

平成 29 年度

高レベル放射性廃棄物等の
地層処分に関する技術開発事業

沿岸部処分システム高度化開発

報告書

平成 30 年 3 月

国立研究開発法人産業技術総合研究所

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター

一般財団法人電力中央研究所

目次

1. はじめに	1
1.1 本事業の背景と目的	1
1.2 平成 29 年度における本事業の概要	2
2. 沿岸部における地質環境の調査技術の高度化開発	4
2.1 沿岸部の自然現象に関する研究	4
2.1.1 沿岸部における隆起・侵食に関する検討	4
2.1.2 沿岸部における断層活動に関する検討	66
2.1.3 沿岸部における火成活動に関する検討	70
2.2 沿岸部の地下水長期安定性に関わる研究	97
2.2.1 沿岸部の地下水長期安定性評価技術の検討	97
2.2.2 地下水流動解析による深部地下水年代の評価	171
2.3 沿岸部の地質環境の情報整備	187
2.3.1 背景と目的	187
2.3.2 沿岸部地下水に係わる文献の整理	187
2.3.3 沿岸部の地質環境情報の整理・集約	229
3. 沿岸部における工学技術の高度化開発	246
3.1 人工バリア材料などに関する劣化や変質に関する現象の把握	246
3.1.1 オーバーパック	247
3.1.2 緩衝材	257
3.1.3 セメント系材料	281
3.1.4 ニアフィールド複合現象評価手法の開発	297
3.2 塩水環境下ニアフィールド領域での処分システムの成立性に係る手法等の提示	310
3.2.1 グラウト設計および影響評価技術の開発	311
3.2.2 ニアフィールド領域での処分システム構成材料の成立性と品質確保の方法の提示	329
4. 沿岸部における安全評価技術の高度化開発	346
4.1 はじめに	346
4.2 評価の枠組みの整備	348
4.3 核種移行モデル・パラメータ整備および影響評価	354
4.3.1 沿岸部の特徴を考慮した核種移行評価手法の整備	354
4.3.2 沿岸部の特徴を考慮した核種移行モデル・パラメータ整備	365
4.3.3 沿岸部の特徴を考慮したコロイド・有機物・微生物の影響評価	375
5. おわりに	392

図 目 次

図 2.1-1	事例研究による検討範囲.....	5
図 2.1-2	本事業における段丘対比の考え方.....	7
図 2.1-3	海水準変動と段丘の形成の模式図.....	8
図 2.1-4	隆起速度の空間外挿の概念図.....	9
図 2.1-5	沿岸部付近の模式的な地形・地質断面.....	9
図 2.1-6	宮崎平野中・北部の段丘分布図.....	11
図 2.1-7	各段丘面における露頭柱状図.....	15
図 2.1-8	宮崎平野中・北部の段丘対比・編年.....	17
図 2.1-9	地形・地質断面位置および宮崎平野前面海域における沖積層基底等深線図.....	19
図 2.1-10	一ツ瀬川ならびにそれに続く海底谷沿いの地形・地質断面図.....	20
図 2.1-11	小丸川ならびにそれに続く海底谷沿いの地形・地質断面図.....	20
図 2.1-12	名貫川ならびにそれに続く海底谷沿いの地形・地質断面図.....	21
図 2.1-13	耳川ならびにそれに続く海底谷沿いの地形・地質断面図.....	21
図 2.1-14	海成段丘面の旧汀線高度分布図.....	22
図 2.1-15	宮崎平野中・北部の隆起モデル.....	23
図 2.1-16	海底地形アナグリフと海陸シームレス旧汀線分布図の例（奥尻島周辺）.....	27
図 2.1-17	地形断面と地形計測結果.....	27
図 2.1-18	海陸シームレス旧汀線分布図.....	28
図 2.1-19	沈水旧汀線の深度分布.....	29
図 2.1-20	沈水旧汀線高度の頻度分布.....	30
図 2.1-21	海底段丘の地形断面図.....	30
図 2.1-22	段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20171221-01-1：b-Hf1 面）.....	36
図 2.1-23	段丘礫試料と赤鉄鉱、針鉄鉱の XRD プロファイル.....	38
図 2.1-24	Hf1 面（171221-01）、Mm1 面（171219-04）および Lf2 面（171214-DA02）の礫の間隙径分布.....	39
図 2.1-25	Hf1 面被覆層の露頭柱状図と測色値.....	40
図 2.1-26	被覆層の元素分布と測色値（試料：MYZ20171221-01-②：b-Hf1 面）.....	41
図 2.1-27	段丘被覆層の XRD プロファイルの比較（Hf1 の最下部赤色部と最上部）と赤鉄鉱、針鉄鉱の XRD プロファイル.....	42
図 2.1-28	段丘被覆層の XRD プロファイルの比較（Hf1 の最下部赤色部と幌延下沼試料）と赤鉄鉱、針鉄鉱の XRD プロファイル.....	43
図 2.1-29	XRD 分析の対象としたブロック試料の被覆層の測色値.....	43
図 2.1-30	段丘被覆層の遊離酸化鉄分析結果.....	45
図 2.1-31	海食崖の後退と波蝕台の形成の模式図.....	51
図 2.1-32	複数段の侵食段丘を用いた離水前の TCN 蓄積量補正の概念図.....	52
図 2.1-33	岩石侵食段丘や局所的な堆積物の年代などに基づく対比・編年に有効な試料分布のイメージ（平成 28 年度報告書の図 2.1-29）.....	53
図 2.1-34	幌延地域およびその周辺の地形の概要と段丘分布.....	55
図 2.1-35	微化石分析露頭の柱状図と試料採取位置.....	56
図 2.1-36	微化石分析露頭の産状を示す代表的な写真.....	57
図 2.1-37	珪藻化石分析結果.....	58

図 2.1-38	パッチ状テフラ (N-t) および十和田 a 火山灰 (To-a)、白頭山-苦小牧火山灰 (B-Tm) の K_2O-TiO_2 図	60
図 2.1-39	日本列島の基盤地質構造に基づく地域区分	67
図 2.1-40	沈み込み帯における流体の発生・上昇に関する概念図	71
図 2.1-41	沿岸部での自然地震観測による地下構造の推定に関する模式図	76
図 2.1-42	各地震波速度 (各図右下) 層の下面深度分布	80
図 2.1-43	(a) 堆積層を考慮しない場合、(b) 堆積層を考慮した場合における震源決定の概念図	81
図 2.1-44	解析領域における初期震源の震央分布 (○) および地震観測点 (□) の分布	81
図 2.1-45	解析領域周辺における地震基盤深度の深さ分布	82
図 2.1-46	初期震源の震央分布および震源再決定後の震源の分布	82
図 2.1-47	サロベツ断層帯海域延長部を横切る断面における(a) 初期震源の震央分布および(b) 震源再決定後の震源の分布	83
図 2.1-48	日本列島におけるヘリウム同位体比の最大値分布	87
図 2.1-49	深さ 25 km および 40 km における $d\ln V_s/d\ln V_p$ 構造	88
図 2.1-50	日本列島における地温勾配分布	88
図 2.1-51	各ブロックにおける地温勾配およびヘリウム同位体比	89
図 2.1-52	日本列島における低周波地震 (○) およびヘリウム同位体比分布	89
図 2.1-53	各ブロックにおけるヘリウム同位体比および低周波地震からの最短距離	90
図 2.1-54	(a)ヘリウム同位体比データ数の分布および(b)各ブロックにおける最大値と最小値の差	90
図 2.1-55	ヘリウム同位体比および活断層からの最短距離	91
図 2.2-1	沿岸部の地下水長期安定性評価の概念図	98
図 2.2-2	沿岸部での地下水分布の概念図	99
図 2.2-3	調査位置図 (縮尺 1:25,000) (国土地理院 25,000 地形図「音類」、「稚咲内」より)	100
図 2.2-4	地下水年代検討フロー	101
図 2.2-5	主要溶存イオンのヘキサダイアグラム表示	102
図 2.2-6	Cl^- 濃度および水素・酸素同位体比の鉛直分布	102
図 2.2-7	水素・酸素同位体比の関係	103
図 2.2-8	降水中のトリチウム濃度	104
図 2.2-9	炭素濃度とその同位体の深度方向分布	105
図 2.2-10	$\delta^{13}C$ と ^{14}C の関係と有機物分解による影響	105
図 2.2-11	$^{36}Cl/Cl$ の濃度変化と時間の関係	106
図 2.2-12	$^{36}Cl/Cl$ と Cl の鉛直分布	107
図 2.2-13	4He と $^3He/^4He$ の鉛直分布	108
図 2.2-14	越後平野の地質 (産総研シームレス地質図を簡略化) と礫層分布図	110
図 2.2-15	ヘキサダイアグラム (新潟)	111
図 2.2-16	水素・酸素同位体比の関係 (新潟)	111
図 2.2-17	$\delta^{13}C$ と ^{14}C の関係 (新潟)	112
図 2.2-18	新潟平野の地下水年代分布の概念図 (福本ほか, 2017 を用いて作成)。	113
図 2.2-19	地質図 中島・渡辺 (2005) を元に作成	114

図 2.2-20	ヘキサダイアグラムおよび地化学および拡散を考慮して補正された炭素 14 年代.....	115
図 2.2-21	君津帯水層の地下水流動概念モデル.....	115
図 2.2-22	地質図（産総研シームレス地質図を改変）と第四系の基底面深度分布図.....	116
図 2.2-23	勇払平野の浅層から深層地下水水質を示したヘキサダイアグラム.....	117
図 2.2-24	地下水、湧水、地表水の $\delta D-\delta^{18}O$ の関係.....	117
図 2.2-25	勇払平野の地下水概念モデル.....	118
図 2.2-26	ヘキサダイアグラム（温泉試料）.....	119
図 2.2-27	水素・酸素同位体比の関係（温泉試料）.....	120
図 2.2-28	^{14}C 濃度と $\delta^{13}C$ の関係.....	121
図 2.2-29	^{14}C 濃度と Cl^- 濃度の関係および地下水の区分結果.....	122
図 2.2-30	$^{36}Cl/Cl$ 濃度と Cl^- 濃度の関係および地下水の区分結果.....	123
図 2.2-31	4He 濃度と $^3He/^4He$ 濃度の関係.....	124
図 2.2-32	$^{129}I/^{127}I$ と Cl^- 濃度の関係.....	124
図 2.2-33	Cl^- 濃度、 ^{14}C と ^{36}Cl との関係.....	125
図 2.2-34	214 m 区間におけるモニタリング結果.....	129
図 2.2-35	306 m 区間におけるモニタリング結果.....	131
図 2.2-36	476 m 区間におけるモニタリング結果.....	132
図 2.2-37	613 m 区間におけるモニタリング結果.....	134
図 2.2-38	715 m 区間におけるモニタリング結果.....	136
図 2.2-39	943 m 区間におけるモニタリング結果.....	138
図 2.2-40	物理化学パラメータの地上と原位置との比較.....	140
図 2.2-41	溶存ガスの分析結果.....	141
図 2.2-42	溶存ガスの起源の推定.....	142
図 2.2-43	pH-Eh ダイアグラム.....	145
図 2.2-44	Eh の実測値と計算値の比較.....	147
図 2.2-45	酸化還元対同士の相関関係.....	148
図 2.2-46	各区分項目での作業イメージ（浜里 DD-1 孔を例として）.....	151
図 2.2-47	文献から抽出した 3435 地点の井戸の分布図.....	153
図 2.2-48	バックグラウンドデータから得られた深部地下水の温度構造.....	155
図 2.2-49	バックグラウンドデータから得られた深部地下水の Cl 濃度構造.....	156
図 2.2-50	地下水年代、井戸底標高および集水域内の表層地質分類との関係.....	157
図 2.2-51	プッシュプル試験のイメージ.....	159
図 2.2-52	破過曲線の例.....	160
図 2.2-53	分子拡散の影響のみが生じた場合.....	161
図 2.2-54	トレーサー溶液が揚水井の 1 m 下流側に移動したケース.....	162
図 2.2-55	揚水試験における酸素・水素同位体比をトレーサーとした破過曲線.....	163
図 2.2-56	PP-1 と PP-2 の水素安定同位体比をトレーサーとした破過曲線の比較... ..	164
図 2.2-57	研究対象地域.....	171
図 2.2-58	地下水流動解析モデルの作成状況全体図.....	174
図 2.2-59	サロベツ原野モデルの解析領域.....	176
図 2.2-60	サロベツ平野におけるグリッド分割の状況（上：全景、下：東西断面）.....	177
図 2.2-61	サロベツ原野モデルにおける境界条件.....	178
図 2.2-62	地表面通過流量分布図.....	179

図 2.2-63	予測地下水面図	180
図 2.2-64	予測水収支	180
図 2.2-65	三次元ポテンシャル分布図	181
図 2.2-66	三次元塩濃度分布図	182
図 2.2-67	定常解析による採水井の塩濃度プロファイル	183
図 2.2-68	非定常解析による現海水準相当の採水井の塩分濃度プロファイル	183
図 2.2-69	塩濃度分布と流跡線解析の結果	184
図 2.3-1	形態素解析・時系列分析の流れ	188
図 2.3-2	形態素解析システム処理フローチャート	191
図 2.3-3	発行年別文献数	192
図 2.3-4	属性キーワード別出現数	193
図 2.3-5	地域関連文献 発行年別出現数	193
図 2.3-6	高頻度キーワード 年度別出現数	194
図 2.3-7	地域関連文献 都道府県別出現数	195
図 2.3-8	地域別出現数	195
図 2.3-9	地形第 2 階層キーワード別出現数	196
図 2.3-10	地形関連文献 発行年別出現数	196
図 2.3-11	高頻度キーワード 年度別出現数	197
図 2.3-12	地形関連文献 都道府県別出現数	198
図 2.3-13	地域別出現数	198
図 2.3-14	地盤調査第 2 階層キーワード別出現数	199
図 2.3-15	地盤調査関連文献 発行年別出現数	199
図 2.3-16	高頻度キーワード 年度別出現数	200
図 2.3-17	地質関連文献 都道府県別出現数	201
図 2.3-18	地域別出現数	201
図 2.3-19	地盤調査第 2 階層キーワード別出現数	202
図 2.3-20	地盤調査関連文献 発行年別出現数	202
図 2.3-21	高頻度キーワード 年度別出現数	203
図 2.3-22	地盤調査関連文献 都道府県別出現数	204
図 2.3-23	地域別出現数	204
図 2.3-24	環境第 3 階層キーワード別出現数	205
図 2.3-25	環境関連文献 発行年別出現数	205
図 2.3-26	高頻度キーワード 年度別出現数	206
図 2.3-27	環境関連文献 都道府県別出現数	207
図 2.3-28	地域別出現数	207
図 2.3-29	エネルギー第 3 階層キーワード別出現数	208
図 2.3-30	エネルギー関連文献 発行年別出現数	208
図 2.3-31	高頻度キーワード 年度別出現数	209
図 2.3-32	エネルギー関連文献 都道府県別出現数	210
図 2.3-33	地域別出現数	210
図 2.3-34	災害第 3 階層キーワード別出現数	211
図 2.3-35	災害関連文献 発行年別出現数	211
図 2.3-36	高頻度キーワード 年度別出現数	212
図 2.3-37	災害関連文献 都道府県別出現数	213

図 2.3-38	地域別出現数	213
図 2.3-39	地下水第 2 階層キーワード別出現数	214
図 2.3-40	地下水関連文献 発行年別出現数	214
図 2.3-41	高頻度キーワード 年度別出現数	215
図 2.3-42	地下水関連文献 都道府県別出現数	216
図 2.3-43	地域別出現数	216
図 2.3-44	地質年代第 2 階層キーワード別出現数	217
図 2.3-45	地質年代関連文献 発行年別出現数	217
図 2.3-46	高頻度キーワード 年度別出現数	218
図 2.3-47	地質年代関連文献 都道府県別出現数	219
図 2.3-48	地域別出現数	219
図 2.3-49	ルールベース化の例	230
図 2.3-50	産総研地質調査総合センターの公開する Linked Data	232
図 2.3-51	エキスパートシステムに追加した検索機能のイメージ	233
図 2.3-52	事例ベースシステムに追加したタグ機能の画面イメージ	234
図 2.3-53	事例ベースシステムに追加した簡易形態素解析機能の画面イメージ	235
図 2.3-54	試行番号【1】の結果	237
図 2.3-55	試行番号【2】の結果	238
図 2.3-56	試行番号【3】の結果	239
図 2.3-57	試行番号【4】の結果	240
図 2.3-58	試行番号【5】の結果	240
図 3.1-1	試験などに関する全体計画	248
図 3.1-2	試験カラムの模式図	249
図 3.1-3	浸漬試験後の試験片の外観	252
図 3.1-4	平均腐食速度の経時変化	253
図 3.1-5	平均腐食量の経時変化	253
図 3.1-6	水素抽出曲線の一例	253
図 3.1-7	希釈倍数と拡散性水素濃度の関係	253
図 3.1-8	定電位保持試験装置構成	254
図 3.1-9	母材が全面腐食を呈する環境下での Grooving factor α	255
図 3.1-10	改良溶接試験体の外観と断面マクロ観察	256
図 3.1-11	三軸試験装置概略	258
図 3.1-12	圧密過程	259
図 3.1-13	応力-ひずみ関係	260
図 3.1-14	有効応力経路	260
図 3.1-15	パラメータの設定フロー	261
図 3.1-16	圧密非排水三軸試験の再現解析結果	262
図 3.1-17	標準圧密試験の再現解析結果	262
図 3.1-18	標準圧密試験の再現解析における有効応力経路	263
図 3.1-19	膨潤指数と当量イオン濃度関係	264
図 3.1-20	提案モデルの状態曲面の概念図	267
図 3.1-21	透水係数	268
図 3.1-22	メッシュ図・境界条件	269
図 3.1-23	膨潤圧の経時変化	270

図 3.1-24	膨潤圧と当量イオン濃度の関係.....	270
図 3.1-25	一次元浸潤速度試験装置概略図.....	272
図 3.1-26	給水量と通水圧、飽和フロントの経時変化.....	272
図 3.1-27	海水系の液種で作製したベントナイトスラリーの沈下曲線.....	273
図 3.1-28	密度分布均質化土槽試験のイメージと供試体を充填した試験装置.....	274
図 3.1-29	比抵抗値の分布から算出した飽和度分布.....	275
図 3.1-30	緩衝材流出試験用のセル.....	276
図 3.1-31	KCl、MgCl ₂ 水溶液と人工海水の流出量と通水量の関係.....	276
図 3.1-32	人工海水 0.001 L/min の水みちの形成状況.....	277
図 3.1-33	OPC 硬化体浸漬液のモデル計算値と分析値 (pH および Ca 濃度).....	283
図 3.1-34	OPC 硬化体浸漬液のモデル計算値と分析値 (Si および Mg 濃度).....	284
図 3.1-35	HFSC 硬化体浸漬液のモデル計算値と分析値 (pH および Ca 濃度).....	284
図 3.1-36	HFSC 硬化体浸漬液のモデル計算値と分析値 (Si および Mg 濃度).....	284
図 3.1-37	浸漬試験体の浸漬方法.....	287
図 3.1-38	浸漬期間 4 ヶ月の浸漬試験体の EPMA 測定結果.....	288
図 3.1-39	EPMA によるセメント相中の元素濃度プロファイルの例 (浸漬期間 4 ヶ月).....	289
図 3.1-40	接液面からの距離と Ca、Cl の濃度およびピッカース硬度の関係の例.....	292
図 3.1-41	セメント硬化体中での物質移動と相平衡の概念図.....	293
図 3.1-42	塩素の浸透プロファイルと鉱物相組成の計算結果.....	294
図 3.1-43	塩素の浸透プロファイルの計算結果と実験結果.....	295
図 3.1-44	化学-物質輸送連成解析の概念.....	299
図 3.1-45	解析開始時点 (処分場閉鎖直後) の鉱物組成の分布.....	301
図 3.1-46	化学-物質輸送連成解析の結果の例.....	302
図 3.1-47	化学-物質輸送連成解析の結果の例.....	302
図 3.1-48	海水系地下水を想定した場合のニアフィールドの概念モデルの例.....	306
図 3.2-1	エンジニアリングの枠内で扱われる処分システムの成立性.....	310
図 3.2-2	3 種類の溶液型グラウトの配合の考え方.....	312
図 3.2-3	海水硬化促進グラウトの配合の考え方.....	312
図 3.2-4	pH 調整剤を 0.5 ml/L 添加した場合の海水硬化促進グラウトのゲルタイム.....	313
図 3.2-5	基本配合の一軸圧縮試験結果.....	314
図 3.2-6	白濁試験結果 (練混ぜ水: 人工海水).....	314
図 3.2-7	粒径分布の時間変化.....	315
図 3.2-8	ゲル化の進展に伴う流動曲線の変化 (Si-60).....	316
図 3.2-9	ゲル化の進展に伴うせん断粘度の変化 (Si-45、Si-60、S-60).....	316
図 3.2-10	海水硬化促進グラウトのホモゲルの一軸圧縮強度.....	317
図 3.2-11	20℃標準養生の場合のシリカ濃度の時間変化.....	317
図 3.2-12	海水硬化促進グラウトの養生水のイオン状シリカの時間変化.....	318
図 3.2-13	倉敷 LPG と本試験における一軸圧縮強度の比較(55℃促進養生、20℃標準養生).....	319
図 3.2-14	倉敷 LPG と本試験における養生水のシリカ濃度の時間変化の比較.....	320
図 3.2-15	海水条件下における海水適応グラウトの長期止水性能の推定結果.....	321
図 3.2-16	CTH が提唱して北欧の地下研で実践されてきたグラウト設計フロー.....	322

図 3.2-17	注入時間に対する粘性および浸透距離の関係.....	322
図 3.2-18	CTH で実施されたグラウト材の流出試験	323
図 3.2-19	亀裂開口幅（横軸）と深度（縦軸）に応じたグラウト材の流出リスク判定図	323
図 3.2-20	溶液型グラウトのゲルタイムの時間割合に対するせん断強度発現の推定	324
図 3.2-21	淡水環境下（左）と海水環境下（右）での溶液型グラウトの浸透状況の観察 例.....	325
図 3.2-22	海水環境下(Putki2)と淡水環境下(Putki1)におけるグラウト注入量の経時変 化.....	325
図 3.2-23	処分システムの成立性に係わる手法の提示に向けた検討作業の全体像 ...	329
図 3.2-24	想定されるニアフィールド領域の構成要素例.....	330
図 3.2-25	フィンランドの性能評価書における掘削・操業から閉鎖までの評価体系	332
図 3.2-26	NUMO 文献に記載されている要素（赤線）と一般土木で想定される要素の 重ね合わせの断面図	334
図 3.2-27	各スケールの水理地質構造モデル（鳥瞰図）	336
図 3.2-28	NF スケールモデルの解析メッシュ	337
図 3.2-29	解析条件	339
図 3.2-30	掘削・埋戻し（定置）に伴う処分坑道・処分孔の湧水量の経時変化	340
図 3.2-31	坑道周辺の各ケースの設定（坑道横断方向断面図）	340
図 3.2-32	中央の処分坑道の湧水量の変化.....	341
図 3.2-33	飽和度分布図（坑道横断方向断面）	342
図 3.2-34	想定されるニアフィールド領域の構成要素	343
図 4.1-1	平成 29 年度の実施項目と「沿岸海底下等における地層処分技術的課題に関 する研究会とりまとめ」での重点項目との関係	347
図 4.2-1	沿岸部固有の特徴等を踏まえた核種移行評価と生活圏評価のそれぞれの概略 的な枠組み.....	348
図 4.2-2	性能評価の立場かつ情報に着目した場合に限定した連携の全体像とポイント のイメージ案	351
図 4.3-1	亀裂とマトリクス部による二重空隙モデル概念図	355
図 4.3-2	広域スケールの地形を考慮した鉛直二次元の地形モデル概念図.....	358
図 4.3-3	マトリクス部での拡散により塩分を留める効果が亀裂内の塩水と淡水の置換 挙動に及ぼす影響が検討の例.....	359
図 4.3-4	地下水流速やマトリクス拡散に関連するパラメータ値が DaI に与える影響の 例.....	360
図 4.3-5	HydroGeoSphere を用いた亀裂とマトリクス部の二重空隙モデルの概念図	361
図 4.3-6	200 m スケールを対象とした地下水流動・物質移動解析の境界条件概念図	362
図 4.3-7	亀裂部とマトリクス部の塩分濃度比の時間変化	363
図 4.3-8	下流側境界における塩分濃度比と物質濃度比 C/C_0 の時間変化	363
図 4.3-9	モンモリロナイトへの Sr の収着データおよびモデルの適用性の評価結果	368
図 4.3-10	モンモリロナイトへの Ni の収着データおよびモデルの適用性の評価結果	369

図 4.3-11 Na 型クニピア F への Ca の収着データに対する 1-Weak サイトモデルおよび 2-Weak サイトモデルによるフィッティング結果.....	371
図 4.3-12 Na 型クニピア F への Ca の収着データに対する 2-Weak サイトモデルによるフィッティング結果および適用したモデルパラメータ.....	371
図 4.3-13 Na 型クニピア F への Ca の収着データに対するフィッティング結果.....	373
図 4.3-14 Na 型クニピア F への Sr の収着データに対するフィッティング結果.....	373
図 4.3-15 Na 型クニピア F への Sr の収着データの共存 Ca 濃度依存性およびフィッティング結果.....	374
図 4.3-16 遠心分離後のモンモリロナイト懸濁液中のコロイド濃度測定結果.....	377
図 4.3-17 NaCl 溶液中に分散させたモンモリロナイト粒子の平均粒径の時間変化.....	377
図 4.3-18 沿岸部の深部地下水に溶存する有機物の濃度および組成.....	379
図 4.3-19 サイズ排除クロマトグラフィーによる沿岸部地下水に溶存する有機物の圧縮ベンツナイト透過サイズの評価.....	382
図 4.3-20 沿岸部および陸域の地下における微生物現存量の深度分布.....	383

目 次

表 2.1-1 宮崎平野中・北部の段丘一覧.....	12
表 2.1-2 本調査地域で認められているテフラ一覧.....	14
表 2.1-3 海陸統合 DEM の作成に際して使用した地形デジタルデータの一覧.....	26
表 2.1-4 水浸法による段丘礫の有効間隙率.....	36
表 2.1-5 ポロシメータ測定による段丘礫の間隙率.....	37
表 2.1-6 XRD による段丘礫の鉱物組成.....	37
表 2.1-7 XRD による段丘被覆層の鉱物組成.....	42
表 2.1-8 段丘面区分と構成層砂岩礫と被覆層の関係.....	47
表 2.1-9 マグマや深部流体に関する地球物理学的手法の概要.....	77
表 2.2-1 地下水年代測定結果のまとめ（サロベツ原野）.....	109
表 2.2-2 地下水年代測定結果のまとめ（新潟）.....	113
表 2.2-3 地下水年代測定結果のまとめ.....	126
表 2.2-4 モニタリング結果のまとめ.....	139
表 2.2-5 溶存ガスおよびガス水比の採取状況.....	141
表 2.2-6 pH の推定計算に用いたパラメータ.....	143
表 2.2-7 pH の推算結果.....	143
表 2.2-8 pH の推算の結果得られたカルサイトの飽和指数.....	143
表 2.2-9 酸化還元電位の推定計算結果.....	147
表 2.2-10 システムティック区分における区分項目と使用する文献、データベース.....	151
表 2.2-11 システムティック区分の一覧表.....	154
表 2.2-12 モデルに与える透水係数の初期値.....	174
表 2.2-13 モデルに与える有効間隙率、貯留量係数.....	175
表 2.2-14 現況再現解析の検討ケース.....	178
表 2.2-15 解析結果の取りまとめ 実年代測定結果との比較.....	185
表 2.3-1 キーワード・トピック数.....	189
表 2.3-2 キーワード階層例.....	189
表 2.3-3 地盤調査手法 地域別出現数.....	224

表 2.3-4	地盤調査手法 地形、地質、環境別出現数	226
表 2.3-5	地盤調査手法 エネルギー、災害、地下水、地質年代別出現数.....	227
表 2.3-6	研究結果の調査で実施した分類の定義.....	229
表 2.3-7	整理票の項目	231
表 2.3-8	管理方策の試行方式.....	232
表 2.3-9	Geolis データセット検索（キーワード）の利用方法	233
表 2.3-10	Geolis データセット検索（タグ）の利用方法	234
表 2.3-11	Geolis データセット検索（簡易形態素解析）の利用方法	235
表 2.3-12	Geolis データセットの検索結果のフィルタリング	235
表 2.3-13	既存のエキスパートシステムから抽出したキーワード	236
表 2.3-14	既存のエキスパートシステムから整理したカテゴリ情報	236
表 2.3-15	管理方策の有効性評価項目	241
表 2.3-16	キーワードの関連性の評価	242
表 2.3-17	キーワードの保守性の評価	242
表 2.3-18	検索の利便性（容易性）の評価.....	243
表 2.3-19	検索の処理性能の評価	243
表 2.3-20	検索結果の適合性の評価.....	243
表 2.3-21	検索結果の再現性の評価.....	244
表 2.3-22	管理方策の有効性評価	244
表 3.1-1	沿岸部研究会で示された課題と本事業で計画する取組との関係（工学技術分野）	247
表 3.1-2	人工海水の組成と試験条件	248
表 3.1-3	試験片の重量変化から算出した平均腐食量および平均腐食速度.....	250
表 3.1-4	水素抽出曲線より求めた拡散性水素濃度	251
表 3.1-5	従来材を用いた腐食試験の溶液条件	254
表 3.1-6	腐食試験後の外観観察による腐食形態の分類.....	255
表 3.1-7	改良材の化学成分の分析結果（wt%）	256
表 3.1-8	人工海水の組成	257
表 3.1-9	試験条件	259
表 3.1-10	圧密前 B 値計測結果	259
表 3.1-11	圧密後 B 値計測結果	260
表 3.1-12	設定された修正 Cam-clay モデルのパラメータ	263
表 3.1-13	解析パラメータ	269
表 3.1-14	浸潤速度取得試験ケース.....	271
表 3.1-15	スラリー試験のケース	273
表 3.1-16	セメントペースト硬化体粉砕物の浸漬条件（人工海水希釈水）	282
表 3.1-17	セメントペースト硬化体粉砕物の浸漬条件（NaCl 溶液）	285
表 3.1-18	塩水環境下におけるセメント系材料の機械的特性変化に関する検討の実施工程.....	286
表 3.1-19	浸漬試験体の条件.....	287
表 3.1-20	浸漬試験条件	287
表 3.1-21	OPC-45 浸漬試料の鉍物同定結果一覧（浸漬期間 4 ヶ月）	290
表 3.1-22	OPC-60 浸漬試料の鉍物同定結果一覧（浸漬期間 4 ヶ月）	290
表 3.1-23	FAC30 浸漬試料の鉍物同定結果一覧（浸漬期間 4 ヶ月）	291

表 3.1-24	BFSC70 浸漬試料の鉱物同定結果一覧（浸漬期間 4 ヶ月）	291
表 3.1-25	化学-物質輸送連成解析の解析ケース	298
表 3.1-26	ケース 1 の解析条件.....	300
表 3.1-27	ケース 2 の解析条件.....	300
表 3.1-28	セメント系材料（コンクリート支保）の初期水和物組成	300
表 3.1-29	緩衝材の初生鉱物.....	301
表 3.1-30	地下水の組成と各々の材料における初期間隙水組成*.....	301
表 3.1-31	ベントナイト系材料において想定される変質現象と安全機能への影響 ...	304
表 3.1-32	セメント系材料において想定される変質現象と安全機能への影響.....	305
表 3.2-1	海水硬化促進グラウトの 2 種類の基本配合	313
表 3.2-2	倉敷 LPG における溶液型グラウトの基本配合.....	318
表 3.2-3	昨年度の研究で設定した 6 種類の基本配合	318
表 3.2-4	仮設定する処分坑道まとめ	334
表 3.2-5	水理解析の全体計画	335
表 3.2-6	透水係数および間隙率	338
表 4.2-1	性能評価において普遍的に重要性が高い情報の整理例	350
表 4.3-1	亀裂ネットワークモデルの作成に用いたパラメータ値	358
表 4.3-2	亀裂ネットワークモデルから算出した等価な多孔質媒体のパラメータ値..	359
表 4.3-3	地下水流動解析の境界条件設定値	359
表 4.3-4	三次元亀裂ネットワークを対象とした地下水流動・物質移動解析の解析条件	362
表 4.3-5	ゲノム解析手法を活用した未知微生物群の代謝機能と核種との相互作用に関 する推察.....	384

1. はじめに

1.1 本事業の背景と目的

本事業は、平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（沿岸部処分システム高度化開発）として、経済産業省資源エネルギー庁から、産業技術総合研究所（以下、産総研）、日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）、原子力環境整備促進・資金管理センター（以下、原環センター）、電力中央研究所（以下、電中研）の四機関が共同で受託したものである。

本事業は、平成 27 年度に開始された。平成 27 年度においては、沿岸部に関連するこれまでの地層処分研究開発成果に基づいて、沿岸部の特性を整理するとともに課題を抽出し、今後達成すべき目標の設定とともに沿岸部に関する今後の研究開発計画の立案に資するために各課題に対する今後の対策案を整理した（産総研、原子力機構、原環センター、電中研、2016）。続く平成 28 年度においては、地質環境の調査、工学技術、安全評価技術の各分野において実質的な研究を進めながら、研究データや成果の交換を有機的に行う方法を模索した（産総研、原子力機構、原環センター、電中研、2017）。

高レベル放射性廃棄物の地層処分について、平成 27 年 5 月に閣議決定された「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」において、国は科学的に適性が高いと考えられる地域（好ましい特性が確認できる可能性が相対的に高い地域）を提示することなどが示された。各地域の科学的特性については、総合資源エネルギー調査会地層処分技術ワーキンググループにて専門家による検討が進められ、平成 27 年 12 月に「科学的有望地の要件・基準に関する地層処分技術 WG における中間整理」（以下、中間整理という）が公表された（地層処分技術 WG, 2015）。中間整理において、「適性の低い地域（好ましくない特性があると推定される地域）」を除いた上で、廃棄体の輸送時の安全性の観点から、港湾からの距離が十分短い地域（島嶼部を含む沿岸部）が「より適性の高い地域（好ましい特性が確認できる可能性が相対的に高く輸送面でも好ましい地域）」と整理された。加えて、沿岸部において期待される一般的特性や事業を進める上での留意事項が示され、技術的信頼性をさらに向上すべく、取り組むべき課題を抽出・整理すること、専門家を交えた具体的な検討を進めて行くことが重要であることなどが示された。

中間整理を踏まえ、「沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会」が開催され、平成 28 年 8 月には、「とりまとめ」が公表された（沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会, 2016）。とりまとめにおいて、海域を含めた沿岸部において地層処分を実現するために必要な基本的な技術はおおむね整備されていることが示された。さらに、平成 29 年 4 月 17 日「地層処分に関する地域の科学的な特性の提示に係る要件・基準の検討結果（地層処分技術 WG とりまとめ）」が発表され、続いて 7 月 28 日には「科学的特性マップ」が公表された。一方で、地層処分事業の具体的な実施という観点から、今後、技術の高度化に引き続き取り組むことで、さらに信頼性を高めることが重要であるとされ、高度化にあたって、地質環境の調査・評価技術、工学的対策技術、安全評価技術それぞれの観点からは、「沿岸部海域における調査・評価技術の適用性確認および事例の蓄積、塩水環境下における人工バリア構成材料やグラウト材等の各種特性に係わるデータの拡充および設計・施工方法に係わる検討、塩水環境下における核種移行データの拡充といった項目が考えられる」と示された。

これらの状況を踏まえ、本事業では、わが国における沿岸部固有の環境を前提とした、概要調査段階で必要となる地質環境の調査・工学・安全評価技術の分野について、四機関がそれぞれ有している専門的な知識、経験等を効果的に投入し、技術開発に取り組む。

さらに、四機関の専門知識、経験等を分野間に相互補完的に利用し、かつ融合することによって、分野毎の成果の信頼性や汎用性の向上が望めるとともに、分野横断的な課題への取り組みや他分野への成果の反映やフィードバックを適切に実施することにより、地層処分システム全体としての成立性や性能を示す等、事業全体としての総合的な高いレベルの成果の創出が可能となる。

1.2 平成 29 年度における本事業の概要

本事業は、平成 27 年度から開始され、平成 29 年度は 3 年目となる。平成 29 年度は、平成 27 年度の本事業で整理した課題および平成 28 年度の成果、さらに「沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会」で示された今後の技術開発の高度化の方向性を踏まえ、取り組むべき課題を整理し、以下の(1)～(3)を進めた。事業を進めるにあたっては、専門家・有識者で構成される委員会（沿岸部処分システム高度化開発評価委員会）を設置し、研究計画、実施方法、結果の評価などに関する審議・検討を行った。このほか、本事業では独自に、各機関代表者による運営会議、研究参加者による共同研究会議、研究分野ごとの分野研究会議を設置し、分野間連携や機関間連携の強化に努めた。

(1) 沿岸部における地質環境の調査技術の高度化開発

- ・沿岸部の自然現象（隆起・侵食、断層活動、火成活動）に関する研究
- ・沿岸部の地下水長期安定性に関わる研究
- ・沿岸部の地質環境の情報整備

(2) 沿岸部における工学技術の高度化開発

- ・人工バリア材料等に関する劣化や変質に関する現象の把握
- ・塩水環境下ニアフィールド領域での処分システムの成立性に係わる手法の提示

(3) 沿岸部における安全評価技術の高度化開発

- ・評価の枠組みの整備
- ・核種移行モデル・パラメータ整備および影響評価
- ・生活圏評価モデル・パラメータ整備および影響評価

各項目の具体的な取り組み課題は；

(1) 地質環境調査技術

・自然現象：平成 29 年度は、地形・地質調査等によりデータを拡充し、平成 28 年度試行した陸域の隆起・侵食の様式の海域への外挿、地形地質断面図からの隆起・侵食量評価の妥当性・信頼性の検討、精度向上を行う。また、引き続き大陸棚を中心とした地形判読等から沿岸部海域の地形学的特徴を整理する。さらに、平成 28 年度に整理した情報に基づいて地形・地質調査を実施し、要素技術開発を進める。

・地下水長期安定性：平成29年度は、列島の地質や地形を考慮して、現地観測データに基づき地下水の賦存形態や流動性を評価したうえで、我が国を代表する地質や地形に対応した沿岸部の大深度ボーリング孔を選定し、水質・地下水年代調査、地化学調査を実施する。この調査結果に基づき、地質や地形に対応した沿岸部の深層地下水の安定性や、地下水の長期安定性の調査・評価方法を検討する。陸域・海域における地下水試料採取調査を本格的に開始し、選定された地域で地下水流動解析を実施する。さらにこの結果を現地において観測された地下水年代と比較することにより、解析の高精度化を図り、全国規模の深層地下水観測結果（年代測定による長期滞留地下水の存在）が科学的に理解できるようにする。また、平国内外の既存文献の調査を終了し、情報を一元化して管理できるようにする。

(2) 沿岸部における工学技術の高度化開発

人工バリア材料等に関する劣化や変質に関する現象の把握ならびに塩水環境下ニアフィールド領域での処分システムの成立性に係る手法等の提示の 2 項目に対して、これまでに具体化した試験計画や研究開発計画に基づき、以下に示す実施項目毎に、各種試験の継続実施ならびに調査や検討を進める。

(3) 沿岸部における安全評価技術の高度化開発

平成29年度は、平成28年度に実施した、安全評価において留意すべき沿岸部固有の特徴等を踏まえた核種移行評価と生活圏評価のそれぞれの枠組みの前提条件及び概略的な枠組みの整備を踏まえて、沿岸部固有の特徴等を具体的に評価していくための核種移行での評価シナリオ・解析ケースの設定とそれらの具体的な評価方法（モデル化方法、使用ツール、パラメータ設定方法等）、及び生活圏評価での移行経路・被ばく経路等の設定とそれらの具体的な評価方法（モデル化方法、使用ツール、パラメータ設定方法等）について、既存情報に基づく分析・整備を進める。また、核種移行評価に係るモデル・パラメータの整備については、沿岸部固有の場の特徴やその変遷（例えば、海進・海退の影響を受けた地下水流動状況や地下水化学等の変化）の評価手法の調査と評価の試行を進める。定量的評価に向けたデータ拡充として、沿岸部固有の場の特徴やその変遷（塩濃度等の地下水組成やその変化等）の影響を評価するための基盤情報として必要となる、核種の収着に関するデータ、コロイドの安定性に関するデータ、有機物・微生物の存在量や組成等の特性データの取得等を進める。

さらに、国内外の情報収集を怠らないこととともに、外部有識者を加えた委員会を設置して事業の方向性を見極め、着実な成果が挙がるように四機関が協力体制を築く。

参考文献

沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会，とりまとめ，2016.

産業技術総合研究所，日本原子力研究開発機構，原子力環境整備促進・資金管理センター，電力中央研究所，平成 27 年度 地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書，364p，2016.

産業技術総合研究所，日本原子力研究開発機構，原子力環境整備促進・資金管理センター，電力中央研究所，平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書，368p，2017.

資源エネルギー庁，科学的特性マップ，2017.

総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術ワーキンググループ，科学的有望地の要件・基準に関する地層処分技術 WG における中間整理，2015.

総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術ワーキンググループ，地層処分にに関する地域の科学的な特性の提示に係る要件・基準の検討結果（地層処分技術 WG とりまとめ），2017.

2. 沿岸部における地質環境の調査技術の高度化開発

2.1 沿岸部の自然現象に関する研究

2.1.1 沿岸部における隆起・侵食に関する検討

(1) はじめに（これまでの経過と今年度の実施概要）

平成 28 年度は、既往情報の整理に基づく机上検討により、沿岸域における隆起・侵食の検討と、それを支援する要素技術の検討を実施した。前者では、地体構造区分に基づく陸域の地殻変動様式の海域への内挿・外挿の妥当性の検討、地形地質断面図を用いた隆起・侵食手法の試行とそれによって構築した二次元断面上の隆起・沈降モデルの陸域から海域への外挿、海底地形判読に基づく隆起・侵食評価手法の検討としての大陸棚縁辺部の調査を実施した。後者では、岩石段丘表面の露出年代測定手法の開発、経験的な風化指標を重視した総合的な段丘対比・編年手法の高度化、海成段丘の発達が悪い地域の隆起・侵食指標の検討の三つの技術開発の研究に適した野外検討地域の検討を行った。

平成 29 年度は、沿岸域における隆起・侵食の検討と、それを支援する要素技術の検討を継続実施した。前者については、一つ目の検討として、昨年度検討した地域の一つである宮崎平野において事例研究としての野外調査を実施し、隆起・侵食に関わるデータを拡充して広域的な三次元隆起モデルを構築し、それを海域へ外挿することを試みた。二つ目に、海域における隆起・沈降の指標として、海底段丘（沿岸部海中に見られる平坦地形）について検討した。後者については、昨年度に続き、岩石段丘表面の露出年代測定手法の開発、経験的な風化指標を重視した総合的な段丘対比・編年手法の高度化、海成段丘の発達が悪い地域の隆起・侵食指標の検討を実施した。

(2) 実施内容

1) 沿岸域における隆起・侵食の検討

① 目的と概要

平成 28 年度は、データセットの得やすさの観点から選んだ三つの河川沿いの地域（北海道北部・天塩川、北海道東部・湧別川、宮崎・一ツ瀬川）において、陸域の隆起量分布を見積り、陸側から海側に向かっての変化傾向を把握して、それを沿岸海域に外挿した。これらのうち、海陸境界に活断層等が分布していない地域では、外挿法自体を否定する材料はない。また、大陸棚縁辺部が最終氷期最盛期（以下、LGM とする）の河口であるとして隆起量を見積り、陸域からの外挿結果と比較することを試みたが、LGM の最大の海水準低下量、最大低下した時期、LGM の河口部の位置などの不確実性が隆起量の見積りに与える影響が大きく、検証には至らなかった。一方、下刻量は、最高潮時の海岸線付近（現在の海岸線付近）が最大である可能性が示唆された。これらを受け、今後の課題としては、陸域で広域的に把握された隆起・沈降様式を海域に外挿することにより沿岸海域の隆起・沈降評価の精度・信頼性向上をはかること、調査・評価の不確実性の影響を織り込んだ隆起・侵食評価といった点が挙げられた。

そこで、平成 29 年度は、陸から海への外挿法の信頼性の確保を目的として、陸域における広域的な三次元隆起・侵食モデルの構築とその沿岸部海域への外挿を試行する。昨年度机上検討を実施した地域の一つである宮崎平野中・北部を事例研究対象として、文献情報に加え、野外調査によりデータを拡充し、主に段丘を用いた隆起量の見積りにより、陸域の後期更新世の平均隆起速度分布を把握する。これをモデル化し（隆起モデル）、沿岸海域へ外挿する。一方、海上音波探査記録の再解析を行い宮崎平野前面海域における沖積層に埋積された海底地形を復元する。さらに、外挿により見積もられる沿岸海域の後期更新世の平均隆起速度と海底地形の対応を検討する。

なお、本章において記載した研究手法や論拠となるデータについては、陸域については Appendix I に、海域については Appendix II に詳しく記したので、適宜参照されたい。

② 研究地域

事例研究地域は、宮崎平野中・北部を中心とした宮崎市から日向市にかけての沿岸陸域とその前面海域である（図 2.1-1）。先にも述べた通り、本地域は、平成 28 年度に机上検討を実施した宮崎県・一ツ瀬川流域およびその前面海域を含む。

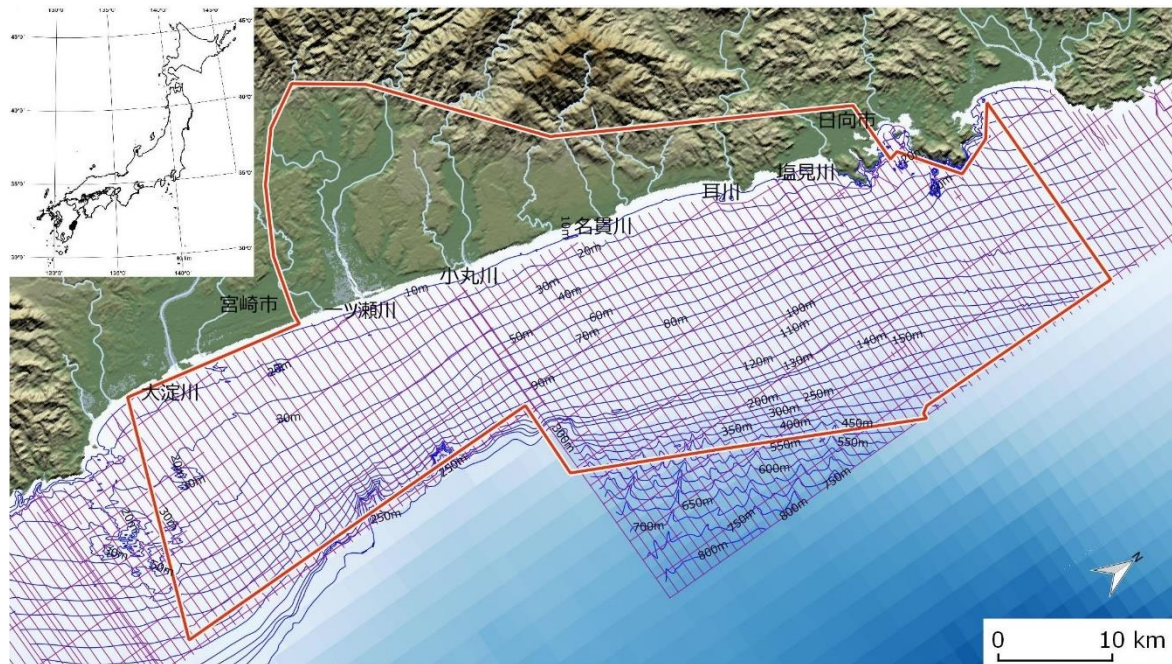


図 2.1-1 事例研究による検討範囲

陸域および海域の基図は、米国航空宇宙局（NASA）による地形データ（SRTM-3）および日本水路協会発行の海底地形データ（M7000 シリーズ）からそれぞれ作成。赤色線：検討範囲、青色線：等深線、紫色線：沿岸の海の基本図「延岡」、「美々津」、「宮崎」および「油津」における航跡

宮崎平野は、九州山地の東に広がる海岸平野である。調査範囲では、一ツ瀬川、小丸川、名貫川、都農川、耳川などの河川が九州山地より西から東へ流れ、日向灘に注いでいる。これらの河川沿い、ならびに、海岸沿いには、多段の海成・河成段丘が広く分布している。また、九州山地と接する平野の西縁や南縁には川南断層（九州活構造研究会編，1989 など）を除いて顕著な断層は報告されていない。先行研究（長岡ほか，2010；地質環境の長期安定性研究委員会編，2011 など）によれば、宮崎市付近の過去 10 万年間の隆起量は 60～90 m とされ、北部の日向に行くに従い、0～30 m まで徐々に減じているとされている。90 m という過去 10 万年間の隆起量は、我が国の陸域では大きい部類に入る。さらに、先行研究では、段丘礫層が広く分布していること、段丘を覆う被覆層中に多くのテフラが含まれていることが記載されており（町田・新井，2003；長岡ほか，2010 など）、段丘対比・編年の材料を得やすく、後述する経験的指標に基づく段丘対比・編年手法の高度化の検討（検証）地域としても適していると期待される。

一方、宮崎平野の沿岸海域には、海岸線より 15～20 km の範囲で大陸棚が広がっている。この地域では、海上保安庁が沿岸海域の海の基本図、「宮崎」、「美々津」、「延岡」を刊行して

いる。これらの資料によれば、調査地域の南部海域には岩石（新第三系堆積岩）の露出が多く、北部は沖積層が広く分布しているという特徴がある。

③ 手法

(a) 基本的な調査の体系

本研究では、以下の記載でもわかるよう、過去の膨大な地形・地質調査において実施されてきた信頼性が高い手法を、常道に沿って体系的に組み合わせて用いている。したがって、本研究における技術開発の主眼は、要素的な手法の開発よりも、成熟した手法（道具）の使い方を問うものである。これは、遠くない将来に文献調査・概要調査を想定した上での戦略の一つである。

(b) 空中写真判読による地形調査

1960 から 1970 年代に国土地理院が撮影した 4 万分の 1 空中写真を使用して、地形層序、段丘区分と平面分布、段丘面の分布形状、段丘面の開析等について記載した。段丘面の開析の程度については、濱田・幡谷（2011）などを参考に、判読基準を提示した上で記載した。本地域には、河成段丘が広く分布していることを考慮して、おおむね主要河川ごとに七つの地域に区分して記載した。なお、段丘面の認定にあたり、段丘の区分、海成・河成の区別については、空中写真判読時には位置と分布形態、地形層序などに基づく地形発達史的解釈も踏まえて判断したが、その判断については、それら段丘を構成する地質を調査することで、追認あるいは修正した。

(c) 地表踏査

段丘を構成する地質、すなわち、段丘の基盤、段丘堆積物／礫層、段丘被覆層を区分し、濱田・幡谷（2011）を参考に経験的な風化の定性的指標に留意して、層相記載を行った。また、これらの記載に基づき、地質年代測定用試料を採取した。併せて、経験的な風化指標を重視した総合的な段丘対比・編年手法の高度化に向けた定量的検討のため、段丘礫層・段丘被覆層の室内分析用試料の採取を行った。

(d) 地質年代測定（テフラ分析）

鉱物組成と各鉱物の出現頻度の層位分布（検鏡）、火山ガラスおよび有色鉱物の屈折率測定、主要化学成分の分析を実施した。屈折率の測定は、古澤（2004）に準ずる。屈折率測定には、(株)古澤地質所有の温度変化型測定装置（マイオット MAIOT；古澤, 1995）を使用した。これは、浸液の温度を直接測定しつつ屈折率を測定するものである。測定項目は、火山ガラスの屈折率 n 、斜方輝石の最大屈折率 γ 、普通角閃石およびカミングトン閃石の壁開片の最大屈折率 n_2 である。火山ガラスの化学分析には、(株)古澤地質所有のエネルギー分散型 X 線分析装置 EMAX-5770（HORIBA 製）と走査線型電子顕微鏡 SEM S-2150（日立製作所製）を用いた。主成分組成計算は ZAF 法による。

(e) 段丘対比・編年

隆起により離水し、海浜あるいは河床などが陸化した年代をここでは段丘の形成年代と呼ぶ。柳田（1991）などによれば、河成段丘では一つの連続する河成段丘面の中でも離水した時期に 1 万年程度の差があることが報告されており、厳密にはそういった詳しい調査を実施する必要があるが、ここでは同一面は同時期に形成されたものと見做す（これはデータの持つ不確実性となる）。

本研究における段丘対比・編年は、基本的に幡谷ほか（2006）に従って行う。段丘の形成年代は、段丘堆積物最上部の堆積年代あるいは基盤最上部の侵食面の形成年代と、被覆層最下部の堆積年代の間である。侵食面の形成年代は別として、両者の堆積年代を見積るにあたり、現在最も有力なツールの一つは火山灰（テフラ）層序であるが、段丘堆積物中から年代デ

一タを取得することは意外に難しいため、火山灰層序によって見積られた段丘被覆層最下部の堆積年代をもって段丘の形成年代と見なされることがしばしばある。このため、火山灰層序から見積られる段丘の形成年代が、地形面の開析の程度などから推定される段丘化した年代よりも、著しく新しく見積られている段丘もあった（幡谷ほか, 2005）。これは、段丘化直後の被覆層が欠けているためである。したがって、本研究では、「露頭で見られる段丘被覆層最下部の堆積年代＝段丘化した年代」という図式は必ずしも成り立たないと考え、空中写真判読調査から得られる段丘面の形態・分布・連続性・地形層序と、段丘を構成する地質層序から想定される編年に対して、火山灰層序・数値年代データ（既往のデータを含む）が矛盾なく説明しうるかという観点（幡谷, 2005：幡谷ほか, 2006 など）で段丘対比・編年を行った。

図 2.1-2 に示すように、仮に、a、b、c の三つの段丘を構成する地質の露頭があったとすると、「被覆層最下部の堆積年代＝段丘化の年代」と杓子定規に考えると (A) に示したように、T1 面、T2 面、T3 面の三つの異なる面が存在することになる。しかし、「被覆層最下部の堆積年代 ≤ 段丘化の年代」と考え、a、b、c の 3 箇所において地形面の形態的特徴の類似性が認められ、かつ、段丘堆積物や被覆層の風化程度等の地質学的特徴に共通性が見出せるのであれば、これらが同一面である可能性 (B) を考えることもできる。この想定のもとに既往の年代データ、あるいは、今回新たに得た年代データが矛盾無く説明しうるかどうかをチェックし、必要に応じて現地踏査と火山灰分析を繰り返し、矛盾が無い対比・編年モデルができた時点でそれを最終解として提案する。本研究の考え方は、火山灰層序隆盛の現在では奇異に見えるかもしれないが、1970 年代以前には基本と考えられていたことである（幡谷, 2005）。火山灰層序という強力なツールが普及した現在だからこそ、基本に立ち戻ることには意義がある。

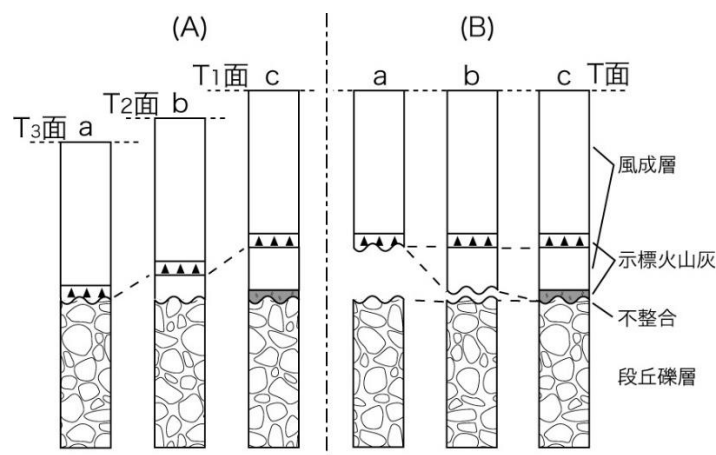


図 2.1-2 本事業における段丘対比の考え方（幡谷, 2006）

本地域では、先行研究において、段丘堆積物中の指標テフラの記載が見られる露頭がいくつかあり、さらに、その中には段丘被覆層下部の指標テフラが見出されている露頭もある。このような箇所の段丘面の形成年代は、精度・信頼性ととも高いと言える。先行研究のデータに本研究での調査結果を加えた上で、このような露頭をホールドポイントと考えて、上記の考え方に沿って対比・編年を組立てた。

(f) 地形・地質断面図による後期更新世の平均隆起速度の見積り

陸域の河川沿いの地形・地質断面図の作成ならびに隆起量および下刻侵食量の評価については、野外調査により拡充されたデータを用いて、昨年と同様な方法により見積もった。昨年度は各検討地域の代表 1 断面を検討したが、今年度は、宮崎平野中・北部全体をカバーすべく、複数断面で実施し、広域的な隆起量分布の把握に努めた。

陸域の隆起量は、気候段丘モデルに基づいて見積もった（貝塚編, 1977；吉山・柳田, 1995 など）。地形・地質断面図上で計測される、吉山・柳田（1995）の海水準 1 サイクル間の隆起量の指標を用いた（図 2.1-3）。この隆起量の見積り方法では、周期的な気候変動に伴って、海水準が周期的かつ同程度の上昇・下降を繰り返すことを前提とする。海水準が最も高かった二つの時期に形成された海成・河成段丘（現河床を含む）同士（FS 値、FS'値）、あるいは、最も寒かった二つの時期に形成された河成段丘同士（TT 値）、あるいは谷底（現河谷を含む）同士（BB 値、BV 値）の比高をもって、気候変動 1 サイクル（10 万年程度）、具体的には二つの段丘または谷底の形成時期の間の隆起量と見なす。同じ海水準の時期の段丘の比較であるため、海水準変動の影響は除去していることになる。具体的な見積りの手順は以下の通りである。おおむね主要河川沿いに断面図を切る基線を設定し、そこに河川沿いの段丘面の高度分布を投影する。これは河床縦断段丘投影図、河床縦断図などと呼ばれることもあるが、ここではこれを地形・地質断面図と呼ぶことにする。この図から、FS、FS'、TT、BB および BV 各値を読み取る。なお、隆起量・隆起速度の見積りにあたっては段丘面上に堆積した被覆層の厚さを考慮する必要があるが、今回は無視した。

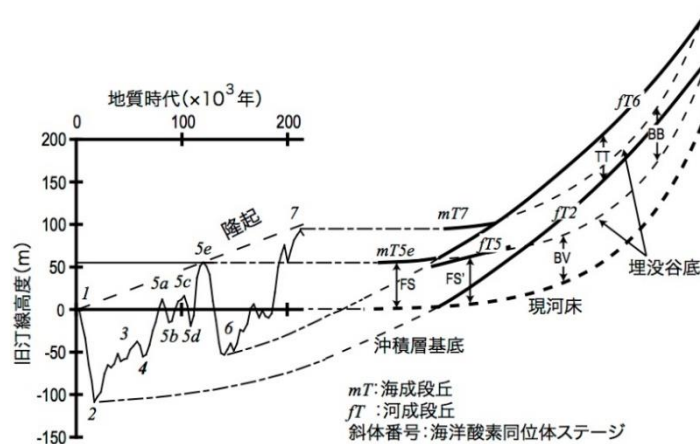


図 2.1-3 海水準変動と段丘の形成の模式図

幡谷（2005）より引用。左側：海水準変動曲線は、Chappell（1994）のデータを使い、等速隆起を仮定して作成。右側：海水準変動に対応した河川縦断形状と隆起量の指標となる河成段丘面の比高値の定義。吉山・柳田（1995）に基づいて作成

(g) 陸域の後期更新世の平均隆起速度分布のモデル化と海域への外挿

後期更新世以降の平均隆起速度×10 万年に相当する標高を 10 万年前に海水準付近に堆積した地層の頂面とみなして（図 2.1-4）、平面あるいは曲面近似する事でモデル化する（例：一様隆起 or 傾動、褶曲変形など）。このモデルを海域へ外挿し、後期更新世以降の平均隆起速度を計算する。

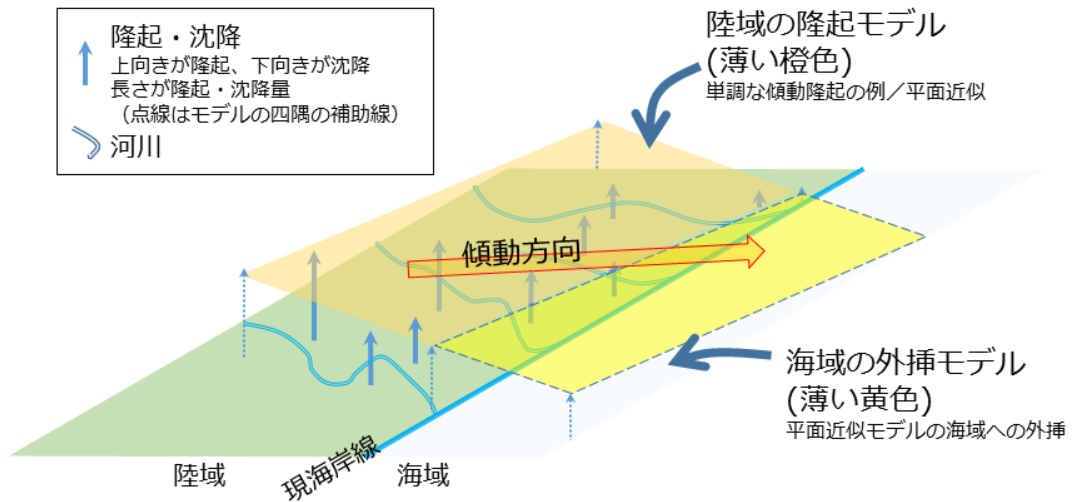
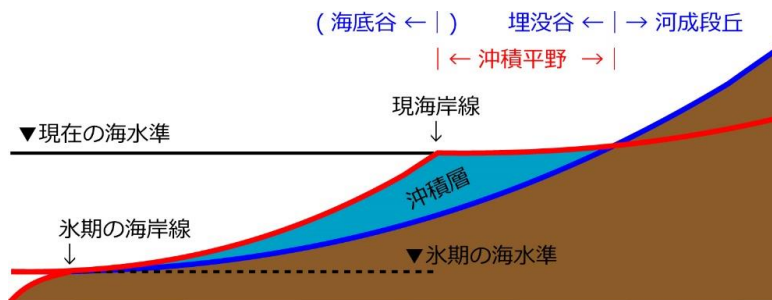


図 2.1-4 隆起速度の空間外挿の概念図

陸域の後期更新世の隆起・沈降量の分布データに基づき、隆起・沈降様式を三次元モデル化する。上図は単調な傾動運動を表す平面近似モデルの概念図。平面近似モデルを沿岸海域に外挿することにより、沿岸海域の隆起量あるいは隆起速度を見積る

(h) 海上音波探査記録の再解析

内陸部では隆起量以上に下刻侵食されることはないと考えられる。しかし、沿岸部では、海水準の低下に伴って隆起量以上に下刻侵食が進む点に留意する必要がある。下刻侵食量の評価にあたっては、沖積層の厚さに着目した。晩氷期および後氷期の氷河性海面変動／海面上昇に伴って水成堆積物すなわち沖積層が堆積し、それが作った堆積平野を沖積平野という。井関（1975）が述べるように、世界の臨海沖積平野の基底をなす埋積谷は、最終氷期の低位海面を示す優れた地形学的証拠であると考えられる（図 2.1-5）。埋没谷底面を覆う礫層は最終氷期最盛期における低位海面に対応して形成された河成堆積層と考えられており、沖積層基底礫層（以下、BG 層とする）と呼ばれている。下刻侵食量は、海水準低下と隆起運動の総和と考えられるが、これらを前提とすれば、海成段丘（過去の海浜）に刻まれた谷底の深さ（現在は沖積層に埋積されている）がその履歴、すなわち、後期更新世以降の河川下刻量と見なすことができる（幡谷ほか, 2016 など）。この論理に基づき、海上音波探査データから沖積層の分布を読み取り、沖積層に埋積された谷を追跡し、谷沿い断面を下刻の最深点と見做した。



青線：氷期の河床縦断面 赤線：間氷期の河床縦断面

図 2.1-5 沿岸部付近の模式的な地形・地質断面

海上音波探査記録の開析に用いたデータは、宮崎平野前面海域の海の基本図「宮崎」、「美々津」、「延岡」を作成する際に用いた記録原本で、海上保安庁より開示して頂いた。

沖積層の追跡にあたっては、国土情報検索サイト「KuniJiban」（国土交通省，2008）に収録された沿岸部陸域のボーリングデータ（柱状図）を参照した。主要河川河口付近の沖積層の基底深度（多くはBG層の基底）を読み取り、これを鍵として海上音波探査記録上で、沿岸海域～大陸棚縁辺部において沖積層に埋積された谷を追跡した。沖積層に埋積された谷沿いの地形・地質断面図を作成する。この海底谷に見られる沖積層最深部をもって、下刻侵食の深さの痕跡と見なす。幡谷ほか（2016）は、陸域において一つ前の高海水準期（MIS5e）の海面高度（旧汀線高度）と沖積層最深部を最大下刻量と見なしたが、海域についてどう評価するかについては本論の論点の一つである。

④ 調査結果とその解析

(a) 段丘の分布と層序

(i) 段丘区分、地形層序など

図 2.1-6 に調査地域の段丘分布図を示す。本地域には海成段丘、河成段丘のいずれも分布するが、南部の A～D 地区が多段の河成段丘の分布で特徴づけられるのに対し、北部の E～G 地区では河成段丘の発達は乏しく、MIS5c の新田原面と呼ばれる明瞭な海成段丘の分布が特徴的である。これらの段丘の地形学的特徴を表 2.1-1 にまとめた。

本地域の段丘を、段丘面の開析の程度、段丘崖の明瞭さ、分布形状・連続性、地形層序などに基づき、高位より、最高位段丘（略号 T、以下同じ）、高位段丘（H）、中位段丘（M）、低位段丘（L）、最低位段丘（LL）の五つに区分し、地形層序によりそれぞれ細分した。また、これらを分布形状・連続性などから、海成面（添え字 m）と河成面（添え字 f）に分類した。

最高位段丘（T）は分布が狭く断片的であり、かつ、段丘崖がハッキリしない丸みを帯びているため、分布の特徴は把握し難く、海成・河成の判断もつけ難い。長岡ほか（2010）の椎原面群に相当する。

高位段丘については、頂面またはわずかに面が認められる。その分布形態から扇状地または川沿い（谷埋め様）に見え、河成段丘（Hf）であると推定した。長岡ほか（2010）の最高位段丘と高位段丘を合わせたものに相当し、東原面・野尻面と呼ばれた相対的に高位の Hf1 面と、茶臼原面と呼ばれた低位の Hf2 面とに区分される。

中位段丘については、先にも少し触れたが、南部の A～D 地区では河成段丘が卓越し、海成（Mm）・河成（Mf）あわせて四段ないし三段に細分できるのに対し、北部の E～G 地区では、海成段丘が二段認められるに留まる。開析は進んでいるが、平坦面は認められる。しかし、南部に追跡していくと、定高性のある尾根状を呈するところもある。長岡ほか（2010）の中位段丘（高位より、三財原、新田原、唐瀬原、西都原各段丘）にほぼ相当する。

低位段丘については、全て河成段丘（Lf）と考えられる。面が明瞭であるが故に細分可能であるが、大きくは南部で四段ないし五段認められるのに対し、北部では大きくは二段となる。長岡ほか（2010）の低位段丘（高位より、清水、岡富・豊原、大淀、深年、三日月原の各段丘）にほぼ相当する。

最低位段丘（LL）については、B 地区と F 地区において、沖積層よりもわずかに高い平坦面として認めた。長岡ほか（2010）で完新世段丘と低地と一括された地域の中にあり、それらとの対応は良く分からない。

次に、本地域で認められる指標テフラの一覧を示す（表 2.1-2）。なお、テフラの略号と降年代は、基本的に町田・新井（2003）の「新編・火山灰アトラス」にしたがうものとし、それより新しい情報については適宜取り入れることとする。本地域におけるテフラ層序について

は、長岡の一連の質の高い研究がある（長岡、1984；同、1986；長岡ほか、2010 など）。これに対し、本研究では、鬼界葛原（略号：K-Tz、降下年代：約 9.5 万年前、以下同じ）～鬼界アカホヤ（K-Ah、7.3 千年前）の広域テフラを検出し、さらに、既報告のテフラへの対比が困難なテフラを含む層準をいくつか見出した（ α 層、 β 層および γ 層と仮称した）。

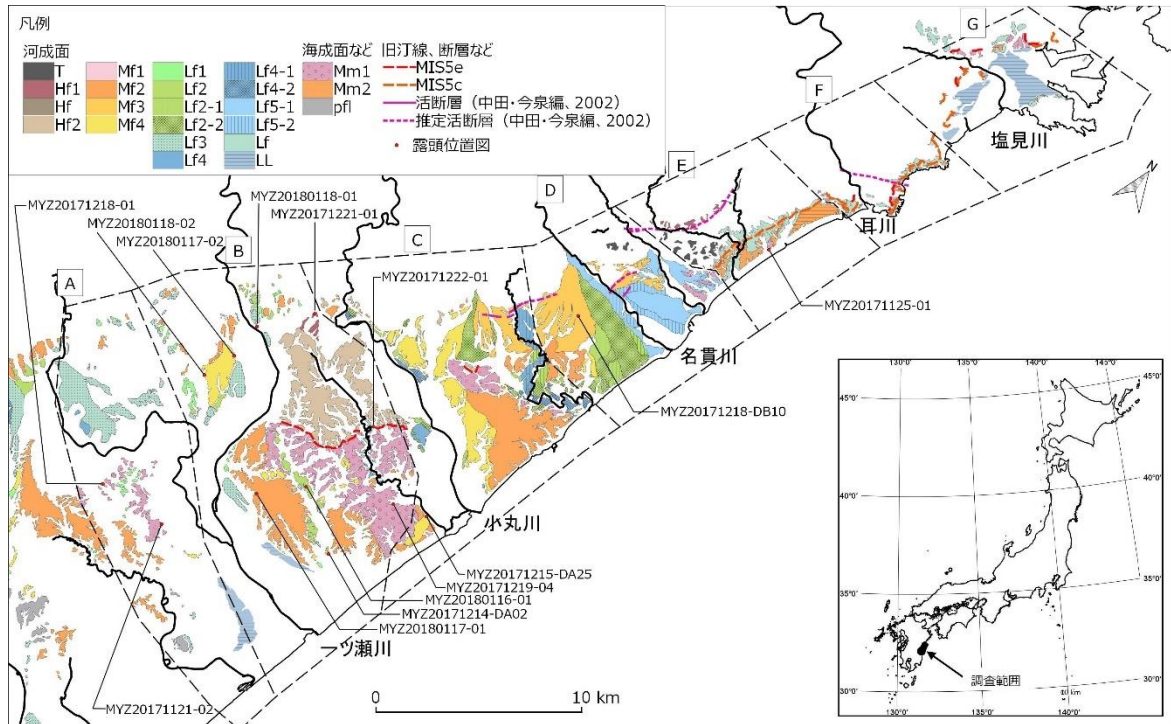


図 2.1-6 宮崎平野中・北部の段丘分布図
 図中には、図 2.1-7 に示した柱状図の位置を示している

表 2.1-1 宮崎平野中・北部の段丘一覧

大区分	段丘面の特徴	各地域における細分						
		A 地区	B 地区	C 地区	D 地区	E 地区	F 地区	G 地区
最高位 段丘	開析が進み、丘陵の頂面に、定高性を有する丸い尾根が連なる形状を呈する。段丘崖は失われて丸みを帯び、不明瞭である。しばしば、海成か河成か判別し難い。				d-T (椎原面群)	e-T (椎原面群)		
高位 段丘	開析が進み、面の保存は悪いが、丸みを帯びた残丘状の面が認められる。段丘崖は不明瞭なことが多い。		b-Hf1 (東原) b-Hf2 (茶臼原)	c-Hf2 (茶臼原)		e-Hf1 (久木野)		
中位 段丘	開析され、より高位の物ほど著しく複雑な分布形状を呈することがあるが、複雑な形状ながら段丘崖は認められ、平坦面も残っている。ただし、浅い谷が刻まれ、段丘面上には起伏が見られる。	a-Mm1 (三財原) a-Mf1 (馬場) a-Mf2 (新田原) a-Mf4 (西都原)	b-Mm1 (三財原) b-Mf2 (新田原Ⅱ) b-Mf4 (西都原)	c-Mm1 (三財原) c-Mf2 (新田原) c-Mf3 (唐瀬原) c-Mf4 (西都原)	d-Mm1 (三財原) d-Mf2 (新田原) d-Mf3 (唐瀬原) d-Mf4 (西都原)	e-Mm1 (三財原) e-Mm2 (新田原)	f-Mm1 (三財原) f-Mm2 (新田原)	g-Mm1 (三財原) g-Mm2 (新田原)
低位 段丘	面の保存は良く、平坦である。段丘崖も明瞭である。	a-Lf1 (国富) a-Lf2 (岡富) a-Lf3 (大淀) a-Lf4-1 (深年Ⅰ) a-Lf4-2 (深年Ⅱ)	b-Lf1 (清水) b-Lf2 (岡富) b-Lf3 (大淀) b-Lf4 (深年)	c-Lf2-1 (岡富・雷野) c-Lf2-2 (豊原) c-Lf4-1 (深年Ⅰ) c-Lf4-2 (深年Ⅱ)	d-Lf2-1 (豊原Ⅰ) d-Lf2-2 (豊原Ⅱ) d-Lf5-1 (三日月原Ⅰ) d-Lf5-2 (三日月原Ⅱ)	e-Lf (豊原・三日月原)	f-Lf (豊原・三日月原)	g-Lf (豊原・三日月原)
最低位 段丘	沖積層よりもわずかに高い面であり、ほとんど開析されていない。		LL (富田)					LL (新称)

【注 1】カッコ内は、先行研究で命名された段丘名。ただし、完全に分布が一致するものではなく、おおよその対応であることに注意。段丘名の出典は、長岡 (1986)、遠藤・鈴木 (1986)、小池・町田編 (2001) および長岡ほか (2010)。

【注 2】各段丘の添え字 f または m は、それぞれ、河成 (fluvial)、海成 (marine) の意味。判断つかないもの (最高位段丘) には着けていない。

(ii) 段丘を構成する地質とそのテフラ層序など

続いて、本事業で得られた段丘を構成する地質の柱状図を示す（図 2.1-7）。

最高位段丘を構成する地質については、確認できた露頭が非常に少ないが、クサリ礫が卓越した段丘礫層と最下部で赤褐色に及ぶ被覆層が見出されている。

高位段丘もまた、クサリ礫が卓越した段丘礫層と最下部で赤褐色に及ぶ被覆層で特徴づけられる。被覆層の最下部に斑紋を伴う赤褐色の風成ロームが認められることがある。さらに、Hf1 面は段丘堆積物直上または被覆層最下部で加久藤（Kkt、降下年代：33～34 万年前）に覆われ、Hf2 面は段丘礫層上部に阿多鳥浜（At-Th、約 24 万年前）を挟んでいる。

中位段丘は、おおむねクサリ礫には及ばないが風化した礫を上部に含む段丘礫層から成り、赤褐色～褐色まで風化が及んだ被覆層に覆われる。テフラ層序は、長岡ほか（2010）の編年を追認することとなったので、以下のテフラの記載は長岡ほか（2010）の引用である。中位段丘の中では最も低位の Mn1 面（三財原段丘相当）は、堆積物中に阿蘇 3（Aso-3、12～13.5 万年前）を挟み、風成ロームを介して阿多（Ata、10.5～11 万年前）に覆われる。Mf1 面（馬場段丘相当）は、阿多に直接覆われている。Mf2 面（新田原段丘相当）は、段丘堆積物の上部に鬼界葛原、始良福山（A-Fk、約 9 万年前）を挟み、風成ロームを介して阿蘇 4（Aso-4、8.5～9 万年前）の火砕流に覆われる。Mf3 面（唐瀬原段丘相当）は、堆積物最上部に阿蘇 4 を挟む。Mf4 面（西都原面相当）は、堆積物上部に阿蘇 4 火砕流を挟み、厚さ 50cm 以上の風成ロームを介して始良岩戸（A-Iw、4.5～5 万年前）に覆われる。ただし、Mf4 面上の風成層中から赤褐色以上に風化した部分は先行研究でも本研究でも見出されていない。

低位段丘は、風化があまり見られない新鮮な礫から構成され、褐色ないし黄褐色の風成ロームに覆われる、ただし、E 地区では、本研究において 1 箇所赤褐色の風成ロームが見られている。Lf1 面（清水段丘相当）は、本研究では段丘堆積物・被覆層の情報が得られなかった。長岡ほか（2010）によれば、厚さ 50 cm 以上の風成ロームを介して始良岩戸に覆われるとある。Lf2 面（岡富段丘、豊春段丘さらには雷野段丘）は比高が小さく亜段に分かれた面群と見られる。始良岩戸を堆積物上部に挟み、霧島イワオコシ（Kr-Iw、4～4.5 万年前）に直接ないし薄い風成ローム層を介して覆われている。Lf3 面（大淀段丘相当）は始良丹沢または入戸火砕流（AT、2.6～2.9 万年前）に直接覆われている。Lf4 面（深年段丘相当）は霧島小林（Kr-Kb、16.7 千年前以降）に直接覆われる亜段群として認められる。Lf5 面（三日月原段丘相当）は鬼界アカホヤに覆われる亜段群である。ただし、E～G 地区では、先行研究でも、本研究でも、低位段丘(群)に関わるテフラ層序の情報が全く得られていない。また、段丘堆積物、被覆層に関する情報自体が非常に乏しい。このため、地形的には 2 面を認められるが、現時点では一括して Lf 面として扱う。

表 2.1-2 本調査地域で認められているテフラ一覧

火山灰名	略号	降下年代 (ka)	堆積様式と層相	主な鉱物	火山ガラスタイプ	(n)	斜方輝石 (γ)	角閃石 (n_2)	備考(他の鉱物の屈折率、本地域での特徴など)
鬼界アカホヤ	K-Ah	7.3	afa	opx	bw, o	1.499 -1.519	-	-	一部の火山ガラスの化学組成が K-Ah のそれと一致する
霧島小林	Kr-Kb	16.7	pfa	opx, cpx	-	-	1705 -1.707	-	-
始良 Tn	AT	29	afa	opx, Gho	bw, pm	1.495 -1.501	1.707 -1.736	1.670 -1.690	γ , n_2 はそれぞれ二つのピークを持つ
始良入戸	A-Ito	29	pfl	opx, Gho	pm, bw	1.497- 1.501	1.705 -1.740	1.674 -1.690	pl, qt(β)を含む γ , n_2 は幅広い値を示す
始良大隅	A-Os	29	pfa	opx	o, pm	1.497 -1.500	1.703 -1.740	-	pl, qt(β)を含む γ は幅広い値を示す
霧島アワオコシ	Kr-Aw	40	sfa	opx, cpx	-	-	1.698 -1.703	-	-
霧島イワオコシ	Kr-Iw	40	pfa	cpx, opx	-	-	1.700 -1.708	-	-
始良岩戸	A-Iw	45	pfa	opx, Gho	pm	1.497 -1.500	1.719 -1.728	-	-
阿蘇 4	Aso-4	85~90	pfl	ho, opx, cpx	bw	1.507 -1.509	1.699 -1.701	1.686 -1.688	-
始良福山	A-Fk	90	pfa	ho, opx	-	-	1.712 -1.716	1.670 -1.675	-
鬼界葛原	K-Tz	95	afa	opx, Gho, cum	o, bw	1.496 -1.500	1.705 -1.711	1.672 -1.678	qt(β)を含む cum 屈折率: 1.601-1.668
阿多	Ata	110	pfl	(opx, cpx)	bw	1.508 -1.511	1.704 -1.708	-	-
阿蘇 3	Aso-3	133	pfl	opx, cpx	pm, bw	1.515 -1.519	1.700 -1.705	-	-
阿多鳥浜	Ata-Th	240	pfl	ho, opx, bi, qt	bw, pm	1.49 -1.500	1.714 -1.718	-	-
加久藤	Kkt	340	pfl	opx, cpx (ho)	bw, pm	1.500 -1.502	1.718 -1.725	-	-
α 層	-	?	pfl	opx, Gho	o	1.497 -1.500	-	-	ol を含む 火山ガラスの主要元素化学組成の類似性から K-Ah に近い時期に降灰か?
β 層	-	?	pfl	opx	o	1.504 -1.508	1.706 -1.710	-	ol を含む 他のテフラとの層位関係から γ 層より若く AT より古い
γ 層	-	?	pfa	opx, Gho	o	1.497 -1.501	-	-	他のテフラとの層位関係から K-Tz 層より若く β 層より古い
Gho+Cum 層	-	?	-	Gho, cum	-	-	-	1.671 -1.679	cum 屈折率: 1.600-1.669, K-Tz より古い

鬼界アカホヤ～加久藤までの各示標テフラについては、基本的に町田・新井(2003)の記載を整理した。

堆積層と層相/afa: 降下火山灰, pfa: 降下軽石, sta: 降下スコリア, pfl: 火砕流 火山ガラスのタイプ/pm: 軽石型, bw: パブルウォール型, o: 発泡型 主な鉱物/opx: 斜方輝石, Gho: 緑色普通角閃石, cum: カミングトン閃石, bi: 黒雲母, ol: かんらん石

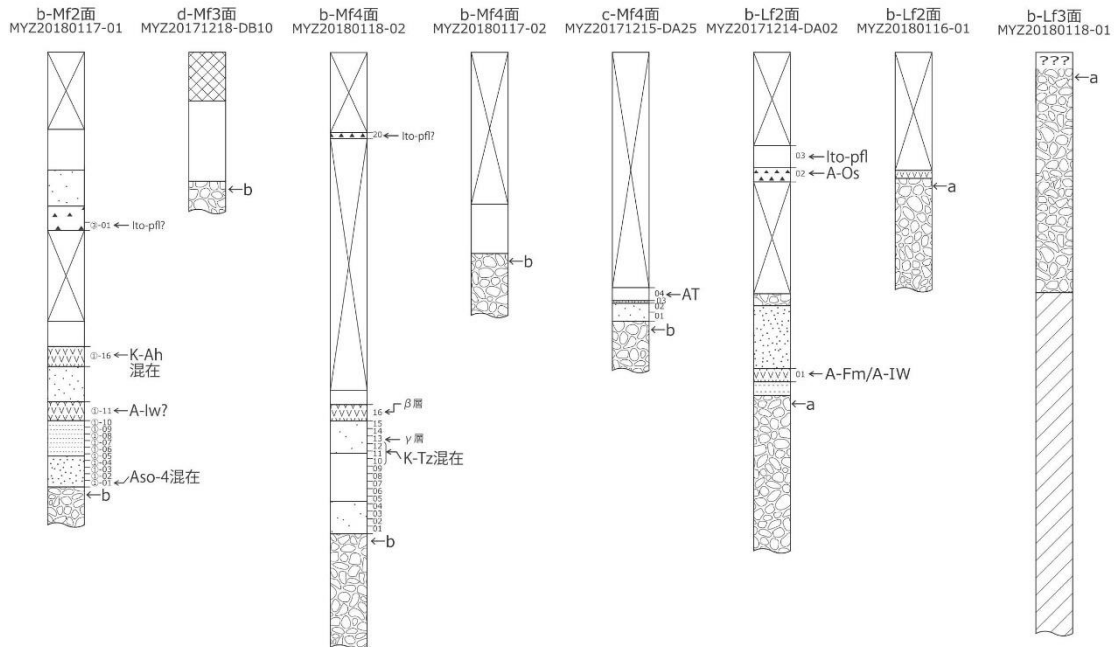
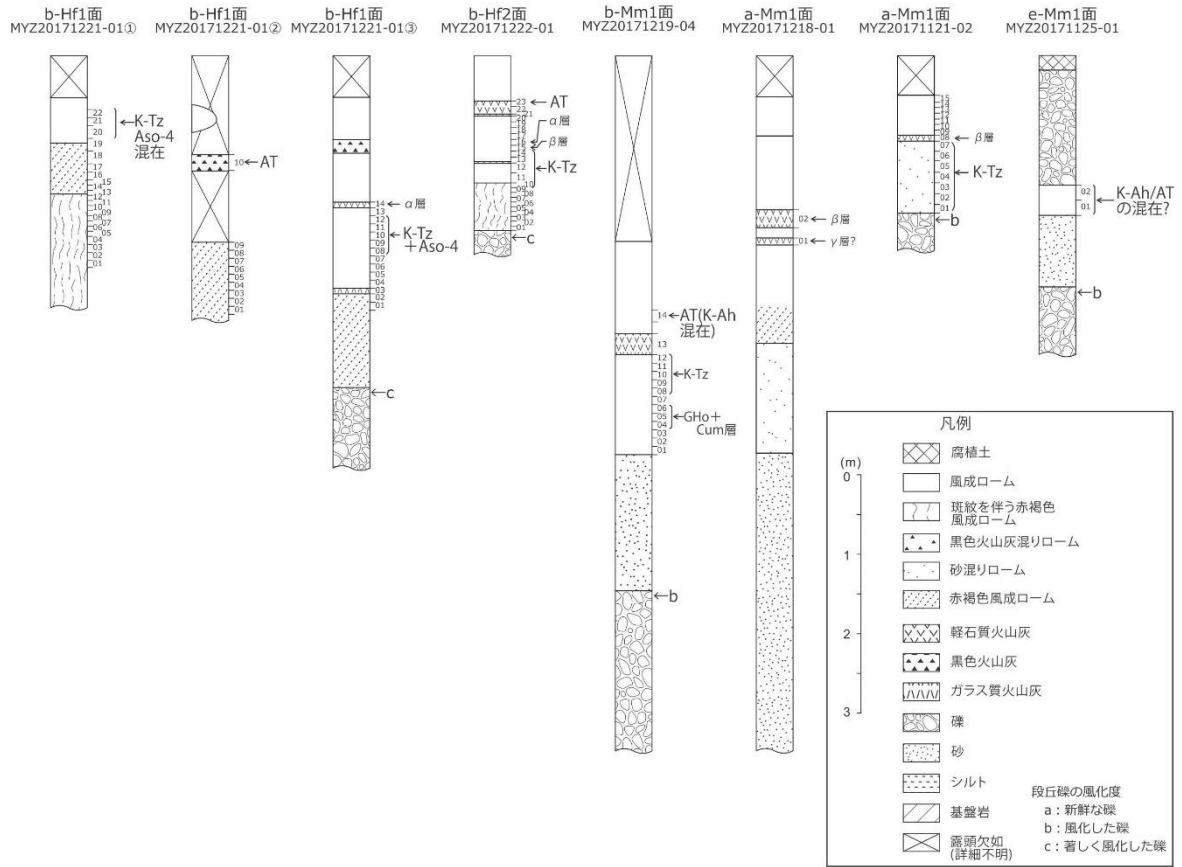


図 2.1-7 各段丘面における露頭柱状図

テフラの略号については、基本的に町田・新井（2003）に従う。テフラについての諸データは、表 2.1-2 に示した。

(b) 段丘の対比・編年（地域別編年図）

ここまでの記載と先に示した考え方に基づいて、本調査地域の段丘対比・編年を行った（図 2.1-8）。結論から言えば、本地域の段丘対比・編年は長岡ほか（2010）を基本的に踏襲する。逆に言えば、本研究のテフラ層序の調査では、長岡ほか（2010）の結果を修正させるようなデータは得られていない。 α 、 β および γ 層（仮称）という今後の検討が必要な層が見いだされたが、現時点で推定される層位・降下年代から考えても、長岡ほか（2010）の結果と矛盾するものではない。したがって、本研究では、基本的に、長岡ほか（2010）の段丘対比・編年を追認できたと考えた。また、現時点では確実に確認できた露頭は少ないが、経験的風化指標の観点からみても、被覆層の色調ならびに段丘礫層の風化の程度の定性的区分において、高位段丘、中位段丘、低位段丘でおおむね整合的であり、対比に大きな矛盾はない。

以上のことから、各段丘面の離水年代を、高位の面から順に以下のように考える。

T 面	MIS10 より前 / 34 万年前より前
Hf1 面	MIS10 / 34 万年前頃（Kkt 降下頃）
Hf2 面	MIS8 / 24 万年前頃（At-Th 降下のすぐ後）
Mm1 面	MIS5e / 13 万年前頃（Ata 以前の最も新しい海成段丘）
Mf1 面	MIS5e-MIS5d / 13 万年前～11 万年前（Ata 降下より少し前）
Mm2 面	MIS5c / 10 万年前頃（Aso-4 降下前、Mm1 面の一つ低位の海成段丘）
Mf2 面	MIS5c-MIS5b / 10 万年前～8.6 万年前 （Aso-4 降下前、Mm2 面との層位関係不明）
Mf3 面	MIS5b / 8.6 万年前頃（Aso-4 降下頃）
Mf4 面	MIS5a-MIS4 / 8 万年前～6 万年前（Aso4 以降、間氷期の河成段丘）
Lf1 面	MIS4-MIS3 / 6 万年前～5 万年前（Mf4 面と Lf2 面の間）
Lf2 面	MIS3 頃 / 5 万年前～4 万年前（A-Iw 降下以降、Kr-Iw 降下前）
Lf3 面	MIS2 / 3 万年前頃（AT 降下直前）
Lf4 面	MIS2 / 3 万年前～2 万年前（AT 降下以降、Kr-Kb 降下前）
Lf5 面	MIS1 / 1～2 万年前（Lf4 の一つ低位、K-Ah 降下前）
Lm	MIS1 / 1 万年前以降（Lf5 と近い時期か）

ただし、北部の E、F、G の三地区については、段丘編年の修正の余地があるかもしれない。そもそも、これらの三つの地域ではテフラを含む段丘を構成する地質層序の情報が乏しく、本研究で Mm1 面と Mm2 面とした海成段丘の 2 か所のみでの被覆層のテフラ層序に基づいて 3 地域全体の編年がなされている（町田・新井、2003；長岡ほか、2010）。さらに、現時点では D 地区以南から確実に連続すると判断しうる中位段丘を認められないため、D 地区以南の層位情報を使って対比することが難しい。

(c) 海域の沖積層基底等深度のマッピング

図 2.1-9 に海域における沖積層基底等深度線図を示す。本研究では、これを最終氷期極相期 (LGM) である 26~29 千年前 (Clark et.al., 2009) における、LGM 当時は陸域であった現・沿岸部海域の地形と考えている。大局的に見て、北側に比べて、南側で地形の起伏が大きい。また、現在の主要河川に繋がると見られる海底谷の深さが、周囲の地形よりもやや深い。さらに細かく見ると、小丸川以北では、現在の海岸線付近では、沖合に比べて、比較的起伏が大きく谷が深いように見える。

(d) 地形・地質断面図による後期更新世の陸域の平均隆起速度と海域の下刻量の見積り

図 2.1-10~図 2.1-14 に、本調査地域の主な地形・地質断面図を示す。これは、陸域においては主要河川沿いに切った断面に段丘の高度を投影したもの、海域においては陸域主要河川より続く海底谷沿いに沖積層の分布 (厚さ) を図示したもの、これらを繋げたものである。

陸域の後期更新世の平均隆起速度は、MIS5e の Mm1 段丘の旧汀線高度 (以下、FS(5e)値)、MIS5e-MIS5d の Mf1 段丘と現河床の比高 (FS'(5e-5d)値)、MIS5c の Mm2 段丘の旧汀線高度 (FS(5c)値)、MIS5c-MIS5b の Mf2 段丘と現河床の比高 (FS'(5c-5b)値)、から算出したものを図示した。南部では、上流から下流に向かって平均隆起速度は減少し、一ツ瀬川沿いで $98 \text{ m}/10^5 \text{ 年} \sim 65 \text{ m}/10^5 \text{ 年}$ 、小丸川沿いで $113 \text{ m}/10^5 \text{ 年} \sim 49 \text{ m}/10^5 \text{ 年}$ の範囲にある。また、海岸線方向 (おおむね旧汀線沿い) で見ると、南側から北側に向けて、 $75 \text{ m}/10^5 \text{ 年} \sim 20 \text{ m}/10^5 \text{ 年}$ と単調に減少している。なお、都農川以北において、FS(5e)値から算出した後期更新世以降の平均隆起速度と FS(5c-5b)値から算出したそれとで、10~20 m の差で系統的に後者の方が大きい点を記しておく。

一方、沖積層の基底深度は、基本的には現海岸線が最も深く、沖合に行くに従い減じている。既存のボーリングデータ「KuniJibann」(国土交通省, 2008) によれば、本調査地域の主要河川の河口付近での沖積層 (BG 層) の基底深度に大きな差は無く地表下 40 m 程度であり、基底の河川沿い勾配は緩やかにほぼ一定で、大陸棚縁辺部付近で 0 となる。

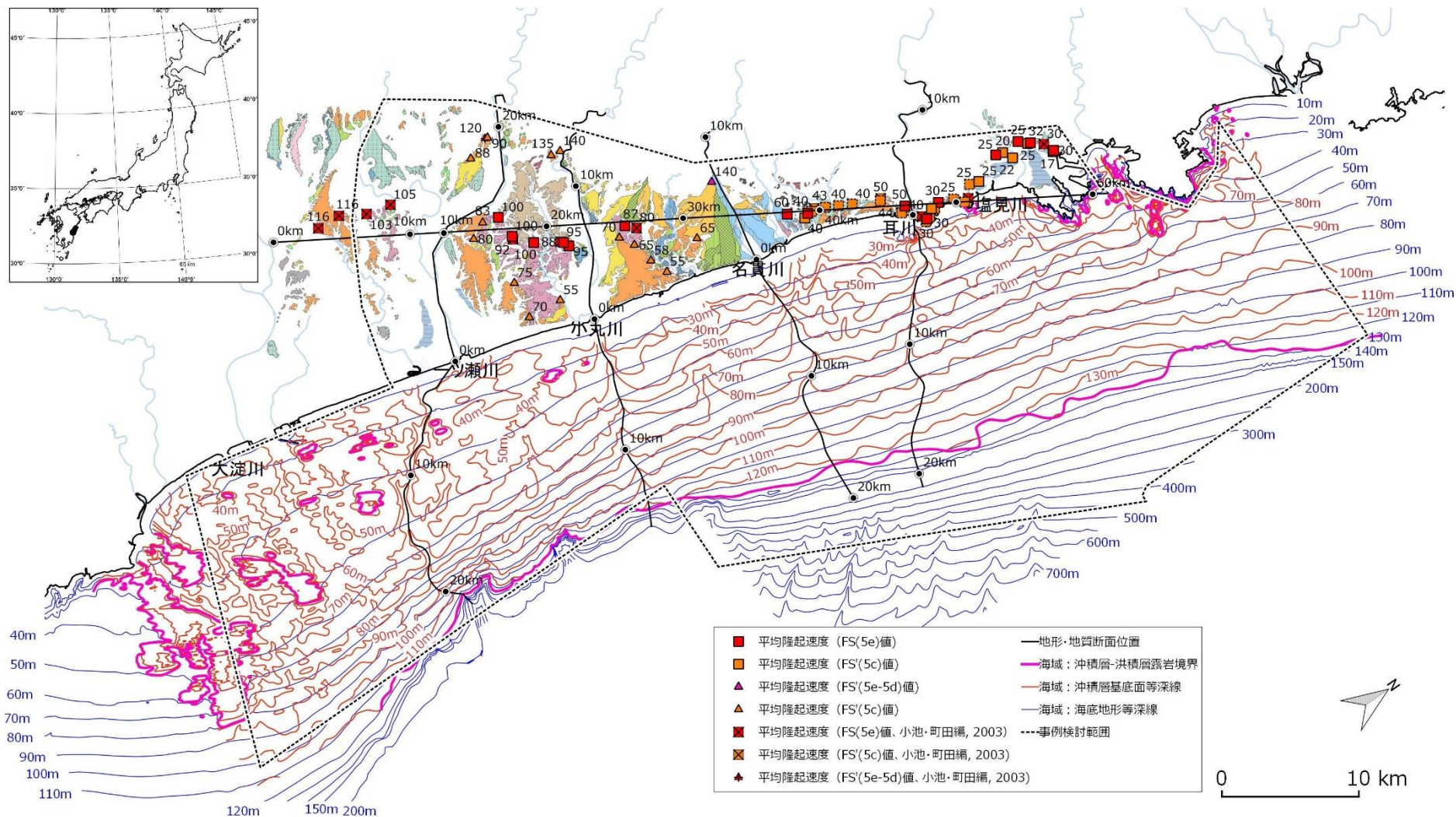


図 2.1-9 地形・地質断面位置および宮崎平野前面海域における沖積層基底等深線図

黒太線は、図 2.1-10～図 2.1-14 に示す地形・地質断面図を切った位置である。陸域の各点は、段丘の比高 (FS 値、FS' 値；吉山・柳田、1995) からの後期更新世の隆起速度を見積ったポイントで、数字は示標から計算された後期更新世の平均隆起速度である。

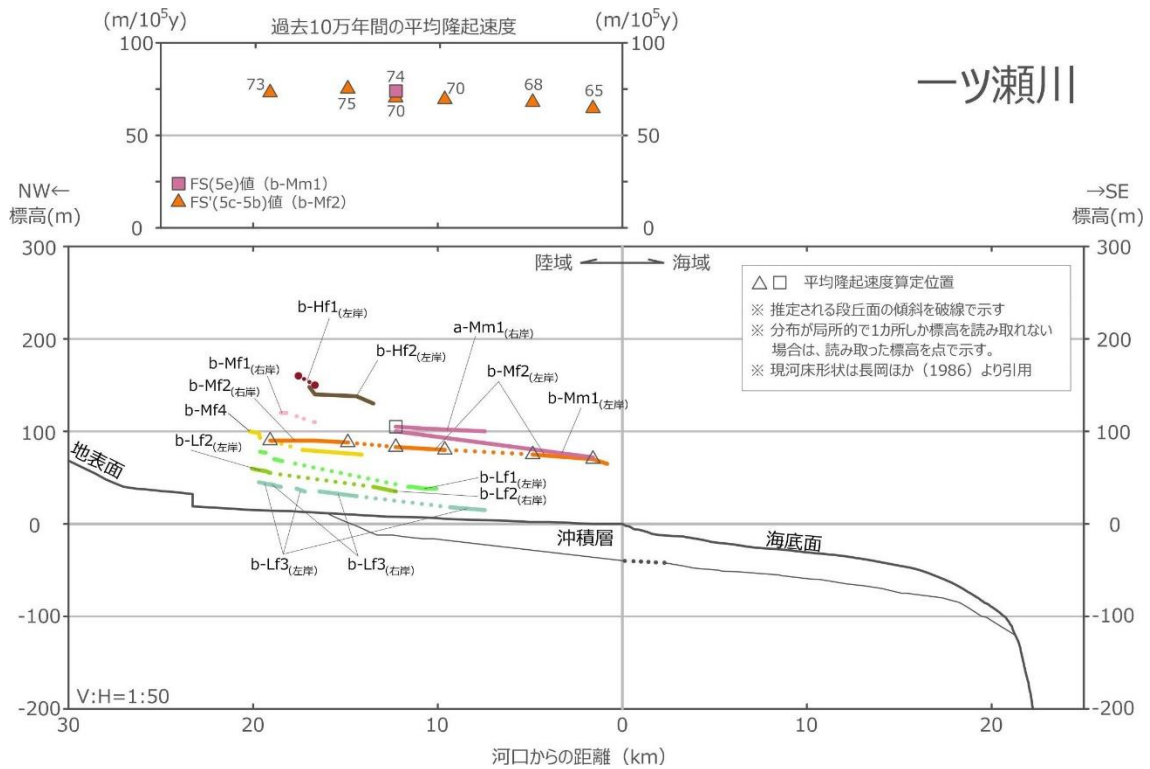


図 2.1-10 一ツ瀬川ならびにそれに続く海底谷沿いの地形・地質断面図
 上図における FS 値、FS'値は吉山・柳田（1995）の海水準 1 サイクル間の隆起量の示標、上
 図中における数字は隆起量の示標から計算された平均隆起速度

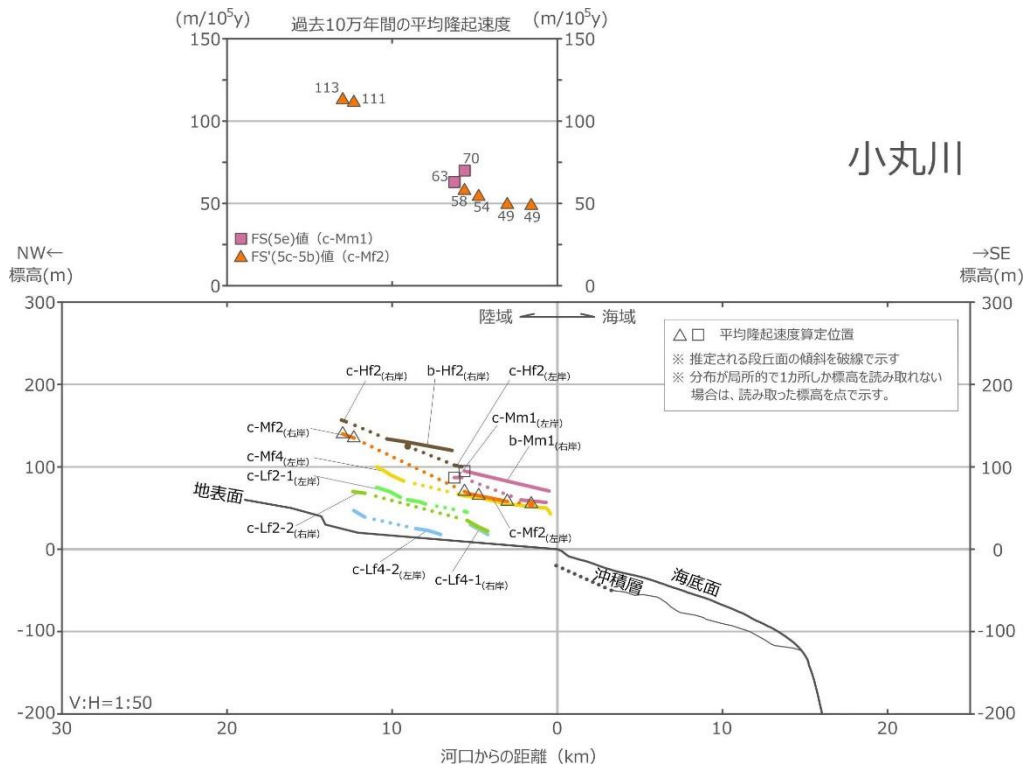


図 2.1-11 小丸川ならびにそれに続く海底谷沿いの地形・地質断面図
 上図における FS 値、FS'値は吉山・柳田（1995）の海水準 1 サイクル間の隆起量の示標、
 上図中における数字はその隆起量示標から計算された平均隆起速度

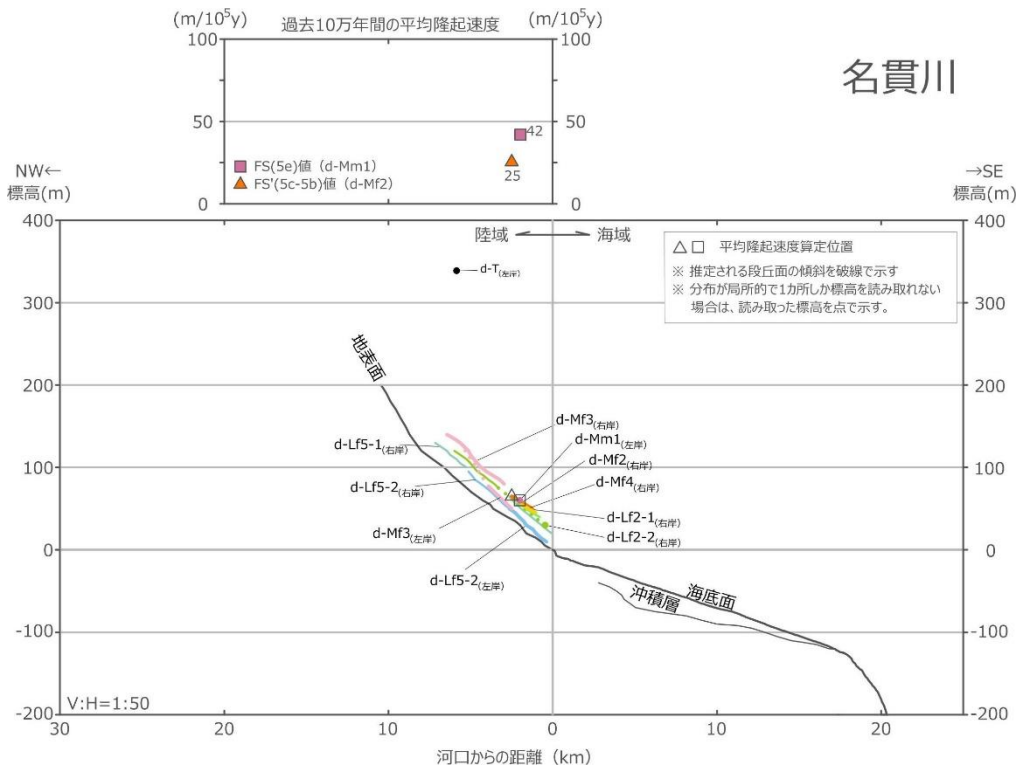


図 2.1-12 名貴川ならびにそれに続く海底谷沿いの地形・地質断面図

上図における FS 値、FS'値は吉山・柳田（1995）の海水準 1 サイクル間の隆起量の示標、上図中における数字はその隆起量示標から計算された平均隆起速度

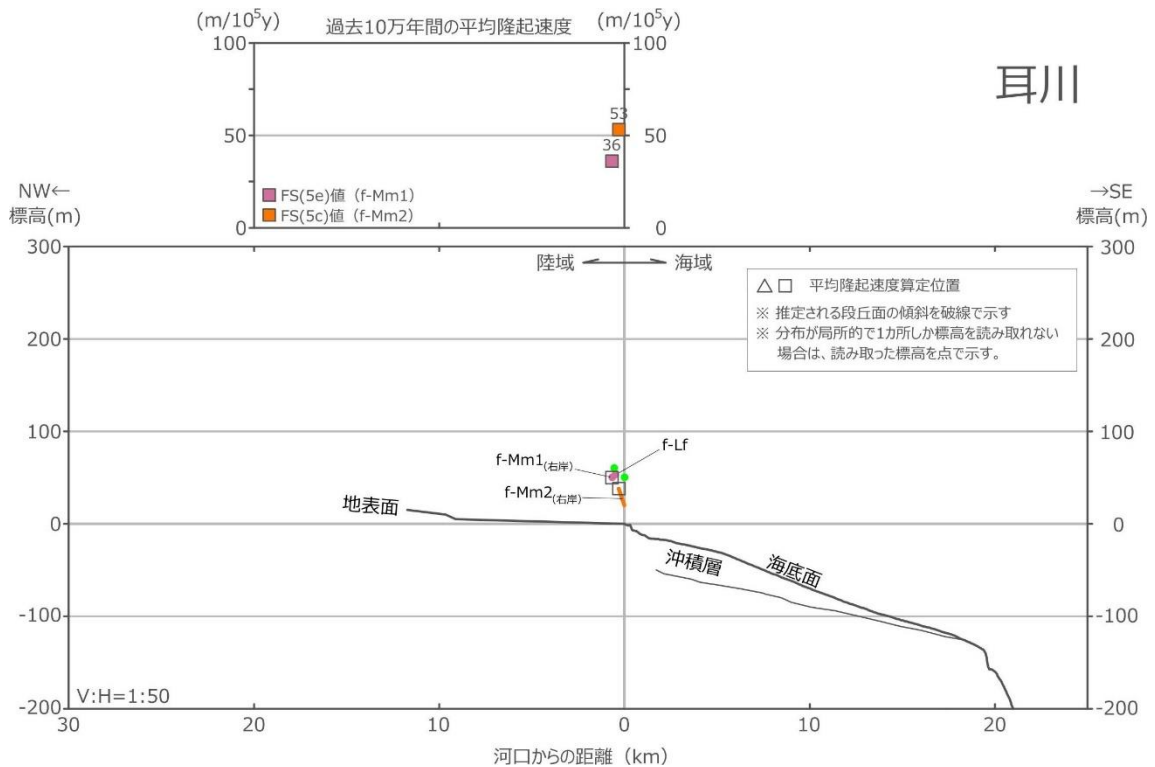


図 2.1-13 耳川ならびにそれに続く海底谷沿いの地形・地質断面図

上図における FS 値は吉山・柳田（1995）の海水準 1 サイクル間の隆起量の示標、上図中における数字は隆起量示標から計算された平均隆起速度

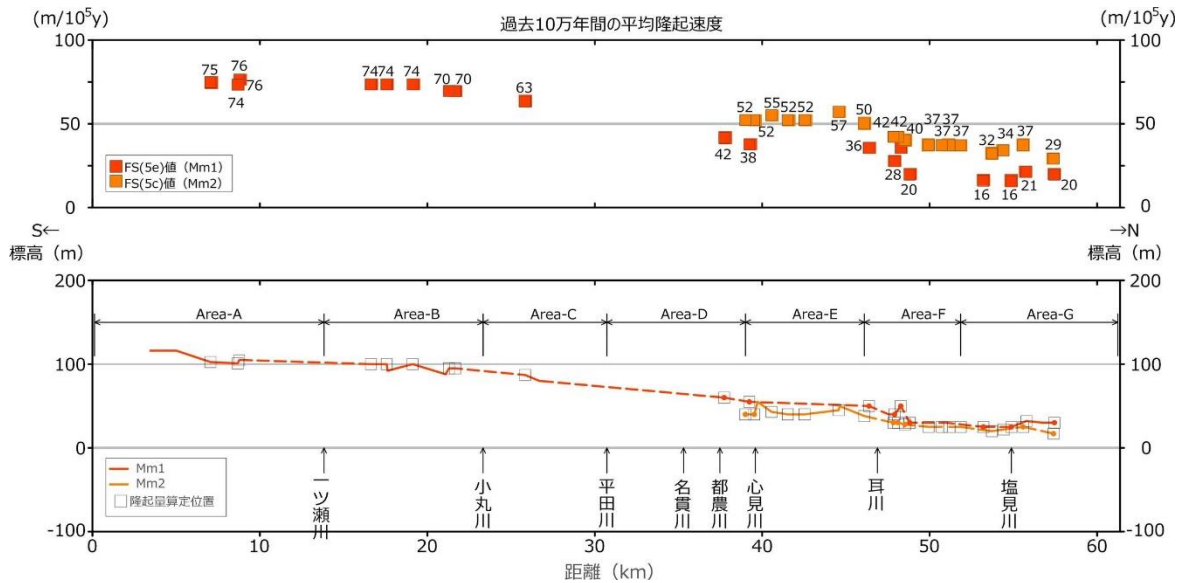


図 2.1-14 海成段丘面の旧汀線高度分布図

上図における FS 値は吉山・柳田（1995）の海水準 1 サイクル間の隆起量の示標、上図中における数字はその隆起量示標から計算された平均隆起速度

(e) 陸域の後期更新世の平均隆起速度分布のモデル化と海域への外挿

図 2.1-10～図 2.1-13 に示したように、陸域から海域へ、南から北へと後期更新世の平均隆起速度の分布に、顕著な不連続は見られない。また、本調査地域では、海岸線沿いに活構造は報告されていない。これらのことから、本地域の三次元的な隆起モデルとして、単純な傾動隆起モデルを考える。つまり、後期更新世の平均隆起速度の分布を平面近似する。

さて、ここで論点として、モデルを構築するにあたって用いるべき隆起量データとして何を採用するかという点を考える。

図 2.1-14 では、北部において、MIS5e からの FS 値と MIS5c からの FS 値が系統的に違うことを述べた。両者の現在の高度にはそれほど差が無いので、この差は MIS5e と MIS5c の海水準高度の差約 20m（小池・町田編, 2001 で採用している値）に相当している。FS'値についても、同様な理由による系統的な差が含まれていると考えられる。そこで、今回は思考実験として、モデル①：MIS5e の海成・河成段丘から得られた FS(5e)値と FS'(5e)値のみを用いた平面近似と、モデル②：FS(5e)値と FS'(5e)値に加えて、MIS5c の海成・河成段丘から得られた FS(5c)値と FS'(5c-5b)値を用いた平面近似を実施した。その結果を図 2.1-15 に示す。両者を比較すると、傾動方向が大きく異なることとなった。モデル①では、海岸線に平行な北北東への傾動となった。これに対し、モデル②では、海岸線とやや斜交する東への傾動となった。

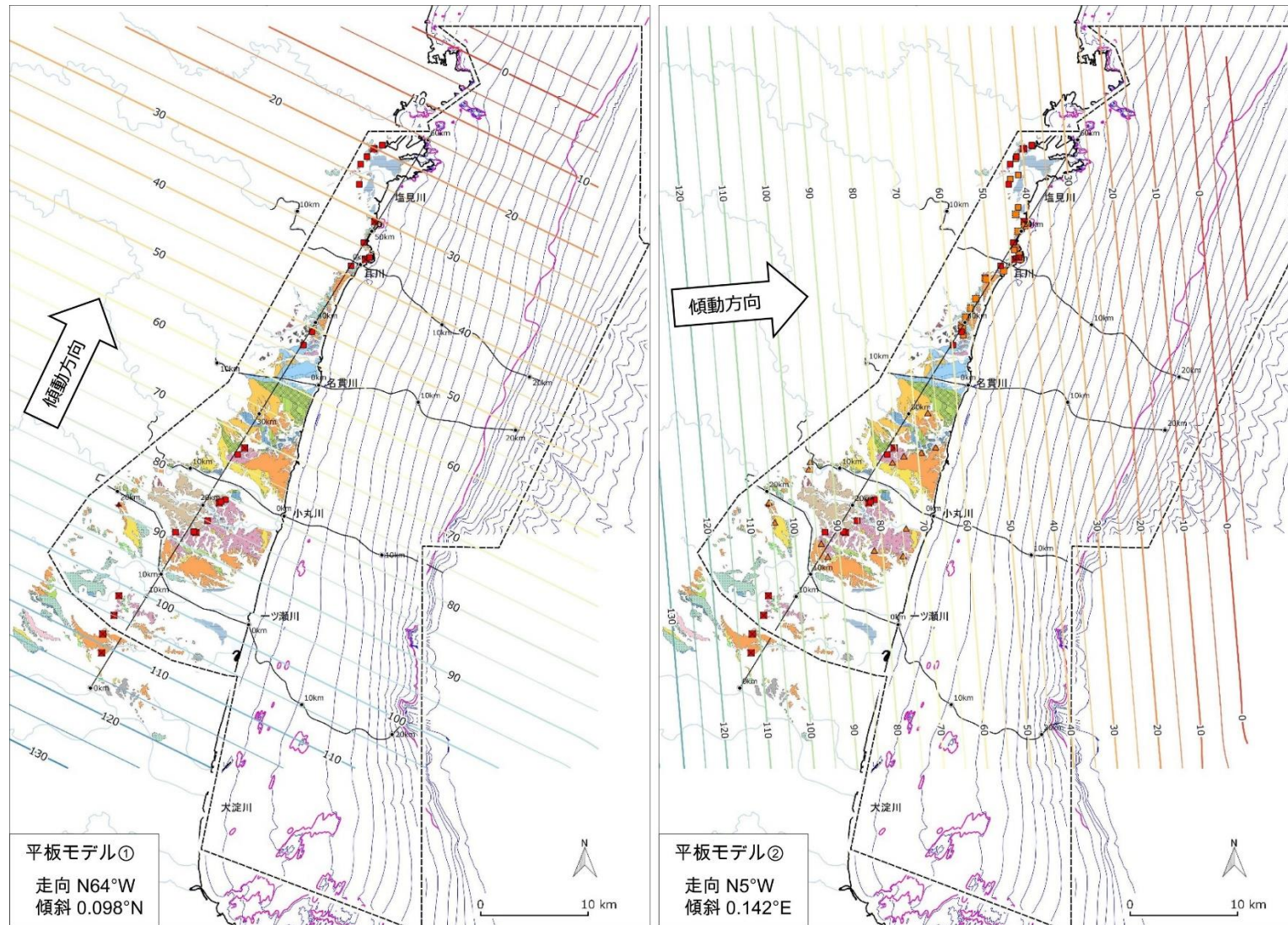


図 2.1-15 宮崎平野中・北部の隆起モデル

⑤ 考察

(i) モデルの評価、外挿の検証

傾動方向の違いは、外挿先である海域の隆起量に違いを生じさせることとなる。モデル①で考えると、海岸線に直交する方向では、隆起量を減ずることがなく、隆起量はほぼ変わらないと見積もられる。一方、モデル②で東に行くほど隆起量を減ずることになり、海域の後期更新世の平均隆起速度は陸域より小さいと考えられる。例えば、一ツ瀬川河口より 10 km 程度沖合を考えると、モデル①では過去 10 万年間に 90~100 m、モデル②では同じく 50~60 m となる。

この違いの原因は、ここまでの隆起量の見積りの論理を逆にたどれば明らかなように、内陸部で見積もられた隆起速度のデータの採否である。そして、ここで内陸部の隆起速度の指標として使っているものの多くは、FS'(5d-5c)値である。FS'値は、「MIS5 の河成段丘と現河床の比高値 (FS 値=旧汀線高度に準ずる)」(吉山・柳田, 1995) とされていることを踏まえ、まず、FS'(5c-5b)値の信頼性・精度について考える。

FS (5e)値、FS' (5e) 値および FS' (5d-5c) 値が複数得られている一ツ瀬川や小丸川では、近接するこれらの値の差は最大でも 10m 程度で、大きな差は無い。故に、FS (5e) 値が後期更新世の隆起量・隆起速度の指標として妥当とするならば、FS' (5d-5c) 値もこの程度の誤差はあるかもしれないが、指標として信頼できると判断できる。したがって、多くの一ツ瀬川や小丸川において、上流ほど指標値が大きく、下流ほど小さいことは、相対的に上流側で隆起量が大きく、下流側で小さいことを示していると考えられる。以上のことから、現時点では、モデル②の方が妥当である可能性が高いと考えられ、このモデルに基づけば、この事例調査地域における沿岸海域の後期更新世の平均隆起速度は、総じて陸域よりも小さいと推定される。

現時点では、海域の後期更新世の平均隆起速度を直接見積めることは難しい。平成 28 年度で議論した大陸棚縁辺部を LGM 時の海岸線と考えて見積める方法との比較は、誤差／不確実性が大きすぎて、うまく行かなかった。しかし、東への単純な傾動運動で第一次近似が可能であることが明らかとなったことを前提とすれば、そのような運動像から期待される海底下の地形・地質現象を考えることにより、定性的に検証の糸口が見いだせるのではないかと考える。

モデル②の傾動方向は、現海岸線とは斜交しているため、現海岸線で見れば南ほど隆起量が大きく、北ほど小さいことになる。これは、図 2.1-15 の海成段丘の旧汀線高度分布として現れている。ここで、海域の沖積層基底等深度図に目を向けると、南ほど凹凸が大きく、北ほどなだらかという基本的な特徴を目にすることができる。さらに細かく見ると、小丸川以北でも現海岸線の近くで凹凸が大きく、沖合でなだらかである。つまり、東西方向で沖積層基底等深度のパターンに違いがある。沖積層基底深度分布を LGM 時の沿岸陸域の地形と見做せるならば、隆起量が大きい山側で、より起伏が大きいということになり、定性的ながら合理的な説明が与えられる。このことは、海底地形の形状が、外挿の妥当性を示す定性的な根拠となっている可能性を示す。

また、今回は取り上げられなかったが、当方に単調に傾動する運動が、後期更新世のみならず、それ以前の長期間にわたって継続していたものであるならば、地質構造にその痕跡が現れると考えられる。今回で言えば、東方への同斜構造である。もちろん、この運動が始まった時の地層の姿勢により、現在の地質分布・地質構造が決まってくるので相応の調査が必要であるが、基盤の地質構造もまた隆起運動モデルを検証する材料になると考える。

(ii) 外挿法による隆起量評価の不確実性とその低減

上記の議論の前提となるのは、正確な段丘の時空分布である。この中から、隆起量の指標となる段丘を決めて指標値を計測する。したがって、段丘の対比・編年は、その最も基本的な情報であり、その誤差、具体的には複数の作業仮説は、複数の隆起速度分布、複数の隆起モデル

を生むこととなり、それらによって外挿され見積もられる複数の評価結果が不確実性そのものとなる。

また、海岸線付近の海成段丘の旧汀線高度のデータだけだと、それらはほぼ一直線上に並んでいることから、三次元的な隆起モデルを構築すると不確実性が大きくなると考えられる。このような不確実性を低減するためには、内陸部の隆起量評価技術の向上が必要と考える。沿岸部での研究事例に比べて、内陸部の研究事例は非常に少なく、さらなる技術の整備が必要である。

⑥ まとめ

本年度は、後期更新世以降の隆起運動について、陸域の平均隆起速度分布から三次元的な隆起運動モデルを構築し、これを沿岸海域に外挿することにより、海域の隆起速度の評価を試みた。この結果については、海底の地形との対応を見ることにより、定性的には説明しうると考えられる。

今後の課題としては、まず、段丘対比・編年に関わる継続的な技術開発（および技術の維持・継承）が挙げられる。この点については、後章にて、新たな検討が展開される。次に、内陸部の隆起量評価も重要な課題であり、この情報がより確からしい三次元の隆起量モデル構築の鍵となる。モデルを絞り込む上では、基盤の地質構造もまた重要な判断材料であると考えられる。言い換えれば、基盤の地質構造の正確な把握とそのモデルへの反映が課題である。最後に、今回は単調な傾動隆起を考えて、平板近似のみの議論であったが、日本の沿岸部には、断層や褶曲が分布する地域もある。このような地域への適用も重要な課題である。

2) 海底地形の地形判読に基づく隆起・侵食評価手法の検討

① 目的と概要

海陸境界付近の隆起・侵食に関する調査・評価技術の高度化においては、現在の陸域だけでなく、氷期に広く陸化する大陸棚からも地殻変動や侵食の指標となる地形の分布やその特徴を読み取ることが技術開発課題となる。この技術開発課題の解決には、大陸棚周辺の地形的特徴の俯瞰的な把握が重要となる。そこで、本事業では、近年利用可能になった海底地形デジタルデータを用いて地形判読を行い、大陸棚周辺の地形的特徴を示した地形学図を作成する。

平成 28 年度の本事業において、我が国の大陸棚周辺に発達する海底地形の広域的な判読を行った。そして、大陸棚の広がりや規定する大陸棚外縁と大陸棚の侵食現象にかかわる地形（海底谷と大陸棚外縁の開析前線）を示す地形学図を作成した。その一方で、海底段丘については、予察的にその存在が指摘されるにとどまった。

我が国の大陸棚周辺に分布する海底段丘の成因については、先行研究が少ないため明らかではない。しかし、陸域に分布する海成段丘との形態の類似性から、海底段丘には海成段丘と同様な過程（ユースタティックな海水準変動と地殻変動の重合）により形成され、現在は水没しているものが含まれている可能性がある。言い換えれば、海底段丘の中には、海域における地殻変動を反映した深度分布を示すものが存在している可能性がある。そのため海底段丘の分布と地形的特徴の把握は、沿岸部における隆起・侵食の傾向を評価する上で重要であると考えられる。

そこで平成 29 年度は、海底段丘を判読し、海底段丘の分布と特徴を把握することを目的とした。具体的には、(1) 地形判読に必要な資料の作成、(2) 海底段丘の判読、(3) 海底段丘から読み取れる沈水旧汀線と陸上の海成段丘から読み取れる旧汀線を一つの地図に示した「海陸シームレス旧汀線分布図」の作成、(4) 旧汀線や段丘面の幅といった地形要素の計測を行った。

② 方法

(a) 地形判読に必要な資料の作成

地形判読に必要な資料は、海底地形の実体視判読を可能とさせる海底地形アナグリフ、ベースマップとなる海底地形図の二つである。本事業では、それらを海域と陸域の数値標高モデル (DEM) を統合した海陸統合 DEM から作成した。使用した海域の DEM は、(財) 日本水路協会が作成した海底地形デジタルデータ (M7000 シリーズ) を後藤 (2013 ; 2014) に記された手法にならい 30 m メッシュのラスターデータに変換したものである。一方、陸域の DEM は、米国航空宇宙局 (NASA) の Shuttle Rader Topographic Mission で作成された 3 秒メッシュ (約 90 m メッシュ) の DEM (SRTM-3) を使用した。これらのデータの一覧を、表 2.1-3 に示す。

海底地形アナグリフと海底地形図については、標準地域メッシュの第一次地域区分 (縮尺 20 万分の 1 地勢図と同じ図郭範囲) のポリゴンを適宜統合して作った図郭ごとに作成した。海底地形アナグリフは、栗田 (2014) にならい標高段彩・傾斜量のグラデーションに等深線図 (主曲線 20 m 間隔、計曲線 100 m 間隔) を重ね合わせたものとした。海底地形アナグリフの作成に使用したソフトウェアは、片柳由明氏作成のフリーウェアである Simple DEM viewer Ver.5.8.8 である。また、Simple DEM viewer 上での高度段彩の色調、傾斜区分のグラデーション、陰影の強さ、高さの強調といった設定条件については、後藤 (2014) を参考にした。海底地形図については、海底地形アナグリフのベースとなった標高段彩・傾斜量のグラデーションに等深線図を重ねたものをそのまま用いた。

表 2.1-3 海陸統合 DEM の作成に際して使用した地形デジタルデータの一覧

海底地形データ(M7000シリーズ)			SRTM-3 DEM	
M7001 ver. 2.3	M7010 ver. 2.0	M7019 ver. 2.2	srtm_61_08	srtm_65_05
M7002 ver. 2.3	M7011 ver. 2.2	M7020 ver. 2.1	srtm_62_06	srtm_65_06
M7003 ver. 2.2	M7012 ver. 2.0.1	M7021 ver. 2.1	srtm_63_05	srtm_66_04
M7004 ver. 2.2	M7013 ver. 2.0	M7022 ver. 2.1	srtm_63_06	
M7005 ver. 2.3	M7014 ver. 2.1	M7023 ver. 2.0	srtm_64_04	
M7006 ver. 2.1	M7015 ver. 2.0	M7024 ver. 2.1	srtm_64_05	
M7007 ver. 2.1	M7016 ver. 2.1	M7025 ver.2.0	srtm_64_06	
M7008 ver. 2.3	M7017 ver. 2.0	M7050 ver. 1.0	srtm_65_03	
M7009 ver. 2.0	M7018 ver. 2.0.1		srtm_65_04	

(b) 海底段丘の判読

地形判読作業は、海底地形アナグリフをパーソナルコンピュータのディスプレイ上に写し、縮尺を適宜変更しながら行った。判読結果については、縮尺 20~80 万分の 1 の海底地形図を A3 サイズで印刷したものに色鉛筆で書き入れた。

海底段丘の判読基準は、陸上の段丘判読における基準 (例えば、鈴木, 2000) を参照し、「一方ないし四方を崖または急斜面で縁取られ、周囲より不連続的に高い平坦面ないしは緩斜面」とした。そして海底段丘の後面段丘崖の基部を沈水旧汀線として判読した。海底地形図には、判読した海底段丘のうち、段丘面の幅が 0.5 km 以上のものの段丘面、段丘崖、旧汀線を書き入れた。

海底段丘面の対比は、段丘面の深度分布と水平方向の連続性に基づいて行ない、上位のもの (=水深が浅いもの) より順に I 面、II 面、III 面・・・と名付けた。

(c) 海陸シームレス旧汀線分布図の作成

海陸シームレス旧汀線分布図は、海域と陸域の旧汀線を示した主題図である。海域の旧汀線は、海底段丘の分布を記した海底地形図をスキャンニングし、沈水旧汀線を地理情報システム (GIS) 上でトレースしたものである。一方、陸域の旧汀線は、「海成段丘アトラス」(小池・町田編, 2001) の 20 万分の 1 地形図に示された旧汀線データを GIS 上でトレースしたものである。海陸シームレス旧汀線分布図の例を図 2.1-16 に示す。

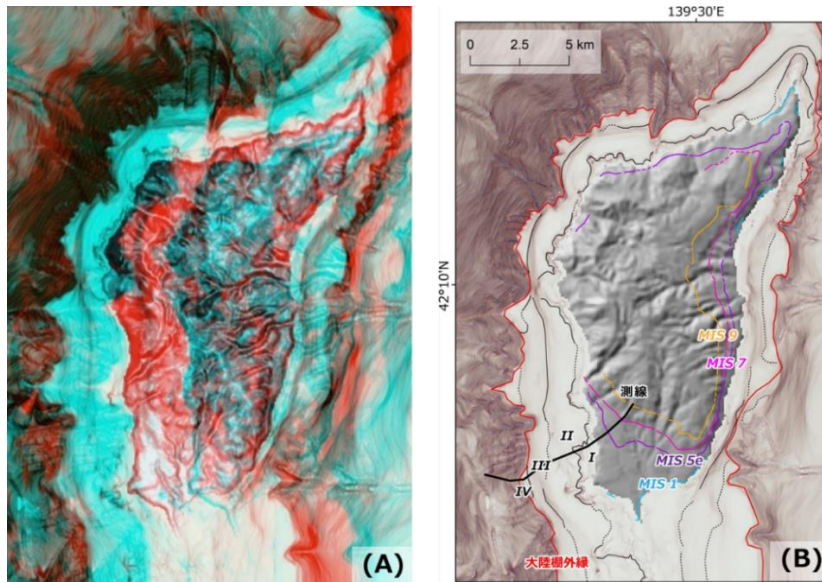


図 2.1-16 海底地形アナグリフ (A) と海陸シームレス旧汀線分布図 (B) の例 (奥尻島周辺)

(d) 地形計測

海陸シームレス旧汀線分布図を海陸統合 DEM 上に示し、海底段丘の発達の良いエリアにおいて地形断面図を作成した。そして、地形断面図から旧汀線の高さ、段丘面の幅の 2 要素を計測した。エリアによっては、海域だけでなく陸域の海成段丘も含めた区間で地形計測を行った。図 2.1-17 に地形断面図と地形計測の結果を示す。

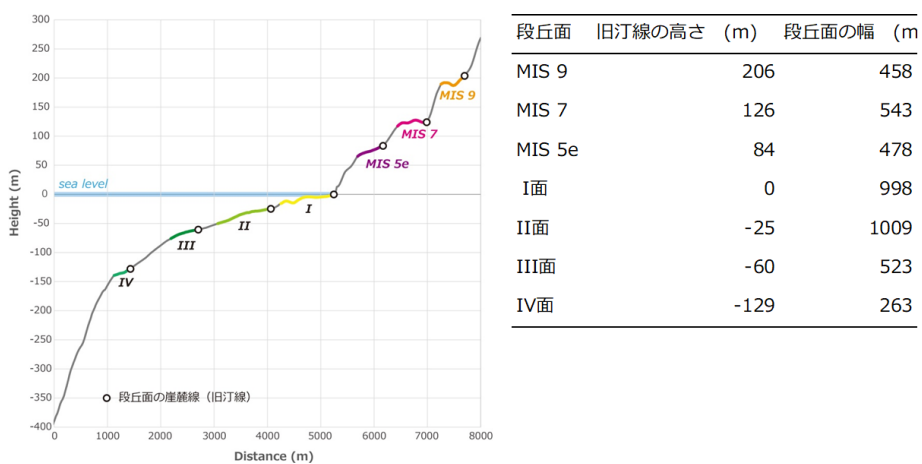


図 2.1-17 地形断面と地形計測結果
測線の位置は図 2.1-16 を参照

③ 結果

本事業では、海底段丘の後面段丘崖基部が沈水旧汀線であると仮定し、それらの分布、深度、形態の特徴について以下に述べる。

(a) 分布の特徴

日本列島周辺の海陸シームレス旧汀線分布図を図 2.1-18 に、沈水旧汀線の深度分布を図 2.1-19（大判の図については Appendix III を参照）にそれぞれ示す。これらの図が示すように、海底段丘は日本列島の大陸棚上に広く分布する。沿岸に海成段丘が分布しない地域においても海底段丘については分布を確認することができる（図 2.1-18）。海底段丘の分布範囲についてみると、水深 140 m、すなわち一般的な大陸棚外縁水深付近（岩淵・加藤, 1988）まで海底段丘が広く分布する海域と沿岸域の水深 60 m 以浅に海底段丘の分布が限られる海域とに分けられる（図 2.1-19）。後者の代表的な海域は、若狭湾～九州西部である。

海底段丘は、これまでに日本海側では、石狩湾（佐藤・茂木, 1982）、津軽海峡西口（例えば、八島・宮内, 1990）、能登半島西方（桜井ほか, 1971）、若狭湾、（佐藤・茂木, 1982）、対馬西岸・対馬東岸（佐藤・茂木, 1982）、対馬海峡（茂木, 1981）の 6 海域、太平洋側では、関東南部（貝塚, 1955）の 1 海域において分布が確認されていた。しかし、本事業での地形判読の結果、海底段丘はこれらの海域以外にも広く発達することが確認できた。

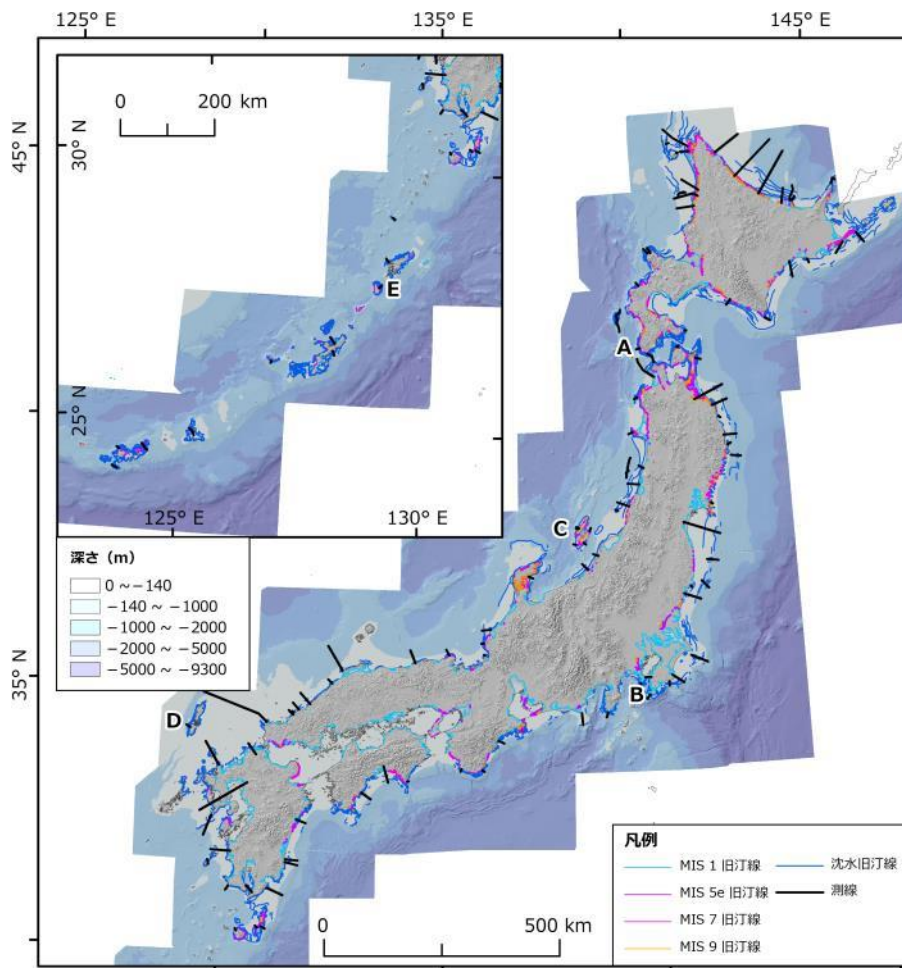


図 2.1-18 海陸シームレス旧汀線分布図

陸域の旧汀線は小池・町田編（2001）に基づいて作成。測線 A~E の地形断面については図 2.1-21 を参照。海底段丘については、瀬戸内海および一部の島嶼で未判読。

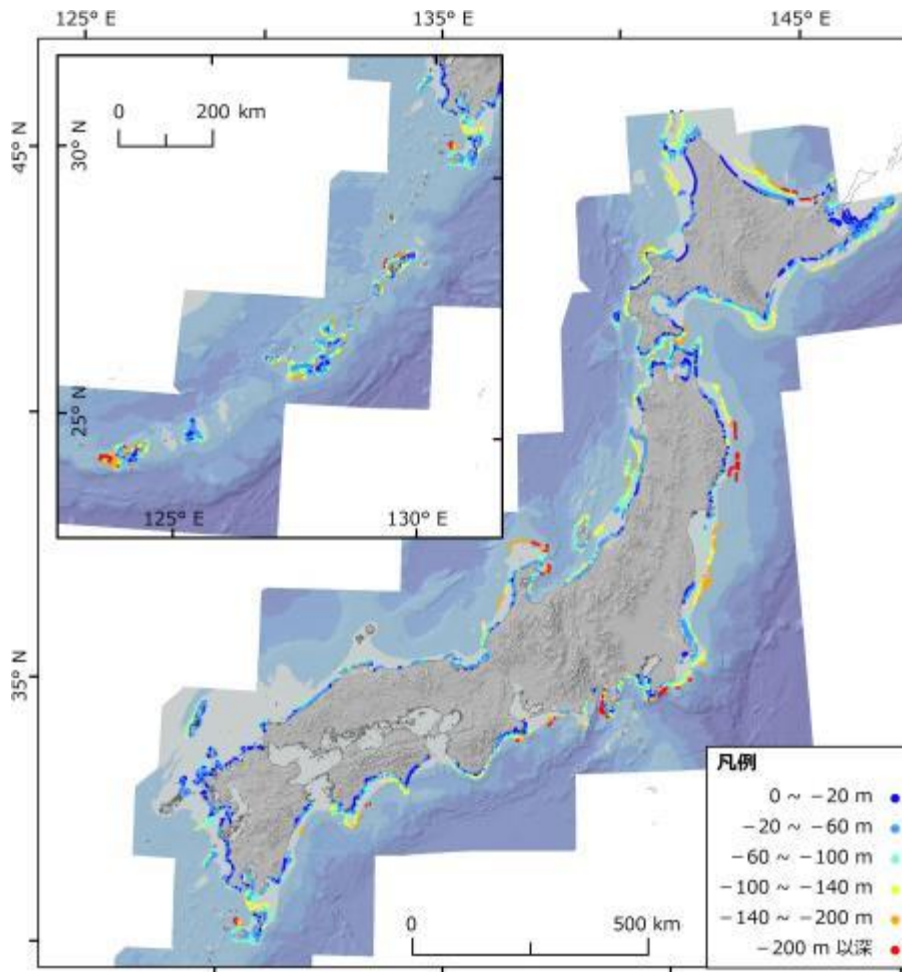


図 2.1-19 沈水旧汀線の深度分布
海底の高度段彩の凡例は、図 2.1-18 と同じ。

(b) 深度の特徴

海底段丘の分布深度について注目すると、海底段丘の大半は、大陸棚外縁の平均水深である約 140 m (岩淵・加藤, 1988) 以浅に分布する (図 2.1-20)。最も発達の良い分布深度は、水深 20 m 以浅である。一方で、水深 200 m 以深においても、全体としての数は少ないが海底段丘を確認することができる。そうした深い位置に分布する海底段丘は、オホーツク海では網走沖、日本海側では積丹半島、庄内沖、能登半島沖、太平洋側では津軽海峡、三陸沖、福島・宮城県沖、房総半島沖、伊豆半島沖、志摩半島沖、足摺半島沖など、東シナ海では奄美大島、沖縄島、石垣島、西表島において確認できる (図 2.1-19)。これらの海域のうち、三陸沖、房総半島沖、伊豆半島南西沖の 3 海域では、水深 400~740 m に海底段丘が分布する。

最終氷期の極相期におけるユースタティックな海水準低下量が 120 m 程度であったことを考慮すると、深度 120 m 以深に判読された沈水旧汀線は、海底の沈降により、最終氷期の極相期ないしは最終氷期以前の汀線を海底に記録したものであると考えられる。今後、そのような海底の地殻変動を、陸域と海域の地形・地質学的証拠から矛盾無く説明できるかどうかについて検討することが求められる。

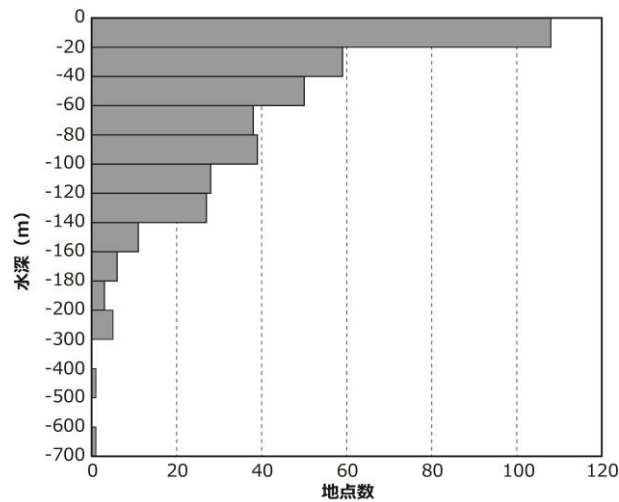


図 2.1-20 沈水旧汀線高度の頻度分布

図 2.1-18 の測線上で確認した 376 地点の沈水旧汀線の分布高度に基づく。

(c) 形態の特徴

日本列島周辺に分布する海底段丘のプロファイルの例を図 2.1-21 に示す。海底段丘崖の斜面形は、凹形、直線形、凸形と様々である (図 2.1-21)。これに対して海底段丘面は、凹形斜面ないしは直線斜面のものが大半である (図 2.1-21)。しかし、数は少ないが、プロファイル C の水深 20~60 m に発達する段丘面のように全体が撓んだ凸形斜面のものも確認できる。

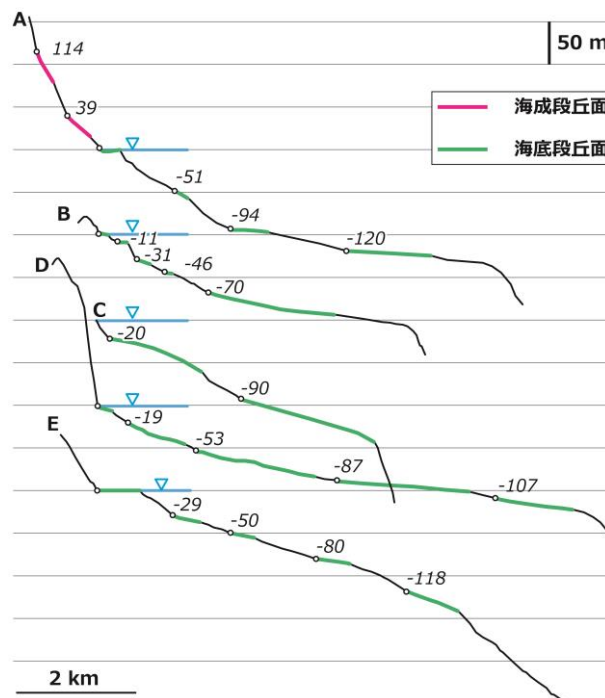


図 2.1-21 海底段丘の地形断面図

測線の位置については、図 2.1-18 を参照

海底段丘面の勾配については、地域差がみられるだけでなく、同一プロファイル上においても差がみられる。例えば、プロファイル D では、全ての海底段丘面の勾配がほぼ揃っている。

るが、プロファイル E では、最上位のサンゴ礁段丘起源の海底段丘面に比して、それ以深の海底段丘面の勾配は急である。

海底段丘崖および海底段丘面の形状は、その形成過程と関係している可能性がある。今後、上記に述べた点について、地形計測に基づく詳細な検討が望まれる。

④ まとめ

本事業では、海底地形デジタルデータから我が国の海陸境界から大陸棚縁辺付近までをカバーするアナグリフと海底地形図を作成するとともに、これらのデータの地形判読から、20～80 万分の 1 スケールで認識される海底段丘の分布図を作成した。さらに海底段丘分布図と海成段丘アトラス（小池・町田編, 2001）のデータを統合することで、海陸シームレス旧汀線分布図を作成した。その結果、海底段丘は、我が国の沿岸域において海成段丘以上に広く分布する地形であることが判明した。しかし、その発達度合いには地域差があり、分布深度も様々である。今後の課題としては、(1) そうした地域差を地形・地質・テクトニクス条件を考慮し、整理すること、(2) 海底段丘の成因の理解に向けて、海底段丘の堆積構造を音波探査記録等から把握することが挙げられる。

3) 要素技術の検討（その 1）経験的指標に基づく段丘対比・編年手法の高度化

① 概要

(i) 研究の背景、論点提示、課題設定など

一般に、段丘の離水（形成）年代は、段丘を構成する堆積物（礫層）の堆積年代より後、段丘堆積物を覆う風成層の堆積年代より前として見積もられる。海成段丘の場合は、これに加えて、地形層序と海洋酸素同位体ステージと照らして、高潮期に形成年代を求めるともしばしば行われる。

この段丘の形成年代決定の原理では、段丘堆積物の上部にテフラなどの年代情報があるほど、また、被覆層の最も下位にやはりテフラなどの年代情報があるほど、不確実性が少ない、狭い年代範囲で形成年代を見積ることができる。しかし、我が国の段丘の年代記載（小池・町田編, 2001）を概観すると、多くの場合、地形層序、被覆層中のテフラ層序、海洋酸素同位体ステージへの当てはめによって段丘の形成年代を見積っている（濱田・幡谷, 2011）。言い換えると、段丘堆積物の年代と被覆層の年代で挟んでいる例は限られ、テフラを始めとした年代情報を段丘堆積物中から見出すことは、しばしば難しい。また、風成層が離水直後から堆積しているとは限らず、しばしば堆積直後に堆積間隙が見られることも多い（幡谷ほか, 2006 など）。また、肉眼観察が可能なテフラ層のみが記載され、その層準よりも下位の被覆層の年代情報が無かったため、そのテフラの降下年代に段丘の年代決定が大きく引っ張られ、本来の段丘の形成年代よりも明らかに新しく見積もっていた例もある（幡谷ほか, 2005 など）。あるいは、古い被覆層中では火山ガラスなどが溶けてしまい、年代情報が得られないがために、確からしい形成年代を決めるのが難しいといった例もあろう。言うまでもなく、このような段丘対比・編年の不確実性は、段丘を用いた隆起量評価の不確実性に直結する。

段丘離水直後の風成層が欠けている点については、風成層全体を 5～10cm 間隔で連続的に分析すること（RIPL 法：古澤, 2004）が行われることにより、肉眼では分からなかったテフラの情報が得られるようになってきて、大きく改善された。しかし、RIPL 法では、地層の欠如自体には対処できない。したがって、他の手法から年代情報を得ることに努める必要がある。

さて、広域テフラの研究がブレイク・スルーする以前は、段丘面の開析（残存）、段丘堆積物／礫層の風化性状、被覆層（風成ローム）の色調など、堆積環境・風化作用の影響を反映し

たと見做される指標が使われてきた（中川, 1961a ; 同, 1961b など）。本稿では、これらの指標を経験的指標と呼ぶ（濱田・幡谷, 2011）。経験的指標は、テフラ層序が主流となった現在でも用いられてはいるが、主に定性的な扱いに留まっており、精度や適用条件についての研究はさほど進んでいない。しかし、テフラが溶けてしまう古い風成ローム層や、段丘堆積物（礫層）から年代情報を得るといった目的に対し、経験的指標の検討は一つの有力なアプローチであると考えられる。

(ii) 研究概要

より確からしい風化指標を作るという技術開発課題に対して、年代がコントロールされた試料を検討に用いるという点は必須と言って良い。また、先行研究において、段丘礫の風化は、安山岩礫など比較的明瞭な風化皮膜を形成するものでは、皮膜の厚さが風化期間を反映して厚くなるが、風化皮膜が不明瞭な砂岩礫では風化程度を定量的に評価することが難しいことが分かっている。さらには、安山岩などの火山岩は、日本全国では分布に偏りがあるため、より普遍的に存在する砂岩・泥岩の風化程度の定量的評価手法が望まれる。

先行研究に依れば（「平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書」）、宮崎平野には、長期間にわたって形成された多段の段丘が分布し、段丘礫層の記載があり、被覆層中に多くの指標テフラが記載されている。したがって、宮崎平野は、本研究の目的に対し、最も適した事例研究地域の一つであると考えられる。そこで、平成 29 年度は、宮崎平野において、隆起・侵食の事例研究を実施しており（本項における 1）「沿岸域における隆起・侵食の検討」、これを基礎として、経験的指標の高度化に取り組む。本項における 1）「沿岸域における隆起・侵食の検討」では、段丘礫の風化の程度や被覆層の赤色化といった経験的指標の定性的な区分に対し、主に地形層序・テフラ層序による段丘対比・編年の結果とは矛盾が無いことを確認した。ここでは、これを一步進めて、宮崎平野に分布する年代の異なる複数の段丘から段丘礫・被覆層試料を採取し、間隙率や色調など風化により変化する特徴について、定量的データを取得することにより、経験的指標の適用性の確認と精度向上を図る。

なお、以下で記している段丘の名称については、本項における 1）「沿岸域における隆起・侵食の検討」での記載に従っており、詳細はそちらを参照されたい。

② 研究手法

(a) 観察・計測・分析項目の選択

段丘礫は、風化により元素の溶出、移動、沈殿が生じることが知られている（栗山ほか, 2006）。これによる明瞭に変化として、間隙率と色調が挙げられ、元素の溶出、移動、沈殿は、鉱物の消失、変質、晶出などを伴っていると推定される。こうした変化が著しく進んだものが、いわゆるクサリ礫と称されるものと考えられる。

一方、風化による風成被覆層の変化としては、赤色化が知られている。一般に、古い段丘の風成被覆層中には、赤色化した部分が認められ、赤色土あるいは赤色風化殻と呼ばれることがある（大政ほか, 1957 ; 松井・加藤, 1965）。主に中位段丘よりも古い段丘に限って分布するとされ（松井・加藤, 1962）、さらに古い高位段丘に分布するものは、中位のものとは色調に違いがあり識別が可能との報告もある（岡田, 1973）。

こうした風化による段丘礫・被覆層の性状の変化は、日本全国で認められているため、段丘の形成年代を推定する上での有用な特徴の一つと考えることができる（濱田・幡谷, 2011）。このため、これらの性状変化の原因になっている現象を観察・計測・分析により定量的に把握できれば、客観的な年代指標にできる可能性があると考えられる。

一方、段丘被覆層には、再堆積など堆積後の移動の可能性がある、この影響を評価する必要がある。段丘被覆層は、通常、肉眼で観察可能な明瞭な堆積構造をもたないが、赤色化、赤褐色化が進んだ被覆層には、しばしば、「トラ斑」「ローズ状」と言った用語で記載される特徴的な斑紋が観察される。こうした斑紋は、疑似グライ化作用による土壌中の鉄の不均一な分布によるものである(三土, 1972; 永塚, 1997)。疑似グライ化は、土壌中での停滞水の周期的な変動によるため、被覆層が風成で堆積し、定着した以降に大きな乱れが生じていないことの証拠と見なすという意見もある(濱田・幡谷, 2015)。また、斑紋がない場合でも、一度固結した被覆層と未固結の風成層とでは、密度差が生じる可能性が考えられる。したがって、段丘被覆層が長期に渡って安定した地層であった後、削剥、再堆積が生じると密度の異なる碎屑物による不規則な堆積構造を形成すると推定される。このような構造は、肉眼での観察に加えて、段丘被覆層をブロック状の塊で採取し、X線CTやX線分析顕微鏡による元素マッピングにより、把握できると期待される。

岩石・土壌の赤色化は、それらに含まれる鉄鉱物、中でも赤鉄鉱の結晶成長によって生じると考えられている(Nagano et al., 1994; Cornell and Schwertmann, 2003)。このうち、段丘被覆層中では、風化の進行により、有色鉱物などから遊離した鉄が、非晶質なものから、徐々に針鉄鉱、赤鉄鉱などの鉄鉱物となり、さらに結晶成長を続けていく。このため、遊離酸化鉄の存在状態は、土壌化の程度を識別する指標となる(永塚, 1973)。

これらのことから、段丘礫、被覆層の風化による性状変化を定量的に理解するには、以下の項目の観察・計測・分析が有効だと考えられる。

まず、礫については、間隙率測定が有効であると推定される。間隙率の測定では、水銀圧入式のポラシメータにより、風化部分と新鮮部分の間隙率および間隙径の測定が望まれる。しかし、ポラシメータによる測定は、非常に時間と手間を要する。このため、限られた期間での研究で、すべての試料に対して実施するのは現実的ではない。そこで、ポラシメータによる測定は、一部の試料にとどめ、他の試料については、間隙率を代表する値とされ、既往の研究事例でも風化の程度を示す重要な物性値として測定された実績を持つ有効間隙率(西山ほか, 2001, 栗山ほか, 2006)を用いることとした。

礫および被覆層の内部における元素の移動、沈殿、鉱物の消失、変質、晶出については、肉眼での観察に加え、X線分析顕微鏡による元素マッピング、XRDによる鉱物分析により把握することが可能と考えられる。

風化による色調の変化については、肉眼での観察に加え、測色計を用いることにより、より客観的なデータとすることが可能である。

さらに、鉄の鉱物変化や結晶成長の程度については、XRDによる分析と遊離酸化鉄分析により把握することが可能と考えられる。

(b) 段丘礫採取方法と留意点

段丘礫の試料採取にあたっては、採取層準と礫径に留意した。段丘礫の風化は、基本的に地表から進むので、段丘礫層の堆積面よりも一定深度以内の試料を分析に供する必要がある。濱田(2012)は被覆層/段丘礫層境界より2 m下方を境に風化の程度が異なることを報告しており、これを参考に、被覆層/段丘礫層境界より2 mよりも浅い箇所ですべて試料を採取した。風化の程度を表す定量データとして有効間隙率が考えられるが、これは礫径に依存している可能性がある(濱田, 2012)。このため、分析に供する礫の礫径を拳大に揃えた。

分析試料数については、野外より一露頭あたり10個程度の礫試料を採取し、室内における岩相の確認を経て礫種を砂岩ないし泥岩に揃えた5個の試料を分析に供した。これは、風化の仕方は、礫の種類によって異なると考えられるからである(栗山ほか, 2006など)。

(c) 段丘礫の分析項目・手法の説明

礫試料すべてに対して、切断研磨面の観察・測色、XGTによる元素マッピング、水浸による有効間隙率測定を行い、一部の試料については、水銀圧入式のポラシメータによる間隙径分布の測定、XRD分析による鉱物組成の同定を行った。

以下に、各分析項目とその内容を説明する。

(i) 切断研磨面の観察・測色

礫の切断研磨面上で、色調の変化を観察・計測した。測色は、コニカミノルタ製分光測色計 CM-600d を使用し、切断研磨面上の長径に沿って 6 mm 間隔で連続測定を行い、(L*a*b*) 表色系で記録した。

(ii) 有効間隙率測定

すべての礫試料について、「岩の調査と試験」(地盤工学会編, 1989) の水浸法で、全岩の有効間隙率を測定した。

(iii) X線分析顕微鏡 (XGT) による元素マッピング

堀場製作所製 X線分析顕微鏡 XGT-7200 により、切断面上で、風化による変化が比較的大きい Al、Si、Ca および Fe の分布を調べた。

(iv) X線回折分析 (XRD) による鉱物組成分析

一般的な構成鉱物の同定に加え、風化により晶出することが予想される針鉄鉱、赤鉄鉱について、それらの標準試料から得られている XRD パターンとの比較を行って、これらの鉱物の有無を確認した。分析は礫試料の中での風化部分と未風化部分をそれぞれ行った。分析に使用した装置は、Rigaku 製 RINT2500/PC であり、管球 Cu、出力 40kv・50mA、スキャン速度 2°/min、スキャン範囲 回折角 $2\theta=2\sim 60^\circ$ 、スキャンスリット DS, SS 1° RS 0.3 mm の測定条件で行い、得られた X線回折パターンから鉱物種を同定した。

(v) 間隙率・間隙径測定 (水銀圧入法)

風化による空隙の増加に伴う空隙の連結やそれらの大きさなどの変化を把握するために、風化程度の異なる砂岩礫を対象として、島津製作所製水銀圧入式ポロシメータ Pore Sizer 9320 を用いて、間隙率、間隙径を測定した。

(d) 被覆層試料採取方法と留意点

被覆層の性状に関する調査では、調査・分析の方法として三つのアプローチをとった。一つは、露頭面における直接的な測色、二つ目は、被覆層のうち、段丘離水時以降の風化による性状の調査、三つ目は、被覆層の堆積物としての構造の確認を目的とした調査である。

一つ目の露頭面における直接的な測色は、詳細観察を行った露頭面において、整形し平滑化した上で、約 10 cm おきに土色計で測色していった。

二つ目は、段丘構成層直上が最も堆積の時期が古く、風化していると推定される層準において、上記の鉄鉱物の種類、結晶度などの分析用に試料採取を行った。この際、分析の対象とする試料は、段丘構成層との境界面に近い層準から採取することを心がけた。ただし、段丘面上においては、しばしば、段丘構成層と被覆層の境界部において、下位の構成層の砂粒子などが風成のロームと混合する層準があるので、こうした層準は避けた。

三つ目の被覆層の堆積物の構造の確認のための試料は、縦 20 cm、横幅 8 cm のアクリル板を露頭面に押し当て、板の周囲を金物で削り込んで、ブロック状の塊として採取した。ブロック状試料の採取箇所は、露頭面の下部の被覆層の標準的な堆積構造を保持していると箇所を中心に選び、著しく多くの角礫を含むような、明らかに再堆積と見られる部分は避けた。また、複数の層準から試料採取が可能な露頭では、比較のため異なる層準からも同様の試料を採取した。

(e) 段丘被覆層の分析項目・手法の説明

(i) 段丘被覆層の露頭での観察・測色およびブロック試料の観察・測色

被覆層は、風成堆積物であるため、岩石、礫ほど風化による構成鉱物の消失、変化が小さい可能性もあるが、色彩の変化、すなわち鉄鉱物の結晶成長が生じていることは確実である。このため、肉眼での観察に加え、L*a*b*表色系の測色値を鉛直方向に約 10 cm おきに計測した。使用機器は、コニカミノルタ製土色計 SPAD-503 である。また、ブロック試料についても、XRD 分析、遊離酸化鉄分析の分析データとの関係性を評価するために、整形したブロック試料の整形面を鉛直的に 5 cm おきに測色した。測色には、コニカミノルタ製分光測色計 CM-700d を使用した。

(ii) X 線 CT 観察

段丘被覆層が再堆積等、異常なものではない、整然層であることを確認するために、X 線 CT 装置により、被覆層の三次元的な構造を観察・確認した。使用した X 線 CT 装置は、東芝メディカルシステムズ製の医療用ヘリカル(64列マルチスライス CT:Aquilion TSX-101A) である。

(iii) X 線分析顕微鏡 (XGT) による元素マッピング

段丘被覆層の再堆積の有無や疑似グライ化作用による斑紋、さらに風化による赤色化による鉄鉱物の結晶成長による鉄の増加などを把握するため、堀場製作所製 X 線分析顕微鏡 XGT-7200 により、断面の元素分布をマッピングした。本事業では、礫との比較の観点から、Al、Si、Ca および Fe をマッピングした。

(iv) XRD による鉱物組成分析

段丘被覆層中の鉄鉱物の有無、量を把握および風化による粘土化等を評価するために、XRD 分析を行った。鉄鉱物の結晶回折ピークの認定にあたっては、別に用意したほとんど不純物を含まない赤鉄鉱、針鉄鉱の分析を行って得た回折パターンを用いた。分析に使用した装置は、Rigaku 製 RINT2500/PC および Philips 製 X'Pert であり、分析条件は、いずれも、管球 Cu、出力 40kv・50mA、スキャンスピード 2°/min、スキャン範囲 回折角 $2\theta = 2\sim 60^\circ$ 、スキャンスリット DS, SS 1° RS 0.3 mm である。

(v) 遊離酸化鉄分析

主要な段丘被覆層から採取した試料を対象に、遊離酸化鉄分析を行った。分析の方法は、全鉄(Fet)はフッ化水素酸分解-原子吸光法(日本土壤肥料学会監修, 1997)、酸性シュウ酸塩可溶鉄(Feo)は Tamm A 試薬抽出-原子吸光法、ジチオナイト可溶鉄(Fed)は DCB 抽出(Mehra and Jackson 法)-原子吸光法(日本第四紀学会編, 1993)によった。

③ 調査結果

(a) 各段丘の段丘礫の風化程度の分析

Hf1 面、Hf2 面、Mm1 面、Mf1 面、Mf2 面および Lf2 面の露頭から採取した礫試料について、各 5 試料ずつに対して元素マッピング、測色、有効間隙率の測定を行い、風化程度の定量化を行った。例として Hf1 面の段丘礫の元素マッピング、測色結果を図 2.1-22 に示す。その他の分析結果については、Appendix IV に収録した。

また、Hf1 面、Mm1 面および Lf2 面の各段丘の各 1 試料の礫についてポロシメータによる間隙率、間隙径測定を行った。有効間隙率の結果を表 2.1-4 に、ポロシメータによる間隙率の測定結果を表 2.1-5 に示す。

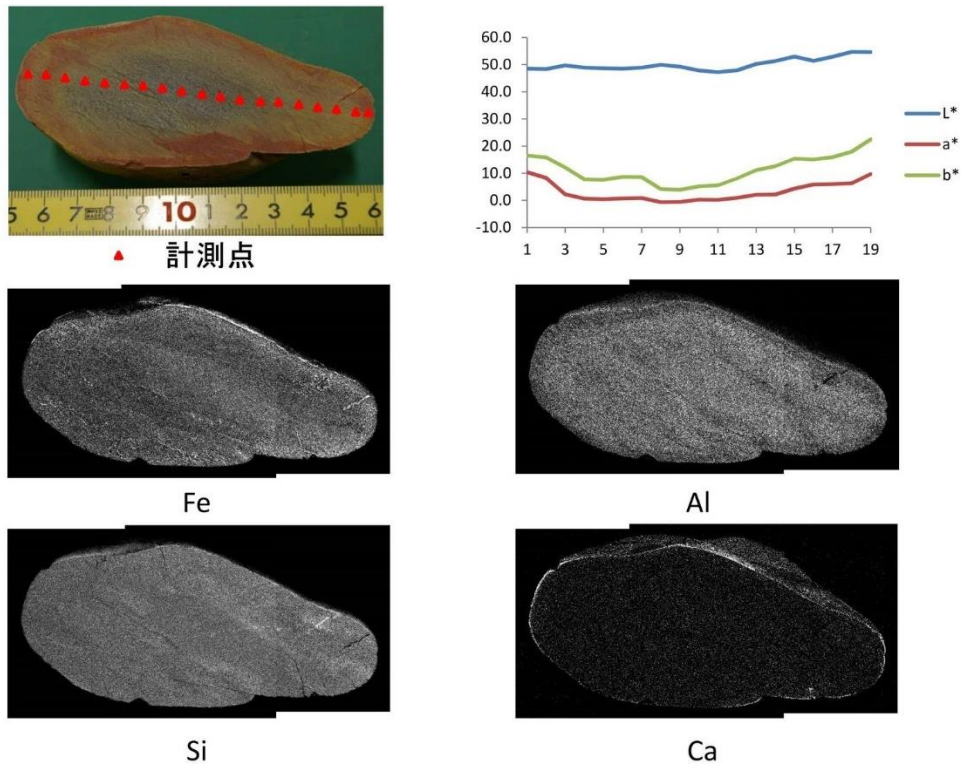


図 2.1-22 段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20171221-01-1：b-Hf1 面）
 礫断面での測色は、写真に示す各計測点で行っている。計測点は、礫の長軸に沿って表面から 3 mm の位置を 1 番目とし、そこから 6 mm 間隔で連続的に測定している

表 2.1-4 水浸法による段丘礫の有効間隙率

試料名	段丘	有効間隙率	平均値
171221-01-1	Hf1面	20.8	22.3
171221-01-2		19.9	
171221-01-3		26.3	
171221-01-4		23.0	
171221-01-5		21.6	
171222-01-1	Hf2面	12.0	17.4
171222-01-2		10.3	
171222-01-3		11.7	
171222-01-5		28.3	
171222-01-6		24.5	
171219-04-1	Mm1面	17.0	17.0
171219-04-2		14.4	
171219-04-3		21.2	
171219-04-4		20.6	
171219-04-5		11.9	
180117-01-1	Mf2面	12.0	11.5
180117-01-2		12.5	
180117-01-3		4.2	
180117-01-4		12.0	
180117-01-5		16.6	
180117-02-1	Mf4面	6.0	5.7
180117-02-2		5.9	
180117-02-3		5.6	
180117-02-4		5.6	
180117-02-5		5.7	
171214-DA02-1	Lf2面	8.7	8.7
171214-DA02-2		9.7	
171214-DA02-3		7.7	
171214-DA02-4		5.3	
171214-DA02-5		12.3	

表 2.1-5 ポロシメータ測定による段丘礫の間隙率

試料名	段丘	かさ密度 (g/cc)	真密度 (g/cc)	間隙率 (%)
171221-01-3	Hf1	1.75	2.56	31.56
171219-04-1	Mm1	2.13	2.61	18.33
171214-DA02-2	Lf2	2.47	2.64	6.20

肉眼観察ならびに測色結果から、高位段丘の礫で赤褐色化が顕著で、最も高位の Hf1 面では、a*値 10 以上、b*値 20~30、続く Hf2 面では a*値 10、b*値 20 程度、中位段丘では、a*値 0~10、b*値 10~20 となり、低位の Lf2 面では a*値 0~10、b*値 10~20 の範囲である。中位の Mm1 面、Mf1 面および Mf2 面は形成年代が近いのか、測色値が近い値を示している。有効間隙率の値は、Lf2 面では 8.7%であるのが、Mm1 面では 17.0%、高位段丘では 20%を超えている。

元素マッピング結果では、風化の強い外縁部は、芯に比べ Si や Al が少なくなっているものがある。これに対して、新鮮な礫では、Si や Al の減少が見られない。また、赤褐色化する部分において鉄が多い。

(b) XRD による段丘礫の鉱物組成分析

段丘礫の XRD 分析は、差異の有無の確認のため、風化程度の異なる Hf1 面、Mm1 面および Lf2 面の段丘礫をそれぞれ一つずつ選んで行った (表 2.1-6)。

いずれも砂岩であるが、Hf1 面の礫のみ、鉱物組み合わせに違いがみられる。斜長石と白雲母がみられないことと微量ながらギブサイトが認められる点である。風化していることもあり、もともとの鉱物組成に差があったのかは確認が難しい。ただし、斜長石は、砂岩に普通に入っている鉱物であるため、風化により失われた可能性が高い。また、ギブサイトも風化した地層にしばしば認められる鉱物であるため、風化によって生じた可能性がある。

このほか、これらの XRD チャートを詳細に調べてみると Hf1 面の礫には、小さなピークであるが赤鉄鉱と針鉄鉱が認められるのに対し、Lf2 面の礫ではピークは認められない (図 2.1-23)。

表 2.1-6 XRD による段丘礫の鉱物組成

試料名	段丘	Qz	Ch	Al	Mu	Gi
171221-01-3	Hf1面	○	+	—	—	+
171219-04-1	Mm1面	○	+	○	○	—
171214-DA02-2	Lf2面	○	+	○	○	—

Qz: Quartz, Ch: Chlorite, Al: Albite, Mu: Muscovite, Gi: Gibbsite

○: ある, +: 微量にある, —: ない

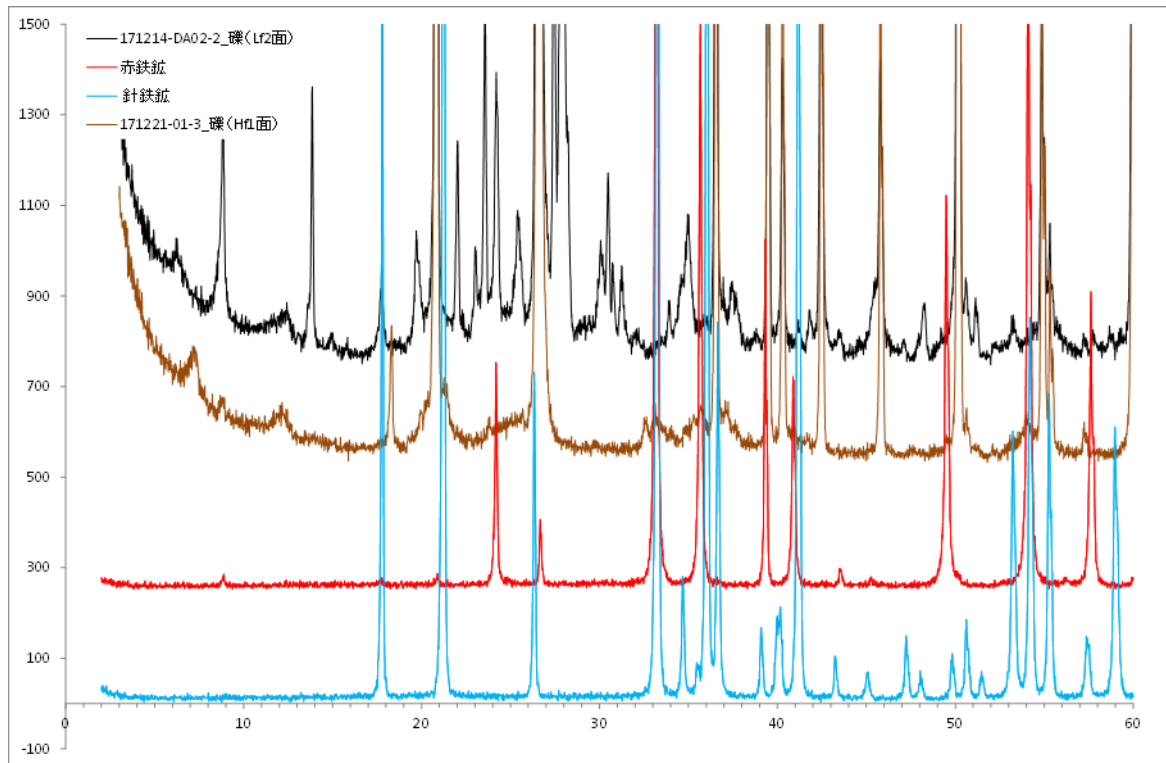


図 2.1-23 段丘礫試料と赤鉄鉱、針鉄鉱の XRD プロファイル

(c) ポロシメータによる段丘礫の間隙分布

各段丘の礫の項に記述した通り、ポロシメータによる測定は、Hf1 面、Mm1 面および Lf2 面のそれぞれから採取した一つずつのみである。上述した通り、高位の段丘ほど間隙率が高くなる傾向が明瞭である。これとは別に、それぞれの礫の間隙の大きさを比較すると、高位の段丘ほど間隙径が大きい(図 2.1-24)。この結果は、砂岩の初生的な差である可能性もあるが、砂岩の粒度に大きな差がないことなどと併せて考えると、風化により間隙が大きくなっている可能性が高い。

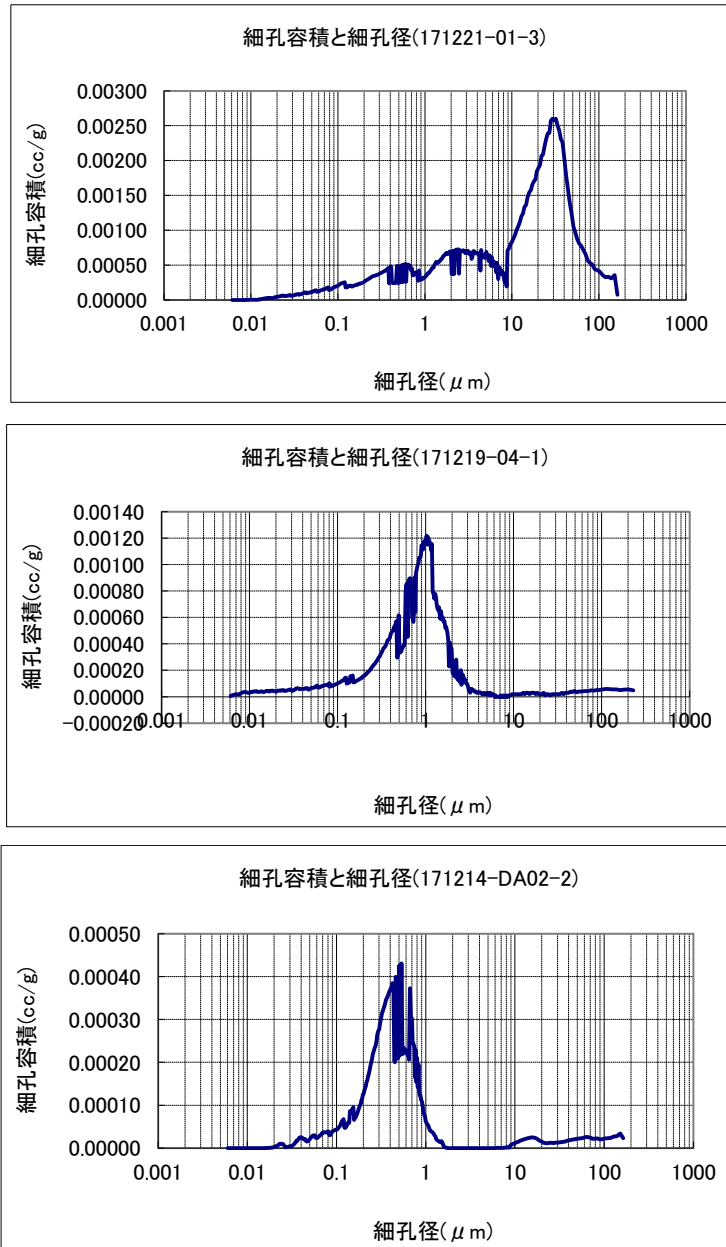


図 2.1-24 Hf1 面 (171221-01)、Mm1 面 (171219-04) および Lf2 面 (171214-DA02) の礫の間隙径分布

(d) 各段丘の段丘被覆層の赤色化程度の分析

Hf1 面、Hf2 面、Mm1 面、Mf1 面、Mf2 面および Lf2 面の各露頭において、段丘被覆層を鉛直方向に測色データを取得した。高位段丘および中位段丘では、連続的な測色値が得られ、基本的に下位から上位にかけて、段階的に a*値、b*値が低くなっていく傾向が読み取られる。図 2.1-25 に Hf1 面で計測した結果を示す。その他の露頭での計測結果は、Appendix IV に収録している。すなわち、古い層準ほど風化により、鉄鉱物の量が多くなっており、段丘被覆層を年代指標としうる現象が確認できる。

年代コントロールを行うためのテフラデータが不足気味であるが、複数の段丘で分布が比較的追跡できる K-Tz 層準を基準にすると、a*値は 10 程度、b*値は 20 程度の値を示し、肉眼的には褐色ないし赤褐色を呈する。これに対し、これより下位の a*値は 10 を超えて増加するが、b*値に関しては、K-Tz 層準とあまり変わらず、もっぱら赤色化が進んでいることを

示す。一方、K-Tz 層準よりも上位の層準では、a*値、b*値とも減少傾向にあり、a*値、b*値の変動し、赤色化と褐色化が被覆層の色調を左右していることが分かる。

一方、被覆層の下位層準でも、砂の混入が認められる層準などでは、a*値が低い値を示し、段丘被覆層の層相、構成物により色調が変化している。

地層の乱れの有無を確認するために、ブロック試料の X 線 CT による観察を行ったが、顕著な乱れを示す構造は確認されなかった。X 線 CT 画像については、Appendix IV に収録している。なお、ブロック試料の例として Hf1 面の露頭で採取した試料の写真と測色結果、元素分布画像を図 2.1-26 に示した。

一方、異なる気候下での段丘被覆層の赤色風化の違いの比較のため、北海道幌延地域の下沼露頭 (図 2.1-34 の Loc.2) の段丘被覆層においても露頭およびブロック試料の測色データを取得した。下沼露頭は、MIS7 に形成された海成段丘とされ、被覆層の下部は赤褐色化しているとされているが (新里ほか, 2007)、その測色値は、a*値 10 弱、b*値 20 弱であり、宮崎地域の K-Tz 層準よりも赤褐色化の程度が弱い。同露頭の測色値は、順に a*値、b*値が低下していく傾向にあり、すべての層準で、宮崎地域の K-Tz 層準より赤褐色化の程度が弱い。

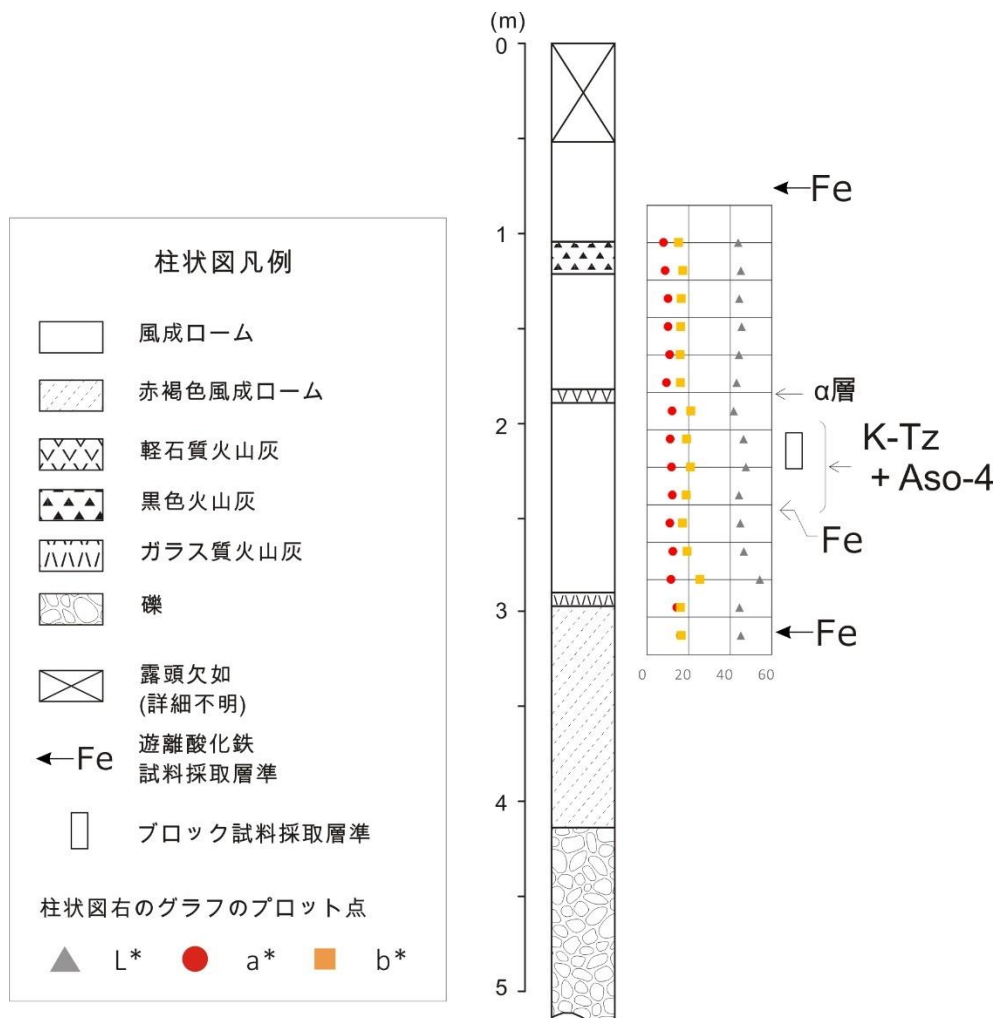


図 2.1-25 Hf1 面被覆層の露頭柱状図と測色値

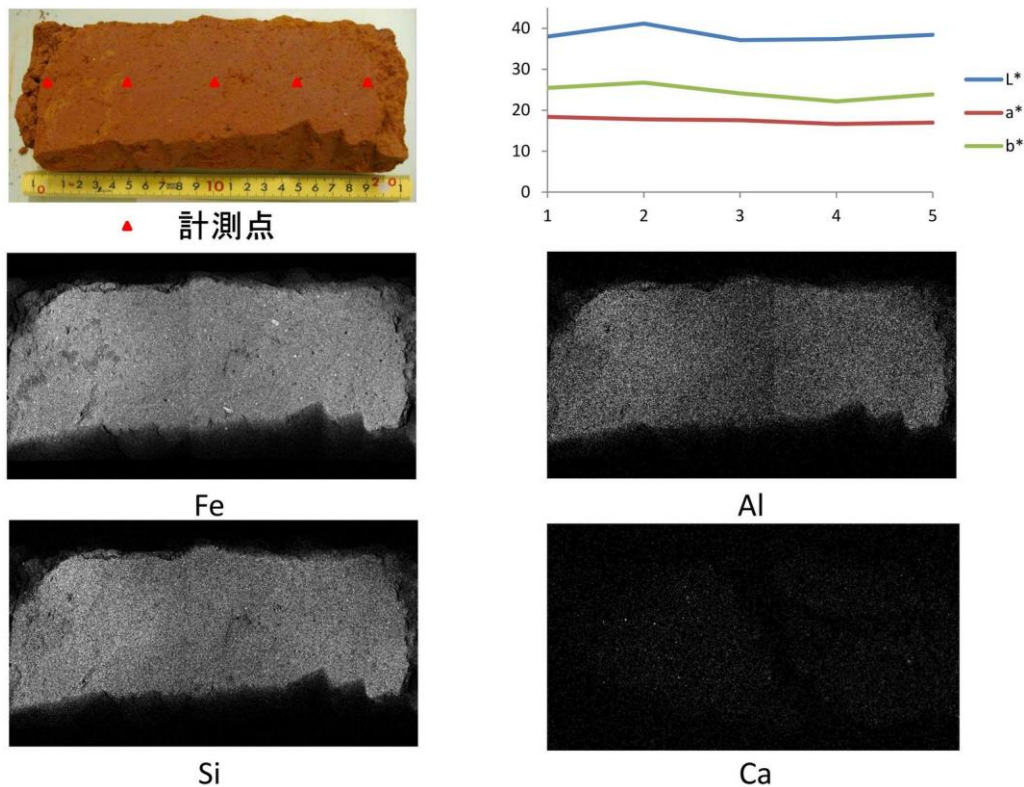


図 2.1-26 被覆層の元素分布と測色値（試料：MYZ20171221-01-②）：b-Hf1 面）

(e) XRD による鉱物組成分析

XRD によって検出された鉱物のうち、鉄鉱物以外の鉱物種の産出組み合わせを見ると、特徴的なのは、ギブサイトの有無である（表 2.1-7）。風化礫の XRD 結果と同様に風化の強い試料ほどギブサイトが含まれている傾向にある。Hf1 面の最も下位の層準ではまとまった量のギブサイトが含まれているのに対して、上位の層準では、わずかに含まれる程度である。また、Mm1 面では最下位の層準ではなく、中間の層準にギブサイトが多くなっているが、最下部のブロック試料の採取箇所はやや砂質であり、石英等の砂由来の鉱物が相対的に多く含まれるようになったために、ローム層の構成鉱物の構成物の割合が低くなっている可能性がある。また、同じく Mm1 面の最上部のブロックも斜長石、白雲母の含有が高くなっているが、同ブロックにテフラが含まれていることから、テフラ由来の可能性もある。一方、幌延地域の下沼露頭の被覆層にはギブサイトが全く含まれていない。宮崎地域の他のどの試料にも共通して認められることからして、明らかな相違である。

鉄鉱物については、最も高位の段丘の最も下部の赤色化が強い層準での試料では、小さいながらも赤鉄鉱、針鉄鉱のピークが明瞭に認められた（図 2.1-27）。これに対して、同露頭の上位層準の試料では、これらのピークはかなり不明瞭である。一方、風化の弱い幌延地域の試料は、鉄鉱物のピークはまったく認められない（図 2.1-28）。

XRD 分析を行った試料の測色値の比較をすると、鉄鉱物を多く含む試料で a* 値、b* 値が高くなっている傾向があり（図 2.1-29）、この傾向は遊離酸化鉄の結晶度の分析結果からも確認できる。

表 2.1-7 XRD による段丘被覆層の鉱物組成

試料名	段丘	Qz	Ch	Al	Mu	Gi
171221-01-01-Red	Hf1面	○	○	+	+	○
171221-01-01-brown	Hf1面	○	+	+	+	○
171221-01-02	Hf1面	○	+	—	+	+
171221-01-03	Hf1面	○	+	—	+	+
171221-01-②	Hf1面	○	+	—	+	+
171221-01-③-4	Hf1面	○	+	—	+	+
171219-04-1	Mm1面	○	○	+	+	+
171219-04-2	Mm1面	○	○	+	+	○
171219-04-3	Mm1面	○	○	○	○	+
171018-01	幌延	○	+	+	+	—

Qz: Quartz, Ch: Chlorite, Al: Albite, Mu: Muscovite, Gi: Gibbsite,

○: ある, +: 微量にある, -: ない

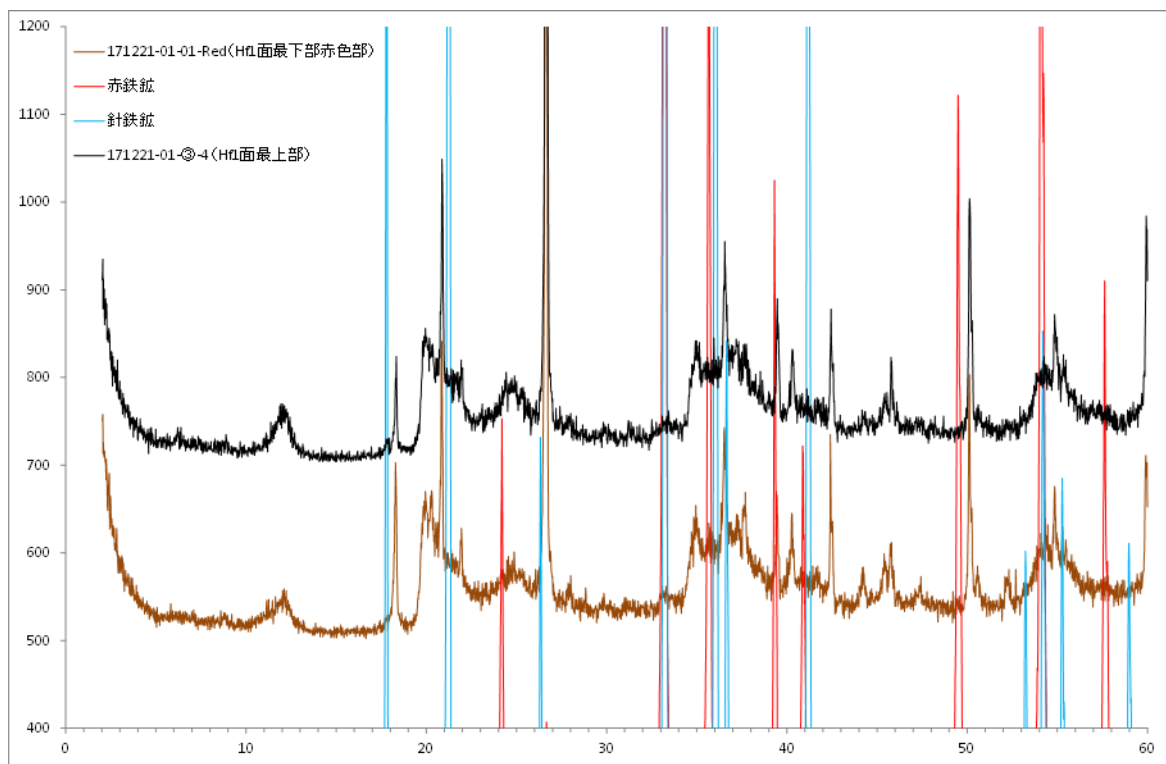


図 2.1-27 段丘被覆層の XRD プロファイルの比較 (Hf1 の最下部赤色部と最上部) と赤鉄鉱、針鉄鉱の XRD プロファイル

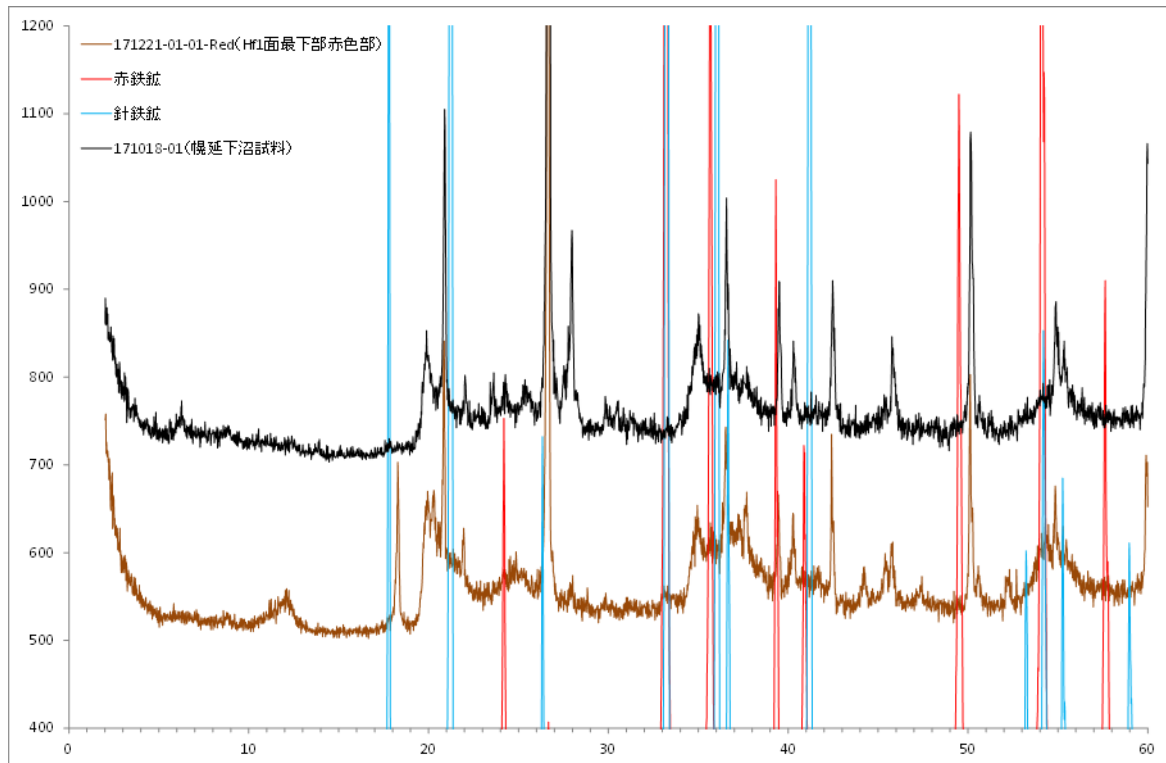


図 2.1-28 段丘被覆層の XRD プロファイルの比較 (Hf1 の最下部赤色部と幌延下沼試料) と赤鉄鉱、針鉄鉱の XRD プロファイル

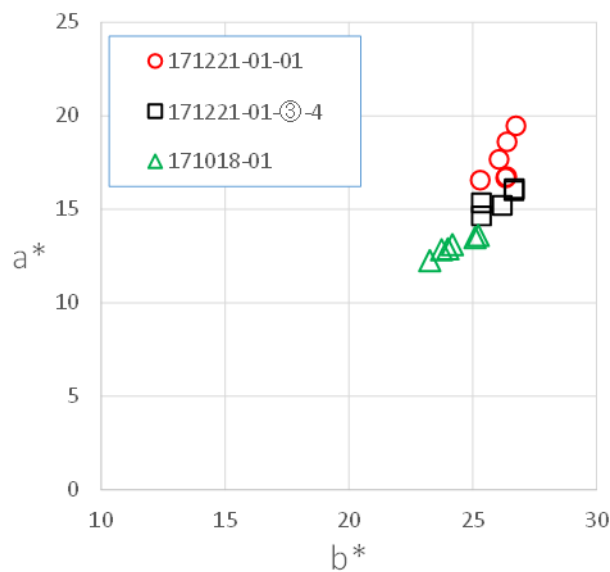


図 2.1-29 XRD 分析の対象としたブロック試料の被覆層の測色値

□ は 171221-01-01 (Hf1 面の被覆層最下部)、□ は 171221-01-③-4 (Hf1 面の被覆層最上部)、
△ は 171018-01 (幌延下沼試料)

(f) 遊離酸化鉄分析

遊離酸化鉄分析を行った試料は、宮崎地域では、高位から低位までさまざまな段丘から採取した。試料採取箇所は、Appendix IV に収録している各露頭の柱状図に示している。厚い被覆層を持つ高位と中位の段丘からは、一つの露頭の複数の層準から試料採取を行った。こ

これらの被覆層では、テフラ分析を行った。現時点では、産出したすべてが、指標テフラに対比されているわけではないが、ATとK-Tzについては、宮崎地域の多くの露頭の被覆層から層位が確認された。また、幌延地域では、MIS7に対比されている段丘の被覆層の露出する下沼露頭において、複数層準から試料採取を行った。この露頭は、新里ほか(2007)に記載されている箇所であり、そこに示されたテフラ分析結果を参照すると、今回遊離酸化鉄分析を行った試料の少なくとも半数程度は、クッチャロ羽幌(略号:Kc-Hb、降下年代:11.5万年~12万年前、町田・新井,2003)テフラの降下層準よりも下位と推定される。

遊離酸化鉄分析の結果を宮崎地域と幌延地域と比較すると、幌延地域の被覆層は、宮崎地域のものに比べて、古い年代のものであっても遊離酸化鉄の結晶化指数が低く、結晶化が進んでいない(図2.1-30)。幌延地域の試料の半数程度は、Kc-Hbよりも下位の層準のものであるが、それらは黄褐色土(YB)の領域に入る。一方、宮崎地域で採取したこれより若い年代であるK-Tz降下層準より上位の試料も黄褐色土(YB)の領域に入るが、結晶化指数は幌延地域の試料よりも高い値を示す。幌延地域の試料のうち、上位の二層準で採取した試料は、褐色森林土(B)の領域に入るが、これらは、利尻豊徳(略号:Rs-Ht、降下年代:1万年前より若い、町田・新井,2003)より上位の層準である。

宮崎地域で採取した試料に限定してみると、被覆層における結晶化指数は、ほとんどのもので堆積年代が古いほど高い値を示している。具体的には、褐色森林土の領域に入る試料は、ATの降下層準以上の若い被覆層に限られる。これらの試料は、低位段丘に載る若い被覆層は当然であるが、中位、高位段丘に載る被覆層の上位の層準で得られた試料も同様である。一方、黄褐色土の領域に入る試料は、K-Tzの層準かそれよりやや上位の層準で採取されたものである。さらに、赤色土(R)の領域に入るものは、K-Tzよりも明らかに下位の層準のものがほとんどである。赤色土の領域に入っているもののうち、Hf1面のMYZ20171221-②露頭から採取した試料は、K-Tzが検出されていないため、これとの層位関係が不明である。ただし、この試料の採取層準は、赤褐色化が進んでおり、同様の層相を持つ、隣接するMYZ20171221-①および③露頭で得た試料はいずれもK-Tzよりも下位であることから、MYZ20171221-②露頭から採取した試料もK-Tzよりも下位の層準である可能性が高い。K-Tzとの層位関係が明らかでないもう一つの試料はMf3面から得られたものである。この露頭では、現時点ではテフラ分析を行っていない。ただし、段丘面区分からするとK-Tz降下年代よりも若い可能性がある。

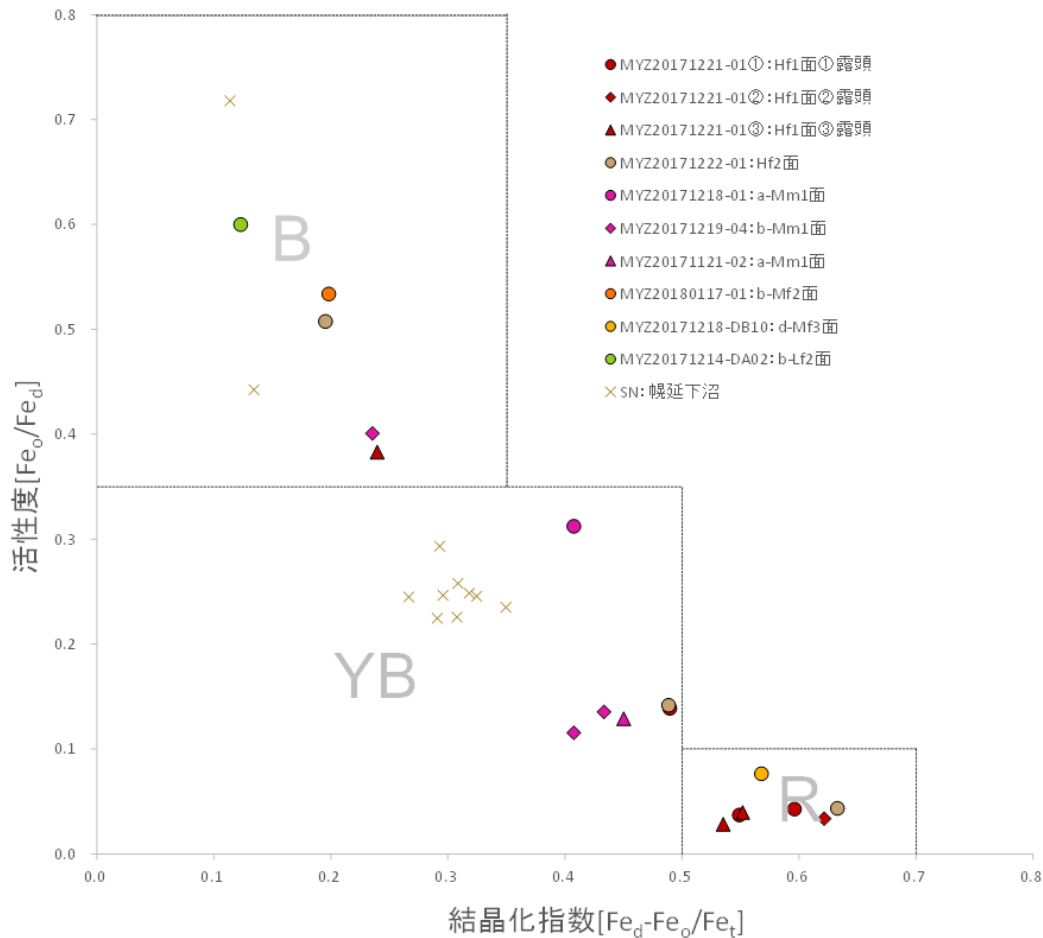


図 2.1-30 段丘被覆層の遊離酸化鉄分析結果

グラフ上の領域区分は永塚（1973）による。B：褐色森林土、YB：黄褐色土、R：赤色土

④ 考察

宮崎地域における段丘礫、段丘被覆層の風化性状を指標とした段丘対比・編年指標の適用性を検討した。調査・分析の結果は、段丘礫、段丘被覆層の性状が段丘の新旧に対応して、変化している。以下に、段丘礫と段丘被覆層に認められた経験的指標としての性状と段丘形成年代との関係について、それぞれ考察する。

(a) 段丘礫の風化性状

段丘礫は、野外露頭観察によって、低位面で新鮮なものが高位面では極めて風化し、最も高位の Hf1 面では、いわゆるクサリ礫となっていることを確認した。本研究では、対象とする礫の種類を砂岩に絞って検討し、風化現象を評価するために実施した間隙率の増加、赤色化は、おおむね観察事実と整合する値を取ることが確認した（表 2.1-8）。

具体的には、有効間隙率の値は、Lf2 面では平均 8.7%であるのが、Mm1 面では 17.0%、高位段丘では 20%を超えており、段丘の新旧を識別する指標となる。有効間隙率の値は、水銀圧入法で測定した間隙率に整合的に増減しており、礫全体の間隙率として妥当と考えられる。また、測色値は、最も高位の Hf1 面では、a*値 10 以上、b*値 20~30、続く Hf2 面では a*値 10、b*値 20 程度、中位段丘では、a*値 0~10、b*値 10~20 となり、低位の Lf2 面では a*値 0~10、b*値 10~20 の範囲であることを確認した。中位の Mm1 面、Mf2 面、Mf4 面は形成年代が近いためか、測色値が近い値を示しているが、データの集まりごとに比べれば、新旧関係を把握するには問題ない。すなわち、段丘礫の有効間隙率と色調による風化程度は、段丘の

地形層序とおおむね整合しており、少なくとも段丘の新旧を区別する指標として扱うことが可能である。適用できる年代範囲については、Mm1 面が MIS5e に形成された段丘面であることが確かであれば、Hf2 面は MIS7、Hf1 面は MIS9 に対比される可能性があり、20～30 万年のタイムスケールで段丘の年代差を区別できると言える。

一方、有効間隙率と測色値の具体的な数値と段丘の形成年代との間にどれだけの整合的な関係があるのかについては、テフラデータの不足などにより、各段丘面の細かな形成年代が明らかになっていないため、現時点では不明である。なお、Hf1 面の露頭付近では、赤色土の中から加久藤テフラが検出されたとの報告があり（赤木ほか、2003）、これが確かであれば、Hf1 面はさらに古い時代に形成されたと考えられる。この場合、MIS9 とそれ以前の時代との区別が風化指標で可能かどうか、新たに検討すべき問題となる。

こうした段丘礫の風化指標となる測定データと段丘の新旧関係との間に矛盾があったのは、Mf4 面および Lf2 面である。有効間隙率および測色値ともに、より形成年代の若い Lf2 面の礫の方が高い値を示した。今回の検討では、礫試料の採取は、年代の異なる各段丘の 1 露頭のみである。このため、今後、複数の露頭での観察・調査により、今回対象とした露頭が、各段丘を代表する風化性状を示しているかを検証していく必要があると考える。礫試料を採取した露頭が段丘の風化性状を示しているかという点について、今回、Mf4 面の代表とした露頭は、問題がある可能性も考えられる。

表 2.1-8 段丘面区分と構成層砂岩礫と被覆層の関係

段丘面	段丘構成層砂岩礫の特徴				段丘被覆層の特徴		
	間隙率	測色値	元素分布	構成鉱物	測色値	構成鉱物	遊離酸化鉄
Hf1	有効間隙率は、ほとんどが20%を超える。平均：22.3% 水銀圧入法での間隙率：32.6%	外縁部：a*値 10 以上、b*値 20～30 芯部では外縁部よりも a*,b*値が小さい	Al は芯部に比べ外縁部でやや乏しい。Fe は芯部に比べ外縁部でやや富む。Si は一様に分布、Ca は全体に少ない	斜長石と白雲母を欠き、ギブサイトを含む。針鉄鉱、赤鉄鉱を含む	露頭での被覆層下部、a*値 10 以上、15 を超す部分あり、b*値 20 程度 ブロック試料、a*値 20 近く、b*値 25 超	被覆層の下部でギブサイトを多く含む。針鉄鉱、赤鉄鉱を含み、斑紋部では相対的に赤色部が多い	被覆層下部は、結晶化指数が 0.5 以上の高い値を示し、赤色土の領域に入る
Hf2	有効間隙率は、鉱物脈が発達するものを除き20%を超える。平均：17.4%	外縁部：a*値 10 程度、b*値 20 程度 芯部では外縁部よりもやや a*,b*値が小さい。	Al は芯部に比べ外縁部でやや乏しいが、Hf1 より不明瞭。Si は芯部に比べ外縁部でやや乏しいものもある。Fe は芯部に比べ外縁部でやや富む Ca は全体に少ないが、芯にやや高く含有するものがある	—	露頭での被覆層下部、a*値 15 程度、b*値 20 前後	—	被覆層下部は、結晶化指数が 0.5 以上の高い値を示し、赤色土の領域に入る
Mm1	有効間隙率は 10 ないし 20 強。平均：17.0%。 水銀圧入法での間隙率：18.3%	a*,b*値とも外縁部と芯ではほぼ一定、a*値 5 以下、b*値 10～20。 b*値は、外縁部で若干高い値を示すものがある	元素の分布に際だった方よりはるはないが、Si は外縁部でやや低くなっているものもある	斜長石と白雲母を残しており、ギブサイトは含まない。針鉄鉱は含むが、赤鉄鉱はほとんど認められない	K-Tz 層準付近では、a*値 10 超、b*値 25 超だが、やや砂質な下部では、a*値 10 超、b*値 30 程度。ブロック試料、K-Tz 層準 a*値 20 近く、b*値 25 超	緑泥石とギブサイトを含む。針鉄鉱は含むが、赤鉄鉱はほとんど認められない	被覆層下部は、結晶化指数が 0.4 から 0.5 と比較的高く、かつ活性度が 0.35 未満で、黄褐色土の領域に入る
Mf2	有効間隙率は、4.2～16.6 とやや幅がある。平均：11.5%	均一な部分は a*値 0～10、b*値 10～20 程度、外縁部の赤褐色化が進む部分は a*値 10 程度、b*値 20～30 程度	Al,Si に外縁部での際立った低下は認められないが、外縁部で赤褐色化が顕著な試料では、該当箇所 Fe が高い	—	Aso-4 が混じる層準付近は、砂、シルトが混入し、a*値 10 未満。やや上位の軽石質テフラの層準付近は a*値 10、b*値 20 弱。さらに上位の層準では a*、b*値さらに低い	—	被覆層上部は、結晶化指数が低く、かつ活性度が高く、褐色森林土の領域に入る。被覆層下部は不明
Mf3	—	—	—	—	露頭面では最上部を除くと a*値 10 前後、b*値 15 前後。ブロック試料では、a*値 10 超、b*値 25 前後	—	被覆層下部は、結晶化指数が 0.5 以上の高い値を示し、赤色土の領域に入る
Mf4	有効間隙率は、5.6 から 6.0、平均：5.7%	不規則な岩石組織を反映する部分以外は、比較的均一。a*値 0～10、b*値 10～20 程度。赤褐色化が進む部分では a*値 10 程度、b*値 20 程度。L*値は、やや低い 50 近くを取るものが多い	Al,Si に外縁部での際立った低下は認められず、赤褐色化が顕著な部位で Fe が高い	—	露頭では、下部で a*値 10 未満、b*値 20 程度であるが、かなり砂が混じる。その上位の比較的純粋なロームに近い層準では、a*値 10 未満、b*値 20 未満。	—	—
Lf2	有効間隙率は、5.3 から 12.3 の間でややばらつく。平均：8.7%。 水銀圧入法での間隙率：6.2%	不規則な岩石組織や外縁部に赤褐色化部を持つ試料以外では、比較的均一。 鉱物脈を伴った礫は、Mf4 面より a*値、b*値が低い。他の試料は、a*値 0～10、b*値 10～20 強。L*値は、風化した礫は 50～60。新鮮な礫は 40 を下回る	Al,Si に外縁部での際立った低下は認められず、赤褐色化が顕著な部位で Fe が高い	斜長石と白雲母を残しており、ギブサイトは含まない。針鉄鉱、赤鉄鉱は含まない	露頭の被覆層の露出は、非常に限定的であるが、a*値が 10 程度、b*値が一方は 20 未満、もう一方は 20 超。	—	被覆層上部は、結晶化指数が低く、かつ活性度が高く、褐色森林土の領域に入る。被覆層下部は不明

表内の段丘礫層、被覆層に関する記述は、測定、分析を行った段丘のものであり、ここに記していない段丘は、データがない。また、表中空欄の部分も、測定、分析未実施でデータがない

今回、Mf4面の被覆層を観察・調査を行った露頭は2箇所あるが、礫試料を採取した露頭は、段丘頂面からやや距離があり、被覆層もごくわずかにしか確認できていない。2露頭で得られた柱状図を見ると、MYZ20180117-01露頭では礫層の上に砂の混じるローム層が載り(図2.1-7参照)、離水直後の堆積物が連続的に載っていると解釈できる。これに対し、礫試料を採取したMYZ20180117-02では、礫層の上に直接やや軟らかめの褐色ローム層が載っている。段丘頂面から離れていることも考えると、礫層の上部と被覆層の下部が失われている可能性が考えられる。被覆層の層序は、今後、テフラ分析などを詳細に行うことにより検証していく必要があると考える。

一方で、Lf2面の礫は、肉眼でも褐色化が認識でき、かつ礫の表面付近がねじり鎌でかすかに傷つけられる程度に軟らかくなりかけており、低位段丘の礫としては、やや風化が進んでいる印象がある。Lf2面の露頭では、礫層の20cm程度上位にA-FkまたはA-Iwが砂層の下に挟まれている(図2.1-7)。このテフラが、古い年代を示すA-Iwだとすると、段丘の離水の年代は、古く見積ると約5万年程度と考えられる。この場合、該当露頭の段丘面はLf1面に対比されるべきものである可能性がある。そうであれば、8万年から6万年前に離水したとされるMf4面との年代差が小さくなり、露頭条件などのばらつきの範囲で風化が似たような状態になることも説明可能と考えられる。

逆に現在の段丘区分であるLf2面が適当であるとするならば、該当露頭が風化の進み易い条件下にあったと考えるしかない。そのような観点で該当露頭の柱状図(図2.1-7参照)を見ると、この露頭では礫層の上位に幾分厚めの50cm以上の砂層が載っている点を他の露頭との差異として指摘できる。砂層があることによる風化条件の違いとしては、降水の到達が容易となることが考えられる。この場合、より透水性の低いロームからなる被覆層が直接載る場合より、風化が進み易いと考えerことは可能である。同じく砂層が発達するMm1面の礫層も、より上位のHf2面とあまり差がない程度に有効間隙率が高くなっており、砂層の存在は、礫の風化条件に影響している可能性がある。礫層の上に砂層が載ることにより、上位の段丘面よりも風化が進むほどに影響を与えうるかについては、疑問が残るが、比較の対象となっているMf4面の礫の方も礫層の下位の風化の弱い部分を見ているという条件で考えれば、可能性がありうるかもしれない。今後、それぞれの露頭の代表性を再検証することから、見直しをする必要があると考える。

逆転こそ見られないが、高位段丘であるHf1面とHf2面の礫の風化程度の差も年代差が大きい可能性を考えると大きくはない。この理由は2点考えられる。一つは、Mf4面の採取露頭と同様、段丘の頂面からやや離れた箇所で採取したため、礫層の上部を欠いている可能性、もう一つは、露頭において礫を採取する際、クサリ礫が多く、クサリ礫は採取し難いため、採取された礫が露頭中で比較的新鮮なものを選択してしまっている可能性である。

前者は、調査地域内で他に露頭を得ることが難しいため、段丘頂面付近でボーリングを掘る以外に解決する方法がない。後者は、その可能性が高く、礫層全体での実際の有効間隙率は、分析値よりも高いという解釈を行う必要がある。実際、多くの岩石種の礫において、30万年程度の年代では30%以上の有効間隙率が得られており(濱田・幡谷, 2009)、今回の分析値は、過小な値を見ている可能性がある。こうしたことから、クサリ礫化した礫層については、試料採取の方法も含め、礫の風化程度の評価法について、検討・工夫していく必要がある。

(b) 段丘被覆層の風化性状

段丘被覆層の風化による赤色化についても、年代指標としての有効性は確認できた。現時点では、被覆層の堆積時期の細かな年代コントロールを行うにはテフラのデータが不足しているが、多くの露頭で確認できたK-Tzの層準の前後の年代の赤色化、赤褐色化の程度は、ほ

ば共通する性状であることが確認できている（表 2.1-8）また、AT、K-Tz などのテフラの層準をもとに分析結果を比べると、遊離酸化鉄の結晶化指数は、ほとんどの場合、堆積年代に近い試料同士で類似した値を取っていることが確認された。さらに、被覆層ならびに礫の分析結果から、赤色化の強い試料で共通して鉄鉱物、特に赤鉄鉱の結晶成長が進んでいることが確認できた。すなわち、風化指標の一つである赤色化は、遊離鉄の結晶成長の進行によって生じている。宮崎地域では、被覆層の堆積時期と赤色化の程度に共通性が見られることから、同一地域内ではほぼ同じ早さで進む反応であると考えることができ、信頼性のある年代指標とすることができる。

一方、赤色化は、宮崎地域と幌延地域とは、反応の早さが異なっている可能性がある。幌延地域の MIS7 に形成されたとされる段丘被覆層は、宮崎地域の段丘の K-Tz 層準付近の被覆層に比べ、赤色化の程度が弱く、また鉄鉱物の結晶成長が進んでいない。この差の原因としては、被覆層の構成物質に違いがある可能性もあるが、もし、これらに大きな差がないとすれば、両地域の気候条件の差が大きく関係している可能性が考えられる。実際、日本全国の段丘被覆層あるいは段丘礫の風化程度を調査した結果によれば、気候が温暖な地域ほど、赤色化が進んでいる傾向がある（濱田・幡谷, 2011）。

被覆層の測色値の鉛直的な変化をみると、その変化が常に一定の割合で変化しているのではなく、ある層準を境に段階的に変化しているように見えることが多い。このことは、赤色化を引き起こす反応、すなわち赤鉄鉱の結晶成長が、進行する時期と停滞する時期を持っていることを示している可能性が高い。宮崎地域と幌延地域の鉄鉱物の成長の違い、あるいは日本全国の段丘の被覆層・段丘礫の赤色化の傾向を併せて考えると、赤色化は温暖期に進行し、寒冷期には停滞するものと考えられる。

宮崎地域の段丘の露頭で観察された事実として、MIS5 の温暖期を経していない低位段丘は、専ら褐色ロームのみ載せているのに対し、MIS5 の温暖期を経ている中位段丘は、部分的に赤褐色ロームを載せていることが多い。宮崎地域では、中位段丘に複数の段が認められたため、中位段丘同士では、赤褐色化の程度のあまり差がないことが確認された。このことは、赤色化を年代指標として扱う場合には、単純なタイムスケールの尺度ではなく、温暖期の回数あるいは長さを比較する指標として扱うべきであると考えられる。

一方、同時代に堆積したと考えられる被覆層においても、赤褐色化の程度に差がある場合や、あるいは古い時代にも関わらず、赤褐色化の程度が低調な箇所も見られた。こうした箇所は、段丘の離水直後の砂などの風成起源のローム以外の構成物が多く混じっていると考えられる層準である場合が多かった（Appendix IV の図 2-1～3 を参照）。今後、被覆層の色調と構成物の差異の関係を調査・分析していく必要があるが、被覆層の色調を年代指標とする際には、対象とする被覆層の層相、構成物に留意する必要があると考えられる。

赤色化と関係してやや矛盾するような結果が得られたのは、Mf3 面に載る被覆層の遊離酸化鉄分析である。この露頭では他の中位段丘の試料からは得られていない、赤色土領域に属する結晶化指数を示す分析値が得られた。この段丘の被覆層ではテフラ分析が未実施のため、堆積年代を判断するデータがないが、段丘面区分から考えると、年代感に矛盾して結晶化が進み過ぎている。同試料は、肉眼での露頭観察上は構成物に著しい差があるようには見えない。また、X 線 CT および X 線分析顕微鏡による被覆層のブロック試料の観察結果からも、再堆積の可能性は考えにくい。今後、テフラ分析を行って検証する必要があるが、上述の被覆層の構成物の違い等も含め条件の差を確認していく必要がある。

⑤ まとめと今後の課題

宮崎地域の一部において、段丘礫層、段丘被覆層の風化性状を調べ、対比・編年指標としての適用性を検討した。現時点では、年代情報が充分ではないが、段丘の新旧を区別する上での指標となることを確認した。ただし、礫および被覆層の風化性状を示す有効間隙率や測色値の数値が、段丘の形成年代と整合するかについては、不明である。今後は、テフラ分析等を進めて年代情報を充実させ、指標の精度の確認、向上を行っていく必要がある。

また、数は少ないものの、いくつか段丘の層位関係と礫の風化程度の逆転している所も見られる。この理由を説明するために、以下のような課題があると考えられる。

- ・ 礫層の上に砂層が載っている場合に風化が進み易くなる可能性
- ・ クサリ礫からなる礫層の風化程度を過小に評価している可能性
- ・ 砕屑物の混入による被覆層の色調への影響
- ・ 堆積年代と遊離酸化鉄結晶度の関係において、遊離酸化鉄結晶度が局所的に進んでいる可能性

今回の検討では、段丘礫の分析は、各段丘一露頭で得られた試料によるものであり、かつ試料数も5個ずつのみである。また、被覆層の色調の計測や遊離酸化鉄分析も多くても、2、3箇所の露頭での結果である。このため、データのバラつきについての評価が不十分である。今後、観察・計測露頭数、分析試料数を増やし、各段丘におけるデータの代表性を確かなものとする事で、上記の課題解決を進められると考えられる。

また、今回の検討では砂岩礫に絞った評価を行ったが、北部のE~G地区では、段丘の主な基盤が酸性火成岩であり、その上に載る段丘礫の種類も酸性岩であることが多い。広域の対比・編年のためには、酸性岩類についても、系統的な風化性状調査が必要であり、その上で南部と対比することが課題となる。

4) 要素技術の検討（その2）岩石侵食段丘や局所的な堆積物の年代などによる隆起・侵食評価手法の検討

① 岩石侵食段丘の露出年代測定による隆起・侵食量の評価手法の検討

(a) 目的と概要

沿岸部に分布する被覆層を大きく欠く岩石侵食段丘に対しては、原位置宇宙線生成核種（terrestrial *in situ* cosmogenic nuclide ; TCN）を用いた年代測定法（TCN法）を用いることが、離水時期の推定に有効となる可能性がある。測定対象は、段丘を構成する岩石（基盤岩）、または局所的に分布する堆積物である。TCN法は面上の岩石を測定すれば直ちに離水年代が求まるというような単純な手法ではなく、どのような侵食プロセスを仮定するかによって年代値の解釈は大きく変化する。平成28年度の本事業では、既往文献に基づきTCN法を用いた研究事例について取りまとめたが、平成29年度は、完新世および更新世の沿岸部の岩石侵食段丘を対象とした離水時期の推定を目的としたTCN法の適用における、試料採取や結果の解釈の考え方についてさらに具体的な検討を行った。

(b) 研究方法

(i) TCN法の概要

TCNのうち、 ^{10}Be や ^{26}Al は、岩石中に含まれる酸素やケイ素に宇宙線が照射される事によって生成・蓄積される。宇宙線のフラックスは地表に到達後、深度方向に指数関数的に減衰するため（松四ほか、2007）、現在の地表面におけるTCNの蓄積量は、岩石の露出年代や侵

食速度に依存する（若狭ほか, 2004；横山ほか, 2005）。TCN が生成・蓄積されるのは地表から数 m 以内の範囲に限られるため、TCN 法から推定できる侵食速度は、数 m 以下の侵食に要した時間スケールの値となる。例えば侵食速度 0.01～1 mm/yr の地域の場合、 $10^3\sim 10^5$ 年スケールの侵食速度が測定対象となる（Dunai, 2010）。

岩石試料の採取量は、TCN の濃度にもよるが、1 kg 程度が必要となる（一般に、測定には粒径 0.2 mm 以上かつ高品質の石英が 20～30 g 以上必要である）。試料は、岩石表面から採取する場合は、表面から厚さ数 cm 以内の岩石を採取する。採取はハンマーやたがねでも可能であるが、岩石カッターを用いるとより簡便である（菅沼ほか, 2012）。採取した岩石は、ポリタングステン酸ナトリウム（SPT）溶液による比重分離およびフッ酸処理によって、ほぼ純粋な石英（99.99%以上）のみを抽出する。分離の基準は、ガラスビードにした試料を蛍光 X 線（XRF）分析で測定した際に、Si と 0.1%以下の Al のみが検出され、他の元素は nd となることである。

(ii) 完新世の侵食段丘における TCN 法の適用

完新世の侵食段丘では、ヤッコカンザシやサンゴなどの生物遺骸の放射性炭素年代測定による離水年代の推定が可能であり、高知県室戸岬（前空, 2001）、福井県越前海岸（山本ほか, 2010）、フィリピン・ルソン島（Ramos and Tsutsumi, 2010）など、国内外の様々な地域で行われている。しかし、このような生物遺骸は常に分布しているとは限らないため、そのような場合の代替手法の確立が必要である。また、本事業では、TCN 法を用いた侵食段丘の離水年代の推定法の確立を目的としているが、TCN 法の技術的適用性を確認するうえで他の年代測定手法と比較することが有効であると言える。そこで、生物遺骸の放射性炭素年代測定による離水年代の推定が可能な完新世侵食段丘における TCN 法の適用方法を検討した。

岩石侵食段丘の元となる波蝕台は、面全体が一様に鉛直方向に侵食されて形成されるわけではなく、海岸侵食によって海食崖が後退した結果として形成される（図 2.1-31）。すなわち、同じ面の中でも、海食崖の基部付近と海側とでは侵食の時期が異なり、TCN 濃度の蓄積量にも違いが生じる可能性が考えられる。そこでまずは、海食崖の基部（旧汀線）から海側に向かって、同一面上において数地点で岩石試料を採取し、TCN 年代を測定して結果を比較する必要がある。これにより、侵食段丘面上における TCN 年代の空間変化の有無を評価すると同時に、侵食段丘の離水年代を推定するうえで、面上のどの地点で測定を行うのが適切かを検討する。もし離水以前の侵食過程に応じて TCN が蓄積していた場合、最後に侵食を受けた海食崖の基部で、離水年代に最も近い値が得られると期待されるが、侵食前の被覆量の違いや離水後の波蝕の影響などにも注意する必要がある。

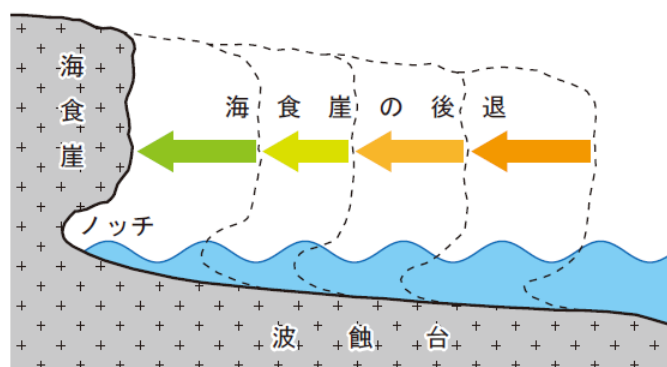


図 2.1-31 海食崖の後退と波蝕台の形成の模式図

(iii) 堆積段丘における深度プロファイル

侵食段丘上に局所的に分布する堆積物を用いた離水年代の推定を念頭に、堆積段丘を対象とした TCN 法の適用性を検討した。TCN の蓄積量は、露出年代や侵食速度に応じて深度方向に特定のパターンを示すことが知られている（松四ほか, 2007 ; Matsushi et al., 2006）。そのため、深度方向の TCN 蓄積量の変化を測定することで、侵食シナリオから理論的に計算される深度プロファイルとの比較によって、侵食シナリオの妥当性が検討できる（例えば、Tsou et al., 2014）。一般に、測定可能量の TCN が生成・蓄積されるのは地表から深さ約 1~2 m 以内であるため、測定値と理論計算との比較のためには、深度 1~2 m 程度まで段丘堆積物を露出させ、30~50 cm おきを目途に厚さ数 cm 程度の岩石を数か所採取する必要がある。試料採取は、基質の砂を採取する方法と石英を含む礫を採取する方法の 2 通りがあるが、試料の代表性向上の観点から前者の方がより好ましい。

(iv) 離水時期が異なる複数段の更新世~完新世侵食段丘における TCN 法の適用

離水以前の TCN 蓄積量の評価は、侵食段丘に TCN 法を適用するに当たって必須の検討課題である。また、更新世段丘の多くは放射性炭素年代測定法の適用範囲外となるため、完新世段丘の場合以上に、TCN 法による離水年代の測定法の確立が望まれる。以上について検討するうえで、年代既知の複数段の更新世段丘、完新世段丘および現世の波蝕台に TCN 法を適用し、結果を比較することが有効であると考えられる。より具体的には、以下の三つの点について検証を行うことができると見込まれる：1) 更新世段丘の場合、離水以降に蓄積した TCN 量が完新世段丘に比べて多いため、離水以前の TCN 蓄積量が誤差として無視できないか、2) 離水以前の TCN 蓄積量はどの時代の侵食段丘面でもほぼ同程度と考えられるため、横軸に既知の離水年代、縦軸に TCN 蓄積量をプロットし、後者の理論曲線からのずれ量を評価することで、離水以前の蓄積量を補正できないか（図 2.1-32）、3) 現世の波蝕台の TCN 蓄積量を測定することで、離水以前の TCN 蓄積の有無やその影響範囲を評価できないか。なお、3) の検討は、図 2.1-32 における実測データのフィッティング曲線の縦軸切片の決定と同義であるため、2) の検討で信頼性の高いフィッティング曲線を引くためには、3) の検討も併せて実施する事が望ましい。

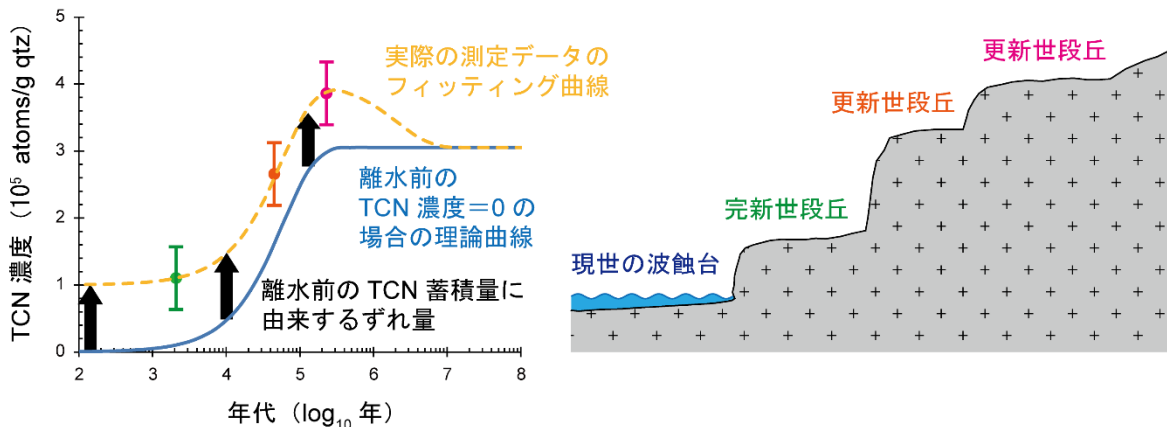


図 2.1-32 複数段の侵食段丘を用いた離水前の TCN 蓄積量補正の概念図

(c) まとめ

放射性炭素年代が適用できない場合における侵食段丘の離水年代を推定する方法の一つとして、TCN 法の適用が考えられる。しかし、波蝕台の形成・離水プロセスを考慮すると、侵食段丘の TCN 年代の解釈は単純ではなく、同一面上での TCN 蓄積量の不均質や、離水以前

に蓄積された TCN 量などを評価する必要がある。そのため、29 年度の本事業では、侵食段丘への TCN 法適用に先立っての基礎的な知見の収集を目的として、1) 完新世侵食段丘における水平方向の TCN 蓄積量の不均質の検討、2) 完新世堆積段丘における TCN 深度プロファイルの測定、3) 離水時期の異なる複数段の侵食段丘における TCN 法の適用について、試料採取および測定結果の解釈における考え方を検討した。今後は、特に 1) や 3) について、事例研究等を通じた検討結果の検証が課題である。

② 局所的な堆積物の年代などによる隆起・侵食評価手法の検討

(a) 目的と概要

海成段丘の発達が悪い地域においても、局所的に分布する堆積物を用いて隆起量・侵食量が推定できる場合がある (図 2.1-33)。平成 28 年度の本事業では、堆積学的指標、生物学的指標、化学的指標、物理的指標 (色彩や密度など) のそれぞれについて、隆起量・侵食量の推定の基礎情報となる堆積物の堆積環境 (陸成・海成の区別や深度) の推定の適用事例に関してレビューした。既往研究からは、堆積学的指標、化学的指標、物理的指標については、得られる情報に限界があり、堆積物の堆積環境の推定としては課題が多いのに対し、生物学的指標については、陸成・汽水成・海成の区別のみならず、堆積時の水深や流速などの堆積環境の推定が可能な化石種もあり、適用範囲が広いことが分かっている。平成 29 年度は、この生物学的指標と、堆積物の年代決定として強力なツールであるテフラ着目し、局所的に分布する堆積物を対象とした更なる適用事例の蓄積を進めた。

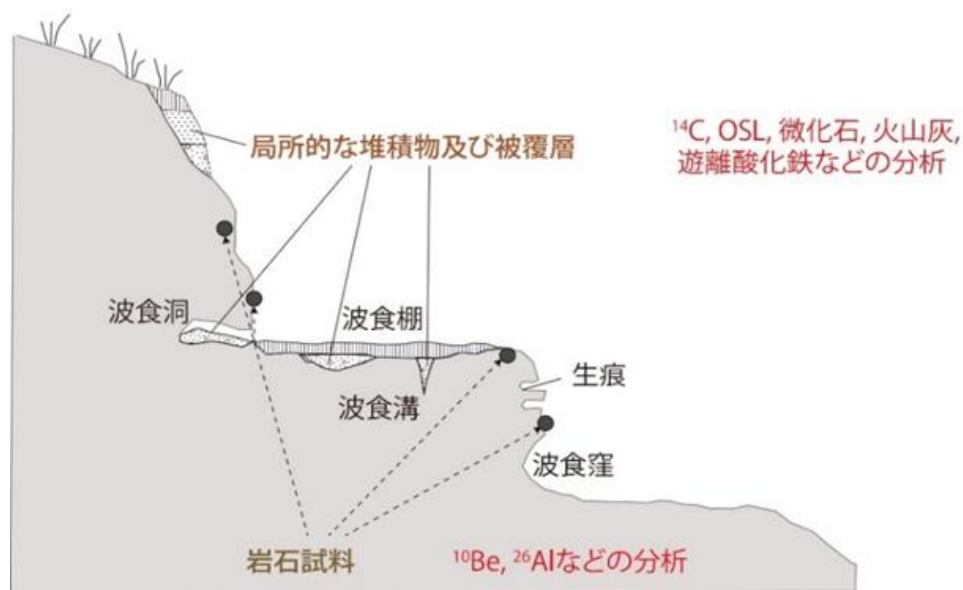


図 2.1-33 岩石侵食段丘や局所的な堆積物の年代などに基づく対比・編年に有効な試料分布のイメージ (平成 28 年度報告書の図 2.1-29)

(b) 生物学的指標に係る適用事例の蓄積

沿岸部に位置し、広域的な地形・地質構造が比較的良く知られている北海道幌延地域 (太田ほか, 2007) を事例対象として、局所的に分布する堆積物の微化石分析を行い、堆積環境の推定を試みた。

北海道留萌地方北部～宗谷地方西部の沿岸部には、MIS1～9 の海成段丘が広く分布しており (小池・町田編, 2001)、その比高から過去約 30 万年前以降の隆起速度の推定が可能である。幌延地域においても、サロベツ背斜の分布する丘陵にこれらの海成段丘が分布し (図 2.1-

34)、隆起速度を推定するための地形・地質学的検討が行われている(安江ほか, 2005)。一方、天塩川を上流に辿った内陸の間寒別地域には、同時期に堆積した河成段丘が広く分布していることが知られている(岡, 1985)。それよりやや下流に位置する大曲断層を伴う背斜の西側にも、段丘堆積物の分布がわずかに知られているが(太田ほか, 2007)、これらの堆積環境に係わる詳細な検討は未だなされていない。北海道北部の日本海東縁部は鮮新世末期～第四紀以降、東西圧縮場の下で fold-and-thrust 帯が発達してきた場とされており、東から順次、褶曲構造が形成されたと考えられている(小椋・掃部, 1992; 新里ほか, 2007)。間寒別地域から天塩川の河口域にかけて、段丘発達の変遷を明らかにすることは、fold-and-thrust 帯の発達するような活動的な場における沿岸部の隆起速度の変遷を理解する上でも重要であると言える。以上の観点から、大曲断層を伴う背斜の西側に小規模に分布する段丘堆積物を対象に地質記載および微化石分析を行い、堆積環境を推定するとともに、当該地域の隆起量に係わる考察を行った。

微化石分析を行った地点(図 2.1-34 の Loc. 1)では、平坦面の分布と比高とから MIS5e(約 12.5 万年前)と推定されている段丘面を切るように林道が分布し、その切割に段丘堆積物が露出する。段丘堆積物は下位より大局的に、細粒砂とシルトのリズミカルな互層、褐色の斑点が目立つ塊状のシルト層、粘性が高く火炎状構造を伴う粘土層、上位の細粒砂・シルト互層に侵食され層厚が著しく変化する礫層、著しく擾乱した細粒砂・シルト互層、表面が酸化して褐色を帯びた礫層、含礫シルト層、化石凍結割れ目を伴う礫層、褐色の斑点を伴うシルト層からなる(図 2.1-35; 図 2.1-36)。地層はおおむね水平であるが、その産状からは、火炎状構造を伴う粘土層より下位の細粒砂・シルト層はほとんど擾乱を伴わないのに対し、それより上位(かつ、表面が酸化して褐色を帯びた礫層より下位)の砂・シルト・礫層は著しく擾乱し、層厚が大きく変化したり、地層がレンズ状に破断している部分が見られる。最上位の礫層には長さ約 70 cm で鉛直に割れ目が発達し、上位のシルトが充填している。割れ目の性状からは、寒冷地の陸成層に特徴的に発達する化石凍結割れ目(澤口・小岩, 1990; 澤口・三浦, 2009; 近藤, 2011)であると考えられるが、その産状、発達密度および規模を他地域での報告事例(三浦・平川, 1995)と比較すると、本地点のそれは永久凍土起源ではなく、季節的な凍結融解で形成されるソイルウェッジであると推定される。

微化石分析試料は、シルト～粘土層を中心に採取した(図 2.1-35)。肉眼観察からは、有孔虫や貝形虫が存在する兆候は見られなかったため、堆積時期のみならず陸成・汽水成・海成の区別にも有効な珪藻の分析に重点を置いた。珪藻分析は株式会社パレオ・ラボにおいて実施した。

珪藻分析の結果、すべての試料において豊富な珪藻殻が得られ(10⁵～10⁶個/g以上)、うち約半数は完形殻であった(図 2.1-37)。それらは主に海水種からなり、わずかに淡水種・汽水種を伴う。海水種は大部分が海水不定・不明種であったが、*Thalassionema nitzschioides*などの外洋指標種(千葉・澤井, 2014)も特徴的に存在する。海水不定・不明種の大半を占める *Denticulopsis* 属は、ほとんどは鮮新世に絶滅した *Denticulopsis (Neodenticula) kamtschatica*(柳沢, 2010)と推定された。また、同じく海水不定・不明種の *Stephanopyxis corona*も中新世～更新世の絶滅種である(芳賀・鈴木, 1999)。淡水種は下部のほとんど擾乱を伴わない層準でやや多く、*Reimeria sinuata*のような河川指標種や、*Diadesmis contenta*のような耐乾性の強い陸生珪藻(千葉・澤井, 2014)を伴う。

既往研究の通り本地点が MIS5e(海進期)の段丘面であるとすれば、下部のほとんど擾乱を伴わない層準の堆積環境は、外洋指標種と淡水種の存在からは、近傍の河川の影響をわずかに受ける外洋に面した、あるいは潮通りの良い沿岸部が推定される。この場合、大量に含まれる海水不定・不明種の絶滅種は新第三紀堆積岩からの再堆積と解釈され、当該地域で波蝕

による侵食が働いていたと考えられる。実際、幌延地域の新第三紀堆積岩からは *Neodenticula kamtschatica* の産出が知られている（木方ほか, 2006）。一方、上部の著しく擾乱した細粒砂～シルトおよび礫層に挟まれる含礫シルトについては、同じ沿岸部であっても、堆積速度が速かったために淡水種が下部ほど取り込まれなかった可能性がある。礫層や細粒砂・シルト互層の著しい擾乱は、沿岸部での暴浪などが原因と考えられる。

しかし、いずれの試料も、基盤の新第三紀堆積岩由来と思われる絶滅種の割合がかなり多く、堆積環境の詳細な検討を困難にしている。本地点の直下に露出する基盤は更新統の更別層であり、堆積物が基盤岩そのものである可能性は低いですが、今後、テフラ分析などの他の手法の結果と組み合わせて堆積年代や環境を絞り込む必要がある。

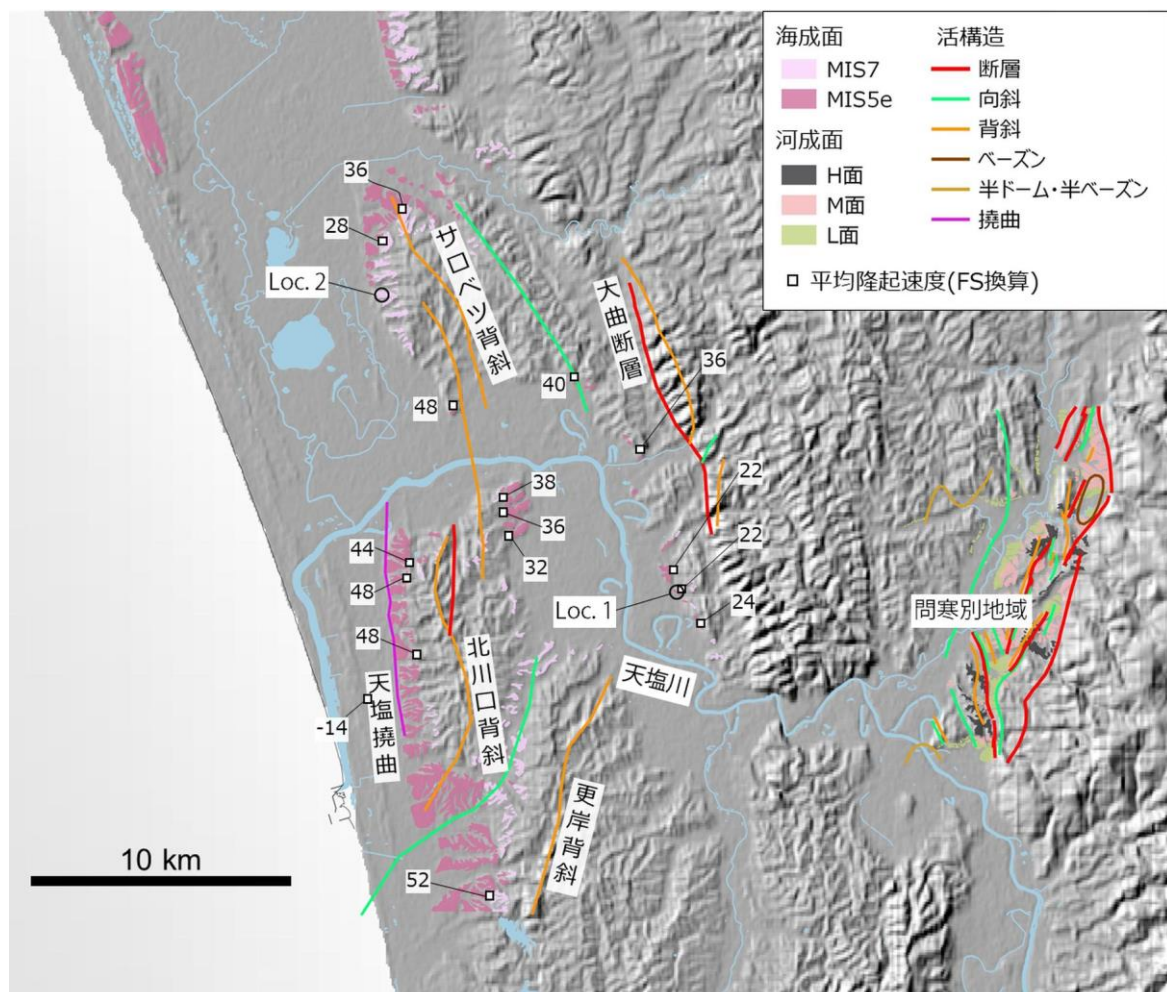


図 2.1-34 幌延地域およびその周辺の地形の概要と段丘分布
平成 28 年度報告書の図 2.1-9 に加筆

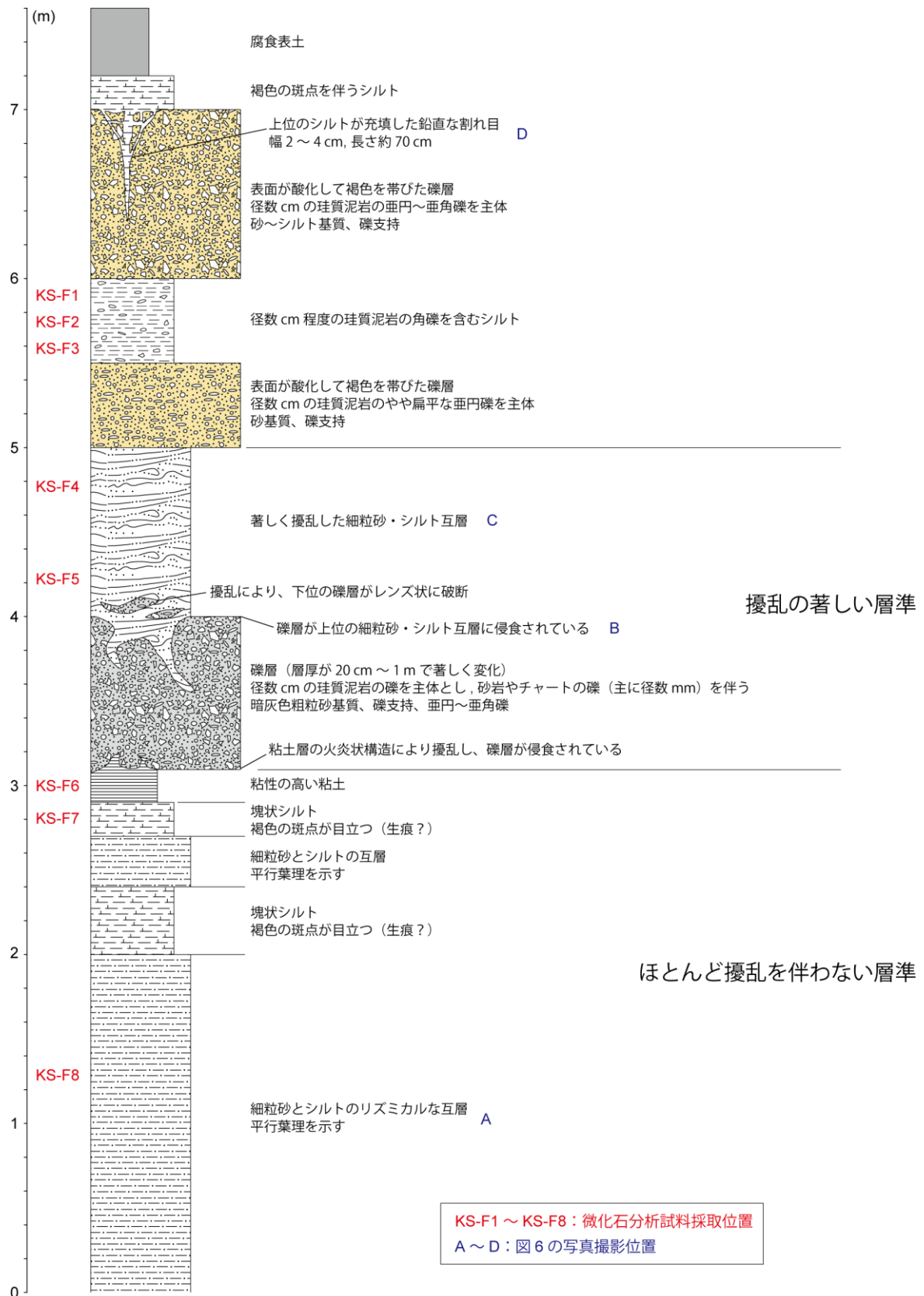


図 2.1-35 微化石分析露頭の柱状図と試料採取位置

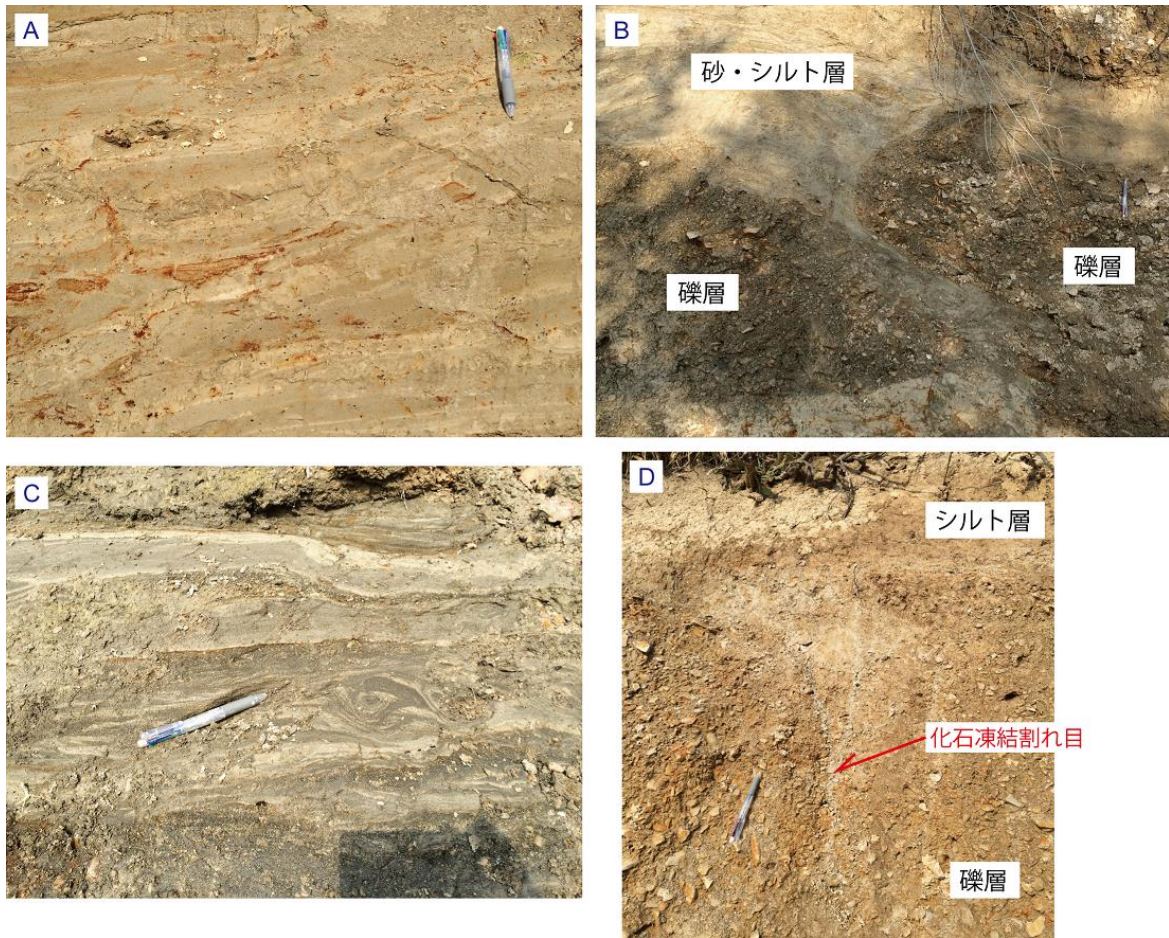


図 2.1-36 微化石分析露頭の産状を示す代表的な写真

(A) 細粒砂とシルトのリズミカルな互層、(B) 上位の細粒砂・シルト互層に侵食され層厚が著しく変化する礫層、(C) 著しく擾乱した細粒砂・シルト互層、(D) 上位のシルトが充填した化石凍結割れ目を伴う礫層

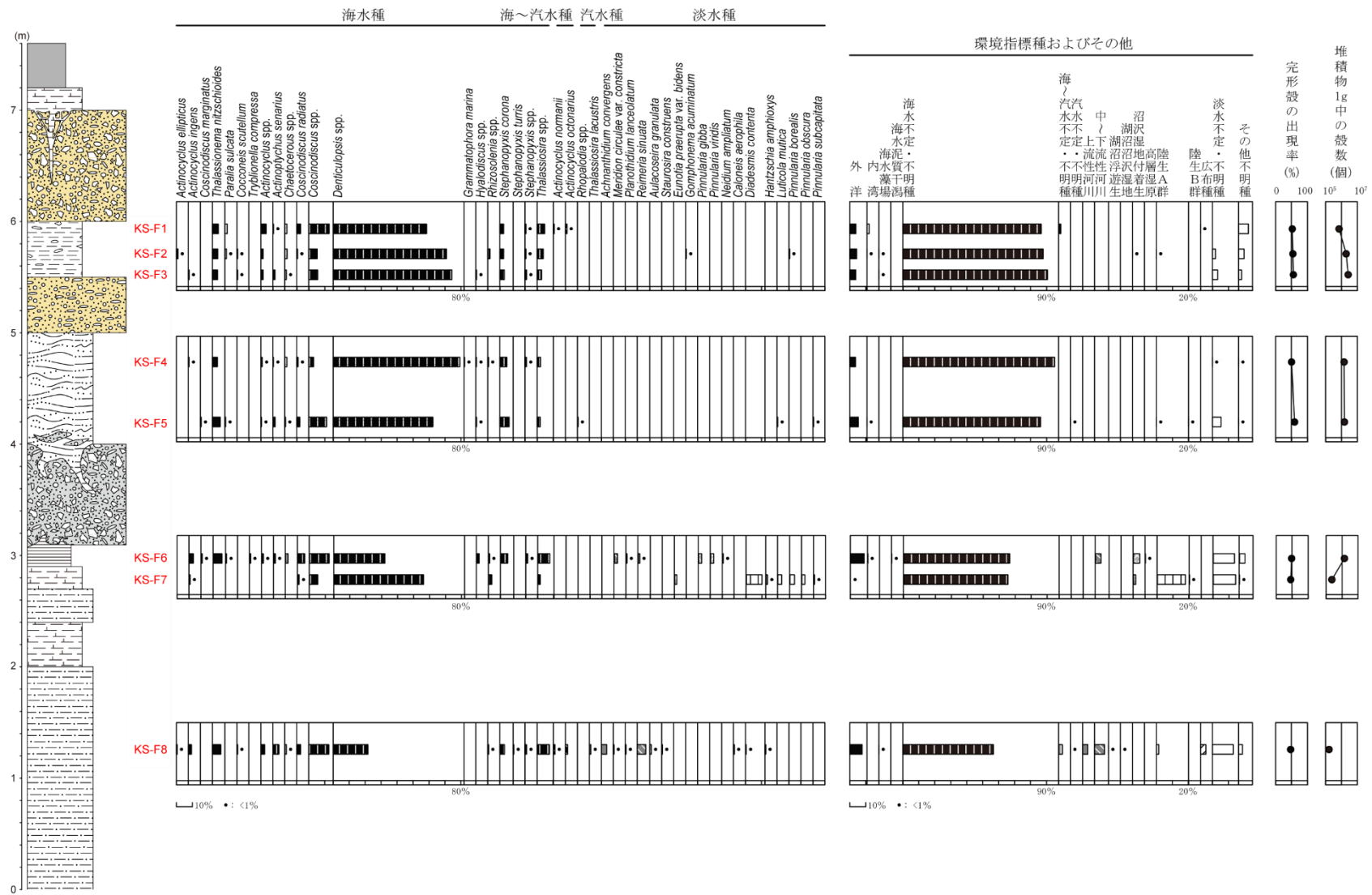


図 2.1-37 珪藻化石分析結果

(c) テフラを用いた年代決定に係る検討

一般に、沿岸部では最終間氷期に形成された海成段丘が発達しており、これらの旧汀線高度の分布から過去約 12.5 万年間の隆起量（隆起速度）を推定することが可能である。しかしながら、第四紀後期に沈降から隆起に転じた地域では、段丘や構成する堆積物、侵食地形などが局所的にしか分布しておらず、将来の地質環境の予測・評価に重要となる過去十万年程度の隆起・侵食量を見積ることは困難となる。これらの問題を解決するためには、未発達の段丘や構成堆積物に含まれる編年基準（鍵層）を地質記載、粒度分析、鉱物・化学組成分析、テフラ分析などによって認定することのほか、これらの堆積物の形成年代を高い精度で決定するための技術を整備することが重要となる。特に、数万年以上の堆積年代に関する情報については、光ルミネッセンス（OSL）などの年代測定が試みられているが、現時点では火山灰層序学（テフロクロロジー）によって指標地形面の年代を推定する方法が最も信頼性が高いと考えられる。ここで、鍵層としてのテフラ層を対比するためには、テフラ粒子の同定やモード組成、鉱物・火山ガラスの化学組成などの情報が必要となる。

実際の堆積物に含まれるテフラが「純層」の場合は、堆積物がブロックとして再移動していないかぎり、その層位が示す時刻に火山噴火による降灰が起こったことを示す。すなわち、年代既知のテフラが純層として対比できれば重要な鍵層となり、段丘の形成年代の決定に極めて有効である。一方で、「純層」として連続性がなく、パッチ状に含まれるテフラや肉眼では認められないクリプトテフラ（例えば、Blockley et al., 2007）などの場合は、再堆積している可能性があり、この下位の層準が対比されたテフラの降灰年代より古いという証拠とは必ずしもならない。また、この場合は、複数のテフラの混合層であることも考えられる。本事業では、テフラの同定技術の高度化に資するための事例研究として、鳴沢川周辺の沖積層のコア試料中（熊谷ほか, 2017）に含まれるパッチ状の火山灰（N-t）に含まれる発泡したガラスの EPMA による分析により、パッチ状に含まれるテフラを利用した堆積年代同定の可能性について検討した。

EPMA は日本電子製波長分散型 EPMA（JXA-8230）を用いて、電子ビーム径 10 μm 、加速電圧 15 kV、電流値 10 nA の分析条件によって測定を行った。図 2.1-38 には、N-t の主成分元素組成のうち、 TiO_2 を横軸に、 K_2O を縦軸にプロットした結果を示す。また、このテフラと対比するため、同図にはこの地域に降灰している可能性が高い十和田 a 火山灰（To-a）、白頭山ー苦小牧火山灰（B-Tm）も併せて示した。これによれば、N-t の化学組成は比較的ばらつきが少なく、To-a の化学組成に近い領域にプロットされる。しかしながら、一部のガラスについては B-Tm と整合的であることから、パッチ状の火山灰は西暦 915 年に噴火した To-a および西暦 946 年に噴火した B-Tm（Oppenheimer et al., 2017）の混合層の可能性がある。この場合、このテフラの下位の堆積物が西暦 946 年よりも古いとは言えないが、その上位の堆積物は 946 年より新しいことは確実である。熊谷ほか（2017）は、テフラの上位の堆積物中の土壌のヒューミンの ^{14}C 年代測定を行って $680 \pm 45 \text{ yr BP}$ という値を得ており、以上の結果と沖積層コアの編年には矛盾がない。以上のように再堆積した可能性が高いパッチ状の火山灰であっても、EPMA によるガラスの化学組成によって年代既知の広域テフラなどと対比することにより、堆積物の上限の年代をある程度決定することは可能であると考えられる。

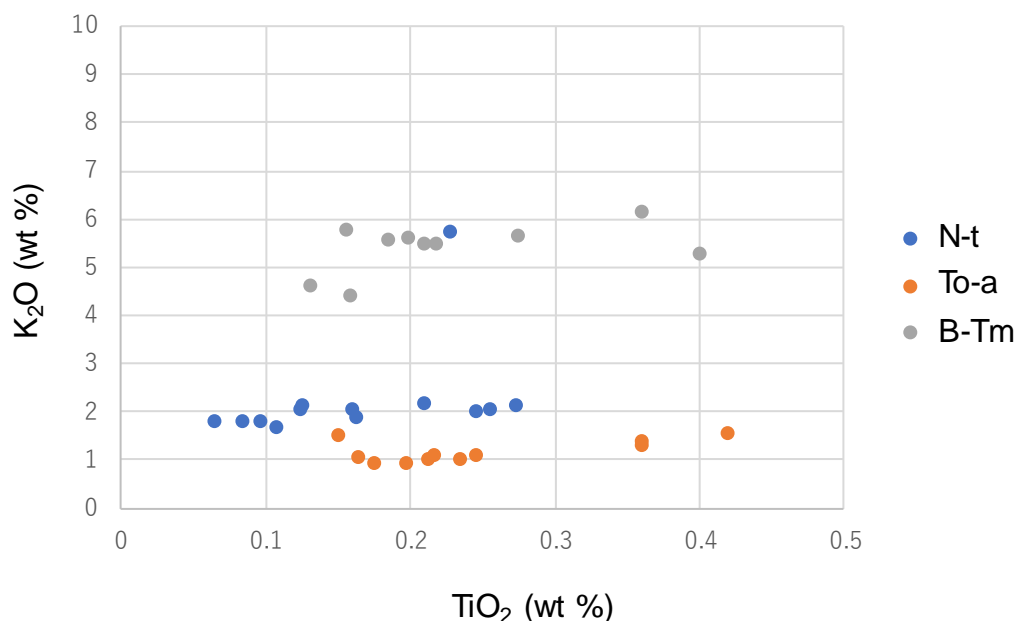


図 2.1-38 パッチ状テフラ (N-t) および十和田 a 火山灰 (To-a)、白頭山-苦小牧火山灰 (B-Tm) の K₂O-TiO₂ 図

(3) まとめと今後の課題

本年度は、沿岸域における隆起・侵食の検討、海底地形の地形判読に基づく隆起・侵食評価手法の検討、経験的指標に基づく段丘対比・編年手法の高度化、岩石侵食段丘や局所的な堆積物の年代などによる隆起・侵食評価手法の検討、以上 4 点を実施した。これらの主な成果と今後の課題を以下にまとめる。

- 宮崎平野を事例として、後期更新世以降の隆起運動について、陸域の平均隆起速度分布から三次元的な隆起運動モデルを構築し、これを沿岸海域に外挿することにより、海域の隆起速度の評価を試みた。この結果については、海底の地形との対応を見ることにより、定性的には説明しうると考えられる。今後の課題としては、段丘対比・編年に関わる継続的な技術開発（および技術の維持・継承）、内陸部の隆起量評価、基盤の地質構造の正確な把握とそのモデルへの反映、断層や褶曲が分布する地域への適用といった点が挙げられる。
- 我が国の海陸境界から大陸棚縁辺付近までをカバーするアナグリフと海底地形図を作成し、これらのデータの地形判読から、20~80 万分の 1 スケールの海底段丘の分布図を作成した。さらに、この図と「海成段丘アトラス」(小池・町田編, 2001) のデータを統合し、海域も含めた旧汀線の分布図(海陸シームレス旧汀線分布図)を作成した。海底段丘は、我が国の沿岸域において海成段丘以上に広く分布する地形である。しかし、その発達度合いには地域差があり、分布深度も様々である。今後の課題としては、(1)地域差を地形・地質・テクトニクス条件を考慮し、整理すること、(2) 海底段丘の成因の理解に向けて、海底段丘の堆積構造を音波探査記録等から把握することが挙げられる。
- 経験的指標に基づく段丘対比・編年手法の高度化については、形成年代が明らかにされている宮崎平野中部の段丘を構成する地層を事例対象として指標の定量化を進め、砂岩の段丘礫の間隙率、砂岩の段丘礫ならびに被覆層(風成ローム層)の色調・鉱物組成

により定量化ができる見通しを得た。今後は火成岩の段丘礫など、さらにデータを拡充して検討する必要がある。

- ・ 侵食段丘の離水年代を推定する方法の技術開発として TCN 法の検討を行った。侵食段丘への TCN 法適用に先立っての基礎的な知見の収集を目的として、1) 完新世侵食段丘における水平方向の TCN 蓄積量の不均質の検討、2) 完新世堆積段丘における TCN 深度プロファイルの測定、3) 離水時期の異なる複数段の侵食段丘における TCN 法の適用について、試料採取および測定結果の解釈における考え方を検討した。今後は、特に 1) や 3) について、事例研究等を通じた検討結果の検証が課題である。

謝辞

ここでの検討に用いた海上音波探査記録は、海の基本図の記録原本で、海上保安庁より開示して頂いた。ここに記して、関係者に深く謝意を表す。

引用文献

- 赤木功, 井上弦, 長友由隆, 九州南部に分布する赤黄色土(古赤色土)の産状, 日本土壤肥科学雑誌, vol. 74, pp.623-630, 2003.
- 栗田泰夫, DEM から作成する詳細地形判読のための立体等高線図, 日本活断層学会 2014 年秋期学術大会ポスター発表予稿集, P-9, 2014.
- Blockley, S. P. E., Lane, C. S., Lotter, A. F. and Pollard, A. M., Evidence for the presence of the Vedde Ash in Central Europe, *Quaternary Science Reviews*, vol.26, pp.3030-3036, 2007.
- Chappell, J., Upper Quaternary sea levels, coral terraces, oxygen isotopes and deep-sea temperatures, *Journal of Geography*, vol.103, pp.828-840, 1994.
- 千葉 崇, 澤井裕紀, 環境指標種群の再検討と更新, *Diatom*, vol.30, pp.17-30, 2014.
- 地質環境の長期安定性研究委員会 (編), 地質リーフレット 4 「日本列島の地質環境の長期安定性」, 日本地質学会, 2011.
- Clark, P. U., Dyke, A. S., Shakun, J. D., Carlson, A. E., Clark, J., Wohlfarth, B., Mitrovica, J. X., Hostetler, S. W. and McCabe, A. M., The Last Glacial Maximum, *Science*, vol.325, pp.710-714, 2009.
- Cornell, R. M. and Schwertmann, U., *The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses*, 2nd edition, Wiley-VCH, 703p., 2003.
- Dunai, T.J., *Cosmogenic nuclides: Principles, concepts and applications in the earth surface sciences*, Cambridge University Press, 198p, 2010.
- 遠藤秀典, 鈴木裕一郎, 妻および高鍋地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 105p., 1986.
- 古澤 明, 火山ガラスの屈折率測定および形態分類とその統計的な解析に基づくテフラの識別, 地質学雑誌, vol.101, pp.123-133, 1995.
- 古澤 明, RIPL 法により由布岳火山周辺のテフリックレスから見いだした火山活動, 地質学雑誌, vol.110, pp.19-37, 2004.
- 後藤秀昭, 等深線データから作成した日本列島周辺の海底地形アナグリフ—解説と地図一, 広島大学大学院文学研究科論集, vol.73, 特集号, 74p, 2013.
- 後藤秀昭, 日本列島と周辺海域を統合した詳細地形アナグリフ—解説と地図一, 広島大学大学院文学研究科論集, vol.74, 特集号, 103p, 2014.

- 芳賀正和, 鈴木 進, 三浦半島葉山層群下部から産出した珪藻化石, *Diatom*, vol.15, pp.119-125, 1999.
- 濱田崇臣, 幡谷竜太, 段丘の対比・編年の信頼性向上のための風化指標の検討—新潟県中越地域等に分布する段丘の観察・分析結果に基づいて—, 電力中央研究所報告(研究報告), N08063, 2009.
- 濱田崇臣, 幡谷竜太, 河成段丘を用いた内陸部隆起量評価手法の適用性の検討～経験的指標を重視したアプローチ～(本編および別冊付録), 電力中央研究所報告(研究報告), N10050, 2011.
- 濱田崇臣, 段丘の対比・編年の信頼性向上のための風化指標の検討(その2) —段丘礫の風化状態の把握と対比指標の適用条件の提示—, 電力中央研究所報告, N12007, 2012.
- 濱田崇臣, 幡谷竜太, 風成ローム層に発達する斑紋構造の編年上の意義, 日本第四紀学会講演要旨集, 45, 26, 2015.
- 幡谷竜太, 河成段丘を用いた第四紀後期の隆起量評価手法の検討(1) 段丘対比の考え方の提案と河成段丘の編年に関わるケーススタディー, 電力中央研究所報告, N05005, 2005.
- 幡谷竜太, 柳田 誠, 佐藤 賢, 佐々木俊法, 宮崎県陸前川崎盆地における海洋酸素同位体ステージ6河成段丘の認定とその意義, 第四紀研究, vol.44, pp.155-167, 2005.
- 幡谷竜太, 河成段丘を用いた第四紀後期の隆起量評価手法の検討(2) 那珂川沿いに分布する河成段丘の層序, 電力中央研究所報告, N05016, 2006.
- 幡谷竜太, 柳田 誠, 山本真哉, 佐藤 賢, 古澤 明, 新潟県魚沼丘陵北部の河成段丘の層序, 応用地質, vol.47, pp.140-151, 2006.
- 幡谷竜太, 柳田 誠, 鳥越祐司, 佐藤 賢, 後期更新世以降の現海岸線付近での下刻, 応用地質, vol.57, pp.15-26, 2016.
- 岩淵義郎, 加藤 茂, 第四紀地図の作成過程からみた大陸棚, 第四紀研究, vol.23, pp.217-225, 1988.
- 井関弘太郎, 沖積層基底歴礫層について, 地学雑誌, vol.84, pp.247-264, 1975.
- 地盤工学会編, 岩の調査と試験, 地盤工学会, 540p., 1989.
- 貝塚爽平, 関東南岸の陸棚形成時代に関する一考察, 地理学評論, vol.28, pp.15-26, 1955.
- 貝塚爽平(編), 日本の地形—特質と由来—, 岩波新書, 234p, 1977.
- 木方建造, 大山隆弘, 鈴木浩一, 中田英二, 田中姿郎, 宮川公雄, 石井英一, 高橋一晴, 濱克宏, 國丸貴紀, 津久井郎太, 福島龍郎, 瀬谷正巳, 青木和弘, 幌延における堆積岩の特性研究, 電力中央研究所/日本原子力研究開発機構共同研究成果報告, 50p, 2006.
- 近藤玲介, OSL年代およびAMS14C年代に基づく北海道北部における化石周氷河現象の形成年代の推定, 地学雑誌, vol.120, pp.547-556, 2011.
- 小池一之, 町田 洋(編), 日本の海成段丘アトラス, 東京大学出版会, 122p, 2001.
- 国土交通省, 国土地盤情報検索サイト「KuniJiban」, 2008. <http://www.kunijiban.pwri.go.jp> (2018年3月12日最終閲覧)
- 熊谷秀平, 梅田浩司, 鎌滝孝信, 小岩直人, 藤田奈津子, 青森県鱒ヶ沢町にみられるイベント堆積物, 東北地域災害科学研究, 53, 7-14, 2017.
- 栗山健弘, 吉田英一, 山本博文, 勝田長貴, 河岸段丘礫の表面風化にみる酸化フロントの形成とその移動速度, 地質学雑誌, vol.112, pp.136-152, 2006.
- 九州活構造研究会編, 九州の活構造, 東京大学出版会, 562p., 1989.
- 町田 洋, 新井房夫, 新編 火山灰アトラス, 東京大学出版会, 336p, 2003.
- 前杵英明, 隆起付着生物のAMS14C年代からみた室戸岬の地震性隆起に関する再検討, 地学雑誌, vol.110, pp.479-490, 2001.

- 松井健, 加藤芳朗, 日本の赤色土壌の生成時期・生成環境にかんする二, 三の考察, 第四紀研究, vol.2, pp.161-179, 1962.
- 松井健, 加藤芳朗, 中国・四国地方およびその周辺における赤色土の産状と生成時期—西南日本の赤色土の生成にかんする古土壌学的研究第2報, 資源科学研究所彙報, vol.64, pp.31-48, 1965.
- Matsushi, Y., Wakasa, S., Matsuzaki, H. and Matsukura, Y., Long-term denudation rates of actively uplifting hillcrests in the Boso Peninsula, Japan, estimated from depth profiling of in situ-produced cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al , *Geomorphology*, vol.82, pp.283-294, 2006.
- 松四雄騎, 若狭 幸, 松崎浩之, 松倉公憲, 宇宙線生成核種 ^{10}Be および ^{26}Al のプロセス地形学的応用, *地形*, vol.28, pp.87-107, 2007.
- 三土正則, 東播台地のトラ斑土壌, ペドロジスト, vol.16, pp.40-48, 1972.
- 三浦英樹, 平川一臣, 北海道北・東部における化石凍結割れ目構造の起源, *地学雑誌*, vol.104, pp.189-224, 1995.
- 茂木昭夫, 対馬海峡大陸棚の地形発達—対馬陸橋に関連して—, *第四紀研究*, vol.20, pp.243-256, 1981.
- Nagano, T., Nakashima, S. Nakayama, S. and Sendo, M., The use of color to quantify the effects of pH and temperature on the crystallization kinetics of goethite under highly alkaline condition, *Clay and Clay Minerals*, vol.42, pp.226-234, 1994.
- 長岡信治, 大隅半島北部から宮崎平野に分布する後期更新世テフラ, *地学雑誌*, vol.93, pp.348-370, 1984.
- 長岡信治, 後期更新世における宮崎平野の地形発達, *第四紀研究*, vol.25, pp.139-163, 1986.
- 長岡信治, 西山賢一, 井上 弦, 過去 200 万年間における宮崎平野の地層形成と陸化プロセス—海面変化とテクトニクスに関連して—, *地学雑誌*, vol.119, pp.632-667, 2010.
- 永塚鎮男, 褐色森林土, 黄褐色森林土, 赤色土における遊離酸化鉄の存在形態について, ペドロジスト, vol.17, pp.70-83, 1973.
- 永塚鎮男, 原色日本土壌生態図鑑, フジ・テクノシステム, 49p., 1997.
- 中川久夫, 東北日本南部太平洋沿岸地方の段丘群, *地質学雑誌*, vol.67, pp.66-78.
- 中川久夫, 本邦太平洋沿岸地方における海水準静的変化と第四紀編年, *東北大学地質古生物邦文報告*, vol.54, pp.1-61.
- 中田 高, 今泉俊文 (編), 活断層詳細デジタルマップ, 東京大学出版会, 60p., 2002.
- 日本第四紀学会編, 第四紀試料分析法, 東京大学出版会, 664p, 1993.
- 日本土壌肥料学会 (監修), 土壌環境分析法, 博友社, 427p, 1997.
- 新里忠史, 舟木泰智, 安江健一, 北海道北部, 幌延地域における後期鮮新世以降の古地理と地質構造発達史, *地質学雑誌 (補遺)*, vol.113, pp.119-135, 2007.
- 西山賢一, 横田修一郎, 岩松暉, 扇状地堆積物における赤色化礫の分布と性状, *応用地質*, vol.40, pp.2-13, 1999.
- 西山賢一, 水上陽成, 小池克明, 松倉公憲, 風化による砂岩礫の間隙構造の時間変化, *応用地質*, vol.42, pp.2-14, 2001.
- 小椋伸幸, 掃部 満, 天北・羽幌地域の石油地質—深部構造特性と炭化水素ポテンシャル—, *石油技術協会誌*, vol.57, pp.32-44, 1992.
- 岡田篤正, 四国中央北縁部における中央構造線の第四紀断層運動, *地理学評論*, vol.46, pp.295-322, 1973.

- 岡 孝雄, 北海道天北・間寒別構造盆地のネオテクトニクス, 活断層研究, vol.1, pp.19-29, 1985.
- 大政正隆, 黒島忠, 木立正嗣, 赤色土壌の研究, 林野土壌調査報告, vol.8, pp.1-23, 1957.
- Oppenheimer, C., Wacker, L., Xu, J., Galvan, J. D., Stoffel, M., Guillet, S., Corona, C., Sigl, M., Cosmo, N. D., Hajdas, I., Pan, B., Breuker, R., Schneider, L., Esper, J., Fei, J., Hammond, J. O. S. and Büntgen, U., Multi-proxy dating the 'Millennium Eruption' of Changbaishan to late 946 CE, *Quaternary Science Reviews*, vol.158, pp.164-171, 2017.
- 太田久仁雄, 阿部寛信, 山口雄大, 國丸貴紀, 石井英一, 操上広志, 戸村豪治, 柴野一則, 濱克宏, 松井裕哉, 新里忠史, 高橋一晴, 丹生屋純夫, 大原英史, 浅森浩一, 森岡宏之, 舟木泰智, 茂田直孝, 福島龍朗, 幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第一段階) 研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2007-044, 2007.
- Ramos, N. T. and Tsutsumi, H., Evidence of large prehistoric offshore earthquakes deduced from uplifted Holocene marine terraces in Pangasinan Province, Luzon Island, Philippines, *Tectonophysics*, vol.495, pp.145-158, 2010.
- 桜井 操, 佐藤任弘, 田口 弘, 永野真男, 内田摩利夫, 能登半島西方大陸棚の海底地形と地質構造, *地質学雑誌*, vol.77, pp.645-651, 1971.
- 産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書, 368p, 2017.
- 佐藤任弘, 茂木昭夫, 海底地形からみた日本海の海水準変化, *第四紀研究*, vol.21, pp.203-210, 1982.
- 澤口晋一, 小岩直人, 北海道宗谷地方徳満付近において観察されたアイスウェッジカスト, *第四紀研究*, vol.29, pp.151-153, 1990.
- 澤口晋一, 三浦英樹, 化石周氷河現象と氷期の凍土環境の復元, *デジタルブック最新第四紀学*, pp.5-154~5-175, 2009.
- 菅沼悠介, 三浦英樹, 奥野淳一, 表面照射年代法における携帯型電動カッターを用いた新たな試料採取方法, *南極資料*, vol.56, pp.85-90, 2012.
- 鈴木隆介, 建設技術者のための地形図読図入門 第 3 巻 段丘・丘陵・山地, 古今書院, 942p., 2000.
- Tsou, C.-Y., Chigira, M., Matsushi, Y. and Chen, S.-C., Fluvial incision history that controlled the distribution of landslides in the Central Range of Taiwan, *Geomorphology*, vol.226, pp.175-192, 2014.
- 若狭 幸, 松崎浩之, 松倉公憲, 原位置宇宙線生成核種年代測定法: 侵食地形変化速度の解明への適用, *地形*, vol.25, pp.247-265, 2004.
- 山本博文, 木下慶之, 中川登美雄, 中村俊夫, 福井県越前海岸沿い断層群の活動履歴について, 福井大学地域環境研究教育センター研究紀要「日本海地域の自然と環境」, vol.17, pp.57-78, 2010.
- 柳田 誠, 河成段丘の動的地形変化に関する研究, *駒沢地理*, vol.17, 1-17, 1991.
- 柳沢幸夫, 釧路海底谷側壁から採取された泥岩試料の珪藻化石, *地質調査研究報告*, vol.61, pp.105-123, 2010.
- 八島邦夫, 宮内崇裕, 津軽陸橋問題と第四紀地殻変動, *第四紀研究*, vol. 29, pp.267-275, 1990.
- 安江健一, 石井英一, 古澤 明, 北海道北部, サロベツ背斜周辺における海成段丘の形成時期, 日本地質学会第 112 年学術大会講演要旨, P-238, 2005.

横山祐典, 阿瀬貴博, 村澤 晃, 松崎浩之, 宇宙線照射生成核種を用いた地球表層プロセスの研究, 地質学雑誌, vol.111, pp.693-700, 2005.

吉山 昭, 柳田 誠, 河成地形面の比高分布から見た地殻変動, 地学雑誌, vol.104, pp.809-826, 1995.

2.1.2 沿岸部における断層活動に関する検討

(1) 背景と目的・実施内容

沿岸部における地質環境の調査技術のうち、断層運動については、海陸接合部における断層の分布や活動性といった情報を得るため、陸域および海域の双方における調査技術の適切な組み合わせが重要となる。特にわが国は四方が海で囲まれており、海陸境界付近での断層運動に関する調査・評価技術の整備に加え、わが国の沿岸部における断層の分布や特徴について十分な情報が整理されていることが求められていると言える。

日本列島およびその周辺海域の断層の分布や特徴については、既に網羅的に調査・整理された文献などの情報が複数知られている（例えば、徳山ほか, 2001；阿部・青柳, 2006；文部科学省研究開発局・海洋研究開発機構, 2015；2016；2017）。また、平成 28 年度までの本事業でも、網羅的な情報収集および整理が進められており（産業技術総合研究所ほか, 2016；2017）、その結果、1) 断層の分布や断層運動の特徴は同じ地域であれば陸域と沿岸部とで大きな違いはないこと、2) 広域的な海底地形・海底地質については、資源探査分野などを中心とした調査により日本列島周辺海域の情報がほぼ網羅されていること、3) 陸域での地形・地質調査によって海域の延長線上に活断層が疑われる地域においては、地震調査研究推進本部などのプロジェクトにより、沿岸部の断層分布や活動性に関する調査が既になされていることが確認できている。

沿岸部の断層を対象とした調査・解析技術についても、海底地形計測、音波探査、海底ボーリング調査といった調査目的に応じた複数の手法が整備されており、海域においても陸域と同様、活断層分布を確認するための段階的な地質環境調査を実施することが可能である見通しが得られている（沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会, 2016）。海陸境界では、調査船の進入が困難なことなどにより、調査技術に一部制限があるものの、ケーブルの敷設による浅海部での観測と、陸域沿岸での地質調査・観測とを組み合わせることなどによって海陸境界付近に分布する断層を検出するような工夫がなされた実績が複数存在する。また、地層処分のサイト選定に係わる調査を念頭とした場合、国内外の原子力施設の耐震安全評価に関連して実施された調査・評価に加え、沿岸部における地下資源探査や二酸化炭素地下貯留の実証試験などで蓄積されたノウハウの活用が有効であることも見出された。

平成 29 年度の本事業では、海陸境界付近の断層などに関する調査・研究事例と調査技術に関する文献などの情報について、平成 28 年度に収集された情報に加え、今年度新規に追加した情報を含めて、地域ごとに分類（図 2.1-31）するとともに、各種調査技術の仕様をまとめた一覧表（Appendix V）として整理し、わが国における沿岸部の断層運動に関わる特徴や、既存の調査技術の適用性について確認した。本報告書では、一覧表に整理した結果確認された若干の考察について取りまとめた。なお、Appendix V には、海上保安庁や産業技術総合研究所などによる国土基盤情報（海底地形図や海洋地質図）の作成のために実施された調査は、沿岸部の断層運動に関わる特筆すべき調査・解析がなされた場合を除き、一覧表に含めていない。また、資源エネルギー庁による基礎物理探査および基礎試錐調査についても、既に広く公開されたものでかつ、沿岸部の断層運動に関わる特筆すべき調査・解析がなされた場合を除き、掲載していない。

調査・研究事例に係わる地域ごとの分類は、現在の日本列島の基盤地質構造（Yasue et al., 2014）に加え、新第三紀中新世以降の地殻変動に着目した地体構造区分の研究（松田・吉川, 2001；垣見ほか, 2003）を参考にして行った。時間スケールを新第三紀中新世以降としたのは、過去 1 億年程度の日本列島の地史の中で、最も大きいと言ってよい地史イベントと考えられている日本海拡大が中期中新世までに終了したと考えられているためである。

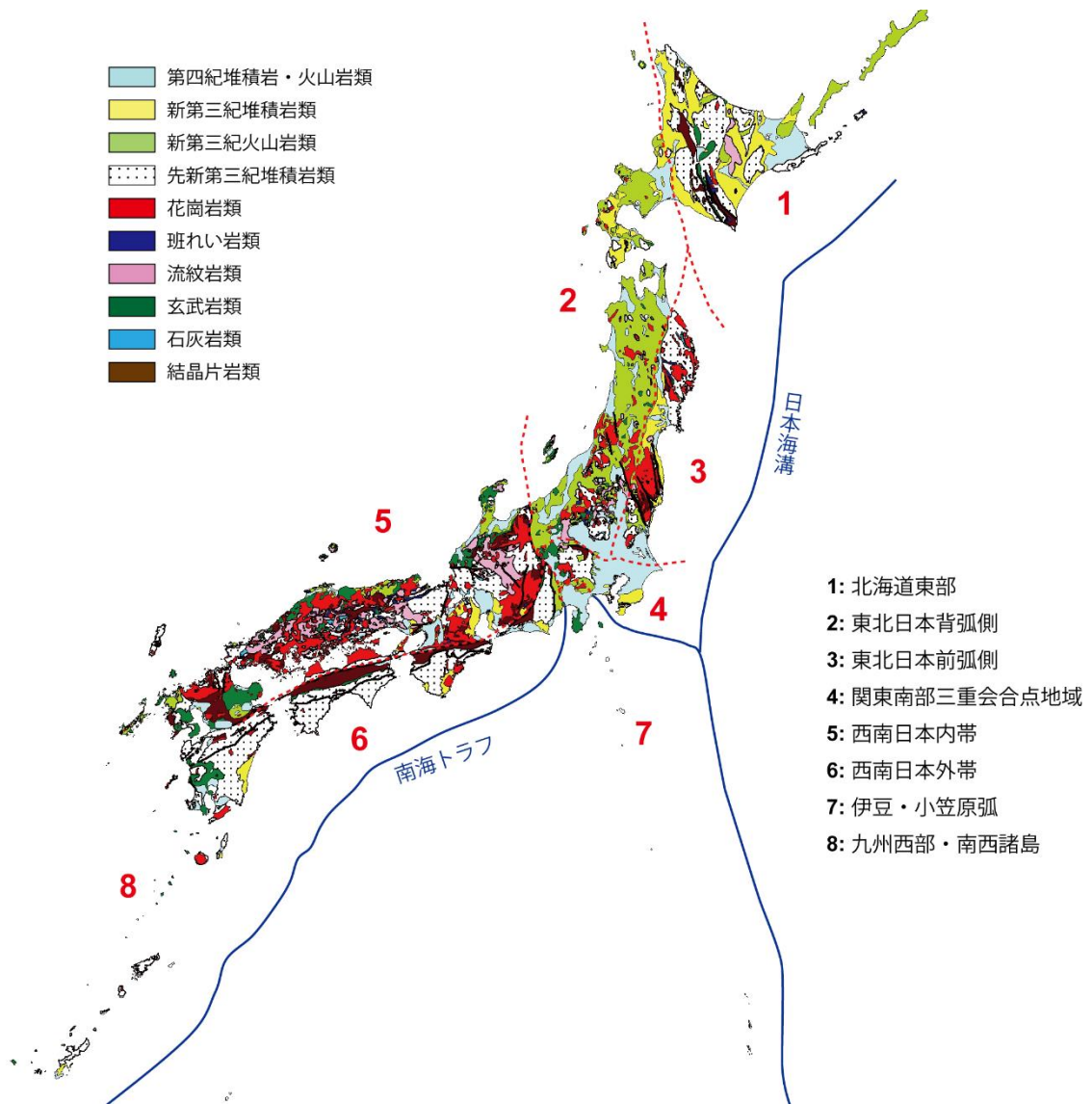


図 2.1-39 日本列島の基盤地質構造に基づく地域区分

地質図は Yasue et al. (2014) の海拔 0 m レベルの水平地質断面図に基づき作成。

(2) 考察およびまとめ

本事業で収集・整理した情報に基づく、海底地質調査として最も広く行われている音波探査については、2000 年代以前は 1) ソノプローブやチャープソナーによる海底からの深度約 100 m 以浅の浅部地下構造探査、2) スパーカーを用いた複数測線を設定して行うやや広域的な地質構造を把握するためのシングルチャンネル探査、3) ウォーターガンやエアガンによる深部（海底からの深度約 100 m 以深）の地下構造を把握するためのシングルチャンネル探査が主体であったが、2000 年代以降は、4) ブーマーによる海底からの深度約 200 m 以浅の地下構造を主な対象としたマルチチャンネル音波探査および 5) ウォーターガンやエアガンを用いたより深部の地下構造まで把握するためのマルチチャンネル探査が主流となってきている。また、海底からの深度約数十 m までの極浅部の地下構造の詳細な探査には、パラメトリック方式音源のサブボトムプロファイラーなどの新しい機器が用いられるようになってきた。さらに、28 年度の本事業で示した通り、二次元音波探査のデータを複数測線で取得して三次元的な地質構造を復元する手法に加え、複数のストリーマーケーブルを連結して一度に

データを取得する三次元音波探査が普及しつつある。

海底地形調査については、2000年代以前もそれ以降もマルチビーム測深が多く行われており、機器の進歩に伴い測定精度や利便性が向上している傾向があると言える。重力探査については、海上（船上）重力探査よりも精度が優れている海底重力探査のデータが集積されつつある。

海底堆積物調査については、最も充実したデータの得られる海上ボーリングに関しては、28年度の本事業で整理した通り技術としては整備されつつあるものの、日本の沿岸部で掘削～試料採取まで行われ、学術的な検証が可能な形で公表されている実績は、資源エネルギー庁による基礎試錐調査などを除くとあまり多くないのが現状である。

一方、本事業で実施している日本列島の沿岸部を対象とした海底地形の網羅的な地形判読（2.1.1.(2).2参照）により、従来活断層の分布が知られていない地域にも変動地形の可能性のある地形的変状の存在が示唆されている。また、既存の音波探査結果の再解析から復元された海底地層の分布パターンから地殻変動の履歴が読み取れる可能性もある（産業技術総合研究所ほか、2017の図2.1-40や本報告書の2.1.1.(2).1).③.(f)参照）。このような沿岸部の海底地形の詳細な解析から地殻変動の傾向を把握し取りまとめることは今後取り組むべき課題であると言える。

(3) 参考文献

阿部信太郎，青柳恭平，日本列島沿岸海域における海底活断層調査の現状と課題－海底活断層評価の信頼度向上に向けて－，電力中央研究所報告，N05047，26p，2006.

沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会，沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会とりまとめ，

<http://www.meti.go.jp/press/2016/08/20160809001/20180809001-1.pdf>，17p，2016.

（2018年1月11日最終閲覧）

垣見俊弘，松田時彦，相田 勇，衣笠善博，日本列島と周辺海域の地震地体構造区分，地震第2輯，vol.55，pp.389-406，2003.

松田時彦，吉川真季，陸域の $M \geq 5$ 地震と活断層の分布関係－断層と地震の分布関係－その2，活断層研究，vol.20，pp.1-22，2001.

文部科学省研究開発局，海洋研究開発機構，海域における断層情報総合評価プロジェクト 平成26年度成果報告書，209p，2015.

文部科学省研究開発局，海洋研究開発機構，海域における断層情報総合評価プロジェクト 平成27年度成果報告書，266p，2016.

文部科学省研究開発局，海洋研究開発機構，海域における断層情報総合評価プロジェクト 平成28年度成果報告書，339p，2017.

産業技術総合研究所，日本原子力研究開発機構，原子力環境整備促進・資金管理センター，電力中央研究所，平成27年度 地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書，139p，2016.

産業技術総合研究所，日本原子力研究開発機構，原子力環境整備促進・資金管理センター，電力中央研究所，平成28年度 地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書，372p，2017.

徳山英一，本座栄一，木村政昭，倉本真一，芦寿一郎，岡村行信，荒戸裕之，伊藤康人，徐 垣，日野亮太，野原 壯，阿部寛信，坂井真一，向山建二郎，「日本周辺海域中新世最末期以降の構造発達史」付図 日本周辺海域の第四紀地質構造図，海洋調査技術，vol.13，pp.27-53，2001.

Yasue, K., Ishimaru, T., Kobori, K., Umeda, K. and Nakatsuka, N., Subsurface geological mapping of the Japanese Islands, *Journal of Geological Society of Japan*, vol.120, pp.XIII-XIV, 2014.

2.1.3 沿岸部における火成活動に関する検討

(1) 背景と目的

1) 火山・火成活動が地層処分システムに及ぼす影響

火成活動が地層処分システムに及ぼす影響については、マグマの貫入や噴出による処分施設および廃棄体の直接的な破損のほか、マグマや深部流体の熱などによる地下水温の上昇や熱水対流の発生、熱水・火山ガスの混入による地下水の水質変化などが考えられる。一方、深部流体は、沈み込むスラブやマントル起源の流体が断裂系などを通じて地表付近に上昇するもので（産業技術総合研究所, 2012a）、pH が低く炭酸化学種が高濃度に含まれるなどの特徴があり、温度が高い場合には熱環境への影響もある。そのため、これらが流入する範囲では地質環境として好ましくない熱環境や化学場が生成される可能性があり、概要調査などにおいてその影響を排除することが望ましい（地層処分技術 WG, 2014）。これらのことから、地下深部のマグマや深部流体の存否や分布をあらかじめ確認するための調査技術を整備することが重要となる。

地層処分の技術的信頼性の再評価や今後の研究課題について議論を行っている経済産業省総合資源エネルギー調査会地層処分技術ワーキンググループにおいては、廃棄物の輸送時の安全性の観点から、沿岸部（島嶼部や海底下を含む）を「より適性の高い地域」とするとの考え方が示された。また、地層処分の観点から沿岸部において期待される特性や留意事項が示され、今後の調査研究などへの取組について、具体的な検討を進めて行くことが重要であるとの指摘がなされた（地層処分技術 WG, 2015）。これらの指摘を受けて、経済産業省が設置した「沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会」においては、地層処分の物理的隔離機能に影響を与える可能性がある自然現象の一つとして火山・火成活動が考えられることが示され、処分事業における概要調査や精密調査の実施にあたってマグマ・深部流体などの有無を確認し、影響範囲を評価するための調査・評価技術の高度化が今後の課題の一つとして挙げられている（沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会, 2016）。

そのため本事業では、沿岸部におけるマグマや深部流体などの存否や分布を把握するための手法についての情報を整理するとともに、ここで抽出された課題への対応として、地球物理学的手法の高度化およびそれを補足する地球化学的手法について検討する。

2) マグマ・深部流体の発生・移動に関する科学的知見

日本列島のようなプレートの沈み込み帯におけるマグマやいわゆる深部流体は、海洋プレートが陸側のプレート下へ沈み込むことで地球内部に運ばれた水が、沈み込みに伴う温度・圧力の上昇によって、海洋プレートからマントルウェッジへ放出されることに起因すると考えられている（例えば、Tatsumi, 1989 ; Iwamori, 1998）。図 2.1-32 に沈み込み帯における流体の発生や上昇の概念図を示す。

日本列島では、海洋プレートである太平洋プレートやフィリピン海プレートが、北米プレート（オホーツクプレート）とユーラシアプレートの下へ沈み込んでいる。沈み込んだプレート（以下、スラブという）では、その温度と圧力の上昇に伴って、スラブを構成する含水鉱物が脱水反応を起こすことが知られている（例えば、Iwamori, 1998）。また、特に火山フロントよりも海溝側となる前弧域では、スラブ上面における堆積層からの間隙水の放出も生じるとも指摘されている（例えば、Hyndman and Peacock, 2003）。このように放出された水は、周囲との密度差により上昇してマントルウェッジへ移動し、マントル物質（カンラン岩）を蛇紋岩化させる。含水鉱物の脱水反応が生じる深さは、スラブの生成年代に起因する温度構造などに依存するため、太平洋スラブとフィリピン海スラブとで異なる。そのため、比較的古く

低温の太平洋スラブでの脱水深度は、若く高温であるフィリピン海スラブよりも深くなると考えられている。

スラブ起源の水が加わることによって蛇紋岩化したマントルは、東北日本の場合、スラブの沈み込みに引きずられ、さらに深部で再度脱水分解する。ここで放出された水はマントルウェッジ内を上昇する過程で部分溶融を引き起こしてメルトを生成させ、火山フロント直下でモホ面(モホロビッチ不連続面)まで達すると考えられている(例えば、Zhao et al., 1992; Nakajima et al., 2001; Hasegawa et al., 2007)。モホ面まで達したメルトは火山活動の原因となる。また、部分溶融を経ずに地表付近まで上昇するものは、深部流体の原因の一つと考えられている。これらの流体は、地殻物質を軟化させ、地殻内で非弾性変形を生じさせるとも考えられており、地殻内で発生する内陸地震は、このような構造不均質に伴う局所的な応力蓄積なども一因であると指摘されている(Iio et al., 2002; Hasegawa et al., 2007; 長谷川ほか, 2008)。また、このような構造不均質は、長期的には隆起山地の形成にも関与しているとも考えられている(例えば、梅田・浅森, 2016)。一方で西南日本では、東北日本に比べて浅部で脱水反応が生じるため、前弧域下のマントルウェッジ先端付近において流体の生成・上昇やマントル物質の蛇紋岩化が生じる可能性が指摘されている(例えば、Iwamori, 1998; Zhao et al., 2000; Kato et al., 2010)。このような流体の生成・上昇やマントル物質の蛇紋岩化は、プレート境界で発生するスロースリップや低周波地震の発生に寄与していることが示唆されている(Kodaira et al., 2004; Shelly et al., 2006; Kato et al., 2010)。なお、スラブ起源の深部流体が地表まで上昇する際は、地殻深部にまで達するような構造線や大断層が主な経路となることが指摘されている(産業技術総合研究所, 2007; 2012a)。さらに、前弧域に位置する紀伊半島に湧出する高温の温泉は、このような流体の上昇が関与しているとも指摘されている(例えば、西村, 2001)。

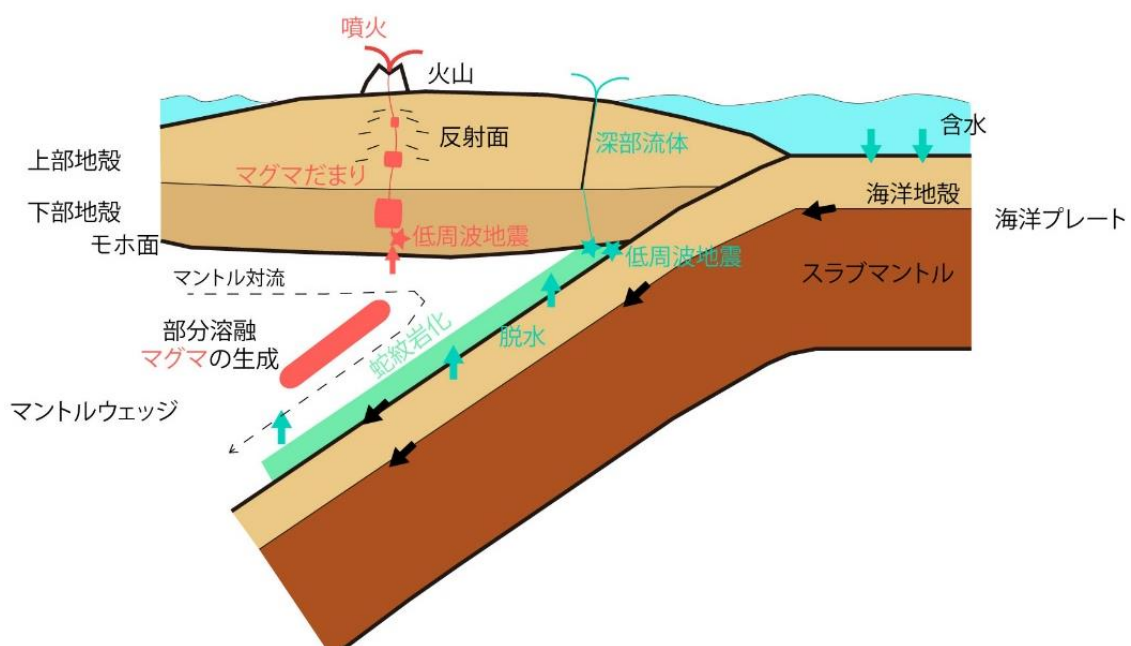


図 2.1-40 沈み込み帯における流体の発生・上昇に関する概念図

(2) 実施内容

1) 沿岸部における地球物理学的手法の適用性と課題の整理

① 地磁気・地電流および自然地震の観測に基づく地下深部構造の調査手法

地下深部（地殻および上部マントル）における流体の存否や分布などに関する調査・研究では、これまで、地震波トモグラフィや地磁気・地電流法（Magnetotelluric 法。以下、「MT 法」という）といった自然由来の現象（地磁気・地電流、自然地震）の観測に基づく手法が主要な方法として用いられてきた。このうち MT 法を用いてマグマや深部流体を検出した事例としては、例えば富士山周辺において、活火山に供給するマグマの存在を示唆する顕著な低比抵抗体が見出されている（Aizawa et al., 2004）。また、沿岸部海域においては、日本列島と同様にプレートの沈み込み帯に位置する中米コスタリカの海域から陸域にかけての領域を対象とした研究（Worzewski et al., 2011）によって、前弧域における海洋スラブからの脱水に起因する流体の存在が、海岸線直下の深さ 12~15 km に見出されている。なお、この事例では沿岸部海域での観測について、特に浅海域では波浪による観測装置の揺動によってノイズが生じ、観測データの品質を低下させることが指摘されている。しかしながら、これに対応した観測手法については、既に開発が進められている（例えば、産業技術総合研究所, 2013）。

一方で、地震波トモグラフィについては、陸域下の下部地殻や上部マントルに存在するマグマや深部流体が 20 km 程度より高い空間分解能で検出されている（例えば、Nakajima and Hasegawa, 2003）。ここで、マグマや深部流体の存在の有無を調べるためには、対象とするマグマや深部流体のスケールに対して同程度以上の分解能で地震波速度構造を推定する必要がある。そのため、これらと同様の手法を用いる場合は、対象とするマグマや深部流体の空間スケールと同程度以上の観測点間隔（観測点密度）で観測し、地震波速度構造の推定に十分な数の P 波、S 波初動到達時刻データを蓄積する必要がある。なお、対象とする地域の地震活動度によるが、一般にこれらのデータ蓄積には数年以上の観測期間を要する。

現時点において、陸域を対象として地震波トモグラフィを適用する場合は、Hi-net や大学などの約 20 km の観測点間隔の定常地震観測網を用いることができる。地殻やマントル最上部を対象として陸域の地下構造を推定する場合は、これと同程度の空間分解能を有する解析が可能である。一方で海域では、太平洋沖や南海トラフ沖に S-net や Do-net と呼ばれる海底ケーブルを用いた地震観測網が一部の地域において近年整備されている（例えば、金沢ほか, 2009）。しかしながら、これらの海域地震観測網は、高密度で観測点が展開されている領域においても観測点間隔が 30 km 程度より大きく、これまでに陸域で実施されている事例と同様の手法によって 20 km 程度の分解能で地下深部構造を推定することは難しい。また、地震波トモグラフィのように、自然地震の観測に基づく手法を適用する場合は、それらの解析の入力情報となる震源パラメータ（震源位置および発震時刻）が精度よく決定されている必要がある。そのため沿岸部では、陸域と海域の地震観測網を統合した解析によって震源パラメータを推定（震源決定）することが想定されるが、これを高い精度で行うためには海岸線付近を境として急激に厚くなる海域の堆積層（極めて地震波速度が遅い層）の存在を考慮する必要がある（Nakano et al., 2015）。また、一般に海域のように地震観測網の端部や外側で発生する地震の震源決定精度は、観測網の内部（内陸部）に比べて極めて低いため、地震波トモグラフィをはじめとした自然地震の観測データを用いる手法の解析精度もまた低下するといった課題がある（図 2.1-33）。

② 人工地震探査による地下深部構造の調査手法

既に述べたように、地下深部における流体の存否や分布などの推定には、自然地震を用いたトモグラフィによる地震波速度構造の推定が有効な手法の一つであると考えられる。しかし沿岸部においては、海域の地震観測網が陸域の地震観測網に比べて十分でないことによる分解能の低下、海域で発生する地震の震源決定精度の低下による解析精度の低下などが課題として挙げられる。これらの問題を解決する方策の一つとして、人工地震を用いた地震波速度構造の推定などを併用することも考えられる。ここでは、人工地震探査についての特徴と調査事例をまとめ、沿岸部における適用性について整理する。

(a) 人工地震探査の特徴

人工地震探査では、発振時刻や位置が既知であるため、対象とする場所の構造を高精度で調査することが可能である。また時空間的な偏りがある自然地震を用いた手法に比べると、短期間でデータを取得できるという利点がある。人工地震探査は、振源で放出されるエネルギーが自然地震に比べて小さく、また発振源が地表近傍に限られる。そのため、探査可能な深度が限られるという欠点もあるが、これまで火山の浅部構造を対象とした基盤構造の推定、マグマだまりや火道の構造の推定、高精度の震源決定を目的とした速度構造の推定などが行われてきた。

人工地震探査では、地表や海中に設置した人工振源から放出された地震波が地下の密度や地震波速度の異なる境界面で屈折・反射し、地表、海底等に設置された観測点で記録された地震波を用いる。振源としては、陸域ではダイナマイト発破やパイプロサイス、海域ではエアガン発振を用い、観測点としては、陸域の地震計、海域では海底地震計やハイドロフォンなどが用いられる。主な解析手法としては、屈折波の走時トモグラフィ解析、反射法解析が挙げられる。

このうち屈折波の走時トモグラフィ解析では、地震波の到達時刻を用い、地下の地震波速度構造から計算される理論走時と観測走時の差が最小になるような地震波速度構造を逆解析により推定する。これまで、火山直下の浅部（深さ 2~3 km 程度まで）に地震波高速度の領域が推定され、火山下の深部では低速度体が推定されている（例えば、Aoki et al., 2009 ; Tanaka et al., 2002 ; Nishi et al., 2002 ; 筒井, 2005 ; Paulatto et al., 2012 ; Heath et al., 2012）。

また、反射法解析では、地下の密度や地震波速度が異なる境界面で反射した地震波の振幅や速度を用い、地下の反射面の位置を推定する。共通反射点（CMP）重合という反射点が一一致するようなデータを足し合わせ反射波を強調させて反射断面を得る一般的な反射法解析のほかに、人工振源の導入が困難な場所でも観測点を設置できれば遠方震源に対する観測波形の中から自己相関関数を用いて重複反射成分を抽出して反射断面に相当する断面が得られる疑似反射記録法（筒井ほか, 2004）などが用いられる。これまで反射法解析により火山体内部の反射面の分布からマグマだまりの上面を推定した例（例えば、Matsumoto et al., 2012）や、疑似反射記録法により火山性流体に関連した反射波を捉えた例（例えば、筒井ほか, 2007）が報告されている。

以下では、人工地震探査によって陸域や沿岸域においてマグマの存在を明らかにした事例について述べる。

(b) 人工地震探査による調査事例

(i) 陸域での事例

国内では人工地震を用いた火山の構造探査が、文部科学省科学技術・学術審議会測地学分

科会による火山噴火予知計画において、1994 年以降継続的に行われてきた（文部科学省，2007）。これらの探査では、ダイナマイトによる発破を振源とし、稠密な臨時地震観測網（観測点間隔数 100 m 程度）によって観測されたデータを用いて、火山下浅部の詳細な地下構造が調べられてきた。

屈折波の走時トモグラフィ解析が適用された事例では、多くの活火山（例えば、浅間山、岩手山、雲仙火山）において、山体直下の浅部（深さ 2~3 km 程度まで）に高速度体が存在することが明らかにされた（例えば、Aoki et al., 2009 ; Tanaka et al., 2002 ; Nishi et al., 2002 ; 筒井, 2005）。これらの高速度体は、噴火活動に伴って貫入したマグマの固結領域であることと指摘されている（例えば、Aoki et al., 2009 ; 筒井, 2005）。このうち Aoki et al. (2009) では、2006 年に浅間山で行われた人工地震探査のデータ（薬量 250~300 kg のダイナマイト発破を 5 か所で行い、150 m 間隔で設置した 464 個の地震計で観測したデータ）を用いて三次元のトモグラフィ解析を行い、深さ 5 km 程度までの P 波速度構造を 1 km 程度の分解能で推定した。その結果、浅間山の西側 4 km、深さ 2 km 付近に貫入したマグマの固結領域を示唆する高速度体が存在することを示した。また、地震活動の震源分布（Takeo et al., 2006）や比抵抗分布（Aizawa et al., 2008）などとの比較から 2004 年の噴火に至ったマグマの上昇経路を推定している。また浅間山では常時微動を用いて表面波の位相速度から火山下の S 波速度構造を調べる研究も行われており、Nagaoka et al. (2012) では Aoki et al. (2009) で推定された高速度体の下の深さ 5~10 km 付近にマグマだまりの存在を示唆する低速度体が存在することを示している。

火山下の深部構造を調べた例も事例は限られるが存在する。筒井ほか (2007) では 2003 年に富士山で行われた人工地震探査のデータ（薬量 500 kg のダイナマイト発破を 5 箇所で行い、山頂部 100 m、山頂部以外 250 m 間隔で設置した 468 個の地震計で観測したデータ）を用いて、疑似反射記録法により富士山直下の深さ 13 km および 16 km 付近に反射面を検出した。この反射面は自然地震を用いたトモグラフィによって推定された低速度体に対応し、この領域では超臨界状態の水などの流体の存在が示唆されていることから（Nakamichi et al., 2007）、検出した反射面は流体が存在する場所の上面や下面の密度境界であると指摘している。低速度体の周囲では低周波地震が発生しており（Nakamichi et al., 2004）、低速度体の深部（深さ 20 km 以深）に低比抵抗領域の存在が示されていることから（Aizawa et al., 2004）、筒井ほか (2007) では検出した反射面が火山性流体の存在と関連していると指摘している。

また、国外での事例の一つとして、アメリカの北西部オレゴン州に位置するニューベリー（Newberry）火山で 2008 年に行われた人工地震探査が挙げられる（Heath et al., 2012）。この探査では、1 トンのダイナマイトによる発破を振源とし、全長約 40 km の測線において、山腹や山頂周辺で 300 m 間隔、それ以外は 800 m 間隔で 81 個の観測点を設置して行われた。人工地震探査で得られた P 波到達時刻と遠地地震の P 波到達時間差について、合わせて 1,006 個のデータを用いてトモグラフィ解析が行われ、火山下 8 km 程度までの P 波速度構造が、水平方向数 100 m 程度、深さ方向 1 km 程度の分解能で推定されている。その結果、火山下の深さ 3~5 km 付近にマグマだまりの存在を示唆する低速度体が推定された。

(ii) 沿岸域での事例

沿岸部や島嶼部において OBSIP（Ocean Bottom Seismograph Instrument Pool）と呼ばれる海底地震計（OBS）の共用設備を利用した地下構造探査が行われており、その中で火山下の地下構造を対象とした探査も行われている。火山下のマグマの存在を明らかにした事例は限られるが、ここではモントセラト（Montserrat）の例を紹介する。

モントセラト（Montserrat）はカリブ海の小アンティル諸島に位置する火山島であり、2007

年に人工地震探査が行われた。この探査では、10個の海底地震計と244個の陸域地震計が設置され、振源として総容量2600 cubic inch (42.61 L)のエアガンレイによる発振が用いられ、モントセラト島の周囲を巡るようにして約140 m 間隔で4,414回の発破が行われた。181,665個の屈折波の初動走時を用いて三次元のトモグラフィ解析が行われた結果、深さ約7.5 km 程度までのP波速度構造が推定された (Paulatto et al., 2012)。分解能としては、深さ方向に2~4 km 程度、水平方向に4~8 km 程度である。トモグラフィの結果からスーフリエールヒル火山やその他の火山下の約4 km 以浅では高速度体が推定され、またスーフリエールヒル火山下の深さ5.5 km から少なくとも7.5 km の領域にかけて低速度体が推定された。スーフリエールヒル火山下深部の低速度体については高温のマグマだまりの存在を、浅部の高速度体についてはマグマだまりから貫入したマグマの固結領域の存在を示唆すると指摘されている。

(c) 人工地震探査の沿岸部における適用性

人工地震探査の特徴や調査事例をまとめると、人工地震探査の探査可能な深度については、測線の長さや人工振源の放出するエネルギーに依存するが、陸域や沿岸部において深さ10 km 程度までと考えられる。プレート沈み込み帯を対象とした事例では、総容量12000 cubic inch (197 L)の大容量のエアガンを用いて深さ数十 km までの地下構造を推定した例が報告されているが (例えば、Kodaira et al., 2004 ; Kodaira et al., 2006)、深さ10 km 以深のマグマだまりを検出した事例は報告されていない。分解能については数 km と自然地震探査より高く、精度についても発振時刻や位置が既知であるため高い精度が期待される。また沿岸部においてもエアガンや海底地震計などを用いて陸域と同程度の分解能や精度での観測は可能である。しかしながら、深さ10 km よりも深い地下構造については、人工地震探査のみを用いて推定することは困難である。深さ10 km よりも深部に存在するマグマや深部流体の存否や分布を調べるには自然地震の観測に基づく手法等を併用する必要がある。

③ 既存の調査手法に関する整理 (まとめ)

表 2.1-8 には、マグマや深部流体に関する地球物理学的手法として、上述のMT法や地震波トモグラフィのほか、レシーバ関数解析やS波反射面解析などについて、沿岸部への適用性や課題を示す。これらの手法の多くは自然地震の観測データを用いるため、高い精度で解析を行うためには、定常観測網の外側となる海域での震源決定精度の向上が重要となる。このような課題への対応の一つとして、人工地震探査の併用が考えられる。しかしながら、これまでの適用事例などからみると、探査可能な深度がおよそ10 km 程度である。大容量のエアガンを用いることで深さ10 km 以深の地殻中部に存在するマグマだまりを検出できる可能性はあるが、現状ではそのような事例は報告されていない。

また、陸域または海域のどちらを対象とするかにかかわらず、一般に複数の手法によって得られた情報が整合的であることはその結果の信頼性が高いことを示し、マグマおよび高温流体などの存在やその分布を評価する上で重要である。しかしながら、実際には必ずしもすべてが一致するとは限らず、例えばMT法と地震波トモグラフィによって得られた地下構造のイメージが異なる場合もある。これは、それぞれの手法によって推定される物性値 (比抵抗構造、地震波速度構造) が異なった要因に依存することに加え、部分的な精度の低下や分解能の差といった観測・解析に関する不確実性に起因すると考えられる。そのため、このような手法を適用する場合は、それぞれの解析結果の信頼性を分解能テストなど (例えば、Zhao et al., 1992 ; Ichihara et al., 2011) によって評価することも必要であるが、これらの地球物理学的

情報に加えて地球化学などの他分野の情報を組み合わせ、総合的に検討することも重要であると考えられる。

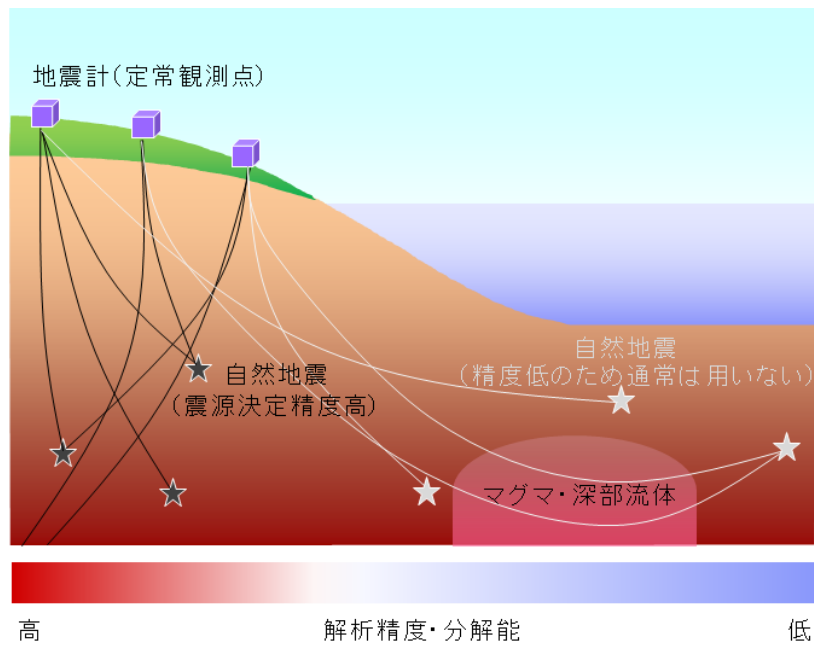


図 2.1-41 沿岸部での自然地震観測による地下構造の推定に関する模式図

表 2.1-9 マグマや深部流体に関する地球物理学的手法の概要

手法	得られるパラメータ	探査深度	空間分解能・決定精度	マグマ・深部流体に対する情報	沿岸部への適用性と課題
地震波トモグラフィ	P波・S波速度分布 (二次元、三次元)	震源深さと同程度 (～数百km)	分解能:観測点間隔と同程度 (国内陸域では20～30 km程度)	流体分布域:地震波低速度, 高ポアソン比 高温領域:地震波低速度	<ul style="list-style-type: none"> ・定常地震観測網の外側(沿岸部海域)では震源決定精度が低下 ・そのため、陸域と同程度の信頼性を有する解析は困難
MT法 (地磁気・地電流法)	比抵抗分布 (二次元、三次元)	観測周波数に依存 (～百数十km)	分解能:観測点間隔に依存するが、 深部ほど分解能低下 (地殻深部で10～20km程度)	流体分布域:低比抵抗	<ul style="list-style-type: none"> ・浅海域での観測では波浪によりノイズが混入するため、装置の揺動を低減可能な観測機を用いることが重要
レシーバ関数解析	Ps変換面深さ (分布)	地殻, 上部マントル (～百数十km)	分解能:観測点間隔と同程度	流体分布域:境界面深さ	<ul style="list-style-type: none"> ・沿岸部海域の多くは定常地震観測網の外側に位置するため、解析は困難
S波反射面解析	反射面の位置・ 傾斜・方位角	地殻内	位置決定精度(陸域):数km	流体分布域:上面深さ	<ul style="list-style-type: none"> ・定常地震観測網の外側(沿岸部海域)では震源決定精度が低下 ・そのため、陸域と同程度の信頼性を有する解析は困難
低周波地震震源決定	震源位置(分布)	地殻内, マントル最上部	位置決定精度(陸域):数km	流体分布域の存在: 流体分布域の端部で発生する傾向	<ul style="list-style-type: none"> ・定常地震観測網の外側(沿岸部海域)では震源決定精度が低下
地殻熱流量 地温勾配測定	地表付近での熱的 情報	地殻内	分解能:観測点間隔と同程度	高温領域の存否	<ul style="list-style-type: none"> ・陸域と同程度の測定が可能
地震発生層解析	地震発生層の 下面深さ分布	地殻内	深さ決定精度(陸域):数km	高温領域:周辺に比べて下面深度が浅い領域	<ul style="list-style-type: none"> ・定常地震観測網の外側(沿岸部海域)では震源決定精度が低下 ・そのため、陸域と同程度の信頼性を有する解析は困難
地震波トモグラフィ (人工地震探査)	P波速度分布 (二次元、三次元)	深さ10km程度	分解能:浅部(数km)は観測点間隔 と同程度。深部ほど分解能が低下	流体分布域:地震波低速度 高温領域:地震波低速度	<ul style="list-style-type: none"> ・陸域と同程度の測定が可能だが、探査深度が深さ10 km程度までに限られる。

2) 沿岸部における調査手法の高度化に関する検討

① 自然地震の観測に基づく手法に関する検討

既に述べたように、沿岸部に対して自然地震の観測データを用いた手法を適用する場合は、定常観測網の外側となる海域で発生した地震の震源決定精度を向上させることが重要となる。本事業では、マグマや深部流体の有無や分布を把握するための主要な手法の一つと考えられる地震波トモグラフィについて、この問題点を改善するため、堆積層などの層厚分布を考慮した震源再決定を試行し、解析手法の妥当性について検討した。

自然地震データを用いた地震波トモグラフィは、地震の発生に伴って震源から地表の地震観測点に伝播する地震波の観測データを多量に使い、多数の三次元ブロックまたは格子点によって表現された解析対象領域内の地震波速度構造をインバージョンによって推定する手法である。しかし、この技術の汎用性や適用性といった観点でみた場合は、主に二つの課題が挙げられる。一つ目の課題は、解析精度の向上（不確実性の低減）である。日本列島には、地震波速度が極めて遅い堆積層などが場所によって大きく異なる厚さ（～数千 m）をもって分布しているが、従来の方法ではこれらの詳細な分布が考慮されていない。この場合、波線追跡と呼ばれる数値解析によって計算される地殻内の地震波伝播経路（理論波線）や伝播に要した時間（理論走時）が実際と大きくずれてしまう。そのため、このような領域を対象として震源決定を行った場合、実際とは大きくずれた位置に震源が推定されてしまうことが想定される。地震波トモグラフィを含め、自然地震の観測に基づく手法（S波反射面解析、低周波地震分布、地震発生層の深さ分布）では、このように推定される震源パラメータが、それぞれの解析の入力情報となる。そのため、このような領域に対して地震波トモグラフィを適用した場合は、結果として地殻構造のイメージには偽像が生じてしまうことが想定される。また、二つ目の課題は、空間分解能の向上である。通常よく用いられる地震波トモグラフィでは、地表における地震観測点の間隔に比べて高い空間分解能で地殻構造を推定することができない。特に、定常的な地震観測点が展開されていない海域においては、この課題への対応も重要となる。

図 2.1-34 に、深部地盤構造モデル（防災科学技術研究所編, 2009）として取りまとめられている地震基盤面およびそれ以浅の地震波速度モデル（地震波速度境界の深さ分布）を示す。これらは、日本列島各地において実施された深層試錐調査や人工地震探査（反射法、屈折法）のほか、微動探査、重力異常、地質構造などに係わる情報をコンパイルすることによって、強震動予測を行うために構築されたモデルである。そのため、少なくとも深さ数 km 以浅の領域における三次元的な地震波速度モデルとしては、極めて精度の高い情報であると言える。これによると、西南日本における深さ数千 m までの地震波速度構造は比較的均質な傾向を示すが、東北日本においては火山地域や平野部において地震波速度が遅い層が分布する。また、北海道では、その中軸部を境に大きく構造が変化している。さらに、このような大きな構造の変化は日本列島の沿岸部で広くみられ、海岸線を境に、海側では地震波速度が極めて遅い堆積層が厚く覆っている。そのため、特に沿岸部海域で発生する地震の震源分布を高い精度で推定する場合は、先に述べた震源決定などの解析で用いられる波線追跡に、これらの詳細な地震波速度モデルを考慮することが望ましい。以下では、地下深部にマグマの存在が想定される利尻火山が位置し、かつ堆積層の層厚変化が著しい北海道北西部における陸域・海域を含む領域を事例とした震源決定について述べる。

一般に、地震の震源決定においては、震源パラメータを未知数とし、地下の一次元地震波速度構造を仮定して計算される理論走時と観測走時の差が最小となる震源パラメータをインバージョン（逆解析）によって推定する。そのため、仮定する地震波速度構造が実際のそれと大きく乖離している場合は、震源が誤った位置に推定されてしまうこととなる（図 2.1-35）。震源分布を正確に推定するためには、上部地殻や下部地殻に比べて極めて地震波速度が遅い堆

積層の存在を考慮することが重要となるが、先に述べたようにその厚さは局所的に大きく異なる。従来、理論走時の計算には観測点補正値の適用により擬似的にその影響を補正する方法や、震源パラメータとともに地震波速度構造も同時決定する方法が採られてきたが、堆積層の複雑な分布を理論走時の計算へ直接的に考慮した例はほとんど無い。ここでは、直達波の理論走時計算に対するこれらの影響の考慮 (Asamori and Zhao, 2015) に加えて、屈折波に対しても同様の影響を考慮した。

震源決定に用いた地震データは、2002年6月から2016年12月までの期間に発生し、気象庁一元化検測値データに掲載される3,960個の浅発地震である(図2.1-36)。震源決定においては、まずグリッド・サーチによって震源決定を行った後に、最小二乗法による震源再決定を行った。また、これらの震源再決定における理論走時の計算にあたっては、Zhao et al. (1992) による三次元高速波線追跡に、先に述べた深部地盤構造モデルを地震波速度境界(図2.1-34)として考慮した。なお、この地震波速度境界の精度は数十~数百 m オーダーであることから(防災科学技術研究所, 2009)、従来に比べて高い精度で理論走時を計算することができると期待される。

本解析に適用した地震波速度境界のうち、最深層の下面に相当する地震基盤面(P波速度5.0 km/s~6.0 km/s およびS波速度2.5 km/s~3.5 km/s の速度境界)について、解析領域周辺における深さ分布を図2.1-37に示す。これによれば、定常地震観測網が展開されている陸域の西部および海域においては極めて地震波速度が遅い層が厚く分布する。一方で、その東側においてはほとんど存在せず、地点によりその深度は数千 m の差がみられる。このため、本領域を対象とした震源決定において堆積層の分布を考慮しない場合、単純には、実際の震源位置よりも東側深部に誤って決定されてしまうと想定される。

上述の震源再決定により得られた震源分布を、気象庁でのルーチン処理によって決定された震源(以下、初期震源)分布とともに図2.1-38に示す。震源再決定前の震源は、その37%がうまく決定されておらず震源深さの誤差が評価されていないが、それ以外の震源の深さの誤差は平均2.75 kmであった。これに対して震源再決定後は、91%の地震が深さの誤差3.0 km以下で決定され、その平均は1.15 kmに減少した。また、震源再決定後の震源は、初期震源に比べて全体的に西側へシフトし、浅い位置に分布する傾向がみられる(図2.1-38)。前述のように、この傾向は定常地震観測網の西部および海域のみに堆積層が厚く分布することに起因すると考えられる。

また、図2.1-39には、解析領域北部に分布する活断層であるサロベツ断層帯について、その海域延長部(阿部ほか, 2013)の走向と直交する断面での震源分布を示す。サロベツ断層帯海域延長部(抜海沖活動セグメント)は、20° Eの傾斜を持つ全長約49 kmの活断層とされ、平均変位速度は1.0 m/千年と見積られている(産業技術総合研究所, 2012b)。図2.1-39に示す震源再決定前後の震源分布によると、初期震源は比較的ばらついた分布をしている。これに対して、震源再決定後においては、東に傾斜する震源の集中域が認められ、その地表延長部は活断層トレースのやや東方に位置する。地表付近における活断層の傾斜は低角であると推定されていることから、震源再決定によって推定された震源分布は、活断層の深部延長部における活動を示唆している可能性が考えられる。

以上の成果は、マグマや深部流体の有無や分布を把握するために必要となる自然地震の震源情報について、その決定精度を向上させるためには、堆積層の分布を考慮した震源決定が有効であることを示唆する。また、堆積層の層厚が急変し、かつ定常地震観測網の端部に位置する沿岸部においては特に有効であると考えられる。

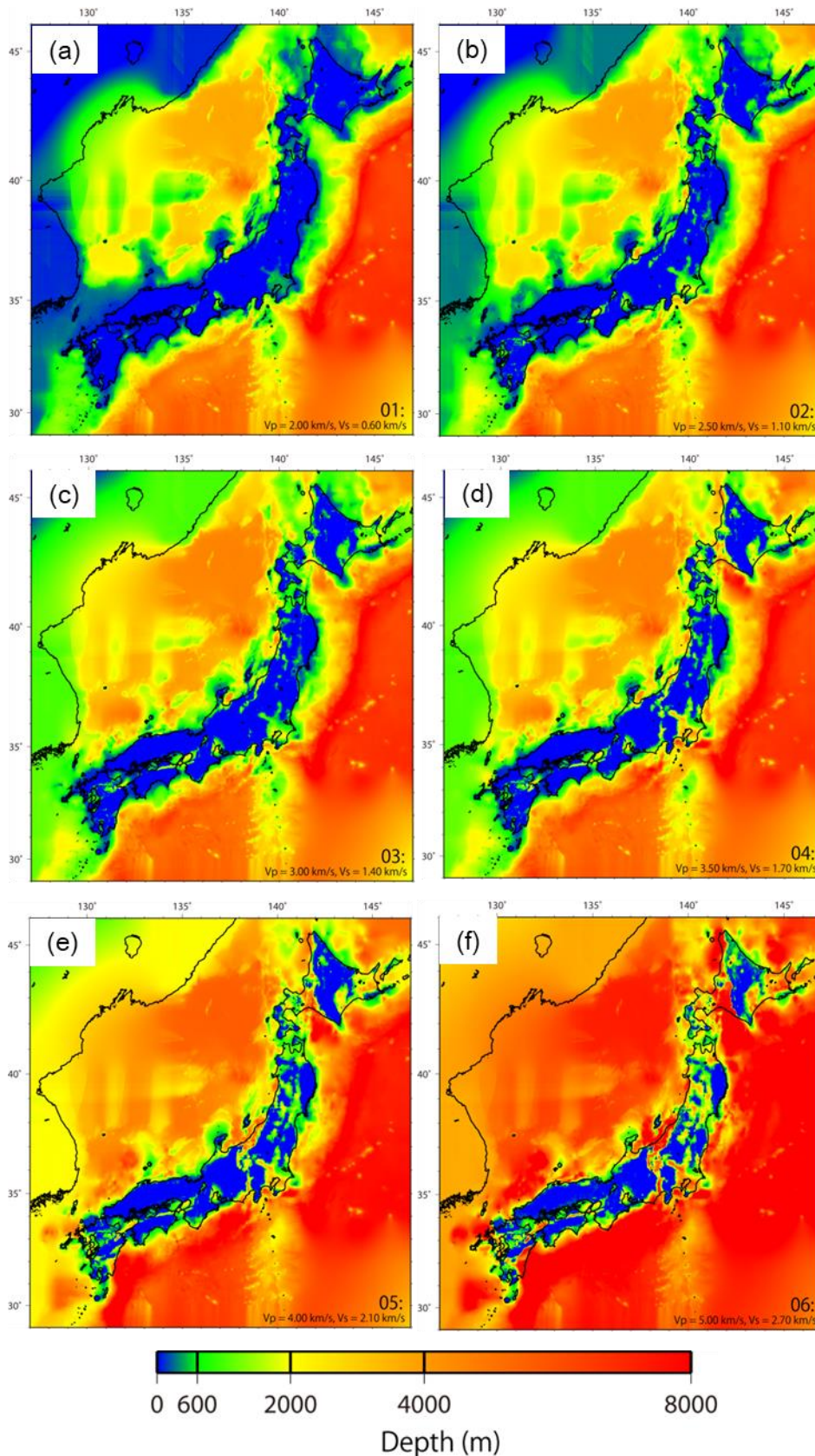


図 2.1-42 各地震波速度（各図右下）層の下面深度分布

（深部地盤構造モデル（防災科学技術研究所, 2009）をもとに作成）

(a) - (f)は、それぞれ P 波速度が 2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、5.0 km/s の層の下面深度を示す。

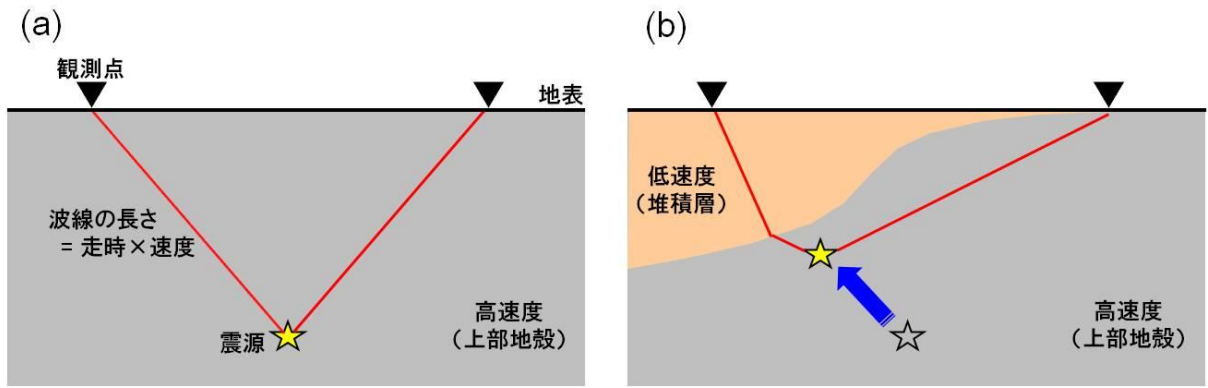


図 2.1-43 (a) 堆積層を考慮しない場合、(b) 堆積層を考慮した場合における震源決定の概念図

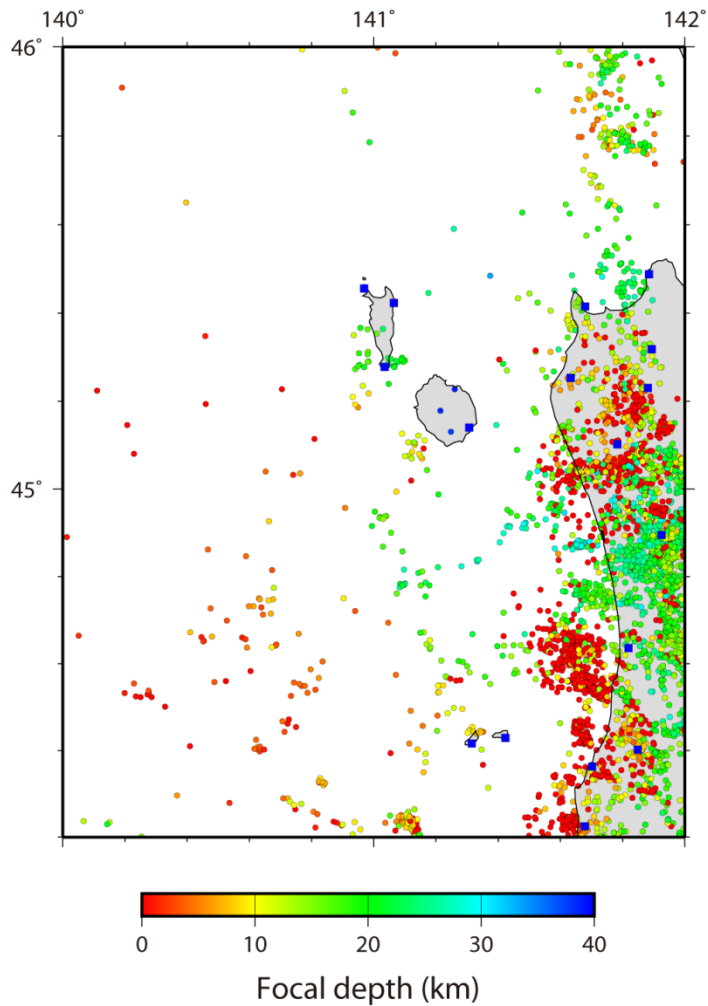


図 2.1-44 解析領域における初期震源の震央分布 (○) および地震観測点 (□) の分布

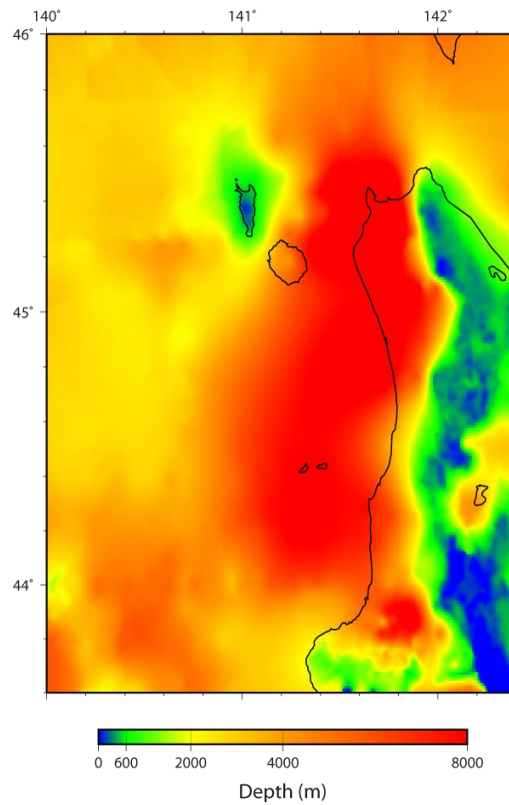


図 2.1-45 解析領域周辺における地震基盤深度の深さ分布

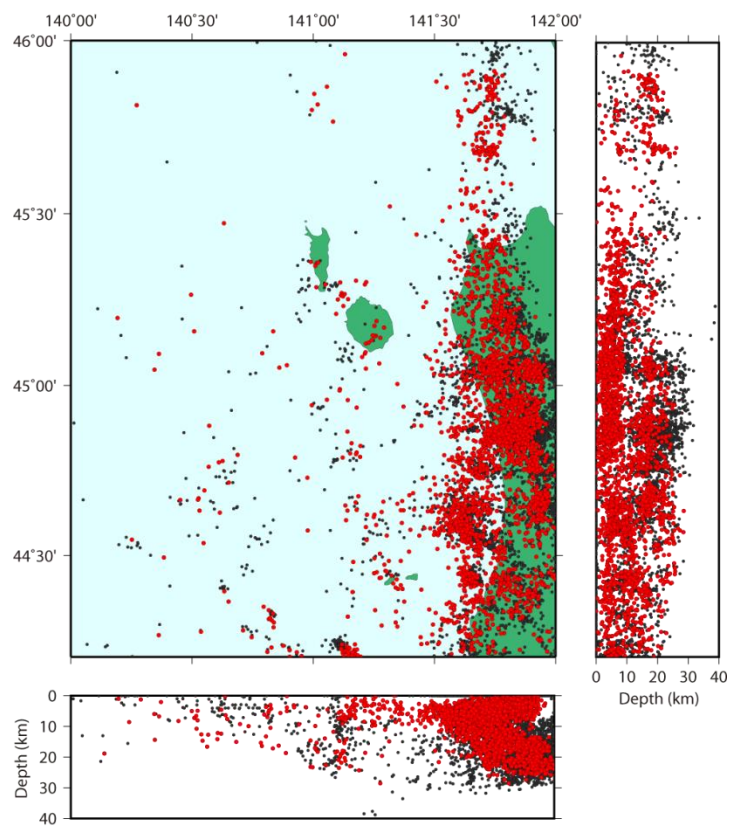


図 2.1-46 初期震源の震央分布（黒丸）および震源再決定後の震源（赤丸）の分布

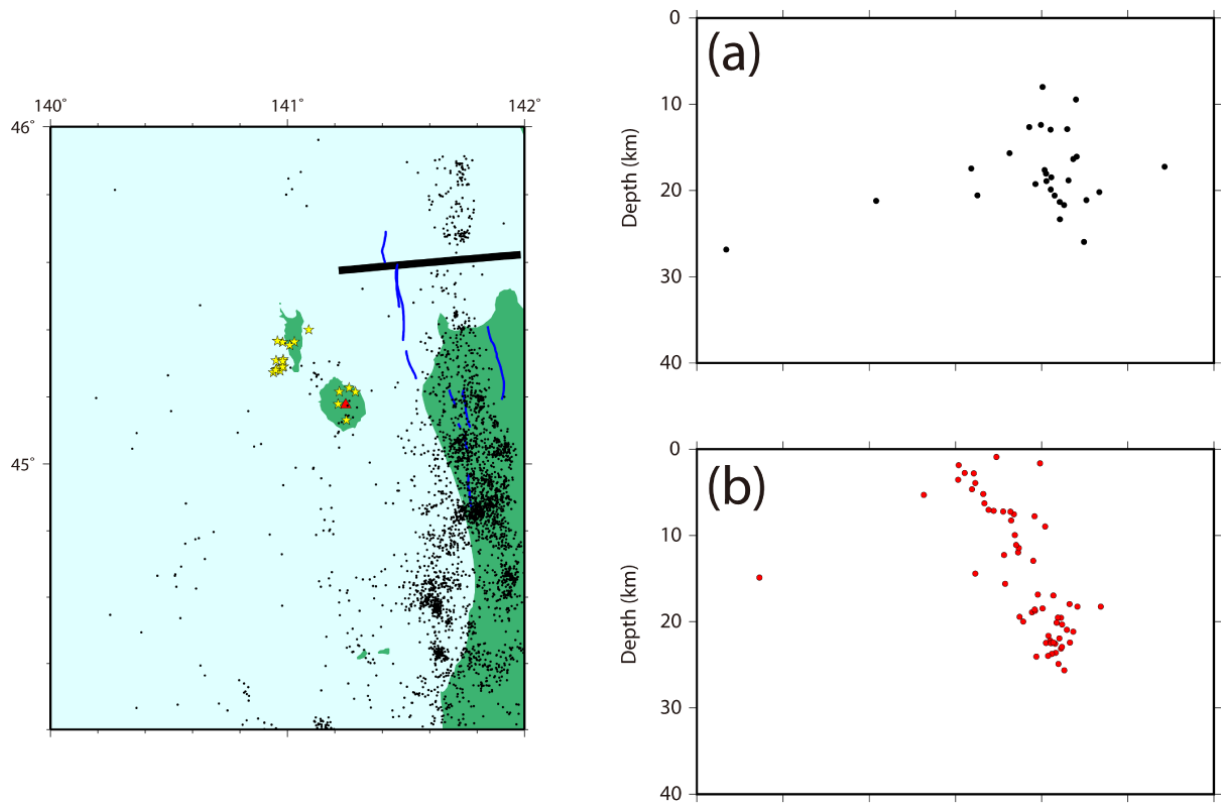


図 2.1-47 サロベツ断層帯海域延長部を横切る断面（左図黒線）における(a) 初期震源の震央分布および(b) 震源再決定後の震源の分布

② 地球化学的手法に関する検討

既に述べたように、沿岸部において地球物理学的手法を適用する場合は、その観測環境などに起因して取得可能な情報が限られるほか、地下深部の構造に関する情報の精度や空間分解能が内陸部を対象とした場合に比べて劣ることも想定しうる。そのため、マグマや深部流体に関するこれら以外の情報も取得して相補的に用いることで、その存否や分布を総合的に検討することが、沿岸部においては特に重要と考えられる。ここでは、これまでの調査・研究でマグマや深部流体の存否に関連する地球化学的な指標の一つとして用いられてきたヘリウム同位体比 ($^3\text{He}/^4\text{He}$ 比) について、その情報を整理した。さらに、日本列島全域で観測されている地下水や遊離ガスのヘリウム同位体比のデータを用いて、地球物理学的情報 (地震波速度構造、地温勾配分布、低周波地震分布) と比較することによって、それらの広域的な関連性のほか、沿岸部への適用について検討した。

(a) 希ガス同位体を用いた地下深部のマグマなどの検出の可能性

不活性ガスであるヘリウムは、地殻中での化学反応を生じにくいことから地下深部の化学的な情報を得るための重要な指標の一つである。特にヘリウム同位体比 ($^3\text{He}/^4\text{He}$ 比) は、大気・地殻・マントルで大きく異なることから、地下から放出されるガスの起源を推定するための重要な手段と考えられている。一般に、ヘリウム同位体比は、火山フロントから背弧側では MORB (中央海嶺玄武岩) の値 ($\sim 8 R_A$; $R_A = 1.4 \times 10^{-6}$) に近く、前弧域では大気や地殻物質の寄与を示すような低い値が報告されている。火山周辺で観測されるガスや温泉水のヘリウム同位体比は、中央火口ほど高く、山体から離れるにしたがって低い値を示す (Sano et al., 1984)。これは、上部マントルを起源とするマグマがマントルの初生的なヘリウムを地殻まで運搬し、火山ガスや温泉として地表にもたらしたものと考えられている。以上のことから、温泉ガスなどに含まれるヘリウム同位体比は、地下深部にマグマが存在する可能性を示唆する指標の一つに挙げられる。活動的な火山において、火山ガスや周辺の温泉ガスなどに含まれるヘリウム同位体比を測定した例は数多い。しかしながら、火山地域以外において希ガス同位体を用いてマグマの存在の可能性を指摘した研究例はほとんどなく、紀伊半島 (Wakita et al., 1987)、飯豊山地 (Umeda et al., 2007) のみである。紀伊半島の温泉ガスの高いヘリウム同位体比の原因については、その後の研究によって紀伊半島下に沈み込むスラブ起源の深部流体がマントルヘリウムを地下浅所にもたらしたと考えられている (例えば、Matsumoto et al., 2003; Umeda et al., 2006a)。また、Umeda et al. (2007) は、飯豊山地周辺に分布する温泉井から遊離ガスを採取し、ヘリウムの同位体を測定した。測定した多くのガスのヘリウム同位体比は、島弧の火山ガスに含まれるヘリウム同位体比と同程度 (島弧の火山ガスのヘリウム同位体比の平均値は $5.1 R_A$ である) あるいはそれより高い値であった。さらに、飯豊山地の北股岳近傍の飯豊温泉のヘリウム同位体比が最も高く ($7.9 R_A$) マントルの値に匹敵するものの、そこから離れるにしたがって同位体比の値は顕著に低下する傾向を見出している。一般に、地下水中のヘリウム同位体比は、大気成分、地殻成分の混合比によって決まるが、大気を超えてはマントル成分の混入によって説明できる。このため、北股岳の下にはマントル起源物質の供給源が存在し、天水起源の地下水に一定の割合で混入していることを示唆すると指摘されている。

一方、飯豊山地およびその周辺では地磁気・地電流観測が行なわれており、上記の北股岳の地下 10 km 以深にはマントル最上部に延びる低比抵抗を示す領域が推定されている (Umeda et al., 2006b)。この地球物理学的特徴と高いヘリウム同位体比を示す地球化学的な情報は空間的に整合しており、それを引き起こす物質は、北股岳の地下 10 km 以深に存在していると指摘されている。この物質はマントル起源のマグマ、あるいはマグマの一部固化したものの

から放出された熱水と考えられている。以上の事例から、温泉ガスなどに含まれるヘリウム同位体比は、マグマや深部流体の存否を検討する上で、有効な情報を与えることができると考えられる。

(b) 地球物理学的情報との関連性と沿岸部における適用性の検討

一般に、地下水井や温泉井から採取された試料から得られるヘリウム同位体比は、それぞれの採取地点におけるローカルな地質構造の違いや試料の採取環境などによって変わり得ることなどから、広域的な分布傾向を議論する場合は、しばしばその最大値が用いられる（例えば、Sano and Wakita, 1985）。そのため、ここでは日本列島全域を $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ のブロックに分割した上で、それぞれのブロック内におけるヘリウム同位体比の最大値を代表値とすることで、その広域的な分布傾向を示し（図 2.1-40）、それぞれの地球物理学的情報との比較を行った。なお、解析にはヘリウム同位体比の観測値 ($R = {}^3\text{He}/{}^4\text{He}$) を大気のものである ($R_A = 1.4 \times 10^{-6}$) を用いて規格化した値を用いた。これによると、大気のヘリウム同位体比よりも高い値は、火山フロントおよびその背弧側に分布する傾向が認められ、島弧の火成活動に関連したマントル起源ヘリウムの供給を示唆している。一方で、第四紀火山が分布しない前弧域においては、火山地域でみられるような高い値 ($R/R_A \sim 8.0$) はほとんど認められないものの、紀伊半島では大気の 4 倍程度の値を示す領域が広域的に分布する。また、その他の前弧域では、これらに比べてさらに低いものの、大気の 2 倍程度の値を示す領域が太平洋沿岸部を含めて点在する。

比較の対象とした地球物理学的情報のうち地震波速度構造については、日本列島全域を対象とした地震波トモグラフィによって推定された $d\ln V_s/d\ln V_p$ 構造 (Asamori and Zhao, 2015) を用いた。一般に、地殻や上部マントルにおいてメルトや水といった流体が存在する場合、地震波トモグラフィによって推定される P 波速度偏差 ($d\ln V_p$) および S 波速度偏差 ($d\ln V_s$) (標準的な地震波速度からの偏差) は、ともに負の値 (低速度) を示す。これらの速度偏差から計算できる $d\ln V_s/d\ln V_p$ は、岩石中に含まれる流体の種類や間隙の形態などによって変化するパラメータである (Takei, 2002)。しかしながら、P 波および S 波の速度偏差は、互いに独立した解析によって推定されるため、それぞれが有する精度や信頼性は互いに異なる。そのため、両者の詳細なイメージを比較すると、細部で異なることも少なくない。図 2.1-41 に示す深さ 25 km および 40 km の $d\ln V_s/d\ln V_p$ 分布は、P 波と S 波の速度偏差がともに負の値 (低速度) を示す領域に対してのみ推定されているものであり、広域的な流体の存在や分布傾向を議論する上では、P 波、S 波それぞれの地震波速度構造を別個に用いるよりも信頼性が高いと考えられる。すなわち、図 2.1-41 において着色されている領域は、P 波速度と S 波速度がともに低速度を表し、簡単には流体 (メルト、水) の存在を示唆することとなる。これによると、下部地殻およびマントル最上部に相当する深さ (深さ 25 km および 40 km) では、主に火山フロントやその背弧側において流体の存在を示唆する地震波低速度の領域が認められている。また、深さ 40 km におけるそれらの $d\ln V_s/d\ln V_p$ が主に 1.0 以上であることに対して深さ 25 km では 1.0 以下を示すことは、平衡構造モデル (Takei, 2002) と呼ばれる岩石中の間隙形態を仮定した場合、浅くなるにつれて間隙を満たす流体がメルトから水に遷移している傾向を示唆する。この $d\ln V_s/d\ln V_p$ 分布とヘリウム同位体比の最大値分布 (図 2.1-40) によると、大局的な傾向としては、主として火山地域において大気よりも高いヘリウム同位体比が得られている領域では、地震波速度構造からも地下深部にマントル起源の流体の存在が示唆される。しかしながら、詳細な領域についてみると、例えば紀伊半島などのように、両者の関係性が認められない地域もみられる。今回の解析に用いた地震波速度構造の空間分解能は、水平方向におよそ 33 km である。そのため、地震波速度構造などの地下

物性値分布に関する情報と地球化学的情報との関連性を明確に示すためには、より空間分解能の高い解析を適用することが必要である。

一般に、地下深部のマグマは、その周辺に比べて高温である。また、非火山地域における深部流体の湧出が関与するとも考えられている有馬温泉や紀伊半島などでは、沸騰温度に近い温泉水が湧出する（例えば、産業技術総合研究所, 2012a ; 西村, 2001）。そのため、マグマや深部流体の存否を検討する際は、地殻内の温度構造に関する情報も、有効な手掛かりの一つとなりうる。そのため、ここでは「日本列島及びその周辺域の地温勾配及び地殻熱流量データベース」（産業技術総合研究所, 2004）に取りまとめられた地温勾配データを用いた。また、ヘリウム同位体比との比較にあたっては、前述したヘリウム同位体比に対する処理と同様に、日本列島全域を $0.2^{\circ} \times 0.2^{\circ}$ のブロックに分割した上で、それぞれのブロック内における地温勾配の最大値を代表値とし、その広域的な分布傾向を示すデータとした（図 2.1-42）。これによると、大局的には第四紀火山周辺で高い地温勾配が認められ、これらは火山下の高温領域の存在を示唆する。また、前述した深部流体の湧出が示唆されている紀伊半島などでも一部に高い地温勾配が認められるが、その他の非火山地域では顕著に高い地温勾配を示す領域はほとんど認められない。解析では、各ブロックにおけるヘリウム同位体比と地温勾配の最大値について、両者の関連性を検討した（図 2.1-43）。これによると、およそ 100 K/km 以上の地温勾配を示す領域のほとんどでは、大気よりも高いヘリウム同位体比が得られており、両者の関連性が認められる。ただし、比較的低い地温勾配であるにもかかわらず、大気よりも顕著に高いヘリウム同位体比を示す領域も多数認められる。

低周波地震（または、低周波イベント）は、その発生に伴って観測される地震波形の特性によって、低周波微小地震（例えば、Hasegawa and Yamamoto, 1994）や低周波微動（例えば、Obara, 2002）に分けられる。このうち前者は、火山地域の周辺においてよく検知されるが、後者は主に西南日本に沈み込むフィリピン海スラブの上面付近で発生していることが知られている。いずれの低周波地震もモホ面付近の深さに見られることが多いが、その発生には流体の存在が関与していると推定されている。また、低周波微小地震の震源は、地震波トモグラフィなどによって推定された流体分布域の端部に位置するとの傾向が報告されており（例えば、Nakajima and Hasegawa, 2003 ; Hasegawa et al., 2005）、マグマや深部流体の存在に関する情報を与えることができると考えられる。今回の解析に用いたデータは、防災科学技術研究所によって公開されている気象庁一元化検測値データに掲載される 2002 年 6 月から 2016 年 12 月までに発生した 46,987 個の低周波地震である（図 2.1-44）。解析では、図 2.1-40 に示すヘリウム同位体比の試料採取地点から最も近い位置で発生した低周波地震の震央までの距離を計算することにより、両者の関連性について検討した（図 2.1-45）。これによると、顕著に高いヘリウム同位体比が得られている領域は、低周波地震の発生域周辺に多く分布しているといった定性的な傾向が認められる。しかしながら、低周波地震の発生域近傍においても低いヘリウム同位体比を示す領域も多くみられ、両者の定量的な関連性を見出すことはできない。

以上の結果より、これらの地球化学的情報と地球物理学的情報との相関性を広域的な空間スケールで見た場合、定量的な傾向を見出すことは困難であるものの、定性的には関連性が認められた。このことは、地球化学的情報の一つとして、ヘリウム同位体比を用いることが有効であることを示唆する。

ヘリウム同位体比の情報をマグマや深部流体の存否の検討に用いる場合は、特に対象とする領域内の最大値に着目することとなると考えられる。しかしながら、沿岸部海域においてこれを得ようとする場合、対象とする領域内に多数の坑井を掘削して試料採取を行うことは、陸域において同様の調査を行う場合に比べて容易ではないことも想定される。図 2.1-46(a)

に各々のブロックにおけるヘリウム同位体比のデータ数を示す。また図 2.1-46(b)には、各ブロックにおけるヘリウム同位体比の最大値と最小値との差を示す。両者を比較すると、多数の地点でデータが取得されたブロックでは、それらの最大値と最小値との差が大きくなる傾向がみられる。一方で、図 2.1-40 の結果と比較すると、最大値が大きいブロックではデータのばらつきが大きいといった傾向もみられる。これらのことや前述した検討の結果は、マントル起源ヘリウムが比較的狭い範囲にピークをなして地下深部から地表付近へ供給されていることを示唆する。このような傾向は、マントル起源ヘリウムの供給経路となりうる火山の近傍や断層の周辺における観測からも指摘されている(例えば、Umeda and Ninomiya, 2009)。図 2.1-47 には、第四紀火山から 30 km 以上離れた地点で得られたヘリウム同位体比とその採取地点から活断層までの最短距離の相関を示す。ここで、活断層の分布は、「活断層データベース」(産業技術総合研究所, 2012b) を用いた。これによると、顕著に高いヘリウム同位体比が分布する領域は、活断層のごく近傍に集中していることが分かる。すなわち、活断層がマントル起源ヘリウムの供給経路の一つとして機能していることを示唆すると考えられる。このため、ヘリウム同位体比を指標としてマグマや深部流体の存在に関する徴候を捉えるためには、その供給経路についても留意することが重要であると考えられる。以上のことから、地下深部におけるマグマや深部流体に関し、陸域に比べて取得できる情報量が少なくなることも想定される沿岸部海域において適用する際は、マントル起源ヘリウムの供給経路となるような構造に着目し、そのような領域を重点的に調査することも有効である可能性がある。

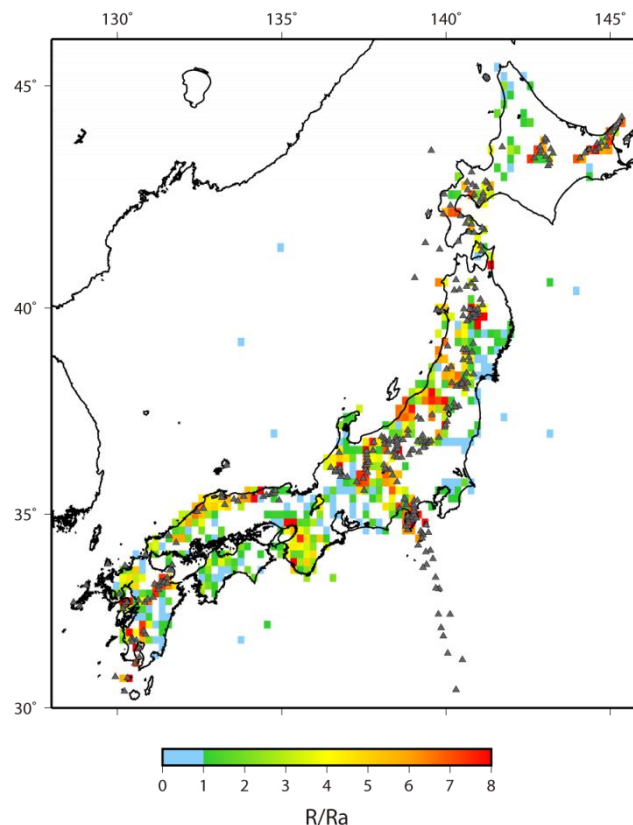


図 2.1-48 日本列島におけるヘリウム同位体比の最大値分布

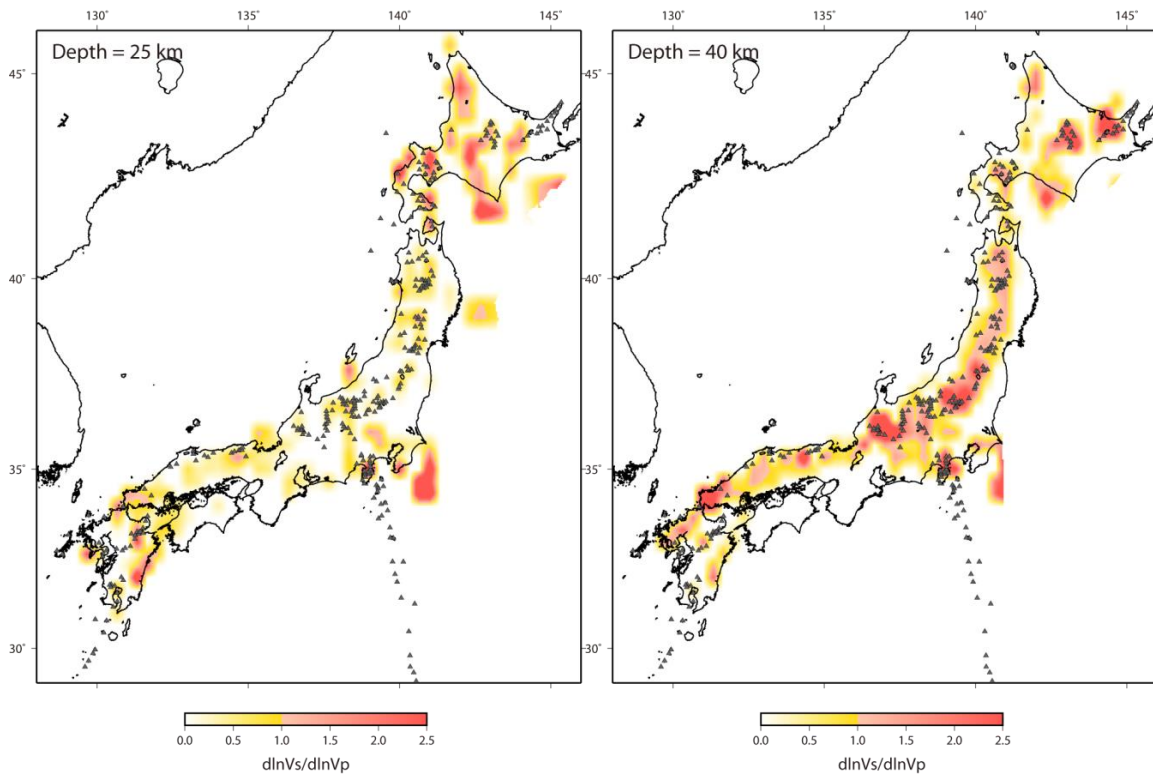


図 2.1-49 深さ 25 km および 40 km における $d\ln V_s/d\ln V_p$ 構造

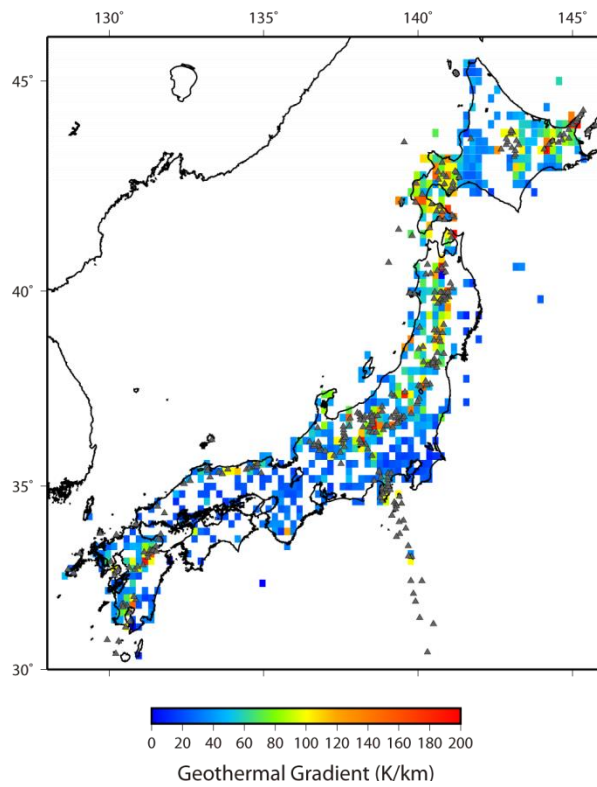


図 2.1-50 日本列島における地温勾配分布

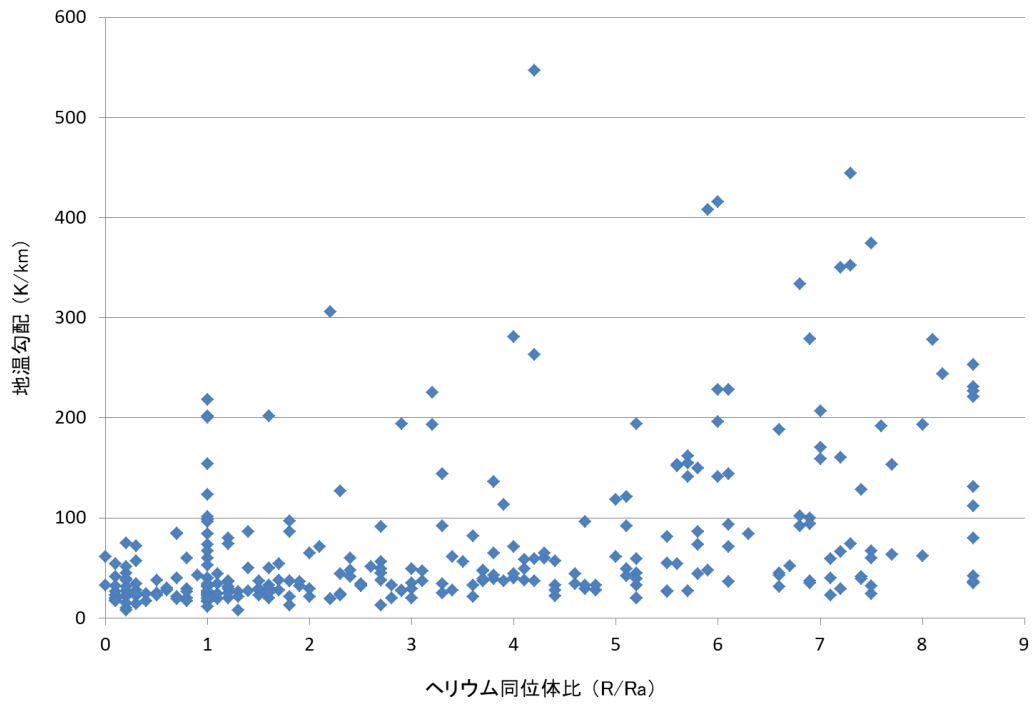


図 2.1-51 各ブロックにおける地温勾配およびヘリウム同位体比

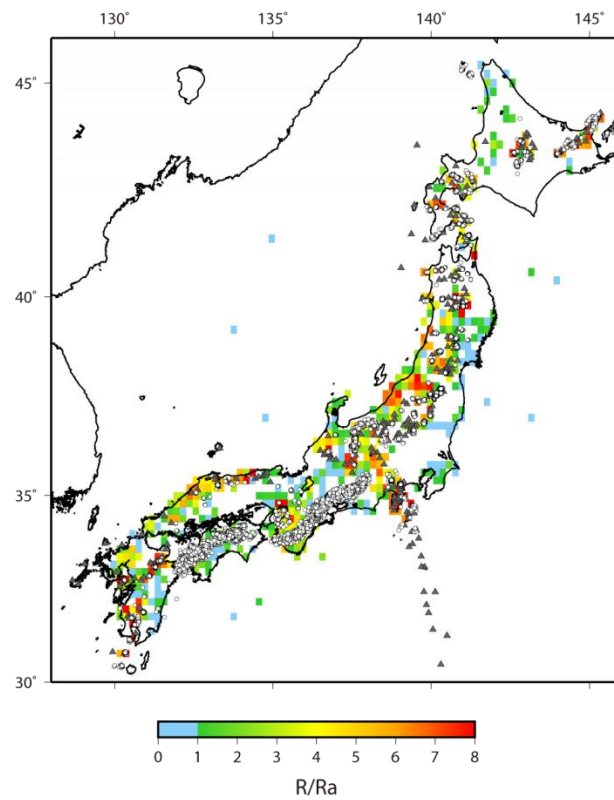


図 2.1-52 日本列島における低周波地震 (○) およびヘリウム同位体比分布

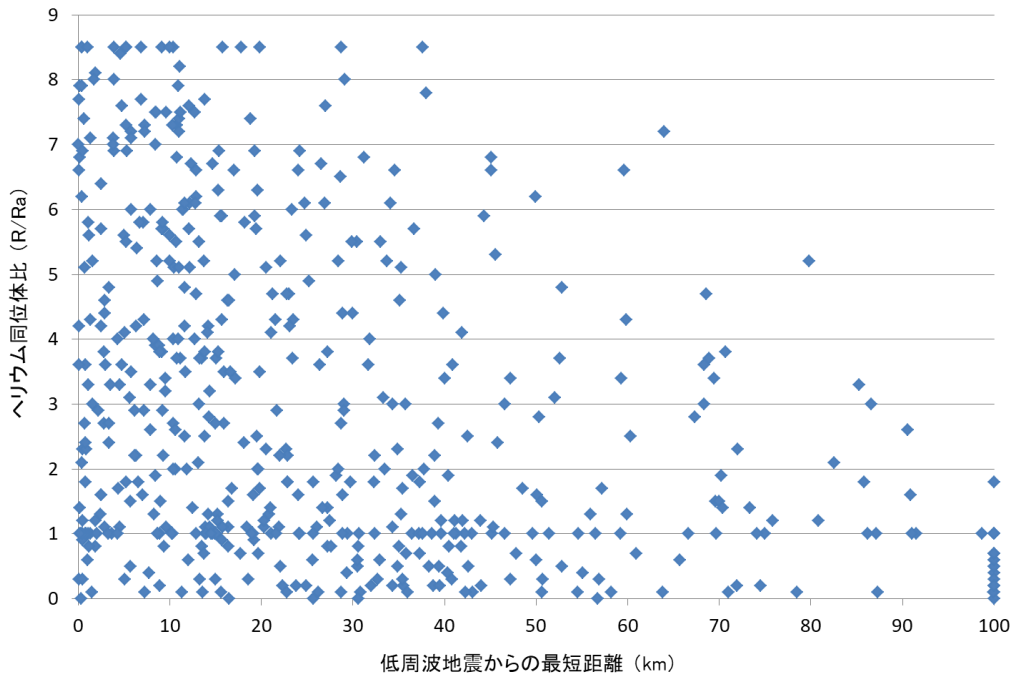


図 2.1-53 各ブロックにおけるヘリウム同位体比および低周波地震からの最短距離

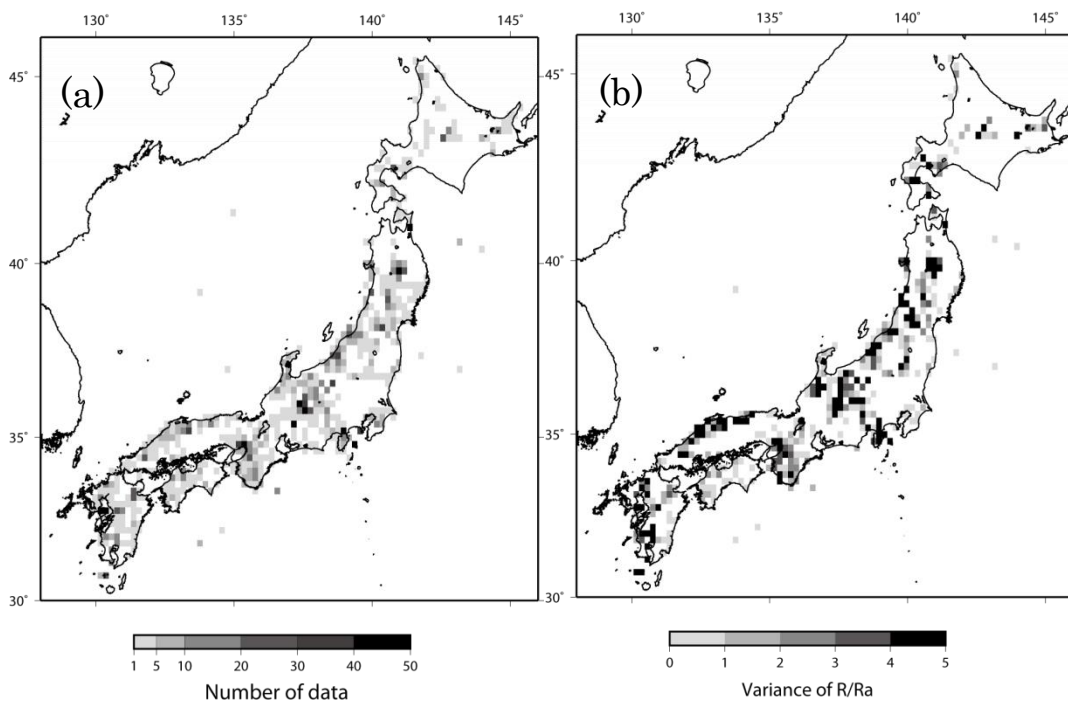


図 2.1-54 (a)ヘリウム同位体比データ数の分布および(b)各ブロックにおける最大値と最小値の差

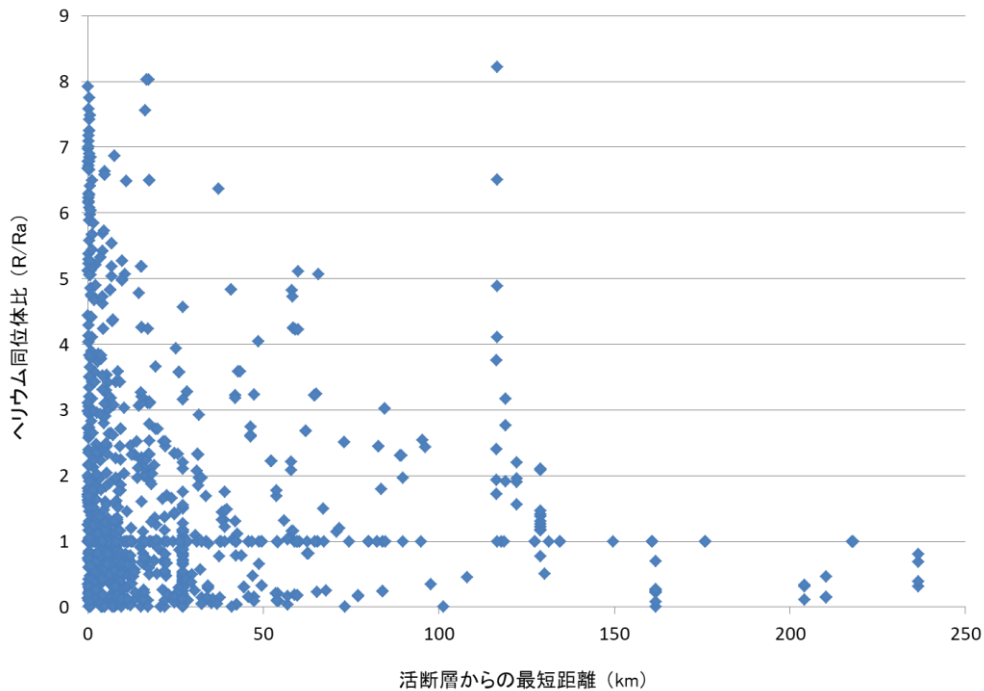


図 2.1-55 ヘリウム同位体比および活断層からの最短距離

(3) まとめと今後の課題

本事業では、沿岸部におけるマグマや深部流体などの存否や分布などを評価するための手法の高度化を目的として、地球物理学的手法の適用性に加えて、地球化学などの他分野に関する情報も考慮した方法論についても検討した。本検討の結果、明らかになった今後の課題については、以下のようにまとめられる。

地球物理学的手法については、地震波トモグラフィをはじめとした自然地震を用いた手法を沿岸部に適用する場合、定常観測網の外側となる海域での震源決定精度が陸域に比べて極めて低いことによる解析精度の低下が課題となる。この課題への対応の一つとして人工地震探査の併用が考えられるが、これまでの適用事例などからみると、探査可能な深度はおよそ 10 km 程度である。大容量のエアガンを用いることで深さ 10 km 以深の地殻中部に存在するマグマだまりを検出できる可能性はあるが、現状ではそのような事例は報告されていない。一方で、沿岸部において自然地震の震源決定精度を向上させるためには、堆積層の層厚変化を考慮した震源決定手法の適用が有効であると考えられる。

地球化学的手法については、ヘリウム同位体比の高い領域と地球物理学的にマグマや深部流体の存在が示唆される領域（地震波低速度、高地温勾配、低周波地震分布）に定性的な相関がみられた。ヘリウム同位体比の高い領域には地下にマグマや深部流体が存在する可能性が示唆され、地球化学的な指標の一つとしてヘリウム同位体比を用いた調査はマグマおよび深部流体の存否を調べるための有効な手法の一つとなり得ることを示した。またマントル起源のヘリウムが地表へ上昇する際の供給経路の一つとして活断層が機能していることを示唆する結果が得られた。ヘリウム同位体比の情報を沿岸部海域において取得する際には、陸域と比べて試料採取地点が限られることが想定されることから、あらかじめ地震探査などの情報に基づいてマントル起源ヘリウムの供給経路となるような地質構造に着目して、試料採取地点を検討することも重要であると考えられる。

(4) 謝辞

本報告では、防災科学技術研究所によって公開されている気象庁一元化地震データを使用しました。気象庁一元化地震データは防災科学技術研究所、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、気象庁、産業技術総合研究所、国土地理院、青森県、東京都、静岡県および神奈川県温泉地学研究所の地震観測データを使用して、気象庁が文部科学省と協力して整理したものです。ここに記して感謝いたします。

(5) 参考文献

- 阿部信太郎, 内田康人, 荒井良祐, 岡村行信, サロベツ断層帯海域延長部における活構造の分布・性状と活動性について, 活断層・古地震研究報告, vol.13, pp.39-74, 2013.
- Aizawa, K., Yoshimura, R. and Oshiman, N., Splitting of the Philippine Sea Plate and a magma chamber beneath Mt. Fuji, *Geophysical Research Letters*, vol.31, L09603, doi:10.1029/2004GL019477, 2004.
- Aizawa, K., Ogawa, Y., Hashimoto, T., Koyama, T., Kanda, W., Yamaya, Y., Mishina, M. and Kagiya, T., Shallow resistivity structure of Asama Volcano and its implications for magma ascent process in the 2004 eruption, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol.173, pp.165-177, 2008.
- Aoki, Y., Takeo, M., Aoyama, H., Fujimatsu, J., Matsumoto, S., Miyamachi, H., Nakamichi, H., Ohkura, T., Ohminato, T., Oikawa, J., Tanada, R., Tsutsui, T., Yamamoto, K., Yamamoto, M., Yamasato, H. and Yamawaki, T., P-wave velocity structure beneath Asama Volcano, Japan, inferred from active source seismic experiment, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol.187, pp.272-277, 2009.
- Asamori, K. and Zhao, D., Teleseismic shear wave tomography of the Japan subduction zone, *Geophysical Journal International*, vol.203, pp.1752-1772, 2015.
- 防災科学技術研究所 (編), 強震動評価のための全国深部地盤構造モデル作成手法の検討, 防災科学技術研究所資料, no.337, 2009.
- 沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会, 沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会 とりまとめ, 17p, 2016.
- Hasegawa, A. and Yamamoto, A., Deep, low-frequency microearthquakes in or around seismic low-velocity zones beneath active volcanoes in northeastern Japan, *Tectonophysics*, vol.233, pp.233-252, 1994.
- Hasegawa, A., Nakajima, J., Umino, N. and Miura, S., Deep structure of the northeastern Japan arc and its implications for crustal deformation and shallow seismic activity, *Tectonophysics*, vol.403, pp.59-75, 2005.
- Hasegawa, A., Nakajima, J., Kita, S., Okada, T., Matsuzawa, T. and Kirby, S. H., Anomalous deepening of a belt of intraslab earthquakes in the Pacific slab crust under Kanto, central Japan: Possible anomalous thermal shielding, dehydration reactions, and seismicity caused by shallower cold slab material, *Geophysical Research Letters*, vol.34, L09305, doi:10.1029/2007GL029616, 2007.
- 長谷川昭, 中島淳一, 北佐枝子, 辻 優介, 新居恭平, 岡田知己, 松澤 暢, 趙 大鵬, 地震波でみた東北日本沈み込み帯の水循環-スラブから島弧地殻への水の供給-, *地学雑誌*, vol.117, pp.59-75, 2008.
- Heath, B. A., Hooft, E. E. E., Toomey, D. R. and Bezada, M. J., Imaging the magmatic system of Newberry Volcano using joint active source and teleseismic tomography, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol.16, doi:10.1002/2015GC006129, 2015.
- Hyndman, R. D. and Peacock, S. M., Serpentinization of the forearc mantle, *Earth and Planetary Science Letters*, vol.212, pp.417-432, 2003.
- Ichihara, H., Uyeshima, M., Sakanaka, S., Ogawa, T., Mishina, M., Ogawa, Y., Nishitani, T., Yamaya, Y., Watanabe, A., Morita, Y., Yoshimura, R. and Usui, Y., A fault-zone conductor beneath a compressional inversion zone, northeastern Honshu, Japan, *Geophysical Research Letters*, vol.38, L09301, doi:10.1029/2011GL047382, 2011.

- Iio, Y., Sagiya, T., Kobayashi, Y. and Shiozaki, I., Water-weakened lower crust and its role in the concentrated deformation in the Japanese Islands, *Earth and Planetary Science Letters*, vol.203, pp.245-253, 2002.
- Iwamori, H., Transportation of H₂O and melting in subduction zones, *Earth and Planetary Science Letters*, vol.160, pp.65-80, 1998.
- 金沢敏彦, 篠原雅尚, 塩原 肇, 海底地震観測の最近の進展 -海底地震観測システムと海底における自然地震観測の進展について-, *地震第2輯*, vol.61, pp.55-68, 2009.
- Kato, A., Iidaka, T., Ikuta, R., Yoshida, Y., Katsumata, K., Iwasaki, T., Sakai, S., Thurber, C., Tsumura, N., Yamaoka, K., Watanabe, T., Kunitomo, T., Yamazaki, F., Okubo, M., Suzuki, S. and Hirata, N., Variations of fluid pressure within the subducting oceanic crust and slow earthquakes, *Geophysical Research Letters*, vol.37, L14310, doi:10.1029/2010 GL043723, 2010.
- Kodaira, S., Iidaka, T., Kato, A., Park, J. -O., Iwasaki, T. and Kaneda, Y., High pore fluid pressure may cause silent slip in the Nankai Trough, *Science*, vol.304, pp.1295-1298, 2004.
- Kodaira, S., Hori, T., Ito, A., Miura, S., Fujie, G., Park, J. O., Baba, T., Sakaguchi, H., and Kaneda, Y., A cause of rupture segmentation and synchronization in the Nankai trough revealed by seismic imaging and numerical simulation, *Journal of Geophysical Research*, vol.111, B09301, doi:10.1029/2005JB004030, 2006.
- Matsumoto, T., Kawabata, T., Matsuda, J. and Yamamoto, K., ³He/⁴He ratios in well gases in the Kinki district, SW Japan: surface appearance of slab-derived fluids in a non-volcanic area in Kii Peninsula, *Earth and Planetary Science Letters*, vol.216, pp.221-230, 2003.
- Matsumoto, S., Shimizu, H., Onishi, M. and Uehira, K., Seismic reflection survey of the crustal structure beneath Unzen volcano, Kyushu, Japan, *Earth Planets and Space*, vol.64, pp.405-414, 2012.
- 文部科学省, 「第7次火山噴火予知計画の実施状況等のレビューについて(報告)」, http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu6/toushin/1218056.htm, 2007.
(2018年1月9日最終閲覧)
- Nagaoka, Y., Nishida, K., Aoki, Y., Takeo, M. and Ohminato, T., Seismic imaging of magma chamber beneath an active volcano, *Earth and Planetary Science Letters*, 333-334, pp.1-8, 2012.
- Nakajima, J. and Hasegawa, A., Tomographic imaging of seismic velocity structure in and around the Onikobe volcanic area, northeastern Japan: implications for fluid distribution, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol.127, pp.1-18, 2003.
- Nakajima, J., Matsuzawa, T., Hasegawa, A. and Zhao, D., Three-dimensional structure of V_p, V_s, and V_p/V_s beneath northeastern Japan: Implications for arc magmatism and fluids, *Journal of Geophysical Research*, vol.106, pp.21843-21857, 2001.
- Nakamichi, H., Ukawa, M. and Sakai, S., Precise hypocenter locations of midcrustal low-frequency earthquakes beneath Mt. Fuji, Japan, *Earth Planets and Space*, vol.56, pp.e37-e40, 2004.
- Nakamichi, H., Watanabe, H. and Ohminato, T., Three-dimensional velocity structures of Mount Fuji and the South Fossa Magna, central Japan, *Journal of Geophysical Research*, vol.112, B03310, doi: 10.1029/2005JB004161, 2007.

- Nakano, M., Nakamura, T. and Kaneda, Y., Hypocenters in the Nankai trough determined by using data from both ocean-bottom and land seismic networks and a 3D velocity structure model: Implications for seismotectonic activity, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol.105, pp.1594-1605, 2015.
- Nishi, K., Three-dimensional seismic velocity structure beneath Unzen Volcano, Kyushu, Japan inferred by tomography from experimental explosion data, *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, vol.47, pp.227-241, 2002.
- 西村 進, 紀伊半島の温泉とその熱源, *温泉科学*, vol.51, pp.98-107, 2001.
- Obara, K., Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, *Science*, vol.296, pp.1679-1681, 2002.
- Paulatto, M., Annen, C., Henstock, T. J., Kiddle, E., Minshull, T. A., Sparks, R. S. J. and Voight, B., Magma chamber properties from integrated seismic tomography and thermal modeling at Montserrat, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol.13, Q01014, doi:10.1029/2011GC003892, 2012.
- Sano, Y. and Wakita, H., Geographical distribution of $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in Japan: Implications for arc tectonics and incipient magmatism, *Journal of Geophysical Research*, vol.90, pp.8729-8741, 1985.
- Sano, Y., Nakamura, Y., Wakita, H., Urabe, A. and Tominaga, T., Helium-3 emission related to volcanic activity, *Science*, vol.224, pp.150-151, doi:10.1126/science.224.4645.150, 1984.
- 産業技術総合研究所, 日本列島及びその周辺域の地温勾配及び地殻熱流量データベース, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 数値地質図 P-5, 2004.
- 産業技術総合研究所, 概要調査の調査・評価項目に関する技術資料-長期変動と地質環境の科学的知見と調査の進め方-, 産業技術総合研究所地質調査総合センター研究資料集, no.459, 126p, 2007.
- 産業技術総合研究所, 概要調査の調査・評価項目に関する技術資料-立地要件への適合性とその根拠となる調査結果の妥当性-, 産業技術総合研究所地質調査総合センター研究資料集, no.560, 112p, 2012a.
- 産業技術総合研究所, 研究情報公開データベース, https://gbank.gsj.jp/activefault/index_gmap.html, 2012b.
- 産業技術総合研究所, 沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発 平成 24 年度 成果報告書, 産業技術総合研究所, 521p, 2013.
- 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術ワーキンググループ, 最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価-地質環境特性および地質環境の長期安定性について-, 61p, 2014.
- 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術ワーキンググループ, 科学的有望地の要件・基準に関する地層処分技術 WG における中間整理, 2015.
- Shelly, D. R., Beroza, G. C., Ide, S. and Nakamura, S., Low-frequency earthquakes in Shikoku, Japan, and their relationship to episodic tremor and slip, *Nature*, vol.442, pp.188-191, doi:10.1038/nature 04931, 2006.
- Takei, Y., Effect of pore geometry on V_P/V_S : From equilibrium geometry to crack, *Journal of Geophysical Research*, vol.107, doi:10.1029/2001JB000522, 2002.
- Takeo, M., Aoki, Y., Ohminato, T. and Yamamoto, M., Magma supply path beneath Mt. Asama volcano, Japan, *Geophysical Research Letters*, vol.33, L15310,

- doi:10.1029/2006GL026247, 2006.
- Tanaka, S., Hamaguchi, H., Nishimura, T., Yamawaki, T., Ueki, S., Nakamichi, H., Tsutsui, T., Miyamachi, H., Matsuwo, N., Oikawa, J., Ohminato, T., Miyaoka, K., Onizawa, S., Mori, T. and Aizawa, K., Three-dimensional P-wave velocity structure of Iwate volcano, Japan from active seismic survey, *Geophysical Research Letters*, vol.29, doi:10.1029/2002GL014983, 2002.
- Tatsumi, Y., Migration of fluid phases and genesis of basalt magmas in subduction zones, *Journal of Geophysical Research*, vol.94, pp.4697-4707, 1989.
- 筒井智樹, 地震学的手法を用いた活火山構造探査の現状と課題, *火山*, vol.50, pp.101-114, 2005.
- 筒井智樹, 松島 健, 清水 洋, 雲仙火山の浅部構造に対する擬似反射記録法の適用の試み, *火山*, vol.49, pp.143-151, 2004.
- 筒井智樹, 及川 純, 鍵山恒臣, 富士火山人工地震構造探査グループ, 人工地震で見た富士火山の内部構造, *物理探査*, vol.60, pp.131-144, 2007.
- 梅田浩司, 浅森浩一, 地球科学の原子力安全への貢献 (その 1) 地球科学からみた地殻流体と地層処分技術への応用, *日本原子力学会誌*, vol.58, pp.45-49, 2016.
- Umeda, K., Ogawa, Y., Asamori, K. and Oikawa, T., Aqueous fluids derived from a subducting slab: Observed high ^3He emanation and conductive anomaly in a non-volcanic region, Kii Peninsula southwest Japan, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol.149, pp.47-61, 2006a.
- Umeda, K., Asamori, K., Negi, T. and Ogawa, Y., Magnetotelluric imaging of crustal magma storage beneath the Mesozoic crystalline mountains in a nonvolcanic region, northeast Japan, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol.7, Q08005, doi:10.1042/2006GC 001247, 2006b.
- Umeda, K., Asamori, K., Ninomiya, A., Kanazawa, S. and Oikawa, T., Multiple lines of evidence for crustal magma storage beneath the Mesozoic crystalline Iide Mountains, northeast Japan, *Journal of Geophysical Research*, vol.112, B05207, doi:10.1029/2006JB004590, 2007.
- Umeda, K. and Ninomiya, A., Helium isotopes as a tool for detecting concealed active faults, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol.10, Q08010, doi:10.1029/2009GC002501, 2009.
- Wakita, H., Sano, Y. and Mizoue, M., High ^3He emanation and seismic swarms observed in a nonvolcanic, forearc region, *Journal of Geophysical Research*, vol.92, pp.12539-12546, doi:10.1029/JB092iB12p12539, 1987.
- Worzewski, T., Jegen, M., Kopp, H., Brasse, H. and Castillo, W. T., Magnetotelluric image of the fluid cycle in the Costa Rican subduction zone, *Nature Geoscience*, vol.4, pp.108-111, doi:10.1038/ngeo1041, 2011.
- Zhao, D., Asamori, K. and Iwamori, H., Seismic structure and magmatism of the young Kyushu subduction zone, *Geophysical Research Letters*, vol.27, pp.2057-2060, 2000.
- Zhao, D., Hasegawa, A. and Horiuchi, S., Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan, *Journal of Geophysical Research*, vol.97, pp.19909-19928, 1992.

2.2 沿岸部の地下水長期安定性に関わる研究

2.2.1 沿岸部の地下水長期安定性評価技術の検討

(1) 背景と目的

高レベル放射性廃棄物処分においては、処分した放射性核種が漏洩し、地下水によって輸送されることを想定した「地下水シナリオ」が安全評価において重要になる。核種は放射性物質のため、漏出までの時間が長いほど放射壊変によって危険度が低下することを考えると、処分場周辺の地下水流速が遅い方が安全評価上有利である。地形勾配の小さい沿岸部の深部では動水勾配が小さく、塩淡水境界の下位にある塩水は上位の淡水と比べて流動性が低いため、長期にわたって安定なことが期待される。また、地下水の化学組成や溶存イオン濃度も、核種の溶解度や地層への吸着特性へ影響を及ぼすため重要である。したがって、「地下水シナリオ」を評価するためには、地下水の長期安定性と深部地下環境に関する知見が必要である。しかしながら、処分対象となるような深部の地下水の安定性や地化学環境に関するデータはそれほど多くない。この理由から本事業では、図 2.2-1 に示すような既存の大深度ボーリング孔などから地下水を採取し、地下水年代（平均滞留時間）・地化学環境測定を行うこととした。

地下水年代測定は、地下水の長期安定性に関する知見を得るための最も有効な方法と考えられる。これは、天然に存在する同位体や溶存ガスから地下水の地下水年代を導くものである。ただし、適切に地下水年代を決定するためには、岩石の間隙率、主要鉱物、含有元素や、降水・浅層水など流域の地下水情報が必要である。そこで本事業では第一段階として、正しい地化学情報の取得や正しい採水方法に関する検討と、これらによって得られたデータから地下水年代決定までのプロセスを提示することにより、地下水年代測定の課題抽出と高度化を行う。

一般に、このような作業により導出した地下水年代の妥当性は、地形、地質、水文などの情報から推定した概念モデル（NUMO, 2011）や他地域の事例との整合性を確認する必要がある。そこで本事業の第二段階として特に幌延において、既存の大深度ボーリング孔や井戸などから地下水を採取し、深部の地下水年代・地化学環境を明らかにするとともに、既存の地下水流動の概念モデルとの整合性を検討する。さらに幌延以外の、比較的既存データが多い地域では、既存の概念モデルに新たに得られた地下水年代を組み込んでモデルを高度化するか、あるいは概念モデルそのものの構築を行う。既存データの少ない地域では既存井などを調査し、地下水年代に加えて地化学特性を把握する。そして、流域の地形、地質、隆起・沈降速度などの地域の特徴などとの関連性を導き、ある地点の地下水年代の決定に重要となる地球科学的、地理学的因子を求める（本解析を行う理由は、前年度報告書（平成 28 年度沿岸部処分システム高度化開発報告書）の「Appendix VI：現地調査における地域への丁寧な説明と成果の公表に関する配慮について」にて述べた）。以上が地下水長期安定性に関わる研究の中心的な調査項目である。

これらに加えて、本年度ではプッシュプル試験の高度化を加えた。この手法は単孔式揚水試験を応用したものであり、しばしば帯水層の物理・化学特性を求めるために適用される。その高い再現性については、沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発（産総研, 2013）で確認が行われており、この試験を応用して地下水の自然流速を求めることが理論的に可能である。本年度はその実用性を確認するための野外試験を行った。

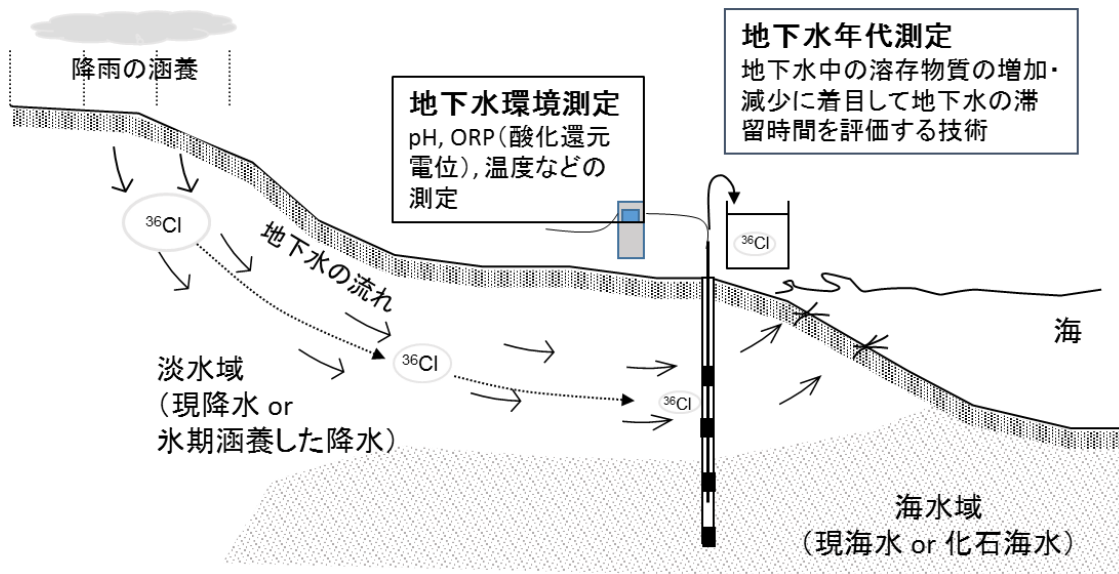


図 2.2-1 沿岸部の地下水長期安定性評価の概念図

(2) 評価技術の概要

1) 地下水年代測定技術

地下水年代測定技術は天然に存在する放射性物質の壊変や壊変に伴う蓄積などに着目し、地下水の地下水年代を評価する方法である。地下水年代解析の原理および用いられる放射性物質やトレーサーの種類については前年度報告書 (2.2.1 (2)) にまとめた。

地下水年代は用いたトレーサーの初期値、平衡値、異なる起源の混合などの影響を受ける。そのため一つの物質や同位体のみから地下水年代を評価することは難しい。適切な地下水年代を求めるためには、同じ地下水に複数の方法を適用し、相互比較して求めることが好ましい (Hasegawa et al., 2016)。このため、本事業では可能な限り複数の方法を適用する。なお、近年は ^{129}I についても前処理方法と分析方法が確立され、近年適用事例が増えてきている (Mahara et al., 2012 ; 2013)。 ^{129}I は海水に主に含まれ、非常に長い半減期を持っていることから、海水の古さや地質との関係性を評価できる可能性がある。しかし、日本国内において ^{129}I の測定が行える機関は少ないため、本事業ではペレトロン加速器年代測定装置(JAEA-AMS-TONO)で ^{129}I 測定を行うための整備をおこなっており、これについては 2.2.1 (9) にて述べる。

沿岸部では、地下水が海水準変動の影響を受けていると想定すると、大別して、現降水 (0~2 万年)、現海水 (0~2 万年)、最終氷期以前の地下水 (2 万年以上 : 以後、氷期降水)、化石海水 (100 万年以上) の四つに分類できる可能性がある (図 2.2-2)。図 2.2-2 のような分布が想定される理由は氷期に海水準が長期にわたって低下し、その後の間氷期では逆に海水準が上昇するためである。海岸部の地下水流動は、この海水準の変化に対応して変化しようとするが、地下水の流れは緩慢であるため応答には時間がかかる。図 2.2-2 に示すように、沿岸部の降水系地下水は、現降水と氷期降水の 2 種類が考えられる。氷期降水は、水素・酸素安定同位体比が軽く、涵養温度も現在よりも低くなるため、希ガス濃度にも違いが表れるはずである。このため、これらの違いから現降水と氷期降水は識別できる可能性がある。一方、現海水と化石海水は、ともに海水が源になっているが、地下水年代にはかなり大きな差がある。現海水では、 ^{14}C が有意に検出され、 ^4He の蓄積は進んでおらず、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ 、 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ は海水に近い値になるだろうが、化石海水では ^{14}C が検出されず、 ^4He の蓄積が進み、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ が有意に大きくなると推定される。また、 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ は地下水年代が数百万年以上であれば海水とは異

なる値になる。このように、多くの指標で違いが出ることから、現海水と化石海水は、現降水と氷期降水よりも識別しやすい。以上のように、淡水と海水およびそれらの年代差や涵養温度の差で、現降水と氷期降水、現海水と化石海水が識別できる可能性が高い。

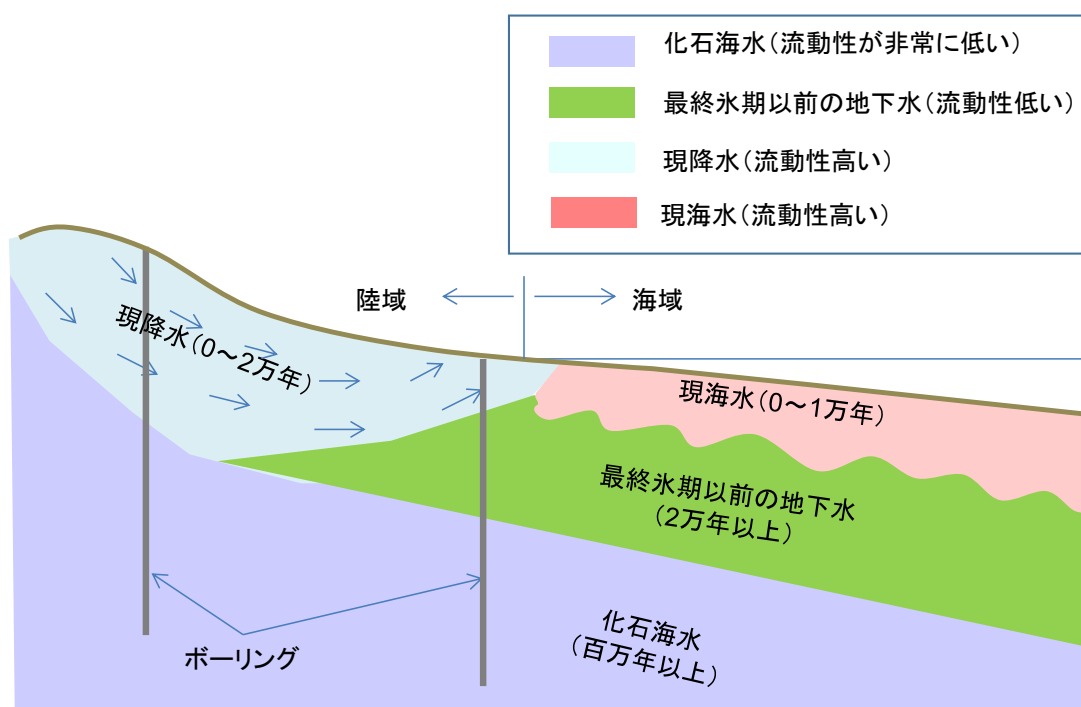


図 2.2-2 沿岸部での地下水分布の概念図

2) プッシュプル試験

地層処分事業では、地下情報を得るために大深度の掘削が行われるが、掘削は一般に高額である。そのため、1本のボーリング孔からできる限り多くの水文地質情報を求めることが望ましい。プッシュプル試験では既知量のトレーサーを含む溶液を試験孔から帯水層に注水し、同じ試験孔から地下水を揚水しながらトレーサーの濃度を計測し、破過曲線を作成して、地下水中の溶質の挙動や帯水層の物性を評価する。プッシュプル試験から評価される地下水中の溶質の挙動や帯水層の物性には、分散長、溶存成分の遅延特性などが挙げられ、その応用により分解生成反応、有効間隙率、移流速度などの評価が可能となる（産総研, 2013）。沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発（産総研, 2013）では、北海道天塩郡幌延町浜里試験地のDD-2孔（100 m）を対象とした実験を実施しているが、本年度は手法の高度化を目指し、沿岸部での地下水の移流速度を求めるための実験をおこなった。

(3) 原位置調査

地下水年代測定、地化学測定のための原位置調査は、原位置の状況にあわせて実施した。原位置調査の方法および手順、地化学環境の現地測定項目に関する詳細については前年度報告書 2.2.1 (3) および前年度および今年度「Appendix VI 原位置調査装置および採取方法の開発」を参照されたい。

(4) 室内分析

室内分析項目については前年度報告書 2.2.1 (4) および前年度および今年度「Appendix VI 原位置調査装置および採取方法の開発」に示す。

(5) 詳細検討（概念モデル構築）地点での調査結果

1) サロベツ原野の地下水年代測定結果

調査地域は、海岸から約 300 m ほど離れた、北海道天塩郡幌延町浜里（図 2.2-3）である。この試験地では平成 21～24 年度にかけて深度 1200 m の調査井 DD-1 孔が掘削されており、ケーシング設置後、深度 214 m、306 m、476 m、613 m、715 m、943 m、1,143 m の 7 深度でパーフォレーションによる穿孔がおこなわれている。昨年度から本年度にかけて、深度 214 m、306 m、476 m、613 m、715 m、943 m、また、同敷地内の DD-2 孔（深度 90.5-99.5 m）から水試料を採取して地下水年代調査を実施した。



図 2.2-3 調査位置図（縮尺 1:25,000）（国土地理院 25,000 地形図「音類」、「稚咲内」より）

地下水年代測定は、これまで検討してきた図 2.2-4 のフローに基づいて実施した。まず、主要溶存イオンから、淡水、汽水、海水に分類するとともに、地化学反応の有無を評価する。次に、水素・酸素同位体の相関図を作成し、降水起源、海水起源などの地下水の起源を明らかにするとともに、氷期降水の可能性、水岩石相互作用の影響を評価する。その後、地下水年代測定として実施した放射性同位体の分析結果を、半減期の短い側から、 ^3H 、 ^{14}C 、 ^{36}Cl と順に調べ、地下水の長期安定性を概略的に評価する。また補足として、現降水については地球温暖化ガス（CFCs：フロンガス、 SF_6 ：六フッ化硫黄）が検出されるかどうか（検出されれば数十年オーダーの地下水）、氷期降水については、希ガス温度計で評価した涵養温度が現在の平均気温よりも低くなっているかどうか、そして、 ^4He 濃度、 ^{81}Kr 濃度、 ^{129}I 濃度から非常に古い数十万年以上のオーダーの地下水かを評価する。このように、複数の方法で整合性がとれるかどうかを確認し、地下水の滞留性を評価した。

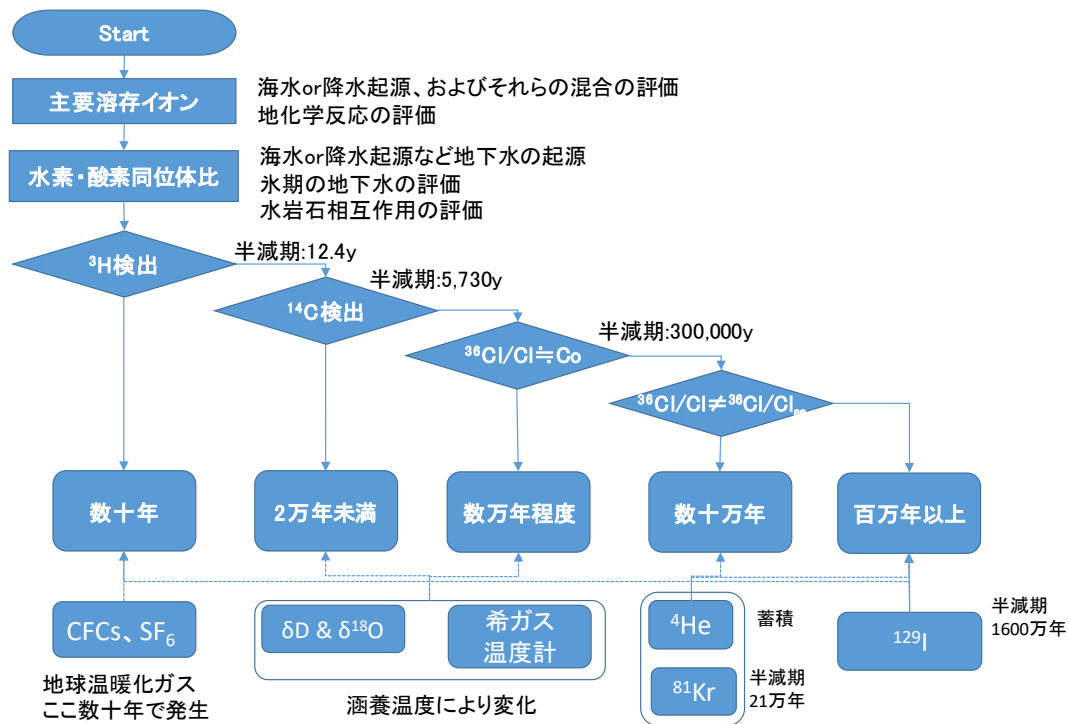


図 2.2-4 地下水年代検討フロー

① 主要溶存イオン

主要溶存イオンは、図 2.2-5 のヘキサダイアグラムに示すように、おおむね Na-Cl 型で、海水もしくは海水を希釈したイオンバランスになっている。更別層と勇知層の地層境界を境に、浅部（470 m 以浅）と深部（470 m 以深）とで溶存イオン量が大きく異なるため、スケールを変えて表示している。浅部は降水起源と推定されるが、深部では海水起源であると考えられる。

Cl⁻濃度の鉛直方向分布を図 2.2-6 に示す。ここでは、Ikawa et al.(2014)と電力中央研究所 (2012) で取られたデータなどもあわせて示す。Cl⁻濃度は、深度 470 m 以浅ではほぼ 1000 mg/L 以下であるが、深度 470 m 以深では高くなり、深度 800 m 付近で 16,000 mg/L 程度で、深度 800 m 以深ではほぼ 16000 mg/L で一定である。この Cl⁻濃度（16000 mg/L）は海水の Cl 濃度（19,000 mg/L）よりもやや低い。Cl⁻濃度が海水よりも低い原因は後で議論する。

このため、更別層まで（深度 470 m 以浅）は、おおむね降水起源の地下水であるが、勇知層の上部（深度 470 m～深度 800 m）では降水と海水の混合、勇知層の下部（深度 800 m 以深）では海水になっている。

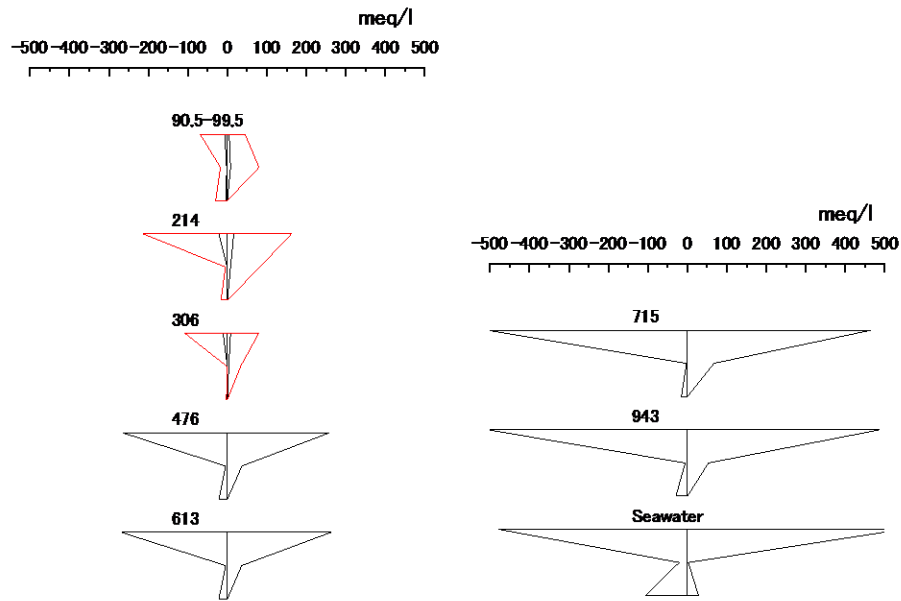


図 2.2-5 主要溶存イオンのヘキサダイアグラム表示

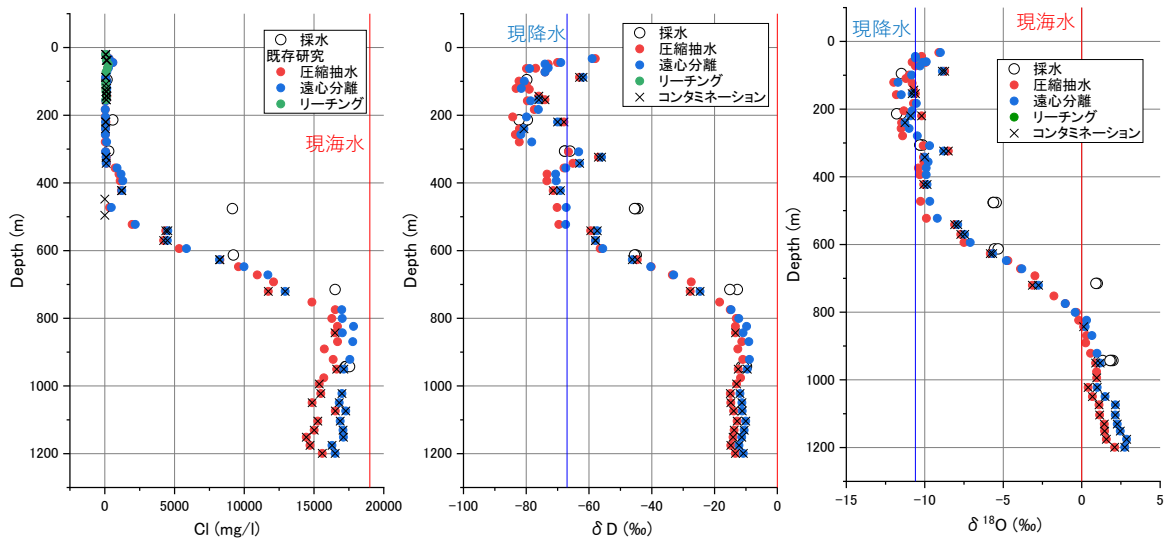


図 2.2-6 Cl⁻濃度および水素・酸素同位体比の鉛直分布

② 水素・酸素同位体比

水素・酸素同位体比は、主要溶存イオンとほぼ同じ傾向であり、深度 470 m 以浅では降水起源であるが、深度 470 m 以深では降水と海水の混合、深度 800 m 付近では海水起源の地下水となる。水素同位体比は、深度 90~300 m 程度まで -81‰ 程度と現降水 ($-67 \pm 1\%$) よりも低い傾向にある。また、水素同位体比は、深度 800 m 以深において -10‰ 程度の値をとり、海水 (0‰) よりもやや低い。同様に、酸素同位体比は深度 90~300 m 程度まで -11.6‰ 程度と現降水 ($-10.6 \pm 0.2\%$) よりも低い傾向にある。また、酸素同位体比は深度 800 m 以深において、海水 (0‰) よりも数%程度高くなる傾向にある。なお、現降水の値は、Kashiwaya et al.(2014)の約 50 年程度の地下水年代を持つ試料 9 試料の平均値から求めた。これは、あまり地下水年代が若いと季節変動の影響を受ける可能性があるためである。

水素・酸素同位体比の関係を図 2.2-7 に示す。図には、本地点のデータだけでなく Nakata et al. (2018) および天野ほか (2012) の幌延地区の大深度ボーリング孔での調査結果 (声問層、稚内層) も併せて示した。

水素・酸素同位体比から、本地点の水素・酸素同位体比は、更別層内 (深度 90~470 m) において現降水よりも低い傾向がある。これは、前述のように更別層内の地下水が氷期に涵養したためと推定される。勇知層下部 (深度 800 m 以深) において現海水よりも Cl^- 濃度、水素同位体比がやや軽く、酸素同位体は比重い傾向がある。これは、粘土鉱物からの脱水により、 Cl^- 濃度が低くなるとともに、水素同位体比が軽くなっていると推定される。また、深度とともに酸素が重くなる方向に変化しているが、これは水岩石相互作用によるものと考えられる。勇知層上部 (深度 470~800 m) では、勇知層下部の酸素同位体比が重くなっていない成分 (δD , $\delta^{18}\text{O}$) = (-15‰, 0‰) と更別層内の降水成分が混合して形成されていると考えられる。

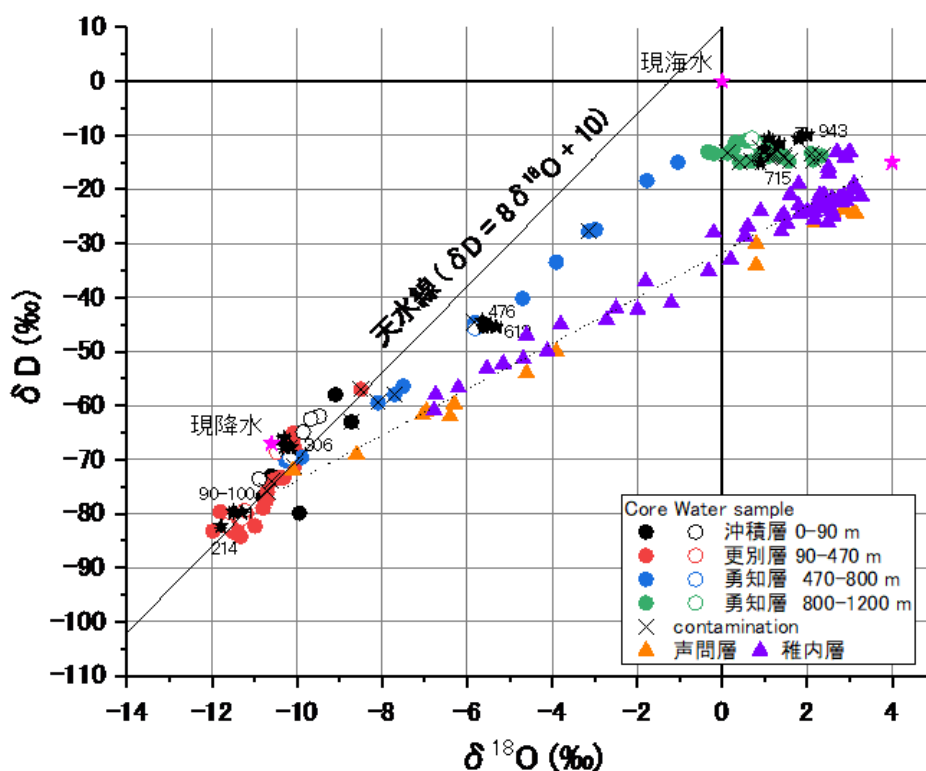


図 2.2-7 水素・酸素同位体比の関係

③ トリチウム

トリチウム (^3H) は、自然界において降水や海水に含まれている。降水中の ^3H 濃度は、図 2.2-8 に示すように核実験の影響で 1960 年代に非常に高くなったが、徐々に低下してきており、現在の降水は 2~5 TU 程度である。今回の採水地点では、深度 3~25 m 程度の井戸では検出されるが、それ以外では検出されていない。 ^3H の半減期は 12.4 年で、通常の実験での定量限界は 0.3TU 程度のため、 ^3H が含まれる地下水は、比較的若い地下水 (50 年未満) と考えられる。

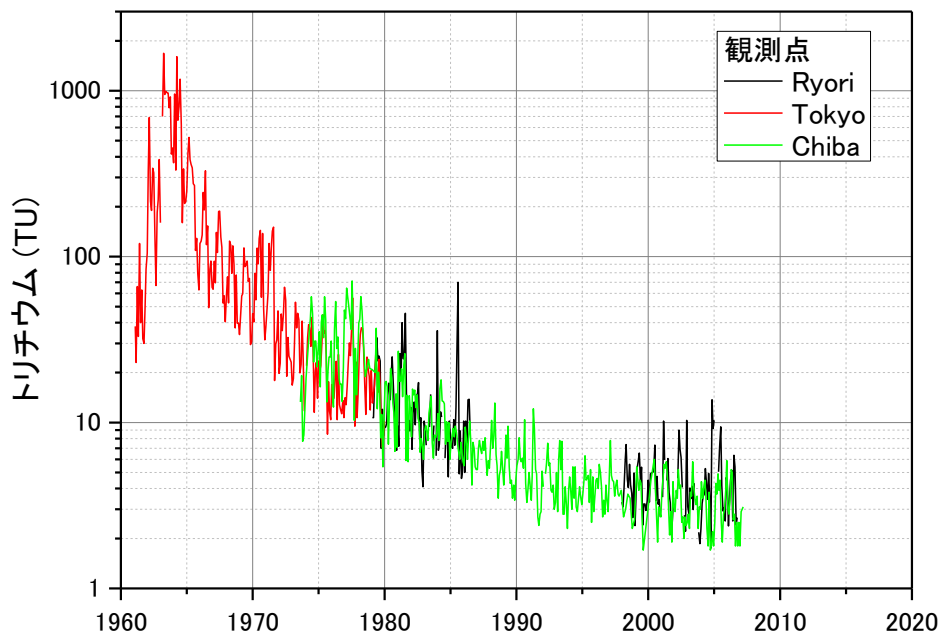


図 2.2-8 降水中のトリチウム濃度
(Ryori と Tokyo は IAEA/WMO(2017)、Chiba は放射線医学総合研究所 (2012))

④ ^{14}C

^{14}C は、大気でおおむね 100 pMC の値をとり、半減期 5,730 年の放射壊変に着目して地下水年代を評価する。ただし、地下水では、炭酸塩鉱物、有機物の酸化などによって濃度の低い ^{14}C が付加されるため、これらを補正して年代を求める必要がある (Kalin, 2000)。この炭酸塩鉱物や有機物の溶解は、炭素の同位体である $\delta^{13}\text{C}$ の保存性を用いて評価される場合が多い。地下水の $\delta^{13}\text{C}$ は涵養条件によって異なり、 -23% (Closed condition) $\sim -13\%$ (Open condition) 程度とばらつく (Kalin, 2000)。これは涵養時に土中の CO_2 と十分に同位体交換をして涵養したかどうか依存している。このため、涵養時の $\delta^{13}\text{C}$ を把握するために、浅層地下水の調査が必要である。また、海水起源の場合、海水の ^{14}C は 100 pMC、 $\delta^{13}\text{C}$ は 0% 程度であるため、降水の場合とは補正方法が異なる。一方で、溶解する海成炭酸塩と有機物の $\delta^{13}\text{C}$ は、それぞれ 0% と -25% と言われている (Clark and Fritz, 1997)。このような起源の異なる炭素を考慮して、 ^{14}C 年代は評価する必要がある。

溶存無機炭素濃度とその同位体の計測結果を図 2.2-9 に示す。今回採水した地点では、 ^3H が検出される 3~25 m 程度の井戸では 100pMC に近い値が計測されている。一方で、それ以外では深度 90 m と 300 m の深度で検出されている。ただし、本地点の溶存無機炭素の起源は、大気起源だけではなく、有機物起源の可能性もある。溶存炭素濃度の鉛直分布からもわかるように、溶存無機炭素にはおおむね深度依存性があり、深部ほど溶存無機炭素量が多い。また、 $\delta^{13}\text{C}$ の値も大気を起源とするものは、 $-23\sim -13\%$ 程度であるが、本地点では 0% 以上のものがある。この理由は微生物によるメタン生成に伴い、重い $\delta^{15}\text{C}$ を持つ溶存炭酸が生成されるためと考えられる。

$\delta^{13}\text{C}$ と ^{14}C の関係を図 2.2-10 に示す。この図は降水起源の炭素の ^{14}C を 100 pMC、 $\delta^{13}\text{C}$ を -20% 、有機物由来の炭素の ^{14}C を 0 pMC、 $\delta^{13}\text{C}$ を 10 ‰として、 $\delta^{13}\text{C}$ を混合の指標として ^{14}C の変化量を推定したものである。あわせて、無機炭酸濃度もシンボルの大ききで示した。このような表記が必要な理由は、Nakata et al. (2016) によって指摘されるように、地下水の無機炭酸濃度が低い場合、大気中の CO_2 が溶解することで ^{14}C 濃度が高くなること

多いためである。また、本地点ではメタンガスが多いため、以下のような反応が起こっていると考えられる。これは、有機物が分解しメタンガスと炭酸ガスが生成しているという反応である。

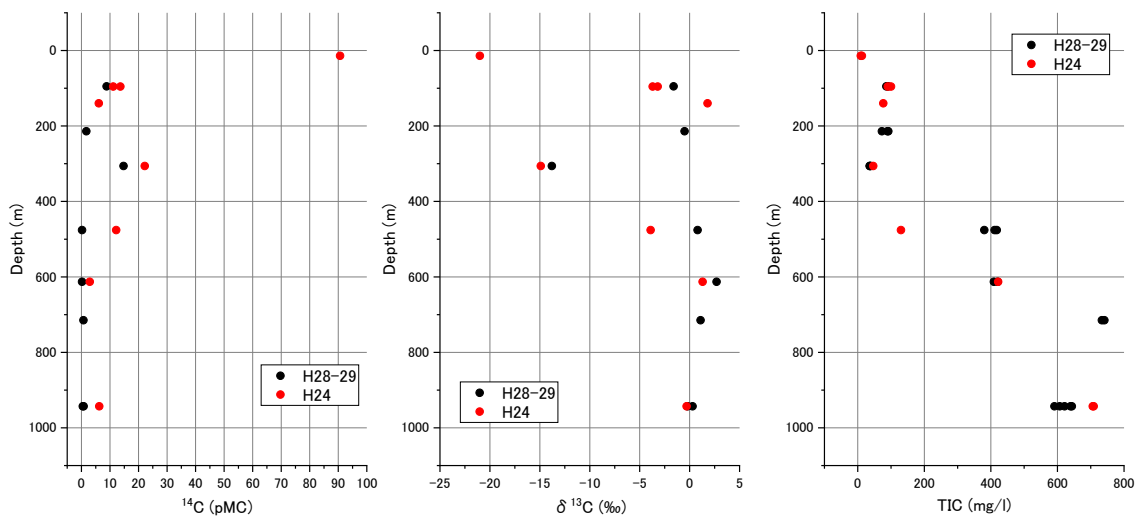
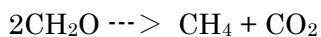


図 2.2-9 炭素濃度とその同位体の深度方向分布

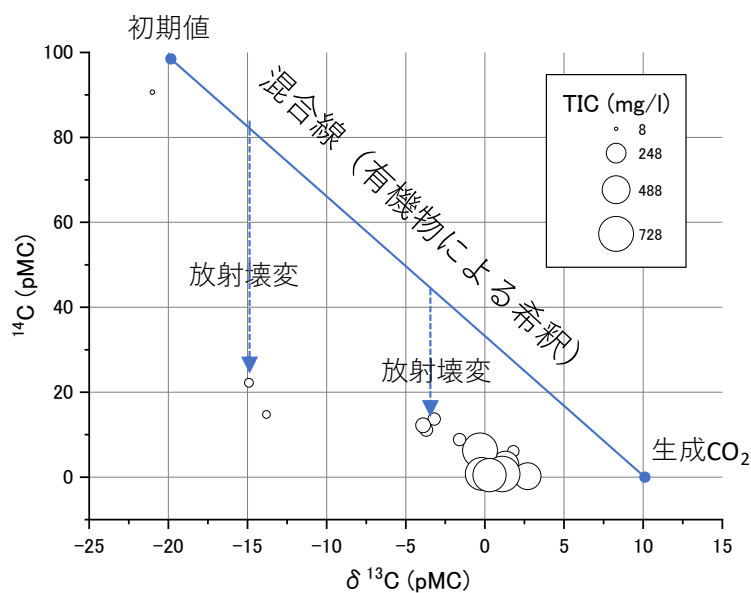


図 2.2-10 $\delta^{13}\text{C}$ と ^{14}C の関係と有機物分解による影響

$\delta^{13}\text{C}$ の特性値は、有機物で -25‰ (Clark and Fritz, 1997)、メタンで -60‰ 程度である。このメタンの $\delta^{13}\text{C}$ 値は計測結果に基づいている。上記の反応を仮定すると、生成する CO_2 の $\delta^{13}\text{C}$ は $+10\text{‰}$ と推定される。この反応を仮定すると、 ^{14}C の希釈は、 $\delta^{13}\text{C}$ を用いて図 2.2-10 のように表される。また、メタンガス濃度を見ても $30\sim 60\text{ mmol/L}$ 程度となっており、 500 m 以深での無機炭酸濃度とおおむね整合する。

$\delta^{13}\text{C}$ に基づいて補正し ^{14}C 年代を求めると、 $90.5\sim 99.5\text{ m}$ で $12,000$ 年、 214 m で $25,000$ 年、 306 m で $14,000$ 年と ^{14}C 年代を計算できる。

⑤ ^{36}Cl

^{36}Cl は、化学的に安定で地下水のトレーサーとしてしばしば用いられる Cl の放射性同位体で有り、半減期は約 30 万年である。 ^{36}Cl の初期値は、緯度や海岸からの距離により異なる。これは、 ^{36}Cl の降下量が緯度に依存するためと、海塩からも ^{36}Cl が供給されるためである (Philips, 2013)。このため、降水起源の場合、 ^{36}Cl の初期値の推定には、浅層の地下水や降水の調査が必要である。一方で、海水起源の場合、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ は 0.7×10^{-15} 程度で一定と考えられている (Fifield et al., 2013)。海水を起源とする場合、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ は原位置で放射化され、図 2.2-11 に示すように、原位置平衡値に時間とともに近づく。原位置平衡値は堆積岩では $5 \sim 10 \times 10^{-15}$ 程度、花崗岩では $40 \sim 60 \times 10^{-15}$ 程度である。平衡値は主に岩石中のウラン・トリウム量、間隙率に依存する。花崗岩の平衡値が大きいのは間隙率が小さいためであり、堆積岩でも間隙率の低下とともに平衡値が増加する。

$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ について調査した結果、図 2.2-12 に示すように、更別層では $4 \sim 6 \times 10^{-15}$ 程度の値をとりばらつきが大きく、勇知層内では浅部では 3×10^{-15} 程度であるが深度とともに増加していく傾向が見られた。更別層では、 Cl^- 濃度が低いことから、降水によって供給された ^{36}Cl であると考えられ、勇知層では Cl^- 濃度が高いことから、海水起源であるが、原位置で生成して ^{36}Cl が増加していると考えられる。勇知層内から採取した地下水の $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ は、現海水の値 (0.7×10^{-15} 程度) よりも優位に大きく、勇知層内の海水の ^{36}Cl 年代は 5 万年以上であると推定される。

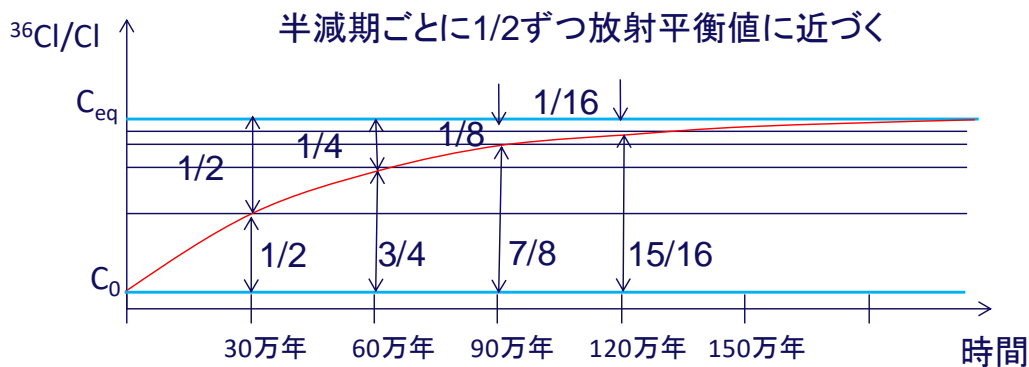


図 2.2-11 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ の濃度変化と時間の関係
(C_{eq} : 原位置平衡値、 C_0 : 初期値)

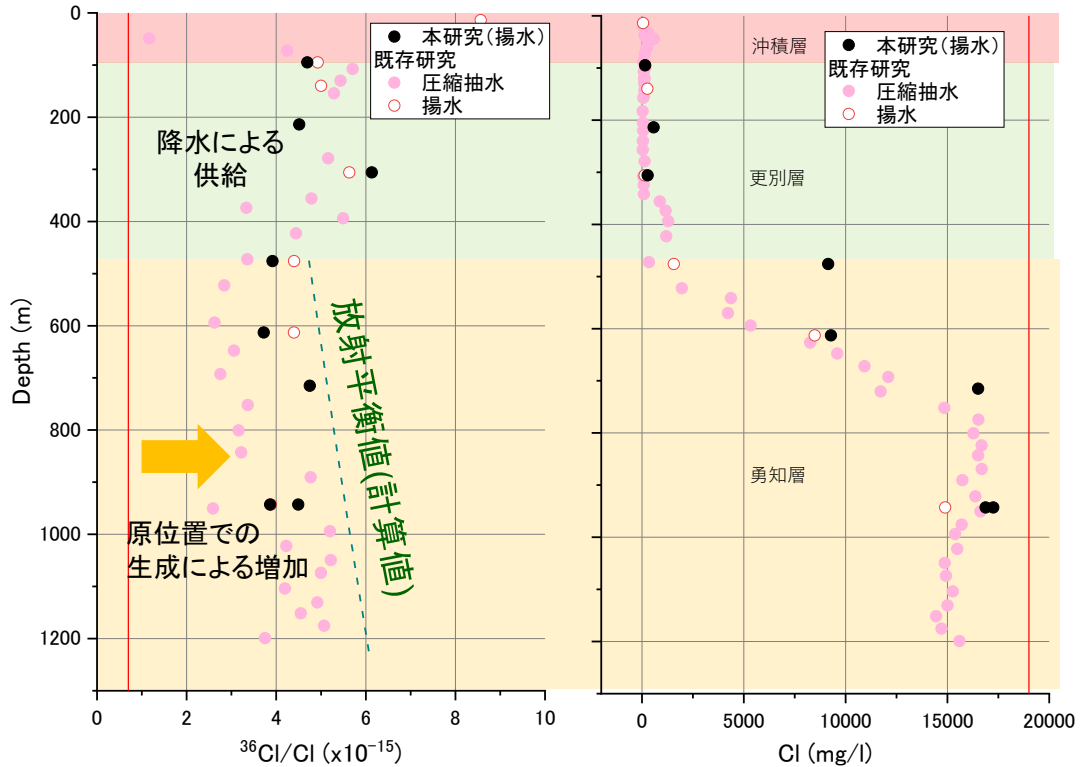


図 2.2-12 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ と Cl の鉛直分布

⑥ そのほかの地下水年代測定結果

^4He は、地盤に含まれるウラン・トリウムが放射壊変して生成する。このため、地下水年代の増加に伴い地下水中に蓄積する量が増える。本地点でのウラン・トリウム量、密度、間隙率から、生成速度は $2 \times 10^{-12} \text{ ccSTP/gwy}$ 程度と推定される。浅部（470 m 以浅）では He 濃度は、大気平衡値 4.8×10^{-8} に対して、 10^{-8} オーダーであり、3 万年未満の蓄積量である。すなわち浅部（470 m 以浅）では、 He 年代は 3 万年未満と推定される（図 2.2-13）。

一方で、深部（470 m 以深）では、 10^{-6} オーダーと $10 \sim 100$ 万年オーダーの蓄積量となる。特に今研究で再取得したサンプルは原位置で封圧採水しているため、 ^4He 濃度が高く、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ がより小さい傾向にある。このため、浅部と深部とで大きく流動性が異なり、浅部の淡水は数万年以内で流れる地下水、深部の海水は $10 \sim 100$ 万年程度の地下水年代を持つ化石海水と推定される。

その他に、 ^{129}I と ^{81}Kr による年代測定法を実施しているが、これらの結果については、Appendix VI 原位置調査装置および採取方法の開発を参考にされたい。

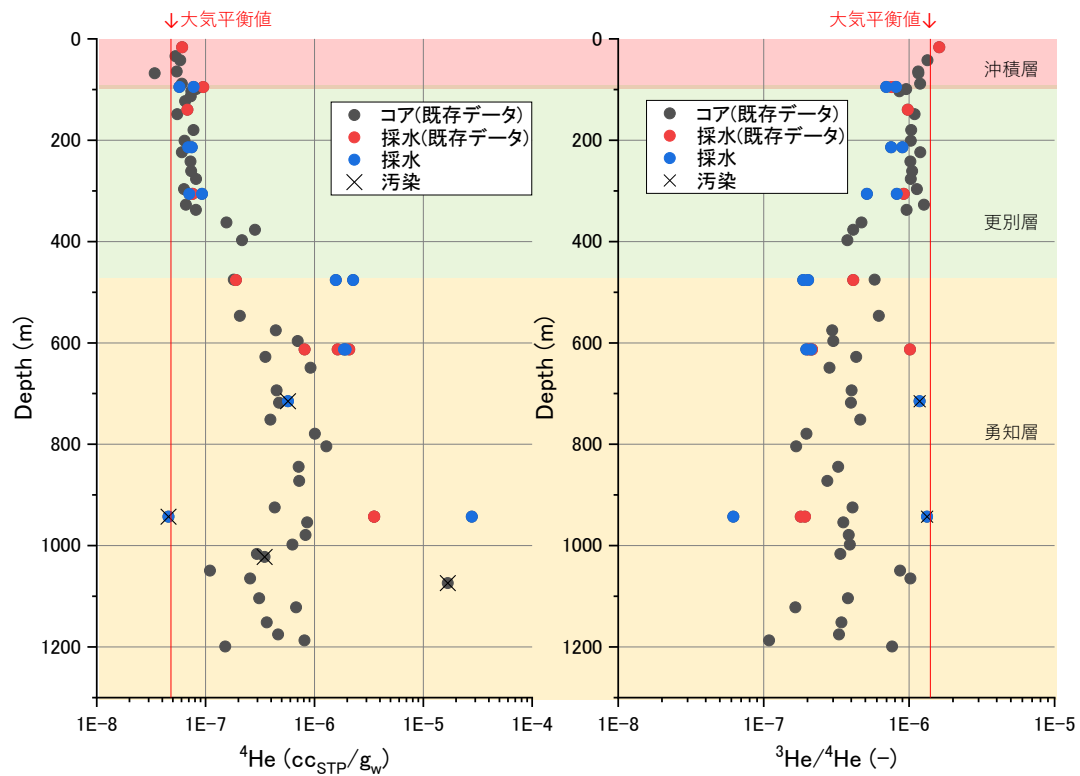


図 2.2-13 ${}^4\text{He}$ と ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ の鉛直分布

⑦ 地下水年代測定結果のまとめ

これらの結果をまとめると、表 2.2-1 のようになる。浅部の更別層中の地下水は、降水で地下水年代は長くても数万程度である。ただし、90.5-99.5 m 地点の地下水の水素酸素同位体は、優位に軽いものの、 ${}^{14}\text{C}$ 年代は 12,000 年程度と、氷期降水にしては若い年代を示す。一方で、306 m 地点は 214 m 地点よりも地下水年代が若くなっており、現降水のような特徴を有する。勇知層内は、浅部では降水と混合しているものの深部では化石海水となっている。

表 2.2-1 地下水年代測定結果のまとめ（サロベツ原野）

深度 (m)	主要溶存イオン	水素・酸素同位体	^3H	^{14}C ($\delta^{13}\text{C}$ 補正)	$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$	^4He	判定
90.5-99.5	降水	氷期降水	> 50	12,000	—	< 30000	降水 or 氷期降水
214	降水	氷期降水	> 50	25,000	—	< 30000	氷期降水
306	降水	現降水	> 50	14,000	—	< 30000	降水
476	汽水	降水/海水	> 50	> 30,000	化石海水	> 100000	降水/化石海水混合
613	汽水	降水/海水	> 50	> 30,000	化石海水	> 100000	降水/化石海水混合
715	海水	海水	> 50	> 30,000	化石海水	> 100000	化石海水
943	海水	海水	> 50	> 30,000	化石海水	> 100000	化石海水

2) その他の地域

上述したように、本事業では日本の地下水を年代別に、現降水、現海水、氷期降水、化石海水の四つに分類した。我が国の地形、地質、気象等の多様性を考えると、地下水年代の深度分布には地域差があることが予想され、その一般性は不明である。仮に、この一般的分布を明らかにすることができれば、地下水流動解析での下部境界条件の与え方に対するヒントを得ることができ、地域の地下水年代分布を論じる際の基準とすることができる。また、例えば将来、ある沿岸部が地層処分候補地になったとき、その地域の水文地質学的特徴を国民に対して説明する際にも有用だろう。このような理由から 2.2.1. (8) では地下水年代と流域の水文地質学的、地理学的な特徴との関連を解析しているが、本節では主に調査および研究事例のレビューを行うことにより、いくつかの地域での地下水年代分布を求める。このような理由から、本年度は越後平野、千葉県君津市、勇払平野を扱う。ただし、地層処分という観点において、本概念モデルには大きな仮定が含まれている。一般に地下水の水質や同位体を用いる研究では、野外調査にて既存井から地下水試料を得るが、多くの既存井では帯水層の深度すなわち地下水が通りやすい領域にスクリーンが設けられている。したがって、概念モデルでは自然状態の地下水流動を表現することを意図してはいるものの、既に既存井の利用というバイアスがかかっており、実際の地下水はより流れにくい状態になっている可能性がある。

① 越後平野

越後平野は、新潟平野とも呼ばれ、東側と南側は越後山脈と魚沼丘陵によって、西側は弥彦山脈と東頸城（くびき）丘陵の北端部によって境され、日本海沿岸部にそって南西から北東に細長く広がる海岸平野である（図 2.2-14）。その面積は約 2,000 km² であり、我が国の平野の中では屈指の大きさを有している（高野, 1979）。越後平野の地表地質は産総研（シームレス地質図）により図 2.2-14 のように記されているため、一見、中新統～鮮新統が基盤を形成し、更新統と完新統がその上位を埋めている形を予想させる。しかし、後述するように本地域で

は更新統内ですでに Cl^- 濃度は $5,000 \text{ mg/L}$ を超えており、地下水流動は不活発となっている。それは図 2.2-14 にも示したように Q1 (更新統底面) 標高分布が極めて深いことも影響している。以下に本事業における深部地下水の採取結果および地下水年代の概念モデルについて述べる。

昨年度および今年度にかけて、新潟市西区黒鳥字深湯 4330 に位置する経済産業省地盤沈下観測井 1,050 m 井 (スクリーン深度 : $972.0 \sim 1,043.0 \text{ m}$ 。以下、西蒲原 1,050 m とする) と、新潟市東区山木戸一丁目東新潟中学校敷地内 (スクリーン深度 : $553.0 \sim 558.0 \text{ m}$ 。以下沼垂 (ぬったり) 560 m とする) において地下水を採取した。新潟平野では更新統から鮮新統にかけていくつかの礫層が存在しており、上位から G1 層、G2 層・・・G7 層と続く。G1 層は完新統の基底付近に存在する礫層で連続性が良いが、G2 層以下は明確ではない。西蒲原 1,050 m のスクリーン深度はいわゆる G6 層、沼垂 560 m のスクリーン深度は G5 層に相当するとされている (新潟県県民生活・環境部, 2016)。

以下、これまで検討してきた図 2.2-4 のフローに基づき、地下水年代を解析した。

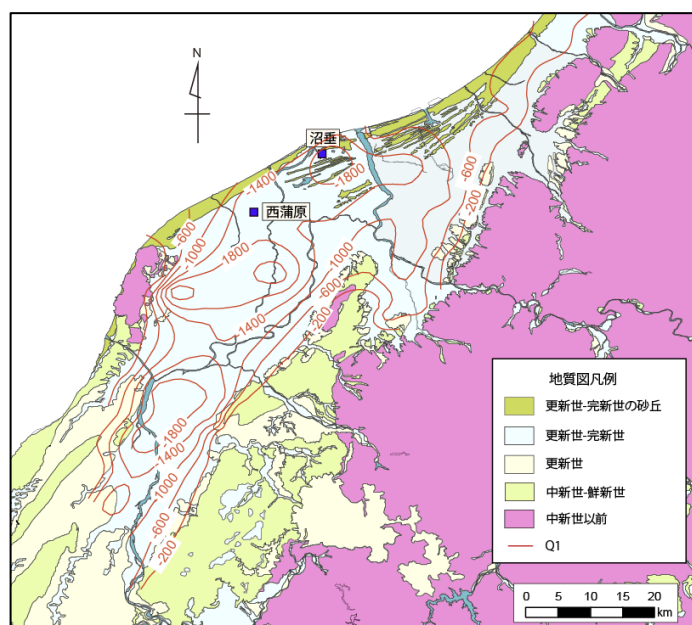


図 2.2-14 越後平野の地質 (産総研シームレス地質図を簡略化) と礫層分布図
赤いコンターは越谷モデル (越谷, 2012) による Q1 層の底面標高分布。図には西蒲原 1,050 m と沼垂 560 m の位置を示した。

② 主要溶存イオン

主要溶存イオンは、図 2.2-15 のヘキサダイアグラムに示すように、Na-Cl 型で海水を希釈したイオンバランスになっている。浅部 (560 m) から深部 (1,050 m) へと溶存イオン量が増加する傾向がみられる。このため海水起源の地下水が降水起源の地下水で希釈されていると考えられる。

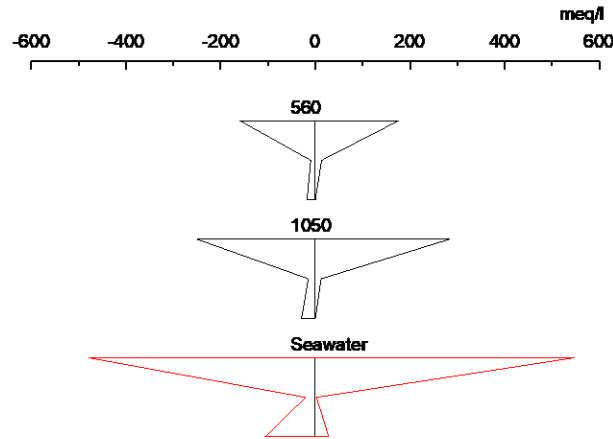


図 2.2-15 ヘキサダイアグラム (新潟)

③ 水素・酸素同位体比

水素・酸素同位体比の関係を図 2.2-16 に示す。採取した地下水は天水線よりも上に位置する。海水を起源とするが、海水と降水との混合線とは離れているように見える。この理由として、比較的低温での続成作用を受けたことにより、地下水の $\delta^{18}\text{O}$ が低くなった可能性もある (加藤・梶原, 1986 ; 長谷川ほか, 2012)。

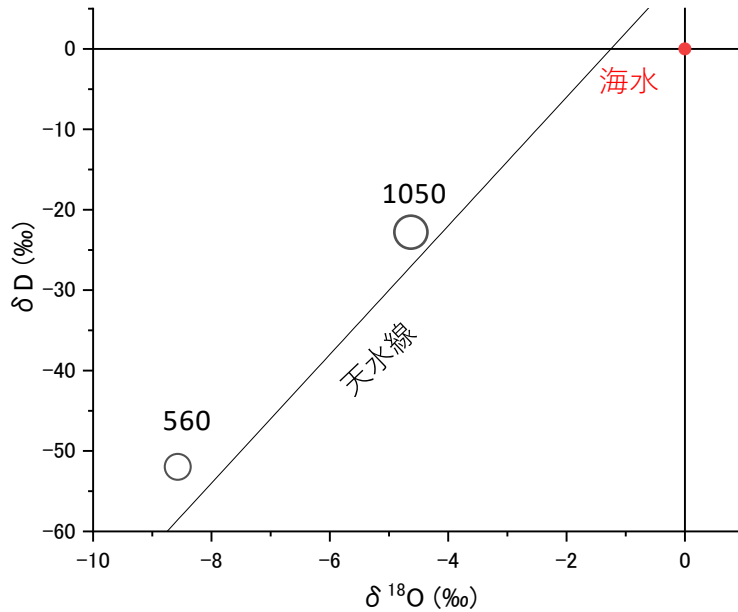


図 2.2-16 水素・酸素同位体比の関係 (新潟)

④ トリチウム

トリチウムは、これらの試料から検出されていないため、混合している地下水は、地下水年代が 50 年以上の降水であると推定できる。

⑤ ^{14}C

$\delta^{13}\text{C}$ と ^{14}C の関係を図 2.2-17 に示す。この図は、 ^{14}C の起源と各成分の混合の影響を表したものである。あわせて、無機炭酸濃度をシンボルの大きさに示した。本地点では ^{14}C は検出

されていないが、 $\delta^{13}\text{C}$ が海成炭酸塩よりも多く、無機炭酸濃度も非常に大きいことから、有機物分解に伴うメタン生成の影響が出ていると考えられる。これによって、 ^{14}C 濃度は希釈されていると考えられる。ただし、大気成分とメタン生成 CO_2 の混合線を考慮すると、混合線よりも十分に低いため、地下水年代は数万年以上であると推定できる。

⑥ ^{36}Cl

$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ は 4.1×10^{-15} と海水の初期値 (0.7×10^{-15}) よりも十分に大きい。ただし、本地点で 0 は岩石組成が不明なため、原位置平衡値が不明である。このため平衡に達しているかどうかの判断はつかない。このため、地下水の海水成分は 5 万年以上の地下水年代を持っていると考えられる。

⑦ そのほかの地下水年代測定結果

^4He 濃度は、大気平衡値 (4.8×10^{-8} ccSTP/gw) に対して 8×10^{-8} ccSTP/gw と 2.0×10^{-7} ccSTP/gw とやや高い。一般的な堆積岩の蓄積速度 1×10^{-12} ccSTP/gwy を考えると、数万～数十万程度の蓄積に相当する。 $^3\text{He}/^4\text{He}$ は大気平衡値 (1.4×10^{-6} ccSTP/gw) よりも、 9.7×10^{-7} と 7.7×10^{-7} とやや小さい程度であり、有意に蓄積が進んでいるとはいいがたい。このため、原位置生成によって多少蓄積が進んでいるものの、蓄積量は数十万年以下であると推定できる。

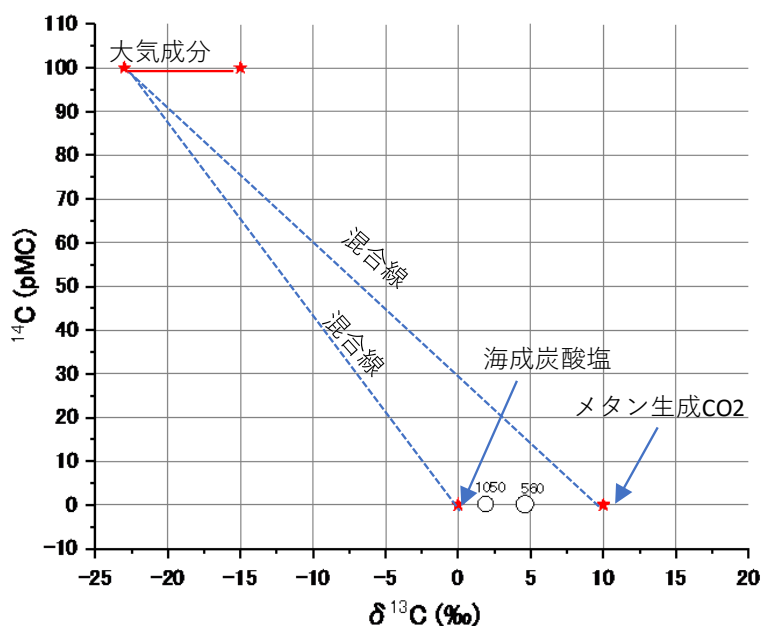


図 2.2-17 $\delta^{13}\text{C}$ と ^{14}C の関係 (新潟)

⑧ 地下水年代測定結果のまとめ

これらの結果をまとめると表 2.2-2 のようになる。本地点の地下水は、汽水であるが、 ^3H を含むような新しい地下水の混合は有意ではなく、海水の起源も $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ が現海水よりも有意に大きいことから 5 万年以上であると考えられる。概念モデルを図 2.2-18 に示すが、これについては次年度さらなる検討を行う。

表 2.2-2 地下水年代測定結果のまとめ（新潟）

深度 (m)	主要溶存イオン	水素・酸素同位体	^3H	^{14}C ($\delta^{13}\text{C}$ 補正)	$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$	^4He	判定
560	汽水	同位体変化	> 50	>20,000	> 50,000	数万～数十万	化石海水
1,050	汽水	同位体変化	> 50	>20,000	> 50,000	数万～数十万	化石海水

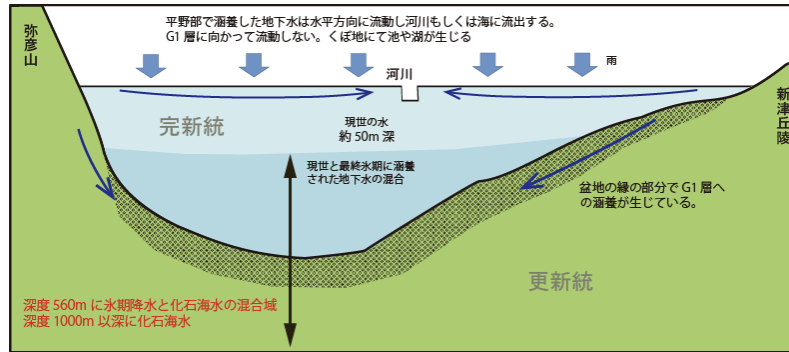


図 2.2-18 新潟平野の地下水年代分布の概念図（福本ほか, 2017 を用いて作成）。赤字が本事業にて示された部分。越後平野においては深度 50 m 程度から現降水から氷期降水の遷移帯になっており、氷期降水の影響は深度 560 m まで及んでいると言えそうである。

・千葉県君津帯水層（Machida et al., 2013）

房総半島中部の東京湾側に位置する千葉県君津市小糸川流域は単斜構造を有する地質を持つ流域の例として考えることができる。本地域の地質は全体的に北～北西に緩やかに傾斜する単斜構造をなしており、上位から完新統、中期～後期更新統、前期更新統となる。これ以深は鮮新統となる（図 2.2-19）。君津市（1996）、中島・渡辺（2005）に示されるように、本地域の地層はより細分化されているものの、これらの地層に含まれる鉱物組成は極めて似通っていることから、全体を一つの砂泥互層として扱うことが可能である。この近辺は上総掘りという人力による井戸掘削技術発祥の地として知られており、自噴井が数多く分布するが、自噴地下水を胚胎する一連の地層は君津帯水層と呼ばれている。

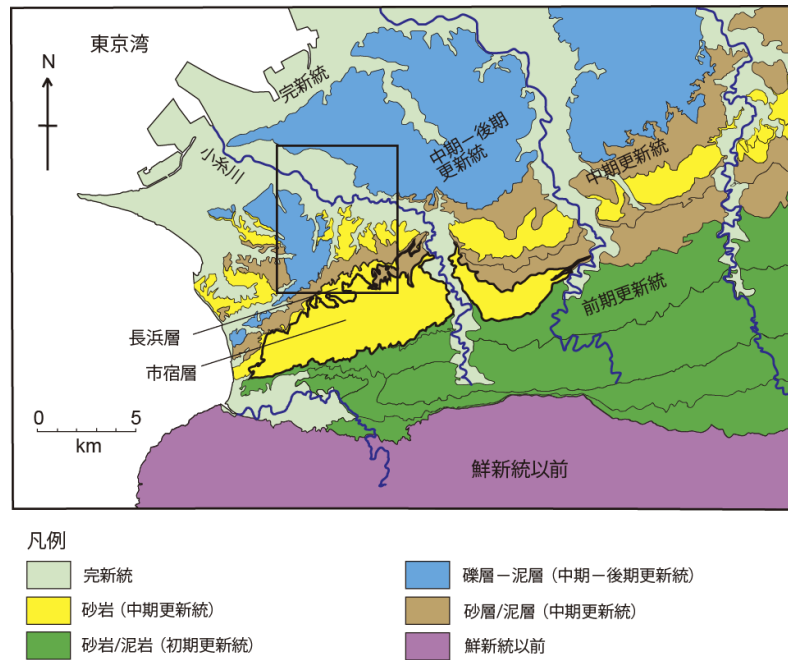


図 2.2-19 地質図 中島・渡辺 (2005) を元に作成
市宿層の分布域から北の斜面が、小糸川流域地下水の涵養域と考えられている。
(Machida et al., 2013 を用いて作成)

広域地下水流動系という視点で見れば、この地域の地下水は鬼泪—鹿野山系列を涵養域としている。流出域は東京湾海底部と言われているが、現在までに証拠となるデータはない。この地域の地下水水質は堆積岩中に微量に含まれるカルサイトによって大きく規定されており、涵養直後の pH は 7.5 以下だったものが被圧帯水層内に流動したときには 8.0 以上となる。さらにカオリナイトとモンモリロナイトとの平衡より、少なくとも数千年間、 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 型の極めて安定した水質を示すようになる (電気伝導度の上昇率は $20 \mu\text{S}/\text{cm}/1000$ 年)。このような安定した化学環境のため、地化学反応を考慮した炭素 14 調整年代の計算が可能となり、地化学に難透水層中の拡散を考慮した地下水年代が明らかにされている (図 2.2-20)。

図 2.2-20 のヘキサダイアグラム中に書かれている数値が地下水年代 (年) である。涵養域の湧水 (①、②) や不圧地下水 (③) の ^{14}C 年代は 0 年であり、下流側 (北側) へ向かうにつれて年代が増加していく。最下流部の④~⑥では 5,600~9,700 年となっている。湧水を除く全ての地下水の $\delta^{18}\text{O}$ や δD は極めて近いいため氷期降水のシグナルは認められず、 ^{14}C から得られている年代と矛盾はない。また、③と⑬の間の水頭差と透水係数から概算された地下水流速からも図 2.2-20 の年代は整合的である。以上の結果から図 2.2-21 のような概念モデルが描ける。この図では深度 500 m まで現降水が分布していることになり、サロベツ原野での結果 (現降水は地表から 20 m 深まで) と大きく異なる。調査地域の北から西には東京湾があるが、上述したように、君津帯水層中の被圧地下水の流出域が東京湾海底から流出しているかどうかは証拠が得られておらず、上位を厚い粘土層によって“パッキング”されていて、(自然状態の) 深層ではほとんど動いていない可能性もある。

勇払平野は北海道南部の平野部であり苫小牧市が位置する。解析地域は、北はウトナイ湖周辺、東は安平川、西は樽前川、南は太平洋によって囲まれている。この領域の地質構造は、上位から概して完新統、支笏火山噴出物層、更新統、鮮新統となる。

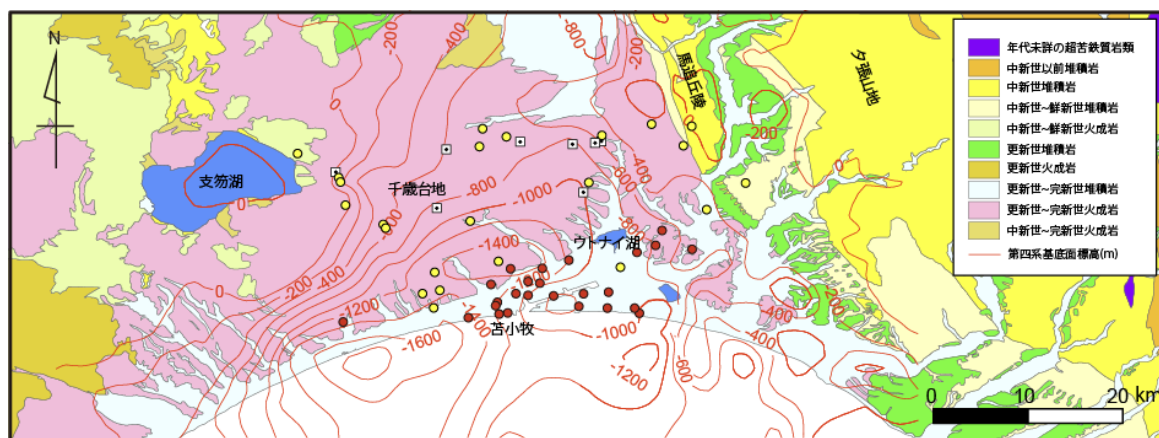


図 2.2-22 地質図（産総研シームレス地質図を改変）と第四系の基底面深度分布図（越谷・丸井, 2011）。

赤丸は町田ほか（2017）、黄丸は Takahashi et al.(2003)の調査地点（町田ほか, 2016 を用いて作成）

まず、勇払平野周辺の水文地質について述べる（図 2.2-22）。平野の北から西に広がる千歳台地は支笏火山噴出物によって覆われており、支笏湖（水面標高約 250 m）に向かう傾斜をなしている。支笏火山噴出物は後期更新世の噴出物であり、苫小牧市街地では層厚が 50 m に達する。支笏火山噴出物は高透水性で地下水流動が活発であるため、地下水中の溶存成分量は少なく、得られる地下水の多くから ^3H が検出される。勇払平野の低地には完新統の泥炭地が広がるが、浅層地下水の水質は一般に劣悪であるため、これを掘り抜き、その下にもぐりこんでいる支笏火山噴出物層と、その直下にある上部更新統の砂～砂礫層から地下水を得ていることが多い。

解析地域を拡大したものが図 2.2-23 である。美々川源流部では深度約 90 m の更新統中の地下水で ^3H が検出されており、現降水が到達していることがわかる。これは千歳台地から流動してきた地下水と考えられる。平野の東では、更新統中の地下水水質は安平川を境として著しく異なっており、安平川の東側では地下水年代の古い地下水が分布すると考えられている。その理由として、山口ほか（1978）は、安平川以東では高压の化石水を貯えた比較的古い年代の地層が地下浅くに伏在して、その上位の新しい年代の帯水層へ化石水を供給しているためと述べている。このような化石水が残留していることは、地下水流動が不活発であることを示唆する。したがって、安平川以東にも夕張山地のような標高の高い山地は存在するものの、これらの地層は古く、深層への涵養量は小さいと考えられている。

勇払平野内において、地下水流動は図 2.2-23 の A-B 線を境に異なることが知られており、A-B 線の北西側では採水深度に関わらず地下水流動は活発で地下水年代の若い地下水が存在し、一方で南東側においては、浅層の支笏火山噴出物層中では若い年代の地下水が、深層の更新統中は古い年代の地下水が存在すると推定されてきた（広田ほか, 1996）。このことは、採取層別に色分けされたヘキサダイアグラム（図 2.2-23）を見ても明らかであり、更新統より採取した黄色のヘキサダイアグラムは、A-B 線の近辺および西の地点 1a、4、9、11 では $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 型が卓越し、東の地点 16、17、20 では Na-Ca のイオン交換による NaHCO_3 型

が卓越している。特に地点 17 と地点 20 では支笏火山噴出物中の地下水と更新統中の地下水の水質のコントラストが確認される。また温泉水（鮮新統より採取）の地下水は NaCl 型を示しており、化石海水あるいは化石海水と淡水の混合が生じている。



図 2.2-23 勇払平野の浅層から深層地下水水質を示したヘキサダイアグラム (町田ほか, 2016 を用いて作成)

地下水の δD や $\delta^{18}O$ も地域差があり、平野の西部では更新統中の地下水は完新統や支笏火山噴出物中の地下水に近い値を示す一方で、平野東部の更新統では明らかに軽い同位体比を持つ地下水が得られている (図 2.2-24)。この軽い同位体比が高度効果によるものか、あるいは氷期降水であるかは、今後 ^{14}C 濃度等の調査により、明らかになるだろう。概念モデルは図 2.2-25 の通りである。

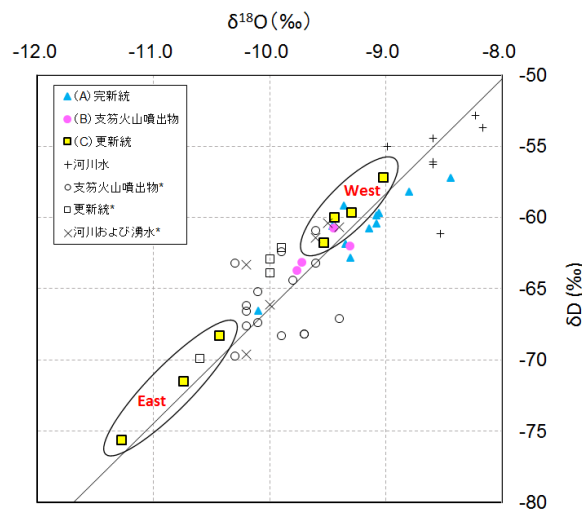


図 2.2-24 地下水、湧水、地表水の δD — $\delta^{18}O$ の関係 (町田ほか, 2016 を用いて作成)

+は 2014 および 2015 年の夏の調査結果、▲、●、■は 2016 年の調査結果 (いずれも町田ほか, 2016)、○、□、×は Takahashi et al.(2003)、の調査結果である。East と West は更新統から得られた地下水のうち、広田 (1996) が示した A-B 線の南東側と北西側を示す。

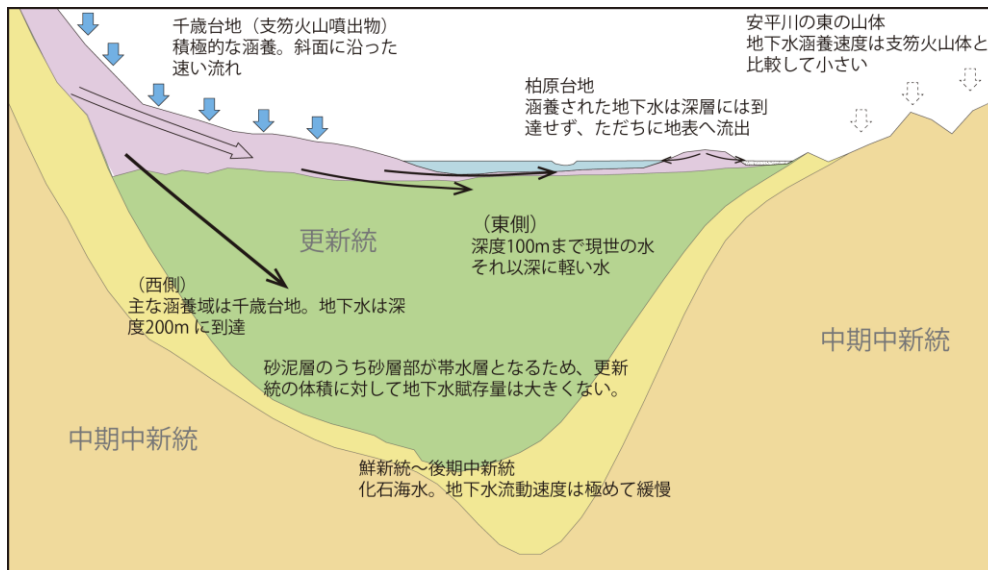


図 2.2-25 勇払平野の地下水概念モデル

平野東部の深度 100 m 以深に軽い同位体比を持つ地下水が分布する。今後はこの地下水年代を明らかにすることが重要である（町田ほか, 2016 を用いて作成）。

(6) 概略検討地点での調査結果

沿岸部の水文地質の理解（場の理解）を目的として、温泉試料を対象に地下水の年代測定を実施した。温泉試料では、源泉から直接地下水を採取することが困難な場合が多い。溶存ガス成分は、大気と接触すると抜ける場合や大気成分に近づくため、大気と接触する条件の場合には、溶存ガス類の採取は実施していない。ここでは、今年度採取した試料について、図 2.2-4 のフローに従い地下水年代を評価する。

① 主要溶存イオン

主要溶存イオンについて、図 2.2-26 に示すようにヘキサダイアグラムによる図化を行った。図には海水のイオンバランスも併せて示した。

この結果を淡水 ($\text{Cl} < 1,900 \text{ mg/L}$)、汽水 ($1,900 \sim 16,000 \text{ mg/L}$)、海水 ($16,000 \text{ mg/L}$) に分類した結果、淡水に分類されるものは 29 試料 (52%)、汽水に分類されるものが 21 試料 (37%)、海水に分類されるものは 6 試料 (11%) であった。沿岸部から採取しているものの、海水は比較的少なく、淡水や汽水が多い結果となっている。水質のタイプとしては、Na-Cl 型が 33 試料 (59%)、Na-HCO₃ 型が 12 試料 (21%)、Na-SO₄ 型が 4 試料 (7%)、Ca-Cl 型が 5 試料 (9%)、Ca-SO₄ 型が 2 試料 (4%) であった。沿岸部から地下水を採取しているため、Na-Cl 型に属するものが多い傾向にある。一般に、水質の進化は、Ca-HCO₃ 型が陽イオン交換で Na-HCO₃ 型となり、流動性が高い順に HCO₃ → SO₄ → Cl と支配的な陰イオンが変化していくことから、Ca-HCO₃ 型 → Na-HCO₃ 型 → Na-Cl 型で流動性が低下すると考えられる。このため、Na-Cl 型が多いということは流動性が低いことを表していると考えられる。

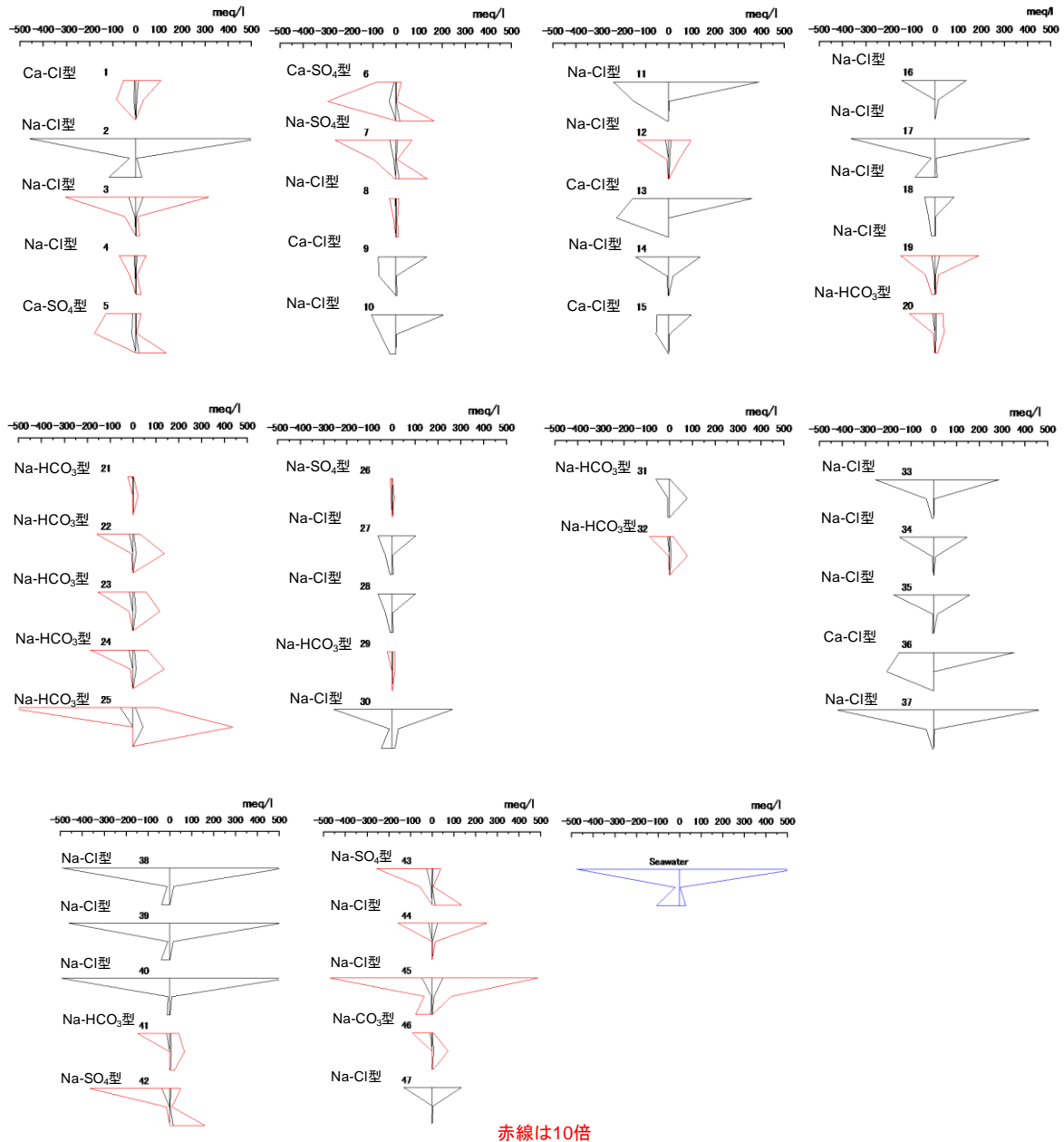


図 2.2-26 ヘキサダイアグラム (温泉試料)

また、微量成分に基づいて深部流体流入の判定を行った。風早ほか (2014) では西南日本について深部流体の調査を行ない、有馬型の深部流体の判定基準として、 Li/Cl の重量濃度比で 0.001 以上かつ Cl^- 濃度が 200 mg/L 以上という分類をしている。今回は風早ほか (2014) の基準に従って深部流体の混合について判定をした結果、試料 24 と 25 が有馬型の深部流体の判定基準値に適合した。ただし、ほとんどの地点において Li/Cl や B/Cl はいずれも海水より高い値を示すことから、熱水などの水岩石作用を受けた水が水素・酸素同位体比の大きなズレを生じない程度に混合しているか、 Li や B を多く含む地質を通過してきた水であると考えられる。

② 水素・酸素同位体比

水素・酸素同位体比を図 2.2-27 に示す。図では Cl^- 濃度でプロットの色を変えている。汽

水あるいは海水に属するものは天水線からずれて海水 (Seawater) 周辺にプロットされる。海水から離れたデータは、水岩石相互作用によって、水素・酸素同位体比が変化したものと考えられる。一部のサンプルでは、比較的低温での続成作用を受け、 $\delta^{18}\text{O}$ が欠乏し、天水線の上側にプロットされることがある (加藤・梶原, 1986 ; 長谷川ほか, 2012)。

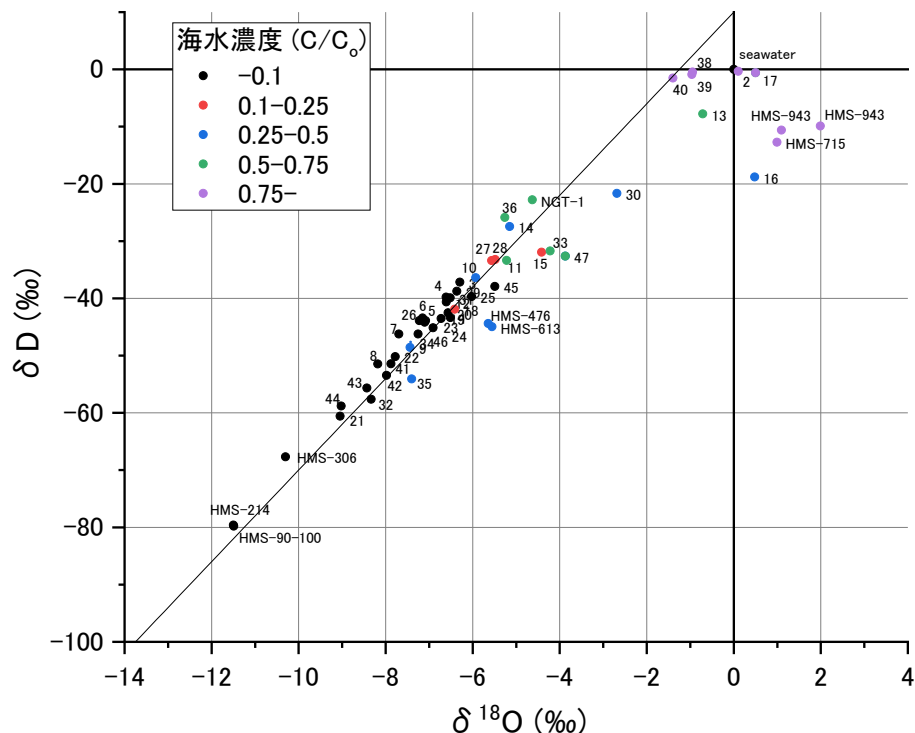


図 2.2-27 水素・酸素同位体比の関係 (温泉試料)

③ トリチウム

トリチウムは、半減期が 12.4 年であり、現在の降水は 2~5 TU 程度であるため、地下水年代が 50 年未満もしくは新しい地下水あるいは海水の混合が有意な試料でのみ検出される。今回の調査では、数地点で検出されており、これらは、塩分濃度が高ければ現海水、低ければ現降水であると判定することができる。

④ ^{14}C

^{14}C の分析結果を図 2.2-28 に示す。溶存炭酸量が大きいもので、 ^{14}C 濃度が高いものは、新しい地下水、現降水もしくは現海水の可能性が高い。溶存炭酸量が大きいもので、 ^{14}C 濃度の低いものは、海成炭酸塩や有機物の溶解、メタン生成 CO_2 の溶解の影響を受けている可能性がある。判定の方法としては、図中に示した破線が混合線であり、混合線上にプロットされるものは、これらの成分の単純混合で ^{14}C の変化が説明可能である。混合線よりも下にプロットされる場合は、放射壊変による濃度変化とみなすことができるため、 ^{14}C 年代を推定することができる。溶存炭酸量が少ない場合には、大気混入により ^{14}C 濃度が高くなっている可能性があり、これらについても注意が必要である。前述のように、Nakata et al.(2016)によれば、水試料の採水時には、大気混入によって 1 mg 程度の C が加わる可能性があるため、TIC 濃度が低く、 ^{14}C 濃度が高いものは、大気混入を疑う必要がある。

^{14}C 濃度と Cl 濃度との関係を図 2.2-29 に示す。現海水、現降水には ^{14}C が有意に含まれるが、化石海水には ^{14}C には含まれず、氷期降水では ^{14}C 濃度が低いことから、 ^{14}C と Cl^- 濃度

を用いて、地下水の区分が可能であると考えられる。この分類により、現海水と化石海水は明確に判別が可能である。現降水と氷期降水は 10 pMC を基準に判定した。これは 100 pMC を初期値とすると放射壊変によって 10 pMC 以下となるのが、約 2 万年以上になるためである。ただし、前述のように、海成炭酸塩やメタン生成 CO_2 が溶解した場合、10 pMC を下回る可能性があるため、必ずしも絶対的な基準ではない。このため、現降水と氷期降水の判別については信頼性が低い。

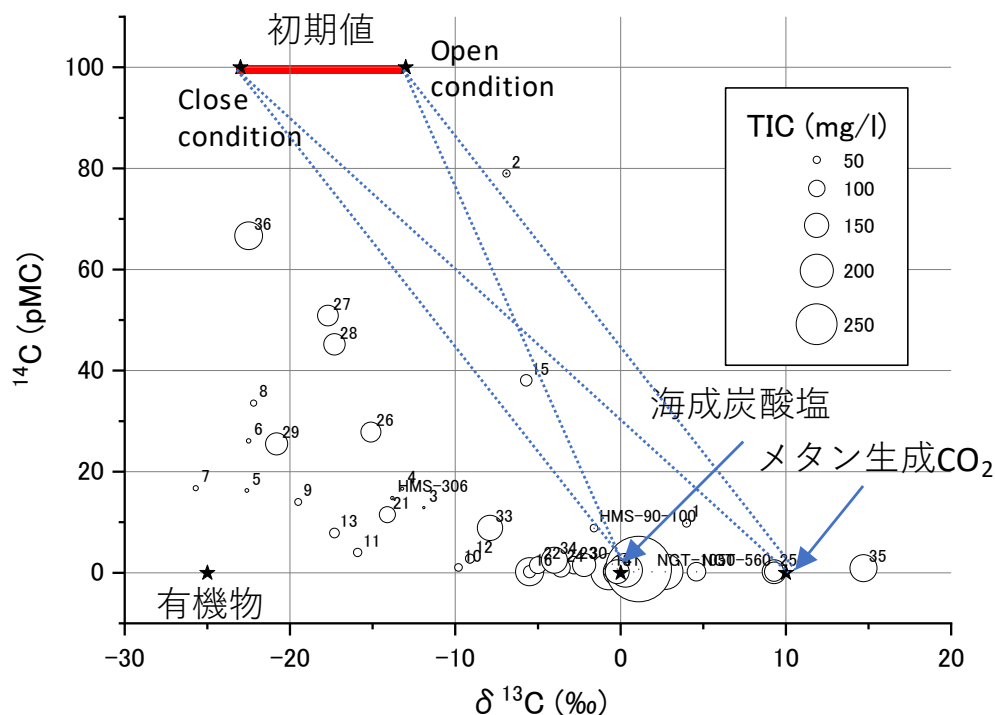


図 2.2-28 ^{14}C 濃度と $\delta^{13}\text{C}$ の関係

^{14}C 濃度を縦軸、 $\delta^{13}\text{C}$ を横軸にとり、シンボルの大きさは、溶存炭酸量 (TIC) を示している。

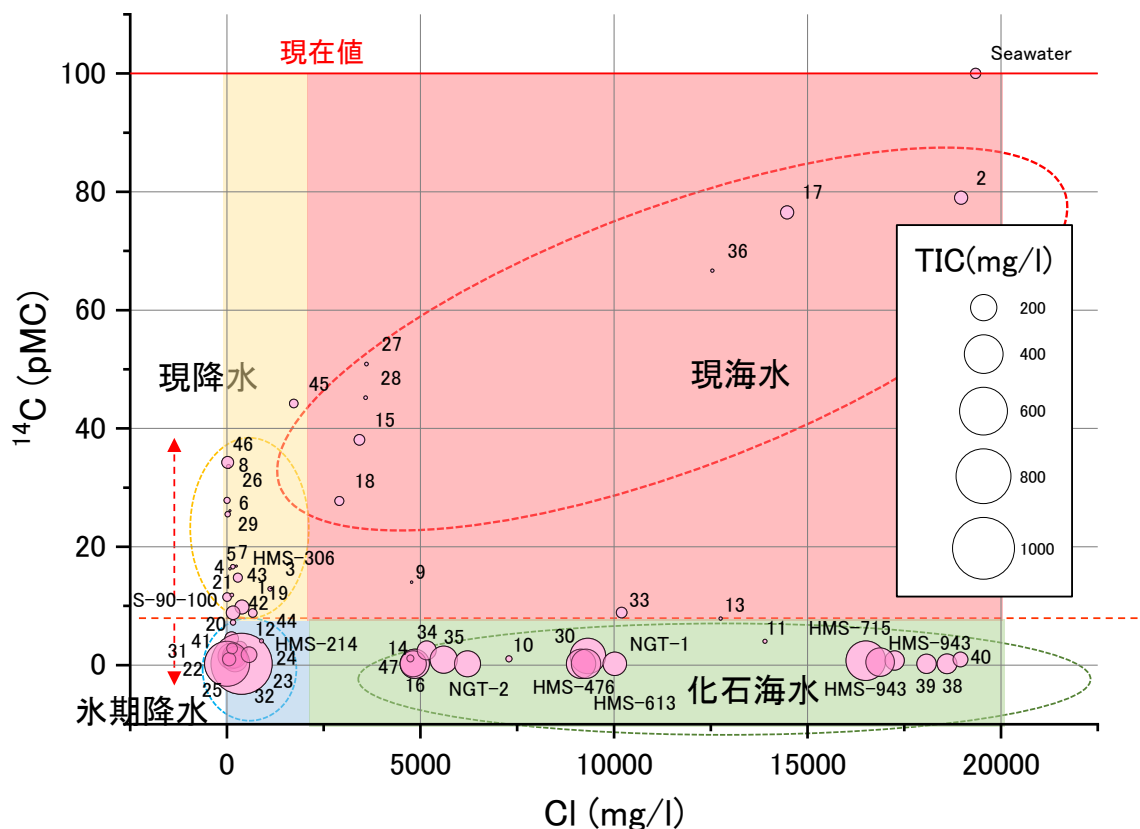


図 2.2-29 ^{14}C 濃度と Cl^- 濃度の関係および地下水の区分結果

⑤ ^{36}Cl

$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}^-$ と Cl^- 濃度の関係を図 2.2-30 に示す。ここでは、横軸に Cl^- 濃度、縦軸に $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}^-$ として整理した。また、前述の ^{14}C と Cl^- 濃度の関係から推定した地下水区分でプロットを別けて表示した。

$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}^-$ は、現海水では 0.7×10^{-15} である (Fifield et al., 2013)。 ^{36}Cl は、地層中で長期に滞留すれば (数十万年以上)、原位置生成も有意となるため、化石海水は現海水に比べて $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}^-$ が高くなる。このため、 Cl^- 濃度が高く、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}^-$ が海水よりも有意に高いものは、化石海水であると考えられる。

$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}^-$ と Cl^- 濃度の関係で整理しなおすと、 ^{14}C と Cl^- 濃度の関係で区分した化石海水と現海水の区分はおおむね妥当であったことが確認できる。評価結果が異なるのは試料 36 が現海水と評価されていたが、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}^-$ から見ると化石海水である。この試料は、溶存炭素量が 2.9 mg/L と少ないため、大気中の炭酸が溶解し、 ^{14}C 濃度が高くなっている可能性がある。試料 30 については、 ^{36}Cl の分析で ^{36}Cl が全く検出されなかったため、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}^-$ の分析結果が信頼できない可能性がある。

降水系の地下水について、 ^{36}Cl 年代を求めるためには初期値が必要となる。ただし、降水の初期値は、緯度や海からの距離に依存する。これは緯度によって宇宙線のフラックスが異なり、Ar を核破砕して生成する ^{36}Cl の量が変化するためと、海からの距離によって、海塩による希釈率が異なるためである。このため、降水系では初期値が明確でない場合、 ^{36}Cl 年代の推定が難しい。

以上、 ^{14}C と Cl^- の関係から推定された化石海水と現海水の区分と、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}^-$ と Cl^- を用いた評価結果は整合的であった。

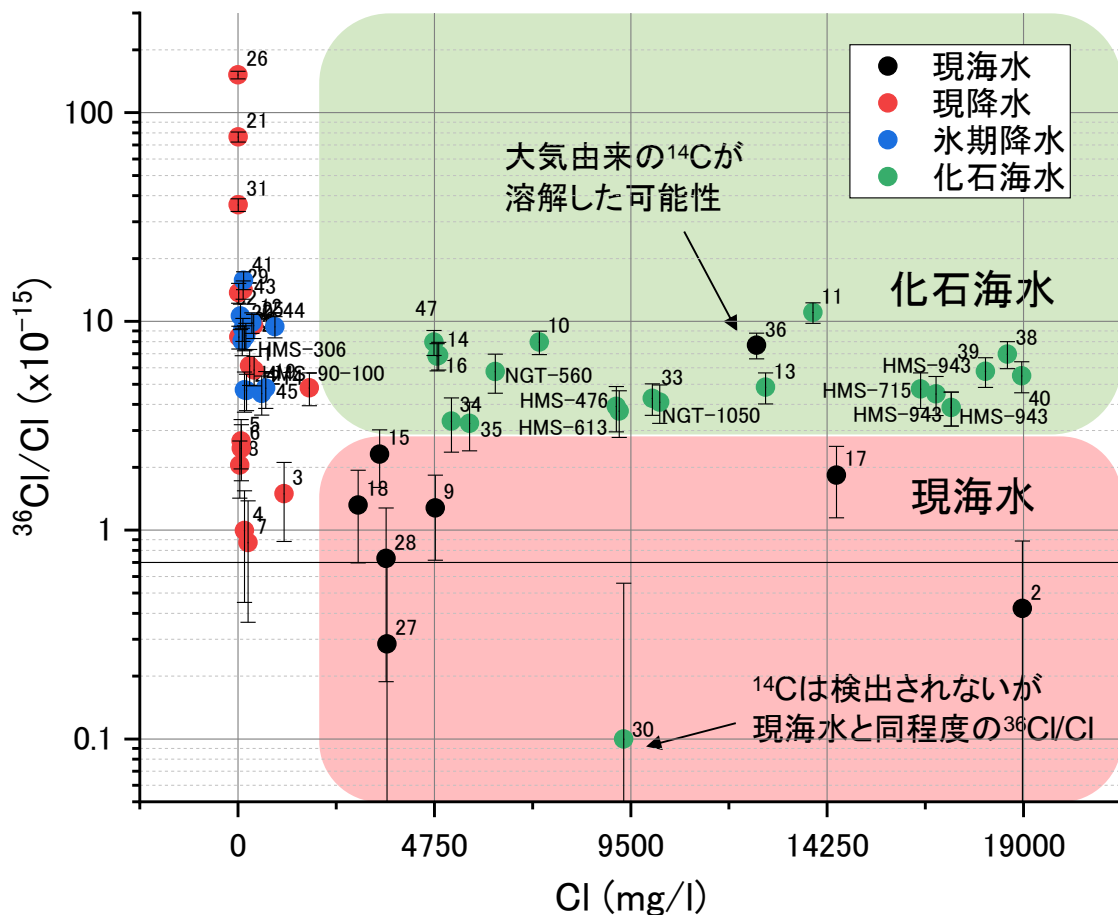


図 2.2-30 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ 濃度と Cl^- 濃度の関係および地下水の区分結果

⑥ そのほかの地下水年代測定結果

^4He 濃度と $^3\text{He}/^4\text{He}$ を図 2.2-31 に示す。図では、地下水の区分を考慮して表示するとともに、 ^4He の大気平衡濃度 ($=4.8 \times 10^{-8} \text{ ccSTP/g}_w$) と $^3\text{He}/^4\text{He}$ の大気平衡値 ($=1.4 \times 10^{-6}$) を併せて示した。この結果、 ^4He 濃度が高く、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ が低い、蓄積が進んでいるとみなせる地下水については、氷期降水や化石海水が多い傾向にある。特に、この傾向が強いものは化石海水が多い。化石海水に分類されたものでも、大気平衡に近いところに位置するものは、採水時に大気にふれた影響でガスが抜ける、あるいは、大気と交換したと考えられるものが多い。溶存ガスについては、大気と接触すると、大気と交換し大気の濃度に戻ってしまう可能性が高いため、注意が必要である。一方で、 ^4He 濃度は高いが、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ が高いものは、マントル由来の He が流入していると考えられる。これらは、火山などの影響をうけた温泉水であると考えられる。

$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ と Cl 濃度の関係を図 2.2-32 に示す。降水系の地下水ではヨウ素濃度が低く、分析が困難であることから、 I 濃度が $10 \mu\text{g/L}$ を超える海水系の地下水を中心に分析を実施している。 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ は現海水や化石海水にかかわらず、おおむね $10^{-14} \sim 10^{-13}$ に分布している。 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ は半減期 1,360 万年、初期値は 150×10^{-14} 程度とされている。この条件で、 ^{129}I 年代を計算すると、すべての試料で年代が 1000 万年を超える。一部例外はあるが、化石海水に分類されるものの $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ はおおむね低い 10^{-14} オーダー、氷期降水では 10^{-13} オーダーとなっている。試料 10 と 11 では濃度が高くなっているが原因は不明である。 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ による地下水年代測定については、起源や動態について不明確な部分が多いため、今後事例を増やすとともに、他の方法と比較して検討が必要である。

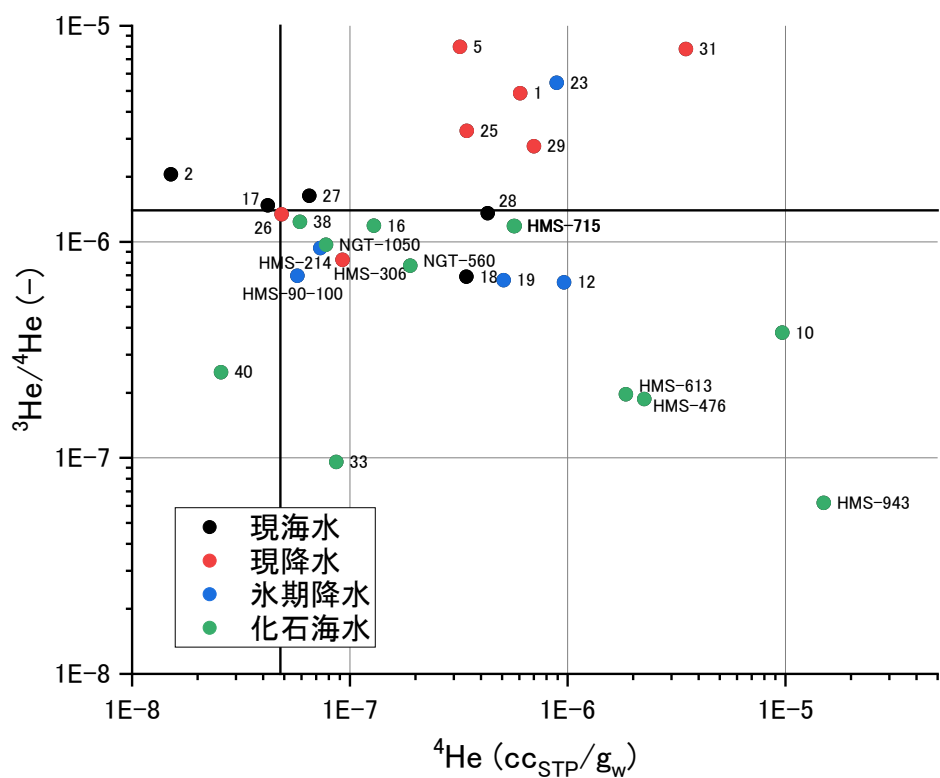


図 2.2-31 ^4He 濃度と $^3\text{He}/^4\text{He}$ 濃度の関係

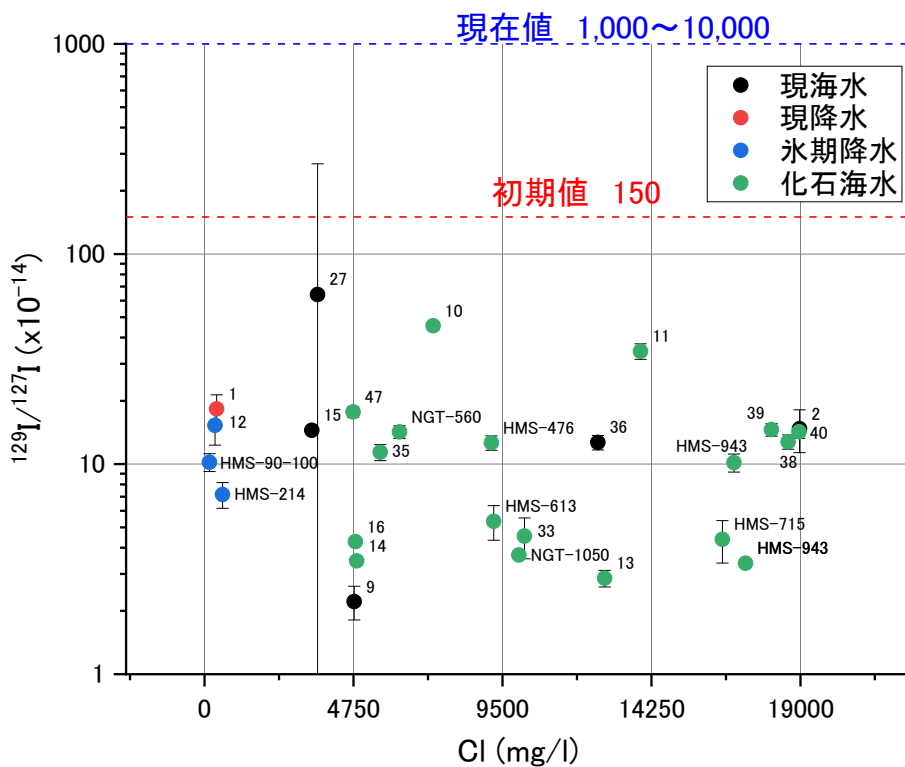


図 2.2-32 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ と Cl^- 濃度の関係

⑦ 地下水年代測定結果のまとめ

地下水年代測定結果に基づいて、地下水を区分すると、表 2.2-3 に示すように、現海水 8 試料 (14%)、現降水 13 試料 (23%)、氷期降水 15 試料 (27%)、化石海水 20 試料 (36%) となる。ここでは、現降水と氷期降水の淡水系地下水、現海水と化石海水の海水系地下水は、 Cl^- 濃度で 1,900 mg/L を基準に識別している。また、現降水と現海水の 2 万年未満の地下水、氷期降水と化石海水の 2 万年以上の地下水は、 ^{14}C 濃度で 10 pMC を基準としている。現降水と氷期降水との識別は ^{14}C 濃度のみに基づいており、 $\delta^{13}\text{C}$ や溶存イオン量などによる補正を実施していないため不確実性が高い。一方で、現海水と化石海水の識別は、図 2.2-33 に示すように、 ^{14}C だけでなく $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ でも確認している。 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ は現海水が 0.7×10^{-15} 程度であることから、測定誤差を考慮し、 3×10^{-15} を基準に、それ以下を現海水、それ以上を化石海水としている。この図は、 Cl^- 濃度が高く、 ^{14}C 濃度が低い地下水は、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ が大きく、化石海水であることを示している。ただし、試料 30 と 36 の 2 試料は、これらの基準に反した評価結果になっている。また、試料 39 については、化石海水と判定されているが、トリチウムが検出されている。これらの 3 試料については再分析などが必要と考えられる。ここでは、 Cl^- 濃度が低くても化石海水としているが、これは水岩石相互作用で希釈される場合があるためである。実際には、氷期降水と化石海水が混合している可能性がある。このように、様々な地下水年代測定によって、総合的に現海水、現降水、氷期降水、化石海水の判定ができることがわかった。

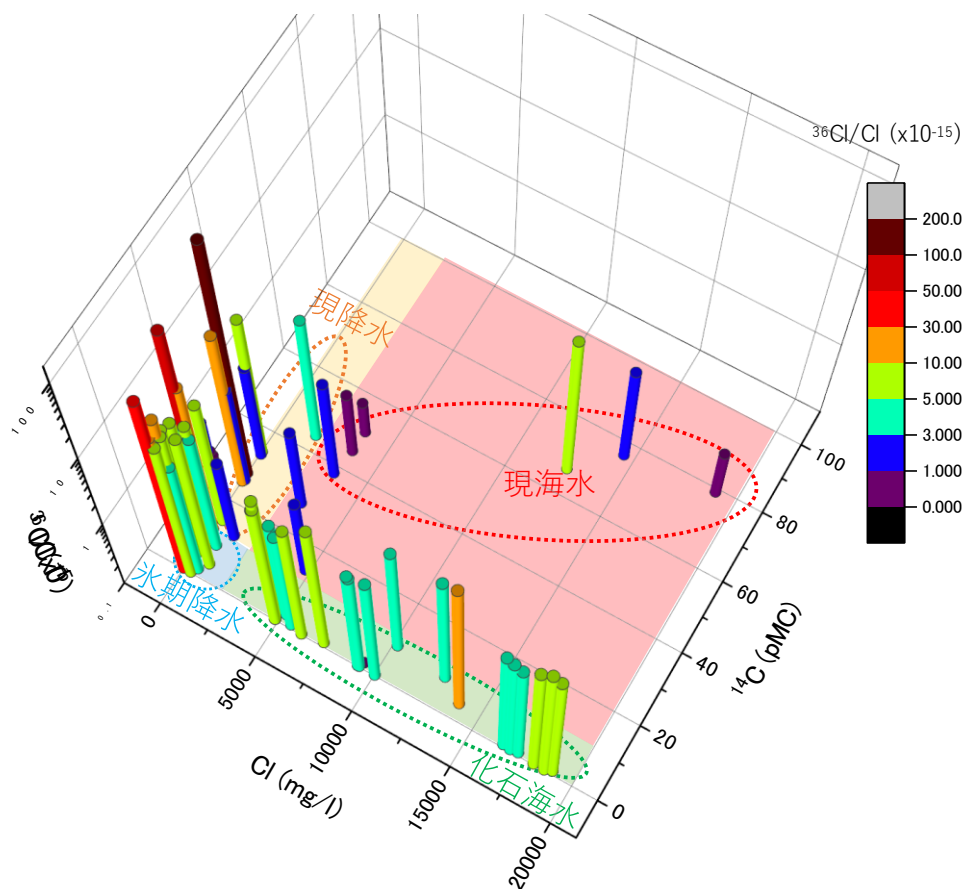


図 2.2-33 Cl^- 濃度、 ^{14}C と ^{36}Cl との関係

表 2.2-3 地下水年代測定結果のまとめ

No.	水質	Cl (mg/L)	水質タイプ	³ H (TU)	¹⁴ C (pMC)	³⁶ Cl/Cl (x10 ⁻¹⁵)	判定
1	淡水	390	Ca-Cl	0.4	9.8%	5.9	現降水
2	海水	19,000	Na-Cl	<0.3	79.0%	0.4	現海水
3	淡水	1,100	Na-Cl	<0.3	12.9%	1.5	現降水
4	淡水	160	Na-Cl	<0.3	16.6%	1.0	現降水
5	淡水	78	Ca-SO ₄	<0.3	16.3%	2.7	現降水
6	淡水	82	Ca-SO ₄	<0.3	26.1%	2.5	現降水
7	淡水	240	Ca-SO ₄	<0.3	16.7%	0.9	現降水
8	淡水	43	Na-Cl	<0.3	33.6%	2.0	現降水
9	汽水	4,800	Ca-Cl	<0.3	14.0%	1.3	現海水
10	汽水	7,300	Na-Cl	<0.3	1.0%	8.0	化石海水
11	汽水	14,000	Na-Cl	<0.3	4.0%	11.0	化石海水
12	淡水	340	Na-Cl	<0.3	2.8%	9.9	氷期降水
13	汽水	13,000	Ca-Cl	<0.3	7.8%	4.8	化石海水
14	汽水	4,900	Na-Cl	<0.3	N.D	6.9	化石海水
15	汽水	3,400	Ca-Cl	0.9	38.1%	2.3	現海水
16	汽水	4,800	Na-Cl	<0.31	N.D	6.8	化石海水
17	汽水	14,000	Na-Cl	<0.32	76.5%	1.8	現海水
18	汽水	2,900	Na-Cl	<0.32	27.7%	1.3	現海水
19	淡水	670	Na-Cl	<0.32	8.8%	4.8	氷期降水
20	淡水	120	Na-HCO ₃	<0.33	4.5%	9.2	氷期降水
21	淡水	3.4	Na-HCO ₃	<0.32	11.5%	76.5	現降水
22	淡水	100	Na-HCO ₃	0.39	1.5%	8.1	氷期降水
23	淡水	190	Na-HCO ₃	0.36	1.5%	8.5	氷期降水
24	淡水	210	Na-HCO ₃	<0.32	1.0%	4.7	氷期降水
25	淡水	380	Na-HCO ₃	<0.32	N.D	9.5	氷期降水
26	淡水	2.6	Na-SO ₄	0.49	27.8%	151.5	現降水
27	汽水	3,600	Na-Cl	<0.34	50.9%	0.3	現海水
28	汽水	3,600	Na-Cl	<0.33	45.2%	0.7	現海水
29	淡水	19	Na-HCO ₃	<0.32	25.5%	13.7	現降水
30	汽水	9,300	Na-Cl	<0.33	1.5%	0.0	化石海水?
31	淡水	7.1	Na-HCO ₃	<0.32	N.D	36.2	氷期降水
32	淡水	58	Na-HCO ₃	<0.33	1.0%	10.6	氷期降水
33	汽水	10,000	Na-Cl	<0.30	8.9%	4.1	化石海水
34	汽水	5,200	Na-Cl	<0.29	2.5%	3.3	化石海水
35	汽水	5,600	Na-Cl	<0.29	0.9%	3.3	化石海水
36	汽水	13,000	Ca-Cl	<0.30	66.7%	7.7	現海水?
37	海水	16,000	Na-Cl				
38	海水	19,000	Na-Cl	<0.32	N.D	7.0	化石海水
39	海水	18,000	Na-Cl	0.4	N.D	5.8	化石海水?
40	海水	19,000	Na-Cl	<0.33	0.9%	5.5	化石海水
41	淡水	140	Na-HCO ₃	<0.33	2.8%	15.7	氷期降水
42	淡水	160	Na-SO ₄	<0.32	7.2%	8.4	氷期降水
43	淡水	130	Na-SO ₄	<0.33	11.8%	14.2	現降水
44	淡水	890	Na-Cl	<0.34	4.1%	9.4	氷期降水
45	淡水	1,700	Na-Cl	0.8	44.2%	4.8	現降水
46	淡水	20	Na-HCO ₃	<0.32	34.3%	8.4	現降水
47	汽水	4,700	Na-Cl	<0.32	1.1%	8.0	化石海水

(7) 地化学環境評価

地下水水質は安全評価上必要な地化学特性を把握するための基本情報である。また、地下水流動解析の確証法の一つとして、流動解析結果と実際の地下水水質分布を比較することがしばしば行なわれる。さらに、地下水年代測定においては原位置性を保った地下水を採取する必要があることや、地下水流動解析同様に水質・同位体の分布との比較が年代の妥当性を示す上で重要となることから、可能な限り正しい水質データを取得することが望まれる。

地下深部の水質はボーリング孔での計測・採水によって得られるが、ボーリング孔掘削時の掘削水の地下水への混合や、採水時に地上まで揚水した際に発生する溶存ガスの脱ガス、地下水試料への大気の混入など、原位置性を保った計測や採水は容易ではない。本事業では、北海道幌延町浜里の DD-1 孔を対象として水質調査を行い、得られたデータの妥当性について検討を行った。また、DD-1 孔に隣接する DD-2 孔および新潟県の東新潟沼垂観測井において地下水溶存ガスの採取を行なった結果についても報告する。検討・報告内容は以下の四つで構成される。

- 1) 浜里 DD-1 孔において蛍光染料濃度および物理化学パラメータのモニタリングを行ない、得られた水質の妥当性について検討。
- 2) 地下水溶存ガスのガス組成と炭素同位体比から見た起源の推定。
- 3) DD-1 孔で得られた pH と ORP の妥当性の検討。
- 4) まとめ

1) DD-1 孔における予備排水中の蛍光染料濃度および物理化学パラメータのモニタリング

掘削時、掘削水にトレーサー物質を加えておくことにより、その後におこなわれる揚水時に地下水に対する掘削水等の混合率を知ることができる。本孔では掘削水に対し 30 mg/L のアミノ G 酸を加えているが、本来の地下水の水質を得るためには掘削水の混合が無いこと、すなわち、アミノ G 酸の濃度がゼロになることが理想である。また、採水区間の水が完全に原位置地下水に置き換われば、各物理化学パラメータは安定した値を示すはずである。また、物理化学パラメータは採水における水質の安定を見るだけでなく、地化学の評価において熱力学的計算に用いられるなどの重要なパラメータである。十分に予備排水を行い、安定した値を取得することが望ましい。

物理化学パラメータのうち、pH と ORP は地上での測定値が原位置の測定値と異なる場合のあることが知られている。そのため、これらの測定は原位置で行なうことが望ましいが、实例は多くない。そこで本事業では DD-1 孔における地下水試料採水前におこなわれる予備排水において地上と原位置での物理化学パラメータ測定（水温、pH、EC、ORP、DO）を行い、それらの値の妥当性の検討を行った。

以下に各揚水区間（214 m、306 m、476 m、613 m、715 m、943 m）における予備排水中の蛍光染料濃度測定ならびに物理化学パラメータ測定の結果および考察を示す。

① 214 m 区間

地上のフローセルでの測定は堀場社製 W-22XD を使用し、原位置の測定には Idronaut 社の Oceanseven303 を使用した。揚水はポンプで連続揚水を行った。採水開始時刻までの積算揚水量は 32,204L であり、パッカーで区切られた区間から孔口までの容積（デッドボリューム（DV））の 36.9 倍の揚水が行われている。

蛍光染料濃度、地上フローセルおよび原位置のモニタリング結果を図 2.2-34 に示す。縦軸をそれぞれのパラメータ、横軸を積算揚水量とし、揚水開始から採水開始時刻までのデータをプロットしている。掘削水のトレーサーであるアミノ G 酸の濃度は揚水開始後速やかに低下し、1DV（約 900L）を揚水し終えることからおおむね一定の値となる。採水時点の濃度は 0.21 mg/L である。アミノ G の測定は蛍光光度計により行ったが、昨年度の本報告書で記述したとおり、地下水に溶存する天然有機物の波長ピークが大きく、アミノ G 酸に帰属するピークが隠されてしまうことから、蛍光染料濃度は不明である。ただし、その濃度は高くとも 0.21 mg/L 以下である、すなわち、掘削水の混合率は 0.7%以下といえることができる。

地上のフローセル測定において DO を除くパラメータは 19,000L 付近で大きく乱れているが、その時刻でポンプの流量を変化させた影響と考えられる。また、24,000L 付近でもギャップやピークがみられるが、1 日程度揚水を停止している時間に当たり、その影響が出ているものと考えられる。アミノ G 酸の濃度は揚水開始後に急激に低下し、おおむね一定値を示している。pH は揚水初期に一旦上昇した後は低下傾向にあり、一定値へと向かっているように見える。EC は揚水開始後に急激に低下し、おおむね一定値を示す。ORP は細かな乱れはあるがおおむね一定値となっている。

原位置モニタリングの結果では、温度は安定した値を示している。pH は緩やかに減少し、一定の値に向かっているように見える。24,000L 付近の急激な上昇は 1 日程度揚水停止をした影響である。EC は揚水開始後から急激に低下し、早期に緩やかな低下に転じ、わずかな低下をしながらおおむね一定の値を示している。ORP は 24,000L あたりで揚水を停止した影響が出ているが、揚水期間を通じて緩やかに低下している。

地上・原位置ともに pH は低下傾向にあるが、おおむね一定値に近づいている。ORP は低下傾向にある。EC と DO は一定値を示している。蛍光染料濃度は天然有機物と区別がつきにくいものの、0.21 mg/L よりも低いといえる。以上から、本区間は原位置の水に完全に置き換わってはいないものの、原位置の性質に近い水が得られているものと考えられる。

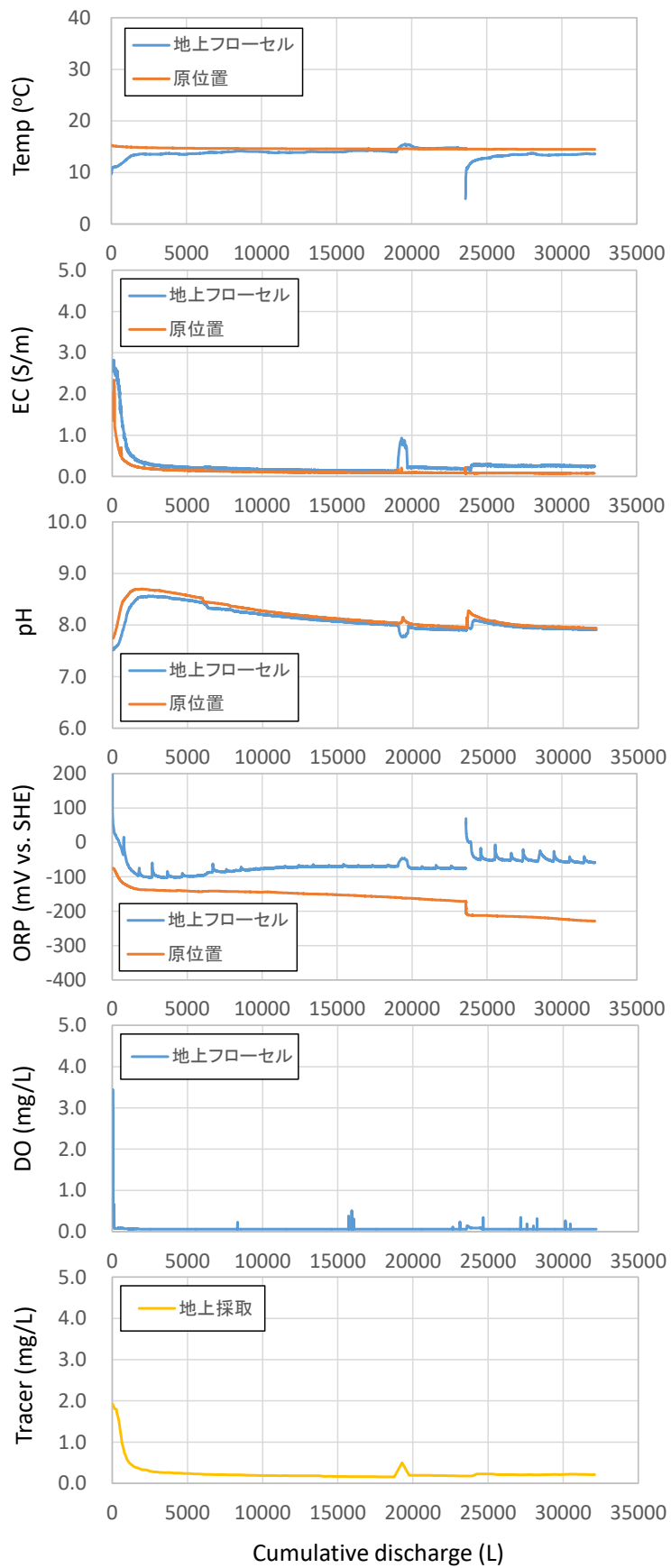


図 2.2-34 214 m 区間におけるモニタリング結果

② 306 m 区間

本区間では原位置で用いる予定であった機材の不調により、堀場社製 W-22XD とフローセルを用いた地上測定のみ実施している。本区間の揚水はポンプで連続揚水を行った。採水開始時刻までの積算揚水量は 31,967L であり、DV の 34.2 倍の揚水が行われている。

蛍光染料濃度および地上のフローセルによるモニタリング結果を図 2.2-35 に示す。縦軸をそれぞれのパラメータ、横軸を積算揚水量とし、揚水開始から採水開始時刻までのデータをプロットしている。

アミノ G 酸の濃度は採水時点で 0.18 mg/L である。アミノ G 酸に帰属するピークは天然有機物のピークと干渉していることから正確な濃度は分からないが、高くとも 0.18 mg/L 以下であるといえる。すなわち、掘削水の混合率は 0.6% 以下ということができる。アミノ G 酸の濃度は揚水開始後に急激に低下し、緩やかに減少する傾向にある。揚水の初期は孔内のたまり水であり、採水区間の地下水ではない。原位置から地上までの採水装置の DV が約 900L あることから、積算揚水量 900L 以降から揚水された水に区間の地下水が混合していることになる。pH は揚水初期に乱れるがその後は低下する傾向にある。30,000L あたりから一定になっているようにも見えるが計測を継続しなければ分からない。EC についてはおおむね 10,000L を越えるあたりからごくわずかに低下してく傾向が見られるが、おおむね一定値である。ORP は 5,000L から 2,500L あたりでおおむね一定値を示すが、25,000L を越えたあたりで乱れが生じている。25,000L 付近では地上で別の実験を行なうためにフローセルへの流量を大きく絞ったことから、その影響を受けているものと考えられる。フローセルへの流量を絞るとフローセル内の内圧が低下すると考えられることから、DO が一定して 0 mg/L であるものの、DO 電極が応答しない程度のわずかな大気の混入を受けた可能性が考えられる。

pH が安定しているかどうかは不確定であり、また、トレーサー濃度や EC がわずかであるが低下傾向であることから掘削水等の混合の影響が残っていると考えられるが、トレーサー濃度が十分に低いと考えられることから。本区間の水は原位置の地下水におおむね置き換わっていると考えられる。

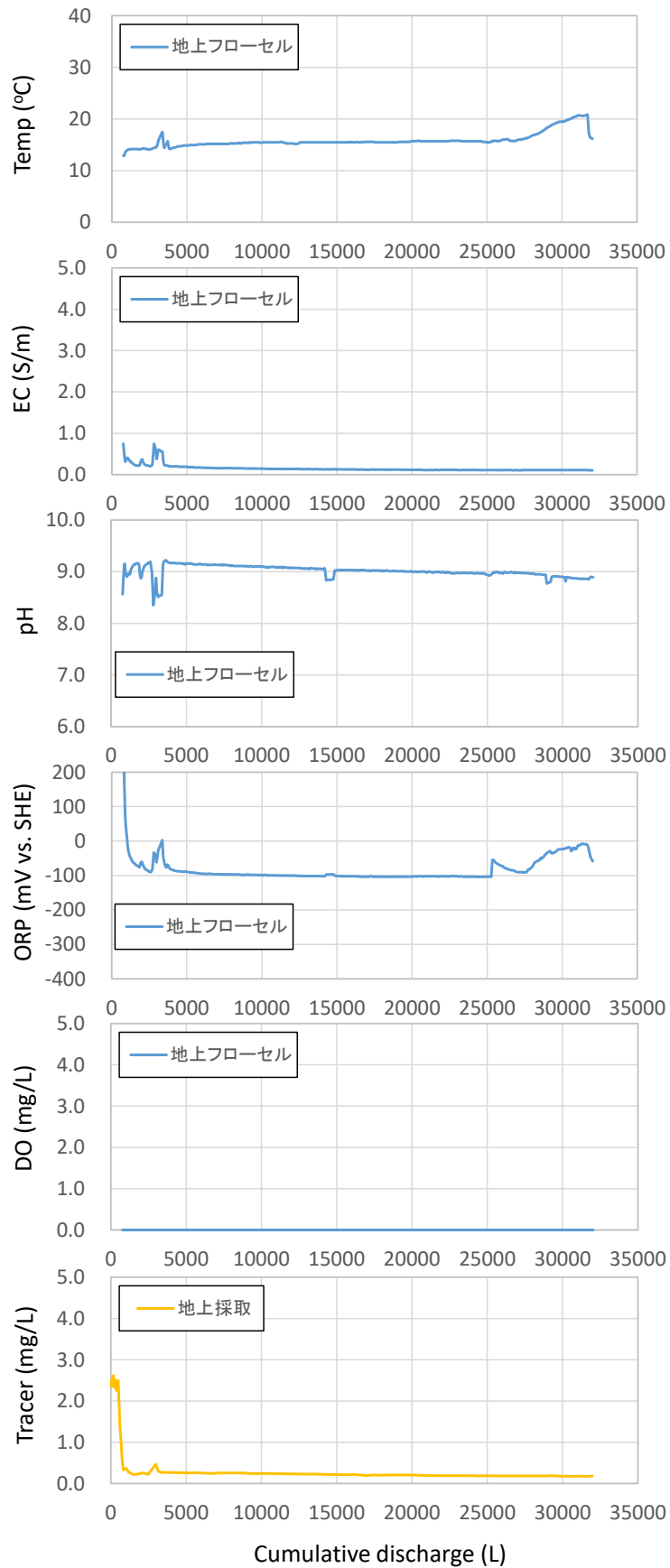


図 2.2-35 306 m 区間におけるモニタリング結果

③ 476 m 区間

地上のフローセル測定と原位置の測定ともに、Idronaut 社の Oceanseven303 を使用している。ただし、本区間の採水開始時刻までの積算揚水量は 540L であり、DV の 0.5 倍の揚水量である。すなわち、原位置の水は地上まで達していないことから地上のフローセル測定値は示していない。

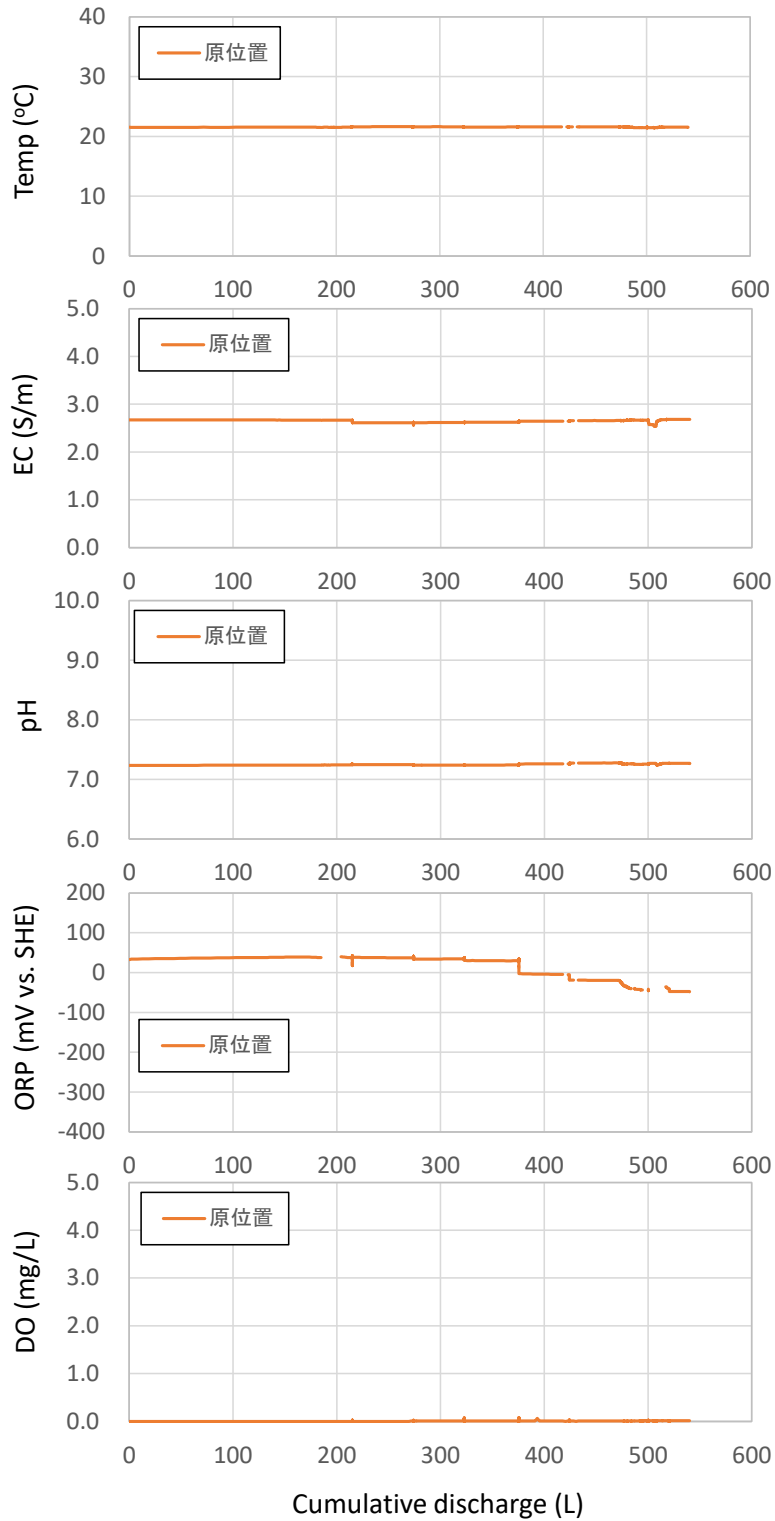


図 2.2-36 476 m 区間におけるモニタリング結果

原位置のモニタリング結果を図 2.2-36 に示す。縦軸をそれぞれのパラメータ、横軸を積算揚水量とし、揚水開始から採水開始時刻までのデータをプロットしている。揚水はポンプで連続揚水を行なった後、管内加圧式直接揚水（エアリフト）を行った。エアリフトでは、採水区間のすぐ上にある Oceanseven303 の直上から地上まで細い採水チューブをつないであり、孔内の地下水面を加圧することで、採水チューブから排水を行うものである。採水はそのチューブの DV を排水した後に実施している。パッカー区間の体積は 22L であることから積算揚水量から考えるとパッカー区間の水は 23.3 倍入れ替わっており、エアリフト方式ではその水を直接的に採水していることになる。掘削時の掘削水のトレーサーにはアミノ G 酸を使用している。地上採水後の原位置採水装置を用いた採水で得られた水のアミノ G 酸濃度は 0.9 mg/L であった。天然有機物の影響を受けてアミノ G 酸のピークが被ることから正確な濃度は分からないが、アミノ G 酸の濃度は 0.9 mg/L 以下すなわち掘削水の混合率は 3%以下といえる。pH、水温、EC はおおむね一定値を示し、DO もおおむね 0 mg/L で一定しているといえる。ORP は揚水開始から 380L 付近まで一定値を示した後、低下し、480L 以降は一定値を示している。

全体に物理化学パラメータの値が安定しており、トレーサー濃度も十分に低いと考えられることから。採水した水は原位置の地下水におおむね置き換わっていると考えられる。

④ 613 m 区間

地上のフローセル測定と原位置の測定ともに、Idronaut 社の Oceanseven303 を使用している。揚水はポンプで連続揚水を行なった。採水開始時刻までの積算揚水量は 28925L であり、DV の 23.3 倍の揚水が行われている。

蛍光染料濃度、地上フローセルおよび原位置のモニタリング結果を図 2.2-37 に示す。縦軸をそれぞれのパラメータ、横軸を積算揚水量とし、揚水開始から採水開始時刻までのデータをプロットしている。地上採水後の原位置採水装置で得られた水のアミノ G 酸濃度は 0.9 mg/L である。天然有機物の影響を受けていることから、アミノ G 酸の濃度は 0.9 mg/L 以下、掘削水の混合率は 3%以下といえる。地上のフローセル測定では、pH、水温、EC、ORP はおおむね一定値を示し、DO もおおむね 0 mg/L で一定しているといえる。水温については地上でのフローセル計測であるため原位置の水温ではなく、室温を反映したものである。ORP は揚水開始から 380L 付近まで一定値を示した後、低下し、480L 以降は一定値を示している。なお、pH と ORP に繰り返し出ているピークは通信エラーに伴うものであり、地下水の性質を反映したものではない。

原位置の pH、水温、EC、ORP はおおむね一定値を示している。DO は地上では 0 mg/L で安定していることから 613 m の深度で DO が検出されるとは考えがたい。また、溶存酸素電極のカタログ上の分解能は 0.01 mg/L であるが、精度は 0.1 mg/L である。原位置の DO は精度を下回る値であり、また 0.05 mg/L で安定していることから、装置の誤差によるものであり、事実上 0 mg/L であると考えられる。

地上、原位置ともに、各物理化学パラメータそれぞれの値がおおむね安定しており、トレーサー濃度も十分に低いと考えられることから。採水した水は原位置の地下水におおむね置き換わっていると考えられる。

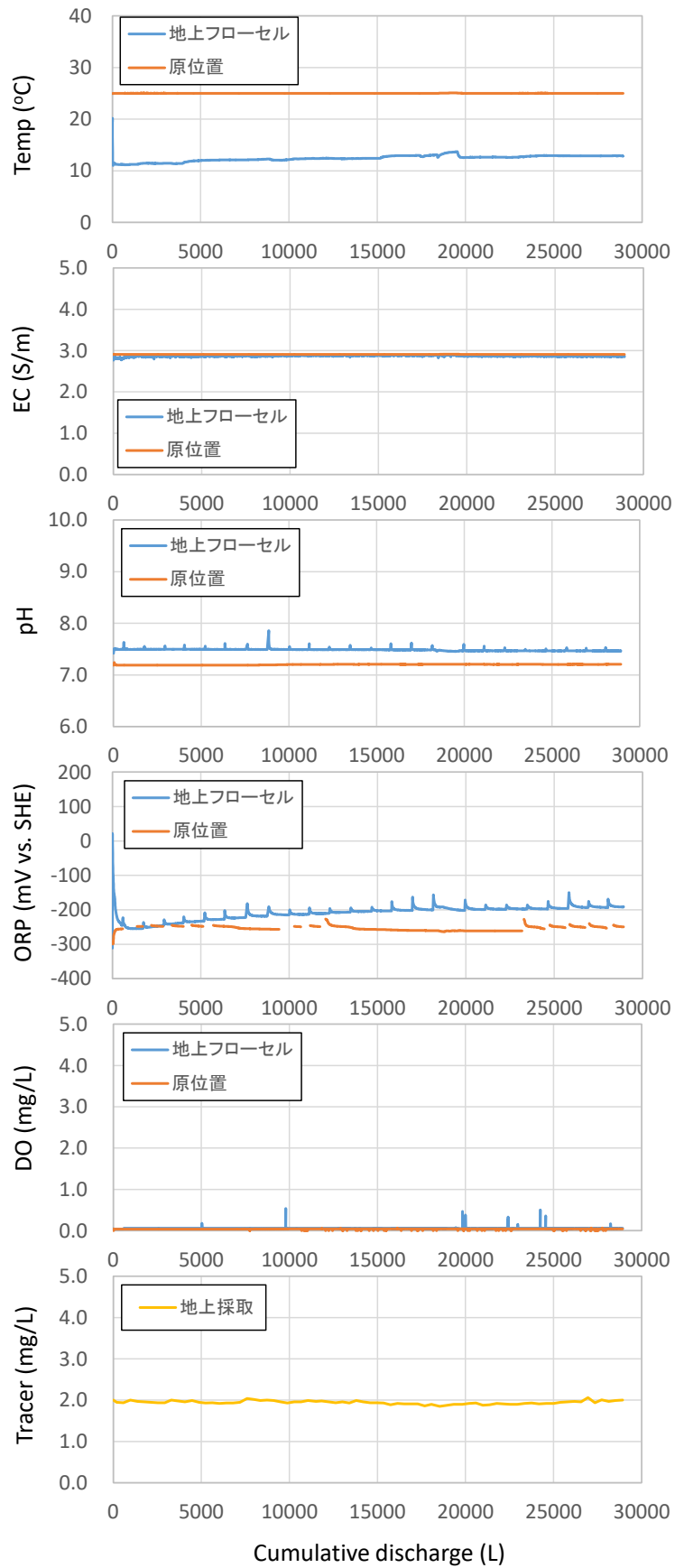


図 2.2-37 613 m 区間におけるモニタリング結果

⑤ 715 m 区間

地上のフローセルでの測定は堀場社製 W-22XD を使用し、原位置の測定には Idronaut 社の Oceanseven303 を使用している。

揚水はポンプで連続揚水を行った。本区間の採水開始時刻までの積算揚水量は 8340L であり、DV の 6.3 倍の揚水が行われている。

蛍光染料濃度、地上フローセルおよび原位置のモニタリング結果を図 2.2-38 に示す。縦軸をそれぞれのパラメータ、横軸を積算揚水量とし、揚水開始から採水開始時刻までのデータをプロットしている。

採水時のアミノ G 酸の濃度は 5.5 mg/L であるが、天然有機物の影響が大きいことからその濃度は不明である。ただし、アミノ G 酸に帰属するピークは天然有機物のピークに隠れてしまっていることから、高くとも 5.5 mg/L 以下、掘削水の混合率にして 18.3%以下ということが出来る。アミノ G 酸の濃度は揚水開始後に一旦増加し、1,500L 付近から 5,000L 程度まではおおむね一定値を示した後、緩やかに増加する。揚水の初期は孔内のたまり水であり、採水区間の地下水ではない。原位置から地上までの採水装置の DV が約 1,300L あることから、積算揚水量 1,300L 以降から揚水された水に区間の地下水が混合していることになる。

地上フローセル測定においては、pH は 1,300L 付近から揚水を進めるとともに低下し、採水まで緩やかに低下傾向にある。EC についてはおおむね 1300L を越えたあたりから採水開始まで一定の値を示す。ORP は揚水開始から採水開始まで緩やかな低下傾向にある。DO は一定して 0 mg/L を示している。

原位置の測定では、温度と EC はおおむね安定した値を示している。pH は緩やかに減少している。ORP は 800L あたりでピークを迎えた後、低下し、6,000L あたりからおおむね一定値を示している。

pH については地上での観測と同じく低下傾向にある。また、蛍光染料の値が実際のアミノ G 酸の濃度を示していないことから掘削水の混合率は分からないが、pH が低下し続けているということは原位置の地下水に完全に置き換わっていない可能性が考えられる。

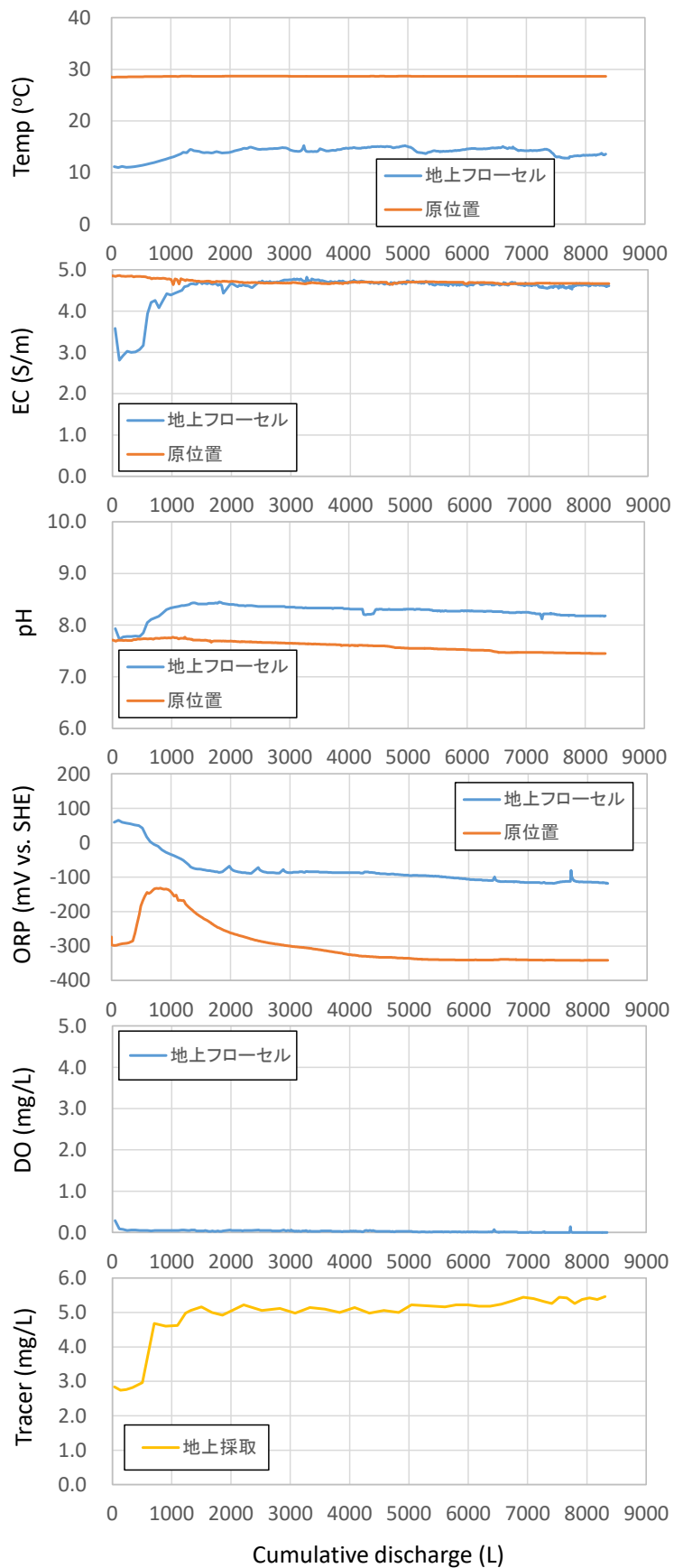


図 2.2-38 715 m 区間におけるモニタリング結果

⑥ 943 m 区間

地上のフローセル測定と原位置の測定ともに、Idronaut 社の Oceanseven303 を使用している。

本区間の採水開始時刻までの積算揚水量は 2,383L であり、DV の 1.5 倍の揚水が行われている。揚水はポンプで間欠揚水を行なったのち、途中からエアリフトに変更している。地上での物理化学パラメータ測定はエアリフト方式に変更する前のポンプ揚水時のみ行ったことから、地上でのモニタリングの終了は積算揚水量が 2297L のときである。

地上採水後の原位置採水装置で得られた水のアミノ G 酸濃度は 3.1 mg/L である。天然有機物の影響を受けていることから、真のアミノ G 酸の濃度は 3.1 mg/L 以下で、掘削水の混合率は 10.3%以下ということができる。

蛍光染料濃度、地上フローセルおよび原位置のモニタリング結果を図 2.2-39 に示す。縦軸をそれぞれのパラメータ、横軸を積算揚水量とし、揚水開始から採水開始時刻までのデータをプロットしている。本区間の DV は約 1,600L であり、それ以降は原位置から汲み上げた地下水の測定がなされている。地上のフローセル測定においては、pH は緩やかなカーブを描くが 1,700L 付近以降は一定の値を示す。水温は大きく上下しているが、間欠式の揚水のため、地下水の温度と室温が繰り返し測定されているためと考えられる。EC は緩やかに上昇しながら 1,500L 付近以降は一定の値を示す。ORP は緩やかに低下し、2,000L 以降はわずかに低下しつつもおおむね一定の値を示す。DO は 0.07 mg/L 程度のわずかな量がおおむね一定して検出されている。酸素が溶存している可能性は否定できないが、この程度の微量の値は較正時に生ずる多少の誤差とも考えられる。地上のフローセル測定では、蛍光染料濃度、pH、EC、ORP のいずれもおおむね安定した値が得られている。

原位置においては、pH はわずかに低下傾向にあるもののおおむね一定の値を示す。水温はモニタリング期間を通じて一定の値である。EC は揚水開始直後から 8 S/m 程度の値で安定しており、揚水の後半で急激に 5 S/m 程度まで低下している。水質分析値から海水よりも低いイオン強度であり、海水の値 (5.3S/m) (浅海、2014) よりも明らかに高いというのは電極の故障もしくは計測中に電極に何かが付着した等の不具合であると考えられる。ORP は緩やかに低下していることから計測を続ければさらに低い値を示すものと考えられる。DO は測定していない。

ORP は低下傾向にあり、pH と蛍光染料濃度は安定している。蛍光染料濃度が不明のため、掘削水が残存している可能性は否定できないが、おおむね原位置の地下水に近い水が得られているものと考えられる。

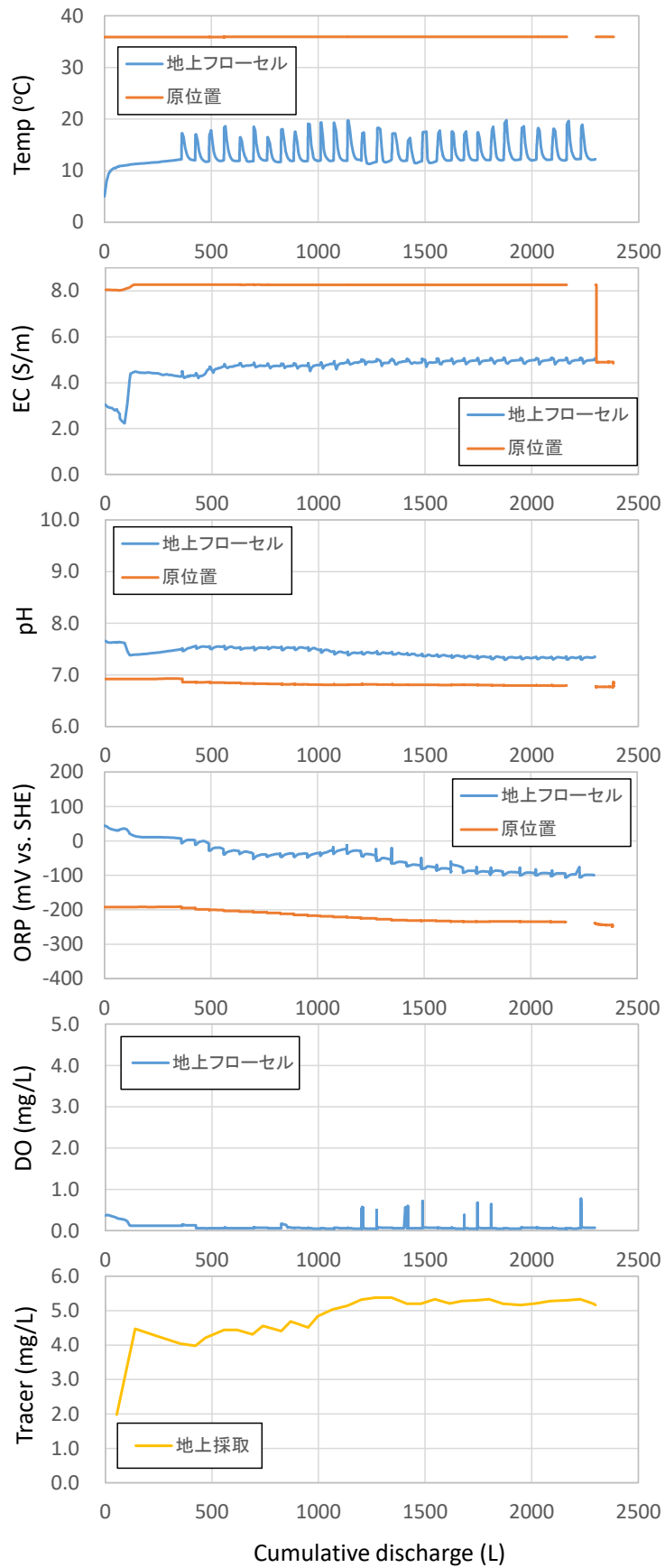


図 2.2-39 943 m 区間におけるモニタリング結果

⑦ 物理化学パラメータモニタリング結果の検討とまとめ

各区間における掘削水の混合率と物理化学パラメータ変化の観察結果を表 2.2-4 にまとめる。715 m 区間が緩やかではあるが、pH が低下傾向にあったことから確からしい値を確認するには暫くモニタリングを継続する必要があると考えられる。他の区間についてはおおむね安定した値であった。

物理化学パラメータ変化の観察の結果、各値の安定の程度から、715 m 区間を除いておおむね原位置の本来の水質に近いデータが得られていると考えられる。715 m 区間の pH 変化についても緩やかな変化であることから、ある程度は十分な予備排水ができているものと考えられる。

表 2.2-4 モニタリング結果のまとめ

区間	掘削水混合率	地上フローセル測定	原位置測定	物理化学パラメータの変化の観察結果
214 m	0.7% 以下	有	有	地上、原位置ともに緩やかに変化している途上にあるがおおむね安定する傾向にある。
306 m	0.6% 以下	有	なし	トレーサー濃度と EC がわずかに低下している途上にあり、pH はと ORP はフローセルの流量を変化させた影響により、値が安定したかどうか見極めにくいがおおむね安定する傾向にある。
476 m	3% 以下	なし	有	原位置の値は安定。ただし ORP は緩やかな低下傾向
613 m	3% 以下	有	有	地上原位置ともに安定。
715 m	18.3% 以下	有	有	pH については地上と原位置ともに緩やかではあるが低下傾向にある。原位置の地下水に完全に置き換わっていない可能性が考えられる。
943 m	10.3% 以下	有	有	地上、原位置ともに pH と蛍光染料濃度は安定しているが、ORP は低下傾向にある。

次に地上での測定値と原位置での測定値の比較を行う。各区間での pH、EC、ORP 測定値の最終値の比較を図 2.2-40 に示す。上述した地上フローセル、原位置の各モニタリングの結果のほか、採水時に大気開放下で測定した値（地上採水）も示す。

水温：図 2.2-40 に示していないが、採水のシステムにおいては採水区間から地上まで揚水する過程で揚水管、ポンプ、ポンプから水を地上へ導入するためのホース、地上の測定系等の様々な温度のものに接触するので、地上フローセルならびに採水中の水温は原位置の値を示さない。正しい水温が必要な場合は原位置で測定する必要がある。

pH：214 m 区間を除いて、地上と原位置で値が異なり、採水時と地上フローセルは原位置よりも高い値を示す。地上と原位置の pH の差異については 3) で後述する。地上フローセルと

地上採水の違いは小さい。

EC：各区間とも地上と原位置で同程度の値を示した。少なくとも今回の採水において EC に関しては地上で測定しても原位置で測定しても正しい結果が得られているものと考えられる。EC は溶存しているイオンの濃度とそれぞれのイオンの持つモル電気伝導度に依存する (Appelo & Postma, 2005)。このため、溶存ガスが多い場合は地上では脱ガスにより地下水から失われるため、今回のような顕著な脱ガスの発生する系では地上と原位置で異なる値を示す可能性がある。しかしながら、もともと溶存元素濃度が高いことから今回の脱ガスの程度では電気伝導度の変化が小さく、その変化を捉えるに至らなかったと考えられる。

ORP：地上と原位置で値が異なり、採水時と地上フローセルは原位置よりも高い値を示す。原位置と地上での ORP の差異については 3) で改めて検討する。地上フローセルと地上採水同士で異なる値を示す場合があるが、どちらが高い/低いといった傾向は見られない。

DO：図 2.2-40 に示していないが、溶存酸素は地上、原位置ともにゼロもしくはゼロに近い低い値で一定であった。いずれの区間も深度数百 m と深いことから、DO はほとんど溶存していないものと考えられる。

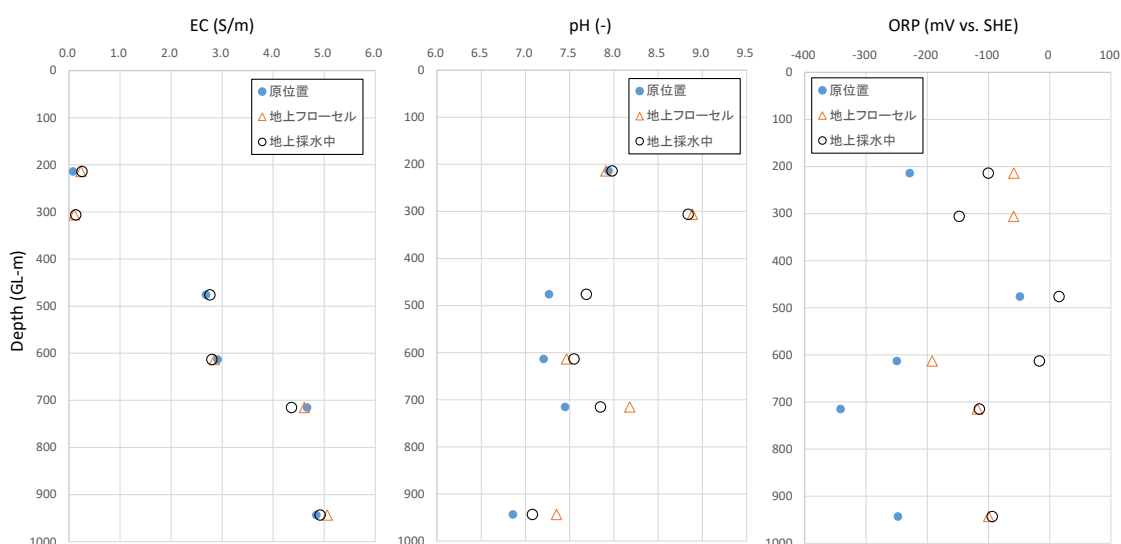


図 2.2-40 物理化学パラメータの地上と原位置との比較

2) 地下水溶存ガスのガス組成と炭素同位体比から見た起源の推定

今年度は DD-1 孔における採取のほか、DD-2 孔と東新潟沼垂調査井での採取を行なっている。これらのガスについて測定値の検討および起源の検討を行った。

① 測定値の検討

DD-1 孔では地上と原位置とでガスの採取を行なっている。ただし、装置の不調等で全ての点での採取はできていない。採取の状況を表 2.2-5 に整理する。

表 2.2-5 溶存ガスおよびガス水比の採取状況

区間	ガス採取 (地上)	ガス採取 (原位置)	ガス水比 (地上)	ガス水比 (原位置)
DD-2 (区間中 : 95 m)	有	なし	なし	なし
DD-1 : 214 m	有	なし	有	なし
DD-1 : 306 m	有	なし	有	なし
DD-1 : 476 m	有	有	有	有
DD-1 : 613 m	有	有	有	有
DD-1 : 715 m	有	有	有	有
DD-1 : 943 m	有	有	有	有

ガス濃度および炭素同位体比と深さの関係を図 2.2-41 に示す。区間によって採取点数が異なるが 3 点取れたものは標準偏差をエラーバーとして付記している。

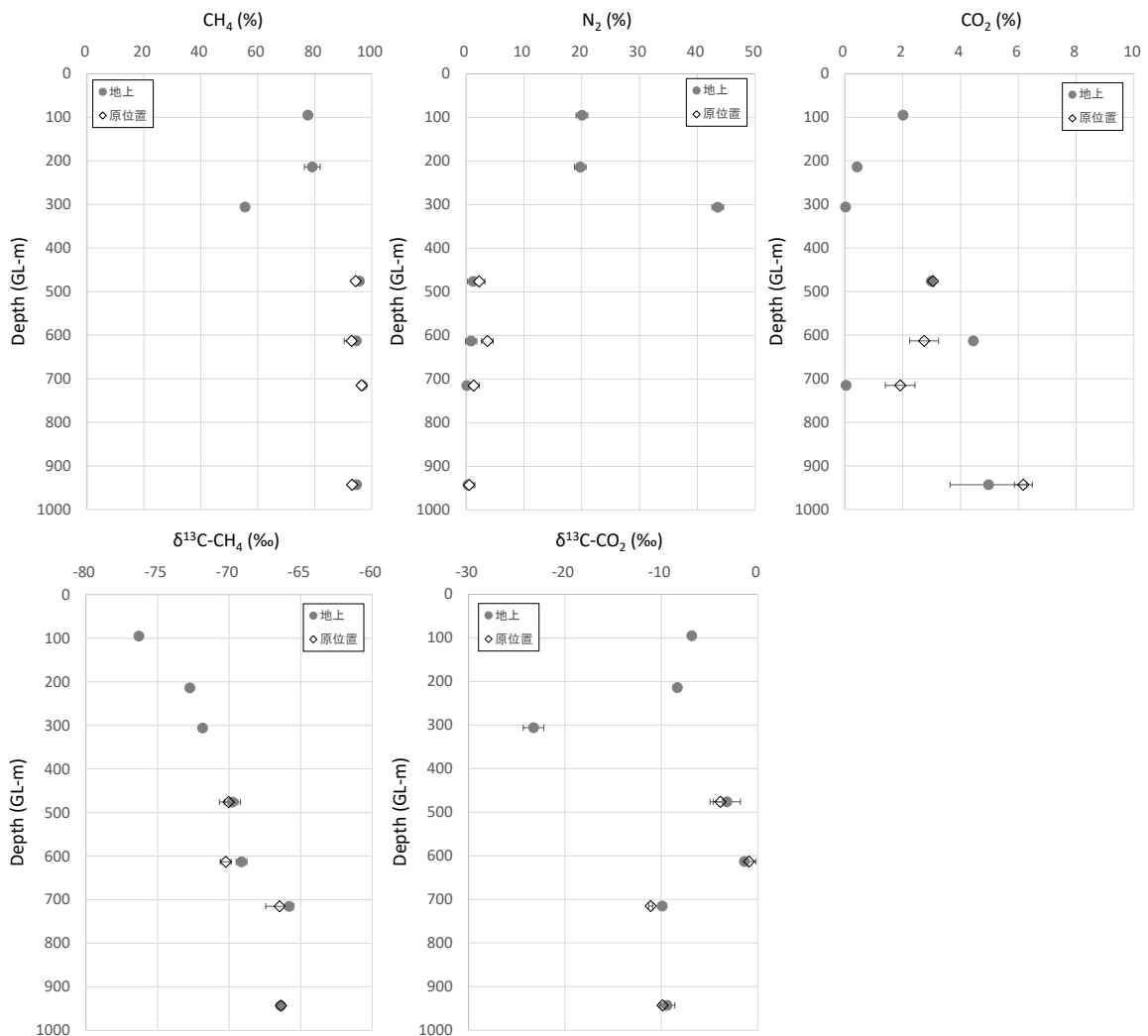


図 2.2-41 溶存ガスの分析結果

476 m 以深は 95% 程度のメタン濃度であるが。それより上の区間 (95 m、214 m、306 m)

ではメタン濃度は 80%を下回り、N₂濃度が増加している。

地上と原位置の両方で採取できた 476 m 以深のデータは CO₂濃度を除いて各ガス濃度、メタン、CO₂の炭素同位体について地上と原位置とでほとんど差が無い結果が得られている。

② ガスの起源について

本年度得られた DD-1 のガス組成を早稲田ほか (2002) において用いられている $\delta^{13}\text{C}\text{-CO}_2$ と $\text{C}_1/(\text{C}_2+\text{C}_3)$ の関係を図 2.2-42 にプロットする。東新潟沼垂観測井では C₂、C₃ が定量下限値以下であったため、図 2.2-42 上にプロットしていないが、C₁ の $\delta^{13}\text{C}$ (-66.2‰) から微生物起源と考えられる。また、DD-1 孔で得られたメタンは全て微生物起源のエリアにプロットされる。

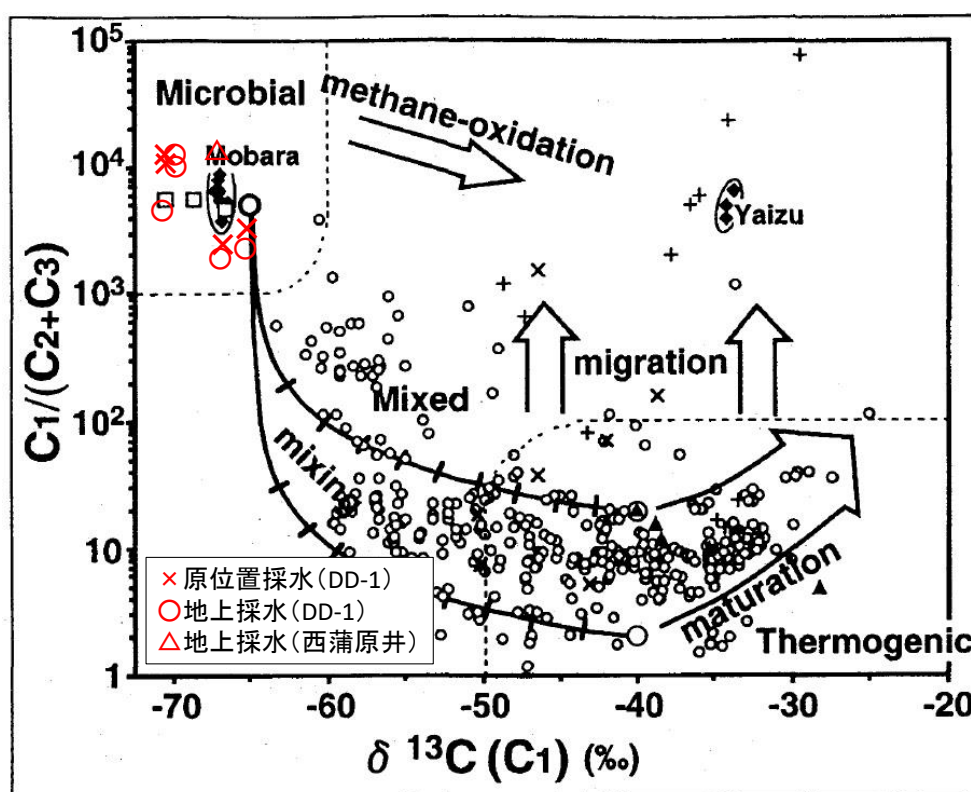


図 2.2-42 溶存ガスの起源の推定 (早稲田ほか (2002) を改変)

③ 地下水溶存ガスのガス組成と炭素同位体比から見た起源の推定のまとめ。

地上と地下の値の比較において CO₂濃度が乖離しているものがあつた。CO₂ガスが正しく採取できていない可能性が考えられる。他の溶存ガスや CH₄および CO₂の炭素同位体比については地上でも原位置でも差異はあるものの、CO₂ほど明瞭な差は見られず、また、CO₂濃度も含め、ガスの起源推定に影響を及ぼすほどの差異はなかつた。また、ガスの起源については今回測定したものは全て微生物起源のガスに分類された。

3) DD-1 孔で得られた pH と ORP の妥当性の検討

① 水質および溶存ガスの分析値を用いた原位置 pH の推定

地上で測定した pH は CO₂の脱ガスの影響を受けることが知られている (岩月ほか, 2009; 穂苅, 2010; Sasamoto et al., 2011)。今回の調査においても、明らかな脱ガスが観測されていることから、その影響について検討を行った。昨年度は原位置の pH 計の不具合のため、地上での測定値と原位置の値を比較することができなかったが、本年度は 3 箇所について溶存

ガスとガス水比の測定、地上の測定値と原位置の測定値が得られた。この 3 箇所についてガスの影響を考慮した pH 推算を行なった。推算に用いたガス組成と温度を表 2.2-6 に示す。推算には PHREEQC2(Parkhurst & Appelo, 1999)を用いた。計算の初期設定の pH は採水中に大気開放下で得られた値を使用した。また、採取した溶存ガスは CH₄、CO₂ 以外に、少量の N₂ および、わずかな O₂ および C₂ 以上の炭化水素が得られたが、このうち、主なものである CO₂、CH₄、N₂ の 3 種類で 100%とした。推算の結果を表 2.2-7 に示す。

表 2.2-6 pH の推定計算に用いたパラメータ

ガス組成	476m	613m	715m	943m
CH ₄ (%)	0.948	0.936	0.968	0.933
CO ₂ (%)	0.031	0.028	0.019	0.062
N ₂ (%)	0.022	0.036	0.01	0.005
ガス水比	1.1	0.75	1.35	1.65
原位置温度(°C)	21.5	25.0	28.6	35.9

表 2.2-7 pH の推算結果

測定pH、計算pH	476m	613m	715m	943m
地上採水	7.69	7.55	7.85	7.08
原位置	7.27	7.21	7.45	6.86
溶存ガスを考慮した計算値	7.56	7.47	7.46	6.75

表 2.2-8 pH の推算の結果得られたカルサイトの飽和指数

SI _{calcite}	476m	613m	715m	943m
地上採水	0.89	0.67	0.80	0.34
溶存ガスを考慮した計算値	0.83	0.76	0.58	0.27

表 2.2-7 から、地上採水中の pH に対してガス成分を考慮した推算を行った pH は原位置の値程度や、近い値を示す。それぞれの計算結果から得られたカルサイトの飽和指数を表 2.2-8 に示す。

pH に関するガス成分の平衡を考慮した計算では、地上で測定された値よりも低くなり、原位置で計測された値に近づいている。一方で、カルサイトの SI は 0.27~0.83 と高い値を示す。カルサイトは本系で反応する CO₂ に関わる鉱物であり、また、速やかに溶解沈殿する鉱物である。すなわち、過飽和であれば沈殿し、平衡となるものと考えられることから、理想的には水質分析値やガス組成等の正しい値が取得されていればカルサイトの飽和指数は 0.0 を示すはずである。一方で、飽和指数を算出する熱力学計算には標準生成自由エネルギーが用いられるが、あくまでそれが取得された条件でのデータであり、天然の系を評価する場合には必ずしも同じ値を示さないことが知られている。また、試料の採取・分析においては真の値を採取することは困難であり、誤差が生ずることが通常であることから、計算によって得られる平衡条件に対してはいくらかのずれを許容しなければならない。そのずれの程度と妥当性は評価する系の条件や、飽和指数の値を使う目的によって様々であるため一意に決定することができないが、Langmuir (1997) ではカルサイトの飽和指数において±0.1 のズレは通常発生するとしている。また、別の文献(日本地下水学会, 2000)では一般に鉱物の平衡を見るときは±0.37 であれば平衡とみなすとされている。

今回の結果において±0.37 を平衡とみなすと、943 m の結果は平衡の範囲に入っており、

また、推算値も原位置で取得された pH とほぼ同じ値を示している。613 m と 715 m では 0.37 を超える飽和指数を示している。その原因としては、測定、計算の精度、採取・分析の正確さが影響を及ぼしているものと考えられる。これら原因のうち、計算の精度についてはソフトウェアに依存するものであるため基本的には変更できない。また、分析の精度については各分析機関で適切に管理された装置で JIS 等に基づく手順を採用して分析しており、その上で生ずる誤差については容易には改善しがたい。一方で 715 m のモニタリング結果（表 2.2-4）において 715 m については pH の値が低下傾向であったことから、正しい pH 値が取得できておらず、また、水質も原位置の本来の水質に達していなかった可能性がある。この点については、予備排水を十分に行うことで改善されるものと考えられる。このほかの理由としては、例えば、ガス水比やガス組成が正確ではなかった可能性が挙げられる。溶存ガスの採取には地上、原位置ともに 100 mL のバイアル瓶を用いた水上置換法を用いているが、バイアル瓶の中を通る短い時間のうちに全てのガスが完全に脱ガスするとは考えがたい。よってガス水比は低く見積られている可能性がある。また 2)「で述べたように、CO₂ 濃度については地上で得られた試料と原位置で得られた試料とで他のガスに比べて差が大きかった。このことは CO₂ ガスが正しく採取されていない可能性を示唆する。計算による pH の推定についてより精度を高めるためには、これら誤差要因について改善をする必要がある。

物理化学パラメータについて原位置の計測値が得られる場合には pH の推定計算は必ずしも必要ないが、今回の pH の推定計算は溶存ガスのある地下水化学場での平衡計算と言い換えることができる。原位置の化学場を解明するためには、溶存ガス等の正確な値の採取方法の開発や、値の誤差が及ぼす平衡計算への影響など、今後も検討を続けることが必要と考えられる。

② 水質分析値を利用した ORP 値の妥当性検討

pH と ORP の値を pH-Eh ダイアグラム上にプロットしたものを図 2.2-43 に示す。pH-Eh ダイアグラムの作成には Geochemist's Workbench ver.11 (Bethke, 2008) を用いた。区間名の後に (原) と付記した原位置で測定した pH と Eh については 613 m 以深のものは CH₄(aq)-HCO₃⁻、NH₄⁺-N₂(g)ならびに H₂S(aq)-HS⁻-SO₄²⁻の境界付近にプロットされる。476 m は Magnetite-Siderite の境界線上にプロットされる。

Eh は一般に、その系を支配する酸化還元反応に関わる線上にプロットされる。今回は種々の平衡線上にプロットされており、いずれの反応が支配的なのかは判別できないが、SO₄²⁻が低い濃度を示し、NH₄⁺が著量に検出されること、また、N₂ ガス、CH₄ ガス、CO₂ ガスが溶存していることから、今回のような ORP 値が出ることは妥当であると考えられる。一方で、区間名の後に (地) と付記した地上の採水中に測定したものは、613 m (地) と 913 m (地) とプロットしたもののついては境界線上にプロットされないものが多い。地上のフローセルと原位置の値の違いの原因は定かでは無いが、脱ガスによる系の平衡状態の変化が起きていることや、また、わずかな大気への侵入による溶存物質の酸化などが影響して、別の安定状態に移る途上にあるか、本来の原位置とは別の安定状態にプロットされているものと考えられる。

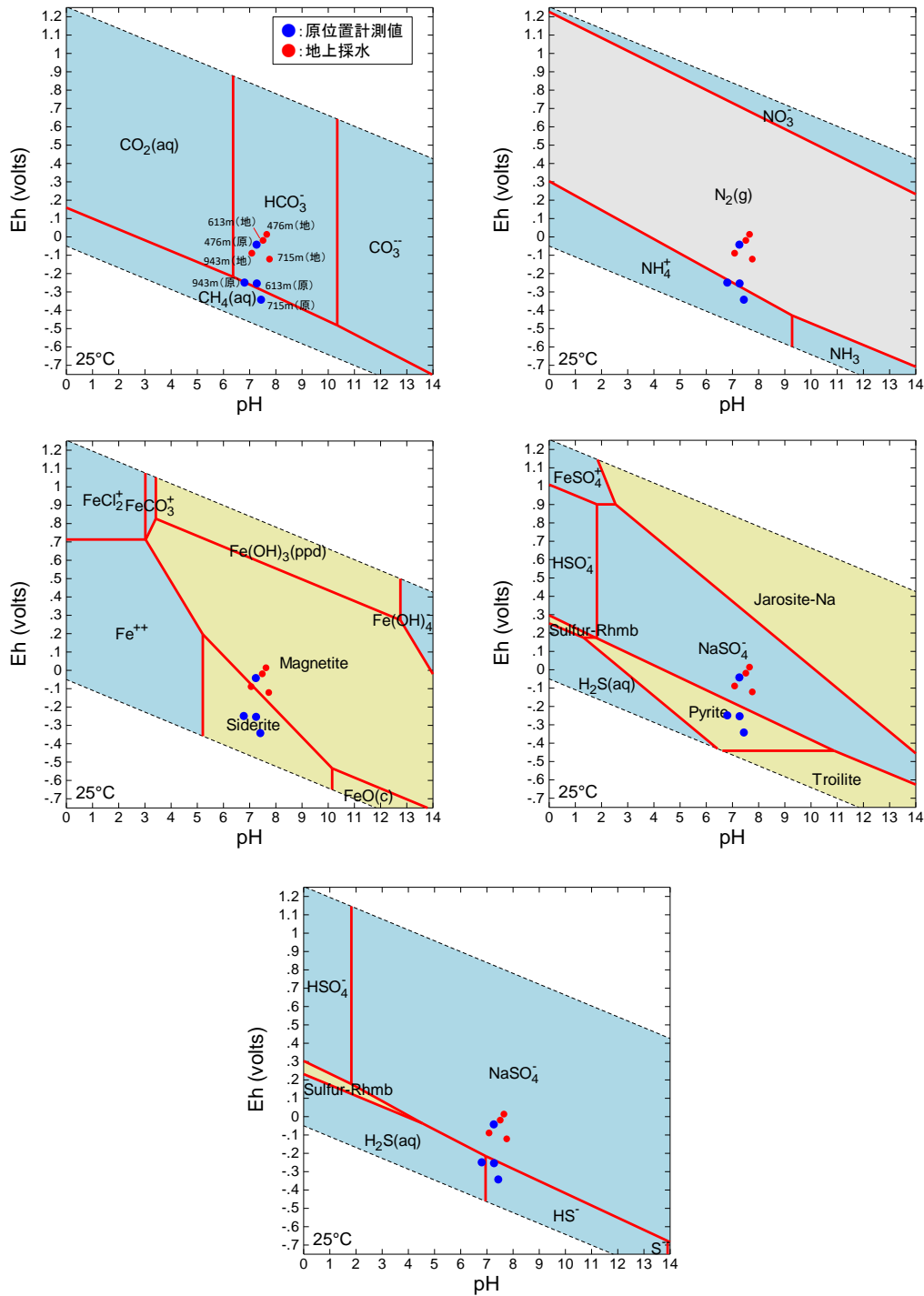


図 2.2-43 pH-Eh ダイアグラム

③ 酸化還元電位の推定について

・はじめに

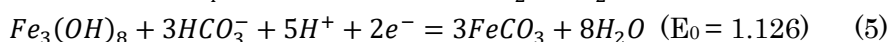
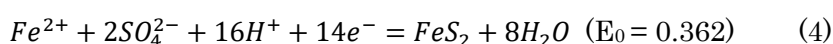
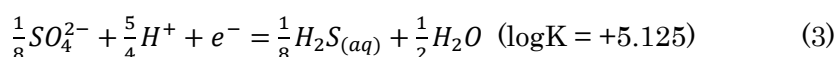
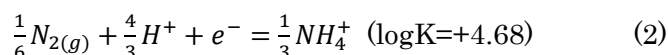
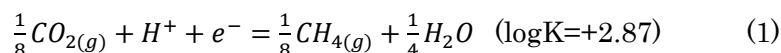
酸化還元電位は銀/塩化銀電極を参照極とし、白金電極を作動電極とした ORP 電極を被検液に浸して測定を行っている。電位測定では作動極表面でのアノード、カソードの電流が釣り合ってゼロとなるときの電圧を平衡電位として計測している (Stumm & Morgan, 1996)。天然水のような様々な酸化還元物質が溶存している系においては、電極表面で複数の反応が同時に起きており、それらに関わる酸化還元反応をまとめて捉えた電位が計測される。すな

わち、作動電極と速やかな電荷のやり取りをし、かつ、反応量が多く反応速度が高いなどの理由で電極へ流れる電流が大きい酸化還元物質の反応に関わる電位が測定値に反映されることになる (Stumm & Morgan, 1996; Stefánsson et al., 2005; Peiffer, et al., 1992)。例えば、深部地下水の環境ではメタンガスが検出されることがしばしばある。その場にメタン菌が存在してメタンが生成する環境にあったとしても、微生物が起こす反応は不可逆反応と考えられるため、微生物による CO_2 を CH_4 へ変化させる反応を電極で捉えても、それは理論的に標準生成自由エネルギーから算出される平衡電位とはならないといわれている (Inzelt, 2006; Meyer, et al., 2014)。同様に N_2 と NH_4 についても白金電極による測定では捉えられない可能性が指摘されている (Appelo & Postma, 2005; Inzelt, 2006)。一方で、Fe や S 化学種については白金電極上で反応を捉えることができ、測定された電位と分析値から推定した電位がよく一致する場合が多いといわれている (Langmuir, 1997)。

本事業で得られた pH と ORP について図 2.2-43 に示したとおり、原位置で取得された値は状況から推定される正しいと考えられる値を示した。正しい値であれば、溶存物質の濃度から推定する ORP も同じ値を示すと考えられる。そこで本節では、いくつかの酸化還元に関わる物質の定量分析を行った浜里の DD-1 孔の採水データを用いて酸化還元に関わる溶存物質の濃度から系の酸化還元電位の推定を行い、その妥当性について検討する。

・測定系と分析について

酸化還元電位は原位置で測定された 476 m、613 m、715 m、943 m の 4 深度を対象とする。前節 (図 2.2-43) で示した pH-Eh ダイアグラムから、本系の酸化還元電位に影響を及ぼすと考えられる半反応式は以下である (Stumm & Morgan, 1996; Langmuir, 1997)。なお、 $\text{Fe}_3(\text{OH})_8$ は非晶質のマグネタイトである。



また、これらを計算するために用いた溶存イオンの分析値は地上採水で得られたものを使用し、ガス成分については原位置の採水ボトルで得られたものを使用した。分析値から PHREEQC を使用して活量を求め、上記の式 (1) ~ (5) から酸化還元電位を計算した。酸化還元電位の推定計算結果を表 2.2-9 に示す。

表 2.2-9 酸化還元電位の推定計算結果

	476 m	613 m	715 m	943 m
原位置での実測 Eh(V)	-0.048	-0.250	-0.341	-0.248
(1) CO ₂ (g)/CH ₄ (g)	-0.297	-0.291	-0.291	-0.245
(2) N ₂ (g)/NH ₄	-0.298	-0.283	-0.291	-0.246
(3) SO ₄ /H ₂ S(aq)	*1)	-0.268 ²⁾	*1)	-0.228 ²⁾
(4) SO ₄ /FeS ₂	*1)	-0.228	*1)	-0.199
(5) Magnetite(am)/Siderite	-0.072	-0.074	-0.075	0.001

1) SO₄ 濃度および H₂S 濃度が定量限界未満であったため、データなし。

2) H₂S 濃度は定量限界未満であったため、活量は PHREEQC の電荷バランスによって算出された値を使用した。

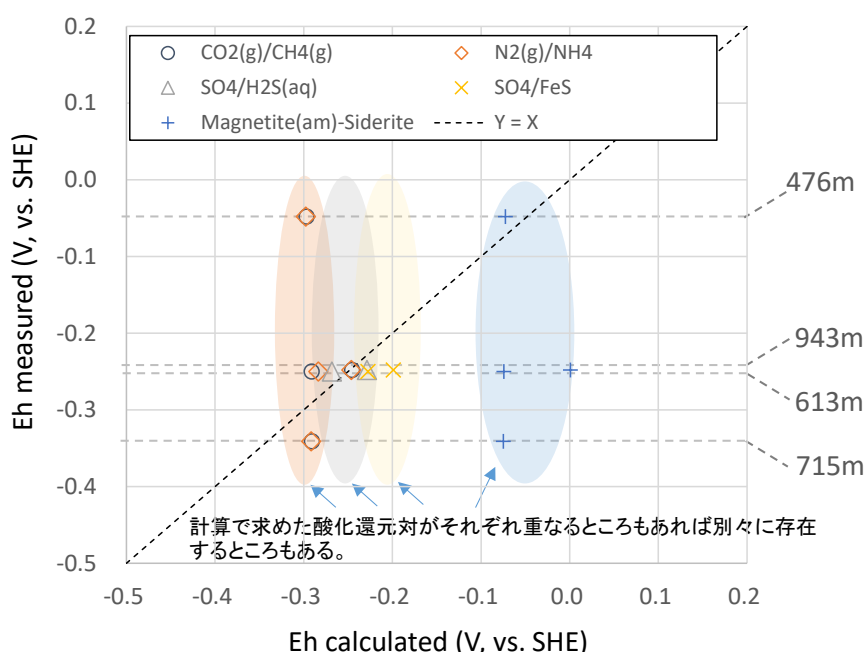


図 2.2-44 Eh の実測値と計算値の比較

・検討

Lindberg & Runnells (1984) は天然水を対象とした種々の酸化還元対の濃度と酸化還元電位の実測値との関係を調べ、それぞれの酸化還元対は酸化還元電位の値と必ずしも平衡に無いことを示した。図 2.2-44 に示したように、本事業で得られた結果も Lindberg & Runnells (1984) と同様に、各酸化還元対でそれぞれの値を示している。全ての酸化還元対が相互に電荷のやり取りをした上で平衡に達しているならば $Y = X$ の直線状にプロットされるが、実際はそうではない。実測された酸化還元電位に基づく分配がすべての酸化還元対に対して起きているわけではないこと、すなわち、ORP 電極で測定した酸化還元電位の値のみから各溶解物質の酸化還元状態を推定することは困難であることが改めて分かる。

図 2.2-45 に各酸化還元対から算出される電位の比較を示す。CO₂/CH₄、N₂/NH₄、SO₄/H₂S から推定されるそれぞれの電位が近い値を示し、実測された酸化還元電位と整合的な値を持つ。CO₂、N₂、SO₄ の還元反応が相互に電荷をやり取りしているかのように見えるが、これらの反応はそれぞれ主に微生物反応で行なわれているため、相互に電荷のやり取りをしている

とは考えがたい。また、微生物反応は可逆反応ではないため、測定される平衡電位としては式 (1) ~ (5) で算出される値と必ずしも一致しないと考えられる。このため、図 2.2-44 において反応式から熱力学的に算出される電位と実測した電位が一致することや、図 2.2-45 において複数の微生物反応が同じ電位を示すことはそれぞれの酸化還元反応とは別の理由があるのではないかと推察される。このような関係は他でも報告されている (Thorstenson, 1970; Washington et al., 2004; Mayer et al., 2014)。Washington ほか (2004) によれば、DO や NO_3 のような高い電位の酸化剤がない酸化還元系では溶存水素濃度を軸とした反応を考慮した計算をすると硫酸還元反応やメタン生成反応の電位と似た電位が算出されるとしている。本事業の系においても、それぞれの反応は別個に起きており、硫酸還元反応やメタン生成、アンモニア生成の反応は直接的に ORP 電極で捉えられていないが、溶存水素とそれぞれの物質に関わる反応が ORP 電極で捉えられている可能性がある。

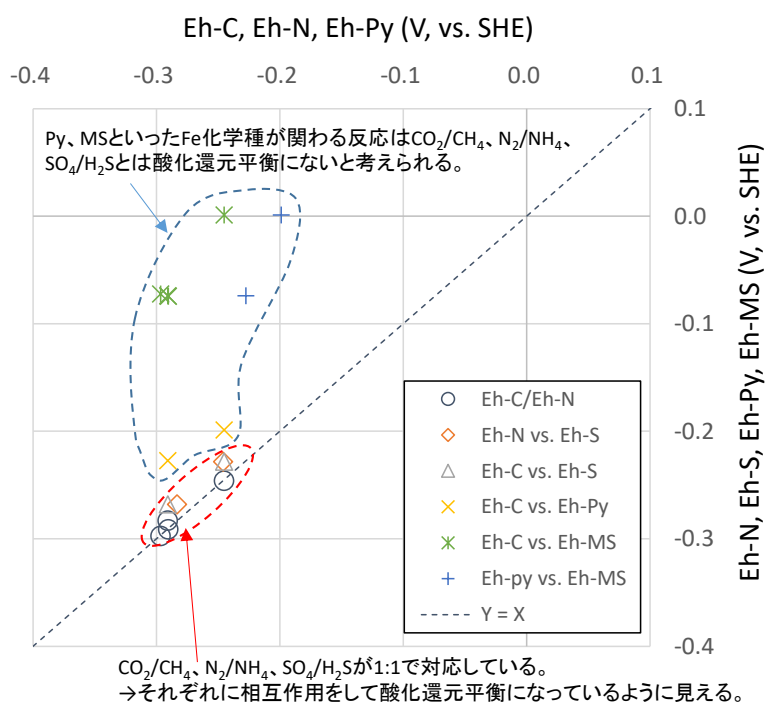


図 2.2-45 酸化還元対同士の相関関係

表 2.2-9 および図 2.2-44 で示したように、476 m は実測した酸化還元電位が -48 mV であり、溶存物質の濃度から式 (5) によって計算した酸化還元電位は -72 mV である。それぞれが近い値を示すことから、476 m においては式 (5) の反応が ORP 電極で観測されているものと考えられる。一方で、著量の CH_4 ガスが観測され、 NH_4 も観測されており、それらの濃度から算出した酸化還元電位は平衡値に近い結果となっている。このことはこれまで述べてきたように、計測された酸化還元電位としては CH_4 や NH_4 が著量に観測される条件ではないが、酸化還元電位はその場で起きている主たる反応が計測されるため、測定された電位に関わらずメタン生成反応等が起きる環境にある可能性がある。溶存水素濃度や CH_4 や NH_4 生成に関わる菌の活性を確認するなどの検討を併せて行うことで ORP 電極では観測されない反応も確認できるものと考えられる。

・まとめ

本節では、酸化還元物質の濃度や分圧と半電池反応式から酸化還元電位を推定し、原位置における実測値と比較を行なった。計算によって求めた酸化還元電位は 476 m で

Magnetite(am)/Siderite と、613 m、715 m、943 m においては CO_2/CH_4 、 N_2/NH_4 、 $\text{SO}_4/\text{H}_2\text{S}$ の酸化還元対について実測値と整合的な値を示した。すなわち、今回の ORP の原位置測定については確からしい値を取得することができたものと考えられる。ただし、このことは電極と反応する酸化還元反応のうちの主たる反応を特定できたに過ぎない。系で起きている酸化還元反応を解明するためには酸化還元電位の取得だけではなく、溶存している酸化還元にかかわる元素の分析や微生物反応の検討が必要であると考えられる。

4) 地化学環境評価のまとめ

今年度の地化学環境評価として、北海道幌延町浜里の DD-1 孔を対象として水質調査を行い、得られたデータの妥当性について検討を行った。また、DD-1 孔に隣接する DD-2 孔および、新潟県の東新潟沼垂観測井において地下水溶存ガスの採取を行ない、ガスの起源について考察した。以下に各節のまとめを記す。

- 1) DD-1 孔における予備排水中の蛍光染料濃度および物理化学パラメータのモニタリング
予備排水中のモニタリングを行い、ほとんどの区間で確からしい値を得ることができた。一方で、掘削水混合率を求めるために使用した蛍光染料トレーサーは、地下水に含まれる天然有機物と定量ピークが被ることから定量が困難であった。
- 2) 地下水溶存ガスのガス組成と炭素同位体比から見た起源の推定
DD-1 孔、DD-2 孔、沼垂調査井で得られた溶存ガスは微生物起源であった。
- 3) DD-1 孔で得られた pH と ORP の妥当性の検討
水質データ、溶存ガスデータを用いて、原位置の pH と ORP の推定計算を行なった。pH については全ての計算値において原位置の値に近づく結果が得られたが、計算値と原位置の値とで同程度の値を示す場合もあれば、離れているものもあった。誤差を生ずる原因について今後検討を行う必要がある。ORP については推定計算の結果と原位置での測定結果は整合的なものであった。

(8) システムティック区分

1) システムティック区分の方法

本事業では、沿岸部の深部地下水を複数地点で採取し、その水質や年代などをとりまとめることで、国内の沿岸部に存在する深部地下水の性状の一般性を検討する。検討に当たっては、採取した深部地下水がどのような水文地質学的な場（あるいは条件）を反映した試料であるかという位置づけをあらかじめ把握した上で進める必要がある。そのために、沿岸部の深部地下水の性状に関連すると考えられる水文地質学的な項目を挙げ、それらの項目に応じた深部地下水試料を区分して検討する。本事業ではこの作業をシステムティック区分と呼称する。平成 28 年度はシステムティック区分に用いる各種文献やデータベースの収集を行い、作業の方向性を示した。今年度は、引き続き深部地下水データの収集と収集結果に基づく検討を進めた。

システムティック区分に用いる文献等の情報を表 2.2-10 に示す。本事業で区分の対象とした地点は日本各地に分布していることから、それらの位置づけを把握するためには、全国一律の基準で評価されたデータに基づいて検討を進める必要がある。そこで本事業では、全国規模でデータが整備されている文献やデータベースを収集し、システムティック区分の判定に用いることとした。なお、これらの区分項目や使用するデータは暫定的なものであり、検討の進捗に応じた変更も想定される。

表 2.2-10 に示した文献は、GIS（地理情報システム）を用いてデータの統合と解析を行う。本事業では、GIS ソフトとして ESRI 社 Arc Map を用いた。GIS による作業のイメージを図 2.2-46 に示す。また、本事業におけるデータの統合および解析手法は以下の通りである。

表 2.2-10 システマティック区分における区分項目と使用する文献、データベース

区分項目	文献、データベース等
地形図	国土交通省国土地理院基盤地図情報サイト 数値標高モデル10mメッシュ
地形分類	国土交通省国土調査 20万分の1土地分類基本調査
集水域	数値標高モデル10mメッシュからArc GISにより計算
地形勾配	数値標高モデル10mメッシュからArc GISにより計算
表層地質	産業技術総合研究所地質調査総合センター 20万分の1 日本シームレス地質図
隆起、沈降	日本地質学会(2011)日本列島と地質環境の長期安定性 隆起速度マップ
地質年代	越谷・丸井(2012) 日本列島における地下水賦存量の試 算に用いた堆積物の地層境界面と層厚の三次元モデル (第一版)

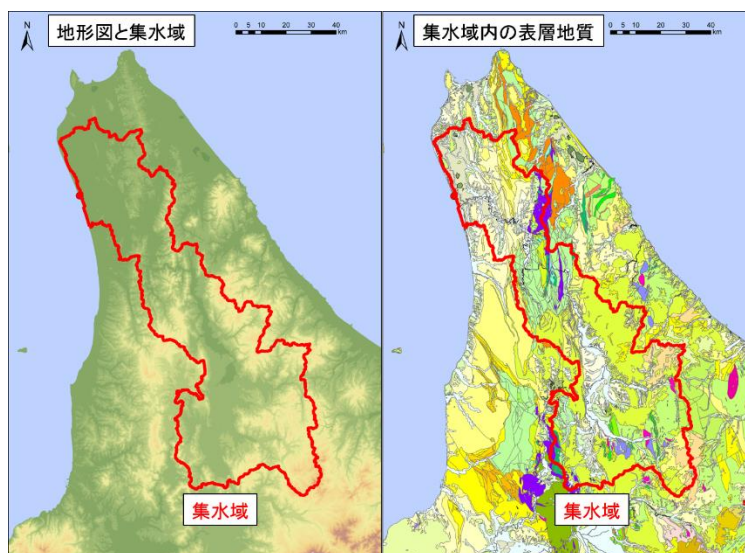


図 2.2-46 各区分項目での作業イメージ (浜里 DD-1 孔を例として)

・地形図

国土基盤地図情報サイトにおいて、数値標高モデル（10 m メッシュ）から調査地点周辺の地形データを取得し、Arc Map を用いて DEM データの地形図とする。

・地形分類

国土交通省の国土調査のサイトにおいて、20 万分の 1 土地分類基本調査の GIS データを取得する。Arc Map を用いて GIS データに含まれる地形区分（SHP データ）を DEM データの地形図に重ね合わせた後、調査地点の緯度・経度情報から現在の地形を抽出する。なお抽出された地形分類の表記方法は、土地分類基本調査に準ずる形とした。

・集水域

DEM データより作成した地形図を基に、Arc Map の Spatial Analyst に属する水文解析ツールにより、集水域を導出する。DEM データの地形図は起伏に富むため、水文解析ツールの平滑化（Fill）によって窪地を取り除き、流向ラスタの作成（Flow Direction）および累積

流量ラスタの作成 (Flow Accumulation) の処理を行う。その後、調査地点の位置情報と、周辺山地の分布を比較して、水文地質学的な見地から深部地下水に対して適当と思われる集水域の出口を判断して、集水域ラスタの作成 (Watershed) を実行して集水域を決定した後、集水域の面積を計算した。なお前提条件として、設定した集水域は現地形に基づいて算出されるため、古地形や海水準変動に伴う海岸線の移動は考慮されない。

- ・地形勾配

決定した各集水域を対象に地形勾配の解析 (Slope) を行い、流域内の平均地形勾配を算出した。

- ・表層地質

産総研地質調査総合センターが配信している 20 万分の 1 日本シームレス地質図から地質図 (基本版) の SHP データを取得する。Arc Map により地質図を DEM データの地形図に重ね合わせた後、上記に示した各地点の集水域の範囲において、堆積岩類、火山岩類、深成岩類、変成岩類、付加コンプレックスおよびその他の 6 分類の面積をそれぞれ計算し、集水域に占める面積が最も大きい地質を抽出して記載した。

- ・隆起、沈降

日本の隆起速度マップ (日本地質学会、2011) は、およそ 20 km 四方を一つのエリアとするメッシュから構成され、日本全国のメッシュごとの隆起速度を判定できる。本事業では、隆起速度マップを TIF 画像として Arc Map に取り込み、ジオリファレンスツールによって日本地図と重ね合わせた上で、調査地点の緯度・経度情報から、その地点が位置するメッシュを抽出して隆起速度を読み取る。なお、深部地下水の井戸が第四紀火山に区分されているメッシュにある場合は「データ無し」とした。

- ・地質年代

越谷・丸井 (2012) は、数値地質図や全国の 1 万 2 千本のボーリング柱状図を基に、地球統計学的手法を用いて、日本国内における約 1 km メッシュ当りの地層境界面と層厚を算出した。これにより、日本国内の任意の地点における新第三紀層から第四紀層の境界面の標高や各層の層厚を把握できる。本事業では、調査地点の緯度・経度情報と深部地下水試料の採取深度を基に、当該地点の取水対象となっている地層を判定した。

2) 深部地下水の性状把握にかかわるバックグラウンドデータの作成

システムティック区分の対象とする深部地下水の温度および水質と比較するため、国内の深部地下水のバックグラウンドデータを作成した。バックグラウンドデータとして、全国地熱ポテンシャルマップ (地質調査総合センター、2009) に収録されている 7,213 地点の内、井戸の位置 (緯度、経度)、井戸深度、塩化物イオン濃度、水温の情報が揃っている 3,435 地点のデータを抽出して用いた (図 2.2-47)。抽出した深部地下水のデータはそれらの緯度・経度に基づき、Arc GIS を用いて海岸からの距離、地盤標高をそれぞれ算出した。地盤標高の算出には、国土地理院の数値地図 50 m メッシュ (標高) のデータを用いた。

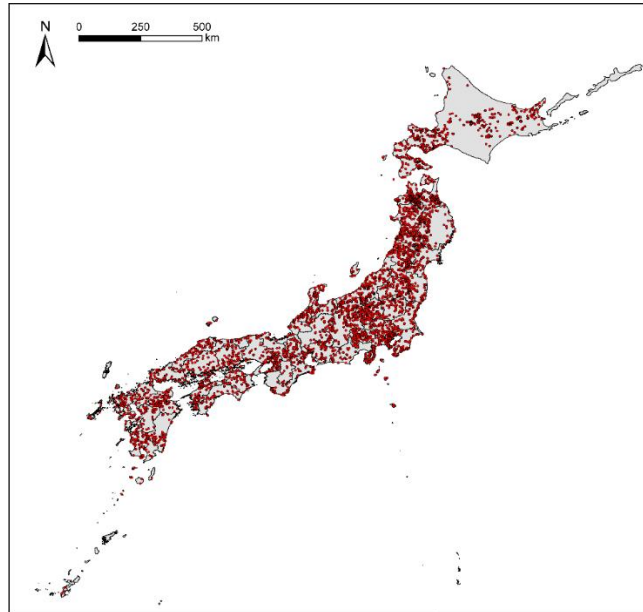


図 2.2-47 文献から抽出した 3435 地点の井戸の分布図
 (地質調査総合センター, 2009 に収録されているデータより作成。赤丸が地点の位置を示す。)

3) システマティック区分の結果

表 2.2-11 にシステマティック区分の結果を示す。浜里 DD-1 孔、西蒲原観測井、沼垂観測井は本節 (5) にて示した地点であり、J-01～J-75 は現地調査や既存文献から収集した各地の深部地下水のデータである。一部には深度 100 m より浅い井戸も含まれているが、近傍に位置する深部地下水との対照地点として収集したものである。J-1～J-16 は、平成 28 年度成果報告書に記載されている 1～16 に対応し、J-48～J-60 および J-62～J-65 は丸井ほか(2017)より引用した。

今回収集した深部地下水は海岸からの距離が最大で約 38 km、最小で 0 km (ほぼ海岸線に位置する) であった。多くは地形分類上の低地に位置しており、隆起・沈降の判定ではほとんどが隆起帯に属している。集水域の面積はオーダーとして $10^1 \sim 10^4 \text{ km}^2$ 、地質は 4 分類 (堆積岩類、火山岩類、深成岩類、付加コンプレックス) が主要なものであった。集水域内の平均傾斜角度は 1 度未満から 37 度程度であった。井戸の下底深度に相当する地層は、浜里や西蒲原などで新第三紀層や第四紀層と判定された。その一方で、多くの地点が N1 層より下位の判定となった。これは実際に N1 層の下位にある地層から採水しているわけではなく、地質情報が不足していることに起因すると考えられる。越谷・丸井 (2012) は、国内の 1 万 2 千本程度の柱状図を収集しているが、多くは平野部などに分布しており、山地などでは情報が乏しいため信頼性が低いとしている。本事業で対象とした地点においても、沿岸部に隣接する山地に位置する深部地下水が多数含まれていたため、判定できなかったものと考えられる。この点については今後検討する必要がある。

表 2.2-11 システムティック区分の一覧表

地点名	地盤 標高 (m)	井戸 深度 (m)	海岸から の距離 (km)	地形 分類	隆起 ・沈降	集水域 (km ²)	集水域内の 平均傾斜角 (度)	集水域内の 表層地質	相当する地層	Cl濃度 (mg/L)
浜里DD-1孔	4	1200	0.3	低地	沈降	5573.9	14	堆積岩類	N1	18357
西浦原観測井	1	1050	4.3	低地	沈降	11830.0	20	堆積岩類	Q1	14690
沼垂観測井	1	560	2.8	低地	沈降	12053.7	20	堆積岩類	Q2	6093
J-01	10	1500	4.6	低地	隆起	51.3	17	堆積岩類	N1より下位	399
J-02	4	1100	0.3	低地	隆起	0.5	0.9	堆積岩類	N1より下位	19223
J-03	19	1500	2.0	低地	隆起	72.3	28	火山岩類	N1より下位	1133
J-04	55	850	5.3	低地	隆起	27.2	27	火山岩類	N1	161
J-05	9	1000	1.9	低地	隆起	43.8	28	火山岩類	N1より下位	79
J-06	9	1300	1.6	山地	隆起	55.3	30	火山岩類	N1より下位	82
J-07	7	1000	0.6	低地	隆起	20.4	29	火山岩類	N1より下位	250
J-08	15	1300	5.4	ローム台地	隆起	1.1	1.2	火山岩類	N1より下位	45
J-09	90	1330	5.1	火山地	隆起	0.4	5	火山岩類	N1より下位	5101
J-10	20	1500	12.0	台地段丘	隆起	12.7	14	付加コンプレックス	N1より下位	7954
J-11	31	1000	9.3	台地段丘	隆起	209.5	16	付加コンプレックス	N1より下位	14279
J-12	40	1500	7.9	低地	隆起	23.3	2	堆積岩類	N1より下位	545
J-13	44	1500	0.4	丘陵地	隆起	0.7	25	堆積岩類	N1より下位	13159
J-14	5	1500	0.4	低地	隆起	162.8	8	堆積岩類	N1	5068
J-15	4	1502	0.3	低地	隆起	199.8	21	付加コンプレックス	N1より下位	3617
J-16	49	1203	5.7	低地	隆起	1.3	15	堆積岩類	N1より下位	4952
J-17	4	1100	0.3	低地	隆起	0.5	0.9	堆積岩類	N1より下位	11146
J-18	5	74	1.4	低地	隆起	142.8	2	堆積岩類	N1より下位	2925
J-19	5	500	3.6	低地	隆起	45.6	3	堆積岩類	N1より下位	676
J-20	3	1200	2.8	低地	隆起	33.7	2	堆積岩類	N1より下位	118
J-21	38	1000	0.3	データなし	データなし	0.0	7	火山岩類	N1より下位	-
J-22	25	1200	14.7	丘陵地	隆起	93.7	14	堆積岩類	N1	18464
J-23	5	1807	0.4	低地	隆起	5589.6	14	堆積岩類	N1	5599
J-24	4	1004	0.3	低地	隆起	0.3	11	堆積岩類	N1	8716
J-25	1	200	0.0	低地	隆起	0.3	15	堆積岩類	N1	397
J-26	8	不明	1.5	低地	沈降	251.5	3	火山岩類	N1より下位	10700
J-27	5	1104	0.6	台地段丘	隆起	108.1	18	火山岩類	N1より下位	5260
J-28	12	700	0.2	ローム台地	隆起	175.2	6	堆積岩類	N1より下位	5710
J-29	9	不明	2.0	低地	隆起	2407.6	9	火山岩類	N1より下位	13000
J-30	21	1400	0.3	台地段丘	隆起	692.8	20	堆積岩類	N1より下位	16800
J-31	17	1406	9.1	台地・段丘・砂礫台地	隆起	28.3	3	堆積岩類	N1より下位	13859
J-32	4	852	5.1	低地	沈降	41.5	0.4	堆積岩類	N3	83
J-33	2	1050	9.3	低地	隆起	82.8	4	堆積岩類	N1より下位	4638
J-34	23	1501	1.8	台地・段丘・砂礫台地	隆起	33.0	25	堆積岩類	N1より下位	1304
J-35	3	1206	16.6	低地	隆起	26.6	5	堆積岩類	N1より下位	4
J-36	706	400	37.6	山地	データなし	33.4	33	付加コンプレックス	N1より下位	4
J-37	129	不明	29.6	山地	隆起	12.3	37	付加コンプレックス	N1より下位	104
J-38	68	不明	23.6	丘陵地	隆起	65.4	34	付加コンプレックス	N1より下位	193
J-39	108	自噴	26.0	丘陵地	隆起	1.3	29	付加コンプレックス	N1より下位	213
J-40	306	500	22.6	山地	隆起	39.3	34	付加コンプレックス	N1より下位	375
J-41	165	1300	17.0	台地段丘	隆起	148.5	33	付加コンプレックス	N1より下位	3
J-42	0	不明	0.0	低地	隆起	22.7	28	火山岩類	N1より下位	3267
J-43	4	不明	0.2	低地	隆起	22.7	28	火山岩類	N1より下位	3279
J-44	10	20	4.0	山地	隆起	336.8	32	付加コンプレックス	N1より下位	19
J-45	3	不明	0.0	丘陵地	隆起	252.6	29	付加コンプレックス	N1より下位	9532
J-46	91	800	7.3	山地	隆起	3.6	29	付加コンプレックス	N1より下位	8
J-47	1	1000	0.3	データなし	隆起	9759.6	15	堆積岩類	N1より下位	58
J-48	480	600	26.0	丘陵地	隆起	20.6	17	深成岩類	N1より下位	10
J-49	295	600	5.9	山地	隆起	2.1	37	深成岩類	N1より下位	11
J-50	36	600	25.6	低地	隆起	48.5	35	火山岩類	N1より下位	5
J-51	38	不明	4.3	山地	隆起	0.2	19	深成岩類	N1より下位	6
J-52	24	580	0.6	丘陵地	隆起	5.6	27	堆積岩類	N1より下位	16
J-53	62	600	29.7	台地段丘	隆起	20.6	26	付加コンプレックス	N1より下位	14
J-54	123	600	12.7	山地	隆起	0.9	17	深成岩類	N1より下位	19
J-55	126	376	0.4	低地	隆起	23.7	36	付加コンプレックス	N1より下位	2
J-56	168	503	0.4	山地	隆起	3.1	30	深成岩類	N1より下位	14
J-57	18	355	0.7	山地	隆起	29.9	25	付加コンプレックス	N1より下位	10
J-58	0	600	2.8	低地	隆起	325.5	21	付加コンプレックス	N1より下位	10994
J-59	213	201	5.8	低地	データなし	12.9	15	付加コンプレックス	N1より下位	6
J-60	9	280	0.1	データなし	データなし	11.7	22	堆積岩類	N1より下位	16176
J-61	40	603	2.4	丘陵地	隆起	49.9	22	付加コンプレックス	N1より下位	12
J-62	40	118	7.3	低地	隆起	39.0	0.6	堆積岩類	Q2	16
J-63	19	108	7.4	低地	隆起	81.6	0.8	堆積岩類	Q2	19
J-64	21	104	6.7	ローム台地	隆起	109.4	0.9	堆積岩類	Q2	9
J-65	21	1490	1.6	ローム台地	隆起	51.3	1.2	堆積岩類	N2	14679
J-66	6	不明	5.6	低地	隆起	0.1	0.1	堆積岩類	N1より下位	13948
J-67	7	不明	5.9	低地	隆起	3.1	0.1	堆積岩類	N1より下位	12750
J-68	25	不明	4.0	ローム台地	隆起	7.3	2	堆積岩類	N1より下位	13677
J-69	25	400	1.2	山地	隆起	0.2	29	付加コンプレックス	N1より下位	-
J-70	60	1500	13.1	丘陵地	隆起	0.6	6	堆積岩類	N2	-
J-71	138	不明	23.3	山地	隆起	1.2	29	堆積岩類	N1より下位	-
J-72	18	1500	0.2	ローム台地	隆起	5.2	13	堆積岩類	N1より下位	-
J-73	49	不明	2.3	台地	隆起	7.5	11	堆積岩類	N1より下位	-
J-74	6	700	33.9	データなし	隆起	383.4	6	堆積岩類	N1より下位	-
J-75	3	不明	1.8	低地	隆起	443.5	6	堆積岩類	N1より下位	-

4) 深部地下水の温度と塩化物イオン濃度構造

バックグラウンドデータの内、海岸から 20 km 以内の距離に分布する 1,938 地点の井戸における井戸底の標高と温度および塩化物イオン濃度との関係を図 2.2-48 および図 2.2-49 に示す。井戸では一般的にスクリーンが設けられているため、文献に掲載されている水温や水

質の情報は、井戸底付近の深度に限らず、より浅い深度の地下環境を反映したものと考えられる。本事業では、この点に留意して検討を進めた。

地下の温度構造（図 2.2-48a）はおおむね浅部で低く、深部で高い傾向にあるが、一部に高い温度を示す地点が認められる。ここで井戸底の標高と地温勾配の関係から、非火山性の地下水に該当する地点を抽出した（図 2.2-48b）。ここで地温勾配は $3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ （日本地熱学会ホームページ）、地表の平均気温を 15°C として計算した。この判定により、浅部で高温を示していた地点は除外され、おおむね深度が増加するにつれて温度が増加する成層構造が確認できた。この構造を踏まえて、今後システムティック区分における沿岸部深部地下水の温度環境の検討を進める。

塩化物イオン濃度は、低濃度の地点は内陸から海岸まで普遍的に存在し、同時に高濃度の地点も同じ傾向にあった（図 2.2-49 (a)）。また、地温勾配から判定された非火山性の地下水に限った場合も同様の傾向にあった（図 2.2-49 (b)）。これらの結果は、深部地下水の塩化物イオン濃度は、現海水の塩化物イオン濃度： $19,400\text{ mg/L}$ （国立天文台、2015）と同程度の高い濃度ばかりではないことを示している。また、システムティック区分の結果（表 2）と比較しても、例えば海岸から 5 km 以内にある深部地下水の塩化物イオン濃度は多様であり、均質な分布ではないことがわかる。これらの要因についてはさらなる検討が必要である。

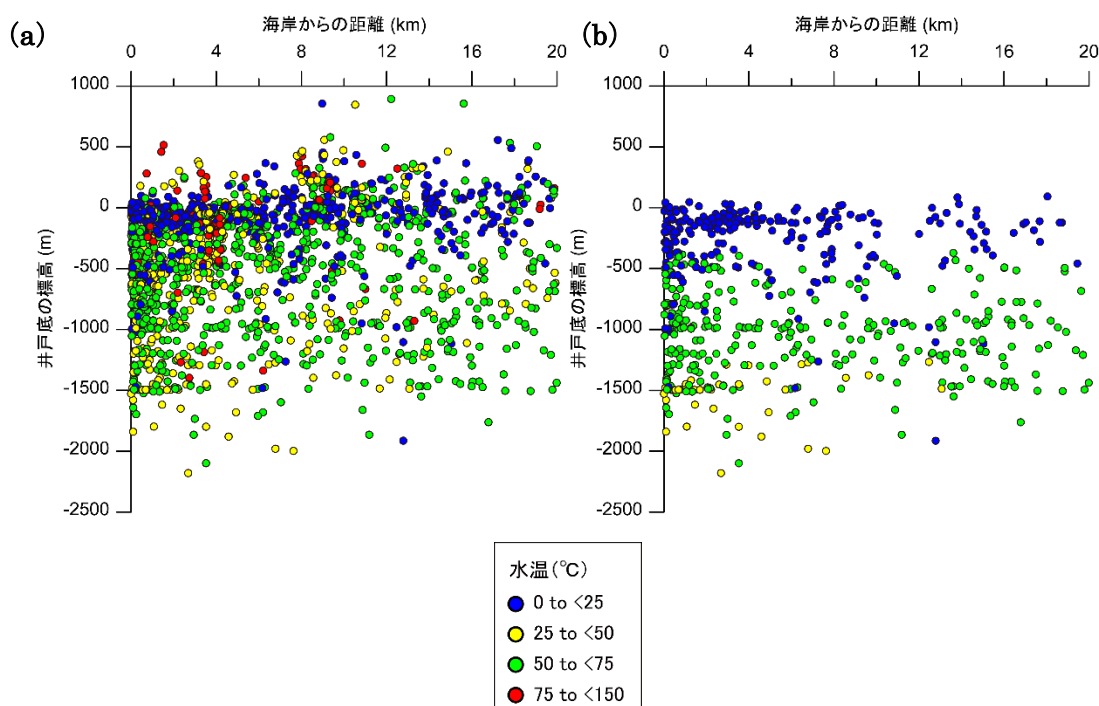


図 2.2-48 バックグラウンドデータから得られた深部地下水の温度構造
((a) 1938 地点のデータ、(b) 地温勾配から非火山性地下水と判定されたデータ)

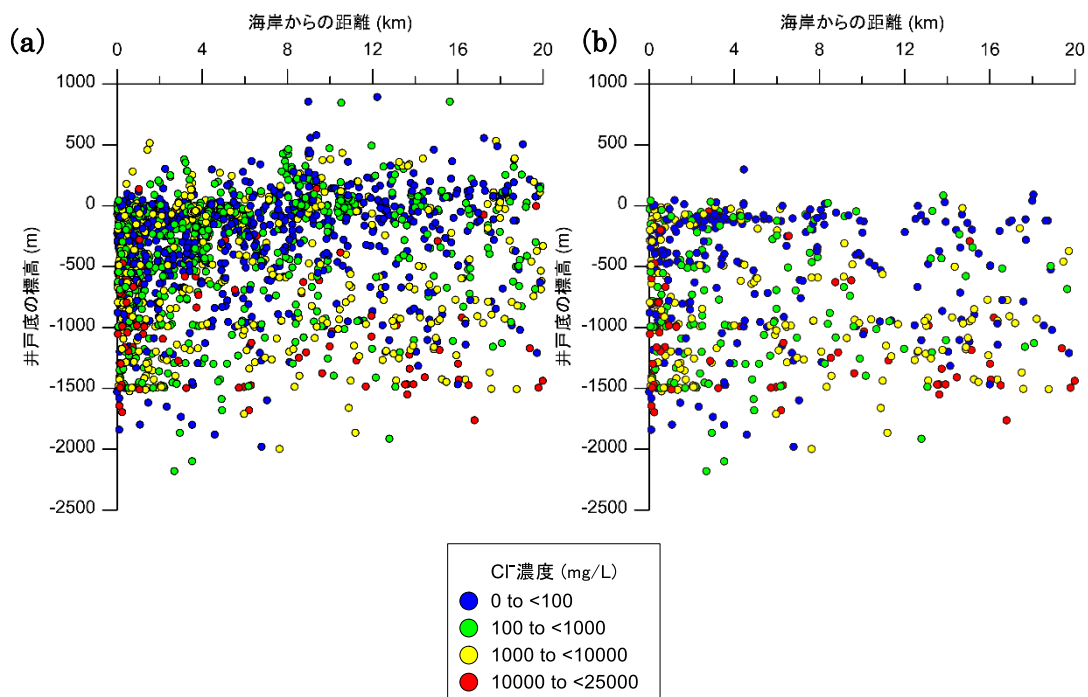


図 2.2-49 バックグラウンドデータから得られた深部地下水の Cl 濃度構造
 ((a) 1938 地点のデータ、(b) 地温勾配から非火山性地下水と判定されたデータ)

5) システマティック区分における地形、地質と地下水年代の関係性の検討

集水域内の表層地質、井戸底の標高、流域の平均傾斜角度と地下水年代との関係を図 2.2-50 に示す。ここでは地下水年代の値が報告されている地点を対象として、「現降水」、「現海水」、「氷期降水」、「化石海水」の区分に基づいて検討した。ここで示した地点は、いずれも海岸から 10 km 以内の距離に位置している。表層地質、井戸底の標高および地下水年代の関係（図 2.2-50 (a)）を見ると、おおむね同じ深度にある地下水の場合、堆積岩類ではより地下水年代が古く、火山岩類では若い傾向が認められた。また集水域の平均傾斜角との比較（図 2.2-50 (b)）では、火山岩類ほど勾配が大きいと同時に地下水年代が若い傾向にあり、一方で堆積岩類では勾配が小さく地下水年代が古い傾向にあった。集水域の平均傾斜角度が堆積岩類で小さく火山岩で大きいことは、一般的な堆積作用や噴出過程を踏まえれば納得できる結果である。また、地形勾配が地下水の駆動力となることを考えれば、地形の傾斜角度が地下水年代と一定の関係にありそうであることは想像に難くない。しかし、この仮説を裏付けるためには、さらなる深部地下水データの収集と詳細な検討が必要である。

ドに比べ、Al カソードの方が測定精度にばらつきが見られた。デジタルマイクロスコープで、測定前後のカソードを観察したところ、Al カソードでのみ、充填部に化学反応の痕跡が確認され、これが測定精度に影響を与えていると思われる。このことから今後は Cu カソードを使用することとした。また、Nb 混合率については、混合率が増加すると、測定精度が良くなる一方で、測定感度がある混合率で極大を示した後、低下する傾向が見られた。今後の課題として、実試料測定に適当な測定感度と精度が得られる最適な混合比を決定する必要がある。

前処理方法では、これまで課題となっていたヨウ素の抽出法であるノルマルヘキサン溶媒抽出法と陰イオン交換樹脂法について情報収集を行った。陰イオン交換樹脂法は、前処理時に人為起源の ^{129}I の混合が報告されている（楠野ほか 2017）ことから、同位体比が低いと予想される地下水試料の試料調製には不向きであることがわかった。したがって、ヨウ素の精製・分離はノルマルヘキサン溶媒抽出法が望ましいが、抽出時、地下水試料中に含まれる不純物が抽出されたヨウ素を含む有機層と一緒に分取される可能性があり、不純物の除去方法を確立する必要がある。

このほか、高い精度で地下水年代測定を行うには、大型実験装置の使用や測定時間の長さなどの制約がある。その解決策の一つとしてマルチコレクター型希ガス質量分析装置の活用が挙げられる。また、質量分析装置を用いた ^4He 法による地下水年代測定においては、 ^4He 濃度の初生値に関する検討等も重要となることから、マルチコレクター型希ガス質量分析装置を用いた検討を行った。「Appendix VII マルチコレクター型希ガス質量分析装置の地下水試料測定への活用」に詳細を示す。

(10) プッシュプル試験

・はじめに

2.2.1 節「沿岸部の地下水長期安定性評価技術」の中でのプッシュプル試験の位置づけについて述べる。概要調査段階の安全評価では、超長期間の核種移行を評価するために超長期地下水流動解析が実施される。流動解析の骨格となる数値モデル構築の際には、地下水年代分布が重要な役割を果たすが、一般に沿岸部の深部地下水についてはその調査事例が少ない。そのため、本事業（2.2.1 節）では実際に原位置地下水を採取し、地化学、放射性同位体比、安定同位体比などを分析することにより、地下水年代決定までの手順を体系化するとともに、課題の抽出を行っている。そして得られた成果を用いて、概念図の作成やシステムティック区分を行い、沿岸部の地下水年代分布の解明を試みている。この一連の調査研究の蓄積により、実際の概要調査時に得られる地下水年代分布を、より正しく評価することができるようになるだろう。

一方、同位体等によって得られた地下水年代を別の手法で検証することも重要である。深部地下水の年代は地下水の移流速度（自然流速）を反映しているが、これを現場試験で検証できれば、同位体によって得られた地下水年代分布は、より信頼性の高いものとなる。本年度のプッシュプル試験は、この地下水の移流速度を求めることを目的に実施したものである。

・概要

プッシュプル試験の概要、得られるデータの例を図 2-2-51、図 2-2-52 に示す。本試験に関しては、平成 24 年度沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発（産総研, 2013）でも実施されており、本年度も同じ観測井を用いた。観測井は北海道天塩郡幌延町浜里試験地にある DD-2 孔であり、井戸の構造と地質柱状図の詳細は Appendix VIII に記した。DD-2 孔は深度 100 m、スクリーン深度は深度 90.7~99.7 m である。本帯水層の透水係数は $1.8\sim 3.3\times 10^{-5}\text{m/s}$

(Cooper-Jacob 法) であり、本年度の調査では $1.3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ となった。したがって 10^{-5} m/s オーダーといえる。比貯留係数は本年度の調査より $7.2 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ が得られた。

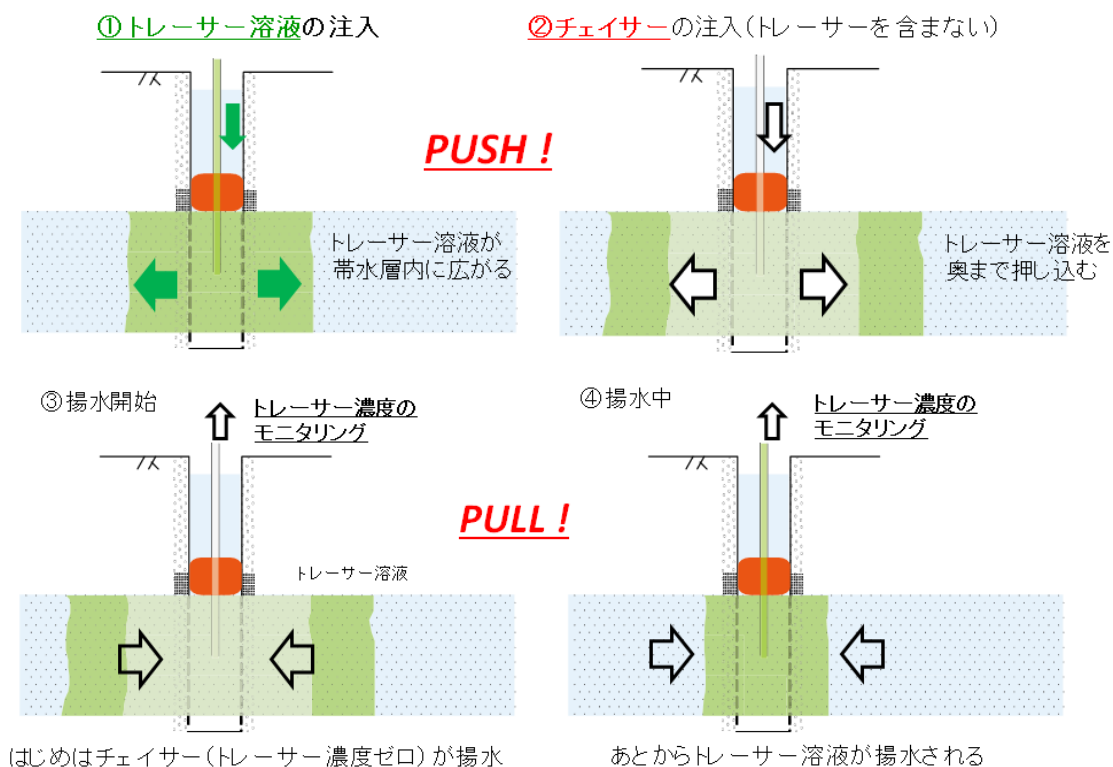


図 2.2-51 プッシュプル試験のイメージ

一般にプッシュプル試験では以下のような作業を行う。①試験区間にトレーサー溶液を注入する（橙色で示されたパッカーの下が試験区間）。トレーサー溶液は井戸を中心として帯水層内を放射状に広がる。②続いてチェイサーと呼ばれる溶液を注水する。チェイサーはしばしばトレーサーを含まない溶液が用いられ、トレーサー溶液を帯水層の奥に押し込む役割がある。ここまでの注水すなわち“プッシュ”である。③トレーサー濃度をモニタリングしながら揚水する。注水後直ちに揚水した場合、まずはチェイサーが揚水されるが、チェイサーが揚水しつくされると、④のようにトレーサー溶液が揚水される。この揚水が“プル”に当たる。

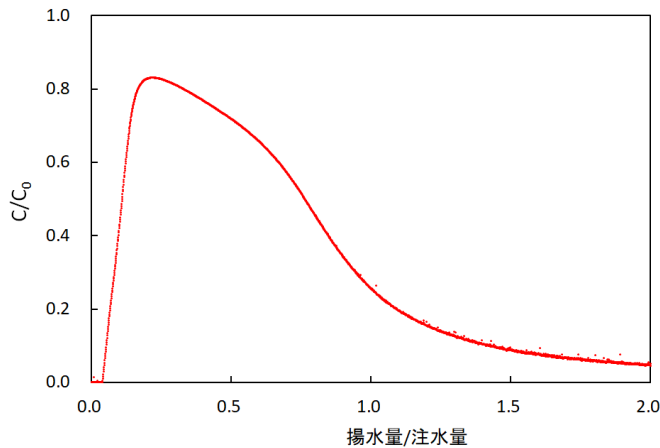


図 2.2-52 破過曲線の例
横軸は揚水量に関する指標、縦軸は観測された濃度に関する指標（この場合は注入したトレーサー溶液中のトレーサー濃度 C_0 と観測された濃度 C の比）の関係。

・平成 24 年度試験の課題と本年度の試験

DD-2 孔から得られる地下水は軽い δD 、 $\delta^{18}O$ を示しており、氷期降水に分類される（産総研, 2011）。昨年度報告書（平成 28 年度沿岸部処分システム高度化開発報告書）でも述べたが、今回調査対象となる DD-2 孔の地下水の涵養域はサロベツ背斜よりも海側であることが比抵抗探査によって明らかにされている。広域スケールで見れば、地下水は涵養域を下沼周辺とし、ピストン流的に海に向かって流動していると考えられることができるだろう。そのため涵養域周辺の深度 80 m にて氷期降水のシグナルが得られたことは、涵養域においても氷期降水が（ピストン流的に押し出されずに）残留していること、つまり、ほとんど流動していないことを示唆する。地下水年代分布から得られる結論として、DD-2 孔の地下水は人間の時間感覚ではほとんど動いていないと考えることができる。

一方、2012 年には希釈試験と呼ばれる地下水の自然流速を求めるための原位置試験が行われている（Appendix VIII）。この試験の結果、地下水のダルシー流速は $6.9 \times 10^{-7} \sim 1.0 \times 10^{-6}$ [m/s]、すなわち約 22~34 m/y が得られた。この値は地下水年代から推定される自然流速よりもはるかに速い。両者が食い違う理由として希釈試験装置の影響も考えられるが、はっきりしない。

仮に地下水がある程度の自然流速を有している場合、トレーサー溶液（およびチェイサー）の注入後から揚水までの間に、一定の待機期間を設けると、トレーサー溶液は移動し破過曲線の重心は変化すると予想される。この原理を用いて本年度はトレーサー溶液およびチェイサーの注入後に異なる待機期間を設けた三つの試験を実施した。

【1】長期プッシュプル試験

約 5 年前に注入したトレーサー溶液およびチェイサーの回収を目的とした試験。平成 24 年 10 月 26 日に $\delta D=0 \text{ ‰}$ のトレーサー溶液 900L と $\delta D= -60 \text{ ‰}$ のチェイサー 120L を注入した。本年度は、その回収を目的とし、揚水および地下水試料の採取、同位体分析をおこなった。採水の間隔は Appendix VIII の通りである。

【2】プッシュプル試験（PP-1）

注入後、直ちに揚水を実施することでトレーサーおよびチェイサーを回収する試験。平成 24 年度に実施したプッシュプル試験と同じ仕様。平成 24 年度試験結果の再現性の確認の意味がある。注水量はトレーサー溶液 900L、チェイサー 120L、注揚水流量は 5 L/min、揚水時間は 34 時間とした。地下水試料の採水間隔は Appendix VIII の通りである。

【3】プッシュプル試験（PP-2）

注入後、約 1 ヶ月後に揚水を実施することでトレーサー溶液およびチェイサーを回収する試

験。トレーサー溶液とチェイサーの注入量、注揚水流量、揚水時間、地下水試料の採取間隔はPP-1と同じである。

【4】中期プッシュプル試験

平成24年度と同様、次年度以降の揚水に備え、トレーサー水900Lとチェイサー120Lを注入した。トレーサー溶液とチェイサーの水質測定結果をAppendix VIIIに示す。

・試験前の予想1

帯水層内をトレーサー溶液が均一に広がると仮定すると、トレーサー溶液は井戸の中心から約32cm進むことになる(Appendix VIII)。これを初期値として、フィックの式を解いたものが図2-2-53である。この計算では、移流がなく分子拡散のみが物質輸送に関わる場合に生じる濃度分布を推定しているが、(地下水年代から推定されるように)移流が極めて小さいならば、5年後においてもDD-2孔の直下にてトレーサー溶液が検出されるはずである。

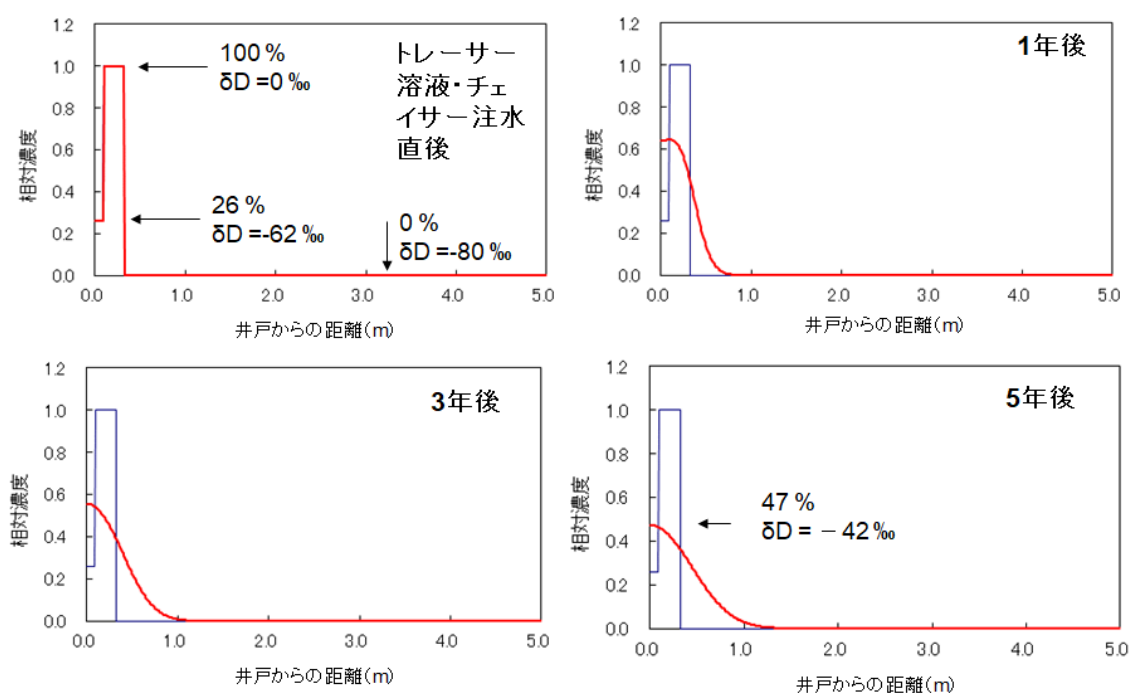


図 2.2-53 分子拡散の影響のみが生じた場合

横軸は井戸からの距離であり、ゼロが井戸の中心を意味する。縦軸が相対濃度であり、 $\delta D=0\text{‰}$ (トレーサー溶液) のとき1.0、 $\delta D=-80\text{‰}$ (原位置地下水) のとき0.0である。左上のトレーサー溶液・チェイサー注水直後の図に記載されている、26% ($\delta D=-62\text{‰}$) はチェイサーの値であるが、チェイサーとトレーサー溶液間の分子拡散および分散の影響は無視した。残りの三つの図については、フィックの式(円筒座標系)を差分展開して算出した。与えたパラメータは有効拡散係数 $=4 \times 10^{-10}$ [m²/s]、時間ステップ86,400秒、セル長0.01 m、境界条件として井戸から20 mの距離にて相対濃度0とした。有効拡散係数は、Ikawa et al. (2014) のDD-1孔の拡散場の値を用いた。 δD の分析精度は $\pm 1\text{‰}$ であることを考えると、このケースでは5年後でも十分にトレーサー溶液の検出は可能である。

・試験前の予想2

平成24年度の希釈試験で示されたように移流が存在する場合は、注水したトレーサー溶液とチェイサーが下流側に移動する。図2-2-54はリング状になっているトレーサーの中心が井

戸から 1 m 下流に流されたケース、すなわち、1 m 上流側で揚水をおこなったケースを概算したものだが、この場合は注水時のトレーサー濃度の 10%が検出されている（右下図）。 δD の分析精度を考えると分子拡散の影響を加味しても検出は可能と思われる。一方、同様の計算をトレーサーの中心から揚水井までの距離を変えておこなったところ、1.5 m ほど離れると検出が難しくなることが示された。粗い試算ではあるが、仮に地下水の自然流速（ダルシー流速）が $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{y}$ 以上（実流速で約 0.1 m/y 以上）の場合は、トレーサーの検出が難しくなると予想される。

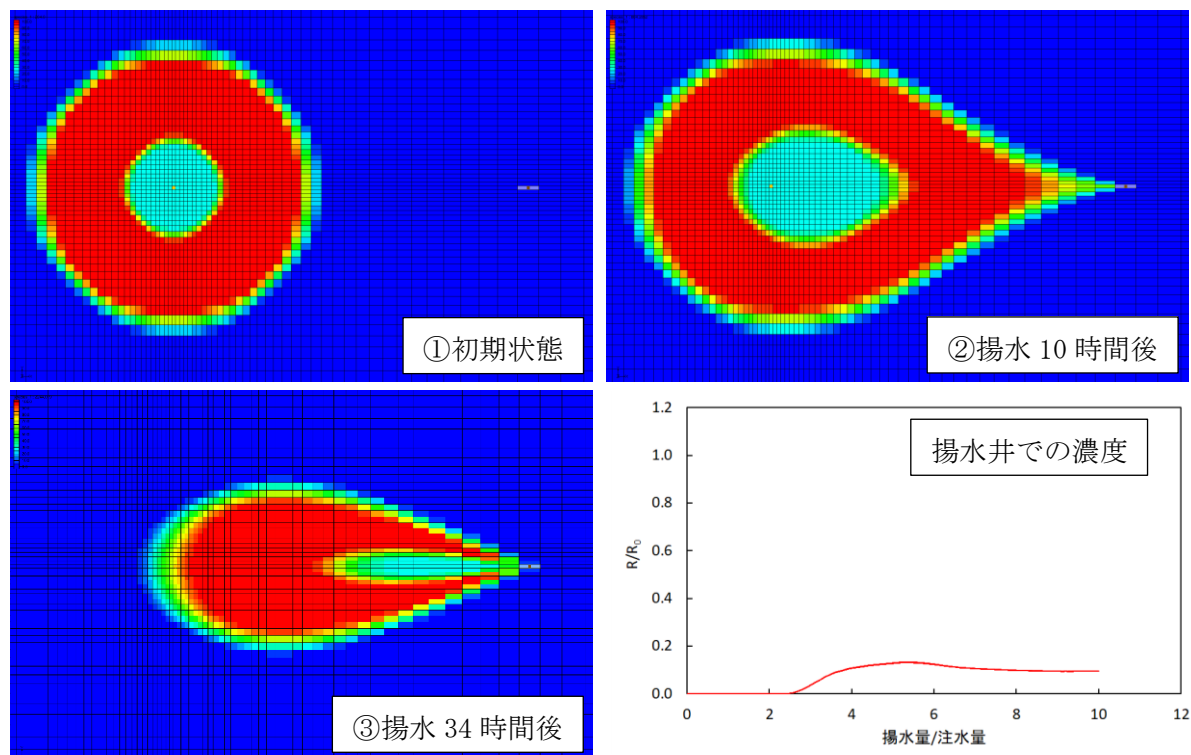


図 2.2-54 トレーサー溶液が揚水井の 1 m 下流側に移動したケース

注水井にてトレーサー溶液とチェイサーを注水後、1 m 離れた揚水井から揚水する計算をおこなった。MODFLOW および MT3DMS (GMS10.3.5, Aquaveo 社) を使用。被圧帯水層を厚さ 9 m の平板とし、z 方向（上下方向）の流れは無し、xy 方向のメッシュ長 0.01~1 m（場所により変化）、透水係数 $K_x=K_y=10^{-5} \text{ m/s}$ 、貯留係数 $7.2 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 、有効間隙率 0.3、境界条件として井戸から x および y 方向に 25 m 以上（計算上の揚水の影響半径外）の位置にて定水頭を与え、現場試験と同じ 5 L/min の揚水流量で 34 時間の揚水をおこなった。①トレーサー溶液とチェイサーが注水後 1 m 下流に流された状態を初期条件とした。ただし、流動に伴う流体力学的分散は考慮していない。トレーサー濃度が高い領域が暖色系、低い領域は寒色系である。トレーサー溶液の位置が赤色のリング、リング内の水色はチェイサーを意味する。② 1 m 離れた位置から揚水を開始した時の 10 時間後のトレーサー溶液およびチェイサーの様子。トレーサー溶液が揚水井に集まっている。③揚水開始から 34 時間後。右下は揚水井でのトレーサー濃度の時間変化。トレーサー溶液の 10~15%程度の濃度が確認される。横軸が 6~8 のあたりに濃度が低下する傾向がある。これはチェイサーを観測していることを意味している。

・結果

【1】長期プッシュプル試験

平成 24 年 10 月 26 日に注入したトレーサー溶液とチェイサーを回収するため揚水および採水を実施した。揚水中の水素・酸素安定同位体比の破過曲線が図 2-2-55 である。結果として平成 24 年度に注水したトレーサーは認められなかった。

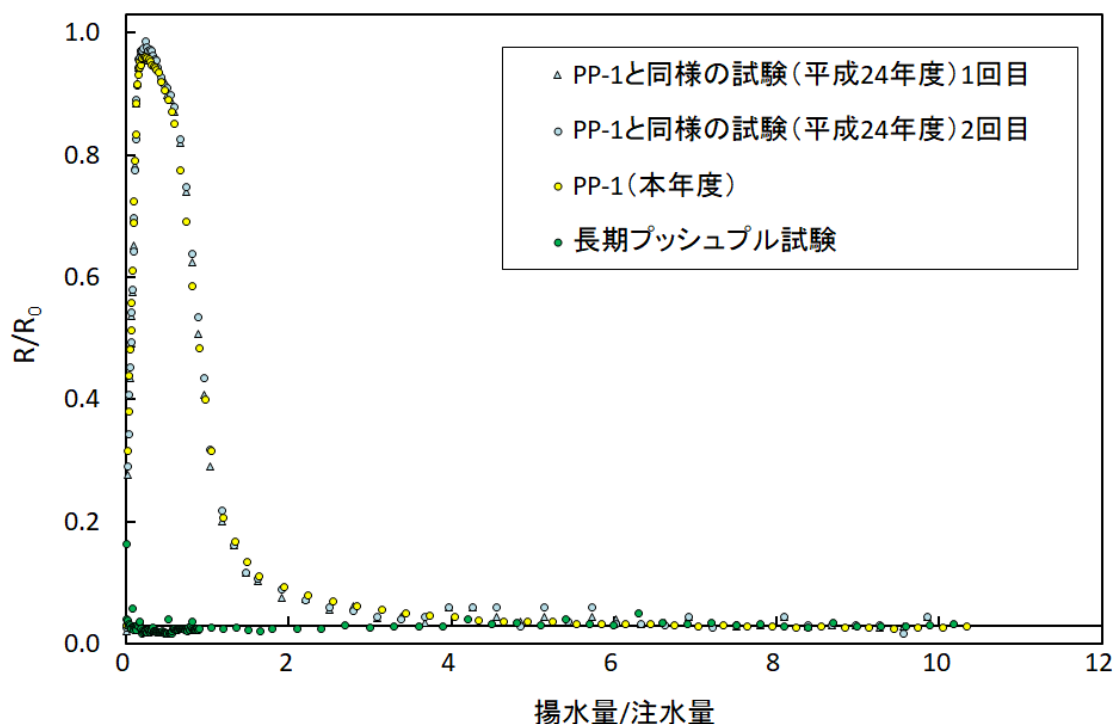


図 2.2-55 揚水試験における酸素・水素同位体比をトレーサーとした破過曲線

【2】プッシュプル試験 (PP-1)

トレーサー溶液とチェイサーを DD-2 孔に注入し、直後に揚水した。得られた破過曲線は図 2-2-55 の通りである。 δD で算出された回収率は 89% であり、注水したトレーサーは適切に回収されたことが示唆される。また、平成 24 年度に行われた破過曲線とも非常に近く、本年度の試験が適切に行われており、帯水層構造や井戸構造が変化していないことを示唆している。また、以上の再現性の高さは、先に述べた長期プッシュプル試験の結果と、後述する PP-2 の結果が信頼できることを意味する。

【3】プッシュプル試験 (PP-2)

図 2-2-56 は PP-1 と PP-2 の結果の比較である。PP-1 と比して PP-2 試験の方がピークが早く出現し、ピーク濃度は低くなった。また、揚水量/注水量が 1 を超えたあたり（揚水量が 1,000 L あたり）以降、PP-2 試験の濃度低下傾向は PP-1 試験に比べてなだらかとなった。破過曲線のテール部の低下傾向に差異がみられることは、PP-2 において注水から揚水までの 1 カ月間に、トレーサーの移動が生じたことを意味する。特にピークの出現時間に相違が見られることは、PP-2 試験の結果が、PP-1 試験と比して移流および移流により生じる機械的分散の影響を受けた可能性を示唆している。

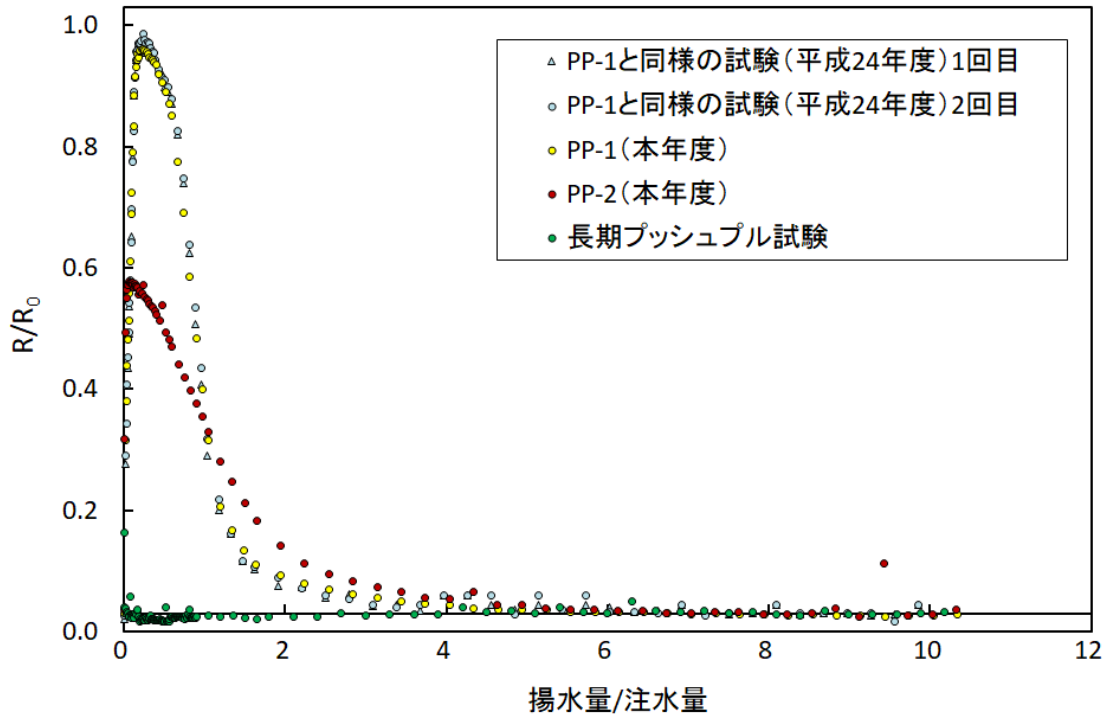


図 2.2-56 PP-1 と PP-2 の水素安定同位体比をトレーサーとした破過曲線の比較

【4】中期プッシュプル試験

PP-2 試験の後に 5 L/min の流量で DD-2 孔にトレーサー溶液 900L、チェイサー120L を注水した。Appendix VIII に注水前のトレーサーおよびチェイサーの水質測定結果を示す。

・本年度の結果と課題

同位体などから推定される地下水年代分布は、超長期流動解析による評価に影響を及ぼすため、別の手法で検証することが望ましい。本事業ではその方法としてトレーサーの重心の動きから自然流速を求めるプッシュプル試験を考え、幌延町浜里 DD-2 孔にて適用試験をおこなった。その結果は以下の通りまとめられる。(1)平成 24 年度の試験結果との比較により、本試験は 10^{-5} m/s の透水係数を有する帯水層に対して高い再現性を持つことがわかった。(2)地下水年代の結果を受けて、DD-2 孔の地下水がほぼ不動と仮定し、注水後 5 年間の待機時間を設けた試験をおこなったところ、予想に反してトレーサーが全く検出されないという結果になった。(3)待機時間を 1 カ月に変更したところ、破過曲線のピークが早く現れ、かつピーク濃度が大きく低下した。次年度は本試験結果を解析し、特に PP-2 の破過曲線の特性について検討を行う予定である。

(11)参考文献

天野由記, 山本陽一, 南條 功, 村上裕晃, 横田秀晴, 山崎雅則, 國丸貴紀, 大山隆弘, 岩月輝希, 幌延深地層研究計画における地下水, 河川水および降水の水質データ (2001~2010 年度), 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code2011-023, 2012.

Andrews, J.N. and Lee, D.J., Inert gases in groundwater from the Bunter sandstone of England as indicators of age and paleoclimatic trends, J. Hydrol. 41, pp.233-252, 1979.

Appelo, C.A.J. and Postma, D., Geochemistry, groundwater and pollution, 2nd edition, A.A. Balkema publishers, 649p, 2005.

- 浅海敏昭, 電気伝導率標準液に関する調査研究, 産総研計量標準報告, 9, No.1, pp.135-153, 2014.
- Bethke, C., *Geochemical and biogeochemical reaction modeling*, Second Edition, Cambridge University Press, 543p, 2008.
- Busenberg, E. and Plummer, L. N., Dating young ground water with sulfur hexafluoride- Natural and anthropogenic sources of sulfur hexafluoride. *Water resources of research*, 36, pp.3011-3030, 2000.
- 地質調査総合センター, 全国地熱ポテンシャルマップ CD-ROM 版. 数値地質図 GT-4, 地質調査総合センター, 2009.
- Clark, I. D. and Fritz, P., *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers, pp. 197-244, 1997.
- Colpen, T.B., Herczeg A.L. and Barnes, C., Isotope engineering – Using stable isotopes of the water molecule to solve practical problems, *Environmental tracers in subsurface hydrology* edited by Cook P. and Herczeg A.L., Kluwer Academic Publishers, pp.79-110, 2000.
- Craig H., Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, pp.1702-1703, 1961.
- Drever, I. J., *The geochemistry of natural waters* second edition, Printice Hall, Inc., 437p, 1988.
- 営繕工事における天然ガス対応のための関係官公庁連絡会議編, 施設整備・監理のための天然ガス対策ハンドブック, 国土交通省関東地方整備局東京第二営繕事務所, 99p, 2007.
- Elmore, D., Fulton, B.R., Clover, M.R., Marsden, J.R., Gove, H.E., Naylor, H., Purser, K.H., Kilius, L.R., Beukens, R.P. and Litherland, A.E., Analysis of Cl-36 in environmental water samples using an electrostatic accelerator, *Nature*, 277, pp. 22-25, 1979.
- Engelhardt, V. W. and Tunn, W. L. M., *The flow of fluids through sandstones*, translated by Witherspoon from Heidelberg Beitrage zur Mineralogie und Petrographie 2: 12-25, Illinois State Geological Survey, no.194, pp.1-17, 1955.
- Fifield, L.K., Tims, S.G., Stone, J.O., Argento D.C. and De Cesare, M., Ultra-sensitive measurements of ^{36}Cl and ^{236}U at the Australian National University, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 294, pp.126-131, 2013.
- 福本幸一郎, 町田 功, 坂東和郎, 藤野丈志, 小酒欽弥, 岡本信寛, 新潟平野の地下水流動概念モデル (第 1 報) , 2017 年春季講演会講演予稿, pp.20-21, 2017.
- 舟木泰智, 石山宏二, 早稲田周, 加藤 進, 渡辺邦夫, 北海道北部, 幌延地域に分布する新第三紀堆積岩中の炭化水素ガスの分子組成と炭素同位体組成, *地学雑誌*, 121(6), pp.929-945, 2012.
- Hasegawa, T, Nakata. K., Tomioka, Y., Kazuyuki G., Kashiwaya, K., Hama, K., Iwatsuki, T., Kunimaru, T. and Takeda, M., Cross-checking groundwater age by ^4He and ^{14}C dating in a granite, Tono area, central Japan, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 192, pp.166-185, 2016.
- 長谷川琢磨, 中田弘太郎, 近藤浩文, 五嶋慶一郎, 村元茂則, 富岡祐一, 後藤和幸, 柏谷公希, 沿岸域における地下水の流動性の年代測定による評価 —三浦半島西部沿岸域でのボーリング調査—, *地学雑誌*, Vol.122, No.1, pp.116-138, 2013.
- 広田知保, 和田信彦, 小原常弘, 村山泰司, 深見浩司, 丸谷 薫, 北海道の地下水資源 石狩低地帯主部, 地下資源調査所調査研究報告, 27, 北海道立地下資源調査所, 91p, 1996.
- 穂莉利之, 化学平衡論解析を用いた原位置深層地下水水質の推定, 清水建設研究報告, 87,

- pp.77-86, 2010.
- 穂莉利之, 沖原光信, 富岡祐一, 後藤和幸, 近藤浩文, 吉村公孝, 原位置地下水の物理化学変数の推定手法の適用例, 地下水学会 2012 年度秋季講演会講演要旨集, pp.112-117, 2010.
- 放射線医学総合研究所, 環境中のトリチウム測定調査データベース (NETS DB), <http://www.nirs.go.jp/db/anzendb/AnzenkenkyuDB.php>, 2012. (最終確認日, 2012 年)
- IAEA/WMO, Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. Accessible at: <http://www.iaea.org/water>, 2017. (最終更新日, 2017 年 6 月 27 日版)
- Ikawa, R., Machida, I., Koshigai, M., Nishizaki, S. and Marui, A, Coastal aquifer system in late Pleistocene to Holocene deposits at Horonobe in Hokkaido, Japan, *Hydrogeology Journal*, vol.22, pp.987-1002, 2014.
- Inzelt, G., Standard, formal, and other characteristic potentials of selected electrode reactions, In: Bard, A. and Stratmann, M., Scholtz, F. and Pickett J. (eds), *Encyclopedia of Electrochemistry, Volume 7a, Inorganic Chemistry*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., pp.17-76, 2006.
- 一般社団法人日本地質学会 地質環境の長期安定性研究委員会編, 日本列島と地質環境の長期安定性, 地質リーフレット 4, 2011.
- 石井英一, 安江健一, 幌延町における鮮新世～前期更新世のテフラ層と FT 年代, JNC-TN5400 2005-006, 2005.
- Iwatsuki, T., Xu, S., Mizutani, Y., Hama, K., Saegusa, H., Nakano, K., Carbon-14 study of groundwater in the sedimentary rocks at the Tono study site, central Japan. *Appl. Geochem.* 16, pp.849-859, 2001.
- Iwatsuki, T., Furue, R., Mie, H., Ioka, S., and Mizuno, T., Hydrochemical baseline condition of groundwater at the Mizunami underground research laboratory (MIU), *Applied Geochemistry*, 20, pp.2283-2302, 2005.
- 岩月輝希, 森川佳太, 細谷真一, 吉川英樹, 深部地下水の物理化学パラメータ (pH, 酸化還元電位) の測定とその留意点, 地下水学会誌, 51, pp.205-214, 2009.
- Jabbar, T., Steier, P., Wallner, G., Kandler, N., & Katzlberger, C. AMS analysis of iodine-129 in aerosols from Austria. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 269, pp.3183-3187, 2011.
- 海上保安庁海洋情報部海洋情報課/日本海洋データセンター ホームページ
http://www.jodc.go.jp/jodcweb/index_j.html (最終更新日, 2017 年 6 月 27 日版) .
- Kalin R.M., Radiocarbon dating of groundwater systems, *Environmental tracers in subsurface hydrology*, Springer US, pp.111-144, 2000.
- Kashiwaya, K., Hasegawa, T., Nakata, K., Tomioka, Y. and Mizuno, T., Multiple tracer study in Horonobe, northern Hokkaido, Japan: 1. Residence time estimation based on multiple environmental tracers and lumped parameter models, *Journal of Hydrology*, 519, 532-548, 2014.
- 加藤進, 梶原義照, 新潟地域油・ガス田付随水の水素および酸素の同位体組成. 石油技術協会誌, 51, pp.113-122, 1986.
- 君津市, 君津市史一自然編. 東京, 第一法規, 640p, 1996.
- 木村重彦, 水中のトリチウムによる地下水の流れの研究, 農業土木試験場報告, pp.1-43, 1971.
- 国土交通省国土調査ホームページ
<http://nrb-www.mlit.go.jp/kokjo/inspect/inspect.html> (最終更新日, 2017 年 6 月 27 日版) .

国土交通省国土地理院基盤地図情報サイト

<http://www.gsi.go.jp/kiban/> (最終更新日, 2017年6月27日版)

国土交通省国土地理院基盤地図情報サイト

<http://www.gsi.go.jp/kiban/>

国土地理院, 数値地図 50m メッシュ (標高) 日本-III CD-ROM 版, 2000.

国土地理院, 数値地図 50m メッシュ (標高) 日本-I CD-ROM 版, 2001.

国土地理院, 数値地図 50m メッシュ (標高) 日本-III CD-ROM 版, 2001.

国立天文台 (編), 理科年表 第 89 冊, 1098pp, 丸善出版株式会社, 2016.

越谷賢, 丸井敦尚, 日本列島における地下水賦存量の試算に用いた堆積物の地層境界面と層厚の三次元モデル (第一版) 地質調査総合センター研究資料集, no.564, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2012.

楠野葉瑠香, 松崎浩之, 山道美和子, 川本万里奈, 徳山裕憲, 永田俊, 海水中無機ヨウ素の化学種別 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 比分析の試み, 第 19 回 AMS シンポジウム・2016 年度「樹木年輪」研究会共同開催シンポジウム報告書, pp.90-93, 2017.

Langmuir, D., *Aquieous Environmental Geochemistry*, Prentice-Hall, New Jersey, 602p, 1997.

Lindberg, R. and Runnells, D., Groundwater redox reactions: An analysis of equilibrium state applied to Eh measurements and geochemical modeling, *Science*, 225, pp.925-927, 1984.

Liu, H-H. and Birkholzer, J., On the relationship between water flux and hydraulic gradient for unsaturated and saturated clay, *Journal of Hydrology*, 453, pp.242-247, 2012.

Long A., Eastoe C. J., Kaufmann R. S., Martin J. G., Wirt L. and Finley J. B., High-precision measurement of chlorine stable isotope ratios, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57, pp.2907-2912, 1993.

Lu, Z. T. and Mueller, P., Atom trap trace analysis of rare noble gas isotopes, *Advances in Atomic, Molecular and Optical Physics* (BERMAN, P., ARIMONDO, E., LIN, C., Eds), Elsevier, vol.58, pp.173-205, 2010.

Machida, I., Suzuki, Y. and Takeuchi, M., Carbon-14 age and chemical evolution of $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ -type groundwater of age less than 8,000 years in a confined sandy and muddy Pleistocene aquifer, Japan, *Hydrogeology Journal*, pp.1289-1305, 2013.

町田功, 福本幸一郎, 森野祐助, 丸井敦尚, 苫小牧周辺の広域地下水流動モデル, 地下水技術, pp.1-11, 2016.

馬原保典, 溶存希ガスを用いた地下水年代測定法の開発 -溶存希ガス地下水調査法の体系化-, 電力中央研究所 研究報告: U97052., 1998.

Mahara, Y., Ohta, T., Tokunaga, T., Matsuzaki, H., Nakata, E., Miyamoto, Y., Mizuochi, Y., Tashiro, T., Ono, M., Igarashi, T. and Nagao, K., Comparison of stable isotopes, ratios of $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ and $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ in brine and deep groundwater from the Pacific coastal region and the eastern margin of the Japan Sea, *Appl. Geochem.*, 27, pp.2389-2402, 2012.

Mahara, Y., Ohta, T., Tokunaga, T., Matsuzaki, H., Nagao, K., Nakata, E., Miyamoto, Y. and Kubota, T., Pore-water mobility: Distribution of $\delta^{37}\text{Cl}$, $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$, $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ and dissolved ^4He concentration in the core drilled in the Mobarra gas field, Japan, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 294, pp.597-601, 2013.

- 丸井敦尚, 小野昌彦, 町田 功, (2016) 日本列島南海沿岸部の深部地下水特性, 地下水技術, 58, 3・4, pp.23-28, 2017.
- Matsuzaki, H., Muramatsu, Y., Kato, K., Yasumoto, M., and Nakano, C., Development of ^{129}I -AMS system at MALT and measurements of ^{129}I concentrations in several Japanese soils. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 259(1), pp.721-726, 2007.
- Meyer, D., Prien, R., Dellwig, O., Waniek, J. and Schulz-Bull, D. Electrode measurements of the oxidation reduction potential in the Gotland Deep using a moored profiling instrumentation, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 141, 26-36, 2014.
- 文部科学省 科学技術・学術政策局 原子力安全課防災環境対策室, 放射能測定法シリーズ 9 トリチウム分析法 平成 14 年改訂, (財) 日本分析センター, 127p, 2002.
- Muramatsu, Y., Fehn, U. and Yoshida, S., Recycling of iodine in fore-arc areas: evidence from the iodine brines in Chiba, Japan. Earth Planet. Sci. Lett. 192, pp.583-593, 2001
- 中島輝允, 渡辺真人, 富津地域の地質. 茨城: 地質調査総合センター, 102p, 2005.
- 中村俊夫, I. 加速器質量分析 (AMS) による環境中およびトレーサー放射性同位体の高感度測定, Radioisotopes, 52, pp.144-171, 2003.
- Nakata, K., Kodama, H., Hasegawa, T., Hama, K., Iwatsuki, T. and Miyajima T., Groundwater dating using radiocarbon in fulvic acid in groundwater containing fluorescein, Journal of Hydrology, vol.489, pp.189-200, 2013.
- Nakata, K., Hasegawa, T., Iwatsuki, T. and Kato, T., Comparison of ^{14}C collected by precipitation and gas-strip methods for dating groundwater, Radiocarbon, 58, pp.491-503, 2016.
- Nakata, K., Hasegawa, T., Oyama, T., Ishii, E., Miyakawa, K. and Sasamoto, H., An Evaluation of the Long-Term Stagnancy of Porewater in the Neogene Sedimentary Rocks in Northern Japan, Geofluids, vol. 2018, Article ID 7823195, 21 pages, 2018. doi:10.1155/2018/7823195
- 日本分析化学会北海道支部編, 水の分析 第 5 版, 化学同人, 472p, 2005.
- 日本分析化学会関東支部編, 上本道久監修, ICP 発光分析・ICP 質量分析の基礎と実際 装置を使いこなすために, オーム社, pp.130-160, 2008.
- 日本地下水学会, 地下水水質の基礎, 理工図書, 189p, 2000.
- 日本地熱学会ホームページ <http://grsi.gr.jp>
- 日本地質学会 地質環境の長期安定性研究委員会 (編) (2011) 日本列島と地質環境の長期安定性. 地質リーフレット 4.
- 新潟県県民生活・環境図, 新潟平野の地盤沈下, 70p, 2016.
- 新里忠史, 舟木泰智, 安江健一, 幌延地域における後期鮮新世以降の古地理と地質構造発達史, 地質学雑誌, vol.113, 補遺, pp.119-125, 2007.
- NUMO, 概要調査計画立案の基本的考え方, NUMO-TR-10-08, 42p, 2011.
- Parkhurst, D.L and Appelo, C.A.J., User's guide to PHREEQC (VERSION 2) - A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, USGS, Water-Resources Investigations Report, pp.99-4259, 1999.
- Peiffer, S., Klemm, O., Pecher, K. and Hollerung, R., Redox measurements in aqueous solutions-A theoretical approach to data interpretation, based on electrode kinetics, Journal of Contaminant Hydrology, 10, pp.1-18, 1992.

- Philips F. M., Chlorine-36 Dating of Old Groundwater. Isotope Methods for Dating Old Groundwater. IAEA, pp.125-152, 2013.
- Plummer L. N. and Busenberg E., Chlorofluorocarbons in the atmosphere (Chapter 2) in Use of chlorofluorocarbons in hydrology -a guidebook-, IAEA, pp.9-16, 2006.
- 酒井利彰, 井岡聖一郎, 五十嵐敏文, サロベツ原野南部における沖積層の水文地質構造と地下水流動, 応用地質, 53(4), pp.172-182, 2012.
- 産業技術総合研究所, 沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発成果報告書, 402p, 2013.
- 産業技術総合研究所, 海域地質環境調査確証技術開発成果報告書, 434p, 2013.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 20 万分の 1 日本シームレス地質図 ; <https://gbank.gsj.jp/seamless/> (最終更新日, 2015 年 5 月 29 日版)
- 産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進, 資金管理センター, 電力中央研究所, 平成 28 年度沿岸部処分システム高度化開発報告書, 368p, 2017
- 佐々木泰, 低レベル放射性廃棄物処分システムにおける新第三紀堆積岩の透水性状の研究, 埼玉大学大学院理工学研究科 博士論文, 178p, 2000.
- 佐藤邦明, 室田明, 吸着効果を受ける微速浸透流に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 195, pp.67-75, 1971.
- Sackleton, N. J., Oxygen isotopes, ice volume and sea level, Quaternary Science Reviews, 6, pp.183-190, 1987.
- Sasamoto, H, R. C. Arthur and Hama, K., Interpretation of undisturbed hydrochemical conditions in Neogene sediments of the Horonobe area, Hokkaido, Japan, Applied Geochemistry, 26, pp.1464-1477, 2011.
- Smedley, M. W. and Milne, J.C., Paleowaters in coastal Europe: evolution of groundwater since the late Pleistocene, Geological Society Special Publication, No.189, 332p, 2001.
- Solomon D.K., ⁴He in groundwater, In Environmental tracers in subsurface hydrology (eds Cook P. and Herczeg A.L.). Kluwer Academic Publishers, pp.425-439, 2000.
- Stefánsson, A., Arnórsson, S. and Sveinbjörnsdóttir, Á., Redox reactions and potentials in natural waters at disequilibrium, Chemical Geology, 221, pp.289-311, 2005.
- Stumm, W. and Morgan, J, Aquatic chemistry 3ed ed., Wiley-Interscience publication, p.445, 465, 1996.
- Stute, M. and Schlosser, P., Atmospheric noble gases, Environmental tracers in subsurface hydrology edited by Cook P. and Herczeg A.L., Kluwer Academic Publishers, pp.349-378, 2000.
- Swartzendruber, D., Modification of Darcy's law for the flow of water in soils, Soil Science, vol.93, pp.22-29, 1962.
- Takahashi, K., SungGi, H., Jimbo, M., Hayama, H. and Tanaka, Y., Character of the groundwater in the Bibi-gawa lowland from the radio isotopic point of view, in Groundwater of the Shikotsu volcanic ash Plateau, Hokkaido, Japan, Suzuki, E., Jimbo, M. and Seki, H. (Eds.), Hokkaido Regional Development Bureau, 171p, 2003.
- 高橋康裕, 鈴木和則, 萩沼真之, 松尾雄司, 土山滋郎, 大岡政雄, 菱谷智幸, 沿岸域における地下水流動への非ダルシー性への影響 (1) —解析的検討—, 土木学会第 59 回年次学術講演会, CS1-022, pp.43-44, 2004.
- 高野武男, 新潟平野の形成とその災害をめぐる, アーバンクボタ, 17, pp.22-43, 1979.
- Thorstenson, D., Equilibrium distribution of small organic molecules in natural waters, Geochimica et Cosmochimica Acta, 34, pp.745-770, 1970.

- 内田利弘, 上田匠, 光畑裕司, 横田俊之, 幌延沿岸域における海陸接合 MT 法の二次元解析, 物理探査学会学術講演会講演論文集, 124, pp.235-238, 2011.
- Volkowa, Z. V. , Acta physicochim, U.S.S.R. v.4 p.635, 1936, translated by I.I.Bikerman in Surface Chemistry, 247p, New York, 1948.
- Wang, S., Zhu, W. Qian, X., Xu, H. and Fan, X., Study of threshold gradient for compacted clays based on effective aperture, Environmental Earth Science, 75, pp.521-525, 2016.
- Washington, J., Endale, D., Samarkina, L. and Chappell, K. Kinetic control of oxidation state at thermodynamically buffered potentials in subsurface waters, Geochimica et Cosmochimica Acta, 68, pp.4831-4842, 2004.
- 早稲田周, 中井信也, 中部日本・東日本における天然水の同位体組成, 地球化学, No.17, pp.83-91, 1983.
- 早稲田周, 岩野裕嗣, 竹田伸従, 地球化学からみた天然ガスの成因と熟成度, 石油技術協会誌, 67, pp.3-15, 2002.
- 早稲田周, 岩野裕嗣, 浅利康介, ガス炭素同位体組成からみた北蒲原地域における炭化水素の移動・集積, 石油技術協会誌, 76, pp.43-51, 2011.
- 山口久之助: 苫小牧東部の地下水について, 地下資源調査所報告, 50, 133 - 159, 1978
- 山本荘毅, 新版地下水調査法, 古今書院, 490p, 1982.
- 山中 勤, 恩田裕一, 波長スキャンキャビティリングダウン分光法を用いた水同位体分析計の測定精度について, 筑波大学陸域環境研究センター報告, No.12, pp.31-40, 2011.
- 安江健一, 秋葉文雄, 大平寛人, 石井英一, 北海道北部, サロベツ背斜付近に分布する声間層上部の鮮新統上部珪藻化石帯とフィッシュン・トラック年代, 地質学雑誌, Vo.112(4), pp.284-293, 2006.
- 安原正也, 開発一郎, 多孔質媒体中の非ダルシー流動に関する研究の流れ, 日本地下水学会会誌, vol.23, pp.1-43, 1981.

2.2.2 地下水流動解析による深部地下水年代の評価

(1) 目的

地層処分システム構築においては、安全性が十分に確保されることが重要であり、科学的見地から地域の地質環境特性を明らかにする必要がある。特に地下水環境は極めて重要であり、その地域特性を把握する技術開発が求められている。

本研究では、沿岸域における地質環境の調査・評価技術に着目して、これまでに実施されてきた深部地下水環境を把握する手法について、技術の更なる一般化を図ることを目的として、わが国における特定の対象地域での塩水・淡水を含む帯水層の地下水流動解析を実施する。今回の研究においては、下の 12 の平野における地下水採取結果を評価するための解析を実施している。

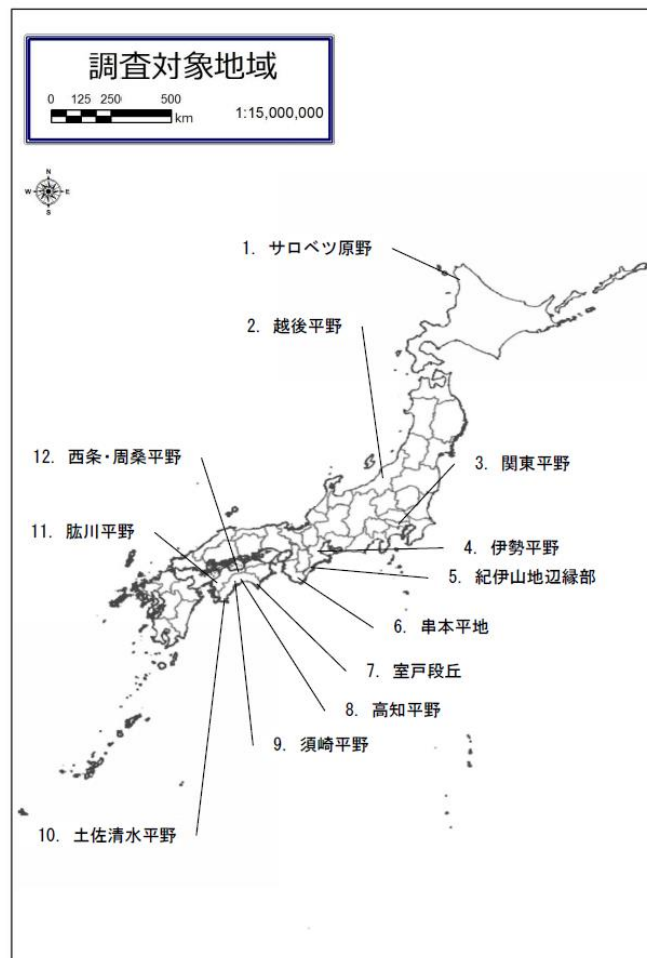


図 2.2-57 研究対象地域

(2) 解析の方法

各地域の採水地点における地下水年代をモデルによって算出するために、前述にて選定した12地域に対して、三次元地下水流動解析モデル（浅海域を含む）を構築した。地下水流動解析の実施にあたっては、MODFLOW（米国地質調査所）を採用し、塩水による密度依存型の三次元地下水流動解析を実施するためにSEAWAT2000を活用した。

モデルには、全国堆積層データベース（産総研）、透水係数データベース（JAEA）、河川流況データ（国交省）等の既存資料から推定される合理的な境界条件・物性値を設定した。モデルの初期条件は、モデル全域が塩水で満たされた状態とした。構築したモデルに天水によって洗い出される条件を与え、そこで得られるモデル全体の地下水涵養量（計算値）が解析領域内・付近を流れる河川の湧水流量を再現するよう、透水係数を調整した。

これによって、定常状態の深部地下水の地下水流動環境を得ることができ、また、60万年（12万年×5周期）にわたる海水準変動を与え、この影響を受けた塩淡水境界形状を明らかにする。定常モデルは粒子追跡法解析コードMODPATHを実施して、地下水年代を推定し、現場で得られた地下水年代と比較検討を行った。

MODFLOWは米国地質調査所が開発した三次元有限差分地下水シミュレータである。MODFLOWの関連プログラムを使用すれば、地下水—地表水—一体解析や溶質輸送、密度依存流、不飽和帯流れ、帯水層圧縮や地盤沈下、パラメータ評価、地下水管理が可能となる。

MODFLOWが有する機能を以下に示す。

- a) 定常・非定常解析が可能
- b) 平面二次元、断面二次元、準三次元、三次元の全ての解析が可能
- c) 帯水層は不圧、被圧ならびに両条件が転換可能なように設定することが可能
- d) River-packageにより、河川・地下水間の流入・流出計算が可能
- e) Drain-packageにより、湧出・排水の計算が可能
- f) GHB-packageにより、遠方固定境界の設定が可能
- g) Recharge-packageにより、地下水涵養量の入力が可能
- h) Well-packageにより、井戸からの揚水ならびに井戸への注水の計算が可能

ここで、 h ：水頭（L）

k_{xx}, k_{yy}, k_{zz} ：X,Y,Z方向の透水係数（L/T）

S_s ：比貯留係数

W ：単位体積あたりの吸い込み（流入）・湧き出し（流出）量（L³/T）

SEAWATは地下水流動解析プログラムであるMODFLOWと溶質輸送解析プログラムであるMT3DMSを連成させたプログラムであり、塩濃度の変化に応じて流体密度を適宜変更し、地下水流動の駆動力に反映させることが可能である。

SEAWAT の基礎方程式を式 1、2 に示す。

$$\nabla \cdot \left[\rho K_f \left(\nabla h_f + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \right) \nabla z \right] = \rho S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} - \rho q_s \quad \text{式 1}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \cdot \nabla C) - \nabla \cdot (\bar{v}C) - \frac{q_s}{\theta} C_s + \sum_{k=1}^N R_k \quad \text{式 2}$$

ρ : 流体密度、 ρ_f : 淡水密度、 K_f : 透水係数テンソル、 h_f : 等価淡水水頭、 S_f : 比貯留係数、 θ : 間隙率、 C : 溶質濃度、 $\rho q_s \cdot C_s$: ソース/シンク項、 D : 水理学的分散係数、 R_k : 反応項

解析領域は効率的な解析を実施するために、次の二段階のステップを経て設定する。第一に、採水地点が包含される一級水系流域界、平野・盆地域を抽出し、沖合い 20~30 km 程度の浅海域を拡張した上で、解析領域を設定する。第二に、この解析領域から全国堆積層データベースにおける N1 層以前の水理基盤に相当する範囲を除去する。ただし、解析領域内に N1 層以降の地層が存在しない場合は、第一ステップで設定した解析領域を採用する。この場合、鉛直方向のモデル化範囲は、観測井戸深度の 2 倍とした。

解析領域内は 1 km×1 km の解析グリッドに分割することを基本とする。また、鉛直方向については、地表面・海底面を基準として 100 m の均等層厚による一律のグリッド設計を行った。深度方向の水質変化を詳細に把握するために、semi-uniform Grid($\Delta=100$ m)を適用した。

地下水流動解析モデルの作成状況の全体図を図 2.2-59 に示す。解析対象は、近畿・四国地方から関東（茨城県）までが多く選定されており、この地方は N1 以降の地層が分布しないモデルが多い。

モデルにおいて、上面（陸域）には、地表面に相当する固定水頭値を設定し、淡水濃度の固定濃度境界を設定する。上面（海域）には、海水面に相当する固定水頭値を設定し、海水濃度の固定濃度境界を設定する。側面、下面は、不透水・非流動の境界として計算を実行した。海水準変動の影響を評価する非定常解析においては、海水準変動条件を設定し、海域セルに与えた。海水準は最近 50 万年程度においては、約 12 万年周期で変動し、変動幅は現海水準の -120 m~+5 m 程度と言われている（核燃料サイクル機構、2000）。本研究では海退時は 10 万年間で 120 m 海水位が低下し、海進時は 2 万年間で 125 m 海水準が上昇する海水準変動曲線を 5 周期分設定した。モデルの設定上は、海進海退過程でそれぞれ 25 ステップずつに境界条件を更新し、海域と陸域での境界条件の切り替わりがよりシームレスに行われるように工夫した。海域には塩濃度および流体密度が 35 kg/m³、1,025 kg/m³ となる固定水頭・濃度境界を与えた。陸域セルは、定常解析時と同様に、地表面に固定水頭を設定している。

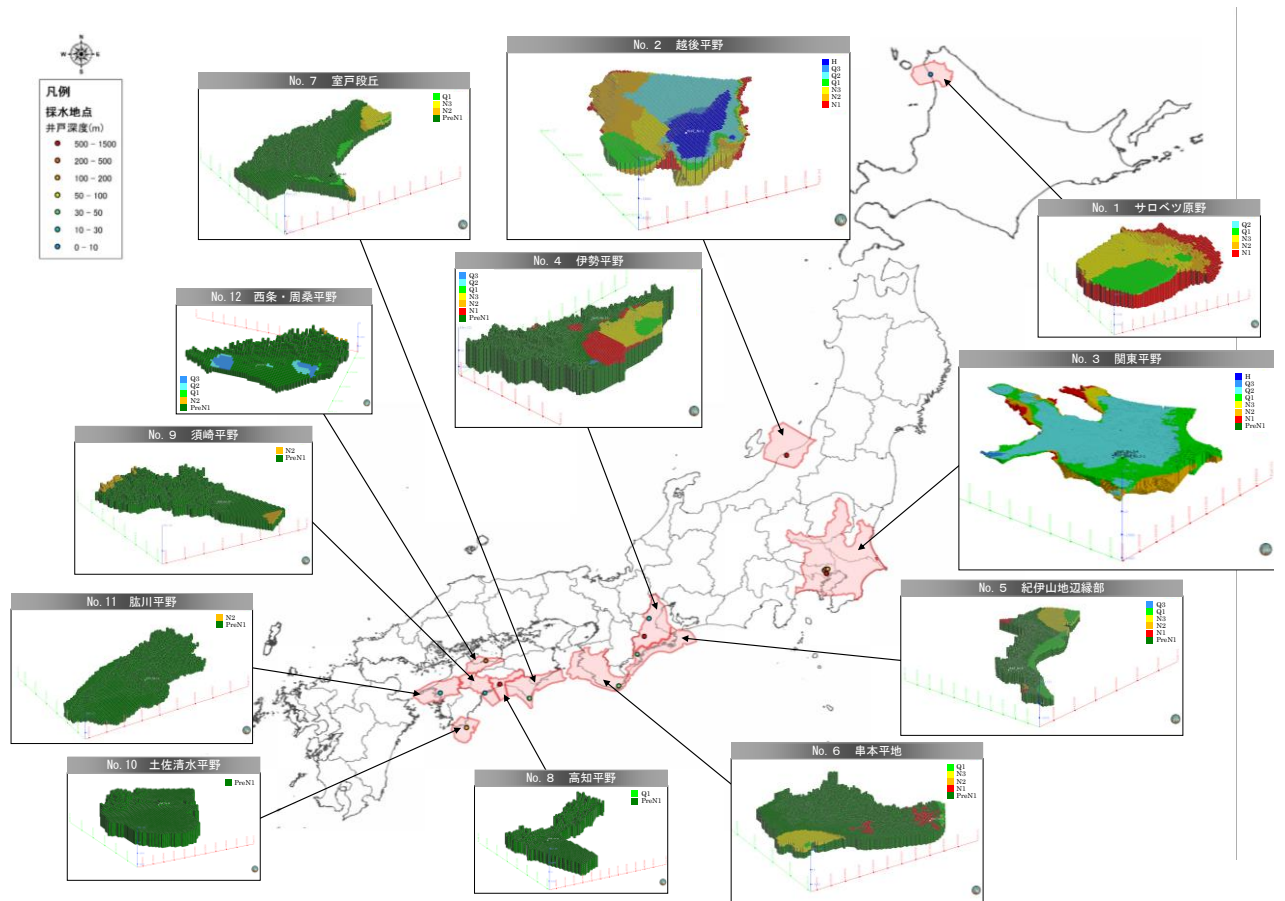


図 2.2-58 地下水流動解析モデルの作成状況全体図

本研究の解析における物性値は以下のように設定している。

・透水係数：梅田（1996）を参考に、以下を初期値（平均透水係数）として設定する。なお、現況再現解析の過程において、透水係数を検定対象とした。

表 2.2-12 モデルに与える透水係数の初期値

地層区分	透水係数 (cm/s)
H	3.4×10^{-3}
Q3	1.8×10^{-3}
Q2	3.9×10^{-4}
Q1	9.6×10^{-5}
N3	6.5×10^{-5}
N2	5.0×10^{-5}
N1	3.1×10^{-5}
Base	2.0×10^{-5}

・有効間隙率、貯留量係数：有効間隙率・比貯留係数は、日本地下水学会（2010）、日本原子力研究開発機構（1999）等を参考に、以下を初期値として設定した。

表 2.2-13 モデルに与える有効間隙率、貯留量係数

地層区分	有効間隙率 (%)	比貯留係数 (1/m)
H	20	6.97×10^{-4}
Q3	15	6.97×10^{-4}
Q2	15	6.97×10^{-4}
Q1	15	6.97×10^{-4}
N3	10	7.06×10^{-4}
N2	10	7.06×10^{-4}
N1	10	7.06×10^{-4}
Base	5	7.06×10^{-4}

・分子拡散係数と分散長：塩水の分子拡散係数は、 Na^+ 、 Cl^- の分子拡散係数の平均 $16.8 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ を参考に $20.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ を用いる。縦方向分散長は、既往文献を参考に 100m とし、横方向分散長は、縦方向分散長の 1/10 とした。

これらのもとで、定常解析結果における地表面通過流量分布図、地下水面等高線図、塩濃度分布図を作成した。また、定常解析、非定常解析結果を用いて、採水地点における塩濃度の深度プロファイル図を作成した。現況再現モデル（定常モデル）を用いて、粒子追跡法（MODPATH）による採水地点の地下水年代の推定を行った。

MODPATH とは、米国地質調査所により開発されたソフトウェアであり、MODFLOW によって計算された定常/非定常流動解析結果を利用して三次元流跡線を計算するためのパーティクルトラッキングポストプロセッサである。パーティクルトラッキングパッケージには次の二つの Fortran コードが含まれる。

(1) MODPATH は流跡線を計算する。

(2) MODPATH-PLOT はグラフィカルに結果を表示する。

MODPATH は地下水流動システムの流動パターンを把握するための可視化ツールとして有用であり、MODFLOW で計算された水源の流出エリアや帯水層構造の図化にも役立つ。

具体的には、各差分グリッドセルで得られた粒子の流跡を解析的に表現する。粒子の流跡は粒子が境界や内部流入流出点に到達するまで、もしくは収束判定を満足するまで、あるセルの粒子を追跡することによって計算する。定常解析でも非定常解析でも計算可能である。後方追跡（バックトラッキング）によって、採水井戸の涵養源および地下水年代（滞留時間）の計算を行った。

(3) サロベツ原野モデルの解析結果

サロベツ原野モデルは、サロベツ原野が含まれる天塩川流域および周辺浅海域を対象とした範囲から、N1 層以降の地層が分布する範囲を抽出して、解析領域とした。この結果、解析領域の面積は、約 2,151 km^2 となった。なお、本採水地点では約 1,200 m 深の井戸を用いた水質の詳細な深度プロファイル結果および地下水年代測定値が存在する。

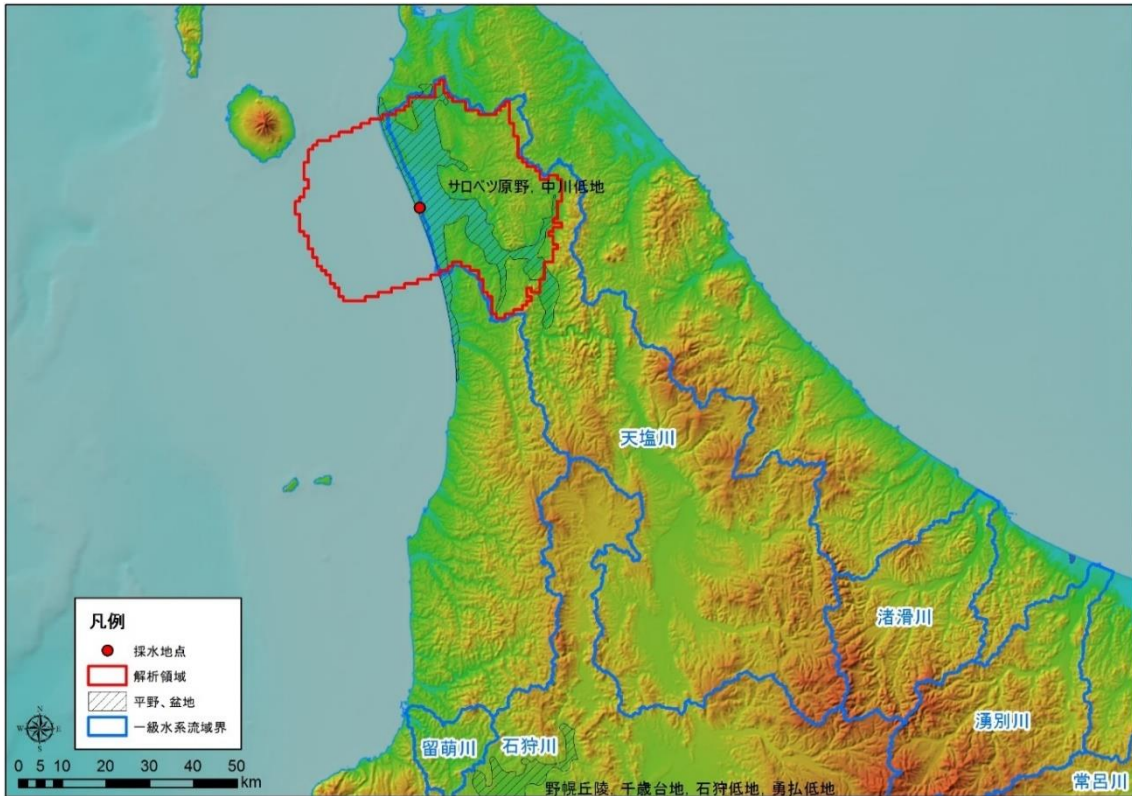


図 2.2-59 サロベツ原野モデルの解析領域

解析領域内は、X方向に61、Y方向に55、Z方向に29のグリッドで分割され、Active Cell数は、40,937となった。本領域内は、Q2、Q1、N3、N2、N1で構成される。採水井戸付近では、N3層、N2層、N1層が分布する。

項目	設定値
Row数	55
Columns数	61
Layer数	29
Active Cell数	40,937
ΔX	1,000 m
ΔY	1,000 m

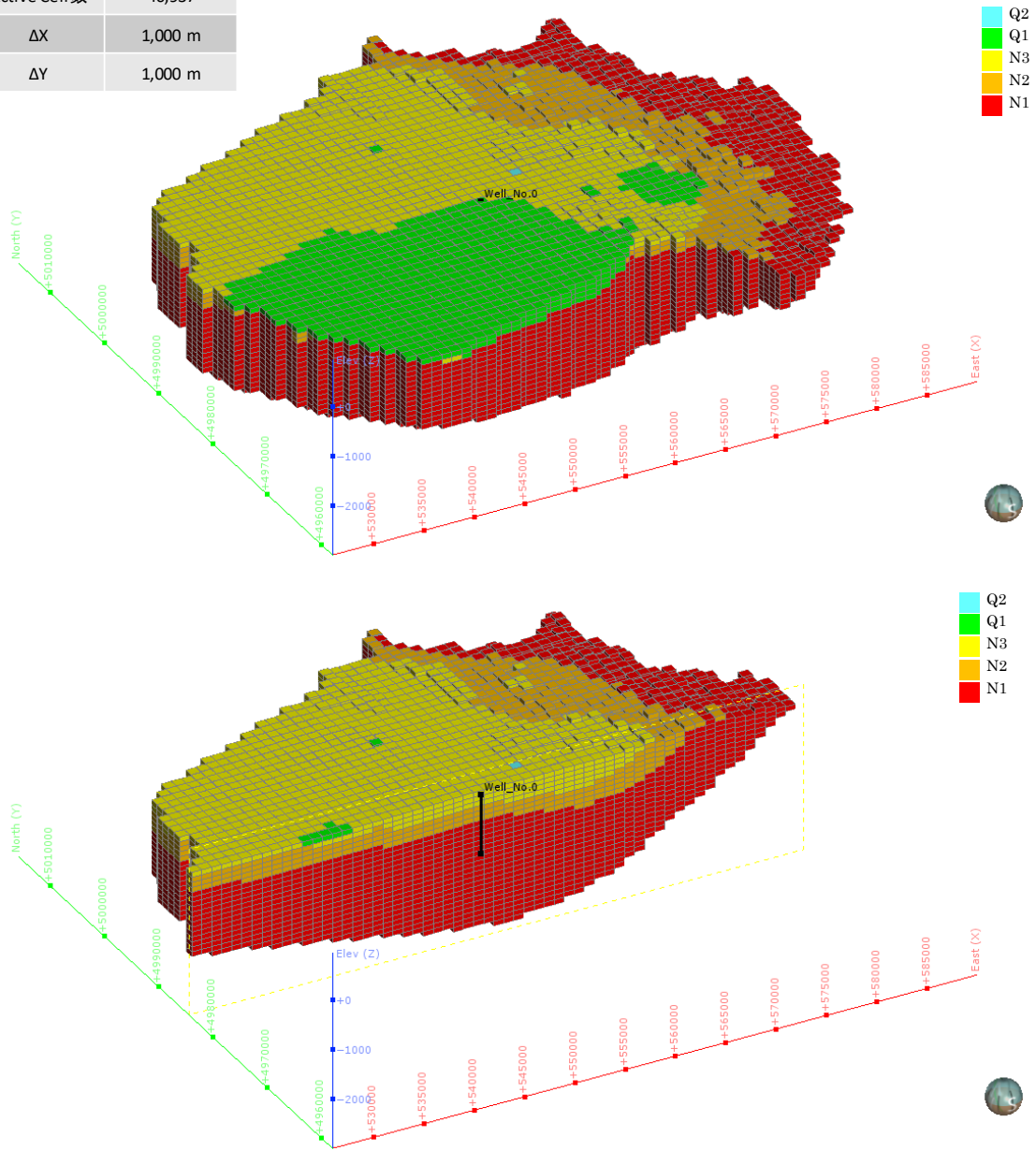


図 2.2-60 サロベツ平野におけるグリッド分割の状況（上：全景、下：東西断面）

本解析モデルに設定した、陸域セル (N=1,223) と海域セル (N=898) の設定位置図を図 2.2-62 に示す。非定常解析においては、海域セルに海水準変動条件を与える。

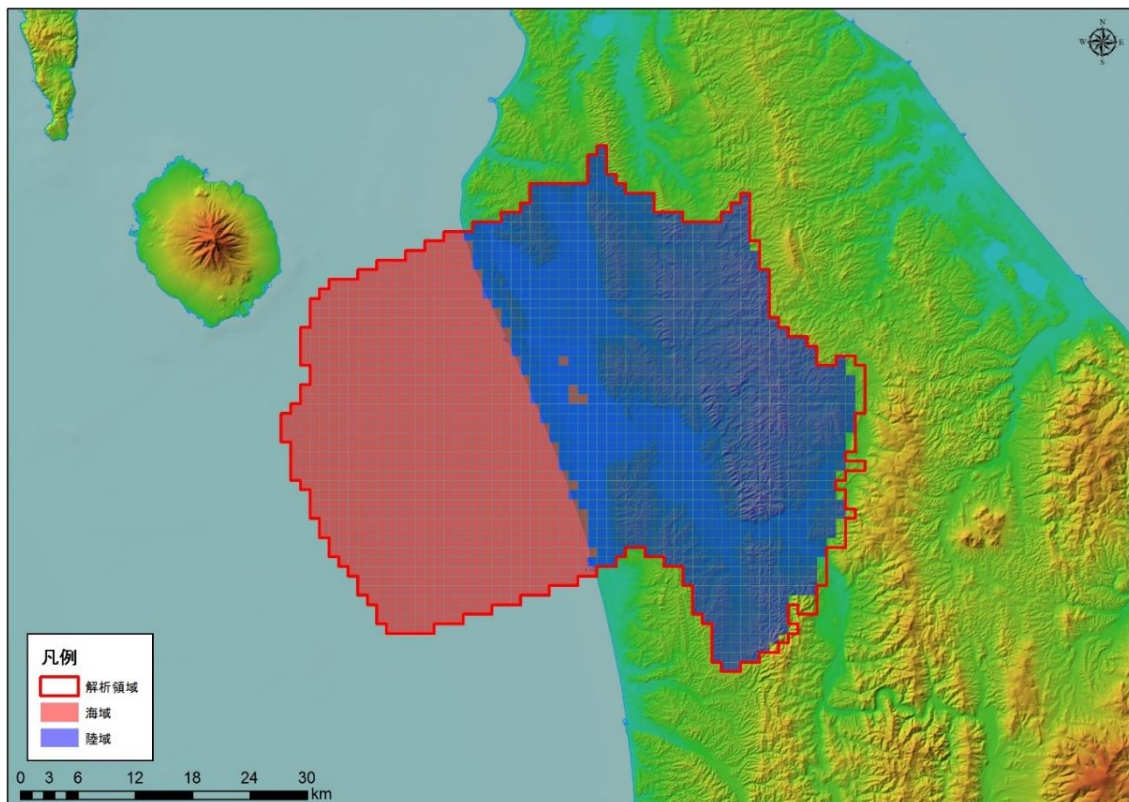


図 2.2-61 サロベツ原野モデルにおける境界条件

現況再現解析の結果、平均透水係数×3.2 倍にしたケース (ケース 4) における計算地下水涵養量は 1.31 mm/日であり、天塩川の湧水比流量の 1.31 mm/日と同等であると判断されたため、このケースを再現モデルとして採用した。

表 2.2-14 現況再現解析の検討ケース

地質区分	飽和透水係数(m/日)			
	ケース1 Kave	ケース2 Kave+ σ	ケース3 Kave- σ	ケース4 Kave× 3.2
H	2.95E+00	6.24E+01	1.76E-01	9.44E+00
Q3	1.54E+00	3.21E+01	9.34E-02	4.94E+00
Q2	3.41E-01	1.24E+01	1.34E-02	1.09E+00
Q1	8.29E-02	1.08E+00	7.08E-03	2.65E-01
N3	5.61E-02	8.33E-01	4.18E-03	1.79E-01
N2	4.31E-02	5.88E-01	3.81E-03	1.38E-01
N1	2.70E-02	2.13E-01	3.60E-03	8.66E-02
基盤	1.72E-02	9.69E-02	3.07E-03	5.52E-02
モデル内の涵養量 (mm/日)	0.41	4.47	0.04	1.31

再現モデル(ケース4)に関する地表面通過流量分布図を下図に示す。流動量の正值(青系)は涵養量を、流動量の負値(赤系)は河川流出量を、それぞれ示している。地表面に固定境界を置いている影響で、地形なりに地表面通過量が決定されており、大局的な涵養域/流出域の区分は難しい状況となっている。以降では、この再現モデル(ケース4)を定常モデルとして取り扱う。

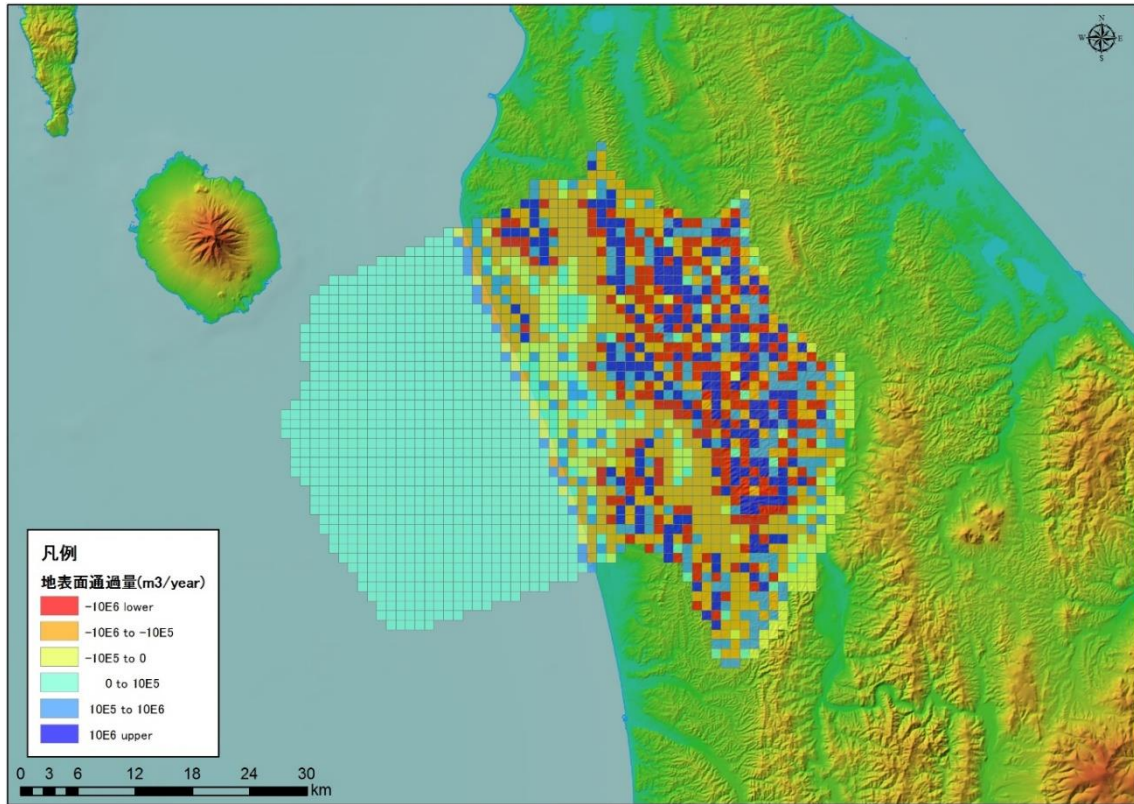


図 2.2-62 地表面通過流量分布図

定常モデルに関する地下水面等高線図、水収支集計結果を、以下に示す。地下水位等高線はおよそ地形等高線と同等に形成されている。流動量の多くは涵養量と河川流出量が占めており、海底流出量(海底湧水量)は全体流出量の0.6%程度となった。

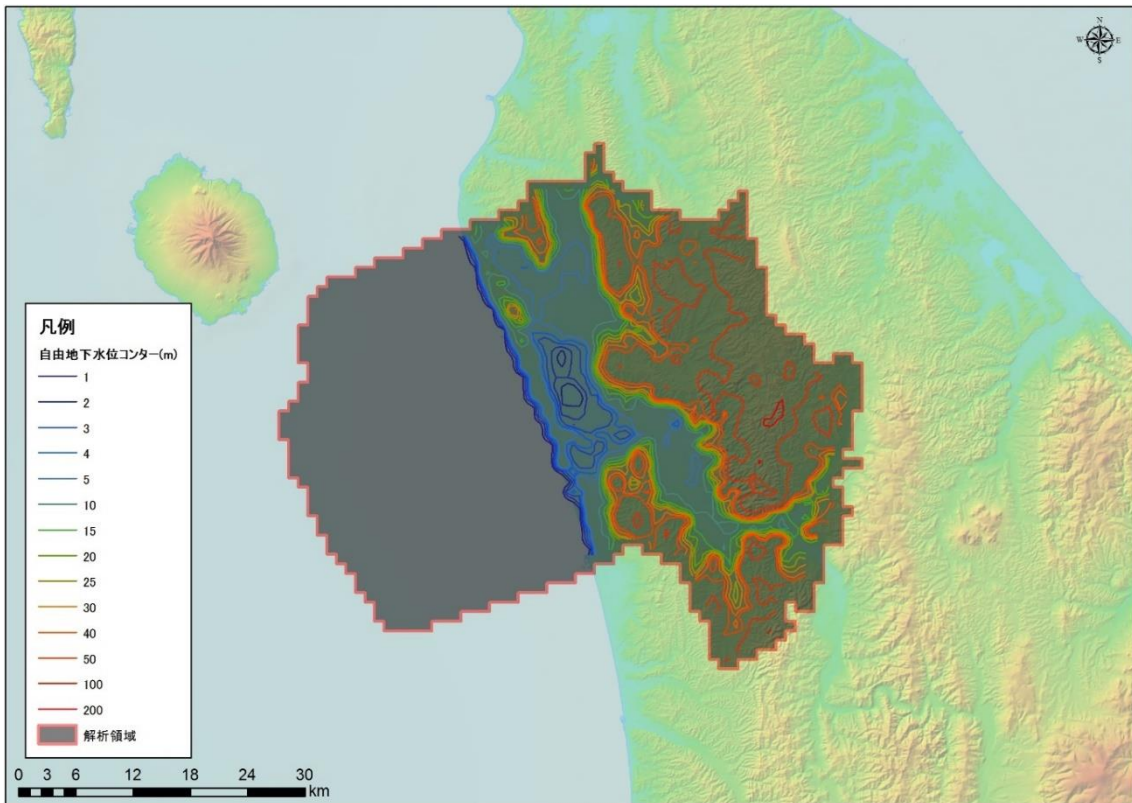


図 2.2-63 予測地下水面図

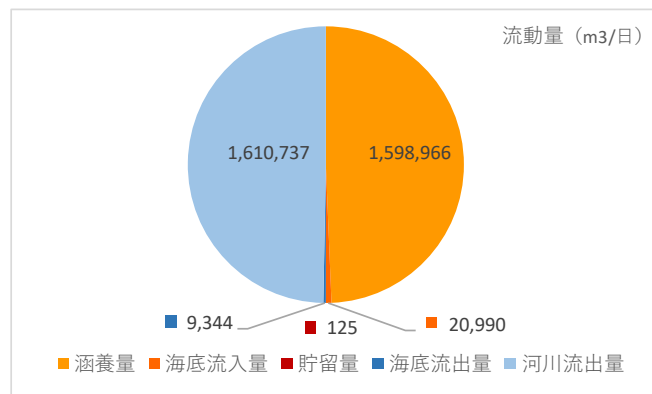


図 2.2-64 予測水収支

定常モデルと非定常モデルを用いて、定常時、非定常時（5 周期目）の最海退期、現海水準、最海進期における、三次元ポテンシャル分布図、三次元塩濃度分布図を示す。また、採水井戸における塩濃度のプロファイル結果も同時に示す。

海水準の変化に応じて、モデル内のポテンシャルが変化しているが、定常時と非定常時の現海水準では、大きな相違は見られない。一方で、塩濃度については、定常時と非定常時の現海水準の比較において、非定常時（海水準変動を考慮したモデル）の方が、採水地点においてより淡水化が進んでいる状況が窺える。

採水井戸における塩濃度においても、非定常時（海水準変動を考慮したモデル）の方が淡水化が進行しており、現場観測値により近い結果となった。

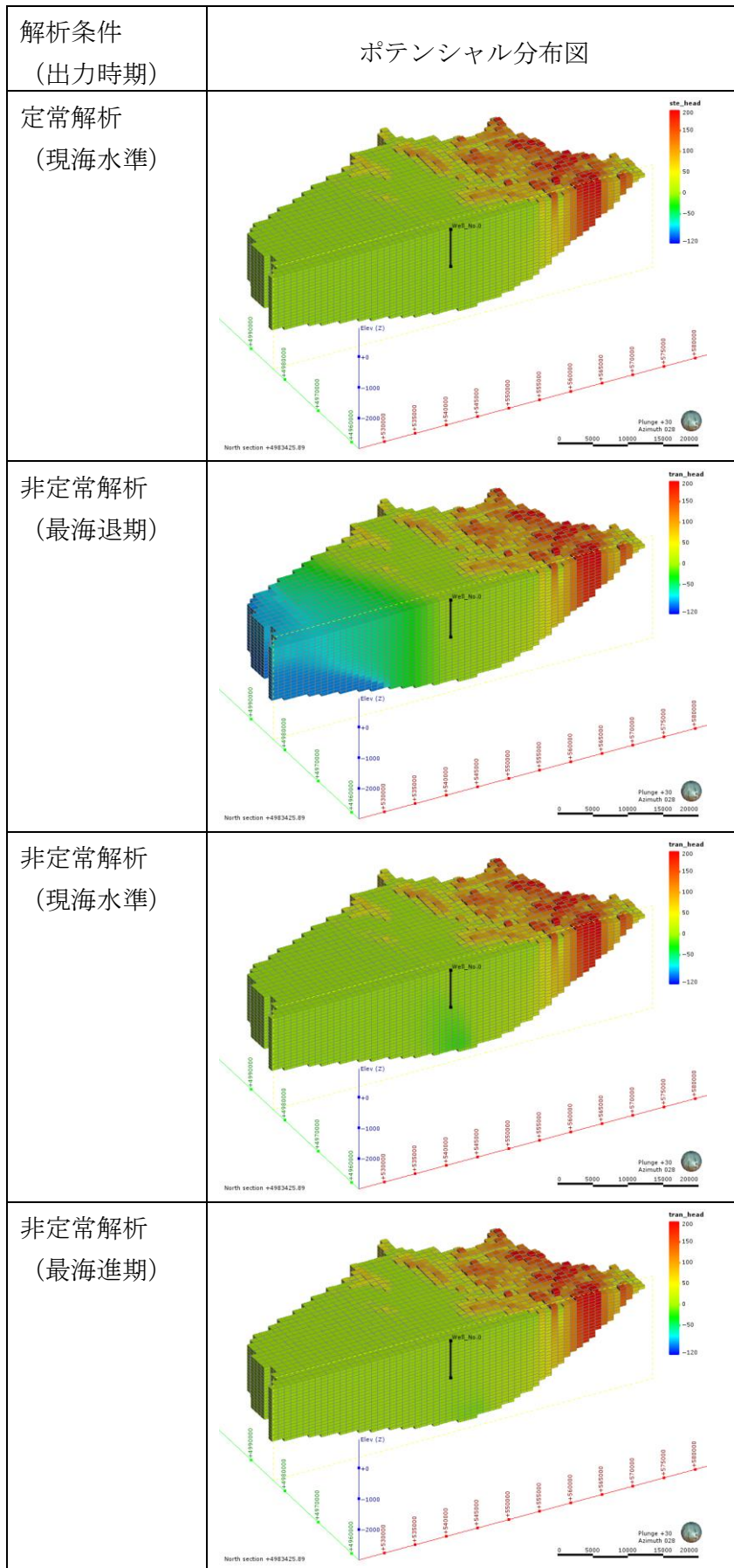


図 2.2-65 三次元ポテンシャル分布図

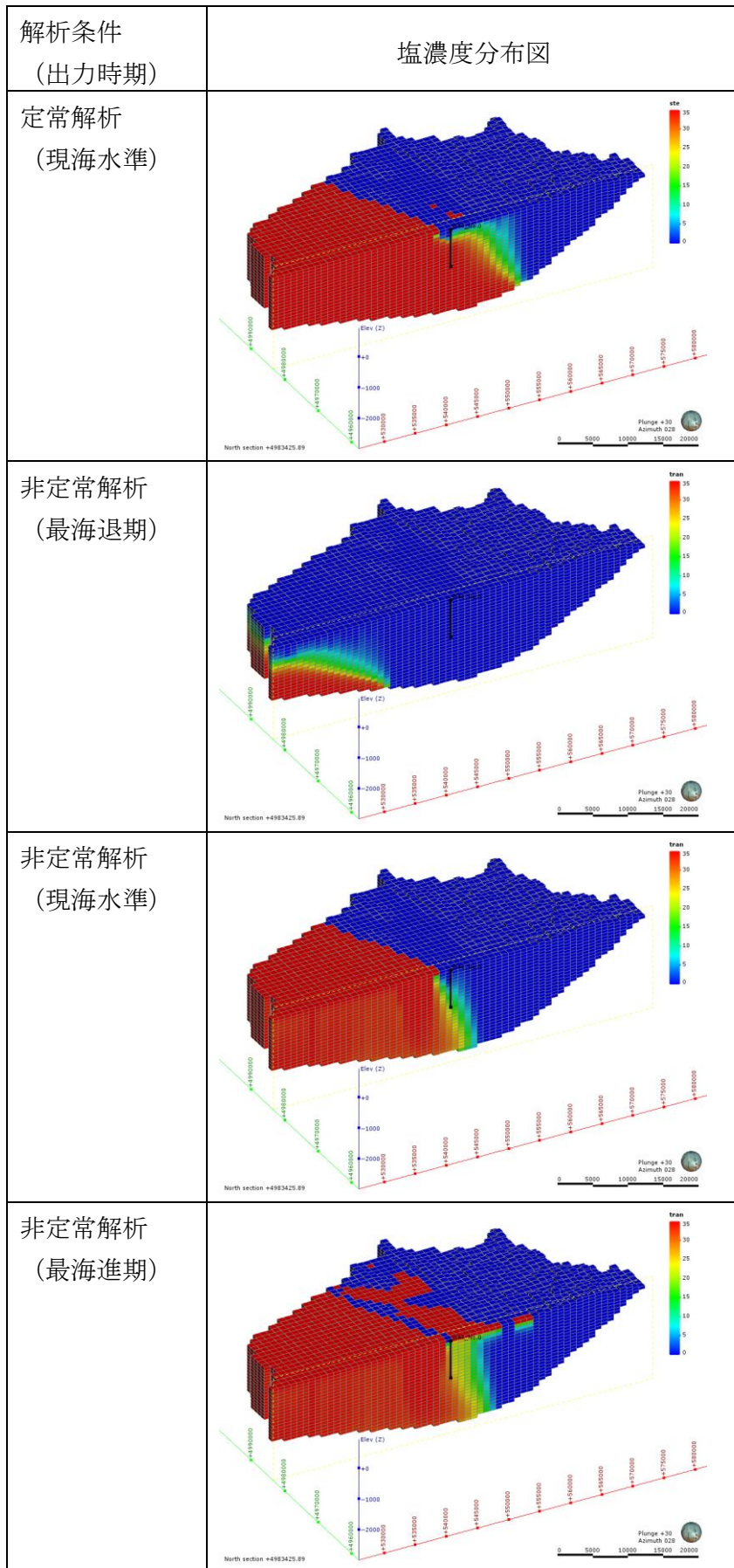


図 2.2-66 三次元塩濃度分布図

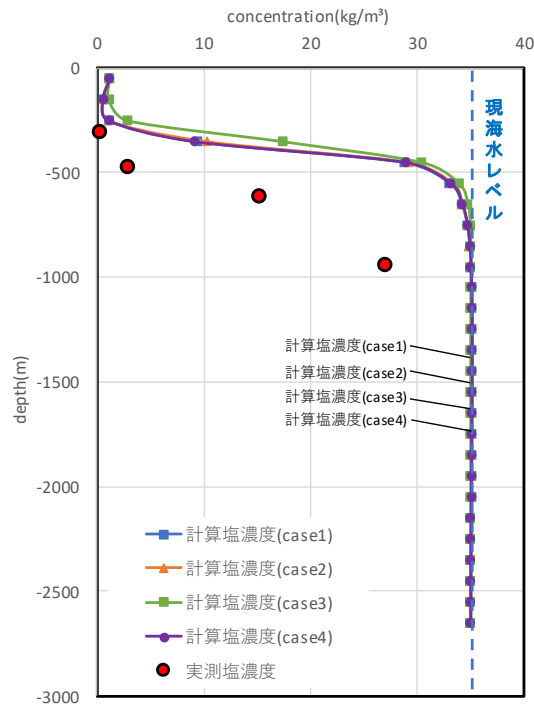


図 2.2-67 定常解析による採水井の塩濃度プロファイル

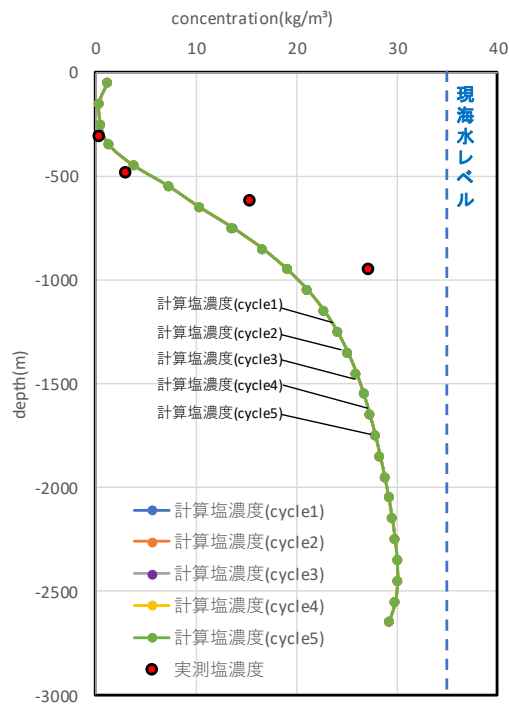


図 2.2-68 非定常解析による現海水準相当の採水井の塩分濃度プロファイル

採水井戸を通過する断面における、塩濃度分布と流跡線解析結果を下に示す。海から涵養された地下水が 3,100 年程度かけて、採水井戸の下端 (GL.-1,200 m) に到達する状況が計算された。この井戸では、同位体分析によって 64,000 年の地下水年代が同定された実績があり、計算値と乖離がある。

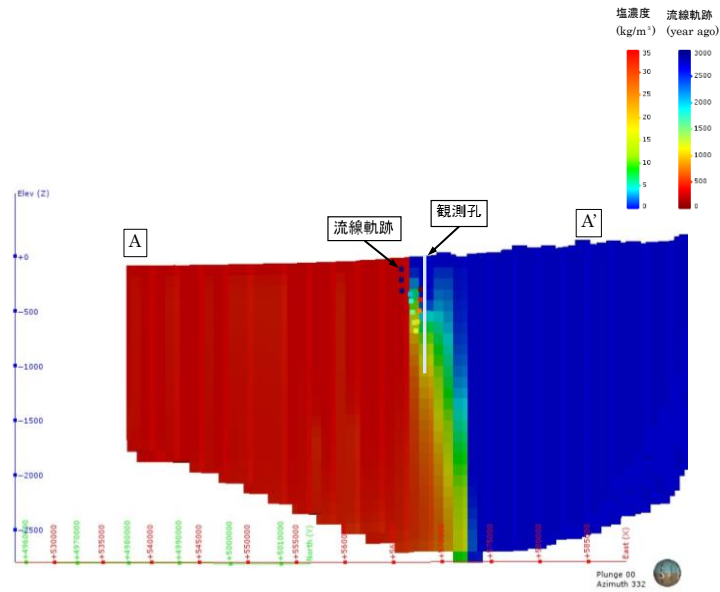


図 2.2-69 塩濃度分布と流跡線解析の結果

(4) まとめ

サロベツ原野と同様の解析を他の 11 地域においても実施した結果、沿岸域・島嶼部における地下水流動解析について表 2.2-16 に示す。地下水流動解析においては、近傍の一級河川の湧水流量とモデル計算による積算流入量（地下水涵養量）が合致するよう、透水係数データベース（JAEA）を調整して、モデルに与える透水係数を設定した。これによって、比較的簡便に大局的な地下水涵養量を求めることができるものの、地表面通過量は地形構造に強く依存してしまうため、大局的な涵養域／流出域の区分が難しいことが課題である。

また、対象 12 地域において、ポテンシャル分布および天水起源の地下水により形成される塩淡境界分布形状が推定することができた。特に、海水準変動を考量すると、沿岸域の地下水の塩濃度がより淡水がちになる傾向が見出された。高知平野、西条・周桑平野では、計算値が観測値よりも低い状況を示しており、これらの地域に関してはより詳細な解析が求められる。工学設計技術へのデータ受け渡しにおいては、解析時の地質条件や海水準変動要件などを詳細に伝える必要が出てきた。

同位体分析による観測地下水年代と流跡線解析による計算地下水年代は、サロベツ原野、伊勢平野、肱川平野で、計算値が観測値よりも大きく若い値を示している。これらの地域に関してはより詳細な解析が求められると同時に、天水起源以外の地下水流動も検討する必要がある。換言すれば、詳細な現地地下水調査により、解析値を大きく上回る安定領域の評価ができる可能性がある。

本研究により、実施された深部地下水環境を評価する手法は、一般公開情報のみを用いて、比較的簡便にどこでも適用できるという点で有用である。今後は、本手法を他地域にも展開し、本邦国土の深部地下水流動環境評価に資するデータ（地図）の構築につなげていきたい。

表 2.2-15 解析結果の取りまとめ 実年代測定結果との比較

ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
領域名	サロベツ原野	越後平野	関東平野	伊勢平野	紀伊山地縁辺部	串本平野	室戸平野	高知平野	須崎平野	土佐清水平野	肱川平野	西条平野
自治体	北海道	新潟県	東京都ほか	三重県	三重県	三重県	高知県	高知県	高知県	高知県	愛媛県	愛媛県
折領域面積(km ²)	2.151	4.835	16.447	3.942	3.302	5.053	3.375	1.245	2.236	1.659	2.672	1.203
井戸深度(EL-m)	1200	1050	70-118 80-108 70-104 900-1480	503	600	580	600	600	355	600	200	280
水質データ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
地下水年代データ	○	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Row	55	95	211	122	103	93	84	67	73	56	59	38
Column	61	87	169	69	126	113	108	63	73	53	88	69
Layer	29	46	30	28	12	14	10	12	8	12	4	6
Active Cell	40937	99685	178949	126144	39642	70742	33750	14940	17888	19088	10688	7218
ΔX(m)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
ΔY(m)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
地層区分	H	×	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×
	Q3	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	○
	Q2	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	○
	Q1	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○
	N3	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×
	N2	○	○	○	○	○	○	○	×	○	×	○
	N1	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×
河川名	天塩川	信濃川	利根川ほか	鈴鹿川ほか	宮川 新宮川	新宮川	那賀川 物部川	物部川	仁淀川	渡川	肱川	肱川ほか
透水係数の調整	Kave × 3.2	Kave × 5.9	Kave × 2.3	Kave × 0.5	Kave × 0.5	Kave × 1.1	Kave × 0.8	Kave - σ	Kave × 0.8	Kave × 4.5	Kave	Kave × 0.7
地下水涵養量(mm/day)	1.31	2.02	0.76	0.42	0.42	1.07	1	0.19	0.98	3.96	0.56	0.63
地下水年代	測定値(年)	640,000	ND	ND	10,000以上	5,000以下	5,000以下	5,000以下	ND	5,000以下	5,000以下	5,000
	計算値(年)	3,100	2,300	1,470	110	270	100	310, 2,470	2,640	30	10	330

参考文献

梅田浩司 1996: 日本の地盤を対象とした透水係数データベースの作成, PNCTN7450, 96-002, 111p.

Hesch, W. and Chmakov, S. (2011): A Unified Modeler's Workbench: Workflow-Driven Conceptual and Numerical Modeling, Proceedings ModelCARE2011, 2011, 1-7.

2.3 沿岸部の地質環境の情報整備

2.3.1 背景と目的

地層処分を対象とした候補サイトの選定や、選定後のサイトにおける自然現象や地質環境の把握には既存の調査技術、データ、モデルおよび解析結果が大きな役割を担う。このような情報は、論文や各種資料などの文献に含まれているが、現状では論文検索のためのデータベースは複数存在しており集約されているとは言い難い。その観点から、膨大な情報を有益かつ効率的に活用するためには、わが国の地球科学に関する文献を一括に検索できるデータベースの構築が望まれる。特に本事業に関わる沿岸部の地質環境調査や評価技術に着目して、これまでに実施されてきた深部地下水環境に関わる研究を把握するために、わが国における対象地域での地質・地下水にかかわる文献情報データの集積を実施する。このデータベースは地域の科学的特性の提示や、文献調査段階の基礎データに資するものとなる。Geolis を用いた 1945 年から 2015 年の国内文献整理の総数は 50 万件を超えた（1945 年より前の論文は、情報や手法が古いことと、活字体が大きく異なるので電子化は困難である）。今年度は、これまでに引き続き、GeoScienceWorld を用いて情報の整理・分類・解析を継続した。

一方で、これまで深地層の研究施設計画など国内外の地層処分を対象とした地質環境調査、他の分野で実施された地質調査などに基づく調査技術に関する研究開発成果やそれらを適用した経験・ノウハウなどを有効に利用できるように、知識工学的手法や IT を利用した次世代型サイト特性調査情報統合システム（Information Synthesis and Interpretation System: 以下、「ISIS」という）が開発されている。このシステムは、平成 19 年度から平成 24 年度の経済産業省委託事業（地層処分共通技術調査：地質環境総合評価技術高度化開発）の一環として開発された。今年度は、地質環境の研究成果から得られた知識の整理・集約を行うとともに、地質環境情報の管理方策の試行を行った。

2.3.2 沿岸部地下水に係わる文献の整理

(1) 背景と目的

日本列島に関する和文と英文の地球科学文献は 100 万部を超えて発表されており、このうち OCR に耐えると考えられる 80 万件超をこれまでにデータベース化した。これを使って、地域ごと、地質ごと、地形ごとにこれまでどのような調査研究がされてきたかを研究の対象や手法ごとにまとめ、今後地層処分研究に貢献できる統計解析を実施した。

本統計解析は、単なる研究動向の把握に留まらず、我が国を対象とした地球科学研究で蓄積されてきた知識を客観的かつ再現可能な手法を用いて再認識するものであり、どこの地域で、どのような研究が行われてきたかの歴史的経緯を含めて明らかにすることで、将来の安全評価との関連付けを視野に入れた地下水流動モデルの構築などの地球科学研究に関する各種論拠の獲得を支援可能な基礎データを整備する。そこで、地域・地質・地形ごとに、どのような調査研究がされてきたかを研究のターゲットや手法、年代ごとにまとめ、前述の目的に沿った統計諸量を出力するシステムを開発した。

(2) 研究手法

約 80 万件の地球科学文献を対象に、全文タイトル形態素解析を実施し、統計処理の対象とする属性キーワードおよび関連するキーワードの出現数・年代等を整理した統計諸量を出力するシステムを開発した。また、出力した統計諸量をもとに地球科学的見地に基づいた分析を行った。全体的な流れを図 2.3-1 に示す。

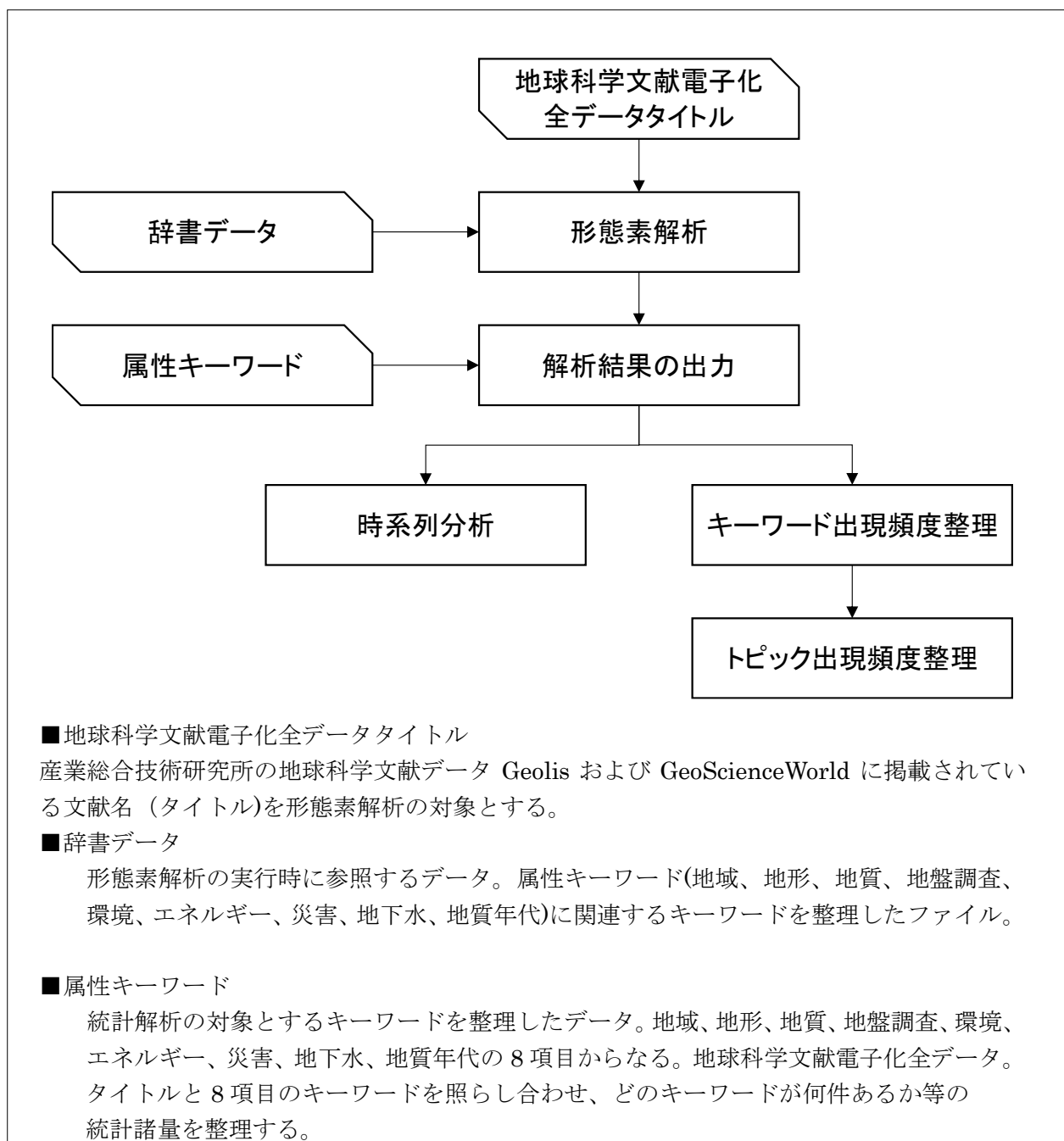


図 2.3-1 形態素解析・時系列分析の流れ

統計解析のための辞書およびトピックの作成

統計解析に用いる属性キーワード、関連キーワードを収録した辞書および関連キーワードの組み合わせで定義されるトピック：「地域属性と地域以外の属性の論理積として定義」を作成する。具体的には、解析対象文献に含まれる地球科学分野の専門用語や新語などを抽出し登録する。特に、当該文献が対象とする地域、地形、地質、地盤調査、環境、エネルギー、災害、地下水、地質年代に関するキーワードについては、後述の統計解析結果の妥当性に影響を及ぼす場合があるため、関連学会等で刊行されている用語辞典などの併用を踏まえ、過不足に十分留意して設定した。

辞書に登録した属性キーワードと各属性キーワードに関連するキーワード数、トピック数を表 2.3-1 に示す。統計解析においては、属性キーワードごとに関連文献数(出現数)を計測する。ここで各属性キーワードに関連するキーワードは定義や意味で階層を分けて整理した。下位の階層となるほど詳細・具体的な物および手法、固有名詞となる。例として、「地域」に関連するキーワードは上位階層から順に「地域」、「東日本 or 西日本」、「都道府県」、「市区町村」とした。各階層の出現数は、下位階層での出現数を合計したものとした。キーワードの階層例を表 2.3-2 に示す。また、全キーワードの階層表を別添資料 Appendix IX. A に示す。

表 2.3-1 キーワード・トピック数

属性キーワード	関連キーワード数	トピック数
地域	2746	—
地形	296	296
地質	29	29
地盤調査	193	193
環境	69	69
エネルギー	29	29
災害	49	49
地下水	120	120
地質年代	86	86
合計	3617	871

表 2.3-2 キーワード階層例

第1階層 (属性キーワード)	第2階層	第3階層	第4階層	第5階層
地域	東日本	北海道	札幌	
地形	風成地形	砂丘		
地質	未固結堆積層	火山灰	火砕流堆積物	
地盤調査	地下水調査	透水試験	ルジオン試験	
環境	公害	地盤沈下	不等沈下	
エネルギー	再生可能エネルギー	地中熱	熱応答試験	
災害	自然災害	噴火	火砕流	
地下水	地下構造	帯水層	地層水	
地質年代	顕生代	新生代	第四紀	完新世

(3) 統計解析の実施

作成した辞書データを用いて地球科学文献電子化全データタイトルの形態素解析を実施した。全文データタイトルに含まれる属性キーワードおよび関連するキーワードの出現数・年代等を整理する。

形態素解析

本事業で開発するシステムにおける形態素解析モジュールは、京都大学情報学研究科－日本電信電話株式会社コミュニケーション科学基礎研究所共同研究ユニットプロジェクトを通じて開発されたオープンソース形態素解析モジュールである **MeCab** を採用した。**MeCab** は、他の解析モジュールと比べ高速に動作し、言語に依存せず辞書データの追加・編集が容易であることが特徴である。

プログラム概要

図 2.3-1 に示す形態素解析においては、地球科学文献電子化全データ、解析時に参照する辞書データ、統計処理の対象とする属性キーワードおよび関連するキーワードが必要となる。

これら入力データは **Microsoft** 社の **Excel** を始めとした表計算ソフトまたはテキストエディタで容易に編集できる **CSV** 形式で取り扱う仕様とした。ただし、形態素解析に採用した **MeCab** の仕様上、入力データの文字コードを **UTF-8** で統一する必要がある、改善点の一つとして挙げられる。

フローチャート

本業務で開発したシステムの処理フローを図 2.3-2 に示す。システムは大きく二つのプログラムに分類され、それぞれ不特定用語の抽出・統計処理用データの出力を行う。

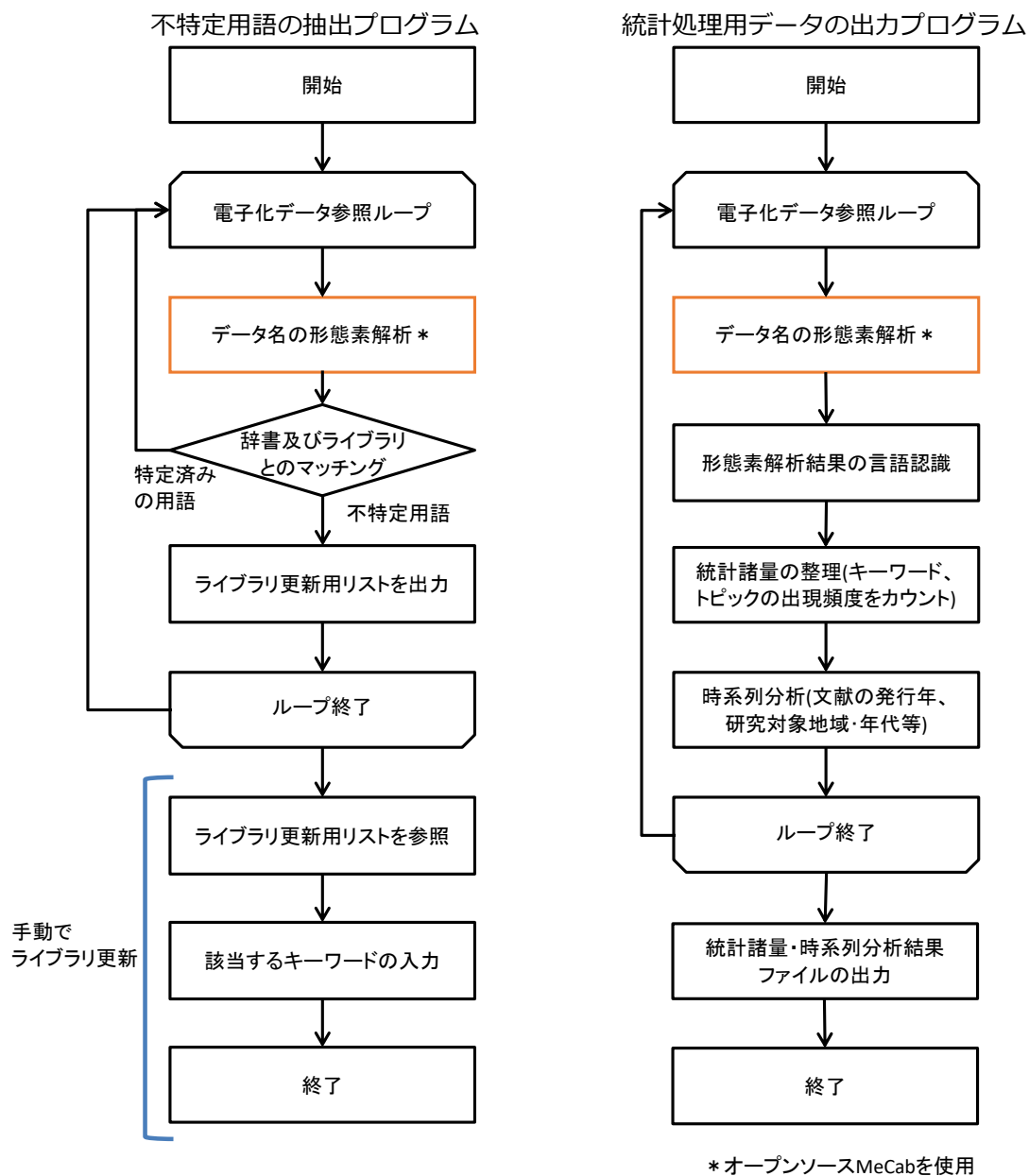


図 2.3-2 形態素解析システム処理フローチャート

時系列分析

前述した形態素解析の入力データである地球科学文献電子化全データは、文献ごとに発行年が記録されている。これにより、属性キーワードおよび関連するキーワードの出現数の計測と同時に年度の計測ができる。後述の統計解析結果のおよびにおいては、属性キーワードごとに年度別の出現頻度を整理した。

統計解析結果の分析

統計解析結果を元に、地球科学的見地に基づいた統計諸量の分析を行う。具体的には、出現頻度の高いまたは低いキーワード、トピックの学術的背景、要因に関する考察、時系列分析結果と年代ごとの背景・ニーズとの関連付け等を分析した。

今回解析を実施した文献は 823,983 件あり、内 309,381 件が和名文献、514,602 件が英名文献であった。全文献を発行年別に分類したグラフを図 2.3-3 に示す。

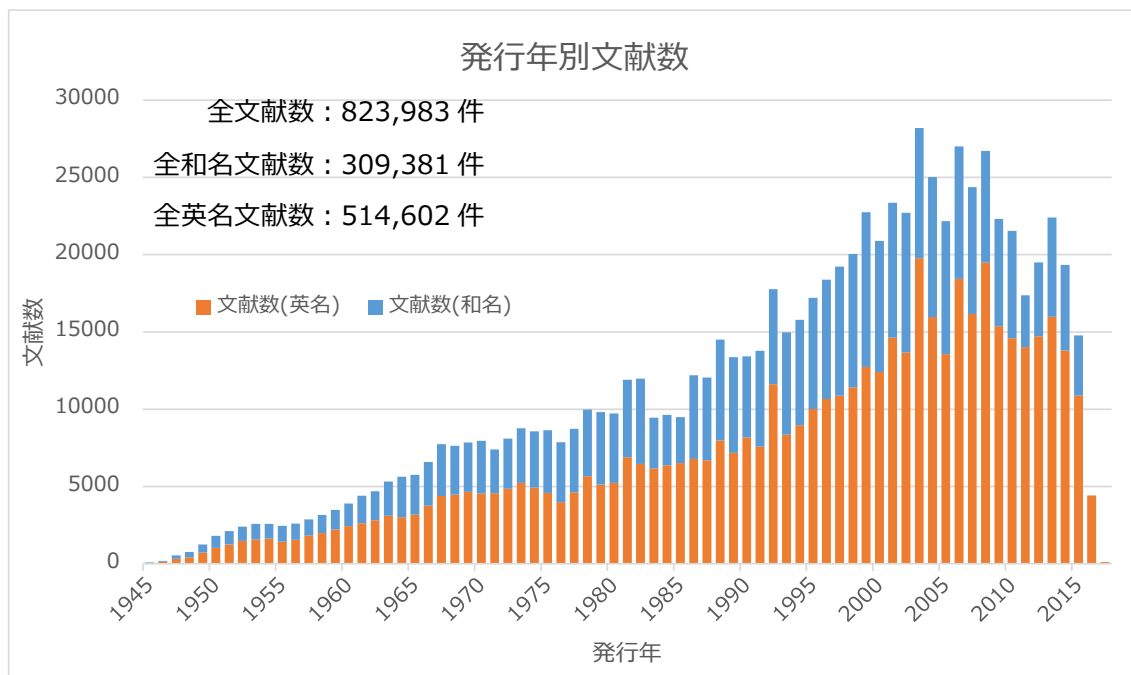


図 2.3-3 発行年別文献数

地域

全文献 823,983 件の内、地域に関するキーワードを含む文献は 163,763 件であった。図 2.3-4 には、年代別に色分けされた属性キーワード別の出現数を示す。図 2.3-5 には、地域に関するキーワードを含む文献の発行年度別の出現数を示す。図 2.3-6_(a)、(b)、(c)には、各属性キーワード高出現頻度順に 3 種を発行年度別に分類し第 2 階層キーワード別に色分けした分布図を示す。図 2.3-7 には、地域に関するキーワードを含む文献を都道府県別に分類し発行年代別に色分けした分布図を示す。図 2.3-8 には、図 2.3-7 において 20 年ごとの出現頻度を地図上に示した分布図を示す。

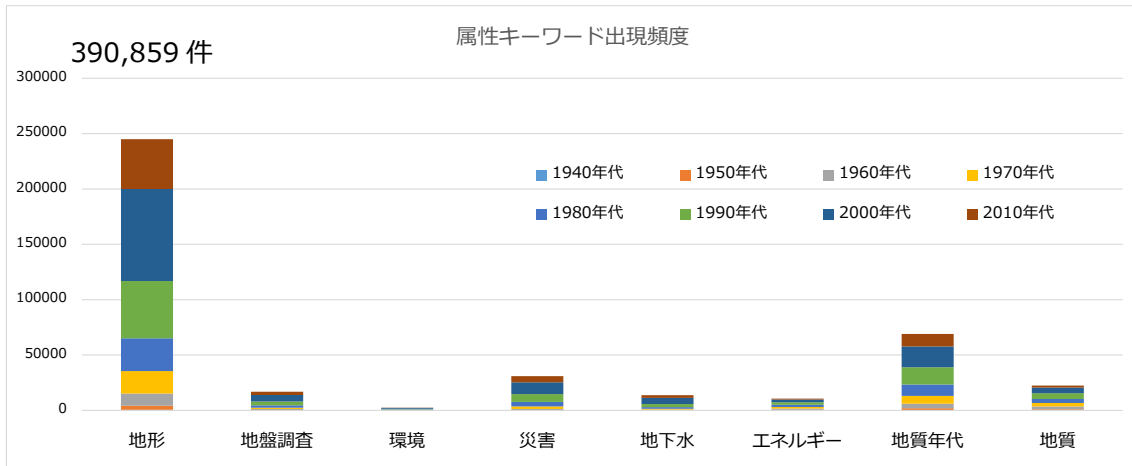


図 2.3-4 属性キーワード別出現数

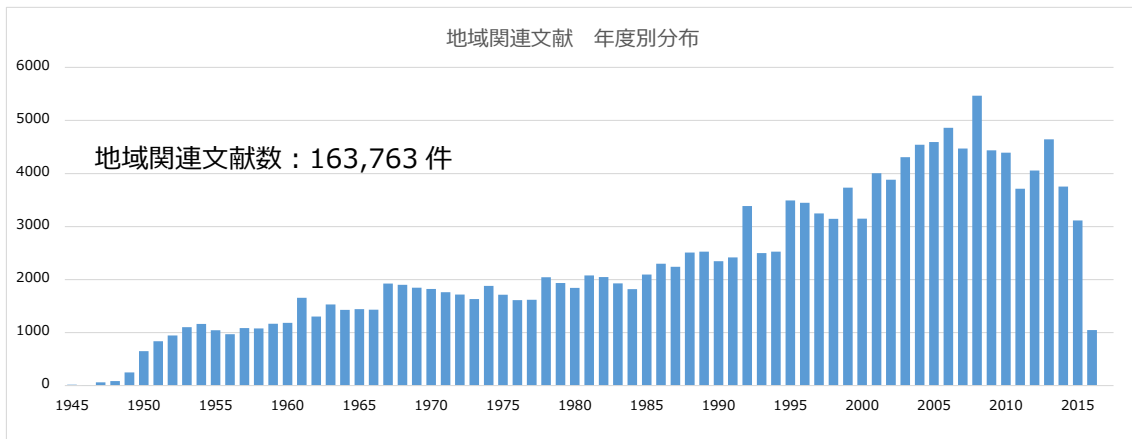


図 2.3-5 地域関連文献 発行年別出現数

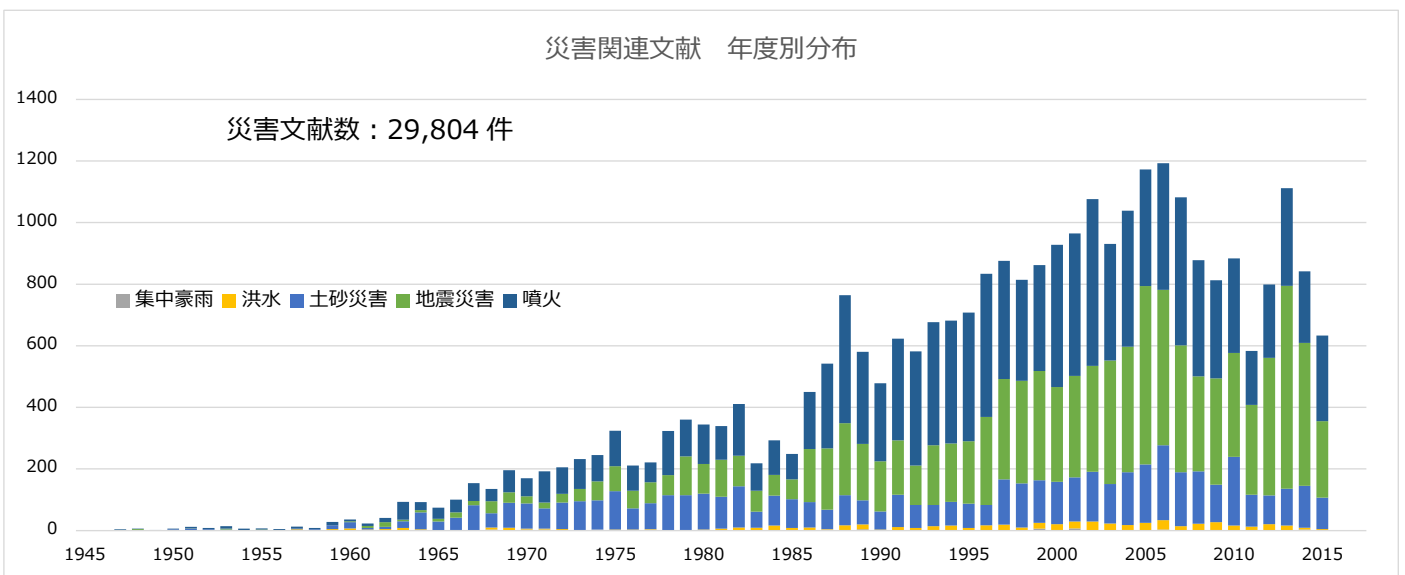
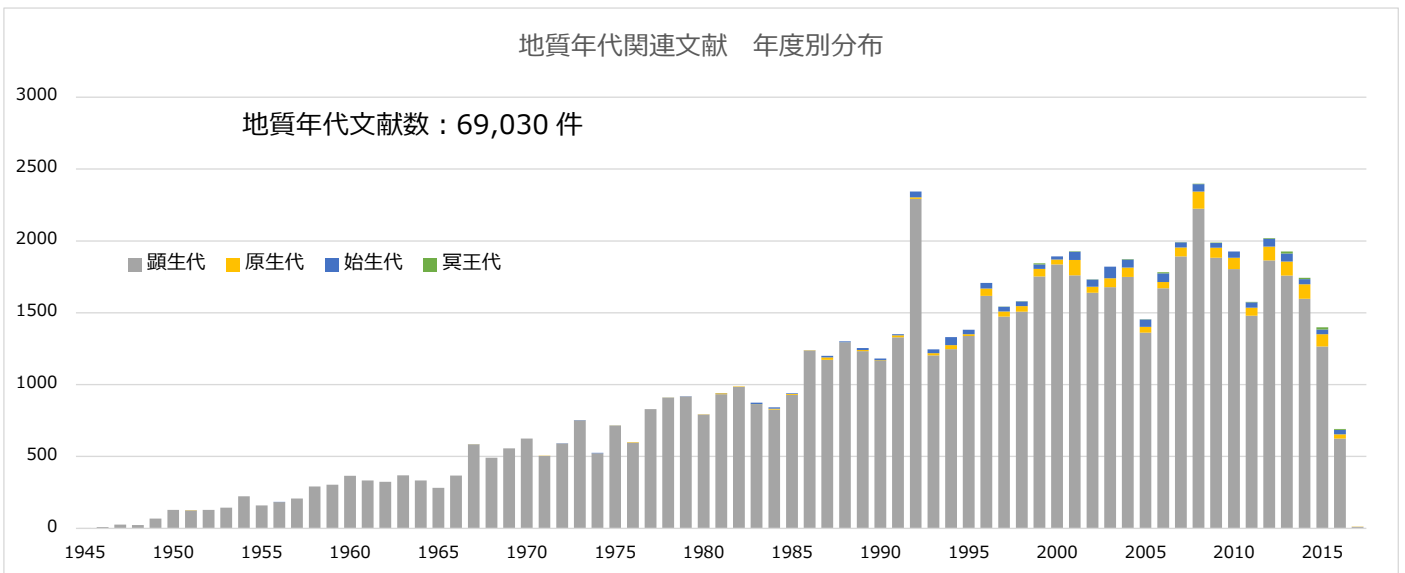
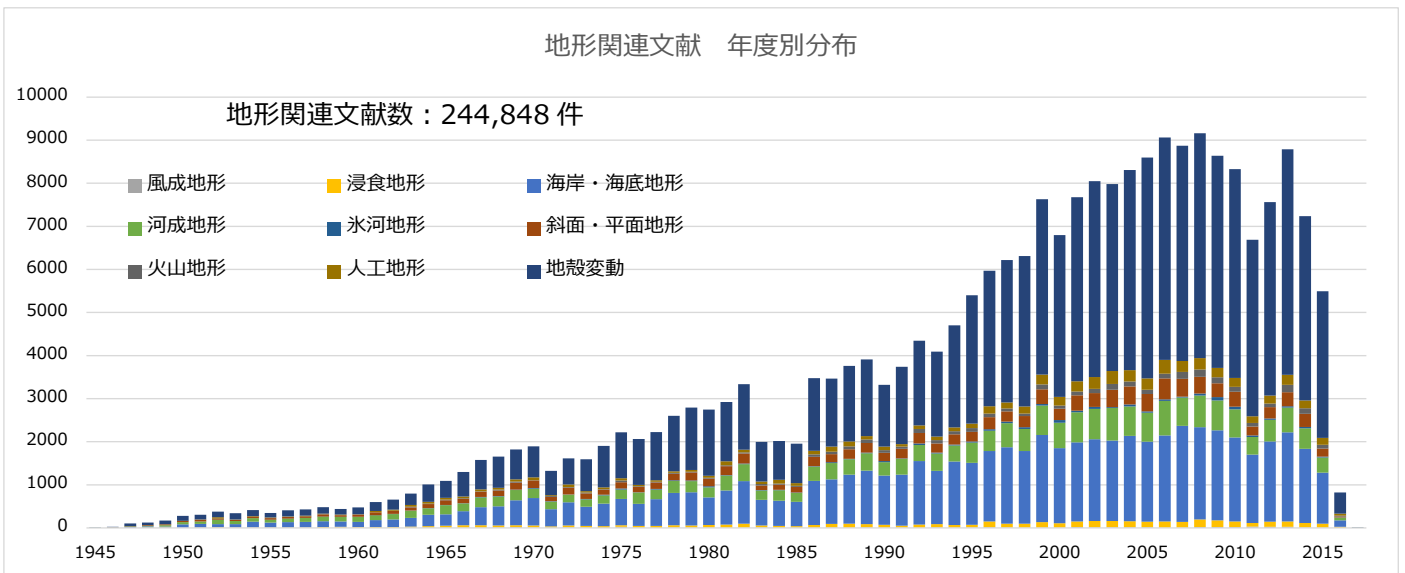


図 2.3-6 高頻度キーワード 年度別出現数

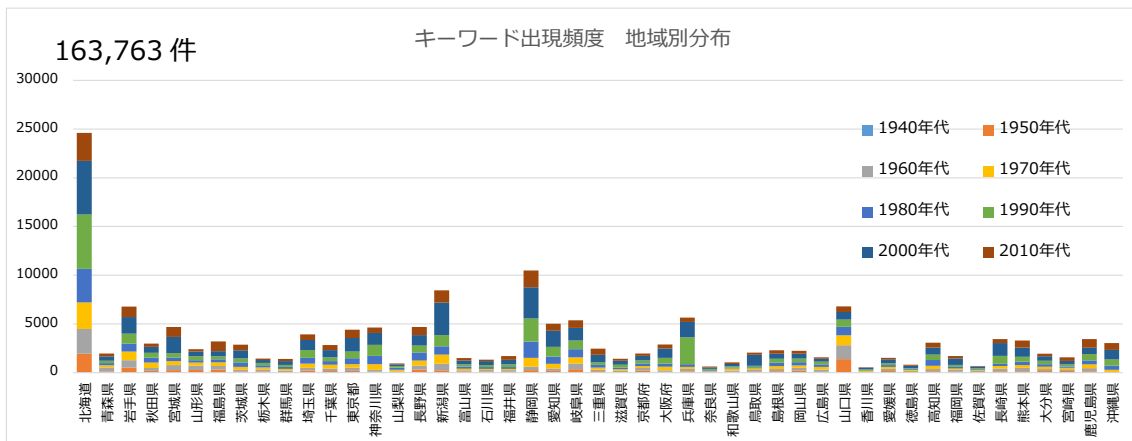


図 2.3-7 地域関連文献 都道府県別出現数

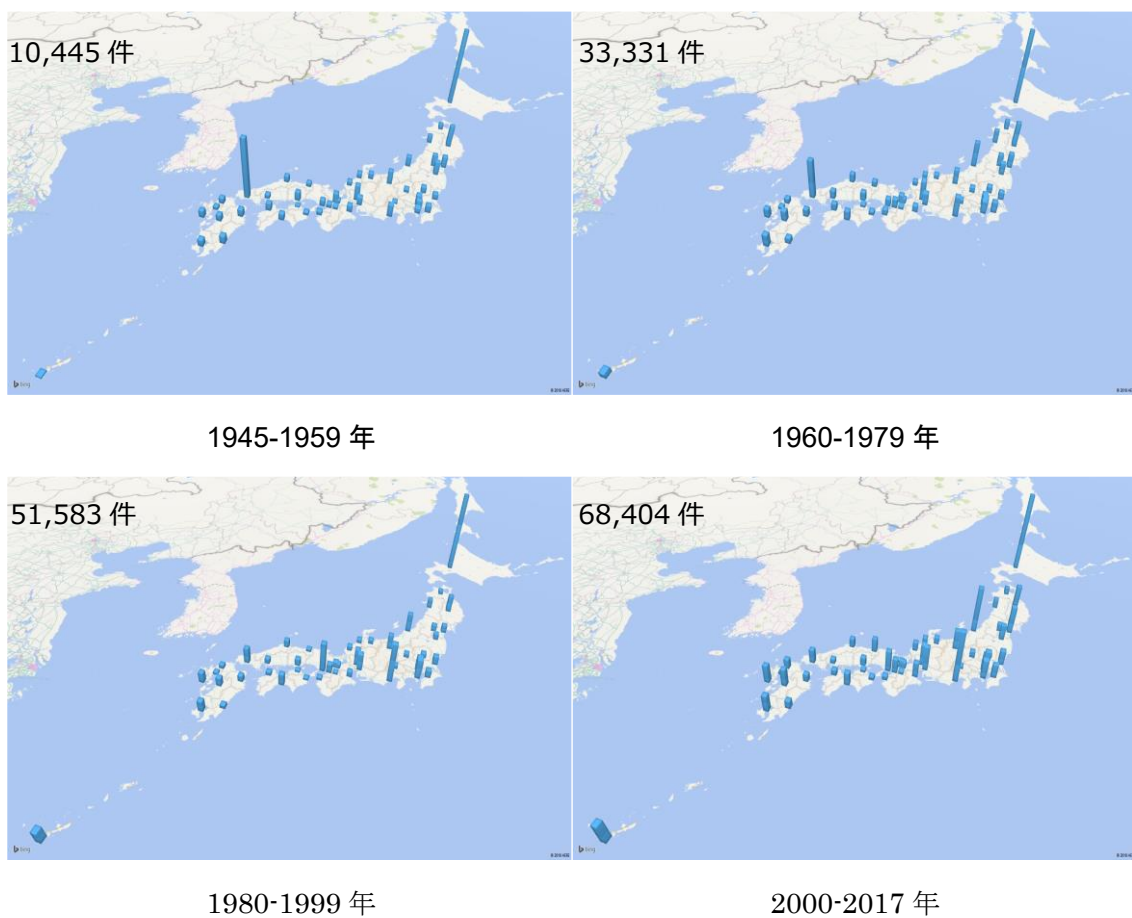


図 2.3-8 地域別出現数

地形

全文献 823,983 件の内、地形に関するキーワードを含む文献は 244,848 件であった。図 2.3-9 には、年代別に色分けされた第 2 階層キーワード別の出現数を示し、図 2.3-10 には、発行年度別の出現数を示す。図 2.3-11_(a)、(b)、(c)には、第 2 階層キーワード高出現頻度順に 3 種を発行年度別に分類し第 3 階層キーワード別に色分けした分布図を示す。図 2.3-12 には、地形入地域属性キーワード（トピック）に該当した文献を都道府県別に分類し第 2 階層キーワード別に色分けした分

布図を示す。図 2.3-13 には、図 2.3-12 において第 2 階層キーワードの出現数の高い順に 4 種の度数を地図上に示した分布図を示す。

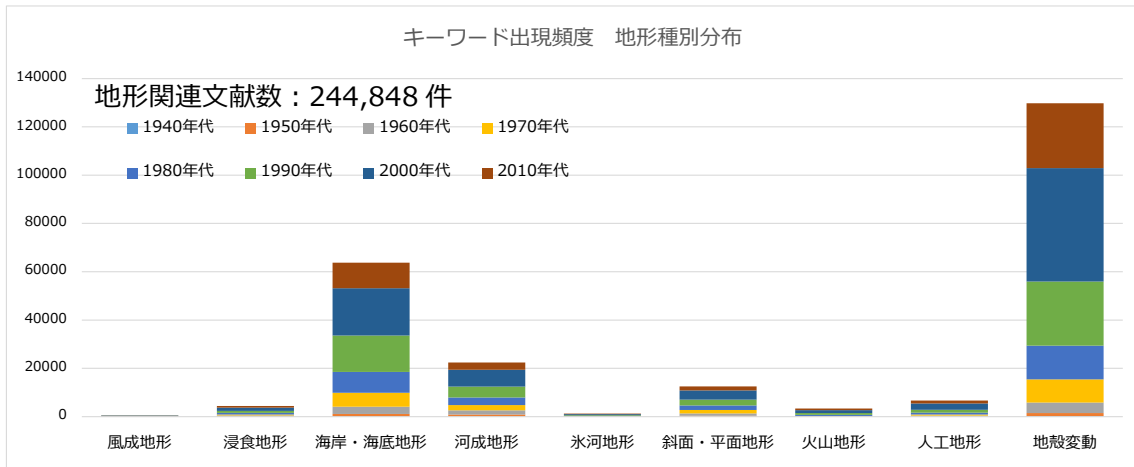


図 2.3-9 地形第 2 階層キーワード別出現数

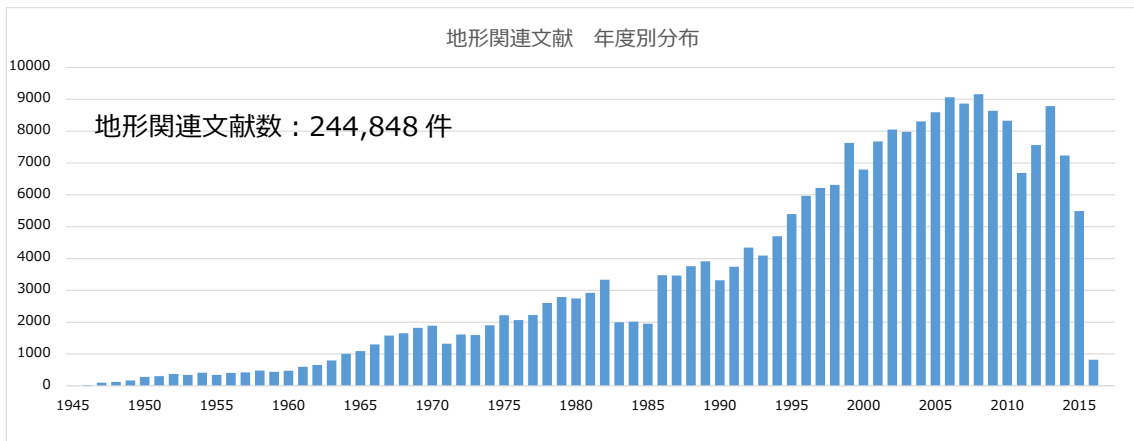
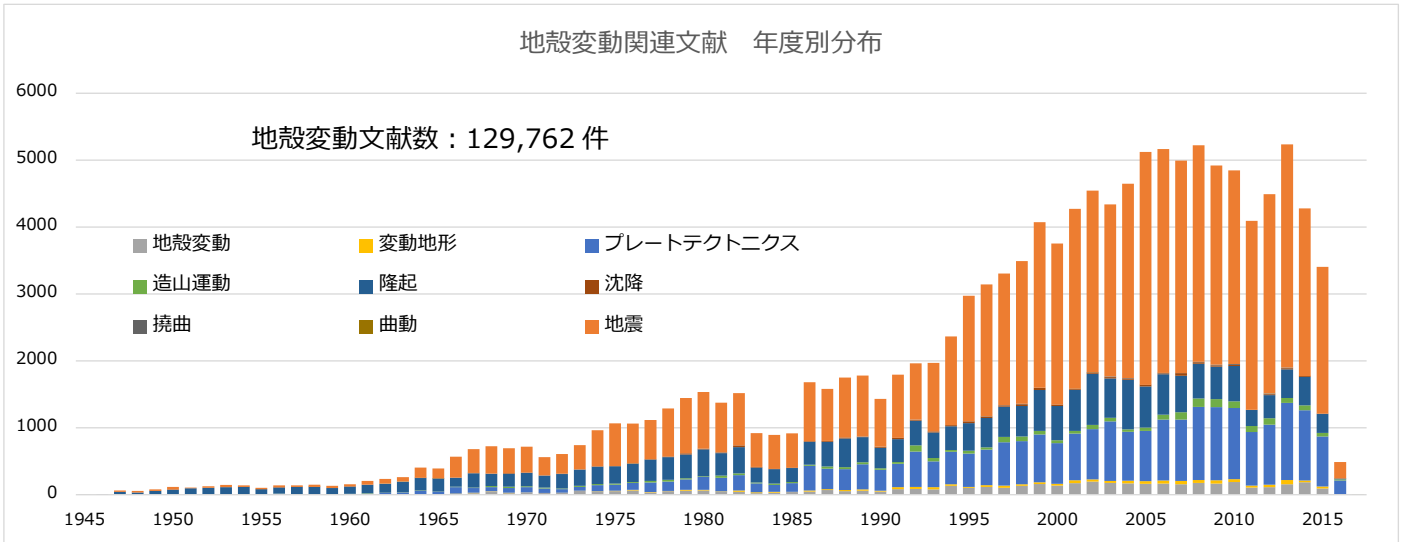
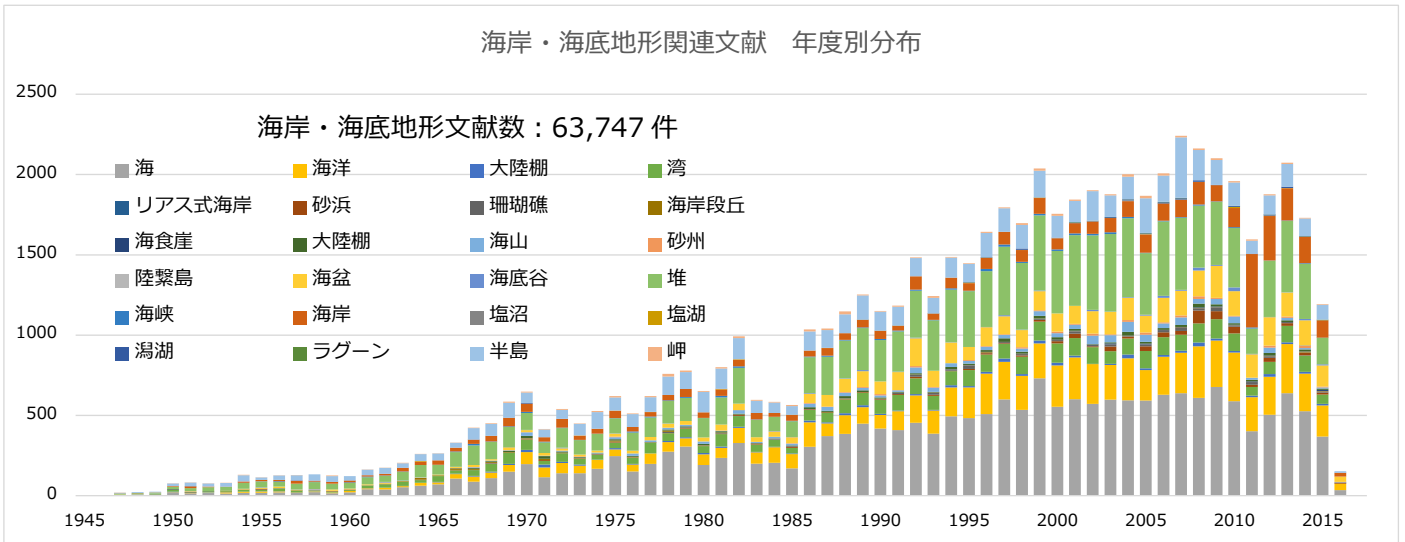


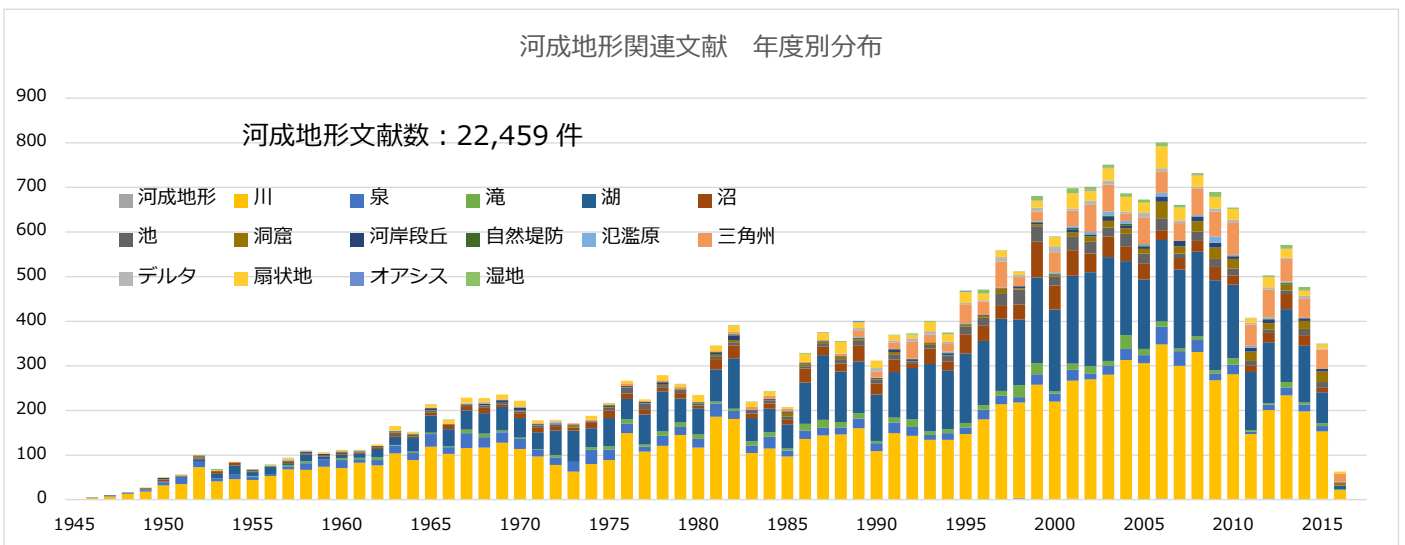
図 2.3-10 地形関連文献 発行年別出現数



(a) 地殻変動関連文献



(b) 海岸・海底地形関連文献



(c) 河成地形関連文献

図 2.3-11 高頻度キーワード 年度別出現数

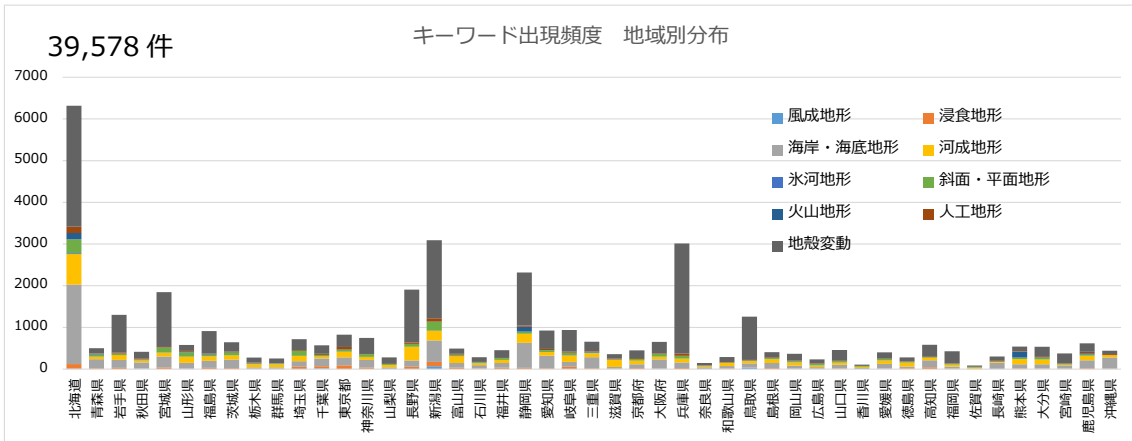


図 2.3-12 地形関連文献 都道府県別出現数

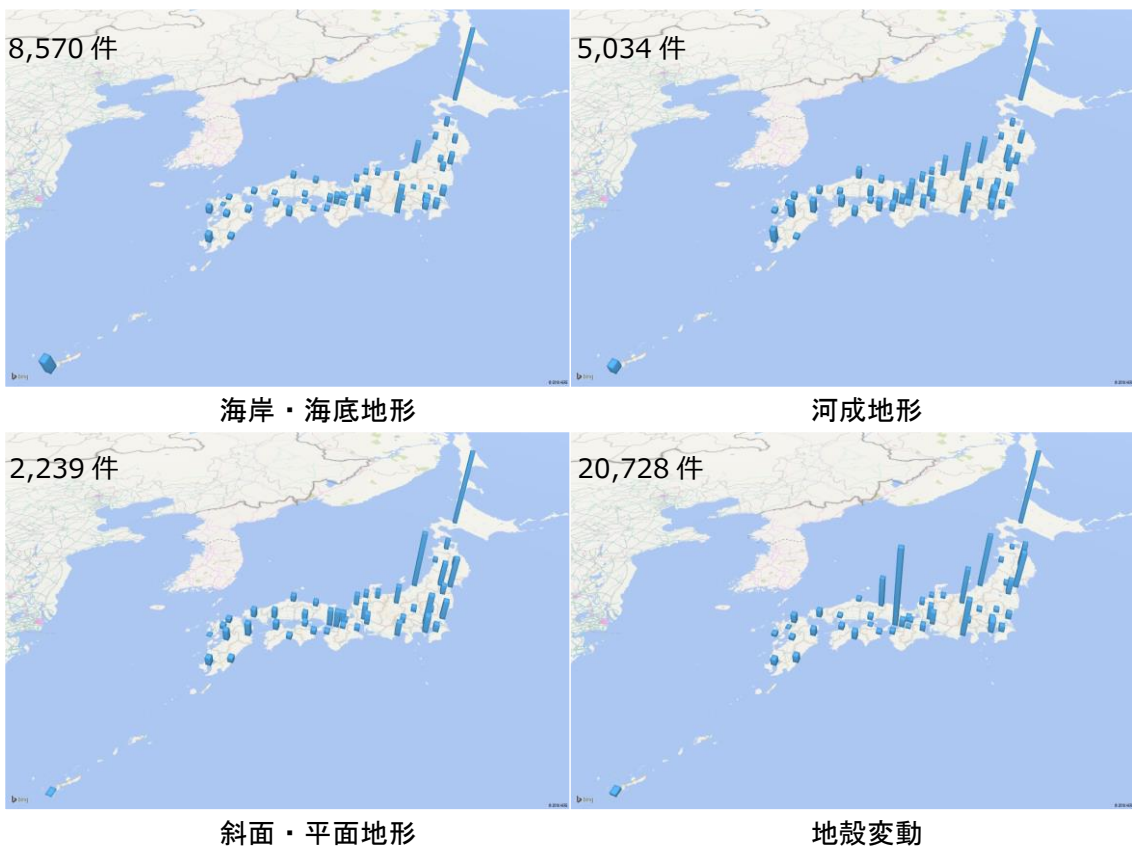


図 2.3-13 地域別出現数

地質

全文献 823,983 件の内、地質に関するキーワードを含む文献は 20,179 件あった。

図 2.3-14 には、年代別に色分けされた第 3 階層キーワード別の出現数を示し、図 2.3-15 には、発行年度別の出現数を示す。図 2.3-16_(a)、(b)、(c)には、第 3 階層キーワード高出現頻度順に 3 種を発行年度別に分類し第 4 階層キーワード別に色分けした分布図を示す。図 2.3-17 には、地盤調査^地域属性キーワード（トピック）に該当した文献を都道府県別に分類し第 3 階層キーワード別に色分けした分布図を示す。図 2.3-18 には、図 2.3-17 において第 3 階層キーワードの出現数の高い順に 4 種の度数を地図上に示した分布図を示す。

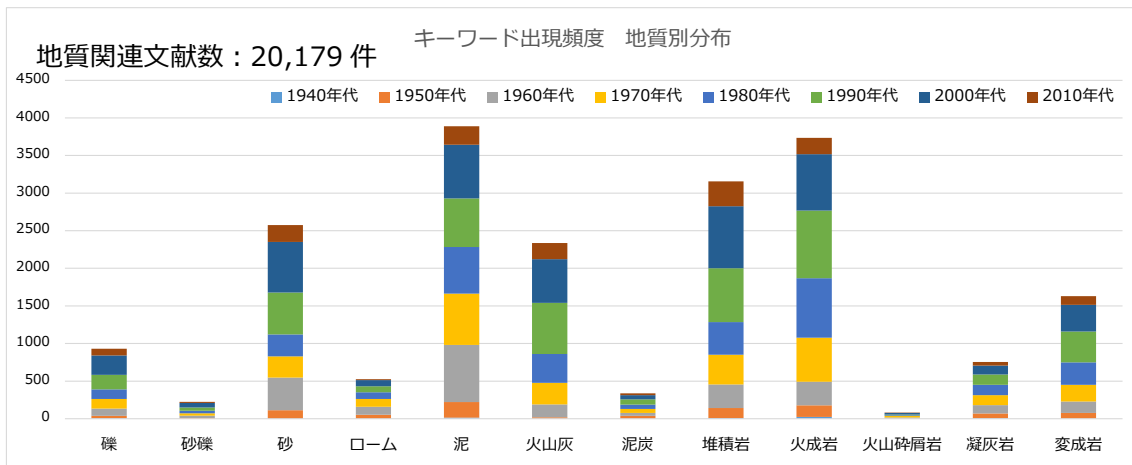


図 2.3-14 地盤調査第 2 階層キーワード別出現数

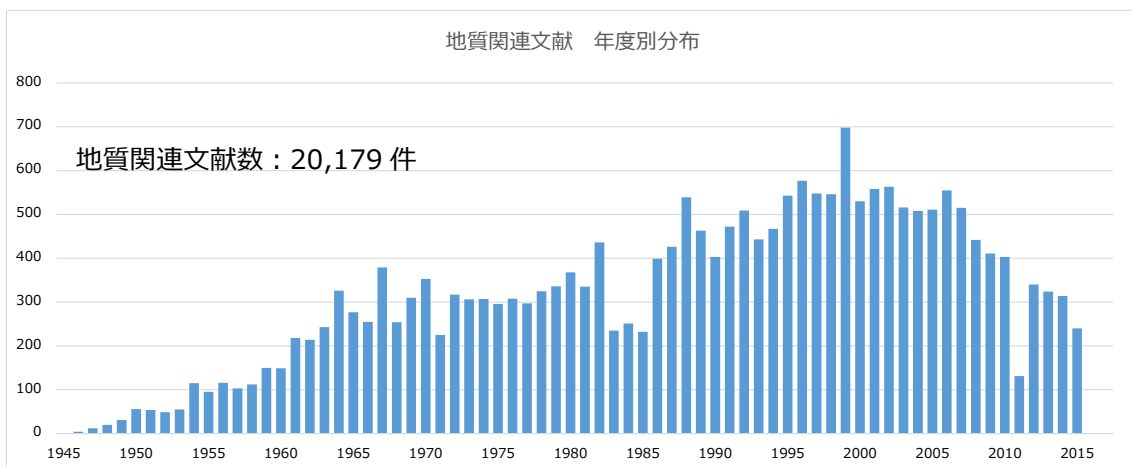


図 2.3-15 地盤調査関連文献 発行年別出現数

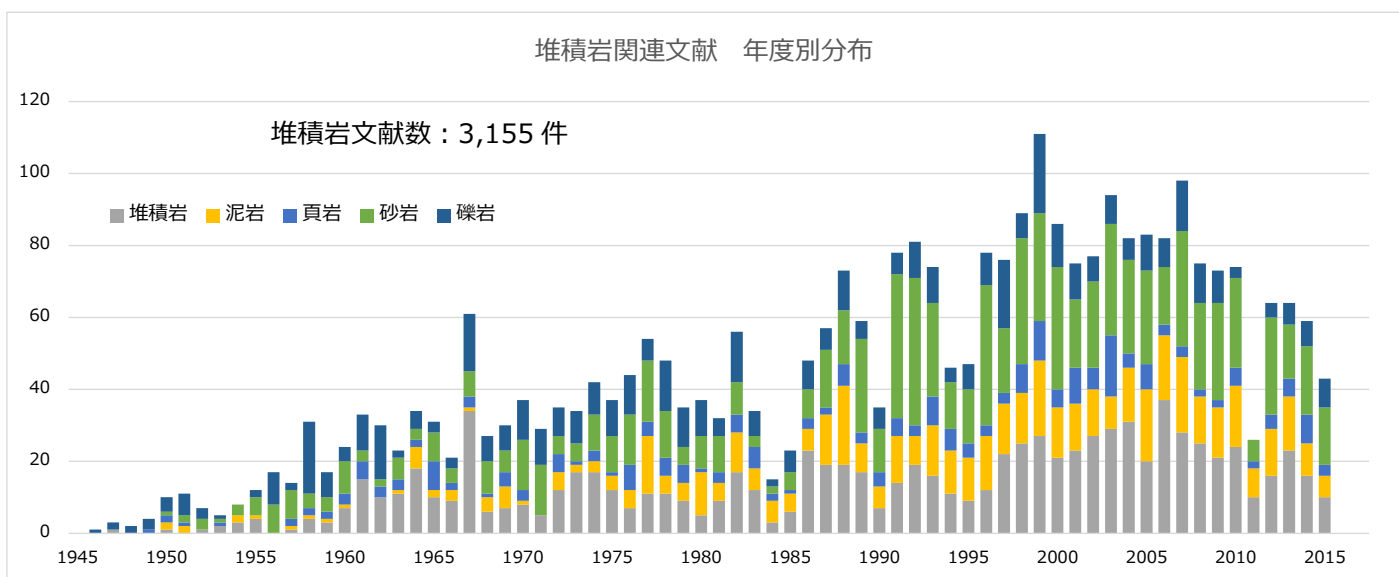
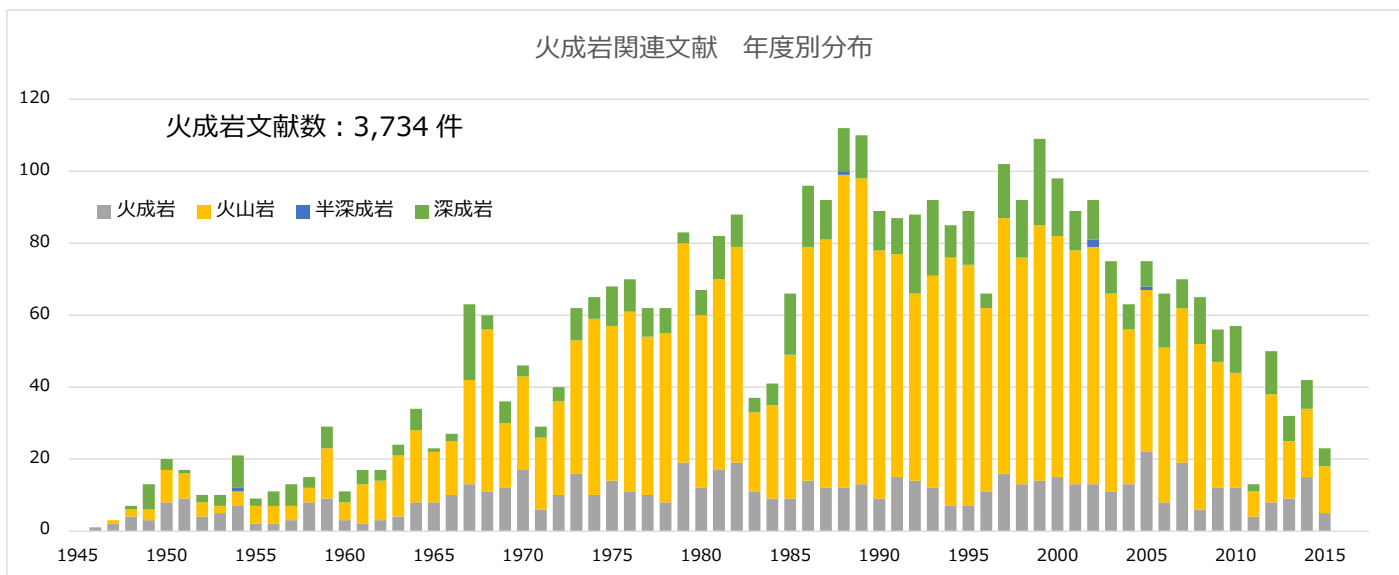
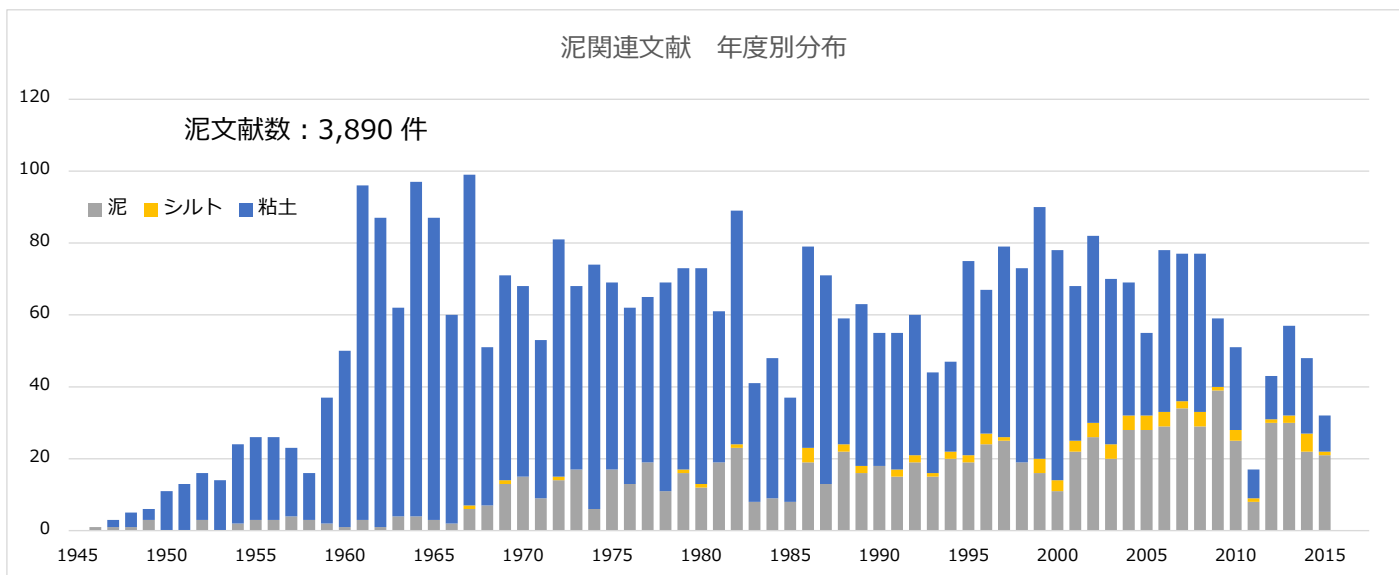


図 2.3-16 高頻度キーワード 年度別出現数

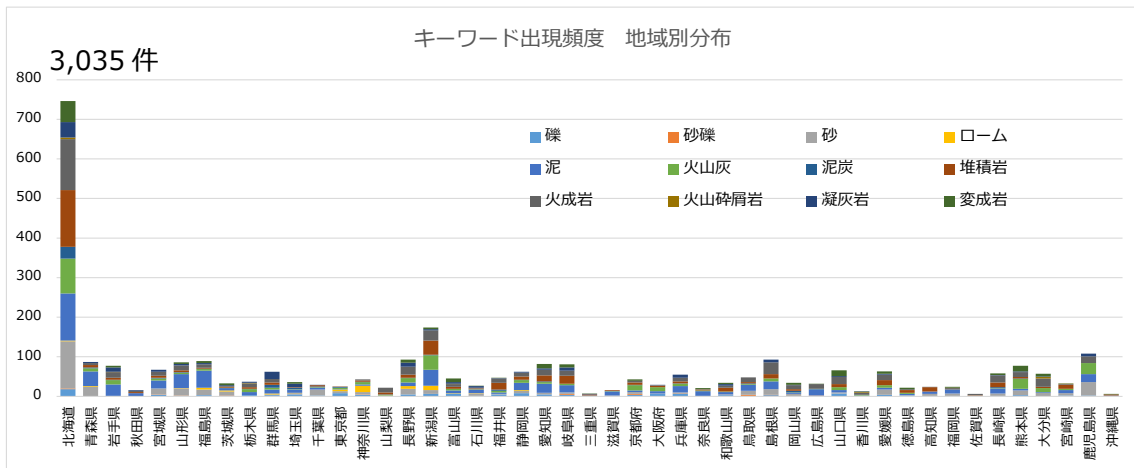


図 2.3-17 地質関連文献 都道府県別出現数

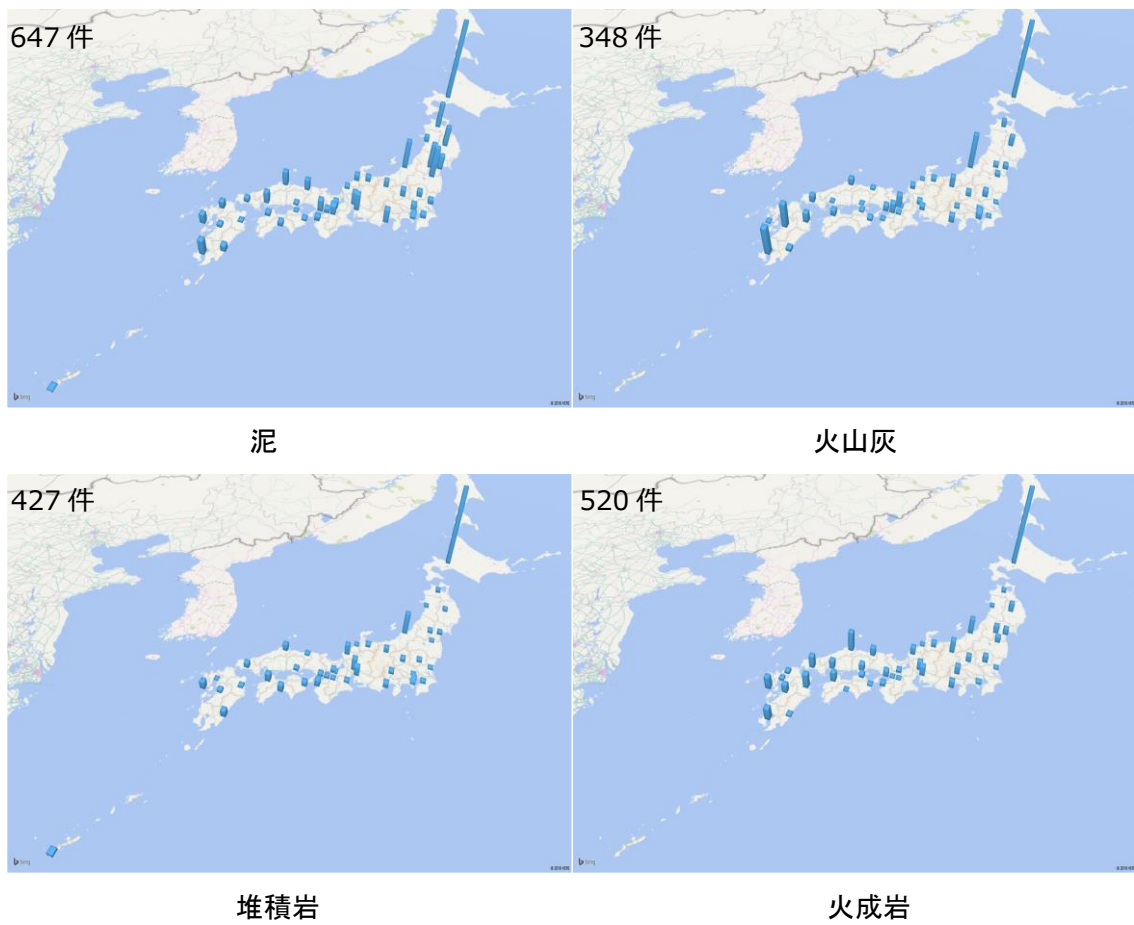


図 2.3-18 地域別出現数

地盤調査

全文献 823,983 件の内、地盤調査に関するキーワードを含む文献は 16,797 件あった。図 2.3-19 には、年代別に色分けされた第 2 階層キーワード別の出現数を示し、図 2.3-20 には、発行年度別の出現数を示す。図 2.3-21_(a)、(b)、(c)には、第 2 階層キーワード高出現頻度順に 3 種を発行年度別に分類し第 3 階層キーワード別に色分けした分布図を示す。図 2.3-22 には、地盤調査^地域属性キーワード（トピック）に該当した文献を都道府県別に分類し第 2 階層キーワード別に色分けした分布図を示す。図 2.3-23 には、図 2.3-22 において第 2 階層キーワードの出現数の高い順に 4 種の度数を地図上に示した分布図を示す。

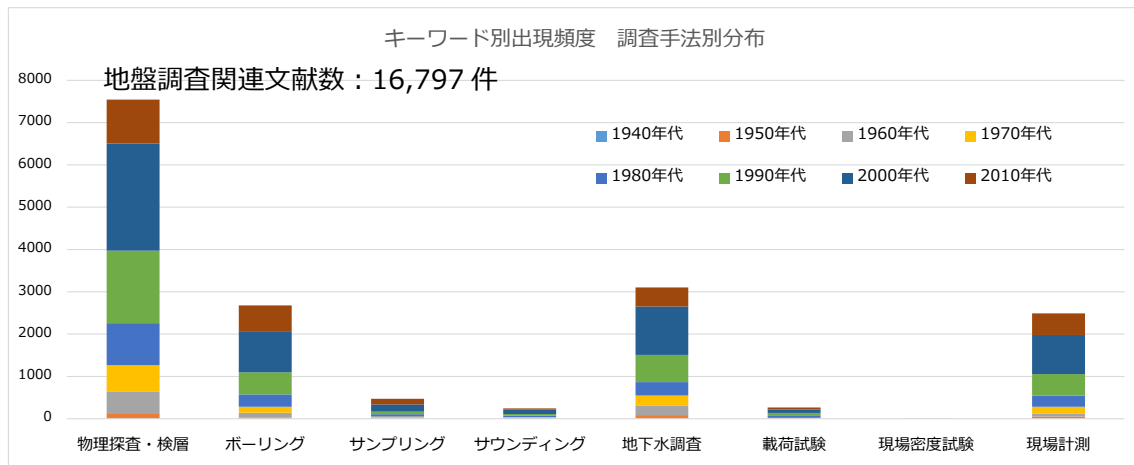


図 2.3-19 地盤調査第 2 階層キーワード別出現数

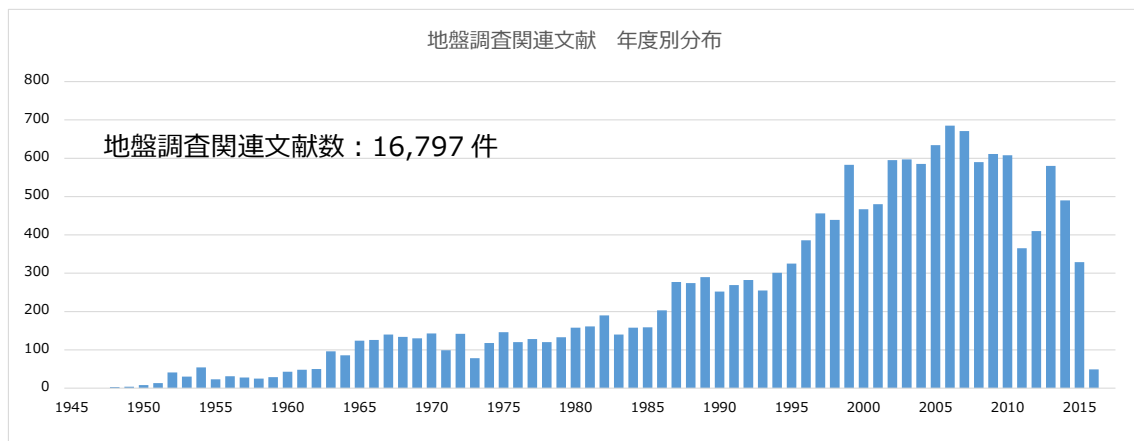
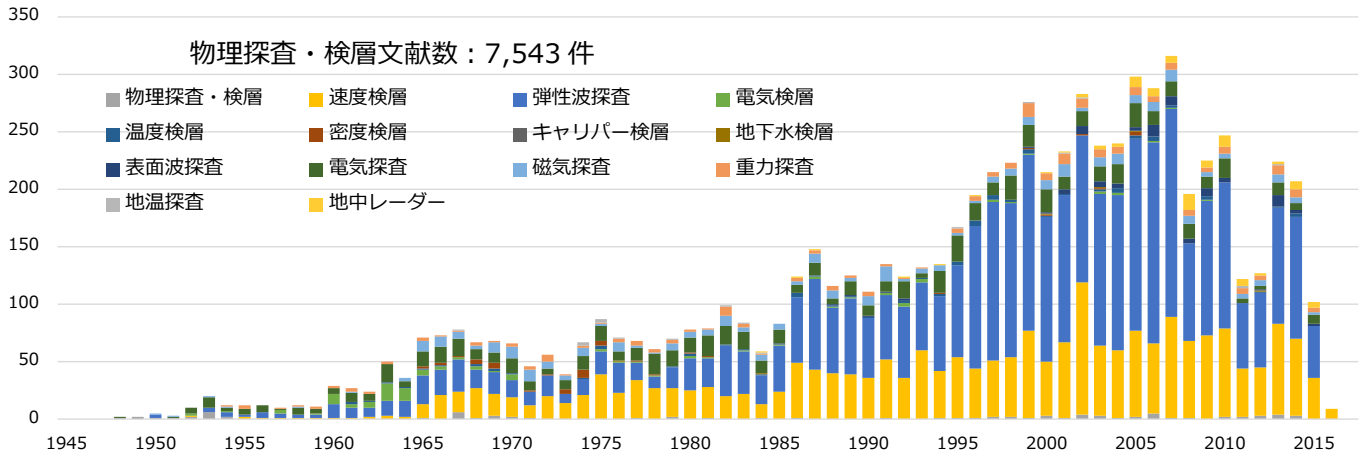


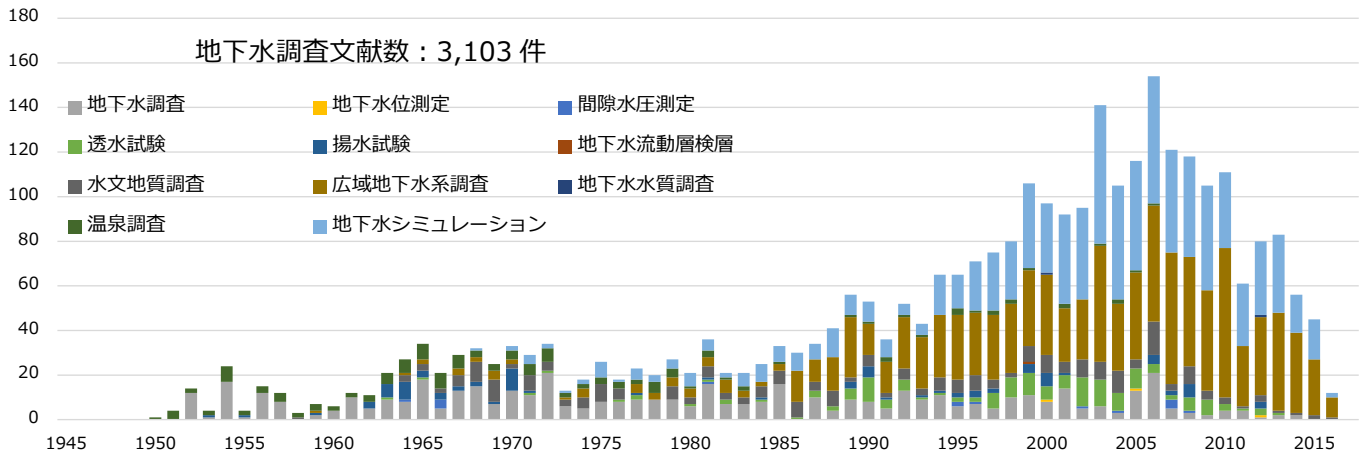
図 2.3-20 地盤調査関連文献 発行年別出現数

物理探査・検層関連文献 年度別分布



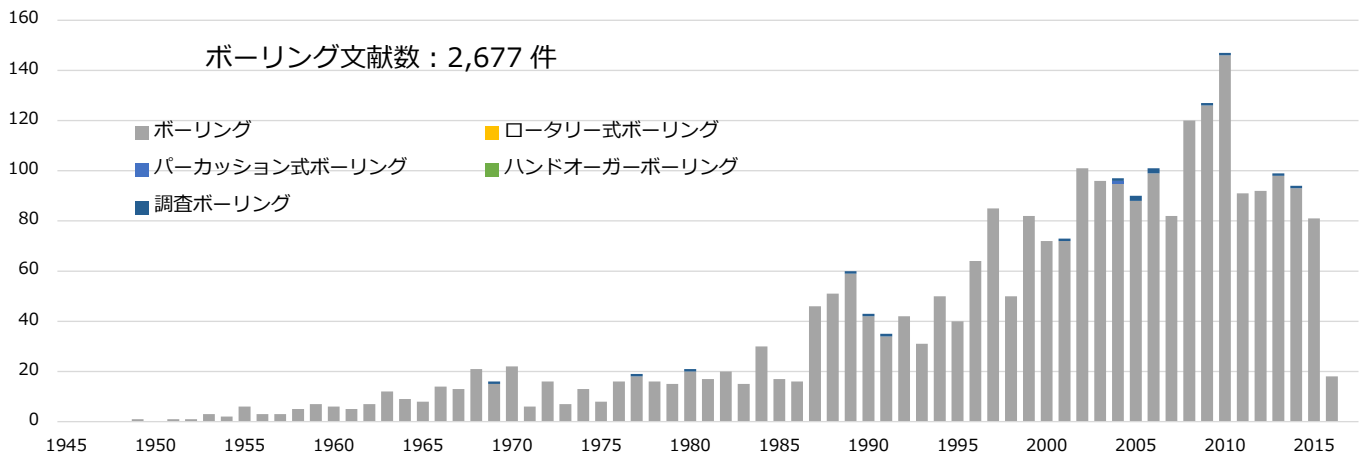
(a) 物理探査・検層関連文献

地下水調査関連文献 年度別分布



(b) 地下水調査関連文献

ボーリング関連文献 年度別分布



(c) ボーリング関連文献

図 2.3-21 高頻度キーワード 年度別出現数

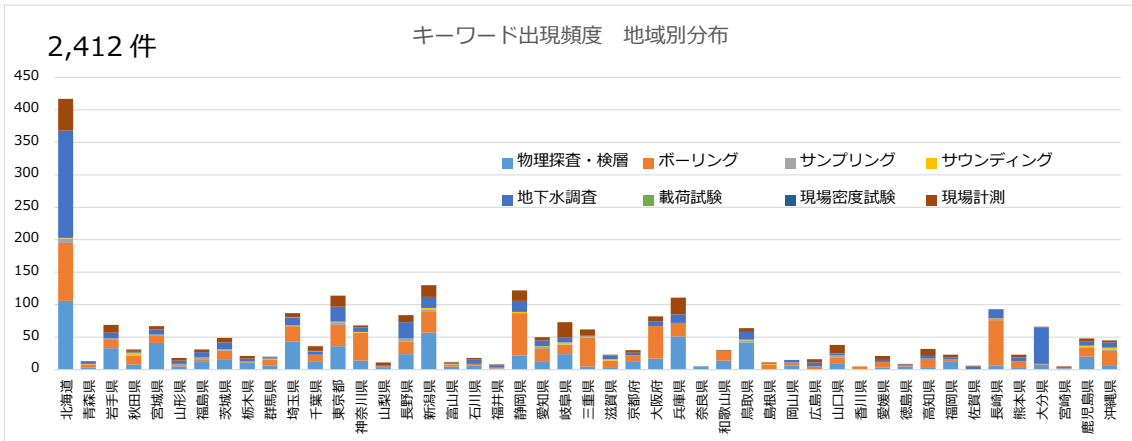


図 2.3-22 地盤調査関連文献 都道府県別出現数

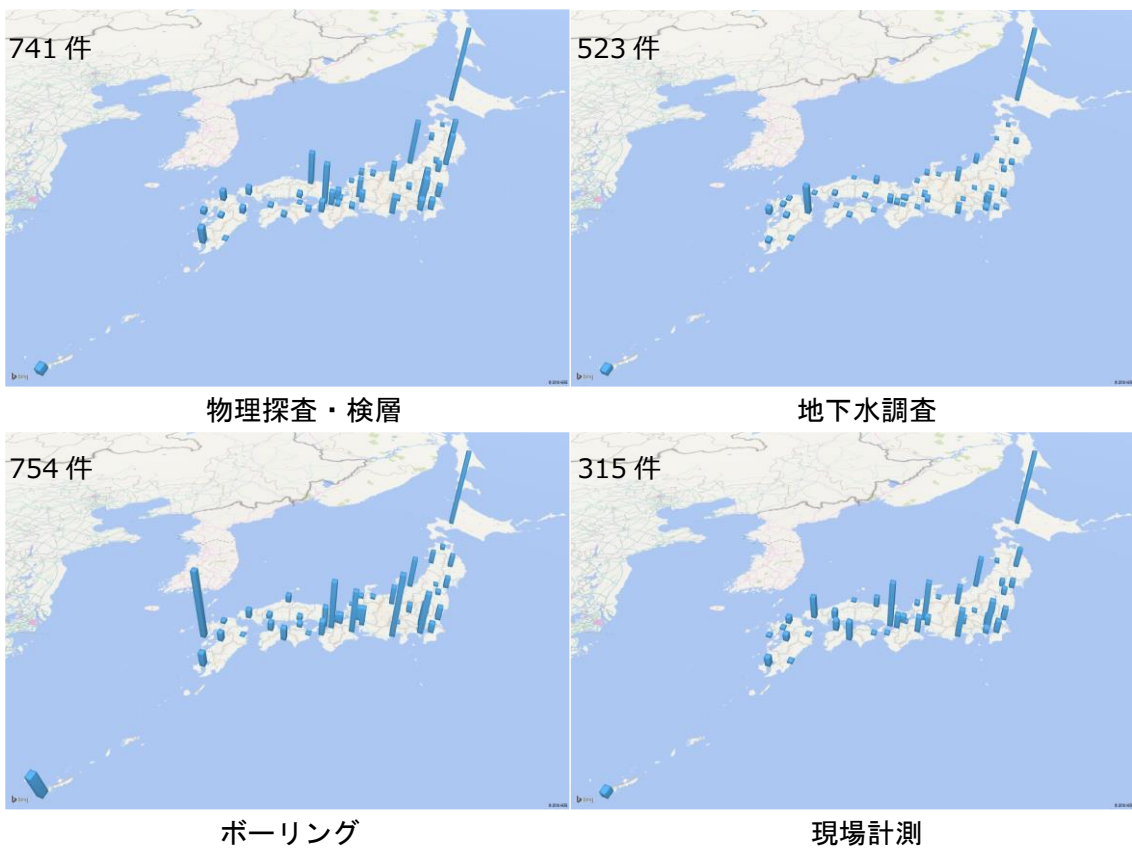


図 2.3-23 地域別出現数

環境

全文献 823,983 件の内、環境に関するキーワードを含む文献は 2,453 件あった。

図 2.3-24 には、年代別に色分けされた第 3 階層キーワード別の出現数を示し、図 2.3-25 には、発行年度別の出現数を示す。図 2.3-26_(a)、(b)、(c)には、第 3 階層キーワード高出現頻度順に 3 種を発行年度別に分類し第 4 階層キーワード別に色分けした分布図を示す。図 2.3-27 には、環境入地域属性キーワード（トピック）に該当した文献を都道府県別に分類し第 2 階層キーワード別に色分けした分布図を示す。図 2.3-28 には、図 2.3-27 において第 3 階層キーワードの出現数の高い順に 4 種の度数を地図上に示した分布図を示す。

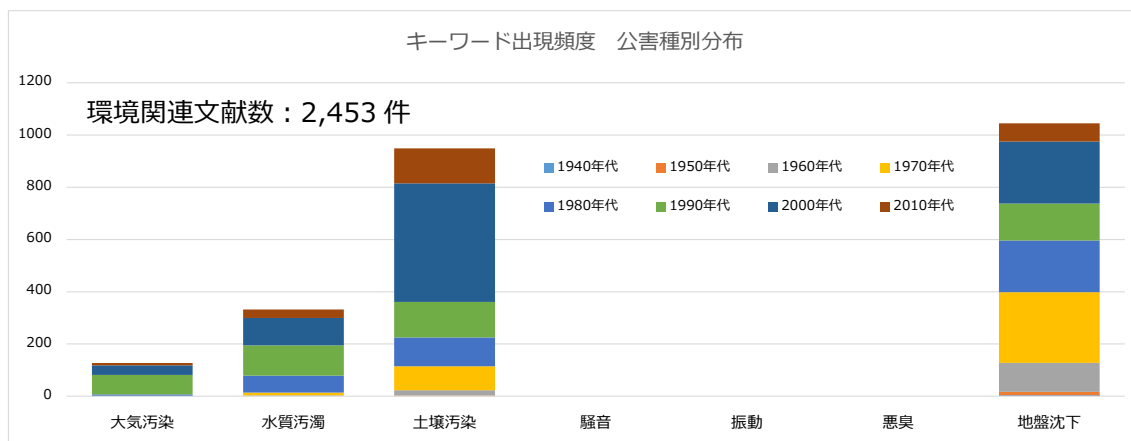


図 2.3-24 環境第 3 階層キーワード別出現数

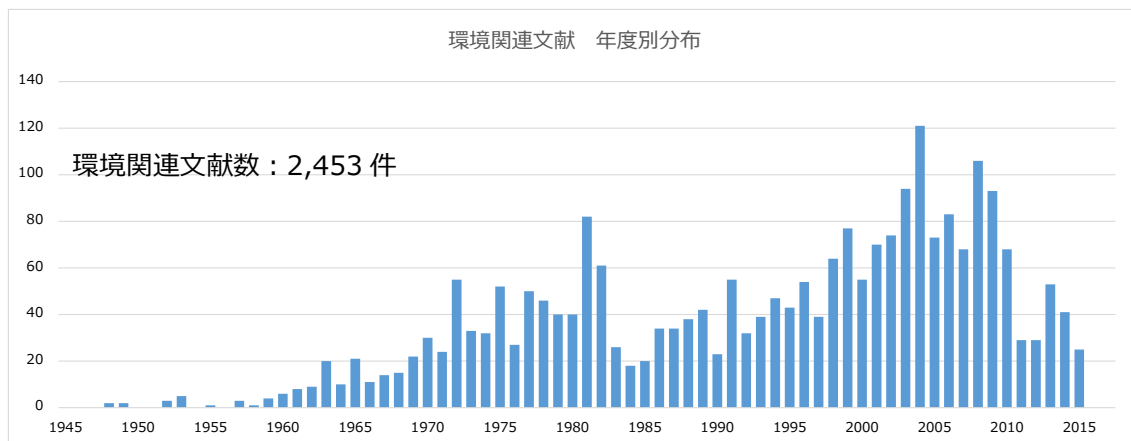
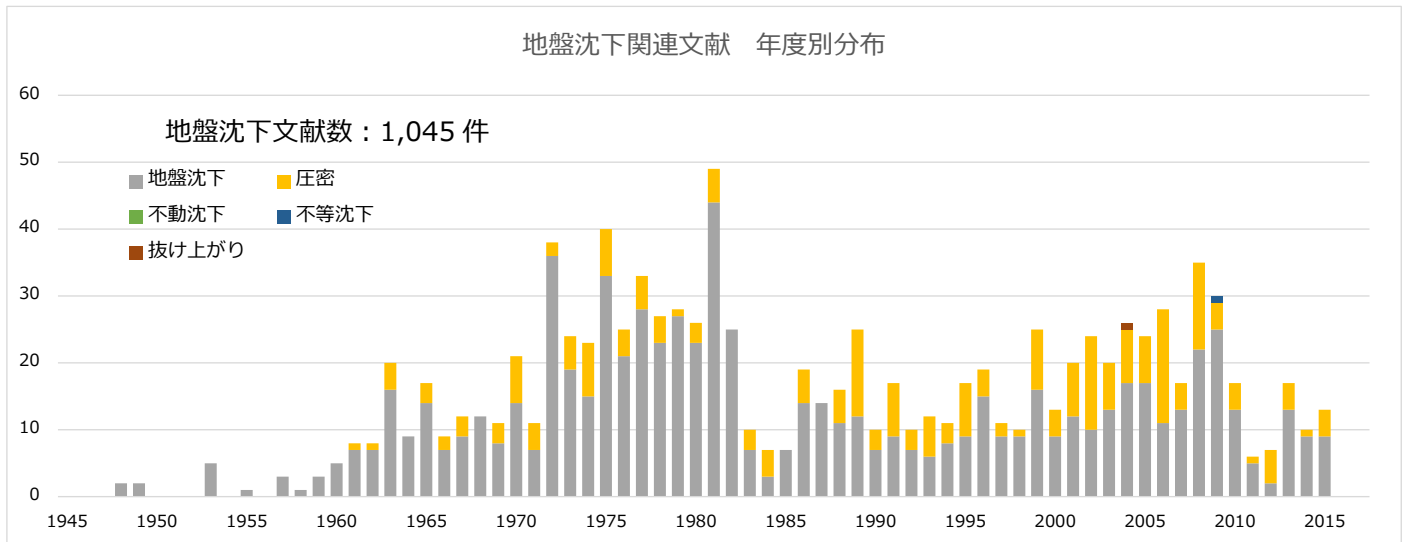
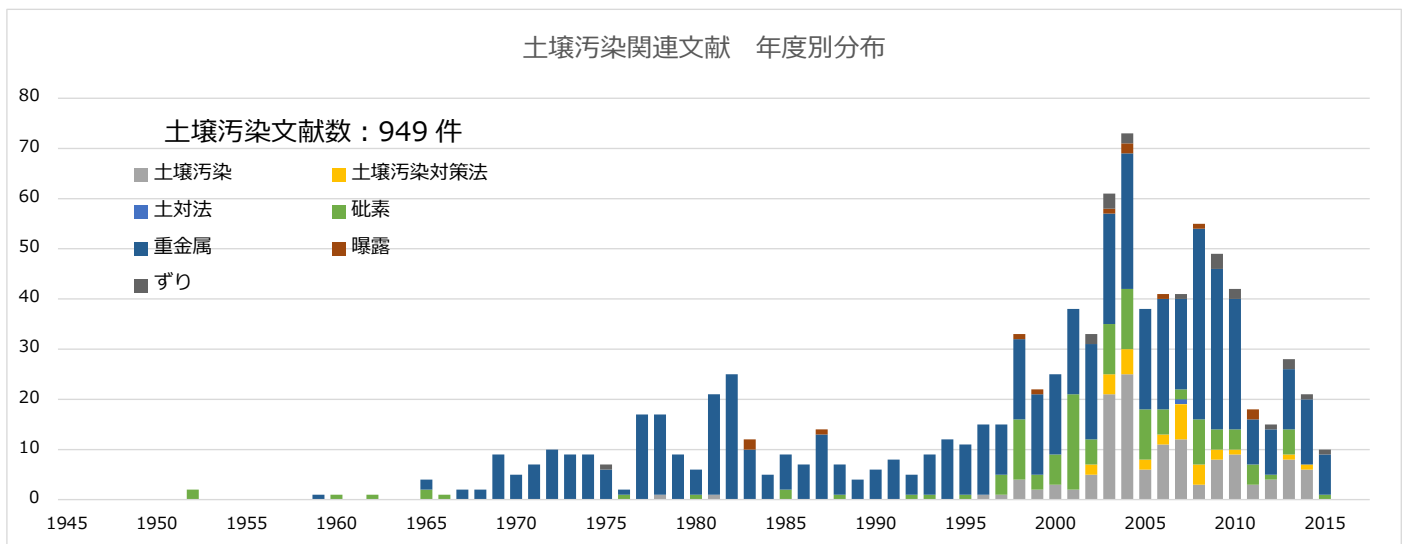


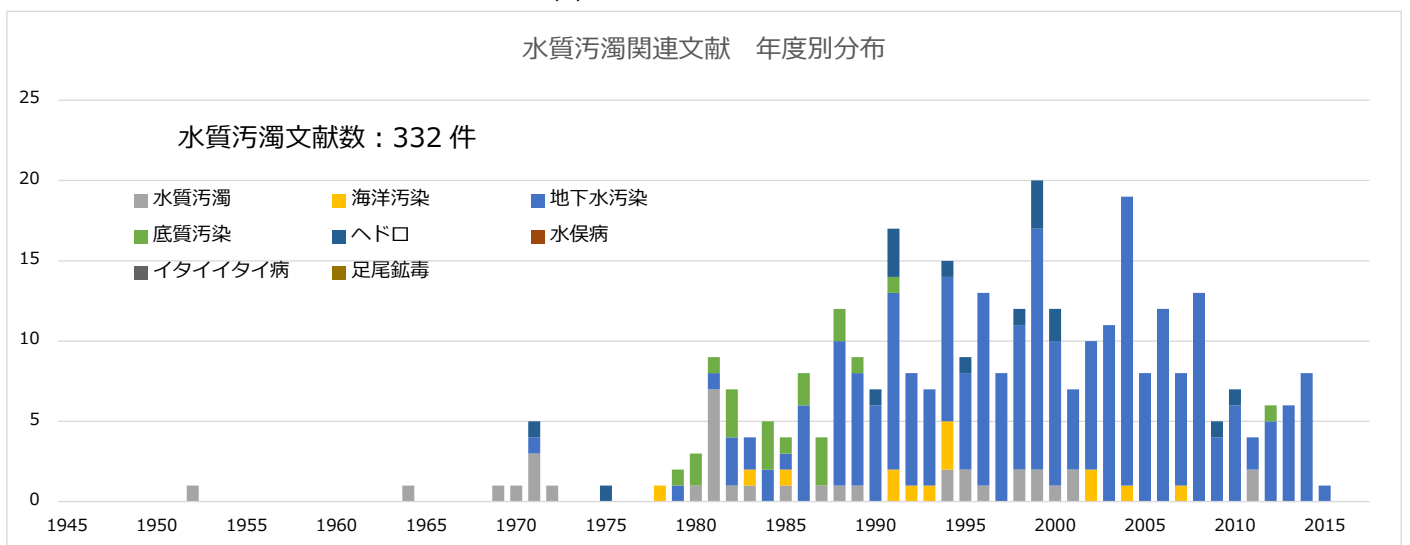
図 2.3-25 環境関連文献 発行年別出現数



(a) 地盤沈下関連文献



(b) 土壌汚染関連文献



(c) 水質汚濁関連文献

図 2.3-26 高頻度キーワード 年度別出現数

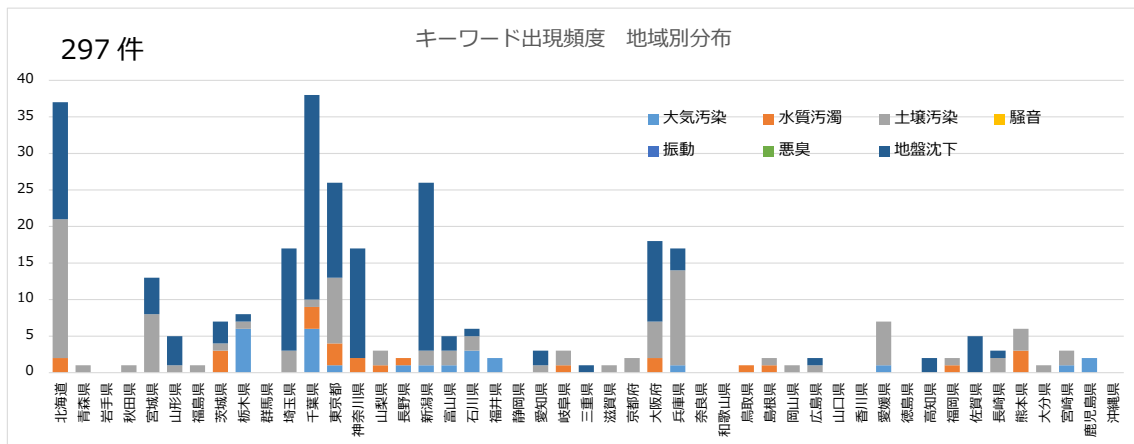


図 2.3-27 環境関連文献 都道府県別出現数

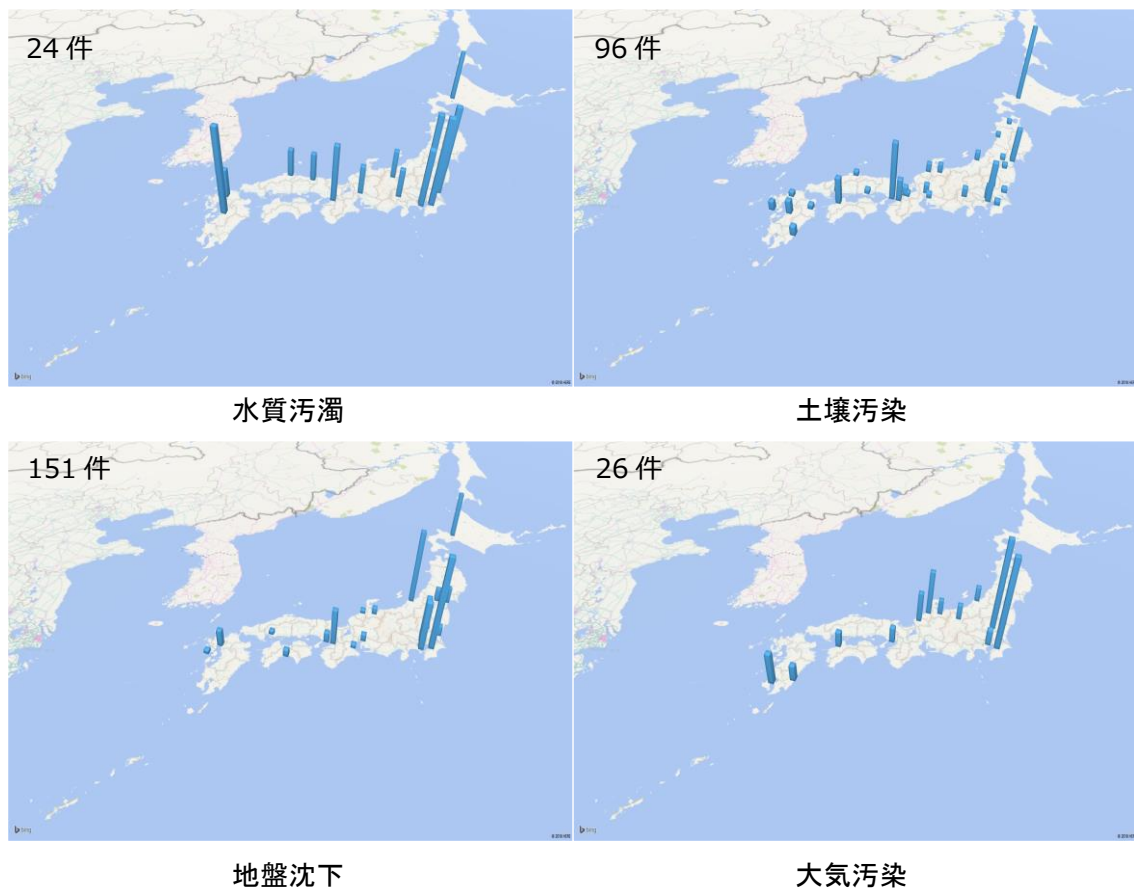


図 2.3-28 地域別出現数

エネルギー

全文献 823,983 件の内、エネルギーに関するキーワードを含む文献は 10,563 件であった。図 2.3-29 には、年代別に色分けされた第 3 階層キーワード別の出現数を示し、図 2.3-30 には、発行年度別の出現数を示す。図 2.3-31_(a)、(b)、(c)には、第 3 階層キーワード高出現頻度順に 3 種を発行年度別に分類し第 4 階層キーワード別に色分けした分布図を示す。図 2.3-32 には、エネルギー∧地域属性キーワード（トピック）に該当した文献を都道府県別に分類し第 3 階層キーワード別に色分けした分布図を示す。図 2.3-33 には、図 2.3-32 において第 4 階層キーワードの出現数の高い順に 4 種の度数を地図上に示した分布図を示す。

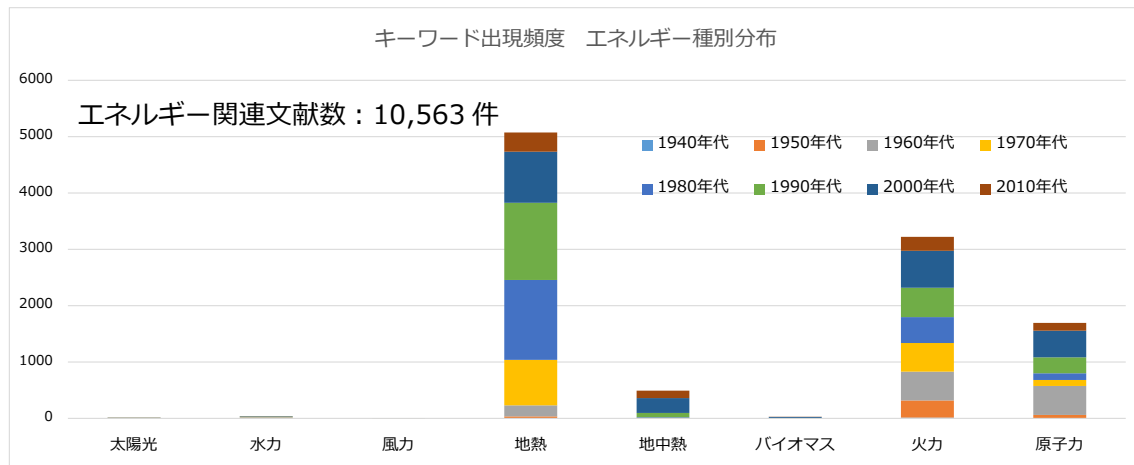


図 2.3-29 エネルギー第 3 階層キーワード別出現数

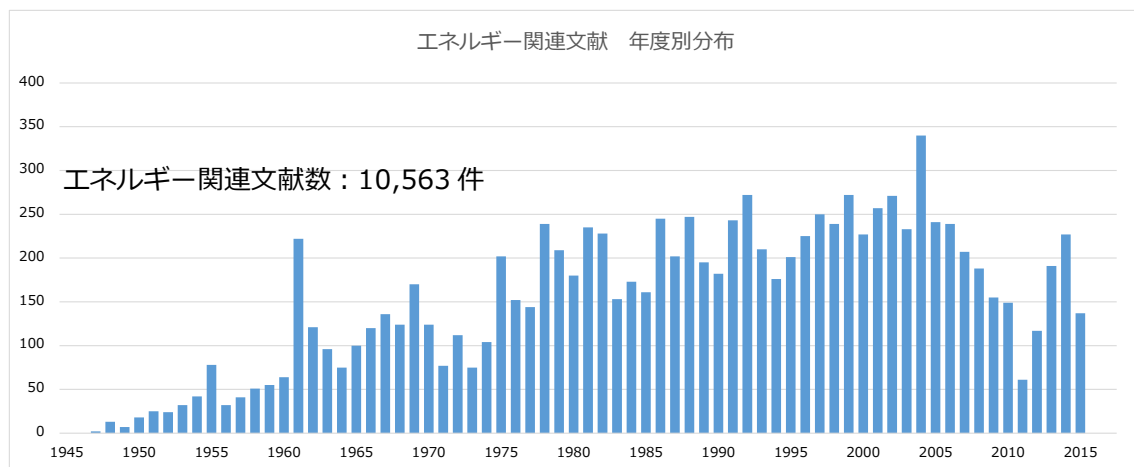
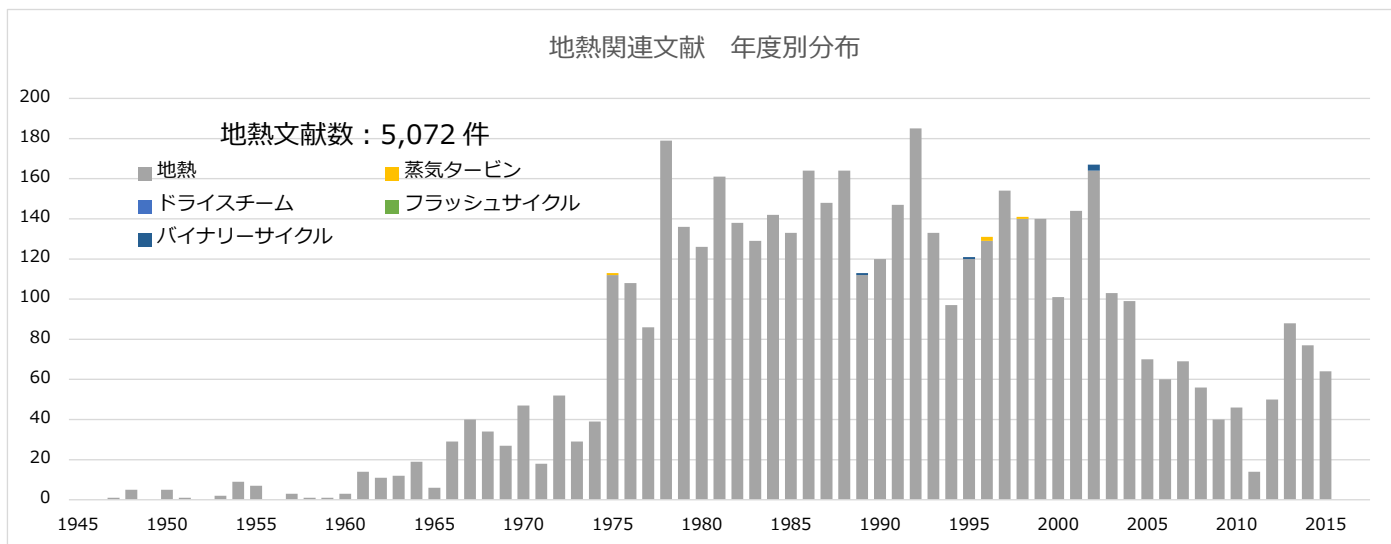
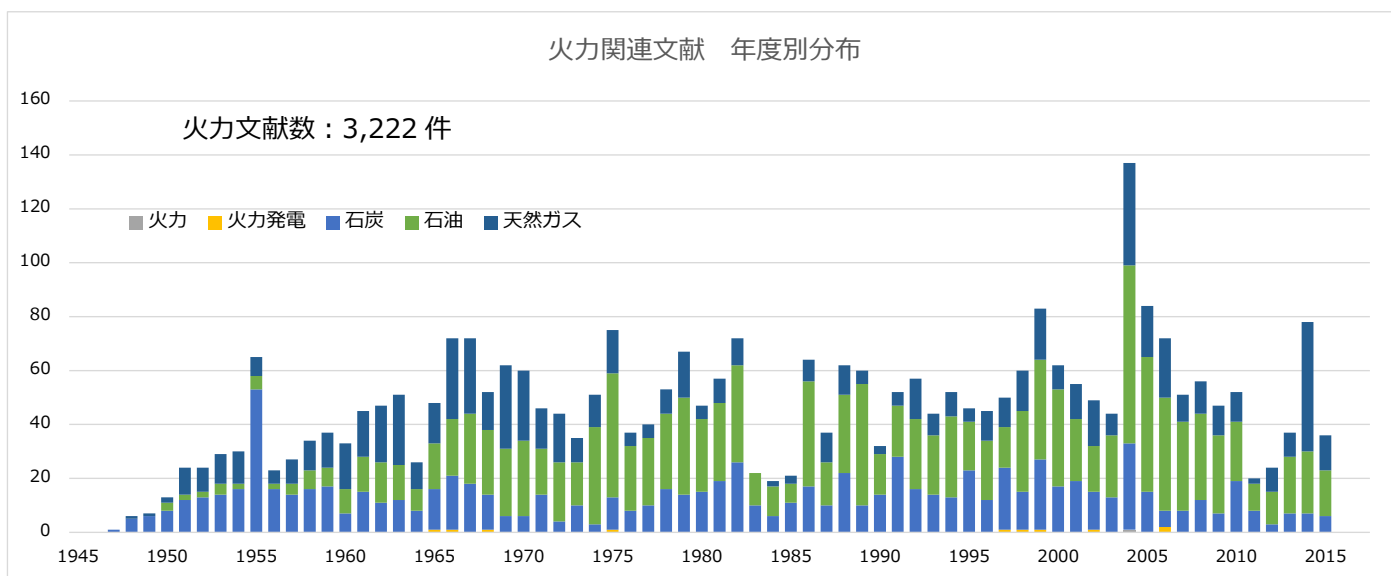


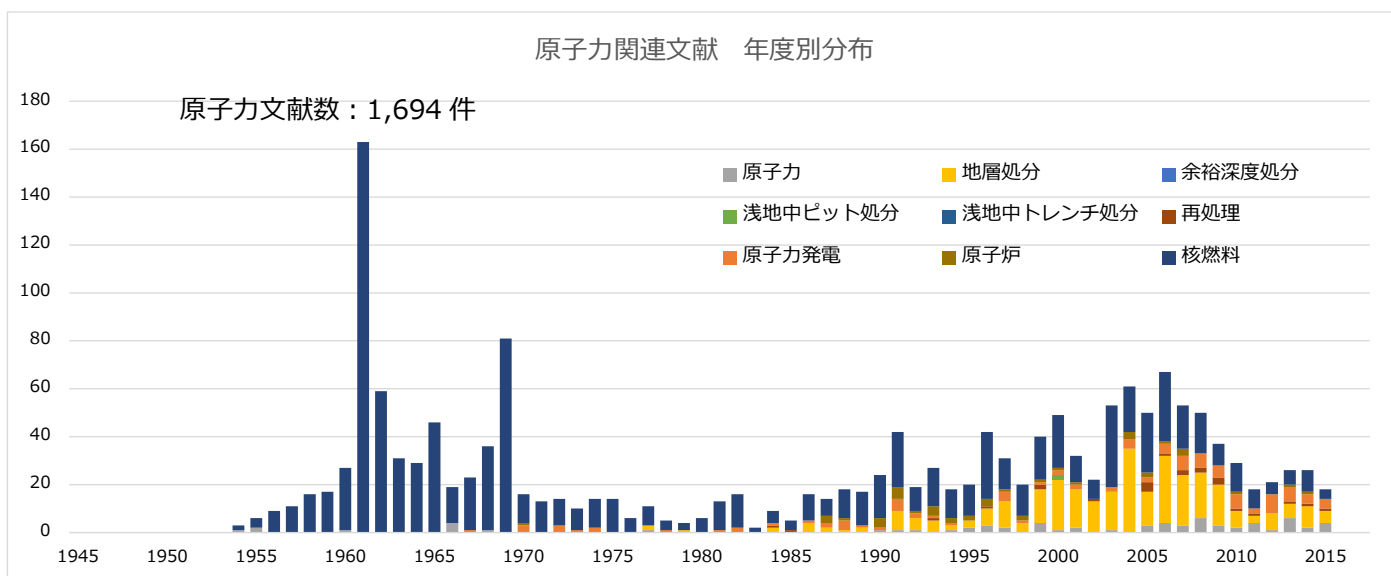
図 2.3-30 エネルギー関連文献 発行年別出現数



(a) 地熱関連文献



(b) 地中熱関連文献



(c) 原子力関連文献

図 2.3-31 高頻度キーワード 年度別出現数

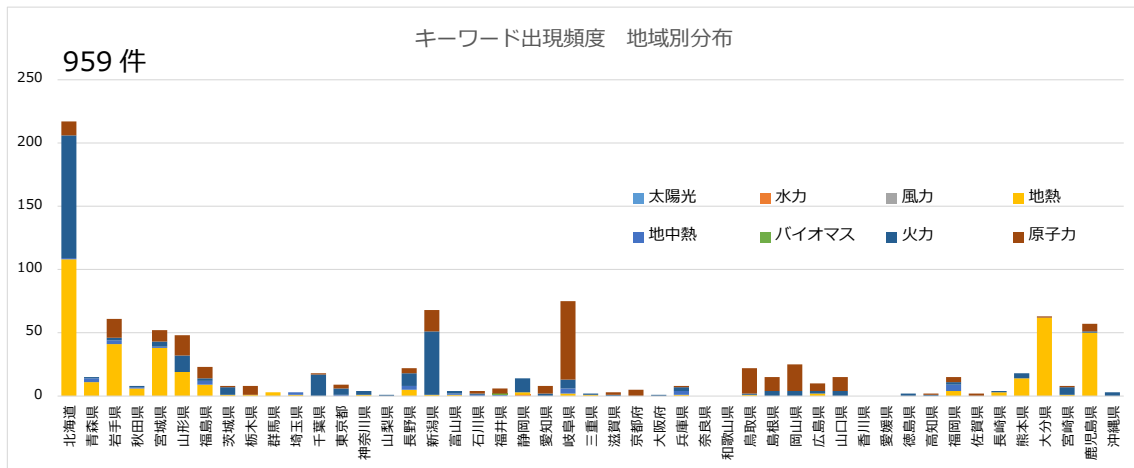


図 2.3-32 エネルギー関連文献 都道府県別出現数

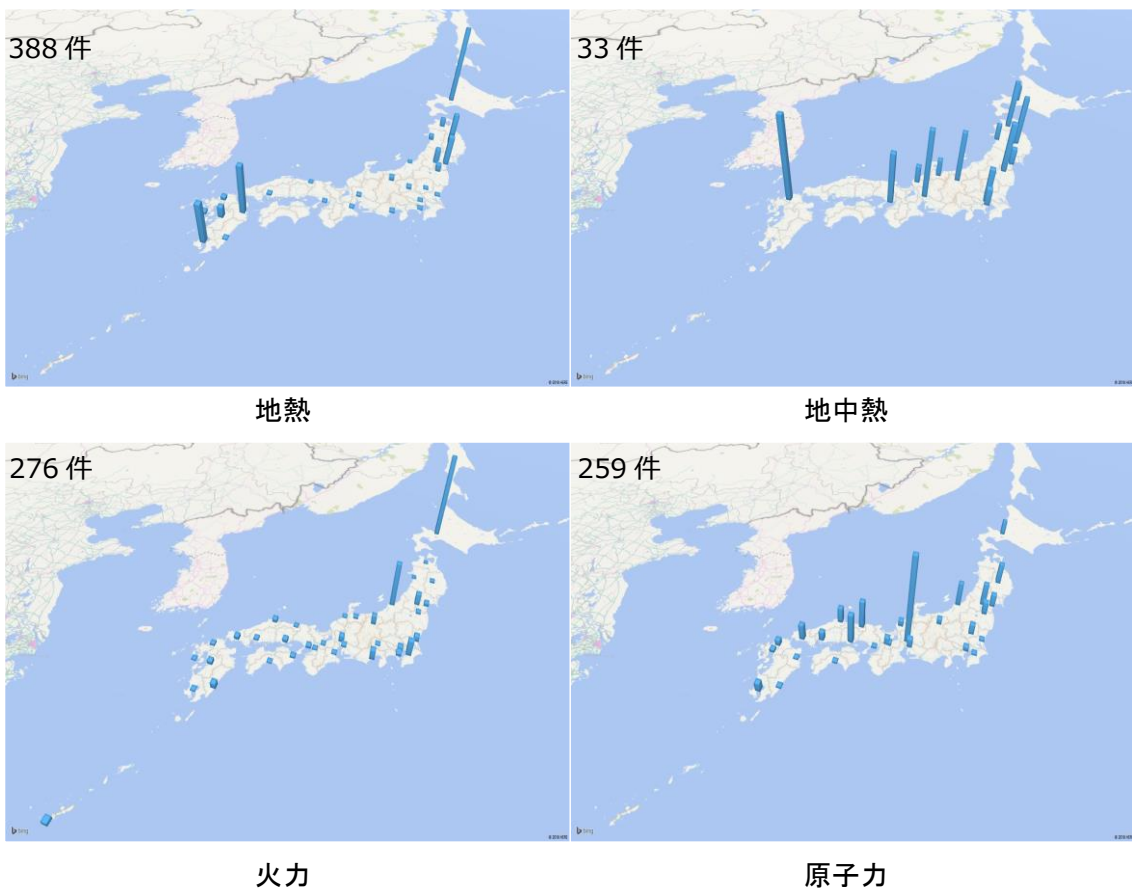


図 2.3-33 地域別出現数

災害

全文献 823,983 件の内、災害に関するキーワードを含む文献は 30,758 件であった。

図 2.3-34 には、年代別に色分けされた第 3 階層キーワード別の出現数を示し、図 2.3-35 には、発行年度別の出現数を示す。図 2.3-36_(a)、(b)、(c)には、第 3 階層キーワード高出現頻度順に 3 種を発行年度別に分類し第 4 階層キーワード別に色分けした分布図を示す。図 2.3-37 には、災害入地域属性キーワード（トピック）に該当した文献を都道府県別に分類し第 3 階層キーワード別に色分けした分布図を示す。図 2.3-38 には、図 2.3-37 において第 3 階層キーワードの出現数の高い順に 4 種の度数を地図上に示した分布図を示す。

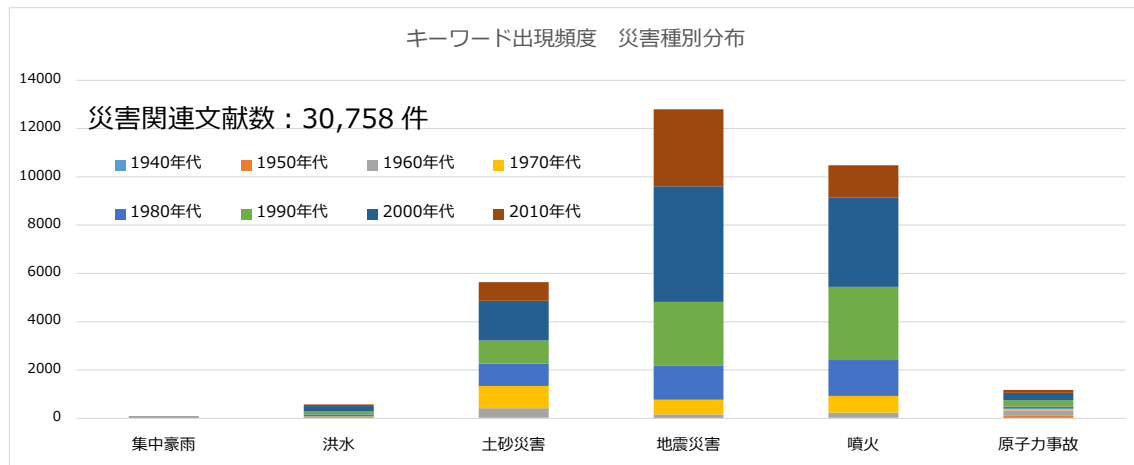


図 2.3-34 災害第 3 階層キーワード別出現数

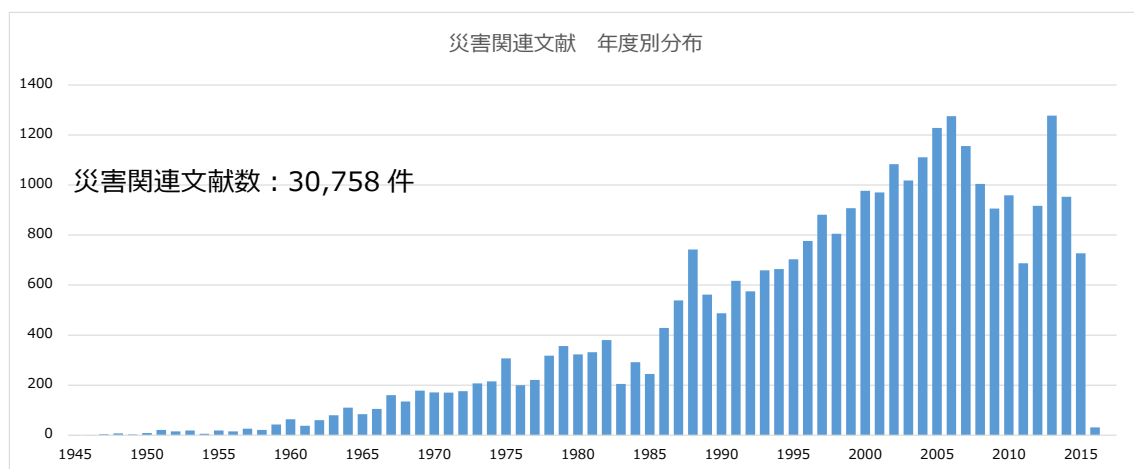
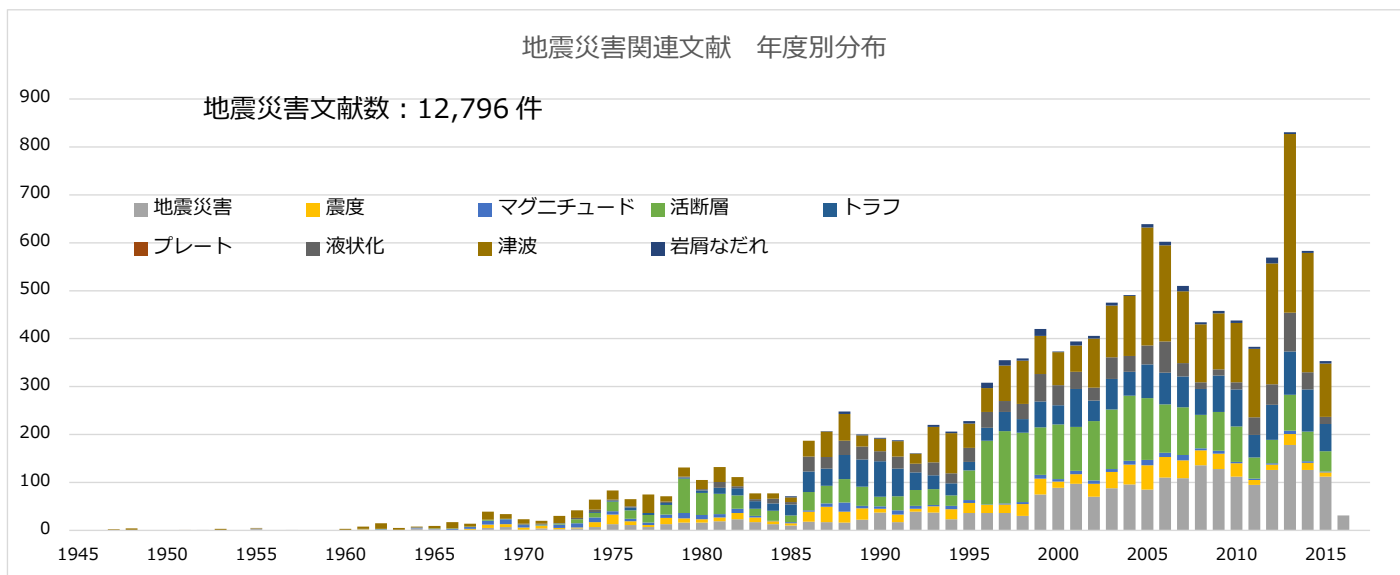
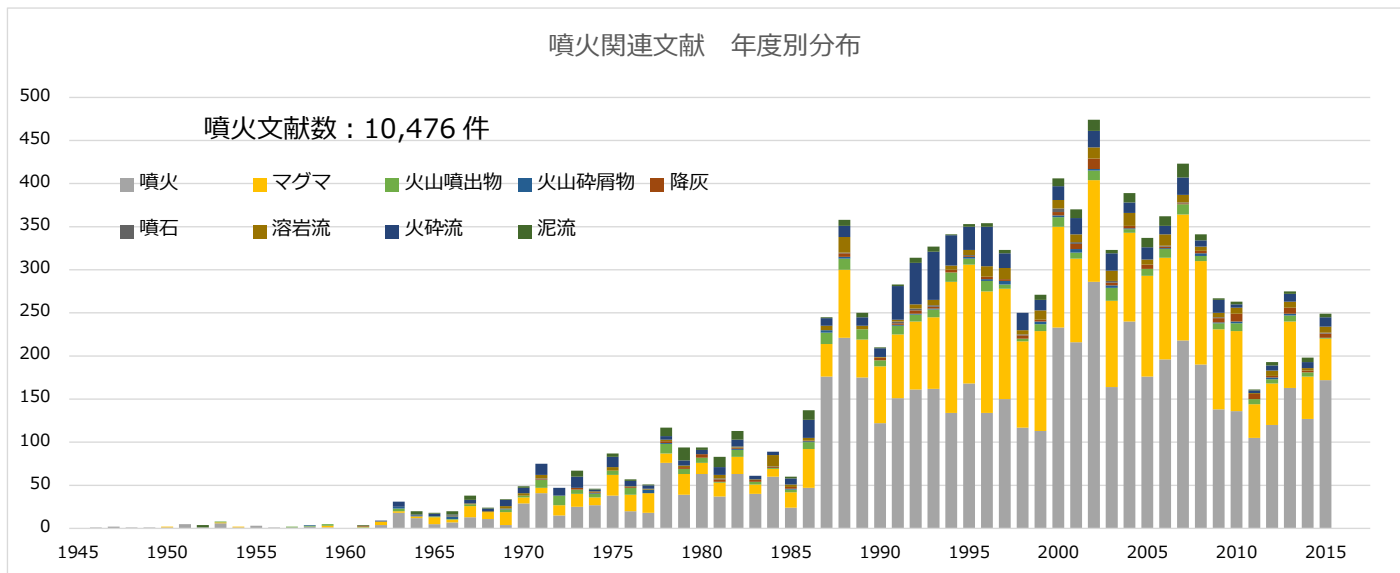


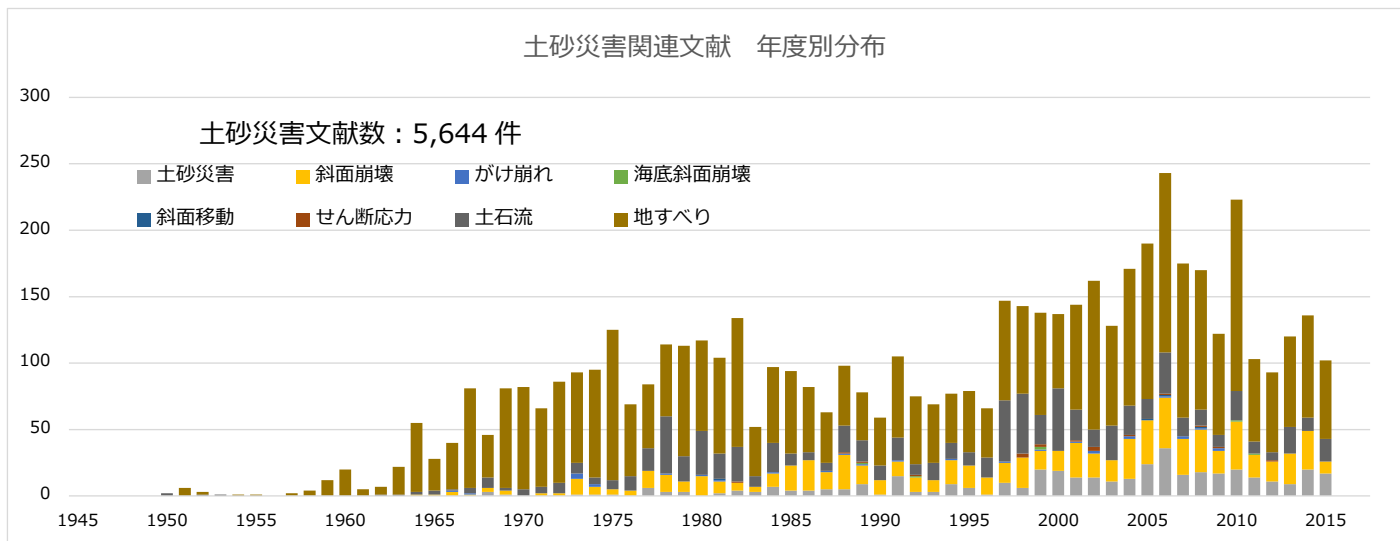
図 2.3-35 災害関連文献 発行年別出現数



(a) 地震災害関連文献



(b) 噴火関連文献



(c) 土砂災害関連文献

図 2.3-36 高頻度キーワード 年度別出現数

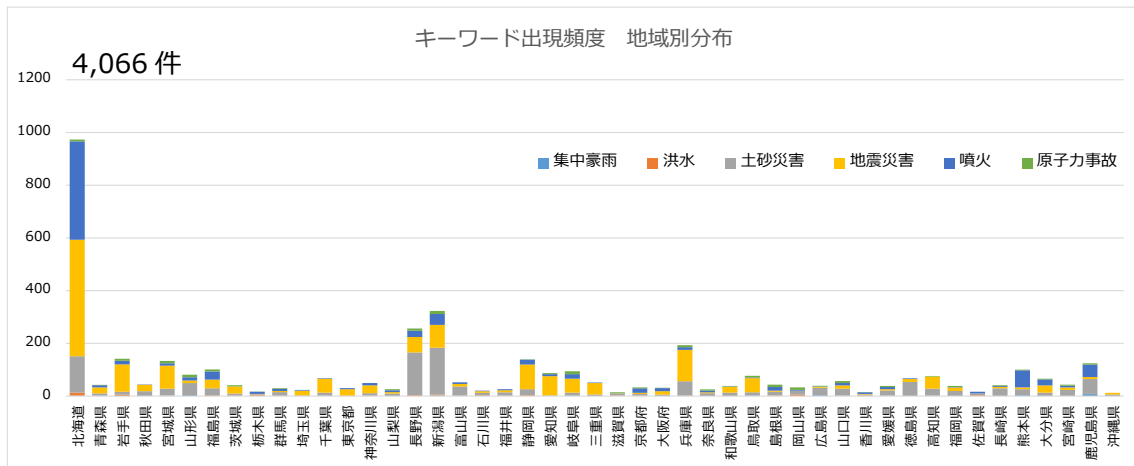


図 2.3-37 災害関連文献 都道府県別出現数

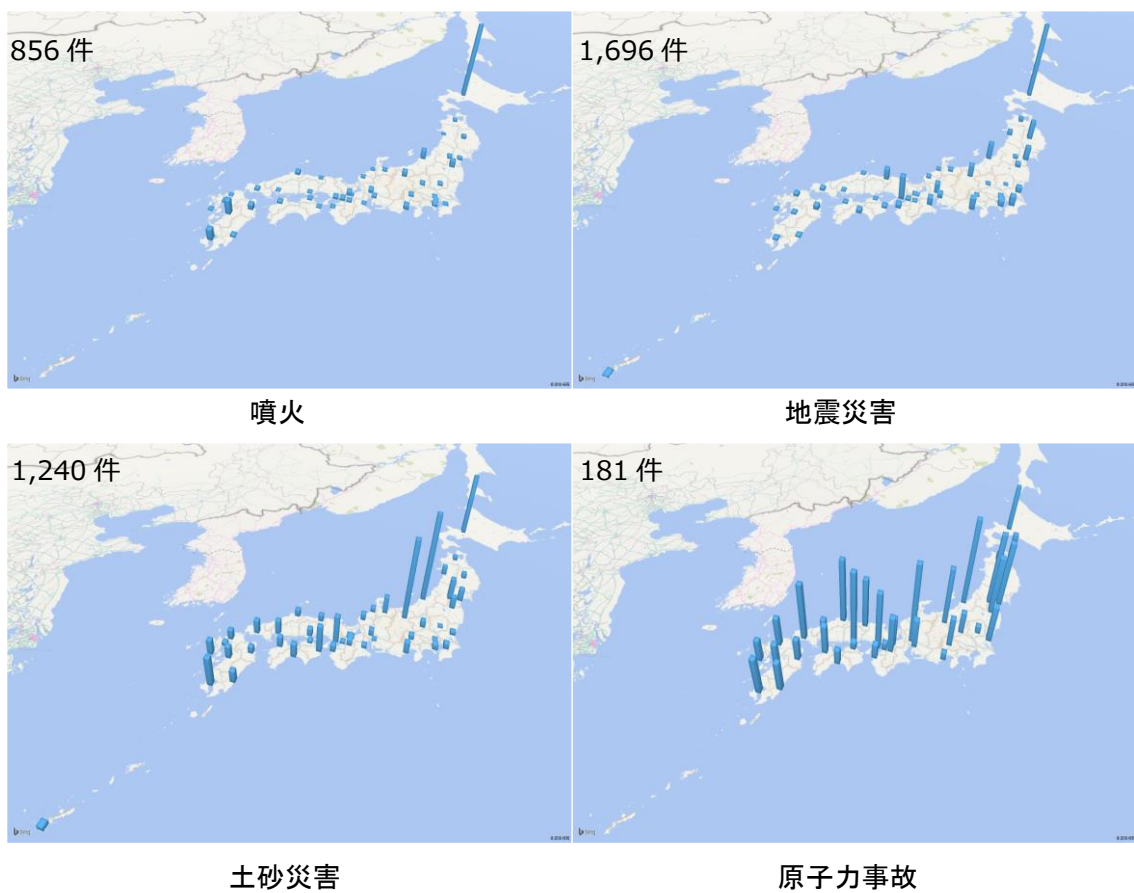


図 2.3-38 地域別出現数

地下水

全文献 823,983 件の内、地下水に関するキーワードを含む文献は 13,798 件であった。図 2.3-39 には、年代別に色分けされた第 2 階層キーワード別の出現数を示し、図 2.3-40 には、発行年度別の出現数を示す。図 2.3-41_(a)、(b)、(c)には、第 2 階層キーワード高出現頻度順に 3 種を発行年度別に分類し第 3 階層キーワード別に色分けした分布図を示す。図 2.3-42 には、地下水入地域属性キーワード（トピック）に該当した文献を都道府県別に分類し第 2 階層キーワード別に色分けした分布図を示す。図 2.3-43 には、図 2.3-42 において第 2 階層キーワードの出現数の高い順に 4 種の度数を地図上に示した分布図を示す。

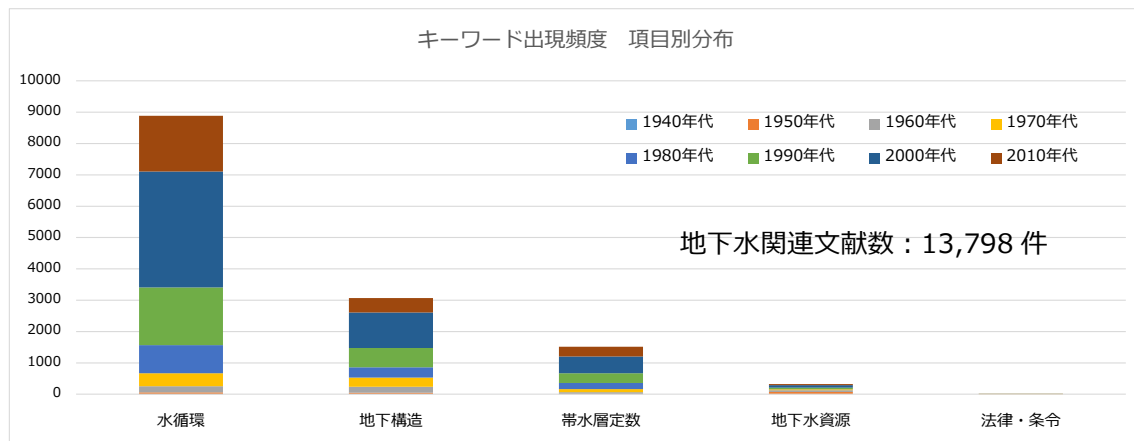


図 2.3-39 地下水第 2 階層キーワード別出現数

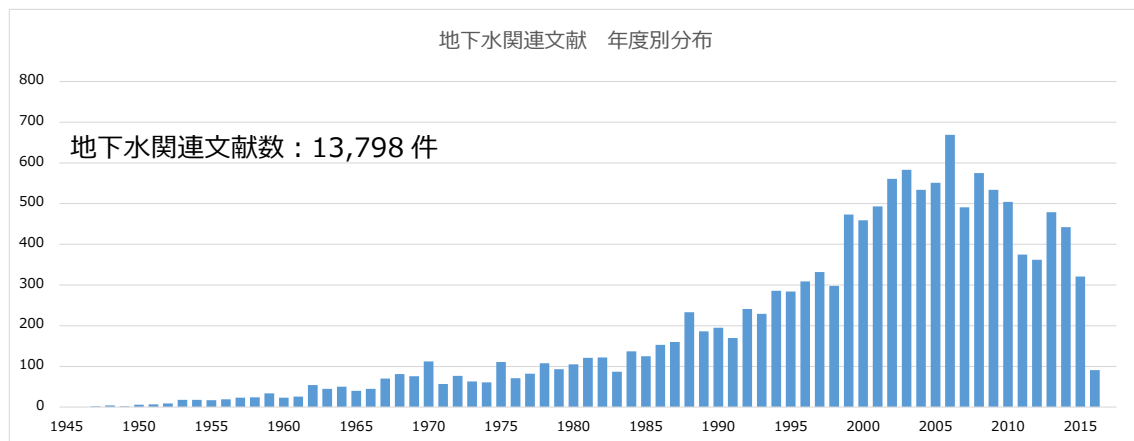
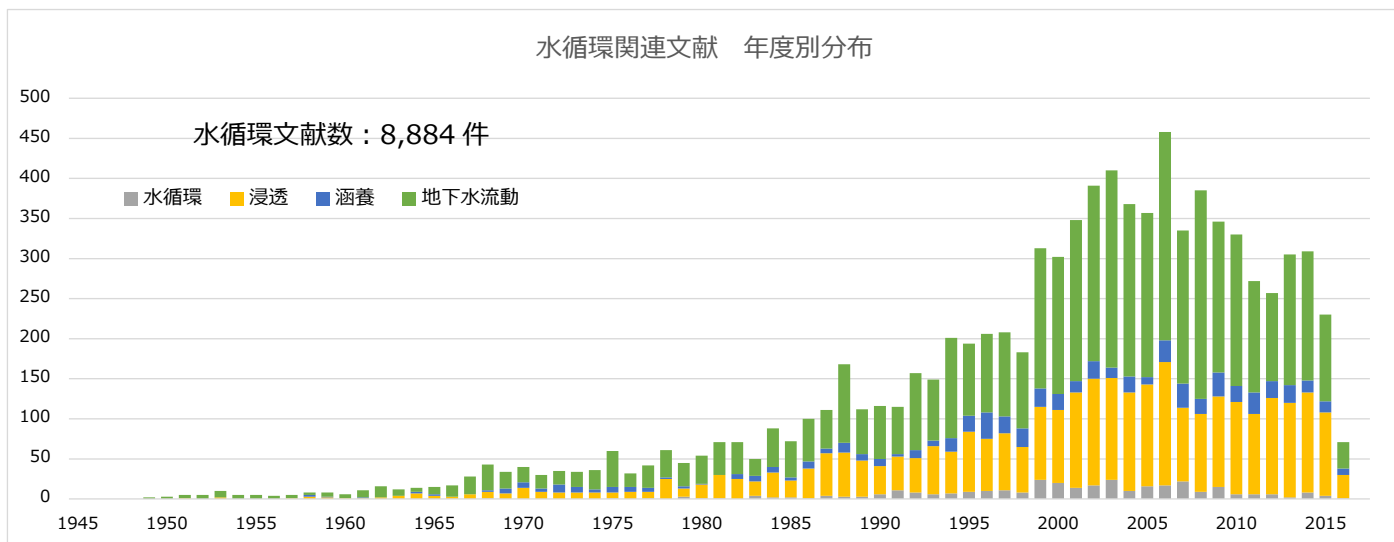
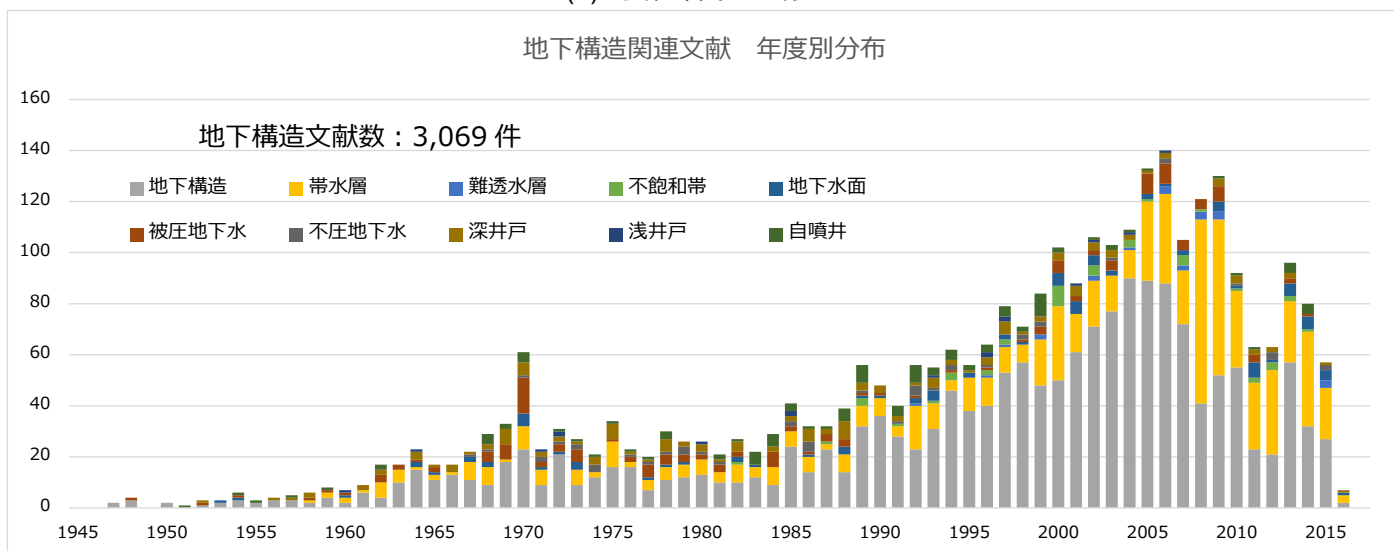


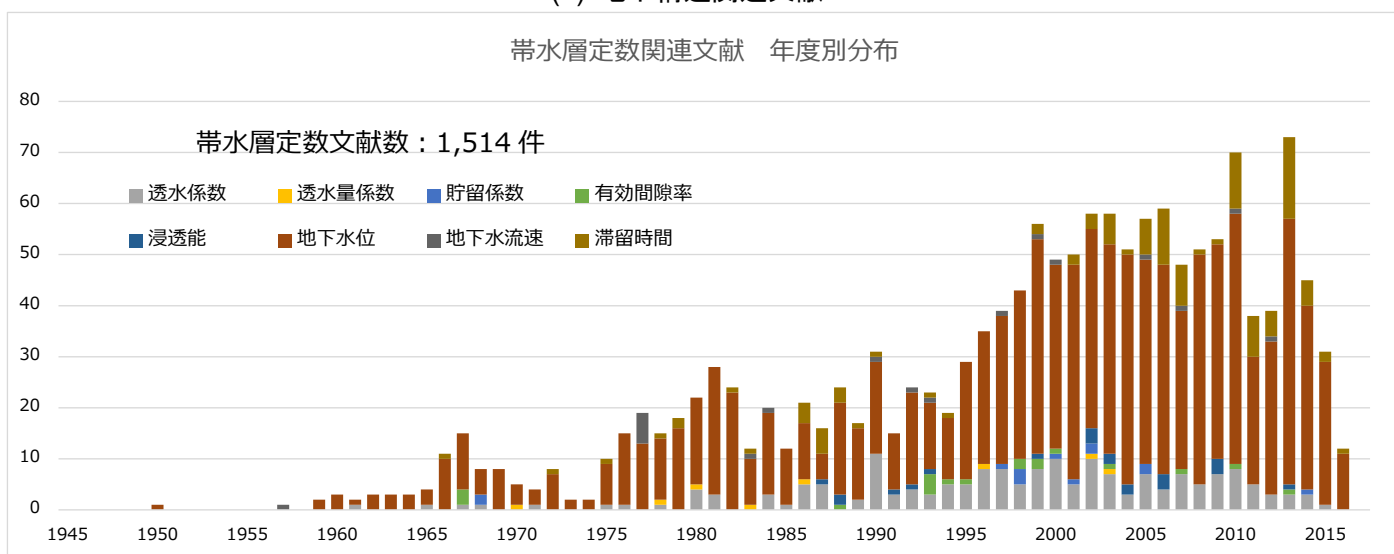
図 2.3-40 地下水関連文献 発行年別出現数



(a) 水循環関連文献



(b) 地下構造関連文献



(c) 帯水層定数関連文献

図 2.3-41 高頻度キーワード 年度別出現数

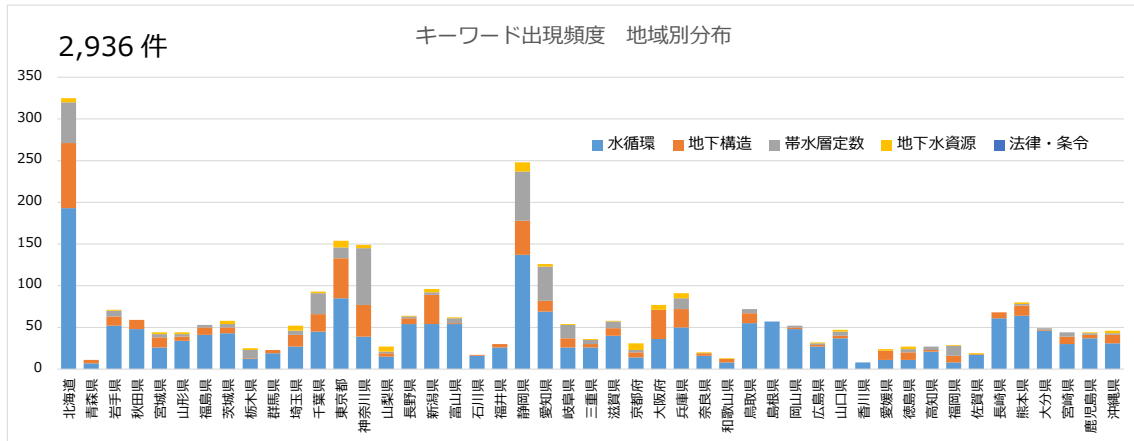


図 2.3-42 地下水関連文献 都道府県別出現数

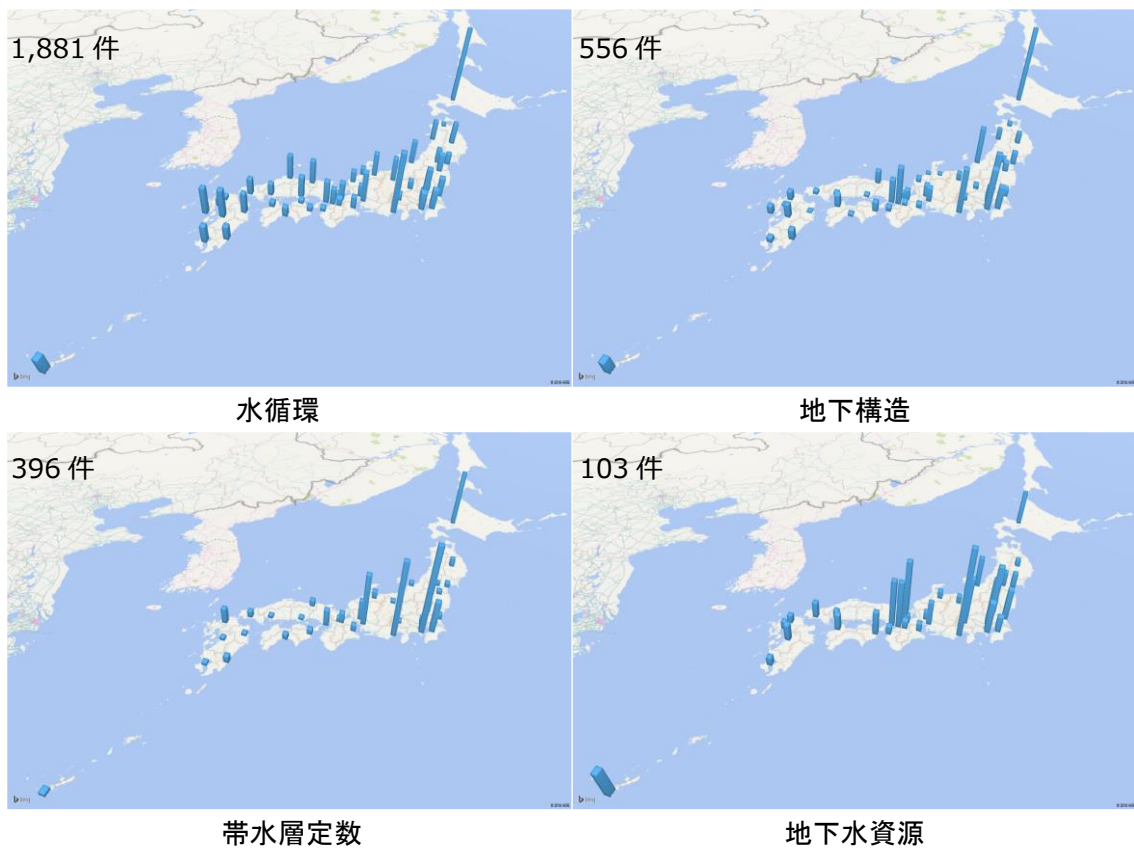


図 2.3-43 地域別出現数

地質年代

全文献 823,983 件の内、地質年代に関するキーワードを含む文献は 69,030 件であった。図 2.3-44 には、年代別に色分けされた第 2 階層キーワード別の出現数を示し、図 2.3-45 には、発行年度別の出現数を示す。図 2.3-46_(a)、(b)、(c)には、第 2 階層キーワード高出現頻度順に 3 種を発行年度別に分類し第 3 階層キーワード別に色分けした分布図を示す。図 2.3-47 には、地質年代^地域属性キーワード（トピック）に該当した文献を都道府県別に分類し第 2 階層キーワード別に色分けした分布図を示す。図 2.3-48 には、図 2.3-47 において第 2 階層キーワードの出現数の高い順に 4 種の度数を地図上に示した分布図を示す。

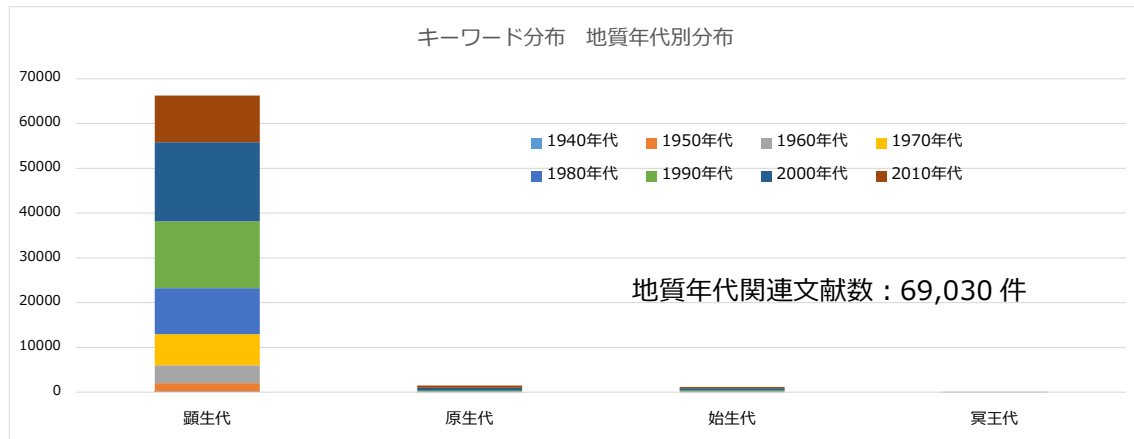


図 2.3-44 地質年代第 2 階層キーワード別出現数

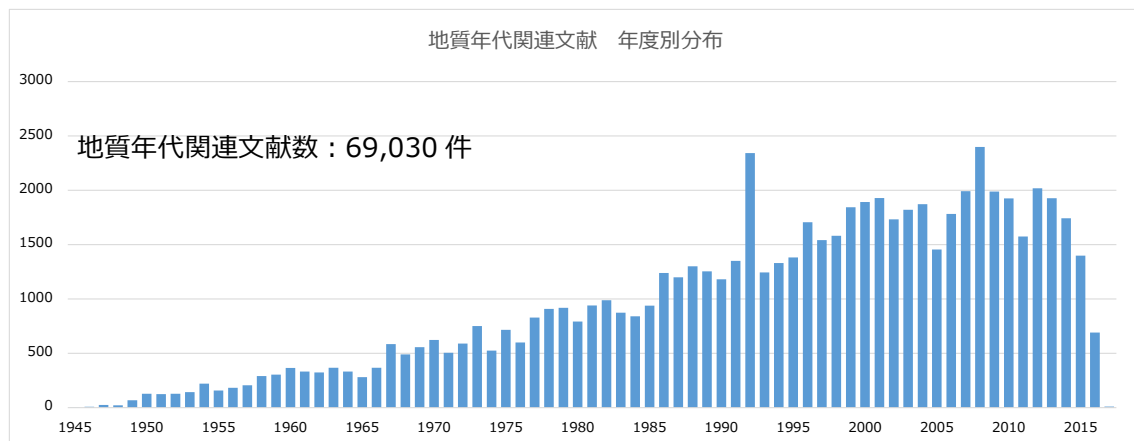
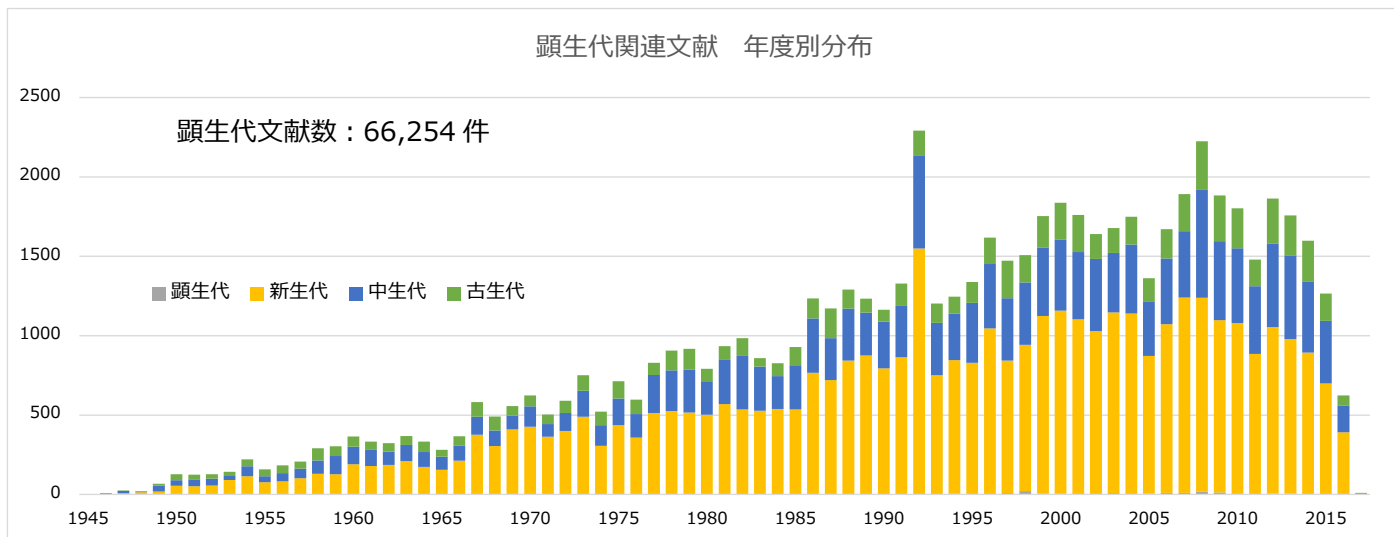
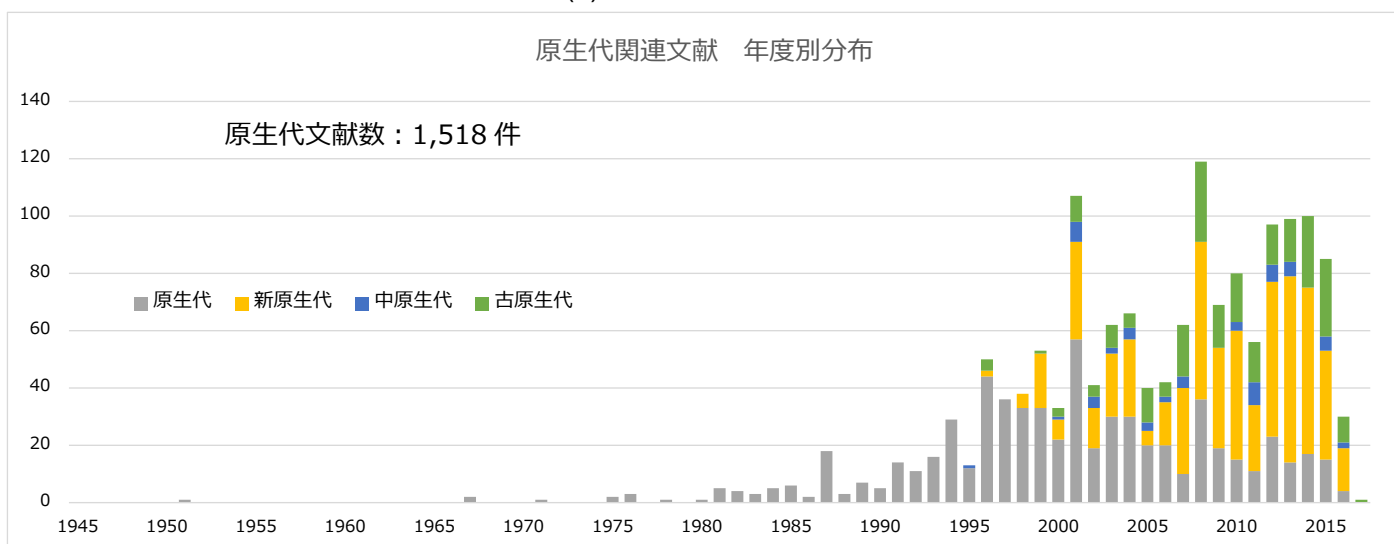


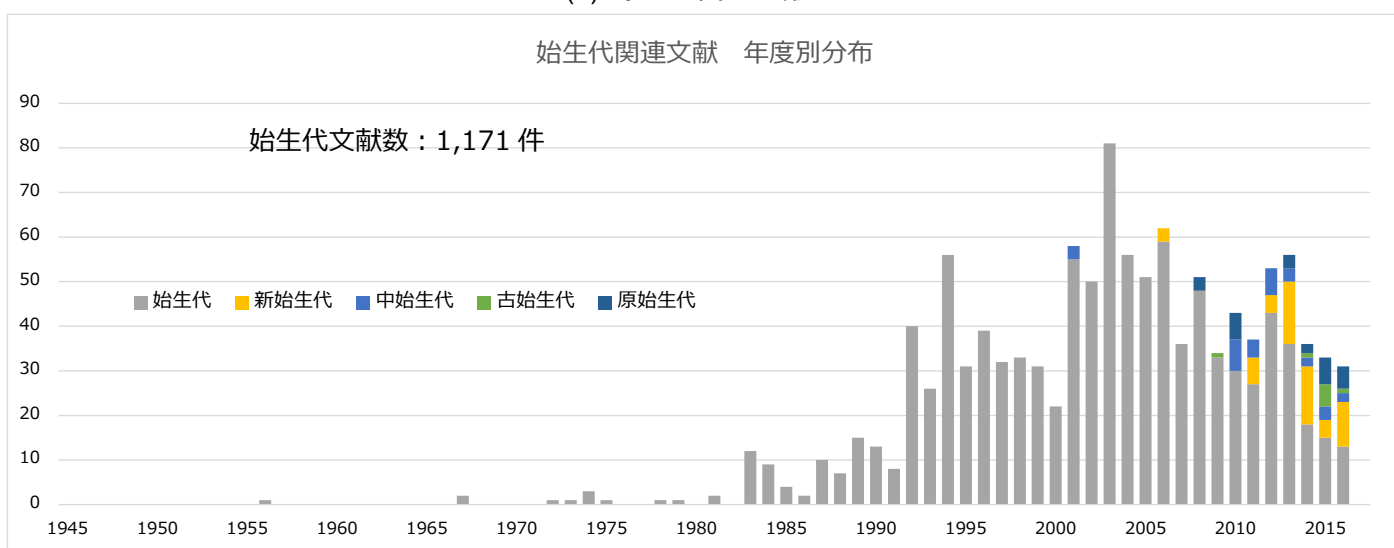
図 2.3-45 地質年代関連文献 発行年別出現数



(a) 顕生代関連文献



(b) 原生代関連文献



(c) 始生代定数関連文献

図 2.3-46 高頻度キーワード 年度別出現数

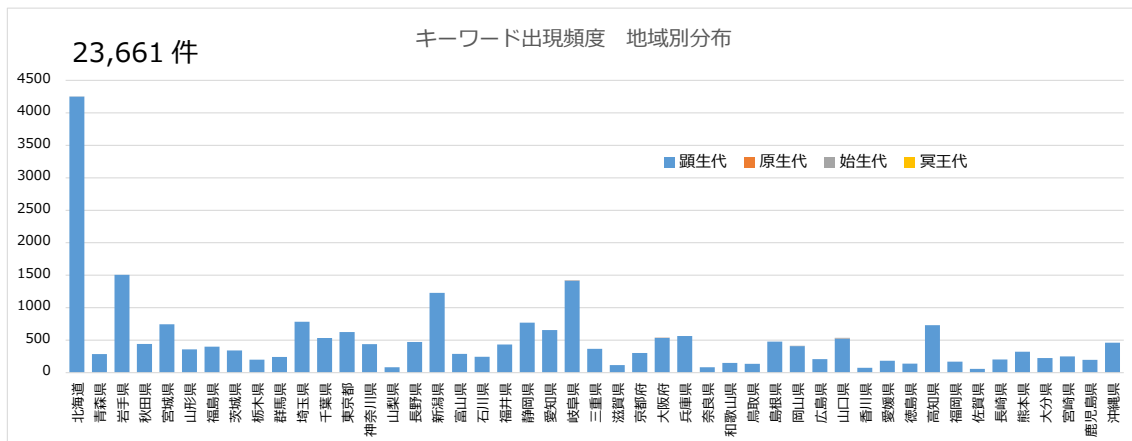


図 2.3-47 地質年代関連文献 都道府県別出現数

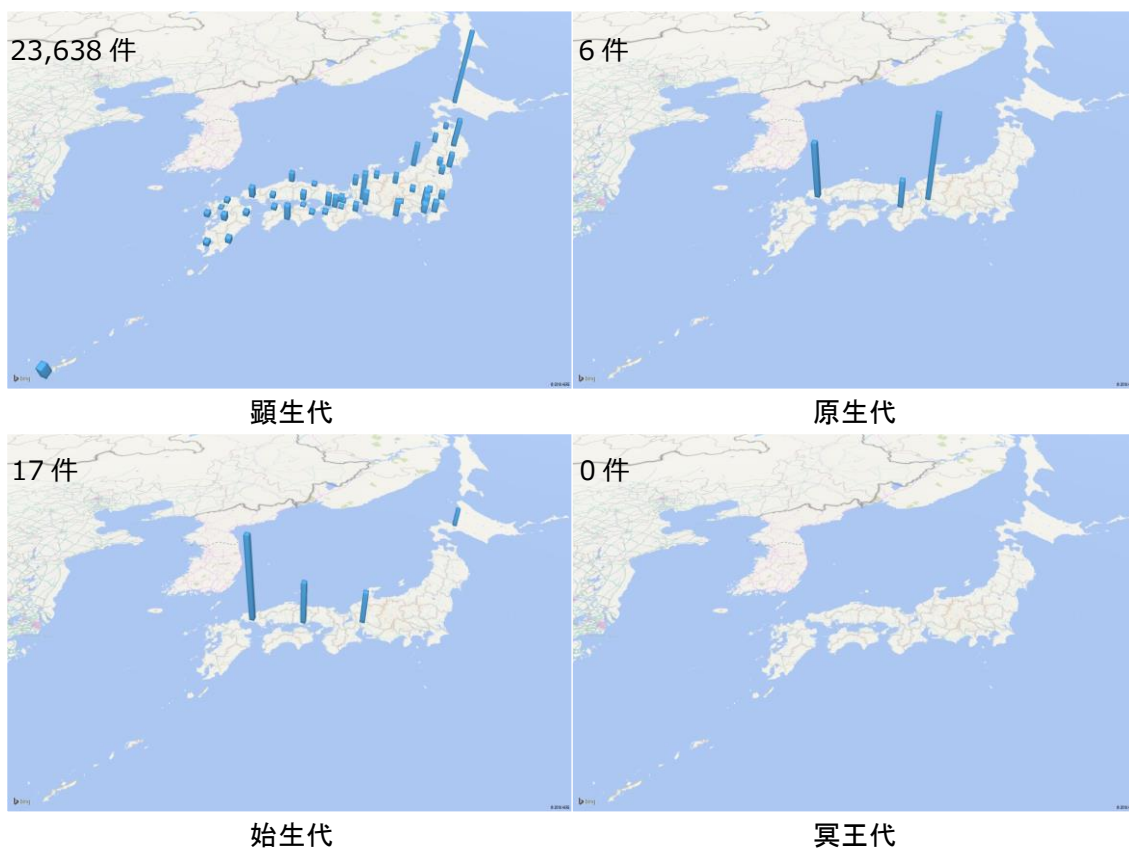


図 2.3-48 地域別出現数

(4) 考察

2.3 解析結果から各キーワードに対し推測される学術的背景、要因に関する考察、年代ごとの背景・ニーズとの関連付けを以降に記載し、最後に総括として今後地層処分研究のセ이프ティーケースを議論するうえで貢献できる統計解析結果について述べる。

表 2.3-3 は、地盤調査^地域キーワード（トピック）に該当した文献の出現数を示す。表 2.3-4 は、地盤調査^地形、地質、環境キーワード（トピック）に該当した文献の出現数を示す。表 2.3-5 は、地盤調査^エネルギー、災害、地下水、地質年代キーワード（トピック）に該当した文献の出現数を示す。

地域

日本全国の都道府県および市町村名を含む文献(地域関連文献)は 163,763 件あった。図 2.3-5 地域関連文献 発行年別文献数を見ると、文献数は 1945 年より増加していき 2005 年を境に少なくなる傾向となり、図 2.3 に示した全文献における傾向と一致した。

図 2.3-7、図 2.3-8 を見ると、最も出現数が多いのは”北海道”であり、2000 年代まで徐々に出現数が上昇している。2010 年代で出現数の増加幅が減少しているのは、全体の文献数が減っている為と考えられる。

また、”新潟県”は 2000 年代、“兵庫県”は 1990 年代で文献数が最も増加している。これは、新潟県中越地震(2004 年)、阪神淡路大震災(1995 年)による災害後調査・研究論文が増えた為と考えられる。

地形

地形に関するキーワードを含む文献は 244,848 件あった。図 2.3-10 より、文献数は 1945 年より増加していき 2005 年を境に少なくなる傾向がわかる。同傾向は、“地域”関連文献および全文献における傾向と一致する。

図 2.3-9、図 2.3-11 より、最も出現数の多いキーワードは”地殻変動”であり 129,762 件あった。このうち、約 60%の 76,584 件は、地震に関連する文献である。”地震”の出現数の増加数を見ると、1993 年までは 50 件前後の数で増えていくのに対し、1993 年以降は数百件単位に増加しており、地震に対する関心が深まっている事がわかる。1995 年には阪神淡路大震災が発生しており、要因の一つとして考えられる。

また、図 2.3-11 の(b) 海岸・海底地形関連文献を見ると、2011 年に”海岸”の出現数が高くなっている。2011 年には東日本大震災が起きており、津波災害が問題となった事で関連文献が増えたものと思われる。

図 2.3-12、図 2.3-13 より、都道府県別に見ても最も出現数の高いキーワードは”地殻変動”である。3.1 地域で述べた新潟県、兵庫県においては地殻変動の出現頻度が高く、震災の影響が考えられる。

地質

地質に関するキーワードを含む文献は 20,179 件あった。図 2.3-15 より、“地域”・”地形”と同様、文献数は 1945 年より増加していき 2005 年を境に少なくなる傾向となった。

図 2.3-14、図 2.3-16 より、最も出現数の多いキーワードは”泥”であり 3,890 件あった。このうち、約 75%の 2,865 件は”粘土”に関連する文献、約 25%の 948 件は”泥”に関する文献であり”シルト”に関する文献は 77 件とほとんど出現していない結果となった。”粘土”については、1947 年に計測され以降数十件の出現数を維持しており、古くから調査・研究されている項目と言える。“粘土”と同じ傾向は図 2.3-16 の(b)にある”火山岩”にも見られた。

図 2.3-15、図 2.3-16 より、地質に関するキーワードを含む文献に共通している傾向として、2011 年に出現数が減少している事が挙げられる。2011 年には東日本大震災が発生しており、震災に関わる文献が上昇した代わりに地質に関する文献が減少したものと思われる。

地盤調査

地盤調査に関するキーワードを含む文献は 16,797 件あった。図 2.3-20 より、“地域”・“地形”と同様、文献数は 1945 年より増加していき 2005 年を境に少なくなる傾向となった。

図 2.3-19、図 2.3-21 より、最も出現数の多いキーワードは“物理探査・検層”であり 7,543 件あった。このうち、約 50%の 3,606 件は“弾性波探査”に関連する文献、約 30%の 2,203 件は“速度検層”に関する文献であり、この二つが“物理探査・検層”の 80%を占めている。特に、“弾性波探査”をみると 1980 年代後半から出現数が倍近く増加しており、以降も 2010 年まで出現数が増加し続けている。これは、1980 年代に入りデジタル技術が発展した事によるものと思われる。

“弾性波探査”においてはデジタル技術を利用した反射法の研究が活断層調査や土木地質調査の分野でも行われるようになり、調査・研究論文が増加したものと考えられる(参考資料 9)

デジタル技術発展による影響は図 2.3-21 の(b)地下水調査関連文献にもみられる。“地下水シミュレーション”は 1970 年頃から文献が出始め、1995 年前後を境に頻出する傾向が見られる。1970 年から 1980 年代については、数値解析の一種である有限要素法が広まり始めたのが 1970 年代であり、関連する論文が計測されたものと思われる(参考資料 8)

また、1995 年前後から出現数が増える点については、パーソナルコンピュータの普及とともにシミュレーション技術が広まった為と考えられる。

環境

環境に関するキーワードを含む文献は 2,453 件あった。図 2.3-25 より、年度別の文献数は“地域”・“地形”と同傾向であった。

図 2.3-24、図 2.3-26 より、最も出現数の多いキーワードは“地盤沈下”であり 1,045 件あった。このうち、約 80%の 789 件は“地盤沈下”という単語で計測された文献であった。“地盤沈下”の出現数を見ると 1970 年代から 1980 年代前半に頻出している事が判る。同時期においては、高度経済成長の過程で地下水を過剰摂取したことによる地盤沈下が社会問題となっていた。対策としてビル用水法が制定されたのが 1962 年であり、その後は地下水の揚水が規制された。1970 年代においては、揚水規制後の調査等の文献が計測されたものと考えられる。図 2.3-28 より“地盤沈下”の出現数の多い都道府県をみると、新潟県(南魚沼)、千葉県(九十九里平野)、東京都・埼玉県(関東平野)、大阪府(大阪平野)、佐賀県(筑後・佐賀平野)といずれも地盤沈下が激しい箇所である(参考資料 10)

図 2.3-26 の(b)土壤汚染関連文献を見ると、“土壤汚染対策法”が 2003 年より計測されている事が判る。同法の施行が 2003 年である為、正しく計測できていると言える。施行の背景として有害物質による土壤汚染が問題となっていたことが挙げられるが、“砒素”の出現数が“土壤汚染対策法”の数年前から上昇しており、要因の一つだったことが伺える。同じく有害物質として考えられる“重金属”は 1970 年頃より出現しているが、これについては 1971 年に施工された水質汚濁防止法による調査・研究が進んだものと思われる。

また、図 2.3-26 の(c)水質汚濁関連文献では、1988 年から“地下水汚染”に関連する文献が増加している事が判る。この背景には、廃棄物の処理および清掃に関する法律が関わっているものと思われる。同法は 1990 年代、2000 年代に何度も改正されており、地下水汚染に関わる文献も継続的に出ていたことが考えられる。

エネルギー

エネルギーに関するキーワードを含む文献は 10,563 件あった。図 2.3-30 より、年度別の出現数を見ると 1960 年頃より 100 から 250 件の間を推移しており、全体の文献数と関わりなく一定数の文献が存在する傾向が見られた。

図 2.3-29、図 2.3-31 より、最も出現数の多いキーワードは”地熱”であり 5,072 件と”エネルギー”関連文献の約 90%を占めている。地熱発電の研究は 1945 年以前より行われていたが、実用的となったのは松川地熱発電所が営業運転を始めた 1966 年である。出現数も同年より上昇している。図 2.3-33 より”地熱”の出現数の多い都道府県をみると、北海道、岩手県、宮城県、大分県、鹿児島県といずれも地熱発電所が設置されている箇所である。

図 2.3-31 の(c)には原子力関連文献の関連キーワード別度数分布を示した。1961 年に”核燃料”の出現数が大きく上昇している。これは同年に決定した原子力開発利用長期計画による影響が考えられる(参考資料 11)

災害

災害に関するキーワードを含む文献は 33,051 件あった。図 2.3-35 より、年度別の文献数は”地域”・”地形”と同傾向であった。

図 2.3-34、図 2.3-36 より、最も出現数の多いキーワードは”地震災害”であり 12,796 件あった。地震災害関連文献を見ると、2013 年前後で”津波”の出現数が高くなっており、東日本大震災(2011 年)の影響が見られた。一方、津波による被害がなかった阪神淡路大震災(1995 年)の時期では出現数に変わり無く、地震を起こした活断層の文献が増えている傾向が見られた。

図 2.3-36 の(b)噴火関連文献を見ると、“噴火”に関連する文献は 1987 年頃より頻出しており、“マグマ”、“火山灰”、“火砕流”といった関連キーワードも同年を境に出現数が上昇している。国内では噴火が多発しており因果関係の特定には至らなかったが、1987 年前後の火山噴火には大島噴火(1986 年)、三宅島噴火(1983 年)が挙げられる。“火砕流”については特に 1991 年より出現数が上昇しているが、これは同年の雲仙岳噴火による火砕流が問題となった事が挙げられる。

地下水

地下水に関するキーワードを含む文献は 13,798 件あった。図 2.3-40 より、年度別の文献数は”地域”・”地形”と同傾向であった。

図 2.3-39、図 2.3-41 より、最も出現数の多いキーワードは”水循環”であり 8,884 件あった。

“地下水”に関連するキーワードに共通する傾向は、図 2.3-21 の(b)地下水調査関連文献にも見られ、地下水調査手法の発展とともに地下水に関わる文献が増えている事が判る。

また、図 2.3-43 より都道府県別の出現数をみると”水循環”は全国的に分布しており調査が盛んにおこなわれていることが判る。

地質年代

地質年代に関するキーワードを含む文献は 69,030 件あった。図 2.3-45 より、年度別の文献数は”地域”・”地形”と同傾向であった。

図 2.3-44、図 2.3-46 より、最も出現数の多いキーワードは”顕生代”であり 66,254 件と”地質年代”関連文献の約 95%を占めている。“顕生代”については過去より文献が見られるが、“原生代”、“始生代”については 1980 年以降で分布が見られる。これについては、原生代や始生代は顕生代と異なり終わりの年代について明瞭な地質学的事項がなく年代の定義が曖昧である

為、まだ研究が進んでいない事が考えられる。

また、地質年代に関しては、国際層序委員会(International Commission on Stratigraphy, ICS)により基底年代が随時改訂されている為、過去の文献を現代に反映する際に留意する必要がある。

地層処分研究

地層処分研究としては、属性キーワードのエネルギーに関するキーワードとして、“原子力”を設定し出現数、年代を計測した。“原子力”に関する文献は 1,694 件計測され、このうち約 20%の 310 件が“地層処分”に関する文献であった。

ここまで解析結果に対し、国内で発生した年代ごとの背景、また技術の発展といった学術的背景から各キーワードの出現数・年代について関連付けを行った結果として、実社会における要因(科学の発展、災害等)の発生前後で関連するキーワードの頻出が見られ、システムが正しく動作する事を確認した。今後は、精度向上の為、“地層処分”に関連するキーワードを細分化して追加する事が重要である。具体的には、処分箇所に関わる地質や安全評価や解析に関わる要件、地下水用語などが考えられる。これらキーワード・トピックを充実させる事で地層処分研究に貢献できる統計解析ができると考える。

表 2.3-3 地盤調査手法 地域別出現数

属性キーワード		物理探 査・検層	ボーリン グ	サンプ リング	サウン ディング	地下水調 査	載荷 試験	現場密度 試験	現場 計測	
地域	東日本	北海道	106	89	7	1	165	0	0	49
		青森県	3	5	0	1	4	0	0	0
		岩手県	33	14	1	0	9	0	0	12
		秋田県	8	14	0	4	3	0	0	2
		宮城県	41	12	0	1	8	0	0	5
		山形県	5	2	2	0	5	0	0	4
		福島県	12	4	3	0	8	0	0	4
		茨城県	15	14	1	1	11	0	0	7
		栃木県	11	2	0	0	4	0	0	4
		群馬県	6	9	1	1	2	0	0	1
		埼玉県	43	24	0	1	12	1	0	6
		千葉県	13	10	0	0	5	1	0	7
		東京都	36	33	4	1	23	0	0	17
	神奈川県	14	43	0	1	7	0	0	3	
	西日本	山梨県	4	1	0	0	2	0	0	4
		長野県	24	19	5	0	25	0	0	11
		新潟県	57	32	3	3	17	0	0	18
		富山県	5	3	0	1	2	0	0	1
		石川県	6	3	0	0	7	0	0	2
		福井県	2	1	0	0	3	0	0	2
静岡県		22	65	0	2	17	0	0	16	
愛知県		13	19	3	1	9	0	0	5	
岐阜県	24	14	1	3	8	0	0	23		
三重県	5	44	1	1	2	0	0	9		

表 2.3-3 地盤調査手法 地域別出現数 (続き)

属性キーワード		物理探 査・検層	ボーリン グ	サンプ リング	サウン ディング	地下水調 査	載荷 試験	現場密度 試験	現場 計測	
地域	西日本	滋賀県	4	10	0	2	6	0	0	1
		京都府	13	9	0	0	4	0	0	4
		大阪府	17	50	0	0	7	0	0	8
		兵庫県	51	21	0	0	13	0	0	26
		奈良県	4	0	0	0	1	0	0	0
		和歌山県	14	15	0	0	0	0	0	1
		鳥取県	42	0	3	1	12	0	0	6
		島根県	0	8	0	1	1	0	0	1
		岡山県	6	5	0	0	4	0	0	0
		広島県	0	5	0	0	6	0	0	5
		山口県	10	9	3	0	3	0	0	13
		香川県	1	4	0	0	0	0	0	0
		愛媛県	3	9	0	0	3	0	0	6
		徳島県	5	1	0	0	2	0	0	1
		高知県	4	13	0	0	4	0	0	11
		福岡県	13	3	0	0	3	0	0	4
		佐賀県	0	0	0	0	5	0	0	1
		長崎県	6	70	2	1	13	0	0	1
		熊本県	4	9	0	0	6	0	0	4
		大分県	8	1	0	0	56	0	0	1
宮崎県	1	0	1	0	2	0	0	1		
鹿児島県	20	14	1	2	6	0	0	5		
沖縄県	7	22	2	3	8	0	0	3		

表 2.3-4 地盤調査手法 地形、地質、環境別出現数

属性キーワード		物理探 査・ 検層	ボーリン グ	サンプ リング	サウン ディング	地下水 調査	載荷 試験	現場密 度試 験	現場 計測		
地形	風成地形	3	3	0	0	3	0	0	9		
	浸食地形	50	17	0	0	11	0	0	10		
	海岸・海底地形	790	236	44	15	188	9	0	190		
	河成地形	223	120	8	2	167	1	0	59		
	氷河地形	0	3	0	0	2	0	0	6		
	斜面・平面地形	421	131	1	1	104	0	0	24		
	火山地形	22	16	0	1	3	0	0	3		
	人工地形	148	55	2	3	49	6	0	60		
	地殻変動	2110	421	64	19	344	10	0	498		
地質	未固結 堆積層	礫	0	0	1	0	1	0	0	5	
		砂礫	2	2	3	0	0	2	0	0	
		砂	14	5	9	1	18	3	0	21	
		ローム	3	3	1	0	2	1	0	0	
		泥	22	12	8	0	3	8	0	17	
		火山灰	0	14	2	0	1	0	0	2	
		泥炭	2	0	2	1	4	0	0	0	
	岩盤	堆積岩	4	2	3	0	13	3	0	24	
		火成岩	17	2	3	0	5	0	0	4	
		火山砕屑岩	0	1	0	0	0	0	0	0	
		凝灰岩	0	0	0	0	1	0	0	1	
		変成岩	7	0	0	0	1	0	0	3	
	環境	公害	大気汚染	0	0	0	0	1	0	0	0
			水質汚濁	2	2	0	0	5	0	0	1
土壤汚染			5	1	1	0	1	0	0	1	
騒音			4	1	0	0	10	1	0	3	
振動			0	0	0	0	0	0	0	0	
悪臭			0	0	0	0	1	0	0	2	
地盤沈下			60	11	0	1	47	15	0	37	

表 2.3-5 地盤調査手法 エネルギー、災害、地下水、地質年代別出現数

属性キーワード		属性	理探査・検層	ボーリング	サンプリング	サウンディング	下水調査	載荷試験	易密度試験	現場計測
エネルギー	再生可能エネルギー	太陽光	155	19	1	0	10	0	0	10
		水力	7	0	0	0	2	0	0	5
		風力	0	0	0	0	1	0	0	0
		地熱	33	5	1	0	2	0	0	6
		地中熱	34	1	0	0	3	0	0	5
		バイオマス	41	27	5	2	197	3	0	78
	化石燃料	火力	352	21	2	1	47	1	0	52
	原子力	5	7	5	0	32	0	0	22	
災害	自然災害	集中豪雨	292	50	2	3	26	2	0	43
		洪水	9	10	2	0	11	0	0	15
		土砂災害	10	2	1	0	8	0	0	9
		地震災害	0	0	0	0	0	0	0	0
		噴火	2	2	0	0	0	0	0	0
	人的災害	原子力事故	0	0	0	0	0	0	0	0
地下水	水循環	2	3	0	0	8	0	0	1	
	地下構造	0	0	0	0	0	0	0	0	
	評価数値	32	217	4	2	48	1	0	44	
	地下水資源	0	0	0	0	4	0	0	1	
	法律・条令	0	15	0	0	0	0	0	0	
地質年代	顕生代	0	0	0	0	0	0	0	0	
	原生代	0	0	0	0	0	0	0	0	
	始生代	0	0	0	0	0	0	0	0	
	冥王代	0	0	0	0	0	0	0	0	

(5) 今後の展望、課題

本業務では、地球科学文献の形態素解析・時系列分析を実施し、統計解析用のデータ出力および可視化を行うシステムを開発し、解析結果を分析した。解析結果の分析においては、国内で発生した震災や施行された法律・条令といった年代ごとの背景、また技術の発展といった学術的背景から各キーワードの出現頻度・年代について関連付けを行った。

結果として、実社会における要因(科学の発展、災害等)の発生前後で関連するキーワードの頻出が見られ、システムが正しく動作する事を確認した。

今後は、キーワードを検出する手法を改良しキーワードごとの出現数、関連付けを向上させる事、解析結果をより判り易い形で可視化する事が考えられる。具体的には、出現数の向上においては、本業務では文献のタイトルから各キーワードを抽出していたが、論文に記載するキーワード(関連語句)や著者名、雑誌・学会名からも抽出することで、各キーワードの出現数評価の向上が見込まれる。解析結果の可視化においては、システムから出力されるデータのデータベース化、データベースを利用したGISシステムの開発が考えられる。これにより、図 2.3.1-(5)のように日本全土を俯瞰したものではなく、地図を自由に拡大し都道府県で

はなく、処分事業を考慮した市町村レベルで結果を表示させることが可能となる。また、国土地理院で公開されている国土数値情報を GIS システムに適用することで河川流域や海岸線等に応じた結果表示が可能となる。

2.3.3 沿岸部の地質環境情報の整理・集約

本節では、沿岸部の自然現象・地下水長期安定性に関わる研究結果として、平成 27 年度（産業技術総合研究所ほか, 2016）および平成 28 年度地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発報告書（産業技術総合研究所ほか, 2017）、（以下、平成 27 年度報告書、平成 28 年度報告書）を対象に、研究結果から得られたノウハウの整理を行い、分野内および分野間の作業（タスク）の構築および関連する専門分野固有の知識（領域知識）の整理を行った。

研究結果の方法等が示されるタスクは、一つの課題を検討する上での作業方法や考え方等が示されることや、タスクに関連した考察や結果等の領域知識が整理できること、さらに、これらタスクの組み合わせや連携は、検討を進める上での領域知識の選択や判断、理解の展開のためのフレームとして、エキスパートシステム（ES）の構成要素になり得ることが考えられる。

したがって、タスクおよび知識の整理では、最初に、上記報告書から研究結果のノウハウとなる記載内容から、「領域知識」、「タスク」、「事例」および「一般知識」の四つの観点からスクリーニング調査から内容の分類を行い、次に、分類した研究結果のタスクに着目して、従来の ES の構成を参考にしながら、タスクの整理、タスク間の連携とルールベース化の検討、タスクと領域知識の整理票を作成した。

(1) 研究結果の調査と内容の分類

沿岸部の自然現象・地下水長期安定性に関わる研究結果から得られたノウハウの整理を行い、分野内および分野間の作業（タスク）の構築および関連する専門分野固有の知識（領域知識）の整理を実施した。

まず、平成 27 年度報告書、平成 28 年度報告書を対象に、報告書の構成に基づいて記載内容の特徴を「領域知識」、「タスク」、「事例」および「一般知識」の四つに分類・整理した（表 2.3-6 参照）。なお、分類に供した報告書の範囲は、平成 27 年度報告書が「3.沿岸域における地質環境の調査技術の高度化開発」、「4.沿岸域の研究に資する工学技術の高度化開発」、「5.沿岸部における安全評価技術の高度化開発」、平成 28 年度報告書が「2.沿岸部における地質環境の調査技術の高度化開発」である。

分類・整理の結果、平成 27 年度報告書は領域知識と事例に分類されたが、平成 28 年度報告書は検討方法などのタスクを分類、抽出することが可能となった。

表 2.3-6 研究結果の調査で実施した分類の定義

分類	定義
領域知識	当該分野の専門的知識の解説、技術的知見、概要など
タスク	専門知識を利用して実施される作業や解析、評価など（主として作業題目や作業目的として示すもの）
事例	対象が特定のまたは具体的に示されるもの
一般知識	当該分野以外または学術一般的な知識や参考文献など

(2) 研究結果から得られたタスクおよび領域知識の整理

本節では、分類結果を基に、特にタスクの分類に着目して、ノウハウや領域知識の理解や利用のための整理とタスク間の基本構成について従来のエキスパートシステム（ES）の構成を参考にしながら、タスクの連携（タスクフロー）について検討・整理を行なった。ここでは、大項目に集約されるタスクを ES と位置付け、ES に連なる最上流のタスクを主要タスクとして定義して整理するとともに主要タスクの下流に連なるタスク間の連携（タスクフロー）を

整理した。さらに、タスク間の分岐におけるルールベース化の検討を行った。最後に、主要タスクの目的や内容を理解するために領域知識を整理票形式でまとめた。

1) タスクフローにおけるルールベース化の検討

エキスパートシステムでは、タスク間の連携において、ユーザのニーズに基づいた項目の選択や数値の入力が行なわれる。エキスパートシステムにおけるルールベース化は、専門家によって行なわれ、ルールは決定木形式と真理表形式により記述される。一般的に、決定木はある集合内における要素あるいは状況を入力として受け取り、それに対して意思決定を助けることを目的として「If (A) /Then (X) : (もし要素がAならば決定はX等)」で出力する木構造形式で表現されるモデルである。したがって、対象を階層的に分類するのに適している。これに対して真理表は、ある集合内の要素の考えられる組み合わせを表現するのに適している。ここでは、ESまたは主要タスクに連なる検討に必要な下流タスクの選択において、領域知識や留意点に記載されている内容から、決定木や真理表に基づいたルールベース化の連携を試みた。これらのいずれにも該当しない連携は、利用者のニーズに応えた項目の選択による連携として整理した。ルールベース化の1例は、図 2.3-49 に示す。

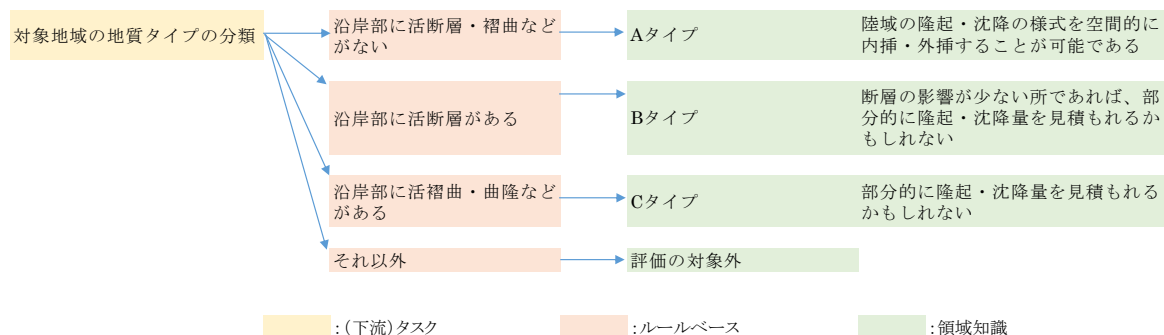


図 2.3-49 ルールベース化の例

2) 知識の整理

平成 28 年度報告書の記載内容を基にした分類結果から、下流タスクや知識情報が充実しているいくつかの主要タスクを対象に領域知識を整理票形式でまとめた。整理票では、タスクと関連する概要や説明などの領域知識の中から関係するものを一覧としてまとめるとともに、タスクの進行方向が分かるように、上流タスクを入力、下流タスクを出力として整理し、いくつかの下流タスクに分岐する場合は、ユーザの利用の観点からの選択肢を記載した。ただし、分類・整理した領域知識の内容に対して、タスク項目が細分化されている場合や領域知識の内容がタスクの内容（目的・整理）として不十分な場合は、タスクとして分類した内容から整理した。整理票の項目は、表 2.3-7 に示す。主要タスクの整理票は Appendix IX に示す。

表 2.3-7 整理票の項目

項目	内容
ES	検討課題のタイトル
主要タスク	ESを実施するためのタスクの最上流に位置するタスク
目的	タスクの目的
概要または背景	領域知識等から得られたタスクの概要または背景
留意点	ESまたはタスクを実施する上で留意または考慮する点など
入力タスク	本タスクの上流に連なるタスク
選択枝	下流タスクへ移行する選択項目
出力タスク	本タスクの下流に連なるタスク
関連図	本タスクに関連する図など
報告書	参照する報告書の目次項目等

(3) 沿岸部の地質環境情報に関する管理方策の試行

平成 28 年度の ISIS および Geolis の管理方策の検討では、「画面表示インターフェイスからの各種データベース等へのリンクによる構成」、「アプリケーションレベルの連携による構成」、「データベースの取り込みによる一元管理」によるデータ連携方式の有効性を評価した。

データの連携においては、リンクおよび検索リクエストによる情報の関連付けが可能である。しかしながら、膨大な情報を各々リンクにより関連性を定義し、データの整合性や品質を維持していくには多くの労力が必要と考えられる。ISIS から Geolis への検索では、一つの検索リクエストに対し、条件に合った検索結果のデータセットを受け取ることができるが、検索リクエストに指定するキーワードによっては、多くの検索結果を受け取ることになる。ユーザにとって必要な情報を絞り込むこと、また、さらに関連する情報を取得するためには、より高度な検索機能が必要とされる。本年度は、「データベースの取り込みによる一元管理」を採用し、さらに ISIS に高度な検索機能を検討することにより管理方策の試行を行った。

1) 地質環境情報と連携する管理方策の検討

① 試行のための管理方策の選定

沿岸部の地質環境情報の整理・集約では、情報のルールベース化を目的に整理した。その作業と関連性の高い既存のエキスパートシステムを用いて、Geolis のデータをキーワード検索により連携する方式を検討した。キーワードを用いる方法においては、一つのキーワードにて検索を行った場合、Geolis のデータ検索結果の量が膨大になる可能性が想定された。そのため、複数のキーワードを AND 条件にて絞り込む機能も実装を検討した。さらに、検索結果を絞り込むためにカテゴリ分類を定義し、検索結果を対象にカテゴリに含まれるキーワードによりデータを抽出する連携方式を検討した。

また、キーワードによる検索では、ユーザ自身がキーワードを指定する必要があるため、検索の自由度はあるものの、検索結果はユーザによって異なる情報が表示される可能性が高い。そのため、ISIS の情報に関連するキーワード等をタグとして埋め込み、ISIS に登録されている情報を用いて、どのユーザに対しても同様の検索結果を得る連携方式を検討した。

タグを用いた連携方式では、キーワードの登録機能がある事例ベースシステムを用いることを検討とした。さらに、ユーザの利便性を向上させるために、Geolis のデータ検索結果の表示画面にて、ユーザがキーワードを入力し、データを抽出する方式を検討した。

管理方策の試行として行った Geolis のデータ連携方式を表 2.3-8 に示す。

表 2.3-8 管理方策の試行方式

試行方式		試行番号
キーワード	キーワード (複数指定可)	【1】
	キーワードおよびカテゴリ情報	【2】
	キーワードの埋め込み	【3】
タグ	簡易形態素解析*	【4】
	検索結果のフィルタリング	【5】

*簡易形態素解析は文章を意味のある最小単位の単語に分解し、キーワードとして用いる名詞を抽出する手法である。

② Geolis の RDF 形式データセット

「産総研地質調査総合センターの公開する Linked Data (<https://gbank.gsj.jp/ld/>)」において、Geolis の全データは RDF 形式 (Turtle 形式) で公開されており、データをダウンロードすることが可能となっている (図 2.3-50)。本業務においては、この RDF 形式のデータを用いて、ISIS から様々な検索ができる仕組みを検討した。そのため、ISIS のデータベースに RDF 形式のデータを格納・検索等ができる機能を検討した。

The screenshot shows the 'GSJ LD' page from the Geology Research Institute of Japan. It features a navigation menu with links for 'GSJ LD', '文献' (Literature), '火山' (Volcanoes), '標本' (Specimens), 'GSJ出版物' (GSJ Publications), '画像' (Images), and 'ヘルプ' (Help). Below the menu, there are sections for '文献' (Literature), '火山' (Volcanoes), '標本' (Specimens), 'GSJ出版物' (GSJ Publications), and '画像' (Images), each with a sub-link and a brief description. A prominent section titled 'データ形式' (Data Format) explains that data can be retrieved in RDF/XML, JSON-LD, or Turtle formats. It provides examples of individual data retrieval URLs and search result list retrieval URLs. At the bottom, there is a 'データセットのダウンロード' (Download Data Sets) section with a table of available datasets. A red box highlights the '地質文献' (Geology Literature) dataset, specifically the 'RDF(Turtle)' and 'RDF(Turtle).zip' files. A footer note states that users should refer to the '産総研地質調査総合センターの研究成果情報の利用について' (Usage of Research Results Information of the Geology Research Institute of Japan) for site conditions.

データ形式	更新日	サイズ	ダウンロード
RDF(Turtle)	2017.1.5	330.8 MB	ダウンロード
RDF(Turtle).zip	2017.1.5	73.4 MB	ダウンロード

図 2.3-50 産総研地質調査総合センターの公開する Linked Data (<https://gbank.gsj.jp/ld/>)

③ 試行のための ISIS の機能検討

Apache Jena Fuseki にアップロードしたデータは、問い合わせ言語 SPARQL を用いることにより検索等が可能となる。地質環境情報と連携する管理方策の試行のため、既存のエキスパートシステムおよび事例ベースシステムの一部の機能の改良方法を検討し、キーワードおよびタグ等を用いて Geolis データセットを検索する機能を検討した。

(a) エキスパートシステムの改良方法の検討

キーワード検索を活用する連携方式の試行を行うためにエキスパートシステムの一部の機能の改良方法を検討した。エキスパートシステムの実行画面に「①検索キーワード入力」および「②カテゴリ選択」の機能を追加し、「③Geolis データセット検索 (キーワード)」ボタンをクリックすることにより、Geolis のデータセットから検索条件に該当するデータを抽出する機能を拡充する (図 2.3-51)。キーワードおよびカテゴリ情報を用いた試行における追加した画面項目の使い方の一例を表 2.3-9 に示す。複数のキーワードを用いた検索においては、検索結果の絞り込みを行うことを目的に AND 条件にて検索を行うようにする。さらにカテゴリを選択した場合には、検索結果から、さらに定義したキーワードを含むデータを絞り込みする機能を実装する。本試行においては、Geolis のデータ項目のうち、「論文題名」を対象にキーワード検索を行う仕組みとした。

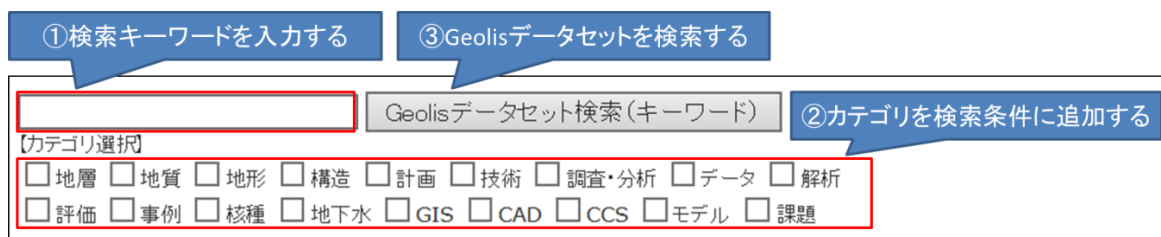


図 2.3-51 エキスパートシステムに追加した検索機能のイメージ

表 2.3-9 Geolis データセット検索 (キーワード) の利用方法

試行番号	利用する画面の項目	内容
【1】	① 検索キーワード	検索キーワードを用いて Geolis データセットを検索する。検索キーワードは、カンマ区切りで複数指定可能。
【2】	① 検索キーワードおよび②カテゴリ選択	検索キーワードに加えて、カテゴリに関連付けたキーワードを用いて検索結果の絞り込みを行う。

(b) 事例ベースシステムの改良方法の検討

タグ検索を活用する連携方式の試行を行うために、事例ベースシステムの一部の機能の改良方法を検討した。事例ベースシステムの事例詳細画面の「①キーワード項目の内容」にタグ情報を登録することを前提とし、「②Geolis データセット検索 (タグ)」をクリックすることにより、Geolis のデータセットから検索条件に該当するデータを抽出する機能を検討した(図 2.3-52)。

キーワードの埋め込みを用いた試行において利用する画面項目の使い方を表 2.3-10 に示す。複数のキーワードの埋め込みの検索においては、関連する情報を取得することを目的に OR 条件にて検索を行うようにする。本試行においては、Geolis のデータ項目のうち、「論文題名」を対象にタグとして登録したキーワード検索を行う仕組みとした。

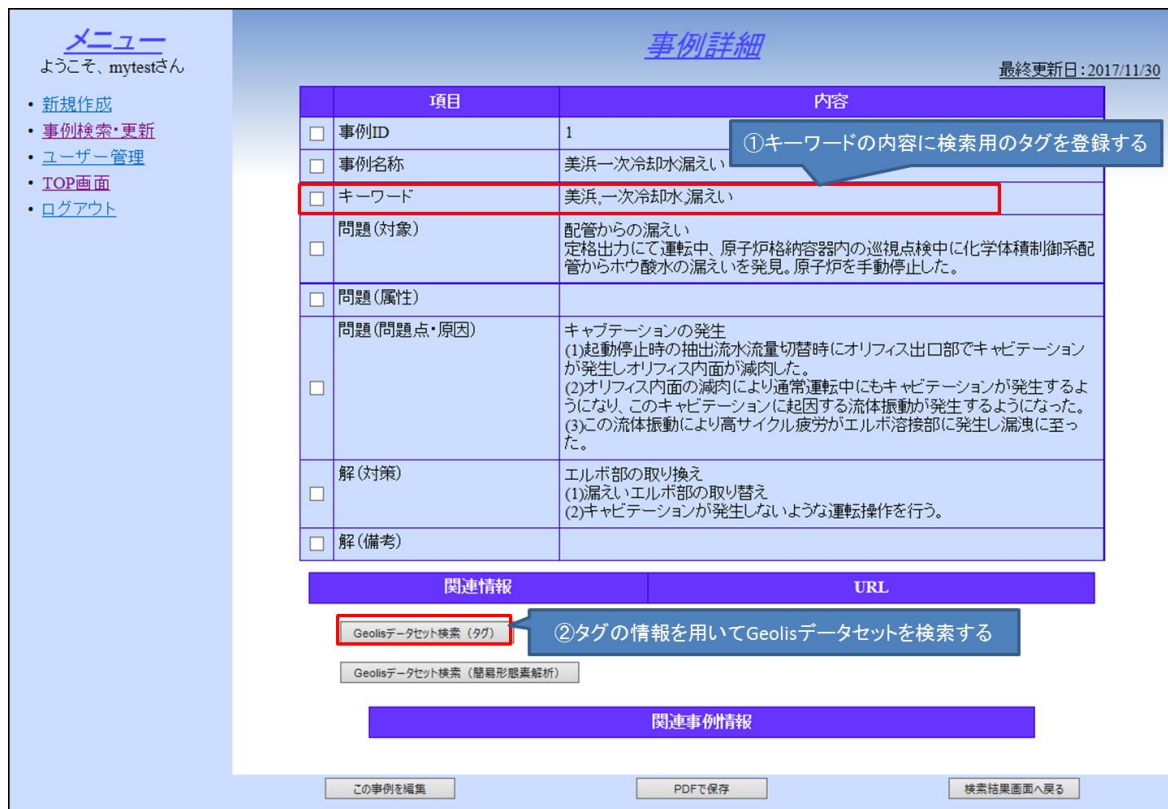


図 2.3-52 事例ベースシステムに追加したタグ機能の画面イメージ

表 2.3-10 Geolis データセット検索 (タグ) の利用方法

試行番号	利用する画面の項目	内容
【3】	② キーワードの内容	タグとして登録したキーワードを用いて Geolis データセットを検索する。タグは、カンマ区切りで複数指定可能。

また、事例ベースシステムの事例詳細画面の「①事例名称項目の内容」に含まれる情報を用いて簡易形態素解析を行い、検索に用いるキーワードを自動的に抽出し、「②Geolis データセット検索 (簡易形態素解析)」をクリックすることにより、Geolis のデータセットから検索条件に該当するデータを抽出する機能を検討した(図 2.3-53)。簡易形態素解析により抽出したキーワードを用いた試行において利用する画面項目の使い方を表 2.3-11 に示す。複数のキー

ワードを用いた検索においては、関連する情報を取得することを行うことを目的に OR 条件にて検索を行うようにする。本試行においては、Geolis のデータ項目のうち、「論文題名」を対象に簡易形態素解析で抽出したキーワード検索を行う仕組みとした。

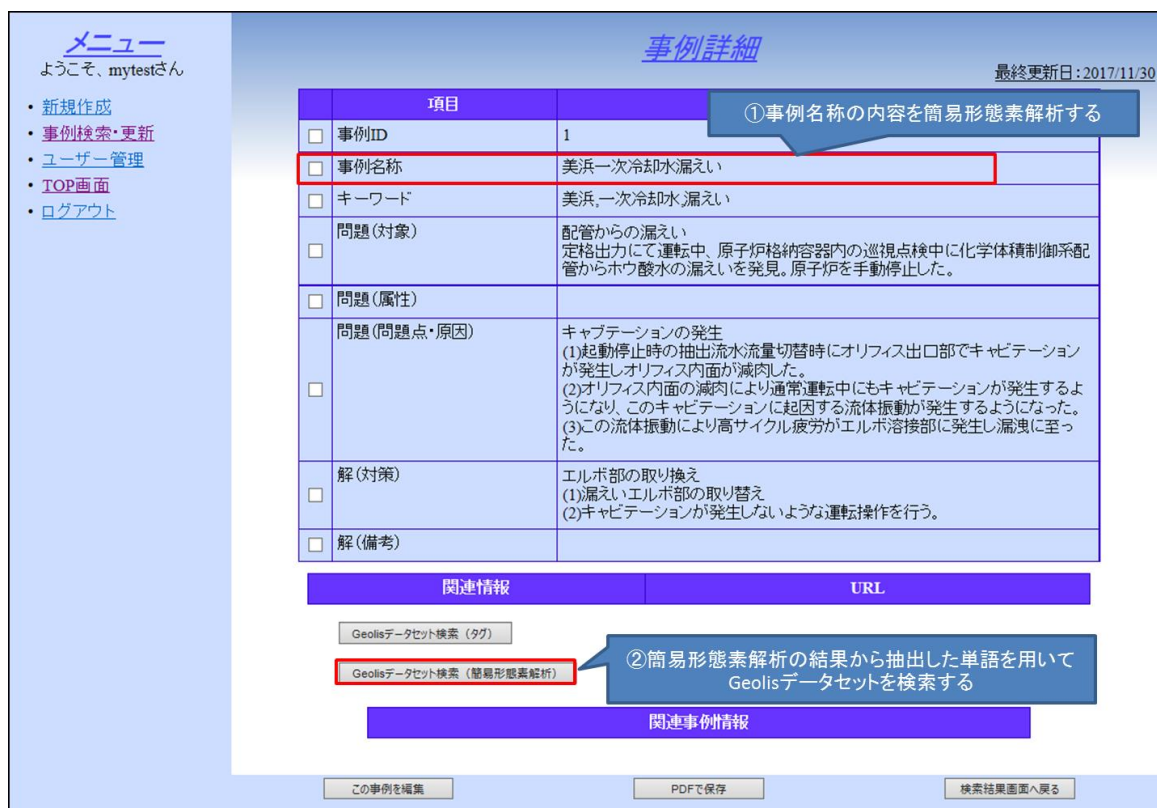


図 2.3-53 事例ベースシステムに追加した簡易形態素解析機能の画面イメージ

表 2.3-11 Geolis データセット検索（簡易形態素解析）の利用方法

試行番号	利用する画面の項目	内容
【4】	①事例名称の内容	簡易形態素解析により抽出したキーワードを用いて Geolis データセットを検索する。2文字以上の単語を抽出。

さらに、「Geolis データセット検索」ボタンをクリックした際に、Geolis データセットの検索結果を表示する画面を検討した。Geolis データセットの検索は OR 条件にて行うため、多くの検索結果が表示される可能性がある。そのため、検索結果の情報をさらに絞り込んで画面に表示する機能（検索結果のフィルタリング）を検討する。検索結果のフィルタリングを用いた試行において利用する画面項目の使い方を表 2.3-12 に示す。本試行においては、Geolis のデータ検索結果として画面に表示した項目を対象にフィルタリングを行う仕組みとした。

表 2.3-12 Geolis データセットの検索結果のフィルタリング

試行番号	利用する画面の項目	内容
【5】	Geolisデータセットの検索結果の情報	絞り込み欄に入力した文字列を含むデータのみ一覧表示する。

2) 地質環境情報と連携する管理方策の試行

① データ連携に用いるキーワード等の抽出

エキスパートシステムおよび Geolis のデータ連携のため、関連付けるキーワードの抽出および Geolis データの検索結果を絞り込むためのカテゴリ情報の整理を行った。なお、カテゴリ情報は、Geolis データセットの検索結果をさらに絞り込むために、エキスパートシステム内に定義したキーワード群の分類項目である。

(a) Geolis データセットの検索キーワードの検討

既存のエキスパートシステムのデータベース情報と Geolis のデータセットを関連付けるための試行準備として、①「調査項目の抽出と優先順位付けの考え方 ES」と②「地質環境モデル構築に関する全体フロー ES」の各タスクの内容からキーワードの抽出を行った。対象とした①の ES は、「Yes」または「No」などの選択肢で 6 項目のタスクがフロー展開されるルールベースで構成されていること、②の ES は選択項目を持たないが、記載内容が全体フローを対象にしていることから対象とした。キーワードの抽出結果は、システムの試行を目的としたものであるため、便宜的におこなったものであり、対象範囲も限定的なものである。既存のエキスパートシステムから抽出したキーワードを表 2.3-13 に示す。

表 2.3-13 既存のエキスパートシステムから抽出したキーワード

分類		抽出したキーワード
1	主語や目的語になるような専門用語	地質環境モデル、地質モデル、水理モデル、地質環境、岩盤力学、長期変遷、モデル
2	分類 1 に関連する専門用語	調査計画、感度解析、データベース、地質条件、地形条件、自然現象、時間・空間スケール、整合性、課題、安全性評価、設計、計画、不確実性、要因、要素、地理、条件、時間スケール、空間スケール

(b) 検索結果をフィルタリングするカテゴリ情報の検討

カテゴリ情報は、エキスパートシステム全般にわたって汎用的なカテゴリになるように、主要項目である「予察的地質環境モデルの構築」、「調査計画立案支援」、「調査支援」、「解析・モデル化」の四つの内容を基本に頻出するキーワード（事例、核種、地下水など）やトピック的なキーワード（GIS、CAD、CCS など）を含んで設定した。これら設定した 18 種類のカテゴリと各カテゴリに含めたキーワードを表 2.3-14 に示す。ただし、ここでのカテゴリおよび関連付けたキーワードは、本試行のために暫定的に設定したものである。

表 2.3-14 既存のエキスパートシステムから整理したカテゴリ情報

カテゴリに含まれるキーワード	絞り込みカテゴリ																	
	地層	地質	地形	構造	計画	技術	調査・分析	データ	解析	評価	事例	核種	地下水	GIS	CAD	CCS	モデル	課題
	地層	地質	地形	構造	計画	技術	調査・分析	データ	解析	評価	事例	核種	地下水	GIS	CAD	CCS	モデル	課題
	地層	地質	地形	構造	計画	技術	調査・分析	データ	解析	評価	事例	核種	地下水	GIS	CAD	CCS	モデル	課題
	断層	鉱物	侵食		予定	手法	ボーリング	分析結果		不確実性	地域			地理情報		二酸化炭素	概念	
	堆積層		風化			方法	試験	測定結果		要因				システム			考え方	
			隆起			方式	分析	試験結果		要素								
			海岸				同定	値										
			海底				探査											
			氷河															
			氷河															

(b) キーワードおよびカテゴリ情報を用いた試行（試行番号【2】）

既存のエキスパートシステムの情報から整理したキーワードを用いて、Geolis データセットの検索を行い、さらにカテゴリに関連付けたキーワードに関連する情報の抽出を試行した。例として、キーワードに「地理」および「条件」を入力し、さらにカテゴリ「解析」を選択した検索結果は、図 2.3-55 に示す。

①キーワードに「地理」「条件」を入力し、さらにカテゴリ「解析」を選択し、Geolisデータセット検索を実行

検索キーワード	Geolisデータセットの検索結果（件数）																	
	地層	地質	地形	構造	計画	技術	調査・分析	データ	解析	評価	事例	数値	地下水	SIS	CAD	GIS	モデル	種類
地質環境, モデル	4	18	1	2	1	8	12	2	2	6	1	1	5	0	0	0	18	0
地質, モデル	132	391	38	140	2	78	85	58	42	41	48	13	19	9	1	2	391	8
岩盤力学, モデル	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0
水理, モデル	10	13	0	12	2	5	6	5	12	5	2	1	9	0	0	1	31	0
長期, 変遷	12	10	9	1	2	14	2	1	4	5	6	0	4	0	0	0	3	0
調査, 計画	88	123	18	12	399	37	399	8	6	6	51	0	23	1	0	0	5	6
不確実性, 要因	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
地質環境, 要素	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
感度, 解析	6	1	0	3	0	8	8	4	32	4	3	1	1	0	0	1	4	0
地理, 条件	1	0	9	0	4	46	45	0	3	1	14	0	0	0	0	0	0	0
地質, 条件	17	137	48	15	0	12	16	5	6	8	12	0	9	0	0	0	4	4
地形, 条件	6	44	196	4	0	4	4	5	6	6	18	0	1	4	0	0	1	3
時間, 空間, スケール	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
安全性, 評価	7	12	3	2	0	4	3	0	3	33	0	0	0	0	0	2	0	3

URL	著者	発行者	論文題名
https://ebank.gsi.jp/ld/resource/geolis/20041283/	建設省計画局, 国土地理院	国土地理院	大原清, 紀伊水道地塊大規模開発計画調査報告書(土地条件・土地利用現況解析調査), 国土地理院技術資料D-2-No.7
https://ebank.gsi.jp/ld/resource/geolis/20131046/	小笠井 南, 中基 貴元, 岡田 隆基	日本地質学会	地理空間情報の解析からみた津波被害と土地条件との関係(TS-O-0)(調査)
https://ebank.gsi.jp/ld/resource/geolis/99902778/	建設省計画局, 国土地理院	建設省計画局, 国土地理院	大原清, 紀伊水道地塊大規模開発計画調査報告書(土地条件・土地利用現況解析調査)(その2), 国土地理院技術資料D-2-No.8

図 2.3-55 試行番号【2】の結果

③ 事例ベースシステムを活用した管理方策の試行

(a) タグとしてキーワードの埋め込みを用いた試行（試行番号【3】）

改良した事例ベースシステムのキーワード項目欄にタグを登録し、そのタグ情報を用いて Geolis データセットから関連する情報の抽出を試行した。

例として、キーワードに「美浜」、「一次冷却水」および「漏えい」を入力し、Geolis データセットの検索を実施した検索結果は、図 2.3-56 に示す。

事例 ID	タイトル	登録したタグ	Geolis データセットの検索結果 (件数)
1	美浜一次冷却水漏えい	美浜, 一次冷却水, 漏えい	19
2	浅層ボーリング調査における試験装置の抑留	浅層, ボーリング調査, 試験装置	855
3	露頭位置の地図上へのプロットミス	露頭位置, 地図上, プロットミス	8
5	データ品質の不良 (空中磁気探査)	データ品質, 不良, 空中磁気探査	190

図 2.3-56 試行番号【3】の結果

(b) タグとして簡易形態素解析によるキーワードの抽出を用いた試行（試行番号【4】）

改良した事例ベースシステムの事例名称に登録されている文字列を対象に簡易形態素解析を行い、抽出した情報を用いて Geolis データセットから関連する情報の抽出を試行した。簡易形態素解析を用いることにより、既に登録されている情報を用いて Geolis データセットとの連携を行うことができる。簡易形態素解析では、文字列を単語等に分解し、2文字以上の漢字を含む文字もしくはカタカナをキーワードとして抽出している。

例として、事例 ID : 1 を用いて簡易形態素解析を行った。キーワードとして「美浜」、「冷却」および「漏えい」が抽出され、Geolis データセットの検索を実施した結果は、図 2.3-57 に示す。

事例詳細 最終更新日: 2017/11/30

① 簡易形態素解析の対象

事例ID: 1

事例名称: 美浜一次冷却水漏えい

キーワード: 美浜一次冷却水漏えい

問題(対象): 配管からの漏えい
定輪出力にて運転中、原子炉格納容器内の水位点検中に化学体積制御配管からの冷却水の漏えいを発見、原子炉を自動停止した。

問題(属性): キーワードの発生
(1) 起動時、格納容器内水位流量監視時にオフライン出口部でキセーションが発生し、オフラインが検出された。
(2) オフラインの発生により、格納容器中にキセーションが発生するようになった。このキセーションに起因する液体移動が発生するようになった。
(3) この液体移動により、高圧シールド管が破損し、漏えいとなった。

解(対策): エルボ部の取り換え
(1) 漏えい、エルボ部の取り換え
(2) キセーションが原因とならないような運転操作を行う。

備考(備考):

関連情報 URL

Geolisデータ検索(実行)

Geolisデータセット検索(検索結果を表示)

② Geolisデータセットの検索を実行

関連事例情報

この事例情報 事例ID情報 検索結果を表示

事例ベースシステム Geolisの検索結果 検索キーワード: 美浜, 冷却, 漏えい

URL	概要	発行機関	論文概要
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/1960212	清水 勉	日本地質学会	agent systemの導入、格納容器のオフライン、格納容器の冷却水漏えい
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/1960401	藤田 宗雄, 北村 雅夫, 山崎 公孝	日本地質学会	美浜原子力発電所3号機格納容器冷却水漏えい原因調査報告書
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/1960402	藤田 宗雄, 山崎 公孝	日本地質学会	美浜原子力発電所3号機格納容器冷却水漏えい原因調査報告書(補遺)
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/1960711	藤田 宗雄, 山崎 公孝	日本地質学会	美浜原子力発電所3号機格納容器冷却水漏えい原因調査報告書(補遺)
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/1960902	佐藤 真, 山崎 公孝	日本地質学会	美浜原子力発電所3号機格納容器冷却水漏えい原因調査報告書(補遺)
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/1960903	佐藤 真, 山崎 公孝	日本地質学会	美浜原子力発電所3号機格納容器冷却水漏えい原因調査報告書(補遺)
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/1960904	佐藤 真, 山崎 公孝	日本地質学会	美浜原子力発電所3号機格納容器冷却水漏えい原因調査報告書(補遺)
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/1960905	佐藤 真, 山崎 公孝	日本地質学会	美浜原子力発電所3号機格納容器冷却水漏えい原因調査報告書(補遺)
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/1960906	佐藤 真, 山崎 公孝	日本地質学会	美浜原子力発電所3号機格納容器冷却水漏えい原因調査報告書(補遺)
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/1960907	佐藤 真, 山崎 公孝	日本地質学会	美浜原子力発電所3号機格納容器冷却水漏えい原因調査報告書(補遺)
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/1960908	佐藤 真, 山崎 公孝	日本地質学会	美浜原子力発電所3号機格納容器冷却水漏えい原因調査報告書(補遺)
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/1960909	佐藤 真, 山崎 公孝	日本地質学会	美浜原子力発電所3号機格納容器冷却水漏えい原因調査報告書(補遺)
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/1960910	佐藤 真, 山崎 公孝	日本地質学会	美浜原子力発電所3号機格納容器冷却水漏えい原因調査報告書(補遺)
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/1960911	佐藤 真, 山崎 公孝	日本地質学会	美浜原子力発電所3号機格納容器冷却水漏えい原因調査報告書(補遺)
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/1960912	佐藤 真, 山崎 公孝	日本地質学会	美浜原子力発電所3号機格納容器冷却水漏えい原因調査報告書(補遺)
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/1960913	佐藤 真, 山崎 公孝	日本地質学会	美浜原子力発電所3号機格納容器冷却水漏えい原因調査報告書(補遺)
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/1960914	佐藤 真, 山崎 公孝	日本地質学会	美浜原子力発電所3号機格納容器冷却水漏えい原因調査報告書(補遺)
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/1960915	佐藤 真, 山崎 公孝	日本地質学会	美浜原子力発電所3号機格納容器冷却水漏えい原因調査報告書(補遺)
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/1960916	佐藤 真, 山崎 公孝	日本地質学会	美浜原子力発電所3号機格納容器冷却水漏えい原因調査報告書(補遺)
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/1960917	佐藤 真, 山崎 公孝	日本地質学会	美浜原子力発電所3号機格納容器冷却水漏えい原因調査報告書(補遺)
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/1960918	佐藤 真, 山崎 公孝	日本地質学会	美浜原子力発電所3号機格納容器冷却水漏えい原因調査報告書(補遺)
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/1960919	佐藤 真, 山崎 公孝	日本地質学会	美浜原子力発電所3号機格納容器冷却水漏えい原因調査報告書(補遺)
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/1960920	佐藤 真, 山崎 公孝	日本地質学会	美浜原子力発電所3号機格納容器冷却水漏えい原因調査報告書(補遺)

事例 ID	タイトル	抽出したキーワード	Geolis データセットの検索結果 (件数)
1	美浜一次冷却水漏えい	美浜, 冷却, 漏えい	334
3	露頭位置の地図上へのプロットミス	露頭, 位置, 地図, プロット, ミス	2984
15	掘削パイプの破損	掘削, パイプ, 破損	2538
16	ボーリング孔内への物体の落下	ボーリング, 物体, 落下	2233

図 2.3-57 試行番号【4】の結果

(c) Geolis データセット検索結果のフィルタリングの試行 (試行番号【5】)

タグおよび簡易形態素解析を用いた Geolis データセットの検索は OR 条件で行った。そのため、各事例に関連する Geolis データセットの検索結果には多くの情報が含まれる。ここでは、Geolis データセットの検索結果をさらに絞り込むための試行を行った。

例として、事例 ID : 2 のタグ情報として登録した「浅層」、「ボーリング調査」および「試験装置」のキーワードを用いて Geolis データセットの検索を実施し、さらに「沿岸」「海域」「モデル」等のキーワードによりデータのフィルタリングを行った結果は図 2.3-58 に示す。

事例ベースシステム Geolisの検索結果 検索キーワード: 浅層, ボーリング調査, 試験装置

絞り込み: search 絞り込み: 絞り込み: URL | 更新 | 発行 | 論文題名

URL	概要	発行機関	論文概要
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/19610041	豊林 泰野, 行 東京 豊林 隆治, 山崎 宗雄	静岡県	大沢地帯のボーリング調査
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/196100418	東京 豊林 隆治, 山崎 宗雄	静岡県	富士大沢のボーリング調査
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/196301221	金井 孝夫	地質調査所	スエーデン式サンディング等による浅層地盤調査
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/196301232	交際 高明	仙台 浅野 康夫, 地質調査所	スエーデン式サンディングによる浅層地盤調査
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/196401311	金井 孝夫	地質調査所	加古川, 扇状地におけるスエーデン式サンディングによる浅層地盤調査
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/196401312	交際 高明	地質調査所	扇状地の浅層地盤調査
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/196401313	尾原 信彦	地質調査所	ボーリング調査から知られた東予地区瀬野前野の浅層地盤調査について
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/196401336	相原 輝雄	地質調査所	扇状地の浅層地盤調査について
https://gbank.gsj.jp/Id/resource/geolis/196401352	交際 高明	地質調査所	スエーデン式サンディングによる浅層地盤調査

絞り込み: 沿岸

絞り込み: 海域

絞り込み: モデル

絞り込み結果: 6

絞り込み結果: 1

絞り込み結果: 37

検索結果: 855

図 2.3-58 試行番号【5】の結果

3) 地質環境情報と連携する管理方策の有効性評価

① 管理方策の有効性評価項目

本年度の試行における連携方式では、①キーワードの入力、②検索の実行、③検索結果の閲覧という一連の手順を踏み情報を取得した。そのため、検索に係る作業の各手順に応じて評価項目を設定した（表 2.3-15）。

キーワードの入力（①）は、ユーザが検索の都度キーワードの入力する方法、カテゴリ情報として関連キーワードを事前に登録する方法、検索のために事前にキーワードをタグとして登録する方法、既存の情報を用いてキーワードを抽出する方法を試行した。データ連携においては、ISIS と Geolis のデータを関連付けるためのキーワードが重要になる。そのため、利用するキーワードによって、どの程度関連付けが行えるかを評価項目とした。また、キーワードを事前に ISIS に登録する場合に必要な登録や変更等の保守に関わる作業負荷を評価項目とした。

検索の実行（②）は、ユーザがキーワードを入力した後に検索を実行する方法、カテゴリの分類項目を選択した後に検索を実行する方法、あらかじめ登録された情報を用いて検索の実行のみ行う方法を試行した。そのため、ユーザが検索を行うための手順がどれくらい容易であるかを評価項目とした。また、検索の実行においては、ユーザが検索結果を得るまでの応答時間（サーバ側の処理負荷）も考慮する必要があるため評価項目とした。

検索結果の閲覧（③）は、ユーザが検索結果を閲覧した際に、見たい情報がどれくらい絞り込まれて表示されたのか、その適合性を評価項目とした。また、データ連携の観点から、誰が何度、検索を行っても同様の検索結果が得られるのか、データの関連性を維持できるのか等、検索結果の再現性を評価項目とした。

表 2.3-15 管理方策の有効性評価項目

評価項目		概要
キーワードの入力	キーワードの関連性	検索キーワードの Geolis データとの関連度合い
	キーワードの保守性	システムにキーワードを登録する作業負荷（ユーザの作業）
検索の実行	検索の利便性（容易性）	検索結果を得るまでの作業負荷（ユーザの検索処理ステップ）
	検索の処理性能	検索結果の応答時間（システム側の処理時間）
検索結果の閲覧	検索結果の適合性	期待される検索結果の取得（データの絞り込みの度合い）
	検索結果の再現性	誰が何度、検索を行っても同じ検索結果を得る仕組み

② 管理方策の有効性評価

(a) キーワードの関連性

ISIS から Geolis データの検索を行うために利用するキーワードを明確に定義できるほど評価が高いとした。評価結果を表 2.3-16 に示す。

表 2.3-16 キーワードの関連性の評価

試行番号	判断内容	評価結果
【1】	ユーザが指定したキーワードを用いて Geolis データを検索する。汎用性は高いもののキーワードの影響が高いため、データ連携としては親密度が低い。	△
【2】	Geolis データの検索結果をさらにカテゴリ情報を用いて絞り込みを行う。検索結果を対象としているため、必要な情報の絞り込みが容易である。	○
【3】	事前に ISIS に登録したキーワードを用いて Geolis データを検索する。各データに Geolis データと関連性の高いキーワードを登録できる。	◎
【4】	ISIS の特定の項目を対象にキーワードを自動的に抽出し、Geolis データを検索する。関連性の高い Geolis データの検索は可能であるが、ユーザが意図した結果になるとは限らない。	○
【5】	Geolis データの検索結果をさらにキーワードを用いて絞り込みを行う。検索結果を対象としているため、必要な情報の絞り込みが容易である。事前に ISIS にキーワードを登録しないので保守は必要ない。	○

評価基準：◎より高い関連付けができる ○関連付けできる（基準） △ユーザに依存する

(b) キーワードの保守性

ISIS から Geolis データの検索を行うために事前に登録するキーワードの保守作業が少ないほど評価が高いとした。評価結果を表 2.3-17 に示す。

表 2.3-17 キーワードの保守性の評価

試行番号	判断内容	評価結果
【1】	ユーザが指定したキーワードを用いて Geolis データを検索する。事前に ISIS にキーワードを登録しないので保守は必要ない。	◎
【2】	Geolis データの検索結果をさらにカテゴリ情報を用いて絞り込みを行う。事前に ISIS にカテゴリに含めるキーワードを登録する必要がある。	○
【3】	事前に ISIS に登録したキーワードを用いて Geolis データを検索する。事前に ISIS にキーワードを登録する必要がある。	△
【4】	ISIS の特定の項目を対象にキーワードを自動的に抽出し、Geolis データを検索する。事前に ISIS にキーワードを登録しないので保守は必要ない。	◎
【5】	Geolis データの検索結果をさらにキーワードを用いて絞り込みを行う。検索結果を対象としているため、必要な情報の絞り込みが容易である。事前に ISIS にキーワードを登録しないので保守は必要ない。	◎

評価基準：◎保守が必要ない ○保守が必要（基準） △保守の作業量が大きい

(c) 検索の利便性（容易性）

ISIS から Geolis データの検索を行うための作業が容易であるほど評価が高いとした。評価結果を表 2.3-18 に示す。

表 2.3-18 検索の利便性（容易性）の評価

試行番号	判断内容	評価結果
【1】	ユーザがキーワードを入力した後、検索を実行する。検索の都度、キーワードを入力する必要がある。	△
【2】	ユーザが既に定義されたキーワードを選択した後、検索を実行する。検索の都度、キーワードを選択する必要がある。	○
【3】	ユーザがキーワードの入力や選択をしなくて、検索結果を得ることができる。検索の実行のみ行う。	◎
【4】	ユーザがキーワードの入力や選択をしなくて、検索結果を得ることができる。検索の実行のみ行う。	◎
【5】	ユーザがキーワードを入力した後、検索を実行する。検索の都度、キーワードを入力する必要がある。	△

評価基準：◎キーワード等の入力や選択が不要 ○キーワード等の選択が必要（基準） △キーワードの入力が必要

(d) 検索の処理性能

ISIS から Geolis データの検索を行った際のサーバ側の処理負荷が小さいほど評価が高いとした。評価結果を表 2.3-19 に示す。

表 2.3-19 検索の処理性能の評価

試行番号	判断内容	評価結果
【1】	サーバ側で Geolis データの検索処理を一つ実行する。検索条件により応答時間は変動する。	○
【2】	サーバ側で Geolis データの検索を実行する。さらに検索結果のデータから条件に合うデータの抽出を行う。	△
【3】	サーバ側で Geolis データの検索処理を一つ実行する。検索条件により応答時間は変動する。	○
【4】	サーバ側で Geolis データの検索処理を一つ実行する。検索条件により応答時間は変動する。	○
【5】	サーバ側の処理を必要としない。PC 側の処理のみでデータの抽出を行う。	◎

評価基準：◎サーバ側での検索処理不要 ○一つの検索処理（基準） △複合的な検索処理

(e) 検索結果の適合性

ISIS から Geolis データの検索を行う際に条件に合ったデータ抽出の仕組みが高機能であるほど評価が高いとした。評価結果を表 2.3-20 に示す。

表 2.3-20 検索結果の適合性の評価

試行番号	判断内容	評価結果
【1】	一つの検索リクエストにて Geolis データの検索を行うことができる。	△
【2】	Geolis データの検索結果をさらに特定の条件でデータの抽出ができる。	◎
【3】	一つの検索リクエストにて Geolis データの検索を行うことができる。	△
【4】	一つの検索リクエストにて Geolis データの検索を行うことができる。	△
【5】	Geolis データの検索結果を用いて、さらにユーザが指定するキーワードにてデータの抽出ができる。	○

評価基準：◎複合的な検索が可能 ○検索結果のフィルタリングが可能（基準） △一つの検索リクエストに対応

(f) 検索結果の再現性

ISIS から Geolis データの検索を行った際に、誰が実施しても同じ検索結果が得られる方式をより評価が高いとした。評価結果を表 2.3-21 に示す。

表 2.3-21 検索結果の再現性の評価

試行番号	判断内容	評価結果
【1】	ユーザがキーワードを指定するため、Geolis データの検索結果がユーザによって異なる可能性がある。	△
【2】	Geolis データの検索結果をカテゴリ情報に定義したキーワードで抽出できる。	○
【3】	誰が何度 Geolis データの検索を実行しても同様の検索結果を得ることができる。	◎
【4】	誰が何度 Geolis データの検索を実行しても同様の検索結果を得ることができる。	◎
【5】	ユーザがキーワードを指定するため、Geolis データの検索結果がユーザによって異なる可能性がある。	△

評価基準：◎自動的に同じキーワードを利用 ○選択により同じキーワードを利用（基準） △ユーザに依存する

(g) 管理方策の有効性評価

管理方策のそれぞれの試行について、表 2.3-16～表 2.3-21 に示す評価結果を表 2.3-22 に整理した。有効性を評価するにあたっては、定量評価するために評価結果の数値を基に重み付けによる総合評価を行った。その結果、試行においては総合的に試行番号【4】の、既に ISIS に登録されている情報を用いて、簡易形態素解析からキーワードを抽出し、データ連携を行う方式は有効性が大きい。また、試行番号【4】では、Geolis データの検索は OR 条件で行ったため、多くの検索結果が得られた。そのため、検索結果の適合性の評価が低い。検索結果の適合性を高めるために、試行番号【2】で試行したカテゴリ情報を用いて検索結果をさらに絞り込む機能を併せて活用することが有効である。

表 2.3-22 管理方策の有効性評価

評価項目	試行番号【1】	試行番号【2】	試行番号【3】	試行番号【4】	試行番号【5】
キーワードの関連性	△	○	◎	○	○
キーワードの保守性	◎	○	△	◎	◎
検索の利便性	△	○	◎	◎	△
検索の処理性能	○	△	○	○	◎
検索結果の適合性	△	◎	△	△	○
検索結果の再現性	△	○	◎	◎	△
総合評価	9	12	13	14	12

重み付け：◎：3点、○：2点、△：1点

(4) まとめと今後の課題

(2)では、沿岸部の地質環境情報の整理・集約として、平成 27 年度および平成 28 年度地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発報告書の研究結果を基に、沿岸部の自然現象・地下水長期安定性に関わる研究内容を対象に、記載内容の特徴を「領域知識」、「タスク」、「事例」および「一般知識」の四つに分類・整理した。特に平成 28 年度報告書については、課題に対する検討方法や考察の内容が多く確認されたため、これらを対象にエキスパートシステム (ES) の命題を五つに分類した上で、それに連なる 18 の主要タスクのうち、領域知識等が充実していた 11 の主要タスクについて、留意点や領域知識、関連図等を整理票としてまとめた。次に、主要タスクに連なる下流の作業をタスクフローとして整理し、タスク間の連携を ES 構成に適用できるようなルールベース化について検討を行った。

今後、本年度の成果を ES に適用するにあたっては、現場の実施計画や状況、ユーザの利用ニーズを鑑みてより実用的な ES を選別するとともに、ルールベース化の検討結果を基にしたより実務的なルールベースの構築が必要と考えられる。

(3)では、沿岸域の地質環境情報に関する管理方策の試行として、ISIS の中から ES および事例ベースシステムのデータベース情報を対象に、Geolis データセットとの管理方策の試行を行なった。ES では、【1】キーワード検索、【2】キーワード検索およびカテゴリ情報による抽出のデータ連携の試行を行い、事例ベースシステムではタグを利用した検索として、【3】キーワードの埋め込み、【4】簡易形態素解析、【5】検索結果のフィルタリングの試行を行った。

事例ベースシステムのタグを利用した【4】の試行では、既に登録されている情報から自動的にキーワードを抽出することで、キーワードの登録作業が不要となり、検索が容易になることや、検索結果がユーザ共通で同じ結果を得ることができることを確認し有効性が高いことが示された。

今後は、ISIS に既に登録されている情報を用いて、より実用的な形態素解析を行うことにより、適切なキーワードの抽出を行うこと、併せてカテゴリ情報を用いたフィルタリング機能を活用することにより、実用的なデータ連携の方式を構築することが必要と考えられる。また、本年度は ISIS および Geolis のデータ連携を主体として試行を行ったが、他のデータベース等とのデータ連携を推進する必要があると考えられる。そのためには、拡張性のある仕組みとして、インターネット上に公開されている関連する地質環境情報等を対象に、指定した特定のウェブサイトの情報を自動的に収集し、キーワード等によりデータ連携できる枠組みの構築が有効である。

(5) 参考文献

国立研究開発法人産業技術総合研究所, 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構, 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター, 一般財団法人電力中央研究所, 平成 27 年度地層処分技術調査事業沿岸部処分システム高度化開発報告書, 139p, 2016.

国立研究開発法人産業技術総合研究所, 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構, 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター, 一般財団法人電力中央研究所, 平成 28 年度地層処分技術調査事業沿岸部処分システム高度化開発報告書, 372p, 2017.

3. 沿岸部における工学技術の高度化開発

概要調査段階以降に必要なとなる工学技術の高度化の観点では、第1章で述べたように、平成27年度より着手した本事業の初年度において、沿岸部における処分システムの構築を念頭に、沿岸部の特性などに関連したこれまでの地層処分研究開発成果の再整理を行い、再検討が必要な課題などを抽出・整理している（産総研ほか, 2016）。このような整理結果は、並行して進められた“沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会”（以下、「沿岸部研究会」という。）に適宜提供され、平成28年8月の同研究会のとりまとめでは、“海域を含めた沿岸部において地層処分を実現するために必要な基本的な技術はおおむね整備されている”としつつも、“今後、技術の高度化に引き続き取り組むことで、さらに信頼性を高めることが重要である”と結論付け、併せて技術の高度化に向けて取り組むべき課題とその方向性（表3.1-1に工学技術分野の課題を抜粋）が示された（沿岸部研究会, 2016）。

このような沿岸部研究会における議論を踏まえ、本事業における工学技術の高度化に向けた取組では、実施項目（大項目）として次の二つを設定し、含まれる個々の課題に関する平成28年度からの3ヵ年計画を具体化したうえで取組に着手している（沿岸部研究会で示された課題との対応を表3.1-1に示す）。

- ①人工バリア材料などに関する劣化や変質に関する現象の把握（各種特性などのデータ拡充）
- ②塩水環境下ニアフィールド領域での処分システムの成立性に係る手法などの提示

本章（第3章）では概要調査段階以降に必要なとなる工学技術の高度化の観点から、上記の実施項目①②（大項目）に含まれる個々の課題について、全体計画（平成28年度からの3ヵ年計画）を整理したうえで、本年度の実施内容や結果などについて述べる。

3.1 人工バリア材料などに関する劣化や変質に関する現象の把握

表3.1-1に示す本事業で計画する取組のうち、人工バリア材料などの劣化や変質に関する現象の把握について、平成27年度は、ニアフィールド領域で用いられる材料を対象として、これまでの研究開発などで得られた劣化や変質に関する知見やデータなどの調査・確認を行い、更なる拡充が望まれる知見やデータなどを、オーバーパック、緩衝材、その他のニアフィールド構成材料の三つに分類して整理した。さらに、この整理結果を踏まえて、閉鎖後の長期挙動評価への反映および設計・施工などのエンジニアリングへの反映の二つの観点から、試験時間や試験スケールなどを考慮して、更なる知見やデータなどを取得するための全体試験計画を立案した（産総研ほか, 2016）。

以上のような整理を踏まえ、本事業で対象とする個々の対象材料について、考慮すべき挙動や研究課題を以下のように設定して取り組んでいる。

- オーバーパック（3.1.1項）：不働態化、酸素による腐食進展、水の還元による腐食進展、応力腐食割れ、水素脆化
- 緩衝材（3.1.2項）：基本特性に対する化学的影響、侵入・浸食、残留密度差、膨潤圧、浸潤速度、流出、緩衝材定置方法による膨潤性能への影響
- セメント系材料（3.1.3項）：セメント系材料の変質評価（長期挙動評価のためのセメント水和物の溶解沈殿モデルの沿岸部での適用性）、セメント系材料の機械的特性変化（短期的な機械的特性の変化）
- ニアフィールド複合現象評価手法の開発（3.1.4項）：緩衝材やセメント系材料などのニアフィールド複合現象を評価するシステムの構築に向けた課題などの整理（緩衝材やセ

メント系材料などの人工バリア材料と海水系地下水との化学反応による材料の劣化による影響、海水系地下水から降水系地下水への変遷などの影響)

表 3.1-1 沿岸部研究会で示された課題と本事業で計画する取組との関係（工学技術分野）

沿岸海底下等における地層処分技術的課題に関する研究会で示された課題と対応の方向性		本事業の実施項目との対応関係
課題	対応の方向性	
オーバーパックの腐食速度に係るデータの拡充	・溶接部を含め、沿岸部で想定される種々の地下水条件下（※1）で腐食試験を行うことにより、溶接部を含む腐食データを拡充するとともに、既往の腐食寿命評価や腐食代設定の適用性を確認する。	●
緩衝材の各種特性に係るデータの拡充	・沿岸部で想定される種々の地下水条件下（※1）で室内試験を行うことにより、周辺母岩への浸入・浸食および流出現象、地下水浸潤挙動、膨潤圧、透水・せん断・圧密特性を把握するためのデータを拡充する。	●
セメント系材料の各種特性に係るデータの拡充	・沿岸部で想定される種々の地下水条件下（※1）でバッチ式浸漬実験や通水実験を行うことにより、特性や変質挙動に係るデータを拡充するとともに、既往の長期的変質挙動評価モデルの適用性の確認や改良を行う。	●
グラウト材の各種特性に係るデータの拡充	・海水系地下水条件に対する溶液型グラウトの設計・施工・長期影響に関するデータを室内試験により取得し、適用性を評価する。	●
グラウト注入施工方法及びグラウト材の長期的耐久性の検討	・グラウト材の即効性や耐久性、ニアフィールドシステムへの影響を考慮したグラウト注入施工方法に係る検討を実施する。	●
ニアフィールド領域構成材料（※2）に係る各種データの拡充に伴う現象モデルの高度化	・沿岸部で想定される種々の地下水条件下（※1）での緩衝材の力学挙動に係るデータを取得するとともに、取得したデータを活用して熱-水-応力-化学（THMC）連成解析モデルの力学的現象に関するモデルの高度化を行う。 ・オーバーパック、緩衝材、セメント系材料の各個別要素に対する海水環境下での長期挙動評価モデル開発・データ取得等の成果を反映しつつ、鉄-ベントナイト-セメント系材料の相互作用や複合現象を考慮した評価手法を構築する。 ・室内試験等を通じてモデルの信頼性を確認する。	●
処分概念およびそれに必要な総合的評価手法の構築	・沿岸海底下の特性を考慮した地下施設の配置、人工バリアの仕様と構成の組み合わせによる種々の処分概念を検討し、その成立条件を確認する。 ・ニアフィールド領域構成材料（※2）間の相互作用を考慮した室内試験により、人工バリア構成材料の各種特性や挙動に係るデータを拡充する。 ・拡充したデータに基づき、以下を考慮可能なニアフィールドシステムの総合的評価手法を構築する。 ・個々のニアフィールド領域構成材料（※2）が海水系地下水環境下で受ける影響や、材料間の相互作用 ・建設から操業段階における海水系地下水の湧水がニアフィールド領域構成材料（※2）に与える影響（特に、緩衝材の流出挙動に与える影響）	● ●
地上・地下施設の総合的な設計の検討	・沿岸部の特徴を考慮した上で、制約条件を整理し、それを考慮した地下施設の総合的な設計を行う。また、その結果を踏まえて陸域の場合との共通点や相違点を明確にするとともに、コストへの影響を整理する。 ・島嶼の場合は既存インフラの利用可能性等の観点も考慮する。 ・沿岸海底下の地下施設へアクセスするための坑道延長が長くなることを考慮し、火災等の異常時対応も含めた換気システムに係る検討を行う。 ・津波による地下施設の水没を防ぐために、地形条件を考慮した検討を行う。	●

① 人工バリア材料等に関する劣化や変質に関する現象の把握（各種特性等のデータ拡充）

② 塩水環境下ニアフィールド領域での処分システムの成立性に係る手法の提示

注）一部、他の事業で対応する課題やNUMOが担当実施する課題などがある

3.1.1 オーバーパック

(1) 背景と目的

地層処分環境における炭素鋼オーバーパックで考慮すべき腐食現象として、不動態化、酸素による腐食（全面腐食、孔食、すきま腐食）、水の還元による全面腐食、応力腐食割れ、水素脆化割れが挙げられており（核燃料サイクル開発機構, 1999）、平成 27 年度にこれらの腐食現象を対象とした現状の知見を整理した上で、沿岸部を対象とした場合に検討すべき課題と対策案を整理した（産総研ほか, 2016）。

沿岸部における炭素鋼オーバーパックの閉じ込め機能に対する信頼性向上を目的として、次の二つの挙動に係わる腐食試験に着手し、沿岸部における炭素鋼オーバーパックの腐食挙動に関するデータを取得する。

○浸漬試験による腐食挙動

○溶接部の腐食挙動

これらのデータ取得に向けた試験などに関する全体計画を図 3.1-1 に示す。平成 28 年度は、炭素鋼の母材を対象として人工海水を 1~1,000 倍に希釈した試験溶液を用いて浸漬期間 30 日間までの腐食試験を行い、腐食速度や拡散性水素濃度を求めた（産総研ほか, 2017）。また、市販の溶接材料を用いた腐食試験片を作製し、電気化学試験の条件設定のための予備試験を行うとともに、溶接部の選択的な腐食を改善するために Ni を添加した改良溶接材料を作製した（産総研ほか, 2017）。平成 29 年度は、炭素鋼の母材を対象として人工海水を用いた緩衝材共存系での浸漬試験を実施して、腐食速度および拡散性水素濃度を求める。また、平成

28 年度に作製した溶接試験片を用いた電気化学試験を実施するとともに、改良溶接材料を用いた腐食試験片を作製する。

母材	H28	H29	H30	備考
腐食試験(人工海水)	_____	_____	.....	従来の試験方法を適用
腐食試験(模擬地下水)		_____	.....	既往データとの比較
塩濃度の影響評価		_____	_____	長期的な影響の可能性、など
溶接部	H28	H29	H30	備考
材料手配・溶接試験体の製作	従来材	改良材		鍛造材利用 TIG溶接
腐食試験(電気化学試験)	条件設定	従来材	改良材	例えば、定電位分極法
地下水組成の影響評価	評価方法	検討	従来材	不均一性、vs. 溶液、材料

図 3.1-1 試験などに関する全体計画

(2) 浸漬試験による腐食挙動

1) 試験方法

① 試験片

- ・材質：JIS G 3106 SM400B (C:0.13, Si:0.20, Mn:1.04, P:0.017, S:0.006 mass%)
- ・試験片形状：30×30×t2 mm
- ・表面仕上げ：エメリー #800 研磨仕上げ

② 試験条件

試験溶液には表 3.1-2 に示す組成の人工海水 (ASTM (米国材料協会規格) D1141 準拠) および、これを 10、100、1,000 倍希釈した溶液を用いた。試験温度は既往の例 (谷口ほか, 2010 ; Kobayashi et al., 2011) に準じて 80°C、試験期間は 30 日間および 90 日間とした。1 条件あたりの試験数 (n 数) は n=3 とした。

表 3.1-2 人工海水の組成と試験条件

人工海水組成		試験条件			
化学種	濃度 (M)	緩衝材	温度(°C)	希釈	期間(d)
Cl ⁻	5.6x10 ⁻¹	あり	80	なし	
SO ₄ ²⁻	2.9x10 ⁻²			10 倍	30
HCO ₃ ⁻	2.4x10 ⁻³			100 倍	30
F ⁻	7.4x10 ⁻⁵			1000 倍	30
Br ⁻	8.6x10 ⁻⁴			なし	90
BO ₃ ³⁻	4.4x10 ⁻⁴			10 倍	90
Na ⁺	4.8x10 ⁻¹			100 倍	90
K ⁺	1.0x10 ⁻²			1000 倍	90
Ca ²⁺	1.0x10 ⁻²				
Mg ²⁺	5.5x10 ⁻²				
Sr ²⁺	7.0x10 ⁻⁴				
pH	8.9				

③ 試験方法

図 3.1-2 に示すように、チタン製のカラム内に炭素鋼試験片と緩衝材（30wt%ケイ砂混合ベントナイト）を入れ、緩衝材が所定の密度(1.6 g/cm³)になるように圧縮成形した。試験溶液を窒素雰囲気のグローブボックス中（気相部酸素濃度 1 ppm 以下）で 24 時間以上ボックス内のガスを試験溶液に通気することにより溶存酸素を除去した。

その溶液と試験片をテフロン製の容器に入れ、これを 80℃に設定した恒温槽内に静置した。浸漬期間経過後に試験片を取り出し、腐食生成物を除去した後に重量を測定し、試験前後の試験片重量の差から平均腐食量を算出した。腐食生成物分析用の試験片については取り出し後直ちに X 線回折測定用の雰囲気制御セルに入れ、セル内を窒素ガスで置換した後に分析を行った。水素吸収量については、昇温脱離法により水素抽出曲線を求め、拡散性水素の放出が完了する温度（約 200℃）以下までの放出水素量として求めた。測定条件を以下に示す。

- ・水素分析：API-MS 法
- ・温度範囲：室温～600℃
- ・昇温速度：12℃/min
- ・雰囲気（キャリアガス）：Ar

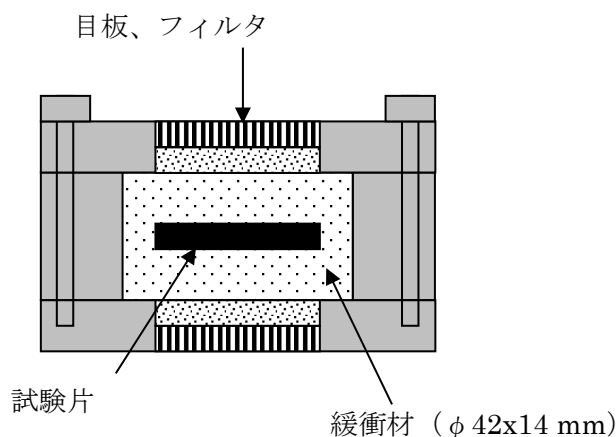


図 3.1-2 試験カラムの模式図

2) 試験結果と考察

① 試験片の外観および腐食生成物

試験後の試験片の外観を図 3.1-3 に示す。30 日の試験では人工海水（希釈なし）および 10 倍希釈では表面に皮膜が形成されていたが、100 倍および 1000 倍希釈では素地が見えた状態である。90 日では 30 日に比較して全体的に皮膜がより濃い色を呈していたが、中央付近に素地が見えた状態のものも見られた。いずれの条件においても外観上は 90 日のほうが腐食は進展している様相であるが、緻密な皮膜は形成されておらず、皮膜による腐食の抑制の効果は小さいと推定される。既往の例（谷口ほか，2008）においても腐食の顕著な抑制は浸漬後約 1 年以降に認められており、保護性の皮膜の形成にはある程度の時間を要すると考えられる。

② 腐食速度

重量法により得られた平均腐食速度と平均腐食量を表 3.1-3 に示す。また、平均腐食速度の経時変化を図 3.1-4 に、平均腐食量の経時変化を図 3.1-5 に示す。図 3.1-4 には平成 28 年度に溶液単独系で得られた値（産業技術総合研究所ほか，2017）もプロットした。緩衝材中と

溶液単独系では腐食速度が異なっているが、これは既往の結果(谷口ほか, 2010)と整合する。溶液単独系では平成 28 年度の結果(産業技術総合研究所ほか, 2017)が示すように、30 日までの試験でも試験片全面に均一な皮膜が形成されており、その保護作用によって腐食が比較的速やかに抑制されたものと考えられる。一方、緩衝材中では、前述のとおり 90 日後の試験においても素地が一部観察されており、保護性の皮膜形成にはさらに時間を要する可能性がある。平均腐食速度に及ぼす塩濃度の影響については、図 3.1-4 に示すように 30 日、90 日ともに人工海水でやや大きな値となっているものの、大きな違いはなく、希釈倍数の依存性もほとんど見られなかった。図 3.1-5 から試験期間を通じて人工海水では希釈した場合に比較してやや大きな腐食量となっていたが、平均腐食量の変化から算出した平均腐食速度(図中の近似直線の傾きから算出した値)はほぼ同様の値であり、希釈倍数による影響はほとんど見られなかった。以上の結果から、現時点までのデータに基づくと緩衝材共存下では塩濃度による腐食速度への影響が大きく緩和されていると考えられる。この理由は明らかではないが、緩衝材に含まれる可溶性不純物の影響や緩衝材の化学的緩衝作用が寄与している可能性などが考えられる。今後、より長期データの取得と表面に形成される皮膜性状の変化などをより詳細に調査する必要がある。

表 3.1-3 試験片の重量変化から算出した平均腐食量および平均腐食速度

溶液	浸漬期間 (日)	平均腐食量 (mm)	平均腐食速度(mm/y)
人工海水 (希釈なし)	30	4.06×10^{-3}	4.93×10^{-2}
		4.15×10^{-3}	5.05×10^{-2}
		3.57×10^{-3}	4.34×10^{-2}
10 倍希釈	30	2.98×10^{-3}	3.62×10^{-2}
		3.15×10^{-3}	3.83×10^{-2}
		3.31×10^{-3}	4.03×10^{-2}
100 倍希釈	30	2.98×10^{-3}	3.62×10^{-2}
		2.94×10^{-3}	3.57×10^{-2}
		3.47×10^{-3}	4.22×10^{-2}
1000 倍希釈	30	3.19×10^{-3}	3.89×10^{-2}
		3.19×10^{-3}	3.88×10^{-2}
		3.29×10^{-3}	4.00×10^{-2}
なし	90	6.25×10^{-3}	2.53×10^{-2}
		6.71×10^{-3}	2.72×10^{-2}
		6.42×10^{-3}	2.60×10^{-2}
10 倍	90	5.70×10^{-3}	2.31×10^{-2}
		5.65×10^{-3}	2.29×10^{-2}
		5.62×10^{-3}	2.28×10^{-2}
100 倍	90	5.48×10^{-3}	2.22×10^{-2}
		5.41×10^{-3}	2.20×10^{-2}
		5.44×10^{-3}	2.20×10^{-2}
1,000 倍	90	5.57×10^{-3}	2.26×10^{-2}
		5.48×10^{-3}	2.22×10^{-2}
		5.61×10^{-3}	2.27×10^{-2}

③ 水素吸収量

水素抽出曲線の一例を図 3.1-6 に示す。この曲線より約 250°Cまでに放出された水素量を拡散性水素とみなして求めた水素濃度を表 3.1-4 に示す。また、希釈倍数と拡散性水素濃度の関係を図 3.1-7 に示す。30 日の試験で 1,000 倍希釈において 1 試料のみ比較的大きな値 (0.075 ppm) を示した以外では約 0.01~0.05 ppm の範囲であり、経時的な変化や希釈倍数の明瞭な依存性も見られなかった。また、今回得られた拡散性水素濃度の値は人工海水系において得られている母材のデータ (Kobayashi et al., 2011) と同程度であり、脆化が問題となる濃度 (ppm オーダー以上) (Okada, 1977) よりも十分小さいことがわかった。今回の実験条件の範囲では腐食速度についても既往のデータ (Kobayashi et al., 2011) と大きな違いはないことから、水素発生速度はこれら既往の例と同程度であり、水素吸収のメカニズムや律速過程、材料中の水素トラップサイト等に大きな違いがなければ、同様の水素吸収量になると考えられる。今後はより長期のデータを取得し、既往のデータとの違いや水素濃度の変化の傾向を確認する必要がある。

表 3.1-4 水素抽出曲線より求めた拡散性水素濃度

試験溶液	浸漬期間 (日)	拡散性水素濃度 (ppm)
人工海水 (希釈なし)	30	0.024
		0.018
		0.016
10 倍希釈	30	0.031
		0.024
		0.022
100 倍希釈	30	0.033
		0.020
		0.035
1000 倍希釈	30	0.075
		0.030
		0.030
人工海水 (希釈なし)	90	0.012
		0.015
		0.036
10 倍希釈	90	0.025
		0.045
		0.019
100 倍希釈	90	0.016
		0.024
		0.019
1000 倍希釈	90	0.025
		0.038
		0.021












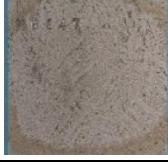












試験溶液	浸漬期間	試験後の試験片外観 (30×30×2 mm)		
人工海水 (希釈なし)	30 日			
10 倍希釈	30 日			
100 倍希釈	30 日			
1000 倍希釈	30 日			
人工海水 (希釈なし)	90 日			
10 倍希釈	90 日			
100 倍希釈	90 日			
1000 倍希釈	90 日			

図 3.1-3 浸漬試験後の試験片の外観

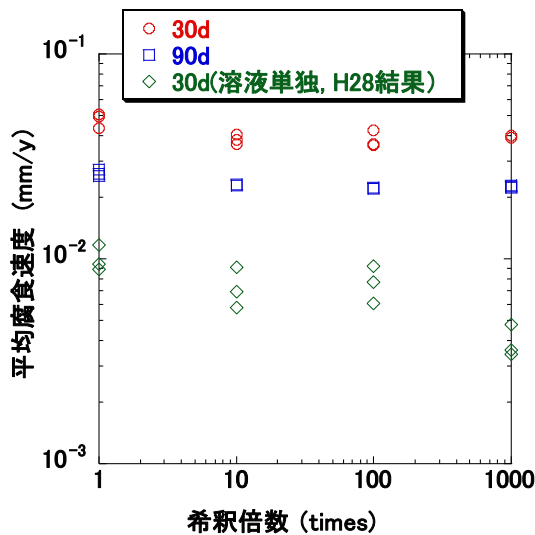


図 3.1-4 平均腐食速度の経時変化

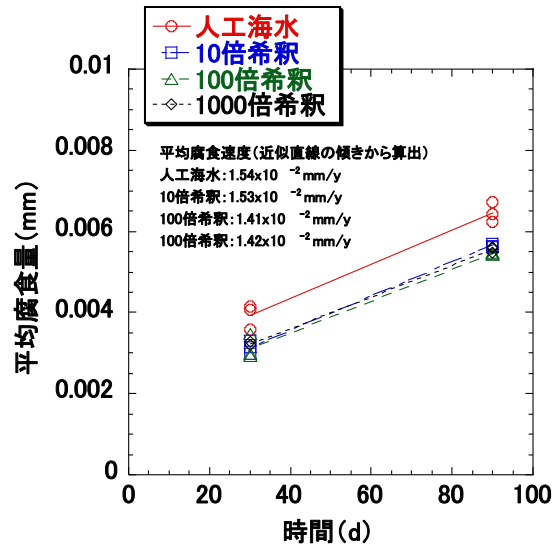


図 3.1-5 平均腐食量の経時変化

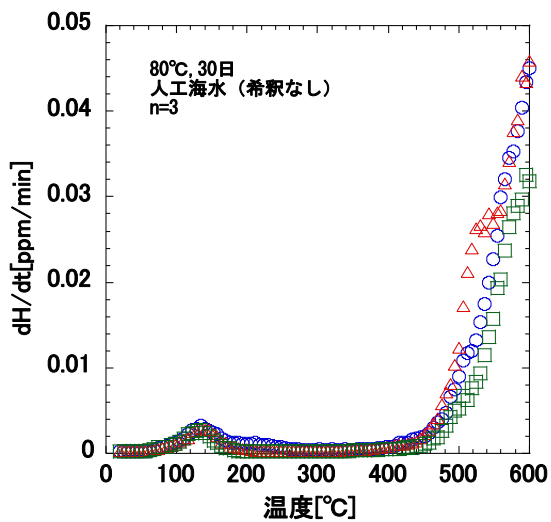


図 3.1-6 水素抽出曲線の一例

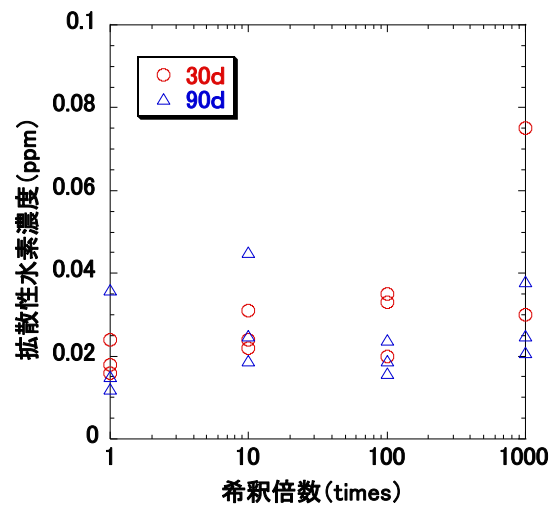


図 3.1-7 希釈倍数と拡散性水素濃度の関係

(3) 溶接部の腐食挙動

1) 試験方法

沿岸部における地下水の組成のうち、塩化物イオン(Cl^-)と重炭酸イオン(HCO_3^-)の濃度比に着目し、溶液組成が炭素鋼溶接部の腐食の均一性に与える影響を調査した。試験方法として、電気化学的手法によるスクリーニングを行った。

① 試験片

平成 28 年度に作製した従来材の腐食試験片 (以下、「従来材」という。) を用いた (産総研ほか, 2017)。母材の材質は JIS G3201 SF340A、市販の溶接材料を使用した TIG (Tungsten Inert Gas) 溶接により、多層盛溶接を実施した。試験片は溶接部が中央に位置するようにマスキングを施した。

溶接部の選択的な腐食を抑制する対策として、Ni を添加した溶接材料の改良方法が検討されている (原環センター, 2011)。後述の②に示す試験環境下での溶接部の品質改善効果を検証するため、改良溶接材を用いた溶接試験のための試験片 (以下、「改良材」という。) を作製した。

本年度は上記 2 種類の試験片のうち、従来材を使用した試験を実施した。

② 試験環境

蒸留水に NaCl と NaHCO₃ で調整した。表 3.1-5 に溶液組成の組合わせを示す。

表 3.1-5 従来材を用いた腐食試験の溶液条件

Run No.	母材	溶接材料	試験溶液条件				
			Cl ⁻		HCO ₃ ⁻ (NaHCO ₃)		[Cl ⁻]/[HCO ₃ ⁻]
			(ppm)	(mol/L)	(ppm)	(mol/L)	(-)
1	SF340A	市販品	2×10 ¹	6×10 ⁻⁴	1×10 ¹ (1×10 ¹)	2×10 ⁻⁴	3
2			2×10 ¹	6×10 ⁻⁴	1.5×10 ² (2.1×10 ²)	2.5×10 ⁻³	2×10 ⁻¹
3			2×10 ¹	6×10 ⁻⁴	1.5×10 ³ (2.1×10 ³)	2.5×10 ⁻²	2×10 ⁻²
4			1.0×10 ³	2.8×10 ⁻²	1×10 ¹ (1×10 ¹)	2×10 ⁻⁴	2×10 ²
5			1.0×10 ³	2.8×10 ⁻²	1.5×10 ² (2.1×10 ²)	2.5×10 ⁻³	1.1×10 ¹
6			1.0×10 ³	2.8×10 ⁻²	1.5×10 ³ (2.1×10 ³)	2.5×10 ⁻²	1.1
7			1.9×10 ⁴	5.4×10 ⁻¹	1×10 ¹ (1×10 ¹)	2×10 ⁻⁴	3×10 ³
8			1.9×10 ⁴	5.4×10 ⁻¹	1.5×10 ² (2.1×10 ²)	2.5×10 ⁻³	2.2×10 ²
9			1.9×10 ⁴	5.4×10 ⁻¹	1.5×10 ³ (2.1×10 ³)	2.5×10 ⁻²	2.2×10 ¹

③ 試験方法

定電位保持試験装置の構成図を図 3.1-8 に示す。試験は恒温槽中にて温度保持したガラス容器に腐食試験片を設置し、試験中に試験液の気相部に空気を吹き込んで実施した。溶液温度を 80℃ に加温して試験片を浸漬し、80 分後の電位を浸漬前の電位として記録した。その後、設定電位 -630 mV_{SCE} に設定し、100 時間の定電位分極を行なった。参照電極として SSE (Saturated Silver – silver chloride Electrode) を用いた。100 時間経過後に分極を停止し 10 分後および 30 分後に電位を計測して平均した値を試験後の浸漬電位とした。また、試験後に脱スケール処理を実施し、試験片の減肉形状を三次元形状測定器で計測した。

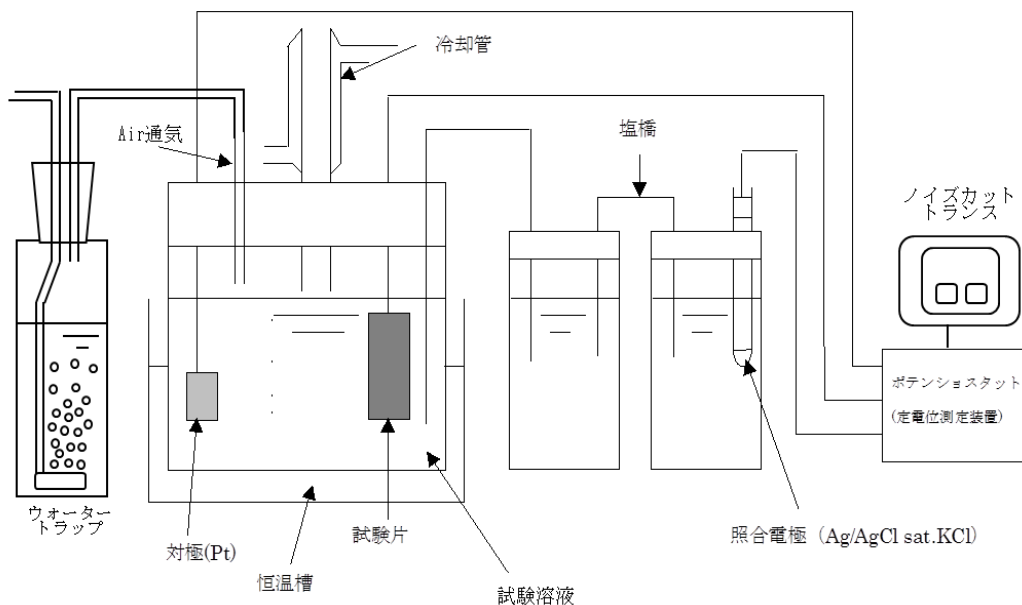


図 3.1-8 定電位保持試験装置構成

2) 試験結果

本年度は従来材について、表 3.1-5 の 8 条件について定電位分極試験を実施し、試験前後の電位の変化、試験後の外観観察を実施した結果、表 3.1-6 の傾向がみられた。

表 3.1-6 腐食試験後の外観観察による腐食形態の分類

	該当する試験条件	母材	溶接金属
A	Run4, 5, 7, 8	全面腐食	選択腐食
B	Run1, 2, 6, 9	孔食	孔食 又は 選択腐食
C	Run3	顕著な腐食減肉なし	顕著な腐食減肉なし

溶接部における選択腐食の程度を示す指標として、試験片全体の平均腐食深さに対する溶接部の最大深さの比を Grooving Factor α (=溶接部の最大深さ/全体の平均深さ) (Masamura et al., 1981) とした。母材に全面腐食が見られた Run4、Run5、Run7 および Run8 の形状計測結果から Grooving Factor α を算出したものを図 3.1-9 に示す。母材が全面腐食を呈す条件においては溶接金属に選択腐食が確認でき、 α は 1.2~2.1 程度であった。

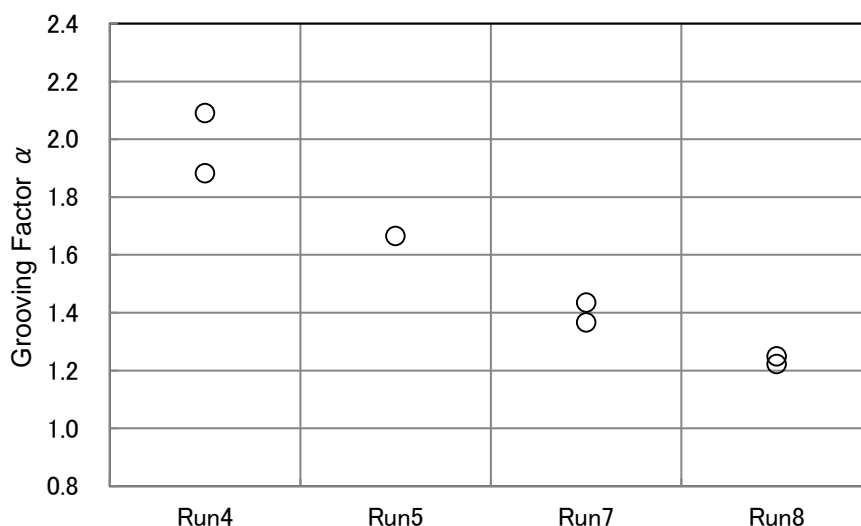


図 3.1-9 母材が全面腐食を呈する環境下での Grooving factor α

各試験条件では、腐食に対し攻撃的な塩化物イオンと、保護的に働く重炭酸イオンが含まれている。Run4~Run6、Run7~Run9 は $[Cl^-]$ がそれぞれ $2.8 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$ 、 $5.4 \times 10^{-1} \text{ mol/L}$ であり、 $[HCO_3^-]$ は $2 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ から $2.5 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ と高くなっている。同一 $[Cl^-]$ では、 $[HCO_3^-]$ の濃度が高くなるほど α が小さくなり全面腐食を示す $\alpha=1$ に近づく一方で、 $[HCO_3^-]$ が $2.5 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ より高くなると不動態化が起りやすくなり、孔食などの局部腐食を呈する傾向がみられる。このように、溶液の組成や比率により溶接部の腐食形態が変化することを確認した。

3) 改良溶接材料を用いた腐食試験片の作製

従来材と同一ロットで作製した SF 340A の厚板材に開先加工を施し、Ni を添加した改良溶接材料（産総研ほか, 2017）を用いた溶接試験体を作製した。溶接試験は事前に予備試験で確認し、従来材と同じ溶接条件とした。溶接試験体における溶接部の化学成分の分析結果を表 3.1-7 に示す。作製した溶接試験体に対して放射線透過試験（RT）を実施し、溶接欠陥が存在しない領域から腐食試験片を切り出し、試験片表面に欠陥が存在しないことを目視で確認した。

表 3.1-7 改良材の化学成分の分析結果（wt%）

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
母材 SF340A	0.10	0.18	0.42	0.011	0.017	0.13	0.09	0.12	0.02	<0.01
改良溶接材	0.082	0.23	1.08	0.004	0.0025	0.24	0.31	<0.010	<0.010	<0.002
溶接金属	0.08	0.22	0.93	0.008	0.007	0.20	0.24	0.04	<0.01	<0.01



図 3.1-10 改良溶接試験体の外観と断面マクロ観察

(4) まとめ

人工海水および希釈した人工海水を用いて緩衝材中における炭素鋼の腐食量と水素吸収量の測定を行った。その結果、緩衝材共存下では溶液単独系よりも腐食速度は大きいですが、塩濃度による影響は緩和されることがわかった。水素吸収量については希釈度合いによる明瞭な影響はみられなかった。また、今回実施した範囲では水素脆化が問題になる水素濃度よりも十分小さい値となった。今後はより長期の試験などのデータ拡充や、腐食形態、応力腐食割れ感受性などへの塩濃度による影響を確認することが課題である。

炭素鋼溶接部については、塩化物イオンと重炭酸イオンの組成比率をパラメータとした環境での溶接部の腐食形態の評価を実施した。その結果、同一の塩化物イオン濃度下では、重炭酸イオンの濃度が高くなるに従い全面腐食形態に近づくものの、ある濃度を超えると局部腐食を呈することが確認された。今後、本年度に作製した改良材を用いた腐食形態の評価試験を実施し、溶液組成が溶接部の全面腐食挙動に及ぼす影響を評価するとともに、溶接部の品質改善手法の妥当性についても検証していく。

3.1.2 緩衝材

(1) 背景と目的

これまでに、緩衝材の変質、膨潤、流出に関して、蒸留水、海水相当イオン強度を持つ NaCl 溶液ならびに CaCl₂ 溶液を用いた試験が行われ、緩衝材の再冠水過程における挙動の把握が進められている。それらの先行研究から、蒸留水とイオン強度を持つ溶液とでは、ベントナイトの膨潤挙動に差異はあるものの、緩衝材の性能を発揮できなくなるほどの影響が生じることはないという知見が得られている。しかし、未だイオンを含む溶液でのデータは少なく、海水のように複数のイオンを含む溶液に対する再冠水時の挙動に係る知見は十分とは言えない。

そのため本業務では、これまでの塩水環境を考慮した試験に基づく知見やデータを踏まえ、人工海水、各種溶存イオンならびにイオン強度など、沿岸部の地下で想定される地下水の化学成分に着目した試験を行い、知見やデータの拡充を行うとともに、緩衝材の機能変化に対するこれらの影響を確認する。

(2) 塩水環境下における緩衝材のせん断特性

沿岸部を対象とした際の緩衝材の基本特性に関する既存の研究として、幌延深地層研究センターで採水された 0.18M (海水の約 1/3) の塩化物イオンを含む実地下水 (以下、幌延地下水) や人工海水を用いた透水試験、熱物性試験、膨潤圧試験、標準圧密試験、圧密非排水三軸試験、一軸圧縮試験、侵入試験、浸食試験が実施されている (菊池・棚井, 2005 ; 松本・棚井, 2004 ; 松本・棚井, 2005 ; 松本・藤田, 2011)。せん断特性に関しては、海水系地下水を用いた圧密非排水三軸試験が実施されている (菊池・棚井, 2005) もの、試験溶液とせん断特性との明確な相関関係を明らかにするのに必要な試験データは十分には取得されていない。そのため、圧密非排水三軸試験データを拡充し、塩水環境下における緩衝材のせん断特性を明らかにする必要がある。また、沿岸部を対象とした緩衝材の力学挙動を解析する際に使用する弾塑性構成モデルとして Cam-clay モデル (Roscoe et al., 1963) や修正 Cam-clay モデル (Roscoe et al., 1968) などが候補として考えられるが、これらの代表的な弾塑性構成モデルの違いはせん断特性の表現方法の違いにある。従って、塩水環境下における緩衝材のせん断特性を明らかにすることは、対象となる地下水環境に応じて最適な弾塑性構成モデルを選定することに貢献する。今年度は、ASTM D1141 に準拠した人工海水 (表 3.1-8) を用いた圧密非排水三軸試験を実施した。さらに、試験結果を基に、海水系地下水環境下における弾塑性パラメータを整備するとともに、海水系地下水環境において適用できる構成モデルを構築した。

表 3.1-8 人工海水の組成

人工海水	
イオン種	イオン強度 (mol dm ⁻³)
Na ⁺	0.501
K ⁺	0.01
Ca ²⁺	0.042
Mg ²⁺	0.221
Sr ²⁺	0.003
Cl ⁻	0.558
SO ₄ ²⁻	0.117
F ⁻	0.00024

1) 圧密非排水三軸試験概要

圧密非排水三軸試験の概略図を（図 3.1-11）に示す。試験手順については、既往の研究で実施されている緩衝材の圧密非排水三軸試験の手順（菊池ほか, 2005）を参考に、以下の手順で実施した。

1. 所定の含水比のケイ砂混合ベントナイト試料をプレス機を用いて所定の供試体寸法および密度となるよう圧縮成型する。
2. 圧縮成型した供試体を飽和セルに入れ、1 ヶ月以上かけて加压給水し、供試体を飽和させる。
3. 飽和セルから供試体を取り出し、寸法および重量を計測し簡易的に飽和を確認する。
4. 飽和した供試体を三軸試験装置にセットし、排水経路を水で満たす。
5. 膨潤圧相当の側圧を载荷し、試験装置セット時に供試体が吸収した余分な水を排水させる。
6. 段階的に背圧（間隙水圧）を負荷する。これに合わせて側圧も背圧相当分増圧する。
7. 供試体からの水の出入りが収まったのを確認した後、非排水状態で拘束圧を上昇させ間隙圧係数（B 値）の測定を実施し、供試体の飽和を確認する。
8. 所定の圧密荷重を供試体に载荷し圧密を開始する。
9. 圧密を行い、圧密終了を3t 法により確認する。
10. 非排水状態で拘束圧を上昇させ圧密後のB 値を測定する。
11. 拘束圧を圧密時の圧力まで戻した後、軸方向に $0.01\% \text{ min}^{-1}$ のひずみ速度でせん断試験を開始する。
12. 軸ひずみが15%を超えた時点を目安に、供試体は破壊したとみなし、試験を終了する。
13. 供試体破壊後試験装置より供試体を取り出し、破壊状況を写真撮影および観察する。
14. 恒温槽で乾燥させ、乾燥重量を測定する。

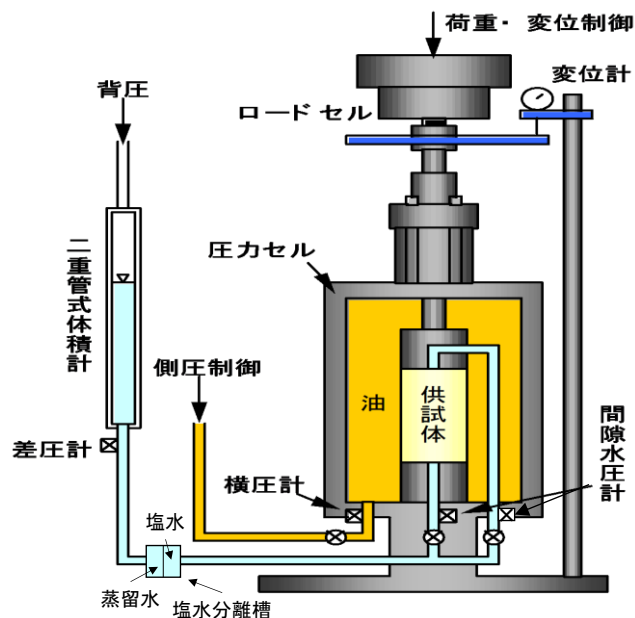


図 3.1-11 三軸試験装置概略

表 3.1-9 に試験条件を示す。供試体は、クニゲル V1、3 号ケイ砂、5 号ケイ砂を質量比 7 : 1.5 : 1.5 で混合した材料とし、乾燥密度は 1.6 Mg/m^3 とした。拘束圧は、1.0、2.0、3.0 MPa の 3 ケースとした。

表 3.1-9 試験条件

ベントナイト系材料	クニゲル V1		
混合材料	3号ケイ砂、5号ケイ砂		
乾燥密度 (Mg/m ³)	1.6		
混合材混合率 (wt%)	30		
供試体寸法 (mm)	D50×H100		
試験溶液	人工海水		
有効拘束圧 (MPa)	1.0	2.0	3.0
試験ケース	CU-SW1.0MPa	CU-SW2.0MPa	CU-SW3.0MPa

2) 圧密非排水三軸試験結果

① 圧密過程

圧密開始前の B 値測定結果を表 3.1-10 に示す。B 値については、供試体上部と下部の水圧を計測し、求めた。いずれのケースにおいても、B 値が 0.95 以上となっているため、飽和状態とみなし、圧密を実施した。圧密過程の体積変化量の時間変化を図 3.1-12 に示す。まず、圧密開始初期においては、2.0MPa と 3.0MPa の体積変化量の差は小さいものの、拘束圧に応じた体積変化が生じていることが確認できる。体積変形が緩やかになった後の挙動においては、拘束圧 2.0MPa のケースでは、体積減少がゆるやかに続く挙動が生じているが、拘束圧 1.0、3.0MPa のケースでは、若干の体積膨張が生じている。

表 3.1-10 圧密前 B 値計測結果

試験ケース	CU-SW1.0 MPa	CU-SW2.0 MPa	CU-SW3.0 MPa
B 値 (上部)	1.00	0.95	1.01
B 値 (下部)	1.01	1.01	0.95

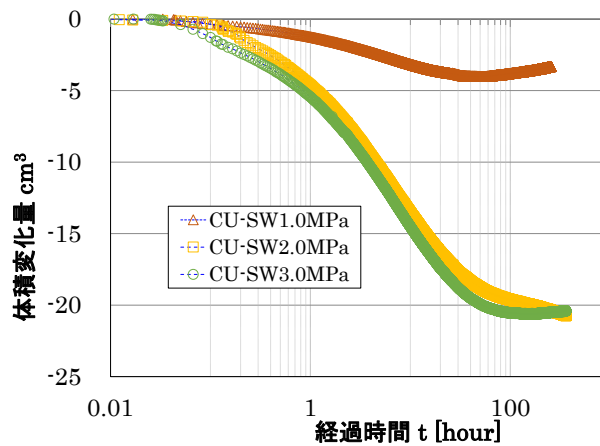


図 3.1-12 圧密過程

② せん断過程

せん断開始前の B 値測定結果を表 3.1-11 に示す。いずれのケースにおいても、B 値が 0.95 以上となっていることが確認できる。図 3.1-13 にせん断過程における応力-ひずみ関係、図 3.1-14 に有効応力経路図を示す。図 3.1-4 には、蒸留水を用いた場合の限界状態線（限界応力比：0.63）を示しているが、人工海水を用いた場合においても、限界応力比は蒸留水の場合とほとんど変わらないことが分かる。

表 3.1-11 圧密後 B 値計測結果

試験ケース	CU-SW1.0 MPa	CU-SW2.0 MPa	CU-SW3.0 MPa
B 値 (上部)	1.00	1.00	0.98
B 値 (下部)	0.99	0.99	0.97

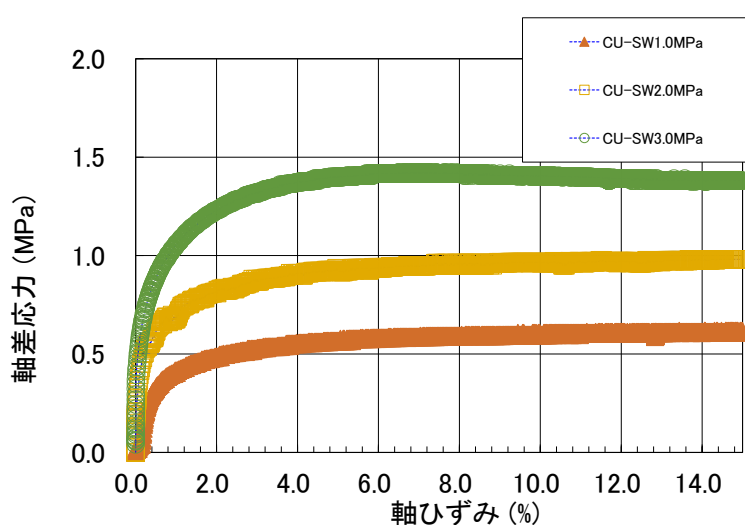


図 3.1-13 応力-ひずみ関係

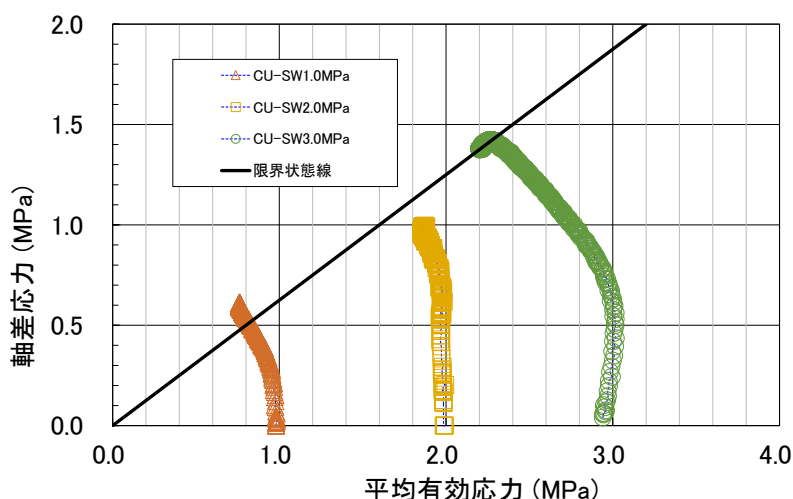


図 3.1-14 有効応力経路

3) 塩水環境下における緩衝材の弾塑性パラメータの設定

蒸留水および海水系地下水（幌延地下水, NaCl 溶液, 人工海水）を用いた標準圧密試験（菊池・棚井, 2005）、蒸留水を用いた圧密非排水三軸試験（高治・鈴木, 1999）、幌延地下水を用

いた圧密非排水三軸試験（高治・重野・下河内, 2004）および本事業で実施した人工海水を用いた圧密非排水三軸試験の再現解析により、緩衝材の弾塑性パラメータを設定した。図 3.1-15 にパラメータの設定フローを示す。まず蒸留水条件におけるパラメータを決定した後に、海水系地下水におけるパラメータを設定した。ここで、蒸留水および海水系地下水を用いた標準圧密試験結果から、圧縮指数は塩水環境ではほとんど変化しないことがわかっている（菊池・棚井, 2005）。また、2)の人工海水を用いた圧密非排水三軸試験結果から、限界応力比についても塩水環境ではほとんど変化しないと考えられるため、海水系地下水におけるパラメータ設定においては、膨潤指数のみを変化させることとした。また、フローチャートにおいて実施する標準圧密試験および圧密非排水三軸試験の再現解析には修正 Cam-clay モデルを用い、構成モデル（増分型有効応力-ひずみ関係式）のみを用いた差分法により解析解を取得した。

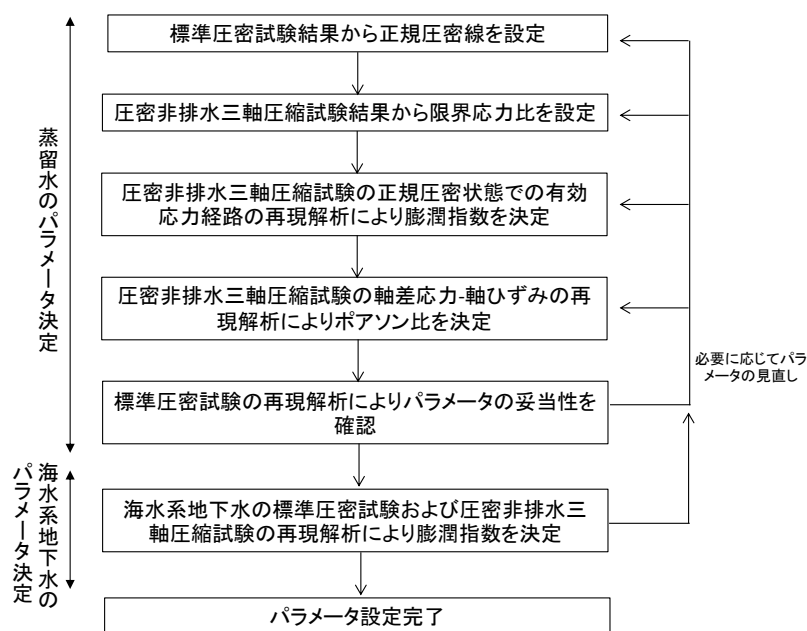


図 3.1-15 パラメータの設定フロー

上記のフローにおいて実施した再現解析結果を図 3.1-16、図 3.1-17、図 3.1-18 に、使用したパラメータを表 3.1-12 に示す。図から、修正 Cam-clay モデルを使用すれば、圧密非排水三軸試験および標準圧密試験結果をおおむね再現できていることが分かる。特に標準圧密試験においては、除荷時の非線形な膨潤挙動や、除荷・再載荷時のヒステリシス挙動を再現できているのが確認できる。除荷・再載荷において常に弾性状態であれば、除荷・再載荷で同じ有効応力経路をたどるためヒステリシス挙動は現れないが、図 3.1-18 に示す有効応力経路図を見ると、除荷過程で降伏し弾塑性状態となり、除荷・再載荷において違う有効応力経路をたどっているため、間隙比-鉛直有効応力関係においてヒステリシス挙動が現れている。また、降水系地下水環境でのパラメータのうち膨潤指数を変化させることで、海水系地下水環境における力学挙動の変化（標準圧密試験における除荷時の膨潤変形量の低下など）をうまく再現できることが分かる。ただし、圧密非排水三軸試験については蒸留水と幌延地下水と人工海水のみの試験結果しかないため、今後は試験データを拡充していくことが必要である。

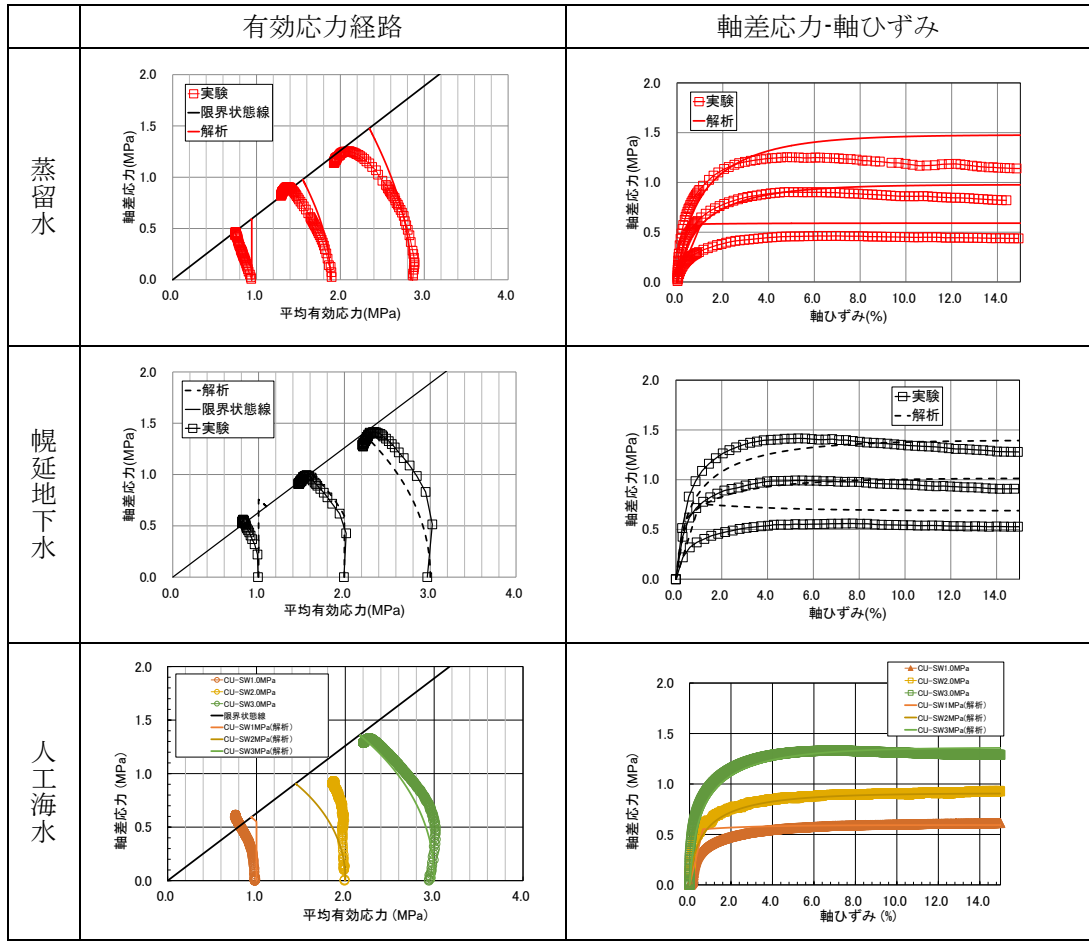


図 3.1-16 圧密非排水三軸試験の再現解析結果

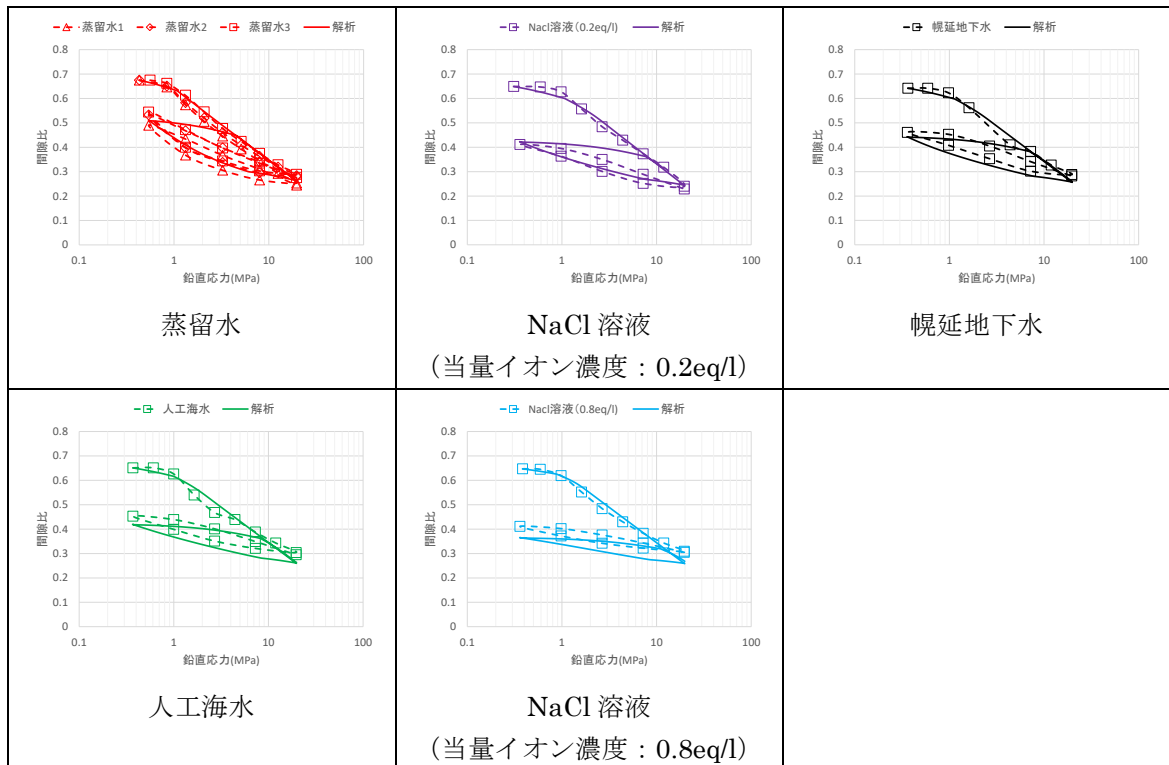


図 3.1-17 標準圧密試験の再現解析結果

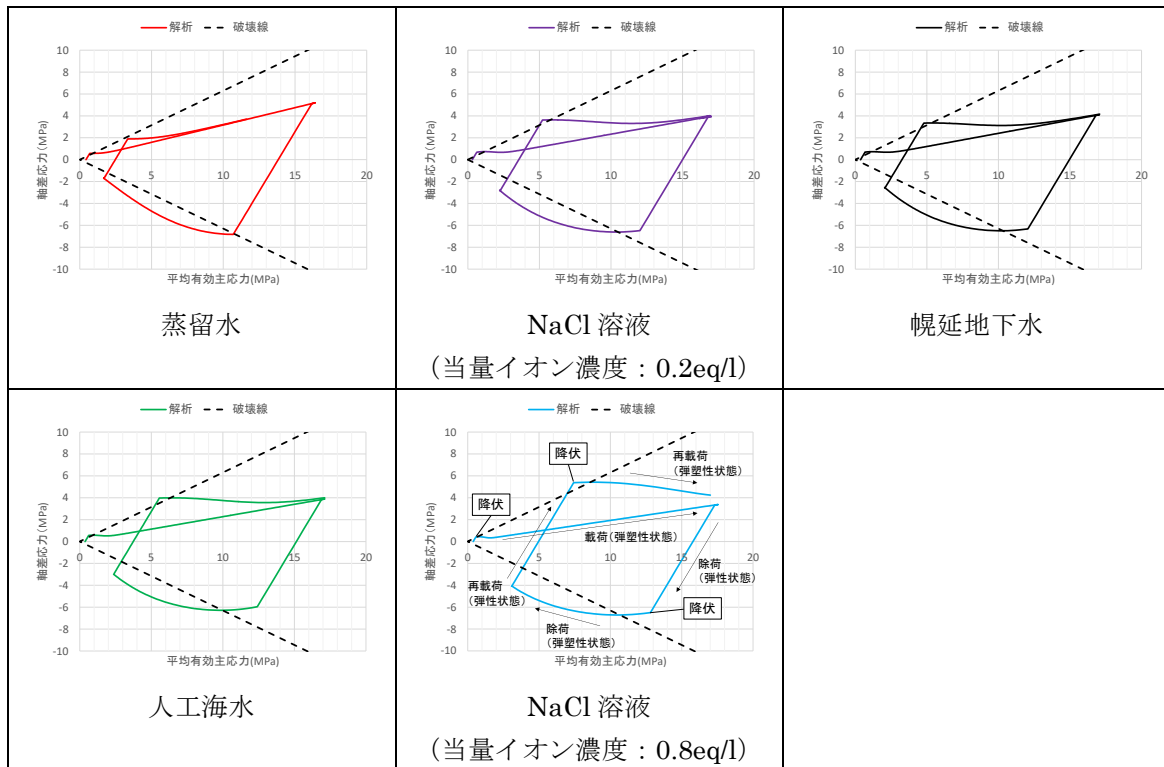


図 3.1-18 標準圧密試験の再現解析における有効応力経路

表 3.1-12 設定された修正 Cam-clay モデルのパラメータ

		蒸留水	NaCl 溶液	幌延地下水	人工海水	NaCl 溶液
当量イオン濃度(eq/l)	c	0	0.2	0.21	0.64	0.8
膨潤指数	κ	0.09	0.07	0.07	0.065	0.05
圧縮指数	λ	0.125				
限界応力比	M	0.63				
ポアソン比	ν	0.1				
圧密降伏応力 (MPa)	p_0	$p_0 = \exp(0.62 - e_0 - \kappa \ln p'_i) / (\lambda - \kappa)$ e_0 : 初期間隙比, p'_i : 初期平均有効応力 (=膨潤圧)				

伊藤・三原（2005）の研究にならい、当量イオン濃度 c を用いて膨潤指数を整理した結果を図 3.1-19 に示す。図中には、膨潤指数 κ と当量イオン濃度 c の関係式を示している。関係式の設定においては、 $c=0$ において $\kappa=0.09$ となること、常に $\kappa > 0$ となること、を考慮して以下のように設定した。

$$\kappa = 0.09 \left(a_\kappa + \frac{(1 - a_\kappa)}{1 + b_\kappa c} \right) \quad (3.1-1)$$

ここで、 a_κ, b_κ : フィッティングパラメータであり、 a_κ は濃度が上昇した時の κ の下限値を決定するパラメータであり、 b_κ は曲線の形状を決めるパラメータとなる。本検討では、最小二乗法により、

$$a_\kappa = 0.4759 \quad (3.1-2)$$

$$b_\kappa = 3.3315 \quad (3.1-3)$$

とした。なお、上式は修正 Cam-clay モデルを用いた場合の関係式であり、他の構成モデルを使用する場合は別途関係式を設定する必要がある。

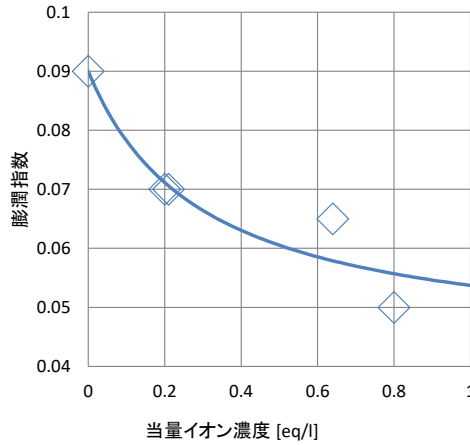


図 3.1-19 膨潤指数と当量イオン濃度関係

4) 当量イオン濃度変化を考慮した弾塑性構成モデルの構築

膨潤指数と当量イオン濃度の関係式を用いて、不飽和弾塑性構成モデルである *Se-hardening model* (大野ら, 2007 ; Takayama et al, 2017) を当量イオン濃度変化を考慮できるように拡張した。*Se-hardening model* の降伏関数は、飽和の弾塑性構成モデルと同じであり、本検討では修正 Cam-clay モデルの降伏関数を使用する。

$$f(\sigma', p'_c) = MD \ln \frac{p'}{p'_c} + MD \ln \left[\frac{M^2 + \left(\frac{q}{p'} \right)^2}{M^2} \right] = 0 \quad (3.1-4)$$

ここで、 p' : 平均有効主応力、 q : 軸差応力、 D : ダイレイタンスー係数、 p'_c : 降伏応力である。降伏応力 p'_c は、不飽和状態においては、

$$p'_c = \zeta p'_{sat} \quad (3.1-5)$$

$$\zeta = \exp \left\{ (1 - S_e)^n \ln a \right\} \quad (3.1-6)$$

で表わされる。ここで、 p'_{sat} : 飽和時の先行圧密降伏応力、 a, n : フィッティングパラメーター ($1 \leq \zeta \leq a$)、 S_e : 有効飽和度である。*Se-hardening model* では、塑性体積ひずみの増加による硬化のほかに、有効飽和度の増減による軟化/硬化を表現することができる。また、ダイレイタンスー係数は、

$$D = \frac{\lambda - \kappa}{(1 + e_0)M} \quad (3.1-7)$$

で表わされ、ベントナイトの場合、膨潤指数を以下のように表すことで不飽和から飽和に至る過程での膨潤挙動を表現している (Takayama et al, 2017)。

$$\kappa = \kappa(S_e) = \kappa_0 - (\kappa_0 - \kappa_{sat}) S_e^l \quad (3.1-8)$$

ここで、 κ_0 : $S_e=0$ での膨潤指数、 κ_{sat} : $S_e=1$ での膨潤指数、 l : フィッティングパラメータであり、本検討では当量イオン濃度変化を考慮できるように κ_{sat} を以下のように拡張した。

$$\kappa_{sat} = \kappa_{sat0} \left(a_\kappa + \frac{1 - a_\kappa}{1 + b_\kappa c} \right) \quad (3.1-9)$$

ここで、 κ_{sat0} : $S_e=1$ かつ $c=0$ での膨潤指数であり、0.09 である。続いて、応力-ひずみ関係を導出する。通常の土質材料と同様に、膨潤線を以下の式で表現する。

$$e = e|_{p'=p'_{sat}} - \kappa \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} \quad (3.1-10)$$

ここで、 e : 間隙比、 $e|_{p'=p'_{sat}}$: 降伏時の間隙比である。また、弾性体積ひずみ増分 $\dot{\epsilon}_v^e$ は以下の式で表わされる。

$$\dot{\epsilon}_v^e = -\frac{\dot{e}}{1+e_0} \quad (3.1-11)$$

式(3.1-10)を式(3.1-11)に代入すると、弾性状態における平均有効主応力増分は、

$$\dot{p}' = K \dot{\epsilon}_v^e + K_{S_e} \dot{S}_e + K_c \dot{c} \quad (3.1-12)$$

で表わされる。ここで、

$$K = \frac{1+e_0}{\kappa} p' \quad (3.1-13)$$

$$K_{S_e} = \frac{(\kappa_0 - \kappa_{sat}) S_e^{l-1} \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} - \kappa n (1 - S_e)^{n-1} \ln a}{\kappa} p' \quad (3.1-14)$$

$$K_c = \frac{(1 - a_\kappa) b_\kappa p' S_e^l k_{sat0}}{k(1 + b_\kappa c)^2} \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} \quad (3.1-15)$$

である。本事業では、上式を内包する以下の非線形弾性構成式を適用する。

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}}' = \mathbf{D}^e : \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^e + K_{S_e} \dot{S}_e \mathbf{1} + K_c \dot{c} \mathbf{1} \quad (3.1-16)$$

ここで、 \mathbf{D}^e : 弾性剛性テンソルであり、

$$\mathbf{D}^e = K \mathbf{1} \otimes \mathbf{1} + 2G \mathbf{A} \quad (3.1-17)$$

$$G = \frac{3(1 - 2\nu')}{2(1 + \nu')} K \quad (3.1-18)$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{I} - \frac{1}{3} \mathbf{1} \otimes \mathbf{1} \quad (3.1-19)$$

である。ここで、 $\mathbf{1}$: クロネッカーのデルタ、 $\dot{\boldsymbol{\epsilon}}G$: せん断弾性係数、 $\mathbf{1}$: 4 階の単位テンソルである。続いて弾塑性状態の応力ひずみ関係を導出する。現応力が常に降伏曲面上にあるとすると、適応条件は、

$$\dot{f}(\boldsymbol{\sigma}', S_e, c, p'_{sat}) = \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}'} : \dot{\boldsymbol{\sigma}}' + \frac{\partial f}{\partial S_e} \dot{S}_e + \frac{\partial f}{\partial p'_{sat}} \dot{p}'_{sat} + \frac{\partial f}{\partial c} \dot{c} = 0 \quad (3.1-20)$$

であり、

$$\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}'} = \frac{D}{3p'} \left[M - \frac{2M \left(\frac{q}{p'} \right)^2}{M^2 + \left(\frac{q}{p'} \right)^2} \right] \mathbf{1} + \frac{3D}{2qp'} \left[\frac{2M \left(\frac{q}{p'} \right)}{M^2 + \left(\frac{q}{p'} \right)^2} \right] \mathbf{s} \quad (3.1-21)$$

$$\frac{\partial f}{\partial S_e} = \frac{(\kappa_0 - \kappa_{sat}) S_e^{l-1}}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} \left(\frac{M^2 + \left(\frac{q}{p'} \right)}{M^2} \right) + MD(1 - S_e)^{n-1} n \ln a \quad (3.1-22)$$

$$\frac{\partial f}{\partial p'_{sat}} = -\frac{MD}{p'_{sat}} \quad (3.1-23)$$

$$\frac{\partial f}{\partial c} = \frac{(1-a_\kappa)b_\kappa\kappa_{sat0}S_e^l}{(1+b_\kappa c)^2(1+e_0)} \ln \left[\frac{p'}{\zeta p'_{sat}} \left(\frac{M^2 + \left(\frac{q}{p'}\right)^2}{M^2} \right) \right] \quad (3.1-24)$$

$$\frac{\partial f}{\partial D} = \left[M \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} + M \ln \left[\frac{M^2 + \left(\frac{q}{p'}\right)^2}{M^2} \right] \right] \quad (3.1-25)$$

$$\frac{\partial D}{\partial k} = -\frac{1}{(1+e_0)M} \quad (3.1-26)$$

$$\frac{\partial \kappa}{\partial c} = \frac{-(1-a_\kappa)b_\kappa\kappa_{sat0}S_e^l}{(1+b_\kappa c)^2} \quad (3.1-27)$$

である。硬化則については、*Se-hardening model* と同じものを用いる。すなわち、

$$\frac{\dot{p}'_{sat}}{p'_{sat}} = \frac{\dot{\epsilon}_v^p}{MD} \quad (3.1-28)$$

である。塑性ひずみ増分 $\dot{\epsilon}^p$ が以下の関連流れ則に従うと仮定する。

$$\dot{\epsilon}^p = \gamma \frac{\partial f}{\partial \sigma'} \quad (3.1-29)$$

ここで、 γ :塑性定数である。また、ひずみ増分が弾性と塑性に分解できると仮定すると、

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^e + \dot{\epsilon}^p \quad (3.1-30)$$

となる。式 (3.1-29)および(3.1-30)を式(3.1-16)に代入すると、

$$\dot{\sigma}' = \mathbf{D}^e : \left(\dot{\epsilon} - \gamma \frac{\partial f}{\partial \sigma'} \right) + K_{Se} \dot{S}_e \mathbf{1} + K_c \dot{c} \mathbf{1} \quad (3.1-31)$$

となる。式(3.1-20)に式(3.1-31)を代入すると、塑性定数 γ は、

$$\gamma = \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma'} : \mathbf{D}^e : \dot{\epsilon} + \left[\frac{\partial f}{\partial p'} K_{Se} + \frac{\partial f}{\partial S_e} \right] \dot{S}_e + \left[\frac{\partial f}{\partial p'} K_c + \frac{\partial f}{\partial c} \right] \dot{c}}{\frac{\partial f}{\partial \sigma'} : \mathbf{D}^e : \frac{\partial f}{\partial \sigma'} + \frac{\partial f}{\partial p'}} \quad (3.1-32)$$

となる。ここで、

$$\frac{\partial f}{\partial p'} = \frac{D}{p'} \left[M - \frac{2M \left(\frac{q}{p'}\right)^2}{M^2 + \left(\frac{q}{p'}\right)^2} \right] \quad (3.1-33)$$

である。式(3.1-32)を式(3.1-31)に代入すると、弾塑性状態における応力ひずみ関係が得られる。

$$\dot{\sigma}' = \mathbf{D}^{ep} : \dot{\epsilon} - \mathbf{C}^{ep} \dot{S}_e - \mathbf{E}^{ep} \dot{c} \quad (3.1-34)$$

ここで、 \mathbf{D}^{ep} :弾塑性剛性テンソルであり、 \mathbf{C}^{ep} :有効飽和度変化に対する弾塑性剛性テンソル、 \mathbf{E}^{ep} :当量イオン濃度変化に対する弾塑性剛性テンソルであり、

$$\mathbf{D}^{ep} = \mathbf{D}^e - \frac{\mathbf{D}^e : \frac{\partial f}{\partial \sigma'} \otimes \frac{\partial f}{\partial \sigma'} : \mathbf{D}^e}{\frac{\partial f}{\partial \sigma'} : \mathbf{D}^e : \frac{\partial f}{\partial \sigma'} + \frac{\partial f}{\partial p'}} \quad (3.1-35)$$

$$\mathbf{C}^{ep} = \frac{\mathbf{D}^e : \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}'} \left(\frac{\partial f}{\partial p'} K_{S_e} + \frac{\partial f}{\partial S_e} \right)}{\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}'} : \mathbf{D}^e : \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}'} + \frac{\partial f}{\partial p'}} - K_{S_e} \mathbf{1} \quad (3.1-36)$$

$$\mathbf{E}^{ep} = \frac{\mathbf{D}^e : \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}'} \left[\frac{\partial f}{\partial p'} K_c + \frac{\partial f}{\partial c} \right]}{\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}'} : \mathbf{D}^e : \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}'} + \frac{\partial f}{\partial p'}} - K_c \mathbf{1} \quad (3.1-37)$$

である。提案モデルにおいては、塑性定数を用いて弾塑性判定を実施する。図 3.1-20 に提案モデルの状態曲面 (state boundary surface) の概念図を示す。不飽和状態における状態曲面は、式(3.1-5)に従い p' 軸に対して飽和状態の ξ 倍大きくなる。また、当量イオン濃度変化がない条件で飽和度が上昇した場合、式(3.1-8)に従い q 軸に対して上に凸の形状に変化していく。一方、当量イオン濃度が上昇すると、式(3.1-9)に従い膨潤壁面の傾きが低下していく。従って、提案モデルの状態曲面は、飽和度と当量イオン濃度に強く依存する。状態曲面と膨潤壁面の交点である降伏曲面は、 p' - q 平面において、相似形を保ちながら飽和度の変化によって拡大・縮小し、その形状は限界応力比 M にのみ依存する。

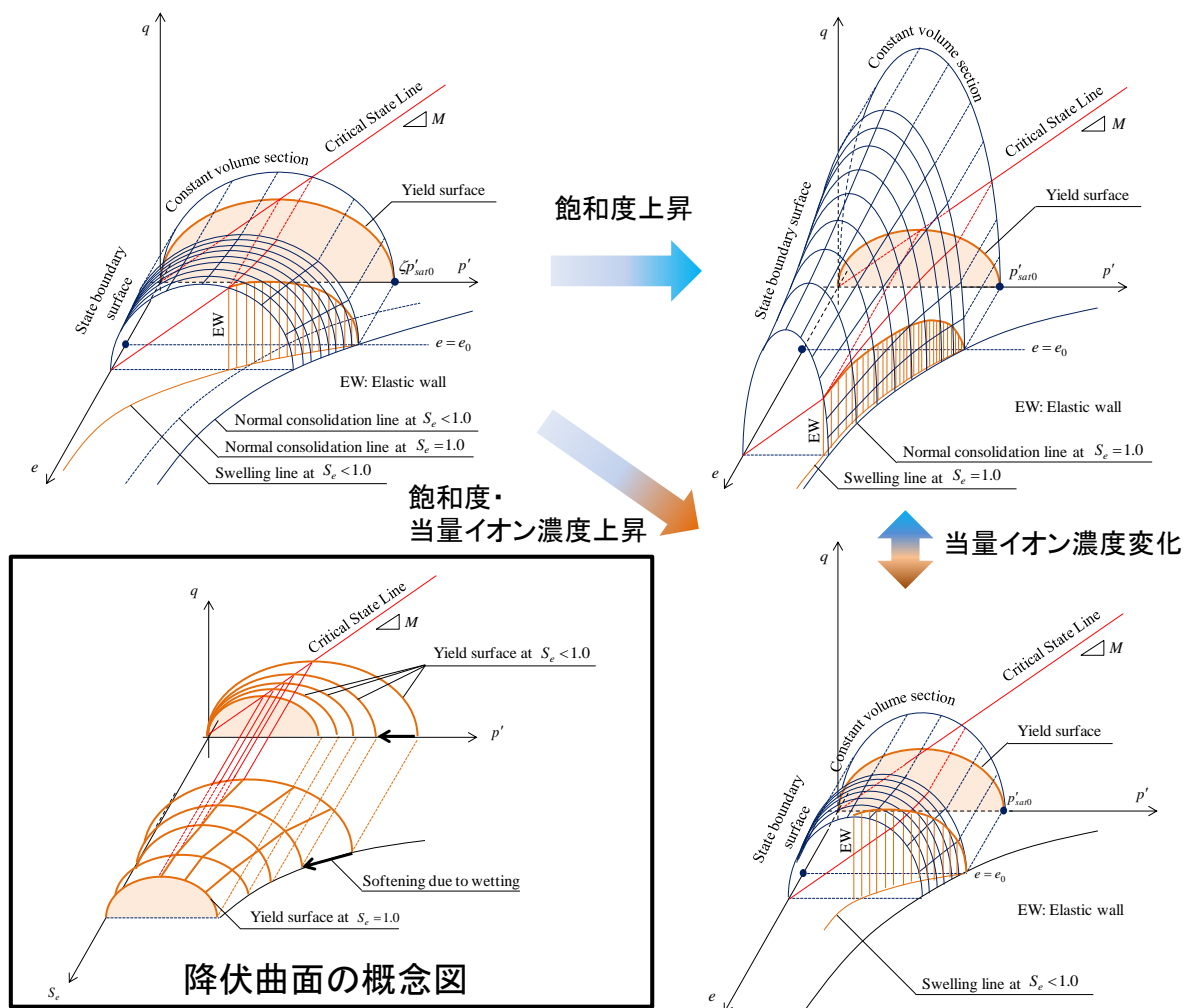


図 3.1-20 提案モデルの状態曲面の概念図

5) 当量イオン濃度変化を考慮した弾塑性構成モデルの検証

構成モデルの検証を実施するため、土/水/空気/溶解物質連成解析コード DACSAR-MP-ad(野村ら、2011)にモデルを適用し、NaCl 溶液(0.2, 0.5, 0.8eq/l)および蒸留水を想定した膨潤圧試験(菊池・棚井, 2005; 鈴木・藤田, 1999)の解析を実施した。

飽和透水係数については、図 3.1-21 に示す既往の試験結果(緩衝材基本特性データベース(BMDB)、日本原子力研究開発機構, 2015, 2017)から、以下の式を設定して用いた。

$$k_w = k_w \exp(3.66c) \quad : 0 \leq c \leq 1.83 \quad (3.1-38)$$

$$k_w = 820.57k_{w0} \quad : 1.83 < c \leq 6 \quad (3.1-39)$$

ここで、 k_w : 透水係数 (m/s)、 k_{w0} : $c=0$ での透水係数 (=5.8E-13 m/s) である。

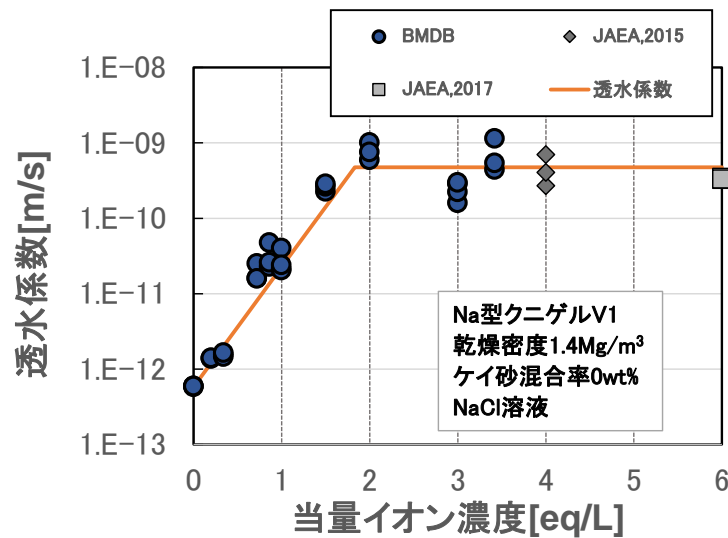


図 3.1-21 透水係数

不飽和透水係数については、Brooks-Corey 式 (Brooks and Corey, 1964) を用いた。

$$k_r = S_e^m \quad (3.1-40)$$

ここで、 k_r : 比透水係数、 m : フィッティングパラメータであり、浸潤試験(鈴木・藤田, 1999)の再現解析により m を決定した。水分特性曲線については、河井ら(2002)のモデルを使用し、既往の試験データ(鈴木・藤田, 1999)からパラメータを決定した。このモデルにおけるサクション s と飽和度 S_r 関係は、

$$S_r = S_{ra} + (S_{rf} - S_{ra}) / (1 + s^B \exp A) \quad (3.1-41)$$

であり、任意の状態 ($s=s^*$, $S_r=S_r^*$) からの吸水・脱水過程において、

$$\left. \begin{aligned} A = A_w, B = B_w, S_{rf} = 1.0, \quad \text{and} \\ S_{ra} = \frac{S_r^* (1 + s^{*B} \exp A) - S_{rf}}{s^{*B} \exp A} \end{aligned} \right\} \text{ 湿潤過程} \quad (3.1-42)$$

$$\left. \begin{aligned} A = A_d, B = B_d, S_{ra} = S_{r0}, \text{ and} \\ S_{rf} = S_{ra} + (S_r^* - S_{ra})(1 + s^{*B} \exp A) \end{aligned} \right\} \text{脱水過程} \quad (3.1-43)$$

となる。ここで、 S_{r0} :残留飽和度、 A_d, B_d, A_w, B_w : フィッティングパラメータである。拡散係数については、第二次 TRU レポート(電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構, 2005)で使用されている以下の式を用いた。

$$D(n, \alpha_{mon}) = 4 \times 10^{-9} \times n^{2.22\alpha_{mon}^{0.13} + 1} \quad (3.1-44)$$

ここで、 D : 拡散係数 (m^2/s)、 n : 空隙率 (-)、 α_{mon} : モンモリロナイト含有率 (-) である。不飽和状態における弾塑性パラメータ a, n については、静的締固め圧力 20MPa の締め固め曲線(千々松ほか, 1999)を基に決定した。不飽和状態における弾塑性パラメータ l については、後述の蒸留水を用いた膨潤圧試験の解析において、生じる膨潤圧が実験値と同等となるように設定した。使用したパラメータを表 3.1-13 にまとめる。図 3.1-22 に解析に使用したメッシュ図・境界条件を示す。なお、本解析で想定した膨潤圧試験は、上端から空気が抜ける構造であるため、空気が他の挙動に与える影響は小さいと考え、解析では空気については連成していない。

表 3.1-13 解析パラメータ

事象	パラメータ				
力学 (飽和)	λ :0.125	κ_{sat0} :0.09	M :0.63	v' :0.1	
力学 (不飽和)	κ_0 :0.043	a :35	n :1.3	l :1.7	
水理 (水分特性曲線)	A_d :-6.5	B_d :1.0	A_w :-5.0	B_w :1.0	S_{r0} :0.0
水理 (透水)	kw_0 :5.8E-13 m/s	m :1.3			
初期条件	e_0 :0.676	s_i :5 MPa	Sr_i :0.258	α_{mon} :0.385	

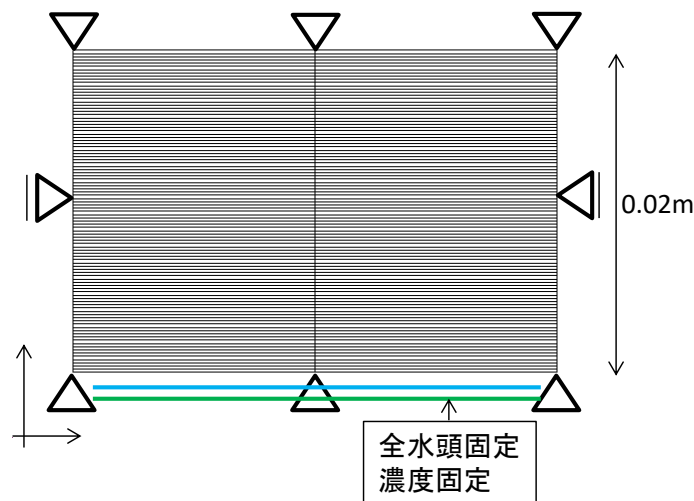


図 3.1-22 メッシュ図・境界条件

膨潤圧の時間変化を図 3.1-23 に、飽和時に発揮している膨潤圧と当量イオン濃度の関係を図 3.1-24 に示す。図 3.1-24 には、既往の試験データ(菊池・棚井, 2005; 鈴木・藤田, 1999)もあわせて示している。実験では NaCl 溶液を用いた場合、蒸留水を用いた場合より膨潤圧が小

さくなる傾向があるが、解析においても同様の傾向を表現できているとともに、生じる膨潤圧も実験と同等の値を再現することができている。

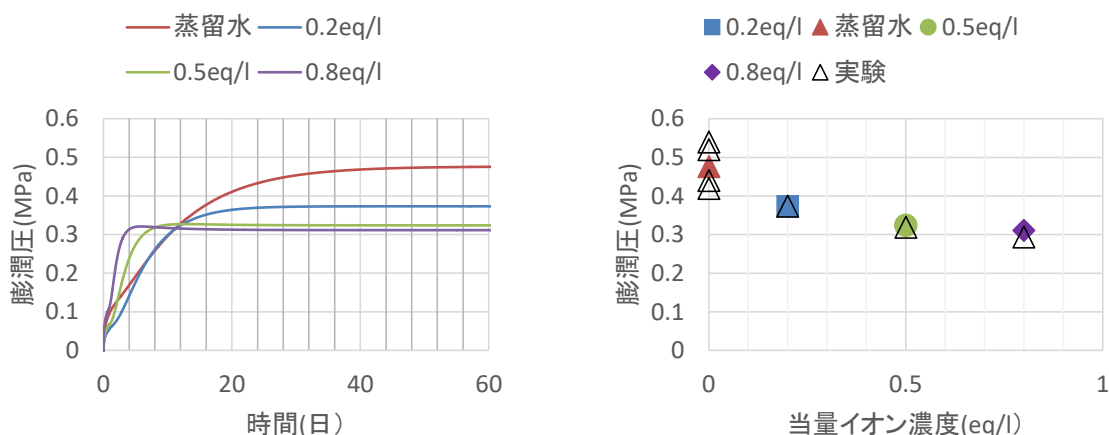


図 3.1-23 膨潤圧の経時変化(左図)

図 3.1-24 膨潤圧と当量イオン濃度の関係(右図)

6) まとめ

本検討では人工海水を用いた三軸非排水圧縮試験を実施した。その結果、人工海水条件下における緩衝材の限界応力比は蒸留水における値と同等であることがわかった。また、得られた試験結果および既往の試験データを基に、当量イオン濃度を用いて緩衝材の力学挙動解析に必要な弾塑性パラメータを整理した。さらに、整理されたパラメータを基に、当量イオン濃度変化を考慮できる不飽和弾塑性構成モデルを構築した。構築した弾塑性構成モデルは、飽和状態における当量イオン濃度の違いに応じた除荷時の膨潤挙動の違いを表現できるとともに、不飽和から飽和に至る過程で生じる当量イオン濃度の違いに応じた膨潤圧の違いも表現することが可能であることを示した。今後は、試験データの拡充を行うことによるパラメータやモデルの精緻化が必要である。

(3) 再冠水時の緩衝材の挙動

閉鎖後長期の安全性の確保の観点から示される緩衝材に対する要求性能を満足させるためには、緩衝材の施工（操業段階）から再冠水に至る緩衝材の状態の変化を連続的に評価し、長期性能評価の初期状態を確からしく予測する必要がある。そのため、施工後の緩衝材の状態変遷あるいは性能の変化について、再冠水過程に予期される諸現象に伴う影響を考慮して、その挙動を定量的に評価することが必要である。処分場が沿岸部に設置される場合には、海水系（塩水）の地下水環境が想定されることから、これらの評価では、再冠水する地下水が塩水である可能性を考慮する必要がある。

本事業では、再冠水挙動に関するこれまでの研究成果を踏まえ、沿岸部の特性を考慮した条件での知見やデータを拡充し、緩衝材の施工品質に関する仕様設定に資することを目的とする。

1) 試験計画

平成 27 年度の沿岸部特有の条件を念頭にした場合に拡充すべき知見やデータに係わる整理結果（産総研ほか, 2016）や、別途実施されている試験などにも留意し（原環センター, 2016）、

本事業では、以下の項目について試験や検討を行い、知見やデータを拡充することとしている。

- 地下水浸潤速度および透水係数の取得に関する試験
- 密度分布が膨潤量に及ぼす影響に関する試験
 - ・密度均質化試験
 - ・スラリー圧密試験
- 二次元土槽試験による浸潤・膨潤挙動に関する試験
- 実験室規模の緩衝材流出に関する試験

2) 使用材料

本業務で使用する緩衝材（固相）は、既往の研究成果への知見やデータの拡充や比較検討などの分析や考察を行うために、Na型ベントナイト（クニゲルV1）に3号ケイ砂と5号ケイ砂を乾燥質量比7：1.5：1.5で混合したものとする。

また、使用する試験水は、沿岸部における海水の賦存を考慮して人工海水を基本とし、濃度を変化させたものを用いる。さらに、既往の研究成果と互いに補完し、包括的な知見を形成できるようにするために、単一成分での試験も行い、その特性を把握する。

3) 地下水浸潤速度および透水係数の取得に関する試験

緩衝材の再冠水過程を解析的に評価するためのモデル構築に資することを目的として、本試験では、一次元の試験装置によって緩衝材の浸潤速度を測定している。

① 試験装置と試験条件

試験装置を図3.1-25に、試験ケースを表3.1-14に示す。破過を避けるために、試験開始初期は流量制御で送水し、十分な送水圧が得られた以降は圧力制御で送水した。試験中に、比抵抗値の変化および膨潤圧を計測している。通水圧を大きく（最大1MPa程度）設定して、通水圧の大きさが浸潤挙動に及ぼす影響を得る試験も行っている。

昨年度に装置を製作し、試験をスタートした。緩衝材の含水比は別途求めた比抵抗値と含水率の関係（Appendix X 参照）を用いて算出している。約2年にわたってデータを取得する予定で、試験を続行中である。

表 3.1-14 浸潤速度取得試験ケース

液種	供試体	試験条件	試験数	備考
CaCl ₂ 水溶液（イオン強度0.5M）	ケイ砂30wt%混合Na型ベントナイト	通水圧：流量制御段階の通水圧から決定	1	初期は流量制御として、通水圧が十分大きくなったら圧力制御に移行する。
人工海水			1	
人工海水		通水圧：最大1MPa程度	1	

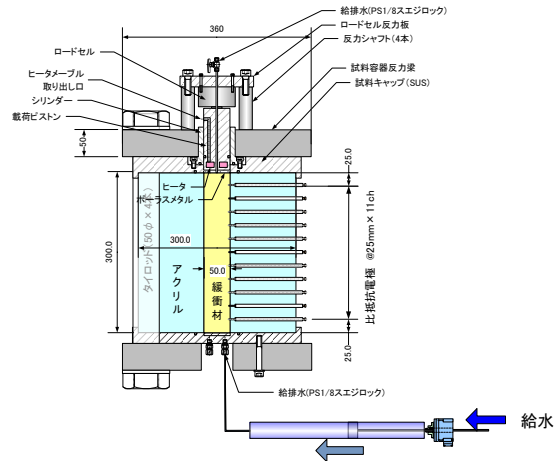


図 3.1-25 一次元浸潤速度試験装置概略図

② 試験結果

図 3.1-26 に、液種ごとに飽和フロントの経時変化を示す。ここでは、飽和度が 90%以上になった地点を飽和フロントと定義した。図から、全てのケースにおいて、通水圧の大きさに応じて流量は変化するが、給水量（総流量）の経時変化は飽和フロントの位置 $d(\text{mm})$ は、通水時間 $t(\text{day})$ の指数関数で表現できると思われる。既往の研究では、浸潤距離は給水時間の平方根に比例すると報告されており（原環センター, 2015）同様の関数形で表現できることがわかる。

人工海水の高圧と低圧のケースを比較すると、通水圧を増加させる前の段階では両フロントともにおおむね同じ経時変化を示しているが、通水圧を増加させると高圧ケースのフロントの移動速度が著しく増加していることが分かる。一方、人工海水の低圧ケースと CaCl_2 水溶液のケースを比較すると、通水圧は同等であるにもかかわらず、 CaCl_2 水溶液の方がフロントの移動速度が遅いことが分かる。このことから、飽和フロントの移動速度が給水される液体に含まれる陽イオンの種類によって変化することが明らかとなった。

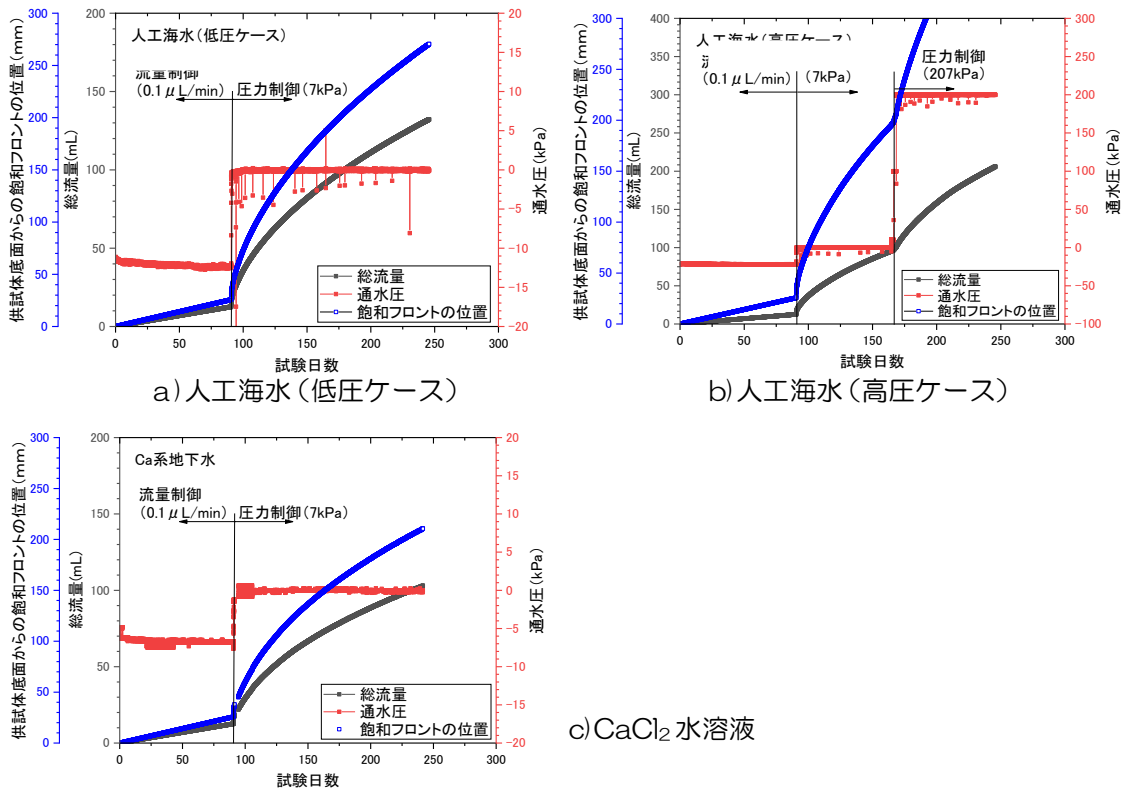


図 3.1-26 給水量と通水圧、飽和フロントの経時変化

4) スラリー圧密試験

既往の研究（笹倉ら, 2003）では、緩衝材は、力が釣合う乾燥密度となるまで膨潤するという力学的な考え方に基づいて、緩衝材の e -log P 関係を取得し、 e -log P 関係を用いて残留密度差を解釈できることを示している。そこで、本事業でも、1/2 人工海水と人工海水を用いた直列膨潤量試験を実施する前段階として、同じ液種で緩衝材のスラリーを作製し、圧密試験を実施して e -log P 関係を取得し、どのような液種であっても e -log P 関係から残留密度差が説明可能であるかを考察するための試験に昨年度から取り組んでいる。

① 試験条件

試験ケースを表 3.1-15 に示す。試験は昨年度からスタートした。

表 3.1-15 スラリー試験のケース

液種	供試体	試験条件	試験数	備考
1/2 人工海水	スラリー（液性限界程度）	段階圧密	1	φ 60 mm×h20 mm 程度
人工海水			1	

② 試験結果

図 3.1-27 には、人工海水と 1/2 人工海水で作製したベントナイトスラリーの沈下曲線を示す。ベントナイト系材料の圧密試験は、膨潤圧よりも大きな圧密圧力を作用させなければ沈下は生じない。本試験の場合、沈下傾向は両者ともほぼ同様であるが、イオン強度が大きい液種の方が小さな圧密圧力で同等の沈下が生じている。また、第二段階载荷では、両者とも 10kPa を载荷しているが、イオン強度が大きい人工海水の方が、沈下が進行している。ただし、両者の差異は大きくはない。イオン強度による膨潤性能の低下は、0~0.1 mol/L までが著しく、それ以上では膨潤性能に対する影響は鈍化することが報告されている（笹倉ら, 2003）。本試験では、使用した人工海水のイオン強度が 0.2 mol/L 以上であるため、イオン強度が膨潤性能に及ぼす影響の差が小さかったものと考えられる。

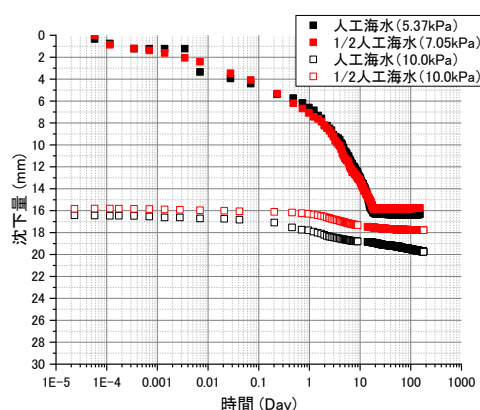


図 3.1-27 海水系の液種で作製したベントナイトスラリーの沈下曲線

5) 二次元土槽試験による浸潤・膨潤挙動に関する試験

① 試験方法

既往の研究（原環センター, 2015）において、再冠水直前の緩衝材の施工時に存在する、施工方法や環境条件に起因する密度分布、隙間、初期間隙などが膨潤挙動に及ぼす影響を評価するために、図 3.1-28 に示すような土槽内に二次元密度分布を有する緩衝材を作製し、底面から給水することによって緩衝材の浸潤過程における飽和度および飽和後の密度分布を測定

している。その結果、緩衝材の施工方法によって隙間や間隙分布が異なり、緩衝材内の浸潤の方向が異なるために、密度分布の変化の進行状況が異なることが明らかとなった。

本業務では、緩衝材の施工方法として検討されているもののうち、ブロック定置 - ペレット充填併用ケースを対象にして、液種の違いが膨潤による緩衝材の密度分布の変化に及ぼす影響を同様の試験装置を用いて検討する。

② 試験結果

図 3.1-29 に比抵抗値から算出した土槽内の飽和度分布を示す。開始直後からペレット部が先行して浸潤が進んでいることがわかる。ペレット部は数時間で飽和が進みその後、ブロック部に浸潤が移行している。一旦、飽和に近い状態となったペレット部の液相がブロック部に吸われているために飽和度が下がっている様子も見られた。50 日後には、比抵抗値で見るとほぼ 100% の飽和度になっており、全体が浸潤したことが伺える。ただし、間隙体積に対する注水量は 100% になっておらず、比抵抗値が飽和度付近で感度が下がっていることが影響し、飽和度を過大評価していることが考えられる。さらに給水を続け、その後解体し、実際の含水比および密度分布を測定する予定である。

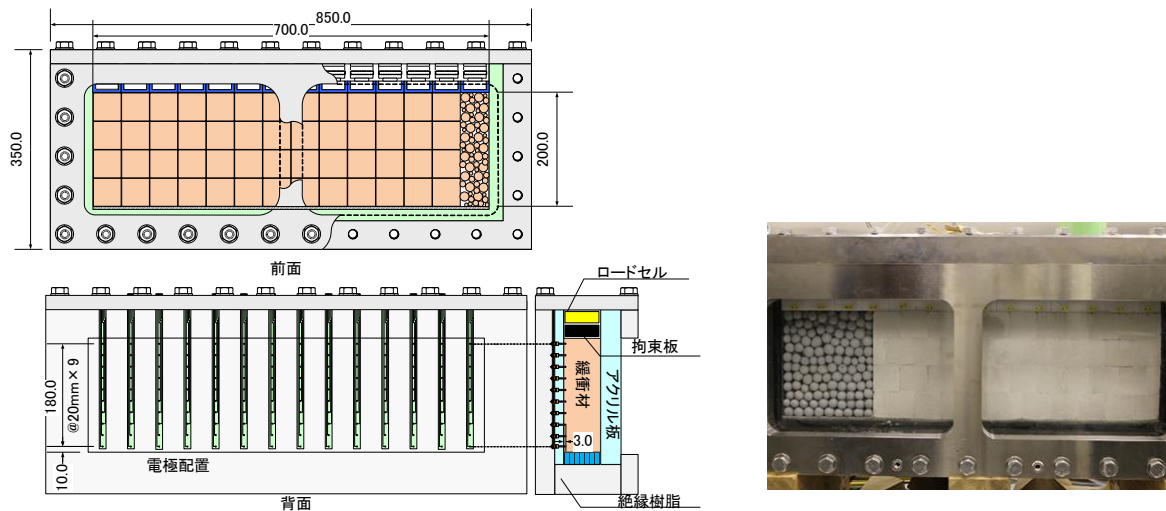


図 3.1-28 密度分布均質化土槽試験のイメージと供試体を充填した試験装置
(ブロック定置+ペレット充填ケース)

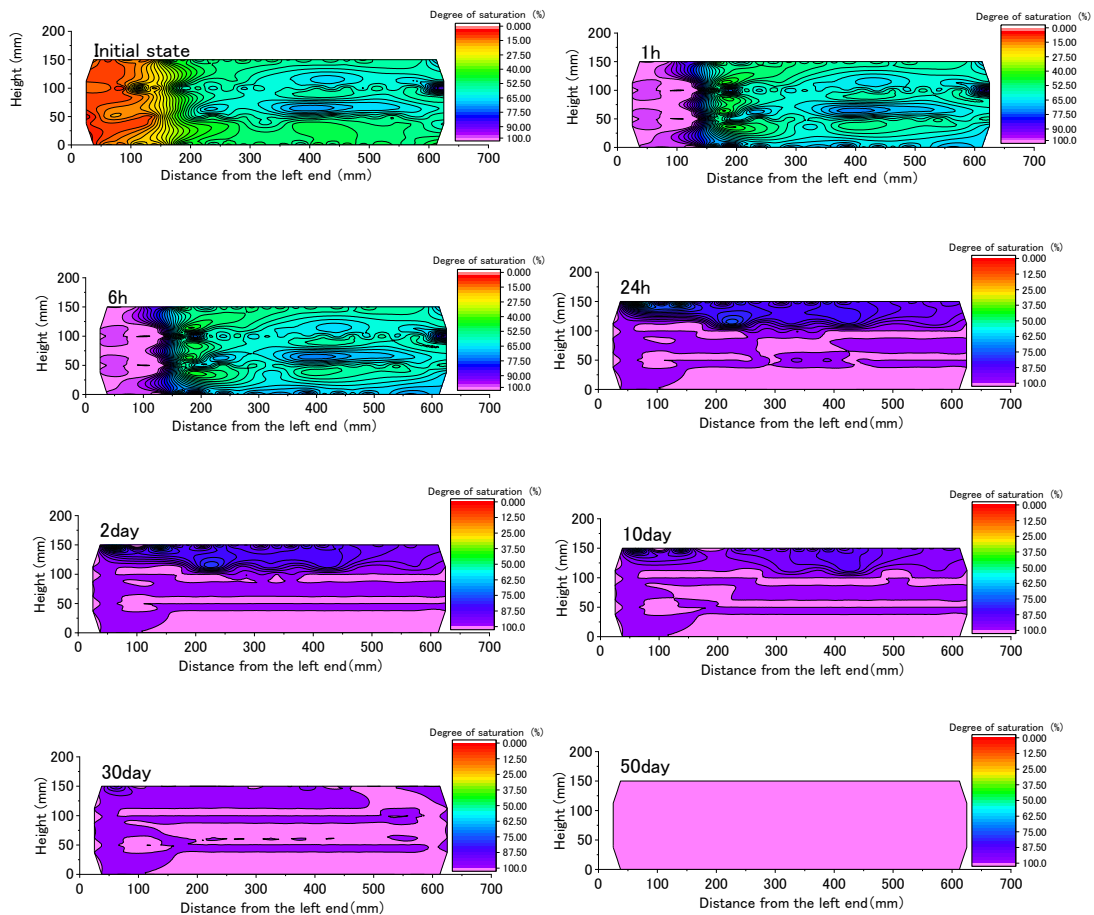


図 3.1-29 比抵抗値の分布から算出した飽和度分布

6) 実験室規模の緩衝材流出に関する試験

既往の研究として実験室規模で行われてきた種々の条件下での緩衝材の流出挙動に関する試験のうち、塩水環境に適応する試験としては、NaCl 溶液と CaCl₂ 溶液による試験が行われた（原環センター，2015）。本業務では沿岸部の地下水質を考慮した試験を行うことを目的としているため、Na イオンおよび Ca イオンについての評価だけでは十分ではないと考え、昨年度、海水中で Na イオンに次ぐ濃度を持つ Mg イオンと K イオンについての試験を行った。今年度は人工海水での試験を行う。

① 試験方法

既往の研究成果と整合性をもって比較するため、既往の研究と同様の試験装置を用いた。図 3.1-30 に試験に用いたセルを示す。本年度は、人工海水を供給し、その特性を把握するための試験を行った。緩衝材は乾燥密度 1.6 Mg/m³ に締め固めた円柱状のブロックを用いた。

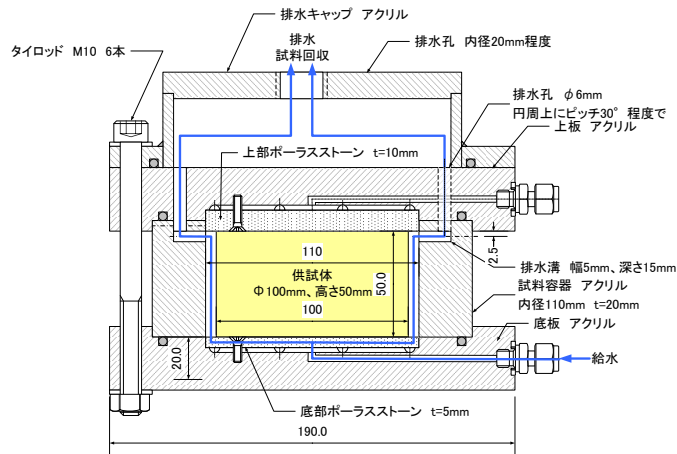


図 3.1-30 緩衝材流出試験用のセル

② 試験結果

図 3.1-31 に人工海水 1ml/min の場合の水みち形成状況を示す。写真から、給水開始から 30 分後には供試体表面に小さな水みちが形成され、最後まで水みちが残った。水圧の急激な低下（破過現象）が見られたが、この現象が起こったのもこの小さな水みちが一時的に閉塞したためだと考えられる。昨年度の試験で観察された、 $MgCl_2$ 水溶液のように表面が鱗状の薄片になったり、 KCl 水溶液のように供試体がひび割れたりするような現象は観察されなかった（産総研ほか, 2017）。給水開始から一日後でも、水みちがシールされるような状況は観察されなかった。10ml/min、100ml/min の通水においても、同様に水みちが観察され、緩衝材の流出現象が起こった。詳細は Appendix X を参照されたい。

図 3.1-32 に昨年度と今年度に行った試験結果と既往の研究結果(原環センター、2015)をまとめて示す。人工海水が供試体に作用した際に、供試体表面が陽イオン交換反応によって変質するが、人工海水に含まれる主要な陽イオンがナトリウムイオンであるため、その膨潤性能に及ぼす影響は KCl や $MgCl_2$ の水溶液に比べれば限定的であると考えられる。また、1ml/min の流量でも水みちが確認され、緩衝材の流出は発生したが、イオン強度の影響でベントナイトが凝集するため、系外に持ち出される緩衝材の量は少ないことが示唆される。

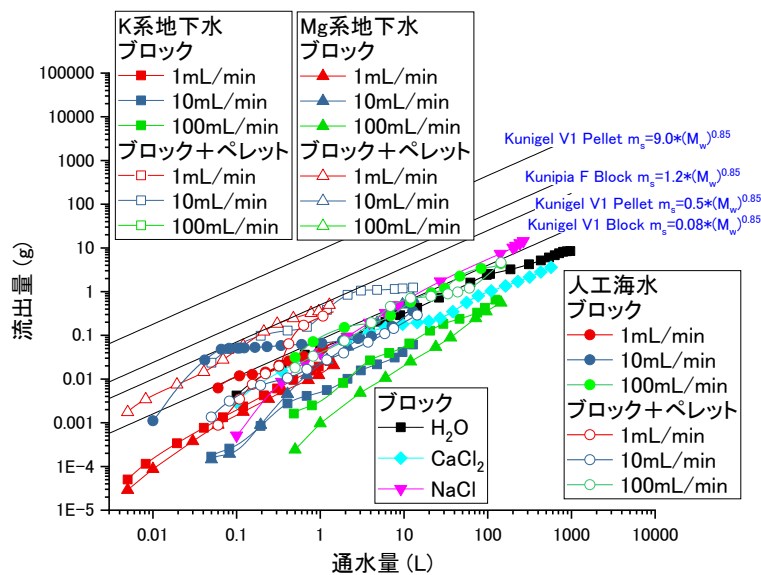


図 3.1-31 KCl 、 $MgCl_2$ 水溶液と人工海水の流出量と通水量の関係

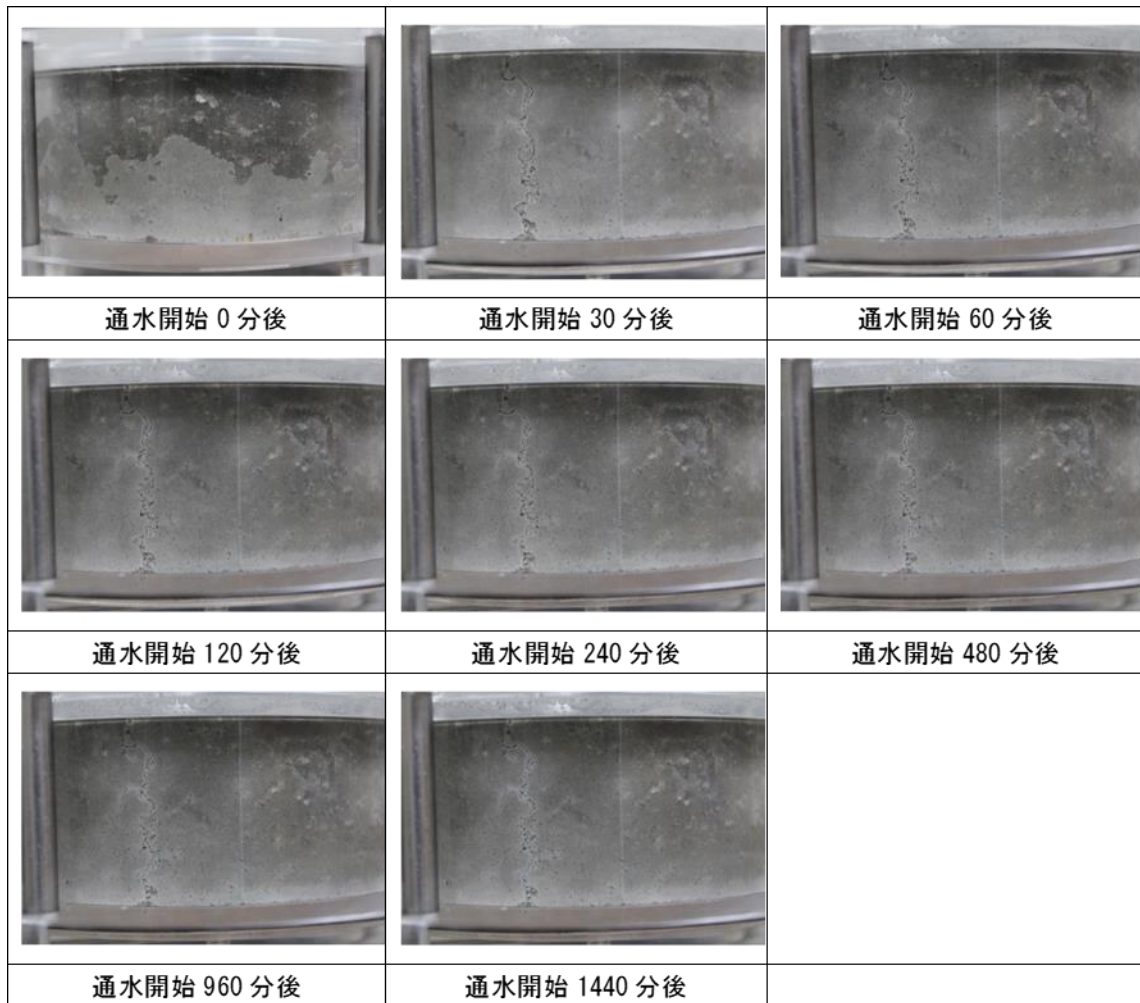


図 3.1-32 人工海水 0.001 L/min の水みちの形成状況

7) まとめ

本年度は、地下水浸潤速度、透水係数の測定およびスラリー圧密試験については昨年度から継続して試験を行い、二次元土槽試験および緩衝材流出試験に関しては、新たな試験を行った。

それぞれの試験において、塩水環境下では緩衝材の再冠水時の挙動が溶存イオンの影響を受けることが明らかとなっている。その中でも既往の検討で NaCl 水溶液を対象として行われていたものと大きく結果が異なるものには注意が必要となる。また、その挙動の差がイオン強度で整理できるものであるか、イオン種の違いに起因するものかを見極め、多様な地下水組成に対応可能な知見を得ることが重要だと考える。今年度は、試験経過の報告となっているため、来年度までの試験結果と、試験後の分析によって知見を取りまとめる予定である。

参考文献

- Brooks, R.H., and Corey, A.T.: Properties of porous media affecting fluid flow. J.Irrig. Drainage Div., ASCE Proc. 72(IR2): pp.61-88, 1964.
- 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構, TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, 2005.
- 沿岸部研究会, 沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会 とりまとめ, 2016.
- 福手勤, 濱田 秀則, 山本 邦夫, 海洋環境に 20 年間曝露されたコンクリートの耐久性に関する研究, 土木学会論文集 No.442, V-16, pp. 43-52., 1992.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 17 年度地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処分技術調査－人工バリア長期性能確認試験－報告書, 2006.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 18 年度地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処分技術調査－人工バリア長期性能確認試験－報告書, 2007.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 20 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書 (第 1 分冊)－人工バリアの長期挙動の評価－, 2009.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 21 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書 (第 1 分冊)－人工バリアの長期挙動の評価－, 2010.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 22 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書 (第 1 分冊)－人工バリアの長期挙動の評価－, 2011.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 24 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発平成 19 年度～平成 24 年度の取りまとめ報告書, 2011.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 23 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書 (第 1 分冊)－人工バリアの長期挙動の評価－, 2012.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 27 年度地層処分技術調査等事業 (高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学確認技術開発) 人工バリア品質/健全性評価手法の構築 (その 2)－緩衝材, 2015.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 28 年度地層処分技術調査等事業 (高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学確認技術開発) 人工バリア品質/健全性評価手法の構築 (その 2)－緩衝材, 2016.
- 細川佳史, 小川彰一, 山田一夫, 水分・CO₂ ガス及び液相化学種の移動と熱力学的相平衡との連成システムによる複合劣化の再現, 第 65 回セメント技術大会講演要旨, pp.308-309, 2011.
- 細川佳史, 山田一夫, Bjorn JOHANNESSON, Lars-OlofNILSSON, 熱力学的相平衡を考慮した Multi-species 物質移動モデルの構築, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp. 957-962, 2007.
- 入矢桂史郎, 三原守弘, ポゾランを高含有した低アルカリ性コンクリートの開発, コンクリート工学年次論文集, 25, 1, pp.185-190, 2003.
- 伊藤弘之, 三原守弘: ベントナイト系材料の飽和透水係数の変遷評価式, JNC TN8400 2005-029, 2005

- 核燃料サイクル開発機構, わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 分冊 2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022, 1999.
- 核燃料サイクル開発機構, わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第 2 次取りまとめ-分冊 3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023, 1999.
- 緩衝材基本特性データベース, <https://bufferdb.jaea.go.jp/bmdb/>
- 河井克之, 江偉川, 飯塚敦: 水分特性曲線ヒステリシスの表現と不飽和土の応力変化, 応用力学論文集, Vol.5, pp.777-784, 2002.
- 菊池広人, 棚井憲治, 幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験 JNC TN8430 2004-005, 2005.
- Kobayashi, M., Yokoyama, Y., Takahashi, R., Asano, H., Taniguchi, N. and Naito, M., Long term integrity of overpack closure weld for HLW geological disposal Part 2- corrosion properties under anaerobic conditions, Corrosion Engineering, Science and Technology, vol.46, 2, pp.212-216, 2011.
- 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構:平成 27 年度地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発報告書, 2015
- 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構:平成 28 年度地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発報告書, 2017
- Masamura, K. and Matsushima, I., CORROSION'81, Paper No.75, 1981.
- 松本一浩, 藤田朝雄, 緩衝材の流出/侵入特性, (Ⅲ) JAEA-Research 2011-014, 2011.
- 松本一浩, 棚井憲治, 緩衝材の流出/侵入特性, JNC TN8400 2003-035, 2004.
- 松本一浩, 棚井憲治, 緩衝材の流出/侵入特性, (Ⅱ) JNC TN8400 2004-026, 2005.
- Okada, H. (1977): Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Cracking of Structural Steels, Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement of Iron Base Alloys; Unieux-Firminy; France; 12-16 June 1973. pp. 124-134, 1997.
- 大野進太郎, 河井克之, 橘伸也: 有効飽和度を剛性に関する状態量とした不飽和土の弾塑性構成モデル, 土木学会論文集, Vol.63, No.4, 1132-1141, 2007
- 日本原子力研究開発機構:TRU 廃棄物処分技術検討書ー第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめー, 2005
- 日本原子力研究開発機構, 平成 24 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術セメント材料影響評価技術高度化開発報告書, 2013.
- 日本原子力研究開発機構, 平成 25 年度地層処分技術調査等事業セメント材料影響評価技術高度化開発報告書, 2014.
- 日本原子力研究開発機構, 平成 26 年度地層処分技術調査等事業セメント材料影響評価技術高度化開発報告書, 2015.
- 日本原子力研究開発機構, 平成 27 年度地層処分技術調査等事業処分システム評価確証技術開発報告書, 2016.
- 日本原子力研究開発機構, 平成 28 年度地層処分技術調査等事業処分システム評価確証技術開発報告書, 2017.
- 野村瞬, 河井克之, 角井駿祐, 橘伸也, 金澤伸一, 飯塚敦: 飽和/不飽和地盤内における水溶性移動モデルの構築, 土木学会論文集, Vol.67, No.2, pp.231-240, 2011
- Roscoe, K.H., Schofield, A.N. and Thurairajah, A.: Yielding of clays in states wetter than critical. Geotechnique, Vol.13 (3), pp.250-255, 1963.
- Roscoe, K.H. and Burland, J.B.: On the generalized stress-strain behavior of 'wet' clay.

Engineering Plasticity, ed. J. Heyman and F.A. Leckie, Cambridge University Press: Cambridge, pp.535-609, 1968.

産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 平成 27 年度地層処分調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書, 2016.

産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 平成 28 年度地層処分調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書, 2017.

笹倉剛, 畔柳幹雄, 小林一三, 岡本道孝: ベントナイト変遷挙動のモデル化のためのデータ取得 II, JNC TJ8400 2003-048 (2003).

鈴木英明, 藤田朝雄: 緩衝材の膨潤特性, JNC-TN8400 99-038, 1999.

鈴木英明, 藤田朝雄: 緩衝材の不飽和水理特性, JNC-TN8430 99-010, 1999.

Takayama Y, Tachibana S, iizuka A, Kawai K, Kobayashi I: Constitutive modeling for compacted bentonite buffer materials as unsaturated and saturated porous media, Soils and Foundations, Vol.57, Issue 1, pp.80-91, 2017.

谷口直樹, 山口真, 内藤守正, 人工海水中における炭素鋼の腐食挙動に及ぼす γ 線照射の影響, 第 57 回材料と環境討論会講演集, pp.107-110, 2010.

谷口直樹, 川崎 学, 内藤守正, 低酸素濃度下での模擬地下水の飽和した圧縮ベントナイト中における炭素鋼の腐食挙動, 材料と環境, vol.59, 11, pp.418-429, 2010.

千々松正和, 杉田 裕, 雨宮清: 緩衝材の製作・施工技術に関する検討, JNC-TN8400 99-035, 1999.

3.1.3 セメント系材料

(1) 背景と目的

セメント系材料は、高レベル放射性廃棄物処分では処分坑道の支保工、アクセス坑道ならびに斜坑などの支保工およびインバートなどの構造材として、また、TRU 廃棄物の地層処分ではそれらに加えて、処分坑道のインバート、構造駆体、ならびに容器内外の充填材としての使用が考えられている。

セメント系材料は、地下水との反応により変質することが知られており、主な変質としては水和鉱物の溶脱、膨張性の二次鉱物の生成および溶脱成分による他のバリア材料の二次的な変質が想定される。また、それらの影響として、機械的特性や物質移行特性の変化、ひび割れの発生、ならびに機械的特性の低下が考えられる。そのため、短期的には処分場操業中における空洞安定性への影響、長期的には処分場閉鎖後における人工バリア機能への影響が生じる可能性がある。

セメント系材料の海水系地下水環境での変質および劣化現象については、海洋構造物や海岸付近の鉄筋コンクリート構造物の寿命評価などの観点での塩化物イオンの浸透に関する産業界での検討例など、既に知見の蓄積がある。また、地層処分施設の建設および操業期間中の健全性、ならびに人工バリアの長期的な安定性の観点から、化学的な変質についてはこれまでも国の基盤研究などで検討が進められている。これらの検討から、降水系地下水と比較して Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} の影響によるセメント鉱物の変質や析出物の生成を考慮する必要があること、混合セメントの方が普通セメントより変質が少ない傾向にあることなどが確認された（原環センター、2006；2007；2009）。しかしながら、それらは沿岸部での現実的な地下水組成を想定したものではなく、多くは人工海水や海水濃度での模擬地下水を用いた検討である。

以上を踏まえ本事業では、沿岸部で想定される地下環境、特に地下水の各成分の現実的な濃度などを念頭に、長期安全性評価や施設設計などへの適切な対応に向けた検討を進め、以下の実施項目と目標設定を行いこれらに取り組む。

- 塩水環境下におけるセメント系材料の変質評価：これまでに充填材の長期挙動評価のために開発されたセメント水和物の溶解沈殿モデルの沿岸部での適用性の確認と信頼性の向上を目指す。
- 塩水環境下におけるセメント系材料の機械的特性変化に関する検討：設計や工学技術における安全確保の観点から、短期的な機械的特性の変化を把握することを目指す。

(2) 塩水環境下におけるセメント系材料の変質評価

上述したセメント系材料の変質については、主に普通ポルトランドセメント（以下、「OPC」という。）を中心に評価・検討が実施されてきた。一方、実際の地層処分施設ではセメント系材料の高アルカリ性間隙水による緩衝材・周辺岩盤への影響を低減する目的で、低アルカリ性セメントが用いられることも想定される。そのような低アルカリ性セメントの候補の一つとして、OPC に対してフライアッシュ（以下、「FA」という。）とシリカフェーム（以下、「SF」という。）を混合することで間隙水や接触液の pH を低下させたフライアッシュ高含有シリカフェームセメント（以下、「HFSC」という。）が開発された（入矢・三原、2003）。

処分環境におけるセメント系材料の長期的な変質評価を可能とするために必要となる化学モデルとして、化学平衡計算をベースとした水和物溶解沈殿モデル（以下、「モデル」という。）について、OPC および HFSC を対象として開発が行われている（日本原子力研究開発機構、2015；2016；2017）。水和物溶解沈殿モデルは、初期のセメント系材料の組成である「初期水和物組成」の設定を含め、水和物の溶解・沈殿による鉱物組成変化や間隙水組成変化を化学平

衡計算で導出するものである。これまでは、イオン交換水または米国材料協会規格 ASTM D1141 相当（以後、「ASTM 相当」）の人工海水に対するバッチ式浸漬実験結果に対して、モデルによる解析結果を比較することで、モデルの妥当性が検証されてきた（日本原子力研究開発機構, 2017）。

本事業では、平成 27 年度において、上述した研究では ASTM 相当の人工海水を対象としていることから、様々な塩水に対してのモデルの適用性確認が必要であることを示した（産業技術総合研究所ほか, 2016）。これを受けて、平成 28 年度では人工海水を希釈した溶液や海水の特定成分を含有した溶液を用いたバッチ式浸漬実験を想定し、既存のセメント水和物沈殿モデルを用いた解析を実施するとともに、人工海水を希釈水（2 倍および 5 倍に希釈）に対して、OPC および HFSC ペースト硬化体を用いたバッチ式浸漬実験に着手した（産業技術総合研究所ほか, 2017）。平成 29 年度は、モデルの適用性確認のために、平成 28 年度に作製したバッチ式浸漬実験の試料の分析を行い、平成 28 年度のモデル計算値と比較した。また、海水の特定成分として NaCl を対象にして、人工海水の NaCl 濃度（0.644 mol/L）を基準とした希釈水（2 倍および 5 倍に希釈）の OPC および HFSC のバッチ式の浸漬試料を作製した。

1) 人工海水希釈水に対する浸漬実験試料の分析

① 実験概要

平成 28 年度において、ASTM 相当の人工海水（八洲薬品株式会社製の金属腐食試験用アクアマリンを利用（略号：SW））を 2 倍（略号：050SW）および 5 倍（略号：020SW）に希釈した溶液（比較として人工海水、イオン交換水（略号：IEW）も準備）にセメントペースト硬化体粉砕物（OPC および HFSC）をアルゴン雰囲気中で浸漬させた。その後、25℃の温度で試料を保管した（産業技術総合研究所ほか, 2017）。HFSC はフライアッシュ 40%、シリカフェーム 20% および普通ポルトランドセメント 40% の混合比で作製したものであった。試験の優先順位を考慮して、設定した浸漬条件を表 3.1-16 に示す。表に示した●印の条件については、平成 28 年度において分析を実施しており（産業技術総合研究所ほか, 2017）、平成 29 年度は○印の条件について液相分析などを実施した。

表 3.1-16 セメントペースト硬化体粉砕物の浸漬条件（人工海水希釈水）

固相の種類	浸漬液の種類	液固比（浸漬液重量/粉末重量 [g/g]）							
		2	5	10	30	100	300	1,000	3,000
OPC 硬化体を 90 μm 以下に微粉砕したものの	IEW	—	●	●	●	○	○	○	○
	020SW	—	●	●	●	○	○	○	○
	050SW	—	●	●	●	○	—	—	—
	SW	—	●	●	●	○	○	○	○
HFSC 硬化体を 90 μm 以下に微粉砕したものの	IEW	○	○	○	○	○	○	○	○
	020SW	○	○	○	○	○	○	○	○
	SW	○	○	○	○	○	○	○	○

注：—印は、平成 29 年度では試験を実施していないが、今後の研究の進展状況に応じて実施。

表 3.1-16 に示した分析対象試料を、アルゴンガス雰囲気グローブボックスに搬入し、固液分離を実施した。液相については孔径 0.45 μm のメンブランフィルターを通過させたろ液

に対して、複合ガラス電極（堀場製作所製 9677-10D）により pH を、誘導結合プラズマ発光分光分析装置（パーキンエルマー社製 Optima8300）により Ca、Si、Al、Mg、Na、K、S 濃度を、イオンクロマトグラフ（東亜ディーケーケー社製 ICA-2000）により塩化物イオン濃度をそれぞれ定量した。

② 平成 28 年度のモデル計算値と分析結果との比較

OPC 硬化体浸漬液に対して、平成 28 年度に実施した pH および主要液組成（Ca, Si, Mg）のモデル計算値（産業技術総合研究所ほか, 2017）と平成 28 年度（産業技術総合研究所ほか, 2017）および平成 29 年度の分析値との比較を図 3.1-33 および図 3.1-34 に示す。pH および Ca 濃度については、モデル計算値は、どの浸漬液に対しても分析値を再現していることが確認された。Si 濃度については、模擬海水(SW)およびその希釈水(050SW,020SW)について、液固比 100 から数 100 において、濃度が上昇する結果がとまったが、分析値はその傾向を示さなかった。模擬海水に含まれる Mg についてもモデル計算値は、分析値をおおむね再現した。平成 28 年度のモデル計算値は、OPC 硬化体浸漬の主要な液組成を再現していることが確認されたが、Si 濃度が上手く再現されておらず、Si に関わるモデルの見直しが必要であることが示された。

HFSC 硬化体浸漬液に対しても、平成 28 年度に実施したモデル計算値（産業技術総合研究所ほか, 2017）と平成 28 年度（産業技術総合研究所ほか, 2017）および平成 29 年度の分析値との比較を図 3.1-35 および図 3.1-36 に示す。pH については、モデル計算値は、SW および 020SW について、液固比 10 から 1,000 において、分析値に対して高くなる傾向であった。一方、Ca 濃度については、どの浸漬液についても、良い一致を示した。Si 濃度については、分析値は、どの浸漬液に対しても液固比に対しての大きな濃度変化は見られていないが、モデル計算値は SW および 020SW になると、液固比がある値を超えると、濃度が一桁程度低くなった。Mg 濃度については、低い液固比においてモデル計算値と分析値の乖離が見られるが、液固比が大きくなると両者は一致した。HFSC 硬化体浸漬液に対しても Si に関するモデルの見直しが必要であり、特にマグネシウムシリケート水和物 (M-S-H) のデータが大きく関与している可能性があった。

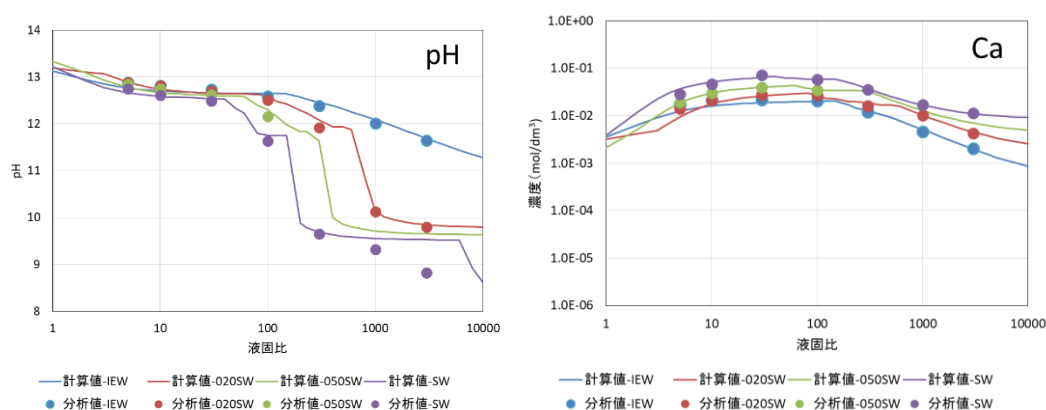


図 3.1-33 OPC 硬化体浸漬液のモデル計算値と分析値（pH および Ca 濃度）

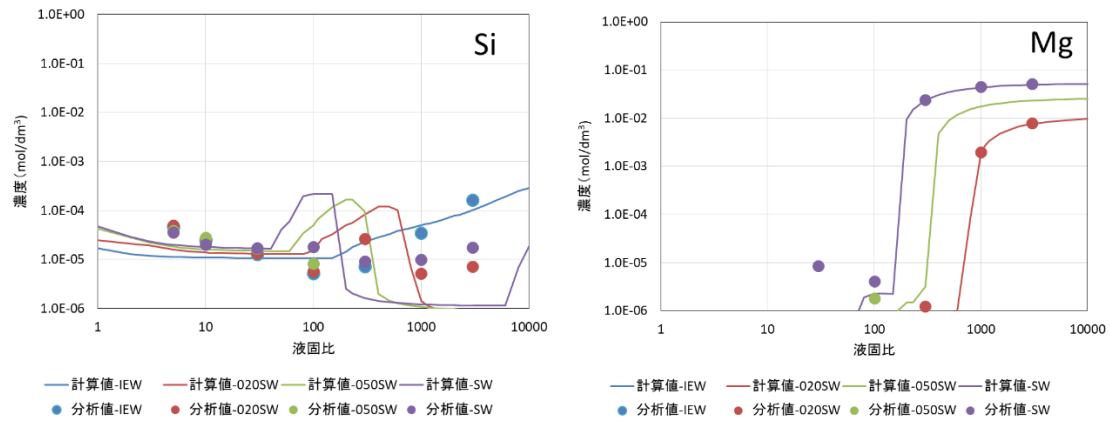


図 3.1-34 OPC 硬化体浸漬液のモデル計算値と分析値 (Si および Mg 濃度)

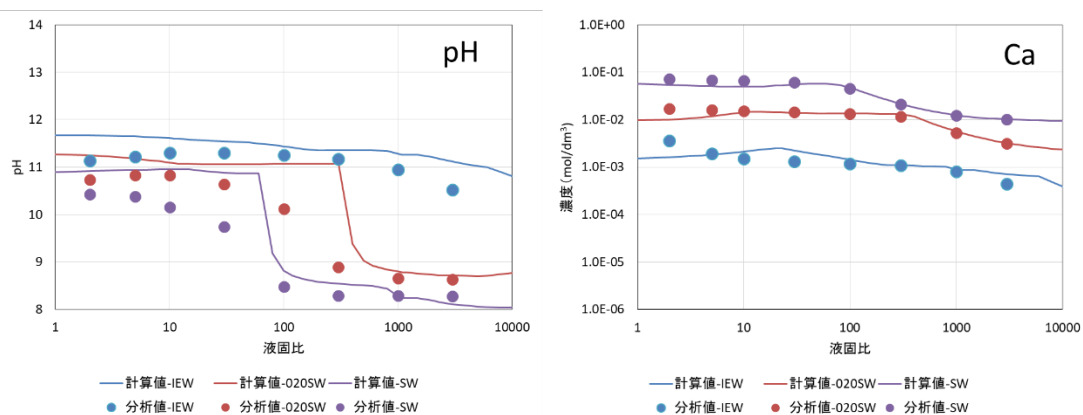


図 3.1-35 HFSC 硬化体浸漬液のモデル計算値と分析値 (pH および Ca 濃度)

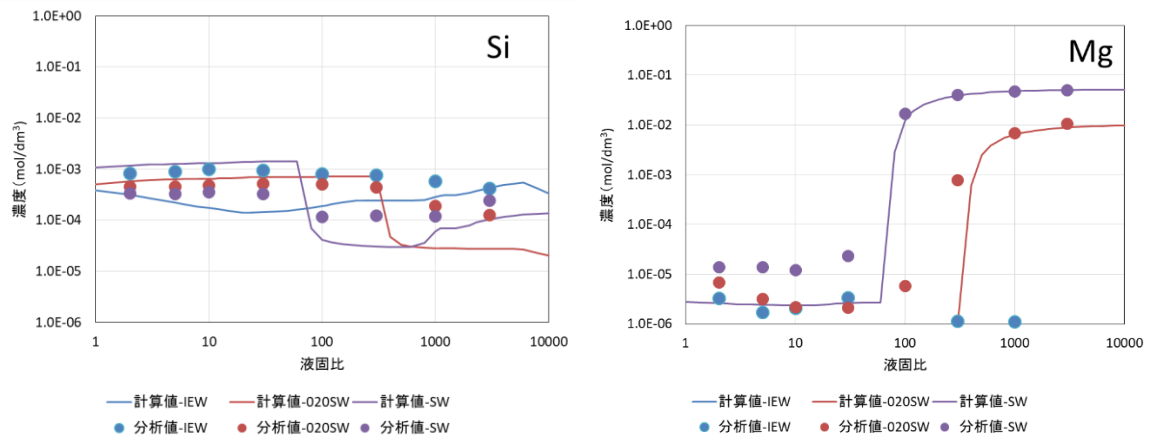


図 3.1-36 HFSC 硬化体浸漬液のモデル計算値と分析値 (Si および Mg 濃度)

2) NaCl 溶液に対する浸漬実験試料の作製

海水の成分として、NaCl に着目し、ASTM 相当の人工海水の NaCl 濃度 0.644 mol/L をベース (略号: NC1) にこれを 2 倍 (略号: NC2) および 5 倍に希釈 (略号: NC3) して、浸漬液を準備し、前項で示した OPC および HFSC の粉砕物を浸漬させた。浸漬条件を表 3.1-17 に示す。

これらの試料については、約 25°C にて保管した。今後、これらの試料についても液相およ

び固相の分析を行う予定である。

表 3.1-17 セメントペースト硬化体粉砕物の浸漬条件 (NaCl 溶液)

固相の種類	浸漬液の種類	液固比(浸漬液重量/粉末重量 [g/g])							
		2	5	10	30	100	300	1,000	3,000
OPC 硬化体を 90 μ m 以下に微粉砕したものの	NC1	—	○	—	○	—	○	○	—
	NC2	—	○	—	○	—	○	○	—
	NC3	—	○	—	○	—	○	○	—
HFSC 硬化体を 90 μ m 以下に微粉砕したものの	NC1	—	○	—	○	—	○	○	—
	NC2	—	○	—	○	—	○	○	—
	NC3	—	○	—	○	—	○	○	—

注: —印は、平成 29 年度では試験を実施していないが、今後の研究の進展状況に応じて実施。

3) まとめ

平成 29 年度は、処分環境におけるセメント系材料の長期的な変質評価を可能とするために必要となる化学モデルの信頼性向上のために、人工海水希釈水とセメントペースト硬化体との反応に関わるデータを取得するとともに、平成 28 年度に実施したモデル計算値（産業技術総合研究所ほか, 2017）との比較を実施した。さらに海水の主要成分である NaCl 溶液を対象としたセメントペースト硬化体との反応に関わるデータ取得のための浸漬実験に着手した。今後、モデルの改良を行うとともに、取得されたデータとの比較を行う予定である。

(3) 塩水環境下におけるセメント系材料の機械的特性変化に関する検討

1) 目的および実施内容

平成 27 年度の検討では、既往の知見や技術などの調査を踏まえ、今後沿岸域で想定される地下環境、特に地下水の各成分の濃度などを踏まえた施設設計などへの適切な対応に向けて、以下の課題を抽出した（産総研ほか, 2016）。

- ① 海水系および降水系の化学モデルの適用範囲の確認
- ② バルク試験体を用いた力学特性の変化に関するデータの取得
- ③ ひび割れの閉塞挙動の確認
- ④ 塩水浸透に係わるモデルの検討

本検討では、課題の緊急性を勘案し、設計や工学技術における安全確保の観点からの処分場の空洞安定性評価における根拠の整備の一環として、沿岸部での処分場操業期間におけるセメント系材料の変質に伴う短期的な強度変化を把握することを目的に、②および④に注力する。

2) 3 カ年の全体計画

本検討に関する 3 カ年の実施計画を表 3.1-18 に示す。各実施項目の具体的な内容について、後述の 3) および 4) に整理する。

表 3.1-18 塩水環境下におけるセメント系材料の機械的特性変化に関する検討の実施工程

実施項目	平成28年度	平成29年度	平成30年度
バルク試験体を用いた力学特性の変化に関するデータ取得			
人工海水への長期浸漬(10年程度)バルク試験体での変質状態の確認			
沿岸海底下条件での強度変化確認(浸漬試験)			
塩水浸透に係るモデルの検討			
産業界の塩化物イオン拡散モデルの調査			
沿岸海底下環境での塩化物浸透モデルへの高度化			

3) バルク試験体を用いた力学特性の変化に関するデータの取得

これまでに、各種セメント系材料の水和物粉末およびブロック状の硬化体（以下、「バルク試験体」という。）について、降水系地下水および海水系地下水を模擬した浸漬試験を実施し、水和物粉末ではセメント系材料全体が一様に変質するのに対し、バルク試験体ではCaが表層から溶出するのに加え、人工海水に浸漬した混合セメントのバルク試験体では明確な変質が認められない事を確認した（原環センター, 2007 ; 2010 ; 2011）。このことは、各種セメント系材料の水和物粉末試料の試験結果に基づいた溶解平衡モデルを用いた化学解析の結果が、海水系地下水環境下での変質の影響範囲を過大に評価している可能性があることを示唆している。そのため、現実的な変質過程での機械的特性の把握には、バルク試験体を用いて試験を実施する必要がある。

これらのデータ取得では、沿岸部で想定される条件でのセメント系材料のバルク試験体の変質状態と強度変化との関係を把握するため、塩水によるセメント変質が処分場操業期間の強度（短期的強度）に及ぼす影響を検討する。また、処分場環境における地下水中の成分濃度が、陸域からの降水系地下水の混合により、海水より低いことなどを考慮して試験を行うこととした。平成28年度は、人工海水に10年程度浸漬したバルク試験体（セメントペースト、以下、「長期浸漬バルク試験体」という。）の変質状態の確認により、短期的強度への影響の推定および操業期間の空洞安定性へのセメント変質の影響を検討し、以下の知見を得た（産総研ほか, 2017）。

- 海水系地下水の影響によるセメント中のCaなどの溶出により操業期間中にセメント系材料の強度が低下する可能性がある。
- セメント系材料の変質と強度との関係の検討を進めるためには、バルク状のセメント系材料からの成分溶出と短期的強度低下の関係の定量的な把握が必要である。

平成29年度は、上記知見を受けて平成28年度に開始した沿岸海底下の条件での強度変化確認のための浸漬試験試料の分析を実施した（平成30年度にも、変質状態と強度変化の関係を確認する）。沿岸海底下条件での強度変化確認のための浸漬試験の試験体（以下、浸漬試験体）の条件を表3.1-19に、浸漬試験条件を表3.1-20に示す。また、浸漬試験体の浸漬方法を図3.1-37に示す。

表 3.1-19 浸漬試験体の条件

試料名	セメント種類	水結合材比	養生条件
OPC-45	普通ポルトランドセメント	45%	50°C (水中) 91 日間 (練り混ぜは 30°C)
OPC-60	普通ポルトランドセメント	60%	
FAC30	普通ポルトランドセメント/フライアッシュ＝ 7/3	60%	
BFSC70	普通ポルトランドセメント/高炉スラグ＝3/7	60%	

表 3.1-20 浸漬試験条件

項目	内容
浸漬液相	希釈人工海水： 1 倍 (人工海水)、1/10 倍 (1/10 人工海水)、1/100 倍 (1/100 人工海水)
浸漬液量	500 ml/1 試料あたり、月 1 回液交換
試験期間	常時スターラ攪拌条件で 4 ヶ月間
雰囲気	浸漬試験中は密封し外気を遮断

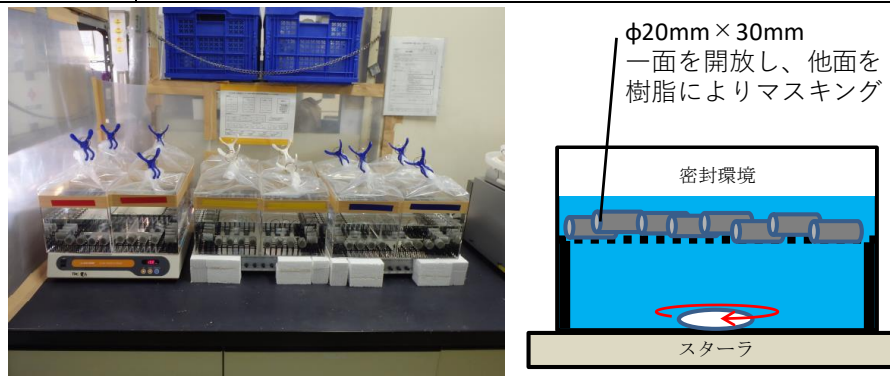


図 3.1-37 浸漬試験体の浸漬方法

浸漬期間 4 ヶ月の浸漬試験体の EPMA 測定結果を、図 3.1-38 に示す。普通ポルトランドセメント (以下、OPC) のみ、人工海水浸漬試料では試料の接液面にドーム状の膨張 (以下、ドームと略記) が生成した試料と生成していない試料を、また、1/10 人工海水浸漬試料では全ての試料の接液面にドームを確認した。一方、OPC の 1/100 人工海水浸漬試料および混合セメント試料では、全ての試料でドームは生成しなかった。ドームを有する試料では、試料の接液面が析出物の膜とともに浮き上がり、ドーム内に存在していた (Appendix XI 図 2.1-86 および 2.1-91 参照)。ドームの主要成分は Ca、Mg であった。また、EPMA からはドームの生成の有無に関係なく、溶脱する成分および沈殿する成分は同じである事を確認した。

既往のコンクリートの海水暴露試験 (福手ほか, 1992) ではこの様なドーム状の生成物は報告されていない。本試験の固相試料はペースト硬化体であり、モルタル、コンクリートなどの骨材を含む硬化体と比較して同体積当たりのセメント量が多く、浸漬液への Ca などの溶出が多いため、接液面全体に析出物が膜状に形成し、何らかの原因でひび割れ、そこから内部 (セメント試料側) に浸漬水が侵入して析出、膨張した可能性が考えられる

浸漬液の濃度の影響を比較検討するため、OPC の人工海水浸漬試料ではドームを形成しない試料 (外観変化無) を分析対象とした (混合セメントではいずれの試料もドームを形成しなかったことを勘案した)。ただし、OPC の 1/10 人工海水浸漬試料では全ての試料がドームを形成しているため、ドームを形成している試料 (外観変化有) を分析対象とした。

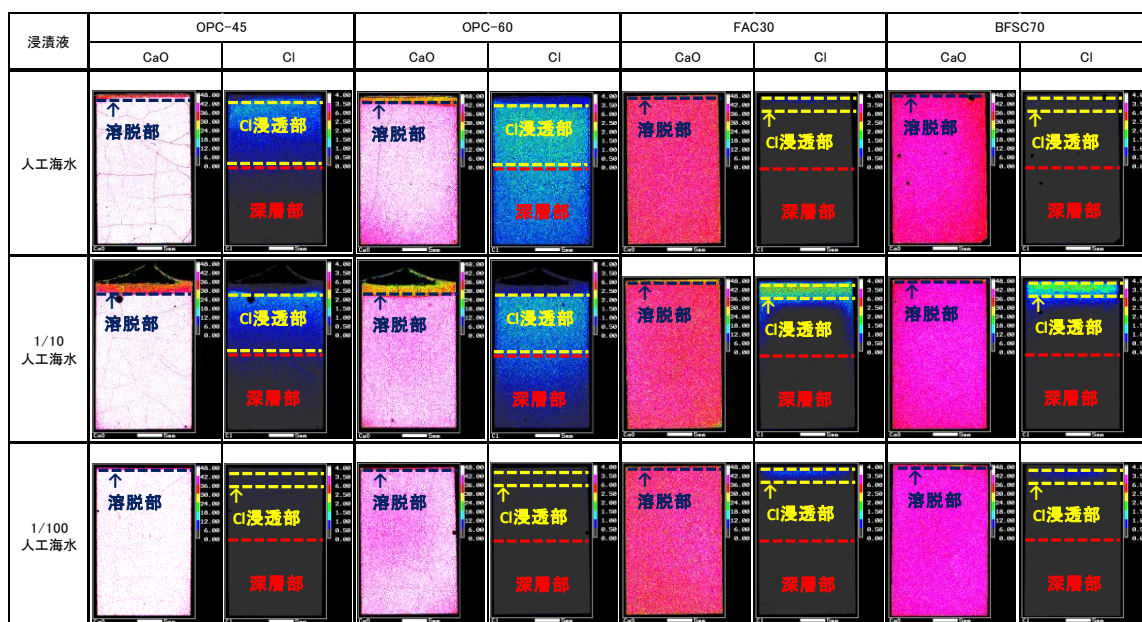


図 3.1-38 浸漬期間 4 ヶ月の浸漬試験体の EPMA 測定結果

セメント系材料と海水系浸漬液の反応による鉱物の溶脱や生成などを伴う変質は、接液面からみてセメント相の内部と外部で発生した。変質の状況を以下に記す（セメント中の元素濃度プロファイルは図 3.1-39、鉱物組成の一覧は表 3.1-21～表 3.1-24、また、分析結果の詳細は Appendix XI 2.1.3(2)～(4)項参照）。なお、本試験はドームが生成した事、浸漬期間が 4 ヶ月であるため変質が少ない事などの誤差要因を含んでいるため、引き続き浸漬を継続して変質がさらに進行した状態での検討を行う。

- セメント相内部の変質については、Ca溶脱およびCl浸透領域の深さはOPCの方が混合セメントより深く、材料固有の空隙構造の違いが影響していると考えられた。また、鉱物の変化はセメント種類および海水濃度に依らず同様の傾向を示し、同じ現象が生じていると推定された。
 - ・ 接液面近傍の内部ではCaが減少する傾向にあった。XRDの測定からPortlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) の溶脱が起きている事が確認された (Appendix X 2.1.3(3)項参照)。
 - ・ Caの溶脱領域では SO_4^{2-} が浸透していた (Appendix XI 2.1.3(2)2) 項参照)。
 - ・ ClはCaの溶脱領域以深に浸透していた。OPCでは浸透速度が速く、この試験期間では試料端部 (深さ30 mm) まで塩素が浸透しており浸透深さはわからなかったが、混合セメント硬化体では浸漬液の濃度に関係なく Clの浸透深さは8～10 mmであった (Appendix XI 2.1.3(2)2) 項参照)。
 - ・ OPCでは浸漬液のCl濃度と試料内部のCl濃度の傾向が一致したのに対し、混合セメントでは浸漬液のCl濃度と試料内部のCl濃度の傾向が一致せず、Cl浸透量は1/10倍人工海水浸漬試料が最も多かった。
 - ・ Ca溶脱領域では SO_4^{2-} 、Clが浸透することで既存のアルミネート鉱物である Monosulfate ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) や Monocarbonate ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$) が Ettringite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) や Friedel's salt (フリーデル氏塩、 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) に変化する傾向にあった (Appendix XI 2.1.3(3)項参照)。
- 接液面からみてセメント相外部または接液面極近傍のセメント相内部での変質については、浸漬液の海水成分の濃度に応じてCa部かMg部、またはその両方が確認された。

これらは海水成分の浸透を抑制している可能性が考えられる (Appendix XI 2.1.3(4)2 項参照)。

- SEM観察により、OPCでは外部にCa部 (Calcite (CaCO_3) と推定、人工海水浸漬試料にのみ生成) および外部 (ドームを形成した試料ではドームの液相側の外部) にMg部 (Brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) と推定) を確認した。
 - SEM観察により、混合セメント (いずれもドーム無し) では人工海水浸漬試料の外部にCa部 (Calciteと推定)、接液面極近傍の内部のCa減少部にMg部 (M-S-H ($x\text{MgO} \cdot y\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) と推定) を確認した。1/10人工海水に浸漬した試料ではMg部 (Brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) と推定) が生成した。1/100人工海水に浸漬した試料ではいずれも確認できなかった。
 - Calcite (推定) はOPCの方が混合セメントより生成量が多かった。浸漬液として使用した人工海水中のCa濃度が低い事から、セメントからCa成分が溶脱して沈殿したものであると考えられる。
 - Brucite (推定) はCa溶脱量が多い試料で生成量が多い傾向にあることから、浸漬液中の Mg^{2+} とPortlanditeの溶脱により浸漬液中に供給された OH^- の反応により生成したと考えられる。
 - SEM観察からCalcite (推定) およびBrucite (推定) は非常に緻密な相と判断でき、本検討では海水成分の浸透を抑制している可能性がある。これは実環境でも起こり得ることを検討しつつ、今後、析出層の生成が物質移行に与える影響についての知見を増やしていく必要がある。
- 浸漬液の濃度とセメント系材料の溶解および海水成分の浸透の関係は、OPCでは人工海水濃度が高いほど溶解および海水成分浸透の領域と程度が大きい傾向にあった。一方、混合セメントではOPCより溶解領域が小さく、Cl⁻浸透についてもOPCと異なり1/10人工海水に浸漬した試料が最も顕著であった。

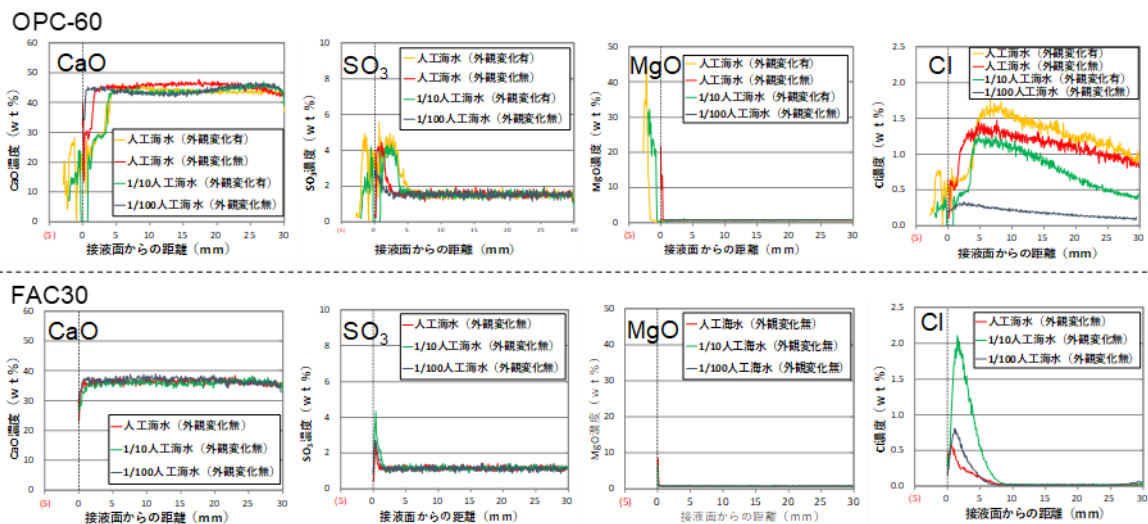


図 3.1-39 EPMA によるセメント相中の元素濃度プロファイルの例 (浸漬期間 4 ヶ月)
この図のみ OPC の人工海水浸漬試料について比較のため外観変化有りの試料データも掲載

表 3.1-21 OPC-45 浸漬試料の鉱物同定結果一覧（浸漬期間 4 ヶ月）

試料条件			SEM観察			XRD分析											
試料名	浸漬液	測定位置	接液面近傍に生成した鉱物			ブランク試料に含有している鉱物					海水影響で生成した鉱物			混和材			
			Calcite (推定)	Brucite (推定)	M-S-H (推定)	CSH	Portlan dite	kato ite	Mono sulfate	Mono carbonate	Ettrin gite	Friedel's salt	un known	Quartz	Mullite		
OPC-45	人工海水	BL	-				緑	黄	青								
		接液面 近傍	外部		青												
			表層極近 傍の内部														
			溶脱部				緑	黄	青		青	青					
			内部	Cl浸透部				緑	黄	青							
		深層部				緑	黄	青									
		1/10 人工海水	外部		青												
			表層極近 傍の内部														
			溶脱部				緑	黄	青		青	青					
			内部	Cl浸透部				緑	黄	青							
		深層部				緑	黄	青									
		1/100 人工海水	外部		青												
表層極近 傍の内部																	
溶脱部					緑	黄	青		青	青							
内部	Cl浸透部					緑	黄	青									
深層部				緑	黄	青											

黄色：XRD ピーク強度が強く明瞭、緑：XRD ピークが明瞭、青：XRD ピーク強度が弱い、または、SEM による微小領域の元素組成分析で確認、白：検出されず。

表 3.1-22 OPC-60 浸漬試料の鉱物同定結果一覧（浸漬期間 4 ヶ月）

試料条件			SEM観察			XRD分析										
試料名	浸漬液	測定位置	接液面近傍に生成した鉱物			ブランク試料に含有している鉱物					海水影響で生成した鉱物			混和材		
			Calcite (推定)	Brucite (推定)	M-S-H (推定)	CSH	Portlan dite	kato ite	Mono sulfate	Mono carbonate	Ettrin gite	Friedel's salt	un known	Quartz	Mullite	
OPC-60	人工海水	BL	-				緑	黄	青	青						
		接液面 近傍	外部		青											
			表層極近 傍の内部													
			溶脱部				緑	黄	青		青	青				
			内部	Cl浸透部				緑	黄	青						
		深層部				緑	黄	青								
		1/10 人工海水	外部		青											
			表層極近 傍の内部													
			溶脱部				緑	黄	青		青	青				
			内部	Cl浸透部				緑	黄	青						
		深層部				緑	黄	青								
		1/100 人工海水	外部		青											
表層極近 傍の内部																
溶脱部					緑	黄	青		青	青						
内部	Cl浸透部					緑	黄	青								
深層部				緑	黄	青										

黄色：XRD ピーク強度が強く明瞭、緑：XRD ピークが明瞭、青：XRD ピーク強度が弱い、または、SEM による微小領域の元素組成分析で確認、白：検出されず。

表 3.1-23 FAC30 浸漬試料の鉱物同定結果一覧（浸漬期間 4 ヶ月）

試料条件			SEM観察			XRD分析										
試料名	浸漬液	測定位置	接液面近傍に生成した鉱物			ブランク試料に含有している鉱物					海水影響で生成した鉱物			混和材		
			Calcite (推定)	Brucite (推定)	M-S-H (推定)	CSH	Portlan dite	kato ite	Mono sulfate	Mono carbonate	Ettrin gite	Friedel's salt	un known	Quartz	Mullite	
FAC30	BL	-														
	人工海水	接液面近傍	外部													
			表層極近傍の内部													
			溶脱部													
		内部	Cl浸透部													
			深層部													
	1/10 人工海水	接液面近傍	外部													
			表層極近傍の内部													
			溶脱部													
		内部	Cl浸透部													
			深層部													
	1/100 人工海水	接液面近傍	外部													
			表層極近傍の内部													
			溶脱部													
		内部	Cl浸透部													
深層部																

黄色：XRD ピーク強度が強く明瞭、緑：XRD ピークが明瞭、青：XRD ピーク強度が弱い、または、SEM による微小領域の元素組成分析で確認、白：検出されず。

表 3.1-24 BFSC70 浸漬試料の鉱物同定結果一覧（浸漬期間 4 ヶ月）

試料条件			SEM観察			XRD分析									
試料名	浸漬液	測定位置	接液面近傍に生成した鉱物			ブランク試料に含有している鉱物					海水影響で生成した鉱物			混和材	
			Calcite (推定)	Brucite (推定)	M-S-H (推定)	CSH	Portlan dite	kato ite	Mono sulfate	Mono carbonate	Ettrin gite	Friedel's salt	un known	Quartz	Mullite
BFSC70	BL	-													
	人工海水	接液面近傍	外部												
			表層極近傍の内部												
			溶脱部												
		内部	Cl浸透部												
			深層部												
	1/10 人工海水	接液面近傍	外部												
			表層極近傍の内部												
			溶脱部												
		内部	Cl浸透部												
			深層部												
	1/100 人工海水	接液面近傍	外部												
			表層極近傍の内部												
			溶脱部												
		内部	Cl浸透部												
深層部															

黄色：XRD ピーク強度が強く明瞭、緑：XRD ピークが明瞭、青：XRD ピーク強度が弱い、または、SEM による微小領域の元素組成分析で確認、白：検出されず。

図 3.1-38 に示した「溶脱部」、「Cl 浸透部」、「深層部（2 か所）」について微小領域の硬度（ビッカース硬度）を測定した結果の例を図 3.1-40 に示す（全試料の結果は Appendix XI

2.1.3(5)項参照)。この図には、浸漬試験開始前 (BL) のビッカース硬度に加え、Ca および Cl の組成分布を併せて示す。

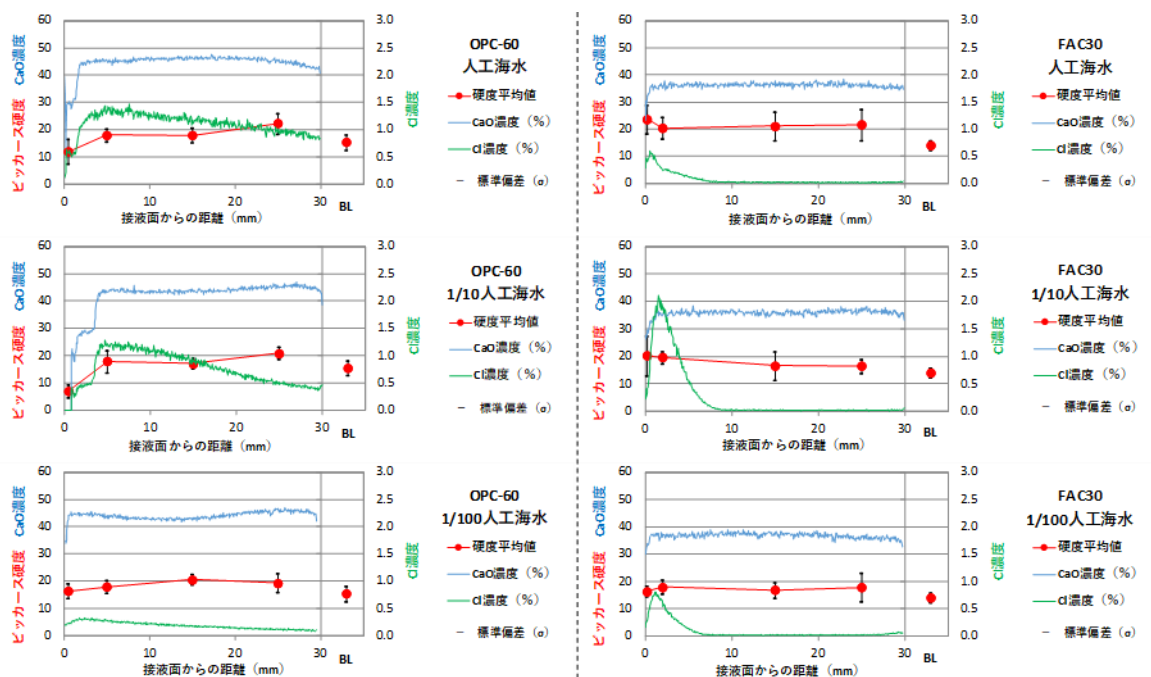


図 3.1-40 接液面からの距離と Ca、Cl の濃度およびビッカース硬度の関係の例 (浸漬期間 4 ヶ月)

ビッカース硬度の測定から新たに分かった点は以下の通りである。

- ・ Ca溶脱が進行している部位でのビッカース硬度の低下傾向が認められた。
- ・ 深層部の強度は浸漬試験の開始前と同等であり、Clの浸透の有無と含有量の多少および浸漬後の鉱物相の変化とビッカース硬度に関連は無かった。
- ・ ビッカース硬度と圧縮強度の関係性は、水セメント比の異なる硬化体の関係性を示す線形となり、硬度値が大きい試料では圧縮強度も大きい傾向にあった (Appendix XI 2.1.3(5)3) 項参照)。

以上の結果を踏まえ、海水系地下水によるセメント変質が短期的強度へ及ぼす影響を推定するとともに、課題を記す。

- 海水系地下水によるセメント変質部は、セメント系材料の強度が低下する可能性がある。
- 硬度の低下はCa溶脱が支配的要因であると考えられるが、Ca溶脱部ではEttringiteなども生成しており、成分溶脱と鉱物生成のそれぞれの影響を検討する必要がある。
- 浸漬試験を継続して変質の進行に伴う硬度の変化を調査し、地下水の海水成分濃度、セメント変質の程度および短期的強度との関係を検討する必要がある。

4) 塩水浸透に係わるモデルの検討

沿岸海底下では、処分場操業期間中に塩化物イオン(Cl-)のセメント系材料への浸透による内部の鋼材の腐食、それに伴うひび割れの発生、さらには、それらによる機械的強度の低下が懸念される。海水中の塩化物イオンの浸透によるセメント系材料中の鋼材腐食は、コンクリート構造物の耐久性を評価する上で重要であることから、土木建築分野では塩化物イオンの移動現象のみを扱った浸透予測式および数値解析モデルが検討されている。一方で、海水影

響を受ける環境では、前項 3) で確認したように、セメント成分の溶脱以外に二次鉱物が生成する。このような環境でのセメント変質を考慮した塩化物イオンの浸透解析においては、塩化物イオンと海水中に含まれる他のイオンとの相互作用など多くの水和物の相平衡を考慮することが必要であり、そのためには、多核種、多相を同時に計算することが必要であると考えられる。

本検討では、沿岸海底下での鋼材などの腐食によるセメント系材料のひび割れ発生に伴う機械的特性の変化の評価にあたり、以上を踏まえて沿岸海底下の地下水によるセメント系材料の塩化物イオンの浸透を検討する。平成 28 年度には産業界で検討されている塩化物イオンの浸透モデルを調査し、沿岸海底下の地層処分の条件における評価への適用性を検討して必要な課題を抽出した（産総研ほか, 2017）。平成 29 年度は、そのうち物質移行（拡散モデル）と化学反応（相平衡モデル）を連成させた相平衡物質移行解析コード（細川ほか, 2007; 2011）を適用した塩化物イオンの浸透解析（以下、本解析）について、濃度の異なる海水系地下水での塩化物イオンの浸透解析を検討した。

本解析の概要を図 3.1-41 に示す。本解析は、複数の成分がコンクリート内部に浸透する現象、ならびに浸透した成分がセメント成分に化学的に作用する現象を、有限要素法と熱力学的相平衡を組み合わせることによって計算する。図 3.1-41 のような現象について、液相中の化学種は一次元の物質移動モデルに従って移動するものと扱い、溶解、析出に加え表面吸着による固相中の水和物と液相化学種との間での物質の授受の挙動については熱力学的相平衡モデルに従って解析を行う。そのため、塩化物イオンと他のイオンの相互作用についても考慮することが可能である。さらには鉄筋腐食要因の一つである $[Cl^-]/[OH^-]$ を相平衡に基づいて算出できるため、従来の全塩化物イオン濃度に加え $[Cl^-]/[OH^-]$ の双方から鉄筋腐食の評価を可能としている。

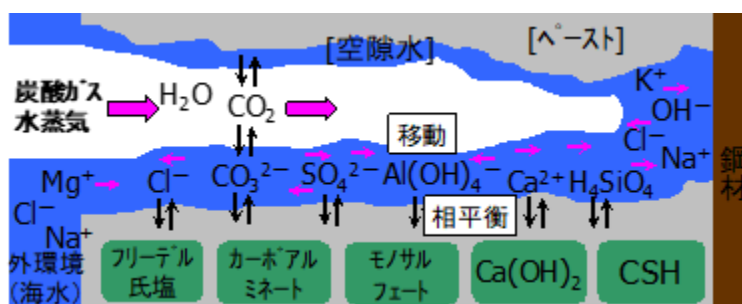


図 3.1-41 セメント硬化体中での物質移動と相平衡の概念図

本解析手法は地上構造物での海水条件での塩化物イオンの浸透を検討した実績はあるが、様々な濃度の海水系地下水環境での検討の実績は無い。そこで、前項 3) で実施した浸漬試験条件での海水成分の浸透とそれに伴う反応を計算し、試験結果と比較検証する事で、本解析にて濃度が異なる海水系地下水での塩化物イオンの浸透解析を行う際の留意点などを確認した。本解析を試験結果により検証するのに必要な各種セメントペーストのイオンの移動に対する構造因子は、平成 23 年度に実施した各種セメントペースト硬化体の NaCl 溶液への浸漬試験結果（原環センター, 2012）を基に決定した。

本解析の結果を以下に記す（図 3.1-42、図 3.1-43 および Appendix XI 3.3 節参照）。

- ・ OPC-60硬化体について、海水系地下水の濃度と塩化物イオンの浸透の関係は、解析と試験ともに塩化物イオン濃度が高いほど浸透が進んでおり、同様の傾向を示した。しかし、塩化物イオンの浸透の程度は、1/100人工海水浸漬試料では解析と試験で同等で

- あったが、その他の試料は解析の方が試験より塩化物イオンが浸透する結果となった。
- 混合セメント硬化体について、海水系地下水の濃度と塩化物イオンの浸透の関係は、試験では塩化物イオン濃度によらず浸透深さが一定、かつ、1/10人工海水浸漬試料が最も塩化物イオン浸透量が多かったのに対し、解析では塩化物イオン濃度が高いほど浸透深さおよび量ともに大きく、解析と試験で異なる傾向を示した。1/10人工海水浸漬試料および1/100人工海水浸漬試料では、解析の方が試験よりも塩化物イオンが浸透しない結果となった。
 - 鉱物組成について、EttringiteおよびFriedel's saltは、生成箇所や生成量が試験とは異なっていたが、生成が認められた事は試験結果と一致していた。一方、試験では接液面外部に生成していたBruciteは、解析ではセメント相内部に生成していた例が認められたが、生成の有無および生成量は試験と完全には一致しなかった。また、解析では接液面近傍のPortlanditeが全量溶脱した上にC-S-Hの溶脱も起きており、試験でPortlanditeがCa溶脱部に残留していたのとは異なっていた。

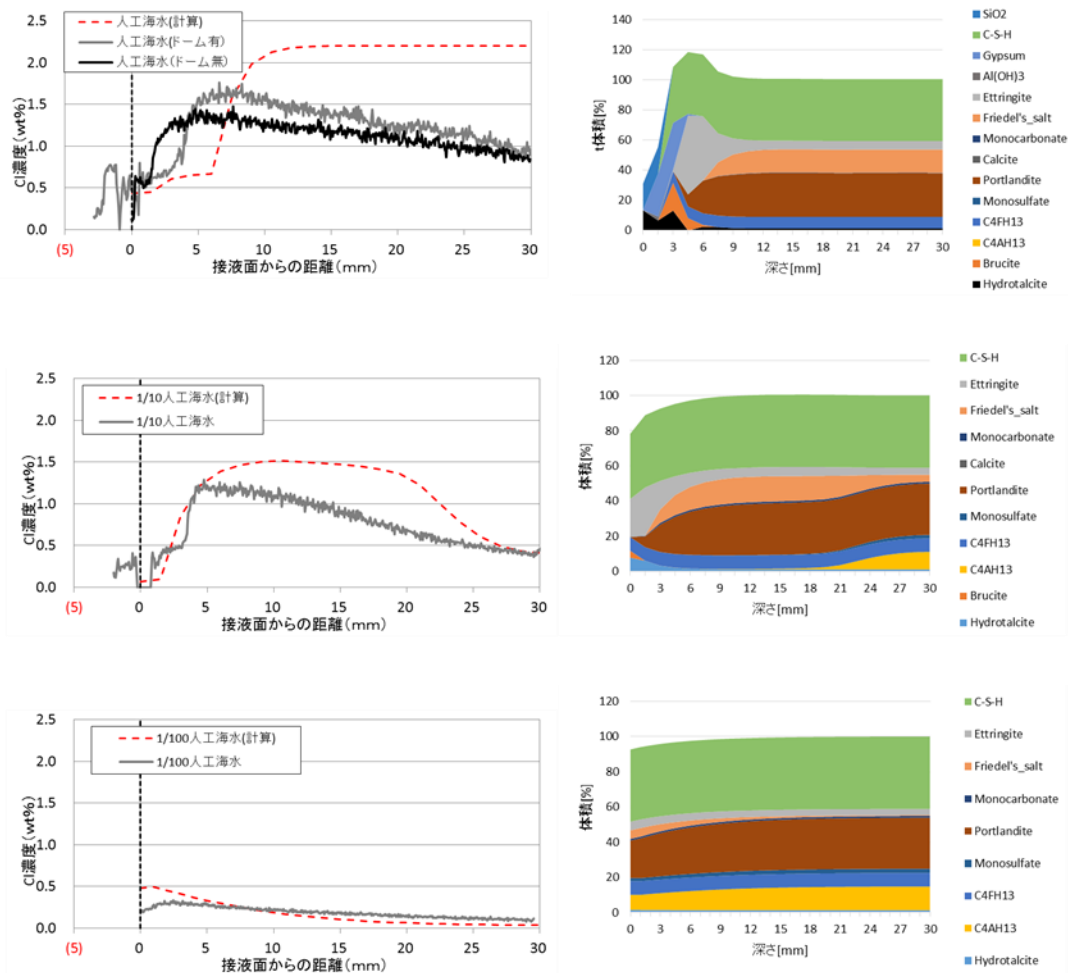


図 3.1-42 塩素の浸透プロファイルと鉱物相組成の計算結果
(OPC-60、浸漬期間 4 ヶ月)

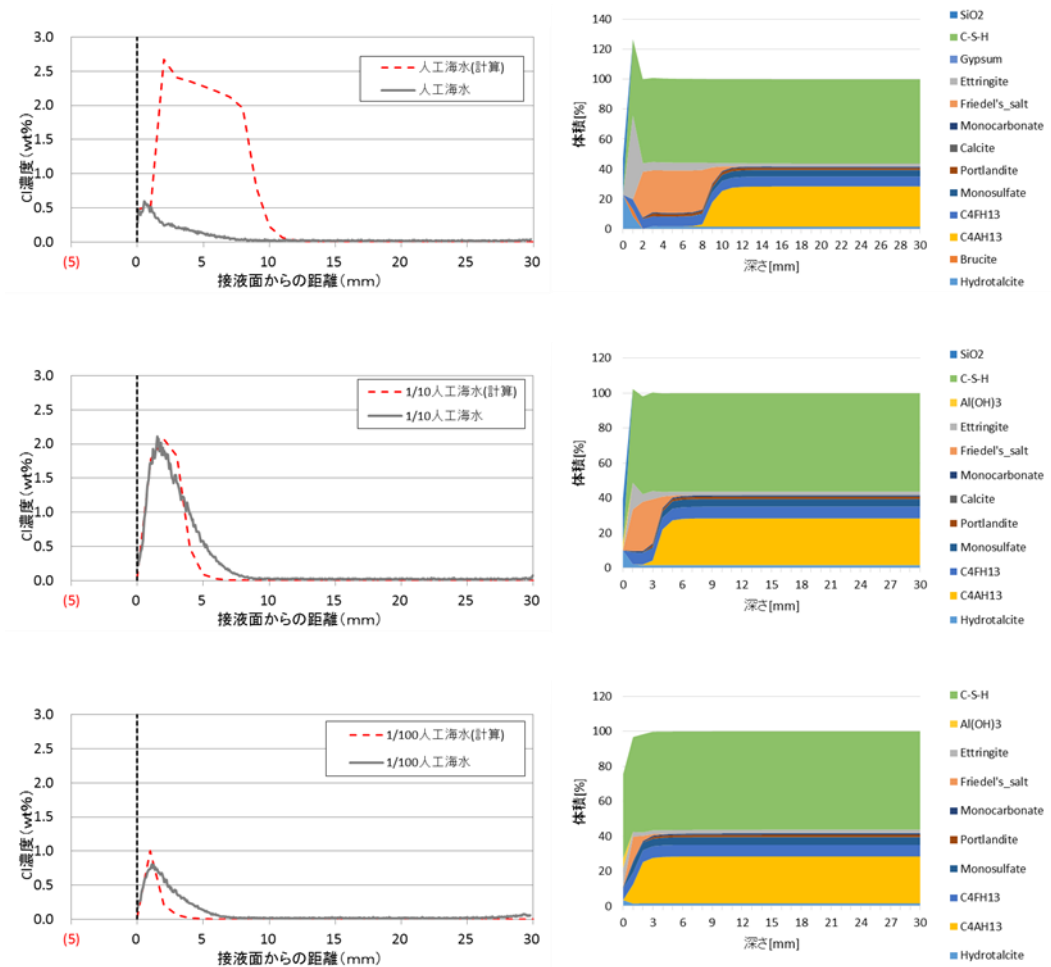


図 3.1-43 塩素の浸透プロファイルの計算結果と実験結果
(FAC-30、浸漬期間 4 ヶ月)

解析の方が試験よりも塩化物イオンが浸透した結果については、本解析の物質移行モデルでは表層の析出層の影響を考慮できない事が影響した可能性が考えられる。前述のように、今後、析出層の生成が物質移行に与える影響についての知見を増やしていく必要がある。また、混合セメントにて解析の方が試験よりも塩化物イオンが浸透しない結果となったのは、本解析では Friedel's salt を含むアルミネート系水和物の生成量を過剰に評価している事が原因の一つである可能性がある。今後の試験結果も確認しつつ、引き続き濃度の異なる海水系地下水における塩化物イオンの浸透解析の検討をしていく必要がある。

また、本解析はセメントペーストに対する塩化物イオンの浸透を解析したものであり、地層処分場における塩化物イオンの浸透から鉄筋の腐食を評価するにあたっては、骨材が存在するモルタルおよびコンクリートの空隙構造や物質移行特性も考慮する必要がある。

5) まとめ

セメント系材料の化学的な変質が強度に及ぼす影響を把握するため、濃度の異なる人工海水へ 4 ヶ月浸漬したバルク試験体の分析を実施した。その結果、Ca が溶出した部分の硬度が低下する傾向が確認された。

鉄筋腐食によるセメント系材料の強度低下に関連して、セメントの変質を考慮した塩水浸透に係わるモデルを検討した。物質移行（拡散モデル）と化学反応（相平衡モデル）を連成させた相平衡物質移行解析コードを適用した塩化物イオンの浸透解析について、試験を再現した解析を行い、様々な海水系地下水環境における塩化物イオンの浸透解析のため、今後の検討に留意すべき点を確認した。

平成 30 年度のとりまとめに向けて、浸漬試験を継続し試験による変質と力学特性の関連の把握と塩化物イオンの浸透に関する解析手法の検証と検討を行い、処分場作業時の空洞安定性の評価に係る根拠の整備を進めていく。

3.1.4 ニアフィールド複合現象評価手法の開発

(1) 背景と目的

高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）および TRU 廃棄物の地層処分システムの性能評価では、ニアフィールドの長期挙動に影響を及ぼす可能性のある複数の現象と、これらの相関関係の理解に基づき、ニアフィールドの状態変遷を評価するとともに、こうした評価から得られる知見や情報を、核種移行の場の設定に反映させて核種移行挙動を評価することが重要である（例えば、日本原子力研究開発機構（2015））。このようなニアフィールドの複合現象を評価するシステムを構築する上で、材料表面や異種材料の境界面における選択的な材料の変質促進あるいは二次鉱物による間隙の閉塞に伴う物質移行・変質の抑制などの局所的な領域における振る舞いが施設全体の長期的変遷に影響を及ぼす可能性を考慮することが重要であると指摘されており（日本原子力研究開発機構, 2013）、沿岸域に処分場を建設することを想定する場合においても、緩衝材やセメント系材料などの人工バリア材料と海水系の地下水との化学反応による材料の変質・劣化などによる影響およびこれら材料間の相互作用による影響を考慮することが必要であると考えられる。

また、沿岸域に処分場を建設する場合には、海水準変動などの環境変遷による、長期的な時間スケールでの地下水組成の変遷を考慮することが特に重要であると考えられるが、このような影響については、ニアフィールドの複合現象を評価するシステムに関する既往の検討（例えば、日本原子力研究開発機構, 2013；日本原子力研究開発機構, 2014；日本原子力研究開発機構, 2015；日本原子力研究開発機構, 2016；日本原子力研究開発機構, 2017）では考慮されていない。

以上の観点から、平成 28 年度においては、沿岸域に処分施設を建設する場合のニアフィールド複合現象を評価するシステムを構築するための課題を抽出することを目的として、海水系の地下水環境での人工バリア材料の変質挙動に関する既往の知見を調査するとともに、このようなバリア材料の変質挙動と、沿岸部に処分施設を建設する場合に想定されるニアフィールド環境条件の変遷を考慮した化学-物質輸送連成解析を行った（産業技術総合研究所ほか, 2017）。

本年度は、平成 28 年度の検討では考慮されていなかった、オーバーパックなどの鉄材料と緩衝材との相互作用による影響も考慮しつつ、人工バリア材料の材料間相互作用を考慮した化学-物質輸送連成解析を行った。さらに、解析結果および平成 28 年度に実施した課題の抽出結果などを踏まえて、沿岸部に処分施設を建設する場合を想定してニアフィールドにおける複合現象の概念モデルを検討した。本項ではこれらの検討の成果を示す。

(2) 人工バリア材料の材料間相互作用を考慮した化学-物質輸送連成解析

沿岸海底下に処分施設を建設することを想定して、オーバーパックを構成する鉄、ベントナイト緩衝材およびコンクリート支保の変質挙動およびこれらの材料間相互作用を把握することを目的として、化学-物質輸送連成解析コード QPAC（日本原子力研究開発機構, 2015）による解析を実施した。解析においては、HLW 処分施設のバリアシステムを対象とした。また、(1)で示したように、沿岸海底下に処分施設を建設することを想定する場合には、海水準変動などの環境変遷による長期的時間スケールでの地下水組成の変遷による影響を考慮することも必要と考えられることから、ケーススタディとして、処分場閉鎖後にニアフィールドにおける地下水組成が変化することを想定した解析も実施するものとした。

1) 解析ケースの設定

化学-物質輸送連成解析の解析ケースを表 3.1-25 に示す。ケース 1 では、処分施設が海水系

の地下水環境下にある場合の材料の変質挙動を把握することを目的として、このような場の状態を想定した解析を行うとともに、降水系の地下水環境下にある場合を想定した解析も行い、結果の比較・分析を行った。ケース 2 では、海水準変動などの長期的な環境変遷の影響により、処分施設が海水系の地下水環境から、降水系の地下水環境へ変遷する場合の材料の変質挙動を把握することを目的とする解析を行った。

表 3.1-25 化学-物質輸送連成解析の解析ケース

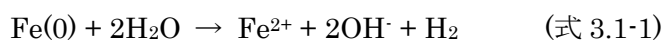
処分場周辺の地下水の状態		
ケース 1	ケース 1a	降水系地下水を想定
	ケース 1b	海水系地下水を想定
ケース 2	海水系地下水から降水系地下水への変遷を想定	

2) 解析モデルの概要

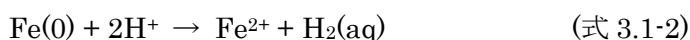
本解析では、沿岸海底下に処分施設を建設することを想定して、海水系の地下水環境におけるオーバーパックを構成する鉄、ベントナイト緩衝材およびコンクリート支保の変質挙動およびこれらの材料間相互作用を把握することを目的としていることから、HLW 処分坑道（横置き定置方式を想定）に直交する方向に地下水が流れている状態を仮定し、円筒座標系で解析を行うものとした。

化学-物質輸送連成解析の概念を図 3.1-44 に示す。緩衝材およびコンクリート支保のいずれの材料についても、処分直後の物質輸送特性が維持されるものとして、人工バリア内の移流による物質移行は考慮せず、拡散のみを考慮した。拡散係数の設定方法については、平成 28 年度と同様に、既往の検討（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構, 2005）を参考に間隙率とモンモリロナイト含有率の関数として設定した。掘削影響領域における地下水流動についても、平成 28 年度の解析と同様に、多重円環定常地下水流動の理論解による解析を行い、掘削影響領域に流れる地下水の流速を決定して、これに相当する値として設定した。

また、本年度の解析では、平成 28 年度では考慮していなかった緩衝材への鉄影響を考慮した。中性からアルカリ領域における鉄の腐食反応は式 3.1-1 で表される。



しかしながら、後述する熱力学データベース（JAEA 6-TDB (v1.07)）の制約から、ここでは以下の式 3.1-2 により鉄腐食を表現した。鉄の腐食速度については、文献値から引用して与えるものとした。具体的な数値については(2)の 3)で述べる。



この式では、鉄が速度 $R \text{ mol y}^{-1}$ で腐食する場合、 H^+ は $2R \text{ mol y}^{-1}$ の速度で消費され、 Fe^{2+} と $\text{H}_2(\text{aq})$ は速度 R で生成されることになるため、そのようなフラックスを表現する境界条件を緩衝材内側の境界に設定した。なお、腐食により生じた鉄イオンは全て緩衝材との反応に供給されるものとした。

それ以外のモデルの詳細については、平成 28 年度の解析と同一とした。

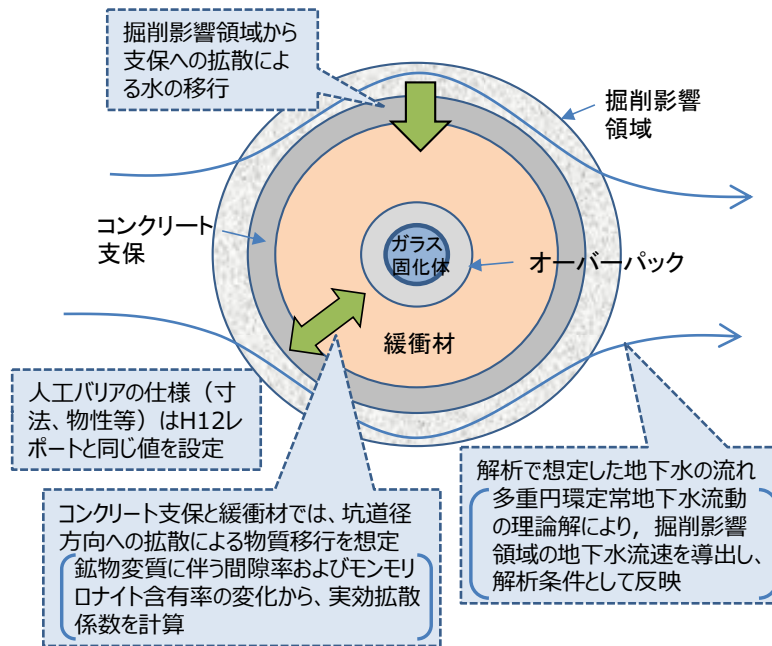


図 3.1-44 化学-物質輸送連成解析の概念

3) 解析条件の設定

ケース 1 の解析条件を表 3.1-26 に示す。海水系の地下水および降水系の地下水の組成としては、昨年度の解析と同様に、既往の性能評価解析（例えば、核燃料サイクル開発機構（1999）、電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構（2005））において標準的なデータセットとして使用されている降水系高 pH 型地下水（FRHP）および海水系高 pH 型地下水（SRHP）を選択した。また、1)で示した多重円環定常地下水流動の解析における動水勾配と透水係数の値については、既往の検討結果（核燃料サイクル開発機構, 1999）から引用した。鉄の腐食速度についても、既往の検討結果（谷口ほか, 2010）より代表的な値を引用した。

ケース 2 の解析条件を表 3.1-27 に示す。海水系地下水から降水系地下水への変遷を考慮して TRU 処分体系を対象として実施した昨年度の解析と同様に、処分後 1 万年で地下水組成が海水系地下水から降水系地下水へ切り替わるものとした。動水勾配についても、海底下で想定される低い値 (10^{-4}) から、陸化された場合に想定される高い値 (10^{-2}) へ切り替わることを想定した。なお、昨年度の解析では、地下水の切り替わりによる緩衝材での鉱物組成の変化は認められなかったが、この理由として緩衝材とセメント間の境界近傍の間隙が閉塞して、物質移行が抑制されたことが考えられた。このことは、処分場周辺岩盤の地下水組成が降水系地下水へ切り替わっても、材料内部では、元の海水系地下水に由来する間隙水組成が維持される可能性を示唆している。このような境界の変質層については、力学的に安定せず、破壊と修復が繰り返されることによって間欠的な溶質および核種の移行が生じる可能性も指摘されていることから、本解析では、材料間の境界において間隙の閉塞が進まず、元の緩衝材と同程度の拡散係数で、物質移行が維持される場合を想定して解析を行った。

コンクリートの初期水和物組成、緩衝材の初生鉱物の組成および初期間隙水組成を表 3.1-28、表 3.1-29、表 3.1-30 にそれぞれ示す。これらの値については、ケース 1 およびケース 2 のいずれについても、平成 28 年度の解析と同一とした。解析には、日本原子力研究開発機構（2017）の熱力学データベース JAEA8-TDB (v1.07) を用いた。解析開始時点の鉱物組成分布を図 3.1-45 に示す。

表 3.1-26 ケース 1 の解析条件

地下水	FRHP (降水系高 pH 地下水) あるいは、SRHP (海水系高 pH 地下水)
動水勾配	10^{-4}
透水係数 ^{※1}	緩衝材： 10^{-12} m/s, 支保： 10^{-12} m/s, 掘削影響領域： 3×10^{-7} m/s, 岩盤： 3×10^{-8} m/s
鉄の腐食速度 ^{※2}	1.0 $\mu\text{m/y}$

※1：核燃料サイクル開発機構(1999)および電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構(2005)を参考に標準的な値として設定。

※2：谷口ほか(2010)より引用。

表 3.1-27 ケース 2 の解析条件

地下水	【切り替わり前】 SRHP(海水系高 pH 地下水)	【切り替わり後】 FRHP(降水系高 pH 地下水)
動水勾配	10^{-4}	10^{-2}
透水係数 ^{※1}	緩衝材： 10^{-12} m/s, 支保： 10^{-12} m/s, 掘削影響領域： 3×10^{-7} m/s, 岩盤： 3×10^{-8} m/s	
鉄の腐食速度 ^{※2}	1.0 $\mu\text{m/y}$	

※1：核燃料サイクル開発機構(1999)および電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構(2005)を参考に標準的な値として設定。

※2：谷口ほか(2010)より引用。

表 3.1-28 セメント系材料 (コンクリート支保) の初期水和物組成

初期水和物	初期値
Portlandite [mol/dm^3]	1.218
CSH(1.65) [mol/dm^3]	1.062
Ettringite-Al [mol/dm^3]	0.024
Katoite-Al [mol/dm^3]	0.041
Brucite [mol/dm^3]	0.143
Na_2O [mol/dm^3] ※	0.012
K_2O [mol/dm^3] ※	0.014
細・粗骨材 [%]	69.840
間隙率 [%]	14.451

※固相中の含有量に相当する量を液相成分として設定

表 3.1-29 緩衝材の初生鉱物

初生鉱物	初期値
Montmor-Na [mol/dm ³]	1.462
Quartz [mol/dm ³]	8.100
Chalcedony [mol/dm ³]	7.071
Calcite [mol/dm ³]	0.268
Dolomite [mol/dm ³]	0.146
Analcime-I [mol/dm ³]	0.168
間隙率 [%]	40.302

表 3.1-30 地下水の組成と各々の材料における初期間隙水組成*

	FRHP			SRHP		
	地下水	緩衝材	セメント	地下水	緩衝材	セメント
pH	8.286	8.371	13.397	7.900	6.654	13.378
Al	3.43×10 ⁻⁷	3.43×10 ⁻⁷	1.25×10 ⁻³	3.33×10 ⁻⁹	3.21×10 ⁻⁹	8.48×10 ⁻⁵
C	3.48×10 ⁻³	1.59×10 ⁻²	2.32×10 ⁻⁴	3.55×10 ⁻²	1.33×10 ⁻²	5.17×10 ⁻⁴
Ca	8.06×10 ⁻⁵	5.13×10 ⁻⁵	9.05×10 ⁻⁴	1.16×10 ⁻⁴	1.29×10 ⁻²	1.17×10 ⁻³
Cl	1.19×10 ⁻⁶	1.19×10 ⁻⁶	1.47×10 ⁻⁵	6.13×10 ⁻¹	5.90×10 ⁻¹	6.21×10 ⁻¹
Fe	9.73×10 ⁻¹⁰	9.73×10 ⁻¹⁰	9.73×10 ⁻¹⁰	3.89×10 ⁻⁸	3.89×10 ⁻⁸	3.89×10 ⁻⁸
K	6.15×10 ⁻⁵	1.29×10 ⁻⁴	2.02×10 ⁻¹	1.10×10 ⁻²	3.62×10 ⁻³	2.15×10 ⁻¹
Mg	2.16×10 ⁻⁵	4.19×10 ⁻⁶	2.58×10 ⁻⁹	2.78×10 ⁻⁵	1.29×10 ⁻³	9.64×10 ⁻¹⁰
Na	3.55×10 ⁻³	2.84×10 ⁻²	1.77×10 ⁻¹	6.62×10 ⁻¹	5.75×10 ⁻¹	8.46×10 ⁻¹
S	1.11×10 ⁻⁴	1.11×10 ⁻⁴	6.18×10 ⁻⁴	3.13×10 ⁻²	3.01×10 ⁻²	3.96×10 ⁻²
Si	3.39×10 ⁻⁴	3.22×10 ⁻⁴	7.87×10 ⁻⁵	3.06×10 ⁻⁴	2.54×10 ⁻⁴	1.75×10 ⁻⁴

* 初期間隙水組成の単位は[mol/dm³]

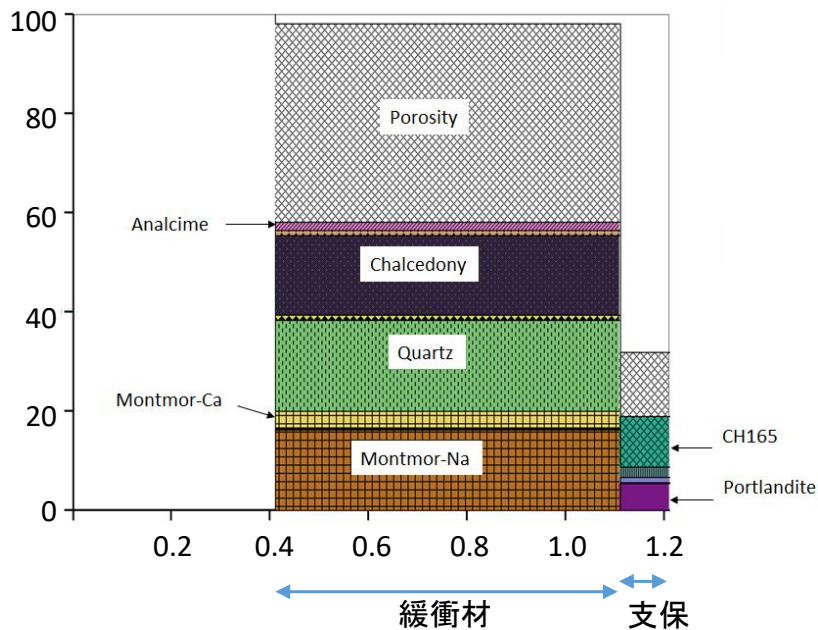


図 3.1-45 解析開始時点（処分場閉鎖直後）の鉱物組成の分布

4) 解析結果

ケース 1 の解析結果の一例を図 3.1-46 に示す。降水系地下水の環境下（ケース 1a）では、オーバーパックと緩衝材の境界近傍において Fe 型モンモリロナイトの生成がわずかに認められたが、海水系地下水の環境下（ケース 1b）では、表 3.1-30 で示されている通り、緩衝材の間隙水に含まれる Ca 濃度が高いことから、Ca 型モンモリロナイトの生成量が多く、Fe 型モンモリロナイトは生じない結果が得られた。

ケース 2 の解析結果の一例を図 3.1-47 に示す。比較のために、海水系地下水が維持されることを想定して、ケース 2 と同一の条件で行った解析の結果も示す。ケース 2 では、降水系地下水が維持されるケース 1a の結果と同様に、オーバーパックと緩衝材の境界近傍において Fe 型モンモリロナイトが析出する結果が得られた。このような傾向は、海水系地下水環境が保持されたとした解析では認められなかったことから、1 万年後に海水系地下水から降水系地下水に切り替わることによるものと考えられる。このことは、緩衝材の境界近傍の二次鉱物などの生成による間隙の閉塞とそれによる物質移行の抑制が起こらず、元の緩衝材と同程度の拡散による物質輸送が維持されることを想定する場合には、処分場周辺岩盤の地下水が海水系地下水から降水系地下水へ切り替わることで、緩衝材の間隙水組成も変化し、海水系地下水環境が維持される場合とは異なる鉱物が生成することを示唆している。

なお、いずれのケースでも、2) で述べたとおり、鉄の腐食に伴い生じた鉄イオンは全て緩衝材との反応に供給されるものとしたため、マグネタイトなどの鉄腐食生成物は認められなかった。

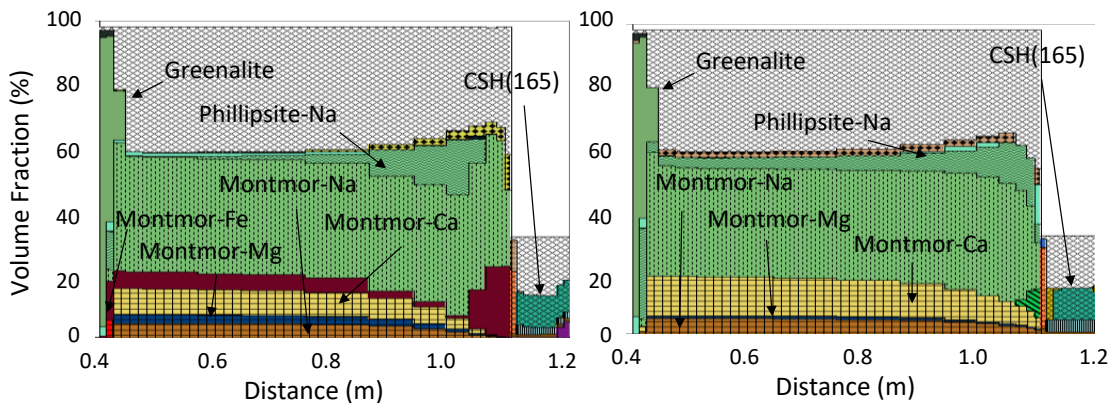


図 3.1-46 化学-物質輸送連成解析の結果の例
(左：ケース 1a、右：ケース 1b、処分後 5 万年後)

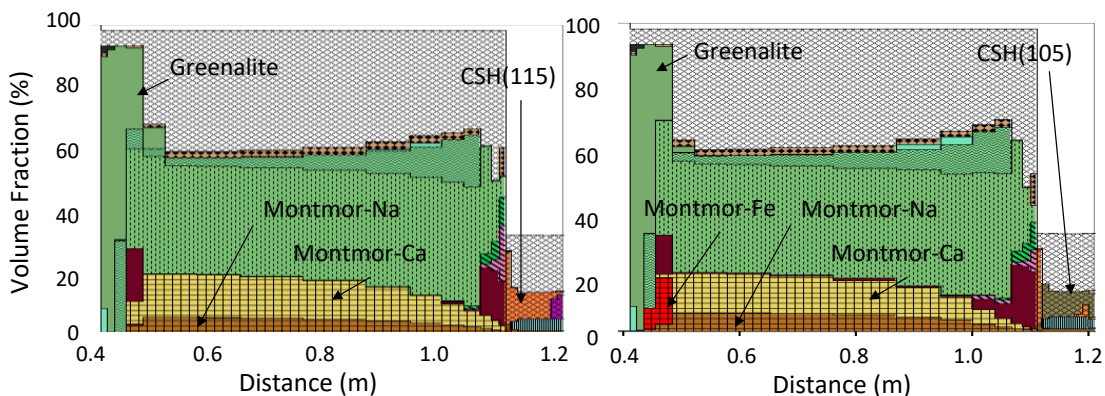


図 3.1-47 化学-物質輸送連成解析の結果の例
(左：海水系地下水が保持されたとしたケース、右：ケース 2、処分後 1.7 万年後)

(3) 沿岸域処分を想定したニアフィールド複合現象の概念モデルの構築

ニアフィールドでの核種の移行挙動を規定する場の状態については、(2)で対象としたような、人工バリア材料と地下水との化学反応による変質・劣化とそれに伴う水理・物質移行特性の変化のみならず、材料の変形などの力学的な現象を含む、化学-水理-力学に跨るマルチフィジックスの連成現象で定まると考えられる。さらに、緩衝材、セメント系材料、鉄などの異種材料間の相互作用による影響も考慮することが必要である。こうした観点から、ここでは、沿岸域に処分場を建設する場合を想定してニアフィールドの複合現象を評価する上で、化学-水理-力学に跨るマルチフィジックスの連成および材料間の相互作用などに着目しつつ、考慮すべき現象を概念モデルとして整理することを試みた。

はじめに、ニアフィールドにおける材料間相互作用やマルチフィジックスの連成現象を考慮して、核種移行の場の状態に及ぼす影響を検討した既往の結果（例えば、日本原子力研究開発機構(2017)）を参考として、降水系地下水環境下における場の状態の変化を概念モデルとして整理した。さらに、この結果に対して、平成 28 年度に実施した、既往の文献調査の結果から抽出された、セメント系材料とベントナイト緩衝材において想定される変質現象と安全機能への影響や、(2)に示す解析結果などを踏まえて、海水系地下水環境下における概念モデルを整理した。平成 28 年度に整理された、ベントナイト緩衝材とセメント系材料において想定される変質現象と安全機能への影響を表 3.1-31 および表 3.1-32 に、概念モデルとして整理した結果を図 3.1-48 にそれぞれ示す。

図 3.1-48 に示されるように、材料間の相互作用や化学-物質輸送-力学に跨る連成の全体構造については、海水系地下水の場合と降水系地下水の場合で大きな違いは無いが、人工バリアの特性を左右する海水系地下水環境に特有の現象を考慮することにより、連成現象などの帰結として生じるバリア材料の安全機能の変化の程度が異なる可能性があると考えられた。今後、このような整理や(2)の解析結果などに基づき、隆起・侵食や海水準変動などの環境変遷が境界条件として作用する場合に、沿岸域に処分施設を建設する場合に特に考慮すべき場の状態の変遷に関するシナリオ分析が必要となる可能性がある。

表 3.1-31 ベントナイト系材料において想定される変質現象と安全機能への影響
(産業技術総合研究所ほか, 2017)

現象	海水中の原因物質など	想定される安全機能への影響など
スメクタイトのパリゴルスカイトへの変質	マグネシウム、シリカ	緩衝材の膨潤性の低下など。
スメクタイトの緑泥石又は緑泥石に類似した鉱物への変質	マグネシウム	緩衝材の膨潤性の低下など。
スメクタイトのサポナイトへの変質	マグネシウム	緩衝材の膨潤性の低下などの安全機能への影響は限定的となる可能性がある
スメクタイトのイライトへの変質	カリウム	緩衝材の膨潤性の低下。ただし、100℃以下となるように処分施設を設計することにより、イライト化を回避できる可能性がある。
層間陽イオン型の Mg 型への変化	マグネシウム	緩衝材の膨潤性の低下。
層間陽イオン型の K 型への変化	カリウム	緩衝材の膨潤性の低下。
層間陽イオン型の NH ₄ 型への変化	アンモニウム	緩衝材の膨潤性の低下。
密度が比較的低い領域における膨潤圧の低下	海水中の塩分	緩衝材の膨潤性の低下。有機物の透過が促進される可能性もある。

表 3.1-32 セメント系材料において想定される変質現象と安全機能への影響

(産業技術総合研究所ほか, 2017)

現象	海水中の原因物質など	想定される安全機能への影響など
ブルーサイトおよび M-S-H ゲルの生成による間隙水の pH 低下と、それによるポルトランドイトおよび C-S-H ゲルの溶解	マグネシウム	ポルトランドイトや C-S-H ゲル溶解に伴うコンクリートの強度低下・ひび割れがもたらす、透水性の増加、卓越した移行経路の形成。 C-S-H ゲル溶解に伴う核種の収着性低下。
緩衝材あるいは母岩との界面でのブルーサイト生成	マグネシウム	界面における地下水および物質の移行抑制。
エトリンガイトや二水石膏などの膨張性鉱物の生成と、それによるひび割れの発生・劣化の促進	硫酸塩	セメント組織の脆弱化に伴うコンクリートの強度低下・ひび割れがもたらす、透水性の増加。卓越した移行経路の形成。
ソーマサイトの生成	硫酸塩 炭酸塩	セメント組織の脆弱化に伴うコンクリートの強度低下・ひび割れがもたらす、透水性の増加。卓越した移行経路の形成。 C-S-H ゲル溶解に伴う核種の収着性低下。
フリーデル氏塩生成に伴う pH 上昇	塩化物	アルカリ骨材反応によるひび割れの発生、透水性の増加および卓越した移行経路の形成 緩衝材への高 pH 間隙水の移行によるモンモリロナイトの溶解度上昇、緩衝材の劣化。
コンクリート内部における $3\text{CaO} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ などの析出とそれによる結晶圧の発生・コンクリートの破壊	塩化物	透水性の増加による、卓越した移行経路の形成。
カルサイトなどの沈殿と、それに伴うポルトランドイトおよび C-S-H の溶解	炭酸塩	ポルトランドイトや C-S-H ゲル溶解に伴うコンクリートの強度低下・ひび割れがもたらす、透水性の増加、卓越した移行経路の形成。 C-S-H ゲル溶解に伴う核種の収着性低下。 カルサイト沈殿、セメント内部の緻密化による物質移行の抑制。
コンクリート中の鉄の表面の不動態被膜の破壊・腐食の進展	塩化物	金属材料の腐食膨張などによる引張応力が加わることでひび割れが発生。透水性の増加による、卓越した移行経路の形成。

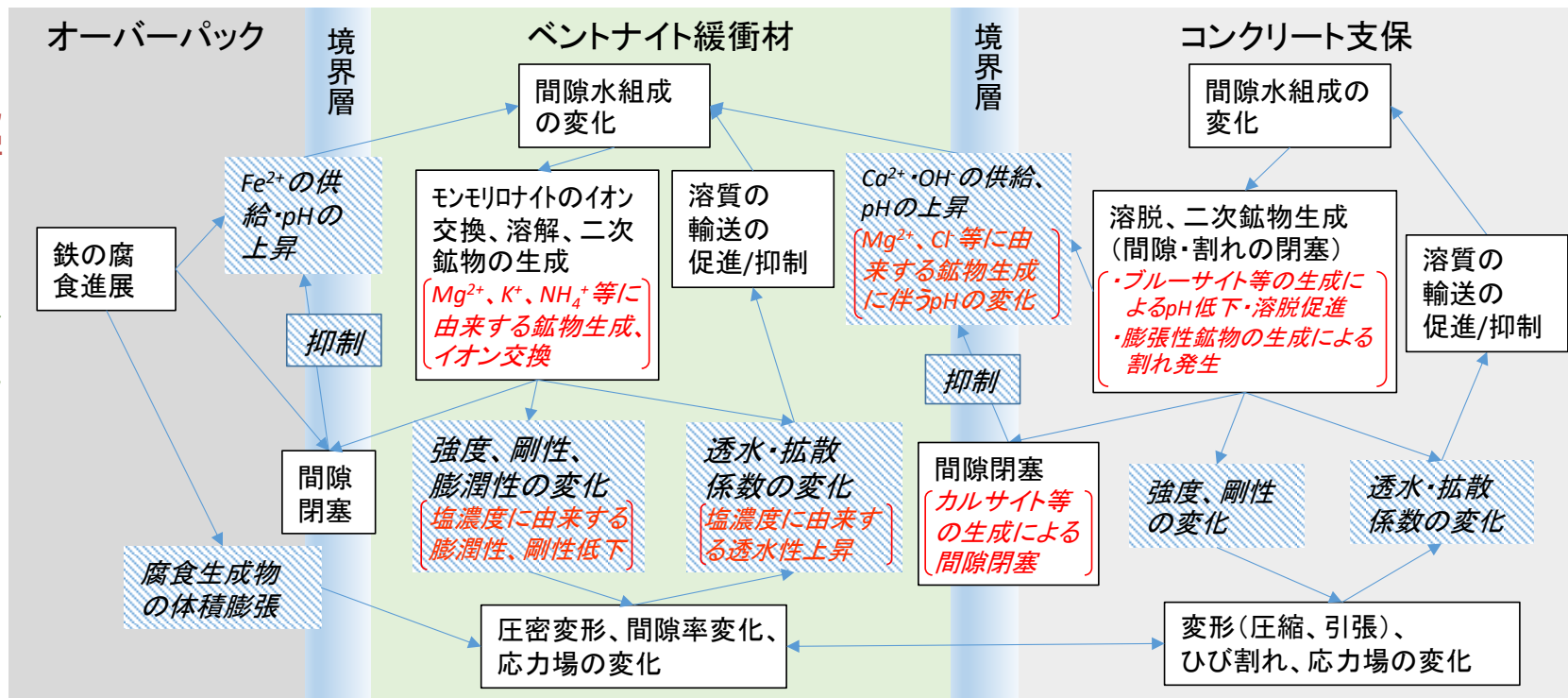


図 3.1-48 海水系地下水を想定した場合のニアフィールドの概念モデルの例
 (海水系地下水特有の現象などを赤字で示す)

(4) まとめ

オーバーパックなどの鉄材料と緩衝材との相互作用による影響も考慮しつつ、人工バリア材料の材料間相互作用を考慮した化学-物質輸送連成解析を行うとともに、平成 28 年度に実施した課題の抽出結果等を踏まえて、沿岸部に処分施設を建設する場合を想定してニアフィールドにおける複合現象の概念モデルを整理した。材料間の相互作用や化学-物質輸送-力学に跨る連成の全体構造については、降水系地下水環境と大きな違いは無いが、人工バリアの特性を左右する海水系地下水環境に特有の現象を考慮することにより、連成現象等の帰結として生じるバリア材料の安全機能の変化の程度が異なる可能性があると考えられた。今後、隆起・侵食や海水準変動等の環境変遷が境界条件として作用する場合に、考慮すべき場の状態の変遷に関するシナリオ分析が必要となる可能性がある。

(5) 参考文献

- Brooks, R.H., and Corey, A.T.: Properties of porous media affecting fluid flow. J.Irrig. Drainage Div., ASCE Proc. 72(IR2): pp.61-88, 1964.
- 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構, TRU 廃棄物処分技術検討書-第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ-, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, 2005.
- 沿岸部研究会, 沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会 とりまとめ, 2016.
- 福手勤, 濱田 秀則, 山本 邦夫, 海洋環境に 20 年間曝露されたコンクリートの耐久性に関する研究, 土木学会論文集 No.442, V-16, pp. 43-52., 1992.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 17 年度地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処分技術調査-人工バリア長期性能確認試験-報告書, 2006.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 18 年度地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処分技術調査-人工バリア長期性能確認試験-報告書, 2007.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 20 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書 (第 1 分冊) -人工バリアの長期挙動の評価-, 2009.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 21 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書 (第 1 分冊) -人工バリアの長期挙動の評価-, 2010.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 22 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書 (第 1 分冊) -人工バリアの長期挙動の評価-, 2011.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 24 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発平成 19 年度~平成 24 年度の取りまとめ報告書, 2011.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 23 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書 (第 1 分冊) -人工バリアの長期挙動の評価-, 2012.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 27 年度地層処分技術調査等事業 (高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学確認技術開発) 人工バリア品質/健全性評価手法の構築 (その 2) -緩衝材, 2015.

- 細川佳史, 小川彰一, 山田一夫, 水分・CO₂ガス及び液相化学種の移動と熱力学的相平衡との連成システムによる複合劣化の再現, 第 65 回セメント技術大会講演要旨, pp.308-309, 2011.
- 細川佳史, 山田一夫, Bjorn JOHANNESSON, Lars-Olof NILSSON, 熱力学的相平衡を考慮した Multi-species 物質移動モデルの構築, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp. 957-962, 2007.
- 入矢桂史郎, 三原守弘, ポゾランを高含有した低アルカリ性コンクリートの開発, コンクリート工学年次論文集, 25, 1, pp.185-190, 2003.
- 伊藤弘之, 三原守弘: ベントナイト系材料の飽和透水係数の変遷評価式, JNC TN8400 2005-029, 2005.
- 核燃料サイクル開発機構, わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 分冊 2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022, 1999.
- 核燃料サイクル開発機構, わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第 2 次取りまとめ-分冊 3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023, 1999.
- 緩衝材基本特性データベース, <https://bufferdb.jaea.go.jp/bmdb/>
- 河井克之, 江偉川, 飯塚敦: 水分特性曲線ヒステリシスの表現と不飽和土の応力変化, 応用力学論文集, Vol.5, pp.777-784, 2002.
- 菊池広人, 棚井憲治, 幌延地下水を用いた緩衝材・埋戻し材の基本特性試験 JNC TN8430 2004-005, 2005.
- Kobayashi, M., Yokoyama, Y., Takahashi, R., Asano, H., Taniguchi, N. and Naito, M., Long term integrity of overpack closure weld for HLW geological disposal Part 2- corrosion properties under anaerobic conditions, Corrosion Engineering, Science and Technology, vol.46, 2, pp.212-216, 2011.
- 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構: 平成 27 年度地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発報告書, 2015.
- 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構: 平成 28 年度地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発報告書, 2017.
- Masamura, K. and Matsushima, I., CORROSION'81, Paper No.75, 1981.
- 松本一浩, 藤田朝雄, 緩衝材の流出/侵入特性, (Ⅲ) JAEA-Research 2011-014, 2011.
- 松本一浩, 棚井憲治, 緩衝材の流出/侵入特性, JNC TN8400 2003-035, 2004.
- 松本一浩, 棚井憲治, 緩衝材の流出/侵入特性, (Ⅱ) JNC TN8400 2004-026, 2005.
- Okada, H. (1977): Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Cracking of Structural Steels, Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement of Iron Base Alloys; Unieux-Firminy; France; 12-16 June 1973. pp.124-134.
- 大野進太郎, 河井克之, 橘伸也: 有効飽和度を剛性に関する状態量とした不飽和土の弾塑性構成モデル, 土木学会論文集, Vol.63, No.4, pp.1132-1141, 2007.
- 日本原子力研究開発機構: TRU 廃棄物処分技術検討書-第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ-, 2005.
- 日本原子力研究開発機構, 平成 24 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術セメント材料影響評価技術高度化開発報告書, 2013.
- 日本原子力研究開発機構, 平成 25 年度地層処分技術調査等事業セメント材料影響評価技術高度化開発報告書, 2014.
- 日本原子力研究開発機構, 平成 26 年度地層処分技術調査等事業セメント材料影響評価技術高

- 度化開発報告書, 2015.
- 日本原子力研究開発機構, 平成 27 年度地層処分技術調査等事業処分システム評価確証技術開発報告書, 2016.
- 日本原子力研究開発機構, 平成 28 年度地層処分技術調査等事業処分システム評価確証技術開発報告書, 2017.
- 野村瞬, 河井克之, 角井駿祐, 橋伸也, 金澤伸一, 飯塚敦: 飽和/不飽和地盤内における水溶性移動モデルの構築, 土木学会論文集, Vol.67, No.2, pp.231-240, 2011.
- Roscoe, K.H., Schofield, A.N. and Thurairajah, A.: Yielding of clays in states wetter than critical. *Geotechnique*, Vol.13 (3), pp.250-255, 1963.
- Roscoe, K.H. and Burland, J.B.: On the generalized stress-strain behavior of 'wet' clay. *Engineering Plasticity*, ed. J. Heyman and F.A. Leckie, Cambridge University Press: Cambridge, pp.535-609, 1968.
- 産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 平成 27 年度地層処分調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書, 2016.
- 産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 平成 28 年度地層処分調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書, 2017.
- 笹倉剛, 畔柳幹雄, 小林一三, 岡本道孝: ベントナイト変遷挙動のモデル化のためのデータ取得Ⅱ, JNC TJ8400 2003-048 (2003).
- 鈴木英明, 藤田朝雄: 緩衝材の膨潤特性, JNC-TN8400 99-038, 1999.
- 鈴木英明, 藤田朝雄: 緩衝材の不飽和水理特性, JNC-TN8430 99-010, 1999.
- Takayama Y, Tachibana S, Iizuka A, Kawai K, Kobayashi I: Constitutive modeling for compacted bentonite buffer materials as unsaturated and saturated porous media, *Soils and Foundations*, Vol.57, Issue 1, pp.80-91, 2017.
- 谷口直樹, 山口 真, 内藤守正, 人工海水中における炭素鋼の腐食挙動に及ぼす γ 線照射の影響, 第 57 回材料と環境討論会講演集, pp.107-110, 2010.
- 谷口直樹, 川崎 学, 内藤守正, 低酸素濃度下での模擬地下水の飽和した圧縮ベントナイト中における炭素鋼の腐食挙動, *材料と環境*, vol.59, 11, pp.418-429, 2010.
- 千々松正和, 杉田 裕, 雨宮清: 緩衝材の製作・施工技術に関する検討, JNC-TN8400 99-035, 1999.

3.2 塩水環境下ニアフィールド領域での処分システムの成立性に係る手法等の提示

設計・施工を通して構築される地層処分システムの成立性を考える際には、閉鎖後長期の安全性を満足させることに加え、エンジニアリングの観点から処分システムの成立性を以下の取組をもって示すことが必要と考える（図 3.2-1）。

- ①閉鎖後長期の安全評価が前提とする処分システムの初期性能達成の見通しを得る（設計照査技術）⇒ 製造／施工品質の幅や施工後の擾乱影響（湧水や坑内換気など）の見積り。
- ②操業段階における製造／施工の品質保証や性能確認ができることの見通しを得る（品質保証／性能確認技術）⇒ それらを可能とする具体的なプログラム案が準備されていること。

上記のような技術の整備や知見などの体系の具体化を進め、概要調査段階のセーフティケース開発や精密調査計画の立案を支援する設計照査や品質保証／性能確認に係る技術基盤を整備することが必要である。

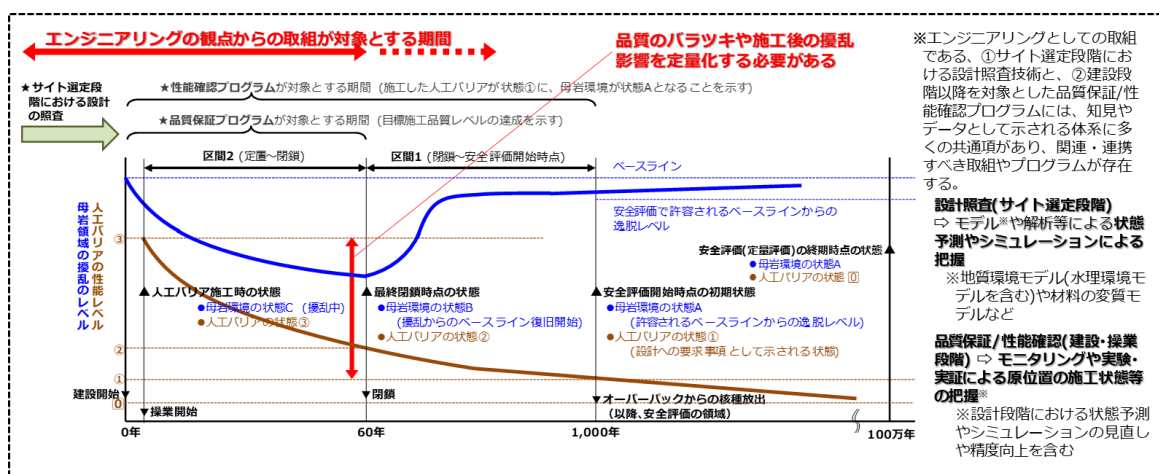


図 3.2-1 エンジニアリングの枠内で扱われる処分システムの成立性

本章冒頭に示した沿岸部研究会による課題整理を踏まえ（表 3.1-1）、本事業では、上記①の課題に取り組む。その際、沿岸部研究会で示された本課題に関する高度化の方向性に留意して、操業段階と閉鎖後長期の処分システムの安全確保を考え、その対象を個々の人工バリア材料だけではなく、ニアフィールド領域において関連する部材に広げることおよびそこの湧水条件に着目する。

平成 27 年度に実施した北欧（沿岸部での立地を進めているスウェーデンおよびフィンランド）の先行的な取組事例に関する調査結果から、特に、閉鎖段階までにおける廃棄体定置後の緩衝材の挙動に着目し、緩衝材の機能発揮に影響する要因（湧水による緩衝材流出挙動）に留意する必要性が示されている（産総研ほか、2016）。湧水という点からは緩衝材と地下水の相互作用である、吸水、膨潤、あるいは再冠水過程での流出挙動が人工バリアシステムの成立には深く関わっており、この影響をニアフィールド領域で解明して、対策を立てることがガラス固化体を内包するオーバーパック周囲の環境条件を維持することにつながる。これを踏まえ、本課題への取り組みでは、わが国の沿岸部で特徴的となる地下水理環境（湧水環境／湧水対策）や地下の構成材料に対する化学的影響（塩水環境）などの状況を念頭に置いた重要な要素や影響因子を特定して、成立性に係わる手法の提示に向けた検討を進めることとしている。なお、グラウトは、建設～閉鎖段階における地下水理環境の擾乱の影響緩和対策（湧水対策）として、本課題における個別のテーマの一つと位置付け、本節の中で展開する。

以下、次の構成で個々の個別課題に関する全体計画および本年度の実施内容などについて

整理する。

○グラウト設計および影響評価技術の開発（3.2.1 項）

○ニアフィールド領域での処分システム構成材料の成立性と品質確保の方法の提示（3.2.2 項）

3.2.1 グラウト設計および影響評価技術の開発

(1) 背景と目的

坑道掘削時の湧水抑制対策にはグラウト注入が有効であるが、地層処分のための地下坑道は高水圧および低透水性の地質環境にあり、地下水の地球化学特性の変化や鉱物の変質など、グラウトによる天然バリア・人工バリアへの影響が懸念される。北欧では、処分坑道や処分孔周辺において湧水量を大幅に少なくするために、浸透性が高く耐久性の高い活性シリカコロイドを用いた溶液型のグラウトの研究が行われ、沿岸域のエスポ岩盤研究所（スウェーデン）やオンカロ（フィンランド）において実証試験および実適用が開始されている。ただし、海水条件下での固化のメカニズムは不明であり、施工方法も未確立である。また、溶液型グラウトの周辺岩盤への影響については未知の部分が多い。

このような背景を踏まえて、本業務では以下の課題を設定し、グラウトに関する研究を進める計画としている。

- ・既存の知見および課題の整理
- ・グラウト特性データの拡充・長期挙動の現象理解・モデル化・数値解析
- ・グラウト設計技術の更新・適用性確認
- ・グラウトの影響評価技術の更新・適用性確認

本年度は、昨年度に着手した既存の知見および課題の整理を踏まえ、グラウト特性データの拡充、長期挙動の現象理解ならびにモデル化・数値解析への適用性の検討を行った。

(2) 海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得

グラウト注入環境が海水条件となる可能性や、海水を用いてグラウトを練混ぜることの実現性などを考慮し、海水条件下での溶液型グラウト特性データを室内試験により取得した。

本年度は、昨年度に開始した長期安定性に係わる力学的、化学的なデータを引き続き取得した。また、昨年度の検討結果から得られた新しい配合の考え方にに基づき、ゲルタイム試験による基本配合の設定とともに、設定した基本配合において昨年同様に基本物性や施工性などに係わる物性および長期安定性に係わるデータ取得を行った。この配合は、練混ぜ水で用いる海水の硬化促進機能を有効に活用して硬化促進剤を用いない配合であり、「海水硬化促進グラウト」と称する。これにより、海水条件下の配合での使用材料の種類を減らすことができ、現場での施工性の向上が期待される。

ここで、これまで検討されてきた 3 種類の配合の概念を図 3.2-2 に示す。一つ目の配合は、淡水環境で無機塩系の硬化促進剤（KCl や NaCl）のみを用いてゲルタイムの調整を行う従来の溶液型グラウトの配合であり、「従来型グラウト」と称する。瑞浪超深地層研究所で適用された配合はこのタイプである。しかし、海水環境で用いた場合には白濁現象が発生し、適用が困難となる。二つ目の配合は、海水環境下で白濁現象を生じさせないように硬化促進剤に pH 調整剤を併用してゲルタイムを調整する配合であり、「海水適応グラウト」と称する。倉敷 LPG で適用された配合はこのタイプであり、昨年度の実験検討もこの配合で実施した。三つ目は、上述のとおり硬化促進剤を添加せず、pH 調整剤とシリカの量でゲルタイムの調整を行う「海水硬化促進グラウト」である。

【従来型グラウト】 海水条件下では**適用不可**（海水条件下での白濁懸念）

Hi シリカ	硬化促進剤	練混ぜ水 (淡水)
--------	-------	--------------

【海水適応グラウト】 海水条件下で**適用可**

Hi シリカ	pH調整剤	硬化促進剤	練混ぜ水 (人工海水)
--------	-------	-------	----------------

【海水硬化促進グラウト】 海水条件下で**適用可**

Hi シリカ	pH調整剤	練混ぜ水 (人工海水)
--------	-------	----------------

※Hi シリカ：強化土エンジニアリング社製のコロイダルシリカ

図 3.2-2 3種類の溶液型グラウトの配合の考え方

コロイダルシリカ溶液に練混ぜ水として海水のみを用いても、すなわち硬化促進剤や pH 調整剤を用いなくても、従来の配合割合（シリカ溶液と海水の比率が 8:2）の場合には数時間のうちにゲル化することがわかっている。硬化促進剤の機能を果たす無機塩が海水にもともと含まれているからである。岩盤亀裂へ注入するためのグラウトとしては、数時間というゲルタイムは長すぎて適当でないので、シリカ溶液と海水の混合比率を変えることで、グラウトに適する 60～120 分程度のゲルタイムのグラウトを作製することも可能と考えられる。また、ゲルタイムの調整は、pH 調整剤によっても可能である。このようにゲルタイムの調整に硬化促進剤を使用しない溶液型グラウトを海水硬化促進グラウトと呼ぶ。図 3.2-3 に海水硬化促進グラウトの配合の考え方を示す。硬化促進剤と pH 調整剤の 2 種類の薬液を添加剤として用いるよりも、施工の合理化に有利であると考えられる。

以下では、海水硬化促進グラウトの検討結果を整理した。

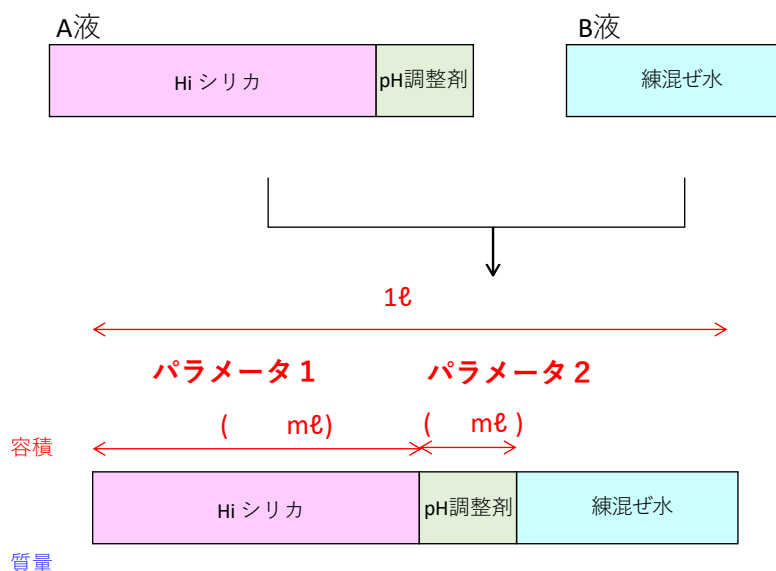


図 3.2-3 海水硬化促進グラウトの配合の考え方

1) 基本物性の把握

練混ぜ水に人工海水を用いた場合は、pH 調整剤を 0.5 ml/L 以上添加しないと白濁現象を抑えられなかった。一方、pH 調整剤を 0.6 ml/L 以上添加するとゲルタイムが長くなりすぎ、

目標とするゲルタイム 60 分が実現できないことが明らかとなった。一方、練混ぜ水を 50%人工海水とした場合には、pH 調整剤を 0.4 ml/L 以上添加することで、白濁現象を抑えられるが、この配合では 60 分のゲルタイムを実現することができなかった。

よって、60 分を目標ゲルタイムとする 2 種類の基本配合は、練混ぜ水に人工海水を用いた場合から選定することとし、目標ゲルタイムが若干大きめの 80 分程度となるが、図 3.2-4 に示すように Hi シリカ濃度 45%と 60%とした。表 3.2-1 に設定した海水硬化促進グラウトの 2 種類の基本配合を示す。

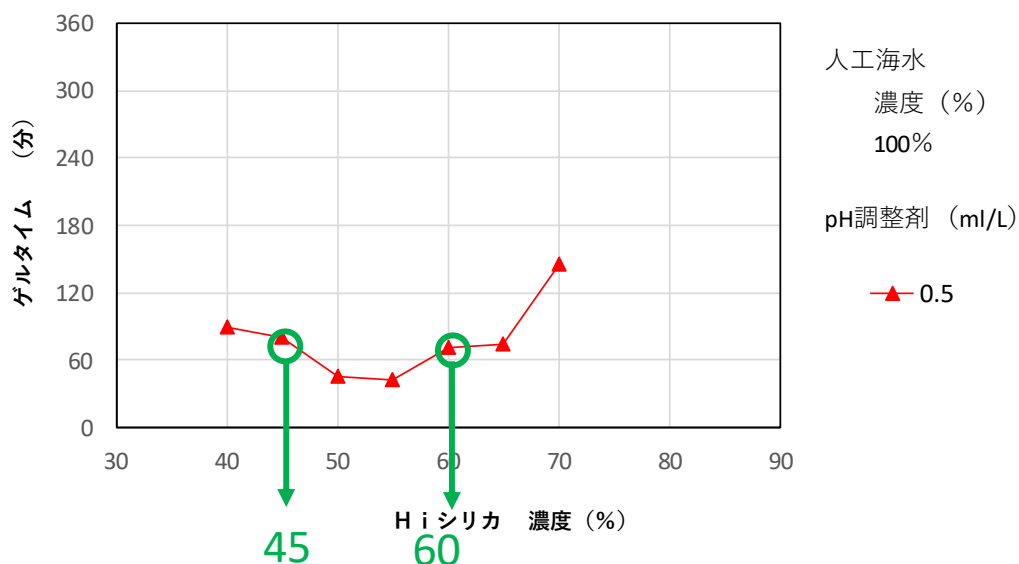


図 3.2-4 pH 調整剤を 0.5 ml/L 添加した場合の海水硬化促進グラウトのゲルタイム
(練混ぜ水：人工海水)

表 3.2-1 海水硬化促進グラウトの 2 種類の基本配合

配合名	練混ぜ水	ゲルタイム	Hi シリカ (ml/L)	pH	pH 調整剤 (ml/L)	硬化促進剤 (g/L)
Si-45	人工海水	80 分	450	7.75	0.5	0
Si-60		72 分	600	8.13		

設定した 2 種類の基本配合のホモゲル（グラウト硬化体）に対して一軸圧縮試験を行い、基本的な強度特性および Hi シリカ濃度の影響を把握した。

図 3.2-5 に試験結果を示す。なお、Hi シリカ濃度 80%は、昨年度の配合 S-60（練混ぜ水：人工海水、目標ゲルタイム 60 分）の結果である。

Hi シリカ濃度の違いに係わらず、材齢が進むにつれて一軸圧縮強度は大きくなる。また、材齢 1 日～7 日の範囲の短期的な強度は Hi シリカ濃度に応じて大きくなる。グラウト材に含まれるシリカの割合に一軸圧縮強度が大きく依存しているといえる。

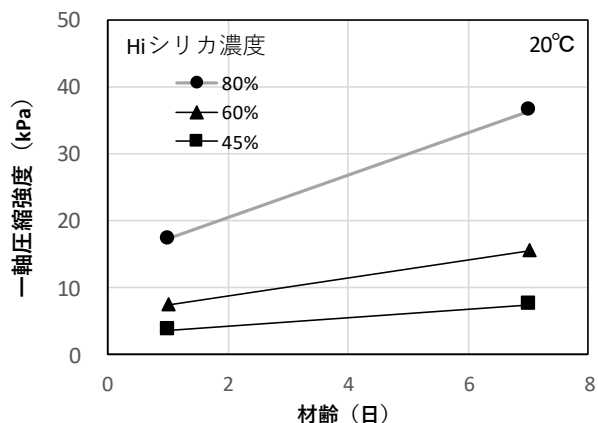


図 3.2-5 基本配合の一軸圧縮試験結果

2) 施工性・止水性（ゲル化特性）の把握

① 地下水との接触による白濁試験

昨年と同様に、海水硬化促進グラウトに対して、Hi シリカ濃度と pH 調整剤の添加量を変化させ白濁試験を実施した。

図 3.2-6 に練混ぜ水に人工海水を用いた場合の白濁試験の結果を示す。pH 調整剤の添加量が 0.3 ml/L 以下の場合は白濁現象が発生する。pH 調整剤を 0.4 ml/L 添加した場合は、シリカ濃度が高い場合は白濁し、低い場合には白濁しない。pH 調整剤を 0.5 ml/L 添加した場合には試験を行った Hi シリカ濃度 40~70%の範囲で白濁現象は発生しなかった。

		シリカ濃度(%)						
		40	50	60	65	70	75	80
pH調整剤(ml/L)	0							
	0.2							
	0.3		白濁する ↑					
	0.4		白濁しない ↓					
	0.5							

図 3.2-6 白濁試験結果（練混ぜ水：人工海水）

② 粒径の経時変化測定試験

ゲル化するまでの溶液型グラウトの粒径分布を動的光散乱法により測定した。測定試料は海水硬化促進グラウトの2種類の基本配合 (Si-45、Si-60) とし、練混ぜからゲル化までの間に5~6回の測定を行い、ゲル化にともなう粒径の変化を確認した。

図 3.2-7 に試験結果を示す。(a)、(b)が今年度実施した海水硬化促進グラウトの結果で、(c)は昨年度実施の海水適応グラウト S-60 (練混ぜ水が人工海水で、ゲルタイムが 60 分) の結果である。海水硬化促進グラウトにおいても、海水適応グラウトと同様に粒径は 10~50 nm の範囲にあり、その状態がゲルタイムの半分の時間程度は継続することが明らかになった。

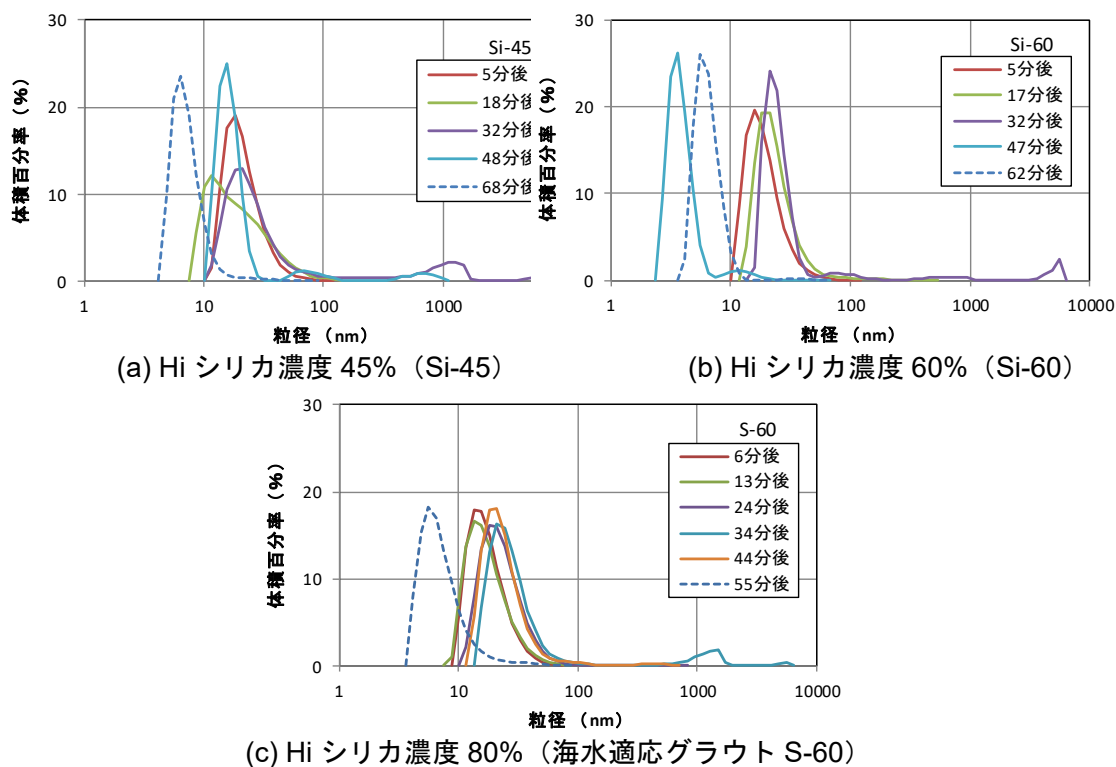
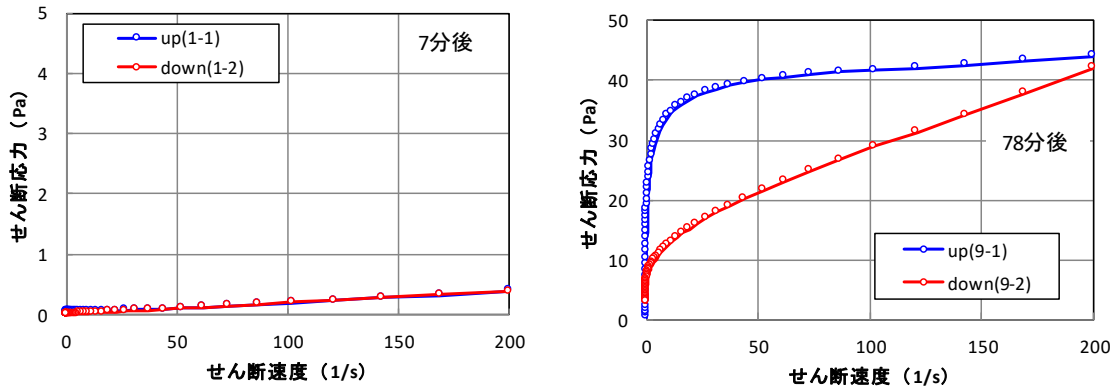


図 3.2-7 粒径分布の時間変化

③ 粘性の経時変化測定試験

基本配合の溶液型グラウトの粘性は回転型レオメーターを用いて測定した。測定試料は海水硬化促進グラウトの2種類の基本配合 (Si-45、Si-60) とし、ゲル化にともなう粘性の変化を確認した。図 3.2-8 に示すように、練混ぜ直後には流動曲線は直線に近く、ニュートン流体的な挙動を示すことがわかる。しかし、ゲル化が進むにつれて曲線的な挙動を示すようになる。この傾向は、他の2種類の基本配合 (Si-45、Si-60) とともに同様であった。

図 3.2-9 はゲル化にともなうせん断粘度の変化を示したもので、海水硬化促進グラウトの2種類の基本配合 (Si-45、Si-60) および昨年度実施の S-60 (練混ぜ水が人工海水で、ゲルタイムが 60 分) を比較している。昨年度の S-60 がゲルタイムの 3/2 程度の時間 (40 分) から急激にせん断粘度が上昇したのに対して、海水硬化促進グラウトでは 1/2 程度の時間 (40 分) から急激にせん断粘度が上昇しており、ゲルタイムに対して比較的早い時間から流動性が上昇することがわかった。



(a) 7分後 (b) 78分後
 図 3.2-8 ゲル化の進展に伴う流動曲線の変化 (Si-60)

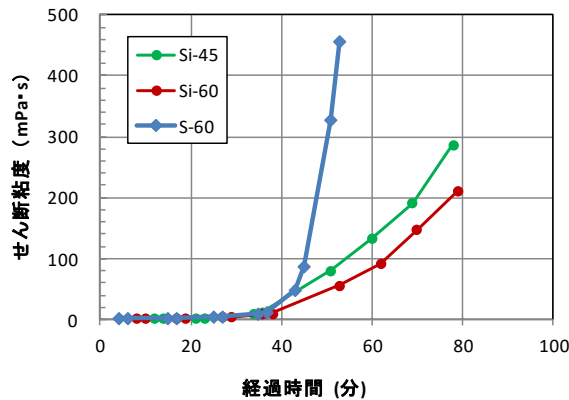


図 3.2-9 ゲル化の進展に伴うせん断粘度の変化 (Si-45、Si-60、S-60)

3) ホモゲル長期安定性（力学的・化学的安定性）の把握

① ホモゲル長期力学的安定性確認試験

海水硬化促進グラウトの養生時間ともなう強度の変化を、長期間養生したホモゲルを用いて一軸圧縮試験で確認した。また、グラウト原液と練り混ぜ水の比率を変えて作製したホモゲルにおけるシリカ濃度の違いが強度発現に与える影響を検討した。

図 3.2-10 に 20℃標準養生したホモゲルの一軸圧縮強度の変化を示す。Hi シリカ濃度 45% と 60%が本年度実施した海水硬化促進グラウト (Si-45、Si-60) の結果であり、Hi シリカ濃度 80%は昨年度の結果のうち海水硬化促進グラウトと条件に近い基本配合 S-60 (練り混ぜ水：人工海水、ゲルタイム 60 分) の結果である。

Hi シリカ濃度が大きい方が一軸圧縮強度は大きいことが分かる。グラウト内のシリカ含有量がグラウトの強度に与える影響は明らかである。しかし、養生時間に応じて一軸圧縮強度は大きくなるが、その傾向は Hi シリカ濃度が 80%の場合と Hi シリカ濃度が 45%、60%の場合と若干異なっている。20℃標準養生の場合は Hi シリカ濃度 80%では 90 日時点で強度増加は継続しているが、Hi シリカ濃度 45%、60%の場合にはほぼ収束しているように見える。

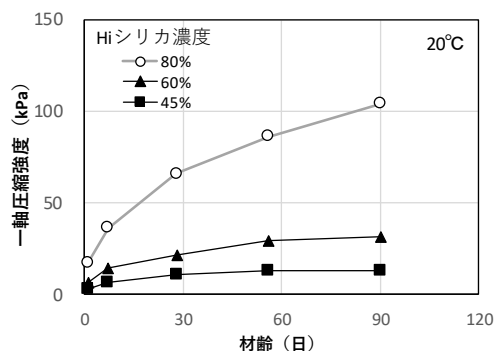


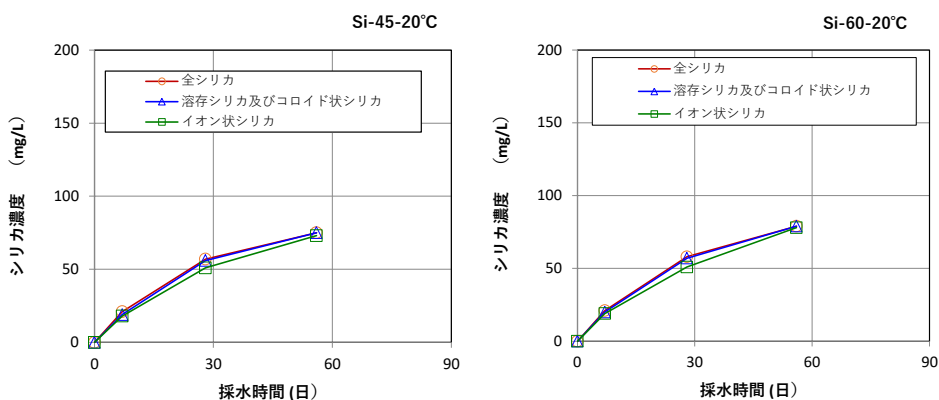
図 3.2-10 海水硬化促進グラウトのホモゲルの一軸圧縮強度

② ホモゲル長期化学的安定性確認試験

地下水にさらされた時のホモゲルの化学的安定性を把握するために、硬化したホモゲルを養生水に浸漬し、養生水の化学分析を行うことでホモゲルからのシリカ成分などの溶出挙動を確認した。シリカについては、溶出形態の判断のために、全シリカ、溶存およびコロイド状シリカ、イオン状シリカの 3 種類を対象とした。全シリカ濃度は、サンプルをイオン化させて分析することで、すべての形態のシリカ濃度を測定したものである。溶存およびコロイド状シリカ濃度は、ろ過により $1 \mu\text{m}$ 以上のシリカを除いたうえで、ろ液をすべてイオン化させて測定した。イオン状シリカ濃度は、同様のろ液をイオン化させる処理をすることなく分析することで、イオン状態のシリカのみを測定した。

図 3.2-11 には 20°C 標準養生のホモゲルの養生水のシリカ濃度 (3 種類) を示す。すべてのケースにおいて全シリカ濃度はイオン状シリカ濃度よりも高いが、その差はわずかであり、シリカ成分のほとんどはイオン状でホモゲルから溶出していることがわかる。

図 3.2-12 は、海水硬化促進グラウトの結果の中からイオン状シリカ濃度のみを、昨年度実施の海水適応グラウトと比較して示した。60~90 日の範囲で濃度の上昇が収束している。収束する濃度は、 20°C 養生の場合が 90 mg/L 程度で、 55°C の場合が 150 mg/L 程度であった。この傾向は濃度が収束するまでの時間、収束濃度ともに、海水硬化促進グラウトと昨年度から実施の基本配合のうち人工海水で練り混ぜた海水適用グラウトはほぼ同等の結果を示している。すなわち、練り混ぜ水が同じであれば、Hi シリカの混合割合が異なっても、シリカ分の溶出挙動はほぼ同程度であると言える。



(a) Hi シリカ濃度 : 45%

(b) Hi シリカ濃度 : 60%

図 3.2-11 20°C 標準養生の場合のシリカ濃度の時間変化

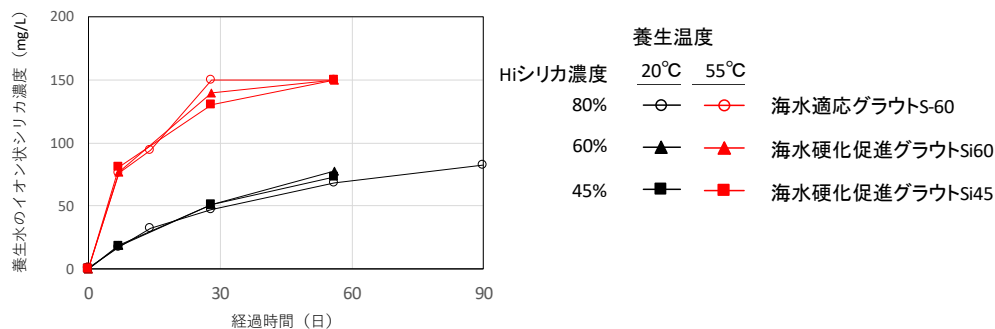


図 3.2-12 海水硬化促進グラウトの養生水のイオン状シリカの時間変化

(3) 長期挙動の現象理解に関する検討

平成 28 年度から今年度にかけて取得された海水適応グラウトの研究成果をもとに、塩水条件下を想定した海水適応グラウトの基礎物性や長期安定性に関する力学的・化学的な物性の得られたデータを、世界中で唯一実施された倉敷 LPG の同等の試験における公開データと整理して比較した。これらの比較検討をもとに、塩水条件下における溶液型グラウトの長期止水性能を推定した。

1) 海水条件下における溶液型グラウトの長期止水性能

① 基本物性の比較

倉敷 LPG における長期安定性確認試験 (Kobayashi et al., 2014) が実施された溶液型グラウトの基本配合と平成 28 年度からの研究で選定した 6 種類の海水適応グラウトの基本配合を表 3.2-2 と表 3.2-3 に示す。

これまで検討してきた海水適応グラウトは倉敷 LPG と扱っている材料が同製品かつ pH 調整剤の添加量や練り上りのグラウト溶液の pH もほぼ同一であり、海水に白濁しない配合であることから、両者のグラウトは成分上ほぼ同等であるといえる。したがって、両者の基本物性が同等であることが推定された。

表 3.2-2 倉敷 LPG における溶液型グラウトの基本配合

Table 3. Grout mix tested in the experiments.

Gel time (min)	pH	Hi-silica (kg)	pH adjuster (kg)	Water (kg)	Accelerator (kg)
120	6.5	968	5.93	191.6	9.4

(Kobayashi et al., 2014)

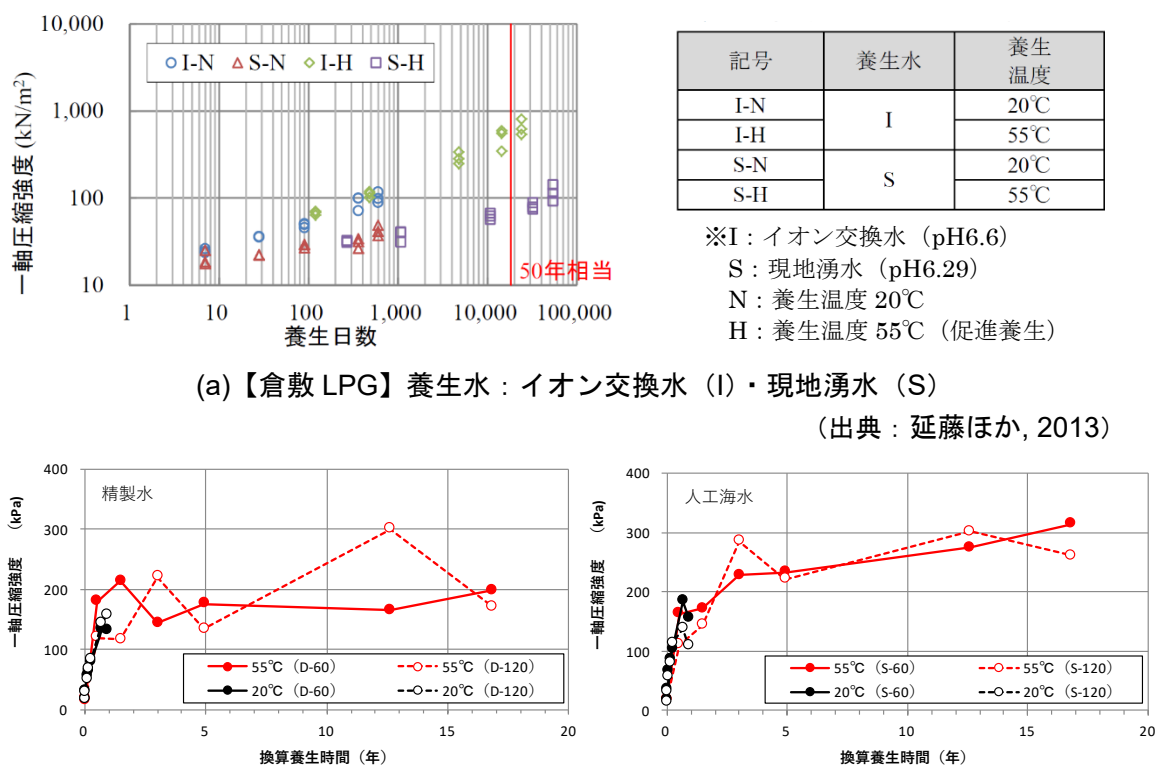
表 3.2-3 昨年度の研究で設定した 6 種類の基本配合

配合名	練混ぜ水	設定 ゲルタイム	pH 調整剤 (ml/L)	pH	硬化促進剤 (g/L)
D-60	精製水	60分	4.0	6.49	15.0
D-120		120分		6.46	11.0
M-60	50%人工海水	60分		6.43	13.0
M-120		120分		6.48	8.5
S-60	人工海水	60分		6.44	11.0
S-120		120分		6.46	6.5

② 静水時での長期挙動の比較

● 長期力学的安定性の比較

倉敷 LPG の長期力学的安定性試験（延藤ほか, 2013）と本試験の比較を図 3.2-13 に示す。本研究では海水適応グラウトの長期力学的安定試験は 330 日（1 年弱）を経過したところであり、同図(a) に示されている倉敷 LPG における 600 日相当（2 年弱）の試験データと比較すると取得期間は約半分である。20℃養生時での両者の 330 日時点あたりの試験結果に着目すると、倉敷 LPG（同図 (a) 中の○I-N、◇S-N）では一軸圧縮強度がおおむね 50～100 kN/m²（MPa）程度と推定できるのに対し、本試験（同図 (b-1～3) 中の黒線ならびに黒点線）では 330 日時点でいずれも 100～300 kN/m²（MPa）の範囲にあるため、本試験の方が総じて高い強度が出ていることが判明した。このように、長期的な力学的強度は、現時点までの分析では本試験が倉敷 LPG より同等以上の強度が出ているといえる。したがって、両者の長期力学的安定性の特性はほぼ同等または海水適応グラウトの方が高い可能性があることが推定された。



(a) 【倉敷 LPG】 養生水：イオン交換水 (I)・現地湧水 (S)

(出典：延藤ほか, 2013)

(b-1) 【本試験】 練混ぜ水・養生水：精製水

(b-2) 【本試験】 練混ぜ水・養生水：人工海水

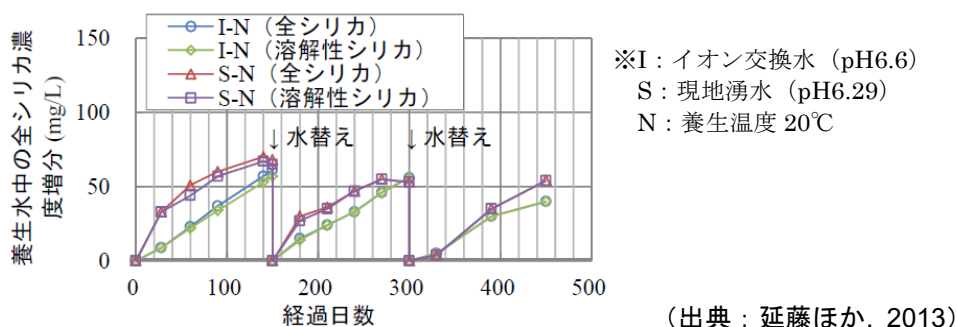
図 3.2-13 倉敷 LPG と本試験における一軸圧縮強度の比較(55℃促進養生、20℃標準養生)

● 長期化学的安定性の比較

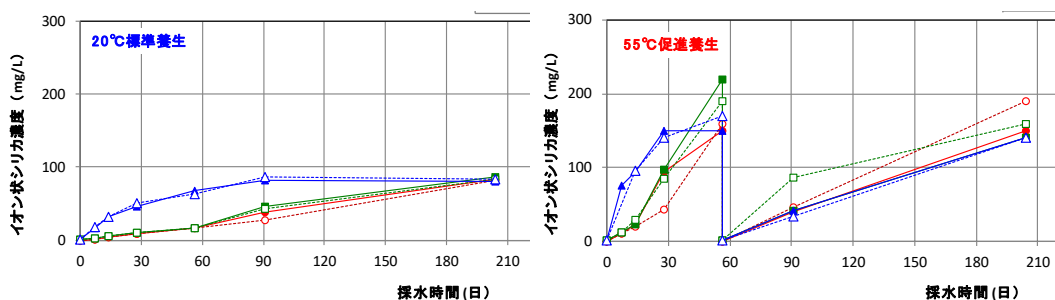
倉敷 LPG の長期化学的安定性試験（延藤ほか, 2013）と本試験の比較を図 3.2-14 に示す。本研究では 330 日（1 年弱）を経過したところであり、倉敷 LPG で得られている 450 日相当（1.5 年弱）の試験データ（図 3.2-14(a)）と比較すると取得期間は約 2/3 である。倉敷 LPG では、1 回目の水替りまでの溶出の傾向に着目すると、倉敷 LPG の現地湧水で養生時（同図 (a) 中の S-N）では、当初の溶解速度が速くシリカ濃度の上昇が速いものの徐々に溶解速度が落ちて収まってきているのに対して、イオン交換水で養生時（同図 (a) 中の I-N）では単調に増加し、水替えの 150 日経過時にはいずれも 50-100 mg/L でほぼ同程度の溶出量になっ

ていることが分かる。一方、本試験では 20℃養生時に着目すると、人工海水で養生時（同図 (b) 左図中の△、▲）の結果が倉敷 LPG での現地湧水同様に当初の濃度上昇が速く徐々に溶解速度が落ちており、50%人工海水とイオン交換水で養生時（同図 (b) 左図中の■、□、●、○）の結果が倉敷 LPG でのイオン交換水同様にほぼ単調に増加している。さらに、150 日経過時では倉敷 LPG と同様にいずれも 50-100 mg/L でほぼ同量の溶出量になっていると推定できる。

海水条件下での海水適応グラウトは、1 回目の水替え時期の半年程度までは倉敷 LPG と同様のシリカ濃度上昇を示すため同等の化学的安定性があり、それ以降の長期については、淡水条件下に比べてシリカ濃度の飽和量が低いことや、水替え後も倉敷 LPG の傾向に比べて上昇の速度が遅い傾向にあることが推察できた。したがって、海水適応グラウトは海水条件下で倉敷 LPG と同等以上の長期化学的安定性があることが推察された。



(a) 【倉敷 LPG】養生水：イオン交換水 (I)・現地湧水 (S)、養生温度：20℃



		練混ぜ水		
		精製水	50%人工海水	人工海水
ゲル タイム	60分	●	■	▲
	120分	○	□	△

(b) 【本試験】練り混ぜ水：精製水・50%人工海水・人工海水、養生温度：20℃(左)・55℃(右)

図 3.2-14 倉敷 LPG と本試験における養生水のシリカ濃度の時間変化の比較

2) 海水環境下における長期止水性能の推定

これまでの比較検討結果から、本研究で実施した海水適応グラウトの基本物性が倉敷 LPG のそれとほぼ同等であり、静水時の長期物性である力学的安定性試験ならびに化学的安定性についても倉敷 LPG のそれらと同等または同等以上であることを推察することができた。静水時の長期物性と動水時のそれは相関があるため、海水適応グラウトは倉敷 LPG と「同等以上に」動水時での長期物性である「長期止水性能」を示すことが推定できた（図 3.2-15）。

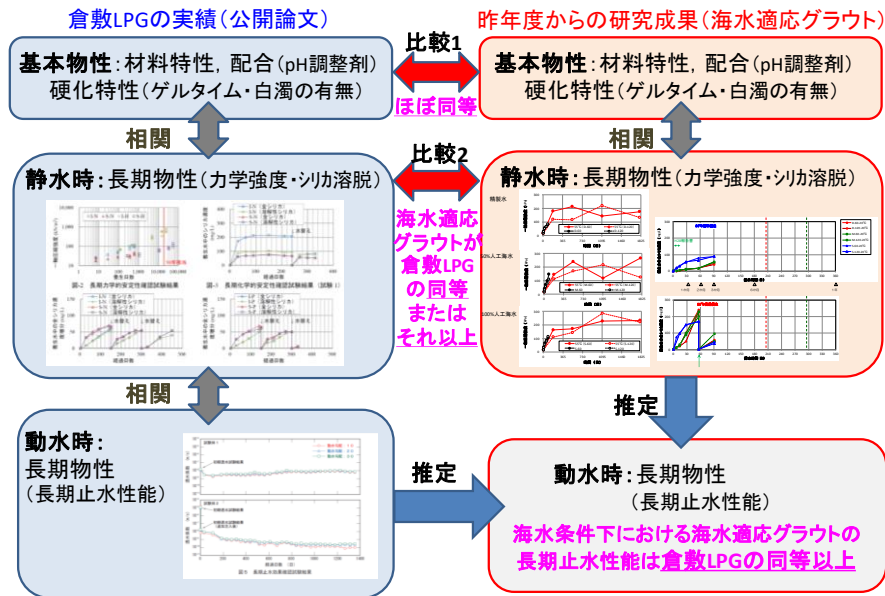


図 3.2-15 海水条件下における海水適応グラウトの長期止水性能の推定結果

(4) モデル化・数値解析への適用性検討

スウェーデンで研究されているグラウト浸透モデルに対して、海水条件下の場合にはどのような補正や改善を実施するのが適切か検討し、モデル化・数値解析へ展開する場合に留意すべき点や課題などを挙げた。その際、グラウトの浸透モデルに詳しい北欧の専門家などから技術的アドバイスやレビューを受けた。

1) スウェーデンで研究されているグラウト浸透モデルについて

スウェーデンでは、CTH (シャルマーシュエーデン工科大学) が浸透理論と岩盤亀裂評価に基づく合理的なプレグラウチング (掘削前のグラウチング) を実施するためのグラウトの調査から設計の一連のグラウト設計フロー (図 3.2-16) を提唱している (Fransson, 2008)。このグラウト設計フローは、最初に施工後 (坑道掘削後) に許容する湧水量を設定し、長尺のプレボーリング孔などによる掘削する坑道の岩盤亀裂評価のための予備調査を行う。次に、調査結果から掘削範囲における岩盤亀裂の透水量係数 (の和) を算出し、想定される亀裂開口幅 (の分布) をもとに施工後の湧水量を予測する。その湧水量が最初に設定した許容湧水量を満たすよう「グラウト浸透モデル」を用いて適切な材料選定からグラウト浸透距離に基づく孔配置を設計するというものである。

この手法は、SKB によるエスポ硬岩研究所の大深度 (TASS トンネル) での液型グラウトを用いた岩盤止水プロジェクト (Funehag, 2011) や POSIVA によるオンカロ特性調査施設の大深度 (デモ 2 トンネル) でのグラウチングのプロジェクト (Hollmén, 2013) で採用されてきた。

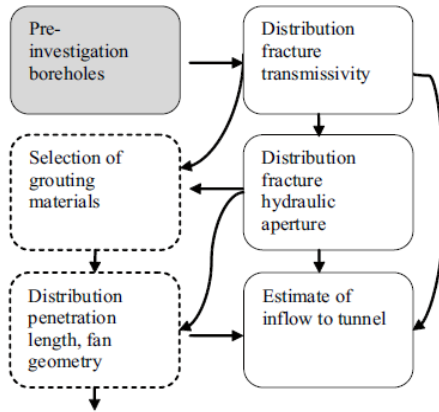


図 3.2-16 CTH が提唱して北欧の地下研で実践されてきたグラウト設計フロー
(出典 : Fransson, 2008)

溶液型グラウトのグラウト浸透理論のベースとなる理論式 (Funehag, 2007) は、CTH の Funehag 博士が提唱している下式である。ここで、 $I_{max, 2-D}$ はグラウトが二次元状に (=グラウト孔と交差する亀裂から円盤状に) 広がるときの最大の浸透距離、 b は水理学的亀裂開口幅、 Δp はグラウト注入差圧 (注入圧と湧水圧の差)、 t_G は gel induction time (ゲル・インダクションタイム)、 μ_0 は溶液型グラウトの配合時の初期粘性である。

$$I_{max, 2-D} = 0.45 \cdot b \sqrt{\frac{\Delta p t_G}{6\mu_0}} \quad (3.2-1)$$

特筆すべきは、ゲル化特性のある溶液型グラウトの浸透理論に特有のゲル・インダクションタイム (t_G) である。ゲル・インダクションタイムとは、粘性が配合時の 2 倍になる時間と定義されており、経験上ゲルタイムの約 1/3 の時間とされている。図 3.2-17 に、注入時間に応じて「ゲル化を考慮しない場合の浸透距離」と、「ゲル化を考慮した場合の浸透距離」の双方の曲線を示すが、Funehag (Funehag, 2012) はグラウト浸透距離が t_G 以降はゲル化の進展により距離の増大がほとんど見込めないため t_G 時点でのグラウト浸透距離を最大の浸透距離 $I_{max, 2-D}$ に近似できること、またその $I_{max, 2-D}$ がゲル化を考慮しない場合の理論式から類誌できることを、理論的かつ実験的のアプローチから発見したことで、粘性が変化する流体でありながら上記のような簡易な浸透理論の近似式を開発した。

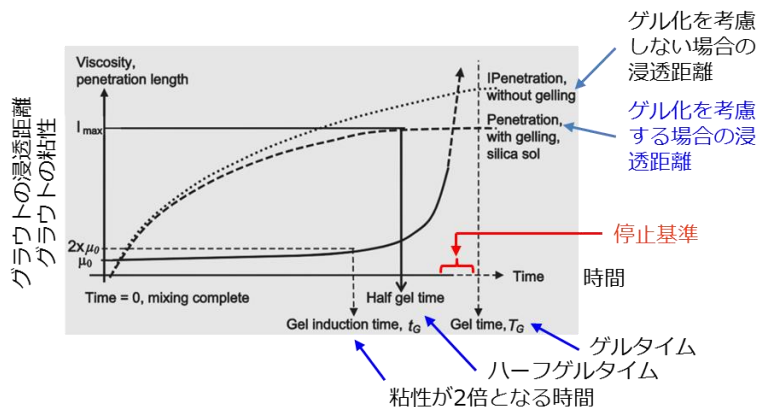


図 3.2-17 注入時間に対する粘性および浸透距離の関係
(出典 : Fransson, 2008 に加筆)

CTHでは、大深度かつ高水圧下で動水勾配の高い壁面付近改良時や、ポストグラウチング時などは、(特に注入孔自体の) 動水勾配が高いことからグラウト材の流出が懸念されて止水が困難であり、動水勾配環境下でのグラウチングが課題とされてきた。

このため、動水勾配を考慮した設計の検討、動水勾配の計測・設定手法の開発、それを踏まえたグラウト注入手法の合理化・最適化などが検討されている。グラウト材の流出(図 3.2-18 参照)については、Axelsson の理論 (Axelsson, 2009) によると、亀裂開口幅および動水勾配から亀裂中の地下水の流れの状態が決まることから、地下水の粘性力(亀裂開口幅と動水勾配により定まる)に抵抗する「降伏強度の高いグラウト材」を適用することでグラウト材の流出が防止できるというものである。

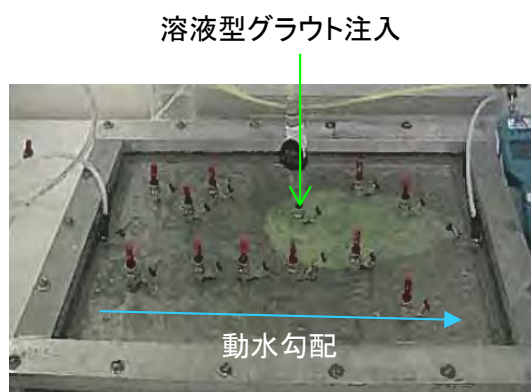


図 3.2-18 CTH で実施されたグラウト材の流出試験
(出典 : Axelsson, 2009)

この流出防止理論の研究結果から、動水勾配と亀裂開口幅に応じたグラウト材の流出リスクを評価している。さらに、深度と動水勾配の関係(正の比例関係)から、図 3.2-19 に示すような深度と亀裂開口幅に応じた流出リスクを評価している。ここで、緑色の範囲(亀裂幅が小さい場合や深度が低い場合)に該当すれば、流出リスクが低いため流出対策の必要はないが、赤色部ではリスクが高く、特別にグラウト材の流出を考慮したグラウト設計をする必要がある。黄色部に該当すれば、降伏値が高いセメントグラウト材を用いるか、溶液型グラウトの場合は十分な強度が発現するよう、注入時間を長くする対策が望ましい。高深度で実施するグラウトほど、流出対策の必要性が高いため、地層処分のような大深度でのグラウトではグラウト材の流出を特に考慮する必要があるといえる。

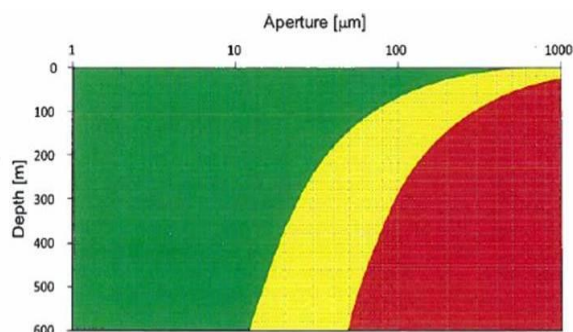


図 3.2-19 亀裂開口幅(横軸)と深度(縦軸)に応じたグラウト材の流出リスク判定図
(出典 : Axelsson, 2009)

溶液型グラウトの強度発現については、ニュートン流体のため初期降伏値は0Paであるが、Axelssonは室内実験結果(Axelsson, 2009)からゲルタイムに応じて十分なせん断強度が発現するように、ゲルタイムの80% (50Pa)の時間を注入するよう提案している(図3.2-20参照)。このため、溶液型グラウトの流出防止対策として、ゲルタイムの80% (50Pa)の時間まで注入を継続することを提案している。これは、地下水の水圧と動水勾配に起因する「粘性力」に、抵抗できる十分なせん断強度が発現する注入時間を停止基準に設定するという思想である。

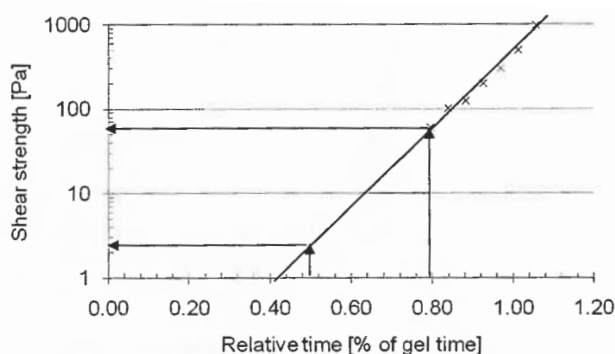


図 3.2-20 溶液型グラウトのゲルタイムの時間割合に対するせん断強度発現の推定
(出典：Axelsson, 2009)

したがって、スウェーデンのグラウト浸透理論から設計上の浸透距離から t_g をもとに「ゲルタイムの半分」の時間の時間以上の注入が必要であるが、流出防止の観点からゲルタイムの3/4倍以上注入する仕様とされていたのが、この研究により80% (4/5倍)までは継続する必要があることが示唆された。

なお、実際の施工状況によっては80%のゲルタイムに到達したとしても、「注入ができず注入流量が減少する状態」に達しない状態で停止してしまう可能性があるため、日本で一般的に採用されている「ダメ押し注入(所定の流量以下になってから10分~30分程度継続して注入後に停止)」の停止基準より危険側の停止基準であると考えられる。

また、オンカロの処分深度のアクセス坑道では溶液型グラウトの注入孔のパッカーを3日間外さずにセットしたままにし、これが高い止水効果の要因の一つと記されている(Hatakka et al., 2013)。これは、スウェーデンのグラウト材流出の観点から考えれば、「グラウト孔の長期養生」が岩盤亀裂に注入されたグラウト材の確実なゲル化や強度発現を促進し、高い動水勾配のかかる亀裂からフレッシュな(十分にゲル化していない、強度発現が十分でない)グラウト流出を防止し、グラウチングの品質向上に繋がった可能性があると考えられる。

2) 海水条件下でのモデル化・数値解析への適用性検討

① モデル化・数値解析への適用性検討

● 従来型グラウト

フィンランドのAalto大学では、様々な亀裂開口幅を模擬して異なる粒径を分布させたサンドコラムを用い、溶液型グラウトを浸透させる比較実験が実施されている(Lehtonen, 2015)。海水条件下と淡水条件下での注入状況の観察例の比較を図3.2-21に示す。同図の左に示す淡水条件下では想定通りに地下水に反応することなく注入が完了でき、ゲルタイム60分の配合に対しての約35分の注入ができたのに対し、同図右の海水条件下では35分の時間よりもはるかに早々に凝集を始めて浸透ができなくなったと示されている。

これらの試験における海水条件下と淡水条件下におけるグラウト注入量の経時変化の比較結果の一例を図 3.2-22 に示す (Lehtonen, 2015)。淡水環境下 (Putki1) では 35 分程度まで浸透するのに対し、海水環境下 (Putki2) では 10 分程度で浸透が止まっていることが分かる。スウェーデンでのグラウト浸透理論では最大浸透距離がゲル・インダクションタイムに依存し、経験上はゲルタイムの約 1/3 であることを紹介したが、この結果においても、淡水環境下 (Putki1) ではゲルタイムの 1/3 にあたる約 20 分経過時に、おおむね最大の浸透距離に到達していることを考えれば浸透理論に合致していることが分かる。一方で、海水環境下 (Putki2) ではゲルタイムの 1/6 にあたる約 10 分経過時までは淡水環境とほぼ同等の浸透量 (浸透距離) に追従していることである。

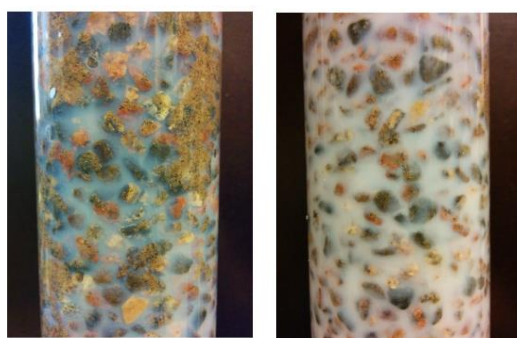


図 3.2-21 淡水環境下 (左) と海水環境下 (右) での溶液型グラウトの浸透状況の観察例 (出典 : Lehtonen, 2015)

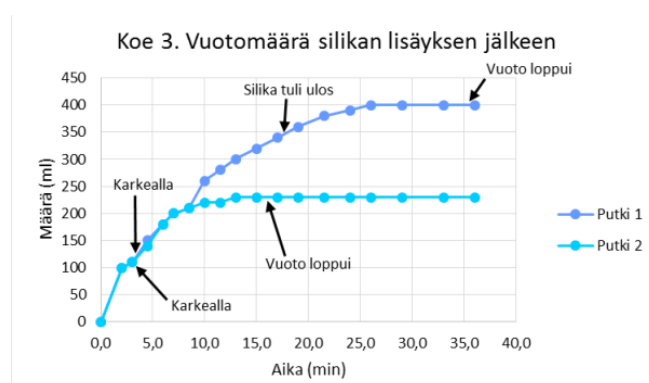


図 3.2-22 海水環境下 (Putki2) と淡水環境下 (Putki1) におけるグラウト注入量の経時変化 (出典 : Lehtonen, 2015)

ここで、海水条件下でのグラウト浸透モデルを適用するにあたり着目すべきことは、海水環境下においてもグラウトが海水と混ざり合うことによってゲルタイムが早くなっていることである。したがって、ゲル・インダクションタイム t_G を補正するパラメータを設定して補正関数 φ を追加することにより、下式のように「海水適用時のグラウト浸透理論」を仮定することができる。

$$I_{max,2-D} = 0.45 \cdot b \sqrt{\frac{\Delta \rho t_G \varphi}{6\mu_0}} \quad (3.2-2)$$

例えば、フィンランドの研究事例では、通常の淡水条件下での $t_G = 60$ 分 $\times 1/3 = 20$ 分なのに

対し、海水条件下では $t_g = 60 \text{ 分} \times 1/3 \times \text{【補正関数 } \phi \text{】} = 10 \text{ 分}$ となる。この実験の条件下では、 $\phi = 0.5$ と定数にするのが妥当である。しかし、実際の岩盤内の亀裂ネットワークにグラウトの浸透する場合は、地下水との混ざり具合なども複雑になる可能性があり、その他多くの条件に依存する可能性もあるため、0.5 として良いかまたは定数とできるかどうかについても今後さらなる検討が必要であるといえる。

したがって、補正関数を考慮したグラウト浸透理論を開発して適用することにより、従来型の溶液型グラウトの浸透距離をモデル化することができ、今後の浸透距離の数値解析へ反映ができるものと考えられる。

● 海水対応グラウト（海水適応グラウト・海水硬化促進グラウト）

海水に対応した海水適応グラウトならびに海水硬化促進グラウトについては、pH 調整剤を配合することにより、無機塩との接触による急激な白濁（硬化）をしにくくした配合である。倉敷 LPG での実績などからも従来型にみられるような施工不良は報告されておらず、フィンランドで起きたようなゲル化が早まることによる浸透距離の減少は考慮しなくて良いものと考えられる。したがって、海水条件下であっても通常の補正関数を考慮しないグラウト浸透理論を適用することにより（式 3.2-1）、従来型の溶液型グラウトの浸透距離をモデル化することができ、今後の浸透距離の数値解析へ反映ができるものと考えられる。

ただし、注入圧が小さい場合や、亀裂が大きい場合など地下水環境と混ざりやすい環境になった場合には別途状況が変わる可能性があるため留意する必要があるといえる。ただし、この場合は淡水環境下も同様にグラウト自体が大きく希釈されることにより、ゲルタイムが伸びる方向に影響する可能性があるので海水条件下に特化した課題ではないと考えられる。

② 専門家へのレビュー

昨年度の研究成果から開発している淡水～海水環境下で白濁しない「海水適応グラウト」「海水硬化促進グラウト」の概要を CTH の Funehag 准教授に示し、本グラウトを北欧の浸透モデル（注入理論）に適用時の補正量や改善についてのレビューならびに適用にあたって留意点などのアドバイスを受けるために下記のヒアリングを実施した。

- ・海水適応グラウト、海水硬化促進グラウトの適用性などについて。
- ・補正関数を用いて理論上浸透距離を減らす（補正する）必要とその定量性について（フィンランドでの実験から（安全側に）補正量を算出することが妥当か）
- ・地下水に対して白濁しない海水対応の配合なら、補正は不要とみなせるか
- ・実験的に浸透挙動を求める必要性、実施の際の留意点などについて
- ・その他、海水条件下で溶液型グラウトに関する留意点などについて
その結果、Funehag 准教授から、以下のアドバイスを得た。
- ・海水適応グラウトについては適用性があるものの、促進グラウトについてはシリカ濃度が低いために十分な強度と耐久性が確保できない可能性があり、適用時には事前の原位置試験で確認するなど留意するよう必要がある。
- ・補正関数による理論上浸透距離を減らす（補正する）手法については妥当と考えられるが、データ量が少ないことや動水勾配や注入圧に留意して検討を進める必要があり、**Water Injection** のような手法は時間がかかり合理的ではないため採用すべきではなく、このような設計的なアプローチによるべき。
- ・今回開発した海水適応グラウト、海水硬化促進グラウトについては、現状では日本の溶液型グラウトでは合理的な対策であり、グラウトの先端で地下水と反応しないことから補

正についても特に考慮しなくて良い可能性がある。ただし、このグラウトにおいても、実際に並行平板などで浸透実験を行うことが望ましい。

(5) まとめ

1) 海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得

海水硬化促進グラウトについて、岩盤注入に適切なゲルタイム 60分となる配合設計を行い、一軸強度などの基本特性、施工性に資する白濁現象の把握、ゲル化するまでの粒径の変化や粘性の変化およびゲル化後の長期的な安定性に資する強度特性やシリカ成分などの溶出特性などにかかわるデータを室内試験で取得した。以下に得られた知見を列挙する。

- ・海水条件下での施工の合理化の観点で練混ぜ水として海水を用いて、pH 調整剤のみでゲルタイムをコントロールする海水硬化促進グラウトについて、ゲルタイム 60分となる配合が、グラウト原液である Hi シリカの混合量を調整することで可能であることを明らかにし、Hi シリカ濃度が異なる 2 種類の基本配合を設定した。
- ・基本配合のホモゲルを作製し、一軸圧縮試験を実施した結果、力学強度が時間とともに増加する傾向を確認したとともに、一軸圧縮強度は Hi シリカの混合量に依存することがわかった。
- ・白濁試験では、硬化促進剤を用いた海水硬化促進グラウトを海水環境の地下水に接触させ、急激にゲル化（白濁）しない配合を把握した結果、pH 調整剤を 0.5 ml/L 添加することで白濁しないことが明らかになり、基本配合の設定へフィードバックした。
- ・粘性の経時変化測定試験では、40 分（ゲルタイムの 1/2）程度までは非常に小さいニュートン流体挙動を示していたが、硬化促進剤と pH 調整剤でゲルタイムの調整を行った基本配合よりも早い段階で粘性が増加する傾向となった。
- ・長期力学的安定性試験のうち、一軸圧縮試験を実施したところ、促進温度 55°C で 30 倍の促進時間を想定した場合の強度変化は、シリカ濃度を低下させた海水硬化促進グラウトではあてはまらない可能性が高いことが推測された。
- ・長期化学的安定性試験のうち、成分分析を行った結果、養生水のシリカ濃度、ナトリウムイオン濃度、カリウムイオン濃度が時間の経過とともに上昇するデータが得られた。特に、イオン状で溶出するシリカによる濃度上昇は、練混ぜ水が同じであれば Hi シリカ濃度が異なっても同様であることが明らかになった。

2) 長期挙動の現象理解に関する検討

塩水条件下を想定した海水適応グラウトの基礎物性や長期安定性に関する力学的・化学的な物性の得られたデータを、倉敷 LPG の同等の試験における公開データと整理して比較した。これらの比較検討をもとに、塩水条件下における（海水適応グラウトの）溶液型グラウトの長期止水性能を推定した結果、以下の結論が得られた。

- ・基本物性：本試験で用いた海水適応グラウトと倉敷 LPG でのグラウトの基本物性は両者ともに同等であることが推定された。
- ・静水時：長期力学的安定性：長期的な力学的強度は、現時点までの分析では本試験が倉敷 LPG より同等以上の強度が出ているものといえる。したがって、両者の長期力学的安定性の特性はほぼ同等、または海水適応グラウトの方が高い可能性があることが推定された。
- ・静水時：長期化学的安定性：海水条件下での海水適応グラウトは、1 回目の水替え時期の半年程度までは倉敷 LPG と同様のシリカ濃度上昇を示すため同等の化学的安定性があり、それ以降の長期については、淡水条件下に比べてシリカ濃度の飽和量が低いことや、水替え後も倉敷 LPG の傾向に比べて上昇の速度が遅い傾向にあることが推察できた。したがって、海水適応グラウトは海水条件下で倉敷 LPG と同等以上の長期化学的安定性があることが推察された。

- ・長期止水性能の推定：海水適応グラウトは倉敷 LPG と同等以上に動水勾配環境下での長期物性である「長期止水性能」を示すことが推定できた。
- ・溶液型グラウトのゲル化特性、ゲルのメカニズム、長期にわたる劣化のメカニズムについて検討を実施した。その結果、海水環境下で海水適応グラウトを用いることは、ゲル化特性・耐久性などについて、通常の淡水時での適用と比較して劣るものではないことが推察された。

3) モデル化・数値解析への適用性検討

pH 調整剤を用いて白濁しにくい配合とした海水対応グラウト（海水適応グラウト・海水硬化促進グラウト）は海水条件下であっても通常の補正関数を考慮しないグラウト浸透理論を適用することにより、従来型の溶液型グラウトの浸透距離をモデル化することができ、今後の浸透距離の数値解析へ反映ができるものと考えた。また、これらの成果について、CTH の Funehag 准教授に示し、海水環境下でのグラウト浸透モデル適用時の補正関数などの提案についてのレビューならびに適用にあたって留意点などのアドバイスを受けた。

(6) 今後の課題

今後検討すべき課題として、以下の項目が挙げられる。

①海水条件下での溶液型グラウト特性データの拡充

海水条件下での溶液型グラウトの長期安定性（力学的、化学的）の把握に資するために、硬化促進剤と pH 調整剤により溶液型グラウトのゲルタイムを調整した海水適応グラウトおよび、pH 調整剤のみで調整した海水硬化促進グラウトのそれぞれのホモゲル供試体（1～2 年程度養生）について、室内試験により特性データを取得する。

②グラウト技術のモデル化・数値解析

今回のレビュー結果などから海水対応のグラウトを今後のモデル化・数値解析へ反映させるために、海水条件下におけるグラウト浸透挙動の知見を得ることを目的に、人工的に亀裂を模擬した平行平板などの装置に対して溶液型グラウトを注入させる試験を行う。

この試験結果を整理することにより、海水条件下を含む亀裂内での溶液型グラウトの浸透性の把握とともに浸透モデルや設計理論を検討し、グラウト設計技術の適用性を確認する。

③グラウト設計技術の更新・適用性確認

平成 29 年度までならび上記の研究成果のうち、溶液型グラウトの設計技術に関する既往知見、取得した特性データ（基礎物性や浸透性）、海水条件下での浸透モデルや設計理論などを整理し、北欧の専門家などとのワークショップなどを実施してレビューを受ける。これらを取りまとめ、溶液型グラウトの海水条件下における設計技術（主に岩盤に注入するまでの段階のグラウト技術）の適用性を確認するとともに、グラウト技術のガイドライン（エネ庁「地下坑道施工技術高度化開発」）の更新版としてガイドラインの別冊を作成する。

④グラウトの影響評価技術の更新・適用性確認

平成 29 年度までならび(1)～(2)の研究成果のうち、溶液型グラウトの影響評価技術に関する既往知見、取得した特性データ（基礎物性や長期耐久性）、長期挙動の現象理解に関する検討結果などを整理し、北欧の専門家などとのワークショップなどを実施してレビューを受ける。これらを取りまとめ、溶液型グラウトの海水条件下における影響評価技術（主に岩盤に注入した後の段階のグラウト技術）の適用性を確認するとともに、グラウト技術のガイドラインの更新版としてガイドラインの別冊を作成する。

3.2.2 ニアフィールド領域での処分システム構成材料の成立性と品質確保の方法の提示

(1) 全体実施内容と平成 29 年度の取組

本節（3.2 節）の冒頭で述べた本課題に関する背景と目的を踏まえ、また、現在のジェネリックな段階に留意して、平成 28 年度から開始した 3 ヶ年にわたる取組では、限定的な条件ではあるものの（地質環境モデルや適用する処分システムの構成などを仮設定したうえで）、処分システムの成立性を示すための手法の検討を進め、必要となる知見やデータなどの体系（構造）を図 3.2-23 に示す検討フローに沿って具体化することとしている。

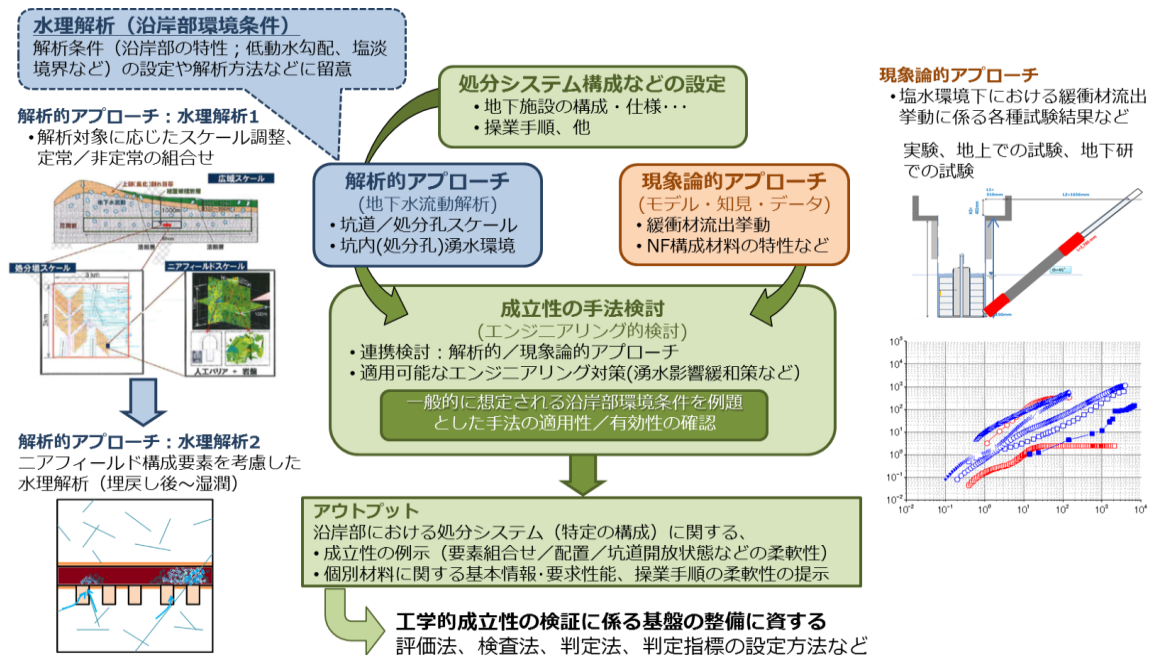


図 3.2-23 処分システムの成立性に係わる手法の提示に向けた検討作業の全体像

具体的な検討では、人工バリアの一つである緩衝材の再冠水に至るまでの挙動、特に緩衝材の設置領域における坑内湧水環境と緩衝材の流出挙動とを結び付け、閉鎖後長年にわたる所定の性能を閉鎖前の操業段階でいかに構築するかを焦点を当て、その検討領域としてニアフィールド領域を対象としている。したがって、この領域における水理の状態を知ることが、検討には不可欠となる。こうした地下水流動の把握を目的とした水理環境の把握に係る検討では、対象領域のスケール（広域から狭域へのスケールダウン）を意識した水理解析体系を整備することが必要となる。一方、緩衝材の吸水、膨潤、流出といった挙動の与条件となる水理環境（湧水条件）は、本来、緩衝材以外の、隙間充填材、埋め戻し材、支保工、グラウトならびにプラグなどのニアフィールド構成材料の影響を受けたものとなる。

以上を踏まえ、本課題に関する 3 ヶ年の全体計画では、特に次の二つの実施項目を設定して取り組むこととしている。

- 1) 処分システム成立性の提示に係わる手法および体系の整備
- 2) 水理解析体系の整備

これらの実施項目は、図 3.2-23 の検討フローに示した作業との関係で、1)は図内の「成立性の手法検討」、2)は図内の「解析的アプローチ（水理解析）」にそれぞれ対応する。図内の「現象論的アプローチ（構成材料に対する化学的影響）」については、既出の 3.1 節に示した取組との連携を念頭に置く。3 ヶ年計画の最終年度には、得られる手法や体系に、特定の条件（一

一般的に想定される沿岸部の環境条件や仮設定する処分システムの構成など) を例題として適用する。このような検討プロセスを経て、沿岸部を念頭においたわが国における処分システム(特定の構成)に関する成立性を例示するとともに、個別材料に関する基本情報・要求性能、作業手順の柔軟性を提示することが可能と考える。

なお、検討をより具体的に進めるために、ここでは検討の前提条件として(検討のための地質環境条件例や処分システムの構成例として)、以下を設定して進めることとした。

- ・地質環境：新第三紀堆積岩
- ・処分概念：堅置き定置方式*

※処分システムの成立性に係わる手法を検討するという本取組の目的、ならびに建設および作業期間中(地下の坑道開放期間)における湧水環境を適切に評価する必要性から、ここでは、緩衝材などの人工バリアのみならず、他の構成材料(隙間充填材、埋め戻し材、支保、グラウト、プラグなど)を含むニアフィールドの構成要素を考慮する(図 3.2-24)。

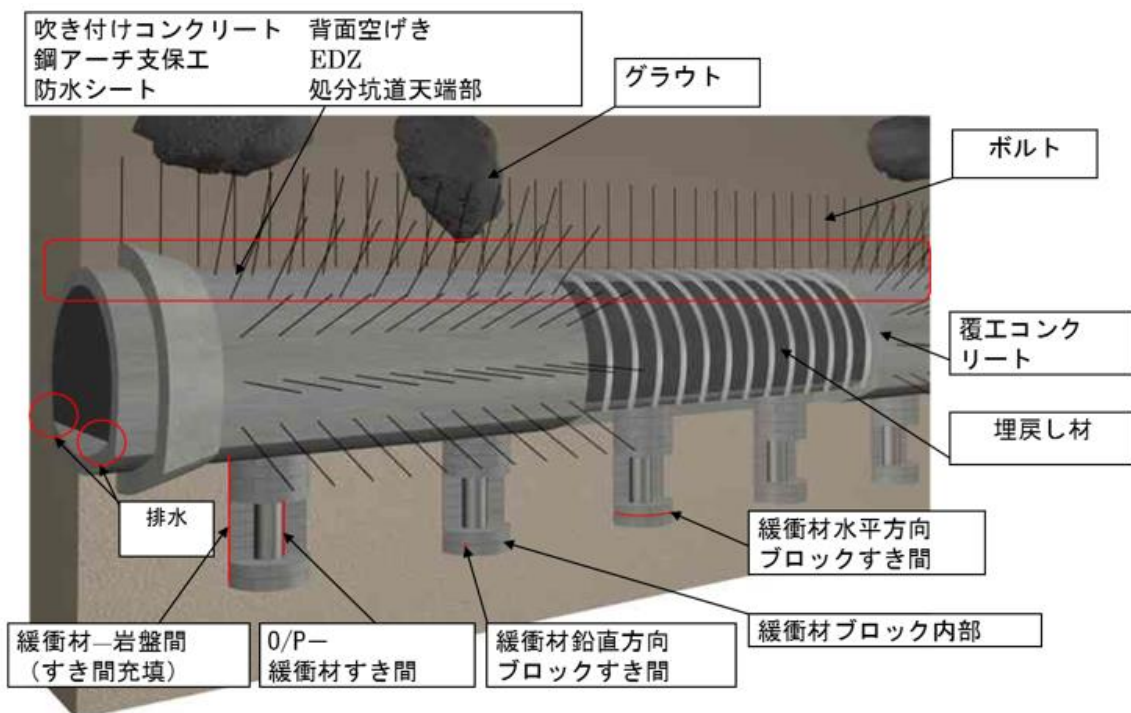


図 3.2-24 想定されるニアフィールド領域の構成要素例

平成 28 年度には、最終年度に実施を予定するわが国における処分システムの成立性の提示に係る手法や体系案の整備に向けて 3 ヶ年の実施計画を策定するとともに、北欧(スウェーデンおよびフィンランド)の先行的な取組事例を参考に、成立性の提示に必要な手法や知見などの体系や構造(建設から作業・閉鎖段階までの期間に着目したニアフィールドにおける地下施設の構成要素の変遷などに関する知見やデータの構造および評価体系)の素案を整備した(産総研ほか, 2017)。また、処分システムの成立性を提示するうえで必要となる水理環境の把握のために、水理解析体系の整備に取り組んだ。水理解析体系の整備では、まず初めに、沿岸部に特有となる因子を整理し、沿岸部で想定される小さな動水勾配、塩淡境界ならびに沿岸海底下における海水の静水圧を考慮すべき因子として抽出し、地下水流動解析によりその影響を評価した。次に、処分場の作業手順(パネル展開や処分坑道の掘削手順など)が処分坑道の湧水状況に与える影響を把握することを目的として、ネスティング手法(入れ子構造の解析モデルを用いた手法)を用いて空間スケールの異なる三次元水理地質構造モデル

を構築し、水理解析体系を整備した。本モデルを用いて建設・操業過程を考慮した非定常の地下水流動解析を行い、掘削過程の違いによる処分坑道の湧水量について比較・評価を行い、その傾向を把握した。

平成 29 年度は、前年度の成果を踏まえ、わが国の処分概念に固有の構成要素について（検討の例題とした縦置き定置方式のうち、北欧の検討事項に含まれない項目について）、一般的な土木工学分野における適用事例などから補完しつつ、わが国に適用可能な手法や体系の整備を進めた。このような取組を経て、仮の設定ではあるものの、処分システムの構成要素の設計仕様を具体化し、操業手順を考慮した水理解析を実施した。また、解析結果を基に、処分システムの成立性を示すための手法（考え方や知見の適用方法）についての検討を進めた。

(2) 平成 29 年度の実施内容と成果

平成 29 年度の実施内容および成果について、以下に次の三つの観点から整理する。

- 1) わが国の処分システムの成立性の評価において参照するフィンランドの処分システムの評価体系
- 2) わが国の沿岸部で想定される処分坑道の検討および仕様値の仮設定
- 3) 水理モデルの構築および解析の実施

1) わが国の処分システムの成立性の評価において参照するフィンランドの処分システムの評価体系

わが国の処分システムの成立性を示すにあたっては、平成 28 年度に整備したフィンランドの建設から操業・閉鎖段階までの期間に着目したニアフィールドにおける地下施設の構成要素の変遷などに関する知見やデータの構造および評価体系¹を出発点として（平成 28 年度に整備した評価体系を図 3.2-25 に再掲する）、本年度は構成要素の短期的な変遷挙動の評価方法などに関する更なる調査を行い、評価体系の構築に資する情報としての整備を進めた。

図 3.2-25 に示すフィンランドの評価体系が前提とする岩盤適合性分類（RSC : Rock Suitability Classification）²では、本取組で着目する処分孔に対する流入水量の上限値は 0.1 L/min と設定されている（POSIVA, 2012b）。Posiva では詳細な水理解析によって、個々の処分孔の湧水量基準への適合性を見通しを得るような評価をしており、透水性亀裂が相互に結合したネットワークを模擬した DFN（Discrete Fracture Network）モデルを用いて「掘削および操業期間から閉鎖まで」の処分坑道／処分孔スケールの地下水流動解析が実施されている。この評価結果によると、湧水量基準値である 0.1 L/min を超過する処分孔は全処分場レイアウトのうち 2%程度に留まることが評価されている（Hartley, et al., 2013）。

フィンランドの処分場で想定されている主な構成要素はキャニスタ、緩衝材、埋め戻し材、プラグ（閉鎖材）であり、これらの変遷挙動などに係る性能評価は、流入水量の上限値を基にして、図 3.2-25 の評価体系に沿って実施される。本取組において特に着目する廃棄体定置後から閉鎖段階までにおける緩衝材の挙動について実施された評価およびその結果を以下に要約する。

¹ フィンランドの高レベル放射性廃棄物（使用済燃料）の処分実施主体である POSIVA 社が整備・公開しているセーフティケースレポート“TURVA 2012”（POSIVA, 2012a）の関連支援ドキュメントである「処分システムの性能評価」にて、人工バリアの構成要素の性能目標と母岩の目標特性に影響を及ぼしうる様々な変遷挙動の評価されている

² 岩盤適合性分類（RSC : Rock Suitability Classification）では、処分場の初期および長期の健全性に悪影響を及ぼす可能性のある母岩を避けるために、最新の岩盤適合性基準に合致した処分場建設の際の適合性の分類手法がまとめられている。

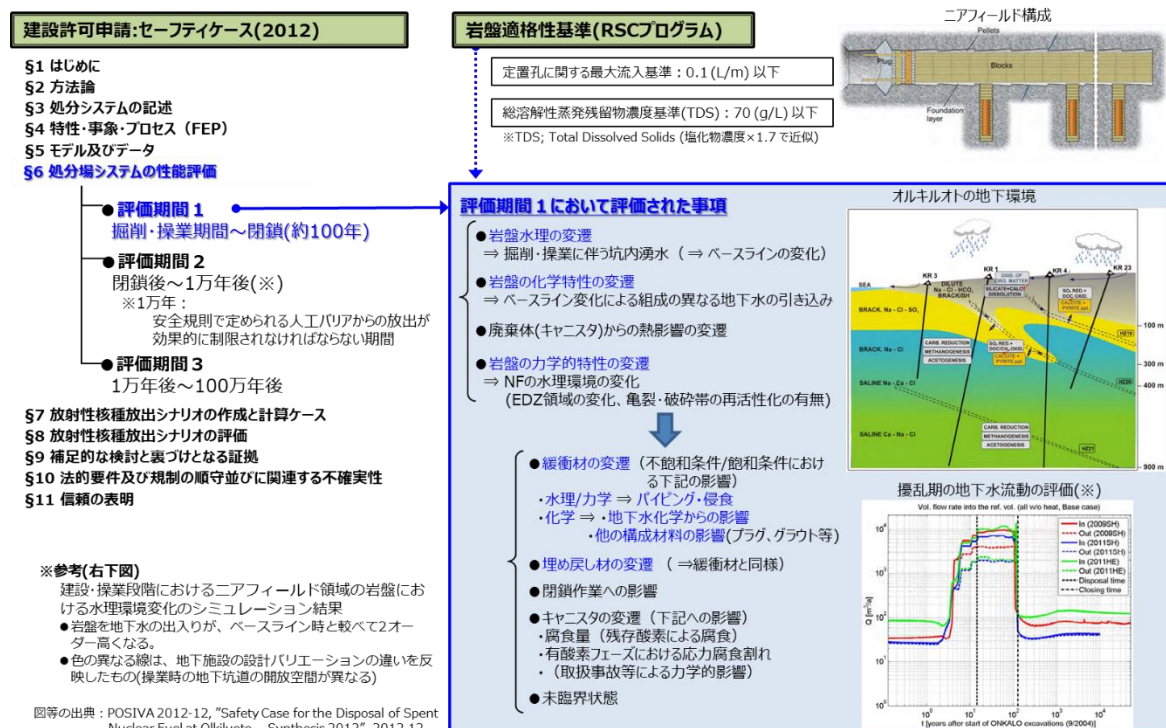


図 3.2-25 フィンランドの性能評価書における掘削・操業から閉鎖までの評価体系

① 力学的および水理学的変遷

- 緩衝材は飽和する前の段階でパイピング/エロージョンにより一部が流出すると予想される。処分孔への地下水流入量の上限をRSCで定める0.1 L/minとすると、流出する緩衝材の質量は最大185 kgと見積られるが、これは処分孔一つあたりの緩衝材重量(20,300~24,300 kgと算出されている)の1%以下であることから、緩衝材の平均密度は透水性や膨湿圧に著しい影響を及ぼさない程度に留まることが予想される。
- また、キャニスタからの熱の影響によっては緩衝材中の塩物質が限定的に溶解・沈殿する可能性があるが、その影響は限定的である。

② 地球化学的変遷

- グラウトやプラグなどからのセメント浸出液は、それらが緩衝材と直接接触していないため、影響が有意になることはないと考えられる。
- 緩衝材中は、比較的早期に還元性雰囲気となる。
- コロイドは、地下水のイオン強度が高いことにも起因してわずかにしか存在しないと考えられる。

以上のような変遷挙動の評価から、操業から閉鎖までの期間においては、ニアフィールド構成要素の変遷の影響を考慮しても、高い信頼度で性能目標は達成されるものと結論付けられている。なお、上記の流入水量の上限値を超過する場合、処分坑道についてはグラウトを使用して流入水量を低減させることが可能であるが、処分孔についてはグラウトの使用は計画されていない。

以降では、上記のフィンランドにおける評価体系を参考として、わが国の処分システムの構成要素の変遷挙動の評価および処分システムの成立性の例示に向けた平成 29 年度の検討結果を整理する。具体的な検討では、まず、わが国のニアフィールド領域における処分システム

の構成要素の設計仕様を仮設定し、作業手順を考慮した水理解析を実施する。この解析結果を用いて、塩水湧水環境がニアフィールド領域に関わる人工バリアと主要な各構成部材（支保、埋め戻し材、プラグ、グラウトなど）の要求機能に与える水理学的および地球化学的影響などについて、これまでに得られている実験結果などの知見を基に評価する。その際には、特に湧水という観点において人工バリアシステムの成立に深く関わる緩衝材と地下水の相互作用（吸水、膨潤、または再冠水過程での流出挙動）に着目し、緩衝材に期待される品質や性能が維持される条件を提示することで、緩衝材とその周囲のニアフィールド構成材料を含めた処分システムとしての成立性と品質確保の方法の提示につなげる。ニアフィールドの構成要素として想定する鋼製支保や覆工コンクリートなどについては、地下水との接触により生じる劣化挙動を見積ることで、ニアフィールド処分システムへの地下水流入量の変化を考察することとする。

2) わが国の沿岸部で想定される処分坑道の検討および仕様値の仮設定

上述したように、フィンランドの処分概念における処分システムの主な構成要素は、キャニスタ、緩衝材、埋め戻し材、プラグ（閉鎖材）である（POSIVA, 2012a）。また、処分坑道の設計では、作業安全を目的とした補助工であるロックボルトおよび金網の使用が計画されている（POSIVA, 2012c）。一方、吹付コンクリートについては、セメント浸出水による化学的擾乱を避けることを理由に使用は計画されていない。このような考え方は、フィンランドにおける処分坑道が吹付コンクリートなしで自立することを可能とする十分な強度を有する岩盤において施工されることを前提としていることに起因する。ただし、処分坑道に対する流入水量の上限値を超過する場合は、グラウトを使用して流入水量を低減させることが可能であるとしている。

わが国における構成要素およびその設計仕様については、沿岸部で一般的に想定される特有の環境（湧水環境、地球化学的環境）および堆積岩に処分施設を建設することを仮定し、NUMOの公開資料（NUMO, 2014; NUMO, 2016）や土木工事設計要領（国土交通省九州整備局, 2016）などの一般土木の知見を基に検討した。

NUMOの公開資料によると、設計値が示されている堅置き方式の坑道構成は、作業従事者の安全確保や坑道壁面剥落防止の目的から吹付コンクリートが設定され、坑道の空洞安定性に関する解析結果やトンネル標準示方書（土木学会, 2005）に示されている標準的な支保パターンなどを参考に、ロックボルト、鋼製支保工、床板コンクリートに関する設計値が示されている。

一方、NUMOの公開資料で示されていない他の坑道の構成要素については、土木工事設計要領（国土交通省九州整備局, 2016）を基に設計値の検討を行った。同要領では、吹付コンクリート、ロックボルト、鋼アーチ支保工、路盤コンクリート（床板コンクリート）に加えて、坑道の止水および、力学構造を確保するためのグラウト、金網、防・排水工、覆工コンクリートの構成要素が示されている。

以上の検討結果を基に、本検討に必要となる水理解析モデルの整備の入力となる、仮設定した処分システムの構成要素を表 3.2-4 および図 3.2-26 に示す。なお、構成要素ごとの設定値や根拠情報については Appendix XII（わが国の沿岸部で想定される処分坑道の仕様値の仮設定に係る根拠情報）を参照されたい。

① 水理解析体系の整備に向けた全体計画

上述した水理解析体系の整備によって、処分施設の建設・操業過程を考慮した、地下の水理環境、特に建設から操業段階における湧水環境の評価、把握を可能とし、各構成材料および施工環境への影響の把握に資することが可能となる。

本事業では、上記の課題に対する実施項目として、次の(i)～(iii)の三つを設定し、3ヵ年計画で順次これらに取り組み、得られる成果を次の実施項目へと連携させながら全体作業を進める(表 3.2-5 参照)。

(i) 沿岸部に特有な環境が地下水理環境に与える影響の把握

処分施設の建設・操業段階の水理場の攪乱期において、沿岸部に特有な環境が処分施設の湧水量に及ぼす影響を把握することは、処分システムの成立性を提示する上で重要な課題であると考えられる。そこで建設・操業段階の処分施設の湧水量に影響を与えられられる沿岸部特有の因子について整理する。次にその影響度を評価するため沿岸部を想定した地下水流動解析を実施し、その湧水量について比較し各因子の影響を把握する。

(ii) 操業手順が処分坑道の湧水環境に与える影響の把握

上記(i)の検討結果に留意しつつ、建設・定置・埋戻しの操業手順が湧水環境に与える影響について処分施設の湧水量に着目した検討を行う。また、このような水理場の攪乱期における変動を見積る上で施設の経時的な形状変化を模擬することは重要と考え、非定常による検討を行う。

(iii) エンジニアリング的な手法の効果に関する検討

上記(i)および(ii)の検討結果に留意しつつ、坑道の掘削から埋め戻し前までの期間を対象とし、坑道の湧水に対する止水対策(グラウトなど)が処分坑道および処分孔の湧水量に与える影響について検討を行う。

表 3.2-5 水理解析の全体計画

実施項目	H28年度		H29年度		H30年度	
	上半期	下半期	上半期	下半期	上半期	下半期
(i) 沿岸部特有な環境が水理環境に与える影響の把握						
広域スケールの鉛直二次元解析による評価		■				
(ii) 操業手順が処分坑道の湧水状況に与える影響の把握						
①水理地質構造モデルの作成		■■■■■				
②処分坑道の掘削・埋戻しパターンによる検討		■■■■■				
(iii) エンジニアリング的な手法の効果に関する検討						
①水理地質構造モデルの作成		■■■■■				
②沿岸海底下条件を考慮した処分孔湧水量の検討			■■■■■			
③埋め戻し～再冠水を対象とした解析				■■■■■		
④止水対策工、ニアフィールド構成材料劣化の影響検討				■■■■■	■■■■■	
取りまとめ						
年次・最終		☆		☆		☆

上記の計画に沿って、本年度は(ii)および(iii)に関する検討を進めた。このような検討を経て整備する水理解析体系は、建設・操業過程の擾乱影響にも留意した、処分システムの成立性を提示する際に利用する解析ツールの一つと位置付け、(1)に示した本検討の前提条件(検討のための地質環境条件例や処分システムの構成例)を踏まえて検討を進めた。水理解析体系の整備に向けた一連の検討に用いた解析コードは、有限要素法による浸透流・移流分散解析プログラム Dtransu 2D・EL および Dtransu 3D・EL である。

② 水理地質構造モデルの構築

(1) で述べたように、本取組における検討の前提条件として対象母岩を新第三紀堆積岩類としている。同岩類に関する水理地質構造モデルは、既に NUMO が現在のジェネリックな段階を考慮した地質環境モデルを整備している (NUMO, 2016)。本検討における水理地質構造モデルは、NUMO が整備したモデルをベースとして、三つのスケール (広域スケール、処分場スケール、ニアフィールドスケール) に関する三次元モデルを平成 28 年度に整備している。解析ではこれらのスケールの異なるモデルをネスティングさせることで、広域からニアフィールド (以下 NF と称す) までのスケールの考慮が可能な水理解析体系とした。また、処分施設は以下のように設定しモデル化した。

○処分区画形状：本取組における検討の前提条件とした豎置き定置方式のパネル展開を基にモデル化。

○処分坑道：広域スケールモデルでは考慮していないが、処分場スケールモデルでは大気圧解放条件を与えた節点群としてモデル化。さらに NF では、処分坑道の形状を詳細にモデル化。

※平成 28 年度に整備した (産総研ほか, 2017) 各スケールの水理地質構造モデルを図 3.2-27 に示す。

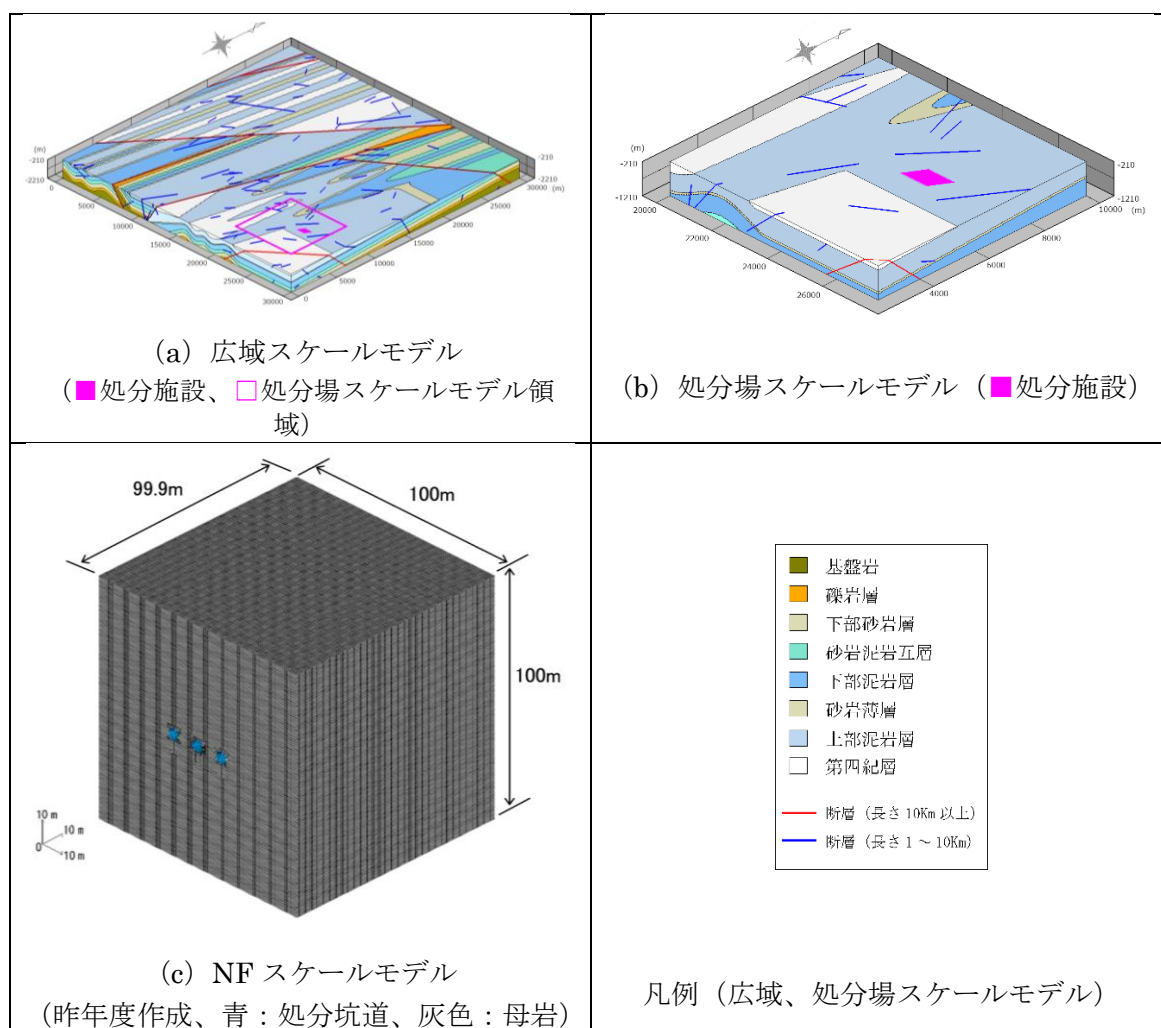


図 3.2-27 各スケールの水理地質構造モデル (鳥瞰図)

③ 平成 29 年度の検討内容

本年度は、上述した平成 28 年に整備した水理地質構造モデルを踏まえて、建設・操業過程をより詳細に表現するための検討を進めた。さらに、2) の「わが国の沿岸部で想定される処分坑道の検討および仕様値の仮設定」の検討で得られた処分システムの構成例を水理地質構造モデルに反映させるため、NF スケールモデルの具体化を行った。

(a) NF スケールモデルの具体化

平成 28 年度の整備したモデルは、均質な多孔質媒体を前提として NF スケールモデルを作成した (図 3.2-27 (c))。一方、NUMO では、割れ目を考慮した等価不均質連続体として 100 ケースのリアライゼーションを実施している (NUMO, 2016)。そこで、本検討における水理地質構造モデルでも割れ目による不均質性を考慮するため、NUMO が採用している等価不均質媒体を用いた。モデルの見直しおよび具体化の要点を以下に整理する。また、解析モデルを図 3.2.2-28 に示す。

- 本取組が緩衝材の流出およびそれに影響を与える坑内湧水に着目して検討を進めるといふ観点から、NUMO が実施した 100 ケースのうち、処分孔への湧水量が比較的多いものをモデルのベースとした。
- モデル化する処分坑道数は 5 本とし、解析領域はモデルの処分坑道横断方向の幅を 60 m とした。2) において整理された知見を基に、坑道周辺の要素分割を詳細に行い坑道の構成材料をより詳細にモデルに反映できるようにした。
- 物性値は NUMO の公開資料 (NUMO, 2016) における設定値をベースとし、不足する情報に関しては地層処分研究開発第 2 次とりまとめ (JNC, 1999) や TRU 廃棄物処分分野におけるガス発生・移行解析などの先行研究事例における情報 (JNC, 2005) を参考に設定した。透水係数および間隙率を表 3.2-6 に示す。物性値に関する詳細な設定は Appendix XII (水理解析の解析条件) を参照されたい。

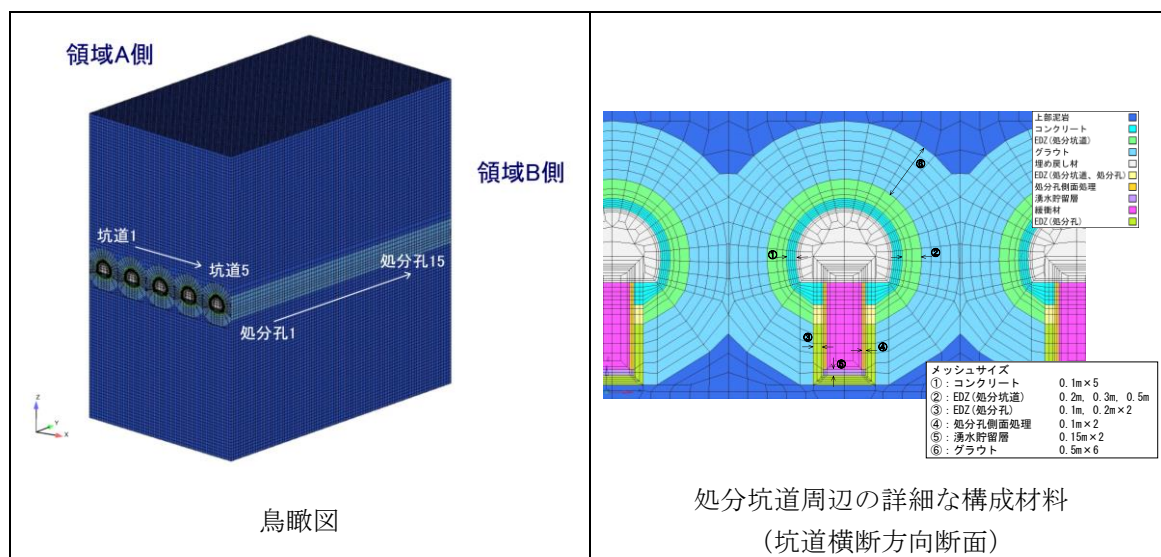


図 3.2-28 NF スケールモデルの解析メッシュ

表 3.2-6 透水係数および間隙率

名称	透水係数(m/s)	間隙率	設定根拠
緩衝材	1.005E-12	0.400	2005-026 ^{※1}
埋戻し材	7.353E-12	0.333	99-022 ^{※1}
支保工/インバート	5.025E-11	0.190	2005-026 ^{※1}
母岩	基質部と割れ目を重ね合わせて等価透水係数を設定	0.245	2005-026 ^{※1}
EDZ (母岩)	母岩の100倍	0.245	2005-026 ^{※1}
グラウト	母岩の1/10	0.245	2005-026 ^{※1}

99-022: 地層処分研究開発第2次とりまとめ(JNC TN1400 99-022)

2005-026: TRU廃棄物処分におけるガス発生・移行解析(JNC TN8400 2005-026)

※1: 間隙流体の温度を30° に想定

(b) 操業手順が処分坑道の湧水状況に与える影響の把握

建設・操業過程（処分坑道の掘削・定置・埋戻し）における地下施設の形状変化が、着目する処分坑道の湧水状況に与える影響を把握することを目的とした検討を非定常の飽和・不飽和浸透流解析によって行った。昨年度は概略的な掘削パターンを複数設定し、掘削工程の違いによる湧水量の変化の把握を行った。本年度は NUMO の公開資料（NUMO, 2016）に基づき、建設・操業過程をさらに詳細に具体化し、掘削から定置、埋戻しに至る過程を考慮した地下水流動解析を行った。

○解析条件

解析モデルは、平成 28 年度に作成した図 3.2-27 の (a) 広域スケールモデルと (b) 処分場スケールモデル、ならびに本年度に作成した図 3.2-28 の NF スケールモデルを用いた。建設・操業プロセスは NUMO の公開資料（NUMO, 2016）に基づき、建設 10 年、操業 40 年、閉鎖 10 年の工程を基本とし、主要坑道を掘削した後、5 本ないし 6 本の坑道単位での一括掘削を行いパネル全体の掘削を行った後、同様の坑道単位で順次一括で埋戻してパネル全体の埋戻しを行う工程を仮定した。また、定置と埋戻しは同時に行うこととした。これらの解析条件を用いて、主要坑道の掘削からパネルの埋戻しまでの各施工段階を想定した地下水流動解析を実施した。これらの条件の前提とした基本ケースにおける処分坑道周辺の解析メッシュを図 3.2-29（右図）に示す。NF スケールモデルの境界条件は、パネルにおける NF スケールモデルの位置を図 3.2-29（左図）のように仮定し、処分場スケールモデルから地下水压を境界条件として引き渡した。境界条件の詳細な設定およびその根拠に関する検討は Appendix XII（推理解析の解析条件）に示す。

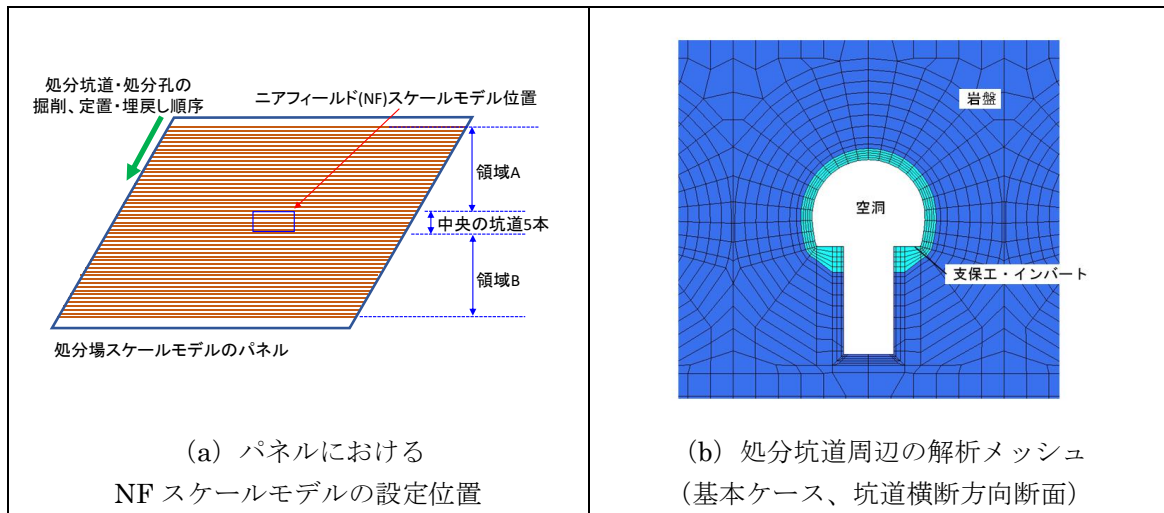


図 3.2-29 解析条件

○解析結果および考察

解析結果のうち、坑道周辺の構成材料を支保工のみとした基本ケースにおいて、5本ないし6本の坑道単位で、一括掘削、一括埋め戻しを行った場合の処分坑道および処分孔の湧水量の経時変化を図 3.2-30 に示す。全体の傾向として、処分坑道および処分孔の湧水量は、中央5本（●、NFスケールモデルの処分坑道）掘削直後は比較的大きな湧水量を示すが、約2ヶ月程度（図 3.2-30 の①の破線）経過した時点で湧水量の大きな変動は落ち着く傾向となる。その後、後進の掘削坑道（●領域B、処分場スケールモデル）の掘削に応じてさらに湧水量は低下し、後進の掘削坑道の掘削開始から約2ヶ月程度（図 3.2-30 の②の破線）で、ほぼ定常に近い傾向となっている。また、全体的に処分孔の湧水量は処分坑道の湧水量の約5倍と処分坑道と比較すると多くなっている。この要因は支保工・インバートの影響と考えられる。処分坑道の周辺は低透水性の支保部材で覆われているため、この透水性が坑道湧水量の支配的な要因となり湧水は少ない、一方処分孔は直接岩盤に接しているため、母岩の透水係数が湧水量の支配的な要因となり、湧水が大きくなると考えられる。

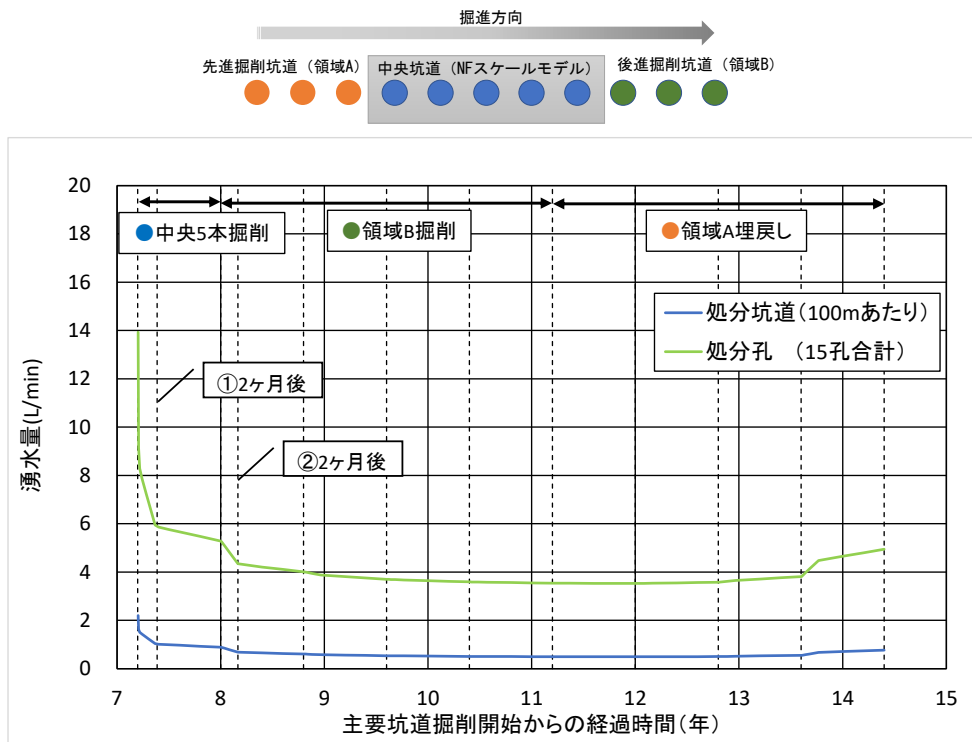


図 3.2-30 掘削・埋戻し（定置）に伴う処分坑道・処分孔の湧水量の経時変化

(c) エンジニアリング的な手法の効果に関する検討

エンジニアリング的な手法の効果に関する検討として、坑道の掘削から埋め戻し前までの期間を対象として、止水対策（グラウト）が坑道の湧水量に与える影響の把握を行った。本年度は特に坑道周辺の構成要素に着目し、その違いによる湧水量および不飽和帯の進展について飽和・不飽和の浸透流解析により比較した。

○解析条件

解析条件のうち境界条件、物性値および掘削過程は前述した「操作手順が処分坑道の湧水状況に与える影響の把握」の検討の設定と同様とした。解析モデルも基本的には同様であるが、NF スケールモデルの処分坑道周辺のモデル化のみを解析ケースに応じて変更した。各解析ケースの NF スケールモデルの坑道周辺の設定を図 3.2-31 に示す。

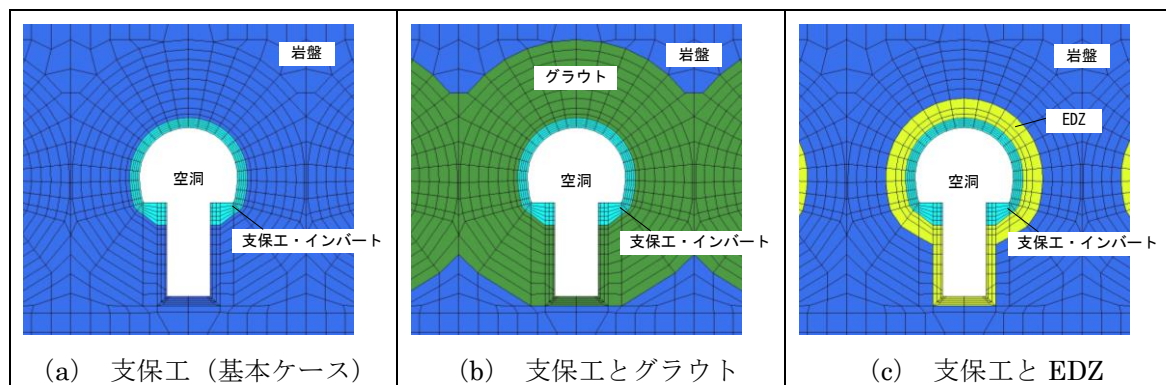


図 3.2-31 坑道周辺の各ケースの設定（坑道横断方向断面図）

○解析結果および考察

各ケースの解析結果のうち湧水量の経時変化を図 3.2-32 に、図 3.2-31 の (a) 支保工、(c) 支保工と EDZ を設定したケースにおける飽和度分布を図 3.2-33 に示す。(a) 支保工のみのケースと (b) の支保工とグラウトを設定したケースでグラウトの有無による影響を比較すると、処分坑道の湧水量に大きな違いは表れなかった。また、グラウトを設定した (b) のケースの方が、処分孔の湧水量は全体的に少ない傾向となった ((a) の 2/5 程度、図 3.2-28)。次に (a) 支保工のみのケースと (c) の支保工と EDZ を設定したケースで EDZ の有無による影響を比較すると、処分坑道からの湧水量は大幅に減少し、処分孔からの湧水量は増加する傾向が得られた (図 3.2-32)。また坑道周辺の不飽和領域の形成を確認すると、(a) のケースでは不飽和領域がほぼ形成されていないのに対して、(c) のケースでは、時間経過とともに EDZ 領域に不飽和領域が形成される結果となった (図 3.2-33)。これは以下のような要因によるものと考えられる。処分坑道の壁面は支保工に覆われているため、母岩に覆われている処分孔の壁面の方がより透水性が高くなっている。そのため、EDZ が形成されている場合は、EDZ 領域内を通じて処分孔に向かう流れが強くなり、EDZ 領域を中心として不飽和帯が形成されやすくなる。

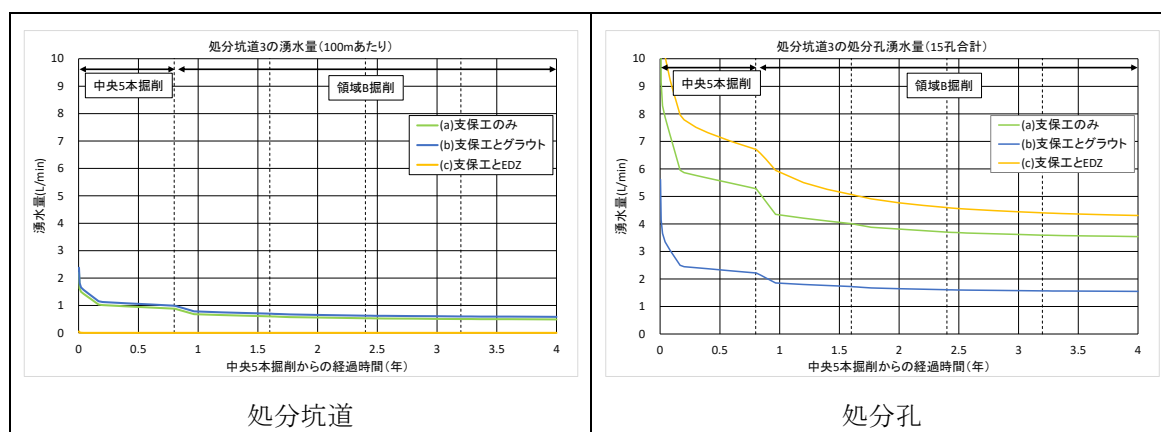


図 3.2-32 中央の処分坑道の湧水量の変化

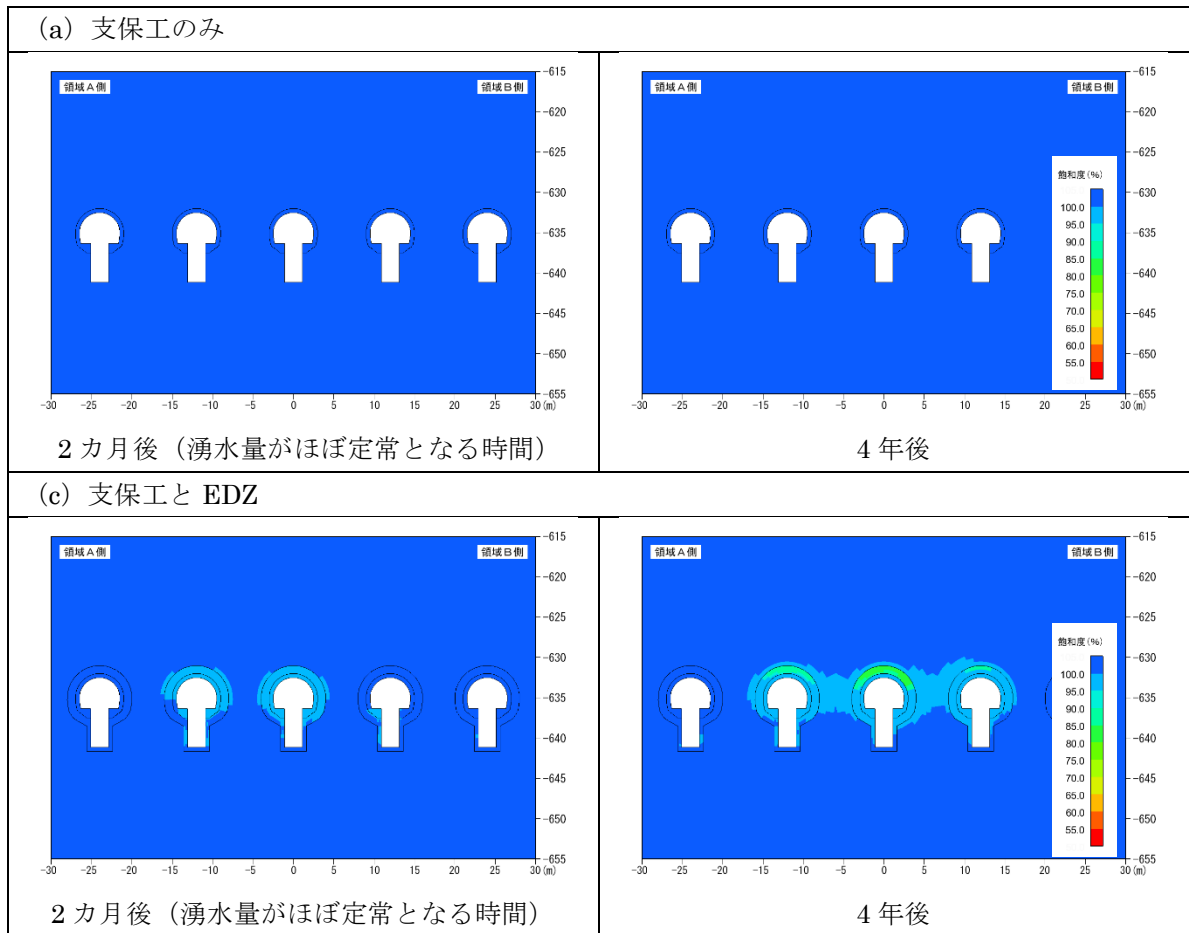


図 3.2-33 飽和度分布図（坑道横断方向断面）

④ まとめおよび今後の課題

水理地質環境モデルの構築および解析の実施では、2) において設定された処分坑道周辺の構成を NF スケールモデルにおいて具体化（モデル化）した。次にそれを用いた非定常の地下水流動解析により、「作業手順が処分坑道の湧水状況に与える影響の把握」および「エンジニアリング的な手法の効果に関する検討」を行った。

前者については、処分坑道および処分孔の掘削・定置による湧水量の比較を行い、掘削埋戻し工程の進展に伴う湧水量を把握することを可能とした。また、後者については、処分坑道周辺の構成要素のモデル化の違いによる湧水量の比較を行い、その傾向を把握した。

また、以上の一連の検討から、水理解析上の課題として次の二つが挙げられる。

- 支保およびEDZの透水性を考慮することに伴う坑道湧水量の違いである。上記(c)において整理した結果より、支保およびEDZの透水性が湧水量を左右する要因となると考えられる。よってそれに起因する湧水量の違いを把握する必要がある。
- 埋戻し材および緩衝材の透水性による再冠水時間の違いが挙げられる。同様に上記(c)において整理した結果より、埋戻し材および緩衝材の透水性が再冠水時間を左右する要因となると考えられるため、その傾向を把握する必要がある。

(3) 今後（最終年度）の検討：水理解析試験結果に対する知見等の適用方法の検討

水理解析結果に留意しつつ、処分システムの成立性の評価手法や知見などの体系のあり方について検討した（図 3.2-34）。図内の実施項目①「ニアフィールド構成材料の劣化、変質に関する知見、データ拡充」は既出の 3.1 節に示した個別要素（オーバパック、緩衝材、セメ

(4) 参考文献

- Axelsson, M., Prevention of Erosion of Fresh Grout in Hard Rock. Doctor thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2009.
- 延藤 遵, 小林伸司, 征矢雅宏, 島田俊介, 小山忠雄, 角田百合香, 前島俊雄, 倉敷 LPG 貯槽 建設工事における溶液型グラウトによる止水対策 (その 2) - 溶液型グラウトの現場条件を考慮した溶液型グラウトの長期安定性確認試験 -, 土木学会第 68 回年次学術講演会, 2013.
- Fransson, A., Grouting design based on characterization of the fractured rock Presentation and demonstration of a methodology, SKB, R-018-127, 2008.
- Funehag, J., Grouting of Fractured Rock with Silica Sol. Grouting Design Based on Penetration Length, Doctor thesis, Department of geology, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2007.
- Funehag, J., Injekteringen av TASS-tunneln Design, genomförande och resultat frånförinjekteringen, SKB, R-10-39, 2011.
- Funehag, J., Guide to grouting with silica sol - for sealing in hard rock, Befo Report 118, 2012.
- 原子力発電環境整備機構 (NUMO) (2014): 処分場を構成する各部位に適用するセメント種類の選定に向けた検討 - 各部位の要求特性の抽出と状態変遷の推定に基づく重要度の検討 - NUMO-TR-13-07.
- 原子力発電環境整備機構 (NUMO) (2016): 外部専門家ワークショップ資料「わが国における安全な地層処分の実現性 - サイト選定で規定される多様な地質環境を対象としたセーフティケース」.
- Hartley, L., Hoek, J., Swan, D., Appleyard, P., Baxter, S., Roberts, D. & Simpson, T. 2013. Hydrogeological modelling for assessment of radionuclide release scenarios for the repository system 2012. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. Working report 2012-42.
- Hatakka, L., Salminen, N., Nuijten, G., Lehmusjärvi, R., Mustonen, S., Silica grouting in deep underground saline conditions in ONKALO underground research facility, Nordic grouting symposium, 2013.
- Hollmén, K., Sievänen, U., Funehag, J., Granberg, N., Lyytinen, T., Syrjänen, P., Säippä, J., Colloidal Silica - Grouting in Demonstration Tunnel 2 in ONKALO, POSIVA, Working Report 2012-84, 2013.
- 核燃料サイクル開発機構, わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第 2 次取りまとめ-分冊 3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023, 1999.
- 核燃料サイクル開発機構, TRU 廃棄物処分におけるガス発生・移行解析, JNC TN8400 2005-026, 2005.
- Kobayashi, S., Soya, M., Takeuchi, N., Nakaya, A., Okuno, T., Shimada, S., Kaneto, T., Maejima, T., Rock grouting and durability experiments of colloidal silica at Kurashiki underground LPG storage base, Proc. of EUROCK 2014, 2014.
- 国土交通省九州整備局 (2016): 土木工事設計要領, 第Ⅲ編
- Lehtonen, H., Impact of groundwater salinity on penetration of colloidal silica. Aalto University. Bachelor Thesis, 2015.

Posiva, “RSC-Programme - Interim Report Approach and Basis for RSC Development, Layout Determining Features and Preliminary Criteria for Tunnel and Deposition Hole Scale”, Working Report 2009-29, 2009.

Posiva, Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto – Synthesis 2012, POSIVA 2012-12, 2012a.

Posiva, “Rock Suitability Classification, RSC-2012”, POSIVA2012-24, 2012b.

Posiva, Underground Openings Production Line 2012, Design, Production and Initial State of the Underground Openings, POSIVA 2012-22, 2012c.

産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 平成 27 年度地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発報告書, 2016.

産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 平成 28 年度地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発報告書, 2017.

4. 沿岸部における安全評価技術の高度化開発

4.1 はじめに

「沿岸部における安全評価技術の高度化開発」では、わが国における沿岸部固有の環境を踏まえた安全評価に関する技術開発の取り組みとして、海外事例なども含めて既存の方法論や評価ツールを活用しつつ、また、沿岸部における地質環境の調査技術の高度化開発（2章参照）や沿岸部における工学技術の高度化開発（3章参照）の進捗・成果などを考慮・反映しながら、沿岸部の特徴に対応した安全評価を行うために必要なデータ、技術およびそれらの特徴が安全評価結果に及ぼす影響に関する知見などの技術基盤の整備を行う。

具体的には、安全評価技術を人工バリアと天然バリアでの核種の移行挙動を評価する核種移行評価と、表層環境に至った核種の移行と被ばくを評価する生活圏評価に区別し、核種移行評価と生活圏評価を沿岸部固有の特徴に対応した評価としていくための評価の枠組みやその実施方法等を検討するうえで参考となる既存情報の整備等を行う。また、核種移行評価では地下水流動状況や地下水化学等の特徴を取り込んだ評価技術と評価事例の整備、生活圏評価では処分場からの核種の表層環境への放出域や核種の移行経路および被ばく経路・形態等の特徴を取り込んだ評価技術と評価事例の整備等を行う。

初年度である平成 27 年度には、沿岸部固有の特徴などを、海外での検討事例（特に沿岸部での処分場立地を進めているフィンランドとスウェーデン）を対象に、技術的観点からの検討や対策などが進められた事例などを調査した。これにより、沿岸部固有の特徴に対する安全評価技術などの整備に向けた課題の整理と今後の研究計画の策定を、安全評価の主要な検討プロセスの項目（現象理解関係、核種移行特性、核種移行評価関係、生活圏評価関係等）ごとに行った。

平成 28 年度は、安全評価において留意すべき沿岸部固有の特徴等を踏まえた核種移行評価と生活圏評価のそれぞれの概略的な枠組みの整備、それを踏まえた核種移行評価と生活圏評価のそれぞれでのパラメータの設定手法の整備およびモデル・パラメータの設定に着手した。

平成 29 年度は、平成 28 年度の検討を発展的に継続することを中心に、以下を実施した。

① 評価の枠組みの整備（4.2 節参照）

安全評価において留意すべき沿岸部固有の特徴等を踏まえた核種移行評価と生活圏評価のそれぞれの枠組みの前提条件および概略的な枠組みについての平成 28 年度の検討も踏まえつつ、沿岸部固有の特徴等を具体的に評価していくための核種移行での評価シナリオ・解析ケースの設定とそれらの具体的な評価方法（モデル化方法、使用ツール、パラメータ設定方法等）および生活圏評価での移行経路・被ばく経路等の設定とそれらの具体的な評価方法（モデル化方法、使用ツール、パラメータ設定方法等）について、既存情報に基づく分析・整備を進めた。

なお、平成 28 年度時点で「生活圏評価モデル・パラメータ整備および影響評価」として実施していた内容は、平成 29 年度においては、上記の観点に重点をおきつつ、本項目で実施した。

② 核種移行モデル・パラメータ整備および影響評価（4.3 節参照）

核種移行評価に係るモデル・パラメータの整備については、沿岸部固有の場の特徴やその変遷（例えば、海進・海退の影響を受けた地下水流動状況や地下水化学等の変化）の評価手法の調査と評価の試行を進めた。定量的評価に向けたデータ拡充として、沿岸部固有の場の特徴やその変遷（塩濃度等の地下水組成やその変化等）の影響を評価するための基盤情報として必要となる、核種の収着に関するデータ、コロイドの安定性に関するデータ、有機物・微生物の存在量や組成等の特性データの取得等を進めた。

上記の内容は多岐にわたるため、4.3 節はさらに以下の下位項目に分割する：

- 沿岸部の特徴を考慮した核種移行評価手法の整備（4.3.1 節参照）
- 沿岸部の特徴を考慮した核種移行モデル・パラメータ整備（4.3.2 節参照）
- 沿岸部の特徴を考慮したコロイド・有機物・微生物の影響評価（4.3.3 節参照）

なお、平成 29 年度の実施項目①および②は、「沿岸海底下等における地層処分技術的課題に関する研究会とりまとめ（資源エネルギー庁）において「安全評価技術に係わる高度化の方向性」として挙げられている重点項目と図 4.1-1 のように対応付けられ、それら重点項目に対して主にデータ拡充や要素技術の整備に重点をおいた検討・整備を行うこととしている。

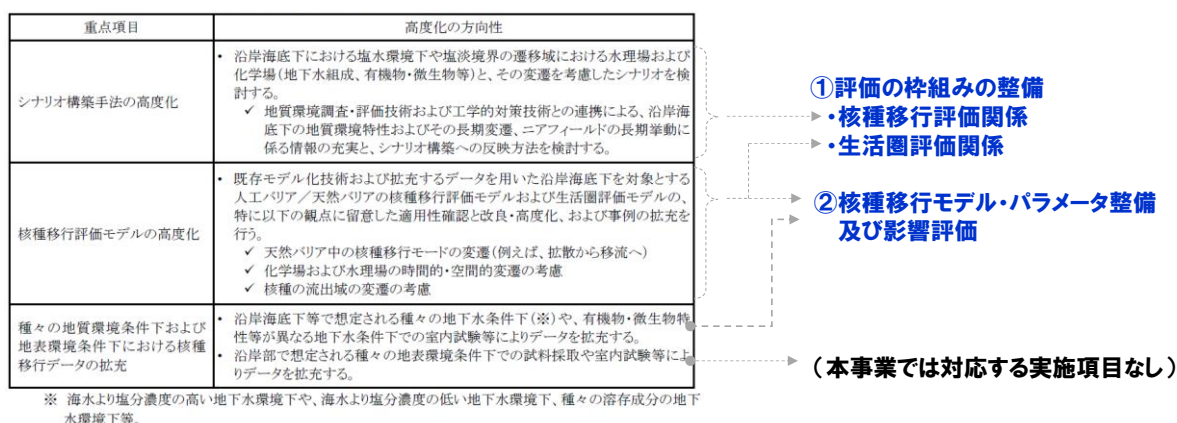


図 4.1-1 平成 29 年度の実施項目と「沿岸海底下等における地層処分技術的課題に関する研究会とりまとめ」での重点項目との関係

以降の 4.2 節と 4.3 節では、実施項目①および②のそれぞれの内容を以下の構成で示す：

- (1) 背景と目的
- (2) 実施内容
- (3) 今後の課題
- (4) 参考文献

参考文献

資源エネルギー庁、沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会とりまとめ：

http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/engan_kaiteika/pdf/report01_01.pdf（2018 年 1 月 22 日最終閲覧）

4.2 評価の枠組みの整備

(1) 背景と目的

安全評価においては、地層処分された放射性廃棄物が人間環境に及ぼす影響を評価する観点から、概要調査・精密調査や、処分場建設・操業を通じて得られた情報に基づき想定される処分直後の処分システムの状態を基本に、長期間のうちにその状態を変化させる可能性のある一連の現象を想定し、これらを組み合わせることで処分システムの長期挙動を描くシナリオを設定する必要がある。また、これらシナリオに基づいた定量的な解析を行うための解析ケースおよび評価方法（モデル化方法、使用ツール、パラメータ設定方法等）を設定していく必要がある。

このような、安全評価の全体像の中で、評価シナリオや解析ケースの設定は、評価の枠組みとなるものであり、それに基づくモデル・パラメータの設定は、評価の内容を具体化するものとなる。

沿岸部における安全評価技術の高度化開発においては、安全評価において留意すべき沿岸部固有の特徴等を踏まえた評価の枠組みと評価の内容の具体化を進めることが必要になる。

平成 28 年度までに、安全評価において留意すべき沿岸部固有の特徴等を踏まえた核種移行評価と生活圏評価のそれぞれの概略的な枠組みについての検討を行ってきた（例えば、図 4.2-1）。

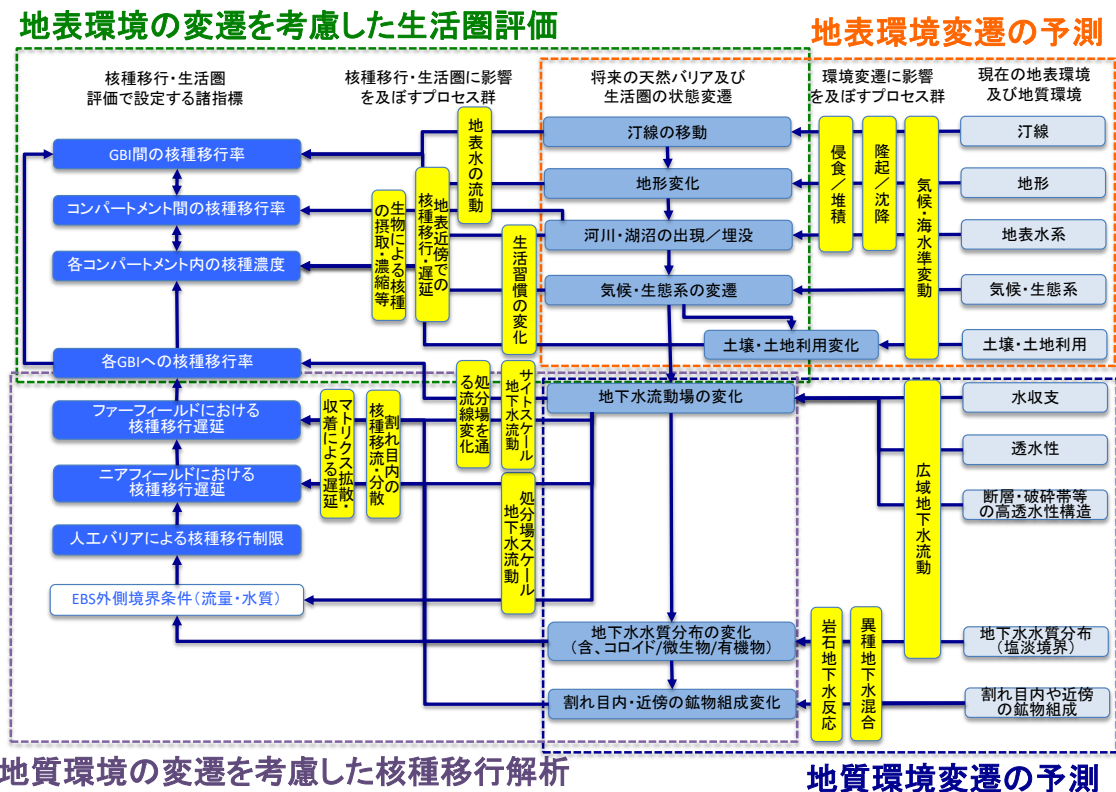


図 4.2-1 沿岸部固有の特徴等を踏まえた核種移行評価と生活圏評価のそれぞれの概略的な枠組み

(産業技術総合研究所ほか, 2017)

平成 29 年度は、沿岸部固有の特徴等を具体的に考慮していくための核種移行での評価シナリオ・解析ケースの設定とそれらの評価方法（モデル化方法、使用ツール、パラメータ設定方

法等) および生活圏評価での移行経路・被ばく経路等の設定とそれらの具体的な評価方法(モデル化方法、使用ツール、パラメータ設定方法等)について、既存情報に基づく分析・整備を進めることとした。

(2) 実施内容

平成 29 年度は、評価シナリオ・解析ケースの設定および設定した評価シナリオ・解析ケースの評価方法についての既存情報に基づく分析・整備の最初のステップとして、地下水移行シナリオの評価に対する基本的な枠組みを示す図 4.2-1 に沿って、評価シナリオ・解析ケースを具体化に設定していく際に留意すべき事項等を洗い出すことを目的とした検討に着手した。具体的には、特に「評価の目的・内容」と「評価に必要となる情報」との関係に着目した分析・整備を、主に既存情報に基づき実施した。なお、この分析・整備で着目する情報としては、既存情報や本章「沿岸部における安全評価技術の高度化開発」の本項以外の検討内容や進捗・成果に加えて、本事業での「沿岸部における地質環境の調査技術の高度化開発」(2章参照)および「沿岸部における工学技術の高度化開発」(3章参照)の検討内容や進捗・成果なども可能な範囲で参考とすることにより、安全評価以外の分野の情報との関係等にも留意したものとしていくこととした。

ここで、「評価に必要となる情報」は、情報の種類だけではなく、その質(情報の精度や信頼性など)や量(データ数、条件のバリエーションなど)などを含めた複数の視点で分析し整理することが必要になると考えられる。これは、評価の内容や複雑さが評価を行う時点や評価の対象・目的等の組み合わせに応じて異なり、この違いは利用できる情報の種類に大きく関わることは当然であるが、それだけではなく、調査や事業の段階によって利用できる情報の質や量が大きく異なってくることに依存すると考えられるためである。

まず、情報の種類については、性能評価において普遍的に重要性が高い主な情報とそれに関連する属性等を、これまでの性能評価で得られた知見等に基づき挙げていくことはそれほど困難ではない。例えば、性能評価において普遍的に重要性が高い情報を、情報の種類に着目し、かつ、熱 T・水理 H・力学 M・化学 C の観点で整理すると、表 4.2-1 のような情報が挙げられる。ここで、情報の種類としては、地下水の流速、地下水の移行経路、地下水の流出域、地下水組成、岩種等を挙げている。このような整理により、それら情報が性能評価のどの部分との関係で重要となるかも比較的簡単に示すことができる。なお、この表の「情報」の欄に示す項目は、地質環境の調査や観測等から直接的に取得されるデータと、それらデータを加工・解釈することによって得られる二次的な情報とは区別されていない。これは性能評価の観点から重要性の高い情報を整理するという意味では問題はないと思われるが、今後安全評価以外の分野との連携等の具体的な検討と実施を進めていく段階では、調査・観測から得られる直接的なデータと、データの加工・解釈による二次的な情報とを分類・整理して記述することも必要になると考えられる。

表 4.2-1 性能評価において普遍的に重要性が高い情報の整理例

THMC	情報	左記の情報が重要となる性能評価の項目
水理 H	地下水の流速	移行時間
	地下水の移行経路	移行距離、移行時間
	地下水の流出域	生活圏への流入場所
化学 C	地下水組成*	移行特性**
	岩種	移行特性
熱 T	温度	移行特性
力学 M	物理特性	間隙構造・特性
	応力情報	掘削影響領域の水理特性の変化等

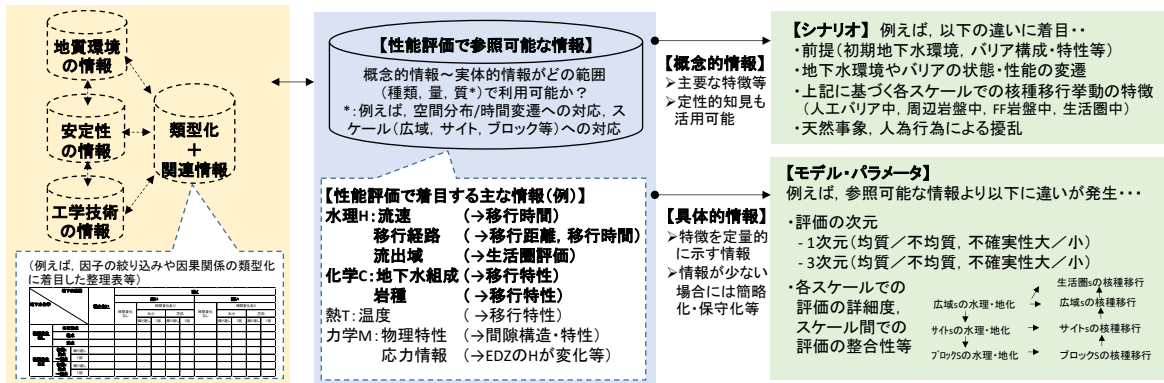
* : pH, Eh, 主要イオン濃度（炭酸イオン等）、その他（有機物、微生物の種類・量等）

** : (元素ごとの) 分配係数、溶解度、拡散係数

一方、情報の種類だけではなく、利用可能な情報の質や量が調査や事業の段階によって異なることにまで着目すると、「評価に必要となる情報」の全体像はかなり複雑になり、それを見通せるようにするための整理はかなり困難なものとなる。例えば、評価に必要となる情報と評価の目的・内容の関係は、以下のような複数の要素の組み合わせとして考えることになり、さらにこれら各要素は複数のバリエーションを有することになるため、情報と評価の関係の全体像は多くの組み合わせを含有する非常に多種多様で複雑なものとなる。

- ・ 得られる情報の質や量が調査や事業の段階によって異なること、すなわち、情報の量や質に複数のレベルがあること、
- ・ そのような情報の量や質の違いにより、評価の対象（例えば、定性的な情報は主にシナリオの設定に利用、定量的な情報は主にモデル・パラメータの設定に利用）と評価可能な時間・空間の範囲（例えば、広域スケール、サイトスケール、ブロック・坑道スケール等）が異なること、さらにはどのような詳細度の評価が行えるかについて、評価の内容（例えば、一次元解析か三次元解析か、均質か不均質か、複数のスケールの評価をどのようにつなげていくか、性能評価に必要な様々な現象をどのように互いに関連付けるか等）とその評価に必要な技術（モデル、ツール、パラメータ設定手法等）等も異なること、
- ・ さらに、評価の目的や評価に求められる情報は、その評価を実施する状況によっても異なると考えられ、例えば、「特定の場を対象としない場合（研究開発段階、サイト選定プロセス実施前等）」と「特定の場を対象とする場合（サイト選定プロセス実施中、サイト選定後等）」に応じて以下のような違いが生じ得る。
 - 特定の場を対象としない場合：主要な目的は、主な特徴や影響の種類・傾向・程度の把握、着目すべき事項の抽出等が主となり、そこで用いる情報については、精緻な値や分布ではなく、上限下限や仮想的な幅の設定でも十分な場合もある。
 - 特定の場を対象とする場合：主要な目的は、特定の場での主な特徴や影響の描写、技術的成立性、安全性の判断等が主となり、そこで用いる情報については、精緻な値や分布が求められる。ただし、値や分布の解像度や精度等は調査段階の進展や取得可能な情報の量・質に大きく依存するものであり、特にサイト選定プロセスの初期の段階では粗い情報に基づく検討とならざるを得ないという制約等も生じ得る。

このような考察に基づき、性能評価の立場から、かつ、情報に着目した場合に限定したものではありませんが、連携の範囲や構造およびそこの留意点等の整理を試みた。その結果、図 4.2-2 のようなイメージが一つの案として考えられた。



ポイントの例:

- ・ 調査情報と性能評価の相関性
- ・ 利用可能な調査情報≠性能評価の入力パラメータ 等

図 4.2-2 性能評価の立場かつ情報に着目した場合に限定した連携の全体像とポイントのイメージ案

さらに、地質環境調査あるいは室内試験等で得られる情報が、必ずしも性能評価でそのまま用いることのできる情報であるとは限らず、調査や試験等で得られる情報を性能評価で使える情報に変換するという行為も必要となる場合がある。例えば、調査や試験等から得られる情報と性能評価で用いる情報との間に、情報の種類、量、質、形態、あるいはそれら情報を取得する際の条件等に関するギャップがある場合が考えられる。このことは、「評価に必要な情報」を検討する際に、安全評価分野の枠の中だけではなく、地質環境調査やあるいは工学技術などの他分野との連携を、情報のつながり方・つなげ方を指標の一つとして、その具体的な方法論を丁寧に検討していくことの必要性を示唆していると考えられる。

調査や試験等から得られた情報を性能評価で利用可能な情報に変換するための取り扱いの例として、室内の収着実験によって得られたデータや異なる環境条件で取得されたデータを、評価の条件に対応したパラメータの設定に適切に活用することが挙げられる。例えば、Crawford (2010) では、室内の収着試験によって得られたデータに含まれる種々のバイアスに起因するギャップを補正する方策の一つとして、以下の補正方法について検討している。

- ・ 原位置での岩石と粉砕試料で吸着に寄与する表面積の差異を考慮するための物理的なダメージに関する補正
- ・ 原位置での岩石と試験に用いられた試料の鉱物組成の差異を考慮するためのCECに関する補正
- ・ 異なる粒子サイズの試料を用いて試験が行われている場合には、比表面積を規格化するための補正
- ・ 原位置での地下水水質と試験に用いられた液相との差異に関する補正

上記の検討から、図 4.2-1 の地下水移行シナリオの評価に対する基本的な枠組みに基づき、「評価に必要な情報」を考える際には、情報の種類に加えて、得られる情報の質や量が調査や事業の段階によって異なることなどにまで着目することが必要であり、そのためには、

性能評価の枠の中だけでなく、地質環境条件等の他分野で取得・整理される情報にも目を向け、それらと性能評価で必要となる情報とのつながり方・つなげ方を考えていくことが重要になる。このような情報をキーとした分野間の連携のあり方等についての議論は、今後継続して進めて行く必要があるが、そのきっかけとしてまず着目すべきは、性能評価において普遍的に重要性が高い情報（表 4.2-1 参照）であり、特に性能評価の結果への影響が大きいことがわかっている地下水流動や地下水組成に関する情報についての連携方法について検討し、実際の連携の経験を蓄積していくことが優先的に重要になると考えられる。なお、連携方法の具体化に係る検討を効率的に進めるためには、連携において対象とする情報の範囲や詳細度について、個々に詳細に見ていくのか、類型化等の何らかの工夫をしていく必要があるのか等の基本的なアプローチ等についても事前に検討し整理しておく必要がある。地下水流動や地下水組成に関する情報は、厳密に言えばまったく同じものは一つとしてなく、対象とする地質環境に応じて多種多様なものが想定されるが、それら全てについて個々に連携の方法論や事例を検討することは困難である。そこで、例えば前述の「特定の場を対象としない場合」と「特定の場を対象とする場合」のような評価の状況の区分を踏まえて、前者の「特定の場を対象としない場合」については、なるべく多種多様な地質環境条件を対象にしつつも、一方で、全ての地質環境条件を別々に考えるのではなく、主な特徴に応じて類型化し、評価はそれぞれの類型に対して行うなどの合理化を図ることが必要になると考えられる。地下水流動や地下水組成に関する情報の類型化を検討し具体化することは、地質環境調査分野にとっても、知見の集約のフォーマットとして一般的なものとなり、さらにそれが情報の提供側である地質環境調査分野と利用側である安全評価分野側で事前に調整したものとして設定することができれば、連携のフォーマットとしても有効性が高くなることが期待できる。また、後者の「特定の場を対象とする場合」については、対象とする地質環境条件が絞られることから、その特定の地質環境条件を適切に表現できるようにすることに注力することが重要になると考えられる。

さらに、一般論ではあるが、連携の検討においては、地質環境調査と工学技術、地質環境調査と安全評価、工学技術と安全評価のそれぞれの分野間での連携にフォーカスし、それぞれの情報とのつながり方・つなげ方を具体化していくとともに、連携を実現可能な範囲でよりよいものとしていくために、連携を実施する状況（「特定の場を対象としない場合」と「特定の場を対象とする場合」等）やそこでの利用可能な情報の種類・量・質、ならびにその状況で求められる評価のレベル等も想定した現実性等に具体的に対応した検討としていくことも重要となる。さらに、それぞれの分野間での連携に加えて、3 分野での全体連携についても、その整合性を図る、あるいは特定の分野間の連携がボトルネックにならないように、全体として底上げしていくことなどにも留意していくことも望まれる。

(3) 今後の課題

平成 29 年度は、沿岸部固有の特徴等を踏まえた安全評価の枠組みの検討の一環として、沿岸部固有の特徴等を具体的に評価していくための評価シナリオ・解析ケースの設定とそれらの具体的な評価方法について、その中で特に留意すべき事項と考えられる「評価に必要な情報」と「評価の目的・内容」との関係について、地下水移行シナリオの評価に対する基本的な枠組み（図 4.2-1）との関係、さらには他分野（地質環境調査等）で取得・整理される情報とのつながり方・つなげ方、などにも着目した分析・整理の考え方を事例とともに示した。これは、今後継続して進めて行く必要がある分野間の連携のあり方等についての議論のきっかけとなることが期待される。

今後は、評価シナリオ・解析ケース設定の方法論や試行についての検討を拡充しつつ、それ

ら評価で必要となる情報や利用可能な情報に対応した評価方法（モデル化方法等）の分析・整備、利用可能な情報に応じた評価の全体的なイメージの例示、などを継続的・段階的に進めて行くことが必要である。また、それら検討への反映も目指しながら、今後は特に、評価の範囲や質の向上のための他分野との連携のあり方や方法を検討・整理していくことが重要になると考えられる。

(4) 参考文献

Crawford, J., Bedrock Kd data and uncertainty assessment for application in SR-Site geosphere transport calculations, SKB R-10-48, Svensk Kärnbränslehantering AB, 242p, 2010.

産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書, 2017.

4.3 核種移行モデル・パラメータ整備および影響評価

4.3.1 沿岸部の特徴を考慮した核種移行評価手法の整備

(1) 背景と目的

沿岸部には、降水起源の淡水系地下水と海水などを起源とする海水系地下水が分布する。沿岸部の地下水環境（地下水流動、地下水の化学組成など）は、陸域の動水勾配を起動力とする淡水系地下水の流動と、塩水（海水）と淡水の密度差を起動力とする流動、移流分散による塩分の移動などの複数の現象に依存して変化する。また、断層や地質構造によって透水特性が不均質に分布する場合には、地下水環境はその影響を受ける。さらに、長期的には、約 12 万年周期で変動すると考えられる海進・海退や、隆起・侵食などの地形変化の影響を受けて地下水環境が変化する。そのため、沿岸部を対象とした核種移行評価においては、海水準変動や隆起・侵食などの地形変化による地下水環境の変化を適切に評価する手法とともに、そのように地下水環境が変遷する環境下での核種移行の挙動を評価する手法などの技術の整備を進めていく必要がある。

沿岸部を対象とした地下水環境の評価については、これまでにボーリング孔などを用いた実際の地質環境調査と数値解析を組み合わせた評価手法が示されている（例えば、今井ほか、2009；産業技術総合研究所、2012；電力中央研究所、2013）。また、沿岸部を対象とした核種移行評価手法も整備が進められている（原子力発電環境整備機構、2011a；2011b）。いずれのケースも、地下水環境の評価には Dtransu-3D・EL（菱谷ほか、1999）や SEAWAT（Guo and Langevi, 2002）などの多孔質媒体を仮定した数値モデルが適用されている。一方で、フォルスマルク（スウェーデン）やオルキルト（フィンランド）などの結晶質岩を対象とした外国の処分場候補地においては、亀裂中の地下水流動に伴う塩分の移動とマトリクス部での拡散による塩分の移動を連成させた数値モデルを用いた地下水環境評価が行われている（SKB, 2011; Posiva, 2013）。このモデルは、概念的に、結晶質岩に代表される亀裂性媒体を対象とした核種移行評価で用いられる亀裂中の移流分散と亀裂に接する岩石マトリクス部での拡散収着を考慮した核種移行モデルと同様である。このような亀裂とマトリクス部による二重空隙モデルにおける溶質の移行挙動は、マトリクス拡散を考慮しない多孔質媒体を仮定した単一空隙モデルの場合に比べて、より複雑かつ緩慢である可能性がある。例えば図 4.3-1 に示すように、亀裂中の溶質の移動は移流分散による移動でその速度は相対的に速いものの、マトリクス部は拡散による移動で溶質の速度が相対的に遅く、かつ間隙率が大きいために溶質を保持する容量が大きくなる。そのため、マトリクス部における塩分の保持により、海進・海退による汀線の移動が地下水中の塩分濃度分布の変動に与える影響が小さくなり、核種移行評価に用いられる地下水環境条件の変動が抑制されると考えられる。以上の観点から、沿岸部における亀裂性媒体を対象に、海水準変動や隆起・侵食による地下水環境変化を評価する際に、亀裂中の地下水流動とそれに伴う塩分の移流分散による移動に加えて、亀裂に接する岩石マトリクス部が拡散により塩分を留める効果を考慮した地下水環境評価手法の整備を進めてきた。

平成 28 年度には、①数十キロメートルの広域スケール、②坑道周辺ブロックスケール（200 m×200 m×200 m 程度の領域）、の二つのスケールを対象にそれぞれ地下水環境評価手法の整備に着手した（産業技術総合研究所ほか、2017）。

- ・ ①の広域スケールは、海進・海退や隆起・侵食などの地形変化に起因した海水準変動が地下水環境に与える影響を評価するために必要な領域で、地下水の涵養域である山地から海洋底下に至る幅広いスケールが検討の対象となる。そのため、この検討に用いた数値解析モデルは、広域スケールを対象とした大規模計算にも適用できるように、亀裂ネットワークモデルを等価な多孔質媒体に変換し、かつマトリクス部での塩分の拡散挙動を解析解に

より評価する近似的な手法（Hoch and Jackson, 2004）を用いた。また、特定のサイトを対象としない段階における評価であること、かつ解析の簡略化のために、鉛直二次元断面の地形モデルを設定した。二重空隙モデルの特徴を考慮した地下水環境評価解析の結果、塩水中の塩分がマトリクス部を拡散により移動する効果を考慮した場合は、それを考慮しない場合と大きく異なり、マトリクス部の拡散と相対的に大きな間隙率により塩分を留める効果が大きく、海水準変動による地下水環境の変化が小さいことが示された。

- ②のブロックスケールについては、①の広域スケールで用いた近似的な手法ではなく、亀裂部の移流分散とマトリクス部での拡散による塩分の移動を直接的に解くことが可能な手法として、三次元の亀裂のネットワーク構造を基に亀裂部とマトリクス部のそれぞれを面要素と体積要素の有限要素に離散化した二重空隙モデルを用いることのできる地下水流動・物質移動解析コードHydroGeoSphere（Aquanty, 2015）の適用を試みた。その結果、評価可能なスケールは200 m×200 m×200 m程度のブロックスケールに限定されるものの、HydroGeoSphereを用いて亀裂部の移流分散とマトリクス部での拡散を考慮した塩分等の物質移動の解析が可能であることを示した。

平成 29 年度は、引き続き①広域スケールと②ブロックスケールの二つのスケールを対象とした地下水環境評価手法の整備を進めた。

- ①広域スケールの検討については、拡散により塩分をマトリクス部に留める効果が亀裂内の塩水と淡水の置換挙動に及ぼす影響が顕在化する条件を抽出するために、地質環境条件を表すパラメータ値の変化に対する影響を検討した。この検討の結果については、後述の「(2) 1) 広域スケールの沿岸部を対象とした地下水環境変化の評価手法の整備」に示す。
- ②ブロックスケールについては、三次元の亀裂のネットワーク構造を基に亀裂部の移流分散とマトリクス部での拡散による塩分の移動を直接的に解くモデルを用いて、海進・海退による地下水環境（地下水流速や流向、地下水中の塩分濃度）の変化が核種移行挙動に及ぼす影響について、塩分濃度に依存した核種の分配係数の変化に着目した方法を検討した。この結果については、後述の「(2) 2) 坑道周辺のブロックスケールを対象とした三次元亀裂ネットワークモデルを用いた地下水環境変化の評価手法の整備」に示す。

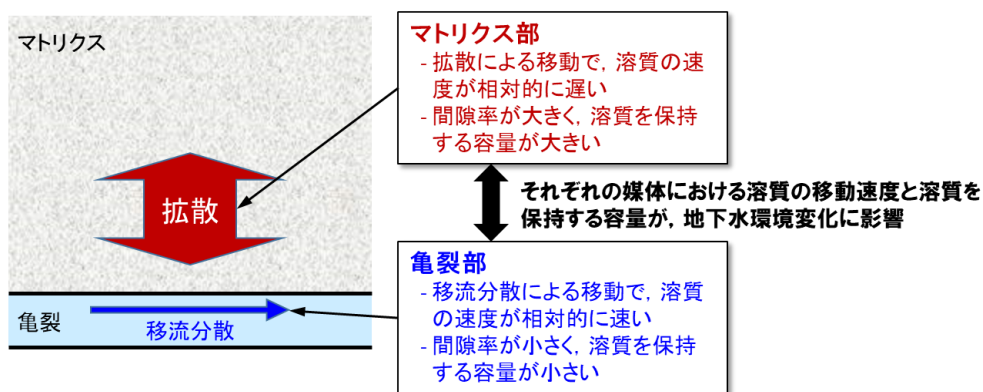


図 4.3-1 亀裂とマトリクス部による二重空隙モデル概念図

(2) 実施内容

1) 広域スケールの沿岸部を対象とした地下水環境変化の評価手法の整備

広域スケールの沿岸部を対象とした地下水環境変化の検討には、平成 28 年度の検討（産業技術総合研究所ほか、2017）に引き続き、わが国の沿岸部の地形モデルの例として日本原子力研究開発機構（2016）が設定した鉛直二次元の地形モデル（図 4.3-2）を用いた。水理地質構造モデルには結晶質岩などの亀裂性媒体の特徴を表す亀裂ネットワークモデルを適用し、そのパラメータ値には「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ—」（以下、「第 2 次取りまとめ」という。）（核燃料サイクル開発機構, 1999 ; 澤田ほか, 1999）におけるレファレンスケース設定で検討した値（表 4.3-1）を用いた。

岩石マトリクス部における拡散による塩分の移動を考慮可能な数値解析コード ConnectFlow（Amec Foster Wheeler, 2016）を用いて地下水流動、塩分濃度分布の変化を解析により求めた。その際、表 4.3-1 に基づき構築した亀裂のネットワークモデルを、それと等価な透水性と有効間隙率を有する多孔質媒体に変換するとともに、マトリクス拡散に寄与する面積とマトリクス拡散深さなどのパラメータ値の平均値などを算出した（表 4.3-2）。そして、亀裂中の水位差ならびに淡水と塩水の密度差に起因した地下水流動と移流分散による塩分の移動に加えて、マトリクス部での塩分の拡散による移動を考慮した地下水流動解析を行った。マトリクス部での塩分の拡散については、多孔質媒体に近似した有限要素モデルに対してマトリクス部における拡散方程式の解析解（Hoch and Jackson, 2004）を適用している。地下水流動解析の境界条件を表 4.3-3 に示す。海水準は 12 万年周期（海退：10.8 万年、海進：1.2 万年）で 125 m の範囲で移動すると仮定した。

拡散により塩分をマトリクス部に留める効果が亀裂内の塩水と淡水の置換挙動に及ぼす影響の大きさは、地質環境条件におけるパラメータ値の大小とその組み合わせに依存すると考えられる。例えば、地形勾配や透水係数などの亀裂内の地下水流動に関するパラメータ、マトリクス部の有効間隙率や拡散深さなどのマトリクス拡散に関するパラメータなどの組み合わせが考えられる。本検討では、地形勾配、透水係数、マトリクス部有効間隙率、拡散深さなどの値の変化が地下環境解析結果に与える影響を検討した。これらのパラメータのうち透水係数の変化に着目した感度解析結果の例を図 4.3-3 に示す。透水係数はその値が地域や地質条件等によって大きく異なり、その違いは数桁と幅広く分布すると考えられる。そこで、表 4.3-2 に記された等価透水係数の値を基準に、1/10 倍、10 倍、100 倍と透水係数を変化させて、それぞれマトリクス拡散を考慮したケース、考慮しないケースで海進・海退を考慮した地下水流動解析を実施した。図 4.3-3 には、初期条件とした淡水と塩水の濃度分布と、最大海退時（10.8 万年後）の淡水と塩水の濃度分布を解析ケースごとに図示している。この結果から、透水係数が小さくなるにつれて、マトリクス拡散を考慮したケースと考慮しないケースの淡水と塩水の分布の違いが顕著になることがわかる。言い換えると、透水係数が小さくなれば、拡散によりマトリクス部に塩分を留める効果が亀裂内の塩水と淡水の置換挙動に及ぼす影響が顕在化することがわかる。一方で、透水係数が大きくなると、マトリクス拡散を考慮したケースと考慮しないケースで違いが不明確になる結果となった。透水係数が大きくなると亀裂部を流れる地下水の流量が多く、地下水流速が速くなり、塩分の移流による移行率が大きくなる。この亀裂部の塩分の移行率が亀裂部とマトリクス部間における塩分の拡散による移行率に比べて極端に大きくなると、媒体全体の塩分移動挙動が亀裂部の塩分の移行率に大きく依存するようになり、塩分をマトリクス部に留める効果の影響が相対的に小さくなると考えられる。この関係は、ダムケラー数を用いて説明することができる。ダムケラー数 DaI （Damköhler number）は、亀裂内の移流と亀裂に接するマトリクス部での拡散という異なる

る移行プロセスが支配的な媒体が隣接する系において、どちらの媒体の移動プロセスが全体の物質移動を支配するかを分析する指標として次式で表される（例えば、Haggerty and Gorelick, 1995; Holt., 1997）。

$$DaI = (\beta + 1) \frac{BD_a L}{d^2 v}$$

ここで、

β : 二つの媒体の溶質の保有率比（定常状態では移流媒体の間隙率に対する拡散媒体の間隙率の比に近似できる）、

B : 拡散媒体の形状に関する変数（拡散モデルに対する 1 次近似では常に 1 以上が与えられる、球状モデルの場合には π 、層状モデルの場合には $\pi/4$ ）、

D_a : みかけの拡散係数、

d : 拡散媒体の厚さ、

L : 移流による移行距離、

V : 移流場の地下水流速（=透水係数×動水勾配/移流場の有効間隙率）、

である。すなわち、 DaI は、拡散媒体と移流媒体間の溶質を保有する間隙率の比、拡散媒体と移流媒体間の拡散による移行率を表す係数 ($B Da/d^2$) と移流媒体中の移行率の逆数 (L/v) の積であらわされる指標で、その大小により拡散媒体と移流媒体のどちらの媒体での移動プロセスが全体の物質移動を支配しているのかを分析することができる。Haggerty and Gorelick (1995) や Holt (1997) によると、 DaI が約 100 より大きな値の場合には拡散が支配的になり拡散媒体での近似が可能で、逆に、約 0.01 より小さい値の場合には移流が支配的となり移流媒体での近似が可能とされている。また、 DaI が 0.01 から 100 の範囲に分布する場合には、移流と拡散の両方の媒体の移行プロセスの影響が現れる。表 4.3-2 のパラメータ値に基づき、上記の式を用いて、地下水流速 v に影響を与える透水係数や動水勾配、マトリクス部での拡散に影響を与えるマトリクス部のみかけの拡散係数の値の変化が DaI に与える影響範囲を図 4.3-4 に示す。動水勾配は、図 4.3-2 の地形モデルの陸側における地形勾配の値 (0.018) を参考に、0.1、0.01、0.001 の 3 ケースについて検討した。図 4.3-4(a) の結果から、透水係数が大きくなると DaI が小さくなり、動水勾配 0.1 のケースの場合、透水係数がおよそ 10^{-7} m/s より大きくなると DaI が 0.01 以下となり移流が支配的となる。この関係を使うと、図 4.3-3 に示した結果は、透水係数を 100 倍 (1.7×10^{-7} m/s) にしたケースでは、塩水と淡水の境界付近で DaI が 0.01 より小さく移流が支配的となるため、マトリクス拡散を考慮したケースとマトリクス拡散を考慮しないケースとで塩水と淡水の分布が同様の結果となったと説明できる。以上のことから、透水係数や動水勾配が極端に大きく DaI が 0.01 以下の場合、亀裂部とマトリクス部間での拡散による移行率に比べて、亀裂部で移流による塩分の移行率が極端に大きくなる。そのため、亀裂部で移流による塩分の移行に比べて亀裂部とマトリクス部間の拡散の効果が相対的に小さくなり、その効果を見捨てた亀裂内の移流分散モデルで地下水流動評価結果を近似することができる。一方で、みかけの拡散係数のばらつきの幅は、透水係数のばらつきの幅に比べて一般に小さいが、数桁の幅のばらつきを考慮しても DaI は 0.01 より大きな値に分布する、すなわち移流媒体と拡散媒体の両方の影響が現れることを示す結果となった（図 4.3-4 (b) 参照）

以上の結果から、沿岸部において、極端に大きな地下水流速が発現するような高い透水係数や動水勾配の場合を除いて、多くの場合には、拡散により塩分をマトリクス部へ留める効果が亀裂内の塩水と淡水の置換挙動に及ぼす影響が有意であることが示された。そのため、亀裂性岩盤を対象とした沿岸部における地下水環境の評価において、多くの場合には亀裂部

における移流分散だけではなくマトリクス部での拡散による塩分の移動を考慮した評価手法を適切に用いる必要があると考えられる。

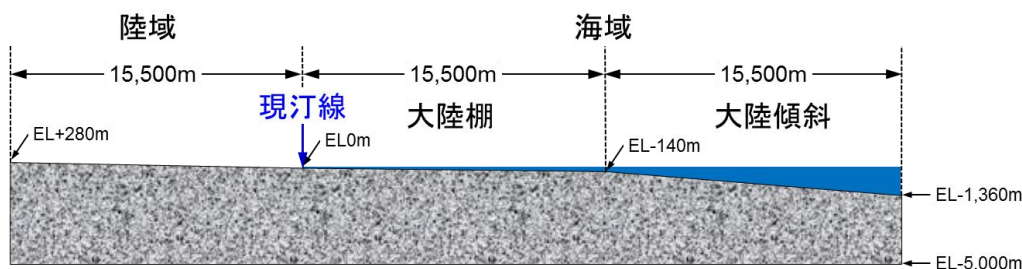


図 4.3-2 広域スケールの地形を考慮した鉛直二次元の地形モデル概念図
(産業技術総合研究所ほか, 2017)

表 4.3-1 亀裂ネットワークモデルの作成に用いたパラメータ値
(核燃料サイクル開発機構, 1999 ; 澤田ほか, 1999)

パラメータ	設定値	備考
亀裂方位*	2セット (フィッシャー分布) セット1: 中心方位(tr, pl)=(0, 0), フィッシャー係数 $\kappa=10$ セット2: 中心方位 (tr, pl) = (90, 0) , フィッシャー係数 $\kappa=10$	方位は亀裂面の法線方向 (pole) の北からの時計 回り角度 (tr) と水平面か らの傾き (pl) で表す
三次元亀裂密度, P_{32} (m^2/m^3)	0.8	二つの亀裂セットの和
亀裂半径 (m)	べき乗分布 べき乗数: 3、最小半径 1	半径 7 m~300 m をモデル 化
透水量係数 (m^2/s)	対数正規分布 対数平均値: -8.99 対数標準偏差: 1.07	深度依存性を考慮せず、釜石 鉱山で測定されたデータ から求めた透水量係数分 布を適用
亀裂開口幅 (m)	透水量係数 T に相関 開口幅 = $2 \times T^{0.5}$	

* : 二次元鉛直断面モデルは東西方向と仮定

表 4.3-2 亀裂ネットワークモデルから算出した等価な多孔質媒体のパラメータ値

パラメータ	設定値	備考
等価透水係数	1.7×10^{-9} m/s	亀裂ネットワークモデルの統計的な 10 個のリアライゼーションの平均値
水理学的有効間隙率	0.0057%	亀裂開口部の体積のみを考慮した、地下水の移行に寄与する間隙の比率
単位体積当たりのマトリクス拡散寄与面積	0.84 m ² /m ³	亀裂ネットワークモデルの P ₃₂ の 2 倍
マトリクス拡散深さ	1.2 m	亀裂の平均間隔の半分
実効拡散係数	2.5×10^{-12} m ² /s	第 2 次とりまとめレファレンスケース（核燃料サイクル開発機構, 1999）より（温度補正なし）
マトリクス部の有効間隙率	2%	第 2 次とりまとめレファレンスケース（核燃料サイクル開発機構, 1999）より

表 4.3-3 地下水流動解析の境界条件設定値

	水頭・流量条件	濃度条件
陸域	地表面でその高さ水頭値で固定	流入時：塩分濃度 0 流出時：流出した地下水の塩分濃度
海域	海底面で海の深さに対応した水頭値で固定（海水の密度 1,025 kg/m ³ ）	流入時：海水の塩分濃度 流出時：流出した地下水の塩分濃度
側方・底部	不透水	塩分の流出入無し

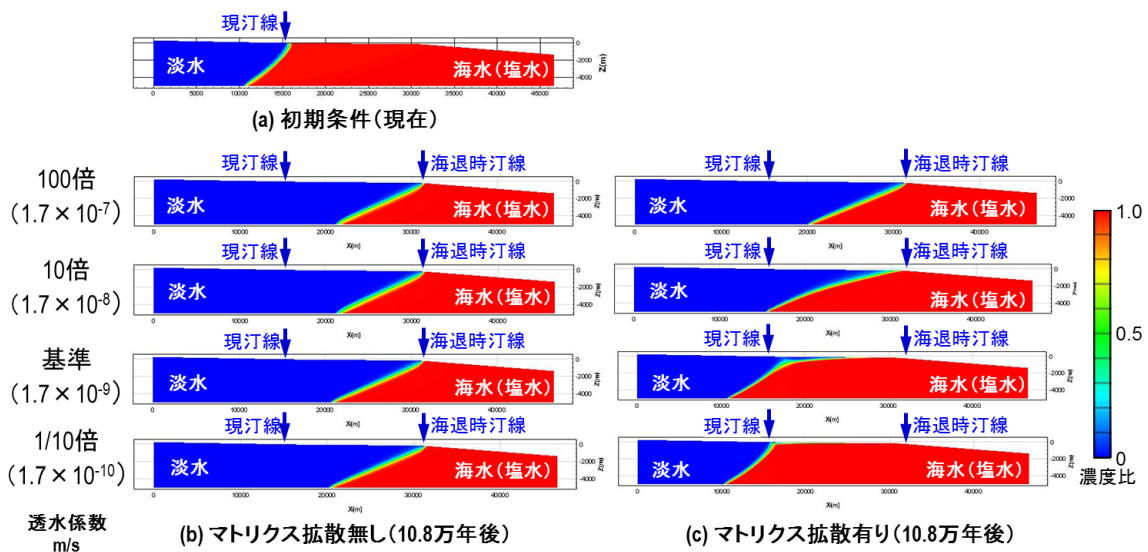
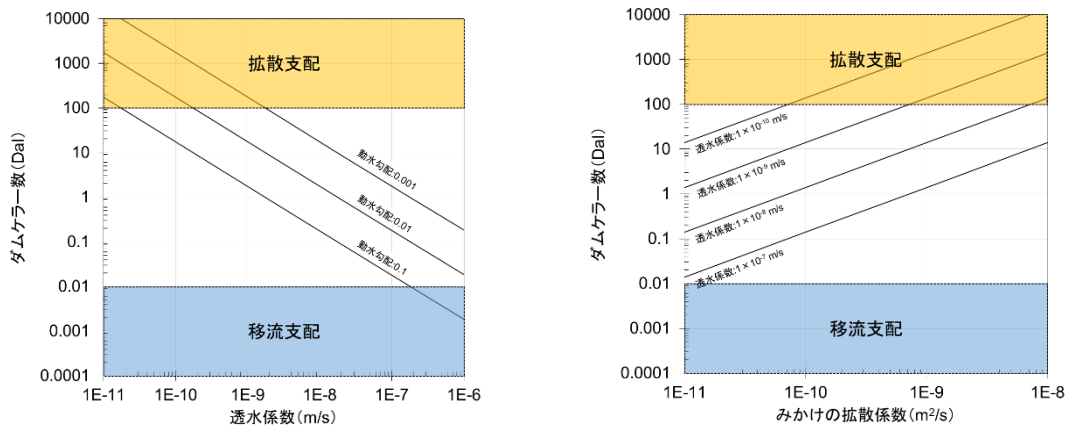


図 4.3-3 マトリクス部での拡散により塩分を留める効果が亀裂内の塩水と淡水の置換挙動に及ぼす影響が検討の例

(10.8 万年後の最大海退時における淡水と塩水の濃度分布の比較)



(a) 透水係数の変化が DaI に与える影響 (b) みかけの拡散係数の変化が DaI に与える影響

図 4.3-4 地下水流速やマトリクス拡散に関連するパラメータ値が DaI に与える影響の例

2) 坑道周辺のブロックスケールを対象とした三次元亀裂ネットワークモデルを用いた地下水環境変化の評価手法の整備

本検討では、処分坑道周辺の 200 m×200 m×200 m のブロックスケールを対象に、三次元の亀裂のネットワーク構造を基に亀裂部とマトリクス部のそれぞれを有限要素に離散化した二重空隙モデルを用いて直接的にモデル化し、海進・海退による地下水環境（地下水流速や流向、地下水中の塩分濃度）の変化を解析するとともに、そのような地下水環境の変化が核種移行挙動に及ぼす影響として、塩分濃度に依存した核種の分配係数の変化に着目した方法を検討した。

二重空隙モデルの構築には、平成 28 年度の検討（産業技術総合研究所ほか, 2017）に引き続き、面要素と体積要素を同時に扱うことが可能な地下水流動・物質移動解析コード HydroGeoSphere (Aquanty, 2015) を用いた。表 4.3-1 のパラメータ値に基づき亀裂ネットワークモデルを 200 m×200 m×200 m の立方体領域に作成し、HydroGeoSphere での解析に適用するために亀裂部とマトリクス部をそれぞれ面要素と体積要素で離散化した有限要素を作成した（図 4.3-5 参照）。本検討で用いた地下水流動解析と物質移動解析の境界条件の概念を図 4.3-6 に、設定値などの解析の諸条件を表 4.3-4 にまとめた。200 m×200 m×200 m の立方体領域全体を塩水で満たした状態を初期条件に設定し、一定の方向に動水勾配 (0.01) を固定値として設定し、モデルに淡水を浸透させた。また、モデル中央部に処分坑道を模擬した 100 m の線要素を配置し、その線要素に一定濃度の物質を固定した境界条件に設定することで、塩水と淡水を考慮した地下水流動解析に併せた物質移動解析を実施した。物質移動解析の対象物質はマトリクス部で収着特性を有し、その分配係数 K_d が淡水環境と塩水環境で異なることを仮定した。例えば、降水系地下水と海水系地下水で K_d が変化する核種として Cs が挙げられ、第 2 次取りまとめの地質環境変更ケースでは降水系地下水のケースで K_d として 0.05 m³/kg が、海水系地下水のケースで K_d として 0.005 m³/kg が設定されている。本検討でも、第 2 次取りまとめの Cs の例を参考に、塩水条件下では 0.005 m³/kg を、淡水条件下では 0.05 m³/kg を K_d の値に設定し、塩分濃度が変遷している過程ではマトリクス部の塩分濃度比 s (-) に応じて次式により K_d が変化すると仮定して、物質移動解析を実施した。

$$K_d = -0.045s + 0.05$$

併せて、 K_d の値が物質移動挙動に与える影響を分析するために、 K_d が一定で、 $0 \text{ m}^3/\text{kg}$ の場合、 $0.005 \text{ m}^3/\text{kg}$ の場合、 $0.05 \text{ m}^3/\text{kg}$ の場合についても解析を実施した。

塩水が満たされた状態から淡水を一定の動水勾配で浸透させた地下水流動解析の結果の例を図 4.3-7(a)と(b)に示す。これらの図では亀裂部とマトリクス部のそれぞれについて、塩分濃度比の時間変化を表す。初期は塩水で満たされていた 200 m のブロックの亀裂部とマトリクス部において、 10 万年までには淡水に置換される様子が示されている。また、図 4.3-8 に、地下水流動解析の結果である下流側境界を通過する地下水中の塩分濃度比と、物質移動解析の結果である下流側境界へ破過する物質の濃度比の時間変化を示す。同図には、物質移動解析の結果については、マトリクス部の塩分濃度比に比例して K_d が $0.005 \text{ kg}/\text{m}^3$ (塩水条件) から $0.05 \text{ kg}/\text{m}^3$ (淡水条件) に変化するケース、 K_d 値が一定で $0 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $0.005 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $0.05 \text{ m}^3/\text{kg}$ のそれぞれのケースの解析結果を示した。地下水流動解析の結果から、初期の塩水は約 7.4 万年で塩分濃度比が 0.01 以下になり、ほぼ淡水に置換される。物質移動解析の結果については、 K_d 値が一定で $0 \text{ m}^3/\text{kg}$ のケースでは、破過した物質濃度比 C/C_0 が 0.99 以上となるのは約 7 万年であり、塩水が淡水に置換されるのとほぼ同様の時間スケールであった。その一方で、 K_d 値が $0.005 \text{ m}^3/\text{kg}$ 以上のケースでは、物質の破過が顕在化するのには塩水が淡水に置換される数万年という時間スケールより長く、地下水環境の変化が物質移動に与える影響として着目した塩水濃度比の変化に依存した K_d 値の変化が物質移動挙動に与える影響は、その物質移動の初期の時点に限定的となった。そのため、塩水濃度比に比例して分配係数を変化させたケースの物質移動の破過曲線は、一様に淡水条件での分配係数を設定したケースの破過曲線と同じ結果となった。以上の結果から、亀裂内の移流分散、マトリクス部での拡散による塩濃度変化の時間スケールと、マトリクス部での収着拡散で遅延される物質移動の時間スケールが極端に異なる場合、地下水環境変化(塩濃度変化→ K_d 値変化)が物質移動に与える影響が顕在化しない場合があることがわかった。これは、核種移行評価の簡単化(例えば、塩水と淡水が時間変化する複雑な環境下でも、移行特性については一様な淡水条件での設定が可能など)の根拠情報として利用できる可能性があり、本手法はそのような核種移行評価上の設定根拠を抽出するツールとしても活用できると考えられる。

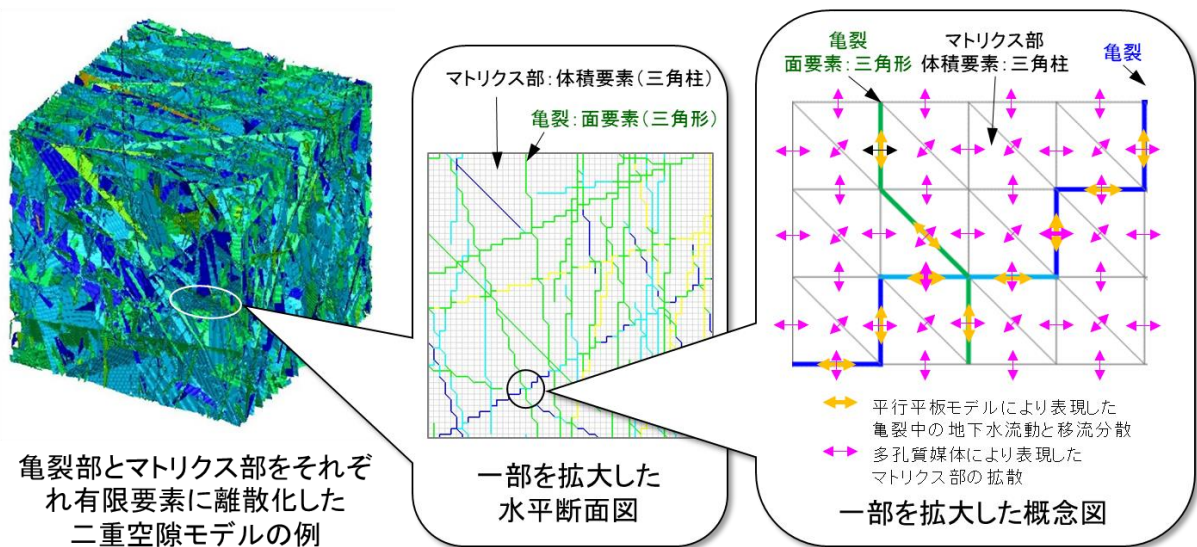


図 4.3-5 HydroGeoSphere を用いた亀裂とマトリクス部の二重空隙モデルの概念図
(産業技術総合研究所ほか, 2017)

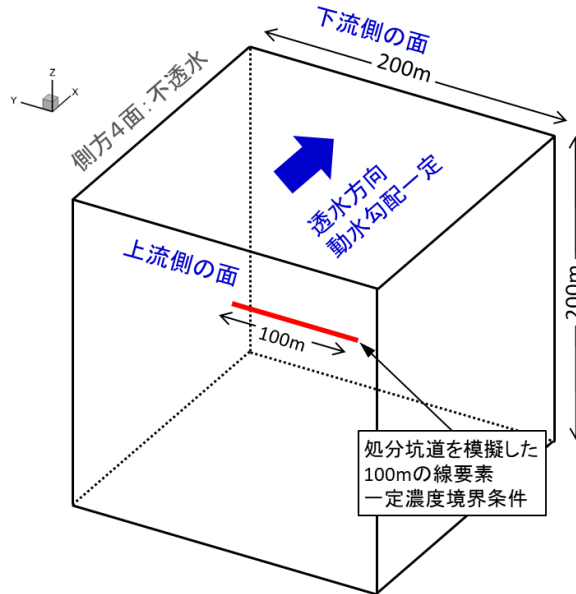


図 4.3-6 200 m スケールを対象とした地下水流動・物質移動解析の境界条件概念図

表 4.3-4 三次元亀裂ネットワークを対象とした地下水流動・物質移動解析の解析条件

			設定条件・値	備考
マトリクス部	透水係数		1×10^{-12} m/s	低透水の条件を設定
マトリクス部	実効拡散係数		2.5×10^{-12} m ² /s	
マトリクス部	有効間隙率		2%	
マトリクス部	分配係数 K_d		塩水条件下: 0.005 m ³ /kg 淡水条件下: 0.05 m ³ /kg	塩分濃度比に線形で 0.05~0.005を補間
地下水流動解析の境界条件	初期条件	濃度条件	亀裂とマトリクス部が全て一定濃度の塩水(海水)で満たされている条件	
	境界条件	上流側	水頭条件: 固定水頭* 濃度条件: 濃度 0 (淡水)	* 一定の動水勾配 0.01 を満たす固定水頭をそれぞれ設定
		下流側	水頭条件: 固定水頭* 濃度条件: 流出した地下水の塩分濃度	
物質移動解析の境界条件		処分坑道を模擬した線要素	濃度条件: 一定値で固定	
		下流側	濃度条件: 流出した地下水の物質濃度	

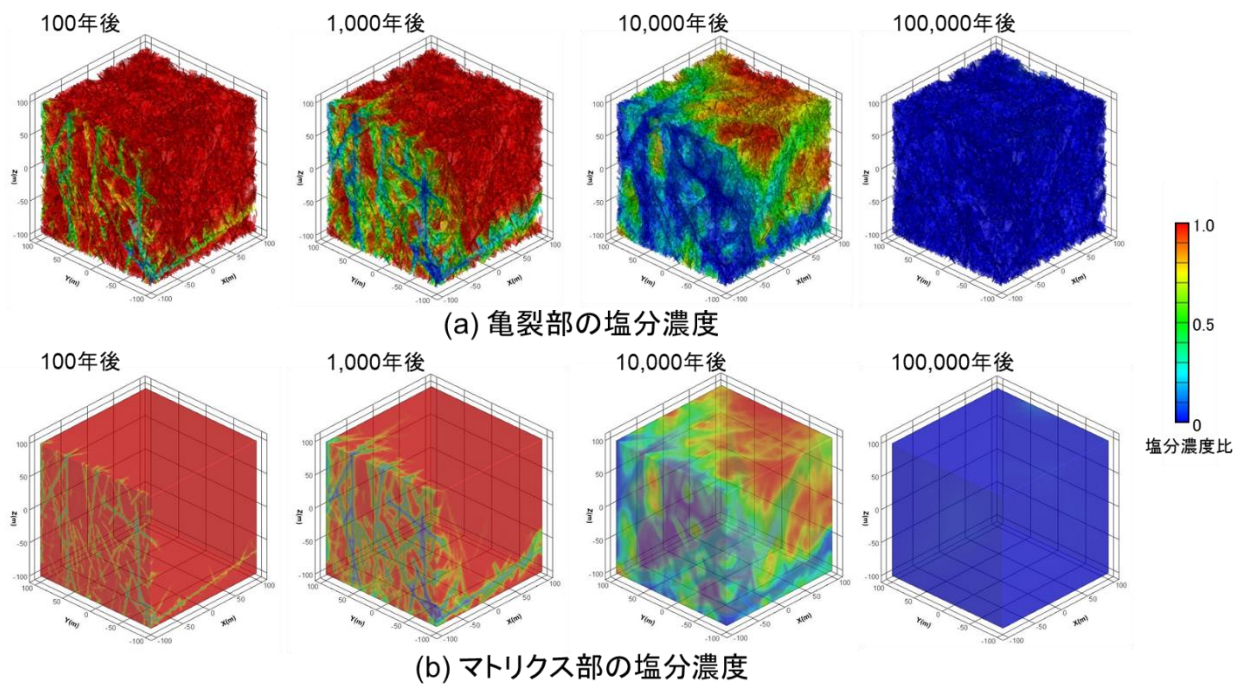


図 4.3-7 亀裂部とマトリクス部の塩分濃度比の時間変化

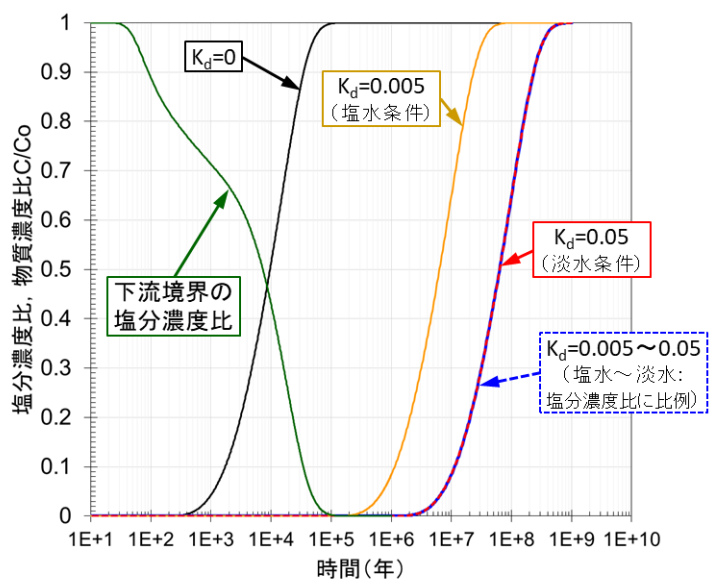


図 4.3-8 下流側境界における塩分濃度比と物質濃度比 C/C_0 の時間変化

(3) 今後の課題

沿岸部における地下水環境（地下水流動、地下水の化学組成など）を評価する手法の整備に向けて、平成 28 年度に継続して、海水準変動や隆起・侵食などの地形変化による地下水環境の変化を評価する手法と、地下水環境が変遷する環境下で核種移行挙動を評価する手法の整備に向けた検討を進めた。これら検討は、数十キロメートルの広域スケールおよび坑道周辺ブロックスケール（200 m×200 m×200 m 程度の領域）を対象に行った。

平成 29 年度の広域スケールを対象とした検討では、鉛直二次元の地形モデルを対象に、結晶質岩などの亀裂性媒体の特徴を考慮した水理地質構造を表現した数値解析モデルを構築し、

拡散により塩分をマトリクス部に留める効果が亀裂内の塩水と淡水の置換挙動に及ぼす影響が顕在化する条件を抽出するための検討を行った。その結果、沿岸部において、極端に大きな地下水流速が発現するような高い透水係数や動水勾配の場合を除いて、多くの場合には亀裂部における移流分散だけではなくマトリクス部での拡散による塩分の移動を考慮した評価手法を適切に用いる必要があることが示された。

今後は、平成 29 年度までに整備してきた広域スケールを対象とした評価手法を活用して、わが国の沿岸部を対象とした地下水環境評価解析の実施による処分場とその周辺の地下水環境の変遷に関する情報の蓄積、さらに、地下水環境の変遷の核種移行評価への具体的な反映方法の検討を進める。例えば、核種移行評価に必要な情報である処分場周辺の地下水流速や塩分濃度の経時変化、核種の移行経路の時空間的な変化やそれら移行経路に沿った地下水流速や塩分濃度などの様々な情報の抽出と、抽出された情報を地質環境の特徴に応じて類型化することによる核種移行解析のケースやモデル・パラメータの地質環境の特徴に応じたパターン化等について検討する。そして、それらの検討結果の、ブロックスケールを対象とした評価へ反映する方法についての検討を進める。

また、平成 29 年度のブロックスケールを対象とした検討では、地下水環境の変遷と併せて核種移行挙動を解析する手法整備として、三次元の亀裂のネットワーク構造を基に亀裂部とマトリクス部のそれぞれを有限要素に離散化した二重空隙モデルを用いて、海進・海退による地下水環境（地下水流速や流向、地下水中の塩分濃度）の変化を解析するとともに、そのような地下水環境の変化が核種移行挙動に及ぼす影響として、Cs のように塩分濃度に依存して分配係数が変化する場合について検討した。その結果、地下水環境として塩分濃度の変化に起因して物質の分配係数の変化が生じたとしても、それが物質移動挙動に及ぼす影響が顕在化しない場合があることを示した。これは、核種移行評価手法の単純化（例えば、塩水と淡水が時間変化する複雑な環境下でも、移行特性については一様な淡水条件での設定が可能など）の根拠情報として利用できる可能性があり、本手法はそのような核種移行評価上の設定根拠を抽出するツールとしても活用することができると考えられる。

今後は、平成 29 年度までに整備してきたブロックスケールを対象とした評価手法を活用して、地下水環境（地下水流速や流向、地下水中の塩分濃度）の変化が物質の移動に与える影響についての評価事例の蓄積を進める。具体的には、広域スケールを対象とした地下水環境評価の結果から類型化した処分場周辺の地下水環境変遷のパターンを活用して、ブロックスケールの初期条件や境界条件の時間変化を設定する。そして、類型化した地下水環境変遷パターンごとに、ブロックスケールを対象とした地下水環境変化の解析と地下水環境の変化が物質移動挙動に与える影響の解析を行う。これらの検討を通じて、沿岸部における広域スケールを対象とした地下水環境の変遷の特徴の評価と坑道周辺のブロックスケールにおける核種移行評価とを適切につなげるための方法論や評価事例の例示を行う。

4.3.2 沿岸部の特徴を考慮した核種移行モデル・パラメータ整備

(1) 背景と目的

人工バリアである緩衝材（ベントナイト）や天然バリアである岩石中での核種の収着および拡散現象は、核種の移行遅延を支配する重要な現象である。これら核種移行現象は、間隙水水質やそこでの核種の溶存化学種等の様々な条件によって大きく変化する。そのため、安全評価の対象となる地質環境や地球化学条件、それらの変動も考慮して、核種移行現象を表現するための核種移行パラメータを、その不確実性とあわせて設定する必要がある。沿岸部の特徴を考慮した核種移行パラメータを評価するうえでは、沿岸部における地下水組成の特徴とその長期的な変遷による影響を適切に考慮することが重要となる。具体的には、地下水組成として海水等を起源とする海水系地下水を考慮する必要性に加え、長期の時間スケールにおいては、海進／海退や隆起・侵食などの地形変化の影響を受けて地下水組成が変化することを考慮する必要がある。

平成 27 年度は、国内外の安全評価において検討されてきたパラメータ設定手法およびモデル整備の現状を調査し、沿岸部の特徴を考慮したパラメータ設定の方法論と課題を検討した（産業技術総合研究所ほか, 2016）。その結果、これまでに最新のデータを集約したデータベースとメカニズム理解に基づく定量評価モデルおよび対象とする環境条件に応じてパラメータとその不確実性を設定するための手法（例えば、柴田ほか, 2015；日本原子力研究開発機構, 2015）が整備されてきており、沿岸部の条件が与えられれば、これらの手法によりパラメータを設定することが基本的には可能との見通しを得た。あわせて、評価の信頼性を向上させるうえでの課題として、沿岸部の特徴を考慮して信頼性の高いパラメータ設定を可能とするための多様な塩濃度条件でのデータおよびモデルの整備・拡充、沿岸部の地質・地下水環境の長期的な変遷をより現実的に考慮した収着・拡散パラメータ評価の方法論の高度化を抽出した。

平成 28 年度は、上記課題を踏まえて、収着パラメータ設定手法の調査・整備については、多様な核種の収着パラメータを対象として、塩濃度影響に関するデータ収集・分析、モデルの適用性評価を行うとともに、諸外国で検討されている方法論である地下水変遷モデルと連動したパラメータ設定評価手法の詳細調査を行った。加えて、沿岸部での処分を考える場合、海水系地下水による高塩濃度、セメント影響による高 pH 環境を考慮する必要があり、このような環境では海水系地下水成分である Ca のモンモリロナイトエッジサイトへの表面錯体反応による収着が顕在化し、この Ca の収着との競合が生じることで核種の収着・移行遅延に影響を及ぼす可能性がある。そのため、モデルの高度化と確証に資する収着モデル基礎データの取得・評価として、Ca と核種の競合の影響をモデルにより評価するために必要となる Ca のモンモリロナイトベーサルサイトに対する収着データを実験的に取得した（産業技術総合研究所ほか, 2017）。

平成 29 年度は、平成 28 年度の取り組みを継続し、収着パラメータ設定手法の整備・調査としては、2 価カチオンである Sr と Ni を対象にモデルの適用性に関する課題の抽出・改善に向けての検討および収着モデル基礎データの取得・評価としては、Ca のモンモリロナイトエッジサイトに対する K_c（錯生成定数）の取得を行うとともに、Ca と Sr の収着競合試験とモデルによる再現の検討を行った。

(2) 実施内容

1) 沿岸部での収着パラメータ設定手法の調査・整備

沿岸部の特徴を考慮した収着・拡散パラメータを評価するうえでは、沿岸部の地下水組成の特徴として塩濃度の影響とその長期的な変遷による影響とを適切に考慮する必要がある。

安全評価における収着・拡散パラメータ設定において従来から採用されてきたアプローチは、海水系地下水等の評価対象条件での収着・拡散データを取得・整備し、それぞれ条件に対する実測データに基づいてパラメータを設定する方法である（例えば、核燃料サイクル開発機構, 1999；電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構, 2005；館ほか, 2017）。これに関して、日本原子力研究開発機構では、多様な環境条件における収着・拡散パラメータの設定に資するため、これまでに緩衝材や岩石を対象として多様な環境条件において国内外で取得された実測データを、収着・拡散データベース（JAEA-SDB/DDB）として整備・拡充してきた（例えば、Tachi and Suyama, 2016；館・陶山, 2016）。しかしながら、実測データは限られることから、沿岸部評価で考慮すべき多様な環境条件やその長期変遷に対応した収着・拡散特性の変化を考慮したパラメータや不確実性の設定を可能とするためには、メカニズム理解に基づく現象論的収着・拡散モデルや条件変換手法が重要となる（例えば、産業技術総合研究所ほか, 2017；館ほか, 2017）。特に緩衝材については、多数の核種と環境条件に適用可能な収着・拡散モデル（収着モデルはイオン交換と表面錯体反応を考慮、拡散モデルについては静電的な相互作用を電気二重層モデルとして考慮）を構築してきており（例えば、Tachi et al., 2014a, 2014b；Tachi and Yotsuji, 2014）、幅広い地下水条件での収着・拡散パラメータの設定や変動の評価が可能となっている。また、岩石についても、幌延の深地層研究センターの泥岩（堆積岩）、スイスのグリムゼル地下試験場の花崗岩（結晶質岩）を対象に、主要核種を対象として、塩濃度依存性を含む収着データの整備やその影響メカニズムの把握による収着モデルの検討を進めてきている（例えば、Tachi et al., 2011, 2015, 2016）。さらに、上記の収着・拡散データベースや収着・拡散モデルなどを活用しつつ、対象とする条件に応じた収着・拡散パラメータおよびその不確実性を評価する手法の整備を進めてきており（例えば、館ほか, 2017）、沿岸部の条件が具体的に与えられれば、これらの手法に基づきパラメータを設定することが基本的には可能であると考えられる。

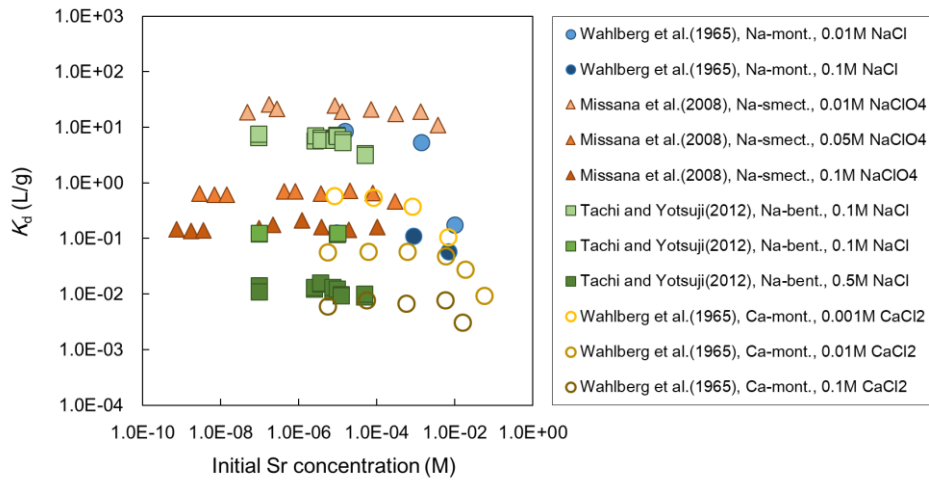
本事業において、沿岸部を対象とした収着・拡散パラメータの設定手法を検討するにあたって、緩衝材ベントナイトの収着パラメータをターゲットとして、主要な核種を対象とした既存の収着データの充足度およびこれらデータでの塩濃度影響の傾向性を調査・分析するとともに、収着モデルの適用性検討を進めている（産業技術総合研究所ほか, 2017）。平成 28 年度までに、最新の JAEA-SDB（Tachi and Suyama, 2016）をもとに、ベントナイトおよびその主成分のモンモリロナイト（Na 型および Ca 型）を対象として、主要核種の収着データ（Cs, Sr, Ni, Am/Eu 等）を抽出し、その塩濃度等に対する依存性を把握するとともに、これまでに整備してきた収着モデル（日本原子力研究開発機構, 2013；Tachi et al., 2014a）の適用性評価を進めた。平成 28 年度は、主要核種として 1 価カチオン（Cs）および 2 価カチオン（Ni）を選択し、ベントナイトおよびその主成分のモンモリロナイトへの収着モデルの適用性の評価を行った（産業技術総合研究所ほか, 2017）。

平成 29 年度は、平成 28 年度の Cs および Ni に対する収着モデル適用性評価から確認された、低 pH 領域における 2 価カチオンの収着データに対するイオン交換反応モデルによる評価結果に乖離があるという再現性の課題に着目した。ここで、2 価カチオンの核種として、処分評価対象であるとともに、既存の実測データが充実している Sr と Ni を選択した。Sr は主にイオン交換反応、Ni はイオン交換反応に加えて表面錯体形成反応が収着に寄与することが知られている。両核種に対して、収着挙動とモデルの適用性の評価を進めるとともに、適用性に関する課題の抽出・改善に向けての検討を進めた。

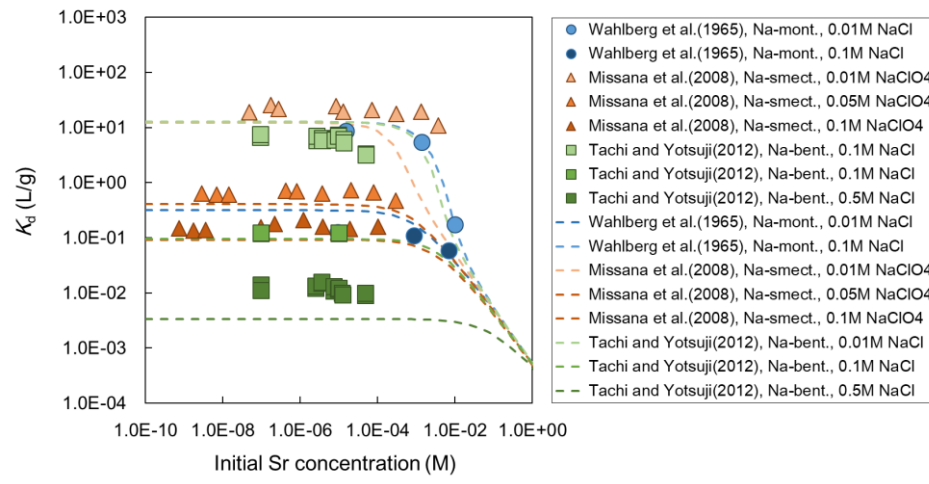
まず、Sr について、Na 型および Ca 型モンモリロナイトに対する収着を塩濃度および Sr 濃度をパラメータとして系統的にデータ取得が取得された三つの文献データ（Wahlberg et al., 1965；Missana et al., 2008；Tachi and Yotsuji, 2012）を図 4.3-9(a)に示す。これらのデ

ータは、いずれも中性の pH 条件における値である。一般に、粘土鉱物への核種の収着は、ベーサルサイトにおけるイオン交換反応とエッジサイトにおける表面錯体形成反応により説明される。イオン交換反応はベーサルサイトの永久荷電に対する静電的な収着であり、塩濃度の影響を受ける。一方、表面錯体形成反応はエッジサイトの変異荷電に対する収着であり、pH の影響を受ける。Sr では塩濃度の上昇に伴って K_d が低下する明瞭な塩濃度依存性が確認でき、これは平成 28 年度に実施した Cs へのイオン交換モデルの適用性評価の場合と同様である。この傾向は、モデルにより Na 型および Ca 型ともに塩濃度依存性をほぼ再現することができた（ただし、Na 型・0.5 M NaCl 条件などの一部の条件では数値的には実測値とやや乖離が見られた）（図 4.3-9(b), (c)）。これらの結果から、中性の pH 条件における Sr の収着は、イオン交換反応が支配的であることがわかる。また、Cs では低 Cs 濃度領域での濃度依存性がみられ、ベーサルサイトでのイオン交換反応に加えて複数の収着サイトを考慮する必要があったが、Sr の収着に濃度依存性は見られず、1 サイトにおけるイオン交換反応で説明できることが確認された。

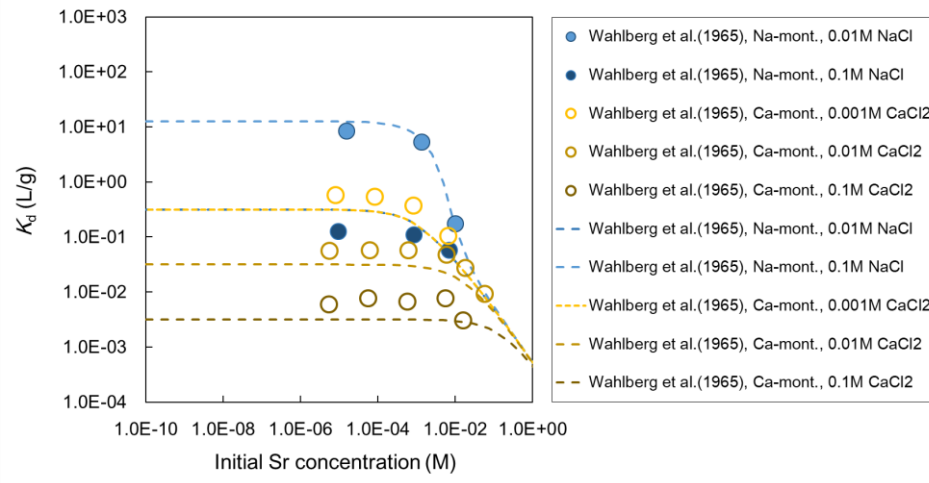
次に、同じ 2 価カチオンである Ni について、塩濃度および pH 依存性に着目して系統的なデータ取得が実施された三つの文献データ(Baeyens and Bradbury, 1997 ; Bradbury and Baeyens, 1997 ; Tertre et al., 2005)を図 4.3-10(a)に示す。低 pH 領域ではイオン交換反応が支配的であり、塩濃度の上昇に伴って K_d が低下する明瞭な塩濃度依存性が確認できる。一方で、pH 6 以上の領域では、pH の上昇に伴う K_d の上昇傾向が塩濃度やモンモリロナイトの型に依らず共通的に確認できる。これは、中性からアルカリ性における Ni の収着は、エッジサイトに対する表面錯体形成反応が支配的な反応であることを意味している。この pH 領域では、塩濃度および Na 型と Ca 型の違いに依らずモデルにより結果を良好に再現できていることから、Ni の表面錯体形成反応に対する塩濃度およびモンモリロナイトの型の影響は大きくないことが確認された（図 4.3-10(c)）。Ni の K_d の塩濃度と pH に対する依存性は、モデルによって全体の傾向性についてはある程度説明可能である。しかしながら、Sr の場合と同様に、低 pH 領域におけるイオン交換反応の塩濃度依存性を十分に再現できていない場合もあり（図 4.3-10(b)）、今後引き続き調査を進めていく必要があると考えられる。



(a) JAEA-SDB から抽出したデータ

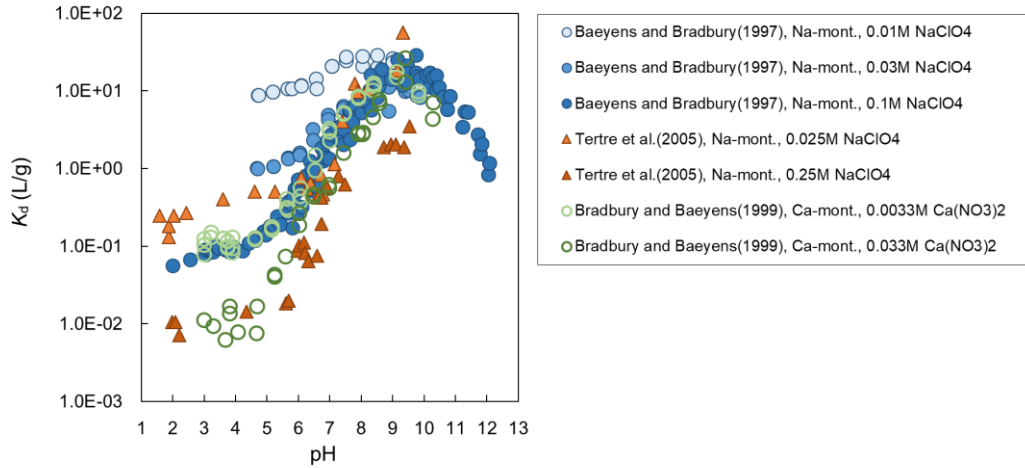


(b) 異なる塩濃度における Na 型モンモリロナイトへの収着の比較

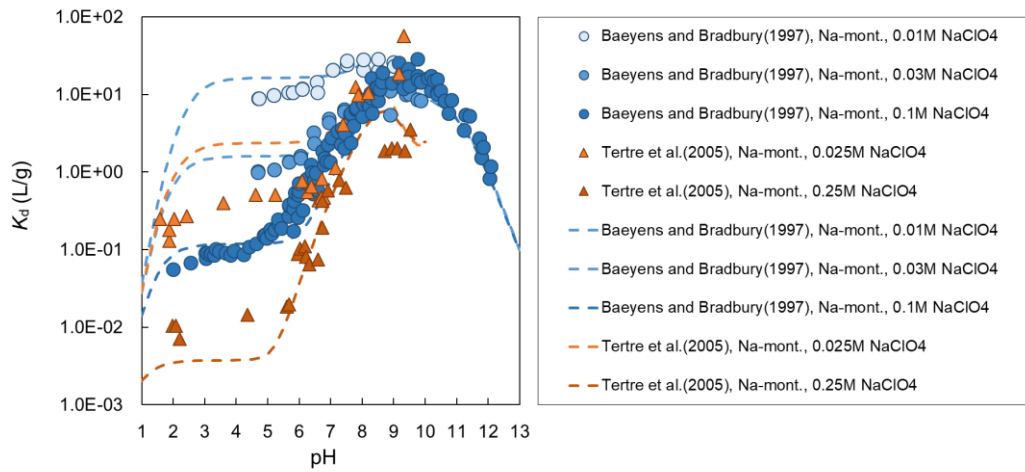


(c) Na 型および Ca 型モンモリロナイトへの収着の比較

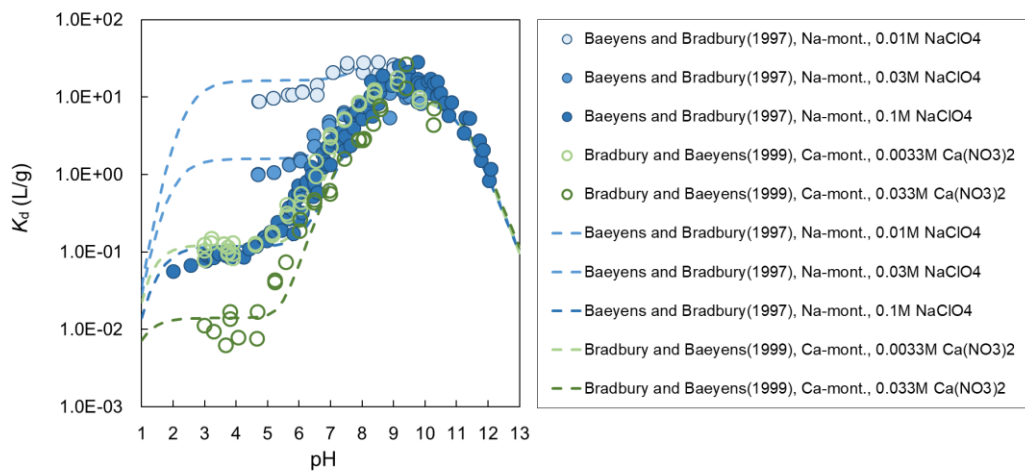
図 4.3-9 モンモリロナイトへの Sr の収着データおよびモデルの適用性の評価結果
(破線はモデルによるフィットを表す)



(a) JAEA-SDB から抽出したデータ



(b) 異なる塩濃度における Na 型モンモリロナイトへの収着の比較



(c) Na 型および Ca 型モンモリロナイトへの収着の比較

図 4.3-10 モンモリロナイトへの Ni の収着データおよびモデルの適用性の評価結果 (破線はモデルによるフィットを表す)

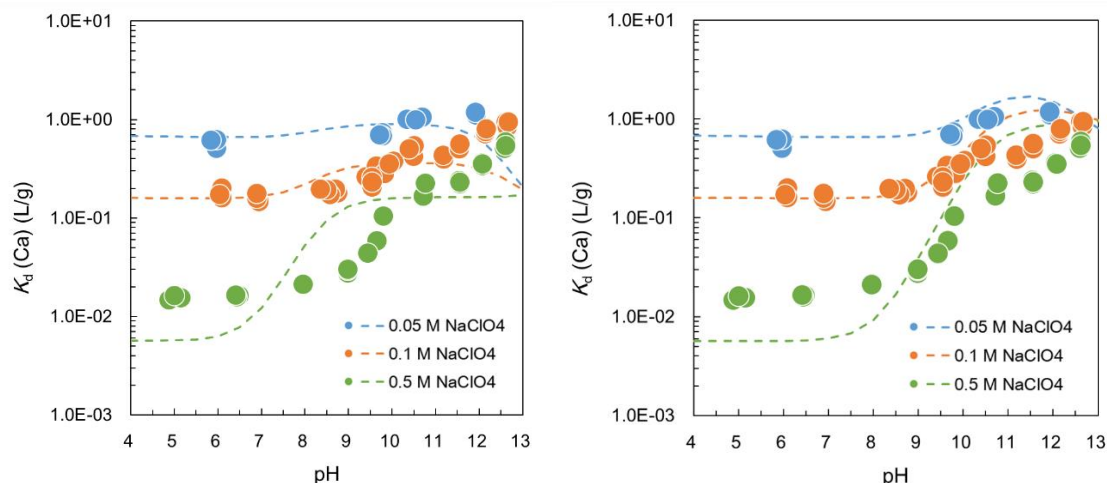
2) 沿岸部での核種移行パラメータ設定に係る収着モデル基礎データの取得

沿岸部での処分を考える場合、海水系地下水による高塩濃度、セメント影響による高 pH 環境を考慮する必要がある、このような環境では海水系地下水成分である Ca のモンモリロナイトエッジサイトへの表面錯体反応による収着が顕在化し、この Ca の収着との競合が生じることで核種の収着・移行遅延に影響を及ぼす可能性がある。モデルによりその影響を評価するためには、Ca のモンモリロナイトエッジサイトに対する K_c (錯生成定数) を取得する必要がある。平成 28 年度は、Ca のモンモリロナイトベーサルサイトに対する収着データを実験的に取得した (産業技術総合研究所ほか, 2017)。平成 29 年度は、引き続き収着試験を行って Ca のモンモリロナイトエッジサイトに対する K_c の取得を行うとともに、Ca と Sr の収着競合試験を行い、その結果のモデルによる再現の検討を行った。

Ca のモンモリロナイトエッジサイトに対する K_c は、Missana and García-Gutiérrez (2007) および Bradbury and Baeyens (1995) の 2 例が報告されている。両者とも、pH をパラメータとして K_d をプロットしたグラフを作成し、2 サイト静電項無視 (Two site protolysis model with no electrostatic term; 2SPNE) モデルでフィッティングを行うことで K_c を求めている。しかしながら、Missana and García-Gutiérrez (2007) ではエッジサイトとして $\equiv S^{\circ}OH$ および $\equiv S^{w}OH$ の 2 種類を仮定しているが、Bradbury and Baeyens (1995) では $\equiv S^{w}OH$ をさらにプロトン化・脱プロトン化定数の異なる二つのサイト $\equiv S^{w1}OH$ および $\equiv S^{w2}OH$ に分けており、両者の用いているモデルは異なる。加えて、両報告では、エッジサイトへの Ca の収着の影響が大きくなる高塩濃度・高 pH での実測はされていない。

これらの先行研究を踏まえ、ここでは、バッチ収着試験により高塩濃度・高 pH におけるエッジサイトへの Ca の収着についての実測値を得るとともに、いずれのモデルを用いることが適当であるかの確認を行った。本収着試験では、カルサイトを除去した精製 Na 型モンモリロナイト (クニピア F) を用いた。CaCl⁺ の生成を防ぎ、Na⁺ と Ca²⁺ のみの交換反応を評価するため (Tournassat et al., 2009; Tertre et al., 2011)、イオン強度 (塩濃度) の調整には NaClO₄ を用いた。なお、Missana and García-Gutiérrez (2007) および Bradbury and Baeyens (1995) は、それぞれ FEBEX および SWy-1 ベントナイトから精製した Na 型モンモリロナイトを用いている。

図 4.3-11 に Missana and García-Gutiérrez (2007) のモデル (1-Weak サイトモデル) および Bradbury and Baeyens (1995) のモデル (2-Weak サイトモデル) を用いて PHREEQC による実測値のフィッティングを行った結果を示す。モデルパラメータセットは、それぞれのモデルで使用されている値を固定して用い、クニピア F で取得された値がある場合は、その値を用いた。1-Weak サイトモデルでは、高イオン強度 (0.5 M NaClO₄) において、実測値より低い pH からエッジサイトへの収着による K_d の上昇が見られる。 K_d の上昇の位置はエッジサイトのプロトン化・脱プロトン化定数に依存するため、1-Weak サイトモデルでは Ca の収着を十分に再現できないことが確認された。一方、Ca が $\equiv S^{w2}OH$ に収着すると仮定する 2-Weak サイトモデルでは、エッジサイトへの収着による K_d が上昇し始める pH を良く再現していた。しかしながら、イオン交換反応が主となる低 pH 領域では、両モデルともイオン強度 0.5 M NaClO₄ において実測値との乖離が見られた。また、pH 12 以上の高 pH 領域においても、実測値の上昇傾向に対してモデルは一定または下降傾向を示すという乖離がみられ、モデルパラメータ修正の必要性が示唆された。



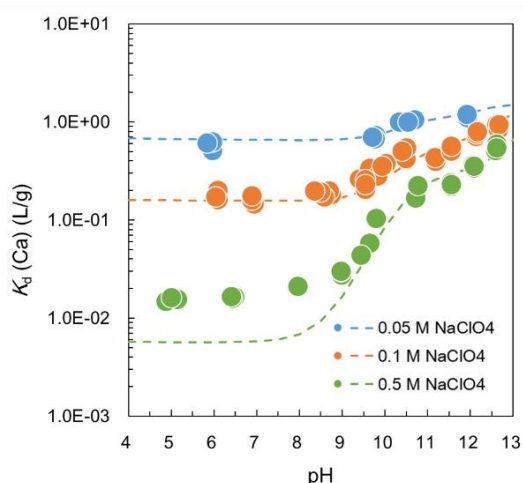
(a) 1-Weak サイトモデル

(b) 2-Weak サイトモデル.

図 4.3-11 Na 型クニピア F への Ca の吸着データに対する 1-Weak サイトモデルおよび 2-Weak サイトモデルによるフィッティング結果.

(破線はモデルによるフィットを表す)

高 pH 領域でのエッジサイトへの吸着による Ca の K_d の上昇を良く再現していた 2-Weak サイトモデルを用いて、再現性の改善を行った。pH 12 以上の高 pH 領域での K_d の上昇を、ベーサルサイトへの CaOH^+ の吸着によるものとみなしてモデルパラメータを追加し (Tournassat et al., 2004)、その錯生成定数をフィッティングにより $\log K_c = -6.0$ と求めた。図 4.3-12 に PHREEQC による再現結果を示す。この操作により、すべてのイオン強度において pH 9 以上の領域での再現性が改善された。しかしながら、0.5 M NaClO_4 の低 pH 領域における乖離は改善できなかった。



(a) フィッティング結果

Site	Site concentration	Reference
X-	108 meq/100 g	JAEA (2013)
$\equiv\text{SSOH}$	2.0E-03 mol/kg	Bradbury and Baeyens (1995)
$\equiv\text{SW1OH}$	4.0E-02 mol/kg	Bradbury and Baeyens (1995)
$\equiv\text{SW2OH}$	4.0E-02 mol/kg	Bradbury and Baeyens (1995)
Reaction	log K	Reference
$\equiv\text{SSOH} + \text{H}^+ = \equiv\text{SSOH}_2^+$	4.5	Bradbury and Baeyens (1995)
$\equiv\text{SSOH} = \equiv\text{SSO}^- + \text{H}^+$	-7.9	Bradbury and Baeyens (1995)
$\equiv\text{SW1OH} + \text{H}^+ = \equiv\text{SW1OH}_2^+$	4.5	Bradbury and Baeyens (1995)
$\equiv\text{SW1OH} = \equiv\text{SW1O}^- + \text{H}^+$	-7.9	Bradbury and Baeyens (1995)
$\equiv\text{SW2OH} + \text{H}^+ = \equiv\text{SW2OH}_2^+$	6.0	Bradbury and Baeyens (1995)
$\equiv\text{SW2OH} = \equiv\text{SW2O}^- + \text{H}^+$	-10.5	Bradbury and Baeyens (1995)
$\equiv\text{SW2OH} + \text{Ca}^{2+} = \equiv\text{SW2OCa}^+ + \text{H}^+$	-6.0	Fit
$2\text{X}^- + \text{Ca}^{2+} = \text{CaX}_2$	0.69	Oda and Shibata (1999)
$\text{X}^- + \text{CaOH}^+ = \text{CaOHX}$	2.5	Tournassat et al. (2004)

(b) 適用したモデルパラメータ

図 4.3-12 Na 型クニピア F への Ca の吸着データに対する 2-Weak サイトモデルによるフィッティング結果および適用したモデルパラメータ

(破線はモデルによるフィットを表す)

低 pH 領域はイオン交換反応が主となり、この領域におけるフィットは選択係数 K_{GT} により決まる。Na と Ca の交換反応の選択係数は、以下の式で定義される：

$$K_{GT} = \frac{X_{Ca}\{Na\}^2}{(X_{Na})^2\{Ca\}} = \frac{X_{Ca}\gamma_{Na}^2(Na)^2}{(X_{Na})^2\gamma_{Ca}(Ca)}$$

X_M : 固相中の金属 M の当量分率

$\{M\}$: 平衡液中の金属 M の活量 (mol/L)

γ_M : 金属 M の活量係数

(M): 平衡液中の金属 M のモル濃度 (mol/L)

Missana and García-Gutiérrez (2007) および Bradbury and Baeyens (1995) は、Ca 濃度が Na 濃度に対して十分低い場合に成り立つ以下の近似を用いて K_{GT} を求めている：

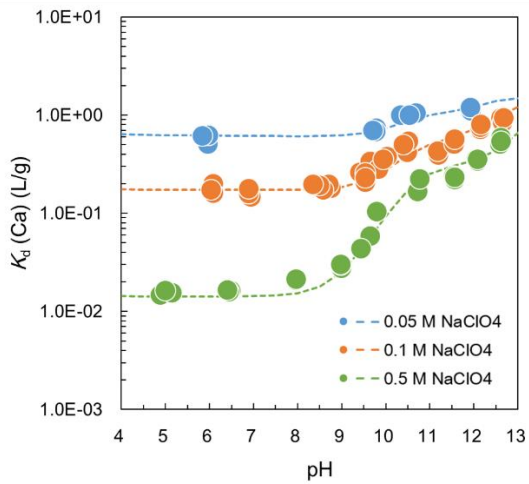
$$K_{GT} \approx \frac{2K_d \gamma_{Na}^2}{CEC \gamma_{Ca}} (Na)^2$$

K_d : Ca の分配係数 (L/g)

本試験では、低 pH 領域において、小田・柴田(1999)と同様に K_{GT} の定義に従って種々のイオン強度における値を求めた (図 4.3-13(b))。なお、活量係数は、すべてのイオン強度において Davies の式を用いて算出した。Missana and García-Gutiérrez (2007) は、 K_{GT} として複数のイオン強度(0.01~0.17 M NaClO₄)で取得した値を平均し、フィッティングにおいてもすべてのイオン強度で単一の値を用いており、Bradbury and Baeyens (1995) は、イオン強度 0 における値を報告している。しかしながら、図 4.3-13(b) に示す通り、イオン強度 (Na 濃度) の増加に伴って K_{GT} の値も上昇しており、Missana et al. (2008) も同様の傾向を報告している。 K_{GT} の値を変化させる要因として、タクトイドの形成(Tournassat et al., 2011; Fukushi and Fukiage, 2015)や Ca (Na) の固相中当量分率(Tournassat et al., 2009)が指摘されている。また、イオンの有効電荷や固相の活量補正、溶液中のイオンのマスバランスの変化等が影響している可能性もある。これらについては、今後より詳細に調査する必要があるが、ここではそれぞれのイオン強度において得られた K_{GT} (図 4.3-13(b)) を用いて Ca の K_C を再評価した (図 4.3-13(a))。その結果、全てのイオン強度において実測値を良好に再現することができ、Ca の錯生成定数は $\log K_C = -6.0$ と見積られた。

次に、エッジサイトへの Ca と Sr の収着競合試験およびモデルによる再現性の確認を行った。初めに、Sr のモデルパラメータ(K_{GT} , K_C)について、Ca と同様に、Sr の種々のイオン強度における K_{GT} を取得するとともに、それら K_{GT} を用いて錯形成定数 K_C を取得した。図 4.3-14 に、実測値および PHREEQC による再現結果を示す。Sr の錯生成定数は $\log K_C = -6.3$ と見積られた。

続いて、上記の Sr 収着試験の条件 (イオン強度 0.5 M NaClO₄) において、 5.0×10^{-4} M または 2.0×10^{-3} M の Ca を共存させ、Sr の収着量の変化を調べた。図 4.3-15 に実測値および PHREEQC による再現結果を示す。Ca および Sr の K_{GT} , K_C は前述の検討で得られた値を使用した。実測値は、pH 9 以上の領域において共存 Ca 濃度の増加に伴って Sr の K_d が低下しており、モンモリロナイトエッジでの表面錯体反応において Sr が Ca と競合していることが確認できる。モデルによる予測はこの傾向を再現しているものの、 5.0×10^{-4} M の Ca と共存させた条件では、実測値とのずれが見られた。今後、条件を変更した試験の実施とモデルへのフィードバックなどにより再現性を改善していく必要がある。

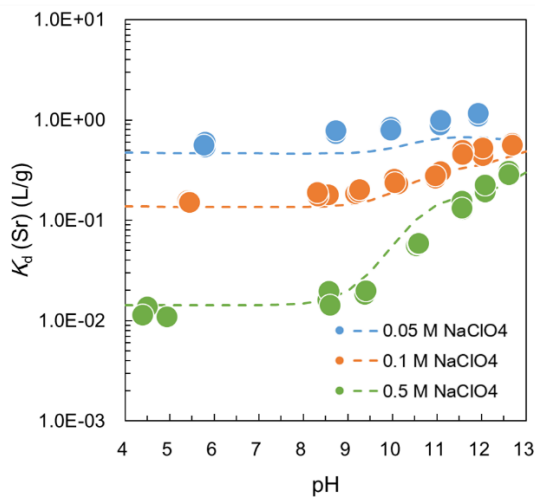


(a)フィッティング結果

Ionic strength	log K_{GT} (Na→Ca)		Reference
	Mean	S.D.	
0.05 M NaClO ₄	0.66	± 0.06	This study (2018)
0.1 M NaClO ₄	0.73	± 0.02	This study (2018)
0.2 M NaClO ₄	0.82	± 0.01	This study (2018)
0.5 M NaClO ₄	1.09	± 0.02	This study (2018)
0.01 M NaCl	0.54	± 0.07	This study (2018)
0.1 M NaCl	0.69	± 0.02	This study (2018)
0.1 M NaCl	0.69	± 0.08	Oda and Shibata (1999)

(b)フィッティングに用いた K_{GT}

図 4.3-13 Na 型クニピア F への Ca の収着データに対するフィッティング結果.
(線はモデルによるフィットを表す。フィッティングに用いた CaOH^+ の K_{GT} は
全イオン強度において図 4.3-12(b)の値を適用。)



(a)フィッティング結果

Ionic strength	log K_{GT} (Na→Sr)		Reference
	Mean	S.D.	
0.05 M NaClO ₄	0.53	± 0.04	This study (2018)
0.1 M NaClO ₄	0.63	± 0.02	This study (2018)
0.2 M NaClO ₄	0.72	± 0.04	This study (2018)
0.5 M NaClO ₄	1.09	± 0.13	This study (2018)

(b)フィッティングに用いた K_{GT}

図 4.3-14 Na 型クニピア F への Sr の収着データに対するフィッティング結果
(線はモデルによるフィットを表す。フィッティングに用いた SrOH^+ の K_{GT} は
報告値がないため、 CaOH^+ と同じ値を仮定して適用。)

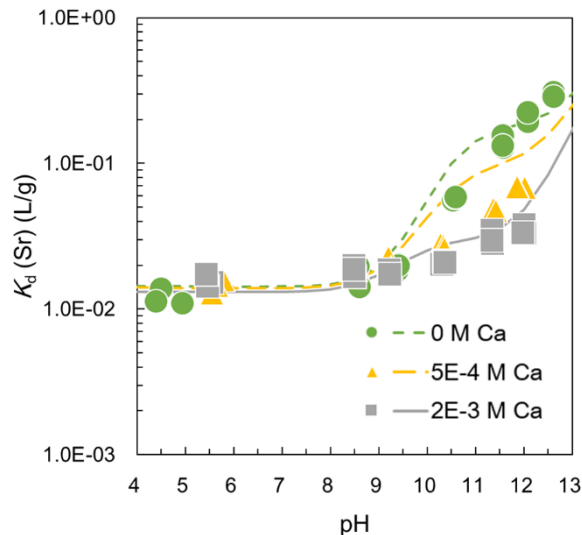


図 4.3-15 Na 型クニピア F への Sr の収着データの共存 Ca 濃度依存性およびフィッティング結果
(線はモデルによるフィットを表す)

(3) まとめおよび今後の課題

平成 29 年度は、沿岸部での収着パラメータ設定手法の調査・整備として、2 価カチオンである Sr および Ni を対象に収着挙動へのモデルの適用性に関する課題の抽出・改善に向けての検討を行った。その結果、モデルにより、イオン交換反応のイオン強度依存性および表面錯体反応の pH 依存性を表現できたものの、イオン交換反応の再現性が課題として抽出された。また、沿岸部での核種移行パラメータ設定に係る収着モデル基礎データの取得として、2 価の代表的地下水成分である Ca の高塩濃度・高 pH におけるモンモリロナイトへの収着データの取得およびモデルによる再現を行った。これにより、イオン交換反応が主となる低 pH 領域では、イオン強度に応じた K_{GT} を適用することで、また、表面錯体反応が主となる高 pH 領域では、2 種類の Weak サイトを仮定したモデルを適用することにより、実測値を良好に再現することができた。エッジサイトへの Ca と Sr の競合についても、得られたモデルパラメータを用いておおむね再現することができた。

今後、モデルにおけるイオン交換反応の再現を決定する K_{GT} を変化させる要因について、タクトイドの形成やイオンの有効電荷等の種々の可能性について調査・検討を行う。また、収着基礎データの取得として、平成 29 年度に着目した Sr と同様に表面錯体形成反応が重要な収着機構となる Ni 等の核種を対象にした Ca との競合試験を行い、実測データ取得およびモデルの適用性評価を進める。

4.3.3 沿岸部の特徴を考慮したコロイド・有機物・微生物の影響評価

(1) 背景と目的

沿岸部の地下環境では、陸域の地下環境と比べて高い塩分濃度や有機物濃度などの地球化学条件に加えて、海水準変動、隆起・侵食などの地形変化にともなう地球化学条件の長期変遷により、コロイド、有機物、微生物の特性（濃度、組成、サイズ、構造）や核種との相互作用性（収脱反応、錯生成反応、酸化還元反応）が変化する可能性がある。沿岸部におけるコロイド、有機物、微生物の影響評価に当たっては、これらの地球化学条件の特徴等を考慮しつつ、従来の淡水系地下水を想定した影響評価体系や手法（核燃料サイクル開発機構, 1999）の有効性について検討する必要がある。

平成 27 年度は、評価手法を含む既存技術の現状についての文献調査を行い、既存の知見を整理するとともに課題を抽出した（産業技術総合研究所ほか, 2016）。具体的には、沿岸部で高い塩濃度の海水条件を想定する場合、コロイド濃度が低く抑えられるため、既存の影響評価事例（海水条件よりコロイド濃度が高いと考えられる淡水を想定）は保守的な評価となると推測した。有機物、微生物については、海底の地下深部における存在量を確認するとともに、微生物の代謝特性が陸域と沿岸部に存在するものと異なるとの知見を確認した。この文献調査の結果を踏まえ、コロイドについては、塩濃度の高い地下水に存在するコロイドの種類やコロイドの安定性の塩濃度依存性などを評価し、コロイドの影響評価が必要となる地下水条件（コロイドが安定に存在する条件）を明らかにすることを課題として挙げた。また、有機物・微生物については、それらの存在量や核種との相互作用性に係る特性（およびその変化）を、塩濃度や酸化還元状態などの地球化学条件およびそれらの長期変遷に応じて評価できるようにすることを課題として挙げた。

平成 28 年度は、平成 27 年度に挙げた課題への対応に向けて、コロイドの塩濃度に対する安定性に係るデータ取得を実施するとともに、沿岸部に固有の有機物や微生物の特性や相互作用性に係る知見の文献調査とデータ取得による拡充および核種移行に及ぼす可能性のある影響の抽出・整理を行った（産業技術総合研究所ほか, 2017）。

平成 29 年度は、コロイドの安定性に係る塩濃度依存性についての知見および沿岸部の地下環境に存在する有機物・微生物の特性等の知見について、文献調査とデータ取得による拡充・深化を進めるとともに、影響が顕在化する要因や条件を抽出・整理を進めた。

(2) 実施内容

1) コロイド

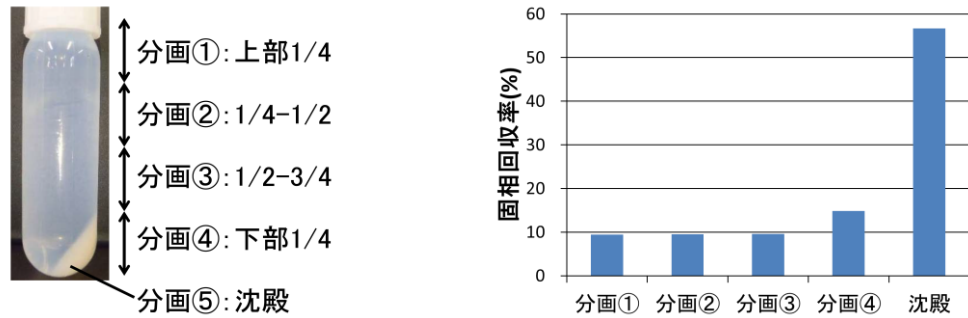
核種移行に及ぼすコロイド影響評価においては、地下水中の塩濃度が上昇した場合、コロイドの安定性が損なわれ濃度が低下するとともに、核種のコロイドへの分配係数が低下することから、性能評価上は保守的になると考えられる。その一方で、塩濃度の高い天然の地下水中に存在するコロイドについては、その種類が同定されておらず、評価の対象とすべきコロイド種を限定することができていない。そのため、塩濃度が高い領域でのコロイドの影響評価の精度を向上させる上では、コロイドが安定に存在しうる地下水条件や影響評価の対象とすべきコロイド種を明確化していく必要がある。また、人工バリアを構成する圧縮ベントナイトからもベントナイトコロイドが生成する可能性がある（例えば、松本ほか, 2008）。ベントナイトコロイドの生成は、核種の移行挙動に影響を及ぼすと同時に、浸食により圧縮ベントナイトの密度を低下させる可能性のある重要な現象である。ここで、圧縮ベントナイトの浸食は、ベントナイトコロイドの安定性が低下する塩濃度の高い地下水に対しては起こらないことが確認されており（松本ほか, 2005）、ベントナイトコロイドの安定性を判断することは、ベントナイトの浸食挙動の評価において重要になると考えられる。そのため、ベントナイ

トコロイドが安定に存在する塩濃度領域を明確にすることは、沿岸部で想定されるような地下水中の塩濃度の変化が起こる環境を対象としてベントナイトの浸食挙動を評価する上でも必要となる。

これらを踏まえ、本調査では、天然の地下水中に存在すると考えられる粘土鉱物コロイドなどの無機コロイドとベントナイトコロイドを対象に、コロイド安定性の塩濃度依存性について実験的に評価する。なお、本事業では、ベントナイトコロイドとして、ベントナイトの主成分であるモンモリロナイトにより構成されるモンモリロナイトコロイドを調査対象とし、溶液中に分散したモンモリロナイト粒子をモンモリロナイトコロイドと定義する。平成 28 年度は、クニゲル V1 と同じ鉱床より採掘されたベントナイトより作製され、その主要構成鉱物であるモンモリロナイト含有量がほぼ 100%であるクニピア F を用い、NaCl 溶液中でのモンモリロナイトコロイドの安定性について評価を行った。その結果、クニピア F では、NaCl 濃度が 0.02 mol/L までは、試験期間中で粒径がほぼ一定であるのに対し、0.03 mol/L においては試験後 1 時間程度で粒径が大きくなる傾向が見られ、0.05 mol/L においてはより顕著に粒径が大きくなる傾向が見られた。この結果から、クニゲル V1 から生成するモンモリロナイトコロイドは、おおむね NaCl 濃度 0.02 mol/L 程度までは凝集せず（コロイドの存在状態としては安定となる）、それ以上の NaCl 濃度では凝集して沈殿する（コロイドの存在状態としては不安定となる）可能性があると考えられた。平成 29 年度は、モンモリロナイトコロイドが安定に存在する塩濃度とその条件でのモンモリロナイトコロイドの生成量を詳細に調査することを目的に、溶液中に分散しやすいことからより高い塩濃度まで安定である可能性がある浮遊しやすいモンモリロナイトコロイドを遠心分離によって採取し、塩濃度に対する安定性の評価を行った。

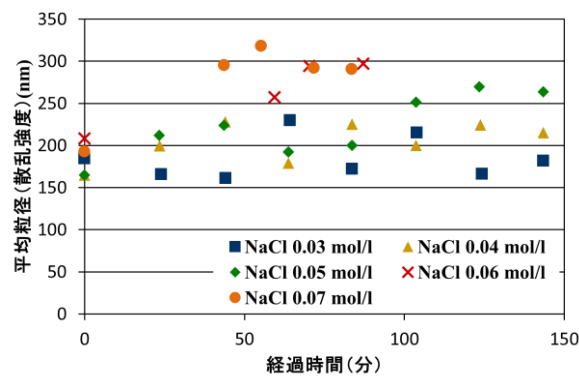
試験では、クニピア F をイオン交換水中に分散させてしばらく静置した後、遠沈管に採取して遠心分離機（日立製作所製 CT6D）により 6000rpm で 120 分間遠心分離を行い、上澄み液を採取することにより、より浮遊しやすいモンモリロナイトコロイドを採取した。採取においては、図 4.3-16(a)に示すように、上澄み液上部から 1/4 ずつ 4 分画（以下、上部から分画①、②、③、④と記載）と沈殿に分けて採取した。採取した各分画のモンモリロナイトの濃度を測定した結果、分画①～④に各 10%ずつのモンモリロナイト、残りの 60%のモンモリロナイトが沈殿として回収された（図 4.3-16(b)）。採取したコロイド溶液には、NaCl 溶液を添加して所定の NaCl 濃度に調整し、一定時間ごとに粒径測定システム（大塚電子株式会社製、ELSZ-1000ZSEA）を用いてモンモリロナイトコロイドの粒径を測定することにより、その凝集挙動を観察した。試験に使用したクニピア F は、含有するカルサイトが溶解し溶液中に Ca イオンが放出されるのを防ぐため、pH を 5 に調整した酢酸ナトリウム溶液に浸漬し、あらかじめカルサイトを溶解させて除去したものをを用いた。試験溶液の pH は 9 とした。

試験結果を図 4.3-17 に示す。図 4.3-17 は、モンモリロナイトコロイドの散乱強度分布より算出される平均粒径の時間変化を示しており、経過時間 0 分での平均粒径は NaCl 溶液添加前のモンモリロナイトコロイドの平均粒径、経過時間 0 分以外の平均粒径は NaCl 溶液添加後のモンモリロナイトコロイドの平均粒径である。また、図 4.3-17(a)は、遠心分離後の上澄み液の上部 1/4 から採取したコロイド（分画①）、図 4.3-17(b)は、上澄み液の上部 1/2 から 3/4 の位置で採取したコロイド（分画③）の対する試験結果である。

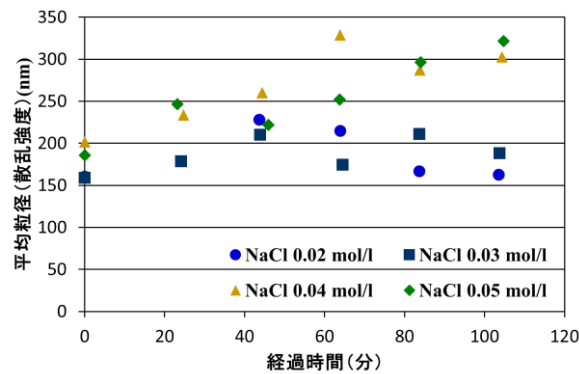


(a) 遠心分離後のモンモリロナイト懸濁液 (b) 各分画中のモンモリロナイトコロイド濃度

図 4.3-16 遠心分離後のモンモリロナイト懸濁液中のコロイド濃度測定結果



(a) 分画① (上澄み上部 1/4)



(b) 分画③ (上澄み上部から 1/2-3/4)

図 4.3-17 NaCl 溶液中に分散させたモンモリロナイト粒子の平均粒径の時間変化

試験の結果、遠心分離後のモンモリロナイトコロイドは、分画①では NaCl 濃度 0.04 mol/L 程度まで、分画③では NaCl 濃度 0.03 mol/L 程度まで、凝集せずに安定である傾向が見られた。平成 28 年度に実施した遠心分離を行っていないモンモリロナイトコロイドに対する試験では、NaCl 濃度が 0.03 mol/L 程度より凝集する傾向が見られており、平成 29 年度の試験は、遠心分離後のモンモリロナイトコロイドがより高い塩濃度まで安定に存在する可能性のあることがわかった。また、遠心分離によるモンモリロナイト回収量より、NaCl 濃度 0.04

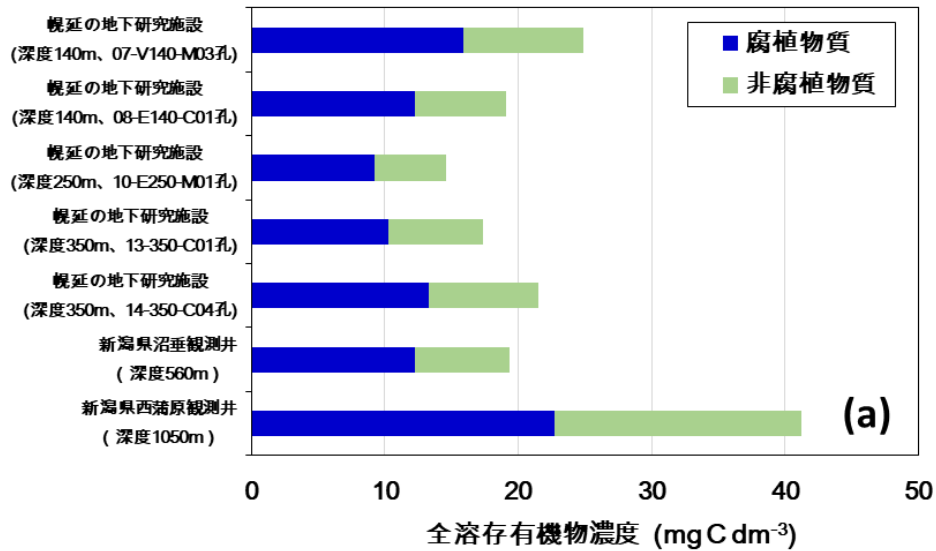
mol/L 程度まで安定な分画①に存在するコロイドは全体の 10%程度、0.03 mol/L 程度まで安定なコロイドは、分画①～③で回収されたコロイドの合計量として全体の 30%程度と算出された。これらのことから、浮遊しやすいモンモリロナイトコロイドは、より高い塩濃度まで安定なコロイドとして存在する可能性はあるものの、それ以外のコロイドが安定なコロイドとして存在する塩濃度領域との違いは小さく、また、浮遊しやすいモンモリロナイトコロイドの全体に対する含有量も限られていることから、ベントナイトコロイドの生成挙動を評価する上での浮遊しやすいモンモリロナイトコロイドの影響は少ないと考えられる。

2) 有機物

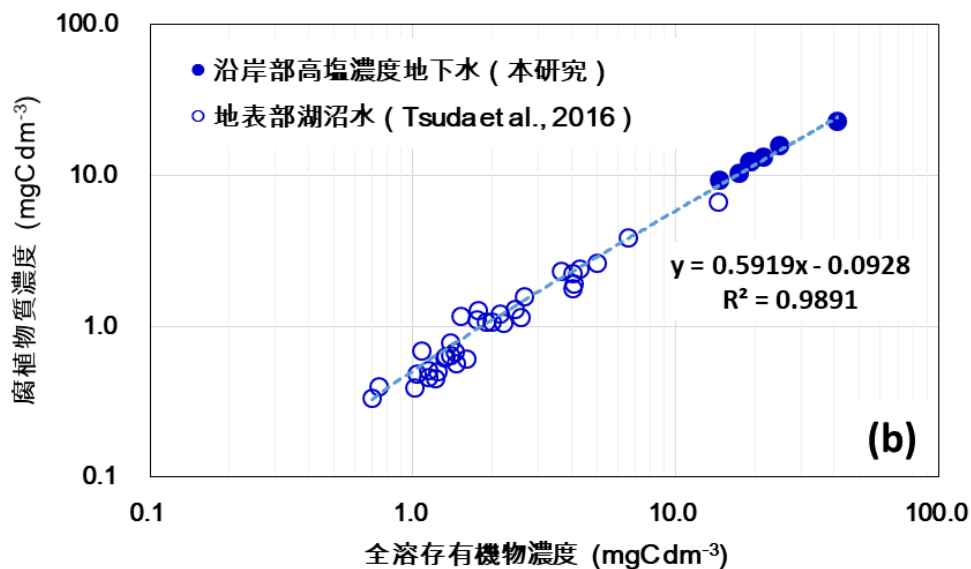
陸域および沿岸部の全ての深部地下環境には、核種と安定な錯体を生成する天然有機物が存在する。これらの有機物と核種との錯体は、核種の見かけの溶解度を上昇させ、また、母岩への核種の収着・拡散を抑制することにより、処分システムにおける核種移行遅延効果を低下させる可能性がある。一方、このような有機物による影響の程度は、地下水水質や有機物の特性等の条件に依存するため、地下深部における有機物の存在が必ずしも影響の顕在化に繋がるとは限らない。本調査では、沿岸部の海水系地下水に溶存する有機物の濃度・組成、錯生成等の特性について、陸域の有機物のものと比較・評価し、沿岸部の深部地下水に溶存する有機物に固有の影響を抽出する。

沿岸部の深部地下水に溶存する有機物は、沿岸部の地層を形成する堆積岩からの溶出によって地下水へ供給されるため、その濃度 ($10\sim 390\text{ mgC dm}^{-3}$) (Thurman, 1985; Nagao et al., 1999, 2009; 笹本ほか, 2015) は、海水中での濃度 ($0.35\sim 12.7\text{ mgC dm}^{-3}$) (Dafner et al., 2002) や陸域の花崗岩に存在する地下水中での濃度 ($1.6\sim 7.7\text{ mgC dm}^{-3}$) (Pettersson et al., 1994) と比べて一般に高い。日本国内の堆積岩に存在する地下水について見てみると、幌延の地下研究施設の深部地下水 (化石海水) 中の溶存有機物濃度は $\sim 24.8\text{ mgC dm}^{-3}$ (笹本ほか, 2015; 産業技術総合研究所ほか, 2017)、千葉県茂原地域の高塩濃度地下水では 56 mgC dm^{-3} との報告があり (Nagao et al., 1999, 2009)、国内の花崗岩に存在する地下水の値 (例えば、岐阜県瑞浪地域の花崗岩の地下水中で $0.1\sim 3.1\text{ mgC dm}^{-3}$) (岩月ほか, 1998; 長尾・岩月, 2007; 長尾ほか, 2009) と比べて $8\sim 560$ 倍程度高いことが分かる。

一方、金属イオンと溶存有機物との錯生成は、溶存有機物の主要成分の一つである腐植物質が重要な役割を果たすと考えられている。平成 28 年度までに、DAX-8 固相抽出法 (Tsuda et al., 2012; Kida et al., 2016) を用いて、幌延の地下研究施設の深部地下水 (化石海水) に溶存する有機物に占める腐植物質の割合を評価し、各深度の地下水に溶存する有機炭素の 59～64%が腐植物質で構成されていること、日本国内の湖沼水中の溶存有機物を構成する腐植物質の存在割合 (37.3～77.1%) (Tsuda et al., 2016) の範囲と一致することを見出し、沿岸部の海水系の深部地下水についても湖沼水と同様に、腐植物質が核種との錯生成において重要な役割を果たすことを指摘した (産業技術総合研究所ほか, 2017)。しかし、評価の対象とした海水系の深部地下水は一箇所に限定されており、得られた知見の一般性は明らかにされていない。そのため、本調査では、平成 28 年度と同様に、DAX-8 固相抽出法を用いて、新潟県の二つの井戸 (西蒲原観測井 (深度 1,050 m)、沼垂観測井 (深度 560 m)) から採水した高塩濃度の地下水に溶存する有機物の組成データを取得した。



(a) 幌延の地下研究施設および新潟県の観測井戸から採取した深部地下水に溶存する有機物の濃度・組成データの比較



(b) 沿岸部（幌延の地下研究施設および新潟県の観測井戸）の高塩濃度地下水中の全溶存有機物濃度と腐植物質濃度との関係と湖沼水中の有機物における同様の関係との比較

図 4.3-18 沿岸部の深部地下水に溶存する有機物の濃度および組成

得られた結果を図 4.3-18a に示す。新潟県沼垂観測井から採水した深部地下水中の溶存有機物（腐植物質+非腐植物質）濃度（19.3 mg C dm⁻³）は、幌延の地下研究施設の深部地下水中の溶存有機物濃度（11.9～24.8 mg C dm⁻³）とおおむね一致するが、新潟県西蒲原観測井から採水した深部地下水中の溶存有機物濃度（41.2 mg C dm⁻³）は、最大で 3.5 倍程度高いことが分かった。新潟県は、国内でも有数の油田・ガス田地帯であり、西蒲原地域も油田地帯に該当している（地質調査所, 1976）。そのため、高い溶存有機物濃度が観測された結果は、地下深部に存在する油やその前駆物質が地下水の水質に影響を与えた結果によるものと推察される。一方、西蒲原および沼垂観測井の地下水中の溶存有機物に対する腐植物質の存在割合は、

それぞれ 55.1%と 63.6%であり、幌延の地下研究施設の地下水（産業技術総合研究所ほか、2017）や地表の湖沼水中（Tsuda et al., 2016）の有機物組成とおおむね一致することが分かった。事実、湖沼水および沿岸部地下水中の全溶存有機物濃度と溶存腐植物質濃度との関係を同時にプロットすると、相関係数（ R^2 ）0.9891 の良好な直線関係が得られ（図 4.3-18b）、溶存有機物の組成（腐植物質と非腐植物質との比率）が地質環境の違いによって変化しないことを確認できる。従って、この結果は、沿岸部地下水においても腐植物質が溶存有機物の主要成分を構成し、核種と溶存有機物との錯生成において腐植物質が支配的な役割を果たすことを支持している。ただし、これらの知見は国内の二地域（北海道北部、新潟県北東部）のデータに限られていることから、国内の別地域の地下水に溶存する有機物についても組成データを取得し、知見の一般性を向上させる必要がある。

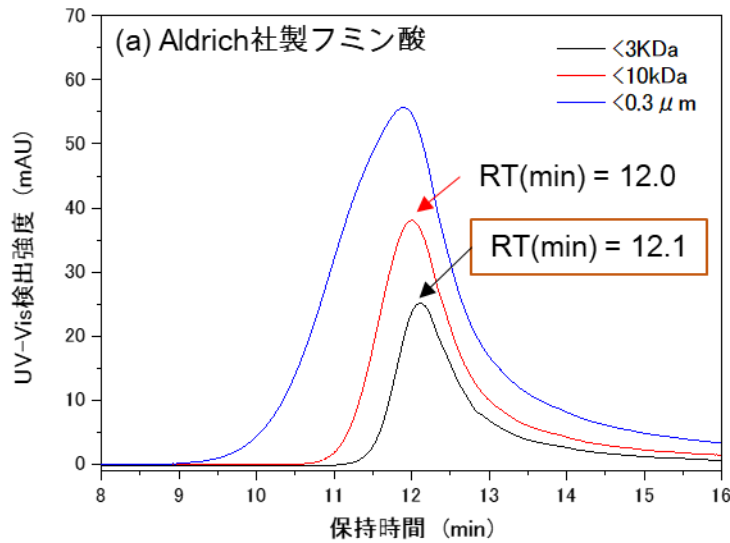
沿岸部の高塩濃度地下水に溶存する腐植物質の錯生成能については、幌延の地下研究施設の深部地下水から分離・精製した溶存腐植物質を対象に、 Cu^{2+} （Saito et al., 2015）や Eu^{3+} （Terashima et al., 2012; Saito et al., 2017）に対する錯生成能が調査されており、それらは土壌や湖水中の腐植物質よりも錯生成定数が小さいことが見出されている。一般に、陸域地表に存在する腐植物質は、植物の構成成分であるリグニンに由来するフェニルプロパノイド（隣接し合うフェノール基（ R-OH ）やメトキシ基（ R-OCH_3 ）を有する）を比較的多く含み、芳香族炭素に富む構造特性を示す（Stevenson, 1994）。一方、沿岸部の地下水中の腐植物質は、海洋堆積物中の有機物、つまり、海洋プランクトンに由来するため、その構成成分である脂肪族炭素に富む構造特性を有すると考えられている（Harvey et al., 1983, Claret et al., 2005）。従って、陸域の腐植物質は、その前駆体の構造上、隣接し合う酸性官能基が比較的多く、核種と多座配位により安定な錯体を生成するのに対し、沿岸部の腐植物質は酸性官能基間が離れた構造特性を有し、比較的不安定な単座配位で核種と錯生成するためであると推察される。しかし、地下水に溶存する有機物は、地表からの涵養や褐炭等の埋没有機物（地表の有機物起源）の溶出により、地表で生成した有機物と混合する場合もあり、必ずしも錯生成能が低くなるとは限らない。一方、元素分析の結果から、沿岸部の地下水に溶存する腐植物質の硫黄の割合（1.9~2.5%）は、湖沼水や淡水組成の地下水に溶存する腐植物質の値（0.0~0.8%）と比べて高い傾向を示すことが見出されている（Saito et al., 2015）。硫黄は、腐植物質の構造中でチオール基（ R-SH ）（Stevenson, 1994）やチオ酢酸基（ R-OSH ）（Saito et al., 2015）等として存在するものがあり、B 族元素の金属イオン（核種では、 Pb-210 など）と比較的強い結合を形成する可能性がある。その影響の程度については、B 族元素の金属イオンとの錯生成についての詳細な調査から明らかにしていく必要がある。

沿岸部の高塩濃度地下水における核種移行に対する有機物影響評価では、濃度や錯生成能とともに、その移行性を考慮する必要がある。特に、緩衝材（圧縮ベントナイト）への有機物の透過性は、塩濃度が高く、有機物のサイズが小さいほど有利であることが知られていることから（Iijima et al., 2009, 2013）、沿岸部の地下水に溶存する有機物のサイズ特性に係わる知見は重要である。これまでに、幌延の地下研究施設の高塩濃度地下水に溶存する腐植物質の分子サイズ（0.30~0.55 nm）は、地表環境（土壌、河川、湖）に存在する腐植物質のもの（0.84~2.49 nm）と比べて小さいことが明らかにされている（Saito et al., 2015）。しかし、この高塩濃度地下水中の溶存腐植物質のサイズが、圧縮ベントナイトを透過するレベルか否かについての知見は得られていない。

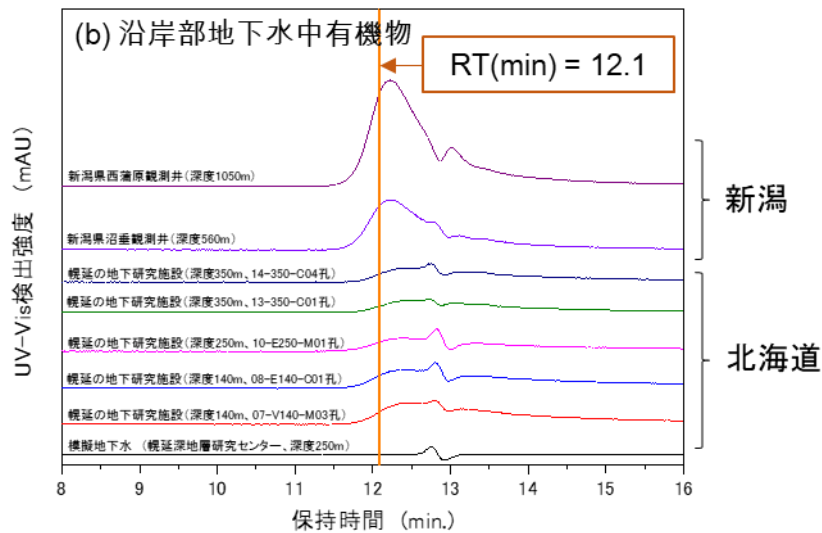
本調査では、サイズ排除クロマトグラフィー（SEC）を用いて、Aldrich 社製フミン酸（AHA）の透過分画と沿岸部地下水（幌延の地下研究施設および新潟県の観測井戸から採取した深部地下水）に溶存する有機物とのサイズ分布データを取得し、得られたサイズ分布との比較から、圧縮ベントナイトに対する透過可能性を評価した。AHA の透過分画については、イオン

強度と圧縮ベントナイトの乾燥密度を設定した圧縮ベントナイトへの AHA の透過性とそのサイズ分布との関係の調査により (Iijima et al, 2009)、 $1 \text{ mol dm}^{-3} \text{ NaCl}$ 溶液では $< 5 \text{ kDa}$ 分画が、 $0.1 \text{ mol dm}^{-3} \text{ NaCl}$ 溶液では $< 3 \text{ kDa}$ 分画が圧縮ベントナイト (乾燥密度、 1.2 Mg m^{-3}) を透過することが報告されている。本調査では、比較的低い塩濃度条件において圧縮ベントナイトを透過する可能性の高い $< 3 \text{ kDa}$ 分画に着目して、サイズ分布データの比較を行った。なお、SEC は、既存の報告と同条件 (カラム、TSKgel SuperSW2000 ; ガードカラム、TSKgel gardcolumn SuperSW ; 溶離液 $1.0 \text{ mmol dm}^{-3} \text{ KH}_2\text{PO}_4 + 2.0 \text{ mmol dm}^{-3} \text{ Na}_2\text{HPO}_4 + 1.0 \text{ mol dm}^{-3} \text{ NaCl}$ (pH 6.53) ; UV-Vis 検出波長 270 nm ; 試料投入量 $25 \times 10^{-6} \text{ dm}^3$ 、流速 $0.35 \times 10^{-3} \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$; カラムオープン温度 $30 \text{ }^\circ\text{C}$) を設定して行った。

図 4.3-19 に、AHA および、幌延の地下研究施設および新潟県の観測井戸から採取した深部地下水に溶存する有機物のサイズ排除クロマトグラムを示す。図 4.3-19 a より、AHA のサイズ排除クロマトグラムは、分画サイズが小さくなるとともに保持時間 (RT) が長くなり、 $< 3 \text{ kDa}$ 分画のピークは $\text{RT} = 12.1$ 分に検出された。このピーク位置と沿岸部の地下水中有機物のサイズ排除クロマトグラムとを比較すると (図 4.3-319 b、橙色実線)、そのピークは地下水中有機物の高分子量分画側 (短い保持時間側) に位置し、大部分の分画が AHA の 3 kDa 分画よりも後に溶出していることが分かった。このことは、沿岸部の地下水に溶存する有機物の大部分が、 $0.1 \text{ mol dm}^{-3} \text{ NaCl}$ 以上のイオン強度を示す海水条件において、圧縮ベントナイトを透過する可能性があることを示唆している。また、新潟県の観測井戸の有機物と比べて、幌延の地下研究施設の有機物は、AHA の $< 3 \text{ kDa}$ 分画よりも後に溶出する低分子量分画成分が多いことから、より多くの有機物が圧縮ベントナイトを透過する可能性が高い。ただし、海水中には Na^+ だけでなく Ca^{2+} や Mg^{2+} が溶存しており、これらが圧縮ベントナイトの間隙構造やベントナイトに対する有機物の収脱着性等に影響を与え、有機物の透過性を変える可能性がある。今後、透過・拡散試験等を通して、沿岸部の地下水中有機物の圧縮ベントナイトへの透過性の有無や発生条件等をより詳細に分析・評価する必要がある。



(a) Aldrich 社製フミン酸 (AHA) の分子量分画のサイズ排除クロマトグラム



(b) 幌延の地下研究施設および新潟県の観測井戸から採取した深部地下水に溶存する有機物のサイズ排除クロマトグラムと AHA の <3kDa 分画のクロマトグラムピーク位置との関係

図 4.3-19 サイズ排除クロマトグラフィーによる沿岸部地下水に溶存する有機物の圧縮ベントナイト透過サイズの評価

3) 微生物

地下環境には、沿岸部および陸域の地下において普遍的に微生物が存在することが数多くの研究から明らかにされている (Inagaki et al., 2006; 2015; Parks et al., 2014; Pedersen et al., 2014)。地層処分システムにおいて、微生物は主に処分場閉鎖後の酸化還元状態回復促進、人工バリア内の金属容器の腐食、放射性核種の移行などに影響を及ぼす可能性があると考えられている。これらの事象に対する微生物影響評価を行う際には、その存在量や核種との相互作用に関連する微生物代謝に関する知見が必要になるが、その特性は岩盤の空隙や栄養塩濃度等に依存するところが多いと考えられている (Pedersen et al., 2014; Inagaki et al.,

2015)。様々な沿岸部環境を対象とした調査報告から、現存量に関する知見は集積されつつあり、深度1,000 m程度までは全菌数として地下水では約 $10^3 \sim 10^6$ cells/ml、岩石中（堆積物中）では約 $10^2 \sim 10^6$ cells/g dry weightの微生物が地下水に存在することが明らかにされている（図4.3-20）（Hallbeck and Pedersen, 2012; Pedersen et al., 2008; 2014; SKB, 2010; Shimizu et al., 2006; 天野ほか, 2012; Ise et al., 2017; Takeuchi et al., 2009; Takeuchi et al., 2011; Inagaki et al., 2015）。一方で、微生物代謝については、各環境で優占する微生物種が異なり、沿岸部地下において優占種として検出されている微生物群は、未だかつて培養に成功しておらず代謝が未知の微生物群に属する種が多く存在することから、代謝の不明なものが多く、知見の蓄積は十分とは言い難い。

そこで本事業では、既存のデータを活用して水質等の地球化学条件と微生物代謝の関係性について評価を行うとともに、沿岸部地下において優占種として存在する未知微生物の代謝について、培養法に依存しない推定手法に関する知見を整理し、これらの微生物代謝が核種移行に影響を及ぼす可能性について考察した。

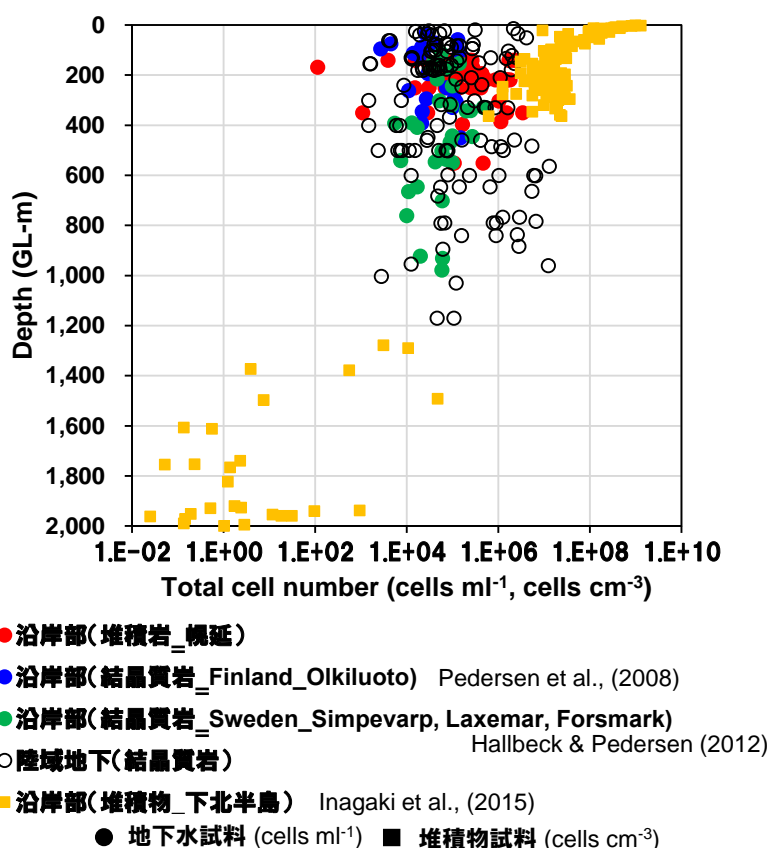


図 4.3-20 沿岸部および陸域の地下における微生物現存量の深度分布

水質条件と微生物代謝の関係性について、主成分分析を用いて各サイト間の群集の類似性を比較し、サイト間の群集の差に起因する水質条件の抽出を試みたところ、群集の類似性はメタン、有機物、硫酸イオンの濃度に関連するとみられる予察的な結果が得られた。今後、既存の知見に基づき参照データを拡充することで、群集間の類似性と水質条件との関係性をより明確に示すことができると考える。

沿岸部の地下で優占種として検出されているのは、メタン生成菌や、硫酸還元菌が属する *Deltaproteobacteria*、発酵菌や硫酸還元菌が属する *Firmicutes* などであり、これらはメタン、

硫酸イオン、水素、有機物の多い環境に特徴的な代謝機能を有する微生物種であると考えられる。沿岸部ではこれらの種に加え、未だかつて培養に成功していないため、代謝機能の未解明な未知微生物群が優占種として検出されている報告例が多い。沿岸部地下において優占種として検出される未知微生物としては、*Chloroflexi*, ANME (嫌氣的メタン酸化古細菌)、JS1、MBG-D (Marine Benthic Group)、MCG (Miscellaneous Crenarchaeotal Group) (Ise et al., 2017; Hermsdorf et al., 2017; Hoshino et al., 2017; Nobu et al., 2016; Takeuchi et al., 2009; Takeuchi et al., 2011)等が挙げられる。これらの微生物群は、そのほとんどが培養に成功しておらず、従来の培養法に基づく代謝機能の推定が困難な種である。そこで、培養法に依存しない代謝機能の推定手法として、環境DNAを対象とした分子生態学的手法（すなわちゲノム解析手法）を活用した未知微生物群の代謝機能推定に関する知見に基づき、前述の未知の微生物種の代謝機能と核種との相互作用の可能性について整理した（表4.3-5）。ゲノム解析では、生物の持つ全遺伝情報を総合的に解析することで、得られた配列情報から遺伝子の同定と機能の推定を行うことにより、その生物の代謝機能を推定することができる。この手法は培養法に依存せず遺伝子情報から代謝機能を推定できることから、培養に成功していない未知微生物に対しても有効な手法である。幌延深地層研究センター地下施設から採取された地下水中で検出された、嫌氣的メタン酸化菌として知られるANME-2dや*Chloroflexi*に属する種は、ゲノム解析から鉄還元反応を行うための遺伝子を有することが報告されており (Hermsdorf et al., 2017)、これらの種は核種の酸化還元反応に関与する可能性がある。一方で、ANME-2dの中でも瑞浪超深地層研究所地下施設から採取された地下水から検出された種については、金属還元反応を行うための遺伝子を有していないことが報告されている (Ino et al., 2017)。また、その他の微生物種であるJS1、MBG-D、MCGについては、有機物の発酵や分解反応によってエネルギーを獲得することが推定されているが、呼吸反応を行う遺伝子を有していないことから (Hermsdorf et al., 2017; Lloyd et al., 2013; Nobu et al., 2016)、核種との相互作用の可能性は低いと考えられる。

表 4.3-5 ゲノム解析手法を活用した未知微生物群の代謝機能と核種との相互作用に関する推察

微生物種	調査サイト	対象試料	地下水のタイプ	ゲノム解析手法に基づき推定された代謝機能	核種との相互作用の可能性*	参考文献
ANME-2d	日本 幌延	堆積岩地下水	methane-rich saline Na-Cl-HCO ₃ ⁻	嫌氣的メタン酸化、鉄還元、炭素固定、窒素固定反応	◎	Hermsdorf et al., 2017
ANME-2d	日本 瑞浪	花崗岩地下水	fresh water, Na-Ca-Cl	嫌氣的メタン酸化、水素酸化	—	Ino et al., 2017
JS1	デンマーク Aarhus bay	堆積物	methane-rich sediment	嫌氣性従属栄養性、呼吸活性を持たない、プロピオン酸などの有機酸の発酵によりエネルギーを獲得	-	Nobu et al., 2016
JS1	日本 幌延	堆積岩地下水	methane-rich saline Na-Cl-HCO ₃ ⁻	嫌氣性従属栄養性、呼吸活性を持たない、発酵、高分子有機物分解	-	Hermsdorf et al., 2017
<i>Chloroflexi</i>	日本 幌延	堆積岩地下水	methane-rich saline Na-Cl-HCO ₃ ⁻	鉄還元、高分子有機物分解、発酵	○	Hermsdorf et al., 2017
MBG-D	デンマーク Aarhus bay	堆積物	methane-rich sediment	嫌氣性従属栄養性、たんばく質の再無機化	△	Lloyd et al., 2013
MCG	デンマーク Aarhus bay	堆積物	methane-rich sediment	嫌氣性従属栄養性、たんばく質の再無機化	△	Lloyd et al., 2013

*微生物細胞表面への収着反応は考慮しない。◎;可能性が大いにある, ○;可能性がある, △;不明, —;可能性は低い

(3) 今後の課題

コロイドについては、平成 29 年度までに、NaCl 溶液中でのモンモリロナイトコロイドの安定性について実験的に検討を行い、基礎的なデータを整備した。今後、実際の地下水環境に近い溶液組成（例えば、海水やその希釈水）を対象とした試験を実施するなどして、実環境へ直接適用可能なモンモリロナイトコロイドの安定性に関するデータとして拡充していくことが課題と考えられる。また、天然の地下水中に存在する可能性のある粘土コロイド等について、塩濃度に対する安定性に関する基礎データの取得を行い、コロイドが安定に存在する地下水条件や影響評価の対象とすべきコロイド種を明確にしていく必要があると考えられる。

有機物については、平成 29 年度に、新潟県の二つの井戸から採水した高塩濃度の地下水に溶存する有機物の組成データを取得した。今後、沿岸部を含めた地質環境と腐植物質濃度との関係の一般化に向けて、異なる地域の沿岸部地下水に溶存する有機物の濃度・組成データを拡充するとともに、腐植物質に含まれる硫黄の錯生成への寄与の把握なども含めて、沿岸部の地下水に溶存する有機物の錯生成への影響について知見を拡充する必要がある。また、緩衝材に対する沿岸部の地下水中有機物の透過の有無確認に向けて、実際の海水中の溶存物の影響も考慮した透過・拡散試験等に取り組む必要があるものと考えられる。

微生物については、平成 29 年度に、沿岸部に特有の微生物種について、沿岸部を対象として行われた既存の地下微生物の調査研究事例から、メタン生成菌、*Chloroflexi*、*Deltaproteobacteria*、*Firmicutes*、SM1、JS1 が代表的な種であることを確認した。これらの未知微生物の代謝は、電子伝達反応ではなく有機物の発酵・分解を行うものや、金属還元反応に関与するものがあり、後者は核種との相互作用の可能性が示唆された。また、ゲノム解析手法の適用により未知微生物も含めた微生物代謝の推定を行い、これらの評価手法が沿岸部特有の微生物代謝を推定する上で有用であるとの見通しが得られた。今後は、長期変遷を考慮した沿岸部の地球化学条件と微生物代謝の関係性について、主観的な評価からより客観的・定量的な評価手法（例えば、主成分分析などの統計手法等）について検討する。また、未知微生物の代謝の推定を含む、沿岸部特有の微生物種についての影響評価の向上の基盤となる、既存のデータベースとゲノム解析手法に基づいた代謝機能のより詳細な検討事例の蓄積を行う。さらに、ゲノム解析手法での推測の可能性をさらに広げるためには、核種との相互作用に関連する微生物代謝のデータのさらなる拡充が必要となる。

(4) 参考文献

- 天野由記, 山本陽一, 南條 功, 村上裕晃, 横田秀晴, 山崎雅則, 國丸貴紀, 大山隆弘, 岩月輝希, 幌延深地層研究計画における地下水、河川水および降水の水質データ (2001~2010 年度), JAEA-Data/Code 2011-023, 2012.
- Amec Foster Wheeler, ConnectFlow Verification Release 11.4, United Kingdom, 148p., 2016.
- Aquanty, HydroGeoSphere Verification Manual Release 1.0, Aquanty Inc., Canada, 86p., 2015.
- Baeyens, B., Bradbury, M. H., A mechanistic description of Ni and Zn sorption on Na-montmorillonite Part I: Titration and sorption measurements, Journal of Contaminant Hydrology, Vol. 27, pp.199-222, 1997.
- Bradbury, M. H., Baeyens, B., A quantitative mechanistic description of Ni, Zn and Ca sorption on Na-montmorillonite Part III: Modelling, PSI Bericht Nr. 95-12, 1995.
- Bradbury, M. H., Baeyens, B., A mechanistic description of Ni and Zn sorption on Na-

- montmorillonite Part II: Modelling, *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 27, pp. 223–248, 1997.
- 地質調査所, 日本油田・ガス田分布図 (第2版), 1976.
- Claret F., Schafer, T., Rabung, T., Wolf, M., Bauer, A., Buckau, G., Differences in properties and Cm(III) complexation behavior of isolated humic and fulvic acid derived from Opalinus clay and Callovo-Oxfordian argillite, *Appl. Geochem.*, 20, pp.1158, 2005.
- Dafner, E.V. and Wangersky, P.J., A brief overview of modern directions in marine DOC studies. Part III – Recent progress in marine DOC studies. *J. Environ. Monit.*, 4, pp. 55-69, 2002.
- 電気事業連合会, 核燃料サイクル開発機構, TRU 廃棄物処分技術検討書 一第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ一, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, 2005.
- 電力中央研究所, 岩盤中地下水移行評価技術高度化開発 -地下水年代測定技術調査-, 402p, 2013.
- Fukushi, K., Fukiage, T., Prediction of intrinsic cesium desorption from Na-smectite in mixed cation solutions, *Environmental Science & Technology*, Vol. 49, pp. 10398–10405, 2015.
- 原子力発電環境整備機構, 地層処分事業のための安全評価技術の開発(II) -核種移行解析モデルの高度化-, NUMO-TR-10-10, 179p, 2011a.
- 原子力発電環境整備機構, 地層処分事業の安全確保 (2010 年度版) -確かな技術による安全な地層処分の実現のために-, NUMO-TR-11-01, 770p, 2011b.
- Guo, W., Langevin, C. , User's Guide to SEAWAT: A Computer Program for Simulation of Three-Dimensional Variable-Density Ground-Water Flow, U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations 6-A7, 77p, 2002.
- Haggerty, R. and Gorelick, S. Multiple-rate mass transfer for modeling diffusion and surface reactions in media with pore-scale heterogeneity, *Water Resources Research*, VOL. 31, NO. 10, pp.2383-2400, 1995.
- Hallbeck, L., and Pedersen, K. Culture-dependent comparison of microbial diversity in deep granitic groundwater from two sites considered for a Swedish final repository of spent nuclear fuel. *FEMS Microbiology Ecology*, 81, pp.66-77, 2012.
- Harvey, G.R., Boran, D.A., Chesal L.A., Tokar, J.M., The structure of marine fulvic and humic acids, *Marine Chemistry* 12, pp.119-132, 1983.
- Hernsdorf A.W., Amano Y., Miyakawa K., Ise K., Suzuki Y., Anantharaman K., Probst A., Burstein D., Thomas B.C., Banfield J.F. Potential for microbial H₂ and metal transformations associated with novel bacteria and archaea in deep terrestrial subsurface sediments. *The ISME Journal* 11, pp.1915-1929, 2017.
- 菱谷智幸, 西垣 誠, 橋本 学, 物質移動を伴う密度依存地下水流の 3 次元数値解析手法に関する研究, 土木学会論文集, No.638/III-49, pp.59~69, 1999.
- Hoch, R. and Jackson, P., Rock-matrix diffusion in transport of salinity. Implementation in ConnectFlow, SKB R-04-78, Svensk Kärnbränslehantering AB, 69p, 2004.
- Holt., R., Conceptual Model for Transport Processes in the Culebra Dolomite Member, Rustler Formation, SAND97-0194, Sandia National Laboratories, U.S.A, 160p., 1997.
- Hoshino, T., Toki, T., Ijiri, A., Morono, Y., Machiyama, H., Ashi, J., Okamura, K., Inagaki, F. Atribacteria from the seafloor sedimentary biosphere disperse to the hydrosphere through submarine mud volcanoes. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1135, 2017.

- Iijima, K., Kurosawa, S., Tobita, M., Kibe, S., Ouchi, Y., Diffusion behavior of humic acid in compacted bentonite: effect of ionic strength, dry density and molecular weight of humic acid. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 1124, pp.263-270, 2009.
- Iijima, K., Kurosawa, S., Kibe, S., Tobita, M., Ouchi, Y., Modeling of diffusion behavior of humic acid and Nd in the presence of humic acid in compacted bentonite, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 65, pp.66-71, 2013.
- 今井 久, 山下 亮, 塩崎 功, 浦野和彦, 笠 博義, 丸山能生, 新里忠史, 前川恵輔, 地下水流動に対する地質環境の長期的変遷の影響に関する研究, *JAEA-Research* 2009-001, 116p., 2009.
- Inagaki, F., Nunoura, T., Nakagawa, S., Teske, A., Lever, M., Lauer, A., Suzuki, M., Takai, K., Delwiche, M., Colwell, F.S., Nealson, K.H., Horikoshi, K., D'Hondt, S., Jørgensen, B.B., Biogeographical distribution and diversity of microbes in methane hydrate-bearing deep marine sediments, on the Pacific Ocean Margin. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 103, pp.2815-2820, 2006.
- Inagaki, F., Hinrichs, K.-U., Kubo, Y., Bowles, M.W., Heuer, V.B., Hong, W.-L., Hoshino, T., Ijiri, A., Imachi, H., Ito, M., Kaneko, M., Lever, M.A., Lin, Y.-S., Methé, B.A., Morita, S., Morono, Y., Tanikawa, W., Bihan, M., Bowden, S.A., Elvert, M., Glombitza, C., Gross, D., Harrington, G.J., Hori, T., Li, K., Limmer, D., Liu, C.-H., Murayama, M., Ohkouchi, N., Ono, S., Park, Y.-S., Phillips, S.C., Prieto-Mollar, X., Purkey, M., Riedinger, N., Sanada, Y., Sauvage, J., Snyder, G., Susilawati, R., Takano, Y., Tasumi, E., Terada, T., Tomaru, H., Trembath-Reichert, E., Wang, D.T. and Yamada, Y., Exploring deep microbial life in coal-bearing sediment down to ~2.5 km below the ocean floor. *Science*, Vol. 349, pp.420-424, 2015.
- Ino K., Hermsdorf A.W., Konno U., Kouduka M., Yanagawa K., Kato S., Sunamura M., Hirota A., Togo Y.S., Ito K., Fukuda A., Iwatsuki T., Mizuno T., Komatsu D.D., Tsunogai U., Ishimura T., Amano Y., Thomas B.C., Banfield J.F., Suzuki Y. Ecological and genomic profiling of anaerobic methane-oxidizing archaea in a deep granitic environment. *The ISME Journal*, pp.1-17, 2017.
- Ise, K., Sasaki, Y., Amano, Y., Iwatsuki, T., Nanjo, I., Asano, T. and Yoshikawa, H., The succession of bacterial community structure in groundwater from a -250-m gallery in the Horonobe Underground Research Laboratory. *Geomicrobiology Journal*, 34, 489-499, 2017.
- 岩月輝希, 豊嶋賢治, 吉田英一, 深地層を対象とした地下水の地球化学調査の現状, *原子力バックエンド研究* Vol.4(2), pp.73-81, 1998.
- 核燃料サイクル開発機構, わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ— 分冊 3 地層処分システムの安全評価, *JNC TN1400* 99-23, 1999.
- Kida, M., Ohtuka, T., Kato, T., Suzuki, T. and Fujitake, N., Evaluation of salinity effect on quantitative analysis of aquatic humic substances using nonionic DAX-8 resin, *Chemosphere* Vol.146, pp.129-132, 2016.
- Lloyd, K.G., Schreiber L., Petersen D.G., Kjeldsen K.U., Lever M.A., Steen A.D., Stepanauskas R., Richter M., Kleindienst S., Lenk S., Schramm A., Jørgensen B.B. Predominant archaea in marine sediments degrade detrital proteins. *Nature*, 496, pp.215-218. 2013.

- Missana, T., García-Gutiérrez, M., Adsorption of bivalent ions (Ca(II), Sr(II) and Co(II)) onto FEBEX bentonite, *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 32, pp. 559-567, 2007.
- Missana, T., García-Gutiérrez, M., Alonso, U., Sorption of strontium onto illite/smectite mixed clays, *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 33, pp. 156-162, 2008.
- 松本一浩, 棚井憲治, 緩衝材の流出/侵入特性(II)－幌延地下水(HDB-6 号孔)を用いた緩衝材の侵入特性評価－, *JNC TN8400 2004-026*, 2005.
- 松本一浩, 飯島和毅, 棚井憲治, 緩衝材の浸食現象評価－ベントナイトコロイドの生成挙動－, *JAEA-Research 2008-097*, 2008.
- 長尾誠也, 岩月輝希, 三次元蛍光分光光度法による深部地下水溶存腐植物質の簡易特性分析, *分析化学 Vol.56(3)*, pp.143-150, 2007.
- 長尾誠也, 岩月輝希, 濱 克宏, 岐阜県東濃地域の地下水から分離精製した溶存腐植物質の特性, *原子力バックエンド研究 Vol.15(2)*, pp.77-86, 2009.
- Nagao, S., Tanaka, T., Nakaguchi, Y., Suzuki, Y., Hiraki, K., Ogawa, H., Complexation of Pu and Am with fulvic acid under saline condition, *JAERI-Conf. 99-004*, pp. 674 – 680, 1999.
- Nagao, S., Sakamoto, Y., Rao, R.R., Fujitake, N., Effects of groundwater humic substances on sorption of Np(V) on sandy materials, *Humic Substances Research*, 5/6, pp.9-17, 2009.
- 日本原子力研究開発機構, 平成 24 年度 地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム化学影響高度化開発, 2013.
- 日本原子力研究開発機構, わが国における使用済燃料の地層処分システムに関する概括的評価 –直接処分第 1 次取りまとめ–, *JAEA-Research 2015-016*, 2015.
- 日本原子力研究開発機構, 平成 27 年度地層処分技術調査等事業直接処分等代替処分技術開発報告書, 平成 28 年 3 月, 538p., 2016.
- Nobu, M.K., Dodsworth, J.A., Murugapiran, S.K., Rinke, C., Gies, E.A., Webster, G., Schwientek, P., Kille, P., Parkes, R.J., Sass, H., Jørgensen, B.B., Weightman, A., Liu, W., Hallam, S., Tsiamis, G., Woyke, T., Hedlund, B.P. Phylogeny and physiology of candidate phylum ‘Atribacteria’ (OP9/JS1) inferred from cultivation-independent genomics. *The ISME Journal*, 10, pp.273-286, 2016.
- 小田治恵, 柴田雅博, ベントナイト－水相互作用の実験とモデル化, *JNC TN8400 99-032*, 1999.
- Parkes, R.J., Webster, G., Cragg, B.A., Weightman, A.J., Newberry, C.J., Ferdelman, T.G., Kallmeyer, J., Jørgensen, B.B., Aiello, I.W., Fry, J.C., Deep sub-seafloor prokaryotes stimulated at interfaces over geological time. *Nature*, 436, pp.390-394. 2005.
- Pedersen, K., Arlinger, J., Eriksson, S., Hallbeck, A., Hallbeck, L., and Johansson, J. Numbers, biomass and cultivable diversity of microbial populations relate to depth and borehole-specific conditions in groundwater from depths of 4-450 m in Olkiluoto, Finland. *The ISME Journal*, 2, pp.760-775, 2008.
- Pedersen, K., Bomberg, M., and Itävaara, M., Summary report microbiology of Olkiluoto and ONKALO groundwater, *POSIVA 2012-42*, 2014.
- Pettersson, C., Ephraim, J. and Allard, B., On the composition and properties of humic substances isolated from deep groundwater and surface waters, *Org. Geochem.* 21, pp.443-451, 1994.
- Posiva, Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Models and Data

- for the Repository System 2012, Posiva 2013-01, Posiva Oy. 474p., 2013.
- Saito, T., Terashima, M., Aoyagi, N., Nagao, S., Fujitake, N. and Ohnuki, T., Physicochemical and ion-binding properties of highly aliphatic humic substances extracted from deep sedimentary groundwater, *Environ. Sci.: Processes Impacts* 17, pp.1386-1395, 2015.
- Saito, T., Aoyagi, N. and Terashima, M., Europium binding to humic substances extracted from deep underground sedimentary groundwater studied by time-resolved laser fluorescence spectroscopy, *J. Nucl. Sci. Technol.* 54, pp.444-451, 2017.
- 産業技術総合研究所, 沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発, 平成 24 年度成果報告書, 521p, 2012.
- 産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 平成 27 年度 地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書, 2016.
- 産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書, 591p, 2017.
- 笹本 広, 山本信幸, 宮川和也, 水野 崇, 幌延深地層研究計画で得られた地下水の水質データ (2011年度~2013年度), 日本原子力研究開発機構 技術報告書, JAEA-Data/Code 2014-033, 2015.
- 澤田 淳, 井尻裕二, 坂本和彦, 亘 真吾, 亀裂性岩盤を対象とした天然バリア中の核種移行解析, JNC-TN8400 99-093, 核燃料サイクル開発機構, 58p, 1999.
- 柴田雅博, 澤田 淳, 舘 幸男, 牧野仁史, 若杉圭一郎, 三ツ井誠一郎, 北村 暁, 吉川英樹, 小田治恵, 石寺孝充, 陶山忠宏, 畑中耕一, 仙波 毅, 瀬尾俊弘, 亀井玄人, 黒澤 進, 後藤淳一, 澁谷早苗, 後藤考裕, 窪田 茂, 稲垣 学, 守屋俊文, 鈴木 寛, 石田圭輔, 西尾 光, 牧内秋恵, 藤原啓司, 概要調査段階における設計・性能評価手法の高度化 (その 3) - NUMO-JAEA 共同研究報告書 (2013 年度) -, JAEA-Research 2014-030, 2015.
- Shimizu, S., Akiyama, M., Ishijima, Y., Hama, K., Kunimaru, T. and Naganuma, T., Molecular characterization of microbial communities in fault-bordered aquifers in the Miocene formation of northernmost Japan. *Geobiology*, Vol. 4, pp. 203-213, 2006.
- SKB, Geosphere process report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-48, 2010a.
- SKB, Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark Main report of the SR-Site project, SKB TR-11-01, Svensk Kärnbränslehantering AB, 893p, 2011.
- Stevenson, F.J., *Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions*, New York: John Wiley & Sons, 1994.
- 舘 幸男, 陶山忠宏, 緩衝材及び岩石中の拡散データベース(JAEA-DDB)の整備-2015 年度におけるデータ拡充-, JAEA-Data/Code 2015-027, 2016.
- 舘 幸男, 陶山忠宏, 澁谷早苗, 地層処分性能評価のための岩石に対する収着分配係数の設定手法の構築: 花崗岩を対象とした性能評価, 原子力バックエンド研究, Vol. 24(2), pp. 109-134, 2017.
- Tachi, Y., Yotsuji, K., Seida, Y., Yui, M., Diffusion and sorption of Cs⁺, I⁻ and HTO in samples of the argillaceous Wakkanai Formation from the Horonobe URL, Japan: Clay-based modeling approach, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 75, pp. 6742-6759, 2011.

- Tachi, Y., Yotsuji, K., Diffusion and sorption of Sr²⁺ in compacted sodium montmorillonite as a function of porewater salinity, *Proceedings of 5th International Meeting on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, pp. 899-900, 2012.
- Tachi, Y., Ochs, M., Suyama, T., Integrated sorption and diffusion model for bentonite. Part 1: Clay-water interaction and sorption modeling in dispersed systems, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 51(10), pp. 1177–1190, 2014a.
- Tachi, Y., Yotsuji, K., Suyama, T., Ochs, M., Integrated sorption and diffusion model for bentonite. Part 2: Porewater chemistry, sorption and diffusion modeling in compacted systems, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 51(10), pp. 1191–1204, 2014b.
- Tachi, Y., Yotsuji, K., Diffusion and sorption of Cs⁺, Na⁺, I⁻ and HTO in compacted sodium montmorillonite as a function of porewater salinity: Integrated sorption and diffusion model, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 132, pp. 75–93, 2014.
- Tachi, Y., Ebina, T., Takeda, C., Saito, T., Takahashi, H., Ohuchi, Y., Martin, A. J., Matrix diffusion and sorption of Cs⁺, Na⁺, I⁻ and HTO in granodiorite: Laboratory-scale results and their extrapolation to the in situ condition, *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 179, pp. 10–24, 2015.
- Tachi, Y., Suyama, T., Development of JAEA sorption database (JAEA-SDB): Update of sorption/QA data in FY2015, *JAEA-Data/Code 2015-028*, 2016.
- Tachi, Y., Suyama, T., Yotsuji, K., Ishii, Y., Takahashi, H., Clay-based modeling approach to diffusion and sorption in the argillaceous rock from the Horonobe URL: Application to Ni(II), Am(III), and Se(IV), *The Clay Minerals Society Workshop Lectures Series*, Vol. 21, Chapter 19, pp. 241–250, 2016.
- Takeuchi, M., Komai, T., Hanada, S., Tamaki, H., Tanabe, S., Miyachi, Y., Uchiyama, M., Nakazawa, T., Kimura, K., and Kamagata, Y., Bacterial and archaeal 16S rRNA genes in Holocene marine sediments from the Kanto Plain. *Geomicrobiology Journal*, Vol. 26, pp. 104-118, 2009.
- Takeuchi, M., Hoshioka, H., Seo, Y., Tanabe, S., Tamaki, H., Kamagata, Y., Takahashi, HA., Igari, S., Mayumi, D., and Sakata, S., A distinct freshwater-adapted subgroup of ANME-1 dominates active archaeal communities in terrestrial subsurfaces in Japan. *Environmental Microbiology*, Vol. 13, pp. 3206-3218, 2011.
- Terashima, M., Nagao, S., Iwatsuki, T., Fujitake, N., Seida, Y., Iijima, K. and Yoshikawa, H., Europium-binding abilities of dissolved humic substances isolated from deep groundwater in Horonobe area, Hokkaido, Japan, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 49, pp.804-815, 2012.
- Tertre, E., Berger, G., Castet, S., Loubet, M., Giffaut, E., Experimental sorption of Ni²⁺, Cs⁺ and Ln³⁺ onto a montmorillonite up to 150°C, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 69(21), pp. 4937–4948, 2005.
- Tertre, E., Prêt, D., Ferrage, E., Influence of the ionic strength and solid/solution ratio on Ca(II)-for-Na⁺ exchange on montmorillonite. Part 1: Chemical measurements, thermodynamic modeling and potential implications for trace elements geochemistry, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 353, pp. 248–256, 2011.

- Thurman, E.M., Organic geochemistry of natural waters, Martinus Nijhoff/Dr W. Junk Publishers, a member of the Academic publishers group, DORDRECHT / BOSTON / LANCASTER, 1985.
- Tournassat, C., Greneche, J. M., Tisserand, D., Charlet, L., The titration of clay minerals I. Discontinuous backtitration technique combined with CEC measurements, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 273, pp. 224–233, 2004.
- Tournassat, C., Gailhanou, H., Crouzet, C., Braibant, G., Gautier, A., Gaucher, E. C., Cation exchange selectivity coefficient values on smectite and mixed-layer illite/smectite minerals, *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 73(3), pp. 928–942, 2009.
- Tournassat, C., Bizi, M., Braibant, G., Crouzet, C., Influence of montmorillonite tactoid size on Ca–Na cation exchange reactions, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 364, pp. 443–454, 2011.
- Tsuda, K., Takata, A., Shirai, H., Kozaki, K. and Fujitake, N., A method for quantitative analysis of aquatic humic substaces in clear water based on carbon concentration, *Analytical Science* Vol.28, pp.1017-1020, 2012.
- Tsuda, K., Kida, M., Aso, S., Kato, T., Fujitake, N., Maruo, M., Hayakawa, K. and Hirota, M., Determination of aquatic humic substances in Japanese lakes and wetlands by the carbon concentration-based resin isolation technique, *Limnology*, pp.1-6, 2016.
- Wahlberg, J. S., Baker, J. H., Vernon, R. W., Dewar, R. S., Exchange adsorption of strontium on clay minerals, *US Geological Survey Bulletin*, 1965.

5. おわりに

本事業は、平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（沿岸部処分システム高度化開発）として、経済産業省資源エネルギー庁から、産業技術総合研究所、日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、電力中央研究所の四機関が受託し、第 3 年度目の成果および次年度以降の課題を 2 章～4 章で述べている。

地質環境調査技術においては、沿岸部の大深度ボーリング(1000m 級)から地下水を採取し、成因の違いから現海水、現降水、氷期降水、化石海水の 4 つにわけて評価した。この結果、我が国の沿岸部の地下水環境には、地形・地質はもちろん、気候変動や海水準変動が大きく関わることが分かり、その時間的な変動も定性的な理解までには至ることができた。また、現地調査の結果、約 1/3 が化石海水であった。さらに、化石海水は、 ^{14}C 濃度が低い、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ が大きいという特徴があり、現海水と識別可能であることを実証でき、塩水の特性を必要とする工学技術分野の具体的な設計に貢献する形となった。

工学技術分野では、水理解析結果に留意しつつ、処分システムの成立性の評価手法や知見などの体系のあり方について検討した。とりわけ、「ニアフィールド構成材料の劣化、変質に関する知見、データ拡充（オーバーパック、緩衝材、セメント、グラウト）」や「構成部材（緩衝材、覆工コンクリートや鋼製支保など）の変遷挙動評価」などを視野に入れつつ、ニアフィールド領域での処分システムの成立性の検討を開始した。さらに、個別要素に関する現象論的アプローチに基づく成果の統合を試みるとともに、他分野との連携課題の具体化を図りつつ、地質環境の調査技術分野から得られる成果を活用するとともに、工学技術分野で得られる成果の反映先となる安全評価技術分野に対してはニアフィールド構成材料の劣化や変質に関する知見やデータ拡充の結果として、閉鎖後長期の安全評価における FEP の整備やシナリオ開発などに貢献した。また、本検討で仮設定した処分場の構成要素は安全評価における残置物評価の入力となる。今後、このような分野間連携のあり方について、より具体的に実施して行くこととする。

沿岸部における安全評価技術では、「評価の枠組みの整備」と「核種移行モデル・パラメータ整備および影響評価」を進めた。評価の枠組みの整備については、評価シナリオ・解析ケースを具体化に設定していく際に留意すべき事項等の洗い出しを進めた。核種移行モデル・パラメータ整備および影響評価については、沿岸部固有の場の特徴やその変遷に着目しつつ、海進・海退の影響を受けた地下水流動状況や地下水化学等の変化の評価手法の調査と評価の試行、核種の収着に関するデータ、コロイドの安定性に関するデータ、有機物・微生物の存在量や組成等の特性データの取得や分析を進めた。

事業の実施にあたっては、四機関がそれぞれに有する専門的な知識や経験を踏まえて、効率的・効果的に成果をあげることができた。また、四機関の専門知識、経験等を分野間に相互補完的に利用し、かつ融合することによって、分野毎の成果の信頼性や汎用性の向上に努めた。とりわけ、地質環境調査技術分野から始まるデータの提供フローと安全評価技術からのデータ要求という双方向の情報提供・情報共有を持つ分野間の連携体制を築いたことは意義深いと考える。

事業を進めるにあたっては、外部の専門家・有識者などで構成される委員会を設置し、研究計画、実施方法、結果の評価などに関する審議・検討を行った。大西有三委員長（関西大学教授・京都大学名誉教授）をはじめ、大江俊昭委員（東海大学教授）、佐藤努委員（北海道大学教授）、佐藤治夫委員（岡山大学准教授）、竹内真司委員（日本大学教授）、登坂博行委員（東京大学名誉教授）、吉田英一委員（名古屋大学教授）（以上、五十音順）には、有益な意見・助言をいただいた。

今後とも、四機関の連携ならびに分野間の連携を強固にし、わが国における沿岸部固有の環境を前提とした、概要調査段階で必要となる地質環境の調査・工学・安全評価に関するシステムティックな技術開発に取り組んで行く。また、当該事業は総合的な研究課題を有していることから、各機関において専門性を持ち合わせたジェネラリストの育成にも努めていくことを確認した。繰り返すが、本研究事業では日本列島の成因を考慮しつつ、列島全体を概観できるように地質環境や地下水環境に関する調査の地域や手法を構成する。さらに、分野横断的な課題への取り組みや他分野への成果の反映やフィードバックを適切に実施することにより、分野間ならびに機関間での相互理解が深まり、あるいは相互補完をすることで、事業の効率化がおこなわれるとともに完成度が高まった。地層処分システム全体としての成立性や性能を示す等、事業全体としての総合的な高いレベルの成果の創出に向けて、さらに国民への分かりやすい情報提供を旨として、今後も四機関が協力して事業に取り組んでいく。

平成 29 年度

高レベル放射性廃棄物等の
地層処分に関する技術開発事業

沿岸部処分システム高度化開発

Appendix

平成 30 年 3 月

国立研究開発法人産業技術総合研究所

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター

一般財団法人電力中央研究所

Appendix 目次

- Appendix I 宮崎平野における沿岸陸域の隆起・浸食に係る地形・地質調査資料集
- Appendix II 宮崎平野における沿岸海域の地形・地質情報整理
- Appendix III 日本列島周辺の海陸シームレス旧汀線分布図
- Appendix IV テフラ・段丘礫・被覆層の分析データ集
- Appendix V わが国の沿岸部の断層運動に関わる主な既往研究のリスト
- Appendix VI 原位置調査装置および採取方法の開発
- Appendix VII マルチコレクター型希ガス質量分析装置の地下水試料測定への活用
- Appendix VIII プッシュプル試験に関する補足
- Appendix IX 沿岸部の地質環境情報の整理・集約（研究結果から得られたタスクおよび領域知識の整理）
- Appendix X 再冠水時の緩衝材の挙動に関する試験
- Appendix XI 塩水環境下におけるセメント系材料の機械的特性変化に関する検討
- Appendix XII ニアフィールド領域での処分システム構成材料の成立性と品質確保の方法の提示に関する補足資料
- Appendix XIII 委員会議事録等

Appendix I

宮崎平野における沿岸陸域の隆起・侵食 に係る地形・地質調査資料集

目次

1. 空中写真判読および段丘の対比・編年結果	I-1
2. 現地調査において見出した露頭位置	I-8
3. 主要な露頭における露頭柱状図	I-10
4. 引用文献	I-13

図目次

図 1-1 事例検討範囲	I-1
図 1-2 段丘区分図（事例検討範囲全域 1）	I-3
図 1-3 段丘区分図（A および B 地区・拡大図）	I-4
図 1-4 段丘区分図（C～E 地区・拡大図）	I-5
図 1-5 段丘区分図（E～G 地区・拡大図）	I-6
図 1-6 事例検討範囲における 段丘対比・編年図	I-7
図 2-1 現地調査において見出した 露頭位置図	I-9
図 3-1 本研究における主要露頭における地質柱状図（1）	I-11
図 3-2 本研究における主要露頭における地質柱状図（2）	I-12

表目次

表 1-1 本研究で使用した空中写真一覧表	I-2
-----------------------	-----

宮崎平野における沿岸陸域の隆起・侵食に係る地形・地質調査資料集

本年度は、沿岸部における陸域から海域への外挿法の信頼性確保を目的に、沿岸陸域（宮崎平野中・北部）において地形・地質調査を実施した。本付録では、地形・地質調査で得られた以下の結果について記す。

- ・空中写真判読および段丘の対比・編年結果
- ・現地調査において見出した露頭調査位置
- ・主要な露頭における露頭柱状図およびその構成層（段丘礫層・被覆層）における性状

なお、主要な露頭から採取した試料を用いた室内分析結果については、Appendix III に示す。

1. 空中写真判読および段丘の対比・編年結果

宮崎平野中部・北部の事例検討範囲（図 1-1）において、1960 年代～1970 年代に国土地理院が撮影した写真縮尺 4 万分の 1 の空中写真を使用して、地形層序、段丘区分と平面分布、段丘面の分布形状、段丘面の開析度などに着目し、空中写真判読を行った。使用した空中写真を表 1-1 に示す。

なお、空中写真判読は、事例検討範囲を対象としたものの、段丘面の水平方向への連続性、地形層序関係把握のため、一部の箇所では検討範囲外も判読した。また、本空中写真判読結果は、机上での検討ののち、現地調査の結果を踏まえた上で、追認あるいは修正を行った。

段丘面の開析程度については、濱田・幡谷（2011）などを参考に、判断基準を設定した上で行った。本地域では河成段丘が広く分布していることを考慮し、7つの地域に区分した。

空中写真判読による結果図（段丘区分図）を図 1-2～図 1-5 に示す。また、空中写真判読による段丘区分、テフラ分析結果、既往文献情報などを踏まえた上で、検討、作成した事例検討範囲における段丘対比・編年図を図 1-6 に示す。

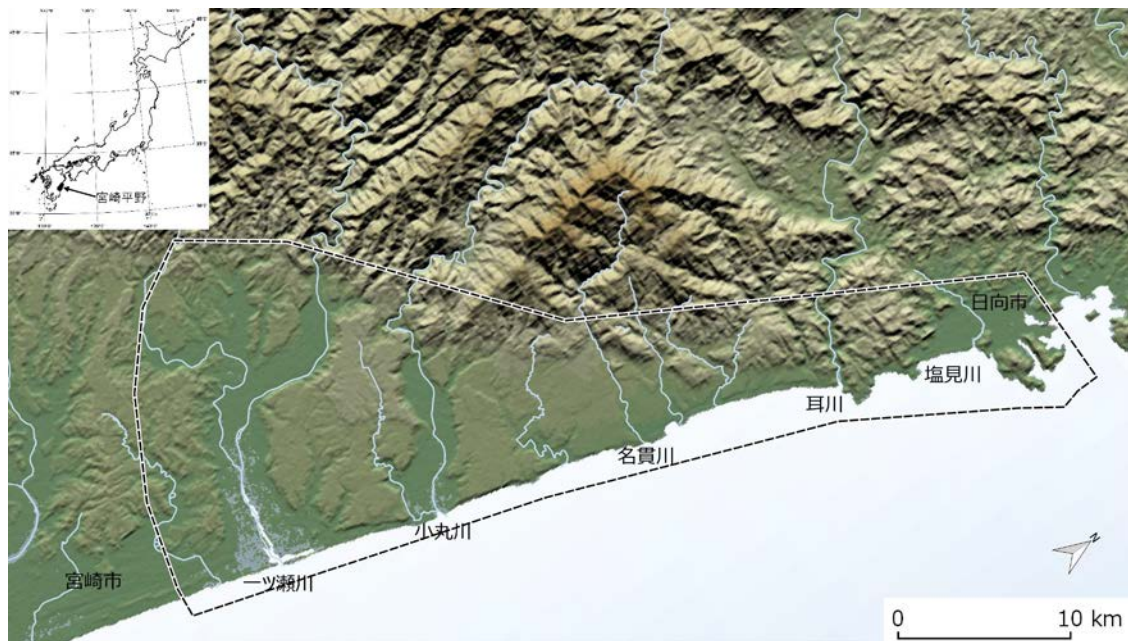


図 1-1 事例検討範囲
黒点線範囲：事例検討範囲

表 1-1 本研究で使用了空中写真一覧表

整理 番号	コース 番号	写真 番号	撮影年月日	撮影 地域	撮影高度 (m)	撮影縮 尺	カメラ 名称	焦点距離 (mm)	カラー 種別	写真 種別
KU645Y	C10	16~20	1964/05/31 (昭和39年)	延岡	4600	40000	RC8	0.000	モノクロ	アナログ
KU645Y	C11	15~19	1964/05/31 (昭和39年)	延岡	4600	40000	RC8	0.000	モノクロ	アナログ
KU645Y	C12	13~18	1964/05/31 (昭和39年)	延岡	4600	40000	RC8	0.000	モノクロ	アナログ
KU645Y	C13	12~17	1964/05/30 (昭和39年)	延岡	4600	40000	RC8	0.000	モノクロ	アナログ
KU6511Y	C1	34~38	1965/09/20 (昭和40年)	人吉	6000	40000	RC8	152.720	モノクロ	アナログ
KU6511Y	C2B	19~24	1965/09/20 (昭和40年)	人吉	6000	40000	RC8	152.720	モノクロ	アナログ
KU6511Y	C3C	7~13	1965/09/20 (昭和40年)	人吉	6000	40000	RC8	152.720	モノクロ	アナログ
KU6511Y	C4	30~37	1965/09/20 (昭和40年)	人吉	6000	40000	RC8	152.720	モノクロ	アナログ
KU6511Y	C5	28~35	1965/09/20 (昭和40年)	人吉	6000	40000	RC8	152.720	モノクロ	アナログ
KU6511Y	C6	26~34	1965/09/20 (昭和40年)	人吉	6000	40000	RC8	152.720	モノクロ	アナログ
KU761Y	C3	4~11	1976/12/04 (昭和51年)	宮崎	6000	40000	RMKAR	151.980	モノクロ	アナログ
KU761Y	C4	6~10	1976/11/30 (昭和51年)	宮崎	6000	40000	RMKAR	151.980	モノクロ	アナログ

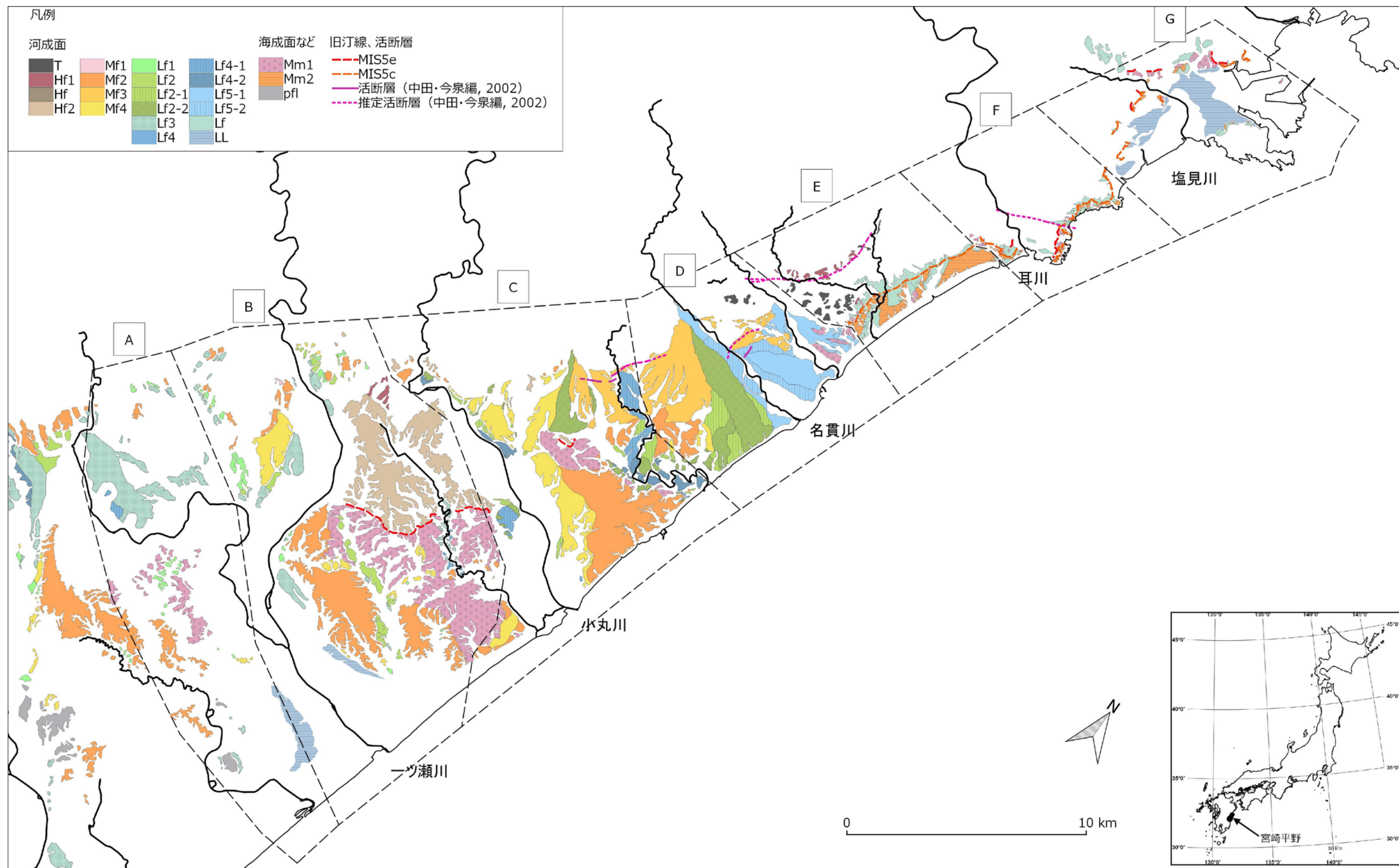


图 1-2 段丘区分图
(事例検討範囲全域)

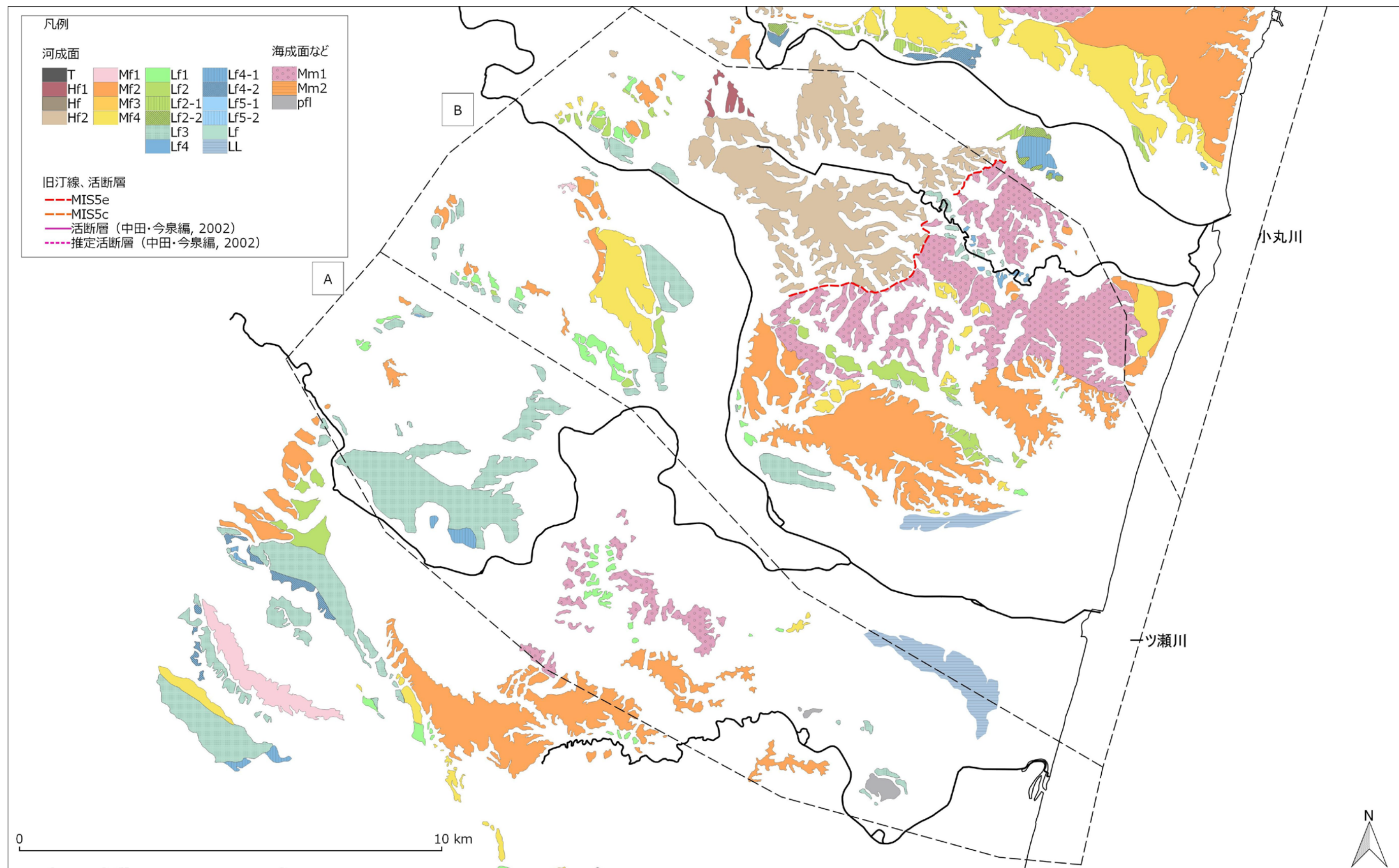


図 1-3 段丘区分図
(A および B 地区・拡大図)

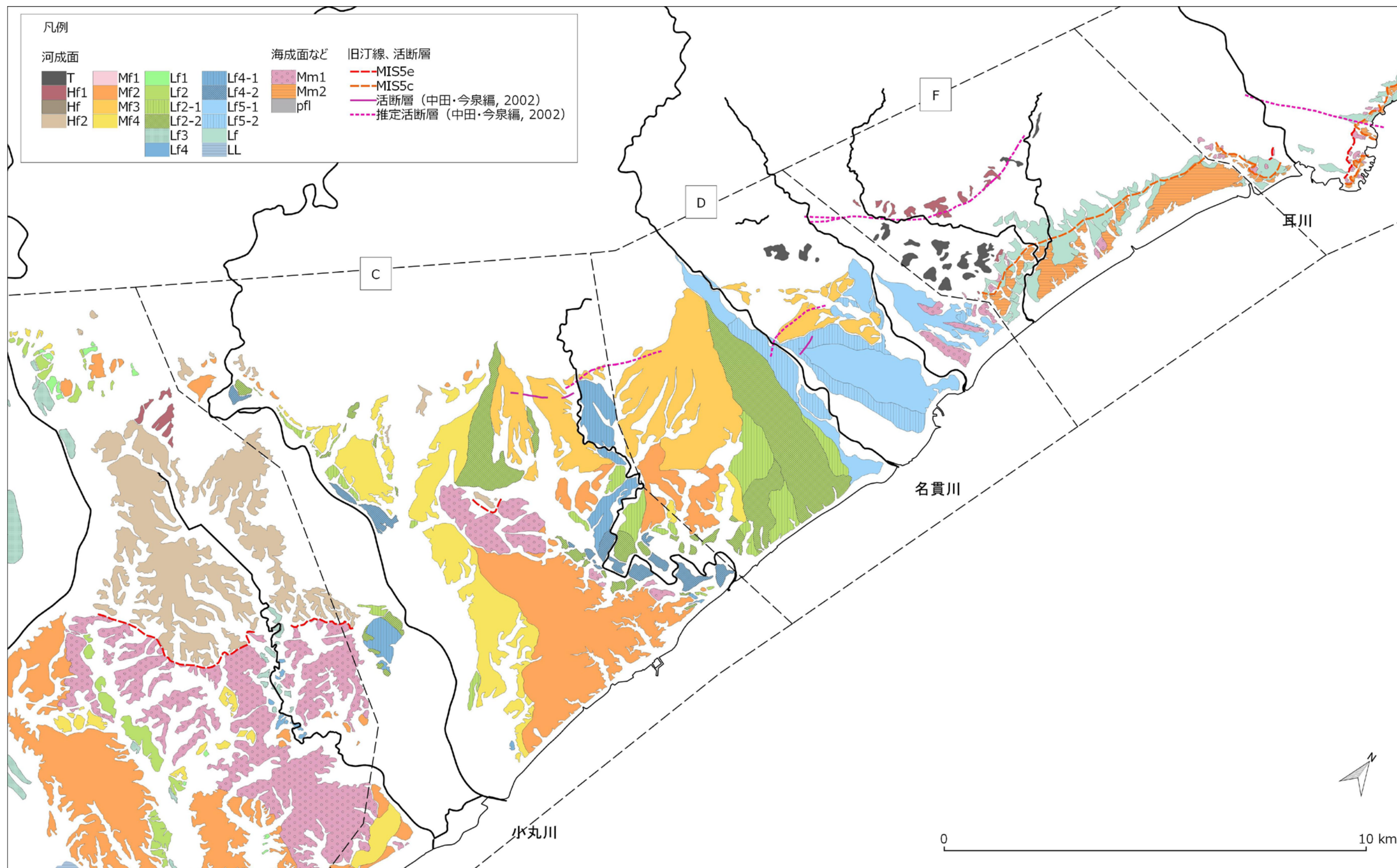


图 1-4 段丘区分图
(C~E 地区・拡大图)

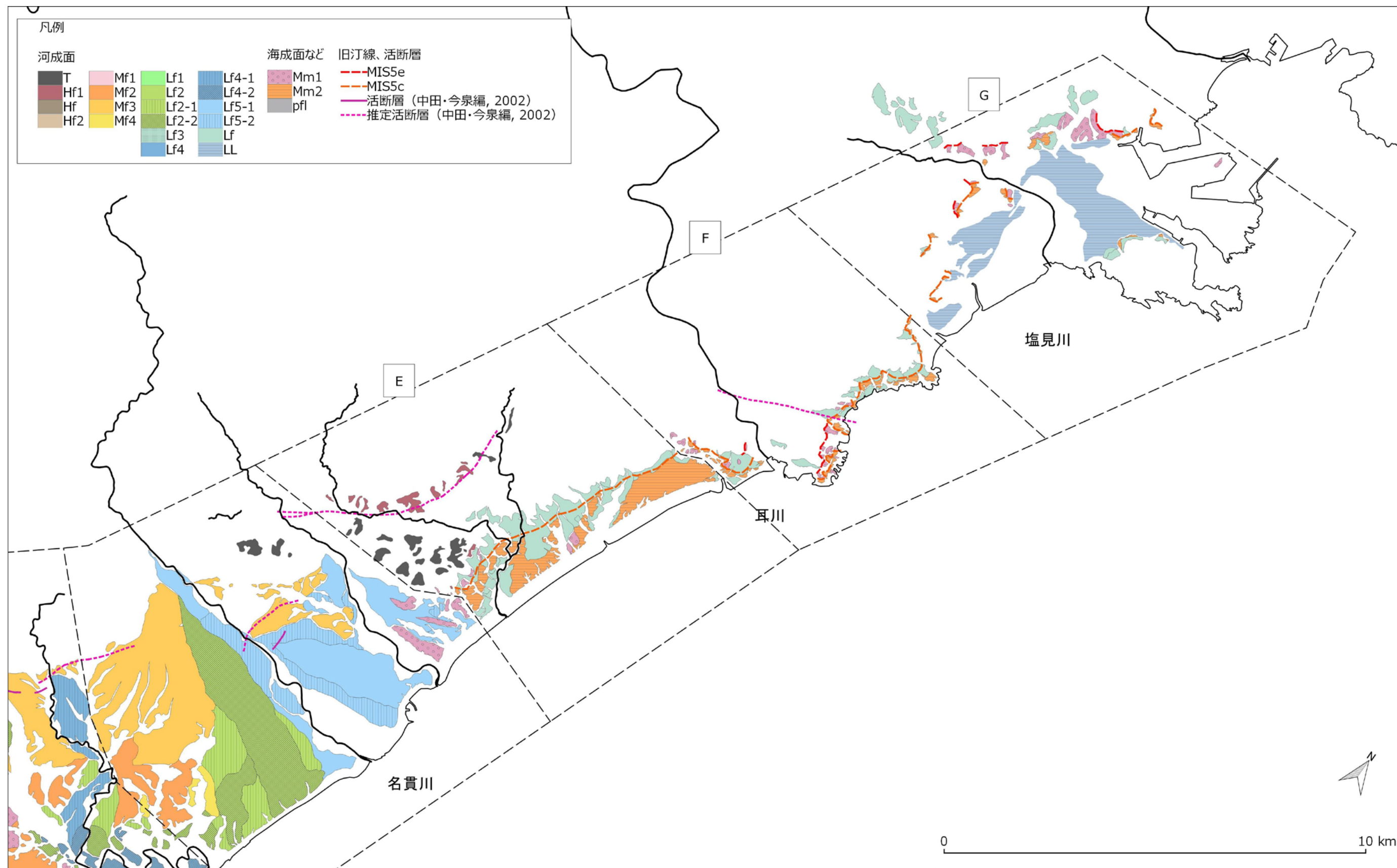


图 1-5 段丘区分图
(E~G 地区・拡大图)

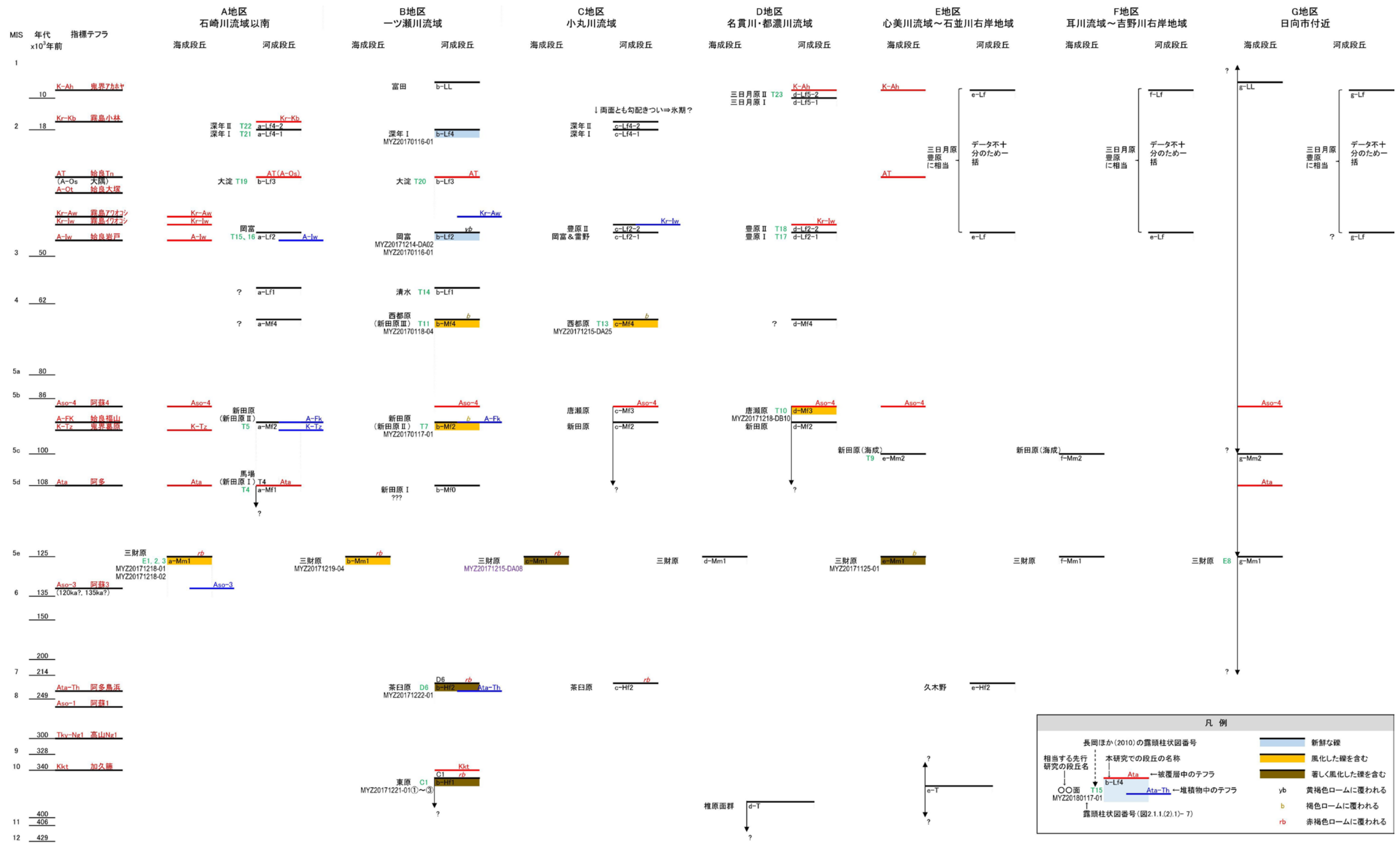


図 1-6 事例検討範囲における段丘対比・編年図

MIS: 海洋酸素同位体ステージ (Marine oxygen Isotope Stage)。指標テフラの名称と略号は、町田・新井 (2003) による「新編火山灰アトラス」にしたがった。未詳テフラ α、β および γ 各層 (報告書本編参照) は、段丘の対比・編年に影響を与えないと判断し、本図からは割愛した

2. 現地調査において見出した露頭位置

現地調査において見出した露頭の位置図を図 2-1 に示す。それらの露頭のうち、各段丘面で代表的と考えられるものに対し地質観察を行った露頭については、同図において強調して示す。

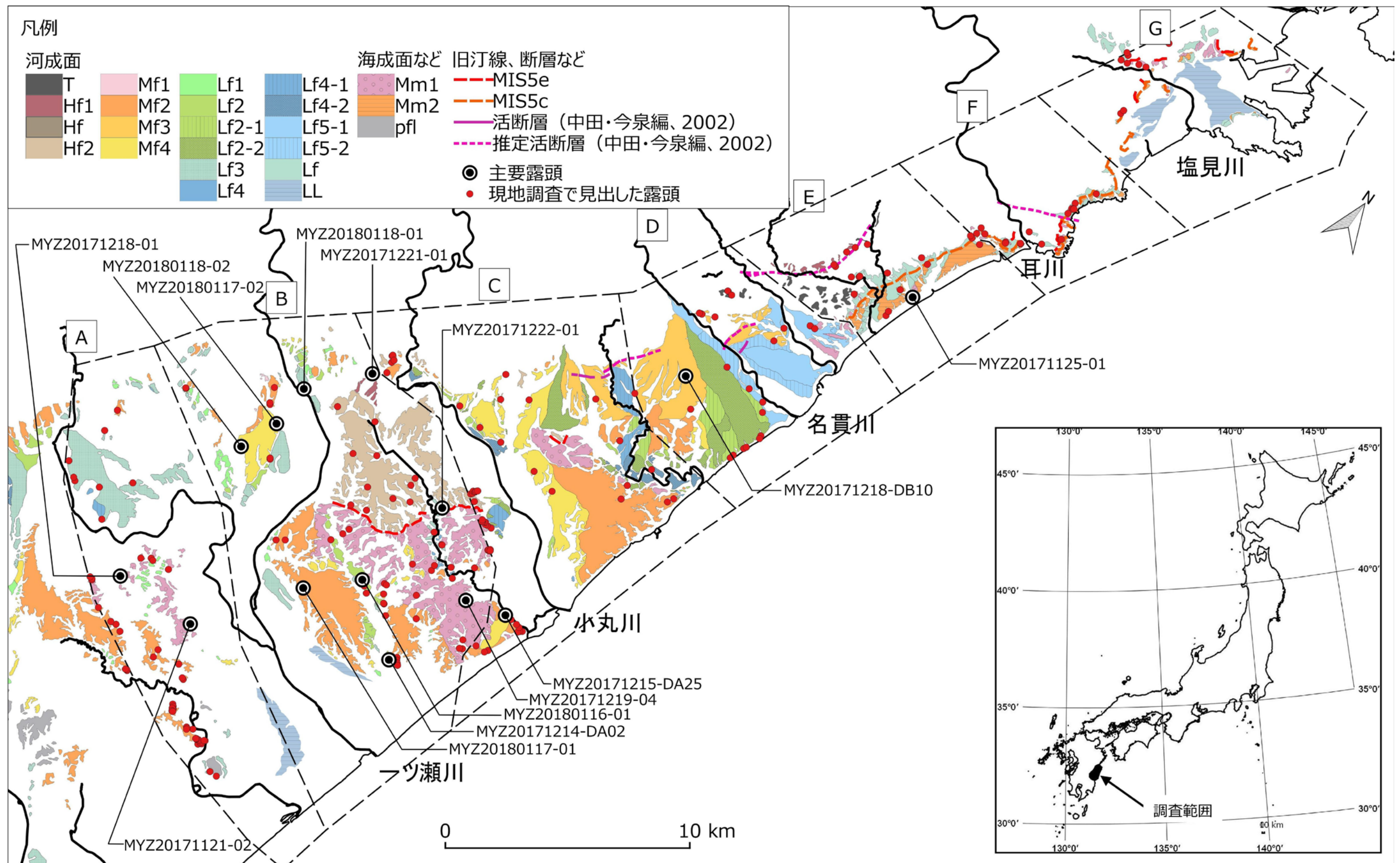


図 2-1 現地調査において見出した露頭位置図

3. 主要な露頭における露頭柱状図

本研究では、宮崎平野で最も最高位段丘から低位段丘までの各段丘がほぼ欠けることなく存在する B 地区を中心に代表的な露頭に対し地質観察を行った。代表的な露頭における柱状図を図 3-1 および図 3-2 に示す。

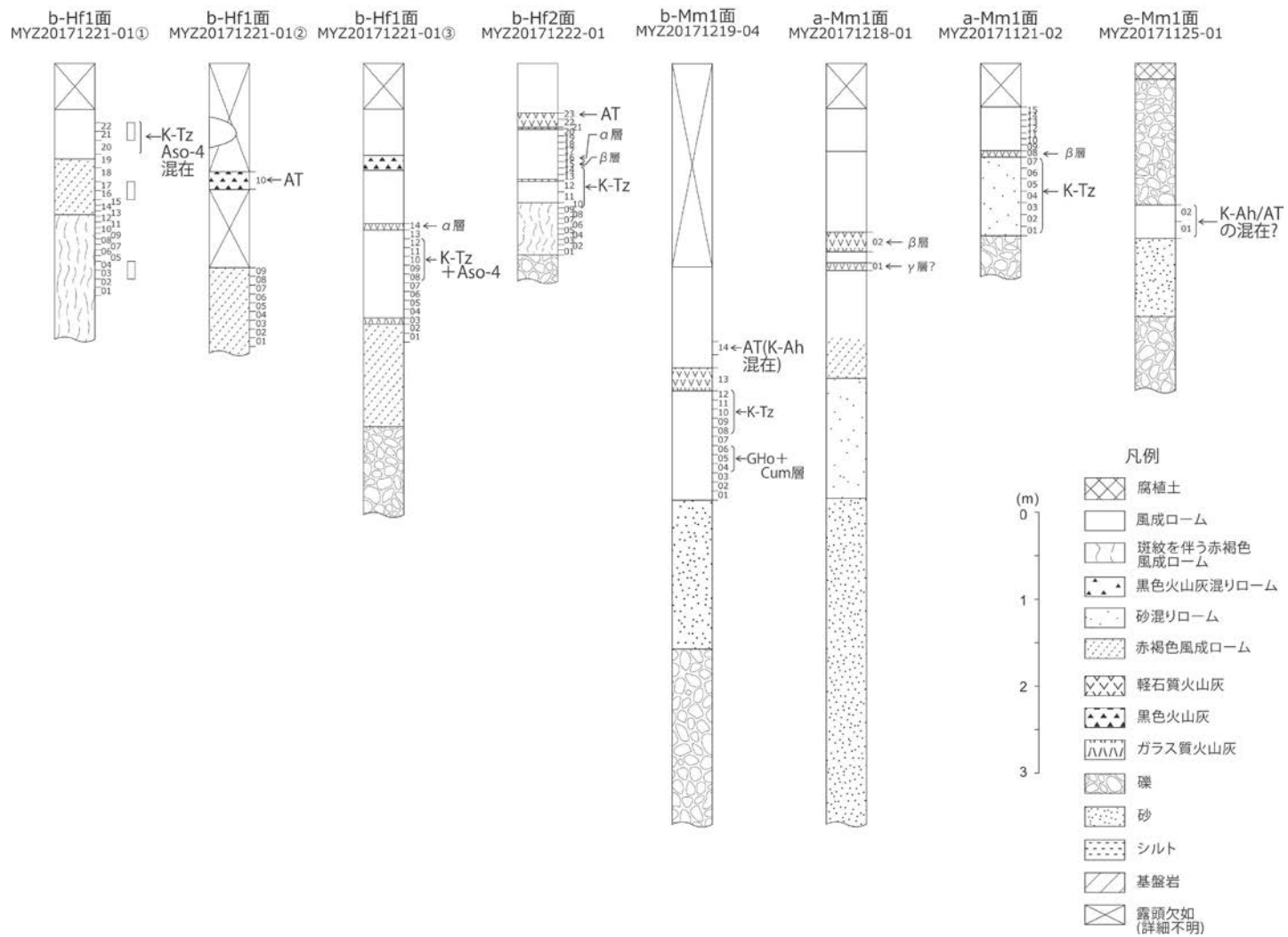


図 3-1 本研究における主要露頭における地質柱状図 (1)

露頭位置は図 2-1 を参照。柱状図横の数字はテフラ分析用試料採取位置を示し、火山灰の略号は、町田・新井（2003）にしたがった。

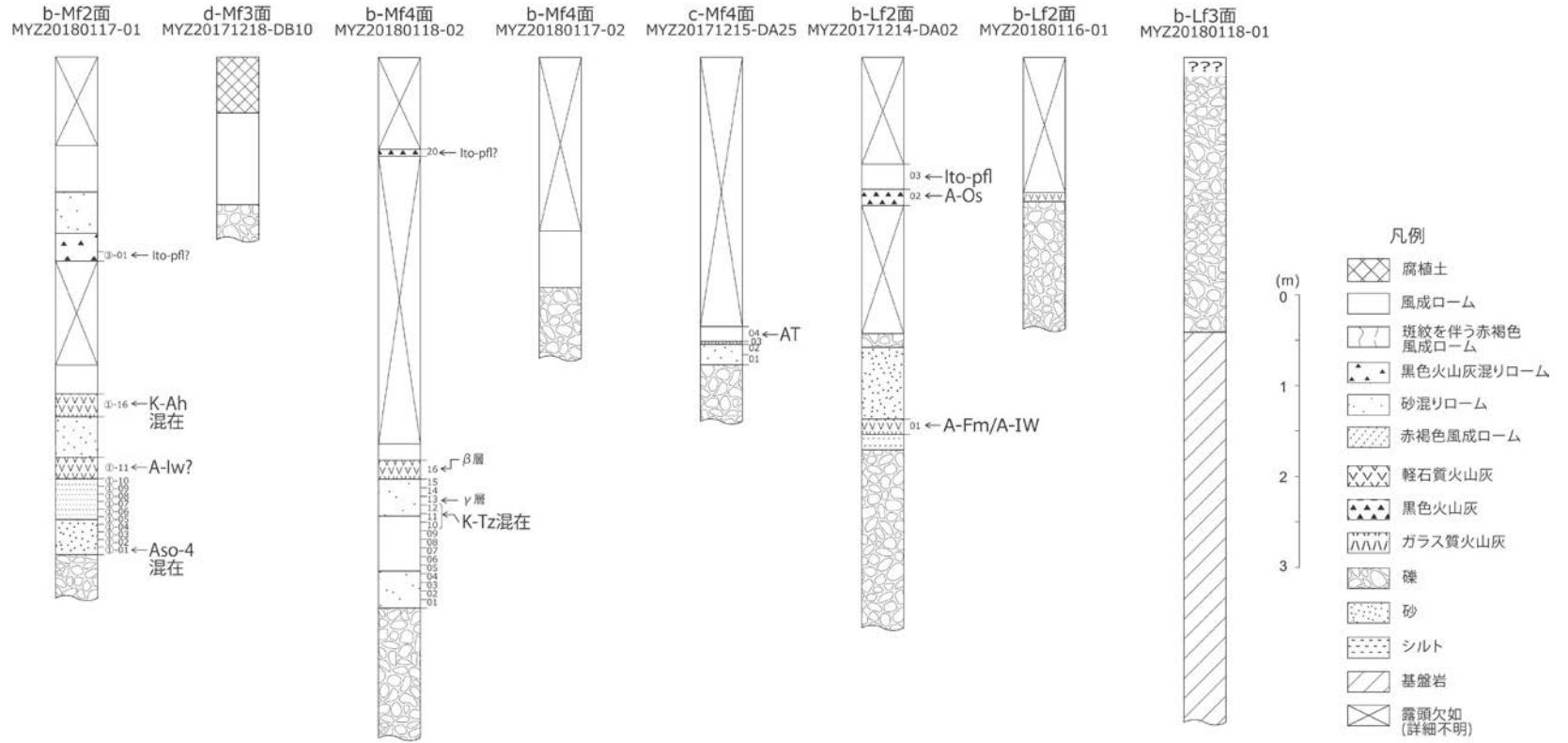


図 3-2 本研究における主要露頭における地質柱状図 (2)

露頭位置は図 2-1 を参照。柱状図横の数字はテフラ分析用試料採取位置を示し、火山灰の略号は、町田・新井（2003）にしたがった。

4. 引用文献

- 濱田崇臣, 幡谷竜太, 河成段丘を用いた内陸部隆起量評価手法の適用性の検討～経験的指標を重視したアプローチ～ (本編および別冊付録), 電力中央研究所報告 (研究報告), N10050, 2011.
- 町田 洋, 新井房夫, 新編 火山灰アトラス, 東京大学出版会, 336p, 2003.
- 中田 高, 今泉俊文 (編), 活断層詳細デジタルマップ, 東京大学出版会, 60p., 2002.

Appendix II

宮崎平野における沿岸海域の 地形・地質情報整理

目次

1. データセット、基底面および河口付近における沖積層基底深度	II-1
1.1 データセット	II-1
1.2 海底地形図	II-2
1.3 主要河川の河口付近における沖積層基底深度	II-4
2. 音波探査記録の再解析	II-6
2.1 記録状況	II-6
2.2 再解析結果	II-6
2.3 沖積層の基底面の平面分布状況	II-8
2.4 海底谷沿いの地形・地質断面図および沖積層の鉛直分布状況	II-11
2.4.1 古加江田川	II-15
2.4.2 古大淀川	II-17
2.4.3 古一ツ瀬川	II-19
2.4.4 古小丸川	II-21
2.4.5 古名貫川	II-23
2.4.6 古耳川	II-25
2.4.7 古塩見川	II-27
2.4.8 古五十鈴川	II-29
謝辞	II-31
引用文献	II-31

図目次

図 1-1 再解析対象の沿岸の海の基本図「宮崎」、「美々津」および「延岡」の図幅範囲	II-1
図 1-2 事例検討範囲およびその周辺における海底地形図（T.P.換算）	II-3
図 1-3 宮崎平野における主要河川付近の既往ボーリング位置図	II-4
図 2-1 検討対象の探査測線位置図	II-7
図 2-2 宮崎県前面海域の沖積層基底等深線図	II-10
図 2-3 宮崎県前面海域における埋積谷の位置図およびの沖積層基底等深線図	II-12
図 2-4 古加江田川、古大淀川、古一ツ瀬川および古小丸川における埋積谷沿いの地形・地質断面図	II-13
図 2-5 古名貫川、古耳川、古塩見川および五十鈴川における埋積谷沿いの地形・地質断面図	II-14
図 2-6 古加江田川における現海岸線から 6.5 km および 15.4 km 付近の再解析結果を基に作成した地質解釈断面図	II-16
図 2-7 古大淀川における現海岸線から 5 km および 15.4 km 付近	II-18
図 2-8 古一ツ瀬川における現海岸線から 10.1 km および 15.1 km 付近の再解析結果を基に作成した地質解釈断面図	II-20
図 2-9 古小丸川における現海岸線から 7.4 km および 10.5 km 付近の再解析結果を基に作成した地質解釈断面図	II-22
図 2-10 古名貫川における現海岸線から 4.7 km および 15.4 km 付近の再解析結果を基に作成した地質解釈断面図	II-24
図 2-11 古耳川における現海岸線から 2.2 km および 8.9 km 付近の再解析結果を基に作成した地質解釈断面図	II-26

図 2-12 古塩見川における現海岸線から 5.3 km および 8.8 km 付近の 再解析結果を基に作成した地質解釈断面図	II-28
図 2-13 古五十鈴川の海岸線から 7.4 km および 11.1 km 付近の 再解析結果を基に作成した地質解釈断面図	II-30

表 目 次

表 1-1 宮崎平野における主要河川付近の既往ボーリングデータ及び沖積層基底深度	II-5
--	------

宮崎平野における沿岸海域の地形・地質情報整理

沿岸海域のうち、水深 120m 程度より浅い地域は、最終氷期最盛期 (Last Glacial Maximum、以下、LGM) において陸域だったと考えられる。この時のこの地域の地形は、その後の海進により海底下となり、堆積物に埋積され、保存されていると期待される。つまり、沖積層の厚さの平面分布を調べるにより、沖積層に埋積された LGM 時の地形を復元できると考える。これは、LGM 時の侵食の記録と見做しうるものであり、この中には主要河川の旧河道も含まれ、沿岸海域の侵食を評価する上で重要なデータとなると考えられる。本報告では、これを沖積層基底等深度線図と呼んだ。

そこで、ここでは、事例研究の一環として取り上げた宮崎平野前面の沿岸海域における沖積層基底等深度線図の作成に際して実施した海上音波探査記録の再解析結果を示す。

1. データセット、基底面および河口付近における沖積層基底深度

1.1 データセット

本研究では、宮崎平野前面海における LGM の旧河道 (埋没谷) を検討するため、海上保安庁刊行の以下の 3 つの沿岸の海の基本図における海上音波探査記録を対象に再解析を行った (図 1-1)。

- ・沿岸の海の基本図 (5 万分の 1) 「宮崎」 (1997 年刊行、海図第 6355 号 2、2-s および報告書) (以下、「宮崎」)
- ・沿岸の海の基本図 (5 万分の 1) 「美々津」 (1999 年刊行、海図第 6355 号 1) (以下、「美々津」)
- ・沿岸の海の基本図 (5 万分の 1) 「延岡」 (2000 年刊行、海図第 6356 号 8) (以下、「延岡」)

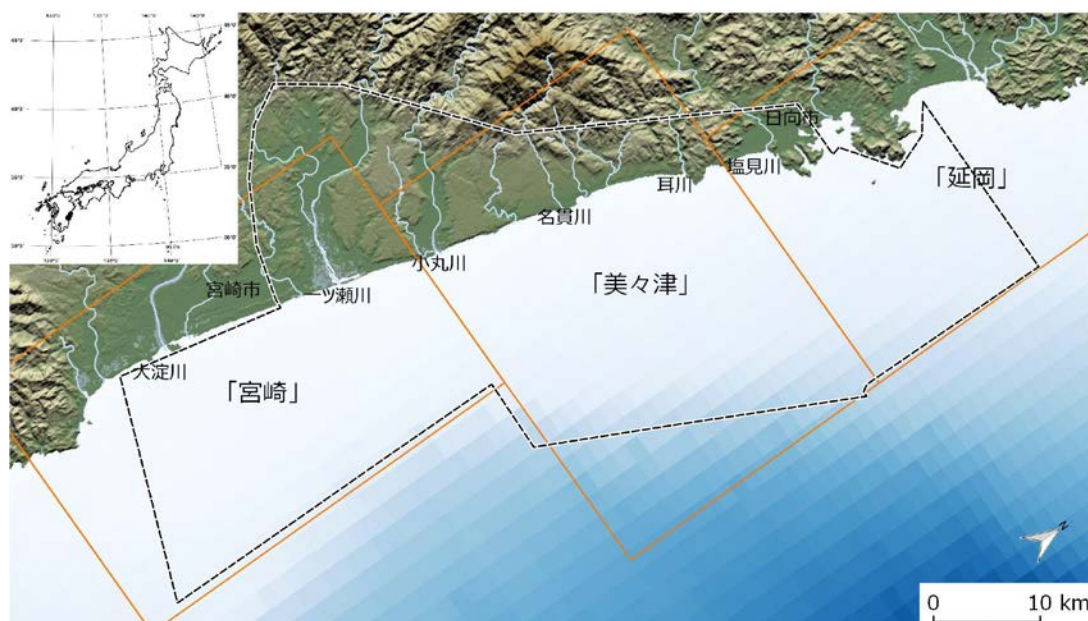


図 1-1 再解析対象の沿岸の海の基本図「宮崎」、「美々津」および「延岡」の図幅範囲
陸域および海域の基図は、米国航空宇宙局 (NASA) による地形データ (SRTM-3) および日本水路協会発行の海底地形データ (M7000 シリーズ) からそれぞれ作成。黒点線：事例検討範囲、橙色線：沿岸の海の基本図「延岡」、「美々津」および「宮崎」

1.2 海底地形図

既存音波探査記録の解析および地質構造の検討・解釈に資することを目的に、事例研究範囲における海底地形図を編集した。

海上保安庁による「沿岸の海の基本図」作成を目的とした調査（以下、「沿岸の海の基本図調査」）は、海図と同様、D.L. (Datum Line : 略最低低潮面 (基本水準面)) を水深の基準面としている。しかしながら、本研究では、沿岸陸域との整合性を考慮し T.P. (Tokyo Peil : 東京湾平均海面) を基準面とし、海上保安庁資料 (海上保安庁、2018) に基づき、対象海域における T.P.と D.L.との差異 (約 1.2 m) を補正することにした。

海底地形図の作成にあたっては、一般財団法人日本水路協会が販売している海底地形デジタルデータ M7000 シリーズの水深データ (四国南岸沖・豊後水道:M7003 および薩南:M7008) をもとに前述の T.P.を基準面とした沿岸陸域の標高と連なるような沿岸海域地形図を編集した。編集した海底地形図を図 1-2 に示し、当該海域の海底地形の特徴を以下に記す。

- ・「宮崎」海域の南部では、景勝地の青島のように新第三系宮崎層群が地表面 (海底面) に露出する露岩域がみられ、複雑な海底地形を示す。
- ・「延岡」海域の北端部の門川町前面海域では、基盤岩の海底面への露出と考えられる複雑な海底地形が海岸線および島嶼の周辺にみられる。
- ・「宮崎」海域南部および「延岡」海域北端部を除く範囲では、等深線の配置は海岸線に沿った形の比較的単純な形状を示す。
- ・「宮崎」海域では、水深 100 m 程度まで顕著な海底谷がみられるが、それより北の「美々津」および「延岡」の両海域では、数条の小規模な谷地形が検討範囲域外に認められる程度となる。

以上のことを踏まえ、本研究における沖積層基底面の検討は、沖積層の分布の限界となる大陸棚外縁までを対象とした。

この大陸棚外縁は、「宮崎」海域ではおおむね水深 120 m 程度にみられるが、より南部ではより深くなるとみられ、等深線の配置の間隔が狭くなる傾斜変換点が不明瞭となる。一方、「美々津」海域では、傾斜変換点の水深は 130 m 以深となり、また、北側に向かい水深が増し、等深線の間隔が密になる傾斜変換点は水深 150m 程度まで深くなる。さらに、「延岡」海域では、再び傾斜変換点の水深は浅くなる傾向を示し、本検討範囲の北東端付近で水深 135 m 程度となる。

ここで、「美々津」および「延岡」海域の水深 T.P.120~130 m において、ところどころ孤立した地形の高まりあるいは連続性に乏しい小規模な谷地形がみられる (図 1-2)。これは、岩盤の露出によるものではなく、削剥され残った更新統の形成する特異地形である可能性がある。

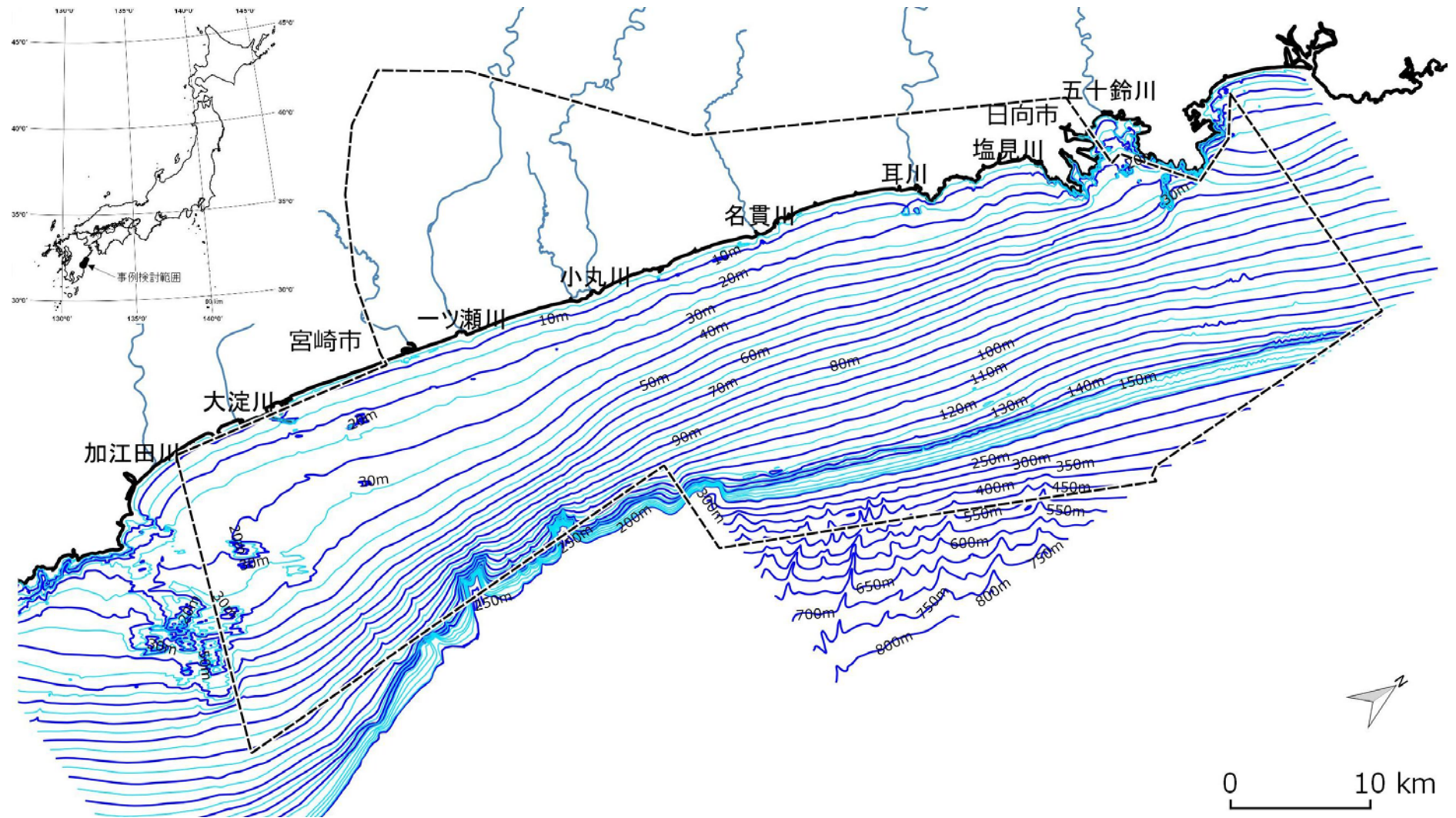


図 1-2 事例検討範囲およびその周辺における海底地形図 (T.P.換算)

一般財団法人日本水路協会発行の海底地形データ M7003 (四国南岸沖-豊後水道) および M7008 (薩南) をもとに T.P.換算し編集。黒点線 : 事例検討範囲

1.3 主要河川の河口付近における沖積層基底深度

海上音波探査記録の再解析時に、陸域の海岸線付近における最終氷期最盛期に形成されたと考えられる沖積層基底面深度との整合性を確認するため、国土情報検索サイト「KuniJiban」(国土交通省、2008、以下、「KuniJiban」)に基づき、宮崎平野の主要河川周辺におけるボーリングデータを収集、整理した。

「KuniJiban」における当該地域のボーリングデータのうち沖積層基底面(沖積層基底礫層(BG層)の下限)まで達している、または、重要な知見を有すると考えられるボーリング孔に関し、ボーリング孔位置および沖積層基底面深度をとりまとめて、図1-3および表1-1に示す。

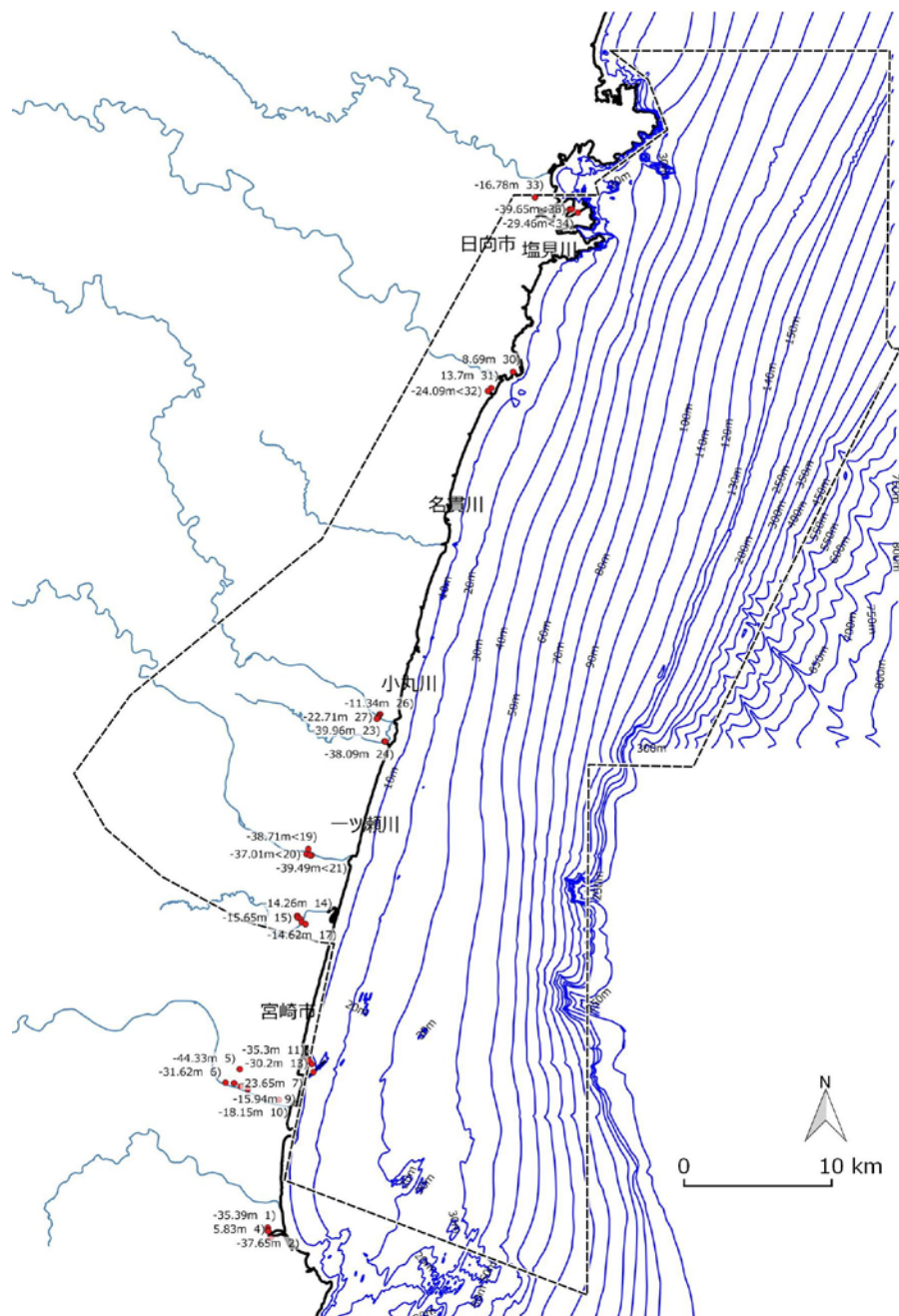


図 1-3 宮崎平野における主要河川付近の既往ボーリング位置図

赤色点：既往ボーリング孔位置。黒点線：事例検討範囲。ボーリング孔における数字は沖積層基底深度、方括弧の数字は表 1-1 におけるデータ出典番号を示す

表 1-1 宮崎平野における主要河川付近の既往ボーリングデータおよび沖積層基底深度

地域	番号	ボーリングデータの出典	沖積層 基底深度 (T.P.: m)	緯度	経度
加江田川 河口付近	1)	国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所(1983a)	-35.39	31°49'10.7"	31°49'10.7"
	2)	国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所(1983b)	-37.65	31°49'04.3"	31°49'04.3"
	3)	国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所(1983c)	-36.45	31°49'03.1"	31°49'03.1"
	4)	国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所(1982a)	5.83	31°48'48.0"	31°48'48.0"
大淀川 河口付近	5)	国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所(1993b)	-44.33	31°55'00.3"	31°55'00.3"
	6)	国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所(1987)	-31.62	31°54'30.6"	31°54'30.6"
	7)	国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所(1986)	-23.65	31°54'29.2"	31°54'29.2"
	8)	国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所(1991a)	-28.09	31°54'16.5"	31°54'16.5"
	9)	国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所(1991b)	-15.94	31°54'22.2"	31°54'22.2"
	10)	国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所(1997)	-18.15	31°53'52.5"	31°53'52.5"
宮崎港 周辺	11)	国土交通省 九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所(1990)	-35.30	31°55'18.4"	31°55'18.4"
	12)	国土交通省 九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所(1989)	-40.78	31°55'10.8"	31°55'10.8"
	13)	国土交通省 九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所(1982)	-30.20	31°54'52.9"	31°54'52.9"
石崎川 河口付近	14)	国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所(1979a)	-14.26	32°00'37.7"	32°00'37.7"
	15)	国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所(1979b)	-15.65	32°00'33.6"	32°00'33.6"
	16)	国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所(1979c)	-19.38	32°00'29.5"	32°00'29.5"
	17)	国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所(1980)	-14.62	32°00'23.1"	32°00'23.1"
	18)	国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所(1984)	-14.60	32°00'19.1"	32°00'19.1"
一ツ瀬川 河口付近	19)	国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所(1982b)	-38.71 以深	32°03'04.6"	32°03'04.6"
	20)	国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所(1982c)	-37.01 以深	32°02'53.3"	32°02'53.3"
	21)	国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所(2006a)	-39.49 以深	32°02'50.4"	32°02'50.4"
	22)	国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所(2006b)	-39.47 以深	32°02'50.7"	32°02'50.7"
宮田川 河口付近	23)	国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所(1988a)	-39.96	32°07'01.0"	32°07'01.0"
	24)	国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所(1988b)	-38.09	32°07'00.8"	32°07'00.8"
小丸川 河口付近	25)	国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所(2008a)	-14.82	32°08'01.0"	32°08'01.0"
	26)	国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所(2008b)	-11.34	32°07'57.3"	32°07'57.3"
	27)	国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所(2008c)	-22.71	32°07'54.9"	32°07'54.9"
小丸川 河口付近	28)	国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所(2008d)	-21.16	32°07'52.4"	32°07'52.4"
	29)	国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所(2008e)	-20.77	32°07'50.8"	32°07'50.8"
耳川河口 付近	30)	国土交通省九州地方整備局 延岡河川国道事務所(1994a)	8.69	32°20'33.4"	32°20'33.4"
	31)	国土交通省九州地方整備局 延岡河川国道事務所(1994b)	13.7	32°19'57.9"	32°19'57.9"
	32)	国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所(1990)	-24.09 以深	32°19'51.5"	32°19'51.5"
日向港 周辺	33)	国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所(1982d)	-16.78	32°26'57.4"	32°26'57.4"
	34)	国土交通省、九州地方整備局(2011a)	-29.46 以深	32°26'23.4"	32°26'23.4"
	35)	国土交通省、九州地方整備局(2011b)	-42.37 以深	32°26'30.2"	32°26'30.2"
	36)	国土交通省、九州地方整備局(2011c)	-39.65 以深	32°26'31.1"	32°26'31.1"

「KuniJiban」におけるボーリングデータをもとに作成

事例検討範囲である宮崎市から日向市にかけての海岸沿いの地域において、主要な河川における河口部および沖積平野にみられる沖積層基底面の最大深度は、おおむね T.P. -20 m ~ -40 m であった。このため、現在の海岸線付近では、LGM には少なくとも T.P.-40 m 程度の下刻があったと推定される。

しかしながら、「KuniJiban」に挙げられる既往ボーリングは、港湾や橋梁などの土木構造物が新設された地域で密集するなどしてデータ密度の粗密が大きく、また、沖積層基底の最深部に掘削されていない可能性もあるため、そのデータの取扱いには注意が必要と考えられる。

2. 音波探査記録の再解析

2.1 記録状況

海上保安庁による沿岸の海の基本図調査は、調査年次が平成 6 年（1994 年）から平成 11 年（1999 年）とやや古い。また、探査記録（原本）は、シングルチャンネルによるアナログ記録であるため、一般にノイズレベルが高く直接波および多重反射などの不要信号が卓越するなど、記録分解能および探査深度がやや低いものが多い。

検討対象とした資料のうち「宮崎」は、その記録品質は中程度であり、音源の特性から発震時の残響が大きい。「美々津」は、その記録品質は中程度であるが全体にノイズレベルが高く、記録判読が困難となるような箇所も一部みられた。「延岡」は、調査年次が比較的新しいこともあり、その品質記録は他の調査のものと比較して良好であった。

再解析対象とした探査記録は、沖合部における沖積層とその基底層との間の不整合面は判読可能であったものの、水深の浅い沿岸部については、発震音源の残響や海面・海底間の多重反射によるマスキングにより、沖積層基底面の判読が困難な部分もみられた。そのような箇所については、沿岸陸域における既往ボーリングデータの沖積層基底深度（表 1-1）などを参考にしつつ、沖積層基底面の反射面を一部推定により解析した。

2.2 再解析結果

前節 2.1「記録状況」で述べたように、探査記録の再解析にあたっては、沖積層に埋積された埋積谷の抽出およびその形状や連続性について注目するとともに、その基底層の地質層序や地質構造について検討を行った。海上音波探査の測線位置を図 2-1 に示す。

再解析の結果、沖積層基底の顕著な不整合面について、検討範囲のほぼ全域にわたって区分、追跡することができた。

沖積層基底をなす地層については、陸域における地質分布に連続する形で、検討範囲南部の「宮崎」海域の南部および沿岸部で新第三紀の中新統宮崎層群が、検討範囲中部の「美々津」海域では第四紀の更新統が存在し、検討範囲北部の「延岡」の南側の沿岸部では中新統の尾鈴山酸性岩類が存在することが想定された。

このうち「延岡」海域における尾鈴山酸性岩類は、大きな傾斜で起伏に富む不整合面を形成し、また音波の透過が悪いことなど探査記録パターンが堆積物層と大きく異なるため、探査記録上においてその区分は容易であった。また、「宮崎」海域における南側の宮崎層群の露岩分布域周辺についても、上位の未固結な沖積層と固結から半固結のやや大きな傾斜で分布する宮崎層群との区分は、比較的容易であった。

しかしながら、「宮崎」海域における沖合部および「美々津」海域で想定される宮崎層群と更新統の堆積物層については、本研究で使用した比較的探査深度が浅い探査記録（海底下 100～150 m 程度）では、識別および区分が困難であった。これは、更新統と想定される堆積物層が、特に大陸棚外縁付近において、プログラデーションを示す比較的大きな傾斜で分布し、ほぼ同じように東方に傾斜する宮崎層群と似たような形態の反射記録パターンを示すことによるものと考えられる。なお、より深部までの記録が得られた場合、両者の間には大きな堆積時間の間隙があることから顕著な不整合面が認められると予想され、それに基づいて両者の区分が可能となるものと期待される。

以上のことをまとめると、本研究での既往探査記録の再解析では、沖積層基底の構成層についての地質分布の判読を試みたものの、探査記録の対象深度が浅く区分が困難であった。特に、沖積層基底を構成する宮崎層群と更新統の識別および区分は、今後の課題であると考えられる。

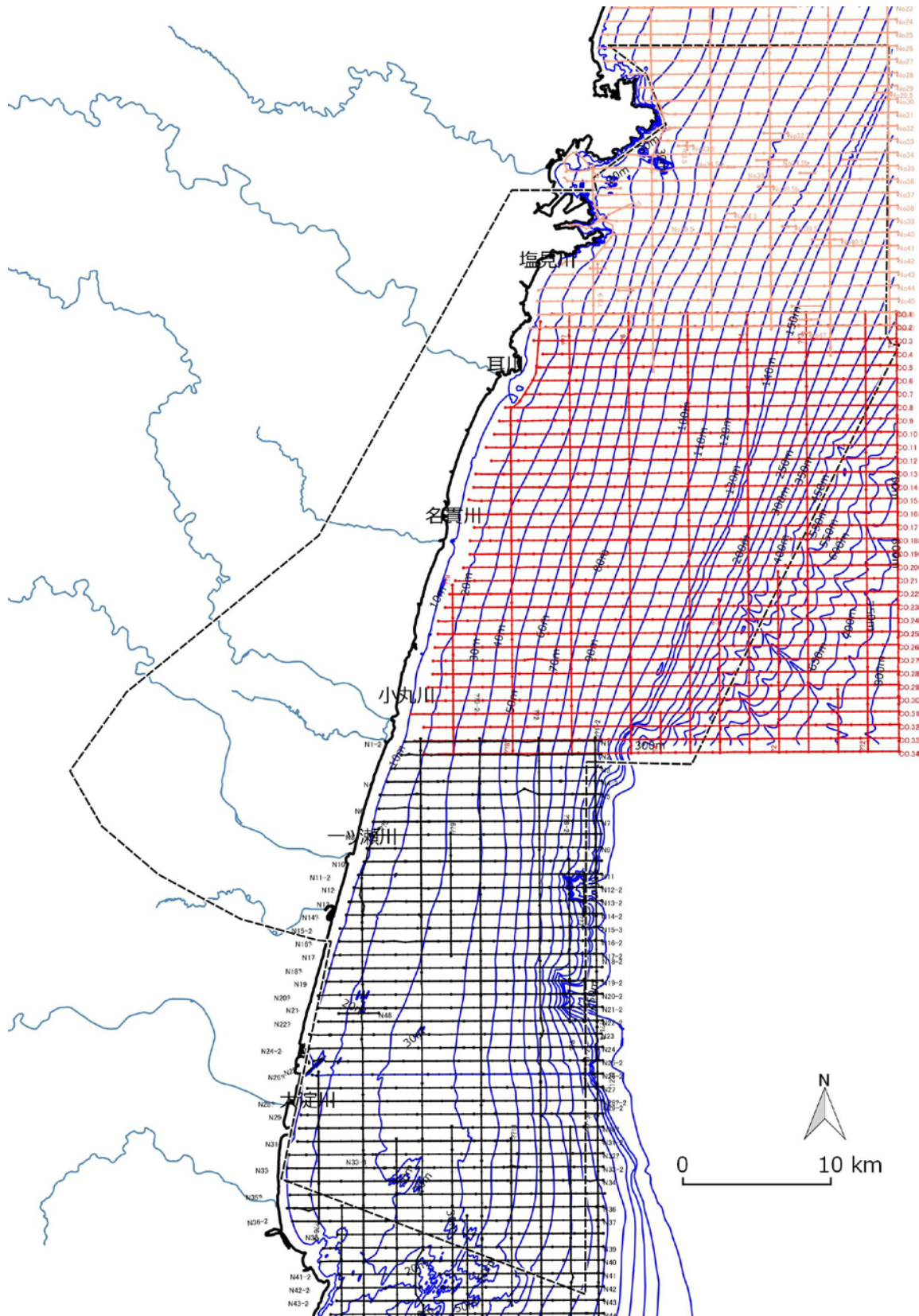


図 2-1 検討対象の探査測線位置図

黒色線：「宮崎」における測線、赤色線：「美々津」における測線、橙色線：「延岡」における測線

2.3 沖積層の基底面の平面分布状況

「宮崎」、「美々津」および「延岡」における探査記録の再解析結果に基づき、判読した沖積層基底面の深度を T.P. を基準として平面図上に展開し等深線で結び沖積層基底等深線図を作成した。本研究における宮崎県前面海域の沖積層基底等深線図を図 2-2 に示す。

なお、既存の音波探査記録の周波数帯域における記録分解能（卓越周波数 200～300 Hz、波長 3.75～2.5 m、記録分解能約 1 m）、音波探査記録解析時における反射面認定の誤差、深度読み取り時の誤差などを勘案し、等深線間隔は 5 m とした。

沖積層基底等深線図（図 2-2）を概観すると、事例検討範囲の南東端部付近から海域中央部の川南町の海岸線付近（＝名貫川河口部付近）を結ぶ線を境として、その西側では等深線が複雑に入り組む形状を示すのに対し、東側では日向灘に向かい深度が増す比較的単純な形状を示す。この両者の等深線の形状の違いは、沖積層基底面を構成する地層の起伏状況の相違を反映したものであり、つまり基底層における層相の相違を示すものと考えられる。前節 2.2 「再解析結果」で述べたように、沖積層基底層の詳細を明らかにすることは困難であったものの、陸域における地質分布も踏まえると、沖積層基底等深線が複雑な海域南部は固結したやや堅硬な新第三系の宮崎層群が、比較的単調な等深線配列を示す海域北部は未固結の第四系の更新統が、沖積層基底層であることを反映している可能性がある。

本研究の検討範囲のうち「宮崎」海域では、宮崎市の沖合から南部にかけて宮崎層群の露岩域が広く分布し、これに規制される形で沖積層基底等深線が複雑な形状を示す。本海域における沖積層の分布外縁水深は、宮崎市の沖合いで T.P.-120 m 程度と最も浅く、より南部に向かい徐々に深くなる。

「美々津」海域では、露岩域は認められず、沖積層基底等深線図において、海底谷周辺以外は比較的単純な等深線の配列を示す。沖積層基底面は、海岸線から 8 km 程度までは、ほぼ東方向に 10/1000～15/1000 の傾斜を示し、一部埋没した段丘状の形態を示す。より沖合では、傾斜は 5/1000～10/1000 と緩くなり、東方へ向かって緩く傾斜する。沖積層の分布外縁水深は、本海域南部の川南町の沖合いで T.P.-125 m 程度、中央部の沖合いで T.P.-130 m 程度、北部で T.P.-140 m 程度と、北に向かって深くなる傾向が見られる。

「延岡」海域では、沿岸陸域および海域部で尾鈴山酸性岩類が分布し、亀瀬や枇榔島などの岩礁が点在する。この沿岸部において沖積層基底をなす尾鈴山酸性岩類は、島嶼周辺など T.P.-50 m 付近まで分布し、全体に大きな傾斜を示す。それより沖合いでは、沖積層基底面の傾斜は 5/1000～10/1000 と緩くなり、東南東に傾斜する。沖積層の分布外縁水深は、南部で T.P.-135 m 程度、北部で T.P.-125 m 程度である。

沖積層基底面を構成する地層について、記録上で内部反射が判然と読み取れる地点については、地質図解法によりその走向・傾斜を計測した（図 2-2）。前述したように、検討範囲の南部では基底層として宮崎層群が分布することが想定され、北部では更新統の堆積層が想定される。後者の更新統堆積物層は、特に、大陸棚外縁付近においてプログラデーションを示す層理面が発達しており、その走向・傾斜はこの層理面の内部反射を計測している。このため、地層構造を反映していない可能性があり注意が必要である。

計測した地層における傾斜は、南部の宮崎層群と考えられる地層で大きく、おおむね 2° 以上を示し、調査海域の南東端部では 5° 程度以上と、海域に分布する地層としては非常に大きい。更新統と想定される地層の内部反射面の傾斜は、全体に 2° 以下であり、北に向かって小さくなるように見える。

地層の走向は、宮崎層群が想定される南部の「宮崎」海域で北西－南東～北北西－南南東を示すが、中央部の「美々津」海域以北では、北北東－南南西～北東－南西方向を示すよう

になる。この走向・傾斜の違いは、前述したような沖積層基底層をなす地層（宮崎層群と更新統の地層）の違いを反映している可能性がある。

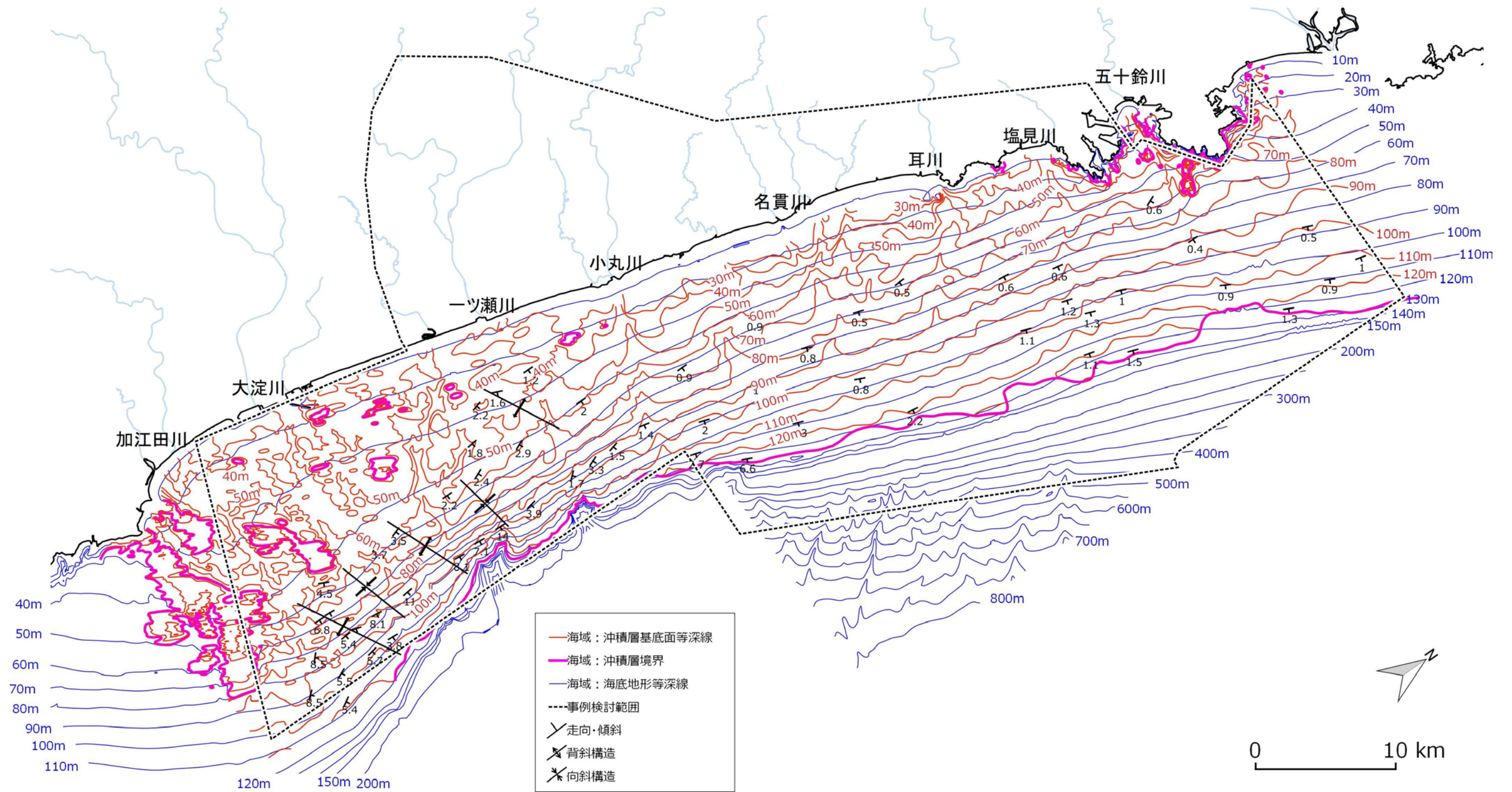


図 2-2 宮崎県前面海域における沖積層基底等深線図

2.4 海底谷沿いの地形・地質断面図および沖積層の鉛直分布状況

沖積層基底等深線図において、加江田川、大淀川、一ツ瀬川、小丸川、名貫川、耳川、塩見川および五十鈴川の前面海域に連続性のある埋積谷が認められた。加江田川、大淀川、一ツ瀬川、小丸川、名貫川、耳川、塩見川および五十鈴川の前面における連続性のある埋積谷を、それぞれ古加江田川、古大淀川、古一ツ瀬川、古小丸川、古名貫川、古耳川、古塩見川および古五十鈴川と称する。それら埋積谷の位置および埋積谷沿いの地形・地質断面図を、図 2-3 ならびに図 2-4 および図 2-5 に示す。なお、小丸川と名貫川との間にある平田川の前面海域でも埋積谷地形が認められるものの(図 2-3)、これは、探査記録上では明瞭でない部分があること、また、沖積層基底等深線の作図時に谷の連続性を強調し過ぎた部分であることから、古河川として判断しなかった。

検討範囲南部における古加江田川、古大淀川および古一ツ瀬川は、北部における古河川と比較して、海岸線付近から大陸棚外縁付近までの流下距離が長いことで特徴づけられる。これは、前節 2.3「沖積層の基底面の平面分布状況」で述べたように、これら南部の三つの古河川が沖積層を構成する基底層の高まり(＝起伏に富む宮崎層群)に規制され大きく蛇行したものと考えられる。

一方、検討範囲北部の埋積谷(古小丸川、古名貫川、古耳川、古塩見川および古五十鈴川)は、現河口から、比較的単純な弧状ないし直線状に大陸棚外縁へと連続する。

これら検討範囲南部と北部における古河川形状の違いは、宮崎層群と更新統の層相などの岩相の相違を反映したものと考えられる。

つまり、侵食に強い固結した宮崎層群域を流下した南部の古河川はその起伏に規制されて蛇行し、侵食しやすい未固結の更新統の堆積物中を流下する北部の古河川は比較的直線状に流下した可能性が考えられる。

次項以降に、各古河川に、その形態などについて記載する。なお、沖積層基底を構成する地層について現時点では明瞭な区分ができていないが、記載にあたっては便宜的に、完新統：A、更新統：B、宮崎層群：M、尾鈴山酸性岩類：R と推定し記した。

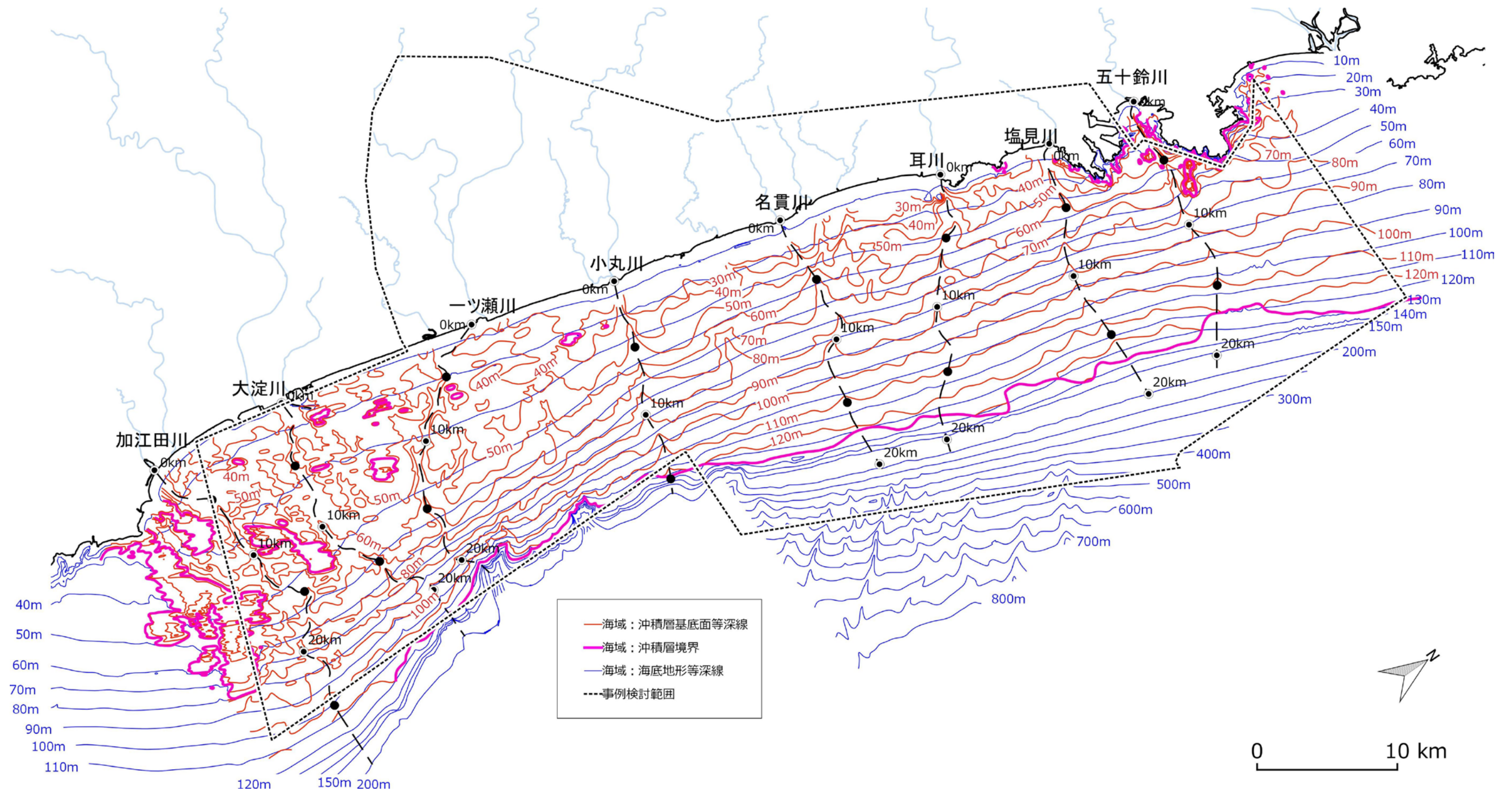


図 2-3 宮崎県前面海域における埋積谷の位置図およびの沖積層基底等深線図
 黒色破線：本研究で見出された埋積谷。各埋積谷沿いの地形・地質断面図は図 2-4 および図 2-5 を参照

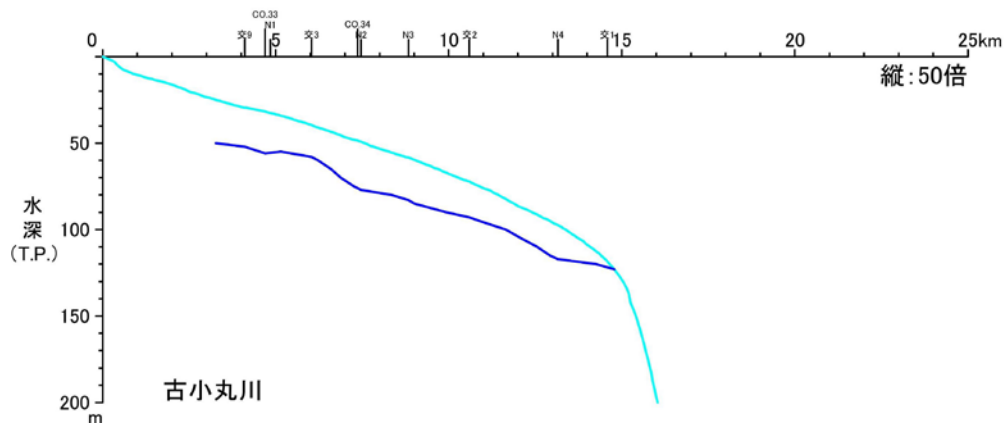
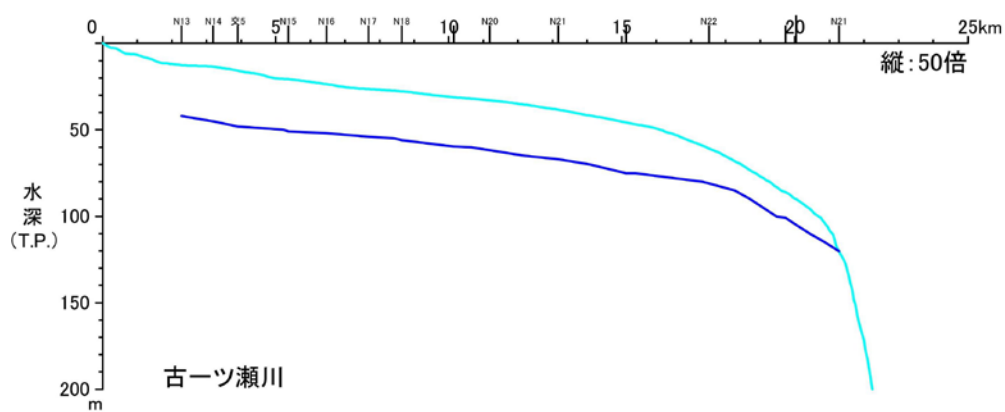
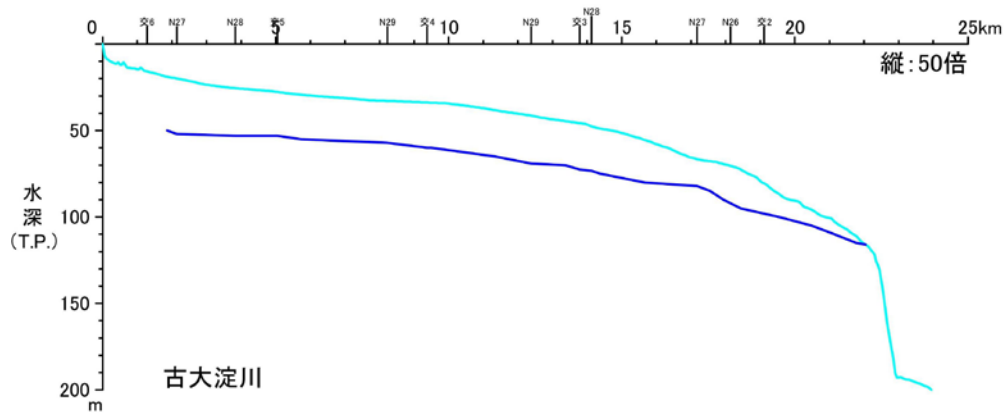
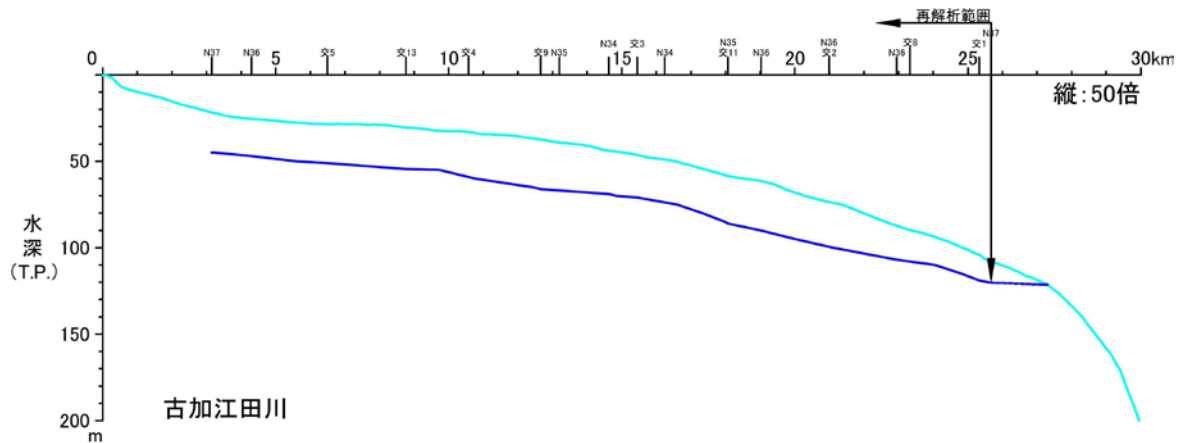


図 2-4 古加江田川、古大淀川、古一ツ瀬川および古小丸川における埋積谷沿いの地形・地質断面図

青緑色線：海底地形面、青色線；沖積層基底面。断面位置については図 2-3 を参照

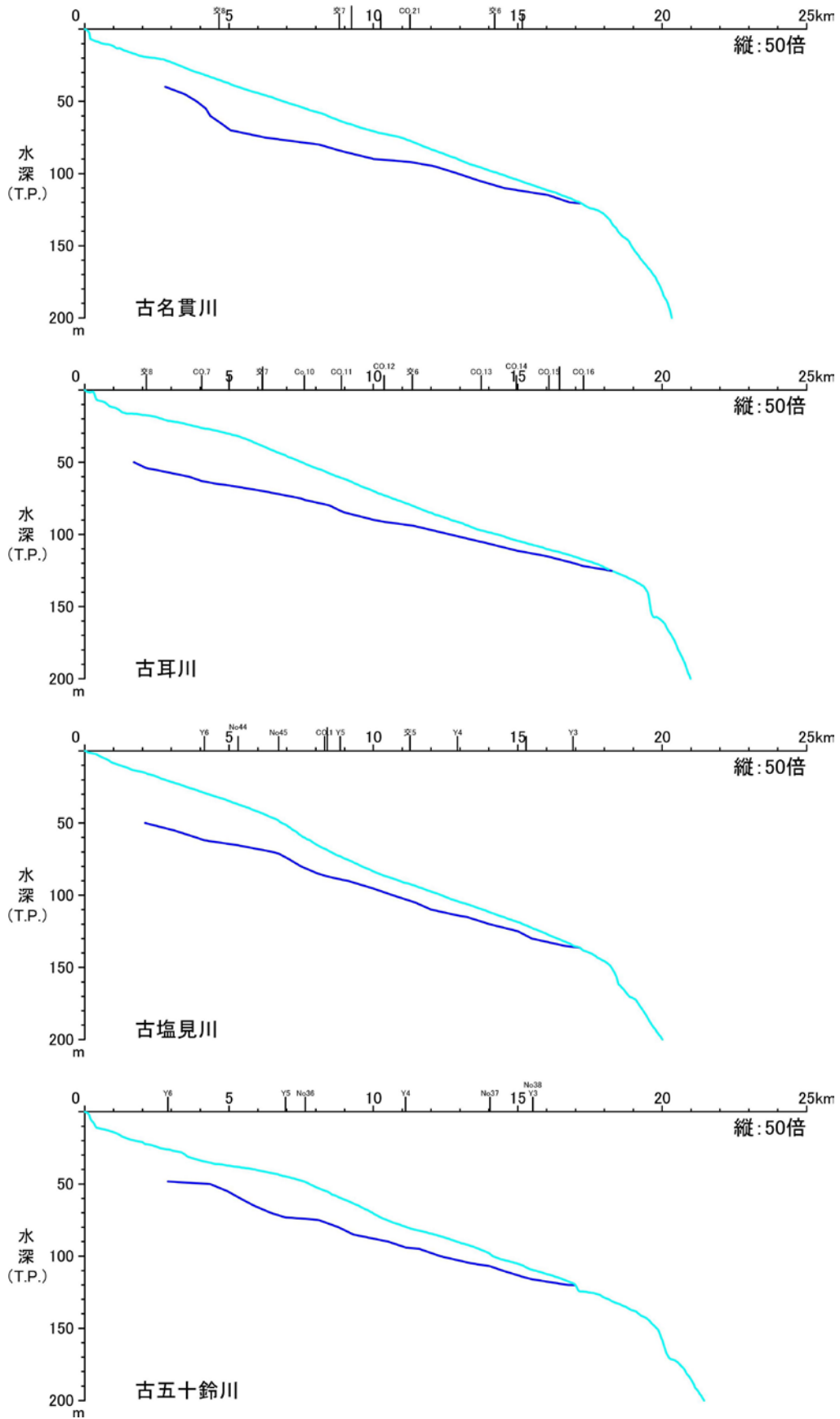


図 2-5 古名貫川、古耳川、古塩見川および五十鈴川における埋積谷沿いの地形・地質断面図

青緑色線：海底地形面、青色線；沖積層基底面。断面位置については図 2-3 を参照

2.4.1 古加江田川

古加江田川における埋積谷のうち代表的な海上音波探査記録の再解析結果を基に作成した地質解釈断面図を、図 2-6 に示す。

古加江田川は、海底面に露出して分布する新第三系宮崎層群の高まりに規制され、ところどころで大きく屈曲しながら流下していたと考えられる（図 2-3）。検討対象とした「宮崎」海域における探査記録は、極沿岸部において南北方向測線がないことから（図 2-1）、古加江田川と現在の加江田川河口との位置関係は明らかではない。しかしながら、現在の加江田川河口付近における既往ボーリングデータから T.P. -37.65 m において沖積層基底面が認められ（国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所、1983b）、その基底面深度は探査記録の再解析結果におけるそれと整合的であることから、おおむね現在の河口付近から流下していたものと考えられる。なお、古加江田川には、清武川河口付近から連続すると考えられるやや不明瞭な埋積谷が、海岸線から 6 km 付近で合流すると考えられる（図 2-3）。

古加江田川の流下距離は、沖積層の外縁位置が本検討範囲外であることから不明であるものの、現在の海岸線からおおよそ 27.5 km 程度と推定される。

海岸線から約 6.5 km 付近の南北方向の探査記録（交 5 測線）では、南側に分布する宮崎層群の縁を削剥し、比較的明瞭な谷地形が形成されている。さらに下った約 15.4 km 付近の探査記録（交 3 測線）では、南北両側を宮崎層群の高まりに規制された、幅約 2 km 程度の谷地形がみられる（図 2-6）。この海岸線から 15.4 km 付近で、古加江田川は南東方向へ大きく流下方向を変える。

埋積谷沿いの地形・地質断面図（図 2-4）において、この海岸線から 15～16 km 付近までの河床勾配は 2.2/1000（約 0.13°）程度であるが、それより沖合い側では 5/1000（約 0.29°）と傾斜が大きくなる。

沖積層の分布外縁は、沿岸の海の基本図「宮崎」では調査範囲外となり詳細は不明であるものの、沖積層基底面の連続性から推定した場合、水深 -125 m 程度で沖積層が消失するものと推定される（図 2-4）。沖積層の層厚は、前述の海岸線から 15～16 km 付近まではおおむね 25 m 程度とほぼ一定（海岸線から 19 km 付近で最大 30 m 弱の層厚）であり、大陸棚外縁に向かって薄くなる（図 2-4）。

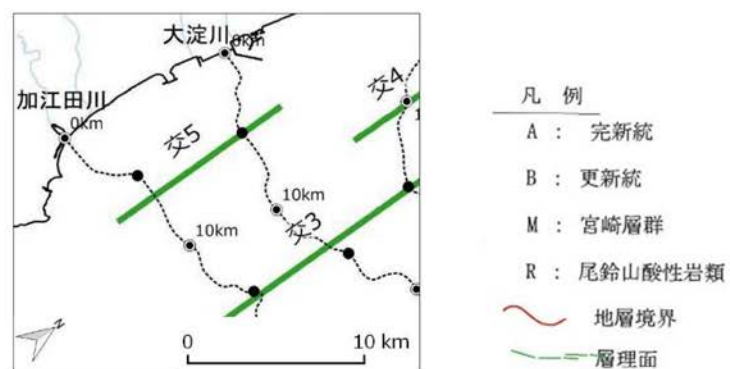
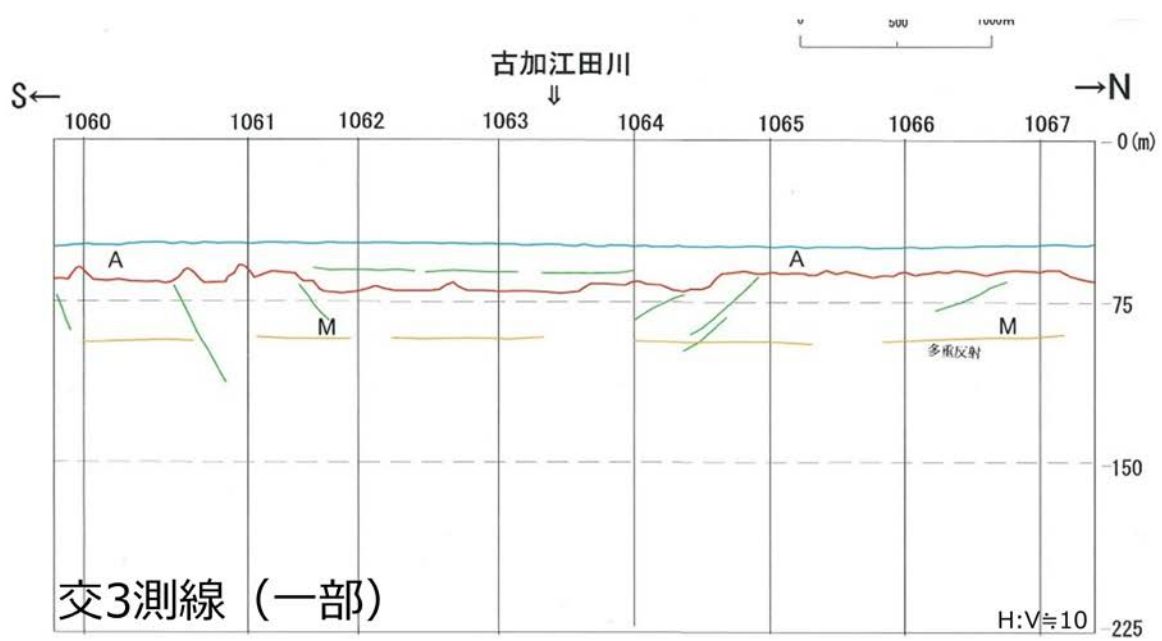
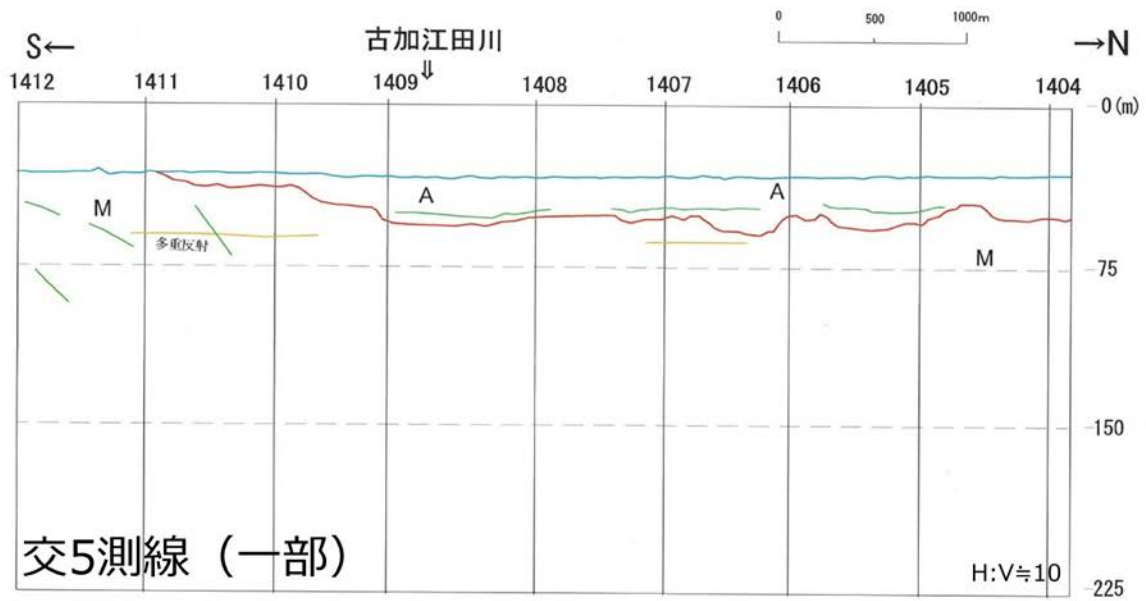


図 2-6 古加江田川における現海岸線から 6.5 km および 15.4 km 付近の再解析結果を基に作成した地質解釈断面図

2.4.2 古大淀川

古大淀川における埋積谷のうち代表的な海上音波探査記録の再解析結果を基に作成した地質解釈断面図を図 2-7 に示す。

古大淀川は、海底面に露岩する新第三系宮崎層群の地形的な高まりを縫うように、また一部でやや大きく屈曲しながら流下していたものと考えられる (図 2-3)。

現在の大淀川河口前面海域には、宮崎層群の地形的な高まりがみられ、陸域における既往ボーリングでも、大淀川河口付近の沖積層基底深度は T.P.-18.15 m と非常に浅いこと (国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所、1997) と整合的である。一方、宮崎市街では T.P. -44.33 m (国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所、1993b)、宮崎港では T.P. -40.78 m (国土交通省九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所、1989) の沖積層基底深度とされている。

古大淀川の詳細な開始位置は、極沿岸部における発震音源の残響や海面-海底間の多重反射によるマスキングにより沖積層基底面の判読が困難であったものの、前述の既往ボーリングデータから、南北両側を宮崎層群の地形的な高まりに規制される形でおおむね現在の河口から 2 km 程度北にあたる宮崎空港付近から流下していたものと考えた (図 2-3)。

古大淀川の流下距離は、現在の海岸線からおおよそ 22 km 程度と考えられ、沖積層の分布の外縁水深は T.P.-118 m 程度と考えられる (図 2-4)。

海岸線から約 5 km 付近の南北方向の探査記録 (交 5 測線) では、北側に分布する宮崎層群の高まりの縁を削剥して明瞭な谷地形が形成されている (図 2-7)。さらに、海岸線から 13.7 km 付近の探査記録 (交 3 測線) では、幅約 2 km 程度の谷地形の北端部に最も削り込まれた深部が認められ、これが古大淀川の流心部と考えられる (図 2-7)。

古大淀川における埋積谷の形状は、海岸線から約 8~9 km 付近までの上流部と、17 km 付近までの中流部、より沖合の下流部の 3 つに区分できる (図 2-4)。それらのうち上流部は、おおむね 1/1000 (0.06°) と非常に緩やかな河床勾配を示し、中流部は 1.8/1000 (0.16°)、下流部は 7/1000 (0.4°) と、流下するにつれて段階的に河床の勾配が大きくなる。

沖積層の層厚は、探査記録で確認できる現在の海岸線から 2 km 付近で最大となりその層厚は 32 m である。古大淀川における沖積層の層厚は、全体として大陸棚外縁に向かい薄くなる。より詳細にみると、上流部では海岸線から徐々に薄くなり層厚が 25 m 程度となり、中流部では 25~27 m 程度とほぼ一定となり、下流部では 22~24 m 程度から大陸棚外縁に向かい大きく層厚が減少する (図 2-4)。

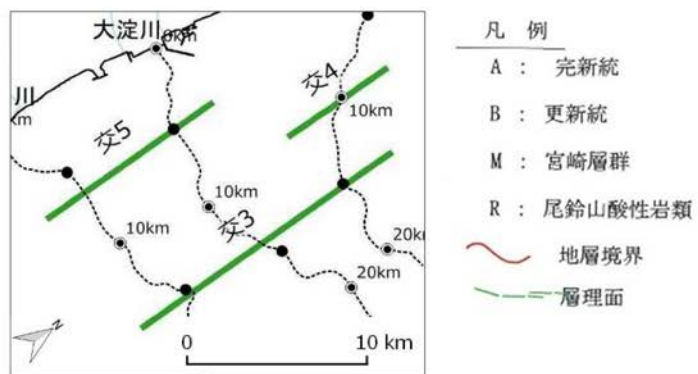
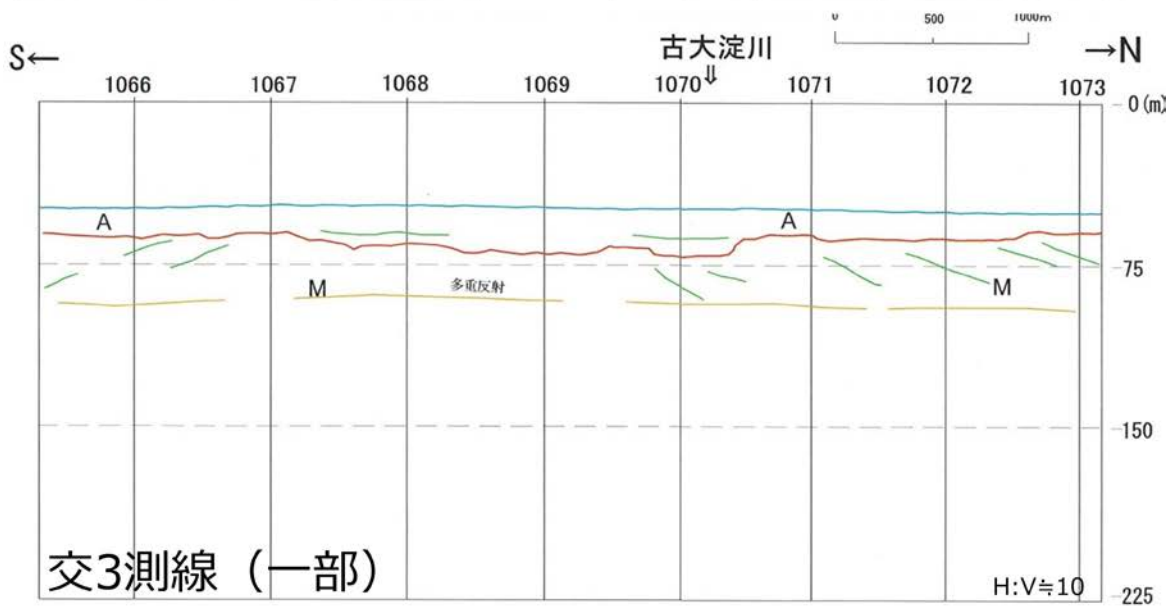
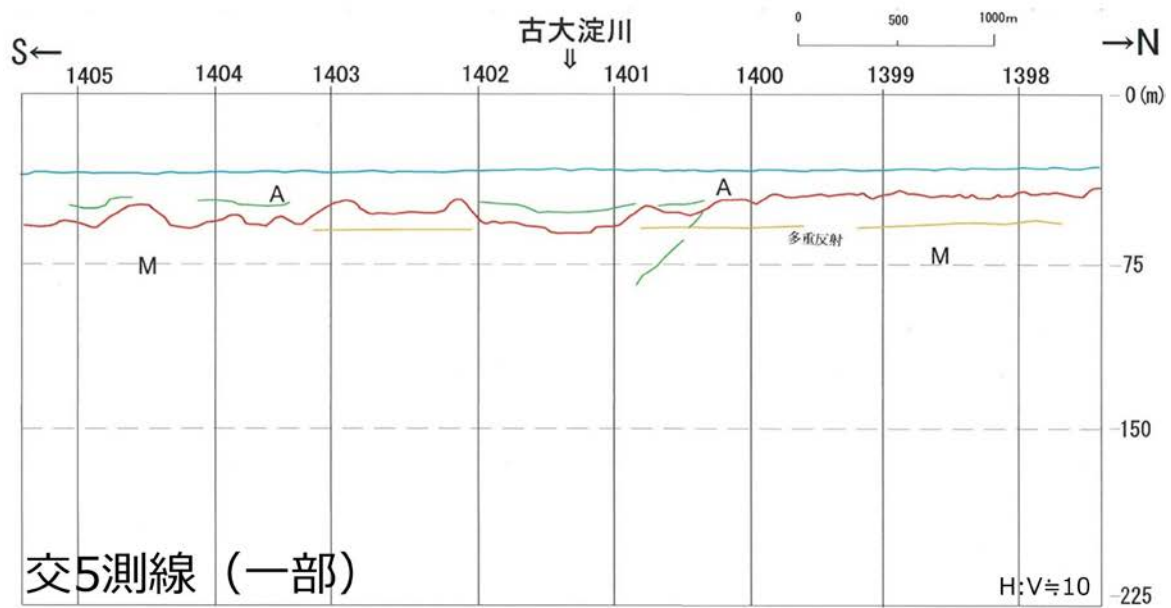


図 2-7 古大淀川における現海岸線から 5 km および 15.4 km 付近の再解析結果を基に作成した地質解釈断面図

2.4.3 古一ツ瀬川

古一ツ瀬川における埋積谷のうち代表的な海上音波探査記録の再解析結果を基に作成した地質解釈断面図を、図 2-8 に示す。

古一ツ瀬川については、昨年度の本研究において検討を行った。今年度の検討において全体的な整合性を図るため、昨年度の沖積層基底等深線の形態から若干の見直しを行ったものの、古一ツ瀬川の埋積谷の位置およびその形状は、昨年度のものからは変更はない。

現在の一ツ瀬川河口の前面海域には新第三系宮崎層群の地形的な高まりが存在し、古一ツ瀬川はそのような地形的な高まりを縫うように流下し、ところどころでやや大きく屈曲しながら流下していたものと考えられる（図 2-3）。

現在の一ツ瀬川の河口近傍には既往ボーリングデータはないものの、河口から約 3.5 km 上流の日向大橋付近におけるボーリングデータ（国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所、2006a）として、沖積層基底深度が T.P. -39.49 m 以上（ただし、沖積層基底面には未達）と示されている（表 1-1）。

以上のことから、古大淀川の詳細な開始位置は、現在の河口よりやや南側を通るものと考えられる。しかしながら、その詳細な位置は、陸域のボーリングデータおよび本研究で再解析した探査記録からは不明である。以上を踏まえ、本研究では、現在の河口から約 1 km 南に下った海岸線を開始点とした。

古一ツ瀬川の流下距離は、約 20.2 km 程度で、大陸棚外縁沖にみられる顕著な海底谷へ連続するものと考えられる。また、沖積層の分布の外縁水深は T.P.-120 m 程度と考えられる。

海岸線から約 10.1 km 付近の南北方向の探査記録（交 4 測線）では、南北両側に分布する宮崎層群の高まりの間に幅約 2.5 km 程度の海底谷が形成されており（図 2-8）、その北寄りに古一ツ瀬川の流心部を想定した。また、海岸線から 15.1 km 付近の南北方向の探査記録（交 3 測線）では、幅 3 km 程度の広い削剥地形がみられ（図 2-8）、その中央付近の深部を古一ツ瀬川の流心部とした。

埋積谷の形状は、現在の海岸線から約 18 km 付近まで、ほぼ 2.6/1000（約 0.16°）の河床勾配であるのに対し、より下流では大陸棚外縁部まで 12/1000（約 0.67°）とやや大きな河床勾配を示す。

沖積層の層厚は、沿岸部ほど厚く、極沿岸部（海岸線から 2.2 km 程度の地点）ではデータがなく詳細不明であるものの、海岸線から 2.2 km 付近で最大層厚約 32 m、海岸線から 10 km 付近で層厚約 28 m、河床の傾斜が変化する海岸線から 18 km 付近で層厚約 18 m となった後、大陸棚外縁に向かって層厚が薄くなる（図 2-4）。

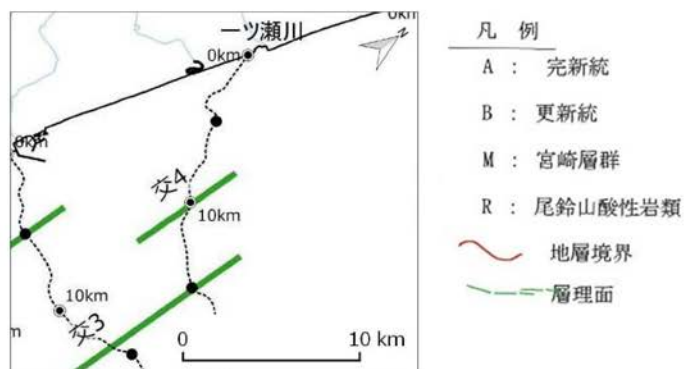
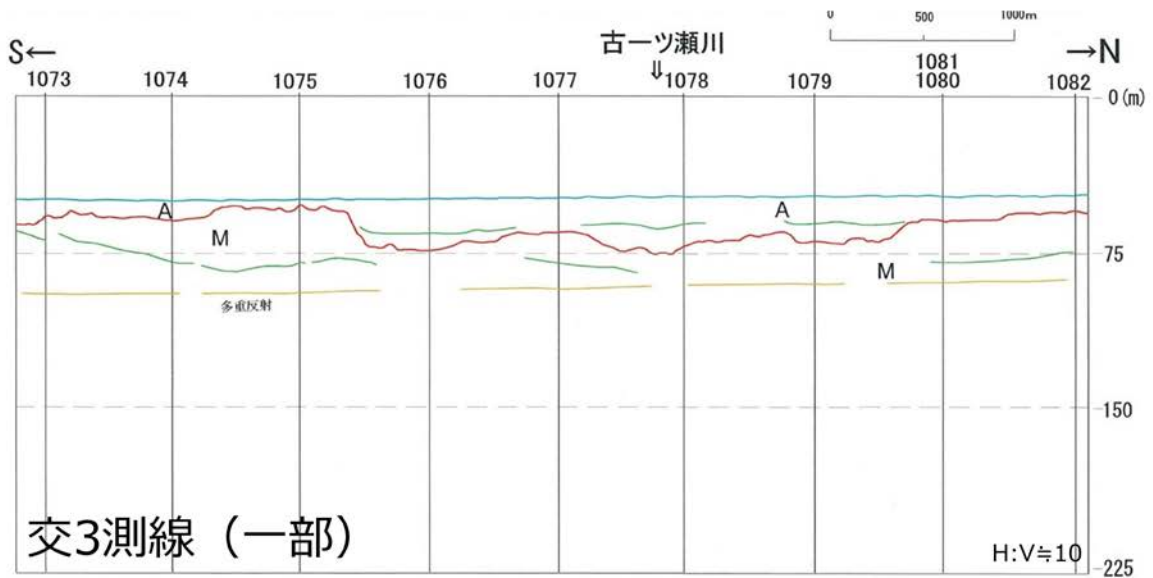
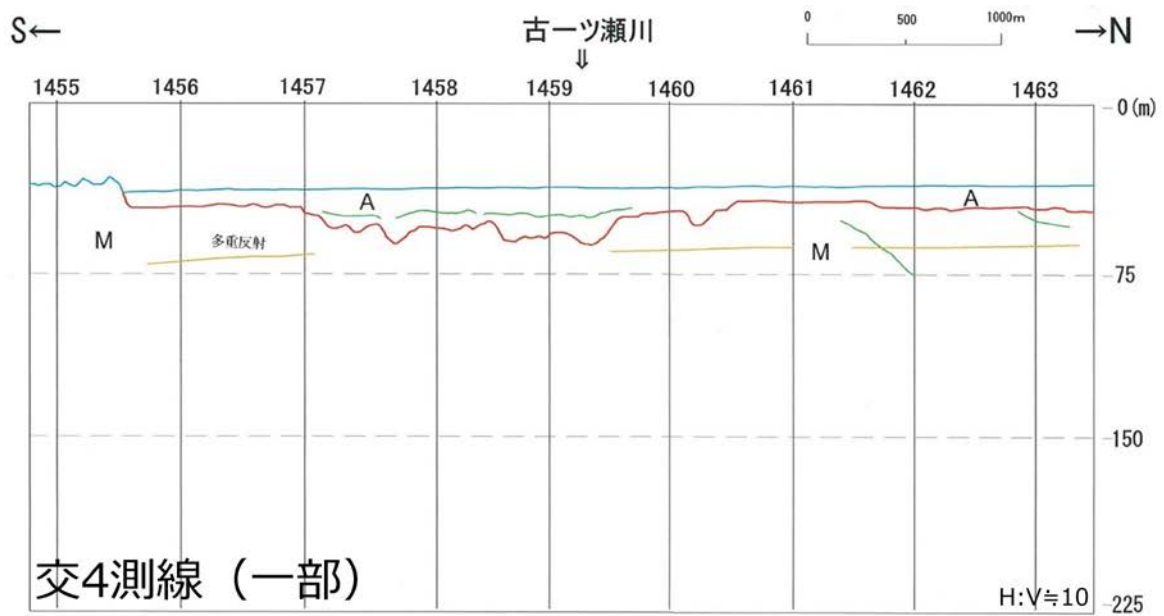


図 2-8 古一ツ瀬川における現海岸線から 10.1 km および 15.1 km 付近の再解析結果を基に作成した地質解釈断面図

2.4.4 古小丸川

古小丸川における埋積谷のうち代表的な海上音波探査記録の再解析結果を基に作成した地質解釈断面図を、図 2-9 に示す。

前節 2.2 「再解析結果」で前述したように、古小丸川以北の海域については、本研究における探査記録の再解析では、沖積層の基底を構成する地層について明らかにすることができなかった。また、「美々津」における探査記録は、全体にノイズレベルが高いことなどから、明瞭な谷の判読が難しく、埋積谷の判読精度は比較的低い。

本研究における探査記録の再解析の結果、古小丸川は、おおむね東南東方向へ直線状ないし緩やかな弧状に流下していたものと考えられる（図 2-3）。

既往ボーリングデータからは、現在の小丸川河口から約 1.5 km 上流側の小丸大橋付近の沖積層基底深度が T.P. -22.71m（国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所、2008c）であるのに対し、小丸川の約 2 km 南に位置する河川規模が比して小さい宮田川河口付近では T.P. -39.96 m（国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所、1988a）と、現小丸川における沖積層基底深度よりも深い。本研究で仕様した「美々津」および「宮崎」における調査では海岸線付近を南北に測定した探査記録がなく、LGM に現在の小丸川および宮田川の前面のどちらに最も深い谷が刻まれていたのかは判断できない。

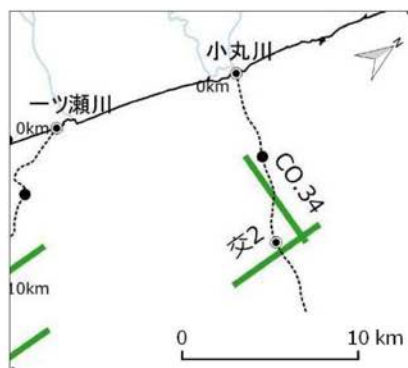
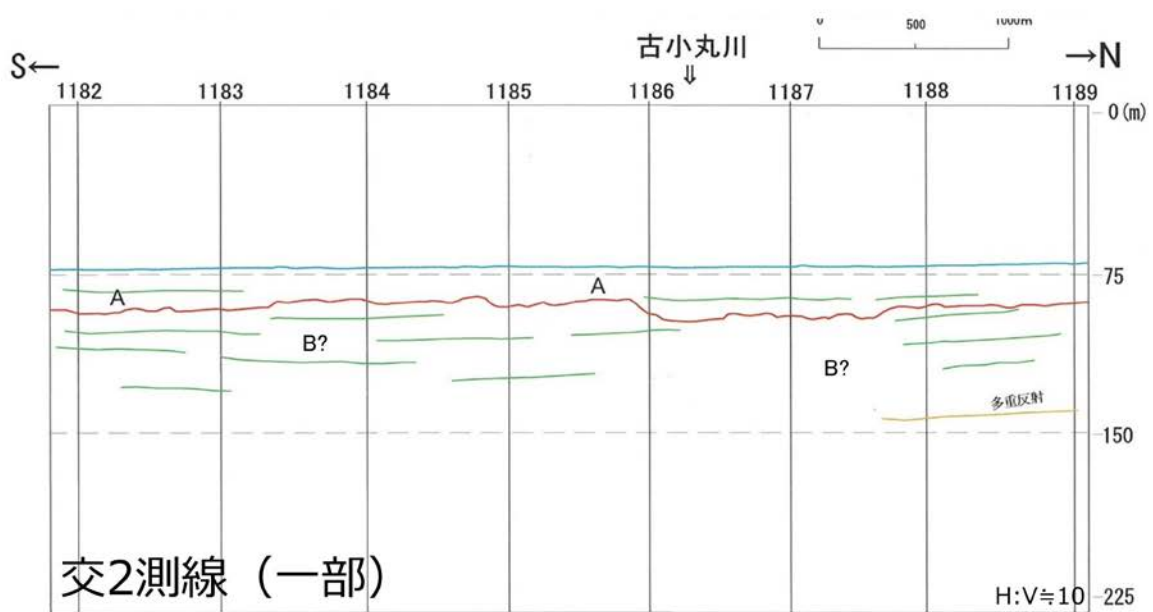
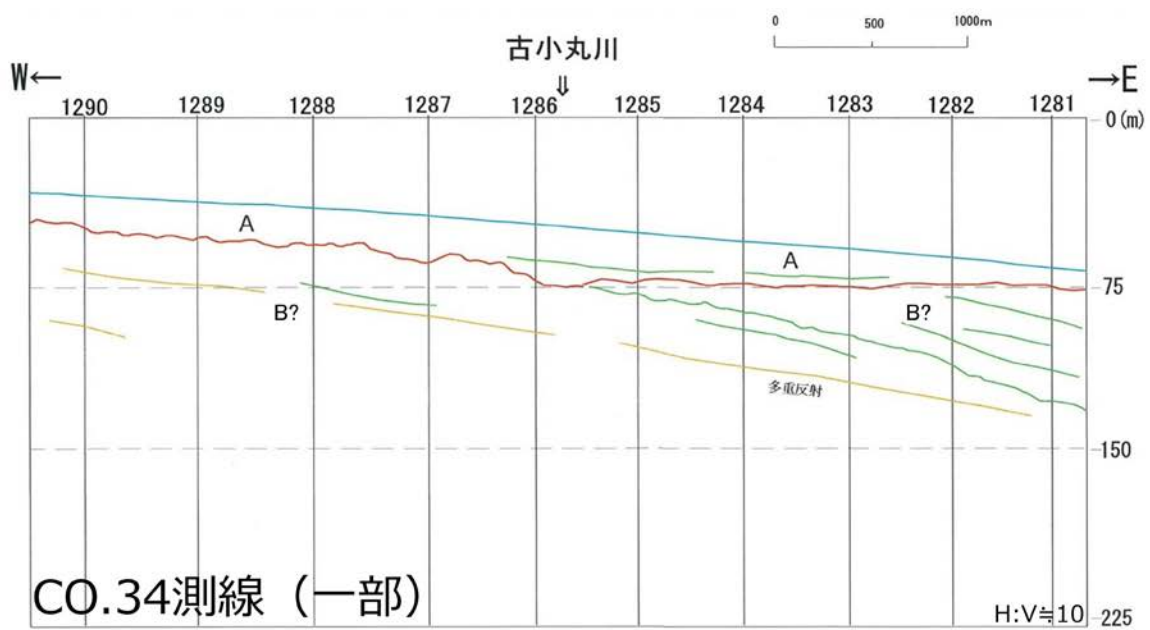
以上を踏まえ、埋積谷の現在の海岸線付近における流下開始地点は不明であるものの、ここでは、河成段丘の発達具合や現河川規模などを踏まえ、現在の小丸川河口付近を始点とした。

古小丸川の流下距離は、現在の海岸線から 14.8 km 程度と最も短いことで特徴づけられ、その沖積層の分布の外縁水深は -122 m 程度と考えられる（図 2-4）。

海岸線付近から約 7.4 km 付近の東西方向の探査記録（CO.34 測線）では、東に向かって深くなる沖積層の基底面に、幅 1 km 程度で周辺より深く削りこまれた谷がみられた（図 2-9）。海岸線付近から 10.5 km 付近の南北方向の探査記録（交 2 測線）では、幅約 1.5 km 程度の谷地形の南端部に最も削り込まれた深部が認められ、これは古小丸川の流心部と考えられる（図 2-9）。

古小丸川の河床勾配は、海岸線から 3～6 km の区間は、3.3/1000（約 0.19°）の比較的緩やかな勾配を、海岸線から約 6～7.5 km 付近の最初の傾斜区間では、13.3/1000（約 0.76°）の勾配を、約 7.5～11.5 km 付近までは 5.5/1000（約 0.32°）の勾配を示す（図 2-4）。海岸線から約 11.5～13 km の傾斜区間では 11.3/1000（約 0.65°）を示し、さらに外縁に向かい 4/1000（約 0.22°）と再び緩やかな河床勾配となる（図 2-4）。以上を踏まえると、古小丸川における埋積谷は、現在の海岸線から約 6～7.5 km 付近と、約 11.5～13 km の 2 区間で大きな傾斜変換がみられ、これにより 3 段の平坦面が形成されていると考えられる（図 2-4）。なお、現在の海岸線から 3 km までの区間は既存音波探査のデータ空白域であり、詳細は不明である。

古小丸川における沖積層の層厚は、沿岸部ほど厚いものと推定されるが、前述したように、沿岸部から 3 km までの区間についてデータがなく不明である。既存探査記録で層厚が確認できる海岸線から 3 km 付近において層厚 26 m 程度を示す。最初の大きな斜面区間である 6～7.5 km 付近では層厚が 20 m から 28 m へと大きく変化する。それより沖合い側では徐々に層厚が薄くなり、11.5～13 km の次の傾斜区間では層厚が 17～18 m と減少した後、外縁に向かって薄くなる（図 2-4）。



- 凡例
- A : 完新統
 - B : 更新統
 - M : 宮崎層群
 - R : 尾鈴山酸性岩類
 - 地層境界
 - 層理面

図 2-9 古小丸川における現海岸線から 7.4 km および 10.5 km 付近の再解析結果を基に作成した地質解釈断面図

2.4.5 古名貫川

古加江田川における埋積谷のうち代表的な海上音波探査記録の再解析結果を基に作成した地質解釈断面図を、図 2-10 に示す。

前節 2.2 「再解析結果」で前述したように、古小丸川以北の海域については、本研究における探査記録の再解析では、沖積層の基底を構成する地層について明らかにすることができなかった。また、「美々津」における探査記録は、全体にノイズレベルが高いことなどから、明瞭な谷の判読は難しく、埋積谷の判読精度は比較的低い。

現名貫川の北方 2.5 km 付近に都農川、さらに北方 4.5 km 付近に心見川が存在し、それぞれの前面にも埋積谷が想定され。しかしながら、名貫川、都農川および塩見川における河成段丘の発達具合や現河川の規模などを考慮し、沖合まで連続する古河川は現在の名貫川河口付近を開始点とする古名貫川と判断した。なお、これらの 3 河川における、既往ボーリングデータはなく、沖積層基底深度は不明である。

古名貫川は、現在の名貫川河口付近から東方へ流下し、大陸棚の中央部付近で南方に向かった後、再び東方へ流下するクランク状の形態を示す (図 2-3)。現在の名貫川河口から約 5 km 付近で前述の都農川前面に見られる埋積谷と、8 km 付近で心見川前面に見られる埋積谷と合流する (図 2-3)。

古名貫川の流下距離は、現在の河口付近から 17.1 km 程度と考えられ、沖積層の分布の外縁水深は T.P.-120 m 程度と考えられる (図 2-5)。

海岸線から約 4.7 km 付近の南北方向の探査記録 (交 8 測線) では、幅約 2 km 程度の侵食面が認められ (図 2-10)、その最深部について古名貫川の流心部と考えた。さらに、海岸線から 10.2 km 付近の東西方向の探査記録 (CO.20 測線) では、幅約 1.5 km 程度の谷地形が認められる (図 2-10)。これらの探査記録で見られるように、古名貫川の実地谷の谷底斜面は、比較的緩やかな斜面であり、顕著な削剥を示す大きな傾斜の面とはなっていない。

古名貫川の埋積谷の形状については、現在の河口付近から約 2.8 km 付近までは既存音波探査のデータ空白域であり、詳細は不明である。海岸線から 2.8 km から 5.1 km 付近にかけては、10/1000 (約 0.56°) とやや大きな河床勾配を示すが、それより沖合いではおおむね 4/1000 (約 0.24°) 程度の緩やかな河床勾配を示す。古名貫川の流系が大きく東から南、そして再び東へと大きく変化する中央部付近 (海岸から約 10 km 付近) においても、谷底の傾斜に大きな変化はみられない (図 2-5)。

古名貫川における沖積層の層厚は、前述した河床勾配が変化する海岸線から 5.1 km 付近で最大 32 m 程度を示し、その後は沖合いに向かってほぼ一定の傾向で薄くなる (図 2-5)。

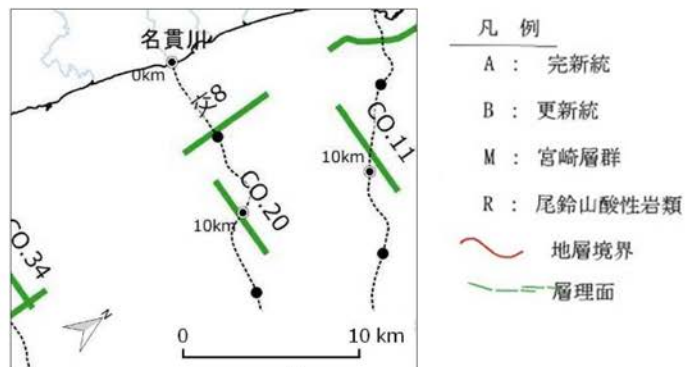
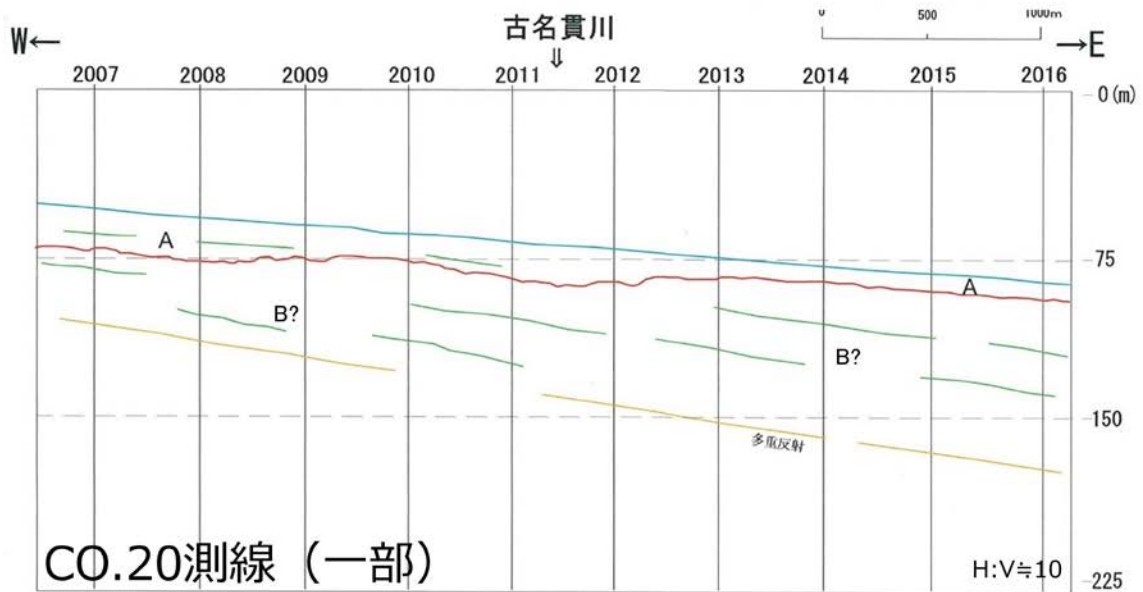
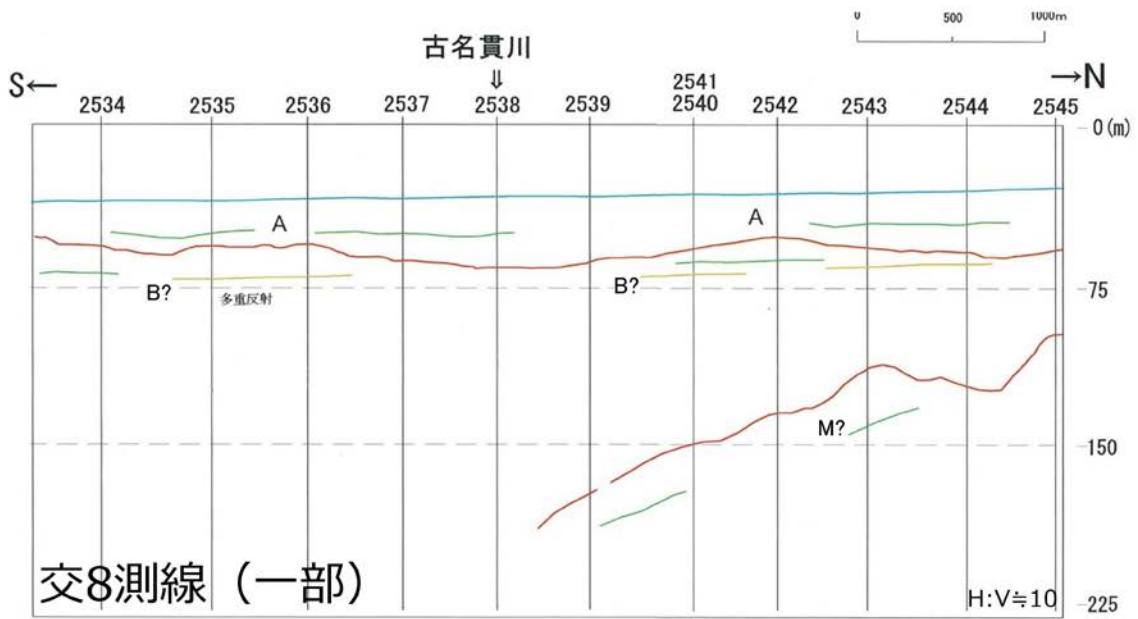


図 2-10 古名貫川における現海岸線から 4.7 km および 15.4 km 付近の再解析結果を基に作成した地質解釈断面図

2.4.6 古耳川

古耳川における埋積谷のうち代表的な海上音波探査記録の再解析結果を基に作成した地質解釈断面図を、図 2-11 に示す。

前節 2.2 「再解析結果」で前述したように、古小丸川以北の海域については、本研究における探査記録の再解析では、沖積層の基底を構成する地層について明らかにすることができなかった。また、「美々津」における探査記録は、全体にノイズレベルが高いことなどから、明瞭な谷の判読は難しく、埋積谷の判読精度は比較的低い。

既往ボーリングデータからは、現在の耳川河口付近では沖積層基底深度に関する情報はなく、耳川河口から北へ離れた平地部と耳川から南へ約 1 km 離れた石並川近くで既往ボーリングデータが存在する（図 1-3）。特に後者のボーリングデータでは、沖積層基底深度が T.P.-25m 以深と考えられる。埋積谷の現在の海岸線付近における流下開始地点は不明であるものの、ここでは、現河川規模を踏まえ、現在の耳川河口付近を始点とした。

古耳川は、現在の河口付近から一ツ神と呼ばれる尾鈴山酸性岩類からなる岩礁の北側をほぼ東へ流下したのち、現在の河口から約 4 km 付近で向きを南東に変えて大陸棚外縁へと連続する（図 2-3）。流下距離は、現在の河口付近から 18.2 km 程度で、沖積層の分布の外縁水深は T.P.-127 m 程度と考えられる（図 2-5）。

海岸線から約 2.2 km 付近の北東-南西方向の探査記録（交 8 測線）では、北川に尾鈴山酸性岩類の高まりがみられ、その南側に幅約 3 km の谷が削りこまれている。この海底谷は更新統を削り込んだものと推定され、より深部にやや強い反射面（宮崎層群？）がみられる。これらの地質分布については、前節 2.2 「再解析結果」で述べたように、本研究で明らかにできなかった。また、古耳川の流心部の南側 2 km 付近に断層の可能性のある反射波の不連続がみられた。しかしながら、周辺の探査記録にはそのような不連続は認められない。

海岸線から 8.9 km 付近の東西方向の探査記録（CO.11 測線）では、幅約 1.5 km 程度のやや微弱な谷地形がみられ（図 2-11）、その最深部について古耳川の流心部を想定した。なお、この測線の西側の探査記録では、やや顕著な谷がみられるが、周辺への連続はみられなかった。

古耳川における埋積谷の形状については、現在の河口付近から約 2 km 付近までは既存音波探査のデータ空白域であり、詳細は不明である。海岸線から 2 km 付近からの古耳川における埋積谷の形状は、全体として 4/1000（約 0.2°）程度の河床勾配を持ち、海岸線から 9 km 付近において河床勾配が 10/1000（約 0.6°）への傾斜変化がみられる。

古耳川における沖積層の層厚は、沿岸部ほど厚く、現在の河口付近から 2 km 付近（より沿岸部ではデータなし）で約 37 m、約 6 km 付近で約 32 m 程度と厚く、その後は外縁に向かってほぼ一定の割合で薄くなる（図 2-5）。

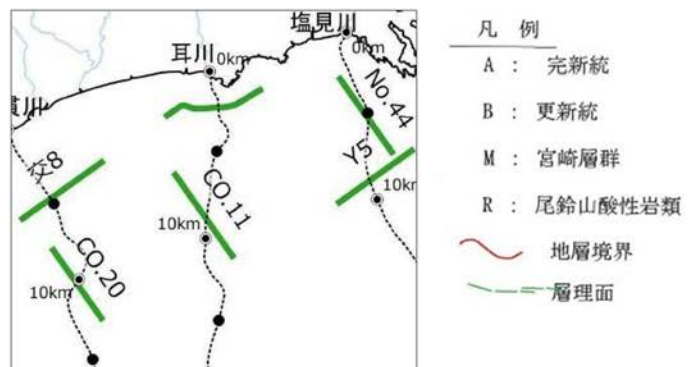
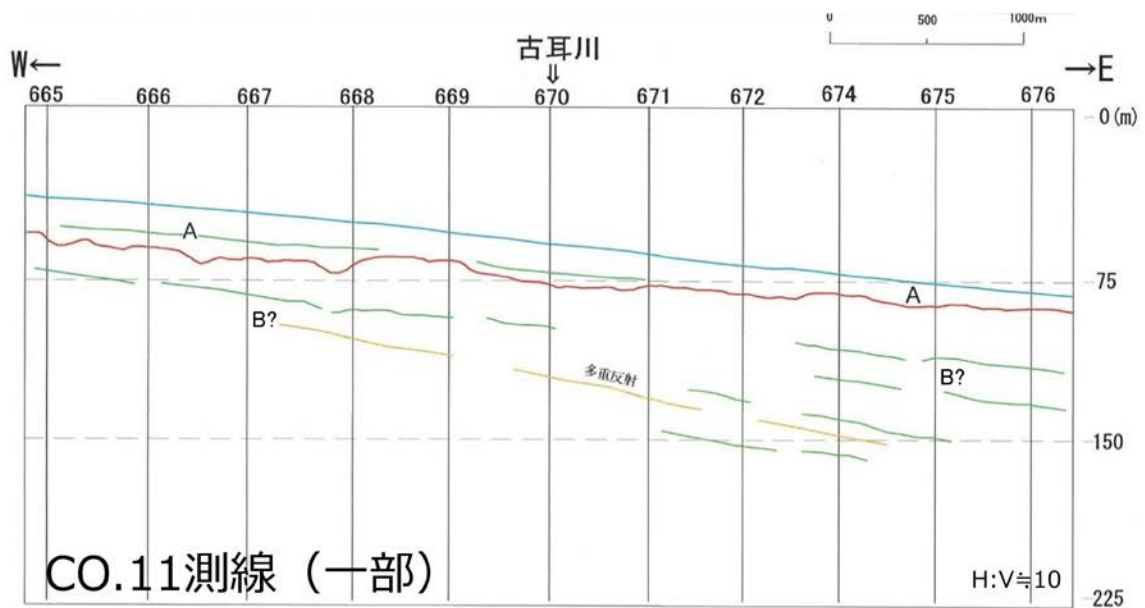
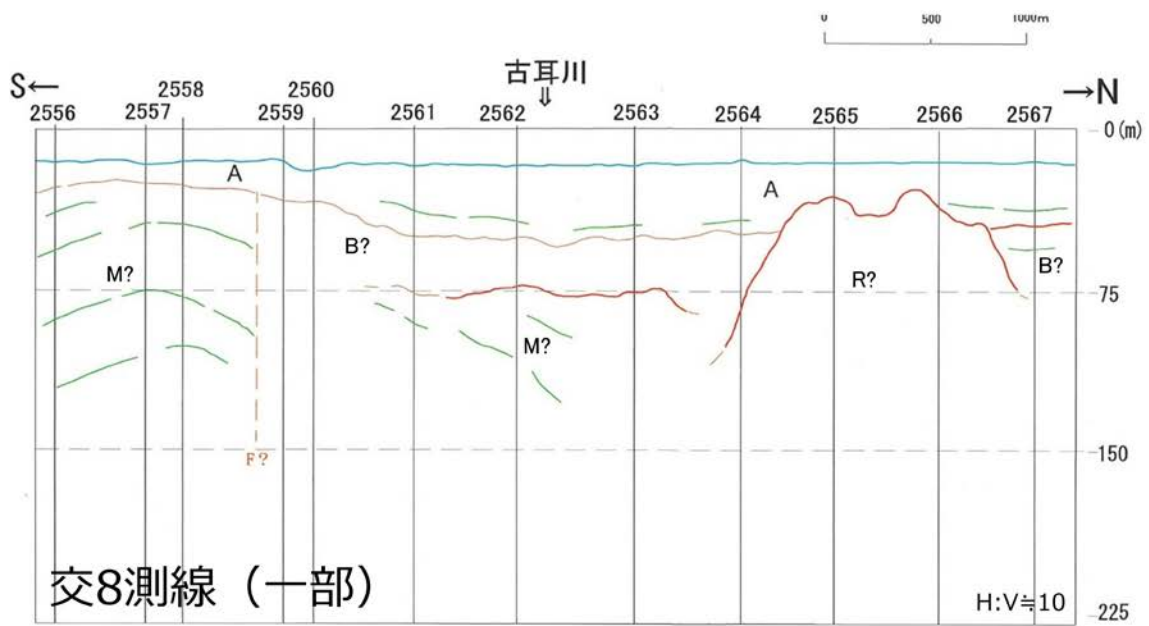


図 2-11 古耳川における現海岸線から 2.2 km および 8.9 km 付近の再解析結果を基に作成した地質解釈断面図

2.4.7 古塩見川

古塩見川における埋積谷のうち代表的な海上音波探査記録の再解析結果を基に作成した地質解釈断面図を、図 2-12 に示す。

前節 2.2 「再解析結果」で前述したように、古小丸川以北の海域については、本研究における探査記録の再解析では、沖積層の基底を構成する地層について明らかにすることができなかった。なお、古塩見川を判読するに資した「延岡」における探査記録は、調査年次が平成 11 年（1999 年）と比較的新しいことから、記録品質は良好で海底谷などの判読が比較的容易であった。

現塩見川周辺では、既往ボーリングデータなく、また、その前面海域では埋積谷は想定されていない。したがって、埋積谷の現在の海岸線付近における流下開始地点は不明であるものの、ここでは、現河川規模を踏まえ、現在の塩見川河口付近を始点とした。

古塩見川は、現在の河口付近から 1 km 程度南東方向へ下った後、東南東へ向かい、5 km 付近から南東へ、さらに 10 km 付近から東方へと緩やかに曲がりながら流下すると考えられる（図 2-3）。流下距離は、現在の河口付近から 17.0 km 程度で、沖積層の分布の外縁水深は-135 m 程度と考えられる。

現在の塩見川河口付近から約 5.3 km 付近の東西方向の探査記録（No.44 測線）では、西側に尾鈴山酸性岩類と推定される地形的な高まりがみられ、その東側に 2 つの谷地形が認められる（図 2-12）。海岸線から 8.8 km 付近の南北方向の探査記録（Y5 測線）では、幅約 1 km 程度弱のやや狭い谷地形がみられ、その最深部について古塩見川の流心部を想定した（図 2-12）。

古塩見川における埋積谷の形状については、現在の河口付近から約 2.1 km 付近までは既存音波探査のデータ空白域であり、詳細は不明である。海岸線から約 2.1～6.7 km 付近までの古塩見川における埋積谷の形状は、おおむね 5.6/1000（約 0.32°）程度の河床勾配をもち、海岸線から 6.7～8.5 km の区間で 10/1000（約 0.57°）とやや傾斜が大きくなった後、再び 5.9/1000（約 0.34°）程度の河床勾配で大陸棚外縁に向かう（図 2-5）。

沖積層の層厚は、沿岸部ほど厚く、現在の河口付近から 2.1 km 付近（より沿岸部はデータなし）で最大の 35 m 程度を示し、6.7～8.5 km の区間で 22～18 m となった後、外縁に向かってほぼ一定の割合で減少する（図 2-5）。

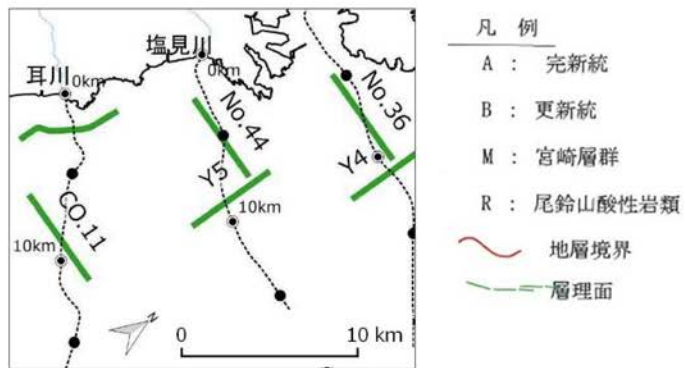
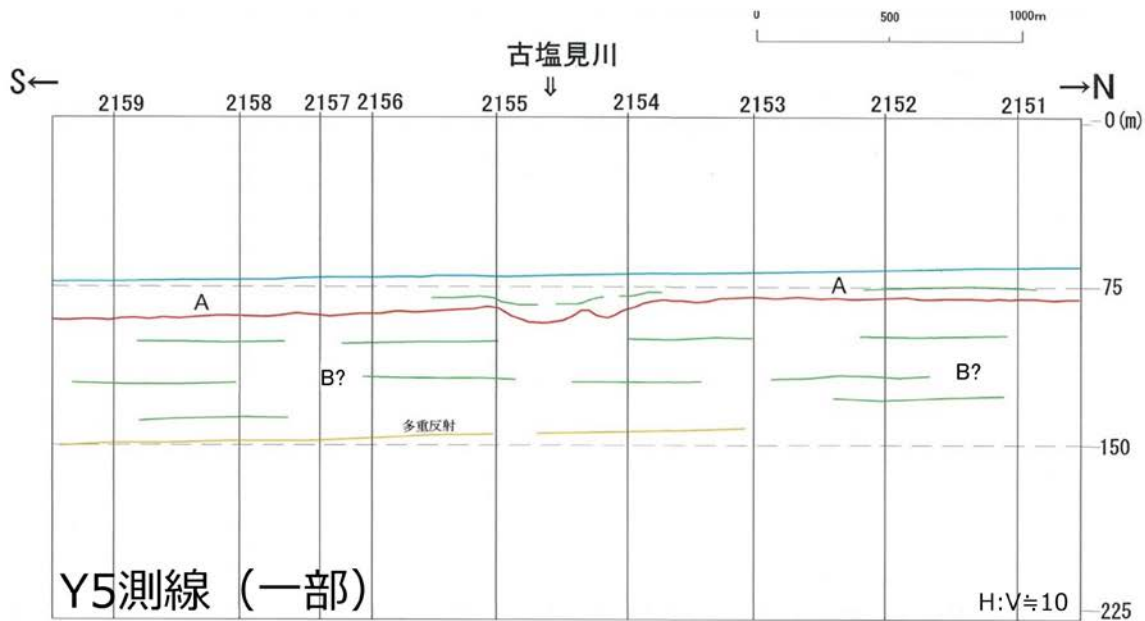
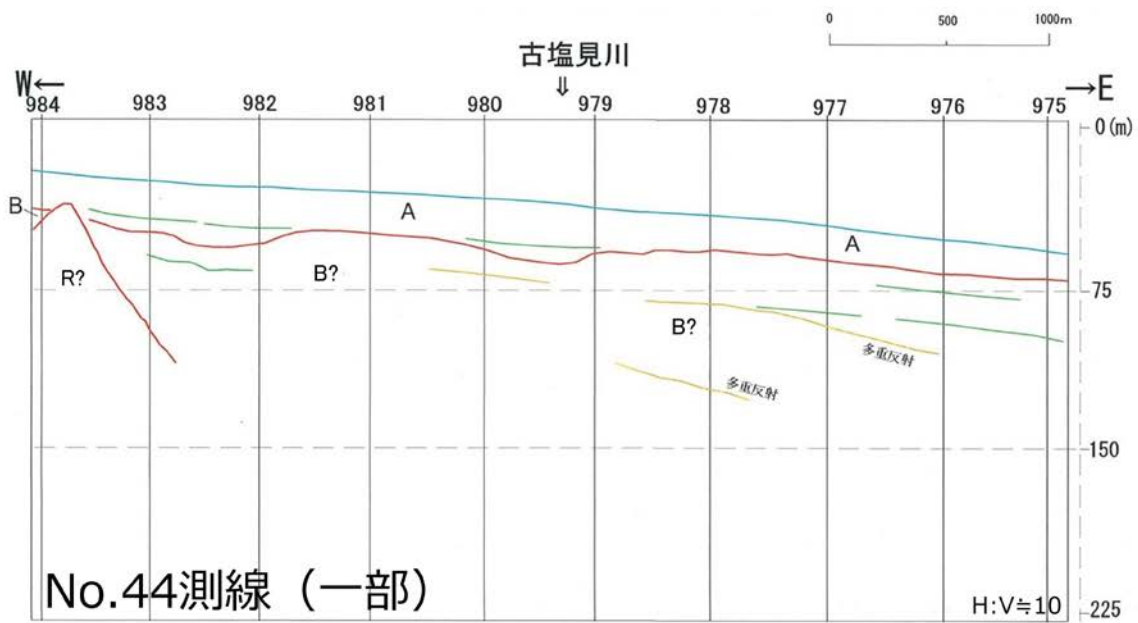


図 2-12 古塩見川における現海岸線から 5.3 km および 8.8 km 付近の再解析結果を基に作成した地質解釈断面図

2.4.8 古五十鈴川

古五十鈴川における埋積谷のうち代表的な海上音波探査記録の再解析結果を基に作成した地質解釈断面図を図 2-13 に示す。

前述したように古五十鈴川周辺については、本研究における探査記録の再解析により、沖積層基底を構成する地層について明らかにすることができなかった。なお、古五十鈴川を判読するに資した「延岡」における探査記録は、調査年次が平成 11 年（1999 年）と比較的新しいことから、記録品質は良好で海底谷などの判読が比較的容易であった。

古五十鈴川は、現在の河口付近からおおむね東方に、沿岸に分布する亀瀬や枇榔島と呼ばれる島嶼の間を通過した後、東方から南東方向へ緩やかに湾曲しながら大陸棚外縁部へと連続する（図 2-3）。

古五十鈴川の流下距離は、現在の河口付近から 17.0 km 程度で、沖積層の分布の外縁水深は T.P. -120 m 程度と考えられる（図 2-5）。

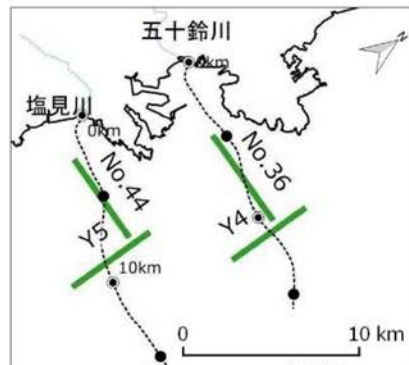
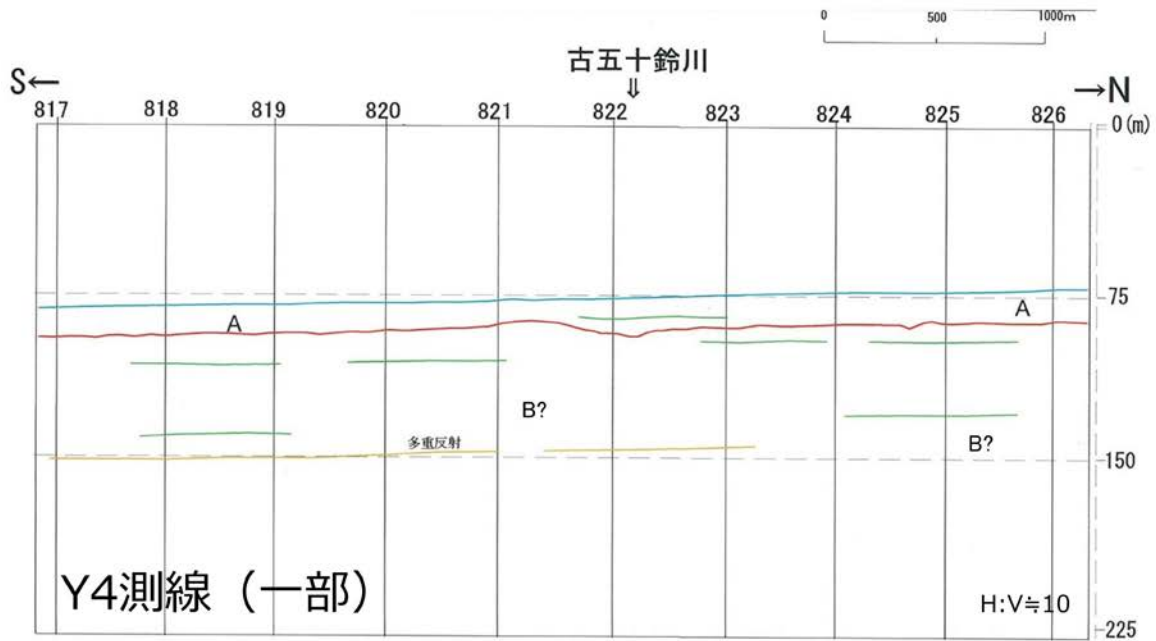
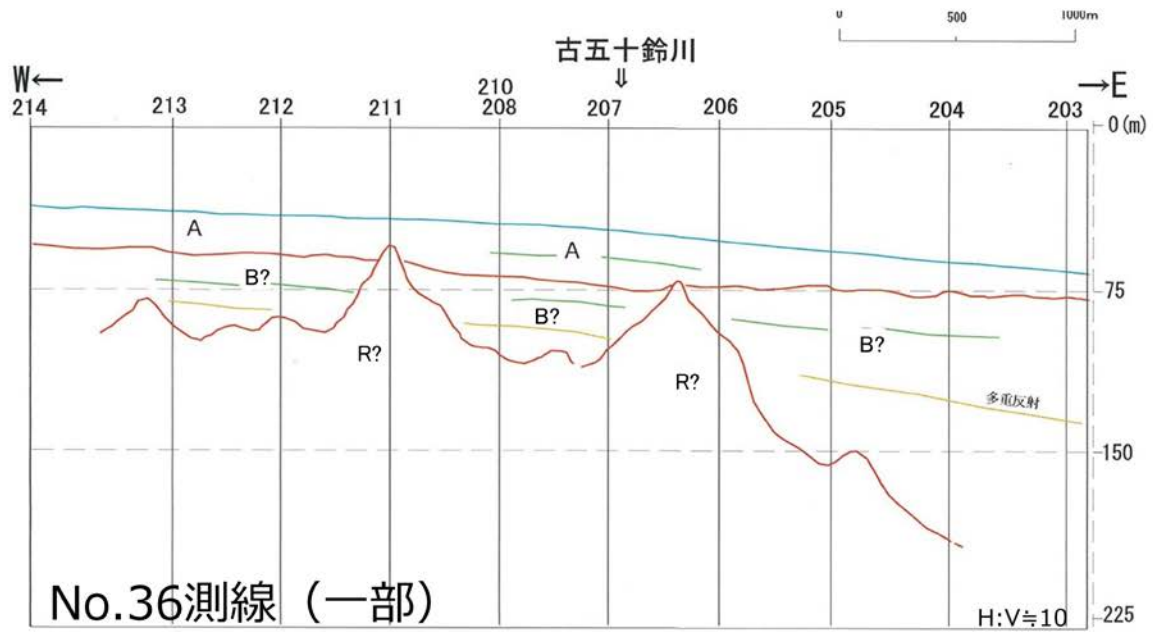
古五十鈴川の現在の河口前面は、門川湾の湾口部にあたり、北側からは遠見山に続く丘陵が迫り、南側は日向港が位置し、両者に挟まれた狭長な谷となっているものと考えられる。

現在の河口付近から約 7.4 km 付近の東西方向の探査記録（No.36 測線）では、海底下に大きな起伏を示して分布する尾鈴山酸性岩類と推定される反射面がみられ、その高まりを埋積する更新統を古五十鈴川が削剥すると考えられる（図 2-13）。海岸線から 11.1 km 付近の南北方向の探査記録（Y4 測線）では、幅約 1 km 程度のやや微弱な谷地形がみられ、その最深部について古五十鈴川の流心部を想定した（図 2-13）。

古五十鈴川における埋積谷沿いの地形・地質断面図において、現在の河口付近から約 2.9 km～4.3 km 付近まではほぼ水平の河床を推定した（図 2-5）。しかしながら、これは、当該地域では既存音波探査のデータが疎であるため、実質的に現在の河口付近から約 4.3 km までは、埋積谷を正しく表現できていない可能性が高い。

海岸線から 4.3 km～7 km 付近にかけては 8.5/1000（約 0.48°）程度のやや大きな河床勾配がみられるが、それより沖合いにかけては 5/1000（約 0.29°）程度の河床勾配で大陸棚の外縁部へ向かう（図 2-5）。

古五十鈴川における沖積層の層厚は、沿岸部において厚いことが想定されるが、前述したように、現在の河口付近から 4.3 km 付近まではデータが乏しく詳細は不明である。海岸線から 4.3 km 付近で沖積層の層厚は約 15 m と判読され、河床勾配が緩やかに変化する 7 km 付近で最大層厚約 28 m まで厚くなったのち、外縁に向かってほぼ一定の傾向で薄くなる（図 2-5）。



- 凡例
- A : 完新統
 - B : 更新統
 - M : 宮崎層群
 - R : 尾鈴山酸性岩類
 - 地層境界
 - 層理面

図 2-13 古五十鈴川の海岸線から 7.4 km および 11.1 km 付近の再解析結果を基に作成した地質解釈断面図

謝辞

ここでの検討に用いた海上音波探査記録は、海の基本図の記録原本で、海上保安庁より開示して頂いた。ここに記して、関係者に深く謝意を表す。

引用文献

海上保安庁, 沿岸の海の基本図 (5 万分の 1) 「宮崎」 (海図第 6355 号 2、2-s および報告書), 1997.

海上保安庁, 沿岸の海の基本図 (5 万分の 1) 「美々津」, (海図第 6355 号 1), 1999.

海上保安庁, 沿岸の海の基本図 (5 万分の 1) 「延岡」 (海図第 6356 号 8), 2000.

海上保安庁, 平均水面、最高水面最低水面一覧表, 2018.

https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/TIDE/enkan/Suijun_hyo/Pub.No741/index.pdf (2018.3.19 最終確認) .

国土交通省九州地方整備局 宮崎空港土質調査 (ボーリング ID=PORT45017020040), 2008.

国土交通省九州地方整備局 宮崎空港土質調査 (ボーリング ID= 宮崎空港土質調査(第 2 次)), 2009.

国土交通省九州地方整備局, HOSJIMAKOU(SIRAHAMATIKU)DAI2JI (ボーリング ID= PORT45001010008), 2011a.

国土交通省九州地方整備局, 細島港(白浜地区)岸壁(-13m)土質調査 (ボーリング ID= PORT45001010035), 2011b.

国土交通省九州地方整備局, 細島港(白浜地区)岸壁(-13.0m)土質調査(第 2 次) (ボーリング ID= PORT45001010043), 2011c.

国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所, 国道 10 号佐土原バイパス地質調査 (その 3) 業務 (ボーリング ID=QS48310307011), 1979a.

国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所, 国道 10 号佐土原バイパス地質調査 (その 3) 業務 (ボーリング ID=QS48310307016), 1979b.

国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所, 国道 10 号佐土原バイパス地質調査 (その 3) 業務 (ボーリング ID=QS48310307017), 1979c.

国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所, 国道 10 号石崎橋地質調査業務 (ボーリング ID=QS48310307009), 1980.

国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所, 国道 220 号青島バイパス地質調査(その 1) 業務 (ボーリング ID=QS47315375004), 1982a.

国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所, 国道 10 号日向大橋側道地質調査業務 (ボーリング ID=QS48310358001), 1982b.

国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所, 国道 10 号日向大橋側道地質調査業務 (ボーリング ID=QS48310357001), 1982.c

国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所, 国道 10 号仙ヶ崎地区外 2 件地質調査業務 (ボーリング ID=QS48315531004), 1982d.

国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所, 国道 220 号島山地区地質調査業務 (ボーリング ID=QS47315375001), 1983a.

国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所, 国道 220 号島山地区地質調査業務 (ボーリング ID=QS47315375003), 1983b.

国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所, 国道 220 号島山地区地質調査業務 (ボーリング ID=QS47315375004), 1983c.

国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所, 宮崎 10 号佐土原地区地質調査業務 (広瀬

跨道橋及び擁壁) (ボーリング ID=QS48310307001) , 1984.

国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所, 小松川排水機場外一件地質調査業務 (ボーリング ID=QS47316383001) , 1986.

国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所, 小松川排水機場地質調査業務 (ボーリング ID=QS47316383003) , 1987.

国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所, 瓜田水門外 1 件地質調査業務 (ボーリング ID=QS48311432001) , 1988.a

国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所, 瓜田水門外 1 件地質調査業務 (ボーリング ID=QS48311432003) , 1988b.

国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所, 石並橋設計業務 (ボーリング ID=QS48313498002) , 1990.

国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所, 大淀河畔特殊堤地質調査業務 (ボーリング ID=QS47316384002) , 1991a.

国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所, 大淀河畔特殊堤地質調査業務 (ボーリング ID=QS47316384004) , 1991b.

国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所, 宮崎工事事務所管内測量調査設計業務 (ボーリング ID=PORT45017020044) , 1993a.

国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所, 宮崎地下駐車場地質調査外 1 件業務 (ボーリング ID=QS47316394002) , 1993b.

国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所, 地震観測所地質調査業務 (ボーリング ID=QS47316376001) , 1997.

国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所, 平成 17 年度日向大橋地質調査業務 (No.1 孔, ボーリング ID=QS20058965610210001) , 2006a.

国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所, 平成 17 年度日向大橋地質調査業務 (No.3 孔, ボーリング ID=QS20058965610210003) , 2006b.

国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所, 高鍋地区外地質調査業務 (No.1 (A1 橋台) , ボーリング ID=QS20078965550200040001) , 2008a.

国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所, 高鍋地区外地質調査業務 (No.3 (A3 橋脚) , ボーリング ID=QS20078965550200040003) , 2008b.

国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所, 高鍋地区外地質調査業務 (No.4 (P5 橋脚) , ボーリング ID=QS20078965550200040004) , 2008c.

国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所, 高鍋地区外地質調査業務 (No.5 (P7 橋脚) , ボーリング ID=QS20078965550200040005) , 2008d.

国土交通省九州地方整備局 宮崎河川国道事務所, 高鍋地区外地質調査業務 (No.6 (A2 橋台) , ボーリング ID=QS20078965550200040006) , 2008e.

国土交通省九州地方整備局 延岡河川国道事務所, 新沖田橋地質調査業務 (ボーリング ID=QS48316533003) , 1979a.

国土交通省九州地方整備局 延岡河川国道事務所, 新沖田橋地質調査業務 (ボーリング ID=QS48316533004) , 1979b.

国土交通省九州地方整備局 延岡河川国道事務所, 新沖田橋地質調査業務 (ボーリング ID=QS48316534010) , 1979c.

国土交通省九州地方整備局 延岡河川国道事務所, 新沖田橋地質調査業務 (ボーリング ID=QS48316534011) , 1979d.

国土交通省九州地方整備局 延岡河川国道事務所, 宮崎 10 号丸山橋外 1 件地質調査業務 (ボ

- ーリング ID=QS48315573001) , 1990.
- 国土交通省九州地方整備局 延岡河川国道事務所, 宮崎 10 号新鳴子橋地質調査業務 (ボーリング ID=QS48315572022) , 1992.
- 国土交通省九州地方整備局 延岡河川国道事務所, 延岡管内地質調査業務 (ボーリング ID=QS48314409002) , 1994a.
- 国土交通省九州地方整備局 延岡河川国道事務所, 延岡管内地質調査業務 (ボーリング ID=QS48313498003) , 1994b.
- 国土交通省 九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所,
MIYAZAKIKOUGAIKOUTHIKUBOUHATEIMINAMICHIYOU (ボーリング ID=PORT45017010062) , 1982.
- 国土交通省 九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所,
MIYAZAKIKOHONKOCHIKUBOHATEINAIDOSHITSUCH (ボーリング ID=PORT45017010015) , 1989.
- 国土交通省 九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所,
MIYAZAKIKO(GAIKOCHIKU)BOHATEDI (ボーリング ID=PORT45017010273) , 1980.

Appendix III

日本列島周辺の海陸シームレス旧汀線分布図

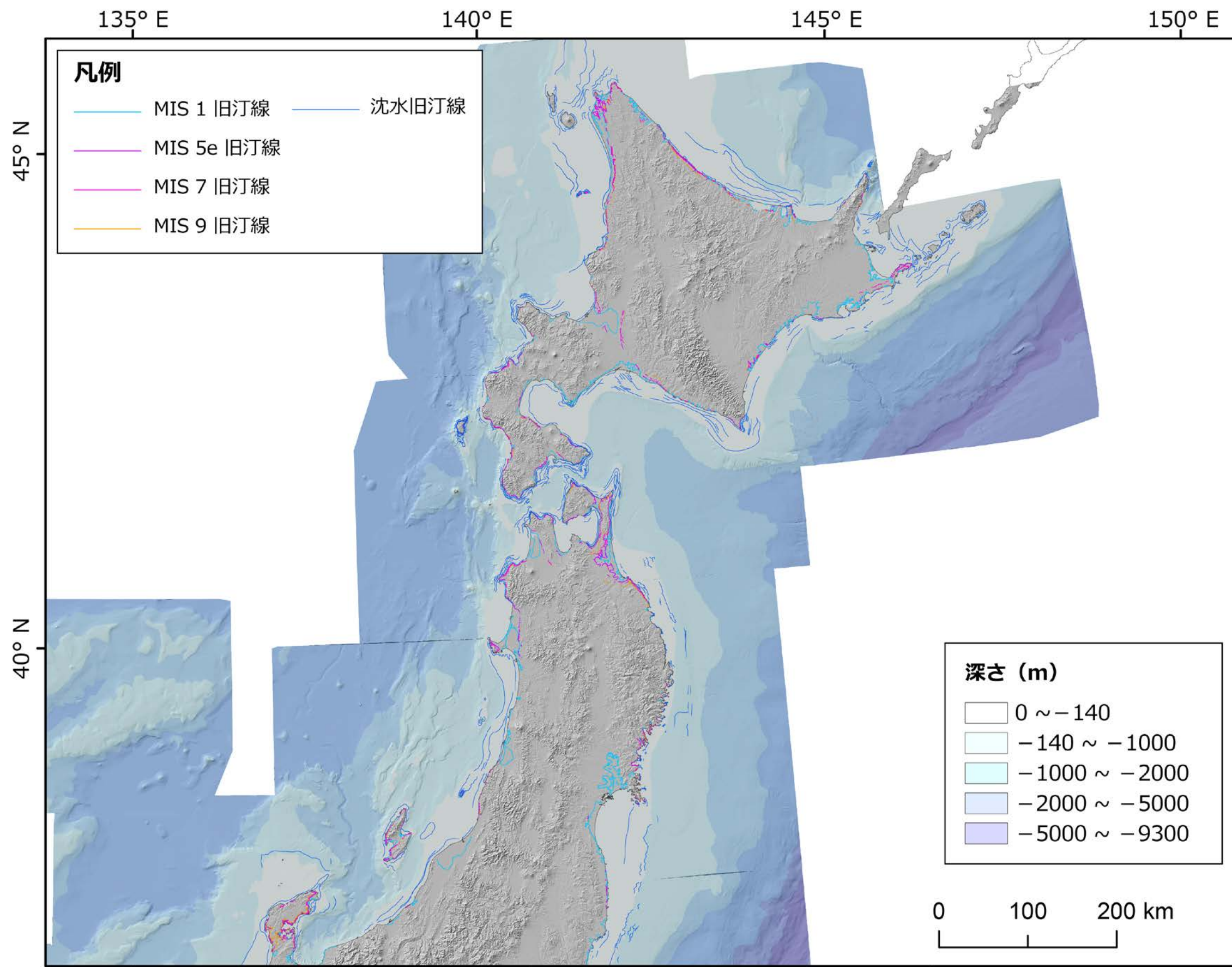


図1 海陸シームレス旧汀線分布図(1)

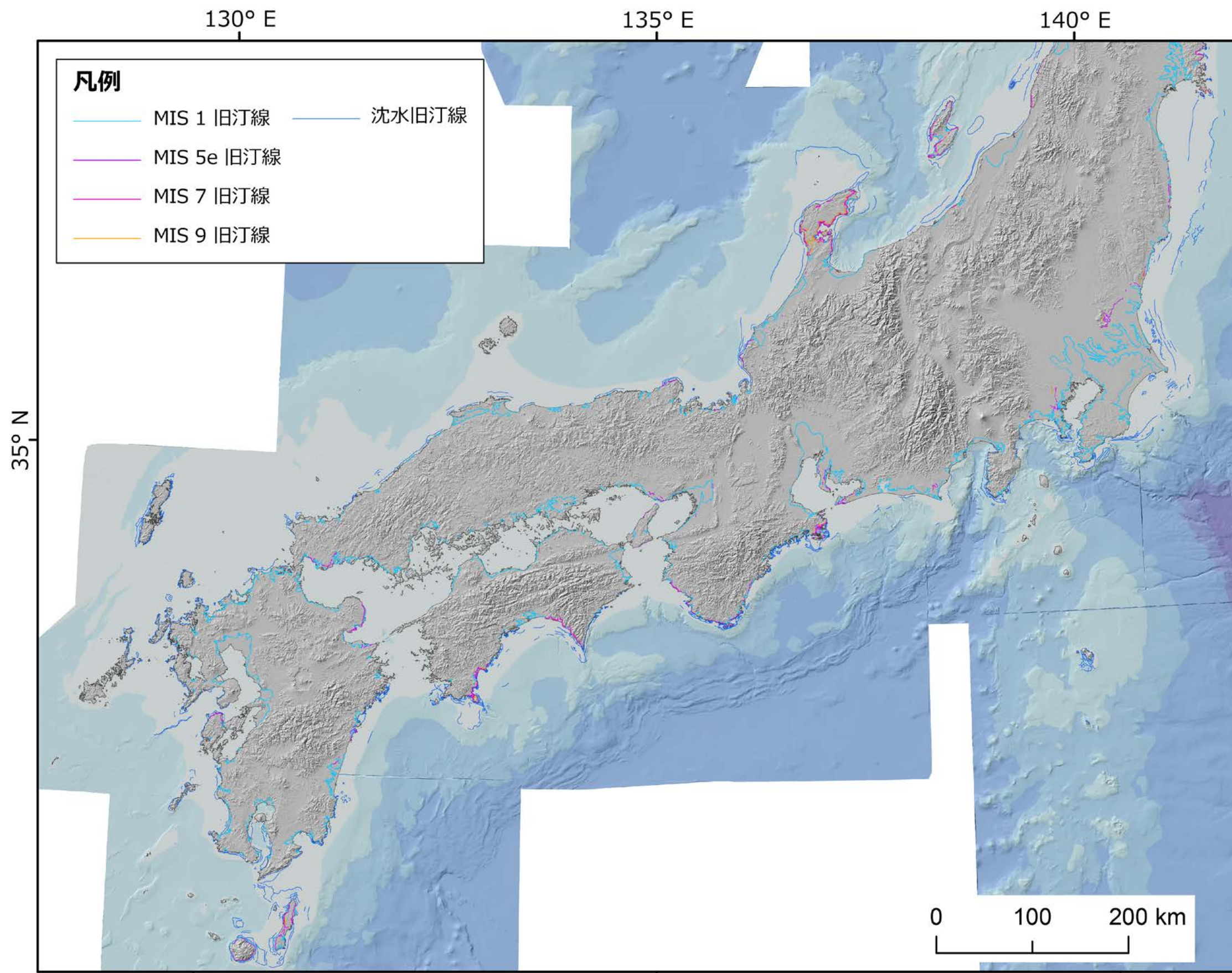


図2 海陸シームレス旧汀線分布図(2)
 海底の高度段彩の凡例は、図1と同じ。

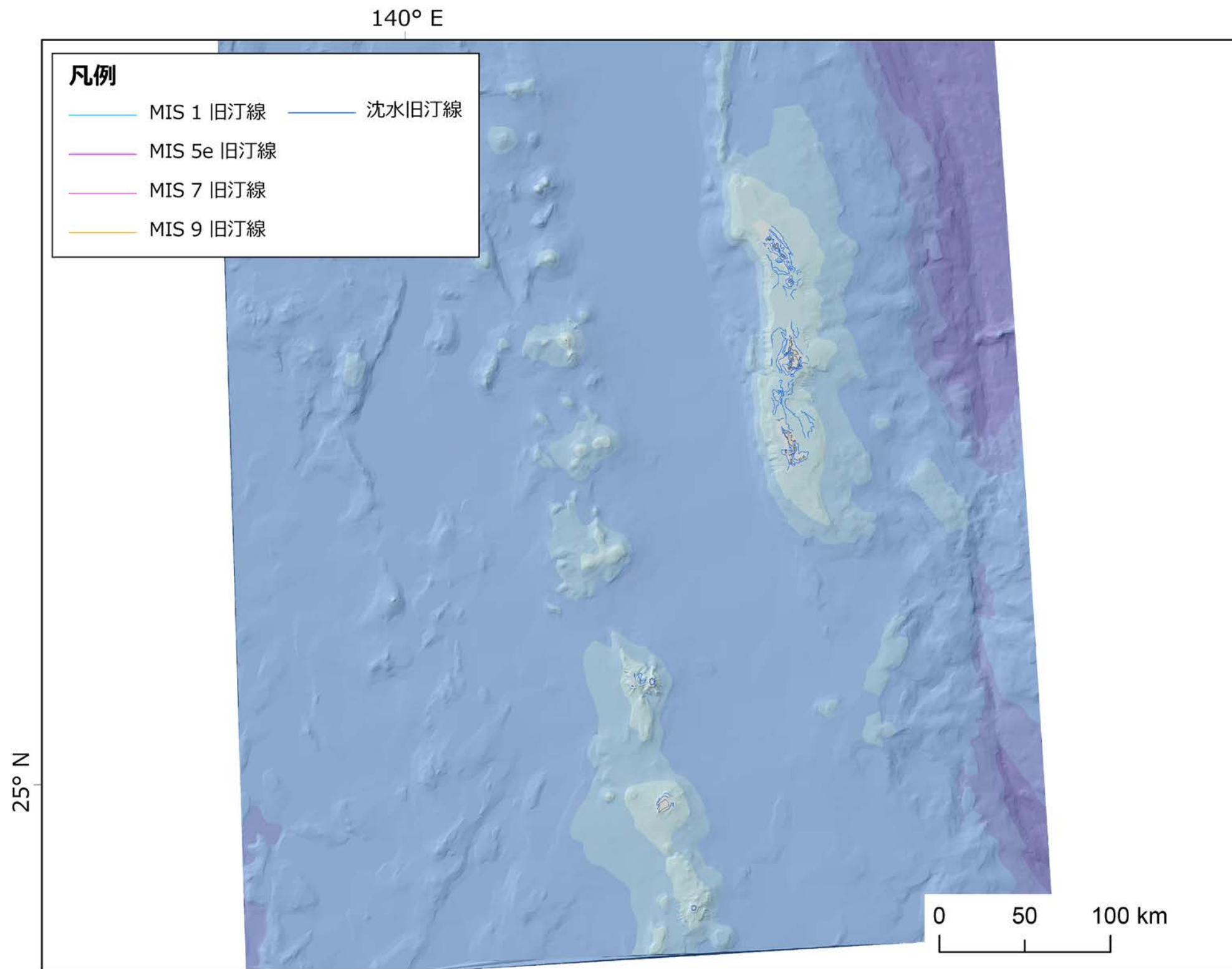


図3 海陸シームレス旧汀線分布図(3)
 海底の高度段彩の凡例は、図1と同じ。

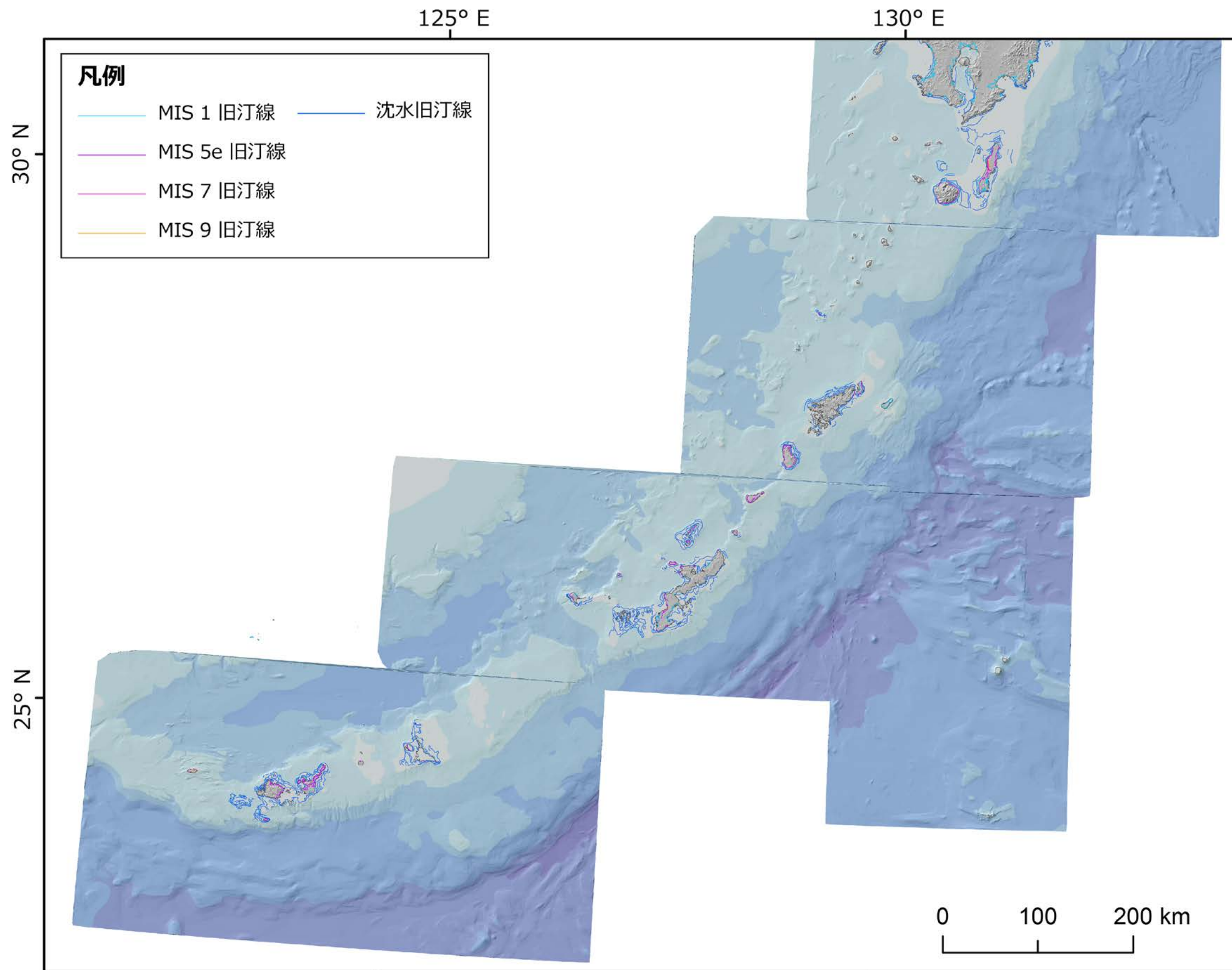


図4 海陸シームレス旧汀線分布図(4)
 海底の高度段彩の凡例は、図1と同じ。

Appendix IV

テフラ・段丘礫・被覆層の分析データ集

目次

1. テフラ分析結果	IV-1
1.1 分析試料	IV-1
1.2 分析方法	IV-6
1.3 検鏡および屈折率測定	IV-6
1.4 火山ガラスおよび鉱物の主要元素化学組成	IV-15
2. 段丘礫・段丘被覆層の分析結果	IV-36
参考文献	IV-62

図目次

図 1 1	テフラ分析試料の採取位置図	IV-3
図 1 2	テフラ分析試料の露頭における採取位置図 (1)	IV-4
図 1 3	テフラ分析試料の露頭における採取位置図 (2)	IV-5
図 1 4	検鏡結果および代表的と考えられる試料に対する火山ガラスおよび重鉱物の屈折率測定結果 (Hf1 面 : MYZ20171221-01①)	IV-7
図 1 5	検鏡結果および代表的と考えられる試料に対する火山ガラスおよび重鉱物の屈折率測定結果 (Hf1 面 : MYZ20171221-01②)	IV-8
図 1 6	検鏡結果および代表的と考えられる試料に対する火山ガラスおよび重鉱物の屈折率測定結果 (Hf1 面 : MYZ20171221-01③)	IV-8
図 1 7	検鏡結果および代表的と考えられる試料に対する火山ガラスおよび重鉱物の屈折率測定結果 (Hf2 面 : MYZ20171222-01①)	IV-9
図 1 8	検鏡結果および代表的と考えられる試料に対する火山ガラスおよび重鉱物の屈折率測定結果 (Mm1 面 : MYZ20171219-04)	IV-10
図 1 9	検鏡結果および代表的と考えられる試料に対する火山ガラスおよび重鉱物の屈折率測定結果 (Mm1 面 : MYZ20171218-01)	IV-10
図 1 10	検鏡結果および代表的と考えられる試料に対する火山ガラスおよび重鉱物の屈折率測定結果 (Mm1 面 : MYZ20171121-02)	IV-11
図 1 11	検鏡結果および代表的と考えられる試料に対する火山ガラスおよび重鉱物の屈折率測定結果 (Mm1 面 : MYZ20171125-01)	IV-11
図 1 12	検鏡結果および代表的と考えられる試料に対する火山ガラスおよび重鉱物の屈折率測定結果 (Mf2 面 : MYZ20180117-01)	IV-12
図 1 13	検鏡結果および代表的と考えられる試料に対する火山ガラスおよび重鉱物の屈折率測定結果 (Mf4 面 : MYZ20180118-02)	IV-13
図 1 14	検鏡結果および代表的と考えられる試料に対する火山ガラスおよび重鉱物の屈折率測定結果 (Mf4 面 : MYZ20171215-DA25)	IV-13
図 1 15	検鏡結果および代表的と考えられる試料に対する火山ガラスおよび重鉱物の屈折率測定結果 (Lf2 面 : MYZ20171214-DA02)	IV-14
図 2 1	宮崎地域における露頭柱状図、被覆層試料採取位置および測色値 (1)	IV-37
図 2 2	宮崎地域における露頭柱状図、被覆層試料採取位置および測色値 (2)	IV-38
図 2 3	宮崎地域における露頭柱状図、被覆層試料採取位置および測色値 (3)	IV-39

図 2 17	幌延地域下沼露頭におけるスケッチ、柱状図、ブロック試料 と遊離酸化鉄試料の採取位置	IV-40
図 2 18	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171221-01-1 : b-Hf1 面)	IV-41
図 2 19	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171221-01-2 : b-Hf1 面)	IV-41
図 2 20	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171221-01-3 : b-Hf1 面)	IV-42
図 2 21	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171221-01-4 : b-Hf1 面)	IV-42
図 2 22	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171221-01-5 : b-Hf1 面)	IV-43
図 2 23	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171222-01-1 : b-Hf2 面)	IV-43
図 2 24	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171222-01-2 : b-Hf2 面)	IV-44
図 2 25	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171222-01-3 : b-Hf2 面)	IV-44
図 2 26	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171222-01-4 : b-Hf2 面)	IV-45
図 2 27	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20181222-01-5 : b-Hf2 面)	IV-45
図 2 28	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171219-04-1 : b-Mm1 面)	IV-46
図 2 29	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171219-04-2 : b-Mm1 面)	IV-46
図 2 30	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171219-04-3 : b-Mm1 面)	IV-47
図 2 31	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171219-04-4 : b-Mm1 面)	IV-47
図 2 32	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171219-04-5 : b-Mm1 面)	IV-48
図 2 33	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20180117-01-1 : b-Mf2 面)	IV-48
図 2 34	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20180117-01-2 : b-Mf2 面)	IV-49
図 2 35	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20180117-01-3 : b-Mf2 面)	IV-49
図 2 36	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20180117-01-4 : b-Mf2 面)	IV-50
図 2 37	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20180117-01-5 : b-Mf2 面)	IV-50
図 2 38	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20180117-02-1 : b-Mf4 面)	IV-51
図 2 39	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20180117-02-2 : b-Mf4 面)	IV-51
図 2 40	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20180117-02-3 : b-Mf4 面)	IV-52
図 2 41	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20180117-02-4 : b-Mf4 面)	IV-52
図 2 42	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20180117-02-5 : b-Mf4 面)	IV-53
図 2 43	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171214-DA02-1 : b-Lf2 面)	IV-53
図 2 44	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171214-DA02-2 : b-Lf2 面)	IV-54
図 2 45	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171214-DA02-3 : b-Lf2 面)	IV-54
図 2 46	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171214-DA02-4 : b-Lf2 面)	IV-55
図 2 47	段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171214-DA02-5 : b-Lf2 面)	IV-55
図 2 48	被覆層の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171018-01)	IV-56
図 2 49	被覆層の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171221-01-01 : b-Hf1 面)	IV-56
図 2 50	被覆層の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171221-01-02 : b-Hf1 面)	IV-57
図 2 51	被覆層の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171221-01-03 : b-Hf1 面)	IV-57
図 2 52	被覆層の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171221-01-② : b-Hf1 面)	IV-58
図 2 53	被覆層の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171221-01-③-4 : b-Hf1 面)	IV-58
図 2 54	被覆層の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171219-04-1 : b-Mm1 面)	IV-59
図 2 55	被覆層の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171219-04-2 : b-Mm1 面)	IV-59
図 2 56	被覆層の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171219-04-3 : b-Mm1 面)	IV-60

図 2 57 被覆層の元素分布と測色値（試料：MYZ20171218-DB10：d-Mf3 面）……………IV-60

表 目 次

表 1 1	テフラ分析に関する試料一覧表 (1)	……………IV-1
表 1 2	テフラ分析に関する試料一覧表 (2)	……………IV-2
表 1 3	EDS 分析結果 (1)	……………IV-16
表 1 4	EDS 分析結果 (2)	……………IV-17
表 1 5	EDS 分析結果 (3)	……………IV-18
表 1 6	EDS 分析結果 (4)	……………IV-19
表 1 7	EDS 分析結果 (5)	……………IV-20
表 1 8	EDS 分析結果 (6)	……………IV-21
表 1 9	EDS 分析結果 (7)	……………IV-22
表 1 10	EDS 分析結果 (8)	……………IV-23
表 1 11	EDS 分析結果 (9)	……………IV-24
表 1 12	EDS 分析結果 (10)	……………IV-25
表 1 13	EDS 分析結果 (11)	……………IV-26
表 1 14	EDS 分析結果 (12)	……………IV-27
表 1 15	EDS 分析結果 (13)	……………IV-28
表 1 16	EDS 分析結果 (14)	……………IV-29
表 1 17	EDS 分析結果 (15)	……………IV-30
表 1 18	EDS 分析結果 (16)	……………IV-31
表 1 19	EDS 分析結果 (17)	……………IV-32
表 1 20	EDS 分析結果 (18)	……………IV-33
表 1 21	EDS 分析結果 (19)	……………IV-34
表 1 22	EDS 分析結果 (20)	……………IV-35
表 2 1	遊離酸化鉄分析結果	……………IV-61

テフラ・段丘礫・被覆層の分析データ集

本研究では、沿岸部における陸域から海域への外挿法の信頼性確保ならびに経験的指標に基づく段丘対比・編年手法の高度化を目的に、宮崎平野中部・北部ならびに北海道・幌延地域において事例研究を実施した。本付録では、その過程で得られたテフラ試料および段丘礫・被覆層に対する分析結果について記す。

1. テフラ分析結果

1.1 分析試料

宮崎平野中部・北部の高位段丘、中位段丘および低位段丘に対する対比・編年を目的に、各段丘における代表的な露頭の段丘被覆層の層準からテフラ分析に資する試料を連続サンプリングし採取した。

採取試料一覧表を表 1-1 および表 1-2 に、また、露頭位置図および露頭における採取位置図をそれぞれ図 1-1 ならびに図 1-2 および図 1-3 に示す。

表 1-1 テフラ分析に関する試料一覧表 (1)

段丘	露頭名	地区	試料名	段丘	露頭名	地区	試料名				
高位面	Hf1	B	MYZ20171221-01①-22	高位面	Hf1	B	MYZ20171221-01③-14				
			MYZ20171221-01①-21				MYZ20171221-01③-13				
			MYZ20171221-01①-20				MYZ20171221-01③-12				
			MYZ20171221-01①-19				MYZ20171221-01③-11				
			MYZ20171221-01①-18				MYZ20171221-01③-10				
			MYZ20171221-01①-17				MYZ20171221-01③-09				
			MYZ20171221-01①-16				MYZ20171221-01③-08				
			MYZ20171221-01①-15				MYZ20171221-01③-07				
			MYZ20171221-01①-14				MYZ20171221-01③-06				
			MYZ20171221-01①-13				MYZ20171221-01③-05				
			MYZ20171221-01①-12				MYZ20171221-01③-04				
			MYZ20171221-01①-11				MYZ20171221-01③-03				
			MYZ20171221-01①-10				MYZ20171221-01③-02				
			MYZ20171221-01①-09				MYZ20171221-01③-01				
			MYZ20171221-01①-08				MYZ20171222-01①-23				
			MYZ20171221-01①-07				MYZ20171222-01①-22				
			MYZ20171221-01①-06				MYZ20171222-01①-21				
			MYZ20171221-01①-05				MYZ20171222-01①-20				
			MYZ20171221-01①-04				MYZ20171222-01①-19				
			MYZ20171221-01①-03				MYZ20171222-01①-18				
			MYZ20171221-01①-02				MYZ20171222-01①-17				
			MYZ20171221-01①-01				MYZ20171222-01①-16				
			MYZ2017 1221-01②				B	MYZ20171221-01②-10	Hf2	B	MYZ20171222-01①-15
								MYZ20171221-01②-09			MYZ20171222-01①-14
								MYZ20171221-01②-08			MYZ20171222-01①-13
								MYZ20171221-01②-07			MYZ20171222-01①-12
MYZ20171221-01②-06	MYZ20171222-01①-11										
MYZ20171221-01②-05	MYZ20171222-01①-10										
MYZ20171221-01②-04	MYZ20171222-01①-09										
MYZ20171221-01②-03	MYZ20171222-01①-08										
MYZ20171221-01②-02	MYZ20171222-01①-07										
MYZ20171221-01②-01	MYZ20171222-01①-06										

表 1-2 テフラ分析に関する試料一覧表 (2)

段丘		露頭名	地区	試料名	段丘	露頭名	地区	試料名		
高位面	Hf-2	MYZ2017 1222-01①	B	MYZ20171222-01①-05	中位面	MYZ2018 0117-01	B	MYZ20180117-01③-01		
				MYZ20171222-01①-04				MYZ20180117-01①-16		
				MYZ20171222-01①-03				MYZ20180117-01①-11		
				MYZ20171222-01①-02				MYZ20180117-01①-10		
				MYZ20171222-01①-01				MYZ20180117-01①-09		
中位面	Mm1	MYZ2017 1219-04	B	MYZ20171219-04-14				MYZ2018 0118-02	B	MYZ20180118-02-20
				MYZ20171219-04-13						MYZ20180118-02-16
				MYZ20171219-04-12						MYZ20180118-02-15
				MYZ20171219-04-11						MYZ20180118-02-14
				MYZ20171219-04-10						MYZ20180118-02-13
				MYZ20171219-04-09						MYZ20180118-02-12
				MYZ20171219-04-08						MYZ20180118-02-11
				MYZ20171219-04-07						MYZ20180118-02-10
				MYZ20171219-04-06						MYZ20180118-02-09
				MYZ20171219-04-05						MYZ20180118-02-08
				MYZ20171219-04-04	MYZ20180118-02-07					
				MYZ20171219-04-03	MYZ20180118-02-06					
				MYZ20171219-04-02	MYZ20180118-02-05					
		MYZ20171219-04-01	MYZ20180118-02-04							
		MYZ2017 1218-01	A	MYZ20171218-01-01	MYZ20180118-02-03					
				MYZ20171218-01-02	MYZ20180118-02-02					
		MYZ2017 1121-02	A	MYZ20171121-02-15	MYZ20180118-02-01					
				MYZ20171121-02-14	MYZ20171215-DA25-01					
				MYZ20171121-02-13	MYZ20171215-DA25-02					
				MYZ20171121-02-12	MYZ20171215-DA25-03					
				MYZ20171121-02-11	MYZ20171215-DA25-04					
				MYZ20171121-02-10	MYZ20171214-DA02-03					
				MYZ20171121-02-09	MYZ20171214-DA02-02					
				MYZ20171121-02-08	MYZ20171214-DA02-01					
				MYZ20171121-02-07						
				MYZ20171121-02-06						
				MYZ20171121-02-05						
				MYZ20171121-02-04						
MYZ20171121-02-03										
MYZ20171121-02-02										
MYZ20171121-02-01										
MYZ2017 1125-01	E	MYZ20171125-01-02								
		MYZ20171125-01-01								
低位面	Lf2	MYZ2017 1214-DA02	B	MYZ20171214-DA02-03						
				MYZ20171214-DA02-02						
				MYZ20171214-DA02-01						

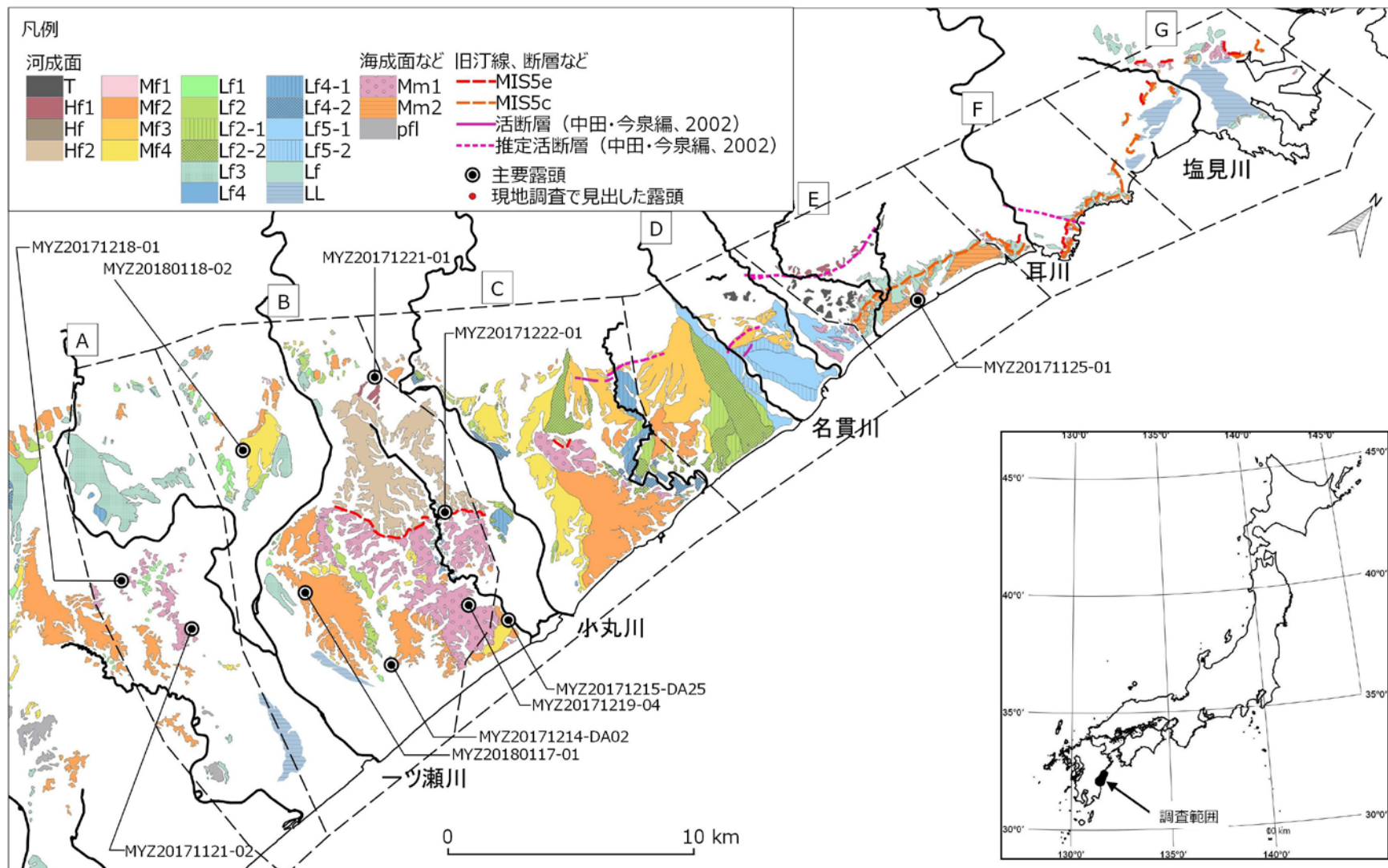


図 1-1 テフラ分析試料の採取位置図

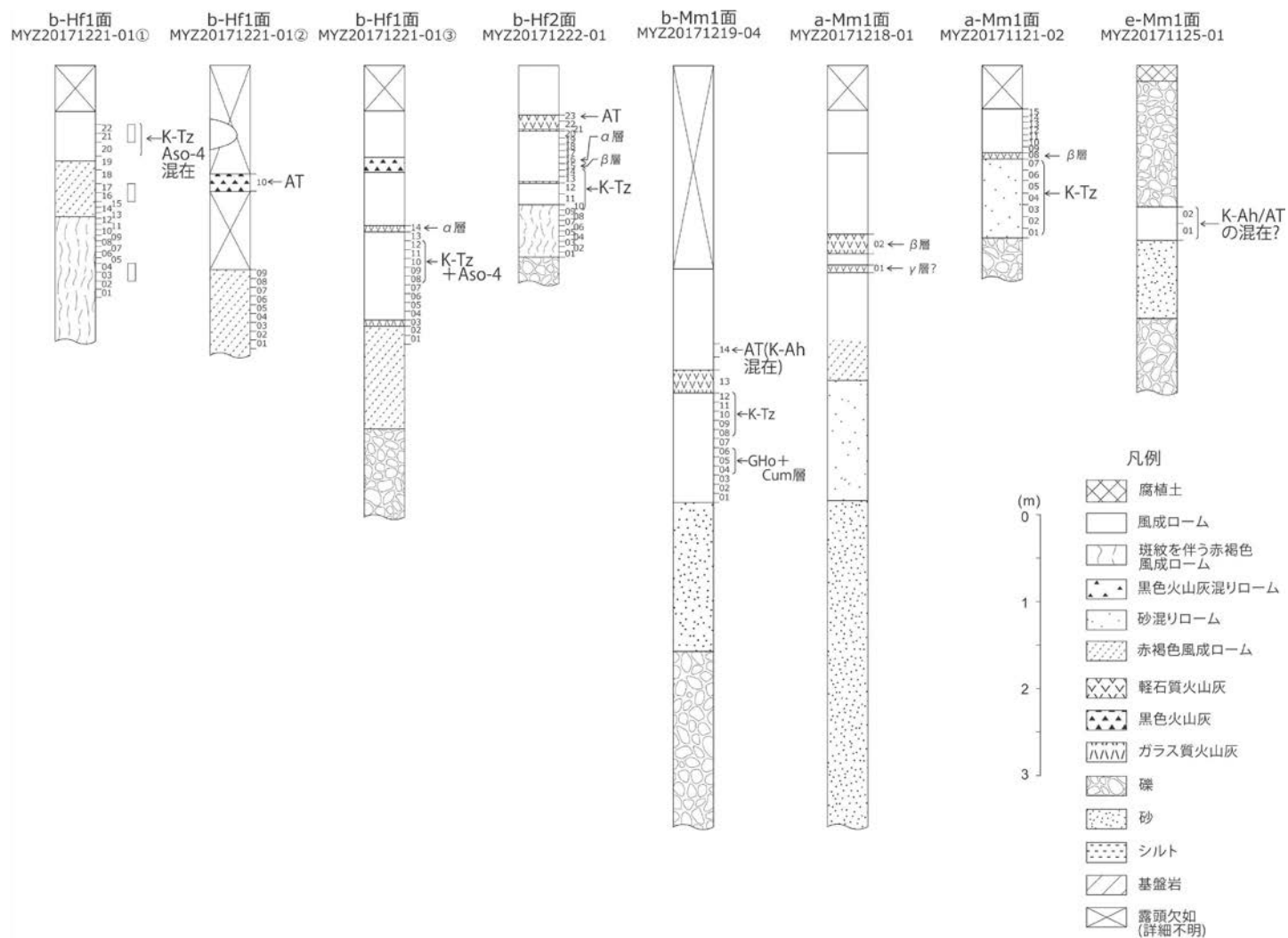


図 1-2 テフラ分析試料の露頭における採取位置図 (1)

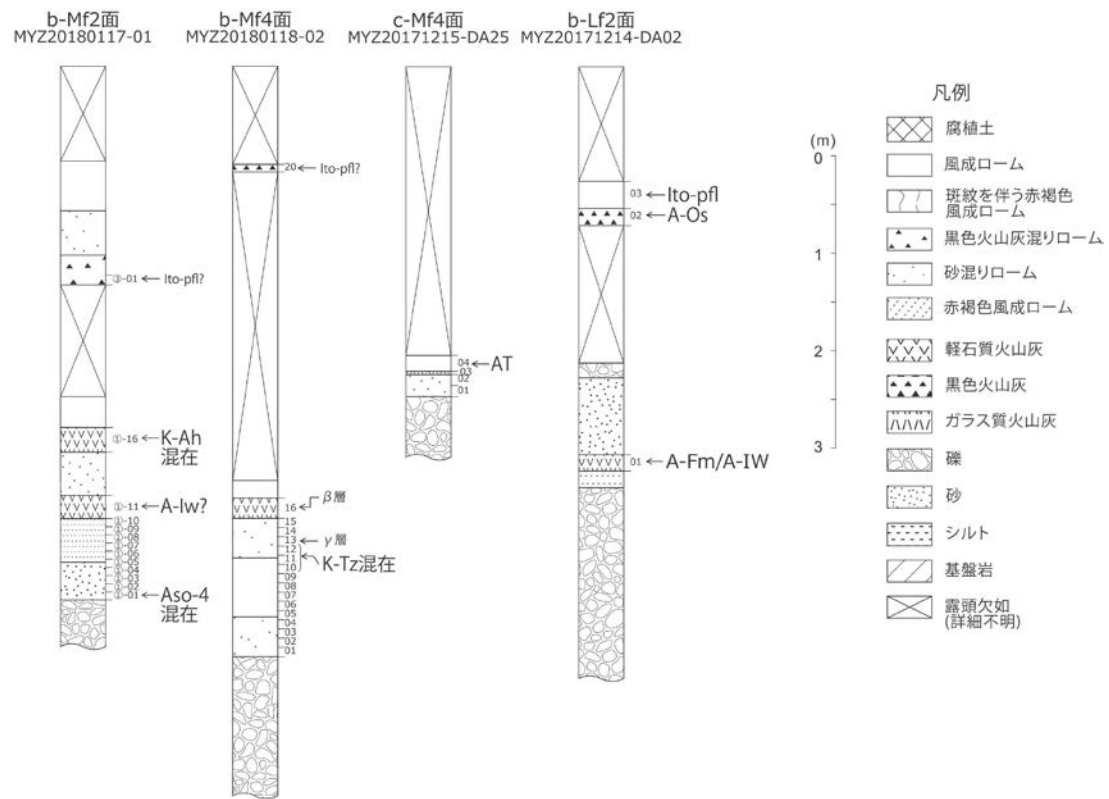


図 1-3 テフラ分析試料の露頭における採取位置図 (2)

1.2 分析方法

テフラ分析では、採取試料に対し検鏡を行い、それに含まれる鉱物種の同定およびその量比を把握したのち、代表的な試料に対し、火山ガラスおよび重鉱物（斜方輝石、角閃石など）の屈折率測定ならびに主要元素化学分析（以下、EDS 分析とする）を行った。

屈折率測定は、古澤（2004）に準じ行った。屈折率測定は、(株)古澤地質所有の温度変化型測定装置（マイオット MAIOT；古澤, 1995）を使用した。これは、浸液の温度を直接測定しつつ屈折率を測定するものである。測定項目は、火山ガラスの屈折率 n 、斜方輝石の最大屈折率 γ 、普通角閃石およびカミングトン閃石の壁開片の最大屈折率 n_2 である。

EDS 分析は、(株)古澤地質所有のエネルギー分散型 X 線分析装置 EMAX-5770（HORIBA 製）と走査線型電子顕微鏡 SEM S-2150（日立製作所製）を用いた。主成分組成は ZAF 法により補正し求めた。

1.3 検鏡および屈折率測定

採取試料の検鏡結果および代表的と考えられる試料における火山ガラスおよび重鉱物の屈折率測定結果を、図 1-4～図 1-15 に示す。

露头名: MYZ20171221-01①

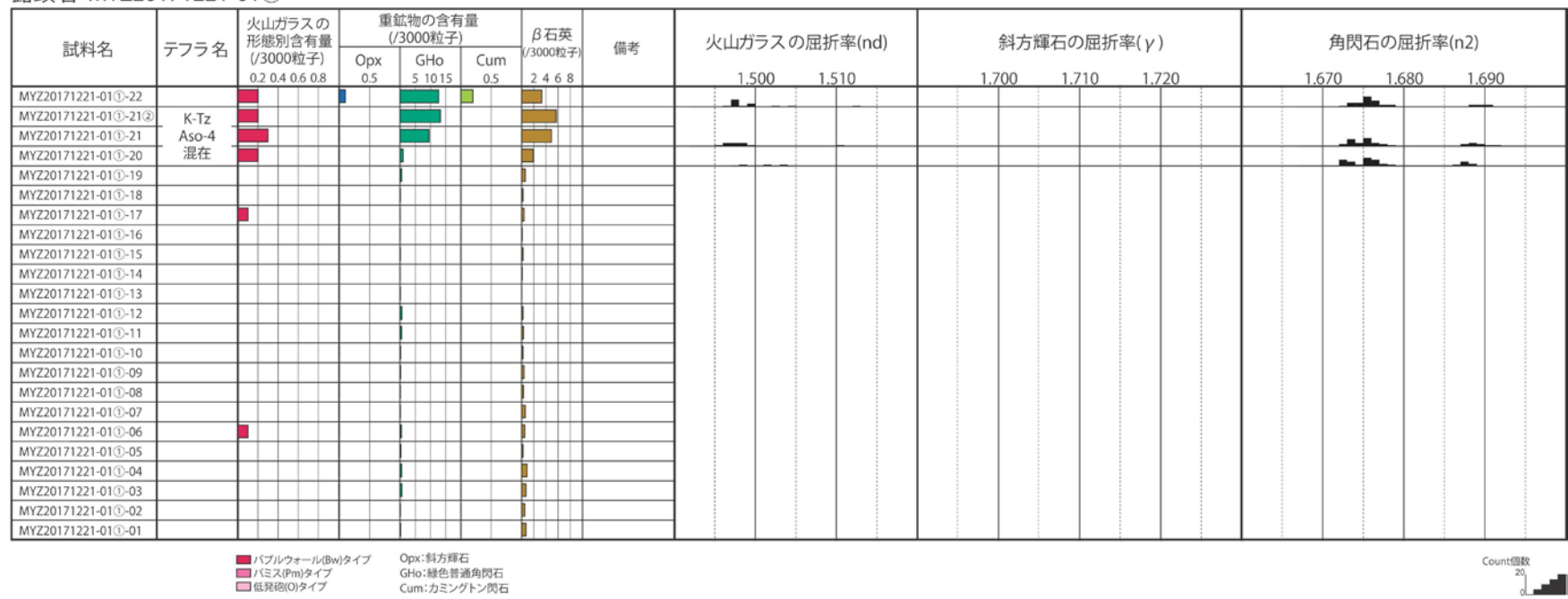


図 1-4 検鏡結果および代表的と考えられる試料に対する火山ガラスおよび重鉱物の屈折率測定結果 (Hf1 面: MYZ20171221-01①)

露頭名:MYZ20171221-01②



図 1-5 検鏡結果および代表的と考えられる試料に対する火山ガラスおよび重鉱物の屈折率測定結果 (Hf1 面 : MYZ20171221-01②)

露頭名:MYZ20171221-01③

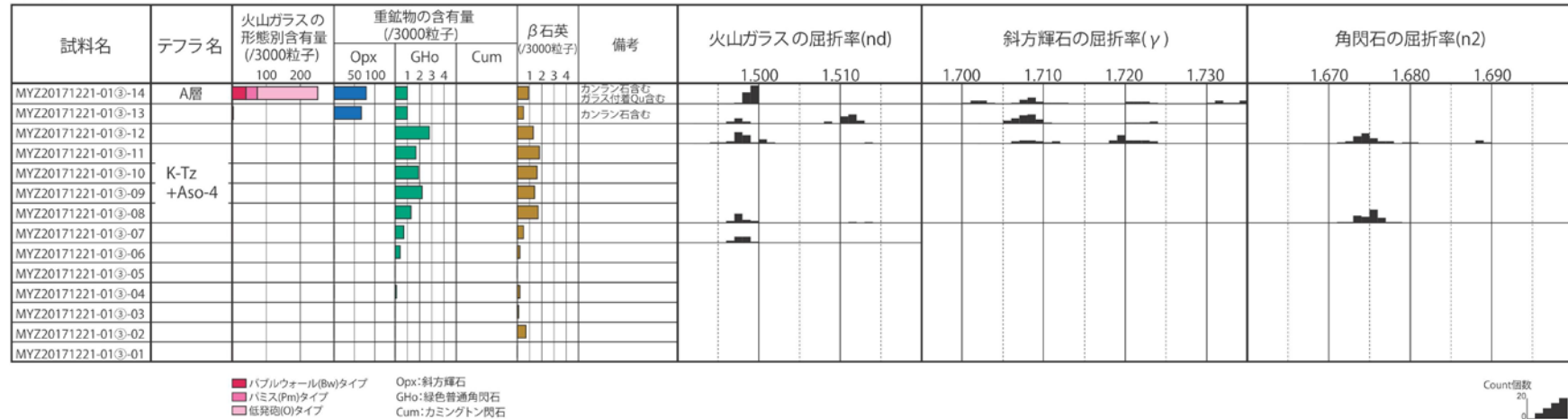


図 1-6 検鏡結果および代表的と考えられる試料に対する火山ガラスおよび重鉱物の屈折率測定結果 (Hf1 面 : MYZ20171221-01③)

露頭名: MYZ20171222-01①

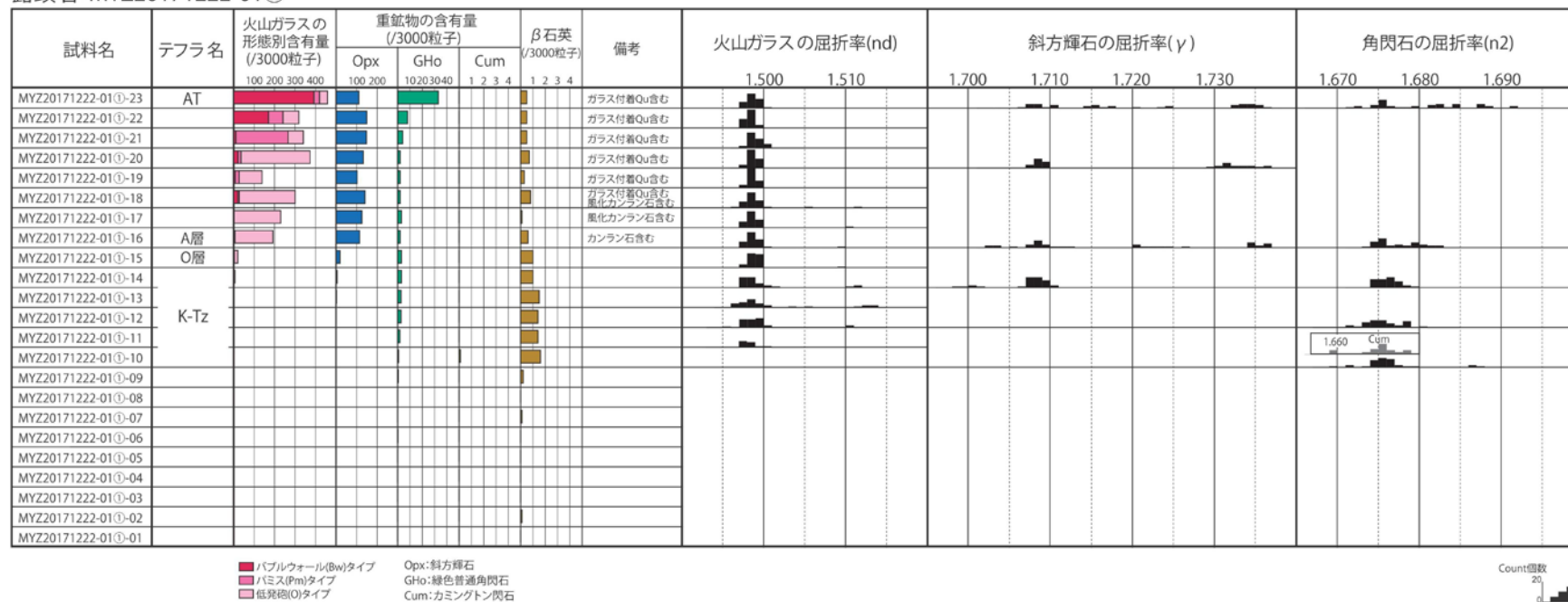


図 1-7 検鏡結果および代表的と考えられる試料に対する火山ガラスおよび重鉱物の屈折率測定結果 (Hf2 面: MYZ20171222-01①)

露頭名:MYZ20171219-04

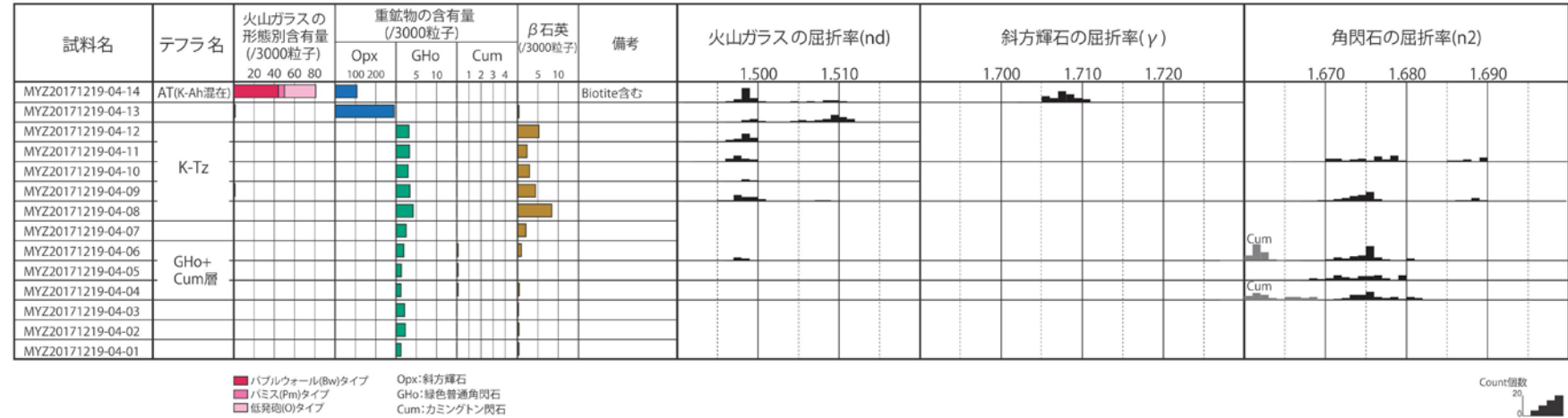


図 1-8 検鏡結果および代表的と考えられる試料に対する火山ガラスおよび重鉱物の屈折率測定結果 (Mm1 面: MYZ20171219-04)

露頭名:MYZ20180118-01

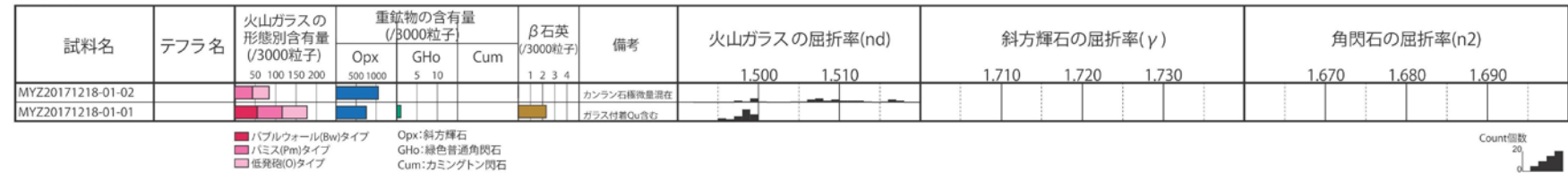


図 1-9 検鏡結果および代表的と考えられる試料に対する火山ガラスおよび重鉱物の屈折率測定結果 (Mm1 面: MYZ20171218-01)

露頭名: MYZ20171121-02

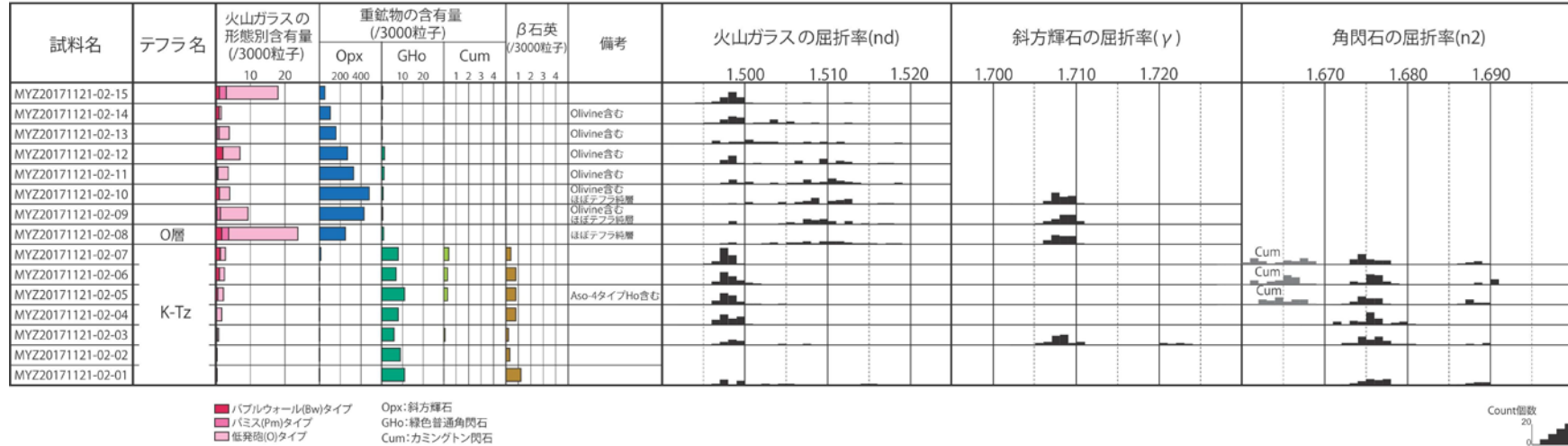


図 1-10 検鏡結果および代表的と考えられる試料に対する火山ガラスおよび重鉱物の屈折率測定結果 (Mm1 面: MYZ20171121-02)

露頭名: MYZ20171125-01

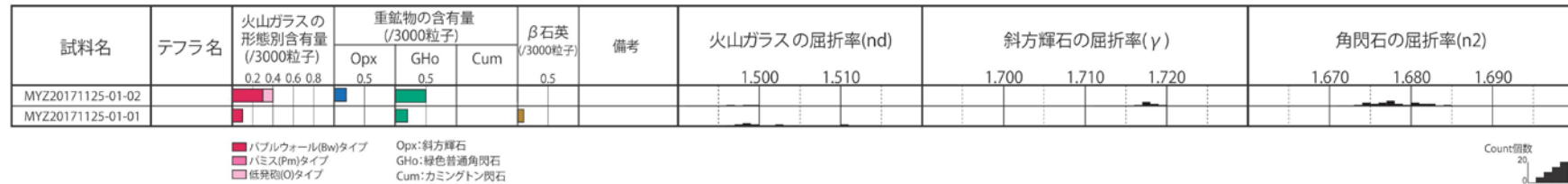


図 1-11 検鏡結果および代表的と考えられる試料に対する火山ガラスおよび重鉱物の屈折率測定結果 (Mm1 面: MYZ20171125-01)

露頭名: MYZ20180117-01

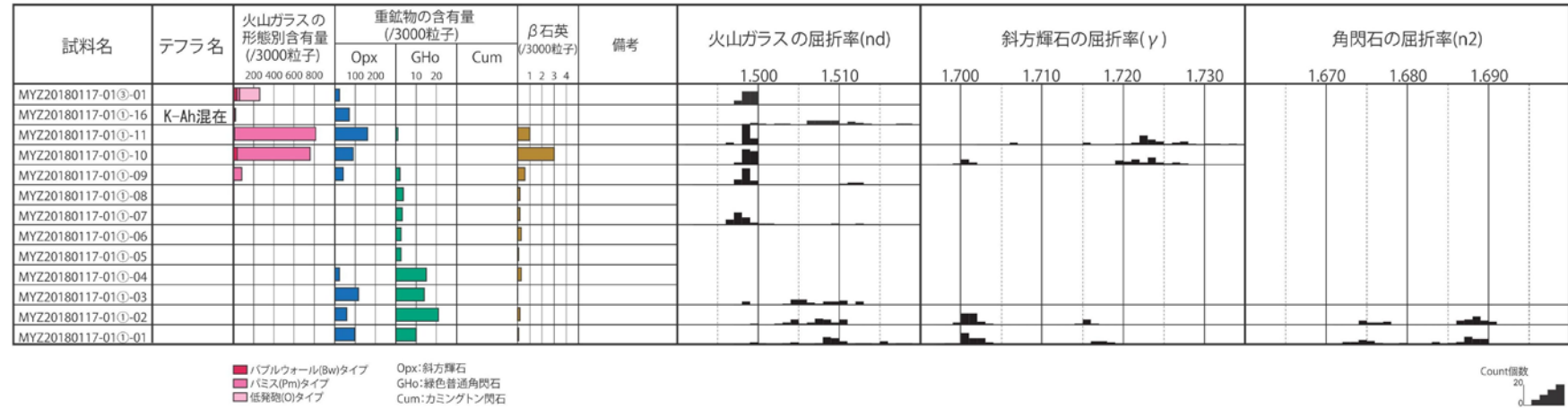
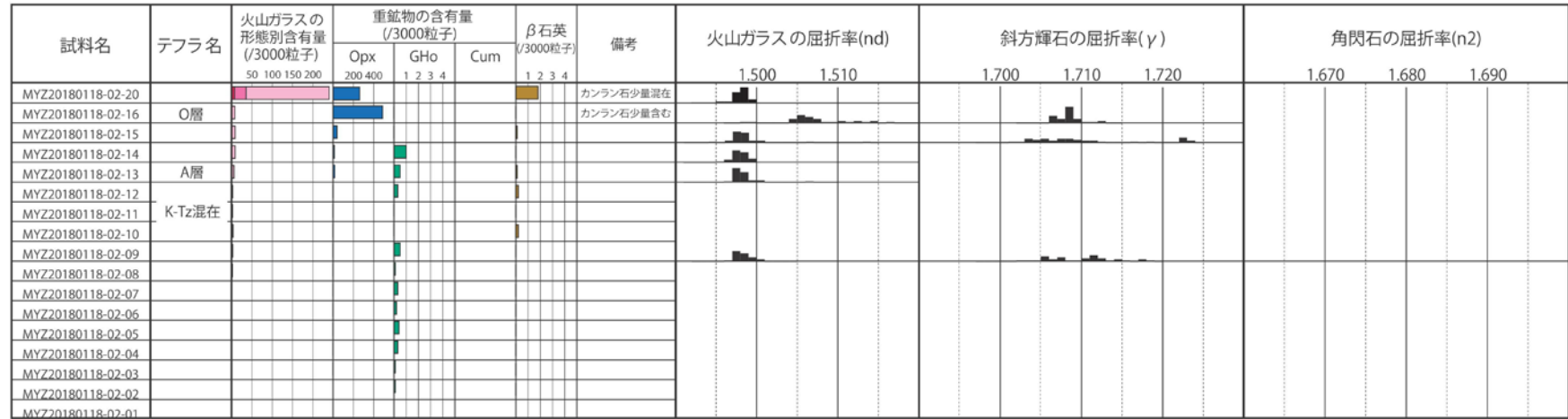


図 1-12 検鏡結果および代表的と考えられる試料に対する火山ガラスおよび重鉱物の屈折率測定結果 (Mf2 面 : MYZ20180117-01)

露头名: MYZ20180118-02

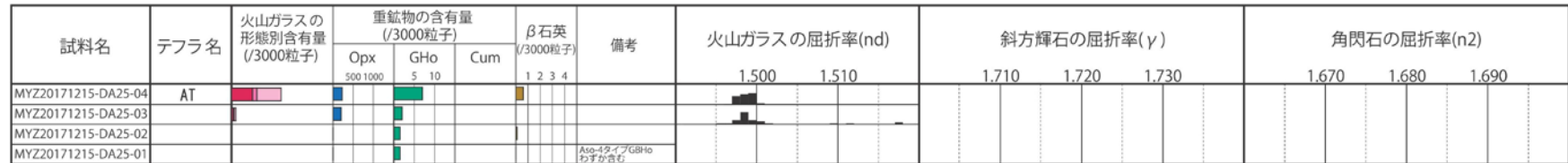


■ バブルウォール(Bw)タイプ
■ バミス(Pm)タイプ
■ 低発砲(O)タイプ
Opx:斜方輝石
GHo:緑色普通角閃石
Cum:カミングトン閃石

Count個数
20
0

図 1-13 検鏡結果および代表的と考えられる試料に対する火山ガラスおよび重鉱物の屈折率測定結果 (Mf4 面: MYZ20180118-02)

露头名: MYZ20171215-DA25



■ バブルウォール(Bw)タイプ
■ バミス(Pm)タイプ
■ 低発砲(O)タイプ
Opx:斜方輝石
GHo:緑色普通角閃石
Cum:カミングトン閃石

Count個数
20
0

図 1-14 検鏡結果および代表的と考えられる試料に対する火山ガラスおよび重鉱物の屈折率測定結果 (Mf4 面: MYZ20171215-DA25)

露頭名: MYZ20171214-DA02

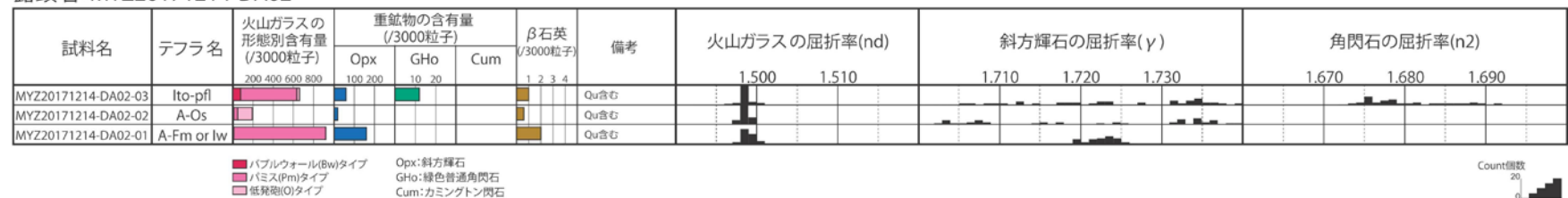


図 1-15 検鏡結果および代表的と考えられる試料に対する火山ガラスおよび重鉱物の屈折率測定結果 (Lf2 面 : MYZ20171214-DA02)

1.4 火山ガラスおよび鉱物の主要元素化学組成

採取試料のうち代表的と考えられる試料における火山ガラスおよび重鉱物の EDS 分析結果を、表 1-3～表 1-22 に示す。

表 1-3 EDS 分析結果 (1)

段丘	試料名	分析対象	分析番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	
Hf1	MYZ20171221-01①-22	Gho	1	48.27	1.10	7.20	14.71	0.68	14.17	10.56	1.27	0.26	98.22	
			2	49.18	1.11	6.46	14.73	0.45	14.36	10.68	1.06	0.28	98.31	
			3	49.31	0.93	6.75	14.67	0.67	14.59	10.35	1.13	0.30	98.70	
			4	49.24	1.42	6.72	11.85	0.65	15.85	11.10	1.15	0.38	98.36	
			5	49.04	1.09	6.66	14.47	0.38	14.76	10.73	1.00	0.33	98.46	
			6	48.51	1.06	7.02	14.90	0.52	14.44	10.52	1.18	0.35	98.50	
			7	48.65	1.09	6.65	14.74	0.46	14.74	10.40	1.05	0.24	98.02	
			8	48.98	0.99	6.71	14.54	0.52	14.67	10.52	1.13	0.31	98.37	
			9	44.46	3.24	9.67	11.47	0.66	14.88	11.25	2.34	0.79	98.76	
			10	48.78	1.14	7.03	14.59	0.46	14.74	10.34	1.17	0.22	98.47	
			11	44.66	3.19	9.69	11.02	0.58	15.03	11.06	2.31	0.80	98.34	
			12	49.10	1.07	6.67	14.19	0.36	14.76	10.75	1.07	0.26	98.23	
			13	49.45	1.10	6.32	14.68	0.48	14.73	10.57	1.07	0.28	98.68	
			14	48.87	1.21	7.08	14.78	0.40	14.45	10.54	1.13	0.33	98.79	
			15	48.83	0.86	6.74	14.79	0.49	14.36	10.59	1.12	0.29	98.07	
			cum	1	54.48	0.23	1.68	19.77	0.87	19.43	1.69	0.18	0.03	98.36
				2	54.72	0.37	1.69	19.73	0.80	19.31	1.68	0.24	0.00	98.54
				3	54.38	0.30	1.93	20.44	1.10	18.34	2.13	0.28	0.01	98.91
				4	54.65	0.24	1.82	20.88	1.03	18.49	1.75	0.32	0.00	99.18
				5	55.24	0.25	1.35	20.19	0.85	19.66	1.65	0.29	0.02	99.50
				6	55.30	0.07	1.37	20.69	1.14	19.08	1.52	0.28	0.00	99.45
				7	54.84	0.26	1.65	20.29	1.04	19.36	1.50	0.26	0.00	99.20
				8	54.87	0.20	1.68	20.53	1.05	18.87	1.68	0.22	0.04	99.14
		MYZ20171221-01①-03	Gho	1	49.36	1.10	6.46	14.35	0.77	14.96	10.66	1.28	0.27	99.21
				2	50.06	1.02	6.48	14.63	0.60	15.05	10.35	1.24	0.22	99.65
				3	49.38	1.31	6.70	14.32	0.67	14.70	10.67	1.26	0.26	99.27
				4	49.04	1.11	6.61	14.94	0.74	14.95	10.51	1.19	0.26	99.35
	5			49.12	1.06	6.63	14.87	0.69	14.86	10.49	1.27	0.30	99.29	
	6			48.05	1.31	7.61	14.93	0.65	14.18	10.77	1.34	0.33	99.17	
	7			48.45	1.23	7.29	15.02	0.57	14.52	10.48	1.21	0.35	99.12	

数値単位は wt.%。gl ; 火山ガラス、Gho : 緑色普通角閃石、opx : 斜方輝石、cum : カミングトン閃石、ol : かんらん石

表 1-4 EDS 分析結果 (2)

段丘	試料名	分析対象	分析番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	
Hf1	MYZ20171221-01①-03	Gho	8	50.38	1.03	5.90	13.94	0.66	15.21	10.55	1.14	0.19	99.00	
			9	49.44	1.21	6.58	14.40	0.83	14.83	10.62	1.18	0.29	99.38	
			10	49.62	1.14	6.82	14.87	0.78	14.79	10.26	1.25	0.22	99.75	
			11	49.03	1.10	6.19	14.03	0.81	14.73	10.64	1.17	0.21	97.91	
			12	49.04	1.00	6.74	14.09	0.63	14.80	10.76	1.06	0.30	98.42	
			13	49.38	0.83	6.50	14.19	0.57	15.00	10.54	1.11	0.31	98.43	
			14	48.56	1.31	6.93	14.41	0.69	14.44	10.62	1.31	0.28	98.55	
	MYZ20171221-01②-10	gl	1	73.33	0.13	11.37	1.10	0.12	0.15	1.02	3.12	3.26	3.26	93.60
			2	73.59	0.19	11.80	0.87	0.05	0.10	0.87	3.11	3.87	3.87	94.45
			3	72.68	0.11	11.37	1.15	0.04	0.07	1.05	3.19	3.28	3.28	92.94
			4	72.40	0.16	11.35	1.09	0.00	0.10	1.15	3.27	3.06	3.06	92.58
			5	72.84	0.17	11.62	1.13	0.00	0.10	1.09	3.22	3.21	3.21	93.38
			6	72.15	0.20	11.27	1.07	0.10	0.15	1.01	3.11	3.44	3.44	92.50
			7	72.20	0.09	11.36	1.12	0.06	0.06	0.99	3.15	3.24	3.24	92.27
			8	71.60	0.02	11.08	1.17	0.00	0.19	0.98	2.98	3.06	3.06	91.08
			9	72.24	0.21	11.22	1.16	0.00	0.09	1.00	3.03	3.13	3.13	92.08
			10	71.77	0.06	11.28	1.02	0.02	0.10	0.97	3.13	3.07	3.07	91.42
			11	71.65	0.19	11.02	1.04	0.00	0.13	0.98	3.08	3.10	3.10	91.19
			12	72.32	0.09	11.22	1.02	0.00	0.15	1.03	3.12	3.19	3.19	92.14
			13	71.75	0.21	11.46	1.01	0.06	0.10	1.04	3.08	3.30	3.30	92.01
			14	70.82	0.12	11.02	1.00	0.10	0.11	1.03	3.02	3.12	3.12	90.34
			15	72.39	0.25	11.42	1.10	0.04	0.12	1.02	3.26	3.11	3.11	92.71
	MYZ20171221-01②-10	Gho	1	49.19	1.20	6.37	12.33	0.74	15.88	10.81	1.50	0.49	0.49	98.51
			2	49.10	1.40	6.78	13.55	0.52	14.87	11.19	1.19	0.30	0.30	98.90
			3	48.65	1.06	6.81	14.88	0.66	14.57	10.51	1.15	0.28	0.28	98.57
			4	48.64	1.14	6.80	14.75	0.63	14.48	10.66	1.15	0.23	0.23	98.48
			5	48.36	1.14	7.08	14.76	0.42	14.24	10.24	1.14	0.25	0.25	97.63
6			47.99	1.49	6.67	12.38	0.58	15.49	10.96	1.43	0.50	0.50	97.49	
7			49.14	1.06	6.57	14.05	0.50	14.93	10.68	1.09	0.28	0.28	98.30	
8			49.24	1.06	6.15	14.00	0.71	15.04	10.29	1.08	0.15	0.15	97.72	

数値単位は wt.%。gl ; 火山ガラス、Gho : 緑色普通角閃石、opx : 斜方輝石、cum : カミングトン閃石、ol : かんらん石

表 1-5 EDS 分析結果 (3)

段丘	試料名	分析対象	分析番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	
Hf1	MYZ20171221-01②-10	Gho	9	48.66	1.15	7.07	14.65	0.54	14.64	10.74	1.19	0.32	98.96	
			10	49.35	1.08	6.56	13.68	0.64	15.43	10.75	1.09	0.19	98.77	
			11	49.55	1.02	6.77	14.84	0.45	14.64	10.59	1.07	0.33	99.26	
			12	48.93	1.05	6.54	15.05	0.70	14.67	10.35	1.10	0.37	98.76	
			13	49.22	1.07	6.81	14.38	0.45	14.76	10.46	1.10	0.30	98.55	
			14	49.12	1.14	6.76	14.19	0.49	14.67	10.82	1.11	0.33	98.63	
			15	49.35	1.08	6.56	13.68	0.64	15.43	10.75	1.09	0.19	98.77	
	MYZ20171221-01②-10	opx	1	51.24	0.09	0.72	31.27	1.59	15.24	0.89	0.07	0.03	0.03	101.14
			2	51.87	0.08	0.54	31.72	1.34	15.20	0.83	0.00	0.01	0.01	101.59
			3	53.86	0.28	0.74	20.34	0.69	23.48	1.23	0.00	0.00	0.00	100.62
			4	51.42	0.20	0.57	30.24	1.31	15.89	0.95	0.00	0.02	0.02	100.60
			5	53.63	0.30	0.97	19.93	0.73	23.81	1.29	0.02	0.01	0.01	100.69
			6	54.62	0.32	0.79	17.65	1.20	25.34	1.40	0.01	0.03	0.03	101.36
			7	53.26	0.33	0.78	17.63	1.55	23.72	1.65	0.02	0.03	0.03	98.97
			8	51.58	0.14	0.54	29.85	1.39	16.71	0.73	0.05	0.00	0.00	100.99
			9	50.83	0.20	0.63	30.21	1.68	15.83	0.78	0.05	0.00	0.00	100.21
			10	50.94	0.03	0.56	28.80	1.34	16.43	1.05	0.03	0.03	0.01	99.19
			11	54.18	0.24	0.66	18.15	1.36	24.73	1.35	0.00	0.00	0.00	100.67
			12	52.85	0.27	0.71	20.55	0.65	23.29	1.31	0.01	0.00	0.00	99.64
			13	50.46	0.07	0.38	31.15	1.49	15.09	0.90	0.04	0.03	0.03	99.61
			14	51.03	0.15	0.82	30.90	1.52	15.47	0.87	0.02	0.01	0.01	100.79
			15	50.70	0.24	0.80	29.82	1.24	15.37	1.76	0.01	0.00	0.00	99.94
	MYZ20171221-01③-14	gl	1	72.39	0.25	11.42	1.10	0.04	0.12	1.02	3.26	3.11	3.11	92.71
			2	72.09	0.03	11.16	0.98	0.06	0.10	1.05	3.09	3.18	3.18	91.74
			3	72.38	0.12	11.00	1.18	0.00	0.11	0.96	3.10	3.12	3.12	91.97
			4	71.59	0.13	11.38	0.91	0.08	0.10	0.96	3.01	3.16	3.16	91.32
			5	71.90	0.17	11.25	0.85	0.00	0.14	0.95	3.07	3.52	3.52	91.85
6			71.11	0.14	10.71	1.10	0.08	0.08	1.08	3.03	3.06	3.06	90.39	
7			72.39	0.16	11.37	1.02	0.12	0.06	1.00	3.16	3.27	3.27	92.55	
8			72.88	0.14	11.62	0.98	0.00	0.06	0.80	3.08	3.86	3.86	93.42	

数値単位は wt.%。gl ; 火山ガラス、Gho : 緑色普通角閃石、opx : 斜方輝石、cum : カミングトン閃石、ol : かんらん石

表 1-6 EDS 分析結果 (4)

段丘	試料名	分析対象	分析番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	
Hf1	MYZ20171221-01③-14	gl	9	68.03	0.28	11.50	1.51	0.07	0.29	1.58	3.10	2.79	89.15	
			10	72.37	0.18	11.31	1.06	0.04	0.08	0.88	3.17	3.33	92.42	
			11	72.02	0.10	11.20	0.93	0.03	0.11	0.93	2.99	3.31	91.62	
			12	70.95	0.23	11.16	1.00	0.04	0.12	1.12	3.05	3.15	90.82	
			13	70.83	0.06	11.10	1.04	0.03	0.09	0.92	2.98	3.37	90.42	
			14	71.08	0.05	10.85	0.92	0.00	0.11	1.06	3.05	3.11	90.23	
			15	73.63	0.07	11.51	1.02	0.00	0.14	0.93	3.21	3.27	93.78	
	MYZ20171221-01③-14	opx	1	54.13	0.34	1.17	20.43	0.63	23.85	1.49	0.00	0.00	0.00	102.04
			2	54.02	0.17	0.80	20.08	0.74	23.87	1.53	0.04	0.02	0.00	101.27
			3	52.37	0.09	0.50	27.29	1.42	18.75	0.87	0.00	0.00	0.00	101.29
			4	54.96	0.23	0.69	17.62	1.21	25.58	1.35	0.00	0.00	0.00	101.64
			5	55.64	0.21	1.05	16.51	0.45	27.27	1.52	0.01	0.00	0.00	102.66
			6	54.62	0.22	0.70	20.19	0.59	24.23	1.20	0.00	0.00	0.00	101.75
			7	53.99	0.30	0.81	21.63	0.70	23.16	1.51	0.00	0.00	0.00	102.10
			8	54.21	0.25	0.82	20.29	0.79	23.78	1.38	0.02	0.00	0.00	101.54
			9	53.84	0.27	1.06	20.30	0.65	23.88	1.31	0.00	0.01	0.00	101.32
			10	54.02	0.19	0.86	20.30	0.64	23.79	1.47	0.01	0.02	0.00	101.30
			11	53.95	0.12	0.92	20.07	0.64	23.78	1.21	0.00	0.04	0.00	100.73
			12	51.17	0.06	0.73	31.87	1.42	14.81	0.77	0.02	0.08	0.00	100.93
			13	51.34	0.12	0.70	30.79	1.49	15.95	0.88	0.02	0.01	0.00	101.30
			14	53.50	0.15	1.17	21.56	0.85	22.83	1.01	0.00	0.00	0.00	101.07
			15	54.67	0.24	0.66	17.69	1.19	25.49	1.43	0.00	0.00	0.00	101.37
	MYZ20171221-01③-14	ol	1	39.18	0.07	0.02	23.28	0.32	39.17	0.11	0.00	0.00	0.00	102.15
			2	39.30	0.04	0.03	22.90	0.42	39.13	0.17	0.00	0.00	0.00	101.99
			3	39.26	0.04	0.05	23.07	0.31	39.50	0.11	0.00	0.00	0.00	102.34
			4	39.23	0.00	0.00	23.14	0.34	38.77	0.12	0.04	0.02	0.00	101.66
			5	40.24	0.04	0.02	16.23	0.30	44.74	0.26	0.00	0.01	0.00	101.84
			1	39.18	0.07	0.02	23.28	0.32	39.17	0.11	0.00	0.00	0.00	102.15
	MYZ20171221-01③-14	ol	2	39.30	0.04	0.03	22.90	0.42	39.13	0.17	0.00	0.00	0.00	101.99
			3	39.26	0.04	0.05	23.07	0.31	39.50	0.11	0.00	0.00	0.00	102.34

数値単位は wt.%。gl ; 火山ガラス、Gho : 緑色普通角閃石、opx : 斜方輝石、cum : カミングトン閃石、ol : かんらん石

表 1-7 EDS 分析結果 (5)

段丘	試料名	分析対象	分析番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total
Hf1	MYZ20171221-01③-14	ol	4	39.23	0.00	0.00	23.14	0.34	38.77	0.12	0.04	0.02	101.66
			5	40.24	0.04	0.02	16.23	0.30	44.74	0.26	0.00	0.01	101.84
	MYZ20171221-01③-8	Gho	1	49.17	1.11	6.39	13.98	0.41	15.00	10.67	1.09	0.32	98.14
			2	48.50	1.08	6.99	14.48	0.65	14.42	10.43	1.24	0.33	98.12
			3	48.91	1.13	6.84	14.88	0.59	14.55	10.36	1.11	0.34	98.71
			4	49.74	0.94	6.58	14.06	0.45	15.25	10.69	1.07	0.35	99.13
			5	44.87	3.11	9.41	11.29	0.66	15.14	11.10	2.24	0.76	98.58
			6	49.44	1.14	6.50	14.67	0.62	14.65	10.53	1.05	0.25	98.85
			7	45.37	3.14	8.79	10.92	0.60	15.38	11.22	2.26	0.80	98.48
			8	48.47	1.08	7.11	14.95	0.58	14.03	10.54	1.14	0.36	98.26
			9	49.00	1.11	6.90	14.62	0.66	14.52	10.79	1.11	0.28	98.99
			10	49.23	1.16	6.69	14.59	0.46	14.76	10.40	1.08	0.27	98.64
			11	49.55	1.19	7.04	14.33	0.54	14.91	10.79	1.12	0.26	99.73
			12	49.53	1.06	6.93	14.52	0.50	14.90	10.73	1.01	0.28	99.46
			13	50.21	0.82	6.11	15.15	0.94	14.54	10.53	0.93	0.28	99.51
			14	49.26	1.03	6.96	15.05	0.54	14.49	10.51	1.15	0.32	99.31
			15	48.61	1.19	7.39	14.90	0.48	14.62	10.77	1.25	0.37	99.58
	15	48.61	1.19	7.39	14.90	0.48	14.62	10.77	1.25	0.37	99.58		
	MYZ20171221-01③-8	gl	1	71.64	0.15	11.49	0.63	0.00	0.00	0.83	3.06	3.77	91.57
			2	74.70	0.06	11.73	0.78	0.03	0.09	0.85	3.28	3.96	95.48
			3	69.51	0.17	10.97	1.09	0.14	0.09	1.12	3.12	3.16	89.37
			4	73.19	0.10	11.37	0.82	0.02	0.14	0.95	3.11	3.41	93.11
			5	74.18	0.19	11.53	0.91	0.09	0.13	1.01	3.15	3.53	94.72
			6	73.95	0.15	11.67	0.72	0.00	0.09	0.81	3.04	3.88	94.31
			7	77.17	0.13	12.03	1.01	0.01	0.20	1.04	3.24	3.79	98.62
			8	74.61	0.09	11.85	0.83	0.03	0.09	0.91	3.13	3.95	95.49
			9	73.83	0.11	11.84	0.70	0.08	0.12	0.82	3.18	3.88	94.56
			10	75.31	0.06	11.84	0.77	0.00	0.18	0.85	3.15	4.00	96.16
11			73.94	0.07	11.68	0.85	0.06	0.09	0.86	3.19	3.92	94.66	
12			73.71	0.11	11.58	0.70	0.07	0.08	0.84	3.10	3.86	94.05	

数値単位は wt.%。gl ; 火山ガラス、Gho : 緑色普通角閃石、opx : 斜方輝石、cum : カミングトン閃石、ol : かんらん石

表 1-8 EDS 分析結果 (6)

段丘	試料名	分析対象	分析番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total
Hf1	MYZ20171221-01③-8	gl	13	73.98	0.13	11.63	0.69	0.10	0.09	0.80	3.17	3.96	94.55
			14	74.44	0.03	11.56	0.90	0.11	0.14	0.99	3.14	3.51	94.82
			15	73.87	0.09	11.79	0.71	0.09	0.14	0.78	3.07	3.94	94.48
Hf2	MYZ20171222-01①-23	gl	1	72.09	0.22	11.16	1.10	0.00	0.08	1.05	3.15	3.06	91.91
			2	72.86	0.17	11.43	1.09	0.00	0.16	1.03	3.23	3.44	93.41
			3	71.31	0.30	11.01	0.98	0.15	0.13	1.06	2.92	3.11	90.97
			4	74.09	0.12	11.67	1.04	0.06	0.13	1.10	3.26	3.11	94.58
			5	72.50	0.15	11.30	1.09	0.11	0.11	0.97	3.18	3.11	92.52
			6	72.88	0.12	11.19	1.03	0.00	0.11	1.09	3.05	3.19	92.66
			7	72.79	0.19	11.24	0.92	0.00	0.15	1.01	3.14	3.15	92.59
			8	72.25	0.13	11.41	0.99	0.10	0.10	0.98	2.99	3.31	92.26
			9	76.17	0.22	11.88	1.18	0.00	0.16	1.00	3.35	3.39	97.35
			10	72.93	0.15	11.33	1.06	0.13	0.10	1.08	3.07	3.23	93.08
			11	73.68	0.11	11.52	1.11	0.13	0.09	1.14	3.30	3.17	94.25
			12	71.69	0.23	11.42	1.14	0.07	0.12	1.05	2.99	3.13	91.84
			13	73.46	0.16	11.76	1.22	0.02	0.12	1.07	3.41	3.05	94.27
			14	73.43	0.10	11.39	1.14	0.00	0.12	1.06	3.12	3.43	93.79
			15	73.40	0.10	11.53	1.38	0.09	0.10	1.08	3.26	3.16	94.10
		Gho	1	49.90	1.11	5.99	13.80	0.60	15.39	10.65	0.98	0.22	98.64
			2	49.41	1.09	6.44	14.52	0.72	15.20	10.44	1.27	0.20	99.29
			3	46.24	1.65	9.66	13.20	0.51	14.33	11.26	1.90	0.27	99.02
			4	49.87	1.07	6.61	14.36	0.37	14.94	10.76	1.15	0.25	99.38
			5	46.62	2.01	8.51	14.92	0.55	13.69	11.38	1.70	0.40	99.78
			6	45.42	1.67	9.50	13.40	0.42	14.47	11.24	1.85	0.28	98.25
			7	45.55	1.89	9.75	13.05	0.42	14.48	11.16	1.97	0.25	98.52
			8	45.39	2.00	9.88	12.23	0.41	15.00	11.40	2.07	0.33	98.71
			9	48.45	1.15	6.50	16.24	0.73	13.36	10.10	1.28	0.21	98.02
10	47.75	1.20	7.56	14.99	0.43	13.94	10.60	1.22	0.31	98.00			
11	45.80	1.33	9.34	14.04	0.33	14.23	11.35	1.84	0.23	98.49			
12	45.95	1.59	9.66	12.97	0.40	14.58	11.23	1.72	0.24	98.34			

数値単位は wt.%。gl ; 火山ガラス、Gho : 緑色普通角閃石、opx : 斜方輝石、cum : カミングトン閃石、ol : かんらん石

表 1-9 EDS 分析結果 (7)

段丘	試料名	分析対象	分析番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total
Hf2	MYZ20171222-01①-23	Gho	13	44.37	1.86	10.64	12.56	0.32	14.53	11.48	2.12	0.29	98.17
			14	47.14	1.95	8.39	11.21	0.35	15.72	11.09	1.85	0.43	98.13
			15	45.03	1.73	9.73	12.44	0.40	14.66	11.10	2.00	0.27	97.36
	MYZ20171222-01①-16	gl	1	73.17	0.13	11.44	1.10	0.11	0.08	1.02	2.90	3.38	93.33
			2	76.84	0.25	12.15	0.98	0.03	0.05	0.91	3.31	3.96	98.48
			3	74.01	0.12	11.94	1.02	0.00	0.11	0.83	3.10	3.83	94.96
			4	76.96	0.17	12.21	0.99	0.00	0.09	0.97	3.28	3.94	98.61
			5	74.74	0.04	11.65	1.01	0.08	0.08	0.77	3.26	3.65	95.28
			6	76.03	0.13	11.93	1.03	0.00	0.14	1.07	3.13	3.60	97.06
			7	72.32	0.08	11.36	0.90	0.00	0.02	0.89	3.08	3.77	92.42
			8	74.75	0.20	11.92	0.95	0.12	0.09	0.86	3.24	3.94	96.07
			9	74.93	0.01	11.88	1.01	0.00	0.16	0.96	3.15	3.74	95.84
			10	73.12	0.09	11.36	0.95	0.10	0.15	0.89	3.17	3.26	93.09
			11	73.66	0.08	11.59	0.99	0.00	0.14	0.90	3.29	3.57	94.22
			12	73.18	0.07	11.68	0.72	0.00	0.06	0.81	3.13	3.89	93.54
			13	72.56	0.15	11.20	0.95	0.12	0.12	0.83	2.91	3.87	92.71
			14	72.58	0.06	11.28	1.04	0.06	0.07	0.95	3.10	3.60	92.74
			15	74.72	0.17	11.53	1.00	0.18	0.13	0.99	3.12	3.69	95.53
		opx	1	53.69	0.18	1.11	21.81	0.70	22.79	1.54	0.00	0.01	101.83
			2	54.44	0.32	0.68	18.16	1.52	24.87	1.37	0.04	0.00	101.40
			3	54.28	0.17	0.50	20.26	1.37	23.88	1.04	0.00	0.03	101.53
			4	53.55	0.31	1.83	17.30	0.50	25.64	1.60	0.02	0.01	100.76
			5	54.29	0.25	0.77	17.75	1.13	25.00	1.43	0.04	0.00	100.66
			6	54.62	0.18	0.44	17.47	1.28	25.38	1.39	0.00	0.01	100.77
			7	52.48	0.24	1.82	19.36	0.49	23.72	1.35	0.01	0.01	99.48
			8	52.53	0.27	1.04	21.69	0.70	21.93	1.95	0.04	0.00	100.15
			9	54.36	0.33	0.69	17.54	1.03	25.24	1.41	0.03	0.01	100.64
10	53.37		0.18	0.95	19.90	0.61	23.44	1.44	0.00	0.04	99.93		
11	53.51		0.23	0.92	20.84	0.67	22.58	1.37	0.00	0.01	100.13		
12	53.93		0.15	0.74	19.57	0.44	24.19	1.40	0.00	0.01	100.43		

数値単位は wt.%。gl ; 火山ガラス、Gho : 緑色普通角閃石、opx : 斜方輝石、cum : カミングトン閃石、ol : かんらん石

表 1-10 EDS 分析結果 (8)

段丘	試料名	分析対象	分析番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total
Hf2	MYZ20171222-01①-16	opx	13	53.91	0.25	0.69	20.95	0.59	23.98	1.41	0.00	0.03	101.81
			14	53.98	0.17	0.95	19.98	0.77	23.71	1.58	0.00	0.00	101.14
			15	53.53	0.21	0.84	20.21	0.82	23.19	1.55	0.00	0.03	100.38
	MYZ20171222-01①-16	ol	1	38.56	0.00	0.04	25.94	0.34	37.07	0.24	0.01	0.08	102.28
			2	40.21	0.00	0.01	18.68	0.33	42.72	0.19	0.00	0.01	102.15
			3	39.85	0.00	0.05	20.25	0.39	41.76	0.18	0.00	0.00	102.48
	MYZ20171222-01①-10	Gho	1	49.18	1.00	6.52	13.99	0.60	14.94	10.65	1.11	0.33	98.32
			2	48.84	1.06	7.22	14.33	0.54	14.87	10.49	1.26	0.29	98.90
			3	48.39	1.10	7.22	14.64	0.49	14.40	10.68	1.19	0.28	98.39
			4	49.11	1.24	6.67	14.10	0.56	14.87	10.59	1.10	0.28	98.52
			5	49.11	1.11	6.45	14.09	0.64	14.83	10.20	1.08	0.25	97.76
			6	49.39	1.01	6.64	14.07	0.58	14.91	10.46	1.05	0.34	98.45
			7	49.89	1.15	6.68	14.27	0.49	15.23	10.65	1.16	0.34	99.86
			8	48.83	1.12	6.72	15.25	0.43	14.41	10.45	1.05	0.37	98.63
			9	48.61	0.94	6.70	14.70	0.76	14.51	10.32	1.03	0.33	97.90
			10	48.25	1.29	7.36	14.40	0.62	14.62	10.36	1.29	0.31	98.50
			11	49.62	1.01	6.22	13.86	0.50	15.06	10.64	1.01	0.24	98.16
			12	48.25	1.23	6.88	14.49	0.60	14.35	10.47	1.16	0.33	97.76
			13	48.79	1.06	6.93	15.23	0.53	14.41	10.34	1.11	0.32	98.72
			14	45.09	3.15	8.91	10.87	0.53	15.29	11.20	2.28	0.78	98.10
15			49.50	1.01	6.39	14.30	0.59	15.13	10.18	1.12	0.27	98.49	
MYZ20171222-01①-10	cum	1	55.54	0.34	1.35	19.99	0.96	19.80	1.41	0.26	0.03	99.68	
		2	54.91	0.24	1.63	19.25	1.09	19.53	1.63	0.32	0.00	98.60	
		3	55.33	0.29	1.70	19.65	0.96	19.57	1.75	0.24	0.01	99.50	
		4	54.09	0.18	1.80	20.93	1.19	18.22	1.66	0.31	0.01	98.39	
		5	54.95	0.18	1.46	20.01	0.88	19.47	1.54	0.27	0.00	98.76	
		6	55.06	0.25	1.70	19.20	1.09	19.45	1.59	0.26	0.02	98.62	
Mm1	MYZ20171219-04-14	gl	1	72.22	0.08	11.11	0.98	0.09	0.15	1.00	3.08	3.26	91.97
			2	69.13	0.31	11.73	1.45	0.00	0.35	1.64	3.07	3.06	90.74
			3	73.03	0.14	11.48	0.90	0.12	0.02	0.79	3.06	3.97	93.51

数値単位は wt.%。gl ; 火山ガラス、Gho : 緑色普通角閃石、opx : 斜方輝石、cum : カミングトン閃石、ol : かんらん石

表 1-11 EDS 分析結果 (9)

段丘	試料名	分析対象	分析番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total			
Mm1	MYZ20171219-04-14	gl	4	73.30	0.09	11.57	1.16	0.00	0.15	0.96	3.03	3.72	93.98			
			5	67.35	0.45	12.68	2.16	0.02	0.46	1.83	3.00	4.08	92.03			
			6	73.01	0.00	11.38	0.99	0.14	0.05	1.01	3.28	3.17	93.03			
			7	72.55	0.07	11.45	1.12	0.09	0.12	1.07	3.34	2.99	92.80			
			8	73.17	0.12	11.44	1.13	0.12	0.09	1.06	3.35	3.26	93.74			
			9	71.81	0.54	12.45	2.36	0.10	0.45	1.89	3.61	2.84	96.05			
			10	75.75	0.15	11.71	1.14	0.00	0.12	1.03	3.34	3.30	96.54			
			11	71.93	0.17	11.37	1.31	0.08	0.12	1.04	3.21	3.11	92.34			
			12	71.36	0.49	14.12	2.28	0.01	0.60	2.55	3.67	2.87	97.95			
			13	73.87	0.08	11.59	1.15	0.10	0.10	1.04	3.07	3.56	94.56			
			14	72.19	0.10	11.23	1.02	0.15	0.18	1.04	2.93	3.48	92.32			
			15	71.63	0.58	13.22	2.10	0.02	0.55	2.12	3.23	4.14	97.59			
			MYZ20171219-04-09	opx	1	53.70	0.25	1.10	19.69	0.63	23.77	1.44	0.09	0.00	0.00	100.67
					2	53.59	0.13	0.93	20.72	1.24	22.96	1.14	0.00	0.01	0.01	100.72
					3	54.21	0.28	0.94	19.82	0.80	23.84	1.35	0.00	0.02	0.02	101.26
	4	53.71			0.32	1.04	20.23	0.76	23.89	1.32	0.00	0.02	0.02	101.29		
	5	54.50			0.19	0.94	18.85	0.65	24.94	1.47	0.00	0.02	0.02	101.56		
	6	53.44			0.21	1.68	20.38	0.71	23.56	1.40	0.03	0.00	0.00	101.41		
	7	53.73			0.22	0.92	21.18	0.87	22.84	1.48	0.00	0.00	0.00	101.24		
	8	54.69			0.25	0.85	19.92	0.61	24.42	1.59	0.03	0.04	0.04	102.40		
	9	54.21			0.28	0.87	19.77	0.73	23.88	1.34	0.00	0.00	0.00	101.08		
	10	54.33			0.23	1.12	20.30	0.74	24.03	1.48	0.00	0.00	0.00	102.23		
	11	53.81			0.25	0.93	19.68	0.68	23.98	1.35	0.02	0.02	0.02	100.72		
	12	53.73			0.16	0.92	21.58	0.69	22.79	1.42	0.00	0.00	0.00	101.29		
	13	53.75			0.12	0.57	21.76	1.18	22.31	1.15	0.04	0.02	0.02	100.90		
	14	54.19			0.24	0.91	20.09	0.75	24.18	1.33	0.03	0.01	0.01	101.73		
	15	54.38			0.32	0.76	19.92	0.73	23.99	1.34	0.04	0.00	0.00	101.48		
	MYZ20171219-04-09	gl	1	75.68	0.14	11.92	1.17	0.14	0.08	1.10	3.09	3.60	96.92			
			2	72.89	0.06	11.43	0.99	0.07	0.14	0.89	2.99	3.46	92.92			
			3	74.88	0.11	12.00	0.74	0.08	0.10	0.87	3.12	4.15	96.05			

数値単位は wt.%。gl ; 火山ガラス、Gho : 緑色普通角閃石、opx : 斜方輝石、cum : カミングトン閃石、ol : かんらん石

表 1-12 EDS 分析結果 (10)

段丘	試料名	分析対象	分析番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total		
Mm1	MYZ20171219-04-09	gl	4	72.58	0.14	11.40	0.97	0.09	0.12	0.93	2.95	3.77	92.95		
			5	71.08	0.40	12.67	1.60	0.04	0.41	1.87	3.36	2.97	94.40		
			6	76.74	0.04	11.99	0.78	0.01	0.17	1.21	3.20	3.42	97.56		
			7	75.52	0.12	11.83	0.94	0.00	0.17	1.21	3.07	3.33	96.19		
			8	73.83	0.23	11.40	0.95	0.00	0.08	0.90	3.03	3.57	93.99		
			9	73.11	0.09	11.55	0.99	0.11	0.10	0.91	3.09	3.68	93.63		
			10	72.46	0.04	11.45	1.22	0.15	0.08	1.06	3.20	3.05	92.71		
			11	71.96	0.17	10.99	1.24	0.00	0.11	1.07	2.99	3.11	91.64		
			12	75.96	0.18	12.14	0.90	0.03	0.22	1.32	3.06	3.54	97.35		
			13	72.15	0.10	11.28	0.97	0.05	0.09	0.98	3.07	3.56	92.25		
			14	75.93	0.19	11.99	1.07	0.00	0.13	1.11	3.19	3.56	97.17		
			15	73.81	0.12	11.66	0.93	0.00	0.17	0.94	3.02	3.66	94.31		
			MYZ20171219-04-09	Gho	1	48.57	1.43	7.12	14.39	0.47	14.48	10.77	1.23	0.32	98.78
					2	44.96	3.18	9.38	11.00	0.57	15.21	11.30	2.33	0.77	98.70
					3	50.14	1.01	6.21	14.28	0.79	15.31	10.37	1.19	0.19	99.49
	4	49.43			1.22	6.52	14.46	0.64	15.02	10.44	1.20	0.21	99.14		
	5	49.70			1.19	6.36	14.41	0.78	15.14	10.63	1.17	0.18	99.56		
	6	45.23			3.41	9.52	11.25	0.68	15.14	11.35	2.33	0.76	99.67		
	7	49.51			1.14	6.35	14.37	0.48	15.11	10.51	1.02	0.24	98.73		
	8	46.55			2.33	8.31	12.17	0.30	15.25	11.39	1.82	0.45	98.57		
	9	48.07			1.50	7.42	14.74	0.53	14.33	10.70	1.23	0.31	98.83		
	10	48.12			1.24	7.22	14.53	0.31	14.35	10.53	1.21	0.28	97.79		
	11	49.06			1.12	6.55	14.24	0.75	14.93	10.53	1.20	0.20	98.58		
	12	50.12			1.02	5.71	13.99	0.76	15.42	10.31	1.18	0.21	98.72		
	13	49.01			1.21	6.72	14.51	0.77	14.65	10.61	1.23	0.21	98.92		
	14	48.97			1.07	6.87	14.62	0.63	14.58	10.64	1.09	0.25	98.72		
	15	49.30			1.26	6.94	14.59	0.49	14.67	10.50	1.14	0.24	99.13		
	MYZ20171219-04-05	Gho	1	49.51	1.04	6.07	14.40	0.72	15.12	10.38	1.12	0.19	98.55		
			2	50.11	1.01	6.01	14.11	0.72	15.24	10.31	1.15	0.20	98.86		
			3	49.66	1.04	6.53	14.06	0.53	15.29	10.76	1.05	0.33	99.25		

数値単位は wt.%。gl ; 火山ガラス、Gho : 緑色普通角閃石、opx : 斜方輝石、cum : カミングトン閃石、ol : かんらん石

表 1-13 EDS 分析結果 (11)

段丘	試料名	分析対象	分析番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total		
Mm1	MYZ20171219-04-05	Gho	4	49.43	1.12	6.22	14.45	0.70	14.83	10.46	1.19	0.30	98.70		
			5	49.85	1.27	5.94	12.00	0.61	16.33	11.23	1.36	0.16	98.75		
			6	49.22	0.99	6.55	14.56	0.65	14.98	10.49	1.21	0.35	99.00		
			7	50.05	1.09	6.08	14.86	0.83	15.17	9.98	1.23	0.21	99.50		
			8	48.55	1.20	6.44	14.47	0.73	14.66	10.38	1.23	0.27	97.93		
			9	48.60	1.12	6.21	14.06	0.69	14.72	10.42	1.10	0.28	97.20		
			10	48.96	1.11	7.15	13.99	0.60	15.05	10.95	1.34	0.32	99.47		
			11	48.87	1.26	7.27	14.37	0.72	14.69	10.60	1.32	0.30	99.40		
			12	49.83	1.17	6.37	14.14	0.76	15.07	10.27	1.17	0.18	98.96		
			13	49.30	1.18	6.57	14.43	0.68	14.82	10.35	1.27	0.28	98.88		
			14	49.30	1.22	6.47	14.38	0.56	14.78	10.67	1.19	0.30	98.87		
			15	49.21	0.99	7.24	13.97	0.81	15.16	10.90	1.33	0.28	99.89		
			cum	1	54.50	0.06	0.95	21.54	0.95	18.07	1.36	0.14	0.01	0.01	97.58
				2	53.95	0.08	1.09	26.37	1.18	15.32	1.02	0.12	0.01	0.01	99.14
				3	54.50	0.21	1.60	19.98	1.33	18.89	1.60	0.31	0.00	0.00	98.42
	4	54.04		0.07	0.92	26.13	2.17	14.77	0.70	0.11	0.02	0.02	98.93		
	5	54.67		0.16	1.28	20.02	0.66	19.46	1.34	0.27	0.00	0.00	97.86		
	MYZ20171218-01-01	gl	1	70.53	0.13	11.21	0.84	0.06	0.11	0.93	3.13	3.25	90.19		
			2	70.16	0.10	11.18	0.82	0.06	0.09	0.84	3.05	3.33	89.63		
			3	71.43	0.11	11.49	0.88	0.08	0.10	0.96	3.17	3.33	91.55		
			4	71.02	0.24	11.41	0.77	0.06	0.07	0.97	3.13	3.47	91.14		
			5	72.05	0.08	11.58	0.76	0.02	0.11	0.94	3.19	3.33	92.06		
			6	71.65	0.06	11.48	0.88	0.15	0.10	0.94	3.12	3.38	91.76		
			7	71.80	0.10	11.43	0.92	0.02	0.10	0.93	3.05	3.51	91.86		
			8	72.19	0.15	11.20	0.84	0.15	0.18	0.90	3.10	3.36	92.07		
			9	71.96	0.04	11.40	0.91	0.01	0.15	0.97	3.18	3.52	92.14		
			10	72.63	0.21	11.39	0.90	0.00	0.11	1.02	3.06	3.38	92.70		
11			72.44	0.14	11.41	0.81	0.03	0.12	0.90	3.15	3.47	92.47			
12			72.19	0.20	11.37	0.89	0.02	0.13	0.98	3.21	3.45	92.44			
13			72.68	0.14	11.51	0.87	0.15	0.17	0.92	3.22	3.61	93.27			

数値単位は wt.%。gl ; 火山ガラス、Gho : 緑色普通角閃石、opx : 斜方輝石、cum : カミングトン閃石、ol : かんらん石

表 1-14 EDS 分析結果 (12)

段丘	試料名	分析対象	分析番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total
Mm1	MYZ20171218-01-01	gl	14	72.03	0.12	11.63	0.96	0.12	0.10	0.94	3.23	3.28	92.41
			15	72.45	0.20	11.52	0.91	0.07	0.13	0.94	3.22	3.42	92.86
	MYZ20171218-01-02	gl	1	72.31	0.46	13.09	2.39	0.00	0.51	1.97	2.79	4.86	98.38
			2	69.06	0.59	13.01	2.33	0.07	0.54	1.99	3.07	4.13	94.79
			3	70.43	0.33	12.26	1.68	0.00	0.41	1.58	2.97	4.37	94.03
			4	69.94	0.46	12.22	1.85	0.07	0.42	1.62	2.87	4.33	93.78
			5	68.91	0.49	12.17	1.92	0.00	0.41	1.71	2.80	4.23	92.64
			6	71.97	0.15	11.46	1.12	0.08	0.10	1.07	3.10	3.31	92.36
			7	71.74	0.11	11.47	1.06	0.04	0.08	0.99	3.17	3.27	91.93
			8	67.91	0.53	13.10	2.36	0.12	0.51	2.13	3.09	4.11	93.86
			9	70.37	0.63	13.34	2.22	0.03	0.51	2.05	3.28	4.14	96.57
			10	73.34	0.09	11.63	0.66	0.05	0.11	0.81	3.12	3.92	93.73
			11	69.66	0.42	12.27	1.97	0.17	0.41	1.74	2.99	4.20	93.83
			12	70.98	0.46	11.72	1.70	0.06	0.27	1.35	2.85	4.42	93.81
			13	69.55	0.50	12.43	1.83	0.04	0.37	1.68	2.90	4.34	93.64
			14	69.76	0.57	13.67	2.73	0.07	0.72	2.56	3.17	3.97	97.22
			15	70.76	0.51	12.98	2.47	0.12	0.54	2.24	2.82	4.41	96.85
	MYZ20171121-02-09	ol	1	40.19	0.03	0.03	19.47	0.41	42.73	0.11	0.00	0.00	102.97
			2	39.88	0.04	0.00	18.52	0.29	43.03	0.17	0.02	0.00	101.95
			3	40.07	0.00	0.04	18.62	0.27	43.31	0.16	0.00	0.00	102.47
			4	39.95	0.09	0.05	18.77	0.24	42.72	0.15	0.04	0.04	102.05
			5	40.23	0.04	0.00	18.90	0.17	43.31	0.12	0.00	0.03	102.80
			6	40.01	0.00	0.00	18.72	0.35	42.85	0.12	0.00	0.00	102.05
			7	39.98	0.00	0.00	18.42	0.38	43.03	0.13	0.00	0.04	101.98
			8	40.36	0.06	0.01	18.97	0.22	43.02	0.16	0.02	0.00	102.82
			9	40.20	0.00	0.01	18.71	0.18	42.89	0.16	0.00	0.00	102.15
			10	39.95	0.00	0.07	18.90	0.34	42.86	0.19	0.02	0.01	102.34
			11	40.28	0.01	0.00	18.77	0.31	43.30	0.16	0.01	0.00	102.84
			12	40.58	0.00	0.05	18.78	0.35	43.46	0.16	0.00	0.00	103.38
			13	40.36	0.02	0.00	18.46	0.28	42.62	0.19	0.00	0.10	102.03

数値単位は wt.%。gl ; 火山ガラス、Gho : 緑色普通角閃石、opx : 斜方輝石、cum : カミングトン閃石、ol : かんらん石

表 1-15 EDS 分析結果 (13)

段丘	試料名	分析対象	分析番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total
Mm1	MYZ20171121-02-09	ol	14	40.65	0.02	0.08	18.40	0.26	43.49	0.18	0.03	0.00	103.11
			15	40.23	0.01	0.09	19.04	0.31	42.99	0.16	0.00	0.00	102.83
	MYZ20171121-02-08	gl	1	68.25	0.66	14.04	3.43	0.16	0.86	2.93	3.35	3.71	97.39
			2	69.57	0.58	12.20	1.99	0.00	0.52	1.85	2.82	4.42	93.95
			3	69.73	0.48	12.08	1.64	0.16	0.34	1.59	2.80	4.49	93.31
			4	70.78	0.39	12.25	1.78	0.10	0.35	1.56	2.86	4.68	94.75
			5	68.87	0.61	11.81	2.60	0.13	0.46	1.77	2.87	4.18	93.30
			6	70.74	0.52	12.47	2.01	0.03	0.42	1.88	3.18	4.00	95.25
			7	72.59	0.36	12.83	1.99	0.14	0.36	1.69	3.05	4.65	97.66
			8	68.84	0.54	13.66	2.99	0.02	0.87	2.65	3.12	3.78	96.47
			9	69.74	0.49	12.59	2.08	0.04	0.41	1.64	3.11	4.28	94.38
			10	69.64	0.63	12.59	1.90	0.00	0.46	1.81	3.14	4.00	94.17
			11	72.41	0.54	12.87	1.84	0.16	0.51	1.99	3.25	4.07	97.64
			12	68.15	0.66	13.35	2.75	0.18	0.72	2.56	3.27	3.71	95.35
			13	69.95	0.35	12.11	1.90	0.00	0.39	1.61	2.95	4.31	93.57
			14	70.05	0.42	12.46	2.08	0.11	0.42	1.69	2.99	4.35	94.57
			15	69.01	0.43	12.25	1.89	0.10	0.42	1.68	2.87	4.34	92.99
	MYZ20171121-02-08	opx	1	54.20	0.28	1.33	20.16	0.69	24.18	1.43	0.03	0.06	102.36
			2	53.04	0.26	1.40	21.36	0.77	22.20	1.88	0.00	0.00	100.91
			3	54.41	0.14	0.75	20.55	0.72	23.75	1.42	0.09	0.08	101.91
			4	53.68	0.24	0.72	21.85	0.80	22.57	1.43	0.00	0.00	101.29
			5	54.33	0.22	0.88	19.47	0.57	24.33	1.41	0.04	0.03	101.28
			6	53.73	0.24	1.19	19.57	0.74	23.89	1.40	0.01	0.00	100.77
			7	53.85	0.20	0.97	20.39	0.62	23.84	1.55	0.07	0.02	101.51
			8	53.18	0.32	1.15	20.37	0.75	23.04	1.35	0.00	0.00	100.16
			9	53.26	0.32	0.69	21.96	0.73	22.50	1.47	0.01	0.00	100.94
			10	53.89	0.25	1.23	20.12	0.55	23.97	1.57	0.01	0.03	101.62
			11	53.95	0.17	0.89	21.12	0.74	23.51	1.47	0.05	0.02	101.92
			12	54.04	0.23	0.87	19.82	0.77	24.01	1.51	0.03	0.01	101.29
			13	54.28	0.20	0.67	20.79	0.77	23.58	1.43	0.00	0.01	101.73

数値単位は wt.%。gl ; 火山ガラス、Gho : 緑色普通角閃石、opx : 斜方輝石、cum : カミングトン閃石、ol : かんらん石

表 1-16 EDS 分析結果 (14)

段丘	試料名	分析対象	分析番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total
Mm1	MYZ20171121-02-08	opx	14	53.77	0.26	0.74	20.79	0.66	23.55	1.55	0.00	0.00	101.32
			15	53.61	0.22	0.80	20.70	0.71	23.06	1.55	0.00	0.00	100.65
	MYZ20171121-02-08	ol	1	40.19	0.03	0.03	19.47	0.41	42.73	0.11	0.00	0.00	102.97
			2	39.88	0.04	0.00	18.52	0.29	43.03	0.17	0.02	0.00	101.95
			3	40.07	0.00	0.04	18.62	0.27	43.31	0.16	0.00	0.00	102.47
			4	39.95	0.09	0.05	18.77	0.24	42.72	0.15	0.04	0.04	102.05
			5	40.23	0.04	0.00	18.90	0.17	43.31	0.12	0.00	0.03	102.80
			6	40.01	0.00	0.00	18.72	0.35	42.85	0.12	0.00	0.00	102.05
			7	39.98	0.00	0.00	18.42	0.38	43.03	0.13	0.00	0.04	101.98
			8	40.36	0.06	0.01	18.97	0.22	43.02	0.16	0.02	0.00	102.82
			9	40.20	0.00	0.01	18.71	0.18	42.89	0.16	0.00	0.00	102.15
			10	39.95	0.00	0.07	18.90	0.34	42.86	0.19	0.02	0.01	102.34
			11	40.28	0.01	0.00	18.77	0.31	43.30	0.16	0.01	0.00	102.84
			12	40.58	0.00	0.05	18.78	0.35	43.46	0.16	0.00	0.00	103.38
			13	40.36	0.02	0.00	18.46	0.28	42.62	0.19	0.00	0.10	102.03
			14	40.65	0.02	0.08	18.40	0.26	43.49	0.18	0.03	0.00	103.11
			15	40.23	0.01	0.09	19.04	0.31	42.99	0.16	0.00	0.00	102.83
	MYZ20171121-02-05	gl	1	73.72	0.00	11.59	0.65	0.00	0.08	0.78	3.23	3.93	93.98
			2	72.94	0.25	11.55	0.60	0.02	0.14	0.75	3.12	3.90	93.27
			3	70.47	0.17	11.21	0.86	0.04	0.15	0.94	3.17	3.25	90.26
			4	75.36	0.01	12.07	0.76	0.04	0.11	0.82	3.22	3.96	96.35
			5	72.41	0.08	11.52	0.78	0.00	0.10	0.78	3.12	3.72	92.51
			6	72.66	0.10	11.50	0.76	0.01	0.09	0.86	3.08	3.89	92.95
			7	74.95	0.10	11.78	0.99	0.02	0.12	1.09	3.22	3.61	95.88
			8	72.72	0.07	11.54	0.77	0.04	0.11	0.85	3.06	3.86	93.02
			9	74.90	0.09	11.98	0.92	0.06	0.11	1.03	3.39	3.38	95.86
			10	74.82	0.17	11.85	0.85	0.00	0.12	1.09	3.12	3.57	95.59
			11	75.86	0.15	11.84	0.91	0.07	0.14	1.10	3.22	3.55	96.84
			12	72.40	0.09	11.37	0.74	0.05	0.11	0.84	3.08	3.81	92.49
			13	71.78	0.15	11.35	0.86	0.11	0.09	1.01	2.70	3.82	91.87
			14	71.97	0.13	10.89	0.97	0.00	0.22	0.96	3.22	3.11	91.47

数値単位は wt.%。gl ; 火山ガラス、Gho : 緑色普通角閃石、opx : 斜方輝石、cum : カミングトン閃石、ol : かんらん石

表 1-17 EDS 分析結果 (15)

段丘	試料名	分析対象	分析番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total
Mm1	MYZ20171121-02-05	gl	15	73.76	0.00	11.69	0.73	0.00	0.09	0.89	3.14	3.91	94.21
		Gho	1	48.25	1.20	6.89	14.65	0.36	14.21	10.54	1.14	0.33	97.57
			2	46.39	2.30	8.44	12.18	0.43	15.14	11.19	2.04	0.67	98.78
			3	48.43	1.04	6.87	14.53	0.61	14.42	10.48	1.02	0.26	97.66
			4	49.86	1.01	6.75	14.52	0.55	15.04	10.58	1.12	0.36	99.79
			5	44.43	3.41	10.05	11.52	0.57	15.05	11.46	2.45	0.72	99.66
			6	49.01	1.27	7.04	14.38	0.41	14.69	10.61	1.10	0.22	98.73
			7	50.12	1.35	6.13	12.21	0.47	16.22	11.30	1.35	0.28	99.43
			8	46.37	2.34	8.35	12.26	0.23	15.00	11.33	1.93	0.47	98.28
			9	48.91	1.11	6.87	14.46	0.53	14.72	10.73	1.17	0.24	98.74
			10	44.06	3.44	9.28	11.11	0.47	15.03	11.34	2.26	0.77	97.76
			11	47.84	2.07	7.37	12.05	0.38	15.55	11.37	1.70	0.47	98.80
			12	48.22	0.96	6.73	15.48	0.58	13.94	10.75	1.08	0.32	98.06
			13	48.14	0.95	6.84	15.48	0.67	13.74	10.52	1.00	0.34	97.68
			14	45.22	3.29	9.61	10.95	0.57	15.06	11.30	2.43	0.69	99.12
15	45.17	3.31	9.31	11.06	0.61	15.21	11.43	2.28	0.80	99.18			
	MYZ20171121-02-05	cum	1	55.03	0.21	1.40	17.31	1.76	20.80	1.50	0.40	0.01	98.42
			2	54.55	0.35	1.78	20.41	1.03	18.90	1.50	0.22	0.03	98.77
			3	55.93	0.36	1.38	17.04	1.77	21.11	1.61	0.30	0.00	99.50
			4	55.86	0.28	1.37	17.12	1.85	21.29	1.43	0.29	0.00	99.49
			5	55.03	0.18	1.64	19.75	0.77	19.44	1.78	0.26	0.03	98.88
			6	54.80	0.26	1.65	20.62	1.16	19.14	1.70	0.28	0.03	99.64
			7	54.48	0.27	1.63	20.10	0.85	19.48	1.59	0.26	0.00	98.66
	MYZ20171125-01-02	gl	1	70.56	0.46	12.04	2.21	0.08	0.49	1.82	3.57	2.79	94.02
			2	73.21	0.11	11.59	1.04	0.04	0.05	1.08	3.28	3.28	93.68
Mf2	MYZ20180117-01①-16	gl	1	71.75	0.51	13.00	2.18	0.12	0.45	1.92	2.93	4.36	97.22
			2	71.82	0.60	12.38	2.24	0.14	0.41	1.90	3.77	2.82	96.08
			3	71.68	0.60	12.33	2.25	0.14	0.41	1.93	3.73	2.84	95.91
			4	71.32	0.51	12.32	2.21	0.13	0.50	1.92	3.68	2.76	95.35
			5	71.08	0.47	12.13	2.08	0.12	0.48	1.91	3.67	2.74	94.68
			6	70.67	0.52	12.23	2.20	0.12	0.41	1.90	3.60	2.73	94.38

数値単位は wt.%。gl ; 火山ガラス、Gho : 緑色普通角閃石、opx : 斜方輝石、cum : カミングトン閃石、ol : かんらん石

表 1-18 EDS 分析結果 (16)

段丘	試料名	分析対象	分析番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total		
Mf2	MYZ20180117-01①-16	gl	7	72.65	0.52	12.67	2.29	0.19	0.43	1.98	3.67	2.96	97.36		
			8	68.80	0.62	14.20	2.88	0.08	0.79	2.87	3.01	3.97	97.22		
			9	69.62	0.60	13.36	2.80	0.09	0.74	2.45	2.80	4.55	97.01		
			10	70.73	0.59	12.28	2.22	0.00	0.43	1.93	3.59	2.91	94.68		
			11	71.19	0.51	12.84	2.41	0.03	0.63	2.40	3.79	2.74	96.54		
			12	69.48	0.57	13.36	3.08	0.00	0.74	2.48	2.72	4.68	97.11		
			13	72.02	0.49	12.52	2.36	0.03	0.44	1.92	3.68	2.78	96.24		
			14	67.77	0.66	12.85	2.90	0.08	0.61	2.34	2.92	3.76	93.89		
			15	69.60	0.47	12.46	1.81	0.12	0.42	1.75	3.13	4.33	94.09		
			MYZ20180117-01①-10	gl	1	73.01	0.14	11.43	0.82	0.04	0.13	0.94	3.17	3.49	93.17
					2	72.10	0.16	11.42	0.97	0.02	0.07	0.95	3.27	3.32	92.28
					3	72.47	0.18	11.50	0.90	0.02	0.15	0.93	3.18	3.66	92.99
					4	72.42	0.21	11.64	0.84	0.06	0.16	1.03	3.11	3.51	92.98
					5	72.63	0.17	11.53	0.95	0.10	0.14	0.89	3.26	3.55	93.22
					6	72.11	0.13	11.51	0.98	0.01	0.11	0.99	3.03	3.61	92.48
	7	72.61			0.12	11.49	0.84	0.17	0.09	1.07	3.15	3.57	93.11		
	8	72.99			0.07	11.60	0.89	0.07	0.11	1.01	3.25	3.63	93.62		
	9	72.45			0.17	11.53	0.81	0.02	0.12	0.90	3.21	3.62	92.83		
	10	73.00			0.19	11.56	0.86	0.05	0.08	0.99	3.13	3.59	93.45		
	11	72.56			0.26	11.52	0.93	0.10	0.08	0.93	3.10	3.58	93.06		
	12	73.17			0.23	11.73	0.83	0.15	0.15	0.86	3.27	3.52	93.91		
	13	73.45			0.04	11.56	0.84	0.21	0.10	0.94	3.25	3.54	93.93		
	14	72.28			0.27	11.34	0.81	0.02	0.14	0.86	3.25	3.39	92.36		
	15	73.62			0.10	11.82	1.01	0.19	0.17	0.95	2.90	3.81	94.57		
	MYZ20180117-01①-01	gl	1	69.75	0.32	13.52	1.07	0.00	0.27	0.85	3.93	4.45	94.16		
			2	70.08	0.14	11.99	1.58	0.00	0.06	0.44	3.40	4.60	92.29		
			3	69.67	0.38	14.14	1.34	0.00	0.28	1.10	4.10	4.66	95.67		
			4	68.90	0.50	13.78	1.37	0.12	0.31	1.04	4.03	4.70	94.75		
			5	70.10	0.53	14.22	1.41	0.04	0.29	1.06	4.27	4.88	96.80		
			6	71.24	0.20	13.65	1.97	0.07	0.09	0.86	3.90	4.88	96.86		
			7	74.12	0.19	11.12	0.83	0.11	0.14	1.01	2.88	4.22	94.62		

数値単位は wt.%。gl ; 火山ガラス、Gho : 緑色普通角閃石、opx : 斜方輝石、cum : カミングトン閃石、ol : かんらん石

表 1-19 EDS 分析結果 (17)

段丘	試料名	分析対象	分析番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total
Mf2	MYZ20180117-01①-01	gl	8	71.52	0.24	10.87	0.99	0.12	0.24	1.00	3.00	3.19	91.17
			9	68.68	0.52	15.01	1.70	0.03	0.35	1.91	4.47	3.83	96.50
			10	70.10	0.32	14.24	1.52	0.13	0.34	1.10	4.03	4.76	96.54
			11	69.59	0.49	14.15	1.49	0.00	0.37	1.08	3.94	4.67	95.78
			12	69.92	0.50	14.11	1.54	0.05	0.33	1.10	4.10	4.79	96.44
			13	72.39	0.30	10.94	0.84	0.01	0.20	0.96	3.23	3.09	91.96
			14	71.63	0.21	11.21	0.99	0.13	0.25	1.46	2.88	2.84	91.60
			15	72.29	0.51	12.30	1.37	0.08	0.23	0.80	3.26	4.81	95.65
Mf4	MYZ20180118-02-16	gl	1	73.26	0.18	11.56	0.75	0.16	0.02	0.95	3.26	3.56	93.70
			2	70.92	0.43	13.31	2.93	0.08	0.63	2.53	3.14	4.22	98.19
			3	71.80	0.51	12.38	2.47	0.07	0.47	1.94	3.71	2.77	96.12
			4	72.80	0.43	12.66	2.27	0.01	0.41	1.86	3.75	2.85	97.04
			5	72.86	0.11	11.62	0.91	0.06	0.12	0.96	3.20	3.44	93.28
			6	73.07	0.47	12.60	2.04	0.11	0.36	1.70	2.96	4.53	97.84
			7	71.28	0.53	13.32	2.38	0.00	0.62	2.17	3.09	4.15	97.54
			8	72.73	0.49	12.68	2.27	0.05	0.49	1.94	3.72	2.85	97.22
			9	72.10	0.45	12.43	2.29	0.08	0.41	2.01	3.63	2.85	96.25
			10	71.33	0.48	12.43	2.27	0.09	0.49	1.86	3.63	2.71	95.29
			11	71.29	0.37	12.01	1.84	0.12	0.39	1.55	3.02	4.04	94.63
			12	73.00	0.16	11.66	0.85	0.05	0.07	0.96	3.15	3.55	93.45
			13	71.28	0.44	12.56	1.88	0.00	0.42	1.72	3.01	4.46	95.77
			14	72.18	0.45	12.58	2.23	0.14	0.41	1.95	3.70	2.87	96.51
			15	72.55	0.56	12.44	2.14	0.01	0.41	2.00	3.71	2.89	96.71
	MYZ20180118-02-09	gl	1	72.26	0.01	11.42	0.82	0.00	0.17	0.97	3.23	3.30	92.18
			2	73.84	0.06	11.64	0.74	0.05	0.14	0.91	3.16	3.91	94.45
			3	71.65	0.50	12.21	2.33	0.01	0.46	1.89	3.63	2.74	95.42
			4	73.98	0.20	11.72	0.67	0.00	0.08	0.84	3.14	3.81	94.44
			5	74.70	0.05	11.78	0.62	0.00	0.09	0.87	3.08	3.79	94.98
			6	74.36	0.17	11.87	0.67	0.00	0.06	0.83	3.22	3.83	95.01
			7	75.87	0.11	11.92	0.75	0.03	0.09	0.87	3.30	4.08	97.02
			8	76.87	0.13	12.46	0.82	0.04	0.16	0.93	3.25	4.10	98.76

数値単位は wt.%。gl ; 火山ガラス、Gho : 緑色普通角閃石、opx : 斜方輝石、cum : カミングトン閃石、ol : かんらん石

表 1-20 EDS 分析結果 (18)

段丘	試料名	分析対象	分析番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	
Mf2	MYZ20180118-02-09	gl	9	73.95	0.18	11.82	0.71	0.02	0.09	0.74	3.21	3.93	94.65	
			10	77.17	0.12	12.26	0.80	0.03	0.06	0.88	3.28	3.94	98.54	
			11	74.70	0.22	11.79	0.93	0.00	0.13	1.03	3.06	3.58	95.44	
			12	77.70	0.10	12.18	0.87	0.08	0.10	1.00	3.32	3.65	99.00	
			13	74.25	0.00	11.70	0.60	0.08	0.08	0.84	3.14	3.94	94.63	
			14	73.70	0.10	11.72	0.58	0.06	0.14	0.75	3.07	3.98	94.10	
			15	74.51	0.08	11.72	0.82	0.00	0.09	0.82	3.11	3.90	95.05	
	MYZ20171215-DA25-04	gl	1	70.83	0.11	11.25	1.07	0.12	0.10	1.04	3.01	3.26	3.26	90.79
			2	70.31	0.53	13.10	2.26	0.00	0.51	1.92	2.96	4.25	4.25	95.84
			3	70.61	0.17	11.12	1.16	0.01	0.13	0.93	2.87	3.25	3.25	90.25
			4	71.76	0.14	11.08	1.00	0.00	0.09	1.10	2.99	3.29	3.29	91.45
			5	71.35	0.11	10.98	1.02	0.06	0.12	1.09	2.92	3.05	3.05	90.70
			6	75.93	0.14	12.06	1.04	0.00	0.16	1.36	3.07	3.56	3.56	97.32
			7	76.38	0.14	12.18	1.12	0.05	0.22	1.39	3.03	3.54	3.54	98.05
			8	71.80	0.07	11.04	1.00	0.03	0.12	0.94	2.99	3.47	3.47	91.46
			9	73.12	0.12	11.38	1.19	0.12	0.11	1.00	3.21	3.32	3.32	93.57
			10	73.28	0.11	11.46	1.23	0.12	0.11	1.08	3.27	3.17	3.17	93.83
			11	72.10	0.17	11.39	1.11	0.06	0.11	1.08	3.18	3.32	3.32	92.52
			12	73.00	0.10	11.17	0.96	0.03	0.14	0.95	3.02	3.45	3.45	92.82
			13	72.39	0.15	11.23	1.20	0.02	0.16	1.01	3.19	3.08	3.08	92.43
			14	72.52	0.16	11.19	1.07	0.10	0.11	1.00	3.14	3.25	3.25	92.54
			15	72.62	0.07	11.51	1.14	0.00	0.10	1.09	3.25	3.20	3.20	92.98
	MYZ20171215-DA25-03	gl	1	72.13	0.10	11.48	0.74	0.00	0.09	0.83	3.17	3.77	3.77	92.31
			2	73.60	0.10	11.64	0.82	0.00	0.04	0.83	3.08	3.97	3.97	94.08
			3	71.48	0.14	11.17	1.08	0.09	0.15	1.20	3.21	3.27	3.27	91.79
			4	73.14	0.20	11.21	1.01	0.18	0.11	1.09	3.11	3.30	3.30	93.35
			5	74.10	0.20	11.41	1.07	0.00	0.10	1.07	3.22	3.31	3.31	94.48
			6	74.94	0.06	11.67	0.69	0.00	0.11	0.85	3.21	3.96	3.96	95.49
			7	74.10	0.10	11.65	0.94	0.01	0.12	0.96	3.10	3.94	3.94	94.92
			8	72.98	0.14	11.59	1.02	0.19	0.08	1.02	3.25	3.73	3.73	94.00
			9	73.19	0.07	11.51	1.06	0.14	0.12	0.87	3.11	3.69	3.69	93.76

数値単位は wt.%。gl ; 火山ガラス、Gho : 緑色普通角閃石、opx : 斜方輝石、cum : カミングトン閃石、ol : かんらん石

表 1-21 EDS 分析結果 (19)

段丘	試料名	分析対象	分析番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total
Mf2	MYZ20171215-DA25-03	gl	10	71.56	0.58	13.62	2.44	0.09	0.49	2.18	2.98	4.36	98.30
			11	71.17	0.54	13.53	2.15	0.06	0.51	2.17	3.00	4.44	97.57
			12	69.08	0.39	12.19	1.86	0.00	0.37	1.71	2.84	4.27	92.71
			13	72.94	0.18	11.04	1.01	0.11	0.08	1.05	3.25	3.08	92.74
			14	71.88	0.48	13.27	2.41	0.00	0.49	1.92	3.11	4.24	97.80
			15	71.23	0.10	11.09	1.18	0.12	0.13	1.05	3.08	3.13	91.11
Lf2	MYZ20171214-DA02-03	gl	1	73.69	0.17	11.30	0.92	0.06	0.12	1.01	3.11	3.22	93.60
			2	73.87	0.14	11.52	1.16	0.00	0.13	1.11	3.28	3.26	94.47
			3	73.53	0.24	11.37	1.13	0.09	0.12	1.07	3.19	3.26	94.00
			4	73.26	0.06	11.39	1.10	0.03	0.06	1.01	3.15	3.14	93.20
			5	74.20	0.20	11.91	1.24	0.17	0.18	1.05	3.31	3.24	95.50
			6	74.28	0.19	11.72	1.01	0.13	0.07	1.04	3.15	3.28	94.87
			7	74.94	0.04	11.60	1.13	0.03	0.13	1.07	3.20	3.22	95.36
			8	73.43	0.29	11.44	1.08	0.12	0.17	1.07	3.20	3.25	94.05
			9	76.20	0.18	12.02	0.78	0.13	0.17	1.16	3.16	3.47	97.27
			10	74.08	0.09	11.36	1.24	0.08	0.12	1.07	3.15	3.23	94.42
			11	74.56	0.17	11.58	1.16	0.07	0.16	1.08	3.23	3.27	95.28
			12	74.56	0.05	11.45	1.20	0.10	0.07	1.08	3.14	3.30	94.95
			13	75.56	0.14	11.65	1.06	0.00	0.06	0.99	3.34	3.35	96.15
			14	74.11	0.15	11.61	1.04	0.00	0.07	1.02	3.18	3.31	94.49
			15	74.46	0.23	11.41	1.09	0.10	0.09	1.01	3.25	3.30	94.94
	MYZ20171214-DA02-01	gl	1	72.04	0.04	11.40	0.77	0.18	0.12	0.99	3.26	3.32	92.12
			2	72.53	0.19	11.54	0.89	0.07	0.12	0.96	3.34	3.22	92.86
			3	74.73	0.15	11.86	0.90	0.07	0.11	1.02	3.38	3.78	96.00
			4	74.89	0.12	11.80	0.95	0.10	0.15	0.96	3.38	3.50	95.85
			5	75.14	0.12	12.05	0.89	0.09	0.06	1.05	3.35	3.54	96.29
			6	75.59	0.19	11.93	0.96	0.05	0.19	1.04	3.32	3.69	96.96
			7	75.20	0.13	12.00	0.79	0.05	0.13	0.99	3.37	3.54	96.20
			8	74.32	0.10	11.87	0.88	0.00	0.16	1.00	3.26	3.59	95.18
			9	73.73	0.14	11.83	0.90	0.09	0.14	1.04	3.27	3.53	94.67

数値単位は wt.%。gl ; 火山ガラス、Gho : 緑色普通角閃石、opx : 斜方輝石、cum : カミングトン閃石、ol : かんらん石

表 1-22 EDS 分析結果 (20)

段丘	試料名	分析対象	分析番号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total
Lf2	MYZ20171214-DA02-01	gl	10	73.03	0.08	11.65	0.95	0.04	0.10	0.95	3.17	3.63	93.60
			11	72.66	0.17	11.46	0.83	0.00	0.13	0.90	3.28	3.43	92.86
			12	73.51	0.15	11.67	0.97	0.08	0.13	1.02	3.15	3.53	94.21
			13	73.02	0.09	11.63	0.71	0.05	0.09	0.96	3.31	3.45	93.31
			14	73.45	0.10	11.91	0.98	0.14	0.08	1.01	3.33	3.52	94.52
			15	73.91	0.18	11.96	1.00	0.19	0.14	0.94	3.33	3.68	95.33

数値単位は wt.%。gl ; 火山ガラス、Gho : 緑色普通角閃石、opx : 斜方輝石、cum : カミングトン閃石、ol : かんらん石

2. 段丘礫・段丘被覆層の分析結果

宮崎地域における各段丘面（Hf1、Hf2、Mm1、Mf2、Mf4 および Lf2 面）の露頭から、段丘礫および段丘被覆層の試料を採取した。また、北海道・幌延地域下沼露頭から段丘被覆層試料を採取した。宮崎地域の採取露頭における試料採取位置を図 2-1～図 2-3 に示す。幌延地域下沼露頭における試料採取位置を図 2-4 に示す。なお、宮崎地域および幌延地域の露頭位置は、それぞれ本付録の図 1-1 および報告書本編の図 2.1-34 を参照されたい。

段丘礫は、その中心を通るように切断、研磨したのち、切断面を測色し XGT による面分析を行った。また、段丘被覆層のブロック試料に対しても、測色し面分析を行った。段丘礫切断面およびブロック状被覆層試料における元素分布と測色値結果を、それぞれ図 2-5～図 2-34 および図 2-35～図 2-44 に示す。

また、段丘被覆層試料に対しては遊離酸化鉄分析を行った。宮崎地域および幌延地域における段丘被覆層試料に対する遊離酸化鉄分析結果を表 2-1 に示す。なお、遊離酸化鉄分析では、全鉄(Fe_t)をフッ化水素酸分解-原子吸光法（日本土壤肥料学会監修, 1997）、酸性シュウ酸塩可溶鉄(Fe_o)を Tamm A 試薬抽出-原子吸光法、ジチオナイト可溶鉄(Fe_d)を DCB 抽出（Mehra and Jackson 法）-原子吸光法（日本第四紀学会編, 1993）により求めた。

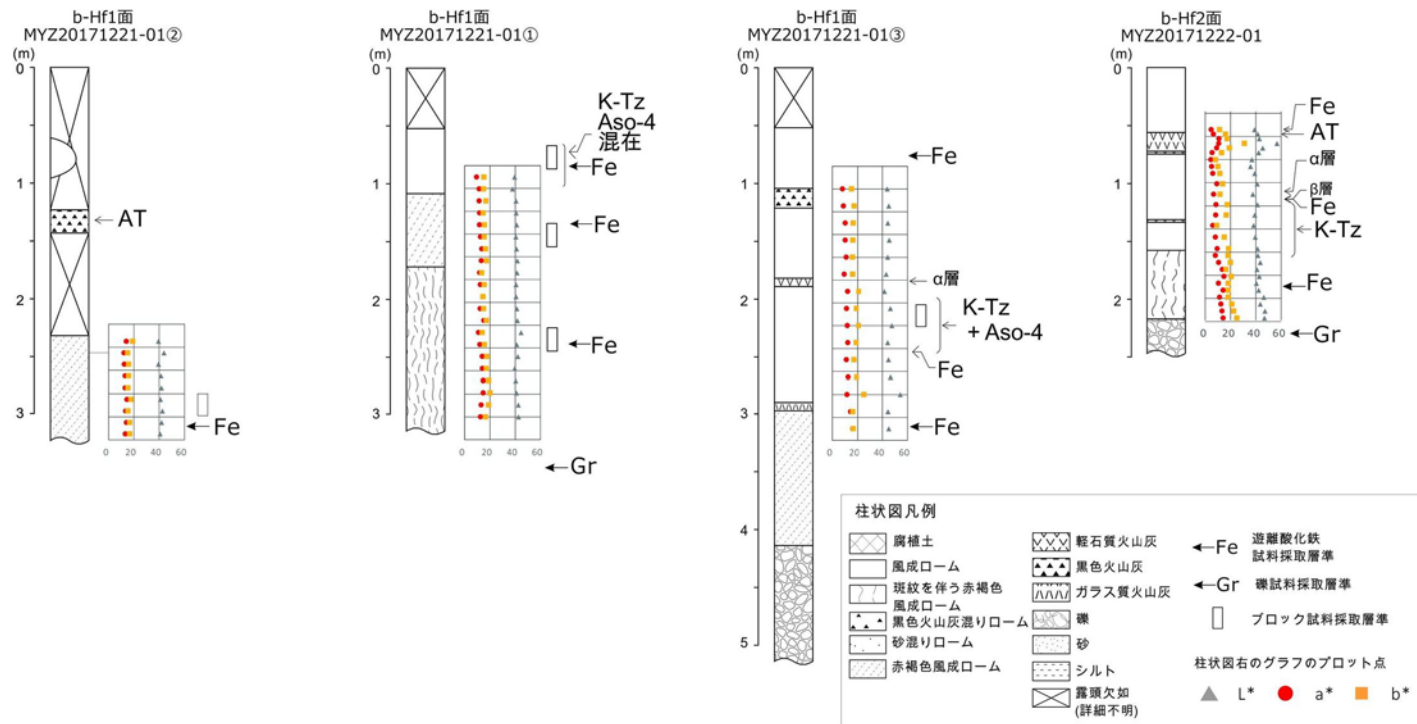


図 2-1 宮崎地域における露頭柱状図、礫・被覆層試料採取位置および測色値 (1)

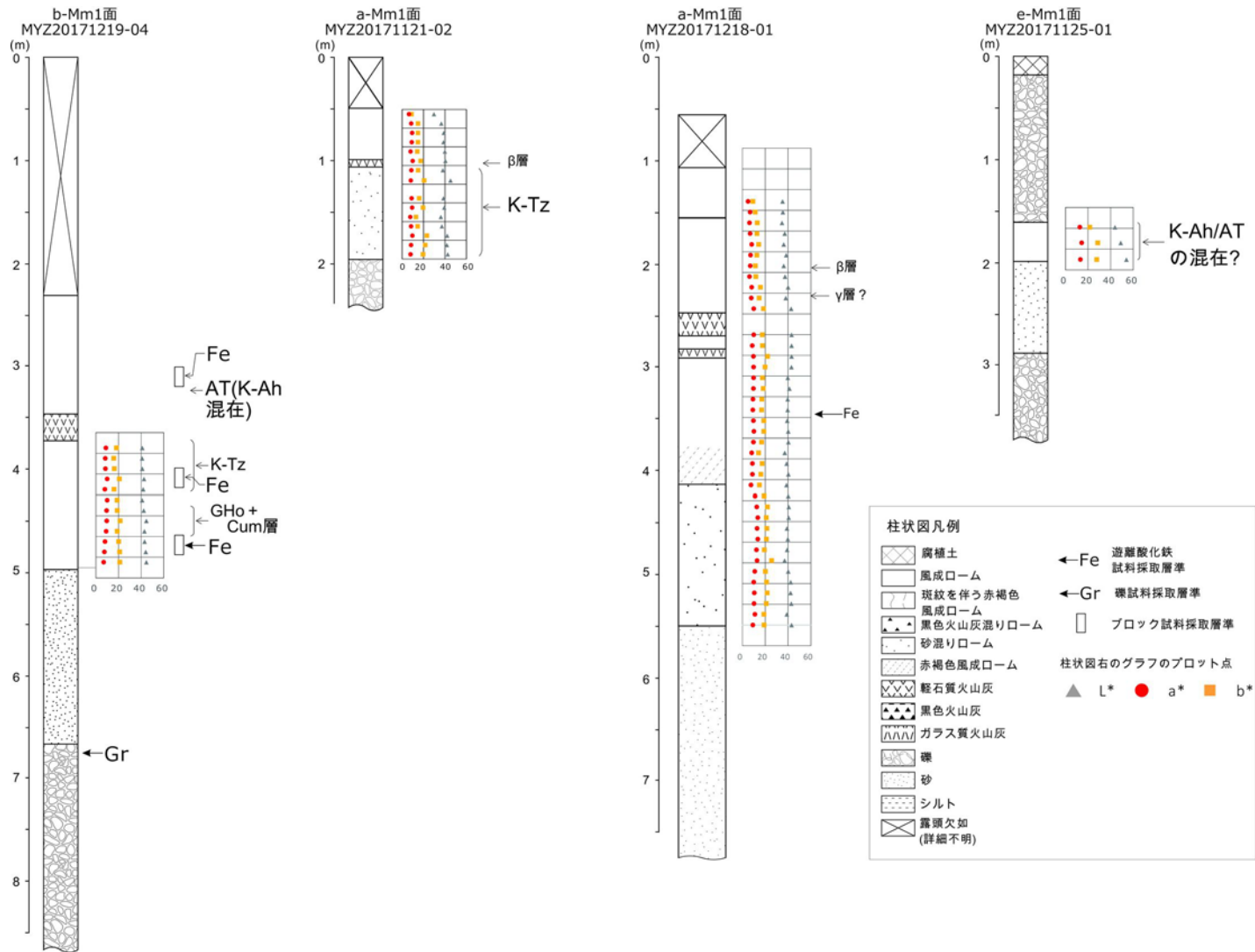


図 2-2 宮崎地域における露頭柱状図、礫・被覆層試料採取位置および測色値 (2)

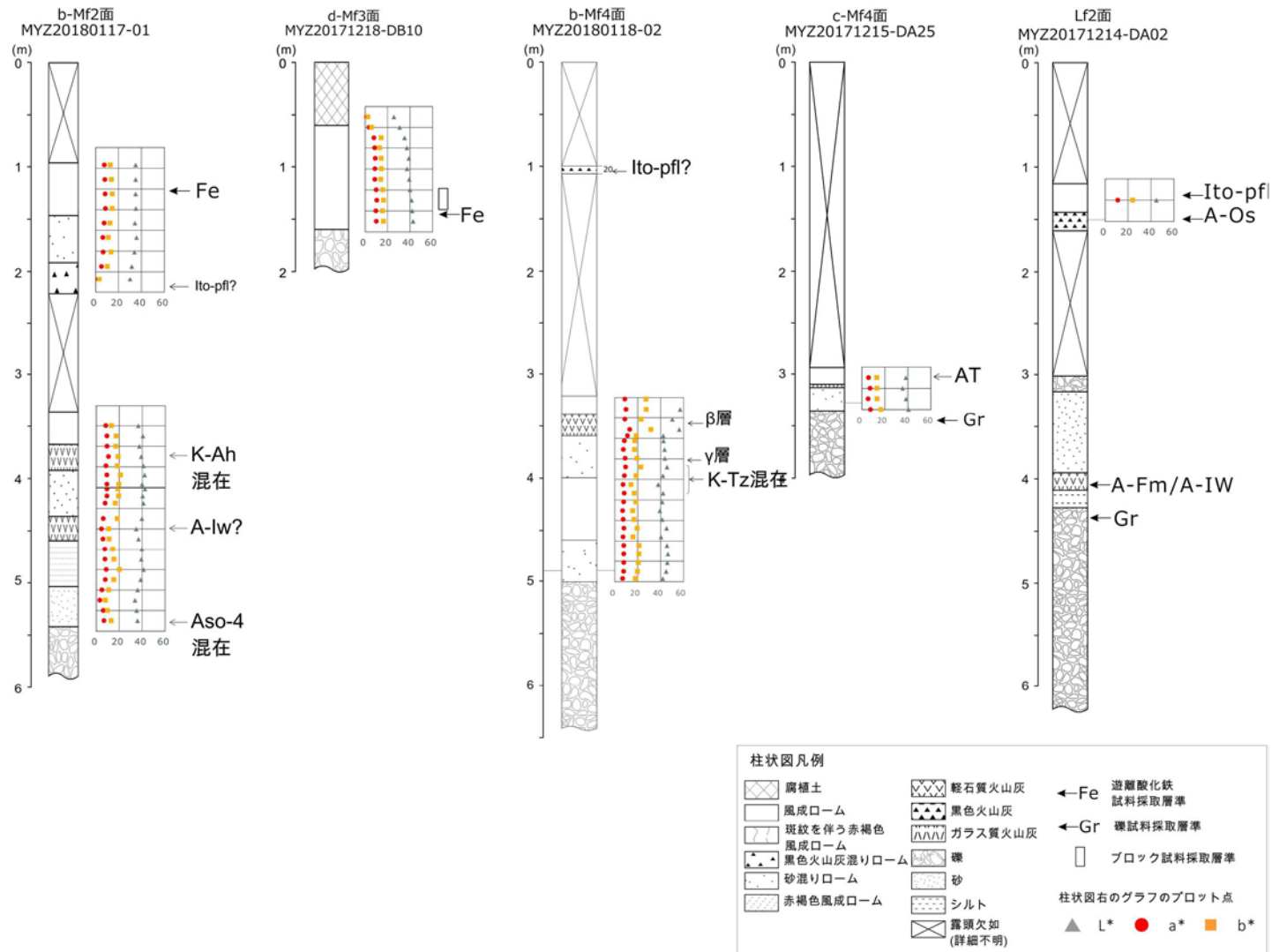


図 2-3 宮崎地域における露頭柱状図、礫・被覆層試料採取位置および測色値 (3)

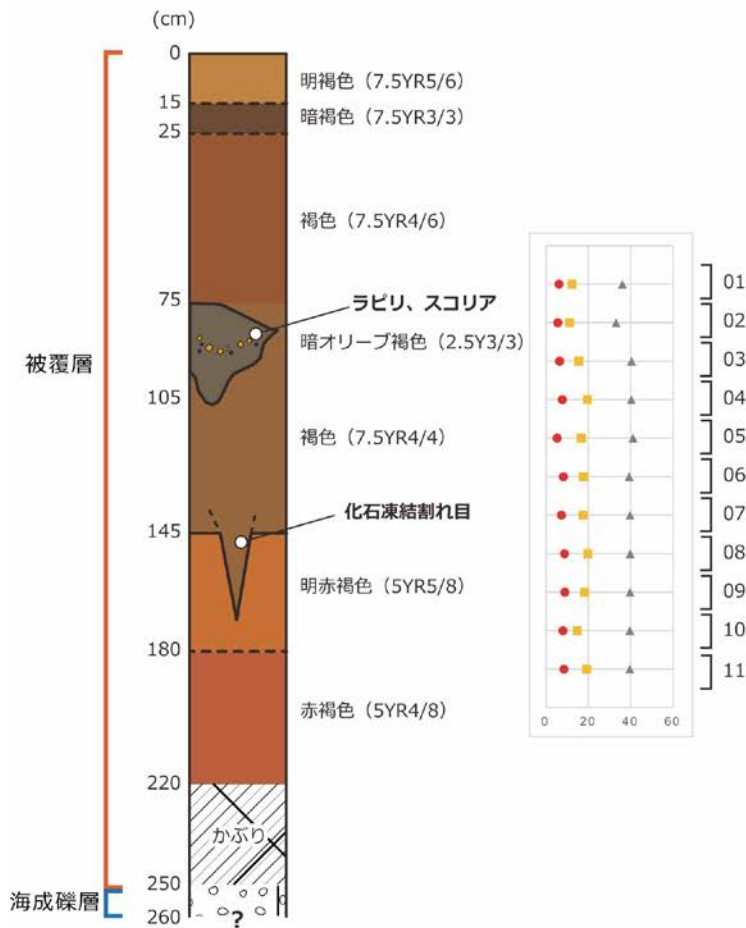
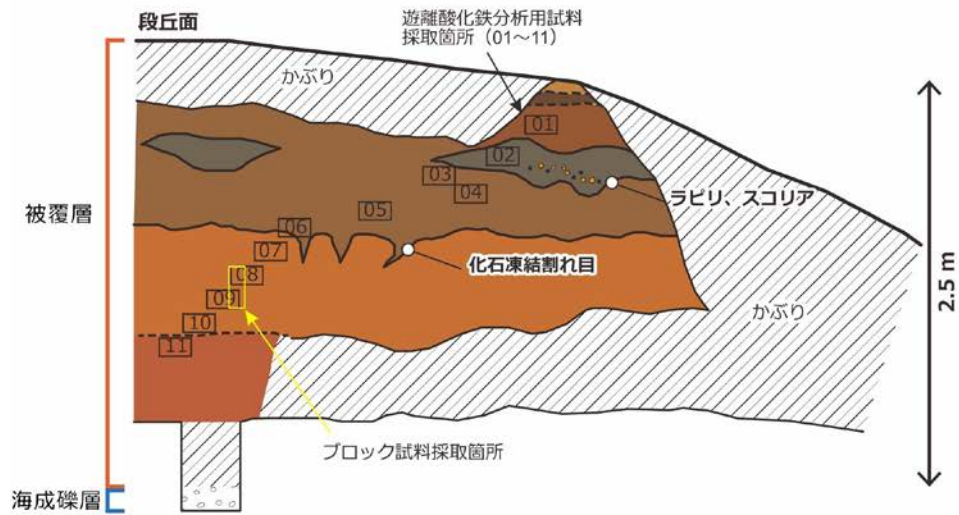


図 2-4 幌延地域下沼露頭におけるスケッチ、柱状図、ブロック試料と遊離酸化鉄試料の採取位置

スケッチおよび柱状図右の 1 から 11 の数字の箇所は、遊離酸化鉄分析試料の、さらに柱状図右の四角枠はブロック試料の採取箇所。被覆層の XRD 分析試料は、ブロック試料から取り分けた。

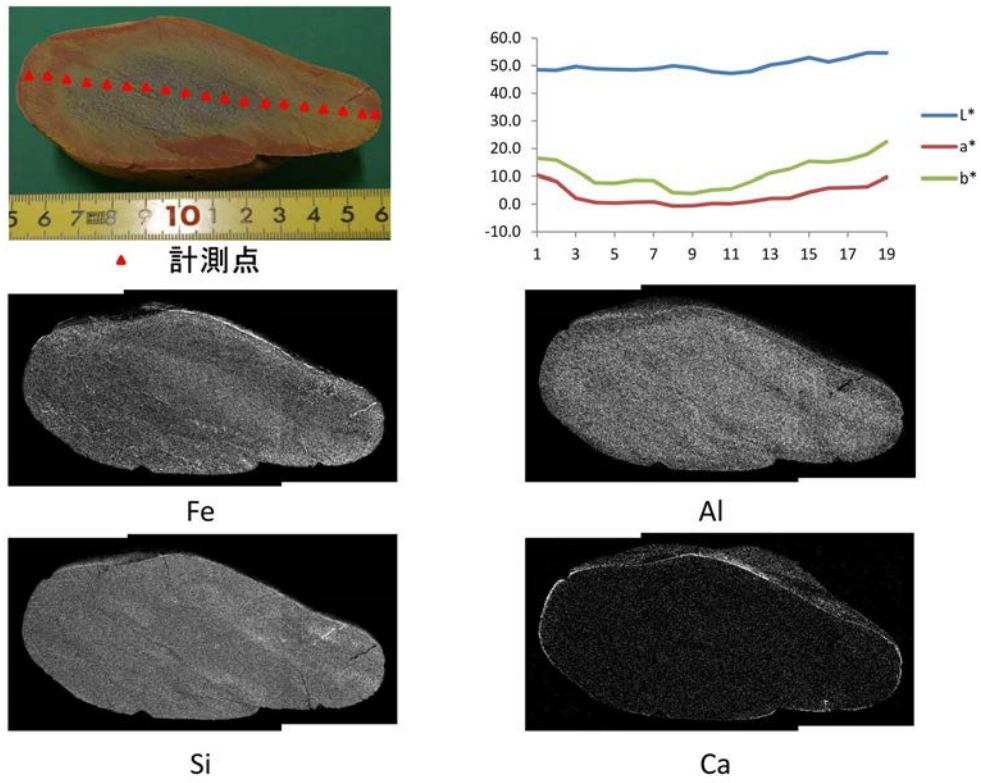


図 2-5 段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20171221-01-1 : b-Hf1 面）

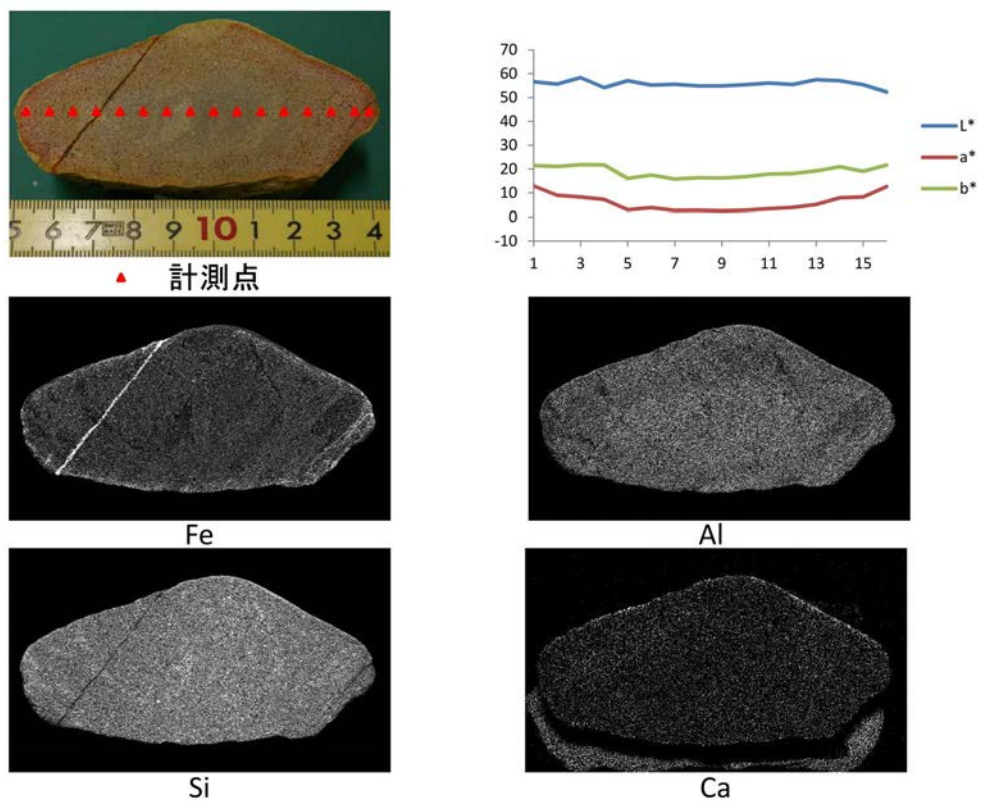


図 2-6 段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20171221-01-2 : b-Hf1 面）

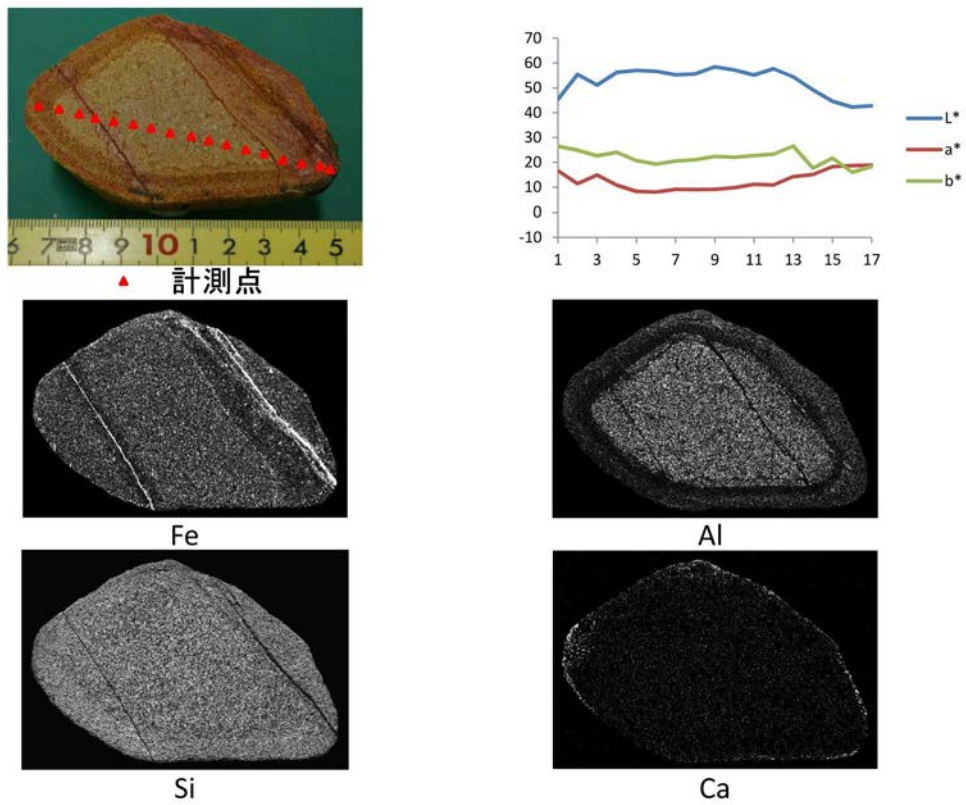


図 2-7 段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20171221-01-3 : b-Hf1 面）

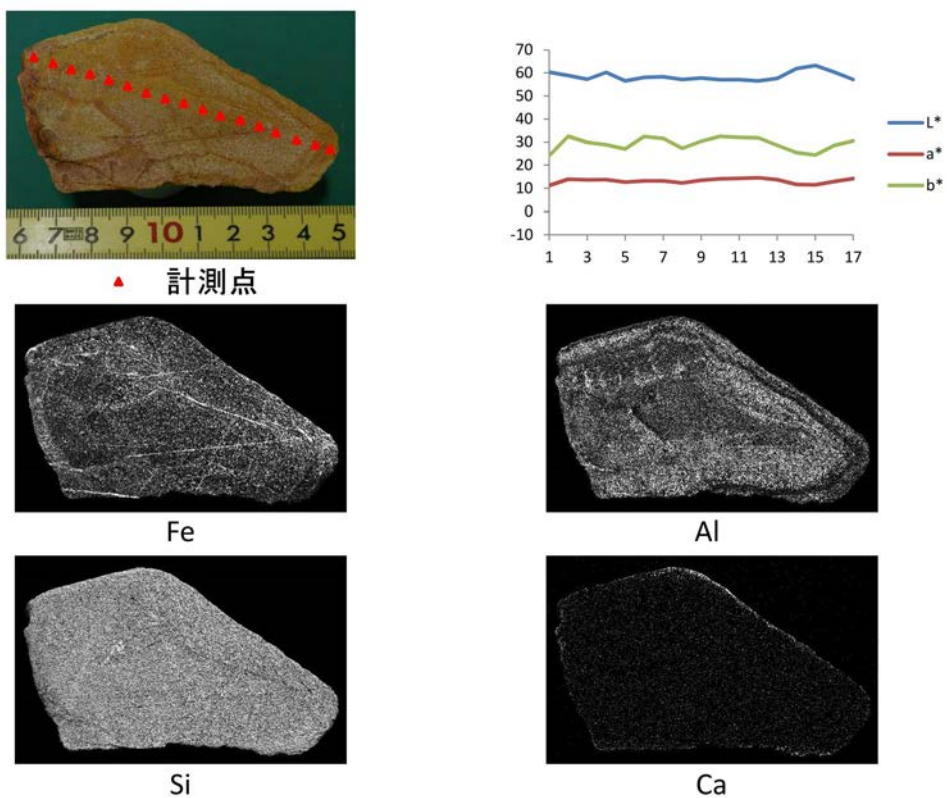


図 2-8 段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20171221-01-4 : b-Hf1 面）

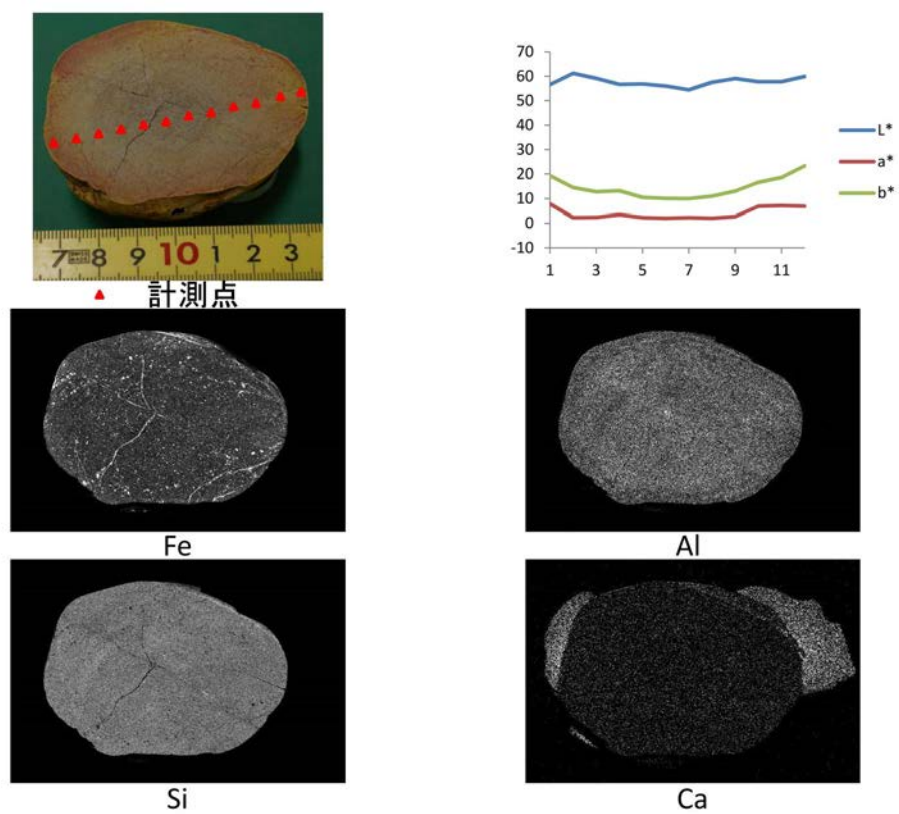


図 2-9 段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20171221-01-5：b-Hf1 面）

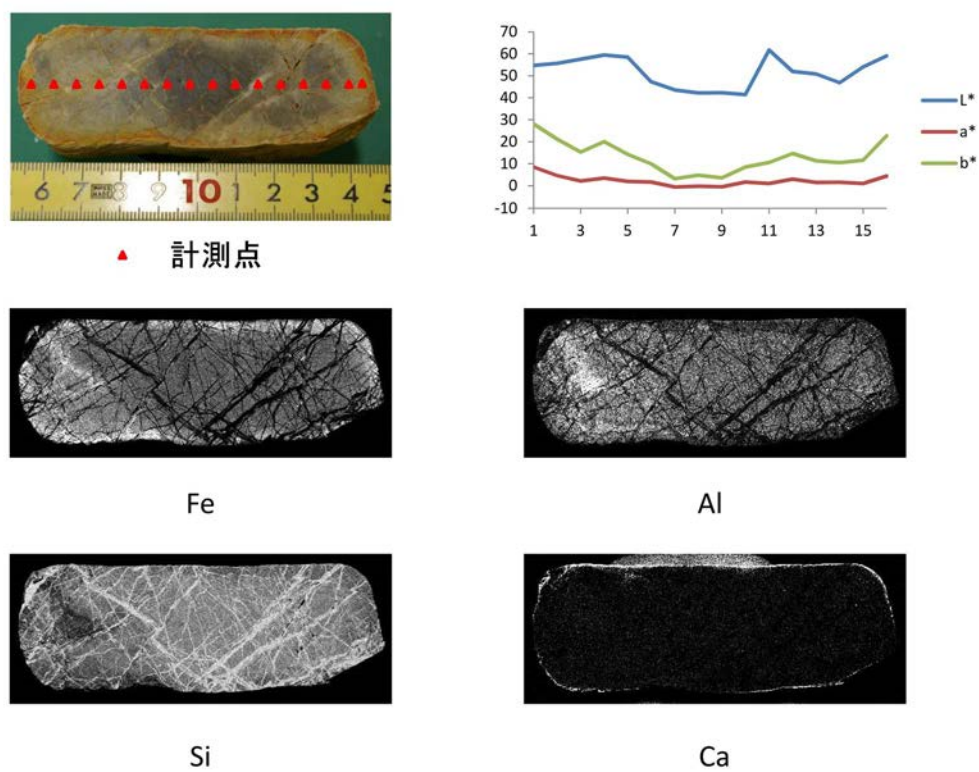


図 2-10 段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20171222-01-1：b-Hf2 面）

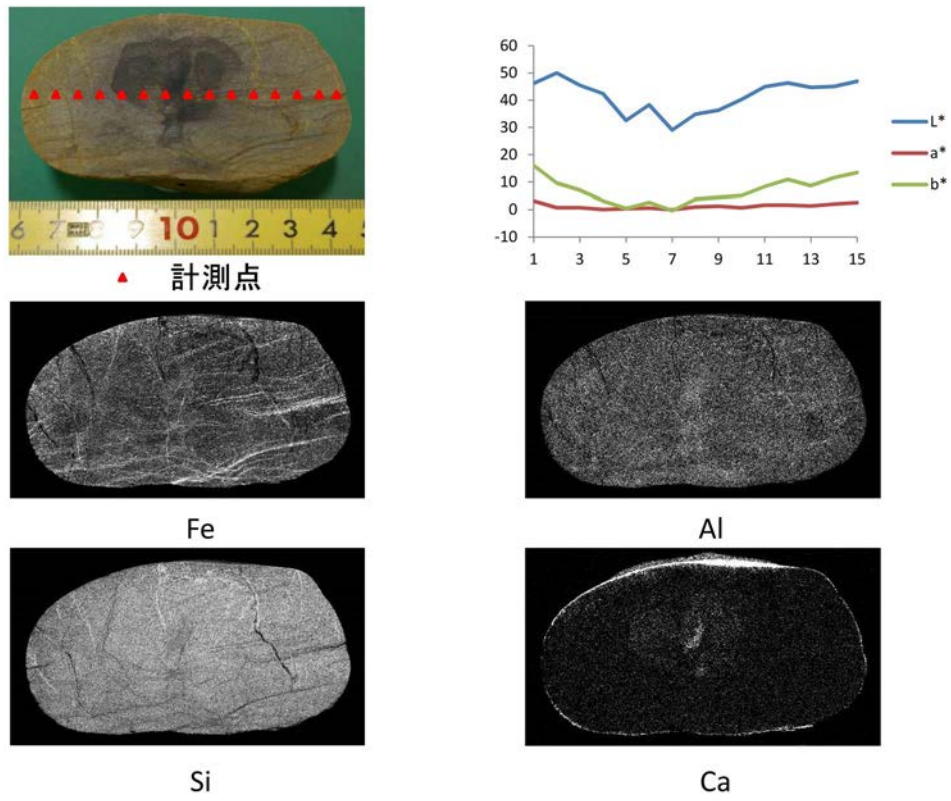


図 2-11 段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20171222-01-2：b-Hf2 面）

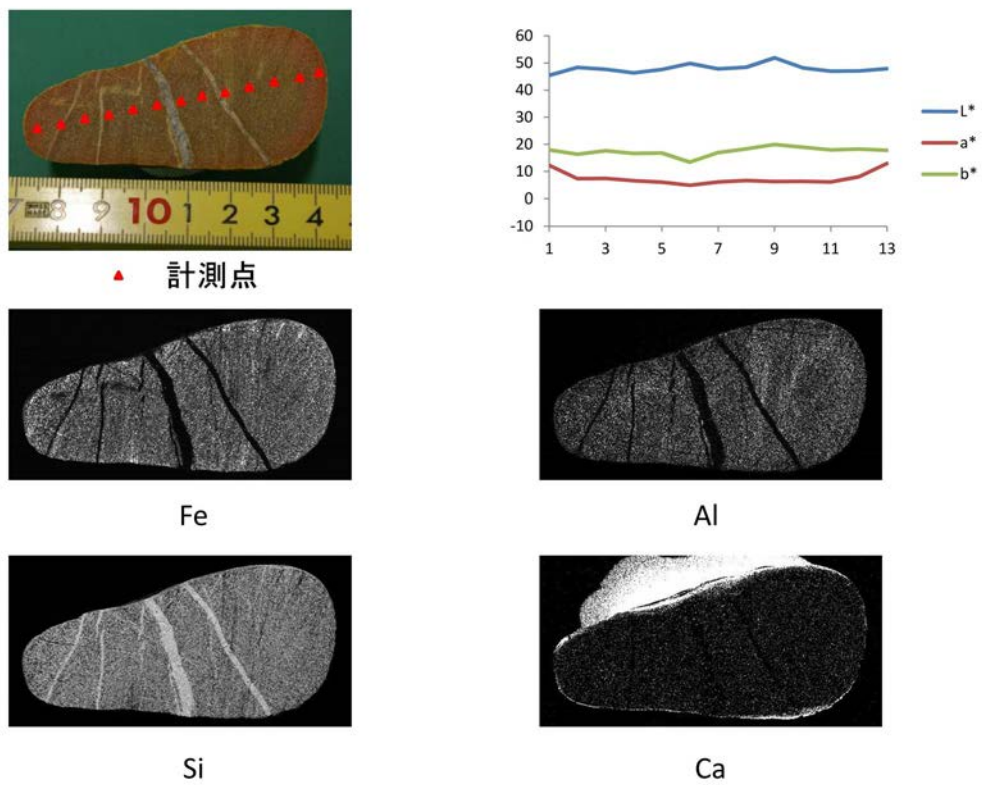


図 2-12 段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20171222-01-3：b-Hf2 面）

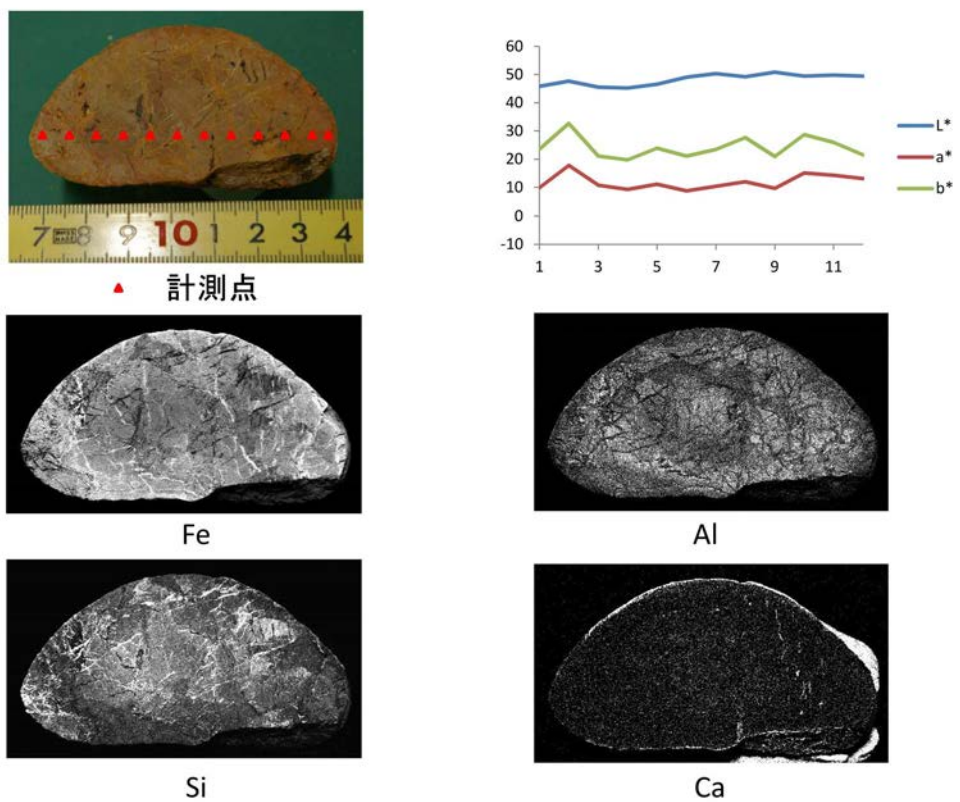


図 2-13 段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20171222-01-4：b-Hf2 面）

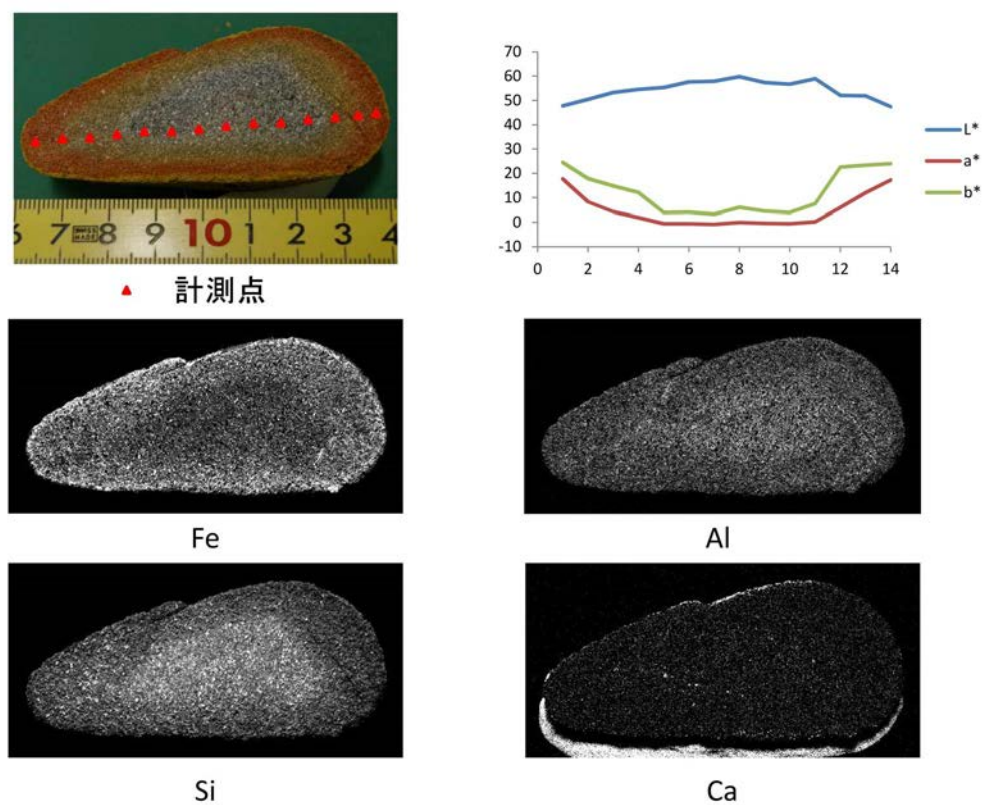


図 2-14 段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20181222-01-5：b-Hf2 面）

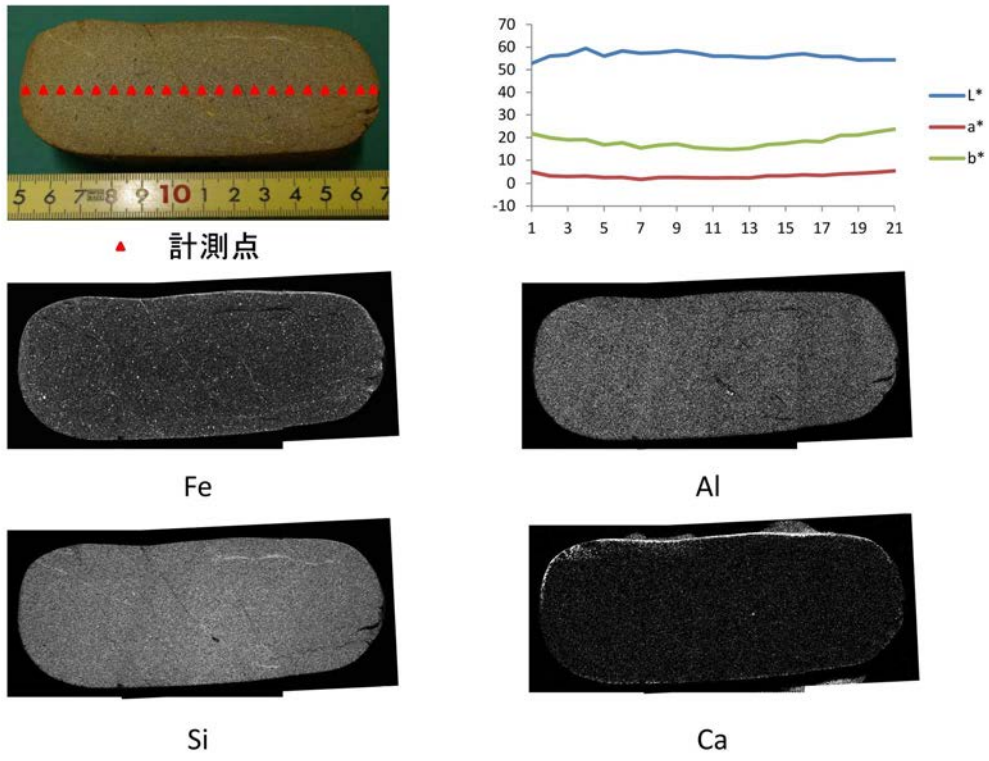


図 2-15 段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20171219-04-1：b-Mm1 面）

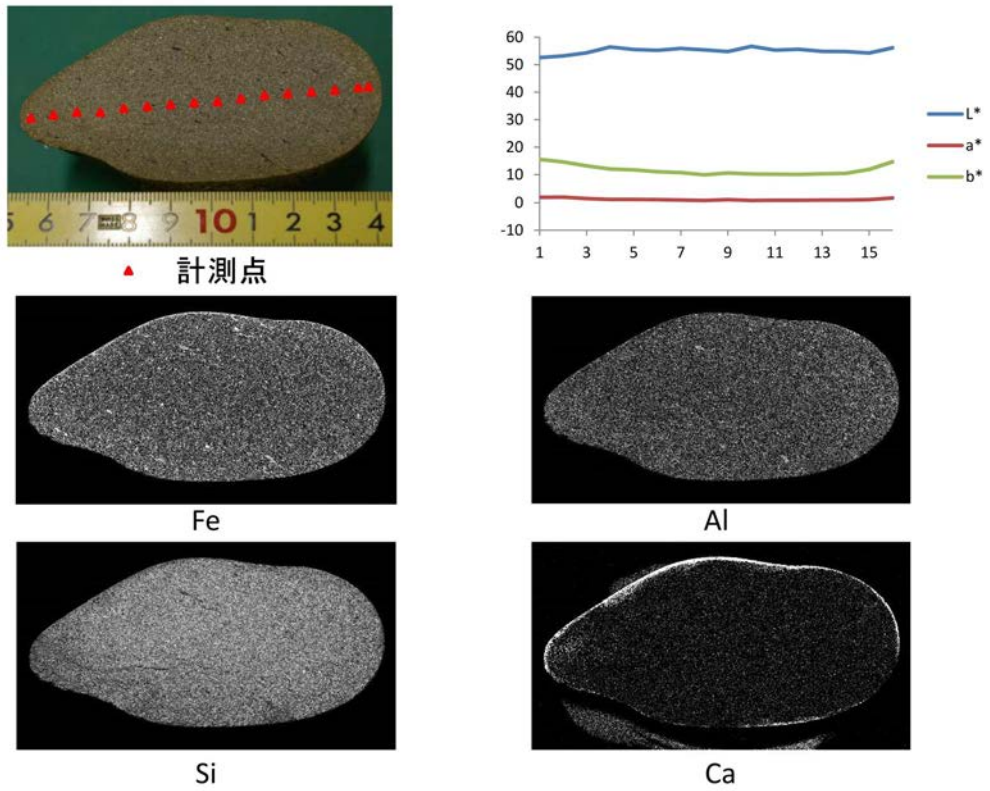


図 2-16 段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20171219-04-2：b-Mm1 面）

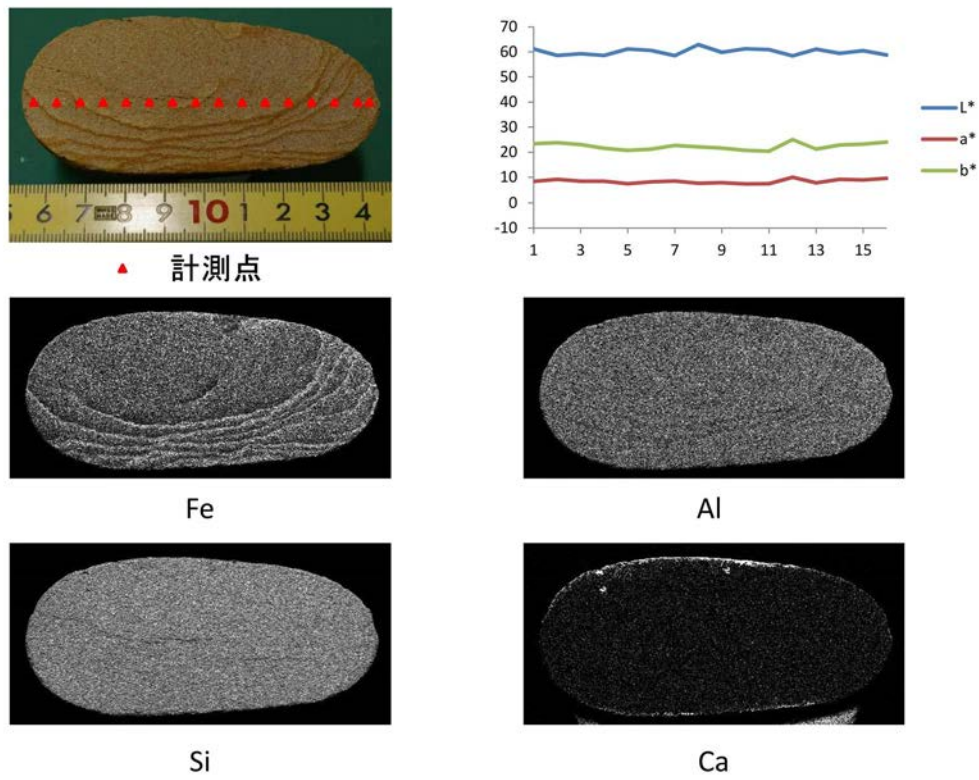


図 2-17 段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20171219-04-3：b-Mm1 面）

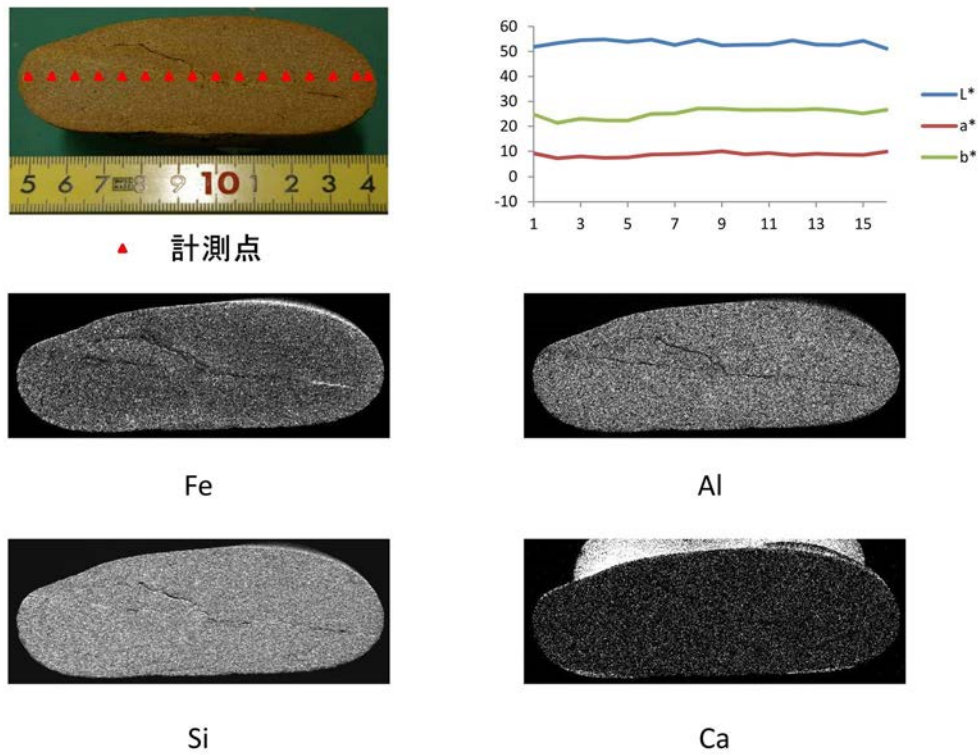
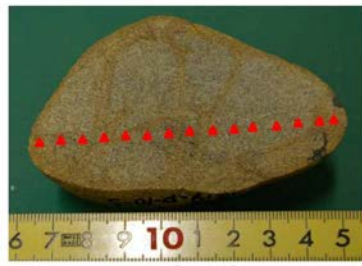


図 2-18 段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20171219-04-4：b-Mm1 面）



▲ 計測点

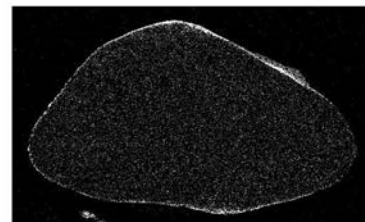
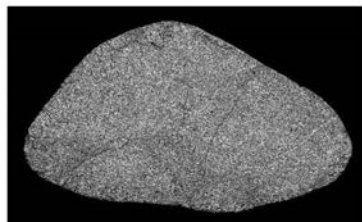
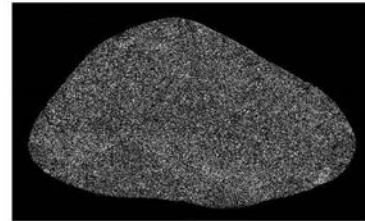
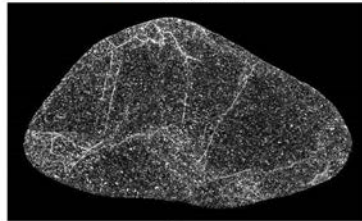
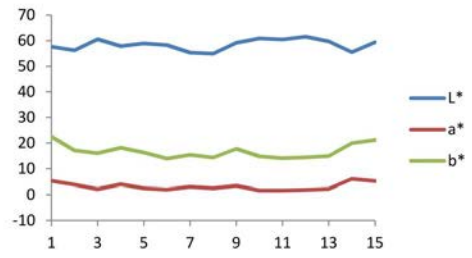


図 2-19 段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20171219-04-5：b-Mm1 面）



▲ 計測点

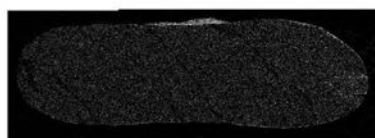
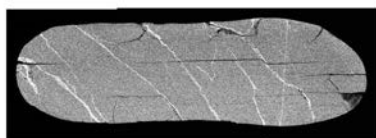
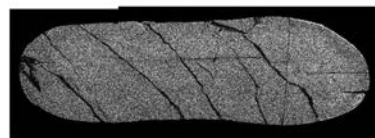
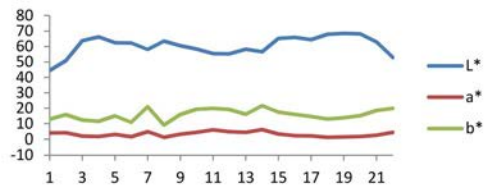


図 2-20 段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20180117-01-1：b-Mf2 面）

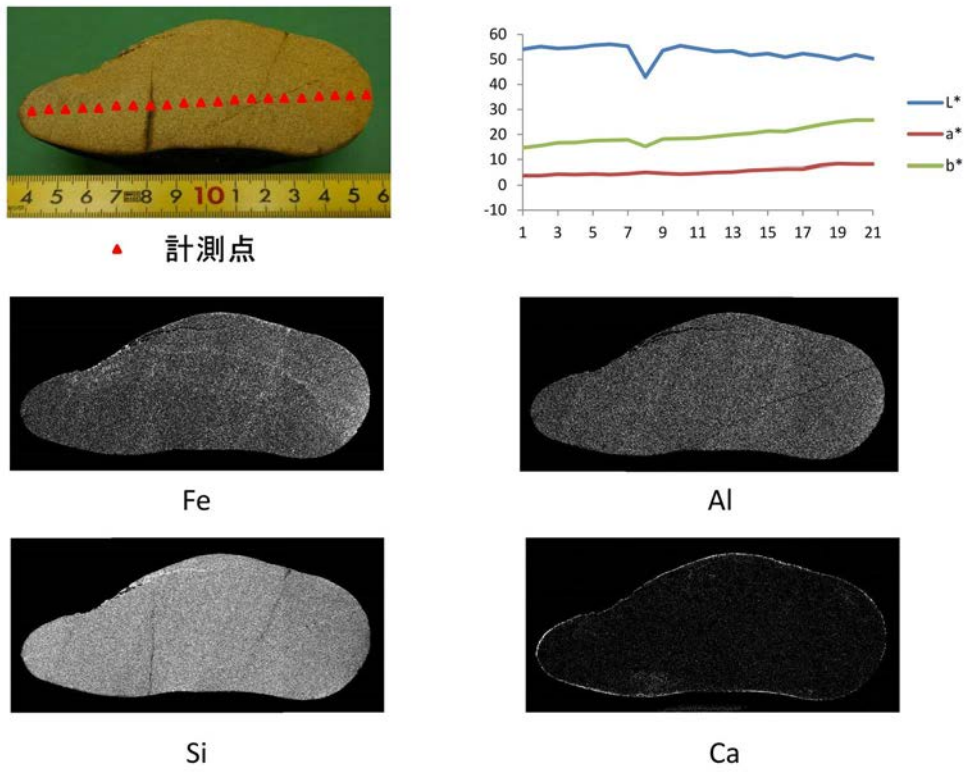


図 2-21 段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20180117-01-2：b-Mf2 面）

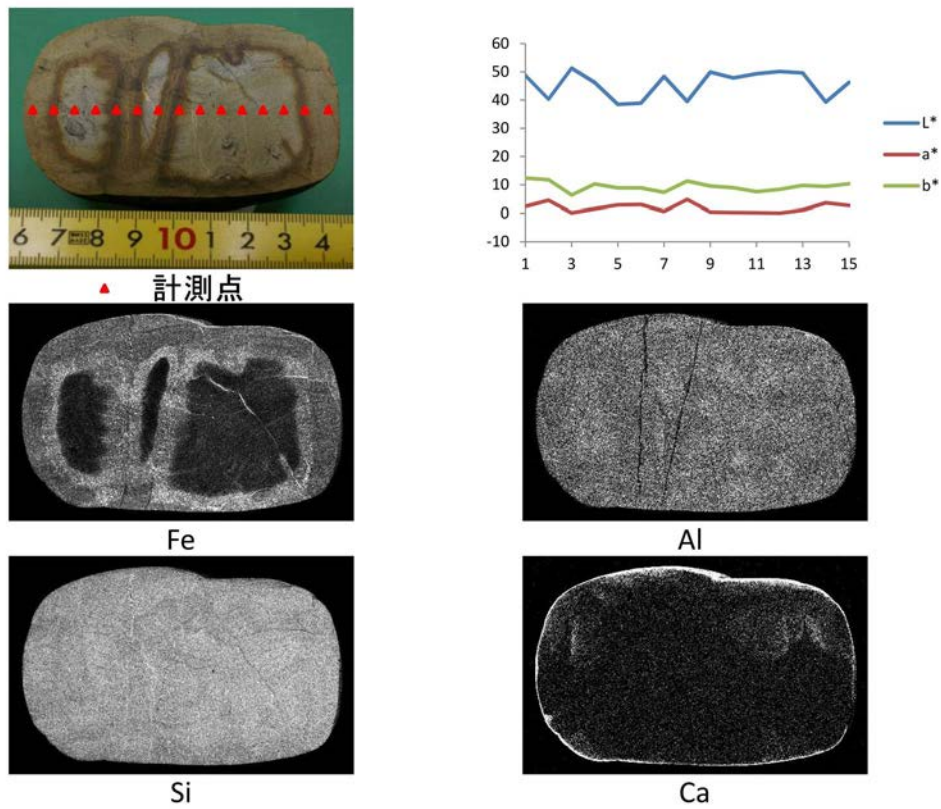
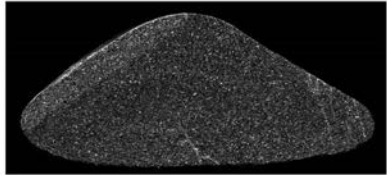
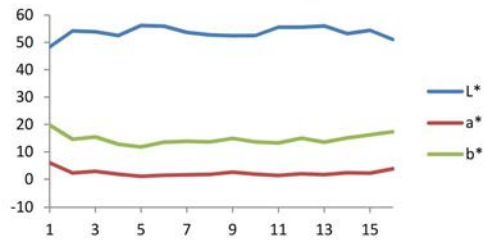


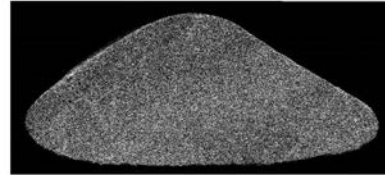
図 2-22 段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20180117-01-3：b-Mf2 面）



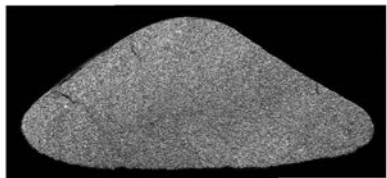
▲ 計測点



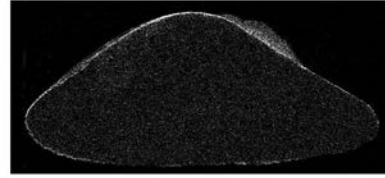
Fe



Al



Si

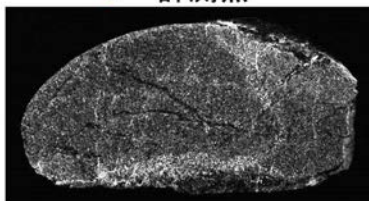
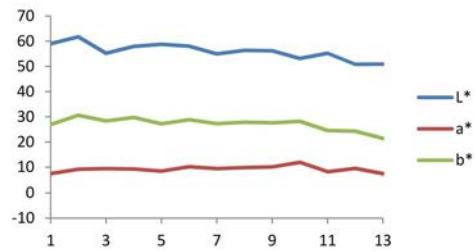


Ca

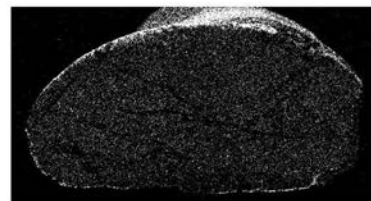
図 2-23 段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20180117-01-4：b-Mf2 面）



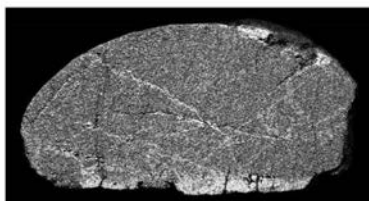
▲ 計測点



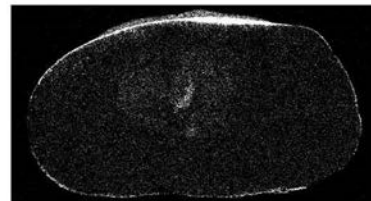
Fe



Al

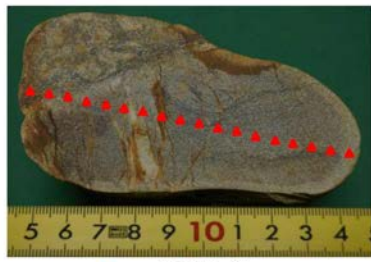


Si



Ca

図 2-24 段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20180117-01-5：b Mf2 面）



▲ 計測点

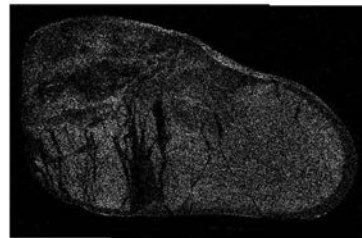
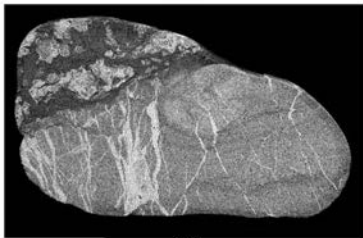
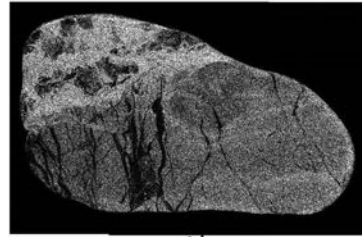
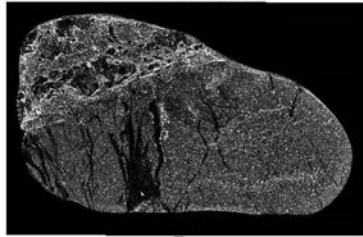
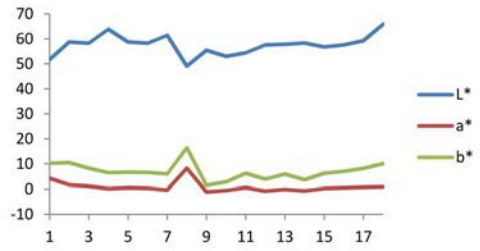
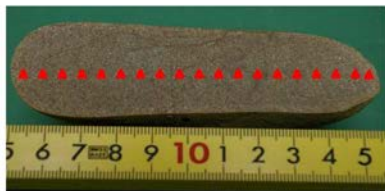


図 2-25 段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20180117-02-1 : b-Mf4 面)



▲ 計測点

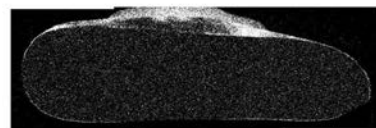
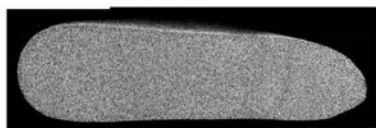
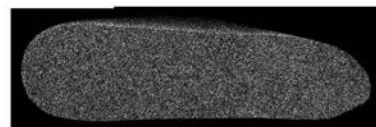
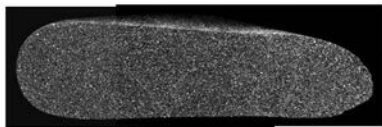
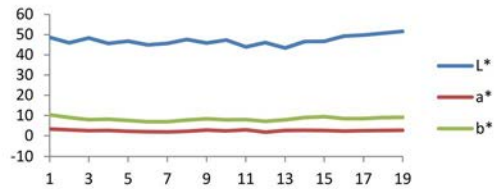


図 2-26 段丘礫断面の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20180117-02-2 : b-Mf4 面)

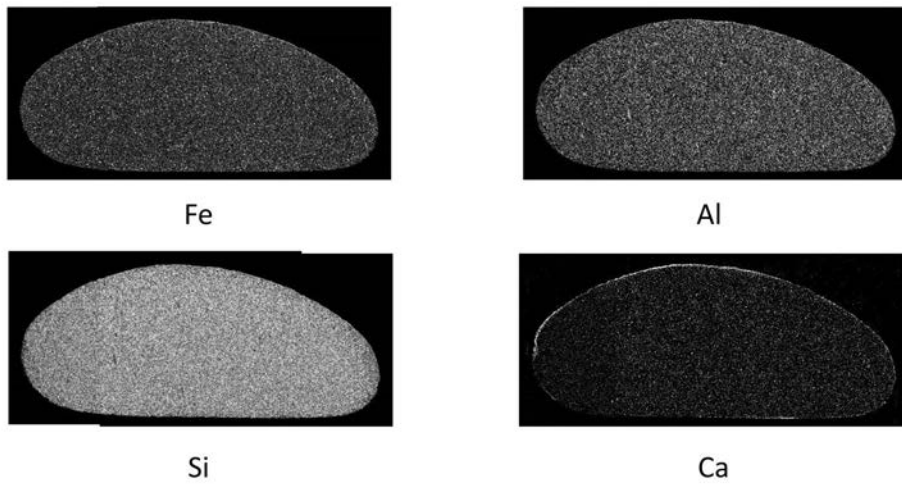
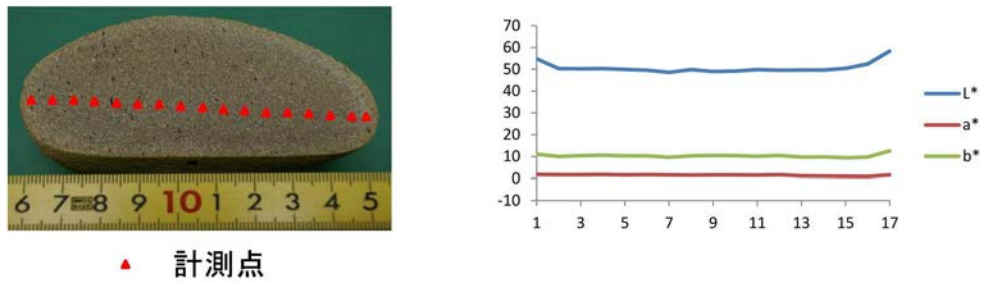


図 2-27 段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20180117-02-3：b-Mf4 面）

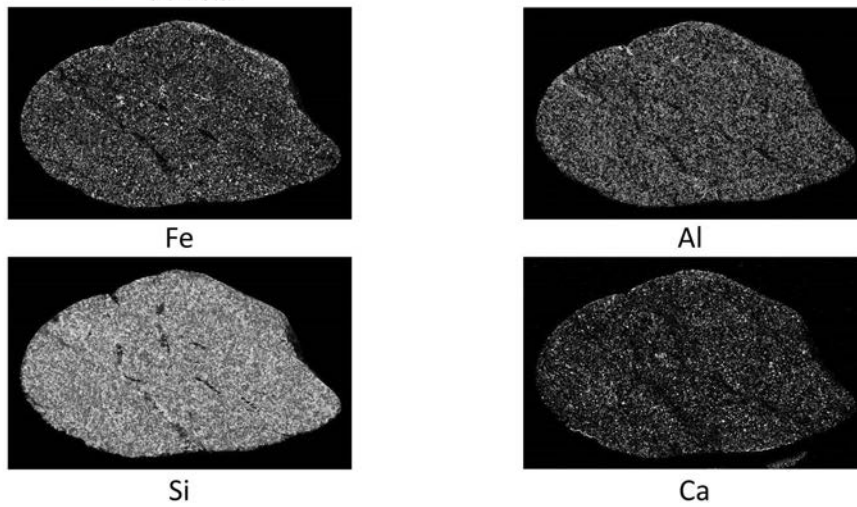
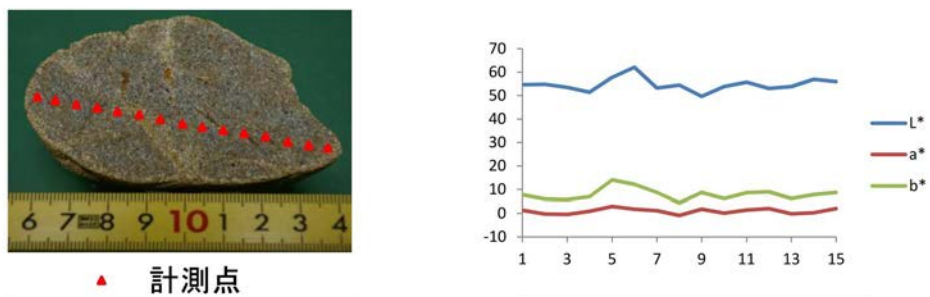


図 2-28 段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20180117-02-4：b-Mf4 面）

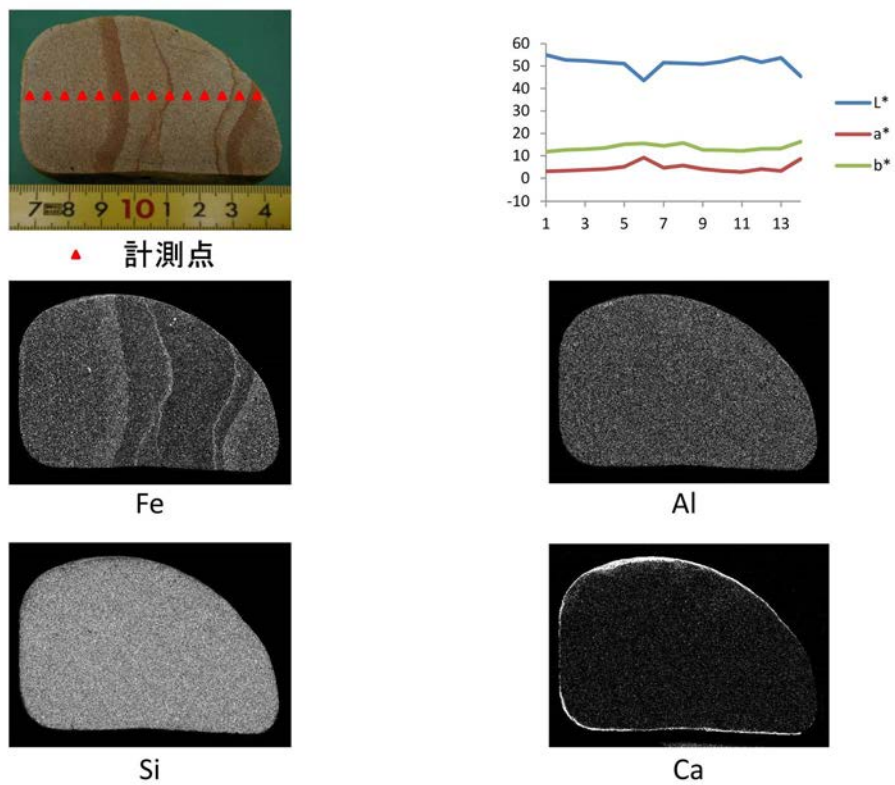


図 2-29 段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20180117-02-5：b-Mf4 面）

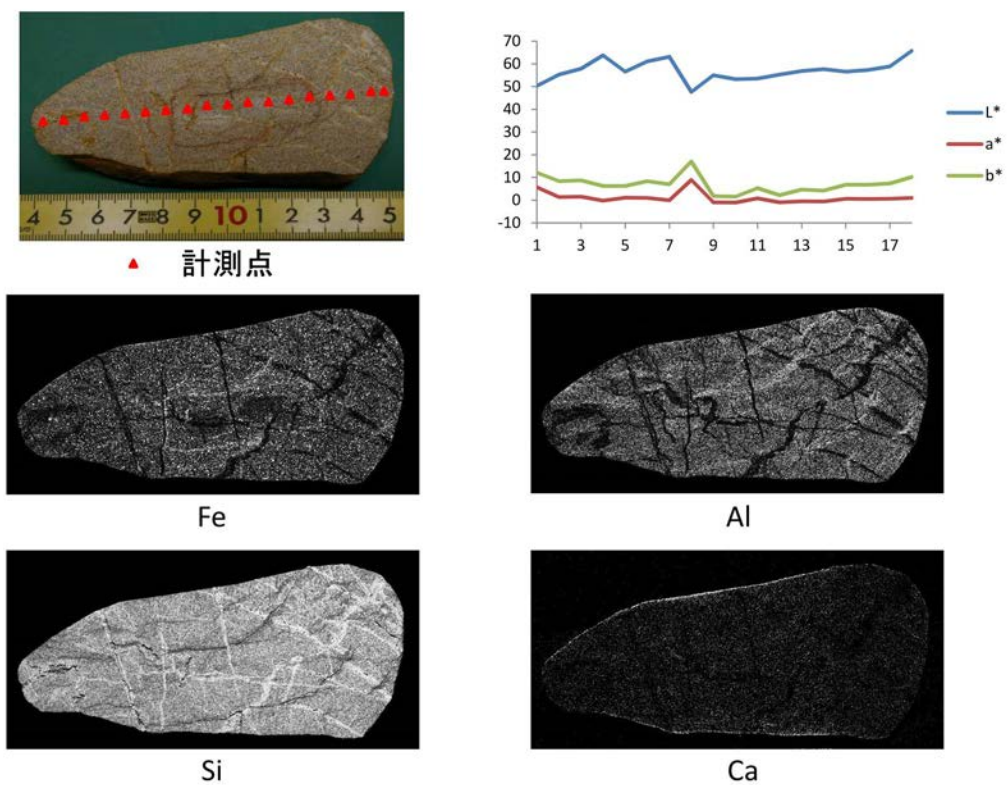


図 2-30 段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20171214-DA02-1：b-Lf2 面）

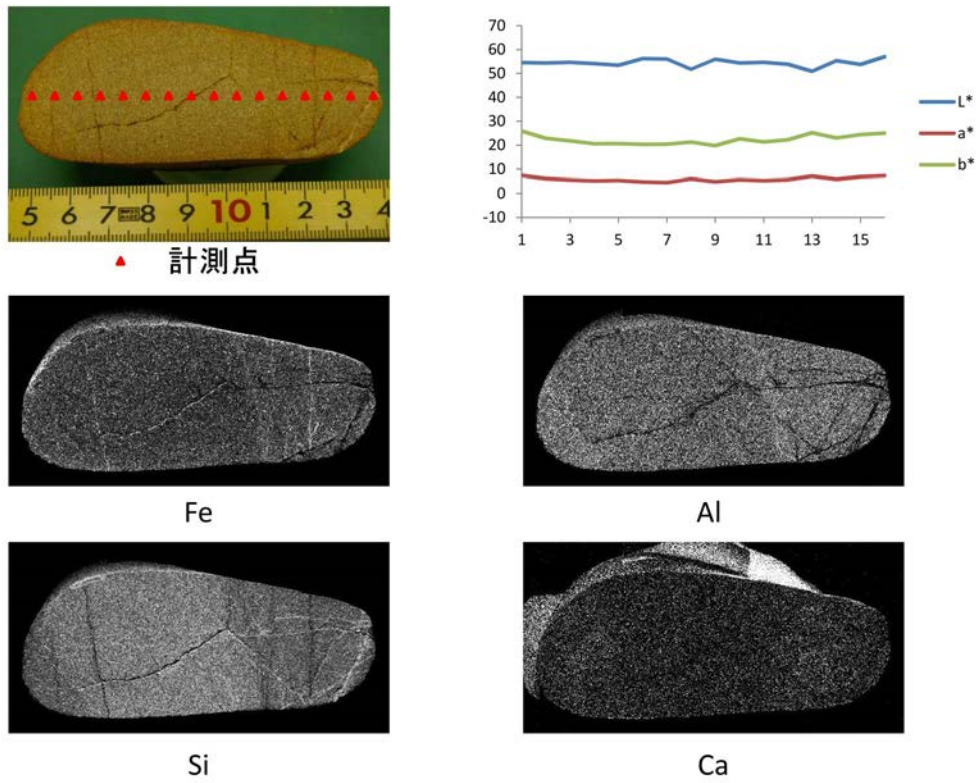


図 2-31 段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20171214-DA02-2：b-Lf2 面）

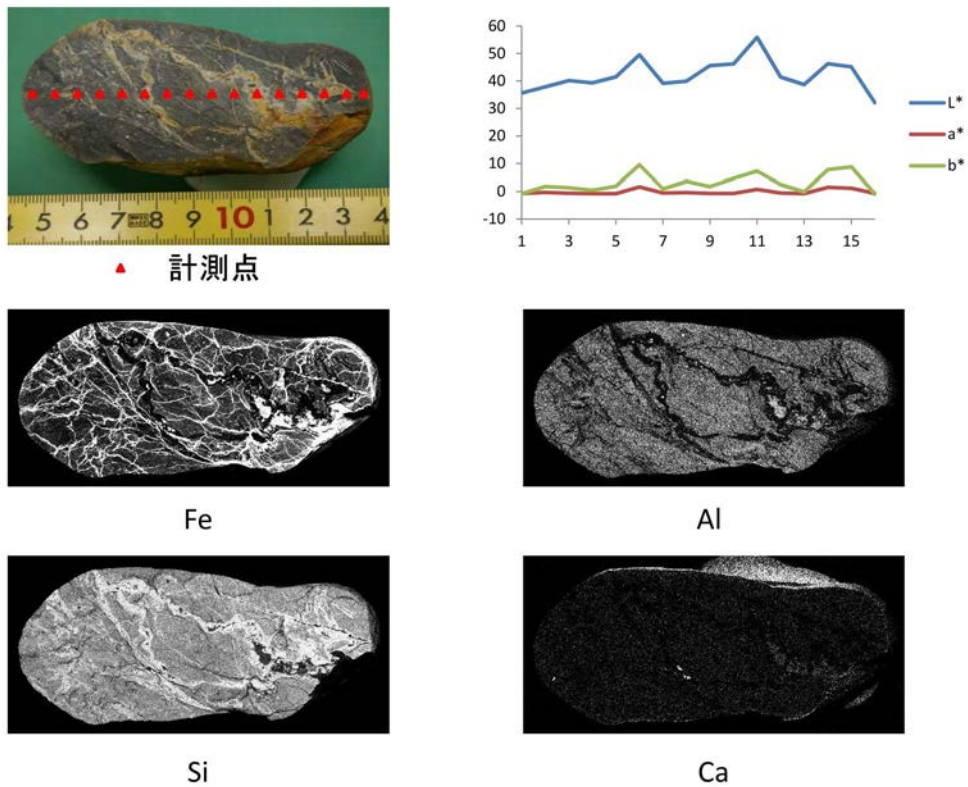


図 2-32 段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20171214-DA02-3：b-Lf2 面）

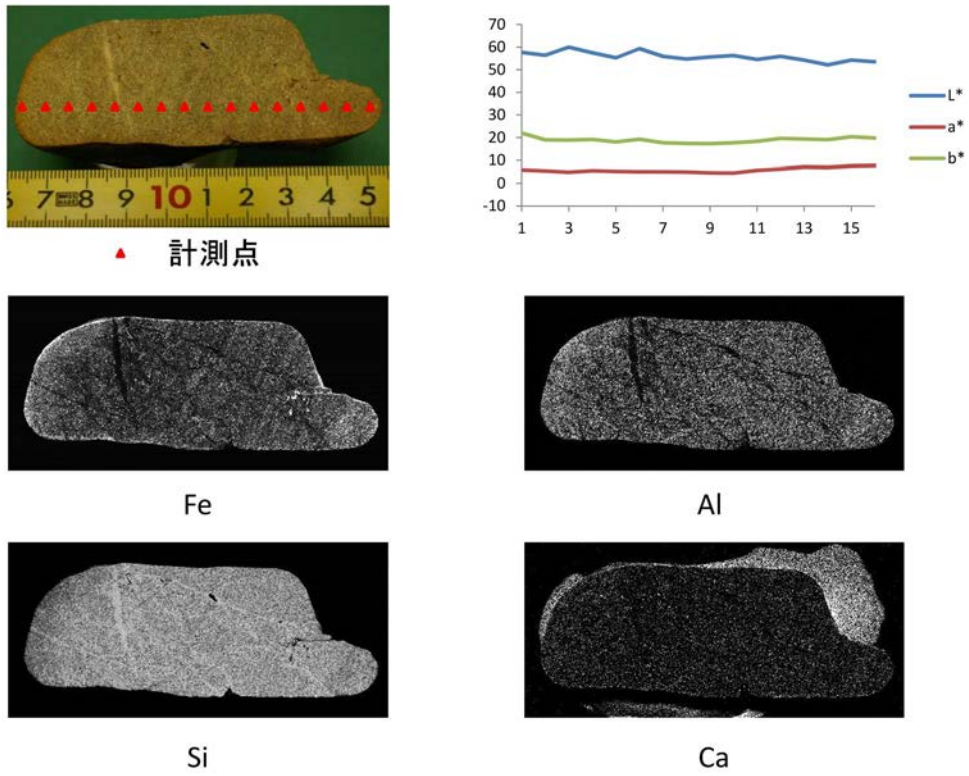


図 2-33 段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20171214-DA02-4：b-Lf2 面）

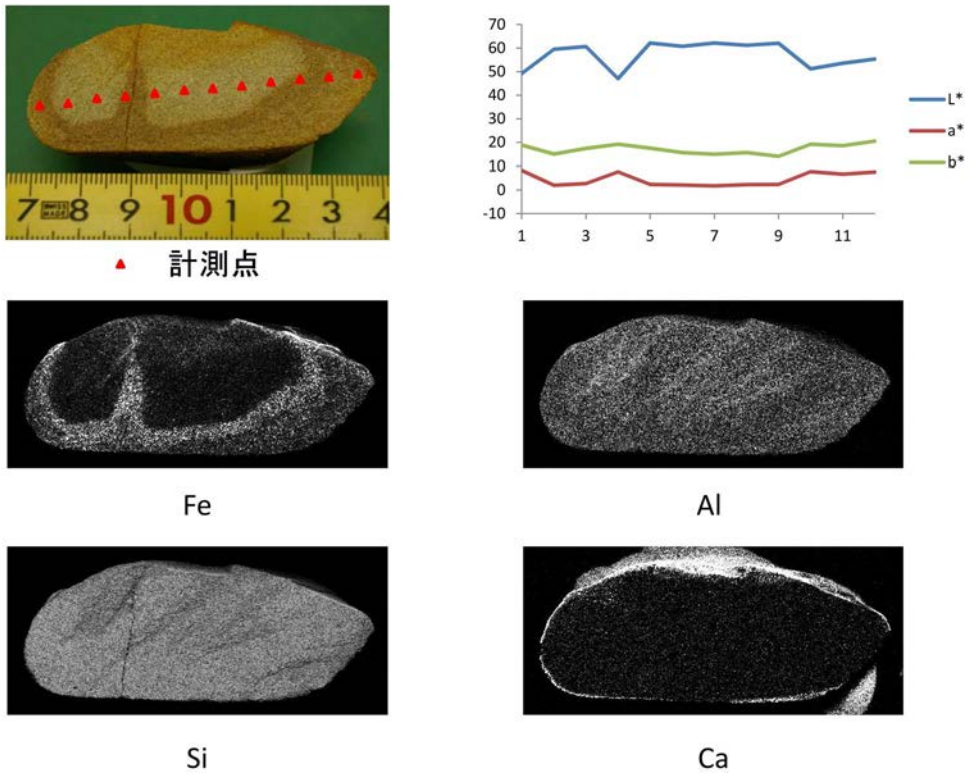


図 2-34 段丘礫断面の元素分布と測色値（試料：MYZ20171214-DA02-5：b-Lf2 面）

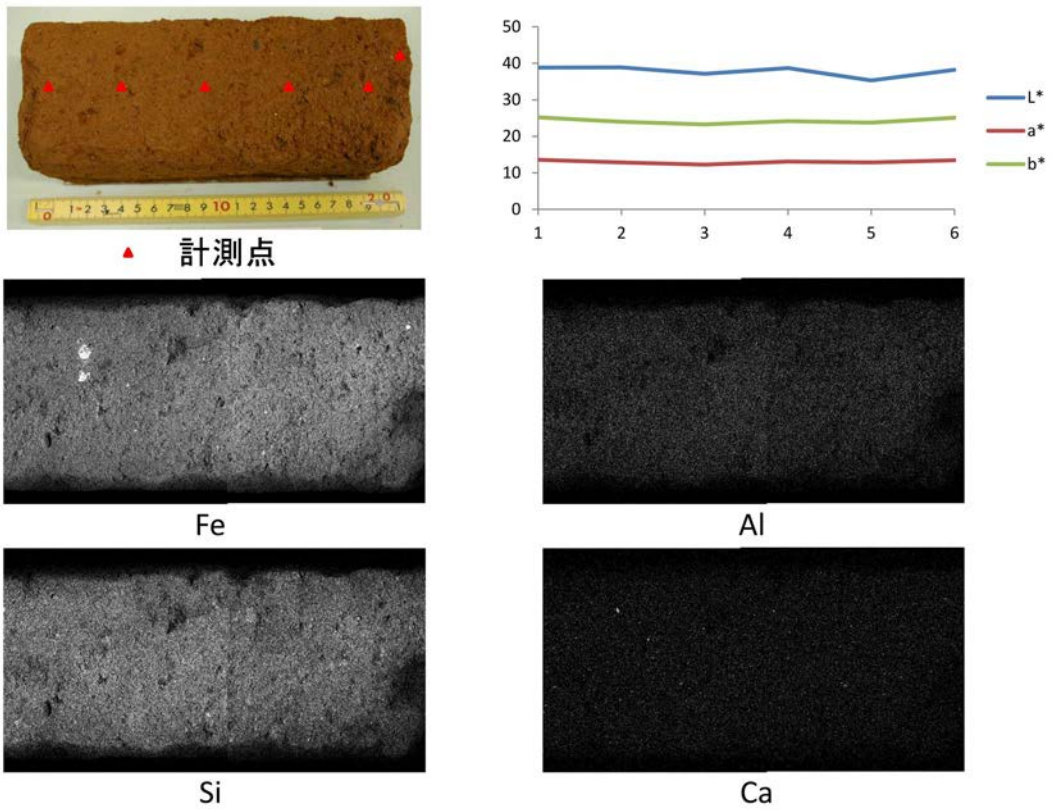


図 2-35 被覆層の元素分布と測色値（試料：MYZ20171018-01）

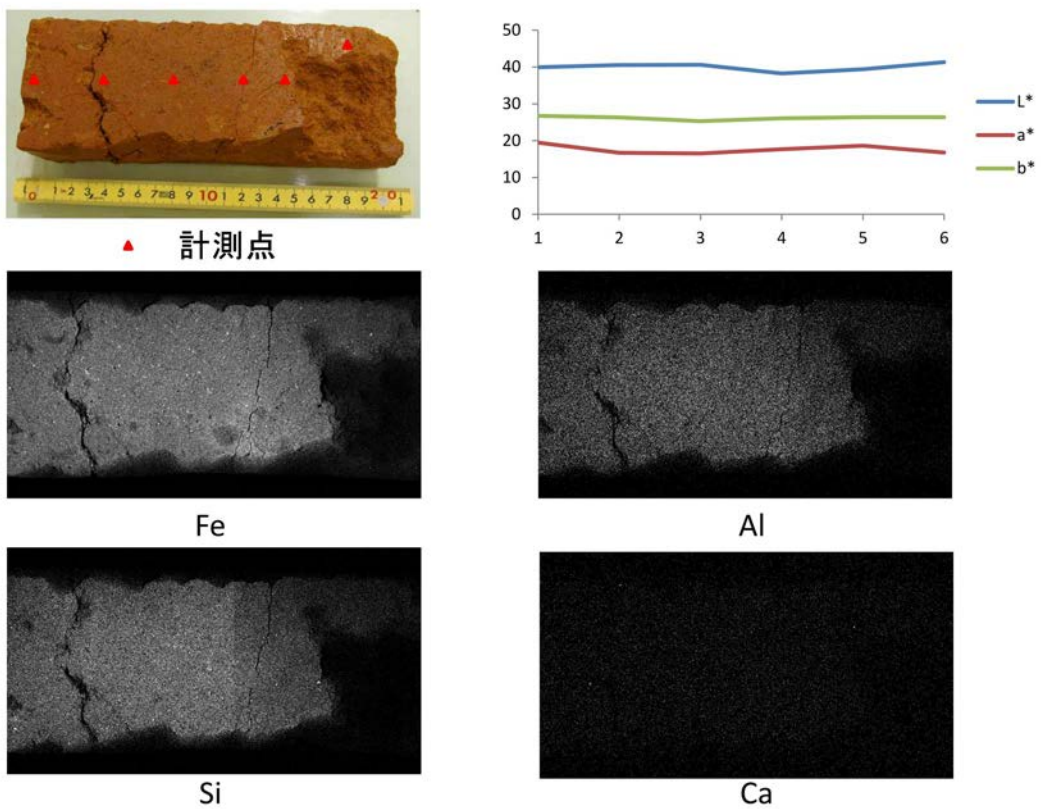
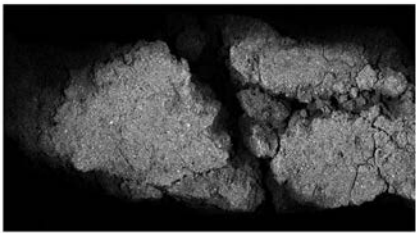
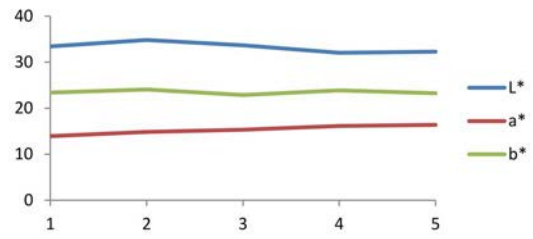


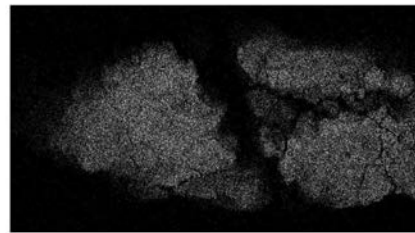
図 2-36 被覆層の元素分布と測色値（試料：MYZ20171221-01-01：b-Hf1 面）



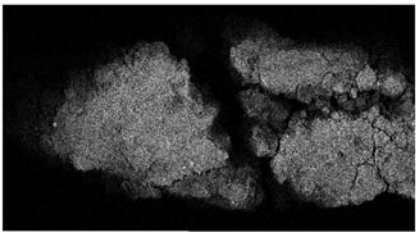
▲ 計測点



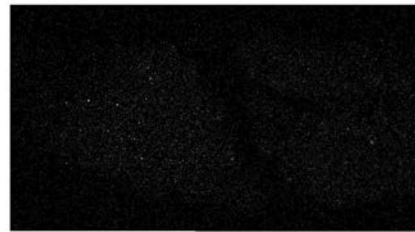
Fe



Al



Si

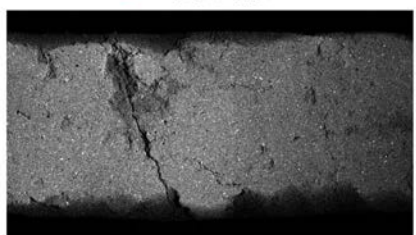
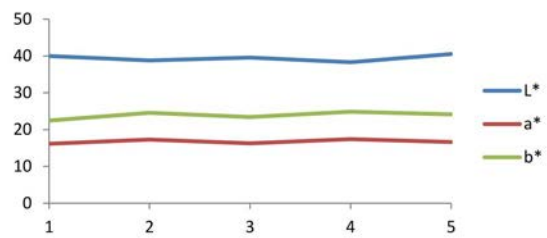


Ca

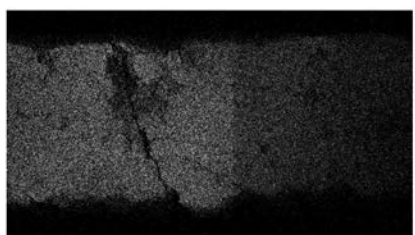
図 2-37 被覆層の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171221-01-02 : b- Hf1 面)



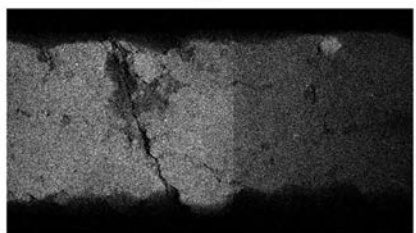
▲ 計測点



Fe



Al



Si



Ca

図 2-38 被覆層の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171221-01-03 : b- Hf1 面)

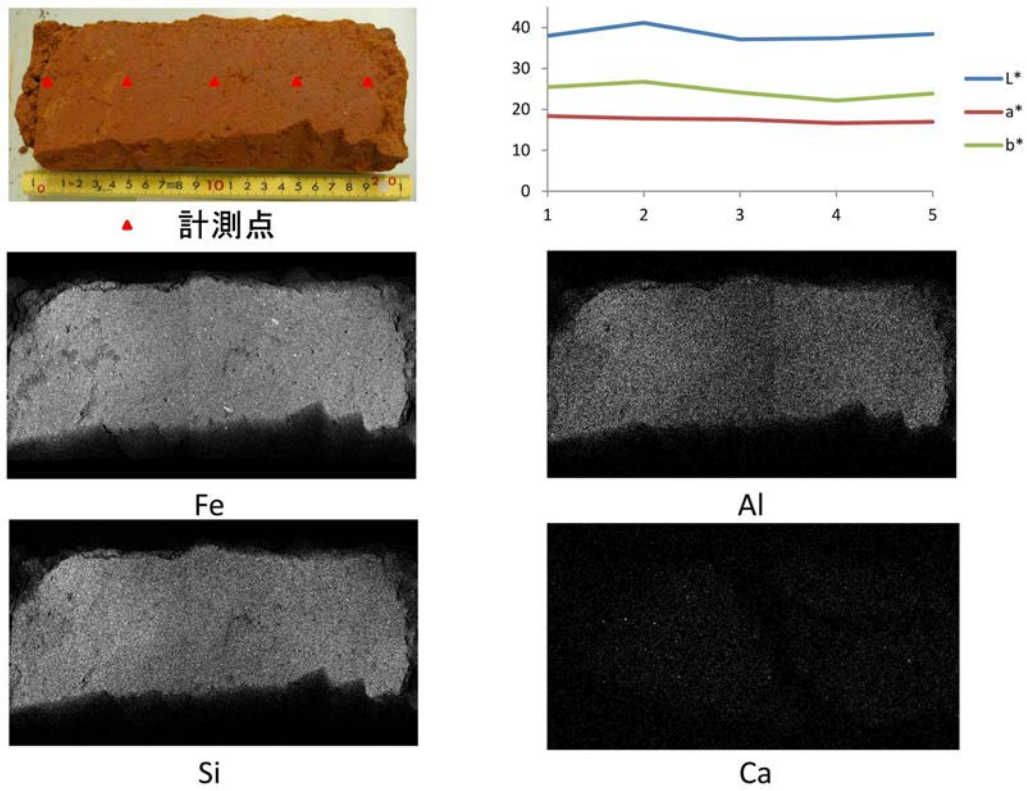


図 2-39 被覆層の元素分布と測色値（試料：MYZ20171221-01-②：b- Hf1 面）

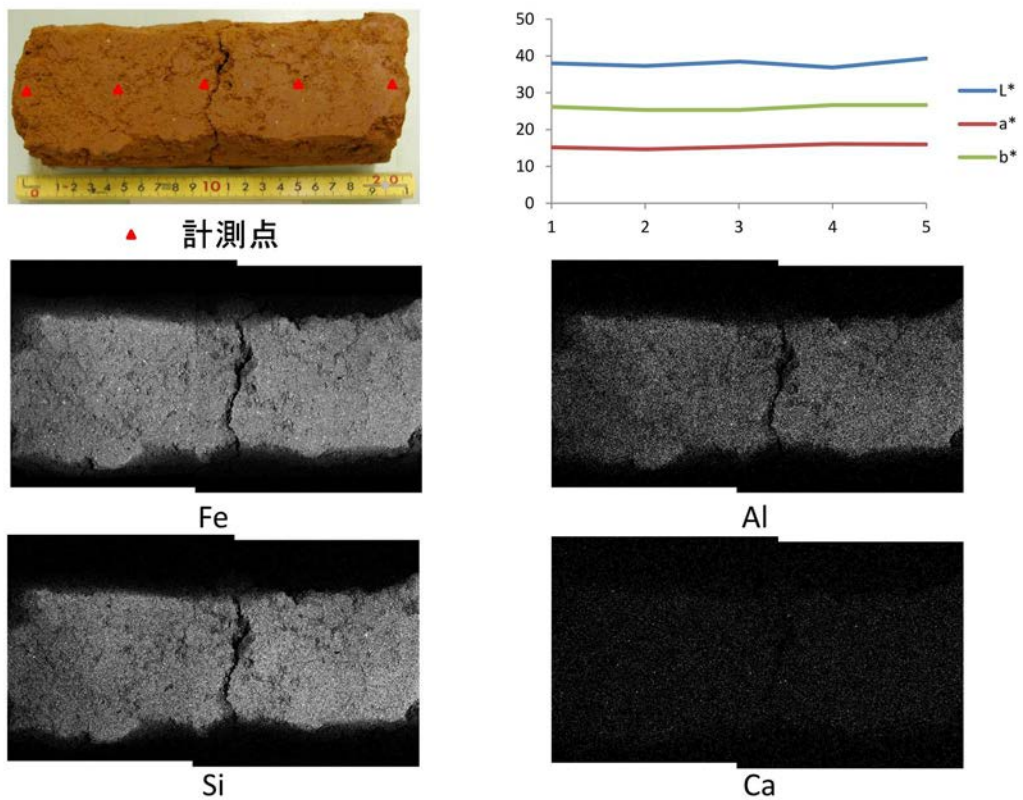


図 2-40 被覆層の元素分布と測色値（試料：MYZ20171221-01-③-4：b- Hf1 面）

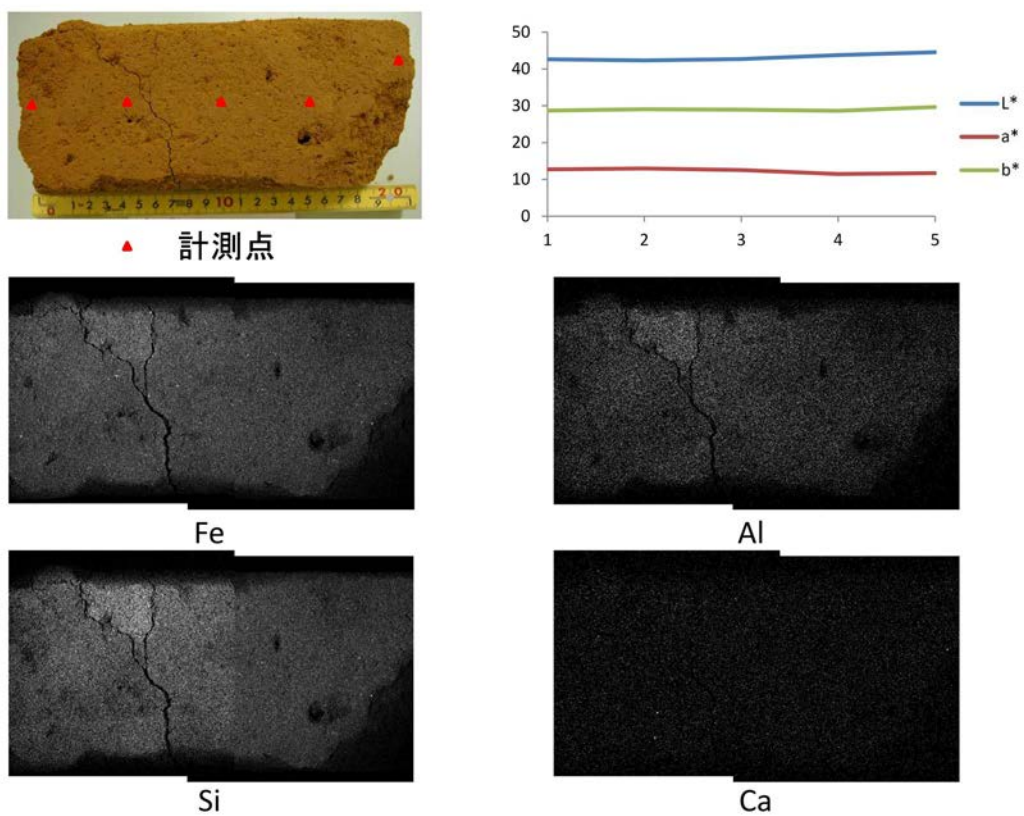


図 2-41 被覆層の元素分布と測色値（試料：MYZ20171219-04-1：b-Mm1 面）

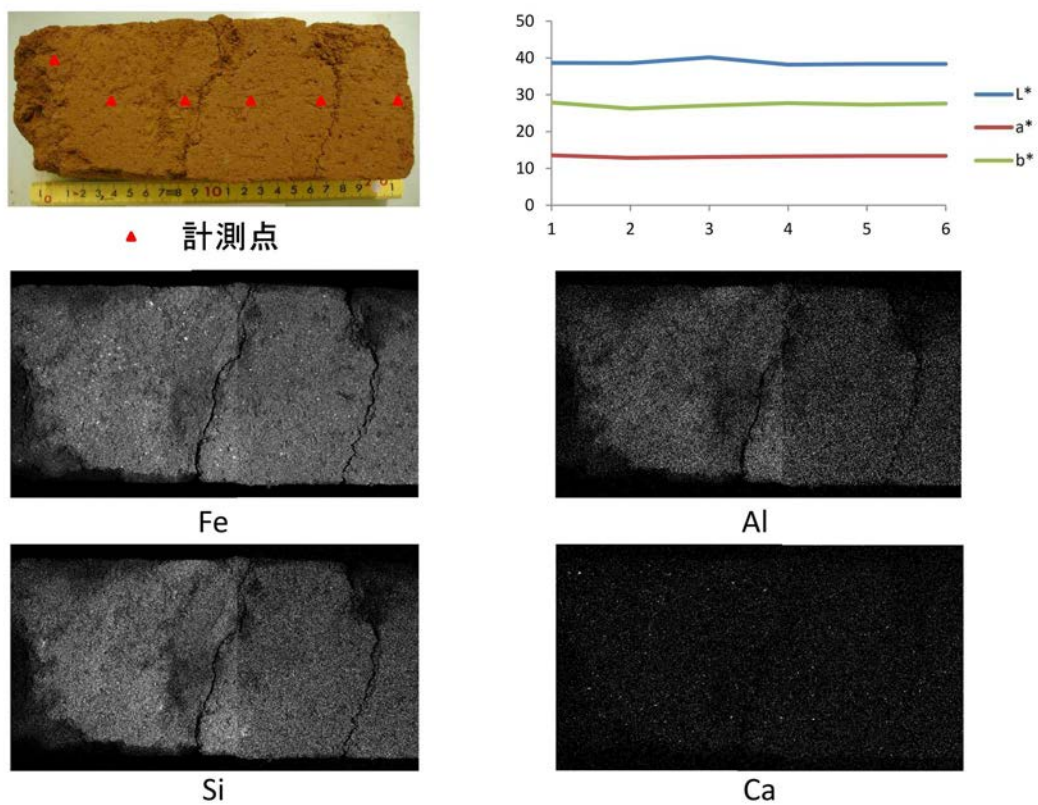


図 2-42 被覆層の元素分布と測色値（試料：MYZ20171219-04-2：b-Mm1 面）

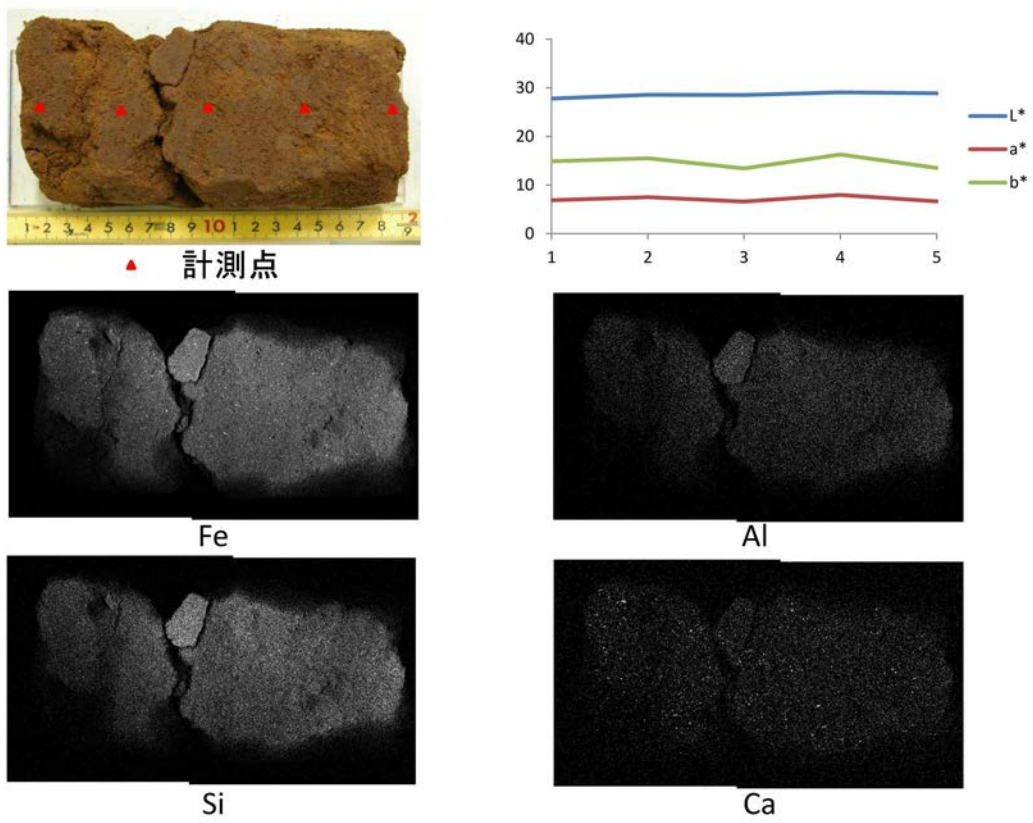


図 2-43 被覆層の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171219-04-3 : b-Mm1 面)

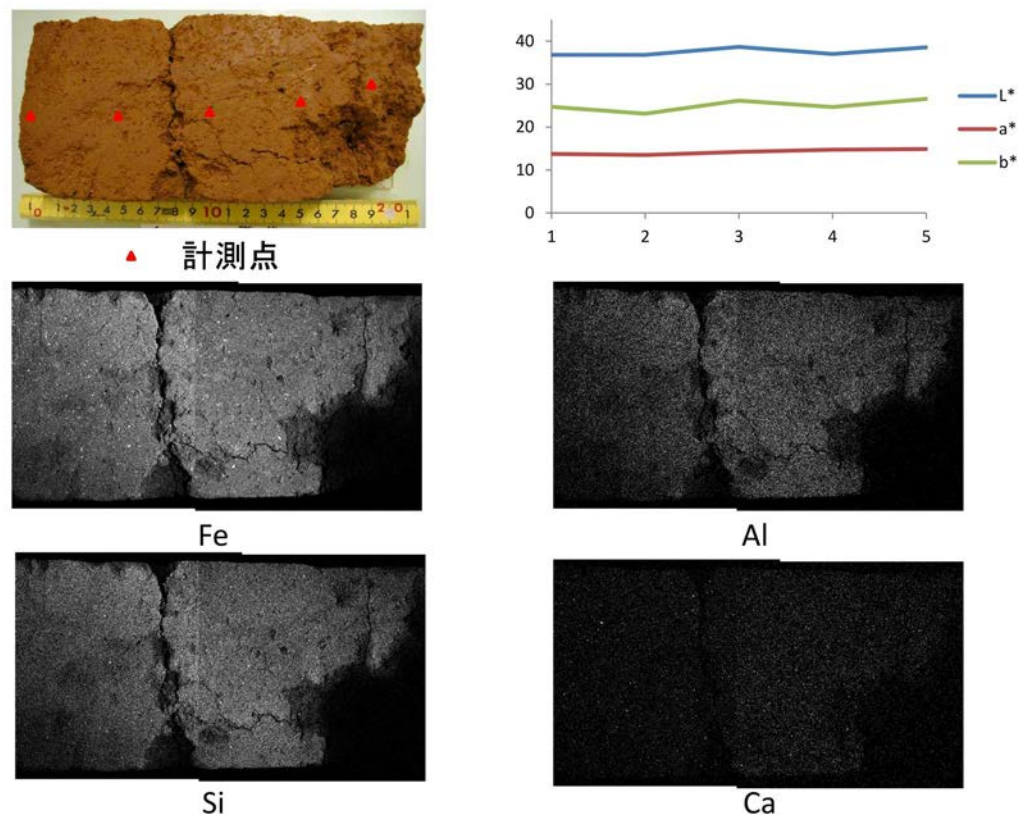


図 2-44 被覆層の元素分布と測色値 (試料 : MYZ20171218-DB10 : d-Mf3 面)

表 2-1 遊離酸化鉄分析結果

検討 範囲	試料名	酸性シュウ酸塩	ジチオナイト	全鉄 (wt.%)
		可溶鉄 (wt.%) (Fe _o)	可溶鉄 (wt.%) (Fe _d)	(Fe _t)
宮崎 地域	MYZ20171221-01①-Fe01	0.13 ±0	3.5 ±0.05	6.14 ±0.01
	MYZ20171221-01①-Fe02	0.17 ±0	3.96 ±0.09	6.36 ±0.03
	MYZ20171221-01①-Fe03	0.49 ±0.02	3.53 ±0.11	6.21 ±0.03
	MYZ20171221-01②-Fe01	0.12 ±0	3.55 ±0.01	5.52 ±0.05
	MYZ20171221-01③-Fe01	0.06 ±0	2.12 ±0.04	3.85 ±0.36
	MYZ20171221-01③-Fe02	0.15 ±0	3.78 ±0.11	6.58 ±0.05
	MYZ20171221-01③-Fe03	0.77 ±0.03	2.01 ±0.01	5.18 ±0.05
	MYZ20171221-01④-Fe01	0.05 ±0	2.75 ±0.05	4.17 ±0.25
	MYZ20171222-01①-Fe01	0.13 ±0	2.99 ±0.19	4.52 ±0.2
	MYZ20171222-01①-Fe02	0.42 ±0.02	2.96 ±0.05	5.2 ±0.13
	MYZ20171222-01①-Fe03	0.67 ±0.03	1.32 ±0.01	3.33 ±0.08
	MYZ20171218-01-Fe01	0.65 ±0.01	2.08 ±0	3.51 ±0.21
	MYZ20171219-04-Fe01	0.17 ±0.01	1.47 ±0.06	3.19 ±0.05
	MYZ20171219-04-Fe02	0.31 ±0.02	2.29 ±0.01	4.57 ±0.11
	MYZ20171219-04-Fe03	0.75 ±0.01	1.87 ±0.01	4.76 ±0
	MYZ20171218-DB10-Fe01	0.26 ±0	3.4 ±0.01	5.53 ±0.01
	MYZ20171121-02	0.24 ±0	1.86 ±0.05	3.6 ±0.01
	MYZ20171214-DA02-Fe01	0.42 ±0.01	0.7 ±0	2.28 ±0.01
	MYZ20180117-01②-Fe01	1.18 ±0	2.21 ±0.01	5.2 ±0.03
	幌延 地域	SN-Fe01	1.35 ±0.05	1.88 ±0.01	4.66 ±0.12
SN-Fe02		0.5 ±0.02	1.13 ±0.01	4.7 ±0.04
SN-Fe03		0.36 ±0.01	1.46 ±0.03	3.72 ±0.1
SN-Fe04		0.29 ±0	1.29 ±0.01	3.44 ±0.03
SN-Fe05		0.25 ±0.01	1.02 ±0.01	2.89 ±0.02
SN-Fe06		0.42 ±0.07	1.86 ±0.01	4.68 ±0.02
SN-Fe07		0.44 ±0	1.79 ±0.01	4.16 ±0.14
SN-Fe08		0.51 ±0.03	2.17 ±0.05	4.75 ±0.23
SN-Fe09		0.51 ±0	2.05 ±0.04	4.84 ±0.01
SN-Fe10		0.49 ±0.02	1.9 ±0.13	4.57 ±0.05
SN-Fe11		0.49 ±0	1.67 ±0.02	4.03 ±0.09

引用文献

古澤 明, 火山ガラスの屈折率測定および形態分類とその統計的な解析に基づくテフラの識別, 地質学雑誌, vol.101, pp.123-133, 1995.

古澤 明, RIPL 法により由布岳火山周辺のテフリックレスから見いだした火山活動, 地質学雑誌, vol.110, pp.19-37, 2004.

日本第四紀学会編, 第四紀試料分析法, 東京大学出版会, 664p., 1993.

日本土壌肥料学会 (監修), 土壌環境分析法, 博友社, 427p., 1997.

Appendix V

わが国の沿岸部の断層運動に関わる主な既往研究 のリスト

表 1 地下構造音波探査（発振関連）：(1)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	調査船	船速 (knot)	対象水深 (m)	探査深度 (海底から) (m)	鉛直分解能 (m)	測線間隔 (m)	測線本数 (本)	探査方式	音源、 機材	発振圧力 (MPa)	発振エネルギー (J)	エアガン容量 (c.u.m.)	周波数域 (Hz)	発振源深度 (m)	船尾と発振源 の距離 (m)	発振間隔 (m)	発振間隔 (sec)
136	光地圏断層	1				<60	10		0.5	18x1	高分解能音波探査									
45	秋田一本荘沖	2	2000-2001			50-150	1000		1	80x8	音波探査									
45	淡路島西部	5	1995				250		1-2	32x6	音波探査									
138	三宅島西方	7		明洋							音波探査									
11	島根・鳥取沖	5	1986								シングルチャンネル (アナログ方式)		2000 W		3500					2
12	津軽海峡周辺	2	1998			<100					シングルチャンネル		36							
129	宮城沖	3			3-5				2-4	21	シングルチャンネル (アナログ方式)		36		2000-5200					0.33
31	東京湾北部	4		天洋		9	50		1-3	19x3	シングルチャンネル		36		1200-8000					0.333
133	伊勢湾	5				<25	50		1-2	14x5										
30	伊勢湾	5		海洋			50		3-5	7x3					3000-8000					0.333
33	大阪湾	5					100		7	4x3	シングルチャンネル		36		1200-8000					0.333
117	伊予灘	5									ソノブローブ (海上電機製SP-3型、 SP-3W型)		36							
118	別府湾	5	1985			30-60	50				ソノブローブ (海上電機製SP-3型)									
79	浦底断層	5	1997							5	シングルチャンネル (アナログ方式)									
79	浦底断層	5	2001						0.2	8	シングルチャンネル (アナログ方式)									
79	浦底断層	5	2005						1	16	シングルチャンネル (アナログ方式)									
95	五日市断層帯	5	2009			10-25	40		0.8-4	15	シングルチャンネル (海上電機製SP-3型)		36				0.9			0.35
96	岩国断層帯	5	2009			10-35	30		3-4	5x5	シングルチャンネル		36				0.95		0.3	
135	サロベツ断層帯	1	2012			15-35	45-55	0.06-0.1	1-2	21x1	シングルチャンネル				2000-16000					

表 1 地下構造音波探査（発振関連）：(2)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	調査船	船速 (knot)	対象水深 (m)	探査深度 (海底から) (m)	鉛直分解能 (m)	測線間隔 (km)	測線本数 (本)	探査方式	音源、 機材	発振圧力 (MPa)	発振エネルギー (J)	エアガン容量 (c.u.m.)	周波数域 (Hz)	発振源深度 (m)	船尾と発振源 の距離 (m)	発振間隔 (m)	発振間隔 (sec)
114	石狩低地 東縁断層帯	1	2012				15				シングルチャンネル	チャープ (古野電気製FE-105型)		10 kW		5500 -8500				
1	津軽半島沖 日本海東縁部	2				140-320	10 -100	0.06-0.1	0.5- 1.5	15x6			3 kW			2000 -16000				1
76	函館湾	2	1998	天洋		5-300	8		0.5- 5.5	23x5			30			3500			0.25	
7	北由利断層	2	2004																	
27	新潟一村上沖	2	2004	天洋 (430 t)	5	20-130	40		0.9- 1.2	21x 45	表層探査装置					1000 -10000	20		0.5	
101	高田平野 断層帯・直江津沖の 断層帯	2	2013			30-50			0.6	8										
41	仙台湾	3	2002										30			3500			0.25	
1	三浦半島 断層帯	4					10 -100	0.06-0.1	0.25- 2	20x5			3 kW			2000 -16000				0.5
30	伊勢湾	5		海洋					0.9- 2.7	41x 11	シングルチャンネル					3500			0.25	
1	深溝断層	5					37.5	0.06-0.1	0.1- 0.5	78x1			3 kW			2000 -16000				0.25
32	広島湾	5	1996	天洋		5-50	40		0.9- 5.6	30x8			30			3000 -8000				0.25
34	福岡湾	5	1996	明洋		20-100			0.9-6	44x5			30			3000 -8000				0.25
48	友ヶ島水道南方 (淡路島南岸)	5	1997			10-110			0.9- 4.5							2000 -7000				0.25-1
49	松山港周辺	5	1997			10-110			0.9							2000 -7000				0.25
51	周防灘	5	1998 -1999	天洋		10-60	15		0.9- 5.6	44x5			30			3500				0.25
42	加賀一福井沖	5	2003			100-350							30						0.5	
44	周防灘	5	2003			15-50	100			1										

表 1 地下構造音波探査（発振関連）：(3)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	調査船	船速 (knot)	対象水深 (m)	探査深度 (海底から) (m)	鉛直分解能 (m)	測線間隔 (m)	測線本数 (本)	探査方式	音源、 機材	発振圧力 (MPa)	発振エネルギー (J)	エアガン容量 (cuin)	周波数域 (Hz)	発振源深度 (m)	船尾と発振源 の距離 (m)	発振間隔 (m)	発振間隔 (sec)
36	能登半島沖	5	2007	昌久丸 (6.98 t)	3-4	5-145		0.06	0.3-2	30x1						2000-16000				
5	山田断層帯・郷村断層帯	5	2011			<250			1-2	10										
79	浦底断層	5	2012						0.05-0.5	46	シングルチャンネル (デジタル方式)									
86	霧多布沖	1	2003, 2004	白嶺丸No.2	8	40-3000	15		3700-8300											
87	浦河沖	1	2004, 2006	白嶺丸No.2	8	<1500														
140	熊野トラフ	6		AUV (うらしま)			40-50													
9	沖縄本島沖	8	2008-2010	白嶺丸No.2																
20	黒松内低地断層帯	2	2010			<65	15			42x2	パラメトリック方式音源 ・シングルチャンネル									
40	函館平野西縁断層帯	2	2011		2-4	<70	15	0.05	0.6-2	32x6	パラメトリック方式音源 ・シングルチャンネル									
107	青森湾西岸断層帯	2	2011	FRP船 (5 t)	2-4	<65	15		0.2-3	42x2	パラメトリック方式音源 ・シングルチャンネル									
104	鴨川低地断層帯	4	2014			6-82	10		0.1-0.3	13	パラメトリック方式音源 ・シングルチャンネル									
103	三浦半島断層帯	4	2014			15-43	8		0.2-0.4	6	パラメトリック方式音源 ・シングルチャンネル									
108	柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯・浦底-柳ヶ瀬山断層帯	5	2011		2-4	5-45	15		0.02-0.5	148	パラメトリック方式音源 ・シングルチャンネル									
109	布引山地東縁断層帯東部	5	2012	うみねこ (19.35 t)	2-4	2-37	30	0.05	0.5-5	19x24	パラメトリック方式音源 ・シングルチャンネル									
110	三方・花折断層帯	5	2013		2-4	12-78	12		0.3-1.5	46x10	パラメトリック方式音源 ・シングルチャンネル									
105	雲仙断層群北部・南東部	8	2009				14	0.05		109x9	パラメトリック方式音源 ・シングルチャンネル									

表 1 地下構造音波探査（発振関連）：(4)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	調査船	船速 (knot)	対象水深 (m)	探査深度 (海底から) (m)	鉛直分解能 (m)	測線間隔 (km)	測線本数 (本)	探査方式	音源、 機材	発振圧力 (MPa)	発振エネルギー (J)	エアガン容量 (cu.in)	周波数域 (Hz)	発振源深度 (m)	船尾と発振源 の距離 (m)	発振間隔 (m)	発振間隔 (sec)
106	布田川一日奈久 断層帯 中部・南西部	8	2010		2-4	10-55	20	0.05	0.25- 0.1	195	パラメトリック方式音源 ・シングルチャンネル	サブボトムプロファイラー (Innomar社製SES2000)								
131	柏崎沖	2				<1000			1-4	33x8	シングルチャンネル	スパーカー							3-12	
128	下北半島沖	2	1977 -1978			<850			3-6	46x 12	シングルチャンネル	スパーカー								
19	積丹半島沖	2	1980			<1000			4	13x 10	シングルチャンネル	スパーカー								
19	積丹半島沖	2	1982			100-600			1-10	30x1	シングルチャンネル	スパーカー								
12	津軽海峡周辺	2	1982 -1983			<100					シングルチャンネル	スパーカー	500-800							
12	津軽海峡周辺	2	1982 -1984			<400					シングルチャンネル	スパーカー	2000-4000							
12	津軽海峡周辺	2	1984 -1986			<400					シングルチャンネル	スパーカー	200-400							
76	函館湾	2	1998	天洋		20-300	80		0.9- 5.5	23x5		スパーカー	1000		200 -1000			1		
27	新潟一村上沖	2	2004	天洋 (430 t)	5	20-130	80		0.9- 1.2	21x 45		スパーカー (AAE社製CSP6000)	1000		50 -300	20			1	
129	宮城沖	3	1985		4-5	20-225			2-8	19x 11	シングルチャンネル (アナログ方式)	スパーカー	2500		100 -1000				2.133	
129	宮城沖	3	1985		4-5	20-225			2-8	8	シングルチャンネル (アナログ方式)	スパーカー	340		100 -800				1.064	
41	仙台湾	3	2002									スパーカー	1000		200 -1000			1.0		
31	東京湾北部	4		天洋		10	90		1-3	19x3	シングルチャンネル	スパーカー	200		60 -700				1.2	
133	伊勢湾	5				<25	100 -200		1-2	14x5	アナログ方式	スパーカー								
30	伊勢湾	5		海洋		20-30	180		0.9- 2.7	41x 11	シングルチャンネル	スパーカー	1000 (5000 V)							0.5
30	伊勢湾	5		海洋					3-5	7x3		スパーカー	200							1
1	深溝断層	5					135		0.1- 0.5	61x1	シングルチャンネル	スパーカー (日本電気製NE-19C)	200							0.5

表 1 地下構造音波探査（発振関連）：(5)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	調査船	船速 (knot)	対象水深 (m)	探査深度 (海底から) (m)	鉛直分解能 (m)	測線間隔 (m)	測線本数 (本)	探査方式	音源、 機材	発振圧力 (MPa)	発振エネルギー (J)	エアガン容量 (cu in)	周波数域 (Hz)	発振源深度 (m)	船尾と発振源 の距離 (m)	発振間隔 (m)	発振間隔 (sec)
21	能登半島沖	5				20-250			<4	26x16	シングルチャンネル	スーパーカー		2450						
21	能登半島沖	5				10-100			1-4	31x8	シングルチャンネル	スーパーカー		360						
33	大阪湾	5					100		7	4x3	シングルチャンネル	スーパーカー		200		60 -700				1.2
117	伊予灘	5										スーパーカー (日本電気製NE-19C , NE-17D, NE19C2)	200, 700, 3600							
54	若狭湾	5	1978		3				1.2	9x1	シングルチャンネル (アナログ方式)	スーパーカー (日本電気製NE-19C)	200							0.532
79	浦底断層	5	1979						1	6	シングルチャンネル (アナログ方式)	スーパーカー								
65	香岐水道	5	1979 -1981								シングルチャンネル	スーパーカー								
11	島根沖	5	1981								シングルチャンネル (アナログ方式)	スーパーカー		700		100 -1000				1.6
54	若狭湾	5	1982 -1983		3-5						シングルチャンネル (アナログ方式)	スーパーカー (日本電気製NE-19C2)		600						1.064
54	若狭湾	5	1982 -1983		3-4						シングルチャンネル (アナログ方式)	スーパーカー (日本電気製NE-19C)		300						1.064
63	糸魚川周辺	5	1988 -1989	天洋								スーパーカー		5000						
11	出雲日御崎	5	1990								シングルチャンネル (アナログ方式)	スーパーカー		200		100 -1000				
11	美保湾	5	1991								シングルチャンネル (アナログ方式)	スーパーカー		700		100 -1000				1.33
28	大阪湾西部	5	1995	海洋 明洋		20-40	120 -200		0.5- 0.9	45x4		スーパーカー		1000						1
32	広島湾	5	1996	天洋		5-50	150		0.9- 5.6	30x8		スーパーカー		1000		100 -500				1
51	周防灘	5	1996	天洋		10-60	170		0.9- 5.6	44x5		スーパーカー		1000		200 -1000				1
34	福岡湾	5	1996	明洋		20-100	160		0.9-6	44x5		スーパーカー		1000		100 -500				1

表 1 地下構造音波探査（発振関連）：(6)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	調査船	船速 (knot)	対象水深 (m)	探査深度 (海底から) (m)	鉛直分解能 (m)	測線間隔 (m)	測線本数 (本)	探査方式	音源、 機材	発振圧力 (MPa)	発振エネルギー (J)	エアガン容量 (cuin)	周波数域 (Hz)	発振源深度 (m)	船尾と発振源 の距離 (m)	発振間隔 (m)	発振間隔 (sec)	
79	浦底断層	5	1997							4	シングルチャンネル (アナログ方式)	スパーカー									
48	友ヶ島水道南方 (波路島南岸)	5	1997			10-110	150		0.9- 4.5			スパーカー	1000			200 -1000				1	
49	松山港周辺	5	1997			10-110	130		0.9			スパーカー	1000			200 -1000				1	
42	加賀一福井沖	5	2003			100-350	500					スパーカー	1500						2.0		
10	御前崎周辺	6	1985 -1986		4-4.5	10-2500	400 -800		4	17× 11	シングルチャンネル (アナログ方式)	スパーカー	2300-7200							1.6, 3.2, 4.28, 5.35	
10	御前崎周辺	6	1985 -1986		3-4	10-500	100 -200		2	17×9	シングルチャンネル (アナログ方式)	スパーカー	360							0.13, 1.07	
125	島原沖	8	1991	明洋		<45			0.37- 1.8			スパーカー	1000							5	
66	甕海峡周辺	8	2004 -2007			<600			2-8	30× 10	シングルチャンネル	スパーカー									
6	サロベツ 断層帯	1	2012		3	10-150	150 -200		1.8- 3.9	14×1	マルチチャンネル	ブーマー	200			500 -5000	0.3	25	2.5		
114	石狩低地東縁 断層帯	1	2012			90			2.5	9×11	マルチチャンネル	ブーマー (Applied Acoustic Engineering社製AA200)	200								
100	石狩低地東縁 断層帯	1	2012			90-200	150		2.5	4×11	マルチチャンネル	ブーマー	300								
4	北海道留萌沖	2			3	<50	300		0.7- 2.3	6×2	マルチチャンネル	ブーマー	200			500 -5000	0.5	25	2.5		
131	柏崎沖	2				<200			1.5- 2.5	11	マルチチャンネル	ブーマー	300							1.25	
76	函館湾	2	1998	天洋		5-20	15		0.5	24×2		ユニブーム	300			0.5-2			0.5		
12	津軽海峡周辺	2	1998			<100					シングルチャンネル	ブーマー	200								
7	北由利断層	2	2004									ブーマー	200								
98	新潟沖	2	2008 -2009			10-150	100	1	1.8- 3.6	43×2	マルチチャンネル	ブーマー (Applied Acoustic Engineering社製)				400 -5000		20		1.25	

表 1 地下構造音波探査（発振関連）：(7)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	調査船	船速 (knot)	対象水深 (m)	探査深度 (海底から) (m)	鉛直分解能 (m)	測線間隔 (m)	測線本数 (本)	探査方式	音源、 機材	発振圧力 (MPa)	発振エネルギー (J)	エアガン容量 (cu in)	周波数域 (Hz)	発振源深度 (m)	船尾と発振源 の距離 (m)	発振間隔 (m)	発振間隔 (sec)
20	黒松内低地 断層帯	2	2010			35-78	120		2-5	5×2	マルチチャンネル	ブーマー (Applied Acoustic Engineering社製AA301)		300				22		1
20	黒松内低地 断層帯	2	2010			<55	120		1-1.5	16	シングルチャンネル	ブーマー (Applied Acoustic Engineering社製AA301)		300				22		0.35
12	津軽海峡周辺	2	2010			<100					マルチチャンネル	ブーマー		300						
40	函館平野 西縁断層帯	2	2011			5-190	150		1-5	17× 13	マルチチャンネル	ブーマー (Applied Acoustic Engineering社製AA300)		200		300 -3800			1.25	
107	青森湾西岸 断層帯	2	2011	FRP船 (5 t)	3-4	5-45	15 -120		4-5	2×1	マルチチャンネル	ブーマー (Applied Acoustic Engineering社製AA301)		300				30		1
107	青森湾 西岸断層帯	2	2011	FRP船 (5 t)	3-4	5-170	15 -120		0.5-5	22×2	シングルチャンネル	ブーマー (Applied Acoustic Engineering社製AA301)		300				30		0.35
19	積丹半島沖	2	2012			<600			1.5-3	10×3	マルチチャンネル	ブーマー								
12	平館海峡周辺	2	2013			<80					マルチチャンネル	ブーマー		200						
101	高田平野断層帯 ・直江津沖の断層帯	2	2013		3	5-122	100 -200		0.7- 1.5	28×1	マルチチャンネル	ブーマー (Applied Acoustic Engineering社製)		200		6000 -7000	0.3	25	2.5	
129	宮城沖	3			2.5-3					1	マルチチャンネル (デジタル方式)	ブーマー		200		300 -1800			1.25	
129	宮城沖	3	2007			25-100				2×1		ユニブーム								
78	日立・東海沖	3	2007 -2008		3	<35			1		マルチチャンネル	ブーマー		200, 300		300 -1500			1.25	
78	大洗沖	3	2008		3	<30			1	13×7	マルチチャンネル	ブーマー		200		300 -1800			2.5	
18	日立・東海沖	3	2008			<100				22	マルチチャンネル	ブーマー							2.5	
14	房総半島東部沿岸	4	2014								マルチチャンネル	ブーマー		300					3.125	

表 1 地下構造音波探査（発振関連）：(8)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	調査船	船速 (knot)	対象水深 (m)	探査深度 (海底から) (m)	鉛直分解能 (m)	測線間隔 (m)	測線本数 (本)	探査方式	音源、 機材	発振圧力 (MPa)	発振エネルギー (J)	エアガン容量 (cu.in)	周波数域 (Hz)	発振源深度 (m)	船尾と発振源 の距離 (m)	発振間隔 (m)	発振間隔 (sec)
104	鴨川低地断層帯	4	2014		3	10-250	100 -200		0.8- 1.3	18x5	マルチチャンネル	ブーマー (Applied Acoustic Engineering社製)		200		6000 -7000	0.3	30	2.5	
103	三浦半島断層帯	4	2014		3	20-220	100 -200		0.5-1	12x4	マルチチャンネル	ブーマー (Applied Acoustic Engineering社製)		200		6000 -7000	0.3	30	2.5	
21	能登半島沖	5				<200			0.7-4	28x 16	マルチチャンネル	ブーマー		200						
23	三方断層帯	5			3-4						マルチチャンネル	ブーマー		200			0.3		1.25	
117	伊予灘	5										ジオパルス (電磁誘導) 5813B, 5420S, AA200		200, 280						
54	若狭湾	5	1982 -1983		3						シングルチャンネル (アナログ方式)	ユニブーム		300						0.6
79	浦底断層	5	1998						2	6	シングルチャンネル (アナログ方式)	ブーマー								
123	柳ヶ瀬・関ヶ原 断層帯主部 北方延長域	5	2003		3-4				0.5	8	シングルチャンネル	ブーマー		100			0.3		0.625	
123	柳ヶ瀬・関ヶ原 断層帯主部 北方延長域	5	2003		3-4				1	18	マルチチャンネル	ブーマー		200			0.3		1.25	
79	浦底断層	5	2005						0.5-1	24	マルチチャンネル ショートタイプ (デジタル方式)	ブーマー								
54	若狭湾	5	2006 -2008		2.5-3.5						マルチチャンネル ショートタイプ (デジタル方式)	ブーマー (ジオパルス)		280			0.3		1.25	
22	能登半島沖	5	2007	第5豊満丸	4	20-170	150		1.5-3	15x1	マルチチャンネル	ブーマー (Applied Acoustic Engineering社製AA300)							1.25	
11	島根沖	5	2007								マルチチャンネル ショートタイプ (デジタル方式)	ブーマー (ジオパルス)		280		400 -14000			1.25	
97	能登半島沖	5	2008	大伸丸 仙東丸		20-170	150	1	1.8	40x2	マルチチャンネル	ブーマー (Applied Acoustic Engineering社製AA300)				400 -5000		20	1.25	

表 1 地下構造音波探査（発振関連）：(9)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	調査船	船速 (km)	対象水深 (m)	探査深度 (海底から) (m)	鉛直分解能 (m)	測線間隔 (m)	測線本数 (本)	探査方式	音源、 機材	発振圧力 (MPa)	発振エネルギー (J)	エアガン容量 (m ³)	周波数域 (Hz)	発振源深度 (m)	船尾と発振源 の距離 (m)	発振間隔 (m)	発振間隔 (sec)
16	敦賀湾	5	2008			20-50	100		2	3x1	マルチチャンネル	ブーマー		300					2	
17	若狭湾	5	2008			20-150	250		1.5-7	9x4	マルチチャンネル	ブーマー		300					2	1
11	島根・美保関沖	5	2008								マルチチャンネル (デジタル方式)	ブーマー		300		50 -10000			1.6-1.8	
65	香岐水道	5	2008								ブーマー									
95	五日市断層帯	5	2009			10-30	30-75		0.6-8	9	マルチチャンネル ショートタイプ	ブーマー (Applied Acoustic Engineering社製)		300			0.3			1.0
96	岩国断層帯	5	2009			20-30	30		4-8	4x2	マルチチャンネル	ブーマー		300			0.3		1.0	
2	菊川断層帯	5	2009				70-80		6	15	マルチチャンネル	ブーマー (Applied Acoustic Engineering社製)								
3	西山断層帯	5	2009				50		2.5	16	マルチチャンネル	ブーマー (Applied Acoustic Engineering社製)								
37	福井平野 東縁断層帯	5	2010		3		60		1-2	11x1	マルチチャンネル	ブーマー (Applied Acoustic Engineering社製)		200		500 -5000	0.5	25	2.5	
11	島根沖	5	2010								マルチチャンネル ショートタイプ (デジタル方式)	ブーマー		300		400 -14000			1.25	
99	福岡沖	5	2010	きりしま		<70	70		2	12x 15	マルチチャンネル	ブーマー (Applied Acoustic Engineering社製)		200					2.5	
99	福岡沖	5	2010	あきづき		<70	70		2	12x 15	マルチチャンネル	ブーマー (Applied Acoustic Engineering社製)		200					1.56	
5	山田断層帯 ・郷村断層帯	5	2011		3	<250			1-2	20x1	マルチチャンネル	ブーマー (Applied Acoustic Engineering社製)		200		500 -5000	0.5	19.5-20	2.5	
111	柳ヶ瀬・関ヶ原 断層帯主部 北方延長域	5	2012	シーホース3	3-4	10-207	210		1-3	18	マルチチャンネル	ブーマー (Applied Acoustic Engineering社製AA300)		200			0.3	25	1.25	
111	柳ヶ瀬・関ヶ原 断層帯主部 北方延長域	5	2012	シーホース3	3-4	50-90	80		0.5	8	シングルチャンネル	ブーマー (Applied Acoustic Engineering社製AA300)		100			0.3	25	0.625	

表 1 地下構造音波探査（発振関連）：(10)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	調査船	船速 (kn)	対象水深 (m)	（探査深度 海底から） (m)	鉛直分解能 (m)	測線間隔 (m)	測線本数 (本)	探査方式	音源、 機材	発振圧力 (MPa)	発振エネルギー (J)	エアガン容量 (cu in)	周波数域 (Hz)	発振源深度 (m)	船尾と発振源 の距離 (m)	発振間隔 (m)	発振間隔 (sec)
54	若狭湾	5	2012		2.5-3.5				0.26	6x1	マルチチャンネル ショートタイプ (デジタル方式)	ブーマー		200			0.3		1.25	
79	浦底断層	5	2012						0.5	3	マルチチャンネル ショートタイプ (デジタル方式)	ブーマー								
110	三方・花折断層帯	5	2013	みはま丸	3-4	20-60	60		0.2-1	14x5	マルチチャンネル	ブーマー (Applied Acoustic Engineering社製AA300)		200		700 -2000	0.3	25	1.25	
110	三方・花折断層帯	5	2013	みはま丸	3-4	20-60	60		0.2	2	マルチチャンネル (海上ボーリング用)	ブーマー (Applied Acoustic Engineering社製AA300)		50-100		700 -2000	0.3	25	0.625	
10	御前崎周辺	6	2009		3-4	10-800	450 -1125		1.5-5	11x4	マルチチャンネル ショートタイプ (デジタル方式)	ブーマー		300		200 -1500			2.5	
77	駿河湾	6	2010	北斗	3-4	10-40			0.01	34	高分解能三次元	ブーマー		200		300 -1500		17.2	1.25	
102	駿河湾	6	2013			<200	300		0.7-2	29x8		ブーマー (AAE社製CAT200)		200		200 -1500			1.25	
102	駿河湾	6	2013			200-500	300		0.7-2	29x8		ブーマー (AAE社製CAT200)		300		200 -1500			2.5	
105	雲仙断層群 北部・南東部	8	2009		3-4	10-45	80		2	21x4	マルチチャンネル ショートタイプ	ブーマー (電磁誘導振動素子1個)		200		500 -2000	0.3		1.25	
106	布田川一日奈久 断層帯 中部・南西部	8	2010		3	20-70	150		0.3-3	37x 15	マルチチャンネル	ブーマー (Applied Acoustic Engineering社製AA301)		300		300 -3800			1.5	1
6	サロベツ断層帯	1	2012		3	10-150	350 -500		2.8- 9.3	7	シングルチャンネル	ウォーターガン	13.2		15	40 -3000	2	50	3	1.5
4	北海道留萌沖	2			3	<50	300		0.7- 2.3	6x2	シングルチャンネル	ウォーターガン	13.2		15	40 -3000	2	20	3	1.5

表 1 地下構造音波探査（発振関連）：(11)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	調査船	船速 (km/h)	対象水深 (m)	探査深度 (海底から) (m)	鉛直分解能 (m)	測線間隔 (km)	測線本数 (本)	探査方式	音源、 機材	発振圧力 (MPa)	発振エネルギー (J)	エアガン容量 (cm ³)	周波数域 (Hz)	発振源深度 (m)	船尾と発振源 の距離 (m)	発振間隔 (s)	発振間隔 (sec)
131	柏崎沖	2				50-1000			1.5-6	18x4	シングルチャンネル	ウォーターガン			15				3-4	
131	柏崎沖	2				<500			2-3	7x3	マルチチャンネル	ウォーターガン			15				12.5	
131	柏崎沖	2									マルチチャンネル	ウォーターガン			400				10	
1	津軽半島沖 日本海東縁部	2				140-320			0.5- 1.5	15x6	シングルチャンネル	ウォーターガン			15					1.1-1.5
19	積丹半島沖	2	1982			200-3400			2-8	31x1	シングルチャンネル	ウォーターガン								
12	津軽海峡周辺	2	1998			<400					シングルチャンネル	ウォーターガン		2800						
12	津軽海峡周辺	2	1998			<100				1	定置式マルチチャンネル	ウォーターガン		2800						
19	積丹半島沖	2	2006			<120				1	5x3	マルチチャンネル	ブーマー+ウォーターガン							
128	下北半島沖	2	2008						5	2	マルチチャンネル ショートタイプ	ウォーターガン								
19	積丹半島沖	2	2012			<200			2-4	6x6	マルチチャンネル	ウォーターガン								
129	宮城沖	3	1994		3-4	20-100			2-4	10x2	シングルチャンネル (アナログ方式)	ウォーターガン		3250		70 -800				1.6
129	宮城沖	3	2007		2.5-3	25-100				2x1	マルチチャンネル (デジタル方式)	ウォーターガン		4000		50 -300			2.5	
129	宮城沖	3	2007		3.5	125-225			3-25	5x1	マルチチャンネル (デジタル方式)	ウォーターガン		4000		20 -100			12.5	
78	日立・東海沖	3	2008		3	<550			2-4	40x 17	マルチチャンネル	ウォーターガン	12.7	3000	15	40 -350			2.5, 3.75	
78	日立・東海沖	3	2008		3					1	マルチチャンネル	ウォーターガン	11.8	3000	15	40 -200			5.0	
18	日立・東海沖	3	2008			<20				9	マルチチャンネル	ウォーターガン			15				5	
18	日立・東海沖	3	2008			20-100				12	マルチチャンネル	ウォーターガン			15				12.5	

表 1 地下構造音波探査（発振関連）：(12)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	調査船	船速 (knot)	対象水深 (m)	探査深度 (海底から) (m)	鉛直分解能 (m)	測線間隔 (m)	測線本数 (本)	探査方式	音源、 機材	発振圧力 (MPa)	発振エネルギー (J)	エアガン容量 (cu.in)	周波数域 (Hz)	発振源深度 (m)	船尾と発振源 の距離 (m)	発振間隔 (m)	発振間隔 (sec)
1	三浦半島断層帯	4							0.25- 2	24x5	シングルチャンネル	ウォーターガン			15					1.5
1	三浦半島断層帯	4								1					15				5	
1	三浦半島断層帯	4								1	マルチチャンネル	ウォーターガン			15				10	
141	房総沖	4	2007			20-250			5-10	5x1		ウォーターガン	13.2		15		2		5	
117	伊予灘	5										ウォーターガン (Seismic System社S15)		4000						
11	余部崎	5	1992								シングルチャンネル (アナログ方式)	ウォーターガン	15	4000	15	50 -2500				2
79	浦底断層	5	1998						4	5	シングルチャンネル (アナログ方式)	ウォーターガン								
54	若狭湾	5	1998		3-4						シングルチャンネル (アナログ方式)	ウォーターガン	11.8 -12.7	2800	15					1.6
11	鳥取沖	5	1999								シングルチャンネル (アナログ方式)	ウォーターガン	13	3500	15	50 -2500				1.6
79	浦底断層	5	2005							6	定置式マルチチャンネル (デジタル方式)	ウォーターガン								
79	浦底断層	5	2005						1	7	マルチチャンネル (デジタル方式)	ウォーターガン								
79	浦底断層	5	2005						1	6	マルチチャンネル ショートタイプ (デジタル方式)	ウォーターガン								
79	浦底断層	5	2005						1	6	シングルチャンネル (デジタル方式)	ウォーターガン								
11	島根沖	5	2007								マルチチャンネル ショートタイプ (デジタル方式)	ウォーターガン	13	4000	15	50 -2500			2.5	
17	若狭湾	5	2008			<120	300		1.5-4	4x3	マルチチャンネル	ウォーターガン	13.7		10				6.25	
11	島根・美保関沖	5	2008								マルチチャンネル (デジタル方式)	ウォーターガン	14	3500	15	50 -2500			9.375	
65	壱岐水道	5	2008			<100			2-10	19x 21	シングルチャンネル	ウォーターガン								
65	壱岐水道	5	2008			10-170				15	マルチチャンネル	ウォーターガン +GIガン								

表 1 地下構造音波探査（発振関連）：(13)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	調査船	船速 (km/h)	対象水深 (m)	(探査深度 海底から) (m)	鉛直分解能 (m)	測線間隔 (km)	測線本数 (本)	探査方式	音源、 機材	発振圧力 (MPa)	発振エネルギー (J)	エアガン容量 (cuin)	周波数域 (Hz)	発振源深度 (m)	船尾と発振源 の距離 (m)	発振間隔 (m)	発振間隔 (sec)
2	菊川断層帯	5	2009				350 -400		2-3	23×1	シングルチャンネル	ウォーターガン (Sercel 社製S-15)								
3	西山断層帯	5	2009				300		2-3	22×2	シングルチャンネル	ウォーターガン (Sercel 社製S-15)								
11	島根沖	5	2010								マルチチャンネル ショートタイプ (デジタル方式)	ウォーターガン	13	4000	15	50 -2500			2.5	
67	福岡沖	5	2010	挑洋丸		<70	350			6×1		ウォーターガン (Sercel 社製S-15)			15				12.5	
79	浦底断層	5	2012							1	マルチチャンネル ショートタイプ (デジタル方式)	ウォーターガン								
102	駿河湾	6	2013			500-1300	300		2			ウォーターガン (Sercel 社製S-15)	13.7		15	50 -1000			6.25	
66	甌海峡周辺	8	2004 -2007			<600			2-8	30× 10	シングルチャンネル	ウォーターガン								
66	甌海峡周辺	8	2004 -2007				150				マルチチャンネル	ウォーターガン								
89	十勝沖	1	2002, 2004	白嶺丸No.2		<3000				3.7- 5.6		GIガン			250, 105					
58	十勝沖	1	2003	かいいい							マルチチャンネル	エアガン			12200					
86	霧多布沖	1	2003 -2004	白嶺丸No.2	8	40-3000				3.7- 8.3		GIガン			250, 105				25	6
87	浦河沖	1	2004, 2006	白嶺丸No.2	8	<1500				5-7		GIガン (Sercel 社製)			355	20 -100				6
1	津軽半島沖 日本海東縁部	2				140-320				0.5- 1.5	15×6	マルチチャンネル	エアガン						12.5	
131	柏崎沖	2										エアガン			7800					
131	柏崎沖	2				50-1500				2.5- 20	22×3	マルチチャンネル	エアガン		1500				25	
131	柏崎沖	2				0-1000	15000			2	海陸接合反射法 地震探査	エアガン +ハイプレーター							25-1000	
12	津軽海峡周辺	2	1983			<400						屈折法地震探査	エアガン		500000					
12	津軽海峡周辺	2	1984			<400						マルチチャンネル	エアガン		25000					

表 1 地下構造音波探査（発振関連）：(14)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	調査船	船速 (knot)	対象水深 (m)	探査深度 (海底から) (m)	鉛直分解能 (m)	測線間隔 (km)	測線本数 (本)	探査方式	音源、 機材	発振圧力 (MPa)	発振エネルギー (J)	エアガン容量 (cal/m)	周波数域 (Hz)	発振源深度 (m)	船尾と発振源 の距離 (m)	発振間隔 (m)	発振間隔 (sec)
115	新潟海陸境界部（海域）	2	1990			0-50	3000			1×1		エアガン			500				25	
115	新潟海陸境界部（陸域）	2	1990				3000			1×1		ダイナマイト 10.5 kg							25	
124	奥尻沖	2	1994	明洋		200-3800			6.4		シングルチャンネル	エアガン								
12	津軽海峡周辺	2	1994			<400					マルチチャンネル	エアガン	34000							
128	下北半島沖	2	1995, 2008			<1000			10-35	6×3	マルチチャンネル	ウォーターガン +GIガン								
19	積丹半島沖	2	1997			50-2500			2-8	38× 14		チャーボンナー +GIガン								
12	津軽海峡周辺	2	1998			<400					マルチチャンネル	エアガン	150000							
12	津軽海峡周辺	2	1998			<100					定置式マルチ チャンネル	エアガン	25000 -110000							
19	積丹半島沖	2	2001			2600-3400			3-25	16	マルチチャンネル	エアガン								
84	新潟沖	2	2007	かいいい		400-2500	6000			3	マルチチャンネル	エアガン	13.8		12000				50	
15	柏崎沖	2	2008	資源	3-5	90-970	200 -6000		150- 300	22		エアガン	17.2		3090					
69	新潟沖	2	2008	第八阿蘇丸 (268 t)		<62				1	海陸接合地震探査	エアガン（海域） +バイプロサイス（陸域）	13.8		1500	4, 8		12.5, 25, 50		
39	新潟海陸境界部（海域）	2	2009			0-30	500 -1000			1		エアガン			80				5	
39	新潟海陸境界部（陸域）	2	2009				500 -1000			1		バイブレータ (IVI社製ENVIRO-VIBE)				10-80			5	
70	新潟沖	2	2009							1	海陸接合地震探査	エアガン (BOLT 1500LL+1900LLX)	13.8		3020		8, 16		25, 50	
70	新潟沖	2	2009							1	海陸接合地震探査	エアガン (BOLT 2800LLX)	13.8		480		2, 6		25, 50	

表 1 地下構造音波探査（発振関連）：(15)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	調査船	船速 (kn)	対象水深 (m)	(探査深度 海底から) (m)	鉛直分解能 (m)	測線間隔 (m)	測線本数 (本)	探査方式	音源、 機材	発振圧力 (MPa)	発振エネルギー (J)	エアガン容量 (cuin)	周波数域 (Hz)	発振源深度 (m)	船尾と発振源 の距離 (m)	発振間隔 (m)	発振間隔 (sec)
83	日本海 東部（東北沖）	2	2009 -2012	かいらい	3.5-5	<3000	15000				マルチチャンネル	エアガン（アレイ）	13.8		7800			10	50	20-30
83	日本海 東部（東北沖）	2	2009 -2012	かいはう							マルチチャンネル	エアガン（アレイ）			12000			10	200	
12	津軽海峡周辺	2	2010			<200					マルチチャンネル	エアガン		110000, 300000						
12	津軽海峡周辺	2	2010			<100				2	定置式マルチ チャンネル	エアガン		16000, 32000						
71	新潟沖	2	2010	かいはう (1292 t)						1	海陸接合地震探査	エアガン (BOLT 1500LL+1900LLX)	13.8		3020		8, 16			
71	新潟沖	2	2010	旭丸 (6 t)						1	海陸接合地震探査	エアガン (BOLT 600B)	13.8		60		2			
71	新潟沖	2	2010	かいらい						11	マルチチャンネル	エアガン (BOLT Annular Port Airgun 32基)	13.8		7800		10		50, 200	
72	新潟沖	2	2011	かいはう						1	海陸接合地震探査	エアガン (BOLT 1500LL+1900LLX)	13.8		3020		8		25	
82	日本海 東部（東北沖）	2	2011 -2012	かいらい	3.5-5	<3000	15000				マルチチャンネル	エアガン（アレイ）	13.8		7800			10	50	20-30
19	積丹半島沖	2	2012			<1000			2-7	15x5	マルチチャンネル	エアガン								
128	下北半島沖	2	2012			<545				1		エアガン（海域） +パイプロサイズ（陸域）							25	
128	下北半島沖	2	2012 -2013			<1000			7-20	11x3	マルチチャンネル	エアガン								
12	平館海峡周辺	2	2013			<80					マルチチャンネル	エアガン		100000						
128	下北半島沖	2	2016			<540				4		エアガン（海域） +パイプロサイズ（陸域） +火薬1 kg（陸域）							12.5	
128	下北半島沖	2	2016			<10				2		エアガン（海域） +油圧インパクト（陸域） +火薬1 kg（陸域）							5.0	
128	下北半島沖	2	2016			20-105			1-2	4x4		エアガン							12.5, 25.0	

表 1 地下構造音波探査（発振関連）：(16)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	調査船	船速 (knot)	対象水深 (m)	探査深度 (海底から) (m)	鉛直分解能 (m)	測線間隔 (m)	測線本数 (本)	探査方式	音源、 機材	発振圧力 (MPa)	発振エネルギー (J)	エアガン容量 (cm ³)	周波数域 (Hz)	発振源深度 (m)	船尾と発振源 の距離 (m)	発振間隔 (m)	発振間隔 (sec)
78	下北～東海沖	2-3	1977								マルチチャンネル	エアガン（アレイ）	13.8	620000	1570	8-64			50	
78	北上～阿武隈沖	3	1970								マルチチャンネル	エアガン（アレイ）	13.8	230000	590-600	8-160			100	
78	鹿島灘	3	1980		10						シングルチャンネル （アナログ方式）	エアガン（波形整形器付）	10.5	40000	120	50 -160				8
78	いわき塩谷崎沖	3	1981 -1982		10						シングルチャンネル （アナログ方式）	エアガン（波形整形器付）	10.5	80000	240	60 -160				6
78	常磐－鹿島沖	3	1984								マルチチャンネル	エアガン（アレイ）	13.8	840000	2090	64			25	
78	南三陸－鹿島沖	3	1986								マルチチャンネル	エアガン（アレイ）	13.8	1300000	3223	64			25	
78	常磐－鹿島沖	3	1994								マルチチャンネル	エアガン（アレイ）	13.8	610000	1500	8-75			25	
129	宮城沖	3	1994		3-4	20-100			3-8	6x2	マルチチャンネル （デジタル方式）	エアガン		34600		10 -100				5
53	宮城沖	3	1998 -2002						9.26		シングルチャンネル	エアガン（BOLT 1500LL）			350					
129	宮城沖	3	2007		3.5	125-225			3-25	5x1	マルチチャンネル （デジタル方式）	GIガン		34000		20 -100			12.5	
78	日立・東海沖	3	2008		3						マルチチャンネル	エアガン（波形整形器付）	11.3	100000	500	10 -150			25	
78	日立・東海沖	3	2008		3					3	マルチチャンネル	エアガン（波形整形器付）	10.8	90000	460	15 -120			25	
18	日立・東海沖	3	2008			15-80				5	マルチチャンネル	エアガン			460				25	
18	日立・東海沖	3	2008			80-500				1	マルチチャンネル	エアガン			460				25	
78	関東沖	3-4	1971								マルチチャンネル	エアガン（アレイ）	13.8	250000	630-650	92			100	
31	東京湾北部	4		天洋		9	2000		1-3	19x3	マルチチャンネル	エアガン（GIガン）	13.79		15					
29	東京湾北部	4					5000		0.25	33	三次元マルチ チャンネル	エアガン	13.8		500, 200				25	
55	東京湾	4	1982	第12海工丸 (297.5 t)			3000		4-6	4x2	マルチチャンネル	エアガン（BOLT 1500B）			500		6		50	

表 1 地下構造音波探査（発振関連）：(17)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	調査船	船速 (knot)	対象水深 (m)	探査深度 (海底から) (m)	鉛直分解能 (m)	測線間隔 (m)	測線本数 (本)	探査方式	音源、 機材	発振圧力 (MPa)	発振エネルギー (J)	エアガン容量 (cm ³)	周波数域 (Hz)	発振源深度 (m)	船尾と発振源 の距離 (m)	発振間隔 (s)	発振間隔 (sec)
141	房総沖	4	2005			120-300	2000			1		GI ガン			60, 70		5		12.5	
13	房総沖	4	2008			<400	2000			1×1		エアガン	13.8		460				12.5	
85	相模沖	4	2010	かいらい	4	500-2000			2.5	5	マルチチャンネル	エアガン	13.8		7800		6		37.5	20-30
64	伊勢湾断層	5					3000		3-4	5×2		エアガン					6			
30	伊勢湾	5		海洋			3000		3-5	7×3	マルチチャンネル	GI ガン	10.8		150	<100			12.5	
1	深溝断層	5							0.5-2	3×1	マルチチャンネル	エアガン			40				12.5	
33	大阪湾	5					3000		7	4×3	マルチチャンネル	GIガン (Harmonic mode)	11		150		5		12.5	
117	伊予灘	5				30-80				8		エアガン (BOLT PAR1500C)		32000, 150000						
117	伊予灘	5				30-70				4	屈折法地震探査	エアガン	11.8	150000	500		5		25	
57	対馬・五島 列島周辺	5	1973 -1975	明洋 昭洋							シングルチャンネル	エアガン (NEC製連続音波探査装置)			0.4	50 -300				
11	隠岐海峡	5	1977								シングルチャンネル (アナログ方式)	エアガン	1.5	80000	20	128				8
143	別府湾	5	1989			10-80	4000		3-7	7×2	マルチチャンネル	エアガン	13.8		300		7		25	
143	豊後水道	5	1990				6000			1	マルチチャンネル	エアガン			2250		7		25	
28	大阪湾西部	5	1995	海洋 明洋					0.5- 0.9	45×4		GI ガン	14.7		152.6					
79	浦底断層	5	1998							1	マルチチャンネル (デジタル方式)	エアガン								
11	隠岐海峡	5	1998								シングルチャンネル (アナログ方式)	エアガン	10.5	24000	40	128				4
11	美保湾	5	1998								マルチチャンネル (デジタル方式)	GIガン	13	17000	45, 105	128			12.5	
43	隠岐海峡	5	2000 -2003									エアガン (GI-150)			150					

表 1 地下構造音波探査（発振関連）：(18)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	調査船	船速 (knot)	対象水深 (m)	探査深度 (海底から) (m)	鉛直分解能 (m)	測線間隔 (m)	測線本数 (本)	探査方式	音源、 機材	発振圧力 (MPa)	発振エネルギー (J)	エアガン容量 (cu in)	周波数域 (Hz)	発振源深度 (m)	船尾と発振源 の距離 (m)	発振間隔 (m)	発振間隔 (sec)	
44	周防灘	5	2003			15-50	800			1	マルチチャンネル	エアガン			40					12.5	
16	敦賀湾	5	2008			20-50	250		2	1×3		エアガン	13.8		20, 40					12.5	
132	呉羽山断層帯	5	2010	タグボート (418 t)		15-700	1000 -2000		1-1.6	4×1	マルチチャンネル	GIガン			45, 105						
132	呉羽山断層帯	5	2010	タグボート (418 t)		20-850	1000 -2000		0.8-1	5×1	シングルチャンネル	エアガン			40						
37	福井平野 東縁断層帯	5	2010		3		800			1	マルチチャンネル	エアガン (BOLT社製)	11		460	<140	5	40		12.5	
79	浦底断層	5	2012							2	マルチチャンネル (デジタル方式)	エアガン									
54	若狭湾	5	2013		2.5-3.5						マルチチャンネル (デジタル方式)	GIガン (Sercel製MiniGI)	12.7	5000	13, 35					6.25	
10	御前崎周辺	6	1994		3-4	50-1500	1500 -4500		3-15	10	マルチチャンネル (デジタル方式)	エアガン	12.3	11000, 30000	30, 80	8-140				10	
94	紀伊半島 南東沖	6	2006	かいいい		3000-4500	4000				三次元マルチ チャンネル	GIガン+Gガン	13.8		652	20 -100	5	106		30	
10	御前崎周辺	6	2008		3	80-3500	10000		8-12	6×1	マルチチャンネル (デジタル方式)	エアガン	13.8	3000000	7800					50	
10	御前崎周辺	6	2008- 2009		3	30-1500	3750		2-5	14×4	マルチチャンネル (デジタル方式)	エアガン	12.3	30000	80	20 -160				12.5	
10	御前崎周辺	6	2009		3	20-800	2250 -3000		2-7	9×3	マルチチャンネル (デジタル方式)	GIガン	12.7	5000	13, 35	20 -180				12.5	
73	紀伊半島南東沖	6	2012	かいいい						1	海陸接合 地震探査	エアガン	14		7800					200	
74	四国海盆	6	2014	かいいい						1	海陸接合 地震探査	エアガン	13.8		7800					200	
47	八丈島	7	1983	昭洋								エアガン									
130	伊豆大島 南部海域	7	1987	開洋丸		<2000	2000			1	マルチチャンネル	エアガン (アレイ)	13.8		4244		8			25	

表 1 地下構造音波探査（発振関連）：(19)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	調査船	船速 (knot)	対象水深 (m)	探査深度 (海底から) (m)	鉛直分解能 (m)	測線間隔 (km)	測線本数 (本)	探査方式	音源、 機材	発振圧力 (MPa)	発振エネルギー (J)	エアガン容量 (cm ³)	周波数域 (Hz)	発振源深度 (m)	船尾と発振源 の距離 (m)	発振間隔 (m)	発振間隔 (sec)
61	伊豆東方沖	7	1989	GECO MY (2415.34 t)						1	マルチチャンネル	エアガン	13.8		4768		7.5		50	
81	福徳岡ノ場	7	1999	昭洋		200-2500	4000			3×2		エアガン (BOLT 800CT)			4000				70	30
142	伊豆・小笠原 前弧域	7	2008	かいいい かいう						1	マルチチャンネル	エアガン					10			
142	伊豆・小笠原 前弧域	7	2008	かいいい かいう						1	マルチチャンネル	エアガン					6			
142	伊豆・小笠原 前弧域	7	2008	かいいい かいう						1	マルチチャンネル	Annular port gun			7800		6		50	
142	伊豆・小笠原 前弧域	7	2008	かいいい かいう						1	マルチチャンネル	G gun			600		5		25	
142	伊豆・小笠原 前弧域	7	2008	かいいい かいう						1	マルチチャンネル	LL gun			12000		10		50	
66	甕海峡周辺	8	2004 -2007				950				マルチチャンネル	GIガン								
105	雲仙断層群 北部・南東部	8	2009		2.5-3.0	20-50	2000		3-6	3×2	マルチチャンネル	エアガン	12.6		460		6		12.5	
9	沖縄本島沖	8	2008 -2010	白嶺丸No.2	8					20× 65	マルチチャンネル	GIガン			355				25	6

*SES2000 の仕様：ビーム幅：±1.8° (0.22×0.22)m²、発信周波数（一次周波数）：100 kHz、発信周波数（二次周波数）：5, 6, 8, 10, 12, 15 kHz、

パルス幅 (μSec)：66～500、更新レート (回/sec)：最大 30 (水深・探査深度により異なる)、レンジ (m)：5～200、

精度 (100 kHz)：0.02m+0.02% of Depth、精度 (10 kHz)：0.04m+0.03% of Depth、入力データ：GPS データ (NMEA・ASCII)、

動揺センサー：DMS-05

表 1 地下構造音波探査 (受振関連) : (1)

文献番号	調査区域	受振装置	ケーブル (m)	チャンネル数 (ch)	チャンネル間隔 (m)	受信機の深度 (m)	船尾とニア チャンネルの 距離 (m)	探鉱機	記録方式	重合数	サンプリング 間隔 (msec)	サンプリング 周波数 (Hz)	収録深度範囲 (m)	記録長 (sec)	受信利得 (dB)	共通反射点間隔 (CMP間隔) (m)	測位	ビーム幅 (度)	備考
136	光地図断層																		
45	秋田一本荘沖																		
45	淡路島西部																		
138	三宅島西方																		
11	島根・鳥取沖												1						
12	津軽海峡周辺																		
129	宮城沖								乾式放電破壊			50	0.067						
31	東京湾北部																		
133	伊勢湾																		
30	伊勢湾																DGPS		
33	大阪湾								ヘリカルスキャン のアナログ記録紙								DGPS		
117	伊予灘											50					電波測位法、 GPS、DGPS		
118	別府湾																		
79	浦底断層								記録紙										
79	浦底断層								記録紙										
79	浦底断層								記録紙										
95	五日市 断層帯					1.1					4000 -8000	50							
96	岩国断層帯					1.15			プロッターによる 記録紙出力			50					DGPS		
135	サロベツ 断層帯	ハイドロフォン (2×2配列)															DGPS	33	ペネトレーション： 砂地（石灰質）：6m 粘土質：80m

表 1 地下構造音波探査 (受振関連) : (2)

文献番号	調査区域	受振装置	ケーブル (m)	チャンネル数 (ch)	チャンネル間隔 (m)	受信器の深度 (m)	船尾とニア チャンネルの 距離 (m)	探鉱機	記録方式	重合数	サンプリング 間隔 (msec)	サンプリング 周波数 (Hz)	収録深度範囲 (m)	記録長 (sec)	受信利得 (dB)	共通反射点間隔 (CMP間隔) (m)	測位	ビーム幅 (度)	備考
114	石狩低地 東縁断層帯								記録紙出力 +レコーダー収録						110			33	
1	津軽半島沖 日本海東縁部										0.05		0.25-0.3					15 -20	
76	函館湾																		
7	北由利断層																		
27	新潟-村上沖																DGPS		
101	高田平野 断層帯 ・直江津沖の 断層帯																		
41	仙台湾																		
1	三浦半島 断層帯										0.05		0.3-0.5					15 -20	
30	伊勢湾																		テルノルテ 社製DGPS
1	深溝断層										0.05		0.05					15 -20	
32	広島湾											50							
34	福岡湾											50							
48	友ヶ島水道南方 (淡路島南岸)																		
49	松山港周辺																		
51	周防灘																		
42	加賀一福井沖																		
44	周防灘																		

表 1 地下構造音波探査（受振関連）：(3)

文献番号	調査区域	受振装置	ケーブル (m)	チャンネル数 (ch)	チャンネル間隔 (m)	受信器の深度 (m)	船尾とニア チャンネルの 距離 (m)	探査機	記録方式	重 合 数	サンプリング 間隔 (msec)	サンプリング 周波数 (Hz)	収録深度範囲 (m)	記録長 (sec)	受信利得 (dB)	共通反射点間隔 (CMP間隔) (m)	測位	ビーム幅 (度)	備考
36	能登半島沖																		
5	山田断層帯 ・郷村断層帯																		
79	浦底断層																		
86	霧多布沖																		
87	浦河沖																		
140	熊野トラフ																		
9	沖縄本島沖																		
20	黒松内 低地断層帯																		Hemisphere 社製DGPS
40	函館平野 西縁断層帯																		DGPS (Hemisphere 社製VS100)
107	青森湾 西岸断層帯																		DGPS (Hemisphere 社製VS100)
104	鴨川低 地断層帯																		
103	三浦半島 断層帯																		
108	柳ヶ瀬・関ヶ原 断層帯 ・浦底-柳ヶ瀬山 断層帯																		
109	布引山地東縁 断層帯東部																		DGPS (Hemisphere 社製VS100)
110	三方・花折断層帯																		
105	雲仙断層群 北部・南東部																		Hemisphere 社製DGPS

表 1 地下構造音波探査（受振関連）：(4)

文献番号	調査区域	受振装置	ケーブル (m)	チャンネル数 (ch)	チャンネル間隔 (m)	受信器の深度 (m)	船尾とニア チャンネルの 距離 (m)	探鉱機	記録方式	重畳数	サンプリング 間隔 (msec)	サンプリング 周波数 (Hz)	収録深度範囲 (m)	記録長 (sec)	受信利得 (dB)	共通反射点間隔 (CMP間隔) (m)	測位	ビーム幅 (度)	備考
106	布田川-日奈久 断層帯 中部・南西部																DGPS (Hemisphere 社製VS100)		
131	柏崎沖																		
128	下北半島沖																		
19	積丹半島沖																		
19	積丹半島沖																		
12	津軽海峡周辺																		
12	津軽海峡周辺																		
12	津軽海峡周辺																		
76	函館湾																		
27	新潟-村上沖	ハイドロフォン					40										DGPS		
129	宮城沖	ハイドロフォン 40個							乾式放電破壊			400	0.533						
129	宮城沖	ハイドロフォン 25個							湿式電解記録			200	0.267						
41	仙台湾																		
31	東京湾北部																		
133	伊勢湾																		
30	伊勢湾																デルノルテ 社製DGPS		
30	伊勢湾																DGPS		
1	深溝断層										0.25		0.25						

表 1 地下構造音波探査 (受振関連) : (5)

文献番号	調査区域	受振装置	ケーブル (m)	チャンネル数 (ch)	チャンネル間隔 (m)	受信器の深度 (m)	船尾とミニア チャンネルの 距離 (m)	探鉱機	記録方式	重合数	サンプリング 間隔 (ms)	サンプリング 周波数 (Hz)	収録深度範囲 (m)	記録長 (sec)	受信利得 (dB)	共通反射点間隔 (CMP間隔) (m)	測位	ビーム幅 (度)	備考
21	能登半島沖																		
21	能登半島沖																		
33	大阪湾								ヘリカルスキャン のアナログ記録紙								DGPS		
117	伊予灘											100, 200, 400					電波測位法、 DGPS		
54	若狭湾	ハイドロフォン 6素子									70 -3000	100	0.133						千本電機社製 PDR-101型 (200kHz) で測量
79	浦底断層								記録紙										
65	香岐水道																		
11	島根沖												0.533						
54	若狭湾	ハイドロフォン 10素子									100 -600	200	0.266						千本電機社製 PDR-101型 (200kHz) で測量
54	若狭湾	ハイドロフォン 40素子									200 -800	100	0.133						千本電機社製 PDR-101型 (200kHz) で測量
63	糸魚川周辺																		
11	出雲日御崎										3550 -2000		0.267, 0.533						
11	美保湾										100 -1000		0.267, 0.533						
28	大阪湾西部																		
32	広島湾												0.5						
51	周防灘																		
34	福岡湾												0.5						

表 1 地下構造音波探査 (受振関連) : (6)

文献番号	調査区域	受振装置	ケーブル (m)	チャンネル数 (ch)	チャンネル間隔 (m)	受信器の深度 (m)	船尾とニアチャンネルの距離 (m)	探鉱機	記録方式	重畳数	サンプリング間隔 (ms)	サンプリング周波数 (Hz)	収録深度範囲 (m)	記録長 (sec)	受信利得 (dB)	共通反射点間隔 (CMP間隔) (m)	測位	ビーム幅 (度)	備考
79	浦底断層								記録紙										
48	友ヶ島水道南方 (淡路島南岸)																		
49	松山港周辺																		
42	加賀一福井沖																		
10	御前崎周辺								乾式放電破壊			40 -700	0.533, 1.067			600- 700			
10	御前崎周辺								湿式電解記録			100 -1000	0.133, 0.267			270- 370			
125	島原沖											80 -500							
66	甌海峡周辺																		
6	サロベツ断層帯	ハイドロフォン		12	2.5	0.3	30	24bit (GEODE)	SEG-Y	6	0.125		0.4			1.25	DGPS		
114	石狩低地東縁断層帯			12	2.5				SEG-Y	6	0.125		0.4						
100	石狩低地東縁断層帯			24	3.25				SEG-Y		0.125		0.4						
4	北海道留萌沖	ハイドロフォン		12	2.5	0.5	30	24bit (GEODE)	SEG-Y	6	0.125		0.42			1.25	DGPS		
131	柏崎沖			12	2.5														
76	函館湾	ハイドロフォン	25																
12	津軽海峡周辺																		
7	北由利断層																		
98	新潟沖		30	12	2.5		30		SEG-Y		0.083		0.6						

表 1 地下構造音波探査 (受振関連) : (7)

文献番号	調査区域	受振装置	ケーブル (m)	チャンネル数 (ch)	チャンネル間隔 (m)	受信器の深度 (m)	船尾とニア チャンネルの 距離 (m)	探鉱機	記録方式	重畳数	サンプリング 間隔 (ms)	サンプリング 周波数 (Hz)	収録深度範囲 (m)	記録長 (sec)	受信利得 (dB)	共通反射点間隔 (CMP間隔) (m)	測位	ビーム幅 (度)	備考
20	黒松内低地 断層帯	ハイドロフォン 4素子/ch (0.5 m間隔; Teledyne Technologies社製)		12	3.125		22	Seismic Source 社製DAQlink III		12		8000		0.6			DGPS (Hemisphere 社製R110)		
20	黒松内低地 断層帯	ハイドロフォン (Applied Acoustics社製 ストリーマー)			4.5		22	Coda Octopus 社製360P				16000		0.35			DGPS (Hemisphere 社製R110)		
12	津軽海峡周辺																		
40	函館平野 西縁断層帯	ショートストリーマー		12	2.5		25	LX-110	SEG-Y		0.1	10000	125	0.6			DGPS (Trimble 社製DSM232)		
107	青森湾西岸 断層帯	ハイドロフォン 4素子/ch (0.5 m間隔; Teledyne Technologies社製)		12	3.125		36	Seismic Source 社製DAQlink III		12		8000		0.6			DGPS		
107	青森湾 西岸断層帯	ハイドロフォン (4.5 m間に20個; Applied Acoustics 社製)					36	Seismic Source 社製DAQlink III				8000		0.35			DGPS		
19	積丹半島沖																		
12	平館海峡周辺																		
101	高田平野断層帯 ・直江津沖の断層帯	ハイドロフォン		12	2.5	0.3	30	24bit (GEODE)	SEG-Y	6	0.125			0.4		1.25	DGPS		
129	宮城沖	ハイドロフォン 4素子/ch		12								600	0.8	18-54					
129	宮城沖																		
78	日立・東海沖			12	2.5				磁気媒体	12	0.083	10 -3600	300	0.4		250			
78	大洗沖			12	2.5				磁気媒体	6	0.125	<3300	150	0.2		250			
18	日立・東海沖	ハイドロフォン		12						6	0.125			0.45					
14	房総半島東部沿岸			24	3.125														

表 1 地下構造音波探査 (受振関連) : (8)

文献番号	調査区域	受振装置	ケーブル (m)	チャンネル数 (ch)	チャンネル間隔 (m)	受信器の深度 (m)	船尾とニア チャンネルの 距離 (m)	探鉱機	記録方式	重合数	サンプリング 間隔 (msec)	サンプリング 周波数 (Hz)	収録深度範囲 (m)	記録長 (sec)	受信利得 (dB)	共通反射点間隔 (CMP間隔) (m)	測位	ビーム幅 (度)	備考
104	鴨川低地断層帯	ハイドロフォン		12	2.5	0.3	35	24bit (GEODE)	SEG-Y	6	0.125			0.5-0.6		1.25	DGPS		
103	三浦半島断層帯	ハイドロフォン		12	2.5	0.3	35	24bit (GEODE)	SEG-Y	6	0.125			0.5-0.6		1.25	DGPS		
21	能登半島沖																		
23	三方断層帯	ハイドロフォン		12	2.5	0.5						10000							
117	伊予灘												75 , 100	0.2, 0.5			DGPS		
54	若狭湾	ハイドロフォン 40素子										800 -2000	75	0.1					千本電機社製 PDR-101型 (200kHz) で測量
79	浦底断層								記録紙										
123	柳ヶ瀬・関ヶ原 断層帯主部 北方延長域													0.3			DGPS		
123	柳ヶ瀬・関ヶ原 断層帯主部 北方延長域			16	2.5									0.6			DGPS		
79	浦底断層			12	2.5														
54	若狭湾	ハイドロフォン 5素子/ch										700 -1500	100 , 150	0.133, 0.2					千本電機社製 PDR-1300型 (200kHz) で測量
22	能登半島沖		約30	12	2.5				SEG-Y		0.082	600							
11	島根沖		30	12	2.5						0.1			0.4					
97	能登半島沖		約30	12	2.5		30		SEG-Y	12	0.082			0.6					

表 1 地下構造音波探査 (受振関連) : (9)

文献番号	調査区域	受振装置	ケーブル (m)	チャンネル数 (ch)	チャンネル間隔 (m)	受信器の深度 (m)	船尾とニアチャンネルの距離 (m)	探鉱機	記録方式	重合数	サンプリング間隔 (sec)	サンプリング周波数 (Hz)	収録深度範囲 (m)	記録長 (sec)	受信利得 (dB)	共通反射点間隔 (CMP間隔) (m)	測位	ビーム幅 (度)	備考
16	敦賀湾	ハイドロフォン		24	2						0.25			0.62					
17	若狭湾	ハイドロフォン		12	3.125						0.125			0.5					
11	島根・美保関沖		56	18	3.125						0.125	3.8 -3400		0.5					
65	杏岐水道			12, 1															
95	五日市断層帯			12	3.125	0.3			紙出力+SEG-Y		0.125		450	0.6					
96	岩国断層帯			12	3.125	0.3			SEG-Y、プロッターによる記録紙出力		0.125			0.6			DGPS		
2	菊川断層帯			12													DGPS		
3	西山断層帯			12													DGPS		
37	福井平野東縁断層帯	ハイドロフォン		12	2.5	0.5	30	24bit (GEODE)	SEG-Y	6	0.125			0.42 (プレトリガー : 0.02 sec)		1.25	DGPS		
11	島根沖		40	16	2.5						0.1			0.4					
99	福岡沖			12	2.5		5.0		SEG-Y	6	0.125			0.4					
99	福岡沖			24	3.125		6.3		SEG-Y	23	0.125			0.4					
5	山田断層帯・郷村断層帯	ハイドロフォン		12	2.5	1	40.0 -41.8	24bit (GEODE)	SEG-Y	6	0.125			0.5-0.62 (プレトリガー : 0.02 sec)		1.25	DGPS		
111	柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯主部北方延長域	ハイドロフォン 5素子/ch		16	2.5		30	LX-110	EPC Laboratories社製GSP-1086-2 サーマルプロッター	16		10000		0.6			DGPS (Trimble社製 DSM232)		
111	柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯主部北方延長域	ハイドロフォン 5素子/ch					30	LX-110	EPC Laboratories社製GSP-1086-2 サーマルプロッター	16		10000		0.3			DGPS (Trimble社製 DSM232)		

表 1 地下構造音波探査（受振関連）：(10)

文献番号	調査区域	受振装置	ケーブル (m)	チャンネル数 (ch)	チャンネル間隔 (m)	受信器の深度 (m)	船尾とニアチャンネルの距離 (m)	探鉱機	記録方式	重畳数	サンプリング間隔 (sec)	サンプリング周波数 (Hz)	収録深度範囲 (m)	記録長 (sec)	受信利得 (dB)	共通反射点間隔 (CMP間隔) (m)	測位	ビーム幅 (度)	備考
54	若狭湾	ハイドロフォン 5素子/ch										400 -1800	100 , 150	0.133, 0.2					千本電機社製 PDR-1300型 (200kHz)で測量
79	浦底断層			16	2.5														
110	三方・花折断層帯	ハイドロフォン 5素子/ch		12	2.5	0.5	30	16bit (LX-110)	EPC Laboratories 社製GSP-1086-2 サーマルプロッター	12		10000		0.6		125	DGPS (Trimble社製 DSM232)		
110	三方・花折断層帯	ハイドロフォン 5素子/ch		12	2.5	0.5	30	16bit (LX-110)	EPC Laboratories 社製GSP-1086-2 サーマルプロッター	12		10000		0.3		125	DGPS (Trimble社製 DSM232)		
10	御前崎周辺			16	2.5				DVD-R	8, 16		<5000		水深200 m以浅 : 0.6 水深200 m以深 : 1.5		250			
77	駿河湾		50	32	2.5													DGPS	
102	駿河湾			12	2.5				SEG-Y		0.01	200 -1500		0.6					
102	駿河湾			12	2.5				SEG-Y		0.01	200 -1500		1.2					
105	雲仙断層群 北部・南東部	ハイドロフォン 5素子/ch		12	2.5	0.5			感熱、24bit			12000	150	次のショットまで。 ただし、 SEG-Y変換時に 0.6 secで切断。		125	DGPS		
106	布田川-日奈久 断層帯 中部・南西部	Mini-streamer (ハイドロフォン : Teledyne Technologies社製)		23	3.125		25	Seismic Source 社製DAQ Link III			0.125	8000		0.4			DGPS (Trimble社製 DSM232)		
6	サロベツ断層帯	ハイドロフォン				1.0-1.5	60	24bit	SEG-Y		0.5			1.0		3	DGPS		
4	北海道留萌沖	ハイドロフォン				1.0-1.5	25	24bit	SEG-Y		0.5			1.0		3	DGPS		

表 1 地下構造音波探査 (受振関連) : (11)

文献番号	調査区域	受振装置	ケーブル (回)	チャンネル数 (回)	チャンネル間隔 (回)	受信器の深度 (回)	船尾とニア チャンネルの 距離 (回)	探査機	記録方式	重 合 数	サンプリング 間隔 (msec)	サンプリング 周波数 (Hz)	収録深度範囲 (回)	記録長 (sec)	受信利得 (dB)	共通反射点間隔 (CMP間隔) (回)	測位	ビーム幅 (度)	備考
131	柏崎沖																		
131	柏崎沖			24	12.5														
131	柏崎沖			12	20														
1	津軽半島沖 日本海東縁部										0.5		0.6-2.0						
19	積丹半島沖																		
12	津軽海峡周辺																		
12	津軽海峡周辺																		
19	積丹半島沖																		
128	下北半島沖			12															
19	積丹半島沖																		
129	宮城沖	ハイドロフォン 20個							乾式放電破壊				200	0.267					
129	宮城沖	ハイドロフォン 4個/ch		12									750	1.0					
129	宮城沖	ハイドロフォン		48									1500	2					
78	日立・東海沖			12, 15	2.5				磁気媒体	6, 5	0.167	10 -1800	750 -1500	1.5, 2.0		250			
78	日立・東海沖			12	2.5				磁気媒体	3	0.5	<800	750	1.0		250			
18	日立・東海沖	ハイドロフォン		12						3	0.5			0.8					
18	日立・東海沖	ハイドロフォン		24						12	0.5			2					

表 1 地下構造音波探査 (受振関連) : (12)

文献番号	調査区域	受振装置	ケーブル (m)	チャンネル数 (ch)	チャンネル間隔 (m)	受信機の深度 (m)	船尾とニア チャンネルの 距離 (m)	探査機	記録方式	重合数	サンプリング 間隔 (msec)	サンプリング 周波数 (Hz)	収録深度範囲 (m)	記録長 (sec)	受信利得 (dB)	共通反射点間隔 (CMP間隔) (m)	測位	ビーム幅 (度)	備考
1	三浦半島断層帯										0.5			1					
1	三浦半島断層帯	バイケーブル		120							0.5			2					
1	三浦半島断層帯			24							1			1					
141	房総沖		30	12	2.5	1		Geometrics Inc. 製Strata View RX			0.25			0.5		5			
117	伊予灘												750	1			DGPS		
11	余部崎											160 -620		0.5					
79	浦底断層								記録紙										
54	若狭湾	ハイドロフォン 40素子/ch										50 -500	400	0.533					千本電機社製 PDR-103型 (28kHz) で測定
11	鳥取沖													0.533					
79	浦底断層			60	10														
79	浦底断層			24	12.5														
79	浦底断層			12	2.5														
79	浦底断層																		
11	島根沖		30	12	2.5						0.1			1					
17	若狭湾	ハイドロフォン		24	3.125						0.25			1.0					
11	島根・美保関沖		300	48	6.25						0.25	3.8 -1700		2					
65	沓岐水道																		
65	沓岐水道			48, 24															

表 1 地下構造音波探査 (受振関連) : (13)

文献番号	調査区域	受振装置	ケーブル (m)	チャンネル数 (ch)	チャンネル間隔 (m)	受信器の深度 (m)	船尾とニアチャンネルの距離 (m)	探鉱機	記録方式	重合数	サンプリング間隔 (msec)	サンプリング周波数 (Hz)	収録深度範囲 (m)	記録長 (sec)	受信利得 (dB)	共通反射点間隔 (CMP間隔) (m)	測位	ビーム幅 (度)	備考
2	菊川断層帯	ハイドロフォン															DGPS		
3	西山断層帯	ハイドロフォン															DGPS		
11	島根沖		40	16	2.5						0.1		1						
67	福岡沖			24	12.5		25		SEG-Y	12	0.5		2.05						
79	浦底断層			16	2.5														
102	駿河湾			24	3.125				SEG-Y		0.5	50 -1000	2.0						
66	甌海峡周辺																		
66	甌海峡周辺																		
89	十勝沖	ハイドロフォン																	
58	十勝沖		5000					Syntron社製											
86	霧多布沖			6															
87	浦河沖											20-80				25			
1	津軽半島沖 日本海東縁部			48							1		2						
131	柏崎沖			444	12.5														
131	柏崎沖			96	12.5														
131	柏崎沖	ベイケーブル														25			
12	津軽海峡周辺																		
12	津軽海峡周辺																		

表 1 地下構造音波探査 (受振関連) : (14)

文献番号	調査区域	受振装置	ケーブル (m)	チャンネル数 (ch)	チャンネル間隔 (m)	受信機の深度 (m)	船尾とニア チャンネルの 距離 (m)	探鉱機	記録方式	重畳数	サンプリング 間隔 (msec)	サンプリング 周波数 (Hz)	収録深度範囲 (m)	記録長 (sec)	受信利得 (dB)	共通反射点間隔 (CMP間隔) (m)	測位	ビーム幅 (度)	備考
115	新潟海陸境界部 (海域)	ジンバルフォン (水深8 m以浅) 、ハイドロフォン (水深8 m以深)		80	25			MYRIASEIS-I			4	10		8					
115	新潟海陸境界部 (陸域)	ジオフォン		80	25			MYRIASEIS-I			4	10		8					
124	奥尻沖																		
12	津軽海峡周辺																		
128	下北半島沖			48, 24, 12															
19	積丹半島沖																		
12	津軽海峡周辺																		
12	津軽海峡周辺																		
19	積丹半島沖																		
84	新潟沖	ハイドロフォン	5200	204	25	15					4			13.5		12.5			
15	柏崎沖		4800	384	12.5						2			10					
69	新潟沖	ベイケーブル (地球科学総合研究所製 GDAPS-Crocodile)		207	25			MS2000D, GDAPS-4A, GDAPS-Crocodile , LS8200SD			4, 8			12				DGPSによる 小型航法 システム (CHIPS)	
39	新潟海陸境界部 (海域)	ハイドロフォン		120	10			Geode		1	0.5 -1	10		15.99, 3					
39	新潟海陸境界部 (陸域)	ジオフォン		180-192	10			DSS-12		4	1	10		15.99, 3					
70	新潟沖	ストリーマー +ベイケーブル				6, 10					4			10-20	12, 30, 31				
70	新潟沖	ストリーマー +ベイケーブル									4			10-20	12, 30, 31				

表 1 地下構造音波探査 (受振関連) : (15)

文献番号	調査区域	受振装置	ケーブル (m)	チャンネル数 (ch)	チャンネル間隔 (m)	受信器の深度 (m)	船尾とニア チャンネルの 距離 (m)	探査機	記録方式	重 合 数	サン プ リ ン グ 間 隔 (ms)	サン プ リ ン グ 周 波 数 (Hz)	収録 深 度 範 囲 (m)	記録長 (sec)	受信利得 (dB)	共通反射点間隔 (CMP間隔) (m)	測位	ビーム幅 (度)	備考
83	日本海 東部 (東北沖)	ハイドロフォン	6000	444	12.5	12					2			16		6.25	DGPS (Concept社 SPECTRA)		
83	日本海 東部 (東北沖)			16	25	15													
12	津軽海峡周辺																		
12	津軽海峡周辺																		
71	新潟沖	ベイクープル (Sercel Inc.製SeaRay)		240	25						4			12, 16	0-12, 30, 31				
71	新潟沖	ベイクープル (Sercel Inc.製SeaRay)		240	25						4			12, 16	0-12, 30, 31				
71	新潟沖	ストリーマー (Sercel Inc.製) +海底地震計		444	12.5	12		Sercel Seal System Ver.5.2 (Sercel Inc.)	SEG-D 8058 Rev.1		2			15			DGPS (Concept社 SPECTRA)		
72	新潟沖	ベイクープル (Sercel Inc.製SeaRay)		350	25						4			12	0-12, 31				
82	日本海 東部 (東北沖)	海底地震計	6000	444	12.5	12					2	100, 200		16		6.25	DGPS (Concept社 SPECTRA)		
19	積丹半島沖																		
128	下北半島沖				12.5						2			>10					
128	下北半島沖			156, 48															
12	平館海峡周辺																		
128	下北半島沖			>160	25						1			>3					
128	下北半島沖			>80	10.0						1			>3					
128	下北半島沖			84	12.5, 6.25						1			5, 2					

表 1 地下構造音波探査 (受振関連) : (16)

文献番号	調査区域	受振装置	ケーブル (m)	チャンネル数 (ch)	チャンネル間隔 (m)	受信器の深度 (m)	船尾とニア チャンネルの 距離 (m)	探査機	記録方式	重 合 数	サン プ リ ン グ 間 隔 (msec)	サン プ リ ン グ 周 波 数 (Hz)	収録 深 度 範 圍 (m)	記録長 (sec)	受信利得 (dB)	共通反射点間隔 (CMP間隔) (m)	測位	ビーム幅 (度)	備考
78	下北～東海沖			48	50				磁気テープ	24	4		3500			2500			
78	北上～阿武隈沖			24	100				磁気テープ	12	4		3500			2000			
78	鹿島灘								乾式放電破壊				3000			15 min			
78	いわき塩谷崎沖								乾式放電破壊				1500			15 min			
78	常磐～鹿島沖			48	25				磁気テープ	48	4		3500			1250			
78	南三陸～鹿島沖			96	25				磁気テープ	48	4		3500			1250			
78	常磐～鹿島沖	ベイケーブル		80	25				磁気テープ	40	4		4500			625			
129	宮城沖	ハイドロフォン 11個/ch		24					乾式放電破壊				200	2.0					
53	宮城沖																		
129	宮城沖	ハイドロフォン		48									2250	3					
78	日立・東海沖			24, 48	12.5				磁気媒体	6, 12	1.0	<400	3750	5.0, 6.0		250			
78	日立・東海沖			24	12.5				磁気媒体	6	1.0	<400	3000	4.0		250			
18	日立・東海沖	ハイドロフォン		24						6	1.0			4					
18	日立・東海沖	ハイドロフォン		48						12	1.0			4					
78	関東沖			24	100				磁気テープ	12	4		3500			2000			
31	東京湾北部			24						12						6.25			
29	東京湾北部			24	25	5					1			5		12.5			
55	東京湾		1200	24	50	7		DFS-IV型	磁気テープ (1600BPI)	12	2		1000	5		25	SYLEDIS 電波測位		

表 1 地下構造音波探査 (受振関連) : (17)

文献番号	調査区域	受振装置	ケーブル (m)	チャンネル数 (ch)	チャンネル間隔 (m)	受信器の深度 (m)	船尾とニア チャンネルの 距離 (m)	探鉱機	記録方式	重 合 数	サン プ リ ン グ 間 隔 (msec)	サン プ リ ン グ 周 波 数 (Hz)	収録 深 度 範 圍 (m)	記録長 (sec)	受信利得 (dB)	共通反射点間隔 (CMP間隔) (m)	測位	ビーム幅 (度)	備考
141	房総沖		600	48	12.5	4-7		Geometrics Inc.製 Strata View RX			1			3		12.5			
13	房総沖	ハイドロフォン		24	12.5			GEODE			1			3		6.25			
85	相模沖	ハイドロフォン	4500	360	12.5	10	110				2			15		6.25			
64	伊勢湾断層	ハイドロフォン	700	24	25	9											SYLEDIS 電波測位		
30	伊勢湾		300	24	12.5	7											DGPS		
1	深溝断層			24							1			2					
33	大阪湾	ハイドロフォン	440	24	12.5												DGPS		
117	伊予灘													3, 5			DGPS		
117	伊予灘	海底地震計 (9~10箇所)			1100 -1700							1000							
57	対馬・五島 列島周辺			2													電波測位		
11	隠岐海峡											40 -125		2, 4					
143	別府湾	ハイドロフォン	600	24	25	10				12	2	8 -128							
143	豊後水道		1500	48		10				24	2	8 -128							
28	大阪湾西部																		
79	浦底断層			48, 24															
11	隠岐海峡											31 -125		2					
11	美保湾		300 -600	48/24	12.5						1			3					
43	隠岐海峡													1					

表 1 地下構造音波探査 (受振関連) : (18)

文献番号	調査区域	受振装置	ケーブル (m)	チャンネル数 (ch)	チャンネル間隔 (m)	受信器の深度 (m)	船尾とニア チャンネルの 距離 (m)	探鉱機	記録方式	重畳数	サンプリング 間隔 (sec)	サンプリング 周波数 (Hz)	収録深度範囲 (m)	記録長 (sec)	受信利得 (dB)	共通反射点間隔 (CMP間隔) (m)	測位	ビーム幅 (度)	備考
44	周防灘	ハイドロフォン		24	12.5														
16	敦賀湾	ハイドロフォン		48	6.25						0.5		2						
132	呉羽山断層帯			24, 48															
132	呉羽山断層帯																		
37	福井平野 東縁断層帯	ハイドロフォン		48	12.5	5	115	24bit (GEODE)	SEG-Y	24	1.0		4.0			6.25	DGPS		
79	浦底断層			48	12.5														
54	若狭湾	ハイドロフォン 8素子/ch										30 -160	1500	2.0					千本電機社製 PDR-1300型 (200kHz) で測定
10	御前崎周辺			24	10				磁気テープ	12		12 -256		2.0-6.0		10			
94	紀伊半島 南東沖		5100	204	25	8	184	SYNTRAK 960-24 Multiple Streamer Telemetry System (Sercel社製)	SEG-D (Code 8048)	43	1			10			DGPS		三次元探査範囲 : 3.5x52 km
10	御前崎周辺			444	12.5				磁気テープ	55		3 -400		14.0		50			
10	御前崎周辺			48	12.5				DVD-R	24		<400		5.0		12.5			
10	御前崎周辺			48	12.5				DVD-R	24		<800		3.0, 4.0		12.5			
73	紀伊半島南東沖	短周期上下動地震計 (陸上) + 海底地震計 (東京測深製TOBS-24N型)							SEG-Y			200							
74	四国海盆	短周期上下動地震計 (陸上) + 海底地震計 (東京測深製TOBS-24N型)							SEG-Y			200							
47	八丈島																		
130	伊豆大島 南部海域			96	25			DFS-V		48	4	<90		8		12.5			

表 1 地下構造音波探査 (受振関連) : (19)

文献番号	調査区域	受振装置	ケーブル (m)	チャンネル数 (ch)	チャンネル間隔 (m)	受信器の深度 (m)	船尾とニア チャンネルの 距離 (m)	探鉱機	記録方式	重合数	サンプリング 間隔 (sec)	サンプリング 周波数 (Hz)	収録深度範囲 (m)	記録長 (sec)	受信利得 (dB)	共通反射点間隔 (CMP間隔) (m)	測位	ビーム幅 (度)	備考
61	伊豆東方沖		3000	120	25	12				30	4	3-62.5		18		12.5	LORAN-C, NNSS		
81	福徳岡ノ場	ストリーマー +海底地震計															GPS		
142	伊豆・小笠原 前弧域					12						20-90							
142	伊豆・小笠原 前弧域					8						20-90							
142	伊豆・小笠原 前弧域		5550	444	12.5	8					2	20-90							
142	伊豆・小笠原 前弧域		400	16	25	5					4	20-80							
142	伊豆・小笠原 前弧域		5100	204	25	15					4	10-90							
66	甌海峡周辺																		
105	雲仙断層群 北部・南東部			48	12.5	7			SEG-Y		1.0			3.05, 4.05	40		DGPS		
9	沖縄本島沖	ストリーマー (Geometrics社製 GeoEel)		16	12.5			CNT-2	SEG-D					5.9					

表 2 試料採取(1)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	探査船	対象水深 (m)	採取試料長 (m)	採取試料径 (mm)	採取面積 (cm ²)	試料採取手法	使用機材	測位
2	菊川断層帯	5			89-121	0.85-5.94			柱状採泥		
102	駿河湾	6	2013	挑洋丸	776-849	0.15-0.25	82 (3本同時採取)		G.S.型表層採泥器 (アシユラ)		
20	黒松内低地断層帯	2	2010		51.3-64.6	1.92-7.31			ピストンコアラ +重力式柱状採泥		
45	秋田-本荘沖	2	2000-2001						ピストンコアラ		
107	青森湾西岸断層帯	2	2011		29-30	1.62-5.23			ピストンコアラ		
50	広島湾	5			24	16			ピストンコアラ		
118	別府湾	5	1985		40		80		水圧ピストンコアラ		
97	能登半島沖	5	2008		53-123	4-8	76 (チューブ径)		ピストンコアラ		
95	五田市断層帯	5	2009		18.6-23	3.57-12.02			ピストンコアラ		
108	柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯 ・浦底-柳ヶ瀬山断層帯	5	2011		36.2-37.2	1.50-6.13	75		ピストンコアラ		DGPS
5	山田断層帯・郷村断層帯	5	2011		227-243	4.3-6.6			ピストンコアラ		
109	布引山地東縁断層帯東部	5	2012		15.5-25.4	6.4-7.4	75		ピストンコアラ		
111	柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯 主部北方延長域	5	2012		80.3-83.1	0.22-0.88	75		ピストンコアラ		DGPS (Hemisphere社製VS110S)
102	駿河湾	6	2013	挑洋丸	84	2.15	75		ピストンコアラ		

表 2 試料採取(2)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	探査船	対象水深 (m)	採取試料長 (m)	採取試料径 (mm)	採取面積 (cm ²)	試料採取手法	使用機材	測位
105	雲仙断層群北部・南東部	8	2009		25.2-38.2	4.63-11.10	76		ピストンコアラ		
106	布田川-日奈久断層帯中部・南西部	8	2010		41-47.5	1.96-14.34	75		ピストンコアラ		
135	サロベツ断層帯	1	2012		20-30	0.75-4.45	140		パイプロコアラ		
100	石狩低地東縁断層帯	1	2012	ひろかい	12.5-40.3	0.25-3.5	88		パイプロコアラ		DGPS
40	函館平野西縁断層帯	2	2011		54-65	0.39-3.24	75		パイプロコアラ		
101	高田平野断層帯・直江津沖の断層帯	2	2013		31-36	1.79-2.92	88		パイプロコアラ		
1	三浦半島断層帯	4				<6	88		パイプロコアラ		
104	鴨川低地断層帯	4	2014		30.2-36.8	0.77-2.97	88		パイプロコアラ		
103	三浦半島断層帯	4	2014		38.6-41	2.99-3.38	88		パイプロコアラ		
97	能登半島沖	5	2008		74-100	1.5	96 (チューブ径)		パイプロコアラ		
2	菊川断層帯	5	2009		89-121	0.85-5.94			パイプロコアラ		
3	西山断層帯	5	2009		57-68	2.12-3.89			パイプロコアラ		
37	福井平野東縁断層帯	5	2010		29-68	0.97-2.24			パイプロコアラ		
99	福岡沖	5	2010		38-66	1.5-4.9			パイプロコアラ		

表 2 試料採取(3)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	探査船	対象水深 (m)	採取試料長 (m)	採取試料径 (mm)	採取面積 (cm ²)	試料採取手法	使用機材	測位
102	駿河湾	6	2013	挑洋丸	33-52	1-3.4	88		パイプロコアラ		
87	浦河沖	1	2004, 2006	白嶺丸No.2	990-1210	3.12-3.32			重力式柱状採泥		
100	石狩低地 東縁断層帯	1	2012	ひろかい	12.5-39.7	0.3	75		重力式柱状採泥		DGPS
1	津軽半島沖 日本海東縁部	2	2006		140-320	<5	114		重力式柱状採泥		
80	房総半島東方沖	4			511-1556	1.17-4.04			重力式柱状採泥		
1	深溝断層	5				<7	114		重力式柱状採泥		
5	山田断層帯 ・郷村断層帯	5	2011		227	3.7			重力式柱状採泥		
102	駿河湾	6	2013	挑洋丸	48-721	0.6-2.6	114		重力式柱状採泥		
86	霧多布沖	1	2003, 2004	白嶺丸No.2	40-3000	0.1-0.3			グラブサンブラ		
100	石狩低地 東縁断層帯	1	2012	ひろかい	12.4-64.9	0.1			グラブサンブラ		DGPS
80	房総半島 東方沖	4			11.9-144.2				グラブサンブラ	スミスマッキンタイヤー	
97	能登半島沖	5	2008		15.0-99.3			484	グラブサンブラ	スミスマッキンタイヤー	
99	福岡沖	5	2010		38-66				グラブサンブラ	スミスマッキンタイヤー	
102	駿河湾	6	2013	挑洋丸	25-849	0.03-0.14			グラブサンブラ	スミスマッキンタイヤー	

表 2 試料採取(4)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	探査船	対象水深 (m)	採取試料長 (m)	採取試料径 (mm)	採取面積 (cm ²)	試料採取手法	使用機材	測位
126	秋田県	2	2004	40-50t吊 クレーン付台船	30-35	18			海上ボーリング	傾動自在型試錐工法 (CTM-10)	
75	新潟沖	2	2004		885-971	1071-2110			海上ボーリング		
98	新潟沖	2	2008-2009		25-30	40	65		海上ボーリング	ロータリー式 ハイドロリックフィード型	
107	青森湾 西岸断層帯	2	2011			29-32			海上ボーリング		
129	仙台湾	3			35	80			海上ボーリング		
126	宮城県	3	2006	40-50t吊 クレーン付台船	31	78			海上ボーリング	傾動自在型試錐工法 (CTM-10)	
31	東京湾北部	4		天洋	9	100			海上ボーリング		
126	神奈川県	4	1994	40-50t吊 クレーン付台船	25-27	21			海上ボーリング	傾動自在型試錐工法 (CTM-10)	
126	東京都	4	2001	40-50t吊 クレーン付台船	26	37			海上ボーリング	傾動自在型試錐工法 (CTM-10)	
126	東京都	4	2002	40-50t吊 クレーン付台船	23	37			海上ボーリング	傾動自在型試錐工法 (CTM-10)	
133	伊勢湾	5			<25	10-90			海上ボーリング		
30	伊勢湾	5			17.9	100	86		海上ボーリング	鋼製やぐら	
1	深溝断層	5				42	86		海上ボーリング		
23	三方断層帯	5							海上ボーリング	湖底ピストン式 シンウォールサンプラー	

表 2 試料採取(5)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	探査船	対象水深 (m)	採取試料長 (m)	採取試料径 (mm)	採取面積 (cm ²)	試料採取手法	使用機材	測位
23	三方断層帯	5							海上ボーリング	打込式 二重管サンプラー	
23	三方断層帯	5							海上ボーリング	ロータリー式 二重管サンプラー	
126	愛知県	5	1993	40-50t吊 クレーン付台船	7-28	60			海上ボーリング	傾動自在型試錐工法 (CTM-10)	
126	山口県	5	1993	40-50t吊 クレーン付台船	20-28	20			海上ボーリング	傾動自在型試錐工法 (CTM-10)	
126	兵庫県	5	2007	40-50t吊 クレーン付台船	30	60			海上ボーリング	傾動自在型試錐工法 (CTM-10)	
126	兵庫県	5	2007	40-50t吊 クレーン付台船	30-32	40			海上ボーリング	傾動自在型試錐工法 (CTM-10)	
126	愛媛県	5	2007	40-50t吊 クレーン付台船	20	9			海上ボーリング	傾動自在型試錐工法 (CTM-10)	
132	呉羽山断層帯	5	2010				86		海上ボーリング	ロータリー式	
110	三方・花折断層帯	5	2013		50	4	86		海上ボーリング	傾動自在型試錐工法 (CTM-10)	DGPS
112	野坂-集福寺 断層帯	5	2013		11.7-12.0	12-27	86		海上ボーリング	傾動自在型試錐工法 (CTM-10)	DGPS
56	御前崎周辺	6	1983		469	3036.5			海上ボーリング		
126	和歌山県	6	1995	40-50t吊 クレーン付台船	25-35	8			海上ボーリング	傾動自在型試錐工法 (CTM-10)	
126	静岡県	6	2003	40-50t吊 クレーン付台船	40-43	30			海上ボーリング	傾動自在型試錐工法 (CTM-10)	
126	鹿児島県	8	2007	40-50t吊 クレーン付台船	20	14			海上ボーリング	傾動自在型試錐工法 (CTM-10)	

表 3 その他の調査手法(1)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	調査船	船速 (knot)	対象水深 (m)	周波数 (kHz)	調査レンジ幅 (m)	スワス幅 (度)	発振ビーム幅 (度)	パルス長 (msec)	レンジ分解能 (cm)	ビーム数 (本)	送信音圧レベル (dB)	測線間隔 (m)	精度 (mGal)	交点誤差	ドリフト (mGal/日)	調査手法	使用機材	測位
100	石狩低地 東縁断層帯	1	2012					600											サイドスキャン ソナー	Edge Tech 社製 MP-4200型	
1	津軽半島沖 日本海東縁部	2				140 -320	100 ±10	600											サイドスキャン ソナー		
35	中越沖 地震震源域	2	2007	天洋 (430 t)			455	300				7.5x 10			1200				サイドスキャン ソナー	KLEINSYSTEM5400	
1	三浦半島 断層帯	4					100 ±10	300-400											サイドスキャン ソナー		
62	相模沖	4	1988 -1989			110 -1180	59			1.2x40					400				ROV+ サイドスキャンソナー	EG&G社製 SMS990型	トリスポンダー +GPS
36	能登半島沖	5	2007	昌久丸 (6.98 t)	3-4	5-145	455					7.5x 10							サイドスキャン ソナー	KLEIN社製 SYSTEM5400	
36	能登半島沖	5	2007	昌久丸 (6.98 t)	3-4	5-145	200					5							サイドスキャン ソナー	BENTHOS社製 C3D-LPM	
28	大阪湾西部	5	1995	あかし			100	100											サイドスキャン ソナー		
97	能登半島沖	5	2008				200	水深の 10~12倍 (<300 m)		1	10-50								サイドスキャン ソナー	BENTHOS 社製C3D	
95	五口市断層帯	5	2009			2-23		水深の12倍											インターフェロ メトリー測深+サイド スキャンソナー	GeoAcoustics社製 GeoSwath Plus	
140	熊野トラフ	6		AUV (うらしま)															サイドスキャン ソナー		
138	三宅島 西方海域	7	2000	昭洋		100													サイドスキャン ソナー		
58	十勝沖	1	2003	かいいい		1000 -7000													マルチビーム測深	SeaBeam2112	
87	浦河沖	1	2004, 2006	白嶺丸 No.2	8	<1500													マルチビーム測深	HydroSweep, Atlas	

表 3 その他の調査手法(2)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	探査船	船速 (knot)	対象水深 (m)	周波数 (kHz)	探査レンジ幅 (m)	スワ幅 (度)	発振ビーム幅 (度)	パルス長 (nsec)	レンジ分解能 (cm)	ビーム数 (本)	送信音圧レベル (dB)	測線間隔 (m)	精度 (mGal)	交点誤差	ドリフト (mGal/日)	探査手法	使用機材	測位
1	津軽半島沖 日本海東縁部	2				140-320	240		150			1	101	217					マルチビーム測深		
46	艦作埼沖 (日本海中部 地震震源域)	2	1984	拓洋		2550-3550													マルチビーム測深		
63	糸魚川周辺海域	2	1988-1989	天洋				水深の2.5倍							>460				マルチビーム測深	ハイドロチャートII	トリスポンダー+GPS
124	奥尻沖	2	1994	明洋		<3800		水深の3.5倍											マルチビーム測深	SeaBeam2000	
127	北海道南西沖	2	1999	よこすか		1000-3650													マルチビーム測深	しんかい6500	
27	新潟一村上沖	2	2004	天洋	5	20-130													マルチビーム測深	SeaBeam1180	
35	中越沖 地震震源域	2	2007	天洋		<600	180		153				126	300					マルチビーム測深	SeaBeam1180	
53	宮城沖	3	1998-2002			<7500								1852-9260					マルチビーム測深	SeaBeam2112	
1	三浦半島 断層帯	4				1-350	240		<150			1	101	217					マルチビーム測深		
62	相模沖	4	1988	天洋				水深の2.5倍					17						マルチビーム測深	ハイドロチャートII	トリスポンダー
85	相模沖	4	2010	かいいい		500-2000													マルチビーム測深		
1	深溝断層	5				1-350	240		<150			1	101	217					マルチビーム測深		
43	隠岐海峡	5	2000-2003																マルチビーム測深	SeaBeam2000	
42	加賀一福井沖	5	2003																マルチビーム測深	SeaBeam2000	

表 3 その他の調査手法(3)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	調査船	船速 (knot)	対象水深 (m)	周波数 (kHz)	探査レンジ幅 (m)	スワ幅 (度)	発振ビーム幅 (度)	パルス長 (msec)	レンジ分解能 (cm)	ビーム数 (本)	送信音圧レベル (dB)	測線間隔 (m)	精度 (mGal)	交点誤差	ドリフト (mGal/日)	探査手法	使用機材	測位
26	菊川断層帯	5	2006	明洋		95 -105													マルチビーム測深	SeaBeam2000	
121	菊川断層帯	5	2008 -2009	明洋 海洋	10		26 -34		<140	1	0.7, 2, 5		282						マルチビーム測深	Kongsberg社製 EM302	DGPS (Kongsberg 社製Seapath200)
121	菊川断層帯	5	2009	はやしお	8		240		<150	1.5	0.021- 0.225		101						マルチビーム測深	Reson社製SEABAT7101ER	DGPS (APPLANIX 社製POS MV WaveMaster)
3	西山断層帯	5	2009				<34												マルチビーム測深	Reson社製 SEABAT8101	
37	福井平野 東縁断層帯	5	2010				1-43												マルチビーム測深	Reson 社製 SEABAT7101	
113	玄界灘	5	2010	海洋 (550t)	10	60 -100	26 -34			1	0.7, 2, 5		282		300				マルチビーム測深	Kongsberg社製 EM302	DGPS (Kongsberg 社製Seapath200)
38	山田断層帯 ・郷村断層帯	5	2011			10-70													マルチビーム測深	Reson 社製 SEABAT7101	
140	熊野トラフ	6		AUV (うらしま)															マルチビーム測深		
52	御前崎沖	6	2001												926 -1852				マルチビーム測深	SeaBeam2000	
8	駿河湾	6	2013	真漁丸		30 -100	200 -400		10-160	0.5-1		1	256						マルチビーム測深	R2Sonic社製 Sonic2024	DGPS
8	駿河湾	6	2013			100 -1000	26 -34	8000				10	864, 432, 216						マルチビーム測深	Kongsberg社製 EM302	DGPS
116	駿河湾	6	2013	拓洋	10	800 -900	12		130	2	5								マルチビーム測深	Kongsberg Maritime 社製EM122	DGPS (Hemisphere 社製MBX-4)
116	駿河湾	6	2014	AUV (ごんどう)	3	800 -900	200 -400	120	120		0.06	4-10		221	100				マルチビーム測深	R2Sonic社製 Sonic2022	慣性航法装置 (IXSEA/PHINS)
81	福徳岡ノ場	7	1999	昭洋		300 -2000													マルチビーム測深	SeaBeam2112	

表 3 その他の調査手法(4)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	調査船	船速 (knot)	対象水深 (m)	周波数 (kHz)	探査レンジ幅 (m)	スワ幅 (度)	発振ビーム幅 (度)	パルス長 (msec)	レンジ分解能 (cm)	ビーム数 (本)	送信音圧レベル (dB)	測線間隔 (m)	精度 (mGal)	交点誤差	ドリフト (mGal/日)	探査手法	使用機材	測位
125	島原沖	8	1991	明洋		<45									370 -1852				マルチビーム測深 +浅海音響測深 (DESO)		
93	薩摩硫黄島沖	8	2006- 2008	明洋 (550 t)		<620									460 -3700				マルチビーム測深	SeaBeam2000, Kongsberg社製 EM302	
9	沖縄本島沖	8	2008- 2010	白嶺丸 No.2															マルチビーム測深	Hydrosweep DS	
68	黒島海丘 (石垣島沖)	8	2010	明洋 (621 t)		619 -1500	30		150	1			288						マルチビーム測深	Kongsberg社製 EM302	DGPS (Kongsberg 社製Seapath200)
120	岩手沿岸	3	2012																水上バイク測深		
20	黒松内 低地断層帯	2	2010			5-13													インターフェロ メトリー測深	GeoAcoustics社製 GeoSwath Plus	Hemisphere 社製DGPS
122	黒松内 低地断層帯	2																	音響測深	PDR-1300	
123	柳ヶ瀬-関ヶ原 断層帯主部 北方延長域	5	2003		3-4														音響測深	PDR-1300	DGPS
111	柳ヶ瀬-関ヶ原 断層帯主部 北方延長域	5	2012	シーホース3															音響測深	PDR-1300	DGPS (Trimble 社製DSM232)
47	八丈島	7	1983	昭洋															音響測深		
81	福徳岡ノ場	7	1999	昭洋		<400	24												音響測深	エコトラック MkII型	
27	新潟-村上沖	2	2004	天洋	5	20 -130									900- 1200				シングルビーム 音響測深	DESO20	DGPS
42	加賀-福井沖	5	2003																シングルビーム 音響測深	DESO20	
134	広島湾	5	2003			18													航空レーザー 測深	SHOALS-1000	DGPS
132	呉羽山 断層帯	5	2010																航空レーザー 測深		

表 3 その他の調査手法(5)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	調査船	船速 (knot)	対象水深 (m)	周波数 (kHz)	探査レンジ幅 (m)	スワ幅 (度)	発振ビーム幅 (度)	パルス長 (msec)	レンジ分解能 (cm)	ビーム数 (本)	送信音圧レベル (dB)	測線間隔 (m)	精度 (mGal)	交点誤差	ドリフト (mGal/日)	探査手法	使用機材	測位
134	高知沖	6	2003			38													航空レーザー測深	SHOALS-1000	DGPS
133	伊勢湾	5				<28									100-200				深浅測量調査		
137	東京湾北部	4	1984	昭洋												1.0 mGal	<0.07		海上重力探査	Bodenseewerk KSS-30	
137	東京湾南部	4	1985	昭洋												3.5 mGal	<0.1		海上重力探査	Bodenseewerk KSS-30	
88	瀬戸内海西部	5	1991	淡青丸		<450										3-5 mGal			海上重力探査	TSSG船上重力計	
43	隠岐海峡	5	2000-2003																海上重力探査	KSS-30	
90	福徳岡ノ場	7	1999	昭洋		<2000													海上重力探査	Bodenseewerk KSS-31	
125	島原沖	8	1991	明洋		<45									370-1852		1.3-1.4 mGal		海上重力探査		
93	薩摩硫黄島沖	8	2006-2008	明洋		<620									460-3700				海上重力探査	Bodenseewerk KSS-30	
92	相模湾北部	4	2014	うみかぜ															海底重力探査		
143	別府湾	5	1990			<70													海底重力探査	LaCoste & Romberg Model H-22-G	
139	播磨灘	5	2002	おのころ (8.5 t)		12.2-43.5										0.01			海底重力探査	Scintrex 社製 CG-3M/SB	JRC製 DGPS200
97	能登半島沖	5	2008	第三大栄丸		11.7-86.7										0.01			海底重力探査	Scintrex 社製 CG-3M/SB	DGPS
59	玄界灘、響灘	5	2010	祐進丸 (5 t)		1.4-55.4										0.01			海底重力探査	Scintrex 社製 CG-5/SB	DGPS
91	駿河湾	6	2013	うみかぜ		12.21-264.7										0.01			海底重力探査	Scintrex 社製 CG-5	DGPS
124	奥尻沖	2	1994	明洋		<3800													重力探査		

表 3 その他の調査手法(6)

文献番号	調査区域	地域区分	調査年度	探査船	船速 (knot)	対象水深 (m)	周波数 (kHz)	探査レンジ幅 (m)	スワ幅 (度)	発振ビーム幅 (度)	パルス長 (msec)	レンジ分解能 (cm)	ビーム数 (本)	送信音圧レベル (dB)	測線間隔 (m)	精度 (mGal)	交点誤差	ドリフト (mGal/日)	探査手法	使用機材	測位
138	三宅島 西方海域	7		明洋															重力探査		
47	八丈島	7	1983	昭洋															重力探査		
119	南海トラフ	6				4000													大量展開型 海底地震計	OBS2G : 2nd Generation OBS to Grid	
119	駿河湾	6				1000													大量展開型 海底地震計	OBS2G : 2nd Generation OBS to Grid	
119	駿河湾	6				100													大量展開型 海底地震計	OBS2G : 2nd Generation OBS to Grid	
119	駿河湾	6	2012			30													大量展開型 海底地震計	OBS2G : 2nd Generation OBS to Grid	
24	大阪湾	5				>4													海底微動 アレー探査		
124	奥尻沖	2	1994	明洋		<3800													海上磁力計 (地磁気全磁力測定)	プロトン磁力計	
138	三宅島 西方海域	7		明洋															地磁気探査		
47	八丈島	7	1983	昭洋															地磁気探査		
90	福徳岡ノ場	7	1999	昭洋		<2000													海上磁気測量	曳航式プロトン磁力計 (PMM-200)	
125	島原沖	8	1991	明洋		<45									370- 1852				地磁気探査	曳航式プロトン磁力計	
93	薩摩硫黄島沖	8	2006- 2008	明洋		<620									460- 3700				海上磁力計 (地磁気全磁力測定)	曳航式プロトン磁力計 (PMM-200, PM-217)	
60	硫黄島	7	1998, 2007	YS-11 (航空機)		<2300									396- 3164		3-38 nT		航空磁気測量	プロトン磁力計	GPS

*AUV : 自律式無人探査機, ROV : 有索式無人探査機

表 4 文献リスト(1)

文献番号	文献名
1	阿部信太郎, 青柳恭平, 日本列島沿岸海域における海底活断層調査の現状と課題—海底活断層評価の信頼度向上に向けて—, 電力中央研究所報告, N05047, 26p, 2006.
2	阿部信太郎, 荒井良祐, 岡村行信, 菊川断層帯海域延長部における断層分布と活動性について, 活断層・古地震研究報告, no.10, pp.81-118, 2010.
3	阿部信太郎, 荒井良祐, 岡村行信, 西山断層帯海域延長部における断層分布と活動性について, 活断層・古地震研究報告, no.10, pp.119-148, 2010.
4	阿部信太郎, 関根真弓, 荒井良祐, 北海道留萌沖における活褶曲とその活動性について, 活断層・古地震研究報告, no.11, pp.1-14, 2011.
5	阿部信太郎, 山本博文, 荒井良祐, 高分解能マルチチャンネル音波探査記録に基づく郷村断層帯海域延長部の断層分布・性状について, 活断層・古地震研究報告, no.12, pp.195-240, 2012.
6	阿部信太郎, 内田康人, 荒井良祐, 岡村行信, サロベツ断層帯海域延長部における活構造の分布・性状と活動性について, 活断層・古地震研究報告, no.13, pp.39-74, 2013.
7	秋田県, 平成 15 年度 地震関係基礎調査交付金 北由利断層に関する調査成果報告書, 秋田県, 2004. http://www.hp1039.jishin.go.jp/danso/Akita8frm.htm (2018年2月28日最終閲覧)
8	荒井晃作, 佐藤智之, 駿河湾静岡市及び富士市沖合の地形調査, 平成 25 年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告, 地質調査総合センター速報, no.65, pp.29-33, 2014
9	荒井晃作, 佐藤智之, 井上卓彦, 沖縄島周辺の島弧の成立と島弧胴切り断層の発達, 月刊地球, vol.34, pp.373-379, 2012.
10	中部電力, 浜岡原子力発電所発電用原子炉設置変更許可申請書(4号発電用原子炉施設の変更), 2015.
11	中国電力, 島根原子力発電所 敷地周辺海域の活断層評価, 原子力規制委員会第 95 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合資料 3-1, 180p, 2014. https://www.nsr.go.jp/data/000035514.pdf (2018年2月28日最終閲覧)
12	電源開発, 大間原子力発電所 敷地周辺及び敷地近傍の断層評価(その2)及びリニアメント, 原子力規制委員会第 432 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合資料 2-2, 286p, 2017. https://www.nsr.go.jp/data/000175727.pdf (2018年2月28日最終閲覧)

表 4 文献リスト(2)

文献番号	文献名
13	古屋裕, 伊藤谷生, 佐藤比呂志, 平田 直, 駒田希充, 津村紀子, 浅尾一巳, 荒井良祐, 半場康弘, 反射法地震探査による房総半島南西部内房沿岸の浅部地下構造, 地震研究所彙報, vol.84, pp.307-329, 2009.
14	古山精史朗, 佐藤智之, 房総半島東部沿岸における反射法音波探査結果概要, 地質調査総合センター速報 No 68, 平成 26 年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告, pp.1-8, 2015.
15	原子力安全・保安院, 新潟県中越沖における海上音波探査について, 第 13 回地震、地質・地盤に関する小委員会, 新潟県, 2008. http://www.pref.niigata.lg.jp/HTML_Article/1-1-jisin13-1,0.pdf (2018 年 2 月 28 日最終閲覧)
16	原子力安全・保安院, 敦賀湾における海上音波探査について, 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会 耐震・構造設計小委員会 地震・津波、地質・地盤合同WG第 1 1 回Cサブグループ会合資料, 合同 C11-3-1-1, 2009. https://www.nsr.go.jp/data/000051307.pdf (2018 年 2 月 28 日最終閲覧)
17	原子力安全・保安院, 若狭湾西部海域等における海上音波探査について, 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会 耐震・構造設計小委員会 地震・津波、地質・地盤合同WG第 1 5 回Cサブグループ会合資料, 合同 C15-2-3, 2009. https://www.nsr.go.jp/data/000049610.pdf (2018 年 2 月 28 日最終閲覧)
18	原子力安全・保安院, 茨城沖における海上音波探査について (合同 A34-1-2 改), 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会耐震・構造設計小委員会地震・津波、地質・地盤合同ワーキンググループ A サブグループ (第 38 回) 会合資料, 合同 A38-1-3-3, 85p, 2011. http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/genshiryoku/taishin_kouzou_wg_a-sub/038_01_03_03a.pdf (2018 年 2 月 28 日最終閲覧)
19	北海道電力, 泊発電所の発電用原子炉設置変更許可申請書 (3号発電用原子炉施設の変更), 2015.
20	北海道立総合研究機構, 産業技術総合研究所, 沿岸海域における活断層調査 黒松内低地断層帯 (海域部) 成果報告書, 39p, 2011.
21	北陸電力, 志賀原子力発電所 2 号炉 敷地の地質・地質構造について【コメント回答】 (敷地周辺の地形, 地質・地質構造) データ集, 原子力規制委員会第 531 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合 机上配布資料 1, 2017. http://www.nsr.go.jp/data/000212805.pdf (2018 年 2 月 28 日最終閲覧)

表 4 文献リスト(3)

文献番号	文献名
22	井上卓彦, 村上文敏, 岡村行信, 池原 研, 2007 年能登半島地震震源域の海底活断層, 地震研究所彙報, vol.82, pp.301-312, 2007.
23	井上卓彦, 杉山雄一, 村上文敏, 坂本 泉, 滝野義幸, 永田高弘, 細矢卓志, 宇佐見琢哉, 福井県美浜町日向沖, 三方断層帯海域部 (A 断層系) の更新世末期以降の活動, 活断層・古地震研究報告, no.14, pp.109-156, 2014.
24	井上佳也, 風嵐健志, 吉田武志, 三好達明, 海底微動アレー探査, 応用地質, vol.42, pp.231-237, 2001.
25	伊藤福夫, 蜷川親治, 海底音波探査技術 (3), 日本鉱業会誌, vol.98, pp.129-132, 1982.
26	伊藤弘志, 泉 紀明, 菊川断層帯の延長海域で発見された変動地形, 活断層研究, vol.31, pp.27-31, 2009.
27	伊藤弘志, 泉 紀明, 成田学, 登崎隆志, 加藤正治, 細萱 泉, 平成 16 年「新潟-村上沖」沿岸海域海底活断層調査報告, 海洋情報部研究報告, vol.46, pp.25-31, 2010.
28	岩淵 洋, 春日 茂, 穀田昇一, 沖野郷子, 志村栄一, 長田 智, 大阪湾西部の活断層, 海洋調査技術, vol.7, no.2, pp.11-19, 1995.
29	岩淵 洋, 加藤 茂, 岸本秀人, 楠 勝浩, 渡辺一樹, 東京湾北部の三次元マルチチャンネル音波探査, 水路部研究報告, vol.31, pp.1-15, 1995.
30	岩淵 洋, 西川 公, 野田直樹, 川尻智敏, 中川正則, 青砥澄夫, 加藤 勲, 安間 恵, 長田 智, 角谷昌洋, 伊勢湾における活断層調査, 水路部研究報告, vol.36, pp.73-96, 2000.
31	岩淵 洋, 西川 公, 野田直樹, 田賀 傑, 雪松隆雄, 東京湾北部の海底断層調査, 水路部技報, vol.16, pp.85-88, 1998a.
32	岩淵 洋, 西川 公, 田中喜年, 雪松隆雄, 広島湾付近の海底断層について, 水路部技報, vol.16, pp.89-94, 1998.
33	岩淵 洋, 西川 公, 野田直樹, 雪松隆夫, 田賀 傑, 宮野正実, 酒井建治, 深沢 満, 反射法音波探査に基づく大阪湾の基盤と活構造, 水路部研究報告, vol.36, 1-23, 2000.
34	岩淵 洋, 西川 公, 田賀 傑, 宮寄 進, 福岡湾付近の断層分布, 水路部技報, vol.16, pp.95-99, 1998b.
35	泉 紀明, 長野勝行, 及川光弘, 西澤あずさ, 小野寺健英, 伊藤弘志, 2007 年新潟県中越沖地震震源域における海底地形及び変動地形について, 海洋情報部技報, vol.26, pp.63-67, 2008a.
36	泉 紀明, 長野勝行, 及川光弘, 西澤あずさ, 小野寺健英, 伊藤弘志, 笹原 昇, 2007 年能登半島地震震源域における海底地形及び変動地形について, 海洋情報部技報, vol.26, pp.57-62, 2008b.
37	地震予知総合研究振興会, 沿岸海域における活断層調査 福井平野東縁断層帯 (海域部) 成果報告書, 19p, 2011.

表 4 文献リスト(4)

文献番号	文献名
38	地震予知総合研究振興会, 沿岸海域における活断層調査 山田断層帯/郷村断層帯 (海域部) 委託業務成果報告書, 21p, 2012.
39	楳原京子, 加野直巳, 山口和雄, 横田俊之, 反射法地震探査からみた新潟海陸境界部の地質構造, 物理探査, vol.64, pp.345-357, 2011a.
40	楳原京子, 内田康人, 村上文敏, 仁科健二, 大津 直, 岡崎紀俊, 函館平野西縁断層帯海域延長部の地下構造と活動性, 活断層・古地震研究報告, no.12, pp.1-43, 2012.
41	海上保安庁海洋情報部, 仙台湾の断層分布, 地震予知連絡会会報, vol.71, pp.339-344, 2004a.
42	海上保安庁海洋情報部, 加賀一福井沖の断層分布, 地震予知連絡会会報, vol.73, pp.422-425, 2005.
43	海上保安庁海洋情報部, 島根沖の海底地形・地質構造, 重力異常, 地震予知連絡会会報, vol.73, pp.581-585, 2005.
44	海上保安庁海洋情報部, 周防灘東部におけるマルチチャンネル音波探査, 地震予知連絡会会報, vol.73, pp.586-588, 2005.
45	海上保安庁海洋情報部, 海域活断層域を含む沿岸調査及びその成果. http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAIYO/FAULTS/main.html (2018年2月28日最終閲覧) .
46	海上保安庁水路部, 拓洋による日本海中部 地震震源域調査, 地震予知連絡会会報, vol.33, pp.42-44, 1985.
47	海上保安庁水路部, 八丈島南方の海底地形・地質構造, 地震予知連絡会会報, vol.33, pp.200-202, 1985.
48	海上保安庁水路部, 友ヶ島水道南方の海底地質構造, 地震予知連絡会会報, vol.61, pp.501-504, 1999a.
49	海上保安庁水路部, 松山港周辺の海底地質構造, 地震予知連絡会会報, vol.61, pp.511-514, 1999b.
50	海上保安庁水路部, 広島湾堆積物採取作業及び解析処理作業 報告書, 89p, 2000.
51	海上保安庁水路部, 周防灘東部の断層分布, 地震予知連絡会会報, vol.65, pp.635-638, 2001.
52	海上保安庁水路部, 御前埼沖の海底変動地形, 地震予知連絡会会報, vol.70, pp.345-350, 2003.
53	海上保安庁海洋情報部, 宮城沖の断層分布, 地震予知連絡会会報, vol.71, pp.332-338, 2004.
54	関西電力, 大飯発電所発電用原子炉設置変更許可申請書 (3号及び4号発電用原子炉施設の変更) , 2013.
55	加藤 茂, 東京湾におけるマルチチャンネル反射法音波探査, 水路部研究報告, vol.19, pp.1-57, 1984.

表 4 文献リスト(5)

文献番号	文献名
56	加藤 進, 井上洋子, 矢口良一, 基礎試錐「御前崎沖」の層序, 地質学雑誌, vol.95, pp.851-864, 1989.
57	桂 忠彦, 対馬～五島列島周辺海域の海底地質, 水路部研究報告, vol.28, pp.55-138, 1992.
58	木戸ゆかり, 樋泉昌之, 鶴 哲郎, 金田義行, 2003年9月十勝沖地震前後の海底地形変動の検出の試み- 地球内部変動研究センター機動的観測データ解析公開サイトの構築と利用-, 情報地質, vol.16, pp.17-26, 2005.
59	駒澤正夫, 大熊茂雄, 押田 淳, 福岡県沿岸部における海底重力調査, 平成 22 年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告, 地質調査総合センター速報, no.56, pp.53-62, 2011.
60	小山 薫, 笹原 昇, 熊川浩一, 小野寺健英, 久保田隆二, 硫黄島の3次元磁気構造モデル, 海洋情報部研究報告, vol.44, 2008.
61	黒田 徹, 井川 猛, 岩城弓雄, 浅田正陽, 笠原敬司, 鈴木宏芳, 山水史生, 岡田義光, マルチチャンネル反射法地震探査による伊豆東方沖地下構造調査, 日本火山学会講演予稿集, vol.2, pp.17-18, 1989.
62	楠 勝浩, 菊地真一, 穀田昇一, 深江邦一, 相模湾北西海域における変動地形調査, 水路部研究報告, vol.27, pp.113-131, 1991.
63	楠 勝浩, 菊池真一, 沖野睦登, 穀田昇一, 渡辺義和, 糸魚川周辺海域における変動地形・地殻構造調査, 水路部研究報告, no.27, pp.133-143, 1991.
64	京都大学理学部, 大阪土質試験所, 阪神コンサルタンツ, 地球科学総合研究所, 水資源開発公団中部支社, 建設省中部地方建設局, 1996, 反射法地震探査による桑名断層および伊勢湾断層の深部形態, 地震予知連絡会会報, vol.55, pp.558-570, 1996.
65	九州電力, 玄海原子力発電所の発電用原子炉設置変更許可申請書(3号及び4号発電用原子炉施設の変更), 2013.
66	九州電力, 川内原子力発電所の発電用原子炉設置変更許可申請書(1号及び2号発電用原子炉施設の変更), 2013.
67	松本 弾, 岡村行信, 福岡県北部沿岸海域の高分解能音波探査, 平成 22 年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告, 地質調査総合センター速報, No.56, pp.1-12, 2011.
68	南 宏樹, 黒島海丘における海底地形調査報告, 海洋情報部研究報告技報, vol.47, pp.66-71, 2011.
69	文部科学省研究開発局, 防災科学技術研究所, ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究(平成20年度)成果報告書, 370p, 2009.

表 4 文献リスト(6)

文献番号	文献名
70	文部科学省研究開発局, 防災科学技術研究所, ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究 (平成 21 年度) 成果報告書, 391p, 2010.
71	文部科学省研究開発局, 防災科学技術研究所, ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究 (平成 22 年度) 成果報告書, 430p, 2011.
72	文部科学省研究開発局, 防災科学技術研究所, ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究 (平成 23 年度) 成果報告書, 499p, 2012.
73	文部科学省研究開発局, 海洋研究開発機構, 平成 20~24 年度 東海・東南海・南海地震の連動性評価のための調査観測・研究, 東海・東南海・南海地震の連動性評価研究プロジェクト, 平成 20~24 年度成果報告書, 397p, 2013.
74	文部科学省研究開発局, 海洋研究開発機構, 南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト 平成 26 年度 成果報告書, 428p, 2015.
75	門澤伸昭, 金子光好, 大澤正博, 基礎試錐「佐渡南西沖」の掘削結果に基づいた佐渡~富山湾海域における石油システムの考察, 石油技術協会誌, vol.71, 618-627, 2006.
76	森下泰成, 渡辺一樹, 富田輝勝, 田中喜年, 藤澤 豪, 函館湾の海底断層, 水路部研究報告, vol.38, pp.59-70, 2002.
77	村上文敏, 古谷昌明, 高智英二郎, 丸山かおる, 畑山一人, 武田伸勝, 佐藤正良, 馬場久紀, 浅海用高分解能三次元音波探査システムの開発とそれによる駿河湾北部沿岸海域の活断層調査, 活断層研究, vol.44, pp.29-40, 2016.
78	日本原子力発電, 東海第二発電所 敷地周辺及び近傍の地質・地質構造について (海上音波探査記録集), 第 194 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合机上配布資料, 140p, 2015. https://www.nsr.go.jp/data/000096262.pdf (2018 年 2 月 28 日最終閲覧)
79	日本原子力発電, 敦賀発電所 2 号炉 敷地の地形, 地質・地質構造について, 原子力規制委員会第 536 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合, 机上配布資料 1, 2017. http://www.nsr.go.jp/data/000214025.pdf (2018 年 2 月 28 日最終閲覧)
80	西田尚央, 味岡 拓, 池原 研, 房総半島東方沖海底堆積物調査の概要, 地質調査総合センター速報 No 68, 平成 26 年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告, pp.9-18, 2015.

表 4 文献リスト(7)

文献番号	文献名
81	西澤あずさ, 小野智三, 坂本平治, 松本良浩, 大谷康夫, 海底火山「福德岡ノ場」における海底地震観測, 水路部研究報告, no.38, pp.101-123, 2002.
82	No, T., Sato, T., Kodaira, S., Ishiyama, T., Sato, H., Takahashi, N., and Kaneda, Y., The source fault of the 1983 Nihonkai-Chubu earthquake revealed by seismic imaging, <i>Earth and Planetary Science Letters</i> , vol.400, pp.14-25, 2014.
83	野 徹雄, 佐藤 壮, 小平秀一, 高橋成実, 石山達也, 佐藤比呂志, 金田義行, 日本海東部におけるマルチチャンネル反射法地震探査, JAMSTEC Report of Research and Development, vol.19, pp.29-47, 2014.
84	No, T., Takahashi, N., Kodaira, S., Obana, K., and Kaneda, Y., Characteristics of deformation structure around the 2007 Niigata-ken Chuetsu-oki earthquake detected by multi-channel seismic reflection imaging, <i>Earth, Planets and Space</i> , vol.61, pp.1111-1115, 2009.
85	No, T., Takahashi, N., Miura, S., Yamashita, M., Kido, Y., and Kodaira, S., Deformation of the Manazuru Knoll in Sagami Bay, central Japan, associated with subduction of the Philippine Sea plate, <i>Earth, Planets and Space</i> , vol.66, pp.1-6, 2014.
86	Noda, A., and TuZino, T., Characteristics of sediments and their dispersal systems along the shelf and slope of an active forearc margin, eastern Hokkaido, northern Japan, <i>Sedimentary Geology</i> , vol.201, no.3-4, pp.341-364, 2007.
87	Noda, A., TuZino, T., Joshima, M., and Goto, S., Mass-transport-dominated sedimentation in a foreland basin, the Hidaka Trough, northern Japan, <i>Geochemistry, Geophysics, Geosystems</i> , vol.14, no.8, pp.2638-2660, 2013.
88	大野一郎, 河野芳輝, 藤本博巳, 小泉金一郎, 瀬戸内海西部の重力異常と負異常帯の地下構造, 地震, vol.2, no.47, pp395-401, 1994.
89	Okamura, Y., Tsujino, T., Arai, K., Sasaki, T., Satake, K., and Joshima, M., Fore arc structure and plate boundary earthquake sources along the southwestern Kuril subduction zone, <i>Journal of Geophysical Research</i> , vol.113, B06305, 2008.
90	小野寺健英, 加藤 剛, 瀬尾徳常, 重力・地磁気異常から推定される福德岡ノ場付近の地殻構造, 海洋情報部研究報告, vol39, pp.23-31, 2003.

表 4 文献リスト(8)

文献番号	文献名
91	大熊茂雄, 駒澤正夫, 宮川歩夢, 押田淳, 駿河湾沿岸域における海底重力調査, 平成 25 年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告, 地質調査総合センター速報, no.65, pp.41-48, 2014
92	大熊茂雄, 駒澤正夫, 押田 淳, 相模湾北部沿岸域における海底重力調査, 地質調査総合センター速報 No.68 平成 26 年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告, pp.107-114, 2015.
93	小野寺健英, 小山 薫, 熊川浩一, 鬼界カルデラの重力・地磁気異常について, 海洋情報部研究報告技報, vol.46, pp.103-107, 2010.
94	朴 進午, 鶴 哲郎, 野 徹雄, 瀧渾 薫, 佐藤 壮, 金田義行, 紀伊半島南東沖南海トラフでの高分解能 3 次元反射法地震探査と重合前深度マイグレーション処理, 物理探査, vol.61, pp.231-241, 2008.
95	産業技術総合研究所, 沿岸海域における活断層調査 五日市断層帯 (海域延長部) 成果報告書, 21p, 2010.
96	産業技術総合研究所, 沿岸海域における活断層調査 岩国断層帯 (海域延長部) 成果報告書, 16p, 2010.
97	産業技術総合研究所, 海陸シームレス地質情報集「能登半島北部沿岸域」, 数値地質図 S-1, 2010.
98	産業技術総合研究所, 海陸シームレス地質情報集「新潟沿岸域」, 数値地質図 S-2, 2011.
99	産業技術総合研究所, 海陸シームレス地質情報集「福岡沿岸域」, 数値地質図 S-3, 2013.
100	産業技術総合研究所, 海陸シームレス地質情報集「石狩低地帯南部沿岸域」, 数値地質図 S-4, 2014.
101	産業技術総合研究所, 沿岸海域における活断層調査 高田平野断層帯/直江津沖の断層 成果報告書, 22p, 2014.
102	産業技術総合研究所, 海陸シームレス地質情報集「駿河湾北部沿岸域」, 数値地質図 S-5, 2016.
103	産業技術総合研究所, 沿岸海域における活断層調査 三浦半島断層群 (海域部) 成果報告書, 52p, 2015a.
104	産業技術総合研究所, 沿岸海域における活断層調査 鴨川低地断層帯 (海域部) 成果報告書, 52p, 2015b.
105	産業技術総合研究所, 千葉大学, 東海大学, 地域地盤環境研究所, 沿岸海域における活断層調査 雲仙断層群北部 (海域) 及び雲仙断層群南東部 (海域) 成果報告書, 49p, 2010.
106	産業技術総合研究所, 地域地盤環境研究所, 東海大学, 沿岸海域における活断層調査 布田川-日奈久断層帯/中部・南西部 (海域部) 成果報告書, 26p, 2011.
107	産業技術総合研究所, 東海大学, 沿岸海域における活断層調査 青森湾西岸断層帯 (海域部) 成果報告書, 43p, 2012.

表 4 文献リスト(9)

文献番号	文献名
108	産業技術総合研究所, 東海大学, 沿岸海域における活断層調査 柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯 浦底-柳ヶ瀬山断層帯 成果報告書, 42p, 2012.
109	産業技術総合研究所, 東海大学, 沿岸海域における活断層調査 布引山地東縁断層帯東部 (海域部) 成果報告書, 25p, 2013.
110	産業技術総合研究所, 東海大学, 平成 25 年度 沿岸海域における活断層調査 三方・花折断層帯/三方断層帯(海域部) 成果報告書, 31p, 2014.
111	産業技術総合研究所, 福井大学, 沿岸海域における活断層調査 柳ヶ瀬-関ヶ原断層帯主部/北部 (海域部) 成果報告書, 37p, 2013.
112	産業技術総合研究所, 東海大学, 平成 25 年度 沿岸海域における活断層調査 野坂・集福寺断層帯/野坂断層帯 (海域部) 成果報告書, 30p, 2014.
113	佐藤勝彦, 伊藤弘志, 福岡県沖玄海灘における海底地形調査速報, 海洋情報部技報, vol.47, pp.61-65, 2011.
114	佐藤智之, 内田康人, 輿水健一, 片山 肇, 池原 研, 石狩低地東縁断層帯の海域への延長, 活断層研究, no.39, pp.17-28, 2013.
115	石油公団, 平成 2 年度国内石油・天然ガス基礎調査 海上基礎物理探査「新潟～富山浅海域」調査報告書, 28p, 1991.
116	瀬尾徳常, 南 宏樹, AUV「ごんどう」を用いた高分解能海底地形調査 ～データ処理方法の概要及びその実例～, 海洋情報部研究報告, vol.52, pp.40-48, 2015.
117	四国電力, 伊方発電所の発電用原子炉設置変更許可申請書 (3号原子炉施設の変更), 2013.
118	島崎邦彦, 中田 高, 千田 昇, 宮武 隆, 岡村 眞, 白神 宏, 前杢英明, 松木宏彰, 辻井 学, 清川昌一, 平田和彦, 海底活断層のポーリング調査による地震発生時長期予測の研究-別府湾海底断層を事例として-, 活断層研究, no.2, pp.83-88, 1986.
119	清水 賢, 渡邊佳孝, 高橋成実, 畠山 清, 前川拓也, 木村忠勝, 次世代海底地震計の開発と実海域試験, ブルーアース 2013, BE13-P44, 2013.
120	下川大介, 太田史朗, 坂上敏彦, 佐藤祥昭, 半場康弘, 津波による海岸堤防の被災状況調査, 大地 (東北地質調査業協会誌), no.53, pp.33-35, 2013.

表 4 文献リスト(10)

文献番号	文献名
121	杉山伸二, 堀迫順一, 福山一郎, 田中喜年, 西下厚志, 成田 学, 加藤正治, 氏原直人, 笹原 昇, 森 弘和, 井上 渉, 本間章禎, 久間裕一, 山口 県沖 (日本海側) における海底地形調査速報, 海洋情報部研究報告, vol.46, pp.92-95, 2010.
122	杉山雄一, 内田康人, 村上文敏, 津久井朗太, 黒松内低地断層帯南方延長部 (内浦湾) の地質構造と活動性, 活断層・古地震研究報告, no.11, pp.21-53, 2011.
123	杉山雄一, 山本博文, 村上文敏, 宇佐見琢哉, 畑山一人, 島崎裕行, 柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯主部北方延長域 (坂井市沖～福井市沖) における活断層の分布と活動性, 活断層・古地震研究報告, no.13, pp.145-185, 2013.
124	水路部北海道南西沖地震震源海域緊急調査班, 北海道南西沖地震震源海域の緊急調査結果, 水路部研究報告, vol.30, pp.395-412, 1994.
125	水路部橘湾・島原湾海底調査班, 雲仙岳噴火に伴う橘湾・島原湾の海底調査, 水路部研究報告, vol.28, pp.231-249, 1992.
126	高橋周作, 傾動自在型試錐工法による海上ボーリング施工事例, 全地連「技術 e-フォーラム 2008」高知, no.34, 2p, 2008.
127	竹内 章, 岡村行信, 加藤幸弘, 池原 研, 張 勁, 佐竹健治, 長尾哲史, 平野真人, 渡辺真人, 日本海東縁, 奥尻海嶺および周辺の大地震と海底変動, JAMSTEC 深海研究, vol.16, 2000.
128	東北電力, 東通原子力発電所敷地周辺～敷地の地形, 地質・地質構造について (震源として考慮する活断層の評価) (コメント回答), 原子力規制委員会第 407 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合資料 1-1, 2014. http://www.nsr.go.jp/data/000166238.pdf (2018 年 2 月 28 日最終閲覧)
129	東北電力, 女川原子力発電所 敷地周辺海域の活断層評価について, 原子力規制委員会第 106 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合資料 2-1, 68p, 2014. http://www.nsr.go.jp/data/000035699.pdf (2018 年 2 月 28 日最終閲覧)
130	徳山英一, 末広 潔, 渡辺秀文, 大西正純, 高橋明久, 井川 猛, 浅田正陽, 藤岡換太郎, 芦寿一郎, 倉本真一, 徐 垣, 小川勇二郎, 伊豆大島南部海域のマルチ・チャンネル音波探査記録, 火山, vol.33, pp.67-77, 1988.
131	東京電力, 柏崎刈羽原子力発電所原子炉設置変更許可申請書 (6 号及び 7 号原子炉施設の変更), 2013.
132	富山大学, 地域地盤環境研究所, 沿岸海域における活断層調査 呉羽山断層帯 (海域部) 成果報告書, 40p, 2011.
133	豊蔵 勇, 岡田篤正, 牧野内猛, 堀川義夫, 長谷川淳, 「中部国際空港」海域 (知多半島常滑市沖) の海底地形・地質, 地学雑誌, vol.108, pp.589-615, 1999.

表 4 文献リスト(11)

文献番号	文献名
134	戸澤 実, 岩本暢之, 航空レーザー測深機による水路測量－航空レーザー測量－, 水路, vol.33, pp.5-10, 2004.
135	内田康人, 仁科健二, 阿部信太郎, 荒井良祐, 田村 慎, 北沢俊幸, 稚内市抜海沖におけるサロベツ断層帯の活動履歴, 活断層・古地震研究報告, no.13, pp.1-38, 2013.
136	内田康人, 仁科健二, 高見雅三, 十勝平野断層帯南部・光地園断層海域延長部における高分解能地層探査, 北海道立総合研究機構平成 27 年度環境・地質研究本部 調査研究成果発表会 地質研究所要旨集, p.3, 2015.
137	植田義夫, 中川久穂, 平岩恒広, 朝尾紀幸, 久保田隆二, 東京湾・南関東周辺の重力異常と深部構造, 水路部研究報告, vol.22, pp.179-206, 1987.
138	植田義夫, 加藤幸弘, 三宅島西方海域調査班, 三宅島西方・群発地震発生海域の地殻構造と銭州海嶺北部のテクトニクス, 水路部研究報告, vol.37, pp.37-56, 2001.
139	上嶋正人, 石原丈実, 小泉金一郎, 島 伸和, 押田 淳, 藤本博巳, 金澤敏彦, 瀬戸内海播磨灘での海底重力測定, 海洋調査技術, vol.18, pp.17-27, 2006.
140	脇田典英, 広川 潔, 市川卓示, 山内由章, 海洋資源の調査に貢献する自律型深海巡航探査機 (AUV) への取組み, 三菱重工技報, vol.47, pp.37-44, 2010.
141	山本修治, 阿部信太郎, 佐藤比呂志, 古屋 裕, 荒井良祐, 津村紀子, 伊藤谷生, 房総半島南部太平洋側浅海域における海溝斜面盆地群の構造: 2005・2007 房総南部浅海高分解能反射法地震探査の成果, 活断層・古地震研究報告, no.13, p.75-110, 2013
142	山下幹也, 三浦誠一, 羽角華奈子, 深尾良夫, 勝又勝郎, 小平 秀一, 海洋微細構造イメージングにおける反射法地震探査データ取得仕様の比較, 物理探査, vol.66, pp.111-118, 2013.
143	由佐悠紀, 竹村恵二, 北岡豪一, 神山孝吉, 堀江正治, 中川一郎, 小林芳正, 久保寺章, 須藤靖明, 井川 猛, 浅田正陽, 反射法地震探査と重力測定による別府湾の地下構造, 地震 第 2 輯, vol.45, pp.199-212, 1992.

Appendix VI

原位置調査装置および採取方法の開発

目次

1. はじめに.....	VI-1
2. 原位置採水装置.....	VI-1
3. 原位置モニタリング装置.....	VI-5
4. 地下水試料の分析方法.....	VI-10
5. ⁸¹ Kr 地下水年代測定法のためのガス分離システムの構築.....	VI-13
6. I-129 ヨウ素の分析方法.....	VI-18
7. 参考文献.....	VI-24

図目次

図 2-1 ピストンサンプラーの概念図.....	VI-2
図 2-2 採水装置構成図.....	VI-2
図 2-3 希ガスサンプル採取時のサンプラーの概念図.....	VI-3
図 2-4 試作したサンプラーの写真.....	VI-4
図 3-1 想定される使用状況.....	VI-5
図 3-2 Oceanseven303 プローブと地上モニタリング装置.....	VI-6
図 3-3 ハウジングの組み立て図（見掛けと実寸は異なる）.....	VI-7
図 3-4 ハウジングの外観.....	VI-7
図 3-5 巻取り装置（左）と Oceanseven303 プローブ.....	VI-8
図 3-6 JFT ロッド（上）と Oceanseven303 を装着したハウジング（下）.....	VI-8
図 3-7 孔内への挿入状況.....	VI-9
図 3-8 データロガーでのモニタリングの様子.....	VI-9
図 5-1 淡水中の D0 の分離効率.....	VI-14
図 5-2 淡水および海水中の D0 の分離効率.....	VI-14
図 5-3 淡水中の D0 の分離効率と分離装置出口の水圧の関係.....	VI-14
図 5-4 深部地下水中の希ガスの分離効率.....	VI-15
図 5-5 幌延沿岸における深部地下水中の ⁸¹ Kr の分離.....	VI-16
図 6-1 酸化還元電位-Kd.....	VI-20
図 6-2 堆積物リーチング水中のヨウ素のフラクション.....	VI-21
図 6-3 沿岸地下水中のヨウ素のフラクション.....	VI-22
図 6-4 有機物試料から有機物を滲出させた試料溶液中のヨウ素のフラクション.....	VI-22

表目次

表 3-1 Oceanseven303 仕様.....	VI-6
表 5-1 幌延沿岸の地下水中のガスの捕集量.....	VI-17
表 6-1 沿岸地下水中の ¹²⁹ I/ ¹²⁷ I 同位体比および ¹⁴ C, ³ H 濃度.....	VI-19
表 6-2 実験条件 21.....	VI-20

1.はじめに

本付録は、地下水調査時に使用した原位置採水装置、地化学モニタリング装置、試料の採取方法および分析方法について説明する。

2.原位置採水装置

地下水の採水には、ポンプでの揚水による地上採水だけでなく、原位置採水装置を用いた封圧採水を実施している。これは、地下水中の溶存ガスを地上に揚水して採水した場合、水圧低下により、脱ガスする可能性がある。脱ガスとは、溶存していたガスがガス化することであり、特に大深度から採取したガスでは、水圧が解放されるため、顕著になる場合が多い。例えば、深度 1000 m の場合、10 MPa 程度の水圧がかかっているが、地表で大気解放されると、ヘンリーの法則などからも明らかなように、溶解度が低下し、ガスが分離する。ガス分離時には、溶液のバブリングなどと同様に、溶存可能であったガスも一緒に抜ける可能性が高いため、地下水中のガス量は著しく低下することが多い。幌延などのように溶存ガスが多い地域では、深度に対して溶存ガス量が飽和状態になっている場合も多いため、揚水などによって脱ガスが発生し、ガスの組成が適切に評価できない場合がある。

このため、原位置までサンプラーを降下させ、原位置の水圧状態で地下水を採取できるサンプラーを用いて採水した。サンプラーは、原位置に到達後に操作することにより、原位置地下水を採取できるものとした（図 2-1参照）。採水装置は、チューブ内にアルコール（比重:0.8 g/cm³）を入れることにより、地上での加圧・減圧で動かせるようにした。まず、地上でチューブを数Mpa以上に加圧してサンプラーを原位置に降ろす。深度1000 mでは、アルコールによる圧力は8 Mpa程度と地下水の10 Mpa程度と比べて2 Mpa程度の差圧が生じる。このため、チューブの加圧を解放するとピストンがアルコールと地下水の差圧で動き、サンプラー内に地下水が充填される。最後にチューブを加圧することで逆止弁が働き、地下水を外部と遮断し、原位置圧力のままで地表に引き上げることができる。このため、装置は確実に原位置で操作することができる。

採水装置は、サンプラー、サンプラーを吊るケーブル兼チューブ、ケーブル用電動ウィンチ、サンプラーを作動させるための圧力容器、駆動力を与えるためのコンプレッサーからなる（図 2-2）。

また、採水装置は、本事業で実施する深井戸などの条件を考慮して以下の性能を有している。

- ・ 深度1200mで採水可能（採水の対象となる井戸の深度を1200mと想定）
- ・ 内径32mmのボーリング孔に挿入可能（ケーシングに挿入できるサンプラーのサイズ）
- ・ サンプラーの有効容量を400 ml以上（1 m程度のサンプラーの長さ）
- ・ 原位置において試料を採取し、原位置圧力を保持可能（圧力の低下を防止）
- ・ 電動ウィンチは分速20 m以上の巻き上げ能力（1200 m孔で上下動に1時間程度）
- ・ 圧力容器はサンプラーを作動させるのに十分な容量と耐圧を要し、サンプラーの動作確認が出来るものとする。
- ・ コンプレッサーは、採水時以外にサンプラーに地下水が流入しないように、十分な圧力を与えられること
- ・ チューブ、タンク、サンプラーなど採水装置を構成する装置はコンプレッサーの圧力に耐える耐圧性能を有すること

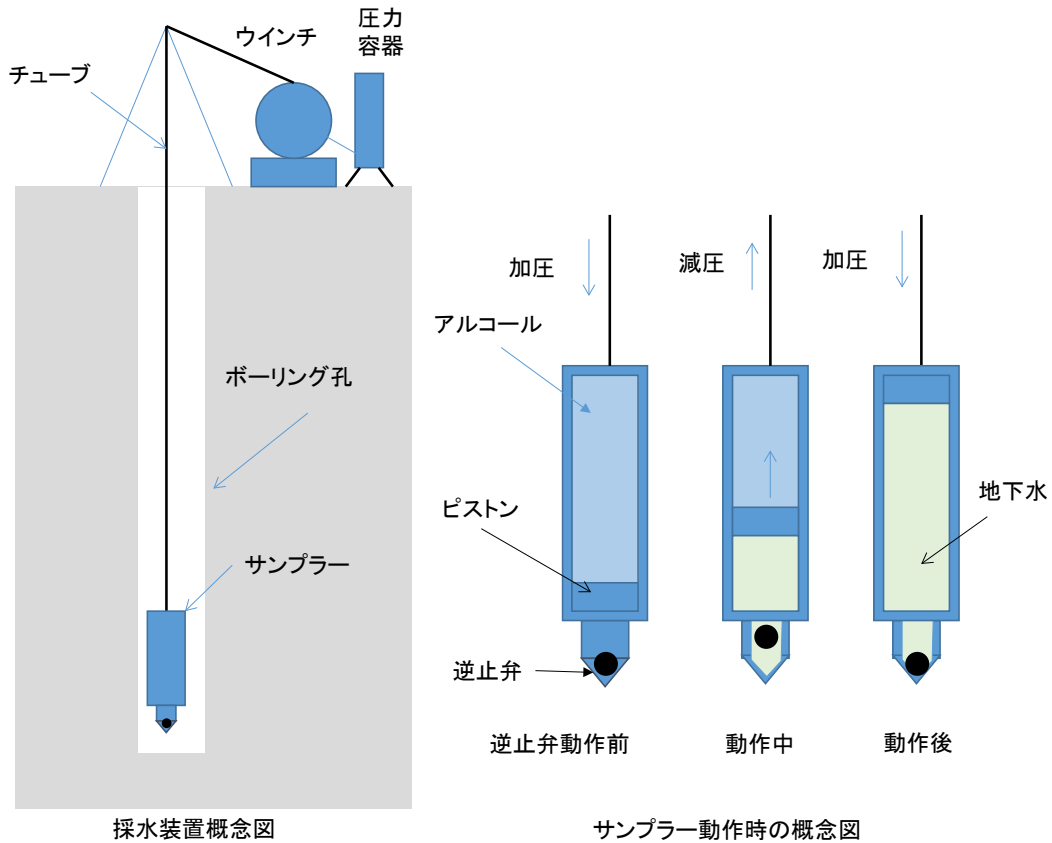


図 2-1 ピストンサンプラーの概念図

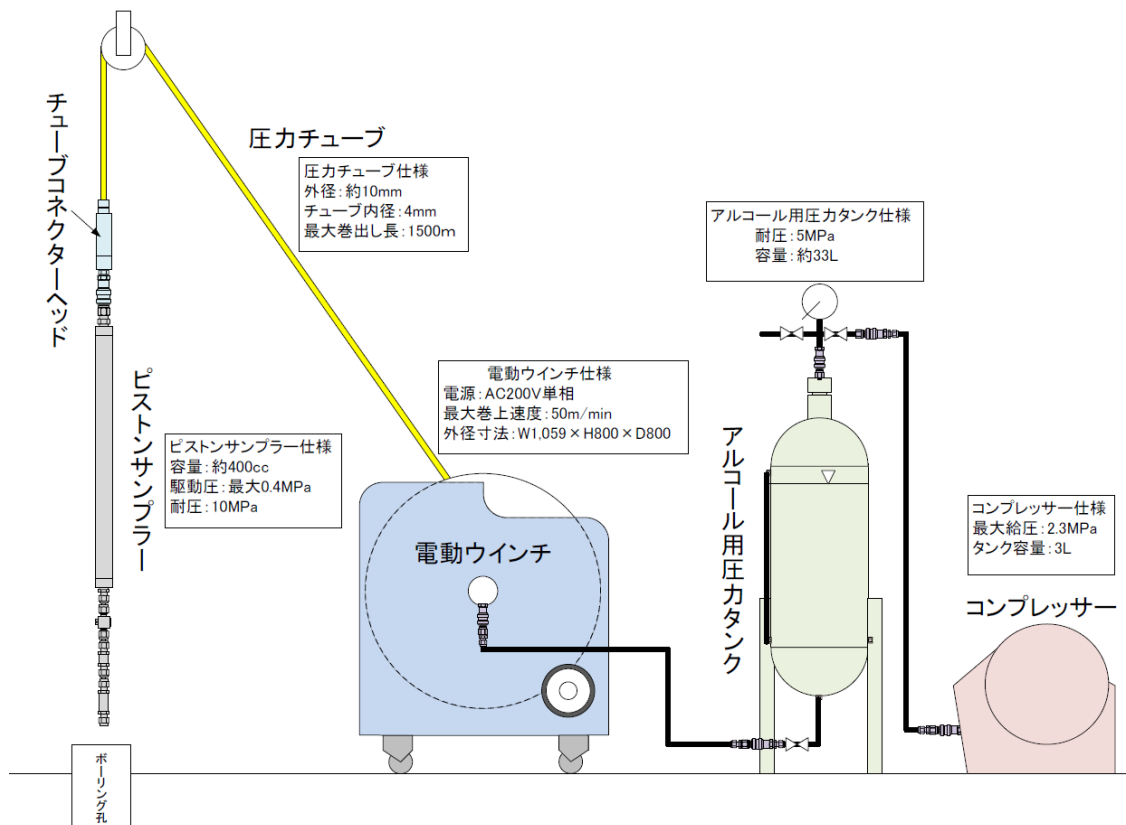


図 2-2 採水装置構成図

希ガス採水の場合には、地下水を銅管内に封入する必要があるため、サンプラーの下部に、バルブ、銅管、バルブ、逆止弁で接続し、初期に蒸留水を銅管に満たしてサンプラーを降ろす。図 2-3 に示すように、サンプリング時には採水と同じように減圧することによって、銅管を通して地下水を流すことにより、蒸留水を地下水で置き換える。銅管の体積(約20 ml)に対して、サンプラーの体積(約400ml)は十分に大きいため、蒸留水は地下水で十分に置き換わると考えられる。

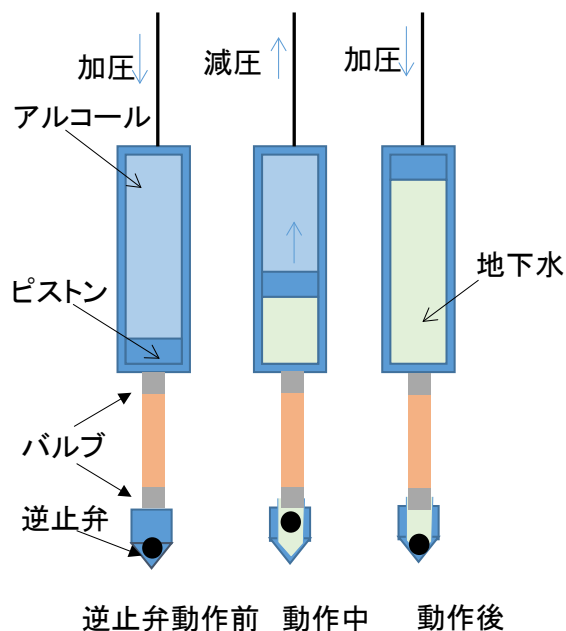


図 2-3 希ガスサンプル採取時のサンプラーの概念図

試作したサンプラーを図 2-4 に示す。原位置の地下水を採取することができた。ただし、浅部では、アルコールと地下水との差圧が小さく、サンプラーが動作しない場合もあった。この場合には、チューブ内のアルコール量を減らし、チューブ内のガス量を多くするなど、より圧力差がつくような工夫が必要であると考えられる。



図 2-4 原位置採水装置の写真

左上：ウィンチ、左下左：加圧タンク、左下右：サンプラー、右：サンプラーの孔内設置状況

3.原位置モニタリング装置

原位置での物理化学パラメータ測定（pH、ORP、EC、DO、温度）のためにモニタリング装置を用いた。その概要を以下に記す。

地下水の物理化学パラメータ（pH、ORP、EC 等）はボーリング孔の孔内で測定対象の地下水が湧水する深度で測定することが必要である。一方で、1000m を超えるような深度では高い水圧がかかることや、地層処分にかかわる調査孔などでは孔径が細い場合が多く、耐圧性と小口径を両立した物理化学パラメータ測定装置が必要である。さらに、地下水の湧水区間にダブルパッカーをかけて地下水を採取する機会が多いが、その場合は地上まで揚水する揚水ロッドの中に物理化学パラメータ測定装置を固定する必要がある。想定される使用状況を図 3-1 に示す。

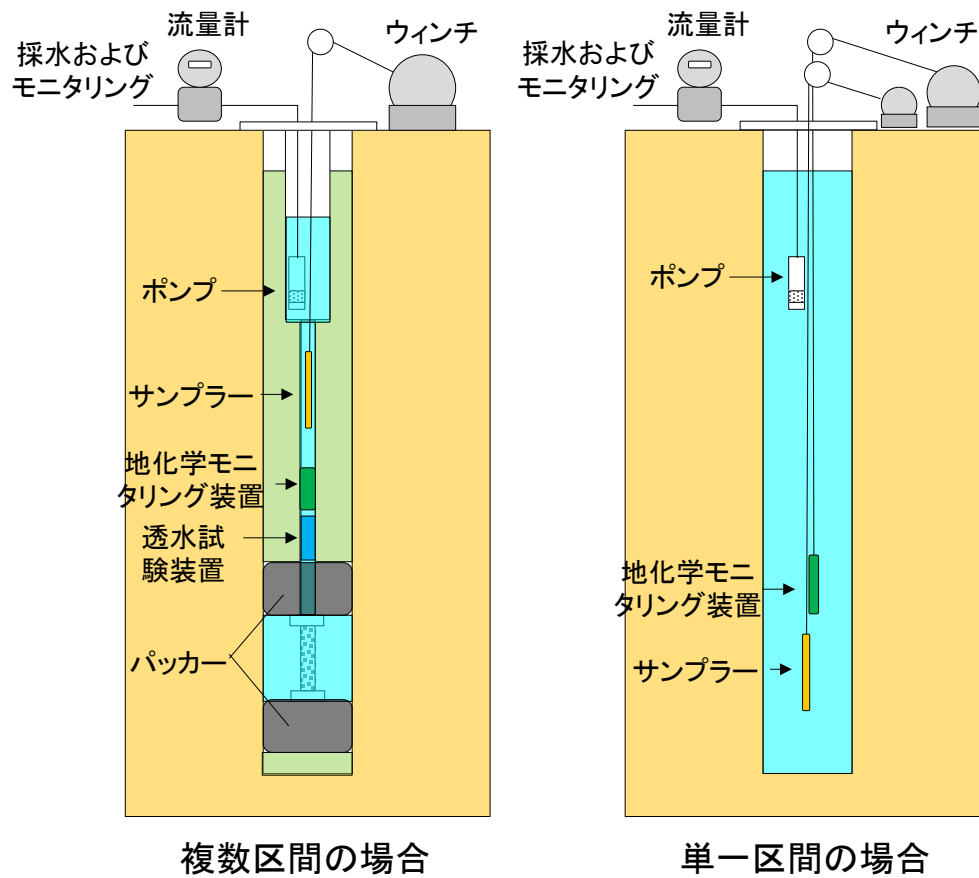


図 3-1 想定される使用状況

3.1 物理化学パラメータ測定装置の選択

物理化学パラメータ測定装置として Idronaut 社製の Oceanseven303 型リアルタイム CTD 計を用いた。1500m までの耐圧性能を持ち、直径は 43mm、長さは 670mm である。仕様を表 3-1、写真を図 3-2 に示す。

表 3-1 Oceanseven303 仕様

センサ標準仕様				
測定項目	測定範囲	精度	分解能	応答速度
深度	0~2000 dbar	0.05%FS	0.0015%FS	0.05 s
温度	-1~+50 °C	0.005 °C	0.001 °C	0.05 s
電気伝導度	0~6.4 S/m	0.7mS/m	0.1mS/m	0.05 s
pH	0~14	0.01 pH	0.001 pH	3 s
ORP	-1000~ +1000 mV	1 mV	0.1 mV	3 s
ハウジング				
材質	AISI 316			
耐圧	1500dbar			
重量	1.6kg (空中)、0.8kg (水中)			

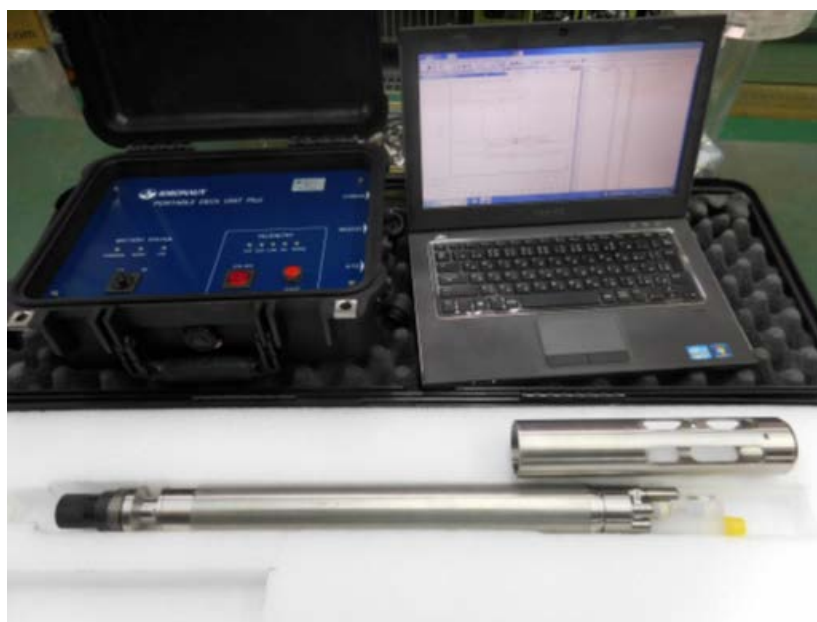


図 3-2 Oceanseven303 プローブと地上モニタリング装置

3.2 物理化学パラメータ測定装置のハウジング

図 3-1に示したとおり、物理化学パラメータ測定装置は、ハウジングに装着してJFTロッドを繋ぎながら上げ下ろしする場合と直接的にケーブルで吊るして上げ下ろしする場合との2通りの使い方が想定される。前者で使用するハウジングの組み立て図を図 3-3に、外観の写真を図 3-4に示す。仕様を以下に述べる。

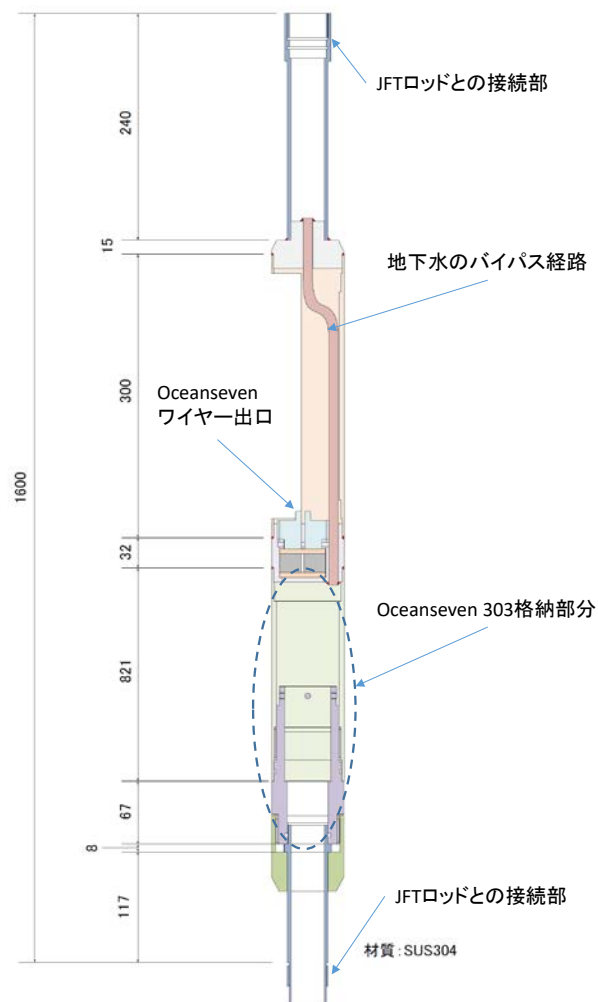


図 3-3 ハウジングの組み立て図（見掛けと実寸は異なる）

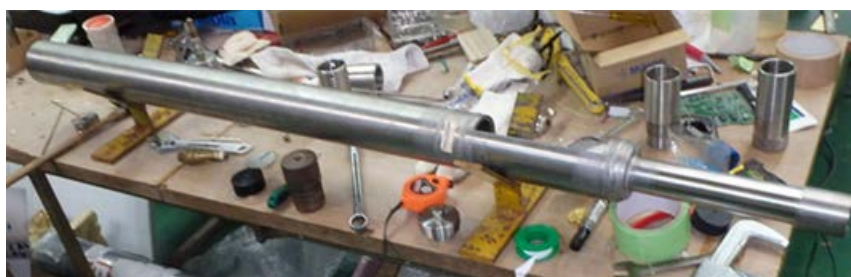


図 3-4 ハウジングの外観

3.3 巻き取り装置

図 3-1に示したとおり、ハウジングを使わずに物理化学パラメータ測定装置を孔内で上げ下げする場合にはウィンチが必要となる。また、孔内を上下させる最中にもモニタリングができるようにするため、スリッピングを装着した（図 3-5）。



図 3-5 巻き取り装置（左）と Oceanseven303 プローブ

3.4 現場での適用状況

北海道天塩郡幌延町浜里の DD-1 孔で原位置モニタリングを行った際の状況について示す。DD-1 孔は図 3-1 の左図のように複数区間で構成される孔のため、採水区間に設置するパッカーの直上に Oceanseven303 を装着したハウジングをつなげる。孔口方向には JFT ロッドを接続する（図 3-6）。



図 3-6 JFT ロッド（上）と Oceanseven303 を装着したハウジング（下）

図 3-7 に示すように、櫓でパッカーユニットと Oceanseven303 を装着したハウジングおよび JFT ロッドを吊り、孔内に沈めつつ、順次 JFT ロッドを繋いで所定の深度まで下ろす。



図 3-7 孔内への挿入状況

Oceanseven303 はリアルタイムモニタリングが可能であるため、データは逐次地上へと送信され、専用のソフトウェアにより表示・記録がなされる (図 3-8)。

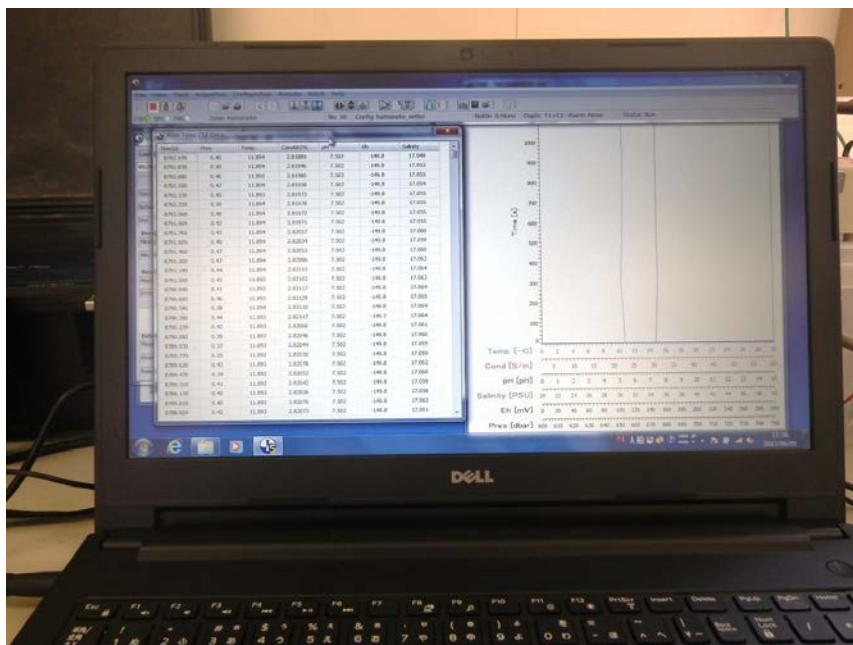


図 3-8 データロガーでのモニタリングの様子

4.地下水試料の分析方法

地下水の分析は以下の項目を実施した。

- ・主要溶存イオン (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 F^- 、 Cl^- 、 Br^- 、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、アルカリ度)
- ・微量元素 (I、B、Li、Si、etc)
- ・全炭素 (TC)、有機炭素 (TOC)、無機炭素 (IC)、不揮発性有機態炭素 (NPOC)
- ・安定同位体 (δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{37}\text{Cl}$ 、etc)
- ・放射性同位体 (^3H 、 ^{14}C 、 ^{36}Cl 、 ^{129}I)
- ・溶存ガス (^3He 、 ^4He 、Ne、Kr、Xe、CFCs (chlorofluorocarbons : フロン)、 SF_6 (六フッ化硫黄)、溶存二酸化炭素および $\text{C}_1\text{-C}_6$ の炭化水素ガスと溶存二酸化炭素および $\text{C}_1\text{-C}_4$ の $\delta^{13}\text{C}$ (以下、一般ガスと呼ぶ))
- ・溶存硫化水素および溶存 Fe(II)

分析方法は以下の通りである。主要溶存イオンの内、陽イオン (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 NH_4^+) の定量分析には、イオンクロマトグラフィー (メトローム社製コンパクトプロフェッショナル IC881) を用いて検量線法により実施した (例えば、日本分析化学会北海道支部編, 2005)。試料水中の各イオンを分離する分離カラムには、陽イオン交換樹脂が充填されている YS-50A、ガードカラムには YS-G を使用した。検量線は、元素ごとに化学分析用標準溶液 (関東化学株式会社) を既知の濃度に希釈した標準試料を調製した。

陰イオン (F^- 、 Cl^- 、 Br^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-}) の定量分析には、イオンクロマトグラフィー (メトローム社製コンパクトプロフェッショナル IC881 CO_2 サプレッサ付き) を用いて検量線法により実施した (例えば、日本分析化学会北海道支部編, 2005)。試料水中の各イオンを分離する分離カラムには、陰イオン交換樹脂が充填されている A Supp 5-150、ガードカラムには ShodexSI-90G を使用した。検量線は、元素ごとに化学分析用標準溶液 (和光純薬工業株式会社製) を既知の濃度に希釈した標準試料を調製し作成した。

アルカリ度の測定は、酸標準液 (0.01 mol/L) 硫酸を用いて pH4.8 まで滴定する手法 (pH4.8 アルカリ度) により実施した (例えば、半谷・小倉, 1995)。実際の作業では試料 30 mL をビーカーにはかり取り、pHメーターで試料の pHを確認しながら、pH4.8になるまで酸標準液で滴定した。

微量元素 (I、Si、B、Fe、Se、Sr、Li、Mn、Zn、Ba、Al、Rb、Cu、As、Cs) の定量分析には、ICP-MS (誘導結合プラズマ-質量分析装置 : Agilent Technologies 製 Agilent7500CE) を用いて検量線法により実施した (例えば、日本分析化学会関東支部編, 2008)。検量線は、元素ごとに化学分析用標準溶液 (和光純薬工業株式会社) を既知の濃度に希釈した標準試料を調製し作成した。

TOC (Total Organic Carbon : 全有機態炭素) および NPOC (Non-Purgeable Organic Carbon : 不揮発性有機態炭素) の測定は、島津製作所製 TOC-V CSH を用いた非分散型赤外分析計 (Non-Dispersive Infrared Gas Analyzer : NDIR) で実施した (例えば、半谷・小倉, 1995)。

TOC の定量分析は、試料中の全炭素 (Total Carbon : TC) と無機態炭素 (Inorganic Carbon : IC、または Total Inorganic Carbon : TIC) をそれぞれ測定し、TC 濃度から IC 濃度を差し引いて求める方法 (差し引き法) で実施した。検量線は、TC 濃度用にフタル酸水素カリウム標準液 (和光純薬工業株式会社)、IC 濃度用に炭酸ナトリウムおよび炭酸水素ナトリウム (ともに和光純薬工業株式会社) を混合した標準溶液をそれぞれ既知の濃度に希釈した標準試料を調製し作成した。

NPOC の定量分析は、試料水を酸性 (pH3 以下) にして通気処理し、試料水中の IC を CO_2 として除去した後に TC を測定する方法 (IC 前処理法またはプレ IC 除去法) で実施した。検量線は、フタル酸水素カリウム標準液 (和光純薬工業株式会社製) を既知の濃度に希釈した標準試料を調製し作成した。

水素・酸素安定同位体の計測は、Los Gatos Research 社製のレーザー吸収ガス分析装置を用いて Off-axis ICOS 法 (Off-axis Integrated Cavity Output Spectroscopy) にて、試料中の水素安定同位体比および酸素安定同位体比の同時分析を実施した (山中・恩田, 2011)。分析は手順書に準じた。

^3H 分析は、電解濃縮 (アルカリ水溶液電解) - 液体シンチレーション計数法によって実施した (文部科学省, 2002)。試料水を予め蒸留精製しアルカリ電解溶液とした後、電解濃縮を行う。電解終了後、電解液を中和・蒸留し、液体 (乳化) シンチレータを加え、低バックグラウンド液体シンチレーションカウンターにより計測した。分析は地球科学研究所で実施した。計測結果は、水素原子 10^{18} 個に対して ^3H が 1 個存在する率である TU (Tritium Unit) で示した。

^{14}C 分析は、グラファイト・ターゲット加速器質量分析法 (AMS 法) で実施した (中村, 2003)。沈殿法では、試料水 1 リットルにつき 1.2 g の塩化ストロンチウムを加え、試料水中の無機炭素を炭酸ストロンチウムとして沈殿させる。沈殿物は中性になるまで洗浄し、乾燥させた後、リン酸と反応させ CO_2 ガスを生成させる。得られた CO_2 ガスを精製した後、コバルト触媒を用いて $600\text{ }^\circ\text{C}$ に加熱しグラファイトを調製した。それらグラファイトをターゲットとし加速器質量分析 (AMS: Accelerator Mass Spectrometry) によって定量した。ガス化法では、試料水にリン酸を加えて CO_2 をガスとして回収した後、グラファイトを生成する (Nakata et al., 2016)。分析は Beta Analytic 社で実施した。

^{36}Cl 分析は、 AgCl ・ターゲット加速器質量分析法 (AMS 法) で実施した。水試料に含まれる塩化物イオンを塩化銀として回収し、それをターゲットとして AMS によって定量する (Fifield et al., 2013)。分析は、Australia National 大学で実施した。試料は、水試料の pH を酸性側に調整した後に、過剰量の硝酸銀を加えることにより、水試料中の塩素イオンを白色の塩化銀として沈殿させ回収する。一般的に水試料の塩素イオン濃度が 20 mg/L 以上ならば、煩雑な手間をかけずに直接沈殿させることにより塩素イオンを回収することができる。 ^{36}Cl の分析では、 ^{36}S が AMS 測定に影響する可能性が指摘されている (Elmore et al., 1979)。この ^{36}S の ^{36}Cl 測定への影響を小さくするために塩化銀の精製を行う。精製手順として、回収された塩化銀をアンモニア水に溶解させ、硝酸バリウムを加えることにより不純物として微量に含まれる硫酸イオンを硫酸バリウムとして沈殿させる。この工程は硫酸イオン濃度によっても異なるが、おおむね 3 回程度繰り返される。

^{129}I 分析は、有機溶媒による溶媒抽出および逆抽出を繰り返し、ヨウ素の分離精製を行い、ヨウ化銀の化学形態で回収する。精製したヨウ化銀と高純度ニオブ粉末を混合し、加速器質量分析装置で混合試料中の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 比の測定を行う。なお、ヨウ素の濃度分析からヨウ素量が 2 mg 以下と推定される場合には、ヨウ素同位体比が既知の同位体比が低い試料を混合して、同位体希釈法によりヨウ素同位体比を計測する。分析は Ottawa 大学で実施した。 $\delta^{37}\text{Cl}$ 分析は、塩化銀-ヨウ化メチル ($\text{AgCl}-\text{CH}_3\text{Cl}$) 変換-安定同位体比ガスクロマトグラフ質量分析法で実施した (Long et al., 1993)。試料水から生成した AgCl 沈殿物に、ヨウ化メチル (CH_3I) を加え、塩化メチル (CH_3Cl) に変換する。この CH_3Cl の同位体比をガスクロマトグラフ付同位体比質量分析計に導入し測定した。分析は Waterloo 大学で実施した。

希ガスの定量は、希ガス質量分析装置 VG-5400 (GV instruments) とその前処理ラインを用いて行った (馬原, 1998)。地下水サンプルを封入した銅管を、直接装置へと接続する。これにより、銅管内の希ガスを散逸させることなく前処理ライン内へ導入することが可能である。抽出ライン内では、まず、サンプルに超音波をあてることで、地下水サンプルからガス成分のみを抽出する。抽出されたガス成分に対して、コールドトラップ (液体窒素温度)・チタンゲッターを作用させ、水分や反応性のガスを取り除き希ガス成分のみを取り出すことができる。さらに、ステージ内温度を 20 K まで低下させることができるクライオスタッドを用いて希ガスを各成分に単離し、希ガ

スごとに質量分析装置へと導入する。質量分析装置では希ガスをイオン化し、適切な磁力をかけることによって設定した質量数のみをカウントすることができる。既知量 (0.13 cc) の空気に含まれる希ガスにおけるカウント数と、サンプルに含まれる希ガスにおけるカウント数を比較し、サンプルに含まれる希ガス量および同位体比を決定した。分析は電力中央研究所で実施した。CFCs の分析は、Purge and Trap 法によって地下水中の CFC を分離・抽出した後に、GC-ECD (Gas Chromatography - Electron Capture Detector : ガスクロマトグラフィ - 電子捕獲型検出器) にて検出・定量を行った (Plummer and Busenberg, 2006)。CFC は CFC-12、CFC-11 および CFC-113 を対象とした。

SF₆ の分析も CFCs と同様に、Purge and Trap 法によって地下水中の CFC を分離・抽出した後に、GC-ECD にて検出・定量を行った (Busenberg and Plummer, 2000)。

溶存二酸化炭素ガスおよび C₁-C₆ までの溶存炭化水素ガスについては Agilent 社製 GC7890 により、JISK-2301 に基づいて定量分析を行った。二酸化炭素および C₁-C₄ までの炭化水素については GV Instrument 社製 Isoprime-GC を用いて δ¹³C の測定を行った。このときの δ¹³C (‰) は PDB 基準である。

溶存硫化水素および溶存 Fe(II) の分析はそれぞれ N,N'-ジメチル-p-フェニレンジアミンを用いたメチレンブルー吸光度法、オルトフェナントロリン法 (日本分析化学会北海道支部編, 2005) にて分析した。

5. ^{81}Kr 地下水年代測定法のためのガス分離システムの構築

地層処分サイトに貯存する地下水の長期安定評価には、 10^4 – 10^6 年の滞留時間の地下水年代測定のためのツール開発が極めて重要である。 ^{81}Kr は宇宙線生成核種であり、半減期が21万年の長寿命放射性核種であるため、地層処分対象となる 10^4 – 10^6 年の時間枠における地下水の絶対年代測定に有効である。我が国の地層処分研究にフォーカスした ^{81}Kr 地下水年代測定法の開発には、我が国の沿岸の深部地下水の性質に適応した抽出システムの構築が必須である。

沿岸の地下水の流動評価のためには、深部地下水の年代を測定できるトレーサー開発が重要となる。我が国の深部地下水はメタンを主成分としたガスが豊富に溶存しており、ガス圧は大気平衡の圧力よりけた違いに高い。また、沿岸の地下水は塩分濃度が海水と同等のものも多い特徴がある。

5.1 沿岸の深部地下水中の ^{81}Kr 分離システムの構築

沿岸の深部地下水の流動評価に必要な地下水中の ^{81}Kr 情報を得るために、地下水中の ^{81}Kr を効率よく分離できる ^{81}Kr 分離システムを開発を行った。

希ガス採取システムは、1) 装置の小型化、2) 大気混入防止対策、3) 沿岸の地下水からの分離効率などを考慮して開発した。

希ガス採取装置は、Ohta et al. (2009)の地下水からのガス採取システムを基に、可動性と小型化の観点から改良を行った。装置は地下水からのガスを分離する分離ユニットとガスを捕集する排気ユニット、およびポンプ部で構成される。分離ユニットにはメンブレンフィルター、中空糸膜、および水トラップホルダーより構成され、排気ユニットは真空ポンプと抽出ラインで構成される。分離ユニット、排気ユニット、ポンプ部は個々に分解でき、可搬できるシステムとした。

正確な希ガス採取のためには、大気混入を定量的に把握する必要があるため、大気混入を評価するために、フロンガスなど大気に含まれるが地下水に含まれない成分を用いて、大気混入を評価した。開発した装置を原位置に適用した結果、フロンガスはサンプルにほとんど含まれないことが確認できた。このため、分離システムラインへの大気混入はほとんど無視できることが確認できた。

地下水に溶存する希ガスを効率的に分離できる地下水の化学・物理的条件(塩分濃度、地下水圧、水温)と分離条件を決定するために、模擬地下水を用いて室内試験を行った。

図 5-1 に淡水中の平衡値に達した D_0 を指標として、淡水中の D_0 の分離効率の経時変化を示す。開発した分離システムでは、 D_0 の分離効率はほぼ100%であることがわかった。

淡水および海水と平衡の D_0 を指標として、脱ガス後の水中の D_0 の分離効率を図 5-2 図 5-3 に示す。淡水および海水中に含まれる D_0 の脱ガス分離効率は100%程度であった。これより、開発した分離システムでは、海水と同等の塩分濃度に対応する地下水でもガスを十分に分離できることを確認した。図 5-3 に地下水圧に応じた本システムの脱ガス効率を示す。

また、開発した分離システムを地下水に適用して、He, Ne, Ar, Kr, Xeの分離効率を求めた(図 5-4)。地下水中のHe, Ne, Ar, Kr, Xeを実測した結果、地下水中の希ガスの分離効率は80–99%であることを明らかにした。したがって、地下水中の ^{81}Kr の分離効率は80%以上であると考えられた。

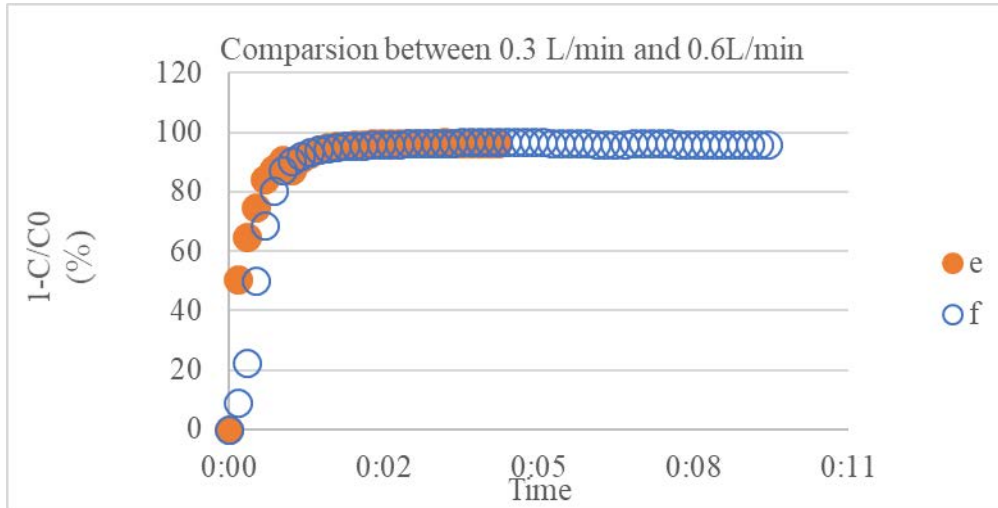


図 5-1 淡水中の D0 の分離効率

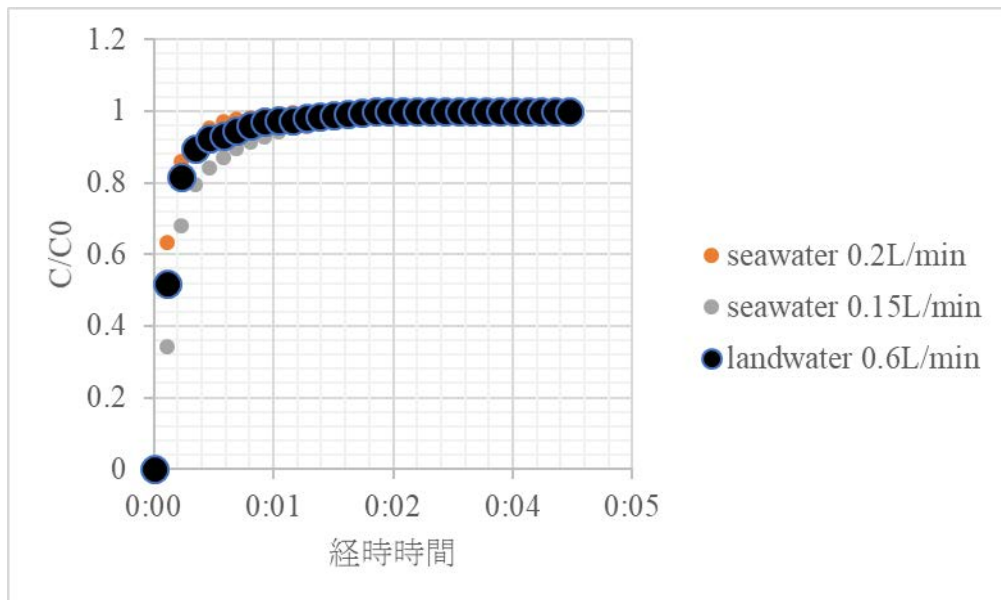


図 5-2 淡水および海水中の D0 の分離効率

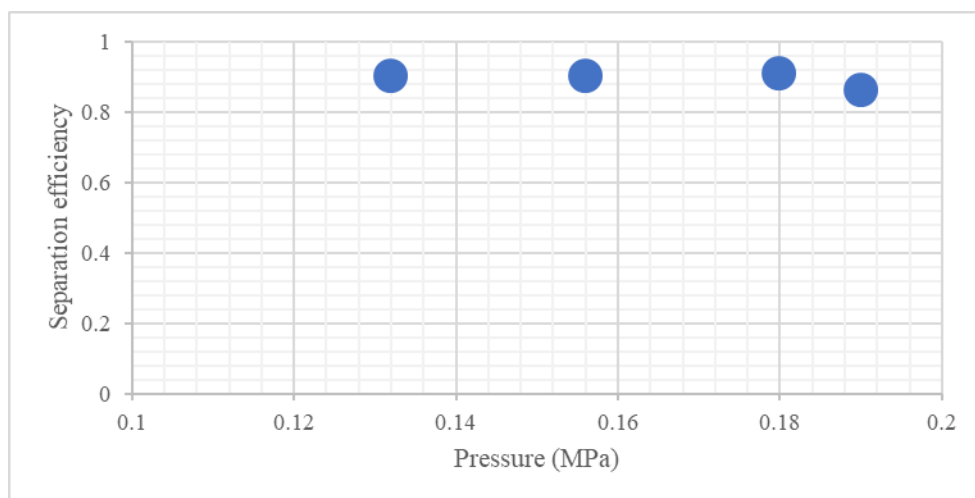


図 5-3 淡水中の D0 の分離効率と分離装置出口の水圧の関係

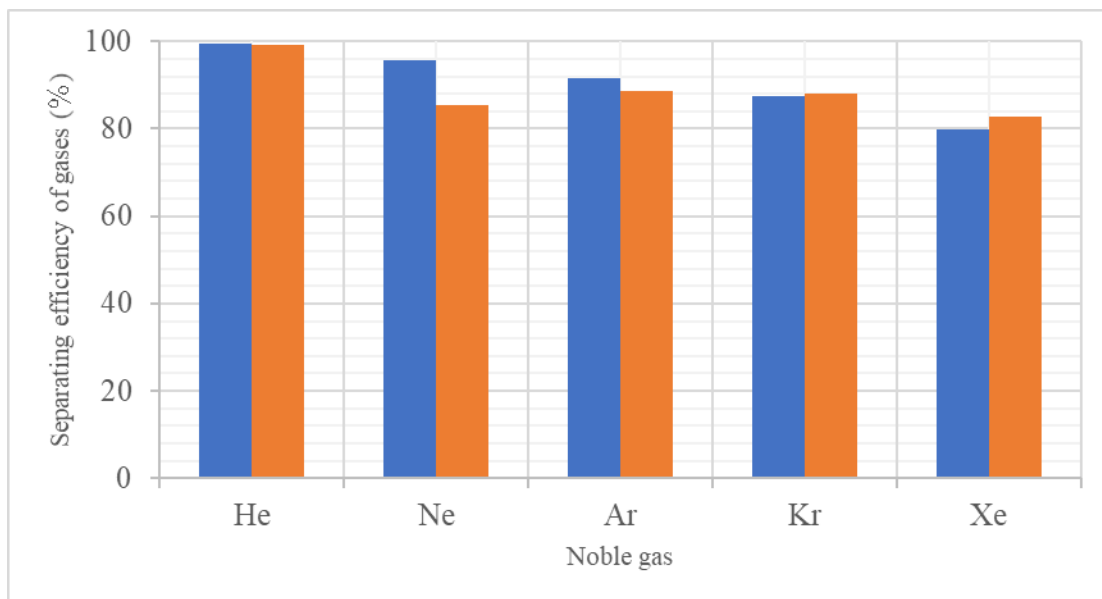


図 5-4 深部地下水中の希ガスの分離効率

5.2 沿岸域の深部地下水への適用

開発した ^{81}Kr 分離システムを用いて、幌延沿岸の地下水中の Kr の捕集を行った。図 5-5 に沿岸域で使用した分離システムを示す。この分離システムを用いて、100L-200L 程度の地下水よりガスを分離した。適用した幌延沿岸の地下水の採ガスの一覧を表 5-1 示す。

現在 $^{81}\text{Kr} / \text{Kr}$ は ATTA で測定準備中である。

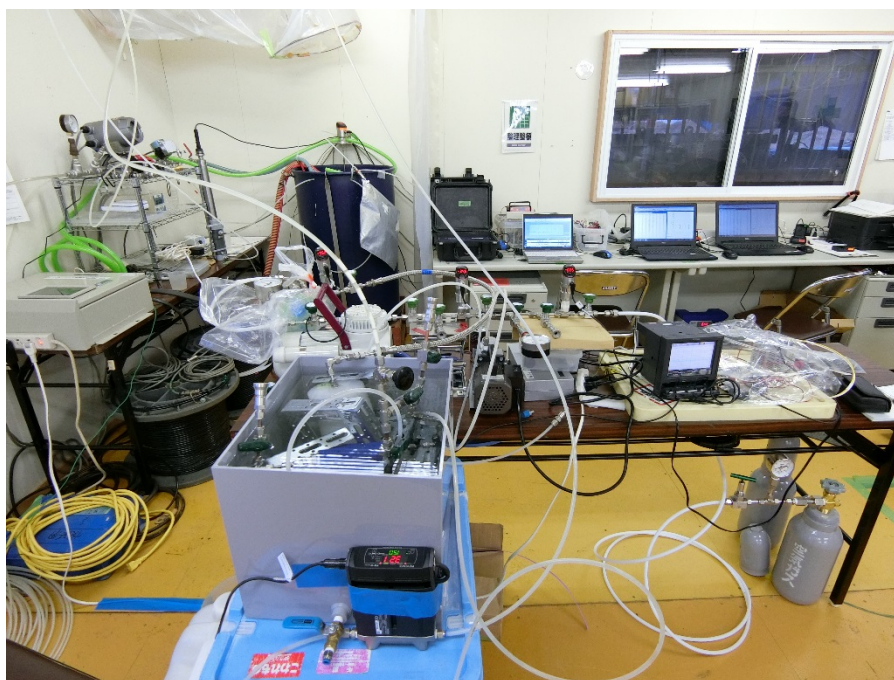


図 5-5 幌延沿岸における深部地下水中の ^{81}Kr の分離

表 5-1 幌延沿岸の地下水中のガスの捕集量

ID	Depth (m)	Sampling date	No	捕集ガス Total (L)
HMS3	715	2017. 5. 21	1	10
HMS4	306	2017. 6. 7-6. 8	1	3. 4
HMS4		2017. 6. 7-6. 8	2	3. 4
HMS4		2017. 6. 7-6. 8	3	3. 4
HMS4		2017. 6. 7-6. 8	4	3. 4
HMS5	476	2017. 9. 3	1	-
HMS6	613	2017. 9. 13	1	13. 9
HMS6		2017. 9. 13	2	12. 9
HMS7	90. 7-99. 7	2017. 10. 3	1	12. 2
HMS7		2017. 10. 3	2	6. 3
HMS8	214	2017. 10. 23	1	9. 2
HMS8		2017. 10. 23	2	9. 5
HMS9	943	2017. 11. 16	1	10
HMS9		2017. 11. 16	2	16
HMS9		2017. 11. 16	3	32
HMS9		2017. 11. 17	4	18

6.I-129 ヨウ素の分析方法

6.1 沿岸の深部地下水中のヨウ素の環境動態と地下水年代測定のための基礎情報の取得

地下水年代が数百万年超の地下水年代測定法のツール開発を行うために、半減期が長い ^{129}I に着目し、 ^{129}I 年代測定の要となる $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 同位体比の初期値および地下深部のヨウ素の動態に関する基礎情報の取得を行った。

6.2 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 同位体比の初期値の評価

^{129}I は半減期が 1570 万年である超寿命放射性核種であるため、超長期枠の物質循環の指標になる可能性がある核種である。 ^{129}I は天然起源および人為起源のものがあり、核実験および再処理工場の稼動が活発化された 1960 年代以降より環境中の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 同位体比は天然起源のものと比較して桁違いに高い(Ohta 2013, 2017)。

^{129}I は放射化学中性子放射化分析法 (Muramatu et al., 1986) およびトリプル四重極誘導結合プラズマ質量分析計 (Ohno et al., 2013) による ^{129}I 分析手法があるが、人為起源レベルの $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 同位体比分析には適応できるものの、 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 同位体比が 10^{-12} オーダーより小さい天然レベルの ^{129}I の分析には測定感度が不足している (太田, 2015)。

我が国では、地下水や海生試料中の極低レベル $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 分析 (10^{-12} 以下) は、2000 年代より AMS で盛んに行われている (Mahara et al. 2010, 2011, 2012, 2013, Muramatus et al., 2001, Ohta et al., 2013, Tomaru et al., 2007, 2009, Synder et al., 2002)。

地下水中の ^{129}I をトレーサーとした地下水年代測定法は核実験前の初期値の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 同位体比をベースとしているが、 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 同位体比より求めた地下水年代は、地下水の賦存する地質年代および $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$, ^4He をベースに求めた地下水年代と比べて違いが高く、地下水中のヨウ素の起源や年代の指標となるヨウ素同位体の初期値にはまだまだ議論の余地がある (Mahara et al., 2010, 2011, 2012, 2013, Ohta et al., 2017)。日本列島周辺の海水中の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 同位体比初期値は、戦前の海藻に残された ^{129}I 情報より核実験前の海水中の ^{129}I 濃度を推定する手法などが試みられている (Ohta et al., 2017)。ここでは、沿岸域の地下深部に貯存する地下水中の ^{129}I を指標とした地下水年代測定法を開発するために、沿岸域の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 同位体比の初期値に相当する値が得られる可能性のある若い地下水中のヨウ素同位体比実測を行い、 ^{14}C と比較を行った。

6.2.1 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 同位体比の初期値の実測

$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 同位体比の初期値を求めるために、 ^{129}I の半減期より遥かに短い時間スケールである数万年の規模の滞留時間の沿岸海域の地下水を対象に、地下水中の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 同位体比を実測した。

地下水中の極低レベルの $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 分析のためには、陰イオン交換樹脂による地下水中のヨウ素の分離・濃縮は試料本来の ^{129}I 値より桁違いに高くなるため、適用はできない (窪田ら 2007, 太田ら 2009, 2010, 2011)。ここでは、 ^{129}I のコンタミを避けた手法で地下水中のヨウ素同位体の化学分離を行い AgI の化学形に固定・精製を行い、加速器質量分析計で $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 同位体比の測定を行った。

表 6-1 に地下水中の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 同位体比および ^{14}C 濃度 (pMC) を記す。

表 6-1 沿岸地下水中の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 同位体比および ^{14}C , ^3H 濃度

Site	^3H (TU)		$^{129}\text{I}/^{127}\text{I} \times 10^{-14}$	^{127}I (ppb)	^{14}C (pMC)	Origin
1	0.4		17.3	223	9.8	淡水
12	n. d.		15.3	159	2.8	淡水
Average			16.3	-	-	-
9	n. d.		2.2	1332	14.0	汽水
10	n. d.		45.6	331	1.0	汽水
15	0.9		14.5	2832	38.1	汽水
Average			20.8	-	-	-
2	n. d.		14.7	139	79	海水
11	n. d.		34.4	239	4.0	海水
13	n. d.		2.9	3424	7.8	海水
Average			17.3	-	-	-
Average			18	-	-	-

表 6-1 より ^{14}C の検出される地下水中の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 同位体比の平均値は淡水起源では 16.3×10^{-14} , 汽水起源で 20.8×10^{-14} , 海水起源では 17.3×10^{-14} であった。沿岸の海域の地下水中の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 同位体比の平均値は 1.8×10^{-13} であった。

一方、地下水年代が 100 万年未満の我が国のかん水中の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 同位体比は 2×10^{-13} オーダーであり (Mahara et al., 2010, 2011, 2012, 2013)、表 1-1 の ^{14}C が検出される地下水中の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 同位体比の平均値と一致した。したがって、 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 同位体比は従来考えられていた初期値より一桁低い可能性があることが示唆された。

6.2.2 沿岸の深部地下水中のヨウ素同位体の動態評価

ヨウ素は主に海洋堆積物 ($5.9 \times 10^{12}\text{t}$; 68.2%) と陸上堆積物 ($5.9 \times 10^{12}\text{t}$; 27.7%) に貯蔵している。水中のヨウ素濃度は堆積物中のものより桁違いに低く、海洋中のヨウ素はわずか 0.8% ($7 \times 10^{10}\text{t}$) である。海水中のヨウ素の濃度は 50-60ppb 程度であるが、陸水中のヨウ素濃度はわずか数 ppb オーダーである (Muramatsu and Wedepohl, 1998)。

陸域・海域では、地球規模・ローカルレベルのヨウ素の物質循環の過程を通じ、植物・海水・陸域地表面よりヨウ素が大気中に放出され、大気中のヨウ素を含むエアロゾルの washout、fallout によりヨウ素を含む降水が陸域や海域へ沈着する。海水中のヨウ素の形態は主に IO_3^- であるが (Hou et al., 2007)、陸水中のヨウ素の形態は溶存態 (I^- , IO_3^- など) や懸濁態など様々な形態で存在している (Muramatsu et al., 2001, Ohta et al., 2012)。近年、Fallout 核種の不飽和層中の分布や形態別分離試験では、 ^{129}I は主に有機物に賦存している。また、不飽和層中の人工起源の ^{129}I の環境動態解析では、Fallout より数年程度の時間スケールでは、不飽和層中のヨウ素は Fe, Mn 酸化物態が有機物結合態より優勢である (Ohta et al., 2016)。

ここでは、沿岸の深部地下水中のヨウ素同位体の動態を理解するために、1) 沿岸の地下深部の場の雰囲気に応じたヨウ素の動態、2) 深部地下水中の有機物および懸濁態中のヨウ素の形態を実測し、ヨウ素と地下水流動の関係を考察する。

6.2.3 沿岸の地下深部の場の雰囲気に応じたヨウ素の挙動

酸化雰囲気および還元雰囲気の場合に応じた地下水中の ^{129}I の挙動を推測するために、酸化雰囲気と還元雰囲気、岩石-水中の ^{127}I のバッチ試験を行った。

バッチ試験の岩石は、深部で採取した岩石を $75\ \mu\text{m}$ 以下に粉碎・分画した試料を用いた。酸化雰囲気によるバッチ試験は、実験室内で行った。一方、還元雰囲気は O_2 を排除したグローボックス内 (N_2 ガスをグローボックス内に充填) でバッチ試験を行った。ヨウ素は I^- および IO_3^- の 2 種類の化学形態でバッチ試験を行った。バッチ試験は、花崗岩試料 100mg に約 1ppm のヨウ素 (I^- または IO_3^-) を含む溶液を添加し、約 168 時間にわたりシントウを行った。

シントウ後に溶液を $0.45\ \mu\text{m}$ のメンブレンフィルターでろ過を行い、溶液中のヨウ素を ICP-MS で測定を行った。また、バッチ試験終了後に酸化還元電位の測定を行った。図 6-1 にヨウ素の分配係数 (Kd) と酸化還元電位 (Eh) を示す。酸化還元電位が 0mV 付近でも Kd がほぼゼロになることが示された。地下深部の地下水中の酸化還元電位は $-n \times 100\text{mV}$ のオーダーであるため、沿岸の還元雰囲気中の地下深部では、Retardation factor は 1 となり、堆積物間隙中のヨウ素は地下水の流れとともに移動できると考えられる。

したがって、酸化還元電位が 0mV 付近以下の地下環境では ^{129}I は地下水とともに移動できるトレーサーとして活用できると考えられる。

表 6-2 実験条件

Size of rock	μm	< 75
Rock sample	g	0.1
IO_3^- conc.	ppm	0.593
I^- conc.	ppm	0.847
Volume	ml	10
Time	day	7

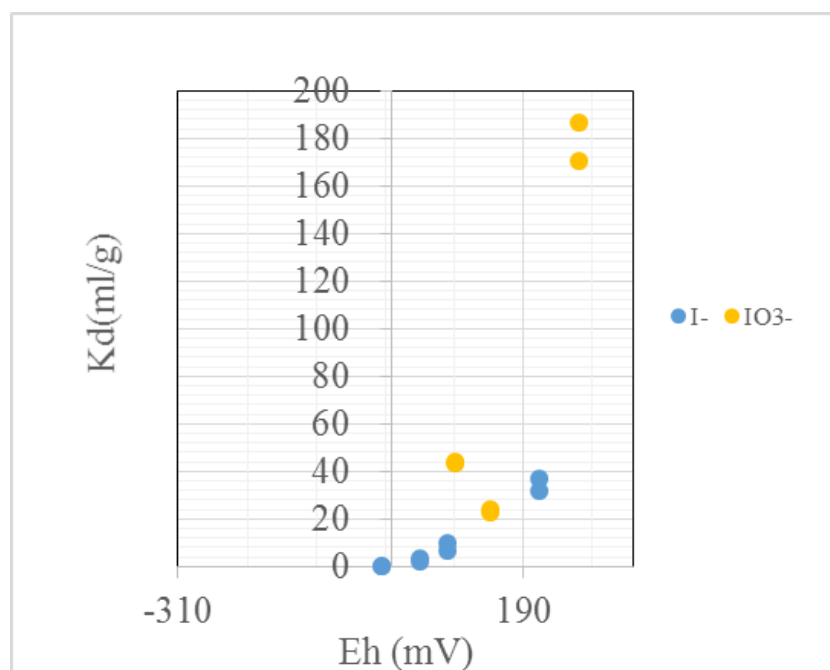


図 6-1 酸化還元電位-Kd

6.2.4 深部地下水中の有機物および懸濁態中のヨウ素の形態

以下のヨウ素と有機物を含む3種類の溶液を用いて、ヨウ素の分画試験を行い、錯形成・懸濁物中のヨウ素と溶存態のヨウ素の動態調査を行った。3種類の溶液は、A: 沿岸の堆積物のリーチング試験溶液, B: 沿岸で採取した深部地下水(2016年度採取, 2016年度報告書に結果記載済み), C: 有機物から淡水に浸出させたヨウ素と溶存有機物を含む溶液である。

Aは、沿岸域で採取した深部堆積物(n=12)をリーチングさせ、ヨウ素と有機物を含む溶液を得た。Bはフィールドより採水を行い、電力中央研究所の試験室内に運搬を行った。Cは、沿岸海底の有機物を擬したセルロースを主成分とした有機物試料を作成し、有機物試料を淡水に浸漬させ、有機物中のヨウ素と有機物を浸出させた試料溶液である。

A, B, Cの試料溶液を0.2 μ m, 100kDa, 30kDa, 3kDaのフィルターおよびカートリッジで分画を行った。分画後の溶液中のヨウ素をICP-MSで測定を行い、分画後の各フラクション溶液中のヨウ素濃度の実測値より、コロイドを形成している可能性のある有機物と溶存態のヨウ素濃度の関係を求めた。

図6-2にAのフラクション溶液中のヨウ素の残存率を示す。図6-2より堆積物のリーチング水中のヨウ素は全て3kDa以上の有機物・コロイドに吸着・錯形成をしていないことがわかった。したがって、3kDaのサイズまで有機物・コロイドを除去しても、水中のヨウ素量は一定であることがわかった。

図6-3に沿岸地下水中のヨウ素のフラクション分布図を示す。図より沿岸の地下水中の有機物および懸濁態を含むコロイドとヨウ素は結合していないことがわかった。

図6-4に有機物試料から有機物を浸出させた試料溶液中のヨウ素のフラクションを示す。有機物より浸出した有機物が豊富な溶液中でもヨウ素は3kDaのフラクションでもコロイドを形成していなかった。

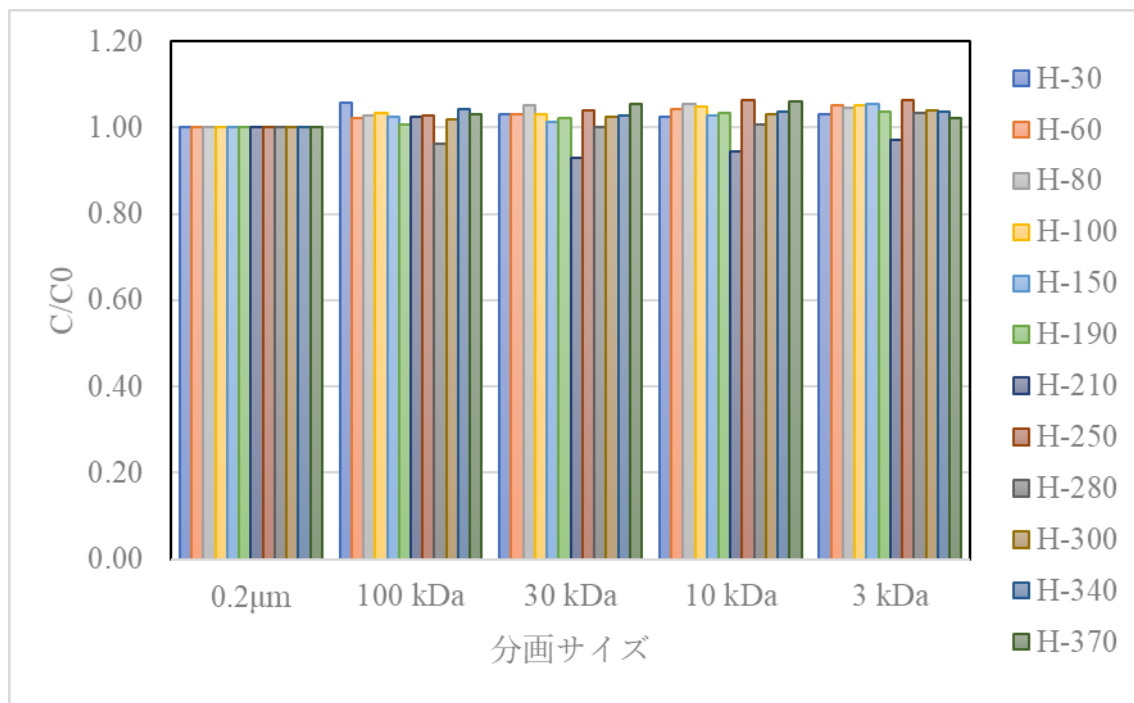


図 6-2 堆積物リーチング水中のヨウ素のフラクション

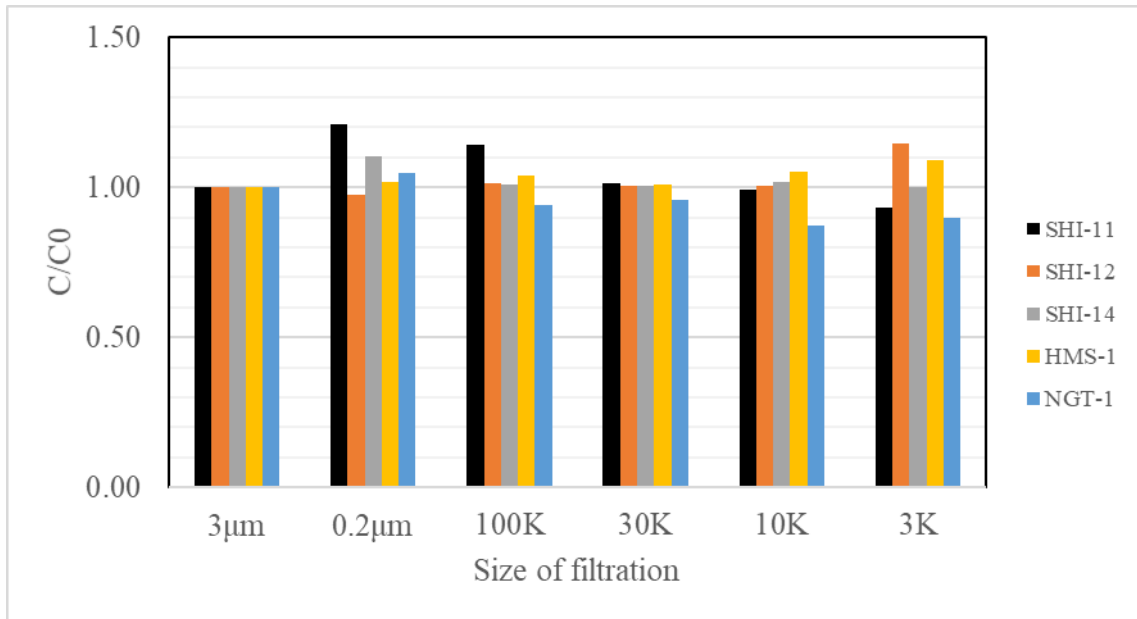


図 6-3 沿岸地下水中のヨウ素のフラクション

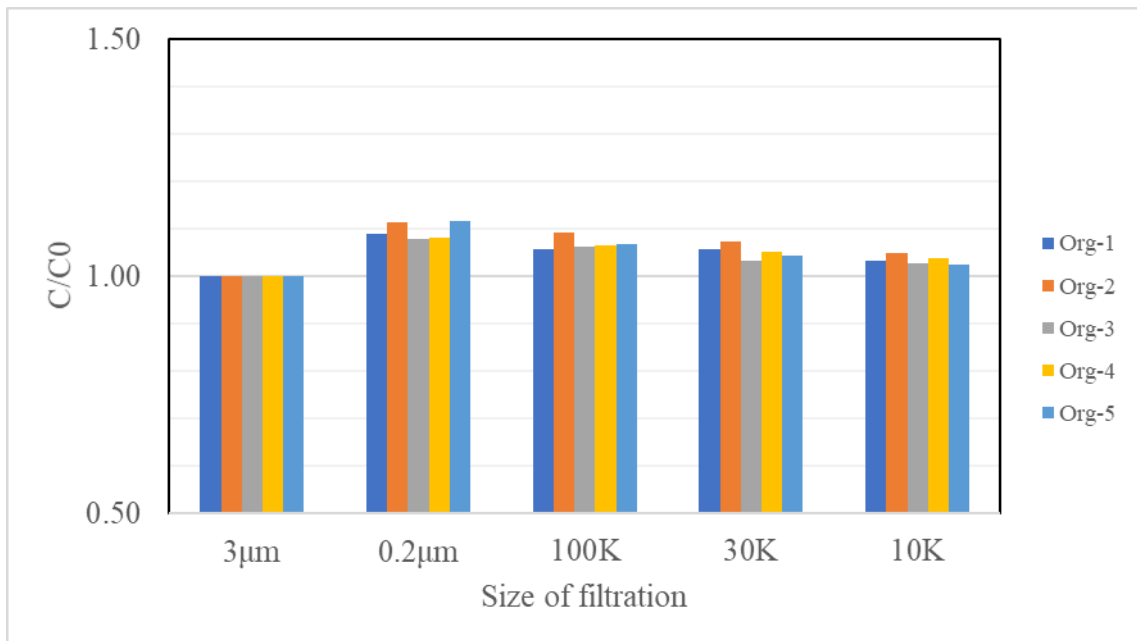


図 6-4 有機物試料から有機物を滲出させた試料溶液中のヨウ素のフラクション

6.3 結論

ヨウ素と有機物を含む沿岸地下水中のヨウ素は 3kDa 以上のサイズの有機物とコロイド形成されておらず、溶存状態で存在していた。酸化雰囲気では堆積物に取り込まれたヨウ素は還元雰囲気環境下で堆積物より溶出するため、地下水では、ヨウ素は地下水とともに移動できる。すなわち、地下深部の ^{129}I が沿岸海域の間隙水に取り込まれたあとは、地下水の流れとともに移動することができる。天然由来の ^{129}I をベースとした地下水年代測定法で従来定説とされてきた $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 同位体比は、 1.5×10^{-12} であるものの、沿岸の地下水中の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 同位体比の観測値から沿岸の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 同位体比の初期値は、従来考えられていた値より一桁低い 10^{-13} のオーダーであることが示唆された。

7.参考文献

- Bunsenberg, E. and Plummer, L.N.: Dating young groundwater with sulphurhexafluoride - Natural and anthropogenic sources of sulphurhexafluoride, *Water Resour. Res.*, 36, 3011-3030, 2000.
- Elmore, D., Fulton, B.R., Clover, M. R., Marsden, J. R., Gove, H. E., Naylor, H., Purser, K. H., Kilius, L. R., Beukens, R. P. and Litherland, A.E.: Analysis of Cl-36 in environmental water samples using an electrostatic accelerator, *Nature*, 277, 22-25, 1979.
- Fehn, U., Snyder, G., Egeberg, P.K., Dating of pore waters with ^{129}I : Relevance for the origin of marine gas hydrates, *Science*, 289, pp. 2332-2335, 2000.
- Fehn, U., Snyder, G.T., Matsumoto, R., Muramatsu, Y., Tomaru, H., Iodine dating of pore waters associated with gas hydrates in the Nankai area, Japan, *Geology*, 31, pp.521-524, 2003.
- Hou, X., Aldahan, A., Nielsen, S. P., Possnert, G., Nies, H., Hedfors, J., Speciation of ^{129}I and ^{127}I in Seawater and Implications for Sources and Transport Pathways in the North Sea, *Environ. Sci. Technol.*, 41, pp. 5993-5999, 2007.
- Long A., Eastoe C. J., Kaufmann R. S., Martin J. G., Wirt L. and Finley J. B.: High-precision measurement of chlorine stable isotope ratios, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57, 2907-2912, 1993. 窪田卓見, 太田朋子, 天野光, 鈴木崇史, 馬原保典, 地下水中のヨウ素同位体比分析のためのヨウ素抽出法の検討, 第1回 JAEA タンデントロン AMS 利用報告会論文集, 1, pp.36-39, 2008.
- Mahara, Y., Ohta, T., Tokunaga, T., Matsuzaki, H., Nakata, E., Nakano, T., Kubota, T., Yasuda, H., Pore-water mobility: Distribution of $\delta^{37}\text{Cl}$, $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$, $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ and dissolved 4He concentration in the core drilled in the Mobara gas field, Japan, *Nuclear Instrument and Method of Physics Research B*, 294, pp. 597-601, 2013.
- Mahara, Y., Ohta, T., Tokunaga, T., Matsuzaki, H., Nakata, E., Miyamoto, Y., Mizuochi, Y., Tashiro, T., Ono, M., Igarashi, T. Nagao, K., Comparison of stable isotopes, ratios of $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ and $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ in brine and deep groundwater from the Pacific coastal region and the eastern margin of the Japan Sea, *Applied Geochemistry*, 27, pp.2389-2402, 2012.
- Mahara, Y., Ohta, T., Tokunaga, T., Matsuzaki, H., Kubota, T., Origin of iodine of brines in the Mobara Gas Field, Japan- suggestion from the biogeochemical indicator of I/Br ratio and the pore water mobility, *International Symposium on Environmental Biogeochemistry 2011*, 2011.
- 馬原保典, 太田朋子, 徳永朋祥, 松崎浩之, 長尾敬介, 塩素 36 と溶存希ガス測定による鹹水の滞留時間推定とヨウ素同位体比について, *Proc. the Eleventh Workshop on Environmental Radioactivity*, 11, pp.107-116, 2010.
- 馬原保典, 太田朋子, 徳永朋祥, 松崎浩之, 長尾敬介, 窪田卓見, 我が国の鹹水中の $^{129}/^{127}\text{I}$ 比の分布と茂原地区における鹹水の滞留時間の推定, 第2回 JAEA タンデントロン AMS 利用報告会論文集, 2, pp.19-25, 2010.
- 馬原保典, 太田朋子, 窪田卓見, 徳永朋祥, 松崎浩之, 長尾敬介, 中田英二, 宮本由紀, 松枝大治, 阿部剛史, 地球規模環境トレーサーとしての沃素同位体比とプレートテクトニクス場の違いについての検討, 京都大学原子炉実験所第43回学術講演会報文集, 2010.

- 馬原保典:溶存希ガスを用いた地下水年代測定法の開発 —溶存希ガス地下水調査法の体系化—, 電力中央研究所 研究報告:U97052, 1998.
- 文部科学省 科学技術・学術政策局原子力安全課防災環境対策室:放射能測定法シリーズ9 トリチウム分析法 平成14年改訂,(財)日本分析センター, 2002.
- Muramatsu, Y., Ohmomo, Y., Iodine-129 and iodine-127 in environmental samples collected from Tokaimurar Ibaraki, *Sci. Total Environ.*, 48, pp. 33-43, 1986.
- Muramatsu, Y., Fehn, U., Yoshida, S., Recycling of iodine in Pacific areas: evidence from the iodine brines in Chiba, Japan, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 192, pp.583-593, 2001.
- Muramatsu Y. and Wedepohl, K. H., The distribution of iodine in the earth's crust, *Chemical Geology*, 147, pp. 201-216, 1998.
- 中村俊夫: I. 加速器質量分析(AMS)における環境中およびトレーサー放射性同位体の高感度測定, *Radioisotopes*, 52, 145-171, 2003.
- Nakata K., Hasegawa T., Iwatsuki T. and Kato T.: Comparison of ^{14}C collected by precipitation and gas-strip methods for dating groundwater, *Radiocarbon* *Radiocarbon*, 58, 491-503, 2016.
- 日本分析化学会北海道支部編:水の分析(第5版)、化学同人、472p, 2005.
- 日本分析化学会関東支部:ICP 発光分析・ICP 質量分析の基礎と実際—装置を使いこなすために、上本道久監修、オーム社、231p, 2008.
- Ohta, T. Mahara, Y., Changes in $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ratios in seaweed samples from Japan following world war II, AMS conference, CD-ROM, 2017.
- Ohta, T. Mahara, Y. Fukutani, S. Kubota, T. Shibahara, Y. Igarashi, T. Fujiyoshi, R. Watanabe, N. Kozaki, T., Speciation of ^{137}Cs and ^{129}I in soil after the Fukushima NPP accident, *Radiological issues for Fukushima's revitalized future*, pp.13-24, Springer, 2016.
- Ohta, T., Mahara, Y., Kubota, T., Abe, T., Matsueda, H., Tokunaga, T., Matsuzaki, H., Separation and measurement of ^{129}I and ^{127}I in pre-nuclear-era marine algae with ultra low $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ isotopic ratios, *Nuclear Instrument and Method of Physics Research B*, 294, pp. 559-562, 2013.
- Ohta, T., Mahara, Y., Kubota, T., Fukutani, S., Fujiwara, K., Takamiya, K., Yoshinaga, N., Mizuochi, Y., Igarashi, T., Prediction of groundwater contamination with ^{137}Cs and ^{131}I from the Fukushima nuclear accident in the Kanto district, *Journal of Environmental Radioactivity*, 111, pp.38-41, 2012.
- Ohta, T., Mahara, Y., Momoshima, N., Inoue, N., Ikawa, R. Taniguchi, M. Shimada, J., Separation of dissolved Kr from water sample with hollow fiber membrane, *Journal of Hydrology*, 376, pp. 152-158, 2009.
- 太田朋子, 土壌試料中のヨウ素-129 分析による福島事故時のヨウ素-131 降下量の復元, *ぶんせき*, No.5, pp.203-204, 2015.
- 太田朋子, 馬原保典, 窪田卓見, 阿部剛史, 松枝大治, 徳永朋祥, 松崎浩之, 海藻中の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 同位体比の測定, 第2回 JAEA タンデントロン AMS 利用報告会論文集, 3, 2012.
- 太田朋子, 窪田卓見, 馬原保典, 松崎浩之, 鈴木崇史, 環境試料中のヨウ素同位体 (^{129}I , ^{127}I) の抽出手法の検討, 第2回 JAEA タンデントロン AMS 利用報告会論文集, 2, pp. 101-104, 2010
- 太田朋子、窪田卓見、松崎浩之、鈴木崇史、天野光、安渡敦史、中野孝教、馬原保典、環境試料中の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 同位体比の抽出方法の検討, 京都大学原子炉実験所第43回学術講演会報文集, 2009.

- Ohno, T., Muramatsu, Y., Shikamori, Y., Toyama, C., Okabe, N., Matsuzaki, H., J. Anal. At. Spectrom., 28, pp.1283-1287, 2013.
- Plummer L.N. and Bunsenberg: Chlorofluorocarbons in the atmosphere (Chapter 2) in Use of chlorofluorocarbons in hydrology -a guide book-, IAEA, 2006.
- Snyder, T., Fehn, U., GoffIodine F., isotope ratio and halide concentrations in fluids of the Satuma-Iwojima volcano, Japan, Earth Planets Space, 54, pp. 265-273, 2002.
- Tomaru, H. Ohsawa, S., Amita, K., Zunli, L., Fehn, U., Influence of subduction zone settings on the origin of Pacific fluids: halogen concentrations and $^{129}\text{I}/\text{I}$ ratios in waters from Kyushu, Japan, Appl. Geochem., 22, pp.671-691, 2007.
- Tomaru, H., Fehn, U., Lu, Z., Takeuchi, R., Inagaki, F., Imachi, H., Kotani, R., Matsumoto, R., Aoki, K., Dating of dissolved iodine in pore water from the gas hydrate occurrence offshore Shimokita Peninsula, Japan: ^{129}I results from the D/V Chikyu shakedown cruise, Resour. Geol., 59, pp.359-373, 2009.
- Tomaru, H., Lu, Z., Fehn, U., Muramatsu Y., Origin of hydrocarbons in the Green Tuff region of Japan: ^{129}I results from oil field brines and deep groundwaters in the Akita and Niigata Basins, Chem. Geol., 264, pp. 221-231, 2009.
- 山中勤, 恩田裕一:波長スキャンキャビティリングダウン分光法を用いた水同位体分析計の測定精度について, 筑波大学陸域環境研究センター報告, 12, 31~40, 2011.

Appendix VII

マルチコレクター型希ガス質量分析装置の 地下水試料測定への活用

高レベル放射性廃棄物の地層処分では、地下水によって放射性核種が輸送されることを想定した「地下水シナリオ」による評価が重要になる。核種は放射性物質のため、地表までの移行時間が長いほど放射壊変によって危険度が低下することを考えると、処分場周辺の地下水流速が遅い方が安全評価上有利である。地下水の長期安定性に関する知見を得る有効な手法として、地下水の年代測定が挙げられる。これは主にトリチウムや放射性炭素を用いる手法が一般的であるが、ウラン等の α 壊変核種から生成された質量数4のヘリウム(^4He)の蓄積から年代を推定する方法(^4He 法)がある。この ^4He 法で推定可能な年代は地層処分では重要であると考えられることから、安全評価を行う上で重要な指標となる。この ^4He 法による地下水年代測定の精度を向上させるためには、地下水の ^4He 濃度の初生値を正確に求めることが必要となる。初生値は希ガスの溶存時の温度に依存するため、それを求めるには希ガス温度計を用いる。これらの手法では、希ガスの同位体比測定が行われ、その精度が手法全体の精度に大きな影響を与えるため、高精度の同位体比測定が求められている。希ガスの安定同位体比測定はこれまで、単独の検出器で同位体ごとに分析用電磁石の磁場を切り替えて交互に測定するピークジャンプ法が主流であった。しかし、この方法は、測定する同位体の数が増加すると測定時間が長くなり、イオン源の感度変動の影響を受けることから測定精度の向上が困難であるといった問題点があった。近年、マルチコレクター型希ガス質量分析装置が開発された。これは、マルチコレクター、つまり複数の検出器により同位体の同時測定が可能であり、測定時間の短縮やイオン源の感度変動の影響を受けないことから高精度の測定が可能であるなどの利点がある。そこで日本原子力研究開発機構東濃地科学センターでは、マルチコレクター型希ガス質量分析装置である IsotopX 社製 NGX を用いて地下水中の希ガスの安定同位体比を測定し、 ^4He 法による地下水年代測定への活用を行っており、本書はその概要を示す。

1. マルチコレクター型希ガス質量分析装置 NGX の概要

マルチコレクター型の希ガス質量分析装置である NGX は、He 同位体組成を測定可能であり、且つネオン (Ne) の同位体組成を高精度で測定でき、アルゴン (Ar)、クリプトン (Kr)、キセノン (Xe) の分析にも対応した装置である(日本原子力研究開発機構 2015、2016、2017)。測定を行うマルチコレクター型希ガス質量分析装置を含め地下水中の希ガスを分析する装置として、地下水から希ガスを抽出する溶存ガス抽出装置、妨害成分の除去や希ガスを単離するための前処理・精製装置を付随する。

溶存ガス抽出装置は、試料容器に合わせた接続部を要しており、銅管も金属製サンプル容器も接続可能となっている。試料容器から溶存ガスを抽出部に導入後、水銀を利用したテプラーポンプを用いて、ガス量を確認し、前処理・精製装置に溶存ガスを輸送するが、抽出量の定量性を保持するため、テプラーポンプを中心に9月に補修を行った。

抽出した溶存ガスから妨害成分を除去するための前処理・精製装置の構成は、Ti-Zr ゲッターを3基、NEG ポンプが2基、活性炭トラップが2基、極低温トラップ(シームレスシーブトラップ)が1基となっている。これらの配管を接続するバルブは、自動化による測定効率の向上を目指し、すべて空気圧で開閉する自動バルブとなっている。

同位体比測定を行うマルチコレクター型希ガス質量分析装置 NGX には、検出器としてファラデーカップ3基、二次電子増倍管3基が装備されている(日本原子力研究開発機構 2014)。ファラデーカップは安定性の高い検出器であり、比較的的存在量の多い同位体の検出に用いる。また、ファラデーカップのうち一つのゲイン抵抗値を従来の標準増幅器($10^{11}\Omega$)の10倍である $10^{12}\Omega$ の高速度仕様増幅器にすることによって比較的量の少ない ^{22}Ne の検出を改善する仕様となっている。二次電子増倍管は、ファラデーカップに比べ高感度の測定が可能であることから、 ^3He や

^{21}Ne の測定に用いる。本検討を行うにあたり、測定結果の品質を維持するため、使用頻度の高い 2 基について更新を行った。その他の特徴を表 1 に示す。

表 1 NGX の特徴

アルゴン感度	$1 \times 10^{-3} \text{ A/Torr}$
質量分解能	$M/\Delta M$ (10 % ピークバレー) > 600
分析可能な質量範囲	1~200

2. 溶存ガス抽出装置の整備、標準試料の測定

補修を行った溶存ガス抽出装置の動作確認や、更新した二次電子増倍管を含めた装置の感度を確認するために、標準水試料の測定を行った。標準水試料は、超純水を 1 週間以上大気中で暴露することで、大気中の希ガスと平衡状態にすることで作製した。その測定結果を表 2 に示す。また、合わせて大気も測定したのでその結果を示す。

表 2 NGX での標準試料等の測定結果

	標準水			大気	
	1 回目	2 回目	3 回目*	本研究	報告値**
$^3\text{He}/^4\text{He}$ ($\times 10^{-6}$)	(1.61±0.01)	(1.90±0.01)	(1.69±0.01)	(1.62±0.05)	1.40×10^{-6}
$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	336±4	334±2	1210±35	1150±24	296
$^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	0.182±0.003	0.224±0.013	0.561±0.001	0.538±0.06	0.188
$^{86}\text{Kr}/^{84}\text{Kr}$	0.299±0.001	0.299±0.001	0.307±0.002	0.304±0.01	0.306
$^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$	0.377±0.004	0.337±0.004	-	-	0.329

*二次電子増倍管交換後

**長尾 (2004)

1 回目及び 2 回目の測定は先に記載した二次電子増倍管の交換前の測定結果である。2 回の測定のうち、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 、 $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 及び $^{132}\text{Xe}/^{136}\text{Xe}$ は変動幅が大きい。 ^3He 及び ^{38}Ar は同じ二次電子増倍管検出器を使用しており、以前より感度の変動が確認されていた。このため、変動が確認された 2 基の二次電子増倍管を交換して感度の安定を図った。3 回目及び大気の測定結果は二次電子増倍管交換後である。標準水試料の $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 及び $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ は交換前と比較して大きく値が変動したが、これは検出器が変わったことによる感度の変化等に起因すると考えられる。また、大気試料の測定値は、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ が報告値の約 1.2 倍である。以前より、本装置では二次電子増倍管交換前より $^3\text{He}/^4\text{He}$ が高い傾向があったため、今後測定を繰り返し、測定値のバラつきと補正值を求める必要がある。 $^{132}\text{Xe}/^{136}\text{Xe}$ の変動幅が大きい理由としては、存在量が少ないため測定時のカウント数が少ないことが原因と考えられるが、原因の特定には至っていない。測定回数を増やすことで測定値のバラつきと変動要因を検討する予定である。

3. 地下水試料の希ガス同位体比測定結果

希ガス温度計において、希ガスの地下水への溶解度は、涵養時の気温に依存し、この影響は、質量数が高い希ガスの方がより顕著であることから、地下水の Kr と Xe の存在比を測定した。測定は、室温 (約 20℃) で作製した標準水試料と北海道天塩郡幌延町浜里地区で採取された地下水に対して行い、その結果の一例を表 3 に示す。

表 3 Kr 及び Xe の存在比

	標準水試料	地下水試料(HMS-5)
$^{86}\text{Kr}/^{84}\text{Kr}$	0.299±0.001	0.300±0.001
$^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$	0.337±0.004	0.358±0.013
$^{84}\text{Kr}/^{136}\text{Xe}$	55.2±4.0	33.3±3.1

$^{86}\text{Kr}/^{84}\text{Kr}$ 及び $^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ の値は、標準水試料と地下水の間で大きな違いは見られない。一方で、 $^{84}\text{Kr}/^{136}\text{Xe}$ では地下水は標準水より Kr の存在度が低い傾向が確認された。希ガスの溶解度は質量数に依存するため、Xeの方が低温では溶解しやすくなることから、地下水は低温状態で涵養した可能性が考えられる。

また、 ^4He 法に対し、Ne を用いた年代測定法がある。 ^{21}Ne は宇宙線暴露によって生成し、地中生成時の蓄積量で年代を推定することができる。しかし、 ^{21}Ne の生成量は非常に微量のため、検出が難しく、報告例も少ない。本検討において、高感度のマルチコレクター型の希ガス質量分析装置を導入した成果として、一部の地下水で Ne の同位体異常を確認できたことが挙げられる。従来のピークジャンプ法では、異常を確認するために必要な精度は得ることが困難であるが、本装置はマルチコレクターであり、さらに微量測定が可能な二次電子増倍管を有していることから、その異常の確認が可能となる。今回測定した地下水試料で、 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ で標準水試料との差は確認できなかったが、 $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ では標準水に比べ約 1.5 倍の高い同位体比が確認された(表 4 参照)。確認された試料の数が少ないこともあり、年代の解析には至っていないものの、マルチコレクター型希ガス質量分析装置を地下水の希ガス同位体比測定に用いることにより、従来法では得られない情報を得ることができた。

表 4 Ne の同位体比異常

	標準水試料	地下水試料(HMS-5)
$^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$	10.5±4.1	11.6±5.0
$^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$	0.0600±0.0120	0.0884±0.0163

馬原保典, 溶存希ガスを用いた地下水年代測定法の開発 –溶存希ガス地下水調査法の体系化–, 電力中央研究所 研究報告 : U97052., 1998.

長尾敬介, スロンチウム同位体比及び希ガスを用いた地球化学的研究手法の確立, JNC TY7400, 2004.

日本原子力研究開発機構 平成 26 年度地層処分技術調査等事業地質環境長期安定性評価確証技術開発報告書, 経済産業省資源エネルギー庁, pp.215-216, 2015.

日本原子力研究開発機構 平成 27 年度地層処分技術調査等事業地質環境長期安定性評価確証技術開発報告書, 経済産業省資源エネルギー庁, pp.208-210, 2016.

日本原子力研究開発機構 平成 28 年度地層処分技術調査等事業地質環境長期安定性評価確証技術開発報告書, 経済産業省資源エネルギー庁, pp.185-187, 2017.

Appendix VIII

プッシュプル試験に関する補足

1. はじめに
2. 試験孔
3. 希釈試験（平成 24 年度）
4. 試験概要
 - (1) 原位置試験システム
 - (2) トレーサー溶液とチェイサー
 - (3) 採水間隔
 - (4) 測器および分析装置
5. 濁度

1. はじめに

プッシュプル試験は、一般に分散長などの帯水層特性を確認するために行われる原位置の帯水層試験である。平成24年度のプッシュプル試験では、適切なチェイサー量を把握するためのチェイサー試験を行い、さらにプッシュプル試験の適用可能性を明らかにするために、繰り返し試験による破過曲線の再現性の確認、注揚水流量に対する分散長の変化、トレーサー溶液のイオン強度の違いに対する破過曲線への影響を明らかにした。平成24年度の調査結果は以下のようにまとめられる。(1) チェイサー試験ではデッドボリュームや裏込め材の間隙率等からチェイサーの最低必要量を約16Lと予想した。一方、実際の野外試験ではチェイサーの必要量は約50Lと見積もられた。結果としてチェイサーの必要量は理論的に求めることが困難であることがわかった。以降のプッシュプル試験ではチェイサーの量を120Lとしている。(2) 水素・酸素安定同位体比をトレーサーとした場合、同一仕様のプッシュプル試験は極めて高い再現性を得た。一方、ウランの破過曲線は似た形状を示すが、ピーク高さが異なるといった問題があった。(3) 水素・酸素安定同位体比を用いた場合でも、トレーサーの相対濃度 (R/R_0 :ここでRはある時間のトレーサー濃度、 R_0 はトレーサー溶液の濃度) を縦軸とする破過曲線のピーク濃度は1に達しなかったため、Gelhar and Collins (1971) の近似解に流入項を取り入れることによって、この問題を解決した。

2. 試験孔

本試験に用いた、北海道天塩郡幌延町浜里試験地にある DD-2 孔は深度 100m、スクリーン深度は深度 90.7～99.7m である。試験地の概要を図 1 に、DD-2 孔の構造および柱状図を図 2 に示す。地盤とスクリーンの間には玉砂利が充填されているが、深度 75～91m には止水材としてベントナイトペレットが充填されている。この深度領域は沖積基底礫層の分布深度に相当する。DD-2 孔では基底礫層の下位にあるシルト～礫層 (91.4～99 m に分布する 7.6 m 幅の帯水層) より地下水を得ていることになる。なお、平成 24 年度に実施したチェイサー試験で予想したチェイサーの最低必要量については、産総研 (2013) に基づき、表 1 から算出した。

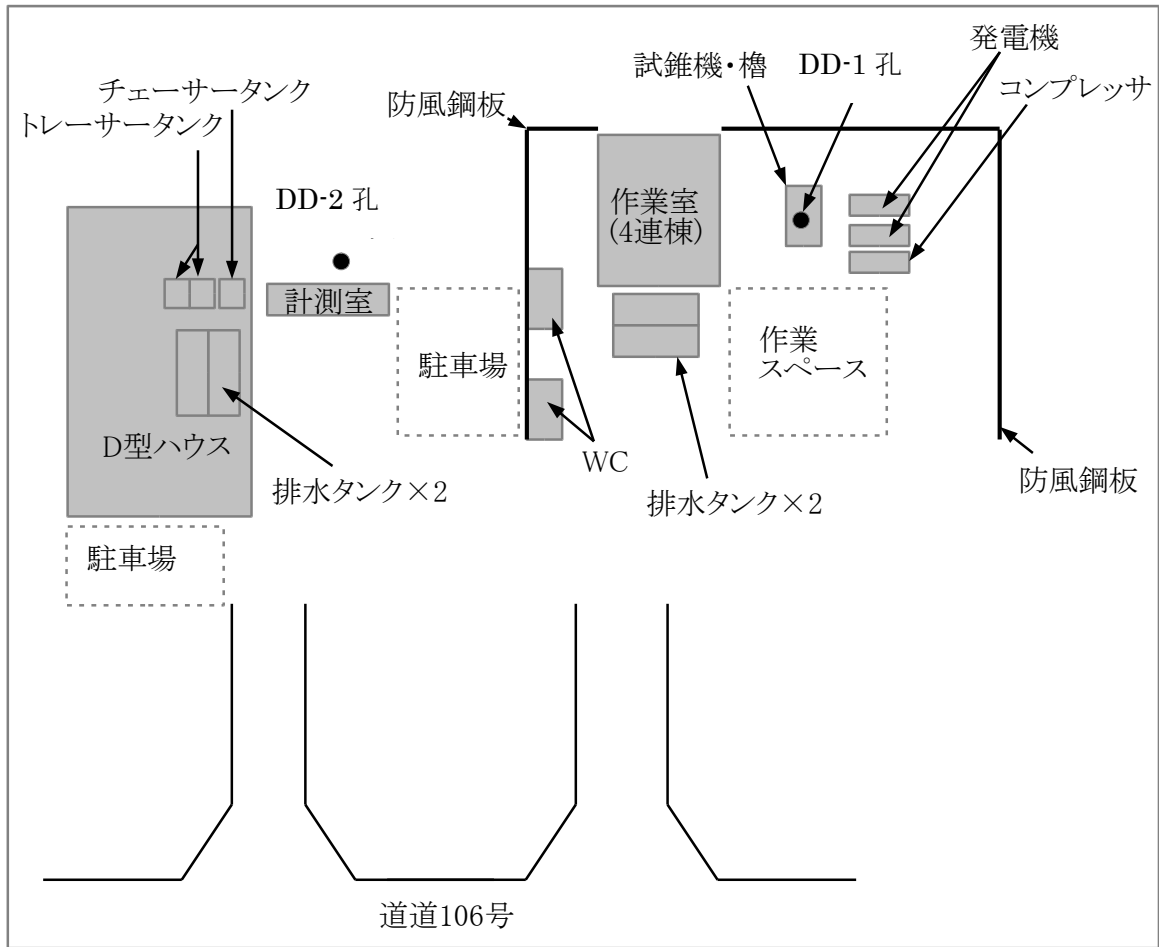


図1 試験地の概要

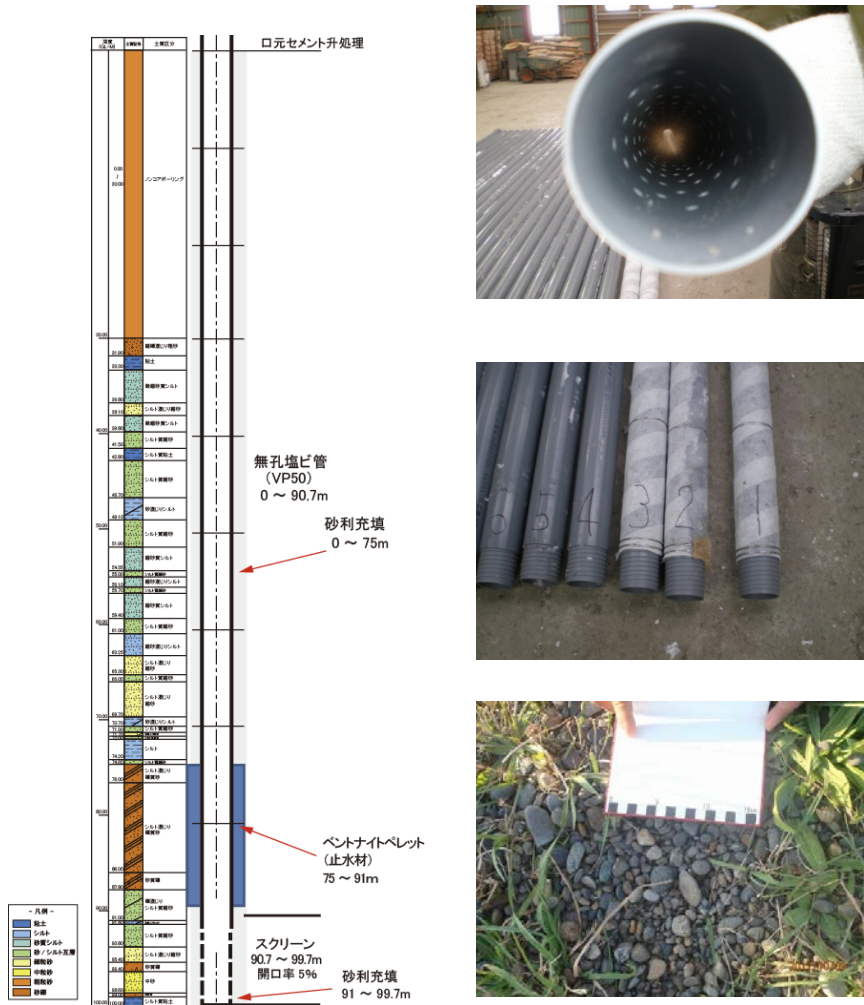


図2 DD-2孔の構造および地質柱状図（左）と、ケーシング（塩ビパイプ）、スクリーン（開口率5%）、玉砂利の写真（右）。産総研（2013）を一部修正。本来、地表から100m深までの地質コアの採取用におこなったボーリング孔であり、必ずしも水理試験用に仕上げられているわけではない。

表1 チェイサー試験の際に用いた井戸の諸元

		単位
スクリーン長	9.0	m
スクリーン内径	0.0255	m
掘削径	0.0580	m
砂礫の間隙率	0.5	
帯水層の間隙率	0.3	

3. 希釈試験（平成24年度）

平成24年度では地下水の自然流速の評価を目的とした試験として、希釈試験と呼ばれるトレーサー試験もおこなっている。試験の概要を図3に示す。パッカーの下が試験区間である。希釈試験では試験区間を、ウランを含んだトレーサー溶液で完全に置換した後、トレーサー溶液の供

給を止めてトレーサー濃度の低下速度を観測する。観測中は試験区間内の水は配管を通じて循環させている。地下水の自然流速が速いときは試験区間内のトレーサー溶液が原位置地下水と入れ替わる時間が短くなるため、トレーサー濃度の低下速度が速くなる。平成 24 年度の希釈試験ではトレーサー溶液の置換速度は 5L/min とし、揚水した地下水が長尺チューブ内のトレーサー水を押し出す形（試験区間に圧力をかけない）にした。

この試験の結果、ダルシー流速で $6.9 \times 10^{-7} \sim 1.0 \times 10^{-6}$ [m/s]、すなわち約 22~34 m/y という流速が得られた。この値は明らかに地下水年代から推定される速度よりも大きい。その理由として図 3 の②以降の配管内の循環速度が、トレーサー濃度の低下に影響を与えた可能性が指摘されたが、詳しいことは不明である。

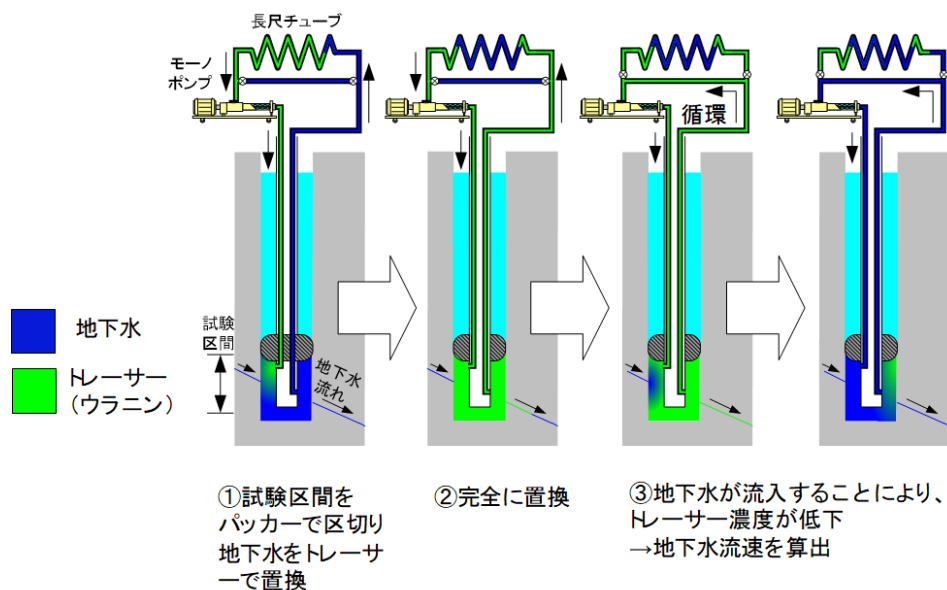


図 3 希釈試験の手順

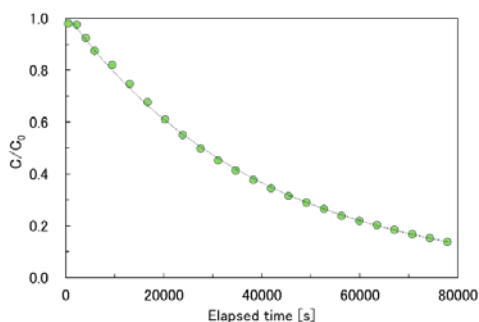


図 4 希釈試験の結果
置換したトレーサーのウラニン濃度が 80000 秒後には 20%以下になっている。

4. 験概要

(1) 原位置試験システム

プッシュプル試験においては、平成 24 年度の試験結果と比較するために、平成 24 年度に使用した装置と同様の性能を有する装置を使用した。本試験に使用した装置の構成を図 5 に、主要機材の一覧を表 2 に示す。図 5 における各部の詳細を以下に記す。

【孔内部】

- ・シングルパッカーでパッカーと孔底間を閉塞
- ・孔内装置のポンプ以深はダミーブロックなどを使用してデッドボリュームを最小にした。
- ・水圧計により、試験区間の水圧を観測するとともに、電気伝導度を試験区間内で観測
- ・水中にも揚水ポンプを配置し、モノポンプの吸引側が負圧にならないようにした。

【中継部】

- ・流量を確保するために、地上から試験区間に至る注水および揚水のチューブは内径φ13mmを主に使用した。
- ・孔内部装置はワイヤロープで吊り下げて挿入した。

【地上部】

- ・注揚水流量は、電磁流量計で計測した。
- ・流量はモノポンプの回転制御により実施した。
- ・水質モニタリング装置を設置し、物理化学パラメータを連続観測した。
- ・積算揚水量は、瞬間流量の積算により求めた。

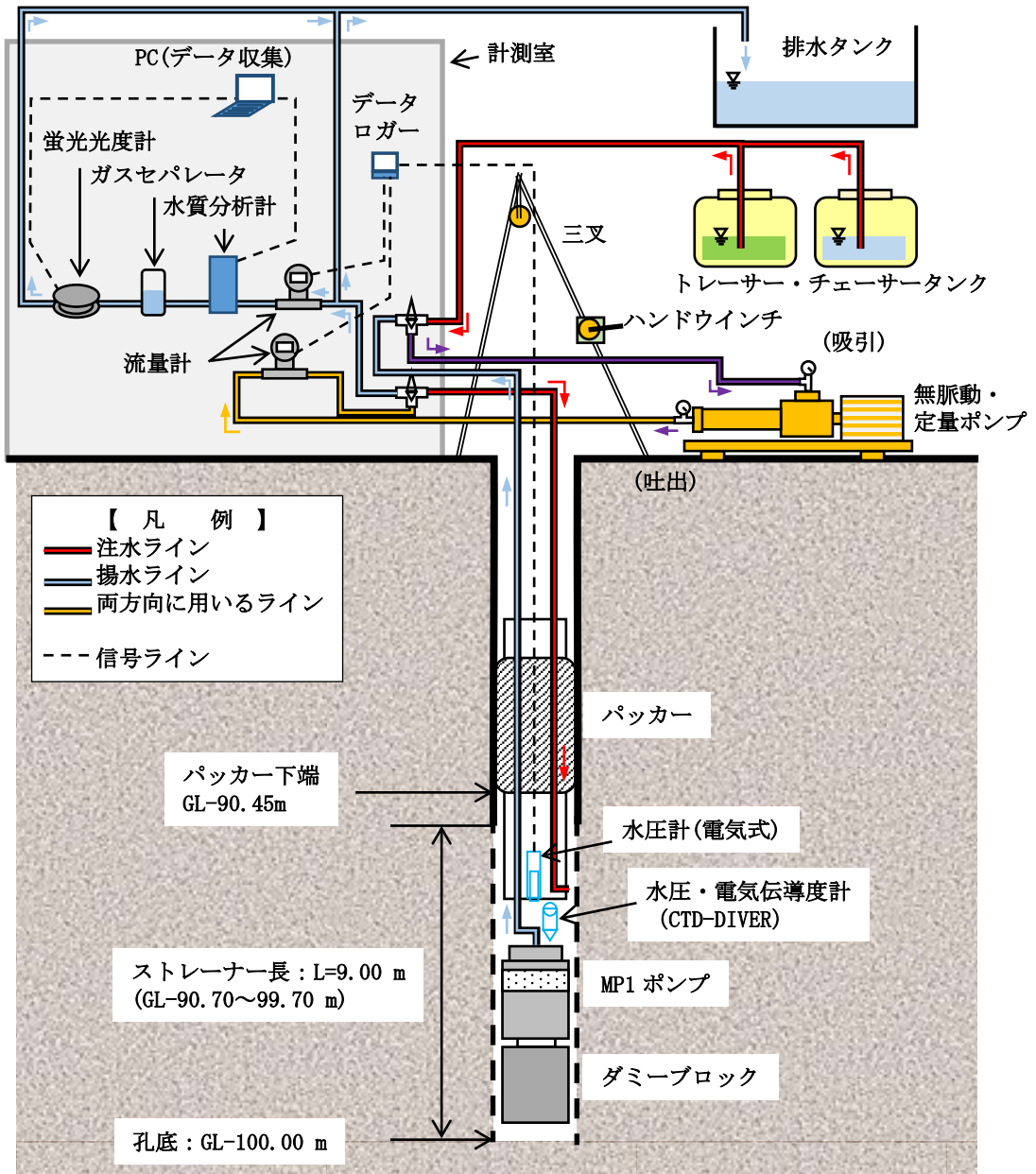


図5 プッシュプル試験装置の構成

表2 プッシュプル試験において使用した主要機材

装 置	主要部品 数量など	仕 様
孔内装置	ポートブロック、パッカーなど1式 適用孔：φVP50 内 最大装置外径：φ42 mm	・注入・揚水ポート ・両端固定式パッカー
圧力計(リアルタイム計測)	・試験区間 1台	・レンジ：0～3 MPa, 精度 FS-0.06%
圧力計(孔内絶対圧計測)	・試験区間 1台	レンジ ・圧力：0～100 m ・水温：-20～+80℃ ・EC：10 μ～120 mS/cm
中継部	ワイヤロープ	φ3mm 破断荷重 0.45t
	注水・揚水チューブ	φ16×13mm
地上水質モニタリング装置	・ホリバ W-22XD：1台	・測定センサー (PH, EC, DO, ORP, TEMP を利用)
	・蛍光光度計 Geomagnetism group GGUN-FL30 ：1台	・蛍光強度(蛍光染料濃度)の測定
排水タンク	ノッチタンク：2台	・計 16000 L
計測部	流量計 KEYNCE FD-UH15G：2台	・電磁流量計(2線式)
	レコーダーKEYENCE TR-V550：1台	・ポータブルタイプ

(2) トレーサー溶液とチェイサー

トレーサー溶液やチェイサーの溶媒は平成24年度の試験と同様の手順で作成した。トレーサー溶液の作成手順として、まず稚咲内港から採取した海水を逆浸透膜 (RO膜) で脱塩し、その後、イオン交換樹脂を通してイオン交換水を作成した (図6)。一方、チェイサーは、敷地内の採水井戸から採取した地下水をイオン交換樹脂を通してイオン交換水を作成した。これらのイオン交換水に対して、平成24年度の沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発 (産総研, 2013) におけるプッシュプル試験と同様に、表3に示す各種試薬を所定の容量加えて、トレーサー溶液およびチェイサーをDD-2孔の地下水に近い水質に調整した。なお、本年度はトレーサーに添加するウラニンの濃度を1mg/Lとした。長期プッシュプル試験、PP-1、PP-2、中期プッシュプル試験において注入する前のトレーサーおよびチェイサーの水質を表4～表9に示す。

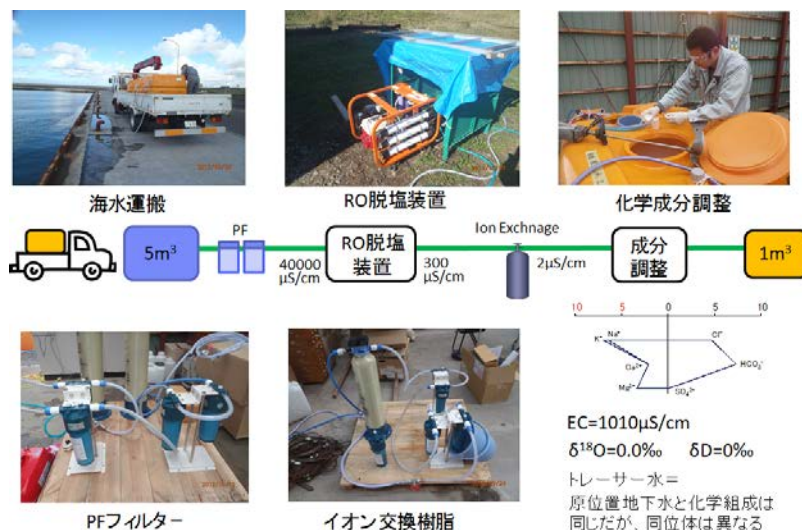


図6 トレーサー溶液の作成

重水等の試薬は用いずに自然環境を利用した。チェイサーの作成では電気伝導度の低い浅層地下水を源としたため、逆浸透膜（RO膜）脱塩装置を用いていない。

表3 トレーサー溶液およびチェイサーの作成に使用した各種薬品と添加量

脱塩海水の量 (L)	添加量 (g)			
	900 L	1800 L	120 L	240 L
NaHCO ₃	456.43	912.86	60.86	121.71
NH ₄ HCO ₃	15.88	31.76	2.12	4.23
KBr	2.17	4.35	0.29	0.58
CaCl ₂	6.43	12.86	0.86	1.71
MgSO ₄	1.15	2.29	0.15	0.31
LiCl	38.96	77.91	5.19	10.39
KI	81.00	162.00	10.80	21.60
CaCO ₃	88.28	176.55	11.77	23.54
CaF ₂	0.20	0.40	0.03	0.05
MgCl ₂	142.97	285.94	19.06	38.13
NaCl	10.93	21.86	1.46	2.91

表 4 PP-1 で注水したトレーサーの水質測定結果

項目	機器 1		機器 2	
	値	温度(°C)	値	温度(°C)
電気伝導度 (S/m)	0.1381	16.4	0.1355	16.6
pH	7.32	16.4	7.43	16.6
ORP (mV)	14.8	16.2	23.0	16.6
DO (mg/L)	-	-	8.87	16.2

表 5 PP-1 で注水したチェイサーの水質測定結果

項目	機器 1		機器 2	
	値	温度(°C)	値	温度(°C)
電気伝導度 (S/m)	0.1381	15.8	0.1361	15.9
pH	7.13	15.7	7.28	15.9
ORP (mV)	18.5	15.6	28.0	15.9
DO (mg/L)	-	-	9.70	15.6

表 6 PP-2 で注水したトレーサーの水質測定結果

項目	機器 1		機器 2	
	値	温度(°C)	値	温度(°C)
電気伝導度 (S/m)	0.1381	21.1	0.1357	21.3
pH	8.50	21.1	8.40	21.2
ORP (mV)	12.0	20.9	98.0	21.2
DO (mg/L)	-	-	8.20	20.9

表 7 PP-2 で注水したチェイサーの水質測定結果

項目	機器 1		機器 2	
	値	温度(°C)	値	温度(°C)
電気伝導度 (S/m)	0.1389	19.5	0.1365	19.6
pH	8.52	19.5	8.45	19.6
ORP (mV)	8.4	19.3	29.0	19.6
DO (mg/L)	-	-	8.90	19.4

表 8 中期プッシュプル試験のトレーサー溶液の水質測定結果

項目	機器 1		機器 2	
	値	温度(°C)	値	温度(°C)
電気伝導度 (S/m)	0.1338	10.8	0.1309	-
pH	8.30	10.8	8.23	-
ORP (mV)	58.1	10.7	58.1	10.7
DO (mg/L)	-	-	10.31	10.7

表 9 中期プッシュプル試験のチェイサーの水質測定結果

項目	機器 1		機器 2	
	値	温度(°C)	値	温度(°C)
電気伝導度 (S/m)	0.1496	9.4	0.1469	9.6
pH	7.85	9.4	7.79	9.6
ORP (mV)	54.1	9.3	-	-
DO (mg/L)	-	-	10.96	9.3

(3) 採水間隔

長期プッシュプル試験、PP-1 および PP-2 における水試料の採水間隔は以下の通りである。

・長期プッシュプル試験

揚水開始から3時間 ----- 2分間隔
 揚水開始から3時間から6時間 ----- 30分間隔
 揚水開始から6時間から34時間 ----- 1時間間隔

・PP-1およびPP-2

揚水開始から38分 ----- 2分間隔
 揚水開始から42分から78分後 ----- 4分間隔
 揚水開始から86分から118分後 ----- 8分間隔
 揚水開始から133分から208分後 ----- 15分間隔
 揚水開始から238分から328分後 ----- 30分間隔
 それ以降 ----- 1時間間隔

(4) 測器および分析装置

①水素・酸素安定同位体比

長期プッシュプル試験および PP-1 および PP-2 にて採取した地下水試料は、PICARRO 社 L2120-i

を用いて波長スキャンキャビティリングダウン分光法（WS-CRDS 法）により水素・酸素安定同位体比分析に供した。各試料について2回の分析を行い、 δD については両者の差が2%以内、 $\delta^{18}O$ については両者の差が0.2%以内の場合、平均値を算出し、これを分析値とした。これ以外については再分析を行い、上記の手順を繰り返した。

②水圧およびその他の水質

周辺環境からの影響を把握するために、長期プッシュプル試験およびPP-1、PP-2試験期間中において、DD-2孔の間隙水圧と電気伝導度を連続的に計測した。また、表10に示す装置（堀場製作所製W-22XD）をフローセルとともに地上に設置することにより、揚水される地下水の水質（水温、電気伝導度、pH、酸化還元電位および溶存酸素）を連続観測した。

③ウラン

PP-1およびPP-2では揚水の配管中にフローセル方式の蛍光光度計（albillia社製GGUN-FL30：以下FL-30）を配して、ウランの蛍光強度（≒蛍光染料濃度）を連続的に測定した。300ppb以上の高濃度のウランを検出するために、FL-30では（蛍光光度計においてウランに近い発光波長を示す）ローダミンWTのチャンネルを使用した（ローダミンWTはEm：580 nm、ウランはEm：512 nm）。また、採取した揚水試料は分光蛍光光度計（F-2700）でもウラン濃度の測定を行い、FL30によるウラン濃度の連続測定およびウランの蛍光塗料としての有用性を再確認した。対象とした蛍光染料と分析の緒元を表11に、FL-30の仕様を表12にそれぞれ示す。

表 10 水質モニタリング装置(地上用:堀場製作所製 W-22XD)仕様

測定項目	範囲	精度	分解能
水深	0～100 m	±5% FS	0.1 m
水温	0～+55℃	±1℃	0.01℃
電気伝導度	0～9.99 S/m	3% FS	0.1% FS
pH	0～14 pH	0.1 pH	0.01 pH
酸化還元電位	±1,999 mV	15 mV	1 mV
溶存酸素	0～19.99 mg/L	0.2 mg/L	0.01 mg/L

表 11 蛍光染料と分析の諸元(プッシュプル試験)

定量 分析	対象とした蛍光染料	Fluorescein sodium (ウラニン ; Uranine)
		CAS No. 518-47-8
	励起波長	470 (nm)
	蛍光波長	525 (nm)
	励起側スリット	10.0 (nm)
	蛍光側スリット	10.0 (nm)
	ホトマル電圧	400 (V)
その他	pHを9以上に調整の上で測定	
3次元 蛍光 スペクトル 分析	励起波長範囲	220.0～500.0 (nm)
	励起側サンプリング間隔	5.0 (nm)
	蛍光波長範囲	220.0～600.0 (nm)
	蛍光側サンプリング間隔	5.0 (nm)
	スキャンスピード	1500 (nm/min)のいずれか
	励起側スリット	5.0 (nm)
	蛍光側スリット	5.0 (nm)
ホトマル電圧	400 (V)	

表 12 蛍光光度計(albillia 社製 GGUN-FL30)の仕様

諸元	仕様
ランプ数(検体種類)	4種
検出限界	2E-8 mg/L(ウラニン)
測定間隔	2秒～20分(9種類)
メモリー	2GB
PCとの接続	USB
入力電源	DC6～12V

5. 濁度

平成 24 年度におこなわれたプッシュプル試験および昨年度の DD-1 孔でも述べたが、本地域の地下水中には着色しており、これがウラニン濃度の測定に影響を及ぼしている。詳細は次年度にゆずるが、本年度はナノ粒子可視化粒子径・粒子数測定装置 (NANO SIGHT NS300) を使ったナノ粒子トラッキング解析を用いて、地下水中の溶存粒子の粒子径と粒子数の測定を行ったのでここで速報する。溶存粒子の測定は 0.45 μ m のシリンジフィルターでろ過した試料を用いた。各地下水試料の測定結果を表 13 に示す。今回の測定ではろ過した全ての地下水試料から 100～200nm 程度の粒子径をもつ粒子が確認された。また粒子径と粒子数と採水深度の関係を図 7 に示す。平均粒子径は大局的には、深度に伴い小さくなる。一方で平均粒子数は深度 700m 以深で大きく増加した。今後は、他の地質データは地下水データと比較することで、これらの要因を検討する。

表 13 溶存粒子分析結果

Sample name	well Depth	Screen depth	Mean screen depth	Mean particles size		Concentration	
	(GL-m)	(GL-m)	(GL-m)	(nm)		(Particles / ml)	
HDW	26	5.5-21.4	13.5	154.9	± 8.7	5.33E+07	± 2.00E+06
DD-2	100	90.7-99.7	95.2	127.6	± 3.6	2.22E+08	± 7.81E+06
DD-3	160	132.5-147.5	140.0	192.5	± 2.8	2.23E+08	± 6.52E+06
DD-1	1200	214-215	214.5	208.4	± 2.3	3.42E+08	± 7.07E+06
		306-307	306.5	175.0	± 3.6	1.54E+08	± 5.34E+06
		476-477	476.5	144.1	± 3.5	6.05E+07	± 2.63E+06
		613-614	613.5	160.6	± 11.3	1.53E+07	± 3.75E+06
		715-716	715.5	138.8	± 2.2	5.09E+08	± 1.12E+07
		943-944	943.5	119.0	± 1.8	2.16E+08	± 2.20E+07

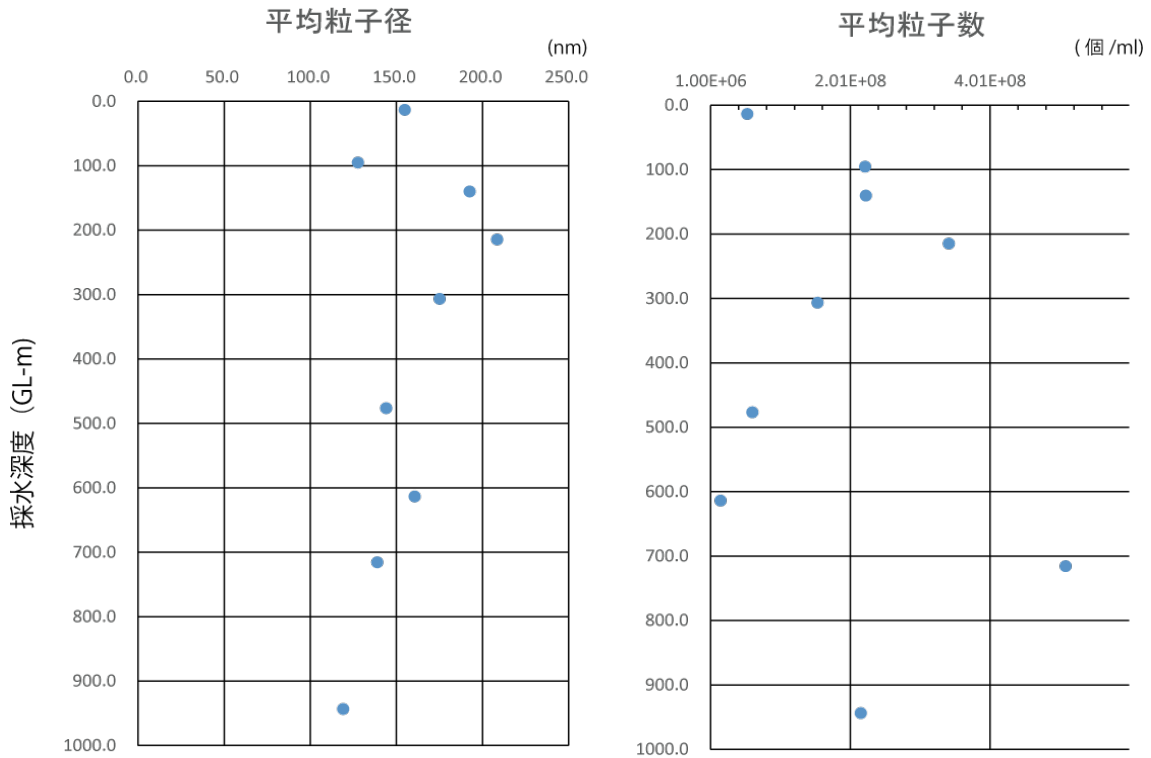


図 7 平均粒子径と粒子数の深度変化

Appendix IX

沿岸部の地質環境情報の整理・集約
(研究結果から得られたタスクおよび領域知識の
整理)

1. はじめに

本資料は、報告書本文 2.3.3 沿岸部の地質環境情報の整理・集約において実施したタスクフローにおけるルールベース化の検討の詳細を示すものである。また、知識の整理として、平成 28 年度報告書の記載内容を基にした分類結果から、下流タスクや知識情報が充実しているいくつかの主要タスクを対象に領域知識を整理票形式でまとめたものを示す。

2. タスク全体のルールベース化の整理結果

○沿岸部の自然現象に関する研究

- ・沿岸部における隆起・侵食に関する検討 ES (図 1-1～図 1-3)
- ・沿岸部における断層運動に関する検討 ES (図 1-4)
- ・沿岸部における火成活動に関する検討 ES (図 1-4)

○沿岸部の地下水長期安定性に関わる研究

- ・沿岸部の地下水長期安定性評価技術の検討 ES (図 1-5)
- ・沿岸部における地質環境の調査・解析・評価技術の検討 ES (図 1-5)

3. 主要タスクの整理表

- ・地体構造区分に基づく陸域の地殻変動様式の海域への内挿・外挿の妥当性の検討 (表 1-1)
- ・地形・地質縦断面を用いた隆起・侵食評価 (表 1-2)
- ・海底地形の特徴に基づく隆起・侵食の評価 (表 1-3)
- ・地形変化シミュレーション技術の高度化 (表 1-4)
- ・要素技術開発 (年代測定関係) に適した野外調査地域の検討 (表 1-5)
- ・海底地形調査における断層の平面分布の推定 (表 1-6)
- ・断層の連続性評価 (表 1-7)
- ・断層の活動時期・断層の活動性評価 (表 1-8)
- ・海底地質調査 (表 1-9)
- ・地下水調査結果の評価 (表 1-10)
- ・地化学環境評価 (表 1-11)

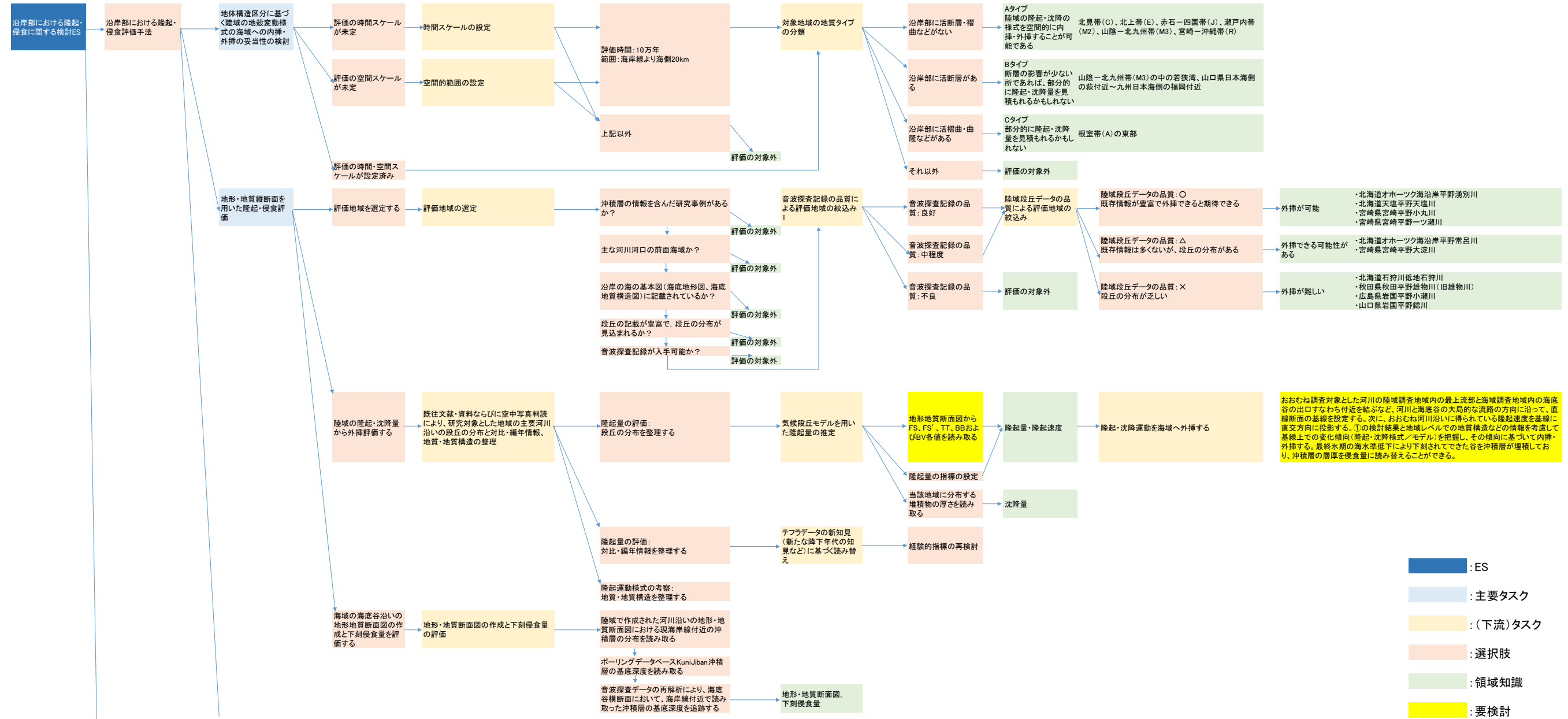


図 1-1 沿岸部における隆起・侵食に関する検討 ES (1/3)

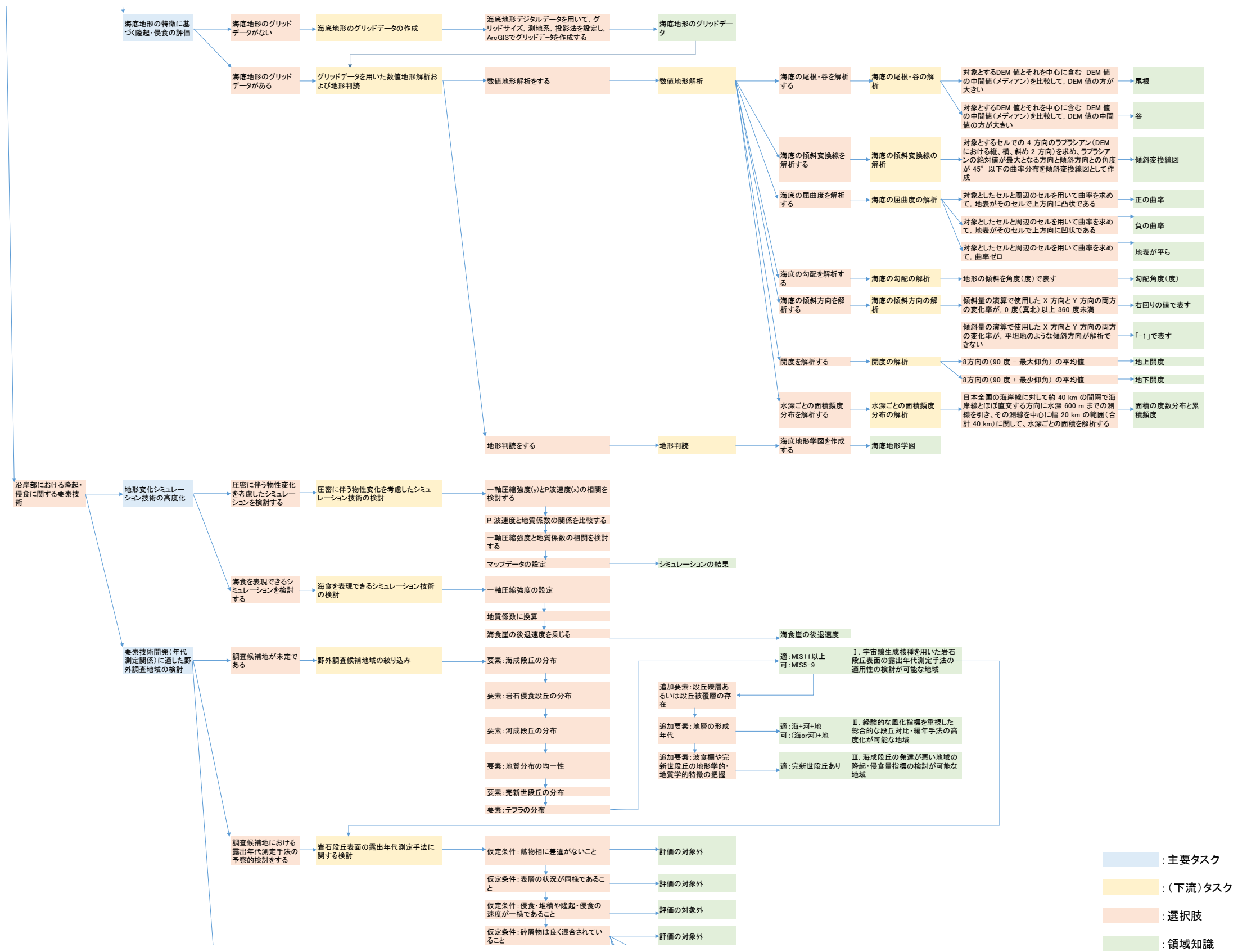


図 1-2 沿岸部における隆起・侵食に関する検討 ES (2/3)

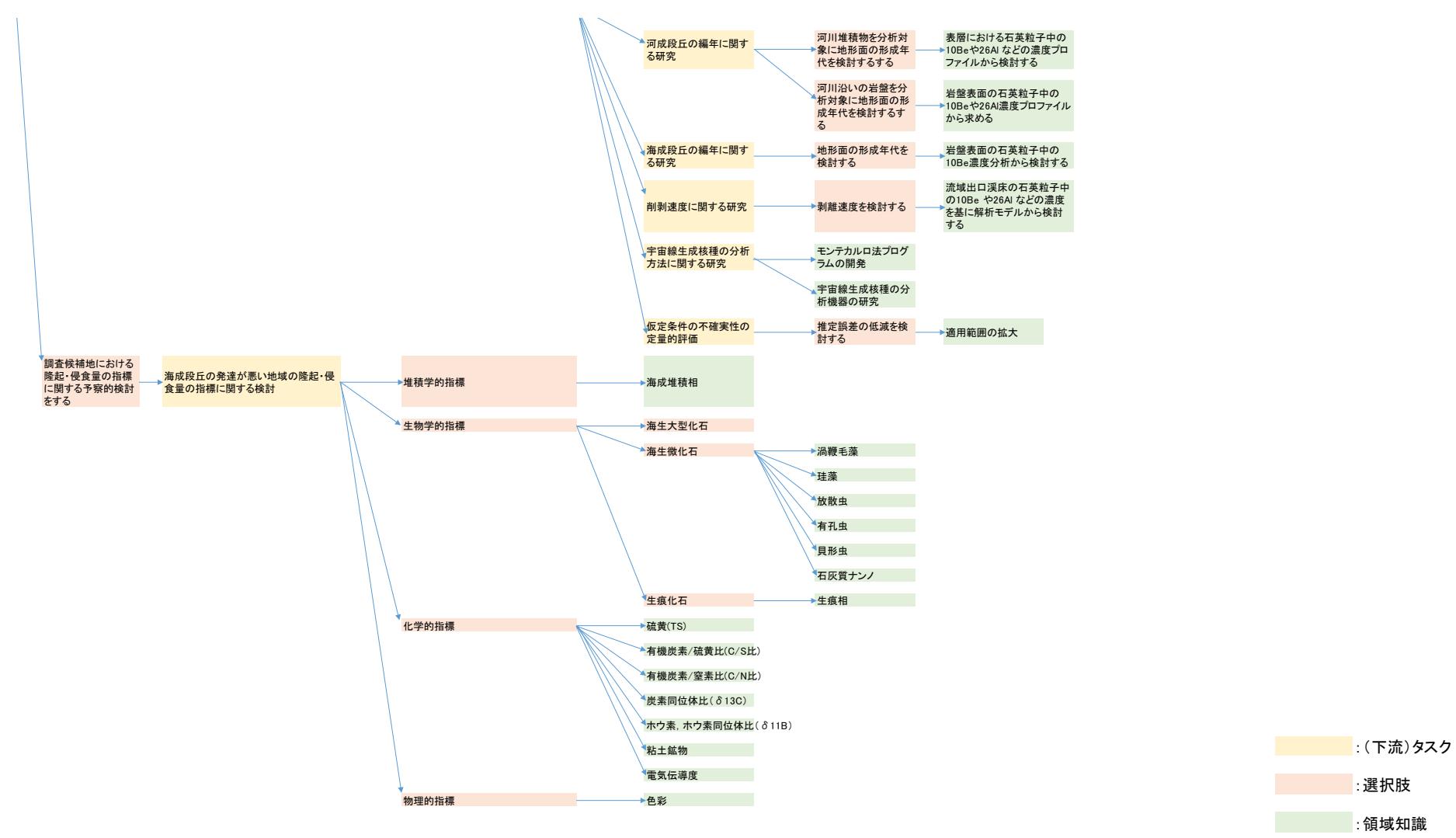


図 1-3 沿岸部における隆起・侵食に関する検討 ES (3/3)

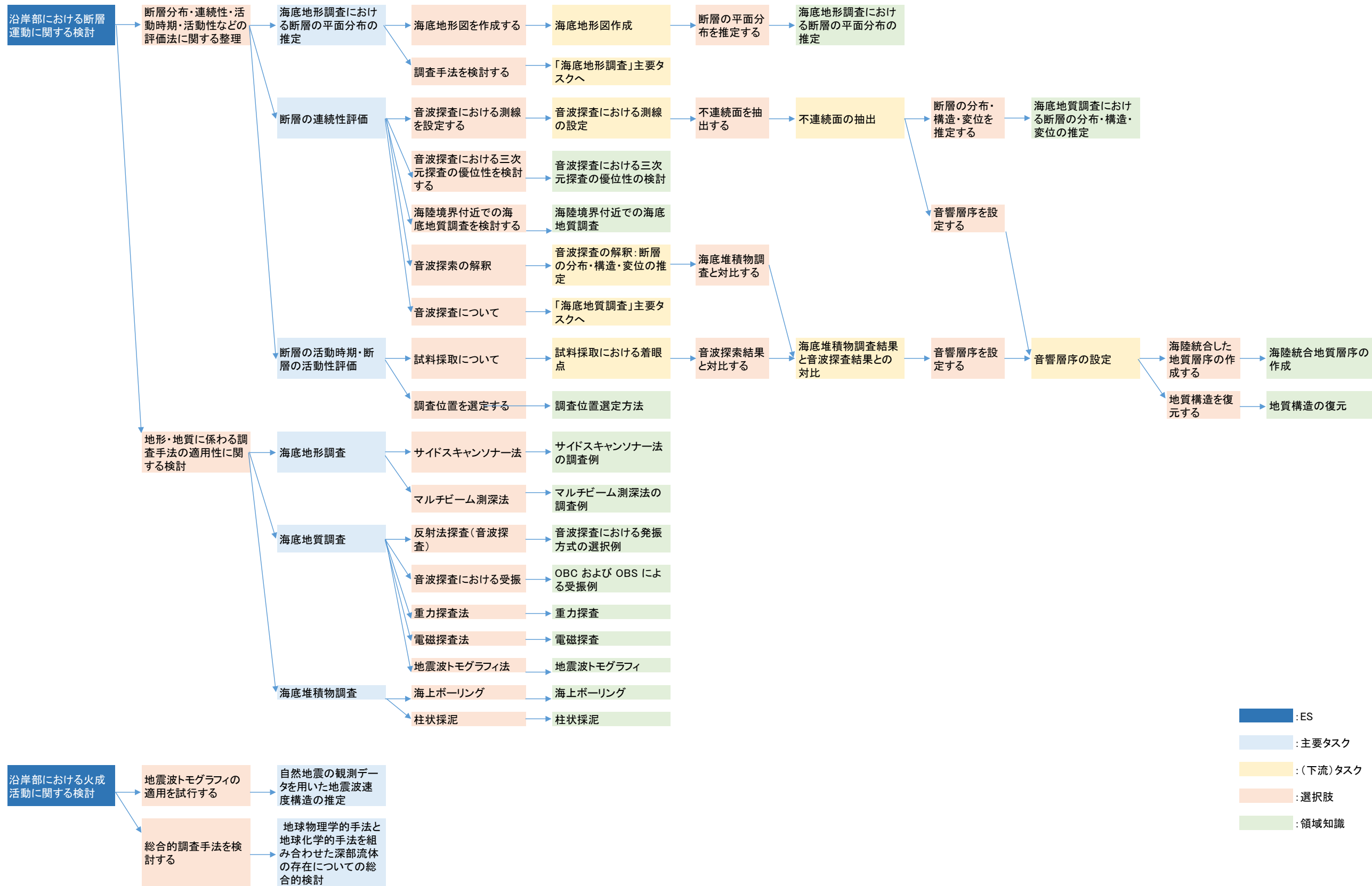


図 1-4 沿岸部における断層運動に関する検討 ES および沿岸部における火成活動に関する検討 ES

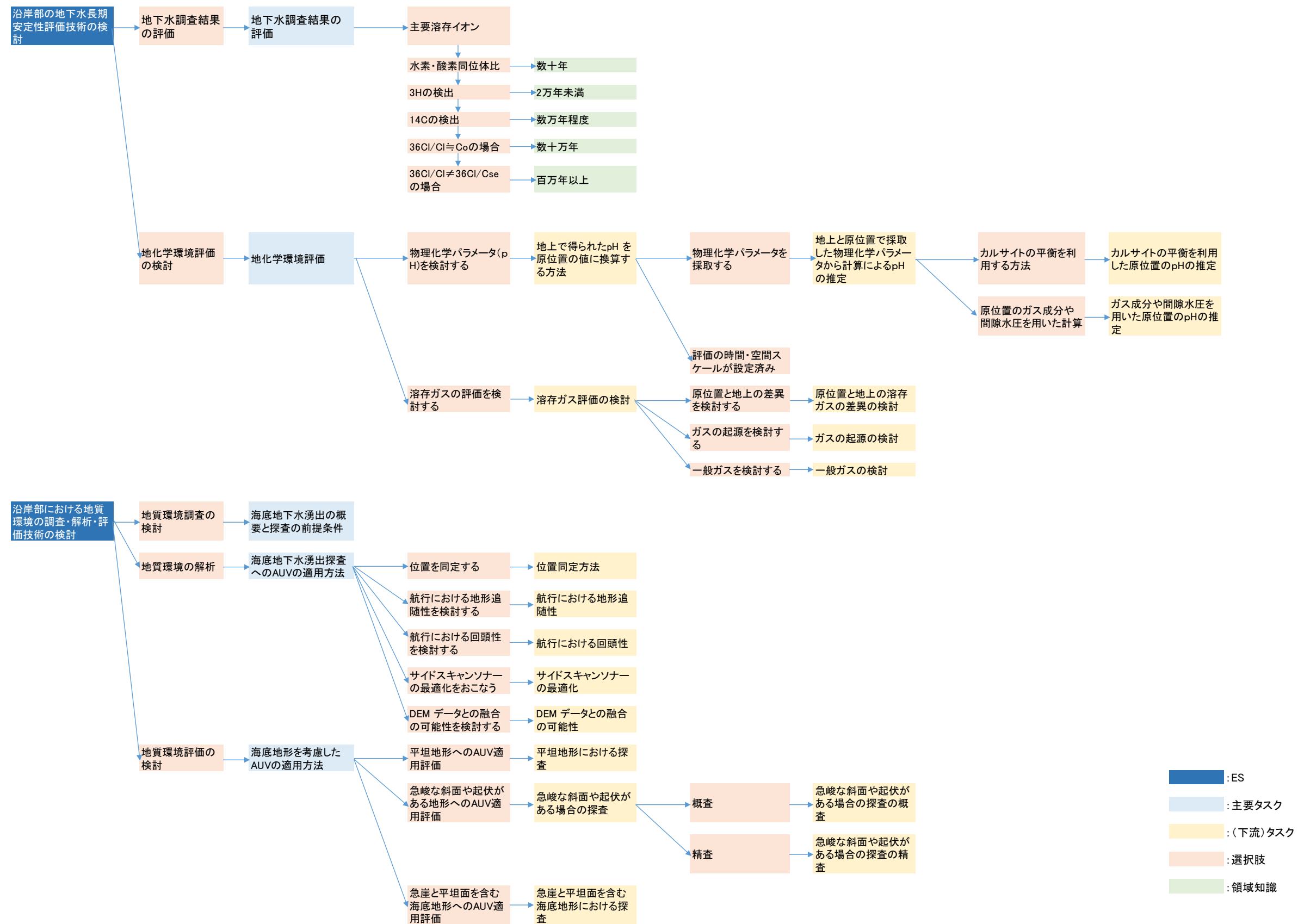


図 1-5 沿岸部の地下水長期安定性評価技術の検討 ES および沿岸部における地質環境の調査・解析・評価技術の検討 ES

表 1-1 地体構造区分に基づく陸域の地殻変動様式の海域への内挿・外挿の妥当性の検討

ES	1-1 沿岸部における隆起・侵食に関する検討 ES
主要タスク	地体構造区分に基づく陸域の地殻変動様式の海域への内挿・外挿の妥当性の検討
目的	陸域の隆起・侵食の様式の海域への内挿・外挿が可能な地域と、より大縮尺の精査が必要あるいは内挿・外挿が難しいなど、詳細な検討が必要な地域とに二分する。
概要または背景	新第三紀の日本海拡大以降から現在に至る地殻変動に着目したわが国の地体構造区分に基づき、マクロスケールにおける陸域の隆起・侵食の様式の海域への内挿・外挿の妥当性について考察を行う。
留意点	<ul style="list-style-type: none"> ・評価すべき事象の時間スケールに見合ったものでなければならない。 ・将来像を外挿により推定する場合、それ以上の過去の傾向を参照情報とする。 ・ここでは海水準1サイクル約10万年間の素過程の理解という観点に立って、過去10万年あたりの平均的な隆起・沈降量の内挿・外挿を考える。 ・時間スケールを新第三紀中新世以降としたのは、過去1億年の日本列島の地史の中で、最も大きいと言ってよい地史イベントと考えられている日本海拡大が中期中新世までに終了したと考えられているためである。
入力タスク	沿岸部における隆起・侵食に関する検討
選択枝	<ul style="list-style-type: none"> ・地体構造区分から海域への内挿・外挿の可能性を評価す ・地形・地質縦断面から評価する ・海底地形の特徴から評価する
出力タスク	<ul style="list-style-type: none"> ・地体構造区分に基づく陸域の地殻変動様式の海域への内挿・外挿の妥当性の検討 ・地形・地質縦断面を用いた隆起・侵食評価 ・海底地形の特徴に基づく隆起・侵食の評価
関連図	<p>図 2.1-1 新生代の地体構造区分の研究事例 (H28 報告書)</p>
報告書	H28, 2.1.1, (2), 1), ①

表 1-2 地形・地質縦断面を用いた隆起・侵食評価

ES	1-1 沿岸部における隆起・侵食に関する検討 ES
主要タスク	地形・地質縦断面を用いた隆起・侵食評価
目的	地形地質断面図を作成して気候段丘モデルに基づく隆起・侵食評価、ならびに沖積層の最大層厚からの見積りにより、後期更新世の隆起量・侵食量を評価する。
概要または背景	地形・地質情報が比較的得られる地域において、陸域主要河川沿い～海域海底谷沿い（以下、河川沿い）の地形地質断面図を作成し、気候段丘モデルに基づく隆起・侵食評価、ならびに沖積層の最大層厚からの見積りにより、後期更新世の隆起量・侵食量の評価を試みる。さらに、これらの結果と当該地域の地史的解釈を合わせて、陸域の隆起・沈降量の海域への外挿の妥当性の検討、後期更新世以降の下刻量分布の解釈を行う。
留意点	<ul style="list-style-type: none"> ・陸上河川～海域谷沿いの地形・地質の連続性がある地域では、沿岸海域の外挿による隆起量の見積りは妥当である可能性がある。しかし、沿岸陸域で平野／山地境界に活断層などがある場合には、外挿に用いることができるデータは限られ、沿岸海域の隆起・沈降量の定量的評価には、沿岸部の地形・地質の精査を要す。 ・大陸棚縁辺部が最終氷期最盛期（LGM）の河口であるとして隆起量を見積ることは、LGMの最大の海水準低下量、最大低下した時期、LGMの河口部の位置などの不確実性の影響が大きい。 ・下刻量は、最高潮時の海岸線付近（現在の海岸線付近）が最大かもしれない。 ・広域的にデータを取得し、三次元的に分析することにより、隆起・沈降様式の理解を深め、沿岸海域の隆起・沈降評価の精度・信頼性向上が望める。 ・外挿とは独立した評価方法として期待される大陸棚の地形・地質情報を用いた隆起量評価については、不確実性の低減を図るか、これらの不確実性の影響を織り込む必要がある。 ・沿岸海域の下刻量の評価のためには、地形面（大陸棚）の成因とその時期の理解が必要である。
入力タスク	沿岸部における隆起・侵食に関する検討 ES
選択枝	<ul style="list-style-type: none"> ・評価地域を選定する ・陸域の隆起・沈降量から外挿評価する ・海域の海底谷沿いの地形地質断面図の作成と下刻侵食量を評価する
出力タスク	<ul style="list-style-type: none"> ・評価地域の選定 ・既往文献・資料ならびに空中写真判読により、研究対象とした地域の主要河川沿いの段丘の分布と対比・編年情報、地質・地質構造の整理 ・地形・地質断面図の作成と下刻侵食量の評価
関連図	<p>図 2.1-15 湧別川地域における陸域から沿岸海域への過去 10 万年間の隆起速度の外挿（H28 報告書）</p>
報告書	H28, 2.1.1, (2), 1), ②

表 1-3 海底地形の特徴に基づく隆起・侵食の評価

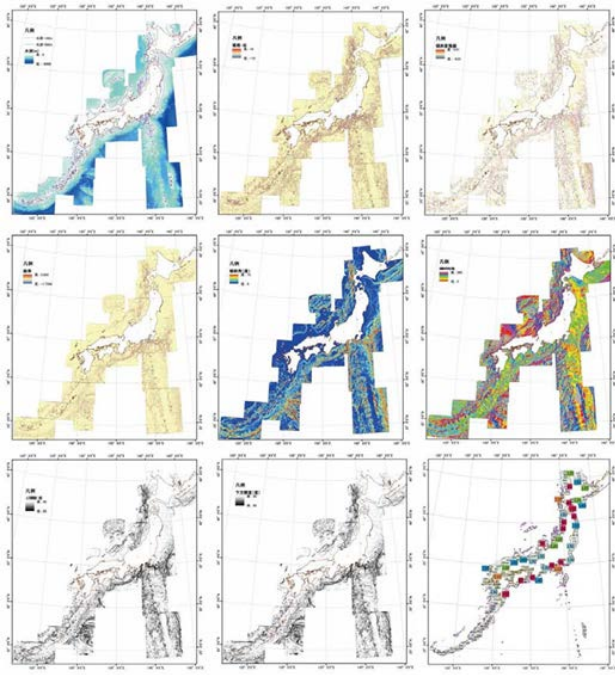
ES	1-1 沿岸部における隆起・侵食に関する検討 ES
主要タスク	海底地形の特徴に基づく隆起・侵食の評価
目的	本タスクでは、近年利用可能になった高精度の海底地形デジタルデータを用いて「数値地形解析」と「地形判読」を行い、大陸棚周辺の地形的特徴を俯瞰するための基礎資料を作成し、それらに基づき隆起・侵食の評価手法を検討する。
概要または背景	海陸境界付近における隆起・侵食に関する調査・評価技術の高度化においては、広域的なデータの取得と三次元的な分析が課題である。特に、陸上だけでなく、氷期に広く陸化する大陸棚からも地殻変動や侵食の指標となる地形の分布やその特徴を読み取る必要がある。そのために日本列島周辺の大陸棚の地形的特徴を俯瞰することは重要である。
留意点	<ul style="list-style-type: none"> 大陸棚外縁の分布については、数値地形解析による水深ごとの面積頻度分布、傾斜変換線、屈曲度などが、地形判読の結果を判断する際のサポートデータになると考えられる。 大陸棚外縁の分布の把握に海底谷の分布も重要であり、数値地形解析による尾根・谷の分布、地形勾配、開度などが、地形判読に抜けがないかなどの確認に有効と考えられる。 海底音波探査データや前述の河川沿いに整理された陸域～海域の地形・地質情報なども踏まえて、平坦面や外縁が旧汀線の深度を示すものであるかどうかについて検討することが重要である。
入力タスク	沿岸部における隆起・侵食に関する検討 ES
選択枝	<ul style="list-style-type: none"> 海底地形のグリッドデータがない 海底地形のグリッドデータがある
出力タスク	<ul style="list-style-type: none"> 海底地形のグリッドデータの作成 グリッドデータを用いた数値地形解析および地形判読
関連図	 <p>図 2.1 20 海底地形を対象とした各種数値地形解析の結果 (H28 報告書) (左上：海底地形, 中上：尾根と谷, 右上：傾斜変換線, 左中：屈曲度, 中中：勾配, 右中：傾斜方向, 左下：地上開度, 中下：地下開度, 右下：面積頻度分布の高まりが見られた深度)</p>
報告書	H28, 2.1.1, (2), 1) ③

表 1-4 地形変化シミュレーション技術の高度化

ES	1-1 沿岸部における隆起・侵食に関する検討 ES
主要タスク	地形変化シミュレーション技術の高度化
目的	本タスクでは、特に、沿岸部における地形変化の数値シミュレーション技術を検討するため、河川の土砂運搬・堆積過程を模擬して地形の大局的な変化を再現する地形変化シミュレーション技術を参考にして、沿岸部に見られる現象である堆積物の圧密に伴う物性変化と海食の数値シミュレーション技術について検討する。
概要または背景	<p>隆起・侵食は、地形に現れることから、地形変化の評価が重要である。地形変化の諸作用に着目する手法においては、計器による観測期間を超えた長期の地形変化が対象となるため、地形変化の数理モデルをもとに、コンピュータによる数値シミュレーションを行い、その結果を検証する手法が有効である。</p> <p>地形変化の数値シミュレーションは、長期にわたる地形変化とその不確実性の幅を定量的に得ることができるという利点を有しており、近年では、数値計算技術の高度化を受け、海成段丘の発達への適用例、河川の土砂運搬作用を考慮した河床縦断面形のシミュレーションなどが報告されており、地形変化の数値シミュレーションに関する研究の発展が期待されている。</p>
留意点	<ul style="list-style-type: none"> ・圧密変化を地形変化シミュレーションに適用するには、埋没深度に応じて地質係数を変更することになる。圧密過程をシミュレーションに組み入れる場合には、垂直方向の基盤や堆積物の境界については上面高のみを記憶させることとし、それぞれの堆積物について地質係数を記入するマップ情報を与える方法が考えられる。 ・海域での外力のような複雑な現象を地形変化シミュレーションに組み入れることは現状では困難と考えられることから、海岸地形の特徴から堆積比マップを作成し、形態模擬的な海食機能をシミュレーションに組み入れる方法が考えられる。 ・JAEAsmtp2 に、沿岸部に見られる現象である堆積物の圧密に伴う物性変化と海食を考慮した数値シミュレーション・プログラムを JAEAsmtp3 と呼ぶ。
入力タスク	沿岸部における隆起・侵食に関する検討 ES
選択枝	<ul style="list-style-type: none"> ・圧密に伴う物性変化を考慮したシミュレーションを検討する ・海食を表現できるシミュレーションを検討する
出力タスク	<ul style="list-style-type: none"> ・圧密に伴う物性変化を考慮したシミュレーション技術 ・海食を表現できるシミュレーション技術
関連図	<p>図 2.128 沿岸部での堆積による海食崖の後退の差 (H28 報告書)</p>
報告書	H28, 2.1.1, (2), 2), ①

表 1-5 要素技術開発（年代測定関係）に適した野外調査地域の検討

ES	1-1 沿岸部における隆起・侵食に関する検討 ES
主要タスク	要素技術開発（年代測定関係）に適した野外調査地域の検討
目的	本タスクでは、既存情報を用いて、岩石段丘表面の露出年代測定手法の適用性の検討、経験的な風化指標を重視した総合的な段丘対比・編年手法の高度化、海成段丘の発達が悪い地域の隆起・侵食量指標の検討の三つの検討項目について、既存情報に基づいた2段階のスクリーニングを行い、野外調査地域の絞り込みの検討を行う。
概要または背景	海成段丘の発達が悪い地域の隆起・侵食量の評価手法、ならびに、被覆層を大きく欠く岩石侵食段丘などを対象とした段丘対比・編年手法の高度化の検討には、詳細な地形の把握と実際の地質試料を用いた分析が必要であるため、野外調査が必須である。
留意点	<ul style="list-style-type: none"> ・隆起・侵食量の見積りには主に段丘を指標として使うため、調査地域周辺には少なくとも対比・編年が可能な程度に段丘が分布していることが望ましい。 ・段丘だけでなく、岩石侵食段丘の前身である波食棚を調査することにより、隆起の指標、数値年代測定のための試料を見つけることも重要である。 ・既存の文献で得られる情報のみでは、検討の具体的な対象となる段丘礫層や段丘被覆層の検討に適したものであるのか確認できない。 ・ある検討項目について適しているとした地域に、既存情報では把握できなかった別の検討項目が可能な地形・地質が分布している可能性もあり、場合によっては効率的に年代測定関係の要素技術開発が可能であることも考えられる。 ・年代測定関係の要素技術開発については、野外調査と試料採取が不可欠と考えられるため、早期に実施に移すべきと考えられる。
入力タスク	沿岸部における隆起・侵食に関する検討 ES
選択枝	<ul style="list-style-type: none"> ・調査候補地が未定である ・調査候補地における露出年代測定手法の予察的検討をする ・調査候補地における隆起・侵食量の指標に関する予察的検討をする
出力タスク	<ul style="list-style-type: none"> ・野外調査候補地域の絞り込み ・岩石段丘表面の露出年代測定手法に関する検討 ・海成段丘の発達が悪い地域の隆起・侵食量の指標に関する検討
関連図	<p>図 2.1 29 岩石侵食段丘の対比・編年に有効な試料分布のイメージ (H28 報告書)</p>
報告書	H28, 2.1.1, (2), 2), ②

表 1-6 海底地形調査における断層の平面分布の推定

ES	1-2 沿岸部における断層運動に関する検討 ES
主要タスク	海底地形調査における断層の平面分布の推定
目的	本タスクでは、既存の海底地形データでは深度や場所によりデータに粗密があるため、既存情報で断層などの重要な地形・地質学的特徴の分布が疑われる範囲等において、改めて海底地形調査による詳細データを取得する方法を検討する。
概要または背景	地層処分実施主体による段階的な調査を考慮すると、まず断層長が 10km を超えるような規模の大きな断層は、一般に幅数 m~数 10m 以上の破碎帯を伴っており、地下の水理地質構造の不均質性をもたらさうという観点から、広域的にその存否や分布を把握しておく必要がある。
留意点	<ul style="list-style-type: none"> ・海域では陸域と異なり、地表踏査や空中写真判読に基づく地形調査は困難である。一方、海域では市街地や植生などによる物理的な制約が少なく、広域的かつ面的な調査がしやすいという利点がある。 ・海域での地形調査技術としては、サイドスキャンソナーやマルチビーム測深などがある。陸にごく近い浅海部では、小型船や水上バイクを使用してマルチビーム測深を行うことができるほか、海水の透明度が良好であれば航空レーザー測量が可能である。 ・干満の差を利用し、満潮時にマルチビーム測深などの水上での探査を行う一方、干潮時に航空測量（空中写真撮影やレーザー測量）や地表踏査を行い、両者の情報を組み合わせることにより海陸境界部の地形を精度良く把握する手法が考えられる。
入力タスク	沿岸部における断層運動に関する検討 ES
選択枝	<ul style="list-style-type: none"> ・海底地形図を作成する ・調査手法を検討する
出力タスク	<ul style="list-style-type: none"> ・海底地形図作成 ・「海底地形調査」主要タスクへ
関連図	<p>図 2.1.35 マルチビーム測深における測線設定の考え方 (H28 報告書)</p> <p>(a) 測線間隔は水深の約 1.73 倍。観測船、海面、水深、海底面、120° の扇状のビーム。</p> <p>(b) 連続的な地形異常 (リニアメントなど) に対する調査を目的とした測線設定。</p> <p>(c) 急峻な斜面における測線設定 (Y-Y' のケースの方が望ましい)。</p> <p>扇状のビームを急峻な斜面の等深線と直交する方向に向けると、ビーム長が扇の中で大きく変化してしまう</p>
報告書	H28, 2.1.2, (2), 2), ①

表 1-7 断層の連続性評価

ES	1-2 沿岸部における断層運動に関する検討 ES
主要タスク	断層の連続性評価
目的	本タスクでは、地下の地質構造を明らかにするための海底地質調査について検討を行う。
概要または背景	海底地形調査では断層の可能性があるリニアメントの平面的な情報は得られるが、断層の三次元的な分布（傾斜、屈曲、分岐など）や変位（正断層、逆断層、横ずれ）を把握する必要がある。
留意点	ケーブルを海水中で曳航させる場合は、波浪の影響によるノイズの補正が必要となる。
入力タスク	沿岸部における断層運動に関する検討 ES
選択枝	<ul style="list-style-type: none"> ・音波探査における測線を設定する ・音波探査における三次元探査の優位性を検討する ・海陸境界付近での海底地質調査を検討する ・音波探査の解釈 ・音波探査について
出力タスク	<ul style="list-style-type: none"> ・音波探査における測線の設定 ・音波探査における三次元探査の優位性の検討 ・海陸境界付近での海底地質調査 ・音波探査の解釈：断層の分布・構造・変位の推定 ・「海底地質調査」主要タスクへ
関連図	<p>図 2.1 36 OBC による海底地質調査のイメージ (H28 報告書)</p>
報告書	H28, 2.1.2, (2), 2), ②

表 1-8 断層の活動時期・断層の活動性評価

ES	1-2 沿岸部における断層運動に関する検討 ES
主要タスク	断層の活動時期・断層の活動性評価
目的	本タスクでは、断層評価のための試料採取の方法および調査位置の選定についての検討を行う。
概要	断層の活動時期を明らかにし、活動性を評価するためには、断層が分布する地域の堆積物や岩石の年代を調べる必要がある。特に、陸から離れた沖合に分布する断層を評価する場合には、試料採取のため海上ボーリングや柱状採泥のような海域特有の調査技術の適用が求められる。陸域では面的な地質踏査に基づいて広域的な地質構造発達史を復元することにより断層の発達過程を考察するという伝統的な地質学的手法が効果的となることが多いが、海域ではそのような手法の適用は難しい。一方、海底では堆積物が比較的厚く連続している地域が多く、微化石や花粉、テフラ、酸素やストロンチウムなどの同位体比、岩石磁気学的手法（古地磁気層序や帯磁率）などを用いた層序学的検討は、地層の堆積年代の推定に加え地質構造発達史の復元に非常に有効となる場合が多いと考えられる。
留意点	海域の調査では、海底地形・地質調査結果に基づき、断層の活動時期・活動性の評価にとって鍵となる試料をいかに良好な状態で採取できるかが重要となる。
入力タスク	沿岸部における断層運動に関する検討 ES
選択枝	<ul style="list-style-type: none"> ・ 試料採取について ・ 調査位置を選定する
出力タスク	<ul style="list-style-type: none"> ・ 試料採取における着眼点 ・ 調査位置選定方法
関連図	<p>図 2.140 海水準の変化と海底斜面における堆積場の変化との関係 (H28 報告書)</p>
報告書	H28, 2.1.2, (2), 2), ③

表 1-9 海底地質調査

ES	1-2 沿岸部における断層運動に関する検討 ES
主要タスク	海底地質調査
目的	本タスクでは、音波探査およびそれ以外の物理探査手法として、重力探査、電磁探査、地震波トモグラフィについての技術的検討を行う。
概要または背景	海域での物理探査で最も広く行われているのは音波探査であり、とりわけ三次元探査でのデータ取得が優位となってきた。
留意点	<ul style="list-style-type: none"> 海上音波探査では、発振方式の違いにより、分解能や可探深度が変化する。鉛直分解能は Rayleigh 基準により、発振器の卓越波長の 1/4 と見なされることが多い。水平分解能は、前述した発振点、受振点それぞれの間隔に加え、発振器の周波数や探査対象深度にも依存する。発振器の周波数が低いものほどショットエネルギーのチャージに時間がかかるため、発振点間隔が長くなり、分解能が大きく（悪く）なる傾向がある。したがって、鉛直・水平分解能ともに、定性的には、発振器の周波数の高い順に分解能が小さく（良く）なる。 可探深度については、マルチビーム測深などにおける適応水深と同様の傾向で、発振器の周波数が低いものほど音波エネルギーが大きいため、地下深部の探査にも対応できる。 音波探査における受振側は、前述したように受振器を連結したケーブルを曳航させるか、OBC や OBS を着底させて受振する。
入力タスク	沿岸部における断層運動に関する検討 ES
選択枝	<ul style="list-style-type: none"> 反射法探査（音波探査） 音波探査における受振 重力探査法 電磁探査法 地震波トモグラフィ法
出力タスク	<ul style="list-style-type: none"> 音波探査における発振方式の選択例 OBC および OBS による受振例 重力探査 電磁探査 地震波トモグラフィ
関連図	<p>図 2.1 41 音源周波数と分解能，可探深度との関係（H28 報告書）</p>
報告書	H28, 2.1.2, (2), 3), ②

表 1-10 地下水調査結果の評価

ES	2-1 沿岸部の地下水長期安定性評価技術の検討 ES
主要タスク	地下水調査結果の評価
目的	本タスクでは、既存の大深度ボーリング孔や井戸などから地下水を採取し、深部の地下水年代・地化学環境を明らかにするとともに、地下水流動の概念モデルと地下水年代測定結果の整合性を検討する。また、同位体濃度から地下水年代決定までのプロセスを提示することにより、地下水年代測定の課題抽出と高度化を行う。
概要または背景	地下水年代測定は、地下水の長期安定性に関する知見を得るための最も有効な方法と考えられる。これは、天然に存在する同位体や溶存ガスから地下水の滞留時間を導くものである。ただし、適切に地下水年代を決定するためには、岩石の間隙率、主要鉱物、含有元素や、降水・浅層水など流域の地下水情報が必要である。また、導出した地下水年代の妥当性は、地形、地質、水文などの情報から推定した概念モデル (NUMO, 2011) との整合性から確認する必要がある。
留意点	<ul style="list-style-type: none"> ・全ての調査地点で地下水流動の概念モデルと地下水年代測定結果の整合性を検討することは困難なため、比較的データが多く、概念モデルが構築できる地点での検討を行い、それ以外の地点では既存井などを調査し、地下水年代に加えて地化学特性を把握する。 ・沿岸部海底下には長期的に安定した地下水が存在することや、深部地下水が上向きに流動するためには、塩淡水境界や断層の存在が鍵になることが判明している。既往文献の調査などに基づく、地下水の流動には非ダルシー領域と呼ばれる地下水が動きにくくなる領域が関係している可能性がある。
入力タスク	沿岸部の地下水長期安定性評価技術の検討 ES
選択枝	<ul style="list-style-type: none"> ・主要溶存イオン ・水素・酸素同位体比 ・^3H の検出 ・^{14}C の検出 ・$^{36}\text{Cl}/\text{Cl} \approx \text{Co}$ の場合 ・$^{36}\text{Cl}/\text{Cl} \neq ^{36}\text{Cl}/\text{C}_{\text{se}}$ の場合
出力タスク	(未定)
関連図	<p>図 2.2-1 沿岸部の地下水長期安定性評価の概念図 (H28 報告書)</p>
報告書	H28, 2.2.1, (6)

表 1-11 地化学環境評価

ES	2-1 沿岸部の地下水長期安定性評価技術の検討 ES
主要タスク	地化学環境評価
目的	本タスクでは、大深度孔で溶存ガスを含む地下水において地上での計測と原位置での計測を行い、改めてその問題点を明確にするとともに、解決する方法を検討する。今回は解決法の一つとして地上で得られた pH を原位置の値に換算する方法について検討および溶存ガスを採取・分析し、その評価について概略的な検討を行う。
概要または背景	pH や ORP は核種の移行評価において重要なパラメータである。pH と ORP の違いで同じ元素でも化学形態が異なり、物質移行特性が異なるため、調査においては正確な pH、ORP 値の取得が望まれる。それらの測定には地上でのフローセルを用いた測定がしばしば行われる。ただし、地上での測定はポンプアップする際にボーリング孔が大気開放系となることや、フローセルの接続に際して隙間から酸素が混入したり、二酸化炭素が入り出したりすることで、pH や ORP の値が変化する。このことから正確な pH、ORP の値の取得のためには原位置での測定が必須である。しかしながら、掘削直後のボーリング孔には掘削泥水があるため電極が汚れて正しい値を測ることができない場合、モニタリングシステムを導入してもモニタリングシステムの径が細いため測定プローブを降下させることが出来ない場合、予備排水に時間がかかり、十分に安定した値を得るまでの測定時間を確保できないなどの理由で、原位置測定が行われないもしくは不十分である事例が多い。特に大深度では、溶存ガスが含まれている場合が多く、地上での測定では脱ガスに起因する pH や ORP の不正確さが問題となる。
留意点	<ul style="list-style-type: none"> ・地層処分関係の調査における大深度孔の掘削において地下水溶存ガスの存在が報告されており、温泉等の掘削においてメタンガスが発生する事例は多い。今後大深度孔の調査をする場合にはガス成分の把握も必須となると考えられる。 ・ガスの成分からその起源や混合を評価する方法が開発されており、ガスの起源と地質との対比やガスの同位体比の変化から、地質環境の安定性の評価に利用できる可能性が示唆されている。
入力タスク	沿岸部の地下水長期安定性評価技術の検討 ES
選択枝	<ul style="list-style-type: none"> ・物理化学パラメータ (pH) を検討する ・溶存ガスの評価を検討する
出力タスク	<ul style="list-style-type: none"> ・地上で得られた pH を原位置の値に換算する方法 ・溶存ガス評価の検討
関連図	<p>ガス水比の測定</p> <p>①ガス水比測定のための地下水(+ガス)の取り出し</p> <p>封圧採水ボトルの中にはピストンが入っており、左右で原位置の地下水と蒸留水に分かれている。左端に真空引きしたアルミニウム製ガスバッグを接続し、左端のバルブを開放する。ガスと地下水がガスバッグへと流入する。さらに右端から蒸留水を送り、ピストンを左端まで移動させて原位置の地下水(ガス含む)を全量採取する。</p> <p>②地下水(+ガス)の体積を測定</p> <p>水道水を入れたバケツにガスと地下水が入ったガスバッグを浸し、バケツの水の増分からガス+地下水の体積を測定。</p> <p>③地下水の体積を測定</p> <p>ガスバッグから水を取り出し水量を測定する。②で求めた体積から、ガスバッグの体積と取り出した水の体積を引くと、ガスの体積が出る。</p> <p>図 2.2-37 原位置サンプラーでのガス水比測定およびガスの採取方法 (H28 報告書)</p>
報告書	H28, 2.2.1, (7)

再冠水時の緩衝材の挙動に関する試験

— 目 次 —

1. 概要	X-1
1.1 使用材料.....	X-1
1.2 使用する液相の組成.....	X-1
1.3 試験装置.....	X-2
2. 地下水浸潤速度および透水係数の取得に関する試験.....	X-2
2.1 飽和度と比抵抗の関係取得.....	X-2
2.1.1 試験方法	X-2
2.1.2 試験結果	X-3
2.2 浸潤速度と透水係数の取得試験	X-9
2.2.1 試験方法	X-9
2.2.2 試験結果	X-14
3. 二次元土槽試験による浸潤・膨潤挙動に関する試験.....	X-22
3.1 試験方法.....	X-22
3.2 試験結果.....	X-25
4. 実験室規模の緩衝材流出に関する試験.....	X-30
4.1 試験方法.....	X-30
4.2 試験結果.....	X-31
4.2.1 MgCl ₂ 水溶液を通水した試験.....	X-31
4.2.2 KCl 水溶液を通水した試験（ブロック）	X-41
4.2.3 人工海水を通水した試験.....	X-49
4.2.4 地下水中の陽イオンがエロージョンに及ぼす影響	X-58
5. 密度分布が膨潤量に及ぼす影響に関する試験.....	X-60
5.1 試験方法.....	X-60
5.2 試験結果.....	X-61
5.2.1 直列膨潤量試験ケース	X-61
5.2.2 スラリー圧密試験ケース.....	X-63
参考文献	X-67

図目次

図 2.1-1	飽和度と比抵抗の関係取得試験装置の断面図	X-2
図 2.1-2	飽和度と比抵抗の関係 (ケイ砂 30wt%含有の Na 型ベントナイト、Ca 系地下水)	X-5
図 2.1-3	飽和度と比抵抗の関係 (ケイ砂 30wt%含有の Na 型ベントナイト、人工海水)	X-6
図 2.1-4	飽和度と比抵抗の関係 (ケイ砂 30wt%含有の Na 型ベントナイト+H ₂ O、NaCl 水溶液)	X-7
図 2.1-5	飽和度と比抵抗の関係 (ケイ砂 30wt%含有の Ca 型ベントナイト+H ₂ O)	X-8
図 2.1-6	飽和度と比抵抗の関係のまとめ (乾燥密度 1.6Mg/m ³)	X-8
図 2.2-1	長尺ベントナイト供試体を用いた一次元浸潤速度取得試験	X-10
図 2.2-2	浸潤フロントの進展状況 (初期飽和度からの増分が 1%で定義)	X-10
図 2.2-3	飽和フロントの進展状況 (飽和度 95%以上で定義)	X-11
図 2.2-4	一次元浸潤速度試験装置概略図	X-11
図 2.2-5	一次元浸潤速度試験装置全景.....	X-13
図 2.2-6	一次元浸潤速度試験装置	X-13
図 2.2-7	一次元浸潤速度試験装置の比抵抗電極の螺旋配置のイメージ.....	X-13
図 2.2-8	給水量と通水圧、飽和フロントの経時変化.....	X-15
図 2.2-9	液種の違いによる飽和フロントの経時変化の差異.....	X-16
図 2.2-10	軸応力の経時変化.....	X-16
図 2.2-11	飽和度分布の経時変化.....	X-18
図 2.2-12	浸潤・飽和フロントの経時変化	X-19
図 2.2-13	浸潤・飽和フロントのフィッティング関数の係数とイオン強度の関係	X-21
図 2.2-14	人工海水 (高圧ケース) の透水係数の経時変化.....	X-22
図 3.1-1	二次元土槽試験のイメージ (ブロック定置+ペレット充填ケース)	X-23
図 3.1-2	密度分布均質化土槽試験装置の空状態の全景	X-23
図 3.1-3	密度分布均質化土槽装置背面に設置した比抵抗電極	X-23
図 3.2-1	二次元土槽試験状況の経時変化	X-27
図 3.2-2	比抵抗値の分布から算出した飽和度分布.....	X-28
図 3.2-3	浸潤に伴う膨潤圧の経時変化と分布.....	X-29
図 3.2-4	給水量の経時変化.....	X-29
図 4.1-1	パイピング・エロージョン試験セル.....	X-30
図 4.1-2	ブロック定置方式とブロック定置+ペレット充填併用方式の供試体イメージ	X-31
図 4.2-1	送水圧と流量の関係 (MgCl ₂ 水溶液 ブロック)	X-33
図 4.2-2	通水時の供試体表面の状況 (MgCl ₂ 水溶液 1ml/min 通水 ブロック)	X-34
図 4.2-3	通水時の供試体表面の状況 (MgCl ₂ 水溶液 10ml/min 通水 ブロック) ...	X-34
図 4.2-4	通水時の供試体表面の状況 (MgCl ₂ 水溶液 100ml/min 通水 ブロック) .	X-35

図 4.2-5	解体状況 (MgCl ₂ 水溶液 1ml/min 通水 ブロック)	X-35
図 4.2-6	解体状況 (MgCl ₂ 水溶液 10ml/min 通水 ブロック)	X-35
図 4.2-7	解体状況 (MgCl ₂ 水溶液 100ml/min 通水 ブロック)	X-36
図 4.2-8	送水圧と流量の関係 (MgCl ₂ 水溶液 ブロック+ペレット)	X-37
図 4.2-9	通水時の供試体表面の状況 (MgCl ₂ 水溶液 1ml/min 通水 ブロック+ペレット)	X-38
図 4.2-10	通水時の供試体表面の状況 (MgCl ₂ 水溶液 10ml/min 通水 ブロック+ペレット)	X-39
図 4.2-11	通水時の供試体表面の状況 (MgCl ₂ 水溶液 100ml/min 通水 ブロック+ペレット)	X-39
図 4.2-12	解体状況 (MgCl ₂ 水溶液 1ml/min 通水 ブロック+ペレット)	X-40
図 4.2-13	解体状況 (MgCl ₂ 水溶液 10ml/min 通水 ブロック+ペレット)	X-40
図 4.2-14	解体状況 (MgCl ₂ 水溶液 100ml/min 通水 ブロック+ペレット)	X-40
図 4.2-15	送水圧と流量の関係 (KCl 水溶液 ブロック)	X-41
図 4.2-16	通水時の供試体表面の状況 (KCl 水溶液 1ml/min 通水 ブロック)	X-42
図 4.2-17	通水時の供試体表面の状況 (KCl 水溶液 10ml/min 通水 ブロック)	X-43
図 4.2-18	通水時の供試体表面の状況 (KCl 水溶液 100ml/min 通水 ブロック)	X-43
図 4.2-19	解体状況 (KCl 水溶液 1ml/min 通水 ブロック)	X-44
図 4.2-20	解体状況 (KCl 水溶液 10ml/min 通水 ブロック)	X-44
図 4.2-21	解体状況 (KCl 水溶液 100ml/min 通水 ブロック)	X-44
図 4.2-22	送水圧と流量の関係 (KCl 水溶液 ブロック+ペレット)	X-45
図 4.2-23	通水時の供試体表面の状況 (KCl 水溶液 1ml/min 通水 ブロック+ペレット)	X-47
図 4.2-24	通水時の供試体表面の状況 (KCl 水溶液 10ml/min 通水 ブロック+ペレット)	X-47
図 4.2-25	通水時の供試体表面の状況 (KCl 水溶液 100ml/min 通水 ブロック+ペレット)	X-48
図 4.2-26	解体状況 (KCl 水溶液 1ml/min 通水 ブロック+ペレット)	X-48
図 4.2-27	K 系地下水 0.01L/min の解体状況 (ブロック+ペレット)	X-48
図 4.2-28	K 系地下水 0.1L/min の解体状況 (ブロック+ペレット)	X-49
図 4.2-29	人工海水 1ml/min の送水圧と流量の関係 (ブロック)	X-49
図 4.2-30	人工海水 10ml/min の送水圧と流量の関係 (ブロック)	X-50
図 4.2-31	人工海水 100ml/min の送水圧と流量の関係 (ブロック)	X-50
図 4.2-32	通水時の供試体表面の状況 (人工海水 1ml/min 通水 ブロック)	X-51
図 4.2-33	通水時の供試体表面の状況 (人工海水 10ml/min 通水 ブロック)	X-52
図 4.2-34	通水時の供試体表面の状況 (人工海水 100ml/min 通水 ブロック)	X-52
図 4.2-35	解体状況 (人工海水 1ml/min 通水 ブロック)	X-53
図 4.2-36	解体状況 (人工海水 10ml/min 通水 ブロック)	X-53
図 4.2-37	解体状況 (人工海水 100ml/min 通水 ブロック)	X-53

図 4.2-38	人工海水 1ml/min の送水圧と流量の関係 (ブロック+ペレット)	X-54
図 4.2-39	人工海水 10ml/min の送水圧と流量の関係 (ブロック+ペレット)	X-55
図 4.2-40	人工海水 100ml/min の送水圧と流量の関係 (ブロック+ペレット)	X-55
図 4.2-41	通水時の供試体表面の状況 (人工海水 1ml/min 通水 ブロック+ペレット)	X-56
図 4.2-42	通水時の供試体表面の状況 (人工海水 10ml/min 通水 ブロック+ペレット)	X-57
図 4.2-43	通水時の供試体表面の状況 (人工海水 100ml/min 通水 ブロック+ペレット)	X-57
図 4.2-44	解体状況 (人工海水 1ml/min 通水 ペレット+ブロック)	X-58
図 4.2-45	解体状況 (人工海水 10ml/min 通水 ペレット+ブロック)	X-58
図 4.2-46	解体状況 (人工海水 100ml/min 通水 ペレット+ブロック)	X-58
図 4.2-47	KCl、MgCl ₂ 水溶液と人工海水の流出量と通水量の関係	X-59
図 4.2-48	流出量と通水量の関係のまとめ	X-60
図 5.1-1	直列膨潤量試験装置による密度分布均質化試験のイメージ	X-61
図 5.2-1	直列膨潤量試験の給水量の経時変化	X-63
図 5.2-2	直列膨潤量試験装置における e-logp 関係のイメージ	X-64
図 5.2-3	スラリー圧密試験の状況	X-65
図 5.2-4	人工海水と 1/2 人工海水で作製したベントナイトスラリーの沈下曲線	X-65
図 5.2-5	人工海水と 1/2 人工海水で作製したベントナイトスラリーの p _a -logp 関係	X-66
図 5.2-6	人工海水と 1/2 人工海水で作製したベントナイトスラリーの e-logp 関係	X-66

表目次

表 1.2-1	使用する液種	X-1
表 2.1-1	飽和度と比抵抗の関係取得試験ケース	X-3
表 2.1-2	飽和度と比抵抗の関係試験 結果一覧 (Na 型ベントナイト、CaCl ₂ 水溶液)	X-4
表 2.1-3	飽和度と比抵抗の関係試験 結果一覧 (Na 型ベントナイト、人工海水)	X-5
表 2.1-4	試験結果.....	X-9
表 2.2-1	浸潤速度取得試験ケース一覧.....	X-11
表 2.2-2	試験結果のまとめ	X-21
表 3.1-1	二次元土槽試験のケース	X-24
表 3.1-2	二次元土槽試験供試体諸元	X-25
表 4.1-1	小規模パイピング・エロージョン試験ケース一覧.....	X-31
表 4.2-1	ブロック+ペレットケースの供試体諸元.....	X-36
表 4.2-2	ブロック+ペレットケースの供試体諸元.....	X-45
表 4.2-3	ブロック+ペレットケースの供試体諸元.....	X-54
表 5.1-1	緩衝材の密度均質化試験ケース	X-61
表 5.2-1	緩衝材の密度均質化試験の供試体諸元	X-63
表 5.2-2	スラリー圧密試験の供試体諸元	X-64

Appendix X では、平成 28 年度と平成 29 年度に行った緩衝材の変質、膨潤、流出挙動に関するデータ取得として行った試験についての試験方法と結果の詳細を記載する。

1. 概要

本業務では、沿岸部での緩衝材の性能評価や性能維持のための工学的な対策の成立性について定量評価を行うために、以下の①から⑤の項目について検討を行う。

- ① 地下水浸潤速度および透水係数の取得に関する試験
- ② 実験室規模の緩衝材流出に関する試験
- ③ 定置方式による膨潤性能への影響に関する試験
- ④ 密度分布が膨潤量に及ぼす影響に関する試験

実施内容の詳細は以下のとおりである。

1.1 使用材料

本業務で使用する材料（固相）は、別途実施している塩を含まない水を用いて実施してきた既往の研究成果（原環センター、2015、2016）との比較を容易にすべく、既往の研究と同じ材料と配合となるようにして、山形産 Na 型ベントナイト(クニゲル V1)に 3 号ケイ砂と 5 号ケイ砂を乾燥質量比 7 : 1.5 : 1.5 で混合したものとする。

1.2 使用する液相の組成

本業務で使用する水は、沿岸域における地下水組成を想定した水溶液とする。これまで、既往の研究（原環センター、2015、2016）において、蒸留水の試験を行うとともに、イオン強度の影響を見るために NaCl 水溶液と一部についての CaCl₂ を用いた試験を実施してきた。その結果と本業務の結果が互いに補完し、包括的な知見を形成できるようにするために、これまで行っていない工海水あるいは 1/2 濃度の人工海水を用いるとともに、海水の主要成分を単一組成で同一のイオン強度の試験を行うこととした。

表 1.2-1 使用する液種

名称	イオン強度等
CaCl ₂ 水溶液	0.5 程度
MgCl 水溶液	0.5 程度
KCl 水溶液	0.5 程度
人工海水	ASTM D1141 に準拠
1/2 人工海水	上記の 1/2

1.3 試験装置

本業務で使用する試験装置のうち、1.2 で示した液相に接する金属は全て SUS316 製とするなどして、試験装置の腐食が試験結果に及ぼす影響を排除する。

2. 地下水浸潤速度および透水係数の取得に関する試験

2.1 飽和度と比抵抗の関係取得

放射性廃棄物処分施設の再冠水期間中にその緩衝材に発生する事象について検討する場合、緩衝材中の浸潤面の移動や飽和度変化などが重要なパラメータとなる。この緩衝材中の浸潤面の移動や飽和度変化を、供試体を乱すことなく計測する方法として比抵抗計測がある。この比抵抗計測は、緩衝材に接触している電極間に電流を流し、その電極間の抵抗値を計測するものである。

2.1.1 試験方法

本業務では、これまでに様々なベントナイトの飽和度と比抵抗の関係を取得した実績がある図 2.1-1 に示すような試験装置を用いて、ケイ砂 30wt%含有 Na 型ベントナイトに対して Ca 系地下水、人工海水が浸潤した場合の飽和度と比抵抗の関係を取得した。

試験体は高さ 100mm の供試体を仕上がり層厚 5mm×20 層で締固めて作製した。ここで、飽和度と比抵抗の関係は一意ではなく、その乾燥密度によって変化するものと考えられるため、乾燥密度 1.2、1.6、1.8、2.0Mg/m³ の場合について飽和度をパラメータとして相関関係に関するデータを取得した。

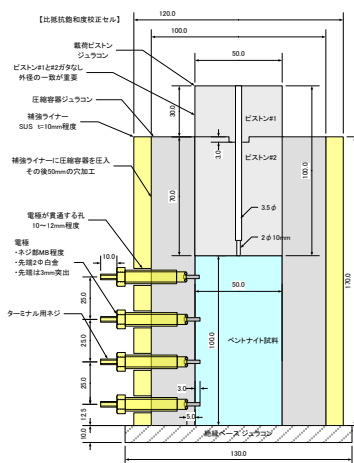


図 2.1-1 飽和度と比抵抗の関係取得試験装置の断面図

試験ケースを表 2.1-1 に示す。これらの試験を実施することによって、既往の研究（原環センター、2015）における（式 2-1）のような飽和度と比抵抗の関係が得られる。

表 2.1-1 飽和度と比抵抗の関係取得試験ケース

液種	ベントナイト	ケイ砂含有率 wt%	乾燥密度 Mg/m ³	飽和度** %
Ca 系地下水	Na 型ベントナイト	30	1.2	30.0
			1.6	45.0*
人工海水			1.8	60.0*
			2.0	75.0
				90.0*

*乾燥密度 2.0 Mg/m³ の時には実施しない

$$R = a \left(\frac{\rho_d / \rho_w}{S_r} \right)^b = a \left(\frac{G_s}{S_r (1 + e)} \right)^b \quad (\text{式 2-1})$$

ただし、 ρ_d は乾燥密度、 ρ_w は間隙液の単位体積質量、 S_r ($\times 100\%$) は飽和度、 e は間隙比、 G_s は土粒子比重である。さらに、 a (Ωm)、 b は液種の違いによる補正係数である。

2.1.2 試験結果

表 2.1-2 と表 2.1-3 にケイ砂 30wt%含有の Na 型ベントナイトで間隙水として CaCl₂ 水溶液（イオン強度 0.5）と人工海水を用いた場合の飽和度と比抵抗の関係取得試験ケースとその結果の一覧を示す。表中の含水比は土粒子の質量に対する水溶液の質量百分率で定義し、土粒子比重も水溶液の密度に対する土粒子密度の割合で定義した。

表 2.1-2 飽和度と比抵抗の関係試験 結果一覧 (Na 型ベントナイト、CaCl₂水溶液)

バルクの土粒子密度 $\rho_s=2.707$ (Mg/m ³)										
設計値					実測値					
乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	含水比 w (%)	間隙比 e	飽和度 S_r (%)	体積含水率 θ (%)	乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	含水比 w (%)	間隙比 e	飽和度 S_r (%)	体積含水率 θ (%)	比抵抗 R (Ωm)
1.200	14.07	1.256	30	16.89	1.196	14.31	1.264	30.26	17.11	51.54
	21.11	1.256	45	25.33	1.194	21.47	1.268	45.27	25.63	18.12
	28.15	1.256	60	33.78	1.192	28.51	1.271	59.91	33.97	13.03
	35.18	1.256	75	42.22	1.190	35.42	1.275	74.22	42.14	10.95
	42.22	1.256	90	50.66	1.188	43.21	1.279	90.25	51.32	7.25
1.600	7.75	0.692	30	12.41	1.597	7.51	0.695	28.86	11.99	103.56
	11.63	0.692	45	18.61	1.595	11.68	0.697	44.82	18.64	36.93
	15.51	0.692	60	24.81	1.594	16.42	0.699	62.80	26.17	21.97
	19.38	0.692	75	31.01	1.593	19.26	0.700	73.53	30.67	15.14
	23.26	0.692	90	37.22	1.591	23.52	0.702	89.60	37.42	10.53
1.800	5.65	0.504	30	10.16	1.797	7.37	0.507	38.86	13.24	81.68
	8.47	0.504	45	15.25	1.796	10.17	0.508	53.52	18.26	39.08
	11.29	0.504	60	20.33	1.795	12.53	0.508	65.88	22.49	23.11
	14.12	0.504	75	25.41	1.793	15.64	0.510	82.00	28.04	15.74
	16.94	0.504	90	30.49	1.793	16.90	0.510	88.56	30.30	13.59
2.000	3.96	0.354	30	7.92	1.998	4.16	0.355	31.35	8.32	163.30
	9.90	0.354	75	19.81	1.995	9.43	0.357	70.65	18.81	20.00

表 2.1-3 飽和度と比抵抗の関係試験 結果一覧 (Na 型ベントナイト、人工海水)

バルクの土粒子密度 $\rho_s=2.707 \text{ (Mg/m}^3\text{)}$										
設計値					実測値					
乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	含水比 w (%)	間隙比 e	飽和度 S_r (%)	体積含水率 θ (%)	乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	含水比 w (%)	間隙比 e	飽和度 S_r (%)	体積含水率 θ (%)	比抵抗 R (Ωm)
1.200	14.07	1.256	30	16.89	1.2	16.40	1.256	34.50	19.68	42.14
	21.11	1.256	45	25.33	1.2	23.36	1.256	49.14	28.03	27.98
	28.15	1.256	60	33.78	1.2	29.19	1.256	61.41	35.03	18.58
	35.18	1.256	75	42.22	1.2	36.56	1.256	76.93	43.88	10.08
	42.22	1.256	90	50.66	1.2	44.19	1.256	92.97	53.03	5.437
1.600	7.75	0.692	30	12.41	1.6	9.93	0.692	37.92	15.89	66.15
	11.63	0.692	45	18.61	1.6	13.72	0.692	52.40	21.96	40.66
	15.51	0.692	60	24.81	1.6	16.94	0.692	64.67	27.11	23.60
	19.38	0.692	75	31.01	1.6	20.27	0.692	77.42	32.44	11.82
	23.26	0.692	90	37.22	1.6	23.66	0.692	90.36	37.86	5.890
1.800	5.65	0.504	30	10.16	1.8	6.14	0.504	32.20	11.05	115.76
	8.47	0.504	45	15.25	1.8	8.56	0.504	44.87	15.40	71.02
	11.29	0.504	60	20.33	1.8	11.64	0.504	61.03	20.95	37.27
	14.12	0.504	75	25.41	1.8	13.93	0.504	73.02	25.07	18.90
	16.94	0.504	90	30.49	1.8	16.91	0.504	88.69	30.45	7.476
2.000	3.96	0.354	30	7.92	2.0	4.39	0.354	32.84	8.78	252.07
	9.90	0.354	75	19.81	2.0	9.92	0.354	74.13	19.84	11.75

さらに、図 2.1-2 に表 2.1-2 に示したケイ砂 30wt%含有の Na 型ベントナイトで間隙水として CaCl₂ 水溶液を用いた場合の飽和度と比抵抗の関係取得試験結果に (式 2-1) を用いてフィッティングした結果を示す。図から、この近似式は、係数 $a=3.5$ 、 $b=2.0$ とすることで全ての試験結果と非常に良く整合していることが分かる。

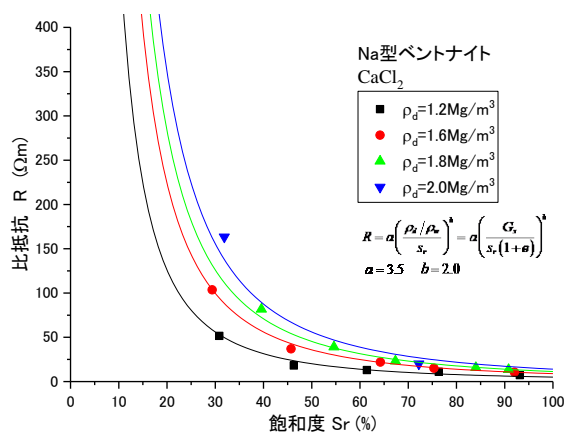


図 2.1-2 飽和度と比抵抗の関係 (ケイ砂 30wt%含有の Na 型ベントナイト、Ca 系地下水)

さらに、図 2.1-3 には、表 2.1-3 に示したケイ砂 30wt%含有の Na 型ベントナイトで間隙水として人工海水を用いた場合の飽和度と比抵抗の関係取得試験結果に (式 2-1) を用いてフィッティングした結果を示す。図から、この近似式は、乾燥密度が 1.2~1.6Mg/m³では、係数 $a=3.5$ 、 $b=2.0$ とすることで試験結果と非常に良く整合しているが、この係数で乾燥密度が 1.8~2.0Mg/m³のケースを評価すると比抵抗を過小評価する可能性がある。一方、乾燥密度が 1.8~2.0Mg/m³を近似式でフィッティングすると、係数 $a=3.5$ 、 $b=2.3$ とすることで試験結果と非常に良く整合している。ただし、この係数で乾燥密度が 1.2~1.6Mg/m³場合の比抵抗値を評価すると過大評価となる。他のケースでは、乾燥密度の増加に対する比抵抗値の増加割合は概ね線形であるが、この人工海水のケースでは、乾燥密度が 1.6Mg/m³から 1.8Mg/m³になると比抵抗値が急激に増加している。この結果が、人工海水に含まれる様々な陽イオンの影響かどうかは本試験結果だけでは判断することが難しい。今後、追加試験を行い、データの拡充を実施する必要があると考える。

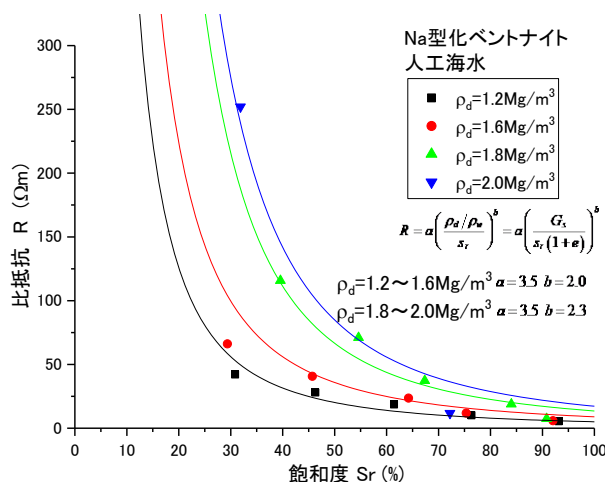


図 2.1-3 飽和度と比抵抗の関係 (ケイ砂 30wt%含有の Na 型ベントナイト、人工海水)

図 2.1-4 と図 2.1-5 には、既往の研究 (原環センター、2015) で取得されているケイ砂 30wt%含有の Na 型ベントナイトに対して H₂O とイオン強度 0.5 の NaCl 水溶液を用いて取得した飽和度と比抵抗の関係と、Ca 型化ベントナイトに対して H₂O を用いて取得した飽和度と比抵抗の関係を示す。図に示すように、ベントナイト系人工バリアに対しては、(式 2-1)を用いれば、幅広い地下水組成の適用可能であると考えられる。

図 2.1-6 には、乾燥密度 1.6Mg/m³のケイ砂 30wt%含有 Na 型ベントナイトとケイ砂 30wt%含有 Ca 型ベントナイトの様々な間隙液の飽和度と比抵抗値の関係を併せて示している。ケイ砂 30wt%含有 Na 型ベントナイトの H₂O とイオン強度 0.5 の NaCl 水溶液を用いた場合の飽和度と比抵抗値の比較から、間隙液のイオン強度が増加すると同じ飽和度でも比抵抗が低下する傾向があることが分かる。その一方で、ケイ砂 30wt%含有 Na 型ベントナイトとケイ砂 30wt%含有 Ca 型ベントナイトで間隙液を蒸留水を用いた場合の比較から、層間陽イオンが Ca イオンの場合、Na イオンの場合に比べ、同じ飽和度で比抵抗値が増加する傾向があることが分かる。

本検討で実施したケイ砂 30wt%含有 Na 型ベントナイトにイオン強度 0.5 の CaCl₂ 水溶液を用いた場合、間隙液のイオン強度が増加すると同時に Ca 型化も生じるため、ケイ砂 30wt%含有 Na 型ベントナイトに蒸留水を用いた場合に比べて、同じ飽和度で比抵抗値が増加する傾向を示している。ただし、ケイ砂 30wt%含有 Ca 型ベントナイトに蒸留水を加えた場合に比べて、同じ飽和度で比抵抗値は低い。さらに、本検討で実施したケイ砂 30wt%含有 Na 型ベントナイトで間隙液に人工海水を用いた場合は、ケイ砂 30wt%含有 Na 型ベントナイトにイオン強度 0.5 の CaCl₂ 水溶液を用いた場合と同等の結果となった。今回の試験で使用した間隙液に含まれる Na イオン以外の陽イオンは 10%程度であり、陽イオン交換反応後の間隙液に含まれる陽イオンは Na イオンのみになると考えられる。そのため、層間陽イオンが比抵抗値に及ぼす影響は小さく、間隙液の影響が大きいものと考えられる。

既往の研究（原環センター、2015）で得られている Ca 型ベントナイトは Na 型ベントナイトを人為的に Ca 型化させたものであり、その製造過程で余分なイオンを洗浄する工程がある。この際に、天然の Na 型ベントナイトの可溶性の随伴鉱物も取り除かれる。これが Ca 型ベントナイトの比抵抗値が増加する理由の一つと考えられる。層間陽イオンの影響を正確に調べるためには、精製した Na 型モンモリロナイトと Ca 型モンモリロナイトを使用して比抵抗計測を行う必要がある。

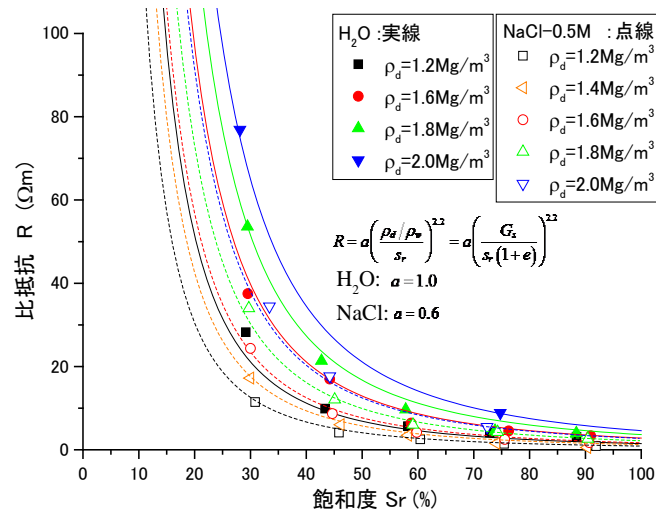


図 2.1-4 飽和度と比抵抗の関係（ケイ砂 30wt%含有の Na 型ベントナイト+H₂O、NaCl 水溶液）（原環センター、2015、2016）

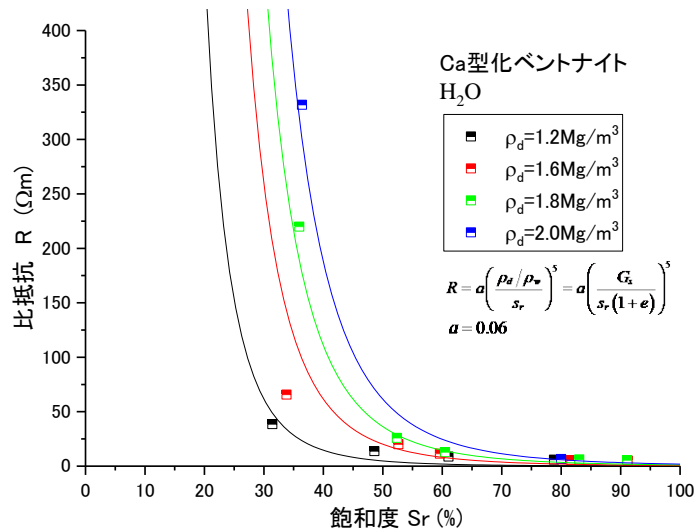


図 2.1-5 飽和度と比抵抗の関係 (ケイ砂 30wt%含有の Ca 型ベントナイト+H₂O) (原環センター、2016)

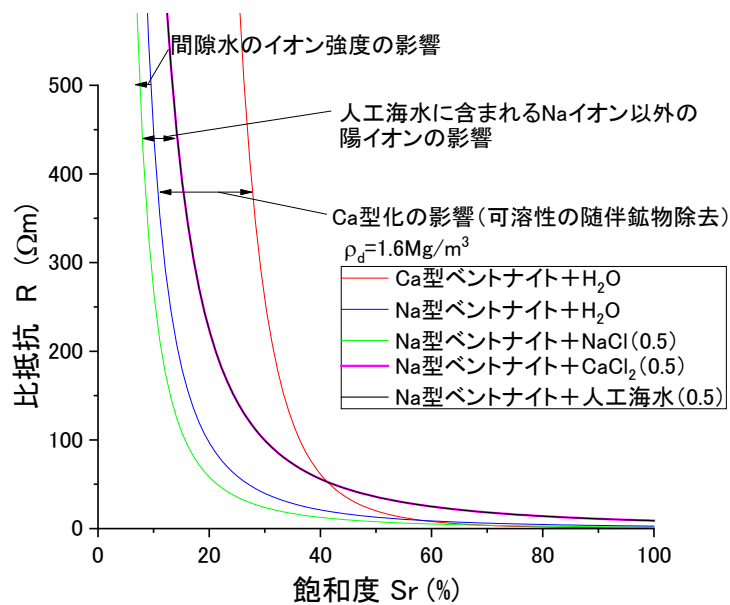


図 2.1-6 飽和度と比抵抗の関係のまとめ (乾燥密度 1.6Mg/m³)

本試験の結果と既往の研究結果 (原環センター、2015) をまとめると、液種ごとの飽和度と比抵抗の関係の係数 a 、 b が表 2.1-4 のようになる。既往の研究結果から、比抵抗で飽和度を推定する場合、層間陽イオンの違いによる吸着水と自由水の差の影響を受ける可能性があることが分かっており、乾燥密度が既知の緩衝材の飽和度を、比抵抗の計測値と式 2-1) によって推定する場合、未知数は a 、 b の 2 個となり、このままでは飽和度を推定できない。層間陽イオンの Ca 型化率や地下水イオン強度、陽イオン濃度などの補足的な情報と未知数 a 、 b の関係を取得し、推定できるように高度化する必要がある。さらに、乾燥密度や飽和度が推定可能な場合、比抵抗値から Ca 型化率を推定できる可能もある。

なお、イオン強度が 0.5 の NaCl 水溶液と CaCl₂ 水溶液の電気伝導度はそれぞれ、4.62s/m と 2.89s/m であり、比抵抗では 0.216Ωm と 0.346Ωm に相当する。さらに、人工海水の電気伝導度は 2.70s/m であり、比抵抗は 0.370Ωm であった。イオン強度が 0.5 の NaCl 水溶液に対してイオン強度が 0.5 の CaCl₂ 水溶液の比抵抗は約 1.6 倍であることが分かる。Na 型ベントナイトに蒸留水を使用した場合もベントナイトの随伴鉱物由来の電解質によって、その間隙水は有意な電気伝導度があるものと考えられる。このベントナイト間隙水の電気伝導度から比抵抗を算出することができれば、ベントナイト間隙水を含む各水溶液の比抵抗を用いて正規化した比抵抗と飽和度の関係が得られる。この正規化した比抵抗が取得できればベントナイト系人工バリア内の状況を間隙水の組成に依らず精緻に推定できる可能性がある。

表 2.1-4 試験結果

	ベントナイト	ケイ砂含有率 wt%	間隙液種	イオン強度	係数 <i>a</i>	係数 <i>b</i>	備考
既往の研究 (原環センター、2015、2016)	Na 型ベントナイト	30	蒸留水	—	1.0	2.2	
	Na 型ベントナイト		NaCl	0.5 程度	0.6	2.2	
	Ca 型化ベントナイト		蒸留水	—	0.06	5	
本研究	Na 型ベントナイト		Ca 系地下水	0.5 程度	3.5	2.0	
			人工海水	0.5 程度	3.5	2.0	乾燥密度 1.2~1.6Mg/m ³
					3.5	2.3	乾燥密度 1.8~2.0Mg/m ³

2.2 浸潤速度と透水係数の取得試験

ベントナイト系人工バリア材料は不飽和締固め膨潤性粘性土である。このような材料に水が浸潤する場合の不飽和領域と飽和領域の境界線である浸潤フロントの移動速度を推定することは、非常に難しい。これは、浸潤に伴う飽和度の変化でベントナイトの土骨格構造が変化するためである。一方で、この浸潤フロントの移動速度を取得することは、再冠水中に緩衝材内で発生する事象の発生時期、期間を推定する上で非常に重要である。

2.2.1 試験方法

既往の研究 (原環センター、2015) では、図 2.2-1 に示すように、緩衝材に地下水が浸潤する速度を得るために、寸法 φ50mm×H1000mm、乾燥密度 1.6Mg/m³ の供試体に対して、一次元条件で底面から蒸留水およびイオン強度 0.5 の NaCl 水溶液を浸潤させ、浸潤に伴う飽和度変化を比抵抗値の変化として継続して計測しており、図 2.2-2、図 2.2-3 に示すように非常に良好な結果を得ている。

そこで、本研究では、この既往の研究 (原環センター、2015) を参考にして、同様の手法で一次元浸潤速度を取得することとした。ただし、既往の研究結果から試験に要する時間を算出

すると、供試体高さ 1000mm では本試験フェーズ中に十分な試験結果が得られない可能性がある。そこで、図 2.2-4 に示すように、供試体高さを 300mm として試験を実施する。

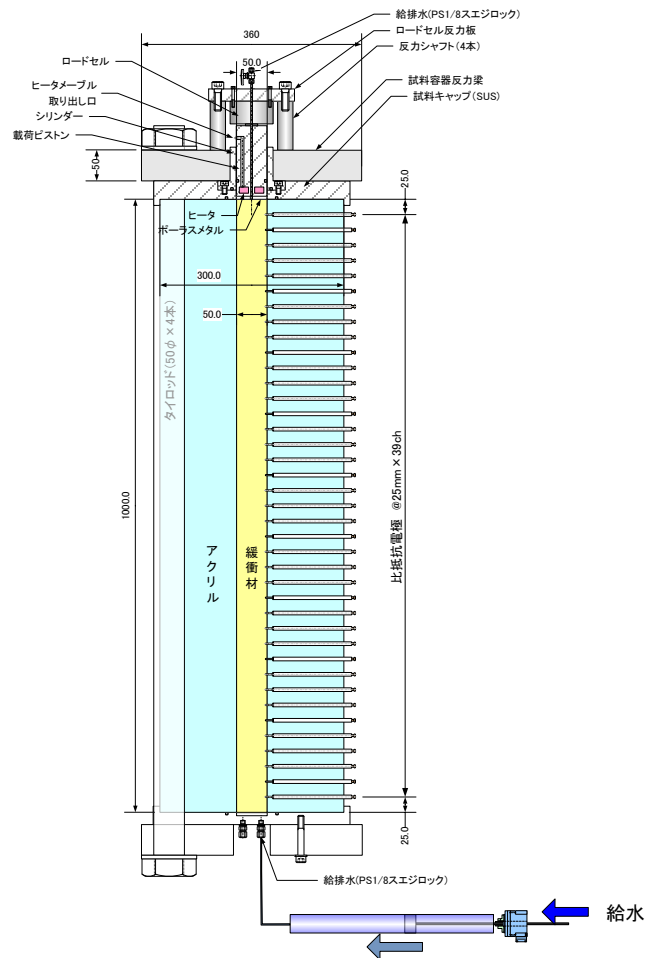


図 2.2-1 長尺ベントナイト供試体を用いた一次元浸潤速度取得試験

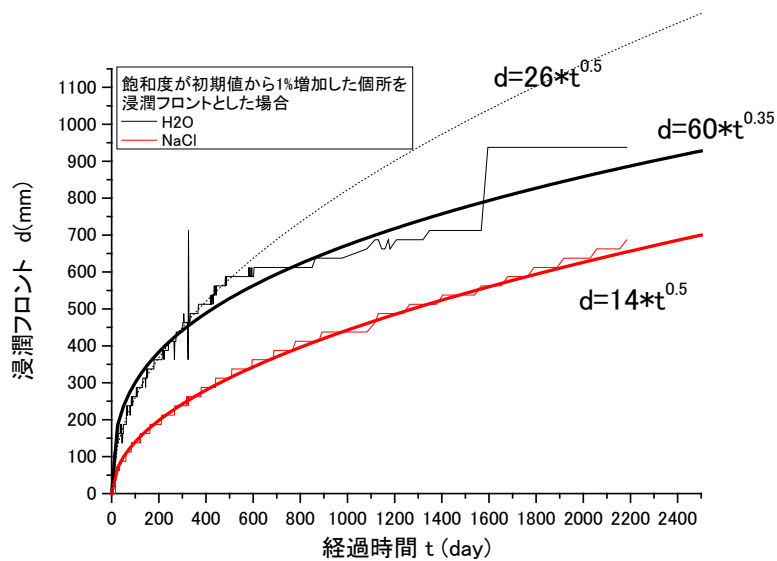


図 2.2-2 浸潤フロントの進展状況（初期飽和度からの増分が 1%で定義）

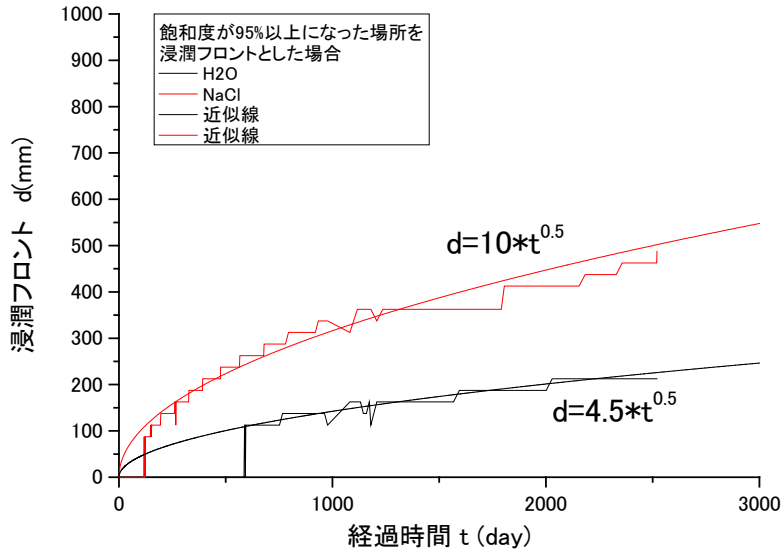


図 2.2-3 飽和フロントの進展状況（飽和度 95%以上で定義）

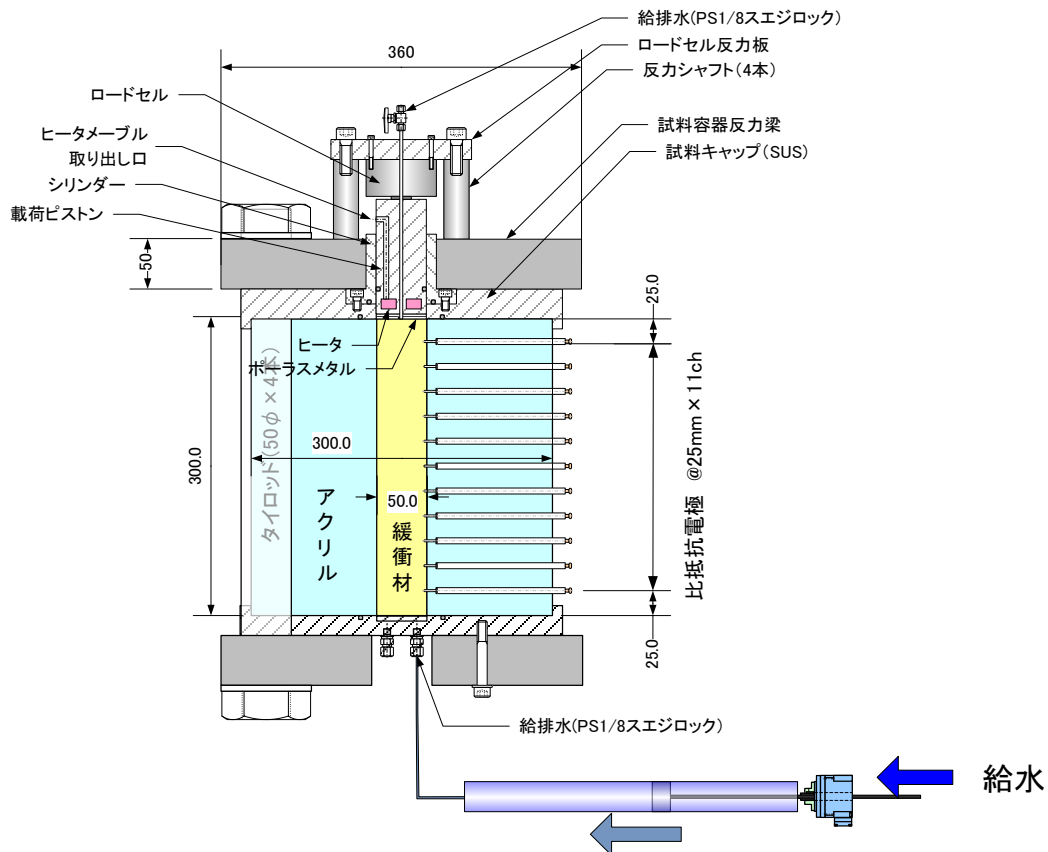


図 2.2-4 一次元浸潤速度試験装置概略図

試験ケースを表 2.2-1 に示す。イオン強度によってはその浸潤により、ベントナイトの膨潤

圧が低下し、セルと供試体の界面が破過する可能性がある。この破過を避けるために、試験開始初期はフローポンプで流量を制御して送水し、十分に送水圧が大きくなったらその送水圧を超えない程度の送水圧となるような圧力制御の試験に移行する。試験中には比抵抗値の変化、膨潤圧を計測する。ただし、1 ケースだけ、通水圧を大きめ（最大 1MPa 程度）に設定して、通水圧の大きさが浸潤挙動に及ぼす影響についてのデータも取得する。上部からの排水が確認された時点で、排水中のイオン分析や透水係数の取得を行う。

表 2.2-1 浸潤速度取得試験ケース一覧

液種	供試体	試験条件	試験数	備考
Ca 系地下水	ケイ砂 30wt%混合 Na 型ベントナイト	通水圧：流量制御段階の 通水圧から決定	1	初期は流量制御として、 通水圧が十分大きくなったら圧力制御に 移行する。
人工海水			1	
人工海水		通水圧：最大 1MPa 程度	1	

これらの試験を実施することによって、既往の研究における (式 2-2) や (式 2-3) のような浸潤距離と時間の関係が得られる。

$$D_p = aT^b \quad (\text{式 2-2})$$

$$D_s = cT^d \quad (\text{式 2-3})$$

ただし、 D_p 、 D_s (mm)は、それぞれ浸潤フロントと飽和フロントの底面からの距離乾燥密度、 τ (日)は経過時間、 a 、 b 、 c 、 d は液種の違いによる補正係数である。

図 2.2-5 に試験装置の全景を示す。Ca 系地下水と人工海水の 2 ケースを同時に開始した。図に示すように、高さ 300mm の供試体をアクリル製のセルで体積拘束し、底面から給水して、1 次元浸潤速度を計測する。

図 2.2-6 には、各ケースの試験装置を示す。図から比抵抗電極が螺旋状に配置されているのが分かる。これは、図 2.2-7 に示すように、高さ 300mm の供試体に、既往の研究（原環センター、2015）で実施したように比抵抗電極を直線配置すると、多くても 10 個程度しか設置できない。本研究では、既往の研究と同様に、4 極法による比抵抗計測を計画しており、その場合、10 個の電極では 7 点しか比抵抗値を計測できない。そこで、図 2.2-7 に示すような螺旋状（2 周半）に電極を配置することとした。この場合、電極間隔を直線配置と同じにしても、20 個の電極を設置でき、計測点も 17 カ所となる。これによって、浸潤方向への比抵抗変化の計測分解能を高めた。

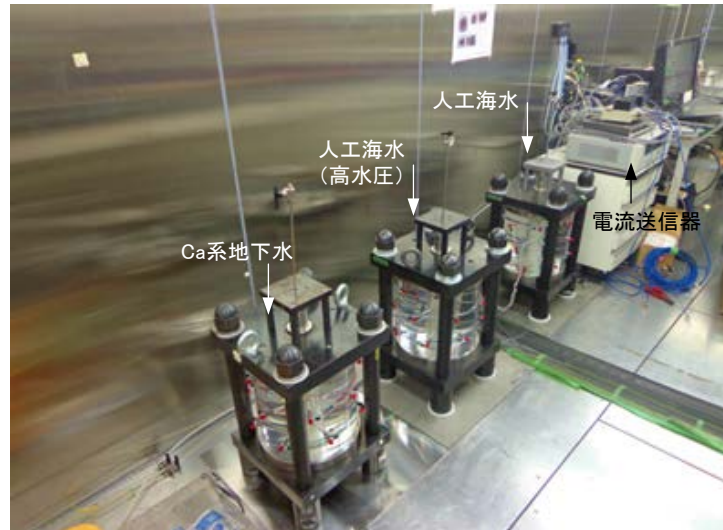
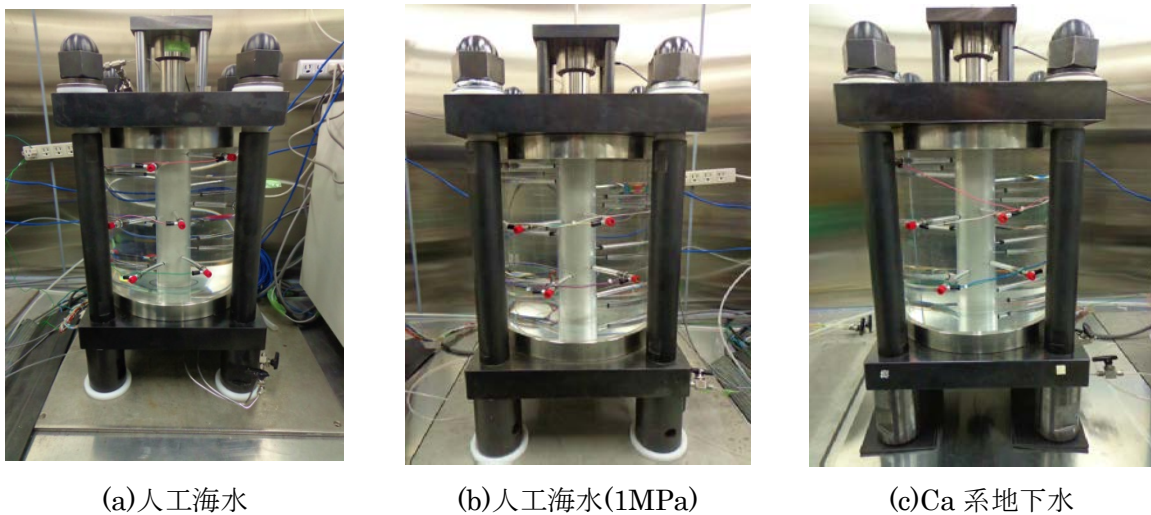


図 2.2-5 一次元浸潤速度試験装置全景



(a)人工海水

(b)人工海水(1MPa)

(c)Ca系地下水

図 2.2-6 一次元浸潤速度試験装置

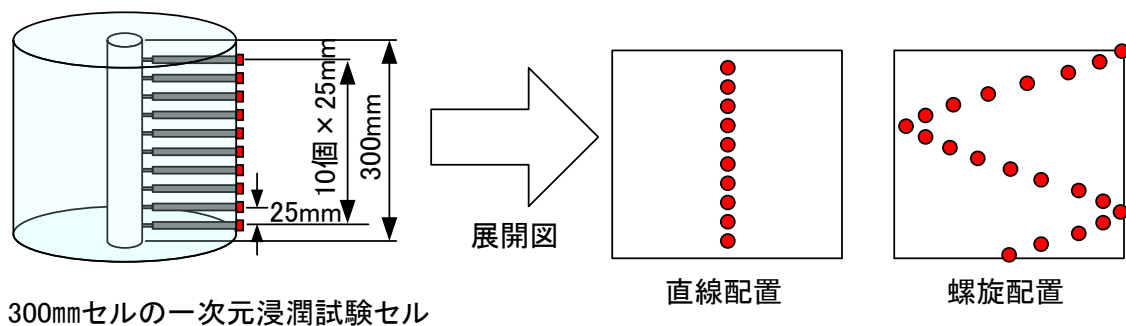


図 2.2-7 一次元浸潤速度試験装置の比抵抗電極の螺旋配置のイメージ

2.2.2 試験結果

図 2.2-8 に給水量と送水圧の経時変化を示す。さらに図には、供試体の空隙体積を供給した液体で満たした場合の飽和フロントの位置の経時変化も併せて示している。この飽和フロントは、供試体内の飽和度の遷移領域が全くない（飽和フロントと浸潤フロントが一致）と仮定した場合に相当している。

本検討は、試験の初期段階では供試体の下部（給水側）に流量制御で十分に膨潤領域を形成してから圧力制御での給水に移行した。これは、試験の初期から圧力制御で給水を行うと、セルと供試体の界面が破過した場合に、シリンジポンプが給水圧を保持するために給水量を急増させ歯止めが効かなくなるのを防ぐためである。界面に給水が進行すると、電極が濡れてしまい、正確な浸潤面の計測が不可能になってしまうためである。図に示すように、全てのケースで、0.0001cc/min で給水を行っており、流量の経時変化は一定勾配で一致している。しかしながら、その際の給水圧は、全てのケースで負圧であり、その値には差異がある。これは、供試体作製時の締固め圧力の違いなどに起因するものと考えられる。

全てのケースで 88 日間流量制御で給水した後に圧力制御に移行した。全てのケースで通水圧をゼロ（実際は、シリンジポンプの位置と供試体の給水孔の水位差 7kPa）とした。図から圧力制御に変更したことにより通水圧が増加したため、流量が増加し、それに連動して浸潤フロントの移動速度も増加していることが分かる。さらに、人工海水の高圧ケースでは、通水圧を段階的に 200kPa まで増加させた。これにより、流量が増加し、計算上、192 日目で飽和フロントが供試体の上面まで達した。

図 2.2-9 には、液種の違いによる飽和フロントの経時変化の差異を示す。図から、全てのケースにおいて、通水圧の大きさに応じて流量は変化するが、給水量（総流量）の経時変化は同じ関数形で表現できそうである。既往の研究では、浸潤距離は給水時間の平方根に比例するという報告があるため、同様の関数形で表現できるものと考えられる。

人工海水の高圧と低圧のケースを比較すると、200kPa に通水圧を増加させる前の段階では両フロントともに概ね同じ経時変化を示しているが、通水圧を増加させると高圧ケースのフロントの移動速度が著しく増加していることが分かる。一方、人工海水の低圧ケースと Ca 系地下水のケースを比較すると、通水圧は同等であるにもかかわらず、Ca 系地下水の方がフロントの移動速度が遅いことが分かる。このことから、飽和フロントの移動速度が給水される液体に含まれる陽イオンの種類によって変化することが明らかとなった。

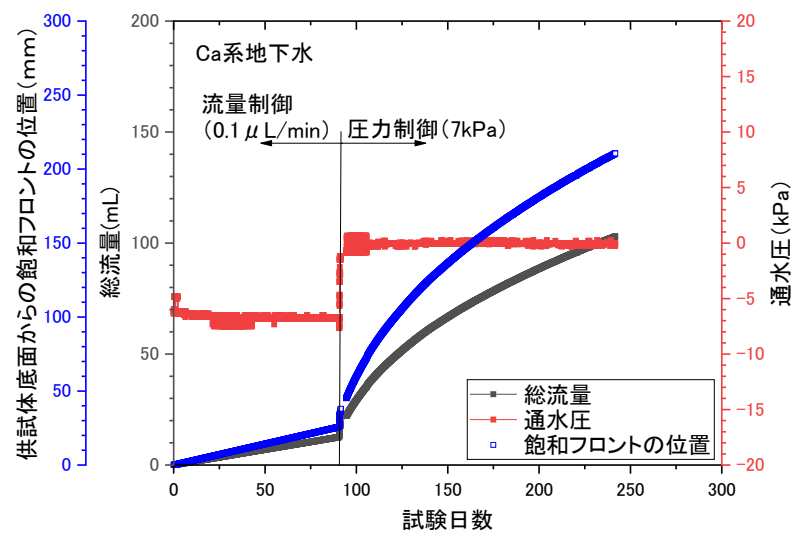
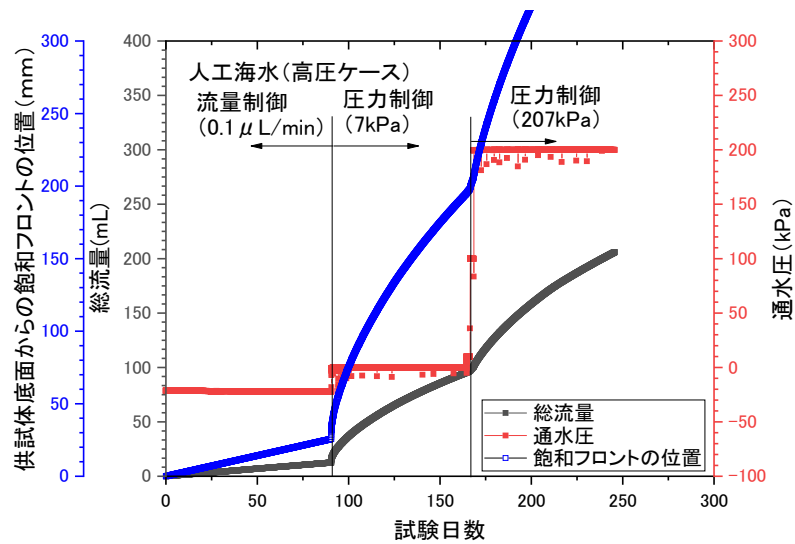
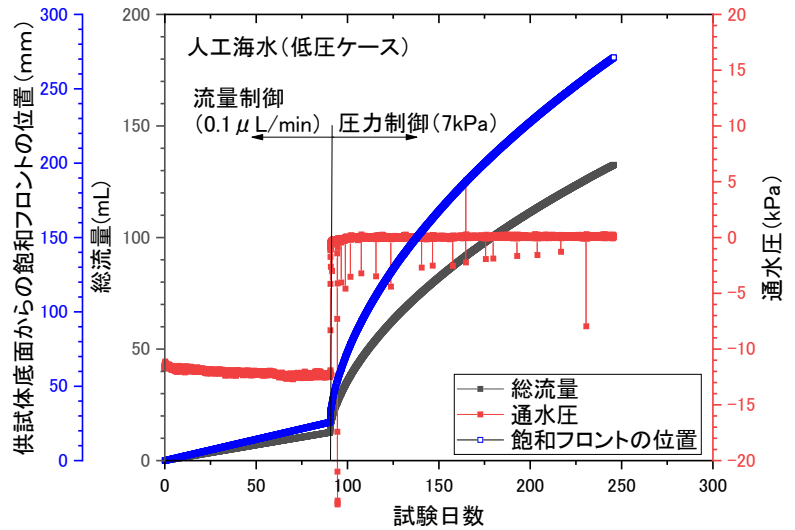


図 2.2-8 給水量と通水圧、飽和フロントの経時変化

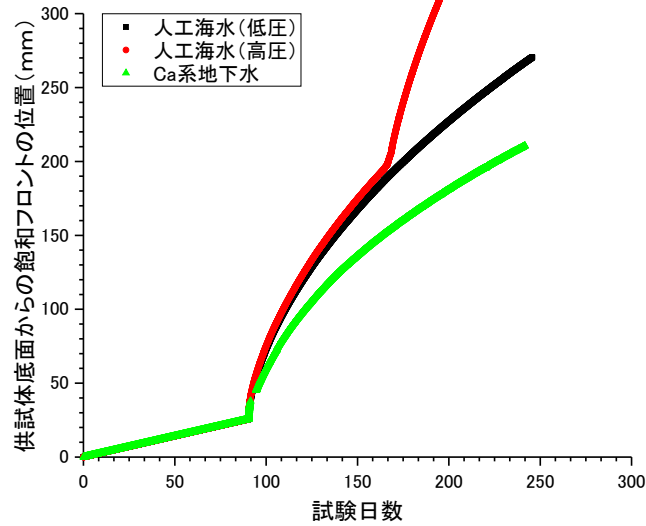


図 2.2-9 液種の違いによる飽和フロントの経時変化の差異

図 2.2-10 には、軸応力の経時変化を示している。供試体は、セルとの界面が水みちとならないように、アクリルセル内で仕上がり高さが 5mm となるように 60 層に分けて締固められ、最終的には反力盤とタイロッドで体積拘束して作製している。この際の供試体の反力が、ロードセルの初期値となっている。図から、全てのケースで給水直後に膨潤圧（軸応力）が大きく低下し、その後、概ね一定値を示していることが分かる。その後、人工海水のケースでは、膨潤圧が低下している。特に、高水圧のケースでは、通水圧を増加させて飽和フロントが供試体上面に達した付近で膨潤圧が急激に低下し一定値に達している。人工海水の低圧ケースも飽和フロントの進展に伴って低下傾向を示している。

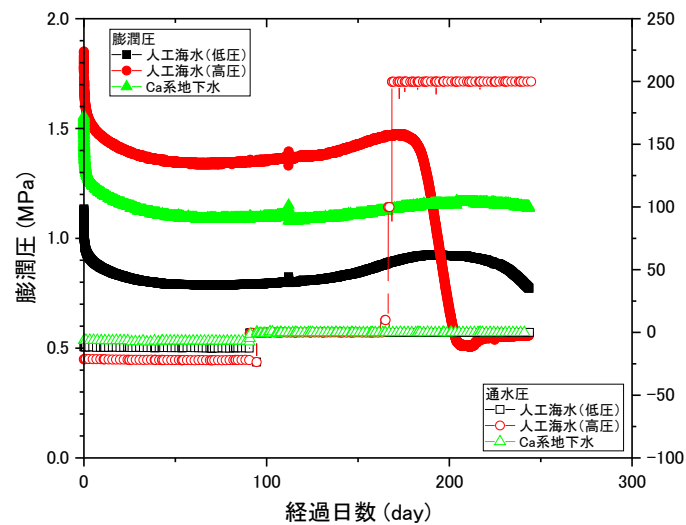
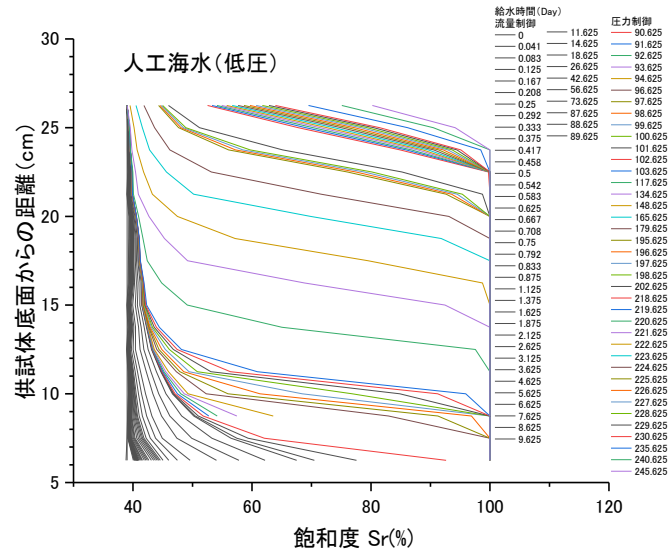


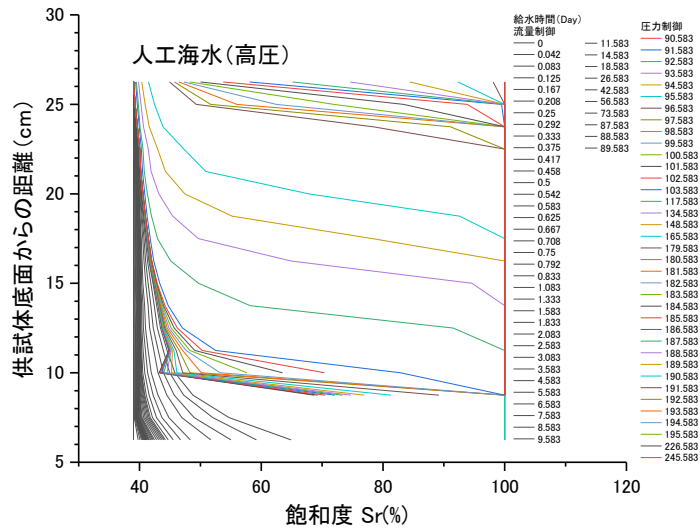
図 2.2-10 軸応力の経時変化

図 2.2-11 には、図 2.1-2 と図 2.1-3 に示したケイ砂 30wt%含有の Na 型ベントナイトで間隙水として Ca 系地下水と人工海水を用いた場合の飽和度と比抵抗の関係から推定した飽和度分布の経時変化を示す。飽和度と比抵抗の関係に基づいて、給水開始から飽和度が増加傾向を示している。使用している液種がイオン強度が大きく、膨潤圧が低下することが予想されたため、十分に飽和領域を形成させ破過を防ぐために、試験開始から 88 日間は流量制御で試験を行っていった。各図では黒線で示している。この流量制御の段階では、人工海水の 2 ケースは液種も給水条件も同じであり、Ca 系地下水のケースも含めて、3 ケースで大きな違いはない。その後、人工海水のケースでは、圧力制御に切り替えてすぐに上端（比抵抗計測できる範囲）の飽和度が変化している。一方、Ca 系地下水のケースも圧力制御に切り替えてから上端（比抵抗計測できる範囲）の飽和度が変化しているが、その時間は人工海水のケースよりも遅かった。

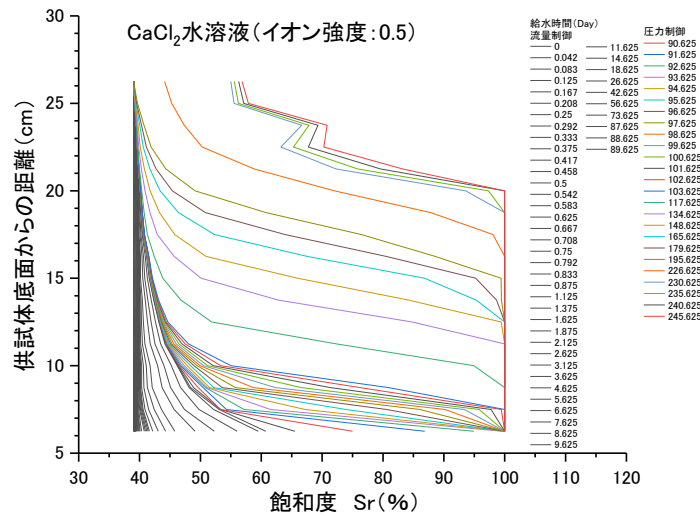
図 2.2-12 には、図 2.2-11 の結果をまとめて飽和度が 1%増加した場所を浸潤フロント、飽和度が 95%に到達した場所を飽和フロントとして定義した場合の、浸潤フロントと飽和フロントの経時変化を示す。前述のように、破過を防ぐために十分に飽和領域を形成させるべく、88 日間の流量制御期間を設けたため、給水開始時点を起点とした場合と圧力制御を起点とした場合の各フロントの経時変化をフィッティングによって取得した。図から、概ね給水時間の平方根に比例する結果となっているが、特に人工海水の高水圧のケースにおいて、飽和フロントは給水圧力の大きさに依存して進展速度が変動している。



(a) 人工海水

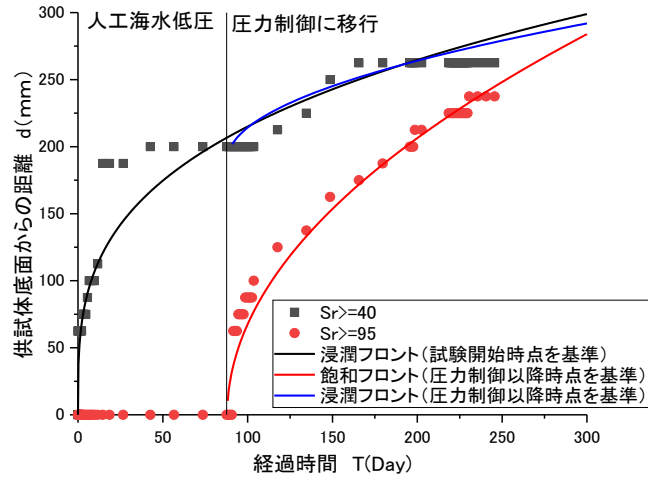


(b) 人工海水(高水圧)

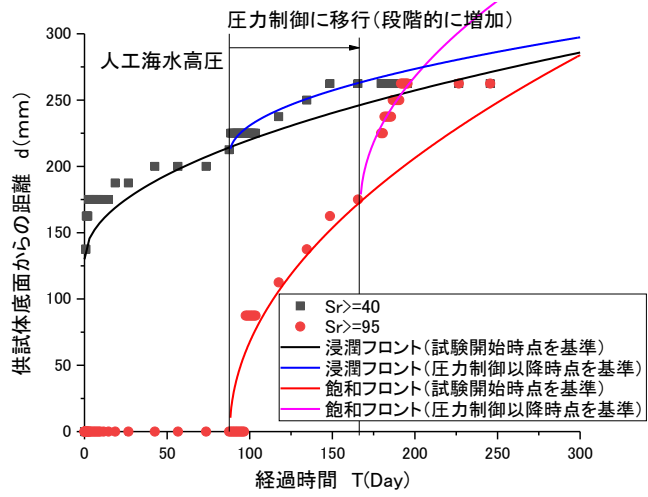


(c) Ca系地下水

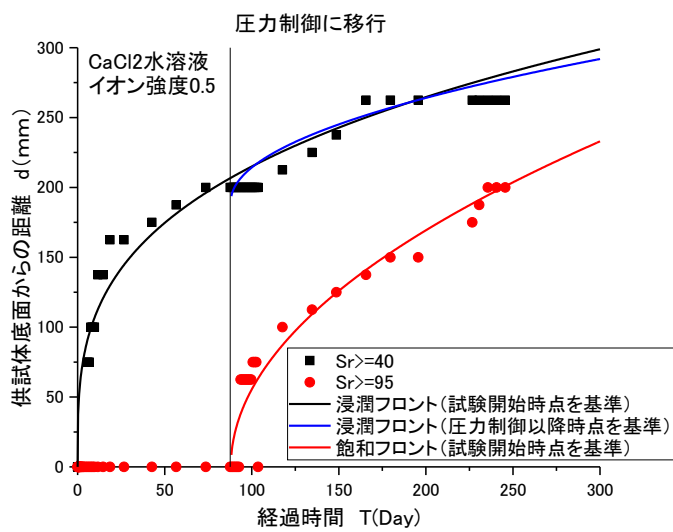
図 2.2-11 飽和度分布の経時変化



(a) 人工海水



(b) 人工海水(高水圧)



(c) CaCl₂ 水溶液

図 2.2-12 浸潤・飽和フロントの経時変化

各フィッティング結果は、フロントの位置（供試体底面からの距離）を $d(\text{mm})$ 、給水時間を $T(\text{Day})$ とすると、人工海水（低水圧）のケースの浸潤フロントは、

$$d = 54T^{0.3} \quad (\text{試験開始時点を起点})$$

$$d = 7(T - 88)^{0.5} + 19 \quad (\text{圧力制御開始時点を起点})$$

となり、飽和フロントは、

$$d = 20(T - 88)^{0.5} \quad (\text{圧力制御開始時点を起点})$$

となった。人工海水（高水圧）のケースの浸潤フロントは、

$$d = 9(T - 88)^{0.5} + 130 \quad (\text{試験開始時点を起点})$$

$$d = 6(T - 88)^{0.5} + 210 \quad (\text{圧力制御開始時点を起点})$$

となり、飽和フロントは、

$$d = 20(T - 88)^{0.5} \quad (\text{圧力制御開始時点を起点})$$

$$d = 17(T - 167)^{0.5} + 170 \quad (\text{圧力増加完了時点を起点})$$

となった。さらに Ca 系地下水のケースの浸潤フロントは、

$$d = 54T^{0.3} \quad (\text{試験開始時点を起点})$$

$$d = 7(T - 88)^{0.5} + 190 \quad (\text{圧力制御開始時点を起点})$$

となり、飽和フロントは、

$$d = 16(T - 88)^{0.5} \quad (\text{圧力制御開始時点を起点})$$

となった。この結果をまとめると表 2.2-2 のようになる。さらに、これらをまとめて図示すると図 2.2-13 のようになる。図には、浸潤・飽和フロントのフィッティング関数の係数とイオン強度の関係を示している。図から、計測時間が短いために、暫定値ではあるが、概ね、蒸留水、Na 系地下水、Ca 系地下水と人工海水で傾向が異なることが分かる。供試体長さを 1000mm 程度にして、計測時間をさらに長くできれば、より精度の高い浸潤フロントの推定式を取得することが可能と考えられる。

なお、既に、写真 2.2-1 に示すように、人工海水の高水圧のケースは排水孔から排水を確認しており、化学分析用の試料を採取しながら、排水の質量計測から排水量を算出し、透水係数を求めている。図 2.2-14 に人工海水（高圧ケース）の透水係数の経時変化を示す。図に示すように、透水係数は 10^{-11} オーダーのを推移している。JAEA の緩衝材データベースによると供試体寸法以外が同じ供試体の透水係数が 1.39×10^{-11} であったことから、本試験から得られた透水係数の方が大きめの値を示している。ただし、試験結果はわずかながら減少傾向を示しており、継続して計測する計画である。

表 2.2-2 試験結果のまとめ

	ベントナイト	ケイ砂含有率 wt%	液種	イオン強度	通水圧	浸潤フロント		飽和フロント	
						係数 <i>a</i>	係数 <i>b</i>	係数 <i>c</i>	係数 <i>d</i>
既往の研究 (原環センター、2016)			蒸留水	—	60kPa	60	0.35	4.5	0.5
			NaCl 水溶液	0.5 程度	7kPa	14	0.5	10.5	0.5
本研究	Na 型ベントナイト	30	CaCl ₂ 水溶液	0.5 程度	7kPa	54 70	0.3 0.5	16	0.5
			人工海水 (低水圧)	0.5 程度	7kPa	54 70	0.3 0.5	20	0.5
			人工海水 (高水圧)	0.5 程度	0.2MPa	90 6	0.5	20 17	0.5

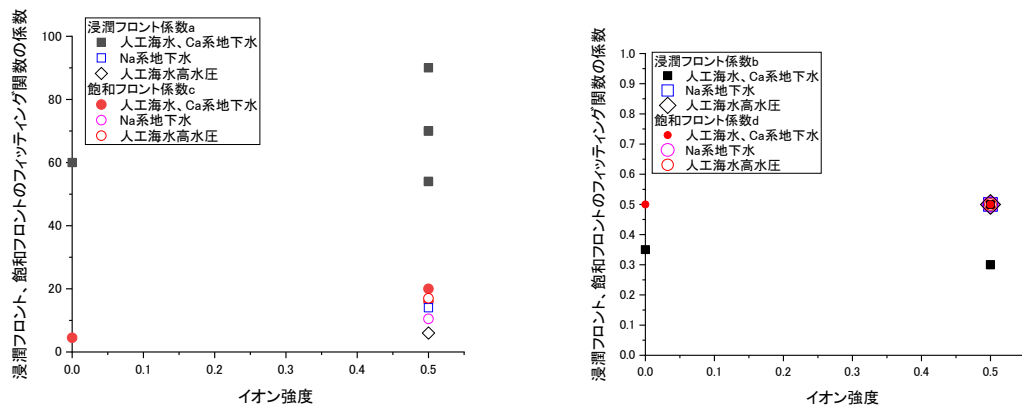


図 2.2-13 浸潤・飽和フロントのフィッティング関数の係数とイオン強度の関係



写真 2.2.2-1 人工海水の高水圧のケースは排水孔から排水状況

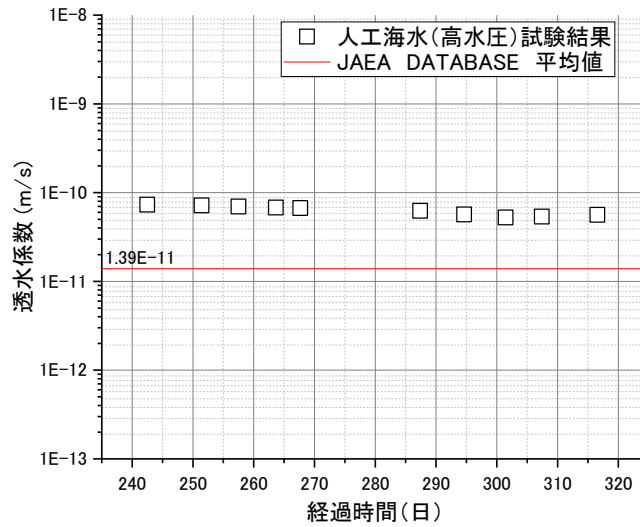


図 2.2-14 人工海水（高圧ケース）の透水係数の経時変化

3. 二次元土槽試験による浸潤・膨潤挙動に関する試験

3.1 試験方法

既往の研究（原環センター、2016）において、緩衝材の施工に起因する密度分布、隙間、初期間隙などが浸潤および膨潤挙動に及ぼす影響を評価するために、図 3.1-1 に示すような土槽内に 2 次元密度分布を有する緩衝材を作製し、底面からの通水によって浸潤、膨潤過程のデータ取得試験が実施された。その結果、緩衝材の施工法に起因する隙間や間隙分布によって給水方向が異なるため、均一化の状況も施工法ごとに異なることが明らかとなった。また、蒸留水と NaCl 水溶液を通水する場合は、浸潤の速度や膨潤による密度の分布の違いがあることが分かった。

本業務では、既往研究においても対象とした、ブロック定置 - ペレット充填併用ケースについて液種の違いが緩衝材の浸潤、膨潤挙動に及ぼす影響を調べる。図 3.1-2 に示すように、試験装置では、給水は底盤前面に設置したセラミックディスクから給水した。給水は、マリオット管を使用し、マリオット管の水位は常に供試体の上面になるようにした。このため、給水時の最大水位差は 20 cm である。また、浸潤状況は、図 3.1-3 に示すように、背面に設置した比抵抗電極によって計測される比抵抗値の変化によって把握する。比抵抗値の分布は、図 2.1-3 に示したケイ砂 30wt%含有の Na 型ベントナイトで間隙水として人工海水を用いた場合で取得した、飽和度と比抵抗の関係から飽和度分布に変換することが可能となる。

試験ケースを表 3.1-1 に示す。

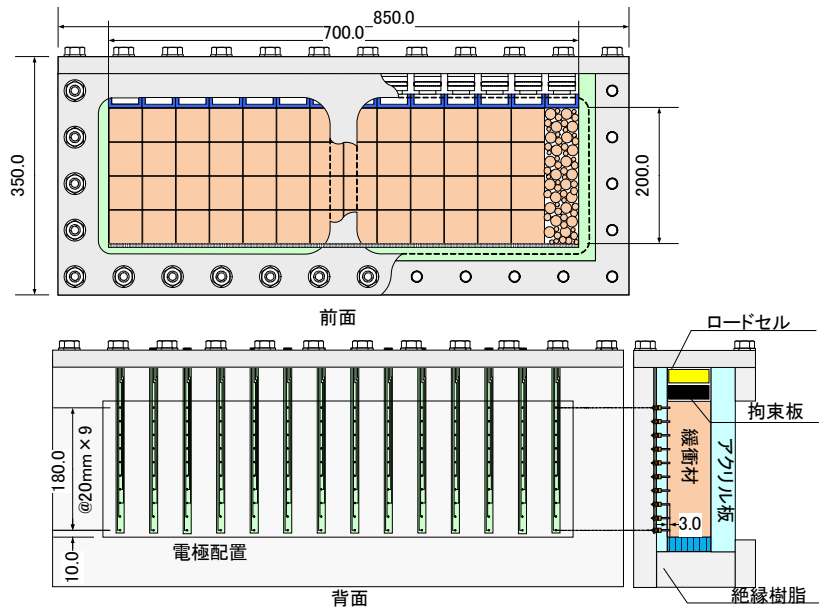


図 3.1-1 二次元土槽試験のイメージ (ブロック定置+ペレット充填ケース)

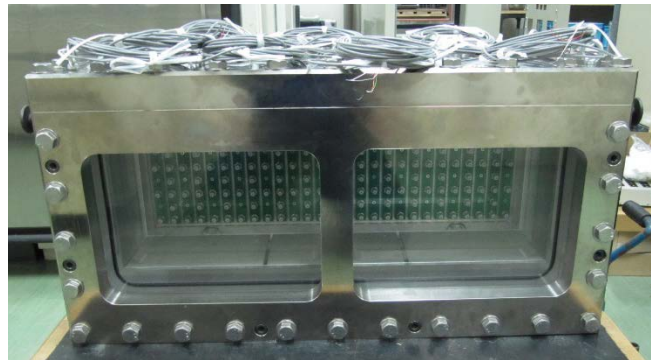


図 3.1-2 密度分布均質化土槽試験装置の空状態の全景

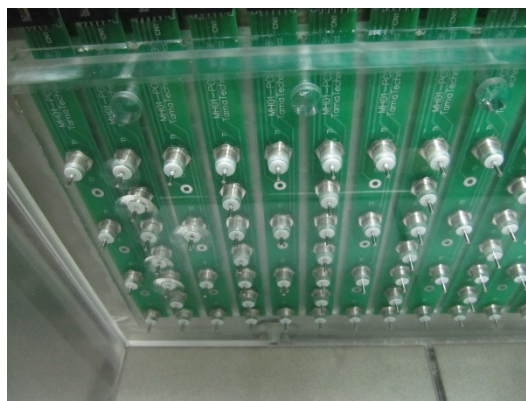


図 3.1-3 密度分布均質化土槽装置背面に設置した比抵抗電極

表 3.1-1 二次元土槽試験のケース

液種	施工方法	ベントナイト平均乾燥密度	初期含水比	計測、観察項目
人工海水	ブロック定置 + ペレット充填	ブロック部：1.6Mg/m ³ (Na型ケイ砂30wt%混合) ペレット部：1.3Mg/m ³ 程度 (Na型ベントナイト単体)	10%	【試験中】 比抵抗分布、膨潤圧分布 給水量、目視観察 【試験後】 密度分布、 飽和度（含水比）分布、 ブロック間の界面状況観察、 ブロックと土槽の界面状況観察

表 3.1-2 に供試体諸元を示す。ブロック部とペレット部の乾燥密度はそれぞれ 1.57Mg/m³ と 1.10Mg/m³ である。表中に示す空隙体積の分だけ給水すれば、計算上は供試体内が飽和したことになるため、飽和の判定の目安となる。

表 3.1-2 二次元土槽試験供試体諸元

材 料	試験用水	人工海水
	使用材料	立方体ブロックと大粒径ペレット併用
ブ ロ ッ ク 部	高さ (cm)	20.0
	幅 (cm)	52.9
	奥行 (cm)	15.0
	含水比 (%)	8.77
	乾燥密度 (g/cm ³)	1.57
ペ レ ッ ト 部	高さ (cm)	20.0
	幅 (cm)	17.1
	奥行 (cm)	15.0
	含水比 (%)	8.67
	乾燥密度 (g/cm ³)	1.10
供 試 体 全 体	高さ (cm)	20.0
	幅 (cm)	70.0
	奥行 (cm)	15.0
	体積 (cm ³)	21000
	含水比 (%)	8.75
	乾燥密度 (g/cm ³)	1.47
	空隙体積 (cm ³)	6838.7

3.2 試験結果

図 3.2-1 に密度分布均質化土槽試験状況の経時変化を示す。写真から、試験開始直後に、ペレット部分だけでなく、ブロック部と土槽の界面にも浸潤がみられる。さらに、給水開始から 7 分後には、ペレット部分にブロック 1 個分の水位まで浸潤が進んでいるが、ブロック間には浸潤がみられない。15 分後にブロック 2 個分の水位までペレット部が浸潤したが、同様にブロック間に浸潤している様子は見られなかった。

さらに給水開始から 15 分後に、ペレット充填部の下部でペレットが膨潤せずに崩壊しながら沈殿する様子が観察された。この沈殿物は、その後、膨潤してペレットの大間隙をシールしているように見える。このような状況は、時間が経過するとさらに進展し、給水開始から 1 時間後にはペレットの大間隙がこの沈殿物で閉塞し、その後、時間が経過してもペレット充填部の状況はあまり変化せず、ブロック定置部の方への浸潤が進展している状況が観察された。1 日後には、ブロック部の底面と側面に人工海水の浸潤が観察された。その後は、上面を除く全周からブロック部に対しても浸潤が観察され、10 日から 30 日にかけて浸潤面が急速に深部まで進展しているように見える。50 日目では、ブロック部の上部中央付近に不飽和領域とみられる箇所が残っているのが観察できる。また、浸潤面よりも上側にあるペレット充填部では、ペレットが膨潤せず

に残っているのが分かる。この浸潤面は、ペレット充填部とブロック部で連続しているようであった。

図 3.2-2 には、比抵抗値の分布から算出した飽和度分布を示す。比抵抗値から飽和度を算出する際には、図 2.1-3 に示したケイ砂 30wt%含有の Na 型ベントナイトで間隙水として人工海水を用いた場合で取得した、飽和度と比抵抗の関係を使用した。

図に示すように、比抵抗計測によって浸潤状況が飽和度変化として示すことができている。この比抵抗計測は、図 3.2-1 に示した二次元土槽試験状況の経時変化ともよく整合していることが分かる。

図 3.2-2 には、人工海水の浸潤に伴う膨潤圧分布の経時変化を示す。図に示すように、全てのロードセルにおいて、概ね定常状態に至っていた。また、膨潤圧はペレット部分で小さく、ブロック部では初期のブロック作製精度や定置に伴う凹凸に応じて膨潤圧分布にも凹凸が存在する。また、大局的には、ペレット部に向かって膨潤圧は小さくなる傾向を示しており、ペレット部の方へブロック部が膨潤変形することによって膨潤圧の上昇を緩衝している可能性がある。このブロック部の膨潤圧分布に見られる凹凸は、時間経過に伴って解消される傾向にあった。

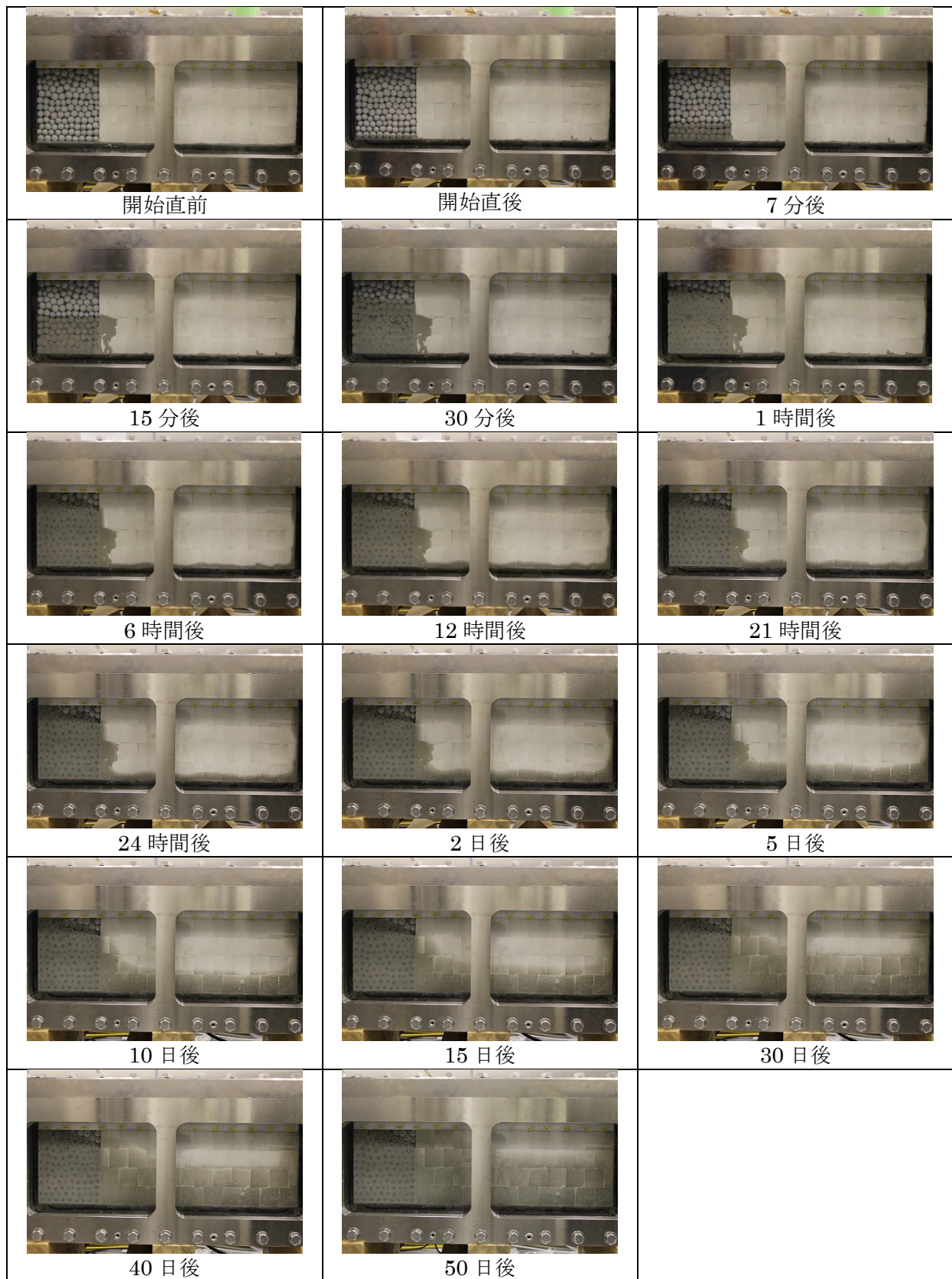


図 3.2-1 二次元土槽試験状況の経時変化

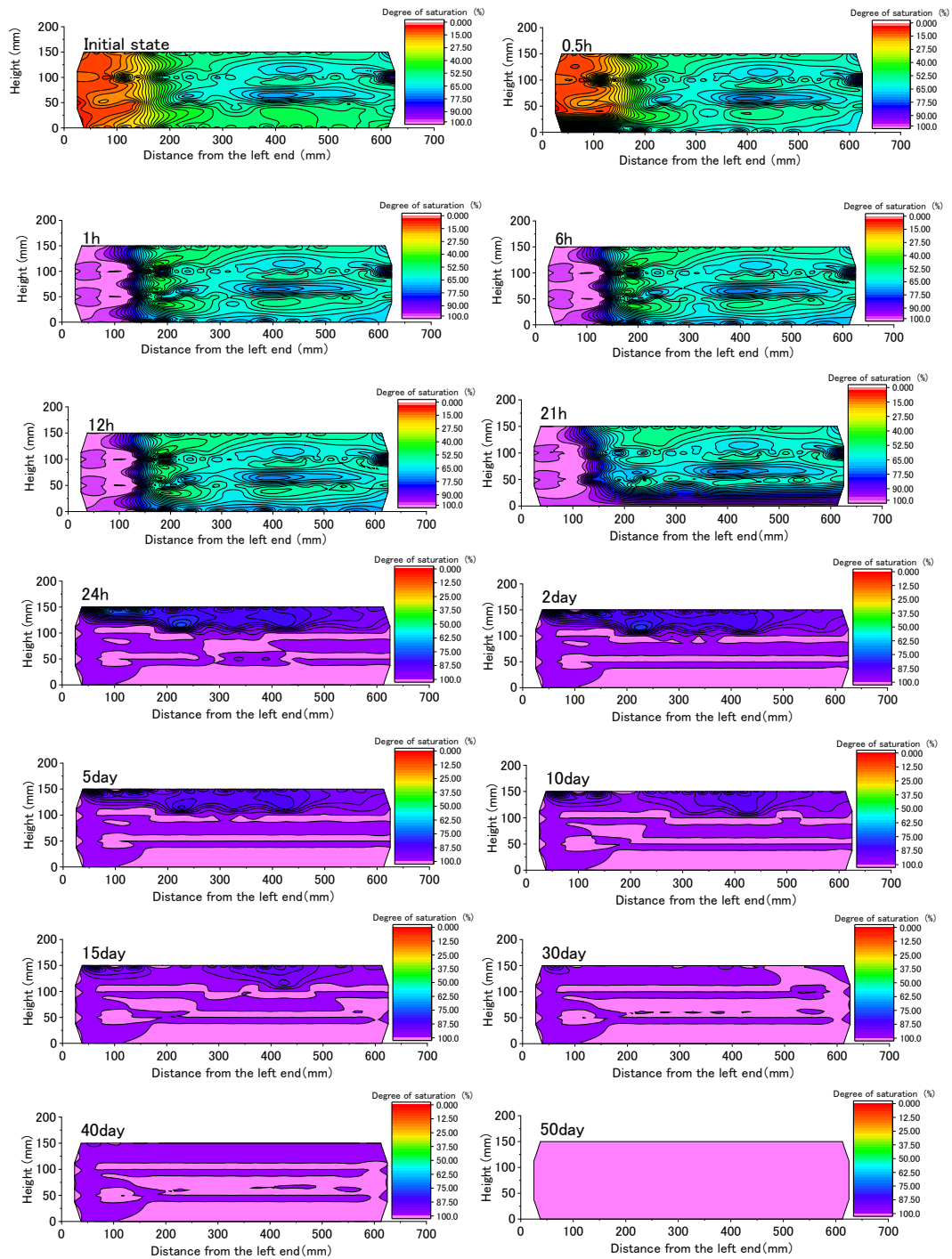


図 3.2-2 比抵抗値の分布から算出した飽和度分布

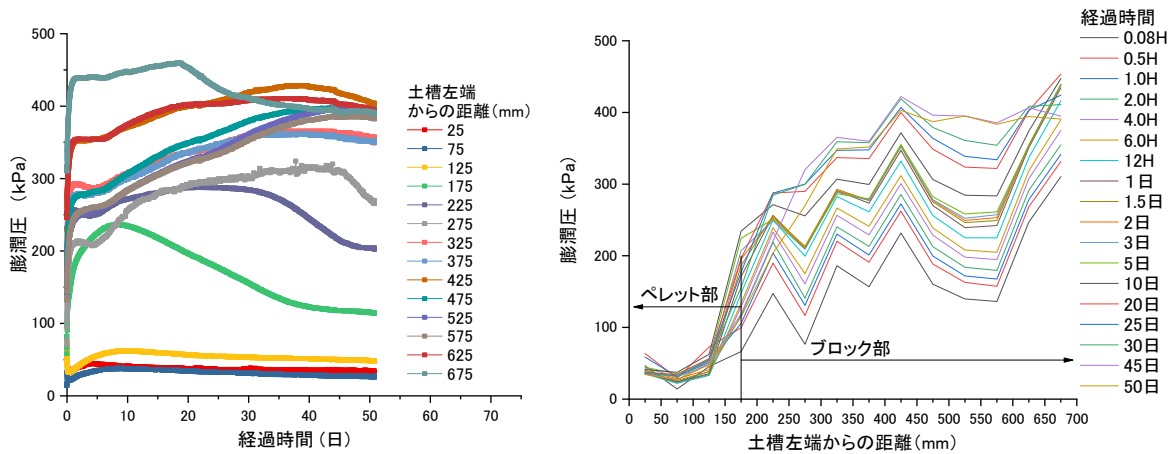


図 3.2-3 浸潤に伴う膨潤圧の経時変化と分布

図 3.2-4 には、給水量の経時変化を示す。図から、給水開始と同時にペレット部に急速に人工海水が浸潤するため、給水量の経時変化の立ち上がりが激しいことが分かる。本試験では、水位を供試体上面に合わせたマリOTT管によって給水を行っており、給水が進むにしたがって水位差が小さくなる。さらに、給水が進むに従ってペレット部とブロック部が膨潤し、給水量が減少することも相俟って、給水速度が急激に減少している。この給水速度の減少と緩衝材の膨潤圧の定常化のタイミングが概ね一致していた。

これまでに、飽和に必要な給水量である飽和給水量 6838.66mL に対して 4933mL 程度給水されており、残りの空隙は計算上 30%程度である。給水量と空隙体積のマスバランスから判断すると、比抵抗値の結果は飽和度を高めに計測している可能性がある。これは、図 2.1-3 に示したように、高飽和度領域では、飽和度の変化に比抵抗が鈍感であることに起因するものと考えられる。今後さらに給水を続け、ほぼ飽和となった時点で解体し、密度分布、飽和度等を測定する。

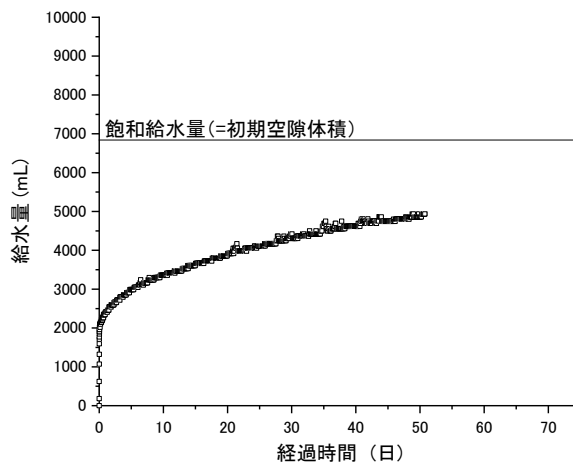


図 3.2-4 給水量の経時変化

4. 実験室規模の緩衝材流出に関する試験

4.1 試験方法

再冠水時に緩衝材に発生する事象のうち、湧水が処分孔に流入する過程で膨潤した緩衝材が湧水によって削られて水みちが形成され（パイピング現象）、処分孔外に流出する現象（エロージョン現象）が発生し、緩衝材の長期性能に及ぼす影響が大きい可能性があることが既往の研究（原環センター、2015、2016）で示されている。このうち、エロージョン現象の影響の大きさは、単位流量当たりのエロージョン量（流出した緩衝材の質量）の大小などで判断されるが、このエロージョン量は試験装置の大きさや試験水の流入出の位置などの影響を受けやすい。既往の研究での成果と本業務の検討結果を比較するためには、既往の研究と同様の試験装置を用いる必要がある。そこで、図 4.1-1 に示すような既往の研究と同等の試験装置を用いて流量とエロージョン量の関係を取得する。図に示すように、比較的小規模な試験であるため、パラメトリックな検討も可能である。本業務では、緩衝材の施工法としてブロック定置方式とブロック定置+ペレット充填併用方式の2通りについて試験を行う。また、液種として、海水中に主要イオンとして含まれる $MgCl_2$ と KCl 水溶液をイオン強度を同一にして使用して、液種ごとのエロージョン現象の発生の有無、通水圧の経時変化などを取得し、エロージョン現象に対する液種の影響を検討する。さらに、人工海水を用いて、エロージョン現象に対する海水組成の影響を調べる。本試験によって、地下水組成成分によるエロージョン現象の発生の有無、通水圧の経時変化などを取得する。事前に吸光光度法によって各液種でベントナイト濃度 wt%と吸光度の関係を取得し、排出液の吸光度を任意の期間ごとに測定することにより、緩衝材の流出量を算定（原環センター、2015）する。

本業務では、表 4.1-1 に示すように、緩衝材の施工法としてブロック定置方式とブロック定置+ペレット充填併用方式の2通りについて、検討を行う。図 4.1-2 には、ブロック定置方式とブロック定置+ペレット充填併用方式の供試体イメージを示す。ブロック作製時の含水比は 23%、乾燥密度は $1.6Mg/m^3$ とした。

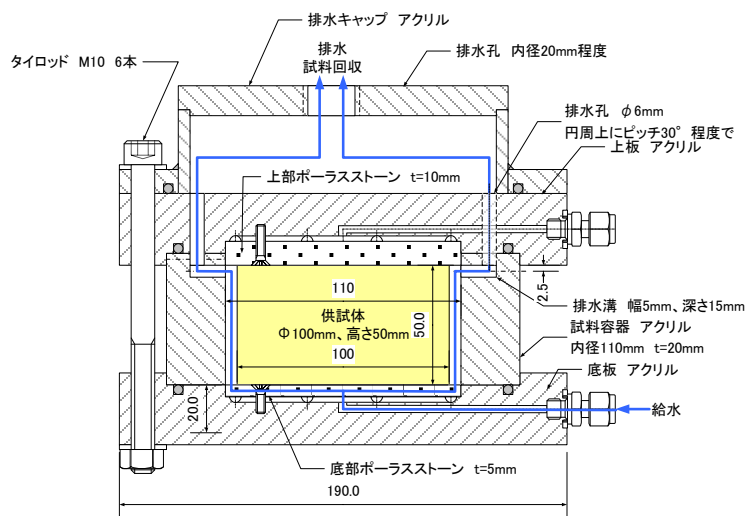


図 4.1-1 パイピング・エロージョン試験セル

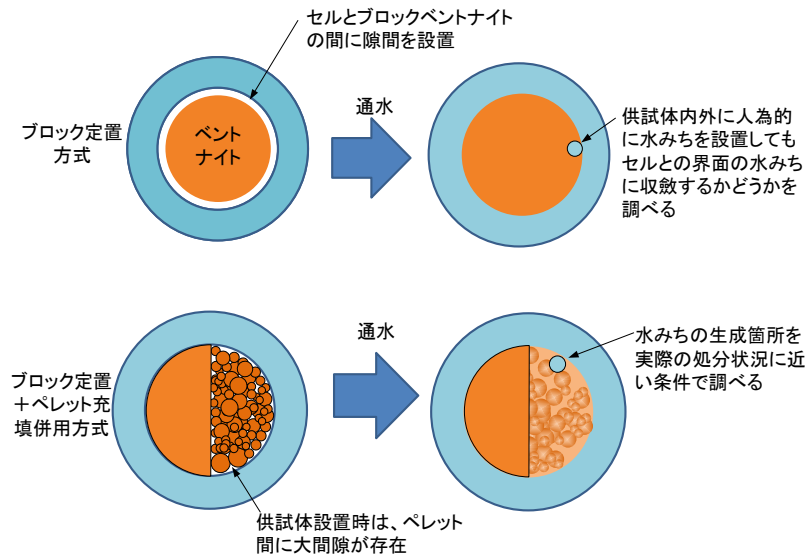


図 4.1-2 ブロック定置方式とブロック定置+ペレット充填併用方式の供試体イメージ

表 4.1-1 小規模パイピング・エロージョン試験ケース一覧

液種	流量 (mL/min)	通水 方向	緩衝材形状
MgCl ₂	1、 10、 100	下部から 上部	ブロック
			ブロック+ペレット
KCl			ブロック
ブロック+ペレット			
人工海水			ブロック
			ブロック+ペレット

これらの試験を実施することによって、既往の研究における（式 4-1）のようなベントナイト流出量 m_e (g) と送水量 M_w (L) の関係が得られる。

$$m_e = aM_w^b \quad \text{(式 4-1)}$$

4.2 試験結果

4.2.1 MgCl₂ 水溶液を通水した試験

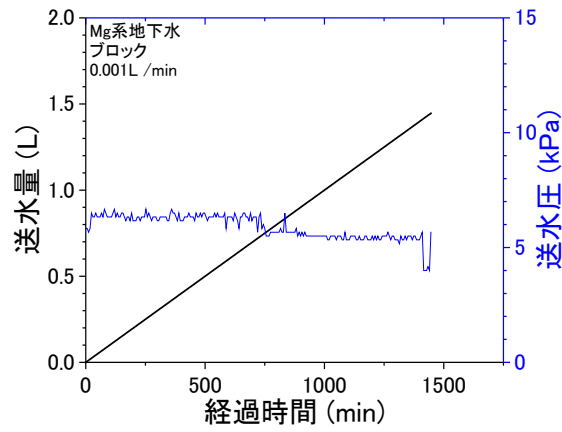
(1) ブロックを用いた通水試験

ブロックは含水比 23.5% で乾燥密度 1.60Mg/m³ で作製した。図 4.2-1 に送水圧と流量の関係を示す。図に示すように、通水開始から全般的に送水圧は低めで推移、あるいは上昇傾向を示したが、試験終了まで急激に変化することがなかった。

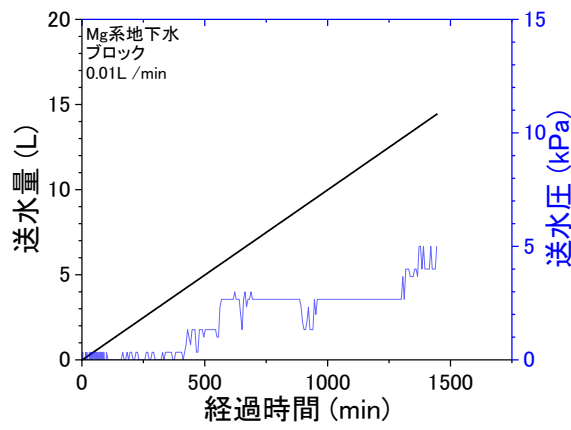
図 4.2-2、図 4.2-3、図 4.2-4 には、通水時の供試体の表面の状態を示す。写真から、どの通水量においても給水直後から供試体表面が、鱗状の薄片になり、時間経過に伴って薄片のまま供試体とセルの間の隙間に沈殿していく様子が分かる。給水開始から一日後でも、沈殿した薄片や供試体自体もほとんど膨潤しておらず、水みちがシールされるような状況は観察されなかった。

図 4.2-5、図 4.2-6、図 4.2-7 に供試体解体状況を示す。供試体の解体からも、供試体表面がほとんど膨潤していないことが分かった。しかし、供試体は水溶液が浸潤して沈殿することなく密実であった。

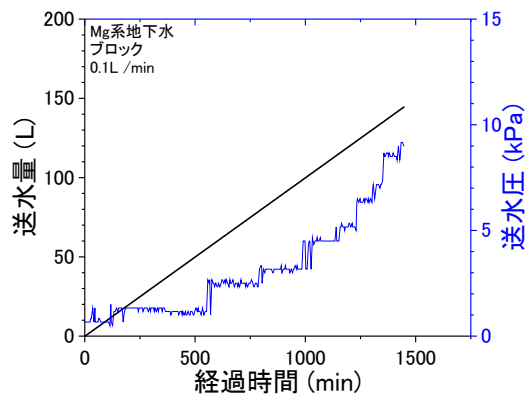
以上から、 MgCl_2 水溶液が供試体に作用した際に、供試体表面が陽イオン交換反応によって Mg 型化したために膨潤性能が低下して薄片上となり沈殿したものと考えられる。



(a) 1ml/min 通水ケース



(b) 10ml/min 通水ケース



(c) 100ml/min 通水ケース

図 4.2-1 送水圧と流量の関係 (MgCl₂ 水溶液 ブロック)

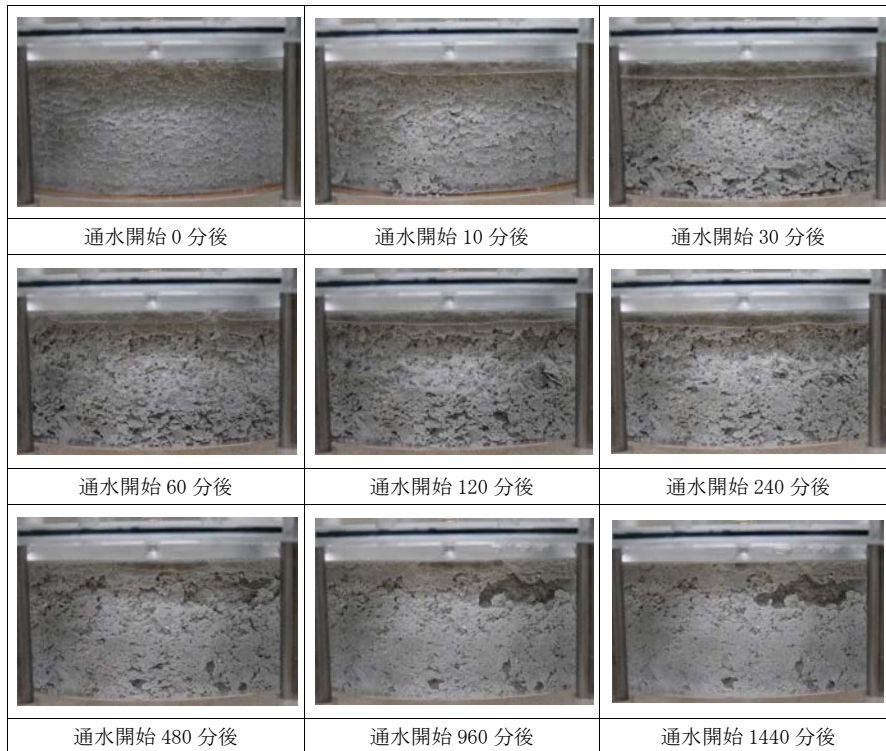


図 4.2-2 通水時の供試体表面の状況 (MgCl_2 水溶液 1ml/min 通水 ブロック)

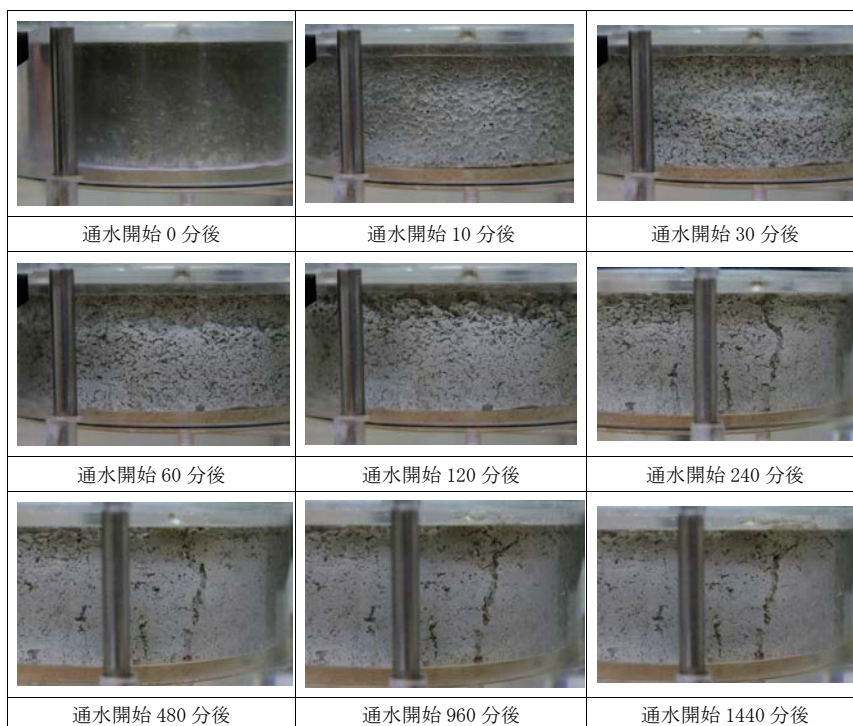


図 4.2-3 通水時の供試体表面の状況 (MgCl_2 水溶液 10ml/min 通水 ブロック)

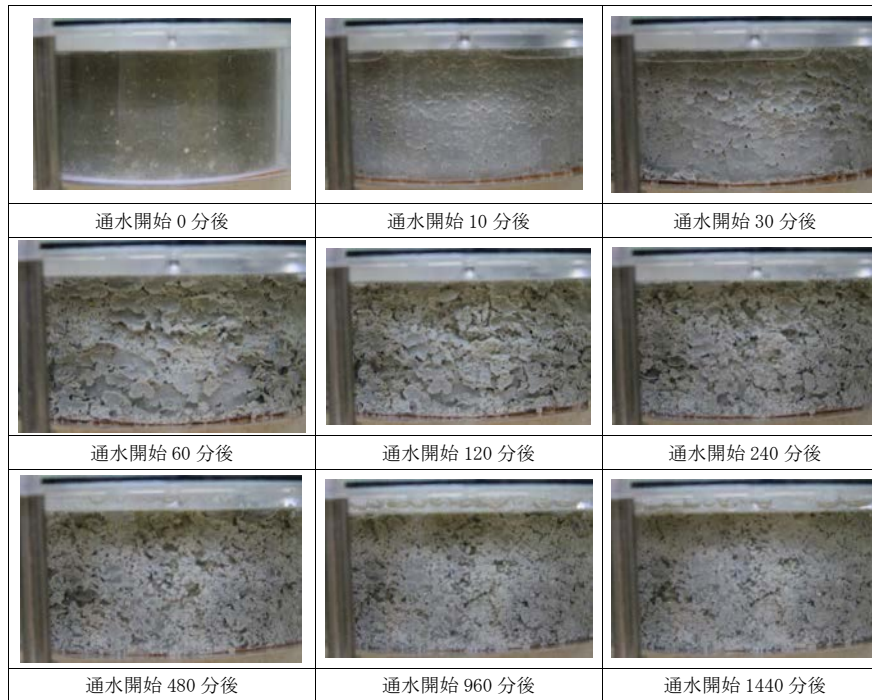


図 4.2-4 通水時の供試体表面の状況 (MgCl₂ 水溶液 100ml/min 通水 ブロック)



図 4.2-5 解体状況 (MgCl₂ 水溶液 1ml/min 通水 ブロック)

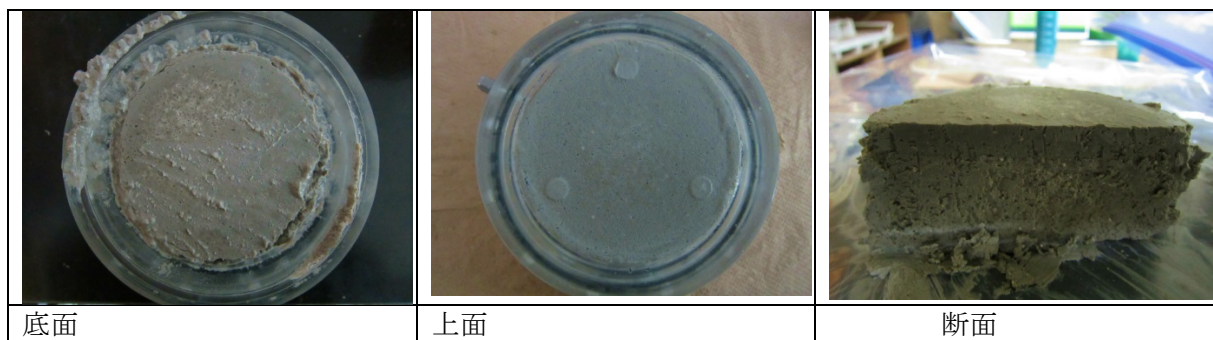


図 4.2-6 解体状況 (MgCl₂ 水溶液 10ml/min 通水 ブロック)

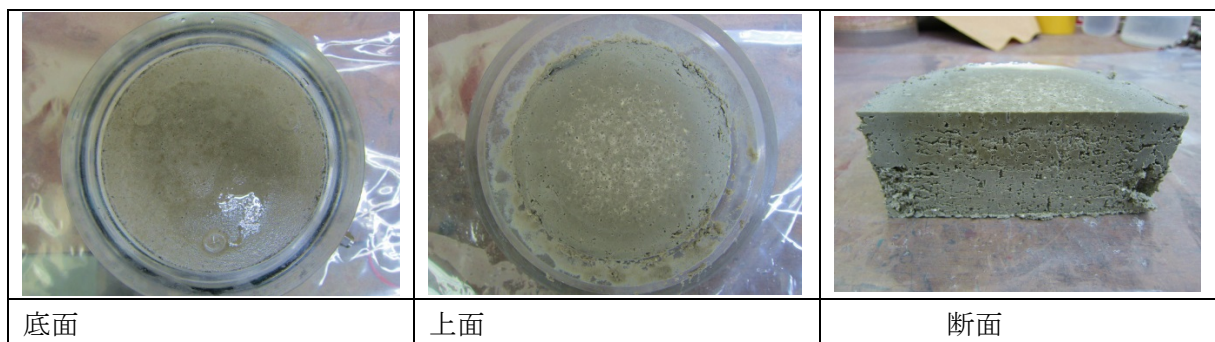


図 4.2-7 解体状況 (MgCl₂ 水溶液 100ml/min 通水 ブロック)

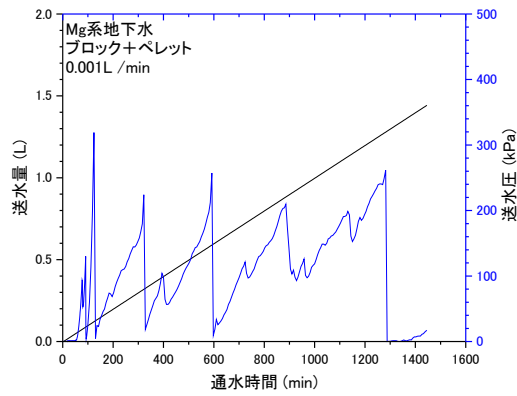
(2) ブロック+ペレットを用いた通水試験

表 4.2-1 に各試験のために作成した供試体諸元を示す。図 4.2-8 に送水圧と流量の関係を示す。(a)の 1ml/min では、通水開始から送水圧が乱高下しており、水みちのシールと破過が繰り返されている。(b)の 10ml/min は、通水開始から全般的に送水圧が高めで推移しており、1150 分程度経過した際には送水圧が急激に増加し、送水圧が 1MPa を超えた。試験機の設計上の耐圧上限値が 1MPa であったため、一旦試験を停止し、再度試験を続行した。その際に破過が発生し、送水圧は一気に低下した。(c)では、通水開始から全般的に送水圧が高めで推移していた。

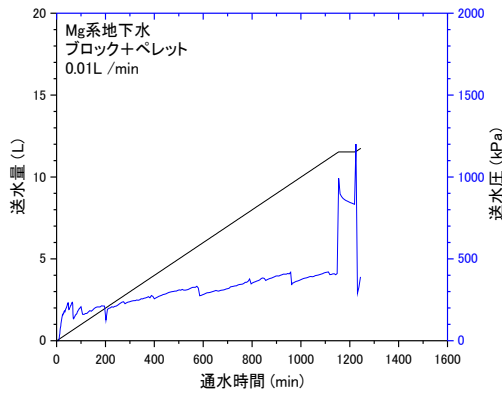
MgCl₂ 水溶液を用いた場合、ブロックのケースでは、試験中ずっと通水圧は小さいままであり、MgCl₂ 水溶液によって膨潤性能が低下することが予想されたが、ペレットとブロックを併用した場合、図に示すように通水圧が大きくなった。このことから、ペレットのように比表面積が大きく、水との接触面積が大きいペレットを埋戻し材として併用することによって、地下水浸潤初期にペレット部分がある程度膨潤して水みちが狭められる効果が得られることが考えられる。そのため、間隙水のイオン強度が多少大きくてもペレットの膨潤で水みちの形成を抑制する可能性がある。

表 4.2-1 ブロック+ペレットケースの供試体諸元

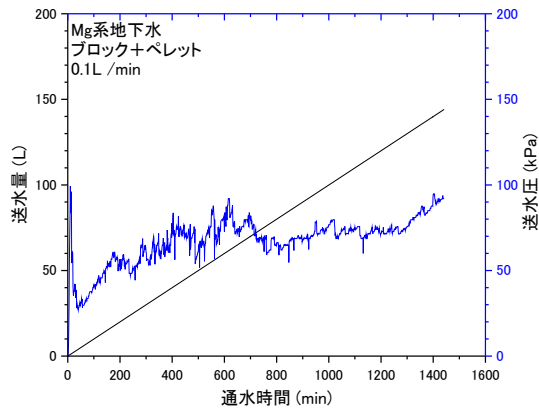
ケース		1ml/min	10ml/min	100ml/min
ブロック部				
含水比	(%)	22.9	23.3	23.5
乾燥密度	(Mg/m ³)	1.60	1.59	1.60
ペレット部				
大ペレット含水比	(%)	8.69	8.69	8.69
大ペレット乾燥質量	(g)	213.9	208.8	229.86
小ペレット含水比	(%)	9.13	9.13	9.13
小ペレット乾燥質量	(g)	96.27	98.31	97.05
混合ペレット乾燥質量	(g)	310.13	307.14	326.90
混合ペレット含水比	(%)	9.55	8.83	8.82
混合ペレット乾燥密度	(Mg/m ³)	1.47	1.48	1.46



(a) 1ml/min 通水ケース



(b) 10ml/min 通水ケース



(c) 100ml/min 通水ケース

図 4.2-8 送水圧と流量の関係 (MgCl₂ 水溶液 ブロック+ペレット)

図 4.2-9、には、通水時の表面の状況を示す。写真から、水みちがペレット部に生成されたのが分かる。図 4.2-3 には、MgCl₂ 水溶液を 10ml/mm 通水した場合の表面状況を示す。写真から、明確な水みちが生成されていないことがわかる。図 4.2-4 には、MgCl₂ 水溶液を 100ml/mm 通水した場合の表面状況を示す。写真から、ペレット部に水みちが生成されてい

るのが分かる。流量によって、水圧の変化や水みちの有無に違いがあった。ペレットを詰めたことにより、間隙が一応ではなく、膨潤も均一ではなかった可能性がある。

また、供試体ブロック部表面はほとんど膨潤していないが、ペレット部は試験開始から膨潤していた。前述のブロック単体のケースでは、ブロック表面に鱗状の薄片が発生したが、ペレットとブロックの併用ケースではそのような現象は観察されなかった。これは、ペレットとブロックの併用ケースでは、ブロックとセルの間に連続した隙間が存在しないため、Mgイオンによる陽イオン交換反応は発生しても鱗状の薄片が形成されないためであると考えられる。ペレット表面も鱗状になっているものと予想されるが、ペレットの表面に発生する薄片が小さいために目視では確認することができなかったことが推測される。

以上から、MgCl₂水溶液が供試体に作用した際に、供試体表面が陽イオン交換反応によってMg型化したために膨潤性能が低下して、水みちが形成される状況はブロック単体と同様であるが、ペレットを配置することにより、イオン強度を有する地下水の浸潤初期のエロージョンに対する抵抗性を向上する可能性があることが分かった。なお、この陽イオン交換反応に伴う変質については、化学分析を実施する必要がある。

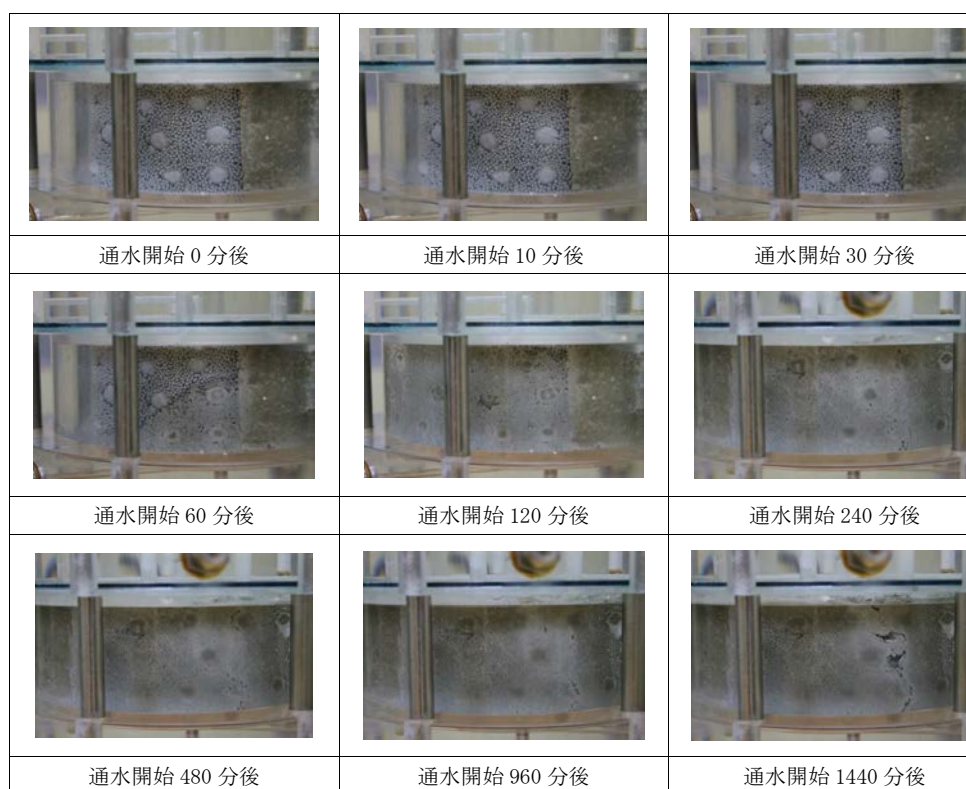


図 4.2-9 通水時の供試体表面の状況 (MgCl₂水溶液 1ml/min 通水 ブロック+ペレット)

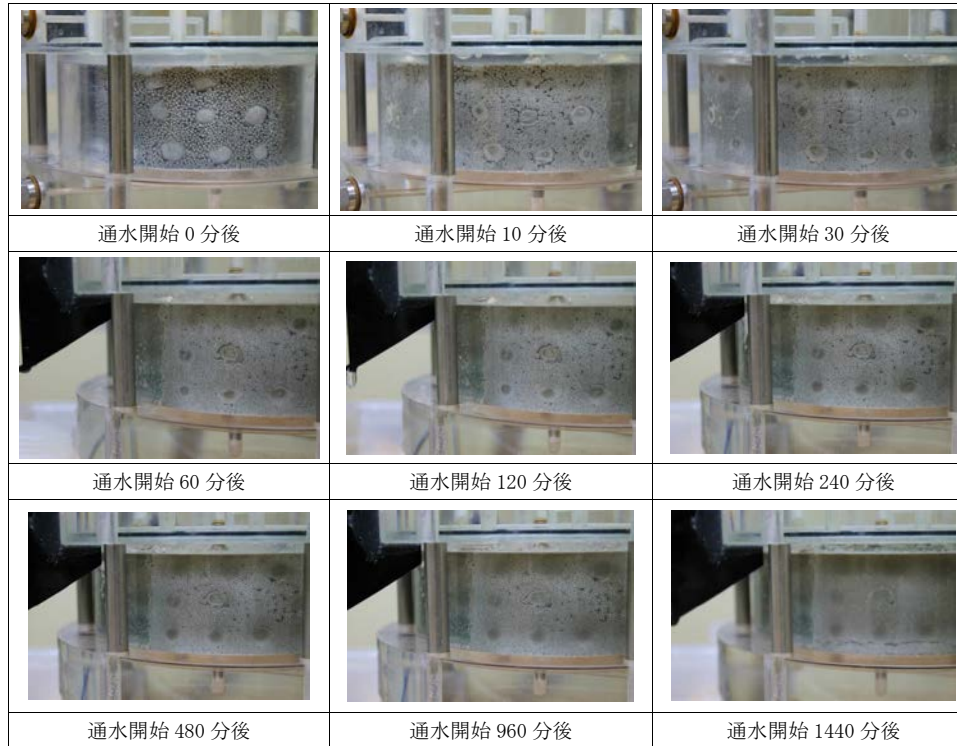


図 4.2-10 通水時の供試体表面の状況 (MgCl_2 水溶液 10ml/min 通水 ブロック+ペレット)

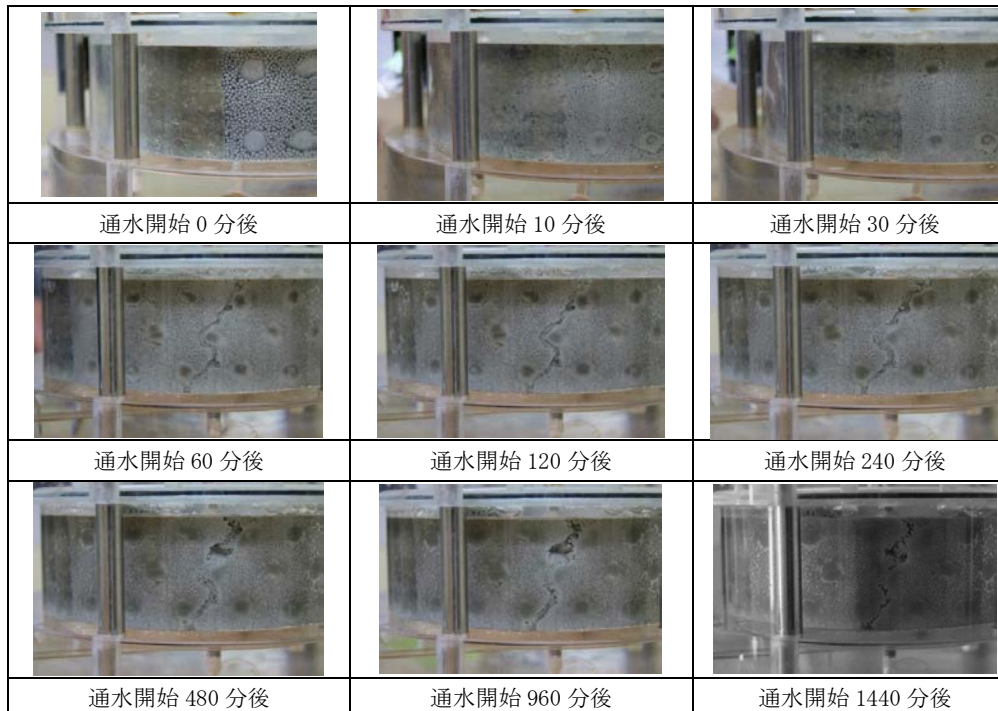


図 4.2-11 通水時の供試体表面の状況 (MgCl_2 水溶液 100ml/min 通水 ブロック+ペレット)

図 4.2-12 には、 MgCl_2 水溶液を 1ml/m で通水の場合の供試体の解体状況を示す。供試体の解体からも、供試体ブロック部では膨潤していないが、ペレット部とセルの界面からある深度まで

は浸潤に伴い膨潤していることが分かった。図 4.2-13 の、10ml/mm で通水した場合には、供試体上面に薄片上の流出物が観察された。これは、給水に伴って発生した鱗状の薄片が流出したものと考えられる。このような薄片が排水孔を閉塞し、水みちがシールされた可能性も考えられる。供試体の解体からは、供試体がある深度まで、浸潤に伴って密実に膨潤していることが分かった。図 4.2-14 には、MgCl₂ 水溶液を 1ml/m で通水の場合の供試体の解体状況を示す。供試体下面には、ポーラスメタルの腐食物が付着しているのが観察された。供試体の解体からは、供試体がある深度まで、浸潤に伴って密実に膨潤していることが分かった。

以上のような結果から、MgCl₂ 水溶液が供試体に作用した際に、供試体表面が陽イオン交換反応によって Mg 型化したために膨潤性能が低下して、水みちが形成される状況はブロック単体と同様であるが、ペレットを配置することにより、イオン強度を有する地下水の浸潤初期のエロージョンに対する抵抗性を向上する可能性があることが分かった。

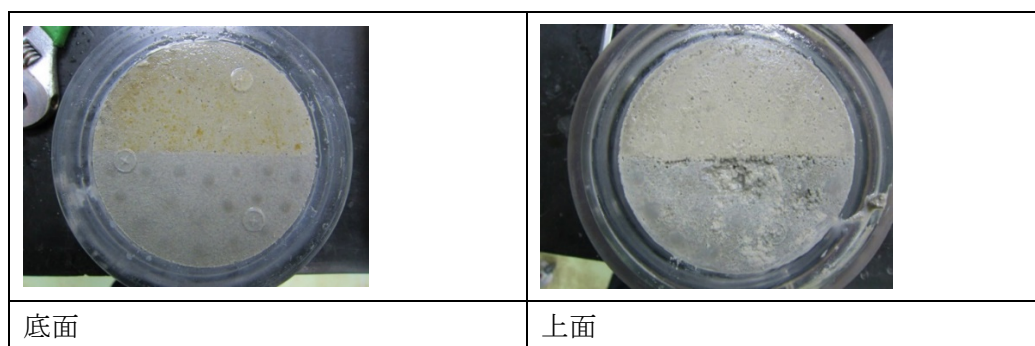


図 4.2-12 解体状況 (MgCl₂ 水溶液 1ml/min 通水 ブロック+ペレット)

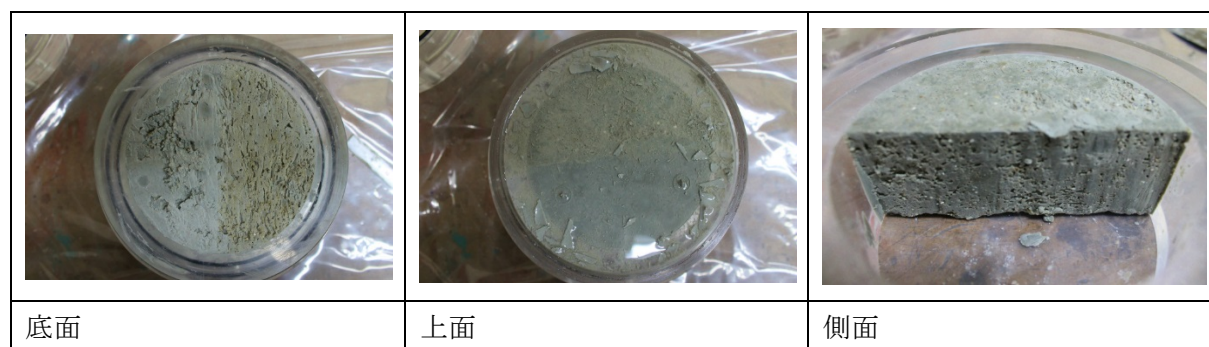


図 4.2-13 解体状況 (MgCl₂ 水溶液 10ml/min 通水 ブロック+ペレット)

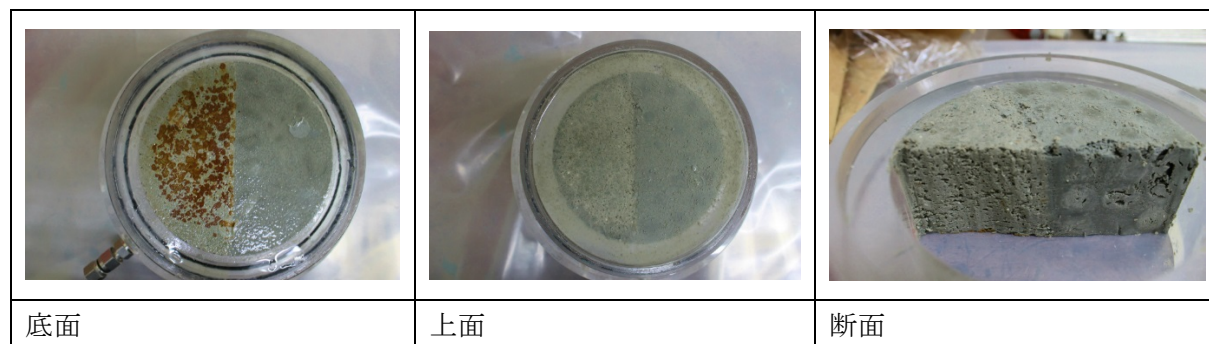
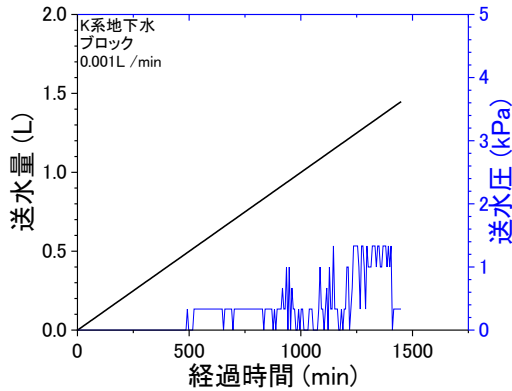


図 4.2-14 解体状況 (MgCl₂ 水溶液 100ml/min 通水 ブロック+ペレット)

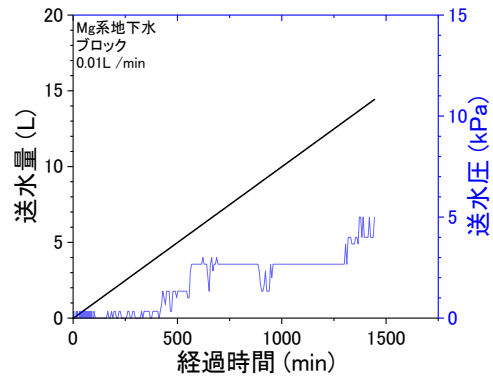
4.2.2 KCl 水溶液を通水した試験（ブロック）

(1) ブロックを用いた通水試験

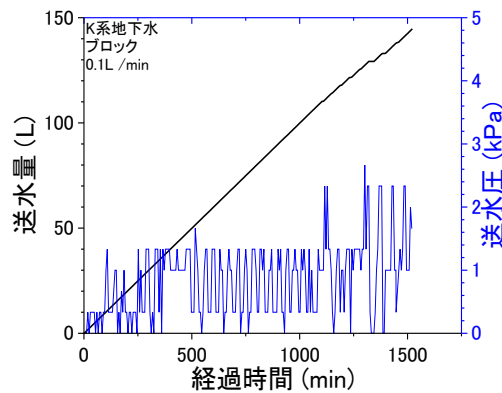
ブロックは含水比 23.5～23.6%で乾燥密度 1.60Mg/m³で作製した。図 4.2-15 に送水圧と流量の関係を示す。図に示すように、通水開始から全般的に送水圧は低い値で推移しており、その値は供試体の給水口と排水口の水位差程度であった。そのため、KCl 水溶液が膨潤性能の低下に及ぼす影響は、他の陽イオンなどよりも大きい可能性がある。



(a) 1ml/min 通水ケース



(b) 10ml/min 通水ケース



(c) 100ml/min 通水ケース

図 4.2-15 送水圧と流量の関係（KCl 水溶液 ブロック）

図 4.2-16 には、KCl 水溶液を 1ml/min 通水した場合の供試体表面の状況を示す。写真から、供試体表面はほとんど膨潤しておらず、供試体とセルとの間の隙間はほとんどシールされなかった。また、供試体は、試験開始後 480 分経過時に大きな塊状にひび割れた。これは、図 4.2-17 に示す 10ml/mm の通水時でもほとんど同じ挙動であった。供試体表面付近が供給水中の K イオンによる陽イオン交換反応によって K 型化し膨潤性能が低下した状態で、K イオンとの陽イオン交換反応によって隙間に放出された Na イオンを含む水溶液が供試体内部に浸潤したため、供試体内部が膨潤した結果、膨潤変形に K 型化した供試体表面が追従できずにひび割れたことが推測される。図 4.2-11 は 100ml/min の通水ケースであるが、このケ

ースではひび割れは観察されなかった。これは、流速が速いことが浸潤状態に影響していると考えられる。

図 4.2-19、図 4.2-20、図 4.2-21 には、通水試験後の解体状況を示す。どの供試体の解体でも、供試体表面がほとんど膨潤していないことが分かった。そのため、KCl 水溶液が膨潤性能の低下に及ぼす影響は、Ca イオンなどよりも大きい可能性がある。

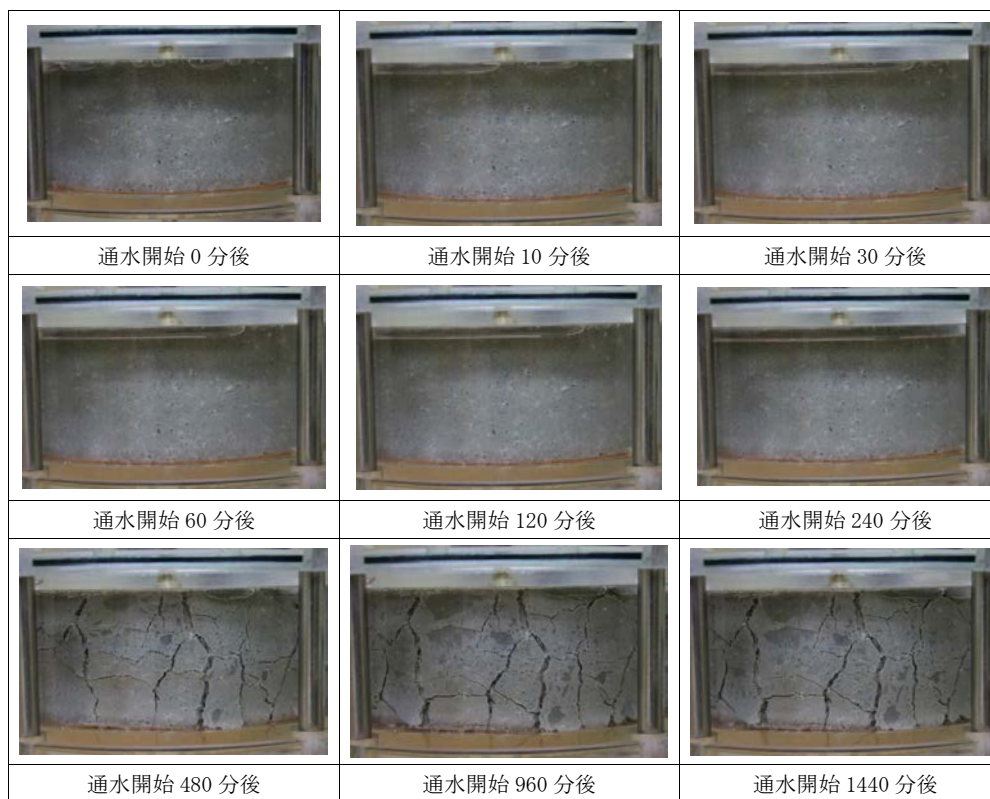


図 4.2-16 通水時の供試体表面の状況 (KCl 水溶液 1ml/min 通水 ブロック)

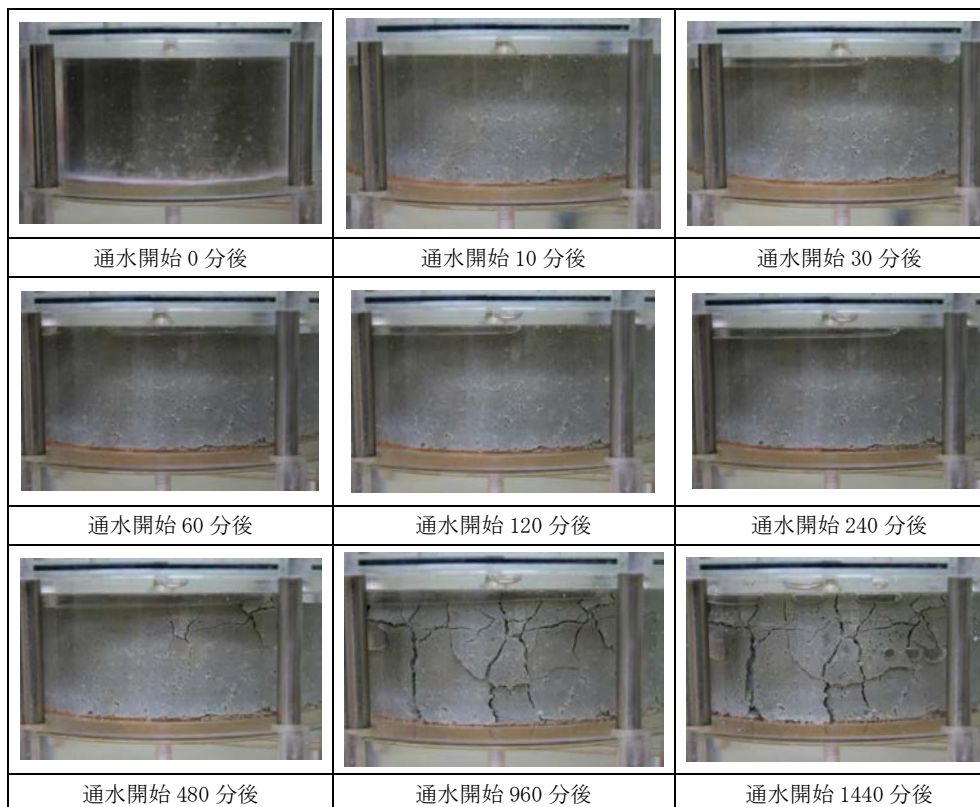


図 4.2-17 通水時の供試体表面の状況 (KCl 水溶液 10ml/min 通水 ブロック)

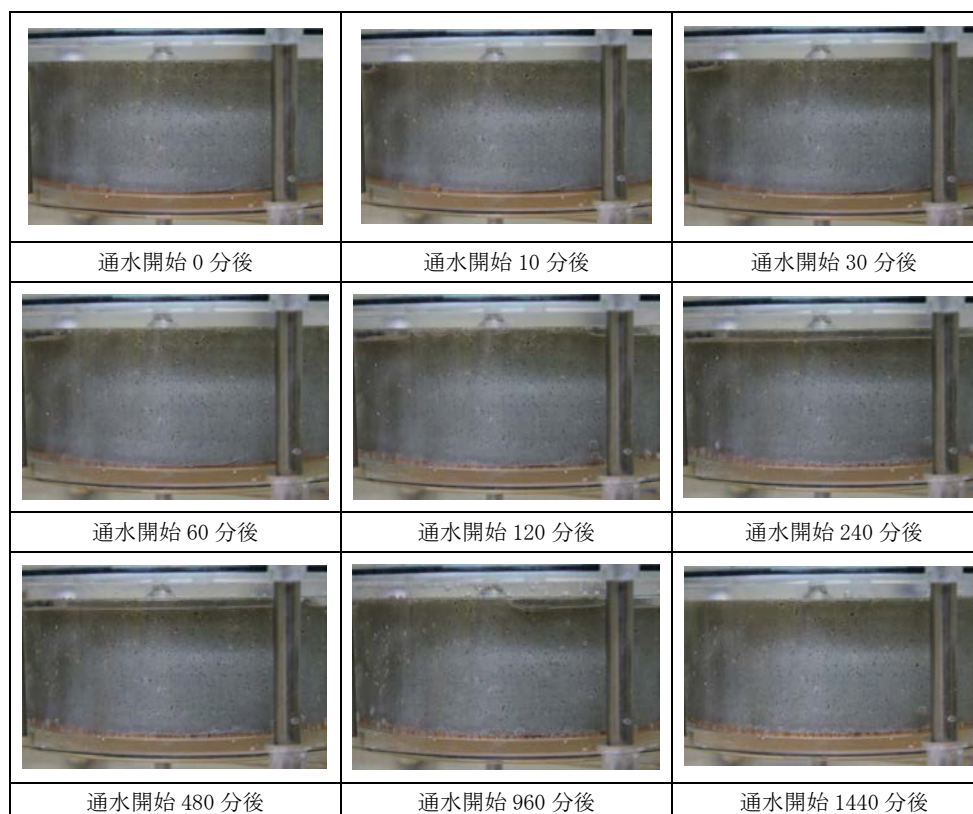


図 4.2-18 通水時の供試体表面の状況 (KCl 水溶液 100ml/min 通水 ブロック)

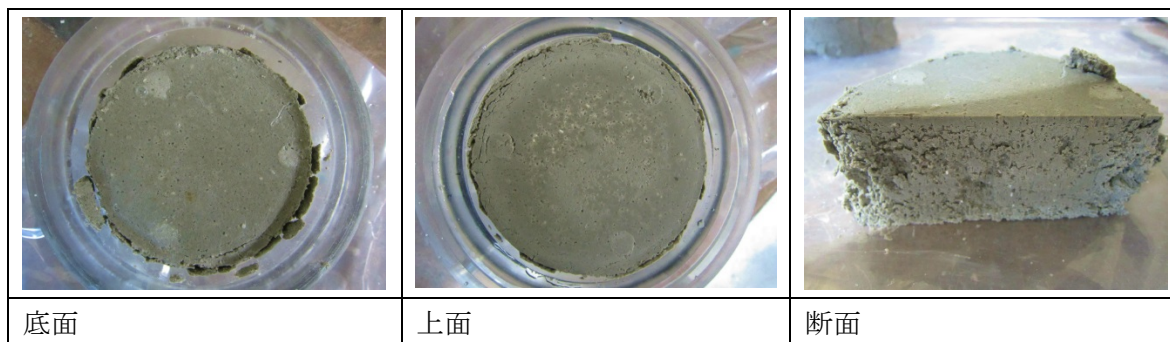


図 4.2-19 解体状況 (KCl 水溶液 1ml/min 通水 ブロック)

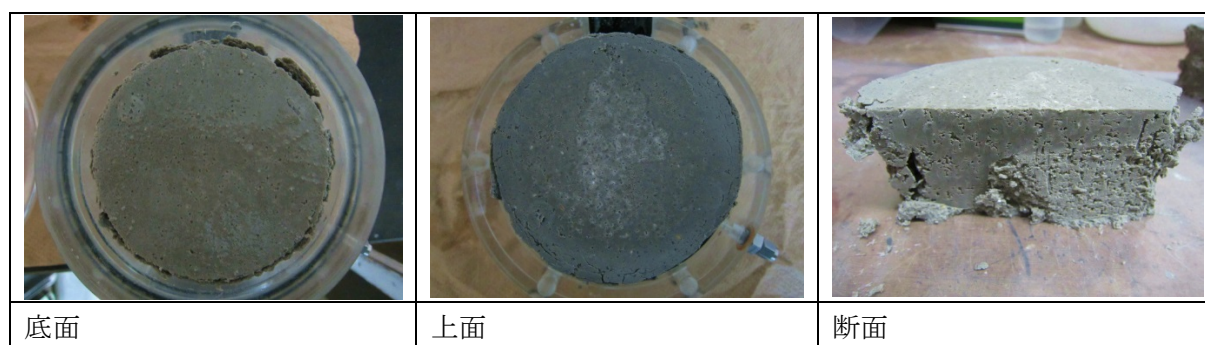


図 4.2-20 解体状況 (KCl 水溶液 10ml/min 通水 ブロック)

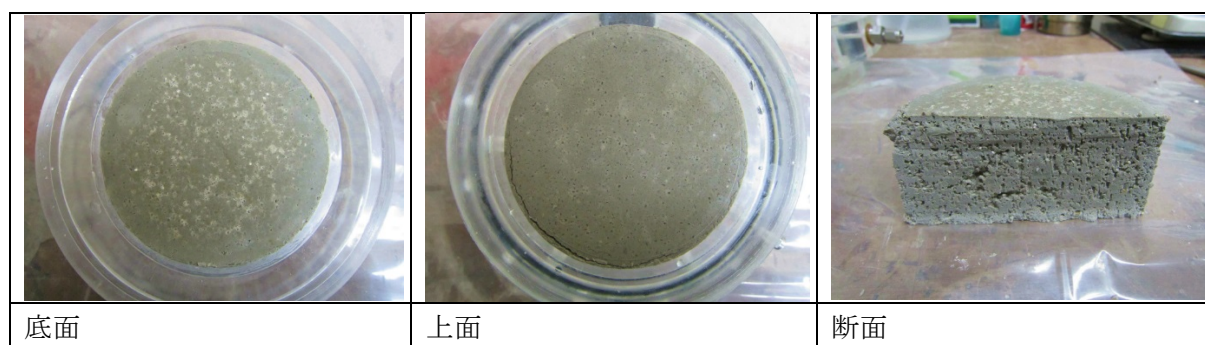


図 4.2-21 解体状況 (KCl 水溶液 100ml/min 通水 ブロック)

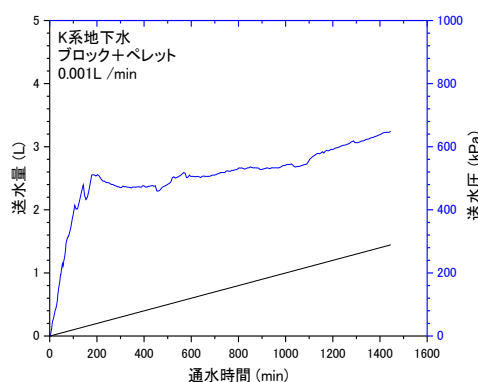
(2) ブロック+ペレットを用いた通水試験

図 4.2-22 に送水圧と流量の関係を示す。(a)の 1ml/min の通水ケースと(b)の 10ml/mm のケースでは、通水開始から全般的に送水圧が高めで推移しており、通水開始から 1 時間程度経過した際には送水圧が急激に増加し、送水圧が 1MPa を超え、破過とシールを繰り返した。KCl 水溶液を用いた場合、ブロックのケースでは、試験中に通水圧は非常に小さいままであり、KCl 水溶液が膨潤性能の低下に及ぼす影響は Ca イオンなどに比べて大きいと考えられたが、ペレットとブロックを併用した場合、図に示すように通水圧が大きくなった。(c)の 100mlm/in の通水ケースでは、送水圧が低い状態で推移した。ただし、ブロック単体での 100ml/min の通水ケースと比べると、本ケースの方が通水圧が大きくなった。このことから、

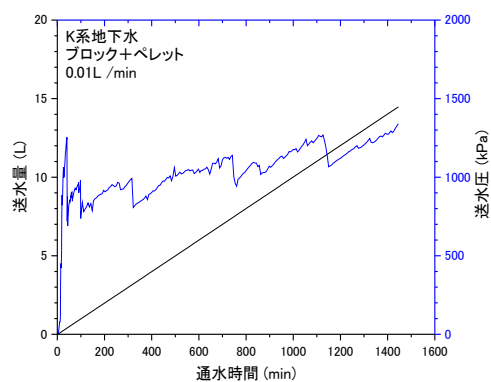
ペレットのように比表面積が大きく、水との接触面積が大きいペレットを埋戻し材として併用することによって、地下水浸潤初期にペレット部分がある程度膨潤して水みちが狭められる効果が得られることが考えられるそのため、間隙水のイオン強度が多少大きくてもペレットの膨潤で水みちの形成を抑制する可能性がある。

表 4.2-2 ブロック+ペレットケースの供試体諸元

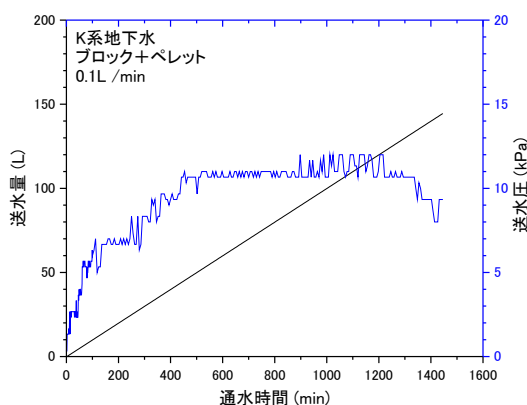
ケース		1ml/min	10ml/min	100ml/min
ブロック部				
含水比	(%)	23.0	23.7	23.7
乾燥密度	(Mg/m ³)	1.60	1.60	1.60
ペレット部				
大ペレット含水比	(%)	8.69	8.69	8.69
大ペレット乾燥質量	(g)	229.4	232.06	234.76
小ペレット含水比	(%)	9.13	9.13	9.13
小ペレット乾燥質量	(g)	99.18	96.80	93.77
混合ペレット乾燥質量	(g)	328.58	328.87	328.53
混合ペレット含水比	(%)	8.82	8.82	8.82
混合ペレット乾燥密度	(Mg/m ³)	1.47	1.47	1.48



(a) 1ml/min 通水ケース



(b) 10ml/min 通水ケース



(c) 100ml/min 通水ケース

図 4.2-22 送水圧と流量の関係 (KCl 水溶液 ブロック+ペレット)

図 4.2-23 には、KCl 水溶液を 1ml/min の流量で通水した時の供試体表面の状況を示す。写真から、供試体ブロック部表面はほとんど膨潤していないが、ペレット部は試験開始直後から膨潤している状況が分かる。水みちはペレット部に生成されたものと推察されたが、その経路は明確ではない。図 4.2-24 では、水みちはペレット部に生成されているのが分かる。図 4.2-25 には、100ml/min で通水した場合の表面状況を示す。写真から、このケースにおいては、供試体ブロック部表面だけでなく、小ペレットもほとんど膨潤していないことがわかる。試験後でも小ペレットの粒界が目視観察できた。

図 4.2-26 には、KCl 水溶液を 1ml/min 通水した試験後の解体状況を示す。供試体の解体からも、供試体ブロック部はほとんど膨潤していないが、ペレット部は浸潤に伴い膨潤して一体化していることが分かった。図 4.2-27 の 10ml/min の場合も同様であった。図 4.2-28 の 100ml/min の通水試験後の供試体では、供試体ブロック部とペレット部、共に膨潤していなかった。本ケースのみ、他のケースと傾向が異なるため、再現性を確認するなど、追加の検討が必要である。

以上のことから、KCl 水溶液が膨潤性能の低下に及ぼす影響は、Ca イオンなどよりも大きいと考えられるが、ペレットを配置することにより、イオン強度を有する地下水の浸潤初期のエロージョンに対する抵抗性を向上する可能性があることが分かった。

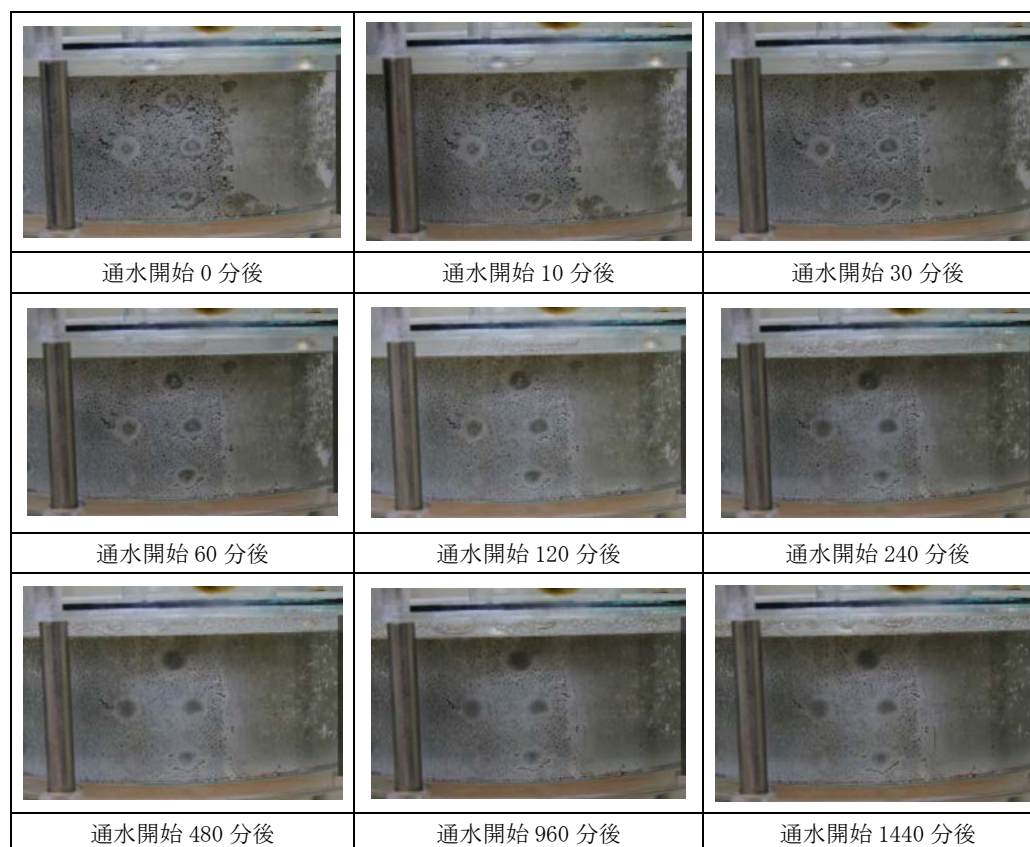


図 4.2-23 通水時の供試体表面の状況 (KCl 水溶液 1ml/min 通水 ブロック+ペレット)

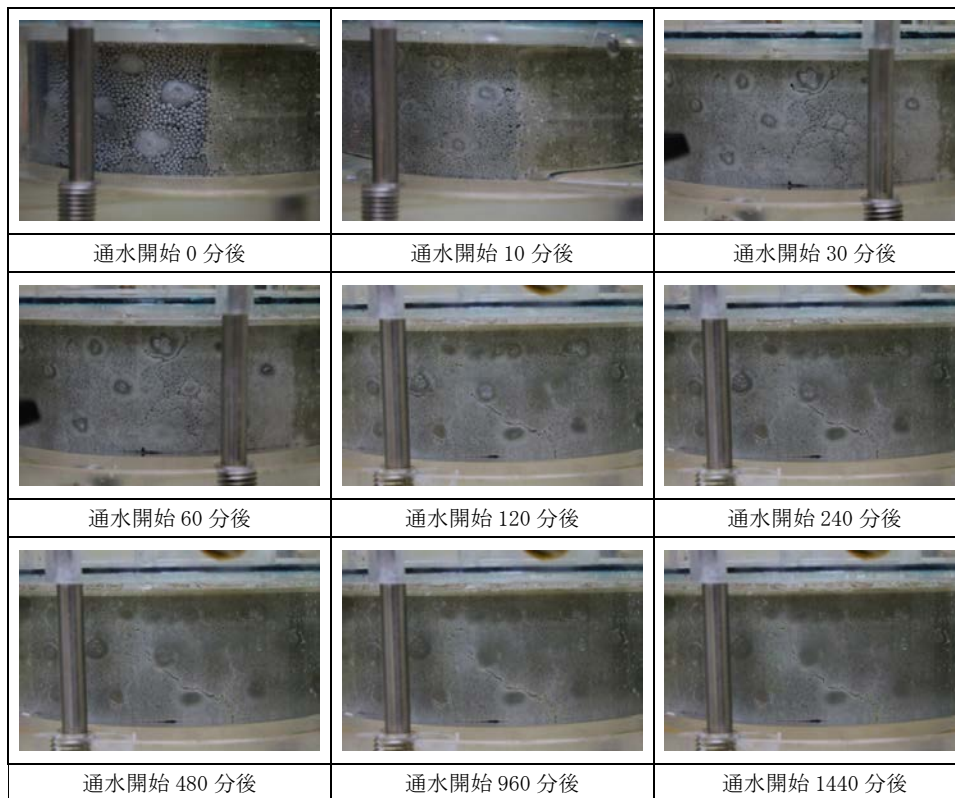


図 4.2-24 通水時の供試体表面の状況 (KCl 水溶液 10ml/min 通水 ブロック+ペレット)

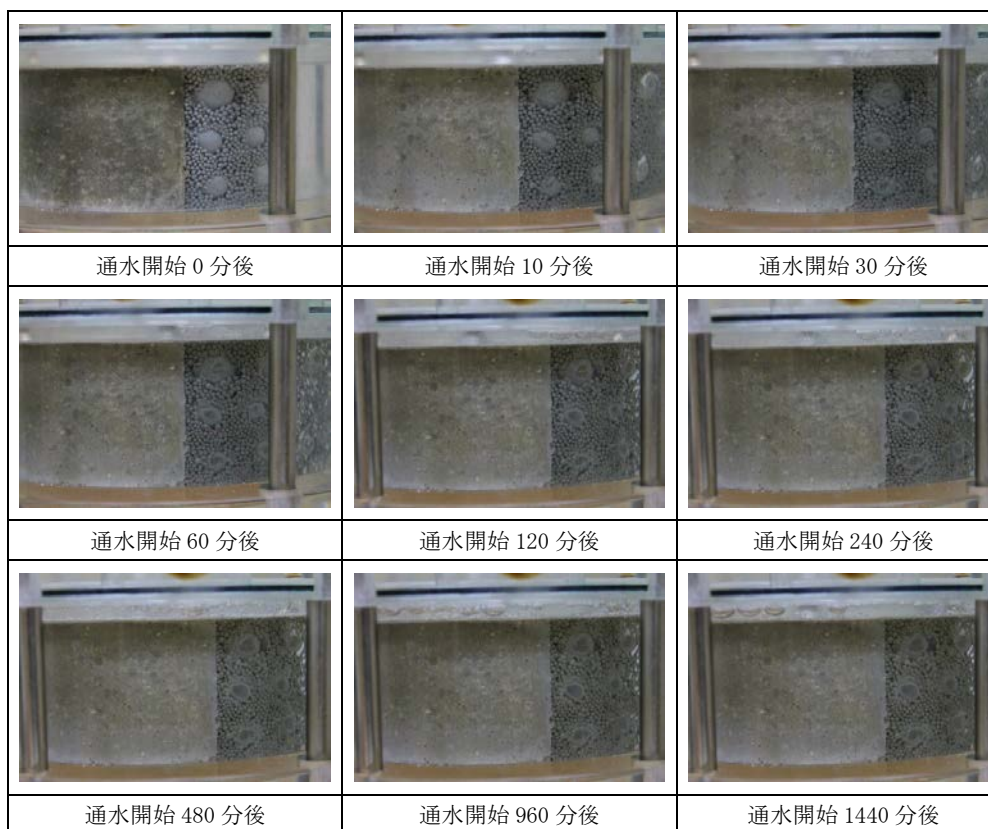


図 4.2-25 通水時の供試体表面の状況 (KCl 水溶液 100ml/min 通水 ブロック+ペレット)

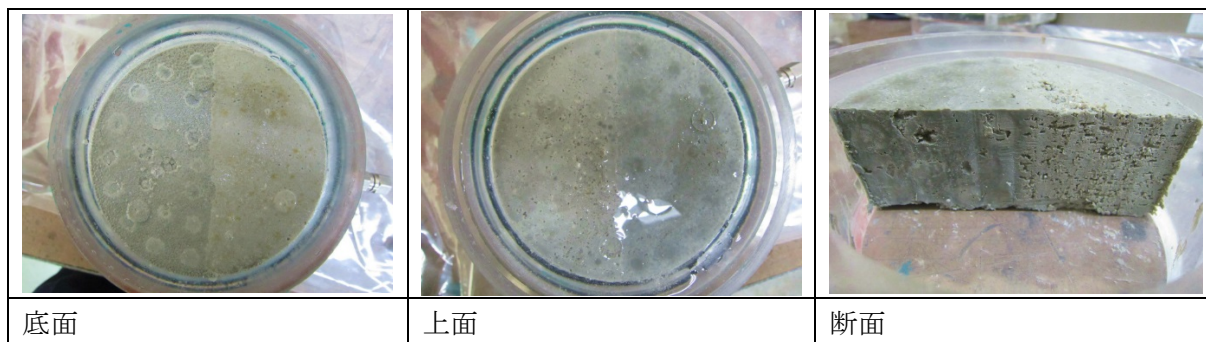


図 4.2-26 解体状況 (KCl 水溶液 1ml/min 通水 ブロック+ペレット)

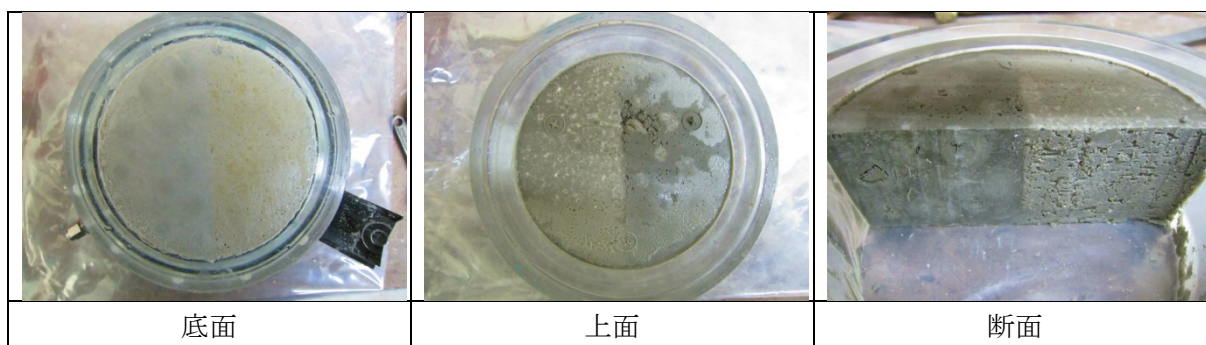


図 4.2-27 K系地下水 0.01L/min の解体状況 (ブロック+ペレット)

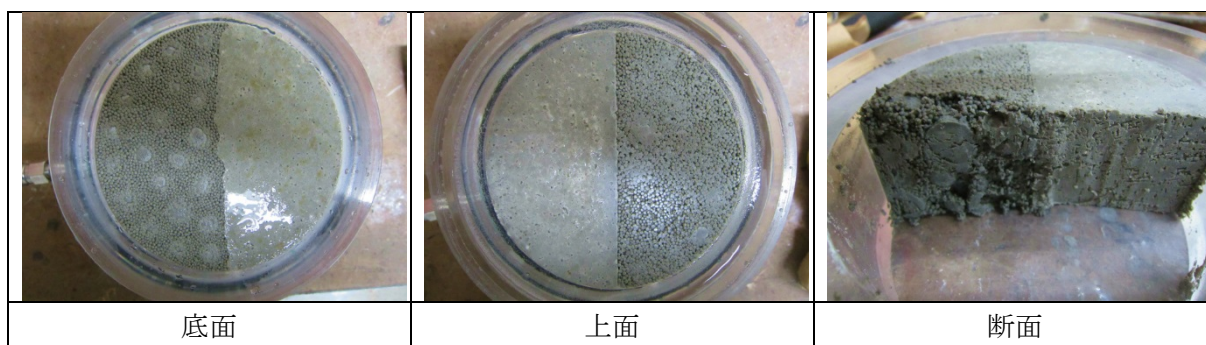


図 4.2-28 K系地下水 0.1L/min の解体状況 (ブロック+ペレット)

4.2.3 人工海水を通水した試験

(1) ブロックを用いた通水試験

ブロックは含水比 21.3~23.6%で乾燥密度 1.60Mg/m^3 で作製した。図 4.2-29 に 1ml/min で通水した時の送水圧と流量の関係を示す。図に示すように、通水開始してすぐに送水圧が急増し、400kPa 程度まで達したが、破過して急激に通水圧が低下し、その後、通水開始から 13 時間後にも小規模な破過挙動を呈した。全般的には、破過を繰り返しつつも送水圧は 100kPa 以下であった。図 4.2-30 には 10ml/min で通水した場合の送水圧と流量を示す。通水開始してすぐに送水圧が急増し、250kPa 程度まで達したが、破過して急激に通水圧が低下し、その後、6 時間おきに送水圧が 170kPa 程度で小規模な破過挙動を繰り返した。全般的

には、破過を繰り返しつつも送水圧は 170kPa 以下であった。図 4.2-31 に示す 100ml/min の通水ケースでは、通水を開始してすぐに送水圧が急増し、250kPa 程度まで達したが、破過して急激に通水圧が低下し、その後、送水圧が 125kPa 程度で小規模な破過挙動を繰り返した。全般的には、破過を繰り返しつつも送水圧は 100kPa 以下であった。

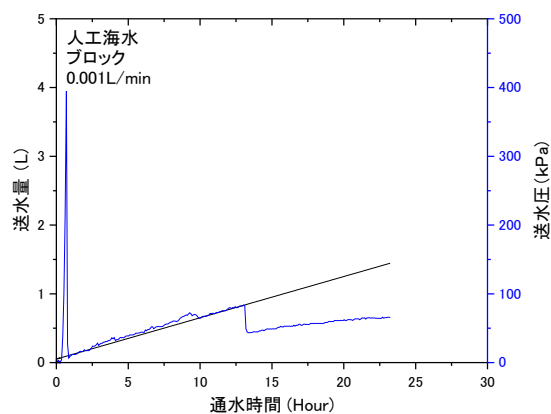


図 4.2-29 人工海水 1ml/min の送水圧と流量の関係 (ブロック)

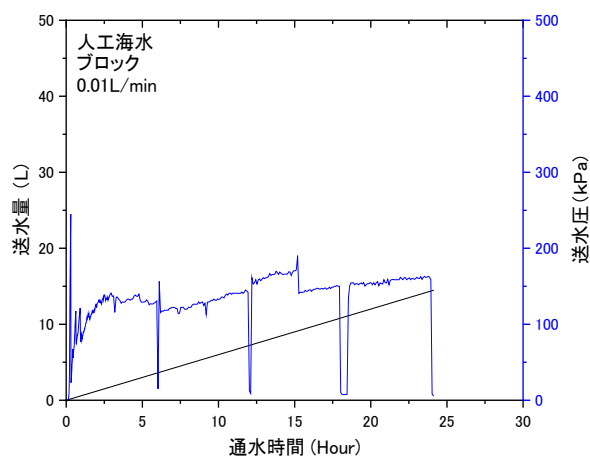


図 4.2-30 人工海水 10ml/min の送水圧と流量の関係 (ブロック)

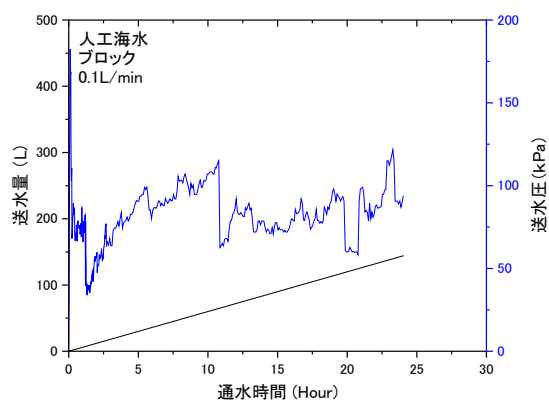


図 4.2-31 人工海水 100ml/min の送水圧と流量の関係 (ブロック)

図 4.2-32 には、人工海水 1ml/min の場合の供試体表面の状況を示す。写真から、給水開始から 30 分後には供試体表面に小さな水みちが形成され、最後まで水みちが残った。破過現象が発生したのはこの小さな水みちが一時的に閉塞したためだと考えられる。図 4.2-34 の 100ml/min 通水の場合には、送水開始から 10 分後には供試体表面に比較的大きな水みちが形成され、最後までその水みちが残った。水みちの大きさが前述の 1ml/min、10ml/min のケースよりも大きいことが分かる。試験時間が 240 分以上経過した時点でケイ砂が水みちを閉塞するように沈殿し始め、そのケイ砂の塊よりも上側の水みちが細くなっていることが分かる。このケイ砂の沈殿による影響で、破過現象が発生したのもと考えられる。MgCl₂ 水溶液を通水した時のように表面が鱗状の薄片になったり、KCl 水溶液を通水した時のような供試体がひび割れたりするような現象は観察されなかった。給水開始から一日後でも、水みちがシールされるような状況は観察されなかった。

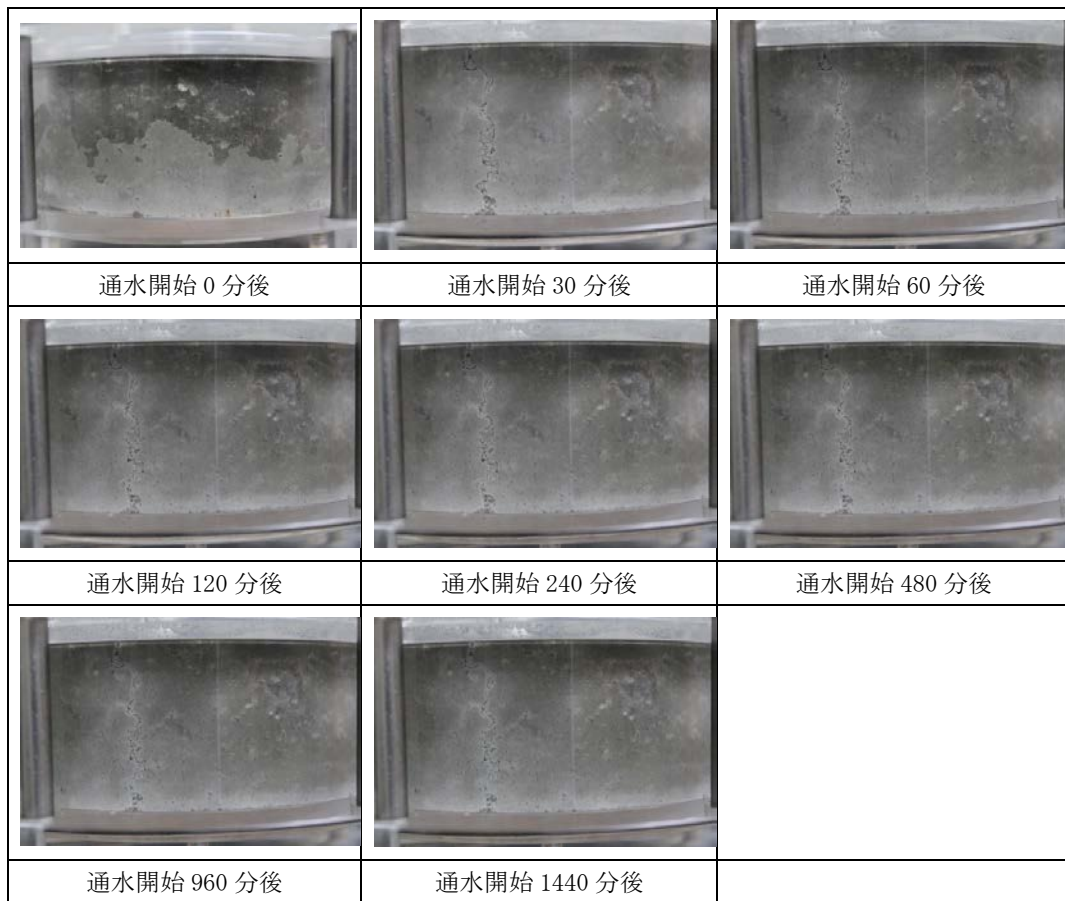


図 4.2-32 通水時の供試体表面の状況 (人工海水 1ml/min 通水 ブロック)

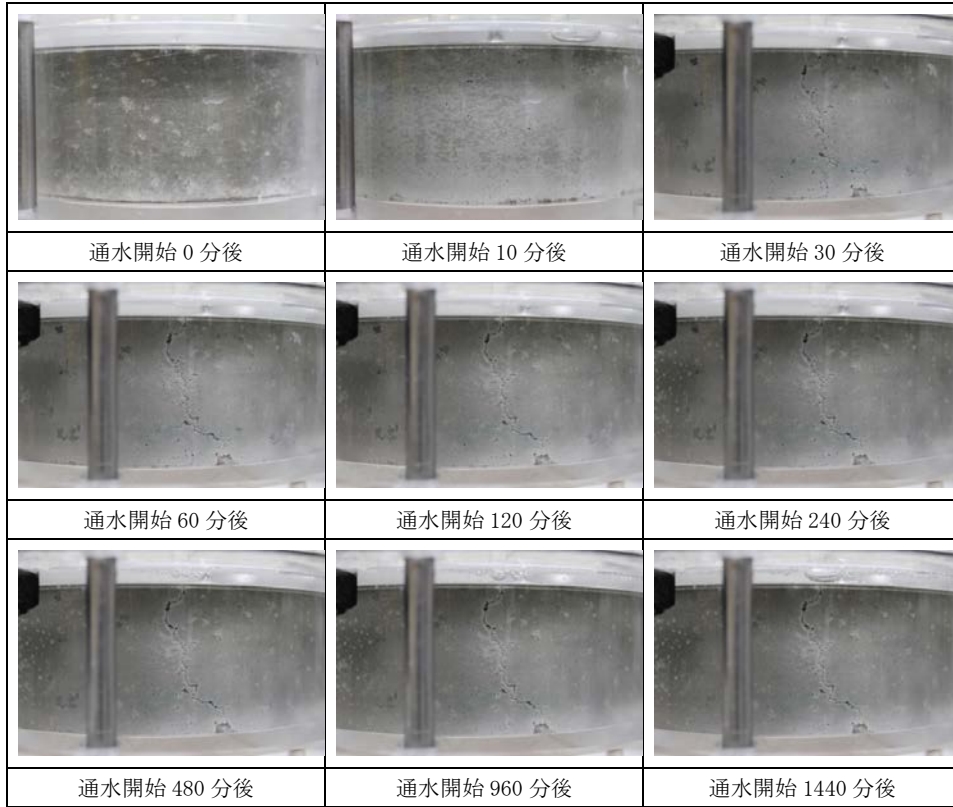


図 4.2-33 通水時の供試体表面の状況（人工海水 10ml/min 通水 ブロック）

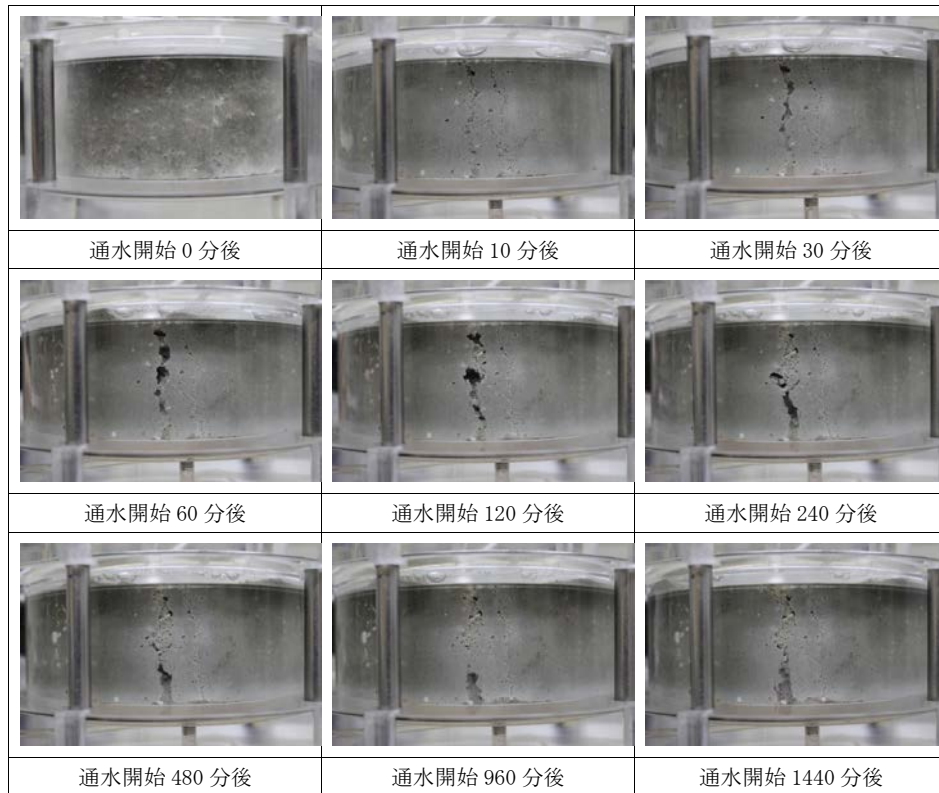


図 4.2-34 通水時の供試体表面の状況（人工海水 100ml/min 通水 ブロック）

図 4.2-35 には、供試体解体状況を示す。供試体の解体時の観察から、供試体表面は、前述の KCl や $MgCl_2$ 水溶液に比べて相対的に膨潤していた。断面も供試体内部にまで水溶液が浸潤して密実であった。

以上から、人工海水が供試体に作用した際に、供試体表面が陽イオン交換反応によって変質するが、人工海水に含まれる主要な陽イオンがナトリウムイオンであるため、その膨潤性能に及ぼす影響は K 系地下水や $MgCl_2$ 水溶液に比べれば限定的であると考えられる。

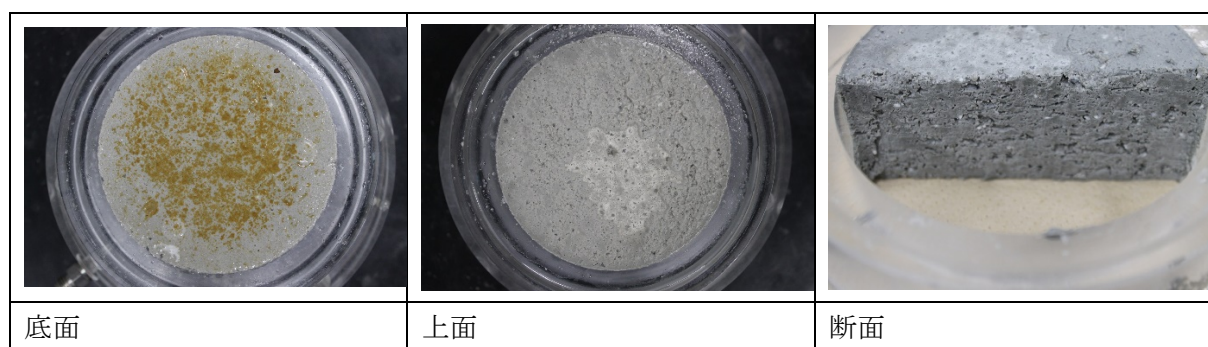


図 4.2-35 解体状況（人工海水 1ml/min 通水 ブロック）



図 4.2-36 解体状況（人工海水 10ml/min 通水 ブロック）

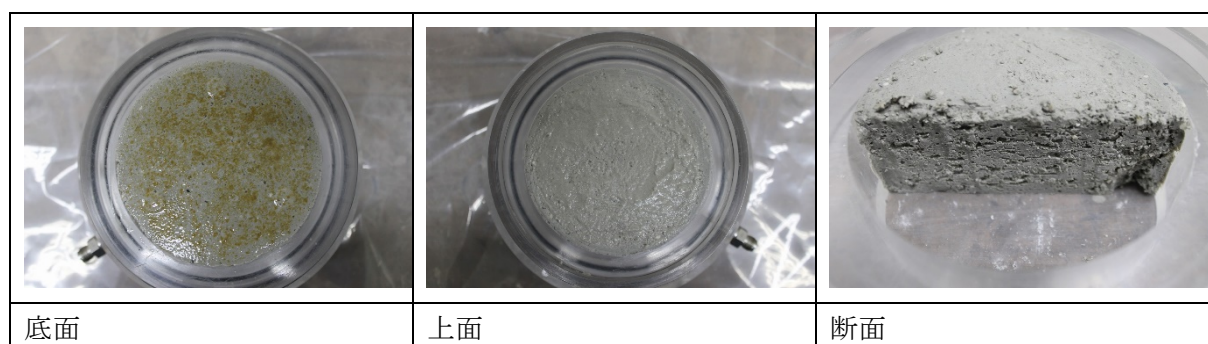


図 4.2-37 解体状況（人工海水 100ml/min 通水 ブロック）

(2) ブロック+ペレットを用いた通水試験

表 4.2-3 に供試体諸元を示す。図 4.2-38 に 1ml/min で通水した時の送水圧と流量の関係を示す。図に示すように、通水開始してすぐに送水圧が急増し、400kPa 程度まで達したが、破過して急激に通水圧が低下した。この傾向は、前述の 1mL/min のブロックケースと概ね一致している。ただし、ブロックケースは破過を繰り返したが、本ケースは破過後は送水圧は 30kPa 以下を推移した。図 4.2-39 に送水圧と流量の関係を示す。図に示すように、通水開始して破過を繰り返しながら通水圧が増加し、最終的には 200kPa 弱で推移した。図 4.2-40 の 100ml/min の通水ケースでは、通水開始してから細かな破過を繰り返しながら通水圧が増加し、最後まで全体的には増加傾向であり、送水圧も 150kPa 弱に達した。

表 4.2-3 ブロック+ペレットケースの供試体諸元

ケース		1ml/min	10ml/min	100ml/min
ブロック部				
含水比	(%)	21.87	21.84	21.84
乾燥密度	(Mg/m ³)	1.61	1.60	1.60
ペレット部				
混合ペレット含水比	(%)	8.81	8.79	8.79
混合ペレット乾燥密度	(g)	1.49	1.51	1.49
全体				
含水比	(%)	15.62	15.39	15.60
乾燥密度	(Mg/m ³)	1.56	1.55	1.55

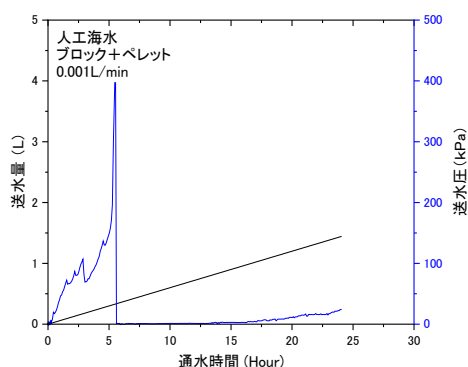


図 4.2-38 人工海水 1ml/min の送水圧と流量の関係 (ブロック+ペレット)

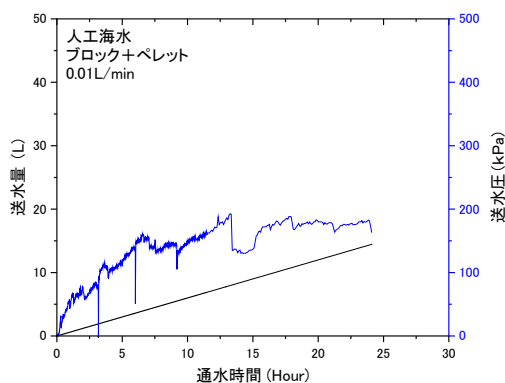


図 4.2-39 人工海水 10ml/min の送水圧と流量の関係 (ブロック+ペレット)

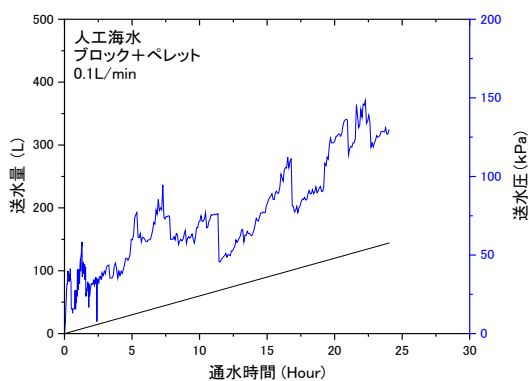


図 4.2-40 人工海水 100ml/min の送水圧と流量の関係 (ブロック+ペレット)

図 4.2-41 には、人工海水 1ml/min で通水した場合の供試体表面の状況を示す。写真から、給水直後からしばらくの間、水みちの形成は見られなかったが、給水開始から 8 時間後にペレット部に比較的大きめの水みちが形成された。この水みち形成に時間がかかったのは、給水量が小さいことに加え、ペレット部の吸水量が大きいことが理由と考えられる。8 時間でペレット部が概ね飽和し、流速の増加に伴い水みちが形成されたものと考えられる。図 4.2-42 の 10ml/min の通水時には、給水直後から 30 分程度までは水みちの形成は見られなかったが、給水開始から 1 時間後にペレット部とブロック部の界面に水みちが形成された。この水みち形成が人工海水 1ml/min のケースよりも時間が早かったのは、通水量が 10 倍であることでペレット部の飽和が早まったためだと考えられる。図 4.2-42 の 100ml/min の通水ケースではさらに早くなり、給水開始から 30 分程度でペレット部とブロック部の界面に水みちが形成された。

図 4.2-44 には、人工海水を 1ml/min で通水した試験後の供試体解体状況を示す。供試体の解体時の観察から、供試体表面は、前述の KCl や $MgCl_2$ 水溶液の通水に比べれば相対的に膨潤しているように見える。断面も供試体内部にまで水溶液が浸潤して密実であった。ペレット部も十分に膨潤し一体化していることが分かる。図 4.2-45 と図 4.2-46 の 10ml/min と 100ml/min の通水ケースでも同様の状況だが、ペレット部は、1ml/min のケースに比べ十分に膨潤し一体化しているとはいえず、ペレット状のベントナイトが残っていた。

以上から、人工海水が供試体に作用した際に、供試体表面が陽イオン交換反応によって変質するが、人工海水に含まれる主要な陽イオンがナトリウムイオンであるため、その膨潤性

能に及ぼす影響は KCl や $MgCl_2$ 水溶液に比べれば限定的であると考えられる。



図 4.2-41 通水時の供試体表面の状況 (人工海水 1ml/min 通水 ブロック+ペレット)

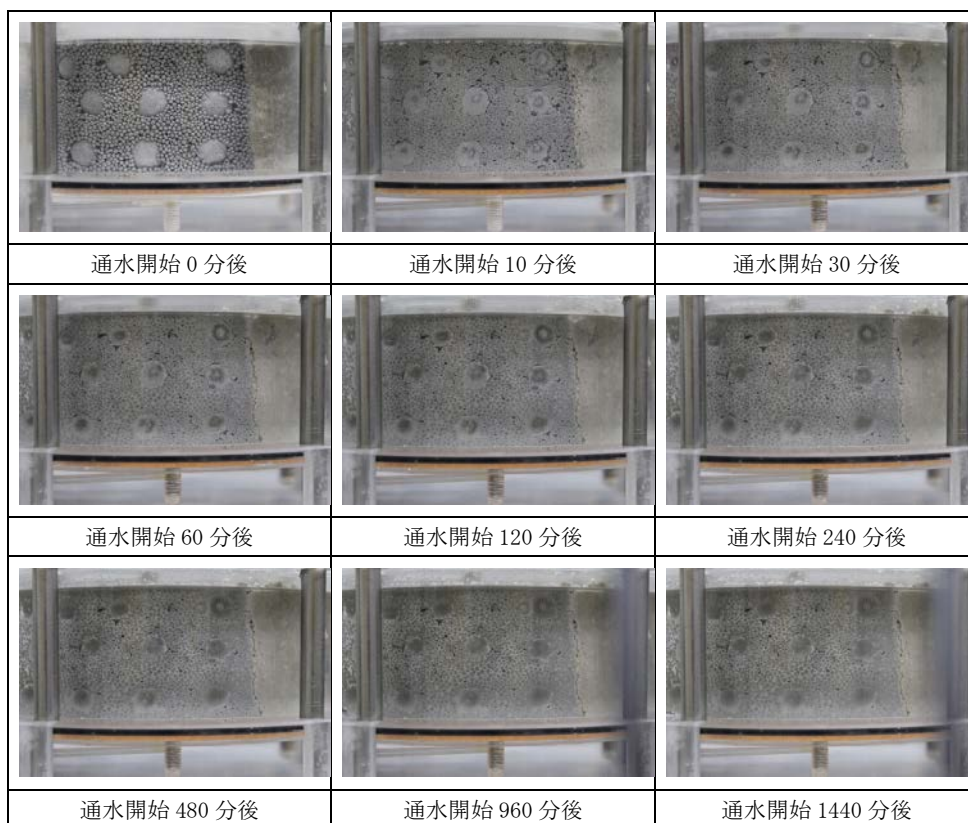


図 4.2-42 通水時の供試体表面の状況 (人工海水 10ml/min 通水 ブロック+ペレット)

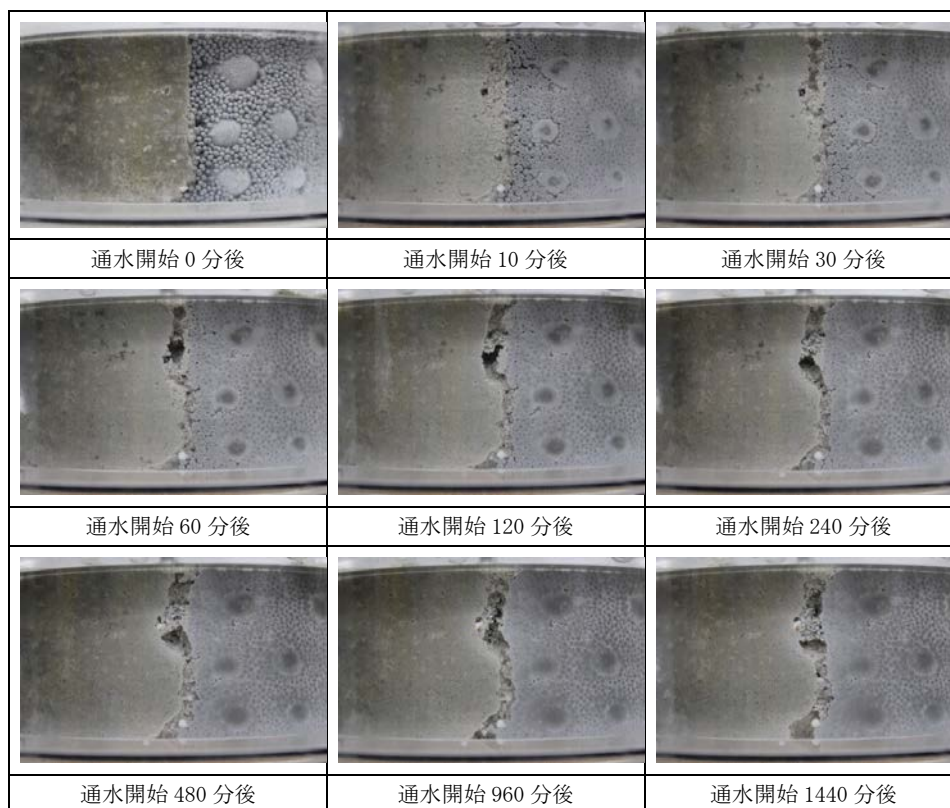


図 4.2-43 通水時の供試体表面の状況 (人工海水 100ml/min 通水 ブロック+ペレット)



図 4.2-44 解体状況（人工海水 1ml/min 通水 ペレット+ブロック）

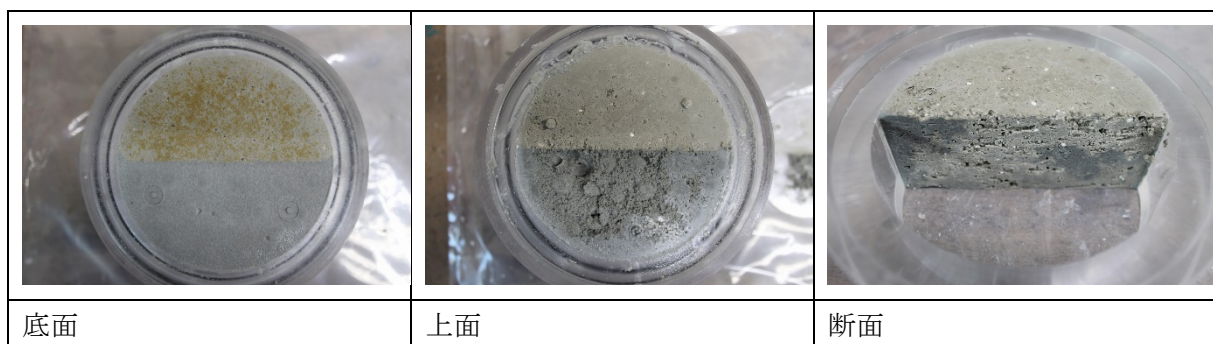


図 4.2-45 解体状況（人工海水 10ml/min 通水 ペレット+ブロック）

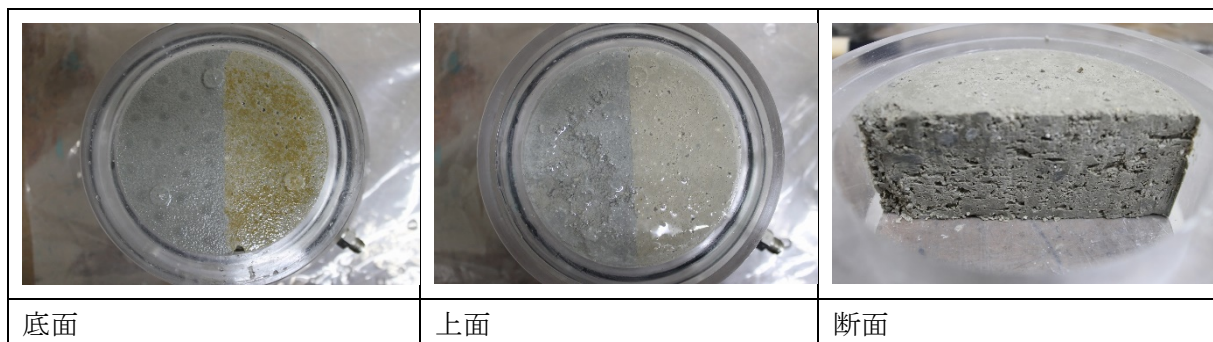


図 4.2-46 解体状況（人工海水 100ml/min 通水 ペレット+ブロック）

4.2.4 地下水中の陽イオンがエロージョンに及ぼす影響

図 4.2-47 に KCl と MgCl₂ 水溶液と人工海水のベントナイト流出量と通水量の関係を併せて示す。図には、Na 型ベントナイト（クニゲル V1、クニピア）に対して蒸留水を用いて実施したエロージョン試験から得られた流出量と通水量の関係も併せて示す。図から、KCl と人工海水のケースは蒸留水の結果から得られた流出量と通水量の関係と概ね同じ勾配である。一方、MgCl₂ 水溶液の流出量と通水量の関係は、蒸留水の結果から得られた流出量と通水量の関係の勾配よりも若干急である。また、全てのケースとも、ブロックのケースでは、蒸留水のケースに比べ、同じ通水量に対する流出量は非常に小さい結果になっているが、ペレット併用ケース

は蒸留水のケースと概ね同じ流出量となっている。このことから、ペレット併用ケースでは、ペレットの膨潤により水みちの断面積が小さくなり、水みちでの流速が大きくなることにより、緩衝材の流出量が大きくなるが、ブロックのケースでは、膨潤性能が低下するために水みちの流速が小さく、緩衝材の流出挙動が抑制されたものと考えられる。ここで注意が必要なのは、緩衝材が流出されない一方で膨潤性能や止水性能が低下しており、緩衝材の性能として機能が損なわれていないかどうかは、別途総合的に評価する必要がある。

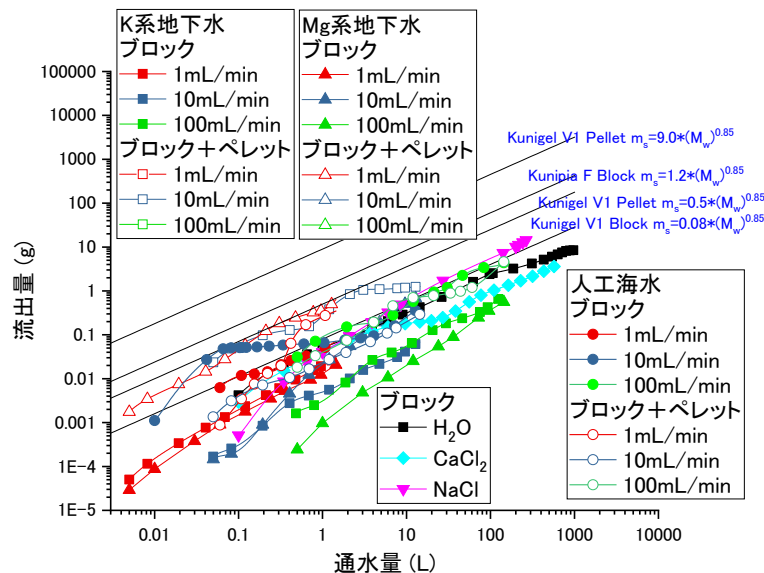


図 4.2-47 KCl、MgCl₂ 水溶液と人工海水の流出量と通水量の関係

図 4.2-48 には、これまでに実施した蒸留水、イオン強度 0.5 の NaCl 水溶液、CaCl₂ 水溶液に加え、MgCl₂ 水溶液、KCl 水溶液、人工海水を用いて実施したエロージョン試験から得られた流出量と通水量の関係を併せて示す。液種以外の試験条件が様々であるため、一概に比較できないが、大局的に見て、流出量と通水量の関係の勾配は、液種に依らず、その勾配はベントナイト（モンモリロナイト）の種類に依存するという結果となった。ただし、エロージョン量は水みちでの流速（緩衝材の膨潤量）だけで決まるものではなく、水みちを流れる流体の粘性抵抗に対する緩衝材のせん断強度などの影響も受けるものと考えられる。また、乾燥密度が大きいほど、このせん断強度は大きくなると考えられるため、膨潤しない方がせん断強度が大きくなり、水みちを流れる流体の粘性抵抗に対して洗掘され難くなる。その一方で、イオン強度が大きくなると、一次粒子同士が凝集して、見かけ上、土粒子径が大きくなった状態となり、締固め土の状態を維持できずに沈殿することも考えられる。エロージョン量は、このような様々な要因が複合的に作用して決まると考えられるため、個々の要因を分離してその影響度を調べるのが重要である。

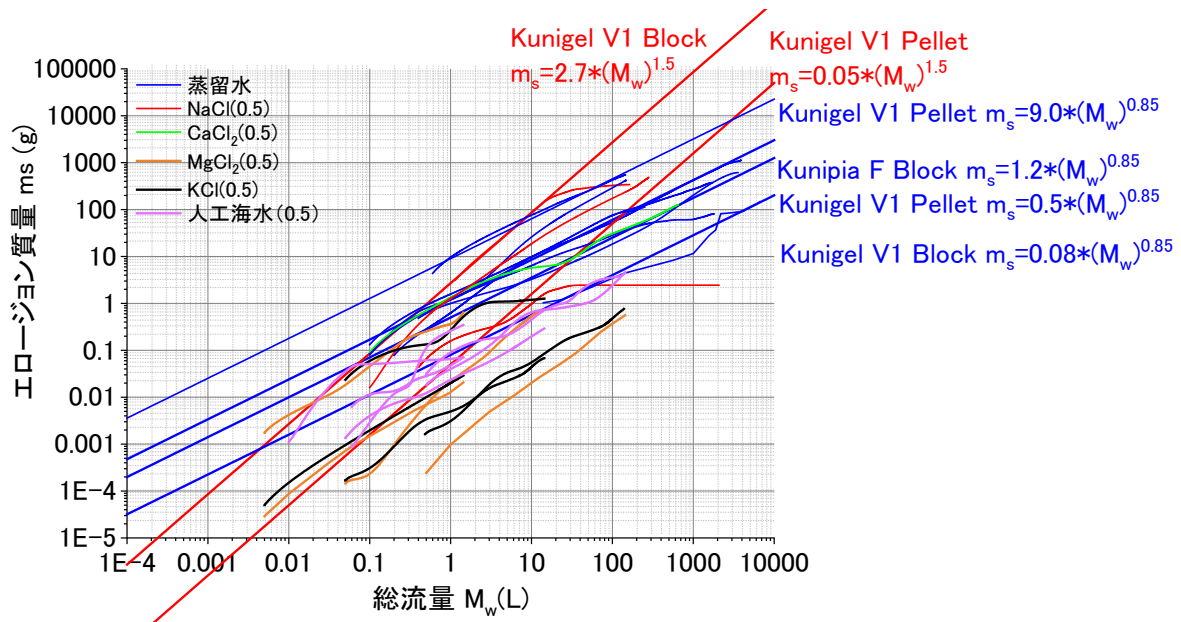


図 4.2-48 流出量と通水量の関係のまとめ

5. 密度分布が膨潤量に及ぼす影響に関する試験

5.1 試験方法

既往の研究において（原環センター、2016）、緩衝材の施工に起因する密度分布は、再冠水時の膨潤によってある程度解消するが、密度分布の大きさ次第では残留することが指摘されている。さらに、この残留密度分布の大きさは、緩衝材の $e\text{-log}P$ 関係で説明できることが明らかとなった。施工に起因する密度分布が、再冠水後の緩衝材に残留するという事は、緩衝材施工時に許容される密度分布の範囲を長期性能の観点から示す必要があるということの意味している。その一方で、緩衝材の膨潤挙動は、浸潤する液相のイオン強度やイオン種の影響を受けることが予想されるため、組成を変えた液種を用いて密度分布を有する緩衝材の膨潤試験を行い、どの程度密度分布が解消されるかを調べることは非常に有用である。

そこで本業務では、図 5.1-1 に示すような直列膨潤量試験装置を用いて種々の溶液について残留密度分布を取得する。直列膨潤量試験は、既往の研究において（原環センター、2015）開発されたものであり、高乾燥密度の供試体と低乾燥密度の供試体をセットした 2 つのセルをピストンとロードセルを介して直列で接続し、様々な液種を用いて膨潤量試験を実施するものである。この際、高密度供試体が膨潤した分ピストンが移動して低密度供試体を圧縮するため、ピストンの移動量を計測すれば密度分布の均質化状況をリアルタイムに計測可能である。

試験ケースを表 5.1-1 に示す。乾燥密度 $2.0\text{Mg}/\text{m}^3$ の供試体と乾燥密度 $1.2\text{Mg}/\text{m}^3$ の供試体をセットした 2 つのセルをピストンとロードセルを介して直列で接続し、様々な液種を用いて膨潤量試験を実施する。この際、高密度供試体が膨潤した分ピストンが移動して低密度供試体を圧縮するため、ピストンの移動量を計測すれば密度分布の均質化状況をリアルタイムに計測可能である。液種は汽水域を模擬して、人工海水と人工海水の半分のイオン強度としたものの 2 通りを用いる。

さらに、人工海水と 1/2 人工海水とを用いて緩衝材のスラリーを作製し、圧密試験を実施して e-logP 関係を取得し、どんな液種であっても e-logP 関係から残留密度差が説明可能であるかどうかを検討する。

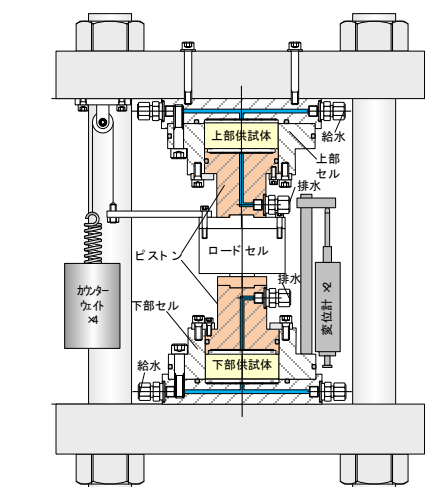


図 5.1-1 直列膨潤量試験装置による密度分布均質化試験のイメージ

表 5.1-1 緩衝材の密度均質化試験ケース

液種	供試体	試験条件	備考
1/2 人工海水	乾燥密度 2.0Mg/m ³ — 1.2Mg/m ³	直列	
人工海水	乾燥密度 2.0Mg/m ³ — 1.2Mg/m ³	直列	
1/2 人工海水	スラリー (液性限界程度)	段階圧密	φ 60mm×h20mm
人工海水	スラリー (液性限界程度)	段階圧密	φ 60mm×h20mm

5.2 試験結果

5.2.1 直列膨潤量試験ケース

表 5.2-2 には、本試験で用いる供試体の諸元を示す。また、図 5.2-1 に直列膨潤量試験の給水量の経時変化を示す。図には、人工海水と 1/2 人工海水の両ケースの結果をまとめて示している。本試験では、給水中に給水面近傍だけが膨潤し、上部と下部のそれぞれの供試体内で密度分布が発生することを防止するために、飽和中は変位を拘束して、十分に供試体に給水がなされた後に変位拘束を解除するという手順で実験を実施している。このため、飽和中に得られる情報は図 5.2-1 に示す直列膨潤量試験の給水量の経時変化のみである。

供試体への給水は、ビュレットの水位差のみで行っており、1/2 人工海水のケースでは、上部供試体（低密度供試体）で 0.6m 程度の水位差、下部供試体（高密度供試体）で 0.8m 程度の水位差

で給水をしている。また、人工海水のケースでは、上部供試体（低密度供試体）で 0.4m 程度の水位差、下部供試体（高密度供試体）で 0.8m 程度の水位差で給水をしている。これは、低密度供試体に高密度供試体と同じ水位差（0.8m 程度）で給水をしたところ、破過が発生したために、低密度供試体では、過度に水位差を付けないようにしたためである。このことにより、給水量に差が生じているが本質的な意味はない。各供試体の飽和体積が表 5.2-2 から 0.02mL～1.6 mL であったため、既に十分に飽和に達していると思われる。ただし、まだ排水を確認できていないため、確認ができ次第、直列膨潤量試験に移行する予定である。

表 5.2-1 緩衝材の密度均質化試験の供試体諸元

		人工海水		1/2 人工海水	
直径	(mm)	60.00	60.00	60.00	60.00
高さ	(mm)	19.85	19.86	19.93	19.90
体積	(cm ³)	56.125	56.153	56.351	56.266
含水比	(%)	43.92	12.52	44.04	12.95
乾燥密度	(g/cm ³)	1.200	2.000	1.200	2.000
空隙体積	(cm ³)	1.600	0.496	1.528	0.020
飽和度	%	94.9	96.6	95.1	99.9

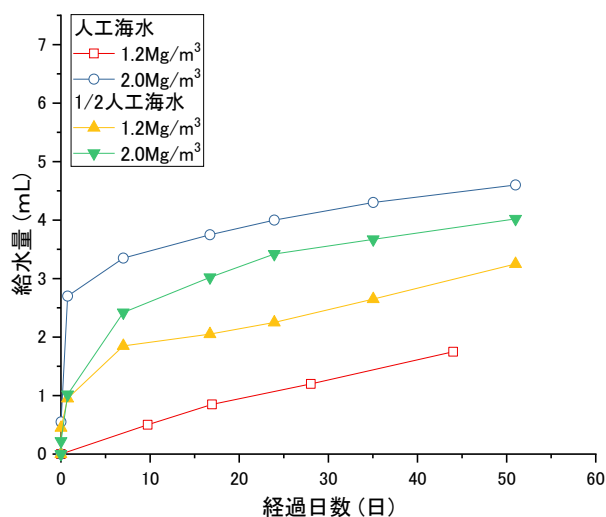


図 5.2-1 直列膨潤量試験の給水量の経時変化

5.2.2 スラリー圧密試験ケース

図 5.2-2 に直列膨潤量試験装置における e - $\log p$ 関係のイメージを示す。前述の直列膨潤量試験開始直前の高乾燥密度供試体と低乾燥密度供試体がそれぞれ点 H_0 、点 L_0 にあるとする。ここで直列膨潤量試験を開始すると、高乾燥密度供試体は膨潤するため、膨潤線（弾性域）を辿り間隙比が大きくなり、 H_1 に至る。一方、低乾燥密度供試体は高乾燥密度供試体の膨潤圧により圧密（圧縮）されて、正規圧密曲線を辿って間隙比が小さくなり L_1 に至る。この H_1 と L_1 は、密度が同じではなく、応力が同じ（釣り合っている）点である。図に示すように、 e - $\log p$ 関係を取得しておけば、この両者が釣り合う点とその時の残留密度差が取得できる。

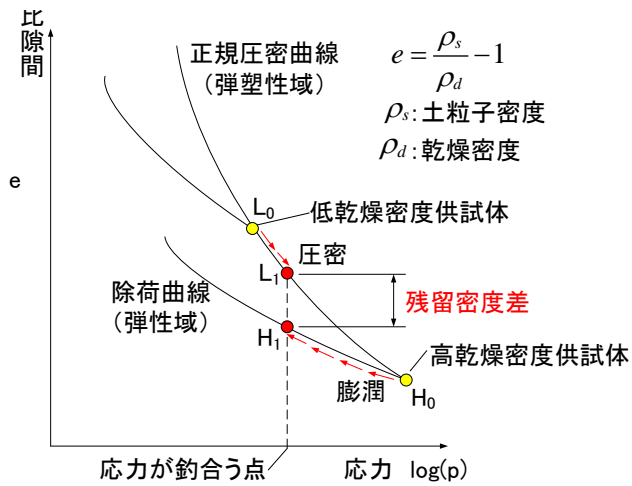


図 5.2-2 直列膨潤量試験装置における e-logp 関係のイメージ

表 5.2-2 にスラリー圧密試験の供試体諸元を示す。人工海水で作製したスラリーの方が 1/2 人工海水で作製したスラリーよりも若干乾燥密度（スラリー濃度）が高いことが分かる。これは、人工海水の方が 1/2 人工海水よりもイオン強度が高いために、ベントナイトの膨潤が抑制されているためであると考えられる。

表 5.2-2 スラリー圧密試験の供試体諸元

ケース名		人工海水	1/2 人工海水	備考
土粒子密度	ρ_s (Mg/m ³)	2.71	2.71	人工海水は ASTM D1141 に準拠。 1/2 人工海水は、人工海水の半分のイオン強度とした。
初期含水比	w_0 (%)	290.53	316.2	
供試体初期高さ	H_0 (cm)	3.00	3.00	
供試体面積	A (cm ²)	28.27	28.27	
初期乾燥密度	ρ_d (Mg/m ³)	0.26	0.24	
間隙比	e_0 (-)	9.32	10.13	
飽和度	S_r (%)	84.35	84.55	
実質高さ	H_s (cm)	0.29	0.27	

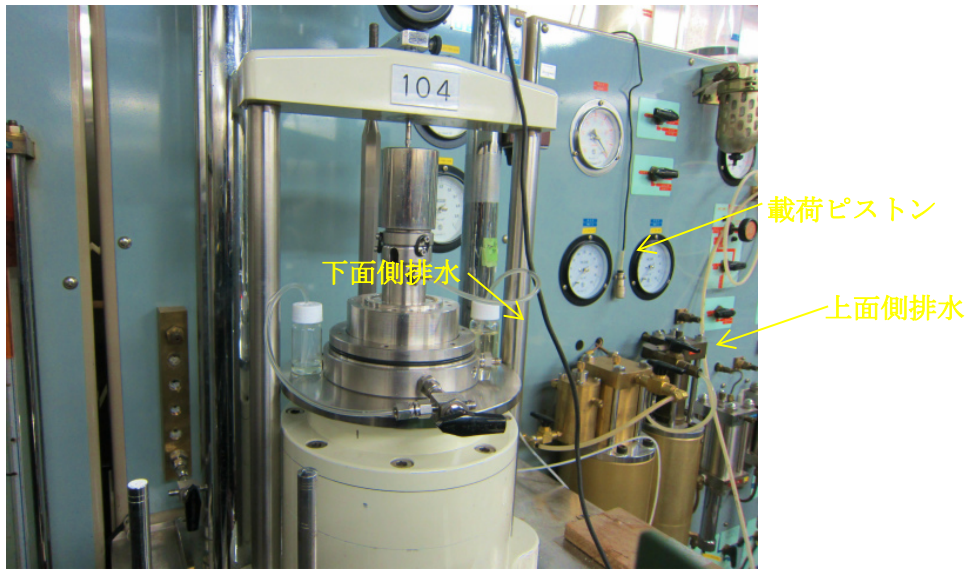


図 5.2-3 スラリー圧密試験の状況

図 5.2-4 には、人工海水と 1/2 人工海水で作製したベントナイトスラリーの沈下曲線を示す。ベントナイト系材料の圧密試験は、膨潤圧よりも大きな圧密圧力を作用させなければ沈下は生じない。本試験の場合、人工海水の方がイオン強度が大きいために、1/2 人工海水よりも小さな圧密圧力で同等の沈下が生じている。沈下傾向は両者ともほぼ同様であることが分かる。また、第 2 段階载荷では、両者とも 10kPa を载荷しているが、この場合、人工海水の方がイオン強度が大きいために、1/2 人工海水のケースに比べ、沈下が進行している。ただし、両者の差異は大きくはない。これは、既往の研究(笹倉ら 2003)によれば、イオン強度による膨潤性能の低下は、0~0.1 までが著しく、それ以上イオン強度が大きくなっても膨潤性能に対する影響は鈍化する。本試験では、人工海水のイオン強度が 0.5 で 1/2 人工海水が 0.25 であるため、イオン強度が膨潤性能に及ぼす影響の差が小さかったものと考えられる。

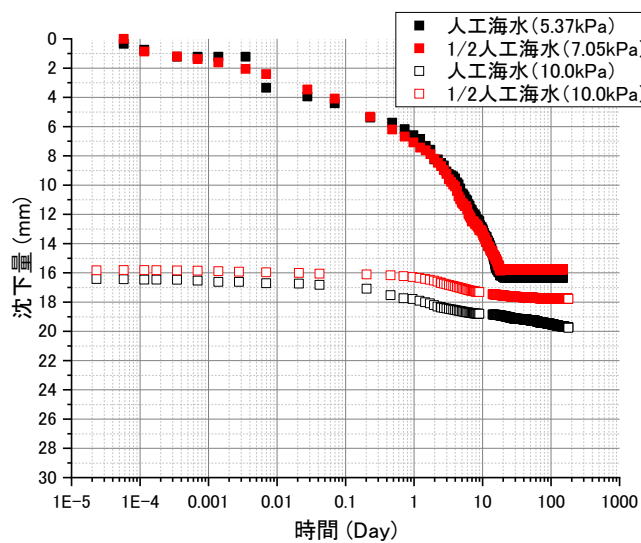


図 5.2-4 人工海水と 1/2 人工海水で作製したベントナイトスラリーの沈下曲線

図 5.2-5 には、人工海水と 1/2 人工海水で作製したベントナイトスラリーの ρ_d - $\log p$ 関係を示す。図には、既往の研究（原環センター、2015、2016）で実施された、クニゲル V1 と蒸留水で取得された ρ_d - $\log p$ 関係も併せて示している。圧密段階がまだ少ないために定量的な判断はできないが、定性的には蒸留水を使用したスラリーの場合に比べ、明確に膨潤性能が低いことが分かる。

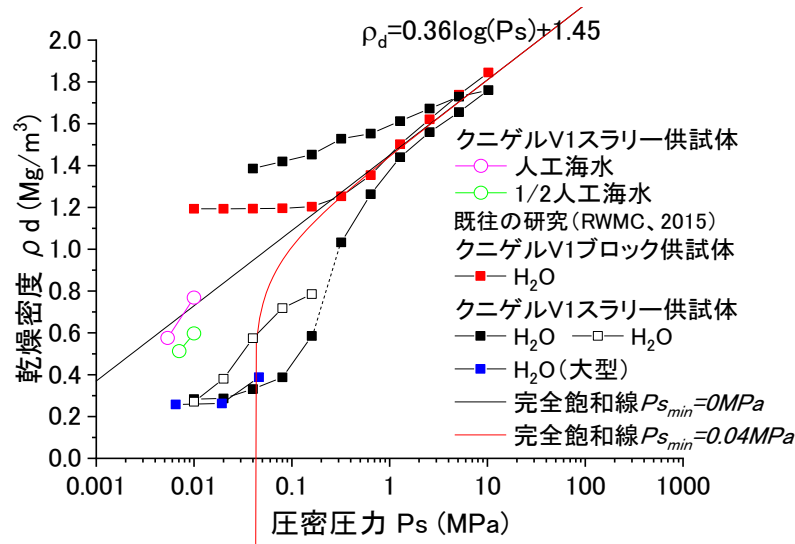


図 5.2-5 人工海水と 1/2 人工海水で作製したベントナイトスラリーの ρ_d - $\log p$ 関係

図 5.2-6 には、人工海水と 1/2 人工海水で作製したベントナイトスラリーの e - $\log p$ 関係を示す。図には、既往の研究で得られた e - $\log p$ 関係も併せて示している。圧密段階がまだ少ないために定量的な判断はできないが、定性的には蒸留水を使用したスラリーの場合に比べ、明確に膨潤性能が低いと考えられる。

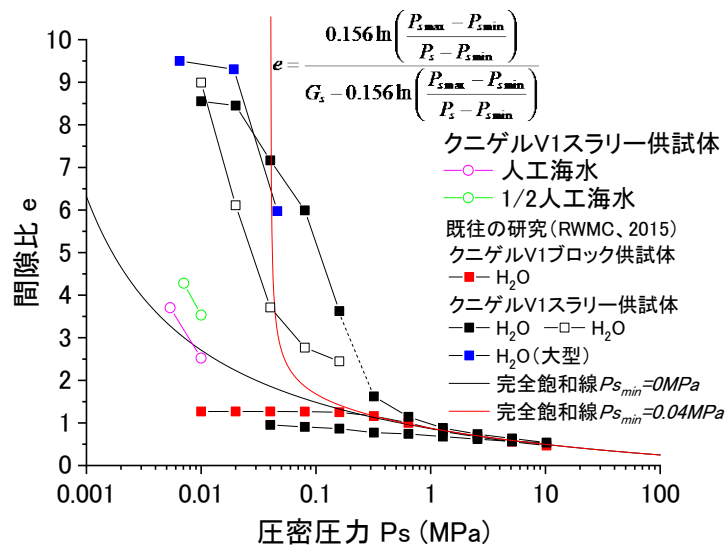


図 5.2-6 人工海水と 1/2 人工海水で作製したベントナイトスラリーの e - $\log p$ 関係

参考文献

- [1] (公益社団法人)原子力環境整備促進・資金管理センター：地層処分技術調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学確証技術開発）人工バリア品質／健全性評価手法の構築、平成 26 年度 報告書 第二分冊 (2015).
- [2] (公益社団法人)原子力環境整備促進・資金管理センター：地層処分技術調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学確証技術開発）人工バリア品質／健全性評価手法の構築、平成 27 年度 報告書 第二分冊 (2016).
- [3] 笹倉剛、畔柳幹雄、小林一三、岡本道孝：ベントナイト変遷挙動のモデル化のためのデータ取得Ⅱ、JNC TJ8400 2003-048 (2003).

Appendix XI

塩水環境下におけるセメント系材料の機械的特性変化に関する検討

試験及び解析結果

1. 実施内容	XI-1
2. バルク試験体を用いた力学特性に関するデータの取得	XI-2
2.1 ブロック浸漬試料の分析	XI-2
2.1.1 試験条件	XI-2
(1) 試験試料の作製条件	XI-2
(2) 浸漬試験条件	XI-2
2.1.2 分析項目と方法	XI-3
(1) pH 分析	XI-3
(2) 試料断面の元素組成分析	XI-4
(3) 鉱物相の同定	XI-4
(4) 鉱物の形態観察及び組成分布	XI-4
(5) 微小領域の硬度の測定	XI-4
2.1.3 分析結果	XI-5
(1) pH 分析	XI-5
(2) 試料断面の元素組成分析	XI-8
1) 分析試料の切断面観察	XI-8
2) 元素組成分布の分析結果及び濃度プロファイル	XI-9
3) EPMA 結果を参考に選定した各測定位置の決定	XI-37
(3) 鉱物相の同定	XI-39
(4) 鉱物の形態観察及び組成分析	XI-49
1) 電子像観察及び EDS 分析	XI-49
2) 接液面近傍の組成分布	XI-63
(5) 微小領域の硬度の測定	XI-83
1) 微小領域のビッカース硬度測定結果	XI-83
2) ビッカース硬度と組成分布の関係	XI-90
3) ビッカース硬度と小径円柱供試体の圧縮強度の関係	XI-95
2.2 分析結果のまとめと考察	XI-97
2.2.1 分析結果まとめ	XI-97
2.2.2 セメント系材料の変質についての考察	XI-103
2.2.3 セメント系材料の変質と短期的強度の関係についての考察	XI-104
2.3 バルク試験体を用いた力学特性に関するデータの取得のまとめ	XI-104
3. 塩水浸透に係わるモデルの検討	XI-106
3.1 解析の概要	XI-106
3.1.1 本解析の特徴	XI-106
3.1.2 液相の物質移行モデル	XI-109

3.1.3 相平衡モデル	XI-109
3.2 バルク試験体の浸漬試験条件を想定した塩分浸透計算のための構造因子の検討	XI-111
3.2.1 固相の初期組成	XI-111
3.2.2 構造因子検討のための境界条件	XI-113
3.2.3 構造因子検討のための解析条件	XI-113
3.2.4 構造因子の解析	XI-113
3.3 バルク試験からの浸漬試験条件を想定した塩分浸透計算	XI-115
3.3.1 試料の初期組成及び空隙率	XI-115
3.3.2 境界条件	XI-116
3.3.3 解析条件	XI-117
3.3.4 解析結果	XI-117
3.4 塩水浸透に係わるモデルの検討のまとめ	XI-121
3.4.1 解析条件の検討	XI-121
3.4.2 浸漬試験条件の浸透解析	XI-122
3.4.3 長期評価のための留意点	XI-122

－ 図目次 －

図 2.1-1	ブロック試料の浸漬試験の模式図	XI-3
図 2.1-2	ブロック試料の浸漬状況	XI-3
図 2.1-3	浸漬液の pH (OPC-45)	XI-6
図 2.1-4	浸漬液の pH (OPC-60)	XI-7
図 2.1-5	浸漬液の pH (FAC30)	XI-7
図 2.1-6	浸漬液の pH (BFSC70)	XI-7
図 2.1-7	分析試料の切断面一覧	XI-9
図 2.1-8	EPMA 測定結果 (OPC-45、人工海水：外観変化なし)	XI-11
図 2.1-9	EPMA 測定結果 (OPC-45、人工海水：外観変化あり)	XI-12
図 2.1-10	EPMA 測定結果 (OPC-45、1/10 人工海水：外観変化あり)	XI-13
図 2.1-11	EPMA 測定結果 (OPC-45、1/100 人工海水：外観変化なし)	XI-14
図 2.1-12	EPMA 測定結果 (OPC-60、人工海水：外観変化なし)	XI-15
図 2.1-13	EPMA 測定結果 (OPC-60、人工海水：外観変化あり)	XI-16
図 2.1-14	EPMA 測定結果 (OPC-60、1/10 人工海水：外観変化あり)	XI-17
図 2.1-15	EPMA 測定結果 (OPC-60、1/100 人工海水：外観変化なし)	XI-18
図 2.1-16	EPMA 測定結果 (FAC30、人工海水：外観変化なし)	XI-19
図 2.1-17	EPMA 測定結果 (FAC30、1/10 人工海水：外観変化なし)	XI-20
図 2.1-18	EPMA 測定結果 (FAC30、1/100 人工海水：外観変化なし)	XI-21
図 2.1-19	EPMA 測定結果 (BFSC70、人工海水：外観変化なし)	XI-22
図 2.1-20	EPMA 測定結果 (BFSC70、1/10 人工海水：外観変化なし)	XI-23
図 2.1-21	EPMA 測定結果 (BFSC70、1/100 人工海水：外観変化なし)	XI-24
図 2.1-22	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-45 : CaO)	XI-25
図 2.1-23	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-45 : SiO ₂)	XI-25
図 2.1-24	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-45 : Al ₂ O ₃)	XI-25
図 2.1-25	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-45 : Fe ₂ O ₃)	XI-26
図 2.1-26	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-45 : SO ₃)	XI-26
図 2.1-27	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-45 : MgO)	XI-26
図 2.1-28	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-45 : Na ₂ O)	XI-27
図 2.1-29	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-45 : K ₂ O)	XI-27
図 2.1-30	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-45 : Cl)	XI-27
図 2.1-31	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-60 : CaO)	XI-28
図 2.1-32	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-60 : SiO ₂)	XI-28
図 2.1-33	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-60 : Al ₂ O ₃)	XI-28
図 2.1-34	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-60 : Fe ₂ O ₃)	XI-29
図 2.1-35	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-60 : SO ₃)	XI-29

図 2.1-36	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-60 : MgO)	XI-29
図 2.1-37	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-60 : Na ₂ O)	XI-30
図 2.1-38	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-60 : K ₂ O)	XI-30
図 2.1-39	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-60 : Cl)	XI-30
図 2.1-40	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (FAC30 : CaO)	XI-31
図 2.1-41	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (FAC30 : SiO ₂)	XI-31
図 2.1-42	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (FAC30 : Al ₂ O ₃)	XI-31
図 2.1-43	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (FAC30 : Fe ₂ O ₃)	XI-32
図 2.1-44	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (FAC30 : SO ₃)	XI-32
図 2.1-45	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (FAC30 : MgO)	XI-32
図 2.1-46	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (FAC30 : Na ₂ O)	XI-33
図 2.1-47	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (FAC30 : K ₂ O)	XI-33
図 2.1-48	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (FAC30 : Cl)	XI-33
図 2.1-49	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (BFSC70 : CaO)	XI-34
図 2.1-50	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (BFSC70 : SiO ₂)	XI-34
図 2.1-51	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (BFSC70 : Al ₂ O ₃)	XI-34
図 2.1-52	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (BFSC70 : Fe ₂ O ₃)	XI-35
図 2.1-53	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (BFSC70 : SO ₃)	XI-35
図 2.1-54	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (BFSC70 : MgO)	XI-35
図 2.1-55	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (BFSC70 : Na ₂ O)	XI-36
図 2.1-56	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (BFSC70 : K ₂ O)	XI-36
図 2.1-57	EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (BFSC70 : Cl)	XI-36
図 2.1-58	各測定位置の状況図	XI-38
図 2.1-59	粉末 X 線回折測定結果 (OPC-45、人工海水)	XI-43
図 2.1-60	粉末 X 線回折測定結果 (OPC-45、1/10 人工海水)	XI-43
図 2.1-61	粉末 X 線回折測定結果 (OPC-45、1/100 人工海水)	XI-44
図 2.1-62	粉末 X 線回折測定結果 (OPC-60、人工海水)	XI-44
図 2.1-63	粉末 X 線回折測定結果 (OPC-60、1/10 人工海水)	XI-45
図 2.1-64	粉末 X 線回折測定結果 (OPC-60、1/100 人工海水)	XI-45
図 2.1-65	粉末 X 線回折測定結果 (FAC30、人工海水)	XI-46
図 2.1-66	粉末 X 線回折測定結果 (FAC30、1/10 人工海水)	XI-46
図 2.1-67	粉末 X 線回折測定結果 (FAC30、1/100 人工海水)	XI-47
図 2.1-68	粉末 X 線回折測定結果 (BFSC70、人工海水)	XI-47
図 2.1-69	粉末 X 線回折測定結果 (BFSC70、1/10 人工海水)	XI-48
図 2.1-70	粉末 X 線回折測定結果 (BFSC70、1/100 人工海水)	XI-48
図 2.1-71	反射電子像観察と組成分析結果 (OPC-45、人工海水)	XI-51
図 2.1-72	反射電子像観察と組成分析結果 (OPC-45、1/10 人工海水)	XI-52

図 2.1-73	反射電子像観察と組成分析結果 (OPC-45、1/100 人工海水)	XI-53
図 2.1-74	反射電子像観察と組成分析結果 (OPC-60、人工海水)	XI-54
図 2.1-75	反射電子像観察と組成分析結果 (OPC-60、1/10 人工海水)	XI-55
図 2.1-76	反射電子像観察と組成分析結果 (OPC-60、1/100 人工海水)	XI-56
図 2.1-77	反射電子像観察と組成分析結果 (FAC30、人工海水)	XI-57
図 2.1-78	反射電子像観察と組成分析結果 (FAC30、1/10 人工海水)	XI-58
図 2.1-79	反射電子像観察と組成分析結果 (FAC30、1/100 人工海水)	XI-59
図 2.1-80	反射電子像観察と組成分析結果 (BFSC70、人工海水)	XI-60
図 2.1-81	反射電子像観察と組成分析結果 (BFSC70、1/10 人工海水)	XI-61
図 2.1-82	反射電子像観察と組成分析結果 (BFSC70、1/100 人工海水)	XI-62
図 2.1-83	接液面近傍の組成分布 (OPC-45、BL)	XI-65
図 2.1-84	接液面近傍の組成分布 (OPC-45、人工海水)	XI-66
図 2.1-85	接液面近傍の組成分布 (OPC-45、1/10 人工海水-1)	XI-67
図 2.1-86	接液面近傍の組成分布 (OPC-45、1/10 人工海水-2)	XI-68
図 2.1-87	接液面近傍の組成分布 (OPC-45、1/100 人工海水)	XI-69
図 2.1-88	接液面近傍の組成分布 (OPC-60、BL)	XI-70
図 2.1-89	接液面近傍の組成分布 (OPC-60、人工海水)	XI-71
図 2.1-90	接液面近傍の組成分布 (OPC-60、1/10 人工海水-1)	XI-72
図 2.1-91	接液面近傍の組成分布 (OPC-60、1/10 人工海水-2)	XI-73
図 2.1-92	接液面近傍の組成分布 (OPC-60、1/100 人工海水)	XI-74
図 2.1-93	接液面近傍の組成分布 (FAC30、BL)	XI-75
図 2.1-94	接液面近傍の組成分布 (FAC30、人工海水)	XI-76
図 2.1-95	接液面近傍の組成分布 (FAC30、1/10 人工海水)	XI-77
図 2.1-96	接液面近傍の組成分布 (FAC30、1/100 人工海水)	XI-78
図 2.1-97	接液面近傍の組成分布 (BFSC70、BL)	XI-79
図 2.1-98	接液面近傍の組成分布 (BFSC70、人工海水)	XI-80
図 2.1-99	接液面近傍の組成分布 (BFSC70、1/10 人工海水)	XI-81
図 2.1-100	接液面近傍の組成分布 (BFSC70、1/100 人工海水)	XI-82
図 2.1-101	接液面からの距離とビッカース硬度の関係 (OPC-45、人工海水)	XI-86
図 2.1-102	接液面からの距離とビッカース硬度の関係 (OPC-45、1/10 人工海水)	XI-86
図 2.1-103	接液面からの距離とビッカース硬度の関係 (OPC-45、1/100 人工海水)	XI-86
図 2.1-104	接液面からの距離とビッカース硬度の関係 (OPC-60、人工海水)	XI-87
図 2.1-105	接液面からの距離とビッカース硬度の関係 (OPC-60、1/10 人工海水)	XI-87
図 2.1-106	接液面からの距離とビッカース硬度の関係 (OPC-60、1/100 人工海水)	XI-87
図 2.1-107	接液面からの距離とビッカース硬度の関係 (FAC30、人工海水)	XI-88
図 2.1-108	接液面からの距離とビッカース硬度の関係 (FAC30、1/10 人工海水)	XI-88
図 2.1-109	接液面からの距離とビッカース硬度の関係 (FAC30、1/100 人工海水)	XI-88

図 2.1-110	接液面からの距離とビッカース硬度の関係 (BFSC70、人工海水)	..... XI-89
図 2.1-111	接液面からの距離とビッカース硬度の関係 (BFSC70、1/10 人工海水)	..... XI-89
図 2.1-112	接液面からの距離とビッカース硬度の関係 (BFSC70、1/100 人工海水)	..... XI-89
図 2.1-113	ビッカース硬度と成分分布の関係 (OPC-45、人工海水)	..... XI-91
図 2.1-114	ビッカース硬度と成分分布の関係 (OPC-45、1/10 人工海水)	..... XI-91
図 2.1-115	ビッカース硬度と成分分布の関係 (OPC-45、1/100 人工海水)	..... XI-91
図 2.1-116	ビッカース硬度と成分分布の関係 (OPC-60、人工海水)	..... XI-92
図 2.1-117	ビッカース硬度と成分分布の関係 (OPC-60、1/10 人工海水)	..... XI-92
図 2.1-118	ビッカース硬度と成分分布の関係 (OPC-60、1/100 人工海水)	..... XI-92
図 2.1-119	ビッカース硬度と成分分布の関係 (FAC30、人工海水)	..... XI-93
図 2.1-120	ビッカース硬度と成分分布の関係 (FAC30、1/10 人工海水)	..... XI-93
図 2.1-121	ビッカース硬度と成分分布の関係 (FAC30、1/100 人工海水)	..... XI-93
図 2.1-122	ビッカース硬度と成分分布の関係 (BFSC70、人工海水)	..... XI-94
図 2.1-123	ビッカース硬度と成分分布の関係 (BFSC70、1/10 人工海水)	..... XI-94
図 2.1-124	ビッカース硬度と成分分布の関係 (BFSC70、1/100 人工海水)	..... XI-94
図 2.1-125	圧縮強度の測定結果 (BL)	..... XI-96
図 2.1-126	ビッカース硬度と圧縮強度の関係 (BL)	..... XI-96
図 3.1-1	セメント硬化体中での物質移動と相平衡の概念図	..... XI-106
図 3.2-1	浸透プロファイルのフィッティング	..... XI-114
図 3.3-1	塩素の浸透プロファイルと鈹物相組成の計算結果と試験結果 (OPC-60)	..... XI-119
図 3.3-2	塩素の浸透プロファイルの計算結果と試験結果 (FAC30)	..... XI-120
図 3.3-3	塩素の浸透プロファイルの計算結果と試験結果 (BFSC70)	..... XI-121

－ 表目次 －

表 2.1-1	試験試料.....	XI-2
表 2.1-2	ブロック試験試料の作製条件.....	XI-2
表 2.1-3	ブロック試料の液交換式浸漬試験の浸漬試験条件.....	XI-3
表 2.1-4	各浸漬液の pH 分析結果.....	XI-6
表 2.1-5	EPMA 結果を参考に選定した各測定位置及び測定数.....	XI-37
表 2.1-6	同定された鉱物の化学式.....	XI-41
表 2.1-7	鉱物の同定結果一覧.....	XI-42
表 2.1-8	微小領域の硬度測定結果 (OPC ペースト).....	XI-84
表 2.1-9	微小領域の硬度測定結果 (混合セメントペースト).....	XI-85
表 2.1-10	圧縮強度の測定結果 (BL).....	XI-95
表 2.2-1	XRD 分析、SEM 観察結果を元に作成した鉱物の分布一覧 (OPC-45).....	XI-99
表 2.2-2	XRD 分析、SEM 観察結果を元に作成した鉱物の分布一覧 (OPC-60).....	XI-100
表 2.2-3	XRD 分析、SEM 観察結果を元に作成した鉱物の分布一覧 (FAC30).....	XI-101
表 2.2-4	XRD 分析、SEM 観察結果を元に作成した鉱物の分布一覧 (BFSC70).....	XI-102
表 3.1-1	本研究で用いた解析コードと PHREEQC-Trans の比較.....	XI-108
表 3.1-2	各水和物の反応式とその熱力学的平衡定数.....	XI-110
表 3.1-3	フィッティングによって得られた熱力学的平衡定数 $\log K_{na}$ 及び $\log K_k$	XI-111
表 3.2-1	OPC-60 の鉱物組成と反応率.....	XI-111
表 3.2-2	FAC30 の鉱物組成と反応率.....	XI-112
表 3.2-3	BFSC70 の鉱物組成と反応率.....	XI-112
表 3.2-4	各硬化体の空隙率.....	XI-112
表 3.2-5	計算に考慮したイオン種、境界条件、拡散係数.....	XI-113
表 3.2-6	構造因子検討のための解析条件.....	XI-113
表 3.2-7	Tortuosity 計算結果.....	XI-115
表 3.3-1	OPC-60 の鉱物組成と反応率.....	XI-115
表 3.3-2	FAC30 の鉱物組成と反応率.....	XI-116
表 3.3-3	BFSC70 の鉱物組成と反応率.....	XI-116
表 3.3-4	各硬化体の空隙率.....	XI-116
表 3.3-5	計算に考慮したイオン種、境界条件、拡散係数.....	XI-117
表 3.3-6	解析条件.....	XI-117

1. 実施内容

2. バルク試験体を用いた力学特性に関するデータの取得、では、海水系の模擬地下水へのバルク試験体の浸漬試験によるセメント系材料の変質状態の分析及び短期的強度変化の関係の把握により、操業期間の海水によるセメント変質の短期的強度変化への影響を検討した。また、この検討においては、処分場環境における地下水中の成分濃度が、陸域からの降水系地下水の混合により海水レベルよりも低くなっている可能性も考慮した。平成 29 年度は、平成 28 年度に作製したバルク試験体の人工海水及び海水より薄い塩水への浸漬試験を継続し、セメント系材料の変質状態の分析及び機械的特性の変化に関する測定を実施した。その結果から、セメント系材料の塩水濃度と化学変質の関連、化学変質と短期的強度変化の関連を把握した。

さらに 3. 塩水浸透に係るモデルの検討、では、鉄筋等の腐食によるセメント系材料のひび割れ発生に伴う機械的特性の変化を評価することを目的に、沿岸海底下の地下水による化学変質を考慮した塩化物イオンの浸透モデルの高度化を検討した。平成 29 年度は、平成 28 年度の調査により抽出された産業界で検討されている塩化物イオンの浸透モデルのうち、物質移行(拡散モデル)と化学反応(相平衡モデル)を連成させた相平衡物質移行解析コード(細川ほか, 2007 ; 2011)を使用して、「2. バルク試験体を用いた力学特性に関するデータの取得で実施したバルク試験体の浸漬試験条件を想定した塩分浸透計算を行い、濃度の異なる海水系地下水での塩化物イオンの浸透解析を検討した。

[参考文献]

細川佳史, 山田一夫, Bjorn JOHANNESSON, Lars-Olof NILSSON, 熱力学的相平衡を考慮した Multi-species 物質移動モデルの構築, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp. 957-962., 2007.

細川佳史, 小川彰一, 山田一夫, 水分・CO₂ ガス及び液相化学種の移動と熱力学的相平衡との連成システムによる複合劣化の再現, 第 65 回セメント技術大会講演要旨, pp. 308-309., 2011.

2. バルク試験体を用いた力学特性に関するデータの取得

2.1 ブロック浸漬試料の分析

人工海水および希釈した人工海水に浸漬していた各種セメントペーストブロックの分析を実施し、現象を整理するとともに、短期的強度変化に影響する事項を検討した。

2.1.1 試験条件

(1) 試験試料の作製条件

平成 28 年度に作製した表 2.1-1 に示すセメントブロック試料の浸漬試験を実施し、試験後に回収した試料の分析を行った。ブロック試料の作製条件を表 2.1-2 に示す。浸漬後試料の比較分析対象となるブランク試料には、浸漬用試料の加工時に同様の形状で作製し、試験期間の間、湿潤保管したものをを用いた。なお、試料名の表記は、普通ポルトランドセメントは OPC-水粉体比、混合セメントはセメント種-混和材内割り比で表す。

表 2.1-1 試験試料

試料名	セメント種類	水/粉体質量比
OPC-45	普通ポルトランドセメント	0.45
OPC-60	普通ポルトランドセメント	0.60
FAC30	普通ポルトランドセメント/フライアッシュ=7/3	0.60
BFSC70	普通ポルトランドセメント/高炉スラグ=3/7	0.60

表 2.1-2 ブロック試験試料の作製条件

項目	内容
配合	水/粉体=0.6
練り混ぜ温度	30℃
打設（成形）	直径 20mm アクリルパイプ
養生	水中養生 50℃、91 日
切断	長さ 30mmに切断加工
マスキング	浸漬用試料：一面を開放し、他面を樹脂によりマスキングした ブランク試料（浸漬前試料）：マスキングなし

(2) 浸漬試験条件

平成 28 年度は既存の地下施設の環境条件の 1 つとして青函トンネル本坑（海底部）の湧水環境に関して文献調査を行っている（秋田ほか, 2001）。調査によればトンネル延長 23.3Km の区間から 1 日あたり約 5000m³ の湧水を外部排出しており、岩盤と吹付コンクリートの隙間では地下水の流れが生じていることがわかった。本試験もこれに習い、地下水の移動に伴う流れを「スター

ラ攪拌)、コンクリートとの接触液の入れ替わりを「液交換」で模擬する浸漬試験条件を設定した。浸漬試験条件を表 2.1-3 に浸漬試験の模式図を図 2.1-1 に、浸漬状況を図 2.1-2 に示した。

表 2.1-3 ブロック試料の液交換式浸漬試験の浸漬試験条件

項目	内容
浸漬液相	人工海水：1倍、1/10倍、1/100倍
浸漬液量	500ml/1試料あたり（単位面積流量 5.7ml/日/cm ² ）、月1回液交換
試験期間	常時スターラ攪拌条件で4ヶ月間
雰囲気	浸漬試験中は密封し外気を遮断

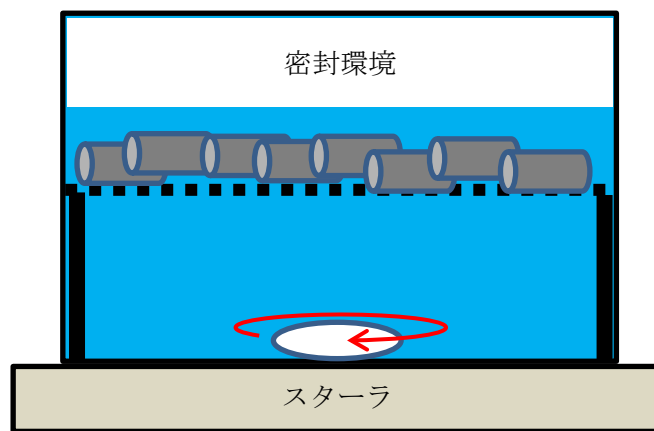


図 2.1-1 ブロック試料の浸漬試験の模式図



図 2.1-2 ブロック試料の浸漬状況

2.1.2 分析項目と方法

(1) pH 分析

pH はガラス電極を装着した pH メータ（堀場社製、LAQUA F-72）を使用して測定し

た。

(2) 試料断面の元素組成分析

電子線マイクロアナライザー（EPMA：日本電子データム株式会社製、JXA-8100）を使用し、加速電圧 15KV、照射電流 5×10^{-8} A、ビーム径 25 μ m の条件で試料断面の元素組成分析をした。測定元素は、Ca、Si、Al、Fe、Mg、S、Na、K、Cl の 9 元素とした。

(3) 鉱物相の同定

X 線回折装置（XRD：PANalytical 社製、X'Pert PRO MPD）を使用し、45kV、40mA の条件で発生した CuK α 線を用いて X 線回折ピークを取得した。測定結果は HighScore Plus というソフトを使用して鉱物相の同定を実施した。

(4) 鉱物の形態観察及び組成分布

走査電子顕微鏡（SEM：日立ハイテクノロジーズ社製、SU5000）を使用し、15 kV の加速電圧で発生した反射電子より試料断面の鉱物の形態情報を取得した。なお、本分析では、鉱物の形態観察の他、DES による組成の簡易分析と接液面近傍の組成分布測定を行うため、観察面は鏡面研磨した。

(5) 微小領域の硬度の測定

マイクロビッカース硬度試験機（ミットヨ社製、HM-221）を使用し、試料断面の人工海水と接触する接液面から内部に向かって所定箇所の硬度を測定した。ビッカース硬度の測定値は、ダイヤモンド製の四角錐圧子に荷重を加え、試料表面に残った圧痕の面積と荷重から算出した。測定には未乾燥の硬化体を用い、圧痕の観察を容易にするため測定面に鏡面研磨を施した。荷重は、くぼみの対角線長さが 50 μ m 前後に収まるよう調整した。

2.1.3 分析結果

(1) pH 分析

各浸漬液の pH の分析結果を表 2.1-4 に示す。浸漬液は、八洲薬品社、金属腐食試験用アクアマリンを製品添付の手順書に基づき作製し、この溶液を人工海水として、人工海水をイオン交換水で 10 倍、100 倍に希釈した溶液をそれぞれ、1/10 人工海水、1/100 人工海水とした。表中の「浸漬前」が固相試料を浸漬する前の pH であり、「1M~4M (month)」が浸漬 4 ヶ月の期間、月に 1 度実施した液交換直前の pH である。浸漬液の pH を図 2.1-3~図 2.1-6 に示す。

浸漬試験前の浸漬液の pH は、人工海水が pH8.19、1/10 人工海水が pH8.23、1/100 人工海水が pH8.01 であり、希釈倍率に関わらず pH8~8.2 程度と近接していた。一般的に固相浸漬後の浸漬液には、セメント材料中に微量含まれる Na、K の溶出、次いで Ca が溶脱し、これにより pH が上昇し元の浸漬液の pH より高くなる。本試験では、定期的に浸漬液を交換するため、pH は液交換の都度 8 程度から上昇する。通常、セメント成分は接液面から溶脱し減少するため、時間の経過と共に深い領域からセメント成分が移動し溶出する。そのため、液交換の回数を重ねるとセメント成分の移動、溶出に要する時間が長くなり、一定期間当たりの pH の上昇割合は低下する。

OPC-45 の浸漬液は、人工海水の 1M で pH9.76 まで上昇、2M では pH8.56、3M、4M の pH は、初期の浸漬液と同等であった。1/10 人工海水、1/100 人工海水の pH は、4M でも初期の浸漬液より高く、それぞれ pH9.88、pH10.09 であった。本報告書に記載している分析用の固相試料を回収した段階では、固液の反応は 1M と比較して活発であったと判断できる。

OPC-60 の浸漬液は、人工海水の 1M で pH9.73 まで上昇、2M では pH9.60、3M、4M の pH は、初期の浸漬液と同等であった。1/10 人工海水、1/100 人工海水は 4M でそれぞれ pH9.88、pH9.95 であった。2M~4M まで pH10 前後で推移しており、固液の反応は 1M と比較して活発であったと判断できる。

FAC30 の浸漬液の pH は、人工海水では、1M~4M まで初期の浸漬液と同等であった。塊状試料を用いた浸漬試験では、混合セメント系材料の成分の溶出速度は OPC 材料と比較して緩慢であることは既知の現象（原環センター、2007）であるが、1/10 人工海水、1/100 人工海水では 1M でそれぞれ pH10.36、pH10.48 まで上昇しており、固相の溶出特性の問題でないことがわかった。

BFSC70 浸漬液の pH 変化の推移は、概ね FAC30 と同等であった。

本試験では、地下水の移動に伴う接触液の流れと入れ替わりを「攪拌と液交換」で模擬している。各水準の浸漬液とも、この効果により pH が 11 以下程度に抑えられたと考えられるが、OPC 系材料、混合セメント系材料とも人工海水の水準では、pH が初期の浸漬液と同等になるほど溶脱が減少していた。液交換の効果の他、固相成分の溶脱が減少した可能性など海水成分と固相の反応による pH の低下理由があるものと考えられた。

表 2.1-4 各浸漬液の pH 分析結果

試料名	浸漬液	各浸漬期間における pH				
		浸漬前	1Month	2Month	3Month	4Month
OPC-45	人工海水	8.19	9.76	8.56	8.14	8.05
	1/10 人工海水	8.23	10.39	10.29	10.01	9.88
	1/100 人工海水	8.01	10.78	10.20	9.94	10.09
OPC-60	人工海水	8.19	9.73	9.60	8.14	8.10
	1/10 人工海水	8.23	10.58	10.10	9.94	9.88
	1/100 人工海水	8.01	10.93	10.12	9.89	9.95
FAC30	人工海水	8.19	8.28	8.16	8.26	8.20
	1/10 人工海水	8.23	10.36	9.99	9.54	9.56
	1/100 人工海水	8.01	10.48	10.14	9.32	9.17
BFSC70	人工海水	8.19	8.28	8.12	8.17	8.34
	1/10 人工海水	8.23	10.34	10.10	9.19	8.92
	1/100 人工海水	8.01	10.34	9.85	9.02	8.60

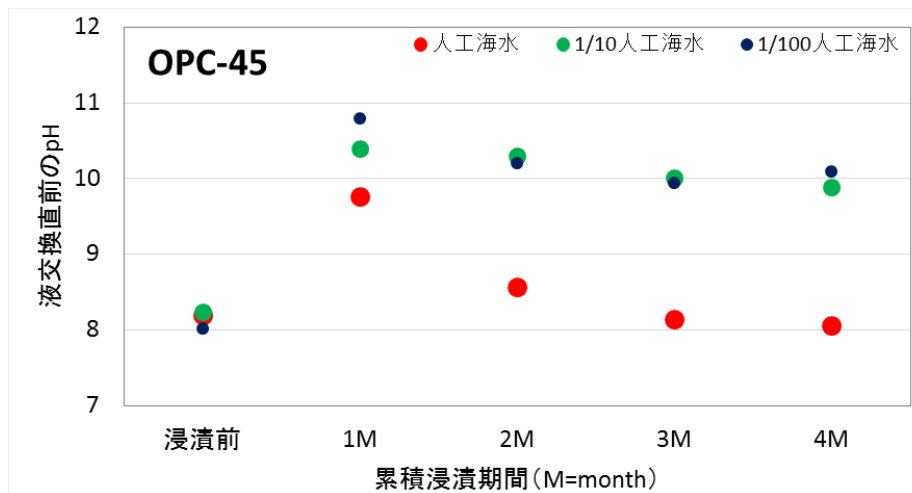


図 2.1-3 浸漬液の pH (OPC-45)

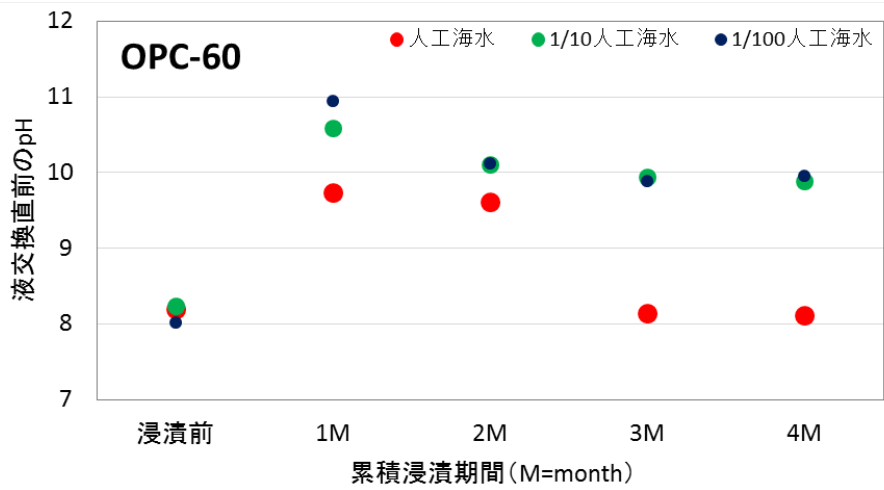


図 2.1-4 浸漬液の pH (OPC-60)

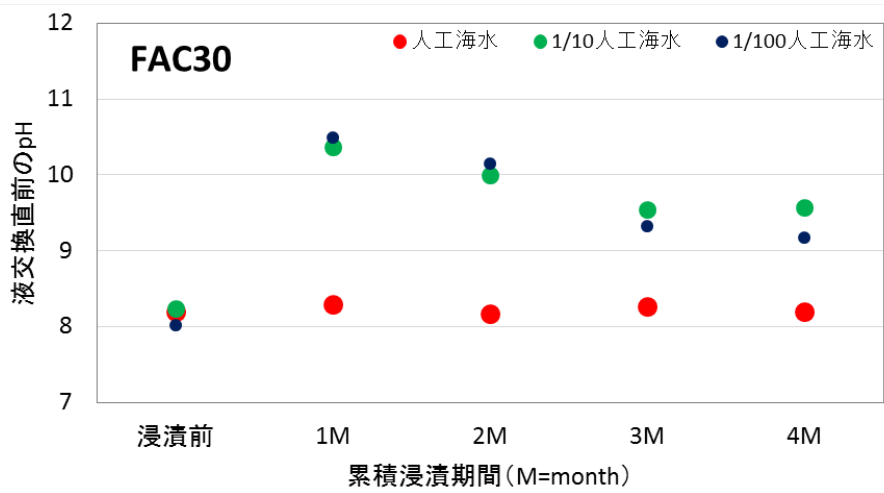


図 2.1-5 浸漬液の pH (FAC30)

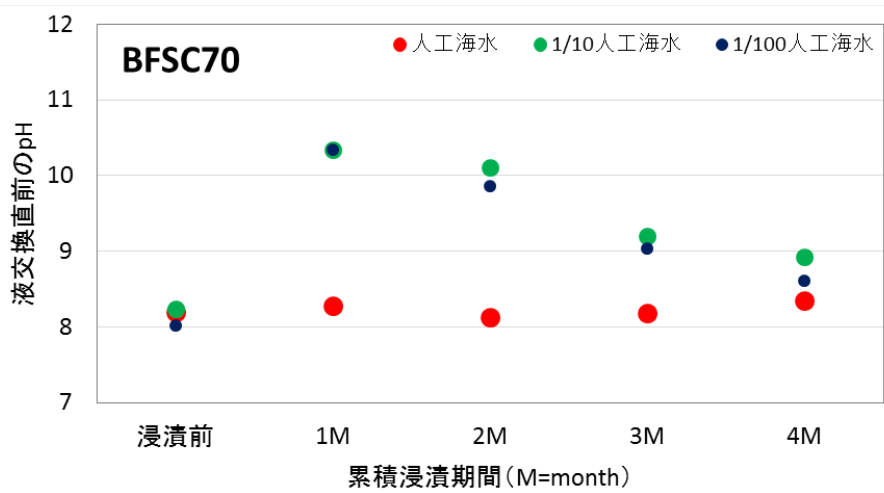


図 2.1-6 浸漬液の pH (BFSC70)

(2) 試料断面の元素組成分析

1) 分析試料の切断面観察

元素組成分析に用いる固相試料は、コンクリートカッターで加工する際の破損のリスクを低減させるため、円柱状試験体の周囲を樹脂で保護した。補強後の試験体は中央部から鉛直にカットし切断面の観察を行った。分析試料の切断面一覧を図 2.1-7 に示す。

OPC-45 及び OPC-60 の人工海水浸漬後試料では、接液面にドーム状の変質域（以下、ドームと略記）が生成した試料と生成していない試料を確認した。接液面上部にドームが形成された試料では、ドームが浮き上がる過程で元々接液面であった試料表層もドームに付着し浮き上がりドーム内に存在すると共に、新たな接液面が形成されていた。これらの状態を区別するために、ドームを有する試料を「外観変化あり」、有しない試料を「外観変化なし」とする。また、OPC-45 及び OPC-60 の 1/10 人工海水浸漬後試料では、全ての試料が外観変化ありの状態であった。その他の浸漬後試料は外観変化なしであることを確認した。

なお、既往のコンクリートの海水浸漬試験（福手ほか, 1992）では、このような生成物は報告されていない。本試験の固相試料はペースト硬化体のため、モルタル、コンクリートなどの骨材を含む硬化体と比較して、同体積当たりのセメント量が多い分、セメント成分が固相内部から移動し接液面を還して溶脱することが容易であり、溶脱成分が多いほど海水成分との沈殿反応が活発となる。これら接液面に多く生成した鉱物が成長の過程で剥離し、さらに空間を伴いながら成長することでドーム状に形成した可能性が考えられた。本試験では、接液面に二次鉱物が生成し難い様、溶脱成分の濃度上昇を制限するための液交換を月に 1 度実施している。しかし、ドームは浸漬 1 ヶ月以内に形成していることから、液交換前に二次鉱物が生成する成分濃度に達したと考えられた。従って、常に地下水が移動して成分濃度の上昇が抑えられる実際の処分場環境下では、このようなドームの形成は起こる可能性が低いものと考えられる。





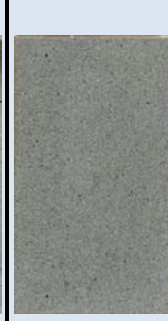


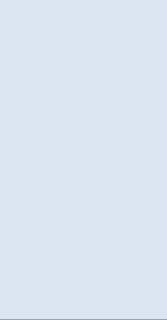
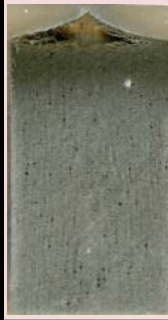
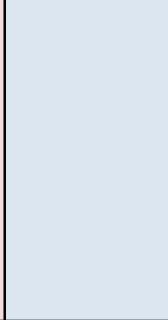
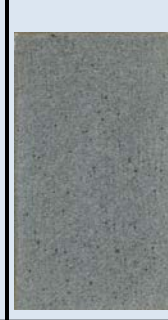




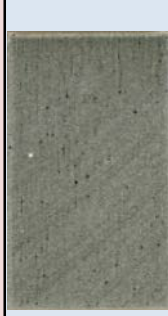


浸漬液	OPC-45		OPC-60		FAC30	BFSC70
	接液面 外観変化あり	接液面 外観変化なし	接液面 外観変化あり	接液面 外観変化なし	接液面 外観変化なし	接液面 外観変化なし
人工海水						
1/10 人工海水						
1/100 人工海水						

図 2.1-7 分析試料の切断面一覧

2) 元素組成分布の分析結果及び濃度プロファイル

EPMA による元素組成分布の分析結果を図 2.1-8～図 2.1-21 に示す。また、EPMA 測定値の平均濃度プロファイルを図 2.1-22～図 2.1-57 に示す。元素濃度は酸化物として算出した。浸漬試料は直径 20 mm、高さ 30 mm の円柱試験体であり、浸漬液との接液面は各図中の上辺のみである。円柱試験体は中央部を鉛直方向に分割しており、組成分布のマッピング面は分割した切断面にあたる。OPC-45 及び OPC-60 の人工海水浸漬後試料は、接液面にドームが生成した「外観変化あり」とドームが生成していない「外観変化なし」の両方の EPMA 測定を実施した。平均濃度プロファイル図の接液面からの距離 0～(5)mm がドームのプロファイルであり、0～30 mm が試料内部のプロファイルである。

OPC-45 の人工海水で生成したドームの主要成分は Ca、Mg であった。同試料は接液面から 3 mm 位の深度まで Ca が減少していた。この領域では S が高濃度であり、浸漬液に Ca が溶出する一方で浸漬液から S が浸透していることが確認された。Cl 濃度は Ca 溶脱部では低く、Ca 溶脱部以深で最も高濃度となっていた。同じ人工海水でドームが生成していない試料においても、接液

面極近傍の主要成分は Ca、Mg であり、Ca 溶脱部では高濃度の S が確認された。また、Cl の濃度は Ca 溶脱部以深で高いことから、ドームの生成の有無に関係なく、溶脱する成分、沈殿する成分は同じであることがわかった。ただし、ドームが生成した試料の方が Ca 溶脱部の領域が深く、浸透した Cl 濃度が高いことから、ドームが拡大する過程で接液面沈殿物のひび割れと生成が起こり、この間に浸漬液が侵入することで、ドームの無い試料よりも多く反応したものと考えられた。1/10 人工海水浸漬後試料の組成分布も人工海水と同様に Ca 溶脱部では高濃度の S が確認され、Cl の濃度は Ca 溶脱部以深で高かった。1/100 人工海水浸漬後試料においても Ca 溶脱部と S 高濃度部は確認されたが、その領域は 1 mm にも満たなかった。浸漬液の Cl 濃度が人工海水の 1/100 で低濃度であるため分布図では Cl の浸透状況を確認することは困難であるが、平均濃度プロファイルの結果から、Cl が接液面から緩やかに浸透していることを確認した。

OPC-60 の各試料の組成分布は、概ね OPC-45 と同様であった。各希釈倍率の溶液に浸漬した試料とも、Ca 溶脱部と S 高濃度部、更には Cl 浸透部の領域が OPC-45 より僅かに深いものの、組成分布の傾向は同様であった。OPC-45 と比較して練混ぜ水量が多い OPC-60 では硬化後の水隙が多い事が、成分の移動し易さに反映されたものと推測された。

FAC30 では OPC 材料と同様に Ca 溶脱部と S 高濃度部、Cl の浸透部が確認された。浸漬液の希釈倍率に関わらず Ca 溶脱部と S 高濃度部の領域は、接液面から 1 mm にも満たない極わずかな深度であった。Cl の浸透領域も浸漬液の希釈倍率に関わらず約 10 mm と同じ深度であったが、Cl の濃度は、1/10 人工海水浸漬後試料が最も高く、次いで 1/100 人工海水浸漬後試料であった。浸漬液の中の Cl 量が最も多い人工海水の試料において、試料中の Cl 濃度が最も低い結果が得られたことから、人工海水浸漬後試料では Cl の浸透抑制があったものと考えられる。なお、1/10 人工海水浸漬後試料のみ、Cl の浸透が外周のマスキング面でも確認されている。この試料ではマスキングの効果が低かった可能性が考えられるものの、Ca 溶脱部、S 高濃度部は特異な分布を示しておらず、これらの成分変化を受けた鉱物変質への影響は小さいと考えられる。

BFSC70 でも FAC30 と同様の結果となった。Cl の浸透領域は浸漬液の希釈倍率に関わらず約 10 mm と同じ深度であったが、Cl の濃度は、1/10 人工海水浸漬後試料が最も高く、次いで 1/100 人工海水浸漬後試料、人工海水浸漬後試料において試料中の Cl 濃度が最も低い結果が得られた。

以上の様に、セメント種類、浸漬液の希釈倍率に関わらず Ca 溶脱部と同領域の S 高濃度部が確認された。また、Cl の浸透部は Ca 溶脱部以深で高く、その他の成分の変化は限定的であった。

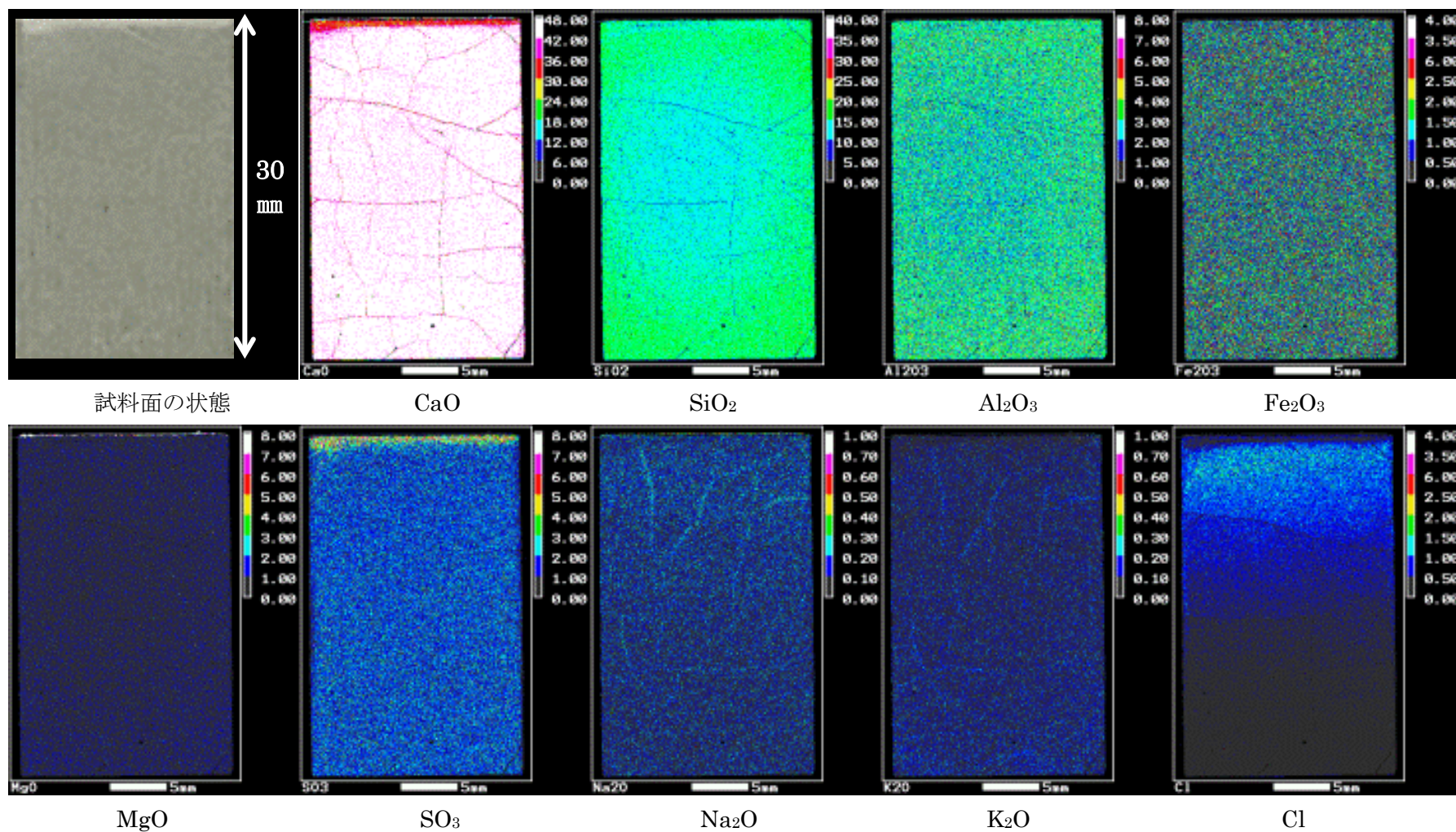


図 2.1-8 EPMA 測定結果 (OPC-45、人工海水：外観変化なし)

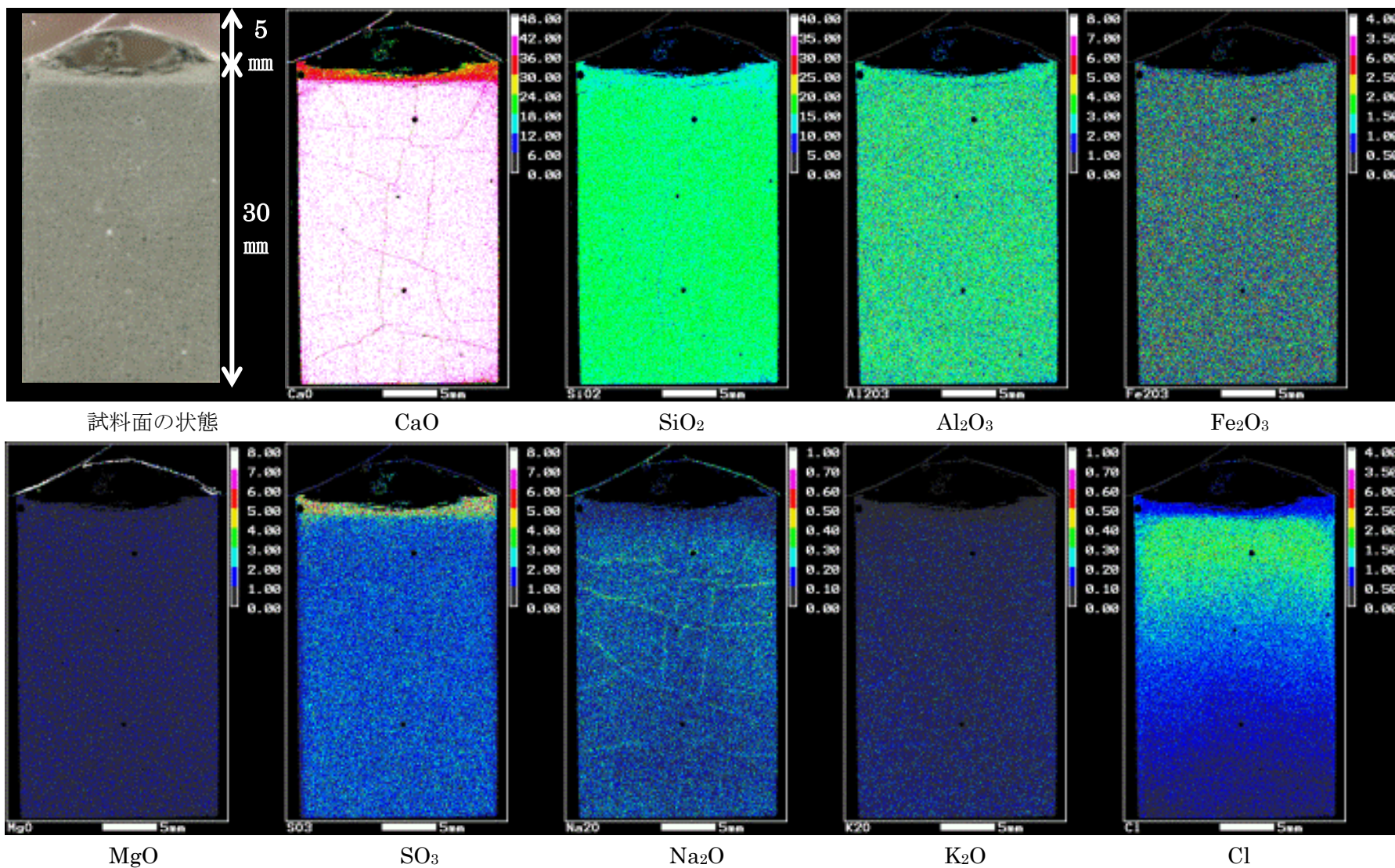


図 2.1-9 EPMA 測定結果 (OPC-45、人工海水：外観変化あり)

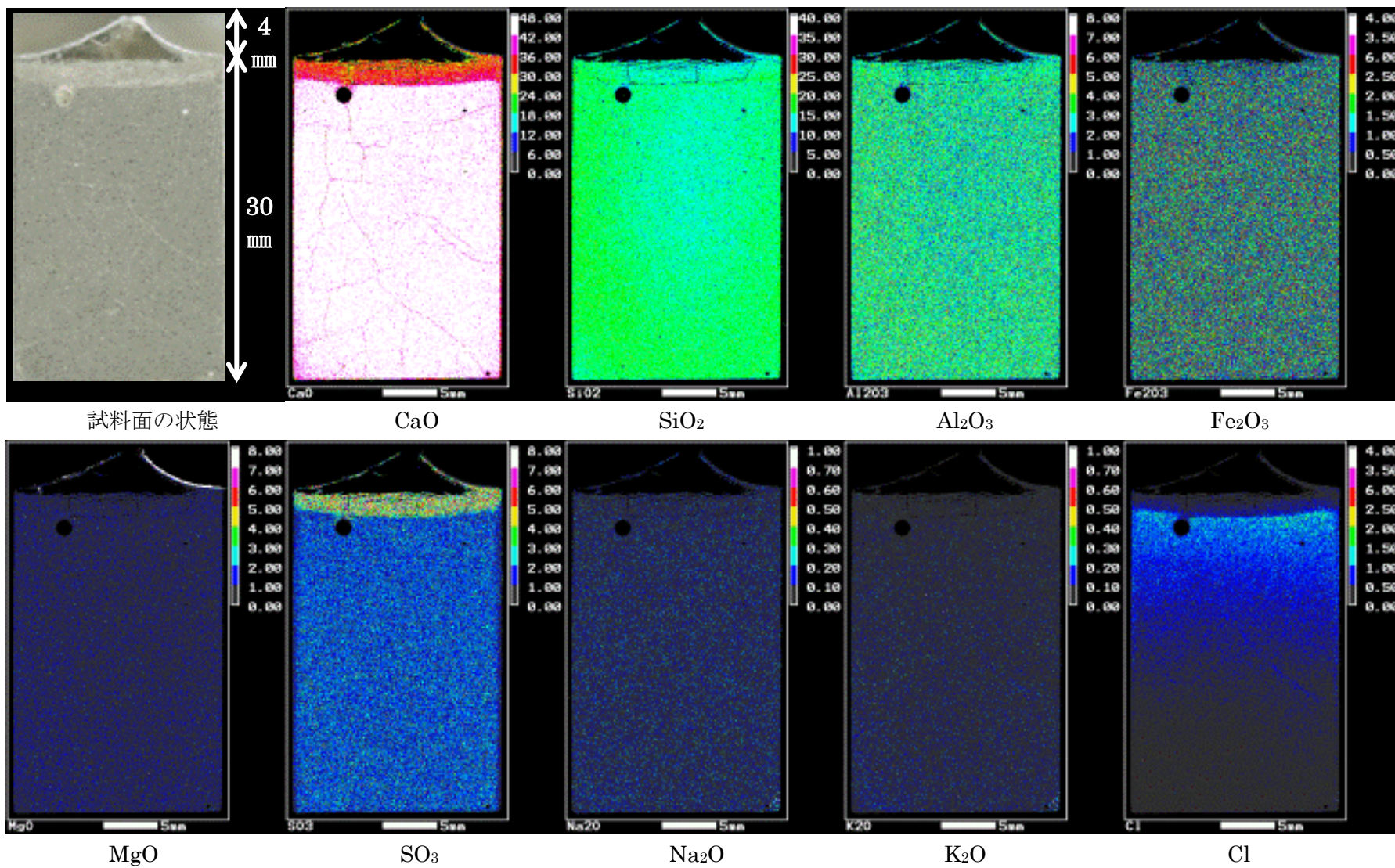


図 2.1-10 EPMA 測定結果 (OPC-45、1/10 人工海水 : 外観変化あり)

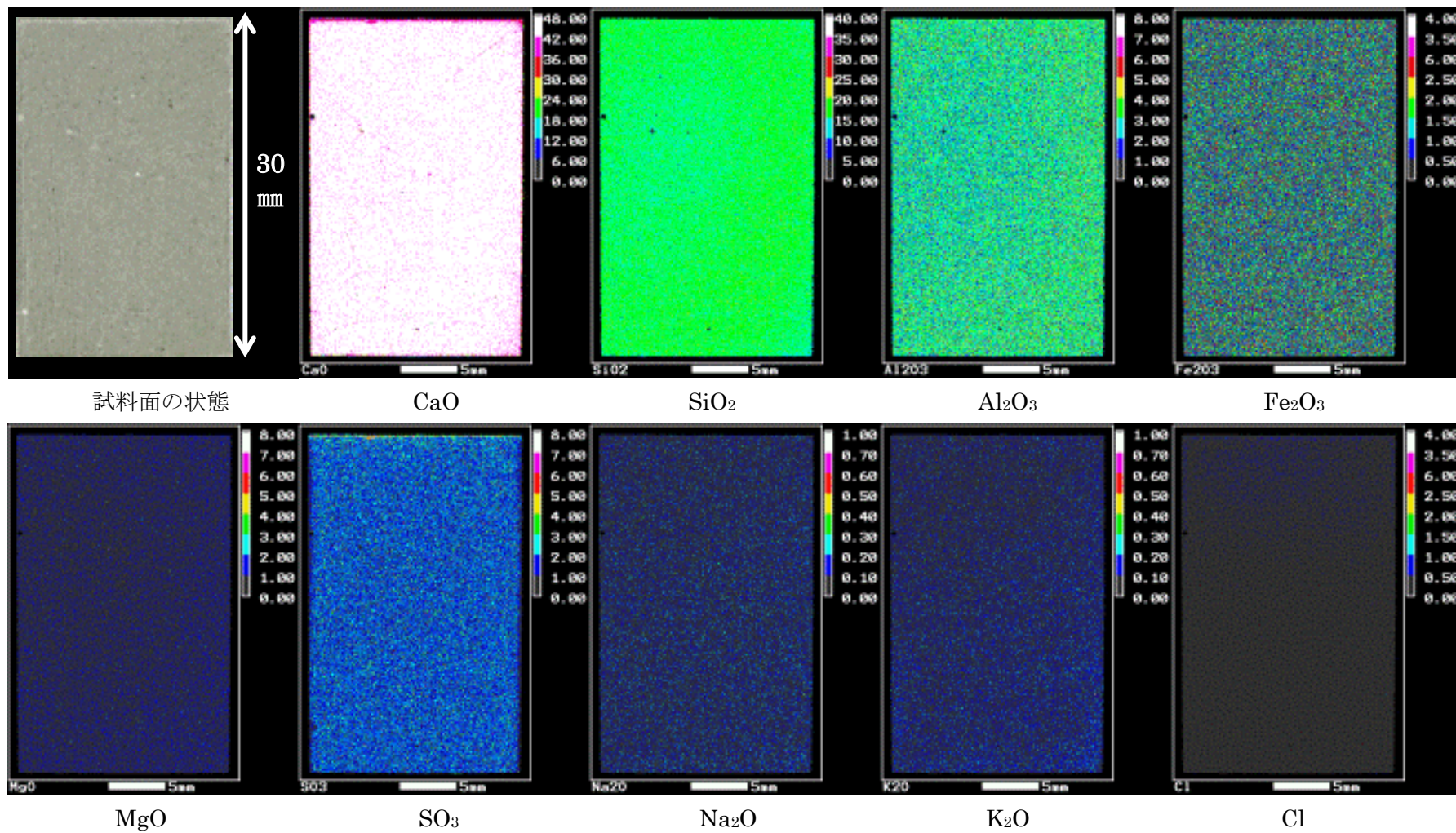


図 2.1-11 EPMA 測定結果 (OPC-45、1/100 人工海水 : 外観変化なし)

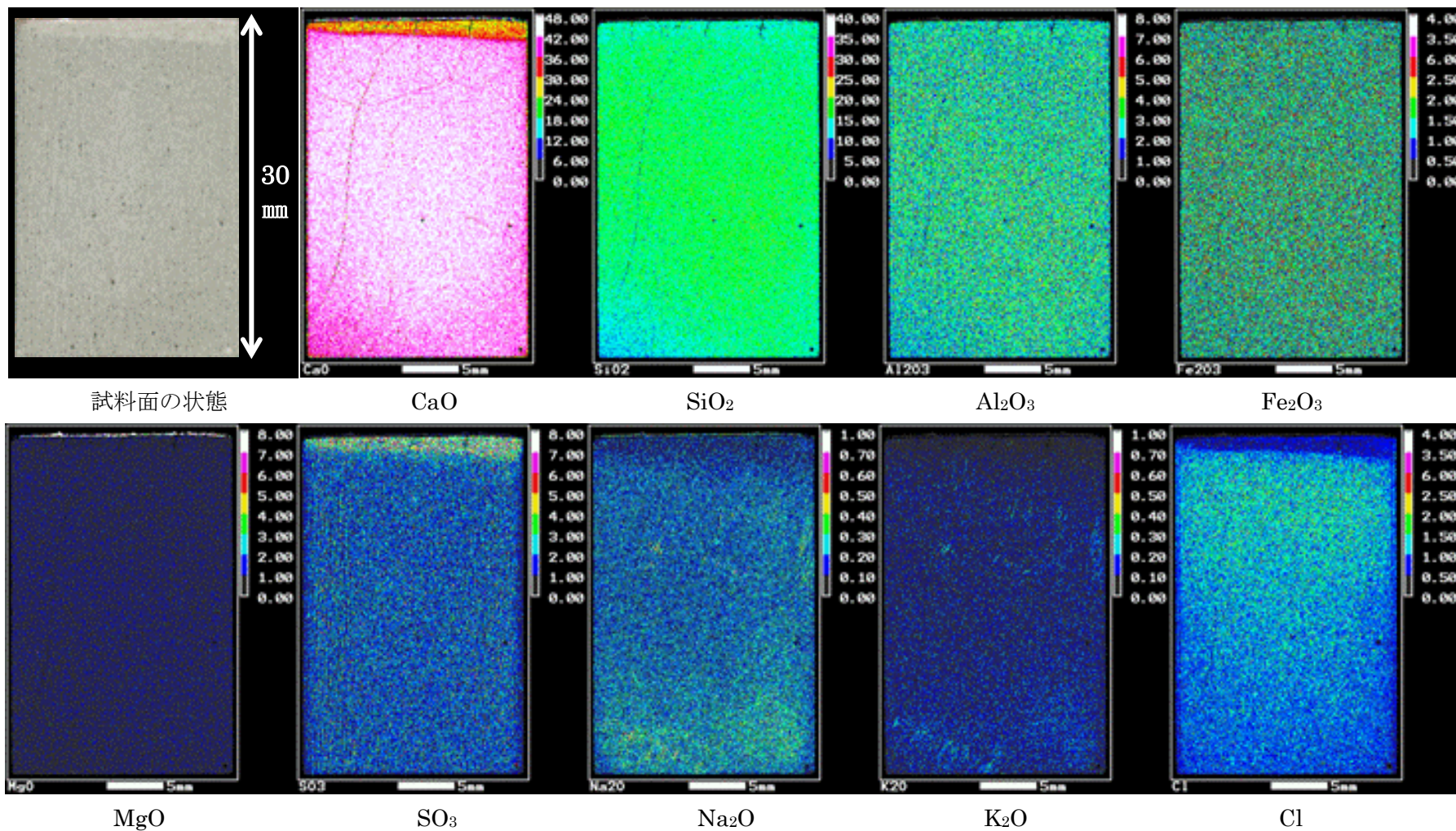


図 2.1-12 EPMA 測定結果 (OPC-60、人工海水：外観変化なし)

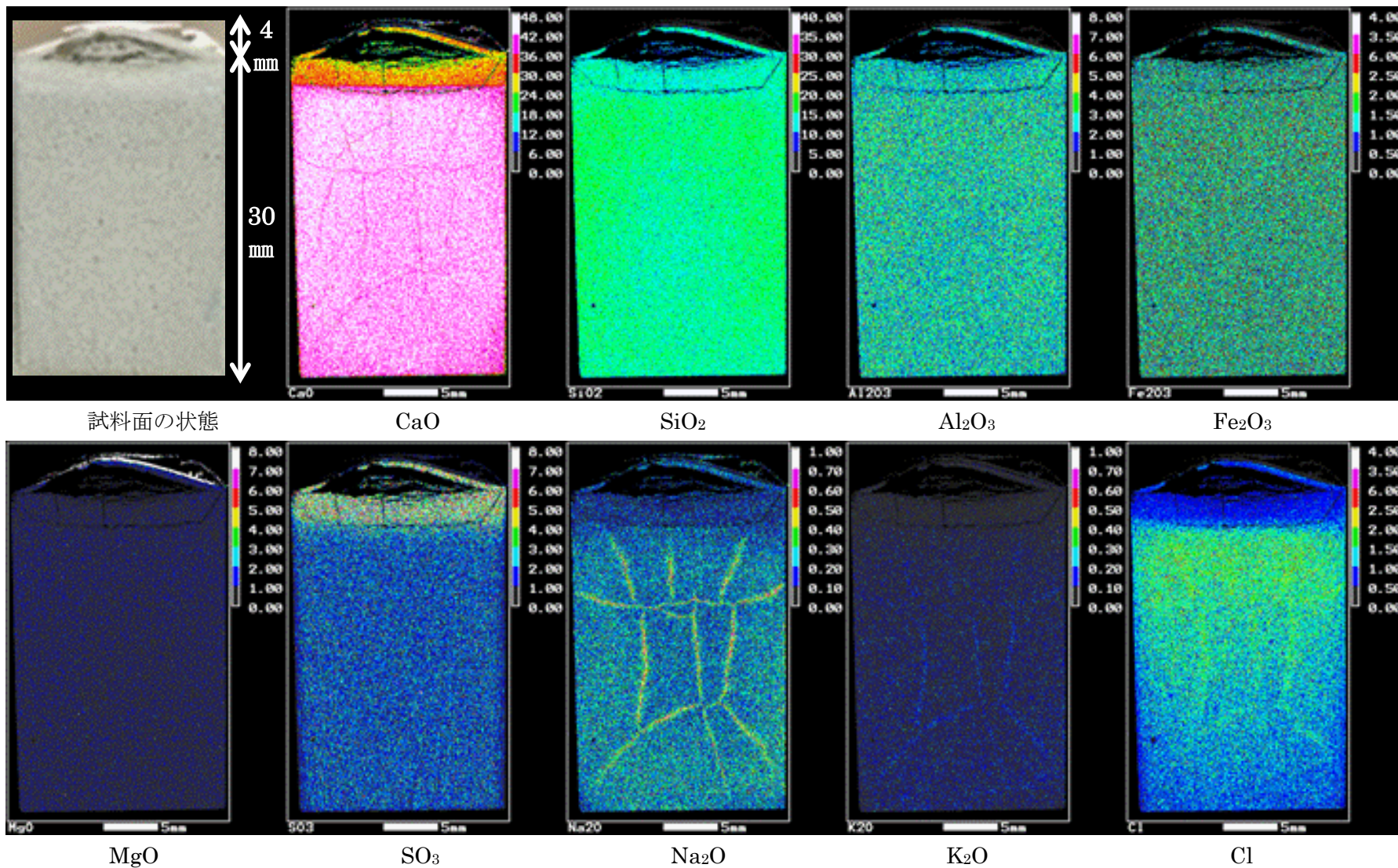


図 2.1-13 EPMA 測定結果 (OPC-60、人工海水：外観変化あり)

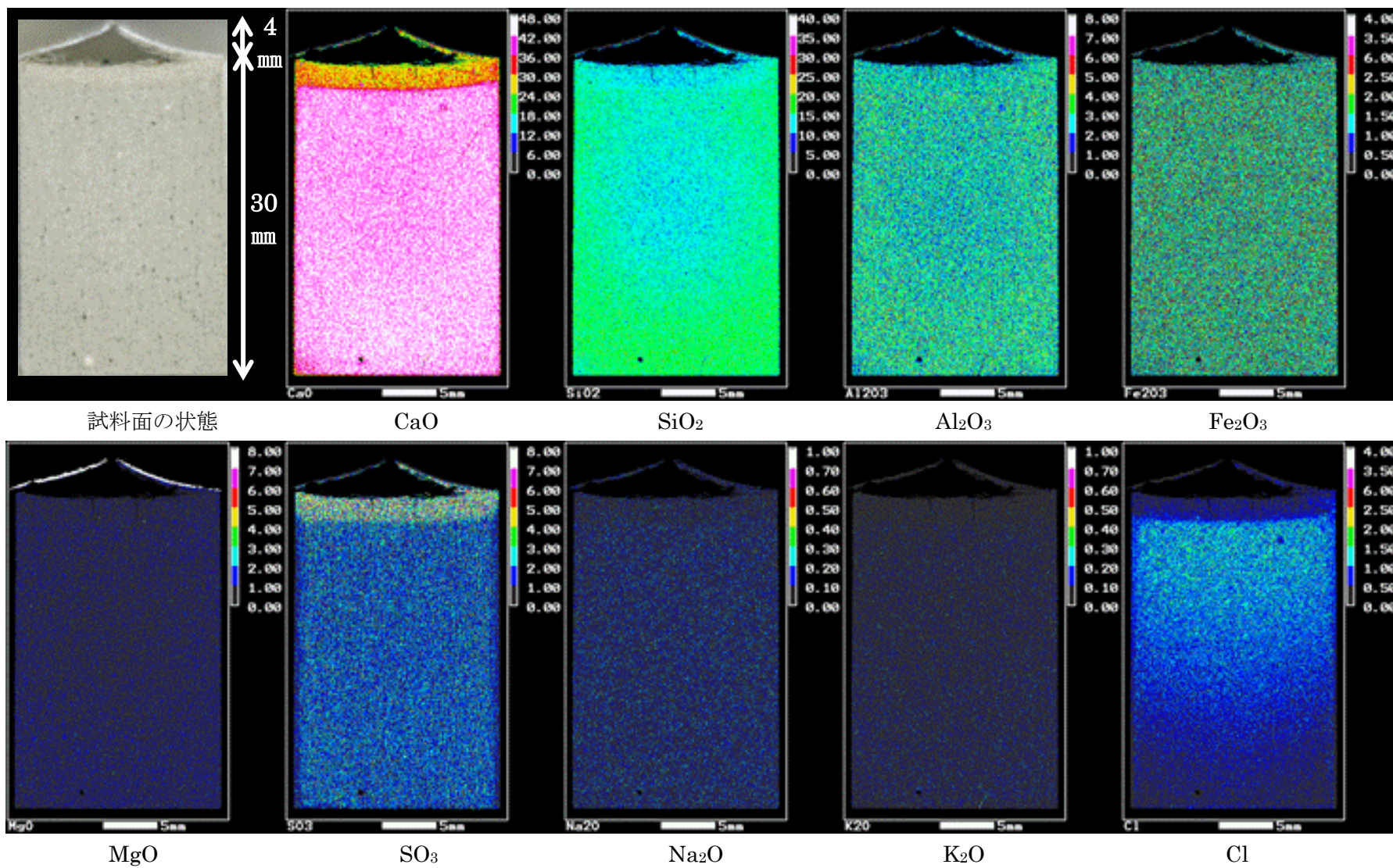


図 2.1-14 EPMA 測定結果 (OPC-60、1/10 人工海水 : 外観変化あり)

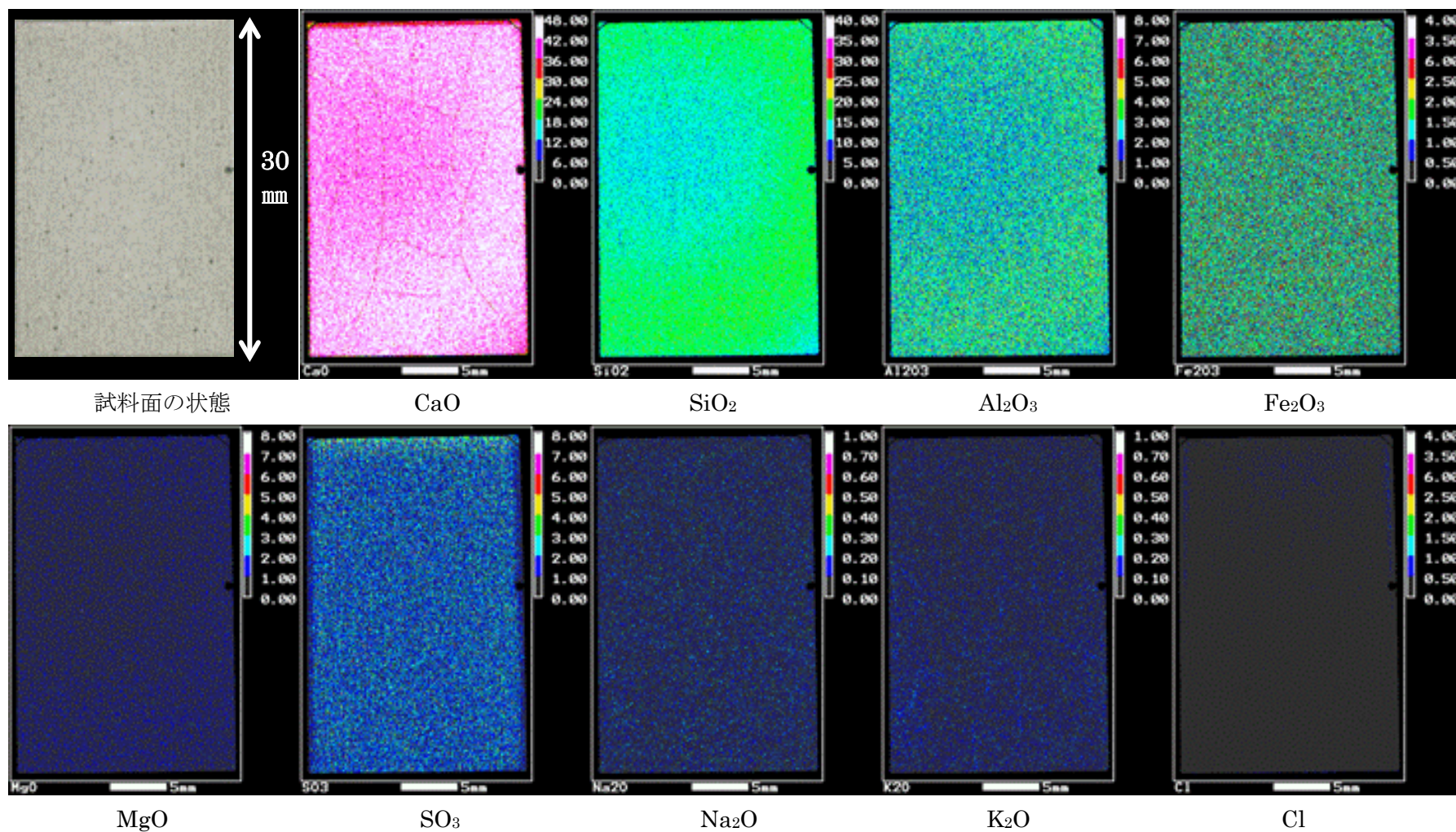


図 2.1-15 EPMA 測定結果 (OPC-60、1/100 人工海水：外観変化なし)

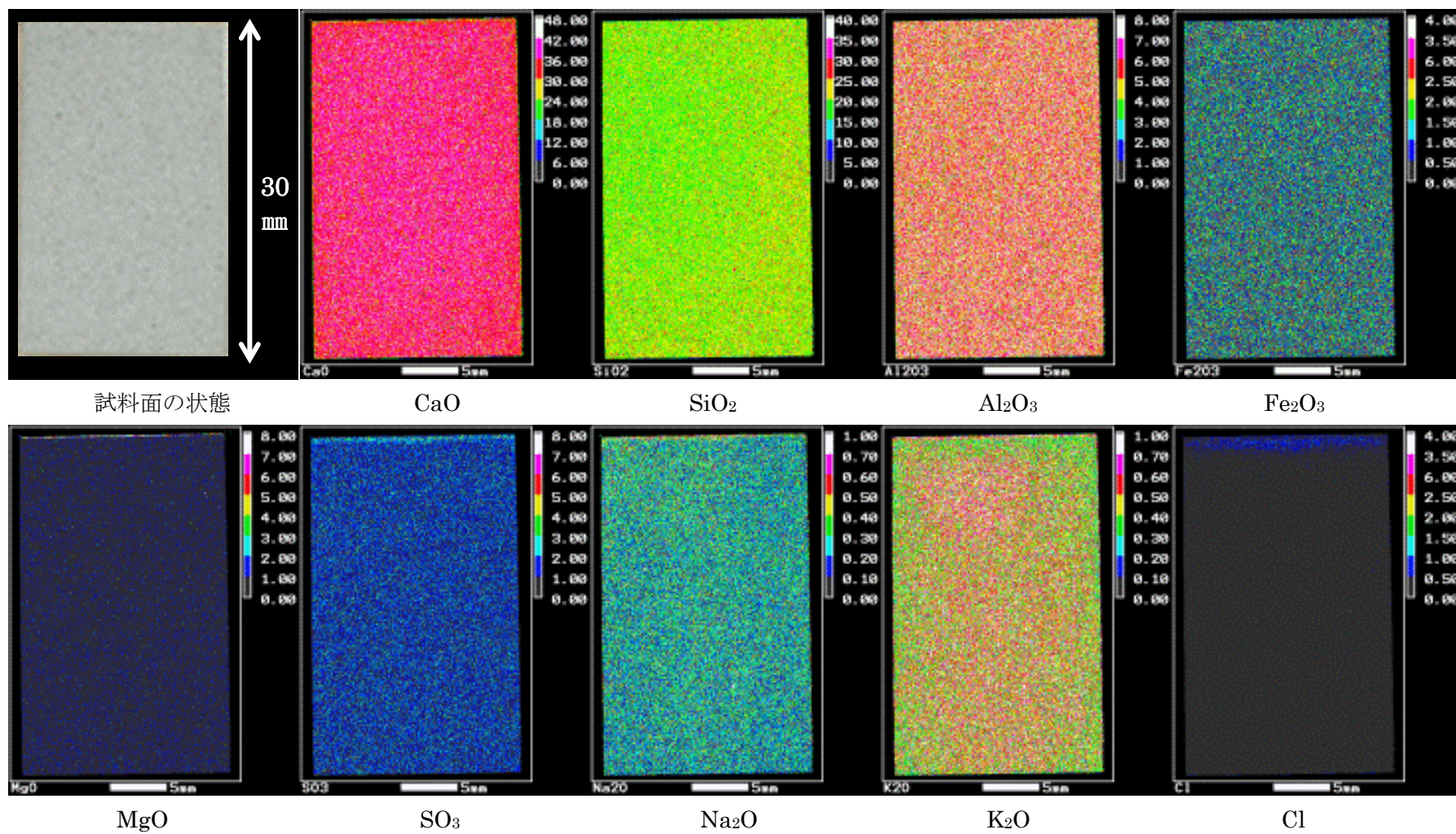


図 2.1-16 EPMA 測定結果 (FAC30、人工海水：外観変化なし)

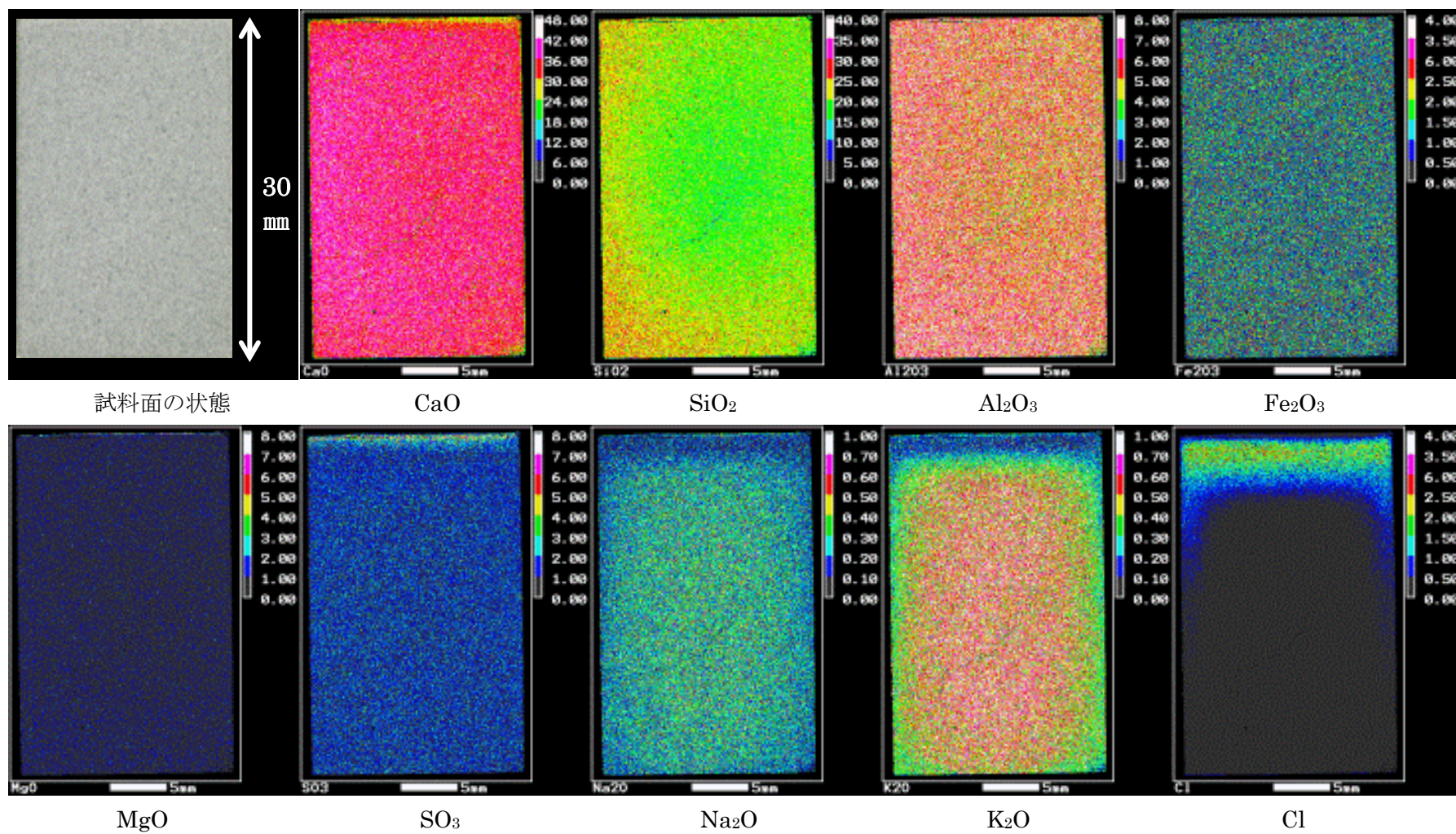


図 2.1-17 EPMA 測定結果 (FAC30、1/10 人工海水 : 外観変化なし)

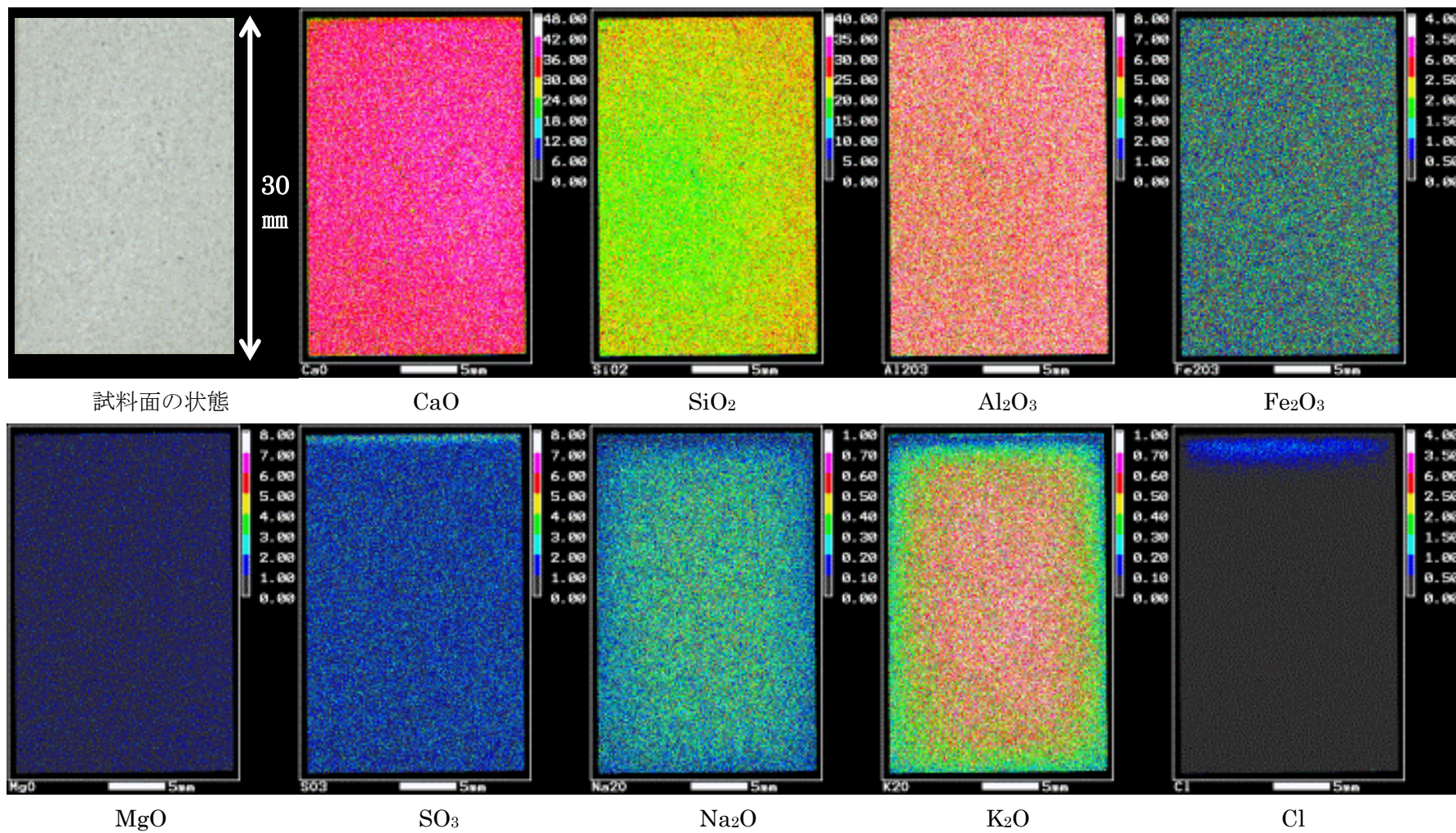


図 2.1-18 EPMA 測定結果 (FAC30、1/100 人工海水 : 外観変化なし)

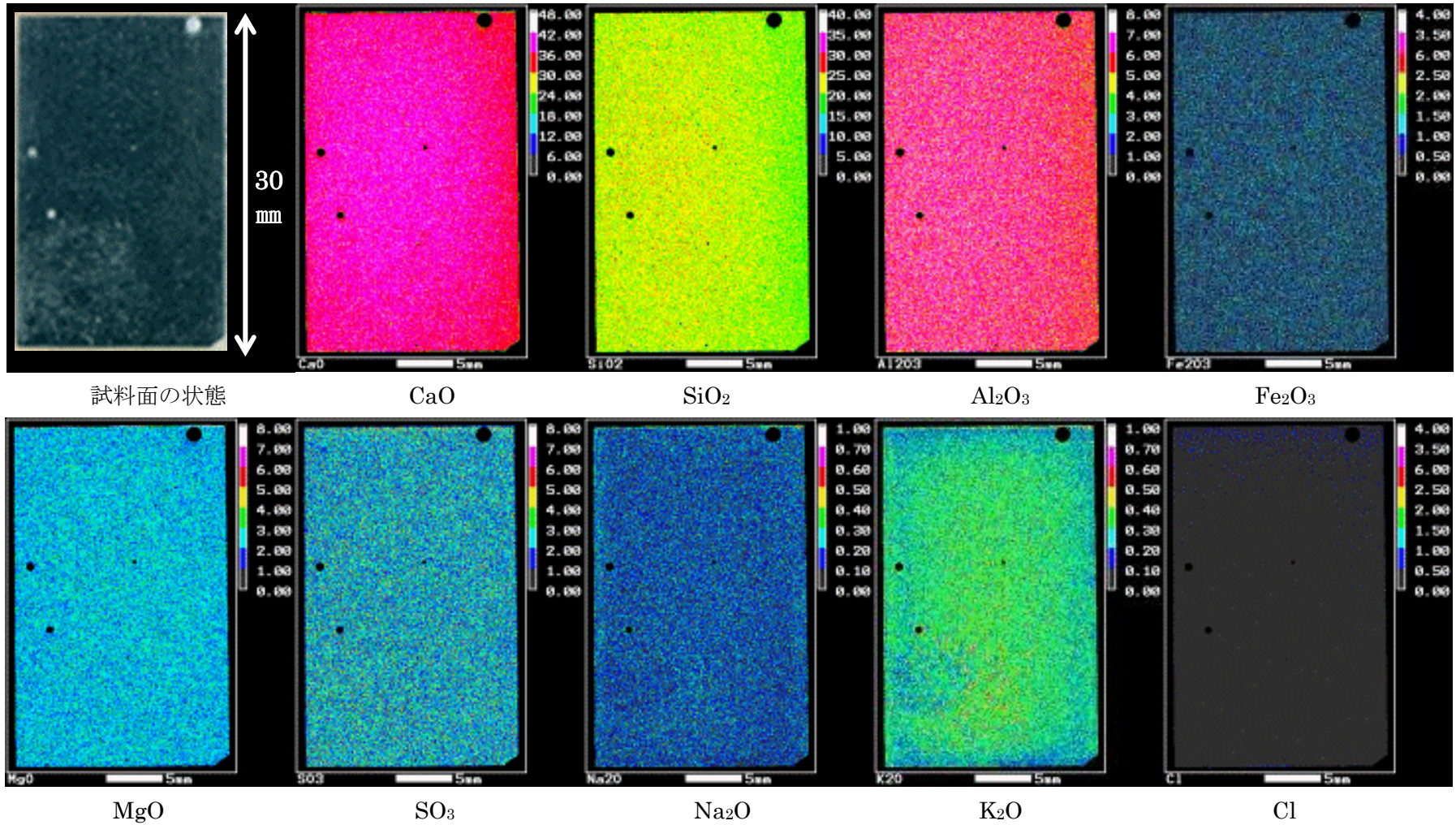


図 2.1-19 EPMA 測定結果 (BFSC70、人工海水：外観変化なし)

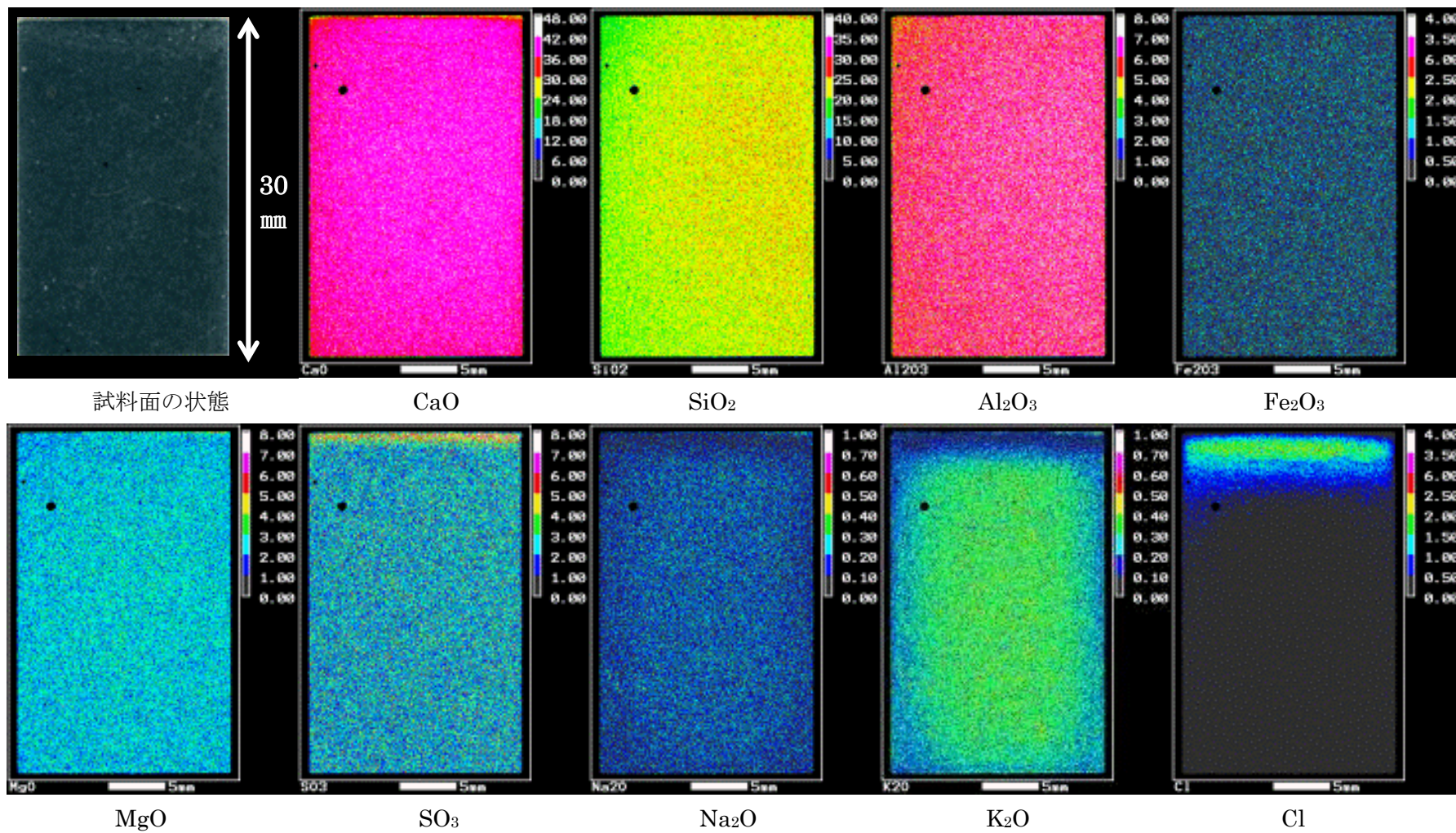


図 2.1-20 EPMA 測定結果 (BFSC70、1/10 人工海水 : 外観変化なし)

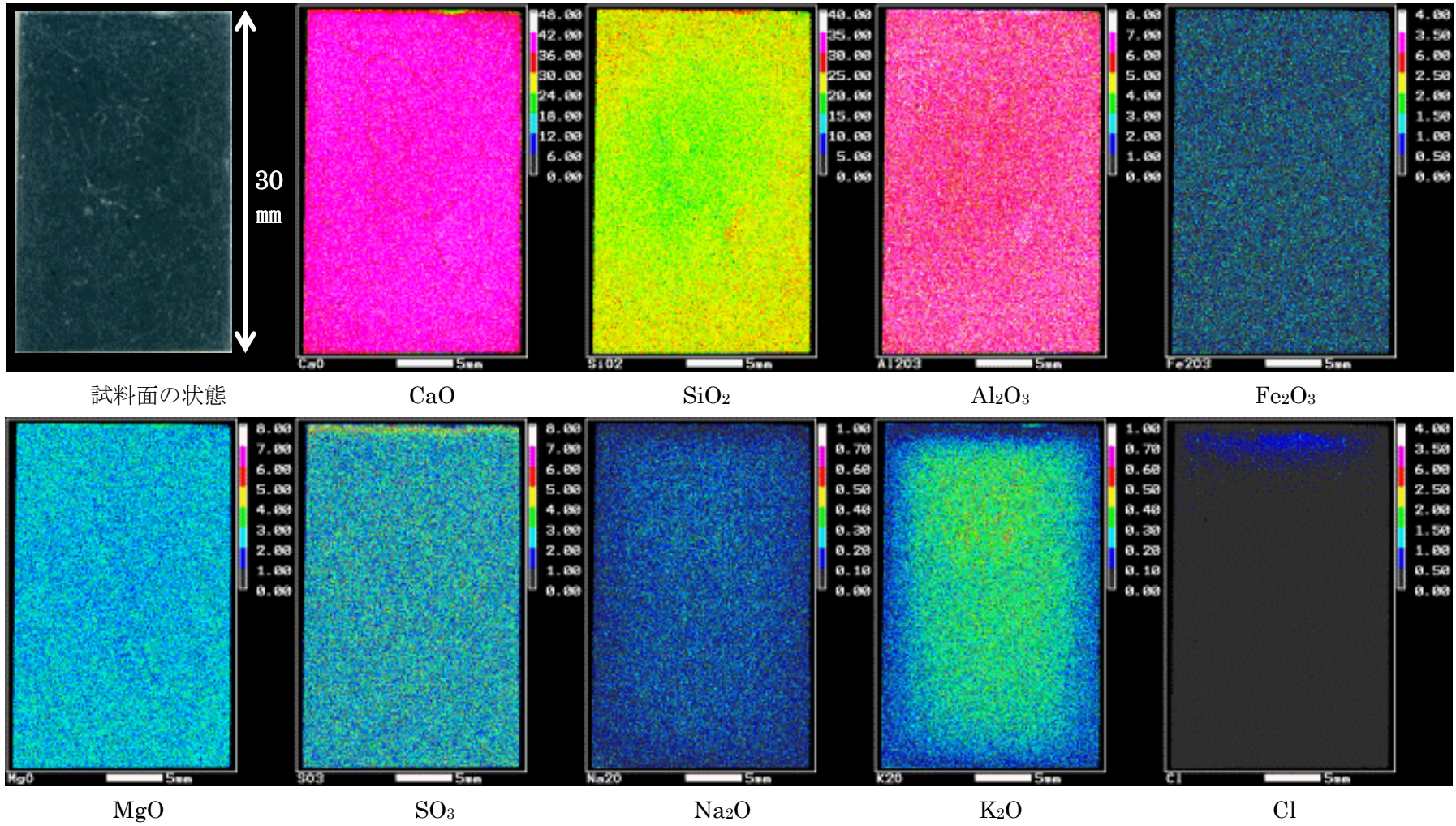


図 2.1-21 EPMA 測定結果 (BFSC70、1/100 人工海水 : 外観変化なし)

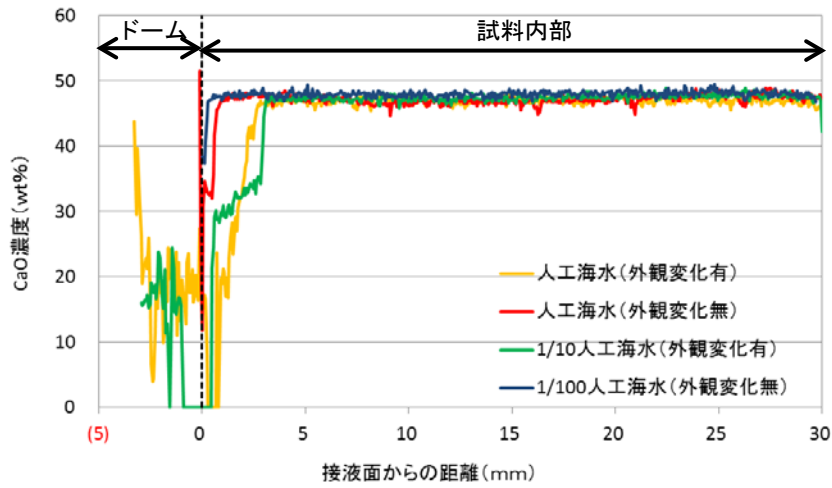


図 2.1-22 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-45 : CaO)

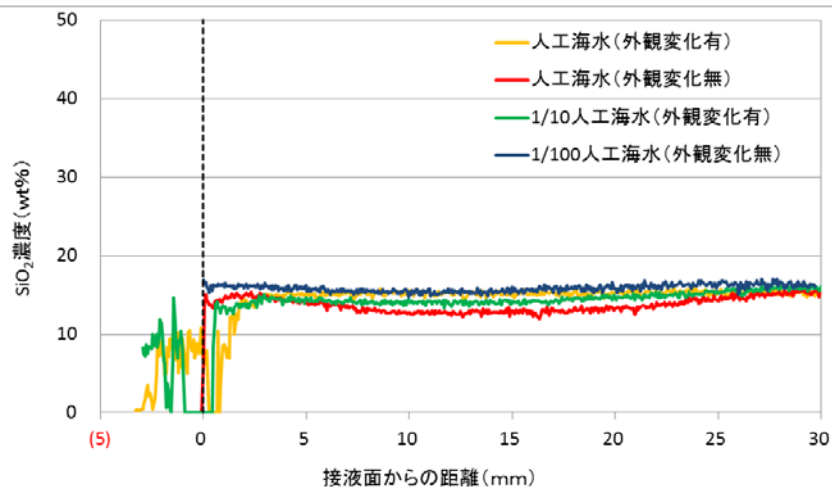


図 2.1-23 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-45 : SiO₂)

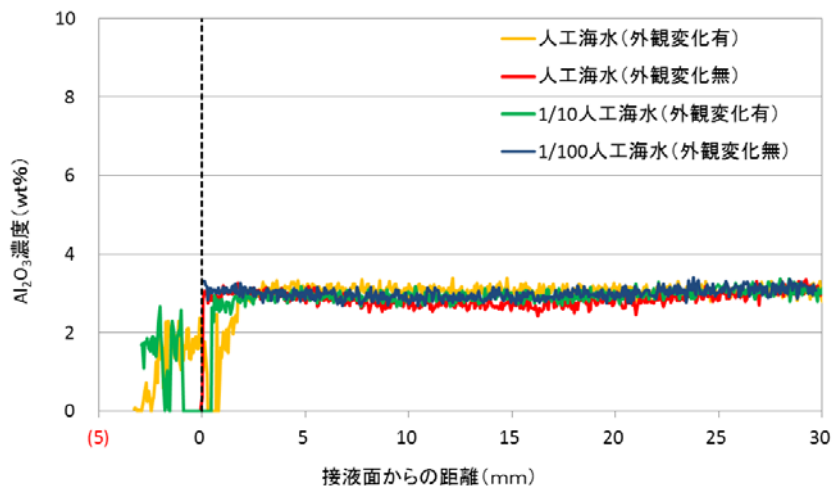


図 2.1-24 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-45 : Al₂O₃)

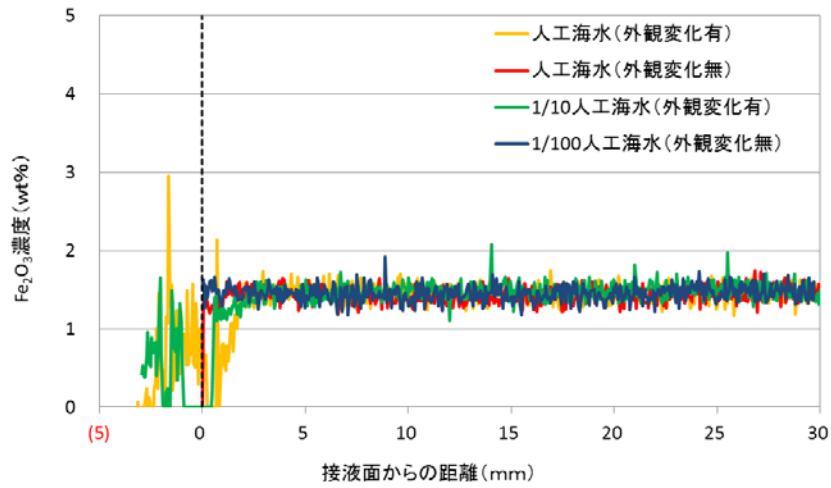


図 2.1-25 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-45 : Fe₂O₃)

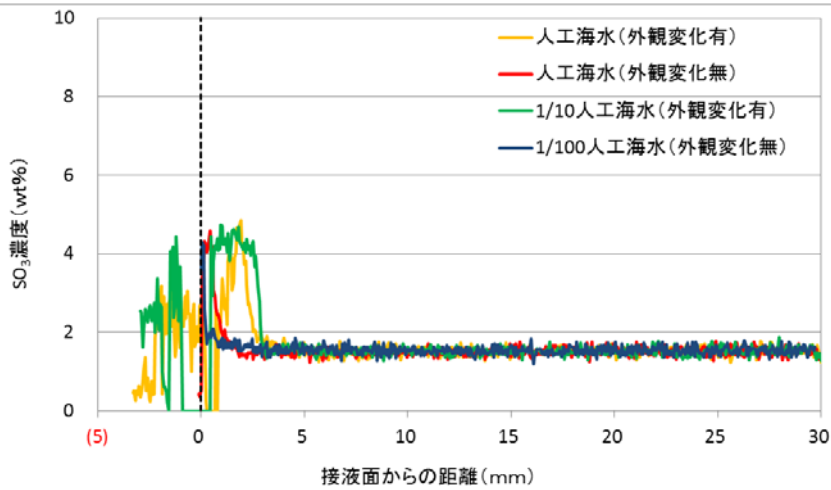


図 2.1-26 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-45 : SO₃)

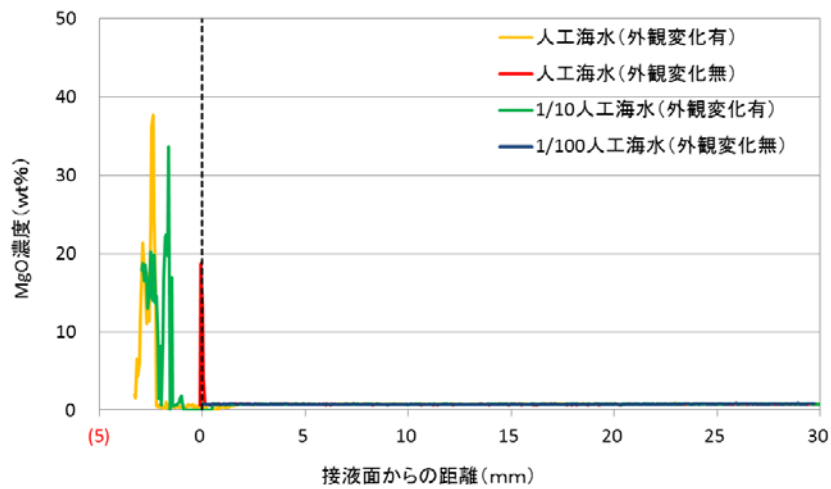


図 2.1-27 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-45 : MgO)

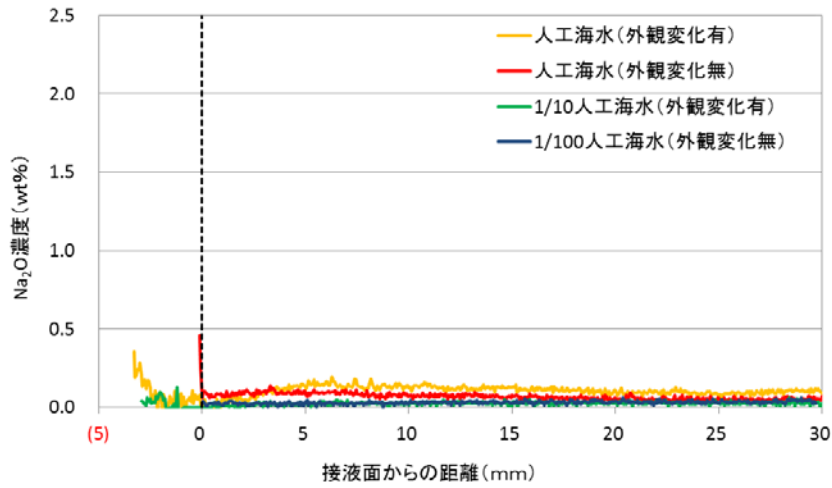


図 2.1-28 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-45 : Na₂O)

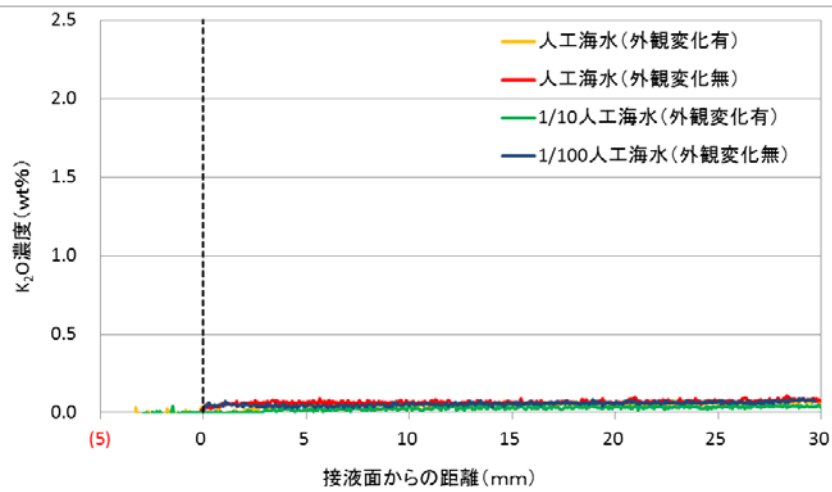


図 2.1-29 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-45 : K₂O)

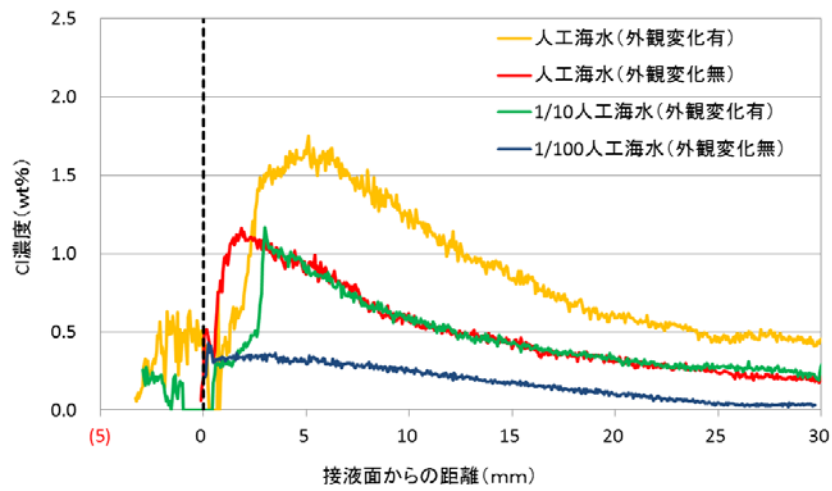


図 2.1-30 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-45 : Cl)

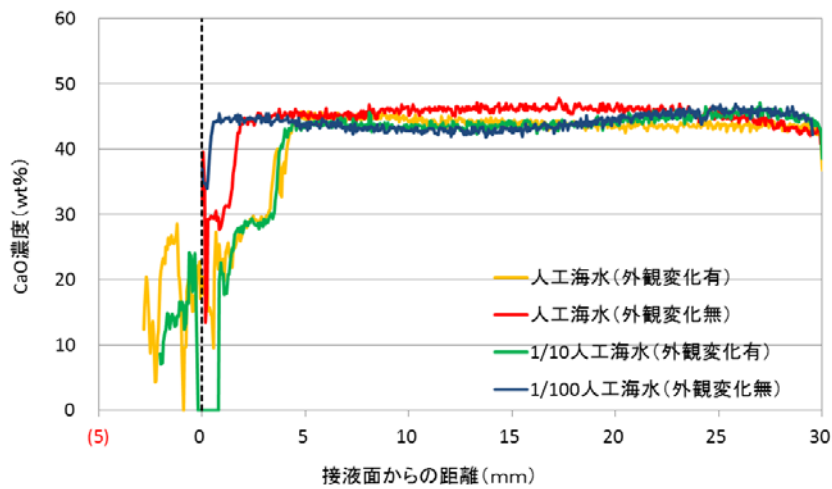


図 2.1-31 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-60 : CaO)

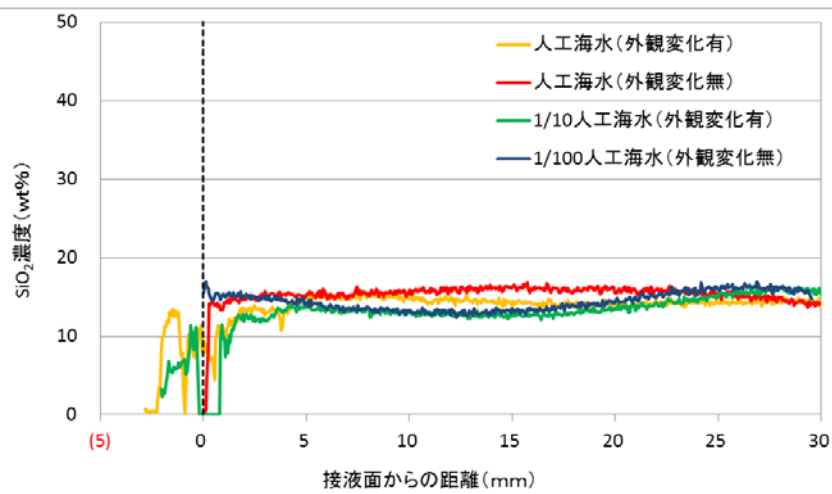


図 2.1-32 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-60 : SiO₂)

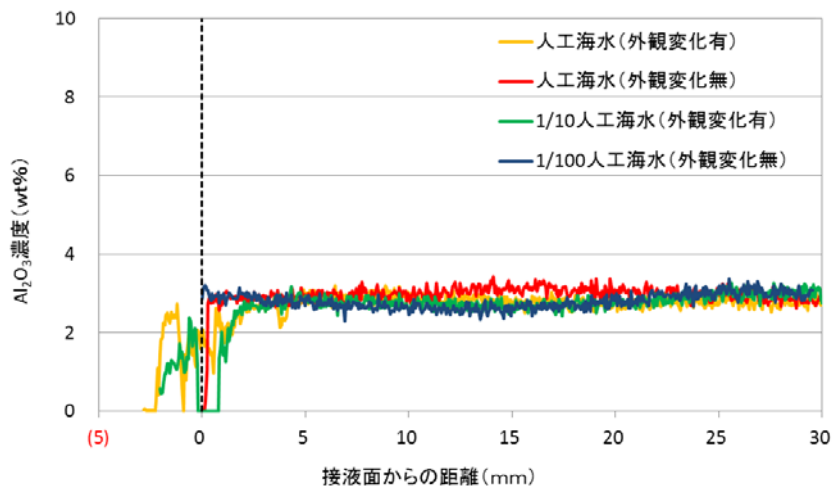


図 2.1-33 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-60 : Al₂O₃)

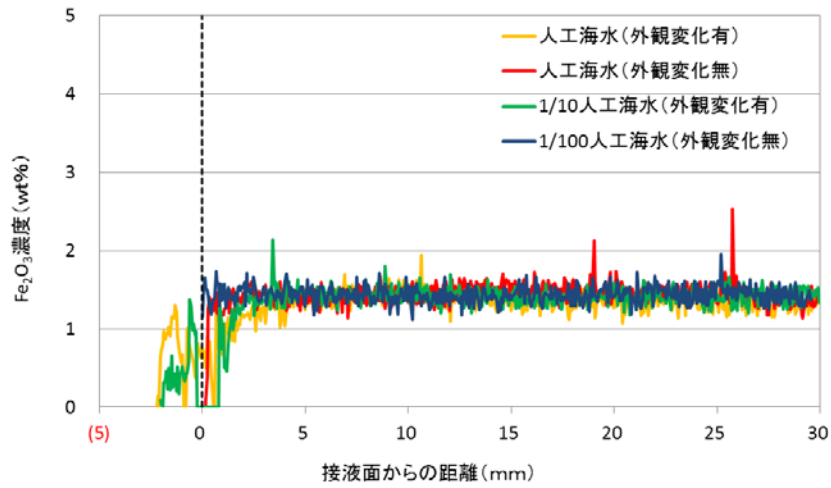


図 2.1-34 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-60 : Fe₂O₃)

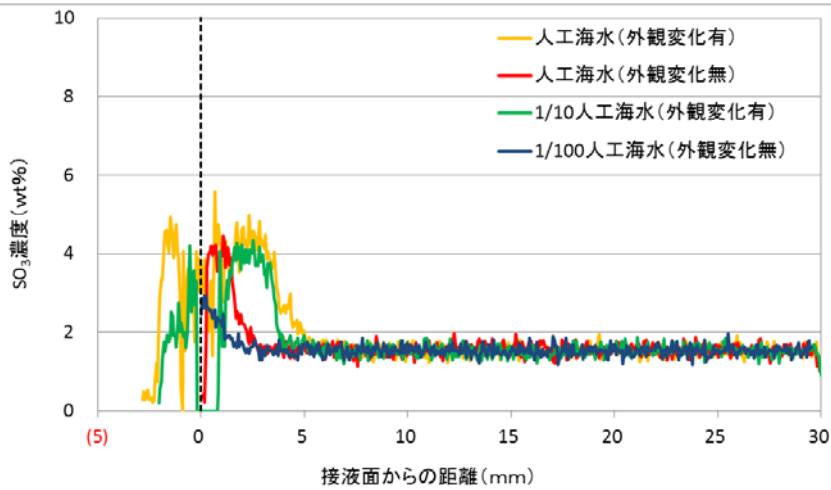


図 2.1-35 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-60 : SO₃)

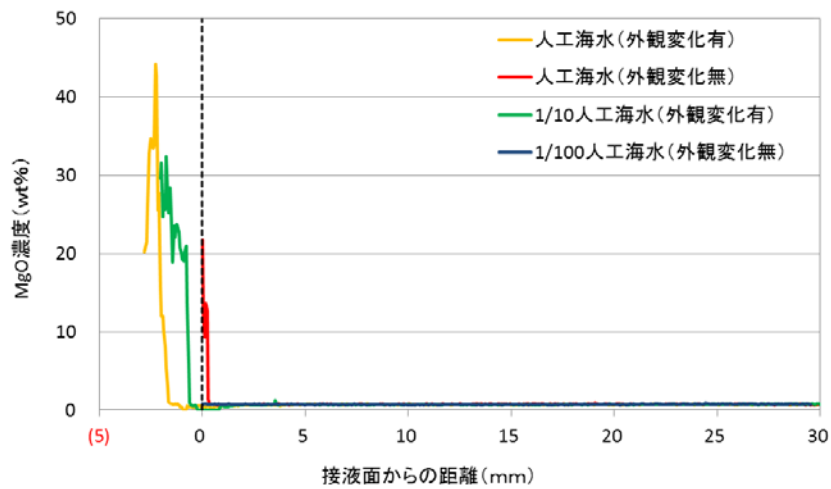


図 2.1-36 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-60 : MgO)

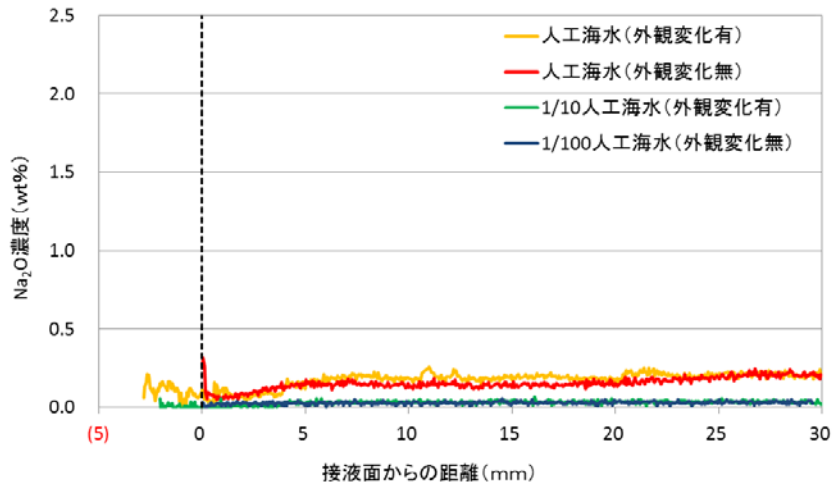


図 2.1-37 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-60 : Na₂O)

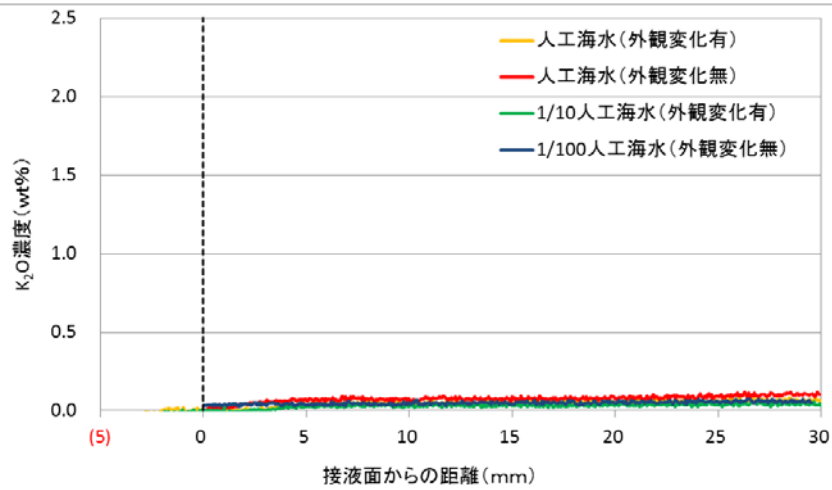


図 2.1-38 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-60 : K₂O)

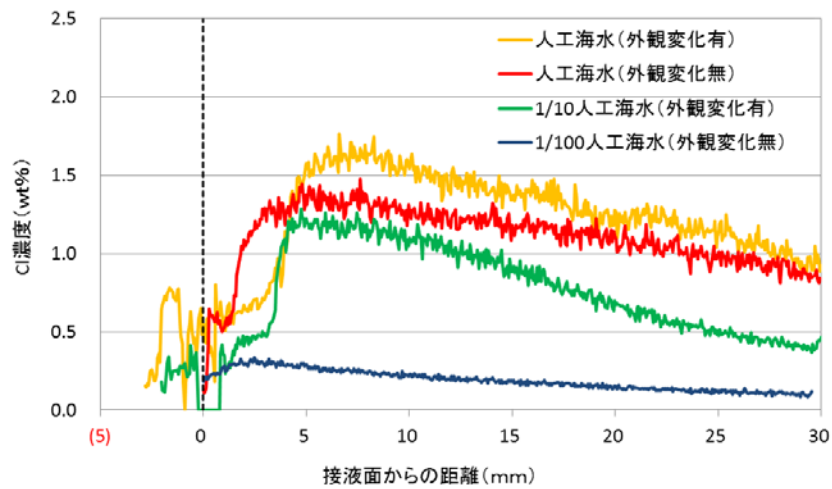


図 2.1-39 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (OPC-60 : Cl)

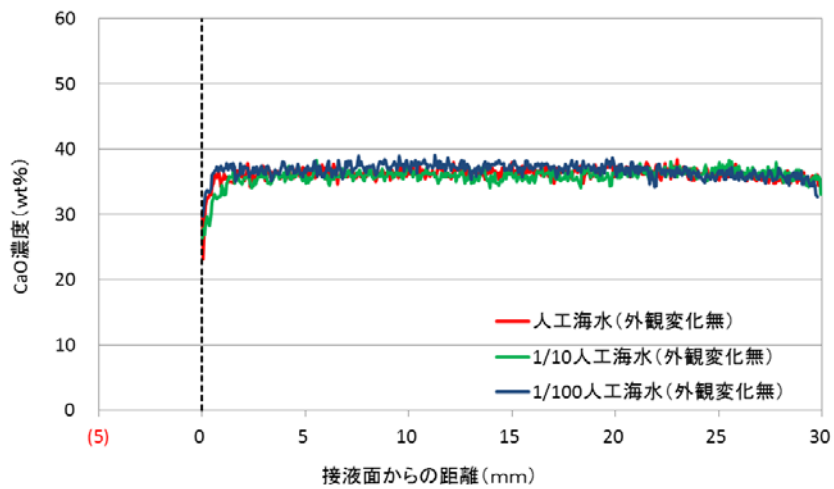


図 2.1-40 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (FAC30 : CaO)

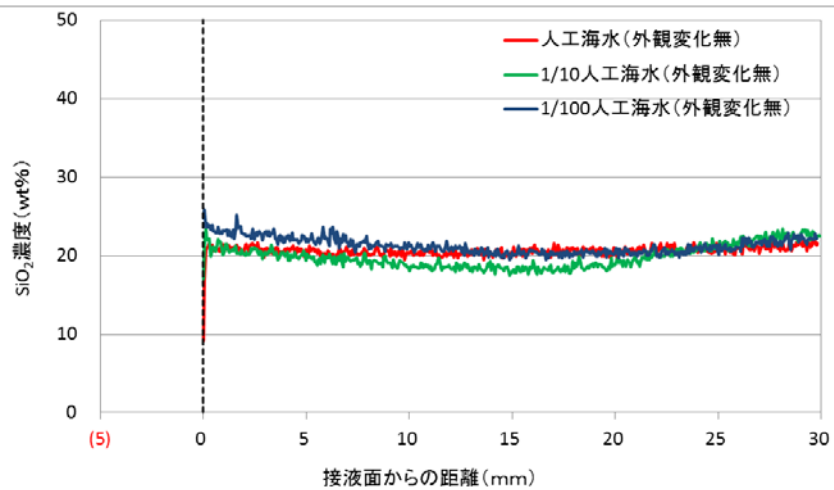


図 2.1-41 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (FAC30 : SiO₂)

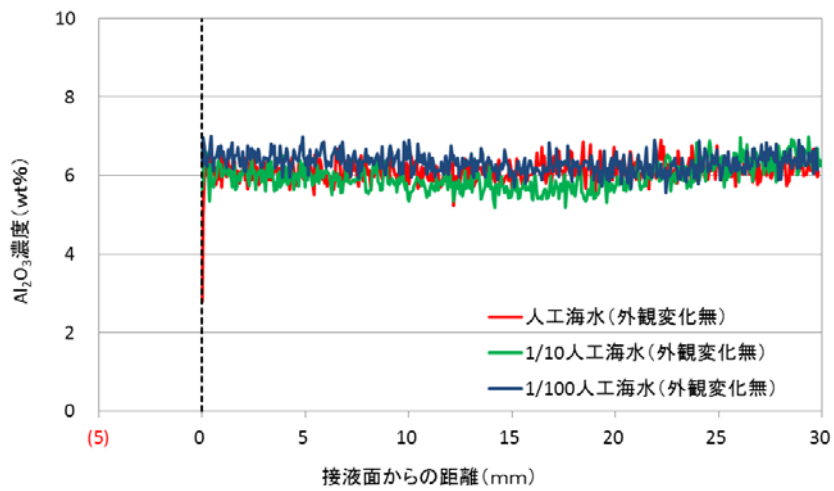


図 2.1-42 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (FAC30 : Al₂O₃)

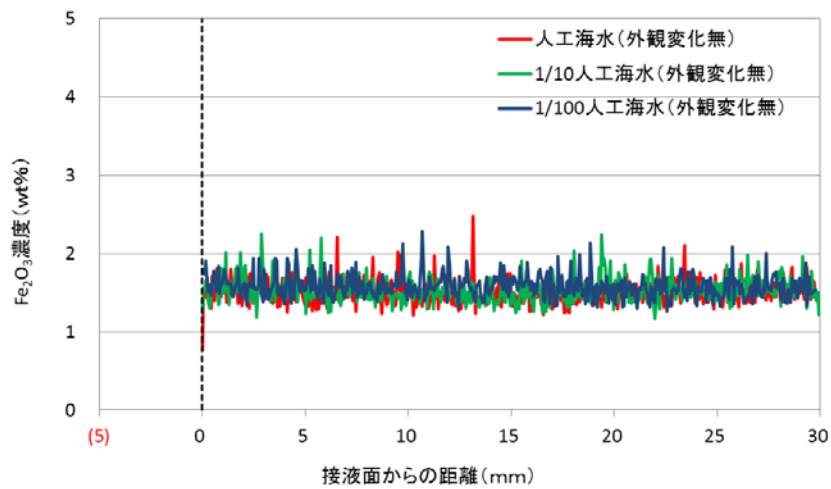


図 2.1-43 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (FAC30 : Fe₂O₃)

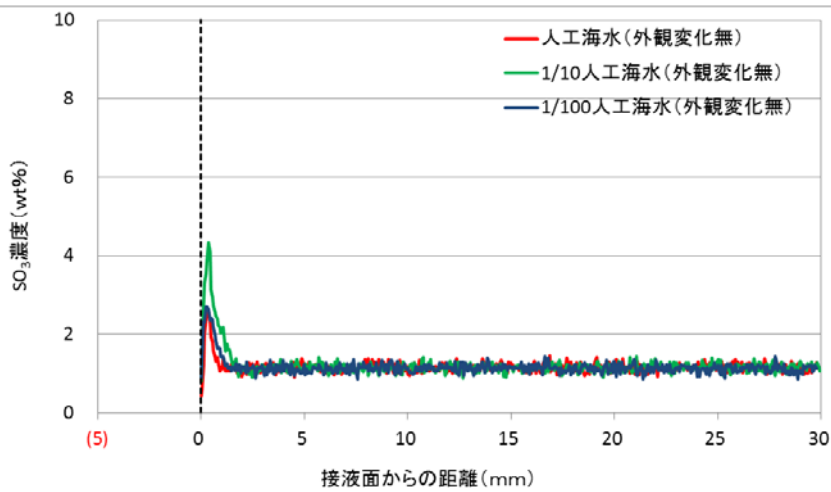


図 2.1-44 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (FAC30 : SO₃)

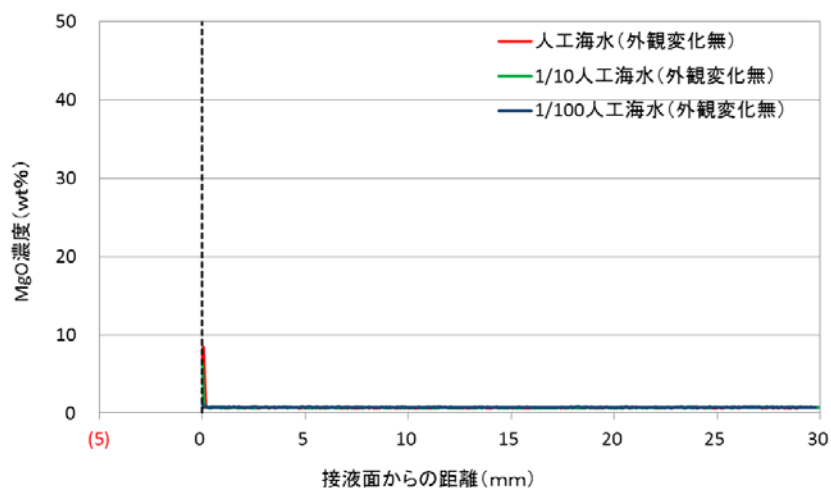


図 2.1-45 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (FAC30 : MgO)

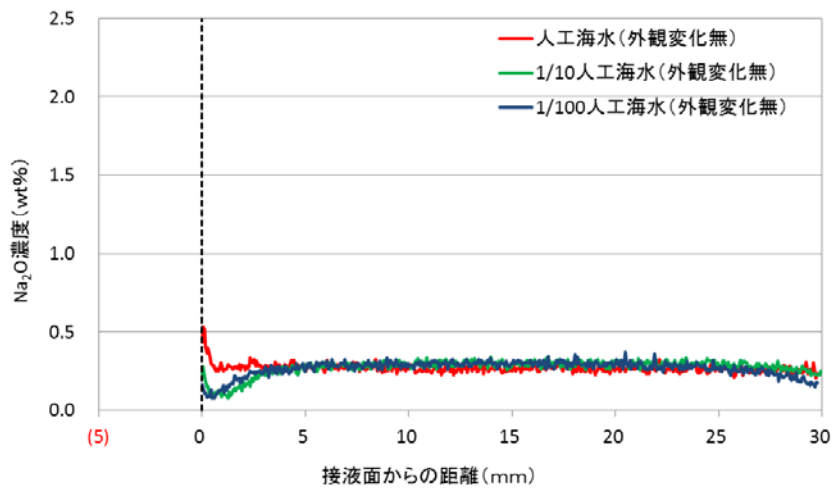


図 2.1-46 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (FAC30 : Na₂O)

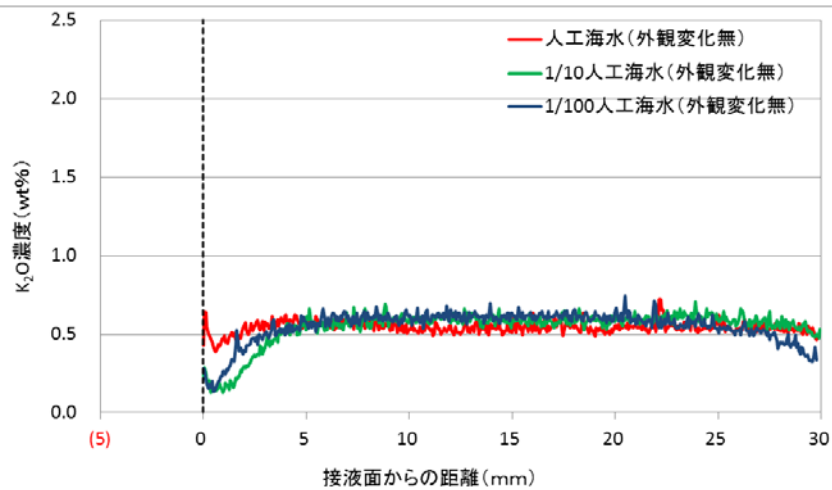


図 2.1-47 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (FAC30 : K₂O)

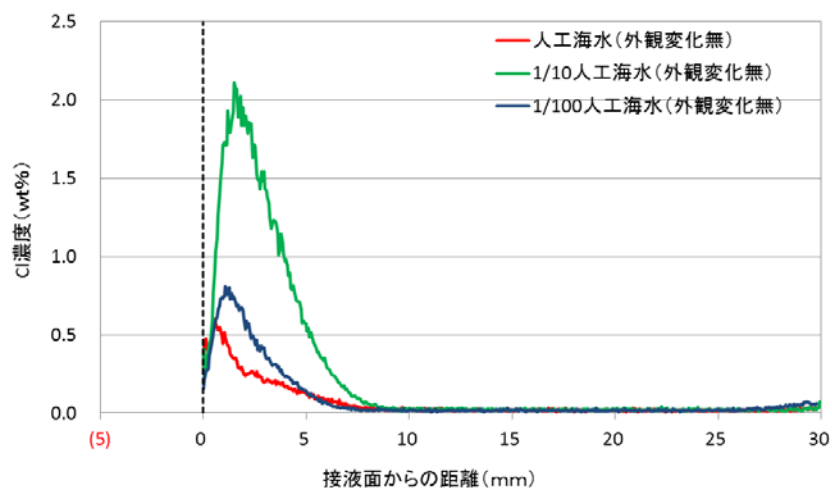


図 2.1-48 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (FAC30 : Cl)

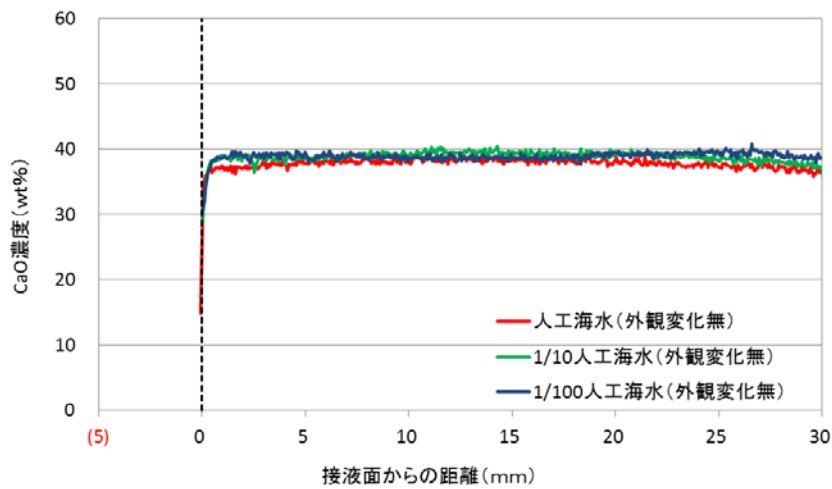


図 2.1-49 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (BFSC70 : CaO)

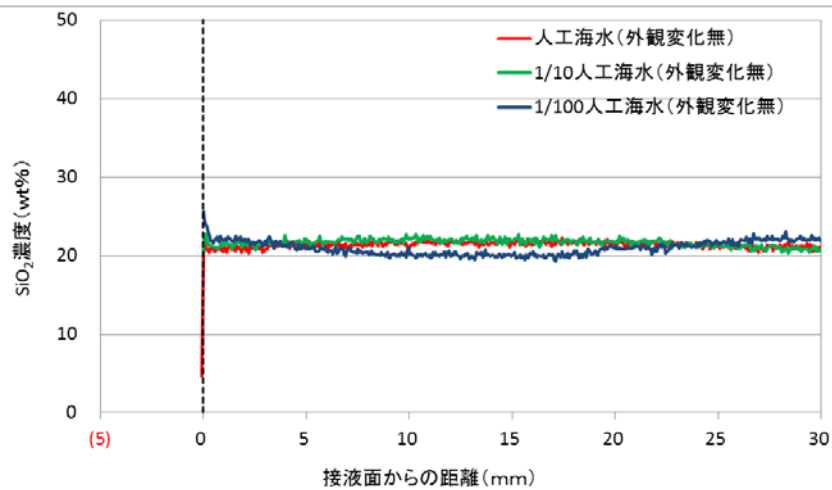


図 2.1-50 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (BFSC70 : SiO₂)

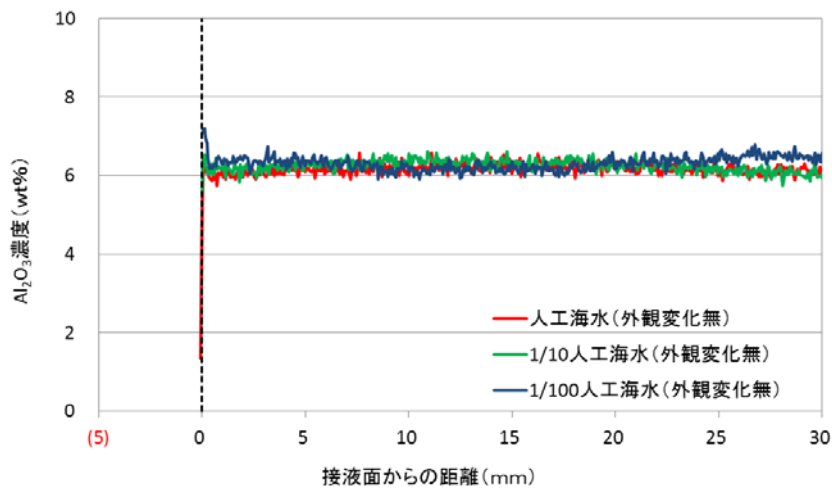


図 2.1-51 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (BFSC70 : Al₂O₃)

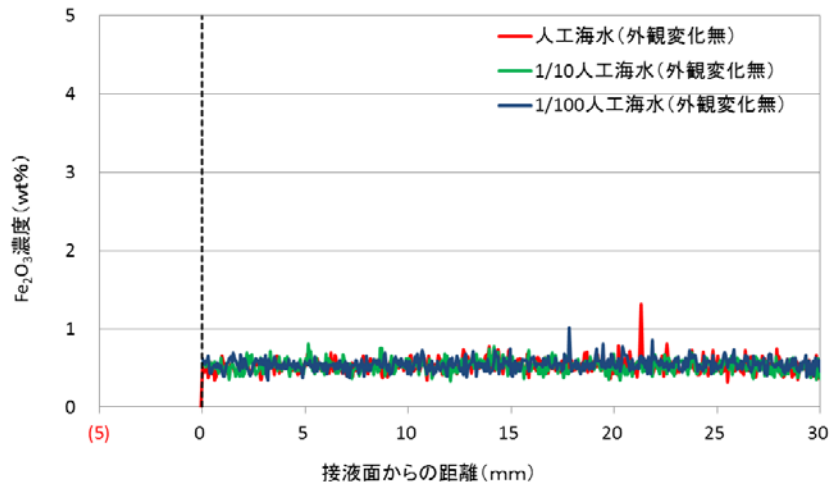


図 2.1-52 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (BFSC70 : Fe₂O₃)

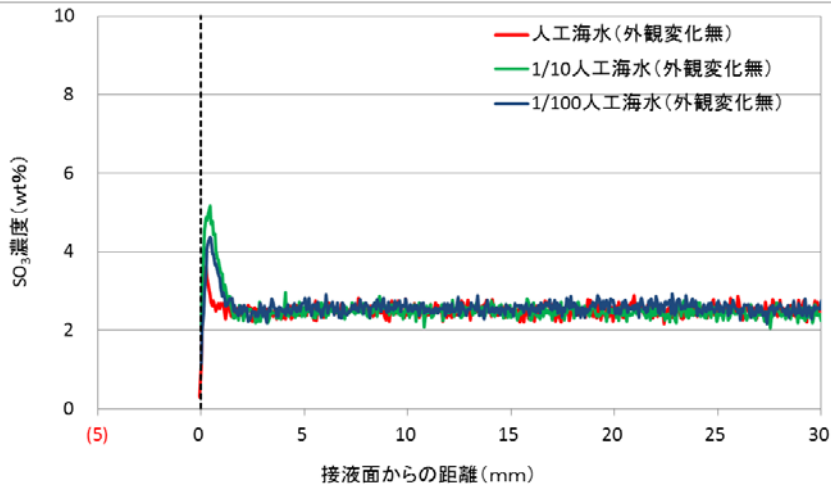


図 2.1-53 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (BFSC70 : SO₃)

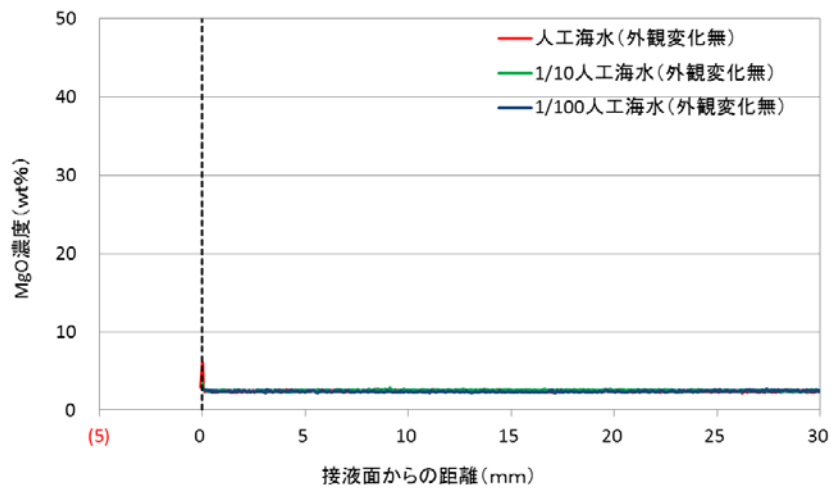


図 2.1-54 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (BFSC70 : MgO)

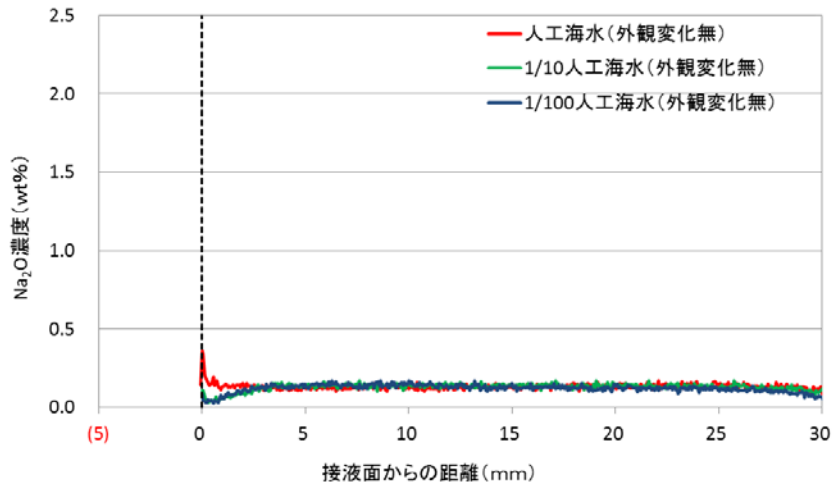


図 2.1-55 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (BFSC70 : Na₂O)

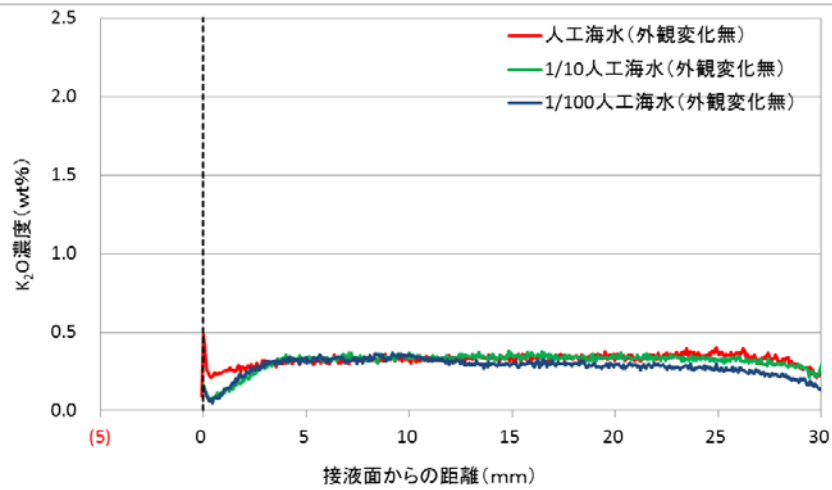


図 2.1-56 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (BFSC70 : K₂O)

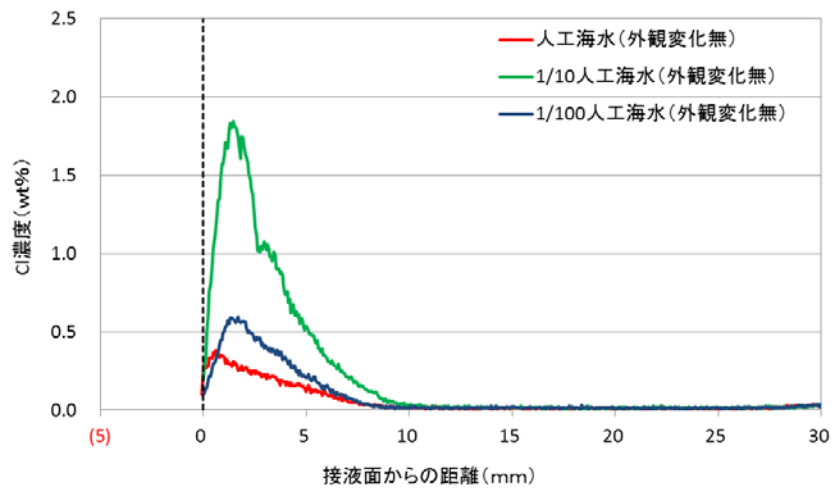


図 2.1-57 EPMA 測定値の平均濃度プロファイル (BFSC70 : Cl)

3) EPMA 結果を参考に選定した各測定位置の決定

SEM 像観察、マイクロビッカース硬度の測定は微小領域の分析であるため、試料面全域の測定が可能な EPMA とは異なり、分析位置をあらかじめ選定する必要がある。また、同様に XRD 測定では、試料を分割加工し粉末状に調製する性質上、分取位置を選定する必要がある。本試験では、EPMA 測定の組成分布の結果と加工断面の状態を参考に、SEM 像観察、マイクロビッカース硬度の測定、XRD 測定の実施位置を決定した。各測定位置を表 2.1-5 と図 2.1-58 に示す。

OPC-45、OPC-60 の人工海水浸漬後試料では、接液面にドーム状の部位が形成した試料とドームを形成しない試料が確認されている。前述のようにこのドーム形成は本試験の条件に起因し実際の処分場環境では起こる可能性が低いと考えられる事、また、ドームの生成の有無に関係なく溶脱する成分及び沈殿する成分は同じであった事を鑑み、OPC-45、OPC-60 の人工海水では、ドームを形成しない試料を分析対象とした。ただし、OPC-45、OPC-60 の 1/10 人工海水では、全ての試料がドームを形成しているため、ドームを形成している試料を分析対象とした。

個々の試料の分析位置は EPMA 組成分布を指標に選定した。EPMA の測定結果で特異な分布が見られた成分は Ca、S、Cl であり、Ca 溶脱部と S 高濃度部は同一深度であることが確認されている。この部位を「溶脱部」とした。溶脱部以深の領域では Cl の浸透が確認されており、この部位を「Cl 浸透部」とした。これら固相成分の溶脱や海水成分の浸透が顕著に確認できる部位の比較部位として、健全部もしくは、健全部に相当する部位も必要であるため、本試験では試料中央部から最端部にかけての領域を比較部位として選定した。ただし、一部の試料では最端部まで Cl の浸透が確認されていることから、厳密には健全部ではない。この健全部相当の部位を「深層部」とした。なお、表中の赤字記載がある試料の溶脱部は接液面の極表層だけであり、XRD 分析用に分割加工することは困難であるため、これらの試料は溶脱部と Cl 浸透部の一体試料として分取した。

表 2.1-5 EPMA 結果を参考に選定した各測定位置及び測定数

浸漬液	固相の分析位置		OPC-45		OPC-60		FAC30		BFSC70	
			SEM XRD	マイクロ ビッカース	SEM XRD	マイクロ ビッカース	SEM XRD	マイクロ ビッカース	SEM XRD	マイクロ ビッカース
人工海水	変質部	溶脱部	1	1	1	1	1	1	1	1
		Cl 浸透部	1	1	1	1	1	1	1	1
	深層部		1	2	1	2	1	2	1	2
1/10 人工海水	変質部	溶脱部	1	1	1	1	1	1	1	1
		Cl 浸透部	1	1	1	1	1	1	1	1
	深層部		1	2	1	2	1	2	1	2
1/100 人工海水	変質部	溶脱部	1	1	1	1	1	1	1	1
		Cl 浸透部	1	1	1	1	1	1	1	1
	深層部		1	2	1	2	1	2	1	2

赤字：溶脱部が僅で XRD 分析用に分割しない。「溶脱部+Cl 浸透部」の一体部とする。

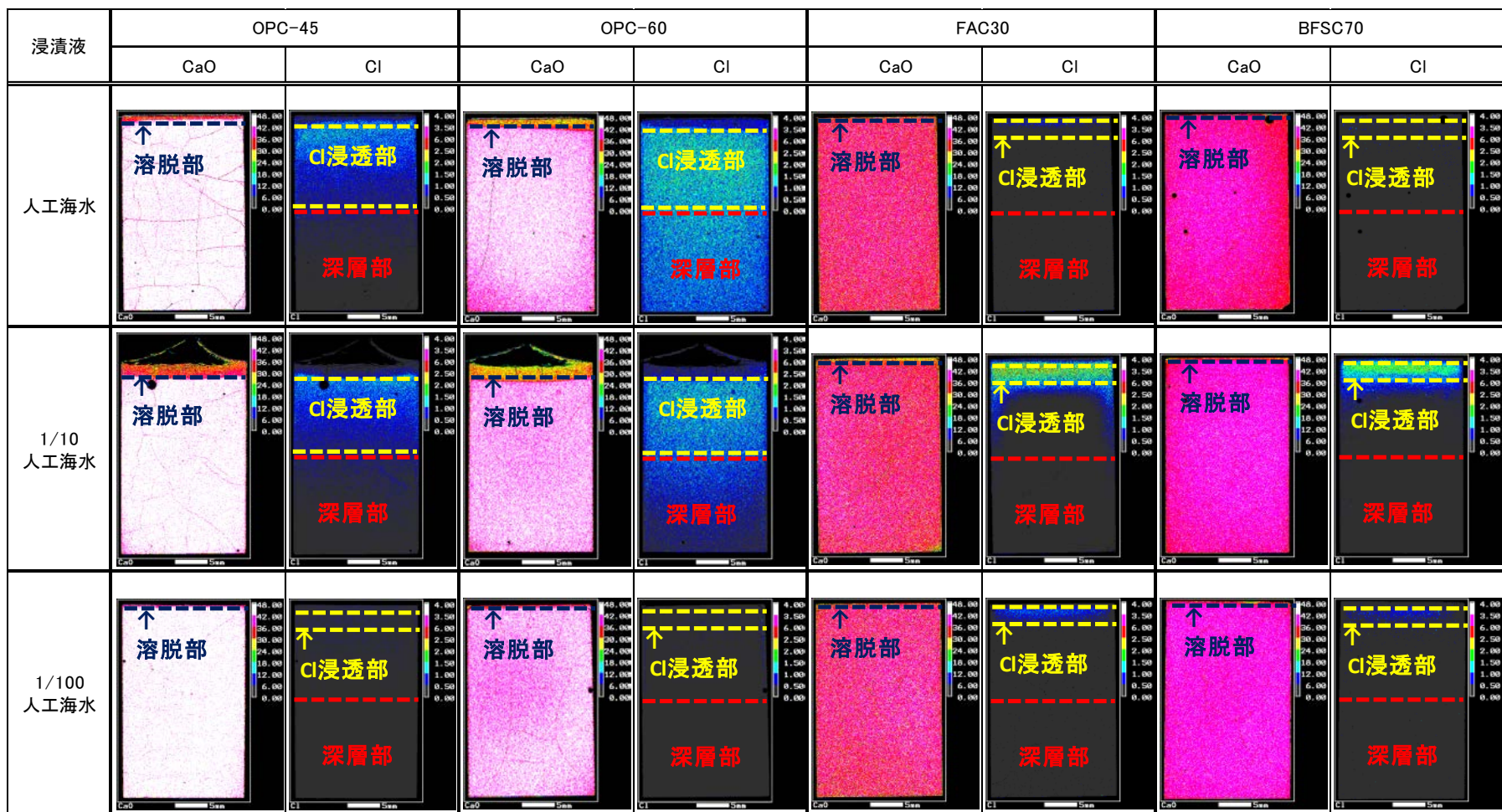


図 2.1-58 各測定位置の状況図

(3) 鉱物相の同定

粉末 X 線回折試験により同定した鉱物相とその化学式を表 2.1-6 に、同定結果一覧を表 2.1-7 に示す。また、粉末 X 線回折のチャートを図 2.1-59～図 2.1-70 にそれぞれ示す。分析位置は、EPMA 分析結果の組成分布を指標に選定した Ca の溶脱部であり同領域の S 濃度の高い「溶脱部」、溶脱部以深の Cl 濃度の高い「Cl 浸透部」、試料の中央部から最端部にかけて「深層部」とした。なお、OPC-45、OPC-60 の人工海水、1/10 人工海水に浸漬した試料以外では、溶脱部は接液面の極表層だけであり、XRD 分析用に分割加工することは困難であったため、これらの試料は溶脱部と Cl 浸透部の一体試料として分取した。図中では「溶脱部+Cl 浸透部」と記す。一部の試料で鉱物の同定が困難なピーク ($2\theta = 10.5^\circ$) が確認された。表中に「unknwn」と記す。

OPC-45 のブランク (BL) 試料では、主要ピークとして C-S-H、Portlandite が同定された。ピーク強度は低いものの Katoite、Monosulfate を含有していることがわかった。人工海水に浸漬した試料の溶脱部では、Monosulfate が消失し、新たに Ettringite と Friedel's salt のピークが確認された。これら消失及び生成した鉱物は、主成分が同じ Ca と Al から構成されるアルミネート鉱物であることから、Monosulfate が浸漬液の影響を受けて Ettringite 及び Friedel's salt に変化したものと考えられた。特に Friedel's salt を構成する成分の 1 つである Cl は、セメント材料には殆ど含まれていないことから、浸漬液の海水成分が影響して生成したものと判断できる。Cl 浸透部の鉱物相には、unknwn が確認されたものの、溶脱部と概ね同じ鉱物相であった。また、深層部の構成鉱物はブランク試料と同等であり、健全部に相当することを確認した。1/10 人工海水に浸漬した試料の溶脱部では、Monosulfate が消失し、新たに Ettringite と Friedel's salt のピークが確認された。ブランク試料で最も明確に同定できる Portlandite のピーク強度は非常に小さく、溶脱部で減少した Ca は Ca を主成分とする Portlandite の減少を反映していることが確認された。また、Cl 浸透部では Monosulfate の消失と Friedel's salt の生成、unknwn ピークが確認された。深層部の構成鉱物はブランク試料と同等であり、人工海水に浸漬した試料と同様に健全部に相当することを確認した。1/100 人工海水に浸漬した試料は、溶脱部と Cl 浸透部を一体試料として分析した。新たに Ettringite が生成しているが、ピークチャートは概ねブランク試料と同じであった。人工海水、1/10 人工海水に浸漬した試料の Cl 浸透部で確認された Friedel's salt のピークは同定されなかった。深層部の構成鉱物はブランク試料と同等であり、人工海水、1/10 人工海水に浸漬した試料と同様に健全部に相当することを確認した。

OPC-60 のブランク試料では、主要ピークとして C-S-H、Portlandite が同定された。ピーク強度は低いものの Katoite、Monosulfate を含有していることがわかった。練混ぜ水量が異なる OPC-45 のブランク試料と構成鉱物は同じであった。人工海水に浸漬した試料の溶脱部では、Monosulfate が消失し、新たに Ettringite と Friedel's salt のピークが確認された。Cl 浸透部、深層部とも鉱物相は溶脱部と同じであった。EPMA 分析の結果でも Cl が深層部まで高濃度で浸透していることが確認されており、Cl 浸透部と深層部の鉱物相が同じであったことと整合している。1/10 人工海水に浸漬した試料の溶脱部では、Monosulfate が消失し、新たに Ettringite と Friedel's salt のピークが確認された。ブランク試料と比較して Portlandite のピーク強度は非常に小さかった。また、Cl 浸透部でも、Monosulfate の消失と Ettringite、Friedel's salt の生成が確認された。深層部でも Monosulfate の消失が確認されているが、Monosulfate に代わるアルミネート鉱物は同定されなかった。深層部では、同定できなかったピーク (unknown) が確認されていることから、このピークが何らかの成分を固溶するアルミネート鉱物である可能性も考えられる。1/100 人工海水に浸漬した試料では、溶脱部と Cl 浸透部を一体試料として分析した。新たに Ettringite が生成しているが、ピークチャートは概ねブランク試料と同じであった。人工海

水、1/10 人工海水に浸漬した試料で確認された Friedel's salt のピークは同定されなかった。深層部の構成鉱物はブランク試料と同等であり、健全部に相当することを確認した。

FAC30 のブランク試料では、主要ピークとして C-S-H、Portlandite が同定された。ピーク強度は低いものの Katoite、Monosulfate を含有していることがわかった。また、OPC に混和材として添加したフライアッシュの結晶相である Quartz、Mullite も同定された。フライアッシュの大部分を占めるガラス相は、非晶質であるため XRD でピークを確認することはできない。このガラス相が OPC と反応することで鉱物が生成する。本ブランク試料でも OPC 系材料と比較して Portlandite のピークが小さいことから、Portlandite がガラス相と反応することで消費され減少したことがわかる。FAC30 では、全ての浸漬条件で溶脱部が接液面の極表層だけであったため、溶脱部と Cl 浸透部の一体試料として分析した。人工海水に浸漬した試料の溶脱部と Cl 浸透部の一体部では、Monosulfate が消失したが、対応するアルミネート鉱物のピークは確認されなかった。この試料においても、unknown ピークが確認された。深層部の構成鉱物はブランク試料と同等であり、健全部に相当することを確認した。1/10 人工海水に浸漬した試料の一体部では、Monosulfate が消失し、新たに Ettringite と Friedel's salt のピークが確認された。EPMA 分析の結果でも 1/10 人工海水に浸漬した試料の Cl 濃度が最も高いことを確認しており、人工海水で同定されていない Cl を含む鉱物 Friedel's salt が同定された結果と整合している。深層部の構成鉱物はブランク試料と同等であることを確認した。1/100 人工海水に浸漬した試料の鉱物同定結果は、人工海水の結果と同様であった。最も海水成分の多い人工海水と、この 1/100 調製液である 1/100 人工海水では液性は異なるものの、EPMA の組成分布は近似している。試料の受けた海水成分の影響が同程度であることから、構成鉱物も同等となったと考えられる。

BFSC70 のブランク試料では、主要ピークとして C-S-H、Portlandite が同定された。ピーク強度は低いものの、Monosulfate、Monocarbonate を含有していることがわかった。OPC に混和材として添加した高炉スラグの殆どはガラス相である。高炉スラグは潜在水硬性を有し、混合した OPC のアルカリ刺激を受け反応する。しかし、その反応率は OPC に比べると低いいため試料中にガラス相のまま多く残存している。ガラス相は非晶質であるため XRD でピークを確認することはできない。本試料の OPC が占める割合は 3 割と同じ混合セメントの FAC30 (OPC、7 割) より含有量は少なく、これを反映して Portlandite のピークは、FAC30 より更に小さかった。BFSC70 では、全ての浸漬条件で溶脱部が接液面の極表層だけであったため、溶脱部と Cl 浸透部の一体試料として分析した。人工海水に浸漬した試料の溶脱部と Cl 浸透部の一体部、深層部とも構成鉱物はブランク試料と同等であった。FAC30、BFSC70 の混合セメント系材料の pH の測定結果でも、人工海水では、浸漬期間に関わらず pH は初期から変動が無く、液相と固相の反応が制限されていた可能性がある。この固液の反応の制限により、海水成分の影響範囲と量が僅かなため、XRD ではピーク変化を確認できないと考えられた。1/10 人工海水に浸漬した試料の一体部では、Monosulfate、Monocarbonate が消失し、新たに Ettringite と Friedel's salt のピークが確認された。unknown ピークも確認された。FAC30 と同様、EPMA 分析の結果でも 1/10 人工海水に浸漬した試料の Cl 濃度が最も高いことを確認しており、人工海水に浸漬した試料で同定されていない Cl を含む鉱物 Friedel's salt が本試料で同定された結果と整合している。深層部の構成鉱物はブランク試料と同等であることを確認した。1/100 人工海水に浸漬した試料の鉱物同定結果は、人工海水に浸漬した試料の結果と同様であり、一体部、深層部とも構成鉱物はブランク試料と同じであった。

EPMA 分析の結果、一部の水準では、ドームまたは接液面近傍に Ca、Mg の高濃度部が確認されている。これらの領域は数 100 μm と僅かであるため XRD で鉱物を特定することはできな

いものの、セメント溶脱成分と海水成分の反応により Ca は Calcite (CaCO_3) または Gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、Mg は Brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) として沈殿したと推測される。

表 2.1-6 同定された鉱物の化学式

分類	鉱物名	化学式
初期試料に含有されている 鉱物	C-S-H	$\text{XCaO} \cdot \text{YSiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
	Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
	Katoite	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
	Ettringite	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$
	Monosulfate	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
	Monocarbonate	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$
	Quartz	SiO_2
	Mullite	$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$
海水成分の影響を受けて生 成した可能性のある鉱物	Friedel's salt	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$

表 2.1-7 鉱物の同定結果一覧

試料名	浸漬液	測定位置	CSH	Portlandite	katoite	Ettringite	Mono sulfate	Mono carbonate	Quartz	Mullite	Hydrocalumite	unknown	
OPC-45	BL	-	○	◎	△		△						
	人工海水	溶脱部	○	◎	△	△					△		
		Cl浸透部	○	◎	△	△					△	△	
		深層部	○	◎	△		△						
	1/10人工海水	溶脱部	○	△	△	○						△	
		Cl浸透部	○	◎	△							△	△
		深層部	○	◎	△		△						
	1/100人工海水	溶脱部	○	◎	△	△	△						
		Cl浸透部	○	◎	△		△						
深層部		○	◎	△		△							
OPC-60	BL	-	○	◎	△		△						
	人工海水	溶脱部	○	◎	△	○					△		
		Cl浸透部	○	◎	△	△					△		
		深層部	○	◎	△	△					△		
	1/10人工海水	溶脱部	○	△	△	○					△		
		Cl浸透部	○	◎	△	△					△		
		深層部	○	◎	△							△	
	1/100人工海水	溶脱部	○	◎	△	△	△						
		Cl浸透部	○	◎	△		△						
深層部		○	◎	△		△							
FAC30	BL	-	○	○	△		△		○	△			
	人工海水	溶脱部	○	○	△				○	△		△	
		Cl浸透部	○	○	△				○	△			
		深層部	○	○	△		△		○	△			
	1/10人工海水	溶脱部	○	○	△	△			○	△	△		
		Cl浸透部	○	○	△				○	△			
		深層部	○	○	△		△		○	△			
	1/100人工海水	溶脱部	○	○	△				○	△		△	
		Cl浸透部	○	○	△				○	△			
深層部		○	○	△		△		○	△				
BFSC70	BL	-	○	○			△	△					
	人工海水	溶脱部	○	○			△	△					
		Cl浸透部	○	○			△	△					
		深層部	○	○			△	△					
	1/10人工海水	溶脱部	○	△		△					△	△	
		Cl浸透部	○	○									
		深層部	○	○			△	△					
	1/100人工海水	溶脱部	○	○				△	△				
		Cl浸透部	○	○				△	△				
深層部		○	○				△	△					

◎：ピーク強度が強く明瞭 ○：ピークが明瞭 △：ピーク強度が弱い 無印：ピークが無い
Friedel's salt (Friedel's salt)

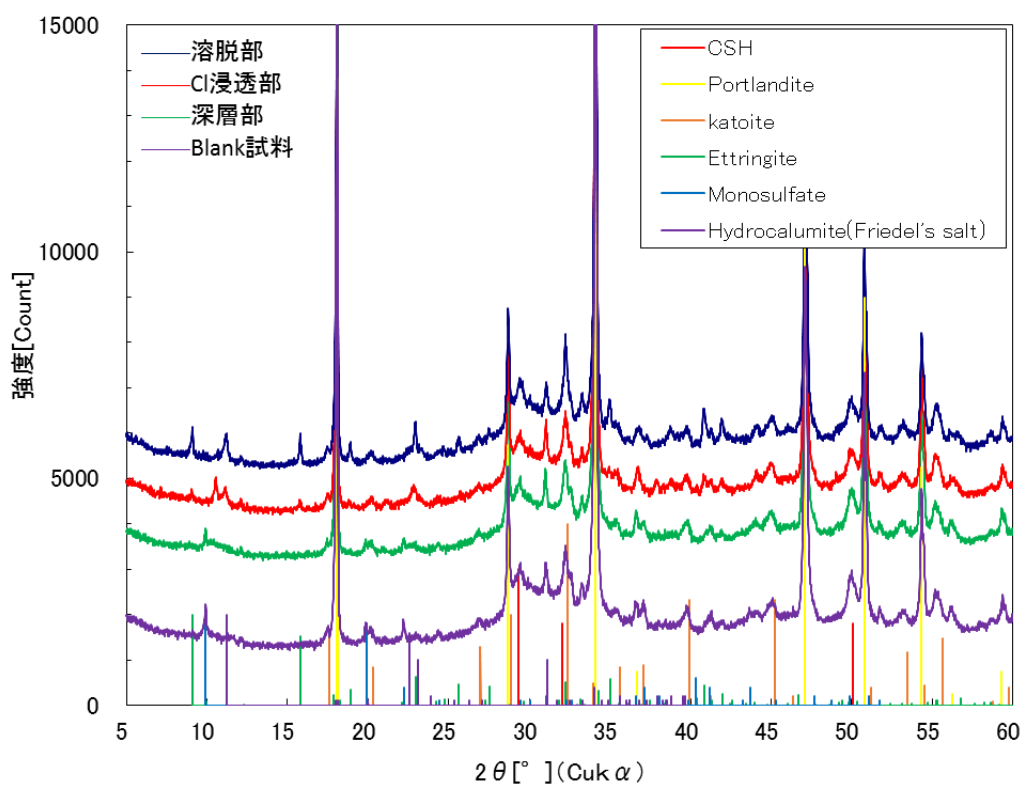


図 2.1-59 粉末 X 線回折測定結果 (OPC-45、人工海水)

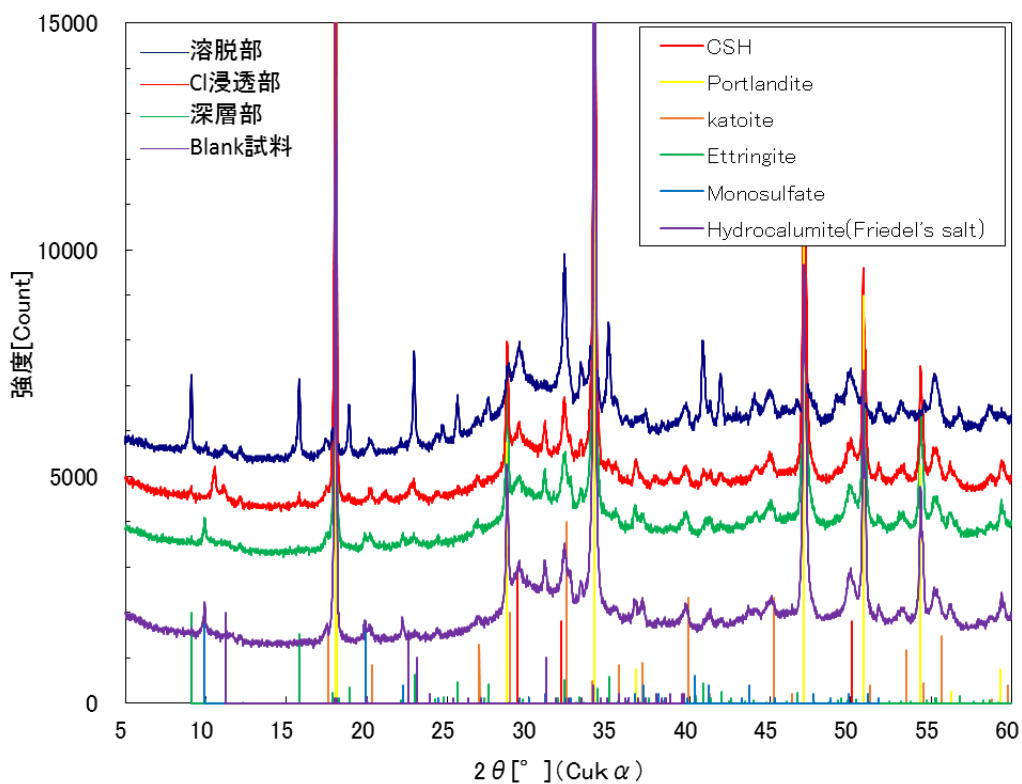


図 2.1-60 粉末 X 線回折測定結果 (OPC-45、1/10 人工海水)

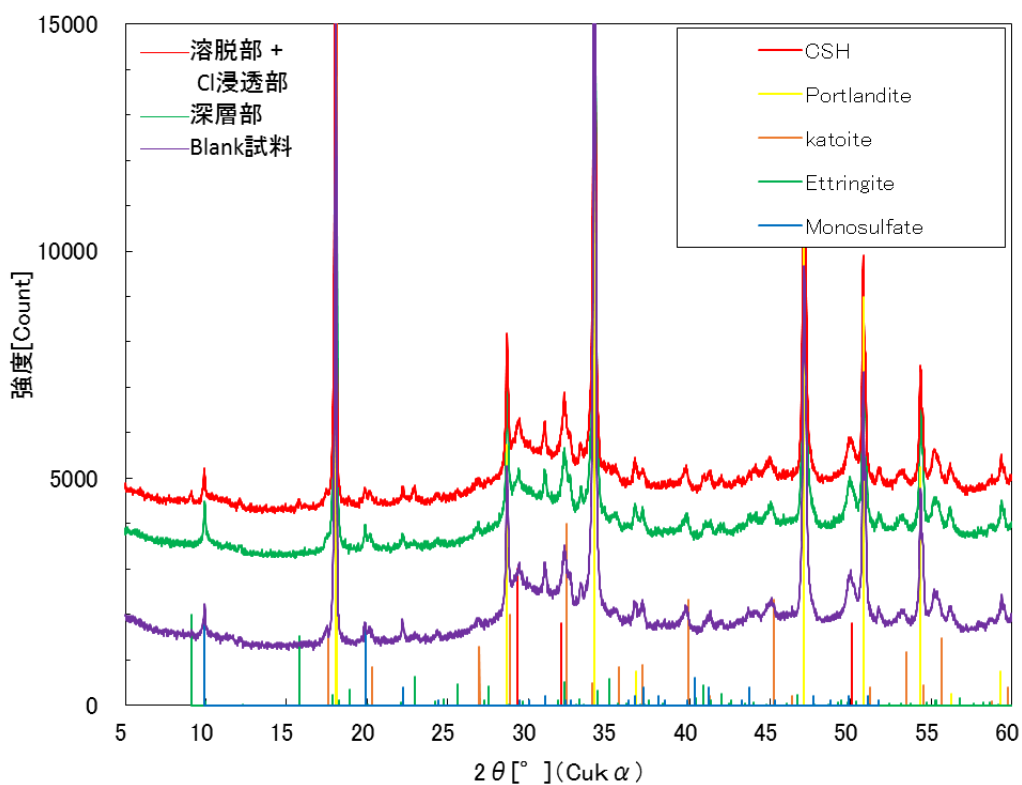


图 2.1-61 粉末 X 線回折測定結果 (OPC-45、1/100 人工海水)

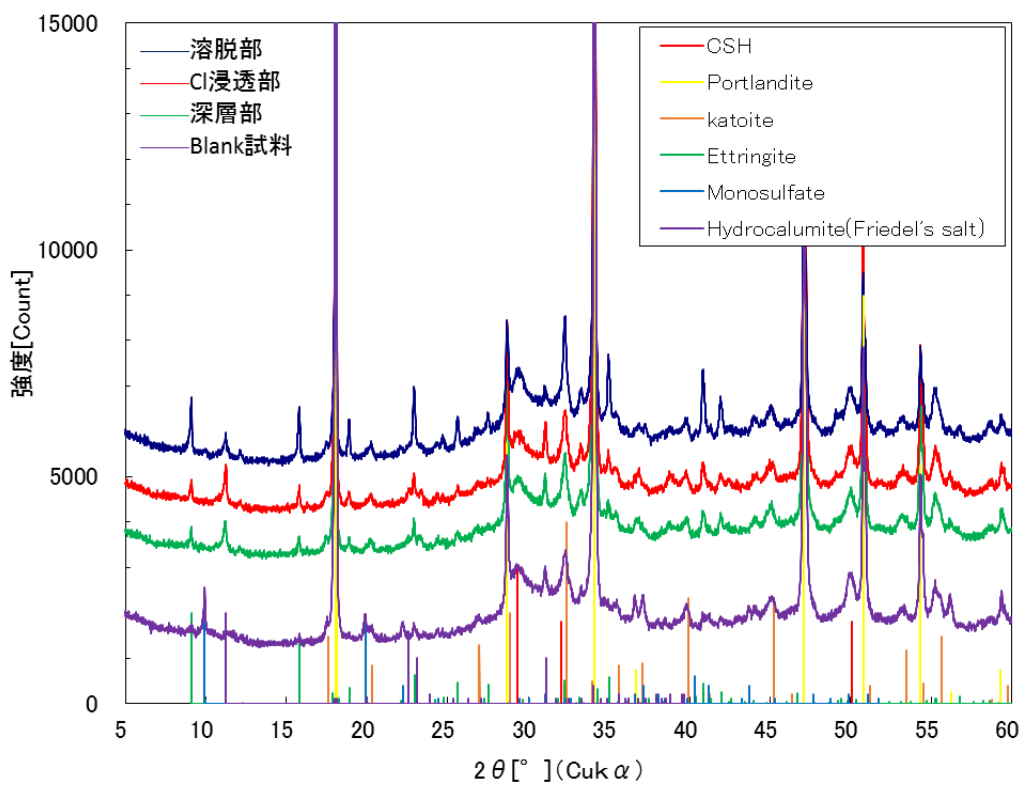


图 2.1-62 粉末 X 線回折測定結果 (OPC-60、人工海水)

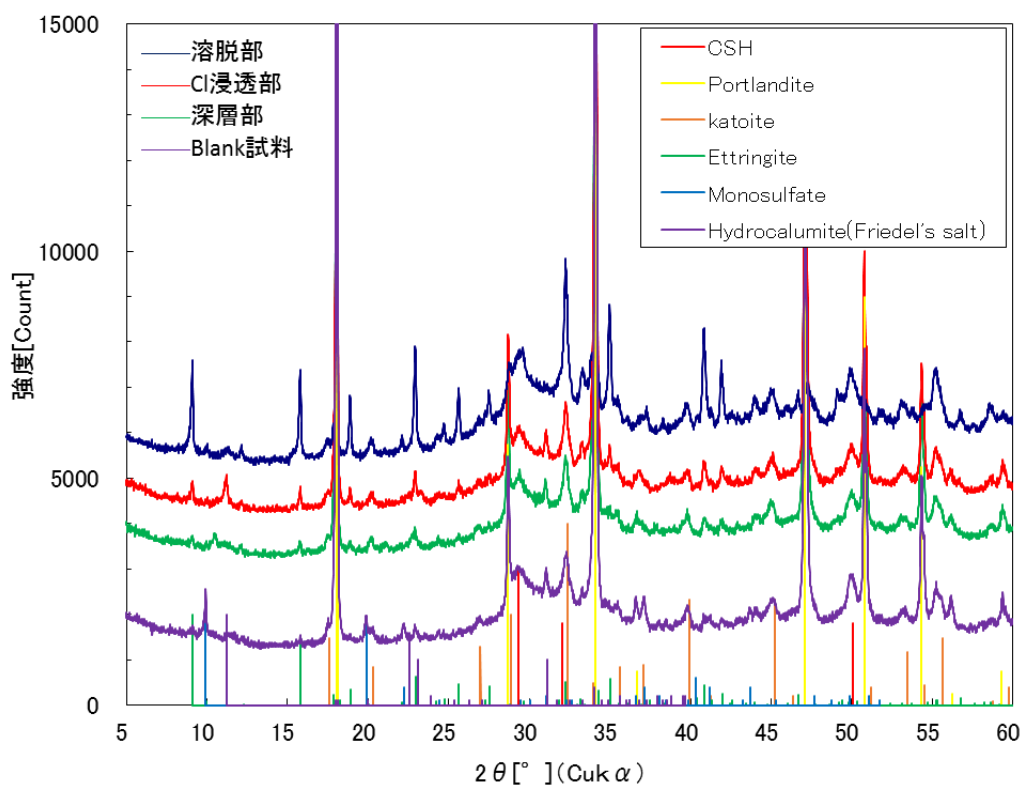


图 2.1-63 粉末 X 線回折測定結果 (OPC-60、1/10 人工海水)

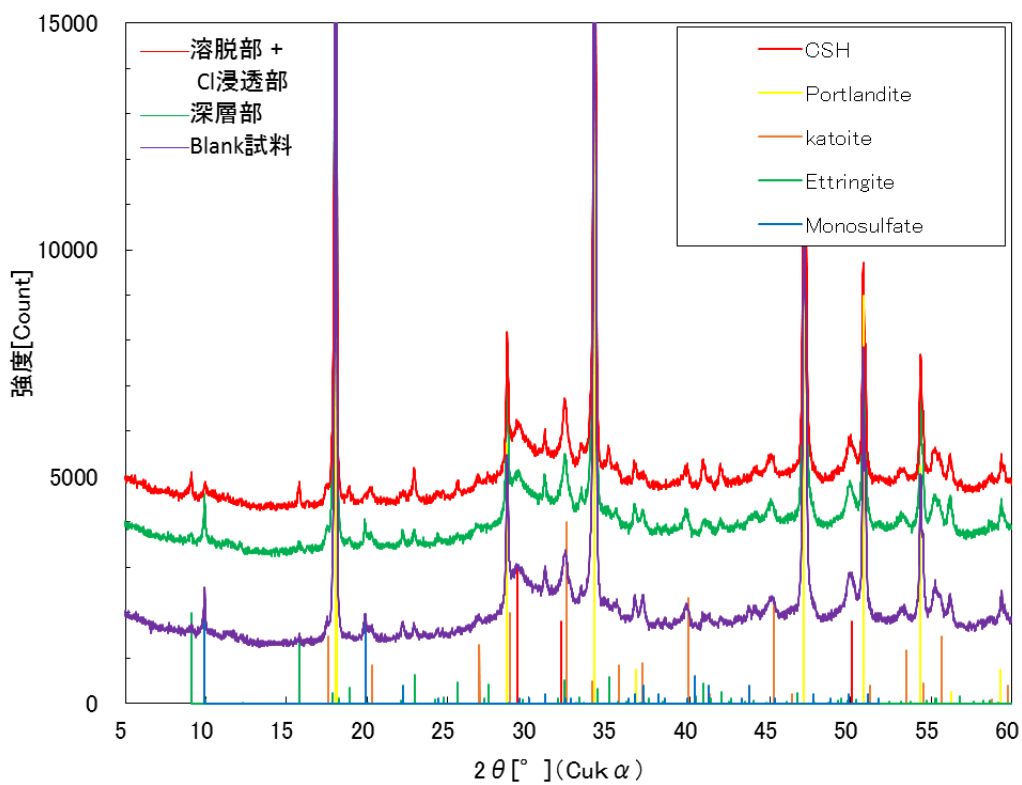


图 2.1-64 粉末 X 線回折測定結果 (OPC-60、1/100 人工海水)

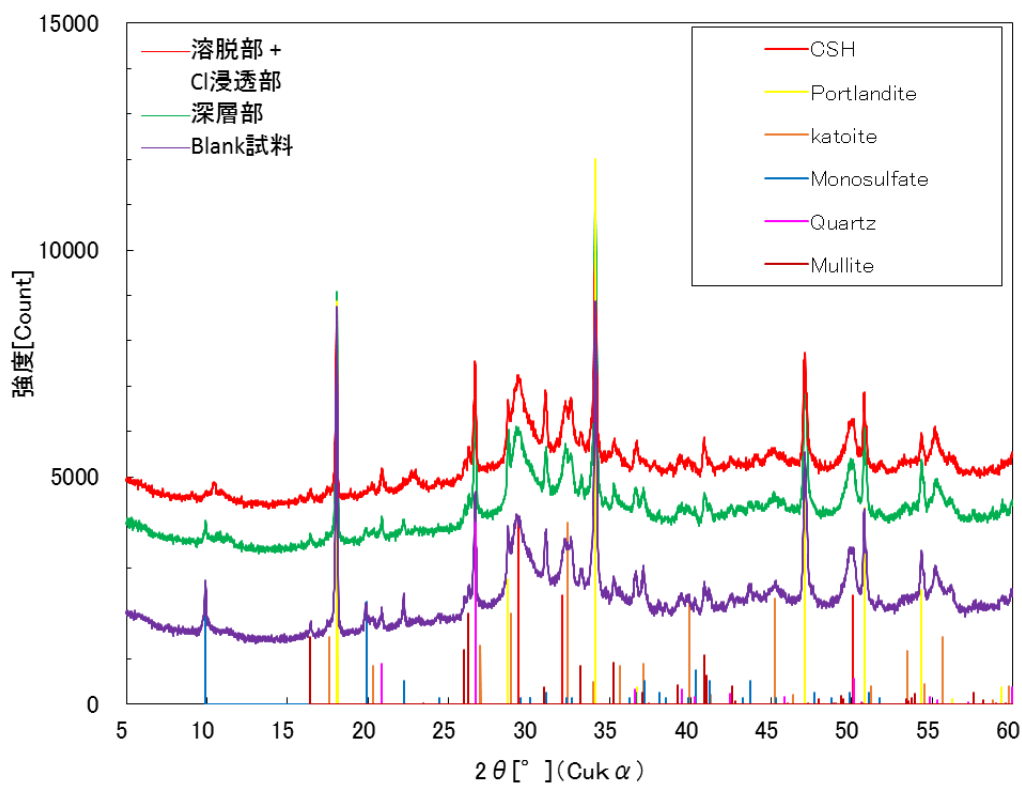


图 2.1-65 粉末 X 線回折測定結果 (FAC30、人工海水)

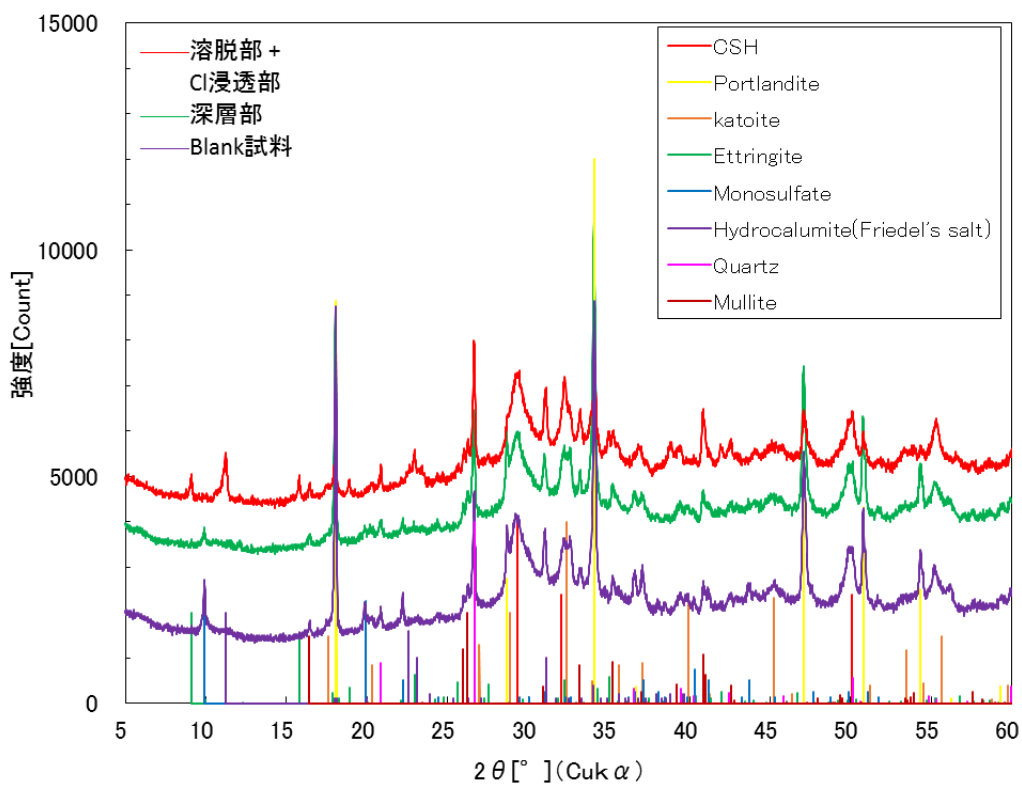


图 2.1-66 粉末 X 線回折測定結果 (FAC30、1/10 人工海水)

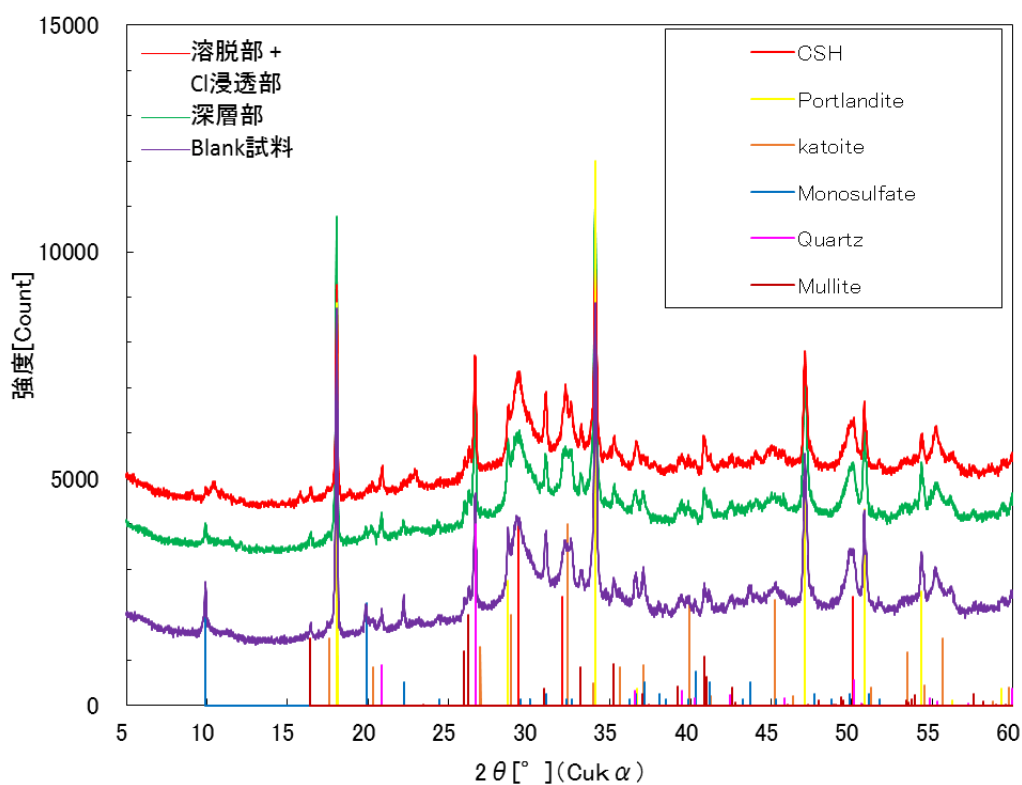


図 2.1-67 粉末 X 線回折測定結果 (FAC30、1/100 人工海水)

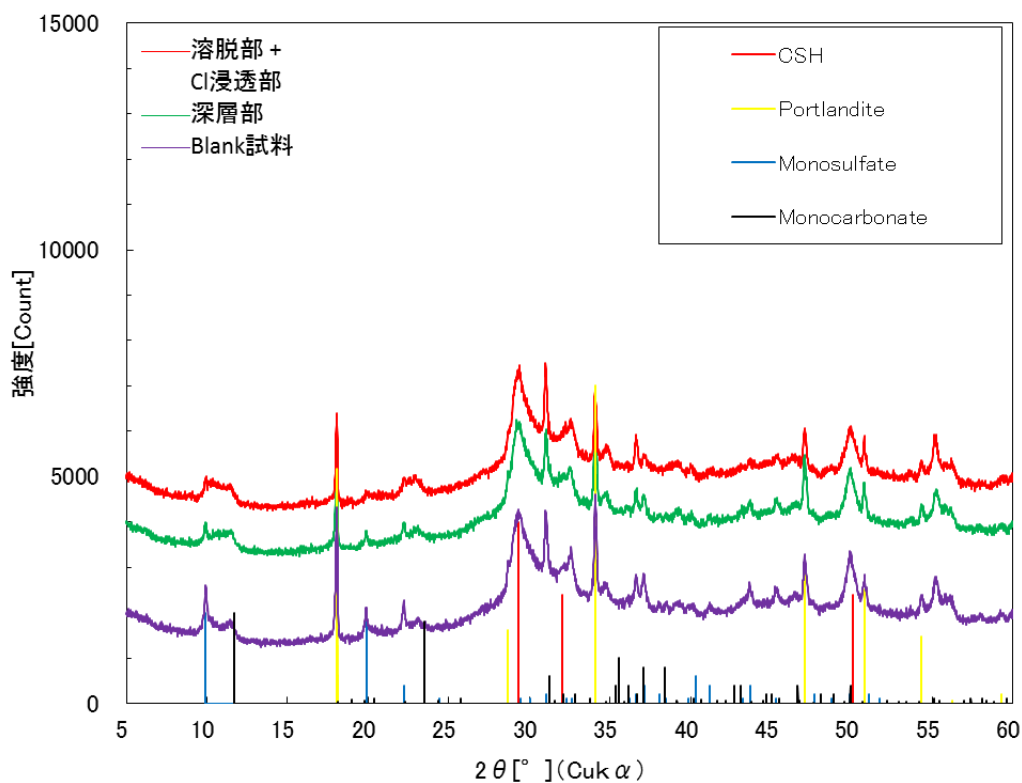


図 2.1-68 粉末 X 線回折測定結果 (BFSC70、人工海水)

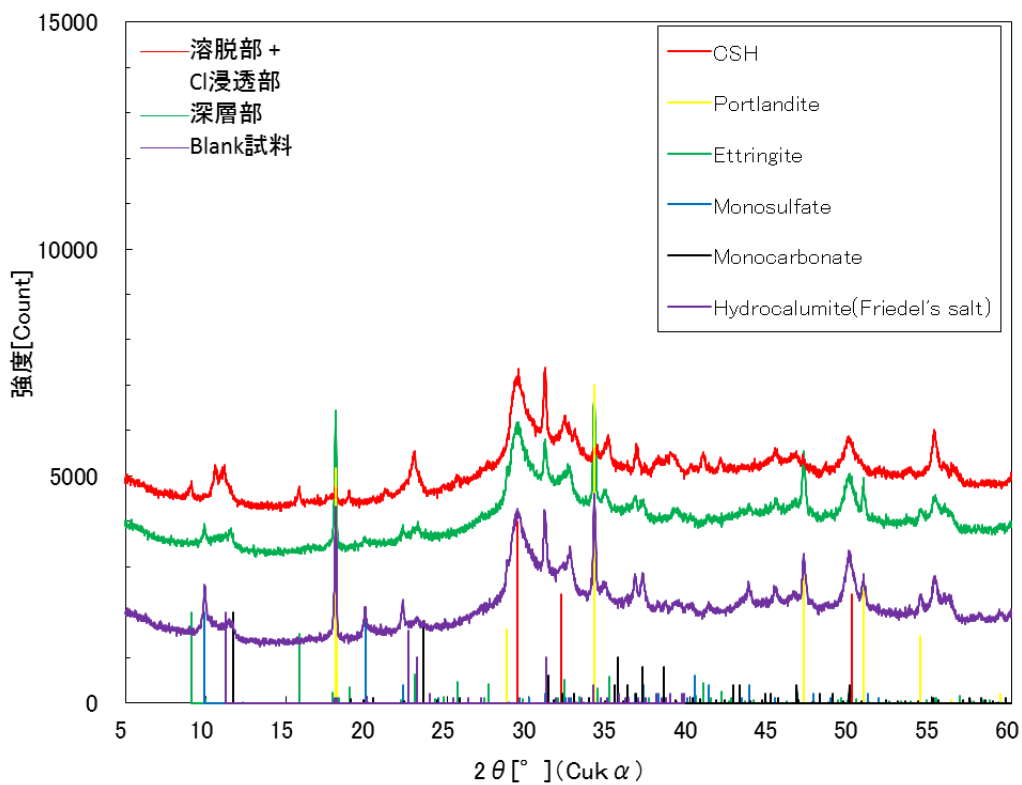


図 2.1-69 粉末 X 線回折測定結果 (BFSC70、1/10 人工海水)

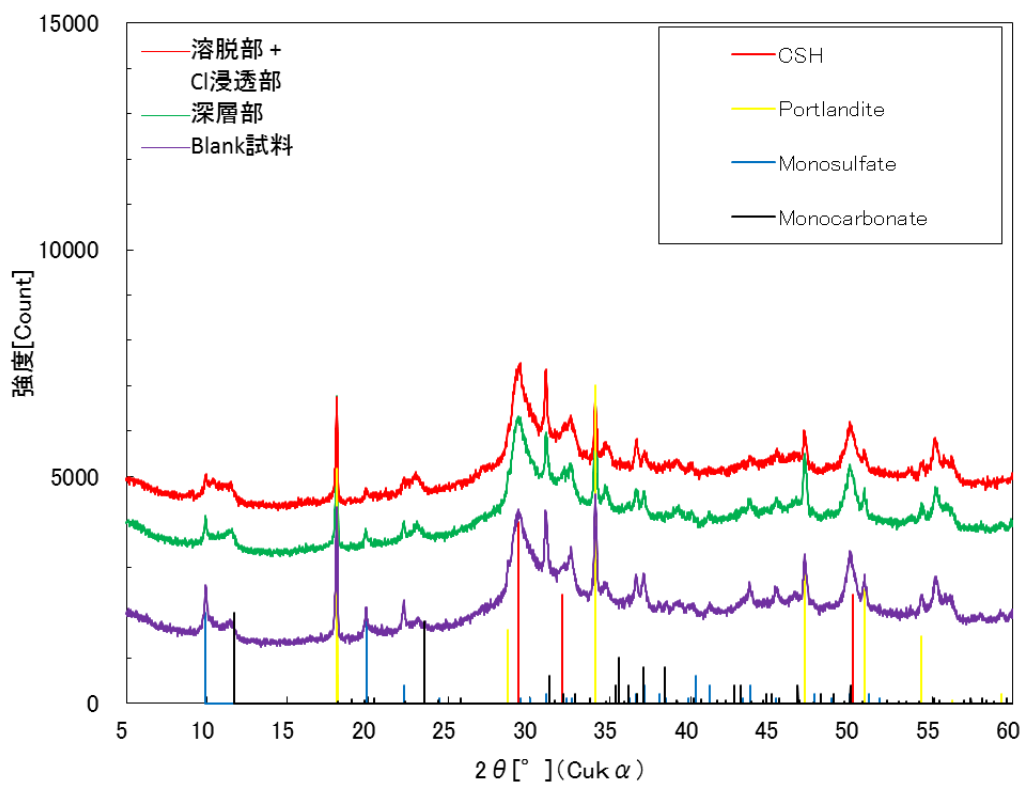


図 2.1-70 粉末 X 線回折測定結果 (BFSC70、1/100 人工海水)

(4) 鉱物の形態観察及び組成分析

1) 電子像観察及び EDS 分析

反射電子像観察と組成分析の結果を図 2.1-71～図 2.1-82 に示す。EDS の測定位置は像中に「+」表記で示しており、そのポイント No.と EDS 測定濃度の No.が対応している。反射電子像で得られる情報は鉱物の形状の他、鉱物を構成する元素に対応したコントラスト像である。コントラストは、構成する物質の原子番号が大きいほど明るく表示される。本分析では、反射電子像の大半を占める暗色（灰色）相がセメント鉱物の大半を占める C-S-H と判断し No.1-5 の 5 ポイントを EDS 測定した。また、像内に点在する明色（白色）相をアルミネート鉱物や未水和セメントの C-S-H 間充填物と判断し No.6-10 の 5 ポイントを EDS 測定した。像内の黒色部は空隙である。電子像観察及び EDS 分析では、鉱物の形状とコントラスト像から C-S-H を特定し、そのポイントの EDS 測定を実施することで C-S-H を構成する成分を特定することを主な目的とする。セメント硬化体の主要鉱物である C-S-H は不特定の成分組成からなり、海水成分の影響を受け、Cl や S を固溶しても XRD などに変質を確認することができないため EDS 分析が有効である。なお、分析位置は、XRD 分析と同様の「溶脱部」、「Cl 浸透部」、「深層部」とした。

OPC-45 の人工海水に浸漬した試料の溶脱部では、C-S-H の主要成分は Ca、Si であり、Cl も含まれていることを確認した。C-S-H 間充填物の主要成分は Ca、Al、Fe であり、未水和セメントと考えられた。Cl 浸透部、深層部も同様の結果であった。1/10 人工海水に浸漬した試料でも各部位の C-S-H は Cl を含んでいた。C-S-H 間充填物は未水和セメントと考えられる。1/100 人工海水に浸漬した試料では、溶脱部、Cl 浸透部の C-S-H に Cl が含まれており、その含有量は、Cl 浸透部が溶脱部より多いことを確認した。また、Cl 浸透部と深層部の C-S-H 間充填物では、Ca、Al、Fe を主成分とする未水和セメントの他、Ca、Al、S から構成する鉱物も確認され、Monosulfate または Ettringite のアルミネート鉱物と考えられる。

OPC-60 の人工海水に浸漬した試料の溶脱部では、C-S-H の主要成分は Ca、Si であり、Cl も含まれていることを確認した。C-S-H 間充填物の主要成分は Ca、Al、Fe であり、未水和セメントと考えられた。Cl 浸透部、深層部も同様の結果であったが、これらの領域の C-S-H の Cl 含有量は溶脱部より多い傾向であった。1/10 人工海水に浸漬した試料でも各部位の C-S-H は Cl を含んでおり、含有量は Cl 浸透部で最も多いことを確認した。1/100 人工海水に浸漬した試料でも各部位の C-S-H は Cl を含んでいるが、人工海水、1/10 人工海水に浸漬した試料と比較すると含有量は少なかった。

FAC30 の像内の球状痕はフライアッシュであり、EDS 測定からは除外した。人工海水に浸漬した試料の溶脱部では、C-S-H の主要成分は Ca、Si、Mg であり、Cl も含まれているが OPC 系材料と比較して含有量が少ないことを確認した。溶脱部では Ca が溶脱した部位に Mg が浸透したか、Mg が浸透することで Ca と置換し溶脱したものと考えられた。C-S-H 間充填物の主要成分は Ca、Al、Fe であり、未水和セメントと考えられた。Cl 浸透部の C-S-H に Cl が含まれていたが、深層部の C-S-H には含まれていなかった。また、両部位の C-S-H では Mg の含有量は多くなく、Mg の浸透は接液面に近い溶脱部のみで確認された。1/10 人工海水に浸漬した試料では、C-S-H と想定したポイントから Ca 含有量が多いポイントを確認した。Portlandite か Calcite と考えられた。C-S-H は Cl をあまり含んでいなかった。Cl 浸透部の C-S-H には Cl が含まれていたが、深層部では含まれていなかった。1/100 人工海水に浸漬した試料でも 1/10 人工海水に浸漬した試料と同様に C-S-H 中の Cl の含有量は Cl 浸透部で多く、その他の部位では少なかった。溶脱部の C-S-H 間充填物として、Si、Al を主成分とするポイントも確認された。鉱物の形状は球状でないもののフライアッシュの組成と考えられる。

BFSC70の像内の $10\mu\text{m}$ 以上の塊状の粗粒子は未水和スラグであり、EDS測定から除外した。人工海水に浸漬した試料の溶脱部では、C-S-Hの主要成分はCa、Si、Al、Mgであり、Clも含まれているがOPC系材料と比較して含有量が少ないことを確認した。溶脱部ではCaが溶脱した部位にMgが浸透したか、Mgが浸透することでCaが置換し溶脱したものと考えられた。このような結果はOPC系材料で確認されず、FAC30で確認されていることから、混合セメントに共通する性状が影響した反応と考えられる。C-S-H間充填物の主要成分はCa、Si、Al、Sであり、MonosulfateまたはEttringiteのアルミネート鉱物の可能性も考えられるが、Siも多く検出されているため、断定できなかった。BFSC70はOPCの混合割合が3割であることから、他のセメント材料と比較するとOPCに由来する鉱物が少なく、未水和セメントと判断できるポイントは確認されなかった。Cl浸透部のC-S-HにはClが含まれていたが、深層部のC-S-Hには含まれていなかった。また、両部位のC-S-HではMgの含有量が溶脱部と比較して少なかった。これらが正常なC-S-Hの組成と考えると、Mgの浸透は接液面に近い溶脱部でのみ起こる反応と考えられる。1/10人工海水に浸漬した試料では、溶脱部のC-S-HにClがあまり含まれていなかった。Cl浸透部のC-S-HにはClが含まれているが、深層部では含まれていなかった。1/100人工海水に浸漬した試料でも1/10人工海水に浸漬した試料と同様にC-S-H中のClの含有量はCl浸透部で多く、その他の部位では少なかった。

各水準の深層部のC-S-Hが最も海水成分の影響を受けていない健全に近い成分組成と考えられる。OPC系材料では、この深層部のC-S-Hと比較して、溶脱部、Cl浸透部のC-S-HにClが多く含まれており、セメント系材料の主成分であるC-S-Hも海水成分の影響を受けて変質していることがわかった。混合セメントにおいても、同様にC-S-HにClが含まれている他、溶脱部ではMgも含まれており、C-S-Hが変質していることがわかった。

なお、XRD分析の結果では、Clを含む鉱物としてFriedel's saltが同定されているが、アルミネート鉱物と考えられるポイントのEDS測定では、Friedel's saltと対応する成分組成の結果は得られていない。その理由として、C-S-HとFriedel's saltが混在して区別化することが困難であった可能性の他、アルミネート鉱物として選択した形状やコントラスト像とはポイントが異なっていた可能性も考えられる。

反射電子像		EDS測定濃度(%)										Ca/Si mol比	
		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl			
OPC-45 溶脱部		CSH	1	54.7	38.2	1.5	0.8	1.5	1.5	0.1	0.0	1.7	1.5
			2	56.0	36.4	1.3	1.0	1.5	2.0	0.1	0.0	1.6	1.6
			3	56.3	37.7	0.9	0.9	0.6	1.9	0.2	0.0	1.4	1.6
			4	60.7	30.9	1.9	1.1	1.6	2.0	0.1	0.0	1.8	2.1
			5	57.6	33.5	1.9	1.0	1.6	2.2	0.1	0.0	2.0	1.8
		平均	57.0	35.3	1.5	1.0	1.4	1.9	0.1	0.0	1.7	1.7	
		CSH間 充填物	6	50.7	6.6	26.5	11.4	3.7	0.2	0.4	0.5	0.1	8.2
			7	55.2	4.1	33.3	4.5	0.6	0.3	1.2	0.7	0.1	14.6
			8	52.3	4.9	27.5	10.8	3.2	0.2	0.8	0.3	0.1	11.4
			9	49.4	5.9	24.8	13.9	4.4	1.2	0.1	0.0	0.2	9.0
10	49.1		6.4	24.2	13.8	4.8	1.2	0.2	0.0	0.2	8.2		
平均	51.3	5.6	27.2	10.9	3.4	0.6	0.5	0.3	0.1	10.3			
OPC-45 Cl浸透部		CSH	1	74.1	22.0	1.4	0.5	0.4	0.9	0.1	0.0	0.5	3.6
			2	57.1	25.8	6.0	5.4	0.9	3.5	0.2	0.0	1.0	2.4
			3	60.2	28.6	3.9	0.7	0.9	3.4	0.1	0.0	2.2	2.3
			4	63.4	28.7	2.5	0.9	1.2	2.3	0.1	0.1	0.8	2.4
			5	62.2	29.6	3.1	1.4	0.7	1.8	0.2	0.0	0.9	2.2
		平均	63.4	26.9	3.4	1.8	0.8	2.4	0.1	0.0	1.1	2.6	
		CSH間 充填物	6	51.9	4.4	29.5	9.5	2.9	0.1	1.2	0.5	0.0	12.6
			7	50.6	4.9	24.2	16.6	3.2	0.3	0.1	0.1	0.1	11.1
			8	48.6	4.6	28.5	13.9	3.9	0.3	0.2	0.0	0.1	11.4
			9	50.2	4.7	25.0	14.7	4.4	0.6	0.2	0.0	0.2	11.4
10	53.7		5.0	31.4	6.9	1.5	0.3	0.9	0.2	0.1	11.6		
平均	51.0	4.7	27.7	12.3	3.2	0.3	0.5	0.1	0.1	11.6			
OPC-45 深層部		CSH	1	62.5	31.0	1.6	0.9	1.0	1.6	0.1	0.1	1.1	2.2
			2	60.1	33.0	1.8	0.7	1.7	1.7	0.1	0.1	0.9	2.0
			3	61.3	31.7	2.0	1.0	1.4	1.7	0.1	0.1	0.7	2.1
			4	60.6	32.3	1.9	0.8	1.8	1.6	0.1	0.0	0.9	2.0
			5	57.8	30.0	3.5	1.4	4.3	1.7	0.1	0.1	1.2	2.1
		平均	60.5	31.6	2.1	1.0	2.0	1.7	0.1	0.1	1.0	2.1	
		CSH間 充填物	6	50.8	4.4	25.8	14.4	4.1	0.1	0.2	0.2	0.0	12.4
			7	51.4	5.0	25.5	13.4	4.0	0.2	0.3	0.1	0.1	10.9
			8	49.4	5.2	25.6	13.7	5.3	0.2	0.4	0.2	0.0	10.3
			9	72.0	24.0	1.6	0.7	1.2	0.2	0.1	0.0	0.0	3.2
10	48.1		5.3	28.9	10.0	6.4	0.9	0.4	0.0	0.1	9.7		
平均	54.3	8.8	21.5	10.4	4.2	0.3	0.3	0.1	0.1	9.3			

図 2.1-71 反射電子像観察と組成分析結果 (OPC-45、人工海水)

反射電子像		EDS測定濃度(%)										Ca/Si mol比	
		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl			
OPC-45 溶脱部		CSH	1	57.2	34.2	2.7	2.0	1.3	1.6	0.0	0.0	0.9	1.8
			2	58.0	34.0	1.7	1.1	1.7	1.8	0.0	0.0	1.6	1.8
			3	57.0	35.7	1.4	0.8	1.9	1.8	0.1	0.0	1.3	1.7
			4	58.3	33.7	1.6	1.0	1.5	2.8	0.1	0.0	1.0	1.9
			5	56.5	37.0	1.4	0.8	1.0	2.1	0.1	0.0	1.0	1.6
		平均	57.4	34.9	1.8	1.2	1.5	2.0	0.1	0.0	1.1	1.8	
		CSH間 充填物	6	50.2	3.2	24.8	17.6	3.6	0.4	0.1	0.0	0.1	16.7
			7	49.5	5.1	26.7	13.3	4.1	0.8	0.2	0.1	0.1	10.3
			8	50.8	5.1	28.0	10.5	3.5	0.7	0.8	0.3	0.1	10.6
			9	49.0	5.5	27.6	10.9	5.4	1.1	0.3	0.0	0.2	9.6
10	50.5		3.2	29.0	12.9	3.3	0.8	0.2	0.0	0.1	16.8		
平均	50.0	4.4	27.2	13.0	4.0	0.8	0.3	0.1	0.1	12.8			
OPC-45 Cl浸透部		CSH	1	61.3	31.8	1.4	0.9	1.1	1.9	0.0	0.0	1.6	2.1
			2	59.6	32.8	1.6	1.1	1.3	1.9	0.0	0.0	1.6	1.9
			3	58.7	28.0	5.9	0.9	1.6	2.4	0.1	0.0	2.4	2.2
			4	55.5	35.1	2.5	1.0	1.7	2.5	0.1	0.0	1.5	1.7
			5	60.5	31.6	1.6	1.0	1.4	2.1	0.0	0.0	1.7	2.1
		平均	59.1	31.9	2.6	1.0	1.4	2.2	0.0	0.0	1.8	2.0	
		CSH間 充填物	6	54.3	4.5	29.8	8.0	2.4	0.2	0.6	0.1	0.1	13.0
			7	51.3	4.5	25.8	14.3	3.7	0.2	0.1	0.0	0.1	12.2
			8	48.0	5.4	32.4	9.0	4.6	0.0	0.3	0.1	0.0	9.5
			9	49.7	6.5	27.6	8.6	6.2	0.7	0.4	0.1	0.2	8.2
10	51.5		3.1	24.9	17.4	2.8	0.1	0.1	0.0	0.1	17.7		
平均	50.9	4.8	28.1	11.5	4.0	0.3	0.3	0.1	0.1	12.1			
OPC-45 深層部		CSH	1	57.5	35.3	1.9	0.8	1.6	1.7	0.0	0.0	1.1	1.7
			2	61.3	32.3	1.6	0.9	1.3	1.5	0.1	0.0	1.0	2.0
			3	62.2	31.5	1.5	1.2	0.8	1.8	0.1	0.0	0.9	2.1
			4	52.7	40.1	2.1	0.7	1.7	1.8	0.0	0.0	1.0	1.4
			5	59.9	33.0	2.1	0.8	1.6	1.7	0.1	0.0	0.8	1.9
		平均	58.7	34.4	1.8	0.9	1.4	1.7	0.0	0.0	1.0	1.8	
		CSH間 充填物	6	97.5	1.8	0.1	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0	0.1	56.8
			7	57.1	4.5	32.4	1.1	4.3	0.4	0.1	0.0	0.1	13.5
			8	57.4	4.4	32.0	1.2	2.4	0.2	1.5	0.8	0.0	13.8
			9	57.4	3.0	35.3	0.8	3.2	0.1	0.0	0.0	0.0	20.8
10	56.6		5.2	31.8	0.9	4.4	0.4	0.6	0.1	0.1	11.7		
平均	65.2	3.8	26.3	0.8	2.9	0.2	0.4	0.2	0.1	23.3			

図 2.1-72 反射電子像観察と組成分析結果 (OPC-45、1/10 人工海水)

反射電子像		EDS測定濃度(%)										Ca/Si mol比	
		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl			
OPC-45 溶脱部		CSH	1	67.7	27.0	1.8	0.9	0.2	1.7	0.1	0.0	0.5	2.7
			2	62.1	31.2	2.2	0.8	0.2	2.8	0.3	0.1	0.4	2.1
			3	59.6	31.2	3.2	0.6	0.2	4.5	0.3	0.1	0.3	2.0
			4	64.2	31.1	1.3	0.9	0.3	1.4	0.2	0.0	0.5	2.2
			5	57.9	34.7	3.1	1.4	0.7	1.5	0.3	0.0	0.4	1.8
		平均	62.3	31.0	2.3	0.9	0.3	2.4	0.2	0.1	0.4	2.2	
		CSH間 充填物	6	51.4	6.5	22.6	14.0	4.2	1.0	0.2	0.0	0.1	8.5
			7	53.6	6.9	18.6	15.2	3.5	1.9	0.1	0.0	0.2	8.3
			8	49.0	7.0	24.2	14.5	4.0	1.0	0.1	0.0	0.2	7.6
			9	50.0	6.2	23.3	14.7	5.0	0.5	0.2	0.0	0.1	8.7
10	49.2		4.2	27.1	10.3	8.0	0.5	0.4	0.2	0.1	12.5		
平均	50.6	6.1	23.2	13.7	5.0	1.0	0.2	0.1	0.1	9.1			
OPC-45 Cl浸透部		CSH	1	59.7	33.1	1.7	1.0	1.4	1.9	0.1	0.0	1.1	1.9
			2	60.6	32.5	1.9	1.0	1.4	1.7	0.0	0.0	1.0	2.0
			3	57.4	22.8	10.2	0.8	0.6	7.3	0.1	0.0	0.7	2.7
			4	62.9	31.1	1.6	0.7	1.2	1.5	0.0	0.1	0.8	2.2
			5	60.2	32.4	2.0	1.1	1.5	1.6	0.0	0.0	1.1	2.0
		平均	60.2	30.4	3.5	0.9	1.2	2.8	0.1	0.0	1.0	2.2	
		CSH間 充填物	6	55.0	6.6	28.5	5.2	2.1	0.2	1.7	0.5	0.0	9.0
			7	54.4	4.5	30.0	6.5	1.7	0.2	1.7	1.0	0.0	12.8
			8	48.8	9.1	21.3	2.0	2.6	15.7	0.1	0.0	0.6	5.8
			9	52.3	15.0	16.6	1.2	0.5	13.5	0.1	0.0	0.7	3.7
10	54.0		11.6	17.7	1.4	1.9	12.9	0.0	0.0	0.5	5.0		
平均	52.9	9.4	22.8	3.3	1.8	8.5	0.7	0.3	0.4	7.3			
OPC-45 深層部		CSH	1	61.7	27.2	5.0	1.8	0.6	3.4	0.1	0.0	0.1	2.4
			2	63.2	28.2	2.9	1.1	3.1	1.2	0.0	0.1	0.2	2.4
			3	60.0	33.5	2.0	0.8	1.5	1.8	0.1	0.0	0.3	1.9
			4	58.3	34.7	2.6	0.8	1.6	1.5	0.1	0.1	0.2	1.8
			5	63.9	31.6	1.9	0.5	0.3	1.2	0.2	0.1	0.2	2.2
		平均	61.4	31.1	2.9	1.0	1.4	1.8	0.1	0.1	0.2	2.1	
		CSH間 充填物	6	48.7	6.3	20.2	18.2	5.5	0.5	0.4	0.1	0.1	8.3
			7	52.3	5.0	25.9	12.2	3.7	0.2	0.6	0.2	0.0	11.2
			8	51.8	4.9	24.7	14.2	3.6	0.4	0.2	0.1	0.0	11.3
			9	47.8	6.1	25.8	0.3	0.1	19.8	0.1	0.0	0.1	8.4
10	50.7		1.9	24.1	1.1	0.9	21.2	0.0	0.0	0.1	28.9		
平均	50.3	4.8	24.1	9.2	2.8	8.4	0.2	0.1	0.1	13.6			

図 2.1-73 反射電子像観察と組成分析結果 (OPC-45、1/100 人工海水)

反射電子像		EDS測定濃度(%)										Ca/Si mol比	
		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl			
OPC-60 溶脱部		CSH	1	58.6	33.8	1.8	1.0	1.5	1.3	0.4	0.1	1.4	1.9
			2	56.8	35.0	1.9	0.5	1.1	2.9	0.6	0.1	1.2	1.7
			3	55.7	36.6	1.3	0.8	1.7	1.4	0.2	0.0	2.4	1.6
			4	54.8	34.1	2.8	0.8	3.1	2.6	0.6	0.1	1.1	1.7
			5	58.7	34.5	1.4	0.7	1.0	2.2	0.3	0.0	1.2	1.8
		平均	56.9	34.8	1.8	0.8	1.7	2.1	0.4	0.1	1.5	1.8	
		CSH間 充填物	6	49.9	5.0	26.2	13.8	3.8	0.6	0.4	0.1	0.2	10.6
			7	45.2	8.2	18.5	16.5	8.1	2.2	0.2	0.0	1.0	5.9
			8	48.1	9.2	21.7	12.4	4.6	3.0	0.2	0.0	0.8	5.6
			9	46.3	8.0	23.0	12.9	7.6	1.1	0.3	0.2	0.6	6.2
10	49.7		7.0	23.2	14.3	4.1	1.0	0.2	0.0	0.4	7.6		
平均	47.8	7.5	22.5	14.0	5.7	1.6	0.3	0.1	0.6	7.2			
OPC-60 Cl浸透部		CSH	1	55.6	36.4	1.6	0.9	1.6	1.1	0.2	0.0	2.6	1.6
			2	59.5	32.3	2.5	1.9	0.6	0.9	0.1	0.0	2.1	2.0
			3	54.9	36.3	2.4	1.3	1.8	1.1	0.1	0.0	1.9	1.6
			4	56.4	35.3	1.9	1.0	1.7	1.0	0.1	0.1	2.6	1.7
			5	55.2	36.5	2.0	0.9	1.6	0.9	0.1	0.0	2.8	1.6
		平均	56.3	35.4	2.1	1.2	1.5	1.0	0.1	0.0	2.4	1.7	
		CSH間 充填物	6	49.4	4.0	27.9	13.6	4.5	0.4	0.1	0.0	0.1	13.1
			7	51.4	7.3	26.2	10.2	3.6	0.5	0.3	0.3	0.2	7.5
			8	51.0	5.3	28.2	10.5	2.4	0.3	1.3	0.8	0.2	10.2
			9	48.8	4.2	24.8	18.8	2.7	0.3	0.2	0.1	0.1	12.5
10	56.5		5.0	33.7	2.8	0.8	0.4	0.6	0.1	0.1	12.1		
平均	51.4	5.2	28.2	11.2	2.8	0.4	0.5	0.2	0.2	11.1			
OPC-60 深層部		CSH	1	53.4	38.0	2.0	0.7	1.6	1.3	0.3	0.0	2.8	1.5
			2	58.1	33.0	2.3	0.7	1.9	1.3	0.2	0.0	2.6	1.9
			3	62.6	29.1	2.3	1.2	1.6	0.9	0.1	0.1	2.1	2.3
			4	62.6	31.2	1.8	0.9	0.7	1.1	0.2	0.1	1.5	2.1
			5	55.9	36.0	1.9	0.8	1.5	1.4	0.2	0.0	2.2	1.7
		平均	58.5	33.5	2.1	0.9	1.4	1.2	0.2	0.1	2.3	1.9	
		CSH間 充填物	6	51.7	6.8	21.7	0.2	0.1	13.6	0.2	0.0	5.6	8.1
			7	47.8	4.5	26.1	12.8	7.8	0.1	0.3	0.4	0.1	11.3
			8	50.2	4.6	26.2	13.6	4.5	0.3	0.4	0.1	0.1	11.8
			9	50.1	4.9	26.3	13.1	4.8	0.2	0.4	0.1	0.1	11.1
10	49.9		4.7	27.4	12.7	4.4	0.4	0.2	0.0	0.2	11.4		
平均	49.9	5.1	25.6	10.5	4.4	2.9	0.3	0.1	1.2	10.7			

図 2.1-74 反射電子像観察と組成分析結果 (OPC-60、人工海水)

反射電子像		EDS測定濃度(%)										Ca/Si mol比	
		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl			
OPC-60 溶脱部		CSH	1	64.3	26.4	2.2	2.5	1.3	1.9	0.1	0.0	1.4	2.6
			2	61.1	32.0	1.5	1.2	1.9	1.2	0.1	0.0	1.0	2.0
			3	58.1	35.7	1.3	0.9	1.3	1.3	0.0	0.0	1.4	1.7
			4	55.6	35.8	2.1	0.8	2.4	2.1	0.2	0.0	1.0	1.7
			5	62.0	32.5	1.0	1.0	0.8	1.2	0.1	0.0	1.2	2.0
		平均	60.2	32.5	1.6	1.3	1.5	1.5	0.1	0.0	1.2	2.0	
		CSH間 充填物	6	52.9	6.3	27.4	8.9	2.8	0.6	0.8	0.1	0.2	9.0
			7	48.8	5.5	29.5	10.4	4.0	0.6	0.7	0.3	0.1	9.5
			8	51.8	8.7	24.2	9.8	4.2	0.5	0.5	0.1	0.1	6.4
			9	49.6	5.8	25.2	13.8	4.8	0.4	0.2	0.0	0.2	9.2
10	46.9		10.7	20.6	13.2	5.5	2.0	0.3	0.0	0.8	4.7		
平均	50.0	7.4	25.4	11.2	4.3	0.8	0.5	0.1	0.3	7.8			
OPC-60 Cl浸透部		CSH	1	55.1	34.4	2.2	1.3	1.8	1.3	0.1	0.0	3.8	1.7
			2	62.0	31.4	1.9	0.6	1.3	1.0	0.1	0.0	1.5	2.1
			3	56.0	36.9	2.1	0.8	1.0	1.2	0.1	0.0	1.8	1.6
			4	55.0	37.0	2.3	0.8	1.6	1.2	0.1	0.0	2.0	1.6
			5	56.4	37.0	1.7	1.0	0.5	1.1	0.1	0.0	2.1	1.6
		平均	56.9	35.4	2.0	0.9	1.2	1.2	0.1	0.0	2.2	1.7	
		CSH間 充填物	6	50.7	4.3	26.6	14.2	3.8	0.1	0.3	0.1	0.1	12.6
			7	50.9	4.5	25.0	15.2	4.0	0.2	0.2	0.0	0.1	12.1
			8	50.4	4.9	26.5	12.9	4.7	0.1	0.3	0.2	0.1	11.1
			9	50.1	5.0	24.9	14.6	4.5	0.4	0.1	0.0	0.3	10.7
10	47.8		4.5	25.8	10.9	9.5	0.5	0.4	0.3	0.1	11.3		
平均	50.0	4.6	25.8	13.5	5.3	0.3	0.3	0.1	0.1	11.6			
OPC-60 深層部		CSH	1	57.6	34.1	2.0	1.0	1.8	1.6	0.1	0.0	1.8	1.8
			2	55.5	36.5	2.6	0.8	1.7	1.6	0.1	0.0	1.2	1.6
			3	58.1	35.0	2.3	0.9	1.3	1.3	0.1	0.0	1.0	1.8
			4	61.9	31.3	2.6	0.9	0.5	2.0	0.1	0.1	0.5	2.1
			5	59.2	34.3	1.9	0.6	1.3	1.1	0.1	0.0	1.4	1.8
		平均	58.5	34.2	2.3	0.8	1.3	1.5	0.1	0.0	1.2	1.8	
		CSH間 充填物	6	72.1	24.4	1.4	0.5	1.0	0.2	0.1	0.1	0.0	3.2
			7	98.3	1.0	0.1	0.2	0.0	0.2	0.0	0.0	0.1	107.1
			8	50.1	4.8	26.2	14.0	4.1	0.5	0.2	0.0	0.1	11.3
			9	50.4	6.5	22.7	14.5	4.7	0.6	0.2	0.1	0.2	8.3
10	49.1		5.2	26.0	13.6	5.3	0.3	0.3	0.0	0.1	10.2		
平均	64.0	8.4	15.3	8.6	3.0	0.4	0.2	0.1	0.1	28.0			

図 2.1-75 反射電子像観察と組成分析結果 (OPC-60、1/10 人工海水)

反射電子像		EDS測定濃度(%)										Ca/Si mol比	
		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl			
OPC-60 溶脱部		CSH	1	56.5	37.6	1.9	0.8	1.5	0.9	0.0	0.0	0.7	1.6
			2	59.9	32.5	2.4	1.4	2.2	0.9	0.1	0.0	0.7	2.0
			3	56.9	36.8	2.1	0.8	1.8	0.9	0.0	0.0	0.7	1.7
			4	57.6	36.5	1.9	0.8	1.5	1.0	0.0	0.0	0.7	1.7
			5	54.9	39.6	1.8	0.7	1.3	1.0	0.0	0.0	0.7	1.5
	平均	57.1	36.6	2.0	0.9	1.7	0.9	0.0	0.0	0.7	1.7		
	CSH間 充填物	6	47.6	5.5	28.1	9.0	8.1	0.3	0.8	0.4	0.1	9.2	
		7	50.9	4.7	23.6	16.3	3.8	0.4	0.1	0.0	0.1	11.5	
		8	49.8	4.5	27.1	12.5	5.9	0.1	0.2	0.0	0.1	12.0	
		9	49.6	4.2	27.1	14.5	4.2	0.2	0.1	0.0	0.0	12.7	
10		54.8	5.2	26.3	10.7	1.9	0.4	0.3	0.1	0.1	11.2		
平均	50.5	4.8	26.4	12.6	4.8	0.3	0.3	0.1	0.1	11.3			
OPC-60 Cl浸透部		CSH	1	59.5	34.3	2.0	0.8	1.5	0.9	0.0	0.0	1.0	1.9
			2	56.8	36.3	2.4	1.2	1.0	1.2	0.1	0.0	1.0	1.7
			3	65.3	26.5	2.5	0.8	0.7	3.4	0.2	0.0	0.4	2.6
			4	59.5	32.1	3.2	0.8	2.4	1.0	0.1	0.0	0.9	2.0
			5	54.9	31.7	5.9	3.6	1.7	1.4	0.2	0.0	0.6	1.9
	平均	59.2	32.2	3.2	1.5	1.5	1.6	0.1	0.0	0.8	2.0		
	CSH間 充填物	6	61.3	33.7	1.7	0.8	0.6	1.1	0.3	0.2	0.2	2.0	
		7	50.8	3.9	27.3	13.2	4.2	0.2	0.1	0.2	0.1	14.1	
		8	49.4	4.3	24.3	17.3	4.1	0.4	0.1	0.0	0.1	12.3	
		9	96.6	2.6	0.2	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	39.7	
10		50.9	4.1	24.7	15.7	4.0	0.3	0.1	0.1	0.0	13.1		
平均	61.8	9.7	15.6	9.5	2.6	0.4	0.1	0.1	0.1	16.2			
OPC-60 深層部		CSH	1	58.2	34.8	2.2	0.9	1.6	1.5	0.1	0.0	0.6	1.8
			2	58.3	34.6	2.1	1.0	1.6	1.6	0.0	0.1	0.6	1.8
			3	57.4	36.3	2.5	0.9	1.0	1.3	0.1	0.0	0.4	1.7
			4	59.8	34.5	2.7	0.7	0.5	1.2	0.3	0.0	0.2	1.9
			5	57.2	36.0	2.7	0.8	1.6	1.1	0.1	0.0	0.5	1.7
	平均	58.2	35.2	2.5	0.9	1.3	1.3	0.1	0.0	0.5	1.8		
	CSH間 充填物	6	51.4	4.8	25.7	13.2	4.1	0.4	0.3	0.1	0.0	11.5	
		7	50.1	4.7	26.8	13.1	4.5	0.4	0.3	0.1	0.0	11.5	
		8	51.4	4.5	25.7	13.8	4.1	0.2	0.2	0.0	0.0	12.1	
		9	52.0	4.7	20.1	19.9	2.7	0.2	0.2	0.1	0.1	11.8	
10		50.2	15.2	14.1	13.8	3.1	2.9	0.1	0.0	0.4	3.5		
平均	51.0	6.8	22.5	14.8	3.7	0.8	0.2	0.1	0.1	10.1			

図 2.1-76 反射電子像観察と組成分析結果 (OPC-60、1/100 人工海水)

反射電子像		EDS測定濃度(%)										Ca/Si mol比
		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl		
FAC30 溶脱部	CSH	1	10.1	29.1	41.0	0.7	16.7	0.6	0.7	0.8	0.3	0.4
		2	19.8	34.0	8.7	2.2	30.5	1.4	0.5	1.9	0.9	0.6
		3	14.0	35.6	10.5	1.1	33.6	1.6	0.7	1.7	1.2	0.4
		4	31.7	37.4	7.6	1.0	18.6	0.8	0.5	0.9	1.4	0.9
		5	11.6	33.4	30.8	1.1	20.7	0.4	0.3	0.7	1.0	0.4
		平均	17.4	33.9	19.7	1.2	24.0	1.0	0.6	1.2	1.0	0.5
	CSH間 充填物	6	49.5	8.6	26.5	10.1	2.9	1.6	0.2	0.2	0.3	6.2
		7	50.4	5.9	24.2	14.2	4.0	0.8	0.1	0.1	0.2	9.2
		8	48.9	4.9	27.8	12.9	5.0	0.1	0.2	0.1	0.1	10.7
		9	33.7	23.7	9.7	10.9	17.3	2.8	0.5	0.4	1.0	1.5
		10	46.2	10.2	24.9	12.9	3.5	1.4	0.3	0.1	0.4	4.9
平均	45.7	10.6	22.6	12.2	6.6	1.4	0.3	0.2	0.4	6.5		
FAC30 Cl浸透部	CSH	1	46.2	31.7	14.7	2.7	2.0	1.6	0.4	0.2	0.4	1.6
		2	46.7	35.8	7.0	1.4	5.0	1.8	0.7	0.3	1.2	1.4
		3	54.9	27.9	8.0	4.9	1.5	1.7	0.3	0.2	0.5	2.1
		4	53.4	32.1	7.7	0.7	1.0	2.2	0.8	1.0	0.9	1.8
		5	51.6	39.2	5.1	1.0	0.5	1.1	0.4	0.3	0.7	1.4
		平均	50.5	33.3	8.5	2.2	2.0	1.7	0.5	0.4	0.8	1.7
	CSH間 充填物	6	46.4	7.6	26.4	13.3	5.2	0.5	0.4	0.1	0.2	6.6
		7	55.2	6.1	28.7	5.2	2.0	0.1	1.5	1.1	0.1	9.7
		8	51.7	5.5	25.7	12.8	2.6	0.1	0.7	0.9	0.1	10.2
		9	52.9	9.3	21.8	11.8	3.5	0.1	0.2	0.3	0.1	6.1
		10	49.3	4.6	26.5	15.6	3.4	0.1	0.3	0.0	0.1	11.4
平均	51.1	6.6	25.8	11.7	3.3	0.2	0.6	0.5	0.1	8.8		
FAC30 深層部	CSH	1	50.1	38.6	6.6	1.0	2.2	0.7	0.3	0.3	0.1	1.4
		2	53.1	38.4	5.4	1.0	0.6	0.8	0.2	0.3	0.1	1.5
		3	54.5	36.4	5.5	1.0	1.0	1.0	0.2	0.3	0.1	1.6
		4	54.9	37.1	5.2	0.9	0.3	0.8	0.3	0.4	0.1	1.6
		5	56.3	34.0	5.1	1.6	1.7	0.7	0.2	0.3	0.1	1.8
		平均	53.8	36.9	5.6	1.1	1.1	0.8	0.2	0.3	0.1	1.6
	CSH間 充填物	6	53.1	6.7	26.3	8.6	3.0	0.1	1.3	0.8	0.0	8.4
		7	46.4	4.9	31.3	10.3	5.3	0.3	0.8	0.7	0.0	10.1
		8	48.9	4.5	27.5	12.7	5.3	0.2	0.5	0.4	0.0	11.7
		9	78.7	11.1	8.7	0.5	0.4	0.3	0.1	0.3	0.1	7.6
		10	46.3	19.4	16.9	10.1	4.7	1.9	0.4	0.2	0.1	2.6
平均	54.7	9.3	22.1	8.4	3.7	0.6	0.6	0.5	0.1	8.1		

図 2.1-77 反射電子像観察と組成分析結果 (FAC30、人工海水)

反射電子像		EDS測定濃度(%)										Ca/Si mol比	
		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl			
FAC30 溶脱部		CSH	1	89.7	5.5	1.1	0.3	1.6	1.3	0.1	0.1	0.4	17.6
			2	83.3	4.9	3.9	0.4	3.7	3.2	0.1	0.1	0.5	18.2
			3	69.4	21.7	2.8	0.7	2.1	2.2	0.5	0.3	0.3	3.4
			4	72.4	19.7	3.1	0.8	1.7	1.4	0.5	0.3	0.2	3.9
			5	66.0	18.2	4.2	0.7	7.0	2.6	0.5	0.2	0.5	3.9
		平均	76.2	14.0	3.0	0.6	3.2	2.2	0.3	0.2	0.4	9.4	
		CSH間 充填物	6	50.4	6.0	25.0	13.1	4.7	0.3	0.3	0.1	0.1	9.0
			7	39.4	18.9	17.0	15.5	7.2	1.1	0.4	0.2	0.3	2.2
			8	46.3	9.0	23.0	15.7	4.9	0.7	0.2	0.1	0.2	5.5
			9	48.9	5.9	26.3	14.0	4.4	0.1	0.2	0.1	0.1	8.9
10	42.7		26.0	9.0	14.1	4.7	2.2	0.3	0.1	0.8	1.8		
平均	45.5	13.2	20.0	14.5	5.2	0.9	0.3	0.1	0.3	5.5			
FAC30 Cl浸透部		CSH	1	52.3	36.9	4.0	0.9	0.4	4.1	0.3	0.1	1.0	1.5
			2	50.7	28.5	9.9	4.7	2.9	1.8	0.2	0.0	1.2	1.9
			3	49.8	26.7	8.0	1.3	2.2	10.4	0.2	0.1	1.3	2.0
			4	59.9	25.9	5.7	4.0	0.8	2.4	0.1	0.1	1.0	2.5
			5	60.1	26.7	5.6	1.2	0.5	1.8	0.2	0.2	3.7	2.4
		平均	54.6	28.9	6.6	2.4	1.4	4.1	0.2	0.1	1.6	2.1	
		CSH間 充填物	6	49.6	1.9	28.6	0.6	0.0	9.7	0.1	0.0	9.4	27.9
			7	50.3	4.9	26.1	14.0	3.9	0.2	0.2	0.2	0.1	11.0
			8	50.5	5.1	23.9	16.1	3.8	0.3	0.1	0.1	0.1	10.5
			9	48.1	5.2	26.3	13.6	6.0	0.4	0.2	0.1	0.2	9.9
10	50.0		6.2	22.0	15.5	5.3	0.3	0.1	0.1	0.3	8.6		
平均	49.7	4.7	25.4	12.0	3.8	2.2	0.1	0.1	2.0	13.6			
FAC30 深層部		CSH	1	46.1	44.8	5.4	0.8	0.5	0.7	0.9	0.7	0.1	1.1
			2	46.3	32.8	10.4	3.7	4.4	1.2	0.6	0.5	0.1	1.5
			3	53.5	26.1	11.5	0.7	0.3	6.5	0.5	0.7	0.1	2.2
			4	49.6	30.6	11.2	2.6	3.9	0.8	0.5	0.7	0.1	1.7
			5	40.3	30.2	13.5	2.4	11.2	0.8	0.6	0.8	0.1	1.4
		平均	47.2	32.9	10.4	2.0	4.1	2.0	0.6	0.7	0.1	1.6	
		CSH間 充填物	6	46.4	8.4	25.6	0.4	0.0	18.6	0.3	0.2	0.1	5.9
			7	46.4	2.1	28.2	0.8	0.0	22.1	0.2	0.1	0.1	24.0
			8	47.5	4.2	27.7	0.4	0.1	19.7	0.2	0.1	0.1	12.1
			9	46.6	10.7	23.3	0.5	0.6	17.6	0.3	0.3	0.1	4.7
10	54.0		15.2	17.5	0.6	0.1	11.5	0.3	0.5	0.1	3.8		
平均	48.2	8.1	24.5	0.6	0.2	17.9	0.3	0.2	0.1	10.1			

図 2.1-78 反射電子像観察と組成分析結果 (FAC30、1/10 人工海水)

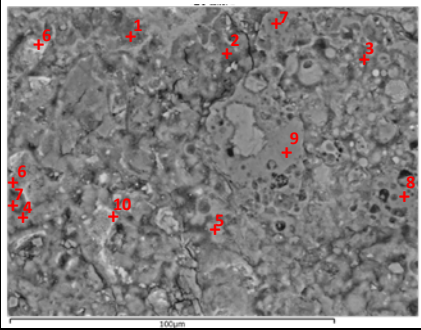
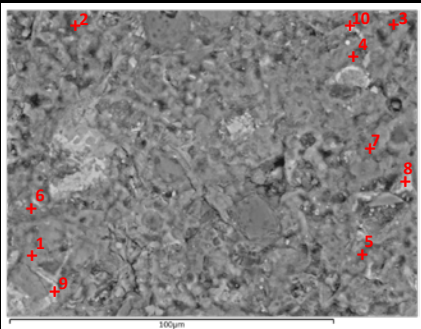
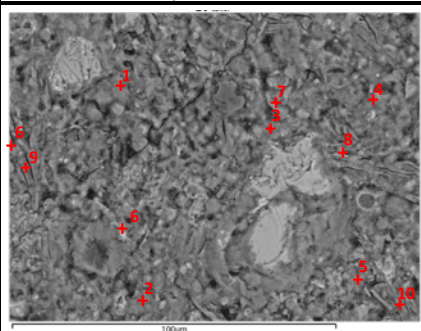
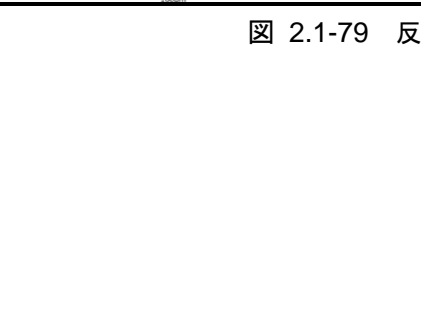
反射電子像		EDS測定濃度(%)										Ca/Si mol比	
		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl			
FAC30 溶脱部		CSH	1	44.3	39.5	8.1	1.3	4.7	0.8	0.5	0.6	0.2	1.2
			2	35.7	47.8	9.3	1.2	3.3	0.9	0.7	0.8	0.3	0.8
			3	29.8	44.3	20.0	1.6	1.3	0.5	0.4	1.8	0.2	0.7
			4	28.3	32.9	31.9	4.3	1.2	0.6	0.4	0.1	0.3	0.9
			5	40.6	45.8	8.9	0.9	1.0	1.0	1.1	0.3	0.4	0.9
	平均	35.8	42.1	15.6	1.9	2.3	0.8	0.6	0.7	0.3	0.9		
		CSH間 充填物	6	49.3	5.9	24.8	14.7	4.7	0.3	0.2	0.0	0.1	8.9
			7	0.5	63.0	34.2	0.2	0.3	0.3	0.8	0.6	0.0	0.0
			8	1.6	51.3	43.6	1.0	1.2	0.2	0.7	0.4	0.0	0.0
			9	0.6	48.6	46.2	2.3	1.3	0.2	0.6	0.2	0.0	0.0
10			50.0	8.1	23.9	12.3	4.2	0.8	0.4	0.2	0.1	6.6	
平均	20.4	35.4	34.5	6.1	2.3	0.4	0.5	0.3	0.1	3.1			
FAC30 Cl浸透部		CSH	1	52.5	35.6	5.6	1.0	2.0	1.6	0.1	0.0	1.5	1.6
			2	54.7	36.5	4.9	0.7	0.5	1.2	0.4	0.3	0.9	1.6
			3	51.3	38.8	5.7	1.6	0.3	1.3	0.3	0.2	0.5	1.4
			4	54.0	34.4	5.8	1.5	2.2	1.3	0.3	0.1	0.5	1.7
			5	50.6	32.9	7.5	1.9	2.0	2.3	0.6	0.3	1.9	1.6
	平均	52.6	35.6	5.9	1.3	1.4	1.6	0.3	0.2	1.1	1.6		
		CSH間 充填物	6	27.2	31.6	37.3	1.7	0.4	1.3	0.2	0.1	0.4	0.9
			7	40.0	35.2	21.6	0.6	0.4	1.2	0.4	0.1	0.5	1.2
			8	49.0	5.1	27.5	12.5	4.3	0.7	0.4	0.6	0.1	10.2
			9	53.5	6.7	24.7	9.9	2.3	0.3	1.3	0.6	0.7	8.5
10			48.6	13.6	20.7	12.9	2.6	0.9	0.2	0.1	0.3	3.8	
平均	43.6	18.5	26.3	7.5	2.0	0.9	0.5	0.3	0.4	4.9			
FAC30 深層部		CSH	1	46.7	41.1	7.7	0.8	1.0	1.0	0.8	0.7	0.2	1.2
			2	50.0	34.7	8.1	3.5	1.5	1.0	0.5	0.5	0.1	1.5
			3	53.4	31.6	7.4	3.8	1.8	1.1	0.3	0.4	0.1	1.8
			4	51.4	34.7	6.9	2.7	2.4	0.6	0.5	0.5	0.1	1.6
			5	48.6	37.7	8.0	0.8	1.9	1.2	0.8	0.8	0.2	1.4
	平均	50.0	35.9	7.6	2.3	1.7	1.0	0.6	0.6	0.1	1.5		
		CSH間 充填物	6	46.2	8.8	27.1	12.8	4.1	0.6	0.3	0.1	0.1	5.6
			7	46.6	12.0	22.7	0.6	0.2	17.1	0.4	0.3	0.1	4.2
			8	46.3	17.3	21.3	0.5	0.4	13.3	0.5	0.4	0.1	2.9
			9	47.9	5.2	27.6	0.2	0.0	18.7	0.1	0.1	0.1	9.8
10			46.4	1.7	28.2	0.3	0.0	23.1	0.1	0.0	0.1	28.7	
平均	46.7	9.0	25.4	2.9	0.9	14.6	0.3	0.2	0.1	10.2			

図 2.1-79 反射電子像観察と組成分析結果 (FAC30、1/100 人工海水)

反射電子像		EDS測定濃度(%)										Ca/Si mol比
		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl		
BFSC70 溶脱部	CSH	1	26.2	32.0	12.4	0.3	25.8	1.4	0.3	0.7	0.8	0.9
		2	34.3	33.2	8.3	0.7	19.8	1.2	0.4	1.0	1.0	1.1
		3	32.8	33.5	14.7	0.2	15.9	1.6	0.4	0.3	0.6	1.1
		4	48.5	22.8	8.5	5.6	5.6	8.2	0.3	0.3	0.2	2.3
		5	26.7	32.7	12.5	0.4	24.5	1.6	0.3	0.6	0.7	0.9
	平均	33.7	30.8	11.3	1.4	18.3	2.8	0.3	0.6	0.7	1.2	
	CSH間 充填物	6	34.2	9.5	16.3	10.7	5.0	23.7	0.2	0.3	0.1	3.8
		7	36.2	16.0	19.4	6.2	8.7	12.9	0.4	0.0	0.2	2.4
		8	36.6	26.9	19.0	2.7	8.9	5.0	0.2	0.1	0.5	1.5
		9	44.1	16.8	20.6	4.5	1.6	12.0	0.2	0.0	0.2	2.8
10		38.3	17.0	22.2	4.6	4.3	13.0	0.4	0.0	0.2	2.4	
平均	37.9	17.3	19.5	5.7	5.7	13.3	0.3	0.1	0.2	2.6		
BFSC70 Cl浸透部	CSH	1	50.6	29.4	9.0	0.8	5.7	3.4	0.1	0.2	0.7	1.8
		2	47.8	31.7	9.3	0.3	7.6	1.7	0.2	0.2	1.2	1.6
		3	63.4	28.3	4.4	0.6	0.7	1.8	0.1	0.2	0.4	2.4
		4	47.1	29.8	11.0	0.5	4.2	6.5	0.3	0.1	0.5	1.7
		5	53.1	30.9	7.4	0.5	4.3	2.6	0.2	0.2	0.6	1.8
	平均	52.4	30.0	8.2	0.5	4.5	3.2	0.2	0.2	0.7	1.9	
	CSH間 充填物	6	41.7	20.1	17.1	7.0	3.8	9.7	0.2	0.0	0.4	2.2
		7	48.5	7.8	24.8	0.8	0.4	15.8	0.3	0.1	1.5	6.7
		8	47.7	3.0	27.9	0.6	0.2	19.8	0.2	0.0	0.6	17.3
		9	45.6	6.7	26.5	1.4	0.2	17.5	0.2	0.0	1.9	7.3
10		48.4	34.6	8.6	0.5	2.9	3.8	0.5	0.1	0.5	1.5	
平均	46.4	14.4	21.0	2.0	1.5	13.3	0.3	0.1	1.0	7.0		
BFSC70 深層部	CSH	1	50.6	29.4	9.0	0.8	5.7	3.4	0.1	0.2	0.7	1.8
		2	47.8	31.7	9.3	0.3	7.6	1.7	0.2	0.2	1.2	1.6
		3	63.4	28.3	4.4	0.6	0.7	1.8	0.1	0.2	0.4	2.4
		4	47.1	29.8	11.0	0.5	4.2	6.5	0.3	0.1	0.5	1.7
		5	53.1	30.9	7.4	0.5	4.3	2.6	0.2	0.2	0.6	1.8
	平均	52.4	30.0	8.2	0.5	4.5	3.2	0.2	0.2	0.7	1.9	
	CSH間 充填物	6	41.7	20.1	17.1	7.0	3.8	9.7	0.2	0.0	0.4	2.2
		7	48.5	7.8	24.8	0.8	0.4	15.8	0.3	0.1	1.5	6.7
		8	47.7	3.0	27.9	0.6	0.2	19.8	0.2	0.0	0.6	17.3
		9	45.6	6.7	26.5	1.4	0.2	17.5	0.2	0.0	1.9	7.3
10		48.4	34.6	8.6	0.5	2.9	3.8	0.5	0.1	0.5	1.5	
平均	46.4	14.4	21.0	2.0	1.5	13.3	0.3	0.1	1.0	7.0		

図 2.1-80 反射電子像観察と組成分析結果 (BFSC70、人工海水)

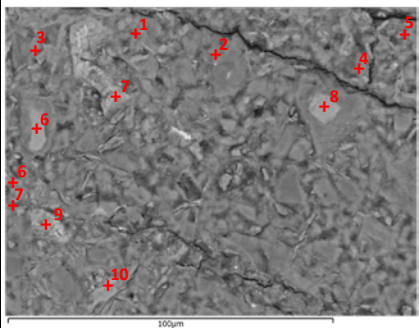
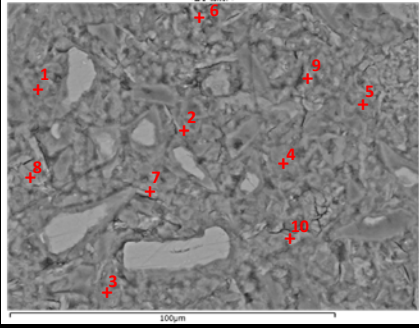
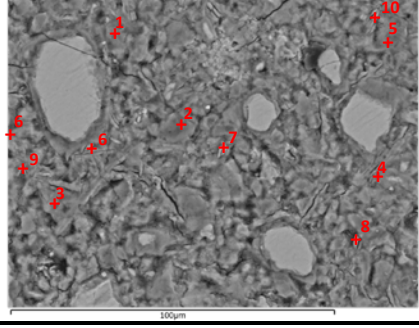
反射電子像		EDS測定濃度(%)										Ca/Si mol比	
		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl			
BFSC70 溶脱部		CSH	1	49.4	37.9	8.9	0.7	1.1	1.1	0.3	0.1	0.5	1.4
			2	43.4	37.8	11.3	0.5	5.1	1.0	0.3	0.1	0.4	1.2
			3	44.7	32.6	11.3	0.3	9.0	1.3	0.1	0.1	0.6	1.5
			4	40.8	41.3	10.2	0.5	4.4	1.2	0.8	0.3	0.4	1.1
			5	47.5	36.0	8.3	0.5	4.8	1.3	0.6	0.5	0.3	1.4
		平均	45.2	37.1	10.0	0.5	4.9	1.2	0.4	0.2	0.5	1.3	
		CSH間 充填物	6	42.4	33.9	14.2	0.1	6.0	2.7	0.3	0.4	0.0	1.3
			7	30.6	11.9	12.4	13.0	7.8	23.8	0.1	0.1	0.2	2.8
			8	42.5	32.6	14.8	0.1	6.4	3.0	0.2	0.3	0.0	1.4
			9	43.0	9.9	22.6	8.4	1.9	13.7	0.2	0.1	0.3	4.7
10	40.2		14.5	18.3	8.3	2.6	15.5	0.1	0.0	0.4	3.0		
平均	39.7	20.5	16.4	6.0	4.9	11.8	0.2	0.2	0.2	2.6			
BFSC70 Cl浸透部		CSH	1	49.8	33.7	6.8	0.3	1.5	6.6	0.3	0.1	0.9	1.6
			2	50.9	25.0	8.3	1.0	5.2	6.6	0.2	0.1	2.8	2.2
			3	51.9	32.2	6.3	0.2	0.6	7.9	0.4	0.1	0.5	1.7
			4	48.8	27.4	8.4	0.3	6.8	4.3	0.1	0.1	3.8	1.9
			5	55.5	28.6	5.6	1.1	2.7	4.9	0.1	0.1	1.4	2.1
		平均	51.4	29.4	7.1	0.6	3.3	6.1	0.2	0.1	1.9	1.9	
		CSH間 充填物	6	42.1	22.5	20.9	3.7	2.9	6.9	0.3	0.0	0.7	2.0
			7	51.7	4.7	26.9	0.2	0.2	8.0	0.1	0.0	8.3	11.9
			8	75.6	4.4	12.4	0.1	1.0	1.7	0.1	0.0	4.7	18.5
			9	50.9	15.4	20.2	0.6	0.6	6.1	0.2	0.0	5.9	3.5
10	47.3		11.4	26.5	0.9	0.2	7.7	0.2	0.0	5.7	4.5		
平均	53.5	11.7	21.4	1.1	1.0	6.1	0.1	0.0	5.1	8.1			
BFSC70 深層部		CSH	1	46.6	32.8	9.7	0.3	7.2	2.7	0.4	0.2	0.2	1.5
			2	45.7	28.0	11.1	0.6	11.4	2.6	0.2	0.1	0.2	1.7
			3	55.7	31.3	6.2	0.5	3.9	1.8	0.2	0.2	0.2	1.9
			4	48.0	32.0	10.8	0.3	4.0	3.9	0.4	0.4	0.1	1.6
			5	48.9	28.2	9.8	0.4	9.8	2.1	0.3	0.3	0.1	1.9
		平均	49.0	30.5	9.5	0.4	7.3	2.6	0.3	0.3	0.2	1.7	
		CSH間 充填物	6	44.2	7.3	26.6	0.5	0.8	20.2	0.1	0.1	0.1	6.5
			7	46.6	16.1	18.8	1.8	0.8	15.2	0.4	0.3	0.2	3.1
			8	48.2	10.8	22.9	0.4	0.6	16.5	0.3	0.2	0.1	4.8
			9	47.8	15.0	19.8	0.6	1.7	14.6	0.3	0.1	0.1	3.4
10	46.6		8.4	23.4	1.1	0.5	19.8	0.2	0.1	0.1	6.0		
平均	46.7	11.5	22.3	0.9	0.9	17.3	0.2	0.1	0.1	4.7			

図 2.1-81 反射電子像観察と組成分析結果 (BFSC70、1/10 人工海水)

反射電子像		EDS測定濃度(%)										Ca/Si mol比	
		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl			
BFSC70 溶脱部		CSH	1	49.1	30.1	11.7	0.5	7.2	1.0	0.1	0.1	0.2	1.7
			2	53.0	29.4	9.8	0.6	5.5	1.1	0.2	0.3	0.3	1.9
			3	25.2	39.3	21.8	0.2	11.9	0.8	0.3	0.3	0.2	0.7
			4	66.2	24.6	5.6	1.1	1.0	0.8	0.2	0.4	0.1	2.9
			5	66.3	23.0	6.5	0.4	2.1	0.9	0.2	0.4	0.1	3.1
		平均	52.0	29.3	11.1	0.6	5.5	0.9	0.2	0.3	0.2	2.1	
		CSH間 充填物	6	67.8	22.0	6.4	0.5	1.6	1.1	0.2	0.3	0.1	3.3
			7	57.7	26.7	9.7	0.6	3.6	1.0	0.5	0.1	0.2	2.3
			8	44.1	24.1	22.8	1.0	5.3	2.3	0.2	0.0	0.2	2.0
			9	43.1	24.9	19.7	3.8	3.6	4.2	0.2	0.1	0.3	1.9
10	34.2		38.8	14.7	0.5	9.9	1.1	0.4	0.1	0.3	0.9		
平均	49.4	27.3	14.7	1.3	4.8	2.0	0.3	0.1	0.2	2.1			
BFSC70 Cl浸透部		CSH	1	52.2	31.6	6.6	0.4	2.3	6.3	0.2	0.1	0.4	1.8
			2	50.3	32.0	6.9	0.4	4.9	3.9	0.3	0.1	1.1	1.7
			3	59.6	30.9	4.3	0.3	0.5	4.0	0.1	0.1	0.2	2.1
			4	48.1	30.9	8.3	0.4	5.6	5.2	0.3	0.1	1.0	1.7
			5	50.1	25.9	8.6	0.4	9.6	4.4	0.0	0.0	1.0	2.1
		平均	52.1	30.2	6.9	0.4	4.6	4.8	0.2	0.1	0.7	1.9	
		CSH間 充填物	6	47.8	5.8	24.7	0.6	0.3	20.3	0.2	0.0	0.2	8.8
			7	44.1	6.4	26.8	0.7	0.3	21.2	0.2	0.0	0.2	7.3
			8	47.0	6.7	24.9	0.9	0.4	19.6	0.2	0.0	0.3	7.6
			9	45.7	3.7	27.5	0.5	0.3	21.8	0.2	0.0	0.2	13.2
10	48.0		6.2	25.1	0.4	0.1	19.7	0.2	0.0	0.3	8.3		
平均	46.5	5.8	25.8	0.6	0.3	20.5	0.2	0.0	0.2	9.0			
BFSC70 深層部		CSH	1	50.2	33.0	7.9	0.5	5.7	2.1	0.3	0.2	0.2	1.6
			2	57.7	27.4	6.5	1.8	3.8	2.3	0.2	0.3	0.1	2.3
			3	59.0	21.4	8.2	1.1	3.1	6.7	0.2	0.2	0.1	3.0
			4	55.8	34.0	6.1	0.3	1.6	1.3	0.4	0.3	0.1	1.8
			5	46.8	25.9	11.8	0.7	11.9	2.2	0.3	0.2	0.2	1.9
		平均	53.9	28.3	8.1	0.9	5.2	2.9	0.3	0.2	0.1	2.1	
		CSH間 充填物	6	45.2	9.1	25.6	0.4	0.5	18.8	0.3	0.0	0.1	5.3
			7	38.1	20.2	17.0	7.0	7.9	9.5	0.2	0.0	0.1	2.0
			8	47.4	9.4	23.6	0.5	0.7	17.8	0.3	0.1	0.1	5.4
			9	42.0	22.4	22.2	2.8	3.1	7.1	0.2	0.0	0.1	2.0
10	50.7		28.0	11.4	0.3	7.3	2.0	0.1	0.0	0.1	1.9		
平均	44.7	17.8	20.0	2.2	3.9	11.1	0.2	0.1	0.1	3.3			

図 2.1-82 反射電子像観察と組成分析結果 (BFSC70、1/100 人工海水)

2) 接液面近傍の組成分布

接液面の組成分布を図 2.1-83～図 2.1-100 に示す。浸漬試験に使用した人工海水には、セメント成分と反応して容易に沈殿する炭酸イオンや Mg イオンなどを含んでいる。Cl イオンのように一部のセメント鉱物でしか固定されない成分は、拡散により深層に移動する一方で、炭酸イオンのようにセメントの主成分である Ca と反応する成分は、試料の極表層で沈殿することが推測される。本分析では溶脱部の極表層にあたる、接液面近傍の約 400 μm 深度に関して反射電子像と組成分布を取得した。OPC-45、OPC-60 の 1/10 人工海水に浸漬した試料は、接液面にドームが形成されており、ドームが浮き上がる過程で元々接液面であった試料表層もドームに付着し剥がれている。従って、この 2 試料に関しては、元接液面であったドーム部（ドーム部と呼ぶ）と新たに接液面となったドームの内部（ドーム内部と呼ぶ）の 2 か所に関して組成分布を取得した。分析対象の成分は、EPMA 分析でセメント成分の溶脱や海水成分の浸透が確認された、Ca、Mg、S、Cl とした。また、セメント相とセメント相外部に生成した鉱物の境界を確認するため、セメントの主要成分の 1 つであり、海水に含まれない Si の分布も取得した。なお、試料と試料を補強するために用いた樹脂の境界も確認できるように全ての図中に「樹脂」と記した。

OPC-45 の人工海水に浸漬した試料の表層では、最外部に 100 μm 位の Ca 部が確認された。Calcite (CaCO₃) と考えられる。次いで、この相とセメント相の間に 100 μm 位の Mg 部が確認された。Brucite (Mg(OH)₂) と考えられる。XRD 分析では、外部の生成鉱物と溶脱部の数 mm 間を区別せず粉末調整しており、それぞれ 100 μm 程度間の Calcite、Brucite は少量のため、ピークとして同定されなかったと推測した。1/10 人工海水に浸漬した試料のドーム部では、150 μm 位の Mg 部が確認された。Ca 部は確認されなかった。Mg イオンは 1/10 人工海水でも約 5mmol/L であるが炭酸イオンは約 0.2 mmol/L であり、この濃度の領域では Calcite の沈殿に至らなかったと推測した。ドーム内部では、Ca がブランク試料と比較して減少しているものの、成分の沈殿部などの特異な分布は見られなかった。1/100 人工海水に浸漬した試料では、Mg イオンは約 0.5mmol/L、炭酸イオンは約 0.02 mmol/L である。10 μm 位の Mg 部が確認され、Ca 部は確認されなかった。溶存イオンの濃度を反映した結果と考えられる。

OPC-60 の人工海水に浸漬した試料の表層では、最外部に 100 μm 位の Ca 部が確認され、次いで、100 μm 位の Mg 部が確認された。更に、これらの相とセメント相の間に同様の Ca 部と Mg 部が確認された。OPC-45 より空隙の多い OPC-60 では、セメント成分が外部へ溶脱しやすいため、セメント成分と海水成分が反応し、OPC-45 と比較して多く外部に沈殿したと考えた。1/10 人工海水に浸漬した試料のドーム部では、200 μm 位の Mg 部が確認された。Ca 部は確認されなかった。ドーム内部では、Ca がブランク試料と比較して減少しているものの、成分の沈殿部などの特異な分布は見られなかった。1/100 人工海水に浸漬した試料では、10 μm 位の Mg 部が確認され、Ca 部は確認されなかった。

FAC30 の人工海水に浸漬した試料の表層でも、OPC 系材料と同様に外部には Ca 部が確認された。厚さは 70 μm 位であった。Mg 部も確認されたが OPC 系材料とは生成位置が異なり、セメント相内の 50 μm 位であった。同部位では Ca 量が少ないことも確認された。1/10 人工海水に浸漬した試料では Mg 部は試料外部に数 μm、セメント相内に 50 μm 位であった。外部とセメント相内の Mg 部の濃度は異なり、生成した鉱物も異なっている可能性がある。また、Mg 部の内側では Ca の多い部位が確認された。1/100 人工海水に浸漬した試料では、セメント相内に数 μm 位の Mg 部が確認され、Mg 部の内側では Ca の多い部位が確認された。

BFSC70 の人工海水に浸漬した試料の表層でも、FAC30 と同様に外部には Ca 部が確認され、厚さは 50 μm 位であった。Mg 部の生成位置も FAC30 と同様でセメント相内 30 μm 位であった。

同部位では Ca 量が少ないことも確認された。1/10 人工海水に浸漬した試料では Mg 部は試料外部に数 μm 程度確認された。Ca 部は確認されなかった。1/100 人工海水に浸漬した試料では、成分の沈殿部などの特異な分布は見られなかった。海水成分の影響を受け生成した鉱物の形成状況は FAC30 と類似しているが、BFSC70の方が海水成分の影響が小さいと考えられる。

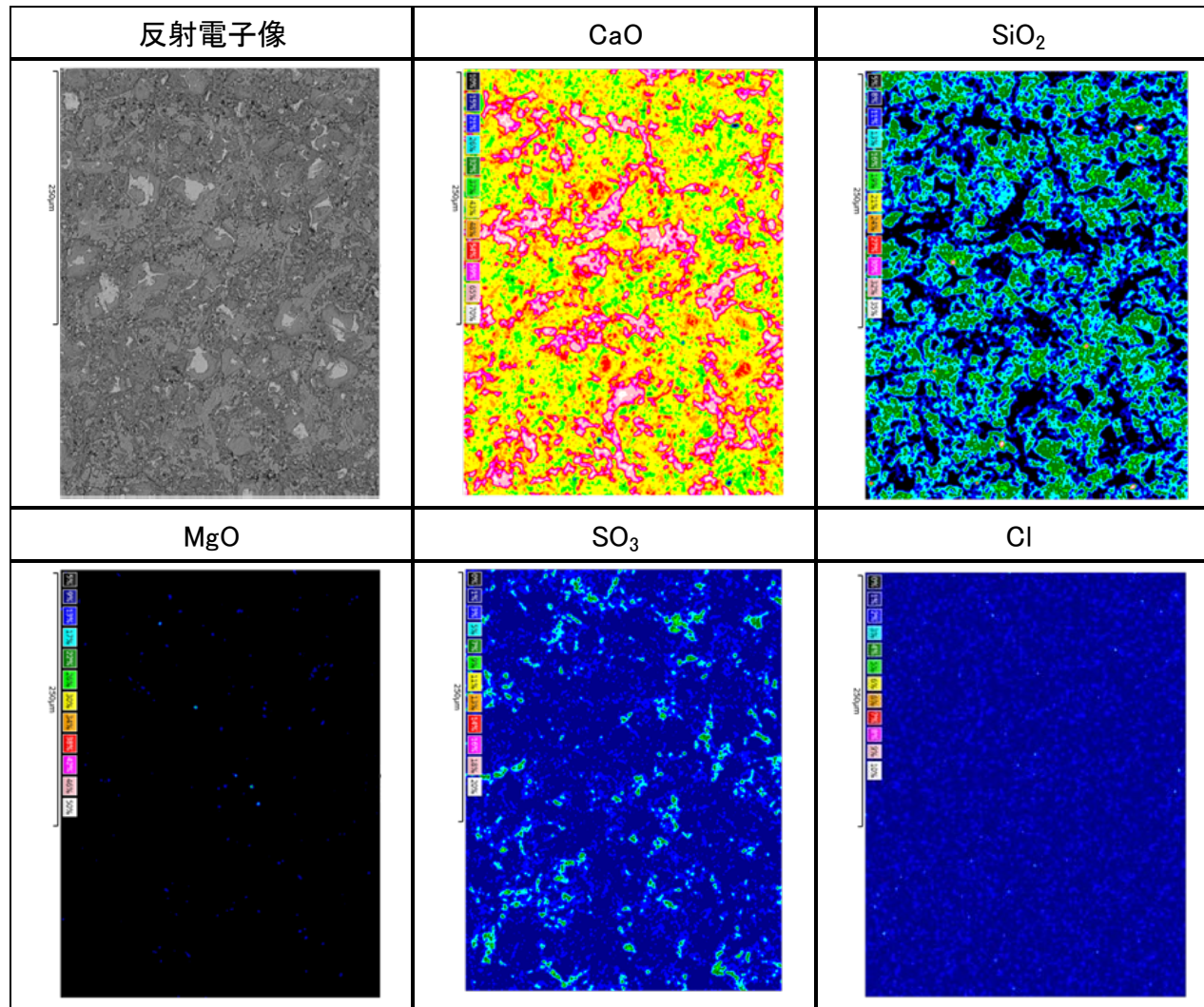


図 2.1-83 接液面近傍の組成分布 (OPC-45、BL)

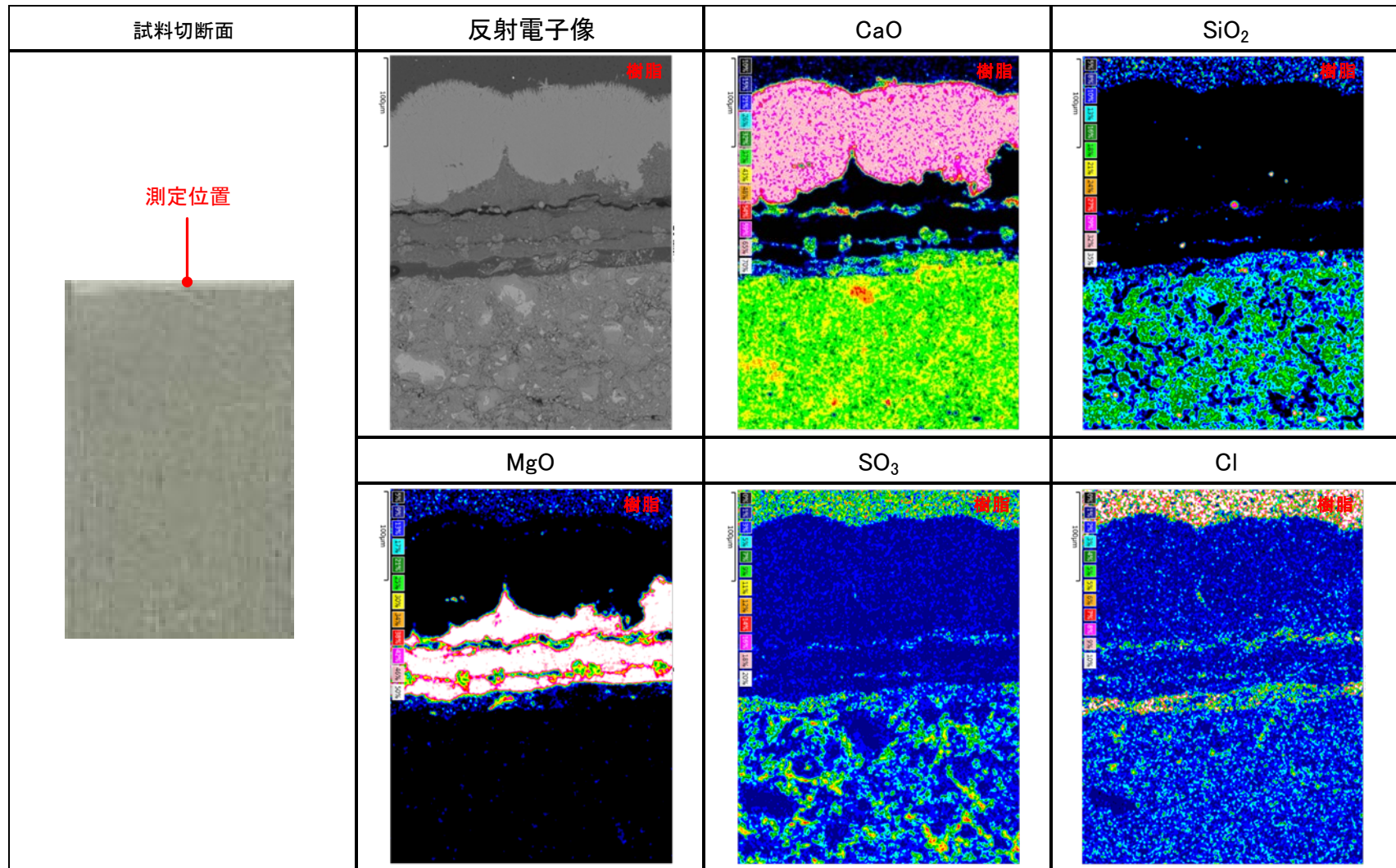


図 2.1-84 接液面近傍の組成分布 (OPC-45、人工海水)

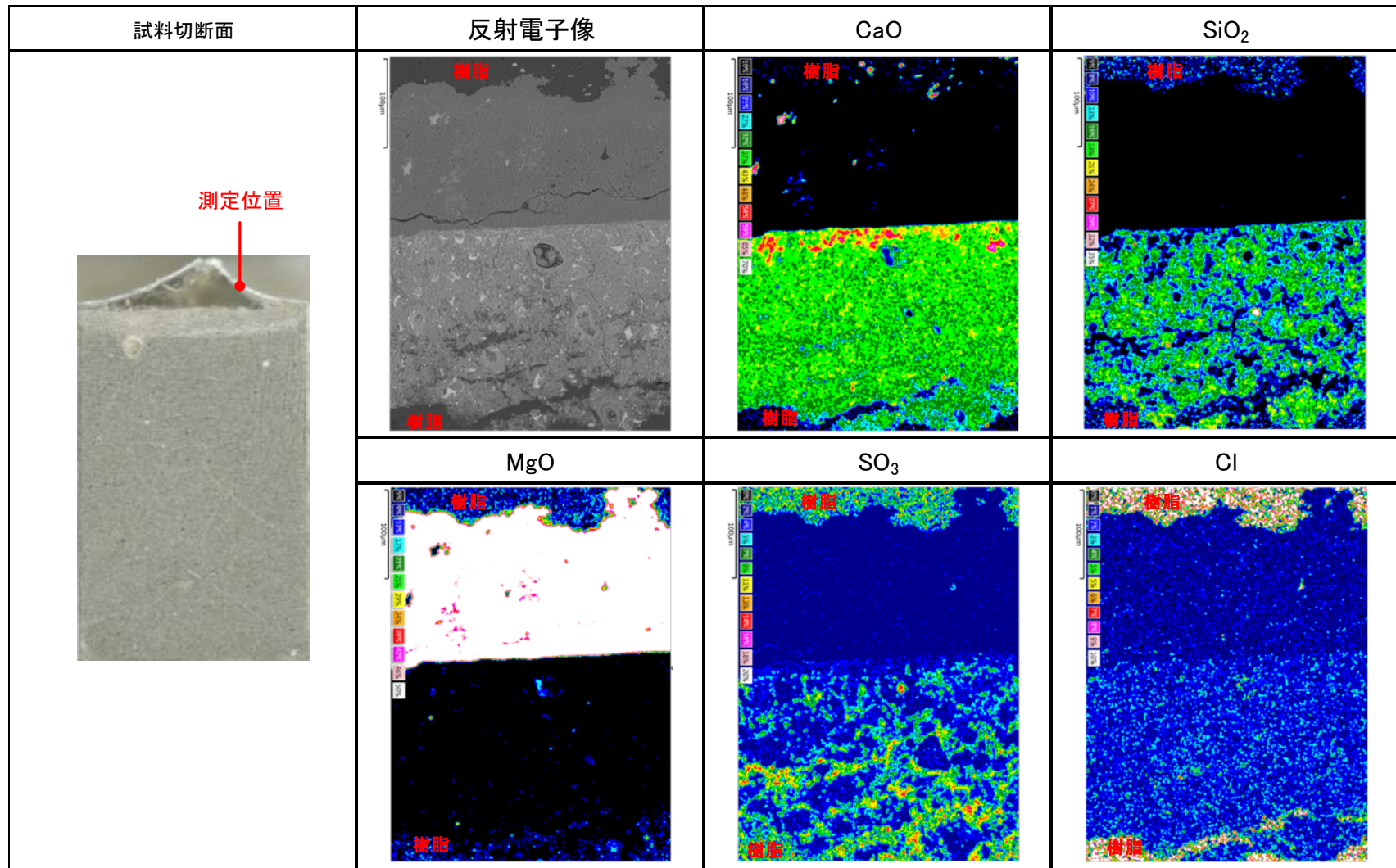


図 2.1-85 接液面近傍の組成分布 (OPC-45、1/10 人工海水-1)

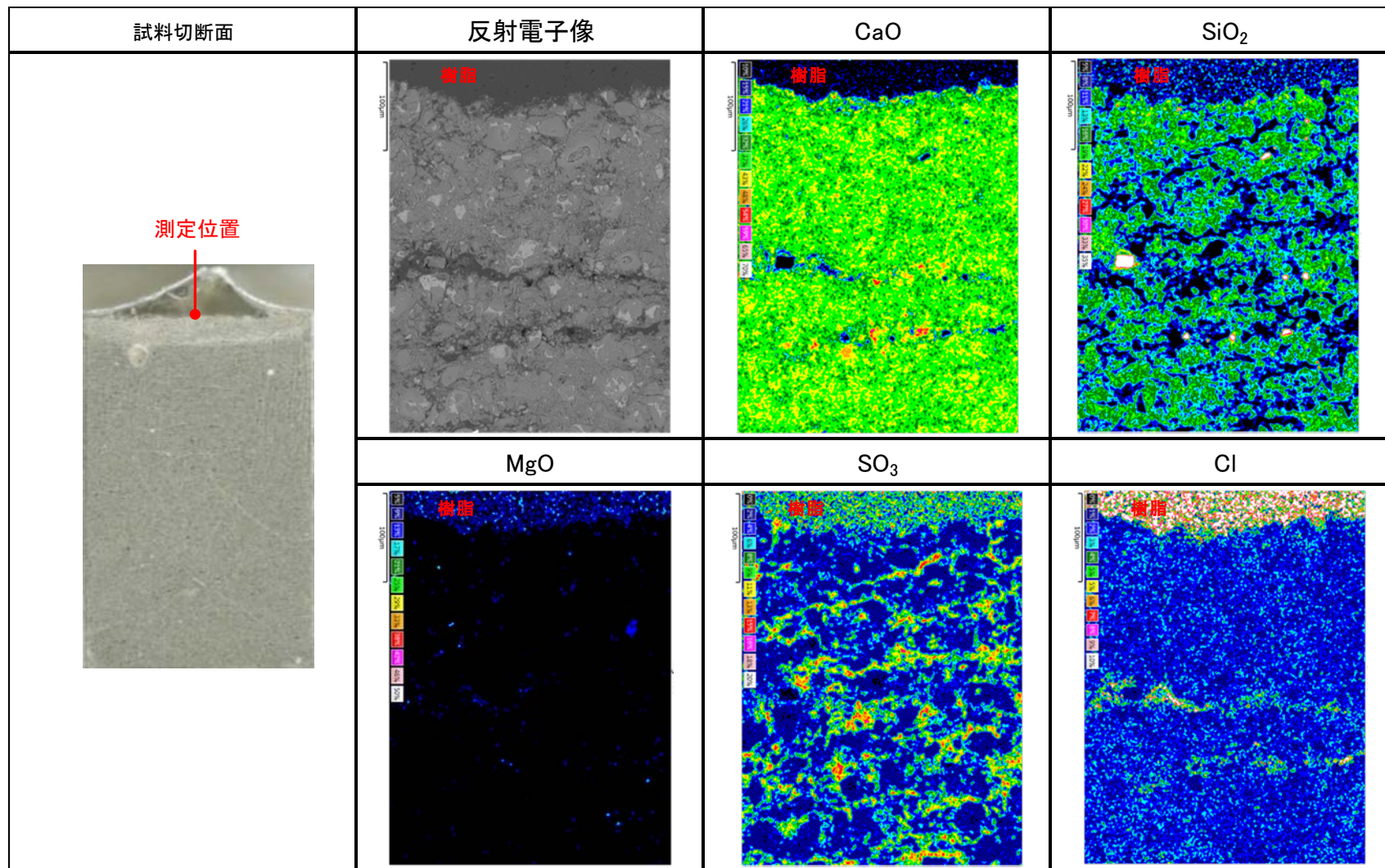


図 2.1-86 接液面近傍の組成分布 (OPC-45、1/10 人工海水-2)

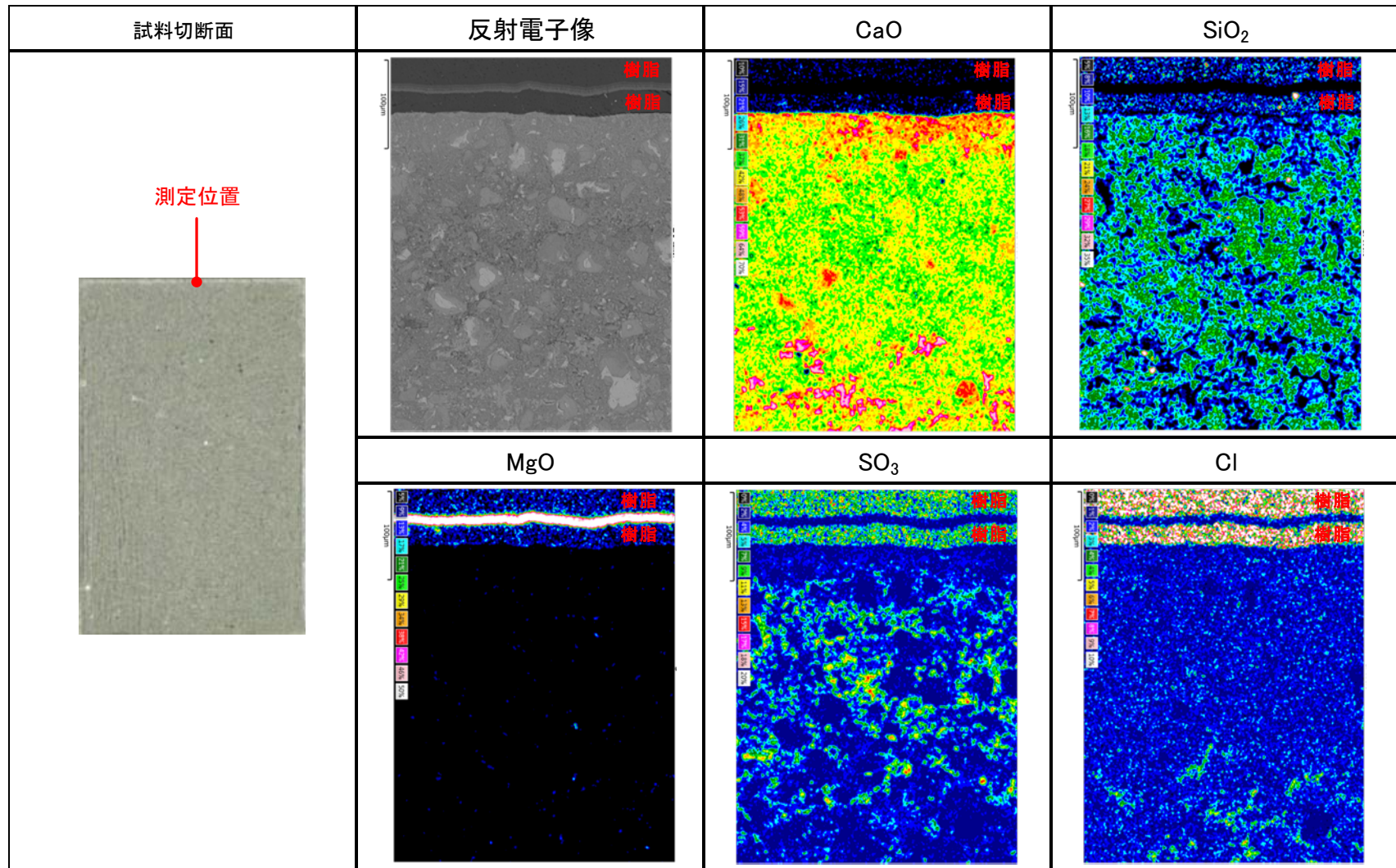


図 2.1-87 接液面近傍の組成分布 (OPC-45、1/100 人工海水)

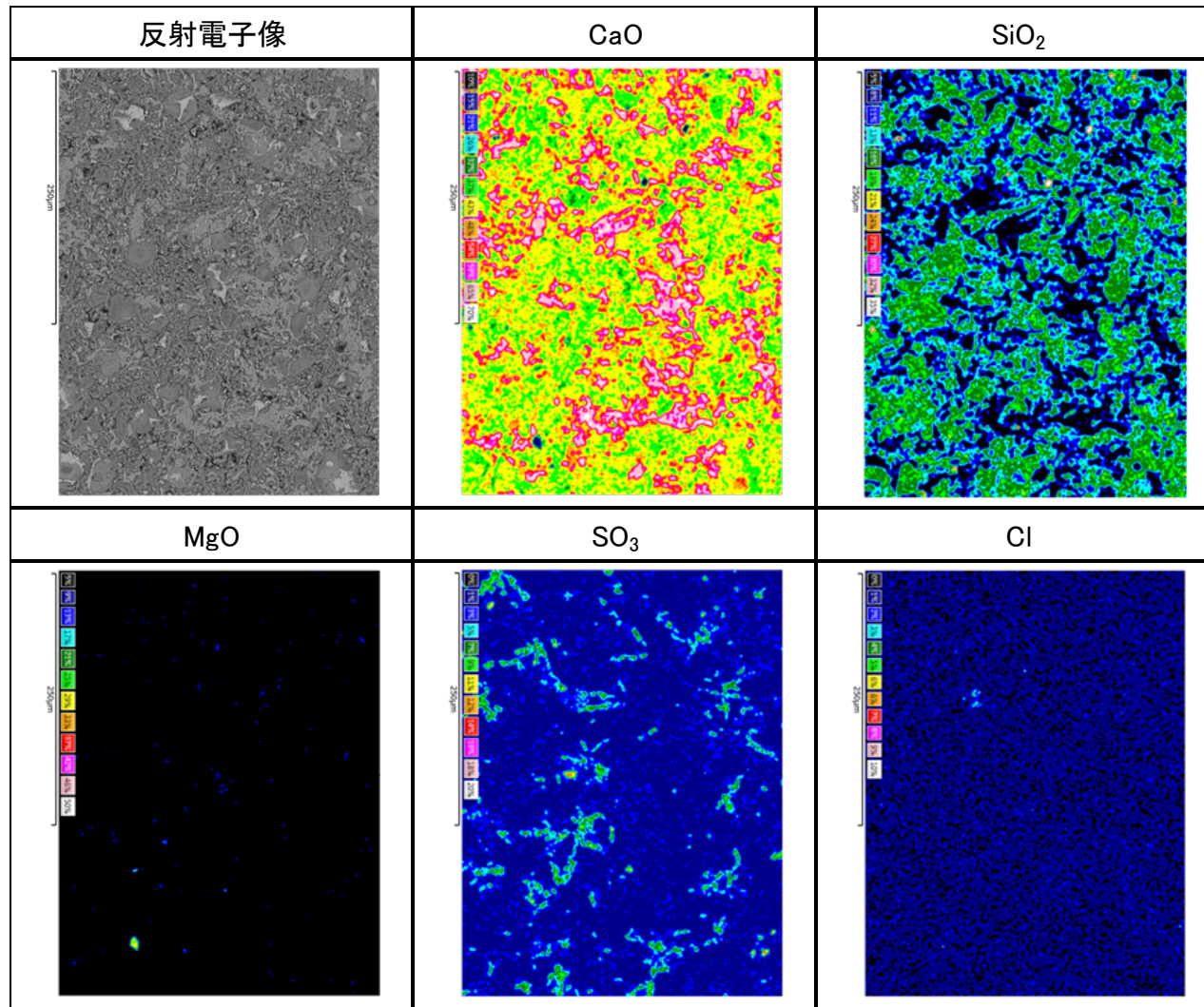


図 2.1-88 接液面近傍の組成分布 (OPC-60、BL)

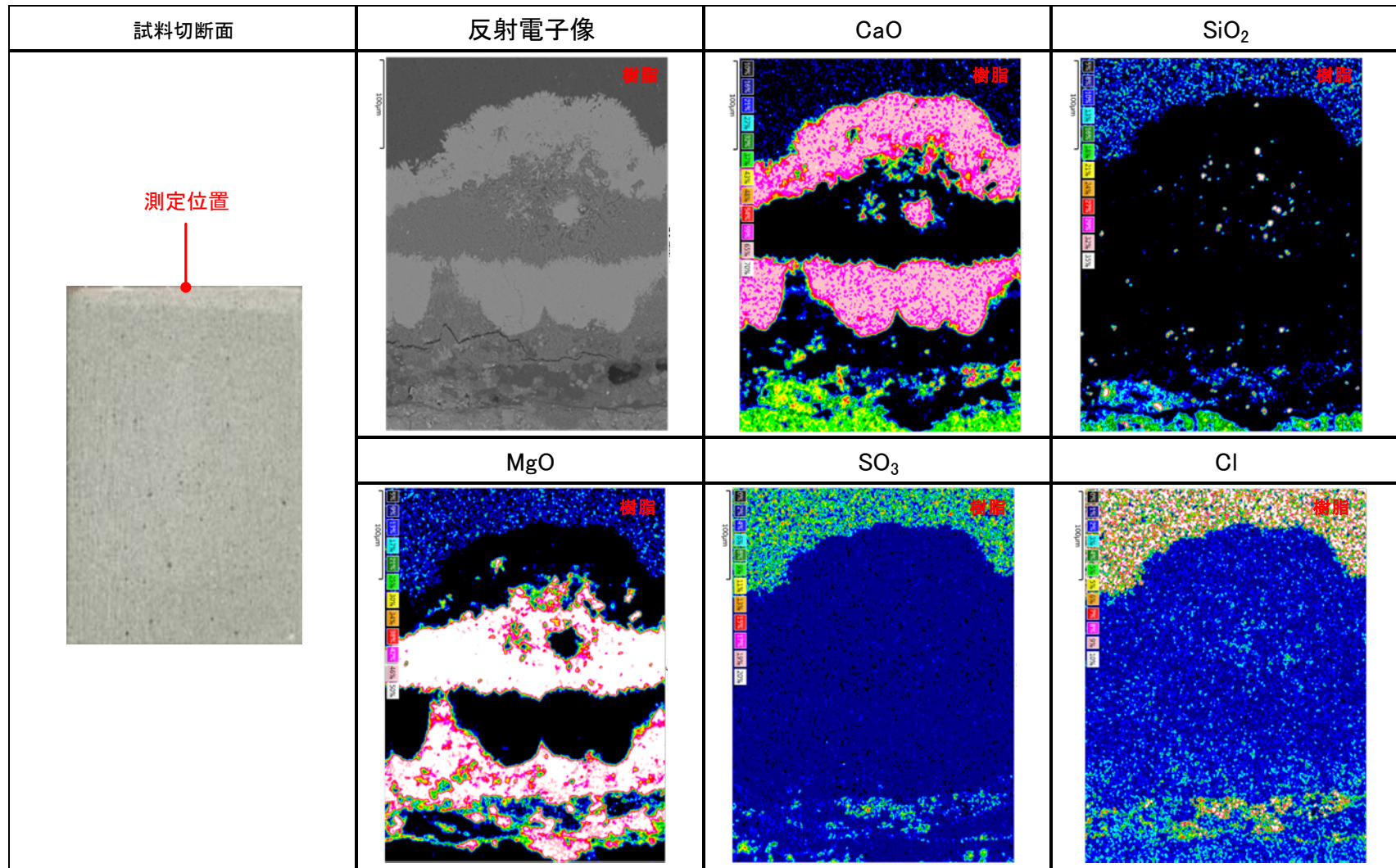


図 2.1-89 接液面近傍の組成分布 (OPC-60、人工海水)

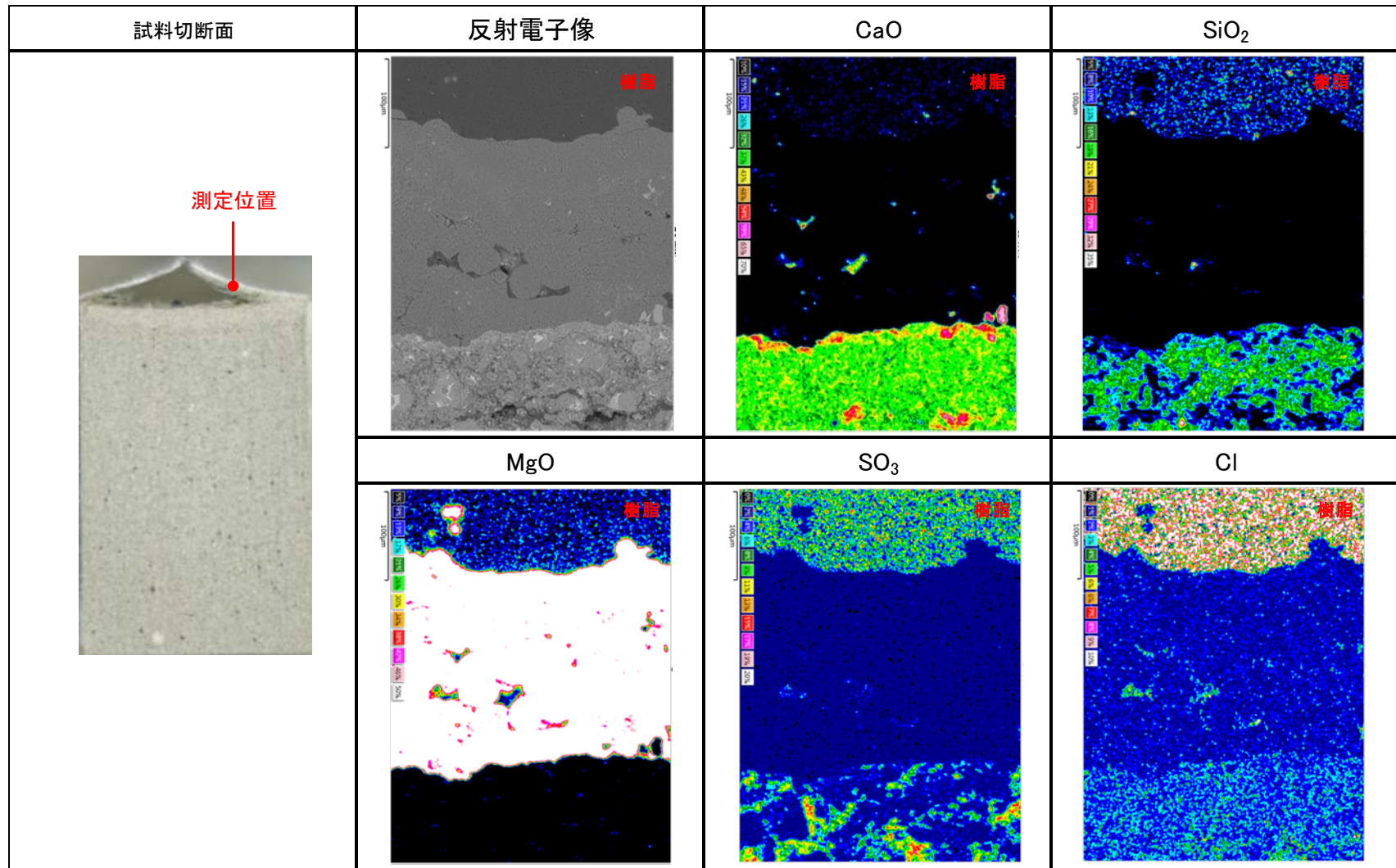


図 2.1-90 接液面近傍の組成分布 (OPC-60、1/10 人工海水-1)

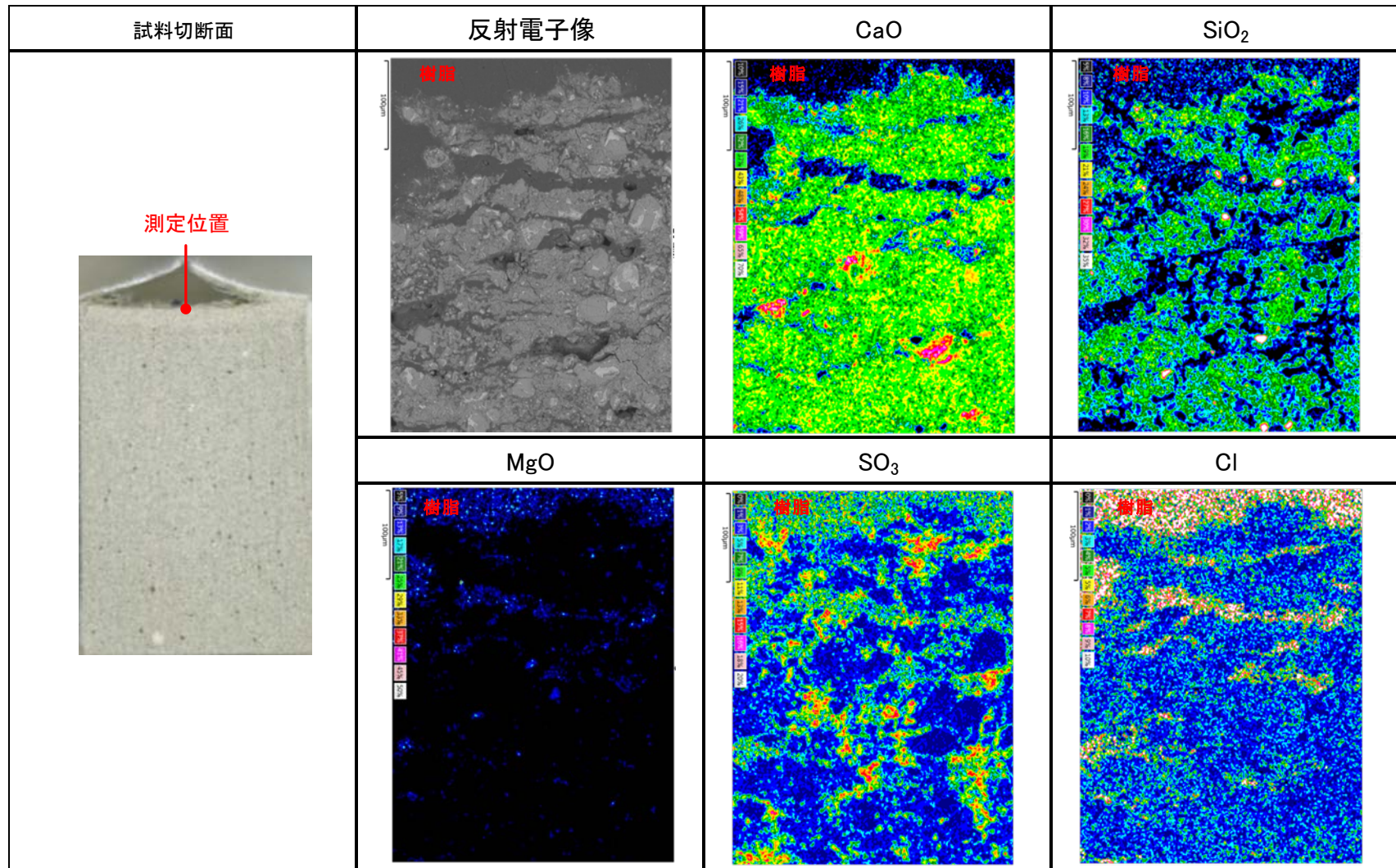


図 2.1-91 接液面近傍の組成分布 (OPC-60、1/10 人工海水-2)

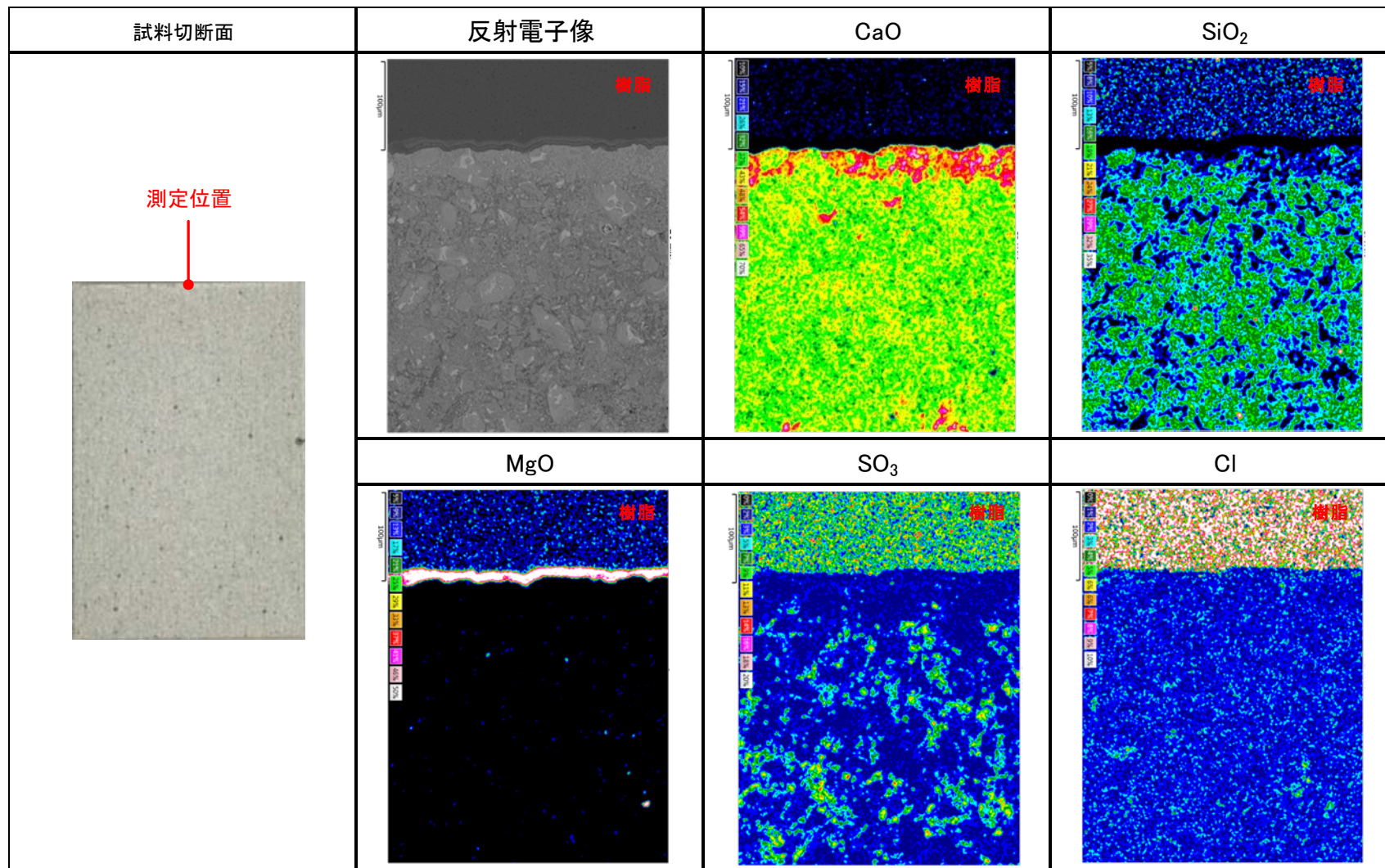


図 2.1-92 接液面近傍の組成分布 (OPC-60、1/100 人工海水)

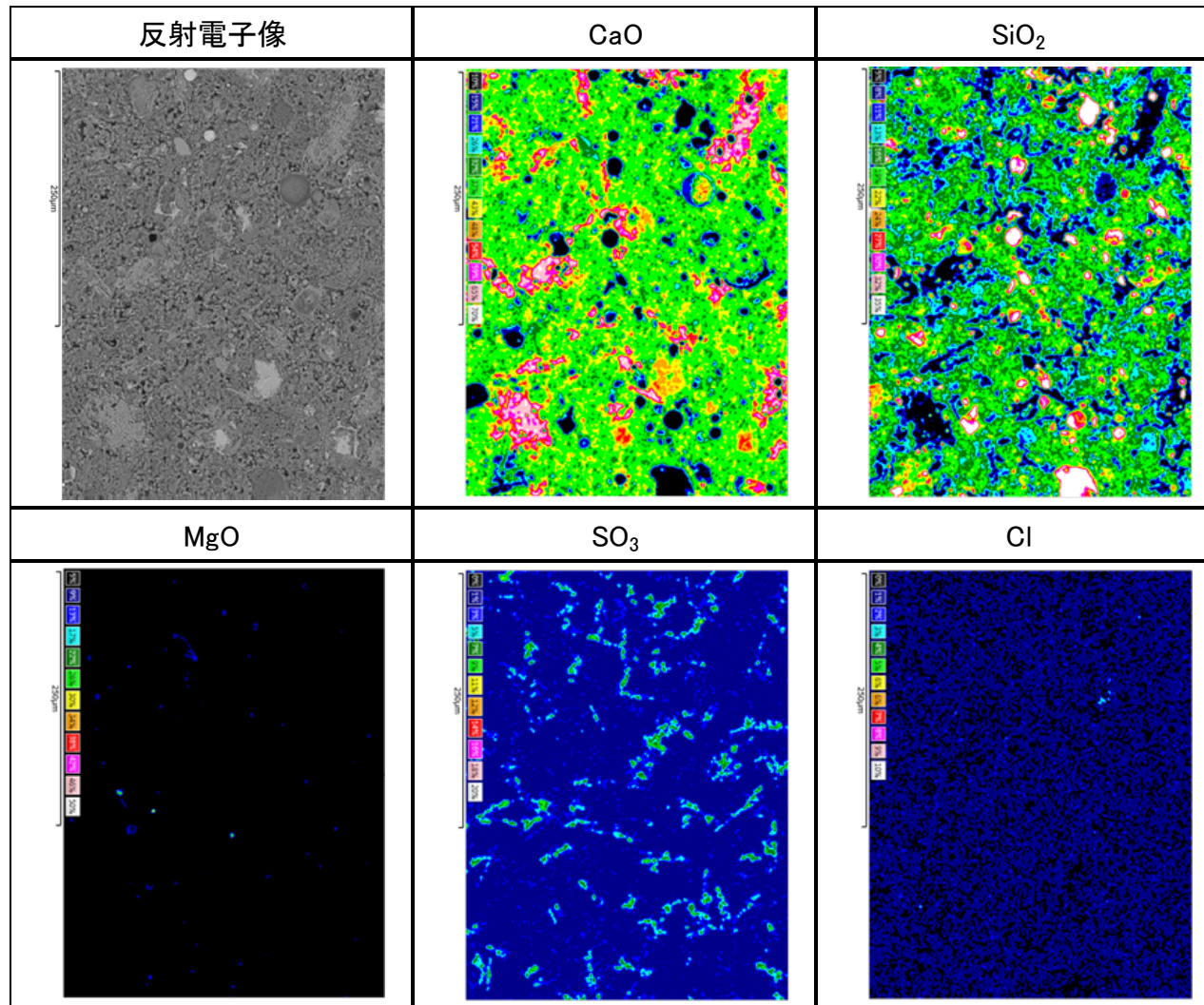


図 2.1-93 接液面近傍の組成分布 (FAC30、BL)

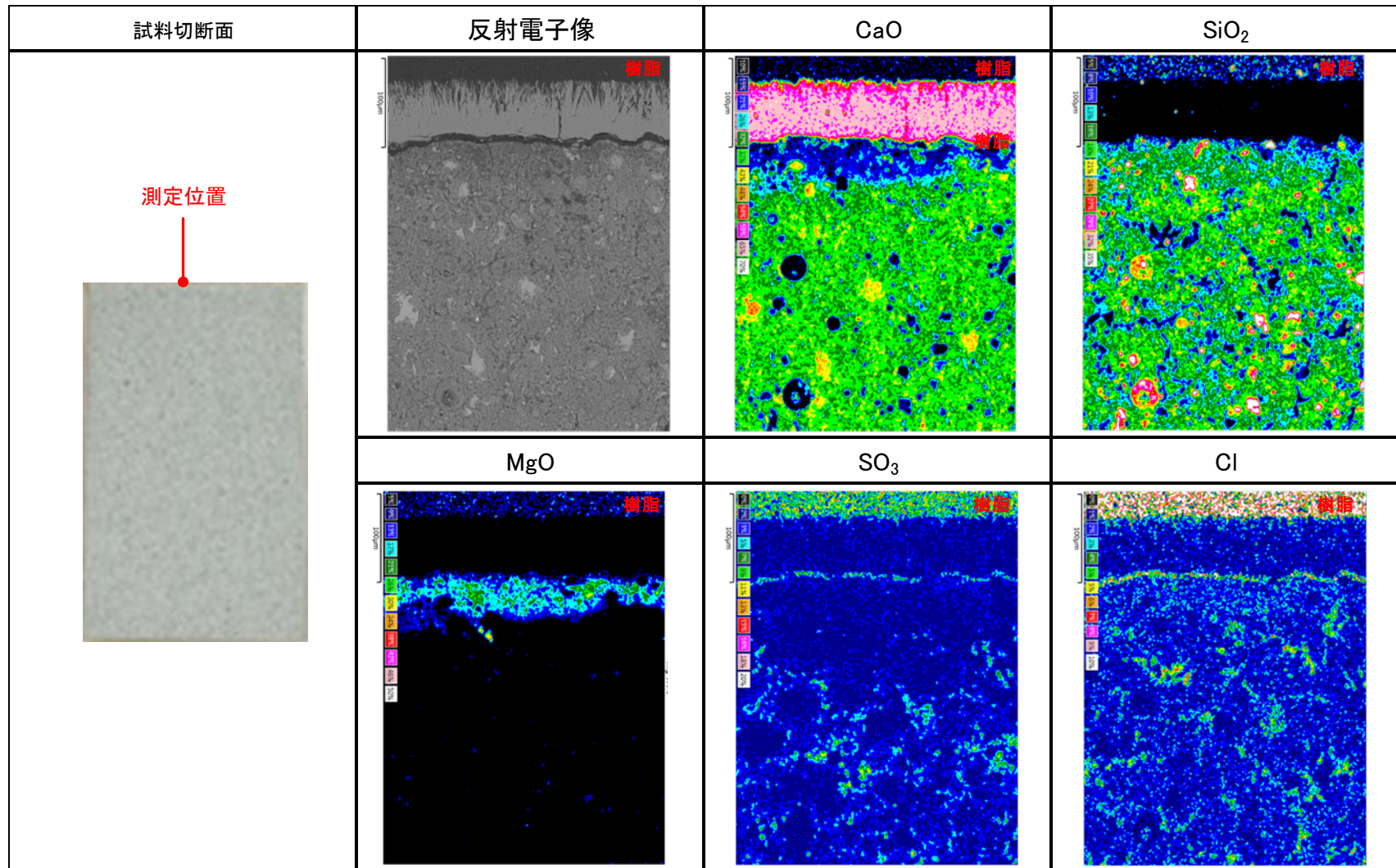


図 2.1-94 接液面近傍の組成分布 (FAC30、人工海水)

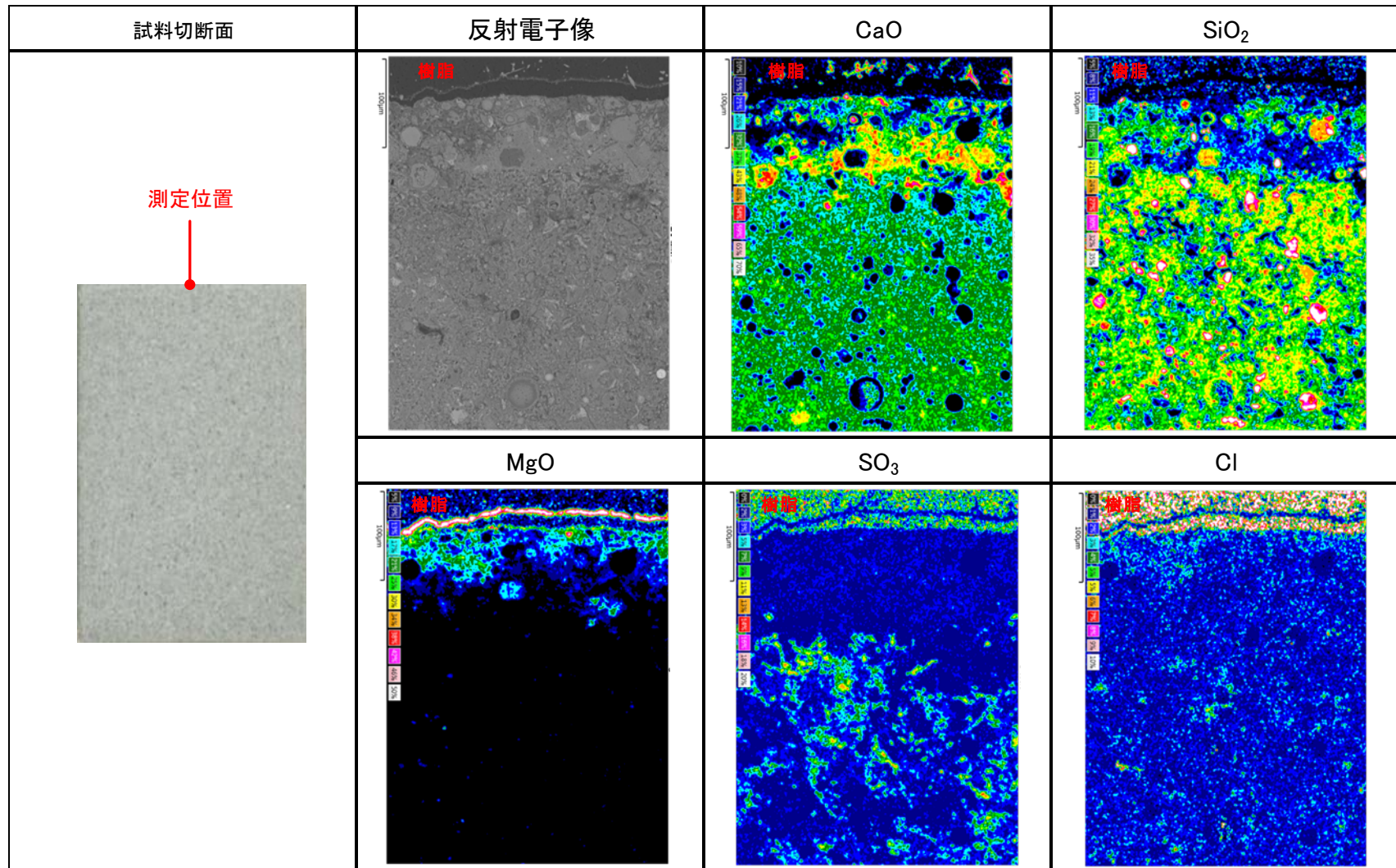


図 2.1-95 接液面近傍の組成分布 (FAC30、1/10 人工海水)

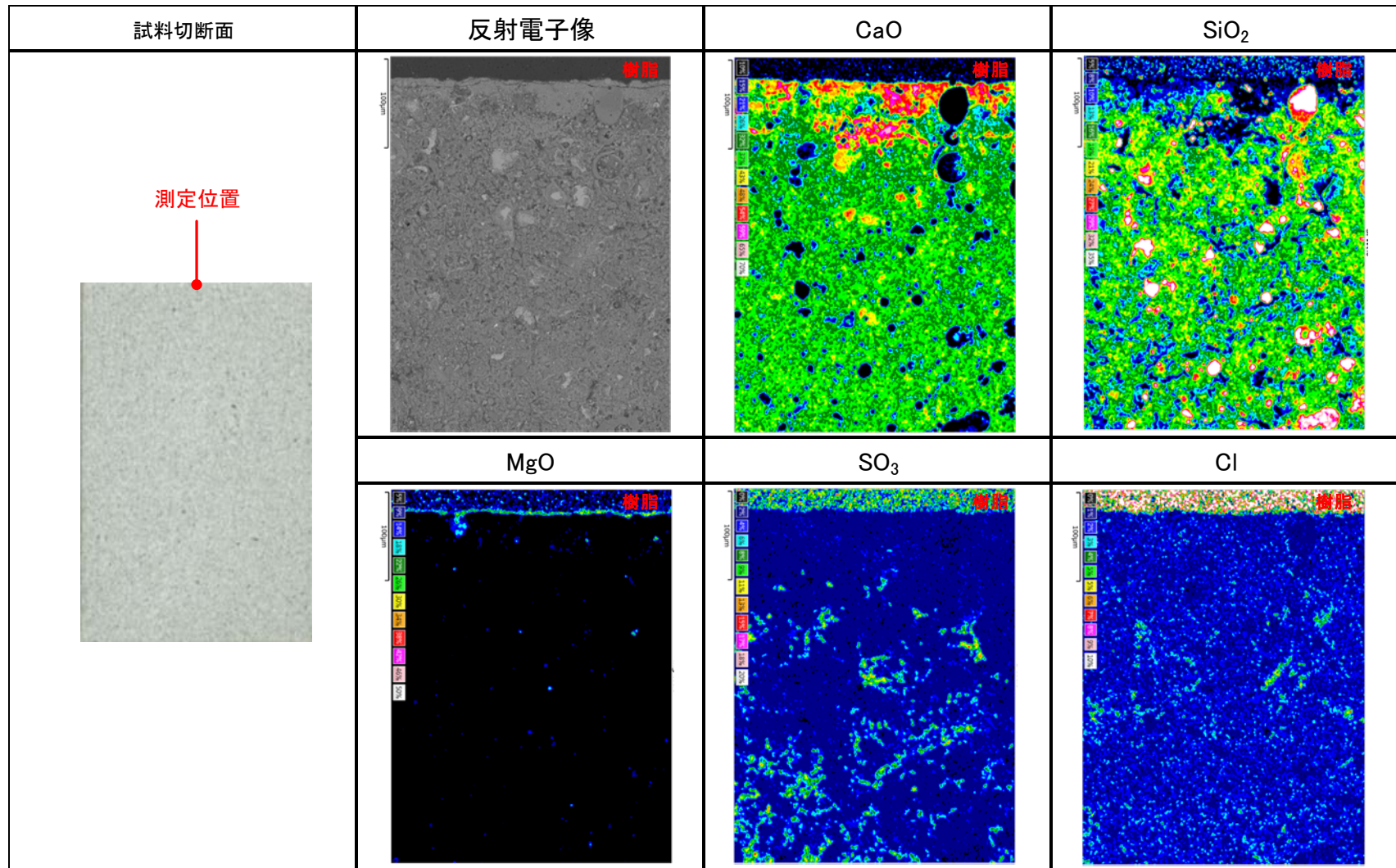


図 2.1-96 接液面近傍の組成分布 (FAC30、1/100 人工海水)

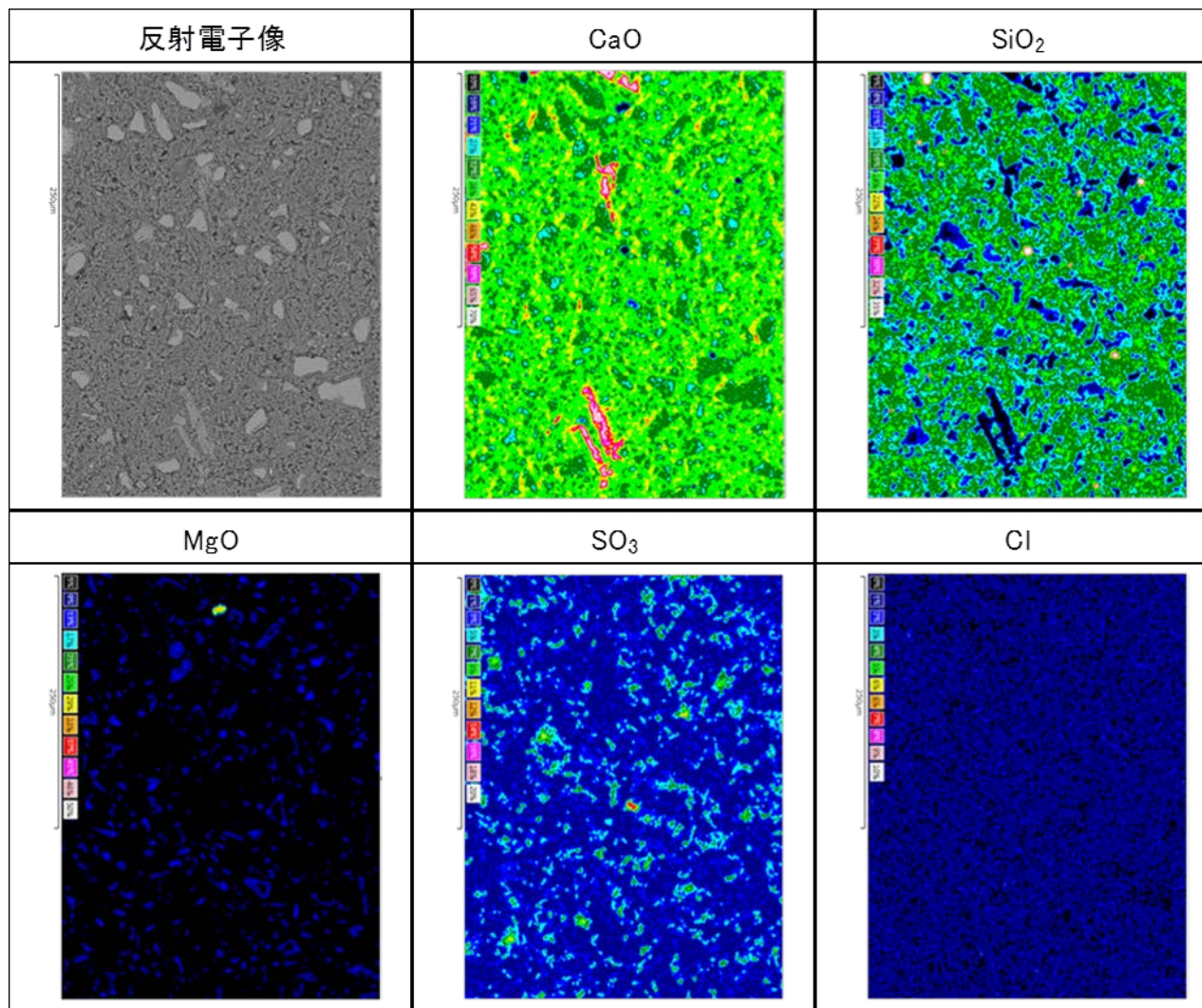


図 2.1-97 接液面近傍の組成分布 (BFSC70、BL)

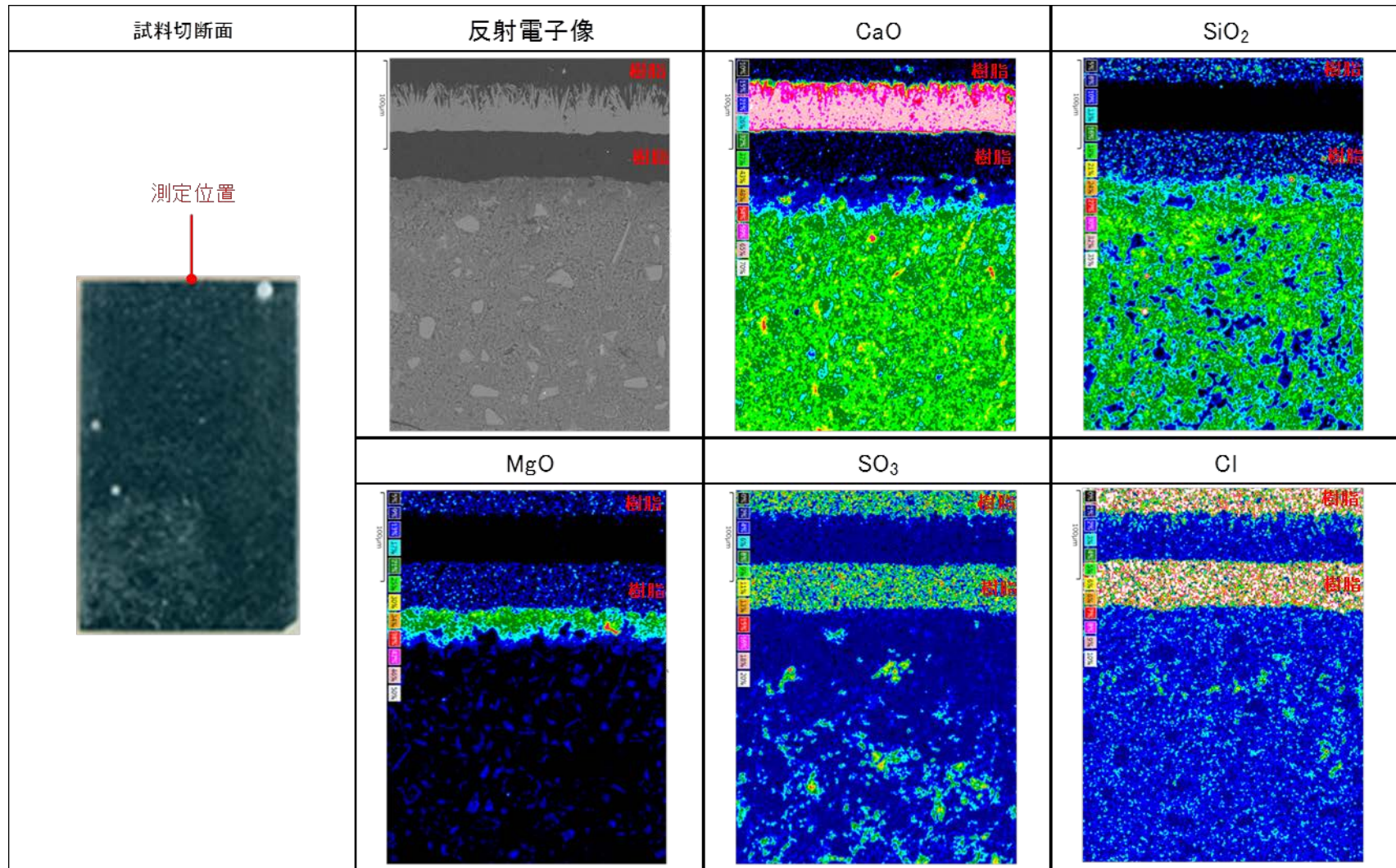


図 2.1-98 接液面近傍の組成分布 (BFSC70、人工海水)

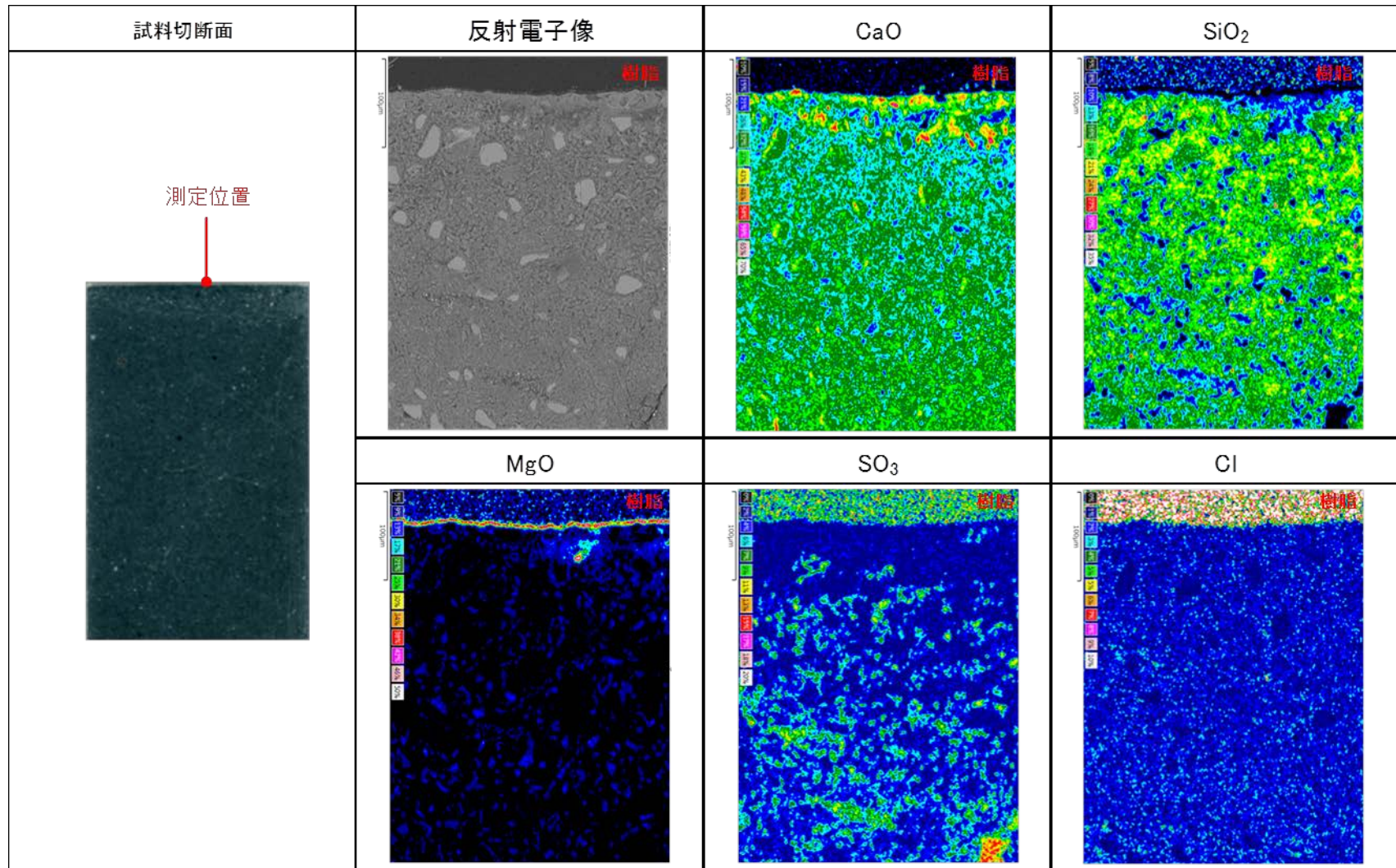


図 2.1-99 接液面近傍の組成分布 (BFSC70、1/10 人工海水)

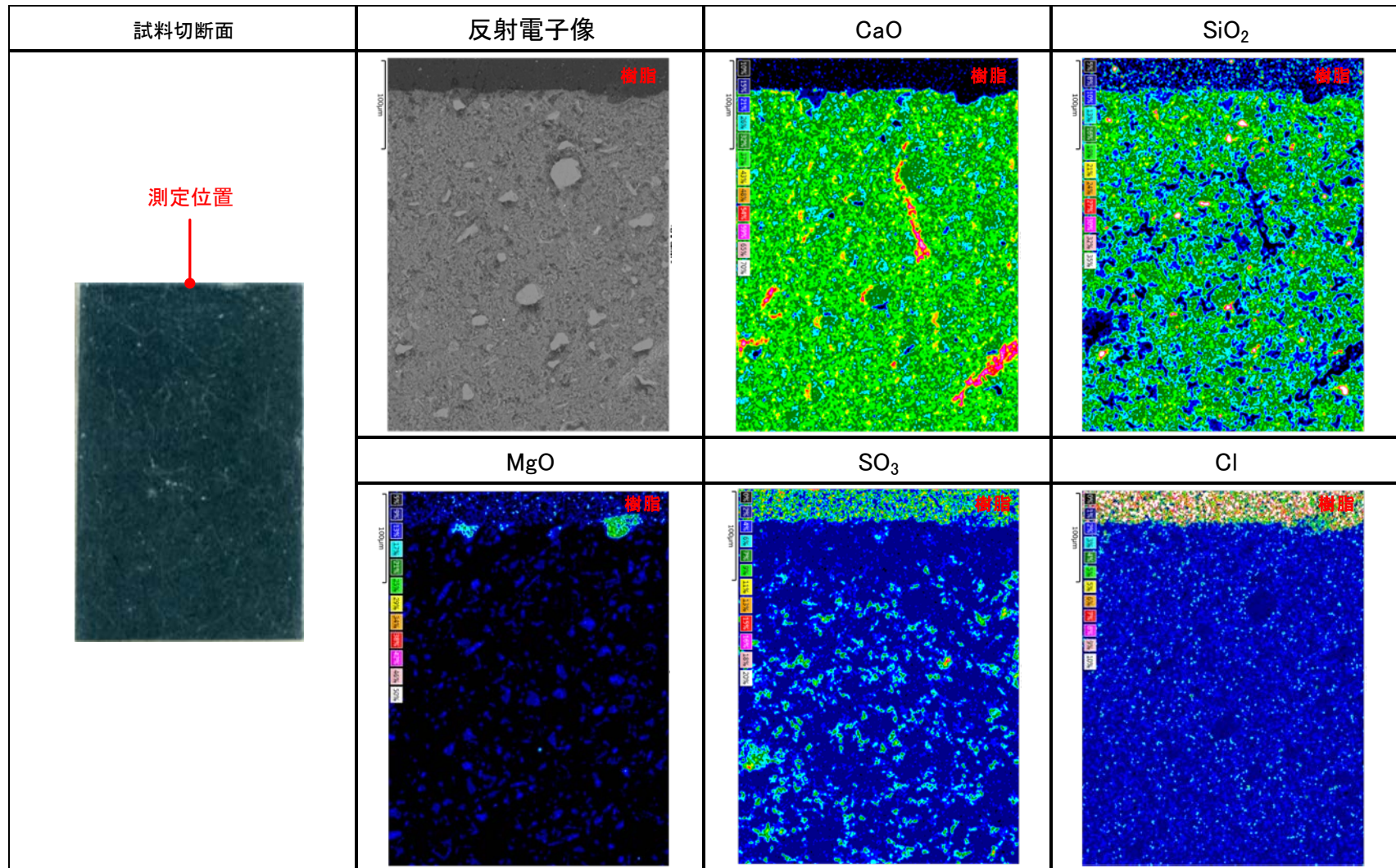


図 2.1-100 接液面近傍の組成分布 (BFSC70、1/100 人工海水)

(5) 微小領域の硬度の測定

ビッカース硬度の測定位置は XRD 分析、SEM 分析と同様の「溶脱部」、「Cl 浸透部」、「深層部」とした。ただし、深層部は接液面からの距離を 15 mm、25 mm の 2 か所を分析対象としたため、計 4 深度の分析となった。1 深度当たりのビッカース硬度の繰り返し実施数は 10 回であり、平均値は標準偏差 (2σ) 内に収まる硬度値の平均とした。なお、一部の試料では接液面の上部に外部生成物が形成（ドーム状の部位または、SEM 組成分布で確認された Ca 部、Mg 部）されていたため、本分析では、参考値として「上部」のビッカース硬度も計測した。バルク試験体の機械的強度は、セメント試料に最も多く含まれる C-S-H の密度や結晶性、剛性や硬度などの状態に大きく依存すると考えられる。従って試料内部の硬度は、未水和鉱物と考えられる塊状の粗粒子の選択を避け、C-S-H と考えられる場所の硬度を計測した。

1) 微小領域のビッカース硬度測定結果

微小領域の硬度測定結果を表 2.1-8 及び表 2.1-9 に、接液面からの距離とビッカース硬度の関係を図 2.1-101～図 2.1-112 にそれぞれ示す。

OPC-45 の人工海水に浸漬した試料の硬度は、溶脱部で 10 点値の変動が大きく、Cl 浸透部、深層部は、ブランク試料と同程度の硬度であった。本試料は溶脱部が表層の僅かな領域であったため、硬度の大きい上部と溶脱部の混在位置の測定結果が得られた可能性が考えられる。1/10 人工海水に浸漬した試料の硬度は、溶脱部でやや小さく、以深では同程度であった。1/100 人工海水に浸漬した試料の硬度は、各部位で同程度であった。

OPC-60 の人工海水に浸漬した試料の硬度は、溶脱部でやや低く、Cl 浸透部、深層部はブランク試料より若干高い硬度であった。1/10 人工海水に浸漬した試料の硬度は、溶脱部で小さく、以深では同程度であった。1/100 人工海水に浸漬した試料の硬度は、各部位で同程度であった。

FAC30 では、浸漬液の希釈倍率や部位に関係なく硬度の差は小さく、ブランク試料と同等か若干高い硬度であった。

BFSC70 でも、FAC30 の結果と同様に、浸漬液の希釈倍率や部位に関係なく硬度の差は小さく、ブランク試料と同等か若干高い硬度であった。

表 2.1-8 微小領域の硬度測定結果 (OPC ペースト)

試料名	浸漬液	深度 (mm)	ビッカース硬度 (HV)										標準偏差 σ	平均
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
OPC -45	-	BL	36.8	35.9	49.0	38.5	33.3	37.2	39.0	33.6	29.7	45.9	6	37.9
	人工海水	上部	227.4	188.2	179.5	167.9	230.6	173.5	223.6	204.0	69.1	179.6	25	197.1
		0.5	43.4	29.7	49.1	12.8	16.9	39.8	28.8	52.9	58.1	35.4	15	36.7
		5.0	22.8	27.4	38.7	25.4	35.6	41.8	29.2	28.8	31.6	32.2	6	31.4
		15.0	33.1	57.7	35.4	24.7	26.4	20.6	29.8	26.0	24.3	32.6	5	28.1
		25.0	34.3	21.2	32.5	35.1	25.5	40.0	33.0	38.3	30.1	26.3	6	31.6
	1/10 人工海水	上部	74.1	147.7	139.3	113.6	82.8	85.6	99.9	118.8	112.6	70.5	27	104.5
		0.5	40.2	27.7	17.4	17.8	22.3	23.0	19.2	22.9	17.5	27.5	4	21.7
		5.0	35.2	29.6	33.1	30.4	29.2	25.9	25.2	25.6	23.3	23.2	4	28.1
		15.0	22.8	23.1	30.9	32.9	28.5	31.7	33.8	37.9	38.4	34.5	5	31.5
		25.0	35.1	41.9	35.4	33.2	34.8	41.8	39.8	37.7	31.3	35.3	4	36.6
	1/100 人工海水	0.5	44.7	31.8	33.2	33.8	30.5	31.4	42.5	28.8	39.7	26.2	6	34.3
		5.0	32.2	27.5	33.0	41.3	34.3	29.6	29.5	30.2	30.9	34.3	2	31.3
		15.0	27.4	38.0	33.6	34.5	30.3	37.9	30.3	28.8	29.4	27.1	4	31.7
		25.0	33.9	37.3	40.6	38.0	37.8	35.8	37.8	33.2	36.1	39.2	2	37.0
	OPC -60	-	BL	13.6	12.8	18.5	15.1	10.8	15.6	20.2	15.6	16.2	15.4	3	15.4
人工海水		上部	239.3	264.3	364.9	378.5	361.0	319.0	279.4	407.9	423.6	325.4	62	336.3
		0.5	8.9	11.2	9.9	14.9	9.4	16.9	7.3	20.7	8.5	72.2	5	12.0
		5.0	19.8	16.9	18.2	17.0	16.2	14.5	16.1	21.1	21.8	18.9	2	18.1
		15.0	14.9	17.4	17.9	19.0	20.8	19.2	19.5	20.8	27.7	12.7	3	18.0
		25.0	18.5	22.9	20.3	29.4	23.4	27.4	23.0	19.9	20.8	18.0	4	22.4
1/10 人工海水		上部	101.8	97.3	128.3	115.9	120.7	113.0	116.0	113.0	175.9	124.9	10	114.5
		0.5	12.4	6.6	7.3	4.1	6.3	5.4	6.9	8.8	6.3	22.3	2	7.1
		5.0	23.4	12.4	18.3	18.4	20.1	20.1	22.1	18.2	16.3	10.1	4	17.9
		15.0	14.1	18.1	16.4	41.0	19.9	17.2	17.1	18.8	15.0	17.7	2	17.1
		25.0	20.0	20.9	20.7	22.4	24.4	19.5	18.8	21.6	17.4	23.3	2	20.9
1/100 人工海水		0.5	14.6	14.0	15.7	13.2	18.4	14.5	18.8	14.9	21.5	18.3	3	16.4
		5.0	15.4	16.2	15.0	20.5	16.8	20.2	17.1	17.3	21.3	19.9	2	18.0
		15.0	22.2	23.3	36.3	21.9	21.1	19.0	17.9	18.5	20.8	20.9	2	20.6
		25.0	22.0	15.9	15.2	17.7	19.5	16.8	25.4	16.9	23.6	20.0	3	19.3

平均：測定値平均 $\pm 2\sigma$ （標準偏差）に収まらない値を除いた硬度の平均値

表 2.1-9 微小領域の硬度測定結果（混合セメントペースト）

試料名	浸漬液	深度 (mm)	ビッカース硬度(HV)										標準偏差 σ	平均	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
FAC 30	-	BL	13.0	12.4	15.2	16.1	15.6	16.3	27.8	12.2	13.6	12.0	2	14.0	
	人工海水	上部	72.5	102.1	83.8	161.4	131.9	170.3	210.5	179.8	105.2	119.9	45	133.7	
		0.2	34.0	18.3	22.1	17.6	28.8	18.5	20.1	24.7	26.4	25.8	5	23.6	
		2.0	44.5	19.9	18.1	21.6	17.7	24.4	22.1	27.8	17.2	15.1	4	20.4	
		15.0	18.7	15.9	20.2	27.7	19.4	25.3	14.9	20.3	31.4	17.3	5	21.1	
		25.0	26.5	15.2	13.7	22.6	19.6	29.2	21.2	29.3	16.7	39.8	6	21.6	
	1/10人工海水	0.2	14.7	31.9	16.3	20.5	32.5	14.3	12.5	25.8	17.6	17.1	7	20.3	
		2.0	17.8	20.8	27.0	18.8	23.0	22.1	17.1	20.0	19.4	17.4	2	19.6	
		15.0	18.3	14.0	25.5	24.9	13.1	12.8	15.9	14.0	11.8	33.3	5	16.7	
		25.0	15.9	20.6	13.4	18.2	17.9	16.1	12.7	18.0	18.3	14.3	3	16.5	
	1/100人工海水	0.2	18.0	17.7	14.5	13.6	14.3	17.3	15.8	15.8	19.2	18.1	2	16.4	
		2.0	16.4	15.5	25.6	18.4	19.5	22.5	20.5	14.5	17.4	16.7	3	17.9	
		15.0	14.3	13.5	17.4	39.4	20.8	16.1	13.9	16.2	21.5	17.3	3	16.8	
		25.0	11.8	25.8	13.2	24.2	13.0	18.4	13.4	23.0	14.4	21.2	5	17.8	
	BFSC 70	-	BL	9.8	16.2	20.7	21.1	17.5	19.2	18.0	15.6	15.3	16.6	2	17.8
		人工海水	上部	116.6	141.9	136.5	83.0	109.9	129.5	116.0	114.7	119.9	102.1	13	120.8
0.2			22.3	23.5	20.7	21.5	21.2	18.2	20.1	20.2	22.1	20.8	1	21.1	
2.0			15.9	19.9	21.2	21.1	17.4	20.1	16.6	20.0	22.7	18.0	2	19.3	
15.0			19.6	32.1	22.0	19.6	16.4	30.4	23.5	19.8	23.4	22.1	5	22.9	
25.0			23.7	20.3	20.1	32.2	24.9	28.1	24.4	18.2	29.3	24.6	4	24.6	
1/10人工海水		0.2	28.5	25.4	28.3	28.9	24.3	25.2	22.6	24.0	22.7	22.2	3	25.2	
		2.0	27.9	19.6	20.7	22.5	19.7	21.0	18.8	22.7	22.8	22.7	2	21.2	
		15.0	16.6	24.5	17.4	18.3	23.2	18.1	22.5	24.9	18.9	15.3	3	20.0	
		25.0	19.7	16.9	19.8	16.0	18.2	16.8	20.7	15.6	19.7	21.3	2	18.5	
1/100人工海水		0.2	17.8	16.0	16.9	16.2	23.1	20.0	21.3	18.1	22.6	21.9	3	19.4	
		2.0	18.2	26.9	26.7	22.4	28.4	25.6	25.8	17.5	21.1	19.9	4	23.3	
		15.0	16.3	16.8	16.3	22.1	22.2	21.0	19.6	17.8	16.6	22.0	3	19.1	
		25.0	21.9	19.0	18.9	17.9	24.1	17.4	20.1	21.5	21.9	23.5	2	20.6	

平均：測定値平均 $\pm 2\sigma$ （標準偏差）に収まらない値を除いた硬度の平均値

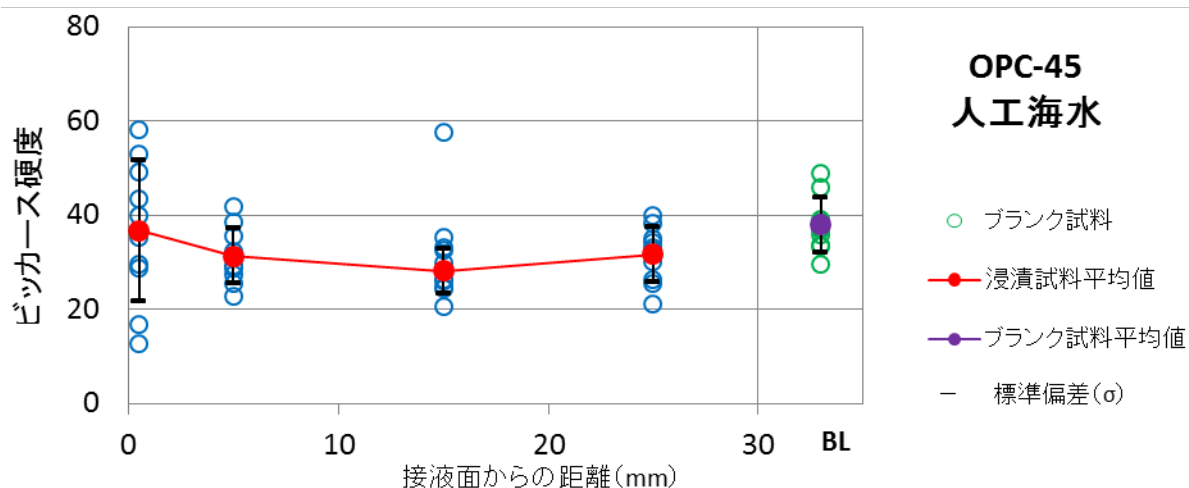


図 2.1-101 接液面からの距離とビッカース硬度の関係 (OPC-45、人工海水)

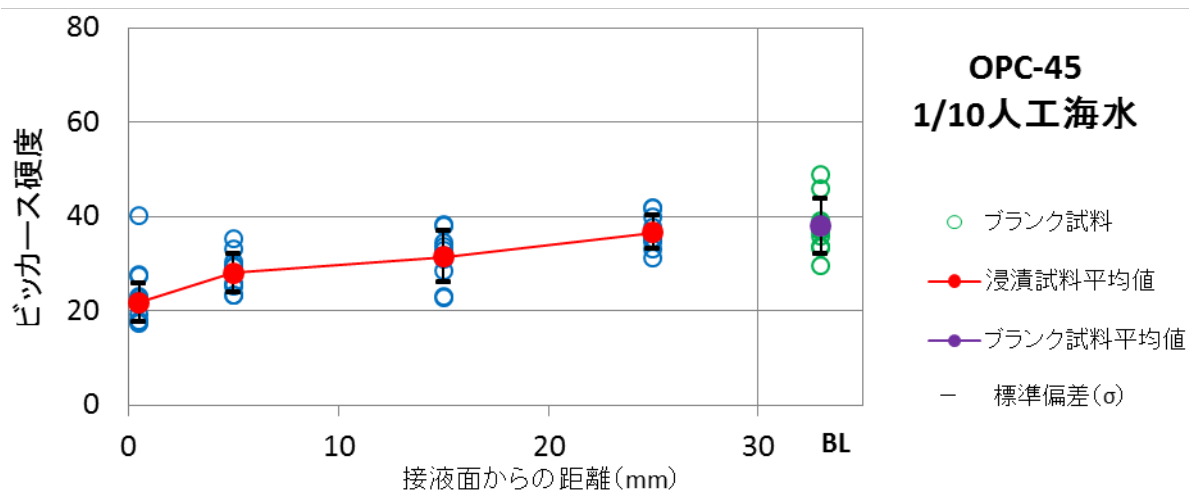


図 2.1-102 接液面からの距離とビッカース硬度の関係 (OPC-45、1/10人工海水)

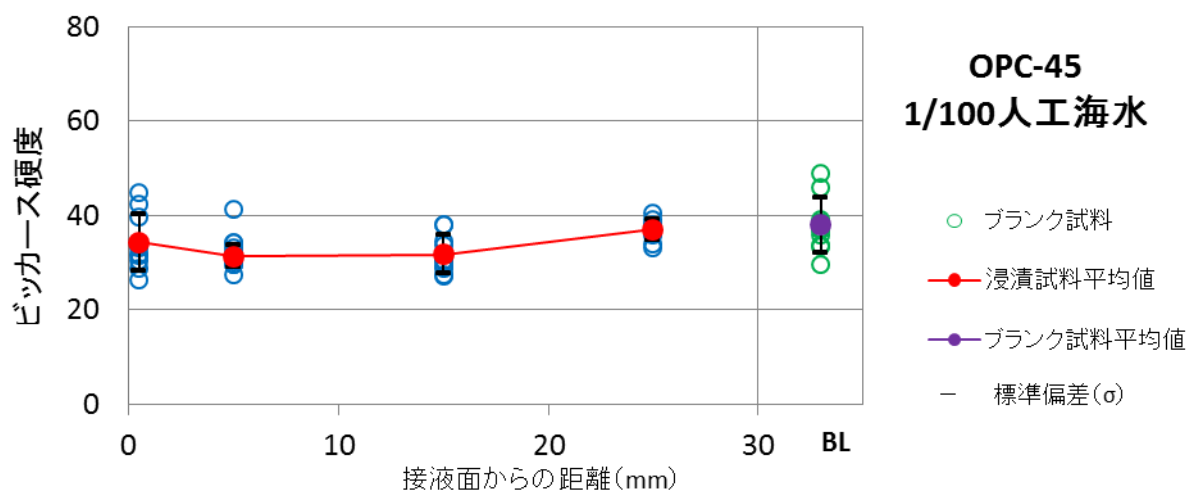


図 2.1-103 接液面からの距離とビッカース硬度の関係 (OPC-45、1/100人工海水)

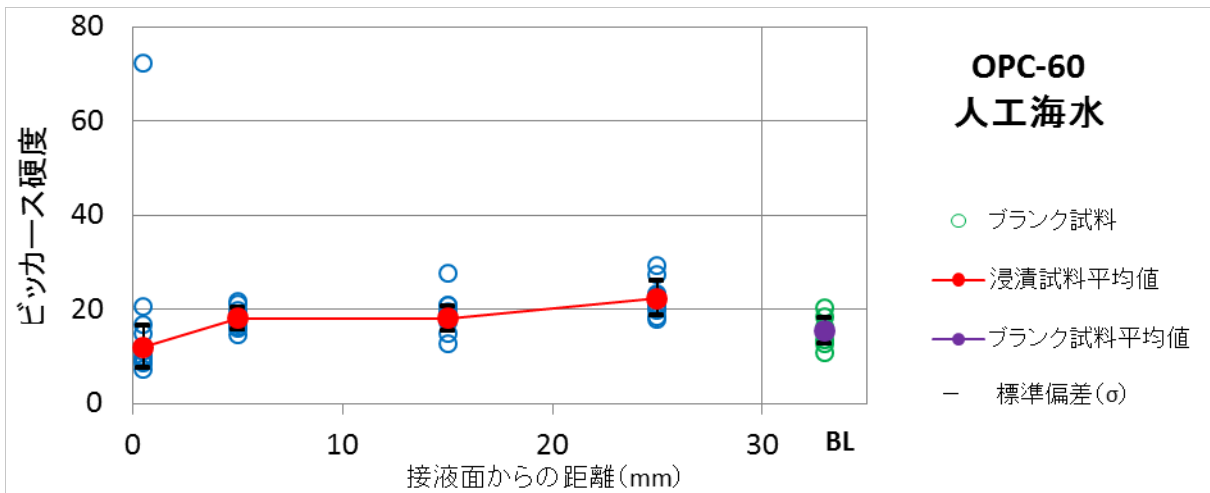


図 2.1-104 接液面からの距離とビッカース硬度の関係 (OPC-60、人工海水)

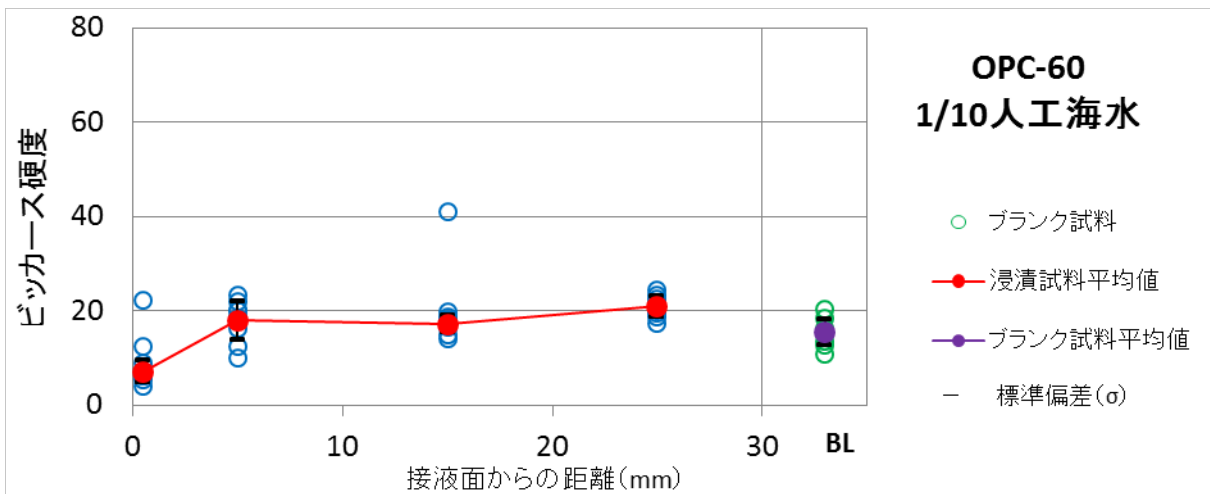


図 2.1-105 接液面からの距離とビッカース硬度の関係 (OPC-60、1/10 人工海水)

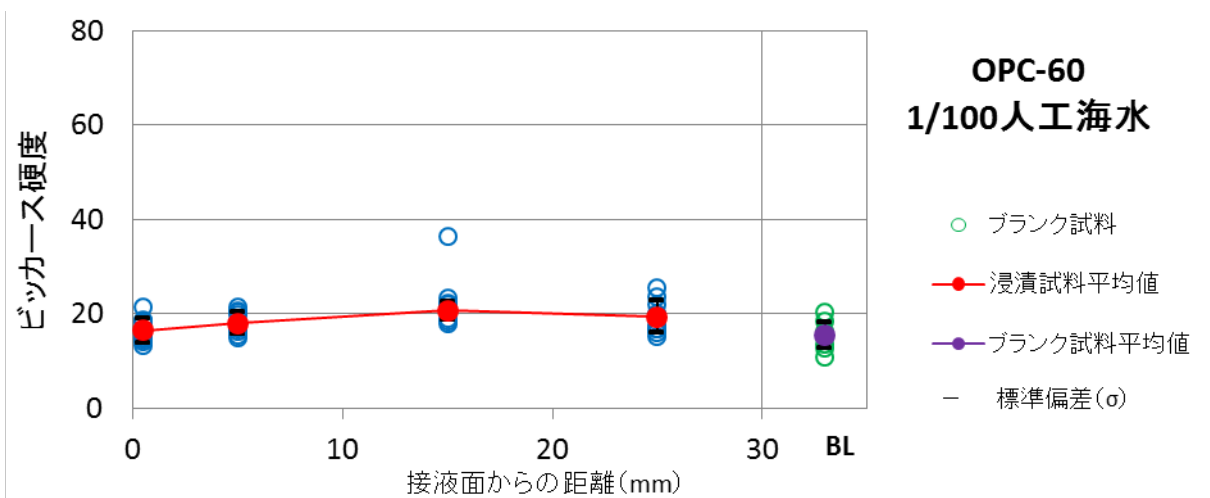


図 2.1-106 接液面からの距離とビッカース硬度の関係 (OPC-60、1/100 人工海水)

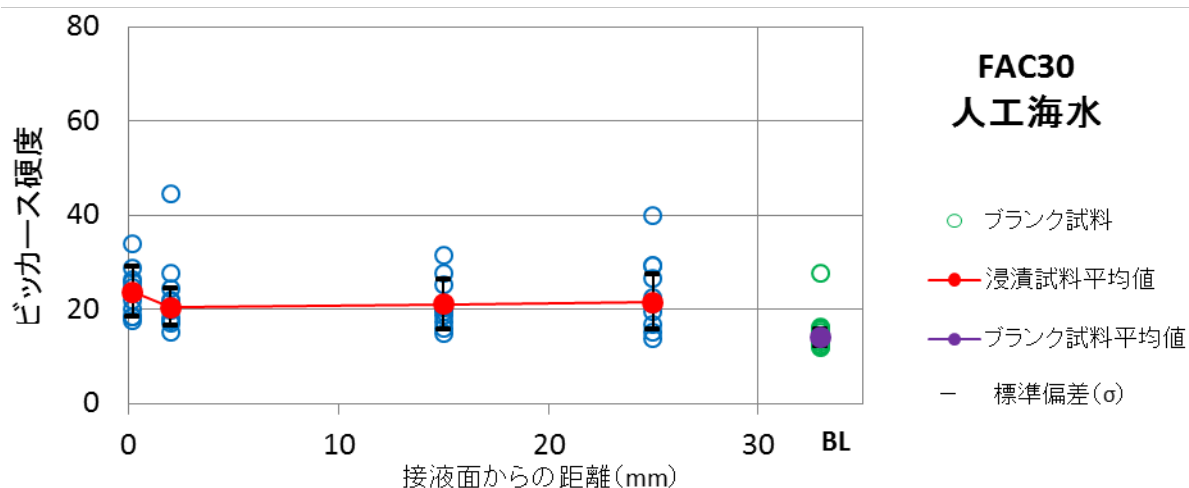


図 2.1-107 接液面からの距離とビッカース硬度の関係 (FAC30、人工海水)

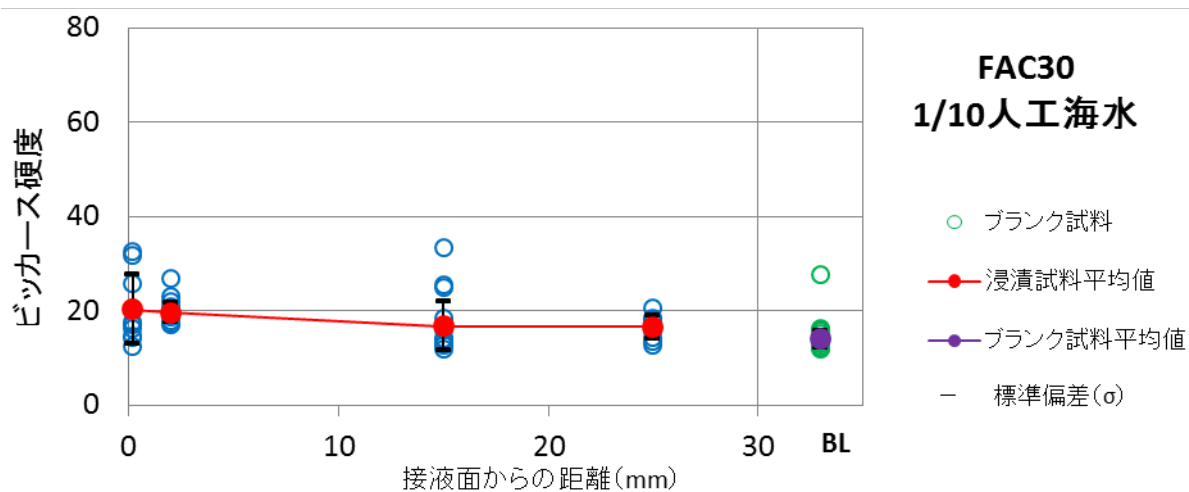


図 2.1-108 接液面からの距離とビッカース硬度の関係 (FAC30、1/10 人工海水)

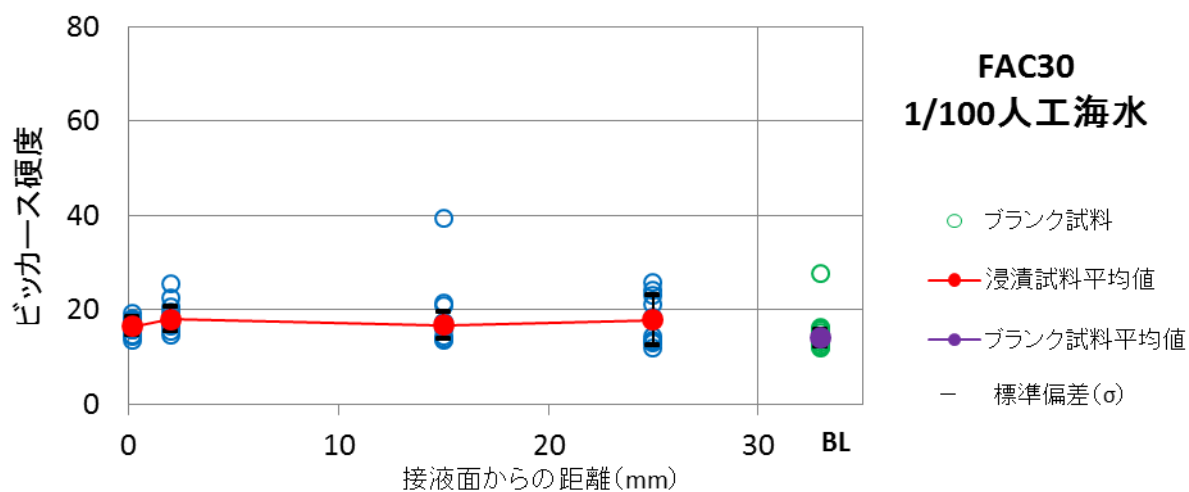


図 2.1-109 接液面からの距離とビッカース硬度の関係 (FAC30、1/100 人工海水)

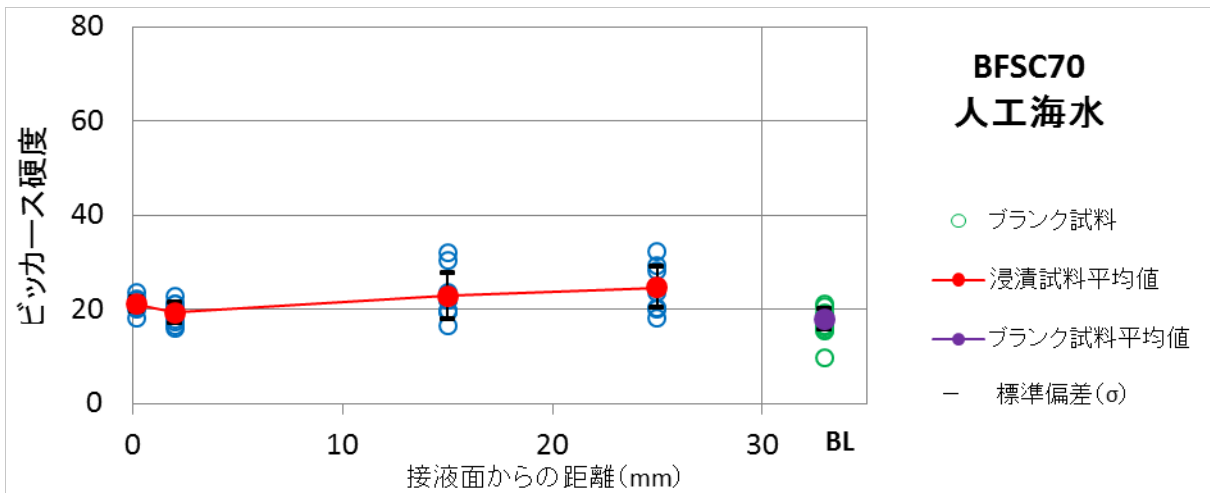


図 2.1-110 接液面からの距離とビッカース硬度の関係 (BFSC70、人工海水)

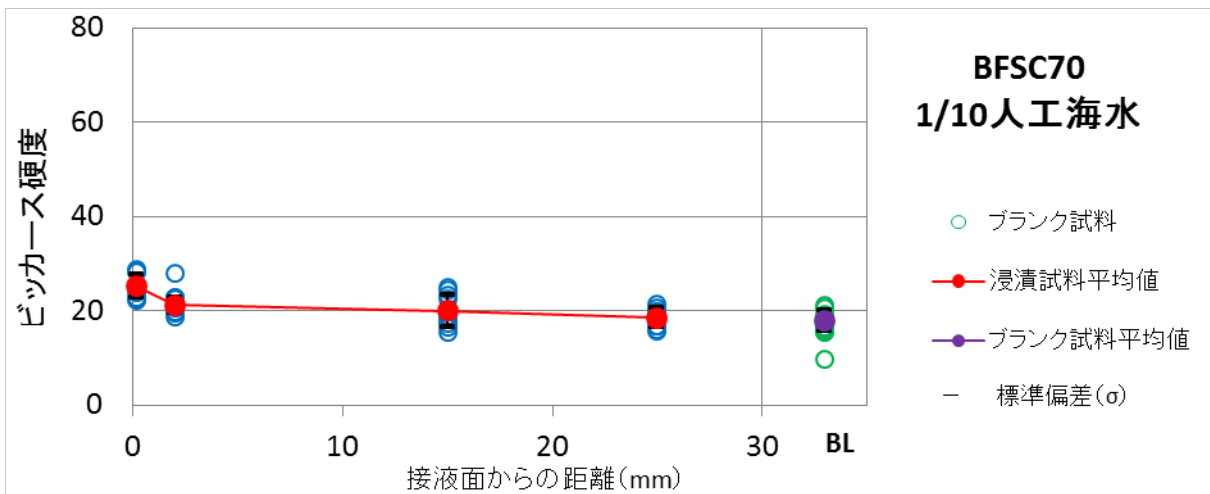


図 2.1-111 接液面からの距離とビッカース硬度の関係 (BFSC70、1/10 人工海水)

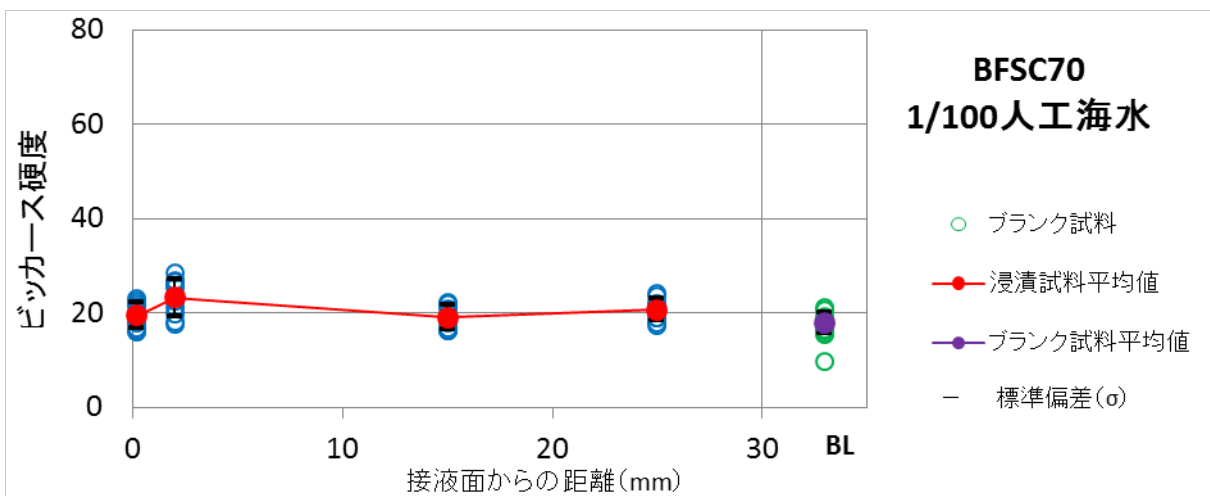


図 2.1-112 接液面からの距離とビッカース硬度の関係 (BFSC70、1/100 人工海水)

2) ビッカース硬度と組成分布の関係

ビッカース硬度と組成分布の関係を図 2.1-113～図 2.1-124 にそれぞれ示す。図中には硬度平均値と標準偏差のみ記す。また、ビッカース硬度と組成分布の関係を確認するための Ca と Cl 濃度プロファイルも図中に記した。EPMA 分析の結果、各セメント材料、浸漬液条件に関わらず、Ca、S、Cl で特異な分布が確認されている。Ca 溶脱部と S 高濃度部は同じ領域（前項の「溶脱部」に相当）であることから、成分の影響範囲を示す濃度プロファイルは Ca のみ示した。

OPC-45 の人工海水に浸漬した試料のビッカース硬度と組成分布の関係は、平均値では、接液面の極表層の Ca 減少部、S 高濃度部で硬度が高い結果となったが、この部位では標準偏差の幅が大きいことから、実際は溶脱部が表層の僅かな領域であったため、硬度の大きい上部と溶脱部の混在位置の測定結果が得られた可能性が考えられる。Cl 分布と硬度の関係性は低いと判断できる。XRD 分析の結果、Cl 浸透量の多い部位では、既存のアルミネート鉱物が Friedel's salt に変化することを確認している。本試験の範囲では、この鉱物変化が硬度に影響しないことを確認した。1/10 人工海水に浸漬した試料では、Ca 減少部、S 高濃度部で硬度が若干低かった。XRD 分析の結果、この部位では、Portlandite のピーク強度の低下と、Ettringite の生成が確認されている。Ca の減少は Portlandite の減少、S の増加は Ettringite の生成に関連していると考えられ、これらの鉱物変化が硬度に影響した可能性がある。特に、Ettringite の生成はアルミネート鉱物の鉱物種が変化した反応であることから空隙変化は限定的であると考えられるものの、Portlandite の減少は鉱物が抜けた分の空隙増加を伴うため、硬度などの物理的性状に対する影響は大きいものと考えられる。1/100 人工海水に浸漬した試料では、Ca、S、Cl 成分の分布の変化と硬度変化は認められなかった。

OPC-60 の人工海水に浸漬した試料のビッカース硬度と組成分布の関係は、Ca 減少部、S 高濃度部で硬度がやや低かった。Cl 濃度が最も高い部位と低い部位で硬度に差はなかった。1/10 人工海水に浸漬した試料では、Ca 減少部、S 高濃度部で硬度が低かった。1/100 人工海水に浸漬した試料では、Ca、S、Cl 成分の分布の変化と硬度変化は認められなかった。

FAC30 では、浸漬液の希釈倍率に関係なく Ca 減少部、S 高濃度部は接液面近傍の極僅かな深度であり、この領域の硬度と以深で硬度の差は小さかった。OPC 系材試料では Cl が最深部まで浸透しているが、FAC30 では浸漬液の希釈倍率に関係なく約 10 mm 深度までであった。従って、FAC30 では Cl 濃度の多少ではなく、Cl 浸透の有無と硬度の関係を確認することができると考えたが、各試料とも Cl が浸透領域と浸透していない領域で硬度は同等であり、Cl の濃度、浸透の有無が硬度変化の主原因とならないことを確認した。

BFSC70 でも、FAC30 の結果と同様に、Ca 減少部、S 高濃度部は接液面近傍の極僅かな深度であり、この領域の硬度と以深で硬度の差は小さいことを確認した。

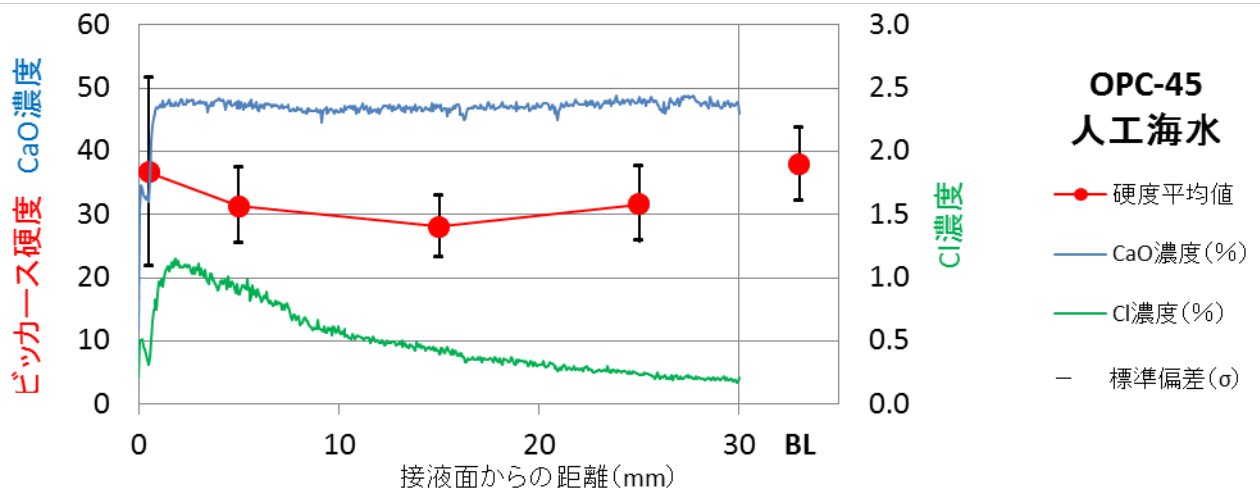


図 2.1-113 ビッカース硬度と成分分布の関係 (OPC-45、人工海水)

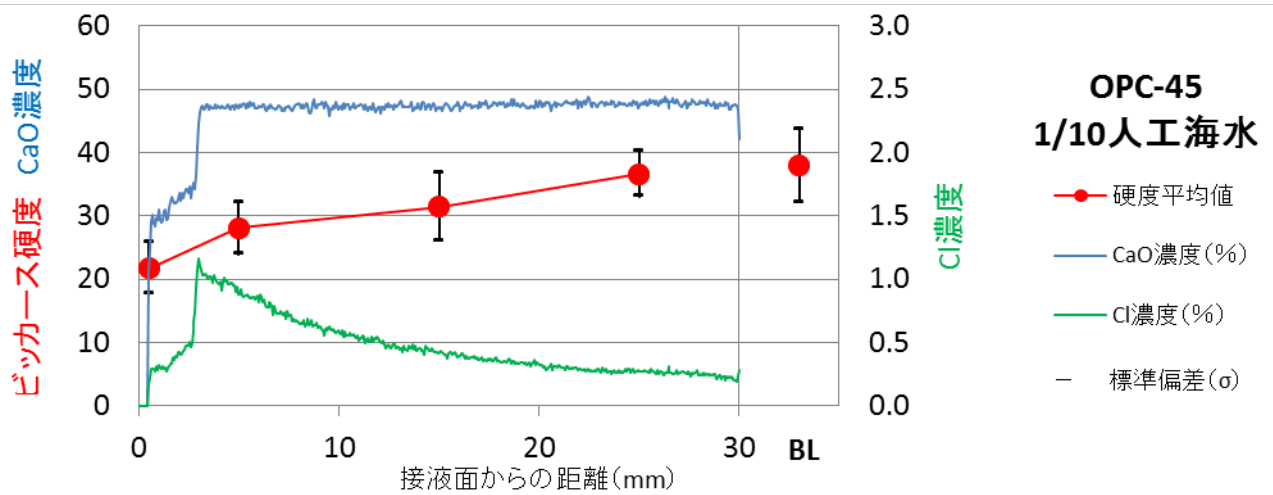


図 2.1-114 ビッカース硬度と成分分布の関係 (OPC-45、1/10 人工海水)

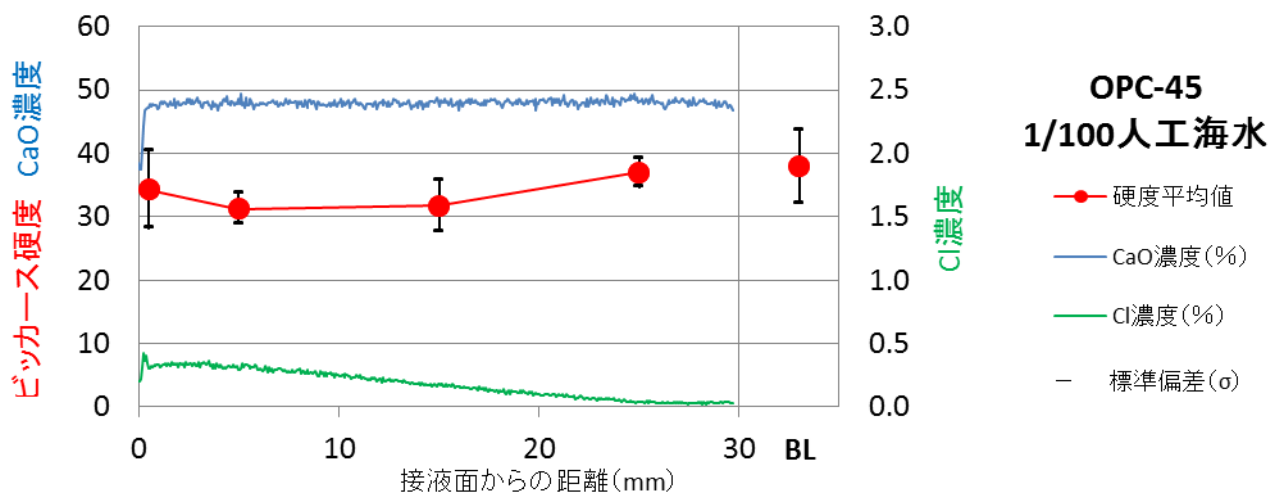


図 2.1-115 ビッカース硬度と成分分布の関係 (OPC-45、1/100 人工海水)

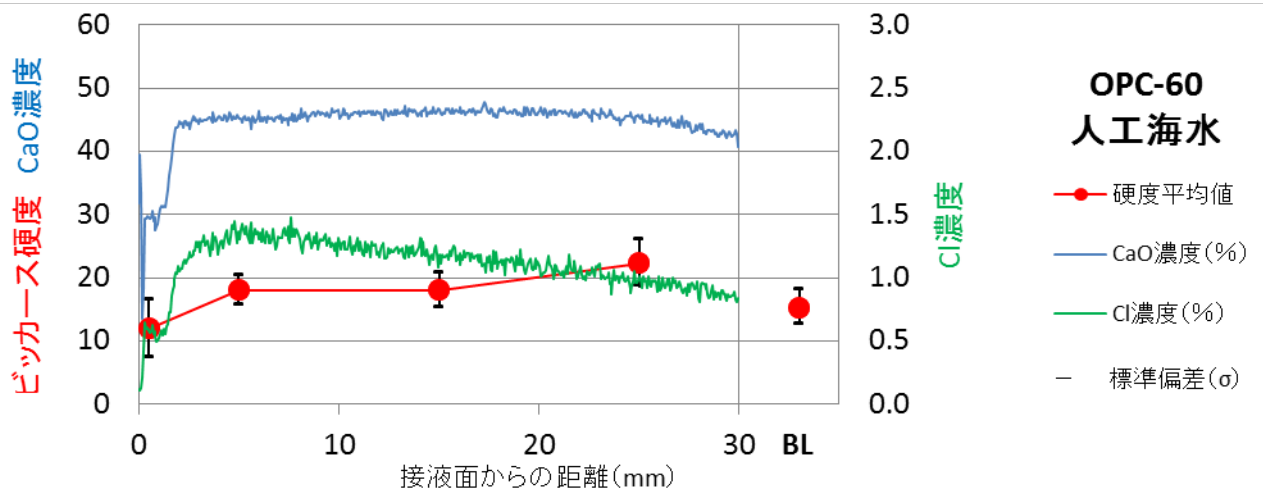


図 2.1-116 ビッカース硬度と成分分布の関係 (OPC-60、人工海水)

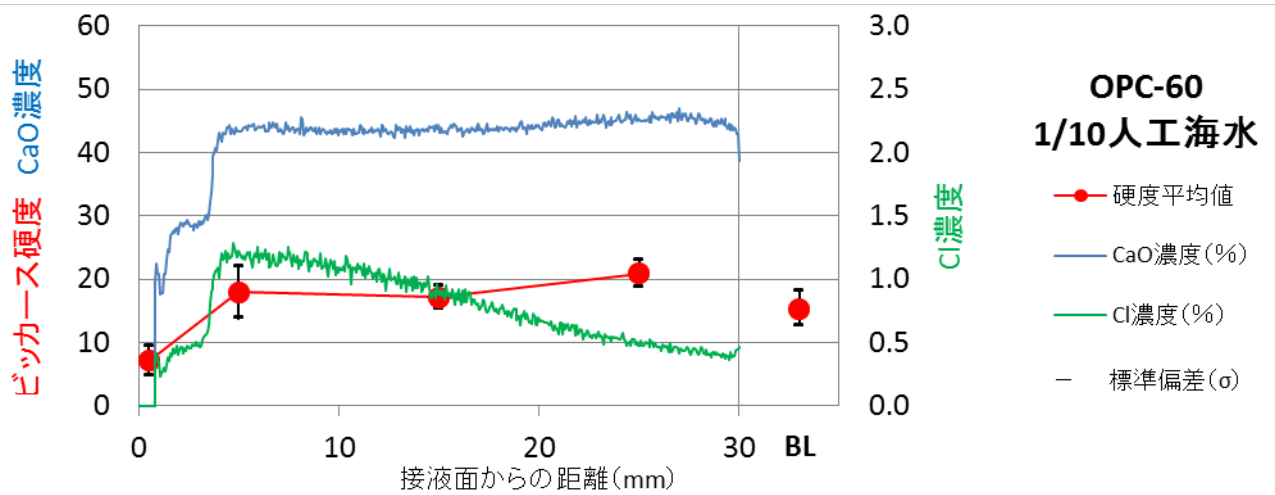


図 2.1-117 ビッカース硬度と成分分布の関係 (OPC-60、1/10 人工海水)

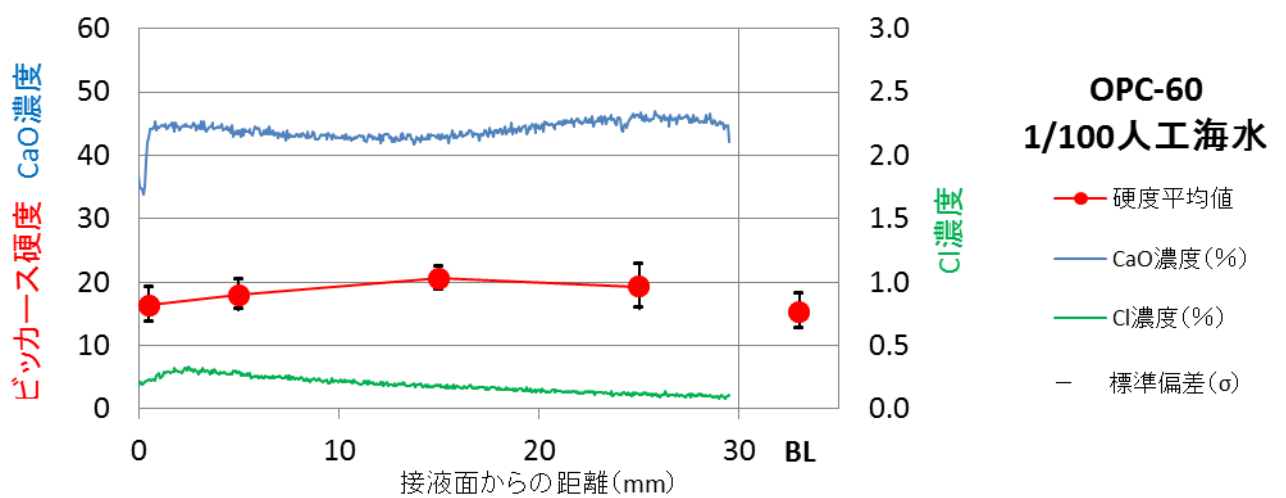


図 2.1-118 ビッカース硬度と成分分布の関係 (OPC-60、1/100 人工海水)

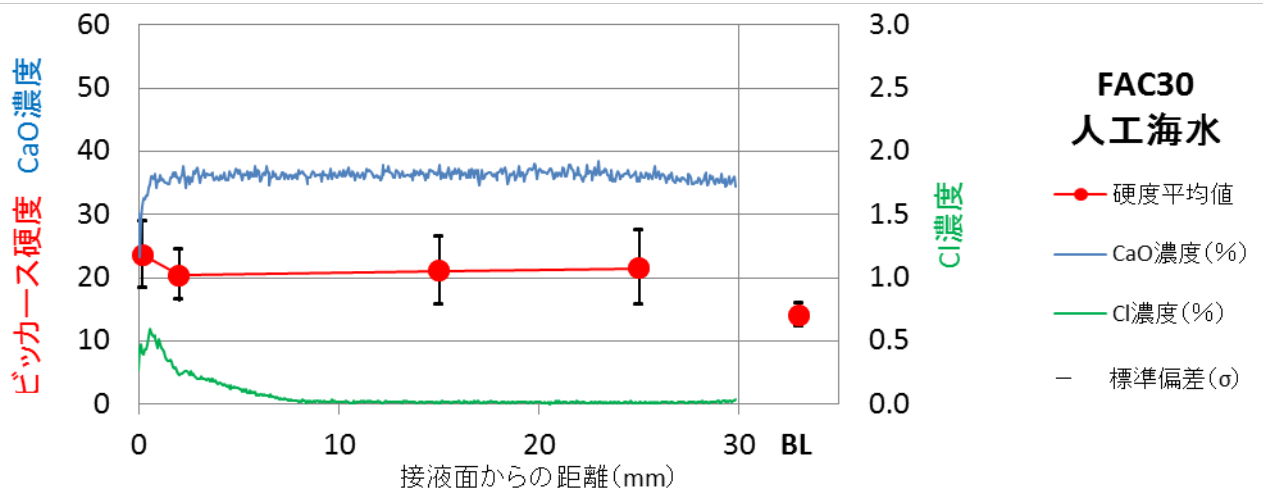


図 2.1-119 ビッカース硬度と成分分布の関係 (FAC30、人工海水)

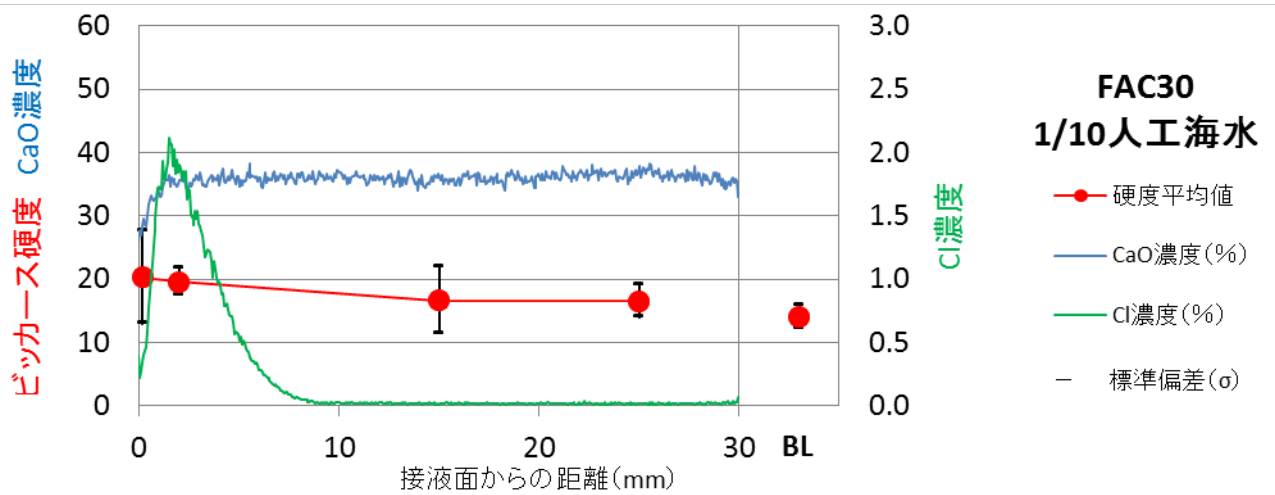


図 2.1-120 ビッカース硬度と成分分布の関係 (FAC30、1/10人工海水)

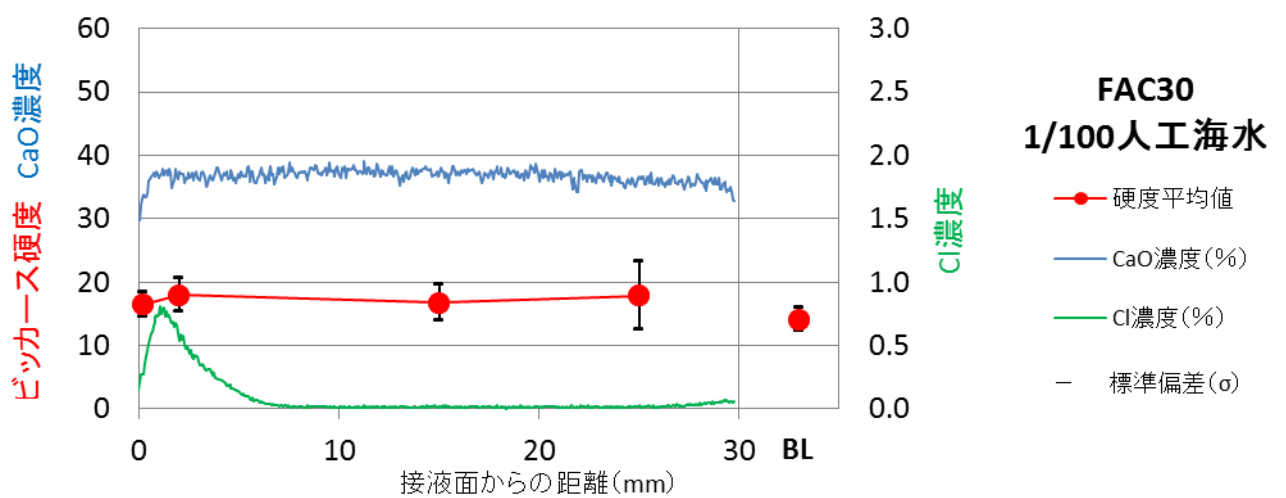


図 2.1-121 ビッカース硬度と成分分布の関係 (FAC30、1/100人工海水)

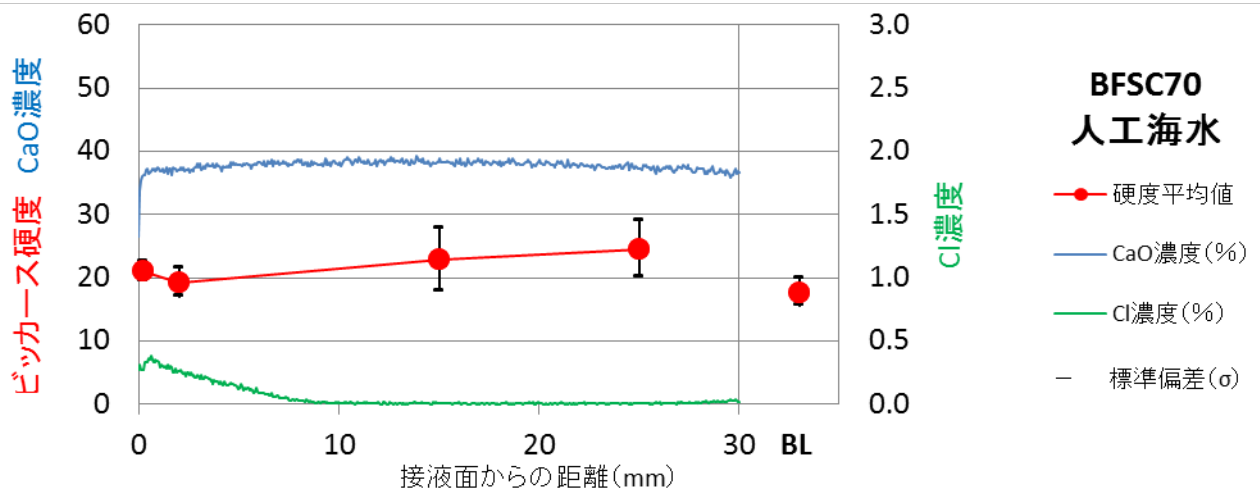


図 2.1-122 ビッカース硬度と成分分布の関係 (BFSC70、人工海水)

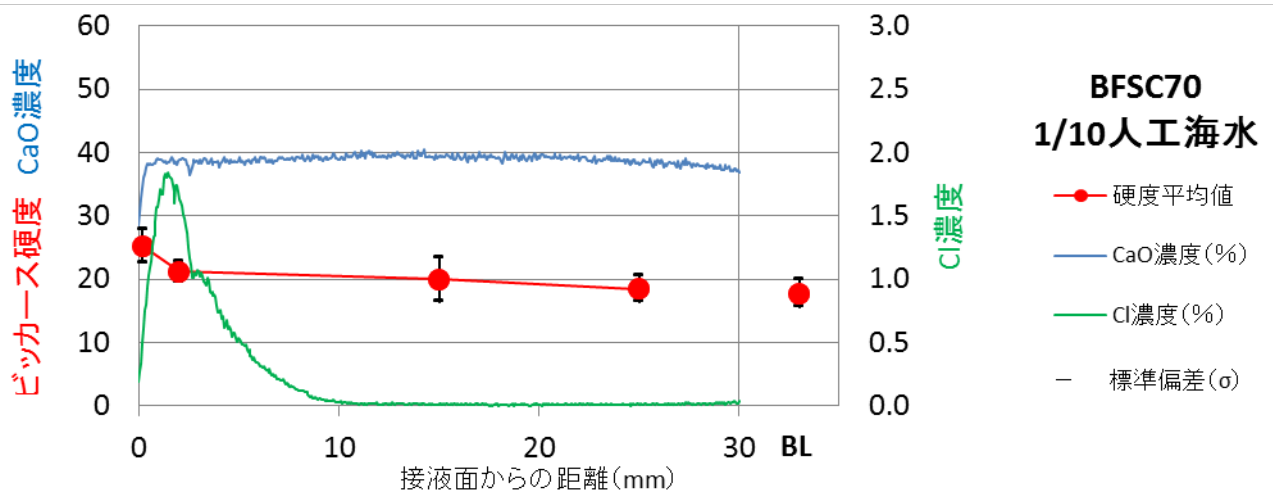


図 2.1-123 ビッカース硬度と成分分布の関係 (BFSC70、1/10 人工海水)

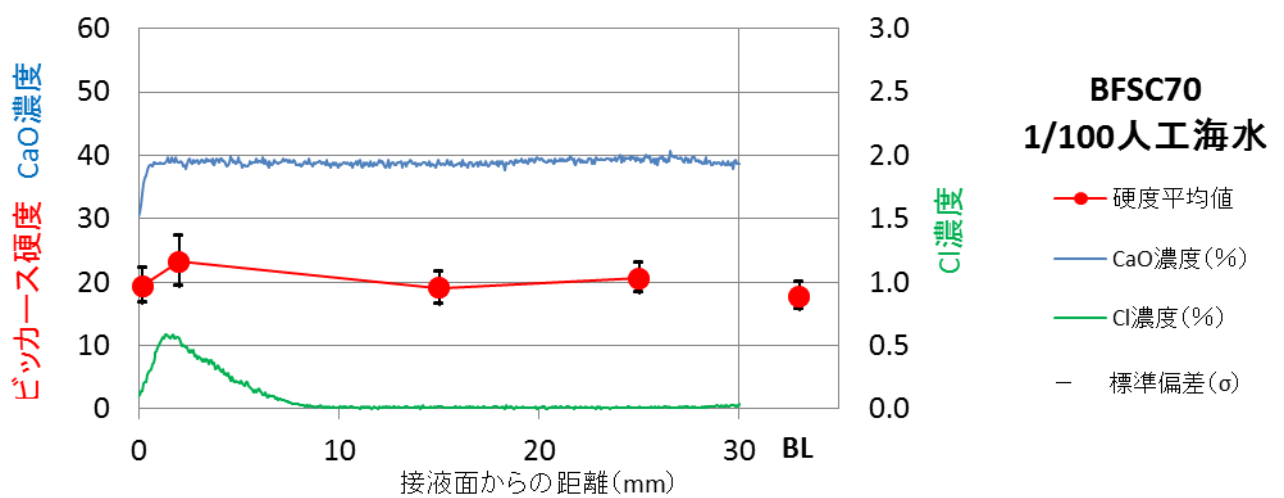


図 2.1-124 ビッカース硬度と成分分布の関係 (BFSC70、1/100 人工海水)

3) ビッカース硬度と小径円柱供試体の圧縮強度の関係

小型円柱供試体の圧縮強度の測定結果を表 2.1-10 及び図 2.1-125 にそれぞれ示す。また、ビッカース硬度と圧縮強度の関係を図 2.1-126 に示す。一軸圧縮強度試験にはφ20 mm、高さ 40 mm の円柱試験体を用いた。1 水準当りの試験体数は 4 本とした。圧縮強度と比較するビッカース硬度はブランク試料の平均値を用いた。

圧縮強度の測定の結果、OPC-45 は平均値で 60.9N/mm²、OPC-60 は 32.3N/mm²、FAC30 は 35.7N/mm²、BFSC70 は 38.6N/mm² であり、水セメント比が同じ、OPC-60、FAC30、BFSC70 が近接した圧縮強度となった。ビッカース硬度の結果も、OPC-60、FAC30、BFSC70 がそれぞれ、14.9、14.0、16.9 と近く、OPC-45 は、これらより高い 36.3 であった。このため、ビッカース硬度と圧縮強度の関係性は、水セメント比 45% と 60% の 2 種の硬化体の関係性を示す線形となったが、硬度値が大きい試料では圧縮強度も大きい傾向にあった。

表 2.1-10 圧縮強度の測定結果 (BL)

試料名	n	供試体寸法(mm)		高さ/ 直径	寸法に 関する補正 係数	最大荷重 (KN)	圧縮強度(N/mm ²)		
		高さ	直径				補正前	補正後	平均
OPC-45	1	40.2	19.8	2.03	1.00	19.1	62.0	62.0	60.9
	2	40.3	19.8	2.04	1.00	19.4	63.0	63.0	
	3	40.1	19.8	2.03	1.00	18.5	60.1	60.1	
	4	40.1	19.8	2.03	1.00	18.0	58.4	58.4	
OPC-60	1	40.3	20.0	2.02	1.00	9.62	30.6	30.6	32.3
	2	40.2	20.0	2.01	1.00	10.3	32.8	32.8	
	3	40.3	20.1	2.00	1.00	10.7	33.8	33.8	
	4	40.4	20.1	2.01	1.00	10.1	31.9	31.9	
FAC30	1	40.4	20.0	2.02	1.00	11.2	35.7	35.7	35.7
	2	40.4	20.1	2.01	1.00	13.0	41.0	41.0	
	3	40.2	20.0	2.01	1.00	11.7	37.3	37.3	
	4	39.9	20.1	1.99	1.00	9.17	28.9	28.9	
BFSC70	1	40.2	20.1	2.00	1.00	12.1	38.2	38.2	38.6
	2	40.2	20.1	2.00	1.00	9.52	30.0	30.0	
	3	40.2	20.1	2.00	1.00	15.6	49.2	49.2	
	4	40.0	20.1	1.99	1.00	11.7	36.9	36.9	

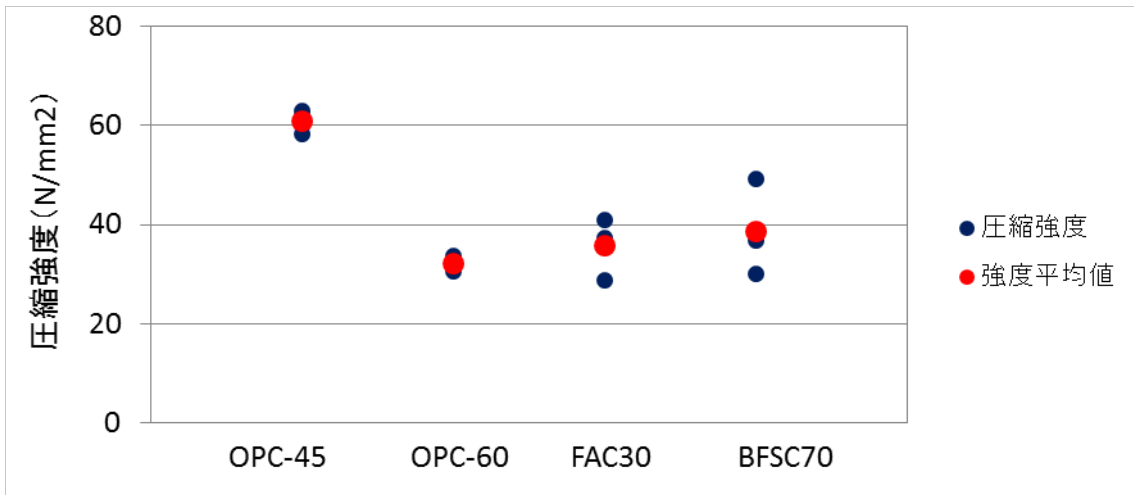


図 2.1-125 圧縮強度の測定結果 (BL)

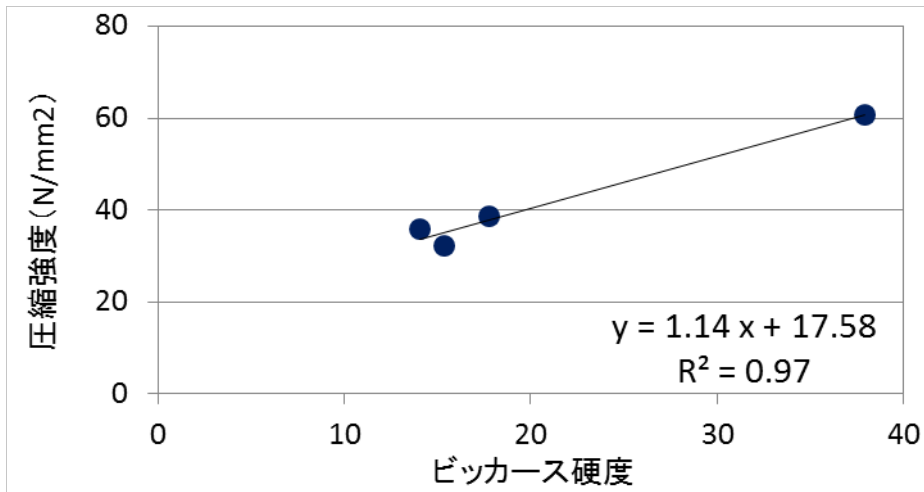


図 2.1-126 ビッカース硬度と圧縮強度の関係 (BL)

2.2 分析結果のまとめと考察

2.2.1 分析結果まとめ

【pH 分析】

- ・ OPC 系材料 (OPC-45、OPC-60) の浸漬液の pH は、人工海水では 1M (M=month)、2M に上昇するが 3M、4M では初期の浸漬液の pH と同等であった。
- ・ 混合セメント系材料 (FAC30、BFSC70) の浸漬液の pH は、人工海水では 1M~4M まで初期の浸漬液の pH と同等であった。

【試料断面の元素組成分析】

- ・ 試料断面を観察した結果、OPC 系材料の人工海水浸漬後試料では、接液面上部にドーム状の変質域が生成した試料と生成していない試料を確認した。1/10 人工海水浸漬後試料では、全ての試料にドームが確認された。
- ・ ドームを有する試料では内部の接液面がひび割れており、接液面から剥離してドーム状になる際に、試料の一部と一緒に剥離したことがわかった。ドームの主要成分は Ca、Mg であった。
- ・ 混合セメントでは浸漬液の塩素濃度と試料内部の塩素濃度の傾向が一致しなかった。海水濃度の高い条件では接液面に Calcite と推定される析出層が生成し、それによって試料内への塩素の浸透が抑制されたと推定される。一方、OPC 硬化体では接液面に Calcite、Brucite と推定される析出層が生成したが、析出層が大きく成長することでひび割れが発生している様子が観察され、海水成分は浸透が抑制される効果は小さかったと推定される。
- ・ 全ての試料に共通して、接液面近傍は Ca の溶脱部であることが確認された。この領域では S が高濃度であり、浸漬液に Ca が溶出する一方で浸漬液から S が浸透することが確認された。これらの変質部は、混合セメント系材料では極表層のみで確認された。
- ・ 全ての試料に共通して、Cl 濃度は Ca 溶脱部では低く、Ca 溶脱部以深で最も高濃度となっていた。OPC 硬化体では浸透速度が速く、この試験期間では試料端部まで塩素が浸透してしまい浸透深さはわからなかったが、混合セメント硬化体では、同一固相であれば浸漬液の希釈倍率に関係なく Cl の浸透深さは同等となることを確認した。OPC 系材料の方が混合セメント系材料より Cl の浸透域が深かった。

【鉱物相の同定】

- ・ OPC 系材料の溶脱部と Cl 浸透部では、ブランクで同定された Monosulfate が消失し、新たに Ettringite と Friedel's salt のピークが同定された。これら消失及び生成した鉱物は、主成分が同じ Ca と Al から構成されるアルミネート鉱物であることから、Monosulfate が浸漬液の影響を受けて Ettringite 及び Friedel's salt に変化したものと推定される。
- ・ 全てのブランク試料で、最も明確に同定できる鉱物は Portlandite であった。溶脱部では、このピーク強度がブランク試料より小さかった。溶脱部での Ca 減少 (EPMA) は Ca を主成分とする Portlandite の減少を反映していることが確認された。
- ・ 混合セメント系材料では、全ての水準で Cl の浸透が確認された (EPMA) が、1/10 人工海水に浸漬した試料のみ、Cl を含む鉱物 Friedel's salt が同定された。

【鉱物の形態観察及び組成分析】

- ・ 短期間の浸漬試験を実施することで、海水成分の浸透領域と未浸透領域、成分の高濃度域と低濃度域、それぞれの部位が確認できた。これらの部位の SEM-EDS 測定の結果、Cl が浸透している部位であれば全ての試料に共通して、C-S-H ($x \text{CaO} \cdot y \text{SiO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$) に Cl が含まれていることを確認した。その含有量は、溶脱部より Cl 浸透部の方が多いこ

とがわかった。

- XRD 分析で同定された Friedel's salt と対応する成分組成のポイントは確認されなかった。アルミネート鉱物として選択した形状やコントラスト像とは含有ポイントが異なっていた可能性、C-S-H と Friedel's salt が混在して区別化することが困難であった可能性が考えられた。
- 接液面近傍の組成分布を取得した結果、全てのセメント材料に共通して、人工海水に浸漬した試料の接液面の表層外部に Calcite (CaCO_3) と考えられる Ca 部を確認した。この Ca 部は、1/10 人工海水、1/100 人工海水に浸漬した試料では確認されなかった。
- OPC 系材料及び混合セメント系材料を 1/10 人工海水に浸漬した試料では、試料の接液面表層外部（ドームが生成した試料はドームの液相側外部）に Brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) と考えられる Mg 部を確認した。この Mg 部は、OPC 系材料を 1/10 人工海水に浸漬した試料のドーム部で最も多く、次いで OPC 系材料を人工海水に浸漬した試料で多く確認された。OPC 系材料を 1/100 人工海水に浸漬した試料及び混合セメント系材料を 1/10 人工海水に浸漬した試料では僅かであった。
- 混合セメント系材料を人工海水に浸漬した試料では、試料の表層内部に Mg の高濃度部が確認され、同部位の Ca は減少していた。試料表層外部で確認された単相の Mg 部とは異なり、Si も含まれていることから M-S-H ($x\text{MgO} \cdot y\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) が生成している可能性も考えられた。
- 接液面近傍に生成した鉱物の生成領域は僅かであるため、同領域では SEM 観察の結果を元に生成鉱物を推測した。表 2.2-1～表 2.2-4 に XRD 分析、SEM 観察結果を元に作成した鉱物の分布一覧を示す。

【微小領域の硬度の測定】

- OPC 系材料では、人工海水及び 1/10 人工海水に浸漬した試料の溶脱部（Ca 溶脱部かつ S 高濃度部の領域）で、硬度がブランク試料より小さい傾向を示した。1/100 人工海水に浸漬した試料では全部位の硬度が同程度であった。
- 混合セメント系材料では、全ての試料の全部位で硬度が同程度であった。
- 全ての試料に共通して、Cl の浸透の有無と含有量の多少は、硬度値に影響がないことを確認した。
- 各ブランク硬化体の小径円柱供試体の圧縮強度を測定した結果、水セメントが同じ、OPC-60、FAC30、BFSC70 が近接した圧縮強度となり、OPC-45 はこれらより高い圧縮強度となった。ビッカース硬度も同様の結果を示しているため、ビッカース硬度と圧縮強度の関係性は、水セメント比 45%と 60%の 2 種の硬化体の関係性を示す線形となり、硬度値が大きい試料では圧縮強度も大きい傾向にあった。

表 2.2-1 XRD 分析、SEM 観察結果を元に作成した鉱物の分布一覧 (OPC-45)

試料条件			SEM観察			XRD分析												
試料名	浸漬液	測定位置		接液面近傍に生成した鉱物			ブランク試料に含有している鉱物					海水影響で生成した鉱物			混和材			
				Calcite (推定)	Brucite (推定)	M-S-H (推定)	CSH	Portlan dite	kato ite	Mono sulfate	Mono carbonate	Ettrin gite	Friedel's salt	un known	Quartz	Mullite		
OPC-45	BL	-					◎	○	△	△								
	人工海水	接液面 近傍	外部	△	△													
			表層極近 傍の内部															
		内部	溶脱部				◎	○	△				△	△				
			Cl浸透部				◎	○	△				△	△	△			
			深層部				◎	○	△	△								
	1/10 人工海水	接液面 近傍	外部		△													
			表層極近 傍の内部															
		内部	溶脱部				◎	○	△	△			◎	△				
			Cl浸透部				◎	○	△	○				△	△			
			深層部				◎	○	△	○	△							
	1/100 人工海水	接液面 近傍	外部		△													
			表層極近 傍の内部															
		内部	溶脱部				◎	○	△	△	△		△					
			Cl浸透部				◎	○	△	○	△			△				
			深層部				◎	○	△	○	△							

XRD分析結果との対応表 (SEM観察結果より推定した鉱物の含有域は僅かであるためXRDの「△」と同様とした)

◎	○	△	なし
◎	○	△	

表 2.2-2 XRD 分析、SEM 観察結果を元に作成した鉱物の分布一覧 (OPC-60)

試料条件			SEM観察			XRD分析												
試料名	浸漬液	測定位置		接液面近傍に生成した鉱物			ブランク試料に含有している鉱物					海水影響で生成した鉱物			混和材			
				Calcite (推定)	Brucite (推定)	M-S-H (推定)	CSH	Portlan dite	kato ite	Mono sulfate	Mono carbonate	Ettrin gite	Friedel's salt	un known	Quartz	Mullite		
OPC-60	BL	-					◎	○	△	△								
	人工海水	接液面 近傍	外部	△	△													
			表層極近 傍の内部															
		内部	溶脱部				◎	○	△				◎	△				
			Cl浸透部				◎	○	△				△	△				
			深層部				◎	○	△				△	△				
	1/10 人工海水	接液面 近傍	外部		△													
			表層極近 傍の内部															
		内部	溶脱部				◎	△	△				◎	△				
			Cl浸透部							◎	○	△			△	△		
			深層部							◎	○	△					△	
	1/100 人工海水	接液面 近傍	外部		△													
			表層極近 傍の内部															
		内部	溶脱部				◎	○	△	△	△		△					
			Cl浸透部							◎	○	△			△	△		
			深層部							◎	○	△	△					

XRD分析結果との対応表 (SEM観察結果より推定した鉱物の含有域は僅かであるためXRDの「△」と同様とした)

◎	○	△	なし
◎	○	△	

表 2.2-3 XRD 分析、SEM 観察結果を元に作成した鉱物の分布一覧 (FAC30)

試料条件			SEM観察			XRD分析													
試料名	浸漬液	測定位置		接液面近傍に生成した鉱物			ブランク試料に含有している鉱物					海水影響で生成した鉱物			混和材				
				Calcite (推定)	Brucite (推定)	M-S-H (推定)	CSH	Portlan dite	kato ite	Mono sulfate	Mono carbonate	Ettrin gite	Friedel's salt	un known	Quartz	Mullite			
FAC30	BL	-					◎	◎	△	△						◎	△		
	人工海水	接液面 近傍	外部	△															
			表層極近 傍の内部			△													
		内部	溶脱部				◎	◎	△						△	◎	◎		
			Cl浸透部																
			深層部				◎	◎	△	△						◎	△		
	1/10 人工海水	接液面 近傍	外部		△														
			表層極近 傍の内部			△													
		内部	溶脱部				◎	◎	△				△	△		◎	◎		
			Cl浸透部																
			深層部				◎	◎	△	△						◎	△		
	1/100 人工海水	接液面 近傍	外部																
			表層極近 傍の内部																
		内部	溶脱部				◎	◎	△						△	◎	◎		
			Cl浸透部																
			深層部				◎	◎	△	△						◎	△		

XRD分析結果との対応表 (SEM観察結果より推定した鉱物の含有域は僅かであるためXRDの「△」と同様とした)

◎	○	△	なし

表 2.2-4 XRD 分析、SEM 観察結果を元に作成した鉱物の分布一覧 (BFSC70)

試料条件			SEM観察			XRD分析										
試料名	浸漬液	測定位置		接液面近傍に生成した鉱物			ブランク試料に含有している鉱物					海水影響で生成した鉱物			混和材	
				Calcite (推定)	Brucite (推定)	M-S-H (推定)	CSH	Portlan dite	kato ite	Mono sulfate	Mono carbonate	Ettrin gite	Friedel's salt	un known	Quartz	Mullite
BFSC70	BL	-					◎	◎		○	○					
	人工海水	接液面 近傍	外部	○												
			表層極近 傍の内部			○										
		内部	溶脱部				◎	◎		○	○					
			Cl浸透部													
			深層部				◎	◎		○	○					
	1/10 人工海水	接液面 近傍	外部		○											
			表層極近 傍の内部													
		内部	溶脱部				◎	◎				○	○	○		
			Cl浸透部													
			深層部				◎	◎		○	○					
	1/100 人工海水	接液面 近傍	外部													
			表層極近 傍の内部													
		内部	溶脱部				◎	◎		○	○					
			Cl浸透部													
			深層部				◎	◎		○	○					

XRD分析結果との対応表 (SEM観察結果より推定した鉱物の含有域は僅かであるためXRDの「△」と同様とした)

◎	○	△	なし
◎	○	△	なし

2.2.2 セメント系材料の変質についての考察

セメント系材料と海水系浸漬液の反応による鉱物の溶脱や生成などを伴う変質は、固相の内部と外部で発生した。

セメント相内部の変質領域の大きさは、OPC 系材料と混合セメント系材料で異なるが、鉱物変化は同じであり、同じ現象が生じていることを確認した。内部の接液面近傍では Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) の溶脱により Ca 成分が減少し、同領域では SO_4^{2-} 、Cl⁻ が浸透することで既存のアルミネート鉱物である Monosulfate ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) や Monocarbonate ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$) が Ettringite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) や Friedel's salt ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) に変化することがわかった。Cl 濃度はこの領域以深で高く、Friedel's salt の生成によるものと考えた。既往の研究 (原環センター, 2007) から、硬化体の作製条件 (水セメント比、養生期間、温度) を揃えた場合、総空隙量は混合セメント系材料の方が多いが、空隙径は OPC 系材料より小径となるため拡散係数は小さいことが確認されている。本研究でも混合セメント系材料の方が OPC 系材料より海水成分の影響領域が狭く、材料固有の空隙構造とこれに起因する拡散係数の違いが変質領域の大きさに影響していると考えられた。

セメント相外部または、接液面極近傍の内部では、セメント種類及び浸漬液の海水成分の濃度に応じて Ca 部か Mg 部、またはその両方が確認された。Ca 部は Calcite (CaCO_3)、Mg 部は、OPC 系材料及び混合セメント系材料を 1/10 人工海水に浸漬した試料では Brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$)、混合セメント系材料を人工海水に浸漬した試料では M-S-H ($x\text{MgO} \cdot y\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) と推測された。Calcite (推定) の生成は人工海水に浸漬した試料のみで確認されており、OPC 系材料の方が混合セメント系材料より生成量が多かった。Calcite の主成分である Ca は、人工海水には僅かしか含まれていないことから、セメントから Ca 成分が溶脱して沈殿したものと考えられる。OPC 系材料では Portlandite の溶脱域が広く、Ca の溶脱量が多いために Calcite の生成が顕著だったと考えた。しかし、同様に Ca の溶脱域が広い OPC 系材料を 1/10 人工海水に浸漬した試料では Calcite が生成していないことから、海水成分の濃度も Calcite の生成の有無に影響することがわかった。試料表層外部で確認された Brucite (推定) の生成に関しても Calcite と同様に固相内部からセメント成分が供給される必要がある。反応に寄与する鉱物も Calcite と同様に Portlandite と推測され、水酸化物イオンが海水中の Mg イオンと反応し Brucite の相が生成したと考えられた。SEM 像の観察結果から、これらの生成相は非常に緻密な相と判断でき、固相内部の空隙径の大小とは別に、海水成分の浸透抑制相となっている可能性があると考えられる。なお、混合セメント系材料を人工海水に浸漬した試料で確認された M-S-H と考えられる相は、接液面から数 10 μm ほどの内部の生成相である。生成域が非常に狭いため、本分析ではこの相の詳細な分析結果を得られなかった。そのため、Calcite 相 (推定) や Brucite 相 (推定) のように海水成分の浸透抑制に寄与しているかについては更に検討が必要である。

以上、固相内外での変質には、セメント成分の溶脱量と溶脱成分と反応する海水濃度が大きく影響し、その溶脱の多少には、成分の移動量を決定する空隙構造が影響していると考えられる。空隙構造は変質状態により増減するため、空隙構造と関連性の高い機械的強度にも影響すると考えられる。変質領域が狭い試料では直接、空隙構造を取得することは困難であるが、鉱物減少である「Portlandite の溶脱は空隙増加」、アルミネートの鉱物変化である「Ettringite、Friedel's salt 生成は空隙減少」と考えられる。従って、混合セメント系材料と比較して「空隙径が大きいため拡散係数が大きい」「Portlandite を多く含む」OPC 系材料では、海水影響を受け、溶脱、成分浸透した際の空隙増加が混合セメント系材料より大きいと考えられる。

2.2.3 セメント系材料の変質と短期的強度の関係についての考察

試験に用いたセメント系材料は「OPC-45、OPC-60、FAC30、BFSC70」の4種、浸漬液は「人工海水、1/10 人工海水、1/100 人工海水」の3水準、各種分析部位は「溶脱部、Cl 浸透部、深層部」の3部位とし、ビッカース硬度の測定部位は計36部位とした。この中で明確な硬度変化が確認されたのは「OPC-45、1/10 人工海水浸漬試料の溶脱部」「OPC-60、人工海水浸漬試料の溶脱部」「OPC-60、1/10 人工海水浸漬試料の溶脱部」の3部位であった。この3部位の変質状況は共通しており、他の水準より溶脱域が深く Portlandite の減少が顕著に確認できることから、Portlandite の溶脱に伴う空隙の増加が硬度低下に反映したものと考えられる。OPC-45 と OPC-60 のブランク試料のビッカース硬度及び圧縮強度を比較しても、水セメント比が高く空隙が多い OPC-60 の硬度、圧縮強度共に低いことから、空隙の増減が短期的強度変化に影響することは明白である。

一方で、各種分析を実施した36部位の中で、海水成分の影響を受け、最も多く鉱物変化が確認されたのは Friedel's salt の生成であったが、これらの生成領域で硬度変化は確認されなかった。Cl の浸透が直接、結合材であるセメント系材料の短期的強度に影響する可能性は低いと考えられる。

2.3 バルク試験体を用いた力学特性に関するデータの取得のまとめ

本検討では、沿岸部における放射性廃棄物の地層処分を想定し、海水の影響や海陸接合部などの沿岸部固有の環境を考慮したセメント系材料の変質試験を実施し、海水濃度とセメント系材料の化学変質の関係、化学変質と短期的強度変化の関係をまとめた。

海水濃度とセメント系材料の化学変質の関係については以下のことが明確になった。浸漬液の影響を受けた固相の変質の一つに Ca の溶脱が確認され、Ca の溶脱域では Portlandite が減少していた。同領域では S 濃度が高く、成分に対応する鉱物として Ettringite の生成が確認された。Portlandite の溶脱による減少は、骨材の有無や海水濃度の多少に関わらず起こる現象と考えられる。本試験の結果では、混合セメント系材料より OPC 系材料、低濃度海水より高濃度海水で Portlandite の溶脱部が広い傾向であった。また、接液面近傍では析出物の生成が認められた。OPC 系材料では接液面外部に Calcite (人工海水に浸漬した試料のみ) や Brucite と推定される析出層の生成が確認され、混合セメントを人工海水に浸漬した試料では接液面外部に Calcite (推定) の生成、また、接液面近傍内部に Mg 部 (M-S-H と推定) が生成していた。加えて、セメント中への成分浸透も認められた。そのうち Cl 浸透に関連する事項としては、すべてのセメント種に共通して Cl 濃度が高い領域で Friedel's salt の生成が確認された。また OPC 系材料では、浸漬液の Cl 濃度が高いほど浸透する Cl 濃度は高くなる傾向を示した。一方、混合セメント系材料では、浸漬液の Cl 濃度が最も高い条件 (人工海水) で、浸透した Cl 濃度が最も低かった。混合セメントを人工海水に浸漬した試料では前述の通り接液面外部に Calcite の生成が認められたことから、Cl などの海水成分の浸透が抑制された可能性があると考えた。OPC 系材料においても混合セメント系材料と同様に析出層が Cl の浸透抑制相となっている可能性が考えられた。なお、このような鉱物の生成は、実環境でも起こり得る現象であるが、処分場環境では常に地下水が流動しており析出物の成長が起きにくい可能性もあり、今後知見の拡充が必要である。

セメント系材料の化学変質と短期的強度変化 (硬度) の関係に関する検討では以下の知見が得られた。セメント系材料の化学変質は前述の通り、Ca 成分の減少 (Portlandite の溶脱)、S 成分の浸透 (含有するアルミネート鉱物の Ettringite への変化)、Cl 成分の浸透 (含有するアルミネート鉱物の Friedel's salt への変化) が確認されている。Ca 成分の溶脱部と S 成分の浸透部は同

じ領域であるため、個々の変質と硬度の関係を分離して評価することはできないが、Portlanditeを多く含み、アルミネート鉱物の含有量が少ない OPC 系材料では、海水成分の影響を受けた際、溶脱による空隙増加が顕著に起こり、この Ca 溶脱部では空隙の増加を反映して硬度が低下する傾向を示したものと考えられる。今回の試験では、混合セメント系材料の浸漬試料全般で硬度変化は確認されなかった。混合セメント系材料は、OPC 系材料より Portlandite の含有量が少なく、空隙径が小さい固体性状が起因し Ca 溶脱部が僅かであったことから、ほとんど硬度変化しなかったと考えられる。また、Cl 成分の浸透の有無や濃度、Friedel's salt の生成はマイクロ分析の硬度値に影響しないことを確認した。

[参考文献]

- 秋田 勝次, 井浦 智実, 朝倉 俊弘, 海底トンネルで施工されたセメント水ガラス注入材の長期材料特性と性能の評価, 土木学会論文集, Vol.67, No.2, pp. 95-107, 2011.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 18 年度地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処分技術調査—人工バリア長期性能確証試験—, 2007.
- 福手勤, 濱田 秀則, 山本 邦夫, 海洋環境に 20 年間曝露されたコンクリートの耐久性に関する研究, 土木学会論文集, No.442, V-16, pp. 43-52., 1992.

3. 塩水浸透に係わるモデルの検討

鉄筋等の腐食によるセメント系材料のひび割れ発生に伴う機械的特性の変化を評価することを目的に、沿岸海底下の地下水による化学変質を考慮した塩化物イオンの浸透モデルの高度化を検討する。平成 29 年度は、平成 28 年度の調査により抽出された産業界で検討されている塩化物イオンの浸透モデルのうち、物質移行（拡散モデル）と化学反応（相平衡モデル）を連成させた相平衡物質移行解析コード（細川ほか, 2007; 2011）を適用した塩化物イオンの浸透解析（以下、本解析）について検討した。本解析手法は地上構造物での海水条件での塩化物イオンの浸透を検討した実績はあるが、様々な濃度の海水系地下水環境での検討の実績は無い。そこで、2. バルク試験体を用いた力学特性に関するデータの取得で実施したバルク試験体の浸漬試験条件を想定した塩分浸透計算を行い、本解析にて濃度が異なる海水系地下水での塩化物イオンの浸透解析を行う際の留意点等を確認した。

3.1 解析の概要

本解析の概要を図 3.1-1 に示す。本解析は、複数の劣化因子がコンクリート内部に浸透する現象、並びに浸透した劣化因子がセメント成分に化学的に作用し劣化を引き起こす現象を、有限要素法と熱力学的相平衡を組み合わせることによって計算する。すなわち、時間の経過に伴い変化する硬化体中の液相・固相の組成の定量化、換言すれば、液相中の各種化学種（液相化学種）の移動や水和物の生成・溶解に加え、それら水和物による液相化学種の固定など、劣化現象に関与する多様な化学的因子の挙動を総合的に解析することが可能である。

本解析では、図 3.1-1 のような現象について、液相化学種は 1 次元の物質移動モデルに従って移動するものと扱う一方、溶解、析出、表面吸着による固相中の水和物と液相化学種との間での物質の授受の挙動については熱力学的相平衡モデルに従うものとした。

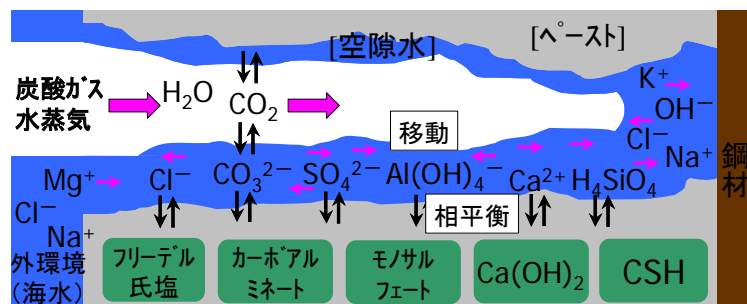


図 3.1-1 セメント硬化体中での物質移動と相平衡の概念図

3.1.1 本解析の特徴

海水のようにセメント水和物と反応し、溶脱以外に二次鉱物を生成する環境での変質事象の解析においては、多くの水和物の相平衡を考慮することが必要である。鉄筋コンクリートの耐久性の評価に当たっては塩素の浸透が重要な因子になることから、土木建築分野では塩素の移動現象のみを扱ったモデルが多く検討されているが、塩素との反応による二次鉱物の生成もあり、多核種、多相を同時に計算することが必要である。

土木・建築分野において塩分浸透評価を目的に使用されている数値解析モデルであれば、地層

処分を想定した地下環境において考慮すべき要因の大半を考慮できるため、浸透予測式より精度の高い予測が可能である。しかし、これらの数値解析モデルのほとんどが塩化物イオンに限定していることから、海水に含まれる他のイオンと塩化物イオンとの相互作用については十分に計算できるとは言えない。一方、細川らのモデルは他のイオンも対象とした **Multi-Species** 物質移動モデルを用いているため、塩化物イオンと他のイオンの相互作用についても考慮することが可能であり、さらには相平衡に基づいて $[Cl^-]/[OH^-]$ を算出できるため、従来の全塩化物イオン濃度に加え $[Cl^-]/[OH^-]$ の双方から鉄筋腐食の評価を可能としている。

TRU 二次レポートで使用されている **PHREEQC-Trans** と本研究で使用した解析コードの概要を表 3.1-1 にまとめる。本研究で用いたモデルでは、構造因子を別途実験などから設定する必要があるが、イオン種毎に移動を計算できる。相平衡計算は汎用的な解析コードである **PHREEQC** を使用しており、そこに最新の知見を反映させている。特に **C-S-H** の溶解モデルに Nonat らのモデルを使用することで、**C-S-H** の表面反応を扱うことができ、変質に伴う核種の収着挙動の変化を計算から求めることが可能である。

また、塩素の移動には対イオンである **Na** や **K** の挙動も重要となる。**Na** や **K** は **C-S-H** に収着することが想定されることから、**C-S-H** のシラノール基に対するこれらのイオンの吸着平衡も重要な因子といえるが、本研究で使用したモデルでは **C-S-H** に対する **Na**、**K** の吸着平衡式も取り込んでおり、海水浸透におけるセメント硬化体の変質を評価するのに適したモデルであるといえる。

表 3.1-1 本研究で用いた解析コードと PHREEQC-Trans の比較

	本研究で使用した解析コード	PHREEQC-Trans
物質移行計算	<p>各イオンの絶対移動度に対して空隙構造因子を乗じる</p> <p>Nernst-Planck 式に基づく質量保存則の式並びに液相化学種の移動に伴い生じる静電ポテンシャル ϕ に関する Poisson 方程式に従う。</p> $\frac{\partial c_i}{\partial t} = \frac{\delta_i D_i^0}{\tau^2} \cdot \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} + \frac{\delta_i B_i^0}{\tau^2} c_i z_i \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + q_i$ <p>i: 液相化学種、t: 時刻、x: 深さ、c_i: 濃度、D_i^0: 自己拡散係数、B_i^0: 絶対移動度、τ: 空隙の屈曲度 (tortuosity)、δ_i: 空隙の収斂度、z_i: 価数、q_i: 生成・消滅項</p> $\varepsilon_w \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = \rho \sum_i z_i c_i$ <p>ε_w: 水の誘電率、ρ: Faraday 定数</p> <ul style="list-style-type: none"> ●イオン種毎に計算可能 ●空隙構造因子を材料ごとに設定する必要がある 	<p>2次元非定常移流拡散方程式を使用し、拡散係数は空隙率との相関式から求める</p> $\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{\partial J_{tx}}{\partial x} + \frac{\partial J_{ty}}{\partial y}$ $= -\frac{\partial}{\partial x} \left(D_e \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_e \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + \left(u_x \frac{\partial C_i}{\partial x} + u_y \frac{\partial C_i}{\partial y} \right)$ $J_{tx} = u_x - D_e \frac{\partial C_i}{\partial x}$ <p>C_i: 液相種 i の濃度、t: 時間、D_e: 実行拡散係数、u_x、u_y: x、y 方向の水フラックス、J_{tx}、J_{ty}: 液相種 i の x 方向、y 方向の物質フラックス</p> <p>拡散係数 $D_e = 4.0 \times 10^{-9} \times \varepsilon^{3.05}$</p> <ul style="list-style-type: none"> ●すべての核種においてトリチウムの拡散係数で代用 ●セメント種類に応じて拡散係数式が変わる
溶解平衡計算	<p>計算コード: PHREEQC</p> <p>セメント系鉱物に関しては熱力データを補完</p> <p>変質鉱物などの設定において最新の情報が入っている。今後、C-A-S-H、M-S-H などの研究成果を反映させて、計算することが可能である。</p> <ul style="list-style-type: none"> ●セメント水和物の鉱物変化を十分に計算可能 	<p>計算コード: PHREEQC</p> <p>セメント系鉱物に関しては熱力データを補完</p> <p>想定されている鉱物種が少なく、C-A-S-H、M-S-H は想定されていない</p>
C-S-H のモデル	<p>Nonat の C-S-H 溶解モデル</p> <p>シリケート 2 量体の溶解平衡と、層状ケイ酸塩のシラノール基-SiOH の反応に関する複数の反応式で構成。表面の電荷状態も考慮されている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ●C-S-H の変化に伴う核種の収着挙動の変化を計算することが可能 	<p>杉山モデルを基本</p> <p>Ca/Si モル比に応じて平衡定数を計算</p> <ul style="list-style-type: none"> ●C-S-H の変化に伴う核種の収着挙動の変化は計算できない

3.1.2 液相の物質移行モデル

物質移行モデルにおける各種液相化学種の液相中での移動は、Nernst-Planck 式に基づく質量保存則の式(1)、並びに、液相化学種の移動に伴い生じる静電ポテンシャル ϕ に関する Poisson 方程式(2)に従うものとした。コンクリートの構造因子 ($\delta\tau^2$) は、実験結果と合わせて検討する事とした。

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = \frac{\delta_i D_i^0}{\tau^2} \cdot \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} + \frac{\delta_i B_i^0}{\tau^2} c_i z_i \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + q_i \quad (1)$$

ここに、 i : 液相化学種、 t : 時刻、 x : 深さ、 c_i : 濃度、 D_i^0 : 自己拡散係数、 B_i^0 : 絶対移動度、 τ : 空隙の屈曲度(tortuosity)、 δ_i : 空隙の収斂度、 z_i : 価数、 q_i : 生成・消滅項、

$$\varepsilon_w \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = \varphi \sum_i z_i c_i \quad (2)$$

ここに、 ε_w : 水の誘電率、 φ : Faraday 定数、である。

3.1.3 相平衡モデル

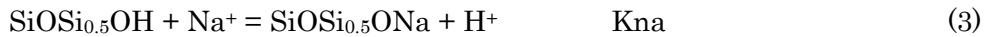
本解析では、Nonat の C-S-H 溶解平衡モデル (Nonat, 2004) を PhreeqC 上に実装し、相平衡論に基づいてセメント硬化体の相組成を計算するモデルを用いた。Nonat らの C-S-H 溶解平衡モデルは、C-S-H 内の層状ケイ酸塩構造を構成するシリケート 2 量体の溶解平衡と、層状ケイ酸塩のシラノール基-SiOH の反応に関する複数の反応式で構成され、各反応式に対し熱力学的平衡定数が与えられている。C-S-H 表面はシラノール基の解離によって帯電し電気二重層 (EDL) を形成する。C-S-H の表面電位 ψ_0 と EDL 内の電荷分布は Poisson - Boltzmann 方程式によって支配され、これを解くことにより EDL の組成が求められる。一方、EDL を除く液相の組成、及び生成する固相の種類とその量は相平衡論に基づき算定される。本解析で用いた水和物の反応式とその $\log K_p$ を表 3.1-2 に示す。これ以外に用いる液相化学種や固相の反応式と平衡定数については、PhreeqC に付属のもの(Wateq4f)と、セメント水和物について整備された Lothenbach らのもの (Lothenbach et al., 2008) を併用して用いた。

表 3.1-2 各水和物の反応式とその熱力学的平衡定数

Phase	Reaction equation	logK _{sp}
Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+ = \text{Ca}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	22.8 a
Calcite	$\text{CaCO}_3 + \text{H}^+ = \text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^-$	1.849 b
Brucite	$\text{Mg}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+ = \text{Mg}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	16.84 b
Ettringite	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O} = 2\text{Al}(\text{OH})_4^- + 6\text{Ca}^{2+} + 26\text{H}_2\text{O} + 4\text{OH}^- + 3\text{SO}_4^{2-}$	-45.09 b
Monosulfate	$(\text{CaO})_3\text{Al}_2\text{O}_3\text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O} = 4\text{Ca}^{2+} + 2\text{Al}(\text{OH})_4^- + \text{SO}_4^{2-} + 4\text{OH}^- + 6\text{H}_2\text{O}$	-27.7 b
Friedel's salt	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Cl}_2(\text{OH})_{12} \cdot 4\text{H}_2\text{O} = 4\text{Ca}^{2+} + 2\text{Al}(\text{OH})_4^- + 2\text{Cl}^- + 4\text{OH}^- + 4\text{H}_2\text{O}$	-27.3 f
C ₄ AH ₁₃	$(\text{CaO})_4\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O} = 4\text{Ca}^{2+} + 2\text{Al}(\text{OH})_4^- + 6\text{OH}^- + 6\text{H}_2\text{O}$	-25.56 b
Monocarbonate	$(\text{CaO})_3(\text{Al}_2\text{O}_3)\text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O} = 4\text{Ca}^{2+} + 2\text{Al}(\text{OH})_4^- + \text{CO}_3^{2-} + 4\text{OH}^- + 5\text{H}_2\text{O}$	-31.47 b
C ₄ FH ₁₃	$(\text{CaO})_4\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O} = 4\text{Ca}^{2+} + 2\text{Fe}(\text{OH})_4^- + 6\text{OH}^- + 6\text{H}_2\text{O}$	-29.88 b
Silica	$\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{H}_4\text{SiO}_4$	-2.85 e
Gypsum	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$	-4.58 a
Al(OH) ₃ (a)	$\text{Al}(\text{OH})_3 + \text{OH}^- = \text{Al}(\text{OH})_4^-$	0.24 b
OH-hydrotalcite	$\text{Mg}_4\text{Al}_2(\text{OH})_{14} \cdot 3\text{H}_2\text{O} = 4\text{Mg}^{2+} + 2\text{Al}(\text{OH})_4^- + 6\text{OH}^- + 3\text{H}_2\text{O}$	-56.02 b
CO ₃ -hydrotalcite	$\text{Mg}_4\text{Al}_2(\text{OH})_{12}\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = 4\text{Mg}^{2+} + 2\text{Al}(\text{OH})_4^- + \text{CO}_3^{2-} + 4\text{OH}^- + 2\text{H}_2\text{O}$	-51.14 b
C-S-H particle	$\text{Ca}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_2 + 4\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} = 2\text{Ca}^{2+} + 2\text{H}_4\text{SiO}_4$	29.6 e
C-S-H internal and	$-\text{SiOH} = -\text{SiO}^- + \text{H}^+$	-11.8 e
External surface sites	$-\text{SiOH} + \text{Ca}^{2+} = -\text{SiOCa}^+ + \text{H}^+$	-9.0 e
	$-\text{SiOH} + -\text{SiOH} + \text{Ca}^{2+} = -\text{SiOCaOSi}^- + 2\text{H}^+$	-20.4 e
	$-\text{SiOH} + \text{Ca}^{2+} + \text{H}_2\text{O} = -\text{SiOCaOH} + 2\text{H}^+$	-24.8 e
	$-\text{SiOH} + -\text{SiOH} + \text{H}_4\text{SiO}_4 = -\text{SiOSi}(\text{OH})_2\text{OSi}^- + 2\text{H}_2\text{O}$	7.0 e

a: WATEQ4F b: Lothenbach et al. c: Reardon d: Birnin-Yauri and Glasser e: Benard et al. f: Iosser

なお、C-S-HによるNa, Kの収着機構については、シラノール基-SiOHとNa, Kとの反応を下式のように定義し、これらをNonatらのC-S-H溶解平衡モデルに加えることでシラノール基とNa, Kとの反応をPhreeqC上に実装した。



各反応式の熱力学的平衡定数Kna, Kkの値を表3.1-3に示す。これらは、合成C-S-H(C/S=1.2)によるNa, Kの固定実験結果をPhreeqCでフィッティングして求めたものである（このとき、C-S-H表面上の電気二重層(EDL)の厚さを決定する比例定数 $\chi = t_s / \kappa^{-1}$ (χ は比例定数、 t_s はEDLの厚さ、 κ^{-1} はデバイ長)は1.0とした)。

表 3.1-3 フィッティングによって得られた熱力学的平衡定数 log Kna 及び log Kk

Log Kna	Log Kk
-12.1	-11.9

3.2 バルク試験体の浸漬試験条件を想定した塩分浸透計算のための構造因子の検討

海水成分の浸透を評価するために、各セメント硬化体の物質移行に関わる構造因子 (Tortuosity) を明確にすることが必要である。しかし、2.にて実施した試験では表層に Calcite や Brucite と推定される析出層が生成しており、海水成分の浸透に影響を及ぼしている可能性があることがわかった。析出物による物質移動の制限事象を考慮した上で、構造因子を決定することは難しい事、また、構造因子は外部析出物の有無によらず同じなので、外部析出物の影響がなかった試験の結果から構造因子を求めることとした。そこで、平成 23 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発—人工バリアの長期挙動の評価—において、各種セメントペースト硬化体を NaCl 溶液への浸漬し、塩素の浸透を評価した実験結果を使用して各セメント硬化体の構造因子を検討した。

3.2.1 固相の初期組成

検討対象は平成 23 年度に NaCl 浸漬試験を実施した OPC ペースト W/C60% (OPC-60)、FAC30 ペースト W/C60% (FAC30)、BFSC70 ペースト W/C60% (BFSC70) の 3 水準とした。材料の化学組成、反応率、空隙率は平成 23 年度に取得したデータを使用した。OPC-60 の鉱物組成と反応率を表 3.2-1、FAC30 の鉱物組成と反応率を表 3.2-2、BFSC70 の鉱物組成と反応率を表 3.2-3 にそれぞれ示す。また、各硬化体の空隙率を表 3.2-4 に示した。

表 3.2-1 OPC-60 の鉱物組成と反応率

	組成(wt%)	水和率(%)
C3S	61.73	95
C2S	18.42	92.5
C3A	7.06	97.8
C4AF	10.29	62.1
MgO	0.47	100
Gypsum	0.01	100
Bassanite	1.31	100
Calcite	0.72	100

表 3.2-2 FAC30 の鉱物組成と反応率

	組成(wt%)	水和率(%)
C3S	43.21	96.4
C2S	12.89	86.2
C3A	4.94	99.7
C4AF	7.20	36.6
MgO	0.33	100
Gypsum	0.01	100
Bassanite	0.92	100
Calcite	0.50	100
Quartz	2.73	0
Mullite	2.60	0
Hematite	0.17	0
Rutile	0.04	0
FAGlass	24.46	66.5

表 3.2-3 BFSC70 の鉱物組成と反応率

	組成(wt%)	水和率(%)
C3S	18.52	95
C2S	5.53	92.5
C3A	2.12	97.8
C4AF	3.09	62.1
MgO	0.14	100
Gypsum	0.00	100
Bassanite	0.39	100
Calcite	0.22	100
BFSglass	70.00	43.2

表 3.2-4 各硬化体の空隙率

	空隙率
OPC-60	0.367
FAC30	0.424
BFSC70	0.392

3.2.2 構造因子検討のための境界条件

境界条件は平成 23 年度実施した実験条件に合わせて NaCl の 0.1mol/L 水溶液とした。計算に考慮した液相イオン種、境界条件、拡散係数を表 3.2-5 に示す。

表 3.2-5 計算に考慮したイオン種、境界条件、拡散係数

考慮したイオン種	境界条件	拡散係数 D_e
	mmol/L	m^2/cm
Cl	100	2.03E-09
Na+	100	1.33E-09
OH	0	5.27E-09
Ca+2	0	7.91E-10
CaOH+	0	7.91E-10
K+	0	1.96E-09
SO4-2	0	1.07E-09
Al(OH)4-	0	1.04E-09
Mg+2	0	7.05E-10
MgOH+	0	7.05E-10
HCO3-	0	1.18E-09
CO3-2	0	9.55E-10

3.2.3 構造因子検討のための解析条件

構造因子検討のための解析条件を表 3.2-6 に示す。OPC-60 と FAC30、BFSC70 の浸透速度が大きく異なっていたため、解析条件はそれぞれに合わせて設定した。

表 3.2-6 構造因子検討のための解析条件

	OPC-60	FAC30, BFSC70
解析対象期間 (days)	7	7
解析のタイムステップ (dt Step[hr])	1.5	3
ステップ数	112	56
空間分割数 (Nodes)	21	31
解析対象空間領域 (L[m])	0.03	0.03

3.2.4 構造因子の解析

NaCl 浸漬試験の塩素浸透プロファイルにフィッティングするように構造因子 (Tortuosity) をパラメータとして計算した。塩素の浸透プロファイルの実測値と計算値を比較した結果を図 3.2-1 に示す。FAC30 と BFSC70 は Tortuosity をパラメータとすることで実測値と計算値が濃度分布も含めて比較的良く一致した。しかし、OPC-60 は濃度分布が一致しなかった。今回使用し

たモデルにおいて、考慮できる C-S-H の C/S 比が小さく、計算では C-S-H 以外の CaO 分が Friedel's salt などの塩素化合物を生成したために、接液面から数 cm 程度の深さまで塩素濃度が高い状態となった。しかし、実験では浸漬期間は 1 週間であり、Friedel's salt などの二次鉱物が生成するほど固相の反応が十分に進んでおらず、Friedel's salt の生成による塩素の固定化が見られなかったのではないかと考えた。また、OPC セメントペーストの C-S-H の C/S 比はモデルで計算できる C-S-H の C/S 比よりも高いことも、解析結果と実測値が乖離した原因の一つであると考えている。モデルで考慮できる鉱物相の拡充は、本モデルの今後の課題である。

本研究では塩素の浸透深さを構造因子決定のための一番の要因であると考え、OPC ペーストにおいても、構造因子は塩素の浸透深さに合うように決定した。フィッティングにより算出されたそれぞれの硬化体の構造因子 (Tortuosity) を表 3.2-7 に示す。

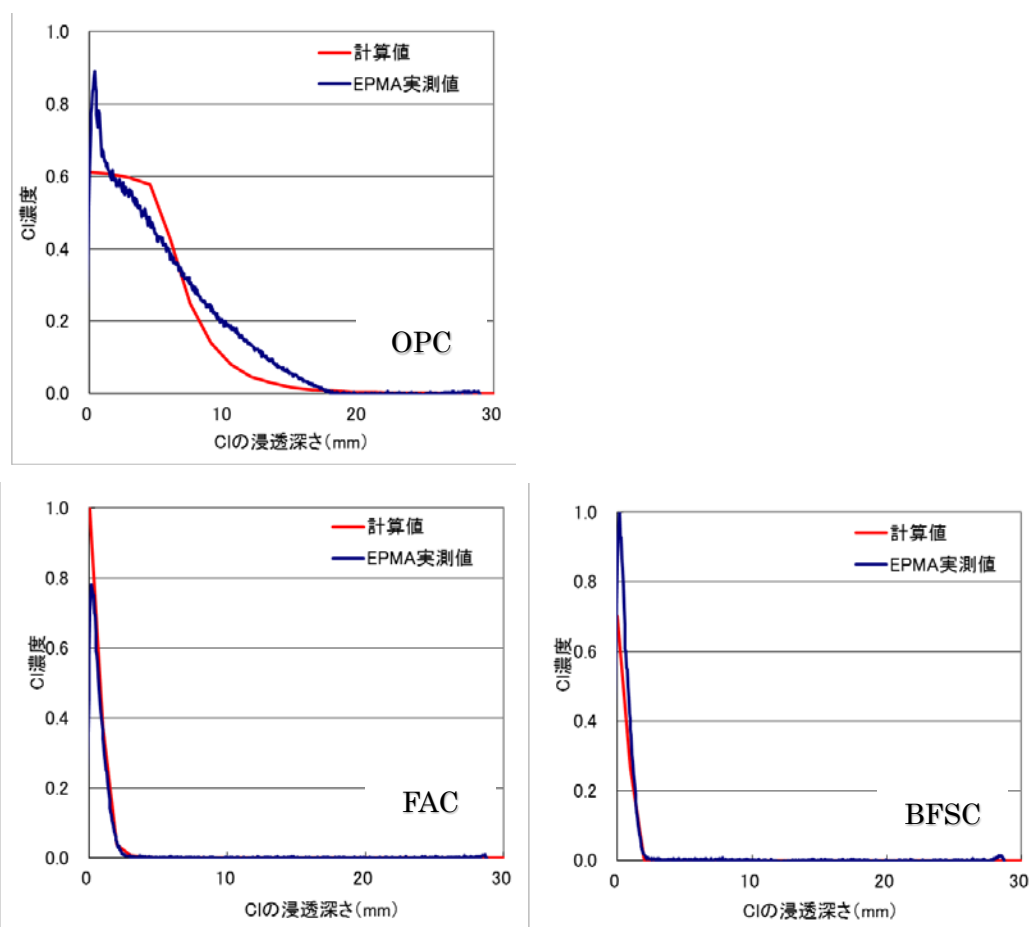


図 3.2-1 浸透プロファイルのフィッティング

表 3.2-7 Tortuosity 計算結果

	Tortuosity
OPC-60	0.4
FAC30	0.008
BFSC70	0.005

3.3 バルク試験からの浸漬試験条件を想定した塩分浸透計算

3.2項においてNaCl溶液浸漬試験結果をもとに各種セメントペーストのイオンの移動に対する構造因子を明確にした。この構造因子を適用して2.で実施した浸漬試験条件での海水成分の浸透とそれに伴う反応を計算し、実験結果と比較し、本解析の課題を抽出した。

3.3.1 試料の初期組成及び空隙率

検討対象は平成 29 年度の実験に使用した OPC W/C60% (OPC-60)、FAC30 W/C60% (FAC30)、BFSC70 W/C60% (BFSC70) の3水準とした。

OPC-60 の鉱物組成と反応率を表 3.3-1 に示す。セメント鉱物相の反応率はリートベルト解析から算出した。

FAC30 の鉱物組成と反応率を表 3.3-2 に示す。FAC 水和物のセメント鉱物の反応率はリートベルト法でもとめ、フライアッシュの水和率は、結晶相は反応しないと仮定して不溶残分から求めた。

BFSC70 の鉱物組成と反応率を表 3.3-3 に示す。BFSC 水和物のセメント鉱物相はリートベルト法でフィッティングが難しく、セメント鉱物の水和率を求めることができなかった。養生条件は同じであることから、セメント鉱物の水和率は OPC と同じと仮定した。スラグのガラス相の水和率はサリチル酸アセトンメタノール不溶残分から求めた。

また、各硬化体の空隙率を表 3.3-4 に示す。

表 3.3-1 OPC-60 の鉱物組成と反応率

	組成 (wt %)	水和率 (%)
C3S	68.5	95
C2S	11	92.5
C3A	6.8	97.8
C4AF	11.2	62.1
MgO	0.6	100
Gypsum	0.3	100
Bassanite	1.5	100
Calcite	0.2	100

表 3.3-2 FAC30 の鉱物組成と反応率

	組成 (wt %)	水和率 (%)
C3S	47.95	96.4
C2S	7.70	86.2
C3A	4.76	99.7
C4AF	7.84	36.6
MgO	0.42	100
Gypsum	0.21	100
Bassanite	1.05	100
Calcite	0.14	100
Quartz	3.37	0
Mullite	3.61	0
Magnetite	0.15	0
FAglass	22.87	66.5

表 3.3-3 BFSC70 の鉱物組成と反応率

	組成 (wt %)	水和率 (%)
C3S	20.55	95
C2S	3.30	92.5
C3A	2.04	97.8
C4AF	3.36	62.1
MgO	0.18	100
Gypsum	0.09	100
Bassanite	0.45	100
Calcite	0.06	100
BFSglass	70.00	43.2

表 3.3-4 各硬化体の空隙率

	空隙率
OPC-60	0.349
FAC30	0.418
BFSC70	0.354

3.3.2 境界条件

境界条件は実験条件に合わせて人工海水、人工海水を 10 倍希釈した溶液、人工海水を 100 倍希釈した溶液とした。計算に考慮した液相イオン種、境界条件、拡散係数を表 3.3-5 に示す。

表 3.3-5 計算に考慮したイオン種、境界条件、拡散係数

考慮したイオン種	拡散係数De	人工海水	人工海水10倍	人工海水100倍
	m ² /cm	mmol/L	mmol/L	mmol/L
Cl	2.03E-09	5.49E+02	5.49E+01	5.49E+00
Na+	1.33E-09	4.75E+02	4.75E+01	4.75E+00
OH	5.27E-09	2.08E-03	2.98E-04	1.20E-04
Ca+2	7.91E-10	9.83E+00	9.83E-01	9.83E-02
CaOH+	7.91E-10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
K+	1.96E-09	1.08E+01	1.08E+00	1.08E-01
SO4-2	1.07E-09	2.84E+01	2.84E+00	2.84E-01
Al(OH)4-	1.04E-09	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Mg+2	7.05E-10	5.20E+01	5.20E+00	5.20E-01
MgOH+	7.05E-10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
HCO3-	1.18E-09	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CO3-2	9.55E-10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

3.3.3 解析条件

解析条件を表 3.3-6 に示す。OPC-60 と FAC30、BFSC70 の浸透速度が大きく異なっていたため、解析条件はそれぞれに合わせて設定した。

表 3.3-6 解析条件

	OPC-人工海水	OPC-1/10人工海水	OPC-1/100人工海水	FAC, BFSC
解析対象期間 (days)	112	112	112	112
解析のタイムステップ (dtStep[hr])	1.5	3	12	3
ステップ数	1792	896	224	896
空間分割数 (Nodes)	21	21	31	31
解析対象空間領域 (L[m])	0.03	0.03	0.03	0.03

3.3.4 解析結果

解析結果の概略を以下に記す。

- OPC-60硬化体について、海水系地下水の濃度と塩化物イオンの浸透の関係は、解析と試験共に塩化物イオン濃度が高いほど浸透が進んでおり、同様の傾向を示した。しかし、塩化物イオンの浸透の程度は、1/100人工海水浸漬試料では解析と試験で同等であったが、その他の試料は解析の方が試験より塩化物イオンが浸透する結果となった。
- 混合セメント硬化体について、海水系地下水の濃度と塩化物イオンの浸透の関係は、試験では塩化物イオン濃度によらず浸透深さが一定、かつ、1/10人工海水浸漬試料が最も塩化物イオン浸透量が多かったのに対し、解析では塩化物イオン濃度が高いほど浸透深さ及び量ともに大きく、解析と試験で異なる傾向を示した。1/10人工海水浸漬試料及び1/100人工海水浸漬試料では、解析の方が試験よりも塩化物イオンが浸透しない結果となった。

- ・ 鉱物組成について、Ettringite及びFriedel's saltは、生成箇所や生成量が試験とは異なっていたが、生成が認められた事は試験結果と一致していた。一方、試験では接液面外部に生成していたBruciteは、解析ではセメント相内部に生成していた例が認められたが、生成の有無及び生成量は試験と完全には一致しなかった。また、解析では接液面近傍のPortlanditeが全量溶脱した上にC-S-Hの溶脱も起きており、試験でPortlanditeがCa溶脱部に残留していたのとは異なっていた。

結果の詳細を以下に記す。

OPC-60の硬化体の塩素濃度プロファイルを計算しEPMAによる塩素濃度プロファイルの測定結果と重ねたグラフと鉱物相組成の計算結果を図 3.3-1 に示す。人工海水に浸漬した試料の計算結果(上段)は試験と比較して内部まで塩素が浸透している結果になった。また、本解析の鉱物相組成の計算結果では、ごく表層付近は溶脱に伴う鉱物の消失によって、体積が減少していた。その内部は二次鉱物としてBrucite、Friedel's salt、Hydrotalcite、C4FH13が生成することによって体積が増加する結果となった。Ettringite及びFriedel's saltが生成した事は試験結果と一致していたが、試験では試料の外側にBruciteが生成したのに対し、本解析では試料の内部に生成した。

試験では接液面表面に緻密で硬い析出物層が形成されており、前述のように、今後、析出層の生成が物質移行に与える影響についての知見を増やしていく必要があるが、物質移動が制限された可能性がある。塩化物イオンの浸透深さについて試験結果と解析結果が一致しなかったのは、本解析ではそのような現象を反映させることができない事が影響したためだと考えられる。試験において接液面表面に生成した緻密で硬い析出物層については、実際の海洋構造物でBruciteの生成が認められる(山路, 2011)一方で、処分場の操業中は地下水が流動しているために析出物が連続層とはなりにくく剥離する可能性も否定できない。また、海水系の地下水のMg濃度は低いと想定されるため(核燃料サイクル開発機構, 1999)、そもそもこのような反応は起きない可能性がある。今後は、析出層の挙動や二次鉱物の生成が物質移行に与える影響についての知見を増やしていくのと並行して、このような析出物の生成を考慮できる解析コードの検討が必要である。

1/10人工海水に浸漬した試料(中段)も同様に塩素は試験よりも本解析のほうが内部に浸透している結果となった。人工海水に浸漬した試料と同様に試験では表層に析出層が生成したためとである可能性がある。1/100人工海水浸漬試料(下段)では強固な析出層が確認されておらず、試験と本解析が比較的一致する結果となった。

FAC30の結果を図 3.3-2に示す。本解析のほうが試験よりも内部に塩素が浸透する結果となり、OPC-60と同様に人工海水に浸漬した試料(上段)では表層の析出層の影響を考慮できないためである可能性がある。しかし、1/10人工海水に浸漬した試料と1/100人工海水に浸漬した試料では、本解析よりも試験のほうが内部に浸透する結果となった。本解析では比較的多量のFriedel's saltが生成しており、Friedel's saltが生成している部分では塩素濃度が高く、Friedel's saltによって多くの塩素が固定されている結果となっている。しかし試験では、Friedel's saltの生成量はそれほど多くなく、1/100人工海水浸漬試料では生成が確認されていないことから、本解析に比較して固定される塩素量が少なく、本解析よりも試験のほうが内部に浸透する結果となったと考えた。本解析ではC-S-Hに対するAlの取り込みが考慮されておらず、Friedel's saltを含むアルミネート系水和物の生成量が多くなっていることが原因の一つであると考えている。

BFSC70の結果を図 3.3-3に示す。FAC30と同じで人工海水に浸漬した試料は本解析のほうが試料内部に塩素が浸透しており、析出層の影響である可能性がある。1/10人工海水と1/100人工海水に浸漬した試料は逆に試験のほうが塩素は内部に浸透していた。FAC30と同様に本解析では

Friedel's salt の生成によって塩素が固定化されたためだと考える。

本研究では構造因子の算出には 1 週間の浸漬試験試料を使用しており、ごく初期の浸透挙動には毛管作用の影響が入っている可能性がある。浸漬期間の長い試料など、いくつかの条件の結果を元に構造因子を決めていくことも必要と考えられる。

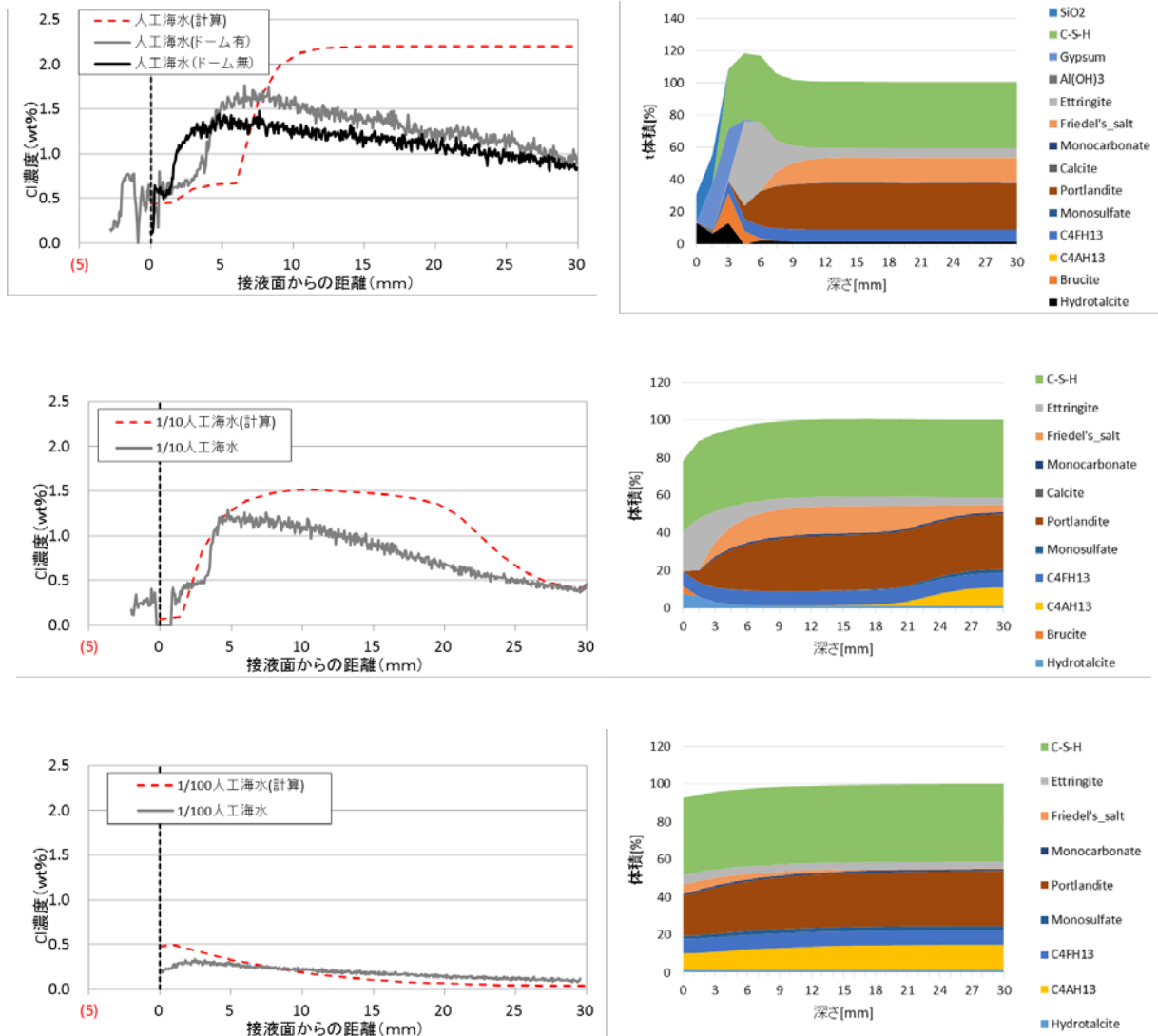


図 3.3-1 塩素の浸透プロファイルと鉱物相組成の計算結果と試験結果 (OPC-60)

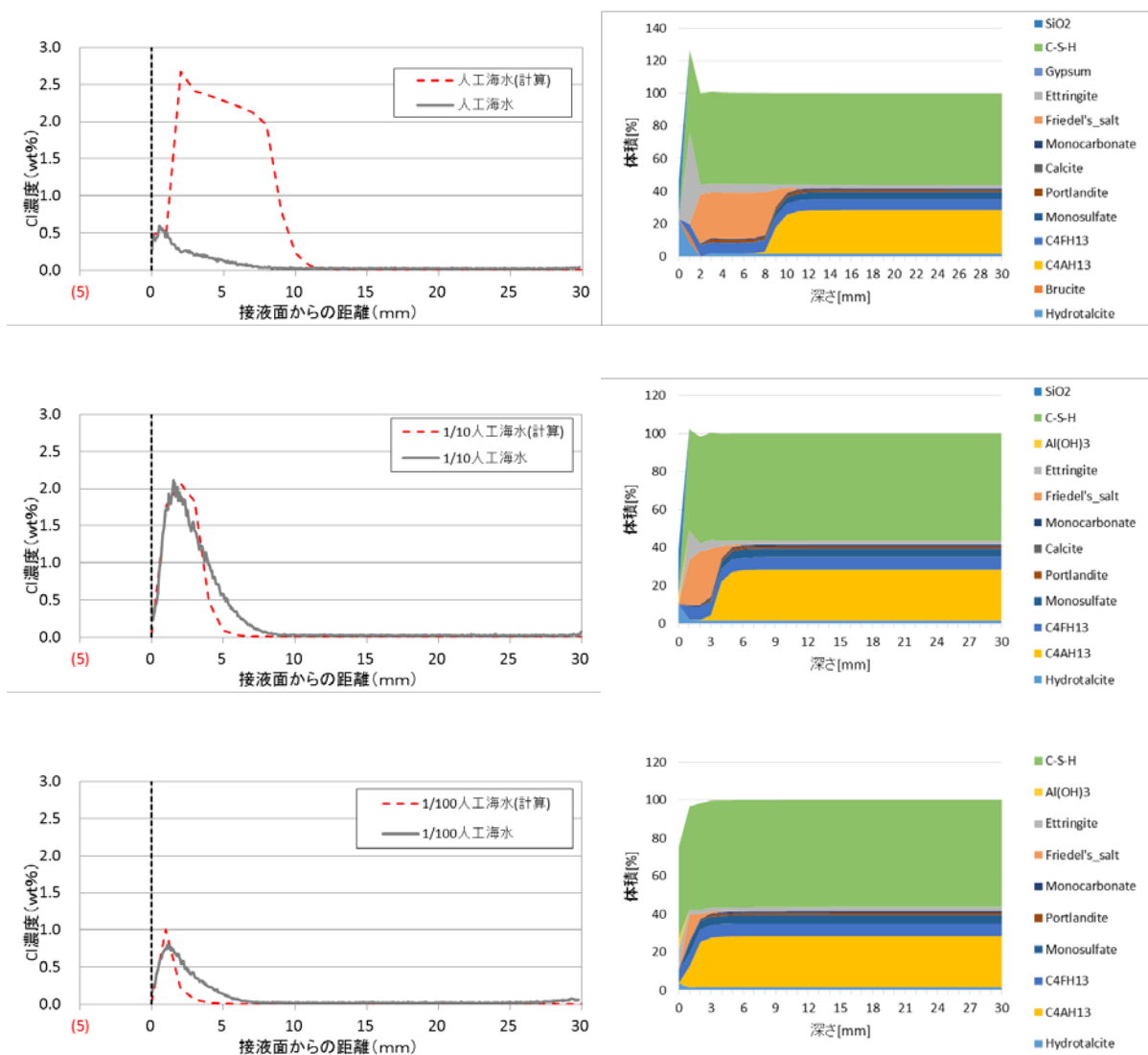


図 3.3-2 塩素の浸透プロファイルの計算結果と試験結果 (FAC30)

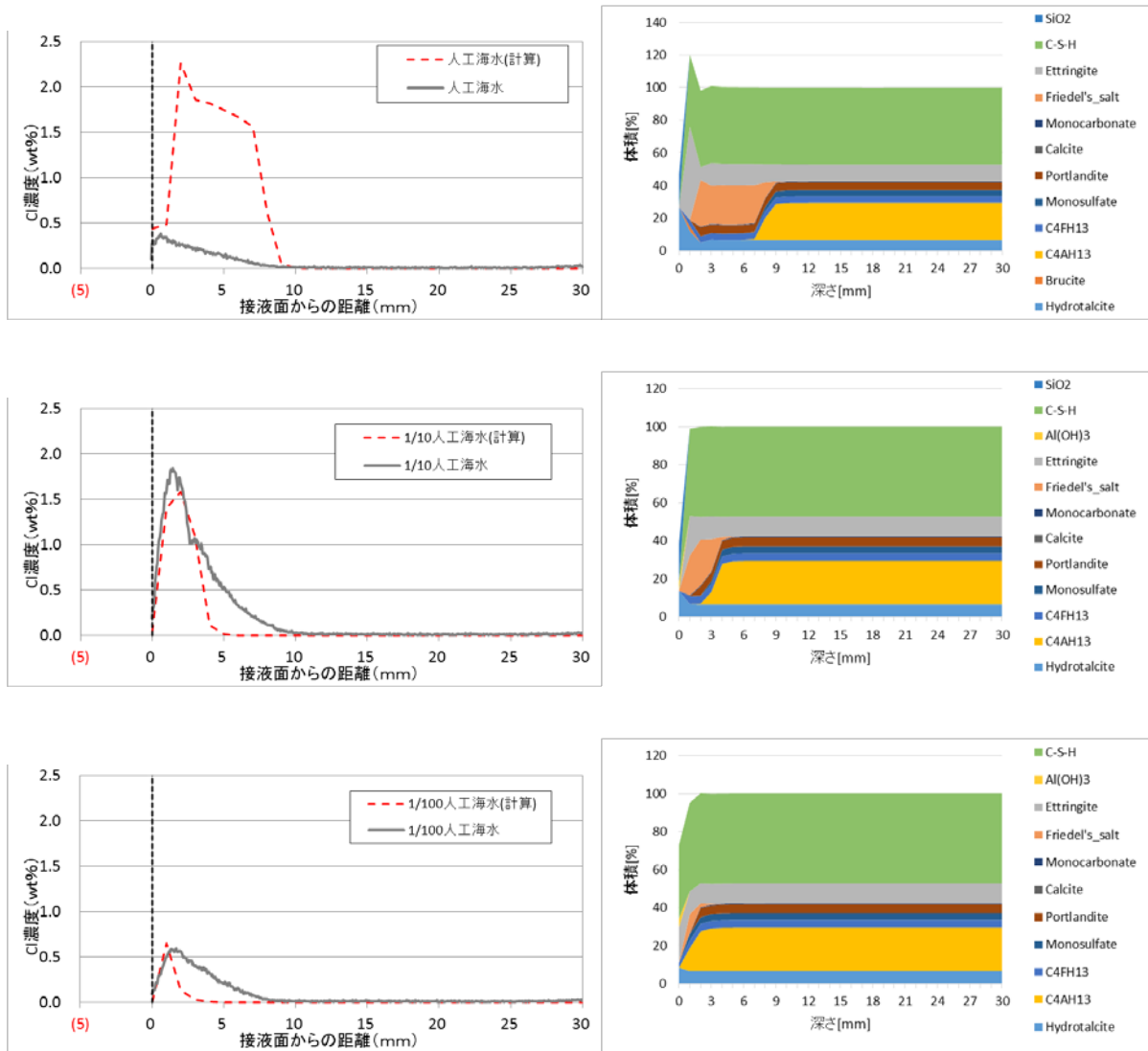


図 3.3-3 塩素の浸透プロファイルの計算結果と試験結果 (BFSC70)

3.4 塩水浸透に係わるモデルの検討のまとめ

鉄筋等の腐食によるセメント系材料のひび割れ発生に伴う機械的特性の変化を評価することを目的に、沿岸海底下の地下水による化学変質を考慮した塩化物イオンの浸透モデルについて、地層処分での塩化物イオン浸透解析に向けた検討を実施した。平成 29 年度は物質移行(拡散モデル)と化学反応(相平衡モデル)を連成させた相平衡物質移行解析コードを使用して、前章 2.で実施したバルク試験体の浸漬試験条件を想定した塩分浸透計算を行い、本解析にて濃度の異なる海水系地下水での塩化物イオン浸透解析を行う際の留意点等を確認した。

3.4.1 解析条件の検討

物質移行計算で使用する構造因子(tortuosity)の検討には NaCl の浸漬試験結果(浸漬期間: 1 週間)を使用した。普通ポルトランドセメントペースト(W/C0.6)は 0.4、フライアッシュセメント(FAC30、W/C0.6)は 0.008、スラグセメント(BFSC70、W/C0.6)は 0.005 とすることで、

塩素イオンの浸透深さを再現できたことから、これらの構造因子を使用して 2. で実施したバルク試験体の計算を実施した。

3.4.2 浸漬試験条件の浸透解析

- OPC-60硬化体について、海水系地下水の濃度と塩化物イオンの浸透の関係は、解析と試験共に塩化物イオン濃度が高いほど浸透が進んでおり、同様の傾向を示した。しかし、塩化物イオンの浸透の程度は、1/100人工海水浸漬試料では解析と試験で同等であったが、その他の試料は解析の方が試験より塩化物イオンが浸透する結果となった。
- 混合セメント硬化体について、海水系地下水の濃度と塩化物イオンの浸透の関係は、試験では塩化物イオン濃度によらず浸透深さが一定、かつ、1/10人工海水浸漬試料が最も塩化物イオン浸透量が多かったのに対し、解析では塩化物イオン濃度が高いほど浸透深さ及び量ともに大きく、解析と試験で異なる傾向を示した。1/10人工海水浸漬試料及び1/100人工海水浸漬試料では、解析の方が試験よりも塩化物イオンが浸透しない結果となった。
- 鉱物組成について、**Ettringite** 及び **Friedel's salt** は、生成箇所や生成量が試験とは異なっていたが、生成が認められた事は試験結果と一致していた。一方、試験では接液面外部に生成していた **Brucite** は、解析ではセメント相内部に生成していた例が認められたが、生成の有無及び生成量は試験と完全には一致しなかった。また、解析では接液面近傍の **Portlandite** が全量溶脱した上に **C-S-H** の溶脱も起きており、試験で **Portlandite** が **Ca** 溶脱部に残留していたのとは異なっていた。

3.4.3 長期評価のための留意点

解析の方が試験よりも塩化物イオンが浸透する結果となった結果については、本解析の物質移行モデルでは表層の析出層の影響を考慮できない事が影響した可能性が考えられる。前述のように、今後、析出層の生成が物質移行に与える影響についての知見を増やしていく必要がある。また、混合セメントにて解析の方が試験よりも塩化物イオンが浸透しない結果となったのは、本解析では **Friedel's salt** を含むアルミネート系水和物の生成量を過剰に評価している事が原因の一つである可能性がある。今後の試験結果も確認しつつ、引き続き濃度の異なる海水系地下水における塩化物イオンの浸透解析の検討をしていく必要がある。

また、本解析はセメントペーストに対する塩化物イオンの浸透を解析したものであり、地層処分場における塩化物イオンの浸透から鉄筋の腐食を評価するにあたっては、骨材が存在するモルタル及びコンクリートの空隙構造や物質移行特性も考慮する必要がある。

[参考文献]

- 細川佳史, 山田一夫, Bjorn JOHANNESSON, Lars-Olof NILSSON, 熱力学的相平衡を考慮した Multi-species 物質移動モデルの構築, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp. 957-962., 2007.
- 細川佳史, 小川彰一, 山田一夫, 水分・CO₂ ガス及び液相化学種の移動と熱力学的相平衡との連成システムによる複合劣化の再現, 第 65 回セメント技術大会講演要旨, pp. 308-309., 2011.
- A. Nonat, The structure and stoichiometry of C-S-H, Cement and concrete research, 34, pp.1521-1528, 2004.

Barbara Lothenbach, Thomas Matschei, Göril Möschner and Fred P. Glasser, Thermodynamic modeling of the effect of temperature on the hydration and porosity of Portland Cement, *Cement and concrete research*, 38(1), pp.1-18, 2008.

山路徹, 海洋に位置するコンクリート構造物の耐久性能照査手法に関する研究, 港湾空港技術研究所資料, No.1232, 2011.

核燃料サイクル開発機構, わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次とりまとめ—分冊3 地層処分システムの安全評価, JNC TN 1400 99-023, 1999.

Appendix XII

ニアフィールド領域での処分システム構成材料 の成立性と品質確保の方法の提示に関する 補足資料

目 次

1. わが国の沿岸部で想定される処分坑道の仕様の仮設定に係る根拠情報	XII-1
1.1 わが国の沿岸部で一般的に想定される処分坑道	XII-1
1.1.1 処分坑道の仕様設定	XII-5
2. 水理解析の解析条件	XII-9
2.1 解析物性値	XII-9
2.1.1 透水係数及び間隙率	XII-9
2.1.2 不飽和特性	XII-11
2.1.3 比貯留係数	XII-15
2.2 境界条件の設定(広域スケール及び処分場スケールモデル)	XII-15
2.2.1 広域スケールモデル	XII-16
2.2.2 処分場スケールモデル	XII-20
2.2.3 NF スケールモデル	XII-21

図 目 次

図 1.1-1	処分坑道断面図 (NUMO 文献より設定)	XII-3
図 1.1-2	処分坑道断面図 (土木工事設計要領 (国土交通省九州整備局, 2016))	XII-4
図 1.1-3	処分坑道の断面 (NUMO 文献より引用)	XII-5
図 1.1-4	ロックボルト穿孔径断面図 (NUMO 文献)	XII-6
図 1.1-5	グラウチングによる改良範囲の概念図	XII-7
図 1.1-6	処分孔の補強寸法設定	XII-8
図 2.1-1	NF スケールモデルの透水係数分布図	XII-10
図 2.1-2	有効飽和度-相対浸透率曲線	XII-12
図 2.1-3	有効飽和度-毛管圧力曲線	XII-14
図 2.2-1	ネスティングの概念図 (NUMO, 2016)	XII-16
図 2.2-2	境界条件の設定の流れ	XII-16
図 2.2-3	広域スケール及び処分場スケールモデルと鉛直二次元モデルとの位置関係	XII-17
図 2.2-4	広域スケールモデルの水理境界条件の設定	XII-19
図 2.2-5	広域スケールモデルと処分場スケールモデルの位置関係 (■処分施設)	XII-20
図 2.2-6	処分場スケールモデルの境界面における全水頭分布 (■断層、■処分施設)	XII-20
図 2.2-7	切り出しモデル	XII-21
図 2.2-8	境界条件の設定	XII-22
図 2.2-9	処分場スケールモデルにおける切り出しモデルの位置	XII-23
図 2.2-10	境界条件の設定方法の比較検討結果	XII-24
図 2.2-11	ニアフィールドスケールモデルに与えた境界条件	XII-25
図 2.2-12	ニアフィールドスケールモデル (解析メッシュ) の鳥瞰図	XII-25
図 2.2-13	解析における施工の工程の考え方と境界条件の考え方	XII-26

表 目 次

表 1.1-1	仮設定する処分坑道まとめ	XII-2
表 2.1-1	透水係数および間隙率の設定	XII-9
表 2.1-2	広域スケールモデルの物性値	XII-10
表 2.1-3	処分場スケールモデルの物性値	XII-11
表 2.1-4	相対浸透率のモデル及びパラメータ	XII-12
表 2.1-5	毛管圧力のモデル及びパラメータ	XII-13
表 2.1-6	比貯留係数の設定	XII-15
表 2.2-1	NUMO が動水勾配算出に用いた参考データ	XII-17
表 2.2-2	解析ケース一覧 (切り出しモデル)	XII-22

1. わが国の沿岸部で想定される処分坑道の仕様の仮設定に係る根拠情報

わが国における処分システムの構成要素については、沿岸部を想定した特有環境（湧水環境、地球化学的環境）や母岩（堆積岩）を仮定し、NUMO 文献（NUMO, 2014; NUMO, 2016）や土木工事設計要領（国土交通省九州整備局, 2016）等の一般土木の知見を基に、その仕様を決定した。以下にその検討内容を示す。

1.1 わが国の沿岸部で一般的に想定される処分坑道

わが国の沿岸部で想定する処分坑道の構成を整理する。NUMO 文献によると、設計値が示されている竖置き方式の坑道構成は、作業従事者の安全確保や坑道壁面剥落防止の目的から、吹付コンクリートが設定され、坑道の空洞安定性解析結果やトンネル標準示方書（土木学会, 2005）に示されている標準的な支保パターンからは、ロックボルト、鋼製支保工、床板コンクリートに対する各項目に対して設計値が示されている。

NUMO 文献にて示されていないその他の坑道の構成については、土木工事設計要領（国土交通省九州整備局, 2016）を基に抽出した。当文献では、吹付コンクリート、ロックボルト、鋼アーチ支保工、路盤コンクリート（床板コンクリート）に加えて、坑道の止水及び、力学構造を確保するためのグラウト、金網、防・排水工、覆工コンクリートの構成要素が示されている。

以上の検討結果を基に、本検討の水理解析モデルが基本とする仮設定した処分システムの構成要素を表 1.1-1 に示した。また、NUMO 文献にて示された坑道構成で設定した処分坑道の図面と一般土木の知見から補填した処分坑道の図面をそれぞれ図 1.1-1 と図 1.1-2 に示した。

表 1.1-1 仮設定する処分坑道まとめ

鋼アーチ支保工	H154×151×8×12 (NUMO 文献)
吹付コンクリート	200 mm (NUMO 文献)
ロックボルト	D22 L=3,000 mm 周方向間隔 1,000 mm (NUMO 文献)
床板コンクリート	坑道の頂点から R4500 の円を水平に切り取った形状 (NUMO 文献)
グラウト	処分坑道の外壁から 4.0m までの範囲に設定 土木工事設計要領 (国土交通省九州整備局, 2016)
金網	150×150×φ5、2.13kgf/m ² 土木工事設計要領 (国土交通省九州整備局, 2016)
防・排水工	防水工：10mm、裏面緩衝材 (透水性緩衝材)：3mm 排水工の設定はなし 土木工事設計要領 (国土交通省九州整備局, 2016)
覆工コンクリート	覆工コンクリート厚：300mm 土木工事設計要領 (国土交通省九州整備局, 2016)

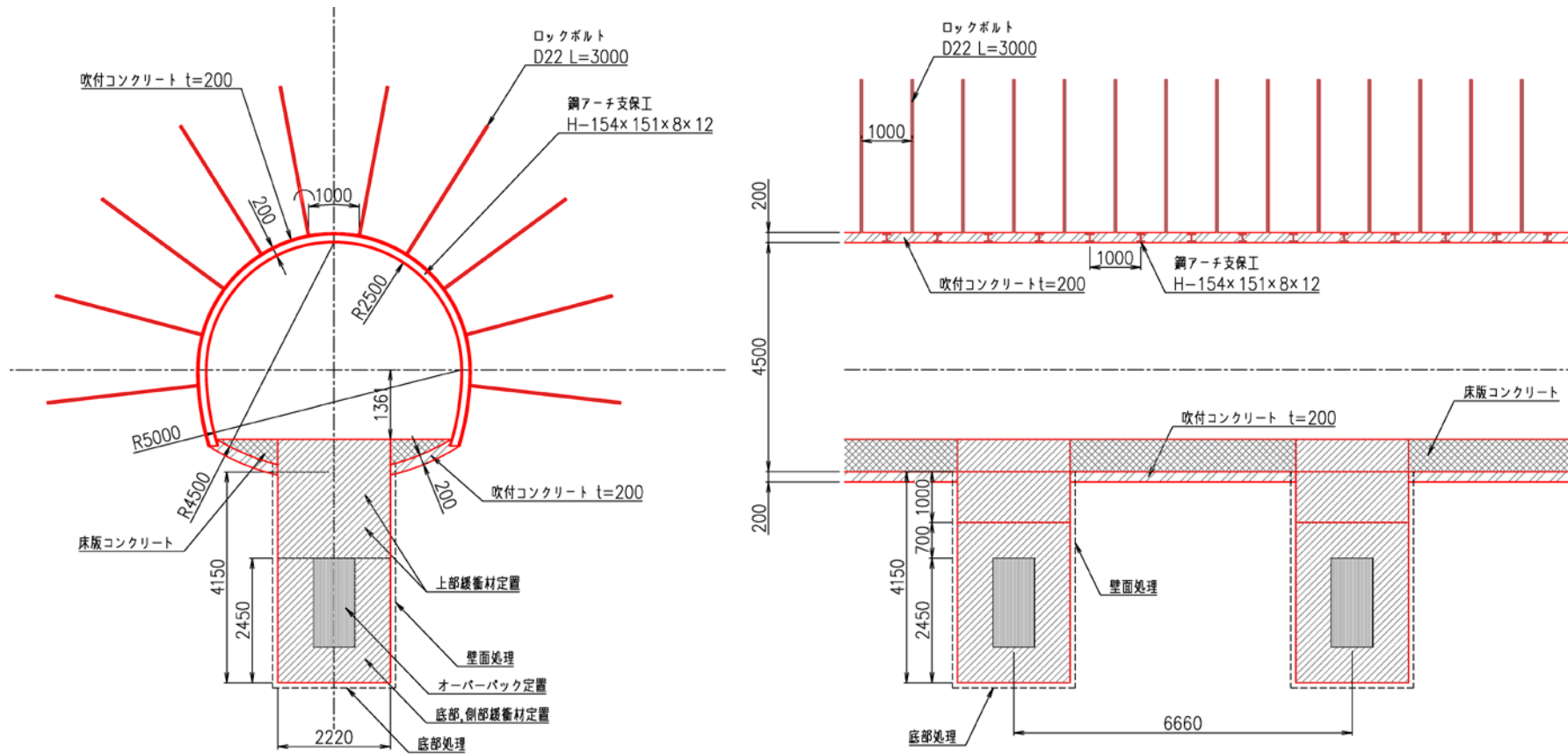


図 1.1-1 処分坑道断面図 (NUMO 文献より設定)

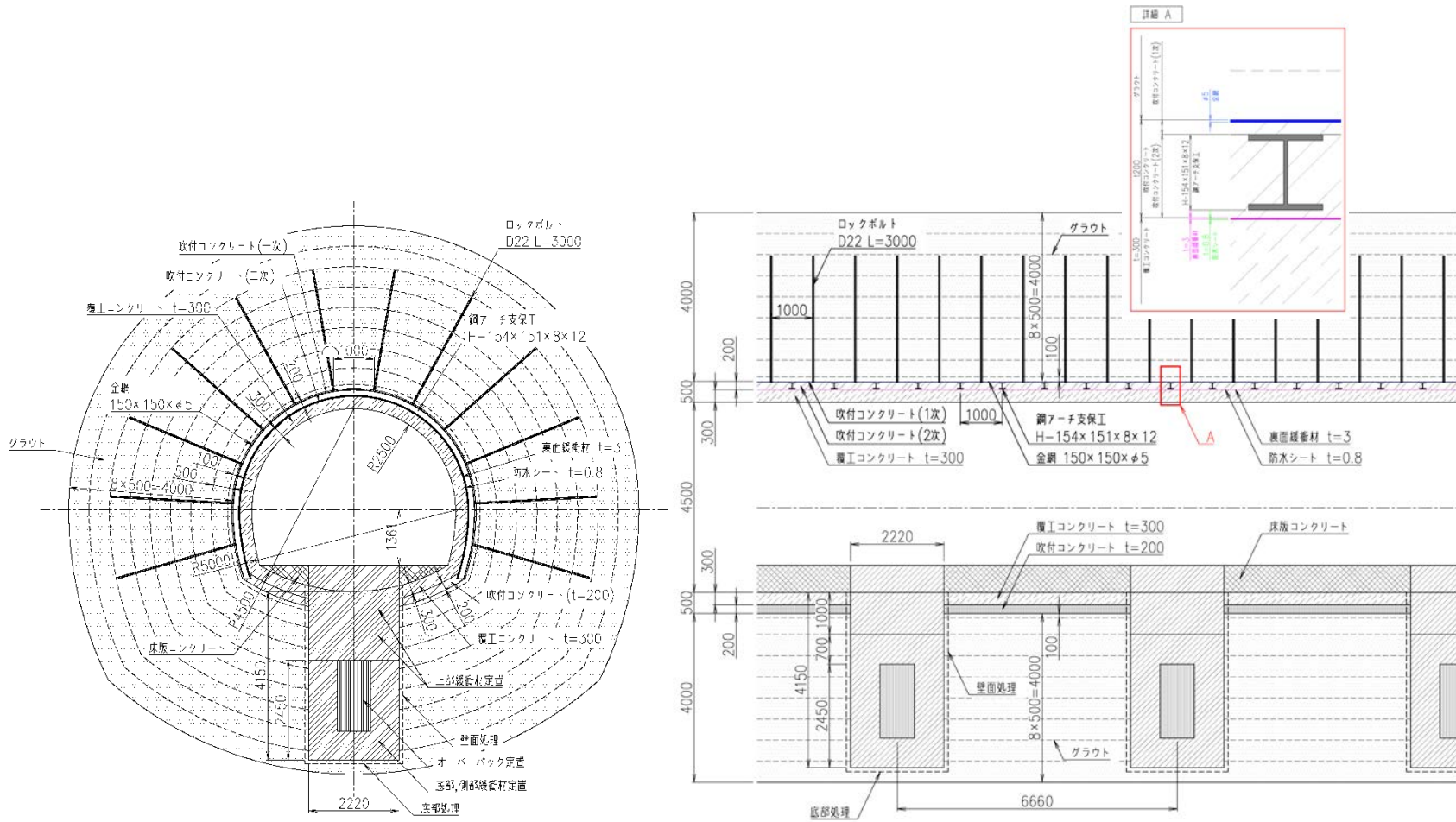


図 1.1-2 処分坑道断面図 (土木工事設計要領 (国土交通省九州整備局, 2016))

1.1.1 処分坑道の仕様設定

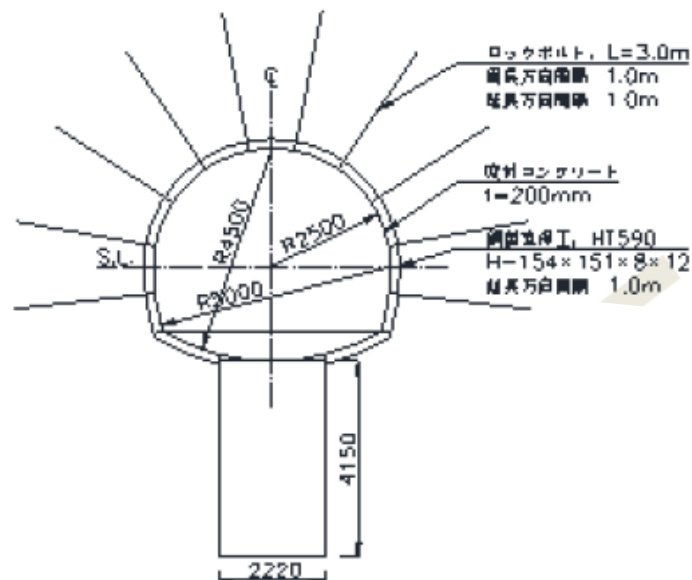
以下では、上述した処分坑道の構成の設定根拠について、NUMO 文献に記載がある項目を (1) に、一般土木の知見から補填した項目を (2) にそれぞれまとめた。

(1) NUMO 文献における設定値

NUMO 文献には、処分坑道の各項目のうち、坑道寸法と、支保メンバーとして鋼製支保工、吹付コンクリート、ロックボルトの記載がされている。これらについての具体的な設定値を以下に示す。

1) 坑道寸法

NUMO 文献での処分坑道の形状は地層処分研究開発第 2 次とりまとめ（核燃料サイクル開発機構, 1999）の形状を参考に設定されている（図 1.1-3）。



Unit (mm)

図 1.1-3 処分坑道の断面 (NUMO 文献より引用)

2) 鋼製支保工

図 1.1-3 より、鋼アーチ支保工の設定は以下である。

- ・ H-154 × 151 × 8 × 12
- ・ 延長方向間隔 1.0m

支保工は、道路トンネルの標準支保パターン（土木学会, 2006）より、処分坑道周辺の岩盤等級を基にして設定される。本検討における岩盤等級は、周辺岩盤として新第三紀堆積岩を仮定しているため D II となる。この岩盤等級における鋼製支保工の延長方向間隔は 1.0m と設定した。

鋼製支保工の種類に関しては、鋼製支保工の応力度と坑道にかかる圧力から算出し、処分坑道を支えるには HT590 が必要であると結論づけている。

3) 吹付コンクリート

NUMO 文献では、吹付コンクリート応力度の評価基準を“二次覆工なし”の 19.4N/mm^2 としていることより、吹付コンクリート厚さを 200 mm と設定している。

4) ロックボルト

前述の岩盤等級 D II の場合の値を設定根拠とし、ロックボルトを以下のように設定した。

- ・ $L=3\text{m}$
- ・ 周長方向間隔 1.0m
- ・ 延長方向間隔 1.0m

穿孔径については、ロックボルトの周囲には定着材規格より、ドライモルタル（セメント：砂=1：3）を充填することとした（図 1.1-4）（一般財団法人建設物価調査委員会, 2015）。

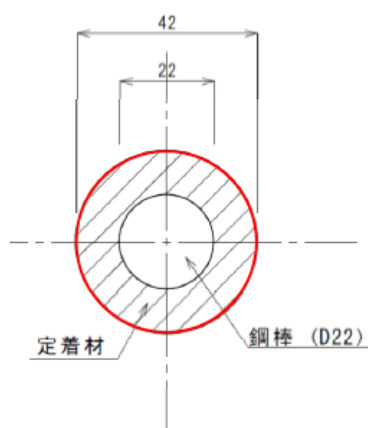


図 1.1-4 ロックボルト穿孔径断面図 (NUMO 文献)

5) 床板コンクリート

床板コンクリートの設定は、前述の図 1.1-3 より、天井部の中央から R4500mm の円を水平に切り取った形状とした。

(2) 一般土木の知見を基下処分坑道構成要素の補填

NUMO 文献に示されていないその他の坑道の構成の仕様値については、一般土木の知見を基に設定した。以下では、グラウト、金網、防・排水工、覆工コンクリート、処分孔の壁面処理（壁面に亀裂が生じた場合のグラウトによる補修）の 5 項目について、一般土木の知見の調査結果を示す。

1) グラウト

グラウト注入範囲の設定は、湧水量により値は異なることが示されており、注入範囲は概ね数 m~10 数 m である。本検討の処分坑道構成要素の仕様値設定段階においては湧水量が不明であるため、湧水量による注入量を判断せず、処分孔までを覆えるグラウト注入量として処分坑道の外壁から 4.0m までの範囲に設定した（図 1.1-5）。

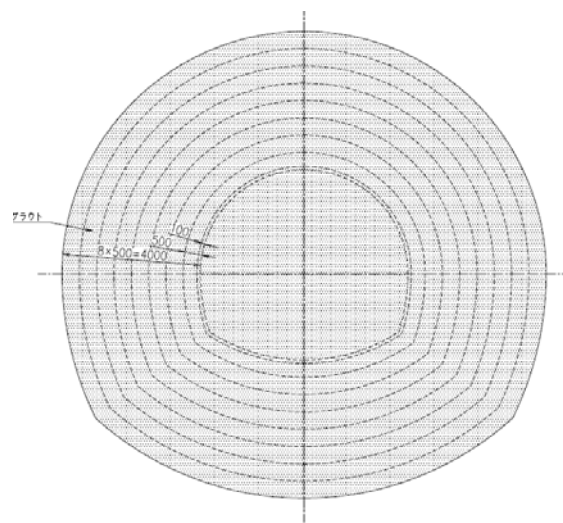


図 1.1-5 グラウチングによる改良範囲の概念図

2) 金網

金網の規格は、今田ほか（1996）より、JIS-G-3551（溶接金網）に準拠した金網に設定した（仕様：150×150×φ5、2.13kgf/m²）。

3) 防・排水工

① 防水工

防水シートの設定については、防水シート本体と裏面緩衝材を使用する「複合積層（一体施工）」（今田ほか, 1996）を設定し、防水シートと裏面緩衝材の厚さについては、防水シートを 10mm、裏面緩衝材（透水性緩衝材）を 3mm と設定した（国土交通省九州整備局, 2016）。

② 排水工

排水設備について、幌延地下坑道の例では床板コンクリート地下部分の中央にドレーン管を設置し、排水する設計となっている（日本原子力研究開発機構, 2010）。しかし、本検討における処分坑道は中央に処分孔を施工するため、ドレーン管を設置することが出来ないため、図面に排水工は反映してい

ない。

4) 覆工コンクリート（アーチ、インバート）

覆工コンクリート厚は、日本道路公団の標準支保パターン（今田ほか、1996）を基に設定した。標準支保パターンは、設置対象の岩盤等級ごとに覆工コンクリート厚の仕様が決められている。本検討では、幌延深地層研究に関する資料（日本原子力研究開発機構、2010；核燃料サイクル開発機構、2005）を参考に、岩盤等級をCM-H（日本道路公団の標準支保パターンのC級岩盤に相当）と設定した。これより、覆工コンクリート厚さは30cmと設定した。

5) 処分孔の処理

処分孔の掘削に伴って処分孔壁面に有意な亀裂・ひび割れや湧水が発生した場合、グラウトの注入などによる補修が必要となる。底部緩衝材定置前には、処分孔底部にベントナイトなどを敷ならし水平となるよう処理が施されることが想定される。本検討では、現行の処分孔の寸法を考慮して、処分孔の壁面処理、底部処理として100mm（吹付コンクリート厚（200mm）の半分の厚さに相当）を仮定した（図 1.1-6）。

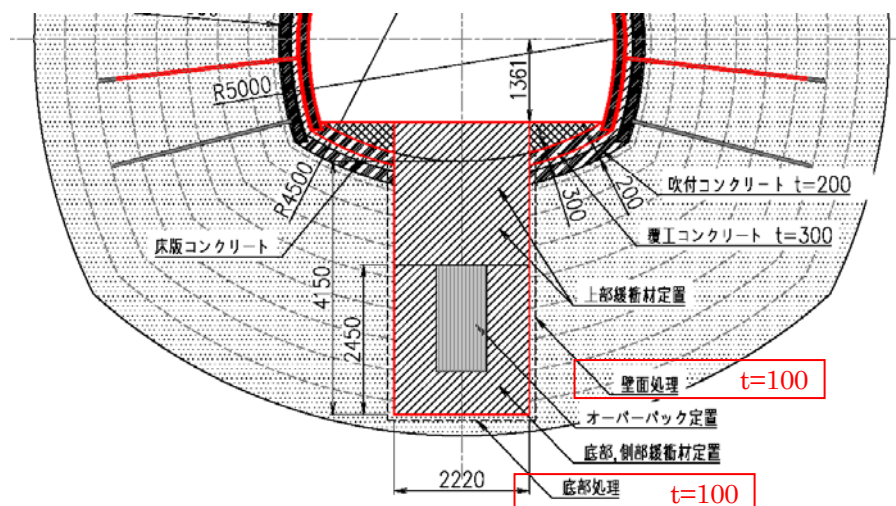


図 1.1-6 処分孔の補強寸法設定

2. 水理解析の解析条件

2.1 解析物性値

ニアフィールドスケールモデル（以下 NF スケールモデルと称す）の解析物性値は NUMO の配布資料（NUMO, 2016）をベースに、地層処分研究開発第 2 次とりまとめ（JNC, 1999）と TRU 廃棄物処分分野におけるガス発生・移行解析などの先行研究事例における情報（JNC, 2005）を参考に設定した。以下にその詳細な設定を記載する。

2.1.1 透水係数及び間隙率

NF スケールモデルに設定した物性値のうち、透水係数及び間隙率及びその設定根拠とした資料を表 2.1-1 に示す。岩盤の透水係数は NUMO の配布資料（NUMO, 2016）を基に割れ目や断層を考慮した不均質な連続体とし、その透水係数は割れ目ネットワークモデルと母岩の基質部の透水係数に基づいて設定した。EDZ は母岩の透水係数の設定の 100 倍、グラウトは母岩の透水係数の設定の 10 倍とした。図 2.1-1 に割れ目ネットワークモデルの透水量分布の例と NF スケールモデルの各軸方向の透水係数分布図を示す。また、参考に広域スケールモデルと処分場スケールモデルに設定した物性値を表 2.1-2 表 2.1-3 に示す。

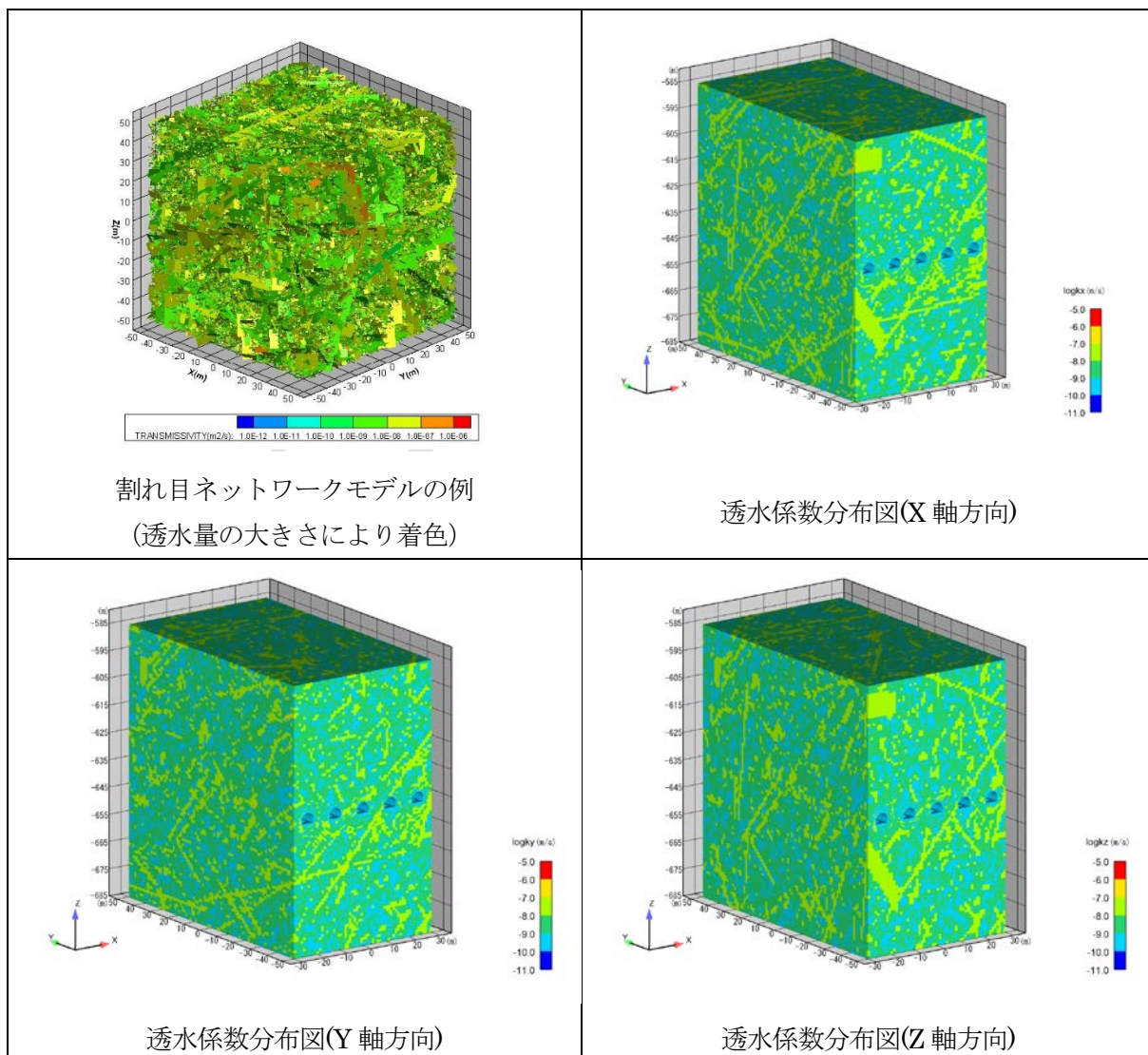
表 2.1-1 透水係数および間隙率の設定

名称	透水係数(m/s)	間隙率	設定根拠
緩衝材	1.005E-12	0.400	2005-026 ^{※1}
埋戻し材	7.353E-12	0.333	99-022 ^{※1}
支保工/インバート	5.025E-11	0.190	2005-026 ^{※1}
母岩	基質部と割れ目を重ね合わせて等価透水係数を設定	0.245	2005-026 ^{※1}
EDZ (母岩)	母岩の100倍	0.245	2005-026 ^{※1}
グラウト	母岩の1/10	0.245	2005-026 ^{※1}

99-022: 地層処分研究開発第2次とりまとめ(JNC TN1400 99-022)

2005-026: TRU廃棄物処分におけるガス発生・移行解析(JNC TN8400 2005-026)

※1: 間隙流体の温度を30° に想定



割れ目ネットワークモデルの例
(透水量の大きさにより着色)

透水係数分布図(X軸方向)

透水係数分布図(Y軸方向)

透水係数分布図(Z軸方向)

図 2.1-1 NF スケールモデルの透水係数分布図

表 2.1-2 広域スケールモデルの物性値

地層名	透水係数(m/s)	
	鉛直	水平
基盤岩	1.1E-08	
礫岩	6.5E-08	
砂岩	5.3E-07	
砂岩泥岩互層	2.3E-08	5.3E-07
泥岩	2.3E-08	
第四紀層	1.0E-05	

表 2.1-3 処分場スケールモデルの物性値

地層名	透水係数(m/s)		有効間隙率	比貯留係数(1/m)
	鉛直	水平		
下部砂岩	5.3E-07		0.245	3.20E-06
砂岩泥岩互層	2.3E-08	5.3E-07	0.245	3.20E-06
下部泥岩	4.4E-08		0.245	3.20E-06
砂岩薄層	5.3E-07		0.245	3.20E-06
上部泥岩	2.0E-09		0.245	3.20E-06
第四紀層	1.0E-05		0.245	3.20E-06

2.1.2 不飽和特性

ここでは設定した不飽和特性として相対浸透率と毛管圧力について以下に述べる。

- 相対浸透率

相対浸透率は Corey モデル及び van Genuchten モデルを用いて設定した。それぞれのモデルの式を下記に示す。母岩や坑道の構成要素ごとに計算に用いるために使用したモデル及びそのパラメータを表 2.1-4 に示す。これらから設定した相対浸透率曲線を図 2.1-2 に示す。

【Corey モデル】

$$k_{rl} = (S^*)^m, k_{rg} = (1 - S^*)^n(1 - (S^*)^n)$$

$$S^* = \frac{S_l - S_{lr}}{1 - S_{lr} - S_{sr}}$$

【van Genuchten モデル】

$$k_{rl} = (S^*)^{\frac{1}{2}} \left(\left(1 - (S^*)^{\frac{1}{\lambda}} \right)^\lambda \right)^2, k_{rg} = 1 - k_{rl}$$

$$S^* = \frac{S_l - S_{lr}}{S_{ls} - S_{lr}}, S_{ls} = 1 - S_{sr}$$

ここに、 k_{rl} ：水の相対浸透率， k_{rg} ：ガスの相対浸透率， S^* ：水の有効飽和度， S_l ：間隙水飽和度， S_{lr} ：水の残留飽和度， S_{ls} ：水の最大飽和度， S_{sr} ：ガスの残留飽和度， m, n, λ ：関数パラメータ

表 2.1-4 相対浸透率のモデル及びパラメータ

名称	相対浸透率関数								出典
	計算式	S_r	S_{ls}	S_{gr}	λ	ε	m	n	
緩衝材	Corey	0.940	-	0.000	-	-	1.500	9.500	2005-026
埋戻し材	van Genuchten	0.000	1.000	-	0.667	0.5	-	-	99-022
支保工/インバート	Corey	0.150	-	0.075	-	-	2.500	2.300	2005-026
母岩	Corey	0.600	-	0.000	-	-	4.000	3.000	2005-026
EDZ	Corey	0.600	-	0.000	-	-	4.000	3.000	2005-026
グラウト	Corey	0.600	-	0.000	-	-	4.000	3.000	2005-026

99-022: 地層処分研究開発第2次とりまとめ(JNC TN1400 99-022)

2005-026: TRU廃棄物処分におけるガス発生・移行解析(JNC TN8400 2005-026)

※1: 間隙流体の温度を30° に想定

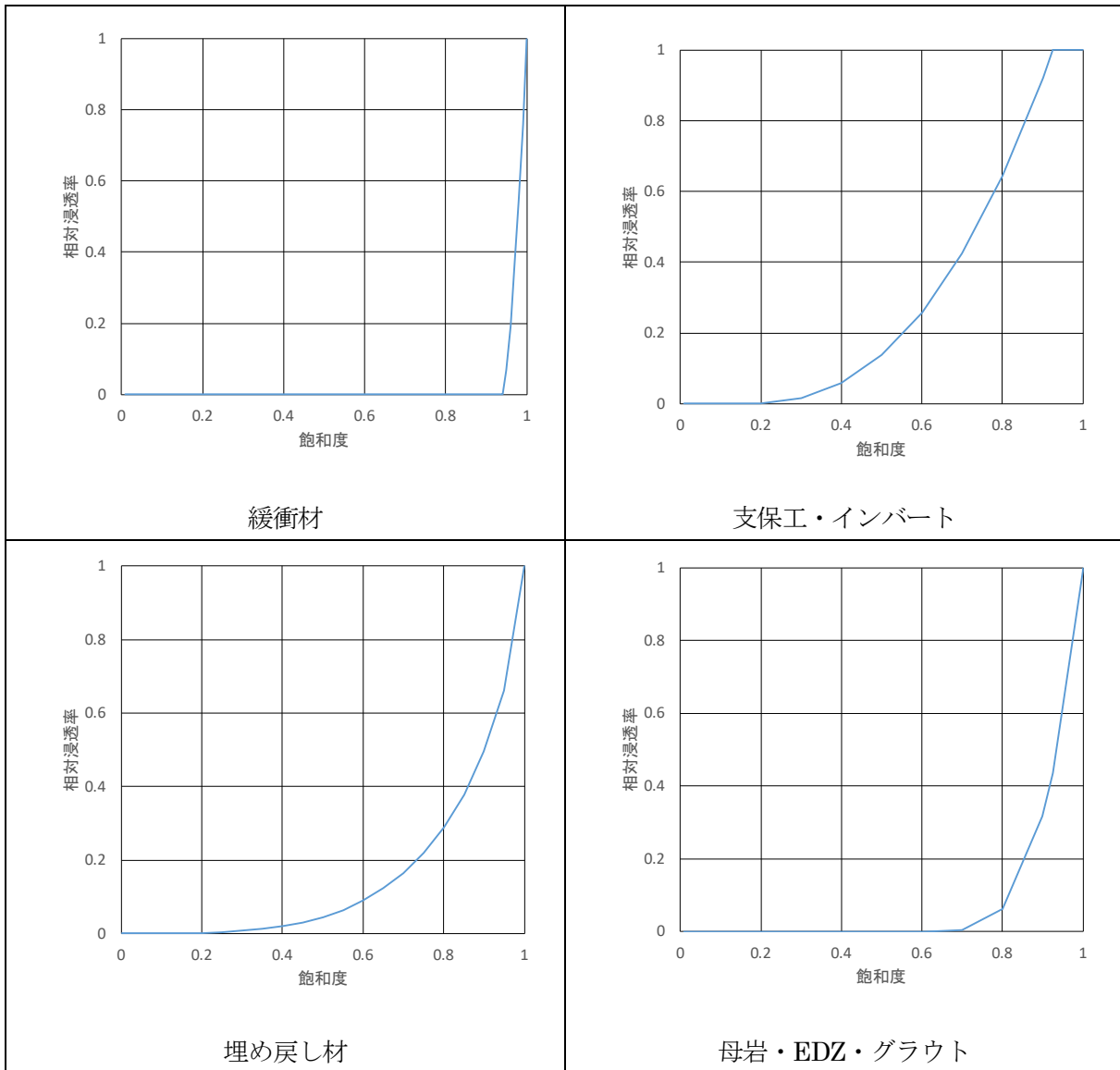


図 2.1-2 有効飽和度-相対浸透率曲線

● 毛管圧力

毛管圧力は Narasimhan モデルと van Genuchten モデルを用いて設定した。それぞれのモデルの式を下記に示す。母岩や坑道の構成要素ごとに計算に用いるために使用したモデル及びそのパラメータを表 2.1-5 に示す。これらの式から設定した毛管圧力曲線を図 2.1-3 に示す。

【Narasimhan モデル】

$$P_{cap,l} = \begin{cases} -P_e - P_0 \left(\frac{1 - S_l}{S_l - S_{lr}} \right)^{\frac{1}{\lambda}} & (S_l < 1) \\ 0 & (S_l = 1) \end{cases}$$

【van Genuchten モデル】

$$P_{cap,l} = p_0 \left((S^*)^{-\lambda} - 1 \right)^{1 - \frac{1}{\lambda}}$$

$$S^* = \frac{S_l - S_{lr}}{S_{ls} - S_{lr}}, S_{ls} = 1 - S_{sr}$$

ここに、 $P_{cap,l}$ ：毛管圧力、 S^* ：水の有効飽和度、 S_l ：間隙水飽和度、 S_{lr} ：水の残留飽和度、 S_{ls} ：水の最大飽和度、 S_{sr} ：ガスの残留飽和度、 λ ：関数パラメータ

表 2.1-5 毛管圧力のモデル及びパラメータ

名称	毛管圧力関数							出典
	計算式	S_r	S_{ls}	λ	α (1/m)	P_0 (Pa)	P_e (Pa)	
緩衝材	Narasimhan	0.000	-	0.450	-	2.500E+06	1.200E+06	2005-026
埋戻し材	van Genuchten	0.000	1	0.667	1.50E-02	-	-	99-022
支保工/インバート	Narasimhan	0.150	-	1.050	-	5.000E+06	6.900E+04	2005-026
母岩	Narasimhan	0.000	-	0.350	-	8.000E+05	3.400E+04	2005-026
EDZ	Narasimhan	0.000	-	0.350	-	8.000E+05	3.400E+04	2005-026
グラウト	Narasimhan	0.000	-	0.350	-	8.000E+05	3.400E+04	2005-026

99-022: 地層処分研究開発第2次とりまとめ(JNC TN1400 99-022)

2005-026: TRU廃棄物処分におけるガス発生・移行解析(JNC TN8400 2005-026)

※1: 間隙流体の温度を30° に想定

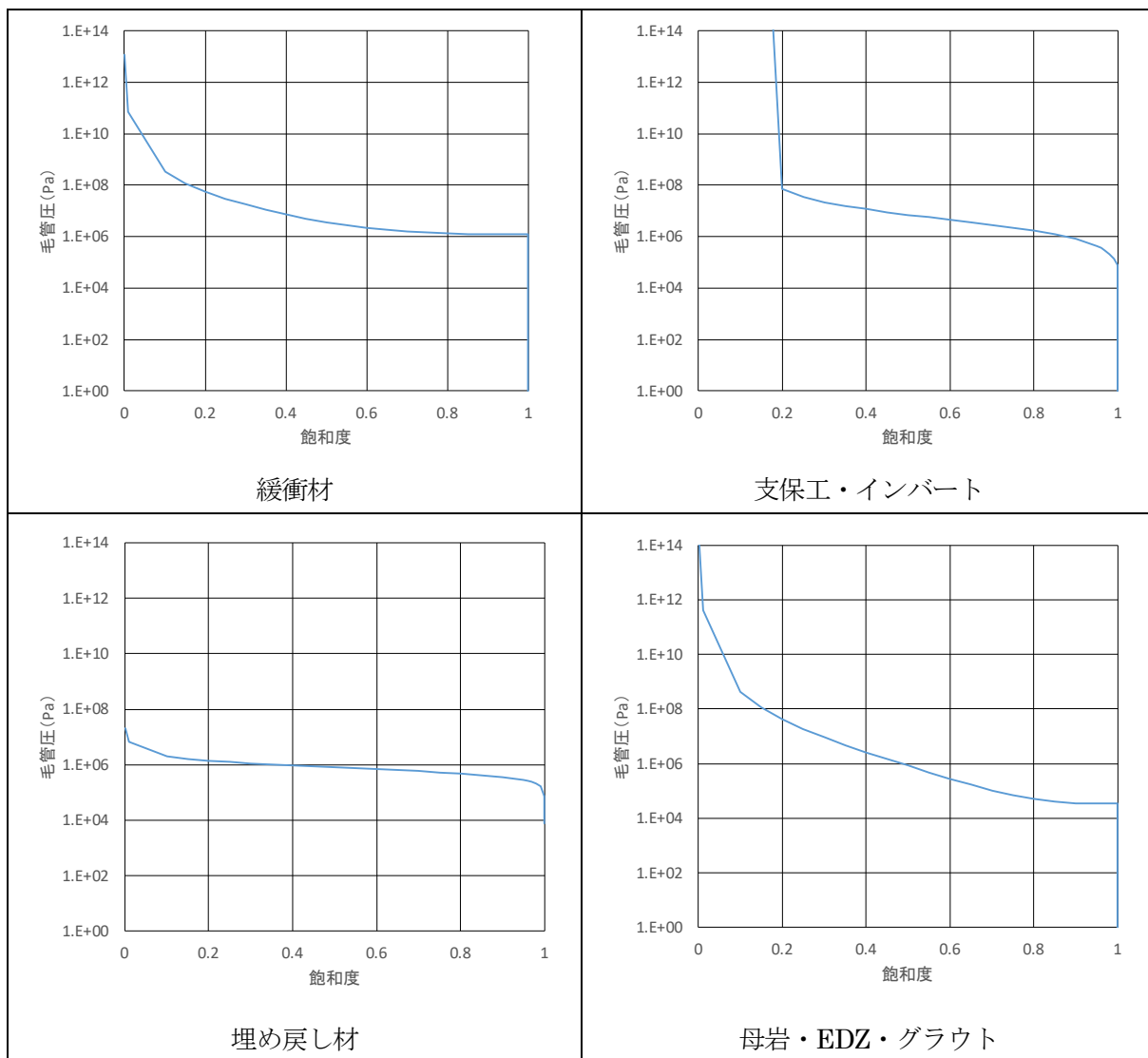


図 2.1-3 有効飽和度-毛管圧力曲線

2.1.3 比貯留係数

比貯留係数は岩盤の弾性係数、ポアソン比、有効間隙率および水の密度と弾性係数を基に算出した値を設定した（徳永, 1998）。比貯留係数の算出式を以下に示す。また、算出の際に設定したパラメータ及び比貯留係数を表 2.1-6 に示す

$$\text{比貯留係数の算出式： } S_s = \rho_f g \left(\frac{1}{K_V} + \frac{\phi}{K_f} \right)$$

$$\text{ここに } K_V = K + \frac{4}{3}G, K = \frac{E}{3(1-2\nu)}, G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

表 2.1-6 比貯留係数の設定

名 称	弾性係数 E(Pa)	ポアソン比 ν	有効間隙率 ϕ	せん断弾性係数 G(Pa)	体積弾性係数 K(Pa)	体積弾性係数 (多孔質体相当) K_v (Pa)	比貯留係数 S_s (1/m)
緩衝材	3.900E+07	0.400	0.40	1.393E+07	6.500E+07	8.357E+07	1.186E-04
埋戻し材	3.900E+07	0.400	0.33	1.393E+07	6.500E+07	8.357E+07	1.183E-04
支保工	2.960E+10	0.200	0.25	1.233E+10	1.644E+10	3.289E+10	1.382E-06
軟岩系岩盤	3.500E+09	0.300	0.25	1.346E+09	2.917E+09	4.712E+09	3.158E-06
EDZ (軟岩系岩盤)	3.500E+08	0.450	0.25	1.207E+08	1.167E+09	1.328E+09	8.442E-06
グラウト	3.500E+09	0.300	0.25	1.346E+09	2.917E+09	4.712E+09	3.158E-06

2.2 境界条件の設定

本検討の地下水流動解析では、広域（数十 km の範囲）の影響を考慮しながら狭域（数百 m の範囲）の挙動を評価する必要がある。本来は広域から狭域までを網羅した一つのモデルで解析を進めるのが理想的であるが、狭域の空間の解像度に合わせて広域のモデルまでを作るとを余儀なくされるため、非常に膨大な計算量が必要となり現実的ではない。そこで、「ネスティング」という手法を用いて解析を行うことでこの課題に対応している。

広域のモデルから狭域モデルまで空間の解像度を段階的に細かくした複数のモデルを使いながら計算を行う。この計算において、処分場スケールからニアフィールドスケールまでのモデルについては、初期・境界条件として、1段階大きいスケールの計算結果（圧力水頭）を設定する。ネスティングの概念図を図 2.2-1 に、本検討における境界条件の設定の流れを図 2.2-2 に示す。例えば、処分場スケールモデルでは、広域スケールモデルにおける処分場スケールモデルに該当する領域の計算結果を、処分場スケールモデルの初期・境界条件として設定している。

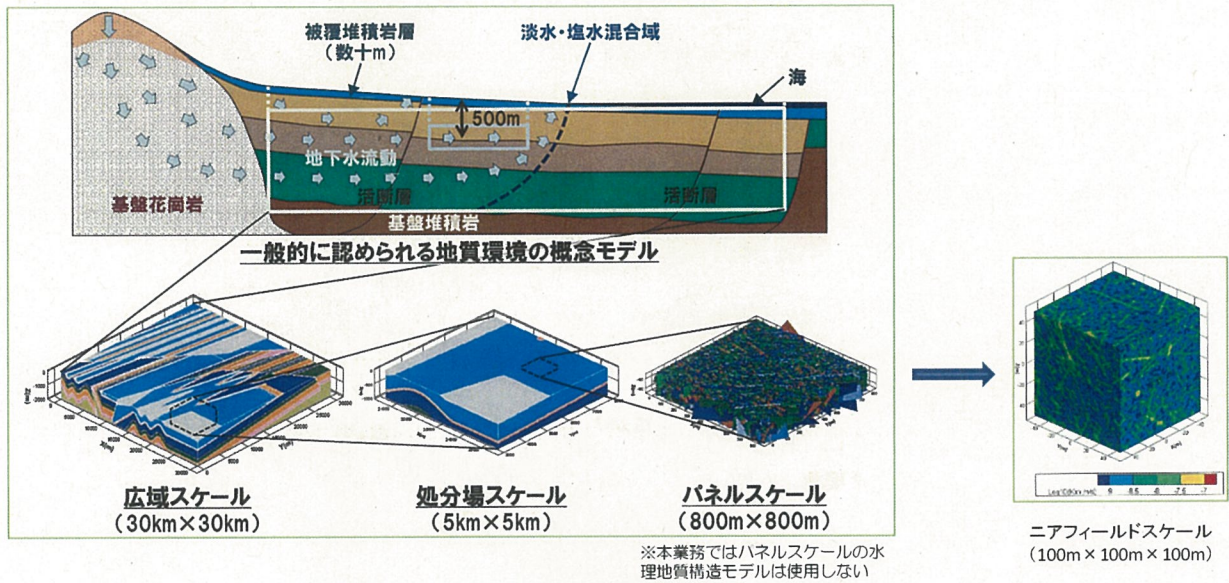


図 2.2-1 ネスティングの概念図 (NUMO, 2016)

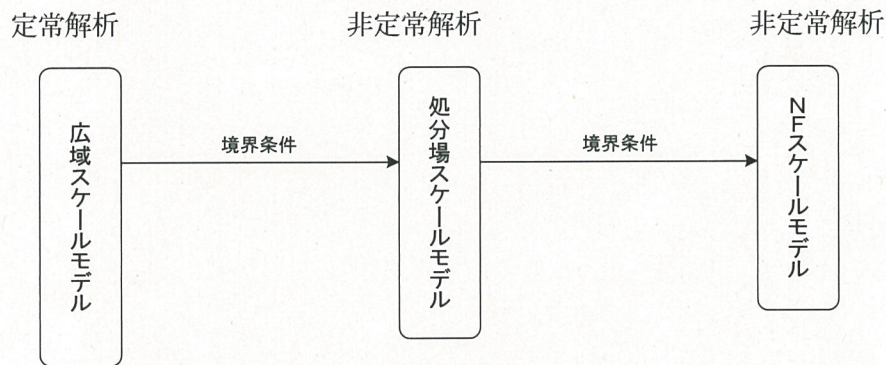


図 2.2-2 境界条件の設定の流れ

2.2.1 広域スケールモデル

広域スケールモデルの境界条件の設定について以下に述べる。NUMOは、広域スケールモデルを用いた地下水流動解析を行うにあたって、解析モデル全体の動水勾配が5%になるような固定水頭境界を設定している (NUMO, 2016)。これは、『全国規模で実施した地下水流動解析の結果や、地層処分研究開発第2次とりまとめに示されている低地、台地、丘陵地における動水勾配の平均値、東濃地域における地下水流動解析結果に基づく動水勾配を参考に、保守的な値』として設定したものである。NUMOが動水勾配算出に用いた参考データを表 2.2-1 に示す。

表 2.2-1 NUMO が動水勾配算出に用いた参考データ

	動水勾配	備考
全国規模の地下水流動解析	0.04(平均値)	<ul style="list-style-type: none"> 地下水の主流動方向に沿った鉛直2次元断面（80断面）における飽和解析結果 陸域における標高-500mでの動水勾配分布を算出
第2次とりまとめ	0.01(低地の平均値)	<ul style="list-style-type: none"> 文献情報に記載された地下水位データに基づき算出
	0.02(台地の平均値)	
	0.04(丘陵地の平均値)	
幌延地域における地下水流動解析結果	0.2~0.003	<ul style="list-style-type: none"> 三次元地下水流動解析結果 陸域における標高-500mでの動水勾配分布を算出

一般に、動水勾配は陸域の地形勾配が大きい地域において大きくなることから、NUMO の設定値は、現実的には陸域の地下における最大値に近い値であると考えられる。また、NUMO のモデルは海域の水理条件が動水勾配に及ぼす効果を考慮しておらず、全体に平均的な動水勾配を与えている。

一方、沿岸部の動水勾配は、陸域ではその地形勾配に応じて大きくなりうるものの、海域では同一海水準下において動水勾配が生じにくいと考えられる。したがって、モデル全体に平均動水勾配 5%を与えると、海域については過度な設定になると考えられる。

そこで、本検討の広域スケールモデルの水理境界条件は、沿岸部に着目するという方針のもと、昨年度において行った水理解析（産総研ほか, 2017）のうち、「沿岸部に特有な環境が地下水理環境に与える影響の把握」の鉛直二次元解析で施設湧水量が最も多い結果となったケース（S-2-1、施設位置：汀線から 15km 海側）の設定を模したものを採用することとした。具体的には、処分場スケールモデル中の処分施設の水平方向位置及び標高を鉛直二次元解析の海域 15km の位置に処分場を設置したケースの設定と一致させ、それに基づいて広域スケールモデルの位置を決定した。このように設定したときの広域スケール及び処分場スケールモデルと鉛直二次元モデルとの位置関係を図 2.2-3 に示す。

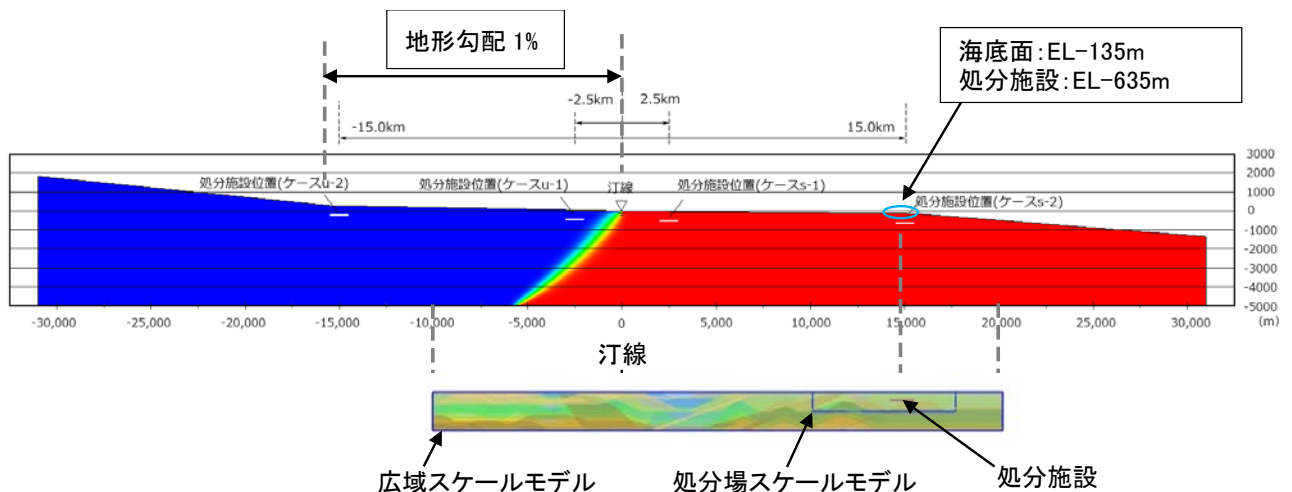


図 2.2-3 広域スケール及び処分場スケールモデルと鉛直二次元モデルとの位置関係

処分施設の位置を鉛直二次元モデルのケース S-2-1（海域 15km）での設定に合わせると、広域スケ

ールモデルの幅 30km のうち、10km が陸域に、20km が海域に含まれることになる。広域スケールモデルの陸域部分は、鉛直二次元モデルの地形勾配が 1% の範囲に相当する。鉛直二次元モデルにおける処分施設の深度は海底面から 500m の位置に設置すると EL. -635m の位置となる。ただし、NUMO の広域スケールモデルには地形が含まれておらず、モデル上面の被り厚は 75m と設定されていることから、処分施設が EL. -635m とした場合、モデル上面は EL. -210m となる。

以上のことから、広域スケールモデルには、次のような水理境界条件を与えた。また、広域スケールモデルの水理境界条件の設定を模式的に図 2.2-4 に示す。

- ・海域に相当するモデル上面および下流側側面は、EL. 0m に相当する水頭で固定する
- ・陸域に相当するモデル上面は、動水勾配が 1% となるよう水頭固定する
- ・上流側側面は EL. +100m (汀線から 10km 内陸×勾配 1%=100m) に相当する水頭で固定する
- ・地下水流動方向に平行な側面およびモデル底面は不透水境界とする

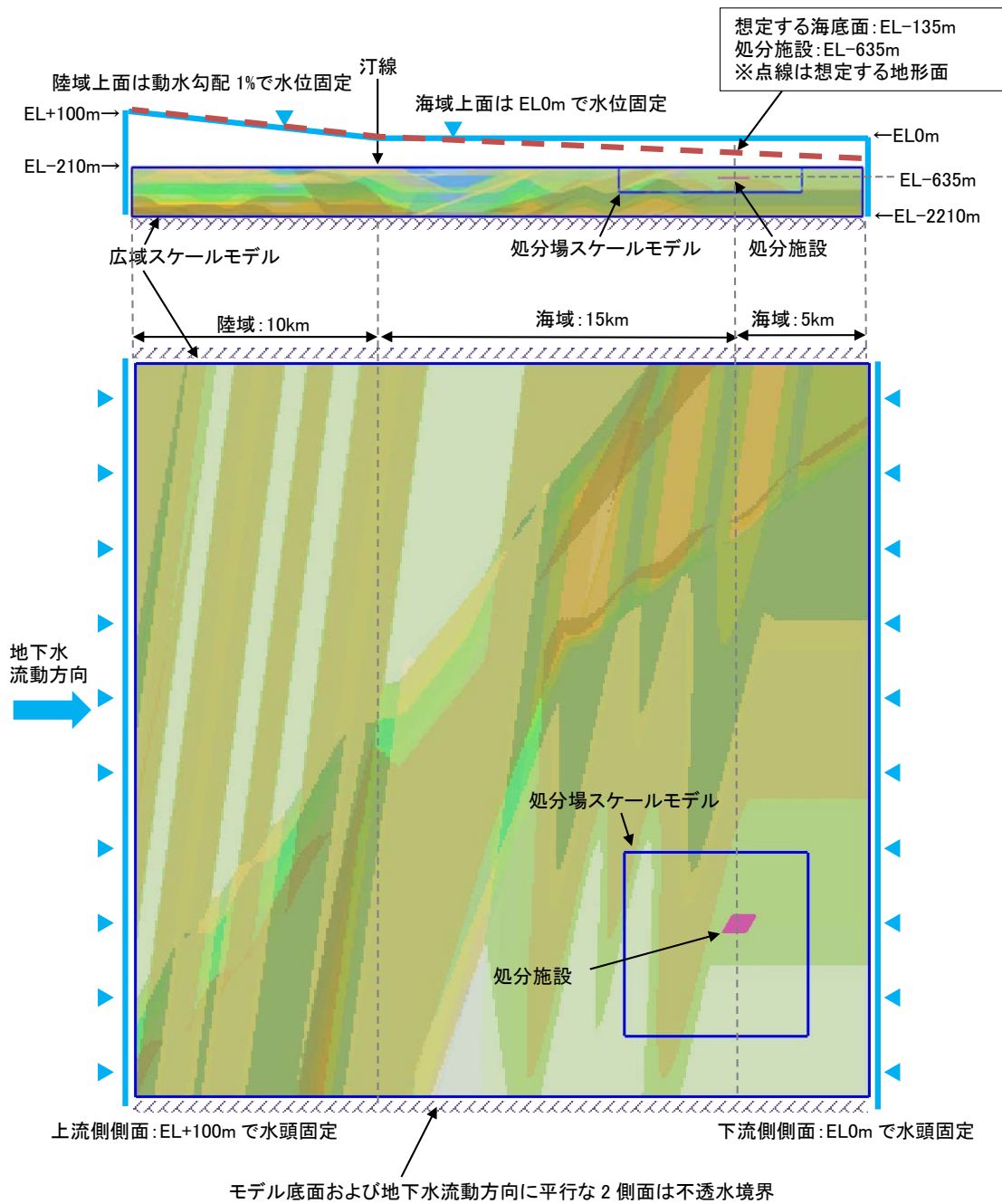


図 2.2-4 広域スケールモデルの水理境界条件の設定

2.2.2 処分場スケールモデル

処分場スケールモデルの境界条件の設定について以下に述べる。処分場スケールモデルの解析領域の上面は、広域スケールモデルと一致している。ただし、モデルの深度方向の長さは広域スケールモデルが 2000m であるのに対し、処分場スケールモデルは 1000m である。そこで、広域スケールモデルの境界条件と整合させるため、処分施設が EL. -635m (モデル上面が EL. -215m) にあるものとして、モデル上面を EL. 0m 相当の圧力で固定した。また、上面以外の 5 面 (4 側面および底面) については、広域スケールモデルを用いた定常解析により得られた水圧分布から、処分場スケールモデルの境界面位置における水圧を補間することにより求め、その圧力で固定した。広域スケールモデルと処分場スケールモデルの位置関係を図 2.2-5 に示す。また、広域スケールモデルの定常解析の結果から求めた処分場スケールモデルの境界面における全水頭分布を図 2.2-6 に示す。

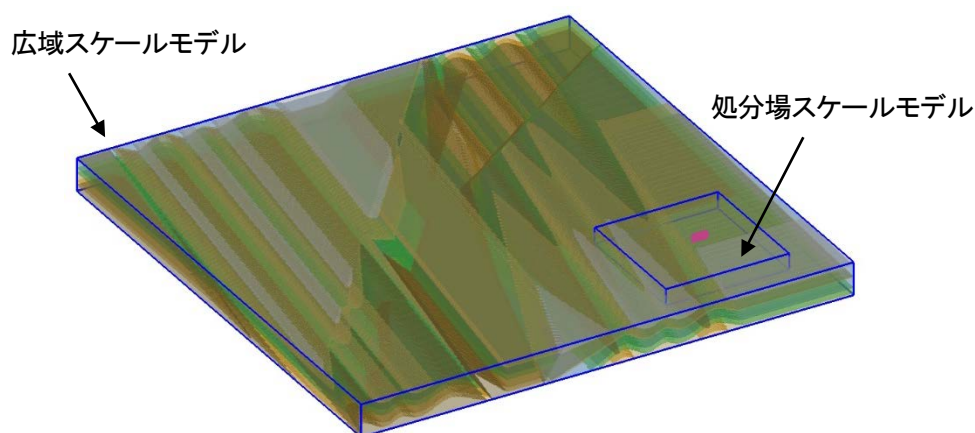


図 2.2-5 広域スケールモデルと処分場スケールモデルの位置関係 (■処分施設)

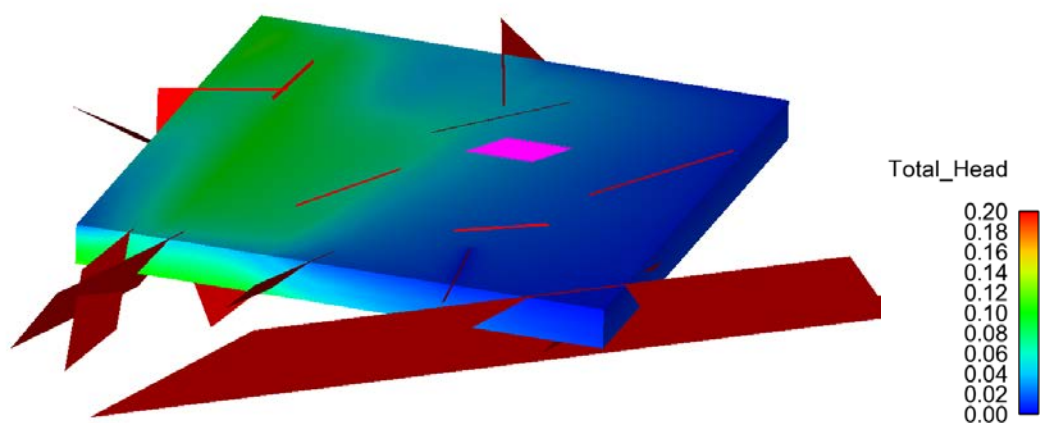


図 2.2-6 処分場スケールモデルの境界面における全水頭分布 (■断層、■処分施設)

2.2.3 NF スケールモデル

(1) 境界条件の検討

定常計算（圧力水頭の平衡状態を求める計算）の場合は、大きいモデルから小さいモデルへの計算結果の引き渡しは1回で済むが、非定常計算（圧力水頭の推移を求める計算）では、計算ステップ毎により大きなスケールモデルの計算結果を境界条件として引き渡す必要がある。そこで、処分場スケールモデルから NF スケールモデルに引き渡す、境界条件の時間分割および空間分割と計算精度の関係について検討した。

1) 検討方法

まず処分場スケールモデルの一部を NF スケールモデルのサイズに切り出したモデル（以下切り出しモデルと称す）を作成した。この切り出しモデルに処分場スケールモデルから与える境界条件の時間分割及び空間分割を変化させて計算を行った。その結果（処分場スケールモデルから切り出しモデルに境界条件を引き渡しネスティングさせた結果）と処分場スケールモデルのみの解析結果（ネスティングさせていない結果）の処分坑道の湧水量を比較し、適切な境界条件について検討を行った。

2) 切り出しモデルの解析条件

処分場スケールモデルから、NF スケールモデルに該当する箇所を切り出した解析メッシュを図 2.2-7 に示す。このモデルに処分場スケールモデルの計算結果から得られる圧力水頭を境界条件として設定した。境界条件の設定方法は空間分割と時間分割を変えた 3 ケースとした。解析ケース一覧を表 2.2-2 に、図 2.2-8 にそれぞれのケースに設定した境界条件の概念図を示す。また、境界条件以外の解析条件については処分場スケールモデルと同様とした。

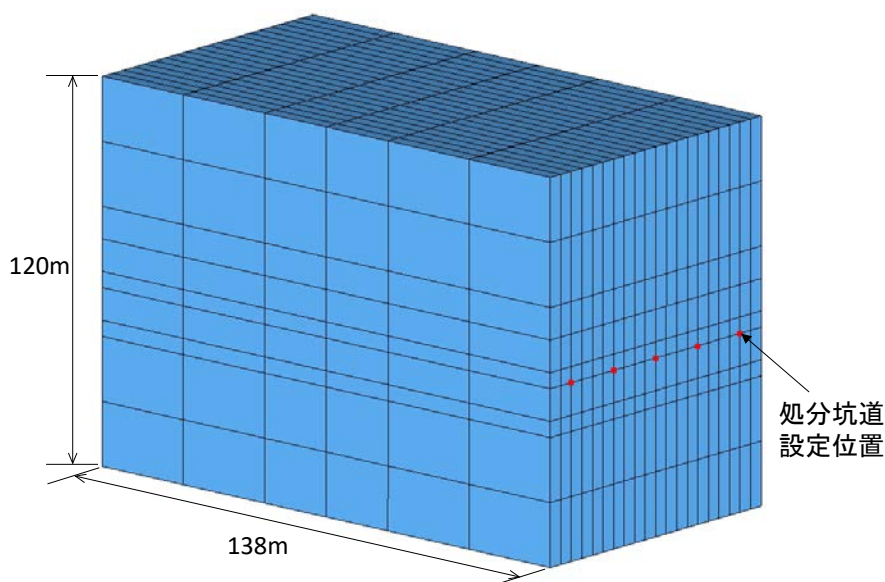


図 2.2-7 切り出しモデル
(処分場スケールモデルから NF スケールモデルのサイズに切り出したモデル)

表 2.2-2 解析ケース一覧 (切り出しモデル)

ケース名	空間条件	時間条件	備考
Case1	条件①：圧力を面毎に平均	条件③：各掘削開始時間を線形に近似	空間及び時間の分割が粗い
Case2	条件①：圧力を面毎に平均	条件④：各掘削開始時間とその中点を線形に近似	空間が粗く、時間が細かい
Case3	条件②：圧力を面毎に平均 +側面のみ3分割	条件③：各掘削開始時間を線形に近似	空間が細かく、時間が粗い

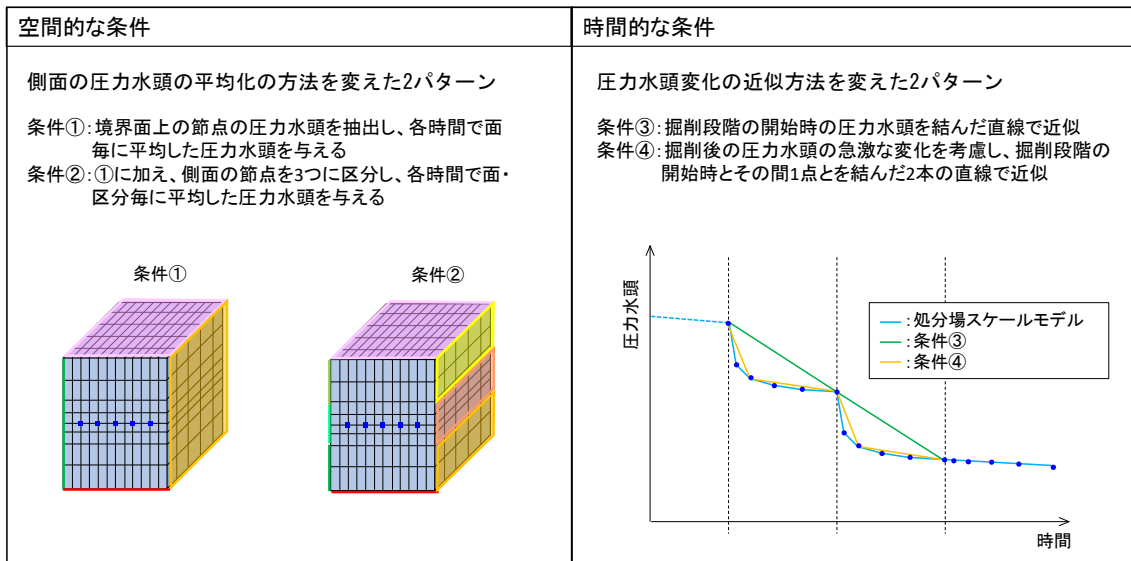


図 2.2-8 境界条件の設定

3) 地下水流動解析

主要坑道掘削から後進掘削坑道（領域 B）の掘削までの施工段階を想定した地下水流動解析を処分場スケールモデル及び切り出しモデル（処分場スケールモデル+切り出しモデルによるネスティング）によって実施し比較した。処分場位置断面において切り出しモデルの位置に該当する箇所を図中に赤枠で示す（図 2.2-9）。

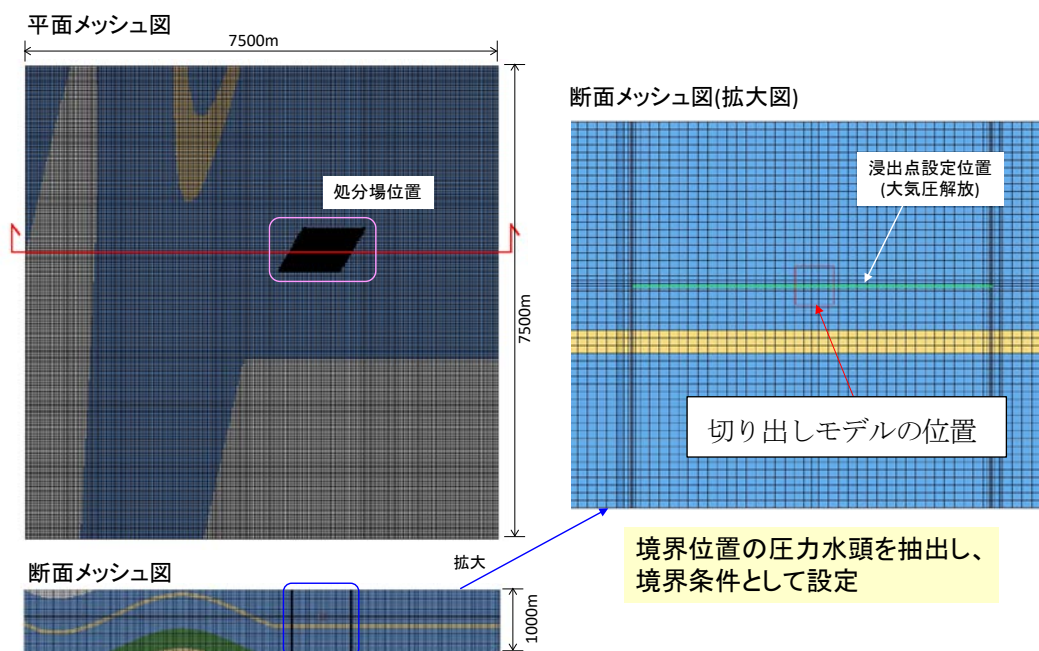


図 2.2-9 処分場スケールモデルにおける切り出しモデルの位置

4) 解析結果

切り出しモデルを使った前述の検討ケース (Case1~3) と、処分場スケールモデルを使った計算結果で中央の処分坑道における流量を比較し、境界条件の設定方法を決定した。切り出しモデルと処分場スケールモデルにおける中央の処分坑道の湧水量の比較を図 2.2-10 に示す。この結果より、空間的条件および時間的条件に関して以下の傾向が把握できた。

- 空間的条件

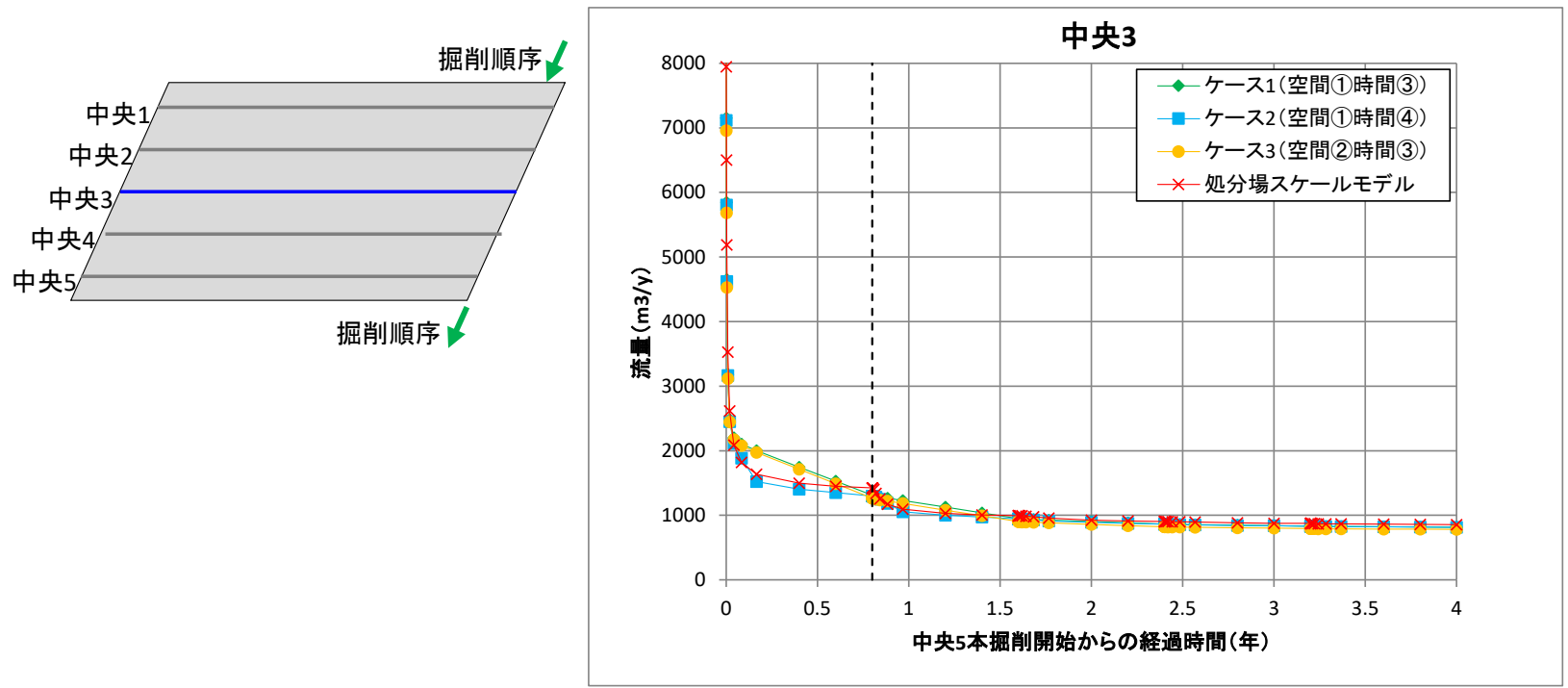
境界条件の設定の仕方として、空間的な分割が粗い場合 (Case1) と、若干細かな場合 (Case3) との比較をした結果、坑道 3 の湧水量に大きな違いは見られなかった。このことから境界条件の空間的条件による処分坑道への湧水量への影響は小さいと考えられる。

- 時間的条件

時間分割が細かい Case2 と時間分割が粗い場合 (Case1) を比較すると、Case2 が処分場スケールモデルの湧水量と比較的整合性が良い。したがって処分場スケールモデルの計算結果を正とすると、空間的な条件と時間的な条件で比較した結果より、境界条件としては、空間的な分割の細かさよりも時間的な分割の細かさによる影響の方が大きいと判断できる。

そこで、本検討における地下水流動解析の非定常計算では、処分場スケールモデルから、NF スケールモデルへの境界条件の引渡し方を次のようにした。

- 空間的な条件は、Fスケールモデルの坑道軸直交方向の各モデルの境界面毎に、処分場スケールモデルの解析結果から得られる圧力水頭を平均して与える(図 2.2-8の条件①)
- 時間的な条件は、各掘削段階の圧力水頭をバイリニアな直線で近似する(図 2.2-8の条④)



処分場スケールモデルと切り出しモデル解析結果の湧水量の比較

- 空間的条件(ケース1ーケース3の比較)
中央3の湧水量の変化に大きな差がみられない。
(処分場スケールモデルとはどちらも傾向が異なる)
- 時間的条件(ケース1ーケース2の比較)
ケース2が処分場スケールモデルと湧水量の挙動が類似している。

NFスケールモデルへのネスティング方法
 空間的条件: ①面毎に平均
 時間的条件: ④掘削段階間の圧力水頭変化を2本の直線で近似

図 2.2-10 境界条件の設定方法の比較検討結果

(2) 境界条件の設定

(1) の結果を踏まえて設定した、処分場スケールモデルの解析結果から NF スケールモデルの各面に与えた圧力水頭の経時変化のグラフを図 2.2-11 に示す。また、参考として NF スケールモデルの解析メッシュを図 2.2-12 に、掘削順序と坑道の位置関係を図 2.2-13 に示す。

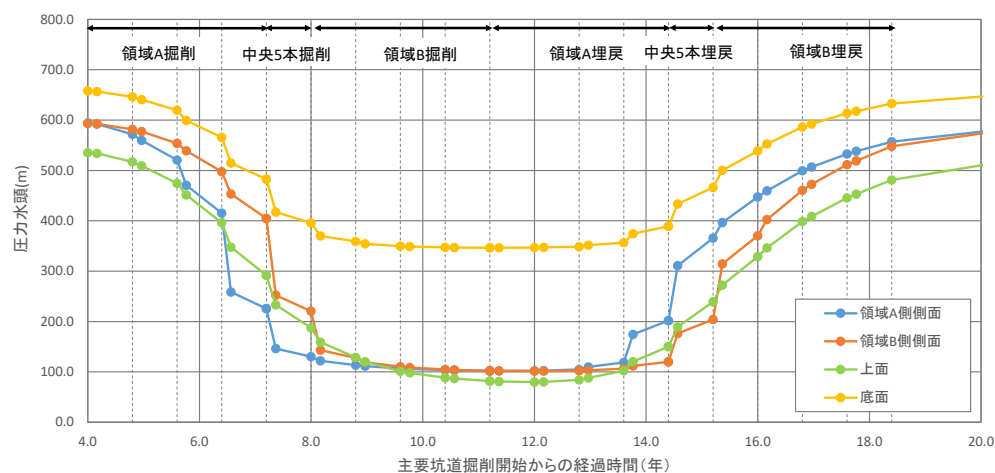


図 2.2-11 ニアフィールドスケールモデルに与えた境界条件

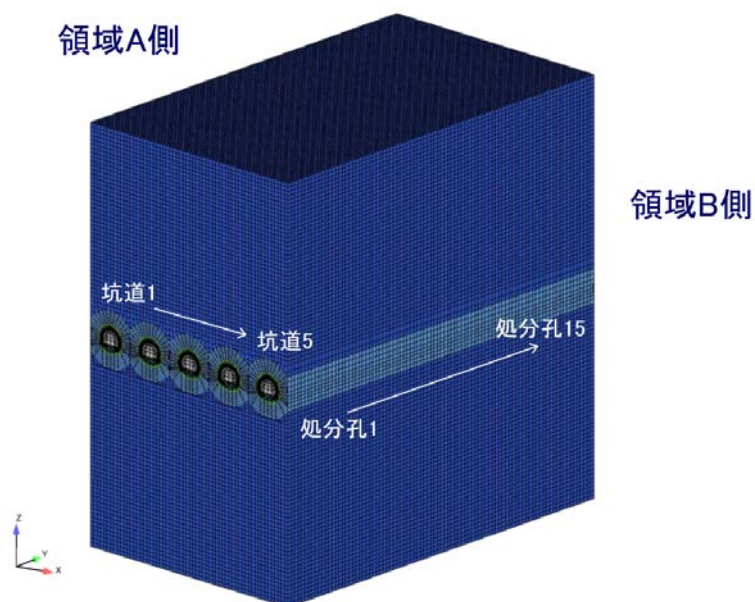
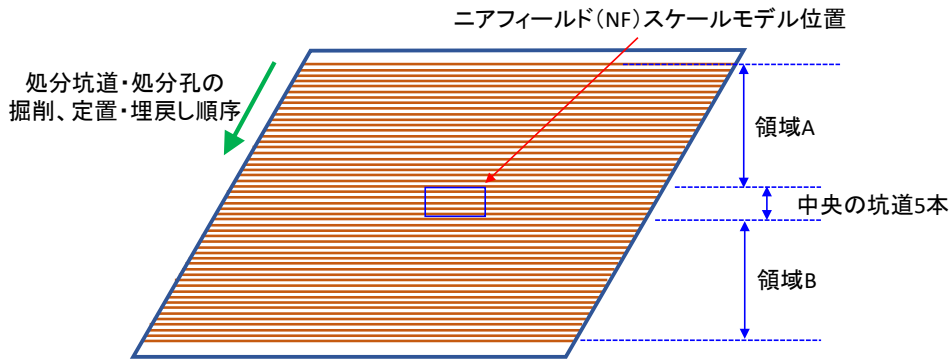
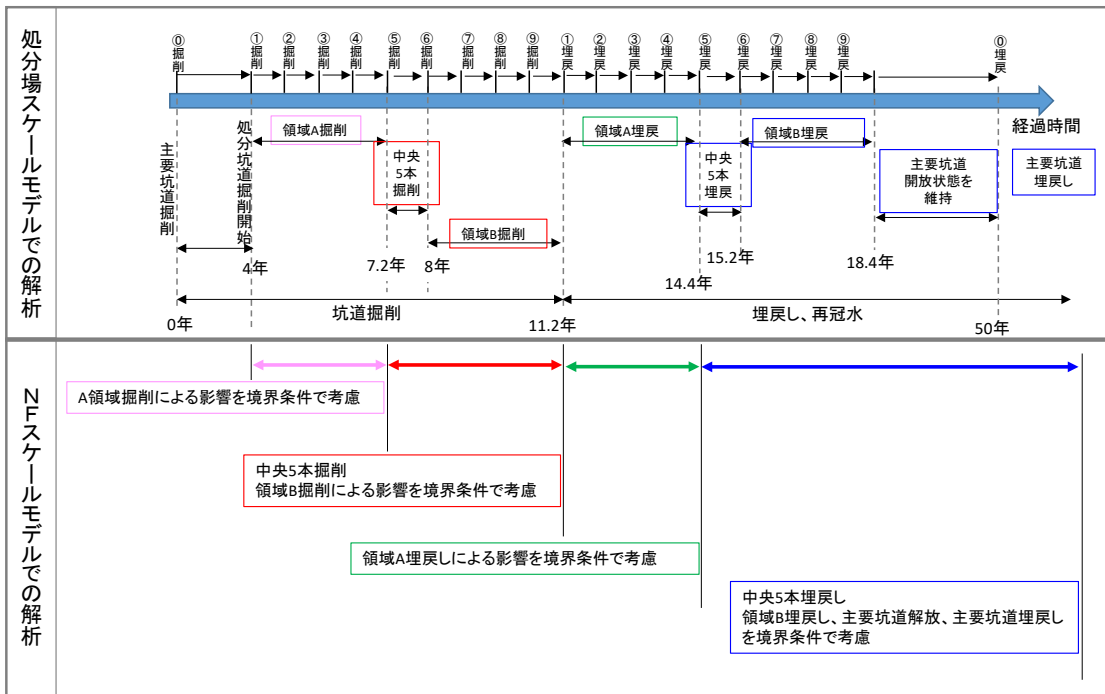


図 2.2-12 ニアフィールドスケールモデル（解析メッシュ）の鳥瞰図



処分場スケールモデルのパネル

(a) 処分場スケールモデルのパネル位置とニアフィールドスケールモデルの位置



(b) 施工の工程とモデル間の境界条件の考慮

図 2.2-13 解析における施工の工程の考え方と境界条件の考え方

参考文献

土木学会 (2006) : トンネル標準示方書

原子力発電環境整備機構 (NUMO) (2016) : 外部専門家ワークショップ資料「わが国における安全な地層処分の実現性—サイト選定で規定される多様な地質環境を対象としたセーフティケース—」

原子力発電環境整備機構 (NUMO) (2014) : 処分場を構成する各部位に適用するセメント種類の選定に向けた検討 —各部位の要求特性の抽出と状態変遷の推定に基づく重要度の検討— NUMO-TR-13-07

今田徹・岡林信行・野間正治 (1996) : 山岳トンネルの施工

一般財団法人建設物価調査委員会 (2015) : 国土交通省 土木工事標準積算基準書 (河川・道路編), 平成 27 年 7 月 27 日

国土交通省九州整備局 (2016) : 土木工事設計要領, 第Ⅲ編

核燃料サイクル開発機構, わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第 2 次取りまとめ-分冊 3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023, 1999.

核燃料サイクル開発機構 (2005) : 幌延深地層研究計画, 地下施設実施設計 —設計報告書—核燃料サイクル開発機構, TRU 廃棄物処分におけるガス発生・移行解析, JNC TN8400 2005-026, 2005.

核燃料サイクル開発機構, わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第 2 次取りまとめ-分冊 3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023, 1999.

日本原子力研究開発機構 (2010) : PFI 事業に関する情報, 図面集

産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 平成 28 年度地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発報告書, 2017.

徳永朋祥, 貯留係数に関する一, 二の議論, 応用地質, 39, 5, pp.475-479, 1998.

Appendix XIII

委員会議事録等

経済産業省 資源エネルギー庁
電力・ガス事業部 放射性廃棄物等対策課 委託事業
平成 29 年度 沿岸部処分システム高度化開発

第 1 回 委員会 議事録

日 時：平成 29 年 9 月 26 日（火）

13:10～15:20 現地巡検

（富士山と富士川河口断層帯周辺りの地形観察）

15:30～17:30 委員会

場 所：富士山メッセ 会議室（委員会）

静岡県富士市柳島 1 8 9 - 8

出席者（順不同・敬称略）

評価委員：大西有三（委員長：関西大学）、大江俊昭（東海大学）、佐藤治夫
（岡山大学）、登坂博行（東京大学）、吉田英一（名古屋大学）

アドバイザー：國丸貴紀（NUMO、太田代理）、藤崎淳（NUMO）

受託者：

AIST：丸井敦尚、町田功、井川怜欧、小野昌彦、松本親樹、樽沢春菜

JAEA：仙波毅、牧野仁史、浅森浩一、佐藤稔紀、三ツ井誠一郎 他

CRIEPI：宮川公雄、幡谷竜太、長谷川琢磨、富岡祐一

RWMC：江守稔、今井政孝、坪能和宏、林大介、井田雅也

静岡県環境衛生科学研究所：村中康秀（巡検のみ参加）

事務局：友澤孝（日本地下水学会）、石井ミカ（ヒップ）、高見弥江（ヒップ）

議事次第

1. 挨拶
2. 本年度研究の概要
3. 事業の説明：地質環境調査技術（沿岸部自然現象—地質）
4. 事業の説明：地質環境調査技術（地下水長期安定性—地下水）
5. 事業の説明：地質環境調査技術（情報整備）
6. 事業の説明：工学技術
7. 事業の説明：安全評価技術
8. 共同研究会議の設立について
9. その他

配布資料

議事次第

- 資料0 本年度研究の概要
- 資料1-1 地質環境調査技術（地質）
- 資料1-2 地質環境調査技術（地下水）
- 資料1-3 地質環境調査技術（情報整備）
- 資料1-4 工学技術
- 資料1-5 安全評価技術

議事次第

1. 開会の辞

- 主催者挨拶（AIST 丸井）
- 大西委員長（委員長継続確認ならびに挨拶）

2. 事業の説明：地質環境調査技術（地質）

—沿岸部の自然現象に関する研究—

○資料1-1について CRIEPI 幡谷、次に JAEA 浅森から説明があり、その後質疑応答に入った。

<質疑応答>

・断層（隆起侵食）調査には、一般化が必要である。広範囲・多地点の調査をこころ掛けてほしい。また、岩種に伴った手法開発が必要である。

3. 事業の説明：地質環境調査技術（地下水）

—沿岸部の地下水長期安定性に関する研究—

○資料1-2について CRIEPI 長谷川、次に AIST 井川から説明があり、その後質疑応答に入った。

<質疑応答>

・沿岸部特有の水理構造を概念図化することの意義は大きい。当該事業では、これをシステムティック区分と称していることを伝え、その詳細を説明し、同意を得た。

4. 事業の説明：地質環境調査技術（情報整備）

○資料1-3について JAEA 佐藤、AIST 丸井から説明があり、その後質疑応答に入ったが、特に質問はなかった。

5. 事業の説明：工学技術

○資料1－4についてRWMC江守、JAEA三ツ井から説明があり、その後質疑応答に入った。

<質疑応答>

・劣化と変質の違いをクリアにしておくことが必要とコメントされ、科学的な整理と用語としての整理について確認した。

6. 事業の説明：安全評価技術

○資料1－5についてJAEA牧野から説明があり、その後質疑応答に入ったが、特に質問はなかった。

7. 共同研究会議の設立について

○AIST丸井、次にJAEA仙波から説明があり、4機関・3分野で行っている本研究プロジェクトの連携を一層密にしていくために、共同研究会議を設立したので、委員の方々にはポリシーや課題についてご指導願いたい旨の説明があった。

8. 総合討論

- ・本事業の目的確認：処分システムの高度化である
- ・海水準変動に関わる環境変化、地形変化、地下水の長期安定性に関わることなどの研究要件の指摘があり、研究手法やゴールなどを議論した。
- ・工学技術、安全評価技術へのリンクを念頭に置いた情報伝達が重要である。
- ・本事業が持つ沿岸部の定義や意味についての確認があり、その上での問題点や課題の整理が行われた。
- ・成果の発信方法についての質問があり、時流と住民への対応・配慮が必要であることが確認された。
- ・沿岸部海側の調査の難しさやデータの整備状況、不確実性など考慮しなければならない内容が多々あることが指摘された。
- ・地下水の長期安定性に関する質問があり、分析手法まで含めて回答した。
- ・分野間の連携（情報交換）をより強固にすべきとの指摘があった。
- ・アドバイザー（NUMO）からは、研究の成果に期待している旨とその分かりやすい発信が求められた。

以上

第2回 委員会 議事録

日 時：平成30年2月12日（月） 13:00～16:40 地質環境調査技術
同 13日（火） 10:00～14:35 工学技術、安全評価技術
場 所：東京国際フォーラム ガラス棟 G510 室
東京都千代田区丸の内3丁目5-1

出席者（順不同・敬称略）

評価委員：大西有三（委員長：関西大学）、大江俊昭（東海大学）、佐藤治夫（岡山大学）、佐藤努（北海道大学）、竹内真司（日本大学）、登坂博行（東京大学）、吉田英一（名古屋大学）

アドバイザー：國丸貴紀（NUMO）、藤崎淳（NUMO）、窪田茂（NUMO）
内田滋（QST）

オブザーバ：江橋健（METI）戸谷成寿（METI）

受託者：

AIST：丸井敦尚、町田功、井川怜欧、小野昌彦、松本親樹、樽沢春菜、木方建造、飯泉綾子

JAEA：仙波毅、牧野仁史、浅森浩一、佐藤稔紀、三ツ井誠一郎 他

CRIEPI：宮川公雄、幡谷竜太、長谷川琢磨、富岡祐一

RWMC：江守稔、今井政孝、小林正人、石井智子、川久保政洋、坪能
和宏、大和田仁、林大介、井田雅也

事務局：友澤孝（日本地下水学会）、石井ミカ（ヒップ）、高見弥江（ヒップ）

議事次第

1. 挨拶（主催者、資源エネルギー庁）
2. 本年度研究の概要
3. 事業の説明：地質環境調査技術（沿岸部自然現象—地質）
4. 事業の説明：地質環境調査技術（地下水長期安定性—地下水）
5. 事業の説明：地質環境調査技術（情報整備）
6. 事業の説明：工学技術
7. 事業の説明：安全評価技術
8. その他

配布資料

議事次第

- 資料 2-1 本年度事業の概要
- 資料 2-2 地質環境調査技術（地質）
- 資料 2-3 地質環境調査技術（地下水）
- 資料 2-4 地質環境調査技術（情報整備）
- 資料 2-5 工学技術
- 資料 2-6 安全評価技術

議事

地質環境調査技術（地質）：CRIEPI 幡谷・JAEA 浅森・丹羽による資料説明

<質疑応答>

- ・地震波トモグラフィーに関する技術的質問とその精度確保に対する質問があり、地域性や岩種による違いも含めて回答した。
- ・沿岸部に断層が存在する可能性と調査の具体的な方法について確認された。
- ・処分地選定の排除要件に関する確認と当該調査との関連についての質問。
- ・マントルや深部流体、高温岩体に対する研究成果やデータの整備状況の確認
- ・断層の同定と年代測定について、年代測定技術（TCN）について
- ・テフラを用いた調査技術の確認について
- ・地質変動に対する 3 次元モデル化における時間軸の考え方が問われ、技術論的な詳細まで含めて回答した。

地質環境調査技術（地下水）：AIST 町田・CRIEPI 長谷川・JAEA 佐藤・AIST 丸井の資料説明に続いて質疑応答があった。

<質疑応答>

- ・地下水流動解析の方法と利用したデータに関する確認
- ・データマイニングとディープラーニングは今後必須の技術であるし興味ある
- ・プッシュ・プル試験の手法を確認し、今後利用可能性が高い（利用の範囲が広い）ことを指摘された。
- ・隆起侵食と地下水年代との関連を問われ、研究分野間の連携を再確認された。
- ・当該研究の情報整備と ISIS の関係について確認された。
- ・ヨウ素年代測定に関する技術的な質問とシステムティック区分への貢献について確認され、分野間での情報のやり取りについて指摘された。
- ・化石海水調査に関わるヨウ素同位体測定技術の有用性についての質問
- ・評価のために当該研究の成果リスト（論文など）を見たい。
- ・プッシュ・プル試験に対する技術的な質問があった。

以上で 2 月 12 日終了

平成 30 年 2 月 13 日（火）

工学技術：RWMC 江守の資料説明の後に続いて

<質疑応答>

- ・坑道（トンネル）内の湧水と水理解析への反映について技術的な質問。
- ・ベントナイトに関する室内実験の技術的確認と現地への適応に関する妥当性や信頼性に関する確認、ベントナイトの適応範囲や水質の影響に関する見解を問われた。
- ・熱力学的な解析の方法に関する技術的な質問があった。
- ・閉鎖後の環境変化や新たな鉱物生成に関する討議があった。
- ・水理解析（不飽和帯の考慮を含む）に関する技術的アドバイスあり。
- ・モデルの精度と導き出せる結論の関係について確認が必要である。
- ・腐食速度やグラウト剤、解析結果について、国民に対する説明であることを考慮し、当該報告書はより誤解を生まない表現やデータを利用すべきである。
- ・THMC 各要素の将来的な変遷についての考えやまとめ方を確認された。
- ・溶液型のグラウトの溶出試験に関する技術的な質問があった。

安全評価技術：JAEA 石寺・牧野の資料説明の後に続いて

<質疑応答>

- ・微生物と各種の相互作用に関するプロセスの質問があり、さらにデータの表現に関するアドバイスがあった。
- ・ベントナイトの実験結果の利用法、イオン交換のプロセスに関する考え方に関する確認があった。
- ・塩水環境下でも有効な工学技術に関する確認が質問された。
- ・沿岸の特徴を考慮した核種移行に関する取り組みについて質問された。
- ・実験の方法とその結果の精度に関する確認法について質問とアドバイスがあった。
- ・地下水解析におけるマトリックス拡散の有効性に関する取扱い方の質問。
- ・解析モデル構築に関する技術的アドバイスがあった。
- ・これからは「評価の枠組みを整備する」ところに力点を置いてほしいとアドバイスがあった（この大西委員長の最後のコメントが中間段階での総評とされた）。

<第 2 回 委員会 終了>

—以上—

第3回 委員会 議事録

日 時：平成30年2月13日（火） 14:50～17:00 事業評価
場 所：東京国際フォーラム ガラス棟 G510 室
東京都千代田区丸の内3丁目5-1

出席者（順不同・敬称略）

評価委員：大西有三（委員長：関西大学）、大江俊昭（東海大学）、登坂博行（東京大学）、吉田英一（名古屋大学）

アドバイザー：國丸貴紀（NUMO）、藤崎淳（NUMO）、窪田茂（NUMO）
内田滋（QST）

オブザーバ：戸谷成寿（METI）

受託者：

AIST：丸井敦尚、町田功、井川怜欧、小野昌彦、松本親樹、樽沢春菜、
木方建造

JAEA：仙波毅、牧野仁史、浅森浩一、佐藤稔紀、三ツ井誠一郎 他

CRIEPI：宮川公雄、幡谷竜太、長谷川琢磨、富岡祐一

RWMC：江守稔、今井政孝、小林正人、石井智子、川久保政洋、坪能
和宏、大和田仁、林大介、井田雅也

事務局：細川裕美子（日本地下水学会）、石井ミカ・高見弥江（ヒップ）

議事次第

1. 挨拶（主催者）
2. 本年度事業評価方法の説明
3. 分野ごとの審議：第2回委員会説明順
4. 機関連携、分野連携について
5. 総評（大西委員長）
6. その他

配布資料

- 3-1 評価票

議事

1. 主催者挨拶と評価方法、評価票の使い方についての説明

2. 分野ごとの審議

ー地質環境調査技術（地質）ー

- ・国の全体枠における当該研究事業の位置づけについての確認。
- ・国民理解のために必要な現地調査の密度と解析手法の活用に関するアドバイスがあった。
- ・現地調査地点の選定プロセスの明確化と地点の代表制についての質問。
- ・研究の方向性（最終的な目標）を明確に示すべきであるとの指摘。
- ・陸域と海域の情報量の違いとその上での調査方法の違いについての確認。
- ・隆起量や断層の動きを地域ごとに明確（定量的）に表せないかとの要求。
- ・地震を例示し、分野間連携と情報共有の手法についてアドバイスと

ー地質環境調査技術（地下水）ー

- ・地下水年代の定義と測定精度に関する質問（確認）。
- ・地下水サンプルの採取方法と測定精度の仕分けについて明確化してはどうかとのアドバイスがあった。
- ・システムティック区分に関する概念図の表現方法へのアドバイス。
- ・プッシュ・プル試験などを実際の処分深度に適用できるかなどの確認。

ー工学技術ー

- ・人口バリアに求める役割と解析における評価の方法についての確認。一般の国民はオールオアナッシングの発想でいることが多いが、正しい理解をするような情報提供が必要である。
- ・リスクに関しても種別や時間軸などを考慮に入れて表現すべき。
- ・例えばベントナイトの緩衝材や金属の錆について、本来性能と副次効果について、しっかりと情報提供をすると安心の確保につながる。

ー安全評価技術ー

- ・不確実性についての情報は重要である。不確実性の種別や大きさなどわかりやすく発信してほしいというリクエスト。
- ・当該事業では、分野ごとに地層処分のどこに焦点を当てた研究をしているのかという疑問がある、研究ステージを明らかにすることで、研究がより明確になるとのアドバイス。
- ・安全評価と性能評価は違う、安全評価とは「最終的に一般公衆がどこまでそのリスクを被る可能性があるかを見定めることである」と認識してほしい。
- ・安全評価上のパーツの抜け落ちは致命的なので、十分に検討してほしい。

4. 機関連携と分野連携

・JAEA 仙波より、現在の連携について、会議体の階層構造などの説明を行い連携強化の方法を示した。その後、評価票への本件に関するコメントなどの記述方法を説明した。

5. 総評（大西委員長）

平成 29 年度 沿岸部処分システム高度化開発 外部評価委員会は発足以来 3 年目（実質的には 2 年目）を迎え、今年度も 3 回開催され、第 1 回、第 2 回の各委員会での研究開発状況の報告と質疑応答が行われ、活発な議論が交わされた。第 3 回委員会では、今年度報告書ドラフトの基となる原案が示され、内容についての検討が行われた。

平成 29 年度の外部評価委員会を終えての総括は以下の通り。

・沿岸部における地質環境の調査技術・工学技術・安全評価技術に関する事項について、4 機関が協力して研究開発が実施された。前年度に比べると、機関同士の協力はスムーズに動きつつあることは報告を聞いていても実感できた。協力体制を一層強固なものにして成果を上げていただきたいと期待する。

・海底底下にある沿岸部処分システム設置場所の複雑な自然現象の把握が必要とされることは、昨年度と同様である。隆起・浸食、断層活動、火成活動に関する検討は、新しい手法も取り入れて、進展していることがうかがえた。

・地下水の長期安定性に関する検討では、サンプル採取、水質分析を通して、システムティック区分を提案、地形・地質との関係を検討していることは、興味深い。さらに、いくつかの試験（新しくプッシュプル試験を実施）の結果を基に、深部地下水年代の評価に供するデータベース構築に向けた取組を行っており、成果に期待する。

・工学技術分野では、沿岸海底下で起きる塩水影響、海水と淡水の混合域の影響などについて実験と解析が行われてきた。既に多くの知見が得られているが、処分システムの中での工学技術の位置付けを含めて、さらなる“高度化”に取り組んでいただきたい。

・安全評価技術は、陸域での地層処分でかなり検討がおこなわれてきているが、沿岸部という特質への対応を急いで検討している段階である。コロイド・有機物・微生物などが沿岸海底という環境でどのような影響を及ぼすかについての知見はこれからまとめなければならないテーマである。この研究項目は JAEA 単独の担当であるが、他機関との意見交換がどのように行われているかについての言及はなかった。この枠組み作りは今後の課題であろう。

・昨年度にも指摘したが、委託事業計画が 4 ヶ年であるということにあまりとらわれる必要は無く、もっと長期的に取り組むべきことは指摘した方がいい。4

年の間に、期間内にできること、今後の課題として残るものの区分は、いままでの知見を元に明示しておくことが必要であろう。検討3項目：地質環境の調査技術、工学技術、安全評価は、それぞれの項目における課題は、それぞれに成果が得られつつある。新しい知見を上手く取り込んで、今年度の取りまとめを行っていただきたい。

6. その他（丸井）

評価票の提出方法や追加コメント、今後のスケジュールなどについて説明があり。大局から細部に至るまでのキメ細かいご指導に感謝の意が述べられた。

—以上—

（追加資料）

以下に、外部有識者委員によるコメントと評点表を示す。

大項目	【肯定的意見】	【問題点・改善すべき点】
<p>1.事業の目的、政策的 位置づけの妥当性</p>	<p>「沿岸部処分システム高度化開発」というテーマは、国の事業として重要であり、国民の関心事であることは論を待たない。最近まで、長年にわたって陸上部での廃棄物処分事業の検討が行われてきたことを踏まえて、新たに沿岸部を対象とした検討がおこなわれることの意義は大きい。</p> <p>事業目的、政策的な位置づけは、明確にされており、長期的な目的に沿って事業が進められている。内容は、年度ごとに、先進的な研究開発、技術開発が付加されており、進歩が見られる。</p> <p>処分は国の原子力政策の結果として顕在化している課題であり、国の関与は必然と考える。特に、長期の課題で、民間企業の形態の枠を超えた議論も必要であるから、責任母体を明確にするうえで、何らかの形で国が関与すべきである。その意味で、本事業は地層処分WGなどの議論を通して国が明確に方向性を示し、そのうえで必要な開発項目を抽出して、検討を開始したものであるため、事業目的、政策的な位置づけも妥当である。</p> <p>科学的有望地の選定において、地質学的観点以外に沿岸域が有力視されている状況から、かつ成果が早急に求められている観点から、オールジャパンで取り組む必要がある。そのためには、英知の結果の観点からも国が関与する事業として取り組む必要がある。したがって、本事業の目的や政策的な位置づけは妥当であると考えられる。実施内容の大部分は、新規性・先進性・独創性・革新性・先導性等は感じられるものではないが、今までフォーカスされていなかった沿岸海洋底の地質環境及び工学環境に対してスピード感をもって理解する必要から、新規性や革新性等が感じられなくても網羅性が感じられれば十分であると考えられる。</p> <p>2015年5月の特廃法の基本方針の改定の中でも示されているように、この地層処分事業は、一機関のみが実施するには難しく、国が前面に立って地域住民とコミュニケーションをとることが明示され、国の責任・役割も重要となった。特に、沿岸域海底下処分については、2017年7月の「科学的特性マップ」の公表により、地域住民にとっては現実的なこととして関心が高まっており、社会的意義も大きい。よって、国の関与は相当であり、ニーズにも合致していると判断する。</p> <p>この事業は、地層処分技術のうち、沿岸海底下で処分する場合に特化して、必要な地質環境の調査・評価技術、情報（データベース等）、工学技術、安全評価技術について整理または調査し、従来技術の適用性や適用限界を含めて、新たな技術を開発し、総合的技術として構築することを目指しているが、陸域での処分に対しても高度化した技術として適用可能である点で期待できる。</p> <p>放射性廃棄物処分は地域の問題ではなく国全体で解決すべきことであり、国の関与が必要不可欠である。本事業は技術的側面からの地層処分に関する技術の高度化について扱っており、国民、社会のニーズに合っているとと思われる。複数の国の研究機関がそれぞれの“得意分野”を中心に実施しており、役割分担は適切と思われる。</p> <p>事業の目的や政策的な位置づけも明確である。昨年度発表された科学的特性マップを補足、補強する知見の蓄積、技術開発が主体であり社会的意義、科学的意義は大きい。既存技術の適用案件中にもあるが、国内で実施可能性を確認する上では重要な内容と考えられる。新規の技術開発案件については、さらに実用性を高めるべく技術開発を進めていただきたい。</p> <p>地層処分のサイト選定評価の基本となる科学技術的検討であり、国の事業として適当と考える。</p> <p>沿岸地域における地質、水理、解析手法ならびに安全評価への展開について、単に1つの研究機関のみで実施可能な課題ではないという理解において、国として、all Japanというスタンスで、現状の知見、技術を網羅し、高度化を行っていく上では、国がある程度関与することは必要と考える。</p> <p>またそれぞれの役割分担についても、概ね妥当と考える。事業の科学的や技術的な意義についても、必要性も含め、重要と考える。</p>	<p>進捗状況が外部には見えにくいので、国民ニーズに合っていないような捉え方がされている。事業の内容の外部への説明をもっと分かり易く、かつ進捗状況も含めてマスコミ等にも噛んで含めるような解説を続ける必要があると思われる。</p> <p>陸上部での処分システムの開発から沿岸部も含めたシステム開発に範囲を広げたわけであるが、沿岸部特有の難しさや課題を浮き彫りにした説明がなされるべきである。そのために、先進的な研究や技術開発が必要とされること、研究だけでなく、具体的な技術の実用化が求められており、対処すべく多くの機関や人々が関わっていることも理解されるように外に向かって説明が求められる。</p> <p>国は昨年7月に「科学的特性マップ」を公表し、10月からは実施主体と共に、福島を除く全国の県庁所在地で、地層処分理解を目的に意見交換を開始したことにより、より実用的な技術と情報が求められている。特に、超長期に亘る地質環境の安定性(変動の評価)については、工学技術や安全評価を行う上では根幹をなす情報であることから、調査・評価技術の信頼性向上は、自然現象も含めて地域住民の関心事であり、極めて重要であると考えられる。</p> <p>これらのことを踏まえ、調査・評価技術、工学技術、安全評価技術の連携は不可欠である。現状では、個別の技術の高度化に志向している傾向があり、サイト選定プロセスの段階的な進捗を踏まえた(処分事業を念頭に置いた)手順とメニューとの関係についても整理する必要がある。</p> <p>また、各分野について、個別の技術や知見、情報については、これまでの研究も含めて整理されつつあるものの、事業化の側面からは、実用性を視野に入れつつ定量的に示すことが大事である。現状では、抽象的で定性的な側面が多いことから、目指す方向を明示すべきと考える。</p> <p>ここで述べるべきか否か不明だが、要は、最終的なアウトプットをどのように提示するのか、何に活用するのか、(例えば、科学特性マップの沿岸域版の作成など)が、実施者も含め不明瞭であり、また共有されていないように感じる。</p>
<p>2.各事業者が行う事業 の研究開発等の目標 設定の妥当性</p>	<p><地質環境調査技術> 研究開発等の目標設定は適切かつ妥当</p> <p>隆起・浸食、断層活動、火成活動を考慮すべき自然現象とし、沿岸部の評価に特有の事項を調査・評価する方法はよい。特に、沿岸陸上部の情報を海域に外挿する方法は手堅く、順当と思われる。</p> <p>全体的には、既存情報(文献データ等)を調査し、その結果に基づいて、現状の技術レベルと課題を整理した上で、事例研究による調査・評価技術の適用性を評価するための目標設定がなされている。</p> <p><工学技術> 研究開発等の目標設定は適切かつ妥当</p> <p>人工バリア材の塩水影響とシーリング技術に着眼したことは、施設の成立性の上では最重要な点であり、手堅い目標設定である。</p> <p><安全評価技術> 研究開発等の目標設定は適切かつ妥当</p> <p>沿岸部固有の特徴を安全評価に取り入れるために、ツールやパラメータを整備することに注力していることは妥当である。</p> <p>沿岸海底部での安全評価の枠組みの整備が試みられているが、今後の概要調査段階でどのようにするか、検討を進めていただきたい。</p> <p><全体> 研究開発のスタート点で、分野の範囲も含めて、目標設定は十分議論されている。評価会議においても、目標設定へのコメントはなかった。</p>	<p><地質環境調査技術> 今年度実施したケース・スタディが一般論として定着するには何を押さえておくべきなのか、単に地点数を増やせば済むことなのか、何らかの整理が欲しい。</p> <p>目標設定が全体的に抽象的な記述となっており、個別の課題に対する目標設定が曖昧であるが故に、目標に対する達成度の判断も曖昧である。また、各実施項目間のつながりが示されていないため、総合的な技術として評価しづらい。</p> <p>水の年齢が仮にある範囲で推定できるとしたら、概要調査の段階で、ボーリング孔から採水された水の年齢が安全評価上の最大の判断基準と受け取られかねない。例えば、年齢が10万年以下と算出されたら、その地点は処分には不向きと考えられてしまう。年齢の解釈や評価での利用の仕方についても検討しておいた方がよいと思われる。</p> <p><工学技術> エンジニアリングを意識した手法の開発を目標に掲げているが、それは具体的に何を指すのか、シーリングという課題が一つ目立つだけで、今ひとつ明確さに欠ける。また、塩水環境ならではの考慮点があるか、もう少しクリアになったほうがよい。単に、淡水を塩水に変えた評価を行う、そのために不足のデータを補う、てよいのか？ そもそも塩水という高いイオン強度の溶液環境下で、緩衝材の変質挙動を解析できるツールがあるのか？ と問われれば、それ自体が開発項目になることはない。</p> <p>処分場の建設・操業・閉鎖までの短期的な段階と閉鎖後の長期的段階とで評価すべき内容も目的(目標)も変わるから考えられることから、それぞれの位置づけを明確にした上で目的(目標)を明示した方がよいと考える。また、課題設定が研究会で示された個別課題のままとなっているが、併せて、例えば、ニアフィールド複合現象モデル(資料2-5-2, p.20)の中で位置づけを示し、その上で具体的な目標を設定してはどうか。</p> <p>人工バリアが劣化した時、10万年程度で廃棄体核種全量のうち、どの程度放出するか、逆に言えば、どの程度漏らさないか、をある程度言えないか。地表生物圏への影響は放出されるソースの量に大きく依存するので。</p> <p><安全評価技術> 陸上処分地下水を塩水系に変えた場合のインパクトを理解することに主眼が置かれている。当面の整理としては、まず行うべきポイントであるが、インパクトを評価するうえで、陸地処分イメージの延長上で捉えているため、課題の抽出に陸地処分の安全評価技術というバイアスが掛かっている可能性は排除できない。その点を常に念頭に置いて、解析ツールや手法の限界を見定めて、新規開発すべき点がないかどうか、を考えてほしい。</p> <p>目標設定が全体的であるため、個別の課題に対する目的が曖昧である。</p> <p>概要調査段階での安全評価の枠組みについていろいろ挙げられているが、全体がわかりにくいと思う。整理の仕方をお願いしたい。</p> <p><全体> すべての分野に対して、目標設定は妥当なものとするが、目標達成度を判断するための適切な指標は設定されていないように感じる。本研究の期間内で達成できるもの、もう少し長期間必要なものの仕訳と達成まで必要な機関の明示が必要。 次ページの判定基準ではa~cまで「目標設定も極めて適切である」とあり、上記の点を考慮して判定することができない。目標水準については、各分野とも明確でないものが多いと思われる。何らかの指標等を設定し、それについてどこまで明らかにするのかを十分に議論されることを期待したい。なお、地質環境調査技術において、沿岸部の地質環境の情報整備については、例えばJAEAのISISについては、OSやソフトウェアのバージョンアップ等が必要になると考えられ、その場合システムの維持・管理に費用が必要となるものと思われる。DB開発と維持・継続は調査データや解析結果、ノウハウや判断根拠などを格納しておくために必要不可欠であることから、国も積極的に予算を投入して欲しい。</p> <p>基本、問題設定は適切になされていると理解するものの、一方で、「沿岸域に特化した安全評価上注目する特性」等については、当日の質問でも提示したが、もう少し検討が必要のように感じる。</p>
<p>3.成果、目標の達成度 の妥当性</p>	<p><地質環境調査技術> それぞれに考え方が異なることから、成果および目標達成度の評価は難しい。委員会でもいろいろな点について質問が多くあったが、質疑応答は内容のチェックと研究精度を高めるためのものであり、批判と評価が交差する。目標が全て達成されているかというところを言い切れず、おおむね妥当としが表現できない。</p> <p>非常に短期間の中で精力的に取り組まれ、成果の発表等は間に合っていないものの、目標に照らしておおむね妥当な成果が得られていると感じる。</p> <p>途中段階のものもあるようであるが、目標に対する成果は得られてきているものと判断する。</p> <p>地下水年代に関し順調に成果が上がっていると考えられる。</p> <p>各分野、テーマごとに成果が得られつつあると判断する。しかし、論文や学会発表などへのチャレンジが少ないように思える。</p> <p><工学技術> これまでの陸域処分の成果を再整理して、優先すべき課題を抽出して計画を策定し、その計画に沿って29年度は試験研究を継続実施したとあり、データの蓄積は着実に進展している。</p> <p>非常に短期間の中で精力的に取り組まれ、成果の発表等は間に合っていないものの、目標に照らして妥当な成果が得られていると感じる。</p> <p>人工バリアの塩水中での劣化に関する検討が順調に進んでいると考えられる。</p> <p><安全評価技術> 核種移行と生活圏の2つに分けて、パラメータ設定手法の整備、パラメータ設定に着手。29年度は具体的な評価方法、ならびに沿岸部の固有条件(海進・海退、塩水影響)を考慮するためのデータ取得を進めるとしている。この目標設定に対して、感度解析的な評価から重要事項を抽出する方針は妥当。</p> <p>非常に短期間の中で精力的に取り組まれ、成果の発表等は間に合っていないものの、目標に照らして概ね妥当な成果が得られていると感じる。</p> <p>色々試みられているが、まだ整理ができていないように思われる。</p>	<p><地質環境調査技術> 28年度に課題出しを行って、一部着手、29年度は情報を追加して、精度向上を目指すところだが、果たして、単年度の作業を追加しただけで、精度が向上したといえるか。</p> <p>現状では各実施課題に対して結果・考察の羅列となっている記述が多く、現状までの調査でどこまで技術が適用できるか(見通しがあるのか)曖昧な記述となっている。例えば、サイト選定プロセスにおける各段階での判断基準や処分場設計へつながる定量的な記述を心がけてほしい。</p> <p>隆起・浸食、断層・火成活動に関しては、例えば概要調査段階での成果目標や使い方をある程度明らかにしつつ進めていただきたい。</p> <p><工学技術> データ収集は進展しているが、結果の解釈を充実させるべき点がある。例えば、緩衝材共存下でオーバーバックの腐食速度が増大するが塩濃度に対する感度が低い理由は示されていない。</p> <p>水理解析の体系整備についても、沿岸部特有の因子の影響を理解する上での解析モデルの設定が単純すぎるので、ここで得た結論が一般的に成り立つかどうかは慎重に判断していただきたい。</p> <p>結果が定性的である場合が多い。実際に設計に反映するためには具体的である必要がある。</p> <p>廃棄体、オーバーバック、人工バリアが捉えておける核種の割合はどの程度か、腐食により漏洩したとしても、結局10万年経っても例えば99%は人工バリア内に捉えられているのではないかと。その辺の見積もりはできないか。地表生物圏への影響は天然バリアへ供給されるソースの量に大いに関係すると考えられる。</p> <p><安全評価技術> 収着パラメータの整備に関して、単にデータに合わせるために平衡状態の定数をフィッティングする手法は説得力がない。定数を変える根拠を明確にすべきである。</p> <p>安全評価技術のモデルパラメータの整備のコンテンツが、安全評価上その整備が適切であるか否かの判断が難しくなった。</p> <p>コロイド、有機物、微生物の影響については、個別の特性データが拡充されつつあるものの、実際の安全評価における具体的に核種移行に及ぼす影響評価手法についても検討しておく必要がある。</p> <p>沿岸部の安全評価については、今後、実際にどのような手順で行うのが良いかを、提案できるように整理してほしい。</p> <p><全体> 得られた成果の達成度レベルをできるだけ明確にするよう、関係者で議論されることに期待したい。</p> <p>成果の外発等については、資料がないため判断ができない。</p> <p>論文や学会発表などへのチャレンジが少ないように思える。また安全評価部分については、沿岸域ならではの解析が必要なのかどうか、といった検討も重要と思われる(ので、検討していただければと思う)。</p>

<p>4.事業化への貢献、成果発表についての妥当性</p>	<p><地質環境調査技術></p> <p>いずれの分野も、それなりの成果は出されており、進んではいる。しかし、事業化や橋渡しへの貢献を確約できる段階ではない。実用化の見通しがあるという段階であると考えられる。</p> <p>本事業は、そもそもNUMOで実施される予定の処分事業への事業化を念頭に計画されているもので、それに対する貢献は妥当であるし、橋渡しの見通しは立っているように感じる。</p> <p>沿岸部での地質環境に関する情報のデータベース整備が進んでおり、事業化段階での基礎情報として貢献できると評価する。また、現在、事例研究の途中ではあるが、事例研究を通して、調査・評価技術の適用性の評価が進むものと期待でき、事業化段階でのサイト選定プロセスに貢献できると期待される。</p> <p>高度化開発が事業のテーマであり、既存手法やノウハウをベースとした現場等への適用性の評価を目的としているものについては、事業化の目的は立っていると思われる。</p> <p>基礎研究としては着実に進められており、将来の事業につながると考えられる。</p> <p>事業化や橋渡しへの貢献については、未だその段階ではなく、もう少し現在の手法の適用性などの知見、検討が蓄積してからのように思われる。</p> <p><工学技術></p> <p>本事業は、そもそもNUMOで実施される予定の処分事業への事業化を念頭に計画されているもので、それに対する貢献は妥当であるし、橋渡しの見通しは立っているように感じる。</p> <p>個別の技術や情報(データ、知見)は拡充されつつあり、事業化段階での基礎情報として貢献できると評価する。</p> <p>既存技術を用いたデータの拡充等をテーマにしている案件については、事業化の目的は立っていると思われる。</p> <p><安全評価技術></p> <p>本事業は、そもそもNUMOで実施される予定の処分事業への事業化を念頭に計画されているもので、それに対する貢献は妥当であるし、橋渡しの見通しは立っているように感じる。</p> <p>地質環境条件とそれを踏まえた処分場の設計条件と運動することを考慮し、沿岸部に特化した評価の枠組みと、地質環境及び処分場の設計条件を考慮して核種移行パラメータが拡充されつつあり、条件に対応したモデルの構築も進んでいることから、事業化段階での貢献が期待できる。</p> <p>既存技術やノウハウをベースとしたデータの拡充等をテーマにしている案件については、事業化の目的は立っていると思われる。</p>	<p><全体></p> <p>実施主体であるNUMOが本課題に関与することが必要であるも、現在はオブザーバーとしての参加であるため、本研究は基礎的開発段階と理解する。しかし、科学的特性マップが公表された後でもあり、処分システムの選択肢として沿岸海底下処分も従前の陸地処分と同様の重みをもって検討されるべきであろう。総合的な評価を行うまでの時間的余裕はあまりない。しかしながら、前述のように、まだ、基礎的段階のものが多く、事業化への橋渡しを議論できるレベルに達しているとは言えない。</p> <p>全体的に、現状では、事業化を踏まえた橋渡しについては明示されていないことから、各技術やデータベース等の情報の具体的な活用方法や枠組み、実用化などについては検討すべき事項である。</p> <p>地質環境調査技術に関して、既存技術の適用性が判断できないものについては諦めるのではなく、適用性が確認できなかった理由とその改善方法を十分に検討することを期待したい。</p> <p>前記の「事業化への見通し」との問いは、まずは概要調査段階で使える成果を上げる、ということとなろうが、委員会での説明資料の中では、概要調査という言葉は出てこなかったように思う。精密調査段階、或いは閉鎖段階で使うものもあるかもしれないが、研究成果をどこで利用するか、もう少し明確にして進めていただく必要があるように思われた。</p> <p>「事業化」については、何を以て「事業化」できたと言えるのかも含め、実施者間での議論と共通の認識を持つことも大事かもしれない。今回は、「事業化」という観点でのプレゼンが行われたという認識はあまりなく、その前段階での話のように思っている。もし、事業化を評価の項目として入れるのであれば、そのゴールのイメージをもっと明確にする必要があるように思われる。</p>
<p>5.研究開発マネジメント、体制等の妥当性</p>	<p><全体></p> <p>社会経済情勢等周辺の状況変化は、毎年大きい。それぞれに対応を考えておられるので、大きくズレたりはしないが、社会的要因の取り込みは難しいので、細かく対処するしかない。</p> <p>分野ごとの連携については、単独の機関で作業している分野は、連携が見えにくいので、どのような連携体制を組み、どのようなところが連携の成果か、示していただけると有り難い。</p> <p>開始初年度に比べ、各機関の行った研究成果についての情報共有はよく進んでいる。状況変化への対応については、大きな状況変化があったとは思えないので、対応すべき点はない。(変化への対応の評点cの意味は、対応が不十分ということではなく、対応すべき点がないということであるが、適切な判断基準が示されていないので、敢えてcと記載した。)</p> <p>研究開発計画の観点から、本事業の目標を達成するために策定された計画は適切であったと考えられるし、採択された実施者は妥当であったと考えられる。また、全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されていると判断できる。この統括リーダーのおかげで、事業体間の連携は密に取れているように感じる。</p> <p>4機関は、それぞれの分野での専門家集団であり、これまでも地層処分技術について研究しており、多くの知識と経験を有している。</p> <p>特に、JAEAは、「第2次取りまとめ」や「平成17年取りまとめ」など、この分野において国の中核機関である。地質環境については、全国規模な調査を行ってきたAISTの得意分野である。また、工学技術については、RWMCにおいて実規模試験や地下研究施設での原位置試験などの情報や知見、技術の蓄積、経験が豊富である。CRIEPIは、地質環境の中でも、地層処分を念頭に地球化学に関する調査技術などについて経験豊富である。</p> <p>この事業も3年目を迎え、初期の頃と比較すれば、事例研究などで一部連携している。</p> <p>事業のマネジメントについて、全体を統括するプロジェクトリーダーが選任されており、適切に行われていると評価する。</p> <p>各機関の技術的特徴が出ており、良い連携ができていているように思われる。</p> <p><地質環境調査技術></p> <p>事例研究等で一部遅れのある課題も見られるが、概ね計画に沿って実施されており、計画と実施スケジュールは概ね妥当と判断する。</p> <p>評価項目・評価基準の(1)、(2)、(4)については概ね適切と判断する。同(3)については該当項目がないと判断する。実施計画、内容、実施者ほか、運営も含め、努力と具体的な成果が得られていると判断する。</p> <p><工学技術></p> <p>人工バリア材料やグラウト材等の個別の課題に対するデータ取得や処分場の建設・操業を想定した場合の水理・力学に関する解析ツールの整備など、処分システムの成立性に関わる技術の整備を計画的に実施しており、スケジュールを含めて概ね妥当と判断する。</p> <p><安全評価技術></p> <p>安全評価においては、地質環境に関わる調査や処分場設計に係る工学技術の進捗の影響を受け評価項目・評価基準の(1)、(2)については概ね適切と判断する。同(3)、(4)については該当項目がないと判断する。</p> <p><安全評価技術></p> <p>評価項目・評価基準の(1)、(2)については概ね適切と判断する。同(3)、(4)については該当項目がないと判断する。</p>	<p>いつものことであるが、全般的に、時間的余裕がない。予算措置の段階から報告書提出まで、スケジュールの見直しがあってもいいのではないかと。(年度ごとの取りまとめの制約を緩めるなど)</p> <p>機関間の連携は、改善されてきたと思う。取りまとめの段階で、改めてこの関連性を確認していただきたい。</p> <p>実施期間が2年では、望むべくもないコメントであることを承知して、希望として述べる。機関の連携が十分な状態とは、各機関の成果のイテレーションがなされている状態と考える。その意味では、ある機関(例えばCRIEPI)の成果を受けて、その次の機関(例えばJAEA)が検討し、その結果をまた元の機関(CRIEPI)に戻して、必要な修正や追加検討を進める、という流れが実現されている段階にまでは進んでいない。</p> <p>地質環境調査技術や工学技術のように、様々な機関のエキスパートが交流して問題点を解決していく形式に高い意義を感じた。その点から、安全評価技術に関しても、様々な分野に人材が分散し、かつ組織を超えたコラボレーションができる状況であった方が良かったと感じた。</p> <p>国は昨年の7月に「科学的特性マップ」を公表し、10月からは実施主体と共に、福島を除く全国の県庁所在地で、地層処分法の理解を目的に意見交換を開始したことにより、以前にも増して実用的な技術と情報が求められている。特に、超長期に亘る地質環境の安定性(変動の評価)については、工学技術や安全評価を行う上では根幹をなす情報であり、調査・評価技術の信頼性向上は、自然現象も含めて地域住民の関心事である。よって、地質環境の調査・評価技術、工学技術、安全評価技術の連携は不可欠であるが、現状では、個別の技術の高度化に志向している傾向があり、サイト選定プロセスの段階的な進捗を踏まえた(処分事業を念頭に置いた)整理が必要である。</p> <p>このプロジェクトでは実施のすべての過程で分野間の連携が重要であることから、分野間の連携を密に取っていただきたい。</p> <p>とくに連携については、実施内容もあることながら、まとめ(来年度)において、この成果をどのように示すのかという点において、非常に重要と考える。先にも述べたが、この成果をどのように活用することを目的に実施しているのかを、再度、よく確認された上で連携を含め、さらに推進されることが重要かと考える。その点において、委託側の国(エネ庁)にも、この成果をどのように活用しようと考えているのかについて、実施担当者や最終年度に向けて確認を行うことも検討されてほしい。</p>
<p>6.総合評価</p>	<p>本事業は、先進的かつ先駆的な研究に取り組んでおり、地層処分技術の開発に貢献していることは明らかである。複数の機関が、有機的に情報交換しながら高度化に取り組もうとしていることは、評価できる</p> <p>3年間という限定された期間を考えると、目標設定は堅実であり、今まで以上に参加機関の連携も取れている。特に、処分システムとして捉えられた時、各々の機関の得意とする分野を連携させることは極めて重要で、それがなされつつあることで、地層処分技術の開発に貢献していることは確かである。</p> <p>科学的有望地の選定において、地質学的観点以外に沿岸域が有力視されている状況から、かつ成果が早急に求められている観点から、オールジャパンで取り組む必要がある。そのような観点から、非常にタイムリーで有用な事業であると判断する。また、その内容は、NUMOの処分事業を念頭に据えられており、事業化の観点からも重要であると考えられる。</p> <p>また、地層処分事業のみならず、二酸化炭素の地中貯留や天然ガスや石油備蓄など、広く地質環境や地質媒体の工学的利用に関する分野への貢献も期待される有用な事業と判断されるので、そのような貢献も広くPRされるとより良いものとなるように感じる。</p> <p>事業体制は、それぞれの機関の強みを生かして適切な役割分担がなされていると評価する。</p> <p>基盤情報は、データ取得やデータベースの整備などにより、着実に整備されつつあると評価する。</p> <p>事例研究などを通して、調査・評価技術の適用性評価などを実施しており、より実用性のある技術として整備されつつあると評価する。</p> <p>本事業は、将来の地層処分事業の実現に向けて重要な研究開発テーマを掲げて最新の知見をフォローしつつ、既存技術の見直しも含めた科学技術の高度化を目指し、着実に実施されている。そのような観点で地層処分技術開発に大きく貢献しているものと判断される。</p> <p>全体として、4つの研究所が連携して、目標を持ちレベルの高い研究を行っているとの印象がある。ここでの成果、特に地質環境の調査技術、安全評価技術は「概要調査段階」のサイト評価に大いに必要となるものと考えられる。</p> <p>本事業は研究として有用であり、地層処分技術の開発に貢献すると判断する。個別研究課題についても、一般化も視野に入れたアプローチが徐々に具体的に示されてきており、手法も含め、さらにそれらの適用性を示すことを念頭にさらに推進されることを期待する。</p>	<p>多くの項目が研究対象となっているが、それらがどのように地層処分の実用化視点が盛り込まれているか十分理解できない部分が含まれている。すなわち、研究の位置付けがまだまだ研究段階に止まるのか、すでに実用化が近くNUMOIに技術移転が出来るようなものなのか内部評価が定まっていないところがあり、細かく見ると目標が見えにくいところも見られる。</p> <p>沿岸海底下処分のメリットを引き出す挑戦的な課題設定がなされたとは言いがたい。3年間という時間的制約から、従前の陸地処分のバリエーションとして捉えるという立場をとらざるを得なかったためと思われるが、緩衝材は必要なのかといった、そもそもの議論がなされてもよいのではないかと考える。</p> <p>期間内にできない事の整理とできない理由をきちんとまとめて、機関の枠を超えて当該分野の「実力」を示してほしい。また、3つの研究分野とも、最終年度は、他分野への貢献や学術に対する貢献を明確にしてほしい。</p> <p>計画の見直し状況が不明確であるため、各課題とも、見直した点を明らかにしつつ報告すべきである。</p> <p>目的なども含めて、報告内容が定性的、抽象的な記述となっている場合が多いことから、実用性の側面から、より具体的な記述とすべきである。</p> <p>基盤情報や各技術の事業化への橋渡しなどについては具体的な記述がないことから、それらを踏まえた記述とするよう検討すべきと考える。</p> <p>今後のこの分野の事業化を想定すると不透明な部分が多いため、それまでの間、これまで蓄積された個別の調査技術や科学的な知見、さらにはノウハウ等を利用可能な形で継承していくことが必要である。このような技術継承に対しては各組織で検討することに加えて、国レベルでも積極的に後押しをする体制を整えていただくことを期待したい。</p> <p>なお、委員会での報告の際は、この評価票の項目も意識した報告あるいは資料を提示していただけると判断がしやすい。出席できなかった分野の評価は特に難しい。</p> <p>すでに述べたように、将来の沿岸域における地層処分の文献～概要調査の実施におけるサイト選定ならびに調査手法の基盤的情報、データ集としての活用が最終アウトプットだと認識するのであれば、そのような形で取りまとめ、過不足、課題などを提示してもらえるとよいのではないかと考える。</p>

	委員A	委員B	委員C	委員D	委員E	委員F	委員G
1. 事業の目的・政策的位置づけの妥当性							
2. 研究開発等の目標設定の妥当性	B	A		B	A	B	B
(1) 研究開発等の目標は適切かつ妥当か。							
①地質環境の調査技術	b	a	a	b	a	b	b
②工学技術	b	a	a	c	a	b	b
③安全評価	b	b	a	b	a	b	b
3. 成果、目標の達成度の妥当性	B	B		B	B	B	B
(1) 成果は妥当か。							
①地質環境の調査技術	b	b	b	b	b	b	b
②工学技術	b	b	b	b	b	b	b
③安全評価	b	b	c	b	b	b	c
(2) 目標の達成度は妥当か。							
①地質環境の調査技術	c	b	b	b	b	b	b
②工学技術	c	c	b	b	b	b	b
③安全評価	c	c	c	b	b	b	c
4. 事業化、橋渡しについての妥当性	C	C		C	B	C	C
(1) 事業化や橋渡しへの貢献については妥当か。							
①地質環境の調査技術	c	c	a	c	b	b	c
②工学技術	c	c	a	c	b	b	c
③安全評価	c	c	a	c	c	b	d
5. 研究開発マネジメント・体制等の妥当性							
(1) 研究開発計画は適切かつ妥当か。	b	a		b	b	b	b
(2) 研究開発者の事業体制は適切かつ妥当か。	b	b		a	b	b	b
(3) 変化への対応は妥当か。	a	c		b		b	c
(4) 研究の基盤整備は妥当か。	c	b		b	c(地質環境調査技術のみ)	b	c
6. 総合評価	B	B		B	A	B	B

分野間・機関間の連携に向けたプロジェクトの運営方針

会議体の種類と機能

・委員会

外部有識者（7名）、アドバイザー（NUMO 及 QST）、オブザーバ（ANRE）を加えた総勢 50 名におよぶ会議である。年 3 回開催され、最終回ではプロジェクトの評価も実施される。

・代表者会議

4 機関の代表者による会議、一堂に会するのは毎年 1, 2 回程度であるが、メール等で頻繁に情報を交換している。プロジェクト運営の方針決定や年度ごとの計画策定などを行う。

・連絡会議

各機関の幹部による会議、総勢 15 名程度であるが、毎年数回の会議を持つ。プロジェクトの進捗状況の確認や課題の整理、分野間連携のための情報整理・交換などを行っている。参考資料として、分野間連携の資料として作られた情報提供に関する取りまとめを添付する。

・全体会議

プロジェクトに関わるものが一堂に会する会議、毎年 1 回程度開催され、それぞれの成果を発表し合う会議。長時間に及ぶが、全体を理解する良い機会である。

		地質環境(地質)	地質環境(地下水)	工学技術	安全評価
今フェーズ	到達目標	<ul style="list-style-type: none"> ・隆起・侵食 ・(比較的変動が単調と考えられる地域での)沿岸部における陸域(三次元)隆起モデルの海域への外挿の例示 ・沿岸部の河川下刻量の評価、考えうる最大の深さ(隆起量+100m)まで河川下刻が進まないことの例示とその理由の考察 ・隆起・侵食評価のための年代測定技術の高度化 ・風化指標を重視した総合的段丘対比・編年手法 ・宇宙線生成核種による年代測定 ・(堆積物のルミネッセンス年代測定) ・海底地形に見られる隆起・侵食の指標となる可能性がある地形・地質の整理 ・断層活動 ・現状の技術の組合せによる調査・評価手法の提示 ・火成活動 ・沿岸部で調査を行うための手法改良と事例提示 ・自然事象全体 ・陸域・海域に跨る沿岸部における地殻変動様式(三次元モデル)の理解に向けた地質環境調査・評価手法の体系化 ・沿岸部を与えられた時に現状でどこまでできるかの試行実験 ・調査・評価フローの見直し 	<ul style="list-style-type: none"> ・地下水の長期安定性 ・全国の温泉などでの地下水年代測定データ ・地下水流動の概念モデル(幌延沿岸・新潟) ・地下水年代(現降水、水期涵養降水、現海水、化石海水)と地形・地質との関連性 	<p>本事業の工学技術の高度化開発においては、オーバーバック、緩衝材、その他のニアフィールド構成材料の劣化や変質に関する現象の把握等のため、平成28年度より各種の試験を実施しているが、平成28年度の試験開始時点において沿岸部で想定される地下水の種類やそれぞれの組成範囲等の情報が不足していたため、沿岸部における海水系地下水と降水系地下水の混合を想定し、人工海水及び人工海水の希釈水を試験溶液として使用している。今後、本事業の今期(第1期)の成果として、沿岸部における地下水に関するより詳細な情報が提示され则认为するが、試験溶液組成等の試験条件設定といった直接的な活用は次期(第2期)の課題とし、今期については現在実施している試験の条件の妥当性の確認に利用する。一方、工学技術の高度化開発として実施しているニアフィールド複合現象評価手法の開発においては、平成28年度の報告書で示された沿岸部の地下水の分類やその流動性に関する傾向を考慮した解析を平成29年度に実施する計画である</p>	
	課題	<ul style="list-style-type: none"> ・隆起・侵食 ・陸域の隆起量評価の応用問題 ・段丘の分布が少ない/無い沿岸域評価、少ない試料での効果的なデータ取得方法の整備 ・露頭の少ない段丘での調査方法、段丘上での簡易ボーリングでの試料採取方法の検討(特に効率的な実施箇所を選定) ・被覆層を大きく欠く段丘の対比・編年の方法(一部課題が残る) ・宇宙線核種年代手法の適用範囲の拡大、被覆層をもつ侵食段丘や段丘堆積物などへの適用 ・海域のデータに基づく、沿岸海域の隆起・侵食評価 ・シークエンス層序学(堆積環境)を用いた隆起・沈降量評価の検討 ・既往データの再解析に基づく検討(次フェーズで可能?) ・海上音波探査の実施(次々フェーズ以降?) ・海底堆積物の堆積年代測定(次々フェーズ以降?) ・より長期の隆起・沈降の運動傾向を対象とした調査・評価手法 ・年代測定技術の進展次第 ・隆起・沈降、堆積・侵食の類型化・様式化 	<ul style="list-style-type: none"> ・地下水の長期安定性 ・水期涵養降水や化石海水が存在する地点での詳細な調査 ・海水準変動などを考慮した地下水流動の長期変遷の評価 ・地下水環境が、現降水、水期涵養降水、現海水、化石海水の場合の人工バリア設計および安全評価を行い、現降水や現海水地点での処分実施可能性の検討 	<p>試験溶液組成等の試験条件設定といった直接的な活用</p>	
次フェーズ	到達目標				