平成30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 31 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 30 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	5
	2.1 沿岸部の自然現象に関する研究	5
	2.1.1 沿岸部における隆起・侵食に関する検討	5
	2.1.2 沿岸部における火成活動に関する検討	64
	2.2 沿岸部の地下水長期安定性に関わる研究	78
	2.2.1 沿岸部の地下水長期安定性評価技術の検討	78
	2.2.2 深部地下水年代測定の評価に関する地下水流動解析とデータベースの構築	. 129
	2.3 沿岸部の地質環境の情報整備	. 146
	2.3.1 背景と目的	. 146
	2.3.2 沿岸部地下水に係わる文献の整理	. 146
	2.3.3 沿岸部の地質環境情報の整理・集約	. 168
3.	沿岸部における工学技術の高度化開発	. 185
	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	. 186
	3.1.1 オーバーパック	. 186
	3.1.2 緩衝材	. 216
	3.1.3 セメント系材料	. 241
	3.1.4 ニアフィールド複合現象評価手法の開発	. 262
	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	
	3.2.1 グラウト設計および影響評価技術の開発	. 275
	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	. 292
4.	沿岸部における安全評価技術の高度化開発	. 307
	4.1 はじめに	. 307
	4.1.1 背景と目的	. 307
	4.1.2 実施内容	. 307
	4.2 評価の枠組みの整備	. 310
	4.3 核種移行モデル・パラメータ整備及び影響評価	
	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	
	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	. 333
	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	. 343
5.	おわりに	. 355

図 目 次

义	2.1 - 1	事例研究調査位置図(宮崎平野とその沿岸海域)	6
义	2.1-2	平面近似モデルの概念図	6
义	2.1-3	ボーリングなど調査位置図	7
义	2.1-4	日向市内の段丘対比・編年の再検討	8
义	2.1-5	平面近似モデル化の試行(平成 29 年度検討結果)	. 10
义	2.1-6	沿岸海域の沖積層下の地形・地質図(平成 29 年度検討結果)	11
义	2.1-7	宮崎層群における走向・傾斜の分布	. 12
义	2.1-8	検討事例範囲のうち海域における海上音波探査記録の再解析による地質平面図	₹13
义	2.1-9	複数の平面近似モデルによる不確実性の検討	. 15
义	2.1-10	各平面近似モデルから外挿された沿岸海域の隆起・沈降量	. 16
义	2.1-11	河川沿い地質断面図の例示	. 17
义	2.1-12	深度・面積分布と地形断面との関係	. 20
义	2.1-13	数値地形解析の例	
义	2.1-14	陸棚谷の分布	
义	2.1-15	数値地形解析の対象海域一覧	
义	2.1-16	浅海底の数値地形解析の例(石狩湾)	
义	2.1-17	浅海底の数値地形解析の例(三陸沿岸)	
义	2.1-18	投影断面図上における海成段丘と浅海底地形の分布例(三陸沖)	
义	2.1-19	投影断面図上における海成段丘と浅海底地形の分布例(房総沖)	
义	2.1-20	投影断面図上における海成段丘と浅海底地形の分布例(津軽海峡)	. 27
义	2.1-21	段丘礫(砂岩)断面の元素分布と測色値 (試料:MYZ20180802-02-5: c-	
		面)	
図		段丘礫(砂岩)断面の元素分布と測色値 (試料:MYZ20180613-13-9:c-M	
凶		段丘礫(溶結凝灰岩)断面の元素分布と測色値 (試料:MYZ20181122-01-	
		11 面)	
	2.1-24	21/7 (KE = C) (4 = IE/4)	
	2.1-25		
		新鮮部と風化部の間隙径分布の比較	
	2.1-27		
	2.1-28	, , , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	
	2.1-29		
	2.1-30	. ,,,, , =	
	2.1-31	— , , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	
	2.1-32		
	2.1-33		
	2.1-34		
	2.1-35		
	2.1-36		
凶	2.1-37	離水年代を 80ka (MIS 5a) と仮定した時の ¹⁰ Be 濃度の深度プロファイル	. 56

义	2.1 - 38	離水年代を 100ka (MIS 5c) と仮定した時の 10Be 濃度の深度プロファイル	. 56
义	2.1-39	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	. 65
図	2.1-40 図	(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	
図	2.1-41		
	2.1-42	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.	
	2.1-43	解析領域における地震基盤深度の深さ分布	
	2.1-44	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	
	2.1-45	震源再決定後の震央および震源分布の断面図	
	2.1-46	地震波トモグラフィ解析に用いた地震の震央分布	
図	2.1-47	各深度における P 波速度偏差の分布	
図	2.1-48	各深度における S 波速度偏差の分布	
図	2.1-49	堆積層厚の変化を考慮した解析により推定された各深度のポアソン比偏差の	
	布		
図	2.2-1	沿岸部の地下水長期安定性評価の概念図	. 78
义	2.2-2	調査位置図	. 79
义	2.2-3	DD-1 孔 1,143m の間隙水圧測定結果(下図)と潮汐変動(上図、気象庁 H	P)
			. 80
义	2.2-4	10月15日から測定終了までの潮位と等価淡水水頭の関係	
义	2.2-5	封圧採水容器からの試料採取状況	. 81
図	2.2-6	ヘキサダイアグラム(赤線は 10 倍)	. 83
図	2.2-7	水素・酸素同位体比の関係	. 84
义	2.2-8	炭素同位体(14C, 813C)と溶存無機炭素濃度の深度方向分布	. 85
义	2.2-9	Cl 濃度と ³⁶ Cl/Cl の深度方向分布	. 85
义	2.2-10	4He 濃度と 3He/4He の深度方向分布	. 86
図	2.2-11	DD-1 孔 1,143 m 区間の pH-Eh ダイヤグラム	. 87
図	2.2-12	DD-1 孔 943m 区間(2018 年度)の pH-Eh ダイヤグラム	. 89
図	2.2-13	コア写真	. 91
义	2.2-14	ケーシングプログラムの概要	. 91
义	2.2-15	掘削作業フロー図	. 92
义	2.2-16	*, * * * * * * * * * * * * * * * * * *	
义	2.2-17	原位置採水方法の概略図	. 94
义	2.2-18	水質モニタリング結果	. 96
义	2.2-19	DD-4 孔 350 m 区間の pH-Eh ダイヤグラム	. 98
义	2.2-20		
义	2.2-21	深部地下水より分離したガス中の 02 濃度と大気コンタミネーション率の関係	系
义	2.2-22	· — · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
図	2.2-23	, = , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	
図	2.2-24	水-中空糸膜間の接触時間と DO 抽出効率	103
図	2.2 - 25	希ガスの拡散係数と希ガス抽出効率の関係	103
义	2.2-26	沿岸部での地下水分布の概念図	106
図	2.2-27	地下水年代検討フロー	106

义	2.2 - 28	ヘキサダイアグラム(赤線は 10 倍にした濃度)	108
図	2.2-29	水素酸素同位体比の関係	109
义	2.2-30	¹⁴ C 濃度と δ ¹³ C の関係	110
义	2.2-31	14C 濃度と Cl 濃度の関係および地下水の区分結果	111
义	2.2-32	36Cl/Cl 濃度と Cl 濃度の関係および地下水の区分結果	112
义	2.2-33	⁴ He 濃度と ³ He/ ⁴ He の関係	113
义	2.2-34	Cl 濃度と 4He 濃度の関係	114
図	2.2-35	129I/127I と Cl 濃度の関係	114
図	2.2-36	129]/127] と 濃度の関係	115
図	2.2-37	地下水の安定性評価の適用結果	116
図	2.2-38	各区分項目での作業イメージ(浜里 DD-1 孔を例として)	118
図	2.2-39	本事業で収集した地下水の水質組成および地下水年代の割合	122
义	2.2-40	説明変数のレンジと群別散布図	123
义	2.2-41	3 つの地質環境モデルにおける地下水年代の割合	124
义	2.2-42	解析対象地域(55 地域)	130
义	2.2-43	地下水位観測地点	138
义	2.2-44	流量観測地点	141
义	2.2-45	解析フロー	142
义	2.2-46	境界条件の設定位置	143
义	2.3-1	形態素解析・時系列分析の流れ	147
义	2.3 - 2	形態素解析システム処理フローチャート	149
义	2.3-3	発行年別文献数	150
义	2.3 - 4	属性キーワード別出現数	150
図	2.3 - 5	地域関連文献 都道府県別出現数	151
义	2.3-6	地形第2階層キーワード別出現数	151
义	2.3-7	高頻度キーワード 年度別出現数	152
义	2.3-8	地盤調査第2階層キーワード別出現数	153
义	2.3-9	地盤調査関連文献 発行年別出現数	153
义	2.3-10	高頻度キーワード 年度別出現数	154
义	2.3-11	地盤調査第2階層キーワード別出現数	155
义	2.3-12	地盤調査関連文献 発行年別出現数	155
义	2.3-13	高頻度キーワード 年度別出現数	156
义	2.3-14	災害第3階層キーワード別出現数	157
义	2.3-15	災害関連文献 発行年別出現数	157
义	2.3-16	高頻度キーワード 年度別出現数	158
义	2.3-17	災害関連文献 都道府県別出現数	159
図	2.3-18	地域別出現数	159
义	2.3-19	地下水第2階層キーワード別出現数	160
図	2.3-20	地下水関連文献 発行年別出現数	160
図	2.3-21	高頻度キーワード 年度別出現数	161
図	2.3-22	地下水関連文献 都道府県別出現数	162
义	2.3-23	地域別出現数	162
図	2.3-24	地質環境情報の整理・集約の作業イメージ	168

図	2.3-25	研究結果の内容分類と ES カテゴリの分類・整理のイメージ	169
図	2.3-26	ES の分類区分に基づいたタスクの連携イメージ	170
図	2.3-27	ES カテゴリとタスクフロー(隆起・侵食)	
図	2.3-28	沿岸部の隆起・侵食における ES カテゴリと新規タスクの連携	173
図	2.3-29	形態素解析機能のイメージ	176
図	2.3-30	クローラ機能の実装イメージ	177
図	2.3-31	参考文献の引用の記載を対象にした正規表現の例	177
図	2.3-32	複合キーワードによる HP 及び Web ページ数の絞込み	178
図	2.3-33	カテゴリによるキーワードの絞込み効果	179
図	2.3-34	Geolis 検索実行の結果	181
図	2.3-35	国立国会図書館サーチ検索実行の結果	182
図	3.1-1	樹脂埋めした試験片の写真	187
図	3.1-2	試験カラムの模式図	187
図	3.1-3	試験セルの模式図	188
図	3.1-4	人工海水中での分極測定結果	189
义	3.1-5	人工海水 10 倍希釈溶液中での分極測定結果	190
図	3.1-6	試験カラムの模式図	191
図	3.1-7	浸漬試験後の試験片の外観	192
図	3.1-8	試験後試験片表面の X 線回折結果	193
図	3.1-9	平均腐食速度の経時変化	194
図	3.1-10	平均腐食量の経時変化	194
図	3.1-11	水素抽出曲線の一例	195
図	3.1-12	SSRT 試験片の形状・寸法	196
図	3.1-13	緩衝材共存下での SSRT 試験用カラムの模式図	196
図	3.1-14	人工海水中における応力-歪み線図	198
図	3.1-15	100 倍希釈人工海水中における応力・歪み線図 左:人工海水単独、右:緩衝	材
	共存.		198
义	3.1-16	最大応力比の電位依存性	198
図	3.1-17	伸び比の電位依存性	199
义	3.1-18	絞り比の電位依存性	199
义	3.1-19	試験後試験片の SEM 観察結果例(人工海水 緩衝材共存系 -800mV vs	
	SCE)		200
図	3.1-20	定電位分極試験用試験片	202
図	3.1-21	定電位保持試験装置構成	203
図	3.1-22	定電位保持試験装置外観写真	203
図	3.1-23	動電位分極曲線による保持電位の設定(1/3)	204
図	3.1-24	動電位分極曲線による保持電位の設定 (2/3)	205
図	3.1-25	動電位分極曲線による保持電位の設定 (3/3)	206
図	3.1-26	定電位分極の結果の一例(溶液 7、試験片 No.RYA20)	207
図	3.1-27	腐食形態と水質の関係	208
図	3.1-28	試験前後の溶液の pH 変化	208
図	3.1-29		
図	3 1-30	腐食電位と溶液組成の関係	209

义	3.1-31	形状計測の範囲と基準点の位置	210
図	3.1-32	腐食試験後の三次元形状計測結果の例(溶液 4)	210
义	3.1-33	Grooving Factor α の算出の考え方	.211
义	3.1-34	溶液組成による溶接部の選択的な腐食の度合い(○:従来材、•:改良材)	212
図	3.1 - 35	Grooving factor αと水質の関係	213
図	3.1-36	Grooving factor αと溶液組成の関係	214
义	3.1-37	三軸試験装置概略	218
义	3.1-38	有効応力経路	219
义	3.1-39	応力・ひずみ関係	219
义	3.1-40	有効応力経路の再現解析結果	220
义	3.1-41	応力・ひずみ関係の再現解析結果	220
义	3.1-42	一次元浸潤速度試験装置概略図	224
义	3.1-43	液種の違いによる飽和フロントの経時変化の差異	225
义	3.1-44	浸潤・飽和フロントの経時変化	227
义	3.1-45	透水係数の経時変化	228
义	3.1-46	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	229
义	3.1 - 47	直列膨潤量試験の膨潤圧の経時変化	230
义	3.1-48	直列膨潤量試験の膨潤量の経時変化	230
义	3.1-49	直列膨潤量試験の乾燥密度の経時変化の既往の研究 (原環センター, 2018)	と
	の比較		231
义	3.1-50	一次元浸潤試験で得られた透水係数の経時変化	231
义	3.1-51	直列膨潤量試験から得られた残留乾燥密度分布による透水係数範囲	232
义	3.1-52	二次元士槽試験のイメージ(ブロック定置+ペレット充填ケース)	232
义	3.1-53	二次元土槽試験状況の経時変化	234
义	3.1-54	解体時の乾燥密度分布(水平断面:全体高さ 200 mm)	235
义	3.1-55	緩衝材の流出試験の結果(通水量 100 mL/min)	
义	3.1-56	陽イオン交換分配係数のイオン強度依存性 (NH ₄ -KF)	238
义	3.1-57	OPC(左図)及び HFSC(右図)硬化体粉砕物浸漬実験の液相 の pH 及び	
	要元素	の分析結果	246
义	3.1-58	OPC(左図)及び HFSC(右図)硬化体粉砕物浸漬実験の液相 の pH 及び	主
	要元素	の分析結果とモデル計算値との比較	248
义	3.1-59	浸漬試験体の浸漬方法	250
义	3.1-60	EPMA による試料断面の元素組成分析の結果(浸漬期間 14 ヶ月)	251
义	3.1-61	浸漬期間 4 ヶ月と 14 ヶ月の接液面近傍の組成分布の比較	252
义	3.1-62	${ m EPMA}$ 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 $14~$ ヶ月)
义	3.1-63	接液面からの距離と Ca、Cl の濃度及びビッカース硬度の関係の例 (浸漬其	朋間
)	
図	3.1-64	空隙率とビッカース硬度の関係(浸漬期間 14 ヶ月)	255
		セメント硬化体中での物質移動と相平衡の概念図	
义	3.1-66	Cl·の浸透解析結果の例(OPC コンクリート、人工海水浸漬)	257
図	3.1-67	経過時間と鉄筋腐食限界になる深さの関係の例(OPC コンクリート)	258
図	3 1-68	経過時間と鉄筋腐食限界になる深さの関係の例 (FAC コンクリート)	258

义	3.1-69	経過時間と鉄筋腐食限界になる深さの関係の例(BFSC コンクリート)	258
図	3.1-70	経過時間と鉄筋腐食限界になる深さの関係の例(吹付けコンクリート)	259
図	3.1-71	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	263
図	3.1-72	緩衝材の止水性が失われる状況に至るシナリオのストーリーボードによる	整理
	結果	(岩盤-支保境界部分)	265
図	3.1-73	緩衝材の止水性が失われる状況に至るシナリオのストーリーボードによる	整理
	結果	(支保-緩衝材境界部分)	266
図	3.1-74	緩衝材の止水性が失われる状況に至るシナリオのストーリーボードによる	整理
	結果	(坑道スケール)	267
図	3.1-75	水理解析の解析モデルの概念図	269
図	3.1-76	解析開始時点(処分場閉鎖直後)の鉱物組成の分布	271
図	3.1-77	ケース1の解析により求められた鉱物組成分布(左:1万年後、右:10万	5年
	後).		272
図	3.1-78	ケース2の解析により求められた鉱物組成分布(左:13万年後、右:16	万年
	後).		272
図	3.2 - 1	工学技術の枠内で扱われる処分システムの成立性	274
図	3.2 - 2	溶液型グラウトとその配合	276
図	3.2-3	海水適応グラウトの一軸圧縮強度の変化	278
図	3.2-4	海水硬化促進グラウトの一軸圧縮強度の変化	278
図	3.2-5	海水適応グラウトのシリカ、ナトリウムイオン、カリウムイオンの溶出量の	の変化
			280
図	3.2-6	海水硬化促進グラウトのシリカ、ナトリウムイオン、カリウムイオンの溶と	出量の
	変化.		281
図	3.2-7	平行平板装置	283
図	3.2-8	浸透性確認試験の結果の一例	285
			400
	3.2-9	浸透性確認試験の結果(浸透距離)	
図	3.2-9 3.2-10	浸透性確認試験の結果(浸透距離)	285
図図			285 286
図図図図	3.2-10 3.2-11	3 種類のグラウトに対する浸透距離結果	285 286 290
図図図図図図	3.2-10 3.2-11	3種類のグラウトに対する浸透距離結果 地質水理環境の状態に応じた各国の手法を取り入れたグラウト手法(案) 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	285 286 290 292
図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図	3.2-10 3.2-11 3.2-12	3種類のグラウトに対する浸透距離結果 地質水理環境の状態に応じた各国の手法を取り入れたグラウト手法(案) 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 想定されるニアフィールド領域の構成要素例	285 286 290 292 293
図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図	3.2-10 3.2-11 3.2-12 3.2-13 3.2-14	3種類のグラウトに対する浸透距離結果 地質水理環境の状態に応じた各国の手法を取り入れたグラウト手法(案) 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 想定されるニアフィールド領域の構成要素例	285 286 290 292 293 比要件
図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図	3.2-10 3.2-11 3.2-12 3.2-13 3.2-14	3種類のグラウトに対する浸透距離結果	285 286 290 292 293 比要件 295
図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図図	3.2-10 3.2-11 3.2-12 3.2-13 3.2-14 並び	3種類のグラウトに対する浸透距離結果	285 286 290 292 293 毕要件 295
	3.2-10 3.2-11 3.2-12 3.2-13 3.2-14 並び 3.2-15	3種類のグラウトに対する浸透距離結果	285 286 290 292 293 と要件 295 298
	3.2-10 3.2-11 3.2-12 3.2-13 3.2-14 並び 3.2-15 3.2-16	3種類のグラウトに対する浸透距離結果	285 286 290 292 293 毕要件 295 298 299
	3.2-10 3.2-11 3.2-12 3.2-13 3.2-14 並びい 3.2-15 3.2-16 3.2-17 3.2-18	3種類のグラウトに対する浸透距離結果	285 286 290 292 293 を要件 295 298 299
	3.2-10 3.2-11 3.2-12 3.2-13 3.2-14 並びい 3.2-15 3.2-16 3.2-17 3.2-18	3種類のグラウトに対する浸透距離結果	285 286 290 292 293 世要件 295 298 299 モデ 300
	3.2-10 3.2-11 3.2-12 3.2-13 3.2-14 並びい 3.2-15 3.2-16 3.2-17 3.2-18	3種類のグラウトに対する浸透距離結果	285 286 290 292 293 を要件 295 298 299 モデ 300
	3.2-10 3.2-11 3.2-12 3.2-13 3.2-14 並びい 3.2-15 3.2-16 3.2-17 3.2-18 ル) . 3.2-19	3種類のグラウトに対する浸透距離結果	285 286 290 292 293 世要件 295 299 モデ 300 301
	3.2-10 3.2-11 3.2-12 3.2-13 3.2-14 並びい 3.2-15 3.2-16 3.2-17 3.2-18 ル). 3.2-19 3.2-20	3種類のグラウトに対する浸透距離結果	285 286 290 292 293 を要件 295 298 299 モデ 300 301 302
	3.2-10 3.2-11 3.2-12 3.2-13 3.2-14 並びい 3.2-15 3.2-16 3.2-17 3.2-18 ル)、 3.2-19 3.2-20 3.2-21	3種類のグラウトに対する浸透距離結果	285 286 290 292 293 世要件 295 295 299 モデ 300 301 302 303

図	4.2 - 1	性能評価の観点からの分野間の連携の手法・手順の概念	311
図	4.2-2	性能評価における入力-モデルー出力の関係のイメージ	313
図	4.3-1	広域スケールの地形を考慮した鉛直2次元の地形モデル概念図	320
図	4.3-2	塩水濃度の初期条件の例と評価点	322
図	4.3-3	各評価点の地下水流速と塩分濃度比の経時変化:透水係数の異なるケース間の	つ比
	較		322
図	4.3-4	各評価点の地下水流速と塩分濃度比の経時変化:異なるマトリクス拡散特性間	引
	のケー	-ス間の比較	323
図	4.3-5	各評価点の地下水流速と塩分濃度比の経時変化:陸域の地形勾配を大きくした	こケ
	ース		324
図	4.3-6	処分場周辺の地下水流速と塩分濃度比の経時変化パターンの例	325
図	4.3-7	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	328
図	4.3-8	三次元亀裂ネットワークモデル外観図と境界条件概念図	328
図	4.3-9	ブロックスケールを対象とした核種移行解析結果の例(パターン1の場合)	329
図	4.3-10	ブロックスケールを対象とした核種移行解析結果の例(パターン 2 の場合)	
			329
図	4.3-11	ブロックスケールを対象とした核種移行解析結果の例(パターン3の場合)	
			330
図	4.3-12	ブロックスケールを対象とした核種移行解析結果の例(パターン 4 の場合)	
			330
図	4.3-13	Na 型モンモリロナイトに対する Ca の収着データ	335
図	4.3-14	Na 型モンモリロナイトに対する Sr の収着データ	335
図	4.3-15	イオン強度と Ca 及び Sr の選択係数の関係	335
図	4.3-16	Na 型モンモリロナイトに対する Ni の収着データ	336
図	4.3-17	モデルによる再現結果	337
図	4.3-18	イオン強度と Ni の選択係数の関係	338
図	4.3-19	共存イオンとの競合を考慮したモデルによる各文献データの再現結果	338
図	4.3-20	Na 型モンモリロナイトに対する Ni の収着データ	339
図	4.3-21	Na 型モンモリロナイトに対する Ni の収着データの共存 Ca 濃度依存性	340
図	4.3-22	希釈した人工海水中に分散させたモンモリロナイトコロイドの 平均粒径の眼	寺間
	変化		345
図	4.3-23	NaCl 溶液中に分散させた粘土鉱物コロイドの平均粒径の時間変化	346
図	4.3-24	溶存腐植物質の UV-Vis スペクトル	348
		溶存腐植物質の SEC-UV クロマトグラム	
図	4.3-26	沿岸部の深部地下水および河川水から抽出した腐植物質に対する Ni および	Pb
	の条件	片付き錯生成定数.	349
図	4 3-27	環境因子と微生物群集組成データを用いた CCA 結果の一例	351

表 目 次

表	2.1-1	宮崎平野の段丘対比・編年(平成 29 年度検討結果を更新)	9
表	2.1-2	海陸統合 DEM の更新に際して使用した 地形デジタルデータの一覧	. 19
表	2.1-3	投影断面図の作成に使用したデータ	. 21
表	2.1-4	水浸法による段丘礫の有効間隙率	. 35
表	2.1-5	XRD による段丘礫の鉱物組成	. 37
表	2.1-6	ポロシメータ測定による段丘礫の間隙率	. 38
表	2.1-7	XRD による段丘被覆層の鉱物組成	. 42
表	2.1-8	使用した試料の整粒後重量・フッ酸処理のサイクル数および処理後の重量 ・	
	Al_2O_3	の含有量	. 53
表	2.1-9	分析結果一覧	. 55
表	2.1-10	事例対象地域における珪藻および CNS 分析結果	. 57
表	2.1-11	マグマや深部流体に関する地球物理学的手法の概要	. 65
表	2.2 - 1	DD-1 孔 $1,143$ m 水質分析結果(採水日 2018 年 11 月 3 日 : 地上)	. 82
表	2.2 - 2	DD-1 孔 1,143 m の pH、Eh の測定結果 ならびに主な溶存ガスの分析結果	. 86
表	2.2 - 3	pH、Eh の測定結果と計算結果の比較	. 87
表	2.2 - 4	DD-1 孔 943 m 区間の pH、Eh の測定結果 ならびに溶存ガスの分析結果	. 88
表	2.2 - 5	pH、Eh の測定結果と計算結果の比較	. 88
表	2.2-6	水位補正に関するデータ	. 94
表	2.2 - 7	DD-4 孔 350 m 区間の物理化学パラメータの測定結果 ならびに溶存ガスの分	析
	結果.		. 97
表	2.2-8	捕集したガス成分(in unit %)	100
表	2.2-9	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	
表	2.2-10	システマティック区分結果の一覧表	
表	2.2-11	数量化Ⅱ類の解析に用いた説明変数とカテゴリースコア	123
表	2.2-12	全国の地下水盆(83 地域)(越谷ほか、2011)	
表	2.2-13		
表	2.2-14	参考文献における条件・結果一覧表 (その 2)	133
	2.2-15	参考文献における条件・結果一覧表 (その3)	
表	2.2-16	参考文献における条件・結果一覧表 (その4)	135
表	2.2 - 17	参考文献における条件・結果一覧表 (その 5)	136
表	2.2-18		
表	2.2-19	3=21-1-1-1	
表	2.2-20	モデルに与えた透水係数の初期値(1)	144
		モデルに与えた透水係数の初期値 (2)	
表	2.3 - 1	キーワード・トピック数	148
表	2.3-2	キーワード階層例	148
表	2.3-3	地盤調査手法 地域別出現数	
表	2.3-4	地盤調査手法 地形、地質、環境別出現数	166
表	2 3-5	地盤調查手法 地域別出現数	167

表	2.3-6	研究結果の調査で実施した分類の定義	168
表	2.3-7	平成 29 年度報告書の対象範囲と ES カテゴリ	170
表	2.3-8	整理票の項目	173
表	2.3-9	ES カテゴリの整理票の例	174
表	2.3-10	データ連携の試行パターン	176
表	2.3-11	キーワード選択の検討結果	178
表	2.3 - 12	汎用ラベルにおけるキーワードの検索結果	180
表	2.3 - 13	正規表現によるキーワードの抽出と Geolis 及び国立国会図書館の検索結果.	181
表	2.3 - 14	管理方策の有効性評価項目	182
表	2.3 - 15	管理方策の有効性評価	183
表	3.1-1	試験などに関する全体計画	186
表	3.1-2	人工海水の組成	188
表	3.1-3	分極曲線から Tafel 外挿法で推定した初期腐食速度(単位:mm/y)	190
表	3.1-4	試験片の重量変化から算出した平均腐食速度	193
表	3.1-5	水素抽出曲線より求めた拡散性水素濃度	195
表	3.1-6	応力腐食割れ試験条件	196
表	3.1-7	腐食試験の溶液条件(mol/L)	
表	3.1-8	人工海水の組成	217
表	3.1-9	試験条件	218
表	3.1-10	圧密前B値計測結果	218
表	3.1-11	圧密後B値計測結果	219
表	3.1-12	昨年度した修正 Cam-clay モデルのパラメータ	220
表	3.1-13	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	222
表	3.1-14	使用した液種	
表	3.1-15	ASTM D1141 人工海水の組成	
表	3.1-16	浸潤速度取得試験ケース一覧	224
表	3.1 - 17	浸潤速度測定試験結果のまとめ	228
	3.1-18	陽イオン分配係数とイオン強度 (NH ₄ -KF)	
表	3.1-19	セメントペースト硬化体粉砕物の浸漬条件(NaCl 溶液)	242
表	3.1-20	OPC 硬化体粉砕物浸漬実験の固相の同定結果	244
	3.1-21		
表	3.1-22	塩水環境下におけるセメント系材料の機械的強度変化に関する検討の実施工	.程
			249
表	3.1-23	浸漬試験体の条件	250
表	3.1 - 24	浸漬試験条件	250
表	3.1 - 25		
表	3.1-26	連成解析の解析ケース	
表	3.1-27	初期状態における人工バリア材料と岩盤の透水性	269
表	3.1-28		
表	3.1-29		
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	270
表	3.2-1	海水適応グラウトの基本配合	276
表	3.2-2	海水硬化促進グラウトの基本配合	276

表	3.2 - 3	溶液型グラウト材料の物性値	282
表	3.2 - 4	浸透性確認試験の試験ケース	283
表	3.2 - 5	浸透性確認試験の試験条件	283
表	3.2-6	ワークショップ参加者一覧	287
表	3.2-7	ワークショップのプログラム	287
表	3.2-8	物性值一覧	300
表	3.2-9	各ケースの水理解析条件	301
表	3.2-10	塩水浸漬試験と地下水流動解析結果における流速の比較	304
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 (産総研,原子力機構,	原
	環セン	/ター, 電中研, 2018)	310
表	4.3-1	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	321
表	4.3 - 2	地下水環境変化の評価に向けた感度解析ケース	321
表	4.3-3	地下水流動解析の境界条件設定値	321
表	4.3-4	地下水環境の変化パターン分類例	325
表	4.3-5	人工海水組成	344

1. はじめに

1.1 本事業の背景と目的

本事業は、平成30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」という)、日本原子力研究開発機構(以下、「原子力機構」という)、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」という)、電力中央研究所(以下、「電中研」という)の四機関が共同で受託したものである。

本事業は、平成 27 年度からの四ヵ年の計画として着手され、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相互活用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)。引き続き平成 29 年度には、分野間の連携を強化すべく、各分野からの情報提供や他分野に対する要求事項などを共有しつつ研究を継続した(産総研,原子力機構,原環センター,電中研,2018)。最終年度に当たる平成 30 年度には、分野間並びに機関間の連携をふまえつつ、手法をシステム化することを目途とし、実施主体への効率的かつ適正な技術移転方法や若手人材の育成に貢献する方法についても考慮に含めた。

高レベル放射性廃棄物等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。

このような経緯を経て、平成 29 年 4 月に「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(地層処分技術 WG, 2017)、同年 7 月には「科学的特性マップ」が公表された(資源エネルギー庁, 2017)。

一方で、これらのとりまとめにおいて、地層処分事業の具体的に進めていくとの観点から、 引き続き技術の高度化に取り組み、信頼性をさらに高めていくことが重要であるとの指摘が なされ、高度化にあたっては、地質環境の調査・評価技術、工学的対策技術、安全評価技術の それぞれの観点から、「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など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。

このような状況を踏まえ、本事業では、わが国における沿岸部固有の環境を念頭に置き、概要調査段階で必要となる地質環境の調査・工学設計・安全評価技術の分野について、四つの研究機関がそれぞれ有している専門的な知識や経験などを効果的に投入し、技術開発に取り組むこととした。さらに、四つの研究機関の専門知識や経験などを分野間で相互補完的に活用し、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期待できるとともに、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が可能となる。このような取り組みをとおして、地層処分システム全体としての成立性や性能を示すなど、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。四ヵ年計画の最終年度となる本年度では、実施主体である原子力発電環境整備機構(以下、「原環機構」という)への技術移転を念頭に置き、成果の取りまとめを行った。

1.2 平成 30 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 30 年度は 4 年目となる。平成 30 年度は、平成 27 年度に整理した課題および平成 28、29 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
 - ・人工バリア材料など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

各項目の具体的な取り組み課題は;

(1) 地質環境調査技術

・沿岸部の自然現象に関する研究:

隆起・侵食に関する検討において、平成 30 年度には、平成 29 年度に実施した地形・地質調査並びに要素技術開発を継続し、沿岸部における隆起・侵食評価手法、海域の隆起・侵食評価指標、要素技術開発について、最終年度としての成果取りまとめと課題の整理を行った。また、火成活動に関する検討においては、沿岸部特有の調査・観測環境により想定され得る課題(地下深部構造推定結果の空間分解能や信頼性の低下などに対する調査手法の高度化)に関する検討を引き続き行った。

・沿岸部の地下水長期安定性に関わる研究: 地下水長期安定性評価技術の検討として、平成30年度は、これまでの結果を踏まえて、 さらに深部地下水の採水調査を行い、水質・地下水年代の調査、地化学特性データの充実を図り、これまでに得られた結果を整理して、地下水の流動性や地化学特性と地形・地質などとの相関を検討するとともに、化石海水や氷期に涵養した地下水の残留要因を検討し、これまでの調査結果を踏まえて、沿岸部地下水の長期安定性の評価を実施した。また、地質環境の調査・解析・評価技術の検討として、沿岸部の深層地下水に関する観測と解析の範囲を広げつつ継続し、列島各地の安定的な深層地下水の領域を把握できるよう調査並びにデータを充実させた。

・沿岸部の地質環境の情報整備:

平成 30 年度には、データマイニング手法を用いて、地域ごとあるいは地質や地形ごとの調査方法、地域の特性などを関連付けるキーワードの抽出を行い、当該事業に対する課題の抽出を行い(文献分析研究)、これを地域ごとや年代ごとにまとめた。さらに、収集・整理した沿岸部の地質環境情報に関する課題を明確化するとともに、一元的に管理するシステムを構築し、当該事業で得られた情報を入力・管理した。

(2) 沿岸部における工学技術の高度化開発

・人工バリア材料などに関する劣化や変質に関する現象の把握:

ニアフィールドを構成する各要素の長期的な機能・性能に及ぼす塩水の影響を把握し、沿岸部を想定した核種移行評価における場の設定や、人工バリアなどの地下構成要素に関する設計へのフィードバックに資することを目的として、ニアフィールドを構成する構成要素(オーバーパック、緩衝材、左記以外のニアフィールド構成材料)に関する各種特性などのデータ拡充や変遷挙動などの評価手法の高度化について、閉鎖後の長期挙動評価への反映、及び設計や施工などのエンジニアリングや操業期間中の安全確保への反映、の二つの視点を念頭に調査、検討を進めた。

・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:

グラウト設計及び影響評価技術の開発として、海水条件下での溶液型グラウト特性データ(長期安定性)の取得およびグラウト設計技術の適用性・影響を評価し、得られた成果を踏まえて、過去の資源エネルギー庁委託事業「地下坑道施工技術高度化開発」で作成したガイドラインおよびグラウトデータベースを更新した。また、ニアフィールド領域を対象として、処分システムを構成するニアフィールド領域の地下構成材の各要素が、建設・操業から閉鎖後の再冠水に至るまでの擾乱や変遷の影響、対策効果を見込んだうえで、閉鎖後長期の安全評価が期待する性能を達成することを示すための手法の構築に向けて、手法や体系の検討を行うとともに、そこで利用可能な水理解析ツールの適用性などの確認を進めた。

(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:

平成 29 年度に開始した、核種移行評価と生活圏評価のそれぞれの評価内容(評価シナリオ・解析ケースなど)と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(モデル化方法など)の分析・整備を継続・拡充した。また、それらに基づき、利用可能な情報に応じた核種移行評価と生活圏評価のそれぞれの全体的なイメージについて、現段階で想定されるものを例示するとともに、引き続き取り組むべき技術的課題を整理した。

・核種移行モデル・パラメータ整備及び影響評価

平成 29 年度に実施した、沿岸部固有の場の特徴を反映した核種移行評価に係るモデル・パラメータの整備を継続するとともに、現段階での技術レベル、引き続き取り組むべき技術的課題を整理した。具体的には、海進・海退の影響を受けた地下水流動状況や地下水化学などの変化の評価手法については、評価の試行と最新情報の収集・整備などを継続・拡充するとともに、それに基づき、利用可能な情報に応じた現象理解の高度化や核種移行評価へ

の反映のイメージと方法及び課題などについて、現段階で想定されるものを整理した。核種の収着、コロイドの安定性とその影響、有機物・微生物の存在量・組成などの特性とその影響などについては、塩濃度などの地下水組成やその変化などの影響を評価するための基盤情報としてのデータ取得と最新情報の収集・整備を継続するとともに、それに基づき、利用可能な情報に応じた核種移行に係る現象理解やパラメータ設定への反映のイメージと方法及び課題などについて、現段階で想定されるものを例示した。

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。また最終年度に当たる当該年度は、毎月の進捗状況を月報にまとめ資工庁廃対課とも密に連携を図ることを心がけた。

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,591p,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,393p,2018.
- 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

本実施項目は平成28年度から実施しており、これまで、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、要素技術の検討を進めている。

沿岸域における隆起・侵食の検討では、これまでに、主に地形学的な手法により構築した陸域における隆起・沈降傾向(隆起モデル)を沿岸海域に外挿する方法(以下、「外挿法」という)の検討として、宮崎平野の事例研究を実施し、外挿法を試行した。併せて、沿岸海域における下刻侵食の深さについての評価手法の検討を行った。平成 30 年度は、引き続き宮崎平野での事例研究を継続し、成果の取りまとめを行なう。

海底地形の地形判読に基づく隆起・侵食評価手法の検討では、これまでに、地形判読等から大陸棚を中心とした沿岸部海域の地形学的特徴を整理した。平成30年度は、平成29年度から実施している沿岸海底に見られる段丘上の地形(以下、「海底段丘」という)の地形学的調査をさらに推し進め、海底段丘に関わる情報を使った隆起量・侵食量の見積もり方法を検討し、成果を取りまとめる。

要素技術の検討としては、これまでに、地形変化シミュレーション技術の高度化、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を実施してきた。平成 30 年度は、後二者を継続し、事例研究を蓄積するとともに成果の取りまとめを行なう。

(2) 実施内容

1) 沿岸域における隆起・侵食の検討

1) 概要

本年度は、平成 29 年度に実施した宮崎平野における後期更新世以降の隆起・侵食についての事例研究を継続した(図 2.1-1)。陸域の後期更新世の平均隆起速度分布から、一方向への傾動隆起モデルを構築し、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。このモデルは、最も単純な隆起モデルの一つであり、隆起量の空間分布が一次式、すなわち、平面・平板で表現されることから、ここではこれらを平面近似モデルと呼ぶ(図 2.1-2)。その結果、主な課題の一つとして、隆起モデルの構築に用いるデータセットの違いによる不確実性、具体的には、複数の作業仮説/隆起モデルの絞り込みが挙げられた。平成 30 年度は、この解決方策として、野外調査等によるデータの拡充、基盤の地質構造のモデルへの反映に取り組み、これらを織り込んで、モデルの絞り込みと外挿法の不確実性について検討した。併せて、隆起量評価を踏まえた沿岸海域での下刻侵食量の見積もり・評価を行なった。

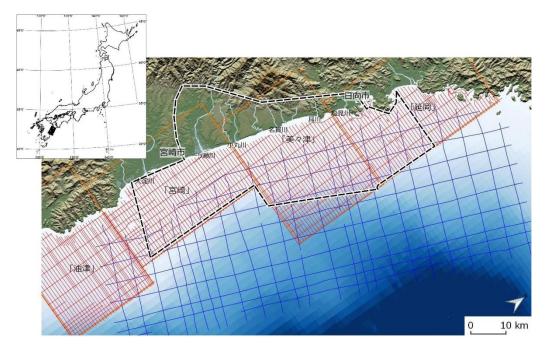


図 2.1-1 事例研究調査位置図(宮崎平野とその沿岸海域)

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」、赤線:沿岸の海の基本図調 査における海上音波探査測線、青線:旧地質調査所による海上音波探査測線(GH83-1)

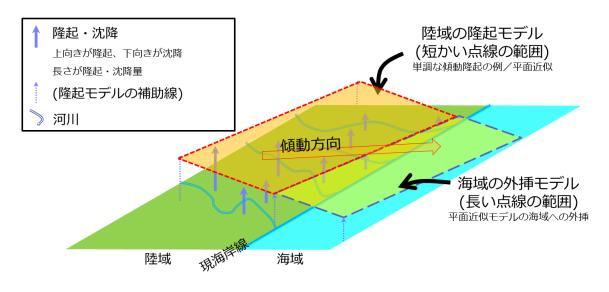


図 2.1-2 平面近似モデルの概念図

② 野外調査などによるデータの拡充と隆起モデル(平面近似モデル)の構築

宮崎平野の事例研究地域では、概ねその中央を東西に流れる名貫川を境に、南部に比べて北部で段丘の対比・編年に関わる情報が少なくなる。特に、日向市内では、露頭が極めて少なく、先行研究の知見の検証、新たな地質情報の獲得が難しかった。このため、ボーリング掘削並びにピット掘削による地質調査を4箇所で実施した(図 2.1-3)。また、1箇所ではあるが、今年度の地表踏査において、新たに段丘の対比・編年に有効な情報が得られた露頭を見出し、観察並びに露

頭試料の室内分析を実施した。これらの調査結果の詳細は、Appendix I に示した。

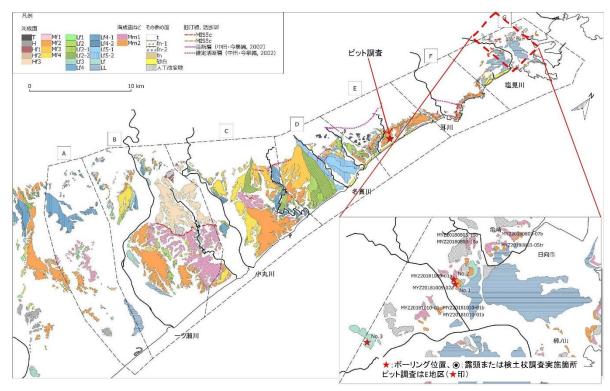


図 2.1-3 ボーリングなど調査位置図

その結果、先行研究(小池・町田、2001 など)により海洋酸素同位体ステージ(Marine Isotpe Stage;以下、「MIS」という)5e(約 12.5 万年前)ならびに MIS5c(約 10 万年前)と記載された日向市内に分布する海成・河成段丘の対比・編年について、先行研究の見解(表 2.1-1)を修正するようなデータは得られなかった(図 2.1-4)。詳細は Appndix I に譲るとして、ここでは要点のみ記す。

本研究では、長岡 (1984) などが日向市街地で三財原面とした段丘を Mm1 面と Mm2 面に細分した。長岡 (1984) が記載しているローム層を介して阿多テフラ (Ata、10.5~11 万年前に降下) に覆われる日向市亀崎の露頭位置は Mm1 面上と考えられる。一方、本研究で実施できたボーリング掘削地点 (No.1 孔, No.2 孔) は 2 つとも Mm2 面上である。

No.1 孔と No.2 孔では、段丘を構成する地質に違いが見られる。No.1 孔では、基盤岩(泥岩)とローム層の間は約 $1.5\,\mathrm{m}$ 厚の礫混じりのシルト層(一部粘土質)である。これに対し、No.2 孔では、基盤岩とローム層の間に、下位から、層厚約 $2.5\,\mathrm{m}$ の礫層、約 $2.3\,\mathrm{m}$ のシルト・砂が分布する。つまり、基盤に約 $4\,\mathrm{m}$ の凹凸があり、これを主に礫層が埋めている。可能性としては、この程度の凹凸は現在の海岸でも見られることから、凹凸を海浜礫が埋めたものと考えることができる。また、河口に近いので、河口性の段丘である可能性もある。いずれにせよ、 $2\,\mathrm{m}$ 本のボーリングの層相だけでは判断し難い。

一方、火山灰については、No.1 孔及び No.2 孔に共通性がある。シルトあるいは砂層の上部から鬼界葛原テフラ (K-Tz、9.5 万年前頃降下)が、ローム層の最下部付近から阿蘇-4 テフラ (Aso-4、8.5-9 万年前に降下)がそれぞれ検出されている。シルト・砂・礫層中に阿多テフラは見いだせていない。

これらのことから、Mm2 面は、その成因に不確実なところが小さくないが、K-Tz、Aso-4 が

降下した頃には、まだ完全な離水に至っていない、あるいは離水直後であったと推定され、段丘が離水した年代は9万年前頃、海洋酸素同位体ステージでいえば、MIS5cから MIS5bにかけてと考えられる。なお、ここに記した火山灰の略号と降下年代は、町田・新井(2003)による。

したがって、長岡 (1986, 2010) が阿多テフラに覆われると記載した段丘は、MIS5c-5b の段丘の一つ高位ということになり、これを MIS5e と見做すことには合理性があると考える。

以上のことから、長岡らの先行研究の段丘対比・編年を昨年度に引き続き踏襲する。そして、 これらの基礎データセットにより構築される陸域の隆起量分布、平面近似の隆起モデルは基本的 に修正しない。

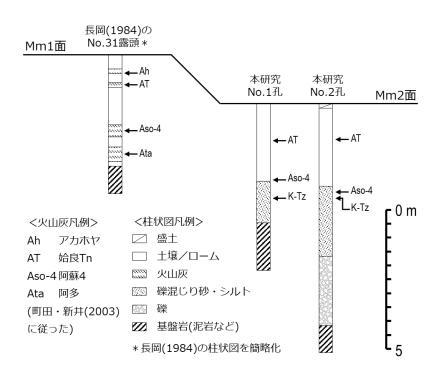


図 2.1-4 日向市内の段丘対比・編年の再検討

長岡の一連の研究における日向市街地の三財原段丘を2つの段丘、Mm1と Mm2 に細分し(図 2.1-3)、Mm2 段丘面上でボーリング調査を実施した。長岡 (1984) の地質記載と共に、ボーリング柱状図を示す。

表 2.1-1 宮崎平野の段丘対比・編年(平成29年度検討結果を更新)

+54	机二两小块物	各地域における細分						
大区分	段丘面の特徴	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(野尻) b-Hf3(茶臼原)	c-Hf3(茶臼原)	d-H(茶臼原相当)	e-H(茶臼原相当)	e-H(茶臼原相当)	
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-Mf1(馬場)	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-Mm2(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)	d-Lf2-1(豊原 I) d-Lf5-1 (三日月原 I)	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(岡富面)					LL
その他の地形面	-	fn-1 (新称。小規模な扇 状地地形。) fn-2 (新称。小規模な扇 状地地形。fn-1 より低 位)	t (支流性の対比困難な小 規模な地形面)			fn (新称。平成 29 年度の Lf 面から緩斜面 (Mm2 の旧汀線付近の緩斜面) を分離・独立)	fn (新称。平成 29 年度の Lf 面から緩斜面 (Mm2 の 旧汀線付近の緩斜面)を 分離・独立)	t (新称。支流性の対比困 難な小規模な地形面)

【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)には付けていない。

③ 陸域の隆起モデルの検証

平成 29 年度は、一つの思考実験として、隆起量の見積もりにおいて、データの信頼性が最も高い MIS5e の海成・河成段丘から見積もられた隆起量データセットと、これに MIS5c の海成・河成段丘から見積もられた隆起量を加えたデータセットからそれぞれ平面近似モデル 1、2 を構築して比較した(図 2.1-5)。その結果、傾動方向が全く異なる、具体的には、モデル(ア)が海岸線の方向に沿う北北東へ、モデル2が山-海方向の東北東へ傾動するモデルがそれぞれ構築された。そして、海の基本図で用いられた海上音波探査記録の再解析により、沿岸海底下の沖積層下の地形分布と宮崎層群とその上位層の地質分布に、それぞれ概ね南北方向の境界が見られたことから(図 2.1-6)、モデル2が妥当ではないかと考えた。

これを踏まえ、今年度は、基盤の地質分布・地質構造の検討を行った。これは、後期更新世以降の傾動運動が地質分布・地質構造にも反映されているのではないかという点に着目した検討である。今回は、産業技術総合研究所(旧地質調査所)より借用した宮崎平野沿岸部の海上音波探査記録(GH83-1 航海)の再解析を実施した。これは、海の基本図の記録よりも高品質の記録であり、これを解析することで宮崎層群の上位層の走向傾斜の把握を狙ったものである。これは、宮崎層群堆積後~後期更新統堆積前以降の運動を反映したものと考えられる。再解析の詳細は、Appendix II に示す。この結果、モデル1で示された傾動方向よりもさらに時計回り(東方向)にやや振れた北北東・南南西走向・西南西傾斜の同斜構造が見出された(図 2.1-7)。

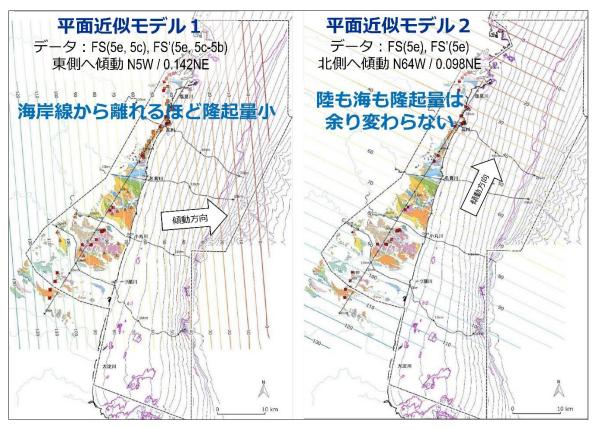


図 2.1-5 平面近似モデル化の試行(平成29年度検討結果) 産総研,原子力機構,原環センター,電中研(2018)

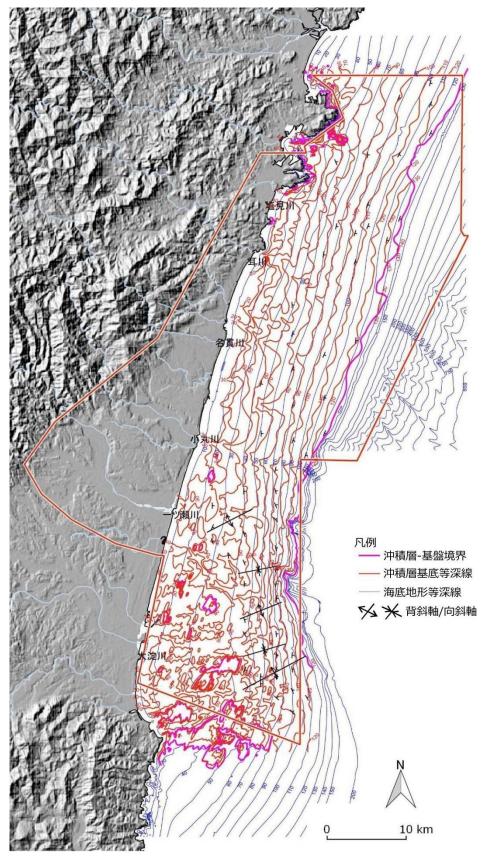


図 2.1-6 沿岸海域の沖積層下の地形・地質図 (平成 29 年度検討結果)

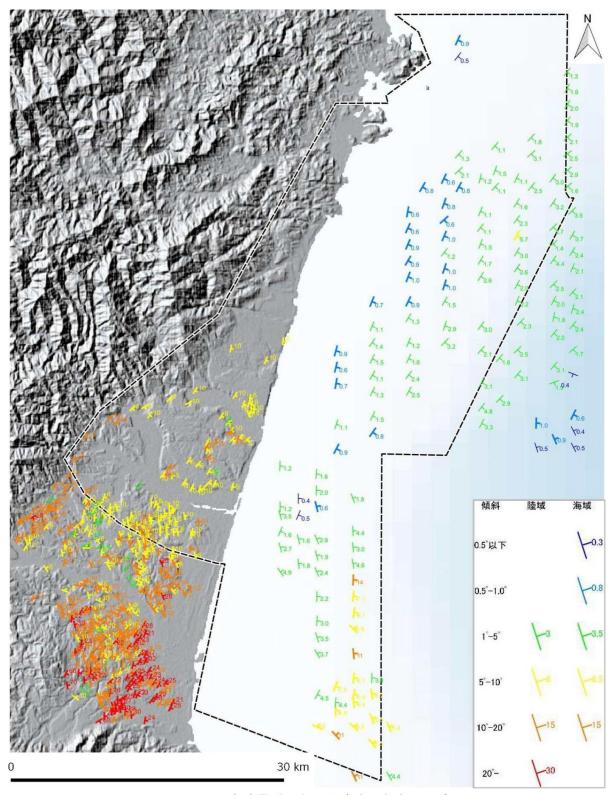


図 2.1-7 宮崎層群における走向・傾斜の分布

さて、陸域においては、鈴木 (1987) が宮崎層群の走向線図 (地層の傾斜方向と傾斜量で地質構造を表現した図)を示している。これによれば、事例調査地域は、中期更新世の地層の走向方向と同等かさらにやや時計回り(東方向→図面から読み取った走向方向を引用)に触れた東南東傾斜の同斜構造を呈している。これは宮崎層群堆積以降の運動を反映したものと考えられる。

次に、旧地質調査所の海上音波探査記録(GH83-1 航海;地質調査所,1998)の再解析によって得られた、精度が高い沿岸海域における宮崎層群と更新統と推定されるその上位層の分布に着目する。海底面では、南北からわずかに西に触れた直線的な境界を以て両層が分布している(図2.1-8)。両者の関係は不整合で、宮崎層群に対し、しばしばその上位層が西向きに高角で接している(アバット)。この境界は、昨年報告した海底地形(図2.1-7)の境界にほぼ相当し、凹凸が多い部分が宮崎層群に、なだらかな部分がその上位層の分布に当たっている。このような地質境界・地形境界は、宮崎層群の傾動と海水準変動によって生まれた堆積域と侵食域の境界、つまり、上位層堆積期の海面最高潮時の汀線を示していると解釈できる。したがって、上位層堆積期、に東からわずかに北に触れた方向に傾動していた可能性を考えることができる。

一方、九州中・南部は、測地 (GPS) により反時計回りの回転運動をしていることが知られている (地震調査委員会, 2013 など)。

以上を考え合わせると、宮崎層群堆積時に始まり、現在に至るまで、傾動方向が反時計回りに変化するという地殻変動の作業仮説を考えることができる。これに沿って考えるならば、一次データの不確実性は大きいかもしれないが、後期更新世以降の隆起運動を表すモデルとしては、モデル1(図 2.1-5)の方が妥当であると考えられる。

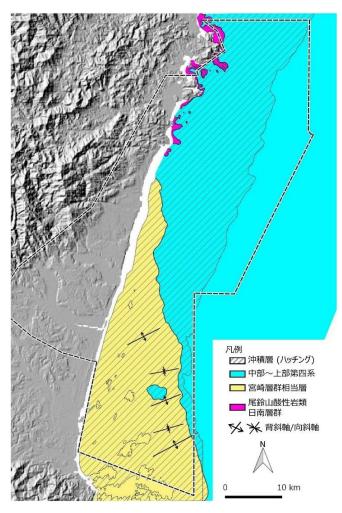


図 2.1-8 検討事例範囲のうち海域における海上音波探査記録の再解析による地質平面図 旧地質調査所・GH-83-1 航海(地質調査所, 1998)で取得された海上音波探査記録の再解析により作成(Appendix II 参照)

④ 隆起モデルの不確実性の検討

隆起モデルは、データセットに依存する。つまり、いうまでもなく、データセットの不確実性はモデル化に影響する。その意味で、本研究で扱うのは、隆起量の見積もりに対して、地形・地質データの不確実性が与える影響、つまりリスクである。ここでは、陸域隆起量の仮想的なデータセットを用いて平面近似モデルを複数構築し、これまでに示したモデル1とモデル2も含めて比較することにより、上記リスクを検討する。

まず、仮想的なものを含めた五つのデータセットから平面近似モデルを作成した(図 2.1-9)。

- (ア) 基本データセット/MIS5e、5c データを用いた場合 (H29 実施、前述のモデル 2)
- (イ) 基本データセットのうち、MIS5e 段丘から見積もられたデータのみ用いた場合 (H29 実施、前述のモデル 1)
- (ウ) 基本データセットの名貫川以北の段丘データを除いた場合
- (エ) 基本データセットの名貫川以北の段丘が1段ずつ古くなった場合
- (オ) 基本データセットの名貫川以南の MIS5e 面が 1 段ずつ古くなった場合

これらは、平成 29 年度のモデル 2 のデータセット (MIS5e、MIS5c データを用いた場合)を基本データセットとし、時間的・空間的にデータがこれより少ない場合の想定 2 ケースと、仮に段丘対比・編年に関わる異なる作業仮説があった場合の想定 2 ケースである。

以下、地史に基づく検証を是とし、(ア)が考えうる最も確からしいモデルであるとの前提で、モデル化の結果とその考察を述べる。

- (ア)と(イ)の比較から、データの品質がやや劣っても、MIS5c のデータがあった方が良い。
- (ア)と(ウ)の比較から、データの分布により、傾動方向が変わり、隆起量の外挿結果が変わる(北部で過大評価、南部で過小評価)ことがわかる。
- (ア)と(エ)の比較では、(ア)よりも(エ)の平面近似の相関が良い。モデル構築の土台である本年度の段丘対比・編年において、昨年度からの変更はないとしたが、引き続き検討する余地があることを示しているのかもしれない。ただし、傾動方向の差は小さく、事例研究地域北半分の沿岸海域では、両者で外挿結果の差も小さい。

(オ)はテフラデータから否定される仮想的なものであるが、相関も良くない。明らかに否定されるようなデータセットを検討する意義はない例となろう。

次に、これらのモデルを沿岸海域に外挿し、隆起・沈降量を見積もった(図 2.1-10)。ア・イ・ウがデータセットの量による比較、ア・エ・オが編年(モデル)の違いによる比較となる。この結果は、データセットの影響が大きいのか、段丘対比・編年に関わる複数の作業仮説の影響が大きいのかは、評価すべき範囲によることを示している。例えば、両測線の交点の C では、段丘の編年の違いによる影響(不確実性)よりもデータセットの影響が大きいが、より北方では必ずしもそうはなっていない。この事例研究が示すのは、このような解析を実施して、各モデルの課題を明らかにし、解決に取り組むことが全体としての不確実性の低減につながることと考える。

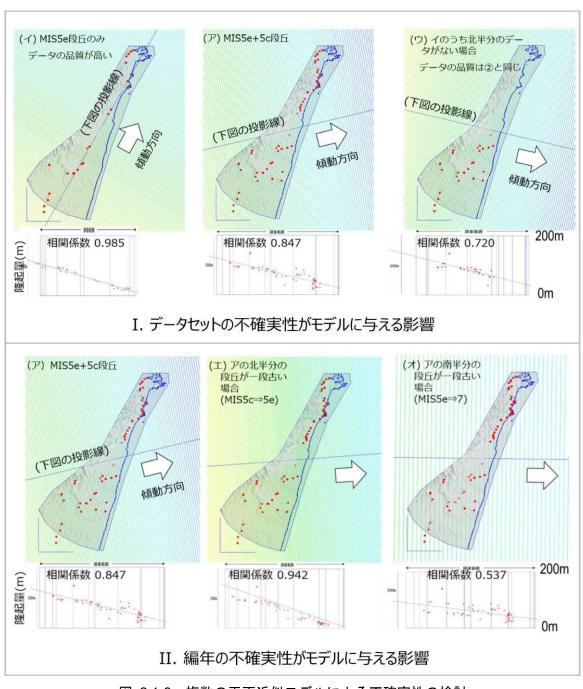


図 2.1-9 複数の平面近似モデルによる不確実性の検討

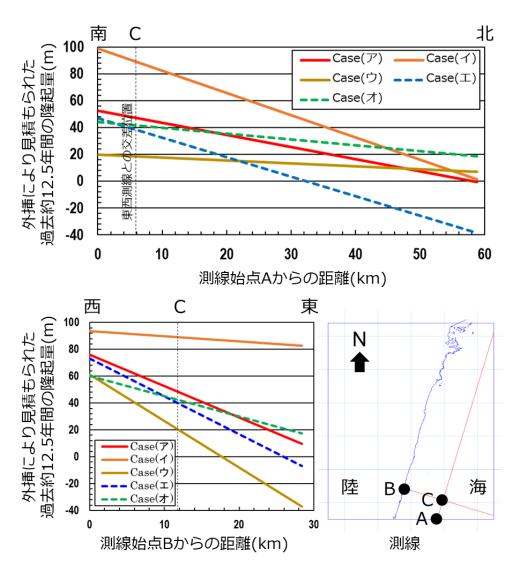


図 2.1-10 各平面近似モデルから外挿された沿岸海域の隆起・沈降量 海岸線に平行な A 測線、同じく直交する B 測線において、各モデルの外挿から計算された結果。

⑤ 沿岸海域の下刻侵食量

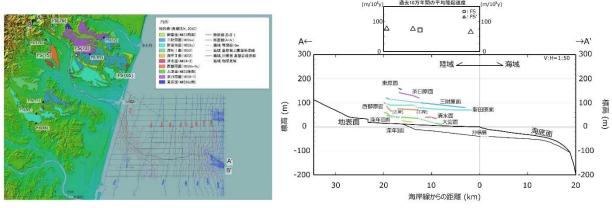
仮に、隆起も沈降も極めて少ない地域の陸域では、下位水準低下に伴う下刻侵食が最も大きい (深い)のは、現在の海岸線付近と考えて差し支えない(井関,1975など)。その下刻量は隆起量 と関連があり、現在の海岸線付近における後期更新世以降すなわち直近の海水準変動1サイクル の間の最大下刻量は、当該地域の後期更新世以降の隆起量に100mを加えたものより小さい(幡 谷ほか,2016)。

事例調査地域・宮崎平野およびその沿岸海域において、東方への傾動運動が生じているのであれば、海岸線から離れるほど後期更新世以降の隆起量は小さいと推定され、後期更新世以降の最大下刻量も小さくなると考えられる。そして、海水準が最も低下した最終氷期極相期(およそ 2-3万年前、Clark et al., 2009 など)の海岸線付近では、少なくとも、そこが隆起していないあるいは沈降していると評価されるならば、下刻量が 0 と推定されることになる。

本研究では、事例研究地域・宮崎平野の沿岸海域である大陸棚上において、現在の主要河川から繋がるとみられる沖積層下に埋積された河谷を追跡し、その地質断面図を作成した。沖積層の

厚さとして表現される下刻量は、海岸線付近で最大であった(図 2.1-11)。このことは、上記の隆起量と組み合わせた評価と整合的である。

ただし、本研究は、あくまで沿岸海域において現海岸線付近の下刻量が最も深くなる一事例である。一般化には事例蓄積が必要と考える。



段丘の分布と編年の情報を整理

河川沿い地形・地質断面図

図 2.1-11 河川沿い地質断面図の例示

⑥ まとめ

陸域において後期更新世以降の隆起モデルを構築し、それを外挿して沿岸海域の後期更新世以 降の隆起・沈降量を見積もる外挿法の事例研究を昨年度に続き、宮崎平野において実施した。以 下に主な結果をまとめる。

- ・ボーリング調査などを含む野外調査を実施し、データの拡充を図った。その結果、従来の 知見を覆すようなデータは得られなかったことから、隆起モデルについて、昨年のモデル (平板近似モデル)を踏襲した。
- ・昨年度構築した二つの隆起モデルの比較検討のため、地質・地質構造の検討を行った。この結果を踏まえ、新第三紀以降、傾動方向が反時計回りになるような地史の作業仮説を提示し、これに整合的な隆起モデルを採用した。このことは、隆起モデルを絞り込むに際し、地史の検討が重要であることを示している。
- ・外挿法による隆起・沈降量の見積りの不確実性を、仮想的なものも含めた複数のデータセットから構築された平面近似モデルを比較することにより検討した。データセットの不確実性の影響、段丘対比・編年の不確実性の影響がある。どちらの影響が大きいかは評価すべき地理的範囲によると思われるが、ここに提示したような方法で検討することにより、不確実性の幅を具体的に把握することができると考えられる。
- ・沿岸部の河川による下刻侵食については、山側から海側に傾動する地域において、現海岸線付近の下刻侵食が最も大きい可能性が示唆された。このことは、幡谷ほか (2016) が示した「隆起量 +100 m より深く彫り込まれることはない」という作業仮説と整合的である。

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。この課題の解決に向けて必要となる基礎データが、我が国の大陸棚に発達する海底地形の実態および特徴をまとめたデータである。そこで、本事業では、そうしたデータを作成することを目的とした。

平成 28 年度の事業においては、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、我が国の大陸棚周辺に発達する海底地形を判読した。そして、その判読結果から、大陸棚の広がりを規定する大陸棚外縁とともに海底の侵食現象に係る大陸棚外縁の開析前線と海底谷の分布を示した海底地形学図を作成した。平成 29 年度の本事業においては、地域的な地殻変動と全球的な氷河性海面変動との重合により形成された可能性をもつ海底段丘の分布を示した海底地形学図を作成した。

平成 30 年度の事業においては、これら 2 か年の研究結果を踏まえ、我が国の大陸棚周辺に分布する地形の特徴をまとめ、海底地形に基づく隆起・侵食量の評価手法を検討した。そのために、まず、未判読であった大陸棚上の谷地形(陸棚谷)の判読と図化を行い、海底地形学図の充実を図った。次に、海底地形デジタルデータの数値地形解析を実施し、その結果と海底地形の判読結果とを比較することにより、海底地形学図の信頼性について検討した。最後に、本事業により判読・図化された海底地形に基づく沿岸部海域の地殻変動の評価手法について予察的に検討した。

② 方法

(a) データの作成

本事業において必要となるデータは、海域と陸域の数値標高モデル(DEM)を統合した海陸統合 DEM である。本研究で使用した海陸統合 DEM は、平成 29 年度に作成した海陸統合 DEM の海域の一部と陸域の全データを更新し、データの解像度の向上をはかったものである。海域については、(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)の伊豆小笠原と南西諸島のデータを更新した。陸域については、米国航空宇宙局(NASA)の Shuttle Radar Topography Mission で作成された 3 秒メッシュ(約 90 m メッシュ)の DEM(SRTM-3)から、衛星搭載型地球観測光学センサ ASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)により取得された 1 秒メッシュ(約 30 m メッシュ)の ASTER GDEM(全球三次元地形データ)に変更した。データ更新作業に用いたデータの一覧を、表 2.1-2 に示す。

表 2.1-2 海陸統合 DEM の更新に際して使用した 地形デジタルデータの一覧

ASTER GDEM				海底地形データ
			(M-7000シリーズ)	
~	E142			
~	E147			(南西諸島)
~	E146			M7019 ver2.2
~	E145			M7020 ver2.1
~	E141	E143		M7021 ver2.1
~	E141			M7025 ver2.1
~	E142			
~	E141			(伊豆小笠原諸島)
~	E141			M7023 ver2.0
~	E140	E132	E133	M7022 ver2.1
~	E140			
~	E139			
~	E136	E139		
~	E133	E139		
~	E131			
~	E131	E140		
~	E130			
~	E129			
~	E128			
~	E124	E131	E141	
~	E125	E131	E141	
		~ E142 ~ E147 ~ E146 ~ E145 ~ E141 ~ E141 ~ E140 ~ E140 ~ E130 ~ E133 ~ E131 ~ E131 ~ E129 ~ E128 ~ E124	~ E142 ~ E147 ~ E146 ~ E145 ~ E141 E143 ~ E141 ~ E142 ~ E141 ~ E140 E132 ~ E140 ~ E139 ~ E136 E139 ~ E131 E140 ~ E131 C140 ~ E130 ~ E131 E140 ~ E129 ~ E128 ~ E124 E131	~ E142 ~ E147 ~ E146 ~ E145 ~ E141 E143 ~ E141 ~ E142 ~ E141 ~ E140 E132 E133 ~ E140 ~ E139 ~ E136 E139 ~ E133 E139 ~ E131 E140 ~ E131 E140 ~ E130 ~ E129 ~ E128 ~ E128 ~ E124 E131 E141

(b) 地形判読

地形判読は、本事業において未判読であった陸棚谷と海底段丘の段丘崖頂部を対象に行った。 判読作業では、平成 29 年度に作成した海底地形アナグリフと海底地形図に加え、海陸統合 DEM から作成した高度段彩図と傾斜区分図を用いた。

陸棚谷については、大陸棚上の谷線を判読、図化した。海底段丘については、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、その前面段丘崖の頂部を判読、図化した。

(c) 数值地形解析

海底地形学図に示された海底段丘の後面段丘崖基部(遷緩線)と大陸棚外縁(遷急線)は、海底地形アナグリフ上での傾斜変換線の認定に基づき判読されたものである。本研究開発では、深度・面積分布図を用いた別手法から大陸棚外縁と海底段丘に相当する傾斜変換線の認定を行った。深度・面積分布と地形断面との関係は、図 2.1-12 のようにまとめられる。図 2.1-12 に示されるように、深度・面積分布にみられるピークは、その深度に平坦面ないしは緩傾斜な斜面が存在することを示し、谷はその深度の面積が狭い、すなわち急斜面が存在することを示す。つまり、深度・面積分布におけるピークの立ち上がり深度は、海底段丘の後面段丘崖基部(遷緩線)に、またピークがみられなくなる上限深度が大陸棚外縁(遷急線)にそれぞれ相当するとみなせる。本解析の具体的な作業手順は、以下の通りである。また、解析結果の例を図 2.1-13 に示す。

・対象海域の海岸線に直交する方向に矩形の解析領域を設定する。解析領域は、原則として 1 本の測線で地形断面を代表させられる程度の範囲とした。結果的に設定した解析領域の幅 (短辺) は 5 - 10 km 程度となった

- ・ 海陸統合 DEM から解析領域の範囲を切り出す
- ・ 切り出した海陸統合 DEM から、深度・面積分布図を作成する
- ・ 深度・面積分布図から、海底段丘の後面段丘崖基部(遷緩線)と大陸棚外縁(遷急線)に相当する深度を読み取る
- ・深度・面積分布図と等深線図、傾斜区分図および地形断面図との相互比較から、海底段丘の 後面段丘崖基部と大陸棚外縁の分布を確認・修正する
- ・海底地形図上に上記検討に基づく後面段丘崖基部と大陸棚外縁を書き入れる

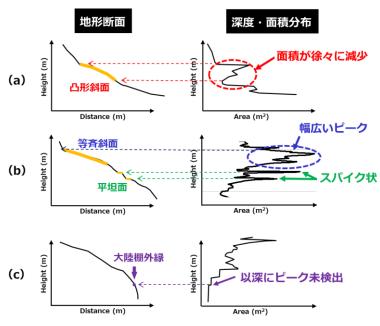


図 2.1-12 深度・面積分布と地形断面との関係

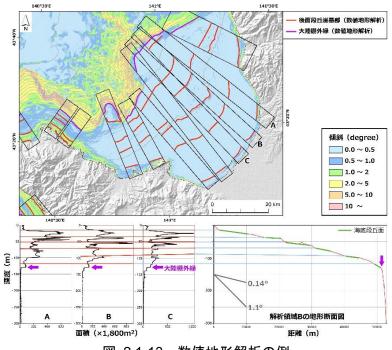


図 2.1-13 数値地形解析の例

深度・面積分布図は、解析領域内の深度 0-300 m のものを示している。

(d) 投影断面図の作成

沿岸部の地殻変動の評価手法について検討するため、本事業では、陸域の過去 12 万年間の地 殻変動を示す MIS 5e 海成段丘の高度分布と海域の海底段丘並びに大陸棚外縁の深度分布を海岸 線の一般方向に投影した投影断面図を作成した。投影断面図の作成に使用したデータを表 2.1-3 に示す。

地形 データ データに施した処理 データからMIS 5eに形成された海成段丘(ポイントデータ)を抽出し、 MIS 5eの海成段丘 野村ほか(2017) その分布をGIS上に表示。GISに示された地点の高度を海陸統合 DEMから読み取り、海成段丘の属性データに追加。 海底段丘の後面段丘岸基部と前面段丘岸頂部(ポリラインデータ)を GISに表示し、それらを5 km間隔でポイントデータに変換。ポイント 海底段丘 本事業 データのある地点の位置情報を海陸統合DEM上から読み取り、属 性データに追加。 大陸棚外縁(ポリラインデータ)をGISに表示し、それらを5 km間隔で ポイントデータに変換。ポイントデータのある地点の位置情報を海陸統合DEM上から読み取り、属性データに追加。 本事業 大陸棚外縁

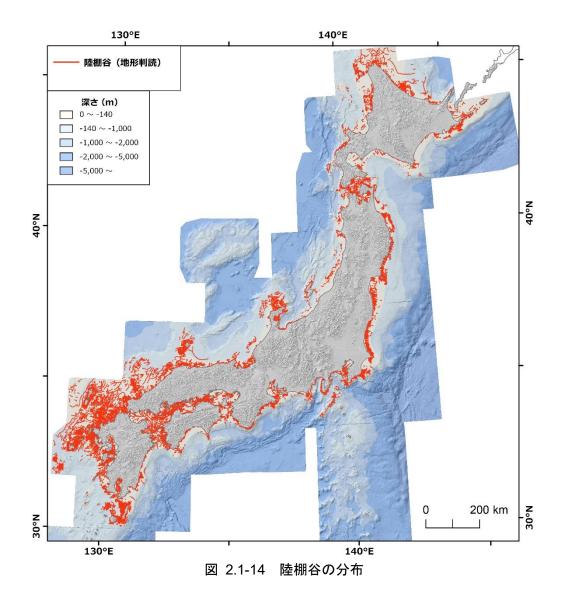
表 2.1-3 投影断面図の作成に使用したデータ

③ 結果

(a) 陸棚谷の分布と特徴

陸棚谷の分布図を図 2.1-14 に示す。陸棚谷は日本列島の大陸棚に広く分布しており(図 2.1-14)、既往研究(第四紀学会編,1987; 嶋村,2008)に示されたものと比較すると、本事業において新たに判読された陸棚谷は非常に多い。しかし、その発達度合いには地域性がみられ、陸棚谷が密に分布している海域と、ほとんど分布していない海域がある。

陸棚谷の出口について着目すると、それらの大半は、大陸棚外縁の平均水深である約 140 m (岩淵・加藤, 1988) 以浅に位置する(図 2.1-14)。しかし、海域によっては陸棚谷を大陸棚外縁以深まで追跡できる。 陸棚谷が氷期に形成された河谷跡であるとすれば、その出口深度は過去の汀線の地形指標になると考えられる。例えば、陸棚谷が、最終氷期に形成された河谷跡であることを示せれば、その出口深度と日本列島における最終氷期極相の海水準(約-130 - -100 m; Nakada et al., 1991)の差から、海域の地殻変動の様式・速度を検討できる可能性がある。今後、海域の地殻変動推定技術の高度化に向けて陸棚谷の出口深度に着目した調査・分析が求められる。



(b) 数値地形解析に基づく浅海底地形の判読結果

本事業では、日本列島の 18 海域 (図 2.1-15) を事例に数値地形解析に基づく浅海底地形の判読を行った。各海域の判読結果については、Appendix III に示す。

数値地形解析に基づく判読結果と海底地形アナグリフ判読の結果とを比較すると、数値地形解析から新たに海底段丘を判読することができた場と数値地形解析のみでは海底段丘を判読することが困難であった場が存在した。大まかに言えば、前者に相当する場は、傾斜 1°未満の斜面であり、後者に相当する場は、1)1本の測線で地形断面を代表させられる解析領域を設定できない、つまり複雑な地形形状をとる場や、2)深度・面積変化が相対的に小さいため、深度方向の面積変化のピークがはっきりしない、例えば、傾斜数°以上の斜面に複数段の海底段丘が分布するような場である。ここでは、前者を「数値地形解析による海底段丘の判読が有効であった場」、後者を「数値地形解析による海底段丘の判読が有効でなかった場」とし、両者の事例を以下に述べる。

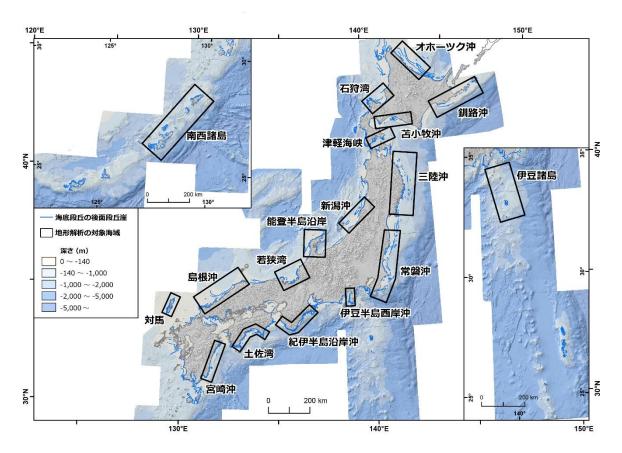


図 2.1-15 数値地形解析の対象海域一覧

(i) 数値地形解析による海底段丘の判読が有効であった場

数値地形解析による海底段丘を新たに判読できた場の例に石狩湾が挙げられる。石狩湾の大陸棚には、傾斜 0.5° 未満の平坦面が広がる。海底地形アナグリフでは、石狩湾内において海底段丘を判読することができないが、深度・面積分布図では、海底段丘の後面段丘崖基部を水深 11-19 m、34-37 m、48-54 m、68-71 m、88-90 m、120 m に認めることができる(図 2.1-16)。これらの深度は、佐藤・茂木 (1982) に示された大陸棚上の平坦面の分布深度ともほぼ一致する。

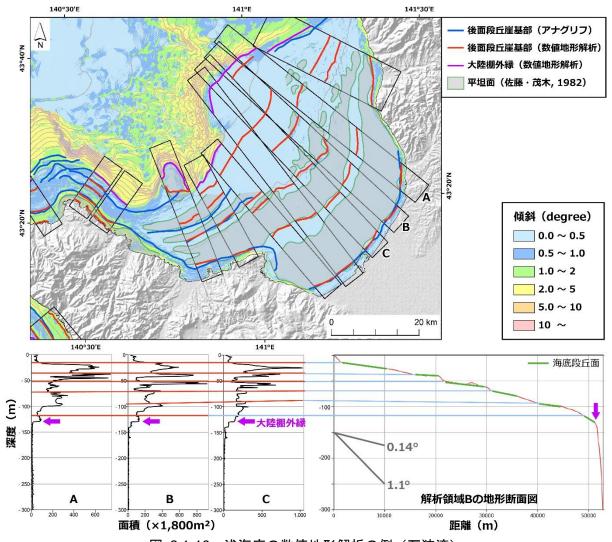


図 2.1-16 浅海底の数値地形解析の例(石狩湾)

傾斜区分図上の平坦面は、佐藤・茂木(1982)に示された大陸棚の平坦面分布図に基づいている。深度・面積分布図は、解析領域内の深度 0-300 m のものを示している。

(ii) 数値地形解析による海底段丘の判読が有効でなかった場

数値地形解析による海底段丘の判読が困難であった場のうち、深度方向の面積変化のピークがはっきりしない場の例としては、三陸の沿岸部が挙げられる。三陸の大陸棚は、上部と下部とで傾斜と斜面形が大きく異なり、沿岸部にあたる上部は傾斜 2 - 10°の凹型斜面、下部は傾斜 1°未満の凸型斜面からなる(図 2.1-17)。

海底地形アナグリフでは、解析領域内において海底段丘の後面段丘崖基部を水深 $30\,\mathrm{m}$ 、 $70\,\mathrm{m}$ 、 $90\,\mathrm{m}$ 、 $140\,\mathrm{m}$ に判読することができる(図 $2.1\text{-}17(\mathrm{a})$, (b))。しかし、水深 $350\,\mathrm{m}$ までを対象とした深度・面積分布図では、海底段丘の後面段丘崖基部を水深 $90\,\mathrm{m}$ と $140\,\mathrm{m}$ にしか認めることができない(図 2.1-17 (d))。さらに、水深 $350\,\mathrm{m}$ までのものと比べ、より詳細に深度・面積分布の変化を検討することができる水深 $150\,\mathrm{m}$ までの深度・面積分布図においても、海底段丘の後面段丘崖基部は水深 $90\,\mathrm{m}$ にしか認めることができず、水深 $70\,\mathrm{m}$, $30\,\mathrm{m}$ に認めることはできない(図 2.1-17 (c))。

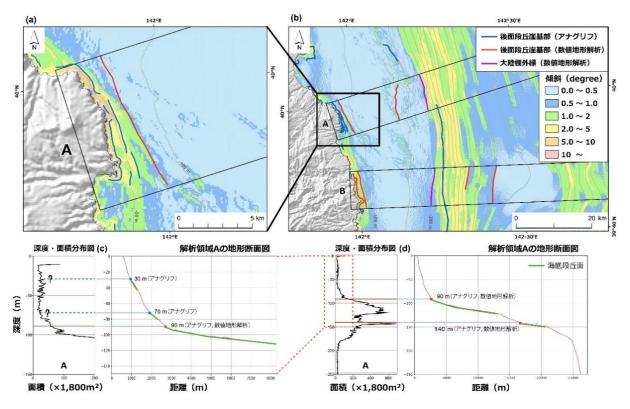


図 2.1-17 浅海底の数値地形解析の例 (三陸沿岸)

(c) 海成段丘と浅海底地形の分布

海底段丘の発達の良い海域を対象に MIS 5e 海成段丘と浅海底地形を投影断面図上に示し、両者の高度分布パターンの比較を行った。図 2.1-18 に三陸沖、図 2.1-19 に房総沖、図 2.1-20 に津軽海峡(北海道側)の事例をそれぞれ示す。ここでは、ひと続きの海底段丘面や大陸棚外縁が同時代に形成された地形であると仮定した時に、投影断面図から読み取れた結果の要点を以下に記す。

- ・海成段丘の高度と海底段丘群や大陸棚外縁の深度変化の傾向が調和的にみえる区間がある (図 2.1-18, 図 2.1-20)。特に注目すべきは、そのような区間では、海成段丘の 高度変化の傾きに対して大陸棚外縁とそれ以浅の海底段丘の深度変化の傾きが小さく、逆に 大陸棚外縁以深では海底段丘の傾きが同等か大きくなることである(図 2.1-18)。
- ・大陸棚外縁については、海岸線の一般方向にほぼ一定深度のものと、深度変化が大きくノコギリ状の深度分布を呈するものがある。後者は、開析前線が大陸棚外縁に及んでいる場合にみられる(図 2.1-19)。
- ・陸域の活断層ないしは推定活断層の海域延長部を境に海底段丘群の深度に変化がみられる (図 2.1-20)。

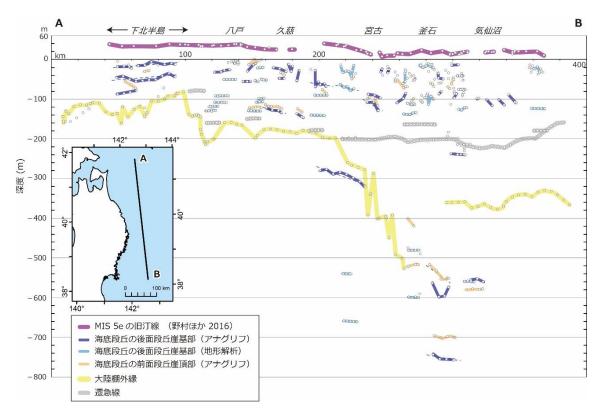


図 2.1-18 投影断面図上における海成段丘と浅海底地形の分布例(三陸沖) MIS 5e の旧汀線分布は、野村ほか(2017)のデータに、それ以外の分布は、本事業によるデータに基づいている。

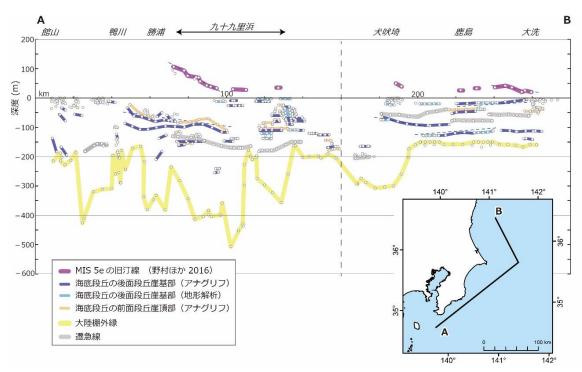


図 2.1-19 投影断面図上における海成段丘と浅海底地形の分布例(房総沖) MIS 5e の旧汀線分布は、野村ほか(2017)のデータに、それ以外の分布は、本事業によるデータに基づいている。

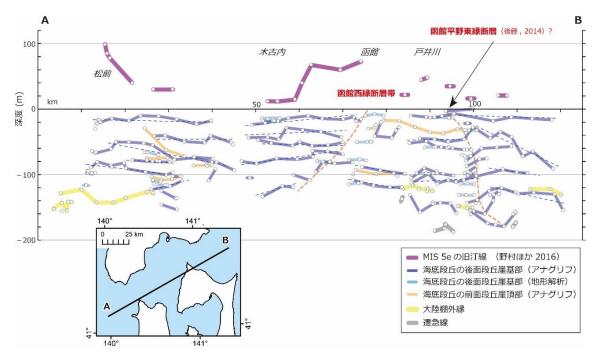


図 2.1-20 投影断面図上における海成段丘と浅海底地形の分布例(津軽海峡) MIS 5e の旧汀線分布は、野村ほか(2017)のデータに、それ以外の分布は、本事業によるデータに基づいている。

④ まとめ

本事業では、陸域だけでなく氷期に陸化する大陸棚からも地殻変動量や侵食量を見積もる方法を検討する上での基礎データ、すなわち我が国の大陸棚に発達する海底地形の実態および特徴をまとめたデータを作成することを目的とした。本年度は、大陸棚上の谷地形である陸棚谷の判読と図化を行い、陸棚谷分布図を作成した。次に、海底地形判読の信頼性向上に向けた海底地形デジタルデータの数値地形解析を行った。最後に、これまでに判読・図化された海底地形に基づいた沿岸部海域の地殻変動の評価手法について予察的に検討した。

陸棚谷分布図の作成の結果、陸棚谷は、日本列島周辺に広く分布しているが、その出口深度には地域差があることがわかった。陸棚谷が最終氷期に形成された河谷跡であるとすれば、その出口深度は旧汀線の地形指標だと考えられる。つまり、それらと日本列島における過去の氷河性海水準との差から、地殻変動の様式・速度を検討できる可能性がある。海域の地殻変動推定技術の高度化に向けた課題としては、陸棚谷の出口深度に着目した調査・分析が挙げられる。

数値地形解析の結果から、本事業で検討した深度・面積分布図を用いた判読手法のみでは、海底地形によって海底段丘を新たに判読できた場と、困難な場が存在することがわかった。大まかに言えば、前者に相当する場は、傾斜 1° 未満の斜面であり、後者に相当する場は、(1) 1 本の測線で地形断面を代表させられる解析領域を設定できない、つまり複雑な地形形状をとる場や、(2) 深度・面積変化が相対的に小さいため、深度方向の面積変化のピークがはっきりしない、例えば、傾斜数。以上の斜面に複数段の海底段丘が分布するような場であった。そのため、傾斜 1° 未満の斜面が広がる大陸棚における海底段丘判読では、アナグリフ画像判読に数値地形解析を組み合わせた手法の適用が望ましいと結論づけられた。

沿岸部海域の地殻変動の評価手法については、MIS 5e の海成段丘の高度分布と海底段丘や大陸棚外縁の深度分布を投影断面図上にプロットした図から予察的に検討した。その結果、海底段丘や大陸棚外縁の深度分布パターンの中には、地殻変動を反映したと考えられるものが含まれて

いることがわかった。このことは、海底段丘や大陸棚外縁の発達史の理解が、海域における地殻 変動様式の把握において重要であることを示す。

以上、本事業では、目的としていた我が国の大陸棚に発達する海底地形の実態および特徴をまとめたデータを作成し、提示することができた。今後、沿岸部海域の地殻変動の評価手法の検討においては、本事業で判読・図化した海底段丘や大陸棚外縁といった海底地形の発達史の理解が必要となる。そのためには、海底段丘や大陸棚外縁の成因を音波探査記録などから把握すること、また、海外の研究事例(例えば、Chaytor et al., 2008; Castillo et al., 2018)のように海底段丘や大陸棚外縁付近から絶対年代試料を採取し、その形成年代を明らかにすることが望まれる。

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

段丘の離水(形成)年代は、多くの場合、段丘を構成する堆積物(礫層)の堆積後に形成される、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。実際には、地形層序が考慮され、また、海成段丘では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こ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嵌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ーク・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 得るという目的に対し、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(年代指標)を作るという技術開発課題に対して、堆積年代が明らかにされている地層の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被膜を形成するものでは、被膜の厚さが風化期間を反映して厚くなるが、風化被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。

平成 29 年度までの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 報告書によれば、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、国内では最も適した事例研究地域の一つであると考えられる。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、これを基礎として、経験的指標の高度化に取り組んだ。平成 29 年度に実施した 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。そのうえで経験的指標の高度化では、宮崎平野の主に南部の地域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し、経験的指標の適用性の確認と精度向上を図った。平成 30 年度は、主に堆積岩礫が段丘礫として含まれる宮崎平野南部地域に対し、溶結凝灰岩などの堆積岩以外の岩石が段丘礫に含まれ、基盤の地質分布も火成岩が主となる宮崎平野北部地域を対象とすることにより、それらの条件の差が、経験的指標の性状にどのような違いを与えるかと調査することにより、指標の高度化、適用性の向上を図る。

なお、以下で記している段丘の名称については、平成 29 年度の 1)「沿岸域における隆起・侵食の検討」および平成 30 年度の Appendix I 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)。 これによる明瞭な変化として、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、更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、水銀圧入式のポロシメータにより、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、ポロ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、ポロ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もつ有効間隙率(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できる。

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) 段丘礫の採取方法と留意点

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、同一の礫種が揃っている露頭については、野外より一露頭あたり 10 個程度の礫試料を採取した。異なる礫種が混在する露頭では、それぞれの礫種を 10 個程度含むように試料を採取した。そのうえで、室内における岩相の確認を経て礫種を砂岩、泥岩および溶結凝灰岩に揃えた 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(栗山ほか, 2006 など)、礫種の違いによる風化の仕方の違いを調べるためである。

(c) 段丘礫の分析項目・手法の説明

礫試料すべてに対して、切断研摩面の観察・測色、XGTによる元素マッピング、水浸法による 有効間隙率測定を行い、一部の試料については、水銀圧入式のポロ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) 切断研摩面の観察・測色

礫の切断研摩面上で、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、切断研摩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 線回析分析(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、Philips 製 X'Pert であり、管球 Cu、出力 $40 \mathrm{kv} \cdot 50 \mathrm{mA}$ 、スキャンスピード $2^{\circ}/\mathrm{min}$ 、スキャン範囲 回折角 $2\theta = 2 \cdot 60^{\circ}$ 、スキャンスリット DS,SS $15 \mathrm{mm}$ RS 0.2° 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と溶結凝灰岩礫を対象として、Micromeritics 社製 AutoPore IV9500 を用い、水銀圧力0.1 - 31000psia 測定範囲0.5 - 30000psia 測定数0.5psiaから300ポイントで、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・分析の方法として二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を明 らかにするための分析である。

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、段丘構成層直上付近の風成層として最も堆積の時期が古く、風化していると推定される層準、すなわち段丘構成層との境界面に近い層準、およびこれとの比較のため、露頭において AT の降下層準と推定される比較的上位の層準において、遊離酸化鉄分析用に試料採取を行った。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。

(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・測色およびボーリングコア試料での観察・測色

被覆層は、石英粒子の割合が高い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、変化が大きくない可能性もあるが、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。露頭での使用機器は、コニカミノルタ製土色計 SPAD-503 である。また、ボーリングコア試料では、同様に肉眼観察を行ったうえで、被覆層部分を対象として、コニカミノルタ製分光測色計 CM-600d を用いて約 10 cm おきに計測した。

(ii) 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、ボーリングコアの被覆層試料について 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、Philips 製 X'Pert であり、管球 Cu、出力 40kv - 50

mA、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 15mm RS 0.2° 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。

(iii) 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。分析方法は、佐々木 (2012) に示されている手法に準拠した。

③ 調査結果

(a) 各段丘の段丘礫の風化程度の分析

宮崎平野北部では、南部に比べて段丘の段数が少なく、高位段丘がほとんど分布しない。また、低位段丘については、分布は広いものの、段丘の風化度の評価に必要な礫層上部を観察できる露頭がなかったため、試料採取を行っていない。そのため、今回の調査・分析では、Mm1 面、Mf2 面の分析結果をもとに段丘礫の風化程度や風化様式の違いについて記述する。

Mm1 面、Mf2 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。例として風化様式の異なる Mm1 面の砂岩礫、Mf2 面の砂岩礫、Mm1 面の溶結凝灰岩礫の元素マッピング、測色結果を図 2.1-21 から図 2.1-23 に示す。また、有効間隙率の結果を表 2.1-4 に示す。その他の分析結果について は、Appendix IV に収録した。

肉眼観察ならびに測色結果から、Mm1 面、Mf2 面の段丘礫は、風化している部分では、a*値 0 - 10、b*値 10 - 20 となり、平成 29 年度の本研究で調査した宮崎平野南部の中位段丘と同程度である。宮崎平野南部の段丘砂岩礫は、ほとんどの場合、礫全体がほぼ均一に風化していたが、宮崎平野北部の段丘礫では、同様の風化様式を示すものも存在するが(砂岩礫が多い)、一部の砂岩礫とほとんどの泥岩、溶結凝灰岩では風化被膜を形成する風化様式を示す。これらの風化被膜を形成している礫では、芯の部分は比較的新鮮であり、a*値は 0 前後の値となり、新鮮な部分ではマイナスの値となっている。また、そのような礫では、b*値も 10 未満程度と低い値となっている。これらの測色値は、Mm1 面と Mf2 面の段丘礫で明確に識別できるほどの差は見られない。むしろ、露頭間もしくは礫種間での差の方が大きく、同一の露頭内の同一岩種では比較的似た値を示す(図 2.1-24)。低位段丘に関しては、野外における肉眼観察のみであるが、明らかに中位段丘のものに比べて新鮮であり、a*値、b*値とも中位段丘よりも低いと推定される。

有効間隙率は、最小で 3.9%、最大で 20.7%となっているが、ほとんどものが $7\sim18\%$ の範囲に入っている。これらの値は、宮崎平野南部の砂岩礫に比べ、若干低い傾向にある。有効間隙率に関しても、色調と同様、Mm1 面と Mf2 面の段丘礫で明確に識別できるほどの差は見られない。露頭間もしくは礫種間での差の方が大きく、同一の露頭内の同一岩種では比較的似た値を示すが、色調に比べるとばらつきが大きい(図 $2.1\cdot25$)。溶結凝灰岩と砂岩が混在する露頭としては、 $MYZ0613\cdot13$ のみであるが、この露頭内での両岩種の風化程度を比較すると、ばらつきの範囲はほぼ重なってはいるが、砂岩礫の方が a*値、b*値および有効間隙率において大きな値をとる試料があり、風化が進んでいるものが含まれる。

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、Al、Ca が少なくなっている傾向が認められる。砂岩や泥岩では、その傾向はかすかに認められる程度であるが、溶結凝灰岩では、Al、Ca に関しては比較的明瞭である。また、多くの試料では、赤褐色化する外縁部では鉄が多くなっている。

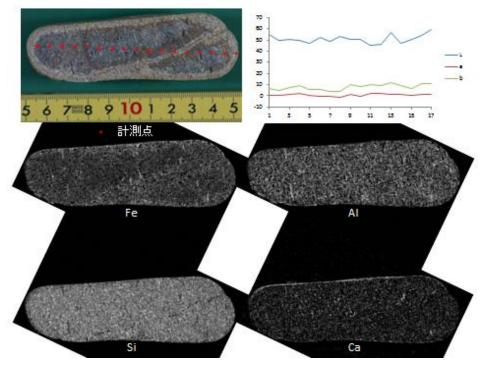


図 2.1-21 段丘礫 (砂岩) 断面の元素分布と測色値

(試料: MYZ20180802-02-5: c-Mm1 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。

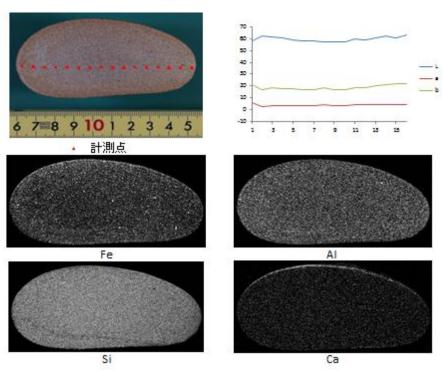


図 2.1-22 段丘礫(砂岩)断面の元素分布と測色値

(試料: MYZ20180613-13-9: c-Mf2 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。

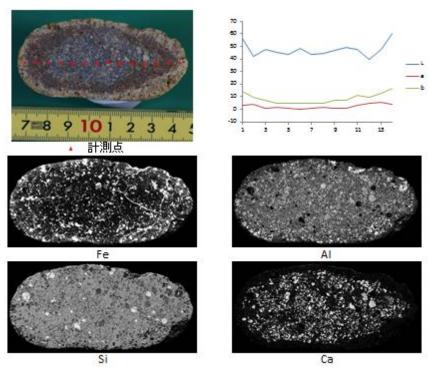


図 2.1-23 段丘礫 (溶結凝灰岩) 断面の元素分布と測色値 (試料: MYZ20181122-01-9: d-Mm1 面)

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

又 2.1 寸 7.	NXAIC	O OPXIIIA	13773	
試料名	段丘	有効間隙率	平均	岩種
180802-02-3		6.4		泥岩
180802-02-2		10.7		砂岩
180802-02-4		10.0		砂岩
180802-02-5	c-Mm1	8.6	0.4	砂岩
180802-02-6		10.8	9.4	砂岩
180802-02-7		8.6		砂岩
180802-02-12		7.5		砂岩
180613-13-7		7.2		泥岩
180613-13-11		11.2	8.7	泥岩
180613-13-20		7.8		泥岩
0613-13-10		8.2		砂岩
180613-13-6		11.1		砂岩
180613-13-8		9.8		砂岩
180613-13-9		19.2	13.0	砂岩
180613-13-21	c-Mf2	16.4		砂岩
180613-13-r-8		13.7		砂岩
180613-13-r-10	_	7.3		溶結凝灰岩
0613-13-5 0613-13-11		12.0	0.0	溶結凝灰岩
		7.0	9.9	溶結凝灰岩
0613-13-13		7.8		溶結凝灰岩
0613-13-21		15.4		<u>溶結凝灰岩</u>
181121-01-2		12.0		溶結凝灰岩
181121-01-3		10.5		溶結凝灰岩
181121-01-4	d-Mf2	8.2	10.5	溶結凝灰岩
181121-01-5		10.9		溶結凝灰岩
181121-01-6		12.8		溶結凝灰岩
181121-01-8		8.5		溶結凝灰岩
181122-01-3		13.3		溶結凝灰岩
181122-01-4		9.2		溶結凝灰岩
181122-01-5	d-Mf2	12.9	12.8	溶結凝灰岩
181122-01-6	G 17112	10.7	. 2.0	溶結凝灰岩
181122-01-7		17.8		溶結凝灰岩
181122-01-9		13.0		溶結凝灰岩
181010-02-1		16.6		溶結凝灰岩
181010-02-3		14.4		溶結凝灰岩
181010-02-4	e-Mf2	15.5	15.9	溶結凝灰岩
181010-02-6	C IVIIZ	13.7	10.8	溶結凝灰岩
181010-02-7		17.2		溶結凝灰岩
181010-02-8		18.1		溶結凝灰岩
181121-02-1		11.8		溶結凝灰岩
181121-02-2		12.8		溶結凝灰岩
181121-02-3	. 1400	10.5	100	溶結凝灰岩
181121-02-4	e-Mf2	9.1	12.2	溶結凝灰岩
181121-02-5		16.6		溶結凝灰岩
181121-02-6		12.3		溶結凝灰岩
171214-DB-04-2		9.9		溶結凝灰岩
171214 DB 04 2		10.2		溶結凝灰岩
171214 DB 04 3	f-Mm1	12.9	12.8	溶結凝灰岩
171214 DB 04 4		12.8	12.0	溶結凝灰岩
171214-DB-04-6		17.9		溶結凝灰岩
171214-06-04-0				溶結凝灰岩
	-	20.7		
171220-01-2	t-Mto	6.7	11.1	溶結凝灰岩
171220-01-3	f-Mf2	17.7		溶結凝灰岩
171220-01-4		3.9		溶結凝灰岩
171220-01-5		6.5		溶結凝灰岩

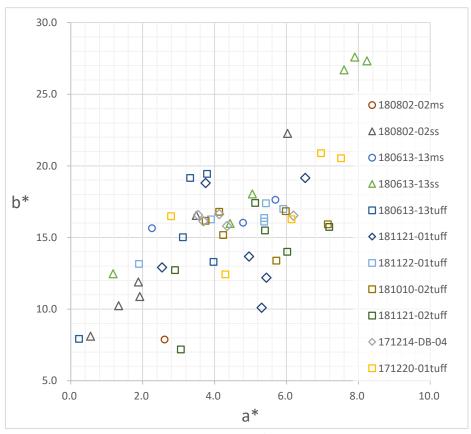


図 2.1-24 露頭・礫種ごとの測色値分布

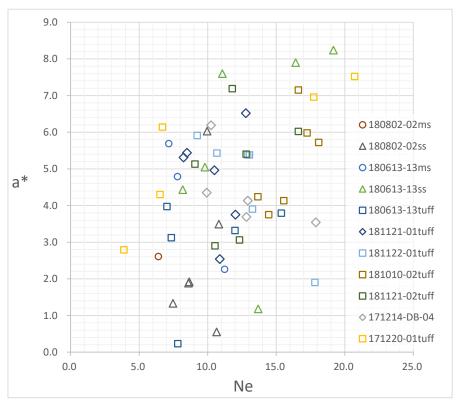


図 2.1-25 露頭・礫種ごとの a*値・有効間隙率の分布

(b) XRD による段丘礫の鉱物組成分析

段丘礫の XRD 分析は、風化被膜の存否による風化程度の差異の有無の確認のため、Mm1 面 (MYZ180802-02) および Mf2 面 (MYZ180613-13) の段丘礫をそれぞれ3つずつ選び、それぞれについて外殻部の風化の強いとみられる部分と芯に近い新鮮と推定される部分について行った (表 2.1-5)。 Mm1 面 (MYZ180802-02) の3 試料は、すべて砂岩礫、Mf2 面 (MYZ180613-13) の試料は、1 試料が砂岩礫、残り2 試料は、溶結凝灰岩礫である。

砂岩礫、溶結凝灰岩礫ともに石英と斜長石を主体としており、新鮮な部分に比べて、風化した 部分で、共通して斜長石のピークが小さくなっている。ただし、小さくなってはいるが、まだ明 瞭に斜長石のピークは確認でき、十分に残存すると推定される。その他の構成鉱物としては、溶 結凝灰岩にはアルカリ長石、雲母類が相当量含まれているほか、試料ごとにごく少量含まれる鉱 物が異なっている。これらの鉱物については、雲母類とギブサイトを除くと、新鮮な部分と風化 した部分での産出状況に差は認められない。

雲母については MYZ20190613-13-11 (Mf2 面) の溶結凝灰岩礫において、風化部分に明瞭なピークが認められるのに対し、新鮮な部分でピークが小さい。地表における風化により雲母が晶出し、増加したとは考えにくく、また、雲母は溶結凝灰岩に斑晶として存在している鉱物であるので、分析に供した部分に偶然、雲母斑晶が多く含まれていた可能性が高い。もう一つの溶結凝灰岩試料では、新鮮部分、風化部分ともに、明瞭な雲母類のピークが認められる。

風化による変化として考えられる鉱物組成としては、ギブサイトの存在がある。Mm1 面 (MYZ180802-02) の試料では、分析した3つの砂岩礫のうち、1つの礫の新鮮部分を除いて、わずかではあるが、ギブサイトが確認された。ギブサイトが検出されなかった砂岩礫は、明瞭な風化被膜を形成しており、ギブサイトは風化によって晶出した鉱物であると考えられる。

風化による鉄酸化鉱物については、いずれの試料でも XRD チャートでは確認できなかった。

試料名	段丘	Qz	PI	Kf	Мс	Ch	Sm	Gi	岩種
180802-02-2(新鮮部)		0	0	_	+	_	+	+	
180802-02-2(風化部)		0	0	_	+	_	+	+	
180802-02-4(新鮮部)	c-Mm1	0	0	_	+	+	_	+	砂岩
180802-02-4(風化部)	C-MIM I	0	0	_	+	+	_	+	砂石
180802-02-12(新鮮部)		0	0	_	+	+	_	_	
180802-02-12(風化部)		0	0	_	+	+	_	+	
0613-13-10(新鮮部)		0	0	_	+	+	_	_	砂岩
0613-13-10(風化部)		0	0	_	+	+	_	_	19/4
0613-13-11(新鮮部)	c−Mf2	0	0	+	+	_	_	_	
0613-13-11(風化部)		0	0	+	0	_	_	_	溶結凝灰岩
0613-13-21(新鮮部)		0	0	0	0	_	_	_	/谷和/郑次石
0613-13-21(風化部)		0	0	0	0	_	_	_	

表 2.1-5 XRD による段丘礫の鉱物組成

Qz:石英, PI:斜長石, Kf: カリ長石, Mc: 雲母, Ch:緑泥石, Sm:スメクタイト, Gi: ギブサイト O: ある, +: 微量にある, -: ない

(c) ポロシメータによる段丘礫の間隙分布

段丘礫のポロシメータ測定は、XRD 分析を行った礫と同じ礫(Mm1 面(MYZ180802-02)および Mf2 面(MYZ180613-13)の段丘礫をそれぞれ三つずつ)を対象とし、XRD 分析と同様、風化被膜の存否による風化程度の差異の有無の確認のため、それぞれについて外殻部の風化の強

いとみられる部分と芯に近い新鮮と推定される部分について行った。すなわち、Mm1 面 (MYZ180802-02) の3試料は、すべて砂岩礫、Mf2 面 (MYZ180613-13) の試料は、1試料が砂岩礫、残り2試料は、溶結凝灰岩礫である。ポロシメータによる間隙率の測定結果を表 2.1-6 に示す。間隙径分布の一例を図 2.1-26 に示し、残りの間隙径分布のデータについては、Appendix IV に収録した。

測定の結果、間隙率は、いずれの礫でも風化部分は新鮮部分に比べて大きかった。ただし、明瞭な風化被膜を形成する礫では、新鮮部分の間隙率が極めて小さく、風化部分との差が顕著である。溶結凝灰岩は、二つの礫試料ともこのような結果である。砂岩礫では、新鮮部の間隙率が低い礫試料は1つに限られる。残りの砂岩礫では、風化部では新鮮部に比べ間隙率が大きいものの、芯の比較的新鮮な部分でも4.2 - 7.7%とある程度の間隙を持つ。これらの砂岩礫は、明瞭な風化被膜はなく、肉眼的に、やや外殻部の方が風化しているように見える礫試料である。すなわち、溶結凝灰岩に比べると均一に近い風化作用をうけているが、それでも基本的には、外側の部分がより風化により間隙が増加していることを示す。

データを見る限り、風化による間隙率については、Mm1 面と Mf2 面の礫では、風化様式が異なっていることもあり、それによって区別が可能な閾値のようなものを設定することはできない。一方、礫の風化部分と新鮮部分の間隙径分布をみると、明瞭な風化被膜がない礫では風化部分と新鮮部分の間隙径分布が比較的似ているのに対し、明瞭な風化被膜をもつ礫では風化部分と新鮮部分の間隙径分布がまったく異なるパターンとなっていることが分かる。すなわち、肉眼で確認できる風化被膜は、その礫の芯の新鮮部分に比べて間隙径が顕著に増大しているのに対し(図2.1-26 (a)(c))、明瞭な風化被膜を持たない礫では、芯側の間隙径分布と似ながら、その間隙径のサイズが増大していることを示している(図 2.1-26 (b))。

表 2.1-6 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 (%)	岩種
180802-02-2(新鮮部)		2.49	2.60	4.28	
180802-02-2(風化部)		2.38	2.64	9.78	
180802-02-4(新鮮部)	c-Mm1	2.42	2.62	7.66	砂岩
180802-02-4(風化部)	C-IVIM I	2.36	2.61	9.54	砂石
180802-02-12(新鮮部)		2.61	2.63	0.81	
180802-02-12(風化部)		2.29	2.64	13.49	
0613-13-10(新鮮部)		2.44	2.65	7.92	砂岩
0613-13-10(風化部)		2.36	2.63	10.61	1976
0613-13-11(新鮮部)	c-Mf2	2.63	2.65	0.69	
0613-13-11(風化部)	C-IVII Z	2.13	2.61	18.20	溶結凝灰岩
0613-13-21(新鮮部)		2.57	2.58	0.49	/谷州/灰/人
0613-13-21(風化部)		2.05	2.61	21.17	

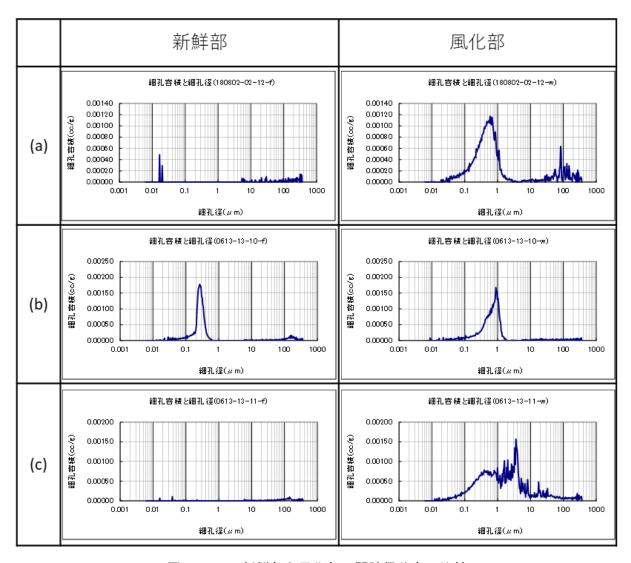


図 2.1-26 新鮮部と風化部の間隙径分布の比較

(a) Mm1 面(180802-02)砂岩 (b) Mf2 面(0613-13)砂岩 (c) Mf2 面(0613-13)溶結凝灰岩

(d) 各段丘の段丘被覆層の赤色化程度の分析

Mm1 面、Mf2 面および Mf2 面の各露頭および日向市内で掘削したボーリングコアについて、段丘被覆層を鉛直方向に測色データを取得した。宮崎平野北部で測定対象とした段丘は中位のものに限られるため、南部に分布する高位段丘に認められるような際立って赤色化が強い層準は認められない。ただし、各段丘では、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は、南部の段丘と同様、読み取られる。図 2.1-27 に Mm1 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 に収録した。

今回対象とした段丘露頭では、ボーリングコアおよび日向市内の Mm1 面の MYZ20181010-01 の露頭を除き、被覆層の基底から上位に向かって、K-Tz の存在を示唆する高温型石英が連続的に産出している。このことは、多くの段丘露頭の被覆層は、K-Tz 降下層準以降に堆積したものである可能性が高いことを示す。しかしながら、Kf2 面の露頭で一部では、シルト層が段丘礫層を覆い、更に上位にフラッドローム様の水つきの堆積物が載る層序関係が確認され、それらの地層から高温石英が連続的に産出する状況から、Mf2 面の離水時期は K-Tz の降下年代に近いものと考えられる。このため、K-Tz の降下層準がはっきりと得られていない露頭であっても、被覆層の基

底付近は K-Tz の降下年代に近いものと見なした。一方、調査範囲では、AT が純層に近い状態で 比較的明瞭に成層していることが多い。

以上を踏まえ、堆積以降の経過時間の違いによる赤色化の程度の違いを比較するため、各露頭の K-Tz 降下層準付近および AT 降下層準付近の 1~3点の測色データを選び出し、a*値、b*値による散布図を作成した(図 2.1·28)。散布図作成に当たっては、被覆層の赤色化に影響を与える可能性がある基盤地質の違いにより、プロットの色を区分した。すなわち、露頭が溶結凝灰岩の分布する付近のものは、暖色系(赤、橙、黄)、砂岩・泥岩などの堆積岩あるいは礫層が厚く分布する範囲の付近のものは、寒色系(水色、青、藍色)から緑系でプロットした。また、K-Tz 降下層準付近のものは、四角、AT 降下層準付近のものは、三角もしくは×などでプロットしている。

この図を見ると、露頭ごとに左下から右上に向かう線上並ぶように測色データが分布する傾向が読み取れる。また、暖色系つまり基盤に溶結凝灰岩が分布する範囲では、寒色系(堆積岩分布地域)より傾斜の緩い線で変化するものが多い。すなわち溶結凝灰岩の分布する地域に分布する露頭では、堆積岩の分布する範囲に分布する露頭より、より大きい a*値を取りながら風化が進んでいくことを示す。前者は、K-Tz付近の層準で a*値は 10 程度、b*値は 15~20 程度の値をとるものが多く、後者では a*値は 10 よりもやや小さく、b*値に関してはばらつきが大きく、15~25程度範囲で分散している。宮崎平野北部で得られたデータはすべて K-Tz の降下層準よりも上位であり、厳密な比較は難しいが、宮崎平野南部の調査で得られた K-Tz 層準付近の a*値は 10 超、b*値は 25 超、Aso-4 の層準のやや上位の層準で a*値 10、b*値は 20 弱という結果と比較すると、誤差、ばらつきの範囲で似た範囲の値を示すといえる。

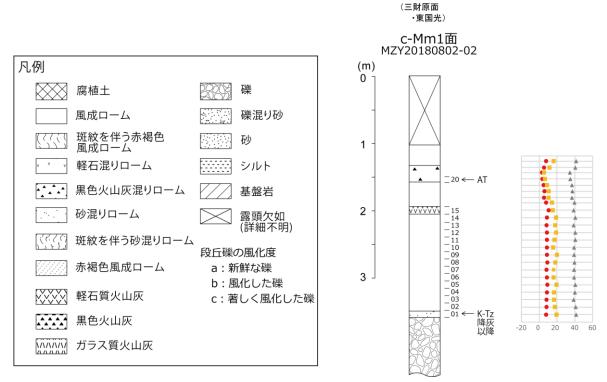


図 2.1-27 Mm1 面被覆層の露頭柱状図と測色値

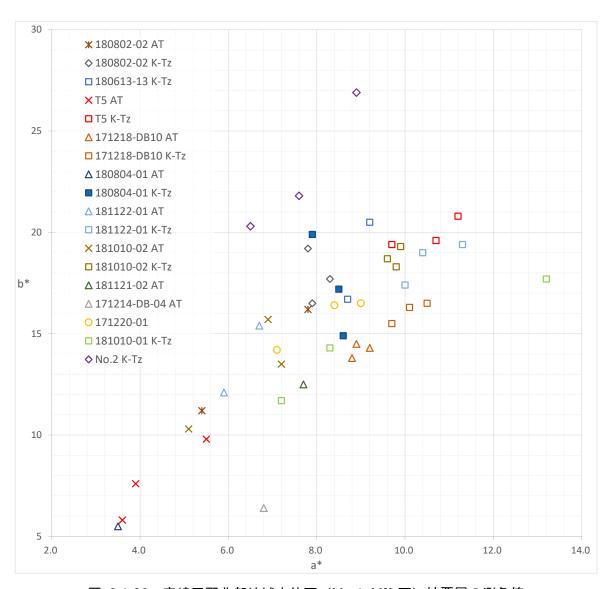


図 2.1-28 宮崎平野北部地域中位面(Mm1, Mf2 面)被覆層の測色値

Mm1, Mf2 面の各露頭およびボーリングコアにおける K-Tz 層準付近および AT 層準付近の測色値の a*値、b*値をプロット。付近とは K-Tz についてはボーリング孔 No.2 を除き基本的に被覆層の基底部の厚さ 20cm の区間、AT については層準の上下 10cm 程度の範囲、ボーリング孔 No.2 については、K-Tz 層準の上下 10cm 程度の範囲を採用している。ただし、明らかに AT そのものやフラッドロームや砂質堆積物が多く混じる層準については、被覆層の色調としては不適当であるため、除外してある。171220-01 の露頭は被覆層の再堆積が疑われる地層であるため、AT と K-Tz の色調が混じったものとなるものとしてプロットした。

(e) XRD による鉱物組成分析

XRD 分析を行った試料は、いずれも日向市で掘削したボーリングコアから採取したものである。No.3 孔を除く No.1 と No.2 では、水成層とそれを覆うテフラ層を覆う被覆層の最下部 (No.1-01, No.2-01) と上部 (No.1-02, No.2-02) の二層準から試料を採取した。風化によって晶出が予想されるギブサイトは、いずれの試料からも産出した(表 2.1-7)。ただし、No.1 孔では上位層準でより大きなピークが得られ、反対に No.2 では下位層準の方が大きなピークが得られた。ギブサイト以外の鉱物の産出状況を見ると斜長石は、No.1、No.2 ともに上位層準の試料に比べて下位

層準の試料でピークが大きく、逆に石英は No.1、No.2 ともに下位層準の試料と比べて上位層準の試料でピークが大きい。斜長石は風化により消失してしまう可能性があるが、石英はそのような変化が起きることは考えにくいため、上位層準と下位層準でもとものとの構成物に違いがあった可能性が考えられる。

鉄鉱物については、XRD プロファイルで量比の大小を判定できるほどの明瞭なピークは確認されなかった。

試料名 段丘 Ы Qz Мс Ch Gi No1-01 Mm2面 0 + No1-02 Mm2面 0 + + 0 No2-01 Mm2面 \circ O 0 No2-02 Mm2面 Ο

表 2.1-7 XRD による段丘被覆層の鉱物組成

Qz:石英 PI:斜長石 Mc:雲母類 Ch:緑泥石 Gi:ギブサイト,

+

+

+

0

〇: ある, +: 微量にある, -: ない

(f)遊離酸化鉄分析

No3-01

Mm2面

遊離酸化鉄分析の試料は、Mm1 面、Mf2 面の被覆層基底付近でかつ、水成堆積物の混入が少ない層準および被覆層の上位の層準、露頭観察で AT の降下層準付近と推定された箇所でなおかつテフラの混入が少ない層準を選ぶようにして採取した。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。分析結果を結晶化指数、活性度を軸とした散布図で示す(図 2.1-29)。

宮崎平野北部地域の Mm1 面、Mf2 面で得られた被覆層の遊離酸化鉄分析結果では、平成 29 年度報告書で報告したような、堆積年代が古いほど結晶化指数が高い値を示す傾向があまり明瞭ではない。大局的にみれば、AT の降下層準に近い層準で得た試料は、褐色土 (B) の領域付近に、K-Tz 降下層準に近い層準で得た試料は、黄褐色土 (YB) の領域付近にプロットされている。しかし、より細かく見ると、例えば、Mm1 面(MYZ20180802-02、MYZ20181122-01)の被覆層基底部から得た試料は、Mf2 面(MYZ20181010-02pit、T5)の基底部よりやや上位の層準から得られた試料の方より、結晶度が低い。これは一見すると、古い被覆層の方が結晶度が低いように見える。ただし、これらの試料は、いずれも年代情報としては K-Tz 降下以降の堆積物である、という以外に情報はなく、層位の新旧を厳密に判定できる試料ではない。

また、分析結果のうち 6 点が、褐色土 (B)、黄褐色土 (YB)、赤色土 (R) の領域からはみ出してプロットされている。こうした分析結果はこれまで報告された事例はなく、分析結果が正しいとするならば、特異な例といえる。

これらの結果は、遊離酸化鉄分析の結晶度、活性度が、被覆層の堆積後の風化期間の長さのみに規制されているのではないことを示している。被覆層の測色値の項でふれたように、被覆層の赤色化には、基盤地質の違いが影響している可能性があり、同様に遊離酸化鉄分析の結果も溶結凝灰岩の分布する範囲に付近に分布する露頭ではより結晶度が高くなっている可能性がある。具体的には、T5、MYZ20181010-02pitであり、黄褐色土(YB)、赤色土(R)のいずれからもはみ出す、異常な値を示している。また、MYZ20181010-01の露頭も基盤が火成岩の貫入岩であるが、この露頭ではテフラ分析の結果から被覆層の再堆積が推定されるため、詳細な議論からは除外することとする。

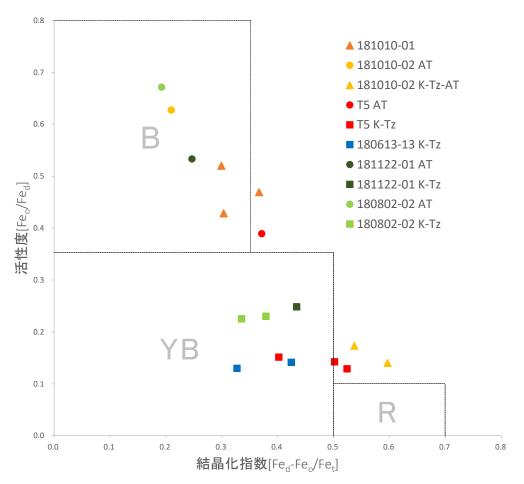


図 2.1-29 段丘被覆層の遊離酸化鉄分析結果

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:赤色土分析データは、各露頭番号と採取層準ごとに区分している。番号の後に AT がつく試料は、AT 層準付近、K-Tz がつく試料は K-Tz 層準付近から採取したものである。181010-02 K-Tz-AT としたものは K-Tz と AT に挟まれる層準から採取した試料。181010-01 の露頭は、被覆層が再堆積を起こしているため、詳細な採取層準を示さなかった。

4) 考察

平成 29 年度の宮崎平野南部地域に引き続き、平成 30 年度は宮崎平野北部に分布する段丘を対象として、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。今年度の調査・分析では、Mm1 面および Mf2 面の中位段丘を対象としたため、それらに含まれる段丘礫の礫種の違いや段丘の分布する地点の基盤地質の違いなどが、段丘礫、段丘被覆層の風化様式にどのような影響を与えているか、その影響は、どのような要因によるかを考察する。そのうえで、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を考える際に、どのような点に留意すべきかを考える。

(a) 段丘礫の風化性状と風化過程

本研究で対象とした地域では、野外露頭観察により、段丘礫は、低位面では新鮮であるが中位面では風化しており、両者が肉眼観察で容易に識別可能である。一方、中位面同士 (Mm1 面、Mf2 面)では、風化の程度が似通っており、肉眼観察の識別が難しい。それと同時に、露頭から

採取した礫試料の室内分析結果(有効間隙率、測色値)は、Mm1 面と Mf2 面で値がばらつきながら重なっており、区分可能なほど差は生じていない。有効間隙率、測色値とも宮崎平野南部とほぼ同じであり、砂岩に限定すると有効間隙率は、北部地域の方が若干小さい結果が得られているが比較的似た値をとること、低位面との風化度の明らかな違いなど合わせて考えると、北部地域でも低位段丘、中位段丘での風化の程度は、同じように変化していると推定される。したがって、段丘礫の風化程度は、低位段丘と中位段丘(あるいは高位段丘)を区別する指標にはなるが、中位段丘を細分するほどの精度はない。

一方で、分析有効間隙率、測色値の測定結果は、露頭間、礫種間を比較すると色調、有効間隙率の値にそれぞれグループ間でやや差があるが、同じグループ(同露頭の同岩種)に属する試料では似た値をとることが多いことが確認された。このことには、主に2つの要因が関係していると推定される。

一つ目は、礫種の違いあるいは同一礫種でも岩石組織や構成鉱物の違いにより風化の仕方の違いがあることによるものである。異なる礫種の場合は、肉眼的観察だけでも、風化様式に違いがあることは明らかである。礫の切断面の観察などにより、溶結凝灰岩の多くは、比較的明瞭な風化被膜を形成して風化が進行することが確認された。これに対して、砂岩礫では、礫全体が褐色化し、ほぼ均一に風化しているものが多い。この均一な風化は、砂岩礫では、基質部分が選択的に溶解していくことによるものと考えられている(西山ほか、2001、西山・松倉、2002)。こうした風化様式の違いは、岩石組織の違いにあると考えられる。

砂岩礫がほぼ均一に風化するのは、基質の間隙が岩石中でほぼ均一に分布するためと考えられる。これに対し、溶結凝灰岩では、ガラスの溶結により、隠微晶質の石英・長石・黒雲母などの鉱物に交代されており(木村ほか,1991)、基質部分は緻密で間隙が少なくなっていると考えられる。なお、明瞭な風化被膜をもつ溶結凝灰岩は、ポロシメータ測定により、風化被膜部での選択的溶解が顕著であり、該当部分では、間隙率が約20%に達するが、礫全体での間隙率の目安となる有効間隙率で砂岩礫と大きな差がなくなっており、岩種に関わらず、溶解によって減少する体積量は、それほど変わらないのかもしれない。

同一礫種でも岩石組織や構成鉱物の違いによる風化様式の違いが生じていると考えられる。今年度、調査・分析を行った地域では、砂岩礫は、礫全体が均一に風化するもののほかに、明瞭な風化被膜をもつものがある。

風化被膜を持つタイプの砂岩礫の多かった露頭である 180802-02 は Mm1 面であるが、より低位の Mf2 面の 180613-13 の砂岩礫よりも a*値、有効間隙率とも小さめの値を試料が多い。また、ポロシメータ測定の結果では、180802-02 の砂岩礫のうち、風化被膜を持つ試料では、外殻部と芯部の間隙率の差が大きく、また、間隙径分布のパターンが異なっており、全体がほぼ均一に風化する 180613-13 の砂岩礫とは異なった風化様式をとっている。また、XRD 分析の結果でも、180802-02 と 180613-13 が異なる風化様式である可能性を指摘できる。両者のうち、180802-02 の砂岩は、微量ではあるが風化によって形成されたと考えられるギブサイトを含むが、180613-13 の砂岩には、まったく見られない。有効間隙率や色調の点からは、180802-02 の砂岩より180613-13 の砂岩の方が風化が進んでいることが推定されるので、風化生成物であるギブサイトを欠くのは矛盾する。岩石組織の違いなどによりギブサイトが蓄積されにくい可能性が考えられる

このような風化様式の違いは、基質部分が選択的に溶解する砂岩の風化プロセスを考えるならば、初生的により基質の間隙が少ないか、あるいは基質が溶解しづらい鉱物から構成されるかのどちらかと考えられ、同じ砂岩でも組織または組成が異なっている可能性がある。

この露頭への礫の供給源と考えられる北西側には、宮崎平野南部とは異なる四万十帯の北部ユ

ニット中の泥岩ユニットが分布する(木村ほか,1991)。そこに分布する砂岩は、宮崎平野南部に礫を供給する地層である四万十帯の南部ユニット中の砂岩ユニットとは砂岩の組成に違いがあるとされている。

また、溶結凝灰岩についても、組成、組織が異なるものが存在する。尾鈴山酸性岩類に含まれる溶結凝灰岩は、噴出時期の異なる2つに分かれ、噴出時期の早いものは、流紋岩質、遅いものはデイサイト質とされる(木村ほか,1991)。また、溶結凝灰岩には、肉眼観察において識別できる程度の粒度の違いがある。今回、分析した溶結凝灰岩については、粗粒なもので、風化被膜が発達する傾向がみられた。

以上のように、岩種の違いのみならず、同一岩種であっても組成、組織に差があり、風化様式に影響を与えうると考えられる。同一露頭を考えた場合、供給河川の流路の類似した岩石的性質をもった礫が段丘堆積物を構成する可能性が考えられる。したがって、風化様式も同一露頭内では類似したものが形成されることになる。

もう一つの要因としては、露頭ごとの風化作用に及ぼす環境条件の違いである。段丘被覆層の 風化性状の項で後述するが、段丘被覆層の風化性状は、段丘露頭の周辺の基盤地質に影響を受け ているとみられる。段丘被覆層の分析結果は、遊離鉄の供給量に差があることを示唆する。した がって、鉄以外の金属についても、段丘構成層に浸透する水の中の含有量に差があり、そうした 金属を礫から溶出させる風化作用に影響を与える可能性が考えられる。しかし、現時点では、こ れらの影響の有無を判断できるデータは得られていない。

上記、二点の要因のいずれか、あるいは両方の複合を考えると、同一露頭内の同一岩種の礫の 風化の類似性は説明可能と考えられる。

(b) 段丘被覆層の風化性状と風化過程

本研究で対象とした地域では、低位段丘では適当な露頭が存在せず、野外露頭観察ができていない。このため、低位段丘と中位段丘の被覆層の性状比較ができない。

中位段丘については、Mm1 面と Mf2 面において被覆層を観察した。ただし、露頭観察を行った段丘の多くは、Mf2 面であり、Mm1 面との風化性状の違いを積極的に論じるのは難しい。中位段丘の被覆層の観察、測色、遊離酸化鉄分析結果からは、Mm1 面、Mf2 面は、段丘礫と同様、見え方、データ範囲について、明確に区分できる境界は見いだせない。

一方で、測色データの鉛直変化を見ると、中位段丘の露頭の多くは、宮崎平野南部でも確認できたように、a*値、b*値の上位層準から下位層準にかけての段階的な増加が認められる。宮崎平野南部で論じたように、この変化は、氷期間氷期サイクルに伴う温暖期の繰り返しによる風化作用によるものと考えられる。すなわち、中位段丘の下位層準は、現在を含む二回の温暖期を経験して赤褐色化したのに対し、上位層準は、現在の温暖期によって赤褐色化している過程であるため、下位層準に比べ赤褐色化が進んでいないと考えられる。K-Tz 付近の層準での a*値、b*値の比較も併せて考えると、宮崎平野北部も南部と同様の範囲を取りながら、赤色化が進行しているといえる。

一方で、Mm1 面、Mf2 面の段丘被覆層の風化性状には明瞭な差が見いだせないが、段丘礫と同様、露頭ごとにみると、異なる赤褐色化の経路をたどっている(図 2.1-28)。そして、周辺の基盤地質に溶結凝灰岩が分布する地点に位置する露頭において、より a*値の大きいパスで赤褐色化が進んでいように見える。このことは、露頭ごとに赤褐色化の進み方が異なることを示すと考えられる。

赤褐色化は、鉄の酸化により、針鉄鉱および赤鉄鉱が結晶成長することによる。一方、主に風 成層からなる被覆層には、ほとんど鉄を含む物質は含まれていない。すなわち、鉄は被覆層の堆 積後に外部から供給、追加されたものと考えられる。鉄は、段丘被覆層の堆積する酸素に富む環境では速やかに酸化されフェリハイドライトとなって沈殿するため(Drever, 1997)、地表において移動することが困難と考えられる。しかしながら、フェリハイドライトは、コロイドを形成するため、わずかな量ではあるが地下水に溶存し、運搬されうることが確認されている(Kersting and Smith, 1999)。こうした条件を考えた場合、段丘被覆層に蓄積される鉄の供給源は、周辺に分布する岩石・地層中に含まれる鉄と推定される。すなわち、周辺に分布する地質によって、供給される鉄の量は、露頭ごとに異なると推定される。

上述したように、露頭ごとに比較すると、周辺に溶結凝灰岩が分布する地点ではより a*値が大きいパスを経て、赤褐色化が進む。本研究地域の溶結凝灰岩は、流紋岩質ないしデイサイト質であるため、それほど苦鉄質の鉱物に富むわけではないが、それでも斜方輝石、黒雲母、チタン鉄鉱を斑晶として持つ(木村ほか,1991). 一方で、四万十帯砂岩・泥岩などの堆積岩では、緑泥石を除くと有色鉱物は乏しいと推定される。したがって、溶結凝灰岩分布域の周辺では、堆積岩分布域周辺に比べ、地表付近を浸透する水に含まれる鉄の量が多くなると推定される。

上記の推論は、遊離酸化鉄分析の結果からも裏付けられる。今回の分析結果は、宮崎平野南部とは傾向がやや異なり、同時代の層準を比較した場合に、より結晶度が高くなっている試料が見られた。これらの試料は、溶結凝灰岩の分布域の周辺に位置する露頭であり、上述のプロセスにより遊離鉄が多く供給されたことで結晶成長が進んだものと推定される。それと同時に、これらの試料では遊離鉄の活性度が高く、永塚(1973)のB: 褐色森林土、YB: 黄褐色土、R: 赤色土の領域からはみ出してしまっているものもある。このことは、これらの地層に含まれる遊離鉄がシュウ酸可溶態として多く存在していることを示す。すなわち、通常の土壌の酸化環境で想定される結晶成長では消化される遊離鉄の量を超えて、遊離鉄が過剰に供給されていることを示すと考えられる。

以上のように場所により遊離鉄の供給量に差があること、それによって、結晶度が影響をうけると考えると、平成 29 年度に実施した分析結果のうち、矛盾すると見られていたデータの再解釈が可能になる。昨年の分析結果では、宮崎平野南部での試料では、赤色土 (R) 領域にプロットされた試料は、一つを除き、高位面から得られた K-Tz より明らかに下位の試料に限られていた。赤色土 (R) 領域にプロットされたもののうちの一つ、Mf3 面のから得られた試料が、年代観に矛盾する結果となっていた。この試料の得られた箇所の周辺は、溶結凝灰岩の分布があるため、遊離鉄の供給量が多い箇所であったと解釈すれば、このデータは矛盾なく説明可能となる。一方、MIS7 に対比される幌延地域の段丘から得られた試料は、宮崎地域の K-Tz の層準付近から得られた試料と同じ黄褐色土 (YB) 領域にプロットされていた。昨年の解釈では、寒冷な気候条件における鉄鉱物の低調な結晶成長と風成層の材質の違いを原因として考えた。しかし、幌延地域には、基盤地質に珪藻質な泥岩が広く分布しており、遊離鉄の供給量が少ないことが推定される。したがって、幌延地域の遊離酸化鉄の結晶成長が低調な理由としては、冷涼な気候条件であることと遊離鉄の供給量の少なさの2点から理解することができる。

一方、宮崎平野北部における段丘被覆層は、酸化鉄鉱物の結晶成長が大きいにも関わらず、測色値の a*値は、最高でも 13 をやや超える程度であり、同程度の結晶度を示す宮崎平野南部の赤色土の領域の試料の層準が示す a*値 20 前後に比べ、明らかに小さい。このことは、結晶成長によって形成されている鉱物がもっぱら針鉄鉱であることを示すと考えられる。先にも論じた通り、赤色化が進むためには温暖期の風化作用が継続することが必要であるため、赤鉄鉱があまり形成されていないと考えられる。

段丘被覆層中の鉄鉱物の同定については、ボーリングコア試料を用いた XRD 分析で行ったが、 いずれの試料も針鉄鉱、赤鉄鉱のピークを確認できていない。これらの試料は、ギブサイトのピ ークがやや大きめに出ていることが特徴である。また、Mm2 面で掘削されたボーリングコアでは、下位層準の試料では石英のピークも含め全体的に回折ピークが小さい。このことは、非晶質な物質が多く含まれていることによるものと考えられる。これらの層準の下位には Aso-4 の火山灰と見られるシルト質の堆積物があり、これの影響により、試料採取層準付近もガラス質な構成物が多く含まれている可能性がある。針鉄鉱、赤鉄鉱のピークがいずれも確認できないのは、こうした被覆層の構成物による影響とボーリング位置の基盤地質が四万十帯の堆積岩でことによるものと考えられるが、比較対象となるデータが得られていないため、不明である。

(c) 段丘礫、被覆層の風化性状を用いた経験的指標の適用方法と留意点

以上の議論を踏まえて、現時点で考えられる経験的指標の適用方法と適用における留意点、さらには、今後の課題について考える。

これまで述べてきた通り、平成30年度に実施した調査・分析結果によれば、宮崎平野段丘礫、段丘被覆層による経験的指標に関して、中位段丘に関して、宮崎平野南部と同程度の風化程度を示しており、高位段丘、低位段丘との区別ができると考えられる。一方で、調査対象としたMm1面、Mf2面では、風化程度に明瞭な差が見られず、これらを区別する指標とはならない。段丘礫、段丘被覆層の風化程度は、礫の種類や基盤地質などの条件により、Mm1面、Mf2面程度の時代差を超える程度に違いが生じていると考えられる。逆にいえば、礫の種類や調査地における地質分布が均一な地域では、より細かな年代差を区別できる指標となる可能性もある。

今回の調査・分析の結果から、段丘礫、段丘被覆層の風化性状は、さまざまな要素が複合して 決まることが確認された。このことを念頭におくと、経験的指標の適用にあたっては、対象調査 地域でのそれらの風化性状に影響を与える要因を把握しておくことが、重要と考えられる。とく に宮崎地域で見られたように調査対象地域が広域に及んだ場合には、地区間で条件が変わる場合 が多くなると予想される。また、調査対象地域が宮崎平野よりも狭い範囲であっても、地質構造 が複雑で、かつ性質の異なる地質が隣接して分布する地域では適用に注意が必要になるであろう。

宮崎平野の溶結凝灰岩と砂岩の礫の風化では、少なくとも有効間隙率に関して同一露頭内では極端な差が見られなかった。これが偶然であるのかあるいはほかの岩種も含めて同様であるのかについては、現時点では不明である。しかし、既往の文献調査の結果によれば(濱田・幡谷、2011)、いわゆるクサリ礫や赤色土といった指標がある程度の年代的共通性をもって分布することは確かであり、岩種間の溶解過程や赤色化の過程は、それほど大きく変わらない可能性がある。宮崎平野北部における遊離酸化鉄分析結果が、永塚(1973)の分類領域を外れた結果となったのは、非常に例外的な地域であった可能性もある。一方、風化による有効間隙率の増加が、岩石の溶解現象を見ていることを考えると、石灰岩やチャートあるいは超苦鉄質岩など、極端に化学組成が異なる岩石では、大きく異なる変化が生じる可能性が考えられる。これらについては、今後のデータの蓄積が必要である。

風化様式に関しては、溶結凝灰岩では砂岩と異なり明瞭な風化被膜を持つことが確認された。今回の調査では中位段丘のみを対象としていたため、詳細な検討はしなかったが、これは既往の報告(栗山ほか, 2006; Oguchi, 2001; 濱田・幡谷, 2009) にある安山岩や玄武岩と同様にその幅が、年代指標として活用できる可能性が考えられる。また、一部の砂岩についても、同様のアプローチが有効である可能性がある。より年代幅の大きな段丘が分布する地域での調査事例の蓄積が望まれる。

以上、全体を通じて、経験的指標の適用性の向上、高度化を目指すためには、段丘礫、段丘被 覆層の風化作用を左右する条件を、これまで以上に明らかにすることが必要と考えられる。上述 したように、それらは、礫の岩種、地質分布などに規制されると予想されるが、これまでそうい った点を考慮して、風化性状を調査・分析してきた事例はなく、今後データを蓄積していく必要がある。そのうえで、条件ごとに風化性状の変化と年代との対応を確認することにより、指標の精度、信頼性の向上が可能になると考えられる。また、適用上の制限や限界などについても明らかになるであろう。こうした条件の調査については、実際の段丘礫、段丘被覆層を対象とした調査・分析が重要であるが、それだけでは事例の収集にかなりの時間と労力が必要になると考えられる。このため、風化性状を左右する条件の絞り込みについては、実験的なアプローチも有効である可能性もあり、こちらの点でもデータの蓄積が求められる。

⑤ まとめ

宮崎地域において、段丘礫層、段丘被覆層の風化性状を調べ、経験的指標の対比・編年指標としての適用性を検討した。その結果段丘礫の有効間隙率、赤色化、段丘被覆層の赤色化などの経験的指標は、高位、中位、低位といった大まかな段丘の区分には十分有効であることを確認した.

宮崎平野南部と北部では、段丘礫層、段丘被覆層の風化様式・性状に違いがあり、すべての段 丘に統一的に適用できる定量的指標は提示が難しい。しかし、中位段丘に限れば、段丘礫の有効 間隙率、色調などの風化性状は、共通性が認められ、段丘の新旧を区別する年代指標とすること ができる。また、中位段丘の複数の露頭間での風化性状に関する観察・分析結果の比較から礫岩 種や段丘礫・段丘被覆層の箇所周辺の基盤地質の違いにより、風化性状に差が生じていることを 確認した。より細かな区分は、段丘礫の有効間隙率については、風化を左右する岩石の初生的な 間隙率、間隙径分布、鉱物組成、鉱物量比、化学組成、段丘分布地域の基盤岩石の鉱物量比、鉱 物組成を個別に考慮したうえで、Al、Si、Ca などの溶出量を評価することにより可能である。ま た、段丘被覆層の赤色化については、段丘分布地域の基盤岩石の鉱物量比、鉱物組成を個別に考 慮したうえで、酸化鉄鉱物の結晶成長を評価することにより可能である。これらの組み合わせは、 調査対象地域ごとに異なるため、その都度、これらを調査、評価する必要があると考えられるが、 実際にどの程度の幅があるのかについては、現時点では明らかとは言えない。段丘礫・段丘被覆 層の風化性状による経験的指標を、より細かな年代指標とするためには、風化性状に影響する要 因とその影響を明らかにする必要があると考えられる。このため、異なる礫種、異なる地質分布 の条件でどのような風化性状が生じ、年代の異なる段丘でどのように変化していくのかの事例を 蓄積していくことが必要である。段丘礫に関しては、風化性状を規制する条件を実験的方法によ り、明らかにしていくことも重要と考えられる。

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

本研究開発は、沿岸部の隆起量の指標となる段丘のうち、岩盤侵食段丘を対象とした編年手法の高度化を目的として実施した。段丘面の離水年代は、一般的に離水後に堆積した被覆層を対象とした、火山灰分析や放射性炭素年代測定などによって推定される。しかし、被覆層を大きく欠く海成侵食段丘に対しては、これらの手法は適用できないという問題がある。このような海成侵食段丘に対しては、岩石中の宇宙線生成核種(terrestrial 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、どのような地形の形成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しうる。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。平成 29 年度は、完新世および 更新世の沿岸部の岩盤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。平成 30 年度は、複数段の海成段丘が発達する土佐湾北東岸地域(四万十帯の堆積岩類)と宮崎平野北部(中新世の 火成岩類)を事例対象として、更新世の海成侵食段丘上でのボーリングやピットの掘削により基盤岩試料を採取し、TCN 法の適用性や精度について検討した。

(b) 研究方法

TCN のうち、10Be や 26Al 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)、現在の地表面に露出する岩石の TCN の蓄積量は、岩石が地表面付近に滞在した時間に依存する。これを利用して、岩石の露出年代や侵食速度を推定することが可能である(若狭ほか, 2004;横山ほか, 2005)。

TCN 法を用いて地表面の露出年代を推定する方法の概要を以下に示す。一般に、ある地点における TCN の時間変化は、以下の式で記述できる:

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t) + P$$

ただし、N(t)は時刻 t (yr) における TCN の生成量 (atoms/g)、 λ は TCN の壊変定数 (/yr)、P は宇宙線照射による TCN の生成率(atoms/g/yr) である。なお、 λ の値は、 ^{10}Be では 4.998×10^{-7} /yr、 ^{26}Al では 9.667×10^{-7} /yr である。ここで、地表の侵食速度がゼロ、P が一定速度、t=0 における TCN の生成量がゼロの単純な場合を仮定すると、上記の式は以下のように解ける。

$$N(t) = \frac{P}{\lambda} \{ 1 - \exp(-\lambda t) \}$$

地表面における TCN の生成率は、宇宙線強度に依存するため、緯度や高度などを基に理論的に計算できる(例えば、Lal, 1991; Stone, 2000)。また、地表面化における生成率は、深度と地下物質の密度によって算出できる。したがって、地表あるいは任意深度における TCN 生成量 N(t) を測定することにより、上式から地表面の露出年代 t を求めることができる。ただし、実際には地表の侵食速度や堆積速度がゼロと仮定できるとは限らず、TCN の生成率 P は時間とともに変化すると考えた方が良い場合がある。そのときは、適当な侵食あるいは堆積のシナリオを考慮してデータを解釈する必要がある。本事業の場合、後述のように、段丘離水後の堆積層厚の増加による遮蔽効果を考慮に入れている。

(c) 地形・地質概要および採取試料

(i) 土佐湾北東岸地域の試料採取地点の地形・地質概要

本事例地域には、多段の更新世海成段丘が良く発達することが知られている(例えば、吉川ほか、1964;小池・町田、2001;Matsu'ura、2015)。本研究開発では、Matsu'ura (2015)により MIS 5e 以前に対比された高位段丘の H2 面と MIS 5e に対比された中位段丘の M1 面を対象に、前者 1 地点、後者 2 地点の計 3 地点で ϕ 86 mm でボーリングを掘削し、TCN 年代測定試料を採取した(図 2.1-30)。ボーリングについては、TCN 年代測定に必要な試料量を確保するため、同一地点において、約 50 cm 間隔で 4 本掘削した。

ボーリングコアの柱状図 (図 2.1-31) は、3 地点ともに堆積時期不明の斜面堆積物と解釈される基質支持の角 - 亜円礫層に被覆された細粒 - 中粒砂岩からなることを示す。基盤岩の上面が離水した海成侵食面だとすれば、本地域では、斜面堆積物の堆積時期を考慮した海成侵食面の露出

-埋没シナリオに基づく TCN 法の適用が必要であると考えられる。一方で、本研究開発の目的は、 海成侵食面への TCN 法の適用と有効性の確認にある。そこで、本研究開発では、後述するよう に、より単純な露出・埋没シナリオから TCN 年代の検討が期待できる宮崎平野北部を事例に試料 採取から年代測定までの作業を実施した。

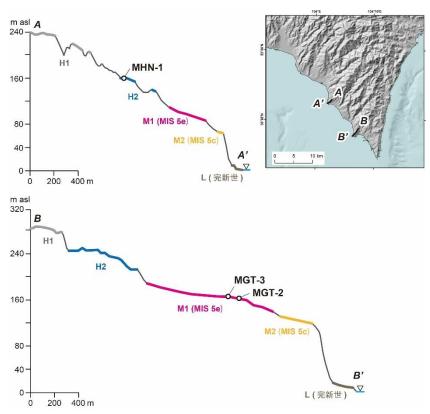
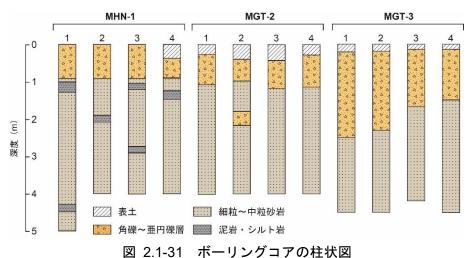


図 2.1-30 試料採取地点の地形

段丘面区分、段丘面の名称および段丘面と MIS との対比は、Matsu'ura (2015) を参照した。



(ii) 宮崎平野北部の試料採取地点の地形・地質概要

• 地形

調査地域には3段の海成段丘が分布する(図2.1-32)。これらの段丘を上位のものより順にそれぞれM1面、M2面、L面と呼ぶ。

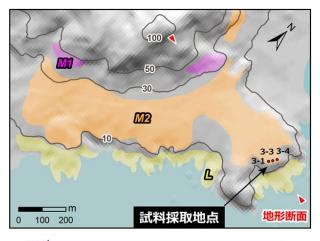
M1 面は、標高 30 - 50 m 付近に局所的に分布する。これに対して、M2 面は、標高 10 - 35 m にかけて広く分布する。L 面は離水波食棚を含む地形面であり、海面付近から標高 8 m 付近まで分布する。海成段丘の分布高度に基づくと、M1 面と M2 面は、長岡ほか(2010)の三財原面と新田原面に、L 面は完新世の地形面に対比されると考えられる。

TCN 試料となる岩石試料は、半島部に発達する M2 面の平坦面上(標高 19.3 - 19.7 m)で掘削した 3 箇所のピット(地点 3-1,3-3 および 3-4)から採取した(図 2.1-32)。以下に採取試料の概要と採取試料の岩石学的特徴について述べる。

・TCN 試料の概要

露頭観察に基づくと、TCN 試料採取地点周辺の M2 面は、柱状節理の発達する基盤岩と柱状節理に沿って風化し、基盤岩より剥離した大礫サイズの角-亜角礫、それらを覆う土壌層からなる。このことは、TCN 試料採取地点周辺が、波蝕棚起源の海成段丘面であることを示す。

3 箇所のピット断面はいずれも露頭観察結果と類似しており、下位から順に,基盤岩、大礫サイズの角-亜角礫層、土壌層からなる(図 2.1-33)。本研究開発では、基盤岩上の角-亜角礫層を原位置風化層と解釈し、その最上部にある礫 1 kg 程度を TCN 試料として採取した。



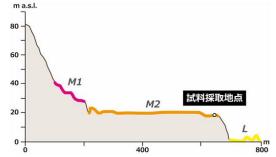


図 2.1-32 TCN 試料採取地点周辺の海成段丘分布図

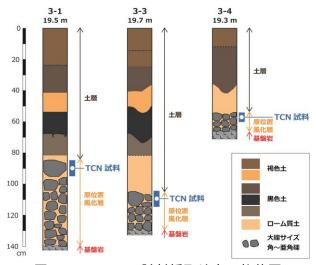


図 2.1-33 TCN 試料採取地点の柱状図

• 岩石学的特徵

採取した岩石試料は、中新世の火成岩類である尾鈴山酸性岩類(野沢・木野,1956;中田,1978)の花崗斑岩である。採取試料には、顕著な斑状組織が認められ、最大 ϕ 0.5 - 1.0 cm 程度の斑晶鉱物が肉眼でも確認できる。その一方で、本質レンズや異質岩片、堆積構造、ユータキシティック組織といった火砕流堆積物由来の特徴は認められない。

鏡下観察では、斑晶鉱物として石英、アルカリ長石、斜長石、変質した有色鉱物が確認される。 斑晶量は 20 - 40 vol.%程度で、斜長石が最も多い。石英は融食形を呈し、不定形のものや石基・他の斑晶鉱物を包有するものが多い(図 2.1-34)。石基は微細な石英とアルカリ長石からなり、全岩中の SiO_2 と K_2O は主にこの石基に含有されている。

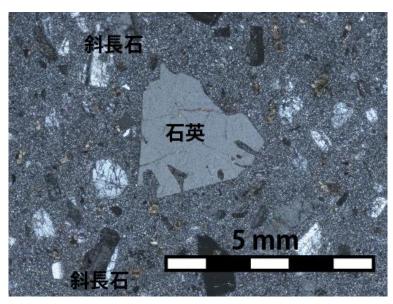


図 2.1-34 試料薄片写真

(d) 分析手順

採取した試料は Kohl and Nishizumi (1992) を基に松四 (2017) の手順に沿って前処理を実施した。手順のフローを図 2.1-35 に示す。

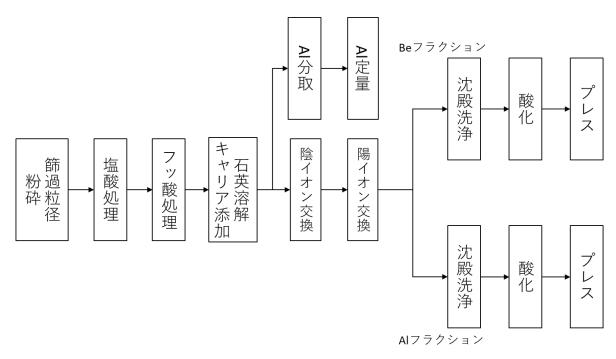


図 2.1-35 試料前処理フロー図

採取した試料を粉砕した後、径 0.25 - 1 mm に整粒した。その後、超音波水槽を用いて塩酸処理、フッ酸処理を実施し、試料中の Al_2O_3 が 0.5 %以下になるのを目安にフッ酸処理を繰り返した。 Al_2O_3 の含有量は XRF を用いて確認した。これにより、溶け残った石英粒子を分析の対象試料とした。各試料の整粒後重量、フッ酸処理のサイクル数、酸処理後の重量、 Al_2O_3 の含有量などを表 2.1-8 に示す。

表 2.1-8 使用した試料の整粒後重量・フッ酸処理のサイクル数および処理後の重量・Al₂O₃の含有量

試料名整粒後重量(g)	敷料沒舌具 (~)	フッ酸処理の	フッ酸処理後	Al ₂ O ₃ 含有量
	登松後里里(g)	サイクル数	重量 (g)	(XRF) (%)
3-1_095	720.06	5サイクル	25.75	0.35
3-3_115	688.22	4サイクル	21.63	0.54
3-4_055	672.76	4サイクル	23.72	0.37

次に乾燥させた石英粒子に富士フィルム和光純薬製原子吸光用標準溶液 Be-100 ppm を 3 ml 加えた。なお、ブランク試料には富士フィルム和光純薬製原子吸光用標準溶液 Al-1,000 ppm も 2 ml 加えた。その後、 $HF \cdot HNO_3$ および $HClO_4$ を用いて石英を溶解した。その際に、ジルコンやチタン鉄鉱、フッ化物などの混入が確認されたので、超音波処理を行ったうえ、遠心分離により、石英以外の残渣と試料溶液に分離し、上澄みの試料溶液を回収した。また、残渣を超純水で 3 回洗浄・回収し、残渣に付着した溶液も試料溶液として回収した。残渣は重量を測り、溶解前の試料重量から減算した。



図 2.1-36 残渣写真 (黒色:チタン鉄鉱、透明鉱物:ジルコン、白色:ふっ化物)

試料溶液を蒸発乾固させ、 HNO_3 を加えて溶液とした後、Al 定量分析を行うため、 $7.5\,ml$ を分取した。その際に、溶液中にチタンからなる白色微粒子が発生したため、超音波処理・加温処理・ HF/HNO_3 、 H_2O_2 、HCl での再分解・遠心分離による分離を行ったが、微粒子を完全に除くには至らなかった。そのため、Al 定量用の分取は微粒子が入らないように留意した。Al の定量は原子力機構 東濃地科学センター設置の ICP-OES (Agilent 5110) において行った。残試料溶液はイオン交換分離によって Be と Al をそれぞれ抽出した。抽出した Be はアートボックスに入れて電子レンジで加熱、Al は炉で加熱して酸化物とした後、カソードにプレス($200\,kPa$ で 1 秒間)した。

 10 Be および 26 Al の加速器質量分析は原子力機構東濃地科学センターの加速器(JAEA-AMS-TONO)において行った。設定条件は測定電圧 $4.5~\mathrm{MV}$ 、ガスセルは未使用、その他については Saitou-Kokubu et al. (2015)に従った。計測した試料の同位体比には、標準試料の同位体比 (10 Be/ 9 Be = (2.709 ± 0.030)×10-11, Nishiizumi et al., 2007)を用いて標準補正を施した。

(e) 分析結果

分析結果を表 2.1-9 に示す。 10 Be 濃度から推定される minimum exposure age(TCN の生成率 P が時間変化しないと仮定した場合の年代)は約 105-70 ka の比較的まとまりが良い値を示した一方で、 26 Al 濃度の場合は約 62-26ka とややばらつきが見られた。 26 Al/ 10 Be の濃度比は、本研究地域における両核種の生成率から理論的に計算すると 6.8 ± 0.6 程度になることが予測されるが、本事業で得られた値は 3 試料ともこの値を有意に下回る。上記の理論的な 26 Al/ 10 Be 比は、純粋な石英(SiO₂)を仮定した値であるため、図 2.1-36 で示したような残渣の存在により 26 Al/ 10 Be が影響を受けたと考えられる。一般にこのような不純物による影響は 10 Be で小さく 26 Al で大きいこと、先述のように minimum exposure age は 10 Be で比較的まとまりが良く 26 Al でばらつくことから、以下では 26 Al の測定結果は参考値として議論には用いない。

表 2.1-9 分析結果一覧

Sample ID	Nuclide	Nuclide conc. ±1 s.d. (10 ⁴ atoms g ⁻¹)	²⁶ Al/ ¹⁰ Be ±1 s.d.	Production rate ± 1 s.d. (atoms g ⁻¹ yr ⁻¹)	Model (generally minimum) exposure age ± 1 s.d. (ka)
3-1_095	¹⁰ Be	18.6 ± 1.2	4.3 ± 0.9	2.7 ± 0.2	70.1 ± 7.4
	²⁶ Al	79.6 ± 15.5		18.2 ± 1.5	44.6 ± 9.7
3-3_115	¹⁰ Be	25.5 ± 1.6	4.0 ± 0.7	2.5 ± 0.2	105.1 ± 11.6
	²⁶ Al	101 ± 17		16.8 ± 1.5	62 ± 12
3-4_055	¹⁰ Be	26.9 ± 1.4	2.0 ± 0.3	3.1 ± 0.2	87.4 ± 7.7
	²⁶ Al	54 ± 8		21.3 ± 1.5	26 ± 4

表 2.1-9 で示した minimum exposure age は、単純な侵食・堆積プロセスを仮定した場合の露出年代である。すなわち、各試料は段丘離水時から TCN の蓄積を開始しており、また上載する堆積物の厚さは離水時から現在まで一定だと仮定されている。このような仮定は実際には成り立たないため、離水前の TCN の蓄積量と、離水後の堆積厚の変化を考慮し、より厳密な検討を行った。離水前の TCN の蓄積量は、面の形成年代から離水年代までの時期に、一定速度の侵食が継続したと仮定して計算した。侵食速度は、本地域の隆起速度と釣り合っていると仮定し、段丘面の標高(20 m で計算)を離水年代で割った値を用いた。面の形成年代は離水年代から決定しており、離水時と同程度の海面高度の時代に面が形成されたと考え、酸素同位体が離水時と同程度の直近の時代を仮定した。なお今回は、離水年代が80 ka(MIS 5a)と100 ka(MIS 5c)の場合を検討したが、面の形成年代はいずれも130kaで計算されている。離水後の堆積厚は、離水後から現在までの堆積速度一定として計算した。現在の堆積層厚は、各試料採取地点の実測値に基づいて、地点3-1で86cm、地点3-3で105cm、地点3-4で55cmと与えた。上載層の密度は、クロボク土の乾燥かさ密度である0.65 g/cm³を用いた。基盤岩の密度は2.5 g/cm³とした。

検討結果を図 2.1-37 と図 2.1-38 に示す。各図は、それぞれ左から地点 3-1、地点 3-3、地点 3-4 の堆積厚を用いた場合の 10 Be 濃度の深度プロファイルを示す。プロットは各試料の 10 Be 濃度を表しており、赤で示したマーカーが、深度プロファイルを計算した地点のデータを示す。すなわち、赤で示したマーカーがプロファイル上に載っていれば、その地点では実測値と理論値が整合的だということになる。図 2.1-37 は 80 ka(MIS 5a)、図 2.1-38 は 100 ka(MIS 5c)の離水を仮定している。図 2.1-37 では、地点 3-1 を除く 2 地点で、実測値と理論値がよく一致している。一方で、図 2.1-38 ではいずれの地点でも実測値と理論値が乖離する結果となった。したがって、今回の分析結果に基づけば、M2 面の離水年代は MIS 5a の可能性が高い。この結果は、M2 面が新田原面(MIS 5c に離水)に対比されるという従来の説に、再検討が必要な可能性を示唆する。ただし、本検討では上載層の密度に乾燥密度を用いているが、自然の状態では水分を含んでいるはずであり、より大きい値を用いるべきかもしれない。その場合、 10 Be 濃度の深度プロファイルはグラフの左側にずれるため、離水年代が若干古くなる可能性がある。本検討に用いた他の仮定やパラメータの吟味も含めて、今後の課題である。

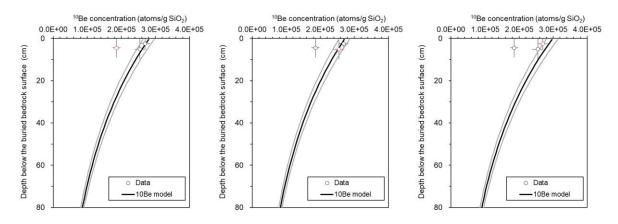


図 2.1-37 離水年代を 80ka (MIS 5a) と仮定した時の ¹⁰Be 濃度の深度プロファイル

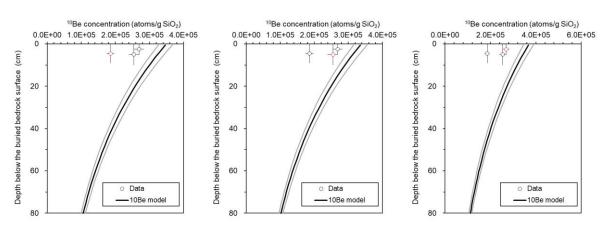


図 2.1-38 離水年代を 100ka (MIS 5c) と仮定した時の ¹⁰Be 濃度の深度プロファイル

なお、本検討結果に基づくと、離水前の TCN 蓄積量を考慮していない minimum exposure age (表 2.1-9) と、考慮した場合の図 2.1-37 および図 2.1-38 の結果に、顕著な乖離は見られなかった。この結果は、少なくとも約 10 万年より古い段丘については、離水前の TCN 蓄積量はほぼ無視できることを示唆している。平成 29 年度に検討したように、海成侵食段丘は波蝕棚が離水したものであるが、波蝕棚は面全体が同時に形成されるわけではなく、海食崖が後退することで形成されるため、厳密には同一面上でも面の形成時期が異なるはずである。しかし、上記のように離水前の TCN 蓄積量の影響が無視できるのであれば、面の中における試料の採取位置は、離水年代の推定結果に影響しないことになる。一方、完新世段丘のような若い段丘については、別途定量的な検討が必要であり、今後の検討が望まれる。

(f)まとめ

本事業では、沿岸部における隆起量・侵食量の見積もり方法の検討の一環として、従来の手法では離水年代の推定が困難だった海成侵食段丘の編年手法の高度化を目的として、TCN 法の適用可能性を検証するための現地データの取得を第一の目標とした。事例研究として、土佐湾北東岸地域(四万十帯の砂岩)と宮崎平野北部(中新世の火成岩)の海成侵食段丘において TCN 法の適用を試みた。年代測定試料については、前者ではボーリング掘削により、後者ではピット掘削により採取した。

ボーリングおよびピット掘削から明らかになった試料採取地点の地形・地質条件から、後者に比べて前者では、より複雑な露出・埋没過程が予想された。それゆえ、本研究開発では、より単純なシナリオによって TCN 年代を検討できる後者の地域で TCN 年代測定の検討を行った。その結果、10Be 濃度からは 105 - 70 ka の minimum exposure age が得られた。離水前の TCN 蓄積量や、離水後の堆積層厚変化を考慮すると、80 ka (MIS 5a) の離水が示唆された。この結果は、従来の知見と比べると、面の離水年代を若干若く見直す必要がある可能性を示している。その一方で、26Al 濃度の測定については、石英の純化に問題があったため、年代値の推定まで至らなかった。以上の結果として、全国の沿岸部に広範に分布する、MIS 5 前後に形成された海成侵食段丘に対して、いくつか課題は残るものの、TCN 法を用いて離水年代が推定できる可能性が提示できた。すなわち、本事業の第一の目的は達成できたと考えられる。

今後の課題としては、離水年代の精度・確度の向上が求められる。具体的には、試料前処理における石英の純化方法の高度化、侵食・堆積シナリオの検討に用いた仮定やパラメータの吟味、複雑な露出ー埋没過程を経る段丘形成史の復元手法の構築が挙げられる。また、本手法の適用範囲の拡大や、様々な地形・地質条件下における適用性の検討のため、より多様な地域における事例の蓄積が望まれる。

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

平成 29 年度の本事業では、陸成・汽水成・海成の区別に加え、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、隆起・沈降量の精度の高い評価が期待できる珪藻分析の事例研究による適用性の検討を行った。しかしながら、基盤岩が珪藻化石に富む堆積岩である場合、それらの再堆積の影響が大きくなり、局所的に分布する堆積物のみから堆積環境を推定するのは困難な結果となった。そこで平成 30 年度の本事業では、他の手法として、化石鑑定や堆積相解析のようなエキスパートジャッジを伴わずに陸成・汽水成・海成の区別が可能で、分析手法も比較的容易な全有機炭素・全窒素・全硫黄分析(CNS 分析)の適用性の検討を行った。事例研究対象とした露頭は、平成 29 年度と同じで、地形判読により MIS 5e とされている段丘面の堆積物である(産業技術総合研究所ほか, 2018 の図 2.1-34)。

CNS 分析の結果は、すべての試料において全有機炭素濃度が 0.18%以下、全窒素濃度が 0.07% 以下、全硫黄濃度が 0.004%以下といずれも極めて低い値となった (表 2.1-10)。リズミカルな砂泥互層を主体とする産状も踏まえると、当該地域は堆積速度の速い環境下にあったことが示唆され、CNS 分析によっても陸成・汽水成・海成の厳密な区別が困難な結果となった。

なお、当該露頭は、石英粒子の OSL 年代測定からは、KS-F6 より下位では線量が飽和し、石英 OSL 年代の検出限界 (約 $100 \, \mathrm{ka}$) より古い可能性が高い一方、KS-F5 と KS-F4 では約 $60 \, \mathrm{ka}$ 、 KS-F3 と KS-F1 では約 $40 \, \mathrm{ka}$ の年代を示す(原子力機構, 2018)。また、KS-F1 の層準ではソイルウェッジが発達し、最終氷期よりも前に堆積していたことを示唆する。したがって、MIS5e より後に KS-F6 直上の擾乱した礫層の部分で離水した可能性があるが、OSL 年代の妥当性の検証ができず、これ以上の検証は困難である。テフラ分析についても、本地域の場合は、基盤岩由来の火山ガラス・鉱物の再堆積の可能性が排除できず、テフロクロノロジーによる編年も難しい。

以上より、局所的な堆積物のみでの検討では、各手法における固有の問題点が強調され、隆起・ 侵食評価が困難な場合があることが明確となった。処分事業におけるサイト選定の観点からは、 局所的な堆積物に拘らず、周辺の条件の良い地点においてボーリングなどを行うことで、より信 頼性の高いデータの取得を目指すことも重要であると考えられる。

表 2.1-10 事例対象地域における珪藻および CNS 分析結果

	珪藻化石分析 (割合:%)					CNS 分析 (濃度:%)		
試料採取 位置	海水種(絶滅種)	海水種(その他)	汽水種	淡水種	その他 不明種	全炭素	全窒素	全硫黄
KS-F1	61.0	31.0	1.4	0.5	6.2	0.18	0.07	<0.002
KS-F2	73.4	20.3	0.0	2.9	3.4	0.18	0.07	<0.002
KS-F3	77.1	17.8	0.0	3.3	1.9	0.16	0.07	0.003
KS-F4	83.9	14.8	0.0	0.4	0.9	0.13	0.06	0.004
KS-F5	68.3	23.9	0.5	6.3	1.0	0.085	0.05	0.004
KS-F6	36.1	39.5	0.0	21.0	3.4	0.12	0.06	<0.002
KS-F7	56.0	9.7	0.0	33.3	0.9	0.14	0.06	0.002
KS-F8	24.8	40.3	3.4	29.1	2.4	0.09	0.05	0.004

試料採取位置の詳細は産業技術総合研究所ほか(2018)の 56 ページを参照。

③ 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(テフロクロノロジー)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。実際の堆積物中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。これらのことか ら、沖積層の既存のコア試料中(鍜治ほか、2018)に含まれる洪水堆積物にパッチ状に含まれる テフラを用いて、その多様性や対比方法について検討した。

洪水堆積物については、形成年代を明らかにするため堆積物に含まれる樹幹の外側の部分と枝と考えられる木片について放射性炭素年代測定を行った結果、25-241 calAD(較正年代 西暦) および 44 calBC(較正年代 紀元前)-177 calAD といった値が得られた。さらに、洪水堆積物に含まれる火山ガラスについて電子プローブマイクロアナライザ(EPMA)による分析を行なった結果、その分析値は SiO_2 が 54.1 - 79.5 wt.%、 TiO_2 が 0.00 - 0.56 wt.%、 Al_2O_3 が 11.3 - 28.8 wt.%、 Fe_2O_3 が 0.29 - 4.45 wt.%、MnO が 0.00 - 0.19 wt.%、MgO が 0.01 - 0.12 wt.%、CaO が 0.23 - 11.7 wt.%、 Na_2O が 2.98 - 5.53 wt.%、 K_2O が 0.09 - 8.79 wt.%とバリエーションが認め

られた。テフラの対比においてはハーカー図がよく用いられるが、青木・町田 (2006) は TiO₂-K₂O 比が有効であることを指摘している。その理由として TiO₂、K₂O ともに他の成分に比べて 火山ごとの組成の分布範囲が広いことが挙げられる。また、K2O は給源火山の火山フロントから の距離と、火山帯によって値が特定の傾向を持っており、火山岩の組成は火山フロントから背弧 側に向かうにつれて K₂O に富むことが知られている。青木・町田 (2006)は日本の主な噴火に伴 う火山ガラスの組成のコンパイルを行なっているが、これと洪水堆積物に含まれるパッチ状テフ ラとを対比すると、洪水堆積物には多くのテフラが含まれている可能性が示唆される。このこと は TiO₂-K₂O 比による対比が広域テフラを判別する上で有効であることを示すが、ローカルテフ ラの場合は対比される可能性のあるテフラに対して主元素組成以外の情報によるクロスチェック を行う必要があると考えられる。この場合、検討すべき項目はテフラに含まれる鉱物の組み合わ せ、屈折率、粒度分布、層序といった基本的な情報に加えて、鉱物の化学組成(チタン磁鉄鉱, 長石など)や火山ガラスの微量元素組成が挙げられる。火山ガラスの微量元素分析には、従来か ら数 10 mg - 数 100 mg 程度の試料を用いて中性子放射化分析 (INAA)、誘導結合プラズマ質量 分析 (ICP-MS) が用いられてきたが、近年ではレーザーアブレーション装置を導入した LA-ICP-MS を用いると、EPMA と同じくシングル・グレイン分析を行うことが可能になっている。その 場合には火山ガラスの希土類元素などの分析によって区分することが有効であると考えられる。

なお、以上のようにテフラを用いた場合は一層の堆積年代を推定することができるが、長期にわたる連続した各層の年代値や堆積速度などの堆積層の形成過程に関する情報を得ることは難しい。連続した各層の年代値を得るためには、各層の土壌中に含まれる植物片などを加速器質量分析法による放射性炭素年代測定に用いることが有効である。しかし、各層を年代測定することにより必然的に試料数が増え、さらに堆積層の形成過程を議論するためには、複数の堆積層を評価する必要もあることから扱う試料数は多数となるほか、僅かな量の試料に対する測定も望まれる。放射性炭素年代測定では試料調製が律速であるため、自動グラファイト調製装置(Ionplus 社製AGE3)を用いた少量試料での試料調製について検討した(Appendix V)。自動グラファイト調製装置は、試料燃焼からグラファイト調整までの作業を自動で行うため、試料調製の大幅な迅速化が期待できる。これらの技術は多試料の年代測定を可能とし、その結果として、堆積物を用いた隆起量推定の精度を向上させる上も有効であると考えられる。

(3) まとめと今後の課題

沿岸域における隆起・侵食の検討については、宮崎平野の事例研究を継続し、陸域において構築した隆起モデルを海域に外挿して海域の隆起・沈降量を見積もる手法(外挿法)について検討した。本研究では、最も単純な一様傾動モデルによる外挿法の手順、モデルの不確実性を反映した複数のモデルの提示、地史の検討によるモデルの絞り込みと検証、モデルの不確実性を反映した隆起量評価の不確実性の提示方法を提案した。これを受け、特に重要と考えられる今後の課題として、以下の2点を挙げたい。まず、要素技術である。広い範囲での隆起量データの取得に対しては、様々な時代に形成された段丘の、言い換えれば、より形成年代が古いものも含めた幅広い段丘対比・編年手法の構築が望まれる。この点については、本節3)において検討を進めているが、更なる検討が必要である。次に、地質構造に関わる問題である。宮崎平野の南部およびその沿岸海域では、大局的に、地質構造が北北東・南南西走向から北西・南東走向に屈曲し大きく変わる。宮崎層群とその上位の更新統との境界は、宮崎層群の屈曲を覆ってほぼ南北に伸び、更新世以降に限れば、一様傾動モデルで近似できる可能性もあるかもしれない。しかし、単純に適用することはできないと考えられる。このような断層や褶曲が分布する地域における陸域から海域への外挿法の適用は引き続き今後の課題である。

謝辞

「1)沿岸域における隆起・侵食の検討」で用いた海上音波探査記録は、沿岸の海の基本図調査データに関しては海上保安庁より、旧地質調査所(現産業技術総合研究所)・GH83-1調査航海データに関しては産業技術総合研究所産業技術総合研究所地質調査総合センター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。

参考文献

- 青木かおり, 町田 洋, 日本に分布する第四紀後期広域テフラの主元素組成-K2O-TiO2図による テフラの識別, 地質調査研究報告, vol.57, pp.239-258, 2006.
- 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.
- Castillo, C.M., Klemperer, S.L., Ingle Jr, J.C., Powell II, C.L., Legg, M.R. and Francis, R.D., Late Quaternary subsidence of Santa Catalina Island, California Continental Boredeland, demonstrated by seismic-reflection data and fossil assemblages from submerged marine terraces, Geological Society of America Bulletin, vol.131, 22p, 2018.
- Chaytor, J.D., Goldfinger, C., Meiner, M.A., Huftile, G.J., Romsos, C.G. and Legg, M.R., Measuring vertical tectonic motion at the intersection of the Santa Cruz-Catalina Ridge and Northern Channel Islands platform, California Continental Borderland, using submerged paleoshorelines. Geological Society of America Bulletin, vol.120, pp.1053–1071, 2008.
- 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.
- 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, 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.
- 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, 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, 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, 26p., 2015.
- 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,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.

- 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.
- 井関弘太郎, 沖積層基底礫層について, 地学雑誌, vol.84, pp.247-264, 1975.
- 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
- 地盤工学会編, 岩の調査と試験, 地盤工学会, 540p., 1989.
- 地震調査委員会, 2013、九州地域の活断層の長期評価(第一版/平成 25 年 2 月 1 日). https://www.jishin.go.jp/main/chousa/13feb_chi_kyushu/k_honbun.pdf
- 鍛冶純輝, 岡田里奈, 梅田浩司, 石田将貴, 内館美紀, 鎌滝孝信, 津軽半島, 鳴沢川流域にみられる過去の洪水堆積物の特徴, 東北地域災害科学研究, vol.54, pp.43-48, 2018.
- Kersting, A.B., Smith, D.K., Migration of plutonium in ground water at the Nevada Test Site. Nature 397, 56-59, 1999.
- 木村克己・巌谷敏光・三村弘二・佐藤喜男・佐藤岱生・鈴木祐一郎・坂巻幸雄,尾鈴山地域の地質.地域地質研究報告(5万分の1地質図幅),地質調査所,137p.,1991.
- Kohl, C.P. and Nishiizumi, K., Chemical isolation of quartz for measurement of in-situ-produced cosmogenic nuclides, Geochimica et Cosmochimica Acta, vol. 56, pp.3583-3587, 1992.
- 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.
- 栗山健弘, 吉田英一, 山本博文, 勝田長貴, 河岸段丘磯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.
- Lal, D., Cosmic ray labeling of erosion surfaces: in situ nuclide production rates and erosion models, Ealth and Planetary Science Letters, vol.104, pp.424-439, 1991.
- 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.
- 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.
- Matsu'ura, T., Late Quaternary uplift rate inferred from marine terraces, Muroto Peninsula, southwest Japan: Forearc deformation in an oblique subduction zone, Geomorphology, vol.234 pp.135-150, 2015.
- 松四雄騎, 宇宙線生成核種を用いた岩盤の風化と土層の生成に関する速度論-手法の原理, 適用法, 研究の現状と課題-, 地学雑誌, vol.126, pp.487-511, 2017.
- 松四雄騎, 若狭 幸, 松崎浩之, 松倉公憲, 宇宙線生成核種 10Be および 26Al 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.
- 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 geothite 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.347-370, 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ー海

- 面変化とテクトニクスに関連して一, 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.
- Nakada, M., Yonekura, N. and Lambeck, K., Late Pleistocene and Holocene sea-level changes in Japan: implications for tectonic histories and mantle rheology, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, vol.85, pp.107-122, 1991.
- 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, 1961a.
- 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.1-61,1961b.
- 中田節也, 尾鈴山酸性岩の地質, 地質学雑誌, vol.84, pp.243-256, 1978.
- 日本第四紀学会編, 日本第四紀地図解説, 東京大学出版会, 119p., 1987.
- 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.
- 日本土壤肥料学会(監修),土壤環境分析法,博友社,427p.,1997.
- 日本原子力研究開発機構,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 地質環境長期安定性評価確証技術開発報告書,217p.,2018.
- 西山賢一, 松倉公憲, 風化による砂岩の岩石組織の変化: 南九州における四万十帯砂岩の例, 地質學雜誌, vol.108, pp.410-413, 2002.
- 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.
- Nishiizumi, K., Imamura, M., Cafee, M. W., Southon, J. R., Finkel, R. C. and McAninch, J., Absolute Calibration of 10Be AMS Standards, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B vol. 258, pp.403-413, 2007.
- 野村勝弘,谷川晋一,雨宮浩樹,安江健一,日本列島の過去約十万年間の隆起量に関する情報整理, 日本原子力研究開発機構,JAEA-Data/Code2016-015, 49p, 2017.
- 野沢 保, 木野義人, 5 万分の 1 地質図幅「富高」同説明書, 地質調査所, 22p, 1956.
- Oguchi, C.T. (2001) Formation of weathering rinds on andesite., Earth Surface Processes and Landform, 26:847-858.
- 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.
- 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.
- Saito-Kokubu, Y., Matsubara, A., Miyake, M., Nishizawa, A., Ohwaki, Y., Nishio, T., Sanada, K., Hanaki, T., Progress on multi-nuclide AMS of JAEA-AMS-TONO, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 361, pp.48-53, 2015.
- 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, 2018.
- 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.
- 嶋村 清, 改訂「日本列島海底谷系図」-海底谷の地形的特徴と問題点-, 地質学雑誌, vol.114, pp.560-576, 2008.
- Stone, J.O., Air pressure and cosmogenic isotope production, Journal of Geophysical Research, vol.105, pp.23753-23759, 2000.

- 鈴木秀明, 宮崎層群の層位学的研究, 東北大學理學部地質學古生物學教室研究邦文報告, vol.90, pp.1-24, 1987
- 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. 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.
- 吉川虎雄, 貝塚爽平, 太田陽子, 土佐湾北東岸の海岸段丘と地殻変動, 地理学評論, vol.37, pp.627-648, 1964.
- 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.

2.1.2 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

火山・火成活動が地層処分システムに及ぼす影響としては、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。また、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)と指摘されている。

一方で、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)。

2) 沿岸部における地球物理学的手法の適用性と課題

これまで本事業では、マグマ・深部流体などの有無や分布を確認するための地球物理学的手法 について、沿岸部への適用のための技術の高度化およびその適用事例の提示を目標として、主に 陸域を対象とした既存の調査・研究事例などに関する情報の収集および分析により、沿岸部での 調査に対する現状の技術の適用性や課題を整理した(表 2.1-11)。その結果、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これまでの調査・研究では、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い ることが明らかになった。このうち MT 法に関しては浅海域における観測の困難性が指摘されて いるものの、それに対応する観測技術の開発が既に進められている(産業技術総合研究所, 2013)。 一方で、地震波トモグラフィのほか、レシーバ関数解析やS波反射面解析といった地震学的手法 では、それぞれの解析の入力データとして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地震観測網の端部または外側となる沿岸部での震源決定精度の向上が必要で あることを示した(図 2.1-39)。沿岸部に対して地震波トモグラフィを適用する場合は、高い精 度で決定された震源パラメータ(発震時刻および震源位置)を用いる必要がある。また、近年で は地層処分システムへの影響の観点から、沿岸部における長期間の湧水発生に係る知見の蓄積の 重要性が指摘されている(地層処分技術 WG, 2014)

そのため以上のことから、平成 30 年度は、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である地震波トモグラフィに着目し、平成 29 年度に引き続き堆積層などの層厚分布を考慮した震源再決定を行うとともに(後述の「1)沿岸部における震源決定精度の向上に関する検討」)、これを地震波トモグラフィにも適用した解析を実施することでその妥当性を検討

した(後述の「2)沿岸部における地震波トモグラフィの精度向上に関する検討」)。さらに、地層処分システムへの影響も指摘されている地震活動に伴って生じた沿岸部における長期間の湧水と深部流体との関連性について、福島県浜通りでの事例を基に検討した(後述の「3)沿岸部における長期間湧水と深部流体との関連性に関する検討」)。

	_	•			• 1-1 : 11121
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	・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	・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	・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	地殼内	位置決定精度(陸域):数km	流体分布域: 上面深さ	・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	·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
地殼熱流量 地温勾配 測定	地表付近での熱的 情報	地殼内	分解能:観測点間隔と同程度	高温領域の存否	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	地殼内	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	・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	・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。

表 2.1-11 マグマや深部流体に関する地球物理学的手法の概要

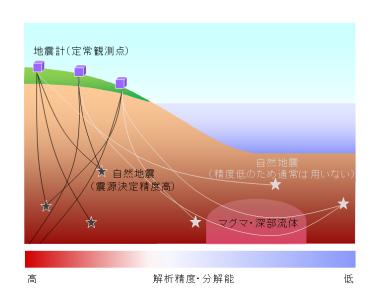


図 2.1-39 沿岸部での自然地震観測による地下構造の推定に関する模式図

(2) 実施内容

1) 沿岸部における震源決定精度の向上に関する検討

自然地震データを用いる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用い、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。この手法を使ったこれまでの研究では、そのほとんどが陸域に展開される定常地震観測網で記録された地震観測データを用いているため、主に観測網の内側となる陸域を解析対象としている(例えば、Zhao et al., 1992; Nakajima et al., 2001)。一方、定常地震観測網の端部あるいは外側に位

置する沿岸部への適用性の観点でみた場合は、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)で分布しているが、従来の方法ではこれらの詳細 な分布が解析に考慮されていない。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 地殼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(図 2.1-40)。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 対応も重要となるが、近年では地震波の後続波を利用することによって海域への適用が進められ ている(例えば、Wang and Zhao, 2005; Liu et al., 2013)。このため、本事業では一つ目の課 題の解決を目的とした震源決定および地震波トモグラフィの高度化について検討した。

図 2.1-41 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(主に堆積層)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。

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 2.1-42)。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(図 2.1-43)。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。そのため、平成 29 年度においては、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て、これらの影響を考慮した震源再決定解析を実施し、その妥当性を示した。以下では、次項で述べる地震波トモグラフィの入力データを得るため、やや広い領域を対象として平成 30 年度に改めて実施した震源再決定の成果について示す。

震源再決定に用いた地震データは、2005年1月から2018年7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 3,509 個の浅発地震である(図 2.1-44)。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(図 2.1-41)を地震波速度境界として考慮した。

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、解析領域における深さ分布を図 2.1-43 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、上部地殻の平均的な地震波速度(P 波速度 6.0 km/s、S 波速度 3.5 km/s)に比べて極めて地震波速度が遅い層(P 波速度 2.0 -5.0 km/s、S 波速度 1.2 -2.9 km/s)が厚く分布する。一方で、陸域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または深部に誤って決定されてしまうと考えられる。

この震源再決定によって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」という)分布とともに図 2.1-44に示す。初期震源は、その 29%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 2.46 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 1.23 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やや西側にシフトしている傾向がみられる(図 2.1-44)。この傾向は、前述のように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 2.1-45 には、震源分布の東西断面図を示す。これによると、宗谷岬以北の海域では東に傾斜する震源の集中域(図中の青点線枠)が認められ、その南端部は 20°E の傾斜を持つサロベツ断層帯海域延長部(産業技術総合研究所, 2012b)のやや東方に位置することから、この断層帯にも関連した地震活動であると考えられる。また、北緯 45°付近以南においては、海岸線近傍の海域から東に傾斜する震源の集中域(図中の赤点線枠)が認められる。解析領域の南端部における日本海側の海岸線付近には、南北方向に延びる東側隆起の活断層が伏在する可能性が指摘されており(阿部ほか, 2011)、それらの活動との関連性が示唆される。さらに、これらの震源集中域とは別に、下部地殻の深部に相当する深さ 30 km 付近においてほぼ水平に連続する帯状の震源集中域が見られるが、その原因については慎重な議論が必要である。

以上のように、今回の震源再決定によって得られた震源分布には活構造と調和的な特徴が認められることなどから、堆積層の分布を考慮した震源決定がその精度向上に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。

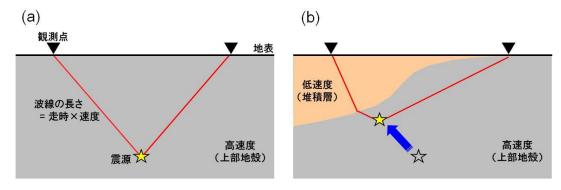


図 2.1-40 (a) 堆積層を考慮しない場合、(b) 堆積層を考慮した場合における震源決定の概念図

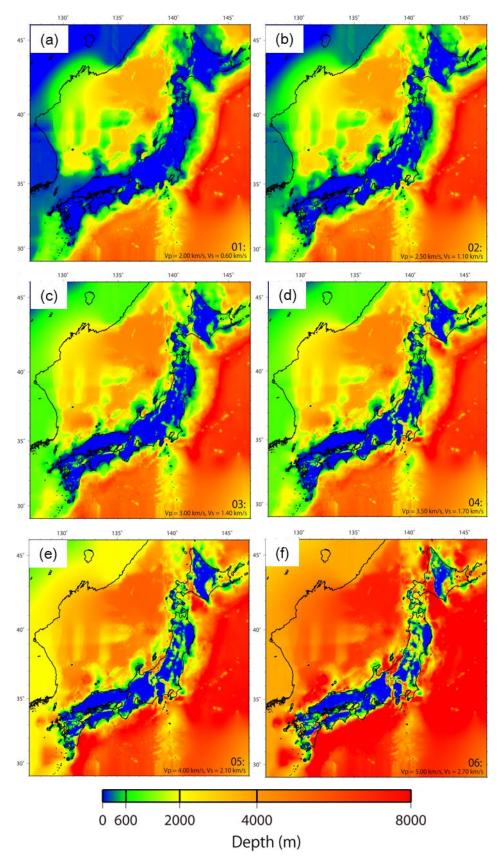


図 2.1-41 各地震波速度(各図右下)層の下面深度分布 深部地盤構造モデル(防災科学技術研究所, 2009)をもとに作成。(a) - (f)は、それぞれ P 波速度が 2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、5.0 km/s の層の下面深度を示す。

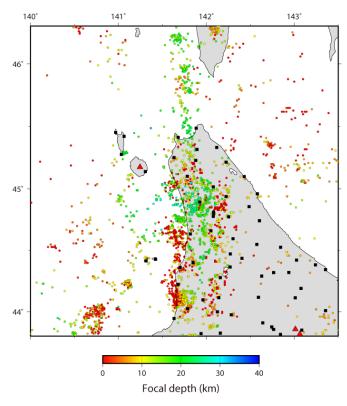


図 2.1-42 解析領域における初期震源の震央分布(○) および地震観測点(■)の分布

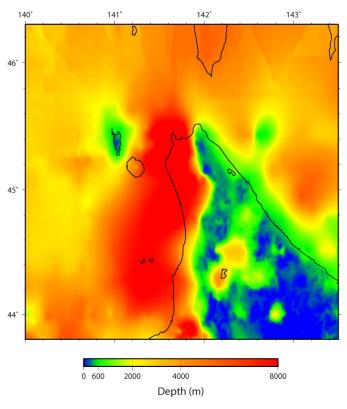


図 2.1-43 解析領域における地震基盤深度の深さ分布

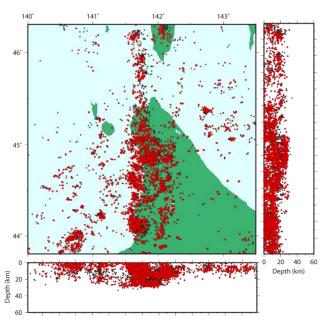


図 2.1-44 初期震源の震央分布(黒丸)および震源再決定後の震源(赤丸)の分布

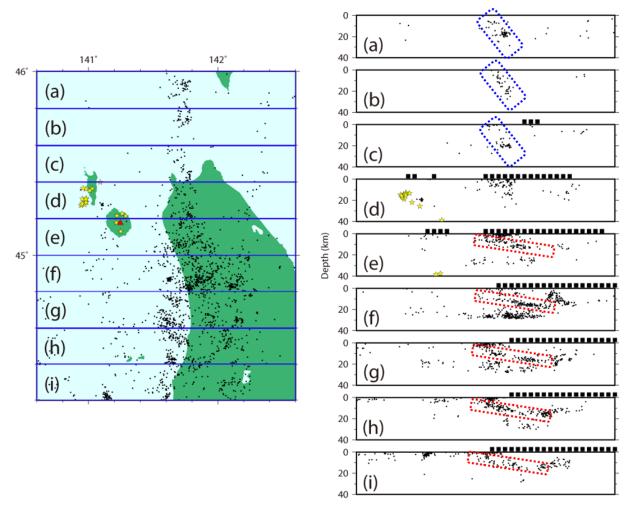


図 2.1-45 震源再決定後の震央および震源分布の断面図 星印および赤三角は、それぞれ低周波地震および第四紀火山を示す。

2) 沿岸部における地震波トモグラフィの精度向上に関する検討

前項で示した震源再決定の解析と同様に、理論波線や理論走時の計算において地震基盤面およびそれ以浅の地震波速度モデル(防災科学技術研究所編, 2009)を考慮した地震波トモグラフィによって北海道北西部における三次元地震波速度構造を推定するとともに、従来の解析手法に基づく結果との比較を行った。

解析の入力データとして使用した地震の震央分布を図 2.1-46 に示す。堆積層の層厚分布を考慮した解析に使用した地震データは、前項で述べた震源再決定後のデータから選出した 1,361 個の地震であり、それに含まれる P 波および S 波到達時刻データ数はそれぞれ 22,155 個および 19,449 個である。また、従来の手法による解析では、これと同一の地震について初期震源の震源パラメータを用いているが、P 波および S 波の到達時刻データは同一である。解析では、対象領域内における格子点(grid point)を鉛直方向には深さ 5 km、10 km、25 km に、水平方向には約 33 km の間隔で設置し、25 Zhao et al. 25 Chao et al. 25 Chao

堆積層の層厚分布を考慮した今回の手法と従来の手法により推定された、P波およびS波速度偏差分布の平面図をそれぞれ図 2.1-47 および図 2.1-48 に示す。従来の手法による解析結果(図 2.1-47 (a)および図 2.1-48 (a))において、第四紀火山である利尻火山周辺の地震波速度は平均的な速度から高速度の領域としてイメージされた。この傾向は、地震波トモグラフィを用いて近年行われた研究(Niu et al., 2016)でも同様である。一方で、今回の手法を用いた解析結果(図 2.1-47 (b)および図 2.1-48 (b))では、P波速度、S 波速度ともに地震波低速度の領域としてイメージされており、利尻火山周辺に対する二つの解析結果は大きく異なる傾向を示す。

地下にマグマなどの流体が存在する場合は、P 波速度、S 波速度ともに低速度、かつ高ポアソン比を示すことが知られている(例えば、O'Connell and Budiansky, 1974; Zhao and Negishi, 1998)。また、利尻火山周辺の地殻においては低周波微小地震の発生が認められるが(図 2.1-47 および図 2.1-48)、その発生には深部から火山に供給する流体の存在が関与していると考えられている。これまでの研究において、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周辺に位置することが多いが(例えば、Nakajima and Hasegawa, 2003; Hasegawa et al., 2005)、今回の手法を用いた解析結果では、利尻火山下の地震波低速度(図 2.1-47 および図 2.1-48)かつ高ポアソン比(図 2.1-49)の領域に分布する。さらに、利尻火山周辺下のマントル・ウェッジでは、流体の上昇を示唆する顕著な地震波低速度体が見出されている(Liu et al., 2013; Asamori and Zhao, 2015; Niu et al., 2016)。以上のことから、堆積層の層厚分布を考慮した解析によって利尻火山下の上部地殻に認められた地震波低速度かつ高ポアソン比の領域は、その火山活動に関連した流体(マグマまたはその固化に伴って放出された水)の存在を示唆すると考えられる。また、従来の手法を適用した場合に認められた地震波高速度体は、解析領域における堆積層の層厚変化が顕著であることに伴う偽像であ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の解析に必要となる自然地震の 震源決定や地震波トモグラフィについて、その精度を向上させるためには、堆積層の分布を考慮 した解析が有効であることを示唆する。また本手法は、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。

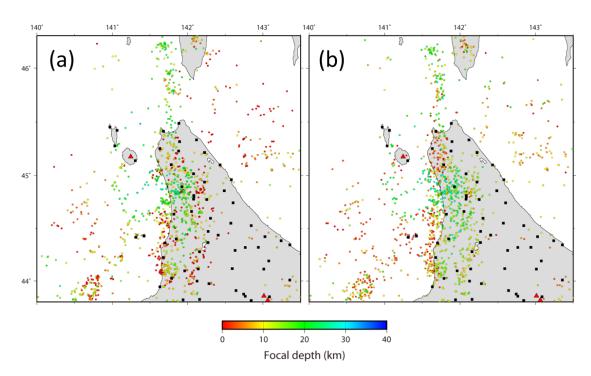


図 2.1-46 地震波トモグラフィ解析に用いた地震の震央分布 (a)従来の手法による解析、(b)堆積層の層厚分布を考慮した手法による解析

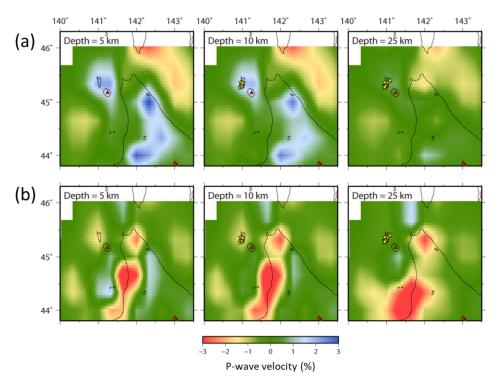


図 2.1-47 各深度における P 波速度偏差の分布 (a)従来の手法による解析結果、(b)堆積層の層厚分布を考慮した手法による解析結果。星印および赤三角は、それぞれ低周波地震および第四紀火山を示す。

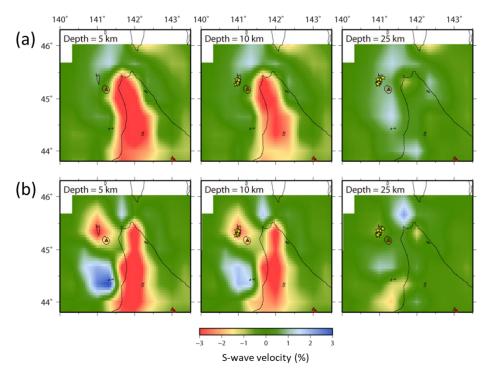


図 2.1-48 各深度におけるS波速度偏差の分布 (a)従来の手法による解析結果、(b)堆積層の層厚分布を考慮した手法による解析結果。星印およ

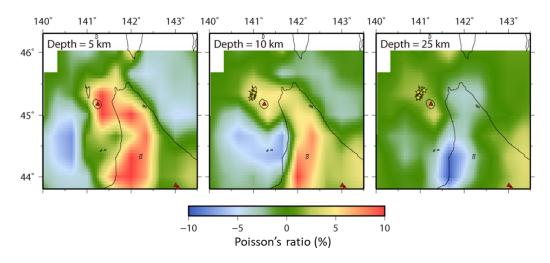


図 2.1-49 堆積層厚の変化を考慮した解析により推定された各深度のポアソン比偏差の分布 星印および赤三角は、それぞれ低周波地震および第四紀火山を示す。

3) 沿岸部における長期間湧水と深部流体との関連性に関する検討

び赤三角は、それぞれ低周波地震および第四紀火山を示す。

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震(以下、「東北沖地震」という。)は海溝型の巨大地震であったが、これに伴い内陸地震が活発化した地域や1m以上の沈降が生じた地域も現れた。また、地下水位の低下や湧水といった水理場の変動も観測されているが、数年間に及ぶ湧水の原因については不明な点が多い(佐藤, 2015)。このような稀頻度の自然現象が地質環境特性に及ぼす影響は変動シナリオを考慮した安全評価などに関わることから、これに係る知見の蓄積の重要性が指摘されている(地層処分技術 WG, 2014)。また、わが国はプレートの沈み込み境界である海

溝(またはトラフ)に沿うように位置していることから、特に太平洋側の沿岸部では同様の現象が今後も生じ得るといった可能性も考慮することが重要であると考えられる。ここでは、東北沖地震以降、福島県浜通り・茨城県北部で発生し、現在も継続している群発地震や、これに伴って生じた沿岸部の湧水などに関するこれまでの科学的知見を基に、深部流体との関連性について検討した。

2011 年 3 月 11 日に東北地方の太平洋沿岸沖に沈み込む太平洋プレートと陸側プレートとのプ レート境界において、マグニチュード (M) 9.0 の巨大地震が発生し、それ以降、海域のみならず 陸域においても多くの地域で地殻内の地震活動が活発化した。例えば、長野県北部(3月12日, M6.7)、秋田県沖(3月12日, M6.4)、静岡県東部(3月15日, M6.4)、福島県浜通り(4月11 日, M7.0) などの地震が発生している。これらの地域はそれまで地震活動が静穏であったことか ら東北沖地震によって誘発されたものと考えられている(例えば、Okada et al., 2011)。誘発地 震の原因については、東北沖地震の地震動による動的な影響(例えば, Kato et al., 2013)のほ か、地殻変動に伴う静的応力変化が指摘されている(例えば、Toda et al., 2011)。このうち茨城 県北部から福島県浜通りにかけての地域では、3月11日以降、茨城県北部で地震活動が始まり、 M5.7 (3月11日)、M6.1 (同19日) の比較的大きな地震も発生した。その後、いわき市周辺で 活動が活発になり、M6.0 (同 23 日) の地震も発生した。さらに東北沖地震の1ヶ月後の4月11 日には、M7.0 の 2011 年福島県浜通り地震が発生するとともに、全域にわたって活動が活発化し ていった。この群発地震の活動は消長を繰り返し徐々に低下しているものの現在も継続しており、 その発震機構は正断層型が多い(例えば、気象庁, 2018)。なお、このような海溝型巨大地震に続 いて前弧域で局所的な群発地震が発生するといったことは、2004 年のスマトラ島西方沖地震 (M9.0) や 2010 年チリ中部沿岸地震 (M8.8) の際にも報告されている (Engdahl et al., 2007; Farías et al., 2011)

4月11日の福島県浜通り地震を含む群発地震が活発化した福島県いわき市では、地下水位の変化や湧水の発生が報告されている(全国さく井協会、2012;佐藤、2015)。これらの報告によると、地震に伴って生じた湧水は陸域において複数確認されているが、そのうちの一つでは 45 - 50℃の温泉水が 3 m3/分で湧出したと指摘されている。一般に、比較的規模の大きい地震が発生した際には、その震源域を含む広域的な範囲で地下水位や間隙水圧の変化がしばしば観測されるが、そのメカニズムについては、地震の発生(断層運動)に伴う静的な地殻応力(地殻ひずみ)の変化のほか、地震波の通過や断層の変位に伴う透水性の変化が指摘されており、特に後者によって生じた場合の湧水の起源としては、周辺の山体における地下水の解放や地下深部を起源とする流体(深部流体)の上昇などが指摘されている(例えば、Manga and Wang、2015)。なお、今回の群発地震に伴って生じた湧水ではないものの、いわき市周辺の温泉にはプレート境界を発端とする深部流体の定常的な上昇が示唆されているが(Togo et al., 2014)、この群発地震の活動域で生じた数年間に及ぶ湧水との関連性は明らかになっていない(佐藤、2015)。

一方で、この群発地震の活動域を含む領域を対象として推定された地殻と上部マントルの三次元地震波速度構造(Tong et al., 2012; Zhao, 2015)によると、群発地震活動域の地下深部には流体の存在を示唆する地震波低速度体が見出されている。また、東北沖地震発生前の地震データを用いた解析でも同様の地震波低速度体の存在が確認されており、この流体が地震発生前から存在していたことや、地震の発生にはこれらの流体が関与した可能性が指摘されている。さらに、この領域の地殻内に深部流体が分布することは、東北沖地震後に行われた MT 法電磁探査によって推定された比抵抗構造でも確認されている(Umeda et al., 2015)。これによると、群発地震の活動域下の 15 km 以深に東西方向の広がりが 20 km 程度の低比抵抗体が検出され、前述した地震波低速度体と調和的な分布を示しており、異なる地球物理学的データによって群発地震活動域下

の下部地殻には深部流体が存在するといったデータが得られている。以上の知見をまとめると、 複数の手法によって捉えられている上述の深部流体が、群発地震や湧水の発生に関与した可能性 も考え得るが、そのメカニズムは必ずしも明らかではないのが現状である。

(3) まとめ

平成 30 年度は、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地球物理学的手法の高度化を目的として、沿岸部における震源決定および地震波トモグラフィに係る解析方法の改善について検討した。定常地震観測網の端部や外側となる沿岸部では震源決定精度が陸域に比べて極めて低い。その結果として地下深部構造推定の精度低下が想定されることに対して、堆積層の層厚変化を考慮した震源決定法および地震波トモグラフィを北海道北西部へ適用し、本手法の妥当性を事例として示した。

本手法は、海岸線付近を境に急変する傾向がある国内の沿岸部に対して特に有効な手法であると考えられるが、これによって得られる解析結果に観測や解析に伴う不確実性が含まれることは避けられない。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すが、このことは特に沿岸部を対象としてマグマおよび高温流体などの存在や分布を評価する上で重要である。また、福島県浜通りの群発地震に伴って生じた湧水について、既存の知見を基に検討した結果、その発生に深部流体が関与した可能性も考え得るものの、そのメカニズムは必ずしも明らかではなく、更なる知見の蓄積が望まれる。

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。

参考文献

- 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, vol.11, pp.1-14, 2011.
- 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.337,265p, 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.
- Engdahl, E. R., Villasenor, A., DeShon, H. R. and Thurber, C. H., Teleseismic relocation and assessment of seismicity (1918-2005) in the region of the 2004 Mw 9.0 Sumatra-Andaman and 2005 Mw 8.6 Nias Island great earthquaks, Bulletin of the Seismological Society of America, vol.97, pp.S43-S61, 2007.
- Farías, M., Comte, D., Roecker, S., Carrizo, D., Pardo, M., Crustal extensional faulting triggered by the 2010 Chilean earthquake: the Pichilemu seismic sequence, Tectonics, vol.30, TC6010, doi:10.1029/2011TC002888, 2011.

- 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.
- Kato, A., Fukuda, J., Obara, K., Response of seismicity to static and dynamic stress changes induced by the 2011 M9.0 Tohoku-Oki earthquake, Geophysical Research Letters, vol.40, pp.3572-3578, 2013.
- 気象庁, 東北地方とその周辺の地震活動(2017 年 5 月 \sim 10 月), 地震予知連絡会会報, vol.99, pp.46-74, 2018.
- Liu, X., Zhao, D. and Li, S., Seismic heterogeneity and anisotropy of the southern Kuril arc: insight into megathrust earthquakes, Geophysical Journal International, vol.194, pp.1069-1090, 2013.
- Manga, M., Wang, C.-Y., Earthquake Hydrology. In: Gerald Schubert (editor-in-chief) Treatise on Geophysics, 2nd edition, vol.4. Oxford: Elsevier, pp.305-328, 2015.
- 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 Vp, Vs, and Vp/Vs beneath northeastern Japan: Implications for arc magmatism and fluids, Journal of Geophysical Research, vol.106, pp.21843-21857, 2001.
- Niu, X., Zhao, D., Li, J. and Ruan, A., P wave azimuthal and radial anisotropy of the Hokkaido subduction zone, Journal of Geophysical Research, vol.121, pp.2636-2660, 2016.
- O'Connell, R. J. and Budiansky, B., Seismic velocities in dry and saturated cracked solids, Journal of Geophysical Research, vol.79, pp.5412-5426, 1974.
- Okada, T., Yoshida, K., Ueki, S., Nakajima, J., Uchida, N., Matsuzawa, T., Umino, N., Hasegawa, A., Group for the aftershock observations of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Shallow inland earthquakes in NE Japan possibly triggered by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Earth, Planets and Space, vol.63, pp.749-754, 2011.
- 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,活断層データベース,2012b;
- https://gbank.gsj.jp/activefault/index_gmap.html(2018年1月18日最終閲覧).
- 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, 2013.
- 佐藤 努, 地震に伴って発生し四年以上も継続する温泉湧出, IEVG ニュースレター, 産業技術総合研究所, vol.2, no.3, pp.1-4, 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,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, 68p, 2015.
- Toda, S., Stein, R.S. and Lin, J., Widespread seismicity excitation throughout central Japan

- following the 2011 M=9.0 Tohoku earthquake and its interpretation by Coulomb stress transfer, Geophysical Research Letters, vol.38, L00G03, doi:10.1029/2011GL047834, 2011.
- Togo, Y., Kazahaya, K., Tosaki, Y., Morikawa, N., Matsuzaki, H., Takahashi, M., Sato, T., Groundwater, possibly originated from subducted sediments, in Joban and Hamadori areas, southern Tohoku, Japan, Earth, Planets and Space, 66:131, doi:10.1186/1880-5981-66-131, 2014.
- Tong, P., Zhao, D. and Yang, D., Tomography of the 2011 Iwaki earthquake (M 7.0) and Fukushima nuclear power plant area, Solid Earth, vol.3, pp.43-51, 2012.
- Umeda, K., Asamori, K., Makuuchi, A., Kobori, K. and Hama, Y., Triggering of earthquake swarms following the 2011 Tohoku megathrust earthquake, Journal of Geophysicl Research, vol.120, pp.2279-2291, doi:10.1002/2014JB011598, 2015.
- Wang, Z. and Zhao, D., Seismic imaging of the entire arc of Tohoku and Hokkaido in Japan using P-wave, S-wave and sP depth-phase data, Physics of the Earth and Planetary Interiors, vol.152, pp.144-162, 2005.
- 全国さく井協会(編),東日本大震災による緯度の被害調査報告書,社団法人全国さく井協会 東日本大震災被害調査委員会,.30p,2012.
- Zhao, D. and Negishi, H., The 1995 Kobe earthquake: seismic image of the source zone and its implications for the rupture nucleation, Journal of Geophysical Research, vol.103, pp.9967-9986, 1998.
- 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.
- Zhao, D., The 2011 Tohoku earthquake (Mw9.0) sequence and subduction dynamics in Western Pacific and East Asia, Journal of Asian Earth Sciences, vol.98, pp.25-49, 2015.

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。沿岸部の地下水流動は、海域が境界条件となり、地形勾配が小さいため、長期にわたって安定なことが期待される。特に、塩淡境界の下位にある塩水は陸域の淡水と異なり、動水勾配がないため、流動性が低い。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、処分で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。

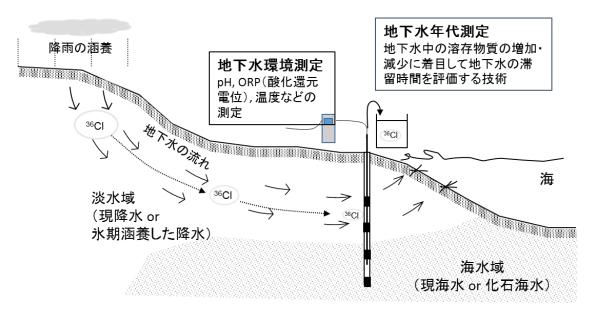


図 2.2-1 沿岸部の地下水長期安定性評価の概念図

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、平成28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。

(2) DD-1 孔 深度 1,143 m からの採水

1) 目的

北海道天塩郡幌延町浜里(図 2.2-2)には平成 $21\sim24$ 年度にかけて掘削された、深度 $1,200\,\mathrm{m}$ ボーリング孔(DD-1 孔)が位置する。浜里から海岸までの距離は約 $300\,\mathrm{m}$ である。DD-1 孔ではケーシング設置後、深度 $214\,\mathrm{m}$ 、 $306\,\mathrm{m}$ 、 $476\,\mathrm{m}$ 、 $613\,\mathrm{m}$ 、 $715\,\mathrm{m}$ 、 $943\,\mathrm{m}$ 、 $1,143\,\mathrm{m}$ 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、昨年度までに深度 $1143\,\mathrm{m}$ を除く 6 深度で揚水・採水がおこなわれた。そのため、本年度は、従来一度も採水が行われてこなかった、 $1,143\,\mathrm{m}$ 深からの地下水試料の採取を $2018\,\mathrm{fm}$ 1月 $16\,\mathrm{fm}$ 日および $17\,\mathrm{fm}$ 1月 $16\,\mathrm{fm}$ 1月 $16\,\mathrm{fm}$ 1日に実施した。



図 2.2-2 調査位置図

(縮尺 1:25,000、地理院 25,000 分の 1 地形図「音類」および「稚咲内」より)

2) 深度 1,143 m の間隙水圧

DD-1 孔深度 $1,143\,\mathrm{m}$ の地質は勇知層であり、粘土混じりの細砂からなる。事前の調査により、DD-1 孔の $1,100\,\mathrm{m}$ 以深では孔内に砂などが堆積している可能性が高いことが分かった。そのた

め採水前にクロスビットによって堆積物をときほぐし、その後エアリフトによる孔内浚渫を実施し、排水しつつ孔内のシルトや細砂成分を取り除いた。その後、1,142.5 - 1,143.5 m をダブルパッカーで遮蔽した上で、開放条件と圧力応答条件を併用して孔内水位の回復状況を測定した。

ここでいう開放条件とは、通常の単孔式揚水試験で行われる水位回復と同じ状態を指す。また、 圧力応答条件とは(水位上昇が生じる)孔内のある深度にシングルパッカーを取り付ける方法で ある。すなわち、産業技術総合研究所(2013)により、この深度の水位回復速度は極めて遅いこ とが分かっていたため、そこで揚水後当初は開放条件である程度地下水を孔内に流入するのを待 ち、その後、孔内にシングルパッカーを取り付けて、水圧上昇を測定した。測定開始は 2018 年 10月5日である。

結果を図 2.2-3 に示す。間隙水圧の測定は揚水ポンプを用いて孔内水位を $G.L.+1.31\,m$ から、 $G.L.-16.4\,m$ まで低下させてからおこなった。開放条件にて 90 時間水位回復を待ち、その後、圧力応答条件に切り替えた。 202 時間経過時では、(換算)水位回復量は 1 時間あたり $1\,cm$ 程度まで低下し、216 時間後に測定を終了した。ただし平衡水位には至っていない。測定終了時の孔内水位は $G.L.+47.18\,m$ であった。この値は 2012 年の測定値 $50.343\,m$ と極めて近い。また、今回用いた水位計(GE Oil & Gas 社製 DRUCK PTX1830)の測定範囲は $0-300\,m$ H $_2O$ 、精度は生 $0.1\,\%$ FS である。そのため $10\,$ 月 $12\,$ 日以降の等価淡水水頭の $10-20\,$ cm 程度の不規則にみえる変動は測定誤差範囲内である。念のため潮位との関係についても調べたが、孔内水位との間に明瞭な関係は見いだせなかった(図 2.2-4)。

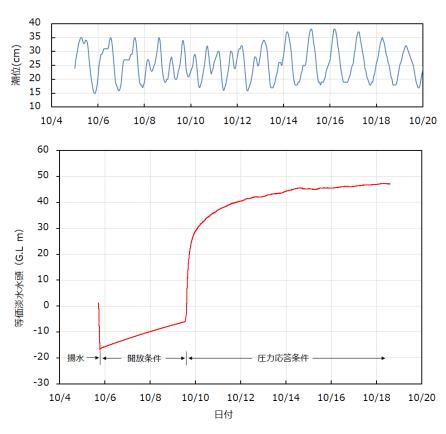


図 2.2-3 DD-1 孔 1,143m の間隙水圧測定結果(下図)と潮汐変動(上図、気象庁 HP) この深度領域を構成する地層は透水性が極めて悪い。216 時間の測定を実施しても平衡水位に達しなかった。測定終了時(2018 年 10 月 18 日)の等価淡水水頭は G.L +47.18 m であった。

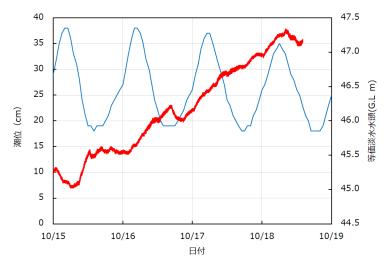


図 2.2-4 10 月 15 日から測定終了までの潮位と等価淡水水頭の関係 等価淡水水頭は測定誤差範囲内でわずかな変動していたため、潮位との関係を調べたが、明瞭な 関係は見いだせなかった。

3) 水質および同位体測定、地下水年代と地化学

① 現場での採水および水質分析結果

深度 1,143 m の穿孔区間からの採水は、揚水による水位回復が緩慢だったため、原位置での封 圧採水 (特許第 5997121 号、平成 28 年 9 月 2 日、サンコーコンサルタント (株))、電力中央研 究所方式 (機材提供) および加圧採水を実施した。実施日は 2018 年 11 月 3 日~11 月 7 日であ る。封圧採水容器から地下水を採取したときの様子を図 2.2-5 に示す。



図 2.2-5 封圧採水容器からの試料採取状況

深度 1143 m にて採取した地下水を封圧採水容器から取り出している。試料はシルト分により混濁し暗緑色を呈した。また多量のガスが含まれていた(炭酸飲料のイメージ)。また、他の深度とは異なり、ガソリンのような臭気をともなっていた。

分析結果を表 2.2-1 に示す。なお、封圧採水では通常、3~4 台の採水装置を直列につないでボーリング孔内に挿入する。そのため、それぞれの装置内の採水深度はわずかに異なる。目視ではシルト分が多く含まれているものと、やや透明度が高い試料があったが、これらのアルカリ度は異なっていた。表 2.2-1 の分析結果は後者を用いたが、図 2.2-6 のダイヤグラムは別の水試料を用いた。このような封圧採水装置毎の水質の違いについては今後検討する必要がある。

表 2.2-1 DD-1 孔 1,143 m 水質分析結果 (採水日 2018 年 11 月 3 日:地上)

浜里1143m

2018/11/3

項目	単位	値	項目	単位	値
スクリーン	m	1142.5 ~ 1143.5	В	ppb	13000
緯度	°(degree)	141.688167	Al	ppb	6
経度	°(degree)	44.994782	Mn	ppb	680
水温	°C	14.1	Fe	ppb	661
pН		9.09	Rb	ppb	126
EC	μS/cm@25℃	45800	Sr	ppb	488
DO	mg/L	0.0	Cs	ppb	-
Eh _{SHE}	mV	-88	Ba	ppb	204
アルカリ度 (pH4.3)	meq/L	53.0	Pb	ppb	126
F ⁻	mg/L	-	Si	ppm	3
Cl	mg/L	16295	$\delta^{18}O$	‰	2.4
NO ₂	mg/L	-	δD	% o	-15
Br ⁻	mg/L	171	$\delta^{13}C$	% o	-1.1
NO ₃	mg/L	1	¹⁴ C	рМС	2.8
SO ₄ ²⁻	mg/L	33			
PO ₄ 3-	mg/L	-			
Na⁺	mg/L	11638			
K⁺	mg/L	386			
Mg ²⁺	mg/L	23			
Ca ²⁺	mg/L	4			
34- 1					

注

封圧採水のため、水温は正確ではない。

また、図 2.2-5 で述べたように深度 1,143 m からの採水では、それよりも浅い深度(900 m 以浅)では感じられなかったガソリン臭が認められたため、GC-MS を用いた定性分析を行った。分析したのは過年度採取試料を含めた DD-1 孔の深度 $214\,\mathrm{m}$ 、 $306\,\mathrm{m}$ 、 $476\,\mathrm{m}$ 、 $613\,\mathrm{m}$ 、 $715\,\mathrm{m}$ 、 $943\,\mathrm{m}$ 、 $1,143\,\mathrm{m}$ および DD-4 の 8 試料であり、ヘッドスペース法を用いた。なお、採水ボトルはガスバリア性のあるテクノボトルを使用しているものの、一部の試料については採水から 1 年程度が経過しているため、揮発性のガスが逸散している可能性も考えられる。結果は以下の通りである。

・深度 715 m : チオフェン

・深度 1,143 m : ベンゼン、トルエン、チオフェン

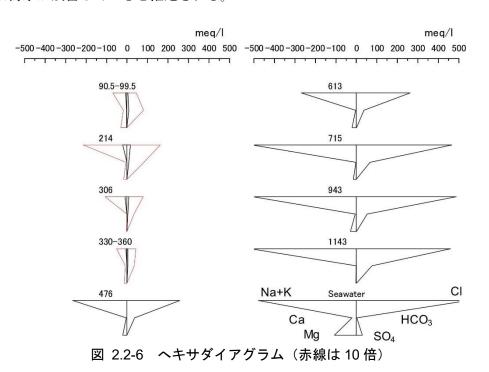
・上記以外の深度:炭化水素ガスは未検出

本地域を含む天北地域は石油・ガスを産する有望地域として知られているが、本地域にて有機物の熟成(堆積性有機物が地層の埋没・沈降に伴って、主に温度と時間の影響で石油に変化する過程。地学団体研究会, 1996)が期待されるのは、新第三系から白亜系とされている(小椋・掃部, 1992)。深度 1,143 m は勇知層(前期更新統~後期鮮新統)や当該深度の地温が約 42° と低

いことを考えると、これらの炭化水素は下位の地層から移動してきて、この深度領域に蓄積したと推定される。これらの炭化水素ガスは深度 $1,143~\mathrm{m}$ を超えてさらに上昇している可能性もあり、その一部が深度 $715~\mathrm{m}$ で検出されたと推定される。しかし、深度 $943\mathrm{m}$ では検出されておらず、不明な点が多い。

② 主要溶存イオン

深度 $1,143 \, \mathrm{m}$ は本地点で揚水採水を実施した最も深い地点である。主要溶存イオンは、図 2.2-6 に示すように、深度 $943 \, \mathrm{m}$ とほぼ同じで Na -Cl 型である。この結果は、掘削時に実施した圧縮 抽水の結果とも整合している。これらの結果から、深度 $800 \, \mathrm{m}$ 以深では主要溶存イオンはほぼ同じで、化石海水が残留していると推定される。



③ 水素・酸素同位体比

深度 1,143 m の水素・酸素同位体比も図 2.2-7 に示すように 943 m 地点とほぼ同じであり、海水よりも水素同位体比が低く、酸素同位体比が大きくなっている。この傾向は、幌延内陸部の深部の化石海水とも整合するものである。このため、深部の地下水は、海水が水岩石相互作用の影響をうけた化石海水であると推定される。

なお、深度 90 - 100 m 区間と深度 214 m 区間では軽い水素酸素同位体比を示しており、氷期降水と判断されるのに対して、深度 306 m 区間の水素酸素同位体比は大きく異なる。希ガス濃度から涵養温度を求めたところ、深度 90 - 100 m 区間と深度 214 m 区間では $0.7\,^{\circ}$ C 程度、深度 306 m 区間では $8.1\,^{\circ}$ C となった。氷期と間氷期では $7-8\,^{\circ}$ C 程度の温度差があると推定されているが、ここではほぼ同程度の温度差となっている。そのため、深度 90 m と深度 214 m の地下水は氷期涵養であり、深度 306 m は間氷期涵養であると考えられる。なお、本地域周辺の稚内での平均気温は $6.8\,^{\circ}$ C 程度であるが、気温と降雨量とで重みづけをして平均を求めると $7.8\,^{\circ}$ C 程度になることから、上記で得られた涵養温度はおおむね妥当であると考えられる。

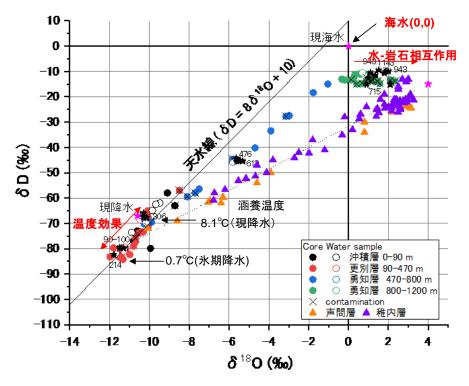


図 2.2-7 水素・酸素同位体比の関係

④ 地下水年代

深度 1,143 m の地下水年代測定結果、14C、36Cl/Cl、4He について以下に述べる。

 14 C 濃度は、図 2.2-8 に示すように、3.0 pMC であった。 14 C が検出されているが、深度 943 m に比べて δ 13 C もやや小さくなっており、孔内水の残留あるいは大気由来の C の溶解が疑われる。これは、当該区間の透水係数が小さく、予備排水が十分にできなかったか、原位置採水で 14 C 分析用の試料を採取したため、試料の移し替え時に大気中の C が溶解したものと考えられる。

 36 CI/CI は、図 2.2-9 に示すように、 5×10^{-15} 程度であった。この値はコアで得られた値と同様である。 36 CI/CI の原位置平衡値は、岩石コアの化学分析結果(含有鉱物・微量元素)に基づいて平衡計算を行って求めたものである。原位置平衡値に深度依存性、深度方向に 36 CI/CI が大きくなるのは、深度とともに間隙率が低下し、原位置で生成する中性子が水に捕獲される率が下がり、CI が捕獲する率が上がるためである。化石海水の場合には、一般的には 36 CI/CI は原位置平衡に到達していると考えられるが、勇知層は地質年代がそれほど古くなく、間隙率にも深度依存性がみられるなど、圧密過程にあると考えられるため、原位置平衡に達していないと考えられる。ただし、 36 CI/CI の実測値自体は、深度とともに増加しており、深部ほど堆積年代が古く、間隙率が小さいことを反映していると考えられる。このため、 36 CI/CI は原位置平衡に到達していないものの、原位置に十分に長い期間滞留していると考えられる。

 4 He と 3 He/ 4 He は、図 2.2-10 に示すように、それぞれ 1×10^{-6} ccSTP/gw 程度、 1×10^{-7} 程度であった。これらの値は、保存性の Ne 量によって補正した値である。 4 He 濃度は、深度 943 m と同程度に蓄積が進んでいる結果となっている。また、 3 He/ 4 He も原位置生成を反映して、低下が確認されている。岩石コアでの調査結果との整合性が低いが、これは、岩石コアは深度 1,000 m 付近から採取し、大気圧に解放されたことで地下水試料よりもさらに脱ガスが進んでおり、通常の補正方法では補正しきれなかったものと考えられる。原位置での He の生成速度は、岩石中の $U\cdot Th$ 濃度や間隙率に依存するが、おおむね 1×10^{-12} ccSTP/gwy 程度であり、原位置生成だ

けで 4 He が蓄積していると仮定すると 1 00 万年程度の蓄積に相当する。ただし、原位置生成の He に比べ 3 He/ 4 He が高いことから、外部からのフラックスの寄与もあると考えられる。また、 勇知層は地質年代が若く、間隙率に深度依存性もあることから、圧密過程にあり、間隙率も時間 とともに変化していると考えられる。このため、 4 He の蓄積速度の推定は不確実性が高く、定量 的な評価は難しい。

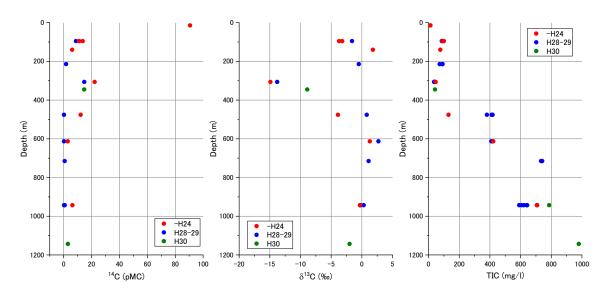


図 2.2-8 炭素同位体(14C, δ13C)と溶存無機炭素濃度の深度方向分布

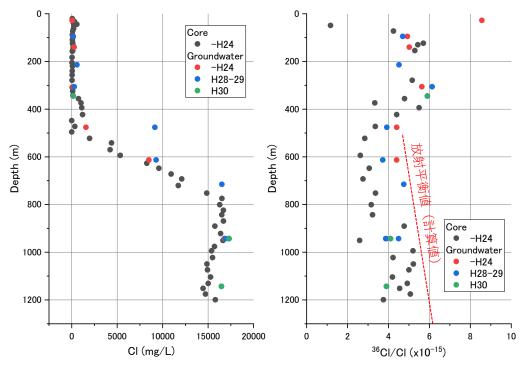


図 2.2-9 CI 濃度と ³⁶CI/CI の深度方向分布

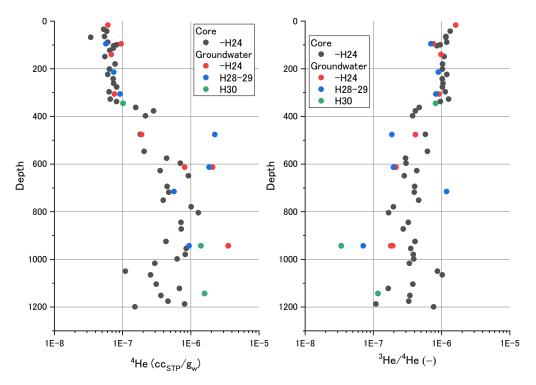


図 2.2-10 ⁴He 濃度と ³He/⁴He の深度方向分布

以上の結果から、定量的な年代の推定は困難であるが、 14 C が検出限界に近いこと、 36 Cl/Cl が 現海水とは異なり原位置平衡値に近いこと、 4 He が十分に蓄積していることなどから、 1,143 m 深度の地下水は堆積時に取り込まれた化石海水であると考えられる。

⑤ 地化学評価

DD-1 孔の 1,143 m 区間において、採水・採ガスおよび物理化学パラメータ測定を行い、取得された pH や Eh 値の妥当性の評価を行った。1,143 m は水位回復速度が遅く、地上まで揚水をすることができなかったため、採水は原位置採水装置で行った。物理化学パラメータの測定結果ならびに溶存ガスの分析結果を表 2.2-2 に示す。

表 2.2-2 DD-1 孔 1,143 m の pH、Eh の測定結果 ならびに主な溶存ガスの分析結果

pHとEh測定値

	地上測定	原位置測定	
pН	8.46	6.65	
Eh (mV)	27	-293	

溶存ガスの主な組成

	N_2	CH₄	CO ₂	
組成(%)	0.22	99.65	0.13	

地上での測定値は pH、Eh ともに原位置と大きく異なる値を示した。過年度の他区間の検討結果と同様に地上では脱ガスや大気混入の影響を受けて値が変化するものと考えられる。pH、Eh

共に、溶存ガスを考慮した化学平衡計算を PHREEQC (Parkhurst & Appelo, 1999) にて行い、原位置プローブで測定した値と比較することでその値の妥当性の確認を行った。

計算後の pH、Eh の値と、実測値との比較を表 2.2-3 に示す。原位置実測値と計算値で pH が 0.9 異なる結果であった。次にこれらを Geochemist's work bench(Bethke, 2008)で作成した pH-Eh ダイヤグラム上にプロットした結果を図 2.2-11 に示す。なお、図 2.2-11 は当該区間の溶 存イオンの水質分析値のうち、主な溶存元素である Na、K、Ca、Mg、Cl、HCO3の活量を考慮して作図したものである。ORP は原位置での測定結果と近い値が得られ、マグネタイト/シデライト以外の、SO4/pyrite、CO2/CH4、N2/NH4の酸化還元対について平衡の値を示した。

表 2.2-3 pH、Ehの測定結果と計算結果の比較

pH測定、計算結果

	pН
地上での測定値	8.46
原位置測定値	6.65
溶存ガスを考慮した計算値	7.58
原位置と計算値の差	0.9

Eh測定值、計算結果

	Eh (mV)
地上での測定値	184
原位置測定値	-293
$\mathrm{CO_2(g)}/\mathrm{CH_4(g)}$	-317
$N_2(g)/NH_4$	-308
SO_4/FeS_2	-271
Magnetite(am)/Siderite	-150

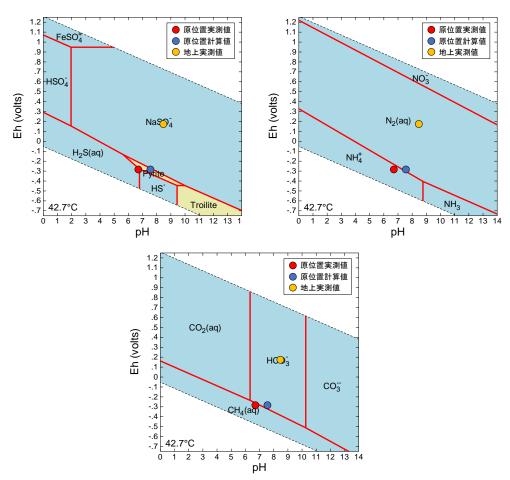


図 2.2-11 DD-1 孔 1,143 m 区間の pH-Eh ダイヤグラム

pH の値のずれについては、さまざまな誤差要因が考えられるが、その一つとして、測定中のドリフトが考えられる。測定後の電極を pH6.85 の標準液に浸して値を確認したところ、pH6.5 を示した。すなわち、0.35 単位分だけ電極は低い値を示した。このことから原位置での pH は 0.35 単位程度、測定値より高い値を示していることになる。そうであれば実測値と計算値との差は 0.5 程度となる。なお、2017 年度で溶存ガスを考慮した化学平衡計算を行った際にも、pH の値は必ずしも一致せず、実測値と計算値で 0.3 程度の乖離があった。

4) 943 m のモニタリング結果

2017年度にも同区間で地上、原位置の物理化学パラメータ測定と水・ガス採取を行ったが、再度採取する機会があったため、確認を行った。原位置で測定した pH は過去の値より 1.73 異なる値を示した。表 2.2-4 に pH、Eh の測定結果ならびに溶存ガスの分析結果を示す。

表 2.2-4 DD-1 孔 943 m 区間の pH、Eh の測定結果 ならびに溶存ガスの分析結果

pHとEh測定値

	地上測定	原位置測定
рН	7.70	9.43
Eh (mV)	27	-271

溶存ガスの主な組成

	N ₂	CH₄	CO ₂
組成(%)	1.6	93.9	4.5

地上での測定値は pH、Eh ともに原位置と大きく異なる値を示した。過年度の検討結果と同様に地上では脱ガスや大気混入の影響を受けて値が変化するものと考えられる。 pH、Eh 共に、溶存ガスを考慮した化学平衡計算を PHREEQC (Parkhurst & Appelo, 1999) にて行い、原位置プローブで測定した値と比較することでその値の妥当性の確認を行った。

計算後の pH、Eh の値と、実測値との比較を表 2.2-5 に示す。原位置実測値と計算値で pH が 2.3 異なる結果であった。2017 年度の原位置測定をした pH は 6.86 であり今年度の結果である 9.43 とは 2.57 の差がある。これは誤差とは言えない大きさであり、原位置での測定に不具合が あったものと推察される。

表 2.2-5 pH、Ehの測定結果と計算結果の比較

pH測定、計算結果

	рН
地上での測定値	7.70
原位置測定値	9.43
溶存ガスを考慮した計算値	7.11
原位置と計算値の差	2.3

Eh測定值、計算結果

	Eh (mV)
地上での測定値	27
原位置測定値	-271
CO ₂ (g)/CH ₄ (g)	-279
$N_2(g)/NH_4$	-270
SO ₄ /FeS ₂	-222
Magnetite(am)/Siderite	-56

これらの結果を Geochemist's work bench (Bethke, 2008) で作成した pH-Eh ダイヤグラム上にプロットした結果を図 2.2-12 に示す。なお、図 2.2-12 は当該区間の溶存イオンの水質分析

値のうち、主な溶存元素である Na、K、Ca、Mg、Cl、 HCO_3 の活量を考慮して作図したものである。地上の pH、Eh はいずれの酸化還元境界にも属さない結果であり、これまでの結果と同様、脱ガスや大気混入のためと考えられる。これらの原位置測定値のプロットをしたところ、いずれの酸化還元境界にも属さない結果であった。一方、pH の計算値と原位置の Eh 実測値をプロットしたところ、 $SO_4/pyrite$ 、 CO_2/CH_4 、 N_2/NH_4 の酸化還元対について平衡の値を示した。これらの酸化還元平衡を示すことは過年度の同区間の結果と同じである。今回、原位置の pH 実測値において、不具合と考えられる値が得られたが、計算値を併用することで、確からしい結果を得ることができた。計算値は実測値に不具合があった時の代替手段として利用できると考えられる。

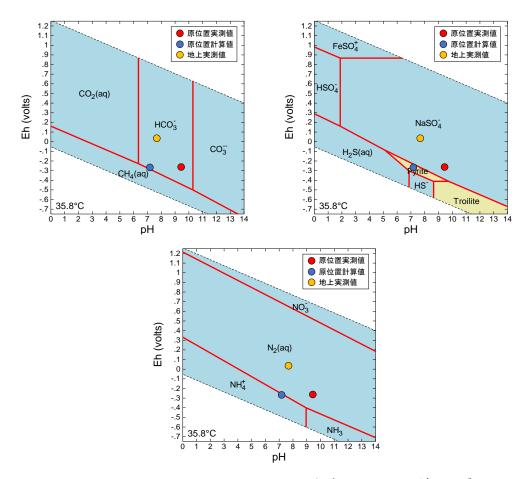


図 2.2-12 DD-1 孔 943m 区間 (2018 年度) の pH-Eh ダイヤグラム

5) まとめ

本年度は DD-1 孔の深度 1,143 m の間隙水圧の測定および採水を実施した。この DD-1 孔では 平成 24 年に、深度 214 m、306 m、476 m、613 m、715 m、943 m、1,143 m の 7 深度にてパーフォレーションによる穿孔とダブルパッカーを用いた間隙水圧の測定が行われた。間隙水圧は 概ね深度方向に上昇したが、深度 1,143 m は等価淡水水頭で G.L.+50 m という極端に高い値を 示した。この調査終了時、DD-1 孔から自噴が認められたため、今回の測定までの 5 年間は孔に 蓋がされており、井戸は密閉されていた。そのため、この間は深度 1,143 m から(高い間隙水圧 のため)基本的に孔内に地下水が流れ込み、上位のいずれかの穿孔部から地層中に流出していた はずである。

このような条件においても、本年度実施した同深度の間隙水圧の測定では、平成24年度と極

めて近い値が得られた。したがって、この深度領域および周辺の地層の広範囲に、極めて高い間隙水圧が保持されていると考えるべきであろう。ただし、その高圧の地下水は低透水性の地層間隙中に胚胎されているため、地下水は動きにくい状態にある。なお、今回は当該深度での潮汐応答は確認できなかった。この高圧地下水の水質は海水と類似した水質であり、これまでの DD-1 孔での調査で得られた 715 m 深度以深と同程度の溶存元素濃度であった。ただし、炭化水素ガスを多く含んでいた。そのため、深度 1,143 m の領域は間隙水圧と水質の面でも、それ以浅とは異なる環境にあることが明らかになった。

地下水年代測定結果では、定量的な年代は推定できないものの、 36 Cl/Cl が海水よりも優位に高く、原位置平衡に近いこと、 4 He 濃度が優位に高いことから、化石海水と推定された。地化学特性については過年度実施の 715 m 深度や 943 m 深度と同じ 80 Pyrite、 80 CO2/CH4、 80 NH4の酸化還元平衡であった。また、原位置の pH 実測値において、不具合と考えられる値が得られたが、計算値を併用することで、確からしい結果を得ることができた。計算値は実測値に不具合があった時の代替手段として利用できると考えられる。

(3) DD-4 孔の掘削と採水

1) 目的

北海道天塩郡幌延町浜里には平成 $21\sim24$ 年度にかけて掘削された、深度 1,200 m ボーリング孔(DD-1 孔)が位置する。DD-1 孔ではケーシング設置後、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、昨年度までに深度 1,143 m を除く 6 深度で揚水・採水がおこなわれた。

その結果、深度 214 m を始めとする多くの深度では、地下水の δ 13 C が 0 %に近く、地層由来の炭素による 14 C の希釈の影響が大きいが、深度 306 m から得られた地下水の δ 13 C は-15 %程度と希釈の程度が小さく、14 C は 20 pMC が検出された。この結果は、平成 24 年度(産総研, 2013)でも得られており、本年度も有意に高い 14 C が検出されたことになる。したがって深度 306 m の地下水は若い年代を示すという結果になった。しかし、浜里試験地では高透水性かつ連続性の高い基底礫層が深度 75 - 89 m 付近に分布し、この基底礫層中の地下水は氷期降水の特性を有している。 さらに上流側の下沼丘陵やビジターセンターに近い地点でも基底礫層中の地下水は氷期降水の下位にそれよりも若い地下水が分布するようなメカニズムは考えにくい。したがって、特に深度 306 m において現降水が得られたことは理論的に解釈が困難である。そのため、深度 306 m もしくはこれらの周辺深度にて改めてシングルスクリーンの井戸を掘削し、コンタミネーションが生じる可能性を最小にした条件で地下水を採取し、改めて年代測定をおこなう必要がある。そこで、本年度においては、新たに DD-4 孔を掘削し、上述の深度もしくはその周辺深度において地下水試料を採取するとともに、年代測定を実施した。

2) ボーリング掘削と地下水試料採取

① ケーシングプログラム

今回新たに設置する DD-4 孔の位置は、現場の都合より DD-1 孔に隣接させることとした (DD-1 孔と DD-4 孔の位置関係は Appendix VI に示す)。そのため、DD-4 孔掘削の際、すでに孔内水が入り込んでいると思われる深度 $306\,\mathrm{m}$ にスクリーンを設置することは避ける必要があった。図 2.2-13 に示すコア写真から判読すると、深度 $306\,\mathrm{m}$ 付近の地層は脆弱であるが深度 $335\,\mathrm{m}$ に粘土層が認められたことから、この粘土層の下位にあるコア流出区間($338.07-339.04\,\mathrm{m}$)にスクリーン深度を設定した。なお、この井戸は将来の利用を考えて後述する水理試験等にも利用でき

るよう施工した。

掘削は、泥水を用いたトリコンビットによるノンコア掘削を行った。主要資機材の詳細を Appendix VI に示す。ケーシングプログラムは 3 段とし、G.L.-30.0 m までは 200A-SGP 管を、G.L.-330.0 m までは 150A-STPG 管を、G.L.-359.0 m まではスクリーン部を含む 100A-STPG 管 を設置した。図 2.2-14 にはケーシングプログラムの概要を、図 2.2-15 には掘削作業のフローを示す。

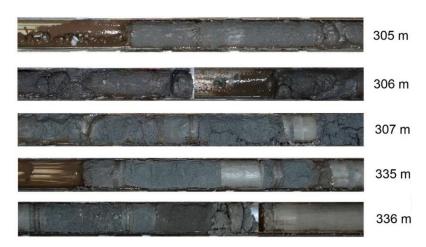


図 2.2-13 コア写真

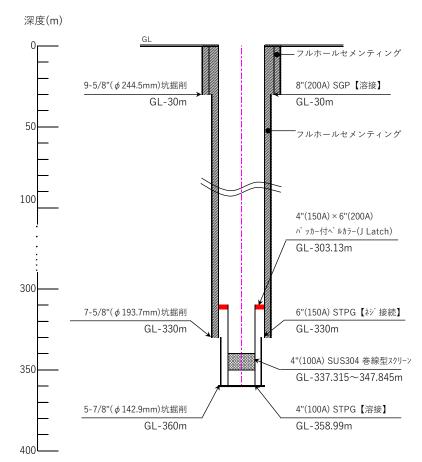


図 2.2-14 ケーシングプログラムの概要

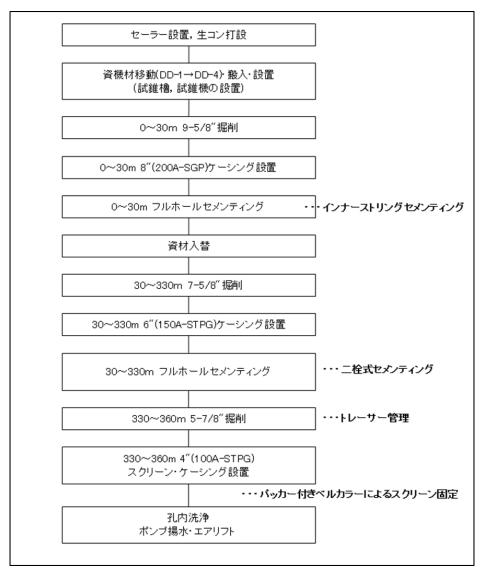


図 2.2-15 掘削作業フロ一図

各段のケーシングの固定と採水区間との遮水は、フルホールセメンティングによりおこなった。第 1 段目($0-30\,\mathrm{m}$)のフルホールセメンティングはインナーストリング式で実施し、第 2 段目($30-330\,\mathrm{m}$)は二栓式で実施した。第 3 段目は、第 2 段目のフルホールセメンティングを実施した後に掘削し、スクリーン部を含む $100\mathrm{A-STPG}$ 管を設置した(各方式の詳細は Appendix VI参照)。フルホールセメンティングにおいては、 $330\,\mathrm{m}$ 掘削時点の孔底より注入したセメントが地表に湧出し、翌日深度 $11\,\mathrm{m}$ まで硬化していることを確認した。また、セメント上端は深度 $30\,\mathrm{m}$ まで設置した $8\,\mathrm{d}$ インチケーシング内に認められたことから、止水は確実におこなわれたと判断される。掘削水・孔内洗浄水・試験用水は、掘削地点周辺に設置されている給水井戸から採取した(Appendix VI の DD-4 孔掘削位置図参照)。第 3 段回目の掘削(深度 $330-360\,\mathrm{m}$ 掘削)の際に用いた泥水には、地下水試料の採取時に地下水と掘削水とを区別する指標として蛍光染料を添加した。近傍の DD-1 孔では掘削水にアミノ G 酸を、また DD-2 孔ではトレーサー試験時にウラニンを使用しており、DD-4 孔ではこれらの水と区別するため、 $\mathrm{Eosin}\,\mathrm{Y}$ (CAS RN 17372-87-1)を使用した。蛍光染料濃度の管理値は、 $30\,\mathrm{mg/L}\,\mathrm{t}$ 10%とした。掘削中に蛍光染料濃度が管理値外となった場合には、溶液を必要量添加することで濃度調整を行った(調整結果は $\mathrm{Appendix}\,\mathrm{VI}$

に示す)。なお、掘削時のカッティングによると、DD-1 孔と DD-4 孔の $300 \, \mathrm{m}$ 付近および以深の 地質に大きな差異はないと考えられる。

② 地下水試料の採取

地下水試料の採取をおこなうため図 2.2-16 に示す装置を DD-4 孔に設置するとともに、掘削水等を十分に排除するために予備排水を実施した(主要資機材の詳細は Appendix VII に示す)。

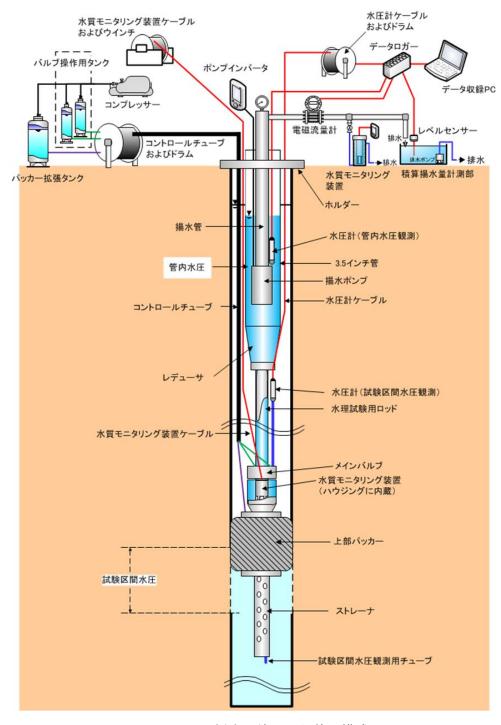


図 2.2-16 採水に使用した装置構成

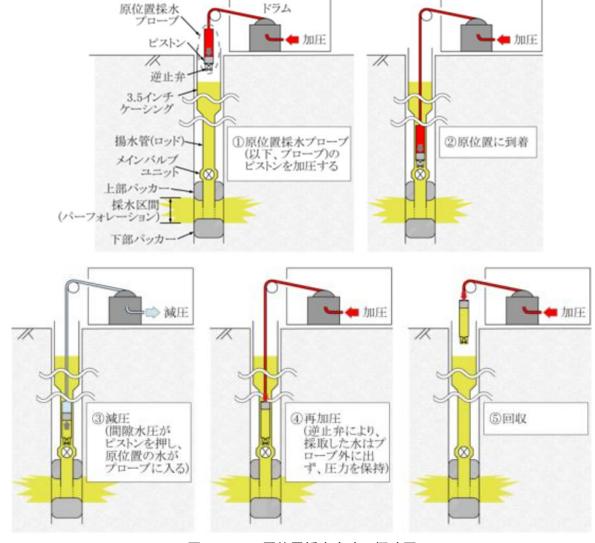


図 2.2-17 原位置採水方法の概略図

また、観測井の建設後には、間隙水圧測定、段階揚水試験、定流量揚水試験を実施した。

間隙水圧測定は、井戸仕上げ完了後に採水装置を設置し、パッカーとメインバルブの閉鎖により区間を閉塞して実施した。間隙水圧は、採水区間よりナイロンチューブを接続した孔内水圧計と孔内の水質モニタリング装置の水圧計で観測した。水圧計で観測した水圧を水位に換算する場合は、水の密度やガスの影響で正しく換算されない場合がある。したがって、孔内に水圧計を設置した際に、孔内の水位を触針式水位計で実測しておき、その時の水圧値での換算値との誤差を求めることで補正した。今回の補正値に関するデータを表 2.2-6 に示す。水圧より換算される水位は実測値より 0.9 m 程度高いため、水圧より換算される水位から 0.9 m を減じて補正した。

	12 2.2	-0)V (37 I.W.T.		•		
	設置	水圧計	水位	水位	補正値	水位実測日
	深度	指示値	換算値	実測値	加北區	時
	(GLm)	(MPa)	(GLm)	(GLm)	(m)	H-21
採水区間水圧系	61.50	0.5940	0.93	0.03	-0.90	2018/11/21
水質モニタリング装置	333.73	3.2640	0.91	0.05	-0.91	16:13

表 2.2-6 水位補正に関するデータ

段階揚水試験は、定流量揚水試験と予備排水時の揚水流量を決定するために実施した。本試験では、揚水流量を段階的に変化させ、それぞれの水位低下量を測定する。結果より、今回準備した揚水設備では、25 L/min が安定して揚水を継続できる最大の流量であるため、定流量揚水試験と予備排水は25 L/min で実施することとした。

定流量揚水試験は、水理定数を算出するために実施した。揚水試験は予備排水や本採水に使用した装置を用いて、一定の揚水流量を維持して水位低下の観測を行う定流量揚水試験とした。また、揚水停止後の水位回復を測定する回復試験を実施した。水理定数(透水係数(透水量係数),比貯留係数(貯留係数))を求めるために、定流量揚水試験より得られた結果を Cooper - Jacob の方法(Cooper and Jacob, 1946)、回復試験結果を Agarwal の方法(Agarwal, 1980)に適用した。算出方法および結果の整理は Appendix VI に示す。なお、水理定数を算出する際、DD-1 孔と同様に、試験区間長はスクリーン長として計算した。

3) 水理定数および水質モニタリング結果

予備排水前に実施した定流量揚水試験の結果、今回地下水試料を採取した帯水層の水理定数は、 以下のように見積もられた。

DD-4 孔

- ・ 間隙水圧 (MPa): 3.3834 (区間の中心深度にかかる水圧)
- · 水位 (G.L. m): 0.00
- · 透水量係数 (m²/s): 2.87E-04
- · 貯留係数 (-): 2.16E-05
- · 透水係数 (m/s): 2.73E-05
- · 比貯留係数 (1/m): 2.05E-06

参考として、以下に DD-1 孔の深度 306 m における平成 24 年度の揚水試験結果(産総研, 2013)を示す。今回得られた透水係数は、DD-1 孔のそれに近い値を示した。しかしながら、DD-1 孔における揚水試験はジェットパーフォレーションにより穿たれた透水孔を対象としていることや、平成 29 年度の DD-1 孔における採水調査において、採水時の揚水流量が平成 24 年度の透水試験結果で見込まれる揚水流量よりも少ない傾向にあり、穿孔部の状況が経年変化していた可能性があることを考慮すると、本報告書 (DD-4 孔)がより正しい水理特性を示していると考えられる。

DD-1 孔

- ・ 間隙水圧 (MPa): 3.3771 (区間の中心深度にかかる水圧)
- · 水位 (G.L. m): -0.64
- · 透水量係数 (m2/s): 1.54E-05
- · 貯留係数 (-): 8.20E-08
- · 透水係数 (m/s): 1.54E-05
- · 比貯留係数 (1/m): 8.20E-08

図 2.2-18 に孔内および地上における水質モニタリングの結果を示す。

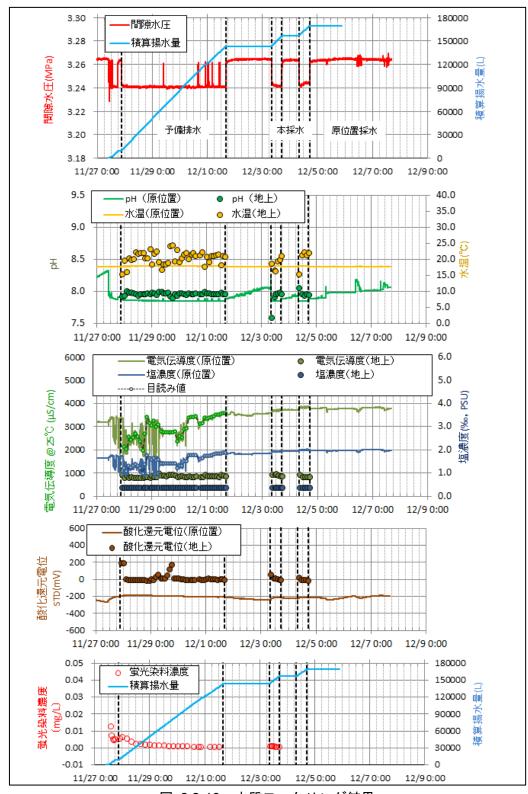


図 2.2-18 水質モニタリング結果

4) 年代·地化学

① 主要溶存イオン

深度 $337 - 348 \,\mathrm{m}$ 区間の主要溶存イオンは、図 2.2 - 6 に示すように、周辺の深度 $300 \,\mathrm{m}$ や深度 $476 \,\mathrm{m}$ と異なり、濃度が低く、 $Na - HCO_3 - Cl$ 型になっている。これは、本地点が周辺に比べて揚

水量が多く、地下水の流動性が高いことを反映していると考えられる。

② 水素・酸素同位体比

深度 330 - 360m 区間の水素・酸素同位体比は、図 2.2-7 に示すように、306 m 地点とほぼ同じであり、現降水に近い値となっている。このため、水素・酸素同位体比や希ガス温度計から深度 330 - 360 m 地点は、深度 90 - 214 m 地点に比べて涵養温度が高いことがわかる。

③ 地下水年代

深度 330 - 360m 区間の 14 C、 4 H を用いた地下水年代測定結果について以下に述べる。 14 C 濃度は、図 $^{2.2-8}$ に示すように、 $^{14.7}$ pMC であった。この値は、 306 m 地点の採水で得られた値とほぼ同じである。ただし、 5 13 C は $^{-8.9}$ %と 306 m ($^{-1}$ 3.9 %) の値に比べてやや小さい。このため、炭酸塩鉱物などによる希釈の影響を受けていると考えられる。このため、 14 C 年代は、以前の評価結果(13,000 年)よりも若くなり、 10,000 年となる。

 4 He と 3 He/ 4 He は、図 2.2-10 に示すように、それぞれ 1×10^{-7} ccSTP/gw 程度、 8×10^{-7} 程度 であった。これらの値は、保存性の Ne 量によって補正した値である。 4 He 濃度と 3 He/ 4 He は、深度 3 He/ 4 He の大気平衡値がそれぞれ $^5\times10^{-8}$ CcSTP/gw、 1 1.4 $\times10^{-6}$ であることから、原位置生成で蓄積しており、生成速度は 1 10- 1 2 ccSTP/gwy オーダーのため、数万年オーダーの地下水であると推定される。

④ 地化学評価

DD-4 孔の 350 m 区間において採水・採ガスおよび物理化学パラメータ測定を行い、取得された pH や Eh 値の妥当性の評価を行った。原位置採水器を使用して採水・採ガスを行った結果、ガスはほとんど含まれなかった。ポンプ揚水した地上での採取では、時間をかけてガスを採取した。物理化学パラメータの測定結果ならびに溶存ガスの分析結果を表 2.2-7 に示す。

表 2.2-7 DD-4 孔 350 m 区間の物理化学パラメータの測定結果 ならびに溶存ガスの分析結果

пH	لرا	Fh	泪	定	店
DГ	1		ᄼᄝᆝ	ᄮ	ПΗ

	地上測定	原位置測定						
рН	7.94	7.85						
Eh (mV)	100	-217						

溶存ガスの主な組成

7日 17 17 17 17 17 17 17									
	N_2	CH₄	CO_2						
組成(%)	45.07	54.70	0.23						

地上と原位置の pH、Eh を比べた結果、pH は地上測定値が原位置測定値に比べ、わずかに高い程度の大差のない結果であったが Eh は大きく異なる値であった。pH については基本的に溶存ガスのうちの CO_2 の脱ガスに伴いその値が変化するが、本区間の溶存ガスはガス水比で 0.01 以下と考えられ、溶存ガス中の CO_2 濃度も 0.23 %と低いことから、pH がほとんど変化しなかったものと考えられる。Eh については大気の混入などの影響を受けて変化したものと考えられる。pH、Eh 共に、溶存ガスを考慮した化学平衡計算を PHREEQC (Parkhurst & Appelo, 1999) にて行い、Geochemist's work bench (Bethke, 2008) で描いた pH-Eh ダイヤグラム上にプロットした結果を図 2.2-19 に示す。なお、図 2.2-19 は当該区間の溶存イオンの水質分析値のうち、主

な溶存元素である Na、K、Ca、Mg、Cl、 HCO_3 の活量を考慮して作図したものである。Eh は原位置での測定結果と似た値が得られ、 $SO_4/Pyrite$ の境界付近にプロットされた。

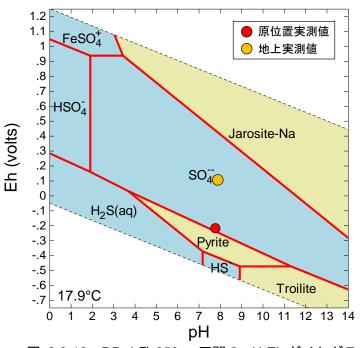


図 2.2-19 DD-4 孔 350 m 区間の pH-Eh ダイヤグラム

5) まとめ

今回新たに DD-4 孔を掘削し、間隙水圧測定、段階揚水試験、定流量揚水試験を実施することで DD-4 孔における帯水層の水理定数を測定した。その結果、DD-1 孔における近傍の深度(深度 306m)とは大きく異なる値が得られた。これは DD-1 孔の取水部でパーフォレーションによる穿孔であること、さらに DD-1 孔の揚水試験は掘削から約 2 年後に実施していることから、穿孔部が経年変化している可能性もある。このような理由により、DD-4 孔において得られた値が本深度領域の水理定数であると考えられる。

DD-4 孔での地下水の 14 C 年代の測定結果から、深度 330 - 360 m 区間の結果は、深度 306 m 区間の結果とほぼ同じであり、温暖期に涵養した 1 万年程度の地下水と推定された。深度 90 - 300 m が氷期に涵養した地下水と推定されているため、その下位に若い地下水が存在することになる。この点については今後の課題である。

地化学特性については、溶存ガスの少ない区間であったため、pH は地上と原位置で変わらない値を示した。Eh は原位置の測定結果と溶存イオン濃度から算出した値が似た値を示した。

(4) 地下水年代

1) 地下水年代測定法の開発概要

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、地下水の滞留時間を評価する方法である。地下水年代解析の原理及び用いられる放射性物質やトレーサーの種類についてまとめたものを図 2.2-20 に示す。

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、 $Atom\ Trace\ Trap\ Analysis\ (ATTA)$ 法の開発により、放射性希ガスの分析が、従来よりも少ない試料量、具体的には数千 L から約 100L で可能となってきている($Lu\ et\ al.,\ 2010$)。 ^{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を評価できる可能性がある。このため、これらについても適用を試みた。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いる。

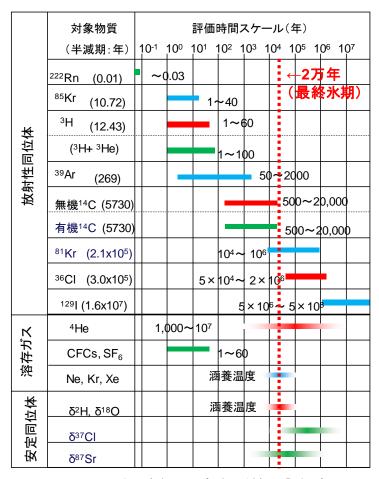


図 2.2-20 地下水年代測定法の種類と評価時間

2) 地下水中の Kr 分析

① はじめに

高レベル放射性廃棄物処分などで対象となる地下水の長期安定評価には、104-106年の滞留時間の地下水年代測定のツール開発が極めて重要である。81Kr(半減期: 0.21 Ma)は宇宙線由来の核種であり、核実験、再処理あるいは岩石内での235Uや238Uの核反応により放出される割合が少ない核種であること、不活性希ガスであるため地下水-岩石間の相互作用も低いことを考慮すると、104-106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と考えられる。近年、Atom Trace Trap Analysis(ATTA)法が開発され、従来よりも少ない試料で計測が可能となった(Purtschert et al., 2013, Lu et al., 2010)。また、深部地下水への適用も行われ、81Krの地下水年代測定の有効性が議論されつつある(Matsumoto et al., 2018)。

昨年、地層処分に求められる科学的特性を明らかにするために、科学的特性マップが示された(経済産業省資源エネルギー庁,2017)。科学的特性マップでは、地質環境の長期安定性や操業時の安全性だけではなく、核種の輸送の観点から、沿岸域が候補地として適正が高いと報告されている。沿岸部の300m以深の地下深部では塩分濃度が高くメタン濃度も高い地下水も存在している可能性が高く、このような地層・深層地下水特性(深部地下水のイオン濃度と共存ガス濃度が高い条件)に適応した抽出システムの構築が必須である。ここでは、Ohta et al.(2009)が開発を行った85Kr分離技術を改良して、1)地下深部のサイトで稼動可能な装置の構築および小型・軽量化、2)大気中の81Krの汚染防止手法・評価手法の開発、3)Krの分離効率手法の検討を行った。

② 小型装置の開発

深部地下水の Kr 分離装置は、Ohta et al. (2009)の Kr 分離抽出システムを基に、地下深部の処分研究サイトで稼動可能な小型サイズの装置の設計・試作を行った。装置(V-2)は深部地下水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、および捕集ボンベ部で構成される。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、コンプレッサーと抽出ラインで構成される。分離ユニット、排気ユニット、ボンベ部は狭い坑道内で可搬可能な小型軽量化したシステムを開発した。V-2 装置をベースとして、V-2 装置よりさらに小型・軽量化をめざした V-7、水トラップを省いた V-8 の V-8

③ 大気由来の 81Kr 汚染防止手法の開発

大気由来の 81 Kr の汚染は、抽出装置のポンプのリークが主な原因である (Ohta et al., 2009)。 大気リークの少ないポンプの選定は、水上置換法で装置稼動を行い、12 時間にわたるリーク量の 観測を基に行った。装置稼動時の大気汚染のコンタミネーションの指標として、捕集ガス中の O_2 を指標とした。

④ 室内試験

室内試験で、Kr 抽出装置のリークチェックのために、 CO_2 をバブリングした極低濃度 O_2 模擬地下水を作成し、装置に模擬地下水を流入させ、模擬地下水中のガスを Al バックに採取した。採取したガスは、CC(ガスクロマト分析器)で、 C_2 の定量を行った。

表 2.2-8 に Kr 抽出装置により分離・捕集したガス中の O_2 濃度を示す。表 2.2-8 に示すように、補修したガス中の O_2 は検出限界以下であることがわかった。したがって、装置によるリークは極低濃度レベルであると考えられる。

	試料 ID	${ m O}_2$	N_2	CH_4	CO_2	H_2
1	HF1-LP	DL	1.4	0.0	98.8	0.0
2	HF1-SP	DL	2.9	0.0	97.1	0.0
3	HF2-LP	DL	1.6	0.0	98.6	0.0
4	HF2- SP	DL	1.7	0.0	98.4	0.0
5	Back ground	DL	2.2	0.0	98.0	0.0
6	Back ground	DL	1.5	0.0	98.7	0.0

表 2.2-8 捕集したガス成分 (in unit %)

DL: below detection limit

⑤ フィールド試験

図 2.2-21 のラインは捕集ガス中の O_2 濃度と大気汚染率を示した計算ラインである。図 2.2-21 より捕集ガス中の O_2 を指標とすることで、大気由来 81 Kr 汚染の有無を正確に評価することができる。

大気から装置の抽出ラインへ混入する 81 Kr の汚染評価のために、深部地下水より抽出したガスを分取し、GC で O_2 測定を行った。膜分離法より分取したガス中の O_2 濃度により、バックグランドレベルもしくは汚染レベルが(低濃度 0.01 %未満)であることが明らかになった(図 2.2-21)。さらに、水上置換法と膜分離法(Kr 分離抽出システム)による分離ガス中の O_2 濃度の比較を行ったところ、酸素混入率は同程度であることがわかった。

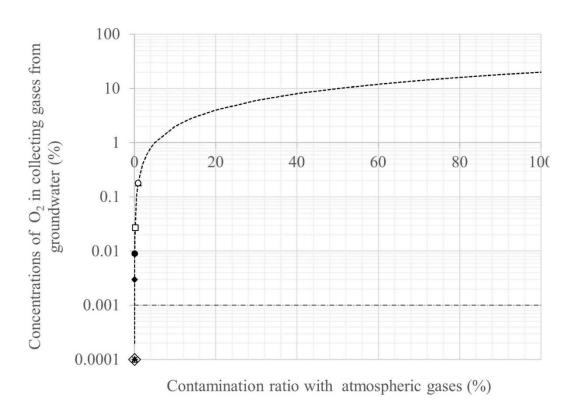


図 2.2-21 深部地下水より分離したガス中の O₂ 濃度と大気コンタミネーション率の関係 DL: 検出限界, O2: ガス中の O2 の定量値に対する大気汚染率の計算ライン。◇: D=214m(V-7) ●:D=613m (V-7) ■: ◆:D=140m (V-8) □:D=214m (WR) ○: D=613m (WR)。D: 深度, (): 捕集方法, V-7, V-8: 中空糸膜による捕集, WR: 水上置換法による捕集

----O2

---- DL

⑥ 最適な抽出条件の検討

Kr 抽出装置の最適な抽出条件を求めるために、中空糸膜の内圧と試料採取圧の関係を実測した。図 2.2-22 に中空糸膜の内圧と試料採取圧の関係を示す。図 2.2-22 に示すように、内圧が 0.02 MPa 以上で試料採取圧が 0.2 MPa 以上に高くなることがわかった。

次に、中空糸内圧と模擬地下水中の DO の抽出率の実測を行った。図 2.2-23 に中空糸膜の内 圧と模擬地下水の DO の抽出率を示す。図 2.2-23 に示すように模擬地下水の DO の抽出率は 0.02 MPa 以下で抽出の効率がよいことがわかった。

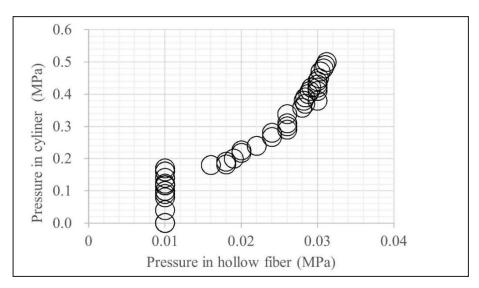


図 2.2-22 中空糸膜の内圧と試料採取圧の関係

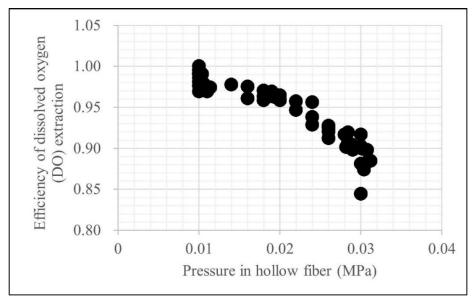


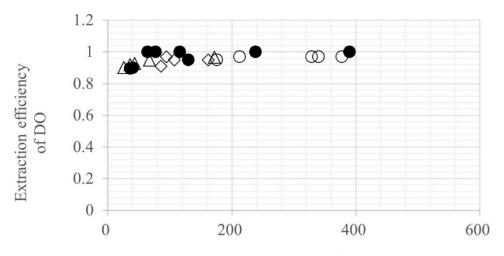
図 2.2-23 中空糸膜の内圧と模擬地下水中の DO の抽出率

⑦ 塩分濃度依存性

地下水に溶存する Kr を効率的に分離できる地下水の塩分濃度を決定するために、淡水および沿岸域の地下水を模擬した海水を用いて室内試験を行った。深部の地層は透水性が低いことが多いため、揚水速度が遅くなることが予測される。よって、Kr 分離抽出システムへの地下水の導入速度は遅いことが推測できるため、水導入速度 1.67×10^{-5} m^3/s 以下を検討対象とした。

図 2.2-24 に Kr 分離抽出システムによる水・中空糸膜の接触時間と淡水中の溶存酸素 (DO) の抽出効率を示す。淡水中の DO は、水・中空糸膜への接触時間が 100 s/m²以下で最も効率よく抽出できることがわかった。

次に、海水を希釈した模擬海水および淡水中の DO の分離効率を 100 s/m²以下の接触時間で求めた。開発した分離システムでは、淡水および海水と同等の塩分濃度に相当する地下水でも溶存ガスを効率よく分離できることが明らかになった。



Contact time of groundwater (s/m²)

図 2.2-24 水-中空糸膜間の接触時間と DO 抽出効率 △: V-8, ●: V-2, ○: V-7, ◇: V-7 (VP3)

⑧ 深部地下水の現地試験における希ガス抽出率

開発した分離システムを深部地下水に適用し、in-site (原位置) で He、Ne、Ar、Kr、Xe、²²²Rn の分離効率を求めた。

分離システムでガス分離を行った地下水中の He、Ne、Ar、Kr、Xe を希ガス質量分析計で実測を行った。一方、 222 Rn は高純度 Ge 半導体検出器(γ 線スペクトロメーター)により、 214 Pb(351 keV)をベースとした γ -ray spectrometry により実測を行った。図 2.2-25 に希ガスの分離効率と拡散係数の関係を示す。膜分離システムでは、拡散係数の大きい He はほぼ 100 %分離できることがわかった。膜分離システムによる希ガスの抽出率は、拡散が支配的であることがわかった。また、地下水中の Kr の分離効率は 90 %程度であることを明らかにした。

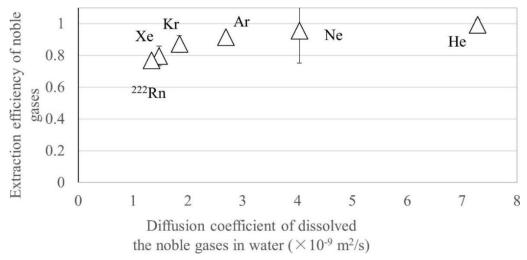


図 2.2-25 希ガスの拡散係数と希ガス抽出効率の関係

9 沿岸域の深部地下水への適用

沿岸部の深部地下水を対象とした81Kr分離システムを構築し、実証試験を行った。構築したシ

ステムは、次の基準を満たす。

- 1) 大気由来の ⁸¹Kr 汚染を最小限 (0.01 %以下) にできるシステムである
- 2) 地下深部の地下水中の Kr は 90 %程度の高い分離効率を示す

3) 地下水年代測定技術の整備

地下水の滞留時間を示す指標として129 [/127] 比やマルチコレクター型希ガス質量分析装置によ る希ガスの同位体比などがあるが、国内において報告例は少ない。地下水の 129I/127I 比年代測定 法を整備するため、これまで試料前処理法の検討及び JAEA-AMS-TONO での測定整備を行って きた。平成 29 年度までにノルマルヘキサンを用いたヨウ素の抽出法などを検討し、一連の前処 理法を確認し、JAEA-AMS-TONO にて測定が容易である地下水に比べて高同位体比の標準試料 を用いた測定条件の最適化を実施してきた。最終年度である平成30年度は、実際の地下水への 適用を目指し、地下水と近い低同位体比試料について確立したノルマルヘキサンを用いたヨウ素 の抽出法の適用を確認し、また、装置の最適化を行った。ノルマルヘキサンは、これまで使われ てきた四塩化炭素のような特別化学物質ではないため、比較的使用しやすい有機溶剤である。し かし、これまで海水などの人為起源の 129I が混入した試料での適用が主であり、地下水のような 低同位体比試料への使用例は少なく、本手法による同位体比への影響の有無に関する報告がなか った。そのため、低同位体比を持つことがわかっているヨウ化イオン溶存溶液を用いて、ノルマ ルヘキサンによるヨウ素の抽出において同位体比に変化があるかを確認した。試料は、同位体比 が 10⁻¹³台の IonPlus (NaIag) と 10⁻¹⁴台の Woodward iodine (I2を亜硫酸ナトリウムを用いて 超純水に溶解させたもの)を用いた。その結果、IonPlus 及び Woodward iodine ともに抽出操作 の有無で、同位体比に差は見られなかった。よって、ノルマルヘキサンによる抽出を含む前処理 法が、同位体比の低い地下水へ適用可能であることが確認できた。

また、JAEA-AMS-TONO による測定では、平成 29 年度は ¹²⁹I/¹²⁷I 比が 10⁻¹¹ 台の試料 (MUTSU#2-3) を測定することができていたが、バックグラウンドの値が他の機関よりも高いという問題があった。そのため、バックグラウンドの低減を図るため、装置の最適化を行った。 検出器の検討を行ったところ、JAEA-AMS-TONO は装置の設計上、¹²⁷I の電流値を測定する電流計が、¹²⁷I が通る軌道よりもわずかに外側に設置されており、電流計に入らない一部の ¹²⁷I が ¹²⁹I の軌道に入り込んでいることがわかった。そのため、¹²⁹I の軌道に ¹²⁷I が混ざらないように ¹²⁹I の検出器前にあるスリットを絞ったところ、バックグラウンドの値が安定し、10⁻¹⁴台とすることができた。この結果、JAEA-AMS-TONO を用いて同位体比の低い地下水の測定が実施可能となった。

以上により、地下水の ¹²⁹I/¹²⁷I 比年代測定法を対象とした前処理法及び JAEA-AMS-TONO による ¹²⁹I/¹²⁷I 比測定の整備を完了した。これまでの調査では、海外施設での測定に頼っていたが、国内での測定が可能となり、より迅速な調査などが遂行可能となった。

また、希ガスの同位体比測定では、地下水に含まれる希ガスを抽出して測定する。平成 29 年度はマルチコレクター型希ガス質量分析装置を活用することにより、高精度の測定が可能になることを報告した。しかし、沿岸部の 300m 以深の地下深部ではメタン濃度が高い発泡性のある地下水も存在していることから、そのような地下水を従来用いられている 1 個の金属容器や銅管の両端をクランプで封入して採取する方法では気泡が混入し、測定に影響を与える。これまでに金属容器を 5 個連結し、湧水を環流させて気泡の混入を防ぐ手法が報告されている (原子力機構, 2018)が、本年度はより採取効率を高めるため、改良した方法を検討した。詳細は Appendix VIII に示す。

(5) 我が国の沿岸部の地下水

1) 大深度地下水調査

これまでに、沿岸部の 1000m 級のボーリング孔や温泉井の 62 地点から地下水を採取し、水 質・地下水年代調査を実施した。涵養状況や地質状況などの情報がない地点では、初期値や原位 置生成値などが不明なため、地下水年代を正確に求めることは難しい。このため、沿岸部の地下 水が海水準変動の影響を受けていると想定し、現降水(0~2万年)、現海水(0~2万年)、氷期 降水 (2 万年以上)、化石海水 (10 万年以上) の 4 つに大別して評価した。これは、図 2.2-26 に 示すように氷期(約2~10万年前)に海水準が長期にわたって低下し、その後の短い期間の間氷 期(約2万年)で海水準が上昇するためである。沿岸部の地下水流動は、この海水準変動に対応 して変化するが、氷期の長い期間をかけて降水が浸透した後、間氷期の短い期間で海水準が上昇 するため、現海水の下に氷期降水が取り残されるような形態になる可能性が高い。また、氷期の 間に降水が浸透しなかった地下深部には化石海水が残留する可能性がある。降水系地下水は、氷 期前後で氷期降水と現降水に区分した。氷期の地下水は、現在よりも、温度が低い状態で涵養す るため、水素・酸素安定同位体比が軽く、希ガス濃度も高いはずであり、涵養温度から評価でき る可能性がある。現海水と化石海水は、海水が起源であるが、地下水年代にはかなり大きな差が ある。現海水は海水準変動の上昇に伴って流入した地下水であり、化石海水は氷期の間にも淡水 で置き換わらなかった地下水である。このため、現海水と化石海水では様々な指標 (14C、36Cl/Cl、 4He など) において、大きく値が異なるはずである。

以上のように、淡水と海水およびそれらの涵養温度差や年代差で、現降水と氷期降水、現海水と化石海水に識別できる可能性が高い。このため、このような区分で流動性を評価する。

地下水年代測定は、これまで検討してきた図 2.2・27 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確認するとともに、氷期に涵養した地下水の可能性、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、14C、36Clと順に調べ、地下水の長期安定性を概略的に評価する。また補足的に、地球温暖化ガス(CFCs:フロンガス、SF6:六フッ化硫黄)が検出されれば数十年オーダーの地下水、水素・酸素同位体比が浅層水よりも軽くなっている地下水で、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れば、氷期に涵養した地下水である可能性が高い。さらに、4He 濃度、81Kr 濃度、129I 濃度から非常に古い地下水かどうかを評価する。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することとした。図 2.2・27 に示すように、3H、14C が有意に検出されず、CI 濃度が高ければ現海水、CI 濃度が低ければ現降水、3H、14C が有意に検出されず、CI 濃度が高ければ現海水、CI 濃度が低ければ氷期降水と判定される。氷期降水については、36Cl/CIが初期値に近いこと、化石海水については 36Cl/CI が初期値と異なることから、判定の妥当性を確認する。

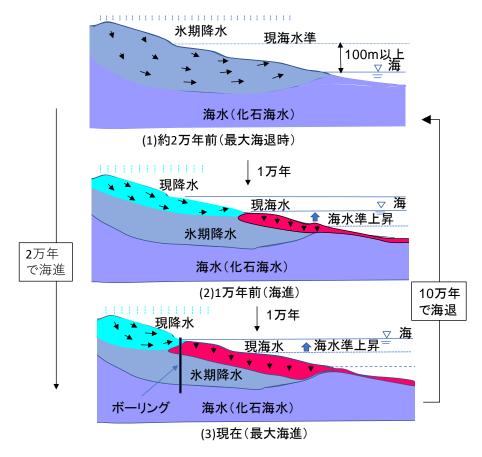


図 2.2-26 沿岸部での地下水分布の概念図

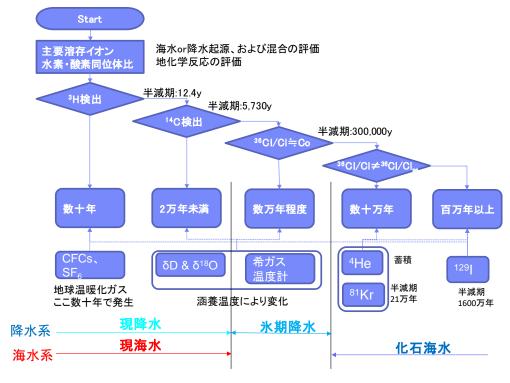


図 2.2-27 地下水年代検討フロー

① 主要溶存イオン

主要溶存イオンについて、図 2.2-28 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(Cl<1,900 mg/l)、汽水(1,900~16,000 mg/l)、海水(16,000 mg/l 以上)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 $HCO_3 \rightarrow SO_4 \rightarrow Cl$ と支配的な陰イオンが変化していくことから、Ca-HCO3型 外a-HCO3→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。

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、25、52、53、55、59 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。

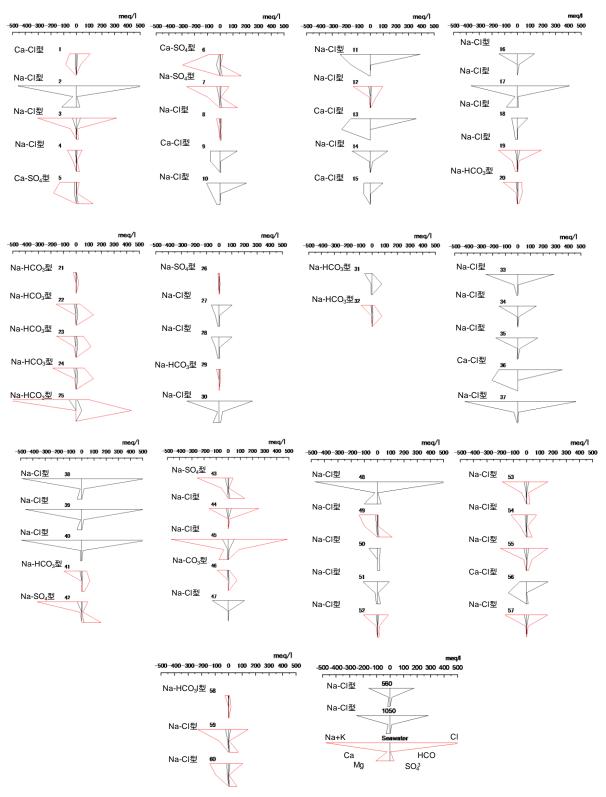


図 2.2-28 ヘキサダイアグラム (赤線は 10 倍にした濃度) ダイヤグラム左上の数値は番号。560 と 1050 は過年度に採取した新潟平野の深層地下水

② 水素・酸素同位体比

水素・酸素同位体比を図 2.2-29 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、 δ ¹⁸O 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)。

幌延浜里のボーリング孔(HMS)では、図 2.2-29 に示すように、深度によって水素・酸素同位体比が大きく異なる。このため、原位置採水試料の溶存希ガス濃度を計測し、涵養温度を求めた。この結果、氷期降水が滞留していると考えられる深度 90-100 m と深度 214 m では涵養温度が 0.7 °C 程度、現降水が滞留していると考えられる深度 306 m では涵養温度は 8.1 °C となった。この結果から、幌延浜里の浅部で見られた水素・酸素同位体比の差は、涵養温度を反映したものであると考えられた。

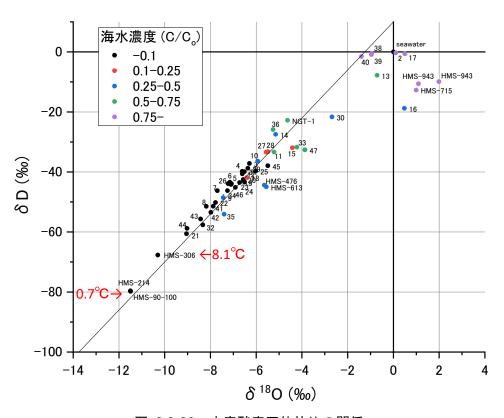


図 2.2-29 水素酸素同位体比の関係

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 $2\sim5$ TU 程度であるため、滞留時間が 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 現降水と判定することができる。

(4) 14C

14C の分析結果を図 2.2-30 に示す。14C は 14C 濃度を縦軸、δ 13C 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。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。

これらの混合の判定の方法としては、図中に示した破線が混合線であり、混合線上であれば、これらの成分の混合で 14 C の変化の説明が可能である。混合線よりも下にあれば、放射壊変による濃度変化とみなすことができ、 14 C 年代を計算することができる。溶存炭酸量を表示したのは、溶存炭酸量が少ない場合には、大気の混入により 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なためである。Nakata et al. (2016) によれば、前処理において 14 C 農度の 14 C 濃度が高いものは、大気の混入を疑う必要がある。試料番号 5 ~9、 11 、 13 、 26 ~29、 36 は大気の混合が疑われる。実際に、溶存炭酸量が少ない 26 ~29 と 36 については再分析を実施した。この結果、図 $^{2.2}$ ~30 の赤の矢印に示すように、 14 C 濃度に増加、 5 13 C に低下の傾向がみられた。このため、溶存炭酸量の少ないものは、大気中の 5 0、 5 2 を溶解し濃度変化している可能性が高い。

14C 濃度と Cl 濃度との関係を図 2.2-31 に示す。現海水、現降水の 14C は高く、化石海水と氷期地下水の 14C は低いことから、14C 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。現降水と氷期地下水は $10\,pMC$ を基準に判定した。これは、 $100\,pMC$ を基準とすると、 $2\,$ 万年以上と判定されるのが、約 $10\,pMC$ 以下の場合だからである。ただし、前述のように、海成炭酸塩やメタン生成 CO_2 の溶解した場合、 $10\,pMC$ を下回る可能性があるため、定量的とは言い難い。このため、現降水と氷期降水判別については、信頼性が高くない。

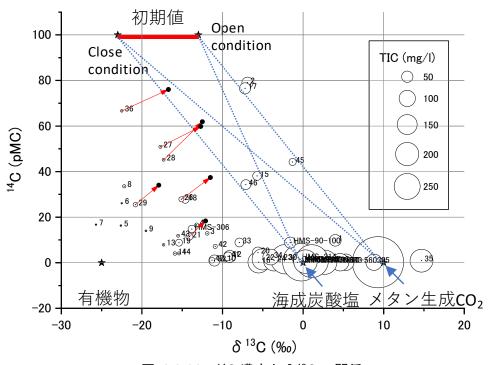


図 2.2-30 ¹⁴C 濃度とδ¹³C の関係

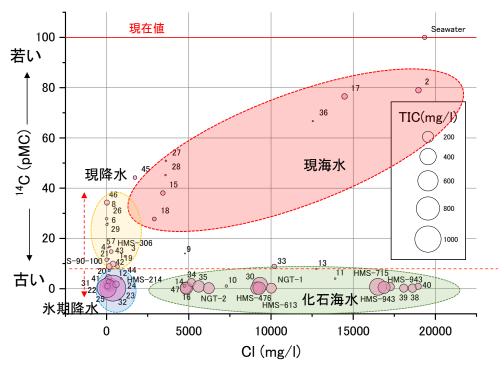


図 2.2-31 ¹⁴C 濃度と CI 濃度の関係および地下水の区分結果

⑤ 36CI

Cl と 14 C とで地下水を 4 種類にわけることができた。ここではその 4 種類の分類を踏まえて、Cl 濃度と 36 Cl/Cl の関係を図 2.2-32 に示した。ここでは、横軸に Cl 濃度、縦軸に 36 Cl/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。

36Cl/Cl は、現海水では 0.7×10^{-15} である(Fifield et al., 2013)。 36Cl は地層中で長期時間(数十万年以上)経過すると、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 36Cl/Cl が高くなる。このため、Cl 濃度が高く、36Cl/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。化石海水と現海水との区分は、測定誤差を考慮して 36Cl/Cl= 3×10^{-15} を基準とした。これは、現海水レベルの極低レベルの 36Cl/Cl の測定精度は $\pm1\times10^{-15}$ 程度のためである。36Cl/Cl と Cl 濃度の関係でも、図 2.2-31 で評価した化石海水の 36Cl/Cl は高く、現海水の 36Cl/Cl は低い結果となっており、 14 C と Cl 濃度の関係で求め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。評価結果が異なる試料が多少あるが、 14 C が高いものについては、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、 36 Cl が低いものについては、原位置平衡値が低い可能性がある。

降水の36Cl/Cl 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36Cl 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、36Cl 年代の推定が難しいとされている。ここでは、現降水としてプロットした36Cl/Cl と Cl に一定の関係があるように見える。図中の線は、宇宙線起源の36Cl のフラックスを100 atm/m²s、降雨量を1,800 mm/y を仮定した場合に、海塩による希釈を考慮した混合線である。現降水中の36Cl は海塩によって希釈され、おおむね混合線に載ることがわかる。一方で、氷期降水中の36Cl は、降水中の36Cl 量よりも増えており、単純に降水起源の36Cl が海塩で希釈されていない。このため、化石海水から36Cl の供給を受けていると考えられる。これらの結果から、現降水は現海水と混合しており、

氷期降水は化石海水と混合している可能性が高いことが明らかになった。これは、概念図で示したように現降水で洗われている滞留時間の短い領域には、海水準変動の影響で流入した現海水の影響を受けている可能性が高く、氷期の地下水が残留しているような滞留時間の長い領域では、その下に残留する化石海水と混合している可能性が高いことを示している。

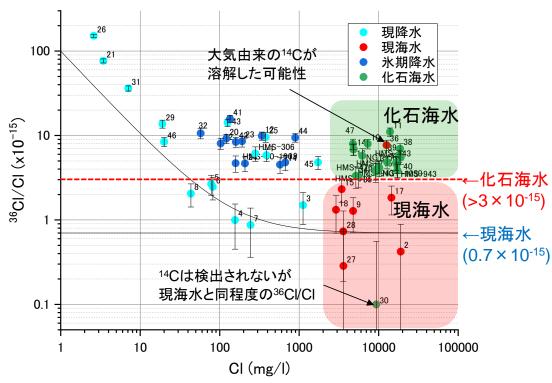


図 2.2-32 ³⁶CI/CI 濃度と CI 濃度の関係および地下水の区分結果

⑥ そのほかの地下水年代測定結果

4He 濃度と 3 He/ 4 He を図 2.2-33 に示す。図 2.2-33 では、地下水の区分を考慮して表示するとともに、 4 He の大気平衡濃度(= 4.8×10^{-8} ccs_{TP}/g_w)と 3 He/ 4 He の大気平衡値(= 1.4×10^{-6})を合わせて示した。ここでは、 4 He 濃度および 3 He/ 4 He については Ne 量で脱ガスおよび空気の混入の補正をしている。

この結果、4He 濃度が高く、3He/4He が低い、蓄積が進んでいるとみなせる地下水については、 水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のものが多い。化 石海水に分類されたものでも、大気平衡値に位置するものは、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、3He/4He 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。4He 濃度と Cl 濃度の関係を 図 2.2-34 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 ×10-8 ccstp/gw) を併せて示した。この結果、4He 濃度が高く、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。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。溶存ガスは、大気と接触すると、大気と交換し大気と平衡 になってしまう可能性がある。 129I/127I と CI 濃度の関係を図 2.2-35 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、海水系の地下水を中心に分析を実施している。ヨウ素濃度が低い場合には、同位体希釈法を適用している。この方法は、129I/127I の低いヨウ素を試料に追加して、計測可能にする方法であるが、試料が希釈され精度が低下する。このため、測定誤差についてはエラーバーで示した。

 129 I/ 127 I は半減期が約 1,600 万年であり、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、化石海水のほとんどは年代が数千万年を超える。現降水や現海水と判定されたものについても、 129 I 年代が数千万年になるものがある。 129 I 年代については、適用事例が少ないため、初期値や平衡値について今後検討が必要であると考えられる。図 2.2-36 に I 濃度と 129 I/ 127 I の関係を示す。I 濃度が高い場合、 129 I/ 127 I は $^{10}\times10^{-14}$ 程度であるが、I 濃度の低下に伴い、 129 I/ 127 I が増加するように見える。これは、I 濃度が低い試料には同位体希釈法が適用されるため、測定誤差が大きくなっている可能性もある。ただし、 129 I/ 127 I が高いものは、 3 H が検出されているものもあり、非常に新しい海水が混合している可能性もある。

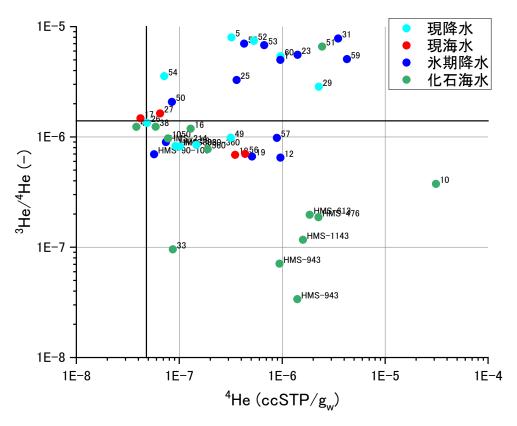


図 2.2-33 ⁴He 濃度と ³He/⁴He の関係

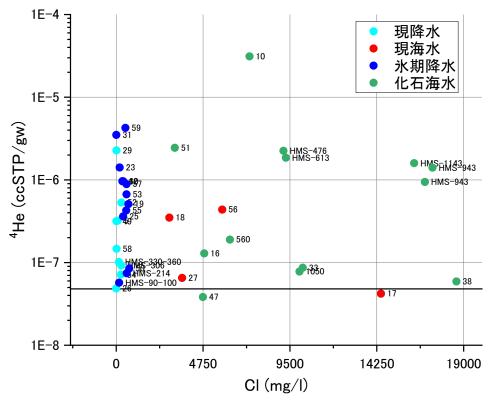


図 2.2-34 CI 濃度と ⁴He 濃度の関係

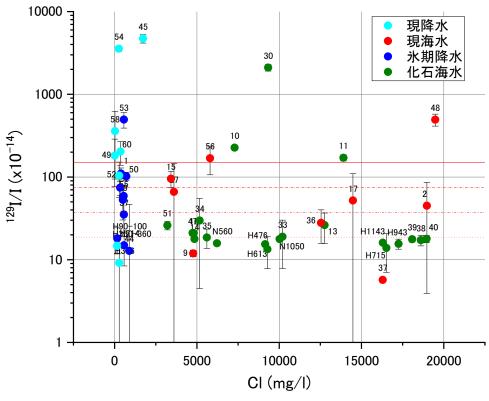


図 2.2-35 129 | /127 | と CI 濃度の関係

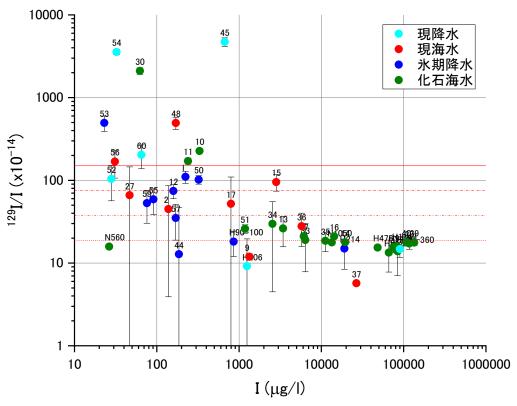


図 2.2-36 129 | /127 | と | 濃度の関係

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、図 2.2-37 の評価手順に基づいて地下水を区分すると、現海水 11 試料(15%)、現降水 17 試料(26%)、氷期降水 18 試料(27%)、化石海水 16 試料(32%)となる。Cl 濃度と ^{14}C 、Cl 濃度と ^{36}Cl のように組み合わせて評価することにより、視覚的にも適切に区分されていると考えられる。現降水と氷期降水との識別は、 ^{14}C 濃度に基づいており、 δ ^{13}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、信頼性が低い。ただし、Cl ^{26}Cl との関係から、現降水は現海水と、氷期降水は化石海水と混合している傾向にあり、地下水の滞留性が近いものが混合していると考えられるため、適切に区分できているとも考えられる。現海水と化石海水の識別は、Cl 濃度と ^{14}C で識別したものが、Cl 濃度と ^{36}Cl で確認できており、一部例外はあるが整合的に説明できている。ここでは、Cl 濃度が 16,000 mg/l 以下でも、化石海水としているが、これは、化石海水では水-岩石相互作用で希釈される場合を考慮した。実際には、水-岩石相互作用ではなく、氷期降水と化石海水が混合している可能性がある。

それ以外の年代測定法を適用したが、溶存ガスを用いた方法は、簡易的な採水では評価が難しいことが明らかになった。これは大深度から地下水を揚水することによって、溶存ガスが分離する、あるいは、地上付近で大気と接触する影響でガス組成が変化するためと考えられる。原位置採水が実施できた浜里地点では、希ガス温度計と水素・酸素同位体比が整合し、氷期降水の識別をすることが可能であったが、原位置採水ができない場合には適用が難しいと考えられる。水素・酸素同位体比については、浅部地下水のデータがない場合には、深部の単独のデータでは評価が難しいことから、浅部地下水の調査の重要性が明らかになった。現降水と氷期降水の区分については信頼性が低いため、水素・酸素同位体比でその違いを明らかにする必要があると考えられる。また、4He や 36Cl では、原位置での生成速度が重要となることから、原位置の岩石コアのデータ、4He ではウラン・トリウム量、間隙率、密度、36Cl では、これに加えて、岩石中の主要鉱物や微

量成分のデータが必要となることから、これらの採取が必要である。129I については、近年分析は可能となっているが、適用例が少ないため、現時点では地下水年代測定法としての適用は簡単ではないと考えられる。今回の調査でも、初期値として 150×10⁻¹⁴ を採用した場合には、129I 年代は非常に古い年代となっている。今後、現降水や氷期降水と判断された地点での浅層水の調査、採水地点での岩石試料の調査などが 4 区分の妥当性を確認するうえで必要と考えられる。

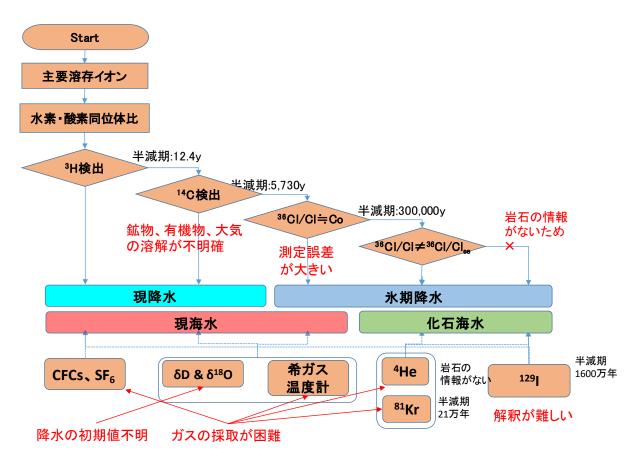


図 2.2-37 地下水の安定性評価の適用結果

2) システマティック区分

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て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マティック区分と呼称する。平成 28 年度と平成29 年度は、国内各地の深部地下水の水質や年代情報を収集するとともに、システマティック区分に用いるデータの収集および検討項目について整理した。また、全国で調査された温泉井のデータ(地質調査総合センター、2009)に基づいて、沿岸部地下水の温度および塩化物イオン濃度の空間分布特性についてまとめた(産業技術総合研究所ほか、2018)。今年度は、本事業で収集した地下水を対象とした区分の最終結果について報告する。

① システマティック区分の方法

本事業では、前述の「(5)-1) 大深度地下水調査」のように沿岸部地下水の組成を塩化物イオン濃度に基づいて大別しており、地下水中の塩化物イオン濃度が 1,900 mg/L 未満を淡水 (降水系地下水)、1,900 mg/L 以上を汽水および海水 (海水系地下水) としている。降水系地下水の形成プロセスに着目すると、沿岸部に賦存する地下水は、陸域における天水の浸透および地下水流動によってもたらされたと考えられる。その地下水は重力と地形勾配に応じて流動することから、流域内の地形勾配が地下水年代の形成に関わる一つの要素と考えられる。また、帯水層の異方性は地下水の流動方向を規定しうることから、流域内の地質情報もまた地下水流動や年代形成に影響を及ぼす要素と考えられる。以上のことから、降水系地下水の年代形成に関わる要素として、井戸の位置に基づく集水域を決定し、その集水域内の水文地質学的条件、特に地形勾配や地質に着目し、区分を行った。

一方で、沿岸部に賦存する海水系地下水は、主に海域から沿岸部帯水層への海水の侵入と、地層堆積時に間隙中で塩水が保存されるプロセスなどが想定される。前者は海水準変動に伴って地下水が流動する循環性の塩水地下水であり、後者はほとんど動かない停滞性の塩水地下水といえる。沿岸部帯水層への海水侵入の観点から考えると、塩水地下水の年代形成に関わる要素として、井戸から海岸線までの間の帯水層の地質がどのような岩相であるかがあげられる。さらに、沿岸部における地下水の年代形成には、海域の地形勾配も関与している可能性が挙げられる。例えば、氷期に海水準が低下し陸域が現在よりも拡大した時期では、海底地形が急峻な地域に比べ、遠浅の地域の方がより陸域の面積が拡大し、氷期の降水が浸透できる領域がより大きくなることが予想され、淡水地下水の分布に影響を与えると推測される。そこで海底地形勾配にも着目し、全国一律に現在の水深 100 m の等深線を海退時の海岸線に相当するとみなして、水深 0 m から 100 m までの海底面の地形勾配を計算した。一方で、海底下の地質については現在研究が盛んにおこなわれているものの、未だ全国的な整備には至っていないため、本事業では検討する要素から除外した。

過年度の検討結果も踏まえて、最終的にシステマティック区分に用いた文献等の情報を表 2.2-9 に示す。本事業で区分の対象とした地点は国内各地に分布していることから、相互の関係性を等しく比べるためには、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、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、システマティック区分の判定に用いた。なお、過年度に採用していた要素のうち、地形分類は後述する集水域の傾斜角から得られる情報で代用できると判断し除外した。同じく過年度に検討を進めた隆起と沈降の判定については、国内の一部地域においてデータが網羅されていなかったため除外した。

表 2.2-9 に示した各文献は、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 2.2-38 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 2.2-9 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
가면기기점 -	数値標高10mメッシュ
集水域	数値標高10mメッシュを用いてArc GISにより計算
地形勾配	数値標高10mメッシュを用いて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
衣眉地貝	20万分の1日本シームレス地質図
海底地形勾配	海上保安庁海洋情報部日本海洋データセンター
海风地形为癿	500mメッシュ水深を用いてArc GISにより計算
地下地質	Yasue et al. (2014)
地 地貝	Subsurface geological mapping of the Japanese Islands

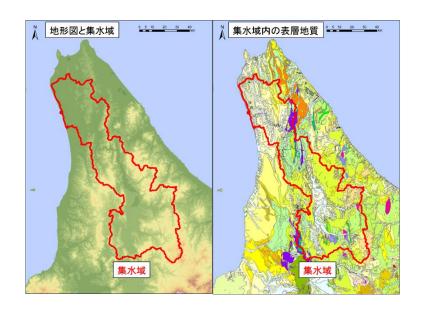


図 2.2-38 各区分項目での作業イメージ(浜里 DD-1 孔を例として)

• 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($10 \, \mathrm{m} \, \mathrm{J}$ メッシュ)から調査地点周辺の地形 データを取得し、 $\mathrm{Arc} \, \mathrm{Map} \, \mathrm{e}$ 用いて $\mathrm{DEM} \, \mathrm{m}$ データの地形図とした。

• 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、集水域を導出した。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、流向ラスターの作成(Flow Direction)および累積流量ラスターの作成(Flow Accumulation)の処理を行った。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、集水域ラスターの作成(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できない。

• 地形勾配

集水域内の地形勾配を検討するために、各地点で決定した集水域を対象に地形勾配の解析 (Slope) を行い、平均傾斜角を算出した。

• 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(産業技術総合研究所, 2015)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。なお、海水系地下水にとっては後背地に存在する表層地質を抽出した情報と考えることができる。

• 海底地形勾配

海上保安庁海洋情報部日本海洋データセンターが公開している日本沿岸の 500 m メッシュ水 深データを Arc Map に取り込んだ後、クリギング法で海底地形のラスタデータを作成し、水深 100 m の等水深線の位置を計算した。次に陸域の井戸から見て最も近傍に位置する海岸線上の 1 点を GIS で算出し、その地点から水深 100 m までの最短距離を計算した。これにより海岸線(水 深 0m)から水深 100 m までの海底地形勾配(単位は度)を求めた。

·地下地質

Yasue et al. (2014) は、既存の地質情報やボーリング情報に基づき、日本全国における海水面、標高 - 500m、標高 - 1000 m でそれぞれスライスした形で 10 種類の地質分布を報告している。本事業では、対象とした各井戸の緯度・経度情報とそれらの井戸深度に基づいて、井戸底の標高値を算出した後、Yasue et al. (2014) の 3 深度の分布から最も近い深度にある地質を、井戸直下の地質として抽出した。

② システマティック区分の結果

表 2.2-10 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、沼垂観測井は地上採水と原位置採水を行った地点であり、J-01~J-87 は現地調査(地上採水)や既存文献から取集した各地の地下水のデータである。なお、本区分結果には 1)大深度地下水調査の⑦地下水年代測定結果のまとめで述べた地点をすべて含んでいる(表 2.1-11)。一部には深度 100 m より浅い井戸や 20 km 以上内陸に位置する深井戸も含まれているが、それぞれ深部地下水や沿岸部地下水との対照地点として収集したものである。J-48~J-60 および J-62~J-65 は丸井ほか(2017)より引用した。

表 2.2-10 には採水時の状況と地下水年代の推定結果の品質を示す指標を併記した。本事業の調査では、可能な限り理想的な深部地下水サンプルの採取を心がけたものの、現場の状況に応じた採水方法を取らざるを得なかった地点も含まれることに留意する必要がある。そこで採水時の状況については、A: 大気接触がない状態で採水、B: 大気接触がある(または可能性がある)状態で採水として表した。また文献値については採水時の状況が不明であったため、C: 採水時の状況が不明として区分した。さらに地下水年代の推定結果については、A: 2 つ以上の年代トレーサー(14 C および 36 Cl など)による推定、B: 1 つの年代トレーサーによる推定(14 C など)、 $^{-}:$ 年代値が得られていない、の 3 つに区分した。

図 2.2-39 は収集したすべての地下水の水質組成(淡水、汽水、塩水)と地下水年代区分(現降

水、現海水、氷期降水、化石海水)を円グラフで示したものである。地下水年代区分は前述の 1) 大深度地下水調査で報告した試料と、既存文献の値の両方を統合して、その割合を再計算した結 果である。

この結果から、海水と同程度の塩化物イオン濃度を持つ塩水はおよそ 1 割程度であり、大半が淡水か淡水と混合した地下水である。また全 90 地点の内、海岸から内陸方向に 20 km以内に位置する地下水 (78 地点)に限った場合も、塩水に区分されるのは 5 地点であることから、淡水が混合した地下水の割合が大きいことが分かる。なお過年度に地質調査総合センター (2009)に基づいて検討した全国の沿岸部地下水 583 地点を同様に区分したところ、淡水が 71%、汽水が 25%、塩水が 4%と算出され、本事業で収集した地下水の結果を支持している。本事業で収集した地下水の年代についてみると、現降水や現海水などの新しい地下水が全体の 4 割で、氷期降水や化石海水などの古い地下水が全体の 6 割であることが分かり、年代の古い地下水の存在割合が大きいことが分かる。

表 2.2-10 システマティック区分結果の一覧表

地点名	地盤標高	井戸深度	海岸からの距離	集水域	集水域内の 平均傾斜角	集水域内の 表層地質	海底地形	地下地質		地下水年代 区分	採水の 品質	年代推定 の品質
	(m) 4	(m) 1200	(km)	(km2)	(度)	從籍 些額	(度)	新第三紀堆積岩類	(mg/L)	ルエ流水	Α.	Α
冼果UUT!式 西蒲原観測井		1050	0.3 4.3	5574 11830	14 20		0.1	・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	18357 14690		A	A
沼垂観測井	i	560	2.8	12054	20	堆積岩類	0.5	第四紀堆積岩類および火山岩類	6093	化石海水	Ä	Ä
J-01	10	1500	4.6	51	17	堆積岩類	1.2	新第三紀火山岩類	399	氷期降水	В	В
J-02	4	1100	0.3	0.55	11	堆積岩類	12.6	新第三紀火山岩類	19223	現海水	В	A
J-03	19	1500	2.0	72	28	火山岩類	2.2	新第三紀火山岩類	1133	現降水	В	В
J-04	55	850	5.3	27	27	火山岩類	1.5	新第三紀火山岩類	161	現降水	В	<u>B</u>
J-05	9	1000	1.9	44	28	火山岩類	1.8	新第三紀火山岩類	79	現降水 現降水	<u>A</u>	<u>B</u>
J-06 J-07	<u>y</u>	1300	1.6 0.6	55 20	30 29	火山岩類 火山岩類	1.9 12.9	新第三紀火山岩類 新第三紀火山岩類	82 250	現降水		
J-08	15	1300	5.4	1.13	1	火山岩類	1.6	新第三紀火山岩類 新第三紀火山岩類	45	現降水	B	B
J-09	90	1330	5.1	0.37	5	火山岩類	4.1	新第三紀火山岩類	5101	現海水	В	Α
J-10	20	1500	12.0	13	14	付加コンプレックス	0.6	先新第三紀堆積岩類	7954	化石海水	A	A
J-11	31	1000	9.3	209	16	付加コンプレックス	0.6	先新第三紀堆積岩類	14279	化石海水	В	A
J-12	40	1500	7.9	23	2	堆積岩類	1.3	新第三紀堆積岩類	545	氷期降水	Α	В
J-13	44	1500	0.4	0.73	25	堆積岩類	1.2	新第三紀火山岩類	13159	化石海水	A	Α
J-14	5	1500	0.4	163	8	堆積岩類	0.9	新第三紀堆積岩類	5068	化石海水	В	<u>A</u>
J-15	4	1502	0.3	200	21	付加コンプレックス	2.6	先新第三紀堆積岩類 	3617	現海水	B	A
J-16	49	1203 1100	5.7 0.3	1.32 0.55		堆積岩類 堆積岩類	0.8 12.6	先新第三紀堆積岩類	4952 11146	化石海水 現海水	<u>A</u>	A
J-17 J-18	····- [74	1.4	143			0.6	新第三紀火山岩類 第四紀堆積岩類および火山岩類	2925	現海小 現海水		····· ^ ·····
J-19		500	3.6	46		推積有類 堆積岩類	0.6	新第三紀堆積岩類	676		<mark>P</mark>	
J-20		1200	2.8	34			0.7	新第三紀堆積岩類	118	水期降水 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	<u>?</u>	
J-21	38	1000	0.3	0.04	7	火山岩類	5.3	データ無し	19852	現海水	Δ	Δ
J-22	25	1200	14.7	94	14	堆積岩類	0.1	新第三紀堆積岩類	18464	化石海水	В	A
J-23	5	1807	0.4	5590	14	堆積岩類	0.1	新第三紀堆積岩類	5599	化石海水	В	A
J-24	4	1004	0.3	0.29	11	堆積岩類	0.3	新第三紀堆積岩類	8716	化石海水	В	A
J-25	1	200	0.0	0.33	15	堆積岩類	0.3	新第三紀堆積岩類	397	氷期降水	В	В
J-26	8	1420	1.5	251	3	火山岩類	0.2	新第三紀堆積岩類	10700	化石海水	В	A
J-27	5	1104	0.6	108	18	火山岩類	0.2	新第三紀火山岩類	5260	化石海水	В	A
J-28	12	700	0.2	175	6	堆積岩類	0.3	新第三紀堆積岩類	5710	<u></u>	В	
J-29	9	1300	2.0	2408	9	火山岩類	0.6	先新第三紀堆積岩類 25年 - 25日 - 2	13000	現海水	<u>B</u>	В
J-30	21	1400 1406	0.3 9.1	693 28	20	堆積岩類 推積岩額	0.2	新第三紀堆積岩類 	16800	ルモデル	<u>B</u>	
J-31					3	堆積岩類 堆積岩額	0.0	花崗岩類	13859	化石海水		<u>A</u>
J-32 J-33	2	852 1050	<u>5.1</u> 9.3	42 83			0.0	花崗岩類 花崗岩類	83 4638		В	B
J-34	23	1501	1.8	33	25	堆積 右規 堆積 岩類	0.1	花崗岩類	1304	北 知 海 水	В	В
J-35	3	1206	16.6	27	5	堆積岩額	0.0	花崗岩額	4	現降水	В	В
J-36	706	400	37.6	33	33	付加コンプレックス	0.1	先新第三紀堆積岩類	4	現降水	Ā	В
J-37	129	不明	29.6	12	37	付加コンプレックス	0.8	-	104	氷期降水	В	В
J-38	68	8	23.6	65	34	付加コンプレックス	1.3	先新第三紀堆積岩類	193	氷期降水	Α	В
J-39	108	不明	26.0	1.35	29	付加コンブレックス	1.1	-	213	氷期降水	A	В
J-40	306	500	22.6	39	34	付加コンプレックス	0.4	先新第三紀堆積岩類	375	氷期降水	В	В
J-41	165	1300	17.0	149	33	付加コンプレックス	0.4	先新第三紀堆積岩類	3	現降水	В	В
J-42	0		0.0	23	28	火山岩類	1.2	-	3267	現海水	В	A
J-43	<u>4</u>		0.2	23	28	火山岩類	1.2		3279	現海水	<u>B</u>	<u>A</u>
J-44 J-45	10 3	20	4.0	337	32	付加コンプレックス	0.7	新第三紀堆積岩類	19	現降水	В	В
J-45 J-46	91	不明 800	0.0 7.3	253 3.62	29 29	付加コンプレックス 付加コンプレックス	0.9 0.5	- 先新第三紀堆積岩類	9532 8	化石海水 氷期降水	A A	B B
J-47	1	1000	0.3	9760	15	堆積岩類	0.0	九初泉—礼址積有規 花崗岩類	58	水期降水	A .	B
J-48	480	600	26.0	21	17	深成岩類	0.2	花崗岩類	10	現降水	Č	В
J-49	295	600	5.9	2.11	37	深成岩類	0.9	花崗岩類	11	現降水	Ċ	В
J-50	36	600	25.6	48	35	火山岩類	0.7	花崗岩類	5	現降水	C	В
J-51	38	不明	4.3	0.17	19	深成岩類	0.1	-	6	-	C	-
J-52	24	580	0.6	5.57	27	堆積岩類	0.9	先新第三紀堆積岩類	16	現降水	C	В
J-53	62	600	29.7	21	26	付加コンブレックス	1.1	先新第三紀堆積岩類	14	現降水	C	В
J-54	123	600	12.7	0.85	17	深成岩類	0.9	花崗岩類	19	現降水	<u>C</u>	В
J-55	126	37.6	0.4	24	36	. 付加コンプレックス	0.9	先新第三紀堆積岩類	2		<u>Ç</u>	В
J-56	168	503 355	0.4	3.05 30	30 25	深成岩類	0.1	花崗岩類	14	氷期降水	C	В
J-57 J-58	18 0	600	2.8	325	25	付加コンプレックス 付加コンプレックス	0.3 0.3	先新第三紀堆積岩類 先新第三紀堆積岩類	10 10994	現降水	C	В
J-59	213	201	5.8	13	15		0.3	元新第二紀唯慎 石規 先新第三紀 堆積 岩類	6		c	_
J-60	9	280	0.1	12	22	付加コンプレックス 堆積岩類	0.1	元初第二批准領有規 先新第三紀堆積岩類	16176		<u>č</u>	
J-61	40	603	2.4	50	22	付加コンプレックス	0.3	先新第三紀堆積岩類	12		č	_
J-62	40	118	7.3	39	1	堆積岩類	0.1	第四紀堆積岩類および火山岩類	16		Č	-
J-63	19	108	7.4	82	1	堆積岩類	0.1	第四紀堆積岩類および火山岩類	19	-	C	_
J-64	21	104	6.7	109	1	堆積岩類	0.1	第四紀堆積岩類および火山岩類	9		C	_
J-65	21	1490	1.6	51	1	堆積岩類	0.1	新第三紀堆積岩類	14679		С	-
J-66	6		5.6	0.13	0		0.2		13948	化石海水	В	A
J-67	7	不明	5.9	3.07	0	堆積岩類	0.2	-	12750	化石海水	В	A
J-68	25	不明	4.0	7.30	2	堆積岩類	0.1		13677	化石海水	Α	Α
J-69	25	400	1.2	0.15	29	付加コンプレックス	0.9	先新第三紀堆積岩類	20	現降水	В	В
J-70	60	1500	13.1	0.55	6	<u>堆積岩類</u>	0.2	先新第三紀堆積岩類	4875	化石海水	В	<u>A</u>
J-71 J-72	138 18	不明 1500	23.3 0.2	1.15 5.18	29 13	堆積岩類 堆積岩類	0.3 0.3	- 先新第三紀堆積岩類	136 156	氷期降水 氷期降水	В В	B B
J-73	49		2.3	7.49	11	班領有規 堆積岩類	0.3	元初第二批·班俱有規 -	126	現降水	В	В
J-74	6	700	33.9	383	6		0.3	先新第三紀堆積岩類	889	氷期降水	B	В
J-75	3	不明	1.8	444	6		0.3		1711	現降水	В	В
J-76	154	不明	49.9	17	9	火山岩類	3.0	-	15	現降水	В	В
J-77	33	1300	6.4	163	6	火山岩類	0.3	花崗岩類	724	氷期降水	В	В
J-78	12	不明	9.8	359	11	深成岩類	0.3	-	3317	化石海水	В	A
J-79	18	不明	0.8	16	11	堆積岩類	1.3	-	266	現降水	В	В
J-80	38	不明	5.2	4.34	10	堆積岩類	1.3	-	286	現降水	В	В
J-81	5	不明	4.3	17	18	深成岩類	1.0	-	578	氷期降水	В	В
J-82	58	<u>不明</u> .	10.3	78	25	火山岩類	1.0	-	564	氷期降水	В	В
J-83	250	不明.	10.0	2.20	18	変成岩類	14.9	-	22	現降水	<u>B</u>	В
J-84	4	不明	1.1	17	12	堆積岩類 空成岩額	1.2	-	563	氷期降水 現降水	<u>B</u>	В
J-85 J-86	3 5	不明 不明	11.6 8.1	1027 4.78	20 6	深成岩類 堆積岩類	3.0 7.3	<u>-</u>	366 510	現畔小 氷期降水	В В	В В
J-87	10	不明. 不明	3.1	2.65	13	供信力規 堆積岩類	1.4	-	7106	現海水	B	B
5 07		0.54	V.1	2.00		-L18/9 75				261441		

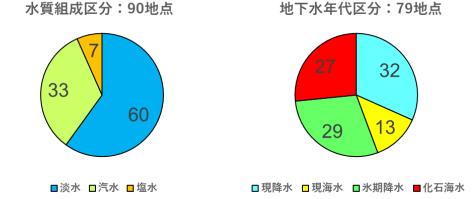


図 2.2-39 本事業で収集した地下水の水質組成および地下水年代の割合 円グラフ中の数値の単位は%

③ 地下水年代と地形・地質学的要素を対象とした多変量解析

上記の区分結果に基づいて、井戸深度が判明しておりかつ地下水年代が推定されている 56 地点を対象に多変量解析を行った。多変量解析の目的は、本事業で収集した地下水の年代の形成において、どのような地形・地質学的要素の関与が大きいかを客観的に判断するためである。今回はエクセル統計 ver2.15 (BellCurve 社製)を用いて数量化 II 類による解析を行った。目的変数は地下水年代で「新しい」と「古い」の2群とし、地形・地質学的要素がいずれの地下水年代の形成に関与するかを判別した。ここでの年代が新しい地下水とは現降水と現海水に区分されたものを指し、古い地下水は氷期降水と化石海水に区分されたものに相当する。また解析に用いた説明変数は表 2.2-11 の通りである。説明変数の中で、井戸深度、海岸からの距離、集水域面積、集水域の地形勾配および海底地形勾配の各要素は、本来数値データであるが、今回は数値データから統計を取って四分位の値を計算し、それらを閾値とする4階級に区分した形で用いた。解析によって得られたカテゴリースコアを表 2.2-11 に、レンジおよび群別散布図を図 2.2-40 に示す。なお、解析の精度を示す相関比は 0.56 と算出された。

数量化 II 類におけるレンジの値が大きいほど、その説明変数の値が予測に大きく関わるとされている。図 2.2-40 のレンジの値によれば、地下水年代 (新しいか古いか) の予測において、最も関与が大きい要素として海底地形勾配があり、次に井戸直下の地下地質の関与が大きいことを示している。また群別散布図で示されたように、第 1 軸のカテゴリースコアが負の値の場合は地下水年代が古いケース、正の値を取る場合は地下水年代の新しいケースに関与すると考えられる。これらを踏まえて考えると、海底地形勾配については、より緩傾斜の 2 階級で負のスコア (-0.38、-0.71)、より急傾斜の 2 階級で正のスコア (0.28、0.76) となっており、それぞれが地下水年代の古いおよび新しいへの関与が大きいことを示唆している。つまり、海底地形勾配が緩いケースで地下水年代が古いということに結びついていると解釈できる。地下地質については、例えば第四紀堆積岩類および火山岩類の区分はスコアが 0.74 であり、地下水年代が新しいことを説明する変数として関与が大きいといえる。一方でスコアが-0.48 となっている新第三紀堆積岩類は、地下水年代の古いことを説明する変数として関与が大きいと言える。

以上のことを総合すると、本事業で収集した地下水は、例えば年代の古い地点は海底の地形勾配が緩傾斜であり、地下地質が新第三紀堆積岩類であるケースが多く認められると推測される。 また地下水年代の形成において海底地形勾配が関与する可能性が示されたことは、沿岸部の特色の一つであるとも解釈できる。

表 2.2-11 数量化Ⅱ類の解析に用いた説明変数とカテゴリースコア

アイテム	カテゴリー	第1軸のカテゴリースコア
	600m未満	0.07
井戸深度	600m以上1050m未満	0.18
(階級)	 1050m以上1308m未満	0.22
	1308m以上	-0.49
	1km未満	-0.05
海岸からの距離	1km以上4km未満	0.31
(階級)	 4km以上9km未満	-0.61
	9km以上	0.24
	5km2未満	0.16
集水域面積	 5km2以上34km2未満	0.41
(階級)	34km2以上144km2未満	-0.62
		-0.03
	6度未満	0.15
地形勾配	6度以上16度未満	0.02
(階級)	 16度以上28度未満	-0.14
	 28度以上	-0.02
•••••	0.2度未満	-0.38
海底地形勾配	0.2度以上0.6度未満	-0.71
(階級)	0.6度以上1.1度未満	0.28
	1.1度以上	0.76
		-0.47
集水域内の		0.55
表層地質		0.59
	 付加コンプレックス	0.30
***************************************	第四紀堆積岩類および火山岩類	0.74
4		0.28
井戸直下の	新第三紀堆積岩類	-0.48
地下地質	先新第三紀堆積岩類	-0.06
	 花崗岩類	0.07

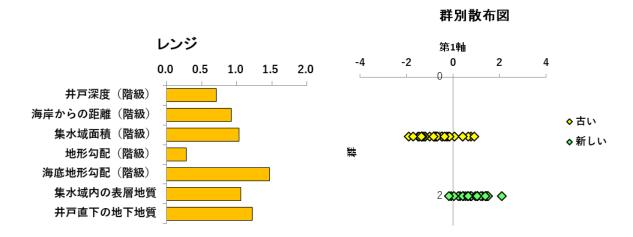


図 2.2-40 説明変数のレンジと群別散布図

④ 地下地質環境の概念モデルと地下水年代との比較

上記の多変量解析から、地下水年代の形成において地下地質の関与が相対的に大きいことが推定された。そこで、2018年に原子力発電環境整備機構が公表した包括技術報告書(原子力発電環境整備機構,2018)における地下地質環境の概念モデルに着目した。この包括技術報告書では花崗岩類、新第三紀堆積岩類、先新第三紀堆積岩類の3つの地質環境モデルを例に挙げて示している。本研究で収集した地下水のうち、上記の3つのモデルに相当する地点を抽出して円グラフとして整理した(図2.2-41)。特徴として、花崗岩類は降水系地下水が多く、年代は相対的に古い地下水が多くみられた。また、新第三紀堆積岩類では9割が古い地下水(氷期降水、化石海水)であり、先新第三紀堆積岩類では年代が新しい地下水が4割程度、古い地下水が5割程度であった。このように地下地質の種類に応じて、古い年代の地下水が存在する割合が異なっていた。



図 2.2-41 3 つの地質環境モデルにおける地下水年代の割合 花崗岩類 12 地点、新第三紀堆積岩類 11 地点、先新第三紀堆積岩類 18 地点、円グラフ中の数値 の単位は%である。

⑤ システマティック区分のまとめ

今年度事業では過年度の検討結果も踏まえて、地下水質組成、地下水年代および地形・地質情報をとりまとめた。その結果、沿岸部地下水の多くで淡水の混合が認められ、地下水年代については6割が古い年代の地下水に区分された。また本事業で得られた地下水年代のデータと各種の地形・地質情報を用いて数量化II類による解析を行ったところ、地下水年代の新しいおよび古いに関わる要素として、海底地形勾配や地下の地質の関与が相対的に大きいことが示唆された。今後は採水方法や年代推定の品質を高く保ちつつ同様の調査や解析手法を各地で適用することによって、国内沿岸部の地下水性状の一般化につながるものと考えられる。

3) 概念モデル

沿岸部処分システム高度化開発(平成 27~29 年度、産業技術総合研究所ほか, 2016; 2017; 2018)では、サロベツ原野については平成 27 年度に太平洋炭鉱、六ケ所、横須賀西岸、長崎の池島炭鉱、イギリスのセラフィールド、スウェーデンのエスポ、フィンランドのオルキルオトについて、平成 27、28 年度に幌延、平成 29 年度について新潟平野、千葉県君津市、勇払平野ついて述べているため、ここでは詳細を割愛しまとめをおこなう。このような知見は、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。

地下水年代分布を論じる際にまず思い浮かぶのが地質構造の影響である。例えば、横須賀西岸では深度 210 m までの中新世後期から鮮新世前期の海成の砂岩泥岩互層、凝灰岩砂岩を主体とす

る三浦層群まで現降水が分布しているが、その下位に分布する中新世前期から中新世中期の付加コンプレックスでは急に地下水年代が古くなる (700 万年)。このように巨視的な地層構造の違いが地下水年代の分布に大きく影響するのは一見すると普通の現象のように思われる。しかし、下記の例からも示される通り、地質構造は我が国の地下水年代分布(広域地下水流動)を決定する一要因にはなっているが、主たる要因とは言い切れない。

我が国の調査地域において、淡水性の現降水が最も深層まで到達したことが示されていたのが、 更新統堆積岩が分布する千葉県君津市であり、この地は上総掘りで有名である。この流域では南 に涵養域である丘陵地(鬼泪―鹿野山系列)があり、地下水は北の東京湾に向かって流動してい ると考えられている。この地域は北落ちの砂泥互層という特徴的な地質構造を有しており、それ は地質図からも明瞭に見て取れる。また、丘陵地は南北で地形が大きく異なっており、南部では 北部と比較して深く開析されるケスタ地形を有している。この流域では(涵養域の)丘陵地付近 では 3H が検出される不圧地下水がみられるが、そこから 5 km 下流側では少なくとも深度 500 mにて(地質制御型の)自噴する現降水が認められた。この条件を考えると、透水性と難透水性 の互層構造が地表付近から深層まで連続していることが、現降水が急速に深層まで流動する条件 の1つとなっていると推定される。加えて、丘陵地では市宿層や長浜層といった砂層が広く分布 しており、地下水が涵養されやすい。一方、千歳台地を涵養域とする勇払平野でも現降水は深度 200 m 付近まで到達していると思われ、君津市ほどではないがやや深層まで現降水が到達してい る。この勇払平野は背後に新規の支笏火山噴出物に覆われた山体(千歳台地)をもつ。また最近、 富士山山麓から駿河湾にかけて調査がおこなわれたが、この地域では少なくとも深度 300 m まで 現降水が確認されている(Ono et al., 2018)。この深度 300 m という値は他の地域と比較しても 大きいことから、背後に巨大な山体を有する地域は、現降水が深層まで流動する要件を備えてい ると判断される。なお、同地域では、今年度の研究で ROV を用いた海底湧出地下水の採水試験 を行い、海底面において淡水が7割程度混合した湧出水の採水に成功している。このような海底 湧出地下水のサンプルを対象とした地下水年代測定により、沿岸部の陸から海に至る一連の地下 水年代分布の解明が期待されている (Appendix IX)。

我が国において最も氷期降水が浅層で見られるのは幌延のサロベツ原野、六ケ所、新潟平野である。サロベツ原野では深度 20 m程度から既に現降水から氷期降水への漸移帯となりはじめる。この流域では東に丘陵部、西に海岸が位置しており、この間はもともと距離 8 km 程度の広い湿地帯であった。地形的には東の丘陵部(サロベツ背斜)が地下水の涵養域になっているようにみえるが、この丘陵部への地下水涵養は小さく、主な涵養域は丘陵部と平野部の接する付近(国道40号付近)と推定されている。さらに、本地域の深度 20-30 m には粘土層および砂/シルト互層(Ho-1a層: 透水係数は 10⁻⁹m/s)が分布しており、このような地層が現降水の深層への流動を制限してきた一因と推定される。一方、六ケ所も深度 40 m から現降水と氷期降水の漸移帯となっている。研究地は 30-60 m の台地になっており、ある程度の動水勾配は存在するが、地層は割れ目の少ない新第三系砂岩・凝灰岩となっているおり、地下水を通しにくい(透水係数は 10⁻⁶~10⁻⁸ m/s)。なお、新潟平野では、深度数 10-100m 程度に消雪パイプ用に揚水がおこなわれている、G1層とよばれる高い透水性を示す礫層があるが、この礫層には氷期降水が分布している。現降水と氷期降水の漸移帯は深度 50 m 程度から始まっているが、この領域には粘土・シルト層が分布しており、これが地下水の下方への流動を妨げている可能性もある。

以上の例から考えられることは、地質構造に加えて、背後の山地の存在(動水勾配)が現降水の到達深度に大きく影響していることである。新潟平野も背後に山地を有するが、こちらは山体での涵養は小さく、平野部の深層地下水流動に大きく影響していないと推定される。加えて、君津市、駿河湾、勇払平野では地下に涵養された水が、涵養域近傍で流出しにくい条件になってい

ることが特徴である。逆にいえば、サロベツ原野や新潟平野はもともと湿地帯、六ケ所も小規模な台地であり、周囲を小河川の流出域や沼に囲まれている。このようにいったん涵養された地下水が、直後に地表に流出してしまうような条件があると、地下水流動の駆動力となる涵養域の地下水ポテンシャルを高めることが難しいはずである。このように、現降水が深層に到達しない理由として、(広域地下水流動に寄与する) 涵養量が少ないことが要因の 1 つになっていると推定される。

一方、氷期降水の到達深度は、サロベツ原野で分布域が深度約 300~500 m、新潟平野では推定深度 550 m と推定される 2.2-1-(4) より、サロベツ原野では DD-4 孔から得られた地下水の年代が間氷期を示しており、深度 300m以深に氷期降水が分布しているとは限らない)、氷期における海水準の低下量は 120 m 程度と言われているが、氷期降水の到達深度は現降水の到達深度と比較して 120 m 以上深層まで到達しているのは明らかであり、単純に基準面が低下した分だけ、流動性地下水が深層を流動するわけではない。この理由は定かではないが、これも氷期の広域地下水流動に寄与する地下水涵養量の違いが影響した可能性がある。

4) まとめと今後の課題

本節では、分類した地下水年代(現降水、現海水、氷期降水、化石海水)を、日本全体の地形、地質、地理情報との関連を調べ、また、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流動の概念モデルをまとめた。すなわち、前者は広範囲を対象とした粗い解析であり、後者は1流域に限定しているが詳細な解析を実施している。これら2つの知見を組み合わせ、我が国の沿岸部の一般的な地下水流動に関する知見を得ることを目的とした。

その結果、地下水年代の新しいおよび古いに関わる要素として、海底地形勾配や地下の地質の 関与が相対的に大きいことが示唆されたとともに、地下水年代分布から示される盆地や平野スケ ールの広域地下水流動に対して、地質構造、動水勾配のほかに、地下水涵養に関する考え方が必 要になることが示唆された。

このような一般的性質に関する知見は、地域の特性を論じるための比較軸となり、今後得られるデータの分類や整理が効率的になる。また、得られた水質情報は工学分野(ニアフィールド)での実験条件の決定や核種移行を議論する安全分野にて有用である。

なお、システマティック区分と概念モデルについて述べてきたが、この解析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。

参考文献

Agarwal, R.G., A new method to account for production time effects when drawdown type curves are used to analyze build up and other test data, SPE paper 9289, 55th Annual Fall Meeting, Dallas, Tex., pp. 1-13, 1980.

Bethke, C., Geochemical and biogeochemical reaction modeling, Second Edition, Cambridge University Press, 543p., 2008.

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.

地学団体研究会, 新版地学辞典, 平凡社, 1143p., 1996.

- Cooper, H.H. and Jacob, C.E., A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history, American Geophysical Union Transaction, 27, pp. 526-534, 1946.
- Fifield, L.K., Tims, S.G., Stone, J.O., Argento D.C. and De Cesare, M., Ultra-sensitive measurements of ³⁶Cl and ²³⁶U at the Australian National University, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 294, pp.126-131, 2013.
- 原子力発電環境整備機構,包括的技術報告書(レビュー版)の概要,67p.,2019. (https://www.numo.or.jp/press/201818112114.html、2019年1月27閲覧)
- 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.
- 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 ¹⁴C dating in a granite, Tono area, central Japan, Geochimica et Cosmochimica Acta, 192, pp.166-185, 2016.
- 穂苅利之, 化学平衡論解析を用いた原位置地下水水質の推定, 清水建設研究報告, vol.87, pp.77-86, 2010.
- 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, vol.51, pp.205-214, 2009.
- 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, 113-122, 1986.
- 風早康平, 高橋正明, 安原正也, 西尾嘉朗, 稲村明彦, 森川徳敏, 佐藤 努, 高橋 浩, 北岡豪一, 大沢信二, 尾山洋一, 大和田道子, 塚本 斉, 堀口桂香, 戸崎裕貴, 切田 司, 西南日本における スラブ起源深部流体の分布と特徴, 日本水文科学会誌, vol.44, pp. 3-16, 2014.
- 海上保安庁海洋情報部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, 2019年3月18日閲覧)
- 経済産業省資源エネルギー庁,「科学的特性マップ」の説明資料, 28p., 2017.
 - (https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kagakutekitokus eimap/maps/setsumei.pdf, 2019 年 3 月 18 日閲覧)
- 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/, 2019 年 3 月 18 日閲覧)
- 国土交通省気象庁ホームページ
 - (https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/tide/suisan/suisan.php, 2018年12月28日版)
- 小椋信幸,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ー,石油 技術協会誌,vol.57, pp.32-44, 1992.
- 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.
- 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 ³⁶Cl/Cl and ¹²⁹I/¹²⁷I 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 δ³⁷Cl, ³⁶Cl/Cl, ¹²⁹I/¹²⁷I and dissolved ⁴He concentration in the core drilled in the Mobara 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, 日本列島南海沿岸部の深部地下水特性, 地下水技術、vol.58, pp.23-28, 2017.
- Matsumoto, T., Chen Z., Wei, W., Yang, G-M., Hu, S-M., Zhang, X., Application of combined ⁸¹Kr and ⁴He chorometers to the dating of old groundwater ina techtonically acitive region of the North china Palin, Earth and Planetary Science letters, vol.493, pp.208-217, 2018.
- Nakata, K., Hasegawa, T., Iwatsuki, T. and Kato, T., Comparison of ¹⁴C collected by precipitation and gas-strip methods for dating groundwater, Radiocarbon, vol.58, pp.491-503, 2016.
- 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, vol.376, pp.152-158, 2009.
- Ono, M., Machida, I., Ikawa, R., Kamitani, T., Oyama, K., Muranaka, Y., Ito, A. and Marui, A., Regional groundwater flow system in a stratovolcano adjacent to a coastal area: a case study of Mt. Fuji and Suruga Bay, Japan, Hydrogeology Journal, pp.1-14, 2018.
- Parkhurst, D.L and Appelo, C.A.J., User's guide to PHREEQC (VERSION 2) A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimentional transport, and inverse geochemical calculations, USGS, Water-Resources Investigations Report 99-4259, 1999.
- Purtschert R, Yokochi R, Struchio N.C., Krypton-81 dating of old groundwater (Chapter 5), Isotope methods for dating old groundwater, IAEA, pp.91-124, 2013.
- Phillips, F.M., Chlorine-36, Environmental tracers in subsurface hydrology (edited by Cook, P. and Herczeg, A.L.), Kluwer Academic Publishers, pp.397-424, 1999.
- 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,産業技術総合研究所,521p.,2013.
- 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年度沿岸部処分システム高度化開発報告書,368p,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29年度沿岸部処分システム高度化開発報告書,393p,2018.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター(編),20万分の1日本シームレス地質図2015年5月29日版.産業技術総合研究所地質調査総合センター,2015.
- 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成果報告書, 402p., 2013.
- Yasue, K., Ishimaru, T., Kobori, K., Umeda., K, and Nakatsuka, N., Subsurface geological mapping of the Japanse Islands. Journal of the Geological Society of Japan, 120, 12, XIII-XIV, 2014.

2.2.2 深部地下水年代測定の評価に関する地下水流動解析とデータベースの構築

(1) 背景と目的

高レベル放射性廃棄物の最終処分に係る立地選定にあたっては、処分の安全性が十分に確保できる地点に選定す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、天然バリアとしての機能を果たすことから、廃棄体からの漏えいを想定した場合には放射性核種の挙動にかかる場として極めて重要であり、その地域特性を把握する技術開発が求められている。

本項では、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、国内沿 岸域における深層地下水(温泉水)の年代解析を行なうとともに、国内の主要な平野・盆地にお ける水文気象データベースの整備および地下水流動解析を実施する。

(2) データベースの構築

1) 対象地域の選定

解析対象地域として、表 2.2-12 に着色して示す 55 地域を選定した (図 2.2-42)。この地域は、 既往文献に示されている全国 83 の地下水盆 (平野・盆地) のうち、面積が 300 km²以上のもの を対象としている。この地下水盆に係るデータ (全国堆積層データベース) は、後述の地質データのデータベース構築にも供する。

表 2.2-12 全国の地下水盆(83地域)(越谷ほか、2011)

No.	Name	面積(km)	No.	Name	面積(km)	No.	Name	面積(km²)
H-1	Makubetsu plain	73.7	TH-14	Aizu basin	328.8	CG-2	Izumo and Matsue plain	742.3
H-2	Tonbetsu plain	459.7	TH-15	Fukushima basin	235.9	CG-3	Tuyama basin	325.9
H-3	Teshio plain	545.8	TH-16	Koriyama basin	534.7	CG-4	Okayama plain	891.3
H-4	Bihuka lowland	83.2	TH-17	lwaki coastal lowland	582.0	CG-5	Fukuyama and Onomichi plain	484.4
H-5	Nayoro basin	145.2	TH-18	Joban coastal lowland	519.3	CG-6	Hiroshima plain	279.5
H-6	Kitami basin	429.1	KA-1	Kanto plain	17340.3	CG-7	Ogouri plain and Yamaguchi basin	347.7
H-7	Bihoro and Shari plain	1223.9	CB-1	Echigo plain	2192.4	SI-1	Tokushima plain	624.2
H-8	Konsen plateau	6133.8	CB-2	Takada plain	385.2	SI-2	Sanuki plain	734.9
H-9	Kamikawa basin	478.9	CB-3	Toyama plain	1065.2	SI-3	Uma and Niihama plain	253.4
H-10	Furano basin	145.4	CB-4	Kanazawa plain	497.3	SI-4	Imabaru plain	62.5
H-11	Tokachi plain	4972.0	CB-5	Fukui plain	615.3	SI-5	Matsuyama plain	253.5
H-12	Ishikari and Yufutsu plain	3445.4	CB-6	Nagano basin	433.3	SI-6	Kochi plain	323.6
H-13	Kuromatsunai lowland	116.0	CB-7	Matsumoto basin	486.9	KY-1	Ogura plain	74.0
H-14	Yakumo plain	88.6	CB-8	Suwa basin	63.2	KY-10	Yatsushiro plain	181.0
H-15	Hakodate plain	200.5	CB-9	Ina basin	399.2	KY-11	Hitoyoshi basin	209.3
TH-1	Aomori plain	128.6	CB-10	Kofu basin	390.9	KY-12	Miyazaki plain	878.6
TH-2	Tsugaru plain	993.5	CB-11	Shizuoka plain	164.4	KY-13	Ookuchi basin	175.7
TH-3	Sanbongihara	1616.2	CB-12	Shizuoka coastal lowland	1373.3	KY-14	Miyakonojo basin	231.5
TH-4	Noshiro and Akita plain	930.8	CB-13	Toyohashi plain	360.5	KY-15	Kasanohara	408.4
TH-5	Honjou and Nigaho plain	152.4	CB-14	Okazaki plain	675.9	KY-2	Yukuhashi plain	184.9
TH-6	Yokote basin	764.2	CB-15	Nobi plain	1738.7	KY-3	Naogata plain	329.2
TH-7	Kitakami basin	1181.1	KI-1	lse plain	1301.5	KY-4	Fukuoka plain	387.2
TH-8	Shonai plain	578.3	KI-2	Ohmi basin	1426.3	KY-5	Chikushi plain	1368.7
TH-9	Shinjo basin	235.2	KI-3	Kyoto basin	355.5	KY-6	Nakatsu plain	270.0
TH-10	Yamagata basin	384.0	KI-4	Nara basin	287.0	KY-7	Beppu plain	99.4
TH-11	Ishimaki plain	1054.4	KI-5	Osaka plain	1342.6	KY-8	Ooita plain	195.1
TH-12	Sendai plain	371.6	KI-6	Harima plain	802.3	KY-9	Kumamoto plain	786.2
TH-13	Nagai and Yonezawa basin	415.3	CG-1	Tottori plain	87.8			

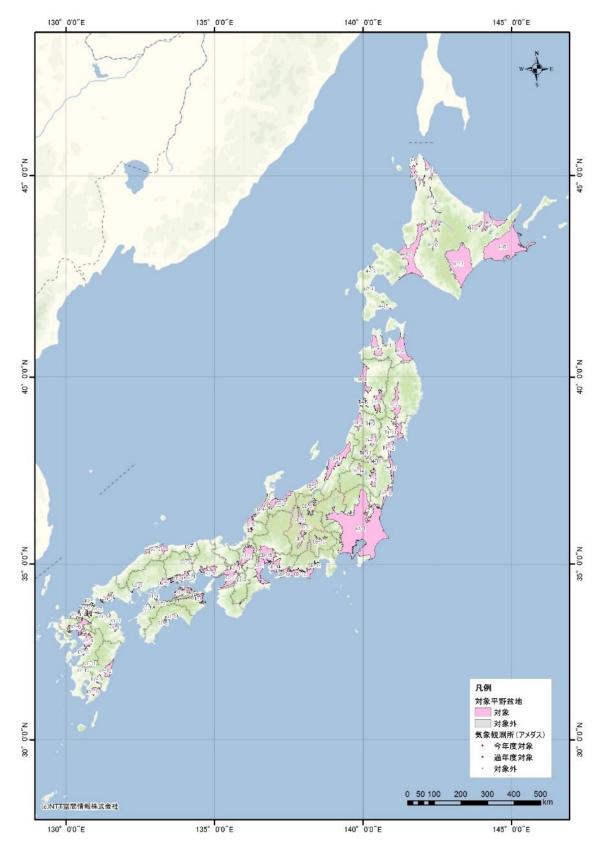


図 2.2-42 解析対象地域 (55 地域)

2) 関連資料の収集・整理

国内外における地下水年代解析に関する文献の収集を、日本地下水学会誌、応用地質、日本原子力研究開発機構関連報告書、Advances in Water Resources、Goundwater、Hydrogeology Journal、Journal of Hydrology、Water Resources Research を対象に、10 件行った。収集した文献は、用いられている解析条件や入力データ、検証データを一覧表として整理した(表 2.2-13 から表 2.2-17)。

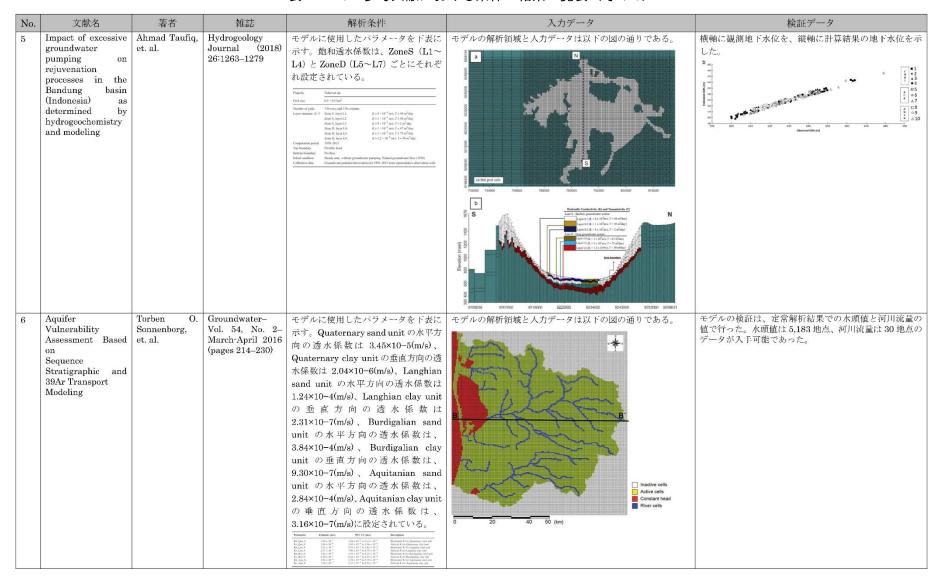
Yager et al. (2013) らは、米国ヴァージニア州の Shenandoah 渓谷の湧水について、 3 H, 3 He, 4 He 及び CFC-113 濃度による年代測定と、数値解析による年代測定結果について比較を行っている。Voss et al. (2014) は、アフリカ大陸の Nubian 帯水層を対象として、 81 Kr と 14 C 同位体による年代測定結果と、MODPATH による数値解析結果の比較を行っている。Vandenbohede et al. (2011) は、 3 H/ 3 He による年代測定結果と、数値解析結果について比較を行っている。Taufi et al. (2018) は、インドネシアの Bandung 盆地について、CFC-12 と 14 C による年代測定結果と数値解析結果を比較している。Sonnenborg et al. (2016) は、デンマーク中央部の深層地下水の 39 Ar 年代測定結果と、数値解析結果を比較し、帯水層の地下水流動系を明らかにしている。Seifert et al. (2008) は、デンマーク中央部を対象として、トリチウム年代と数値モデルの計算結果とを比較している。

このように、地下水年代測定結果は、地下水流動系を明らかにするためのキャリブレーションターゲットとして使えるものであり、特に、地下水頭などの情報の少ない深部地下水の数値解析を行う際には有効なデータであるといえる。数値解析技術は、深部地下水の流動状況を把握する際に大変重要なツールである。当該ツールを適用することで、実測データの取得が困難なフィールドにおいても、地下水流動状況の推定が可能となる。ここで、年代測定データを参照することで、点のデータを地下水流動系という三次元のフィールドに展開することが可能となる。

表 2.2-13 参考文献における条件・結果一覧表 (その 1)

No.	文献名	著者	雑誌	解析条件	入力データ	検証データ
1	Comparison of age distributions estimated from environmental tracers by using binary-dilution and numerical models of fractured and folded karst: Shenandoah Valley of Virginia and West Virginia, USA	Richard M. Yager, et. al.	Hydrogeology Journal (2013) 21: 1193–1217	亀裂系の堆積岩の透水係数は 3D 透水 係数テンソルで表現され、堆積層の走 向傾斜に平行な最大及び中間の透水係 数でそれぞれ示している。 最小の透水係数は堆積層に垂直に表現 している。 各湧水からは、約 2,000 個の粒子追跡 計算を行っている。	モデルの解析領域と入力データは以下の図の通りである。 EXPLANATION Carborate rook and watersted. 「Operator Deak new Binayole Operator Deak new Binayole O	モデルの検証には、485 地点の井戸の地下水位と、2 箇所の河川流最データ及び、51 箇所の湧水地点のデータが用いられている。
2	Quantifying River- Groundwater Interactions of New Zealand's Gravel-Bed Rivers: The Wairau Plain	Thomas Wohling, et. al.	Groundwater–Vol. 56, No. 4–July– August 2018 (pages 647–666)	モデルに使用したパラメータを下表に示す。飽和透水係数:Kn と Specific Yield:Sy は、地層別に定められている。 Specific Storage:Ss は、地層別に 4 つ定義されている。 垂直方向の透水係数 Kn と、排水路の河床の透水係数 Kn もそれぞれ定義されている。 Name	モデルの解析領域と入力データは以下の図の通りである。 (a) MODFLOW Model Legend Secondwater wells Rivers, Springs Model of Journal Aguilard boundary	本解析では、地下水位、湧水流量、河川流量を検証データに使用している。 データは、123 日、925 日、284 日に分割して検証を行っている。

表 2.2-15 参考文献における条件・結果一覧表 (その3)



3) データベースの構築

対象地域とした 55 地域について、これらの地域に関する水文関連資料の収集・整理を行い、データの地図化 (GIS 化)、リスト化、グラフ化などのデータベース作成を行った。収集したデータは下記のとおりである。

- ・地下水位データ(地下水位年表において公表されているデータの過去30年分)
- ・気象データ(アメダスデータの過去30年分)
- ・地質データ(全国堆積層データベースにおいて公表されているデータ)
- ・流量データ (国土交通省において公表されているデータの過去30年分)

① 地下水位データ

国土交通省が提供する地下水位年表に掲載されている観測地点のうち、本研究にて対象とする 55 地域に属する 1,188 地点のデータ (図 2.2-43) を収集整理した (過年度収集分は除く)。収集 した地下水位データは、月変動、年変動グラフとして整理した。

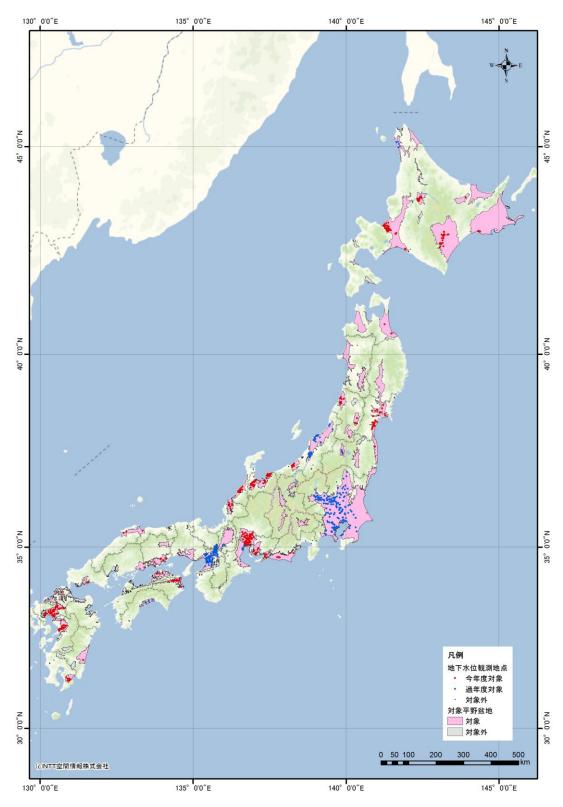


図 2.2-43 地下水位観測地点

② 気象データ

気象データは、本研究にて対象とする 55 地域に属する 375 地点の降水量データ・気温データを全て抽出した(過年度収集分は除く)。収集した雨量・気温データは、月変動および年変動グラ

フとして整理した。また、月気温データを用いて、Thornthwaite 法にて月別可能蒸発散量を、下式にて可能涵養量を算出した。データは過去 30 年間(1987 年から 2016 年)の平均値として整理することを基本とした。また、降水量、可能蒸発散量、可能涵養量は、GIS 化し、その分布範囲を表示した。

なお、Thornthwaite 法とは、丈の低い緑草で、密に覆われた地表面から、水不足の起こらないように給水した場合に失われる蒸発散量を可能蒸発散量と定義したもので、下式で定義されるものである。

$$E_t = 1.6 \left(\frac{10T}{I}\right)^a$$

ここで、
 E_t :可能蒸発散量($cm/month$)
 T :月平均気温($^{\circ}C$)
 I :熱示数
ただし、
 $I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5}\right)^{1.514}$
 $a = (492390 + 17920I - 77.1I^2 + 0.675I^3) \times 10^{-6}$

ただし、湿潤なわが国では降水量や流出量に比べると蒸発散量は年による変動が小さい。そこで、本検討では、上式より得られた可能蒸発散に対し、可照時間による補正値 α を掛けた値を、実蒸発散量として算出した。

③ 地質データ

地質データは全国堆積層データベースを用いて整理した。全国堆積層データベースは、公開論文等による調査結果を地質年代で整理し、 $1~\rm km$ メッシュあたりの地質境界面の深度情報として電子化された地形・地質データ(Microsoft® Office Excel 形式で収録)である。全国堆積層データベースにおける地質区分は上位層から、H、Q3、Q2、Q1、N3、N2、N1、Pre-N1 の層序で管理されている。なお、H は Holocene(完新世)、 $Q3\sim Q1$ は Quaternary(第四紀)、 $N3\sim N1$ は Neogene(新第三紀)である。ここで、Pre-N1 は基盤(BaseRock)と称する。全国堆積層データベースの一例を表 2.2-18 に示す。三次元モデルに利用するため、収集したデータを用いて、グリッドごとの各地層境界面を作成した。また、グリッドごとに地表面から N1 層下面までの厚さを算出し、堆積層厚分布図を作成した。

表 2.2-18 全国堆積層データベースの一例

4	A	В	С	D	E	F	G	Н	I	J	K	L	M	N	0
	経度	緯度	標高				基底面深度	Ę					層厚		
2	F至 /文	#年/支	(DT 1-1)	Н	Q ₃	Q_2	Q ₁	N ₃	N_2	N ₁	Q ₂	Q ₁	N ₃	N ₂	N ₁
3	135.0035	33.3409	-1404	-1404	-1404	-1404	-1404	-1404	-1404	-1404	0	0	0	0	0
4	135.016	33.3409	-1422	-1422	-1422	-1422	-1422	-1422	-1422	-1422	0		0	0	0
5	135.0285	33.3409	-1435	-1435	-1435	-1435	-1435	-1435	-1435	-1435	0		0		0
6	135.041	33.3409	-1462	-1462	-1462	-1462	-1462	-1462	-1462	-1462	0	0	0	0	0
7	135.0535	33.3409	-1478	-1478	-1478	-1478	-1478	-1478	-1478	-1478	0		0	0	0
8	135.066	33.3409	-1500	-1500	-1500	-1500	-1500	-1500	-1500	-1500	0		0		0
9	135.0785	33.3409	-1503	-1503	-1503	-1503	-1503	-1503	-1503	-1503	0	0	0		0
10	135.091	33.3409	-1504	-1504	-1504	-1504	-1504	-1504	-1504	-1504	0	0	0	0	0
11	135.1035	33.3409	-1504	-1504	-1504	-1504	-1504	-1504	-1504	-1504	0	0	0	0	0
12	135.116	33.3409	-1503	-1503	-1503	-1503	-1503	-1503	-1503	-1503	0	0	0	0	0
13	135.0035	33.3492	-1408	-1408	-1408	-1408	-1408	-1408	-1408	-1408	0	0	0	0	0
14	135.016	33.3492	-1427	-1427	-1427	-1427	-1427	-1427	-1427	-1427	0	0	0	0	0
15	135.0285	33.3492	-1442	-1442	-1442	-1442	-1442	-1442	-1442	-1442	0		0		0
16	135.041	33.3492	-1470	-1470	-1470	-1470	-1470	-1470	-1470	-1470	0		0		0
17	135.0535	33.3492	-1484	-1484	-1484	-1484	-1484	-1484	-1484	-1484	0	0	0	0	0
18	135.066	33.3492	-1501	-1501	-1501	-1501	-1501	-1501	-1501	-1501	0	0	0	0	0
19	135.0785	33.3492	-1504	-1504	-1504	-1504	-1504	-1504	-1504	-1504	0	0	0	0	0
20	135.091	33.3492	-1504	-1504	-1504	-1504	-1504	-1504	-1504	-1504	0	0	0	0	0
21	135.1035	33.3492	-1503	-1503	-1503	-1503	-1503	-1503	-1503	-1503	0		0	0	0
22	135.116	33.3492	-1503	-1503	-1503	-1503	-1503	-1503	-1503	-1503	0	0	0	0	0
23	135.0035	33.3576	-1411	-1411	-1411	-1411	-1411	-1411	-1411	-1411	0		0		0
24	135.016	33.3576	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440	0		0		0
4 >	N 説明 関東・	中部地方	/						Ī	4					

④ 流量データ

国土交通省の水文水質データベースに掲載されている流量観測地点の流量データのうち、本業務にて対象とする 55 地域に属する 614 地点のデータ(図 2.2-44)を収集整理した(過年度収集分は除く)。収集した流量データは、月変動、年変動グラフとして整理し巻末資料にまとめるとともに、観測期間の全てのデータを使って毎年の流況表を作成し、観測地点ごとの全期間平均流況(豊水流量、平水流量、低水流量、渇水流量)を算出した。ここで整理した渇水流量は、次項の広域地下水流動解析の再現データとして活用した。

本研究では、これらのデータを選定した 55 の堆積盆ごとにとりまとめ、データベース化している。この電子データを Appendix X に収録した。

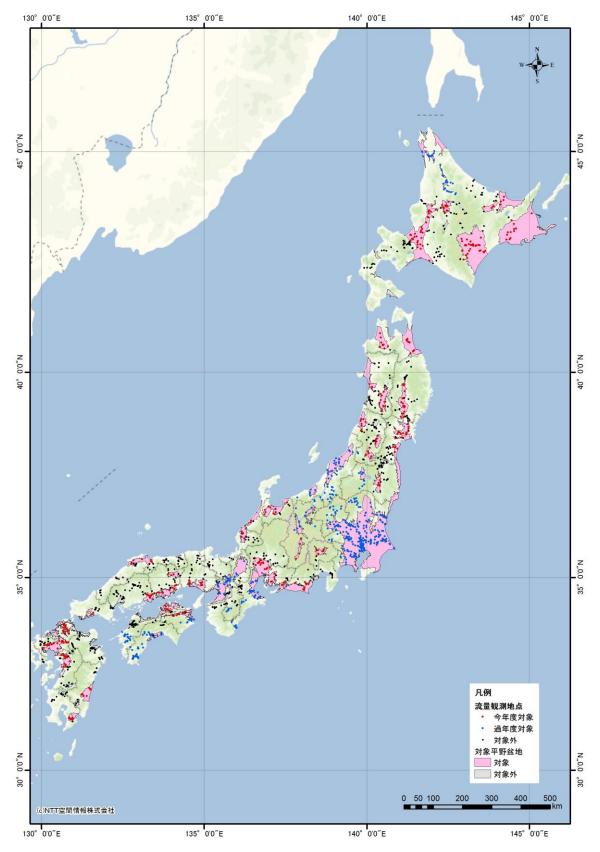


図 2.2-44 流量観測地点

(3) 深部地下水流動の解析

① 解析の方法

調査対象地域 55 地域について三次元地下水流動解析モデルを構築して、塩水・淡水を含む帯 水層の長期地下水流動解析を実施した。地下水流動解析にあたっては、世界的に著名な解析コー ドである 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 解析および地下水年代解析を連成して実施するために SEAWAT2000 (USGS) を使用した。

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(原子力機構)、河川 流況データ(国交省)など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渇水流量もしくは解析領域内に位置する気象観測地点における可能涵養量を 再現するよう、透水係数を調整した。透水係数の調整にあたっては、原子力機構・透水係数デー タベースにおける各層の透水係数を参考にして設定した。これによって、深部地下水流動環境を 推定し、地下水位等高線図、流速ベクトル図、水収支図、地下水年代等値面図(滞留時間:1万 年および10万年)の形式に整理した。

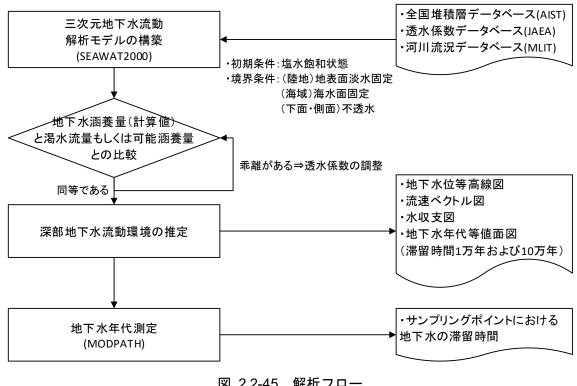


図 2.2-45 解析フロー

また、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した。第 一に、調査対象地域に対し、沿岸域に属する場合は沖合い 20-30 km 程度の浅海域を拡張した上 で、解析領域を設定した。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した。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それとした。この場合、鉛直方向のモデル化範囲は、 試行錯誤法により塩淡境界面が形成される深度まで拡張するものとした。

さらに、解析領域内は1km×1kmの解析グリッドに分割することを基本とした。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。

② 境界条件の設定

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した。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した。側面、下面は、不透水・非流動の境界とした。モデル全域が塩水で満たされた状態を初期条件に、天水によって洗い出されるプロセスを計算した。

境界位置	地下水流動	移流分散
上面(陸域)	固定水頭:地表面	固定濃度:淡水濃度 (=0 kg/m³)
上面(海域)	固定水頭:海水面(=EL. 0m)	固定濃度:海水濃度 (=35 kg/m³)
下面	不透水	非移動
側面	不透水	非移動

表 2.2-19 境界条件の設定一覧

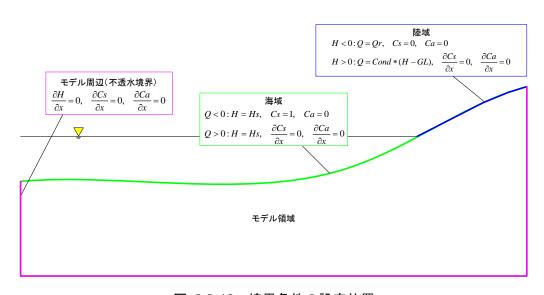


図 2.2-46 境界条件の設定位置

H:地下水ポテンシャル、Cs:正規塩濃度、Hs:海水位、Q:地下水流動量、Qr:地下水涵養量、GL:地表面標高

③ 物性値の設定

透水係数は、梅田ほか (1996) を参考に、表 2.2-20 及び表 2.2-21 を初期値として設定した。 なお、現況再現解析の過程において、これらの値は変更する。

表 2.2-20 モデルに与えた透水係数の初期値(1)

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

表 2.2-21 モデルに与えた透水係数の初期値(2)

記号	標本数	最大値	最小値	中央値	平均値	標本分散	標本標準偏差
	(個)		(log c	m/sec)		(log cm/sec)	
Q2-Hmsg	213	0, 26	-8. 00	-2. 91	-3, 18	3. 49	1, 87
Qls	6	-0. 15	-1, 77	-1. 36	-1, 06	0, 45	1, 67
Qv	74	-1. 44	-7. 15	-3, 90	-3. 97	1, 25	1. 11
Qp	35	-0. 52	-6. 53	-3. 61	-3. 66	1, 24	1, 11
Qtg	18	-0. 30	-4, 50	-2. 38	-2. 21	1, 41	1. 19
Qmsg	510	1.00	-8. 00	-2, 66	-2. 94	2, 76	1, 66
N-Qvp	40	-2.00	-6, 82	-4. 01	-3. 98	0, 92	0, 96
Nms	194	-1, 30	-7, 37	-3, 96	-4.06	1, 56	1, 25
Nvp	136	-1, 59	-6. 97	-4. 23	-4. 37	0. 91	0. 95
PG-Nmsg	12	-3, 41	-5. 58	-4. 68	-4. 70	0, 56	0, 75
K-PGvp	26	-2, 65	-5, 50	-4. 54	-4. 37	0. 56	0, 75
Kms	42	-2, 80	-6, 50	-4. 15	-4. 14	0.50	0, 71
P-Monscyp	65	-2. 80	-8. 28	-4. 18	-4. 35	0. 79	0, 89
P-Mls	3	-2. 98	-4, 81	-3, 60	-3. 80	0.86	0, 96
P-Msch	28	-2. 30	-5. 69	-4. 17	-4. 21	0. 53	0. 73
sp	3	-3. 70	-4. 23	-3, 73	-3, 88	0, 09	0, 30
gr	112	-1. 15	-7. 60	-4. 08	-4. 19	1.06	1, 03
全データ	1, 517	1. 00	-8, 28	-3, 60	-3, 56	2. 37	1, 54

有効間隙率、比貯留係数は、日本地下水学会 (2010)、核燃料サイクル開発機構 (1999) などを参考に、以下を初期値として設定した。また、塩水の分子拡散係数は、 Na^+ 、 Cl^- の分子拡散係数の平均 16.8×10^{-10} m^2/s を参考に 20.0×10^{-10} m^2/s を用いた。縦方向分散長は、既往文献を参考に 100 m とし、横方向分散長は、縦方向分散長の 1/10 とした。

選定した55地域の解析結果は、Appendix Xに収録した。

(4) まとめ

本項では、国内の主要な地下水盆から 55 地域を選定し、一般に公開されている気象、水文、地質等の情報を収集しデータベースを構築した上で、これを基にした三次元地下水流動解析モデルを実施した。

地下水流動解析においては、近傍の一級河川の渇水流量とモデル計算値による積算流入量を比較することによって、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た。また、全国の主要な地下水盆において、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、地下水年代分布を推定することができた。

流跡線解析による計算地下水年代は地域によって差があり、28-898年の地下水年代が算出された。今後、サンプリングされた地下水の年代分析と合わせて結果の妥当性を検証する必要があるが、一般的には実測値よりも解析値の方が年代値が小さくなる傾向にあった。

本節で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かつ透明性が担保された。今後は、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。

参考文献

- 越谷賢, 丸井敦尚,伊藤成輝,吉澤拓也, 日本列島における三次元水文地質モデルの構築と地下水 賦存量の試算, 地下水学会誌, vol.53, pp.357~377, 2011.
- 梅田浩司,柳澤孝一,米田茂夫,日本の地盤を対象とした透水係数データベースの作成,日本地下水学会誌,vol.37,pp.69-77,1995.
- 日本地下水学会編, 地下水用語集, 理工図書, 143p., 2010.
- 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-,全5分冊,1999.
- Yager, R. M., Plummer, L. N., Kauffman, L. J., Doctor, D. H., Nelms, D. L. and Schlosser, P., Comparison of age distributions estimated from environmental tracers by using binary-dilution and numerical models of fractured and folded karst: Shenandoah Valley of Virginia and West Virginia, USA, Hydrogeology Journal, vol.21, pp.1193–1217, 2013.
- Voss, C. I. and Soliman, S. M., The transboundary non-renewable Nubian Aquifer System of Chad, Egypt, Libya and Sudan: classical groundwater questions and parsimonious hydrogeologic analysis and modeling, Hydrogeology Journal, vol.22, pp.441-468, 2014.
- Vandenbohede, A., Hinsby, K., Courtens, C. and Lebbe, L., Flow and transport model of a polder area in the Belgian coastal plain: example of data integration, Hydrogeology Journal, vol.19, pp.1599–1615, 2011.
- Taufiq, A., Hosono, T., Ide, K., Kagabu, M., Iskandar, I., Effendi, A. J. and Hutasoit, L. M. Impact of excessive groundwater pumping on rejuvenation processes in the Bandung basin (Indonesia) as determined by hydrogeochemistry and modeling, Hydrogeology Journal, vol.26, pp.1263–1279, 2018.
- Sonnenborg, T. O., Scharling, P. B., Hinsby, K., Rasmussen, E. S. and Engesgaard, P., Aquifer Vulnerability Assessment Based on Sequence Stratigraphic and ³⁹Ar Transport Modeling, Groundwater, vol. 54, pp.214–230, 2016.

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。統合版地質文献データベース(通称ジオリス:以下、「Geolis」という)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、昨年度に引き続き、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。さらに、これまでに集約してきた情報を格納し、DVDで閲覧できるようにした。

2.3.2 沿岸部地下水に係わる文献の整理

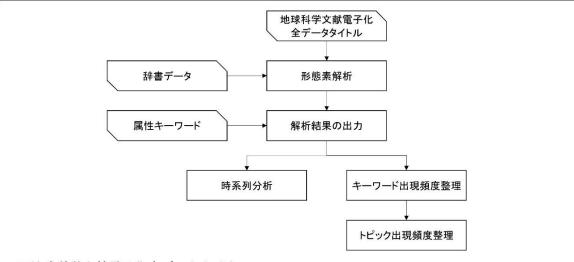
(1) 背景と目的

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、全文献タイトルの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・年代など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。



■地球科学文献電子化全データタイトル

産業総合技術研究所の地球科学文献データ Geolis および GeoScienceWorld に掲載されている文献名 (タイトル)を形態素解析の対象とする。

■辞書データ

形態素解析の実行時に参照するデータ。属性キーワード(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)に関連するキーワードを整理したファイル。

■属性キーワード

統計解析の対象とするキーワードを整理したデータ。地域、地形、地質、地盤調査、環境、エネルギー、災害、地下水、地質年代の8項目からなる。地球科学文献電子化全データ。タイトルと8項目のキーワードを照らし合わせ、どのキーワードが何件あるか等の統計諸量を整理する。

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、関連学会など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」、及び「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。

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	第2階層	第3階層	第4階層	第5階層
(属性キーワード)				
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) 統計解析の結果

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。 全文献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・年代など 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り、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。

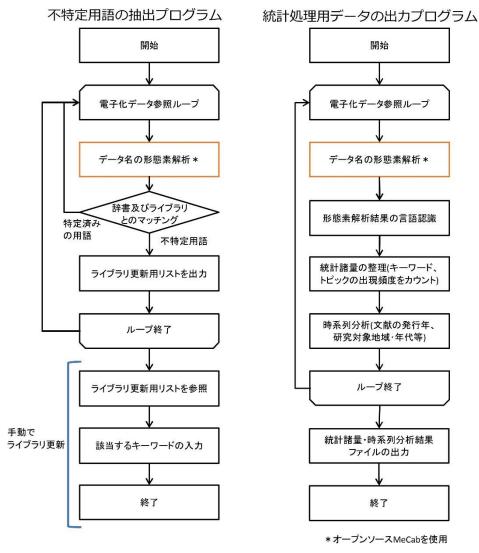


図 2.3-2 形態素解析システム処理フローチャート

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などを分析した。

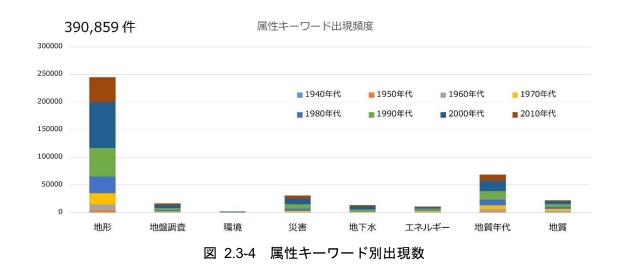
今回解析を実施した文献は 823,983 件あり、内 309,381 件が和名文献、514,602 件が英名文献であった。全文献を発行年別に分類したグラフを図 2.3 - 3 に示す。



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。



キーワード出現頻度 地域別分布

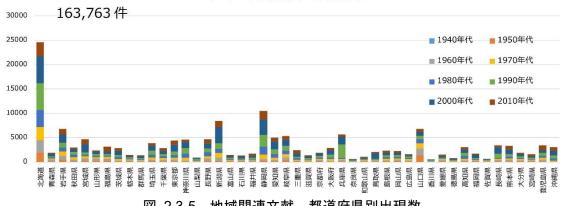


図 2.3-5 地域関連文献 都道府県別出現数

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 2.3-6 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た。

図 2.3-7 の(a)、(b)、及び(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 2.3-8には、地形へ地域属性キーワー 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 2.3-7 には、図 2.3-6 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。

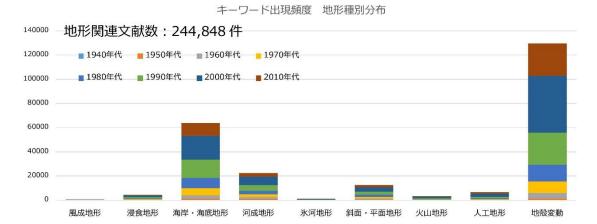


図 2.3-6 地形第2階層キーワード別出現数

地殼変動関連文献 年度別分布

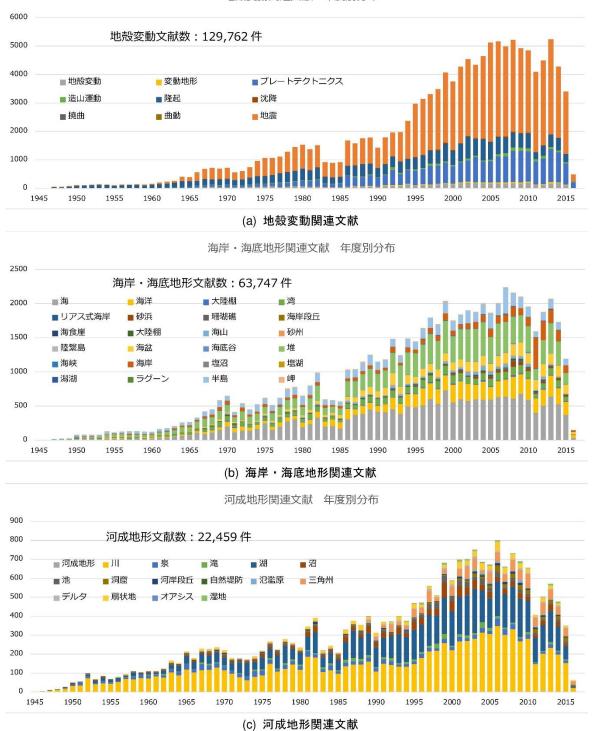


図 2.3-7 高頻度キーワード 年度別出現数

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。

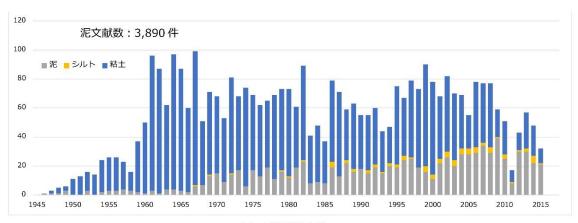
図 2.3-8 には、年代別に色分けされた第 3 階層キーワード別の出現数を示し、図 2.3-9 には、発行年度別の出現数を示す。図 2.3-10 の(a)、(b)、及び(c)には、第 3 階層キーワード高出現頻度順に 3 種を発行年度別に分類し第 4 階層キーワード別に色分けした分布図を示す。



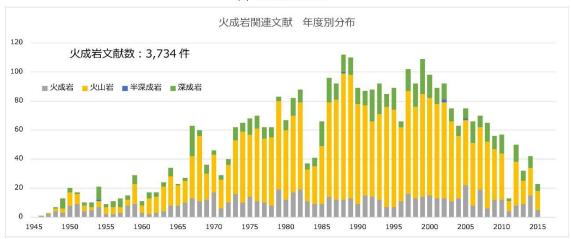
図 2.3-8 地盤調査第2階層キーワード別出現数



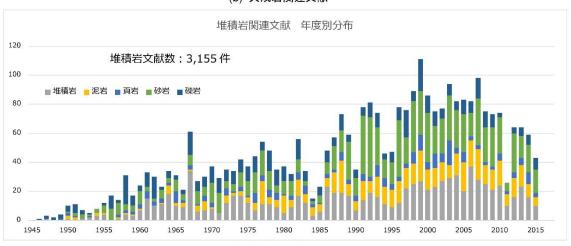
図 2.3-9 地盤調査関連文献 発行年別出現数



(a) 土質関連文献



(b) 火成岩関連文献



(c) 堆積岩関連文献

図 2.3-10 高頻度キーワード 年度別出現数

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 2.3-11 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 2.3-12 には、発行年度別の出現数を示す。図 2.3-13 の(a)、(b)、及び(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。

キーワード別出現頻度 調査手法別分布

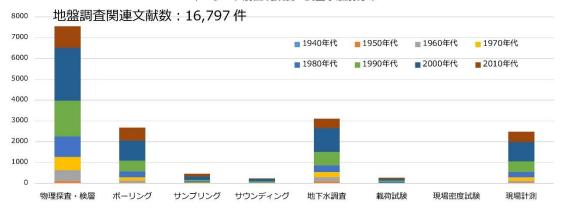
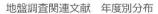


図 2.3-11 地盤調査第2階層キーワード別出現数



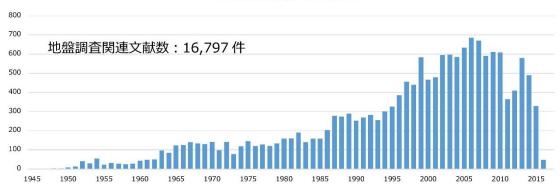
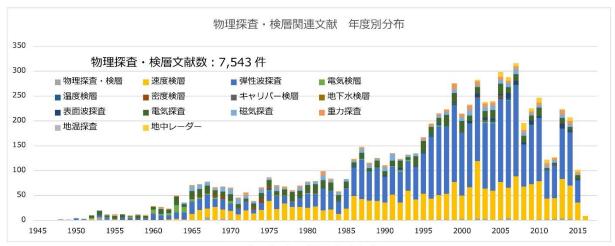


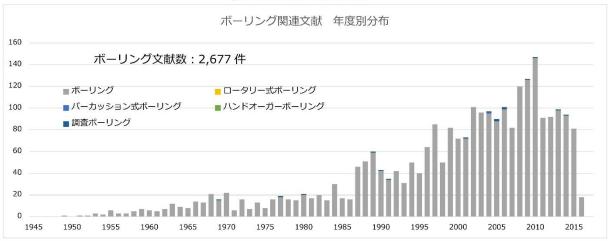
図 2.3-12 地盤調査関連文献 発行年別出現数



(a) 物理探查·検層関連文献



(b) 地下水調査関連文献



(c) ボーリング関連文献

図 2.3-13 高頻度キーワード 年度別出現数

災害

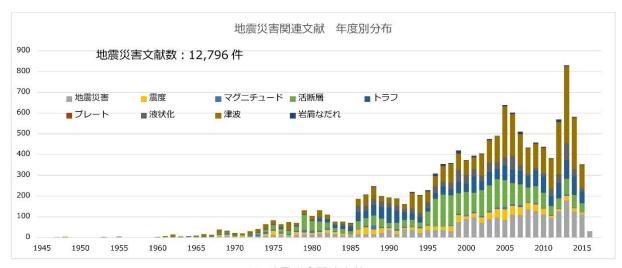
全文献 823,983 件の内、災害に関するキーワードを含む文献は 30,758 件であった。

図 2.3-14 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 の(a)、(b)、及び(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、災害 \wedge 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。

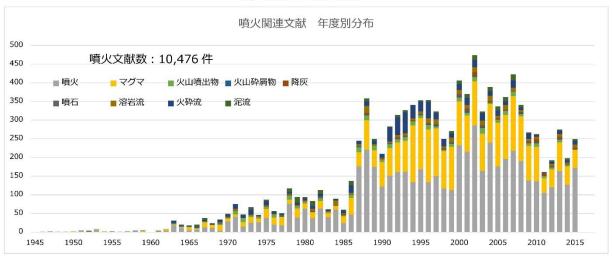


キーワード出現頻度 災害種別分布 14000 災害関連文献数:30,758件 12000 ■ 1940年代 ■ 1950年代 ■ 1960年代 ■1970年代 10000 ■ 1980年代 ■ 1990年代 ■ 2000年代 ■ 2010年代 8000 6000 4000 2000 0 集中豪雨 洪水 土砂災害 地震災害 噴火 原子力事故

図 2.3-15 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 2.3-16 高頻度キーワード 年度別出現数



図 2.3-17 災害関連文献 都道府県別出現数

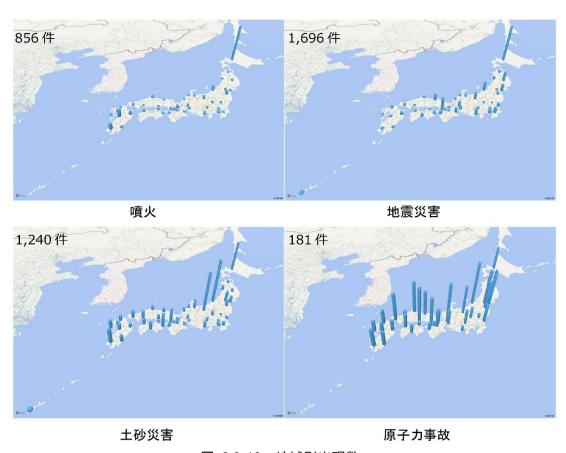


図 2.3-18 地域別出現数

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 2.3-19 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 の(a)、(b)、及び(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、地下水へ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。

キーワード出現頻度 項目別分布



図 2.3-19 地下水第2階層キーワード別出現数



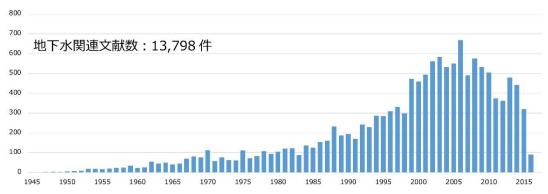


図 2.3-20 地下水関連文献 発行年別出現数



(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 2.3-21 高頻度キーワード 年度別出現数

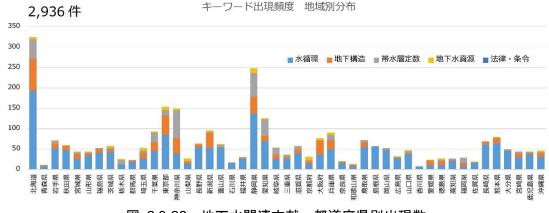


図 2.3-22 地下水関連文献 都道府県別出現数

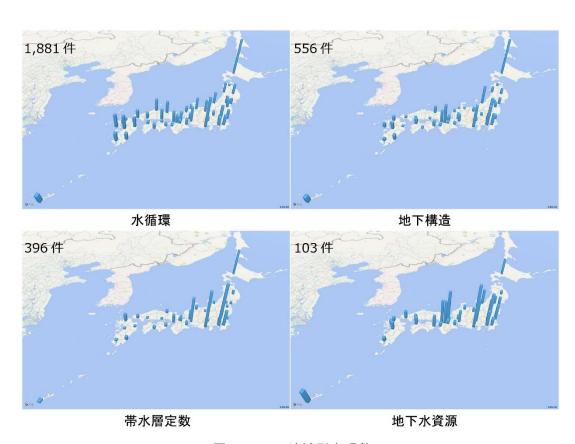


図 2.3-23 地域別出現数

(4) 統計解析の考察

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イフティーケース 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 \wedge 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 2.3-3 は、地盤調査 \wedge 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 2.3-4 は、地盤調査 \wedge 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。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、全文献における傾向と一致した。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。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。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、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。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。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。"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。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"火山岩"にも見られた。

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。"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。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、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。また、1995年前後から出現数が上昇する点については、パーソナルコンピューター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。

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。年度別の文献数は"地域"・"地形"と同傾向であった。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は無く、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。

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。年度別の文献数は"地域"・"地形"と同傾向であった。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、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、都道府県別の出現数をみると"水循環"は全国的に等しく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。

さらに、地層処分研究としては、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、災害など)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

厚	属性キーワード		物理探査 ・検層	ボーリング	一 門丘 」 7 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
		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
	東日	福島県	12	4	3	0	8	0	0	4
	本	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
		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
地		岐阜県	24	14	1	3	8	0	0	23
地域		三重県	5	44	1	1	2	0	0	9
		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
	西	和歌山県	14	15	0	0	0	0	0	1
	日本	鳥取県	42	0	3	1	12	0	0	6
	4	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	70	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

			- 2	fo						
	属性キーワード			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
		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
井	也形	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
		地殼変動	2110	421	64	19	344	10	0	498
		礫	0	0	1	0	1	0	0	5
	未固結 堆積層	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
地質		火山灰	0	14	2	0	1	0	0	2
地貝		泥炭	2	0	2	1	4	0	0	0
		堆積岩	4	2	3	0	13	3	0	24
		火成岩	17	2	3	0	5	0	0	4
	岩盤	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
		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
環境	公害	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 地域別出現数

	属性キーワード			ーリング	ンプリング	サウンディング	下水調查	載荷試験	易密度試験	現場計測
		太陽光	155	19	1	0	10	0	0	10
		水力	7	0	0	0	2	0	0	5
	京 再	風力	0	0	0	0	1	0	0	0
エネルギ	エネルギー	地熱	33	5	1	0	2	0	0	6
ル	能	地中熱	34	1	0	0	3	0	0	5
7		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
	16/11 8/2/47	原子力	5	7	5	0	32	0	0	22
	集中豪雨		292	50	2	3	26	2	0	43
		洪水	9	10	2	0	11	0	0	15
災害	自然災害	土砂災害	10	2	1	0	8	0	0	9
火古		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
		水循環	2	3	0	0	8	0	0	1
		地下構造	0	0	0	0	0	0	0	0
:	地下水	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		法律·条令	0	15	0	0	0	0	0	0
		顕生代	0	0	0	0	0	0	0	0
4-1	也質年代	原生代	0	0	0	0	0	0	0	0
11	八十月四	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、災害など)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。また、最終年度にはサムネイル(概要)の表示も可能にするプログラムを作成した。

今後は、キーワードごとの関連を検出する手法を改良し、地域ごとの調査の進展状況や地質環境に対する理解度、解析結果をより判り易い形で可視化する事が必要であると考える。また、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。さらに、機械学習により効率的なキーワードの分類を行っていくことが望まれる。

2.3.3 沿岸部の地質環境情報の整理・集約

本章では、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、平成28年度、及び平成29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(以下、「平成27年度報告書」、「平成28年度報告書」、及び「平成29年度報告書」という)を対象に、研究結果から得られたノウハウや知識の整理を行い、検討内容における個々の作業(タスク)とそれに関連する専門分野固有の知識(領域知識)の整理を行った(図2.3-24)。初めに、「タスク」と「領域知識」を抽出するために、「領域知識」、「タスク」、「事例」、「一般知識」の四つの区分に基づくスクリーニング調査から内容の分析・整理を行い、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をおこない、最後に、タスク単位で領域知識の整理票の作成を行った。

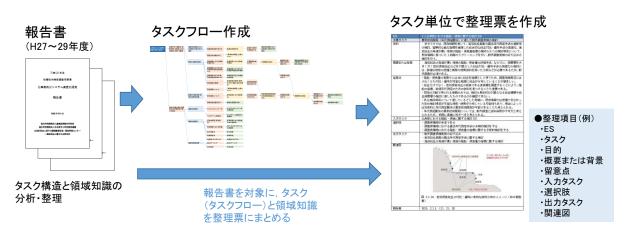


図 2.3-24 地質環境情報の整理・集約の作業イメージ

(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、 分野内及び分野間の作業(タスク)の構築及び関連する専門分野固有の知識(領域知識)の整理 を実施するために、比較的情報量が多い、平成 29 年度報告書の「2.1 沿岸部の自然現象に関する 研究」と「2.2 沿岸部の地下水長期安定性に関わる研究」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」、及び「一般知識」の四つに分類して整理した(表 2.3-6)。

	衣 2.5-0 明光和末の調査で美元した万規の定義
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(ノウハウ)、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
7 ^ 9	して示すもの)
事例	対象が特定的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専門知識や参考文献など

表 2.3-6 研究結果の調査で実施した分類の定義

(2) 研究結果から得られたタスクの整理

タスクは、主に検討結果を導く上での作業や技術などの方法や考え方などが示されるとともに、

タスクに関連する領域知識が同時に整理される。また、タスクの組合せや連携を示したタスクフローを構築することによって、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扱うことができる。さらに、タスクフローをエキスパートシステム(ES)の構成要素として登録するために、既存の ES のカテゴリを考慮してタスクフローの整理を行った。なお、ここでは、平成 27 年度~29 年度報告書に記載された「隆起・侵食」に関する内容を対象に整理を行なった。

1) ES カテゴリとタスク

対象とした研究結果(平成 27 年度報告書、平成 28 年度報告書、平成 29 年度報告書)の記載項目や内容から、「領域知識」、「タスク」、「事例」、及び「一般知識」の四つに区分に分類することができ、特に検討に関する「タスク」については、条件分岐や選択肢などでタスクの詳細化やタスク間の連携や階層として、整理できることを確認した。さらに、ISIS の構成要素であるエキスパートシステムへ追加するためのタスクの整理を検討した。エキスパートシステムでは、「予察的地質環境モデルの構築 ES」、「調査計画立案支援に関わる ES」、「調査支援に関わる ES」、「解析・モデル化 ES」の四つのカテゴリ区分で構成されており、研究開発の進捗とともにエキスパートシステムもこの順で検討が進行する。ここでは、それぞれ「予察的 ES」、「計画・手法 ES」、「調査・技術 ES」、「解析・モデル ES」として四つの ES として扱い、エキスパートシステムの区分と整合するために、分類整理した「領域知識」、「タスク」、「事例」、及び「一般知識」との関係や、タスクの内容と ES の種類について再整理を行った。特に、上流に位置するタスクを ES カテゴリとした。図 2.3・25 に研究結果の内容分類と ES カテゴリの分類・整理のイメージを示す。また、表 2.3・7 に例として、平成 29 年度報告書の対象範囲(沿岸部における隆起・侵食に関する検討)と ES カテゴリを示す。

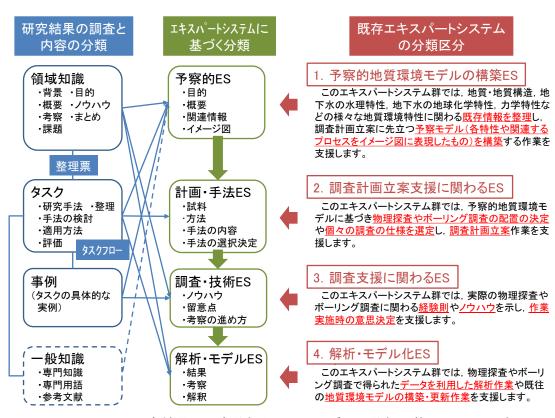


図 2.3-25 研究結果の内容分類と ES カテゴリの分類・整理のイメージ

表 2.3-7 平成 29 年度報告書の対象範囲と ES カテゴリ

報告書の項目	ES カテゴリ	
2.1 沿岸部の自然現象に関する研究	【調査·技術 ES】	
2.1.1 沿岸部における隆起・侵食に関する検討	沿岸域における隆起・侵食の検討手法	
〔2〕実施内容		
1)沿岸域における隆起侵食の検討		
2)海底地形の地形判読に基づく隆起・侵	(「海底地形の特徴に基づく隆起・侵食の評価」の下流タスク)	
食評価手法の検討手法の試行	海底地形の地形判読に基づく隆起・侵食評価手法の検討	
3)要素技術の検討(その 1)経験的指標に	【調査·技術 ES】	
基づく段丘対比・編年手法の高度化	経験的指標に基づく段丘対比・編年手法の高度化	
4)要素技術の検討(その 2)岩石侵食段丘	【調査・技術 ES】	
や局所的な堆積物の年代などによる	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	
隆起・侵食評価手法の検討	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		
② 局所的な堆積物の年代などによる	【調査·技術 ES】	
隆起・侵食評価手法の検討	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	

2) タスクフローの作成

本節では、昨年度に整理したタスクフロー図をベースに、特にコンテンツの内容が充実している「隆起・侵食」に関する記載を作業の対象範囲とし、平成 27 年度及び平成 29 年度報告書の内容を追加整理した。前述の「1) ES カテゴリとタスク」で整理したタスク及びこれまで整理されたタスクフローが ES の分類区分を横断的に進展するため、ES 区分の最初のタスクは ES カテゴリとして独立した ES 項目になることを想定した(図 $2.3\cdot26$)。

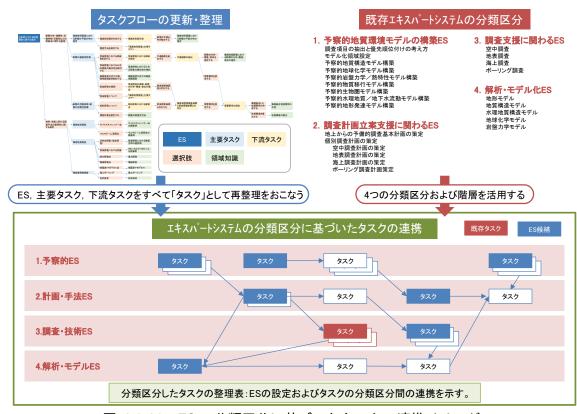
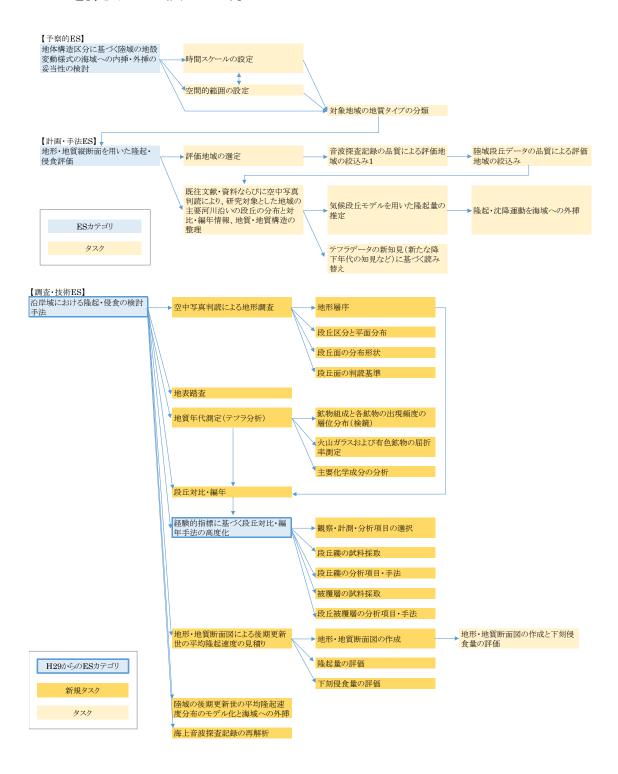


図 2.3-26 ES の分類区分に基づいたタスクの連携イメージ

平成 29 年度報告書から抽出したタスクを前項目 1) で整理した ES 分類区分ごとに整理し、さらに ES カテゴリと関連するタスクまたは内容について整理を行った。また、これらの整理結果と同様に、平成 29 年度報告書で作成されたタスクフローをベースに新たに ES 分類区分の概念に基づいてタスクフローを作成した(図 2.3·27)。最後に、主たる内容を「隆起・侵食の評価」、「露出年代」、及び「隆起・侵食の指標」と大別して、ES 分類区分ごとに ES カテゴリと新規タスクの連携を示した(図 2.3·28)。



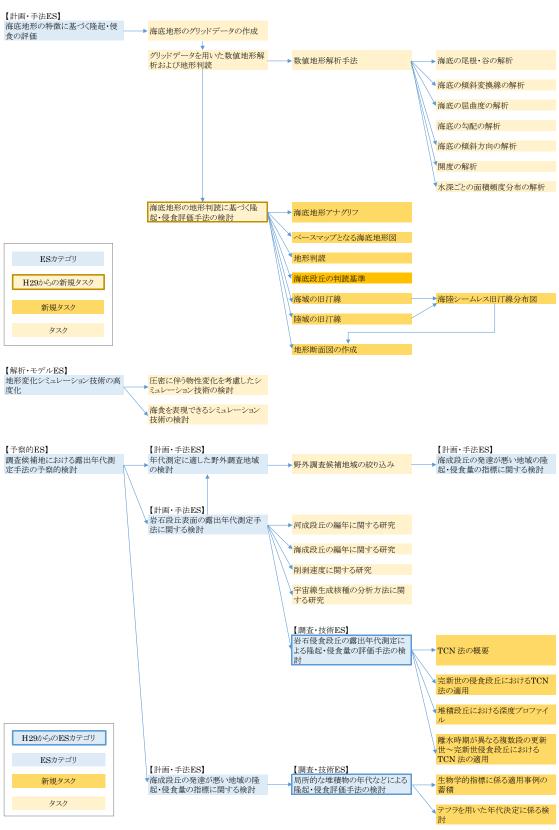


図 2.3-27 ES カテゴリとタスクフロー (隆起・侵食)

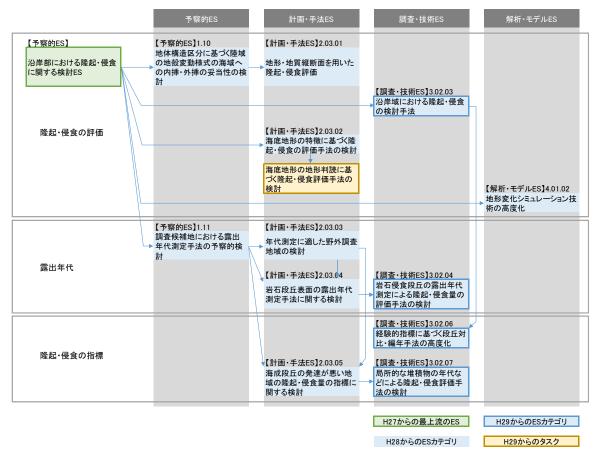


図 2.3-28 沿岸部の隆起・侵食における ES カテゴリと新規タスクの連携

(3) 研究結果から得られた領域知識の整理

1) 整理票の作成

前述の「2.1.1 沿岸部における隆起・侵食に関する検討」で実施した「隆起・侵食」を対象にして整理した ES カテゴリの領域知識を整理票形式でまとめた。整理票では、ES カテゴリ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、関連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。整理票の基本フォーマットを表 2.3-8 に、ES カテゴリの整理票の例を表 2.3-9 に示す。

	衣 2.3-8 登理宗の項目
項目	内容
ESカテゴリ	エキスパートシステムの項目となる検討課題などのタイトル
ES 分類項目	エキスパートシステムで構成される4区分による分類
目的	ES カテゴリの目的
本文	領域知識などから得られた ES カテゴリの概要または背景など
留意点	ES カテゴリ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 ES カテゴリの上流に連なる ES カテゴリまたはタスク
選択枝	下流タスクへ移行する選択項目
出力タスク	本 ES カテゴリ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など

表 2.3-8 整理票の項目

表 2.3-9 ES カテゴリの整理票の例

	表 2.3-9 ESカテコリの整理票の例
ESカテゴリ	調査候補地における露出年代測定手法の予察的検討
ES 分類区分	予察的 ES(1.11)
目的	・調査候補地における露出年代測定の評価と技術の概要説明
本文	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などが必要であるため,野外調査が必須である。例えば,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。どのような段丘がどの程度分布し、どのよう な調査をすれば,対比・編年が可能になるかを確認する必要がある。また,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。そこで,既存情報を用いて,野外調査地域の絞り込みを行 う。
	本土四島を取り囲む海岸線のうち、広い砂(礫)浜や干潟が発達する海岸は 1/5 ほどにすぎず、その他は海食崖が続く岩石海岸(太田ほか、2010)である。そのため、日本では海岸が隆起して形成された海成段丘は岩石侵食段丘が多い。岩石侵食段丘は被覆層を大きく欠くことから、岩石侵食段丘の表面が露出した年代を用いた段丘の対比・編年が有効と考えられる。岩石の露出年代については、宇宙線生成核種を用いた年代測定法が適用可能であることから、岩石段丘表面の露出年代測定手法では、宇宙線生成核種を用いた岩石の露出年代に着目する。
留意点	・岩石段丘表面の露出年代測定手法の適用性の検討に必要な条件は、海成段丘の分布と岩石侵食段丘の分布である。
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	・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を検討する ・海成段丘の発達が悪い地域の隆起・侵食量の指標を検討する
出力タスク	・年代測定に適した野外調査地域の検討・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	*C, OSL, 微化石, 火山灰, 遊離酸化鉄などの分析 と痕 波食薄 と痕 波食運 とれては海岸が隆起して形成された海成段丘は岩石侵食段丘が多い。岩石侵食段丘は被覆層を大きく欠く ことから、岩石表面が露出した年代や局面的な推聴物が推薦した年代を用いた段丘の対比・編年が有効
報告書	ことから、岩石表面が露出した年代や局所的な堆積物が堆積した年代を用いた段丘の対比・編年が有効。 H28, 2.1.1, (2), 2), ②, (a), (i)

(4) 沿岸部の地質環境情報に関する管理システムの構築

平成 29 年度の地質環境情報に関する管理方策の試行結果を踏まえ、沿岸部処分システム高度 化開発事業における地質環境情報と連携するなどの管理方策を引き続き試行した。本年度は、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)の情報と形態素解析及びオープンソースの全文検索ツールを活用した情報の収集・連携などの管理方策の試行を行った。

平成29年度のISIS及びGeolisの管理方策の検討では、ISISの中からエキスパートシステム(以下、「ES」という)及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】キーワード検索及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。さらなる情報の収集・連携においては、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される。

本年度は、ISIS コンテンツの一つである ES の情報から形態素解析によってキーワードを抽出し、オープンソースの全文検索ツール(以下、「Fess」という)を活用して、Web、ファイル及びデータベースを対象にキーワードと関連する情報など、さらに正規表現によるキーワード抽出とGeolis 並びに国立国会図書館サーチ(以下、「国会図書館データ」という)のデータを対象に文献情報などの収集・連携などの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、ES のルールベース化を目的に報告書からタスクやノウハウ、情報を対象に整理を行った。これらの整理結果を踏まえて、一部の範囲を既存のエキスパートシステムに新たな ES カテゴリとして追加登録を試みた。ここでは、登録した内容(文字列)を対象に、キーワードを自動で抽出仕組みとして文字列の形態素解析を ES に実装し、抽出したキーワードをユーザが選択することによって、関連する情報にアクセスできるようにキーワード情報とデータ情報の連携について試行するために、四つの試行パターンを管理方策として選定した(表 2.3-10)。試行パターン(4 を除く)の実施において、検索対象と検索元の共通設計をそれぞれ以下に示す。

- ・検索対象(クロールデータ):全文検索エンジン Fess はクロールした情報を形態素解析し、 その結果からキーワードをインデックスに登録する。
- ・検索元:コンテンツなどを形態素解析し、Fess 検索のためのキーワードとその頻出度を抽出からキーワードを自動選定する。
- 上記それぞれの形態素解析の結果のキーワードをマッチングすることにより関連する情報 の紐付を行い、その実用性を試行する。

表 2.3-10 データ連携の試行パターン

試行	キーワードな	Fess に登録され	全文検索エンジンから情報を抽出するためのキーワードの選
パタ	どの抽出方法	ているキーワード	定
ーン	(検索元)	とのマッチング	
1	形態素解析に よるキーワー ド抽出	キーワード	例として ES の特定ページのコンテンツを形態素解析する。単語の頻出度数、出現順などから検索で利用するキーワードを抽出する。
2		キーワード+ カテゴリ分類	例として ES の特定ページのコンテンツを形態素解析する。単語の頻出度数、出現順などから検索で利用するキーワードを抽出する。さらに関連するカテゴリ情報を検索条件に付与する。
3		キーワード+ ラベル検索	全文検索エンジン Fess のクロール結果にラベル (複数設定可) を付与する。ラベルを付与することにより、特定のラベルが付 与された情報のみに検索対象を絞り込むことができる。例として ES の特定ページのコンテンツを形態素解析する。単語の頻 出度数、出現順などから検索で利用するキーワードを抽出する。さらに関連するラベル情報を検索条件に付与する。
4	正規表現によ る文字列の抽 出	著者+年度 など	例として ES の特定ページのコンテンツを対象に正規表現 (特定の文字列パターン)を用いて、関連する複数のキーワードを抽出する。

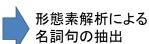
② 形態素解析機能の実装

形態素解析とは、言語で意味を持つ最小単位の列に分割し、それぞれの品詞などを判別する機能である。ここでは、主に「名詞句」を抽出し、キーワードを表示するために利用した。形態素解析機能のイメージを図 2.3-29 に示す。なお、形態素解析のプログラムはオープンソースの Igophp を用いた。

対象の文字列

(地形・地質縦断面を用いた隆起・侵食評価の記述より)

地形・地質情報が比較的得られる地域において、陸域主要所河川沿い〜海域海底谷沿い(以下、河川沿い)の地形地質所図を作成し、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。



情報を検索する時は、検索キーワードとして主に名詞句を利用されることから、領域知識の文章を対象に形態素解析によって名詞句を自動抽出し、さらに頻出度順、出現順、名詞句の連結、重み付け等を考慮して、情報との連携を試行する。



隆起 地史的解釈

図 2.3-29 形態素解析機能のイメージ

③ クローラ機能の実装

クローラ (Crawler) 機能とは、ウェブ上の文書や画像などを周期的に取得し、自動的にデータベ

ース化するプログラムである。ISIS にオープンソースの全文検索エンジンを有する全文検索システム「Fess」を実装して、Web、ファイル、データベースを対象にクロールをおこなう。Fessの機能によりクロールした情報は形態素解析として登録される(図 2.3-30)。クローラ機能の特徴として、以下のことが挙げられる。

- ・WebやDB、ファイルシステム上の様々な種類の情報を収集して検索することができる。
- ・対象ページ(URL)や対象ファイル形式を選択して登録・除外することができる。
- ・ISIS とは独立した検索機能を実装することが可能となり、ISIS がより広範囲の情報と紐付くことが可能となる。

これらのクローラ機能を実装することによって、Web や他の DB 関連情報の検索が可能となり、ISIS の情報がさらに多くの情報・知識と結びつけることが可能となる。Fess のクロールデータと ISIS の連携は Fess の API 機能を利用した。

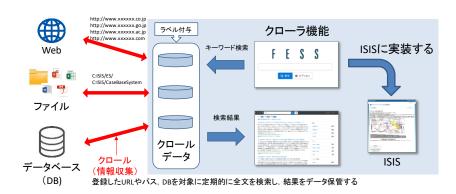


図 2.3-30 クローラ機能の実装イメージ

④ 正規表現の実装

コンテンツの参考文献を引用する場合の記載には、文献によって特定のルールが指定される。本試行では、 $H27\sim H29$ 報告書を参考にし、本文の文末に記載される引用の記載を対象に汎用的な文字列のパターンで正規表現として記述した(図 2.3-31)。この正規表現に合致する文字列を検索・抽出するスクリプトをシステムに実装した。

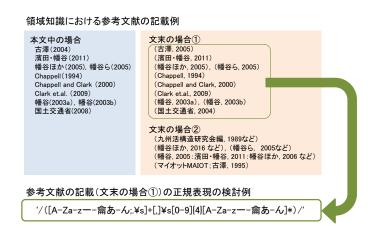


図 2.3-31 参考文献の引用の記載を対象にした正規表現の例

⑤ 試行のための ISIS の機能拡充の検討

エキスパートシステムの各 ES ページに試行のための実行ボタンを実装した。実行ボタンをクリックすると、キーワード抽出(事前登録したキーワードとのマッチング)の対象範囲としてページ本分などが別ウィンドウで開き、各試行を選択することができるように機能を拡充した。

2) 地質環境情報と連携する管理方策の試行

① 試行パターン1(キーワード)

試行パターン1では、選定キーワードと対象本文の形態素解析との結果のマッチングからキーワードの抽出をおこない、Fess データベースを対象に検索をおこなった。ここでは、試行1のキーワード選択において①専門用語の選定、②キーワードの重み付け、③複合キーワードの3種の視点から検討をおこなった。図 2.3-32 に複合キーワードによる HP 及び Web ページ数の絞込みの結果の例を示す。キーワードによる試行結果における各検討のまとめを表 2.3-11 に示す。

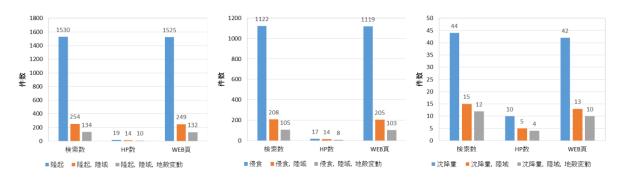


図 2.3-32 複合キーワードによる HP 及び Web ページ数の絞込み

検討番号	メリット	デメリット
① 専門用語の選定	キーワードに成り得る専門用語を対象に形態 素解析することによって、雑多な名詞句をある 程度絞り込でキーワードの抽出ができる。	専門用語の登録がない場合や完全一致し ない場合は、キーワードとして抽出出来 ない。
② キーワードの 重み付け (頻出度)	形態素解析の対象範囲におけるキーワードの 頻出度を知ることができる。	キーワードの頻出度は、記載内容や書き 手によって異なり、必ずしも頻出度が高 いものが重要なキーワードには成り得な い。
③ 複合キーワード	二つ以上のキーワードを選択することによって、より関連する情報を絞り込むことが可能である。	キーワードの複数選択がミスマッチな場合は、検索結果が得られない。

表 2.3-11 キーワード選択の検討結果

② 試行パターン2(キーワード+カテゴリ分類)

試行パターン2では、試行1で抽出したキーワードをカテゴリと関連付け、カテゴリの選択から関連キーワードと対象本文の形態素解析の結果とのマッチングをおこない、キーワードの抽出をおこなった。キーワード選択による Fess データベースの検索結果は試行1と同じである。カテゴリは「地形」と「地質」を最上位としたツリー形式で構成され、上位のカテゴリを選択した場合は、下位のカテゴリも選択対象範囲に含まれる。また、カテゴリには関連するキーワードが登録されている。ここでは、本年度、新規に追加したエキスパートシステムの12項目の本文を対象に、カテゴリ選択(「地形」、「地質」の全選択)によるキーワードの絞込み効果について検討を

おこなった。試行 1 と比較して、試行 2 ではカテゴリによるキーワードの選別登録がされているため、より専門性や関連性が高いキーワードが絞り込むことが出来た(図 2.3-33)。

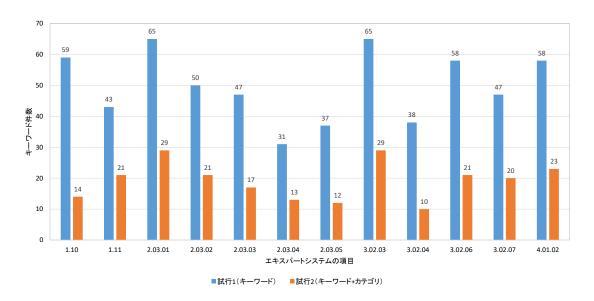


図 2.3-33 カテゴリによるキーワードの絞込み効果

③ 試行パターン3(キーワード+ラベル)

試行パターン 3 では、ラベル選択による Fess データベースの検索範囲を指定して、キーワードの検索を行った。ここでは、クローラ機能の設定時に登録したラベルを選択した上で、対象本文からキーワードの抽出をおこなった。キーワードの抽出は、試行 1 と同じ方法でおこなった。ウェブクロールで複数の URL を対象にした組織名や分類などを汎用ラベルとし、それらと抽出キーワードによる検索の結果を表 $2.3\cdot12$ に示す。

表 2.3-12 汎用ラベルにおけるキーワードの検索結果

					ラ〜	シル			
キーワード	全件数	日本原子力 研究開発機 構	産業技術総 合研究所	国土交通省	文部科学省		海洋研究開 発機構	石油技術協 会	学術·学会
外挿	308	136						105	63
内挿	380	148						117	111
時間スケール	419	212						1	203
地体構造区分	29	3							22
地域	10437	3476	3	4	6	5		715	6219
地殼変動様式	7	1							4
隆起	1530	648	113		2	4		82	676
評価	14293	6401	18	1	6	_		1570	6283
三紀中新世以降	3	0401	10	-				1010	0200
海域	2013	320	24		4	72		147	1439
陸城	744	238			2	34		28	437
妥当性	2010	1213				94		162	401
沿岸海域	130	31	3			1		3	89
日本列島	1451	154	0			1		17	1275
地史イベント	1451	194						- 17	1270
地史イペント		40	l					10	0.40
	306	40	_			_		18	246
設定	5294	2701	3		2	2		377	2203
10万年間	82	40							39
沈降量	44	17	3					2	20
素過程	140	33						5	100
日本海拡大	90	3							85
地層処分	2846	2274	1					1	566
推定	5911	1623	87		4	18		737	3432
沿岸陸域	3	1							
空間的	739	248			1			63	424
中期中新世	217	11						11	193
地殼変動	986	416	1		7	2		6	552
研究事例	174	100						8	63
海岸線	417	151		1		23		1	238
一次近似	9								7
外挿範囲	1								
地層処分技術WG中間整理	1								
新生代	453	6	1					27	416
本事業	11048	5842		3				302	4898
全国規模	58	20						5	31
沿岸部	338	155				4		3	172
侵食傾向	2	100							1.2
可能性	7911	2771	117		6	4		1104	3892
概観	380	81	111			-		48	249
場合	26334	6769	8	4	8	352		7442	11708
技術的判断	26554			4		392		1444	11700
空間的範囲	4	1							1
認定	1554	351	1					86	1114
特徴	5914	1630	1		2	1		947	3327
特徴 地殻変動傾向			1		2	1		947	3327
	5		10					000	1000
様式	3261	1846	13		3			298	1099
三紀	1129	149	1					67	909
マクロスケール	26	13							11
侵食	1122	611	1			4		10	493
連続的	811	299			4	6		111	387
変動傾向	56							1	25
スケール	2212	773	1					198	1237
検討範囲	23	13							7
時空間スケール	44	6							37
空間スケール	177	62							113
本来	1040	384						111	543
構造区	66	14						1	
	00,200	4500	104			10000			
データ	62569	4523	124	5	7	42085		7273	8530

④ 試行パターン4(正規表現)

試行パターン4では、対象範囲の本文中に記載される参考文献の著者と年度の文字列を表す正規表現から「著者+年度」をキーワードとして抽出し、さらに選択したキーワードを Geolis または国立国会図書館データベースを対象に検索をおこなった。ここでは、本年度、新規に追加したエキスパートシステムの 12 項目の本文を対象に試行した。今回対象にした正規表現は、主に文末に参考文献として記述される様なカッコ内に人名と4桁の数字を対象にしている。試行した結果を表 2.3-13 に、Geolis 及び国立国会図書館の検索結果の例を図 2.3-34 と図 2.3-35 に示す。

表 2.3-13 正規表現によるキーワードの抽出と Geolis 及び国立国会図書館の検索結果

エキスパートシステム項目	正規表現から抽出したキー ワード	Geolis	国立国会図書館
1.10-地体構造区分に基づく	(資源エネルギー庁, 2016)	0	50
陸域の地殻変動様式の海域 への内挿・外挿の妥当性の検	垣見ほか(2003)	0	17
討	松田•吉川(2001)	0	27
1.11・調査候補地における露 出年代測定手法の予察的検 討	(太田ほか、2010)	13	>200
2.03.01-地形・地質縦断面を 用いた隆起・侵食評価,	なし		
2.03.02-海底地形の特徴に基づく隆起・侵食の評価手法の 検討	なし		
2.03.03-年代測定に適した野 外調査地域の検討	なし		
2.03.04-岩石段丘表面の露出	1 . 3 () /	4	80
年代測定手法に関する検討	若狭ほか(2008)	1	129
2.03.05-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	なし		
3.02.03·沿岸域における隆 起・侵食の検討手法	なし		
3.02.04・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	なし		
3.02.06-経験的指標に基づく 段丘対比・編年手法の高度化	なし		
3.02.07-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	なし		
4.01.02・地形変化シミュレー ション技術の高度化	なし		

【検索キーワード:垣見, 2003】

絞り込みワード

URL	著者	発行者	論文題名	発行年
https://gbank.gsj.jp/ld/resource/geolis/200301669	垣見俊弘,松田 時彦, 相田 勇,衣笠 善博	日本地震学会	A Seismotectonic Province Map in and around the Japanese Islands	2003
https://gbank.gsj.jp/ld/resource/geolis/200302255	垣見 俊弘	海洋出版	地震地体構造図の実例とその意義	2003
https://gbank.gsj.jp/ld/resource/geolis/200314914	伝法谷宣洋, 垣見俊弘, 植原茂次, 市川八州夫, 高智英二郎	日本地震学会	Geometry of active faults distributed at the north and south margin of the Tsugaru Strait(P036)(poster session) (abs.)	2003

Number of Records: 3

図 2.3-34 Geolis 検索実行の結果

【検索キーワード 著者:垣見、出版年:2003】

概要	著者	カテゴリ
 タイトル:日本列島と周辺海域の地震地体構造区分 タイトル(読み):ニッボン レットウト シュウヘン カイイキ ノ ジシン チ カラダ コウゾウ クブン 	垣見俊弘,松田時彦,相田 勇,衣笠善博,	デジタル資 料
 タイトル: Supply Chain Council[SCC]報告 SCM導入 奮戦記中部電力 タイトル(読み): Supply Chain Council SCC ホウコク SCMドウニュウ フンセンキ チュウブ デンリョク 責任表示: 垣見 祐二, 	垣見祐二,垣見祐二,	記事・論文
中国学園大学/中国短期大学,13479350 ・タイトル: 英語系学科卒業生のキャリア形成に関する研究(3) -卒業生の英語使用と英語教育への提言- ・責任表示: 垣見益子,橋内幸子,	垣見益子,橋内幸子,	デジタル資 ^を 料
 タイトル: 肝炎ウイルスに対する免疫応答の制御と新しい治療法の開発例 責任表示: 垣見, 和宏, 徳山, 宏丈,森安, 史典, 	垣見, 和宏.德山, 宏丈,森安, 史典,垣見, 和宏.德山, 宏丈, 森安, 史典,	デジタル資 料
東京地学協会	野村律夫,垣見俊弘,江口孝雄,	デジタル資 料
	 タイトル: 日本列島と周辺海域の地震地体構造区分・タイトル(読み): ニッボン レットウト シュウヘン カイイキ ノ ジシン チ カラダ コウゾウ クブン タイトル: Supply Chain Council[SCC]報告 SCM導入 奮戦記-中部電力・タイトル(読み): Supply Chain Council SCC ホウコク SCMドウニュウ フンセンキ チュウブ デンリョク・責任表示: 垣見 祐二, 中国学園大学/中国短期大学,13479350・タイトル: 英語系学科卒業生のキャリア形成に関する研究(3) -卒業生の英語使用と英語教育への提言・責任表示: 垣見益子,橋内幸子, タイトル: 肝炎ウイルスに対する免疫応答の制御と新しい治療法の開発例・責任表示: 垣見,和宏,徳山,宏丈,森安,史典,東京地学協会・タイトル: 書評・紹介 	タイトル: 日本列島と周辺海域の地震地体構造区分 タイトル(読み): ニッボン レットウ ト シュウヘン カイイキ ノ ジシン チ カラダ コウゾウ クブン タイトル: Supply Chain Council[SCC]報告 SCM導入 奮戦記―中部電力 タイトル(読み): Supply Chain Council SCC ホウコク SCMドウニュウ フンセンキ チュウブ デンリョク 責任表示: 垣見 祐二, 中国学園大学/中国短期大学,13479350 タイトル: 英語系学科卒業生のキャリア形成に関する研究(3) -卒業生の英語使用と英語教育への提言・責任表示: 垣見益子,橋内幸子, タイトル: 肝炎ウイルスに対する免疫応答の制御と新しい治療法の開発例 責任表示: 垣見,和宏,徳山,宏丈,森安,史典,垣見,和宏,徳山,宏丈,森安,史典,垣見,和宏,徳山,宏丈,森安,史典,垣見,和宏,徳山,宏丈,森安,史典,東京地学協会 東京地学協会 タイトル: 書評・紹介 野村律夫,垣見俊弘,江口孝雄,

Number of Records: 17

図 2.3-35 国立国会図書館サーチ検索実行の結果

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

管理方策の有効性評価項目を表 2.3-14 に示す。

評価項目 概要 キーワード キーワードの関連性 検索キーワードの Fess、Geolis、国会図書館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) の選択 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) 検索の実行 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 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) 誰が何度検索を行っても同じ検索結果を得る仕組み 閲覧 検索結果の再現性

表 2.3-14 管理方策の有効性評価項目

② 管理方策の有効性評価

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、検索結果の再現性のそれぞれの評価項目について評価を行った。各評価結果を数値により重み付けを行なって、定量的に総合評価を行った。評価結果を表 2.3-15 に示す。

総合評価の結果、試行パターン【4】の正規表現から文字列を抽出して情報を検索する方式が最も有効性が高く、次いで試行パターン【2】のカテゴリに分類したキーワードの抽出からキーワードを選択して情報を検索する方式の有効性が高かった。【4】の正規表現は、主に参考文献の記載方法を対象におこなったが、これらの記載方法は、論文や報告書などの文献でそれぞれルール化

されているが、すべての文献で統一的ではない。そのため、今後、さらに汎用的な正規表権、またはそれぞれに対応した正規表現の検討が必要である。【2】のカテゴリに整理したキーワードは、カテゴリとキーワードの追加が必要である。その他、【3】のラベルを利用した検索の試行は、キーワードの選択性が煩雑であることが評価を下げる大きな原因であった。ユーザの利用観点からは、情報の出典や分類などに限定して情報を検索することは、手法としては有用性が高いものであるため、今後、キーワードの選択部分の改良が期待される。さらに、キーワードの質・量ともに最適なものを提示できる新たな手法が今後の課題の一つであることが考えられた。

	20 -10 .0	D - T > 2 > K - 5 13 > 52	12211	
評価項目	試行パターン 【1】	試行パターン 【2】	試行パターン 【3】	試行パターン【4】
キーワードの関連性	Δ	0	0	0
キーワードの保守性	0	0	Δ	0
検索の利便性	Δ	0	Δ	0
検索の処理性能	Δ	0	0	0
検索結果の適合性	\triangle	0	0	Δ
検索結果の再現性	Δ	0	Δ	0
総合評価	8	17	12	20

表 2.3-15 管理方策の有効性評価

※ ◎:3点、○:2点、△:1点とし、総合点の高いものをより有効と評価

(5) システムの構築と地質環境情報の格納

沿岸部の地質環境情報の整理・集約の結果を検討した管理方策のシステムに格納し、DVD で閲覧できるようにした。

(6) まとめと今後の課題

本節では、平成28年度に実施された既存データベースシステム(Geolis 及びISIS)の現状を整理と地質環境の情報に関する管理方策の検討結果を踏まえた上で、新たに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実施した。

沿岸部の地質環境情報の整理・集約として、新たに平成 29 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から「沿岸部の自然現象に関する研究」と「沿岸部の地下水長期安定性に関わる研究」を対象に、記載内容の特徴を「領域知識」、「タスク」、「事例」、「一般知識」の四つに分類して整理した。次に、平成 28 年度に実施された同様の整理結果と合わせてエキスパートシステムに実装するための検討を行った結果、記載内容が詳細かつ充実している「隆起・侵食」に関する記載が最適であったため、平成 27 年度~平成 29 年度報告書の「隆起・侵食」の記載範囲を対象に、エキスパートシステムの分類区分に基づいて目次項目となる ES カテゴリとその下流タスクを整理した結果、エキスパートシステムの 4 区分に合計 12 種の ES カテゴリが整理された。さらに ES カテゴリまたはタスクの連携からタスクフローを作成した。最後に、各カテゴリ ES について関連する領域知識などの内容を整理票にまとめた。

沿岸域の地質環境情報に関する管理方策の試行として、上述の ES カテゴリをエキスパートシステムに実装し、これらの整理票の本文や留意点の記載を対象に形態素解析によってキーワードを抽出し、オープンソースの全文検索ツール (FESS) を活用して、Web、ファイルおよびデータベースを対象にキーワードと関連する情報など、さらに正規表現によるキーワード抽出と Geolis データ並びに国会図書館データを対象に文献情報などの収集・連携に向けた管理方策について検討し、形態素解析機能やクローラ機能の実装と ISIS のシステムの拡充をおこなった。次に、エキスパートシステムの ES カテゴリのページを対象に抽出したキーワードと関連情報のアクセスに

ついて【1】キーワードによる試行、【2】キーワード+カテゴリによる試行、【3】キーワード+ラベルによる試行、【4】正規表現による試行を実施した。最後に、これらの試行について有効性を評価した結果、試行パターン【4】の正規表現から文字列を抽出して情報を検索する方式が最も有効性が高く、次いで試行パターン【2】のカテゴリに分類したキーワードの抽出からキーワードを選択して情報を検索する方式の有効性が高いことが示された。

沿岸部の地質環境情報の整理・集約の結果を格納するとともに、検討した検索機能を ISIS に 追加して、DVD で閲覧できるようにした。

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.
- 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,393p,2018.

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、原子力機構、原環センター、電中研、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」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が示された(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)。

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、下記の実施項目①、②のように大項目として二つの実施項目を設定し、個別研究課題として含まれるニアフィールドの構成要素(材料)や研究テーマに対して平成 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きた。

本章(第3章)では、概要調査段階以降に必要となる工学技術の高度化の観点から、上記の実施項目①、②に含まれる個々の課題について、平成30年度の実施内容や得られた成果などについて述べる。

実施項目①(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)

- 3.1.1 オーバーパック
- 3.1.2 緩衝材
- 3.1.3 セメント系材料
- 3.1.4 ニアフィールド複合現象評価手法の開発

実施項目②(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)

- 3.2.1 グラウト設計および影響評価技術の開発
- 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

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.

https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/engan_kaiteika/report_01.html (2019年3月20日最終閲覧)

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.

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

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、不働態化、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,原子力機構,原環センター,電中研,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表 3.1-1 に示す。平成 29 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 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,原子力機構,原環センター,電 中研,2018)。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,原子力機構,原環センター,電中研,2018)。平成 30 年度は、平成 29 年度に引き続き、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、腐食速度及び拡散性水素濃度を求める。また、溶接試験片を用いた電気化学試験を実施す 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
存金計験(電ケル当計験)	条件設定	従来材	改良材	例えば、定電位分極法
腐食試験(電気化学試験)				

表 3.1-1 試験などに関する全体計画

(2) 炭素鋼の腐食挙動

1) 電気化学挙動

炭素鋼オーバーパックの腐食形態は不働態化の有無によって異なることから、緩衝材共存下での炭素鋼の不働態化挙動を評価する必要があり、従来、炭酸塩環境などの不働態化しやすい条件での検討(核燃料サイクル開発機構,1999)が行われてきた。一方、沿岸部で想定される塩水環境での不働態化の臨界 pH などのデータが十分とは言えない。そのため、本研究では沿岸部での処分における腐食形態や電気化学的特性を把握することを目的として沿岸部での地下水として海水起源の地下水及びこれと降水起源の地下水が混合した地下水を想定した水溶液を用いてアノー

ド/カソード分極測定を行い、緩衝材中における炭素鋼の不働態化挙動を調査するとともに、分極 曲線から浸漬初期における腐食速度を求めた。

① 試験方法

試験片として溶接構造用圧延鋼材 (JIS G 3106) SM400B (C:0.13、Si:0.20、Mn:1.04、P:0.017、S:0.006 mass%) を用い 10 mm×10 mm×2 mm の大きさに加工してリード線を半田付けし、エポキシ樹脂で樹脂埋めした (図 3.1-1)。樹脂埋め後の試験片の試験に供する表面を 800 番まで湿式研磨した後、バフ研磨 (Al_2O_3 、粒径 $0.05\,\mu m$) で仕上げた。図 3.1-2 に示すように、チタン製カラム (外径 60 mm、高さ 34 mm) に、作製した試験片と緩衝材を模擬したベントナイトとケイ砂の混合体を、油圧プレス装置を用いて充填した。ケイ砂の混合率、乾燥密度は既往の緩衝材仕様 (核燃料サイクル開発機構, 1999) に準じてそれぞれ 30 mass%、1.6 Mg/m³とした。

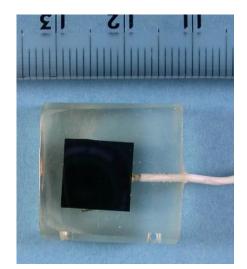


図 3.1-1 樹脂埋めした試験片の写真

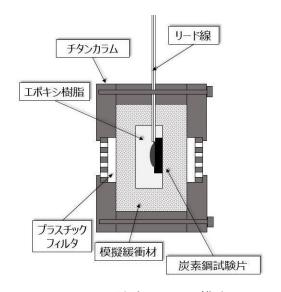


図 3.1-2 試験カラムの模式図

窒素雰囲気のグローブボックス内で、 緩衝材と試験片を入れたカラムを、窒素ガスを吹き込んで脱気した試験溶液に減圧状態で約 24 時間浸漬させた。次に図 3.1-3 に示すように試験セルを組み立て、80^{\circ} に加熱後、自然電位にて 10 の振幅、高周波数(1 kHz 以上)で交流インピー

ダンスを測定し液抵抗を推定した。80°Cに加熱後、自然電位にて 10mV の振幅、高周波数(1kHz 以上)で交流インピーダンスを測定し液抵抗を推定した。次に $-1.2\sim0$ V(vs. Ag/AgCl)の範囲で分極測定を行った。分極測定の走査速度は 20 mV/min とした。得られた分極曲線は液抵抗補正を行った。試験溶液には、表 $3.1\cdot2$ に示す人工海水(ASTM D1141·98 準拠)および人工海水を蒸留水で 10 倍に希釈した溶液を用いた。試験溶液の pH は NaOH を使用して 8.5、10、12 の 3 種類に調整した。比較のため、全ての試験ケースについて緩衝材が共存しない条件として溶液単独での試験も行った。溶液単独の人工海水 10 倍 pH12 の条件のみカソード処理(-1.2V vs.Ag/AgCl, 5 min)を行ってから分極測定を実施した。

表 3.1-2 人工海水の組成

1X J. 1-Z	八工海小奶油风
化学種	濃度(M)
CI-	5.6×10 ⁻¹
SO ₄ ²⁻	2.9×10 ⁻²
HCO ₃ -	2.4×10 ⁻³
F-	7.4×10 ⁻⁵
Br ⁻	8.6×10 ⁻⁴
BO ₃ ³⁻	4.4×10 ⁻⁴
Na⁺	4.8×10 ⁻¹
K⁺	1.0×10 ⁻²
Ca ²⁺	1.0×10 ⁻²
Mg ²⁺	5.5×10 ⁻²
Sr ²⁺	7.0×10 ⁻⁴
рН	8.9

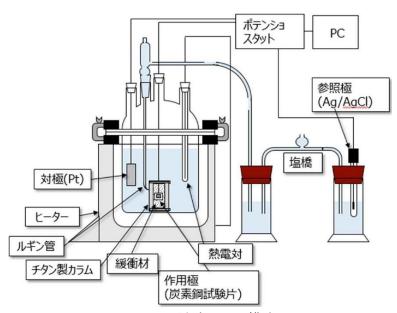


図 3.1-3 試験セルの模式図

② 試験結果と考察

人工海水中及び人工海水 10 倍希釈溶液中で測定した分極曲線をそれぞれ図 3.1-4 及び図 3.1-5 に示す。いずれも pH10 までは緩衝材の有無に関わらず不働態化の兆候は見られなかったが、溶液単独系では pH12 で不働態化の兆候と局部腐食発生によると思われる電流密度の立ち上がりが見られた。一方、緩衝材共存系では不働態化の兆候と考えられる電流密度の低下や局部腐食発生は確認されず、電流密度の挙動は他の pH 条件とほぼ同様であった。

ベントナイトは pH 緩衝作用によりアルカリ性溶液の浸潤に対して間隙水の pH を低下させる 効果を有すると報告されており(Wieland et al, 1994)、このベントナイトの pH 緩衝作用が高 pH 条件であっても不働態化が起こらず電流密度の違いも小さい一因であると考えられる。実際 に一部の条件で pH 試験紙を用いて間隙水の pH を測定した結果、人工海水 10 倍希釈溶液の場合、pH10 の溶液を浸潤させた際のベントナイト間隙水の pH は約 7.5 であった。また、緩衝材 共存系では溶存ケイ酸と鉄イオンの反応や、物質移動が制限されている炭素鋼/緩衝材界面での鉄イオンの加水分解により炭素鋼試験片 - 緩衝材界面の pH が低下し不働態化が抑制されている可能性もあるため、今後これらの現象の可能性や評価結果への影響についての確認が必要である。

図 3.1-4、図 3.1-5 に示す分極曲線から Tafel 外挿法を用いて推定した自然電位での腐食速度を表 3.1-3 に示す。緩衝材の無い溶液単独系では人工海水を希釈することによって腐食速度が 1/20~1/200 程度小さくなるが、緩衝材共存系では溶液を希釈しても腐食速度の変化は小さいことがわかった。

以上の結果から、緩衝材共存系では、塩水環境において高 pH 条件でも不働態化しにくいこと、また、浸漬初期の腐食速度は塩濃度による影響が小さい可能性があることが確認された。ただし、塩水環境における不動態化の可能性については、信頼性の向上に向けて前述のような測定に起因する pH 低下の影響などについて確認が必要である。

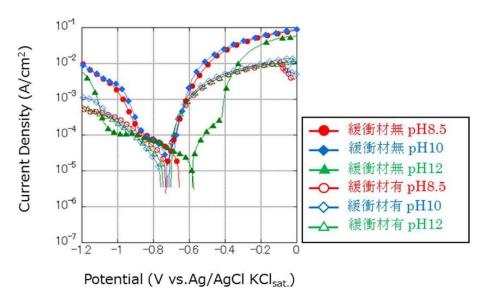


図 3.1-4 人工海水中での分極測定結果

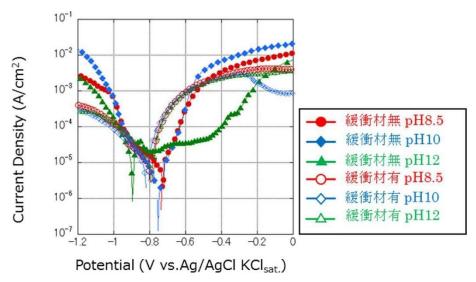


図 3.1-5 人工海水 10 倍希釈溶液中での分極測定結果

表 3.1-3 分極曲線から Tafel 外挿法で推定した初期腐食速度(単位:mm/y)

pН	8.5		10		12	
緩衝材	養衝材 有 無		有	有無無		無
人工海水	0.29	0.43	0.15	0.44	0.16	018
10 倍希釈溶液) 倍希釈溶液 0.14		0.16	0.0022	0.22	-

2) 低酸素濃度下での腐食と水素吸収挙動

オーバーパック周辺の溶存酸素が腐食反応や緩衝材中の鉱物等との反応によって消費された後は地下深部本来の低酸素濃度環境がもたらされ、水の還元反応をカソード反応とした全面腐食が進展すると想定される。また、発生した水素の一部が金属中に吸収され、その吸収量によっては水素脆化による破損が生じる可能性がある。よって、沿岸部を想定した地下水条件での低酸素濃度下における腐食速度と水素吸収挙動を把握することを目的として浸漬試験を実施した。

① 試験方法

炭素鋼試験片には、溶接構造用圧延鋼材 (JIS G 3106) SM400B を用い、その組成は前述の「1) 電気化学挙動」の試験のものと同様である。材料を寸法 $30 \times 30 \times 2$ mm の大きさに切り出し、表面はエメリー#800 の湿式研磨にて仕上げた。

試験溶液には表 3.1-2 に示す組成の人工海水 (ASTM D1141-98 準拠)及び、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, 2010b; Kobayashi et al., 2011)に準じて 80°C、試験期間は 365 日間とした。1 条件あたりの試験数 (n 数)は n=3 とした。

図 3.1-6 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($1.6\,\mathrm{Mg/m^3}$)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 $1\,\mathrm{ppm}$ 以下)で $24\,\mathrm{時間以上ボックス内のガス を試験溶液に通気することにより溶存酸素を除去した。$

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250°C)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

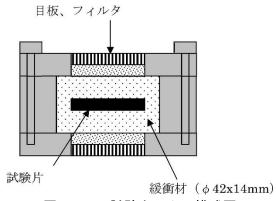


図 3.1-6 試験カラムの模式図

② 試験結果と考察

試験後の試験片の外観を図 3.1-7 に示す。いずれの条件でも黒色の皮膜がほぼ均一に形成されていたが、100 倍、1,000 倍での外観に見られるように、一部は解体時に皮膜が緩衝材とともにはがれて金属素地が露出したものもあった。試験片の表面を X 線回折による分析を行った結果を図 3.1-8 に示す。人工海水で従来の結果(谷口ほか, 2010a)と同様にシデライト($FeCO_3$)が同定されたが、希釈した条件ではいずれも Fe のピークと弱いブロードなピークが観察されたのみであった。

次に、重量法により得られた平均腐食速度を表 3.1-4 に示す。また、平均腐食速度の希釈倍数 依存性を図 3.1-9 に、平均腐食量の経時変化を図 3.1-10 に示す。これらの図には平成 29 年度ま でに得られた値(産総研,原子力機構,原環センター,電中研,2018)もプロットした。図 3.1-10 には平均腐食量(Y)を時間(t)に対してべき乗則(Y=AtB-A,B:係数)でフィッティングして得 られた近似式も示した。図 3.1-9 より、人工海水(希釈なし)の腐食速度が比較的大きく、希釈 倍数が 10-1,000 ではほぼ同様の値を示した。また、今回得られた緩衝材中での腐食速度はいず れも溶液単独系よりも大きい。これは既往の結果(谷口ほか,2010b)と整合する。溶液単独系で は平成28年度の結果(産総研、原子力機構、原環センター、電中研、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抑制さ れたものと考えられる。一方、緩衝材中では平成29年度に報告したとおり90日後の試験におい ても素地が一部観察されており、今回得られた365日の試験においても解体時に皮膜が剥離する など密着性が小さいため保護性も比較的小さかった可能性がある。既往の長期試験(谷口ほか、 2010a) においてもベントナイト中で炭素鋼の腐食進展が大きく抑制されるのは浸漬 1 年以降と されており、今回取り出した試験の期間は密着性や保護性の高い皮膜が形成される途上段階であ った可能性がある。平均腐食速度に及ぼす塩濃度の影響については、人工海水が最も大きく、10 倍以上の希釈では希釈倍数による影響は見られなかった。図 3.1-10 中に示したべき乗則での近 似結果においても皮膜の保護性に関連した値である B 値(値が小さいほど保護性は大きい) は人 工海水でやや大きく、希釈した場合にはほぼ同様の値を示した。したがって、現時点までのデータに基づくと緩衝材共存下では 10 倍以上の希釈によって腐食速度は希釈しない場合よりもやや小さくなり、希釈倍数が大きくなっても腐食速度への影響は小さいと考えられる。希釈による皮膜の形成挙動と腐食抑制への影響やそのメカニズムについては、今回の試験の範囲では人工海水中以外では腐食生成物の構成成分が同定されていないことなどから明らかではない。今後より長期データの取得と表面に形成される皮膜組成や性状の変化等を踏まえてより詳細に検討する必要がある。

次に、水素抽出曲線の一例を図 3.1-11 に示す。この曲線より約 250℃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 3.1-5 に示す。今回得られた拡散性水素濃度の値はいずれも約 0.01 ppm 以下であり、希釈倍数による依存性も見られなかった。また、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。

試験溶液	浸漬期間	試験後の試験片外観(30×30×2mm)				
人工海水 (希釈なし)	365 日					
10 倍希釈	365 日					
100 倍希釈	365 日					
1,000 倍希釈	365 日					

図 3.1-7 浸漬試験後の試験片の外観

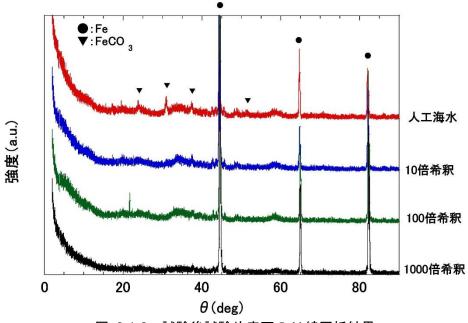


図 3.1-8 試験後試験片表面の X 線回折結果

表 3.1-4 試験片の重量変化から算出した平均腐食速度

溶液	浸漬期間(日)	平均腐食速度(mm/y)			
人工海水		1.67×10 ⁻²			
(希釈なし)	365	1.71×10 ⁻²			
(क्रिक्ट)		1.65×10 ⁻²			
		1.21×10 ⁻²			
10 倍希釈	365	1.20×10 ⁻²			
		1.18×10 ⁻²			
		1.21×10 ⁻²			
100 倍希釈	365	1.18×10 ⁻²			
		1.23×10 ⁻²			
		1.38×10 ⁻²			
1000 倍希釈	365	1.14×10 ⁻²			
		1.15×10 ⁻²			

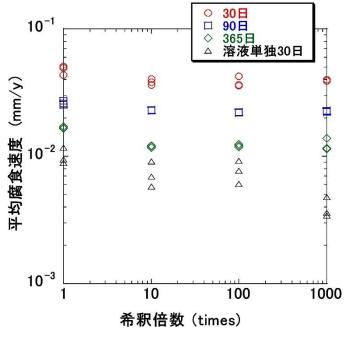


図 3.1-9 平均腐食速度の経時変化

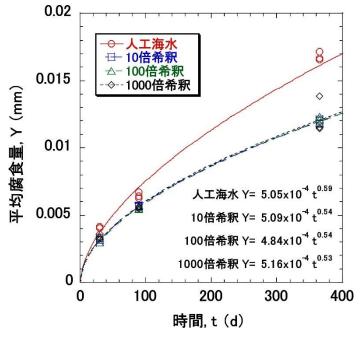


図 3.1-10 平均腐食量の経時変化

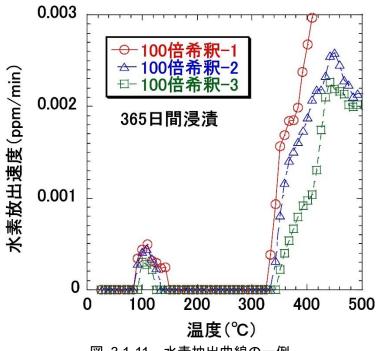


図 3.1-11 水素抽出曲線の一例

衣 3.1-3 小系抽	田田禄より水	のに拡敗性小系辰及
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)	365	0.007~0.009
10 倍希釈	365	不検出
100 倍希釈	365	0.004~0.012
1000 倍希釈	365	0.002~0.005

表 3.1-5 水素抽出曲線より求めた拡散性水素濃度

3) 応力腐食割れ感受性

前述の 1) の結果が示すように、人工海水および希釈した人工海水では不動態化しにくいことから、活性態-不動態遷移領域における応力腐食割れも生じにくいと考えられる。また、前述の「2) 低酸素濃度下での腐食と水素吸収挙動」の結果が示すように、低酸素濃度下における腐食に伴う水素吸収量は十分小さく、水素脆化による破損が生じることは考えにくい。しかしながら、水素発生領域では水素吸収に伴ってある程度の脆化や機械的特性の変化が生じ、割れ感受性を示す可能性がある。よって、沿岸部を想定した地下水条件での水素発生領域における割れ感受性を把握することを目的として、比較的厳しい応力条件で迅速に割れ感受性を評価することが可能な方法として広く用いられている低歪速度法(SSRT: Slow Strain Rate Technique)による応力腐食割れ試験を実施した。

① 試験方法

炭素鋼試験片には溶接構造用圧延鋼材(JIS G 3106)SM400B を用いた(C:014、Si:0.21、Mn:1.11、P:0.016、S:0.004 mass%)。材料を図 3.1-12 の形状・寸法に切り出し、表面はエメリー#800 の湿式研磨にて仕上げた。試験は溶液単独系のほか、図 3.1-13 に示すようにゲージ部に

緩衝材の充填されたカラムを取り付けることにより緩衝材共存系でも実施した。緩衝材はチタン製のカラム内に炭素鋼試験片と緩衝材(30 wt%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 Mg/m^3)になるように圧縮成形した。

試験溶液には人工海水 (ASTM D1141-98 準拠) および、これを 100 倍希釈した溶液を用いた。 なお、比較のため不活性環境での試験として、シリコーンオイル中での試験も実施した。温度は 前述の 1) 及び 2) の試験と同様に 80 とした。

試験片を試験溶液に浸漬させたのち、所定の電位条件で SSRT 試験を行った。電位は自然電位 Ecorr および自然電位より約 100-200mV 卑な電位を目安に設定した。試験条件を表 3.1-6 に示す。歪速度は既往の炭酸塩環境での試験(Mitsui et al, 2008)と同様に 8.3×10^{-7} /s とした。

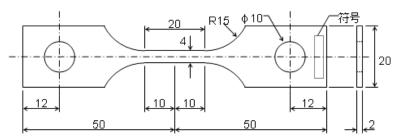


図 3.1-12 SSRT 試験片の形状・寸法

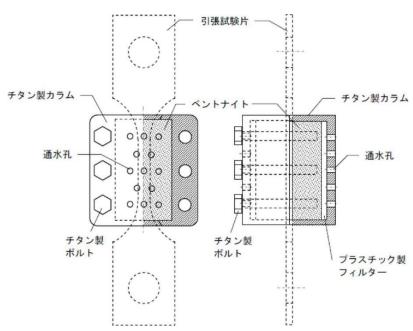


図 3.1-13 緩衝材共存下での SSRT 試験用カラムの模式図

我 0.1-0	心力隊及引作の政策不正				
試験溶液	緩衝材	電位(mV vs. SCE)			
シリコーンオイル	無し	-			
人工海水	無し	自然電位, -800, -900, -1000			
入工海小	有り	自然電位, -800, -900, -1000			
100 倍希釈人工海水	無し	自然電位, -600, -700, -800, -900			
100 信布秋人工海水	有り	自然電位7008009001000			

表 3.1-6 応力腐食割れ試験条件

② 試験結果と考察

人工海水(希釈なし)における応力-歪み線図を図 3.1-14 に、100 倍希釈人工海水における応力-歪み線図を図 3.1-15 に示す。この図より最大応力と破断歪みを求め、シコーンオイル中での値との比として算出した。その結果を図 3.1-16 と図 3.1-17 に示す。また、試験片の破面の面積から絞り(R.A.)を以下の式により求め、シリコーンオイル中での絞り値(R.A.oil)との比として算出した。その結果を図 3.1-18 に示す。

 $R.A. = 1-S_1/S_0$

S₁: 試験後の破面の面積 S₀: 試験前の平行部断面積

これらの値のうち、破断歪みや絞りは材料の延性に関連した指標であり、これらの値が小さいほど脆性的な材料特性を示し、脆化の程度や脆化による割れ感受性を簡易的に評価可能と考えられる。例えば漆原ほか(2002)は、水素脆化による鉄鋼材料の遅れ破壊感受性を非腐食性環境での破断伸びとの比を用いて迅速的に評価している。図 3.1-16 より、最大応力はいずれの条件でもシリコーンオイル中での値からほとんど低下していないが、破断歪みは図 3.1-17 に示すように低下しており、溶液単独系では人工海水のほうが 100 倍希釈人工海水よりも大きく低下する傾向があった。一方、緩衝材共存系では人工海水、100 倍希釈人工海水ともに 0.8 程度まで低下したが、希釈倍数による違いはほとんど見られなかった。絞りについては、溶液単独系では人工海水のほうが絞り比は低下していた(図 3.1-18)。緩衝材共存系でも全体的に人工海水での値のほうが小さいが、電位によって大きくばらついており、溶液単独系に比較して違いは明瞭ではなかった。

次に、試験後の試験片の SEM 観察結果の代表例を図 3.1-19 に示す。破面には水素脆性による破面で特徴的な擬へき開破面(南雲, 2011)が認められており、側面には亀裂が観察された。したがって、図 3.1-17 や図 3.1-18 に見られた破断歪みと絞り比の低下は水素脆化を反映したものと考えられる。

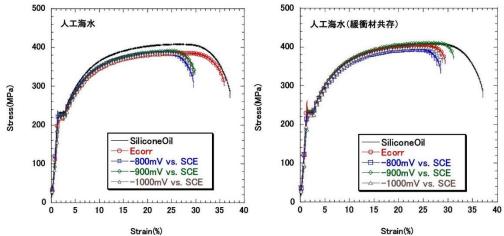


図 3.1-14 人工海水中における応力-歪み線図 左:人工海水単独、右:緩衝材共存

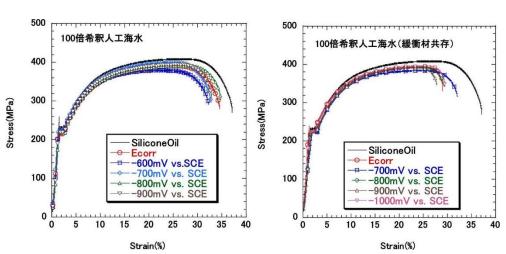


図 3.1-15 100 倍希釈人工海水中における応力-歪み線図 左:人工海水単独、右:緩衝材共存

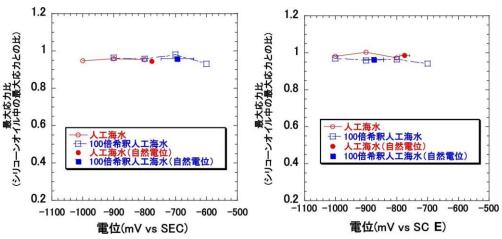


図 3.1-16 最大応力比の電位依存性 左:溶液単独、右:緩衝材共存

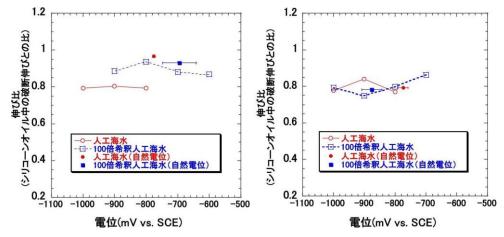


図 3.1-17 伸び比の電位依存性 左:溶液単独、右:緩衝材共存

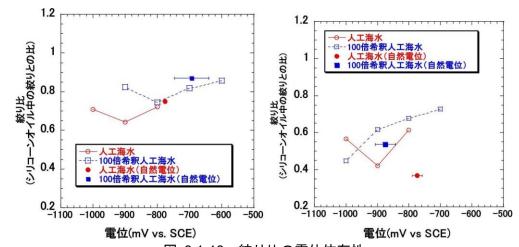


図 3.1-18 絞り比の電位依存性 左:溶液単独、右:緩衝材共存

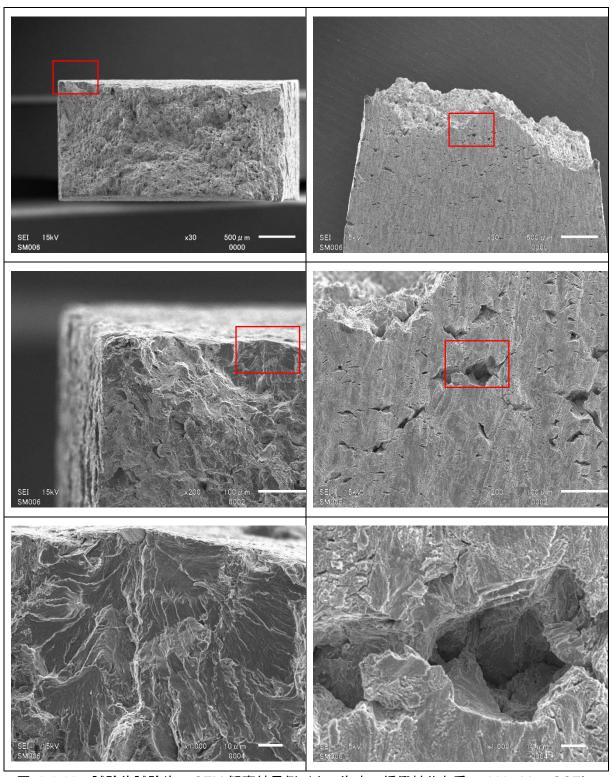


図 3.1-19 試験後試験片の SEM 観察結果例(人工海水 緩衝材共存系 -800mV vs SCE)

4) まとめと今後の課題

人工海水および希釈した人工海水を用いて炭素鋼の腐食試験を実施した。その結果、以下のことが確認された。

- ・溶液単独系では不動態化するような高 pH 条件でも緩衝材共存系では、不働態化しにくい。 よって、沿岸部を想定した処分においても従来の評価と同様に全面腐食が炭素鋼オーバー パックの主要な腐食形態であると考えられる。今後は塩水環境での腐食形態についてより 信頼性の高い評価を行うため、より幅広い地下水組成を想定したデータの拡充と、緩衝材 共存下での不動態化抑制のメカニズムや不動態化挙動評価の妥当性の確認が課題として 挙げられる。
- ・緩衝材共存下では、低酸素濃度下での腐食速度は塩濃度による影響が緩和され、既往の腐食量評価が沿岸部を想定した条件にも適用可能である見通しが得られた。また、緩衝材中での水素吸収量についても希釈倍数による影響は見られず、水素脆化が問題となる濃度よりも十分小さいことが確認された。ただし、水素発生電位では低歪み速度法による試験において水素脆化による割れ感受性を示した。人工海水の希釈によって割れ感受性は低下する傾向が認められたが、緩衝材共存系では溶液単独系に比較して違いは明瞭ではなかった。
- ・今後は塩水環境における低酸素濃度下での長期的な腐食挙動評価の信頼性向上に向けて長期試験などのデータ拡充と、塩濃度による皮膜の形成挙動や腐食抑制・水素吸収への影響とそのメカニズム等に関する詳細な検討が課題として挙げられる。

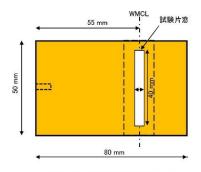
(3) 溶接部の腐食挙動

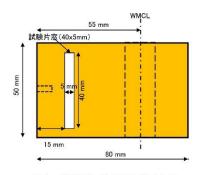
沿岸部における炭素鋼の腐食挙動に影響を及ぼす地下水中の化学成分を整理し、腐食を加速させる化学成分として、塩化物イオン(Cl·)、腐食に対して保護的に作用(不働態化)する化学成分として、重炭酸イオン(HCO₃·)を抽出した。沿岸部における地下水の組成のうち、これら2種の溶液組成が炭素鋼溶接部の腐食の均一性に与える影響を調査した。試験方法として、電気化学的手法によるスクリーニングを行った。

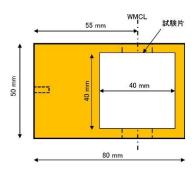
1) 試験方法

① 試験片

溶接試験体の母材は JIS G3201 SF340A とし、TIG(Tungusten Inert Gas)溶接による多層 盛溶接試験体から採取した。溶接材料は市販の溶接材料及び Ni 添加の溶接材料(原環センター, 2011)を使用し、それぞれの溶接試験体から採取した試験片は、以下、「従来材」(産総研, 原子力機構, 原環センター, 電中研, 2017)及び「改良材」(産総研, 原子力機構, 原環センター, 電中研, 2018)と呼称する。図 3.1-20 に分極試験用の試験片形状を示す。溶接試験体から切出し、湿式で 800 番まで研磨後、同電位分極試験では、母材と溶接部にそれぞれ 5×40 mm、定電位分極試験では、溶接部を中心に 40×40 mm を残してシリコン樹脂でマスキングした。







(a) 動電位分極用(溶接金属)

(b) 動電位分極用(母材)

(c) 定電位分極用

図 3.1-20 定電位分極試験用試験片

② 試験環境

試験溶液は蒸留水に NaCl と NaHCO3 を加えることで調整した。表 3.1-7 に溶液組成の組合せを示す。アノード分極曲線は脱気環境で取得するため、pH の変化を HCl や Na_2CO_3 で調整した。

溶液番号	アノード分極試験(脱気)			定電位分極試験(通気)			電位		
	NaCl	NaHCO₃	HCI	Na ₂ CO ₃	рН	NaCl	NaHCO ₃	[Cl ⁻]/[HCO ₃ ⁻]	mV_{SCE}
1	6×10 ⁻⁴	1.6×10 ⁻⁴	9.8×10 ⁻⁶		7.6	6×10 ⁻⁴	2×10 ⁻⁴	3	-150
2	6×10 ⁻⁴	2.4×10 ⁻³		4.6×10 ⁻⁵	8.9	6×10 ⁻⁴	2.5×10 ⁻³	2×10 ⁻¹	-150
3	6×10 ⁻⁴	2.0×10 ⁻²		4.2×10 ⁻³	9.5	6×10 ⁻⁴	2.5×10 ⁻²	2×10 ⁻²	-150
4	2.8×10 ⁻²	1.6×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻⁵		6.9	2.8×10 ⁻²	2×10 ⁻⁴	2×10 ²	-560
5	2.8×10 ⁻²	2.4×10 ⁻³		5.2×10 ⁻⁵	8.7	2.8×10 ⁻²	2.5×10 ⁻³	1.1×10 ¹	-560
6	2.8×10 ⁻²	2.0×10 ⁻²		4.9×10 ⁻³	9.4	2.8×10 ⁻²	2.5×10 ⁻²	1.1	-400
7	5.4×10 ⁻¹	1.6×10 ⁻⁴	8.4×10 ⁻⁶		7.0	5.4×10 ⁻¹	2×10 ⁻⁴	3×10 ³	-630
8	5.4×10 ⁻¹	2.4×10 ⁻³		8.9×10 ⁻⁵	8.4	5.4×10 ⁻¹	2.5×10 ⁻³	2.2×10 ²	-630
9	5.4×10 ⁻¹	1.9×10 ⁻²		15.2×10 ⁻³	9.0	5.4×10 ⁻¹	2.5×10 ⁻²	2.2×10 ¹	-485

表 3.1-7 腐食試験の溶液条件 (mol/L)

③ 試験方法

(a) 保持電位の設定

平成 29 年度は定電位分極の電位を自然電位より貴な -630 mV_{SCE} に固定したが、電位保持中に表面被膜の生成で自然電位が貴にシフトし、-630 mV_{SCE} ではアノード側の過電圧が維持できない状態となる溶液があった。そこで各溶液で同電位分極を行い、溶液ごとに保持電位を設定した。 N_2 で脱気した溶液を 80° に昇温し、走査速度 5 mV/min で 0 mV_{SCE} までアノード分極を行った。カソード分極は母材試験片を使用し、NaCl 濃度を固定し、NaHCO₃ を変えた溶液 No.1,2,3 で同様に取得した。得られた分極曲線から、母材と溶接部の電流密度に差が生じる条件を保持電位として設定した。

(b) 定電位分極による溶接部の選択的な腐食の再現

定電位保持試験装置の構成図を図 3.1-21、装置を図 3.1-22 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、(a)の結果から設定した電位に設定し、100 時間の定電位分極を行なった。100 時間経過 後に分極を停止し 10 分後及び 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。

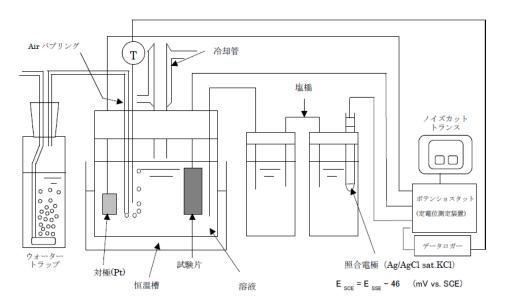


図 3.1-21 定電位保持試験装置構成

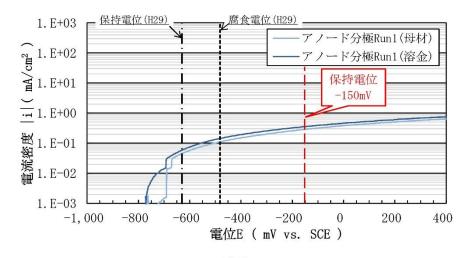


図 3.1-22 定電位保持試験装置外観写真

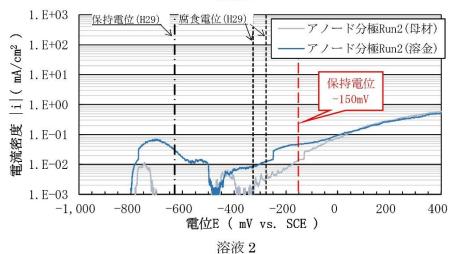
2) 試験結果

① 定電位分極の保持電位の設定

溶接部の選択的な腐食性を評価するために、母材と市販溶接材の溶接金属のアノード分極曲線から、両者の電流密度に差が生じる電位を、保持電位とするための予備試験を実施した。保持電位設定のため各溶液で取得した分極曲線を図 3.1-23 から図 3.1-25 に示す。設定した保持電位を表 3.1-7 に示す。溶液 7 と 8 は昨年度と同様の保持電位である-630 mVsce となった。



溶液1



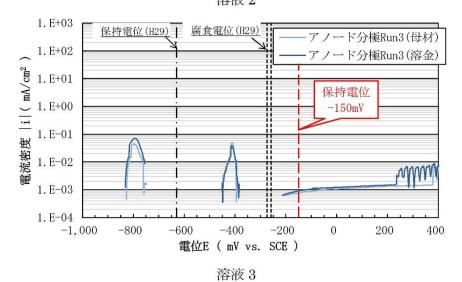
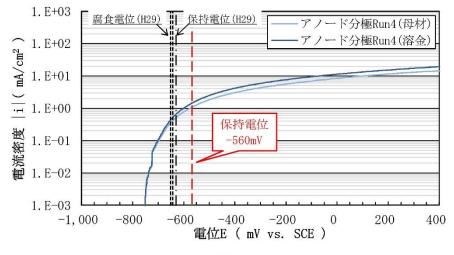
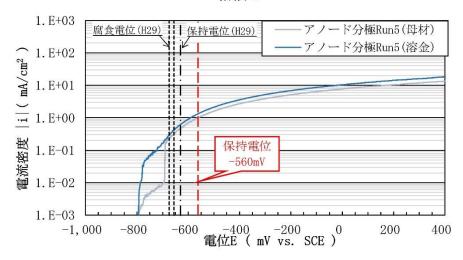


図 3.1-23 動電位分極曲線による保持電位の設定 (1/3)



溶液 4



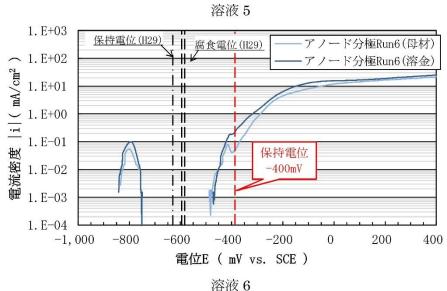
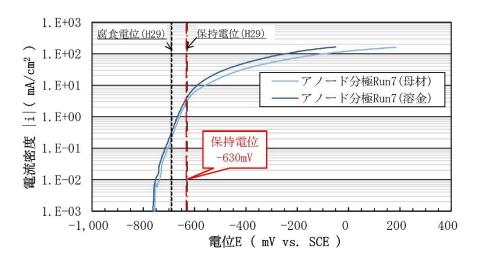
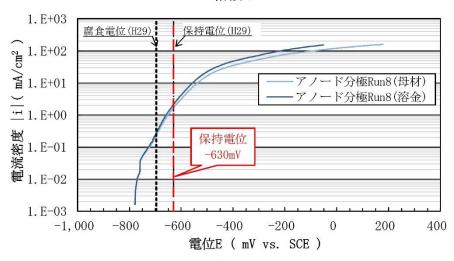


図 3.1-24 動電位分極曲線による保持電位の設定 (2/3)



溶液 7



溶液 8

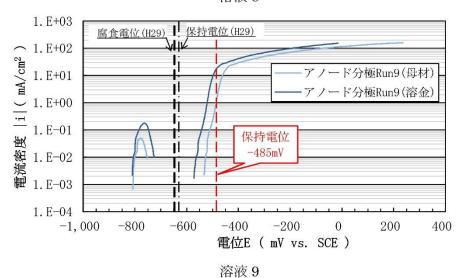


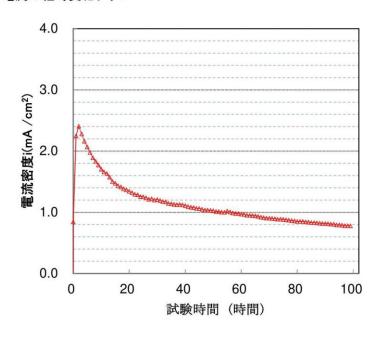
図 3.1-25 動電位分極曲線による保持電位の設定(3/3)

② 定電位分極による溶接部の選択的腐食挙動の再現

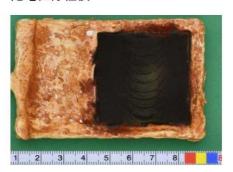
(a) 定電位分極の結果

各溶液に対して設定した保持電位にて、80℃に加温した溶液中での 100 時間の定電位分極を実施した。定電位分極中の電流の経時変化、分極後の試験片外観、並びに脱スケール後の外観一例を図 3.1-26 に示す。

電流の経時変化グラフ



定電位分極後



脱スケール後

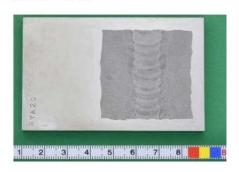


図 3.1-26 定電位分極の結果の一例(溶液 7、試験片 No.RYA20)

本年度は、前述の「① 定電位分極の保持電位の設定」にて設定した各溶液での保持電位条件にて、改良材は 2点の定電位分極試験を実施した。また、昨年度保持電位を $-630 mV_{SCE}$ で統一して実施した従来材に対しても、改良材の改善効果の基準とするため、前項目①で設定した保持電位条件での定電位分極試験を 1点ずつ実施した。改良材と従来材の定電位分極試験の結果をAppendix XI 及び Appendix XII に示す。

(b) 各溶液での挙動

改良材について、各溶液条件における試験溶液の pH の変化、定電位保持後前後の腐食電位をまとめた。

○腐食形態

試験後の試験片表面の外観観察の結果、9 種類の溶液で実施した今回の試験における腐食形態は三つの領域に分類することができる。図 3.1-27 に腐食形態と溶液組成の関係を示す。

領域 A: 母材と溶接部に全面腐食が発生する溶液条件

設定した試験溶液範囲において、HCO3:濃度が低く、Cl:濃度が高いような条件である、溶液 4、溶液 5、溶液 8、及び溶液 9では、母材、溶接部ともに全面腐食が生じた。

領域 B: 母材と溶接部で局部的な減肉が発生する溶液条件

HCO₃-濃度が高い、または Cl-濃度が低い試験溶液範囲においては、母材と溶接部の全面にわたって、局部的な減肉が発生した。

領域 C: 腐食が極端に生じない溶液条件

 HCO_3 -濃度が高く、かつ Cl-濃度が低い条件となる溶液 3 では、同電位分極曲線から設定した電位条件であるにも関わらず、顕著な減肉が確認されなかった。定電位保持の間に試験片表面が不働態化したと考えられる。

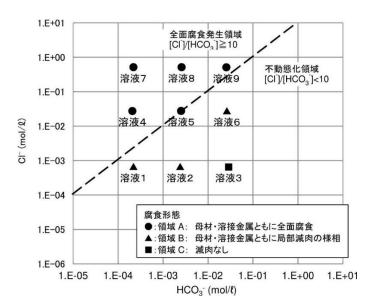


図 3.1-27 腐食形態と水質の関係

○試験溶液の pH の変化

定電位分極前後の溶液の pH を計測した。定電位分極前の空気を通気した溶液と、分極後の溶液の pH の変化を図 3.1-28 に示す。分極後の pH は、溶液中の HCO_3 -の濃度が高いほど pH の上昇が高い傾向が見られた。

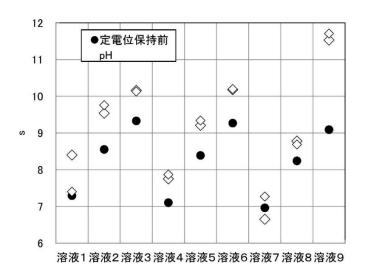


図 3.1-28 試験前後の溶液の pH 変化

○腐食電位の変化

各溶液条件の定電位分極前後の腐食電位の変化を図 3.1-29 に示す。溶液中の CI 濃度が高い、または HCO₃-濃度が低いほど、腐食電位が低下する傾向がみられた。また、図 3.1-30 で示すように定電位分極前の腐食電位が-600 mV_{SCE} よりも高くなる環境では試験片は不働態化する傾向を示し、分極後に局部的な減肉が発生した。

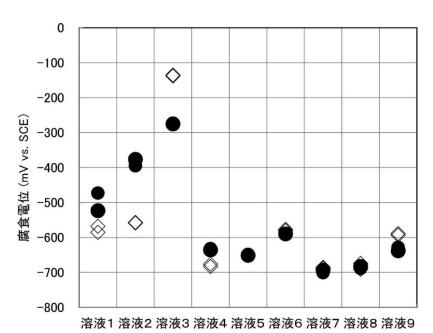


図 3.1-29 試験前後の腐食電位の変化(●:試験前、◇:試験後)

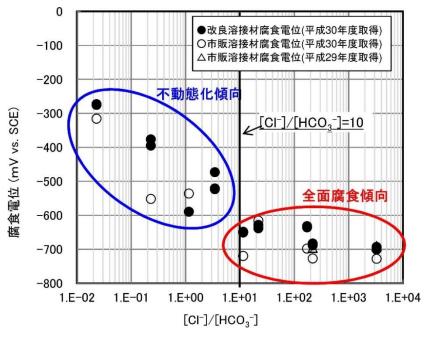


図 3.1-30 腐食電位と溶液組成の関係

③ 三次元形状計測による腐食形態の評価

定電位分極後の試験片の腐食生成物を除去した後、レーザ式三次元計測装置にて試験片表面の形状計測を実施した。計測ピッチは 250 µm とし、マスキングにより存置した初期表面部分を基準点として試験前後の減肉深さを取得した(図 3.1-31)。図 3.1-32 に改良材と従来材の形状計測結果例を示す。

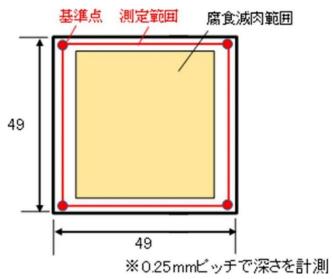


図 3.1-31 形状計測の範囲と基準点の位置

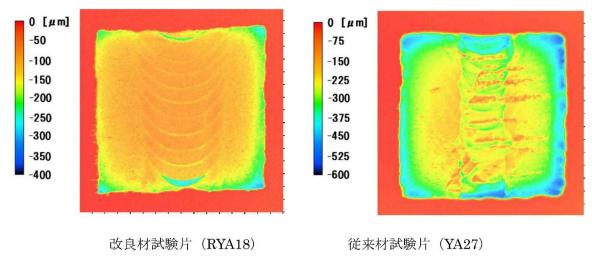


図 3.1-32 腐食試験後の三次元形状計測結果の例 (溶液 4)

④ 改良溶接材料の品質改善効果の評価

Ni を添加した改良溶接材料による溶接部の品質改善効果を評価した。前述の「③ 三次元形状計測による腐食形態の評価」で取得した試験後の減肉形状の三次元形状測定結果から、溶接部の選択腐食の程度を Grooving Factor α(=溶接部の最大深さ/全体の平均深さ)を算出し、従来材と比較した。

(a) Grooving factor の算出方法

Grooving factor αの算出手順を以下に述べる。

○手順1:

形状計測における各計測点 ($250 \, \mu m \, l^2 \nu f$) における深さを、マスキングにより保護した領域の平均深さで差し引き補正する。

 $Z_i = D_i - A$

 $Z_{\rm i}$: 計測点 iにおける深さ補正値(mm)

 $D_{
m i}$: 計測点 iにおける深さ(mm)

A : 基準点の平均深さ(mm)

○手順2:

本試験で実施した定電位分極は 100 時間である。この間の減肉量を元に、1 年間継続した場合の各測定点の腐食速度を算出する。

 $K_i = Z_i / 100(Hr) \times 365(day/year) \times 24(Hr/day)$

 $K_{\rm i}$: 測定点 iにおける腐食速度(mm/y)

○手順3:

図 3.1-33 に示すように、本試験では溶接部の断面方向の腐食深さを取得したが、実際のオーバーパックの腐食の進行方向は溶接最終層側からとなる。形状計測は 250 μ m のメッシュ間隔で実施したが、このメッシュで囲まれた立方体はどの方向からも同じ腐食速度となると仮定し、メッシュ間隔の 250 μ m の腐食に要する時間を算出した。

 $T_{\rm i} = 0.25 / K_{\rm i}$

 T_i : 計測点 iのメッシュ間隔 $0.25 \, \mathrm{mm}$ の腐食に要する時間 (year)

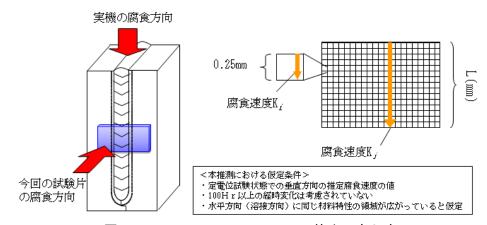


図 3.1-33 Grooving Factor α の算出の考え方

○手順4:

試験体深さ方向の各ライン全体の腐食に要する時間の積算から、各ラインの平均腐食速度を算出 した。

 $K_i = L/\Sigma T_i$

 ΣT_{i} : ライン jの腐食に要する積算時間(year)

L: ラインjの評価対象長さ(mm)

 K_i : ライン jにおける平均腐食速度(mm/year)

○手順 5:

各ラインの腐食速度 K_i から、1 年間の腐食深さを算出し、深さプロファイルを作成した。形状計測結果から求めた深さプロファイルを Appendix XIII に示す。

○手順 6:

深さプロファイルから、Grooving factor αを算出した。

 $\alpha = d_2 / d_1$

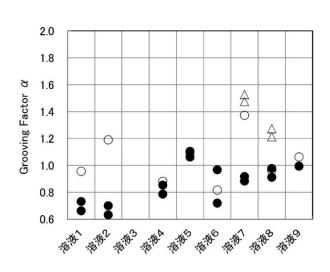
 α : Grooving factor

d: 日材部分の平均腐食深さ(mm)

d : 溶接部(溶接金属+熱影響部)の最大腐食深さ(mm)

(b) 各溶液、試験片における Grooving factor

図 3.1-34 に各溶液における従来材と改良材の Grooving factor α を示す。算出した Grooving factor α について、[Cl]と $[HCO_3$:] (腐食促進イオン Cl:の存在比率) でプロットしたものを図 3.1-35 に示す。[Cl]/ $[HCO_3$:]が 10 以上の全面腐食発生領域において、市販溶接材の α 0 は [Cl]/ $[HCO_3$:]の増加に伴い溶接部の腐食深さが深くなり α 0 が増大する傾向を示した。改良溶接材の α 1 は約1を示しており、[Cl]/ $[HCO_3$:]とともに Grooving Factor の低減幅も大きくなっている。



溶液	従来材	改良材
1	0.96	0.70, 0.63
2	1.19	0.64, 0.70
3		
4	0.88	0.78, 0.85
5	1.10	1.07, 1.10
6	0.82	0.71, 0.97
7	1.37 1.37*, 1.44*	0.92, 0.88
8	0.96 1.22*, 1.25*	0.99, 0.91
9	1.06	1.00, 0.99

※溶液 3 は腐食量がごく僅かで、αが算出出来ないためデータなし

*溶液7と溶液8については、保持電位が昨年度と同一のため参考として記載(△)

図 3.1-34 溶液組成による溶接部の選択的な腐食の度合い(○:従来材、●:改良材)

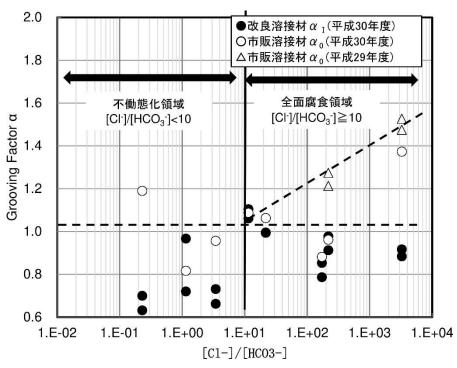


図 3.1-35 Grooving factor αと水質の関係

(c) 改良材の品質改善効果

改良材の溶接部の選択腐食の改善効果の評価を、従来材との比較により行った。従来材、改良 材それぞれの試験片から求めた Grooving factor を用いて、以下の式により求めた。

改善効果 = α_0 / α_I

 α_0 : 改良材の Grooving factor α_1 : 従来材の Grooving factor

改善効果について、[Cl-]と $[HCO_3$ -]の比率でまとめたものを図 3.1-36 に示す。[Cl-]/ $[HCO_3$ -]が 10 以上の全面腐食発生領域において、 α_0 / α_I が 1 より大きくなる傾向が認められた。この領域では図 3.1-35 に示すように[Cl-]/ $[HCO_3$ -]が大きくなるに従い従来材の α_0 は増大するが、改良材の α_I は 1 以下で推移するためである。これは、炭素鋼の腐食に対し加速する効果を有する Cl-が有意に作用する領域では、溶接部の選択的な腐食に対する Ni 添加の改良材の品質改善の効果が顕著になることを意味する。

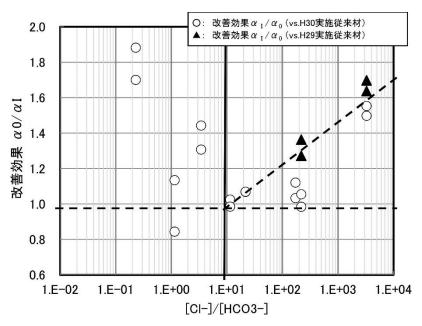


図 3.1-36 Grooving factor αと溶液組成の関係

3) まとめ

沿岸海底下の環境における炭素鋼の腐食挙動に影響を与える重要な化学種として Clと HCO_{3} で抽出した。それぞれの濃度をパラメータ—として[Cl-]= 6.0×10^{-4} - 5.4×10^{-1} mol/L、 $[HCO_{3}]$ = 2.0×10^{-4} - 2.5×10^{-2} mol/L の範囲で 9 つの溶液を設定し、化学種の濃度比率が溶接部の腐食挙動に与える影響を調査した。また、溶接部の選択的な腐食に対する改善手法の適用範囲を確認するため、従来溶接材料、Ni 添加の改良溶接材で製作した溶接試験体を使用した。

・溶液組成の影響

溶液ごとに設置した保持電位にて 100 時間の定電位分極を実施し、溶液組成に対する溶接部の腐食形態を調査した。 $[Cl\cdot]/[HCO_3\cdot] \ge 10$ では、母材・溶接部ともに全面腐食、 $[Cl\cdot]/[HCO_3\cdot] \le 10$ では不働態化する傾向を示した。また不働態化する場合、 $[Cl\cdot]/[HCO_3\cdot] \ge 0.2$ では母材・溶接部ともに局部的な減肉が発生し、 HCO_3 ・濃度が高く Cl・濃度が低い $[Cl\cdot]/[HCO_3\cdot] < 0.02$ (溶液 3) の環境では、設定した保持電位では減肉が認められなかった。

・溶接部の選択的な腐食の程度

溶接部の選択的な腐食の程度を評価する指標として、Grooving factor α を用いた。各溶液条件での定電位分極試験後の三次元形状計測結果から求めた深さプロファイルより α を算出した。母材の腐食深さを基準とした場合、 $\alpha \le 1$ で溶接部の耐食性が母材と同等以上と評価される。従来材の α 0 は溶液組成に因るが α 0.8 - 1.4 となった。一方、改良材の α 1 は溶液組成に因るが α 0.6 - 1.1 となった。

・改良材の改善効果

改良材の α_I と従来材の α_0 を比較し、改良材の改善効果を評価した。減肉が認められなかった溶液 3 を除き、 α_I が α_0 を下回る傾向が確認されたことから、本試験で設定した溶液の範囲においても N_i 添加による選択腐食の改善手法は有効であると言える。

参考文献

- 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 報告書(第2分冊) 人工バリア品質評価技術の開発(1/2),2010.
- 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2, JNC TN1400-99-022, 1999.
- 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, pp.212-216, 2011.
- Mitsui, H., Takahashi, R., Asano, H., Taniguchi, N. and Yui, M., Susceptibility to Stress Corrosion Cracking for Low-Carbon Steel Welds in Carbonate-Bicarbonate Solution, Corrosion, Vol.64, pp.939-948, 2008.
- 南雲道彦, 破壊現象における水素の機能, まてりあ, vol.50, pp.205-211, 2011.
- Okada, H., 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, 1977.
- 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.
- 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,2018.
- 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, pp.418-429, 2010a.
- 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, 2010b
- 漆原亘, 湯瀬文雄, 中山武典, 並村裕一, 茨木信彦, SSRT による高強度鋼の遅れ破壊評価, 神戸製鋼技報, vol.52, pp.57-61, 2002.
- Wieland, E., Wanner, H., Albinsson, Y., Wersin, P. and Karland, O., A Surface Chemical Model of the Bentonite-Water Interface and its Implications for Modelling the Near Field Chemistry in a Repository for Spent Fuel, SKB Technical Report 94-26, 1994.

3.1.2 緩衝材

(1) 背景と目的

これまでに緩衝材の性能や特性に関する多くの検討がなされ、知見やデータの蓄積が進められている。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、浸食試験などが実施されている (菊池・棚井, 2005; 松本・棚井, 2004, 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 Camclay モデル (Roscoe et al., 1963) や修正 Camclay モデル (Roscoe et al., 1968) などが候補として考えられるが、塩水環境下での圧密非排水三軸試験データを拡充することで、塩水環境下でのこれらのモデルのパラメータを設定することが可能となる。

本研究では、塩水を使用した圧密非排水三軸試験を実施し、塩水環境下における緩衝材のせん 断特性に関する試験データを拡充した。平成 29 年度は、ASTM D1141 に準拠した人工海水を用 いた三軸試験を実施した。今年度は、人工海水に対するデータの拡充を行うとともに、NaCl 溶 液 (イオン強度: 0.2 mol/l, 0.8 mol/l) を用いた圧密非排水三軸試験を実施する。さらに、昨年 度設定した弾塑性パラメータ(産総研、原子力機構、原環センター、電中研、2018)を用いて試験 結果の再現解析を実施し、設定したパラメータの適用性を確認する。

一方、これまでに実施された緩衝材の再冠水過程における現象の把握においては、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溶液及びCaCl₂溶液を用いた試験を行い、緩衝材の挙動の把握を行ってきた。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が異なっていたが、緩衝材の性能を発揮できなくなるほどの差が生じることはない、という結果を得ている。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は確認されていない。

そのため本研究では、これまでの知見やデータを踏まえた塩水環境を考慮し、人工海水、各種溶存イオン、イオン強度など、沿岸部における地層処分環境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供に、緩衝材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

今年度は、人工海水(表 3.18)に対するデータの拡充を行うとともに、NaCl 溶液(イオン強度: 0.2 mol/l、0.8 mol/l)を用いた圧密非排水三軸試験を実施した。さらに、昨年度設定した弾塑性パラメータ(産総研、原子力機構、原環センター、電中研、2018)を用いて試験結果の再現解析を実施し、設定したパラメータの適用性を確認した。

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 3.1-37)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・棚井, 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及び 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ヵ月以上かけて加圧給水し、供試体を飽和させる。
- 3. 飽和セルから供試体を取り出し、寸法及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載荷し、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載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 % 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及び観察する。
- 14. 恒温槽で乾燥させ、乾燥重量を測定する。

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 $1.6~{\rm Mg/m^3}$ とした。拘束圧は、1.0、2.0、 $3.0~{\rm MPa}$ の 3 ケースとした。

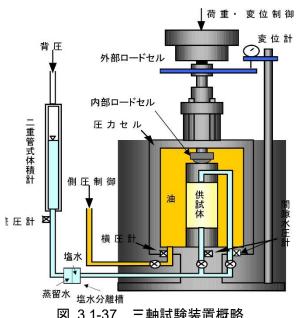


図 3.1-37 三軸試験装置概略

ベントナイト系材料 クニゲル 🗸 1 混合材料 3号ケイ砂、5号ケイ砂 乾燥密度(Mg/m³) 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 人工海水 NaCl(0.2 mol/l) NaCl(0.8 mol/l) 有効拘束圧 (MPa) 2.0 3.0 3.0 3.0 試験ケース No.1 No.2 No.3 No.4

表 3.1-9 試験条件

2) 圧密非排水三軸試験結果

圧密開始前のB値測定結果を表 3.1-10 に、せん断開始前のB値測定結果を表 3.1-11 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、せん断を実施した。

図 3.1-38 に有効応力経路図を示す。有効応力経路図には、蒸留水を用いた場合の限界状態線 (限界応力比: 0.63)、蒸留水(高治・鈴木, 1999) や幌延地下水(高治ほか, 2004) のデータ、 昨年度取得したデータも示しているが、塩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。

図 3.1-39 にせん断過程における応力-ひずみ関係を示す。蒸留水(高治・鈴木、1999) や幌延 地下水(高治ほか,2004)のデータ、昨年度取得したデータも示している。軸差応力と軸ひずみ 関係は、試験溶液条件によって明確な違いは見られないことがわかる。

表 3.1-10 圧密前B値計測結果							
試験ケース No.1 No.2 No.3 No.3							
B値(上部)	1.00	1.07	1.01	0.99			
B値(下部)	1.00	1.04	1.04	0.99			

表 3.1-11 圧密後 B 値計測結果

試験ケース	No.1	No.2	No.3	No.4
B値(上部)	0.97	0.98	0.95	0.95
B値(下部)	0.96	0.99	0.98	0.98

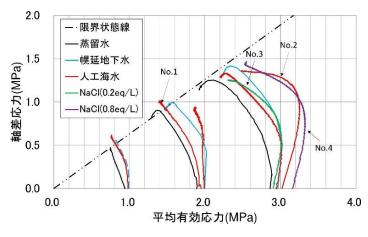
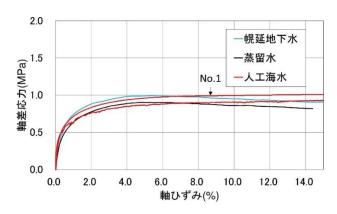
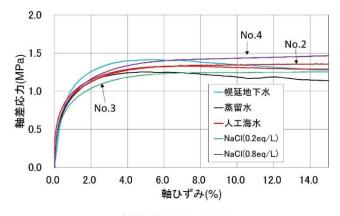


図 3.1-38 有効応力経路



(a)初期拘束圧 2MPa



(b)初期拘束圧 3MPa

図 3.1-39 応力-ひずみ関係

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

昨年度設定した修正カムクレイモデルのパラメータ(産総研、原子力機構、原環センター、電中研、2018)を表 3.1-12 示す。本年度は、表 3.1-12 に示したパラメータを用いて、圧密非排水三軸試験の再現解析を実施した。図 3.1-40 に有効応力経路の再現解析結果、図 3.1-41 に応力-ひずみ関係の再現解析結果を示す。いずれのケースも概ね実験データを再現できていることがわかる。しかしながら、NaCl (0.8 mol/l) の有効応力経路については、他のケースと比較して再現性が低いことがわかる。NaCl (0.8 mol/l) の有効応力経路の試験結果は、軸差応力の増加に伴い、平均有効応力が一度大きく増加している。一般的に、正規圧密状態でせん断応力が働くと、ダイレイタンシー特性によって体積減少を起こそうとするため、過剰間隙水圧が発生し、有効応力は減少する。平均有効応力が一度大きく増加した原因として、供試体が完全に飽和していなかった可能性が考えられる。ベントナイトは難透水性であるため、完全に飽和させることは難しく、供試体内部に封入された空気の影響により、せん断中の過剰間隙水圧の発生量が小さくなった可能性がある。そのため、今後は、供試体の飽和させるための期間をより長期に設定するなどによる試験データの拡充が必要である。

X on it is an individual control of							
	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 <i>c</i> (eq/L)	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v	0.1						
圧密降伏応力 <i>p</i> ₀(MPa)	$p_0=\exp((0.62-e_i-\kappa \ln p_i)/(\lambda-\kappa))$						
	p';:初期平均有効応力(=膨潤圧)						

表 3.1-12 昨年度した修正 Cam-clay モデルのパラメータ

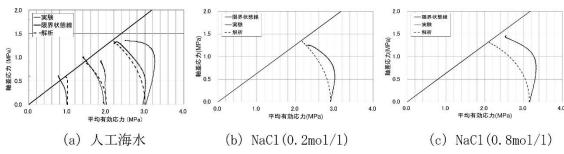


図 3.1-40 有効応力経路の再現解析結果

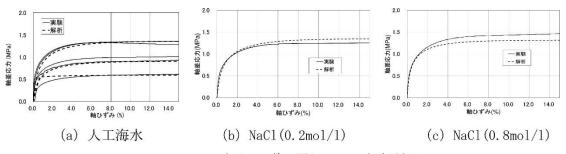


図 3.1-41 応力-ひずみ関係の再現解析結果

4) まとめ

本検討では人工海水に対するデータの拡充を行うとともに、NaCl溶液(イオン強度:0.2 mol/l、0.8 mol/l) を用いた圧密非排水三軸試験を実施した。その結果、塩水条件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。さらに、昨年度設定した弾塑性パラメータを用いて試験結果の再現解析を実施し、設定したパラメータの適用性を確認した。概ね試験結果を再現できることを確認したが、一部再現性が低くなるケースもみられた。供試体内部に封入された空気の影響により、せん断中の過剰間隙水圧の発生量が小さくなった可能性が考えられるため、供試体の飽和させるための期間をより長期に設定するなどによる試験データの拡充を行う必要がある。また、より塩濃度の高い条件や低乾燥密度・高乾燥密度条件での試験データや、弾塑性パラメータのイオン種依存性を検討するための試験データも取得していくことで、実際のサイトの地質環境条件などをより適切に反映した処分施設の力学的な状態変遷の評価が可能となってくると考えられる。

(3) 再冠水時の緩衝材の挙動

1) 試験計画

本研究では、既往の研究成果を活用しながら拡充すべき知見やデータの取得に取り組んできた。 既往の研究(原環センター、2015、2016 など)では、主に塩を含まない水(蒸留水)を用いて実施してきた研究成果をベースとして、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関する知見が得られている。また、本事業の初年度に、沿岸部特有の条件を念頭に置いた場合に拡充すべき知見やデータが、人工バリアシステムを含むニアフィールド構成材料ごとに抽出・整理されている(産総研、原子力機構、原環センター、電中研、2016)。これらの成果や整理結果から、緩衝材については、海水濃度、イオン強度、さらにはイオン種が膨潤挙動及び流出挙動に及ぼす影響(変質影響)に関する知見やデータの拡充が必要と考えられた。

これらの既往の研究成果(原環センター, 2015)を踏まえて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の必要性及び対応状況の整理結果を表 3.1-13 に示す。本研究においては、緩衝材の再冠水過程における浸潤過程、密度分布の変化に対する、塩水系地下水の影響を把握することを目的としており、人工海水を主に、海水に含まれる各主要イオンを対象とした試験を行うこととした。既往の研究成果も含め、本検討は、再冠水過程及び再冠水後の緩衝材内の密度分布を予測するための解析の検証データとして、適用することを目的としている。本フェーズにおける実施の可否に関しては、緩衝材の性能に対する地下水組成が及ぼす影響の大きさ及び試験に要する時間、先行実施することで後続する試験に有用な情報を与えられるなどを総合的に考えて判断した。

表 3.1-13 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

性能・ 影響事象	評価対象	影響因子	響因子 既往の研究における知見、緩 衝材の性能に対する影響度		沿岸部での性能評価に向けた データの追加・拡充の必要性 ^{※※}			
彩音争 条			個例の注記に対する影響度	NaCl*	CaCl ₂ *	海水系	イオン種	
		施工品質 (密度分布)	液種によって残留 密度差が 大きくなる 。	既*	Ca 型 要検討	0	Δ	
	残留密度 分布	応力履歴	密度差が発生するが、履歴の 差は 小さい	既*	Ca 型 要検討	Δ		
膨潤 性能		二次元 浸潤試験	液種によって 残留密度差が 大きくなる	既*	_	0	Δ	
	膨潤圧・ 透水係数	陽イオン 交換・可逆性	膨潤圧に差が生じるが透水 係数への 影響は小さい	Δ	既*	Δ	Δ	
	浸潤速度	地下水組成	液種により飽和度分布の幅 が 異なる	既*	0	0	_	
			種により浸潤速度が 異なる					
流出 挙動	緩衝材 流出量	小規模試験	液種により流出量、水みちの 形状が 異なる	既*	既*	0	0	
		人工注水 効果	イオン強度が高いと効果が 低い 。	既*	既*	幌延 地下水	_	

*:イオン強度 0.5

**既:既往のデータあり。○:本フェーズで実施したもの。 △:本フェーズの結果を踏まえて今後実施することが望ましい項目

2) 使用材料

本研究で使用する緩衝材(試験試料)は、既往の研究成果(原環センター, 2016 など)と比較するため、既往の研究と同じ材料と配合とした。ベントナイトは、山形産 Na 型ベントナイト(クニゲル V1)を用い、3 号ケイ砂と 5 号ケイ砂と合わせて乾燥質量比 7:1.5:1.5 で混合して緩衝材の材料とした。

試験に使用する水は、人工海水をベースとし、さらに既往の研究成果(原環センター, 2016 など)と本研究の成果が互いに補完し、包括的な知見を得ることができるようにするために、イオン種は Na, Ca に加えて、Mg と K を対象とし、その濃度はイオン強度 0.5 に固定することとした。試験に用いた液種を表 3.1-14 に示す。また、試験に用いた人工海水 ASTM D1141 の組成を表 3.1-15 に示す。この組成を目標値として、塩を溶解して溶液を作成した。

表 3.1-14 使用した液種

液種	組成	イオン強度
Ca 溶液	CaCl ₂ 水溶液	0.50 程度
Mg 溶液	MgCl₂水溶液	0.50 程度
K 溶液	KCI 水溶液	0.50 程度
人工海水	ASTM D1141 に準拠	0.50 程度
1/2 人工海水	ASTM D1141 の 1/2	0.25 程度

表 3.1-15 ASTM D1141 人工海水の組成

イオン種	濃度 (ppm)	
塩化物イオン	Cl ⁻	19,841
硫酸イオン	SO ₄ ²⁻	2,769
炭酸水素イオン	HCO ₃ -	146
ふっ化物イオン	F ⁻	1.36
臭化物イオン	Br ⁻	67.1
ほう酸イオン	BO ₃ -	25.7
ナトリウムイオン	Na ⁺	11,033
カリウムイオン	K ⁺	397
カルシウムイオン	Ca ²⁻	418
マグネシウムイオン	Mg ²⁻	1,328
ストロンチウムイオン	Sr ²⁺	13.8
水素イオン指数	рН	7.79~8.61

3) 地下水浸潤速度および透水係数の取得に関する試験

閉鎖後の処分施設への地下水の浸潤と並行して、処分孔では緩衝材への浸潤に伴う力学変化や化学変質などの複数の事象が同時に発生することになる。このようなプロセスへの理解を深めるうえで、地下水が緩衝材に浸潤する速度を把握することは重要である。そのため、地下水の浸潤速度に対する沿岸部を想定した液種の影響を把握するための試験を行った。これまでには NaCl 水溶液でイオン強度の影響のみを検討されてきたが、人工海水、CaCl2 水溶液を用いて、イオン種の影響を加味した浸潤挙動の把握することとし、一次元及び二次元と見なせる試験方法を用いた。また、浸潤速度の取得と共に、透水係数も計測する試験も行うこととした。

① 試験方法

浸潤が上端まで達するまで試験を行って、透水係数を取得するために、既往の研究結果(原環センター, 2016 など)を基に要する時間を予測し、供試体高さを $300~\rm mm$ とした。図 $3.1-42~\rm k$ 試験装置を示す。

試験ケースを表 3.1-16 に示す。試験開始初期はセルと供試体の界面の破過を避けるために、フローポンプを用いて流量制御で送水し、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した。試験中には比抵抗値の変化、膨潤圧を計測した。測定した比抵抗値により、緩衝材の飽和度を算出した(産総研,原子力機構,原環センター,電中研、2018)。1ケースだけ、通水圧を大きめ(最大 1 MPa 程度)に設定し、通水圧の大きさが浸潤挙動に及ぼす影響の把握も行った。また、上部からの排水が確認された場合、排水のイオン分析や透水係数の取得を行った。

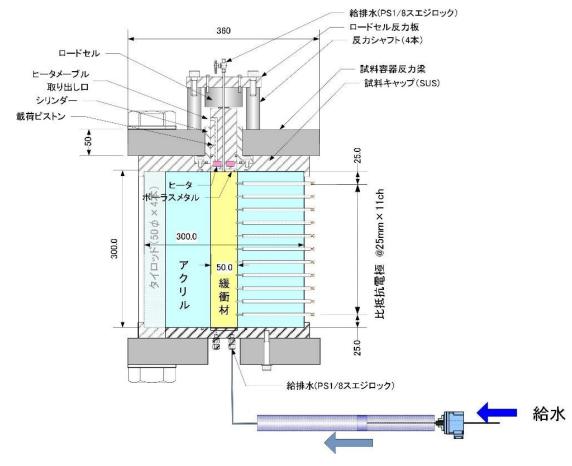


図 3.1-42 一次元浸潤速度試験装置概略図

 液種
 供試体
 試験条件
 備考

 Ca 溶液
 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
 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。

表 3.1-16 浸潤速度取得試験ケース一覧

② 試験結果

初期にはどのケースでも 0.0001 cc/min で給水を行ったが、通水圧は、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。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ほぼゼロ(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 $7~\mathrm{kPa}$)とした。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た。

図 3.1-43 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。人工海水の高圧と低圧のケースを比較すると、200 kPa に通水圧を増加させる前の 88 日後ま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。

人工海水の低圧ケースは、280 日程度で飽和フロントが供試体の上面まで達した。一方、人工海水の高圧ケースでは、通水圧を段階的に 200 kPa まで増加させた(「グラフ中に圧力制御に移行」として示した)ため、流量が増加し、192 日目で飽和フロントが供試体の上面まで達した。さらに、Ca 溶液の場合、人工海水の低圧ケースと通水圧の条件は同様であるが、飽和フロントが供試体の上面に達するのに 418 日を要した。このことにより、Na 型ベントナイトを用いた場合、Na が主成分である人工海水の方が Ca 溶液よりも浸潤速度が大きいことが分かった。

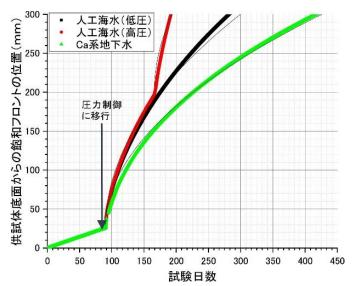


図 3.1-43 液種の違いによる飽和フロントの経時変化の差異

図 3.1-44 には、比抵抗値から求めた飽和度(産総研,原子力機構,原環センター,電中研,2018)が 1%増加した場所(Sr>=40)を浸潤フロント、飽和度が 95 %に到達した場所(Sr>=95)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。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式 3.1-1 及び式 3.1-2 に基づいたパラメーターフィッティングによって取得した。各ケースのフィッティング係数を既往の結果と一緒にまとめると、表 3.1-17 のようになる。表から、概ね給水時間の平方根に比例する結果となっていることがわかる。この結果は、浸潤フロント位置 D(mm)が通水時間 T(day)の平方根に比例するという毛細管現象による水の拡散速度の理論式である Washburn 式と整合する。人工海水の高水圧のケースにおいては、飽和フロントは通水圧力の大きさに依存して進展速度が速まる結果となった。

$$D_p = aT^b$$
 (式 3.1-1)

$$D_s = cT^d$$
 (式 3.1-2)

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、T (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。

また、排水が確認されたケースについては定水位透水試験に移行した。図 3.1·45 に各ケースの透水係数の経時変化を示す。人工海水の低圧のケースは、透水係数が未だ定常には至っていな

いが、 8.00×10^{-11} - 1.16×10^{-10} m/s 程度を推移していることが分かる。一方、高水圧のケースでは、透水係数も概ね定常になっており、 5.00×10^{-11} m/s 程度であった。JAEA の緩衝材データベース(原子力機構, 2013)によると供試体(寸法は異なる)の透水係数が 1.39×10^{-11} (m/s)であったことから、データベースと概ね整合した結果が得られている。 $CaCl_2$ 水溶液の場合は、排水が確認されなかったため、給水量から算出した飽和フロントを用いて動水勾配を規定して透水係数を取得した。図 3.1-45 から、透水係数は 3.00×10^{-10} - 6.00×10^{-10} m/s であり、他のケースに比べて天きいことが分かる。また、浸潤フロントや飽和フロントの進展は他のケースに比べて遅いという結果であった。この結果は、浸潤フロントに関しては、イオン交換によって Ca がモンモリロナイトの層間(内間隙)に取り込まれることによってうち間隙が狭まり、モンモリロナイトの粒子間の間隙(外間隙)が広がり、連通したため、毛細管現象による浸潤が遅くなったものと解釈できる。

以上のように、人工海水によってと $CaCl_2$ 水溶液によって、浸潤速度と透水係数を計測した結果、浸潤は、イオン強度のみでは説明できず、浸潤する水に含まれるイオン種によって影響を受けることが明らかとなった。イオン種の影響としては、価数が一価かニ価か、という差による影響が考えられるが、イオン交換反応が浸潤の進展と同時に進行していることが考えられる。価数が一価かニ価か、という差による層間距離の変化の影響が考えられるが、同時にイオン交換の選択性も考えなければならない。塩水系の地下水を対象として浸潤プロセスを考慮した、再冠水後の緩衝材を予測するためには、イオン交換選択性を含めたイオン種による影響について検討する必要があると考えられる。

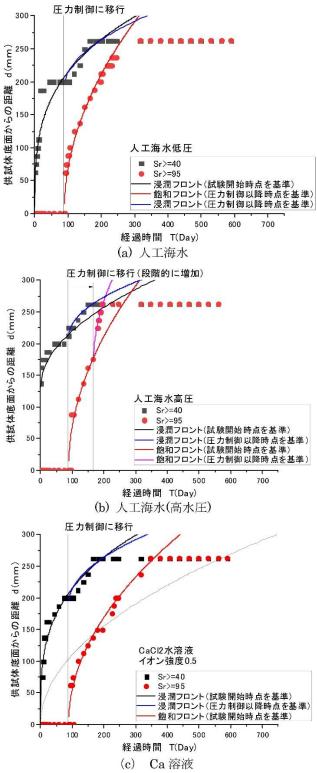
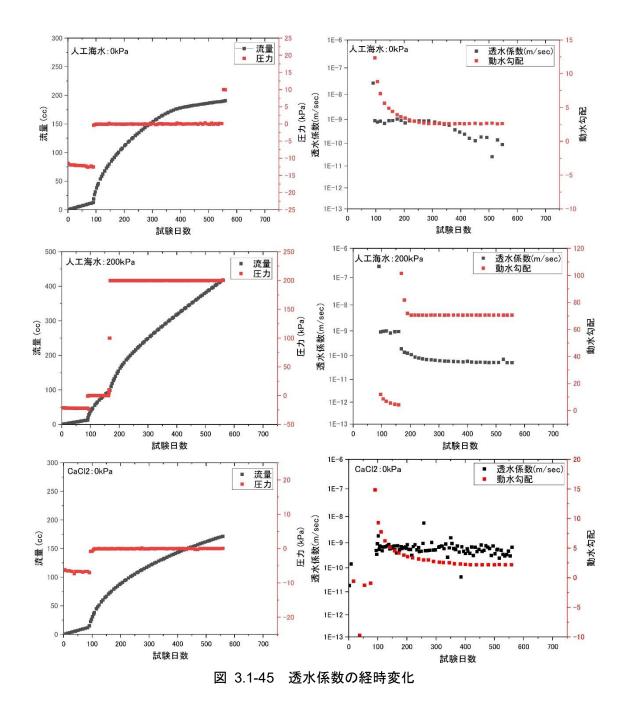


図 3.1-44 浸潤・飽和フロントの経時変化

表 3.1-17 浸潤速度測定試験結果のまとめ

		7+5	2±5.		浸潤フロント		飽和フロント	
実施	ベントナイト	液種	イオン 強度	通水圧	係数	係数	係数	係数
			迅及		а	b	С	d
既往の研究		蒸留水	0	60kPa	60	0.35	4.5	0.5
(原環センター, 2016)		NaCl	0.5 程度	7kPa	14	0.5	10.5	0.5
Na 型ベントナ イト(ケイ砂 30wt%含有)		CaCl ₂	0.5 程度	7kPa	54 7	0.3 0.5	16	0.5
	人工海 水	0.5 程度	7kPa	54 7	0.3 0.5	20	0.5	
		人工海水 (高水圧)	0.5 程度	0.2MPa	9 6	0.5	20 17	0.5



4) 密度均質化試験

緩衝材に求められる要求性能は、緩衝材の乾燥密度が管理パラメータとして用いることができる(原環機構, 2018)。実際の施工においては、目標とする初期乾燥密度に対して、施工に起因する密度の分布があることが想定され、緩衝材が吸水、膨潤して密度が均質化することによって、分布が解消されると考えられている。均質化によって所定の要求性能が満たされるためには、均質化の程度の把握が必要であり、その均質化の幅を踏まえた、施工時に許容される密度分布の範囲を示す必要性がある。緩衝材の均質化は、間隙水のイオン強度の影響を受けることがこれまでの試験でも示されている(原環センター, 2015)が、イオン強度のみでその影響を評価することが妥当であるかどうかの確認が必要である。そのため、人工海水を使用して、密度均質化挙動を把握するための試験を行った。

① 試験方法

本研究では、図 3.1-46 に示すような直列膨潤量試験装置を用いて液種による残留密度分布への影響に関するデータを取得する。この直列膨潤量試験は、既往の研究において(原環センター、2016 など)開発されたものであり、高乾燥密度($2.0\,\mathrm{Mg/m^3}$)の供試体と低乾燥密度($1.2\,\mathrm{Mg/m^3}$)の供試体をセットした二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、上下の供試体にそれぞれ試験体の上部・底部から給水することによって膨潤させ、膨潤量を測定及び膨潤圧を測定した。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。この計測により、膨潤の進行を把握し、定常状態に達しているか否かを確認しながら、試験を行うことができる。液種は人工海水と人工海水の半分のイオン強度としたもの(以下、 $1/2\,\mathrm{人工海水}$ 」という)の $2\,\mathrm{面}$ りを用いる。

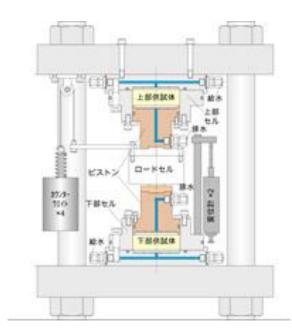


図 3.1-46 直列膨潤量試験装置による密度分布均質化試験のイメージ

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。

② 試験結果

図 3.1-47 に、直列膨潤量試験中の膨潤圧の経時変化を示す。図から、人工海水の膨潤圧の方が 1/2 人工海水に比べ小さいことが分かる。これは、イオン強度の影響で膨潤圧が低下したためで あると考えられる。なお、直列膨潤圧試験中に計測される膨潤圧は、二つの供試体のうち、膨潤 圧が小さい方の供試体の膨潤圧を示しているため、膨潤圧は、乾燥密度 1.2 Mg/m³の膨潤圧の経 時変化として捉えることができる。

図 3.1-48 には、直列膨潤量試験中のピストンの変化量の経時変化を示している。図から、人工海水の方が 1/2 人工海水のケースに比べ膨潤量が小さいことが分かる。

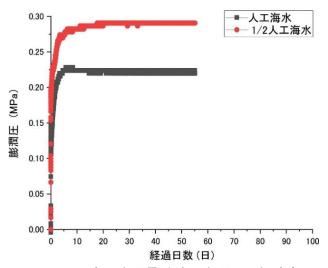


図 3.1-47 直列膨潤量試験の膨潤圧の経時変化

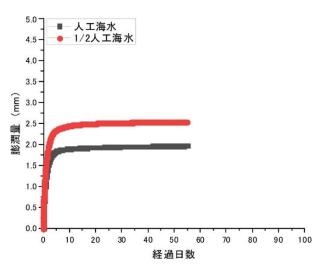


図 3.1-48 直列膨潤量試験の膨潤量の経時変化

図 3.1-49には、既往の研究(原環センター, 2018)における蒸留水とイオン強度 0.5の NaCl 水溶液を用いて実施した乾燥密度 2.0 Mg/m³ と乾燥密度 1.2 Mg/m³ の直列膨潤量試験結果との比較を示す。図から、イオン強度が小さいほど、残留密度差が小さくなる傾向があることが分かる。また、イオン強度が小さいほど、膨潤量が定常になるのに要する時間は長くなる傾向があることも分かる。これは、イオン強度が大きくなると層間距離(内間隙)が縮まり、粒子間の間隙(外間隙)が大きくなることにより、間隙水の移動が容易になるためだと考えられる。

図 3.1-50 には、図 3.1-45 に示した人工海水とイオン強度 0.5 の CaCl2 水溶液を用いて実施した一次元浸潤試験で取得した透水係数の経時変化を示す。図には、試験最終日の透水係数の計測値の平均値も示している。ここで、Kozeny-Carman 則(透水係数と乾燥密度の関係)の比表面積を変化させて、この平均値を通るようにフィッティングしたものを図 3.1-51 に示す。この図に、本試験で実施した人工海水の直列膨潤量試験の試験開始時の乾燥密度と膨潤後の乾燥密度を併せて示す。緩衝材が満足すべき止水性能を、透水係数を指標として決める場合には、残留密度差を把握することによって透水係数と乾燥密度の関係から透水係数のバラつきの範囲を示すことができる。この残留密度差は、イオン強度が大きく、二価のイオン種が含まれる地下水環境下では大きくなることが本検討によって明らかとなった。残留密度差が大きくなることから、施工時に許容される緩衝材の密度分布を小さくする必要があるため、施工の管理は塩水環境の方が厳しくなる。施工の管理値を決定するためには、再冠水後の緩衝材内の密度分布を予測する力学解析手法が必要となるが、解析手法の構築のための検証データとして、本試験は適用できると考えられる。実際の塩水環境下での施工には、巻き出し厚を小さくすることや所定の乾燥密度を満足する範囲で施工時の含水比を最適含水比よりも高めに設定するなど、より品質(密度)を高くする施工が要求される。

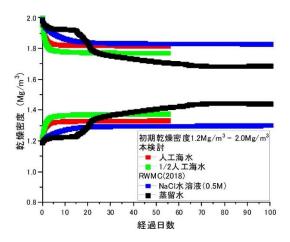


図 3.1-49 直列膨潤量試験の乾燥密度の経時変化の既往の研究 (原環センター, 2018) との比較

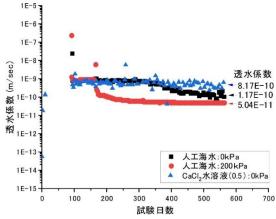


図 3.1-50 一次元浸潤試験で得られた透水係数の経時変化

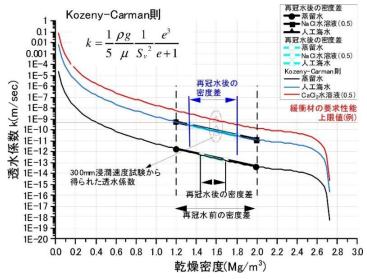


図 3.1-51 直列膨潤量試験から得られた残留乾燥密度分布による透水係数範囲

5) 二次元土槽試験による浸潤・膨潤挙動に関する試験

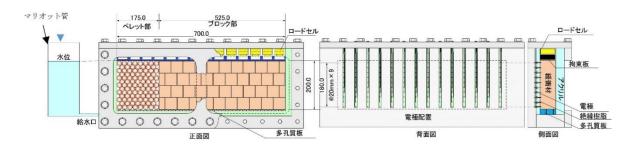
① 試験方法

既往の研究(原環センター, 2015)において、再冠水前の定置後の緩衝材に存在する、施工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の評価を目的として、図 3.1-52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が均一化する過程の調査を行った。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。

本研究では、緩衝材の施工法として検討されているもののうち、既往の研究で蒸留水と NaCl 水溶液を用いて検討されたブロック定置 - 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均質化に及ぼす影響を同様の試験装置を用いて把握する試験を実施した。

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。浸潤状況は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。飽和度は比抵抗との関係式(産総研,原子力機構,原環センター,電中研,2018)より算出した。

供給する液相として人工海水を用い、ブロック定置 - ペレット充填併用ケースの均質化挙動を 検討した。



(a) 正面図 (b) 背面図 図 3.1-52 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)

② 試験結果

試験開始から平成 29 年度までに、ブロック及びペレット充填部の間隙容積に相当する量の給水を行い、比抵抗値から算出した飽和度が 100 %に達した(産総研,原子力機構,原環センター,電中研,2018)ことを確認している。図 3.1-53 に昨年度得られた浸潤状況の変化を示す。

浸潤・膨潤過程の経過を順に追っていくと、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様子が観察された。このような状況は時間の経過とともに進展し、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、その後は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た。 1 日後には、ブロック部の底面と側面に人工海水が浸潤し、上面を除く全周から浸潤が進行した。50 日目には供試体が全体的にほぼ飽和している状態となるが、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存していることが観察された。浸潤面よりも上側にあるペレットは膨潤せずに残っていた。比抵抗値の分布から算出した飽和度分布は、写真に示した浸潤状況の経時変化と浸潤の進行の傾向と整合していたが、より高い飽和度を示す傾向があった。これは、比抵抗値と含水率の関係が、含水率の高い範囲では相関が低い(産総研、原子力機構、原環センター、電中研、2018)ため、飽和度の高い範囲での精度が低かったためであると考えられる。

今年度は供試体を解体し、含水率、密度分布の計測を行った。鉛直方向に3段面(水平断面)、水平方向に4段面(鉛直断面)の乾燥密度分布、飽和度分布が得られるように解体を行った。ブロック部の解体時には膨潤によって正方形で作られたブロックが一体化していることが分かった。供試体上端面は、ペレット充填部のペレットが膨潤せずに原形を保っていたが、少し表面部分を取り除くと、一体化していることが確認できた。図3.1·54には、解体時の乾燥密度分布を下段、中段、上段で水平断面にしたものを示す。図から、ペレット充填部の乾燥密度が小さく、ブロック部の乾燥密度が高いことが分かる。また、ペレット充填部とブロック部との境界は、ブロック部がペレット充填部側に膨潤し、乾燥密度差が小さくなっていることが確認できた。さらに、ブロック部では、土槽との境界付近の乾燥密度が低下していたが中心部は初期の乾燥密度が維持されていた。このため、ブロック部は土槽との界面が中心部より膨潤し易かったため、不均一に膨潤が起こったと考えられる。

本試験によって、土槽との界面近傍では均質化する傾向がみられるものの、人工海水のイオン強度の影響によって緩衝材の膨潤挙動が抑制され、ブロック部が膨潤してペレット充填部を圧縮するという挙動も抑制されることから、試験開始時の乾燥密度分布の残留が大きいことが分かった。ここで得られた膨潤に対する塩水系地下水の影響は、前述の「4)密度均質化試験」で示した密度均質化試験と同様に、塩水環境下での再冠水後の密度分布を予測するための解析手法の二次元の検証データとして適用することができるものである。また、本試験による塩水の影響の傾向から、塩水環境下の処分場においては、緩衝材の膨潤が抑制されることが明らかであるため、緩衝材の施工仕様として、不均一性を考慮した乾燥密度分布(最大・最小乾燥密度)についても設定するなどの対応が必要となると考えられる。

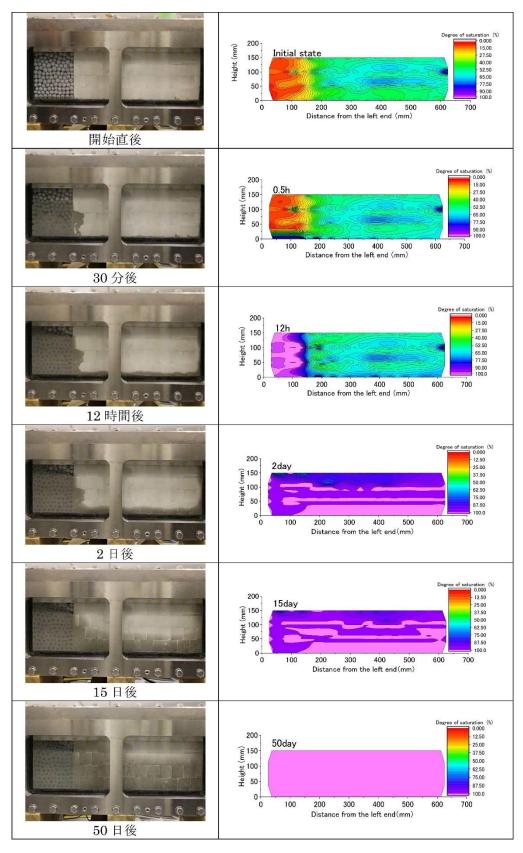


図 3.1-53 二次元土槽試験状況の経時変化

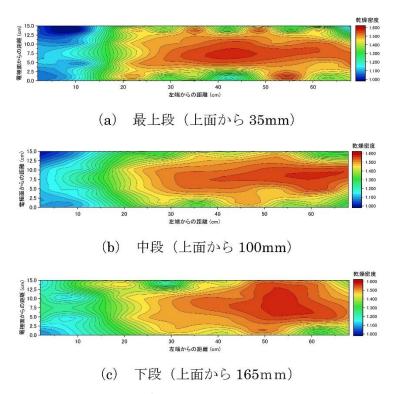


図 3.1-54 解体時の乾燥密度分布(水平断面:全体高さ 200 mm)

6) 緩衝材流出に関する試験 (イオン種の影響に係る検討)

昨年度の緩衝材流出試験では、KCl 水溶液と $MgCl_2$ 水溶液を通水した時に供試体の表面の膨潤が進まず、ひび割れや鱗片状になったことが観察された。これは、セルと供試体の隙間のシール性が低いことを意味し、隙間が狭まることがないために、通水の流速が上がらずに流速が早くなるような断面積が小さい水みちができるに至らなかったと考えることができる。細い水みちができなかったことにより、図 3.1-55 に示したように、緩衝材の流出量は低くなった。一方、人工海水を通水した場合には水みちができ、流出量は、NaCl 水溶液などと同等となった。これは、人工海水の主成分が Na^+ イオンと Cl^- イオンであるためと言える

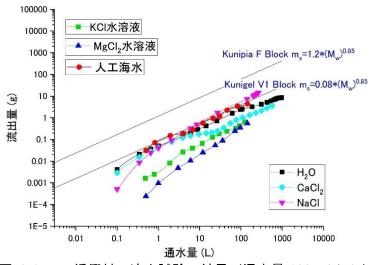


図 3.1-55 緩衝材の流出試験の結果(通水量 100 mL/min)

緩衝材の流出の原因として、膨潤により断面積の小さい水みちが形成されることにより、緩衝材の表面が削剥されることが挙げられる。この削剥が流出量を増加させるため、緩衝材の流出の程度を考える場合には、膨潤性能(シール性)が重要である。そのため、塩水環境での緩衝材の流出による緩衝材の損失を予測するためには、地下水中のイオンによる膨潤性能への影響の把握が必要である。

膨潤性能が通水液によって変化したのは、供試体表面のベントナイトがイオン交換したことによる影響であると考えられる。多種のイオンが含まれる場合には、イオン交換の選択性によってイオン種毎の交換率が決まり、イオンの影響の程度が決まると考えられる。しかし、圧縮した供試体の表面でのイオン交換による層間陽イオンの測定結果は、TRU2次レポート(電気事業連合会、核燃料サイクル開発機構、2005)で使われているイオン交換選択係数を用いた地化学計算では、表現できないことが報告されている(原環センター、2018)。層間陽イオンの測定結果から、高イオン強度環境においては、低イオン強度でのイオン交換よりも分配係数が大きくなる可能性が示唆されている。そのため、イオン交換選択性に対する、イオン強度の影響を検討した。

① 試験方法

イオン交換過程において、Na など既存の陽イオンによる影響を避けるため、また交換性陽イオン間の分配挙動を平等に評価するために、 $1.0\,\mathrm{M}$ 酢酸アンモニウム ($\mathrm{NH_4\text{-}AC}$: $\mathrm{CH_3COO\text{-}NH_4}$) 溶液による洗浄で完全に脱イオン処理によって初期化した Kunipia·F モンモリロナイト ($\mathrm{NH_4\text{-}KF}$) を用いた。 $\mathrm{NH4\text{-}KF}$ を出発試料とし、塩化アンモニウム ($\mathrm{NH_4Cl}$) 溶液と各種塩水 (NaCl 、 KCl、 $\mathrm{CaCl_2}$ 、及び MgCl2)との混合溶液のイオン強度を 0.05, 0.10, 0.25, $0.50\,\mathrm{M}$ に維持して作成した。交換反応系の液固比は、KF/塩化物溶液が $0.15\,\mathrm{g/15mL}$ の条件とし、全て遠沈管内で実施した。イオン交換反応は一定の温度環境の元、 $48\,\mathrm{h}$ 、随時ハンドシェイクによって平衡に到達させた。反応後は遠心分離機を用いて液固分離を行い、液相は交換前後の溶液において、 pH 、主要陽イオン組成、アンモニウム濃度を pH メーター、ICP-AES 分析、分光光度計とネスラー試薬発色法でそれぞれ分析した。分離されたイオン交換前後のモンモリロナイトの層間イオン組成については、 $\mathrm{NH_4\text{-}AC}$ 洗浄法により得られた溶液を ICP-AES による陽イオン分析と分光光度計アンモニウム イオン分析によって定量した。

イオン強度依存性を考慮して一般式化し、その平衡分配定数 Kd を表すと、

$$nZMe_1 + Me_2^{n+} = Z_nMe_2 + nMe_1^{+}$$

$$K_d = \frac{Z_nMe_2 \times \{Me_1^{+}\}^n}{ZMe_1^{n} \times \{Me_2^{n+}\}} = \frac{\frac{Z_nMe_2}{ZMe_1^{n}}}{\{Me_2^{n+}\}^n}$$

と表せる。本試験では Me2 は NH_4 +を設定して実施するが、実際の評価における Kdcalc 値は 各陽イオン Me1, $Me2(NH_4$ +以外の)に対する測定値をから演算して得た値(下式)を用いた。

$$K_{d,calc,1/2} = \frac{K_{d,obs,Me_1}}{K_{d,obs,Me_2}}$$

イオン交換式は、以下のように表され、

 $ZNH_4 + Na^+ = ZNa + NH_4^+$ $ZNH_4 + K^+ = ZK + NH_4^+$ $2ZNH_4 + Ca^{2+} = Z2Ca + 2NH_4^+$ $2ZNH_4 + Mg^{2+} = Z2Mg + 2NH_4^+$ $ZNH_4 + H^+ = ZH + NH_4^+$

これらの平衡分配定数は以下の通り表される。

 $Kd1 = (ZNa/ZNH_4) / {Na+/NH_4+}$

 $Kd2 = (ZK/ZNH_4) / \{K+/NH_4+\}$

 $Kd3 = (Z2Ca/ZNH_{4}^{2}) / \{Ca^{2+}/NH_{4}^{+2}\}$

 $Kd4 = (Z2Mg/ZNH_4^2) / \{Mg^{2+}/NH_4^{+2}\}$

 $Kd5 = (ZH/ZNH^4) / \{H+/NH_4+\}$

② 試験結果

試験の結果を表 3.1-18 に示す。表中に示されているように、Kd 値が最も大きいはずの Kd H/NH_4 が非常に小さく、Kd Na/NH_4 が Kd K/NH_4 に対して圧倒的に大きいため、大きいはずの Kd K/Na は結果的に非常に小さい値となった。他の陽イオンについても Na の分配係数が大きいために、軒並み小さな値になっており、改質した NH_4 -K F を用いたことが影響したと考えられた。Kd 値は小さいが、これらのデータが示すイオン強度依存性について調べた。

各陽イオン交換条件での代表値を使って、イオン強度でまとめると以下のとおりとなる。またイオン交換の平衡分配係数のイオン強度依存性は図 3.1-56 に示す通り明瞭であり、Kd は小さい結果になったが、モンモリロナイトの陽イオン交換には、溶液のイオン強度が作用していることがわかる。K、Ca、Mg、H の順に交換分配係数は大きく、0.2 M 以上の高イオン強度では依存性がほとんど無かった。

本試験によって、イオン交換反応に対して、反応溶液のイオン強度の影響があることが分かった。しかし、試験方法によって、平衡分配係数値が影響を受けるため、イオン交換選択係数の算出のためには、試験条件をさらに検討し、精度を高めた値を得ることが必要である。

Kd Ca/NH4 Kd Mg/NH4 Log Kd H/Na Log Kd K/Na Kd H/NH4 Kd Na/NH4 Kd K/NH4 Log Kd Ca/Na Log Kd Mg/Na IS 1.16E-03 -4.771 0.000 22.698 2.587 0.003 0.001 -2.151-3.908-4.1822.85E-02 0.000 2.889 0.160 0.015 0.014 -4.207-1.442-2.276-2.3275.37E-02 0.001 12.978 0.104 0.457 0.010 -4.043 -2.094 -1.454-3.119 1.45E-01 0.002 13.206 4.969 0.750 0.073 -3.807-0.424-1.245-2.2602.97E-01 -0.541 0.006 44.264 12.745 2.544 0.116 -3.860 -1.241-2.582

表 3.1-18 陽イオン分配係数とイオン強度(NH₄-KF)

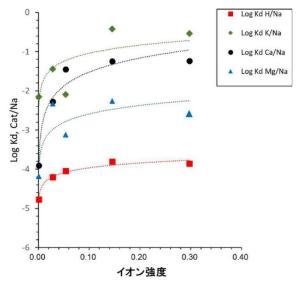


図 3.1-56 陽イオン交換分配係数のイオン強度依存性(NH₄-KF)

7) まとめ

本検討においては、再冠水過程における塩水系地下水の影響の把握のための試験を行った。この試験により、影響の程度を把握すると共に、再冠水後の緩衝材の状態を予測するための解析評価の検証データとして適用することを目的とした。蒸留水や NaCl 水溶液の試験については、データがある程度得られているが、同様の試験によって塩水系地下水のもたらす影響を把握することにより、実際の処分場における再冠水プロセスの解析的評価及び再冠水後の安全評価の初期設定として資することのできる密度分布の予測がより現実的なものとなり得ると考えられる。以下に、それぞれの試験で得られた知見を示す。

閉鎖後の処分施設に地下水が浸潤すると、力学変化や化学変質など事象が発生するため、地下水が緩衝材に浸潤する速度を把握することは、再冠水期間に緩衝材に発生する事象の時期を推定する上で重要な情報となる。そこで、これまでデータが取得されていない、Ca水溶液と人工海水を供給し、一次元条件と見なせる試験で浸潤速度を計測すると共に、透水係数を取得した。さらに、人工海水の1ケースだけ、通水圧を大きく設定して、通水圧の大きさが浸潤挙動に及ぼす影響についても検討した。その結果、以下のような結論を得た。

- ・各ケースの飽和フロントの経時変化は、給水量(総流量)の経時変化は給水時間の平方根 に比例する傾向を示した。これは、浸潤が主に毛細管現象によって進行していることを示 し、既往の研究とも整合する結果であった。
- ・人工海水の高圧と低圧のケースを比較では、通水圧を増加させることにより高圧ケースのフロントの移動速度が著しく増加することが分かった。これは、地下環境で閉鎖後に水位が回復し、水圧が高まることにより、浸潤速度が速くなることを意味する。再冠水過程の予測解析には、水圧の変化も考慮すべきである。
- ・NaCl 水溶液、人工海水、及び CaCl2 水溶液のケースを比較すると、人工海水>Ca 溶液>Na 溶液の順であった。このことから、飽和フロントの移動速度が供給される液体に含まれる陽イオン種によって変化することが明らかとなった。

塩水環境における緩衝材の飽和・膨潤後の密度の不均質性の程度を確認するために、直列膨潤 量試験装置を用いて人工海水と 1/2 人工海水を用いた場合の残留密度差に関するデータを取得し た。どちらのケースも、底部供試体の乾燥密度が $2.0\,\mathrm{Mg/m^3}$ の上部供試体と乾燥密度が $1.2\,\mathrm{Mg/m^3}$ の底部供試体をピストンで直列に繋いで試験を実施した。その結果、以下のような結論が得られた。

- ・液種のイオン強度の大きいものほど再冠水後の密度差が大きくなる。
- ・本試験の結果より、残留密度差を考慮した場合に緩衝材機能を保つために緩衝材施工時に 許容される乾燥密度分布を定量的に示すことができる。
- ・緩衝材の膨潤後の密度分布を解析的に評価する際には、塩水の影響を考慮する必要があり、 本試験は予測解析手法の構築のための検証データとして適用できる。
- ・イオン強度の大きい地下水環境では、緩衝材施工時に許容される乾燥密度分布を小さくす る必要があると考えられる。

再冠水前の定置後の緩衝材に存在する、施工に起因する密度分布、隙間、初期間隙などが膨潤 挙動に及ぼす影響の評価を目的として、ブロック定置 - ペレット充填併用ケースを対象にして、 人工海水が緩衝材の膨潤による均質化に及ぼす影響を同様の試験装置を用いて把握試験を行った。 その結果、以下のようなことが分かった。

- ・膨潤圧はペレット部分で小さく、ブロック部は、ペレット部に向かって膨潤圧が小さくなる傾向を示した。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が緩衝されていた。
- ・NaCl 水溶液での結果(原環センター, 2015)と比較したところ、人工海水による影響は限定的であり、液種の違いよりも施工時の乾燥密度分布などの影響の方が大きいと考えられる。
- ・本試験の結果は、二次元での再冠水過程の解析手法の検証データとして適用できるものである。施工時にペレットを使用するなどの乾燥密度分布を解析的に表現する場合には、膨潤圧などの応力を考えると共に、膨潤変形も考慮する必要がある。

緩衝材の流出挙動に関しては、緩衝材の膨潤による断面積が小さい水みちの生成が緩衝材の流出量を左右する。そのため、膨潤性能が緩衝材の流出に及ぼす影響が大きく、膨潤性能に影響する要因は、イオン交換反応による緩衝材の変化であると考えられる。これまで、検討されていなかった海水の主要陽イオンである、 K^+ 、 Mg^{2+} が流出挙動及び膨潤性能に大きく影響することが昨年度の試験の結果から明らかになった。そのため、多様な塩水系地下水を想定した場合には、イオン交換反応の選択性が重要であると考え、試験により、イオン交換反応選択性のイオン強度に対する依存性について検討した。その結果、以下のようなことが分かった。

- ・イオン交換選択性はイオン強度の影響を受けることが分かった。
- ・イオン交換の平衡分配係数はある程度のイオン強度 $(0.2\,\mathrm{M})$ までは依存性を持ち、それ以上の濃度では、ほぼ一定になった。
- ・本検討では、NH₄+で置換したことにより、平衡分配係数は小さい値を示したため、試験方法も含め、一般性をもってイオン交換選択係数を示すためには、さらに試験を行い、精度のよい平衡分配係数を得ることが必要である。
- ・分散したモンモリロナイトを対象として得られたイオン交換選択性が、圧縮したベントナイトに適応できるかどうかの知見がないため、検討する必要がある。

以上のように、塩水環境下を想定した地下水組成によって、緩衝材の膨潤性能が低下することは明らかであり、そのために、再冠水過程の緩衝材の挙動は淡水系とは異なると考えられ、その影響を考慮する必要がある。そのため、本検討で取得したそれぞれの試験の結果は、再冠水過程、及び再冠水後の密度分布を予測する解析の検証データとして適用することができる。さらに、多様な組成を持つ塩水系の地下水に適応できる予測解析手法の高度化のためには、イオン強度、及びイオン種による緩衝材の膨潤性能に対する影響の考慮として、特にイオン交換反応の選択性についての知見を拡充することが必要であると考える。

参考文献

- 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-TR-2005-02, 2005.
- 原子力発電環境整備機構,包括的技術報告書:わが国における安全な地層処分の実現―適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築― レビュー版,NUMO-TR-18,2018.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター,平成 26 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証技術開発)人工バリア品質/健全性評価手法の構築(そ の 2) -緩衝材 報告書,2015.
- 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証技術開発)人工バリア品質/健全性評価手法の構築(そ の 2) -緩衝材 報告書, 2016.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 29 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証技術開発)人工バリア品質/健全性評価手法の構築(そ の2) -緩衝材 報告書, 2018.
- 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.
- 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.
- 松本一浩、藤田朝雄、緩衝材の流出/侵入特性(Ⅲ), JAEA-Research 2011-014, 2011.
- 日本原子力研究開発機構,緩衝材基本特性データベース,2013.
 - (https://bufferdb.jaea.go.jp/bmdb/、最終閲覧 2019 年 3 月 21 日)
- Roscoe, K.H., Schofield, A.N. and Thurairajah, A., Yielding of clays in states wetter than critical, Geotechnique, vol.13, pp.250-255, 1963.
- Roscoe, K.H. and Burland, J.B., On the generalized stress-strain behavior of 'wet' clay, Engineering Plasticity, Eds. Heyman, J. and Leckie, F.A., Cambridge University Press, 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年度地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発報告書 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 29 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, Appendix X,2018.
- 高治一彦, 重野喜政, 下河内隆文, 幌延の地下水環境下におけるベントナイト混合材料の力学特性に関する研究(Ⅱ), JNC-TN5400-2004-002, 2004
- 高治一彦, 鈴木英明, 緩衝材の静的力学特性, JNC-TN8400-99-041, 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、アクセス坑道並びに斜坑などの支保工及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、並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及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、並 びに機械的強度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及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及び操業期間中の健全性、並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に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 Mg²+、Cl·、SO4²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、多くは人工海水など溶存成分濃度が海水相当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強度変化に関する検討:設計や工学技術における安全確保の観点から、短期的な(操業期間中)機械的強度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)とシリカフューム(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ュームセメント(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澱モデル(以下、「モデル」という)について、OPC及びHFSCを対象として開発が行われている(原子力機構, 2015, 2016, 2017)。水和物溶解沈澱モデルは、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・沈澱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(以下、「ASTM 相当」という)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(原子力機構、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(産総研、原子力機構、原環センター、電中研、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溶解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 倍及び 5 倍に希釈)に対して、OPC 及び 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(産総研、原子力機構、原環センター、電中研、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、人工海水のイオン強度を計算し、それと同等のイオン強度になるよう調製した NaCl 溶液(0.644 mol/L)を基準とした希釈水(2 倍及び 5 倍に希釈)の OPC 及び HFSC のバッチ式の浸漬料を作製した(産総研、原子力機構、原環センター、電中研、2018)。平成 30 年度は、平成 29 年度に作製した NaCl 溶液に対する浸漬実験試料の分析を行うとともに、平成 29 年度に開発したモデル(原子力機構、2018)による計算値との比較を行い、モデルの適用性評価を行った。

1) NaCl 溶液に対する浸漬実験試料の分析

、5.1-15 ピグライベースト版化体物件物の及例来件(NdOI/格が							
田地の種類	浸漬液の	液固比	液固比(浸漬液重量/粉砕試料重量 [g/g])				
固相の種類	種類	5	30	300	1,000		
OPC 硬化体を	NC1	0	0	0	0		
90µm 以下に微粉砕	NC2	\bigcirc	\circ	\circ	\circ		
したもの	NC3	\circ	0	0	0		
HFSC 硬化体を	NC1	0	0	0	0		
90µm 以下に微粉砕	NC2	0	0	0	0		
したもの	NC3	0	0	0	0		

表 3.1-19 セメントペースト硬化体粉砕物の浸漬条件(NaCl溶液)

表 3.1-19 に示した条件で作製した浸漬試料をアルゴンガス雰囲気のグローブボックス内で、 PTFE 製、孔径 $0.45~\mu m$ のメンブレンフィルターを用いて吸引ろ過を行い、液相と固相を分離し、 固相及び液相の分析を行った。 固相は X 線回折(パナリティカル製 X'PertPRO)により含有鉱物の同定を行った。液相は複合ガラス電極(堀場製作所製 D9677-10D)により pH、誘導結合プ

ラズマ発光分光分析装置 (パーキンエルマー製 Optima8300) により Ca、Si、Al、Mg、S、Na、K、S 濃度、イオンクロマトグラフ(東亜ディーケーケー製 ICA-2000) により Cl 濃度、全有機体炭素計(株式会社島津製作所製 TOC-VCSH)を用いて液相中の無機炭素濃度(IC)を定量した。

表 3.1-20 に各浸漬条件における OPC 硬化体粉砕物の X 線回折分析により同定された固相をまとめる。浸漬前の OPC 硬化体粉砕物にいては、ポルトランダイト (P)、C-S-H、モノサルフェート (Ms) の X 線回折のピークが確認されるとともに、ケイ酸ハイドロガーネット (Si-Hg; Dilnesa et al., 2014) と考えられるピークも見られた。IEW に浸漬させると、モノサルフェートのピークが確認されず、エトリンガイト (E) のピークが確認された。ポルトランダイトについては、液固比が 1,000 となると、液相にすべてポルトランダイトが溶解してしまうことから、固相として確認することができなかった。NaCl 溶液に浸漬すると、モノサルフェートのピークが確認されず、エトリンガイトのピークが確認されことは、IEW と同様である。異なる点は、フリーデルフリーデル氏塩 (Fs) のピークの存在と、液固比 300 以上でのポルトランダイトの消失、液固比 1,000 でのエトリンガイトの消失であった。NaCl 濃度が高くなると、ポルトランダイトなどの水和物の溶解度が高くなることが知られており (Duerden, et al., 1997)、IEW に比べて低い液固比でセメント水和物が消失すると考えられた。

表 3.1-21 に各浸漬条件における HFSC 硬化体粉砕物の X 線回折分析により同定された固相をまとめる。浸漬前の HFSC 硬化体粉砕物については、フライアッシュに存在するムライト (Mul)、クオーツのピークが確認されるとともに、C-S-H、エトリンガイトなどの水和物のピークが確認された。シリカフュームやフライアッシュのポゾラン反応の進行により、ポルトランダイトの存在は確認されなかった。 NaCl 溶液に浸漬しても、IEW に浸漬した場合と水和物相の変化はみられなかった。 OPC 粉砕物と同様に NaCl 濃度が高くなると、液固比が高くなるにともない、エトリンガイトの消失がみられた。これは、上述したようにイオン強度の影響で水和物の溶解度が高くなることによると考えられる。

図 3.1-57 に OPC 及び HFSC 硬化体粉砕物の液相の pH 及び主要元素(Ca、Si、Al)の分析結果を示す。pH は、ほぼ 20° Cの条件で測定された。図 3.1-57 の左図の OPC については、どの浸漬液についても、液固比が大きくなるにともない、pH は低下した。NaCl 濃度が高くになるにともない、pH の低下は大きくなる傾向であった。これは、固相の分析結果で示したポルトランダイトの消失の対応していた。Ca 濃度については、どの浸漬液についても、液固比 30 で高い濃度を示し、NaCl 濃度が高いと Ca 濃度も高くなるようであった。Si 濃度については、液固比 1,000で明瞭に NaCl 濃度の影響が見られた。Al 濃度については、IEW と NaCl 溶液とで、液固比の増加に伴う濃度変化に差が見られた。また、S 濃度については、NaCl 濃度に対応して、濃度が高くなった。

図 3.1-57 の右図の HFSC については、浸漬液が NaCl 溶液では、低液固比において、IEW より低い pH を示したが、液固比が大きくなると pH は上昇し、液固比 300 で IEW の pH とほぼ同じ値となった。Ca 濃度については、低液固比で、浸漬液の NaCl 濃度に対応して、Ca 濃度も高くなった。液固比が高くなると、Ca 濃度は低下した。Si 濃度についても、浸漬液が NaCl 溶液では、低液固比において、IEW より低い値を示したが、液固比が大きくなると IEW とほぼ同程度の値となった。Al 濃度については、浸漬液の NaCl 濃度が高くなると、Al の濃度は低下するようである。S 濃度については、IEW と NaCl 溶液との差は、ほとんど確認されなかった。

表 3.1-20 OPC 硬化体粉砕物浸漬実験の固相の同定結果

:/±+□	同定された					
液相	固相	浸漬前	5	液固比[g/g	300	1,000
	Р					-
	C-S-H					
	E	-				
	Ms		-	-	-	-
IEW	Мс	-	-			-
	Hc	-	-		-	-
	Si-Hg					
	Fs	-	-	-	-	-
	NaCl	-	-	-	-	-
	Р				-	-
	C-S-H					
	E	-				-
	Ms		-	-	-	-
NC1	Мс	-	-	-	-	-
	Hc	-	-	-	-	-
	Si-Hg					
	Fs	-				-
	NaCl	-			-	-
	Р				-	-
	C-S-H					
	E	-				-
	Ms		-	-	-	-
NC2	Мс	-	-	-	-	-
	Hc	-	-	-	-	-
	Si-Hg					
	Fs	-				-
	NaCl	-	-	-	-	-
	Р				-	-
	C-S-H					
	E	-				-
	Ms		-	-	-	-
NC3	Mc	-	-	-	-	-
	Нс	-	-	-	-	-
	Si-Hg					
	Fs	-		-		-
	NaCl	-		- n物 F·エトリ	-	-

P:ポルトランダイト、C-S-H:ケイ酸カルシウム水和物、E:エトリンガイト

Ms: モノサルフェート、Mc: モノカーボネート、Hc: ヘミカーボネート、Si-Hg: ケイ酸ハイドロガーネット、Fs: フリーデル氏塩

■■■:X線回折ピーク大、■■:X線回折ピーク中、■::X線回折ピーク小

-:X線回折ピーク検出されず

表 3.1-21 HFSC 硬化体粉砕物浸漬実験の固相の同定結果

液相	同定された	液固比[g/g]				
/权和	固相	浸漬前	5	30	300	1,000
	Mul					
	Qtz					
IEW	C-S-H					
	E					
	NaCl	-	-	-	-	-
	Mul					
	Qtz					
NC1	C-S-H					
	E					-
	NaCl	-				
	Mul					
	Qtz					
NC2	C-S-H					
	E					-
	NaCl	-	-	-	-	-
	Mul					
	Qtz					
NC3	C-S-H					
	E					-
	NaCl	-	-	-	-	-

Mul:ムライト、Qtt:石英、E:エトリンガイト、C-S-H:ケイ酸カルシウム水和物、E:エトリンガイト

■■■: X 線回折ピーク大、■■: X 線回折ピーク中、■:: X 線回折ピーク小

-:X線回折ピーク検出されず

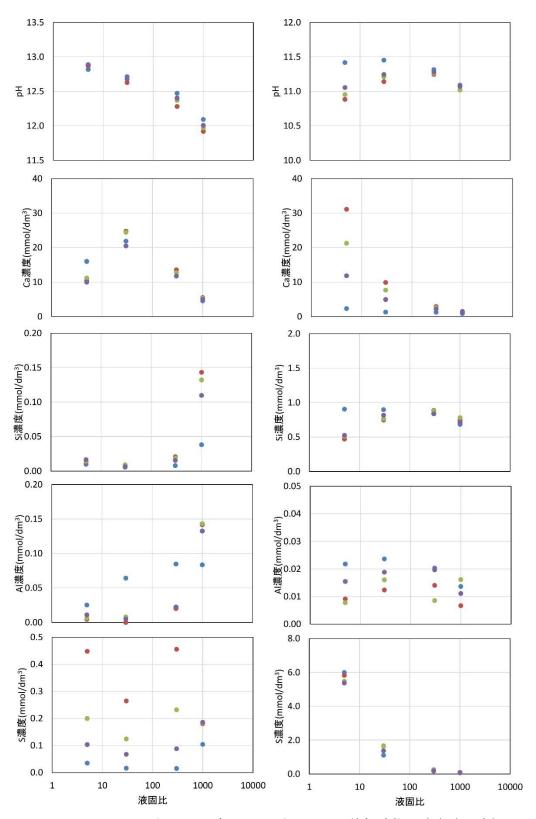


図 3.1-57 OPC (左図) 及び HFSC (右図) 硬化体粉砕物浸漬実験の液相 の pH 及び主要元素の分析結果 ■ IEW、■ NC1、■ NC2、■ NC3

2) NaCl 溶液に対する浸漬実験に対する平成 29 年度溶解沈澱モデルの適用性の評価

前述の「1) NaCl 溶液に対する浸漬実験試料の分析」にて述べた結果と平成 29 年度の処分システム評価確証技術開発(原子力機構, 2018)にて開発したモデルでの計算結果との比較を行いモデルの適用性を評価した。平成 29 年度のモデルでは、浸漬前のセメント硬化体の水和物の設定を、未水和セメントクリンカーを出発物質とした地球化学計算によって求めている点が大きく異なっている。また、Al を含む水和物のモデルや C-S-H ゲルに対する Na 及び K の吸着パラメータの見直しも実施された(原子力機構, 2018)。

図 3.1-58 に分析結果とモデルでの計算結果を比較した。左列図は、OPC 硬化体粉砕物、右列図は、HFSC 硬化体粉砕物に対する結果である。OPC の pH については、概ねモデル計算値は、分析値を再現できた。HFSC については、モデル計算値の pH は、分析値より高く評価する結果となった。Ca、Si 及び S 濃度については、OPC 及び HFSC ともに、モデル計算値は、分析値と一桁以内の差であった。しかし、Al 濃度については、OPC については、分析結果の傾向を概ね表現できたが、HFSC については、モデル計算値は、分析結果と一桁以上乖離する結果となった。平成 29 年度のモデルでは、OPC については、NaCl においても、概ね適用できることが確認された。しかし、HFSC については、pH や Al 濃度について、分析結果をうまく再現できない結果となった。これは、IEW についても同じである。HFSC は、フライアッシュを多量に含むことからケイ酸カルシウムアルミネート水和物(C-A-S-H)が OPC に比較して多量に存在する可能性がある。Al の濃度は、C-A-S-H のような Al を含む水和物の考慮が必要となる可能性がある。また、C-A-S-H、C-S-H と同様にアルカリ金属イオン(Na 及び K)を収着する可能性があり、今後のモデル開発に反映する必要がある。

3) まとめ

平成30年度は、平成29年度に作製したNaCl溶液に対する浸漬実験試料の分析を行い、NaCl溶液に対するセメント硬化体粉砕物との反応に関するデータを蓄積した。さらに、平成29年度に開発したセメント水和物の溶解沈殿モデルの計算値と実験によって得られた分析値との比較を行った。OPCについては、モデル計算値は、pH及び主要元素の浸出液の濃度を概ね(一桁の範囲内)表現することが可能であった。しかし、HFSCについては、モデル計算値は、pHの実測値より高く評価しており、さらに、Al濃度については、分析値との一桁以上の乖離がみられた。モデル計算値は、HFSCの浸出液のpHを高く計算する結果となっており、HFSCの浸出液のpHが低いという本来の性能を評価することができていない。今後、HFSCが処分施設材料として使用するか否かの判断ができるように、HFSCに対するセメント水和物の溶解沈殿モデルの改良が必要である。特に、モデル評価に必要となる水和物の設定などの見直しやモデル計算に必要となる熱力学データの整備を行っていくことが重要であると考えられる。

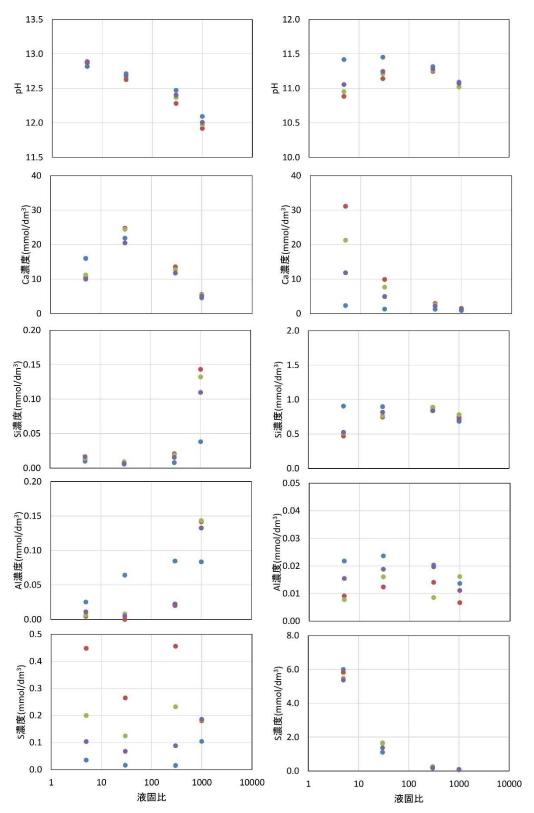


図 3.1-58 OPC (左図) 及び HFSC (右図) 硬化体粉砕物浸漬実験の液相の pH 及び主要元素の分析結果とモデル計算値との比較 ●IEW、●NC1、●NC2、●NC3 は分析値、実線はモデル計算値

(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、沿岸部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、原子力機構、原環センター、電中研、2016)。

- ① 海水系及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機械的強度の変化を把握することを目的に、課題の②及び④に注力する。

なお、本検討においては、沿岸部の処分場環境における地下水中の成分濃度は陸域からの降水 系地下水の混合により海水より低いことが予想される事、地下水条件と各事象の関係については 人工海水での知見はあるが人工海水より濃度が低い塩水系の溶液での試験データが少ないこと、 などを考慮して検討を行うこととした。

2) 3ヵ年の全体計画

本検討に関する平成 28 年度から 30 年度の 3 ヵ年の実施計画を表 3.1-22 に示す。各実施項目の具体的な内容について、後述の「3)バルク試験体を用いた機械的強度変化に関するデータの取得」及び「4)塩水浸透に係わるモデルの検討」に整理する。

表 3.1-22 塩水環境下におけるセメント系材料の機械的強度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機械的強度の変化に 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機械的強度の変化 の確認(浸漬試験)			
塩水浸透に係わるモデルの検討			
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機械的強度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及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、降水系地下水及び海水系地下水を模擬した浸漬試験を実施した。その結果、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強度の把握には、バルク試験体を用いて試験を実施する必要がある。

そこで本試験では、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機械的強度変化との関係を把握するため、塩水によるセメント系材料の変質が処分場操業期間中の機械的強度に及ぼす影響を検討した。

平成 29 年度及び平成 30 年度は、沿岸海底下の条件での機械的強度変化の確認のための浸漬試験試料について、化学的な変質状況の確認のための分析(浸漬液の pH 分析、試料断面の元素組成分析 (EPMA)、鉱物相の同定 (XRD)、鉱物の形態観察及び組成分布 (SEM-EDS))と微小領域の硬度の測定 (ビッカース硬度測定)を実施した。浸漬試験の試験体 (以下、「浸漬試験体」という)の条件を表 3.1-23 に、浸漬試験条件を表 3.1-24 に示す。また、浸漬試験体の浸漬方法を図 3.1-59 に示す。

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
OPC-60	普通ポルトランドセメント	60%	(水中) 91 日間
FAC30	普通ポルトランドセメント/フライアッシュ=7/3	60%	(練り混ぜは
BFSC70	普通ポルトランドセメント/高炉スラグ=3/7	60%	30°C)

表 3.1-23 浸漬試験体の条件

表 3.1-24 浸漬試験条件

項目	内容
	希釈人工海水:1倍(人工海水)、1/10倍(1/10濃度人工海水)、
;⊒;主;左+□	1/100 倍(1/100 濃度人工海水)
浸漬液相 	なお、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た。
浸漬液量	500 ml/1 試料あたり(単位面積流量 160 ml/月/cm ²)、月 1 回液交換
試験期間	常時スターラー攪拌条件で4ヶ月間及び14ヶ月間
雰囲気	浸漬試験中は密封し外気を遮断



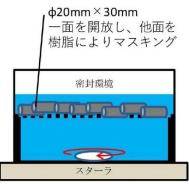


図 3.1-59 浸漬試験体の浸漬方法

浸漬期間 4 ヶ月の結果は平成 29 年度報告書(産総研, 原子力機構, 原環センター, 電中研, 2018) にて報告したため、本報告では浸漬期間 14 ヶ月の結果を中心に記す。

浸漬試験においては、OPCでは、人工海水浸漬試料では試料の接液面に外観変化(ドーム状の膨張)の発生した浸漬試験体と発生していない浸漬試験体を確認した。また、1/10人工海水浸漬

試料では OPC の全ての浸漬試験体の接液面に外観変化を確認した。このドーム状の膨張の主要成分は Ca、Mgであり、外観変化が無かった浸漬試験体の固液境界面の液相側に生成した沈殿物と同様と考えられる。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膨張は報告されておらず、本試験で用いたセメントペースト硬化体は、体積当たりの Ca 溶脱量がモルタルやコンクリートと比較して多かったため、接液面全体に膜状の析出物が生成し、その影響でひび割れや膨張が発生した可能性が考えられる。EPMA からは外観変化の有無に関係なく、溶脱する成分及び沈殿する成分は同じである事を確認した。

EPMA による試料断面の元素組成分析の結果を図 3.1-60 に示すと共に、浸漬試験体の分析結果から考察される浸漬試験体の化学的な変質挙動の概略を以下に記す(詳細は Appendix XIV)。

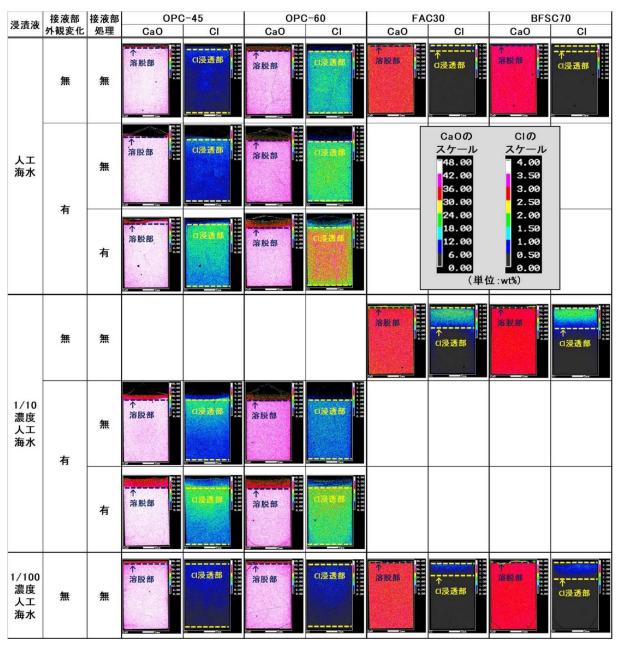


図 3.1-60 EPMA による試料断面の元素組成分析の結果(浸漬期間 14 ヶ月) 外観変化:ドーム状の膨張の生成。接液部処理:浸漬期間 5 ヶ月の時点でのドーム状の膨張の 除去。

▶浸漬試験体の接液面の浸漬液側の沈殿(図 3.1-61 参照):

浸漬期間4ヶ月と同様、浸漬期間14ヶ月においても、OPCではCa沈殿と(Calcite(CaCO₃)と推定) Mg 沈殿(Brucite (Mg(OH)₂と推定)が認められた。混合セメントでは、浸漬試験体の接液面の浸漬液側にCa沈殿が認められたが、1/10 濃度人工海水に浸漬した試験体で認められた Mg 沈殿(Brucite (Mg(OH)₂と推定)は認められなかった。沈殿生成量も浸漬期間4ヶ月と同様、浸漬期間14ヶ月においても、Ca沈殿では塩水濃度と線形の関係が認められた一方、Mg 沈殿では1/10 濃度人工海水に浸漬した試験体が最も多く、塩水濃度と線形の関係は認められなかった。なお、1/10 濃度人工海水に浸漬した試験体にて経時的な観察を実施した結果、沈殿の経時的な増加傾向は認められなかった。これは、接液面の浸漬液側に生成した沈殿により、浸漬試験体内部からのイオンの供給が制限されたためと考えられる。

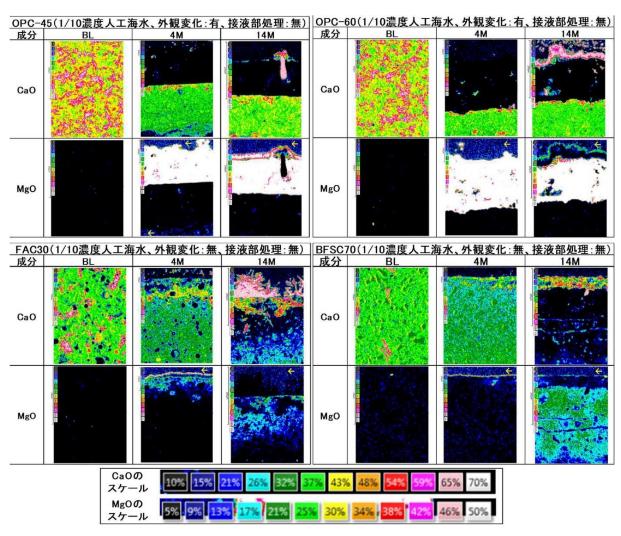


図 3.1-61 浸漬期間 4 ヶ月と 14 ヶ月の接液面近傍の組成分布の比較 黄色矢印で示した層は試料の剥離防止に用いた樹脂

▶浸漬試験体の接液面の内側の変質(図 3.1-62 参照):

浸漬試験体の接液面の内側では、Ca 溶脱領域(Portlandite (Ca(OH)₂)溶脱と <math>SO4²-浸透が起きている領域(以下、「溶脱部」という)、及び Cl-浸透領域(以下、「Cl 浸透部」という)が認められ、傾向は 4 ヶ月と 14 ヶ月は同様であった。具体的には、これらの領域の深さは

OPC の方が混合セメントより深く、本試験の浸漬期間 14 ヶ月の結果においては、溶脱部は OPC が最大 5 mm 程度、混合セメントが 1 mm 程度、Cl 浸透部は OPC が最深部の 30 mm に到達していた一方、混合セメント系材料が 15 - 20 mm 程度であった。溶脱は $Ca(OH)_2$ 量と C-S-H の Ca/Si モル比、浸透は材料固有の空隙構造などの違いが影響していると考えられた。また、溶脱部の深さは塩水濃度との線形の関係は認められなかったが、OPC では塩水濃度が高い方が深く、混合セメントでは塩水濃度が低い方が深い傾向であった。Cl-浸透量と塩水濃度との関係は、OPC では不明瞭であった一方、混合セメントでは 1/10 濃度人工海水に浸漬した試験体が最も大きく、塩水濃度と線形の関係は認められなかった。なお、OPC 及び混合セメントともに Cl 浸透部は溶脱部よりも深部に達していた。

溶脱部は、OPC 系材料、混合セメント系材料ともに、接液面の浸漬液側に沈殿が生成した 試験体では経時的な変化は小さく、接液面の浸漬液側の沈殿が少ない試料では時間経過とと もに内部に進行する傾向が認められた。Cl 浸透部の深さは全試験体で経時的に深くなってお り、内部拡散によるものと考えられる。一方で、Cl-濃度は経時的には大きな変化は認められ ず、接液面の浸漬液側の沈殿により Cl-浸透が抑制されている可能性がある。

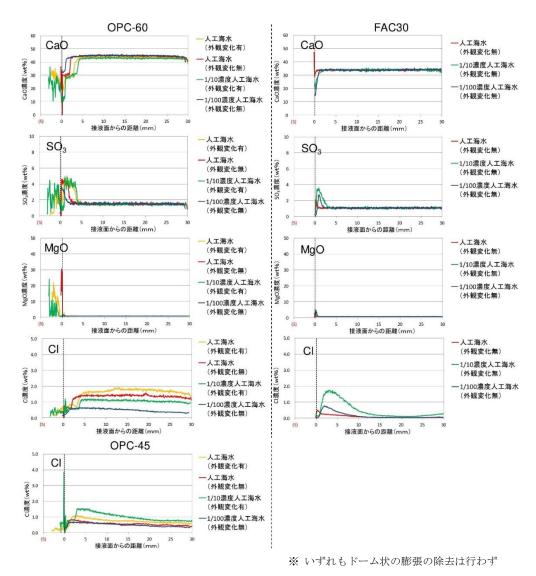


図 3.1-62 EPMA によるセメント相中の元素濃度プロファイルの例 (浸漬期間 14 ヶ月)

▶浸漬試験体内部の鉱物 (表 3.1-25 参照):

浸漬期間 4 ヶ月と同様、浸漬期間 14 ヶ月においても、溶脱部では SO4²、Cl-が浸透する ことで既存のアルミネート鉱物である Monosulfate(3CaO・Al₂O₃・CaSO₄・12H₂O)や Monocarbonate (3CaO・Al₂O₃・CaCO₃・11H₂O) が Ettringite (3CaO・Al₂O₃・3CaSO₄・ 32H₂O) や Friedel's salt (フリーデル氏塩、3CaO・Al₂O₃・CaCl₂・10H₂O) に変化する傾 向にあった。また、混合セメントでは溶脱部において Mg 化合物 (M-S-H と推定) の沈殿が 認められた。この Mg 化合物沈殿の領域は経時的に拡大していた。なお、経時的に、浸漬期 間4ヶ月で認められなかった鉱物が生成したり、生成した鉱物が消失したりする変化は認め られなかった。

浸漬期間:4M 浸漬期間:14M 接液部 試料名 浸漬液 測定位置 Portlan Ettrin Friedel's Portlan Ettrin Friedel's 外観変化 s alt s alt dite dite gite gite BL 0 0 溶脱部 0 0 \bigcirc Δ Δ Δ 人工海水 CI 浸透部 0 0 Δ Δ OPC \bigcirc \bigcirc 1/10 濃度 溶脱部 Δ Δ -45 有 人工海水 CI 浸透部 0 0 Δ Δ 1/100 濃度 溶脱部 0 Δ Δ 無 0 Δ 人工海水 CI 浸透部 0 ВL 0 0 溶脱部 0 \bigcirc Δ Δ 人工海水 無 CI 浸透部 0 0 Δ Δ Δ OPC 1/10 濃度 溶脱部 \bigcirc \bigcirc \bigcirc Δ Δ -60 有 人工海水 CI 浸透部 0 0 \bigcirc Δ Δ 0 溶脱部 1/100 濃度 0 無 Δ 人工海水 CI 浸透部 0 Δ Δ BL \bigcirc 溶脱部 \bigcirc \bigcirc 人工海水 無 CI 浸透部 FAC 1/10 濃度 溶脱部 無 \bigcirc \bigcirc Δ 人工海水 CI 浸透部 1/100 濃度 溶脱部 無 \bigcirc \bigcirc Δ 人工海水 CI 浸透部 \bigcirc ВL 溶脱部 人工海水 無 \bigcirc \bigcirc CI 浸透部 **BFSC** 1/10 濃度 溶脱部 70 無 ٨ ٨ ٨ ٨ ٨ Λ 人工海水 CI 浸透部 1/100 濃度 溶脱部 0 0

表 3.1-25 浸漬期間 4ヶ月と 14ヶ月の鉱物相の比較

CI 浸透部 ◎: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 赤字表記:4Mで同定されず、14Mで同定された鉱物

人工海水

浸漬期間 14 ヶ月の浸漬試験体についても、微小領域の硬度(ビッカース硬度)を測定した。 OPC 及び混合セメントのそれぞれの試験体のうち比較的溶脱部が大きい試験体の測定結果を図 3.1-63 及び図 3.1-64 に示す (全試験体の結果は Appendix XIV 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及びClの組成分布を併せて示す。

ビッカース硬度の測定から分かった点は以下の通りである(Appendix XIV 参照)。

- ・浸漬期間 4 ヶ月と同様、浸漬期間 14 ヶ月においても、塩水濃度及びセメント種類によらず、Ca溶脱が進行している領域でのビッカース硬度の低下が認められた。
- ・OPC では硬度の低下は Ca 溶脱領域で空隙増加によると考えられる。一方、混合セメントでは M-S-H と推定される Mg 化合物生成により空隙増加が認められなかったにもかかわらず硬度低下が認められ、C-S-H の変質が硬度変化に影響していると考えられる。
- ・深層部の硬度は浸漬試験の開始前と同等であり、Cl-の浸透の有無、含有量の多少、及び浸漬後のアルミネート相の鉱物変化とビッカース硬度に関連は認められなかった。
- ・硬度低下の程度からセメント系材料の圧縮強度の変化を推定した。既往の検討(横関ら, 2002)から、モルタルの硬度値低下率と圧縮強度(N/mm²)低下率はほぼ1:1の関係と推定される。これを参考にすると、塩水に浸漬したセメント系材料の溶脱部の圧縮強度は、健全時の1/3-1/2程度まで低下する可能性が示唆された。

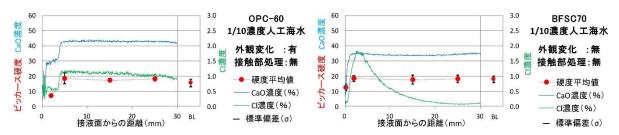


図 3.1-63 接液面からの距離と Ca、CI の濃度及びビッカース硬度の関係の例 (浸漬期間 14 ヶ月)



※ 空隙率は SEM 反射電子像の二値化画像から算出 図 3.1-64 空隙率とビッカース硬度の関係(浸漬期間 14 ヶ月)

以上の結果をまとめると共に、塩水によるセメント変質が短期的な機械的強度へ及ぼす影響を 推定する。

- ・塩水によるセメント変質領域では、セメント系材料の機械的強度が低下する可能性がある。 なお、この傾向は降水系地下水でも同様である。
- ・OPC の硬度低下は Ca 溶脱に伴う空隙の増加が支配的要因であると考えられる。一方、混合セメントの硬度低下は C-S-H の変質の影響を受けている可能性がある。
- ・既往の検討を基に塩水浸漬による圧縮強度の低下を推定した結果、塩水に浸漬したセメント系材料の溶脱部の圧縮強度は、健全時の 1/3・1/2 程度まで低下する可能性が示唆された。

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 (CI) 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、それらによる機械強度の低下が懸念される。海水中の CI 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 CI の移動現象のみを扱った浸透予測式及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、前述の「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」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 CI の浸透解析においては、CI 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有効である。

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強度の変化の評価にあたり、以上を踏まえて化学変質を考慮した Cl:の浸透モデルを適用した予測解析を用い、沿岸海底下の地下水の浸透によりセメント系材料中の Cl:濃度が鋼材腐食発生の濃度に達する期間の評価を試みた。

Cl·の浸透予測解析には、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(細川ほか,2007; Hosokawa et al., 2011)を適用した(以下、「本解析」という)。本解析の概要を図 3.1-65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、並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、それぞれ有限要素法と熱力学的相平衡により計算し連成させる。図 3.1-65 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、Cl·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 Cl·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。

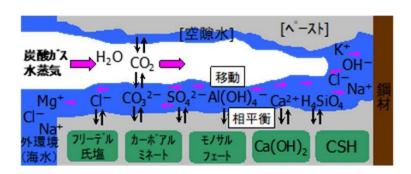


図 3.1-65 セメント硬化体中での物質移動と相平衡の概念図

平成30年度に実施した本解析では、コンクリート4種類(OPC コンクリート、FAC コンクリート、BFSC コンクリート、吹付コンクリート(OPC ベース))、塩水3種類(人工海水、1/10濃度人工海水、1/100濃度人工海水)についてのCl・の浸透解析をケーススタディとして実施した。ただし、本解析においては、固液界面の外側の沈殿生成によるCl・浸透の抑制効果を考慮できないため、Cl・浸透量が塩水濃度と線形の関係となると共に、試験よりCl・浸透が進行するとの計算結果となる可能性があった。本検討においては、この点を保守的と判断した。

本解析の結果の一例として、人工海水と接触した OPC コンクリートの Cl-浸透解析の結果を図 3.1-66、同ケースにおいて経過時間と鉄筋腐食限界 (保守的にコンクリートの全 Cl-濃度 1.2 kg/m^3

(土木学会, 1999)、間隙水の[Cl·]/[OH·]=0.1 (石田ほか, 2007) になる深さの関係を図 3.1-67 から図 3.1-70 に、それぞれ示す (解析条件及び結果の詳細は、Appendix XIV 参照)。 結果の概略は以下の通りである。

- ・本解析におけるコンクリートへの Cl·浸透結果は、コンクリート配合や用いたセメント種類 によっても Cl·浸透領域の深さが変化した。また、塩水濃度が高い程、Cl·浸透領域が深く なっていた。塩水濃度と Cl·浸透領域の深さの関係は 3) の試験結果とは異なっており、塩 水濃度が高いケースにおいては Cl·浸透を実際よりも過大に評価している可能性がある。
- ・経過時間と鉄筋腐食限界になる深さの関係から、鉄筋の腐食限界に達するまでの期間を予測可能とした。平成30年度の検討からは、鉄筋腐食限界に達するまでの期間はセメント種類や配合の影響を受けている事が確認され、吹付コンクリート(OPCベース)、OPCコンクリート、BFSCコンクリート、FACコンクリートの順に短い傾向であった。
- ・本解析の結果における 100 年後の Ca 溶脱部の深さは、人工海水浸漬のケースで Cl-浸透部の 1/10 以下であった。1/10 濃度人工海水及び 1/100 人工海水のケースではコンクリート配合や用いたセメント種類によって異なり、深くまで Cl-が浸透した OPC コンクリート及び吹付コンクリート (OPC ベース) で 1/8~1/6、Cl-浸透部が浅い混合セメントコンクリートで 1/4 程度であった。
- ・解析結果において、主要な鉱物の変化は、前項目 3) での試験と一致しており、塩水の影響による鉱物変遷を再現できていると考えられる。一方、二次鉱物の生成場所が試験結果と異なること及び前述の通り Cl-浸透挙動が試験と異なり塩水濃度と線形の関係にあることなど、さらなる検討が必要な点も残されている。

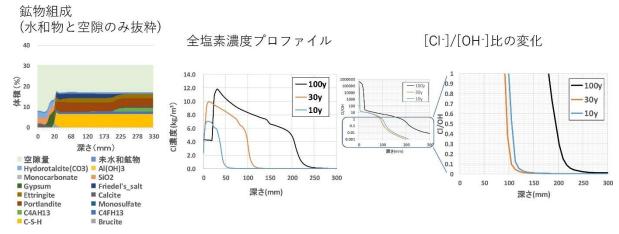


図 3.1-66 Cl の浸透解析結果の例(OPC コンクリート、人工海水浸漬)

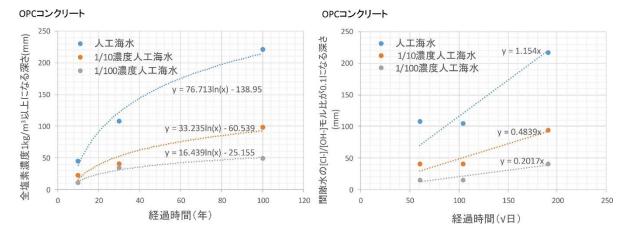


図 3.1-67 経過時間と鉄筋腐食限界になる深さの関係の例(OPC コンクリート)

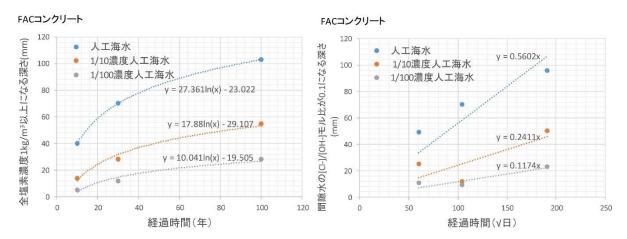


図 3.1-68 経過時間と鉄筋腐食限界になる深さの関係の例(FAC コンクリート)

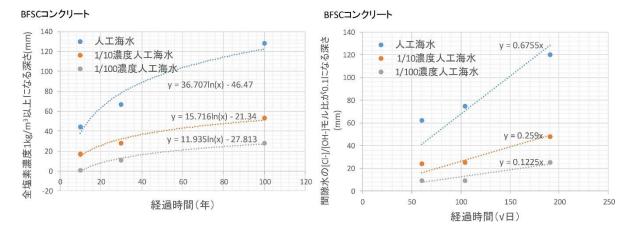


図 3.1-69 経過時間と鉄筋腐食限界になる深さの関係の例(BFSC コンクリート)



吹付けコンクリート

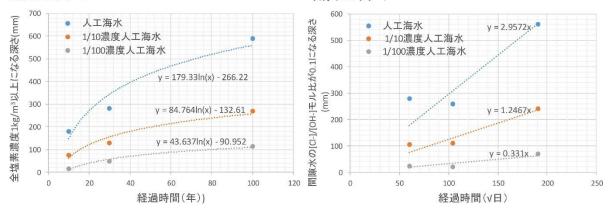


図 3.1-70 経過時間と鉄筋腐食限界になる深さの関係の例(吹付けコンクリート)

5) 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まとめ

バルク試験体を用いた機械的強度の変化に関するデータの取得については、セメント系材料の化学的な変質が機械的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に 14 ヶ月浸漬したバルク試験体の分析を実施した。その結果、浸漬期間が 4 ヶ月と 14 ヶ月とでは傾向は同様で、OPC の方が混合セメントより化学的変質の程度が大きい事、化学変質の程度と塩水濃度との間に明確な線形関係を認められないこと、Ca が溶出した部分で硬度が低下することが確認された。硬度低下には、OPC の場合は Ca 溶脱による空隙の増加、混合セメントの場合は C-S-H の変質が影響していると考えられた。硬度の低下の程度から、既往の検討を基に圧縮強度の低下を推定した結果、セメント系材料の溶脱部の圧縮強度は、健全時の 1/3・1/2 程度まで低下する可能性が示唆された。

また、塩水浸透に係わるモデルの検討においては、鉄筋腐食によるセメント系材料のひび割れに起因する機械的強度低下に関連して、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て、Cl-の浸透のケーススタディを行い、それぞれのケースについて経過時間と鉄筋腐食限界になる深さの関係を求めた。今回実施したケーススタディでは、塩水の影響による主要な鉱物変遷を再現できた。一方、二次鉱物の生成場所が試験結果と異なること及び Cl-浸透挙動が試験と異なり塩水濃度と線形の関係にあることなど、試験結果と異なる点も認められ、塩水濃度が高いケースにおいては Cl-浸透を実際よりも過大に評価している可能性がある。

今後の課題としては以下が挙げられる。

- ・C-S-H の変質など Mg 系二次鉱物生成の機械的強度への影響評価
- ・Cl·浸透解析手法(相平衡物質移行解析)において沈殿物を評価するための検討
- ・現実の処分場の支保工を想定した試験と検討:(岩盤と支保工の接触部分での地下水流動が セメント系材料の化学的変質へ及ぼす影響の評価、モルタルやコンクリートなどの支保工 に使用する材料での検討)

また、処分場の成立性についてより現実的な検討を実施する観点からは、地質調査から得られた処分場周辺の地下水条件(化学組成や流動挙動など)を反映したセメント系材料に関するデータを取得する事、また、水理解析の精度を向上させるにあたり、塩水による変質に伴うセメント系材料の透水性の変化に関する知見を拡充する事が必要であると考えられる。

参考文献

- Dilnesa, B.A., Wieland, E, lothenbach, B., Dahn, R. and Scrivener, K. L., Fe-containing phases in hydrated cement, Cement and Concrete Resarch, vol.58, pp.45-55, 2014.
- 土木学会コンクリート委員会コンクリート標準示方書改訂小委員会, コンクリート標準示方書 耐久性照査型施工編, 1999.
- Duerlden, S., Glasser, F.P., Goldthorpe, K., Pedersen, J. Quillin, K., Ross, D., Stronach, S.A. and Tyrer, M., Chemistory and Performance of blended cements and backfills for use in radioactive waste disposal, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., vol.145, pp.287-294, 1997.
- 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ー人工バリア長期性能確証試験ー報告書,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証試験 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.
- 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, pp.957-962, 2007.
- Hosokawa, Y., Yamada, K., Johannesson, B., Nilsson, L.-O., Development of a multi-species mass transport model for concrete with account to thermodynamic phase equilibriums, Materials and Structures, vol.44, pp.1577–1592, 2011.
- 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, vol.25, pp.185-190, 2003.
- 石田健太, 武若耕司, 山口明伸, 前田 聡, 鉄筋腐食発生限界塩化物イオン量の定量評価に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, vol.29, pp.1065-1070, 2007.
- 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 高度化技術開発報告書, 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.
- 日本原子力研究開発機構,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 処分システム評価確証技術開発報告書, 2018.
- 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,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,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 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,2018.
- 横関康弘, 渡邉賢三, 安田和弘, 坂田 昇, 炭酸化養生によるコンクリートの高耐久化, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, pp.555-560, 2002.

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)及び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、原子力機構,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(原子力機構,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等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・劣化等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、海水準変動等の環境変遷による、長期的な時間スケールでの地下水組成等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、原子力機構, 2012; 2013; 2014; 2015; 2016; 2017; 2018)では考慮されていない。

以上の観点から、沿岸域処分を想定した複合現象の評価手法の構築に向けて、平成 29 年度までは、沿岸域処分における人工バリア材料の変質挙動の特徴を把握するために、セメント系材料とベントナイト系材料に対する海水系の地下水環境での変質挙動に関する既往の知見を調査すると共に、この結果に基づき、これら異種材料間の相互作用や化学・水理・力学に跨るマルチフィジックスの連成現象をニアフィールドの概念モデルとして整理した。また、降水系地下水環境を想定する場合との材料の変質挙動の違いや、海水準変動等の環境変遷によって地下水組成が長期的に変遷していく場合の影響等の傾向を把握することを目的として、沿岸域に処分施設を建設する場合を想定して、ニアフィールド環境条件の変遷を考慮した化学・物質輸送解析を行った。

本年度においては、上記の検討結果を踏まえて、沿岸域処分に特有の環境変遷や材料の変質・相互作用等を考慮した複合現象の評価手法を構築することを目的として、ガラス固化体と TRU 廃棄物を対象とする地層処分システムにおいて共通的に使用される緩衝材に着目し、沿岸域処分を想定した化学・水理等の連成解析の手法を具体化すると共に、これに基づく試解析を行った。さらに、これらの結果から、沿岸域処分において特徴的な現象が、ニアフィールドにおける核種移行の場の状態に影響を及ぼす可能性の有無について整理した。本項ではこれらの検討の成果を示す。

(2) 核種移行経路の場の状態を評価するための連成解析の技術的課題の抽出

過年度の検討では、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した(産総研、原子力機構、原環センター、電中研、2018)。この結果を図 3.1-71 に示す。本図で示されるように、海水系地下水環境においても降水系地下水環境と同様に、緩衝材とコンクリート支保やオーバーパックとの境界領域で二次鉱物が沈殿して間隙が充填されると、緩衝材のそれ以上の変質は抑制され、同時に、核種移行も顕著に抑制されると考えられる。このことから、処分システムの既往の性能評価においては、人工バリア材料の変質は、核種の閉じ込め機能に対しては、むしろ好ましい効果を有するものと考えられている(例えば、電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構、2005)。しかしながら、

海進・海退に起因する、沿岸域処分に特徴的な地下水環境の変遷を考慮すると、このような境界 領域において、緩衝材の変質と核種移行の抑制効果が担保されない可能性があると考えられる。 この場合の核種移行への影響要因として以下が考えられる。

- ✓ 処分場の環境が沿岸域から陸域に変遷して動水勾配が上昇し、コンクリート支保と岩盤あるいは緩衝材とコンクリート支保等の異種材料間の境界近傍で比較的速い地下水流れが生じると、地下水との反応により溶解したバリア材料の成分が外部へ輸送される速度が、二次鉱物が沈殿する速度を上回る可能性が考えられる。この場合、これらの境界において物質輸送を抑制する保護的な変質層が生成(再生)されにくくなり、材料の溶脱あるいは変質が促進していく現象が生じる可能性が考えられる。
- ✔ 閉鎖後長期の時間スケールにおいてニアフィールド岩盤の地下水が海水系地下水から降水系地下水に切り替わることにより、海水系環境下において緩衝材ーコンクリート支保間に形成された境界層が、降水系地下水が浸入することで熱力学的に不安定な状態となり溶解する可能性が考えられる。この場合、上記の流速の増加との組み合わせにより、緩衝材の変質が進行していく可能性が考えられる(例えば、炭酸イオンやマグネシウムイオン濃度が低下することで、緩衝材一支保間に沈殿していたカルサイトやドロマイトが再溶解する可能性などが考えられる)。
- ✓ 緩衝材の外側境界近傍においてコンクリート支保との反応によりモンモリロナイトの含有量が減少しても、内部からの膨潤圧が発揮されると密度の再分配が起こり、拡散場が維持される可能性があると考えられる。しかしながら、海水系地下水環境下では、降水系地下水環境よりも、特に、密度が低い領域で膨潤力が比較的低い値を示すことが知られており(産総研、原子力機構、原環センター、電中研、2017)、これにより、コンクリート支保境界近傍においてモンモリロナイト含有量の低下を緩和する密度の再分配が妨げられる可能性がある。また、降水系地下水環境下に比べて、海水系地下水環境下では緩衝材の透水性が高い値を示すことから(例えば、産総研、原子力機構、原環センター、電中研、2017)、これらの組合せによって緩衝材の変質が進行していく可能性が考えられる。

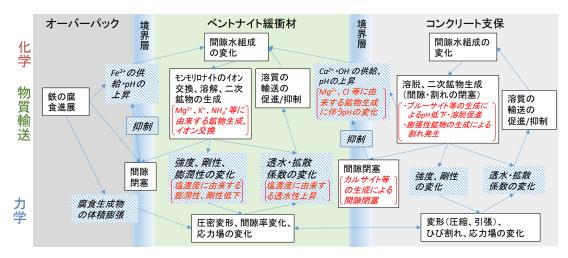


図 3.1-71 海水系地下水を想定した場合の二アフィールドの概念モデルの例 産総研,原子力機構,原環センター,電中研 (2018)。海水系地下水環境に特有の現象を赤字で示す

このような沿岸域処分に特有の地下水環境の変遷によって、コンクリート支保との相互作用が促進され、緩衝材の安全機能が失われる状態の変化をストーリーボードとして整理した。この整理の例を図 3.1-72, 図 3.1-73 および図 3.1-74 に示す。なお、海進・海退に伴って生じる、沿岸域処分に特有の地下水環境の変化としては複数のパターンが想定されるものの、このストーリーボードによる状態変遷の整理においては、処分場の環境が沿岸域から陸域に変遷する単純なパターンを想定した。

緩衝材における、このような状態変遷のパターンに着目しつつ、緩衝材の変質等の状態変化による核種の移行特性に対する影響に関する既往の知見(例えば、伊藤・三原,2005 など)を参考に、拡散係数、透水係数および収着分配係数等を支配する影響因子として、緩衝材のモンモリロナイト含有率と間隙率に着目し、これらの影響因子の変化を定量的に評価するための化学・水理等の連成解析を行うものとして、このためのモデル等に求められる要件を以下に示すように整理した。

- ✓ 海水系地下水環境と降水系地下水環境における人工バリア材料の化学的変質挙動の違いを化学・物質輸送解析モデルで表現できること。
- ✓ ニアフィールド岩盤を流れる地下水の組成や動水勾配が処分後の長期的時間スケールの中のある時点で切り替わることを化学・物質輸送解析および水理解析の境界条件として反映できること。
- ✓ 海水系地下水環境下と降水系地下水環境下での緩衝材の膨潤性および透水性の違いを力学解析モデルで表現できること。

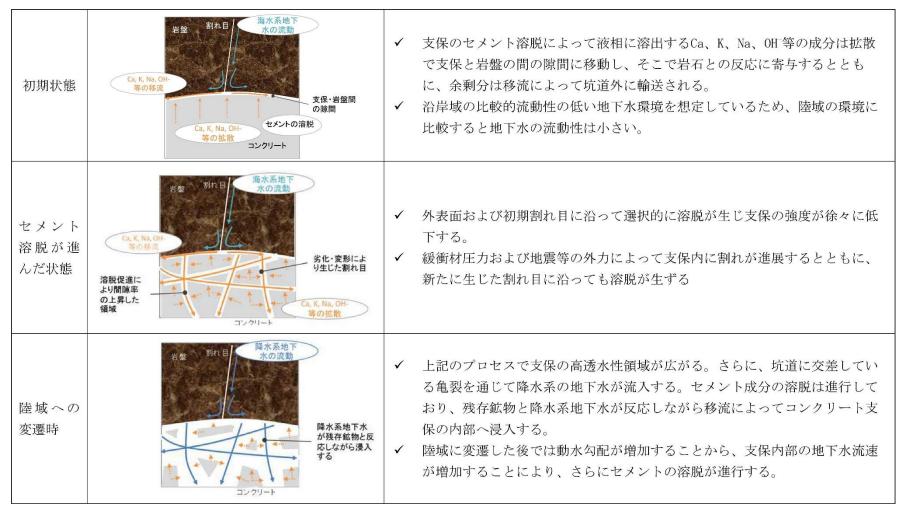


図 3.1-72 緩衝材の止水性が失われる状況に至るシナリオのストーリーボードによる整理結果(岩盤-支保境界部分)

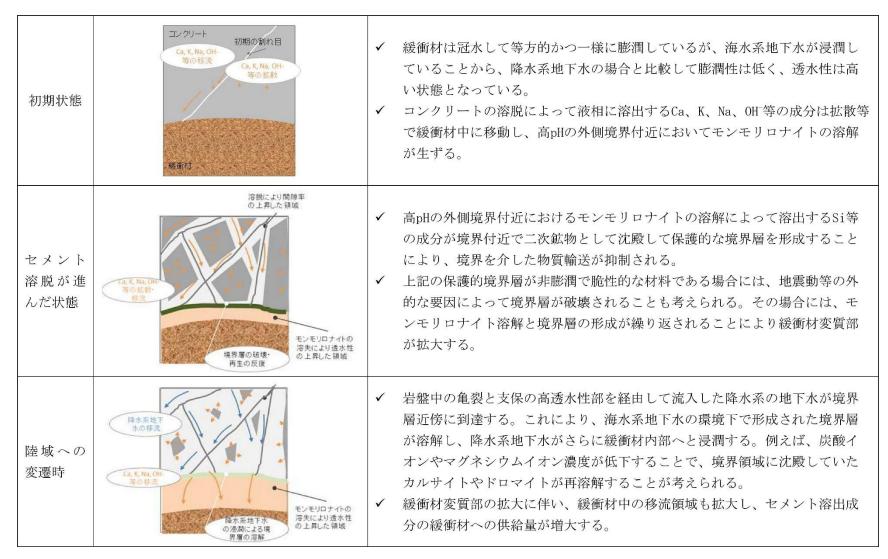


図 3.1-73 緩衝材の止水性が失われる状況に至るシナリオのストーリーボードによる整理結果(支保ー緩衝材境界部分)

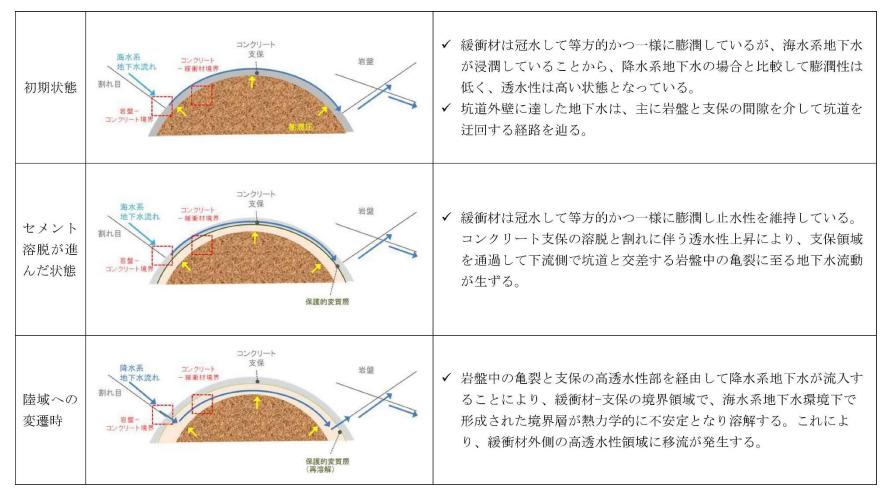


図 3.1-74 緩衝材の止水性が失われる状況に至るシナリオのストーリーボードによる整理結果(坑道スケール)

(3) 緩衝材の長期変遷に着目した連成解析

前述の「(2) 核種移行経路の場の状態を評価するための連成解析の技術的課題の抽出」で示したような、海進・海退に起因する、沿岸域処分に特有の地下水環境の変遷を考慮する場合に、コンクリート支保との境界領域における緩衝材の変質と核種移行の抑制効果が担保されない可能性の有無に着目して化学・水理の連成解析を行うものとした。解析においては、前述の(2)のストーリーボードで示したような、坑道に交差する岩盤中の亀裂から地下水が浸入してコンクリート支保でセメント成分が溶出することによって、支保で選択的な地下水の流れが生じる状況と、これによって高アルカリ水が供給され、緩衝材が変質する状況とを想定し、このような挙動を化学・物質輸送解析と水理解析の連成解析で表現するものとした。

1) 解析ケースの設定

ケース1

解析ケースを表 3.1-26 に示す。ケース 1 では、処分施設が沿岸域に存在し続ける状況を想定し、海進・海退による環境変遷については考慮しなかった。ケース 2 では、前述の(2)のストーリーボードによる状態変遷の整理と同様に、処分場閉鎖後の長期的な時間スケールにおける、沿岸域処分に特有の地下水環境の変化の複数のパターンのうち、沿岸域から陸域に変遷する単純なパターンを想定した。

表 3.1-26 連成解析の解析ケース

処分場周辺の環境条件	
沿岸域に処分場が10万年間存在し続ける状態を想定	

ケース2 沿岸域に処分場が10万年間存在し続けた後に陸域に変遷する状態を想定 Δ岸城および陸城における皇般中の地下水組成としてけ、既往の性能評価解析(例えば、核燃料サイク

※沿岸域および陸域における岩盤中の地下水組成としては、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海水系高pH型地下水(SRHP)および降水系高pH型地下水(FRHP)をそれぞれ選択した。また、動水勾配としては、沿岸域を10⁻²、陸域を10⁻²とした。

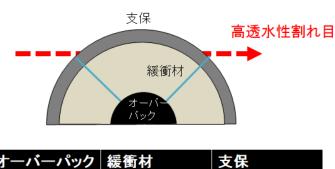
2) 連成解析の手法の具体化

水理解析の解析モデルの概念図を図 3.1-75 に示す。前述の(2)のストーリーボードで整理されたように、亀裂性岩盤を想定して、決定論的な亀裂が坑道に交差している状態をモデル化して、坑道断面を対象とする定常水理解析を行い、求められた人工バリア内の流速に関する情報から、コンクリート支保における地下水流量のみを、化学・物質輸送解析のインプットとして反映するものとした。また、前項(2)で抽出した課題への対応として、処分場が沿岸域から陸域に変遷することによる動水勾配の変化を解析の境界条件として反映するものとした。解析コードとしては、FEMWATER(Lin et al, 1997)を使用するものとした。

化学・物質輸送解析については、一次元軸対象のモデルによる解析を行い、上記の水理解析により求められるコンクリート支保の流量をインプットとして、人工バリア内の緩衝材とコンクリート支保との相互作用による変質挙動をシミュレートするものとした。緩衝材においては拡散場が維持されるものとし、変質によって移流場に変化することについては想定しなかった。また、前項(2)で抽出された課題への対応として、処分場が沿岸域から陸域に変遷することによる、支保に流入する地下水組成の変化を解析条件として反映するものとした。実効拡散係数については、既往の研究(電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構,2005)と同様に、緩衝材については間隙率とモンモリロナイト含有率をパラメータとする関係式を、コンクリート支保については間隙率をパラメータとする関係式により導出した値をそれぞれ用いた。解析コードとしては、ガラス固化体や TRU 廃棄物の人工バリアシステムを対象として、力学解析や水理解析との連成解析を行

った実績があり、かつ、前述の(2)で抽出した課題への対応が可能な解析コードとして、QPAC(原子力機構, 2016) を使用するものとした。

なお、ケース 1 については、初期状態の透水係数が 10 万年間維持されると仮定して上記の定常水理解析を行い、それによって求められた支保内の地下水流量を化学・物質輸送解析のインプットとして反映するものとした。ケース 2 については、ケース 1 と同様に、初期状態の透水係数による定常水理解析の結果をインプットとして反映して、10 万年間、沿岸域に処分場が存在する状態を想定した解析を行い、その後、陸域に環境条件が変化したことを想定した定常水理解析を行って、再度、それにより求められた支保内の地下水流量をインプットとして反映した化学・物質輸送解析を行うものとした。このときの定常水理解析の透水係数については、既往の研究(電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構、2005)と同様に、10 万年後の化学・物質輸送解析の結果に基づき、緩衝材については、ベントナイトの交換性ナトリウムの割合や間隙率等をパラメータとする関係式を、コンクリート支保については間隙率をパラメータとする関係式により導出した値をそれぞれ用いた。



オーバーパック	緩衝材	支保
0.41 m	0.70 m	0.10 m

図 3.1-75 水理解析の解析モデルの概念図

3) 解析条件の設定

初期状態における人工バリアと岩盤の透水性、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 $3.1 \cdot 27$ 、表 $3.1 \cdot 28$ 、表 $3.1 \cdot 29$ 、表 $3.1 \cdot 30$ 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 29 年度の解析と同様に、既往の手法(原子力機構, 2016)などに基づき設定した。解析には、原子力機構 (2017)の熱力学データベース $JAEA 6 \cdot TDB$ (v1.07) を用いた。解析開始時点の鉱物組成分布を図 $3.1 \cdot 76$ に示す。

表 3.1-27 初期状態における人工バリア材料と岩盤の透水性

		値
緩衝材	才の透水係数 [m/s]	$1 imes10^{ ext{-}12}$
コンク	フリート支保の透水係数 [m/s]	$5 imes10^{-11}$
掘削景	ど響領域の透水係数 [m/s]	1×10^{-7}
山原	坑道に交差する決定論的亀裂の透水量係数 [m²/s]	$1 imes10^{-9}$
岩盤	それ以外の部分の透水係数 [m/s]	1×10^{-8}

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]	1.627
CSH(1.65) [mol/dm ³]	1.317
Ettringite-Al [mol/dm ³]	0.029
Katoite-Al [mol/dm ³]	0.012
Hydrotalcite-M4A [mol/dm3]	0.044
Na ₂ O [mol/dm ³] ※	0.015
K ₂ O [mol/dm ³] ※	0.017
細・粗骨材 [%]	67.161
間隙率 [%]	12.898

※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/dm³]	1.465
Quartz [mol/dm ³]	8.101
Chalcedony [mol/dm ³]	7.083
Calcite [mol/dm ³]	0.269
Dolomite [mol/dm ³]	0.146
Analcime-I [mol/dm ³]	0.168
間隙率 [%]	39.998

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
pН	8.286	8.371	13.397	7.900	6.654	13.378
Al	3.43e-07	3.43e-07	1.25e-03	3.33e-09	3.21e-09	8.48e-05
\mathbf{C}	3.48e-03	1.59e-02	2.32e-04	3.55e-02	1.33e-02	5.17e-04
Ca	8.06e-05	5.13e-05	9.05e-04	1.16e-04	1.29e-02	1.17e-03
Cl	1.19e-06	1.19e-06	1.47e-05	6.13e-01	5.90e-01	6.21e-01
Fe	9.73e-10	9.73e-10	9.73e-10	3.89e-08	3.89e-08	3.89e-08
K	6.15e-05	1.29e-04	2.02e-01	1.10e-02	3.62e-03	2.15e-01
Mg	2.16e-05	4.19e-06	2.58e-09	2.78e-05	1.29e-03	9.64e-10
Na	3.55e-03	2.84e-02	1.77e-01	6.62e-01	5.75e-01	8.46e-01
S	1.11e-04	1.11e-04	6.18e-04	3.13e-02	3.01e-02	3.96e-02
Si	3.39e-04	3.22e-04	7.87e-05	3.06e-04	2.54e-04	1.75e-04

※間隙水組成の単位は[mol/dm³]

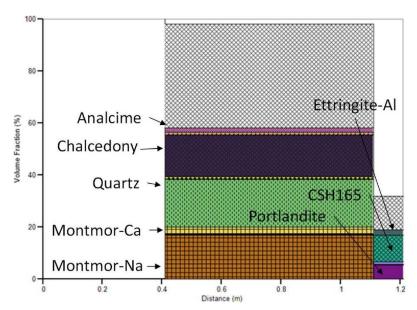


図 3.1-76 解析開始時点(処分場閉鎖直後)の鉱物組成の分布

4) 解析結果

ケース 1 の解析により求められた鉱物組成分布を図 3.1-77 に示す。コンクリート支保については、主な二次鉱物としてカルサイトの生成が認められた。緩衝材との境界領域においては、1万年時点で間隙がほぼ閉塞しており、その後、10 万年に至るまで閉塞状態が継続している様子が認められた。緩衝材については、1/3 程度は Ca 型化したものの、モンモリロナイトの大部分は 10万年後においても残存している様子が認められた。コンクリート支保との境界領域においては僅かにモンモリロナイトが溶解し、カルサイト、ハイドロタルサイト、ドロマイトなどの二次鉱物の生成が認められた。

ケース 2 の解析により求められた鉱物組成分布を図 3.1-78 に示す。コンクリート支保においては、降水系地下水に切り替わることで、CSH の Ca/Si 比の低下や、ポルトランダイト、エトリンガイトなどの溶解による組成変化が認められた。しかしながら、緩衝材においては、モンモリロナイトの減少はコンクリート支保との境界近傍に限定され、地下水組成や流速の変化による影響はほとんど認められなかった。間隙率についても大きな変化は認められなかった。なお、上記に示した、化学-物質輸送解析と水理解析の連成解析の結果から、緩衝材において顕著な変質が認められなかったことから、前述の(2)で示した、緩衝材とコンクリート支保との境界における密度再配分に関する力学的な作用については考慮しなかった。

以上より、前述の(2)で整理された、沿岸域処分に特徴的な環境変遷による、ニアフィールドでの核種の移行挙動に対する顕著な影響は、上記の連成解析の結果からは認められなかった。今後は、より広範囲な地質環境条件や、海水準変動および隆起・侵食による地下水環境の変化に関する複数のパターン間での人工バリア材料の変質挙動への影響の違いにも着目して評価を行い、このような沿岸域に特徴的な環境変遷による核種移行への影響について知見を整備していくことが重要である。

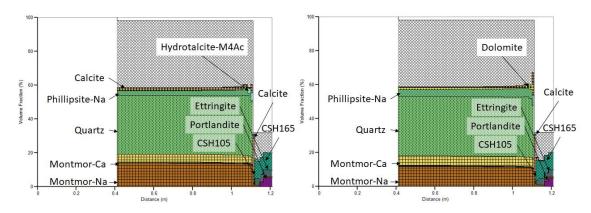


図 3.1-77 ケース1の解析により求められた鉱物組成分布(左:1万年後、右:10万年後)

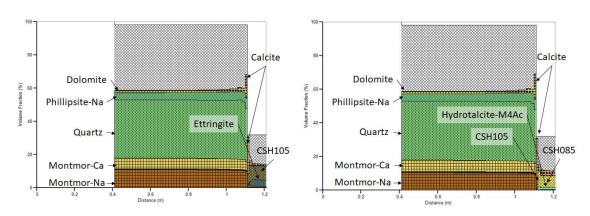


図 3.1-78 ケース 2 の解析により求められた鉱物組成分布(左:13 万年後、右:16 万年後) 10 万年後に陸域に変遷することを想定した解析であることから、それぞれ陸域に変遷してから 3 万年後及び 6 万年後の解析結果に相当する

(4) まとめ

沿岸域処分において、コンクリート支保などの異種材料との相互作用などによって、緩衝材の 止水性が失われる可能性に着目して、化学-水理の連成解析モデルを構築して試解析を行った。そ の結果、緩衝材においてはモンモリロナイトの減少はコンクリート支保との境界近傍に限定され、 地下水組成や流速の変化による影響はほとんど認められなかった。このことは、試解析で想定し た状態変遷のパターンでは、核種移行経路の場の状態に著しい影響を与える可能性は小さいこと を示唆すると考えられる。

今後は、海水準変動や隆起・浸食による地下水環境の変化に関する複数のパターン間での人工バリア材料の変質挙動への影響の違い(例えば、人工バリア材料の変質挙動の空間的な不均質性の違いなど)にも着目した評価手法の構築およびその評価結果を核種移行評価へ反映する手法を構築することにより、これに基づくケーススタディを通じて環境変遷による核種移行への影響に関する情報を拡充できることが期待される。

参考文献

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とりまとめ-, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, 2005.

- 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-地層 処分研究開発第2次とりまとめー分冊3 地層処分システムの安全評価,JNC TN1400,99-023, 1999.
- Lin, H-C.J., Richards, D.R. Yeh, G-T., Cheng, J-R., Cheng, H-P. and Jones, N.L., FEMWATER: A Three-Dimensional Finite Element Computer Model for Simulating Density-Dependent Flow and Transport in Variably Saturated Media, US Army Corps of Engineers, Technical Report CHL-97-12, 1997.
- 日本原子力研究開発機構,平成 23 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, 2012.
- 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.
- 日本原子力研究開発機構,平成 29 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,2018.
- 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,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 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,2018.

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・施工をとお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、工学技術の観点から以下の取組をもって処分システムの成立性を示していく必要がある(図 3.2-1)。

- ▶ 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
- ▶ 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 (品質保証を含む性能確認技術) ⇒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

そのためには、上記の取組に必要となる技術の整備や知見やデータ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/性能確認プログラムの構築に資する技術基盤を整備していくことが望まれる。

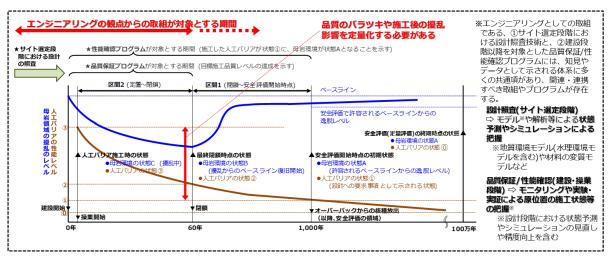


図 3.2-1 工学技術の枠内で扱われる処分システムの成立性

本章の冒頭(3.1 節)に示した沿岸部研究会による課題整理を踏まえ、本事業では上記①の課題に取り組んできた。その際、操業段階と閉鎖後長期の処分システムの安全確保のそれぞれが対象とする時間スケールの違いを考慮しつつ、対象期間における湧水環境(水理場)に着目して、処分システムの初期性能達成の見通しを得るための定量化手法の整備を進めた。

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及びフィンランド)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を及ぼす要因(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,原子力機構,原環センター,電中研,2016)。湧水が及ぼす影響の観点から、緩衝材と地下水の相互作用である吸水・膨潤、更には再冠水過程における流出挙動が人工バリアシステムの成立に深く関わっており、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、本課題への取組では、わが国の沿岸部で特徴的となる地下の水理環境(湧水環境/湧水対策)や処分システムの構成材料に対する化学的影響(塩水系地下水)などの状況

を念頭に置いて、重要な要素や影響因子を特定して、成立性を提示するための手法の整備に向けた検討を進めてきた。

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影響の緩和対策 (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、本節の中で展開している。 以下、次の構成で個々の個別課題に関する全体計画、並びにこれまでの実施内容や得られた成果 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及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、浸透性が高くて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)において実証試験及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、海水条件下における溶液型グラウトの設計・施工方法を確立することを目的として、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。

- ・既存の知見及び課題の整理
- ・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、主として設計方法を確立することに資する情報を得ることを目的として、グラウト 特性データの拡充並びにモデル化・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

溶液型グラウト材料の海水条件下及び化石海水条件下などでの長期安定性(力学的・化学的安定性)の把握に資するため、2種類の海水対応グラウト(「海水適用グラウト」と「海水硬化促進グラウト」)について、1年以上の養生期間を経た海水適応グラウト基本配合及び3ヶ月以上の養生期間を経た海水硬化促進グラウト基本配合のグラウト硬化体(ホモゲル)について、ホモゲル長期力学的安定性確認試験とホモゲル長期化学的安定性確認試験を実施した。図 3.2-2 と表 3.2-1 及び表 3.2-2 に溶液型グラウトの配合を示す

【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)				

図 3.2-2 溶液型グラウトとその配合

表 3.2-1 海水適応グラウトの基本配合

配合名.	練混ぜ水	設定	Hi シリカ	рН	pH 調整剤	硬化促進剤	
		ゲルタイム	(ml/l)		(ml/l)	(g/l)	
D-60	精製水	60 分	800	6.49	4	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	

表 3.2-2 海水硬化促進グラウトの基本配合

配合名.	練混ぜ水	ゲルタイム	Hi シリカ (ml/l)	рН	pH 調整剤 (ml/l)	硬化促進剤 (g/l)
Si-45	して海北	80 分	450	7.75	0.5	0
Si-60	人工海水	72 分	600	8.13	0.5	U

1) 長期力学的安定性の把握

練混ぜ水と同じ養生水で養生した海水適応グラウトのホモゲル(グラウト硬化体)を養生し、一軸圧縮試験により養生後のホモゲルの長期力学的安定性の確認を行う。試験条件は、基本配合 6 種類×養生温度 2 水準(20° C、 55° C)=12 条件とし、材齢は、ホモゲル作成後 1 年以上の養生期間で 2 材齢とする。同様に、練混ぜ水と同じ人工海水で養生した海水硬化促進グラウトのホモゲルを養生し、一軸圧縮試験により養生後のホモゲルの長期力学的安定性の確認を行う。試験条件は、基本配合 2 種類×養生温度 2 水準(20° C、 55° C)=4 条件とし、材齢は、ホモゲル作成後 3 か月以上の養生期間で 2 材齢とした。なお、 55° Cでの試験は 30 倍の加速試験に相当する。

・海水適応グラウト

平成 28 年度及び平成 29 年度に実施した試験結果を含めて図 3.2-3 に示す。20^{\circ} に標準養生の試験の結果、すべての配合のホモゲルにおいて、250 日までは一軸圧縮強度は養生時間に応じて増加し、練混ぜ水の違いによらず、ほぼ同等の強度を示した。練混ぜ水に人工海水を用いた場合であっても強度が小さくなる問題点などは認められなかった。しかし、養生時間が 250 日を超えると、練混ぜ水の違いで強度が異なる結果となった。練混ぜ水に人工海水を用いたケースでは 250 日をピークに強度の低下が始まり、720 日時点では 100 kPa 以下を示し、その後も継続的に強度が低下する可能性がある。練混ぜ水に 50%人工海水を用いたケースでは、最も高い強度を示したのは 630 日時点であり、720 日ではそれよりも強度が低い結果を示しており、人工海水が練混ぜ

水の場合より遅れて 630 日時点から強度低下が始まっていることが予想される。ここで、上記の強度低下が発生するホモゲル、すなわち練混ぜ水に人工海水を用いたケースを観察すると、微細なひび割れが発生していることが分かった。このため、破壊時は細かく粉砕する傾向を示しており、せん断破壊により粉砕する傾向であった 28 日時点での海水系グラウトや 730 日時点での通常のグラウトとは、破壊モードと異なっていた。したがって、練混ぜ水に使用する海水または浸漬に用いる養生水の海水成分が、ホモゲルに年オーダーの長期では微細な内部ひび割れを引き起こし、強度を低下させる可能性が考えられる。ただし、このような微細なひび割れが増加することにより、どこまで強度が低下するか、また、亀裂中の水圧に対する抵抗性にどれだけ寄与するかは把握できないため、今後の課題と考えられる。

55℃促進養生の試験の結果、すべての配合のホモゲルにおいて 20℃に比べて早く強度が発現することが確認できる。例えば、20℃標準養生の場合は一軸圧縮強度が 100 kPa を示すのは 90 日前後経過した段階であるが、55℃養生ではすべての供試体で 7 日経過後にすでに同等以上の強度を示した。55℃養生での一軸圧縮強度は 7 日で大きく増加し、その後 27 日までは増加する傾向を示すが、それ以降は養生時間との明確な関連性は見られず、バラツク傾向を示す。そのバラツキは 100 - 400 kPa と範囲が大きく、練混ぜ水の違いやゲルタイムの違いによる傾向の差異は見受けられない。ただし、20℃養生の場合と異なり、練混ぜ水に人工海水を使用した場合であっても、長期養生後に 100 kPa 以下に強度が低下する傾向は観察されなかった。55℃養生の試験では、通常の 20℃の養生より化学的な反応や分子の運動が早まるため、その結果 20℃養生に対して供試体の時系列を促進したものとして試験を実施している。今回の結果では 100 kPa 以上の範囲でばらついているが、海水促進グラウトで強度が低下していないことから、20℃養生の低下においても、化学的な溶脱や自己崩壊によるひび割れではないことが推定できる。

・海水硬化促進グラウト

図 3.2-4 に海水硬化促進グラウトの 2 種類の配合のホモゲルの一軸圧縮強度の時間変化を示す。養生時間が 90 日までの結果は平成 29 年度の結果であり、それ以降が平成 30 年度の結果である。また、海水適応グラウト(S-60)の結果を比較のために併記した。

20℃標準養生の試験の結果、海水硬化促進グラウト(Si-45、Si-60)の一軸圧縮強度は、海水適応グラウト(S-60)に比べて低いことがわかる。これは、海水硬化促進グラウトのシリカ含有率が低いことが原因と考えられる。海水適応グラウトはグラウト 11 中にグラウト原液である Hi シリカを 800 ml としているが、海水硬化促進グラウトは 600 ml(Si-60)と 450 ml(Si-45)である。Si-45 の方が Si-60 よりも一軸圧縮強度が小さいことからも、ホモゲルの力学強度はシリカ含有率に依存していると言える。一方、一軸圧縮強度の時間変化については、海水硬化促進グラウトは、海水適応グラウトと異なる傾向を示した。すなわち、海水適応グラウトは 250 日をピークに強度が低下し始めたが、海水硬化促進グラウトの 2 種類のホモゲルの強度は 480 日時点で増加中である。

55℃促進養生の試験の結果、一軸圧縮強度は2種類の配合ともに、20℃養生した場合に比べて高い値を示していることがわかる。また、20℃養生の場合は470日時点でも強度増加が続いているが、55℃養生の場合は、30~90日程度まで強度が増加したのちは、ほぼ一定の強度を示した。

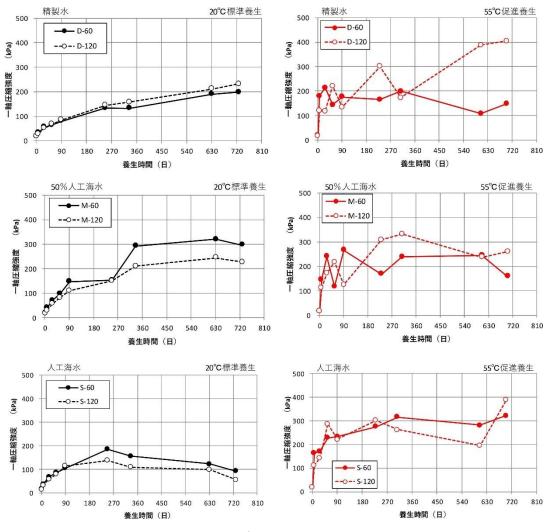


図 3.2-3 海水適応グラウトの一軸圧縮強度の変化

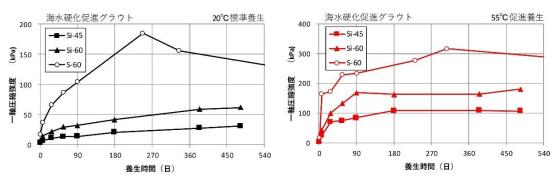


図 3.2-4 海水硬化促進グラウトの一軸圧縮強度の変化

2) 長期化学的安定性の把握

海水適応グラウト及び海水硬化促進グラウトについて、練混ぜ水と同じ養生水でホモゲルを養生し、養生後のホモゲルからのシリカ溶脱量などの経時変化(海水適応グラウトは 2 年、海水硬化促進グラウトは 1 年の期間)を測定することにより、ホモゲルの長期化学的安定性を評価する。試験条件は、海水適応グラウトについては、基本配合 6 種類×養生温度 2 水準(20°C、55°C) = 12 条件とし、データを取得する材齢は、ホモゲル作成後 1 年以上の養生期間で 2 材齢とする。ま

た、海水硬化促進グラウトについては、基本配合 2 種類×養生温度 2 水準(20°C、55°C)=4条件とし、データを取得する材齢は、ホモゲル作成後 3 か月以上の養生期間で 2 材齢とした。

・海水適応グラウト

試験結果を図 3.2-5 に示す。

シリカについては、20℃養生した場合、練混ぜ水が精製水と50%人工海水のホモゲルでは、浸 漬時点からほぼ直線的にシリカ濃度が増加し、200日程度で100 ml/1程度に収束している。これ に対し、練混ぜ水が人工海水のホモゲルでは、他の2つより浸漬初期における濃度の増加が顕著 であり、100日程度で100 ml/Iの濃度に収束している。人工海水の場合が他の2つの場合よりも 初期の溶出量は大きいが、どちらの場合も一定時間が経過し、養生水のシリカ濃度が 100 ml/l 程 度に近づくとホモゲルからのシリカの溶出が抑制されると考えられる。この傾向は、310日時点 で水替えにより養生水を初期状態に戻したあとの、600 - 700 日時点の濃度においても 90 - 100 ml/I 程度となったことからも明らかである。55℃促進養生の場合、人工海水の場合は初期のシリ カ濃度上昇が急激であるが、50%人工海水および精製水の場合は緩やかである。人工海水では他 の2つに比べて比較的早い段階でシリカ濃度の上昇が収まる。このような挙動は、20℃養生の場 合と同様の傾向を示している。しかし、濃度上昇が収束するまでの時間および上昇が収束した濃 度は 55℃養生の場合と 20℃養生の場合で異なっている。濃度上昇が早く収束する人工海水の場 合で比較すると、収束するまでの時間は20℃養生の90日程度に対して55℃養生では30日程度 と、55℃養生のほうが 3 倍速い。また、シリカ濃度の収束値は 20℃の 100 mg/l に対して 55℃で 150 - 170 mg/l と、55℃養生のほうが 1.5 倍程度大きい。これは養生温度が高いことによりシリ カの溶解度が上昇していることが要因と考えられる。したがって、55℃養生を20℃養生の促進試 験ととらえる考え方は、シリカの溶出挙動を評価するための浸漬試験では、せいぜい3倍程度の 促進効果しかなく、強度試験のように 30 倍もの促進とはならないことに加えて、養生水の最大 濃度が養生温度に依存することから、適用する価値が低いと考えられる。

ナトリウムイオンについては、人工海水で練り混ぜたホモゲル(S-60、S-120)は養生水として人工海水を用いており、養生水の初期のナトリウムは $10,000\,\mathrm{mg/l}$ 、また、50%人工海水は人工海水を同量の精製水で希釈しているので、初期のナトリウムイオン濃度は $5,000\,\mathrm{mg/l}$ と人工海水の半分が初期値となっている。養生水のナトリウムイオン濃度は、精製水で練り混ぜたホモゲルを浸漬した場合には、試験期間中でほとんど変化しなかった。一方、50%人工海水および人工海水で練り混ぜたホモゲルの場合は、浸漬初期には変化しないが、その後濃度が増加し、ふたたび下がり始める傾向があった。その濃度増加は 20% 全生の場合は 10-20% 程度であるが、55% 全をの場合は 56 日目までの1回目の浸漬期間では2倍近くまで増加している。養生の温度が高いとナトリウムイオンの溶出が多く、シリカの場合と同様である。

カリウムイオンについては、事前に養生水を分析した結果、初期の養生水のカリウムイオン濃度は人工海水で 390 mg/l であり、50%人工海水で 170 mg/l であった。カリウムイオン濃度は、初期に増加し、その後一定値に収束する挙動を示し、それはナトリウムイオンの場合よりも明確に確認できる。収束濃度はホモゲルの違いによりそれぞれ異なっているが、初期からの濃度増分で評価すると、練混ぜ水(養生水)が異なっても同じ挙動を示していると推測できる。一方で、ゲルタイム 60 分のケースはゲルタイム 120 分のケースがカリウムイオン濃度は高くなることは明らかである。これはホモゲル中のカリウムイオンの含有量に依存していると考えられる。

カリウムイオンについては、事前に養生水を分析した結果、初期の養生水のカリウムイオン濃度は人工海水で 390 mg/l であり、50%人工海水で 170 mg/l であった。カリウムイオン濃度は、初期に増加し、その後一定値に収束する挙動を示し、それはナトリウムイオンの場合よりも明確に確認できる。収束濃度はホモゲルの違いによりそれぞれ異なっているが、初期からの濃度増分

で評価すると、練混ぜ水(養生水)が異なっても同じ挙動を示していると推測できる。一方で、 ゲルタイム 60 分のケースはゲルタイム 120 分のケースがカリウムイオン濃度は高くなることは 明らかである。これはホモゲル中のカリウムイオンの含有量に依存していると考えられる。

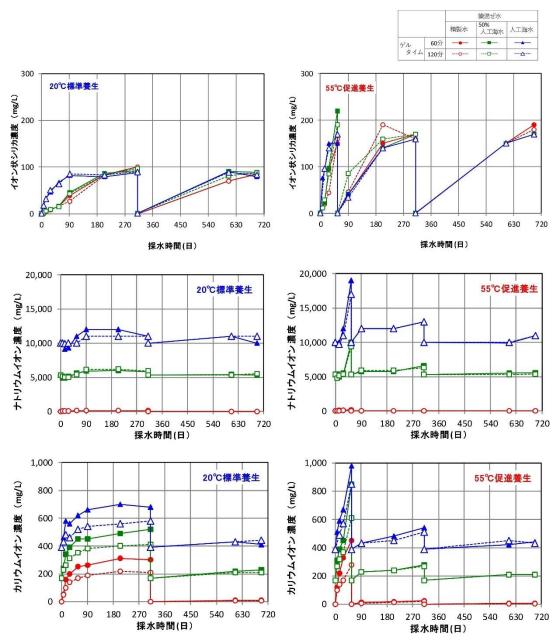


図 3.2-5 海水適応グラウトのシリカ、ナトリウムイオン、カリウムイオンの溶出量の変化

・海水硬化促進グラウト

試験結果を図 3.2-6 に示す。図には 6 種類の海水適応グラウトのうち海水硬化促進グラウトと配合条件が近い S-60 の結果を併せて示した。

シリカについては、濃度の収束値は 20℃養生の場合で 90~100 mg/l、55℃養生の場合で 150~170 mg/l と、海水適応グラウトとほぼ同等であった。20℃標準養生、55℃促進養生にかかわらず、シリカ濃度が収束するのに要する時間、収束する濃度ともに、海水硬化促進グラウトと、海水適応グラウトのうち人工海水で練り混ぜたホモゲルはほぼ同等の結果を示していると言える。

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同じであると言える。

ナトリウムイオンについては、養生水には人工海水を用いており、その初期濃度は 10,000 mg/l であり、その後の経過時間に伴うイオン濃度の上昇は認められない。

カリウムイオンについては、初期濃度は 400 mg/l であった。カリウムイオン濃度については、養生温度によらず、海水硬化促進グラウトのすべてのホモゲルで濃度の上昇は認められない。海水硬化促進グラウトは硬化促進剤を用いておらず、硬化促進剤の主成分は KCl (塩化カリウム)であり、このためカリウムイオン濃度が上昇しなかったと考えられる。すなわち、Hi シリカ濃度80%の平成 28 年度から実施している 6 種類の基本配合の海水適応グラウトでは、カリウムイオンの溶出はすべて硬化促進剤の成分であったといえる。

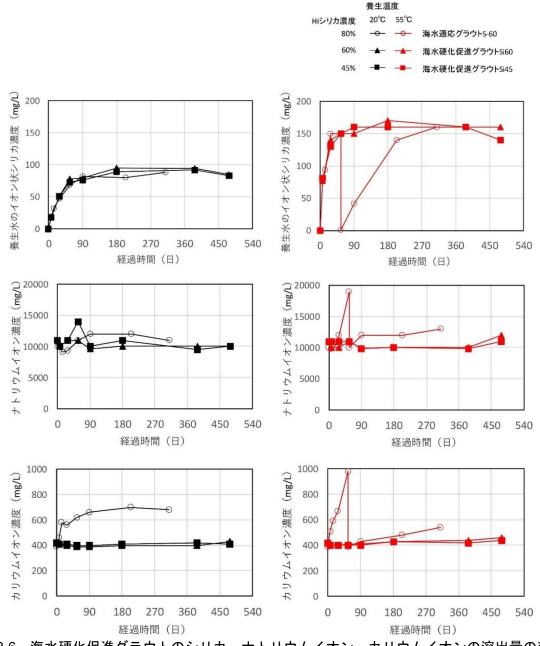


図 3.2-6 海水硬化促進グラウトのシリカ、ナトリウムイオン、カリウムイオンの溶出量の変化

(3) モデル化・数値解析への適用性検討

・グラウト浸透性確認試験

グラウト技術のモデル化・数値解析への適用性検討に資するため、また、昨年度提示した新し いグラウト浸透理論の適用性を検証するため、グラウト浸透性確認試験を実施した。

本試験は、1m 四方程度の人工亀裂を模擬したアクリル製などの材料の平行平板の装置を用い て溶液型グラウトを注入させる室内試験を実施し(フィンランドの AINS グループにより実施)、 亀裂内での溶液型グラウトの浸透特性(浸透距離、時間など)を把握するとともに、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検討した。

材料は、本研究の対象材料であるパーマロック Hi (強化土エンジニヤリング社製) を主材料と し、従来型グラウトと海水適応グラウトを対象とした。また、比較として、北欧で多く用いられ ている Master Rock® MeycoMP320 (BASF SE 社製) の浸透性確認試験も数ケース実施した。 従来型グラウトは、パーマロック Hi を 800 ml、硬化促進剤 200 ml (脱イオン水 200 ml + 臭化 カリウム促進剤 21g) を 30 秒間撹拌して試験に供した。海水適応グラウトは、パーマロック Hi 800 ml、硬化促進剤 196.5 ml(人工海水 196 ml+臭化カリウム促進剤 30 g+pH 調整剤として リン酸を 3.5 ml) を 30 秒間撹拌して試験に供した。北欧のグラウトは、MasterRock (R) MP320 を 800 ml、同シリーズの硬化促進剤 250 ml を 30 秒間撹拌して試験に供した。なお、浸透状況 の視野性を向上するために着色染料を添加した。

表 3.2-3 に材料の物性値を、図 3.2-7 に平行平板試験装置のイメージを、表 3.2-4 に平行平板 を用いた浸透性確認試験のケースを表 3.2-5 に示す。試験においては、以下の情報を取得した。

- ・グラウトの半径方向の浸透距離[mm]
- ・グラウトの排出口からの流出の開始時間[分]
- グラウトの総流出量[]]
- ・グラウトと亀裂内の模擬地下水の混ざり具合の撮影(写真、ビデオ)
- ・試験終了直後のグラウトの浸透状況の撮影(写真、ビデオ)
- グラウトのフロック形成の観察(写真、ビデオ)

なお、事前に実施したゲルタイム確認試験の結果、従来型グラウトは15±1分、海水適応グラ ウトは 17±1 分、Master Rock® MeycoMP320 は 11±1 分であり、若干の差が見られたが、そ れぞれの材料における誤差は1分以内であり、精度は良いことが確認できた。添加した染料の影 響は見られなかった。また、事前に白濁試験を実施し、従来型グラウトとオンカロ地下水の組み 合わせと、MeycoMP32と全ての地下水の組み合わせでは、顕著な白濁があり比較的不均一な混

在が認められた。

材料 粘性 (mPa・s) 密度(kg/m³) シリカ含有量(w%) pHHi シリカ 9-10 < 151210 30-31 MeycoMP320 ~ 10 1300 9.5 - 9.839-41

表 3.2-3 溶液型グラウト材料の物性値

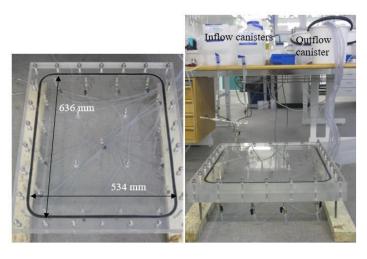


図 3.2-7 平行平板装置

表 3.2-4 浸透性確認試験の試験ケース

模擬地下水 グラウト種類	精製水	50 %海水 + 50 %精製水	人工海水	オンカロ 模擬水
従来型グラウト (パーマロック Hi)	ケース③	ケース⑫	ケース① ケース⑪	ケース②
海水適応グラウト (パーマロック Hi)	ケース⑥	ケース⑬	ケース④ ケース⑩	ケース⑤
Meyco MP320 (Master Rock)	ケース⑨		ケース⑦	ケース⑧

※ ケース①~⑨:動水勾配なし(非流動条件下) ※ ケース⑩~⑩:動水勾配あり(流動条件下)

表 3.2-5 浸透性確認試験の試験条件

材料	ゲルタイム T _G	ゲル化 開始時間 t _G	注水圧力 ΔP (Pa)	初期粘性 µ ₀ (Pa·s)	亀裂 開口幅 B (mm)	浸透距離 半径 (予測値) (mm)
パーマロック Hi	900 秒 (15 分)	300 秒 (5 分)	2,000	0.002	0.1	318
MP320	720 秒 (12 分)	240 秒 (4 分)	2,000	0.005	0.1	180

※注水圧力は注入用チューブで水頭(17 cm の高さ)を調整することで設定した(P=pgh。 $P: 水頭、<math>\rho: \not O$ がラウト材と亀裂内の模擬地下水の密度比、 $g: \pi$ が見から

図 3.2-8 に浸透性確認試験の結果の一例を示す。動水勾配がない場合の結果を整理する。 従来型グラウト (パーマロック Hi) の試験結果は、精製水と人工海水 50%+50%で最も浸透性が良く、オンカロ模擬水はこれらの 1/3 程度であった。

- ・精製水もしくは 50 %混合水 (人工海水+精製水): ~170 mm (7.3 ml)
- · 人工海水: ~110 mm (3.0 ml)
- ・オンカロ模擬水: ~60 mm (1 ml)

海水適応グラウト (パーマロック Hi) の試験結果は、模擬地下水によって浸透距離に差が見られた。精製水と人工海水 50%+50%で最も浸透性が良く、オンカロ模擬水はこれらの 8 割程度であった。従来型グラウトと比べると、精製水、50 %混合水は同じ結果となっているが、オンカロ水模擬では、約 2 倍程度、浸透性が向上している。

- ・精製水もしくは 50%混合水 (人工海水+精製水): ~170 mm (7.3 ml)
- ・オンカロ模擬水: ~130 mm (4.5 ml)

MP320 の試験結果は、模擬地下水によって浸透距離に差が見られた。なお、追加として、模擬地下水をオンカロ模擬水と精製水を 50 % ずつ配合したケースを実施した。

- ・精製水もしくは 50 %混合水 (オンカロ模擬水+精製水): ~265 mm (13.0 ml)
- ・精製水: ~230 mm (13.0 ml)
- ・オンカロ模擬水: ~185 mm (8.3 ml)

試験終了後に装置を解体して、グラウトの浸透状況を確認したところ、従来型グラウト、海水 適応グラウト及びMP320のいずれも以下の状況であった。

- ・薄いゲル状塊がアクリル板上の水中に浮遊していた。
- ・干のゲルがアクリル上板の内側に付着していた。
- ・亀裂へのグラウト注入量は予測式で求められた注入量と整合が取れている。

次に、動水勾配(グラウト注入部における流速: $10 \, \text{ml/min}$)がある場合の結果を整理する。 従来型グラウト(人工海水)では、注入量は $2 \, \text{ml}$ で浸透距離は $89 \, \text{mm}$ であった。グラウトの排出口からの流出はなかった。従来型グラウト(精製水)では、試験開始から $6 \sim 20 \, \text{分の間}$ にグラウトの排出口からの流出が観測された。ゲルタイム($15 \, \text{分}$)が経過した後も、流失によるグラウト量の減少が継続した。グラウトの注入量は $27 \, \text{ml}$ で、浸透距離は $328 \, \text{mm}$ であった。

海水適応型グラウト(人工海水)は、試験開始から3分以内に模擬地下水が流れている方向にグラウトの流出が生じ、6分後にグラウトの排出口からの流出が観測された。ゲルタイム(17分)が経過した後も流失によるグラウト量の減少が継続した。試験終了時(35分)には、均一なグラウトの模様は見られなかった。グラウトの注入量は4mlで、浸透距離は126mmであった。

図 3.2-9 に各ケースのグラウト浸透状況を示す。海水適用グラウトは、動水勾配無しの非流動条件下において、他の地下水環境においても良好なグラウト注入結果となった。動水勾配有りの流動条件下(亀裂内の模擬地下水の流速=10 ml/min)においては、流失によりグラウト量の減少が観測された。オンカロ模擬地下水がグラウトの浸透距離への影響が最もあると言える。

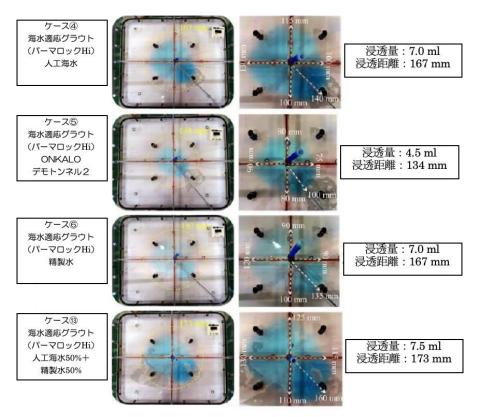


図 3.2-8 浸透性確認試験の結果の一例

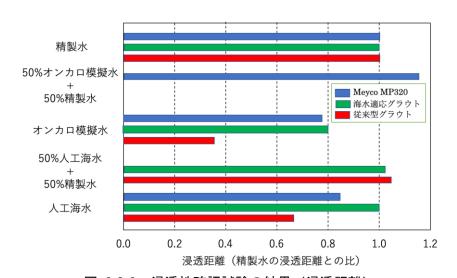
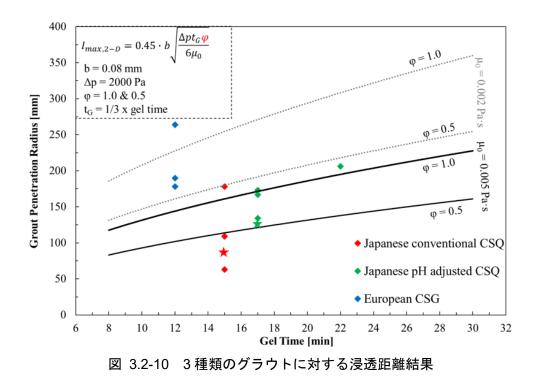


図 3.2-9 浸透性確認試験の結果(浸透距離)

今回のグラウト浸透性確認試験における、5 種類の模擬地下水に対する各グラウトを適用した場合の相対浸透距離(精製水時を 1 とする)の結果は図 3.2-9 に示したとおりである。オンカロ模擬水に対して、海水適応グラウトは白濁試験で白濁が全く発生しなかった事例である。本結果から、グラウトの浸透距離はカルシウムイオンが多いオンカロの地下水(化石水)では大幅に低減されるが、日本の pH 調整型グラウト及び北欧グラウトについてはそれほど低減されないことが分かった。また、50%濃度の人工海水やオンカロ模擬水では低減されないことが分かった。

いずれのケースにおいても一定の浸透距離を確保できたことから、今後、補正係数φの決定手 法を定める必要があるが、地下水が安定する条件下であれば事前に実験室などでφを取得し、ゲ ルタイムを割り増し設計することにより、所定の浸透距離を確保することが可能になると言える。 特筆すべきは、pH 調整型グラウトのみに着目すると日本の人工海水に浸透させたときは、精製水のそれと全く同じ結果になっていることである。すなわち、海水適応グラウトは $_0=1$ となることが示唆される。オンカロ模擬水については、白濁試験を実施して配合選定をしていない。このため、オンカロ水をターゲットとして pH 調整した配合を用いて浸透試験を実施していれば、同様に $_0=1$ になることが期待できる。なお、北欧のグラウトの浸透距離が通常の日本のものに比べて浸透距離の低減が見られないのは、グラウトの粘性が影響していると考えられる。日本のグラウトは $_2$ mPas に対し、北欧のそれは $_3$ mPas のため、グラウトの先端が混ざりにくいことが、北欧グラウトが浸透しやすい理由のひとつではないかと推測できる。

図 3.2-10 は、グラウトの粘性に応じて浸透距離をプロットしたものであり、参考に $\phi=0.5$ と 1.0 を示した場合の理論式を示している。相対距離ではなく絶対的な浸透距離に対して検討すると、日本のものと北欧のものが反対の結果となっている。今回は制約条件が多いなかで検討しており、あくまで ϕ を抽出するための小さいサイズの装置、非常に短いゲルタイムを用いた成果であるが、今後は浸透理論式そのものも含めて検討していくためには、より大型のサイズの試験を実施して検証することが望ましいといえる。今後の浸透理論のさらなる開発のためには、先端でのグラウトの反応が重要な要素と考えられるため、フネハグ博士が取り入れていたグラウト先端での動水勾配の理論などを取り入れる必要があるといえる。このように、適切に ϕ を決定し、理論式をモデル化・数値解析に向けて適切な浸透モデルを提示することにより、グラウト浸透のモデル化数値解析に展開できるといえる。



(4) グラウト設計技術の適用性評価

平成 28 年度及び平成 29 年度に実施した研究成果並びに前述の「(2) 海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得」及び「(3) モデル化・数値解析への適用性検討」の成果について、北欧の専門家を含めたワークショップを開催しレビューを受けた。以下にワークショップの概要を示す。

▶ 開催日 : 2019年1月21日 (月)

> 場所 : Bertel Jungin aukio 9, FI-02600 Espoo, Finland

▶ 参加者 :表 3.2-6 参照

▶ 目的 : 国内外のグラウト最新技術の情報交換及び当案件の成果レビュー

▶ プログラム :表 3.2-7 参照

表 3.2-6 ワークショップ参加者一覧

	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
氏名	所属(国)	
Heikki Sandström	POSIVA (FINLAND)	
Martikainen JARI	AINS (FINLAND)	
Jorma AUTIO		
Fionán O'CARROLL	AINS (FINLAND)	
Schatz Timothy		
Henrik ITTNER	SKB (SWEDEN)	
Johan FUNEHAG	Luleå University of technology (SWEDEN)	
Åsa FRANSSON	Golder Associates (SWEDEN)	
Toshinori SATO 佐藤稔紀	日本原子力研究開発機構(日本)	
Kazuhei AOYAGI 青柳和平		
Hiroyuki TSUCHI 土宏之		
Masakuni TSUJI 辻正邦	速水净剂性学会社(日本)	
Hitoshi NAKASHIMA 中島均	清水建設株式会社(日本)	
Hiromi KUROSAKI 黒﨑ひろみ		
Takamitsu SASAKI 佐々木隆光	強化土エンジニヤリング株式会社(日本)	

表 3.2-7 ワークショップのプログラム

Morning Par	t 1: Introduction		
9:00-9:45	Introductions of each participant	All	-
9:45-10:00	The History of Developing the colloidal silica grout in	T. Sasaki	強化土エンジニ
	Japan		ヤリング(株)
10:00-10:30	-Backgrounds and introduction of the study of the	K. Aoyagi	JAEA
	colloidal silica grout		
	-Backgrounds and introduction of the study, 1.2	M. Tsuji	清水建設 (株)
	Literature review		
10:30-10:45	Short break	-	-
10:45-11:00	Previous grouting workshop in 2017	M. Tsuji	清水建設 (株)
Morning Par	t 2: Characterisation of basic properties	under sea water	
11:00-11:40	Laboratory tests on characterisation of colloidal silica	H. Nakashima	清水建設(株)
	grout (CSG) under seawater		
11:40-12:20	Study on the long-term behavior of CSG	M. Tsuji	清水建設(株)
Afternoon Pa		ation under seawa	
13:20-13:40	Developing a grout penetration theory of CSG under	M. Tsuji	清水建設 (株)
13:40-14:30	seawater Testing Colloidal Silica Grout i a Fracture Test System	M. Jari	AINC Corre
Afternoon Pa	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		AINS Group
14:30-15:10			
	Discussion; review of the study Short break	All	-
15:10-15:30		- 	-
Afternoon Pa			T M C
15:30-16:00	Boreholes –Hydraulic Gradient and Erosion –leaking boreholes, despite grouting	J. Funehag	LTC
16:00-16:20	Nuclear Fuel Repository in Forsmark	H. Ittner	SKB
16:20-16:40	Latest information in Finland	H. Sandström	Posiva
16:40-17:20	Discussion for the future tasks	All	- USIVA
17:20-17:30	Closing	T. Sato	JAEA
11.20 11.00	Closing	1. 5410	0111111

グラウト専門家による当研究成果のレビューの結果を以下に示す。

・導入部について

- ➤ スタンフォード大学をはじめ溶液型グラウトの材料特性・浸透特性に関する最新知見があるので情報提供する。(LTC フネハグ准教授)
- ➤ ニアフィールドへの注入、EDZ の取扱いに注意が必要である(ベントナイトは水が全くなくても固まる)。
- ▶ グラウトの耐久性が重要である。ワーストシナリオを検討すべき。(Posiva ヘイキ氏)
- ▶ ノルウェーの業者が溶液型グラウトを使用して香港で海底トンネルを建設している。 ISRM グラウト委員会を通じて現場担当者へのヒアリングが有効といえる。(Golders オーサ博士)
- ・基礎物性の取得について
 - ➤ 海水適応グラウトのうち、海水硬化促進グラウトの方は海水条件に大きく依存するので難 しいのではないか。(LTC フネハグ准教授)
 - ▶ 指摘通り、練混ぜ水(湧水)の品質が安定しているときに限定した適用を想定している。 なおこの場合については、様々な水理地質条件に基づいた適用手法案を提示しいと考えている。 いる。(清水建設 辻)
- ・浸透特性について
 - ▶ 白濁試験における白濁の発生は大量の塩水に少量のグラウトを投下するため、発生するのは仕方がない。白濁しても実注入ではグラウト注入中の先端で遭遇する地下水が少量のためそう問題にはならないはず。すなわち、先端の少量のグラウトが塩水により白濁しても、後から来るグラウトが回り込んでその先に浸透する現象が起きるといえる。この現象は注入時にグラウトの染料濃度を変える浸透実験を実施して確認できるのではないか。一方で、日本の白濁しないグラウトはそのような懸念点を排除できるため有効と考えられる。(LTCフネハグ准教授)
 - ➤ 浸透実験は大きな成果である。様々な制約条件のなかで効率的に良い結果が得られている。 ただし、試験装置が小さいため、境界条件の影響を受けている可能性がある。また、アク リル製の並行平板で実施しているが、平板表面でグラウトが滑っている(tail slip)可能性 がある。(LTC フネハグ准教授)
 - ➤ 浸透特性のさらなる正確な把握には、大型の浸透装置での検討や CTH で所有している
 裂模擬平行平板試験装置の検討することが望ましい。(LTC フネハグ准教授)
 - ➤ 溶液型グラウトの浸透理論は経験式でなく、理論式である。海水環境下での理論開発を一歩先に進めるためには、動水勾配環境下におけるグラウトの先端での流出特性(地下水との混和性 miscibility)を導入して検討する必要がある。その際には、浸透でのサンドコラムを正確に作成して検証する必要がある。サンドコラムの作成については私の博士論文を参考にしてもらいたい。(LTC フネハグ准教授)
 - ▶ 浸透特性に対する海水系地下水の影響は、結局のところ、十分に解明できていないと言える。海水環境下での浸透特性は依然不明な点が多いので引続き検討が必須である。(LTC フネハグ准教授)
- レビュー及びディスカッションのまとめ
 - ▶ 基本物性については異存なし。配合の開発については、白濁しない日本のグラウトは有効だが、海水硬化促進グラウトについては水質の変動影響が大きく、適用範囲が限定される。
 - ▶ 本研究は、塩水環境下の課題と解決手法を提言し、各国の相互の問題意識の共有につなが

り、新鮮で非常に良い研究である。ただし、浸透特性など今後の課題が残されている。グラウト先端の流出を考慮して浸透理論の信頼性の向上を図るためにも、岩盤亀裂を模擬した平行平板装置や大型浸透性確認試験装置による検証・把握が必要である。(LTC フネハグ准教授)

- ➤ この研究で塩水環境下での溶液型グラウトの適用に課題があることが良く分かった。 (POSIVA へイキ氏ほか)
- ▶ 当プロジェクトは、3年目となるが、3カ年の結論としては、これで完了した(技術が完成した)とせず、さらなる検討が必要とすべきである(有識者全員)
- ➤ 本研究は実験室レベルでの研究である。今後は実際の岩盤(原位置)での検証が必要であり、岩盤と地下水が非常に重要な要素となる。注入材−注入技術−地下水環境(岩盤・地下水の水質)を考慮した一連のグラウト手法の開発が必要である。(Golders オーサ博士)
- ➤ 既往レビューの通り、ノルウェーの業者が溶液型グラウトを適用して香港で水密性を有する海底トンネルを建設している。ISRM グラウト委員会の担当者へのヒアリングが有効といえる。今後、ノルウェーでは長距離大深度の海底トンネルを含む国家プロジェクトが控えており、本技術をそうした海底トンネルの現場に展開することも良いアイディアである。(Golders オーサ博士)

上記のコメントから、本研究においては、3年間を区切りとして長期耐久性の試験を始めとした各種検討を行ってきたが、一定の成果として関係する専門家から賛同が得られ、グラウト設計技術の適用性評価が認められたといえる。また、今後は更なる長期的な耐久性の確認と、更なる浸透性能の確認のために浸透理論の充足や大型の試験装置による浸透性確認試験を実施し、将来の実適用に向けて原位置置の注入試験を計画することが重要であることが分かった。

平成 28 年度に実施した第 1 回のワークショップでは、溶液型グラウトの海水環境下への適用に当たっては、各国の最新技術を取り入れたハイブリッドな開発を実施したほうが良いとの方針が示されていた。そこで、今回のワークショップでも、これまでの研究成果をもとに、地質水理3環境の不確実性の状態(5 段階)に応じた各国の手法を取り入れたグラウト手法(案)を提案した(図 3.2-11)。これについても、グラウト専門家からは一定の賛同を得られたが、具体的な閾値などの設定根拠などを今後設定していく必要があるため、今後の原位置試験などを通して決定していく必要があると考える。

平成 28 年度から開始した、海水条件下における溶液型グラウトの配合の検討や特性データの取得、モデル化・数値解析への適用性の検討の成果について、グラウトデータベースやグラウト技術ガイドライン(資源エネルギー庁委託事業「地下坑道施工技術高度化開発」)に更新の是非について検討した。

グラウトデータベースについては、海水適応グラウトと海水硬化促進グラウトの配合及びこれらを用いた長期力学的安定性試験(一軸圧縮試験)のデータを追加するとともに、グラウトデータベースが作成された平成 24 年度以降の溶液型グラウトの施工事例を紹介した文献を収納できるため、データベース更新に必要な素材を準備した。

グラウト技術ガイドラインについては、地下坑道施工技術高度化開発におけるスイスグリムゼルでの原位置試験を実施した成果も併せてガイドラインの成果となっている。本事業の3か年の研究成果は室内試験レベルでの成果であり、原位置試験での実証が今後の課題として残されている。このことを踏まえると、グラウト技術ガイドラインの更新も今後の課題にするべきである。

- a) Abundant information of hydrogeology: Groundwater composition is well known and stable
 - ⇒ Concept: Most optimal and time saving grouting work
 - 1) pH adjusted CSG (JPN) + penetration theory (SWE) + stop criteria based on gel time (SWE)
- b) Less information of hydrogeology: Groundwater is not analysed and not stable
 - ⇒ Concept: Elaborate grouting work
 - 2) Conventional CSG with long gel time (ALL) + penetration theory with ϕ (SWE and JPN) + stop criteria based on gel time (SWE)
 - Conventional CSG with long gel time (ALL) + penetration theory with φ (SWE and JPN) + stop criteria based on flow criteria (JPN)
- Few information of hydrogeology: Groundwater is very unstable such as boundary between fresh and saline water
 - ⇒ Concept: Most elaborating and time-wasting grouting work
 - 4) Water injection (FIN) + conventional CSG (ALL) + penetration theory (SWE) + stop criteria based on gel time (SWE)
 - 5) Water injection (FIN) + conventional CSG with long gel time (JPN) + penetration theory (SWE) + stop criteria based on flow criteria (JPN)

図 3.2-11 地質水理環境の状態に応じた各国の手法を取り入れたグラウト手法(案)

(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

海水適応グラウトと海水硬化促進グラウトを対象に、養生期間が約720日及び約480日の長期安定性確認試験(一軸圧縮試験と養生水の分析)を実施した。その結果、強度の練混ぜ水の影響や時間依存性のデータが取得された。海水適応グラウトについては、2年経過後も28日程度の強度は確保できると判断された。海水硬化促進グラウトについては、海水適応グラウトより強度が低いものの、約480日経過時点でも強度増加が続いている。溶出試験の結果、シリカやナトリウムイオンやカリウムイオンの濃度は時間経過とともに上昇するものの、ある期間で一定の値に収束するという溶出状況を把握するとともに、練混ぜ水の影響についても確認することができた。

2) モデル化・数値解析への適用性検討

本製のグラウト(パーマロック Hi)を使用した従来型グラウトと海水適応グラウトの 2 種類と、北欧で多く用いられている Master Rock® MeycoMP320 の 1 種類を使用し、5 つの異なる模擬地下水による地下水条件下において動水勾配無し(非流動条件下)及び、動水勾配有り(流動条件下)で、グラウトの浸透性確認試験を実施した。その結果、以下が明らかになった。

- ・注水圧 2 kPa の一定水頭で、0.1 mm 以下の亀裂を模擬した試験装置を用いたグラウトの 注入試験は全てグラウトの注入ができ、全てのケースでグラウトのゲル化が観測された。
- ・模擬地下水の多価カチオン(例えば、 Ca^{2+})の存在は、塩分濃度よりもグラウトの浸透距離に影響を及ぼすと考えられる。
- ・海水適応グラウトは、比較的、非流動条件下でも良好な注入結果が得られた。

- 10 ml/min の流動条件下においては、亀裂内に浸透したグラウトの流失によるグラウト量 の低下が観測された。
- ・本試験で使用した試験装置は、グラウトの浸透性確認試験用の装置として適していること を示したので、今後は亀裂部のグラウトの浸透性の視認性を改善することが望ましい。

今回のグラウト浸透性確認試験では、いずれのケースにおいても一定の浸透距離を確保できたことから、今後、浸透距離を推定するパラメータのひとつである補正係数 φ の決定手法を定める必要があるが、地下水が安定する条件下であれば事前に実験室などで φ を取得し、ゲルタイムを割り増し設計することにより、所定の浸透距離を確保することが可能になると言える。適切に φ を決定し、理論式をモデル化・数値解析に向けて適切な浸透モデルを提示することにより、グラウト浸透のモデル化数値解析に展開できる見通しが得られた。

3) グラウト設計技術の適用性評価

当該事業における試験や検討の結果について、北欧の専門家を含めたワークショップを開催しレビューを受けた。レビューの結果、本研究においては、3年間を区切りとして長期耐久性の試験を始めとした各種検討を行ってきたが、一定の成果として関係する専門家から賛同が得られ、グラウト設計技術の適用性評価が認められたといえる。また、今後は更なる長期的な耐久性の確認と、更なる浸透性能の確認のために浸透理論の充足や大型の試験装置による浸透性確認試験を実施し、将来の実適用に向けて原位置置の注入試験を計画することが重要であることなどが分かった。

資源エネルギー庁委託事業「地下坑道施工技術高度化開発」で作成したグラウトデータベース とグラウト技術ガイドラインについて、本研究の海水条件下における溶液型グラウトの配合や室 内試験の結果や各種の検討結果を含めて更新することの是非について検討し、グラウトデータベースに本研究の成果を追加することとした。

(6) 今後の課題

今後の課題としては、原位置での実際の施工を通じて技術を確証するとともに、より長期における安全評価上の取り扱いの可否を検討するために、以下について想定される。

- ・海水条件下における坑道掘削にともなう実施工による適用性の評価
- ・溶液型グラウトの岩盤や地下水への超長期の影響評価

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30年度の取組

本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ヵ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3.2-12に示す検討フローに沿って具体化することとした。

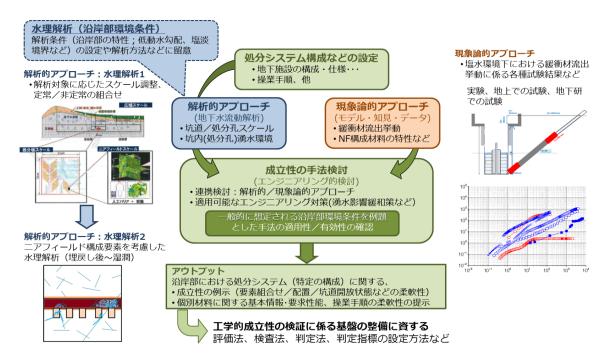


図 3.2-12 処分システムの成立性に係わる手法の提示に向けた検討作業の全体像

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とニアフィールド(以下、「NF」という)領域における坑内湧水環境と緩衝材の流出挙動を結び付け、閉鎖後長期にわたる所定の性能を満足させる処分システムを、閉鎖前の操業段階でいかに構築するかに焦点を当てて検討を進めている。そのような期間を対象とした検討では、着目する NF 領域における水理の状態を知ることが不可欠となる。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、緩衝材の挙動の与条件となる水理環境(湧水条件)は、緩衝材以外の NF 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ヵ年の全体計画では、特に次の二つの実施項目を設定して取り組むこととした。

- 1) 処分システム成立性の提示に係わる手法及び体系の整備
- 2) 水理解析体系の整備

これらの実施項目は上図において、1)は「成立性の手法検討」、2)は「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 節に示した取り組みとの連携を念頭に置く。最後に得られる手法や体系に、特定の条件(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に関する成立性を、特定の構成要素(緩衝材)に着目して例示するとともに、個別材料に関する基本情報・要求性能、操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、並びに建設および操業期間中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 NF の構成要素を考慮する(図 3.2-13)。

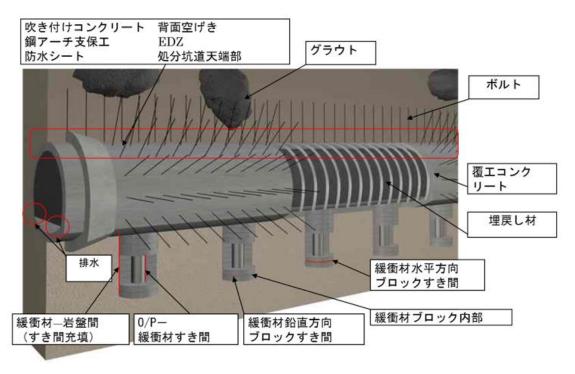


図 3.2-13 想定されるニアフィールド領域の構成要素例

1) 過年度の成果

平成28年度には、3ヵ年の実施計画を策定するとともに、北欧(スウェーデン及びフィンランド)の先行的な取組事例を参考に、成立性の提示に必要となる手法や知見などの体系や構造(建設から操業・閉鎖段階までの期間に着目したNF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及び評価体系)の素案を整備した(産総研,原子力機構,原環センター,電中研,2017)。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(検討の例題とした竪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、沿岸部における処分システムの構成要素の設計仕様を具体化し、水理解析の条件設定に反映させた。更に、建設・操業手順をより詳細に設定して水理解析を実施し、処分坑道や処分孔の湧水量の経時的な変化を把握した。併せて、坑道周辺の構成要素の感度解析を行い、処分坑道及び処分孔の湧水量への影響の把握を行った(産総研、原子力機構、原環センター、電中研、2018)。

2) 平成30年度の実施概要

平成 30 年度は、上述した昨年度までの整理結果である諸外国で先行的に提示されている処分システムの成立性に係る手法を踏まえ、わが国において NF 構成要素に対する水理的な影響を検討するため、建設や操業段階における NF 領域の水理環境を把握した。更に、沿岸部の処分場(塩水環境下を想定)を対象として、安全評価が期待する初期性能達成の見通しを得るための定量化手法の整備を進めた。

具体的には、昨年度の成果である上記の手法・体系の整備に資する情報を用いて、①設計基準の明確化、②設計基準への適合性確認、及び③性能評価の三つに落とし込む手法を整備した。更に、沿岸部の処分システムを例題として整備した手法を試行的に適用し、わが国の概念への適用性を確認した。

(2) 平成30年度の実施内容と成果

建設・操業過程における人工バリアの機能変遷を見込んだうえで安全評価が期待する初期性能 達成の見通しを得るための体系的な手法の整備が必要となる。本検討では、沿岸部を含むわが国 で想定される地質環境や候補となる処分概念に適用できる手法の構築に向けて、以下の取組を進 めた。

- 1) フィンランドの先行的な取組事例を参照した、わが国の処分システムの成立性の評価に適用可能な評価体系の整備
- 2) 処分システムの成立性に係る評価体系の適用性に関する検討

1) わが国の処分システムの成立性の評価に適用可能な評価体系の整備

わが国の処分システムにおける、初期性能達成を定量的に示す手法の素案として、平成 29 年度まで調査においてフィンランド (POSIVA) およびスウェーデン (SKB) の先行的な取組事例を調査した。両国は、地質環境条件の類似性やこれまでの両国の実施主体間の共同研究の実施経緯に基づく処分概念の類似性など、多くの共通事項がある。これらは、わが国が有する地質環境や現時点で有望とされる処分概念との類似点も多い。そこで、公開資料としてより体系的にまとめられているフィンランドの検討事例について整理を行った。

POSIVA のセーフティケースは、以下の①~③に示す反復的なプロセスによって開発され、体系化されている。一連のプロセスの流れの概念を図 3.2-14 に示す。この体系化されたプロセスを参考にし、わが国における処分システムの成立性に関して検討を実施した。各ステップの詳細は Appendix XV を参考されたい。

- ①設計基準の明確化
- ②初期状態の想定および設計基準への適合性確認
- ③性能評価

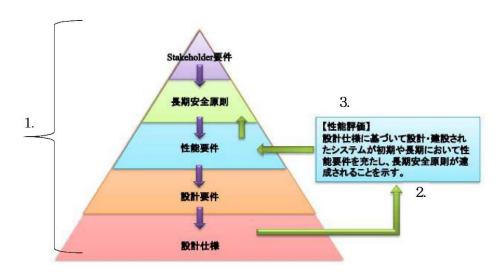


図 3.2-14 Posiva の調査結果に基づく人工バリア構成要素の設計手法及び所定の性能要件並び に安全機能の達成の考え方の体系(概略図)

① 設計基準の明確化

処分システムの性能評価を示すためにはその設計基準が明確である必要がある。そのため、POSIVA の手法を参考として、人工バリアの設計仕様に落とし込むまでの手法を検討した。我が国における設計基準として、設計仕様に至る前段には設計要件などが設定されている(原子力発電環境整備機構, 2018)。これを POSIVA の手法に当てはめる形で整理を行った。一例として、わが国の緩衝材の設計要件(■)、設計要件(■)、設計仕様(■)までの各項目の連関を POSIVA の手法に適応させて整理した結果を図 3.2-15 に例示する。

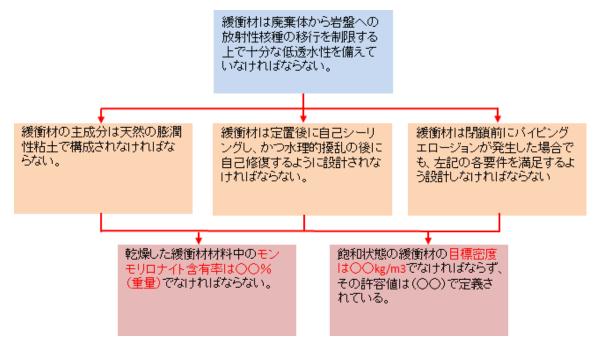


図 3.2-15 わが国の緩衝材設計に関する性能要件から設計仕様の連関イメージ

② 初期状態の想定および設計基準への適合性確認

後述する性能評価は、地層処分システムの構成要素の初期状態に対して評価を実施するとしているため、まずは初期状態の適合性を確認する必要がある。

ここでは、POSIVAの体系に倣って、前述の「① 設計基準の明確化」にて設定した処分システム構成要素の設計仕様が、以下に示した五つのステップにより初期状態に適合するかの確認を行った。設計仕様と初期状態の確認方法については、Appendix XV を参照されたい。

- 1. 参照設計値(Reference Design)の設定
- 2. 参照設計値の設計仕様への適合性確認
- 3. 製作・施工方法の設定
- 4. 参照設計値と製作・施工方法を踏まえた初期状態の設定
- 5. 初期状態の設計仕様への適合性確認

前項で設定した地層処分システムの各構成要素の設計仕様に基づいて、1.及び2.において各構成要素の参照設計を設定した上で、その参照設計が、3.において設定した製作・施工方法によって製作・施工した場合に、どの程度の幅で変動するかを想定したものを、4.にて初期状態として設定し、依然として設計仕様に適合していることを、5.にて示すという手順となる。換言すれば、想定した初期状態が、設計仕様に適合しない場合には、3.において設定した製作・施工方法を見直すことが必要となる。もしくは、地層処分システムの各構成要素の性能要件を満足する範囲内で、設計仕様をゆるくすることが求められる。

この設計基準への適合性確認をわが国に当てはめて考えると、わが国では地層処分システムの各構成要素に関する「1. 設計仕様」や「3. 製作・施工方法の設定」は概ね示されているが、「2. 参照設計値の設計仕様への適合性確認」、「4. 参照設計値と製作・施工方法を踏まえた初期状態の設定」、「5. 初期状態の設計仕様への適合性確認」などは未だ整理されていない。

このため、現段階のわが国で適応する場合は、本個別要素の実施はスキップし、概ね示されている設計仕様をそのまま安全評価の出発点とする必要性がある。

③ 性能評価

ここでは、上記で設定した初期状態を出発点として、地層処分システムの各構成要素に対して性能評価を実施し、前述の①にて設定した設計基準を満足することを確認するという一連の手法を検討する。性能評価の実施に際し、人工バリアや母岩への評価を可能な限り定量的に実施する必要がある。これにより不確実性を考慮した上で、設計基準からの逸脱に繋がる可能性がある条件を特定し、その種の逸脱が発生する可能性とその影響の見積もりを行う。

わが国の性能評価にあたって重要となるのは、地層処分システム構成要素に潜在的に影響を及ぼし得る様々な変遷プロセスを、どのように抜けなく網羅的に抽出するかである。POSIVAを参考に考えると、例えば緩衝材や埋戻材については、以下の項目に対して留意が必要と考えられる。

- ▶ 熱伝達
- ▶ 水の浸入及び膨潤
- ▶ パイピング・エロージョン
- ▶ 化学的エロージョン
- ▶ 間隙水の放射線分解
- ▶ モンモリロナイトの変質

- ▶ 随伴鉱物の変化
- ▶ 凍結及び解凍

2) 処分システムの成立性に係る評価体系の適用性に関する検討

標記の適用性に関する検討では、前述の「(1)全体実施内容と平成30年度の取組」で述べたように、解析的アプローチ(これまでに構築した水理解析体系を用いた水理解析)と、現象論的アプローチ(人工バリアの各構成材料に関する劣化や変質に関する知見)に基づく技術的な判断(エキスパートジャッジ)を組み合わせて実施した。このような試行的な取組に基づく検討を通して、整備した成立性を示す手法の適用性について考察するとともに課題などを整理した。評価の対象としては、建設・操業過程において地下水の影響が懸念される緩衝材とし、併せて同期間の水理場の変遷に影響するセメント系材料(支保工)の溶脱についても、評価の対象として検討を進めた。

① エキスパートジャッジの検討の流れ

エキスパートジャッジに用いる検討の流れは、前述の「1)わが国の処分システムの成立性の評価に適用可能な評価体系の整備」で示した処分システム成立性の提示に係る手法を用いて、図3.2-16 のように作成した。ここに示すようにエキスパートジャッジは、前項目 1)の調査結果をベースに、わが国で検討している人工バリア設計法などを用いて設計基準(設計仕様)を明確化した(産総研、原子力機構、原環センター、電中研、2018)。図中の緑色の枠内のうち、「initial state」において、前述の 1)にて設定した設計基準(設計仕様)が、検討対象となる処分概念に適合するか否かの判断を行う。この手順は、前述の「1)_② 初期状態の想定および設計基準への適合性確認」に相当する。ただし、わが国の検討の現状として、設計仕様に対する適合性確認はまだ未検討であるため、本項目では、包括的技術報告書レビュー版(原環機構、2018)の設計仕様を初期値として扱うこととした。この初期値を参照して、前述の「1)_③ 性能評価」の一つとしてこれまでに整備した水理解析体系を用いて「湧水量の算出」を行った。その結果を用いて設計基準(性能要件)を満足することを確認することにより、地層処分システムの成立性の評価を行った。

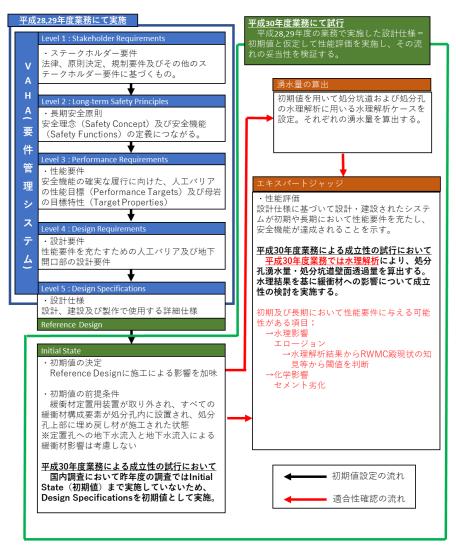


図 3.2-16 エキスパートジャッジの検討の流れ

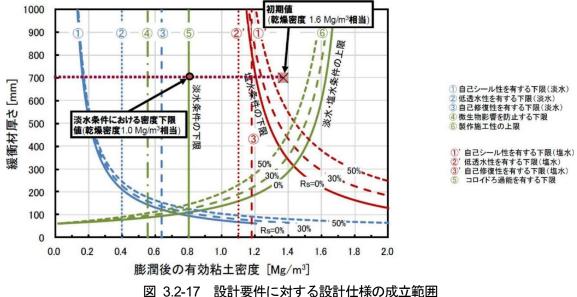
② 緩衝材流出現象

緩衝材は、定置後から再冠水に至るまでの期間において最も状態が変化する。同期間には、緩衝材への地下水の浸潤プロセスの進展に伴い、緩衝材としての期待される特性が発揮できる状態に移行する。一方で、同期間中に処分孔に流れ込む湧水により、緩衝材の流出の可能性も懸念されている。そこで本検討では、処分システムの成立性の指標として、緩衝材流出現象に着目し、流出現象によって損失が懸念される緩衝材に対して、緩衝材長期に期待される性能を発揮するために必要となる緩衝材の密度が残存しているかどうかの評価を行った。

(a) 緩衝材の成立性に関しての考え方

竪置きブロック方式の緩衝材の設計要件に基づく設計仕様(成立範囲)は図 3.2-17のように示されている(原環機構,2018)。同図から、塩水条件下においては、緩衝材が維持すべき膨潤後の有効粘土密度は、塩水環境下での「自己シール性を満足する為の下限値」が最も厳しい値となり、緩衝材の厚さを 700 mm とした場合、膨潤後に要求される有効粘土密度は約 1.25 Mg/m³(乾燥密度 1.0 Mg/m³相当)となる。本検討ではこの値を許容値(下限値)と設定して成立性を評価するものとし、具体的には緩衝材の浸潤後(膨潤後)の有効粘土密度から、定置から埋戻しまでの

間の緩衝材流出の見積り量を差し引いて算出することとした。



ケイ砂を30%混合したクニゲルV1を緩衝材の材料として設定

(b) 緩衝材流出量の許容値の設定

これまでの研究において、緩衝材流出量と設計要件から求められている自己シール性を満足する有効粘土密度の関係の算出方法は次の二つの手法が提示されている。

許容量①:扇状に範囲を限定して流出量を設定する方法(原子力発電環境整備機構, 2018) 許容量②:緩衝材全体に対して流出量を設定する方法(原環センター, 2018; Posiva, 2013 な ど)

①は緩衝材の流出によって水みちができる範囲を扇形と仮定し、その領域での緩衝材の損出と自己シール性について評価する手法である。②は緩衝材の流出を全体としての損出とみなし、緩衝材全体として損出と自己シール性を判断する手法である。両手法による緩衝材流出許容値の設定方法の詳細及びその考察に関しては Appendix XV を参照されたい。それぞれの手法を用いて処分孔1本当りの緩衝材流出量の許容値を計算すると、① 0.629 Mg、② 0.654 Mg となり大きな差異はないが、本検討では保守的となる②を採用して評価することとした。

(c) 水理解析

(i) 解析モデルおよび解析物性値

緩衝材流出量の算出にはこれまでに整備した水理解析体系を用いて評価を行った。本節の冒頭で述べたように、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、既に原環機構がサイト選定前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(原環機構,2016)。本検討における水理地質構造モデルとして、原環機構が整備したモデルをベースに、三つのスケール(広域スケール、処分場スケール、及びNFスケール)に関する三次元モデルを整備した。詳細については過年度報告書を参照されたい(産総研、原子力機構、原環センター、電中研、2017、2018)。一連の解析に用いた解析コード

は、有限要素法に基づく飽和・不飽和浸透流及び移流分散解析コード Dtransu-3D- EL であり、本取組では非定常の飽和・不飽和浸透流解析によって検討を行った。基本ケースの NF スケールモデル及び処分坑道周辺の解析メッシュを図 3.2-18 に示す。また、解析物性値を表 3.2-8 に示す。

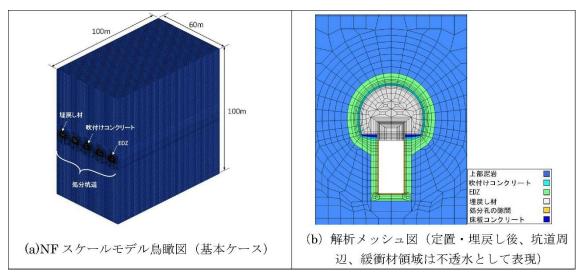


図 3.2-18 処分坑道周辺の解析メッシュ(掘削後及び定置・埋戻し後、NF スケールモデル)

材料区分	透水係数 (m/s)	比貯留係数 (1/m H ₂ O)	間隙率	備考
岩盤	基質部: 3.00E-10	3.16E-6	0.25	室内試験の結果より設定
4 無	対数平均: 3.11E-09		0.23	割れ目を考慮した対数平均値
支保工 (吹付けコンクリート)	5.02E-11	1.38E-6	0.19	
EDZ	岩盤の100倍 (最大3.00E-8)	8.44E-6	0.25	最大値を超えるものは3.00E-8 (m/s)とした
埋戻し材	低透水: 1.00E-08	5.00E-4	0.33	
程灰し物	高透水: 1.00E-05	1.00E-4	0.11	
隙間(処分孔、緩衝材間)	1.00E-05	1.00E-4	0.20	
床版コンクリート	5.02E-11	1.38E-6	0.19	

表 3.2-8 物性値一覧

(ii) 解析ケース

本検討では定置から埋戻しまでの期間の処分孔の湧水量から総流量を算出し、その結果から緩衝材流出量を見積もった。実際の処分場環境や NF 構成要素の仕様にも依存するが、埋め戻し後においても処分孔(緩衝材定置領域)から上部の埋め戻し領域への地下水の流れがある可能性があり、それに伴い緩衝材の流出が続く可能性があることに留意が必要である。

検証する水理解析ケースを表 3.2-9 に示す。ケース a)は処分坑道が開放した状態を維持した状態を想定しており、処分孔からの湧水量が最も多くなるケースであり、緩衝材の流出の観点で保守的なケースとなる。ケース b-1)、ケース b-2)では (緩衝材定置+処分坑道埋戻し)、緩衝材と処分孔周辺の母岩との間の隙間流量の計算をしており、処分坑道の埋戻し材の透水係数の差異による影響の確認も実施している。また、これらのケース以外にもグラウト、吹付けコンクリート、EDZ、亀裂、処分孔の隙間幅(処分孔壁と緩衝材間)などに関する影響の検討にも取り組んだ。

これらの検討結果はAppendix XV に整理しているので参照されたい。

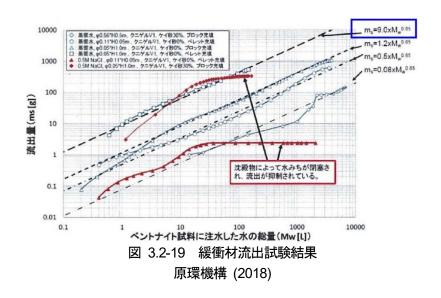
	衣 0.2 0 日 7 7,007小至/开/7个日		
ケース名	緩衝材の定置	埋戻し材	
ケース a)	なし	なし	
ケース b-1)	あり	高透水(砂相当)	
ケース b-2)	あり	低透水(粘性土相当)	

表 3.2-9 各ケースの水理解析条件

(iii) 緩衝材流出量の評価方法

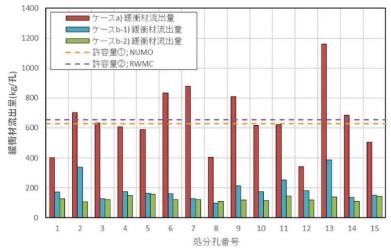
緩衝材の流出量は、水理解析結果から得られる緩衝材と処分孔壁間を通過する流量を、緩衝材 流出試験から得られた通水量と流出量の関係式に当てはめることにより評価した。

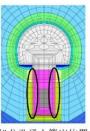
具体的には、水理解析から得られた処分孔壁面と緩衝材の隙間を通過する流量を、室内試験の結果から得られた通水量と緩衝材流出量の関係式のうち、ブロック定置方式を模擬した供試体に 0.5 M NaCl を通水液とした試験結果から得られた式 (m_s=9.0×M_W^{0.85}) に当てはめることにより算出した。図 3.2-19 に緩衝材流出試験から得られた通水量と流出量の関係式を示す。



(iv) 解析結果

NF スケールモデルの中央処分坑道における各ケースの処分孔毎の湧水量から算出した緩衝材流出量を図 3.2·20 に示す。同図には併せて、前項目①及び②の手法によって設定した許容流出量を破線で示している。ケース a)の処分坑道を埋戻さない条件で緩衝材流出量を算出した場合においては、いくつかの処分孔において許容流出量を上回る結果となるが、ケース b·1)及びケース b·2)のように処分坑道を埋め戻した設定であれば、たとえ埋戻し材が高透水性であっても、許容値①、②のいずれの許容流出量も下回る結果が得られた。ケース a)では処分坑道 3 が埋め戻されていないため処分孔内に抵抗がなく、処分孔から湧水量が多くなる結果となったと考えられる。また、流出量の許容量と比較した場合、許容値②で 7 孔超過する結果となった。一方、処分孔への緩衝材定置かつ埋め戻した状態であるケース b·1)、ケース b·2)については流出量が大幅に低下し、全ての処分孔で許容値を下回る結果となった。このことから、今回の試行的な取組における条件においては、処分坑道を埋め戻した場合には、緩衝材の設計要件を満足し、処分システムの成立性を満たすという評価結果となる。





処分孔湧水算出位置

図 3.2-20 各処分孔における緩衝材流出量と許容値との比較 まとめ

(d) まとめ

本検討では緩衝材流出現象に着目し、水理解析及び室内試験の結果を用いて処分システムの成立性について評価を行った。水理解析に基づき評価した緩衝材流出量と、緩衝材の設計要件から設定した許容値を比較すると、処分坑道を埋め戻さないような極端なケースを除けば、設定した許容値を満足する結果が得られた。このことから、今回の試行的な取組における条件のもとでは、緩衝材流出現象に関しては緩衝材の設計要件を満足し成立する見通しを得ることができたと言える。ただし、今回の検討では「1)_② 初期状態の想定および設計基準への適合性確認」で示したように設定した設計仕様が処分場の初期状態に用いる値として適しているか、の確認を省いた形で行っており、この部分に関して今後さらなる検討が必要である。また、水理解析において、期間の想定や解析条件(モデル化、解析手法、使用物性値、境界条件など)が異なる場合には今回の湧水量から変動する可能性があることや、並びに緩衝材の膨潤に伴う隙間の充填プロセスを考慮していない点については留意が必要である。

③ セメント系材料の Ca 溶脱の評価手法に関する検討

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、アクセス坑道並びに斜坑などの支保工及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、並びに容器内外の充填材としての使用が考えられている。また、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、及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。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、並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が生じる可能性がある。そこで、本検討では処分システムの成立性にセメント溶脱が与える影響を把握することを最終的な目的とし、その前提として水理解析から得られる流量からセメント溶脱を評価する手法について検討を行った。

(a) 水理解析

(i) 流量及び流速算出手法

セメント溶脱の評価は、図 3.2-21の緩衝材流出現象のケース b-2)の解析結果を用いて行った。 また、算出した流量は NF スケールモデルの 5 本ある坑道のうちの中央にある処分坑道 3 本を対 象とした。各坑道の横断方向の断面における流量算出位置は図 3.2-21 に示す坑道の天端、側壁、底盤の 3 か所のコンクリートの裏面の EDZ 要素とし、それぞれの位置で坑道壁面に対して直行方向(赤矢印)、周方向(黄矢印)、長軸方向(緑矢印)の 3 方向の流量を求め、周方向と長軸方向に関しては合算して坑道壁面の平行方向の流量として整理した。また、縦断(長軸)方向に関しては図 3.2-21 の 3 点の位置に当たる全ての要素において流量を算出して評価を行った。

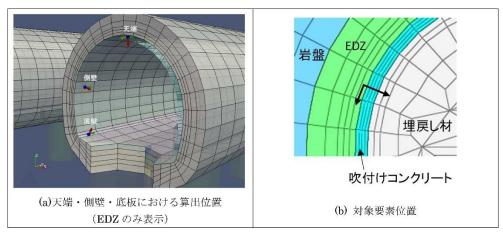


図 3.2-21 流量・流速算出位置

(ii) 解析結果

図 3.2-22 に解析モデルの中央付近 (y=34 m) の位置の中央の処分坑道の坑道壁面の積算流量の経時変化を示す。坑道横断方向の断面位置で流量を比較すると、流量は天端が最も少なく、底盤が最も多い結果となった。経時的な傾向としては、坑道が埋め戻されるまでは流量積算値の増加が大きく、埋戻しが開始すると増加傾向が落ちついている。このことから廃棄体定置後に坑道を埋め戻すまでの期間が長いと、吹付けコンクリートの周囲を通過する地下水流量が増加する傾向となると考えられる。

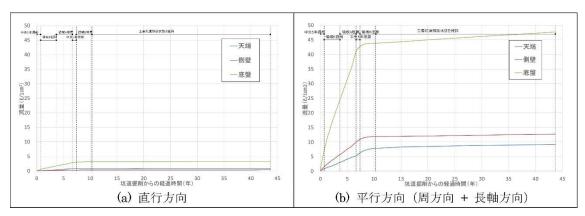


図 3.2-22 坑道壁面流量の経時変化

青:天端、赤:側壁、緑:底板、1 cm³ 当りの流量、 y =34 m

(b) 塩水浸漬試験と水理解析の比較検討

支保工裏面側の流量について、上記で示した水理解析の結果と表 3.2-10 の沿岸海底下を想定 したブロック浸漬資料による塩水浸漬試験の結果を比較し、水理解析から得られた支保工裏面近 傍の流速と、塩水浸漬試験より支保工の Ca 溶脱量を評価する手法に関しての考察を行った。表 3.2-10 に塩水浸漬試験の試験条件に基づき算定した流速と水理解析結果から得られた支保工裏面の流速を比較した結果を示す。

	塩水浸漬試験	比較	支保工裏面側の流速 (水理解析)
接触面 近傍の 流速	容器内をスターラーで攪拌しているので、小 さく見積もっても、10 ⁻³ m/s 程度であると想定 される。	>>	坑道壁面に対して平行方向のダルシー流速は、流速の速い箇所で、 3.1×10 ⁻⁶ m/s (底盤)、6.8×10 ⁻⁷ m/s (側壁)である。
浸の頻基流液換にく	交換する水の流量が $500 \text{mL}/\text{月}$ であるので、下図のような実験系と考えた場合、交換流量 V_w を $1/3$ 乗することで直方体の 1 辺長さ (=試験片 A と接する面の移動距離)を算出する。	V	同上なので、流速の速い箇所で、 3.1×10-6m/s(底盤)、 6.8×10-7m/s(側壁)である。 (なお、平均的にはそれぞれ上記 の 1/10, 1/5程度である。)

表 3.2-10 塩水浸漬試験と地下水流動解析結果における流速の比較

ケース b-2)の水理解析の結果より、坑道壁面に対して平行方向のダルシー流速が比較的大きい位置において流速を算出すると、 3.1×10^{-6} m/s(底盤位置)、 6.8×10^{-7} m/s(側壁位置)となる。一方、塩水浸漬試験では接触面近傍の流速で比較を行うと、容器内をスターラーで攪拌しながら試験を行っていることから、これを流速に変換すると 10^{-3} m/s 程度と想定され、塩水浸漬試験の方がかなり早い流速となった。また、浸漬液の交換頻度に基づいて流速を算出すると塩水浸漬試験の流速は 3.0×10^{-8} m/s となり、こちらは逆にやや遅い流速となった。

支保工裏面側は閉鎖系でなく、上流側の支保工と接触した地下水が流れてくると想定されるため、支保工からの拡散速度が小さいことを考慮すると、地下水への Ca 溶脱量は塩水浸漬試験よりも実際には少ないと考えられる。ただし、流速と変質・溶脱深さに比例関係が成り立つ訳ではないことには留意が必要である。支保工裏面表層においては、溶解した Ca などが坑道壁面に対して平行方向の流れで運ばれると予想される。この影響は、接触面近傍の流速の比較結果より、水理解析よりも塩水浸漬試験の方が大きいと考えられる。

以上の検討より、水理解析の接触面近傍の流速と浸漬液の交換頻度に基づく流速の定量的な比較は難しいが、今回の検討により、支保工裏面側におけるセメント系材料の化学変質は、地下水流動解析による流速と、浸漬試験の浸漬液の交換頻度に基づく流速との比較から、浸漬実験と同程度の Ca の溶脱が予想される。なお、前述の「3.1.3 セメント系材料」の塩水浸漬試験における Ca 溶脱深さは、浸漬期間 14 ヶ月で OPC が最大 5 mm 程度、混合セメントが 1 mm 程度であっ

た。セメント系材料の Ca 溶脱部の強度は、健全部の 1/3・1/2 低下すると推定されている。

3) まとめおよび今後の課題

本項目では、POSIVAの処分システムの成立性の評価体系を参考とし、わが国のNF領域における処分システムの成立性を緩衝材流出現象とセメント溶脱を例題に挙げて評価を試みた。本項目におけるまとめと課題を以下に示す。

○わが国の処分システムの成立性の評価に適用可能な評価体系の整備

- ・ 処分システムの評価体系についてわが国に適応できる見通しを示し、その際の留意点を取りまとめた。
- ・初期状態の想定と設計基準への適合性確認を行う場合、環境などの違いにより注意を払われなければならない。
- ・わが国では地層処分システムの各構成要素に関する設計仕様の設定は概ね示されているが、 その設計仕様が処分場の初期状態に用いる値として適しているかどうかの適合性確認は 実施されていない。今後は、上記初期状態の概念についての整理を進め、処分システムの 成立性の評価の性能向上を図る必要がある。
- ・上記で示した初期状態に対して設計基準にフィードバックし、満足しているかどうかの確認を「性能評価」により行う事が必要と考える。前記をわが国に適用するに当たっては、 わが国の地層処分システム構成要素に潜在的に影響を及ぼし得る様々な変遷プロセスを、 どのように網羅的に抽出するかが重要である。
- ○処分システムの成立性に係る検討の成果と課題

緩衝材流出現象

- ・一連の検討から緩衝材流出現象に関しては緩衝材の設計要件を満足し、処分システムの成立性を示せる見通しを示した。
- ・流出期間の想定や解析条件(モデル化、解析手法、使用物性値、境界条件など)が異なる場合には、今回算出した緩衝材流出量から変動する可能性がある。
- ・緩衝材の膨潤挙動による隙間の充填プロセスを評価する必要性がある。

セメント系材料の Ca 溶脱

- ・セメント系材料の Ca 溶脱に寄与するのは、処分坑道でのセメント系材料への接触量であり、本検討で水理解析結果の比較対象としたのは水槽内での静水環境による室内試験(浸漬液は1か月毎に交換)結果である。このため、より確からしい評価を行うためには室内試験の結果と解析結果の整合性を取りやすくする必要性があると考えられる。
 - ▶ 塩水浸漬試験について浸漬液の交換頻度を大幅に増加させる(例えば1桁増加)条件での試験や、フロースルー試験のように模擬地下水を流し続けるような条件での Ca 溶脱挙動への影響を確認するなどが必要と考えられる。
 - ▶ 水理解析においては、二次元や三次元で地球化学的反応及び物質移行連成解析を実施するか、もしくは間隙率によって、透水係数が変化する挙動をモデル化して支保工裏面付近の地下水流動のセメント系材料の化学変質挙動を確認していく必要があると考えられる。

参考文献

- 原子力発電環境整備機構,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ー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ー」、2016
- 原子力発電環境整備機構,包括的技術報告書:わが国における安全な地層処分の実現ー適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築-(レビュー版),2018.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター,平成26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証技術開発)人工バリア品質/健全性評価手法の構築 (その2) -緩衝材 報告書,2018.
- 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
- POSIVA, Current Status of Mechanical Erosion Studies of Bentonite Buffer, POSIVA 2012-45, 2013.
- 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.
- 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 29 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, 2018.

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

4.1.1 背景と目的

「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、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、技術及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現段階での技術基盤の整備を行うことを目的とする。なお、この技術基盤の整備は、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・成果などを適宜考慮・反映しながら行った。

4.1.2 実施内容

「沿岸部における安全評価技術の高度化開発」では、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などを検討するうえで参考となる既存情報の整備などを行う。また、核種移行評価では地下水流動状況や地下水化学など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及び被ばく経路・形態などの特徴を取り込んだ評価技術と評価事例の整備などを行う。

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(産総研,原子力機構,原環センター,電中研,2016)。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、生活圏評価関係など)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など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及びモデル・パラメータの設定に着手した(産総研,原子力機構,原環センター,電中研,2017)。

平成 29 年度(産総研,原子力機構,原環センター,電中研,2018)は、平成 28 年度の検討を発展的に継続することを中心に、沿岸部固有の特徴などを具体的に評価していくための枠組みとしての評価シナリオ・解析ケースの設定やその具体的な評価方法についての既存情報に基づく分析・整備を進めた。また、沿岸部固有の場の特徴やその変遷の影響を評価するための基盤情報として、海進・海退の影響を受けた地下水流動状況や地下水化学など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などの特性データの取得などを進めた。

平成30年度は、平成29年度までの検討をさらに発展的に充実させることを中心に、以下を実施した。

① 評価の枠組みの整備(4.2 節参照)

平成 29 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などを踏まえた 核種移行評価と生活圏評価のそれぞれの評価の枠組みの検討を継続するとともに、それぞ れの評価の全体的なイメージの具体化を進める。具体的には、平成 29 年度に開始した、核種移行評価と生活圏評価のそれぞれの評価内容(評価シナリオ・解析ケースなど)と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(モデル化方法など)の分析・整備を継続・拡充する。また、それらに基づき、利用可能な情報に応じた核種移行評価と生活圏評価のそれぞれの全体的なイメージについて、現段階で想定されるものを例示するとともに、引き続き取り組むべき技術的課題を整理する。

② 核種移行モデル・パラメータ整備及び影響評価(4.3 節参照)

平成 29 年度に実施した、沿岸部固有の場の特徴を反映した核種移行評価に係るモデル・パラメータの整備を継続するとともに、現段階での技術レベル、引き続き取り組むべき技術的課題を整理する。具体的には、海進・海退の影響を受けた地下水流動状況や地下水化学などの変化の評価手法については、評価の試行と最新情報の収集・整備などを継続・拡充するとともに、それに基づき、利用可能な情報に応じた現象理解の高度化や核種移行評価への反映のイメージと方法及び課題などについて、現段階で想定されるものを例示する。核種の収着、コロイドの安定性とその影響、有機物・微生物の存在量・組成などの特性とその影響などについては、塩濃度などの地下水組成やその変化などの影響を評価するための基盤情報としてのデータ取得と最新情報の収集・整備を継続するとともに、それに基づき、利用可能な情報に応じた核種移行に係る現象理解やパラメータ設定への反映のイメージと方法及び課題などについて、現段階で想定されるものを例示する。

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 30 年度の実施項目①及び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」(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) 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。

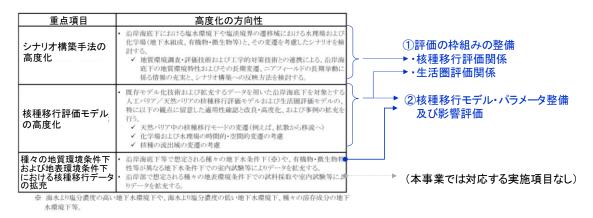


図 4.1-1 平成 30 年度の実施項目と「沿岸海底下等における地層処分技術的課題に 関する研究会とりまとめ」での重点項目との関係

以降の 4.2 節と 4.3 節では、実施項目①及び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

- 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.
 - http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/engan_kaiteika/pdf/report01_01.pdf (2019年1月21日最終閲覧)
- 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,591p.,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,393p.,2018.

4.2 評価の枠組みの整備

(1) 背景と目的

本項では、沿岸部における安全評価技術の高度化開発において、安全評価において留意すべき沿岸部固有の特徴など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を目的とする。

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て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及び評価方法(モデル化方法、使用ツール、パラメータ設定方法など)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。

平成 29 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など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た。また、沿岸部固有の特徴など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など)、及び生活圏評価での移行経路・被ばく経路など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など)について、既存情報に基づく分析・整備を実施した。

平成 30 年度は、平成 29 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などを踏まえた核種移行評価と生活圏評価のそれぞれの評価の枠組みの検討を継続するとともに、それぞれの評価の全体的なイメージの具体化を進める。具体的には、平成 29 年度に開始した、核種移行評価と生活圏評価のそれぞれの評価内容(評価シナリオ・解析ケースなど)と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(モデル化方法など)の分析・整備を継続・拡充する。これらについては、平成 29 年度までに提示した評価シナリオ・解析ケース設定で必要となる項目や「性能評価において普遍的に重要性が高い情報のリスト」(表 4.2-1 参照)を起点に、それらを調査・データ取得側の視点を含めつつ再整理・拡充することにより実施する。また、それらに基づき、利用可能な情報に応じた核種移行評価と生活圏評価のそれぞれの全体的なイメージについて、現段階で想定されるものを例示するとともに、引き続き取り組むべき技術的課題を整理する。

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 (産総研, 原子力機構, 原環センター, 電中研, 2018)

THMC	情報	左記の情報が重要となる性能評価の項目
	地下水の流速	移行時間
水理 H	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**
1L + C	岩種	移行特性
熱 T	温度	移行特性
±₩M	物理特性	間隙構造・特性
力学 M	応力情報	掘削影響領域の水理特性の変化など

^{*:} pH、 Eh、 主要イオン濃度(炭酸イオンなど)、その他(有機物、微生物の種類・量など)

^{**: (}元素ごとの) 分配係数、溶解度、拡散係数

(2) 実施内容

沿岸部固有の特徴を具体的に性能評価に取り込むための「枠組み」の整備の一環として、平成29年度に整理した「性能評価において普遍的に重要性が高い情報のリスト」(表 4.2-1 参照)の拡充に向けて、「性能評価で必要となる情報」の詳細化を分野間での連携とも関係付けつつ行うことに着目し、そのための性能評価の観点からの分野間の連携の手法・手順の例示を試みた(後述の①)。また、その手法・手順を地質環境調査と性能評価の両分野の専門家が参加する形で試行してみることで、「性能評価で必要となる情報」の分野間の連携に留意した詳細化に係る議論などを効果的に行うために有用となる可能性のある留意点や課題も洗い出された(後述の②)。なお、ここでの検討はあくまで性能評価の観点に重点をおいたものであり、異なる分野間での全体としての連携を実効的に実施していくためには、このような検討例も参考にしつつ、性能評価以外の分野の観点を適切に取り込んだ全体的な手法や手順を改めて整理する必要があると考えられる。

1) 性能評価の観点からの分野間の連携の手法・手順の検討

性能評価の観点からの分野間の連携の手法・手順として、「性能評価で必要となる情報」を中心とした分野間での連携の手法・手順の案を検討した。図 4.2-1 に、その手法・手順の概念を示すとともに、各 STEP での具体的な方法を示す。

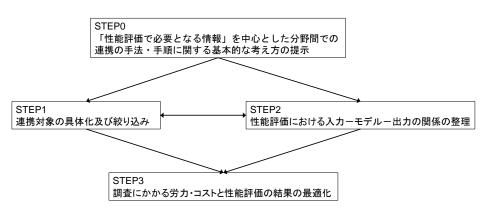


図 4.2-1 性能評価の観点からの分野間の連携の手法・手順の概念

●STEP0:「性能評価で必要となる情報」を中心とした分野間での連携の手法・手順に関する基本的な考え方の提示

本 STEP では、検討の準備として、「性能評価で必要となる情報」を中心とした分野間での連携の手法・手順に関する基本的な考え方を提示する。例えば、以下のような、検討の目的やその際の留意事項、検討の効果的な実施に役立ちそうな着目点・情報・知見などを抽出する。

- ・ 「性能評価で必要となる情報」の以下の観点での詳細化を目指す
 - 平成 29 年度までに提示した「性能評価において普遍的に重要性が高い情報のリスト」 (表 4.2-1 参照) の拡充
 - 異なる分野間での連携の検討を通じた「性能評価で必要となる情報」の詳細化の手法・ 手順を特に以下に着目しつつ例示
 - ◆ 性能評価と地質環境調査の連携を例とする
 - ◆ 性能評価側でのインプットとなる情報と 地質環境調査側でのアウトプットとなる情報の対応の明確化・共有に留意する

- ◆ 性能評価側のニーズ (性能評価において利用可能となることを期待する情報の種類や詳細度など) や地質環境調査側での制約 (性能評価が期待する種類・詳細度での情報の取得や提供の難易度など) の明確化・共有に留意する
- ◆ 上記を効果的かつわかりやすく行うこと、またそのプロセスをトレースできることにも留意する
- ・ 「性能評価で必要となる情報」を以下の観点で評価・整理すること、その特徴を明確にして いくことも有効
 - 性能評価上の重要性(安全性を論じるための性能評価での考慮事項としての重要性、 評価結果に対する感度としての重要性など)
 - 不均質・不確実性の種類やその程度
 - データ取得の難易度などの違い (情報の種類や求める詳細度に応じた違い、想定する 場所による違い、調査段階による違いなど)
- ・ 地質環境調査と性能評価との分野間での連携に係る以下の既往の検討成果において整理できていることを分析・把握し本検討に活用すること、あるいは十分には整理・対応できていないことを踏まえて本検討で取り組むべき課題を分析・把握することなども有効
 - 評価ツリー (柴田ほか, 2015)
 - 統合化データフロー (原子力機構, 2011)

●STEP1:連携対象の具体化及び絞り込み

本 STEP では、連携を通じて詳細化していく「性能評価で必要となる情報」の属性や性能評価 上の位置づけなどを、例えば以下のような切り口から分析し整理していく。

- ・ 熱(T)・水理(H)・力学(M)・化学(C)を起点として、連携の議論の具体化に資するために、連携の対象として着目すべき「情報」を段階的に詳細化(具体化)していく
- ・ そのうえで、性能評価の「どの観点」から「どの情報」の「どのレベル」に着目するかを具 体化(絞り込み)していく

本STEPについては、地質環境調査と性能評価の両分野の専門家が参加する形で試行を行った。 その内容は後述の「②連携対象の具体化の試行」において示す。

●STEP2:性能評価における入力ーモデルー出力の関係の整理

STEP1での「連携対象の具体化及び絞り込み」と並行して、「性能評価で必要となる情報」が性能評価において具体的にどのように使われうるか、それがどのような成果に結びつくかなどを見通せるように、「どのような入力のときに」、「どのようなモデルを通じて」、「どのような出力が得られるか」、「その実現のためには何が必要か」などを、例えば以下のような切り口から整理していく。

- ・ どのレベルの入力 (例:図 4.2-2 の $a\sim f$) とモデルの組み合わせでどのような出力 (例:図 4.2-2 の $A\sim F$; 性能評価の結果としての核種移行率や線量) になるか
- ・ 各入力レベルを整えるためにどのような調査技術やリソースが必要か、また、それを実現するための条件は何か(STEP1のどのレベルの情報で、どのレベルの入力が整えられるか)
- ・ 各出力は、性能評価の成果としてどのような違いがあるか(評価結果として得られる情報・ 知見の種類や詳細度の違い、評価できる内容の現実性の違い、異なる場所の差別化が可能な

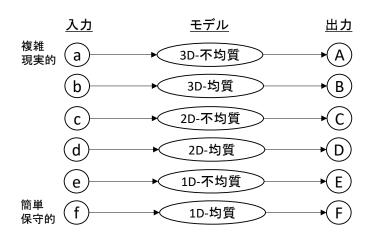


図 4.2-2 性能評価における入力ーモデルー出力の関係のイメージ

●STEP3:調査にかかる労力・コストと性能評価の結果の最適化

本ステップでは、STEP1 と STEP2 の検討・整理の結果を対比・分析し、必要に応じて複数の「性能評価で必要となる情報」についての相対的な優先度などの検討を行う。ただし、このような検討は性能評価上の必要性や重要性だけに着目して行ってしまうと実現できない絵に描いた餅になってしまう可能性が高い。そのため、より実効性のあるものとしていくために、各入力レベルを整えるために必要な調査技術やリソースと、各出力の成果としての価値や詳細度の違いを対比させるなどして、最適な入力と出力のセットはどれかを探り出す、あるいは最適とは言えないまでも同様な意義をもつ入力と出力のセットが複数存在し得るのであればそれらを洗い出し、実効的な選択肢として明示していくことも重要となる。このような検討が進むことで、分野間においてどのような連携をどの段階でどこまで目指すことが実現可能でかつ効果的かを俯瞰することに資する情報・知見が蓄積されていくことが期待される。

2) 連携対象となる情報の具体化の試行

前述の「1)性能評価の観点からの分野間の連携の手法・手順の検討」の「STEP1:連携対象の具体化及び絞り込み」で述べた『連携を通じて詳細化していく「性能評価で必要となる情報」の属性や性能評価上の位置づけなどについての検討』を、地質環境調査と性能評価の両分野の専門家が参加する形で試行をしてみた。

なお、この試行においては、やりながら見えてくることもあると考え、前述の 1) で述べた以下 の二つの切り口も議論のきっかけとして活用しつつも、必ずしもそれらだけにはこだわらず、両 分野の専門家がそれぞれの発言を受けて感じたこと・思ったことを発言するという発想の連鎖を 重視し、自由に議論を広げてみることとした。

- ・ 熱(T)・水理(H)・力学(M)・化学(C)を起点として、連携の議論の具体化に資する ために、連携の対象として着目すべき「情報」を段階的に詳細化(具体化)していく
- ・ そのうえで、性能評価の「どの観点」から「どの情報」の「どのレベル」に着目するか を具体化(絞り込み)していく

また、「STEP0:「性能評価で必要となる情報」を中心とした分野間での連携の手法・手順に関

する基本的な考え方の提示」で例示した、連携に関する議論を通じて期待される「検討の目的や その際の留意事項、検討の効果的な実施に役立ちそうな着目点・情報・知見などの提示」につい ても、本試行のスコープとして、「両分野の専門家の議論において関係する意見やアイディアを出 すこと」を含めることとした。

ただし、このような検討は初めての試みであり、検討の進め方なども試行錯誤であったことから、本試行ではまず、両分野の専門家がそれぞれの考えを発言し、その発言を受けて考えたことを返すと言う双方向の議論を重ねつつ抽出していく作業までが中心となった。その結果、本試行では、STEP1の目的である「性能評価で必要となる情報」の属性や性能評価上の位置づけなどを具体的に整理すること、及び、STEP0で挙げた「検討の目的やその際の留意事項、検討の効果的な実施に役立ちそうな着目点・情報・知見など」を提示すること、までは至らなかった。しかしながら、両分野の専門家による議論を通じて、今後このような連携に係る議論を本格的かつ効果的に進めていくためのポイントや留意点に関係し得る以下に挙げたような意見などを抽出することができたと考える。これらは例えば、両分野の専門家が事前に共有しておくべき事項、あるいは協力して検討していくべき事項などの具体化へとつながっていくことが期待される。

- ・地質環境調査と性能評価との分野間での連携に係る既往の検討成果(評価ツリー(柴田ほか, 2015)、統合化データフロー(原子力機構, 2011))の分析
 - 分類・整理できていること:地質環境調査の項目と性能評価の項目やモデルとの関係づけ
 - 十分には整理・対応できていないこと:上記の項目・モデルのレベルでの関係をより具体的に理解するための情報レベルでの関係づけ
 - ⇒ 地質環境調査と性能評価との連携について本検討で今後主に取り組むべき課題は、既往 の検討で分類・整理されている地質環境調査の項目と性能評価の項目やモデルとの関係を ベースに、その関係の内容をより具体的にしていくための情報レベルでの関係づけである ことを確認
- ・地質環境調査の進み方と性能評価での地質環境の情報の利用ニーズとの関係
 - 地質環境調査は、基本的に「広い領域」から「狭い領域」へと段階的に進む
 - 地質環境調査から得られる情報の性能評価での利用のニーズとしては、大きく「対象領域 の境界条件の設定への反映」と「対象領域内の場の特性と水理・物質移行の特性・現象の設 定への反映」に分類できると考えられる
 - ここで、性能評価での境界条件の設定では、そこで対象とする核種移行解析の領域よりも 広い領域での情報が必要となる
 - ⇒ 性能評価での境界条件として設定する情報の種類や詳細度、さらには境界条件の設定の 違いが性能評価結果に与える影響の大きさなどを確認すること、地質環境調査の早い段階 で性能評価の境界条件の設定に必要な情報は得られるか、得られない場合にはどのような 対応が必要/可能かなどを含めた、「情報の取得と利用について、内容だけでなくタイミ ングも含めたマッチング」に着目した検討が重要になる可能性
- ・地質環境が実際に有する特徴に対する地質環境調査から得られる情報の充足性や性能評価での 表現の対応性
 - 地質環境が実際に有する特徴(特に、地下水化学、地下水流動の内容や不均質性など、及び それらの時間変遷)に対して、地質環境調査から得られる情報に基づいて設定あるいは地 質環境モデルとして表現される地質環境の特徴(例えば、地下水組成の分布、移行経路、移

行時間など)の量的な充足性(例えば、種類の充足性、空間的な充足性、時間的な充足性など)及び質的な充足性(信頼性/不確実性、解像度、現実性など)はどの程度か?

- 地質環境が実際に有する特徴に対して、地質環境調査から得られる情報に基づいて性能評価上で設定あるいはモデルを用いて評価される地質環境の特徴(例えば、地下水組成の分布、移行経路、移行時間など)の量的な充足性(例えば、種類の充足性、空間的な充足性、時間的な充足性など)及び質的な充足性(信頼性/不確実性、解像度、現実性など)はどの程度か?
- 地質環境調査から得られる情報に基づいた地質環境モデルなどとして表現される、また、 性能評価上で設定・評価される地質環境の特徴については、その質・量ともに、地質環境が 実際に有する特徴を表現できるレベルまで充足性を上げることが理想的ではあるが、取得 可能な情報量やその更新頻度・程度には限界がある。質・量の充足性をどこまで高めること を目指すことが可能か?
- ⇒ 地質環境調査と性能評価との連携を、理想論ではなく、実際に目指すべきかつ目指すこと が可能なものとしていくためには、上記のような量・質の充足性についての問題を、以下 のことも考慮しつつ検討し整理していくことが重要になる可能性
 - 地質環境調査や性能評価の充足性は、調査の段階の進展に伴いどのように進展していくことが期待されるか?充足性の進展の限界はどこにあると考えられるか?
 - その充足性の進展や限界は、対象とする地質環境により大きく異なるか?その場合、 特にどのような特徴を持つ地質環境の場合に、地質環境調査や性能評価のどの部分が 大きく異なる可能性があるか?
 - その進展や限界は、地質環境調査に基づく地質環境モデルの構築、性能評価における 核種移行評価結果 (線量評価結果など) にどのような影響を与えるか?地質環境調査 や性能評価の目的を満たすことが可能か?
 - 実現できる充足性の範囲において「地質環境調査や性能評価の目的」が達成されるならば問題はないが、達成されない場合には、地質環境調査や性能評価の信頼性が不十分となる。そのような比較で着目すべき「地質環境調査の目的」や「性能評価の目的」は、対象とする事業の段階によりどのように変化するか、さらには対象とする地質環境に応じて変化するか(時間的な変化が単純な地域と複雑な地域など)、それら目標の進展や違いは、地質環境調査や性能評価の充足性の進展と整合するか?整合しない場合やその他の問題がある場合にはどのような対応が必要になるか?

(3) まとめ及び今後の課題

安全評価において留意すべき沿岸部固有の特徴などを踏まえた核種移行評価と生活圏評価の評価内容と評価方法の分析・整備の一環として、評価シナリオ・解析ケース設定で必要となる項目や「性能評価において普遍的に重要性が高い情報のリスト」について、調査・データ取得側の視点も含めた再整理・拡充を試みた。具体的には、「性能評価で必要となる情報」の詳細化を分野間での連携とも関係付けつつ行うことに着目し、そのための性能評価の観点からの分野間の連携の手法・手順の例示を試みた。また、その手法・手順を地質環境調査と性能評価の両分野の専門家が参加する形で試行してみることで、「性能評価で必要となる情報」の分野間の連携に留意した詳細化に係る議論などを効果的に行うために有用となる可能性のある留意点や課題を洗い出した。これらは、例えば、分野間の連携で不可欠となる、複数分野の専門家が事前に共有しておくべき事項、あるいは協力して検討していくべき事項などの具体化へとつなげること、さらにそれらを蓄積していくことで、その先にある分野間の連携の実現につながっていくことが期待される。

参考文献

- 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 29 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, 2018.
- 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 耕一郎, 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 覚, 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 3, NUMO-JAEA 共同研究報告書(2013 年度)(共同研究), JAEA-Research 2014-030, 2015.
- 日本原子力研究開発機構, 平成 22 年度地 層処分技術調査等委託費 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 報告書, 2011.

4.3 核種移行モデル・パラメータ整備及び影響評価

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地下水の流動、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。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化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と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; 産総研, 2012; 電中研, 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 (原環機構, 2011a, b)。 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 Langevin, 2002) などの数値解析コードを用い、地層を多孔 質媒体で表現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 ルキルオト(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亀裂に接する岩石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 れらの数値モデルは、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概念的に同様のモデ ルである。このような亀裂とマトリクス部による二重空隙モデルを用いた溶質の移行挙動の評価 結果は、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、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を整備することを目的に、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($200 \text{ m} \times 200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 程度の領域) の二つの異なるスケールを対象に技術開発を進めてきた。

① 数十キロメートルの広域スケール

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、平成28年度には、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)を用いた数値解析手法を整備するとともに、特定のサイトを対象としない段階における評価である

ことと解析の簡略化のために、鉛直二次元断面の地形モデルを対象とした検討に着手した。その結果、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に比べて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(産総研,原子力機構,原環センター,電中研,2017)。また、平成29年度には、マトリクス部の塩分を留める効果が地下水環境の変化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い、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(産総研,原子力機構,原環センター,電中研,2018)。

平成 30 年度は、これ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、地下水環境の変化の核種移行評価への反映方法について検討した。具体的には、核種移行評価に必要な情報の一つである処分場周辺の地下水流速や塩分濃度の経時変化などの地下水環境変化についての情報の抽出、抽出された情報に基づく地下水環境変化のパターン分類、それら地下水環境変化のパターンを後段の②の処分場周辺のブロックスケールを対象とした評価へ反映する方法、などについて検討した。これら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 坑道周辺のブロックスケール (200 m×200 m×200 m程度の領域)

ブロックスケールについては、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手法の検 討を試みてきた。平成 28 年度には、亀裂部とマトリクス部の二重空隙モデルを扱うことが可能 な地下水流動・物質移動解析コード HydroGeoSphere (Aquanty, 2015) の適用を試みた結果、 評価可能なスケールは $200~\mathrm{m} imes200~\mathrm{m} imes200~\mathrm{m}$ 程度のブロックスケールに限定されるものの、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などの物質移動の解析が可能であること を示した。また、平成29年度には、地下水環境の変化と併せて核種移行挙動を解析する手法の整 備の一環として、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、塩分 濃度に依存して分配係数が変化する Cs の場合について検討した。その結果、塩分濃度の変化に 起因して分配係数の変化が生じたとしても常に核種移行挙動に顕著な影響を及ぼすわけではなく、 例えば、分配係数の変化がブロックスケールを核種が移行することに要する時間よりも短い時間 で生じる場合には、その変化が核種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することが できると考えられる。

平成 30 年度は、これ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に加えて広域スケールを対象とした地下水環境評価についての検討成果なども活用して、地下水環境(地下水流速や流向、地下水中の塩分濃度)の変化が核種移行挙動に与える影響について検討した。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化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化パターン毎に、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核種移行挙動に与える影響について検討を行った。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。

(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 29 年度までの検討(産 総研, 原子力機構, 原環センター, 電中研, 2017, 2018) に引き続き、わが国の沿岸部を想定した 鉛直二次元の地形モデル(図 4.3-1)を用いて、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(核燃料サイクル開発機構, 1999;澤田ほか, 1999)と 等価な透水性と有効間隙率を有する多孔質媒体モデルを適用した。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モデルのパラメータ値を表 4.3-1 に示す。そして、亀裂に接する岩石 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、地下水環境(地下水流動、塩分濃度分布)の変化を数値解析 により求めた。本検討では、核種移行評価に必要な情報である処分場周辺の地下水環境変化(地 下水流速や塩分濃度の経時変化など)の情報の抽出と、抽出された情報の地質環境の特徴に応じ た類型化を試みるために、基本ケースを表 4.3-1 に示したパラメータ値とし、それに対して、処 分場周辺の地下水環境変化に大きく影響を及ぼすと考えられる亀裂部の透水性やマトリクス拡散 特性についてのパラメータ値を変更した感度解析ケースを設定した(表 4.3-2)。感度解析ケース でのパラメータ値の設定には、母岩の透水係数として 10⁻¹⁰~10⁻⁷ m/s の範囲を対象とした。また、 地下水環境変化に影響を及ぼす因子として陸域の地形勾配にも着目し、基本ケースでの地形勾配 の設定(1.2%)より急勾配(10%)のケースを設定した。

地下水流動解析に用いた境界条件を表 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。また、0.3 m/千年の隆起と 0.1 m/千年の侵食を仮定して、0.2 m/千年での海退を合わせて設定した。初期の塩分濃度分布は 24 万年前から現在に至る海水準変動を考慮した地下水流動解析により求めた(産総研,原子力機構,原環センター,電中研,2017)。図 4.3-2 に算出した初期条件の例を示す。

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などの情報の 抽出は、現汀線の地下 1,000 m の評価点 1、評価点 1 の沖合 5 km (評価点 2)、評価点 1 の沖合 10 km (評価点 3) の三つの評価点を対象とした (図 4.3-2)。各評価点での地下水流速と塩分濃 度比 (海水の塩分濃度に対する比) の経時変化の結果例を図 4.3-3~図 4.3-5に示す。図 4.3-3は 基本ケースの結果と、基本ケースより透水係数を 100 倍、10 倍、1/10 倍したケースの結果を比 較したものである。基本ケースのうち、評価点1は初期の海退の影響により塩水から淡水に変化 し、その後は隆起侵食のために陸域に留まるために地下水環境は一定になる。それに対して、評 価点2や評価点3は隆起侵食の影響と考えられるより長い時間で塩水から淡水に変化する。透水 係数を基本ケースより 1/10 倍したケースは、海水準変動が地下水環境に与える影響が小さい。 評 価点1では隆起・侵食の影響と考えられる塩水から淡水への緩やかな変化が見られるものの、評 価点 2 と 3 では一定の塩水環境が保たれていることがわかる。透水係数を基本ケースより 100 倍、10 倍したケースは、海水準変動が地下水環境に与える影響が顕著に表れている。評価点1で は初期の海退により塩水が淡水に変化し、その後は隆起侵食のために陸域に留まるために地下水 環境は一定になる。評価点2と3では、隆起侵食による陸域化が進むまで海進・海退のサイクル の影響が繰り返えされ、塩水と淡水の入れ替わりが複数回生じている。図 4.3-4 は基本ケースの マトリクス部の特性に対して、小さな有効間隙率と小さなマトリクス拡散深さを設定したケース の結果を基本ケースの結果と比較して示したものである。いずれのケースもマトリクス拡散によ

る遅延効果をより小さくする効果が期待されるものの、その影響は、透水性を一桁ずつ変化させた感度解析ケースに比べて小さく、基本ケースから大きくは変わらない結果となっている。図 4.3-5 は、陸域の地形勾配を急勾配(10%)にした場合の結果であり、基本ケース(1.2%)に比べて陸域側の淡水の水頭が大きくなるため淡水と塩水の境界がより海側にあり、基本ケースでの地形勾配の設定(1.2%)の図 4.3-3 に対して、評価点 2 が基本ケースの評価点 1 に、評価点 3 が基本ケースの評価点 2 に近い結果を示している。

以上の解析結果から、地下水環境の変化パターンは以下の四つに分類できる(図 4.3-6 参照)。

- ・パターン 1) 海水準変動の影響が大きく、初期の海退により一様に塩水から淡水に変化する。
- ・パターン 2) 海水準変動の影響が大きく、海退・海進の影響により塩水→淡水化→塩水化 のサイクルが複数回繰り返される。
- ・パターン 3) 海水準変動の影響が小さく、隆起・侵食の影響により塩水が次第に淡水化する。
- ・パターン 4) 海水準変動の影響、隆起・侵食の影響がともに小さく、一定の塩水環境が保たれる。

各解析ケースの各評価点での地下水環境の変化パターンを上記の4種類に分類して表 4.3-4に整理した。これらの四つのパターンは主として母岩の透水性の違いと評価点の位置(現汀線からの距離)によって生じると考えられる。母岩の透水性が大きい(およそ 10°8 m/s より大きい)場合には、海水準変動が地下水環境の変化に影響を与え、評価点2や評価点3のように現汀線より沖合では12万年周期の海進・海退のサイクルの影響を複数回受ける可能性がある。母岩の透水性が小さく(10°9 m/s 程度)なると、海進・海退が地下水環境の変化に与える影響は小さくなり、隆起・侵食による緩慢な地下水環境変化が生じる。さらに低透水性(10°9 m/s 程度以下)になると海水準変動の影響及び隆起・侵食が地下水環境に与える影響はともに小さく、一定の塩水環境が保たれるようになる。

以上の地下水環境の変化パターンの分類は、後段の 2) で述べる処分場周辺のブロックスケールを対象とした核種移行評価での境界条件の変化パターンの設定などに活用する。

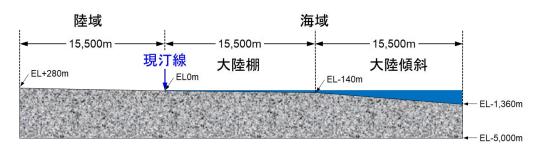


図 4.3-1 広域スケールの地形を考慮した鉛直 2 次元の地形モデル概念図 (産総研, 原子力機構, 原環センター, 電中研, 2017)

表 4.3-1 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		
守Ш透水体剱	1.7×10° m/s	アライゼーションの平均値		
水理学的有効間隙率	0.0057.0/	亀裂開口部の体積のみを考慮した、地下水の移		
// / / / / / / / / / / / / / / / / / /	0.0057 %	行に寄与する間隙の比率		
単位体積当たりのマトリク	0.84 m ² /m ³	亀裂ネットワークモデルの P32 の 2 倍		
ス拡散寄与面積	0.64 m²/m³	毛衣不ツトソークモア/VO F32 O/ 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	$2.5 \times 10^{-12}\mathrm{m}^2/\mathrm{s}$	第2次とりまとめレファレンスケース(核燃料		
大划加权际效		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		
マドソンへ同の行列間除空		サイクル開発機構, 1999)より		

表 4.3-2 地下水環境変化の評価に向けた感度解析ケース

母岩(氰	12型)				
透水係数 (m/s)	有効 間隙率(%)	有効 間隙率(%)	拡散深さ(m)	マトリクス拡散 寄与面積 (m²/m³)	地形勾配 (%)
1.7×10^{-7}	5.7×10^{-2}	2.0	1.2	0.84	1.8
	1.8×10 ⁻²	2.0	1.2	0.84	1.8
17 × 10-8		0.7	1.2	0.84	1.8
1.7 × 10 ⁻⁸		2.0	0.1	0.84	1.8
		2.0	1.2	0.84	10
	5.7×10 ⁻³	2.0	1.2	0.84	1.8
1.7×10 ⁻⁹		0.7	1.2	0.84	1.8
1.7 × 10 -		2.0	0.1	0.84	1.8
		2.0	1.2	0.84	10
	1.8×10 ⁻³	2.0	1.2	0.84	1.8
1.7×10 ⁻¹⁰		0.7	1.2	0.84	1.8
		2.0	0.1	0.84	1.8
		2.0	1.2	0.84	10

(網掛け:基本ケースでのパラメータ値(表 4.3-1 参照))

表 4.3-3 地下水流動解析の境界条件設定値

境界	水頭・流量条件	濃度条件
陸域	地表面に水位を固定	流入時:塩分濃度0
(地表面)		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	流入時:海水の塩分濃
(海底面)	応した水頭値で固定(海	度
	水の密度 1,025kg/m³)	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

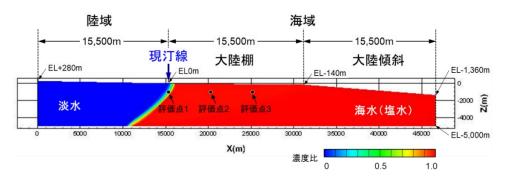


図 4.3-2 塩水濃度の初期条件の例と評価点

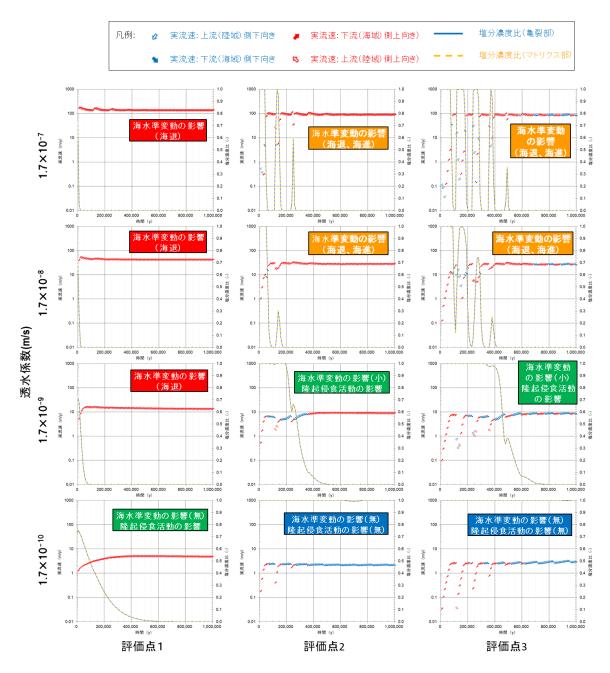


図 4.3-3 各評価点の地下水流速と塩分濃度比の経時変化:透水係数の異なるケース間の比較

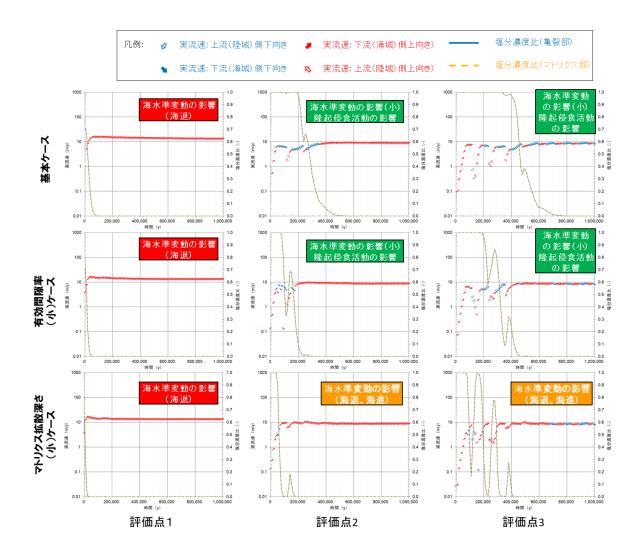


図 4.3-4 各評価点の地下水流速と塩分濃度比の経時変化:異なるマトリクス拡散特性間 のケース間の比較

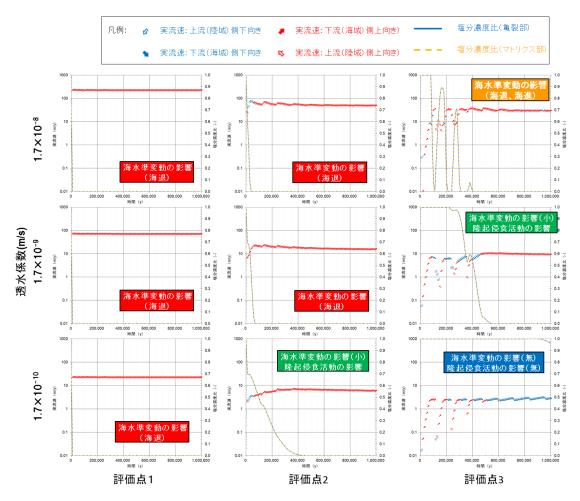


図 4.3-5 各評価点の地下水流速と塩分濃度比の経時変化:陸域の地形勾配を大きくしたケース

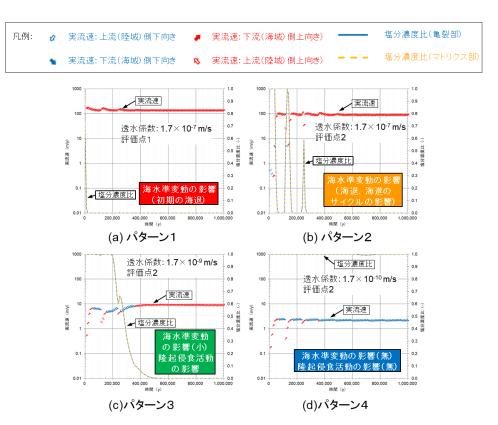


図 4.3-6 処分場周辺の地下水流速と塩分濃度比の経時変化パターンの例

表 4.3-4 地下水環境の変化パターン分類例

清水	母岩(亀裂)		マトリクス部				海水準変動 隆起・侵食の影響		
1.7×10 ⁻⁷ 5.7×10 ⁻² 2.0 1.2 0.84 18 2 油水準変動の影響育り、海水準変動の影響育り(海浪 海山) 海水準変動の影響育り(海浪 海山) 海水準変動の影響有り(海浪 山) 海水準変動の影響有り(海浪 地) 海水準変動の影響有り(海浪 地) 海水準変動の影響有り(海泉 地) 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り(海泉 地) 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海				拡散深さ(m)	寄与面積	地形勾配 (%)			影響
1.7×10 ⁻⁸ 2.0 1.2 0.84 18 3 海水準変動の影響有り(海速変動の影響有り(海速変動の影響有り(海速変)の影響有り(海速変)の影響有り(海速) 海(海速変)の影響有り(海水準変動の影響有り(海水準変動の影響有り(海水準変動の影響有り(海水準変動の影響有り(海水準変動)の影響有り(海水準変動の影響有り(海水準変動の影響有り(海水準変動の影響有り(海水準変動の影響有り(海水準変動の影響有り(海水準変動)の影響有り(海水準変動の影響有り(海水準変動)の影響有り(海水準変動の影響有り(海水準変動)の影響有り(海水準変動の影響有り(海水準変動)の影響有り(海水準変動)の影響有り(海水準変動の影響有り(海水準変動)の影響有り(海水準変動の影響有り(海速変)の) 第2 0 12 084 18 2 海水準変動の影響有り(海水準変動の影響有り(海速変)の) 第2 0 12 084 18 2 海水準変動の影響有り(海水準変動の影響有り(海波変)の影響相) 2 0 12 084 18 2 海水準変動の影響有り(海波変)の影響相) 1 1 海水準変動の影響有り(海波変)の影響相) 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	_			1.2	0.84			110 3 1 000000 1 110 00 12 13 1	海水準変動の影響有り(海退のみ)
1.7×10 ⁻⁸ 1.8×10 ⁻² 2.0 1.2 0.84 18 1 高水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り(海退) 海り (海湿) 海り 海水準変動の影響有り(海退) 海水準変動の影響有り(海退) 海り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り(海退) 海り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り(海退) 海り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り(海退) 海り 海水準変動の影響有り(海退) 海り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響 自り 海水準変動の影響の影響 自り 海水準変動の影響 自り 海水準 自り 海水準 自り 海 はり 自り はり	1.7×10^{-7}	5.7×10^{-2}	2.0			1.8		110 2 1 2 4 2 4 3 4 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	海水準変動の影響有り(海退、海進)
1.7×10 ^{-8 1.8×10^{-2 1.8×10^{-3 1.8×10}}}</sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup>								THE STATE OF COMMENTS AND THE TOP	Provided in Section 1997 Change Provided
1.7×10 ⁻⁸ 1.8×10 ⁻² 1.8×10 ⁻² 1.7×10 ⁻¹⁰ 1.8×10 ⁻² 1.7×10 ⁻¹⁰ 1.8×10 ⁻³ 1.8×10 ⁻³ 1.7×10 ⁻¹⁰ 1.8×10 ⁻³ 1.8×10 ⁻³ 2.0			2.0	4.0		1		110 3 1 Decado 1 30 Es 13 1	海水準変動の影響有処海退のめ
1.7×10 ⁻⁸ 1.8×10 ⁻² 1.8×10 ⁻² 1.8×10 ⁻³ 1.8×10 ⁻³ 1.8×10 ⁻³ 1.8×10 ⁻⁴ 1.8 1.8×10 ⁻⁴ 1.8 1.8×10 ⁻⁴ 1.8×10 ⁻⁵ 1			2.0	1.2	0.04	1.8		110 3 1 0 0 0 0 0 1 10 0	海水洋炎動の影響有り(海返、海運)
1.7×10 ⁻⁸ 1.8×10 ⁻² 1.8×10 ⁻² 2.0 1.1 0.84 1.8 2. 海水準変動の影響有り、海水率変動の影響有り(海退のみ) 海水準変動の影響有り(海退のみ) 海水準変動の影響相の(海退のみ) 海水準変動の影響有り(海退のみ) 海水準変動の影響有り(海退のみ) 海水準変動の影響相の(海退のみ) 海水準変動の影響相の(海退のみ) 海水準変動の影響相の 海水準変動の影響有り(海退のみ) 海水準変動の影響網に 神経機能活動の影響有り(海退のみ) 海水準変動の影響網に 神経機能活動の影響有り 海水準変動の影響網に 神経機能活動の影響有り 海水準変動の影響細に 神経機能活動の影響有り 海水準変動の影響細に 神経機能活動の影響有り 海水準変動の影響細に 神経機能活動の影響有り 海水準変動の影響相に 神経機能活動の影響有り 海水準変動の影響細に 神経機能活動の影響有り 海水準変動の影響相に 神経機能活動の影響有り 海水準変動の影響細に 神経機能活動の影響有り 海水準変動の影響細に 神経機能活動の影響有り 海水準変動の影響相に 神経機能活動の影響有り 海水準変動の影響相に 神経機能活動の影響有り 海水準変動の影響相に 神経機能活動の影響有り 海水準変動の影響相に 神経機能活動の影響有り 海水準変動の影響相に 神経機能活動の影響有り 海水準変動の影響有り 神経機能活動の影響有り 神経機能活動の影響有り 海水準変動の影響有り 神経機能活動の影響有り 神経機能活動の影響有り 神経機能活動の影響有り 神経機能活動の影響有り 海水準変動の影響有り 神経機能活動の影響有り 神経機能活動の影響有り 神経機能活動の影響有り 神経機能活動の影響有り 神経機能活動の影響有り 神経機能活動の影響有り 神経機能活動の影響有り 海水準変動の影響有り 神経機能活動の影響有り 海水準変動の影響有り 神経療 新術 神経療 神経療 新術 神経療								The Residence of the Control of the	THE TELESCOPE AND BUILDING THE COMMENT
1.7×10 ⁻⁹ 18×10 ⁻² 2.0 0.1 0.84 18 2 海水準変動の影響有り、海水準変動の影響有り海水準変動の影響有り、海、海水準変動の影響有り、海、海、海、海、海、海、海、海、海、海、海、海、海、海、海、海、海、海、海			0.7	1.0	0.04	1		THE STATE OF SECURITY AND THE TEXT	15 1 1 5 5 5 7 7 5 6 7 7 7 7
1.7×10 ⁻⁹ 1.8×10 ⁻² 2.0 0.1 0.84 1.8 2 海水準変動の影響有り、海水準変動の影響有り海辺のみ) 2.0 1.2 0.84 1.0 2 海水準変動の影響有り、海水準変動の影響有り海辺のみ) 2.0 1.2 0.84 1.0 2 海水準変動の影響有り、海水準変動の影響有り海辺のみ) 3 海水準変動の影響有り海辺のみ) 3 海水準変動の影響相り 海水準変動の影響有り海水準変動の影響有り海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 隆起侵食活動の影響有り 電見侵食活動の影響有り 電見優食活動の影響有り 電見優良食活動の影響有り 電見優良活動の影響有り 海水準変動の影響有り 電見優良活動の影響有り 電見優良活動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 電見優良活動の影響有り 電見優良活動の影響有り 電見優良活動の影響有り 電見優良活動の影響有り 電見優良活動の影響有り 電見優良活動の影響有り 電見優食活動の影響有り 電見優食活動の影響有り 電見優食活動の影響有り 電見優良変活動の影響有り 電見優食活動の影響有り 電見優食活動の影響有り 電見優食活動の影響有り 電見優食活動の影響有り 電見優食活動の影響有り 電見優食活動の影響有り 電見優養活動の影響有り 電見優な影響を見 電力の影響を見 電見の影響を見 電見の影響を見 電見を見る 第40			0.7	1.2	0.84	1.8		THE STATE OF COMMERCE AND THE TEXT	113 3 1 3 2 3 3 1 3 2 3 3 1 3 1 3 1 3 7 3 7 3 7 3 7 3 7 3 7 3
1.7×10 ⁻¹⁰ 1.8 2 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り(海退のみ) 2.0 1.2 0.84 10 2 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り(海退のみ) 2.0 1.2 0.84 10 2 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り(海退のみ) 3 海水準変動の影響有り(海退のみ) 3 海水準変動の影響有り(海退のみ) 2 海水準変動の影響有り(海退のみ) 1.7×10 ⁻¹⁰ 1.8×10 ⁻³ 1.7×10 ⁻¹⁰ 1.8×10 ⁻³ 1.8×10 ⁻³ 1.8×10 ⁻³ 1.8×10 ⁻³ 1.8×10 ⁻³ 1.9×20 1.2 0.84 1.8 2 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り(海退のみ) 2.0 1.2 0.84 1.0 2 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響相	1.7×10^{-8}	1.8×10 ⁻²						THE RESIDENCE OF THE CASE OF T	
1.7×10 ^{-10 18×10⁻³}</sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup>			2.0	0.1	0.84	1 2			
20 12 0.84 10 2 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響相し 海水準変動の影響相し 海水準変動の影響相し 海水準変動の影響相し 海水準変動の影響相し 陸起侵度活動の影響相し 陸超侵度活動の影響相し 陸超侵度活動の影響相し 陸超侵度活動の影響相し 陸超侵度活動の影響相し 陸超侵度活動の影響相し 陸超侵度活動の影響相し 陸超侵度活動の影響相し 陸超侵度活動の影響有り 陸超侵度活動の影響有り 陸超慢度活動の影響有り 海水準変動の影響相し 陸超慢度活動の影響有り 陸超慢度活動の影響有り 陸超慢度活動の影響有り 世紀後度活動の影響有り 世紀後度活動の影響有り			2.0	0.1	0.04	1.0			
2.0									
1.7×10 ⁻¹⁰			2.0	12	0.84	10	2	All I Add I will the Committee of the Co	
1.7×10 ⁻¹⁰ 1.8 2 海水準変動の影響無し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響相り 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響相り 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響相し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響細し 陸起侵食活動の影響有り 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響細し 陸起侵食活動の影響有り 陸起侵食活動の影響有り 陸起侵食活動の影響有り 地を登食食活動の影響有り 地を登りの影響有り 地を登食食活動の影響有り 地を登りの影響有り 地を登食を動の影響有り 地を登りの影響有り 地を登食を動の影響有り 地を登りの影響有り 地を登りの影響有り 地を登りの影響有り 地を登りの影響有り 地を登りの影響有り 地を登りの影響有り 地を登りる			2.0	1.2	0.01	"		海水準変動の影響有り	海水準変動の影響有り(海退のみ)
1.7×10 ⁻¹⁰ 1.7×10 ⁻¹⁰ 1.7×10 ⁻¹⁰ 1.7×10 ⁻¹⁰ 1.7×10 ⁻¹⁰ 1.8×10 ⁻³ 2.0 0.1 0.84 1.8 2 流水準変動の影響有り 陰起侵食活動の影響有り 高水準変動の影響有り 流水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響相し 陸起侵食活動の影響相し 陸起侵食活動の影響相し 陸起侵食活動の影響相し 陸起侵食活動の影響相し 陸起侵食活動の影響相し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響相し 陸起侵食活動の影響相し 陸起侵食活動の影響相し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響細し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響相し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響相り 陸起侵食活動の影響有り 2.0 1.2 0.84 1.8 2 海水準変動の影響細し 陸起侵食活動の影響有り 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 医足食食活動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水							1	海水準変動の影響有り	海水準変動の影響有り(海退のみ)
1.7×10 ⁻¹⁰ 1.7×10 ⁻¹⁰ 1.8			2.0	1.2	0.84	1.8	2	海水準変動の影響無し	隆起侵食活動の影響有り
1.7×10 ⁻¹⁰ 5.7×10 ⁻³ 0.7 1.2 0.84 1.8 2 海水準変動の影響有り 陸起侵食活動の影響有り 2.0 0.1 0.84 1.8 2 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響相し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響細し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響細し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響細し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響細し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響相し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響相し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響細し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響細し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響細し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響細し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響細し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響相し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響相し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響相し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響相り 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響相り 陸起侵食活動の影響有り 陸起侵食活動の影響有り 陸起侵食活動の影響有り 陸起侵食活動の影響有り 陸起侵食活動の影響有り 陸起侵食活動の影響有り 医足骨食活動の影響有り 陸起侵食活動の影響有り				'			3	海水準変動の影響無し	隆起侵食活動の影響有り
1.7×10 ⁻¹⁰ 1.8×10 ⁻³ 2.0 0.1 0.84 1.8 2 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響相し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響細し 陸起侵食活動の影響有り							1	海水準変動の影響有り	海水準変動の影響有り(海退のみ)
1.7×10 ⁻¹⁰ 2.0 0.1 0.84 1.8 1.8 2 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り(海退のみ) 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り(海退のみ) 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り(海退のみ) 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響相し 陸起侵食活動の影響有り			0.7	1.2	0.84	1.8	2	海水準変動の影響有り	隆起侵食活動の影響有り
1.7×10 ⁻¹⁰ 2.0 0.1 0.84 1.8 1.8 2 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り(海退のみ) 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り(海退のみ) 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り(海退のみ) 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響相し 陸起侵食活動の影響有り	17 × 10-9	5.7×10^{-3}					3	海水準変動の影響無し	
2.0 1.2 0.84 10 3 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り(海退 海進) 2 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り(海退のみ) 3 海水準変動の影響相し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響相し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響相し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響細し 陸起侵食活動の影響相し 陸起侵食活動の影響相し 陸起侵食活動の影響相し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響細し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響細し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響相し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響相し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響細し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響細し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響相し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響相し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響相し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響有り	1.7 \ 10 -			0.1	0.84			海水準変動の影響有り	海水準変動の影響有り(海退のみ)
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1						1.8			海水準変動の影響有り(海退、海進)
2.0 1.2 0.84 10 2 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り海道のみ) 海水準変動の影響相し 陸起侵食活動の影響有り 海水準変動の影響細し 陸起侵食活動の影響有り 1.7×10 ⁻¹⁰ 1.8×10 ⁻³ 2.0 0.1 0.84 1.8 2 海水準変動の影響細し 陸起侵食活動の影響相し 1.7×10 ⁻¹⁰ 1.8×10 ⁻³ 1.8×10 ⁻³ 2.0 0.1 0.84 1.8 2 海水準変動の影響細し 陸起侵食活動の影響有り 1.8×10 ⁻³ 1.8×10 ⁻³ 2.0 0.1 0.84 1.8 2 海水準変動の影響細し 陸起侵食活動の影響有り 1.8×10 ⁻³ 1.8×10 ⁻³ 1.8×10 ⁻³ 2.0 0.1 0.84 1.8 2 海水準変動の影響細し 陸起侵食活動の影響有り 1.8×10 ⁻³ 1.3×10 ⁻³ 1								110 2 1 2 4 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	
2.0 1.2 0.84 1.8 2 流水準変動の影響無し 隆起侵食活動の影響有り 2.0 1.2 0.84 1.8 2 流水準変動の影響無し 隆起侵食活動の影響無し 1.7×10 ⁻¹⁰ 1.8×10 ⁻³ 2.0 0.1 0.84 1.8 2 流水準変動の影響無し 隆起侵食活動の影響有り 1.7×10 ⁻¹⁰ 1.8×10 ⁻³ 2.0 0.1 0.84 1.8 2 流水準変動の影響無し 隆起侵食活動の影響有り 1.7×20 1.8×20			2.0	1.2	0.84			110 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	
20 1.2 0.84 1.8 1 海水準変動の影響無し 隆起侵食活動の影響有り 1.7×10 ⁻¹⁰ 1.8×10 ⁻³ 2.0 0.1 0.84 1.8 2 海水準変動の影響無し 隆起侵食活動の影響有り 1.7×10 ⁻¹⁰ 1.8×10 ⁻³ 2.0 0.1 0.84 1.8 2 海水準変動の影響無し 隆起侵食活動の影響有り 1.8×10 ⁻³ 2.0 0.1 0.84 1.8 2 海水準変動の影響無し 隆起侵食活動の影響有り 1.8×10 ⁻³ 1.8×10 ⁻³ 2.0 0.1 0.84 1.8 2 海水準変動の影響無し 隆起侵食活動の影響有り 1.8×10 ⁻³ 1.3×10 ⁻³ 1.3						10		THOUSE I SHOULD BE TO F	
2.0 1.2 0.84 1.8 2								THOU I I DOCUMENT OF MID INTO THE	
1.7×10 ⁻¹⁰					0.84	1.8	_	7年17十二人まかとか7日7110	
1.7×10 ⁻¹⁰				1.2				THE THE DECIDENCE NO. IN THE PARTY	
1.7×10 ⁻¹⁰								THOUSE I SHOULD BE ATTHE	
1.7×10 ⁻¹⁰	1.7×10 ⁻¹⁰ 1.8×					1		ABOUT I DOUBLE AND IN THE	
1.7×10 ⁻¹⁰ 1.8×10 ⁻³ 2.0 0.1 0.84 1.8 2 海水準変動の影響無し 隆起侵食活動の影響有り 2.0 1.2 0.84 1.8 2 海水準変動の影響無し 隆起侵食活動の影響有り 1 海水準変動の影響相し 隆起侵食活動の影響有り 1 海水準変動の影響有り 2.0 1.2 0.84 1.0 2 海水準変動の影響有り 隆起侵食活動の影響有り 2.0 1.2 0.84 1.0 2 海水準変動の影響有り 隆起侵食活動の影響有り				0.84	1.8		7-3-1 Sept. 7 My E 7110		
2.0 0.1 0.84 1.8 2 海水準変動の影響無し 隆起侵食活動の影響有り 3 海水準変動の影響無し 隆起侵食活動の影響有り 1 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 2.0 1.2 0.84 1.0 2 海水準変動の影響有り 陸起侵食活動の影響有り		1.8×10 ⁻³	2.0 0.1					THE STATE OF SHIP IN THE PARTY	
3 海水準変動の影響無し 隆起侵食活動の影響有り 1 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 2.0 1.2 0.84 10 2 海水準変動の影響有り 隆起侵食活動の影響有り				004	, , l		THE STATE OF SECTION AND THE VIEW		
1 海水準変動の影響有り 海水準変動の影響有り 2.0 1.2 0.84 1.0 2 海水準変動の影響有り 隆起侵食活動の影響有り				l ^{0.1}	U.84	'.º			
2.0 1.2 0.84 1.0 2 海水準変動の影響有り 隆起侵食活動の影響有り			2.0 1.2		0.84	10			
				1.2					
	1			l '.∠		'0	3	海水準変動の影響無し	降起侵食活動の影響無し

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 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 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・海退や隆起・侵食による地下水環境(地下水流速 や流向、地下水中の塩分濃度)の変化を評価するとともに、そのような地下水環境の変化のもと での核種移行挙動を評価する手法を検討した。ここで、ブロックスケールでの海進・海退や隆起・ 侵食による地下水環境の変化を考慮するために、その境界条件の設定において、前項目 1) の広 域スケールを対象とした検討で四つに分類した地下水環境変化パターンに関する情報を活用した。 二重空隙モデルの構築には、平成 29 年度までの検討(産総研, 原子力機構, 原環センター, 電中 研, 2017; 2018) 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。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 4.3-7 参照)。 HydroGeoSphere に適用した三次元亀裂ネットワークモデルの外観図と外側・内側境界条件の概 念図を図 4.3-8 に、地下水流動解析及び核種移行解析の解析条件を表 4.3-5 に示す。地下水流動 の解析条件のうち外側境界条件は、図 4.3-6 の実流速から算出される水頭差と流向の経時変化を 図 4.3-8(b)の上流(陸域)側と下流(海域)側へ設定した。また、外側境界に設定する塩分濃度 の経時変化も、図 4.3-6 に示される塩分濃度比の経時変化を用いた。核種移行解析の対象核種は、 「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ー地層処分研究開発第2次取り まとめー」(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)のレファレン スケースで母岩からの核種移行率の支配核種であり、マトリクス部の分配係数 Kd が地下水中の 塩分濃度に依存して変化する核種の Cs-135 を選定した。図 4.3-8(b)の赤線で示した処分坑道周 辺の掘削影響領域(EDZ)に、第2次とりまとめのリファレンスケースで示された人工バリアか らの核種移行率の経時変化を入力した。なお、本検討で着目している地下水環境(母岩中の地下 水の流速、流向、塩分濃度比など)の経時変化は人工バリア中の核種移行挙動に影響を与え、人 エバリアからの核種移行率も地下水環境の変化に応じて変化すると考えられる。しかし、本検討 の主たる目的は地下水環境の変化が母岩中の核種移行挙動に与える影響を評価する手法を構築す ることにある。そのため、本検討では人工バリア中の核種移行挙動は地下水環境に依存せず一定 であると仮定し、第 2 次とりまとめレファレンスケースで示された Cs-135 の人工バリアからの 核種移行率の経時変化を全ての解析ケースに適用することとした。マトリクス部の Kd の設定に ついては、淡水環境と塩水環境で Kd の値が異なることを仮定した。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 Kd の値に設定し、 塩分濃度が変化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 Kd が変 化すると仮定した。

Kd=-0.045s+0.05 · · · · · · (式 4.3-1)

併せて、Kd の値が物質移動挙動に与える影響を分析するために、Kd が一定で、 $0m^3/kg$ の場合、 $0.005~m^3/kg$ の場合、 $0.05~m^3/kg$ の場合についても解析を実施した。

解析ケースは、1)の広域を対象とした地下水流動解析で提示した、処分場周辺の地下水流速と塩分濃度比の経時変化のパターン(図 4.3-6 参照)に対応する 4 ケースを設定した。これらのケースを対象とした核種移行解析結果を、図 4.3-9~図 4.3-12 に示す。これらの図には、図 4.3-6

の地下水の実流速と塩分濃度比の経時変化を(a)に再掲し、その結果に基づき設定した外側境界条件の経時変化を(b)に、核種移行解析の結果として下流(海域)側境界からの核種移行率の経時変化などを(c)にそれぞれ示した。なお、各図の横軸(時間軸)は、(a)は線形、(b)と(c)は対数で示している。

パターン 1 (図 4.3-9) は相対的に高い透水性を有しており、かつ現汀線下に位置している条件である。そのため、比較的早い地下水流速が維持され、かつ海水準変動の影響により初期の海退で一様に塩水から淡水に変化する。その後、隆起・侵食に伴い淡水環境かつ陸側から海側に向かう比較的早い地下水流速が維持されている。解析の結果、塩水濃度比の変化により Kd が変化するものの、下流(海域)側境界の Cs-135 移行率に与える影響が小さく、淡水の Kd のケースとほぼ同じ結果となった。さらに、地下水流速が比較的早いために母岩中の核種移行遅延効果が小さく、下流(海域)側境界の核種移行率の最大値は人工バリアからの核種移行率の最大値に比較して一桁弱程度の低下であった。

パターン 2(図 4.3-10)はパターン 1 と同様に相対的に高い透水性を有しており、海水準変動の影響が大きい。ただし、パターン 1 が現打線下であるのに対して、パターン 2 はより沖合の位置を対象としており、海退・海進の影響により塩水→淡水化→塩水化のサイクルが複数回繰り返され、四つのパターンの中で地下水環境の変化が最も複雑である。このような複雑な地下水環境の変化パターンでも、これらの地下水環境変化を考慮した境界条件を適切に設定することで、地下水流動の方向、流速、塩水濃度などの地下水環境の変化の繰り返しを考慮した母岩中の複雑な核種移行挙動を解析することができた。その結果、下流(海域)側境界への核種移行率の経時間変化は、地下水環境の変化に対応して複雑な形状を示していることがわかる。また、塩水濃度比の変化による Kd の変化の影響を受け、核種移行率の経時変化は塩水の Kd のケースと淡水の Kd のケースの間に分布している。パターン 2 は高い透水性を有しているため、パターン 1 の結果と同様に母岩中の核種移行遅延効果が小さい。また、地下水流動の方向が変わる度に核種移行率がスパイク的に変化する様子も示されている。

パターン 3 (図 4.3-11) は相対的に透水性が低いため、海水準変動が地下水環境に与える影響が小さいものの、隆起・侵食の影響により塩水環境から次第に淡水環境に変化する。そのため、地下水環境の変化は緩やかかつ単調となる。解析の結果から、下流(海域)側境界への核種移行率の経時間変化は、塩水の Kd のケースから次第に淡水の Kd のケースの移行率に漸移している様子がわかる。パターン 1 や 2 の母岩に比べて透水性が低いため母岩中の核種移行遅延効果が大きく、下流(海域)側境界の核種移行率の最大値は人工バリアからの核種移行率の最大値に比べて 3 桁以上低下していることがわかる。

パターン 4 (図 4.3-12) はケース 3 よりさらに透水性が低いために、海水準変動の影響、隆起・侵食の影響がともに小さく、一定の塩水環境が保たれている。そのため、下流(海域)側境界への核種移行率の経時間変化は、塩水の Kd のケースと同じ結果となっている。そして、その低透水性のため母岩中の核種移行遅延効果がケース 3 より大きく、下流(海域)側境界の核種移行率の最大値は人工バリアからの核種移行率の最大値に比べて 5 桁以上低下していることがわかる。

以上の結果から、地下水環境変化のパターン毎に母岩中の核種移行挙動が異なることが分かった。例えば、海水準変動の影響を受けて地下水環境が繰り返し変化するのは母岩の透水性が相対的に高い場合であり、母岩の透水性が高い場合には核種の移行遅延が小さくなることと組み合わされることで、地下水流速や塩水濃度の変化が母岩中の核種移行挙動に与える影響が大きくなる傾向のあることがわかった。一方、母岩の透水性が小さい場合には、海水準変動が地下水環境に与える影響は小さく、かつ核種の移行遅延が大きいことから、地下水流速や塩水濃度の変化が母岩中の核種移行挙動に与える影響が母岩の透水性が高い場合に比べて小さくなる傾向あることが

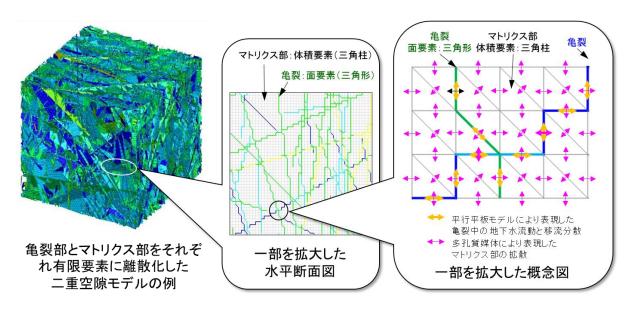


図 4.3-7 HydroGeoSphere を用いた亀裂とマトリクス部の二重空隙モデルの概念図 (産総研, 原子力機構, 原環センター, 電中研, 2017, 2018)

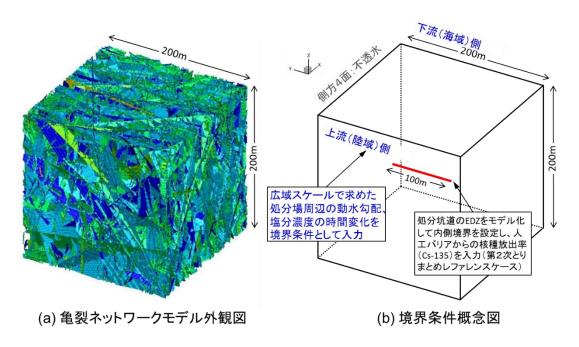


図 4.3-8 三次元亀裂ネットワークモデル外観図と境界条件概念図

表 4.3-5 HydroGeoSphere を用いた地下水流動・核種移行解析の解析条件

23 7	.o-o riyur	occoophicie & /i.		-1/1 07 /1-1/1 / 1
			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
マトリクス語	マトリクス部 実効拡散係数		$2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	
マトリクス音	郊 有効間隙	定率	2 %	
マトリクス語	邻 分配係数	女 Kd	塩水条件下: 0.005 m³/kg	塩分濃度比 s (-) に応
			淡水条件下:0.05 m³/kg	じて次式により Kd が変化すると仮定
				Kd=-0.045s+0.05
地下水流	初期条件	濃度条件	亀裂とマトリクス部が全て	
動解析の			上流側と同じ濃度条件	
境界条件	境界条件	動水勾配	経時的に変化	広域を対象とした地
		塩分濃度	経時的に変化	下水流動解析の結果
				を反映
核種移行解析の 処分坑道を模		濃度条件:経時的に変化	広域を対象とした地	
境界条件 擬した線要素		擬した線要素		下水流動解析の結果
				を反映
		下流側	濃度条件:流出した地下水中 の核種濃度	

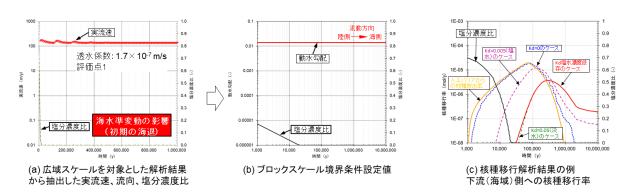


図 4.3-9 ブロックスケールを対象とした核種移行解析結果の例 (パターン1の場合)

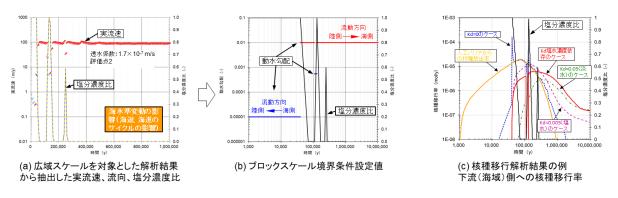


図 4.3-10 ブロックスケールを対象とした核種移行解析結果の例 (パターン2の場合)

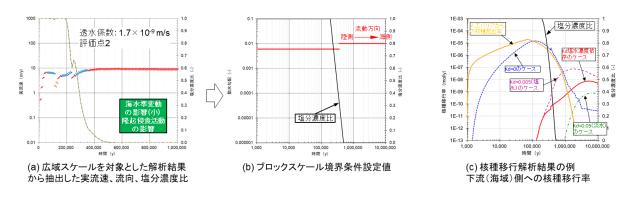


図 4.3-11 ブロックスケールを対象とした核種移行解析結果の例(パターン3の場合)

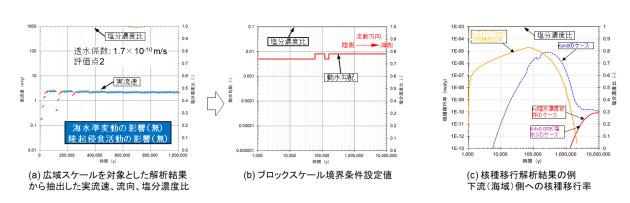


図 4.3-12 ブロックスケールを対象とした核種移行解析結果の例(パターン4の場合)

(3) まとめ及び今後の課題

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 29 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、地下水環境が変化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及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。

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、これ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、核種移行評価に必要な情報のひとつである処分場周辺の地下水流速や塩分濃度などの地下水環境の経時変化などの情報に基づき地下水環境の変化を4種類のパターンに分類した。そして、この地下水環境の変化のパターンは母岩の透水性によって特徴づけられることを示した。本検討で整備した地下水環境変化を評価する手法と感度解析により得られた知見は、文献調査段階など調査の初期の段階などの地質環境データが限られた場合での地下水環境の変化の推定に資することができると考えられる。また、この広域スケールを対象とした地下水環境変化に関する情報を、処分場周辺のブロックスケールを対象とした地下水環境変化に関する情報を、処分場周辺のブロックスケールを対象とした地下水環境の変化を考慮した核種移行評価の境界条件として活用した。

ブロックスケールを対象とした検討では、三次元亀裂ネットワークモデルを用いて、海進・海退や隆起・侵食による地下水環境(地下水流速や流向、地下水中の塩分濃度)の変化と、そのような地下水環境の変化のもとで処分坑道周辺の核種移行挙動を評価する手法を構築した。その手法では、広域スケールを対象としたモデルを用いた地下水環境変化の評価の結果から得られる、地下水流速や塩分濃度の経時変化などの情報をブロックスケールの境界条件に適用することで、地下水環境の変化が母岩中の核種移行挙動に与える影響を考慮した解析を可能にした。この手法

を用いて、広域スケールを対象とした検討で得られた4つの地下水環境の変化のパターンを事例に核種移行解析を行った結果、地下水環境変化のパターン毎に母岩中の核種移行挙動が大きく異なることがわかった。特に、母岩の透水性の高低が地下水環境の変化の大小の主な要因となり、例えば、高透水性の場合には、地下水環境の変化が大きくなることと核種移行の遅延効果が小さくなることとの組み合わせにより、核種移行挙動が複雑となる可能性のあることが示された。

本検討で整備した評価手法により、沿岸部の地下水環境の変化を、花崗岩などの亀裂性媒体の特徴を適切に考慮して評価するとともに、その地下水環境の変化を考慮した処分坑道周辺の三次元のブロックスケールを対象とした核種移行挙動を評価することが可能となった。サイトを特定しない段階における本検討では、広域スケールの地下水環境変化の評価に鉛直二次元断面を対象とした。しかし、広域スケールの評価に用いた Connectflow コードは、具体的なサイトを対象とした三次元モデルを用いた評価についても豊富な実績を有しており (例えば、SKB, 2011; Posiva, 2013)、本手法を具体的なサイトのデータを用いた三次元モデルへ拡張することに大きな課題はないと考えられる。今後は、本検討で整備した一連の評価手法の具体的なサイトデータを用いた評価への適用を積み重ねることにより、その適用上の課題の抽出と、それら課題の解決に向けた評価手法の高度化が期待される。

参考文献

Amec Foster Wheeler, ConnectFlow Verification Release 11.4, United Kingdom, 148p., 2016. Aquanty, HydroGeoSphere Verification Manual Release 1.0, Aquanty Inc., Canada, 86p., 2015. 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. 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)ー確かな技術による安全な地層処分の実現のために一,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.
- 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.
- 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.
- 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次取りまとめー分冊3地層処分システムの安全評価,JNC TN1400 99-023,379p.,1999.
- 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.
- 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 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.

- 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 29 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,393p.,2018.
- 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.
- 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.

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及び拡散は、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など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設定する上では、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など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。

ここでは、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及びモデル整備の現状を調査し、収着についての沿岸部の特徴を考慮したパラメータ設定の方法論や課題を検討するとともに、不足している収着モデル基礎データを取得することを目的とする。

平成 29 年度までには、沿岸部の特徴を考慮した核種移行評価上の課題として、海水系地下水による高塩濃度及びセメント影響による高 pH 環境を考慮する必要性に着目し、既往のデータやモデルを調査するとともに、不足するデータの拡充とモデルの適用性評価を進めた。

まず、平成 27 年度の調査において、粘土の収着機構である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を考慮したモデル (原子力機構, 2015) を用いてパラメータ設定を行うことが可能であるとの見通しが得られた。また、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行うため、イオン交換反応のイオン強度依存性と、表面錯体反応における核種と海水成分との収着競合評価が重要な視点として抽出された (産総研, 原子力機構, 原環センター, 電中研, 2016)。

平成 28 年度以降は、上記課題についての検討を進めた。イオン交換反応のイオン強度依存性については、比較的データが多く存在することから、既往のデータの調査とモデルの適用性評価を中心に進めた。これまでの検討の結果、1 価の陽イオン(Cs)についてはモデルにより結果のイオン強度依存性を良好に再現できる一方、2 価(Sr、Ni)及び3 価(Eu、Am)の陽イオンでは、イオン強度依存性は再現できるものの、モデルと実測値との乖離が生じることが課題として確認された(産総研、原子力機構、原環センター、電中研、2017,2018)。

一方、エッジサイトにおける収着競合については、海水成分である Ca の実測データが不足している状況を踏まえ、本調査においてデータの拡充を行った (産総研,原子力機構,原環センター,電中研,2017,2018)。 平成29年度には、Ca 及びSr のエッジサイトに対する収着データを取得し、収着モデルの適用性評価を行った。その結果、エッジサイトを一つと仮定するモデル (原子力研機構,2015) ではCa 及びSr の収着結果を再現できず、エッジサイトをより詳細に分けたモデル (Bradbury and Baeyens,2005) を用いる必要があることが確認された。加えて、Ca とSr の収着競合試験を行い、エッジサイトへのSr の収着がCa 濃度の増加とともに低下し、その傾向をSr Bradbury and Baeyens (2005) のモデルを用いて再現することができた。

以上を踏まえ、平成30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、イオン交換反応のイオン強度依存性については、イオン強度の変化に伴う選択係数の変化について調査を行った。具体的には、平成29年度のCa及びSrの収着試験の結果と既往の文献値との比較を行い、高イオン強度におけるCa及びSrの選択係数の上昇について考察した。また、Niの収着試験結果のモデルによる再現について、文献値を拡充し、モデルと実測値との乖離の原因を調査した。一方、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、

エッジサイトにおける収着の競合については、平成 29 年度までに着目した Sr と比較して、収着における表面錯体形成反応の寄与がより大きいと考えられる遷移金属元素として Ni に着目し、Ca と Ni との収着競合試験を行い、実測データの取得及びモデルの適用性評価を行った。

(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

平成 29 年度の Ca 及び Sr の収着試験において、高イオン強度における Ca 及び Sr の選択係数 が上昇していた要因について調べるため、平成29年度の試験結果と文献の収着データを比較し、 イオン強度と選択係数との関係を調べた。選択係数は、文献の収着データに対して地球化学計算 コード PHREEQC を用いたフィッティング解析を行うことにより求めた。文献の収着データと しては、Na 型に調整したモンモリロナイトを用いているもののうち、初期濃度が低く収着サイ ト飽和に伴う Kdの低下が起きていないと考えられるものを選択した。さらに、NaCl 系で行われ た試験では、Na と Ca 及び Sr のイオン交換以外に、イオンペア(CaCl+、SrCl+)が生成・収着す るため (Tournassat et al., 2009; Tertre et al., 2011)、NaClO4系で得られた収着データを選択し た。 その結果、文献の収着データとしては、Ca では Baeyens and Bradbury (1995) 及び Missana and García-Gutiérrez (2007)、Sr では Missana and García-Gutiérrez (2007) が有効なデータと 判断された。図 4.3·13、図 4.3·14 に平成 29 年度の Ca 及び Sr の収着試験結果及び文献の収着 データ、並びに図 4.3-15 に Ca 及び Sr のイオン強度との選択係数の関係を示す。0.1 M NaClO₄ 以下では選択係数の値は概ね一定($\log K_{GT} = 0.7$)であり、 $0.5 M NaClO_4$ では値が上昇している。 Na と 2 価イオンの選択係数は、2 価イオンのイオン交換サイトの当量分率とイオン強度により 変化することが報告されている。すなわち、2 価イオンの当量分率が高くなる、またはイオン強 度が高くなると選択係数が上昇する傾向がある (McBride, 1980; Tournassat et al., 2009, 2011)。 このような条件では、粘土鉱物粒子が分散から凝集した状態へ変化し、層が重なったタクトイド と呼ばれる構造を形成する(Fukushi and Fukiage, 2015)。タクトイドでは 2 価イオンに対する 親和性が層間と外表面において異なるため、その形成の程度により選択係数が変動すると考えら れる (Tournassat et al., 2009)。図 4.3-13、図 4.3-14 中の収着データはいずれも Na 型モンモ リロナイトを用いており、初期濃度が低いため 2 価イオン (Ca、Sr) の当量分率が低く、0.5 MNaClO₄条件での選択係数の上昇は、イオン強度が高いことによるタクトイドが形成されたため と考えられる。

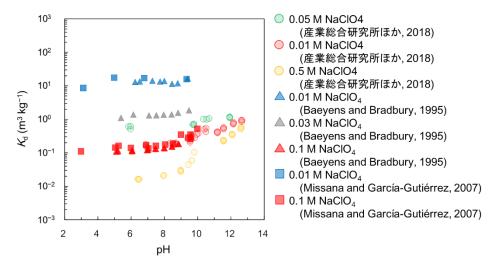


図 4.3-13 Na 型モンモリロナイトに対する Ca の収着データ

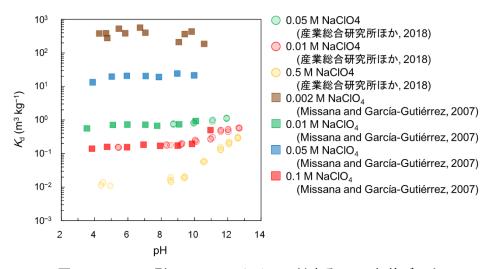


図 4.3-14 Na 型モンモリロナイトに対する Sr の収着データ

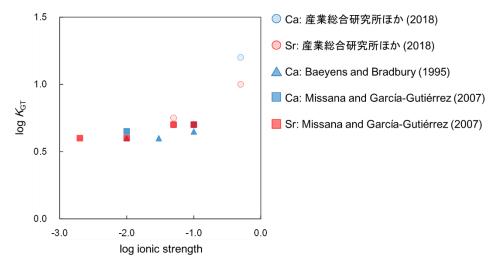


図 4.3-15 イオン強度と Ca 及び Sr の選択係数の関係

次に、平成 29 年度において確認された Ni の収着データの実測値とモデルによる再現とのイオン交換反応領域における乖離の要因の調査及び乖離の緩和のため、前述の Ca 及び Sr の場合と同様にイオン強度と選択係数との関係を調べた。Na 型モンモリロナイトに対する Ni の収着データとして、平成 29 年度に選択した Baeyens and Bradbury (1997) (Bradbury and Baeyens (2005)で追加されたデータを含む)及び Tertre et al. (2005)の文献値に加え、種々のイオン強度でデータを取得している Gu et al. (2010)、及び Lothenbach et al. (1997)と Marcussen et al. (2009)の文献値を有効なデータとして選択した。なお、Ni ではバックグラウンド溶液の種類(NaCl、NaClO4、NaNO3)による収着傾向の明瞭な差は見られていない(Yang et al., 2009)。図 4.3-16に文献値での Ni の収着データを示す。全体として、低 pH 領域においてイオン強度の上昇に伴って収着分配係数が低下する傾向が確認できる。しかし、0.1 M のバックグラウンド溶液濃度で得られた結果は文献間で良く一致しているが、0.01 M で取得された結果は Baeyens and Bradbury (1997)と Marcussen et al. (2009)及び Gu et al. (2010)との間で約 1 桁の差が見られた。図 4.3-17 に平成 29 年度と同様に Baeyens and Bradbury (1997)で得られた選択係数 (log Kgr = 0.5)を用いてモデルによる再現を行った結果を示す。0.1 M で取得された結果は良く再現できているものの、低イオン強度では過大評価となっている。

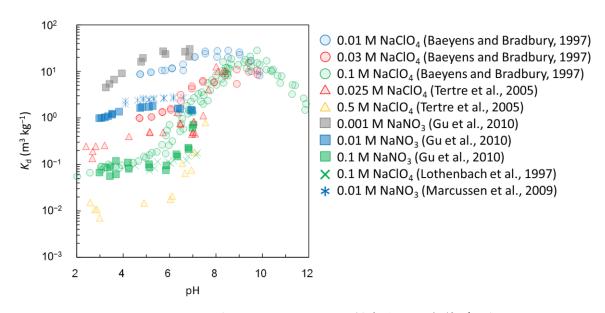


図 4.3-16 Na 型モンモリロナイトに対する Ni の収着データ

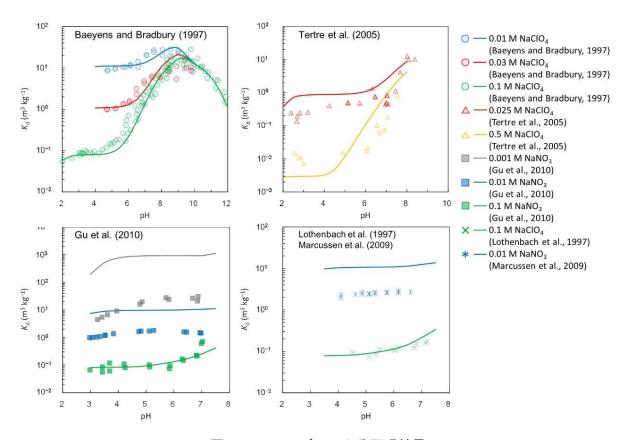


図 4.3-17 モデルによる再現結果

図 4.3-18 に、PHREEQC を用いたフィッティング解析により得られた選択係数とイオン強度 との関係を示す。Baeyens and Bradbury (1997) では各イオン強度において同程度の選択係数が 得られているが、その他の文献では、イオン強度により選択係数が変化している。0.5 M NaClO4 において選択係数が上昇しているのは、Ca及びSrの場合と同様に、タクトイド形成の影響が考 えられる。一方、低イオン強度において選択係数が低下している要因の一つとして、共存イオン の影響が考えられる (Missana et al., 2008; Orucoglu et al., 2018)。Akafia et al. (2011) による 未処理のモンモリロナイトを用いた収着試験結果とモデル評価との比較では、低イオン強度 (0.001, 0.02 M NaNO₃) において収着量がモデルによる予測値よりも大きく低下している。図 4.3-16 で選択した文献は、いずれも夾雑鉱物の影響を防ぐため溶解処理などにより不純物の除去 を行っているが、その手法は文献により完全には統一されていない。Gu et al. (2010) の試験で は、不純物除去及び Na 型化の処理後においても Mg が 0.1 mM オーダーで存在していたことが 報告されている。文献間で不純物除去の程度に差があり、Baeyens and Bradbury (1997)のデー タを除いて、溶液条件にかかわらず Ni 添加前の懸濁液中に Mg が 0.1 mM 存在すると仮定して モデルによる再現を行った結果を図 4.3-19 に示す。Mg の選択係数はイオン強度にかかわらず log K_{GT} = 0.6 (Orucoglu et al., 2018) とした。0.001 M 及び 0.01 M では、モデルによる予測値 が減少し、0.01 M では Ni の選択係数を変化させることなく結果を良好に再現できた。0.001 M では過小評価となっているが、このような極端な低イオン強度では共存イオンの影響が大きくな るため、十分な再現ができなかったと考えられる。一方、0.1 M において文献による大きな差が 見られなかったのは、溶液中の Na 濃度が高く、共存イオンの影響が相対的に小さかったためと 考えられる。

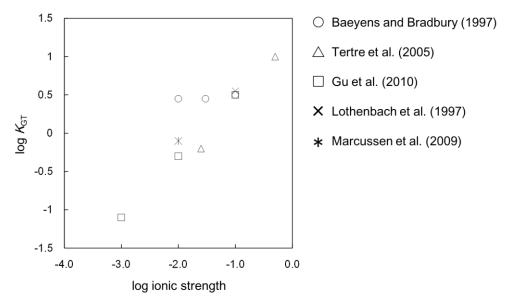


図 4.3-18 イオン強度と Ni の選択係数の関係

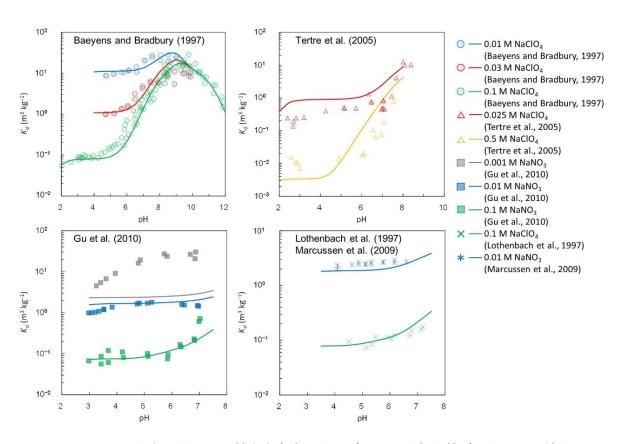


図 4.3-19 共存イオンとの競合を考慮したモデルによる各文献データの再現結果

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り、このような環境では海水系地下水成分である Ca のエッジサイトへの収着が顕在化し、競合により核種の収着・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、収着のパラメータ(錯生成定数 K_c)を取得する必要がある。平成 29年度は、Ca と同族元素である Sr のエッジサイトへの収着についてのデータの取得を行い、Ca の 共存により Sr のエッジサイトへの収着が低下することを確認し、さらにモデルによりその傾向を再現した。一方、平成 29 年度までに着目した Sr と比較して、収着における表面錯体形成反応の寄与がより大きいと考えられる遷移金属元素については、Ca との競合を調べた例はない。そのため、平成 30 年度は、Ni に着目し、Ca と Ni の競合試験の実測データの取得を行い、モデルの適用性評価を行った。

収着試験には、不純物を除去した Na 型モンモリロナイト (クニピア F) を用いた。また、高 pH における Ni の沈殿生成を防ぐため、Ni-63 (キャリアフリー) を用いて Ni の初期濃度が溶解 度未満となる条件で試験を行った。

図 4.3-20 に Ca が共存しない系におけるモンモリロナイトに対する Ni の収着の結果を示す。比較として、高 pH で取得された結果(Baeyens and Bradbury, 1997)及び高イオン強度(0.5 M $NaClO_4$)で取得された結果(Tertre et al., 2005)を示す。なお、本試験は NaCl 系で行われているが、先述のとおり Ni ではバックグラウンド溶液の種類(NaCl, $NaClO_4$, $NaNO_3$)による収着傾向の明瞭な差は見られていない(Yang et al., 2009)。本試験の結果は、pH 10-12 において Baeyens and Bradbury (1997) と比較してやや高いものの、高 pH (pH 12 程度)で K_d が低下する傾向は同様であった。

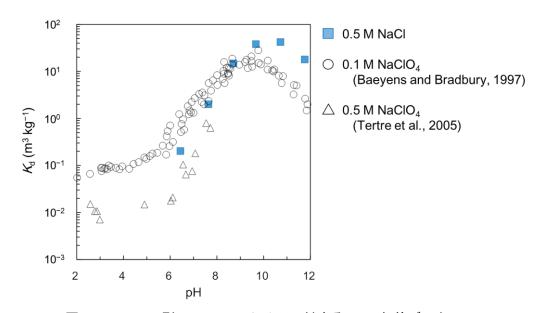


図 4.3-20 Na 型モンモリロナイトに対する Ni の収着データ.

図 4.3-21 に Ca と Ni の収着競合試験の結果を示す。Ca と Ni が同じエッジサイトに収着するのであれば、平成 29 年度の Ca と Sr の収着競合試験で見られたように、 K_d の低下がみられると予想される。しかしながら、Ca 濃度が変化しても Ni の K_d に変化は見られなかった。この結果は、Ca と Ni が異なる種類のエッジサイトに収着することを示唆している。Ni などの遷移金属元素は、初期濃度を変化させて収着量の変化を調べる試験から、低初期濃度では親和性が高いが密度が小さいエッジサイト(\equiv S S OH)に収着し、このサイトが飽和すると、親和性が低いが密度が大きいエッジサイト(\equiv S W 1OH)の寄与が高くなることが確認されている(Ni: Bayens and Bradbury, 1997; Zn: Bayens and Bradbury, 1997; Dähn et al., 2011; Ghayaza et al., 2011; Pb: Ghayaza et al., 2011; Marques Fernandes and Baeyens, 2019; Co: Missana and García-

Gutiérrez, 2007; Eu: Marques Fernandes et al., 2016; U(VI): Marques Fernandes et al., 2012)。 一方、Ca 及び Sr は、放射性同位体を用いて低初期濃度での収着量を調べた試験においても、遷移金属元素で確認された親和性が高いが密度が小さいサイト(\equiv SSOH)への収着は確認されていない(Missana and García-Gutiérrez, 2007)。また、平成 29 年度の Ca 及び Sr の収着競合試験の結果は、親和性が低いが密度が大きいエッジサイトではあるが \equiv SWIOH とは異なるエッジサイト(\equiv SW2OH)に収着すると仮定したモデルで良く再現できることが示されている。これらにより、Ca は Ni と異なるエッジサイトに収着し、競合しないことを実験的に確認することができた。

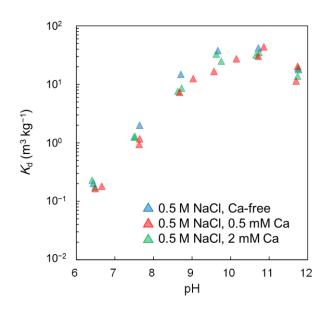


図 4.3-21 Na 型モンモリロナイトに対する Ni の収着データの共存 Ca 濃度依存性

(3) まとめ及び今後の課題

沿岸部での収着パラメータ設定のため、平成 29 年度に課題として抽出された、イオン交換反応において選択係数がイオン強度によって変動する要因を調査した。高イオン強度では、粘土粒子が凝集し、タクトイドを形成することで親和性が変化し、選択係数が上昇する可能性が考えられた。タクトイドの形成を評価する試みも報告されているため、今後このような手法と組み合わせて選択係数を設定していくことが考えられる。一方、低イオン強度では、不純物などの共存イオンとの競合によって見かけ上選択係数が低下する可能性が考えられた。そのため、既往の収着データから選択係数を導出する場合は、データ取得の条件(イオン強度や不純物除去の手法の妥当性など)を確認することが重要となると考えられる。

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、表面錯体形成反応が主な収着機構となる Ni について Ca との収着競合データを取得した。平成 29 年度に収着競合データを取得した Sr と Ca との場合とは異なり、Ni の収着は共存 Ca 濃度に影響を受けず、Ni と Ca は異なる種類のエッジサイトに収着することが示された。平成 29 年度に選択した複数のエッジサイトを仮定するモデルは、このような Sr と Ni での収着挙動の違いを表現することができ、このモデルにより、沿岸部環境において存在することが想定される Ca との競合を考慮した Sr および Ni の収着挙動をそれぞれ評価できる可能性が示された。今後は、遷移金属元素と同様に表面錯体反応が重要な収着機構となるアクチニド元素と Ca との競合についても、理解の深化やモデル適用性の確認に向けた実測値データの拡充なども望まれる。

参考文献

- Akafia, M. M., Reich, T. J., Koretsky, C. M., Assessing Cd, Co, Cu, Ni, and Pb sorption on montmorillonite using surface complexation models, Applied Geochemistry, Vol. 26, pp. S154–S157, 2011.
- Baeyens, B., Bradbury, M. H., A quantitative mechanistic description of Ni, Zn and Ca sorption on Na-montmorillonite Part II: Sorption measurements, Bericht Nr. 95-11, 1995.
- Baeyens, B., Bradbury, M. H., A mechanistic description of Ni and Zn sorption on Namontmorillonite Part I: Titration and sorption measurements, Journal of Contaminant Hydrology, Vol. 27, pp. 199–222, 1997.
- Bradbury, M. H., Baeyens, B., Modelling the sorption of Mn(II), Co(II), Ni(II), Zn(II), Cd(II), Eu(III), Am(III), Sn(IV), Th(IV), Np(V) and U(VI) on montmorillonite: Linear free energy relationships and estimates of surface binding constants for some selected heavy metals and actinides, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 69, pp. 875–892, 2005.
- Dähn, R., Baeyens, B., Bradbury, M. H., Investigation of the different binding sites for Zn on montmorillonite using P-EXAFS The strong/weak site concept in the 2SPNE SC/CE sorption model, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 75, pp. 5154–5168, 2011.
- 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.
- Ghayaza, M., Forestier, L. L., Muller, F., Tournassat, C., Beny, J. M., Pb(II) and Zn(II) adsorption onto Na- and Ca-montmorillonites in acetic acid/acetate medium: Experimental approach and geochemical modeling, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 341, pp. 238–246, 2011.
- Gu, X., Evans, L. J., Barabash, S. J., Modeling the adsorption of Cd (II), Cu (II), Ni (II), Pb (II) and Zn (II) onto montmorillonite, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 74, pp. 5718–5728, 2010.
- Lothenbach, B., Furrer, G., Schulin, R., Immobilization of heavy metals by polynuclear aluminium and montmorillonite compounds, Environmental Science & Technology, Vol. 31, pp. 1452–1462, 1997.
- Marcussen, H., Holm, P. E., Strobel, B. W., Hansen, H. C. B., Nickel sorption to goethite and montmorillonite in presence of citrate, Environmental Science & Technology, Vol. 43, pp. 1122–1127, 2009.
- Marques Fernandes, M., Baeyens, B., Cation exchange and surface complexation of lead on montmorillonite and illite including competitive adsroption effects, Applied Geochemistry, Vol. 100, pp. 190–202, 2019.
- Marques Fernandes, M., Baeyens, B., Dähn, R., Scheinost, A. C., Bradbury, M. H., U(VI) sorption on montmorillonite in the absence and presence of carbonate: A macroscopic and microscopic study, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 93, pp. 262–277, 2012.
- Marques Fernandes, M., Scheinost, A. C., Baeyens, B., Sorption of trivalent lanthanides and actinides onto montmorillonite: Macroscopic, thermodynamic and structural evidence for ternary hydroxo and carbonato surface complexes on multiple sorption sites, Water Research, Vol. 99, pp. 74–82, 2016.
- McBride, M. B., Interpretation of the variability of selectivity coefficients for exchange between ions of unequal charge on smectites, Clays and Clay Minerals, Vol. 28, pp. 255–

- 261, 1980.
- 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.
- Orucoglu, E., Tournassat, C., Robinet, J. C., Madé, B., Lundy, M., From experimental variability to the sorption related retention parameters necessary for performance assessment models for nuclear waste disposal systems: The example of Pb adsorption on clay minerals, Applied Clay Science, Vol. 163, pp. 20–32, 2018.
- 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, 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.
- 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, 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.
- Yang, S., Li, J., Lu, Y., Chen, Y., Wang, X., Sorption of Ni(II) on GMZ bentonite: Effects of pH, ionic strength, foreign ions, humic acid and temperature, Applied Radiation and Isotopes, Vol. 67, pp. 1600–1608, 2009.
- 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.
- 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 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,2018.
- 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 処分システム評価確証技術開発 報告書, 2015.

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、及び構造)や核種との相互作用性(収脱着反応、錯生成反応、及び酸化還元反応)が変化する可能性がある。そのため、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、これらの変化を考慮しつつ、沿岸部に固有の現象について理解を深めるとともに、核種との相互作用に関わる知見の整理や拡充が必要である。

本調査では、沿岸部におけるコロイド、有機物、微生物の影響評価に向けて、これらの地球化学条件の特徴への依存性などを考慮しつつ、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) などの有効性について検討することを目的とする。

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(産総研、原子力機構、原環センター、電中研、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いての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で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(コロイドが凝集して沈殿しない)塩濃度の上限)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(及びその変化)を、塩濃度や酸化還元状態などの地球化学条件及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及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(産総研、原子力機構、原環センター、電中研、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及び沿岸部の地下環境に存在する有機物・微生物の特性などの知見について、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。

平成 30 年度は、各課題について知見とデータを補完し、コロイドの安定性に係る塩濃度依存性の評価や陸域と沿岸部での有機物・微生物の特性の比較評価を通して、それら特性の沿岸部における核種移行への影響について取りまとめる。

(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、コロイドが凝集して沈殿し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傾向があることから、塩濃度が低い場合のコロイド影響評価手法を塩濃度が高い場合にそのまま適用すると保守的な評価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、その種類が十分に同定されていないことから、コロイドが安定に存在しうる地下水条件や評価対象とすべきコロイド種を明確化し、コロイド影響評価の精度を向上させることが

重要である。また、人工バリアを構成する圧縮ベントナイトからはベントナイトコロイドが生成し(例えば、松本ほか、2008)、コロイド生成に伴う浸食により圧縮ベントナイトの密度が低下する可能性がある。しかしながら、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・棚井、2005)、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により、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におけるベントナイトの浸食挙動を適切に評価することが必要である。

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、圧縮ベントナイトより生成する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、本調査では、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 29 年度までに、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 より生成したモンモリロナイトコロイドは、大部分が NaCl 濃度が 0.02 mol/L 程度までは凝集せずコロイドとして安定に存在していることが確認された。また、一部のコロイドは NaCl 濃度が 0.02 mol/L 以上でも安定に存在しうることが確認され、モンモリロナイトコロイド全体のうち 10%程度のコロイドは NaCl 濃度が 0.04 mol/L まで、30%程度のコロイドは 0.03 mol/L まで安定に存在することが確認された。

平成 30 年度は、モンモリロナイトコロイドの安定性に関して、実環境へ直接適用可能なデータを取得するため、平成 29 年度までの NaCl 溶液を対象とした試験に対して、実際の地下水環境に近い溶液組成を想定し、人工海水を希釈した溶液を対象とした試験を実施した。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などについて、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について評価を行った。

モンモリロナイトコロイドを対象とした試験では、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、人工海水を添加して 0.5%から 1%の濃度に希釈し、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用いた。試験に使用した人工海水の組成及び pH を表 4.3-5 に示す。

表 4.3-5 人工海水組成

	濃度 [mol/L]
Na ⁺	4.8×10^{-1}
Mg^{2+}	5.5×10^{-2}
Ca ²⁺	1.1×10^{-2}
K^{+}	1.0×10^{-2}
Cl-	5.6×10^{-1}
SO ₄ ²⁻	2.9×10^{-2}
HCO ₃ -	2.8×10^{-3}
рН	8 付近

試験結果を図 4.3-22 に示す。図 4.3-22 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た平均粒径の時間変化を示しており、経過時間 0 分での平均粒径は人工海水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人工海水添加後のモンモリロナイトコロイドの平均粒径である。

本試験の結果、溶液中の人工海水濃度が 0.5%及び 0.7%の条件においては、溶液中に分散させたモンモリロナイトコロイドの平均粒径は試験期間中でほぼ一定であるのに対し、人工海水濃度が 1%の条件においては、試験開始後に粒径が大きくなることが確認された。この結果から、クニピア F から生成するモンモリロナイトコロイドは、おおむね人工海水の濃度が 1%以上になると凝集して沈殿すると考えられた。一方で、平成 28年度に実施した NaCl 溶液を用いた試験では、NaCl 濃度がおおむね 0.03 mol/L からコロイドが凝集する傾向が観察されている。これらの結果をイオン強度を指標として比較すると、濃度 1%の人工海水のイオン強度が 7.2×10⁻³程度であるのに対し、濃度 0.03 mol/L の NaCl 溶液のイオン強度は 0.03 であることから、実際の地下水環境に近い溶液組成を持つ人工海水を希釈した溶液中の方がより低いイオン強度でモンモリロナイトコロイドが凝集する(モンモリロナイトコロイドが安定に存在する塩濃度が低い)ことがわかる。このことから、NaCl 溶液を用いた試験結果を性能評価へ適用することを考えた場合、モンモリロナイトコロイドが安定に存在しうる地下水条件として、NaCl 溶液を用いた試験により示されたイオン強度を指標として用いることは、保守的な評価につながるものと考えられる。

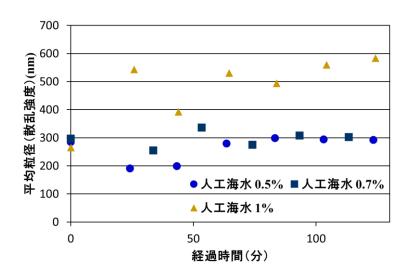
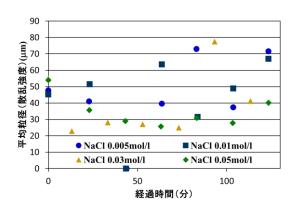


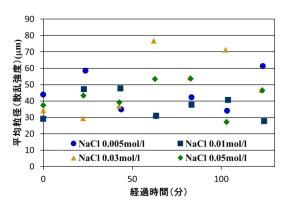
図 4.3-22 希釈した人工海水中に分散させたモンモリロナイトコロイドの 平均粒径の時間変化

粘土鉱物コロイドを対象とした試験では、粘土鉱物試料としてイライト(Rochestsr, NY, USA 産)と黒雲母(Nellore, Andhra Pradesh, India 産)を用いて試験を実施した。粘土鉱物試料は、コロイド状態の試料とするための前処理として、まず、乳鉢を用いて孔径 45μm 以下に粉砕した後、1 mol/L の NaCl 溶液に分散させて懸濁液を作製し、懸濁液を分画分子量 6,000・8,000 の透析膜(Spectrum Laboratories 社製,Spectrumlabs)に封入した。粘土鉱物試料を封入した透析膜は、1 mol/L の NaCl 溶液に浸漬した後、約 3 日おきに 4 回程度 NaCl 溶液を交換し、粘土鉱物試料に収着している陽イオンを Na に置換した。その後、懸濁液中の NaCl を除去するため、粘土鉱物試料を封入した透析膜をイオン交換水に浸漬した。定期的にイオン交換水の交換を行い、

透析膜内部より浸出した Clがイオン交換水中に検出されなくなったことを確認した後、透析膜内から懸濁液を取り出し、粘土鉱物コロイド試料とした。この粘土鉱物コロイド試料に NaCl 溶液を添加して粘土鉱物コロイド試料中の NaCl 濃度を 0.005 mol/L から 0.05 mol/L 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)を用いて粘土鉱物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。粘土鉱物コロイド試料及び添加した NaCl 溶液の pH は 9 付近に調整した。

試験結果を図 4.3-23 に示す。図 4.3-23 は、粘土コロイドの散乱強度分布より算出された平均 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、経過時間 0 分以 外の平均粒径は NaCl 溶液添加後の平均粒径である。





(a) イライトより調整したコロイド

(b) 黒雲母より調整したコロイド

図 4.3-23 NaCl 溶液中に分散させた粘土鉱物コロイドの平均粒径の時間変化

試験の結果、イライト及び黒雲母より作製した粘土鉱物コロイドの平均粒径は $20-80~\mu m$ の値が得られた。概ね 300~nm 程度の粒径で安定した測定結果が得られたモンモリロナイトコロイドの試験と比べて測定結果のばらつきは大きいものの、NaCl 濃度が 0.05~mol/L の試料においても、その平均粒径は、NaCl 濃度の低い他の試料と同様に $20-80~\mu m$ の範囲内でのばらつきであり、NaCl 濃度の増加に伴う粒径の増加傾向は見られなかった。ただし、本試験においては、十分に粘土鉱物試料を粉砕したものの、粘土鉱物コロイドの平均粒径は $20-80~\mu m$ であった。この大きさの粒子の沈降速度をストークスの式を用いて評価すると約 2-30~m m/s となり、長時間地下水中に浮遊することはできないため、地下水中の粘土鉱物コロイドはより小さい粒径を有すると考えられる。地下水中の粘土鉱物コロイドと本試験での粘土鉱物コロイドでは粒径が異なることに留意が必要であるものの、本試験の結果は、これらの粘土鉱物コロイドは、地下水中の塩濃度が増加しても凝集して沈殿することはなく、コロイドが安定して存在する可能性を示唆していると考えられる。

2) 有機物

陸域及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が錯体を生成すると、核種の見かけの溶解度が上昇するとともに、母岩への核種の収着やマトリクス拡散が抑制されて、処分システムにおける核種移行が促進される可能性がある。一方、このような地下水中の溶存有機物による影響の程度は、地下水の水質や有機物の特性などの条件に依存するため、例え地下水中に有機物が溶存している場合でも、核種移行がその影響によって促進するとは限らない。従って、任意の地質環境の深部地下水中の有機

物による核種移行への影響を評価するには、その環境に存在する有機物の特性を把握する必要がある。しかし、沿岸部の海水条件の深部地下水に溶存する有機物の特性に関わる知見は十分得られていない。そこで本調査では、日本国内の沿岸部で見られる海水条件の地下水に溶存する有機物の濃度・組成、錯生成などの特性を評価し、陸域の淡水に溶存する有機物のものとの比較・評価から、沿岸部の深部地下水に溶存する有機物に固有の核種移行への影響を抽出する。

環境水には様々な有機物が溶存しており、その中でも腐植物質は溶存有機物の主要成分であるとともに(Thurman, 1985)、金属イオンと安定な錯体を生成することが知られている。このため、金属イオンと溶存有機物との錯生成において、腐植物質は重要な役割を果たすと考えられている(Bryan et al., 2012)。本調査では、この腐植物質に着目し、平成 29 年度までに、疎水性樹脂(DAX-8 樹脂)を固相抽出剤として用いる腐植物質定量法(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)や新潟県の二つの観測井戸の地下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確認した(産総研、原子力機構、原環センター、電中研、2018)。しかし、沿岸部の深部地下水に溶存する腐植物質の構造特性や錯生成能に関わる知見は、これまでに十分に得られていない。そこで、平成30年度は、異なる沿岸部の深部地下水とその河川水とに溶存する腐植物質の構造特性や錯生成能に関わるデータを室内試験から取得し、それらデータの相互比較から深部地下水と地表水での腐植物質の構造特性や錯生成能の相違を調査した。

本調査で用いた沿岸部の深部地下水や腐植物質の抽出、及び試験操作や条件は、以下の通りで ある。深部地下水は、北海道幌延町の原子力機構の地下研究施設(深度 140 m、250 m、及び 350 m)と新潟県新潟市の経済産業省地盤沈下観測井(沼垂観測井、西蒲原観測井)から採取し(産 総研, 原子力機構, 原環センター, 電中研, 2017, 2018)、河川水は、幌延町のペンケエベコロベツ 川とペンケオコッペ川から採取した。深部地下水及び河川水に溶存する腐植物質は、上記の DAX-8樹脂を用いる定量手法 (Tsuda et al., 2012) を用いて地下水と河川水から抽出し、次いで、DAX-8 樹脂から 0.01 mol dm³の NaOH 水溶液へ溶出させて回収した。DAX-8 樹脂からの腐植物質の 回収率(抽出した腐植物質のうち溶出した腐植物質の割合)は、地下水試料において57~88%、 河川水試料では 47~57%であった。回収した腐植物質水溶液の有機炭素濃度を TOC 計により測 定した後、その濃度値をもとに、腐植物質濃度 5.0 mg C dm⁻³ の水溶液(0.1 mol dm⁻³ NaClO₄ と 0.01 mol dm-3 HEPES 緩衝液(pH7.0)) を調製した。この調製した腐植物質水溶液の紫外可視吸 収スペクトル(UV-Vis)やサイズ排除クロマトグラム(SEC)を取得し、各試料水中の腐植物質 の構造特性を評価した。また、腐植物質の錯生成能の評価については、金属イオンとの錯生成に より腐植物質の蛍光が消光する現象を利用する蛍光消光法 (Terashima et al., 2012) を適用して、 上記で調製した腐植物質水溶液を対象に Ni および Pb に対する条件付き錯生成定数を評価した。 幌延及び新潟の深部地下水と幌延の河川水中に溶存する腐植物質の UV-Vis スペクトルを図 4.3-24 に示す。抽出した腐植物質のスペクトルは、長波長から低波長にかけてなだらかに上昇す る一般的な腐植物質のパターンを示した。しかし、深部地下水と河川水のスペクトルでは、任意 の波長における吸光度に大きな差が存在した。この差は、腐植物質の構造特性の違いを反映した ものであり、特に、波長 254 nm における炭素濃度で規格化された吸光度は、 $SUVA_{254}$ ($L \text{ mg}^{-1}$ m-1) と呼ばれ、腐植物質の芳香族性(有機炭素に占める芳香族炭素の割合)の指標となることが 知られている (Weishaar et al., 2003)。そこで、抽出した腐植物質の SUVA254 を算出したとこ ろ、幌延の河川水中の腐植物質の SUVA254 値は、7.98 - 10.47 L mg-1 m-1 であるのに対し、幌延 と新潟の深部地下水中の腐植物質は 1.60 - 2.94 L mg⁻¹ m⁻¹ となり、河川水中の腐植物質が深部地下水中の腐植物質よりも高い値を示すことを確認した。このことは、河川水中の腐植物質が芳香族性に富む構造特性を有するのに対し、深部地下水では、脂肪族性に富む構造特性を有することを示唆している。一方、幌延及び新潟の深部地下水と幌延の河川水中に溶存する腐植物質の SEC-UV クロマトグラムを、図 4.3-25 に示す。幌延及び新潟の深部地下水から抽出した腐植物質は、幌延の河川水から抽出したものと比べて、より遅くに溶出することを確認した。この結果は、深部地下水の腐植物質が河川水の腐植物質と比較して分子サイズが小さいことを示している。従って、幌延の河川水中の腐植物質は、比較的分子サイズが大きく、芳香族性に富む構造特性を有し、一方、幌延や新潟の深部地下水中の腐植物質は、比較的分子サイズが小さく、脂肪族性に富む構造特性を有すると考えられる。

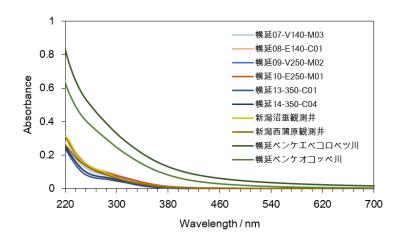


図 4.3-24 溶存腐植物質の UV-Vis スペクトル.

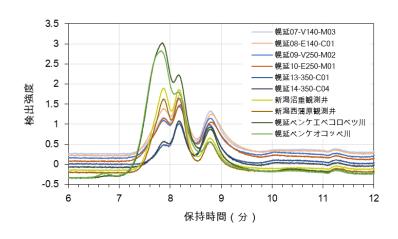


図 4.3-25 溶存腐植物質の SEC-UV クロマトグラム.

幌延及び新潟の深部地下水中の溶存腐植物質に対する Ni および Pb の条件付き錯生成定数の対数値 $(log K(L mol^{-1}))$ を図 4.3-26 に示す。深部地下水に溶存する腐植物質に対する Ni および Pb の log K 値は、幌延と新潟という地域の違いに関わらずほぼ同じであるが、幌延の河川水に溶存する腐植物質に対する値よりも低い。この結果は、Ni ないし Pb に対する腐植物質の錯生成能が、河川水と深部地下水とでは大きく異なるのに対し、深部地下水間ではほぼ同じになる可能性を示唆している。一方、Ni と Pb に対する log K 値を比較すると、深部地下水中の腐植物質では、

地域の違いに関わらず、Niに対する log K値が Pb に対する値よりも小さくなるが、河川水中の 腐植物質では、Ni に対する log K値が Pb に対する値よりも大きくなることが分かった。この結 果は、沿岸部の深部地下水に溶存する腐植物質と河川水に溶存する腐植物質とでは、錯生成サイ トの特性が異なる可能性があることを示唆している。一般に、Ni は「硬い酸」に分類され、水酸 化物イオンなどの「硬い塩基」と強い結合を形成し、Pb は「軟らかい酸」に分類され、硫黄など の「軟らかい塩基」と強い結合を形成する(Pearson, 1963)。また、沿岸部の深部地下水に溶存 する腐植物質は、地表水に溶存する腐植物質と比べて、硫黄の含有量が高く(Saito et al, 2015)、 隣接し合うカルボキシル基間の距離が長い可能性がある(Terashima et al., 2012)。このため、 河川水の腐植物質では、深部地下水の腐植物質では Ni や Pb がカルボキシル基と単座配位により 比較的緩く結合し、一方、河川水の腐植物質では多座配位により強く結合するために、深部地下 水よりも河川水の腐植物質で高い錯生成能が観察されるものと考えられる。また、硫黄を多く含 む深部地下水中の腐植物質では、チオール基サイトなどへの Pb 結合の寄与が、河川水の腐植物 質の場合よりも大きくなり、Pb に対する log K値が Ni に対する値よりも高くなった可能性があ る。しかし、Pb は、腐植物質間を架橋して、安定な錯体を形成する可能性もあることから(Orsetti et al., 2013)、深部地下水の腐植物質の Pb に対する $\log K$ 値が Ni に対する値よりも大きくなっ た原因については、更なる知見やデータの収集・取得による Pb に対する深部地下水の腐植物質 と河川水の腐植物質との錯生成反応機構の相違の詳細理解を通して明らかにしていく必要がある。

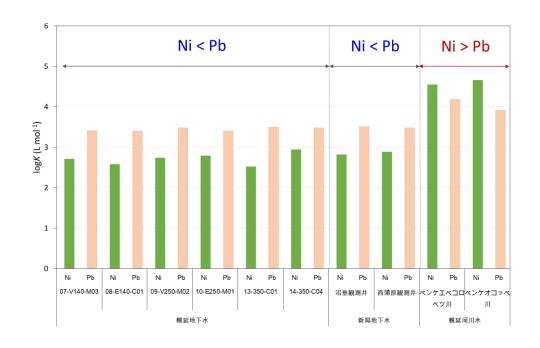


図 4.3-26 沿岸部の深部地下水および河川水から抽出した腐植物質に対する Ni および Pb の条件付き錯生成定数.

3) 微生物

地下環境には、沿岸部及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; Parkes et al., 2005; 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などに依存するところが大き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中では約10³~106 cells/ml、岩石中(堆積物中)では約10²~106 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(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、微生物群集組成については、各環境条件下で優占する微生物種が異なり、近年の培養に依存しない微生物群集構造解析手法の発展により、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がわかってきた。これらの未知微生物は培養されて代謝機能が明らかにされているものに近縁種がいないことから、代謝機能の不明な点が多く残されている。そこで平成30年度は、水質などの地球化学条件と微生物群集構造との関係性についての、統計学的手法を用いた評価手法の検討をおこなった。

環境要因と微生物群集構造の関係性に関する評価には、多変量解析がしばしば用いられている。 多変量解析には、重回帰解析、判別解析、クラスター解析、因子分析、主成分分析、対応分析、 正準対応分析、冗長分析、除歪対応分析、重回帰木分析、非計量多次元尺度構成法、AMMI解析 法など、従来活用されてきた手法から、新たに取り入れられ始めた手法まで様々なものがある。 これらの手法を得たい情報や目的によって使い分けることで、集積されてきた膨大な知見を活用 して必要な情報を得ることが可能になると考えられる。平成30年度は、環境因子と微生物群集構 造の関係性を明らかにするための解析手法として、主成分分析に加えて、生態系内の種構成と環 境要因との関係をわかりやすく解析することを目的に開発された比較的新しい多変量解析手法の 一つである正準対応分析(Canonical Correspondence Analysis: CCA)(鈴木・竹中, 2009)を用 いた検討を行った。

主成分分析を用いて、幌延、下北半島、スウェーデン、米国ユタ州など様々な地下環境の化学条件下における微生物群集の類似性を比較し、各サイト間の群集の差の要因となる水質条件の抽出を試みたところ、水質条件の類似している環境の微生物群集組成が、比較的近い分布を示し、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。また、CCAによる解析結果の例(図 4.3・27)から、水素、鉄、塩化物イオン及びメタンがそれぞれの環境下で微生物代謝に寄与している可能性が示唆された。しかしながら、これらの解析結果の質は、解析に用いるデータ量に依存するが、現段階では信頼性に足る統計学的評価のためのデータが整っていないことから、今後、統計学的評価で参照可能なデータを様々な環境条件下において拡充することで、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、地球化学条件に基づいてある程度微生物群集組成を推定することが可能になると考えられる。

一方で、データベースの拡充は、取り扱うデータの量が膨大であることや、知見ごとにデータの質や取得されたデータの項目などが異なることから、整備には時間と手間を要する。微生物の生息環境と微生物群集組成・代謝の関係性に関する情報については、地層処分の分野だけでなく、環境問題や健康問題など様々な分野で必要とされ始めてきており、例えば、国立遺伝学研究所は、微生物群集組成の大規模データから様々な環境と微生物とのつながりを可視化するウエブツール「LEA」を開発し、平成30年度に公開している(http://leamicrobe.jp; Higashi et al., 2018)。このような公開ツールやデータベースを活用した評価についても、地層処分の分野での有効性について今後検討していく必要があると考える。

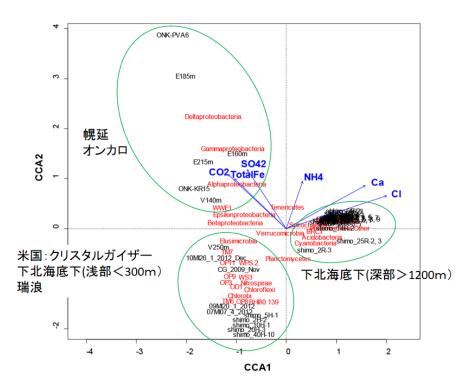


図 4.3-27 環境因子と微生物群集組成データを用いた CCA 結果の一例.

(3) まとめ及び今後の課題

コロイドについては、圧縮ベントナイトより生成するベントナイトコロイド及び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に対して、コロイド安定性の塩濃度依存性について実験的に評価し、コロイドが安定に存在する塩濃度を示した。ただし、天然の地下水中に存在すると考えられる無機コロイドについては、より実環境に近い粒径の小さい粘土鉱物コロイドに対する塩濃度依存性の評価を行うとともに、粘土鉱物コロイド以外の無機コロイドに対しても評価を行っていくことが必要と考えられる。

有機物については、幌延や新潟の沿岸部の深部地下水に溶存する腐植物質の構造特性や錯生成能に関わるデータ取得を行い、得られたデータと河川水に溶存する腐植物質のデータとの比較・評価を行った。その結果、河川水中の腐植物質と比較して、沿岸部の深部地下水中の腐植物質は、分子サイズが小さく、脂肪族性に富む構造特性を有すること、錯生成能は金属イオンの種類に関わらず低くなる可能性があることを示した。このことは、沿岸部の深部地下水中の有機物による核種移行への影響が、陸域地表水の有機物による影響と比べて、小さくなる可能性があることを示唆している。しかし、本調査では、幌延と新潟の二箇所の地下水のみを対象としており、また、錯生成能の評価で検討した金属イオンも Ni と Pb の二種類に限られている。今後、本調査で得られた知見の確認や一般化に向けて、本調査で用いた手法を基に、有機物や核種の多様性を考慮した特性データの拡充を進める必要があるものと考えられる。

微生物については、様々な環境条件下における微生物群集について、統計学的手法を用いた評価を検討し、地球化学条件と微生物群集分布及び微生物代謝との関連性に関する予察的解析を通じて、それらの手法が有効である可能性を示すことができた。今後は、様々な環境条件下における地球化学データ及び微生物群集組成データを拡充する必要がある。また、より信頼性の高い統

計学的評価に向けて、「LEA」などの微生物と環境因子との関係性を可視化するツールの活用などが有効になる可能性があると考えられる。

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.
- Bryan, N.D., Abrahamsen, L., Evans, N., Warwick, P., Buckau, G., Weng, L. and van Riemsdijik, W.H., The effects of humic subsatnes on the treansportation of radionuclides: Recent improvements in the prediction of behabiour and the understanding of mechanisms, Applied Geochemistry, Vol.27, pp.378-389, 2012.
- 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, vol.81, pp.66-77, 2012.
- Higashi, K., Suzuki, S., Kurosawa, S., Mori, H. and Kurokawa, K., Latent environment allocation of microbial community data, PLOS Computational Biology, DOI:10.1371/journal.pcbi.1006143, 2018.
- 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 coalbearing sediment down to ~2.5 km below the ocean floor. Science, Vol. 349, pp.420-424, 2015.
- 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.
- 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.
- 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ーベントナイトコロイドの生成挙動一、

- JAEA-Research 2008-097, 2008.
- Orsetti, S., Marco-Brown, J.L., Andrade, E.M. and Molina, F.V., Pb(II) binding to humic substances: An equilibrium and spectoroscopic study, Environmetal Science and Technology, 47, pp.8325-8333, 2013.
- Parkes, R.J., Webster, G., Cragg, B.A., Weightman, A.J., Newberry, C.J., Ferdelman, T.G., Kallmeyer, J., Jorgensen, B.B., Aiello, I.W., Fry, J.C., Deep sub-seafloor prokaryotes stimulated at interfaces over geological time, Nature, vol.436, pp.390-394, 2005.
- Pearson, R.G., Hard and Soft Acids and Bases, J. Am. Chem. Soc., 85, pp.3533-3539, 1963.
- 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.
- Saito, T., Terashima, M., Aoyagi, N., Nagao, S., Fujitake, N., Ohnuki, T., Physicochemical and ion-binding properties of highly aliphatic humic substances extracted from deep sedimentary groundwater, Environ. Sci.: Processes Impacts, Vol.17, pp.1386-1395, 2015.
- 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.
- 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 29 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, 2018.
- 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, 2010.
- 鈴木 千夏, 竹中 眞, 土壌微生物生態研究における正準対応分析(Canonical Correspondence Analysis: CCA)の利用法, 土と微生物(Soil Microorganisms), 63, pp.32-38, 2009.
- 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.

- 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.
- 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.
- Weishaar, J.L., Aiken, G.R., Bergamaschi, B., Fram, M.S., Fujii, R. and Mopper, K., Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicater of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon, Environmental Science and Technology, 37, pp.4702-4708, 2003.

本事業は、平成 30 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つの研究機関が受託し、これまでの取り組みで得られた成果および残された課題について 2 章から 4 章で述べている。

地質環境調査技術においては、

- ・自然現象:隆起・侵食に関する検討では、事例研究により、沿岸部陸域からの隆起傾向の外挿により海域の隆起量をその不確実性も含めて評価した。また、海底地形の検討により、我が国沿岸部において、海域で直接隆起量の指標となる可能性がある海底段丘などの地形の分布を明らかにした。要素技術の検討では、経験的指標による段丘対比・編年、段丘被覆層を大きく欠くような段丘の形成年代の評価方法、段丘が乏しい地域での隆起指標の検討を行い、調査・評価技術の整備に貢献した。火成活動に関する検討では、沿岸部特有の調査・観測環境により想定され得る課題(地下深部構造推定結果の空間分解能や信頼性の低下などに対する調査手法の高度化)に対して、それを改善するための手法(堆積層の層厚変化を考慮した震源決定法及び地震波トモグラフィ)を検討し、利尻火山の周辺領域における適用事例によってその有効性を示した。
- ・地下水:沿岸部の大深度ボーリング(1,000m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、及び化石海水の四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には理解できるようになった。また、現地調査の結果、約1/3が化石海水であり、化石海水は14C濃度が低く、36Cl/Clが大きいという特徴があることから、現海水と識別可能であることを実証できた。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。また、日本列島沿岸部の深層地下水を採取・分析し、地下水を成因ごとに区分することもできた。報告書ではこの地下水の成因と地形や地質などを比較してシステマティック区分としてまとめている。

工学技術分野では、沿岸部で想定される地下環境、特に塩水系の地下水化学環境を念頭に置き、オーバーパック、緩衝材、セメント並びにグラウトなど、人工バリア材料などのニアフィールドを構成する各要素に関する劣化や変質に関する挙動把握に資する試験や複合現象評価手法の構築に取り組んだ。これらの取り組みでは、地質環境調査技術分野が有する知見を活用し、わが国の沿岸部で想定される地下水組成の幅や長期的な変遷の見通しをより現実的に捉えた試験条件などを設定することができ、従来の降水系を主体とした知見やデータに加え、沿岸部の処分場というものをより現実的に捉えた知見やデータを拡充することができた。しかしながら、得られた知見やデータは、わが国の沿岸部で想定される多様な地質環境や処分場構成要素の材料バリエーションなどに対して十分とは言えず、今後の概要調査段階以降における処分場設計の柔軟性や信頼性の向上に向けて更なる知見などの拡充が望まれる。

また、塩水環境下における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検討に取り組み、建設・操業から閉鎖後の再冠水に至る迄の限定的な期間、沿岸部の地質環境や処分概念に関する限定的な仮定など、検討の前提に制約はあるものの、知見やデータの体系化案を含めた成立性を提示するための手法案(評価手法案)を構築することができた。そのような検討を通して、必要となる水理解析体系の構築を進めるとともに同期間を対象とした水理場の評価における沿岸部の特性などを把握することができた。加えて、このような評価を行う際に分野間で連携すべきデータ項目などを具体化することができた。今後は、限定的な評価手法案の拡張を行

うとともに、分野間で連携すべきデータなどのインタフェイス設計などを進め、サイト選定プロセスの進展に応じて。適時に且つ効果的に評価が行えるように準備を進めておくことが望まれる。

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など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など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など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、経験など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、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)、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。

当該研究課題では、四機関の連携並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・工学設計・安全評価に関するシステマティックな技術開発に取り組んだ。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、分野間並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(適正化にも結び付いた)。地層処分システム全体としての成立性や性能を示すなど、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、今後も地層処分に係る研究機関は、相互に連携して取り組んでいくことが望ましいと示すことができた。