

平成 25 年度

地層処分技術調査等事業

(岩盤中地下水移行評価確証技術開発)

-岩盤中物質移行特性評価技術の確証-

報 告 書

平成 26 年 3 月

一般財団法人 電力中央研究所

< 目 次 >

1. 研究概要	1-1
1.1 本研究の背景.....	1-1
1.2 目的	1-1
1.3 全体計画.....	1-1
1.3.1 研究の内容.....	1-1
1.3.2 研究工程.....	1-2
1.4 本年度の実施概要.....	1-3
1.4.1 トレーサ試験技術の開発.....	1-3
1.4.2 各種割れ目探査技術の開発.....	1-3
1.4.3 原位置での実証.....	1-4
2. 原位置トレーサー試験装置の試作.....	2-1
2.1 はじめに.....	2-1
2.2 トレーサー循環バルブの試作および孔内装置への実装.....	2-1
2.2.1 トレーサー循環バルブの概要.....	2-1
2.2.2 基本動作確認試験.....	2-6
2.2.3 耐圧試験.....	2-7
2.2.4 孔内装置への循環バルブの組み込み.....	2-10
2.3 揚水側無脈動ポンプの製作.....	2-14
2.3.1 装置概要.....	2-14
2.3.2 性能確認試験.....	2-17
2.4 室内試験による性能確認試験.....	2-19
2.4.1 試験概要.....	2-19
2.4.2 試験方法と使用機材.....	2-19
2.4.3 蛍光センサーのキャリブレーション.....	2-23
2.4.4 試験方法.....	2-25
2.4.5 試験結果.....	2-33
2.5 まとめ	2-42
3. トレーサー試験結果の評価手法の開発.....	3-1
3.1 はじめに.....	3-1
3.2 原位置孔間トレーサー試験の予備解析.....	3-1
3.2.1 解析条件.....	3-2
3.2.2 解析結果.....	3-9
3.3 トレーサー試験結果からの物質移行パラメータ同定の検討.....	3-17
3.3.1 解析条件.....	3-19
3.3.2 解析結果.....	3-24

3.4	まとめ	3-30
4.	単孔式トレーサー試験技術の開発	4-1
4.1	はじめに	4-1
4.2	単孔式トレーサー試験の提案	4-2
4.3	単孔式トレーサー試験に関する既往の文献調査	4-3
4.3.1	単孔式トレーサー試験の基本的な流れ	4-3
4.3.2	単孔式トレーサー試験に関する過去の検討・実施例	4-4
4.4	単孔式トレーサー試験の感度解析	4-15
4.4.1	数値解析手法	4-15
4.4.2	割れ目モデルによる感度解析	4-16
4.4.3	複合モデルによる感度解析	4-30
4.4.4	不均質モデルによる感度解析	4-37
4.4.5	ラドン濃度の感度解析	4-48
4.5	まとめ	4-54
5.	ラドン濃度計測による割れ目調査技術の開発	5-1
5.1	はじめに	5-1
5.2	ラドン濃度計測による割れ目幅の推定の概念	5-1
5.3	今年度の実施概要	5-2
5.4	ラドンによる割れ目間隙幅の推定手法の堆積岩への適用性検討	5-3
5.4.1	岩石の物理化学特性	5-3
5.4.2	岩石のラドンフラックス	5-14
5.4.3	低濃度のラドン溶解水の測定方法の検討	5-18
5.5	まとめ	5-20
6.	割れ目間隙の可視化手法	6-1
6.1	はじめに	6-1
6.2	Grinding Tomographyによる割れ目間隙の可視化	6-2
6.2.1	概要	6-2
6.2.2	研削・撮影装置	6-2
6.2.3	研削・撮影の手順	6-9
6.2.4	研削条件および撮影条件	6-9
6.2.5	撮影結果	6-12
6.2.6	レジン充填幅の計測	6-38
6.2.7	まとめ	6-41
6.3	レジン材の選定および基礎的検討	6-42
6.3.1	レジン材の選定	6-42
6.3.2	可使時間および粘度の測定方法	6-43

6.3.3	可使時間の測定結果.....	6-45
6.3.4	粘度校正用標準液の測定結果.....	6-47
6.3.5	主剤および硬化剤の粘度測定結果.....	6-49
6.3.6	レジン材（混合物）の粘度の経時変化.....	6-52
6.3.7	蛍光染料添加に関する検討.....	6-54
6.3.8	まとめ.....	6-58
6.4	X線 CT 観察下でのレジン注入試験.....	6-60
6.4.1	概要.....	6-60
6.4.2	割れ目開口幅と空間分解能.....	6-60
6.4.3	実験方法.....	6-63
6.4.4	実験結果.....	6-67
6.4.5	まとめ.....	6-73
6.5	まとめと今後の課題.....	6-73
7.	適用性試験場の地質環境調査.....	7-1
7.1	はじめに.....	7-1
7.1.1	瑞浪超深地層研究所の研究施設の概要.....	7-1
7.1.2	深度 300m ボーリング横坑の概要.....	7-1
7.2	適用性試験場の地質環境調査概要.....	7-4
7.2.1	調査の目的.....	7-4
7.2.2	調査項目.....	7-5
7.2.3	調査手順.....	7-7
7.3	調査結果.....	7-56
7.3.1	調査の概要（実施工程）.....	7-56
7.3.2	13MI36 号孔の調査結果.....	7-58
7.3.3	13MI37 号孔の調査結果.....	7-104
7.3.4	ポイント希釈試験の試験結果.....	7-127
7.3.5	12MI30 号孔の透水試験結果.....	7-147
7.3.6	高精度孔曲り検層結果.....	7-151
7.3.7	音響トモグラフィ検層結果.....	7-154
7.3.8	高精度 BTV 検層結果.....	7-180
7.3.9	間隙水圧のモニタリング装置の再設置.....	7-231
7.3.10	間隙水圧モニタリング結果.....	7-237
7.4	まとめ.....	7-242
7.4.1	ボーリング孔掘削.....	7-242
7.4.2	地質学的調査.....	7-243
7.4.3	水理学的調査.....	7-247
7.4.4	今後の課題と計画.....	7-249

8.	岩石コアを用いた室内吸着・拡散試験.....	8-1
8.1	背景.....	8-1
8.2	試験に供する岩石の評価.....	8-2
8.2.1	岩石試料の準備.....	8-2
8.2.2	陽イオン交換容量 (CEC) の測定.....	8-3
8.3	バッチ式吸着試験.....	8-6
8.3.1	試験方法.....	8-6
8.3.2	試験結果と考察.....	8-8
8.3.3	バッチ式吸着試験のまとめ.....	8-16
8.4	カラム試験.....	8-16
8.4.1	試験方法.....	8-16
8.4.2	結果と考察.....	8-18
8.5	拡散試験.....	8-22
8.5.1	低濃度での拡散試験の実施.....	8-23
8.5.2	Cs および Sr を用いた拡散試験と分配係数の算出.....	8-26
8.6	模擬トレーサー試験.....	8-28
8.6.1	試験方法.....	8-28
8.6.2	結果と考察.....	8-30
8.7	実地下水および岩石データからの分配係数の算出.....	8-32
8.7.1	試験方法.....	8-33
8.7.2	試験結果と考察.....	8-33
8.8	まとめ.....	8-34
9.	天然トレーサーによる調査技術の開発.....	9-1
9.1	背景.....	9-1
9.2	研究項目.....	9-1
9.3	天然トレーサーの調査.....	9-2
9.3.1	文献調査.....	9-2
9.3.2	技術開発.....	9-10
9.3.3	まとめと今後の課題.....	9-55
9.4	坑道における地下水調査.....	9-56
9.4.1	瑞浪における地下水調査.....	9-56
9.4.2	幌延における地下水採水.....	9-78
9.4.3	まとめと今後の課題.....	9-86
10.	まとめと今後の課題.....	10-1
10.1	原位置トレーサー試験装置の試作.....	10-1
10.2	トレーサー試験結果の評価手法の開発.....	10-2

10.3	単孔式トレーサー試験技術の開発.....	10-3
10.4	ラドン濃度計測による割れ目調査技術の開発.....	10-4
10.5	割れ目の可視化技術の開発.....	10-5
10.6	適用性試験場の地質環境調査.....	10-6
10.7	岩石コアを用いた室内吸着・拡散試験.....	10-7
10.8	天然トレーサーによる調査技術の開発.....	10-8

< 目 次 >

2章 目 次

図 2.1-1	トレーサー試験装置概念図と平成 25 年度改良部	2-2
図 2.2.1-1	従来の注入方式におけるトレーサー濃度の状態	2-1
図 2.2.1-2	トレーサー溶液の流路図（上図：従来の流路、下図：循環バルブによる流路）	2-3
図 2.2.1-3	トレーサー循環バルブの適用例	2-4
図 2.2.1-4	トレーサー循環バルブの試作設計図	2-5
図 2.2.1-5	トレーサー循環バルブの試作器（溶解研磨加工時）	2-5
図 2.2.1-6	トレーサー循環バルブの試作器（実験時）	2-5
図 2.2.2-1	流路切替とポート接続の状況	2-6
図 2.2.2-2	基本動作確認試験状況	2-6
図 2.2.3-1	耐圧試験の概要	2-7
図 2.2.3-2	耐圧試験状況	2-7
図 2.2.3-3	耐圧試験データ（経路 A-B）	2-8
図 2.2.3-4	耐圧試験データ（経路 E-G）	2-8
図 2.2.3-5	耐圧試験データ（経路 F-D）	2-8
図 2.2.3-6	耐圧試験データ（経路 A-E）	2-9
図 2.2.3-7	耐圧試験データ（経路 B-D）	2-9
図 2.2.3-8	耐圧試験データ（経路 F-G）	2-9
図 2.2.4-1	循環バルブの S 字型溝加工	2-10
図 2.2.4-2	孔内装置組図	2-11
図 2.2.4-3	孔内装置部への循環バルブ組込み作業 1	2-12
図 2.2.4-4	孔内装置部への循環バルブ組込み作業 2	2-12
図 2.2.4-5	孔内装置部への循環バルブ組込み作業 3	2-13
図 2.2.4-6	孔内装置部への循環バルブ組込み作業 4	2-13
図 2.3.1-1	無脈動ポンプの外観（側面）	2-14
図 2.3.1-2	無脈動ポンプの外観（前面）	2-14
図 2.3.1-3	制御ボックスの外形寸法図	2-15
図 2.3.1-4	無脈動ポンプの外形寸法図	2-16
図 2.3.2-1	無脈動ポンプ耐圧試験の模式図	2-17
図 2.3.2-2	無脈動ポンプの回転数設定値と吐出量の関係	2-18
図 2.4.2-1	性能確認試験概要図（単孔揚水注水試験）	2-19
図 2.4.2-2	性能確認試験に使用した機材①	2-20
図 2.4.2-3	性能確認試験に使用した機材②	2-20
図 2.4.2-4	性能確認試験に使用した機材③	2-21
図 2.4.2-5	性能確認試験に使用した機材④	2-21
図 2.4.2-6	試験区間形成に使用したポリエステルメッシュおよび PEEK スペーサ	2-22
図 2.4.2-7	試験に使用した脱気水作成状況	2-22

図 2.4.5-1	ポイント希釈試験ケース 1(トレーサー投入 120 分)の試験結果	2-33
図 2.4.5-2	ポイント希釈試験ケース 2(トレーサー投入 10 分)の試験結果	2-34
図 2.4.5-3	ポイント希釈試験(平成 24 年度、トレーサー投入 10 分)の試験結果	2-34
図 2.4.5-4	ポイント希釈試験ケース 1 の試験区間におけるウラニン希釈状況	2-35
図 2.4.5-5	ポイント希釈試験ケース 2 の試験区間におけるウラニン希釈状況	2-36
図 2.4.5-6	循環バルブ実装の有無によるトレーサー濃度の時系列変化の比較	2-37
図 2.4.5-7	循環バルブの有無による循環経路におけるトレーサー濃淡状況の模式図	2-38
図 2.4.5-8	循環バルブ実装時の単孔注水揚水試験(トレーサー10 分)濃度の時系列変化	2-39
図 2.4.5-9	単孔注水揚水試験結果(平成 24 年度、トレーサー10 分投入)	2-40
図 2.4.5-10	単孔注水揚水試験の試験区間におけるウラニン希釈状況	2-40
図 2.4.5-11	循環バルブ実装の有無におけるトレーサー投入濃度変化の比較	2-41

3 章 図 目 次

図 3.2-1	ダイポール試験の概念(National Research Council、1996)	3-2
図 3.2.1-1	解析領域	3-3
図 3.2.1-2	有限要素分割図	3-4
図 3.2.1-3	水理学的境界条件(バックグラウンド流れ無し)	3-5
図 3.2.1-4	水理学的境界条件(バックグラウンド流れ:注水孔と揚水孔を結ぶ線に直交)	3-5
図 3.2.1-5	水理学的境界条件(バックグラウンド流れ:注水孔→揚水孔)	3-6
図 3.2.1-6	水理学的境界条件(バックグラウンド流れ:揚水孔→注水孔)	3-6
図 3.2.1-7	水理学的境界条件(バックグラウンド流れ:斜め 45 度)	3-7
図 3.2.1-8	水理学的境界条件(割れ目開口幅:1.58 mm、バックグラウンド流れ:斜め 45 度)	3-7
図 3.2.2-1	破過曲線(バックグラウンド流れ無し)	3-11
図 3.2.2-2	累積回収率(バックグラウンド流れ無し)	3-11
図 3.2.2-3	破過曲線(バックグラウンド流れ:注水孔と揚水孔を結ぶ線に直交)	3-12
図 3.2.2-4	累積回収率(バックグラウンド流れ:注水孔と揚水孔を結ぶ線に直交)	3-12
図 3.2.2-5	破過曲線(バックグラウンド流れ:注水孔→揚水孔)	3-13
図 3.2.2-6	累積回収率(バックグラウンド流れ:注水孔→揚水孔)	3-13
図 3.2.2-7	破過曲線(バックグラウンド流れ:揚水孔→注水孔)	3-14
図 3.2.2-8	累積回収率(バックグラウンド流れ:揚水孔→注水孔)	3-14
図 3.2.2-9	破過曲線(バックグラウンド流れ:斜め 45 度)	3-15
図 3.2.2-10	累積回収率(バックグラウンド流れ:斜め 45 度)	3-15
図 3.2.2-11	割れ目開口幅の破過曲線への影響(バックグラウンド流れ:斜め 45 度)	3-16
図 3.2.2-12	割れ目開口幅の累積回収率への影響(バックグラウンド流れ:斜め 45 度)	3-16
図 3.3-1	ウラニンの回収フラックスの実測値と計算値の比較(平成 24 年度)	3-17
図 3.3-2	Sr の破過曲線の実測値と計算値の比較(平成 24 年度)	3-18
図 3.3-3	Cs の破過曲線の実測値と計算値の比較(平成 24 年度)	3-18
図 3.3.1-1	トレーサー試験用メッシュ(不均質場 1)	3-21

図 3.3.1-2	トレーサー試験用メッシュ (不均質場 2)	2-21
図 3.3.1-3	トレーサー試験用メッシュ (不均質場 3)	2-22
図 3.3.1-4	トレーサー試験用メッシュ (割れ目に平行な面内)	2-22
図 3.3.1-5	割れ目に直交する方向のメッシュ分割	2-23
図 3.3.1-6	解析モデル	2-23
図 3.3.2-1	Case 1-1 の破過曲線	2-25
図 3.3.2-2	Case 1-2 の破過曲線	2-25
図 3.3.2-3	Case 1-3 の破過曲線	2-26
図 3.3.2-4	Case 2-1 の破過曲線	2-27
図 3.3.2-5	Case 2-2 の破過曲線	2-27
図 3.3.2-6	Case 3-1 の破過曲線	2-28
図 3.3.2-7	Case 3-2 の破過曲線	2-28
図 3.3.2-8	Case 4-1 の破過曲線	2-29
図 3.3.2-9	Case 4-2 の破過曲線	2-29

4章 図目次

図 4.3.1-1	単孔式トレーサー試験の概念図	4-4
図 4.3.1-2	単孔式トレーサー試験によって得られる破過曲線概念図	4-4
図 4.3.3-1	Schroth et al. (2001)による帯水層におけるトレーサー移行範囲概念図	4-12
図 4.3.3-2	Gelhar and Collins (1971)の理論解による破過曲線 (チェーサー無し)	4-14
図 4.3.3-3	Gelhar and Collins (1971)の理論解による破過曲線 (チェーサー100L)	4-14
図 4.4.2-1	解析メッシュ (割れ目モデル)	4-16
図 4.4.2-2	理論解と解析結果の破過曲線	4-18
図 4.4.2-3	動水勾配 0%における濃度コンター図	4-19
図 4.4.2-4	動水勾配 10%における濃度コンター図	4-19
図 4.4.2-5	動水勾配の感度解析における破過曲線	4-22
図 4.4.2-6	割れ目幅の感度解析における破過曲線 (動水勾配 0%)	4-23
図 4.4.2-7	割れ目幅の感度解析における破過曲線 (動水勾配 10%)	4-23
図 4.4.2-8	透水量係数の感度解析における破過曲線 (動水勾配 0%)	4-24
図 4.4.2-9	透水量係数の感度解析における破過曲線 (動水勾配 10%)	4-24
図 4.4.2-10	待機時間の感度解析における破過曲線 (動水勾配 0%)	4-25
図 4.4.2-11	待機時間の感度解析における破過曲線 (動水勾配 10%)	4-25
図 4.4.2-12	縦分散長の感度解析における破過曲線 (動水勾配 0%)	4-26
図 4.4.2-13	縦分散長の感度解析における破過曲線 (動水勾配 10%)	4-26
図 4.4.2-14	遅延係数の感度解析における破過曲線 (動水勾配 0%)	4-27
図 4.4.2-15	遅延係数の感度解析における破過曲線 (動水勾配 10%)	4-27
図 4.4.2-16	回収率 (動水勾配感度解析)	4-28
図 4.4.2-17	回収率 (割れ目幅感度解析)	4-28

図 4.4.2-18	回収率（透水量係数感度解析）	4-28
図 4.4.2-19	回収率（待機時間感度解析）	4-28
図 4.4.2-20	回収率（縦分散長感度解析）	4-28
図 4.4.2-21	回収率（遅延係数感度解析）	4-28
図 4.4.3-1	複合モデルを用いた解析の概念図	4-29
図 4.4.3-2	解析メッシュ（複合モデル）	4-30
図 4.4.3-3	割れ目モデルと複合モデルの破過曲線の比較	4-31
図 4.4.3-4	マトリクス拡散係数の感度解析における破過曲線（動水勾配 0%）	4-33
図 4.4.3-5	マトリクス拡散係数の感度解析における破過曲線（動水勾配 10%）	4-33
図 4.4.3-6	回収率（マトリクス拡散係数感度解析）	4-33
図 4.4.3-7	マトリクス拡散係数の感度解析における破過曲線（動水勾配 0%、待機 24 時間）	4-34
図 4.4.3-8	同位体分別係数の感度解析における破過曲線（動水勾配 0%）	4-35
図 4.4.3-9	同位体分別係数の感度解析における破過曲線（動水勾配 10%）	4-35
図 4.4.4-1	透水量係数頻度分布（標準偏差 0.2）	4-37
図 4.4.4-2	透水量係数分布（標準偏差 0.2）	4-37
図 4.4.4-3	透水量係数頻度分布（標準偏差 0.5）	4-38
図 4.4.4-4	透水量係数分布（標準偏差 0.5）	4-38
図 4.4.4-5	透水量係数頻度分布（標準偏差 1.0）	4-39
図 4.4.4-6	透水量係数分布（標準偏差 1.0）	4-39
図 4.4.4-7	不均質モデルの感度解析における破過曲線（標準偏差 0.2、動水勾配 0%）	4-41
図 4.4.4-8	不均質モデルの感度解析における破過曲線（標準偏差 0.5、動水勾配 0%）	4-41
図 4.4.4-9	不均質モデルの感度解析における破過曲線（標準偏差 1.0、動水勾配 0%）	4-41
図 4.4.4-10	不均質モデルの感度解析における破過曲線（標準偏差 0.2、動水勾配 10%）	4-42
図 4.4.4-11	不均質モデルの感度解析における破過曲線（標準偏差 0.5、動水勾配 10%）	4-42
図 4.4.4-12	不均質モデルの感度解析における破過曲線（標準偏差 1.0、動水勾配 10%）	4-42
図 4.4.4-13	回収率（標準偏差 0.2）	4-43
図 4.4.4-14	回収率（標準偏差 0.5）	4-43
図 4.4.4-15	回収率（標準偏差 1.0）	4-43
図 4.4.4-16	12 時間後の濃度コンター図（標準偏差 0.2、動水勾配 0%）	4-44
図 4.4.4-17	12 時間後の濃度コンター図（標準偏差 0.2、動水勾配 10%）	4-44
図 4.4.4-18	12 時間後の濃度コンター図（標準偏差 0.5、動水勾配 0%）	4-45
図 4.4.4-19	12 時間後の濃度コンター図（標準偏差 0.5、動水勾配 10%）	4-45
図 4.4.4-20	12 時間後の濃度コンター図（標準偏差 1.0、動水勾配 0%）	4-46
図 4.4.4-21	12 時間後の濃度コンター図（標準偏差 1.0、動水勾配 10%）	4-46
図 4.4.5-1	ラドン濃度の濃度コンター図（割れ目幅 1.0mm、動水勾配 0%）	4-49
図 4.4.5-2	ラドン濃度の濃度コンター図（割れ目幅 1.0mm、動水勾配 10%）	4-49
図 4.4.5-3	ラドン濃度の割れ目幅感度解析における破過曲線（動水勾配 0%）	4-50
図 4.4.5-4	ラドン濃度の割れ目幅感度解析における破過曲線（動水勾配 10%）	4-50

図 4.4.5-5	ラドン濃度の縦分散長感度解析における破過曲線（動水勾配 0%）	4-51
図 4.4.5-6	ラドン濃度の縦分散長感度解析における破過曲線（動水勾配 10%）	4-51

5章 図目次

図 5.2-1	ラドンによる割れ目幅計測の原理	5-2
図 5.4.1-1	X線回折分析フロー図	5-5
図 5.4.1-2 (a)	凝灰岩の全岩分析結果	5-7
図 5.4.1-3 (a)	凝灰岩の水ひ処理およびエチレングリコール処理結果	5-8
図 5.4.1-4 (a)	凝灰岩の水ひ処理および塩酸処理結果	5-9
図 5.4.2-1	岩石からのラドンフラックスの測定例	5-14
図 5.4.2-2	試料表面積とラドン発生量との関係	5-16
図 5.4.2-3	試料表面積とラドンフラックス関係	5-17
図 5.4.2-4	試料体積とラドンフラックス関係	5-17
図 5.4.2-5	試料厚さとラドンフラックス関係	5-18
図 5.4.3-1	液体シンチレーションカウンタ（LSC）、Rad7、 γ 線スペクトロメトリによる同一試料の測定	5-19

6章 図目次

図 6.2.2-1	成形研削盤の外観写真	6-3
図 6.2.2-2	撮影装置の外観写真	6-5
図 6.2.2-3	岩石コア嵩上げ用スペーサー	6-6
図 6.2.2-4	ファインダーからの光の進入防止とカメラの水平の確保	6-6
図 6.2.2-5	本研究で用いた岩石コア（赤枠）	6-7
図 6.2.2-6	切断された岩石コア（左：C-FRS 12.001、右：C-FRS 12.003）	6-8
図 6.2.2-7	岩石と鉄板との接着状況（左：クロカワの除去、右：接着および固定）	6-8
図 6.2.2-8	岩石コアの研削盤への設置状況と研削の様子	6-8
図 6.2.4-1	平面研削加工の種類（a：トラバースカット研削、b：バイアス研削）	6-10
図 6.2.5-1	研削深さ 5mm の研削断面画像と X線 CT 画像（C-FRS 12.001 孔）	6-13
図 6.2.5-2	研削深さ 10mm の研削断面画像と X線 CT 画像（C-FRS 12.001 孔）	6-14
図 6.2.5-3	研削深さ 15mm の研削断面画像と X線 CT 画像（C-FRS 12.001 孔）	6-14
図 6.2.5-4	研削深さ 20mm の研削断面画像と X線 CT 画像（C-FRS 12.001 孔）	6-15
図 6.2.5-5	研削深さ 25mm の研削断面画像と X線 CT 画像（C-FRS 12.001 孔）	6-15
図 6.2.5-6	研削深さ 30mm の研削断面画像と X線 CT 画像（C-FRS 12.001 孔）	6-16
図 6.2.5-7	研削深さ 35mm の研削断面画像と X線 CT 画像（C-FRS 12.001 孔）	6-16
図 6.2.5-8	研削深さ 40mm の研削断面画像と X線 CT 画像（C-FRS 12.001 孔）	6-17
図 6.2.5-9	研削最終断面の紫外線蛍光画像	6-17
図 6.2.5-10	y=4mm の研削面の拡大写真（C-FRS 12.001 孔）	6-18
図 6.2.5-11	y=14mm の研削面の拡大写真（C-FRS 12.001 孔）	6-19

図 6.2.5-12	y=34mm の研削面の拡大写真 (C-FRS 12.001 孔)	6-20
図 6.2.5-13	研削断面画像から作成した割れ目間隙の MPR 画像	6-21
図 6.2.5-14	研削断面画像から作成した割れ目間隙の MPR 画像	6-22
図 6.2.5-15	研削断面画像から作成した割れ目間隙の MPR 画像	6-22
図 6.2.5-16	割れ目間隙の X 線 CT 画像の MPR 画像	6-23
図 6.2.5-17	研削断面画像から作成した割れ目間隙の三次元画像	6-24
図 6.2.5-18	研削断面画像から作成した割れ目間隙の三次元画像	6-24
図 6.2.5-19	割れ目間隙の X 線 CT 三次元画像	6-25
図 6.2.5-20	研削深さ 5mm の研削断面画像と X 線 CT 画像 (C-FRS 12.003 孔)	6-26
図 6.2.5-21	研削深さ 10mm の研削断面画像と X 線 CT 画像 (C-FRS 12.003 孔)	6-27
図 6.2.5-22	研削深さ 15mm の研削断面画像と X 線 CT 画像 (C-FRS 12.003 孔)	6-27
図 6.2.5-23	研削深さ 20mm の研削断面画像と X 線 CT 画像 (C-FRS 12.003 孔)	6-28
図 6.2.5-24	研削深さ 25mm の研削断面画像と X 線 CT 画像 (C-FRS 12.003 孔)	6-28
図 6.2.5-25	研削深さ 30mm の研削断面画像と X 線 CT 画像 (C-FRS 12.003 孔)	6-29
図 6.2.5-26	研削深さ 35mm の研削断面画像と X 線 CT 画像 (C-FRS 12.003 孔)	6-29
図 6.2.5-27	研削深さ 40mm の研削断面画像と X 線 CT 画像 (C-FRS 12.003 孔)	6-30
図 6.2.5-28	研削深さ 45mm の研削断面画像と X 線 CT 画像 (C-FRS 12.003 孔)	6-30
図 6.2.5-29	y=29mm の研削面の拡大写真 (C-FRS 12.003 孔)	6-31
図 6.2.5-30	y=39mm の研削面の拡大写真 (C-FRS 12.003 孔)	6-32
図 6.2.5-31	研削断面画像から作成した割れ目間隙の MPR 画像	6-34
図 6.2.5-32	研削断面画像から作成した割れ目間隙の MPR 画像	6-34
図 6.2.5-33	研削断面画像から作成した割れ目間隙の MPR 画像	6-35
図 6.2.5-34	割れ目間隙の X 線 CT 画像の MPR 画像	6-35
図 6.2.5-35	研削断面画像から作成した割れ目間隙の三次元画像	6-36
図 6.2.5-36	研削断面画像から作成した割れ目間隙の三次元画像	6-37
図 6.2.5-37	割れ目間隙の X 線 CT 三次元画像	6-37
図 6.2.6-1	割れ目幅計測の概念図	6-38
図 6.2.6-2	C-FRS12.001 孔で採取された岩石コアの割れ目開口幅の頻度分布	6-39
図 6.2.6-3	C-FRS12.001 孔で採取された岩石コアの割れ目開口幅の累積頻度分布	6-39
図 6.2.6-4	割れ目内のガウジ幅の頻度分布 (C-FRS12.003 孔)	6-40
図 6.2.6-5	割れ目内のガウジ幅の累積頻度分布 (C-FRS12.003 孔)	6-41
図 6.3.2-1	温度上昇法による可使時間測定の様子	6-44
図 6.3.2-2	デジタル B 型粘度計の外観写真	6-45
図 6.3.2-3	デジタル B 型粘度計の標準スピンドルセット	6-45
図 6.3.3-1	温度上昇法による可使時間測定 (発熱温度と時間の関係)	6-46
図 6.3.4-1	粘度校正用標準液 (96.7 mPa・s) の粘度測定結果	6-48
図 6.3.4-2	粘度校正用標準液 (96.7 mPa・s) の粘度と温度・回転数との関係	6-48
図 6.3.4-3	粘度校正用標準液 (986 mPa・s) の粘度と温度・回転数との関係	6-49

図 6.3.5-1	主剤（エポキシ樹脂）の粘度測定結果（EP-300）	6-50
図 6.3.5-2	硬化剤の粘度測定結果（EP-300）	6-50
図 6.3.5-3	主剤（エポキシ樹脂）の粘度測定結果（EP-400）	6-50
図 6.3.5-4	硬化剤の粘度測定結果（EP-400）	6-51
図 6.3.5-5	主剤および硬化剤の粘度と温度の関係（EP-300）	6-51
図 6.3.5-6	主剤および硬化剤の粘度と温度の関係（EP-400）	6-52
図 6.3.6-1	レジン（混合物）の粘度と温度の経時変化（EP-300）	6-53
図 6.3.6-2	レジン（混合物）の粘度と温度の経時変化（EP-400）	6-53
図 6.3.6-3	レジン（混合物）の粘度変化収束時の様子	6-54
図 6.3.7-1	レジン材充填コア回収後のレジン注入孔（C-FRS 08.002 孔）のボアホールカメラ観察	6-54
図 6.3.7-2	主剤へのウラニン添加前後の自然光下での様子	6-55
図 6.3.7-3	主剤へのウラニン添加前後の紫外線光源下での様子	6-56
図 6.3.7-4	硬化剤へのウラニン添加直後の様子	6-57
図 6.3.7-5	ウラニンを添加した硬化剤と主剤の攪拌後の様子	6-57
図 6.3.7-6	硬化後のレジン材をイソプロピルアルコールに浸漬させた時の様子	6-58
図 6.4.2-1	模擬亀裂花崗岩試料の外観写真	6-60
図 6.4.2-2	模擬亀裂花崗岩試料と隙間ゲージ配置状況	6-61
図 6.4.2-3	隙間ゲージを挟んだ模擬亀裂花崗岩試料の X 線 CT 画像（WL:2000、WW:3000）	6-62
図 6.4.3-1	透水セルの模式図	6-63
図 6.4.3-2	岩石コアの外観写真と座標系	6-64
図 6.4.3-3	ヨウ化ナトリウム水溶液の濃度と CT 値の関係	6-65
図 6.4.3-4	レジン注入試験時の装置の設置状況	6-66
図 6.4.3-5	レジン材からのウラニンの分離	6-66
図 6.4.4-1	岩石コアの X 線 CT 原画像（左：yz 断面、右：xy 断面）	6-67
図 6.4.4-2	ガウシアンフィルター処理を施した X 線 CT 画像	6-68
図 6.4.4-3	画像間差分による割れ目領域の抽出結果	6-69
図 6.4.4-4	レジン注入試験後の岩石コアの表面観察結果	6-70
図 6.4.4-5	レジン注入試験後の岩石コア切断面の観察結果	6-71
図 6.4.4-6	割れ目開口幅の累積頻度分布	6-72

7章 図 目 次

図 7.1.1-1	岐阜県瑞浪市における瑞浪超深地層研究所の位置と地下研究施設	7-2
図 7.1.2-1	深度 300m ボーリング横坑構造図	7-3
図 7.2.1-1	深度 300m ボーリング横坑における調査エリア	7-4
図 7.2.2-1	調査フロー	7-6
図 7.2.3-1	ボーリングマシン	7-9
図 7.2.3-2	孔口ケーシング	7-9

図 7.2.3-3	一般部（孔口部以外）ボーリングロッド	7-9
図 7.2.3-4	ボーリングビット	7-10
図 7.2.3-5	シート養生状況	7-11
図 7.2.3-6	掘削水量の計測状況	7-11
図 7.2.3-7	掘削水用タンク	7-12
図 7.2.3-8	排水側の電磁流量計	7-12
図 7.2.3-9	深度 300m ボーリング横坑作業区域概念図	7-13
図 7.2.3-10	ボーリング資機材配置および掘削水の給排水ルート概要図	7-13
図 7.2.3-11	ボーリング位置の位置出し測量状況	7-14
図 7.2.3-12	孔口ケーシング仕上げ概念図	7-15
図 7.2.3-13	1 段目の作業手順	7-16
図 7.2.3-14	φ 86mm（1 段目）掘削状況	7-17
図 7.2.3-15	孔口ケーシング挿入状況	7-17
図 7.2.3-16	ケーシング設置状況	7-17
図 7.2.3-17	加圧試験状況	7-18
図 7.2.3-18	センターリーマー	7-19
図 7.2.3-19	孔口装置概要図	7-19
図 7.2.3-20	分光蛍光光度計（日立 F-2500）	7-20
図 7.2.3-21	村田製作所製シングルショット測定器	7-21
図 7.2.3-22	コアへの基準線記入例	7-22
図 7.2.3-23	コアへの基準線記入状況およびコア箱への収納状況	7-23
図 7.2.3-24	条線およびステップの計測の一例	7-24
図 7.2.3-25	コア写真撮影台	7-26
図 7.2.3-26	キャリパー検層ツール	7-27
図 7.2.3-27	キャリパー検層ツール挿入状況	7-27
図 7.2.3-28	BTV 機能付きフローメータ検層装置の概要図	7-29
図 7.2.3-29	スポンジパッカーの機能	7-29
図 7.2.3-30	測定プローブ（BTV・フローメーター）の挿入状況	7-30
図 7.2.3-31	BTV 孔壁画像取得状況	7-30
図 7.2.3-32	透水試験装置の設置概念図	7-33
図 7.2.3-33	透水試験の基本作業フロー	7-35
図 7.2.3-34	透水試験設置前の検尺	7-36
図 7.2.3-35	定量試験用モノノポンプ	7-37
図 7.2.3-36	間隙水圧測定時の概念	7-37
図 7.2.3-37	パルス試験の概念	7-38
図 7.2.3-38	定流量試験の概念	7-38
図 7.2.3-39	定圧試験の概念	7-39
図 7.2.3-40	Hvorslev の t-Log s 曲線	7-40

図 7.2.3-41	Cooper らの曲線一致法.....	7-41
図 7.2.3-42	Log(t)-s 曲線(上)、Derivative Plot(下)の例.....	7-43
図 7.2.3-43	間隙水圧モニタリング装置孔内部.....	7-44
図 7.2.3-44	間隙水圧モニタリング装置(記録装置部).....	7-44
図 7.2.3-45	間隙水圧モニタリング装置の設置例.....	7-45
図 7.2.3-46	ポイント希釈試験の試験手順.....	7-47
図 7.2.3-47	ポイント希釈試験実施概要図.....	7-47
図 7.2.3-48	ポイント希釈試験設備.....	7-47
図 7.2.3-49	12MI30 号孔の追加透水試験の対象区間.....	7-48
図 7.2.3-50	村田式ジャイロ孔曲がり計測機.....	7-48
図 7.2.3-51	BIP-Vシステム構成.....	7-50
図 7.2.3-52	面構造の走向傾斜の解析ルーチン.....	7-51
図 7.2.3-53	幅の計測結果.....	7-53
図 7.2.3-54	音響トモグラフィ法の計測フロー図.....	7-54
図 7.2.3-55	音響トモグラフィ法計測機器.....	7-54
図 7.2.3-56	発振器(左)と受信器(右).....	7-55
図 7.2.3-57	音響トモグラフィ法の解析フロー.....	7-55
図 7.3.2-1	13MI36 号孔の掘削方向平面図.....	7-59
図 7.3.2-2	13MI36 号孔 孔口ケーシング設置概念図.....	7-60
図 7.3.2-3	13MI36 号孔区間コア写真.....	7-62
図 7.3.2-4	13MI36 号孔掘削時孔口湧水量測定結果.....	7-64
図 7.3.2-5	13MI36 号孔掘削中の 12MI30 号孔の水圧挙動.....	7-66
図 7.3.2-6	13MI36 号孔掘削中の 12MI31 号孔への水圧挙動.....	7-66
図 7.3.2-7	13MI36 号孔掘削水の アミノ G 酸濃度と湧水量.....	7-67
図 7.3.2-8	13MI36 号孔総合地質柱状図.....	7-69
図 7.3.2-9	コア写真 13MI36 号孔(0~9mabh).....	7-70
図 7.3.2-10	コア写真 13MI36 号孔(9.00~18.00mabh).....	7-71
図 7.3.2-11	コア写真 13MI36 号孔(18.00~22.55mabh).....	7-72
図 7.3.2-12	13MI36 号孔 緑泥石脈と緑泥石の付着する引張割れ目.....	7-73
図 7.3.2-13	13MI36 号孔 粘土および方解石の付着する引張割れ目.....	7-74
図 7.3.2-14	13MI36 号孔 割れ目を充填する黄鉄鉱.....	7-74
図 7.3.2-15	13MI36 号孔 断層角礫岩.....	7-75
図 7.3.2-16	13MI36 号孔 断層ガウジ.....	7-76
図 7.3.2-17	13MI36 号孔 孔曲がり検層結果.....	7-77
図 7.3.2-18	13MI36 号孔キャリパー検層結果.....	7-78
図 7.3.2-19	13MI36 号孔のフローメータ検層結果.....	7-80
図 7.3.2-20	13MI36 号孔シュミットネット.....	7-82
図 7.3.2-21	13MI36 号孔 21mabh 付近の単項式透水試験深度図.....	7-83

図 7.3.2-22	13MI36 号孔 17mabh 付近の単項式透水試験深度図.....	7-84
図 7.3.2-23	13MI36 号孔 14mabh 付近の単項式透水試験深度図.....	7-84
図 7.3.2-24	13MI36 号孔 8mabh 付近の単項式透水試験深度図.....	7-85
図 7.3.2-25	13MI36 号孔 No. 1 区間の試験時における圧力変化.....	7-87
図 7.3.2-26	13MI36 号孔 No. 1 区間定流量揚水試験の揚水過程の Derivative Plot.....	7-88
図 7.3.2-27	13MI36 号孔 No. 1 区間定流量揚水試験の揚水過程の Jacob 法による解析結果....	7-88
図 7.3.2-28	13MI36 号孔 No. 1 区間定流量揚水試験の回復過程の Derivative Plot.....	7-89
図 7.3.2-29	13MI36 号孔 No. 1 区間定流量揚水試験の回復過程の Agarwal 法による解析結果..	7-89
図 7.3.2-30	13MI36 号孔 No. 1 区間定流量揚水試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図の結果..	7-90
図 7.3.2-31	13MI36 号孔 No. 1 区間定流量揚水試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図の結果..	7-90
図 7.3.2-32	13MI36 号孔 No. 2 区間の試験時の圧力変化.....	7-91
図 7.3.2-33	13MI36 号孔 No. 2 区間定流量揚水試験の揚水過程の Derivative Plot.....	7-92
図 7.3.2-34	13MI36 号孔 No. 2 区間定流量揚水試験の揚水過程の Jacob 法による解析結果....	7-92
図 7.3.2-35	13MI36 号孔 No. 3 区間定流量揚水試験の回復過程の Derivative Plot.....	7-93
図 7.3.2-36	13MI36 号孔 No. 2 区間定流量揚水試験の回復過程の Agarwal 法による解析結果..	7-93
図 7.3.2-37	13MI36 号孔 No. 2 区間定流量揚水試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図の結果..	7-94
図 7.3.2-38	13MI36 号孔 No. 2 区間定流量揚水試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図の結果..	7-94
図 7.3.2-39	13MI36 号孔 No. 3 区間の試験時における圧力変化.....	7-95
図 7.3.2-40	13MI36 号孔 No. 3 区間定流量揚水試験の揚水過程の Derivative Plot.....	7-96
図 7.3.2-41	13MI36 号孔 No. 3 区間定流量揚水試験の揚水過程の Jacob 法による解析結果....	7-96
図 7.3.2-42	12MI30 号孔 No. 3 区間定流量揚水試験の回復過程の Derivative Plot.....	7-97
図 7.3.2-43	12MI30 号孔 No. 3 区間定流量揚水試験の回復過程の Agarwal 法による解析結果..	7-97
図 7.3.2-44	13MI36 号孔 No. 3 区間定流量揚水試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図の結果..	7-98
図 7.3.2-45	13MI36 号孔 No. 3 区間定流量揚水試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図の結果..	7-98
図 7.3.2-46	13MI36 号孔 No. 4 区間試験時における圧力変化.....	7-99
図 7.3.2-47	13MI36 号孔 No. 4 区間 1 回目のパルス試験の t-Log s Plot.....	7-100
図 7.3.2-48	13MI36 号孔 No. 4 区間 2 回目のパルス試験の t-Log s Plot	7-100
図 7.3.2-49	13MI36 号孔 No. 4 区間パルス試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図の結果....	7-101
図 7.3.2-50	13MI36 号孔 No. 4 区間パルス試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図の結果....	7-101
図 7.3.2-51	間隙水圧モニタリング装置の検尺	7-102
図 7.3.2-52	間隙水圧モニタリング装置の設置	7-102
図 7.3.2-53	13MI36 号孔の間隙水圧モニタリング装置の構成概念図.....	7-103
図 7.3.3-1	13MI37 号孔の掘削方向平面図.....	7-105
図 7.3.3-2	13MI37 号孔 孔口ケーシング設置概念図.....	7-106
図 7.3.3-3	13MI37 号孔区間コア写真.....	7-108
図 7.3.3-4	13MI37 号孔掘削時孔口湧水量測定結果.....	7-110
図 7.3.3-5	13MI37 号孔掘削中の 12MI30 号孔の水圧挙動.....	7-111
図 7.3.3-6	13MI37 号孔掘削中の 12MI31 号孔の水圧挙動.....	7-112

図 7.3.3-7	13MI37 号孔掘削中の 13MI36 号孔の水圧挙動	7-112
図 7.3.3-8	13MI37 号孔掘削水のアミノ G 酸濃度と湧水量	7-113
図 7.3.3-9	13MI37 号孔総合地質柱状図	7-115
図 7.3.3-10	コア写真 13MI37 号孔 (0~9.00mabh)	7-116
図 7.3.3-11	コア写真 13MI37 号孔 (9.00~18.00mabh)	7-117
図 7.3.3-12	コア写真 13MI37 号孔 (18.00~27.00mabh)	7-118
図 7.3.3-13	13MI37 号孔 カタクラサイトを充填する緑泥石	7-120
図 7.3.3-14	13MI37 号孔 割れ目を充填する粘土	7-120
図 7.3.3-15	13MI37 号孔 角礫状~粘土状コア	7-121
図 7.3.3-16	13MI37 号孔 角礫状コア	7-122
図 7.3.3-17	13MI37 号孔 カタクラサイト	7-122
図 7.3.3-18	13MI37 号孔 断層角礫岩と条線 SL(R15)	7-123
図 7.3.3-19	13MI36 号孔 孔曲がり検層結果	7-124
図 7.3.3-20	13MI37 号孔の水理試験装置の構成概念図	7-126
図 7.3.4-1	ポイント希釈試験実施箇所	7-128
図 7.3.4-2	蛍光強度とウラニン濃度の関係	7-129
図 7.3.4-3	ウラニン濃度の検量線	7-130
図 7.3.4-4	ポイント希釈試験結果 (12MI30 号孔 Int2)	7-133
図 7.3.4-5	ポイント希釈試験結果 (12MI30 号孔 Int3)	7-134
図 7.3.4-6	ポイント希釈試験結果 (12MI31 号孔 Int2)	7-135
図 7.3.4-7	ポイント希釈試験結果 (12MI31 号孔 Int3)	7-136
図 7.3.4-8	ポイント希釈試験結果 (12MI31 号孔 Int4)	7-137
図 7.3.4-9	ポイント希釈試験結果 (12MI31 号孔 Int5)	7-138
図 7.3.4-10	ポイント希釈試験結果 (12MI31 号孔 Int6)	7-139
図 7.3.4-11	ポイント希釈試験結果 (13MI36 号孔 Int4)	7-140
図 7.3.4-12	ポイント希釈試験結果 (13MI36 号孔 Int7)	7-141
図 7.3.4-13	ウラニン置換時間 (グラフ読取-容量) の比較	7-143
図 7.3.4-14	区間内置換速度と地下水流量の関係	7-143
図 7.3.4-15	ポイント希釈試験中の 12MI30 号孔の間隙水圧変化	7-145
図 7.3.4-16	ポイント希釈試験中の 12MI31 号孔の間隙水圧変化	7-145
図 7.3.4-17	ポイント希釈試験中の 13MI36 号孔の間隙水圧変化	7-146
図 7.3.4-18	ポイント希釈試験中の 13MI37 号孔の間隙水圧変化	7-146
図 7.3.5-1	12MI30 号孔①区間試験時における圧力変化	7-148
図 7.3.5-2	12MI30 号孔①区間の Hvorslev の t-Log s 曲線	7-148
図 7.3.5-3	12MI30 号孔①区間の Cooper らの曲線一致法	7-149
図 7.3.5-4	12MI30 号孔①区間パルス試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図の結果	7-149
図 7.3.5-5	12MI30 号孔①区間パルス試験時の 13MI36 号孔の水圧応答結果図の結果	7-150
図 7.3.6-1	村田式ジャイロ計測風景	7-151

図 7.3.6-2	ジャイロの測定長および軸線の概念図	7-151
図 7.3.6-3	12MI30 号孔のボーリング孔跡図	7-152
図 7.3.6-4	12MI31 号孔のボーリング孔跡図	7-152
図 7.3.6-5	13MI36 号孔のボーリング孔跡図	7-153
図 7.3.7-1	発振孔(12M30 孔、赤線)と受信孔(12M31 孔、青線)と XY 平面(太線)の関係	7-154
図 7.3.7-2	発振点と受振点の補正, (1)Z 軸を中心に 140.13 度左回転	7-155
図 7.3.7-3	発振点と受信点の補正, (2)X 軸を中心に 29.00 度左回転	7-155
図 7.3.7-4	発振点と受信点の補正, (3)Y 軸を中心に 9.78 度右回転	7-156
図 7.3.7-5	発振点と受信点の補正, (4)Y 軸を対象軸として反転し、X 軸方向に 2.8235 m 平行移動	7-156
図 7.3.7-6	受信波形(孔口からの距離 8.00m、周波数 10kHz)	7-157
図 7.3.7-7	受信波形(孔口からの距離 16.00m、周波数 10kHz)	7-157
図 7.3.7-8	受信波形(孔口からの距離 24.00m、周波数 10kHz)	7-158
図 7.3.7-9	受信波形(孔口からの距離 8.00m、周波数 20kHz)	7-158
図 7.3.7-10	受信波形(孔口からの距離 16.00m、周波数 20kHz)	7-158
図 7.3.7-11	受信波形(孔口からの距離 24.00m、周波数 20kHz)	7-159
図 7.3.7-12	受信波形(孔口からの距離 8.00m、周波数 39kHz)	7-159
図 7.3.7-13	受信波形(孔口からの距離 16.00m、周波数 39kHz)	7-159
図 7.3.7-14	受信波形(孔口からの距離 24.00m、周波数 39kHz)	7-160
図 7.3.7-15	水平波線の読取り結果(sec1)、発振周波数 10kHz(左 速度、右 振幅)	7-160
図 7.3.7-16	水平波線の読取り結果(sec1)、発振周波数 20kHz(左 速度、右 振幅)	7-161
図 7.3.7-17	水平波線の読取り結果(sec1)、発振周波数 39kHz(左 速度、右 振幅)	7-161
図 7.3.7-18	波線解析結果(sec1)、発振周波数(左)10kHz, (中)20kHz, (右)39kHz.	7-162
図 7.3.7-19	速度分布図(左)および減衰率分布図(右) (sec1)、発振周波数 10kHz	7-163
図 7.3.7-20	速度分布図(左)および減衰率分布図(右) (sec1)、発振周波数 20kHz	7-164
図 7.3.7-21	速度分布図(左)および減衰率分布図(右) (sec1)、発振周波数 39kHz	7-165
図 7.3.7-22	受信波形(発振器位置 孔口から 8.0m、周波数 10kHz)	7-166
図 7.3.7-23	受信波形(発振器位置 孔口から 16.0m、周波数 10kHz)	7-166
図 7.3.7-24	受信波形(発振器位置 孔口から 22.00m、周波数 20kHz)	7-166
図 7.3.7-25	受信波形(発振器位置 孔口から 8.00m、周波数 39kHz)	7-167
図 7.3.7-26	受信波形(発振器位置 孔口から 16.00m、周波数 39kHz)	7-167
図 7.3.7-27	受信波形(発振器位置 孔口から 22.00m、周波数 39kHz)	7-167
図 7.3.7-28	受信波形(発振器位置 孔口から 8.00m、周波数 39kHz)	7-168
図 7.3.7-29	受信波形(発振器位置 孔口から 16.00m、周波数 39kHz)	7-168
図 7.3.7-30	受信波形(発振器位置 孔口から 22.00m、周波数 39kHz)	7-168
図 7.3.7-31	水平波線の読取り結果(sec2)、発振周波数 10kHz(左 速度、右 振幅)	7-169
図 7.3.7-32	水平波線の読取り結果(sec2)、発振周波数 20kHz(左 速度、右 振幅)	7-170
図 7.3.7-33	水平波線の読取り結果(sec2)、発振周波数 39kHz(左 速度、右 振幅)	7-170

図 7.3.7-34	波線解析結果(断面 2)、発振周波数(左)10kHz, (中)20kHz, (右)39kHz	7-171
図 7.3.7-35	速度分布図(左)および減衰率分布図(右) (断面 2)、発振周波数 10kHz	7-172
図 7.3.7-36	速度分布図(左)および減衰率分布図(右) (断面 2)、発振周波数 20kHz	7-173
図 7.3.7-37	速度分布図(左)および減衰率分布図(右) (断面 2)、発振周波数 39kHz	7-174
図 7.3.7-38	速度断面と高透水性区間との対比 (39kHz)	7-176
図 7.3.7-39	減衰率断面と高透水性区間との対比 (39kHz)	7-177
図 7.3.7-40	水平波線の読取り結果の比較 (10kHz)	7-178
図 7.3.7-41	水平波線の読取り結果の比較 (20kHz)	7-179
図 7.3.7-42	水平波線の読取り結果の比較 (39kHz)	7-179
図 7.3.8-1	12MI30 号孔 孔壁展開図 4.00~8.00mabh	7-181
図 7.3.8-2	12MI31 号孔 孔壁展開図 4.00~8.00mabh	7-187
図 7.3.8-3	13MI36 号孔 孔壁展開図 4.60~8.00mabh	7-193
図 7.3.8-4	12MI30 孔ステレオネット図 - 全不連続面-	7-199
図 7.3.8-5	12MI31 孔ステレオネット図 - 全不連続面-	7-202
図 7.3.8-6	13MI36 孔ステレオネット図 - 全不連続面-	7-205
図 7.3.8-7	全岩盤分離面の間隔分布	7-209
図 7.3.8-8	全岩盤分離面の深度-方位分布	7-210
図 7.3.8-9	全岩盤分離面の深度-傾斜分布	7-211
図 7.3.8-10	12MI30 号孔の詳細観察画像 (10.11m、N78W14N)	7-213
図 7.3.8-11	12MI31 号孔の詳細観察画像 (14.88m、N45W83SW)	7-219
図 7.3.8-12	13MI36 号孔の詳細観察画像(14.58m、N23W88W)	7-225
図 7.3.9-1	間隙水圧モニタリング設置風景	7-231
図 7.3.9-2	設置後の間隙水圧モニタリング装置地上部	7-231
図 7.3.9-3	12MI30 号孔間隙水圧モニタリング装置の再設置孔内部構成図	7-232
図 7.3.9-4	12MI31 号孔間隙水圧モニタリング装置の再設置孔内部構成図	7-233
図 7.3.9-5	13MI36 号孔間隙水圧モニタリング装置の再設置孔内部構成図	7-234
図 7.3.9-6	13MI37 号孔間隙水圧モニタリング装置の再設置孔内部構成図	7-235
図 7.3.9-7	調査領域における隙水圧モニタリング区間の配置図	7-236
図 7.3.10-1	12MI30 号孔 間隙水圧モニタリング装置抜管までの水圧経時変化	7-238
図 7.3.10-2	12MI31 号孔 間隙水圧モニタリング装置抜管までの水圧経時変化	7-238
図 7.3.10-3	13MI36 号孔 間隙水圧モニタリング装置抜管までの水圧経時変化	7-239
図 7.3.10-4	13MI37 号孔 間隙水圧モニタリング装置抜管までの水圧経時変化	7-239
図 7.3.10-5	12MI30 号孔 間隙水圧モニタリング装置再設置後の水圧経時変化	7-240
図 7.3.10-6	12MI31 号孔 間隙水圧モニタリング装置再設置後の水圧経時変化	7-240
図 7.3.10-7	13MI36 号孔 間隙水圧モニタリング装置再設置後の水圧経時変化	7-241
図 7.3.10-8	13MI37 号孔 間隙水圧モニタリング装置再設置後の水圧経時変化	7-241
図 7.4.2-1	13MI36 号孔の総合地質柱状図	7-245
図 7.4.2-2	13MI37 号孔の総合地質柱状図	7-246

図 7.3.8-1	12MI30 号孔 孔壁展開図	4.00~8.00mabh	7-181
図 7.3.8-2	12MI31 号孔 孔壁展開図	4.00~8.00mabh	7-187
図 7.3.8-3	13MI36 号孔 孔壁展開図	4.60~8.00mabh	7-193
図 7.3.8-4	12MI30 孔ステレオネット図	- 全不連続面-	7-199
図 7.3.8-5	12MI31 孔ステレオネット図	- 全不連続面-	7-202
図 7.3.8-6	13MI36 孔ステレオネット図	- 全不連続面-	7-205
図 7.3.8-7	全岩盤分離面の間隔分布		7-209
図 7.3.8-8	全岩盤分離面の深度-方位分布		7-210
図 7.3.8-9	全岩盤分離面の深度-傾斜分布		7-211
図 7.3.8-10	12MI30 号孔の詳細観察画像	(10.11m、N78W14N)	7-213
図 7.3.8-11	12MI31 号孔の詳細観察画像	(14.88m、N45W83SW)	7-219
図 7.3.8-12	13MI36 号孔の詳細観察画像	(14.58m、N23W88W)	7-225
図 7.3.9-1	間隙水圧モニタリング設置風景		7-231
図 7.3.9-2	設置後の間隙水圧モニタリング装置地上部		7-231
図 7.3.9-3	12MI30 号孔間隙水圧モニタリング装置の再設置孔内部構成図		7-232
図 7.3.9-4	12MI31 号孔間隙水圧モニタリング装置の再設置孔内部構成図		7-233
図 7.3.9-5	13MI36 号孔間隙水圧モニタリング装置の再設置孔内部構成図		7-234
図 7.3.9-6	13MI37 号孔間隙水圧モニタリング装置の再設置孔内部構成図		7-235
図 7.3.9-7	調査領域における隙水圧モニタリング区間の配置図		7-236
図 7.3.10-1	12MI30 号孔 間隙水圧モニタリング装置抜管までの水圧経時変化		7-238
図 7.3.10-2	12MI31 号孔 間隙水圧モニタリング装置抜管までの水圧経時変化		7-238
図 7.3.10-3	13MI36 号孔 間隙水圧モニタリング装置抜管までの水圧経時変化		7-239
図 7.3.10-4	13MI37 号孔 間隙水圧モニタリング装置抜管までの水圧経時変化		7-239
図 7.3.10-5	12MI30 号孔 間隙水圧モニタリング装置再設置後の水圧経時変化		7-240
図 7.3.10-6	12MI31 号孔 間隙水圧モニタリング装置再設置後の水圧経時変化		7-240
図 7.3.10-7	13MI36 号孔 間隙水圧モニタリング装置再設置後の水圧経時変化		7-241
図 7.3.10-8	13MI37 号孔 間隙水圧モニタリング装置再設置後の水圧経時変化		7-241
図 7.4.2-1	13MI36 号孔の総合地質柱状図		7-245
図 7.4.2-2	13MI37 号孔の総合地質柱状図		7-246

8章 図 目 次

図 8.3.2-1	粉末状岩石試料への吸着試験における上澄み液中 Cs または Sr 濃度の経時変化 (花崗岩)	8-9
図 8.3.2-2	粉末状岩石試料への吸着試験における上澄み液中 Cs または Sr 濃度の経時変化 (吉井砂岩)	8-10
図 8.3.2-3	粉末状岩石試料への吸着試験における上澄み液中 Cs または Sr 濃度の経時変化 (和泉砂岩)	8-10
図 8.3.2-4	ディスク状岩石試料への吸着試験における上澄み液中 Cs または Sr 濃度の経時変化 (花崗	

岩)	8-12
図 8.3.2-5 ディスク状岩石試料への吸着試験における上澄み液中 Cs または Sr 濃度の経時変化 (吉井砂岩)	8-12
図 8.3.2-6 ディスク状岩石試料への吸着試験における上澄み液中 Cs または Sr 濃度の経時変化 (和泉砂岩)	8-13
図 8.3.2-7 粉末状とディスク状試料における Cs・Sr 濃度の経時変化比較 (花崗岩)	8-14
図 8.3.2-8 粉末状とディスク状試料における Cs・Sr 濃度の経時変化比較 (吉井砂岩)	8-15
図 8.3.2-9 粉末状とディスク状試料における Cs・Sr 濃度の経時変化比較 (和泉砂岩)	8-15
図 8.4.1-1 粉末状試料における Cs・Sr 濃度の経時変化比較 (花崗岩)	8-17
図 8.4.1-2 カラム試験のカラム写真 (左) と試験系概念図 (右)	8-18
図 8.4.2-1 カラム試験における非吸着性トレーサー濃度と溶液量の関係	8-19
図 8.4.2-2 バッチ吸着試験における Cs・Sr 濃度経時変化とカラム試験時間の関係	8-19
図 8.4.2-3 カラム試験における流出溶液量と Cs 濃度の関係	8-20
図 8.4.2-4 カラム試験における流出溶液量と Cs 濃度の関係 (流速 0.05mL/min)	8-21
図 8.4.2-5 カラム試験における流出溶液量と Cs 濃度の関係	8-22
図 8.5.1-1 真空脱気操作の概念図	8-24
図 8.5.1-2 拡散試験に用いるセルの外観	8-24
図 8.5.1-3 低濃度拡散試験の試験系概念図	8-25
図 8.5.1-4 拡散試験の低濃度側セルにおける Br 濃度の経時変化	8-26
図 8.5.2-1 拡散試験の低濃度側セルにおける Cs 濃度の経時変化	8-27
図 8.5.2-2 拡散試験の低濃度側セルにおける Cs 濃度の経時変化	8-27
図 8.6.1-1 模擬トレーサー試験に用いた試験用カラム	8-29
図 8.6.1-2 模擬トレーサー試験の試験系	8-30
図 8.6.2-1 模擬トレーサー試験における滴下量と Cs および重水濃度の関係 (流速 1.0mL/min)	8-31
図 8.6.2-2 模擬トレーサー試験における滴下量と Sr および重水濃度の関係 (流速 1.0mL/min)	8-31
図 8.6.2-3 模擬トレーサー試験における滴下量と Cs および重水濃度の関係 (流速 0.1mL/min)	8-32
図 8.6.2-4 模擬トレーサー試験における滴下量と Sr および重水濃度の関係 (流速 0.1mL/min)	8-32

9章 図 目 次

図 9.3.1-1 本研究で調査した物質	9-2
図 9.3.1-1 トリチウム濃度の経時変化	9-4
図 9.3.1-2 フロンガス濃度の経時変化 (Plummer et al., 2006)	9-5
図 9.3.1-3 圧力制御サンプリングの概念図 (Andrews et al., 1989)	9-9
図 9.3.1-4 原位置平衡式サンプラーの概念図 (Seldom et al., 2003)	9-9

図 9.3.2-1	瑞浪地域の地下水における He 年代と有機 ^{14}C 年代の関係 (富岡ら 2007 に加筆)	9-11
図 9.3.2-2	$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ の経時変化	9-13
図 9.3.2-3	^{36}Cl 放射平衡値の解析的予測と実測値の比較 (Phillips, 1999 に加筆)	9-14
図 9.3.2-4	Ba 処理前後溶液の IC クロマトグラムの比較	9-18
図 9.3.2-5	各処理後の TOC 濃度の比較	9-20
図 9.3.2-6	濃縮液の 3 次元蛍光スペクトル	9-20
図 9.3.2-7	各処理後の蛍光ピーク強度の変化	9-21
図 9.3.2-8	DAX 樹脂に吸着しなかった有機物成分の三次元蛍光スペクトル	9-23
図 9.3.2-9	水酸化ナトリウム溶液で抽出された有機物成分の三次元蛍光スペクトル	9-23
図 9.3.2-10	サイズ排除クロマトグラフィの校正曲線	9-25
図 9.3.2-11	サイズ排除クロマトグラフィ測定結果 (有機物濃縮液)	9-26
図 9.3.2-12	サイズ排除クロマトグラフィ測定結果 (透析後)	9-26
図 9.3.2-13	二酸化炭素回収用反応容器	9-29
図 9.3.2-14	二酸化炭素回収試験の試験系	9-29
図 9.3.2-15	二酸化炭素回収試験における溶液中無機炭素濃度の経時変化	9-30
図 9.3.2-16	閉鎖空隙の概念図 (Evbuomwan, 2009)	9-32
図 9.3.2-17	カラム試験の実験系の外観	9-35
図 9.3.2-18	浸漬回数と溶液中 Cl 濃度の関係	9-37
図 9.3.2-19	閉鎖空隙とそれ以外の空隙から抽出した Cl 量の比較	9-37
図 9.3.2-20	塩酸滴下時のカラム流下液中 Sr 量 (溶液①)	9-40
図 9.3.2-21	塩酸滴下時のカラム流下液中 Sr 量 (溶液②)	9-40
図 9.3.2-22	Sr Resin における硝酸濃度と選択係数の関係 (Horwitz et al., 1992-a, b)	9-42
図 9.4.1-1	採水地点位置図 (日本原子力研究開発機構 (2014) に加筆)	9-57
図 9.4.1-2	12MI30&31 号の区間と湧水量 (300m ボーリング横坑)	9-58
図 9.4.1-3	希ガス採取システムの概念図と銅管	9-62
図 9.4.1-4	ボトルへの採水状況	9-67
図 9.4.1-5	希ガス採取状況	9-67
図 9.4.1-6	若い地下水の指標となる物質の深度分布	9-74
図 9.4.1-7	^3H と CFC-12、 SF_6 から算出した浅層水混合率の比較	9-75
図 9.4.1-8	地下水年代指標 (^{14}C 、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ 、 ^4He) の深度分布	9-77
図 9.4.2-1	幌延深地層研究所における採水地点	9-78
図 9.4.2-2	孔内部・調査坑道部の循環ライン	9-80
図 9.4.3-3	先行ボーリングと立坑内ボーリングの保存性物質の調査結果の比較	9-84
図 9.4.3-4	先行ボーリングと立坑内ボーリングの地下水年代指標の調査結果の比較	9-85

< 表 目 次 >

1 章 表 目 次

表 1.3.2-1 研究工程 1-3

2 章 表 目 次

表 2.2.3-2 耐圧試験結果の一覧表 2-7
表 2.3.2-1 無脈動ポンプの回転数設定値と吐出量 2-18
表 2.4.3-1 蛍光センサー 1、2 の検量線 2-24
表 2.4.4-1 ポイント希釈試験の試験条件 2-25
表 2.4.4-2 単孔注水揚水試験の試験条件 2-29

3 章 表 目 次

表 3.3.1-1 透水量係数場の発生に使用した統計量 3-18
表 3.3.1-2 解析に使用した溶質移行特性値 3-19
表 3.3.1-3 解析ケース 3-23
表 3.3.2-1 最適なフィッティング結果に使用された物質移行パラメータの値 3-29

4 章 表 目 次

表 4.1-1 単孔式トレーサー試験・孔間式トレーサー試験の概要 4-1
表 4.3.2-1 Nordqvist (2008) で用いられている評価パラメーター 4-9
表 4.4.2-1 割れ目モデルによる感度解析の解析条件 4-17
表 4.4.2-2 動水勾配の感度解析における共通パラメーター 4-22
表 4.4.2-3 割れ目幅の感度解析における共通パラメーター 4-23
表 4.4.2-4 透水量係数の感度解析における共通パラメーター 4-24
表 4.4.2-5 待機時間の感度解析における共通パラメーター 4-25
表 4.4.2-6 縦分散長の感度解析における共通パラメーター 4-26
表 4.4.2-7 遅延係数の感度解析における共通パラメーター 4-27
表 4.4.3-1 複合モデルによる感度解析の共通パラメーター 4-29
表 4.4.3-2 複合モデルによる感度解析の解析条件 4-31
表 4.4.4-1 不均質モデルによる感度解析の共通パラメーター 4-36
表 4.4.5-1 ラドン濃度の感度解析における共通パラメーター 4-48
表 4.4.5-2 ラドン濃度による割れ目幅の算定結果 4-49

5 章 表 目 次

表 5.4.1-1 試験岩石の主要元素 5-4
表 5.4.1-2 ウラン、トリウムの含有量 5-4
表 5.4.1-3 試料の放射能分析結果 5-10
表 5.4.1-4 花崗岩、泥岩の放射能分析 (参考) 5-10

表 5.4.1-5	試料の間隙率、密度測定結果	5-11
表 5.4.1-6	比表面積測定結果	5-12
表 5.4.1-7	細孔分布測定結果	5-13
表 5.4.2-1	ラドンフラックスの測定結果	5-16

6章 表 目 次

表 6.2.2-1	撮影装置の主な仕様	6-5
表 6.2.4-1	デジタルカメラの設定	6-12
表 6.2.4-2	撮影条件	6-12
表 6.2.6-1	割れ目開口幅の統計	6-40
表 6.2.6-2	割れ目内のガウジ幅の統計	6-41
表 6.3.1-1	本研究で用いたレジンの性状 (試験温度: $23 \pm 2^\circ\text{C}$)	6-43
表 6.3.3-1	可使時間の測定結果	6-47
表 6.4.4-1	レジン充填幅の統計	6-72

7章 表 目 次

表 7.2.3-1	主要ボーリング機材一覧表	7-8
表 7.2.3-2	分光蛍光光度計 (日立 F-2500) の仕様	7-21
表 7.2.3-3	キャリパー検層装置の性能一覧表	7-27
表 7.2.3-4	フローメータ検層装置の性能一覧表	7-28
表 7.2.3-5	BTV カメラの性能一覧表	7-28
表 7.2.3-6	透水試験使用機器一覧表	7-32
表 7.2.3-7	モノポンプの仕様	7-34
表 7.2.3-8	透水試験の名称と試験内容	7-35
表 7.2.3-9	高精度 BTV 検層数量	7-49
表 7.2.3-10	計測機器一覧	7-54
表 7.3.1-1	全体工程表	7-57
表 7.3.2-1	13MI36 号孔の仕様	7-58
表 7.3.2-2	13MI36 号孔掘削時孔口湧水量測定結果	7-63
表 7.3.2-3	13MI36 号孔 孔曲がり検層結果	7-77
表 7.3.2-4	13MI36 号孔のフローメータ検層結果一覧	7-79
表 7.3.2-5	13MI36 号孔単項式透水試験の結果	7-85
表 7.3.2-6	13MI36 号孔透水試験結果一覧表	7-86
表 7.3.2-7	12MI30 号孔、12MI31 号孔への圧力応答結果一覧表	7-86
表 7.3.3-1	13MI37 号孔の仕様	7-104
表 7.3.3-2	13MI37 号孔掘削時孔口湧水量測定結果	7-109
表 7.3.3-3	13MI36 号孔 孔曲がり検層結果	7-124
表 7.3.4-1	ポイント希釈試験の実施区間	7-131

表 7.3.4-2	ポイント希釈試験結果	7-132
表 7.3.4-3	ウラン置換時間、ウラン濃度グラフの傾き	7-143
表 7.3.8-1	各孔の全岩盤分離面、割れ目、開口割れ目計測結果	7-180
表 7.3.8-2	各孔の全岩盤分離面、割れ目、開口割れ目の主な卓越方向	7-198
表 7.3.8-3	各孔の全岩盤分離面の集中箇所とその主な方向	7-208
表 7.3.8-4	開口割れ目の開口幅の計測結果の一覧	7-212
表 7.3.8-1	各孔の全岩盤分離面、割れ目、開口割れ目計測結果	7-180
表 7.3.8-2	各孔の全岩盤分離面、割れ目、開口割れ目の主な卓越方向	7-198
表 7.3.8-3	各孔の全岩盤分離面の集中箇所とその主な方向	7-208
表 7.3.8-4	開口割れ目の開口幅の計測結果の一覧	7-212

8章 表 目 次

表 8.2.1-1	比表面積の測定結果	8-3
表 8.2.2-1	粉末状試料における CEC の測定結果	8-5
表 8.2.2-2	ディスク状試料における CEC の測定結果	8-6
表 8.3.1-1	バッチ式吸着試験における初期セシウムおよびスロトロンチウム濃度条件のまとめ	8-8
表 8.3.2-1	バッチ式吸着試験における初期セシウムおよびスロトロンチウム濃度条件のまとめ	8-11
表 8.4.1-1	カラム試験条件のまとめ	8-17

9章 表 目 次

表 9.3.2-1	処理前後の溶液中イオンおよび TOC 濃度の測定結果	9-19
表 9.3.2-2	二酸化炭素回収試験における回収率まとめ	9-30
表 9.3.2-3	二酸化炭素回収試験における回収率まとめ	9-35
表 9.3.2-4	カラム処理結果の一例（リッチモンドフッ化水素酸処理）	9-36
表 9.3.2-5	Sr 回収率の結果まとめ	9-43
表 9.3.2-6	Sr 精製処理試験の結果	9-43
表 9.3.2-7	Sr 逐次抽出試験の結果まとめ	9-45
表 9.3.2-8	Sr 単離操作のまとめ	9-46
表 9.3.2-9	共存イオン濃度低減処理・単離処理の結果まとめ	9-46
表 9.3.2-10	Cl 拡散試験条件	9-50
表 9.3.2-11	Br 拡散試験条件	9-52
表 9.4.1-1	採水項目と採取目的および取得量	9-60
表 9.4.1-2	原位置計測結果	9-65
表 9.4.1-3	採水結果	9-66
表 9.4.1-4	瑞浪超深地層研究所における地下水の分析結果	9-68
表 9.4.2-1	採取地点一覧	9-79
表 9.4.2-2	原位置計測結果	9-80
表 9.4.2-3	地下水試料の採取状況	9-81

表 9.4.2-4 地下水の分析結果 9-81

1. 研究概要

1.1 本研究の背景

高レベル放射性廃棄物を地層処分する際の天然バリアの性能評価においては、人工バリアから漏出した放射性核種が地下水を輸送媒体として生物圏へ移動するといういわゆる「地下水シナリオ」が、重要なシナリオとなる。そのため、処分施設建設地点の岩盤における物質の移動特性を精度良く把握することが重要となる。

岩盤中での物質の移動特性を直接的に測定する手法として、トレーサ物質を含む溶液を岩盤に投入し、岩盤内でのトレーサの移動量および移動速度を計測するトレーサ試験がある。わが国においては、従来非収着性のトレーサ物質を用いた試験研究はわずかながら行われている（池川ら、1996）。しかし、多くの放射性物質にみられるような収着性を有するトレーサ物質を使用したトレーサ試験が原位置の岩盤を対象として実施された例は、海外では若干あるものの、わが国ではほとんどない（例えば、Winberg et al., 2000：核燃料サイクル開発機構、1999）。そのため、特に収着性物質の岩盤中での移動特性を精度良く把握するためのトレーサ試験技術およびその評価技術を開発しておく必要がある。

また、亀裂を有する岩盤においては、地下水は岩石基質部に比べて透水性の高い割れ目を主に選択的に流れていく。そのような岩盤中での物質の移動には、割れ目や岩石基質部の様々な幾何形状・化学特性が関与している。これらの特性値のうち、特に割れ目の幾何形状に関しては、トレーサ試験の結果を解釈する上で不可欠なものである。そこで、トレーサ試験を補完するために、割れ目の分布や開口幅、割れ目内での流動形態等を推定する技術の開発も必要である。

1.2 目的

本研究においては、高レベル放射性廃棄物地層処分の天然バリア性能評価に資するため、岩盤中での特に割れ目を介した物質移動特性を高精度に調査・評価する技術の確立を図る。

1.3 全体計画

1.3.1 研究の内容

本研究においては、岩盤中での特に割れ目を介した溶質移行特性を高精度に調査・評価する以下の技術の開発・確立を行い、原位置試験により国内の地質環境に対する適用性を実証する。

① トレーサ試験技術

岩盤中での地下水溶質の移行特性を直接的に測定する手法として、原位置トレーサ試験技術を開発する。具体的には、放射性核種の多くは岩盤へ収着する性質を有するため、収着性トレーサも使用可能な原位置試験装置の開発を行う。また、地下水溶質の移行には様々なパラメータが関与するため、

トレーサ試験の結果から、それらのパラメータの値を同定する手法も併せて開発する。特に、これまで開発してきた孔間でのトレーサ試験技術に加えて単孔でのトレーサ試験技術についても開発する。

② 各種割れ目探査技術

トレーサ試験を補完する技術として、溶質の主な移行経路となる岩盤割れ目の幾何形状を推定するための割れ目探査技術についても併せて開発する。具体的には、溶存 Rn 濃度計測による割れ目開口幅の調査技術、高粘性流体注入による割れ目内での流動形態に関する調査技術、レジン（樹脂）注入による割れ目の可視化技術を開発する。

③ 天然トレーサによる調査技術

比較的狭いスケールでの調査となるトレーサ試験を補間するために、天然に存在する物質をトレーサとみなした物質移行特性の評価技術の開発を行う。具体的には、立坑掘削時の地下水の水質・地下水年代などの変化、地下水と岩石の相互作用などから、物質移行パラメータを求める技術を開発する。

1.3.2 研究工程

平成 17～24 年度の前フェーズでは、トレーサ試験技術について、収着性トレーサの使用も可能な原位置試験装置を試作するとともに、試験結果から割れ目の開口幅や分散長等の溶質移行パラメータを同定する評価手法を開発した。また、トレーサ試験を補完する割れ目探査技術として、割れ目内地下水の溶存ラドン濃度と岩石表面のラドンフラックスから割れ目開口幅を推定する技術、高粘性流体の注入により流れの次元や割れ目の開口幅を評価する技術、物理探査（音響トモグラフィ）により割れ目分布を調査する技術についても、原位置試験装置を試作するとともに、試験手法および試験結果の評価手法の基本的な整備を終了した。そして、割れ目の分布が比較的単純なスイスの Grimsel Test Site において適用性試験を実施し、これら試験・探査技術の有効性を示した。

今年度から始まるフェーズでは、研究期間を平成 25 年度より平成 29 年度の 5 ヶ年とし、1.3.1 に示した①トレーサ試験技術、②各種割れ目探査技術、③天然トレーサ調査技術について開発・高度化を行うとともに、国内の試験場において原位置試験を行い、我が国の地質環境に対する適用性を実証する。

今フェーズの研究工程を表 1.3.2-1 に示す。

表 1.3.2-1 研究工程

事業項目	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度	
トレーサ試験技術の高度化	単孔式・孔間トレーサ試験技術					
割れ目探査技術の高度化	ラドン濃度計測試験技術					
	高粘性流体注入試験技術					
国内の地下環境への適用	割れ目可視化技術					
	(深度300m)	試験場の地質環境調査			(深度500m)	
	単孔式・孔間トレーサ試験					
	室内収着・拡散試験					
	トレーサ試験予測解析		トレーサ試験評価解析			
			ラドン濃度計測試験			高粘性流体注入試験
天然トレーサを利用した調査技術の開発	樹脂注入試験					
	採水方法の検討			幌延・瑞浪での採水		
	評価指標の調査		評価方法の検討			評価方法の提案
物質移行評価手法の体系化						

※ 装置・手法の改良は原位置試験とインタラクティブに実施

1.4 本年度の実施概要

1.4.1 トレーサ試験技術の開発

トレーサ試験のためのボーリング孔内装置について、送水チューブ内でトレーサが分散し試験区間への注入濃度が不均一になるのを防ぐため、試験区間の直前でトレーサを一定濃度で循環させるシステムを構築し、その結果に基づき孔内装置に設置可能な循環バルブ収納部を設計・試作する。そして、試作した装置の室内性能試験を実施し性能を確認する。

また、単孔式トレーサ試験技術にこれまで開発してきた割れ目探査技術を組み合わせ、割れ目の物質移行特性を簡便に推定する手法を検討する。また、数値シミュレーションにより開発した手法の有効性を確認する。

1.4.2 各種割れ目探査技術の開発

トレーサ試験技術を補完する各種割れ目探査技術のうち今年度はラドン濃度計測による割れ目調査技術について、以下の項目を実施する。

国外の岩盤で適用実績のあるラドンを用いた割れ目特性調査技術の国内の岩盤調査への適用性を把握するため、国内の岩石を用いたラドンの水への室内溶解試験を実施し、岩石表面からのラドンフラックスを測定する。また、ラドン等で推定した割れ目間隙を樹脂などにより可視化する手法を開発するため、樹脂を注入した岩石の充填間隙の分析を行う。

1.4.3 原位置での実証

(1) 適用性試験場の地質環境調査

日本国内の地下の適用性試験場において、ボーリング孔を掘削し、そのボーリング孔を利用して地質環境調査（コア観察、BTV検層、フローメータ検層、間隙水圧計測、透水試験等）を実施する。得られた調査結果から、試験場の地質環境特性を岩盤の不均質性について、地質・地質構造と水理の観点から整理する。

(2) 予備試験

「岩盤中地下水移行評価技術高度化開発」事業で開発した原位置トレーサ試験装置を用い、試験場周辺岩盤の自然状態（注水・揚水を行わない状態）の下で、単孔式トレーサ試験の一種であるポイント希釈試験を実施する。また、ボーリング孔掘削により取得した岩石コアを用いて室内収着試験を実施し、トレーサ物質の岩盤に対する収着特性（分配係数）に関するデータを取得する。

(3) 予備解析

(1)、(2)の結果に基づき、孔間トレーサ試験の試験条件（トレーサ注入孔・回収孔の配置、注入・揚水流量の設定、試験時間等）を設定するための予備解析を実施する。

1.4.4 天然のトレーサを利用した調査技術の開発

(1) 地下の適用性試験場における岩石・地下水調査

広域的な物質移行特性の評価に資するため、地下の適用性試験場のボーリング孔などにおいて、地下水や岩石を採取する。採取した地下水の主要溶存イオン、微量元素、同位体、希ガス、岩石の主要鉱物、微量元素などを計測する。

(2) 天然トレーサの調査

地下での坑道掘削による地下水流動の変化などを利用し、物質移行特性を評価する際に有効と考えられる物質・同位体について網羅的に調査する。また、有望と考えられる物質について、室内試験を実施し、そのメカニズムや変化の定量方法を調査する。

参考文献

池川洋二郎、志田原巧、中川加明一郎、日比野敏(1996)：液体トレーサーによる不連続性岩盤中の浸透経路評価，電力中央研究所研究報告 U96006.

Winberg, A., Andersson, P., Hermanson, J., Byegård, J., Cvetkovic, V., and Birgersson, L. (2000) : Äspö Hard Rock Laboratory. Final report of the first stage of the tracer retention understanding experiments, SKB Technical Report TR-00-07.

核燃料サイクル開発機構(1999)：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次とりまとめ－，分冊1 わが国の地質環境，pp. IV-102-104.

2. 原位置トレーサー試験装置の試作

2.1 はじめに

本研究では、平成 17 年度より収着性トレーサーの使用も可能な原位置トレーサー試験装置の開発を行い、平成 20～22 年度には割れ目の分布が比較的単純なスイス Nagra の Grimasel Test Site において適用性試験を行い、試験装置が良好に機能することを確認した。平成 26 年度以降は日本国内での適用性試験を計画しており、我が国の地質環境への対応を可能とするための装置の改良を重ねている。本年度は、坑道内装置から試験孔内への送水チューブ内でのトレーサー溶液の分散を抑制するための循環バルブの試作と孔内装置への組み込み、揚水装置側の無脈動ポンプの試作を行った。

試験装置全体の中での改良部を、図 2. 1-1 のトレーサー試験装置概念図に示す。

2.2 トレーサー循環バルブの試作および孔内装置への実装

2.2.1 トレーサー循環バルブの概要

従来のトレーサー注入方式では、地上のトレーサー置換タンクから往復約 100 m のチューブを用いて孔内部の試験区間へトレーサーを注入していた。トレーサーをチューブや装置の内部を送水する際には、トレーサーとチューブや装置の内壁との摩擦により、トレーサーの流速に内壁付近と中心付近で速度差が生じていた。この速度差はトレーサー濃度を散逸させる原因である。さらに、トレーサー濃度の散逸は、チューブ長が長いほど、大きく影響を受ける。

従来の注入方式では送水経路長が長いこと、理想的なパルス状のトレーサー注入(図 2. 2. 1-1(a))ができず、注入経路におけるトレーサー濃度の散逸により、トレーサー濃度に緩やかな釣り鐘状の時系列変化(図 2. 2. 1-1(b))が認められた。このトレーサー濃度の緩やかな時系列変化は、試験結果の精度や計測範囲を低下させる要因であった。

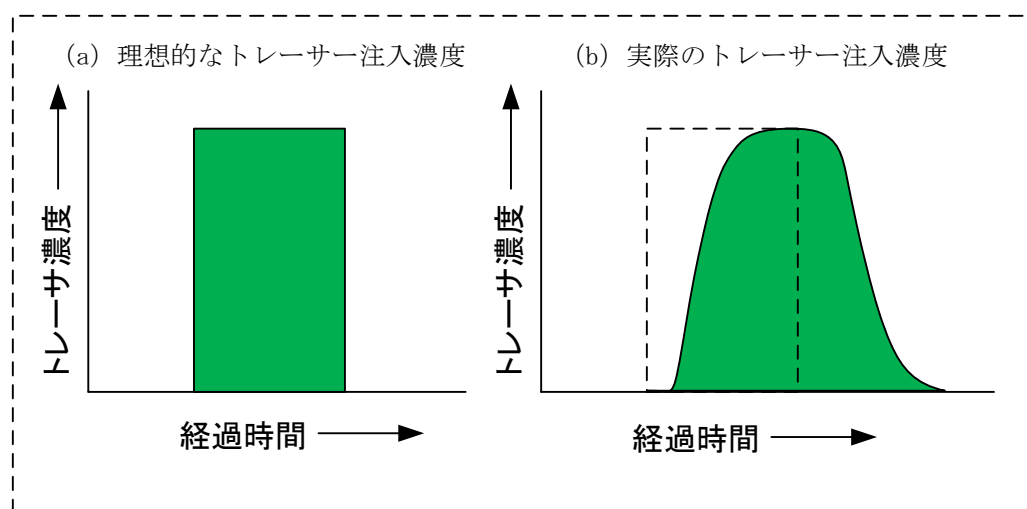


図 2. 2. 1-1 従来の注入方式におけるトレーサー濃度の状態

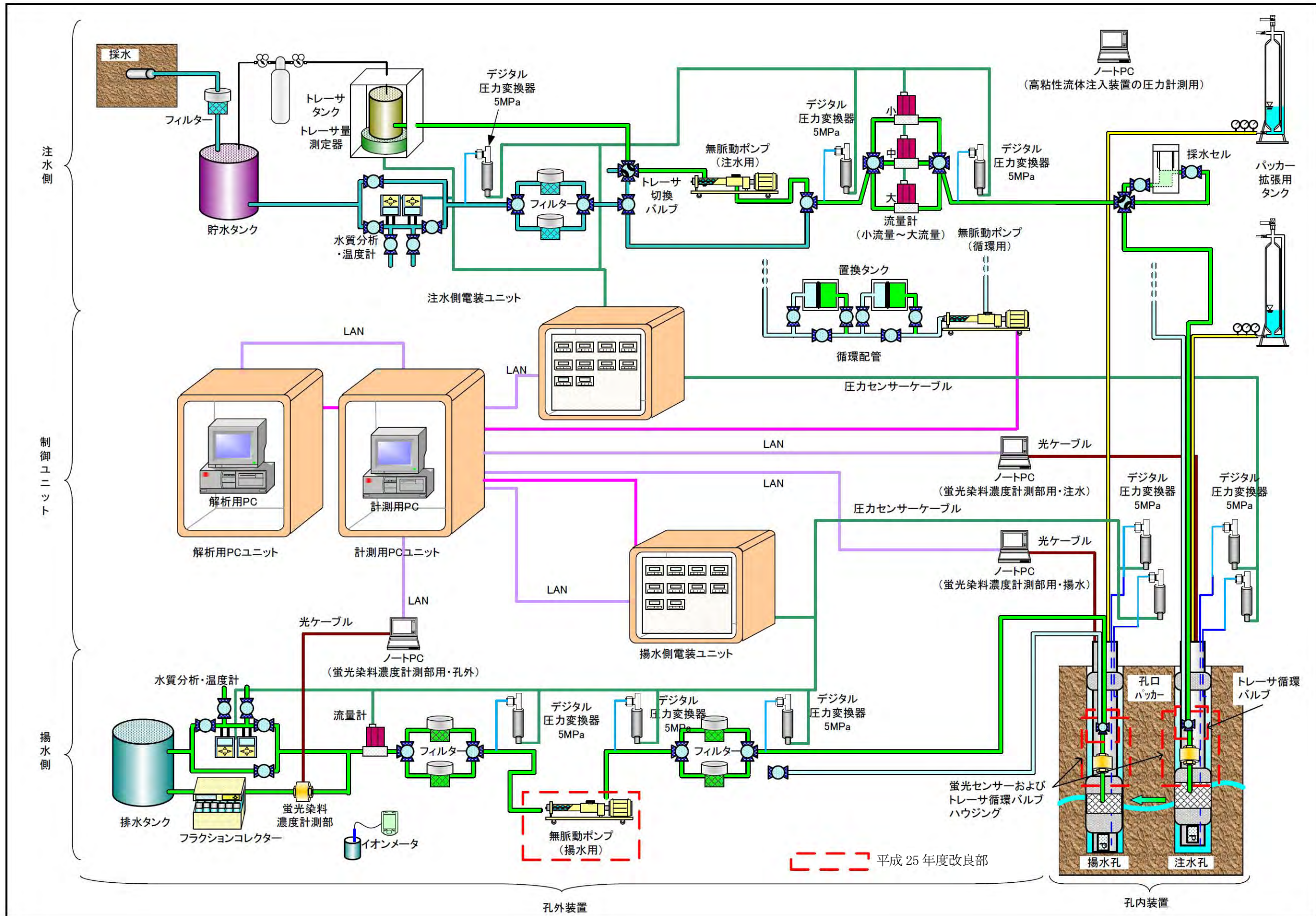


図 2.1-1 トレーサー試験装置概念図と平成 25 年度改良部

そこで、トレーサー濃度の散逸を低減させるため、トレーサー注入の経路長を可能な限り短縮することを目的に孔内装置部内にバルブを設けチューブ長に影響されないトレーサー循環バルブを試作した(図 2.2.1-2)。トレーサー循環バルブの適用例を図 2.2.1-3 に、試作設計図を図 2.2.1-4 に、試作器を図 2.2.1-5、図 2.2.1-6 に示す。なお、バルブ内部の研磨方法として溶解研磨法を採用した。

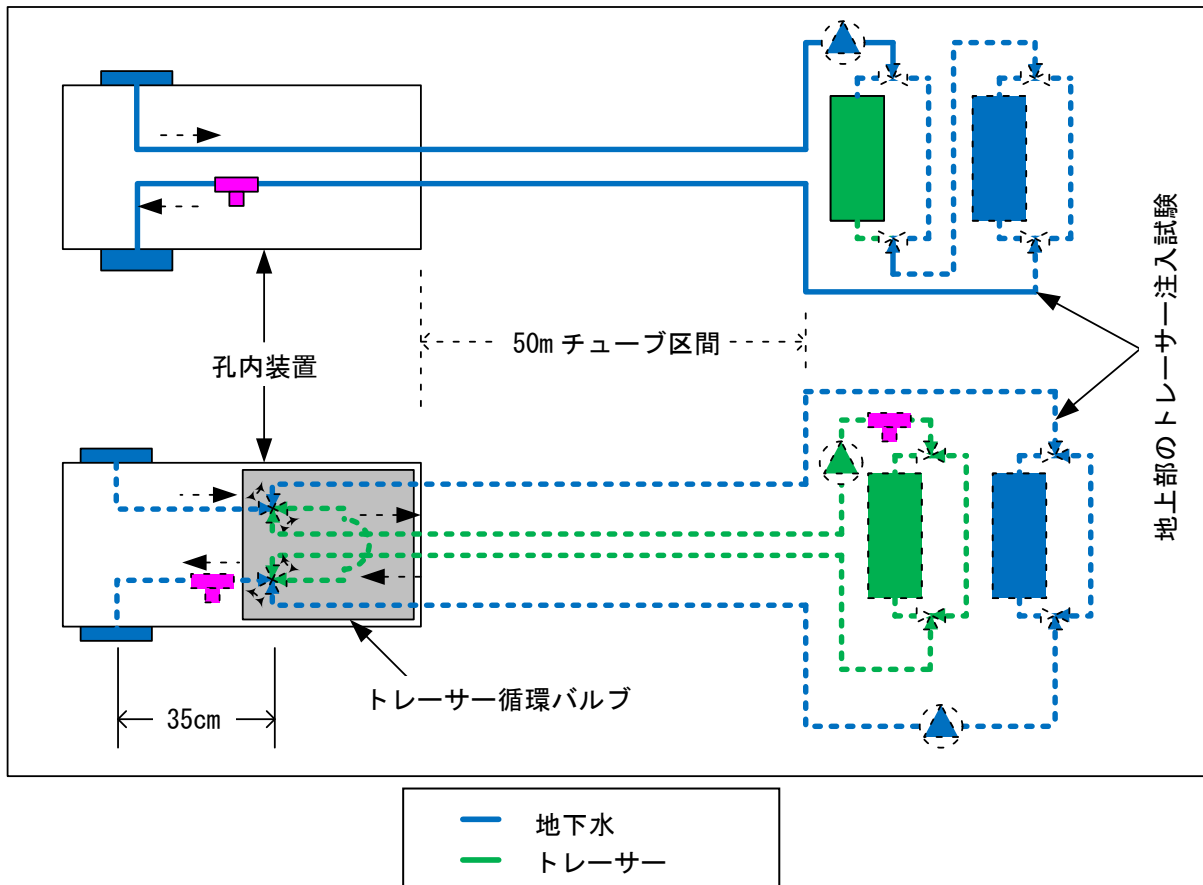
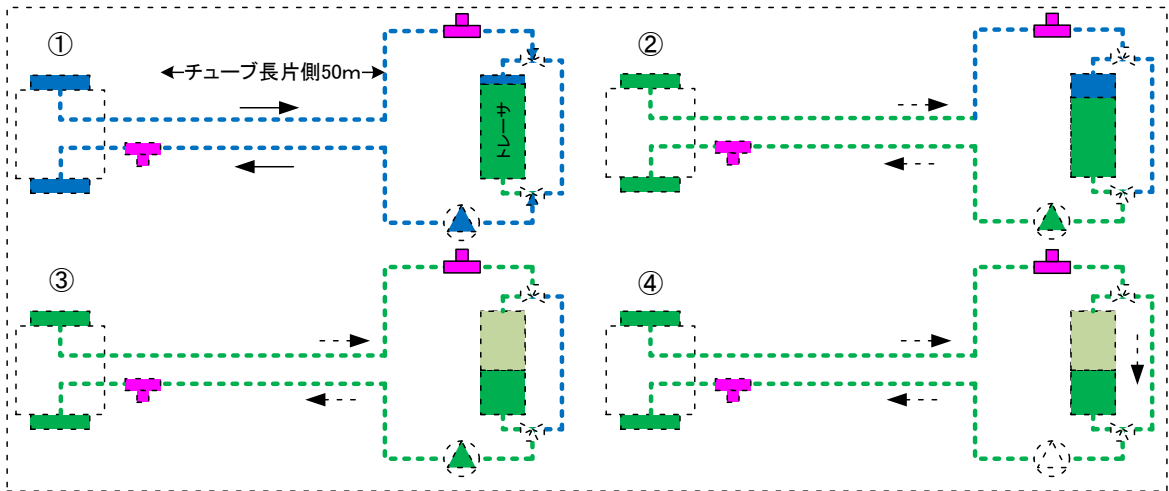
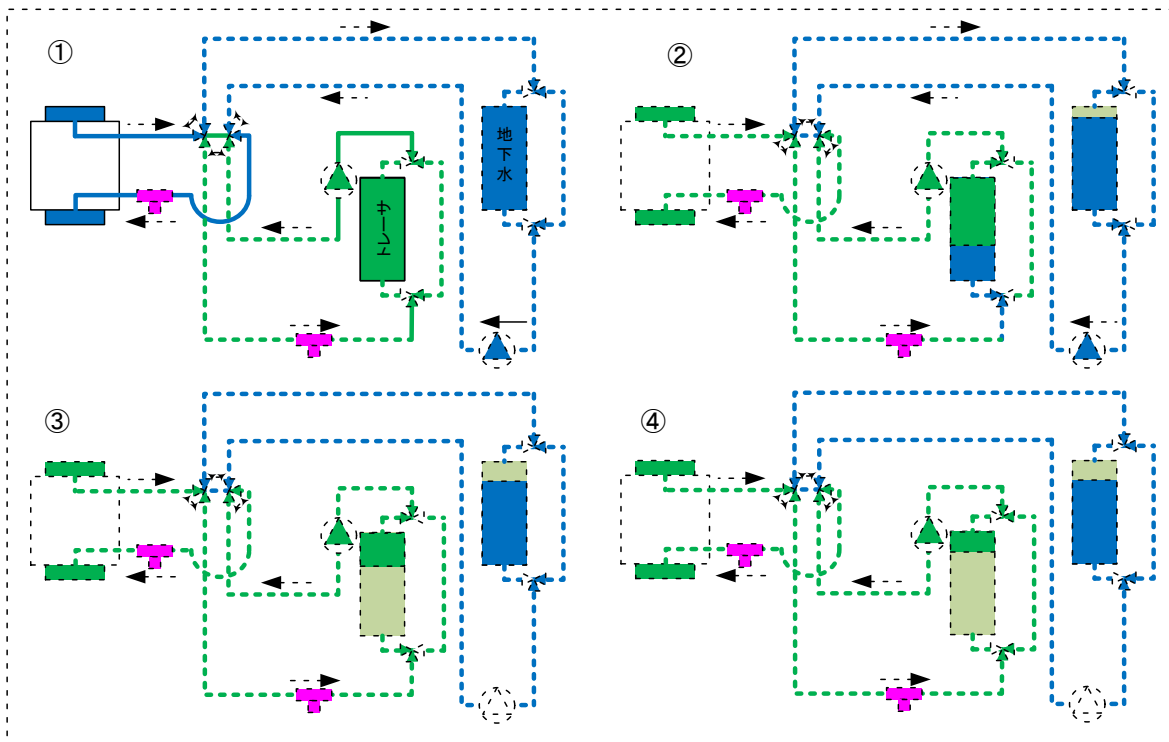


図 2.2.1-2 トレーサー溶液の流路図 (上図：従来の流路、下図：循環バルブによる流路)

従来型のポイント希釈試験



循環バルブを使用したポイント希釈試験の例



- ① 地下水の循環
- ② トレーサーとの置換開始(循環バルブ切替え)
- ③ トレーサーとの置換完了
- ④ ポイント希釈試験開始

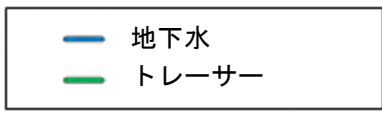


図 2.2.1-3 トレーサー循環バルブの適用例

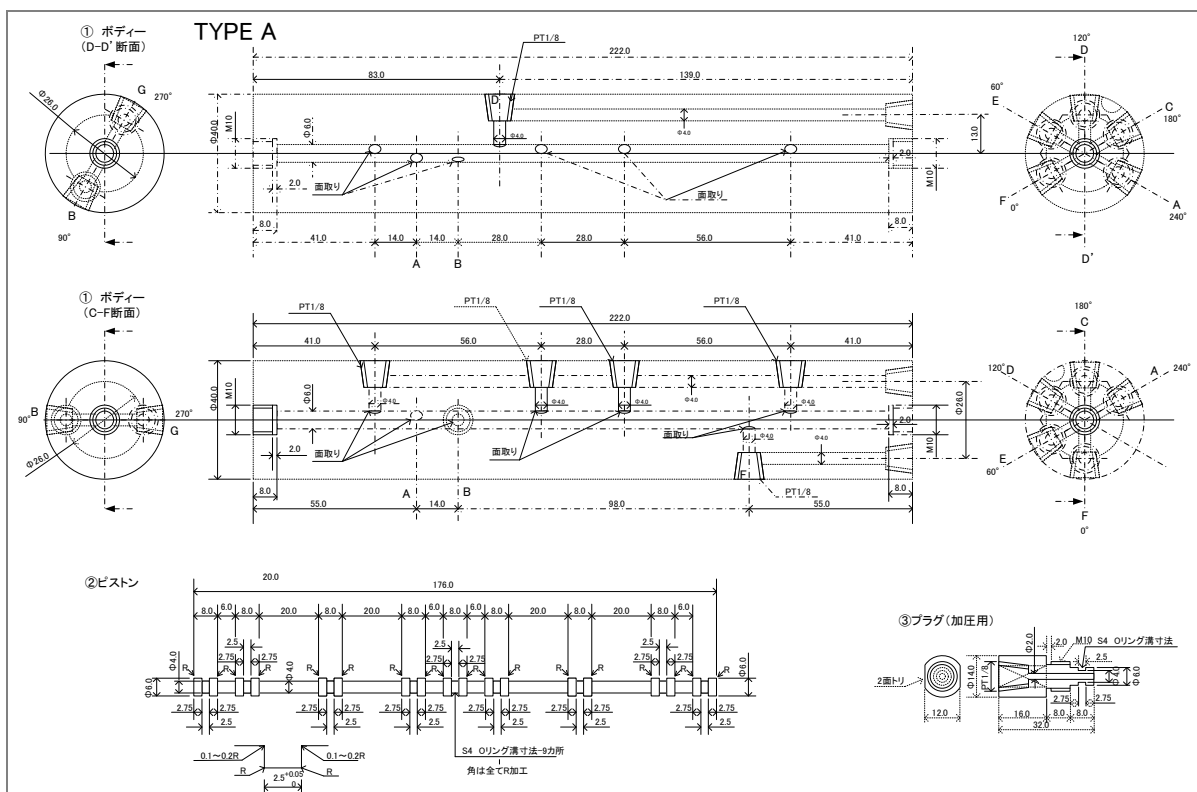


図 2.2.1-4 トレーサー循環バルブの試作設計図



図 2.2.1-5 トレーサー循環バルブの試作器 (溶解研磨加工時)



図 2.2.1-6 トレーサー循環バルブの試作器 (実験時)

2.2.2 基本動作確認試験

2.2.2.1 試験方法

トレーサー循環バルブ内に実装したピストンを水圧で移動させたとき、トレーサー循環バルブの外套部とピストンの相対位置によって循環流路は2つのパターンが形成される。この流路のパターンを流路①、②と称する。さらにトレーサー循環バルブのポートが6か所設けられており、各ポートをA～Gと称する。流路①、②のそれぞれについて、流路の片側のポートから水を手押しポンプで送水したときに、水が出てきたポートを確認して、入出力の対応をA～Gまでの計6ポートについて検査した。

2.2.2.2 試験結果

流路は設計通りA～Gポートを出入口とする計6流路において、正常に切り替わることを確認した。また、流路切替を計500回以上繰り返し、50回程度ごとにポート間の漏洩がないことを確認した。

図2.2.2-1に流路切替とポート接続の状況を示す。試験状況を図2.2.2-2に示す。

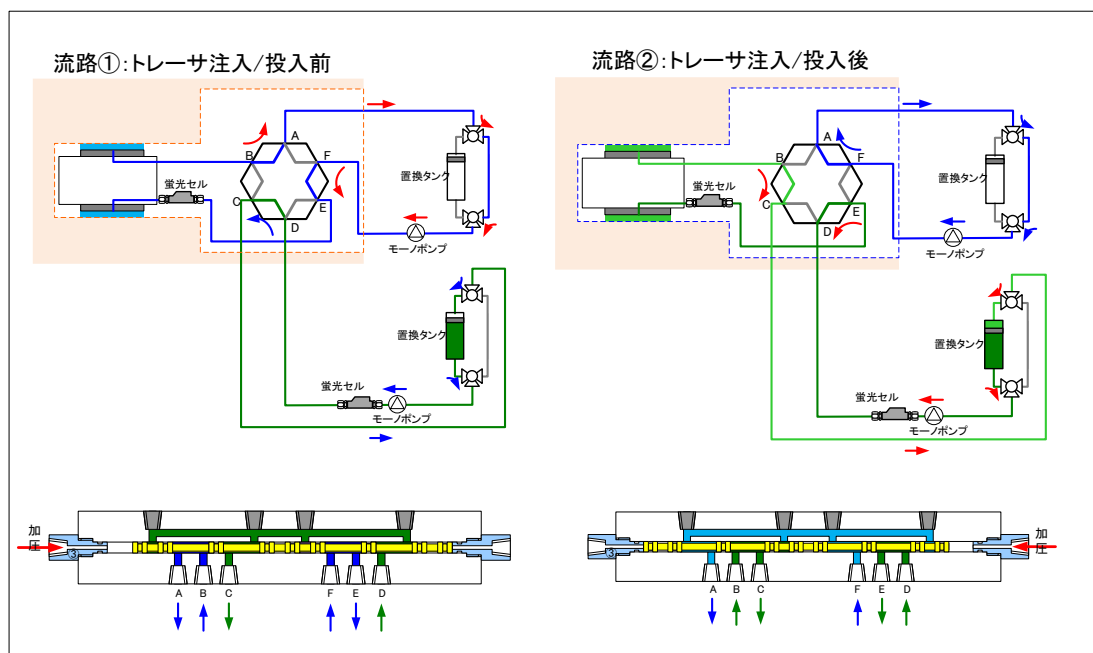


図 2.2.2-1 流路切替とポート接続の状況



図 2.2.2-2 基本動作確認試験状況

2.2.3 耐圧試験

2.2.3.1 試験方法

トレーサー循環バルブに手押しポンプで各流路にそれぞれ水圧をかけたときの耐圧を調査した。

各流路における 5 MPa の耐圧を確認した。試験対象となる流路の片側から手押しポンプで送水し、流路の端部をプラグにより止水して、流路に水圧により 5 MPa 加圧したときに、加圧後から 30 分以上にわたり、5 MPa 以上を保持することを確認した。また、より過酷な条件で耐圧性能を確認するために、試験対象以外の流路は大気解放の状態を実施した。図 2.2.3-1 に試験方法の概要を示す。

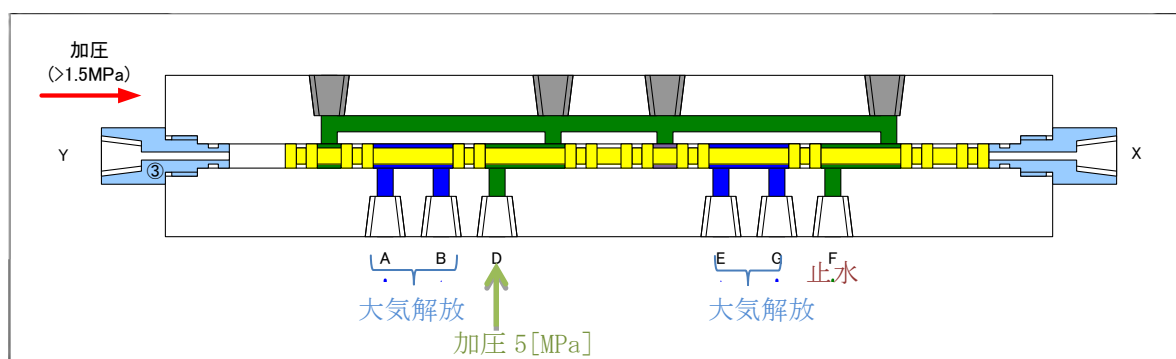


図 2.2.3-1 耐圧試験の概要

2.2.3.2 試験結果

全 6 流路において 5 MPa の耐圧を有することを確認した。耐圧試験結果の一覧表を表 2.2.3-1 に、試験状況を図 2.2.3-2 に、試験データを図 2.2.3-3～図 2.2.3-8 に示す。

表 2.2.3-1 耐圧試験結果の一覧表

経路①	耐圧	経路②	耐圧
A-E	5MPa	A-B	5MPa
B-D	5MPa	D-F	5MPa
F-G	5MPa	E-G	5MPa



図 2.2.3-2 耐圧試験状況

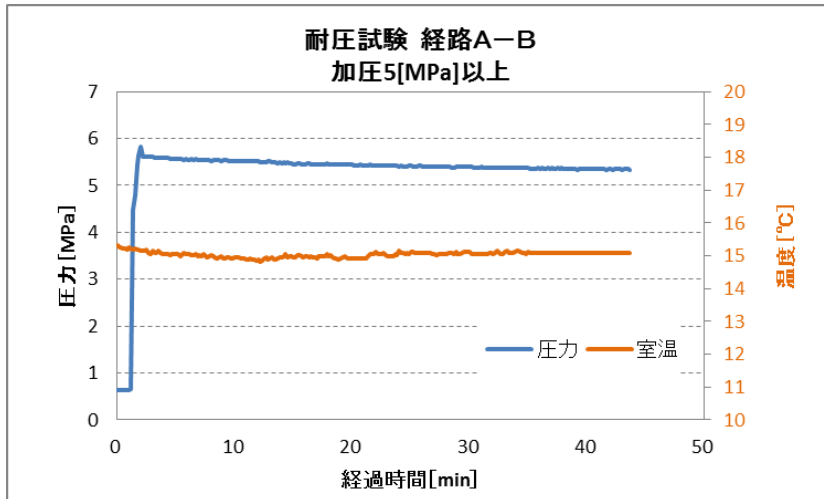


図 2.2.3-3 耐圧試験データ(経路A-B)

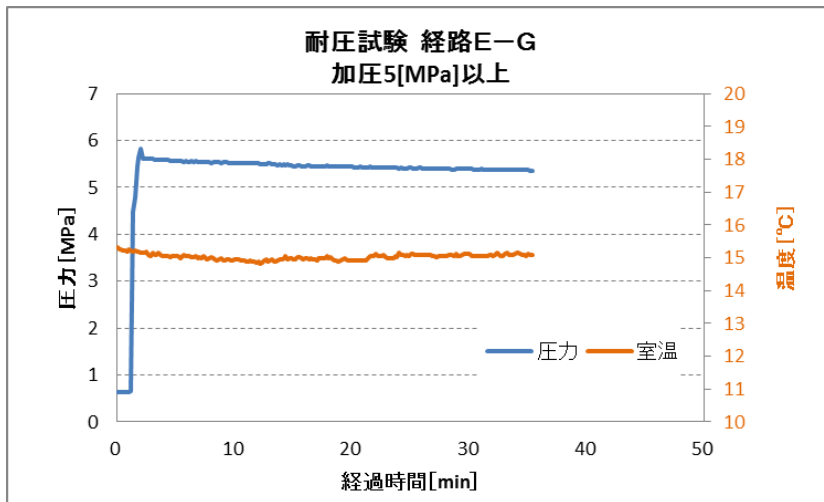


図 2.2.3-4 耐圧試験データ(経路E-G)

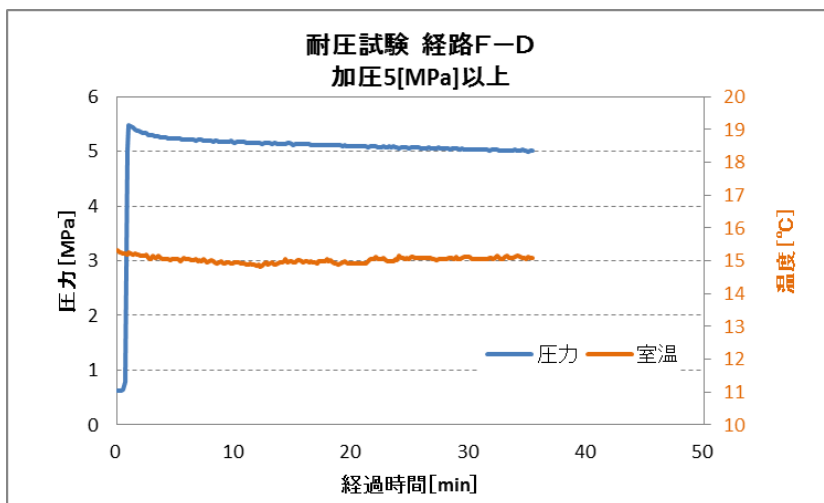


図 2.2.3-5 耐圧試験データ(経路F-D)

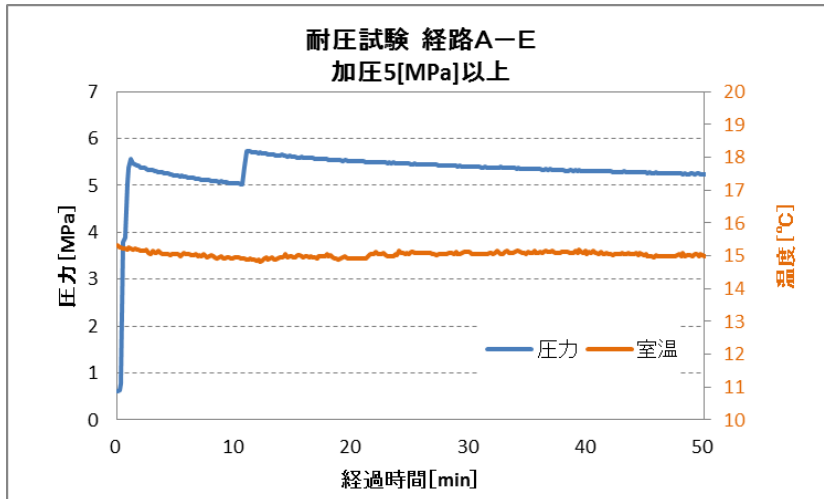


図 2.2.3-6 耐圧試験データ(経路A-E)

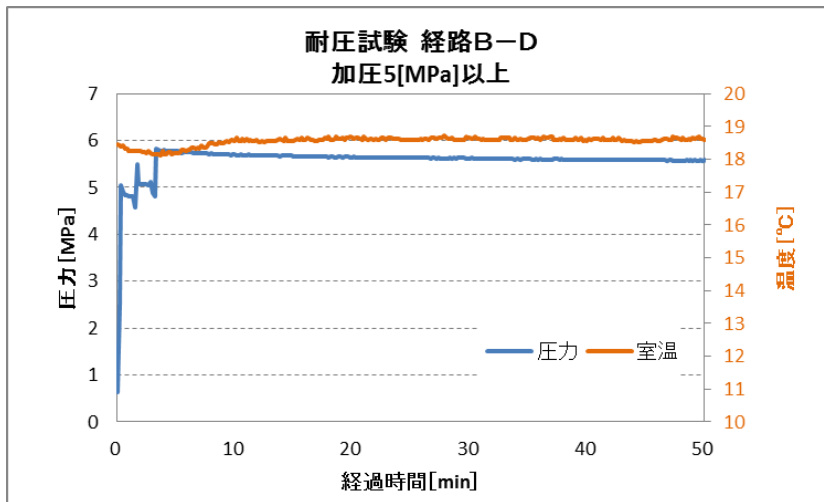


図 2.2.3-7 耐圧試験データ(経路B-D)

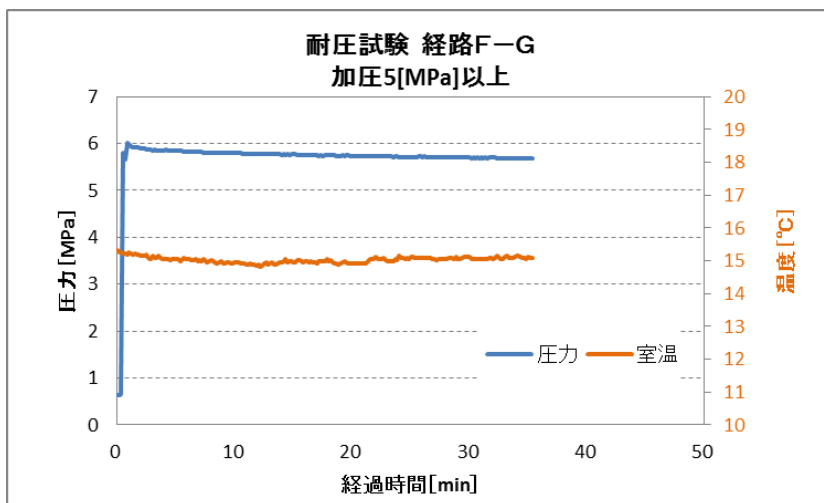


図 2.2.3-8 耐圧試験データ(経路F-G)

2.2.4 孔内装置への循環バルブの組み込み

上記 2.2.2 および 2.2.3 項において、循環バルブの耐圧性能および流路切り替え等の基本性能が確認されたため、孔内装置へ組み込むための設計を実施した。循環バルブの組み込み位置として理想的なのは、孔内装置部の注水・揚水ポートに可能な限り、近い箇所に実装することである。循環バルブとトレーサー注入・揚水ポートの間における距離を短縮するには、孔内装置のマンドレル内の蛍光センサー直近に実装することが望ましい。ただし、この位置で実装する場合は、装置内部のスペースに余裕がなく、蛍光センサー用の光ケーブルφ6 mm×2 本と試験区間計測用水圧計のケーブルφ6 mm×1 本、パッカー拡張用チューブφ4 mm×1 本と本循環バルブ駆動用圧力チューブφ4 mm×1 本のケーブルやチューブがバルブ本体の側方を通さなければならない。そこで、孔内装置のマンドレルの内径が 45 mm に対し循環バルブの外形が 40 mm であることから、循環バルブ側面を削り上記ケーブルとチューブが収まるスペースを確保することとした。図 2.2.1-4 の循環バルブ設計図面でもわかるようにバルブ内は流路がほとんどの方向に配置しているため、ケーブルを這わす溝は流路を避けて S 字型の幅 19 mm 深さ 6 mm を 1 つ削りだした。また、チューブ用の 4.5 mm 幅の溝は、直線で 3 本加工した。循環バルブの S 字型溝の写真を図 2.2.4-1 に示す。

循環バルブの地上部側は、A、D、E、F の 4 本のラインと本循環バルブ駆動用圧力チューブ 1 本が接続されるが、マンドレル内で各ラインを接続するチューブニップルを配置するには、マンドレルの長さが短いため、パッカーの上部(地上側)に各チューブを接続するチューブ接続プローブを増設した。孔内装置の設計組図を図 2.2.4-2 に孔内装置(マンドレル)内への循環バルブ組み込み風景を図 2.2.4-3～図 2.2.4-6 に示す。今回の改良により従来、往復約 100 m トレーサーを送水していたチューブが、往復約 0.7 m まで短縮することができた。また、改良前は試験深度が浅い場合においても、トレーサー濃度検定時に使用したトレーサー送水用のチューブ長(往復約 100 m)を固定して使用する必要があったが、改良後はトレーサー濃度の散逸が低減できることから、トレーサー濃度検定を省略が見込めるため、調査時に使用するチューブ長を、状況に応じて短くすることが可能となり、現場調査における作業性が向上した。



図 2.2.4-1 循環バルブの S 字型溝加工

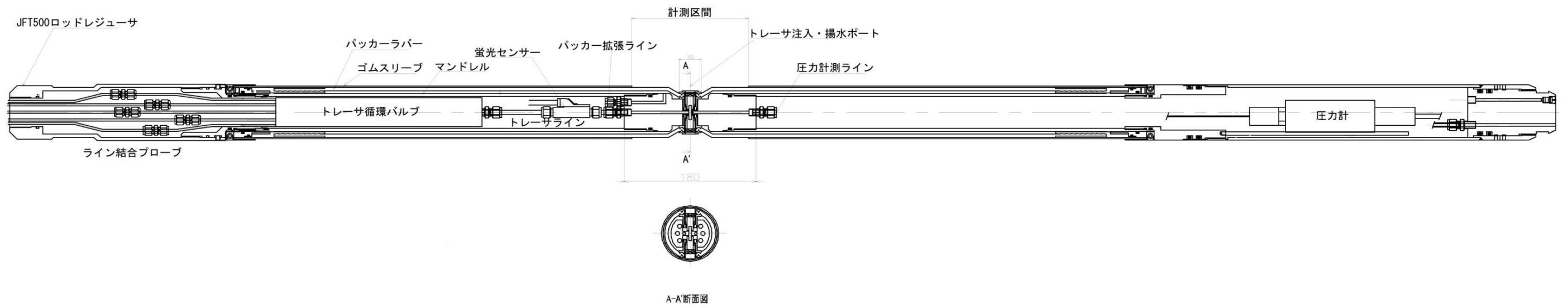


図 2.2.4-2 孔内装置組図



図 2.2.4-3 孔内装置部への循環バルブ組込み作業 1



図 2.2.4-4 孔内装置部への循環バルブ組込み作業 2



図 2.2.4-5 孔内装置部への循環バルブ組み込み作業 3



図 2.2.4-6 孔内装置部への循環バルブ組み込み作業 4

2.3 揚水側無脈動ポンプの製作

2.3.1 装置概要

既往の揚水側無脈動ポンプは、制御ボックスが大きく重いため、運搬時に過大な労力を要するとともに、収納時に余分なスペースが必要であった。そのため、制御ボックスを小型化し機動性を向上させることを目的として、新規に設計・試作を行った。設計にあたっては、操作ボタンなどの配列を整理、集約して操作性を向上させることとした。無脈動ポンプの外観写真を図 2.3.1-1、図 2.3.1-2 に、外形寸法図を図 2.3.1-3、図 2.3.1-4 にそれぞれ示す。



図 2.3.1-1 無脈動ポンプの外観(側面)



図 2.3.1-2 無脈動ポンプの外観(前面)

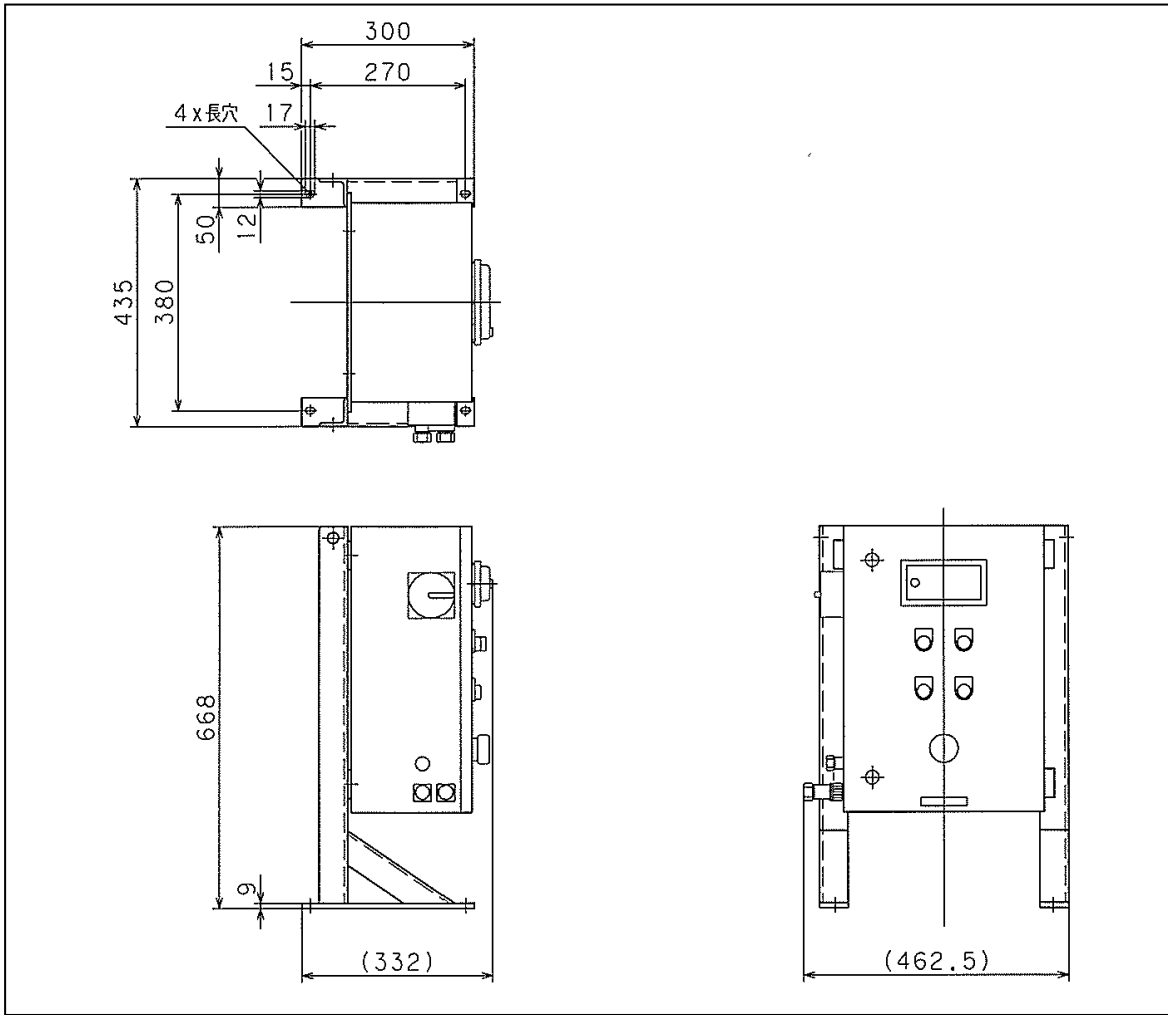


図 2.3.1-3 制御ボックスの外形寸法図

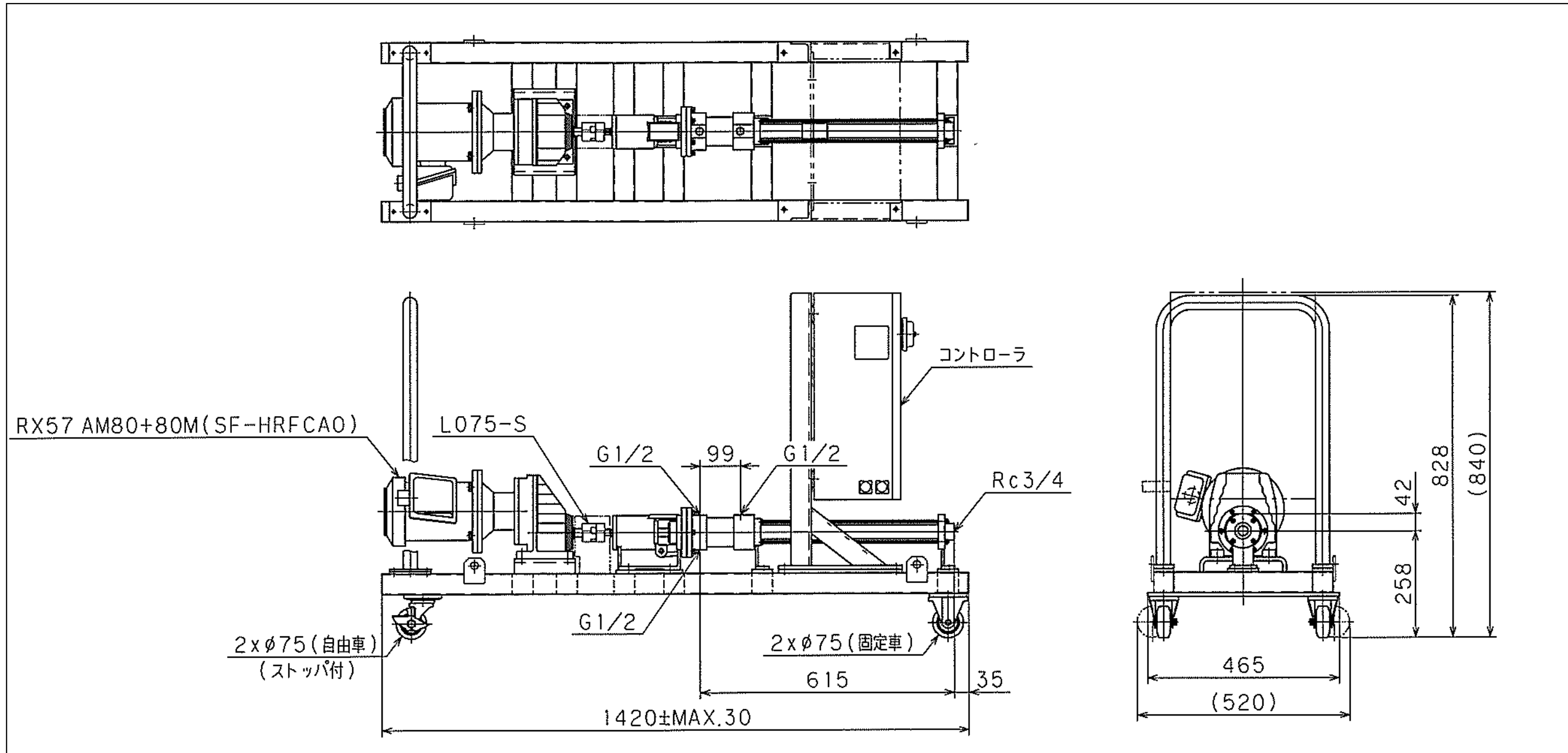


図 2.3.1-4 無脈動ポンプの外形寸法図

2.3.2 性能確認試験

改良した無脈動ポンプの性能を確認するために以下の試験を実施した。

(1) 耐圧性能確認試験

無脈動ポンプの耐圧性能確認試験手順を以下に示す。

- ① 無脈動ポンプとチャンバータンクを接続する（図 2.3.2-1）。
- ② 窒素ガスを用いてチャンバータンク内を 5 MPa まで加圧する。
- ③ 窒素ガスの供給を停止し、メカニカルシール部に漏洩がないことを確認する。
- ④ 無脈動ポンプを作動させ、水を循環させる。循環させる流量は 0.1 L/min とする。
- ⑤ 目視により配管部、シール部分に漏洩のないことを確認する。
- ⑥ 1 時間程度循環運転（④の状態）を実施し、圧力の著しい低下やメカニカルシール部の漏洩がないことを確認する。
- ⑦ 無脈動ポンプを停止し、チャンバータンク内を減圧する。
- ⑧ 無脈動ポンプを目視にて確認し、外観などに変形や破損がないことを確認する。

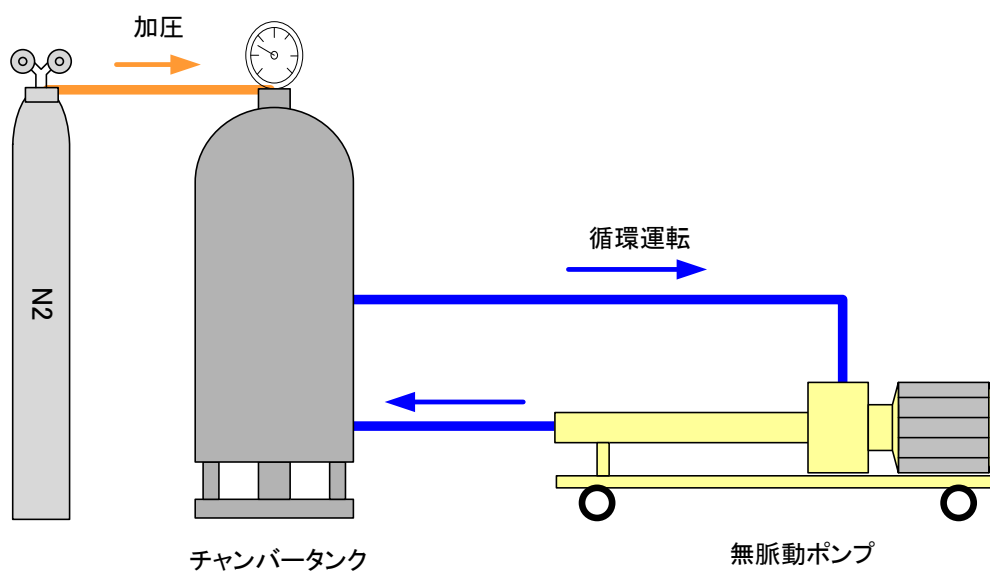


図 2.3.2-1 無脈動ポンプ耐圧試験の模式図

以上より、無脈動ポンプの耐圧や外観に問題がないことを確認した。

(2) 吐出量確認試験

無脈動ポンプの吐出量を確認するため、回転数を 10 段階に変化させたときにおける水の吐出量を測定した。

設定した回転数に応じ、線形で水を吐出することが確認された。また、最大の吐出量は回転数 600 設定時で 2193 ml/min であった。

以上から、今回製作した無脈動ポンプは正常に動作することを確認した。

測定結果を表 2.3.2-1、図 2.3.2-2 に示す。

表 2.3.2-1 無脈動ポンプの回転数設定値と吐出量

試験STEP	ポンプ回転数(1/min)	吐出量(ml/min)
1段階	60	163
2段階	120	391
3段階	180	625
4段階	240	874
5段階	300	1128
6段階	360	1308
7段階	420	1520
8段階	480	1824
9段階	540	2034
10段階	600	2193

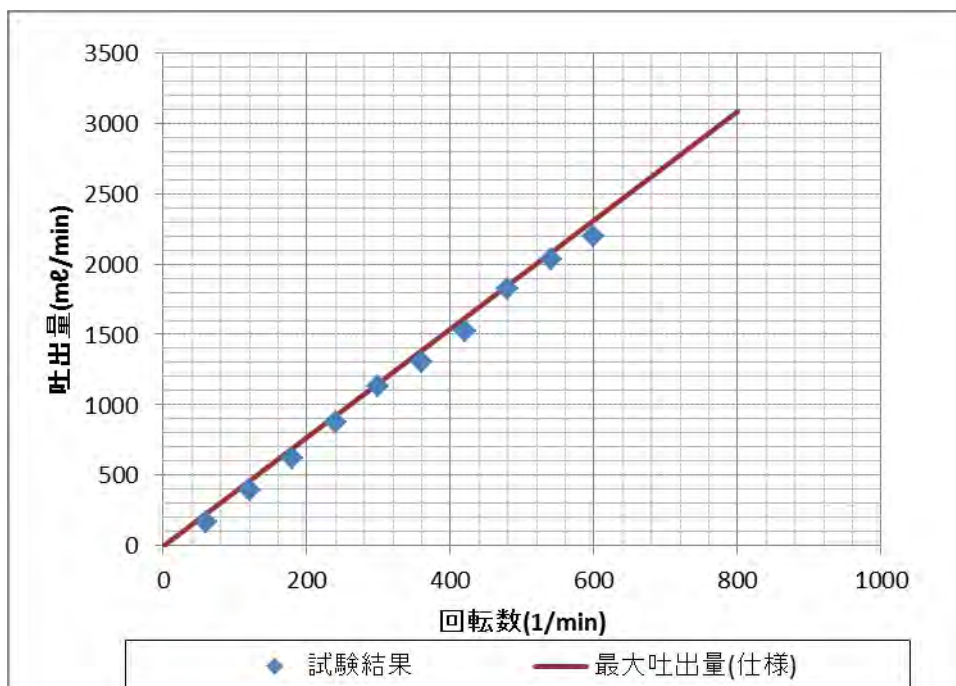


図 2.3.2-2 無脈動ポンプの回転数設定値と吐出量の関係

2.4 室内試験による性能確認試験

2.4.1 試験概要

循環バルブを実装した場合のトレーサー投入特性を把握するために、室内性能確認試験を実施した。性能確認試験は、試験区間長を 16 cm（ポリエステルメッシュおよび PEEK スペーサ使用）とし、ポイント希釈試験、単孔注入揚水試験を模した室内試験を実施した。各室内試験の条件は、平成 24 年度に実施した試験装置の室内性能確認試験と同等とした。

2.4.2 試験方法と使用機材

試験機材については、過去の試験結果との比較のため、平成 24 年度に実施した特性確認試験と同様とした。ただし、本年度製作した循環バルブと無脈動ポンプおよび昨年度製作した置換タンクを使用した。

ポイント希釈試験、単孔注入揚水試験を模したそれぞれの試験は、同一条件下で複数回試験を実施して、計測時の誤差範囲を確認した。試験の模式図を図 2.4.2-1 に、試験装置各部を図 2.4.2-2～2.4.2-5 に示す。

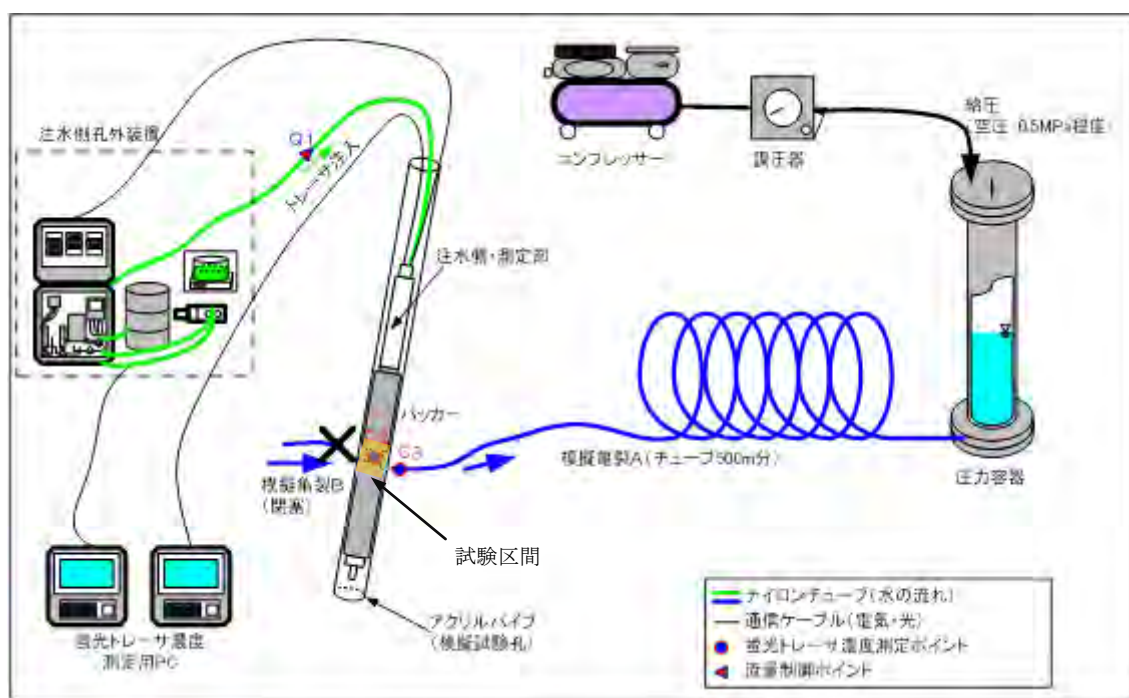


図 2.4.2-1 性能確認試験概要図（単孔揚水注水試験）

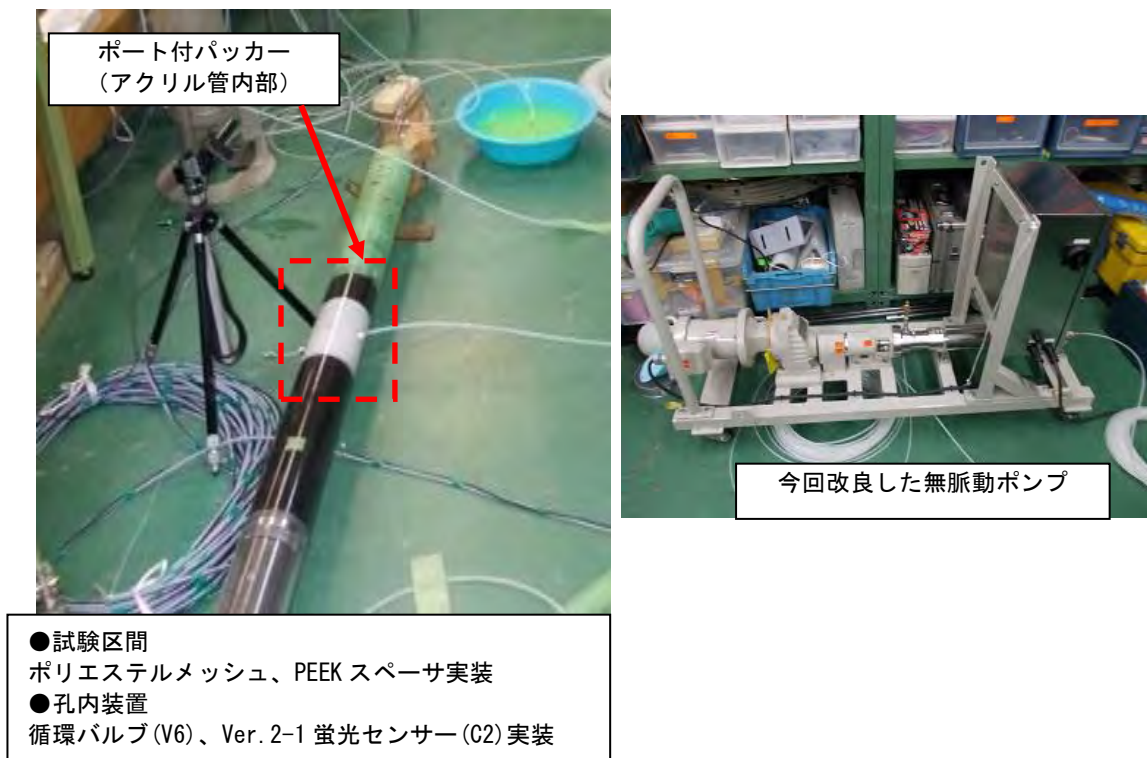


図 2.4.2-2 性能確認試験に使用した機材①

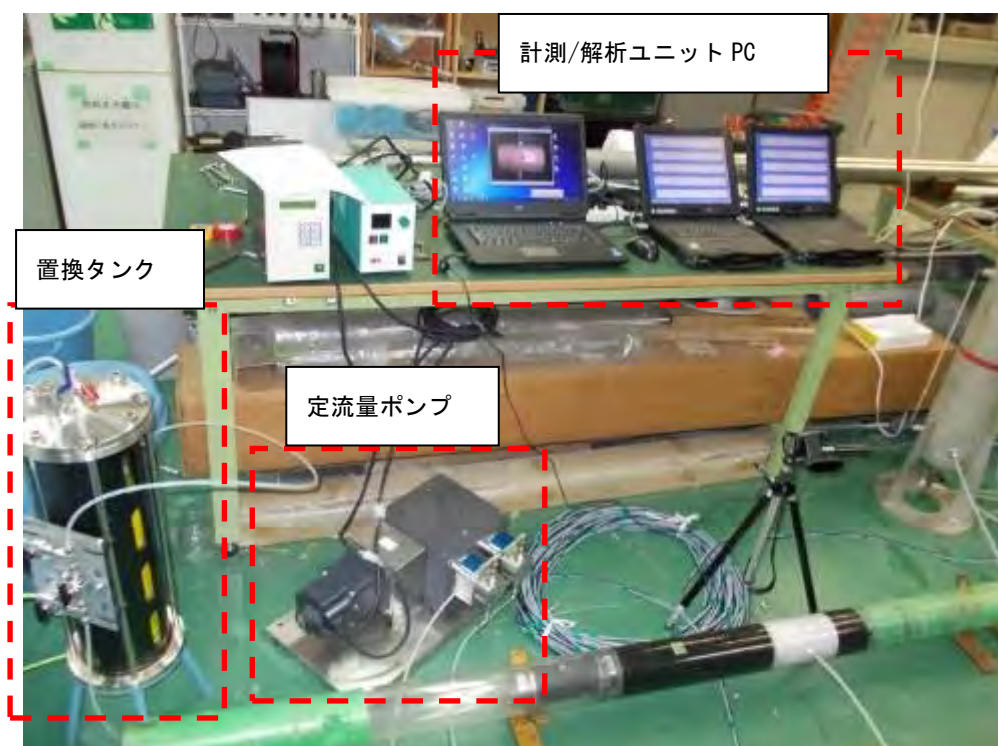
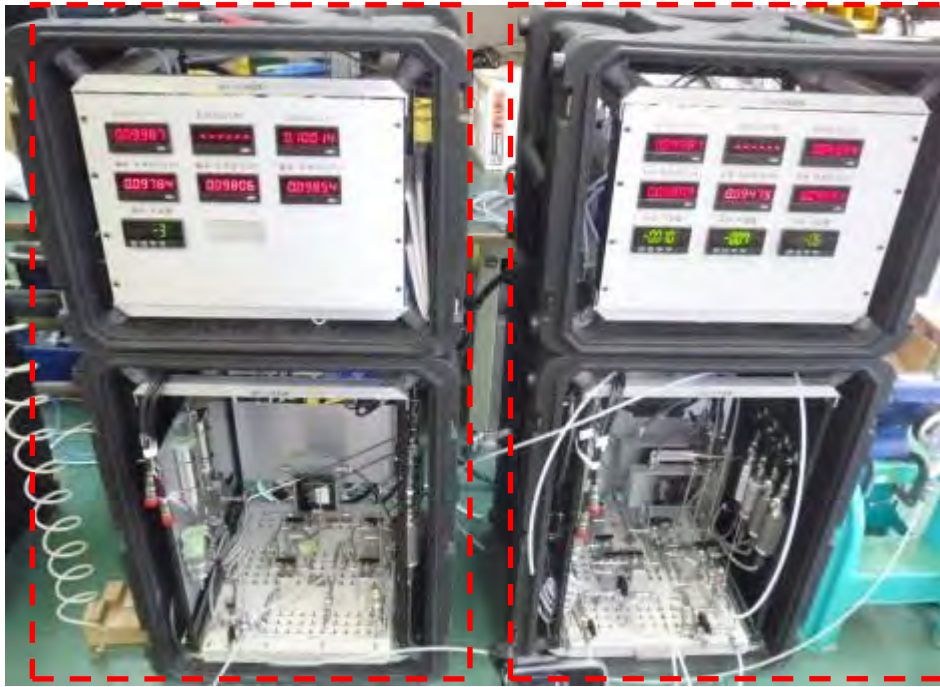


図 2.4.2-3 性能確認試験に使用した機材②



揚水側ユニット

注水側ユニット

図 2.4.2-4 性能確認試験に使用した機材③



図 2.4.2-5 性能確認試験に使用した機材④

ポート付パッカーにポリエステルメッシュおよびPEEK スペーサ (図 2.4.2-6) を取り付けて、パッカーを拡張し試験区間を形成した。PEEK スペーサはφ12 mm を使用し、1 mm 間隔で 160 mm の幅に配

置した。

ポリエステルメッシュはφ80 mm、φ82 mm、φ84 mmの三層とし、φ80 mmとφ82 mmのメッシュの間に PEEK スペーサを配置した。また、ポリエステルメッシュをポート付パッカーに取り付けた後、メッシュ両端をゴムスリーブで固定した。



図 2.4.2-6 試験区間形成に使用したポリエステルメッシュおよび PEEK スペーサ

性能確認試験には、脱気した精製水を使用した。精製水の脱気にはタンクおよび真空ポンプを使用した（図 2.4.2-7）。脱気水を使用することで、試験区間および管路内での気泡の発生を極力抑えることができる。



図 2.4.2-7 試験に使用した脱気水作成状況

2.4.3 蛍光センサーのキャリブレーション

トレーサー濃度の測定には、平成24年度と同様に光源電源、分光器（図2.4.3-1）、蛍光センサー（図2.4.3-2）を用いた。室内試験の準備として、蛍光センサーのキャリブレーションを実施した。キャリブレーションは、室温・大気圧下で実施した。蛍光トレーサーにはウラン溶液を使用し、脱気した精製水を用いてトレーサー溶液を作成した。ウラン溶液濃度を0～100 ppmの範囲で計測し、各濃度における波形を測定して検量線を作成した。

キャリブレーションの手順を、以下に示す。また、実施状況を図2.4.3-4に示す。

- ① 蛍光センサーを設置する（図2.4.3-3）
- ② 様々な濃度（0 ppm～100 ppm）のウラン溶液を作成する
- ③ ウラン溶液を蛍光センサー中に満たし、波形・光強度など各種データを取得する。

各濃度のウラン溶液について③を実施する濃度のウラン溶液と各種データの相関を確認し、蛍光センサーごとに検量線を作成する。

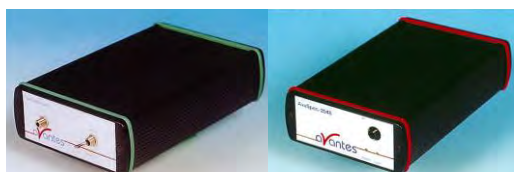


図2.4.3-1 蛍光分析用光源（左）および分光器（右）



図2.4.3-2 蛍光センサー（左：Ver.1，右：Ver.3）

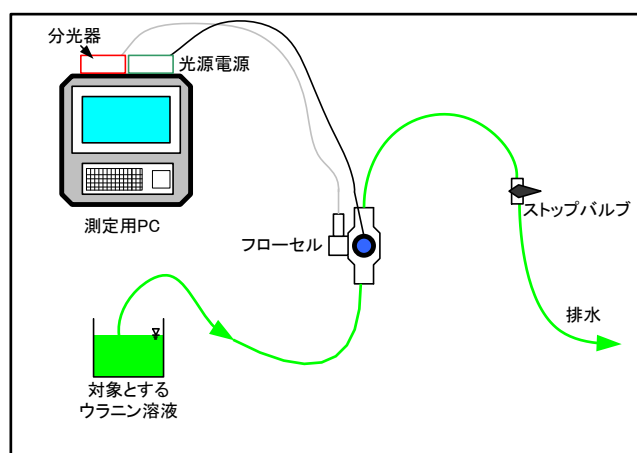


図2.4.3-3 蛍光センサーのキャリブレーション概念図



図 2. 4. 3-4 蛍光センサーのキャリブレーション実施状況

キャリブレーションにより得られた波形・カウント値から、蛍光センサーごとに検量線を作成した(表 2. 4. 3-1)。検量線は式 2. 4. 3-1 を用いて計算する。

表 2. 4. 3-1 蛍光センサー 1、2 の検量線

センサ2	高濃度	中濃度	低濃度
x	F2(counts)	F3(λ)	F2(counts)
a	0.000000000000000091119341371097	0	0
b	-0.000000000016824583894394700000	0.025339167102468500000000000000	0
c	0.000001154223729183320000000000	-38.868843200302300000000000000000	0.000000002654416917400030000000
d	-0.036038618816030600000000000000	19874.6999695194000000000000000000	-0.000017196003168691500000000000
e	470.376001791797000000000000000000	-3387576.2656078700000000000000000000	0.47807602763432000000000000000000

センサ1	高濃度	中濃度	低濃度
x	F2(counts)	F3(λ)	F2(counts)
a	0.0000000000000000123226913764058	0	0
b	-0.000000000020635901216425600000	0.026467085551306700000000000000	0
c	0.000001280897341692500000000000	-40.750031577554700000000000000000	0.000000002192476976500570000000
d	-0.036014137302180900000000000000	20914.9567878603000000000000000000	0.000019493012846538800000000000
e	425.136429803541000000000000000000	-3578436.0469635000000000000000000000	-0.125109407225529000000000000000

$$\text{トレーサー濃度 } C(\text{ppm}) = a * x^4 + b * x^3 + c * x^2 + d * x + e \quad (\text{式 2. 4. 3-1})$$

2.4.4 試験方法

今回改良した循環バルブや無脈動ポンプを試験装置に実装して、試験を実施した。

(1) ポイント希釈試験

図 2.4.4-1 にポイント希釈試験の模擬試験の概略図を示す。

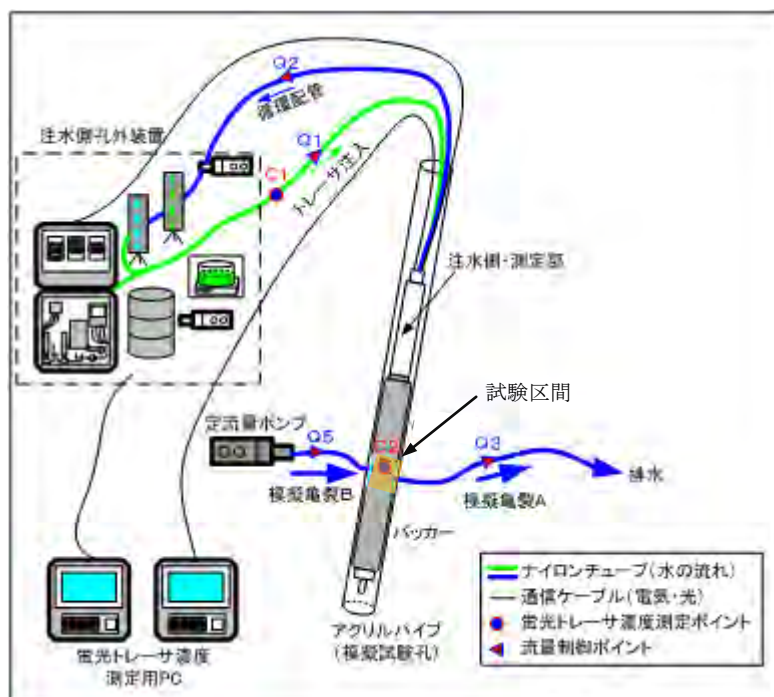


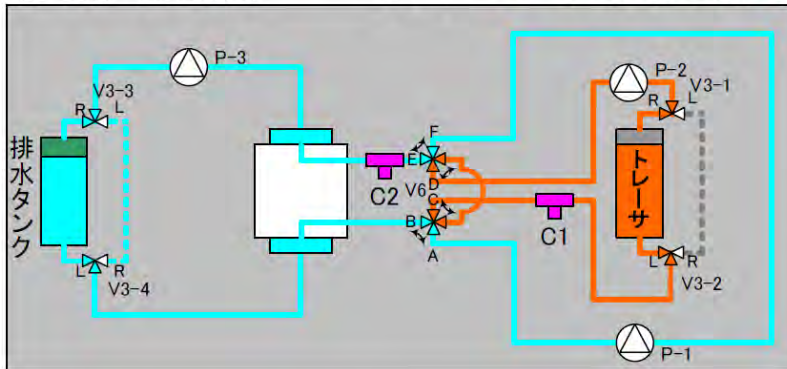
図 2.4.4-1 ポイント希釈試験模擬試験の概略図

ポイント希釈試験は、単一のボーリング孔を用いて自然状態での流動状況を把握するための試験である。ここでは、試験孔から 10 mL/min の流入出がある状態を模して試験を行った。試験条件を表 2.4.4-1 に、試験手順を図 2.4.4-2 に、試験状況の写真を図 2.4.4-3～8 にそれぞれ示す。試験はトレーサーの投入時間を変えて、2 ケース実施した。

表 2.4.4-1 ポイント希釈試験の試験条件

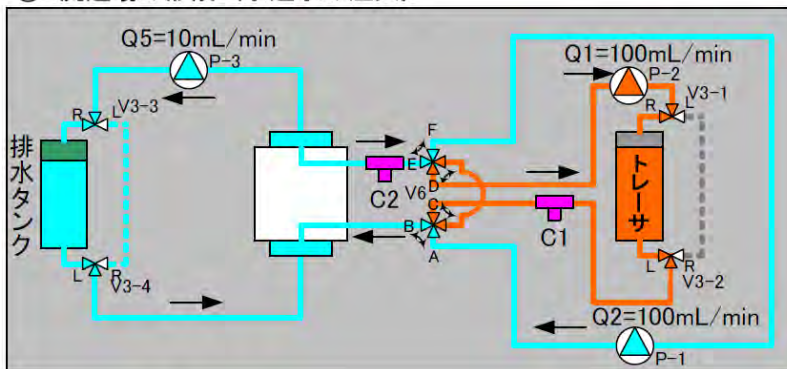
試験名	ケース	トレーサ濃度	トレーサ投入時間	注入流量	循環流量	通過流量	揚水流量	バックグラウンド流れ	
		C1 ppm	min	Q1 mL/min	Q2 mL/min	(Q3) mL/min	Q4 mL/min	Q5 mL/min	(Q6) mL/min
ポイント希釈試験	1	100	120	100	100	10	—	10	—
	2	100	10	100	100	10	—	10	—

① 準備 (配管方法)



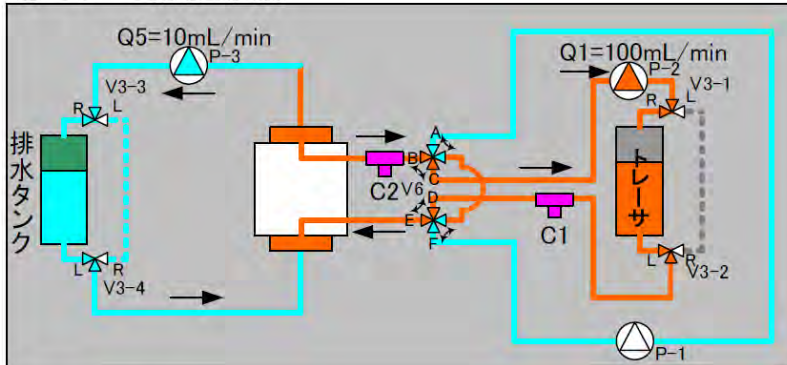
V6: A-B側
 V3-1: R
 V3-2: L
 V3-3: R
 V3-4: L
 P-1: 停止
 P-2: 停止
 P-3: 停止
 注意事項
 配管内の脱気確認

② 流速場の形成 (水道水の注入)



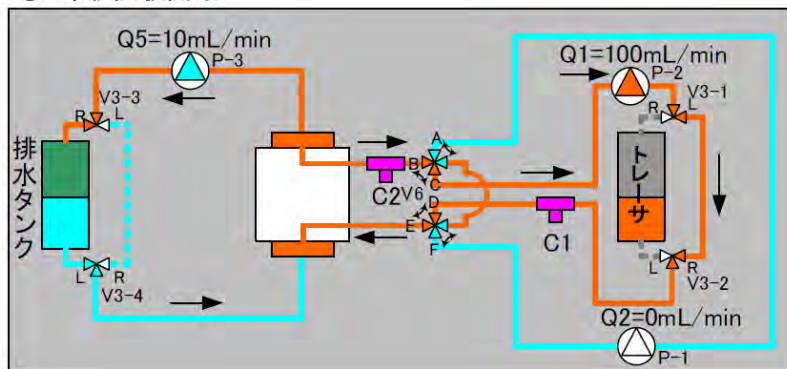
P-3: 逆転
 P-1: 正転
 P-2: 逆転
 V6: A-B側
 V3-1: R
 V3-2: L
 V3-3: R
 V3-4: L
 注意事項
 排水タンク内水位に変動がないことを確認

③ トレーサ溶液の置換



V6: A-F側
 P-1: 停止
 V3-1: R
 V3-2: L
 V3-3: R
 V3-4: L
 P-2: 逆転
 P-3: 逆転
 注意事項
 C1とC2のトレーサ濃度が一定になるまで行う

④ 希釈試験開始



V3-1: L
 V3-2: R
 V6: A-F側
 V3-3: R
 V3-4: L
 P-1: 停止
 P-2: 逆転
 P-3: 逆転
 注意事項
 V3-1とV3-2は同時に切り替える
 排水タンクの残量に注意する

図 2.4.4-2 ポイント希釈試験模擬試験の手順



図 2.4.4-3 ポイント希釈試験状況 1



図 2.4.4-4 ポイント希釈試験状況 2



図 2.4.4-5 ポイント希釈試験状況 3



図 2.4.4-6 ポンプ Q2(今回改良した無脈動ポンプ)



図 2.4.4-7 蛍光センサー1 の設置状況



図 2.4.4-8 蛍光センサー測定機器の設置状況

(2) 単孔注水揚水試験

単孔注水揚水試験模擬試験の概略図を図 2.4.4-9 に示す。

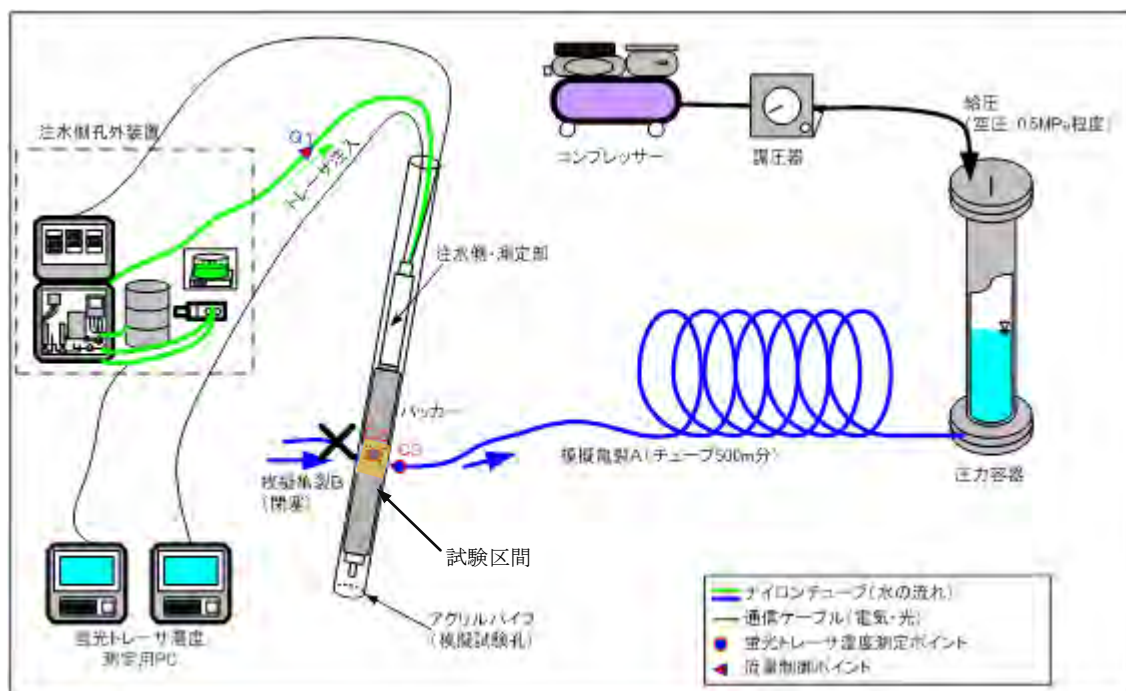


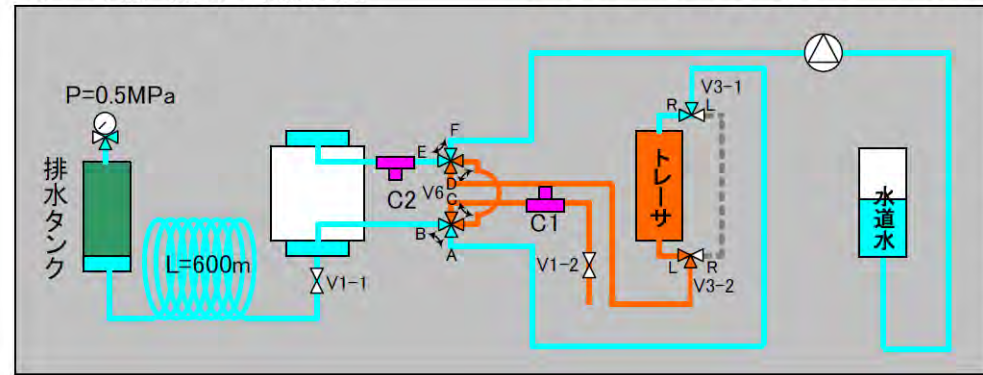
図 2.4.4-9 単孔注水揚水試験模擬試験の概念図

単孔注水揚水試験は、トレーサーを 10 分間注水した後にチェイサーを 50 分間注水し、その後に揚水を実施した。試験条件を表 2.4.4-2 に、試験手順を図 2.4.4-10 に、試験状況写真を図 6.4.2-11～16 にそれぞれ示す。

表 2.4.4-2 単孔注水揚水試験の試験条件

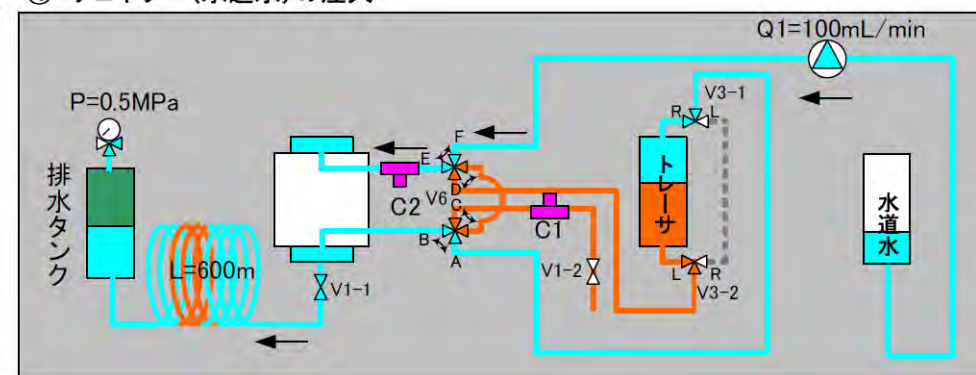
試験名	トレーサ濃度	トレーサ投入時間	注入流量	循環流量	通過流量	揚水流量	バックグラウンド流れ	
	C1 ppm	min	Q1 mL/min	Q2 mL/min	(Q3) mL/min	Q4 mL/min	Q5 mL/min	(Q6) mL/min
単孔注水揚水試験	100	10	100	—	—	100	—	—

①-1 準備 (配管の接続方法)



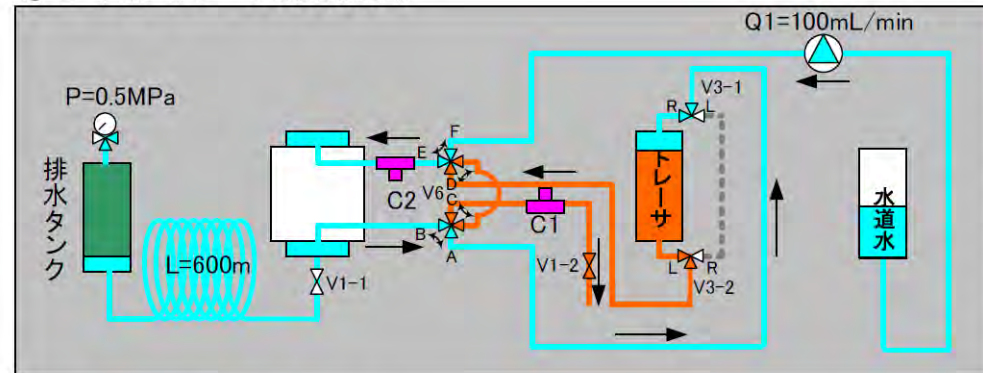
V6: A-B側
V3-1: R
V3-2: L
V1-1: 閉
V1-2: 閉
PUMP: 停止
排水タンク: 加圧
注意事項
配管内の脱気確認

④ チェイサー(水道水)の注入



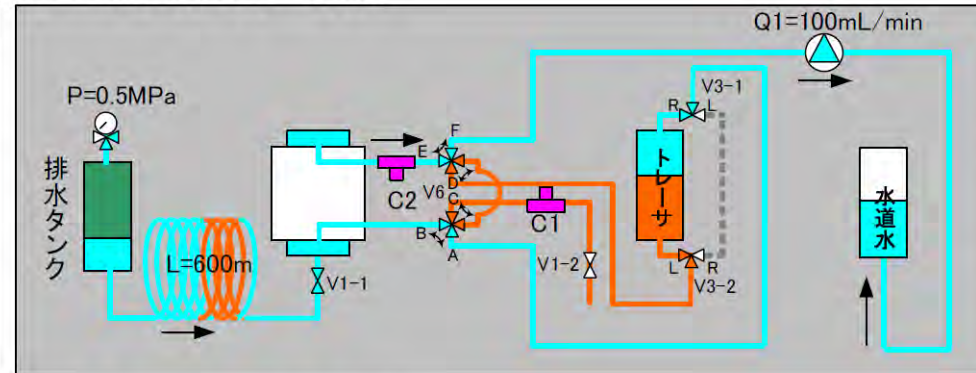
V6: A-B側
V3-1: 閉
V3-2: L
V1-1: 開
V1-2: 閉
PUMP: 正転作動
排水タンク: 加圧
注意事項
C2での濃度確認

①-2 準備 (トレーサの充填方法)



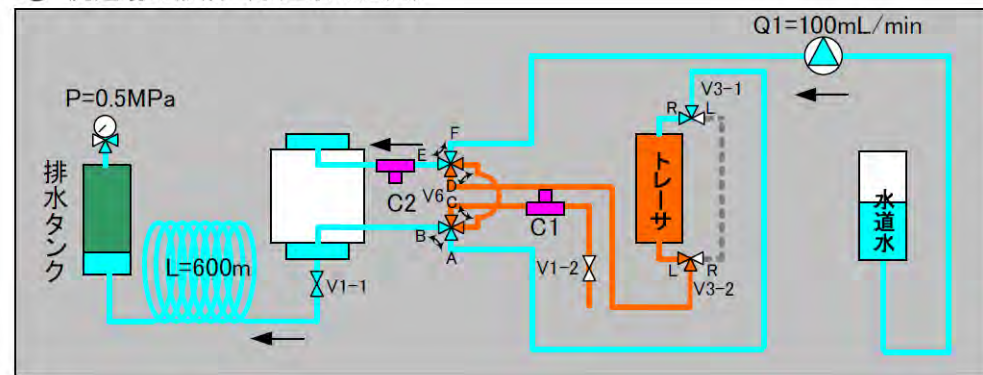
V1-2: 開
PUMP: 正転作動
V6: A-B側
V3-1: R
V3-2: L
V1-1: 閉
排水タンク: 加圧
注意事項
C1での濃度確認

⑤-1 揚水 (チェイサーの回収)



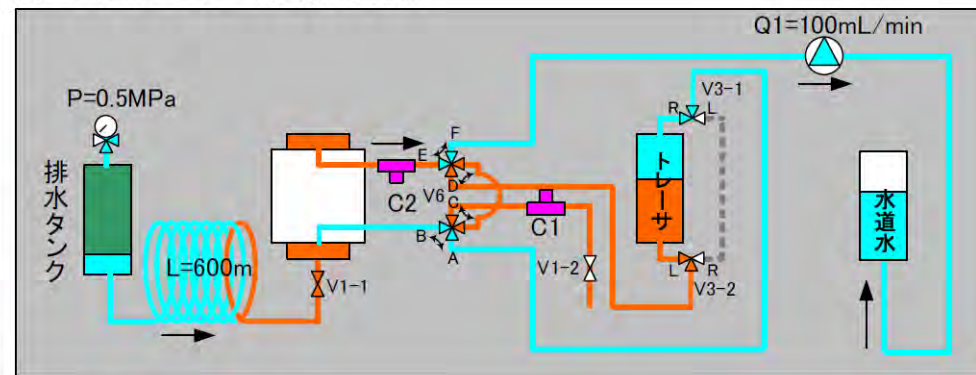
PUMP: 逆転作動
V6: A-B側
V3-1: 閉
V3-2: L
V1-1: 開
V1-2: 閉
排水タンク: 加圧
注意事項
C2での濃度確認
排水タンク量に注意

② 流速場の形成 (水道水の注入)



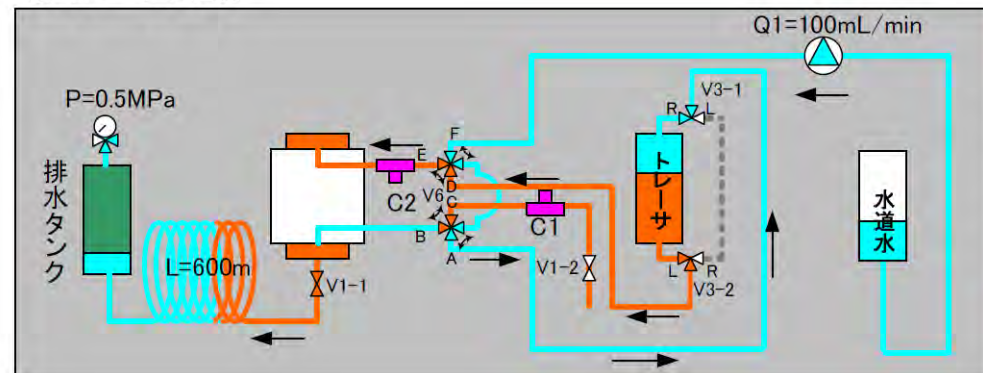
V1-1: 開
V1-2: 閉
V3-1: 閉
V6: A-B側
V3-2: L
PUMP: 正転作動
排水タンク: 加圧
注意事項
ポンプ流量を確認

⑤-2 揚水 (トレーサ溶液の回収)



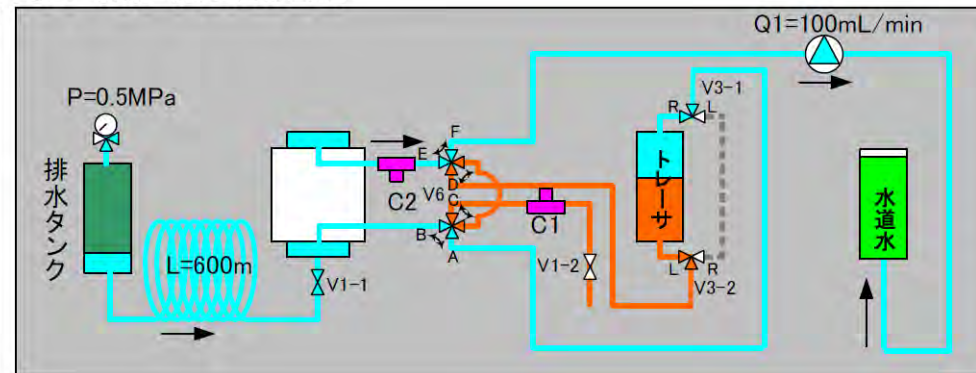
PUMP: 逆転作動
V6: A-B側
V3-1: 閉
V3-2: L
V1-1: 開
V1-2: 閉
排水タンク: 加圧
注意事項
C2での濃度確認
排水タンク量に注意

③ トレーサの注入



V3-1: R
V6: A-F側
V3-2: L
V1-1: 開
V1-2: 閉
PUMP: 正転作動
排水タンク: 加圧
注意事項
C2での濃度確認

⑤-3 揚水 (水道水の回収)



終了時
PUMP: 停止
V6: A-B側
V3-1: 閉
V3-2: L
V1-1: 開
V1-2: 閉
排水タンク: 加圧
注意事項
C2データの確認

図 2. 4. 4-10 単孔注水揚水試験模擬試験の手順



图 2.4.4-11 单孔注水揚水試験状況 1

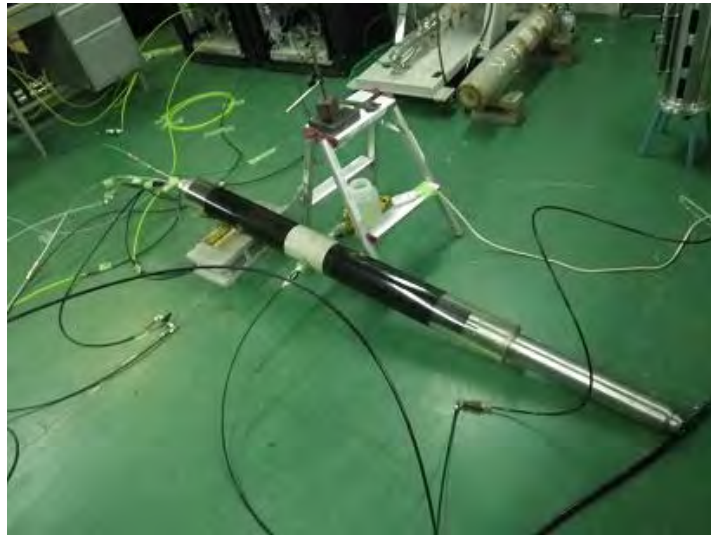


图 2.4.4-12 单孔注水揚水試験状況 2



图 2.4.4-13 单孔注水揚水試験状況 3



図 2.4.4-14 単孔注水揚水試験状況 4



図 2.4.4-15 600m チューブ設置状況



図 2.4.4-16 蛍光センサー測定機器の設置状況

2.4.5 試験結果

(1) ポイント希釈試験結果

ポイント希釈試験のケース 1、2 において、センサ 1、2 で検出したトレーサーの濃度の時系列変化を図 2.4.5-1、図 2.4.5-2 にそれぞれ示す。比較のために、循環バルブを実装していない平成 24 年度の室内性能確認試験結果を図 2.4.5-3 に示す。また、ケース 1 およびケース 2 のトレーサー投入口付近におけるウラニン濃度の時間変化を図 2.4.5-4、5 にそれぞれ示す。

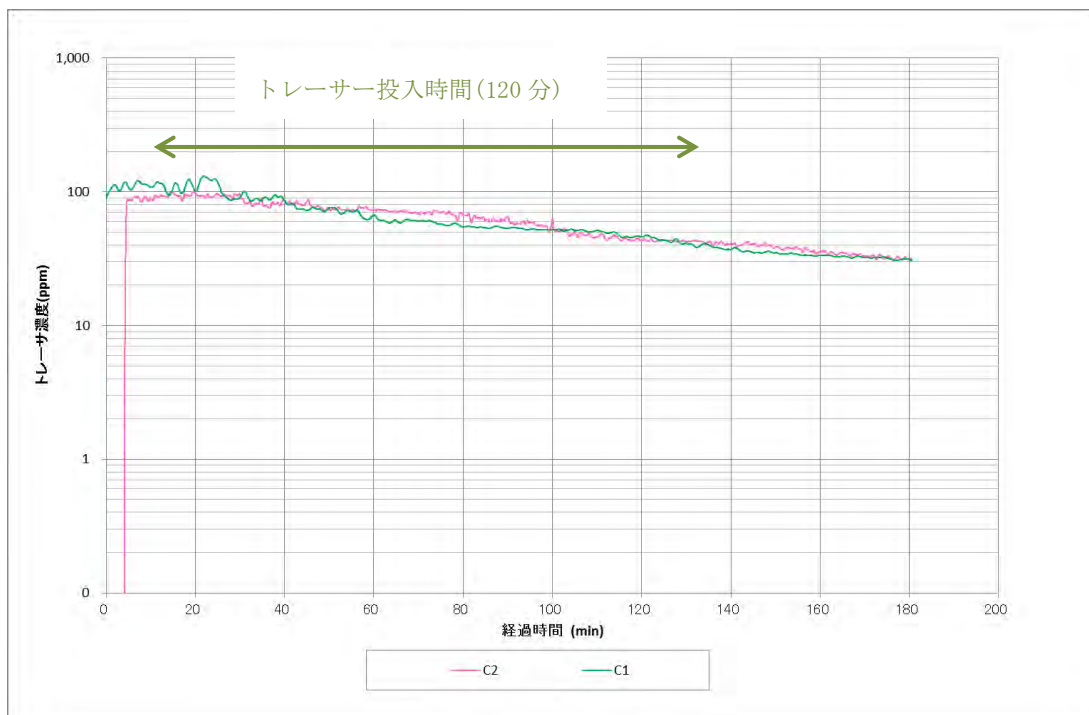


図 2.4.5-1 ポイント希釈試験ケース 1(トレーサー投入 120 分)の試験結果

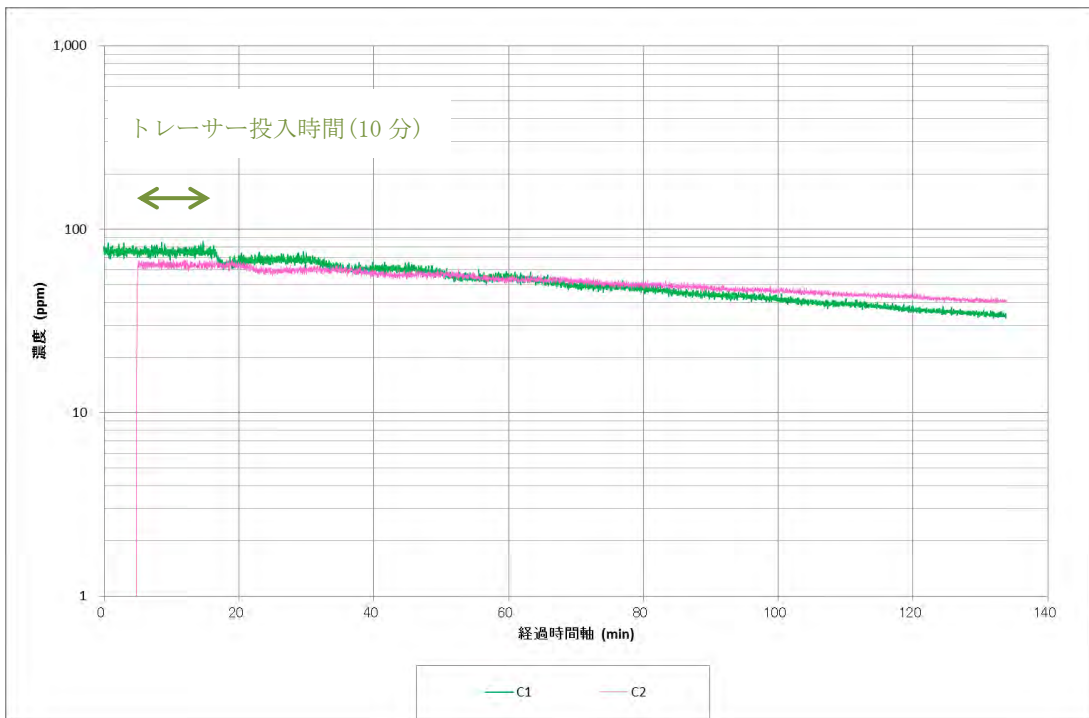


図 2.4.5-2 ポイント希釈試験ケース 2(トレーサー投入 10 分)の試験結果

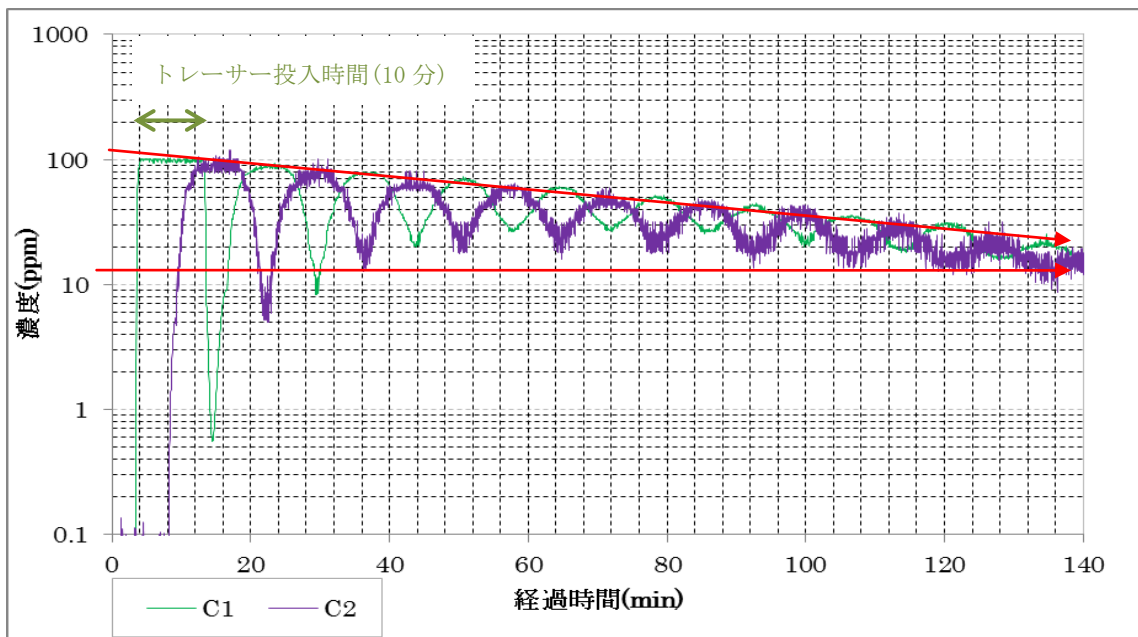


図 2.4.5-3 ポイント希釈試験（平成 24 年度、トレーサー投入 10 分）の試験結果

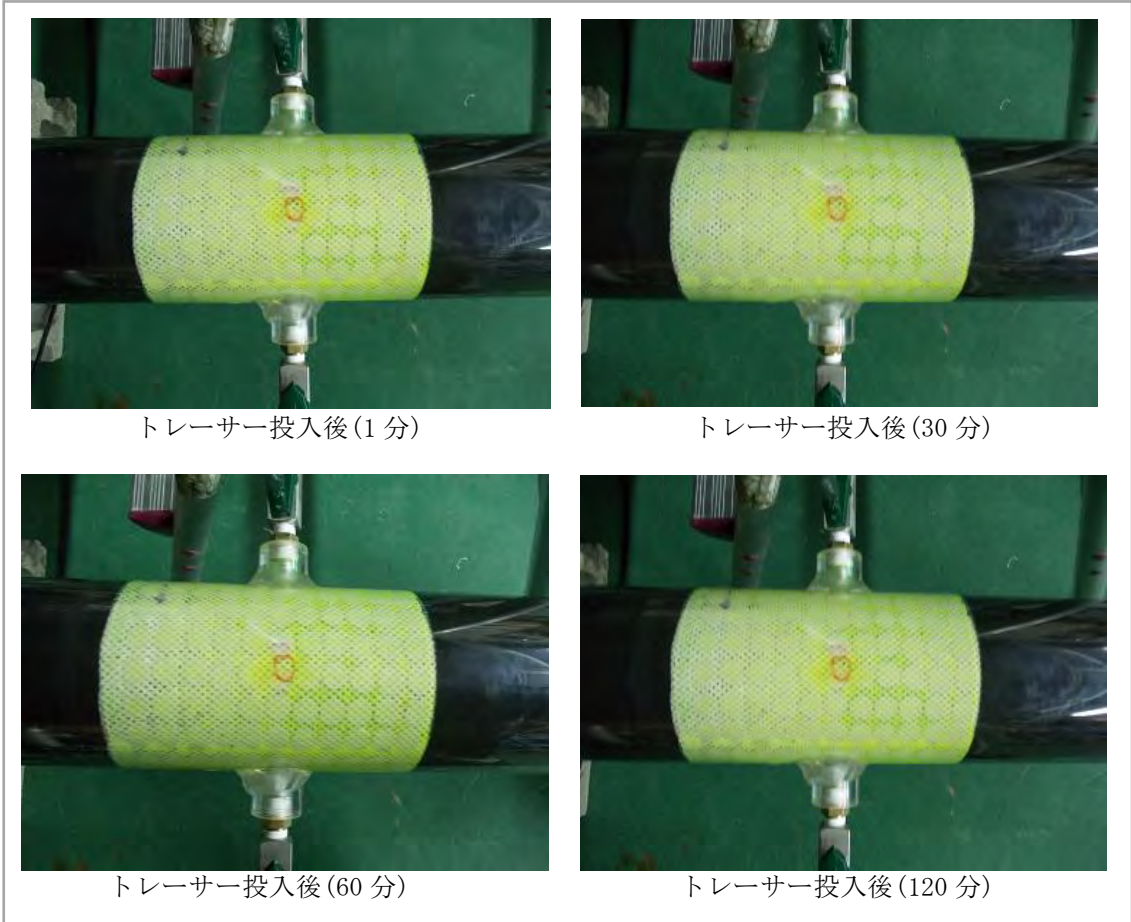


図 2. 4. 5-4 ポイント希釈試験ケース 1 の試験区間におけるウラン希釈状況



トレーサー投入後(1分)



トレーサー投入後(20分)



トレーサー投入後(40分)



トレーサー投入後(60分)



トレーサー投入後(80分)



トレーサー投入後(100分)



トレーサー投入後(120分)



トレーサー投入後(130分)

図 2.4.5-5 ポイント希釈試験ケース 2 の試験区間におけるウラン希釈状況

循環バルブ実装の効果を検証するため、今回のポイント希釈試験と、循環バルブを実装していない過去の試験（H24年度と同条件試験：トレーサー投入10分）のトレーサー濃度の経時変化を図2.4.5-6で比較した。なお、図2.4.5-6の上図にはトレーサー濃度の生データを示し、下図では比較しやすくするために濃度データを平行移動して示した。図から循環バルブ実装時（平成25年度）は、循環バルブが無い場合（平成24年度）に比べて、トレーサー濃度の時間変化は周期的挙動が低減され直線的に降下していることがわかる。

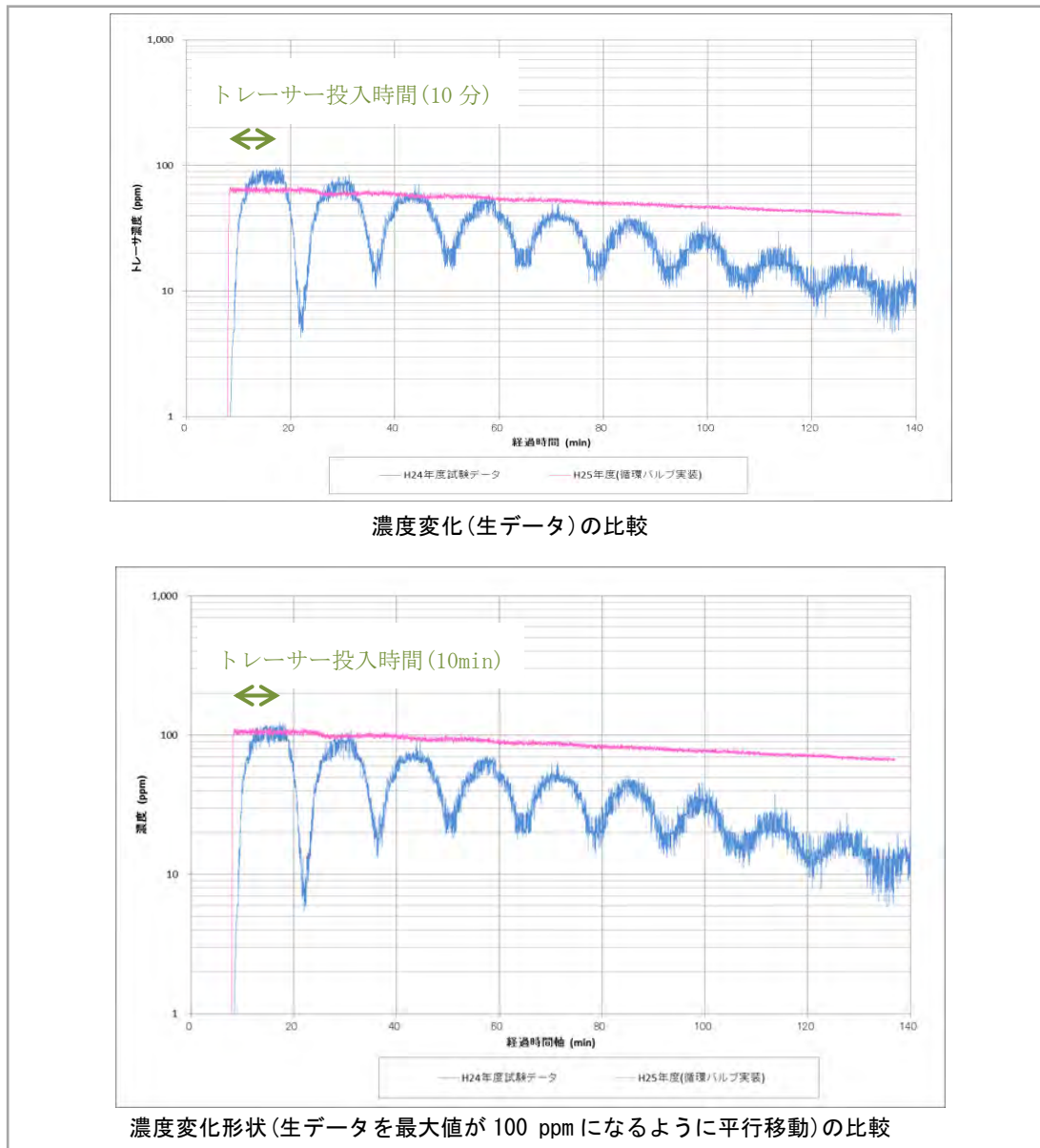
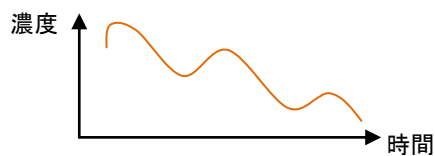
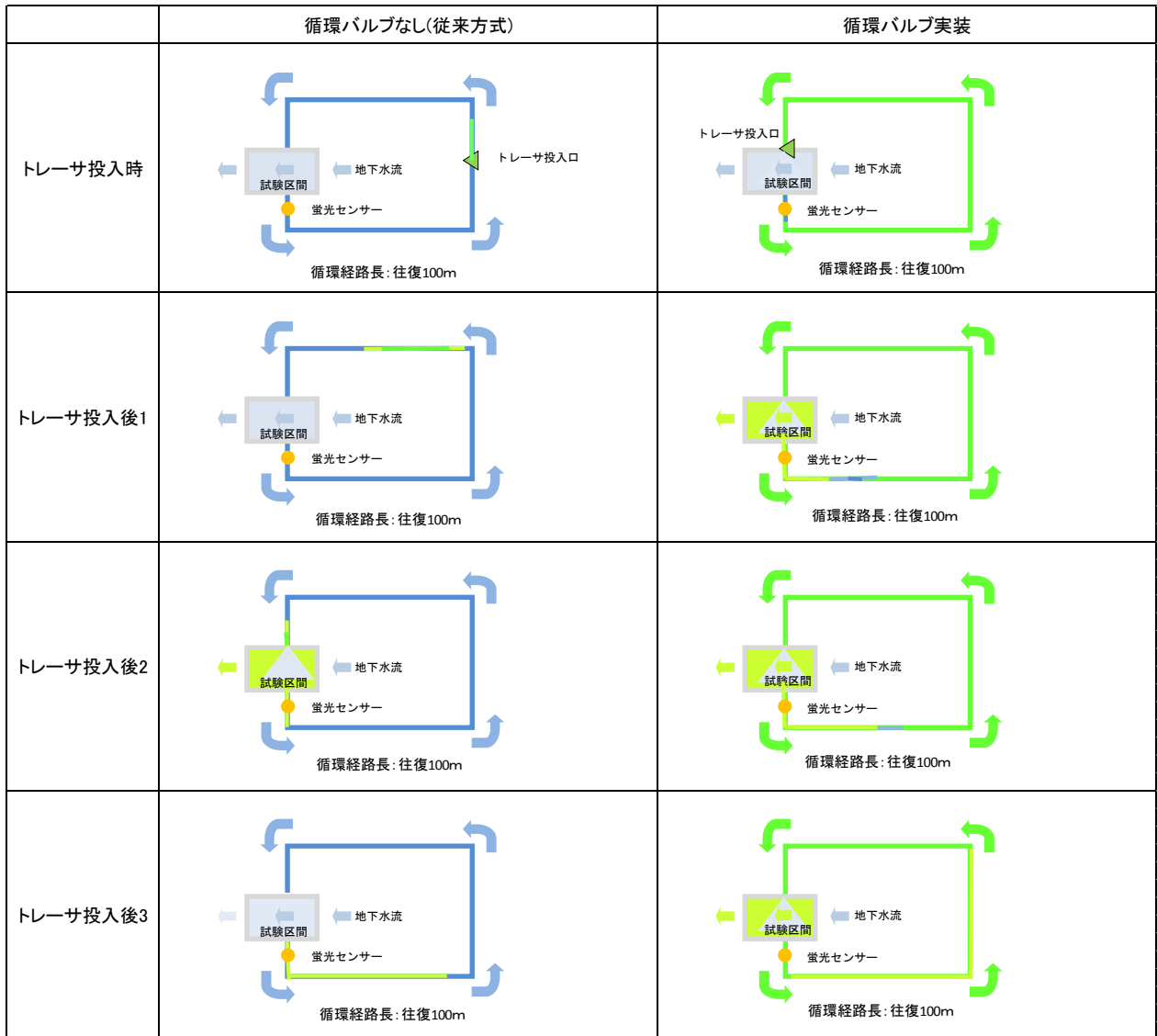


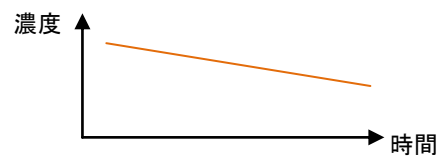
図 2.4.5-6 循環バルブ実装の有無によるトレーサー濃度の時系列変化の比較

循環バルブが無い場合には、図2.4.5-7に示すように、10分間のトレーサー投入では循環経路はトレーサー溶液で満たされていない。そのため、試験期間中にトレーサー溶液が蛍光センサーを通

過する際にはトレーサー濃度が上昇し、トレーサー溶液が通過した後は濃度が減少するという周期的な挙動が見られる。一方、循環バルブの実装した場合には、図 2.4.5-7 に示すように、10 分間のトレーサー投入でも循環経路はトレーサー溶液で満たされた状態となっており、循環経路内でトレーサー濃度が偏ることがないため周期的な挙動は見られない。



循環により濃度が周期的に変化



濃度はほぼ直線的に変化

図 2.4.5-7 循環バルブの有無による循環経路におけるトレーサー濃淡状況の模式図

以上から、循環バルブを実装することにより、循環経路内を循環するトレーサーの全量が、地下水流により徐々に希釈される様子を、階段状の挙動は認められるものの、おおむね直線として捉えることが可能となるため、現場試験での従来方式(循環バルブなし、トレーサー投入時間 120 分)に対するトレーサー投入量の少量化や、試験時間の短縮化、試験結果の精度向上などを図ることが可能と考える。

(2) 単孔注水揚水試験結果

単孔注水揚水試験において、センサ 2 で検出したトレーサーの濃度の経時変化を図 2.4.5-8 に示す。比較のために、循環バルブを実装していない平成 24 年度の室内性能確認試験結果を図 2.4.5-9 に示す。また、試験区間におけるウラニン濃度の時間変化を図 2.4.5-10 に示す。

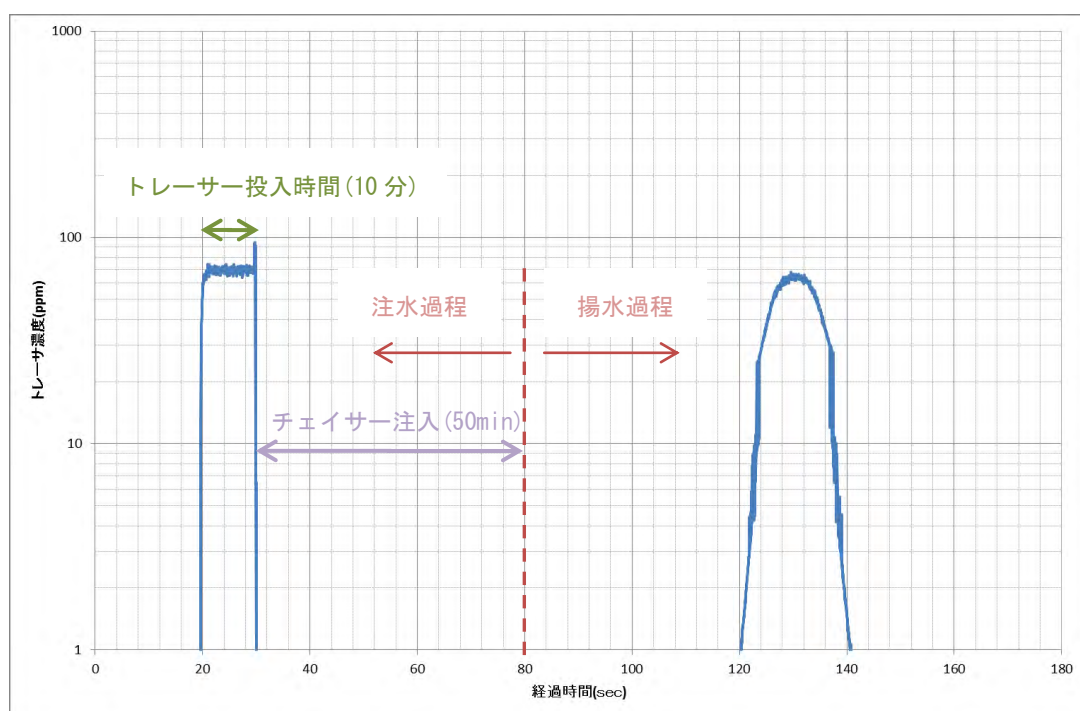


図 2.4.5-8 循環バルブ実装時の単孔注水揚水試験(トレーサー10分)濃度の時系列変化

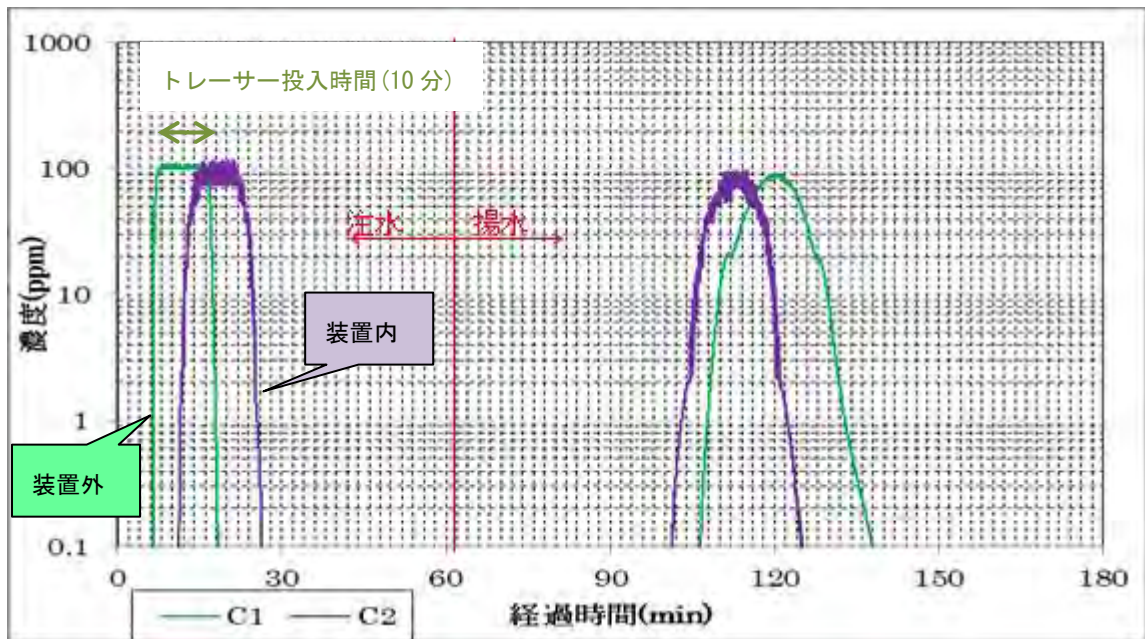
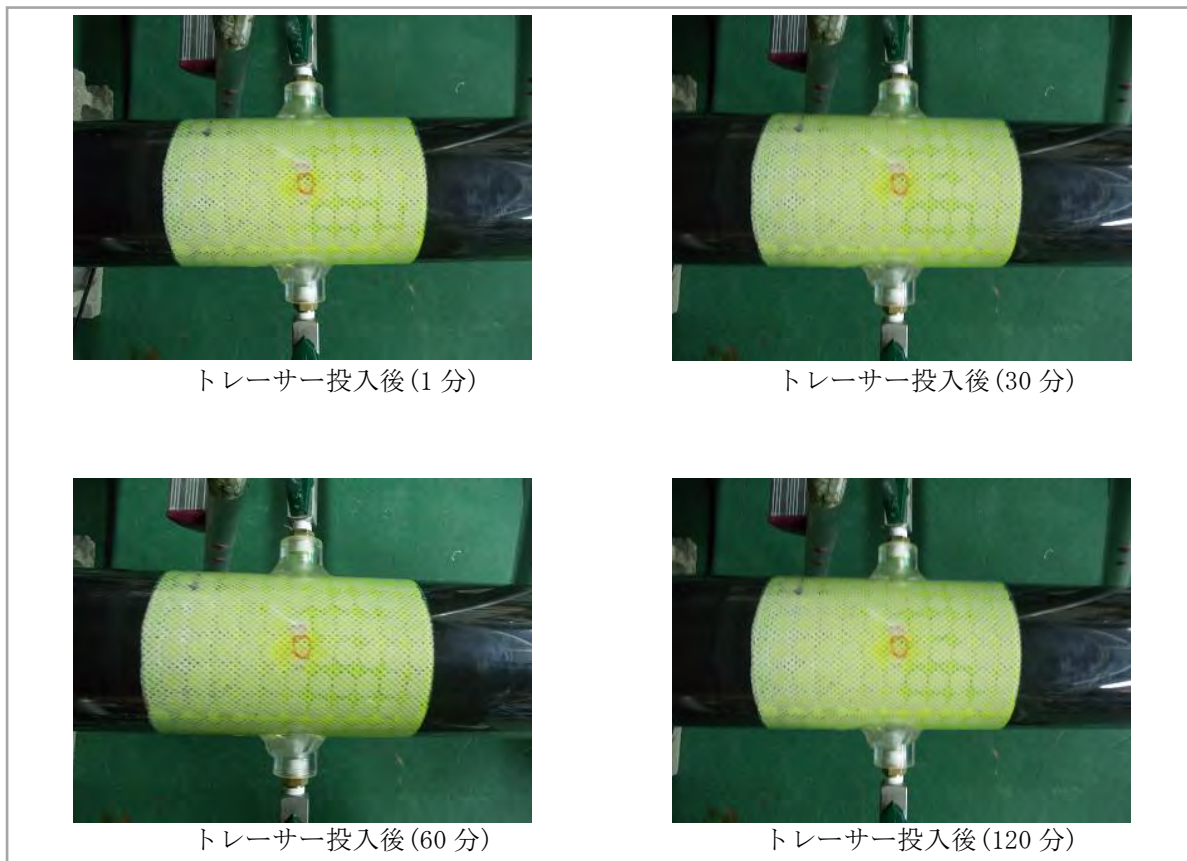


図 2. 4. 5-9 単孔注水揚水試験結果（平成 24 年度、トレーサー 10 分投入）



トレーサー投入後(1分)

トレーサー投入後(30分)

トレーサー投入後(60分)

トレーサー投入後(120分)

図 2. 4. 5-10 単孔注水揚水試験の試験区間におけるウラン希釈状況

循環バルブ実装の効果を検証するため、今回の単孔注水揚水試験と、循環バルブを実装していない過去の試験（H24年度の同条件試験：トレーサー投入10分）において、孔内装置内の蛍光センサーが検出したトレーサー投入時の濃度変化を図2.4.5-11で比較した。なお、図2.4.5-11の上図にはトレーサー濃度の生データを示し、下図では比較しやすくするために最大濃度が一致するように濃度データを平行移動して示した。図2.4.5-11から循環バルブ実装時（H25年度）は、循環バルブが無い場合（H24年度）に比べて、図2.2.1-1で示したようなパルス状となっており、より理想的なトレーサー注入となっていることがわかる。

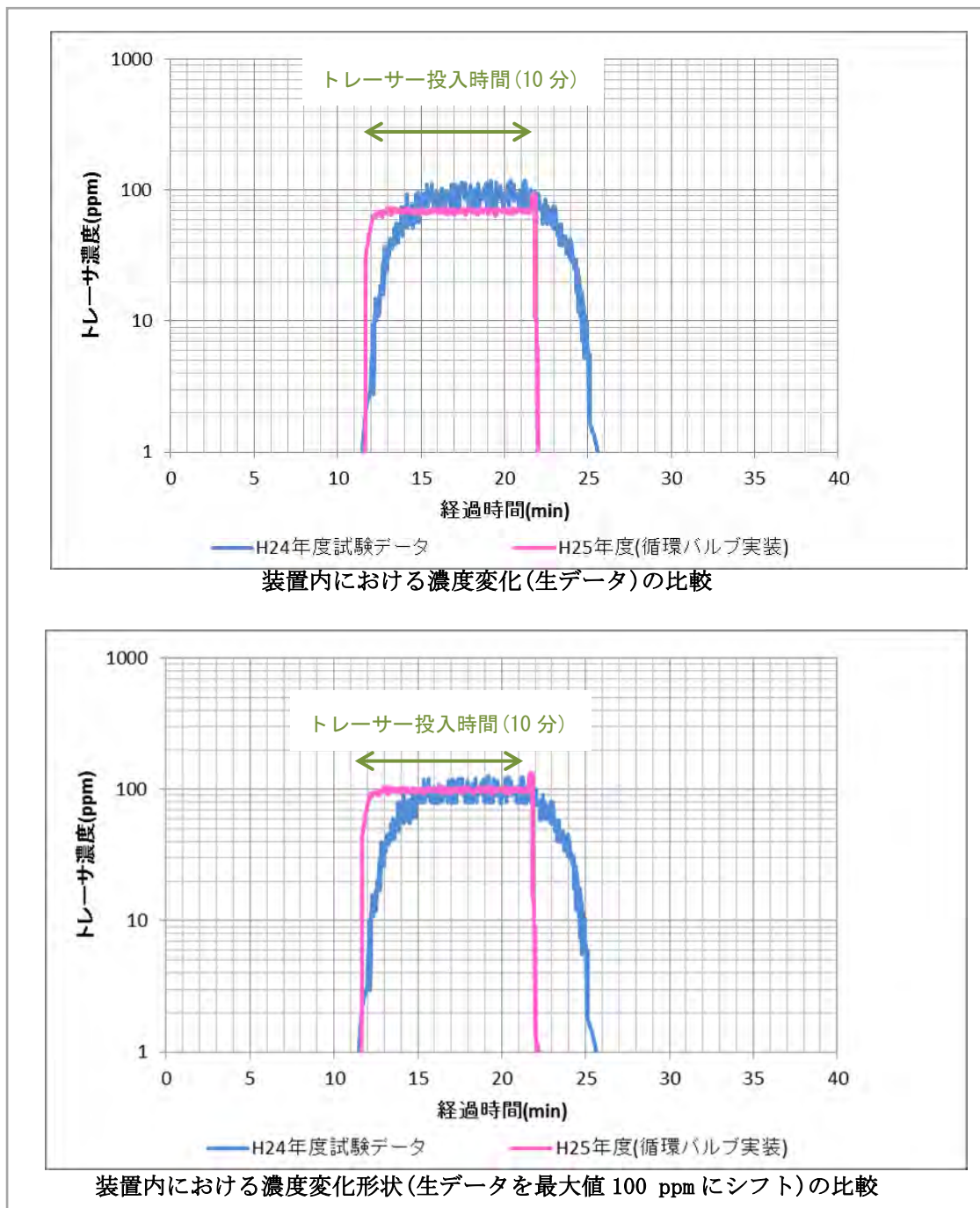


図 2.4.5-11 循環バルブ実装の有無におけるトレーサー投入濃度変化の比較

2.5 まとめ

本年度は、坑道内装置から試験孔内への送水チューブ内でのトレーサー溶液の分散を抑制するための循環バルブの試作と孔内装置への組み込みと、揚水装置側の無脈動ポンプの試作を行った。

まず、トレーサー循環バルブについては、内部のピストンを水圧で移動させることにより、バルブに6箇所設けた注水、回収ポートの流れのパターンを変更することが可能となるように試作した。そして、試作したバルブについて、室内試験により、流路が設計通りに切り替わること、5 MPaの耐水圧性を有することを確認した。また、500回以上の動作確認試験を実施し、その際50回毎にバルブポート間の漏洩検査を行いバルブから漏水がないこともチェックし、循環バルブの耐久性を確認した。これらの確認の後、循環バルブを孔内装置に組み込んだ。循環バルブの組み込み位置は、孔内装置のトレーサー注入・揚水ポートとの距離ができるだけ短くなるように、孔内装置のマンドレル内の蛍光濃度センサーの直近とした。改良前の原位置トレーサー試験装置では、坑道内に設置するトレーサー溶液タンクとボーリング孔内の注入装置とをつなぐ往復約100 mもの長さの注入・回収チューブや注水ポンプ、流量計等の内部において、トレーサー溶液の分散が生じていた。それに対し今回の改良では、坑道に設置する装置と孔内の注入装置との間で、改良前には地下水とトレーサー溶液の兼用としていた注入チューブと回収チューブは地下水専用とし、トレーサー溶液専用の注入チューブと回収チューブを新たに設けた。そして、孔内装置に循環バルブを組み込むことにより、試験区間へ送る地下水とトレーサー溶液との切り替えを孔内装置の中で行うことが可能となり、トレーサーの分散が生じるチューブの長さを往復約0.7 mに縮減することができた。単孔注水揚水試験を模した室内性能確認試験では、循環バルブの組み込みにより矩形状にトレーサー注入を行えることが確認できた。また、ポイント希釈試験を模した室内試験では、坑道と孔内の間の循環経路内の地下水とトレーサー溶液の切り替えを僅かな時間で行うことが可能となり、循環経路内でのトレーサー濃度の偏りに起因する計測濃度の周期的な変動を回避できることが確認できた。

また、揚水装置側のポンプについて、国内での適用性試験に向け5 MPaの水圧下でも使用可能となるように、無脈動ポンプを新たに設計、試作した。その際、無脈動ポンプの機動性と操作性を向上させるために、架台や制御盤の小型化に努めた。そして、室内試験において5 MPaの水圧環境下でポンプを1時間程度作動し、メカニカルシール部より漏水しないことを確認した。さらに、ポンプの回転数を10段階に変化させて水の吐出量を計測し、設定した回転数に応じて線形に水が吐出され、最大吐出量は約2,200 ml/minとなることを確認した。

今後は、国内での原位置適用性試験を通じて新たな課題を抽出し、我が国の地質環境に対応できるように装置の改良・高度化を図る予定である。

3. トレーサー試験結果の評価手法の開発

3.1 はじめに

本研究では、原位置でのトレーサー試験に関わる技術を開発しているが、トレーサー試験においては岩盤に投入したトレーサーの回収率を上げることが、試験を成功させる上で重要である。そのため、原位置で試験を実施する前に数値シミュレーション等により、回収率を上げるための試験条件を明らかにすることを目的として、トレーサー試験の数値シミュレーションを実施する。

また、トレーサー試験の結果から割れ目の開口幅、分散長、割れ目周辺の岩石層への分配係数等、岩盤の物質移行パラメータを精度良く推定する手順を明らかにするために、物質移行パラメータの同定手順について検討を行う。

3.2 原位置孔間トレーサー試験の予備解析

本事業では、開発した原位置トレーサー試験装置の我が国の地質環境に対する適用性を実証するために、平成 26 年度以降に原位置トレーサー試験を実施することを計画している。それに先立ち、7 章で述べるように適用性試験場の地質環境特性調査を実施し、試験場周辺岩盤の水理地質環境の解明を行っている。

ここでは、孔間トレーサー試験の試験条件（トレーサー注入孔・回収孔の配置、注入・揚水流量の設定、試験時間等）を設定する基礎資料とするために、岩盤割れ目を対象としたトレーサー試験の数値シミュレーションを実施する。

孔間トレーサー試験には、放射状収束試験、放射状発散試験、ダイポール試験、自然勾配下試験などの試験手法があり、自然勾配下試験が最も理想的な試験とは考えられるが、試験にかかる時間や費用の面から実施は困難である。そのため、平成 26 年度以降の原位置試験では、自然勾配下試験に近い物質移行パラメータが得られるダイポール試験を計画している。そのため、ここではダイポール試験を想定した数値シミュレーションを実施する。

ダイポール試験は、図 3.2-1 に示すように、一本のボーリング孔において水を注入し、別の一本のボーリング孔で揚水を行い、周囲の地下水流動場が定常状態に達した後に、注水孔からトレーサーをパルス状またはステップ状にインプットし、揚水孔においてトレーサー濃度を計測する試験である。

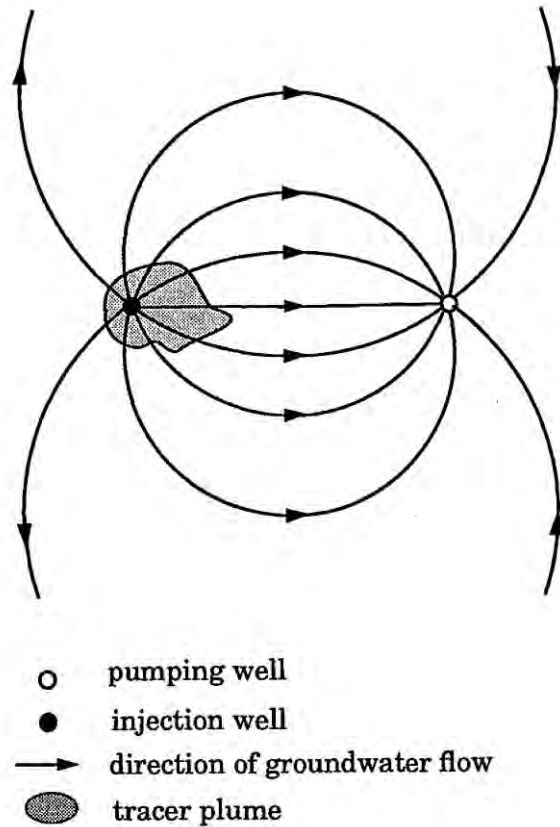


図 3.2-1 ダイポール試験の概念 (National Research Council、1996)

3.2.1 解析条件

解析対象として単一割れ目を想定し、解析モデルは2次元とする。解析領域は、図 3.2.1-1 に示すように1辺の長さが 30 m の正方形とする。解析領域の中心部には、割れ目に直交する 2 本のボーリング孔を設定する。ボーリング孔の直径は 86 mm とし、孔の中心間の距離は 2.5 m とする。これらのボーリング孔は、トレーサー試験の数値シミュレーションにおいて、注入孔、回収孔の役割を果たす。

解析に使用した有限要素メッシュを図 3.2.1-2 に示す。要素数は 23,245 ですべて 4 角形要素、節点数は 23,356 である。ボーリング孔の近傍では、特に要素を細かく分割し、孔内間隙側に 3.5 mm 幅の要素を一層設定し、孔から外に向かって 4.2 mm、4.5 mm、4.9 mm 幅の要素とした。

解析は、以下の手順により実施する。

- ① 所定のバックグラウンドの (元々存在する) 動水勾配、注水流量、揚水流量での定常地下水流動解析を行う。
- ② 上記①の地下水流動場の下で、注水孔から 1 ppm の濃度のトレーサーを 10 分間注入する。
- ③ 割れ目内のトレーサーの移動状況を計算し、揚水孔で回収されるトレーサー濃度の経時変化を算出する。

割れ目の透水量係数 T は、解析領域全体で $2.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ で一様とした。また、割れ目の開口幅 e に

は、Doe's law と呼ばれる以下の式(Uchuida *et al.*, 1994)により算出される 0.79 mm を設定した。

$$e = 0.5\sqrt{T}$$

割れ目の間隙率は 1.0 (=100 %) とした。トレーサーとしてウラニンを想定し、水中拡散係数を $4.50 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{sec}$ に設定した。また、縦分散長は孔間距離の 1/10 の 0.25 m、横分散長はさらにその 1/10 の 0.025 m に設定した。

解析は、バックグラウンドの動水勾配の方向や揚水流量、注水流量を変えて行った。

設定した境界条件を図 3.2.1-3~8 に示す。バックグラウンドの地下水流れが無い場合には、図 3.2.1-3 に示すように、周囲の境界のすべてを同一の全水頭に固定した。一方、バックグラウンドの地下水流れが存在する場合には、割れ目内の単位幅あたりの地下水流量がポイント希釈試験で推定された流量の対数平均値である $3.30 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{sec}$ となるように、想定する地下水流れの方向に応じて図 3.2.1-4~7 に示す境界条件を設定した。割れ目開口幅を 1.58 mm に変更したケースでは、上記の Doe's law により透水量係数は $2.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ の 4 倍の $1.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$ となるため、図 3.2.1-8 に示すように、動水勾配が図 3.2.1-7 の 1/4 になるように境界条件を設定した。

解析ケースを表 3.2.1-1 に示す。

なお、解析には、当所が開発した地下水流動・物質移行解析コード FEGM (河西 他、1994、1995) を用いた。

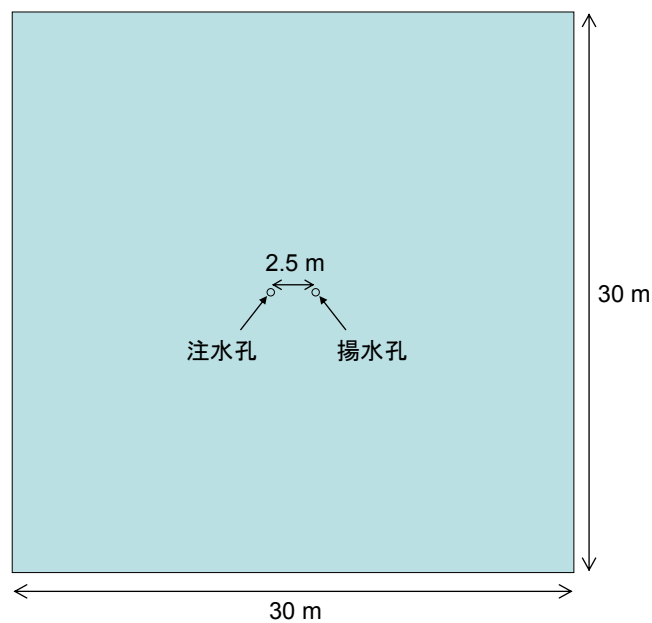
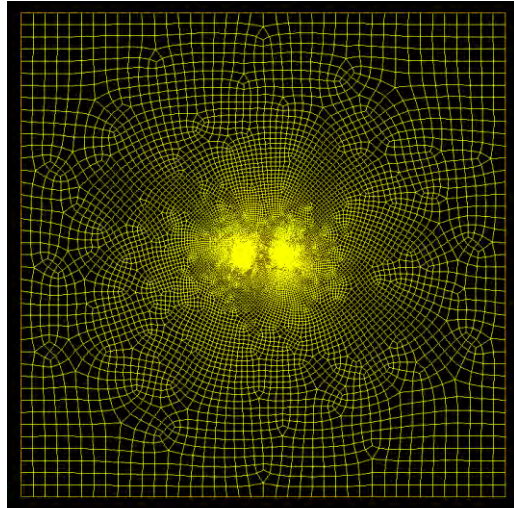
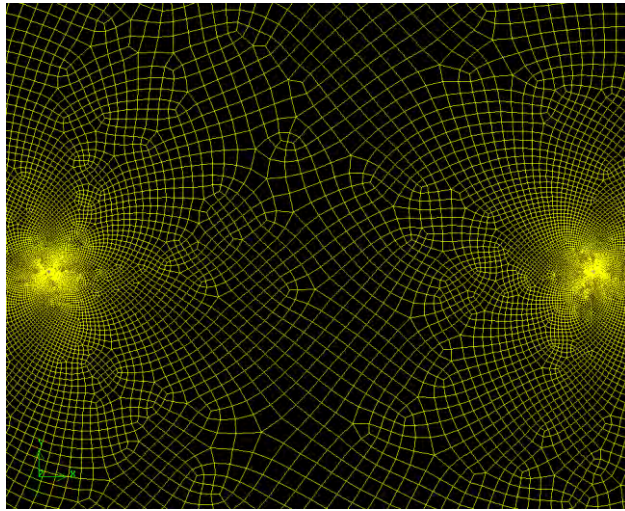


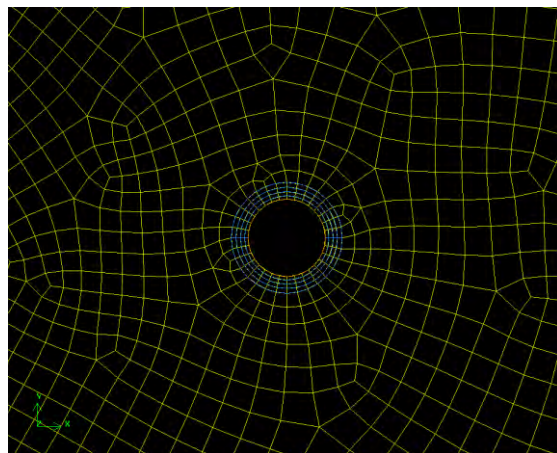
図 3.2.1-1 解析領域



(a) 全体図



(b) 中心部拡大



(c) ボーリング孔近傍

図 3.2.1-2 有限要素分割図

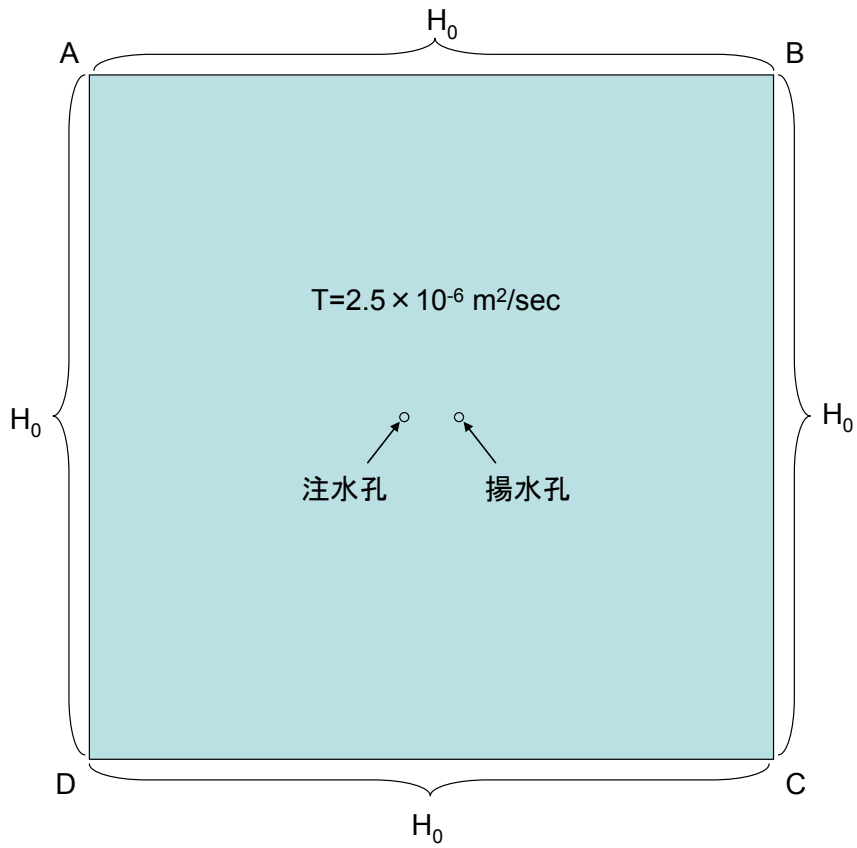


図 3. 2. 1-3 水理学的境界条件 (バックグラウンド流れ無し)

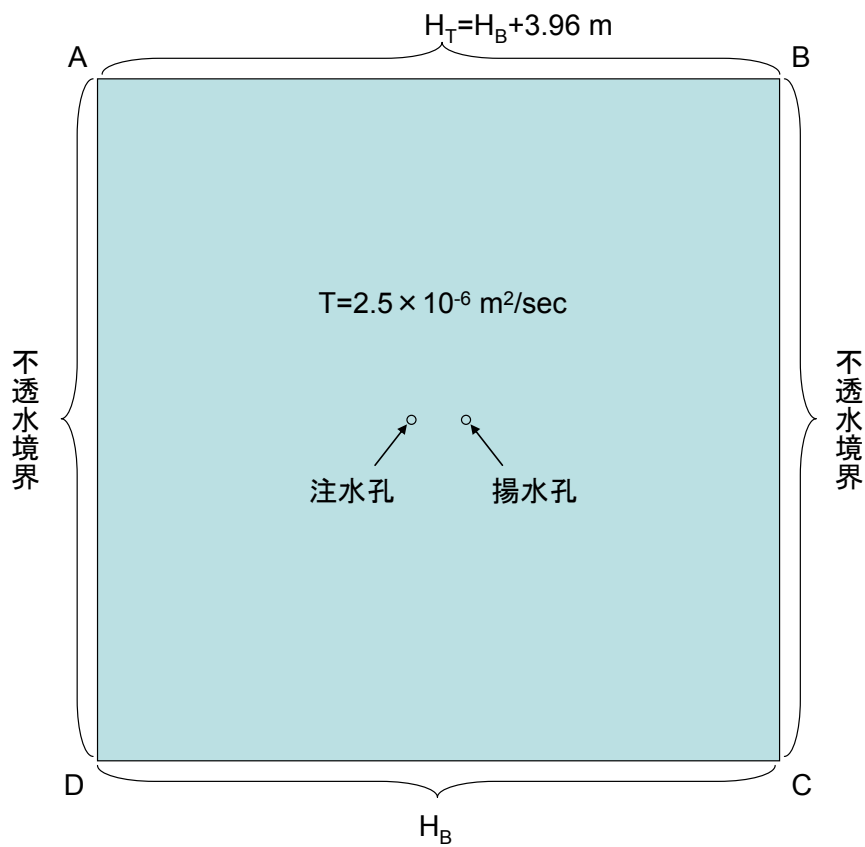


図 3. 2. 1-4 水理学的境界条件 (バックグラウンド流れ：注水孔と揚水孔を結ぶ線に直交)

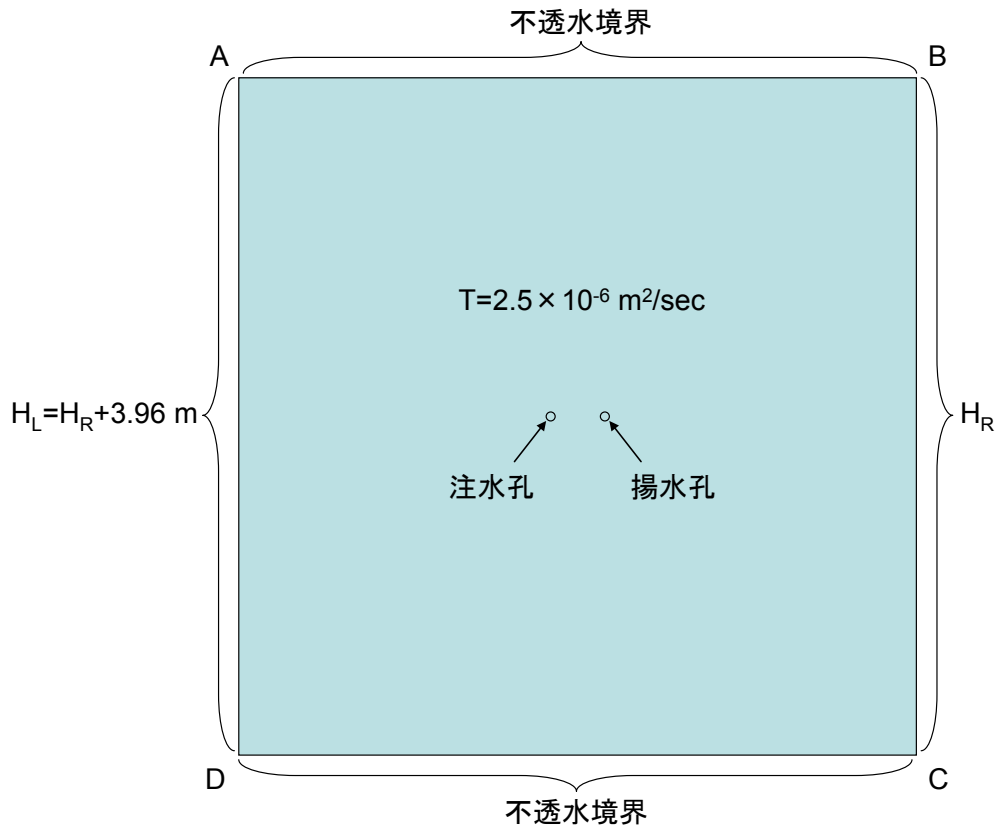


図 3. 2. 1-5 水理学的境界条件 (バックグラウンド流れ : 注水孔→揚水孔)

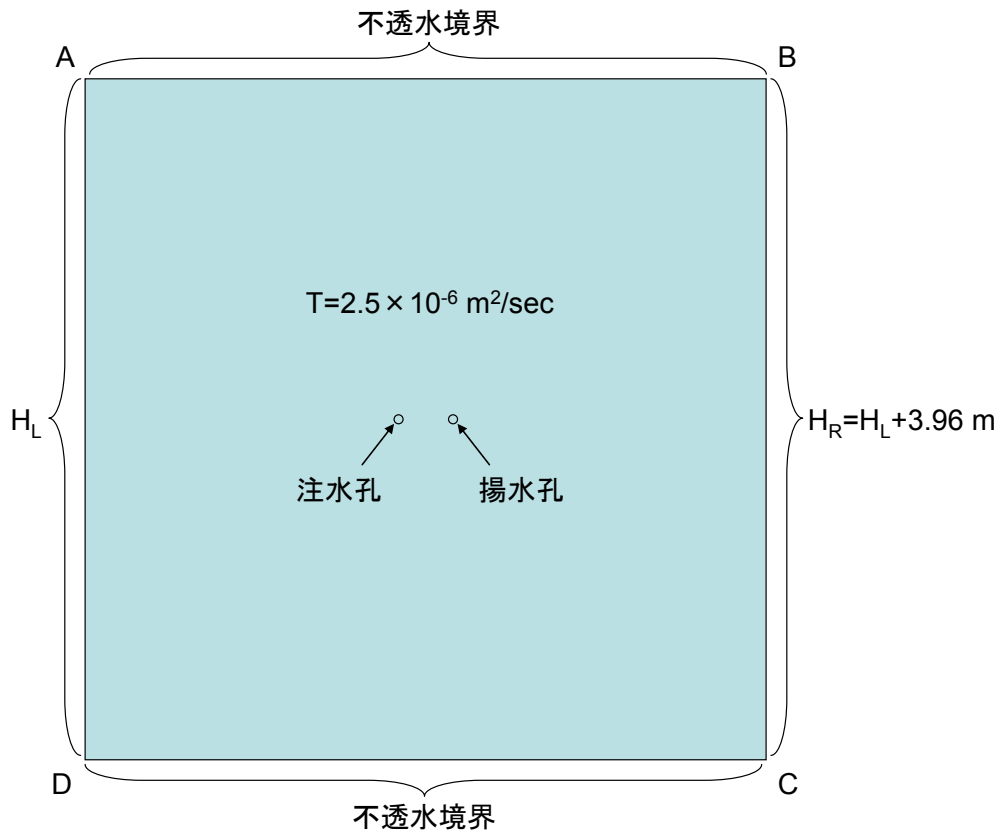


図 3. 2. 1-6 水理学的境界条件 (バックグラウンド流れ : 揚水孔→注水孔)

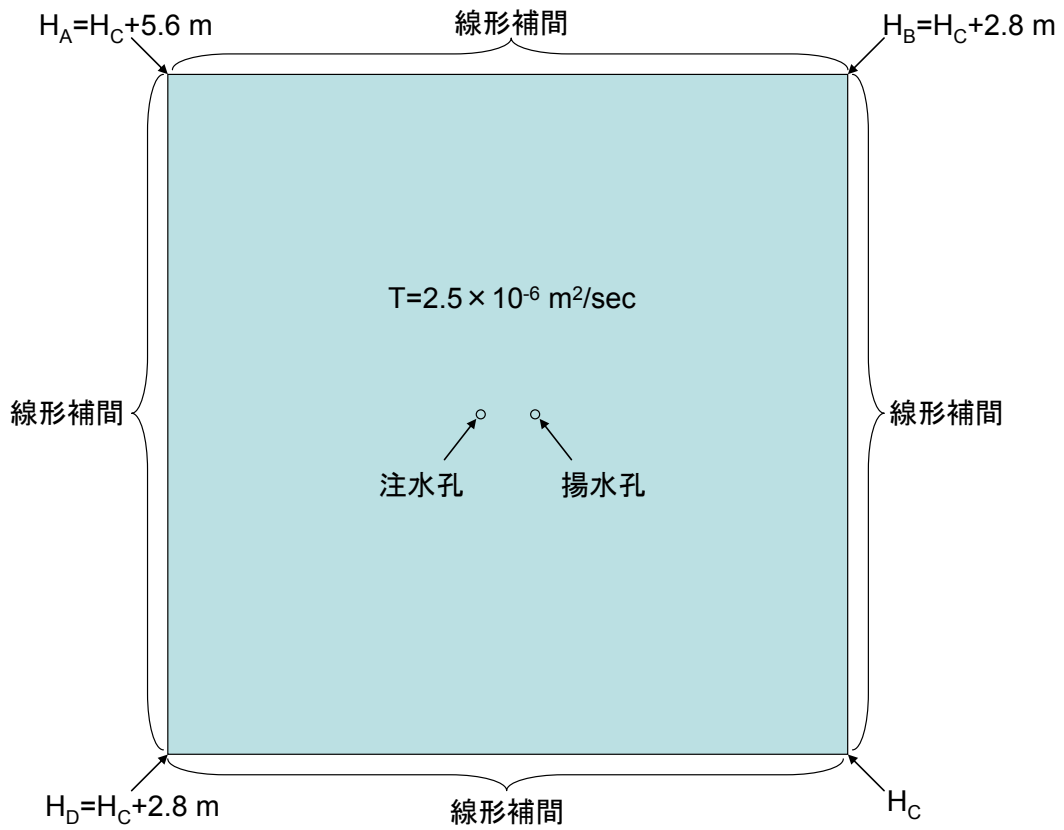


図 3. 2. 1-7 水理学的境界条件 (バックグラウンド流れ : 斜め 45 度)

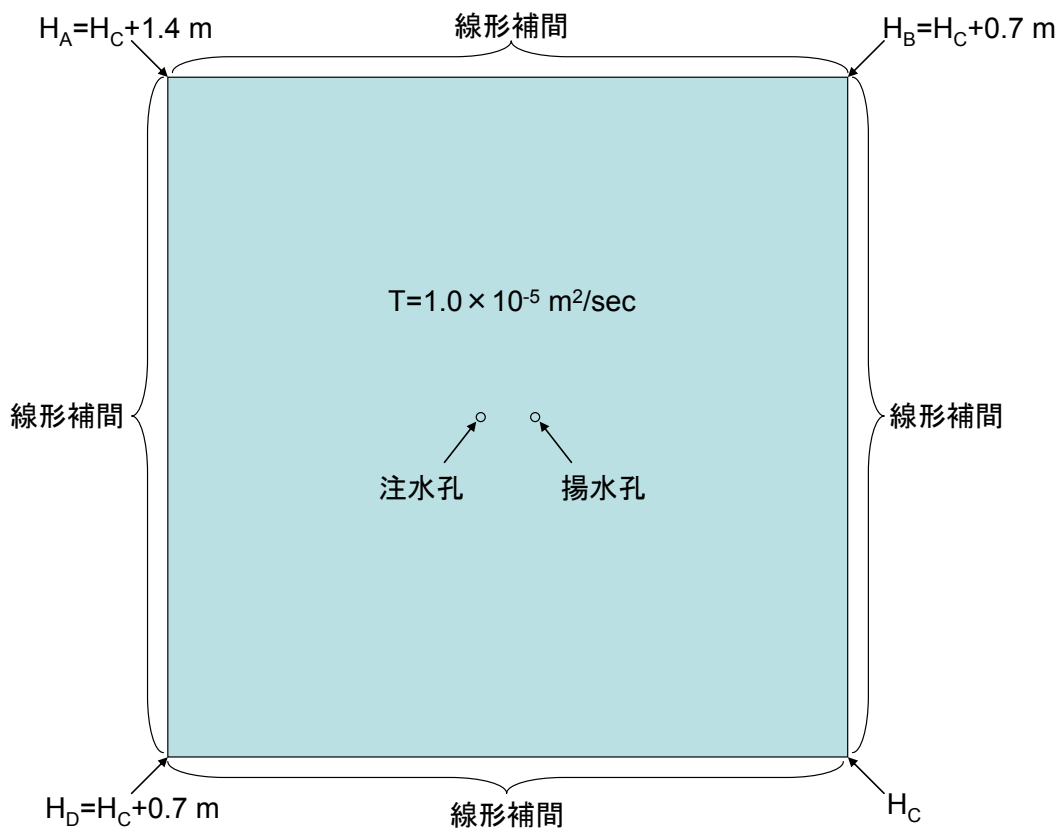


図 3. 2. 1-8 水理学的境界条件 (割れ目開口幅 : 1.58 mm、バックグラウンド流れ : 斜め 45 度)

表 3. 2. 1-1 解析ケース

ケース	注水量 [cc/min]	揚水量 [cc/min]	動水勾配 [m/m]	動水勾配 方向	透水量係数 [m ² /sec]	開口幅 [mm]
1	50	50	0	なし	2. 50E-06	0. 79
2	50	50	0. 132	上→下	2. 50E-06	0. 79
3	200	200	0. 132	上→下	2. 50E-06	0. 79
4	100	200	0. 132	上→下	2. 50E-06	0. 79
5	50	50	0. 132	左→右	2. 50E-06	0. 79
6	10	10	0. 132	左→右	2. 50E-06	0. 79
7	10	20	0. 132	左→右	2. 50E-06	0. 79
8	5	10	0. 132	左→右	2. 50E-06	0. 79
9	50	50	0. 132	右→左	2. 50E-06	0. 79
10	200	200	0. 132	右→左	2. 50E-06	0. 79
11	200	400	0. 132	右→左	2. 50E-06	0. 79
12	100	400	0. 132	右→左	2. 50E-06	0. 79
13	50	50	0. 132	左上→右下	2. 50E-06	0. 79
14	200	200	0. 132	左上→右下	2. 50E-06	0. 79
15	100	200	0. 132	左上→右下	2. 50E-06	0. 79
16	100	200	0. 033	左上→右下	1. 00E-05	1. 58

3.2.2 解析結果

まず、バックグラウンドの地下水流れが無い場合の解析結果を図 3.2.2-1、2 に示す。図 3.2.2-1 は回収孔でのトレーサー濃度の破過曲線であり、図 3.2.2-2 は回収孔でのトレーサーの累積回収率の経時変化である。注水流量、揚水流量は、ともに 50 cc/min である。回収孔でのトレーサー濃度は、試験開始後 101 分に最大値 32.2ppb に達し、その後は減小していく。バックグラウンドの地下水流れが無い場合、理論的には無限大時間後には累積回収率は 100 %に達するはずであるが、600 分経過時点での回収率は 60.3 %にとどまっている。

次に、バックグラウンドの地下水が注水孔と揚水孔を結ぶ線分に対し直交する方向に流れている場合の解析結果を図 3.2.2-3、4 に示す。図には、比較のために、バックグラウンドの地下水流れが無い場合の注水流量、揚水流量がともに 50 cc/min の解析結果も示した。このバックグラウンドの地下水流れの場合には、注水流量、揚水流量がともに 50 cc/min のケースでは、トレーサーはバックグラウンドの地下水流れにより流されてしまい、回収孔でのトレーサー濃度は最大でも 0.0123 ppb (試験開始後 151 分) にしかならず、累積回収率も 600 分後に 0.0161 %でほとんど回収されない。一方、注水流量、揚水流量をともに 200 cc/min に増やすと、濃度の最大値は 96.2 ppb (試験開始後 31.5 分) となり、累積回収率も 600 分後に 40.2 %まで増える。ただし、バックグラウンドの地下水流れが無く注水流量と揚水流量がともに 50 cc/min のケースでは、累積回収率は 600 分後でも増加傾向にあるのに対し、このケースでは 200 分以降はほとんど増えていない。揚水流量は 200 cc/min のままで注水流量を 100 cc/min に減らしたケースでは、回収孔でのトレーサー濃度が最大値 (38.3 ppb) に達する時間が 41.5 分後とやや遅れるが、累積回収率は 600 分後で 42.0 %と僅かではあるが増えている。なお、回収孔でのトレーサー濃度が注水流量、揚水流量ともに 200 cc/min のケースよりも低くなっているのは、注水流量が減ったことにより、割れ目に投入されたトレーサー量が減ったためである。

続いて、バックグラウンドの地下水が注水孔から揚水孔に向かう方向に流れている場合の解析結果を図 3.2.2-5、6 に示す。このバックグラウンドの地下水流れの場合には、注水流量、揚水流量がともに 50 cc/min のケースでは、バックグラウンドの地下水流れが無い場合に比べて、回収孔でのトレーサー濃度が最大値に達する時刻は 49.8 分後と早く、最大値も 139 ppb と高い。また、累積回収率も 600 分後で 81.6 %と高い。注水流量、揚水流量をともに 10 cc/min に減らしたケースでは、回収孔でのトレーサー濃度が最大値 (58.3 ppb) に達する時刻は 66.7 分後とやや遅くなり、累積回収率は 600 分後で 42.7 %と低くなる。注水流量は 10 cc/min のままで、揚水流量を 20 cc/min に増やしたケースでは、回収孔でのトレーサー濃度が最大値 (50.6 ppb) に達する時刻は 63.1 分後とやや早くなり、累積回収率は 600 分後で 70.8 %と高くなった。注水流量を 5 cc/min、揚水流量を 10 cc/min としたケースでは、回収孔でのトレーサー濃度が最大値 (30.0 ppb) に達する時刻は 69.8 分後で、累積回収率は 600 分後で 45.9 %であった。

今度は、バックグラウンドの地下水が揚水孔から注水孔に向かう方向に流れている場合の解析結果を図

3.2.2-7、8に示す。注水流量、揚水流量をともに50 cc/minとしたケースでは、回収孔でのトレーサー濃度は最大でも 3.65×10^{-4} ppb（試験開始後235分）、累積回収率も600分後で 7.53×10^{-4} %とほとんど回収されない。注水流量、揚水流量ともに200 cc/minにしたケースでは、回収孔でのトレーサー濃度の最大値は47.3 ppb（試験開始後38.1分）、600分後の累積回収率は25.7 %と増える。注水流量は200 cc/minのまま揚水流量を400 cc/minに増やしたケースでは、回収孔でのトレーサー濃度の最大値は69.7 ppb（試験開始後26.5分）、600分後の累積回収率は52.2 %とさらに増える。揚水流量は400 cc/minのまま注水流量を100 cc/minに減らしたケースでは、回収孔でのトレーサー濃度は試験開始後33.1分後に最大値31.3 ppbに達し、600分後の累積回収率は59.3 %に増える。

さらに、バックグラウンドの地下水が注水孔のある側から揚水孔のある側に斜め45度に流れている場合の解析結果を図3.2.2-9、10に示す。注水流量、揚水流量をともに50 cc/minとしたケースでは、回収孔でのトレーサー濃度は最大でも19.3 ppb（試験開始後63.1分）で、600分後の累積回収率は13.2 %に過ぎない。注水流量、揚水流量ともに200 cc/minに増やしたケースでは、回収孔でのトレーサー濃度は試験開始後26.5分に最大値173 ppbに達し、600分後の累積回収率は65.3 %まで増えた。揚水流量は200 cc/minのまま注水流量を100 cc/minに減らしたケースでは、回収孔でのトレーサー濃度は試験開始後31.5分で最大値92.6 ppbに達し、600分後の累積回収率はさらに85.0 %まで増えた。

割れ目の開口幅が回収孔での破過曲線や累積回収率に及ぼす影響を調べるために、バックグラウンドの地下水が注水孔のある側から揚水孔のある側に斜め45度に流れている場合の注水流量を100 cc/min、揚水流量を200 cc/minとしたケースについて、割れ目開口幅を2倍にした計算を行った。その際、バックグラウンドの地下水の流量が同一になるように境界条件を設定したため、バックグラウンドの地下水流速は1/2となる。解析結果を図3.2.2-11、12に示す。割れ目開口幅を2倍にしたケースでは、割れ目内での流速が1/2になるため、回収孔でのトレーサー濃度が最大値に達するのは試験開始後58.1分後と遅くなり、最大値も47.2 ppbと約1/2となる。一方、累積回収率は試験の初期段階では低いものの、試験開始後60分経過した頃には回収率の増加率は逆転し、600分後には84.5 %とほぼ同じ回収率となる。

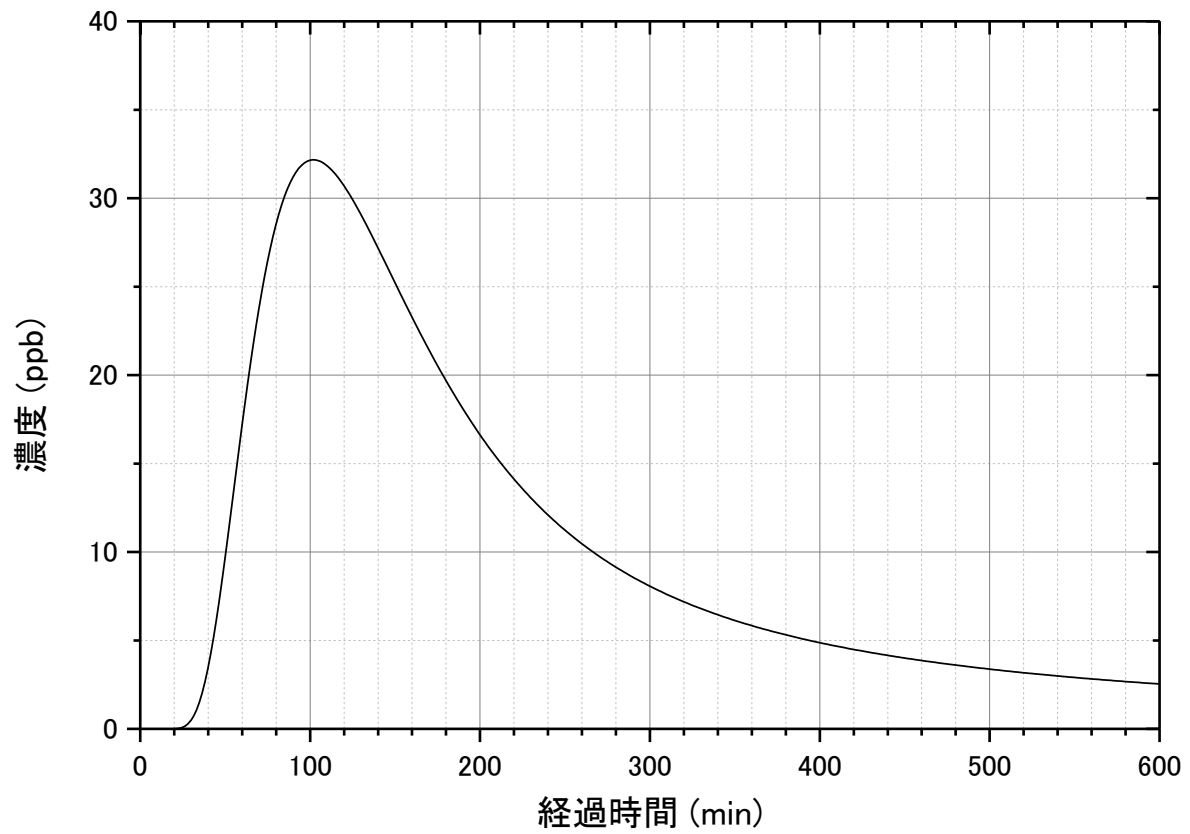


図 3. 2. 2-1 破過曲線 (バックグラウンド流れ無し)

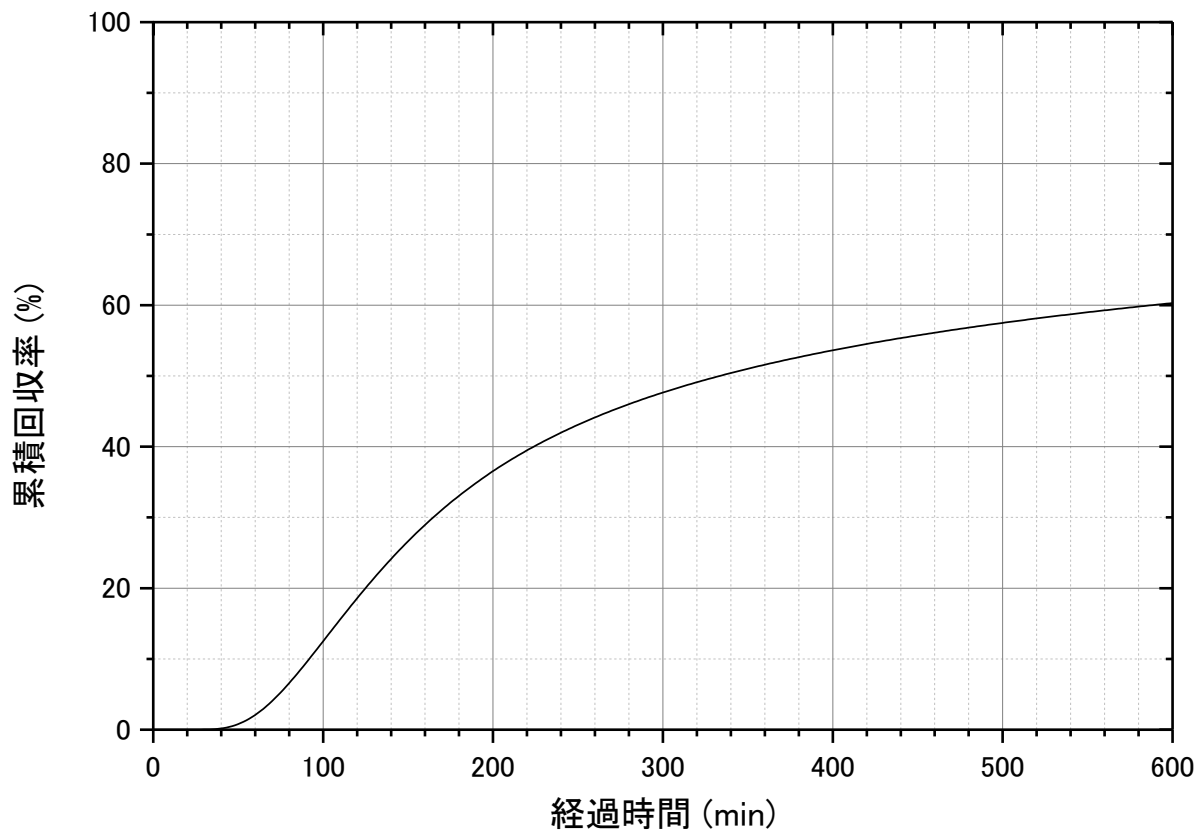


図 3. 2. 2-2 累積回収率 (バックグラウンド流れ無し)

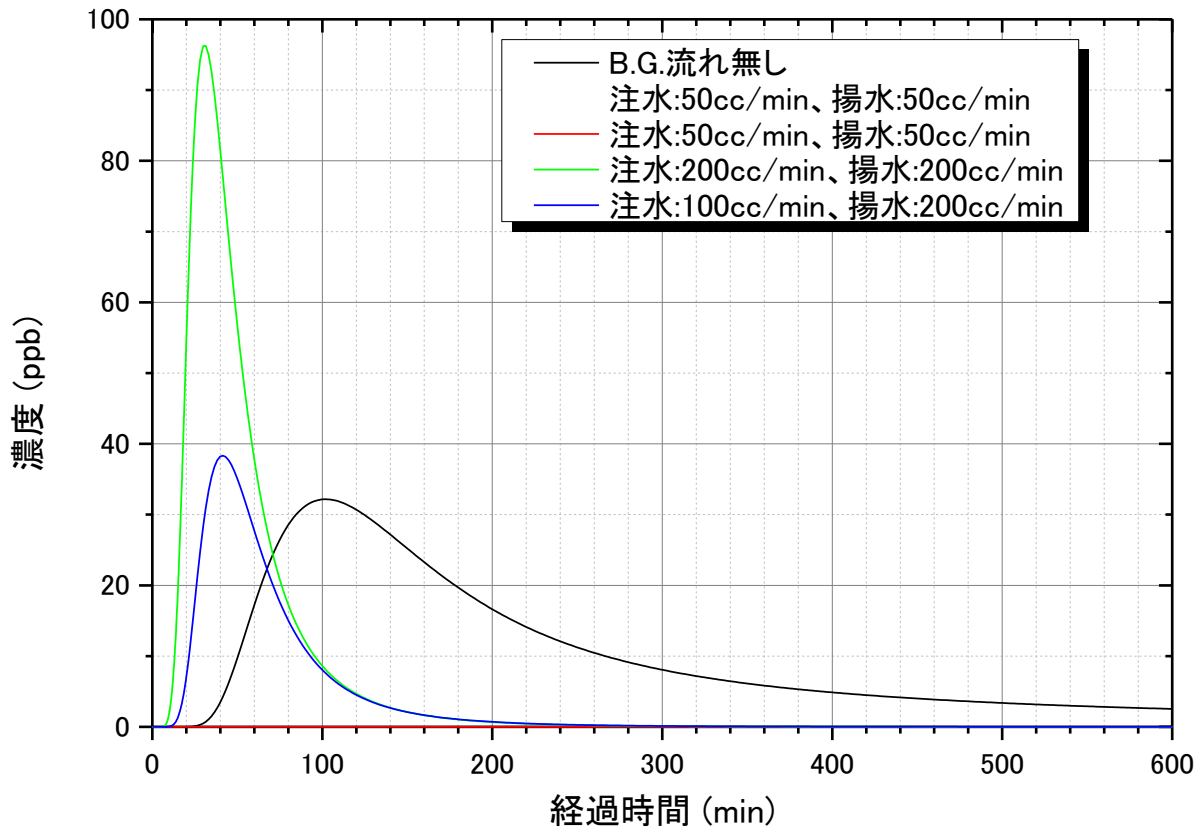


図 3. 2. 2-3 破過曲線 (バックグラウンド流れ：注水孔と揚水孔を結ぶ線に直交)

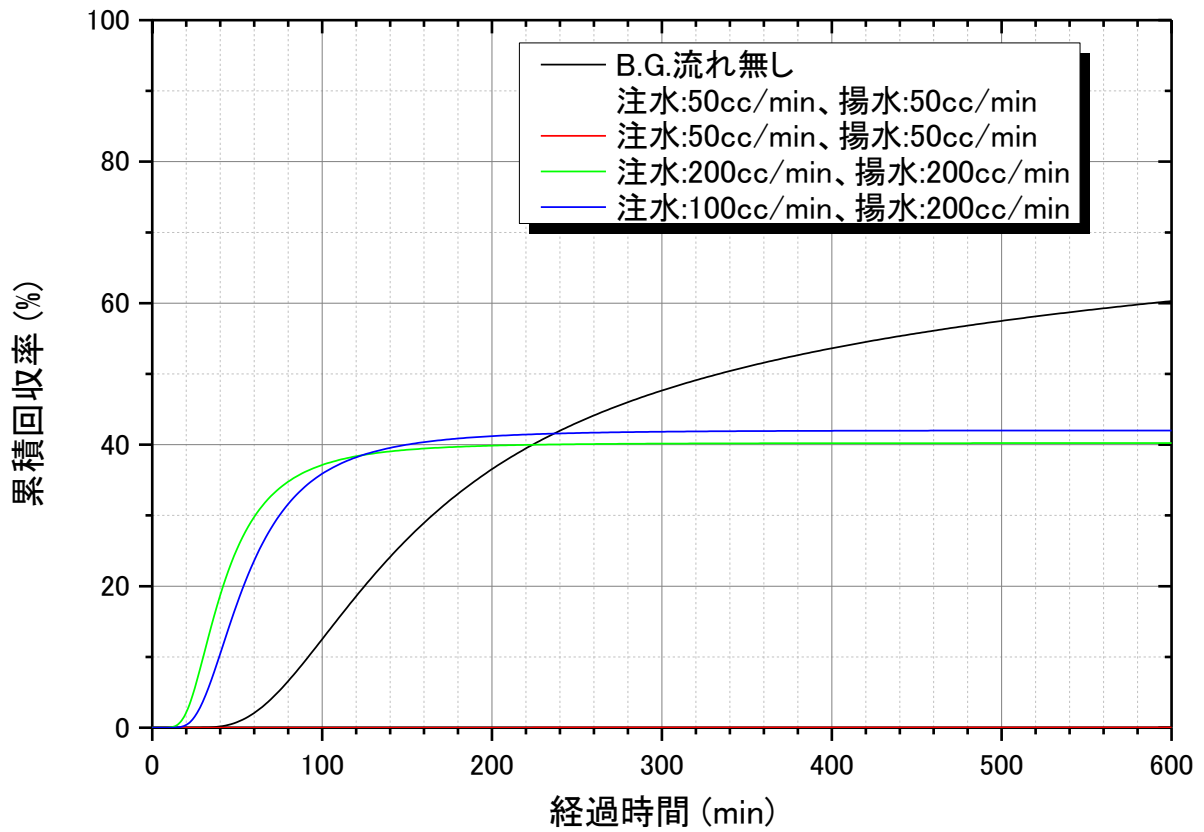


図 3. 2. 2-4 累積回収率 (バックグラウンド流れ：注水孔と揚水孔を結ぶ線に直交)

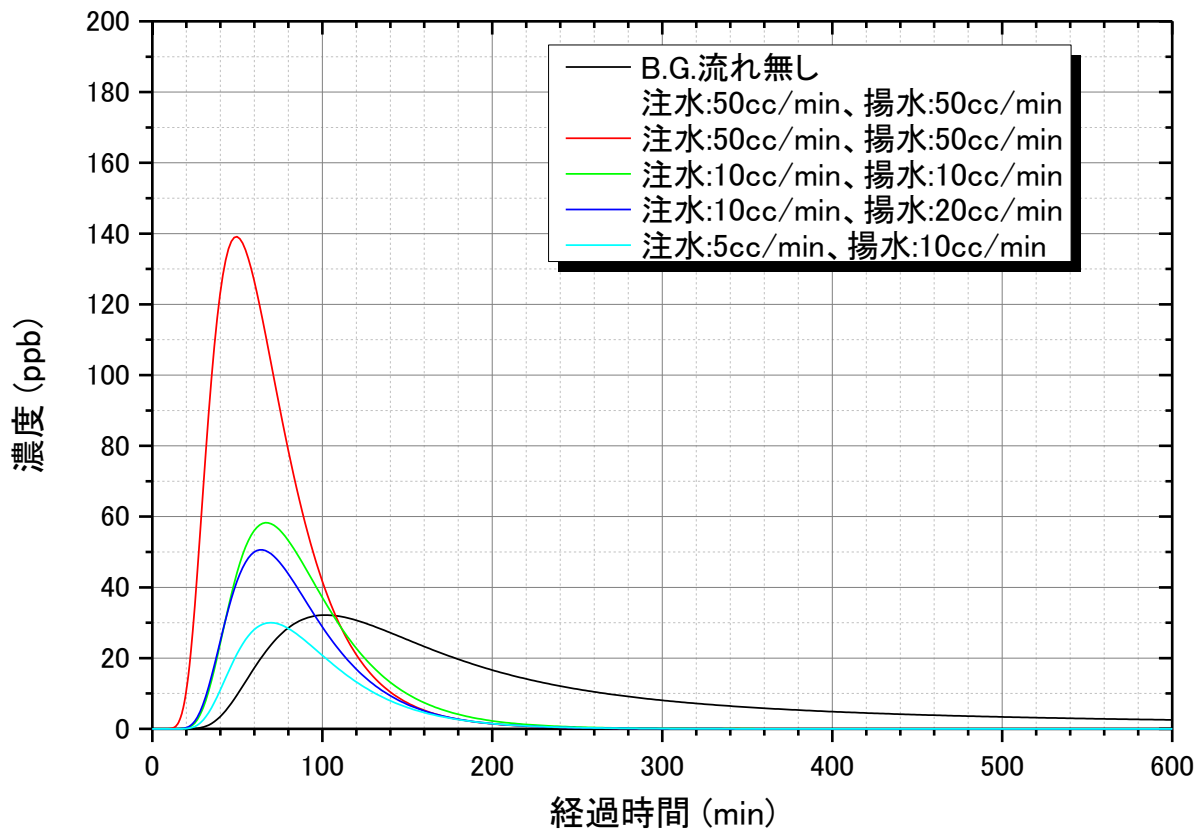


図 3. 2. 2-5 破過曲線 (バックグラウンド流れ：注水孔→揚水孔)

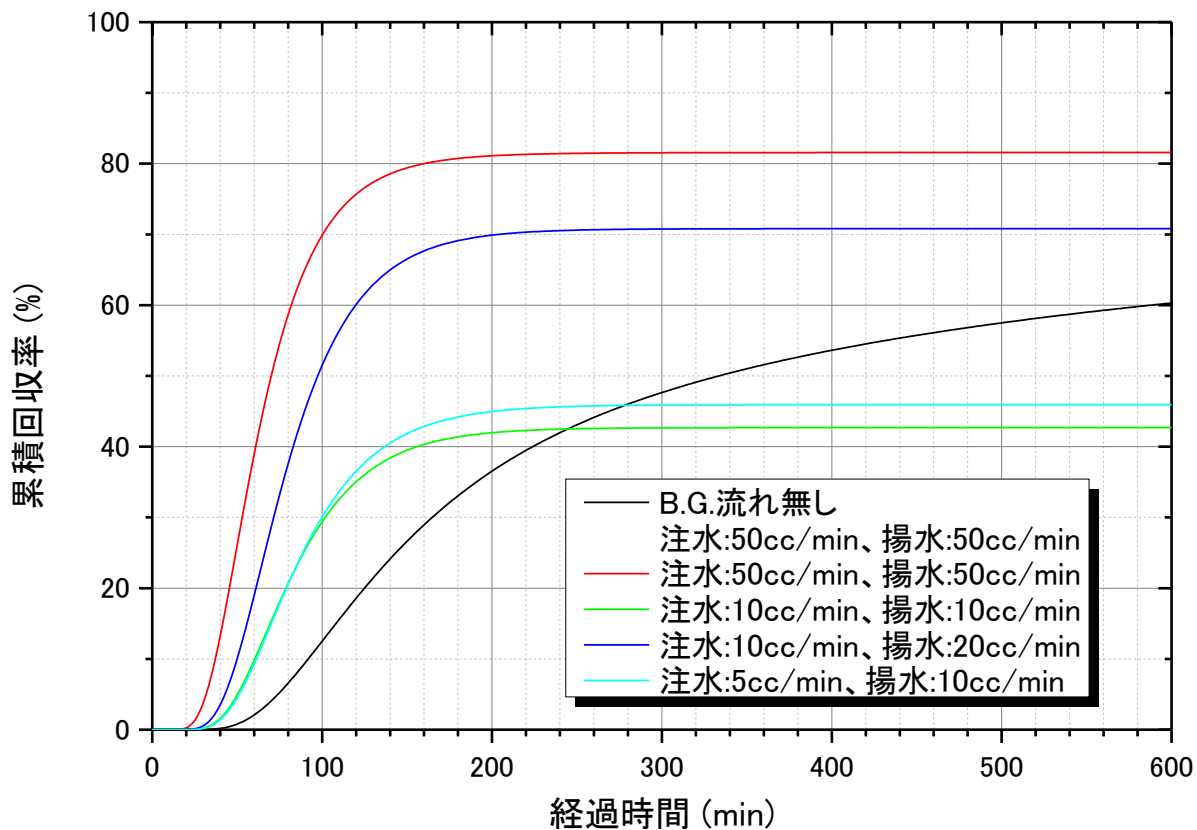


図 3. 2. 2-6 累積回収率 (バックグラウンド流れ：注水孔→揚水孔)

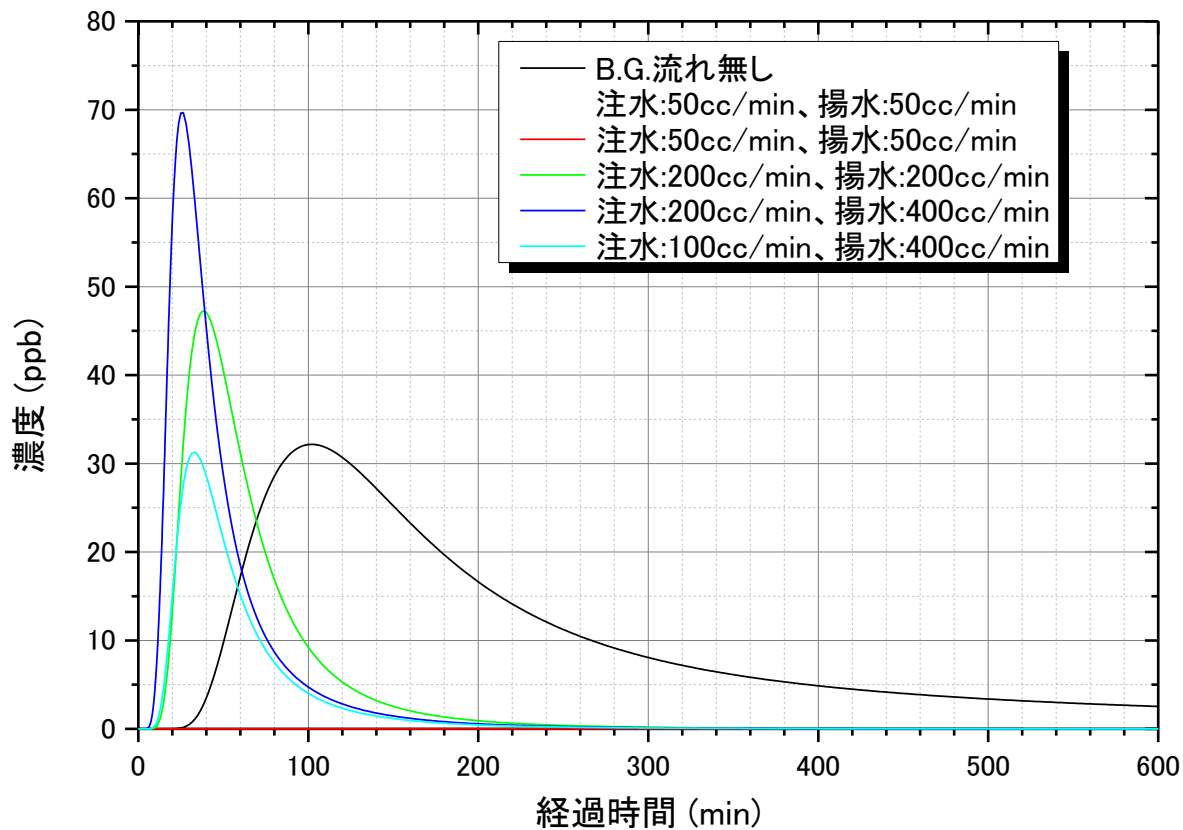


図 3. 2. 2-7 破過曲線 (バックグラウンド流れ : 揚水孔→注水孔)

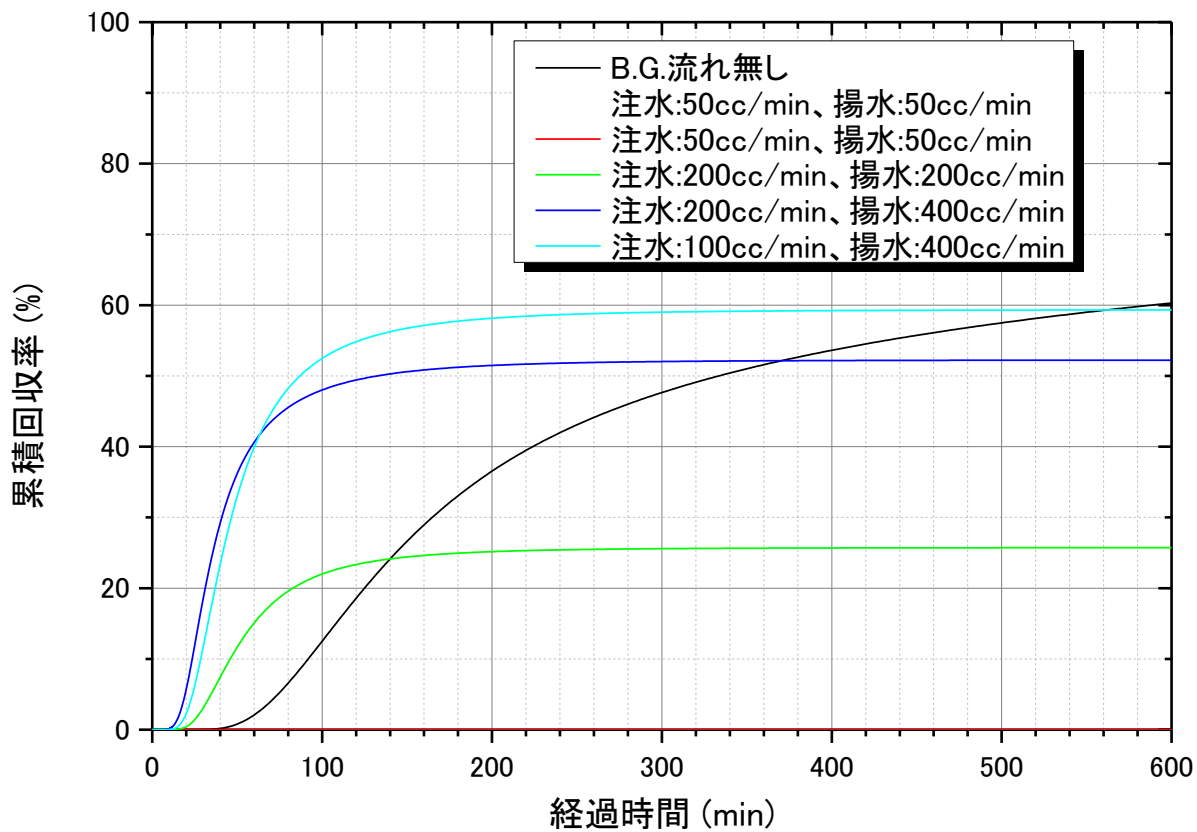


図 3. 2. 2-8 累積回収率 (バックグラウンド流れ : 揚水孔→注水孔)

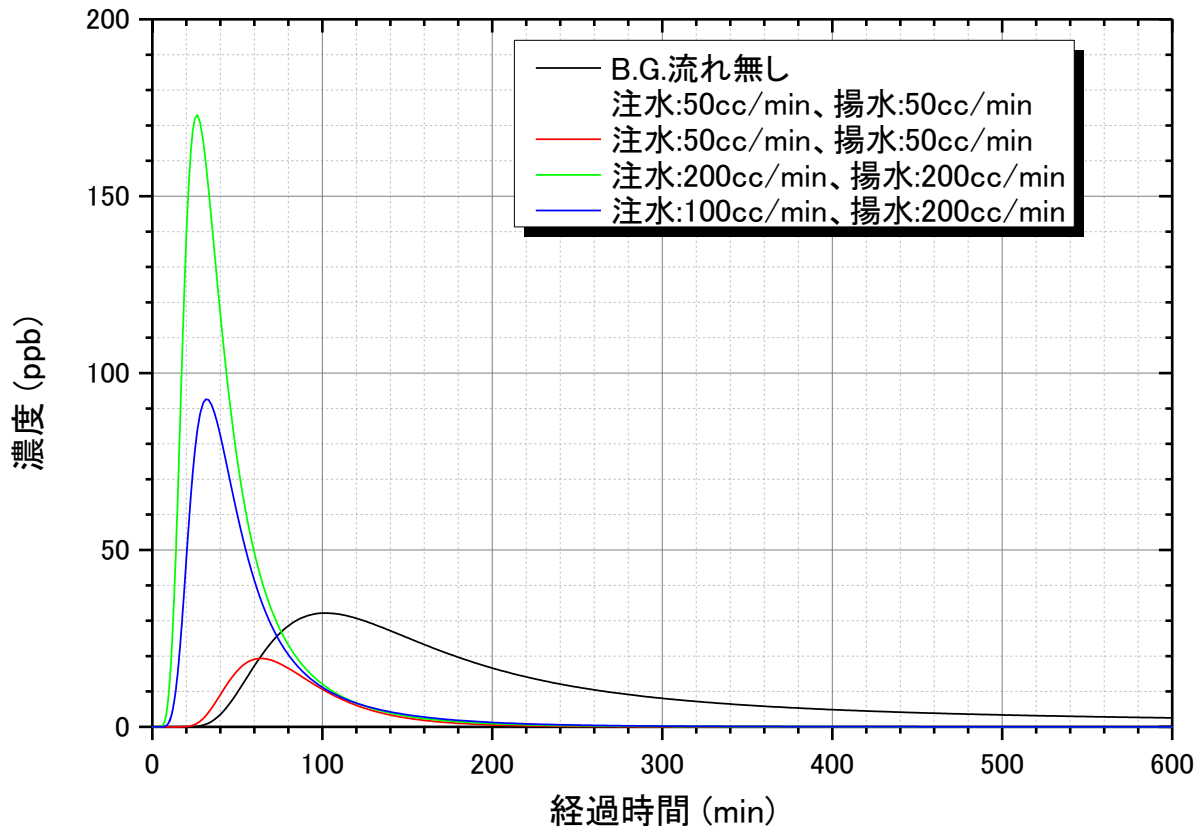


図 3. 2. 2-9 破過曲線 (バックグラウンド流れ : 斜め 45 度)

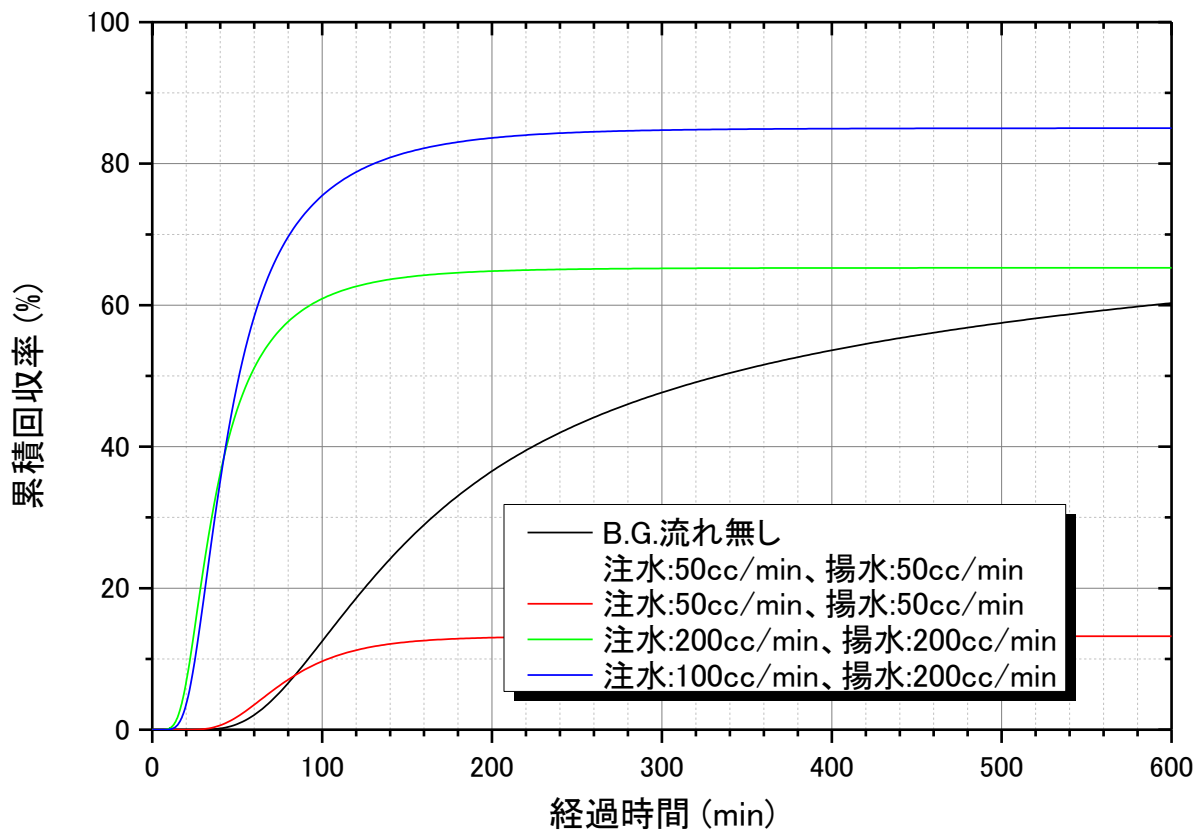


図 3. 2. 2-10 累積回収率 (バックグラウンド流れ : 斜め 45 度)

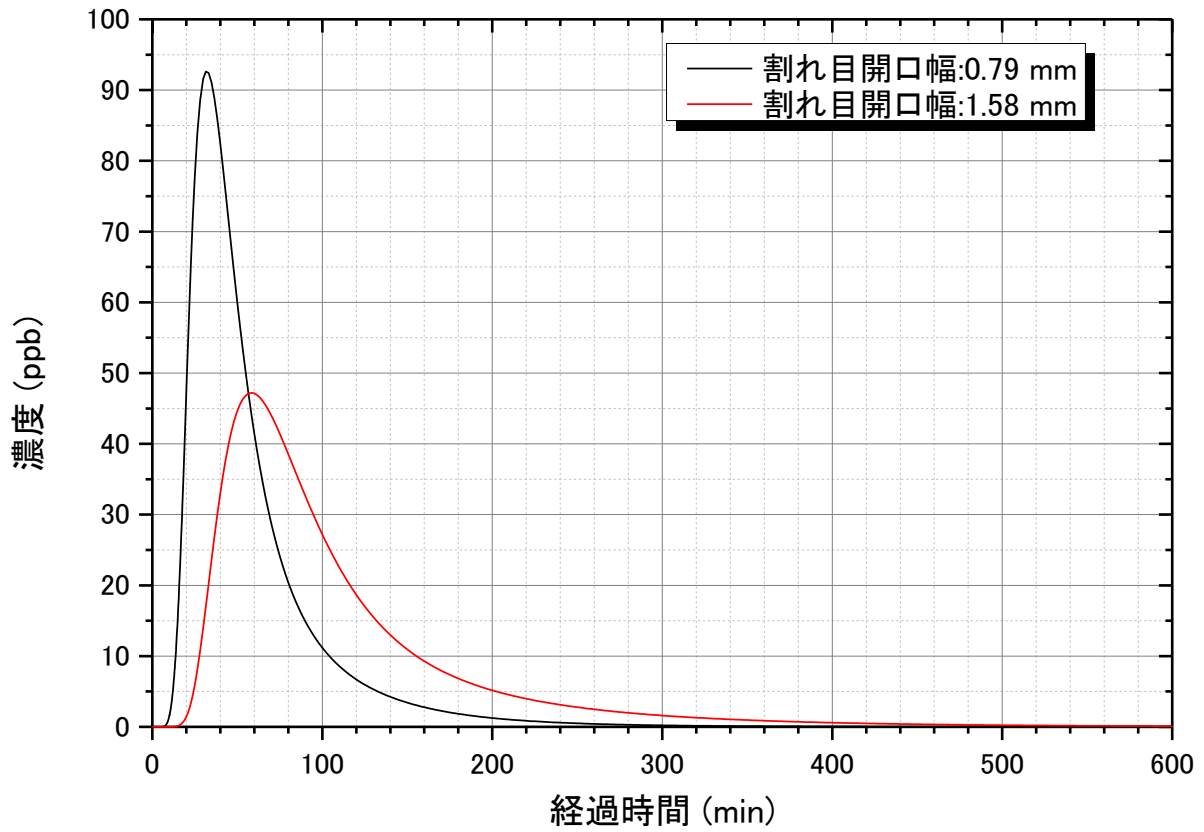


図 3. 2. 2-11 割れ目開口幅の破過曲線への影響 (バックグラウンド流れ : 斜め 45 度)

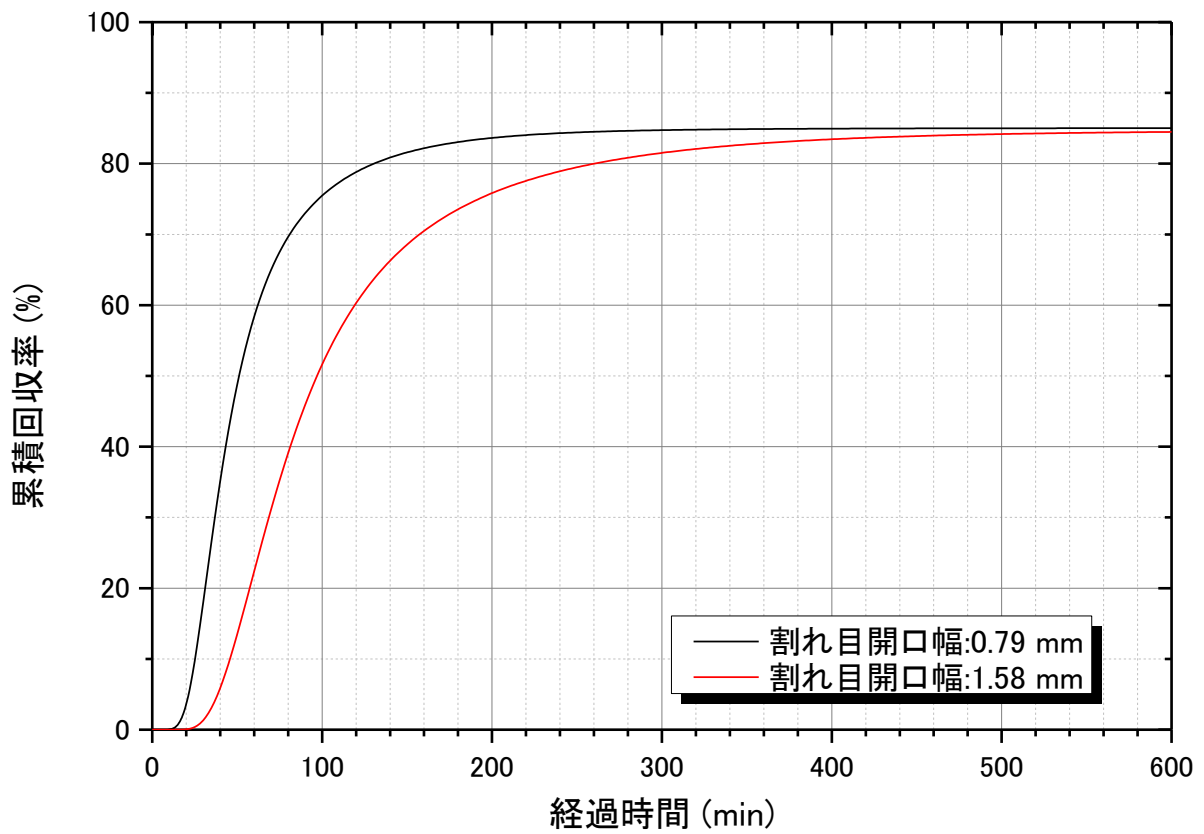


図 3. 2. 2-12 割れ目開口幅の累積回収率への影響 (バックグラウンド流れ : 斜め 45 度)

3.3 トレーサー試験結果からの物質移行パラメータ同定の検討

原位置トレーサー試験の結果の評価では、揚水孔で回収されたトレーサー濃度の破過曲線から割れ目の開口幅、分散長、岩石マトリクスへの分配係数等の物質移行パラメータを推定する。

平成24年度は、スイスNagraのGrimsel Test Siteでの原位置トレーサー試験の結果から、以下の手順により物質移行パラメータを同定した。

- ① 非収着性トレーサーの破過曲線から割れ目の開口幅と分散長を同定する。
- ② 収着性トレーサーの破過曲線から、割れ目の開口幅と分散長は既知として分配係数のみを同定する。

しかし、数値シミュレーションによる逆解析では、非収着性トレーサーの破過曲線は良好に再現できたものの、収着性トレーサーの破過曲線の再現精度は高いとはいえない結果となった（図3.3-1～3.3-3）

そのため、ここでは上記の物質移行パラメータの同定手順について検証を行う。

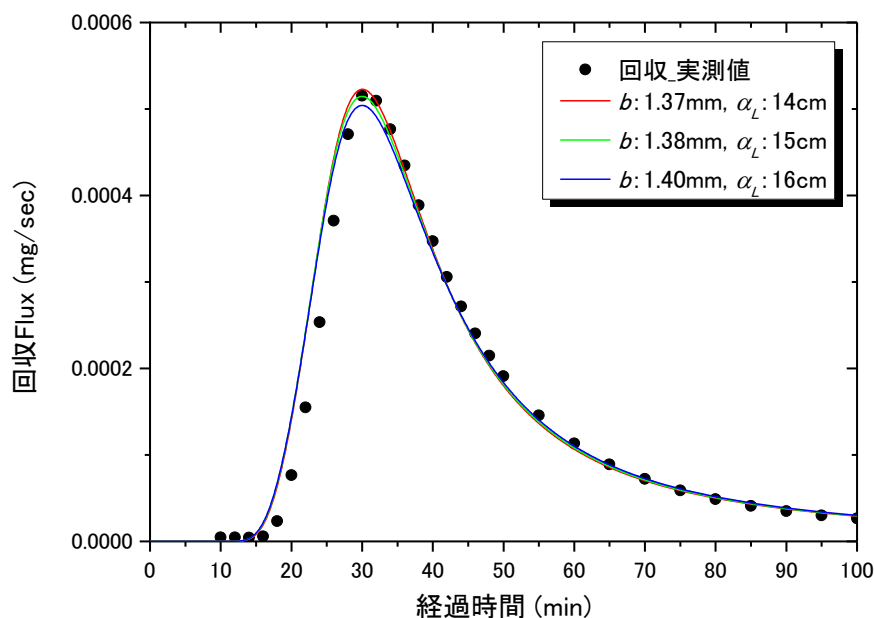


図3.3-1 ウラニンの回収フラックスの実測値と計算値の比較（平成24年度）

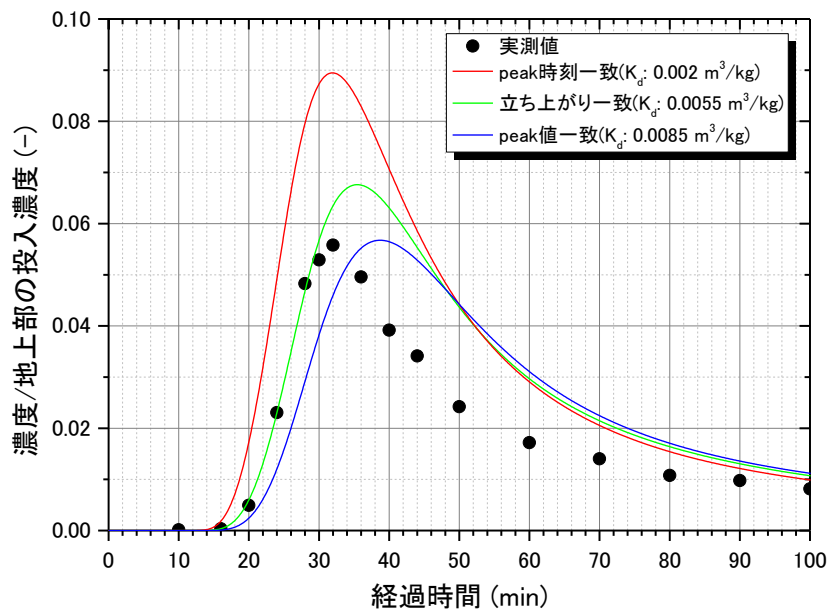


図 3.3-2 Sr の破過曲線の実測値と計算値の比較 (平成 24 年度)

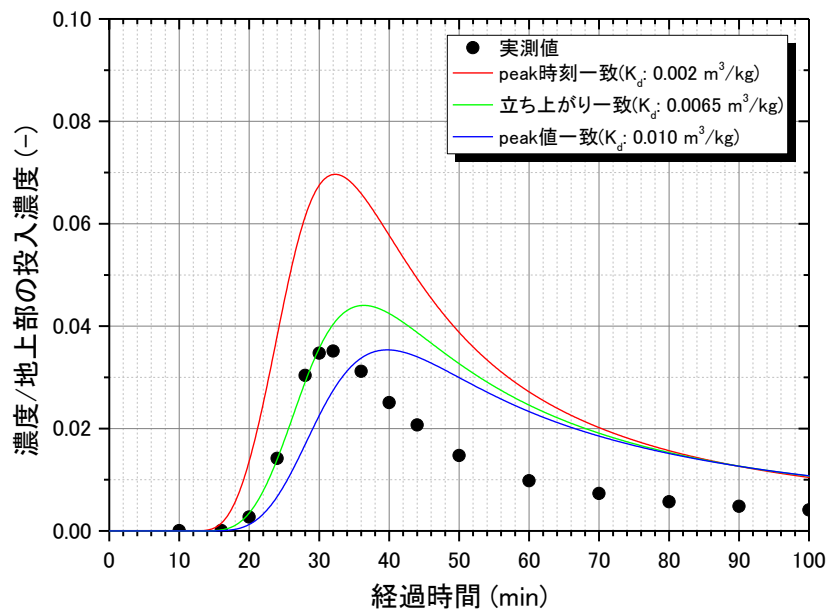


図 3.3-3 Cs の破過曲線の実測値と計算値の比較 (平成 24 年度)

3.3.1 解析条件

原位置トレーサー試験として単一割れ目を対象としたダイポール試験を想定し、以下の手順により検証を行う。

1) トレーサー試験の順解析

- ① 所定の注水流量、揚水流量での定常地下水流動解析を行う。
- ② 上記①の地下水流動場の下で、注水孔からトレーサー（非収着性トレーサーと収着性トレーサー）を一定時間注入する。
- ③ 割れ目内のトレーサーの移動状況を計算し、揚水孔で回収されるトレーサー濃度の経時変化を算出する。

2) トレーサー試験の逆解析

- ① 非収着性トレーサーの破過曲線から割れ目の開口幅と分散長を同定する。
- ② 収着性トレーサーの破過曲線から、割れ目の開口幅と分散長は既知として分配係数のみを同定する。
- ③ 収着性トレーサーの破過曲線から、開口幅と分散長、分配係数の3つのパラメータを同定する

検証は、上記2)の①、②で得られた破過曲線や物質移行パラメータと、③で得られたものを比較することにより行う。

解析に先立ち、解析対象となる仮想割れ目を作成した。仮想割れ目は、一辺の長さが30mの正方形であるとした。現実の割れ目は、同一の割れ目内においても場所により開口幅が異なり、その結果透水量係数の不均質性を有する。そこで、割れ目を一辺の長さが0.15mの正方形ブロックに分割し、それぞれのブロックに一つずつ透水量係数の値を確率的に発生した。ここでは、3通りの不均質場を発生させた。それぞれの不均質場の発生に使用した透水量係数の統計量を、表3.3.1-1に示す。透水量係数の空間的な相関モデルとしては、次式で表される指数関数型のバリオグラムを仮定した。

$$\gamma(h) = c[1 - \exp(-h/a)]$$

ここで、 c はシル、 a は相関長、 h は離間距離である。

不均質場1と不均質場2では同一の統計量に基づいて透水量係数を発生させたが、不均質場3では相関長を変えている。図3.3.1-1～3に不均質場1～3の透水量係数分布を示す。図中の黒点は、ボーリング孔を表す。ボーリング孔は割れ目の中心に1つ、中心から左に5m離れた位置に1つ設定した。

表 3.3.1-1 透水量係数場の発生に使用した統計量

不均質場	対数平均	対数標準偏差	相関長(m)
1, 2	-7.0	0.667	0.2
3	-7.0	0.667	0.1

解析領域は、30 m 四方の割れ目の他に周辺の岩石層も加えた 3 次元領域とする。解析メッシュは、図 3.3.1-4 に示す 4 節点板状要素により表現される割れ目面に 5 層の 8 節点六面体要素で表現する岩石層（マトリクス）を接合した 3 次元モデルとする。総節点数は 182,724、総要素数 180,840 である。メッシュには解析領域の中心に 1 本、そこから 5 m 左に 1 本のボーリング孔を設定した。

解析モデルを図 3.3.1-6 に示す。発生させた透水量係数場の中心のボーリング孔を揚水孔、左のボーリング孔を投入孔とし、図 3.3.1-4、5 のメッシュを割り当てて、2 次元の割れ目層と 3 次元 5 層の岩石層を模擬した。投入孔に 100 秒間のトレーサーのフラックスと一定流量の注水を設定し、揚水孔には注水流量と同流量の揚水を設定した。バックグラウンドの地下水流れは考慮せず、解析領域の 4 辺に固定水頭境界を設定した。順解析においては、割れ目と岩石基質部に表 3.3.1-2 に示す特性パラメータを設定した。非吸着性のトレーサーとしてウラニン、吸着性トレーサーとして Sr を想定した。また、割れ目の各位置での開口幅は、その位置での透水量係数の値からいわゆる 3 乗則により算出し設定した。割れ目内の縦分散長は透水量係数の発生に使用した正方形ブロックの 1 辺の長さの 1/10 とし、横分散長はさらにその 1/10 とした。一方、逆解析においては、割れ目の透水量係数、開口幅は場所によらず均一とし、縦分散長と横分散長の比率は 10:1 に固定し、分散長については縦分散長のみを同定した。

割れ目の水理・物質移行特性やトレーサー試験の条件が解析結果に与える影響についても検討するために、下記の解析パラメータを変えて感度解析を実施する。

- ・岩石層の分配係数
- ・注水・揚水流量
- ・割れ目の不均質性

解析ケースを表 3.3.1-3 に示す。

表 3.3.1-2 解析に使用した溶質移行特性値

パラメータ	適用値
割れ目の透水量係数	統計量に基づき乱数により発生
水中分子拡散係数	ウラニン： 4.50×10^{-10} m ² /s、Sr： 4.50×10^{-10} m ² /s
割れ目の開口幅	$\sqrt[3]{12\nu T/g}$ ν ：動粘性係数、 T ：透水量係数
割れ目内の縦分散長	0.015 m
割れ目内の横分散長	0.0015 m
岩石基質の実効拡散係数	ウラニン： 1.08×10^{-12} m ² /s、Sr： 1.91×10^{-12} m ² /s
岩石基質の密度	2610 kg/m ³
岩石基質の間隙率	0.0089 (=0.89 %)
分配係数	ウラニン：0、Sr：0.002 あるいは 0.004 m ³ /kg

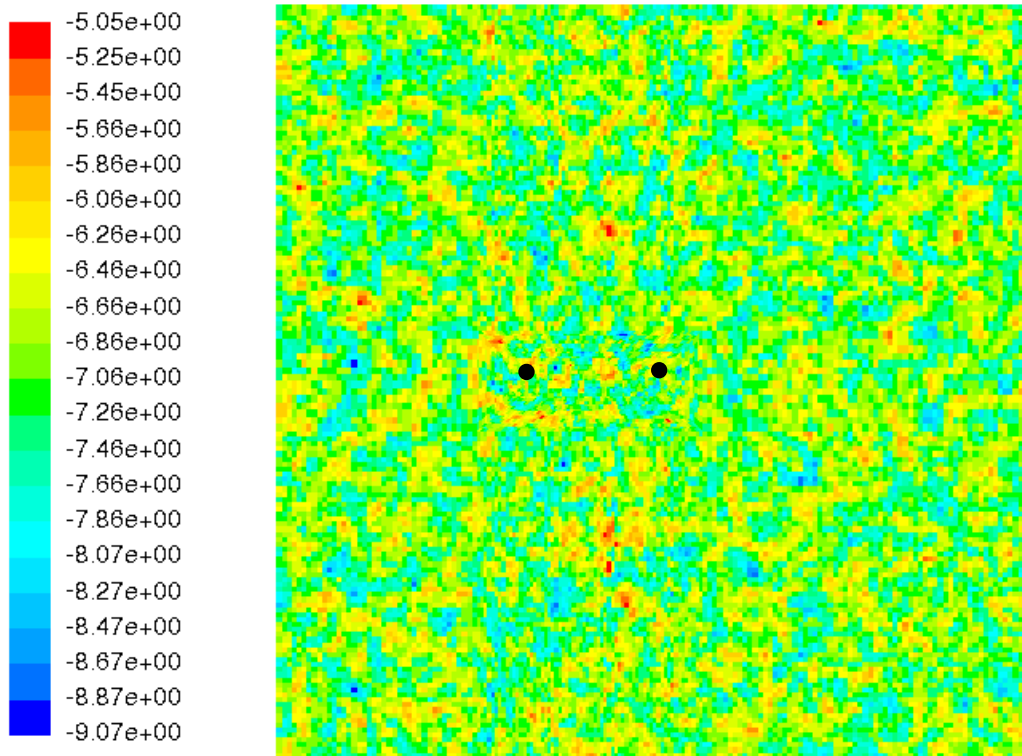


図 3. 3. 1-1 トレーサー試験用メッシュ (不均質場 1)

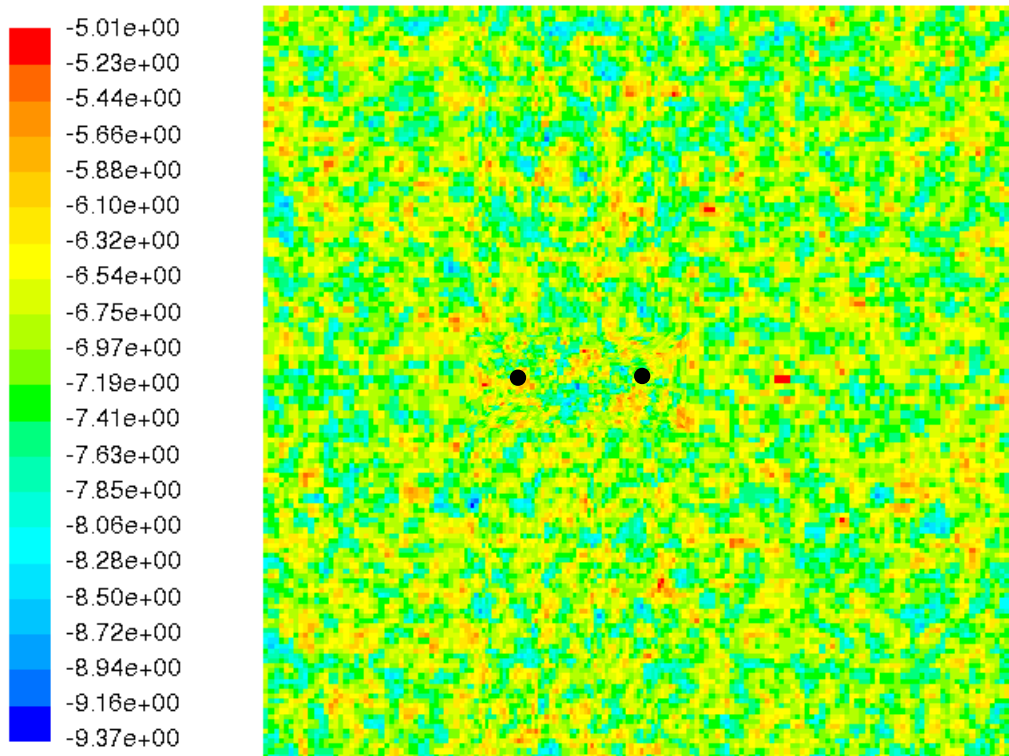


図 3. 3. 1-2 トレーサー試験用メッシュ (不均質場 2)

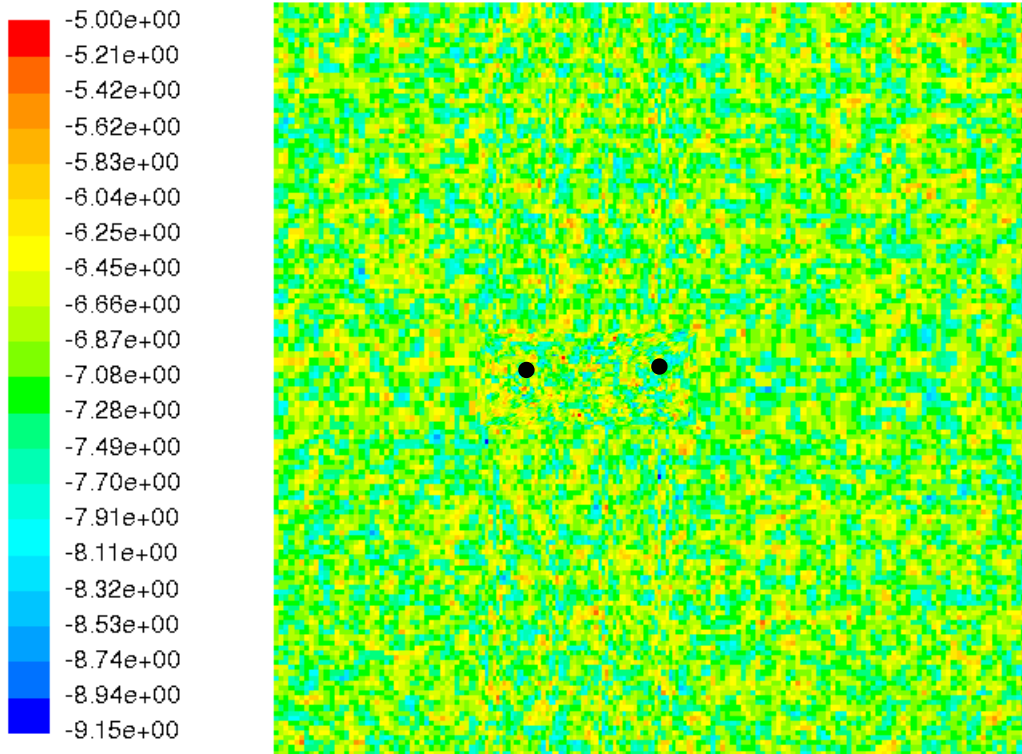
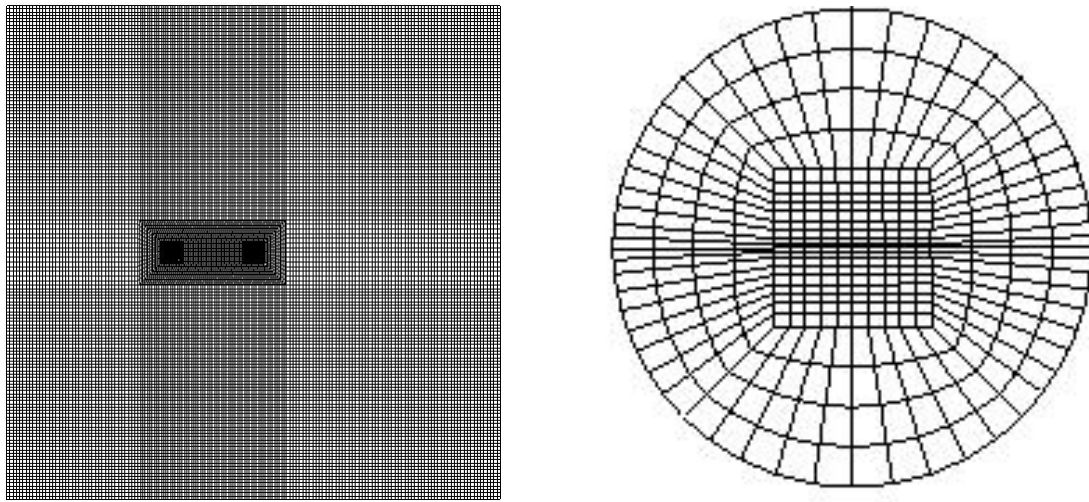


図 3. 3. 1-3 トレーサー試験用メッシュ (不均質場 3)



(a) 全領域

(b) ボーリング孔

図 3. 3. 1-4 トレーサー試験用メッシュ (割れ目に平行な面内)

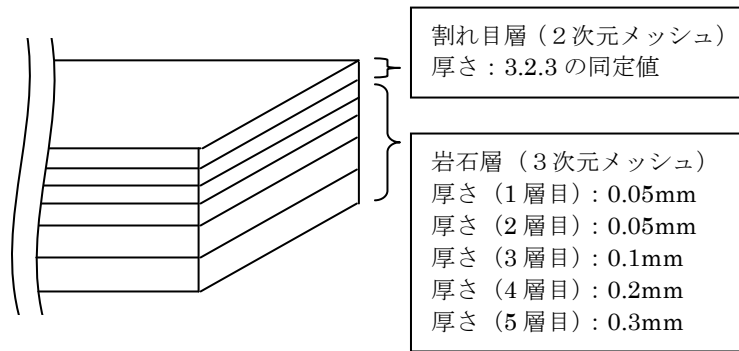


図 3.3.1-5 割れ目に直交する方向のメッシュ分割

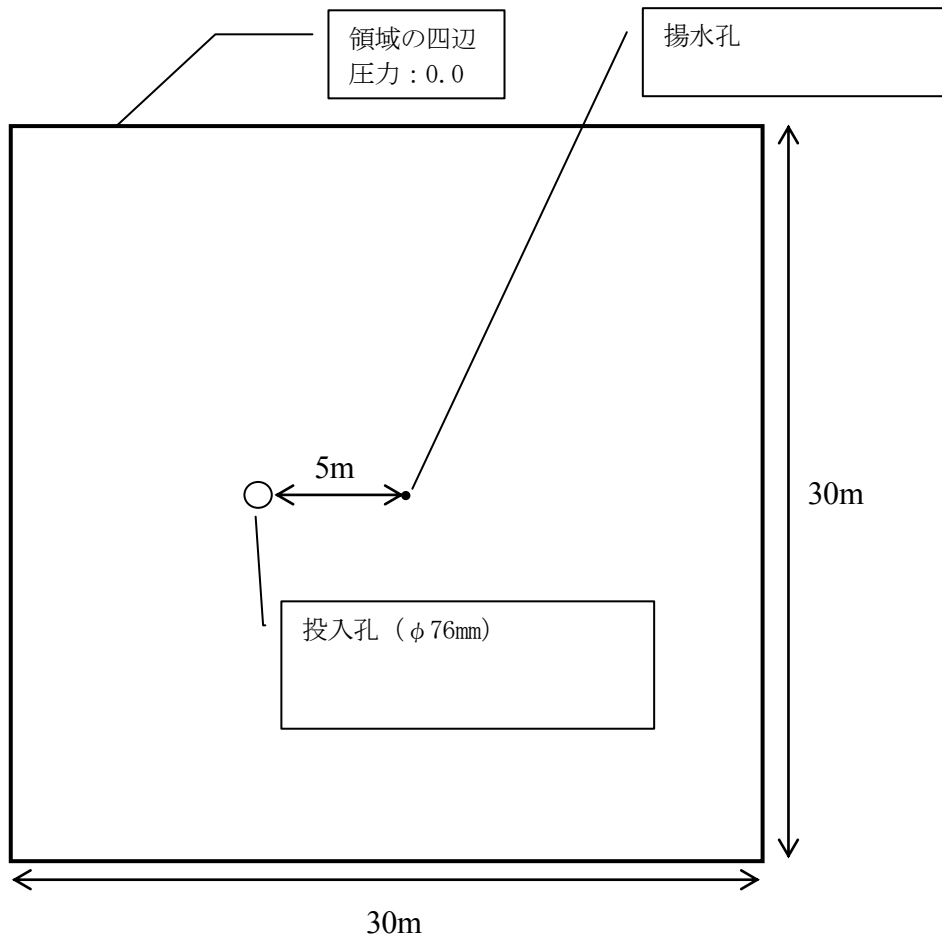


図 3.3.1-6 解析モデル

表 3.3.1-3 解析ケース

ケース名	割れ目	透水量係数の相関長 (m)	トレーサー	分配係数 (m ³ /kg)	注水・揚水流量 (cc/min)
Case 1-1	不均質場 1	0.2	ウラニン	0	60
Case 1-2	不均質場 1	0.2	Sr	0.002	60
Case 1-3	不均質場 1	0.2	Sr	0.004	60
Case 2-1	不均質場 1	0.2	ウラニン	0	40
Case 2-2	不均質場 1	0.2	Sr	0.002	40
Case 3-1	不均質場 2	0.2	ウラニン	0	60
Case 3-2	不均質場 2	0.2	Sr	0.002	60
Case 4-1	不均質場 3	0.1	ウラニン	0	60
Case 4-2	不均質場 3	0.1	Sr	0.002	60

3.3.2 解析結果

各計算ケースにおける不均質な割れ目場での破過曲線と均質な割れ目場での最適なフィッティングの結果を図 3.3.2-1~9 に示す。また、最適なフィッティングにおいて使用された物質移行パラメータを表 3.3.2-1 に示す。最適なフィッティングの結果は、ニューラル・ネットワークによる逆解析により導かれた。

全ケースで逆解析により得られた縦分散長の値が順解析で与えた 0.015 m よりも大きくなっているのは、透水量係数が不均質であることに起因する分散効果が加わっているためである。収着性トレーサーを扱った 5 ケースの中で、Case 3-2 を除く 4 ケースで逆解析手順③による分配係数の同定値の方が、手順②による同定値よりも順解析で設定した 0.002 m³/kg あるいは 0.004 m³/kg に近い値となった。逆解析手順②では、逆解析手順①で得た割れ目の開口幅と分散長を正しいとして分配係数のみを変更してフィッティングを行っている。しかし、逆解析①で得た割れ目の開口幅と分散長は、不均質場でトレーサー試験をした場合の回収孔の破過曲線を再現できる等価な均一場のパラメーター値に過ぎず、不均質場と等価な均質場で割れ目内の各位置を同量のトレーサー物質が通過していくわけではない。そのため、逆解析手順①で得た割れ目の開口幅と分散長を真として分配係数の値のみを変更した逆解析手順②では収着性トレーサーの破過曲線を良好に再現できず、割れ目開口幅と分散長、分配係数の 3 つのパラメーターを同時に変更した逆解析手順③の方が設定値に近い分配係数を得ることができるものとする。

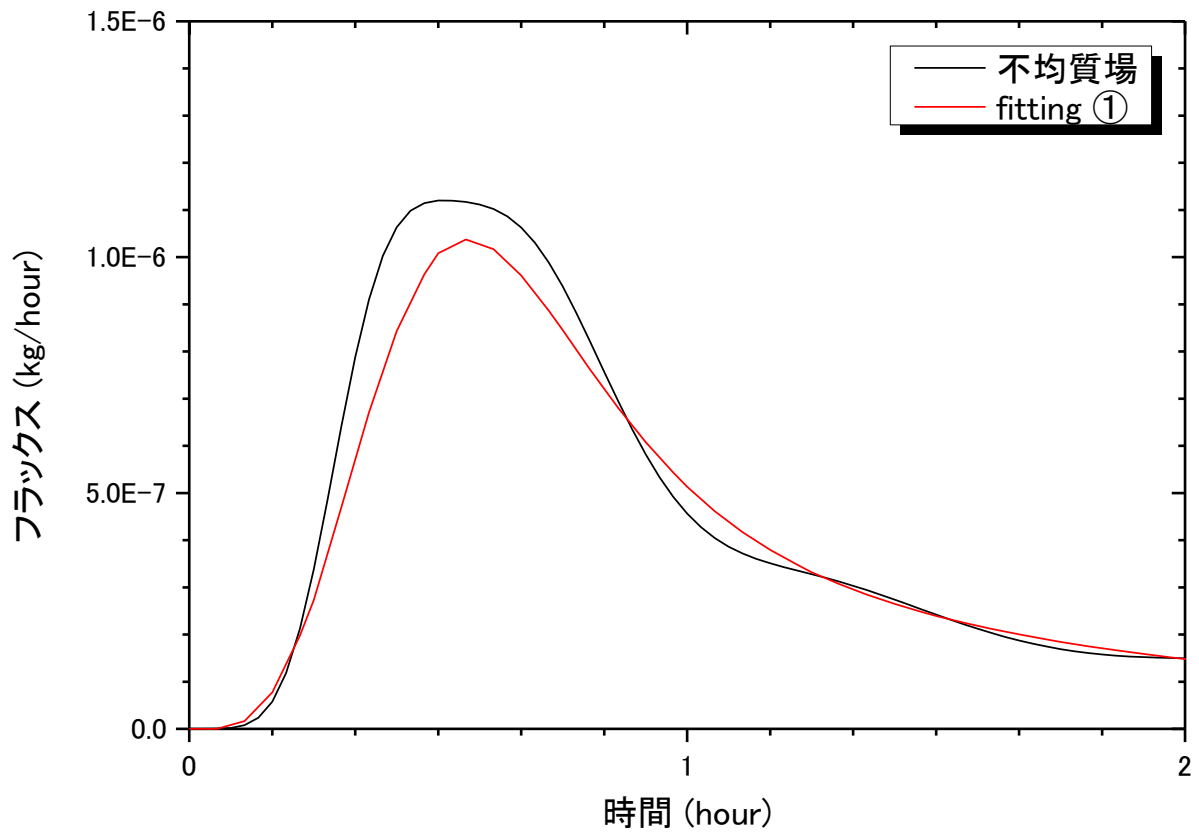


図 3. 3. 2-1 Case 1-1 の破過曲線

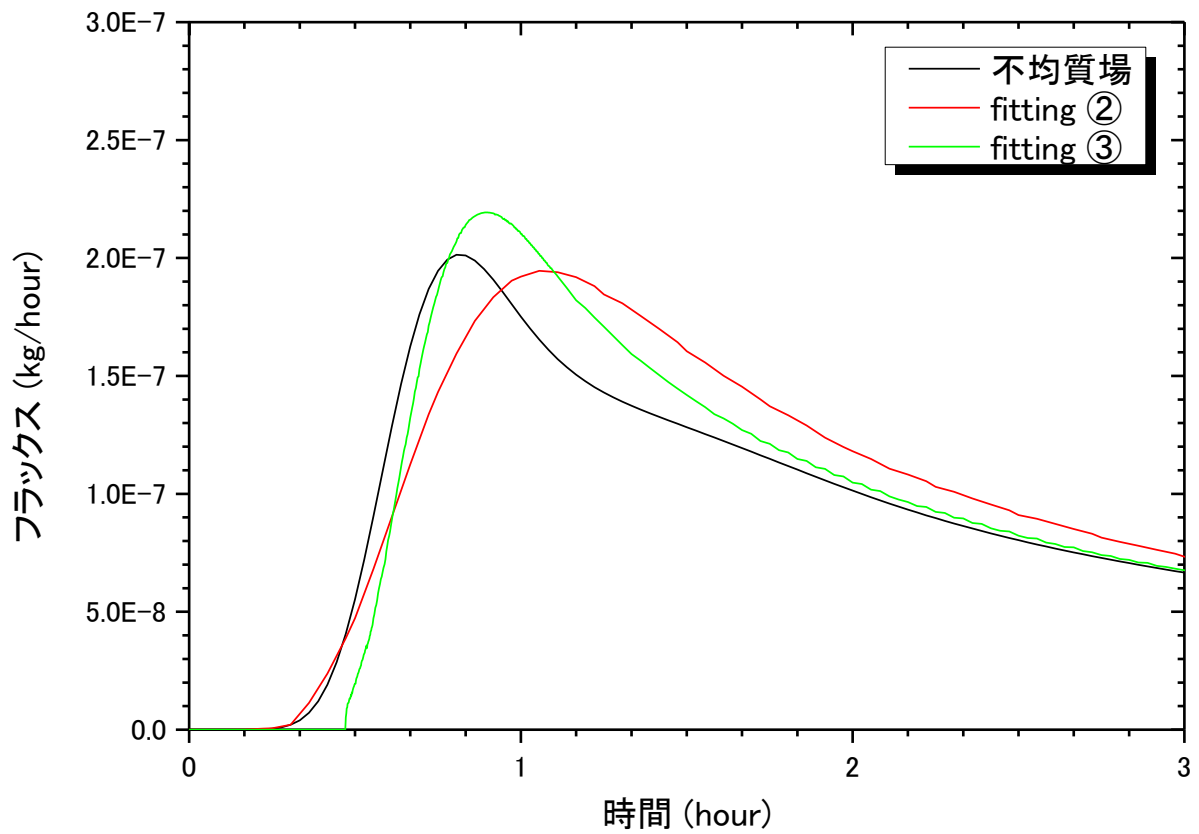


図 3. 3. 2-2 Case 1-2 の破過曲線

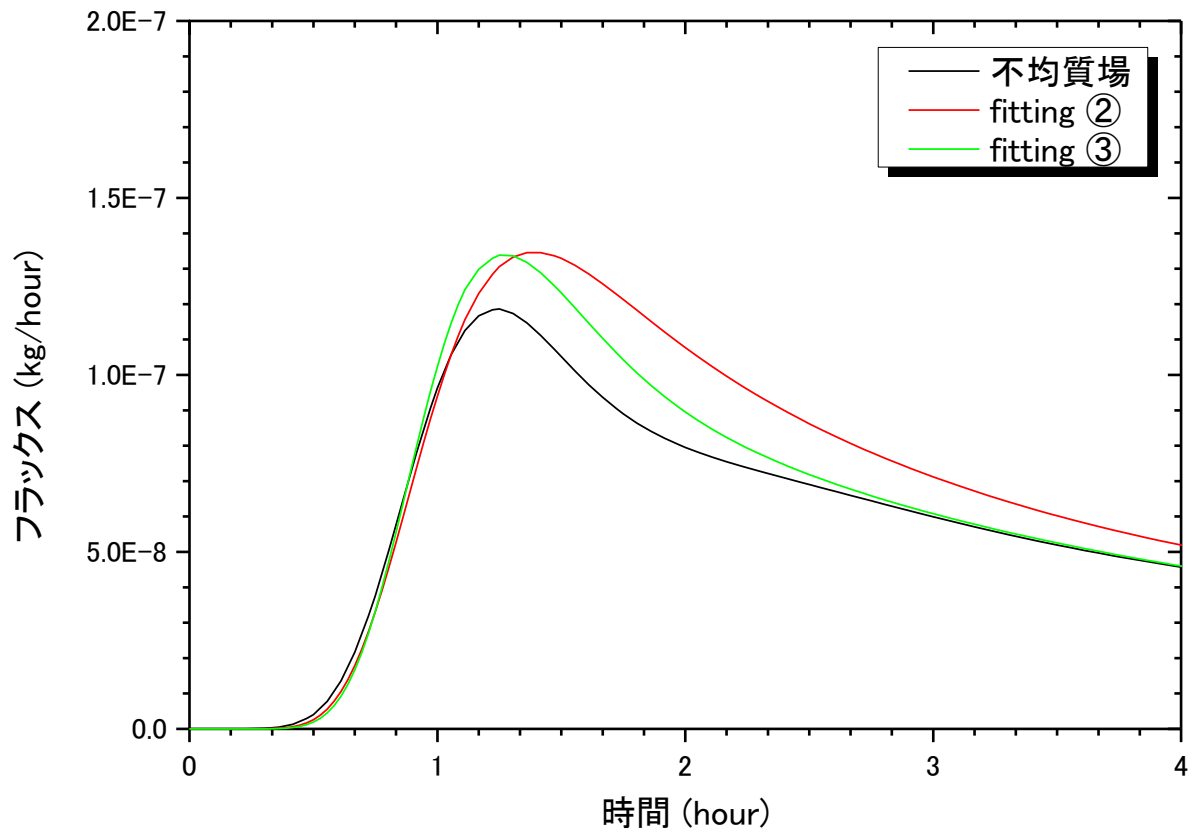


図 3. 3. 2-3 Case 1-3 の破過曲線

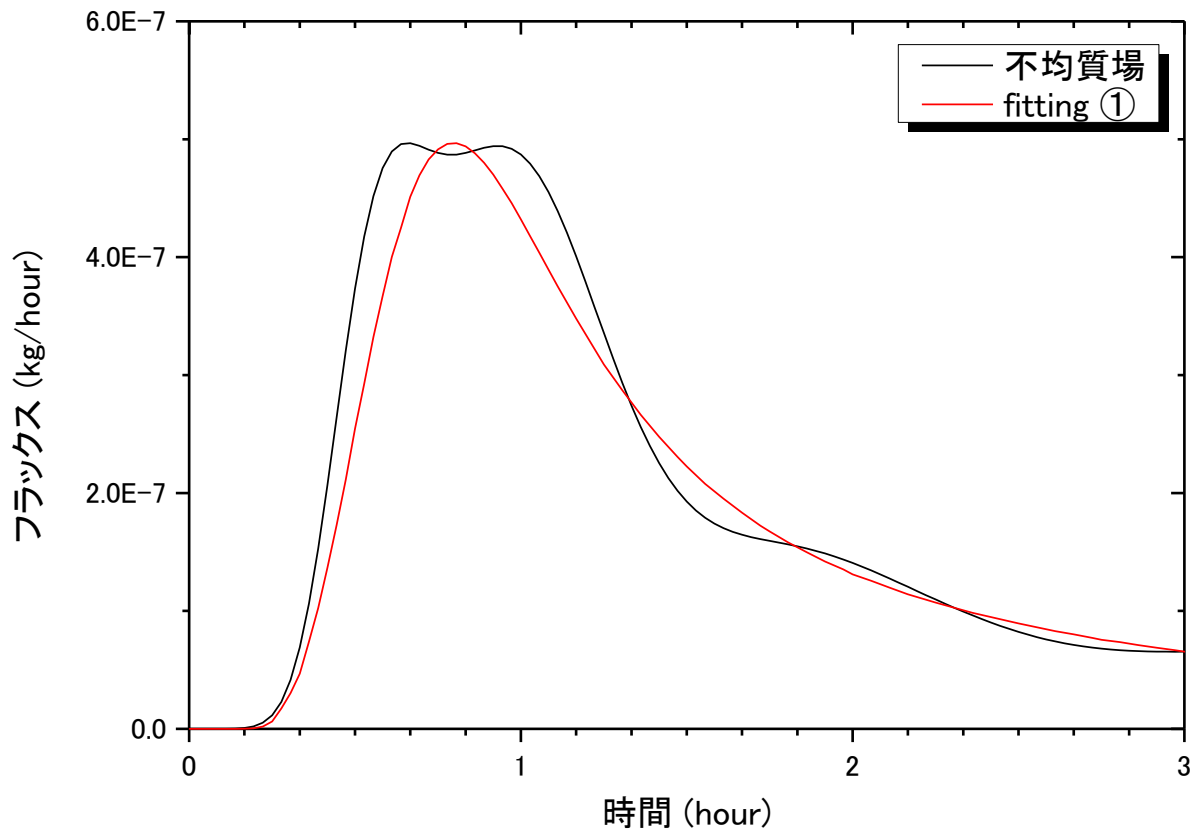


図 3. 3. 2-4 Case 2-1 の破過曲線

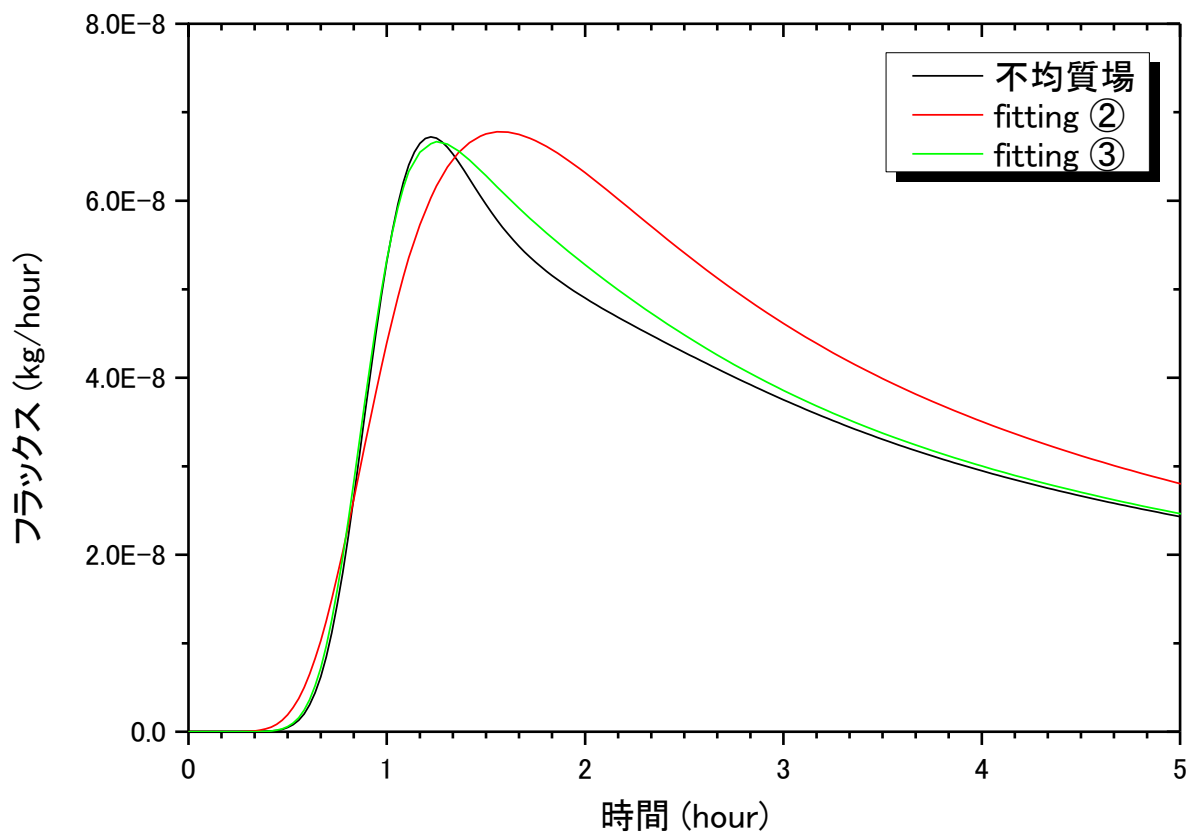


図 3. 3. 2-5 Case 2-2 の破過曲線

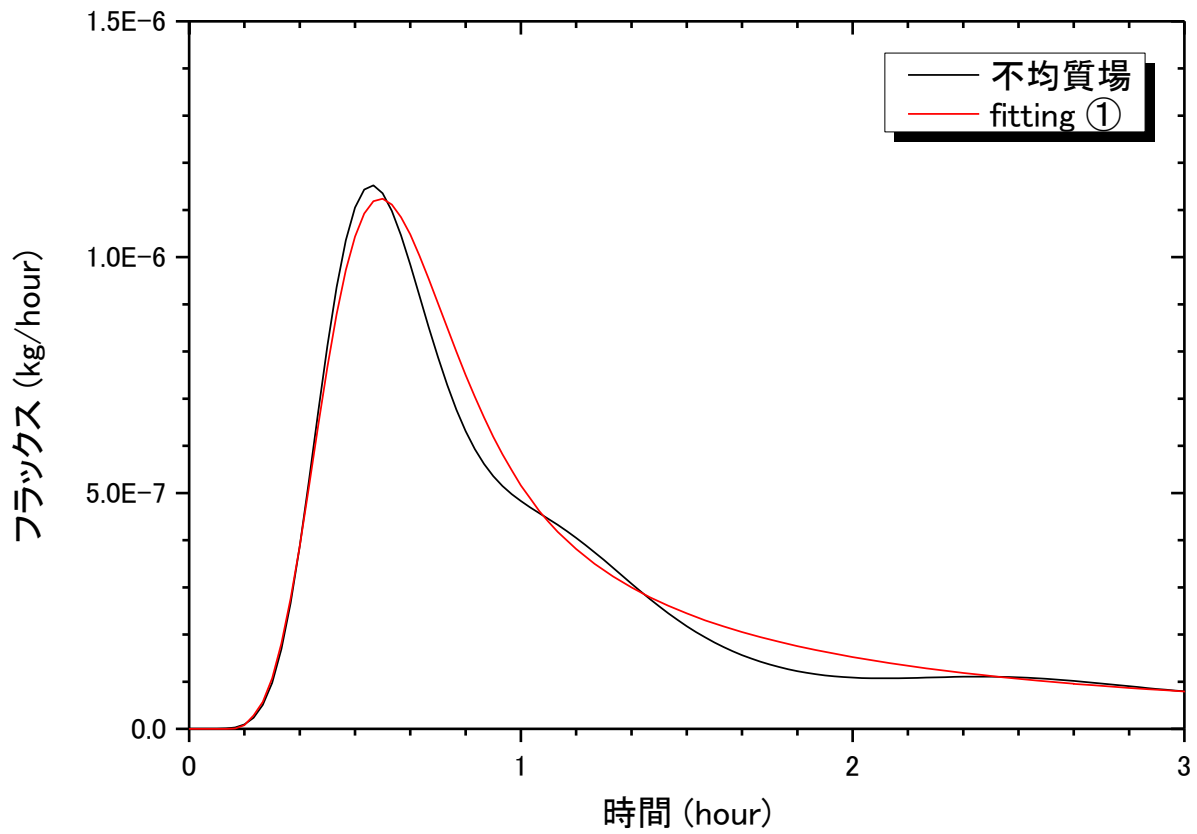


図 3. 3. 2-6 Case 3-1 の破過曲線

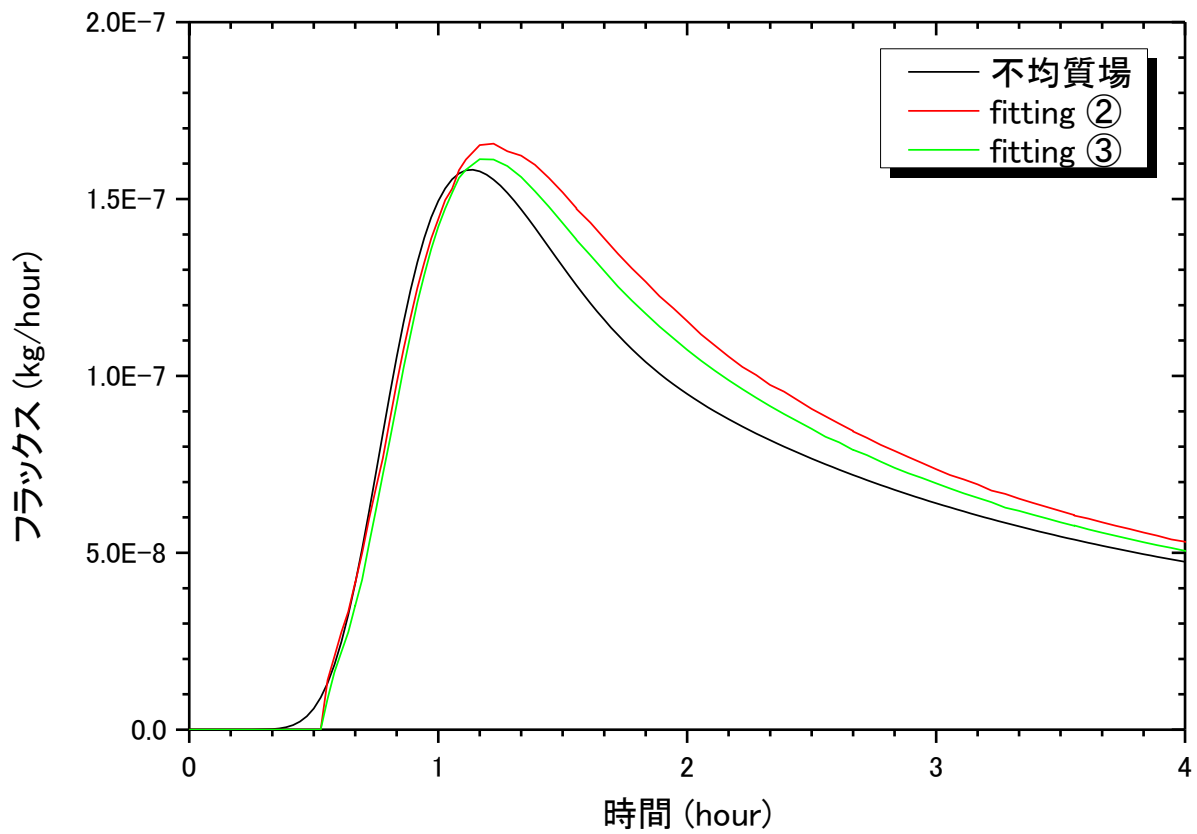


図 3. 3. 2-7 Case 3-2 の破過曲線

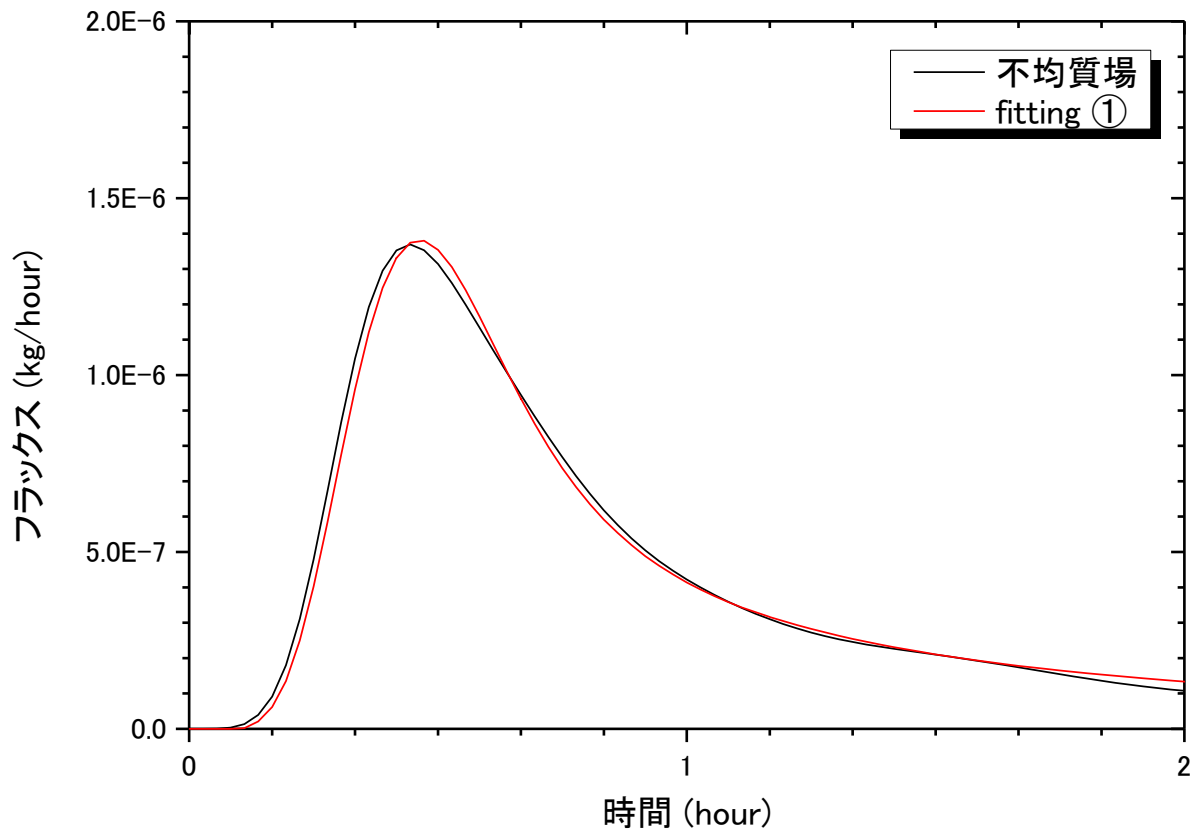


図 3. 3. 2-8 Case 4-1 の破過曲線

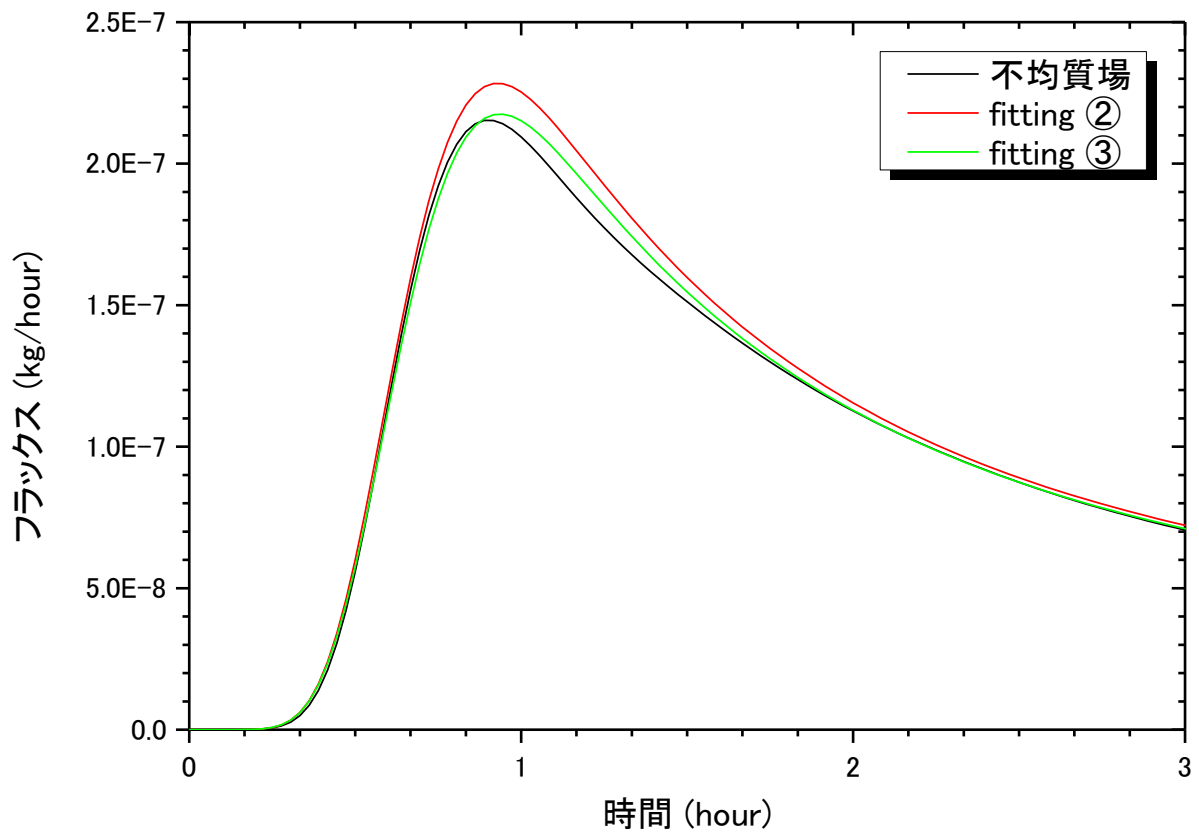


図 3. 3. 2-9 Case 4-2 の破過曲線

表 3.3.2-1 最適なフィッティング結果に使用された物質移行パラメータの値

ケース名	逆解析手順	割れ目開口幅 (mm)	縦分散長 (m)	分配係数 (m ³ /kg)
Case 1-1	①	0.0622	0.145	-
Case 1-2	②	0.0622	0.145	0.00160
	③	0.0385	0.106	0.00200
Case 1-3	②	0.0622	0.145	0.00292
	③	0.00479	0.0751	0.00405
Case 2-1	①	0.0632	0.196	-
Case 2-2	②	0.0632	0.196	0.00150
	③	0.0138	0.0658	0.00208
Case 3-1	①	0.0660	0.126	-
Case 3-2	②	0.0660	0.126	0.00215
	③	0.0482	0.0942	0.00255
Case 4-1	①	0.0516	0.120	-
Case 4-2	②	0.0516	0.120	0.00150
	③	0.0486	0.130	0.00164

3.4 まとめ

本研究では、平成 26 年度以降に原位置でのトレーサー試験技術の適用性試験を予定しており、7 章に述べるように、本年度は適用性試験場の地質環境特性調査を実施した。本章では、その調査で得られた情報を基に、原位置での孔間トレーサー試験の予備解析を数値シミュレーションにより実施した。また、平成 20～24 年度にスイス Nagra の Grimsel Test Site で実施した原位置トレーサー試験およびその評価解析では、吸着性物質を用いたトレーサー試験の破過曲線を十分に再現することができなかった。そのため、吸着性物質を用いたトレーサー試験の破過曲線から分配係数を同定する手順について検討を行った。

孔間トレーサー試験の予備解析では、単一の割れ目のみを考慮した 2 次元モデルにより、孔間距離 2.5m でのダイポール試験を想定して解析を行った。トレーサーとしては非吸着性物質である蛍光染料ウラニンを用いるものとした。最初に自然状態での（バックグラウンドの）地下水流れが存在しない場合の解析を行ったところ、理論上は無限大時間後にはトレーサーの回収率は 100 %になるはずであるが、揚水孔でのトレーサー濃度がピークに達するのに要した時間の 6 倍の時間が経過しても、回収率は 60 %に過ぎなかった。次に、7 章で述べる適用性試験場でのポイント希釈試験で計測されたバックグラウンドの地下水流量を考慮した解析を実施したところ、地下水流量が比較的大きいため揚水孔でのトレーサー回収率に大きく

影響することがわかった。バックグラウンドの流れが注水孔から揚水孔に向かう場合にトレーサーの回収率が最も高く、揚水孔から注水孔に向かう場合に最も低くなる。ただし、バックグラウンドの流れが揚水孔から注水孔に向かう場合には揚水孔と注水孔を入れ替えることで対処することが可能であり、トレーサーの回収が最も難しくなるのは注水孔と揚水孔を結ぶ線分に対しバックグラウンドの流れが直交する場合である。揚水流量を増やすことによりトレーサーの回収率を上げることができるが、孔間でのトレーサーの移行時間も短くなり、岩石基質への収着を期待する収着性物質を用いたトレーサー試験ではあまり好ましいことではない。収着性物質を用いるトレーサー試験では、高い回収率を保ちつつ孔間でのトレーサーの移動時間をできるだけ長くすることが課題となる。

収着性物質を用いたトレーサー試験の破過曲線から分配係数を同定する手順については、単一の割れ目と近傍の岩石基質を考慮した3次元モデルにより、孔間距離5mでのダイポール試験を想定して検討を行った。まず、①非収着性物質を用いたトレーサー試験の破過曲線から割れ目の開口幅と分散長を同定し、②その開口幅と分散長で固定して収着性物質を用いたトレーサー試験の破過曲線から分配係数のみを同定した。それに対し、③収着性物質を用いたトレーサー試験の破過曲線のみから割れ目の開口幅と分散長、分配係数の3パラメーターの値を同定した。解析は、割れ目の透水量係数場を変更したケース、注水・揚水流量を変更したケース、岩石基質への分配係数を変更したケースなど、5ケース実施した。①で得られた割れ目の開口幅と分散長を既知として分配係数のみを同定した②の方法では、収着性トレーサーの破過曲線を良好に再現することができず、分配係数の同定値も“真値”（設定値）とは隔たりが見られた。それに対し、③で得られた分配係数は、1ケースを除いて①、②の手順で得られた同定値よりも“真値”に近いものであった。そのため、岩石基質に対する分配係数を精度良く推定するためには、収着性物質を用いたトレーサー試験の破過曲線を基に逆解析を行う際に、分配係数だけでなく割れ目の開口幅と分散長も変更パラメーターとする必要があると考えられる。

参考文献

National Research Council: Rock Fractures and Fluid Flow, (National Academy Press, Washington, D. C., 1996).

Uchida, M., Doe, T., Dershowitz, W. and Sawada, A.: Discrete-fracture modelling of Äspö Hard Rock LPT-2. Large scale pumping and tracer test, SKB, Äspö Hard Rock Laboratory International Cooperation Report ICR-94-09, (1994).

河西基・五十嵐敏文・田中靖治：「高レベル放射性廃棄物地層処分の天然バリア性能評価手法の開発（その1）－割れ目系岩盤中の地下水流動解析手法－」，電力中央研究所研究報告 U93054, (1994).

河西基・五十嵐敏文・田中靖治：「高レベル放射性廃棄物地層処分の天然バリア性能評価手法の開発（その2）－割れ目系岩盤中の熱および核種の移行解析手法－」，電力中央研究所研究報告 U94053, (1995).

4. 単孔式トレーサー試験技術の開発

4.1 はじめに

原位置トレーサー試験は、主に一本のボーリング孔のみを用いるトレーサー試験（単孔式）と、複数のボーリング孔を用いるトレーサー試験に区別される（孔間式）。表 4.1-1 に日本地下水学会(2009)を参考に、単孔式と孔間式のトレーサー試験の概要について整理する。

単孔式トレーサー試験は、Single-Well Injection-Withdrawal test (SWIW)、Push-Pull test、Injection-backflow test、Huff-puff test と呼ばれており、一本のボーリング孔でトレーサーの注入、トレーサーの回収を行う。一方、孔間式トレーサー試験は、トレーサーの注入（投入）、トレーサーの回収（計測）を行うのはそれぞれ異なるボーリング孔であり、複数のボーリング孔が必要になる。本報告書では、トレーサー希釈試験については取り扱わず、単孔式トレーサー試験に関して検討を行う。

表 4.1-1 単孔式トレーサー試験・孔間式トレーサー試験の概要

単孔	トレーサー希釈試験 Point dilution test	ボーリング孔を横切る地下水流量を求めるため、ボーリング孔内のトレーサーが地下水によって希釈される様子を観測する。
	単孔式トレーサー試験 Single-Well Injection-Withdrawal test	1本のボーリング孔のみで、トレーサーの注入、トレーサーの回収を行う試験。
孔間	自然動水勾配試験 Natural gradient test	複数設置された観測孔の一つにトレーサーを投入し、その周囲の観測孔でトレーサー濃度の経時変化を計測して、自然状態でのトレーサー移行を観測する試験。
	放射状発散試験 Radially divergent test	注入孔において加圧してトレーサーを注入し、その周囲に設けられた観測孔では圧力を変化させずにトレーサー濃度を計測する試験。
	放射状収束試験 Radially convergent test	投入孔においてトレーサーを投入し、その周囲に設けた揚水孔では地下水を揚水し続け、揚水孔におけるトレーサー濃度を計測する試験。
	ダイポール試験 Dipole test	二孔のうち、一方のボーリング孔からトレーサーを注入し、一方のボーリング孔では水を揚水してトレーサー濃度を計測する試験。

4.2 単孔式トレーサー試験の提案

(1) 単孔式トレーサー試験の必要性

岩盤の核種輸送に対するバリア機能を議論する際、吸着による遅延効果と岩盤マトリクスへの拡散による遅延効果が特に重要な評価パラメーターとなる。このため、これら遅延効果を効率よく適切に評価することが求められる。これまで主に開発が進められてきた孔間式トレーサー試験は、注入孔と揚水孔間の水理的連結性を評価でき、吸着による遅延効果、岩盤マトリクスへの拡散による遅延効果も評価できる。但し、孔間式トレーサー試験を行う際は、現実的な試験時間で収まるように、かつ適切な遅延効果が評価できるよう、現地の水理地質構造を考慮してボーリング孔の配置を決定して試験仕様を決めなければならず、綿密な机上検討が欠かせない。しかし、机上検討段階で現地における物質移行パラメーター（分散、拡散、遅延）に関する情報量は不足しているため、いきなり孔間式トレーサー試験を行えば、吸着トレーサーの到達に膨大な試験時間を要してしまうことや、反対に吸着に十分な試験時間を確保できない等、試験がうまくいかない可能性もある。

一方、単孔式トレーサー試験は、一本のボーリング孔のみを用いてトレーサーの注入・回収を行うため、複数のボーリング孔の配置について考えずに済み、孔間式トレーサー試験に比べて簡便に行える。また、単孔式トレーサー試験を行って得られる結果は、特に物質移行パラメーターに関する情報は、孔間式トレーサー試験の試験計画をより現実的なものとするのに役立つ、適切に孔間式トレーサー試験を行うことにつながる。さらに、単孔式トレーサー試験は、孔間式トレーサー試験に比べて、1回あたりのコストが低く、試験時間も比較的短くて済む事が多い。従って、複数深度、複数地点で行うことも可能であり、評価対象域の物質移行に関するデータ拡充が期待できる。

(2) 新しく検討を行う試験方法

1回の試験で1つのトレーサーのみ試験を行って評価するだけでは、各パラメーターの信頼性を十分に確保できないことから、最近では、複数種類から成る混合トレーサーを用いて、1回の試験でそれぞれのトレーサーについて評価を行う方法が検討されている(Becker and Shapiro(2000)、Reimus et al.(2003))。混合トレーサーを用いる方法は、データ数を増やすだけでなく、性質の異なるトレーサーで得た結果をクロスチェックすることを可能とし、パラメーターの妥当性を検証することにも役立つと考えられる。従って、単孔式トレーサー試験においても、混合トレーサーを使用することが有効な手段であると考えられる。また、割れ目内の分散と、岩盤マトリクスへの拡散は、トレーサー試験で得られる破過曲線形状に似通った影響を与えるため、両者を分離してパラメーターを求めることが理想であるものの、実際は一つの破過曲線から各パラメーターを一度に決定することは難しいとされている(熊本・下茂(2012))。そこで、本報告書で検討を行う単孔式トレーサー試験では、同位体効果によって、割れ目の不均質性が及ぼす割れ目内の移流・分散と、岩盤マトリクスへの拡散を分離す

ることを検討する。同位体は、原子番号が同じであるが質量数は異なるため、自由水中の分子拡散係数にも差が生じる。質量数が軽いほど分子拡散係数が大きく、Eggenkamp and Coleman (2009)によれば、 $^{35}\text{Cl}/^{37}\text{Cl}$ で 1.00128~1.00192 程度であることを示している。移流・分散が支配的な割れ目内では同位体分別はほとんど生じず、拡散が支配的な岩盤マトリクスでは同位体分別が生じ、各同位体で岩盤マトリクスへの拡散挙動に差が生じると考えられる。以上のことにより、割れ目内の移流・分散と岩盤マトリクスへの拡散を分離することができ、不均質性の影響が最小化されたマトリクス拡散を評価できると考えられる。

さらに、これまで開発をおこなってきた「ラドン濃度計測による割れ目調査技術」、「高粘性流体の注入による割れ目調査技術」と、「単孔式トレーサー試験」を組み合わせることで、さらに効率良く1本のボーリング孔を用いて、割れ目に関する情報を得ることができると考えられる。「高粘性流体の注入による割れ目調査技術」は、水よりも粘性が非常に高い流体を注入する試験法であり、単孔式トレーサー試験と同時に行うことは難しいと考えられる。一方、「ラドン濃度計測による割れ目調査技術」は、地下水中のラドン濃度を計測する試験法であり、単孔式トレーサー試験と同時に行える可能性が高い。従って、同時に行うことができれば、より効率よく割れ目に関する情報を得られる可能性がある。

以上のことから、岩盤の物質移行に関するデータを効率よく取得し、データ数を増やすために、単孔式トレーサー試験の技術開発が必要であると考えられる。ここでは、まず始めに亀裂性岩盤を対象とした単孔式トレーサー試験に関する検討、実施例を中心に、過去の報告書、論文についてレビューを行う。次に、実岩盤を模擬した単孔式トレーサー試験の感度解析を行い、各パラメーターが破過曲線に与える影響について明らかにする。また、単孔式トレーサー試験とラドン濃度計測を組み合わせた場合におけるラドン濃度の感度解析も行って両者の組み合わせについて検討を行う。なお、レビューの取りまとめには、Istok (2013)、Nordqvist et al. (2002)を参考にした。

4.3 単孔式トレーサー試験に関する既往の文献調査

4.3.1 単孔式トレーサー試験の基本的な流れ

単孔式トレーサー試験の試験概念図を図 4.3.1-1 に、単孔式トレーサー試験によって得られる破過曲線の概念図を図 4.3.1-2 に示す。また、単孔式トレーサー試験の試験手順を以下に述べる。

- 1) 水を注入孔から定流量（あるいは定圧）で注入し、定常状態を形成する。
- 2) 一つ、或いは複数のトレーサー注入に切り替える。
- 3) トレーサー注入終了後、チェーサーの注入を行う。
- 4) チェーサー注入終了後、一定時間静置する。

5) 注入ラインを揚水ラインに切り替え、定流量（あるいは定圧）で揚水し、トレーサーの回収を行う。

3)、4)は試験によっては省かれることもあり、トレーサー注入終了後すぐに揚水を開始する場合もある。但し、チェーサー（主に水が使用される）を注入することによって、トレーサーが広範囲に浸透するため、より広範囲の物質移行を評価することが可能となると考えられる。

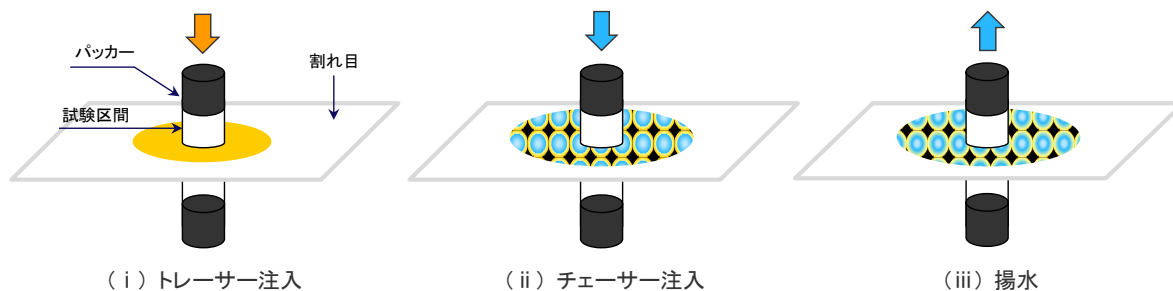


図 4.3.1-1 単孔式トレーサー試験の概念図

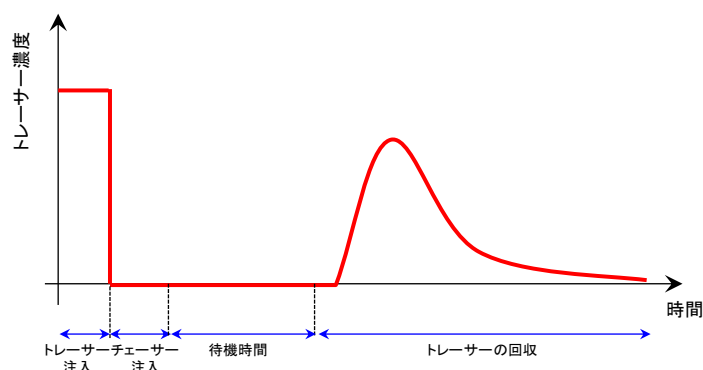


図 4.3.1-2 単孔式トレーサー試験によって得られる破過曲線概念図

4.3.2 単孔式トレーサー試験に関する過去の検討・実施例

(1) 単孔式トレーサー試験の活用例

単孔式トレーサー試験は、始めは石油業界においてよく使用され、発展を遂げてきた。Tomich et al. (1973)は、生産がほぼ終了した石油貯留層で単孔式トレーサー試験を行い、貯留層に残留する石油量の推定を行った。この方法は、親水性、親油性の2つのトレーサーを石油貯留層に注入した場合、新油性のトレーサーは貯留層間隙に残存する石油成分に溶出しやすいため、回収時に2つのトレーサー挙動にズレが生じることを利用するものである。また、Davis et al. (2002)、Davis et al (2003)、Davis et al. (2005)は、この概念をさらに発展させ、非水溶性汚染物質である疎水性液体（NAPL：Non-Aqueous Phase Liquid）が漏洩した地盤で単孔式トレーサー試験を行って、地盤内に残存する残留 NAPL 量を推定する方法を提案している。この方法は、地下水中に普遍的に存在する放射性同位体

^{222}Rn をトレーサーの一つとして考えており、 ^{222}Rn が水よりも NAPL に溶出しやすいことを利用する。つまり、 ^{222}Rn が含まれていない水を汚染地盤へ注入し、回収時の ^{222}Rn 濃度と注入したトレーサー濃度とのズレを評価することで、地盤内に残存する NAPL 含有量の分布が推定された。いずれも、多くの点でデータを効率良く取得し、貯留層内の残留油量、或いは地盤内の残留 NAPL 量の分布を求めることを目的としており、孔間式トレーサー試験ではなく単孔式トレーサー試験が選定されている。

その他にも、単孔式トレーサー試験は、帯水層内の微生物代謝活動を評価することを目的として行われている。Istok et al. (1997) は、石油系炭化水素による汚染が確認された地盤において単孔式トレーサー試験を行い、微生物による汚染地盤の環境修復能力を評価することを目的とし、帯水層における微生物活動の評価を行っている。この場合、微生物反応を起こす物質（硝酸塩、硫酸塩など）が反応性トレーサーに相当し、非反応性トレーサーとのズレを見ることで評価対象域の微生物代謝活動を評価する。

また、Downs et al. (1982)、Capuano et al. (1983)、Kocabas and Horne (1987) は、亀裂性を多く含む岩盤である地熱貯留層において単孔式トレーサー試験を行っている。地下深部に存在する熱源を利用する地熱発電では、発電に使用された熱水は、地熱貯留層の圧力や蒸気生産量を維持するために還元井から地下深部に環水される。この時、生産井から還元井までの間の水理的連結性が重要な指標となり、水理的連結性を評価するためには孔間式トレーサー試験が最も有効な試験法である。しかし、孔間式トレーサー試験は長期に及ぶことが多いため、孔間式トレーサー試験に先んじて単孔式トレーサー試験が行われた。Kocabas et al. (1987) は、塩化ナトリウム水溶液をトレーサーとし、割れ目のみを考慮したモデル、割れ目と岩盤マトリクスを考慮したモデルの二つを用いて単孔式トレーサー試験の結果を評価している。

また、Jung and Pruess (2012) は、高温岩体発電において地熱貯留層に新たに形成された割れ目の効果を検証するため、冷水を注水して揚水時に温度変化を計測する単孔式トレーサー試験を提案し、均質な割れ目と岩盤マトリクスから成るモデルを用いて、理論解を導き感度解析を行った。Jung and Pruess (2012) によれば、割れ目幅の感度は低く、特に割れ目幅が 0.1cm 以下では著しく感度が落ちることを報告している。

(2) 物質移行特性評価を目的とした単孔式トレーサー試験に関する既往の研究

Pickens et al. (1981) は、透水係数が $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{m/sec}$ 、間隙率が 0.33~0.43 で、やや水平方向に不均質な砂質帯水層で単孔式トレーサー試験を行っており、非吸着性トレーサーとして ^{131}I 、吸着性トレーサーとして ^{85}Sr を用いて砂質帯水層の分散特性、遅延特性を評価している。また、Schroth et al. (2001) は、Gelhar and Collins (1971) による等方均質帯水層における単孔式トレーサー試験の理論式を用いて、縦分散長、遅延係数を簡便に求める解法を示しており、Schroth et al. (2001) の中で

Pickens et al. (1981)が行った単孔式トレーサー試験結果の¹³¹Iと⁸⁵Srの破過曲線から縦分散長、遅延係数を評価している。Schroth et al. (2001)が示した解法は、注入時にトレーサーがボーリング孔から円柱状に拡がり、揚水時にトレーサーがボーリング孔に向かって円柱状に移行するモデルである。一方、Schroth and Istok (2005)は、上下が不透水層で挟まれた帯水層を想定し、注入時にトレーサーがボーリング孔から球状に拡がり、揚水時にトレーサーがボーリング孔に向かって球状に移行するモデルを提案し、数値解析の結果と比較してその有効性を示している。

Gelhar et al. (1992)は、トレーサー試験の種類によって求められる分散係数の値の違いについて述べている。単孔式トレーサー試験では、不均質場に注入されたトレーサーが揚水時にほぼ同じ速度でボーリング孔に向かって移行するため、孔間式トレーサー試験に比べて分散係数が低くなる傾向にあるとしている。Becker and Shapiro (2003)は、亀裂が卓越する結晶質岩において非反応性トレーサーを用いた放射状収束試験、ダイポール試験、単孔式トレーサー試験を行い、各試験で分散係数を求めている。放射状収束試験、ダイポール試験ではほぼ同じ分散係数となったのに対し、単孔式トレーサー試験で求められた分散係数は、放射状収束試験で求められた分散係数の約80分の1であったと報告している。

Tsang (1995a)、Tsang (1995b)は、特に場の不均質性が顕著に表れる場合において、単孔式トレーサー試験と孔間トレーサー試験で求められる分散係数の差が顕著になり、単孔式トレーサー試験が岩盤の遅延効果の指標の一つである岩盤マトリクスへの拡散効果を求める最適な試験であると述べている。一般に、岩盤内で主要な透水経路となる亀裂は、割れ目表面の凹凸のため不均質場であることが知られている。原位置でのトレーサー試験において、亀裂内の不均質性によって生じる分散と岩盤マトリクスへの拡散は破過曲線に似通った影響を与え、亀裂内の分散特性とマトリクス拡散を各々評価することを困難にさせることが多い。従って、不均質場で分散係数を低く評価する単孔式トレーサー試験は、マトリクス拡散を適切に評価する試験法であると述べている。Tsang (1995a)、Tsang (1995b)は、統計的に不均質な透水場を設定し、単孔式トレーサー試験、ダイポール試験、放射状収束試験の3つのトレーサー試験に関する解析を行い、単孔式トレーサー試験で得た破過曲線に岩盤マトリクスへの拡散効果の影響が最も顕著に表れることを示している。

Umari et al. (2006)は、2004～2005年にネバダ州ユッカマウンテンの調査サイトにおいて核種移行モデル構築を目的として実施された単孔式トレーサー試験と放射状収束試験について報告している。試験が行われたのは、深度約190～360mに位置する透水係数が 1.4×10^{-4} m/sec程度の亀裂を伴う沖積層であり、トレーサーには非吸着性トレーサーである安息香酸類、NaIが用いられた。孔間トレーサー試験の孔間距離は18m程度で、単孔式トレーサー試験で使用されたボーリング孔が放射状収束試験における揚水孔として使用されている。数値解析による再現解析が行った結果、単孔式トレーサー試験で評価された縦分散長は0.3mであったのに対し、放射状収束試験で評価された縦分散長は0.3～

3.0m となることを示している。つまり、Umari et al. (2006) の結果も Becker and Shapiro (2003) と同様に、単孔式トレーサー試験で求められた分散の方が孔間式トレーサー試験で求められた分散よりも低い結果となっている。

Meigs and Beauheim (2001)、Haggerty et al. (2001)、McKenna et al. (2001) は、米国ニューメキシコ州の南東に位置する Carlsbad 近傍に設置された、TRU 廃棄物の処分を目的とした米国廃棄物隔離パイロットプラント (WIPP: Waste Isolation Pilot Plant) において、サイト内の核種移行モデルを構築するため、放射状収束試験、単孔式トレーサー試験を実施している。トレーサー試験が行われたのは、地下約 230m に薄く堆積する Culebra 層 (ドロマイト) であり、層厚 7m 程度の亀裂性岩盤で、透水量係数が $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{m}^2/\text{sec}$ 程度である。トレーサーには非反応性トレーサーである安息香酸類が用いられた。放射状収束試験の孔間距離は 11~43m 程度でトレーサー回収率が 20% を下回る試験もあったが、単孔式トレーサー試験においては回収率が 94% 以上と高回収率を達成している。Culebra 層は間隙率が 0.15 程度と大きく、一部には小空洞も確認されていることから、岩盤マトリクスの拡散効果が重要な物質移行経路であると考えた。そこで Haggerty et al. (2001) は、岩盤マトリクスを移流現象が支配的な間隙 (Advective porosity) と拡散現象が支配的な間隙 (Diffusive porosity) に区別したモデルを提案し、トレーサー試験の結果を評価している。

Drever and McKee (1980) は、ウランが含有する地質における吸着効果を検証するため、室内試験と単孔式トレーサー試験を行い、両者を比較している。トレーサーは NH_4^+ を用い、単孔式トレーサー試験の評価には、拡散等は考慮せず、ラングミュアの吸着等温式によって分配係数を求めた。室内試験と単孔式トレーサー試験では、概ね一致したものの、室内試験で得た分配係数の方が単孔式トレーサー試験で得た分配係数の 5 倍以上となった結果もあったことから、Drever and McKee (1980) は室内試験と単孔式トレーサー試験において、トレーサーが移行する間隙体積が異なることが要因であると考察している。

Nordqvist (2008) は、SKB 社 (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company) がスウェーデンの Oskarshamn と Forsmark の二つのサイトで行った単孔式トレーサー試験について報告を行っている。単孔式トレーサー試験は、2004~2006 年の間に、深度 300~700m に位置する割れ目が卓越する結晶質岩を対象に行われ、合計 12 箇所物質移行特性が評価された。試験区間は 1~5m であり、透水量係数は $10^{-9} \sim 10^{-6} \text{m}^2/\text{sec}$ 程度である。トレーサーには、非吸着性トレーサーとしてウラニンが、吸着性トレーサーとして Cs^+ 、 Rb^+ が使用された。非吸着性トレーサーであるウラニンの回収率は、透水量係数が $8.9 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{sec}$ の区間で約 43% と低かったものの、その他の区間では概ね 80% 以上の回収率となっている。吸着性トレーサーである Cs^+ 、 Rb^+ の回収率は、割れ目表面や岩盤マトリクスの間隙に吸着されるために低いものの、いずれにおいても濃度上昇部、ピーク、テール部の変化を伴う破過曲線が得られている。但し、単孔式トレーサー試験は孔間式トレーサー試験と違い、トレーサーが拡が

った領域を特定することができないため、割れ目幅を一意的に決定することができないと Nordqvist (2008) は述べている。

孔間式トレーサー試験である放射状収束試験では、次式を用いて割れ目幅が求められている (Hjerne et al. (2010)) 。

$$\delta_m = \frac{Qt_m}{\pi(r^2 - r_w^2)} \quad (1)$$

ここで、 δ_m : 物質移行に寄与する割れ目幅 (mass balance aperture) [L]、 Q : 揚水流量[L³/T]、 r : トレーサー移行距離[L]、 r_w : ボアホール径[L]、 t_m : 平均トレーサー移行時間 (mean residence time) [T]である。また、平均トレーサー移行時間は、トレーサー回収濃度の累積値が 50%に到達した時間を用いることが多いが、Hjerne et al. (2010) は揚水流量 Q 、揚水量 V から平均トレーサー移行時間を求めている。

$$t_m = \frac{V}{Q} \quad (2)$$

トレーサー移行距離は、ボーリング孔の孔間距離等が用いられ、割れ目幅を求めることができる。しかし、単孔式トレーサー試験では、トレーサー移行距離が不明であるため、直接的に割れ目幅を求めることができない。

Nordqvist (2008) は、割れ目から成るモデルと、割れ目と岩盤マトリクスから成る複合モデルの二つを用いて、原位置試験の結果に対する再現解析を行って、各地点の分散性、岩盤マトリクスへの拡散性、吸着による遅延効果を評価している。この時、表 4.3.2-1 内に示すパラメーターを定義し、そのパラメーターを変化させて数値解析を行い、単孔式トレーサー試験の結果にフィッティングし、現地の物質移行特性を評価している。割れ目から成るモデル、割れ目と岩盤マトリクスから成る複合モデルのいずれにおいても、 Cs^+ で 1.6~10000 以上、 Rb^+ で 20~2700 の遅延係数が算定されている。また、表 4.3.2-1 内のマトリクス拡散の効果を表すパラメーターである A 、 A_R は、直接的にマトリクス間隙率、マトリクス拡散係数を算定することができない。しかし、複数の結果で A 、 A_R を評価することで、相対的にマトリクスへの拡散効果を評価することができる。

表 4.3.2-1 Nordqvist (2008) で用いられている評価パラメーター

	割れ目のみのモデル	割れ目・岩盤マトリクスを考慮した複合モデル
分散		$\lambda = \frac{\alpha_L^2 \delta}{V_{inj}}$
マトリクスへの拡散		<p>【非吸着性トレーサー】</p> $A = \frac{\delta}{2p_m \sqrt{D_p}}$ <p>【吸着性トレーサー】</p> $A_R = \frac{\delta}{2p_m \sqrt{R_m D_p}}, \quad D_p = D_w \frac{\delta_D}{\tau^2}$
吸着（遅延）	パラメーターとして評価	$R_m = \frac{D_w}{D_{w,R}} \left(\frac{A}{A_R} \right)^2$

λ 、 A 、 A_R ：評価パラメーター、 δ ：割れ目幅[L]、 α_L ：縦分散長[L]、 V_{inj} ：トレーサー注入量[L³]、 p_m ：岩盤マトリクスの間隙率[-]、 R_m ：マトリクスの遅延係数[-]、 D_w ：非反応性トレーサーの水中における分子拡散係数[L²/T]、 $D_{w,R}$ ：反応性トレーサーの水中における分子拡散係数[L²/T]、 τ ：屈曲率[-]、 δ_D ：岩盤の取れん度である。

Nordqvist (2012) は、SKB 社が行った単孔式トレーサー試験と孔間式トレーサー試験の結果から、両試験について考察を行っている。単孔式トレーサー試験はデータの拡充が期待できる試験であり、岩盤マトリクスへの拡散による遅延、吸着による遅延を求めることに適しているとし、その理由を流れの可逆性 (Flow reversibility) にあると述べている。つまり、バックグラウンド地下水流れの影響が少ない場では、ボーリング孔から拡がったトレーサーがほぼ同じ経路を通過してボーリング孔に戻ってくるため、場の不均質性による分散効果が最小化されるため、それによって遅延の影響が比較的判別し易い。但し、単孔式トレーサー試験は、トレーサーが拡がった範囲が不明であるため、割れ目幅や縦分散長を一意的に決定することができないと述べている。一方、孔間式トレーサー試験は、トレーサー移行距離は孔間距離に相当すると考えることで、割れ目幅や縦分散長を求めることができる。また、注入孔と揚孔間の水理的連結性を客観的に求めることができ、遅延に関するパラメーターも求めることができる。しかし、孔間式トレーサー試験を実施する際は、特に吸着性トレーサーを用いる場合において、現実的な試験時間で収まるように試験計画を検討することが必要であると述べている。

4.3.3 単孔式トレーサー試験の理論式

均質な帯水層における物質輸送の支配方程式は、軸対象の座標系で次式のように表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\rho_b}{\phi} \frac{\partial S}{\partial t} = \alpha_L |v| \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} - v \frac{\partial C}{\partial r} \quad (3)$$

$$\text{但し、 } v = \frac{Q}{2\pi b \phi r} \quad (4)$$

ここで、 C : 液相内の物質濃度[-]、 r : 軸対象系の座標[L]、 t : 時間[T]、 ρ_b : 土粒子密度[M/L³]、 ϕ : 有効間隙率[-]、 S : 固相の物質濃度[-]、 α_L : 縦分散長[L]、 v : 流速[L/T]、 Q : 注入又は揚水流量[L³/T]、 b : 帯水層厚さ[L]である。

式(3)は、流下方向への分散（縦分散）、固相への吸着が考慮されている。ここで、吸着項に関しては線型吸着等温式を用いた場合、遅延係数 R を用いて次式のように変換される。

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = \alpha_L |v| \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} - v \frac{\partial C}{\partial r} \quad (5)$$

$$\text{但し、 } R = 1 + \frac{\rho_b}{\phi} K_d \quad (6)$$

ここで、 K_d : 固相 - 液相間の分配係数[L³/M]である。

均質な帯水層において $C=1.0$ のトレーサーを注入する場合、注入過程におけるトレーサー浸潤距離は、式(7)で表される。

$$\hat{r}_{inj} = \sqrt{\frac{Q_{inj} t_{inj}}{\pi b \phi R} + r_w^2} \quad (7)$$

ここで、 \hat{r}_{inj} : トレーサー ($C/C_0 = 0.50$) の浸潤距離[L]、 Q_{inj} : 注入流量[L³/T]、 t_{inj} : 注入時間[T]、 r_w : ボーリング孔径[L]である。

トレーサー注入終了時におけるトレーサー浸透範囲 \hat{r}_{max} は次式で示される。

$$\hat{r}_{max} = \sqrt{\frac{V_{inj}}{\pi b \phi R} + r_w^2} \quad (8)$$

$$\text{但し、 } V_{inj} = Q_{inj} \times T_{inj}$$

ここで、 V_{inj} : 総注入量[L³]、 T_{inj} : 総注入時間[T]である。

揚水時におけるトレーサーの浸潤距離 \hat{r}_{ext} は次式で示される。

$$\hat{r}_{ext} = \sqrt{\hat{r}_{max}^2 + \frac{Q_{ext} t_{ext}}{\pi b \phi R}} \quad (9)$$

ここで、 Q_{ext} : 揚水流量[L³/T]、 t_{ext} : 揚水時間[T]である。

Gelhar and Collins(1971)は、トレーサーを v_{inj} 注入した後、流量 Q_{ext} で揚水した場合におけるトレーサー濃度の変化について、次式を示している。

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{r^2 - \hat{r}_{ext}^2}{\left\{ \frac{16}{3} \alpha_L (2\hat{r}_{max}^3 - \hat{r}_{ext}^3 - r_w^3) \right\}^{1/2}} \right] \quad (10)$$

式(10)の r_w を0として式(10)に式(8)、(9)を適用した場合における、 $r = r_w$ でのトレーサー濃度変化は次式で表される。

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\frac{V_{ext} - 1}{V_{inj}}}{\left[\frac{16}{3} \frac{\alpha_L}{\hat{r}_{max}} \left\{ 2 - \left| 1 - \frac{V_{ext}}{V_{inj}} \right|^{1/2} \left(1 - \frac{V_{ext}}{V_{inj}} \right) \right\} \right]^{1/2}} \right) \quad (11)$$

ここで、 V_{ext} は揚水量(= $Q_{ext} \times t_{ext}$)である。

式(11)は、分子拡散による拡散効果、流下方向に対して直交する方向の分散である横分散は考慮されておらず、注入や揚水の切り替え時において瞬時に流れ場が定常状態に達すると仮定している。但し、分散効果のうち最も顕著に現れる流下方向の分散を表すパラメーターである縦分散長 α_L が考慮されている。

一方、式(11)を用いて遅延係数を求める方法については、Schroth et al. (2001)が非反応性トレーサーと反応性トレーサーのトレーサー浸透範囲 \hat{r}_{max} の差を用いる方法を述べている。つまり、図4.3.3-1に示したように、非吸着性トレーサーのトレーサー浸透範囲を $\hat{r}_{max, tr}$ 、吸着性トレーサーのトレーサー浸透範囲を $\hat{r}_{max, sol}$ とし、式(11)を次式のように変形した。

・非吸着性トレーサー

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\frac{V_{ext} - 1}{V_{inj}}}{\left[\frac{16}{3} \frac{\alpha_L}{\hat{r}_{max, tr}} \left\{ 2 - \left| 1 - \frac{V_{ext}}{V_{inj}} \right|^{1/2} \left(1 - \frac{V_{ext}}{V_{inj}} \right) \right\} \right]^{1/2}} \right) \quad (12a)$$

・吸着性トレーサー

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\frac{V_{ext} - 1}{V_{inj}}}{\left[\frac{16}{3} \frac{\alpha_L}{\hat{r}_{max,sol}} \left\{ 2 - \left| 1 - \frac{V_{ext}}{V_{inj}} \right|^{1/2} \left(1 - \frac{V_{ext}}{V_{inj}} \right) \right\} \right]^{1/2}} \right) \quad (12b)$$

縦分散長を求める場合は、式(12a)の縦分散長 α_L を変数として非吸着性トレーサーの試験結果とフィッティングし、試験結果を最も良く再現する縦分散長 α_L を求める。一方、遅延係数を求める場合は、非吸着性トレーサーの結果から求めた縦分散長 α_L を既知とし、式(12b)の $\hat{r}_{max,sol}$ を変数として吸着性トレーサーの試験結果とフィッティングして試験結果を最も良く再現する $\hat{r}_{max,sol}$ を決定し、最後に式(13)を用いて遅延係数を求める。

$$R = \left(\frac{\hat{r}_{max,tr}}{\hat{r}_{max,sol}} \right)^2 \quad (13a)$$

ここで、

$$\hat{r}_{max,tr} = \sqrt{\frac{V_{inj}}{\pi b \phi} + r_w^2} \quad (13b)$$

$$\hat{r}_{max,sol} = \sqrt{\frac{V_{inj}}{\pi b \phi R} + r_w^2} \quad (13c)$$

である。

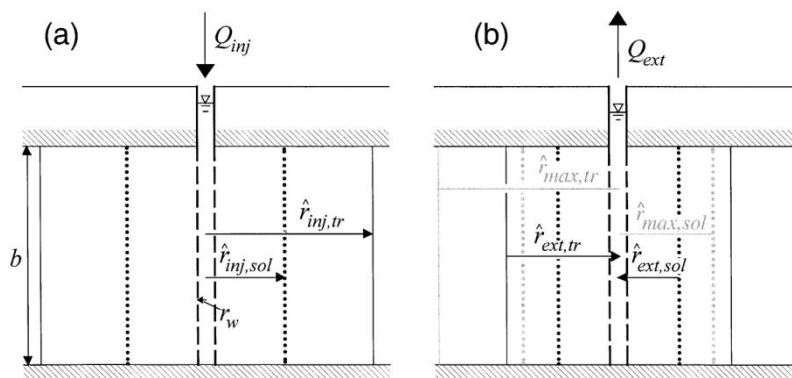
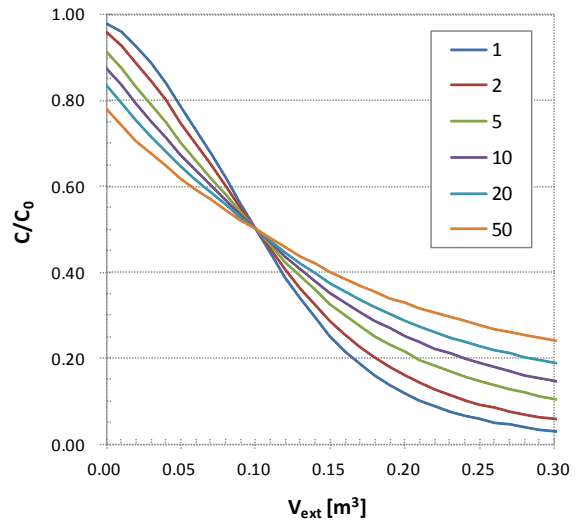
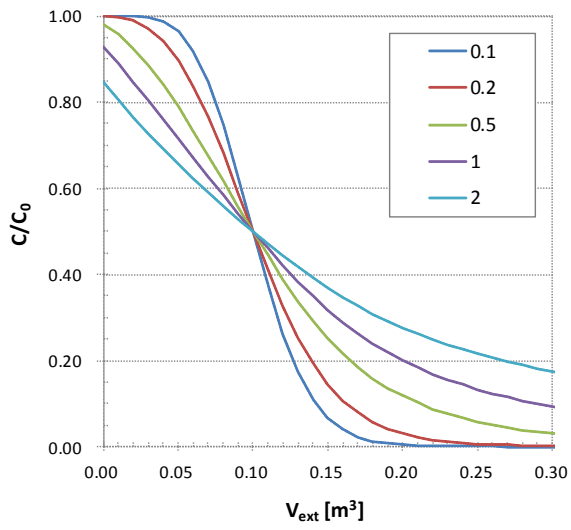


図 4.3.3-1 Schroth et al. (2001)による帯水層におけるトレーサー移行範囲概念図

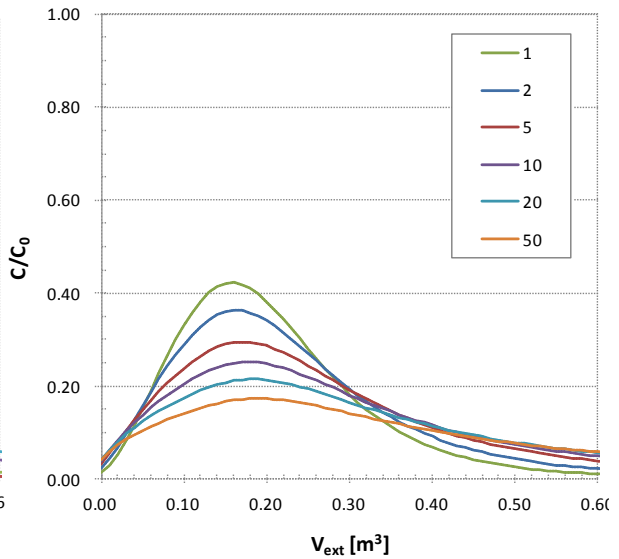
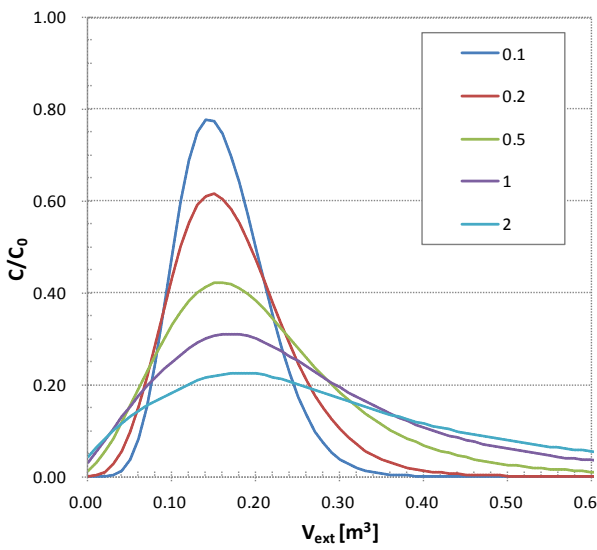
※下付き添え字の sol は吸着性トレーサーを、tr は非吸着性トレーサーを意味する。

帯水層厚さ b を割れ目幅とみなした場合、Gelhar and Collins(1971)の理論解による破過曲線は、式(12a)、(12b)を用いて図4.3.3-2のようになる。この時、割れ目幅は1mm、間隙率は1.0、ボーリング孔径は86mmとし、トレーサー注入量は100L注入とした。また、横軸は経過時間ではなく、揚水量 V_{ex} である。図4.3.3-2(a)は遅延係数を1とし、縦分散長を0.1~2.0mとした場合の結果である。図4.3.3-2(b)は縦分散長を0.5mとし、遅延係数が1~50とした場合の結果である。いずれも、縦分散長、遅延係数の違いが破過曲線に表れている。一方、図4.3.3-3はトレーサーを100L注入した後に、チェーサーとして水を100L注入する場合における破過曲線である。チェーサー有りの場合の結果は、トレーサーを100L、200L注入する場合の結果をそれぞれ求め、200L注入の結果から100L注入の結果を差し引いて求めた。図4.3.3-3(a)は遅延係数を1とし、縦分散長を0.1~2.0mとした場合の結果である。図4.3.3-3(b)は縦分散長を0.5mとし、遅延係数が1~50とした場合の結果である。チェーサー有りの場合は、揚水開始初期は濃度が低く、徐々に値が増加してピークを迎え、その後濃度が漸減する結果となった。いずれも、縦分散長、遅延係数の違いが破過曲線に表れている。



(a) 縦分散長が異なる場合 (遅延係数は 1.0) (b) 遅延係数が異なる場合 (縦分散長は 0.5m)

図 4.3.3-2 Gelhar and Collins(1971)の理論解による破過曲線 (チェーサー無し)



(a) 縦分散長が異なる場合 (遅延係数は 1.0) (b) 遅延係数が異なる場合 (縦分散長は 0.5m)

図 4.3.3-3 Gelhar and Collins(1971)の理論解による破過曲線 (チェーサー100L)

4.4 単孔式トレーサー試験の感度解析

水理パラメーター、物質移行パラメーターが単孔式トレーサー試験の結果に及ぼす影響について明らかにするため、実岩盤を模擬したモデルを用いて感度解析を行う。今回の解析に用いたモデルは、割れ目のみを対象としたモデル（以下、割れ目モデルと呼ぶ）と、割れ目と岩盤マトリクスを対象としたモデル（以下、複合モデルと呼ぶ）の二つである。

4.4.1 数値解析手法

今回の解析には、(一財)電力中央研究所が開発した岩盤中地下水流動・物質移行解析コード FEGM を用いた(河西ほか(1994)、河西ほか(1995))。FEGM は、空間の離散化については有限要素法を、時間の離散化については差分法が用いられており、オイラー座標系で記述されている。FEGM における地下水流動に関する基礎方程式は以下の通りである。

$$\left(\theta\beta + \frac{\theta}{\phi}\alpha + \frac{\partial\theta}{\partial h} \right) \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} V_i + Q = 0 \quad (14)$$

ここで、

$$V_i = -k_r K_{ij} \frac{\partial H}{\partial x_j} \quad (15)$$

であり、 θ : 体積含水率[L³/L³]、 β : 流体の修正圧縮係数[1/L]、 ϕ : 間隙率[-]、 α : 媒体の修正圧縮係数[1/L]、 h : 圧力水頭[L]、 t : 時間[T]、 x_i : 座標[L]、 V_i : ダルシー流速[L/T]、 Q : 湧排水率[L³/L³T]、 k_r : 相対透水係数[-]、 K_{ij} : 飽和係数テンソル[L/T]、 H : 全水頭[L]となる。

また、FEGM における物質移行に関する基礎方程式は、以下の通りである。

$$\begin{aligned} & (\theta + \rho_b K_d) \frac{\partial}{\partial t} C + \left\{ \frac{\partial\theta}{\partial t} + \alpha(\theta + \rho_b K_d) \frac{\partial h}{\partial t} \right\} C \\ & - \frac{\partial}{\partial x_i} \theta D_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} C + \frac{\partial}{\partial x_i} V_i C + M = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

ここで、

$$\theta D_{ij} = \alpha_T \|\mathbf{V}\| \delta_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{V_i V_j}{\|\mathbf{V}\|} + a_m \tau \theta \delta_{ij} \quad (17)$$

であり、 ρ_b : 媒体のみかけ密度[M/L³]、 K_d : 分配係数[L³/M]、 C : 物質濃度[M/L³]、 D_{ij} : 分散係数テンソル[L²/T]、 M : 物質のソース[M/T]、 α_T : 流れ方向に直交する方向の分散長(横分散長)[L]、 α_L : 流れ方向の分散長(縦分散長)[L]、 \mathbf{V} : ダルシー流速ベクトル、 δ_{ij} : クロネッカーのデルタ、 a_m : 分子拡散係数[L²/T]、 τ : 屈曲率[-]となる。

本研究では、吸着による遅延効果を遅延係数として与えて解析に使用した。遅延係数は次式で示される。

$$R = 1 + \frac{\rho_b K_d}{\phi} \quad (18)$$

4.4.2 割れ目モデルによる感度解析

4.4.2.1 解析概要

本解析では、水理パラメーターとして割れ目幅、透水性、バックグラウンド地下水流れについて、物質移行パラメーターとして縦分散長、遅延係数について、その他のパラメーターとして、チェーサー注入後の待機時間について感度解析を行う。割れ目モデルは、ボーリング孔（直径 86mm）に相当する部分を除いた半径 30m の円柱形モデルであり、鉛直方向の長さは任意の割れ目幅である。節点数は 12,096、要素数は 5,976 であり、半径方向の空間分割は 1~50cm である。図 4.4.2-1 に割れ目モデルの解析メッシュを示す。

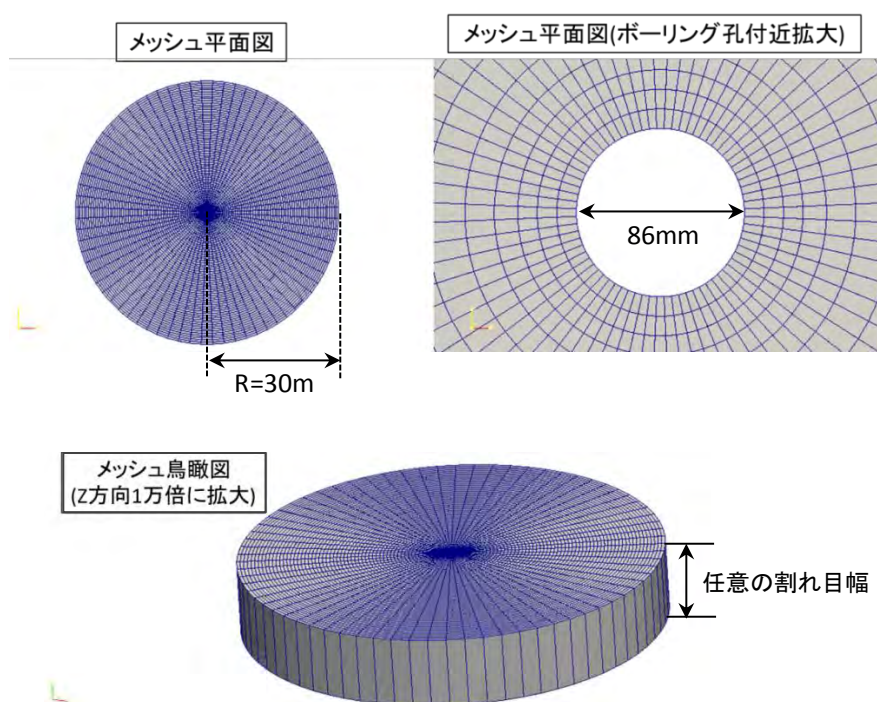


図 4.4.2-1 解析メッシュ（割れ目モデル）

解析は以下の手順で行った。

- 1) 定常解析：水を 200mL/min で注入する定常解析
- 2) トレーサーの注入：トレーサーを 200mL/min で注入する非定常解析（0~4 時間 10 分）

- 3) チェーサーの注入：チェーサーとして水を 200mL/min で注入する非定常解析（4 時間 10 分～8 時間 20 分）
- 4) 待機：チェーサー注入後の非定常解析（8 時間 20 分～待機時間終了まで）
- 5) トレーサーの回収：200mL/min で揚水する非定常解析（待機時間終了～48 時間）

各手順では、一つ前の解析結果を初期条件として計算を行った。注入或いは揚水は、ボーリング孔の外周に位置する要素（ $r=43\text{mm}$ ）に固定流量条件を与え、トレーサー注入時は $C=1$ 、チェーサー注入時は $C=0$ の濃度固定条件を与えた。また、バックグラウンド地下水流れを考慮する場合は、モデル境界（ $r=30\text{m}$ ）に位置する節点に、任意のバックグラウンド地下水流れとなるように固定圧力水頭条件を与えた。

解析条件を表 4.4.2-1 に示す。今回は、動水勾配、割れ目幅、透水量係数、待機時間、縦分散長、遅延係数に関して感度解析を行う。各項目を感度解析する際、それ以外のパラメーターは表 4.4.2-1 内の赤字の値を用いた。例えば、動水勾配について感度解析する際は、割れ目幅を 1mm、透水量係数を $1.0\text{e-}6\text{m}^2/\text{sec}$ 、待機時間を 0hour、縦分散長を 0.5m、遅延係数を 1 として感度解析を行った。

表 4.4.2-1 割れ目モデルによる感度解析の解析条件

項目	単位	値
動水勾配	%	0, 1, 2, 5, 10, 20
割れ目幅	mm	0.2, 0.5, 1.0, 2.0
透水量係数	m^2/sec	$1.0\text{e-}7$, $1.0\text{e-}6$, $2.0\text{e-}6$, $5.0\text{e-}6$, $1.0\text{e-}5$
待機時間	hour	0, 8, 12, 24
縦分散長	m	0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0
遅延係数	-	1, 2, 5, 10, 20, 50, 100

4.4.2.2 解析結果

図 4.4.2-2 に動水勾配が 0、10% の場合における破過曲線を示す。また、図 4.4.2-3、4.4.2-4 には、動水勾配が 0、10% の場合における、チェーサー注入後（トレーサー注入開始から 8 時間 20 分後）、12 時間後（揚水開始から 3 時間 40 分後）の濃度コンター図を示す。この時、割れ目幅は 1mm、透水量係数は $1.0\text{e-}6\text{m}^2/\text{sec}$ 、待機時間は 0hour、縦分散長は 0.5m、遅延係数は 1 である。動水勾配が 0% の場合はトレーサー回収率がほぼ 100% となったが、動水勾配が 10% の場合は回収率が約 53% まで低下する結果となった。つまり、注入されたトレーサー量の半分程度はバックグラウンド地下水流れによって流される結果となった。

また、図 4.4.2-2 には、同じ条件（遅延係数が 1、縦分散長が 0.5m、割れ目幅が 1mm）の場合にお

ける Gelhar and Collins(1971)の理論解も併せて示した。Gelhar and Collins(1971)の理論解は、バックグラウンド地下水流れについて考慮されていないため、動水勾配が0%の場合における解析結果との比較に留まる。ピーク時の濃度は理論解と解析結果でほぼ同じとなったものの、濃度がピークを迎える時間がやや異なった。理論解と解析解で差が生じた要因として、Gelhar and Collins(1971)の理論解では、注入から揚水に切り替えた際、瞬時に定常状態に到達するという仮定に基づいているためであると考えられる。

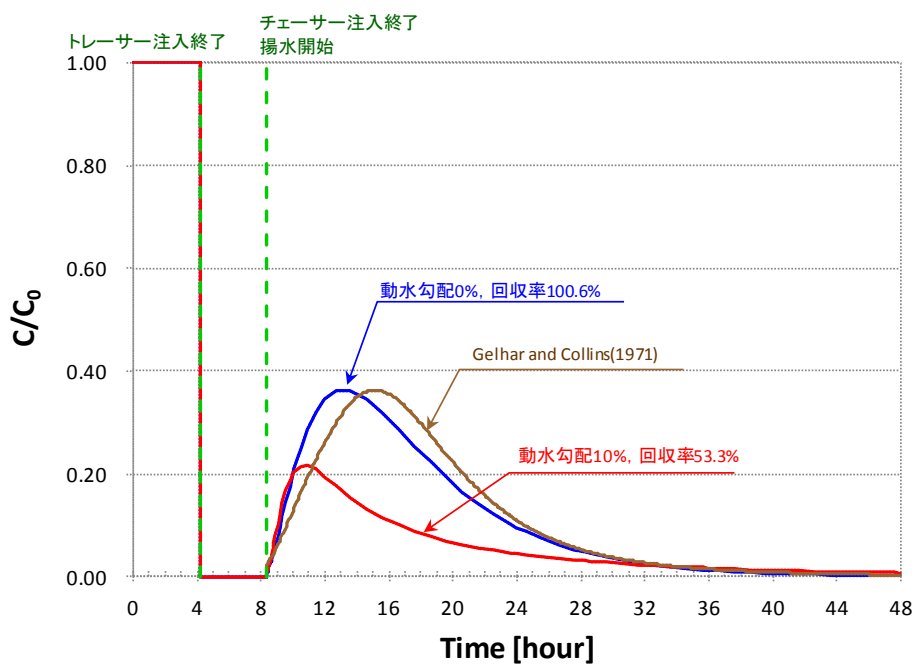
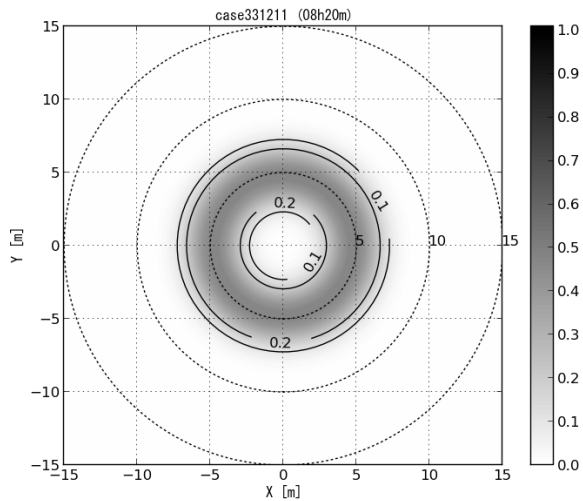
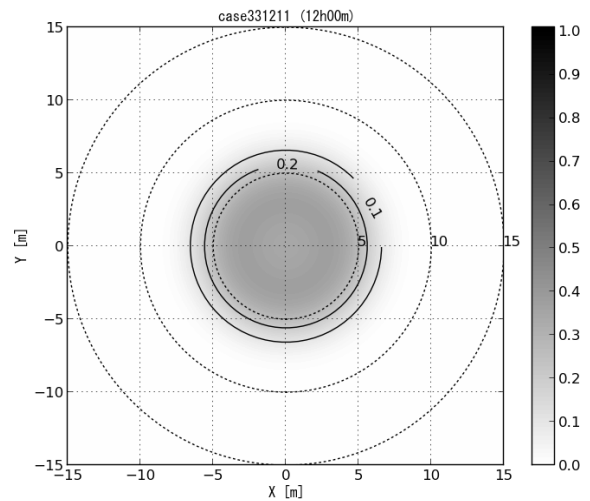


図 4.4.2-2 理論解と解析結果の破過曲線

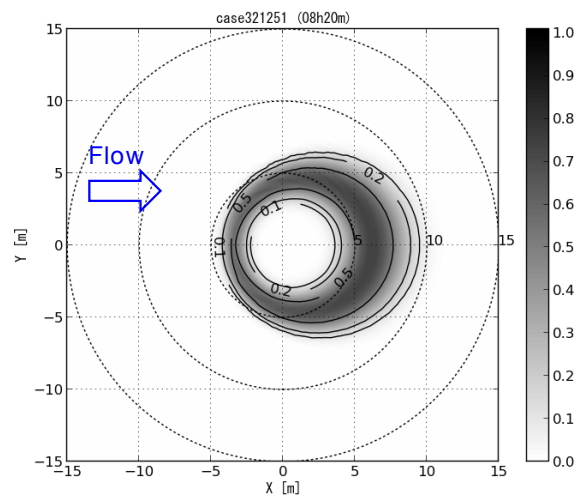


(a) チェーサー注入後の濃度コンター図
(トレーサー注入開始から8時間20分後)

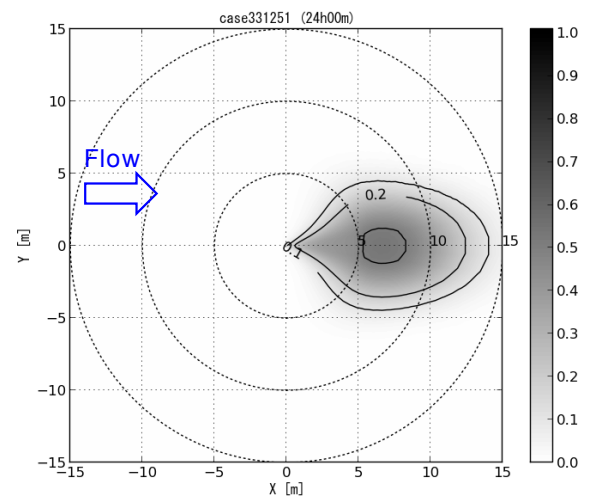


(b) 12時間後の濃度コンター図
(揚水開始から3時間40分後)

図 4.4.2-3 動水勾配 0%における濃度コンター図



(a) チェーサー注入後の濃度コンター図
(トレーサー注入開始から8時間20分後)



(b) 12時間後の濃度コンター図
(揚水開始から3時間40分後)

図 4.4.2-4 動水勾配 10%における濃度コンター図

次に、動水勾配、割れ目幅、透水量係数、待機時間、縦分散長、遅延係数について感度解析を行った結果を示す。

(1) 動水勾配の感度解析結果

表 4.4.2-2 に共通パラメーターを、図 4.4.2-5 に破過曲線を、図 4.4.2-16 に回収率を示す。動水勾配が 0~2%程度の場合、破過曲線に大きな違いは無く、回収率もほぼ 100%となった。しかし、動水勾配が 5%になると回収率はやや減少し、動水勾配が 20%の時の回収率は 9.4%となり、大部分のトレーサーがバックグラウンド地下水流れによって流される結果となった。

(2) 割れ目幅の感度解析結果

表 4.4.2-3 に共通パラメーターを、図 4.4.2-6、図 4.4.2-7 に動水勾配 0%、10%における破過曲線を、図 4.4.2-17 に回収率を示す。トレーサー濃度がピークを迎える時間は、割れ目幅が小さいほど遅くなった。これは、定流量条件でトレーサーを注入しているため、割れ目幅が小さいほどトレーサーが広範囲まで広がったことによると考えられる。また、動水勾配 10%の解析結果では、割れ目幅が小さいほど回収率が小さくなった。これは割れ目幅が小さいほどトレーサーが広範囲まで広がり、バックグラウンドの地下水流れによって流されるトレーサー量が増加したためであると考えられる。

(3) 透水量係数の感度解析結果

表 4.4.2-4 に共通パラメーターを、図 4.4.2-8、図 4.4.2-9 に動水勾配 0%、10%における破過曲線を、図 4.4.2-18 に回収率を示す。動水勾配が 0%の場合、透水量係数がよらずほぼ同じ結果となった。一方、動水勾配が 10%での解析結果では、透水量係数が大きいほど回収率が低くなる結果となった。これは、透水性が大きい方が、揚水によって発生する動水勾配が小さく、相対的にバックグラウンド地下水流れの動水勾配が大きくなったことで、揚水による有意な圧力低下を及ぼす範囲が狭くなり、バックグラウンドの地下水流れによって流されるトレーサー量が増加したためであると考えられる。

(4) 待機時間の感度解析結果

表 4.4.2-5 に共通パラメーターを、図 4.4.2-10、図 4.4.2-11 に動水勾配 0%、10%における破過曲線を、図 4.4.2-19 に回収率を示す。動水勾配 0%の場合は、揚水開始以降の破過曲線は同じであり、結果は変わらない。一方、動水勾配が 10%の場合、待機時間が長いほど、バックグラウンド地下水流れによって流されるトレーサー量が増加するため、回収率が低くなる結果となった。

(5) 縦分散長の感度解析結果

表 4.4.2-6 に共通パラメーターを、図 4.4.2-12、図 4.4.2-13 に動水勾配 0%、10%における破過曲線を、図 4.4.2-20 に回収率を示す。縦分散長が大きいほど、トレーサーが流下方向に分散するため、ピーク時のトレーサー濃度は低くなり、破過曲線は平坦化される。また、動水勾配が 10%の場合、縦分

散長が大きい方がバックグラウンドの地下水流れによって流されるトレーサー量が増加するため、回収率が低下する結果となった。

(6) 遅延係数の感度解析結果

表 4.4.2-7 に共通パラメーターを、図 4.4.2-14、図 4.4.2-15 に動水勾配 0%、動水勾配 10%における破過曲線を、図 4.4.2-21 に回収率を示す。動水勾配が 0%の場合、遅延係数が大きいほどピーク時のトレーサー濃度は低くなり、回収率も低下する。一方、動水勾配が 10%の場合、遅延係数が 5 以下の時は、遅延係数が大きくなるに従って回収率が高くなった。これは、吸着によってトレーサーが広がる範囲が狭くなったことで、バックグラウンド地下水流れによって流されにくくなったためであると考えられる。また、遅延係数が 5 以上の時は、遅延係数が大きくなるに従って回収率が低くなったが、これは吸着によって回収できるトレーサー量が減少したためであると考えられる。

表 4.4.2-2 動水勾配の感度解析における共通パラメーター

項目	単位	値
割れ目幅	mm	1.0
透水量係数	m ² /sec	1.0e-6
待機時間	hour	0
縦分散長	m	0.5
遅延係数	-	1

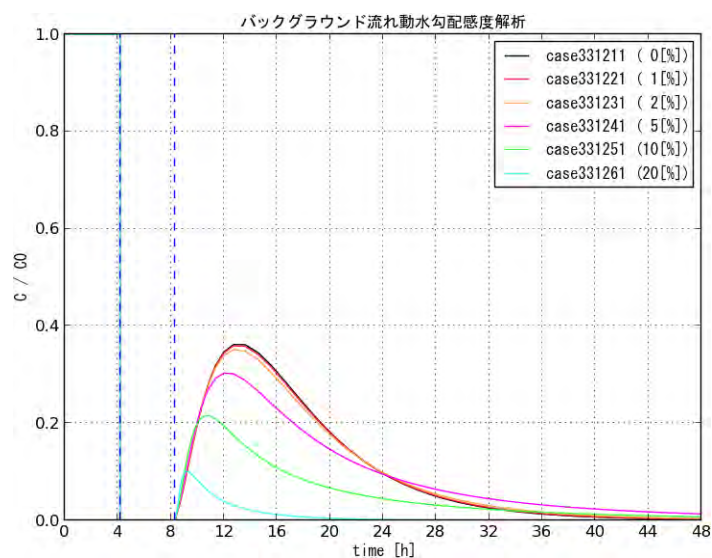


図 4.4.2-5 動水勾配の感度解析における破過曲線

※図中の破線は、トレーサー注入終了（4時間10分）、チェーサー注入終了・揚水開始（8時間20分）の時間を表している。

表 4.4.2-3 割れ目幅の感度解析における共通パラメーター

項目	単位	値
透水量係数	m ² /sec	1.0e-6
待機時間	hour	0
縦分散長	m	0.5
遅延係数	-	1

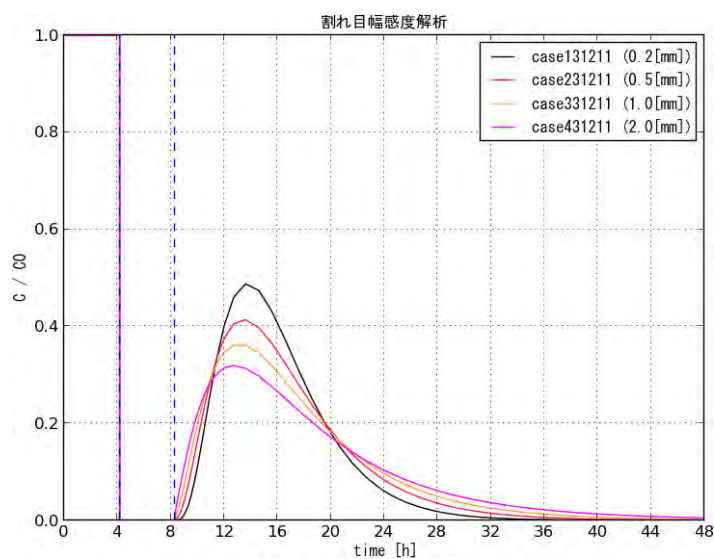


図 4.4.2-6 割れ目幅の感度解析における破過曲線（動水勾配 0%）

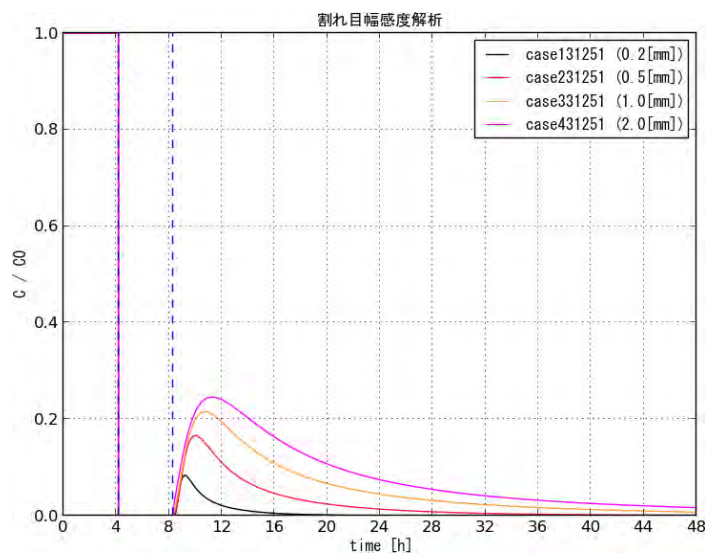


図 4.4.2-7 割れ目幅の感度解析における破過曲線（動水勾配 10%）

※図中の破線は、トレーサー注入終了（4 時間 10 分）、チェーサー注入終了・揚水開始（8 時間 20 分）の時間を表している。

表 4.4.2-4 透水量係数の感度解析における共通パラメーター

項目	単位	値
割れ目幅	mm	1
待機時間	hour	0
縦分散長	m	0.5
遅延係数	-	1

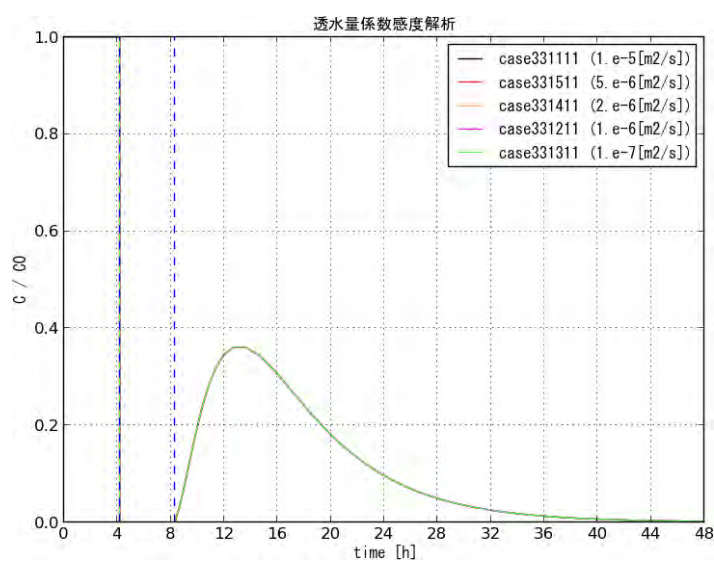


図 4.4.2-8 透水量係数の感度解析における破過曲線（動水勾配 0%）

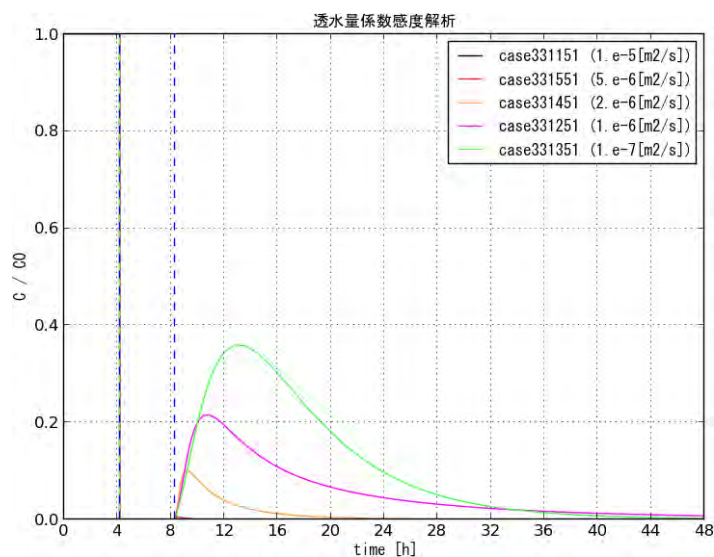


図 4.4.2-9 透水量係数の感度解析における破過曲線（動水勾配 10%）

※図中の破線は、トレーサー注入終了（4 時間 10 分）、チェーサー注入終了・揚水開始（8 時間 20 分）の時間を表している。

表 4.4.2-5 待機時間の感度解析における共通パラメーター

項目	単位	値
割れ目幅	mm	1
透水量係数	m ² /sec	1.0e-6
縦分散長	m	0.5
遅延係数	-	1

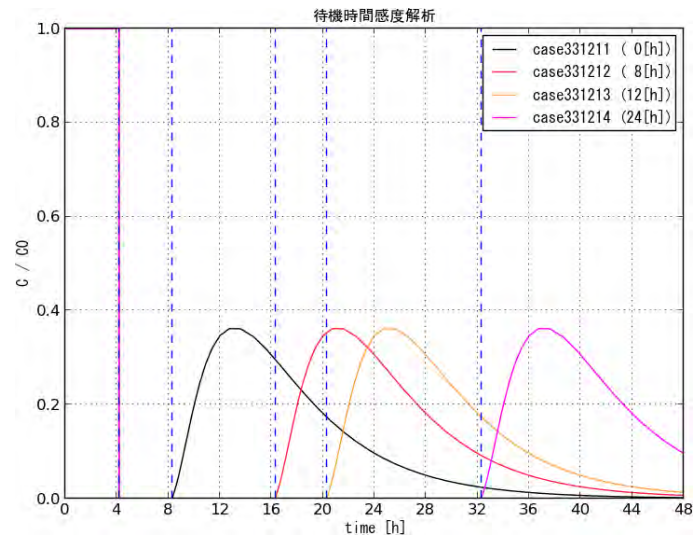


図 4.4.2-10 待機時間の感度解析における破過曲線（動水勾配 0%）

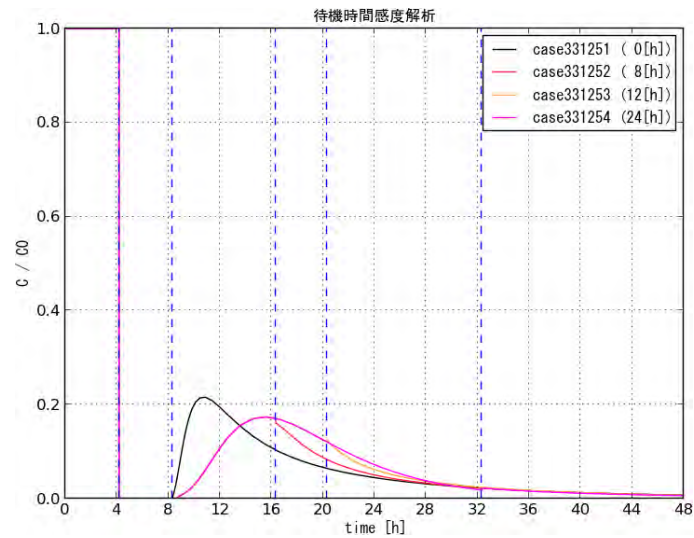


図 4.4.2-11 待機時間の感度解析における破過曲線（動水勾配 10%）

※図中の破線は、トレーサー注入終了（4 時間 10 分）、チェッカー注入終了（8 時間 20 分）、各条件での揚水開始の時間を表している。

表 4. 4. 2-6 縦分散長の感度解析における共通パラメーター

項目	単位	値
割れ目幅	mm	1
透水量係数	m ² /sec	1.0e-6
待機時間	hour	0
遅延係数	-	1

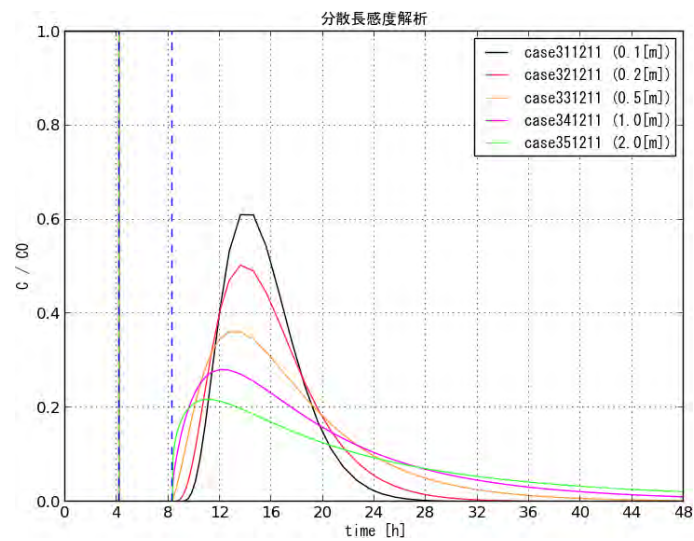


図 4. 4. 2-12 縦分散長の感度解析における破過曲線（動水勾配 0%）

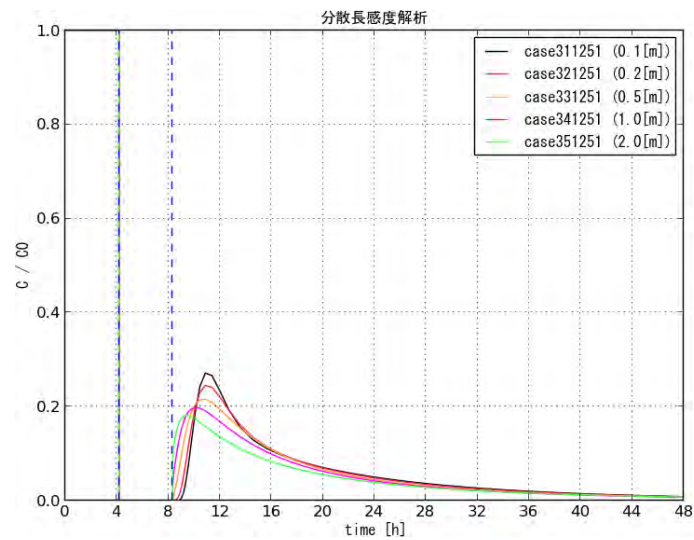


図 4. 4. 2-13 縦分散長の感度解析における破過曲線（動水勾配 10%）

※図中の破線は、トレーサー注入終了（4 時間 10 分）、チェーサー注入終了・揚水開始（8 時間 20 分）の時間を表している。

表 4. 4. 2-7 遅延係数の感度解析にける共通パラメーター

項目	単位	値
割れ目幅	mm	1
透水量係数	m ² /sec	1.0e-6
待機時間	hour	0
縦分散長	m	0.5

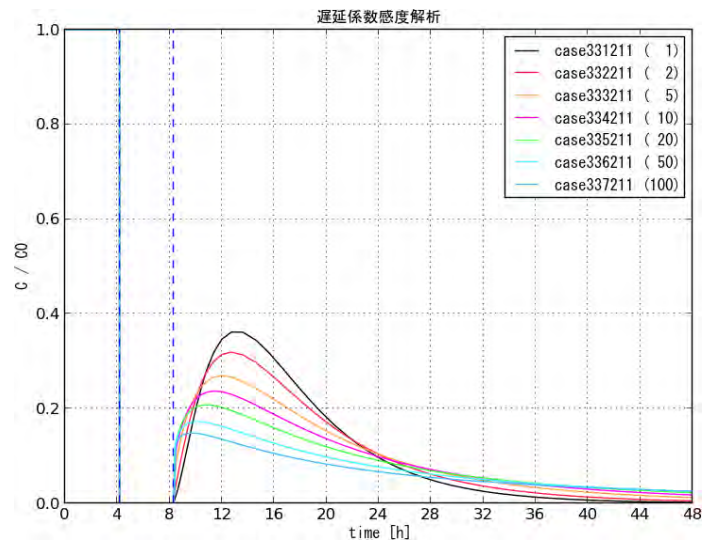


図 4. 4. 2-14 遅延係数の感度解析における破過曲線（動水勾配 0%）

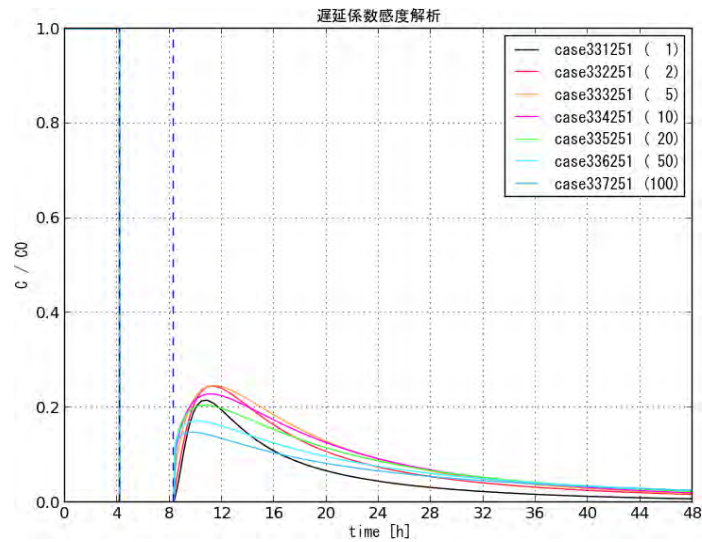


図 4. 4. 2-15 遅延係数の感度解析における破過曲線（動水勾配 10%）

※図中の破線は、トレーサー注入終了（4 時間 10 分）、チェッカー注入終了（8 時間 20 分）、各条件での揚水開始の時間を表している

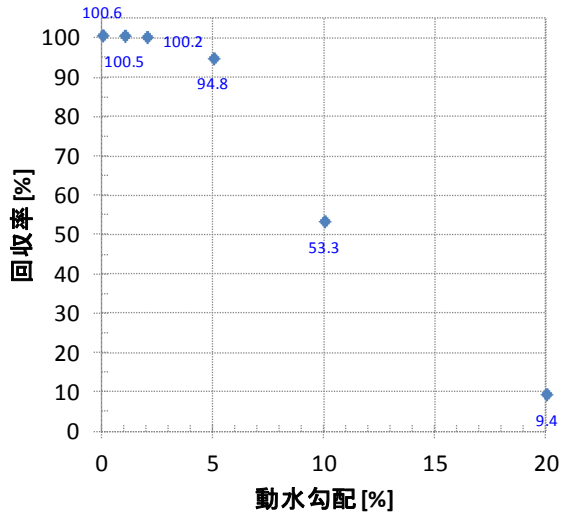


図 4.4.2-16 回収率（動水勾配感度解析）

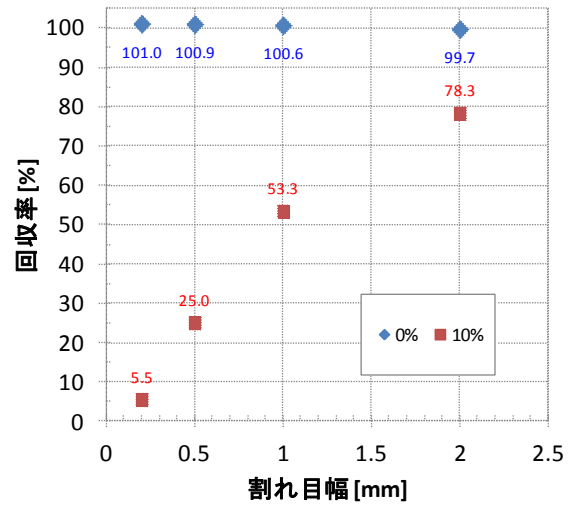


図 4.4.2-17 回収率（割れ目幅感度解析）

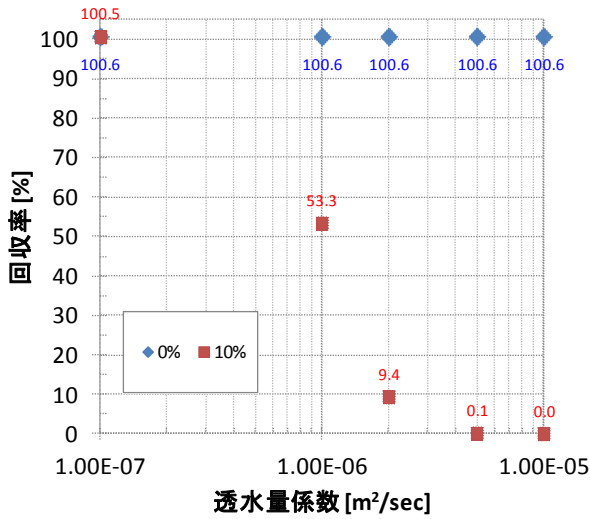


図 4.4.2-18 回収率（透水量係数感度解析）

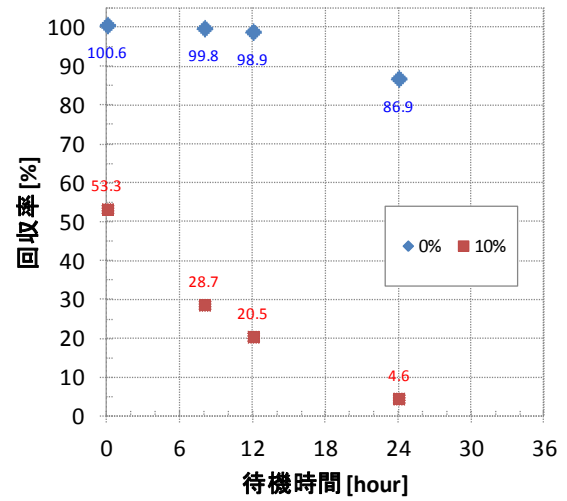


図 4.4.2-19 回収率（待機時間感度解析）

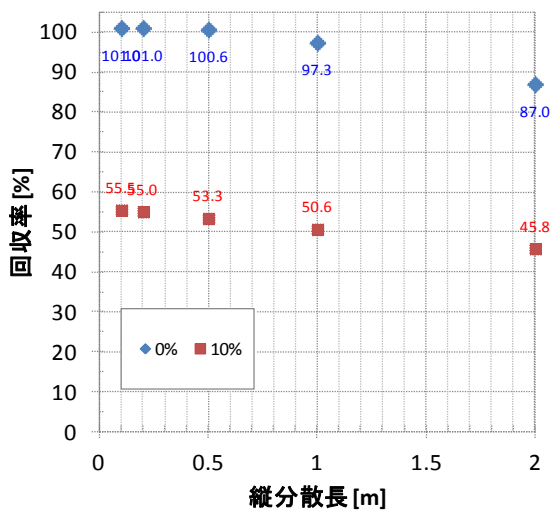


図 4.4.2-20 回収率（縦分散長感度解析）

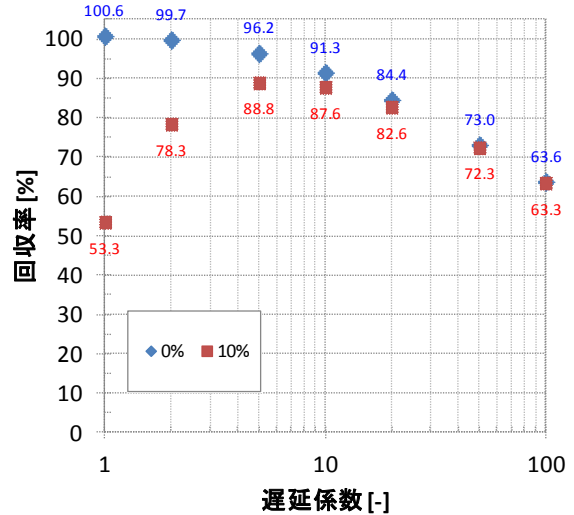


図 4.4.2-21 回収率（遅延係数感度解析）

4.4.3 複合モデルによる感度解析

4.4.3.1 解析概要

ここでは、割れ目と岩盤マトリクスをモデル化した複合モデルを用いて感度解析を行う。図 4.4.3-1 に複合モデルの概念図を示す。複合モデルは透水性の良い割れ目と、透水性の低い岩盤マトリクスから成り、中心部のボーリング孔半径は $r_0=43\text{mm}$ 、解析モデルの半径は 30m 、岩盤マトリクスの鉛直方向の厚みは $B=5\text{m}$ とした。表 4.4.3-1 に感度解析項目以外の共通パラメーターを示す。

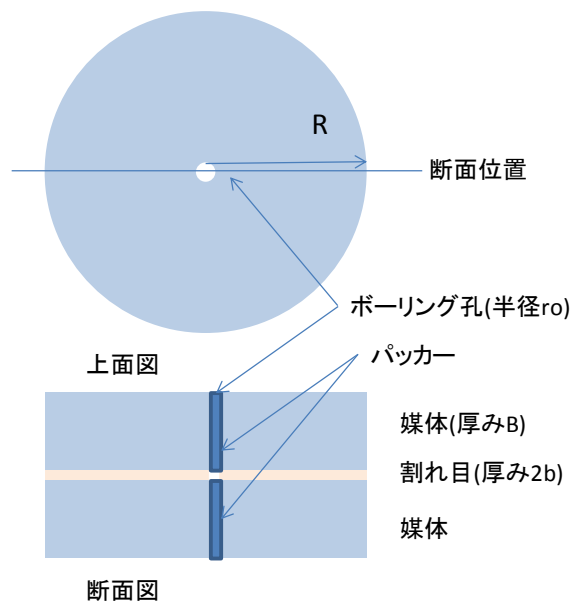


図 4.4.3-1 複合モデルを用いた解析の概念図

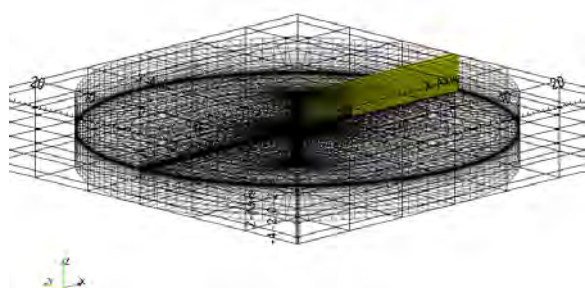
表 4.4.3-1 複合モデルによる感度解析の共通パラメーター

	単位	
割れ目幅	mm	1
割れ目の透水量係数	m^2/sec	$1.0\text{e-}6$
割れ目の間隙率	%	100
割れ目の拡散係数	m^2/sec	0
マトリクス透水係数	m/sec	$1.0\text{e-}13$
縦分散長	m	0.5
横分散長	m	0.05
遅延係数	-	1
待機時間	hour	0

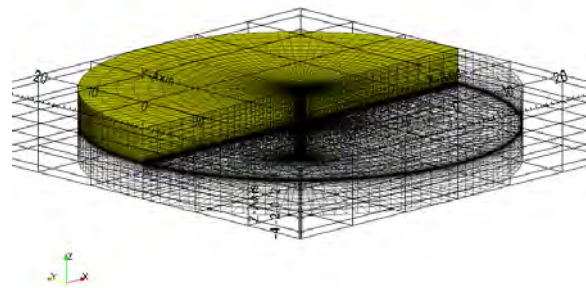
図 4.4.3-2 に今回の解析で用いた解析メッシュを示す。動水勾配が 0% の場合は、3° モデルを用いて解析を行い、全体 (360°) に拡張した。動水勾配が 10% の場合は、180° モデルを用いて解析を行い、全体 (360°) に拡張した。表 4.4.3-2 に複合モデルによる感度解析の解析条件を示す。感度解析は、動水勾配が 0% と 10% の場合について、マトリクス拡散係数、同位体分別係数について行った。各項目を感度解析する際、それ以外のパラメーターは表 4.4.3-2 内の赤字の値を用いた。ここで、同位体分別係数とは、マトリクス拡散係数の比を表している。つまり、分別係数が 1.0015 の場合は、マトリクス拡散係数が $1.0\text{e-}11\text{m}^2/\text{sec}$ の結果と $1.0015\text{e-}11\text{m}^2/\text{sec}$ の結果を比較することとし、マトリクス拡散係数が $1.0\text{e-}11\text{m}^2/\text{sec}$ の結果に対する変化量の千分率で表すこととした。

解析は以下の手順で行った。

- 1) 定常解析：水を 200mL/min で注入する定常解析
- 2) トレーサーの注入：トレーサーを 200mL/min で注入する非定常解析 (0~4 時間 10 分)
- 3) チェーサーの注入：チェーサーとして水を 200mL/min で注入する非定常解析 (4 時間 10 分~8 時間 20 分)
- 4) 待機：チェーサー注入後の非定常解析 (8 時間 20 分~待機時間終了まで)
- 5) トレーサーの回収：200mL/min で揚水する非定常解析 (待機時間終了~72 時間)



(a) 3° モデル：動水勾配 0%
(節点数 5, 100、要素数 2, 450)



(b) 180° モデル：動水勾配 10%
(節点数 155, 560、要素数 147, 000)

図 4.4.3-2 解析メッシュ (複合モデル)

表 4.4.3-2 複合モデルによる感度解析の解析条件

項目	単位	値
動水勾配	%	0, 10
マトリクス拡散係数	m ² /sec	1.0e-13, 1.0e-12, 1.0e-11, 1.0e-10
同位体分別係数	-	1.0000、1.0015、1.0020、1.0025、1.0030

4.4.3.2 解析結果

図 4.4.3-3 に動水勾配が 0%、10%の場合におけるマトリクス拡散係数が 1.0E-11m²/sec の解析結果を示す。図 4.4.3-3 には、「4.4.2 割れ目モデルによる感度解析」内で行った解析結果のうち、同一条件（割れ目幅が 1mm、割れ目の透水量係数が 1.0e-6m²/sec、縦分散長が 0.5m、遅延係数が 1）の解析結果も併せて破線で示した。動水勾配が 0%の場合、複合モデルと割れ目モデルの破過曲線に違いが表れており、この差はマトリクスへトレーサーが拡散したことによると考えられる。一方、動水勾配が 10%の場合、複合モデルと割れ目モデルの破過曲線の差は小さくなった。つまり、バックグラウンドの地下水流れが大きい場合は、マトリクスへ拡散するトレーサー量が減少し、マトリクス拡散係数に対する感度が低下する可能性があると考えられる。

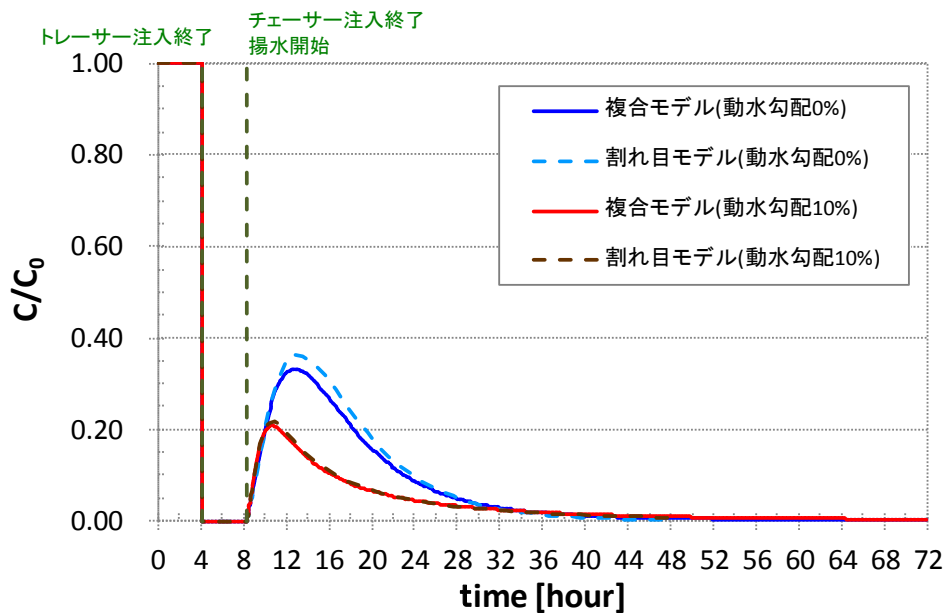


図 4.4.3-3 割れ目モデルと複合モデルの破過曲線の比較

次に、マトリクス拡散係数、分別係数について感度解析を行った結果を示す。

(1) マトリクス拡散係数の感度解析結果

図 4. 4. 3-4、図 4. 4. 3-5 に動水勾配が 0%、10%の場合における破過曲線を、図 4. 4. 3-6 に回収率を示す。動水勾配が 0%の場合、拡散係数が $1.0e-10 \sim 1.0e-12 \text{m}^2/\text{sec}$ の場合は拡散係数の違いによる破過曲線の違いを判別できるが、 $1.0e-12 \text{m}^2/\text{sec}$ より小さい場合は、違いが不明瞭になった。一方、動水勾配が 10%の場合、動水勾配が 0%の場合と比べて感度が低くなり、拡散係数が $1.0e-11 \text{m}^2/\text{sec}$ より小さくなると、拡散係数の違いによる破過曲線の違いを判別することは困難となった。

マトリクスへの拡散効果の影響を大きくする方法として、チェーサー注入後に一定時間待機時間を設ける手法が考えられる。図 4. 4. 3-7 に動水勾配が 0%でチェーサー注入後に 24 時間の待機時間を設けた場合における破過曲線を示す。待機時間を設けない場合(図 4. 4. 3-4)、拡散係数が $1.0e-12 \text{m}^2/\text{sec}$ と $1.0e-13 \text{m}^2/\text{sec}$ の破過曲線の違いは不明瞭であったが、24 時間の待機時間を設けた場合(図 4. 4. 3-7)、破過曲線の違いはやや大きくなった。つまり、待機時間を設けることで、マトリクスに移行するトレーサー量が増加し、マトリクス拡散係数の感度が改善すると考えられる。しかし、動水勾配が大きい場合は、待機時間中にバックグラウンドの地下水流れによってトレーサーが流され、回収率が低くなる可能性があり、現地の水理情報を考慮した待機時間の設定が必要であると考えられる。

(2) 同位体分別係数の感度解析結果

図 4. 4. 3-8、図 4. 4. 3-9 に動水勾配が 0%、10%の場合における破過曲線を示す。縦軸は同位体分別係数が 1.0 (マトリクス拡散係数が $1.0e-11 \text{m}^2/\text{sec}$) の結果に対する変化量の千分率である。揚水開始直後は、同位体分別係数が異なる場合でもほぼ同じ破過曲線となり、約 32 時間後に徐々に変化が表れる結果となった。しかし、その違いは僅かであり、動水勾配が 10%の場合はさらにその差は小さくなった。以上のことから、同位体分別係数に対する感度はそれほど高くないと考えられる。

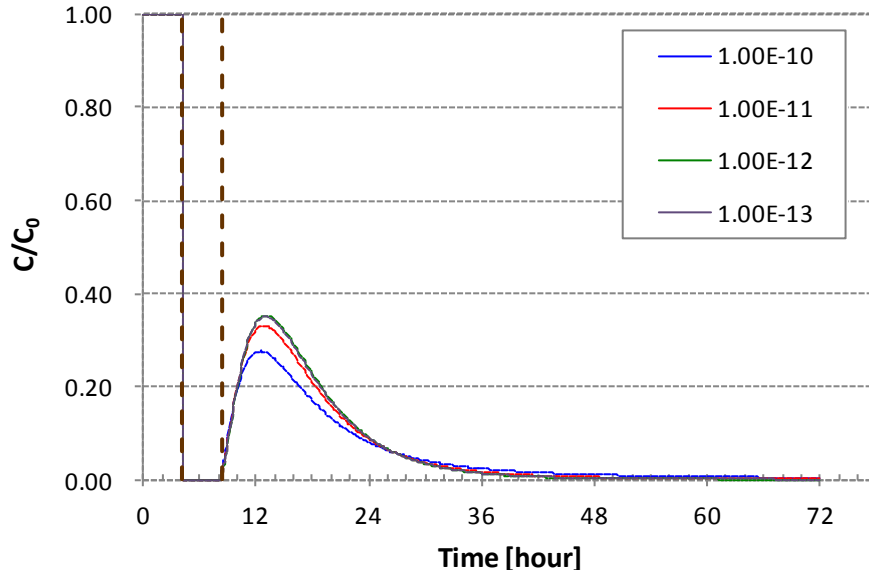


図 4. 4. 3-4 マトリクス拡散係数の感度解析における破過曲線（動水勾配 0%）

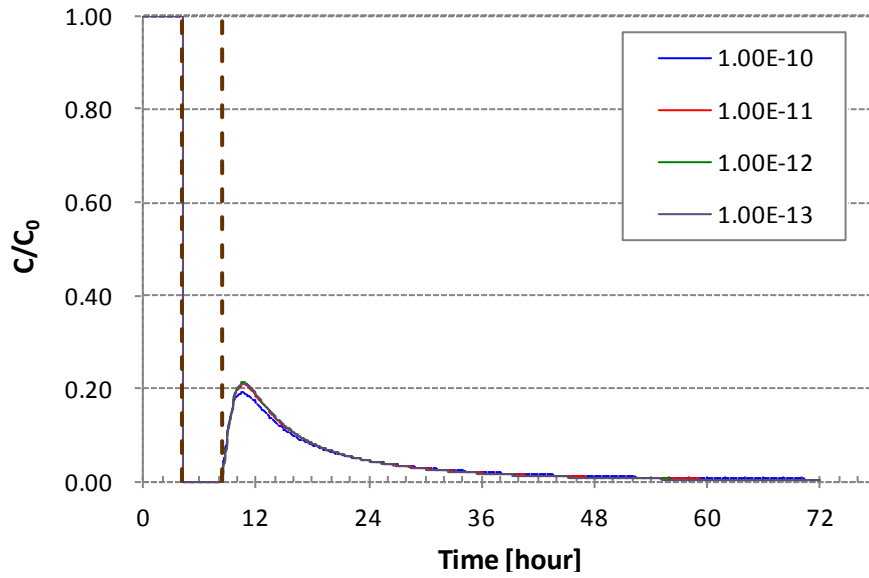


図 4. 4. 3-5 マトリクス拡散係数の感度解析における破過曲線（動水勾配 10%）

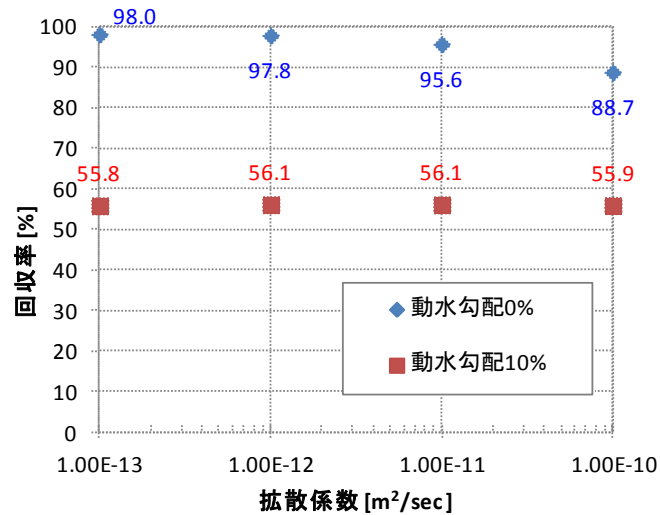


図 4. 4. 3-6 回収率（マトリクス拡散係数感度解析）

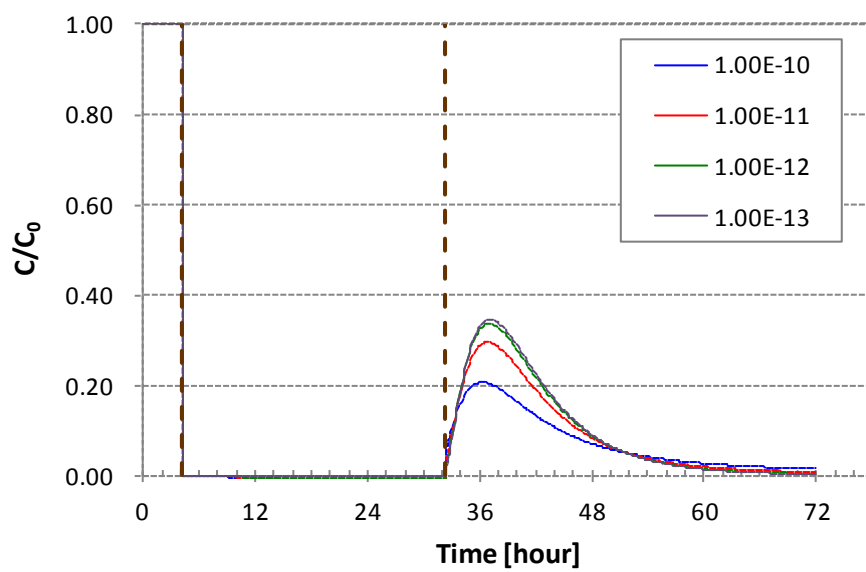


図 4.4.3-7 マトリクス拡散係数の感度解析における破過曲線（動水勾配 0%、待機 24 時間）

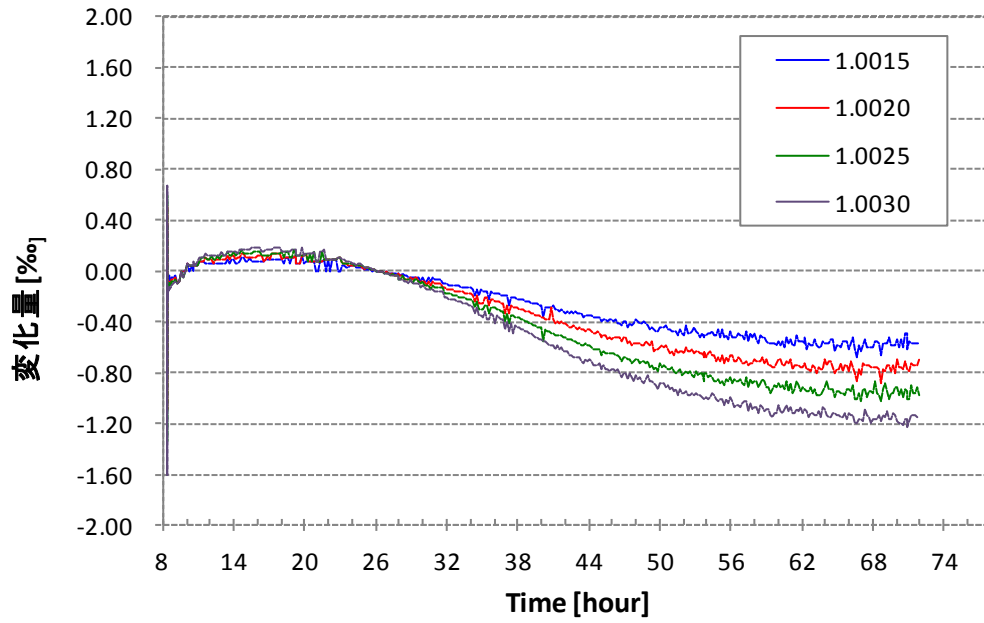


図 4. 4. 3-8 同位体分別係数の感度解析における破過曲線（動水勾配 0%）

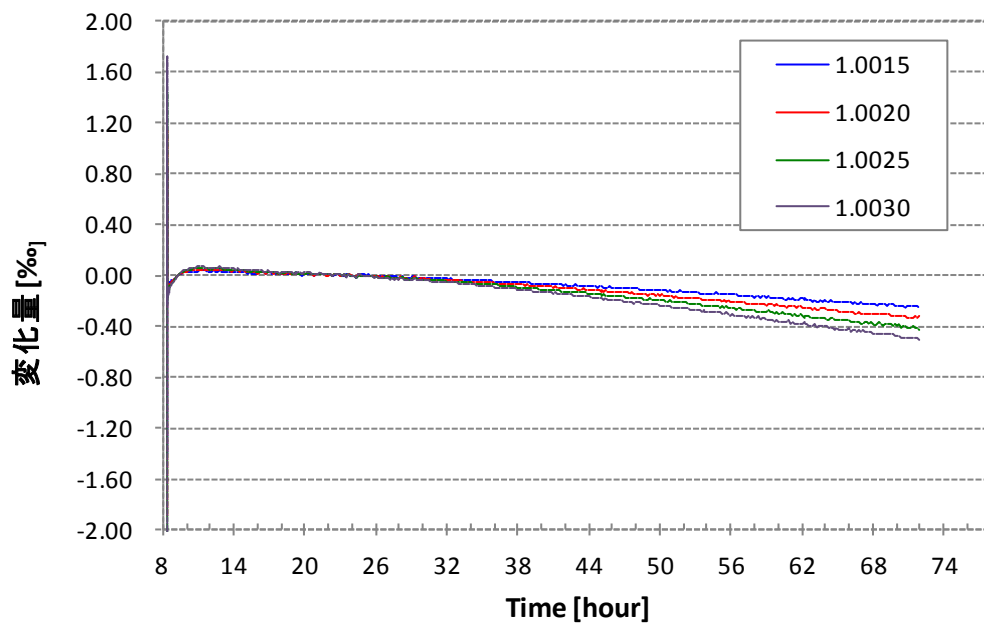


図 4. 4. 3-9 同位体分別係数の感度解析における破過曲線（動水勾配 10%）

4.4.4 不均質モデルによる感度解析

4.4.4.1 解析概要

実際の岩盤割れ目は、同一の割れ目であっても割れ目幅が場所によって異なり、その結果透水性に不均質性が生じる。そこで、透水性の不均質性について検討するため、「4.4.2 割れ目モデルによる感度解析」で使用した解析モデルを用い、透水量係数の不均質性を考慮した感度解析を行った。

透水量係数の不均質性は、次式で表される指数関数型のバリオグラムを仮定して用いた。

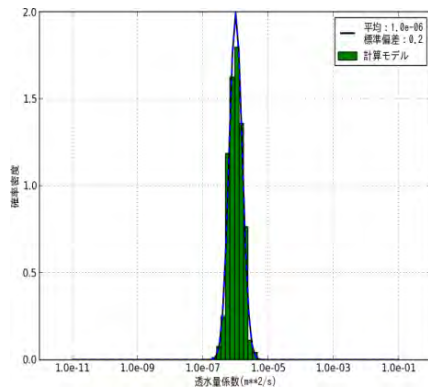
$$\gamma(h) = \sigma^2 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right\} \quad (19)$$

ここで、 h : 離間距離、 σ : 標準偏差、 a : 相関長である。

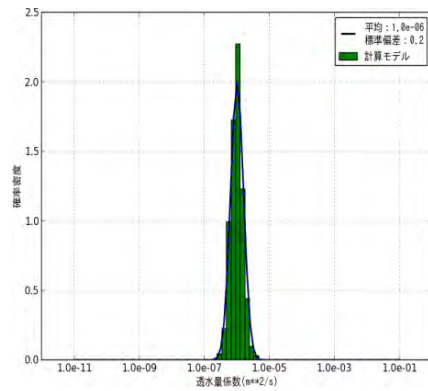
標準偏差を 0.2、0.5、1.0、相関長を 0.2、0.5、1.0、2.0m として、それぞれの組み合わせ（合計 12 組）について透水量係数の平均値が $1.0 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{sec}$ となるよう、乱数により透水量係数の不均質場を発生させた。図 4.4.4-1～図 4.4.4-6 に標準偏差、相関長のそれぞれの組み合わせにおける透水量係数の頻度分布、透水量係数の分布を示す。表 4.4.4-1 には感度解析項目以外の共通パラメーターを示す。

表 4.4.4-1 不均質モデルによる感度解析の共通パラメーター

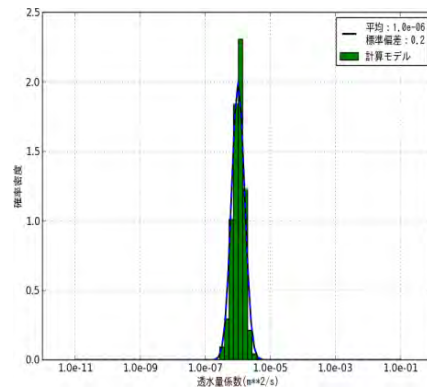
	単位	
割れ目幅	mm	1
割れ目の間隙率	%	100
縦分散長	m	0.5
遅延係数	-	1
待機時間	hour	0



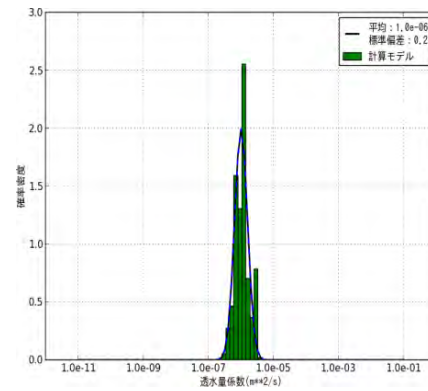
(a) 標準偏差 0.2、相関長 0.2m



(b) 標準偏差 0.2、相関長 0.5m

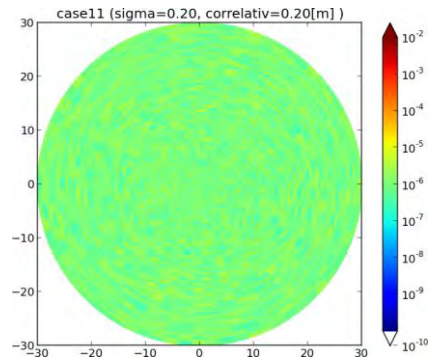


(c) 標準偏差 0.2、相関長 1.0m

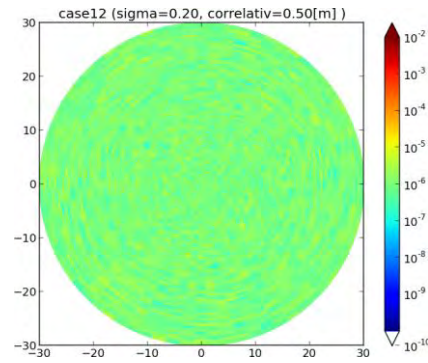


(d) 標準偏差 0.2、相関長 2.0m

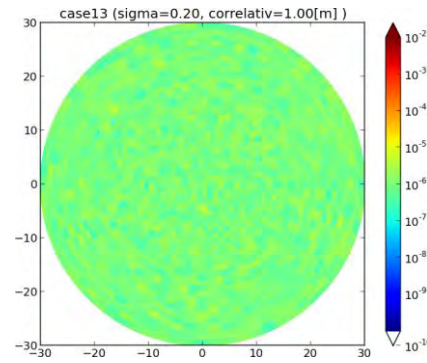
図 4. 4. 4-1 透水量係数頻度分布 (標準偏差 0.2)



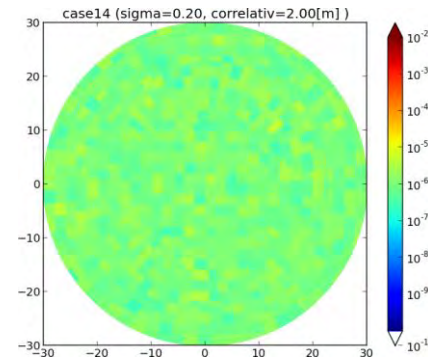
(a) 標準偏差 0.2、相関長 0.2m



(b) 標準偏差 0.2、相関長 0.5m

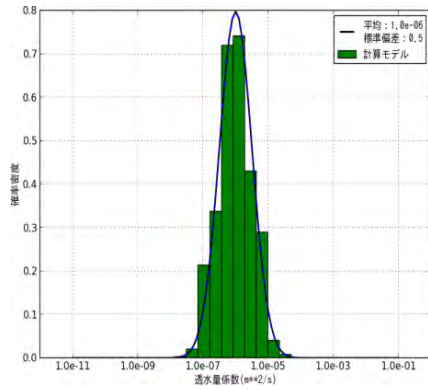


(c) 標準偏差 0.2、相関長 1.0m

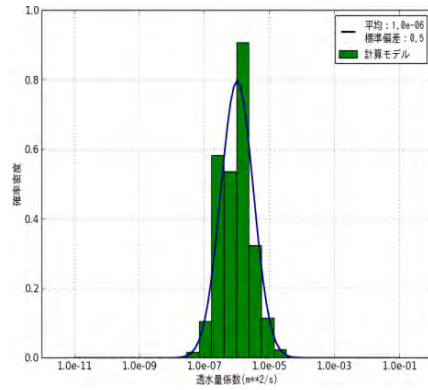


(d) 標準偏差 0.2、相関長 2.0m

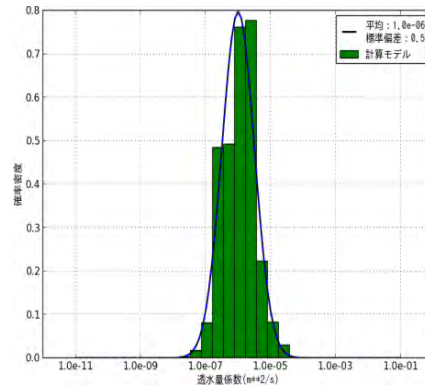
図 4. 4. 4-2 透水量係数分布 (標準偏差 0.2)



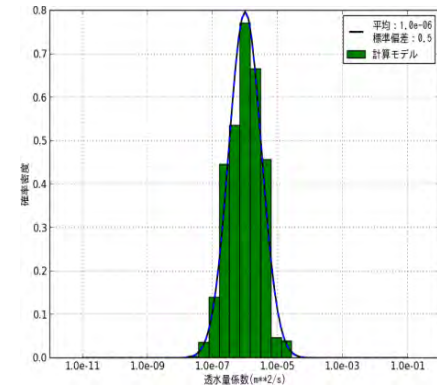
(a) 標準偏差 0.5、相関長 0.2m



(b) 標準偏差 0.5、相関長 0.5m

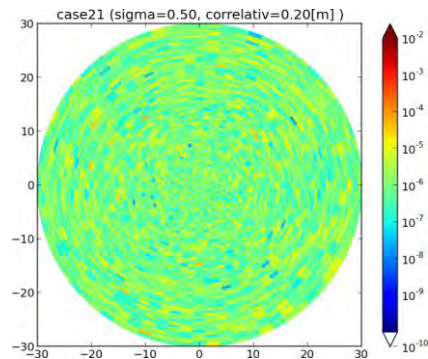


(c) 標準偏差 0.5、相関長 1.0m

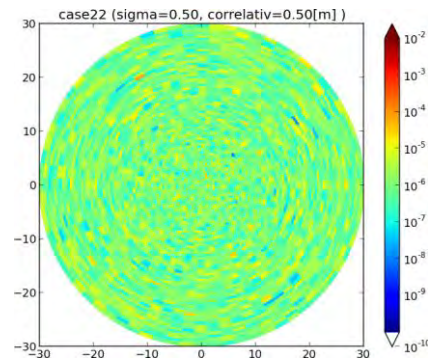


(d) 標準偏差 0.5、相関長 2.0m

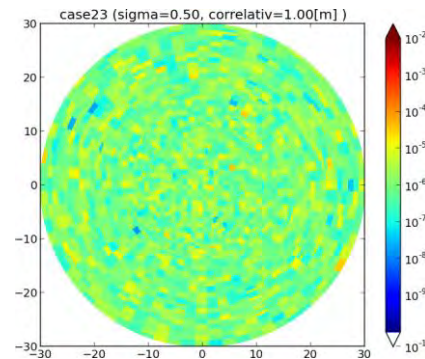
図 4.4.4-3 透水量係数頻度分布 (標準偏差 0.5)



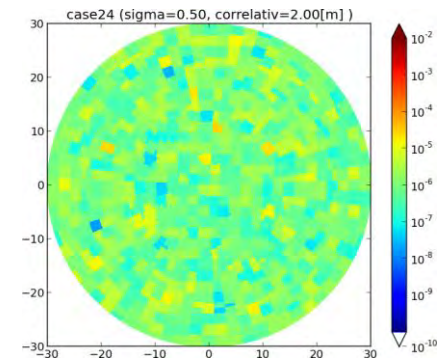
(a) 標準偏差 0.5、相関長 0.2m



(b) 標準偏差 0.5、相関長 0.5m

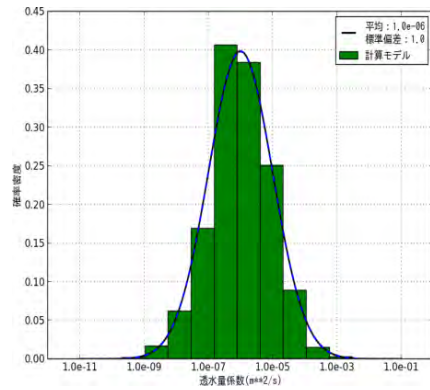


(c) 標準偏差 0.5、相関長 1.0m

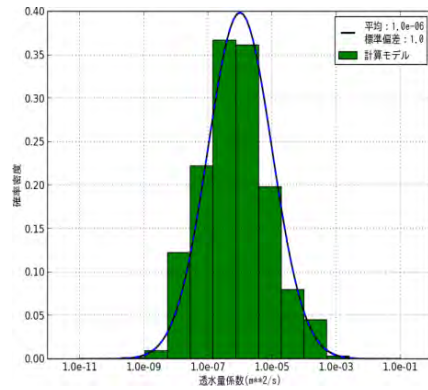


(d) 標準偏差 0.5、相関長 2.0m

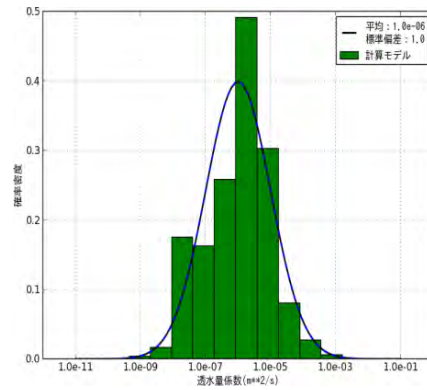
図 4.4.4-4 透水量係数分布 (標準偏差 0.5)



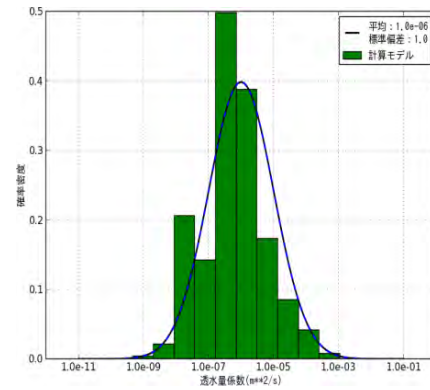
(a) 標準偏差 1.0、相関長 0.2m



(b) 標準偏差 1.0、相関長 0.5m

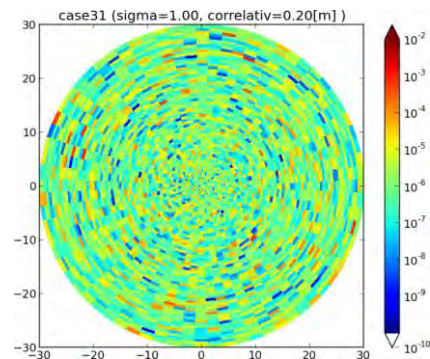


(c) 標準偏差 1.0、相関長 1.0m

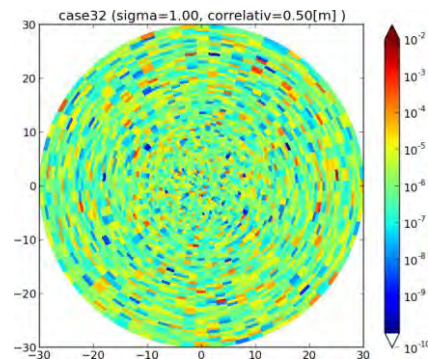


(d) 標準偏差 1.0、相関長 2.0m

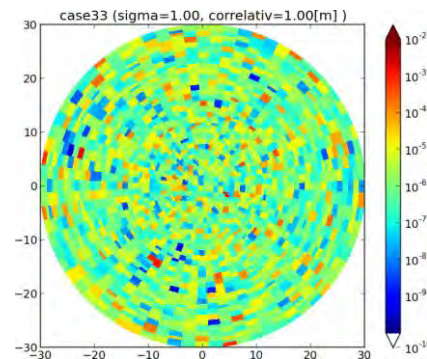
図 4. 4. 4-5 透水量係数頻度分布 (標準偏差 1.0)



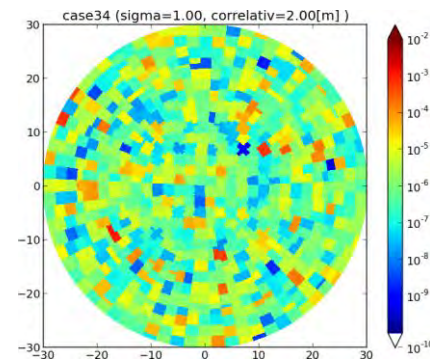
(a) 標準偏差 1.0、相関長 0.2m



(b) 標準偏差 1.0、相関長 0.5m



(c) 標準偏差 1.0、相関長 1.0m



(d) 標準偏差 1.0、相関長 2.0m

図 4. 4. 4-6 透水量係数分布 (標準偏差 1.0)

4.4.4.2 解析結果

図 4.4.4-7～図 4.4.4-9 に動水勾配が 0%の場合における破過曲線を、図 4.4.4-10～図 4.4.4-12 に動水勾配が 10%の場合における破過曲線を示す。また、図 4.4.4-13～図 4.4.4-15 に回収率を、図 4.4.4-16～図 4.4.4-21 に 12 時間後（揚水開始から 3 時間 40 分後）の濃度コンター図を示す。なお、図 4.4.4-7～図 4.4.4-12 には、「4.4.2 割れ目モデルによる感度解析」で行った不均質性を考慮していない解析結果（割れ目幅が 1mm、透水量係数が $1.0e-6\text{m}^2/\text{sec}$ 、待機時間が 0hour、縦分散長が 0.5m、遅延係数が 1）も併せて示した。

動水勾配が 0%の場合、標準偏差が 0.2、0.5 の時は、不均質性を考慮していない破過曲線と不均質モデルの破過曲線はほぼ同じとなった。標準偏差が 1.0 の時は、不均質性の影響が若干表れている。一方、動水勾配が 10%の場合、標準偏差が 0.5 の時に不均質性の影響がやや表れており、標準偏差が 1.0 となって、透水性のばらつき増加すると、さらに不均質性の影響が大きくなった。これは、Nordqvist (2012) の記述と調和的な結果である。つまり、バックグラウンド地下水流れが無い場合、流れの可逆性 (Flow reversibility) によって破過曲線に表れる不均質性の影響は少ないが、バックグラウンド地下水流れが大きい場合、流れの可逆性 (Flow reversibility) が成り立たなくなるため、不均質性の影響が大きくなった。

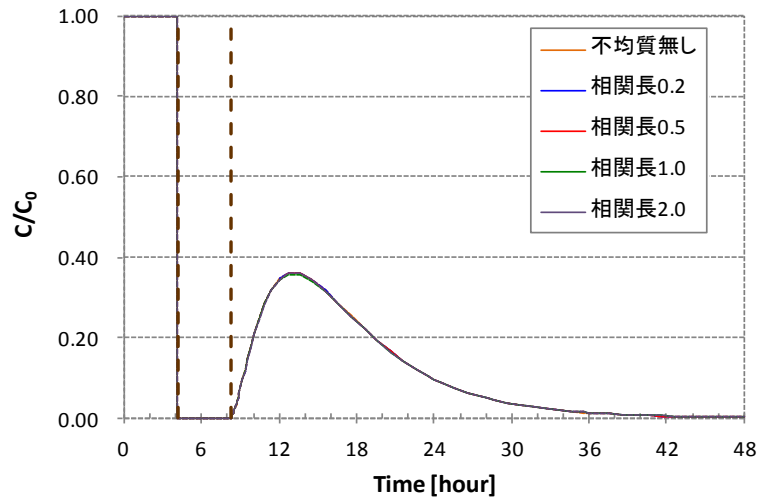


図 4.4.4-7 不均質モデルの感度解析における破過曲線（標準偏差 0.2、動水勾配 0%）

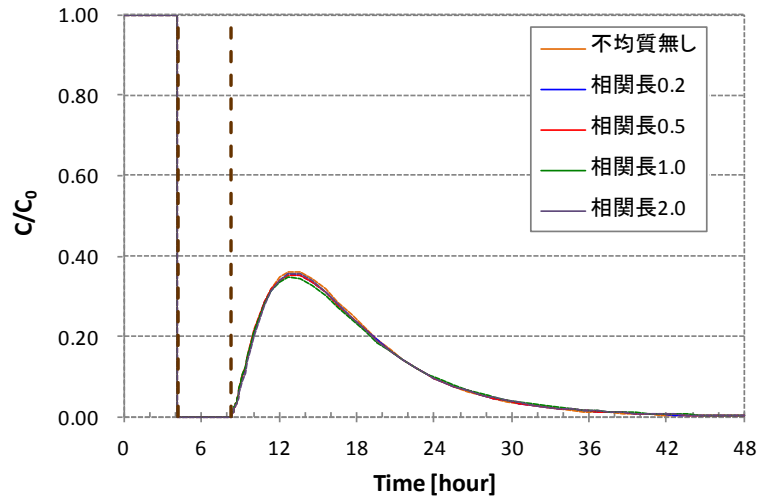


図 4.4.4-8 不均質モデルの感度解析における破過曲線（標準偏差 0.5、動水勾配 0%）

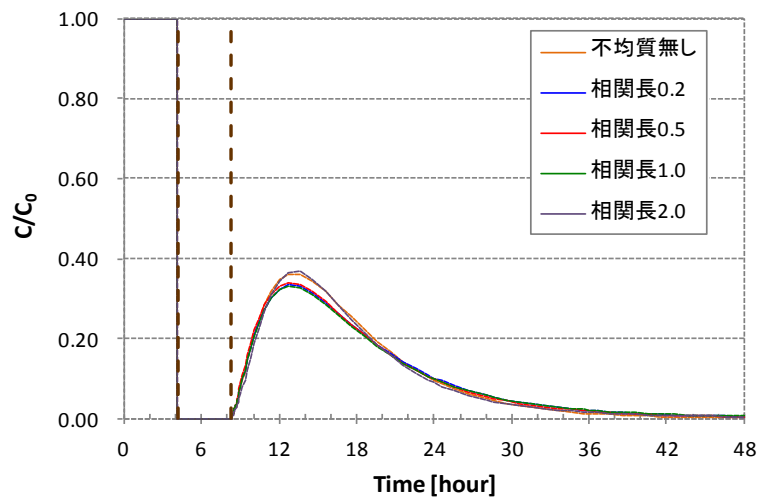


図 4.4.4-9 不均質モデルの感度解析における破過曲線（標準偏差 1.0、動水勾配 0%）

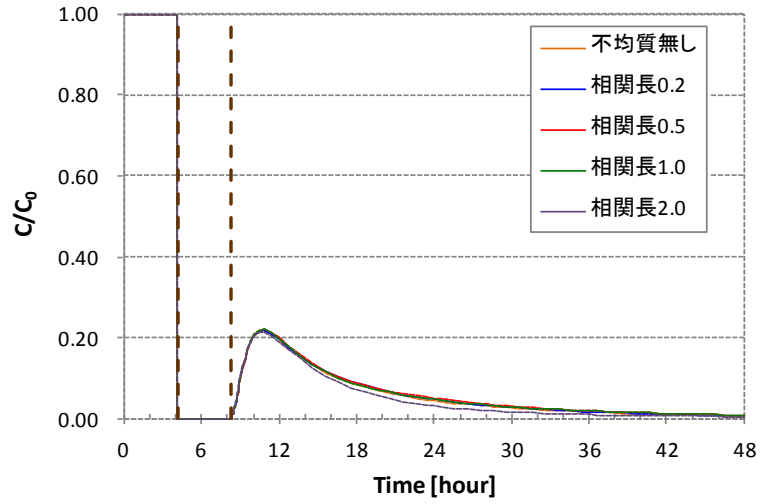


図 4. 4. 4-10 不均質モデルの感度解析における破過曲線（標準偏差 0.2、動水勾配 10%）

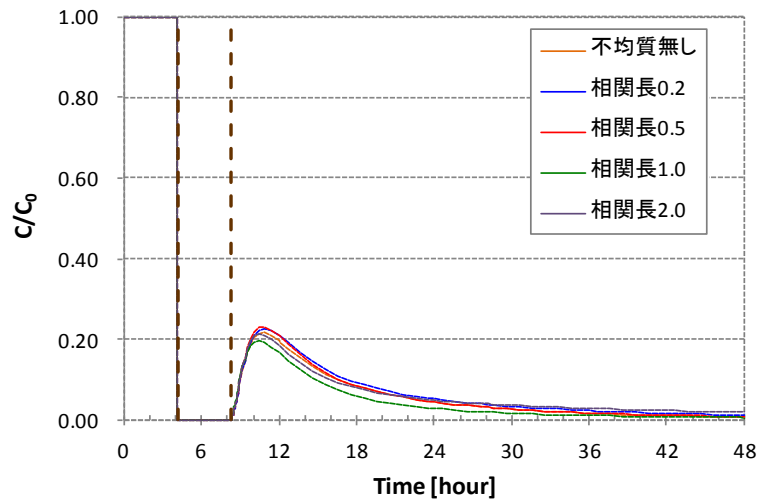


図 4. 4. 4-11 不均質モデルの感度解析における破過曲線（標準偏差 0.5、動水勾配 10%）

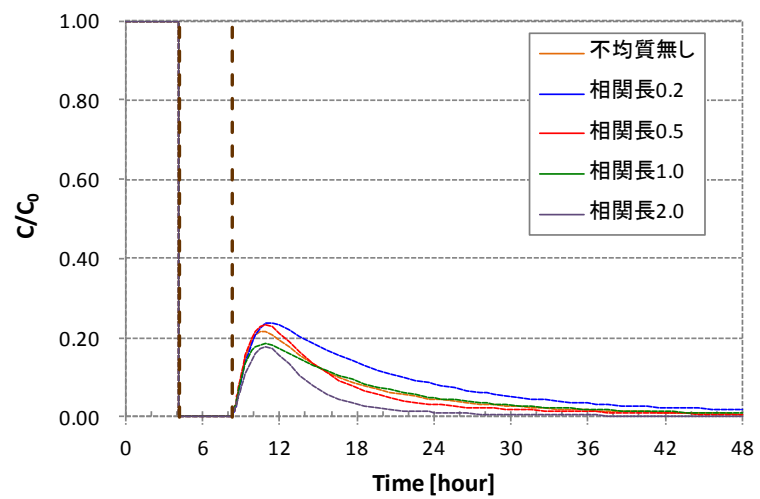


図 4. 4. 4-12 不均質モデルの感度解析における破過曲線（標準偏差 1.0、動水勾配 10%）

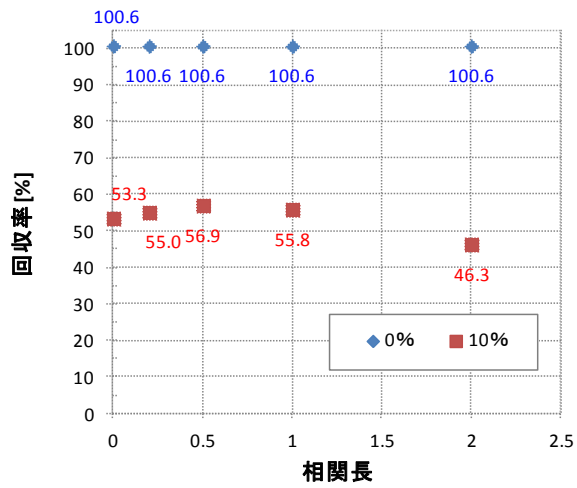


図 4.4.4-13 回収率 (標準偏差 0.2)

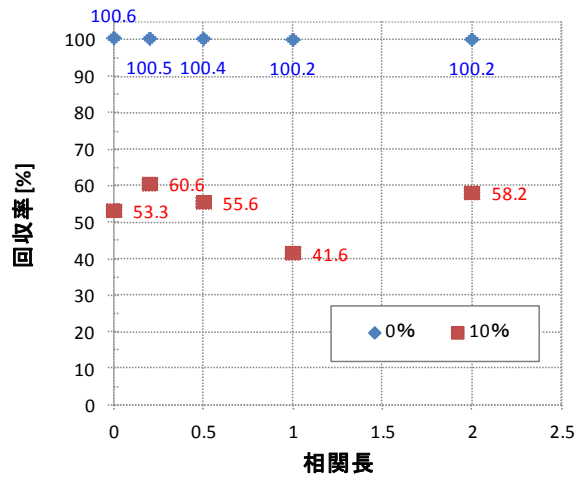


図 4.4.4-14 回収率 (標準偏差 0.5)

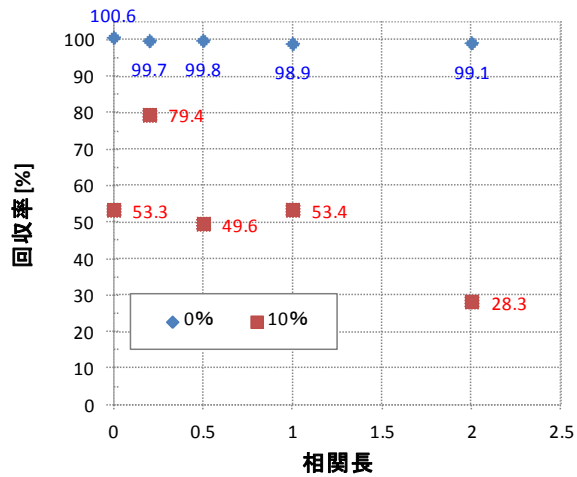
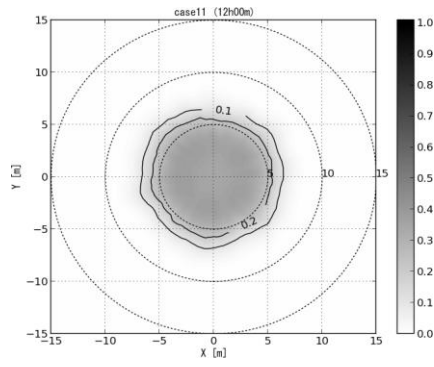
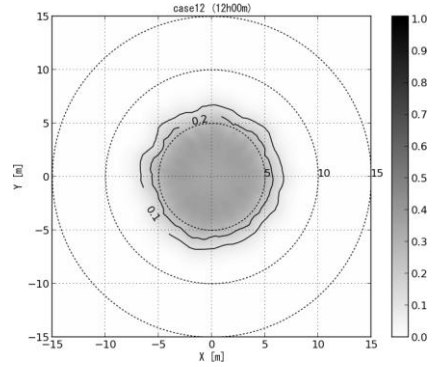


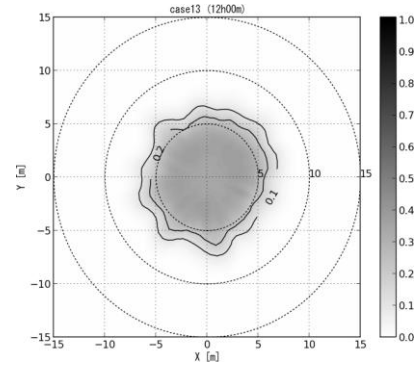
図 4.4.4-15 回収率 (標準偏差 1.0)



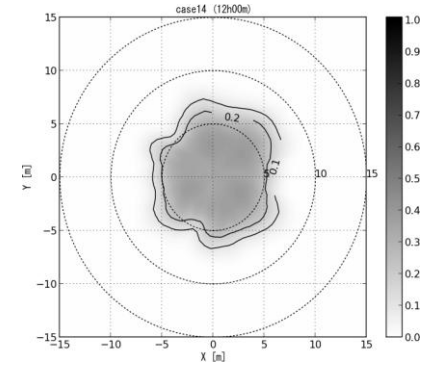
(a) 標準偏差 0.2、相関長 0.2m



(b) 標準偏差 0.2、相関長 0.5

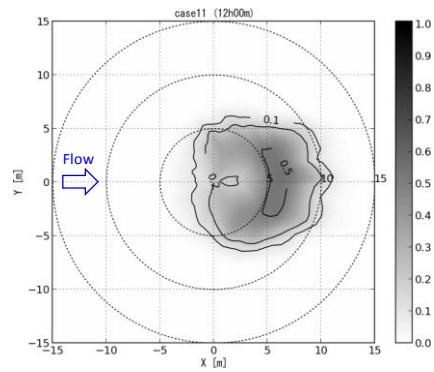


(c) 標準偏差 0.2、相関長 1.0

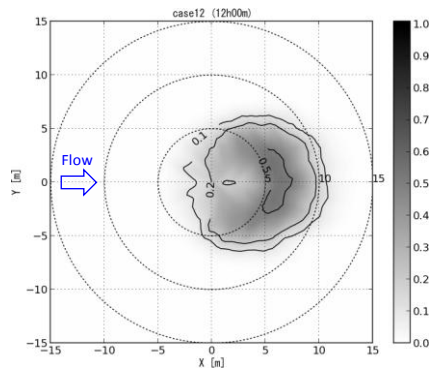


(d) 標準偏差 0.2、相関長 2.0

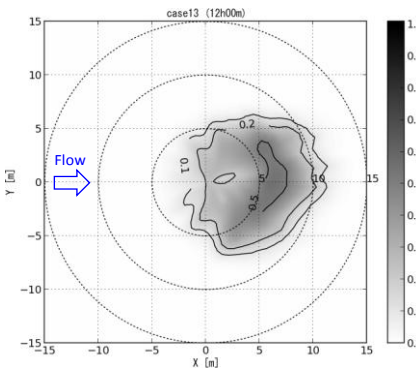
図 4.4.4-16 12 時間後の濃度コンター図 (標準偏差 0.2、動水勾配 0%)



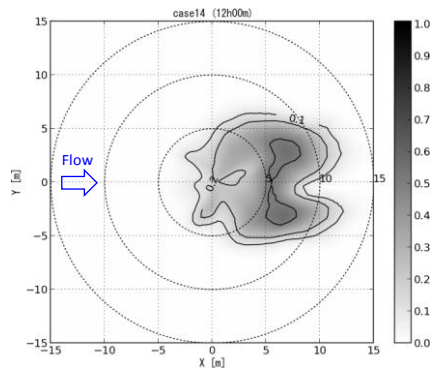
(a) 標準偏差 0.2、相関長 0.2



(b) 標準偏差 0.2、相関長 0.5

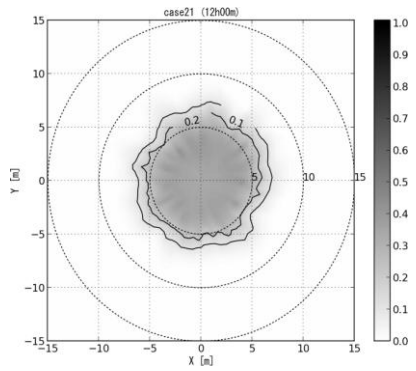


(c) 標準偏差 0.2、相関長 1.0

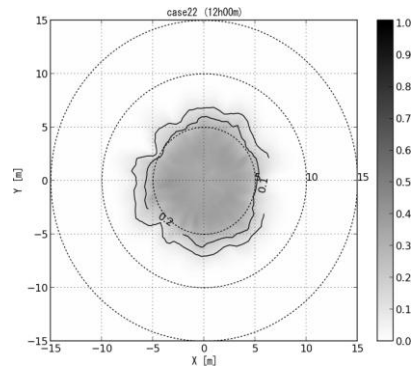


(d) 標準偏差 0.2、相関長 2.0

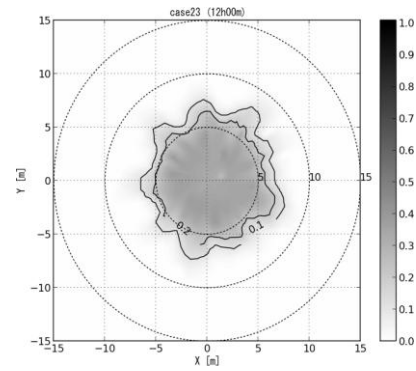
図 4.4.4-17 12 時間後の濃度コンター図 (標準偏差 0.2、動水勾配 10%)



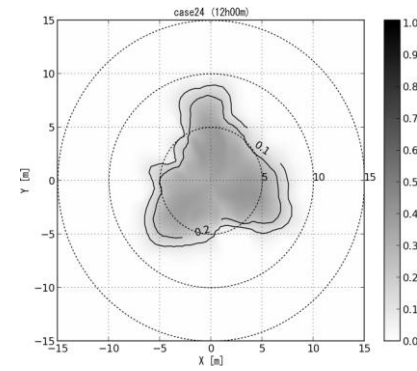
(a) 標準偏差 0.5、相関長 0.2



(b) 標準偏差 0.5、相関長 0.5

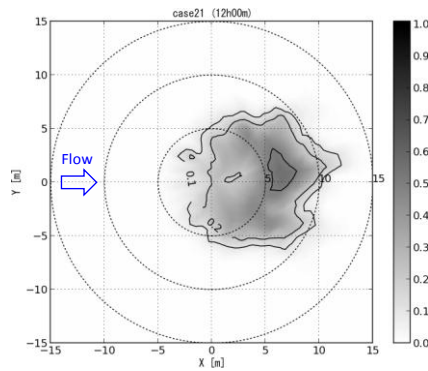


(c) 標準偏差 0.5、相関長 1.0

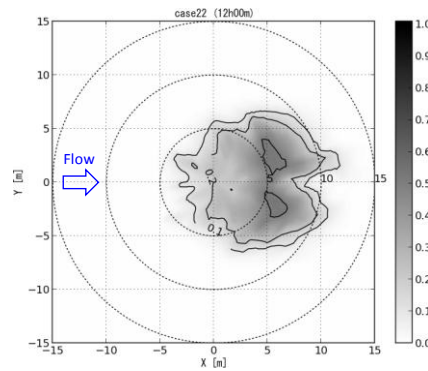


(d) 標準偏差 0.5、相関長 2.0

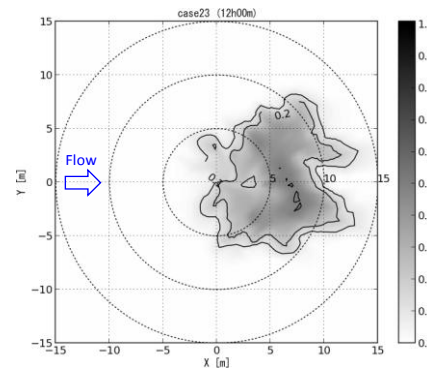
図 4.4.4-18 12 時間後の濃度コンター図 (標準偏差 0.5、動水勾配 0%)



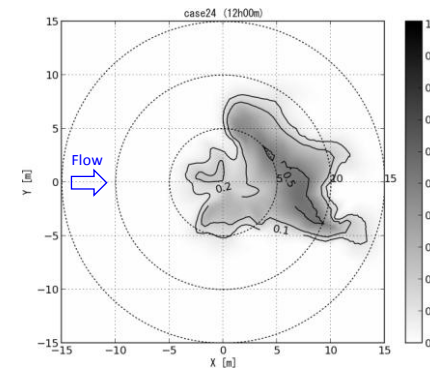
(a) 標準偏差 0.5、相関長 0.2



(b) 標準偏差 0.5、相関長 0.5

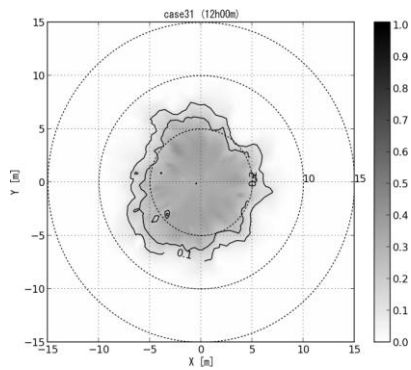


(c) 標準偏差 0.5、相関長 1.0

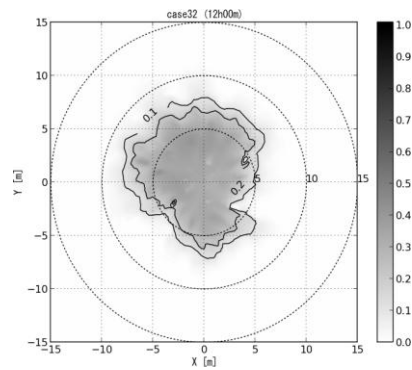


(d) 標準偏差 0.5、相関長 2.0

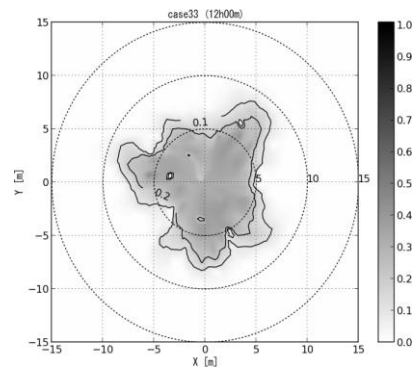
図 4.4.4-19 12 時間後の濃度コンター図 (標準偏差 0.5、動水勾配 10%)



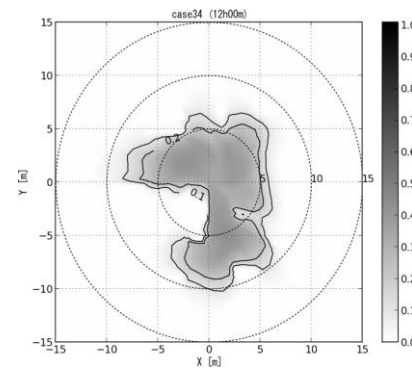
(a) 標準偏差 1.0、相関長 0.2



(b) 標準偏差 1.0、相関長 0.5

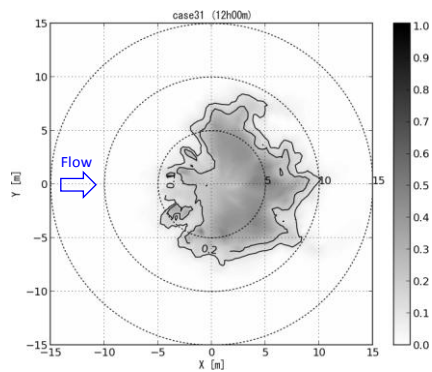


(c) 標準偏差 1.0、相関長 1.0

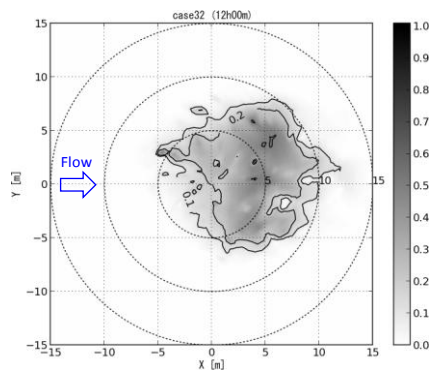


(d) 標準偏差 1.0、相関長 2.0

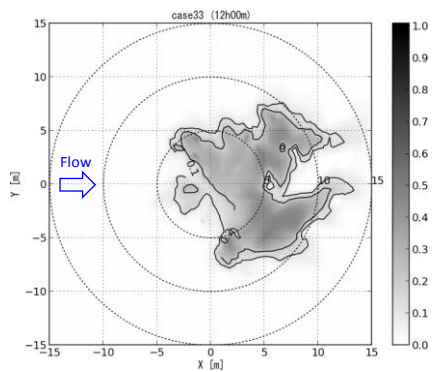
図 4.4.4-20 12 時間後の濃度コンター図 (標準偏差 1.0、動水勾配 0%)



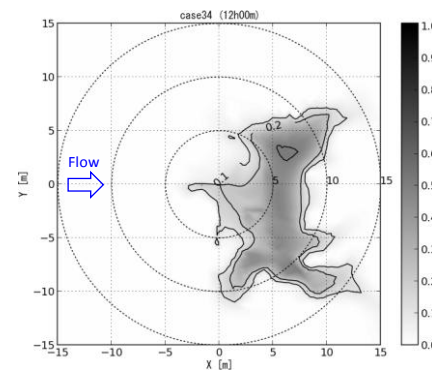
(a) 標準偏差 1.0、相関長 0.2



(b) 標準偏差 1.0、相関長 0.5



(c) 標準偏差 1.0、相関長 1.0



(d) 標準偏差 1.0、相関長 2.0

図 4.4.4-21 12 時間後の濃度コンター図 (標準偏差 1.0、動水勾配 10%)

4.4.5 ラドン濃度の感度解析

ここまでは、単孔式トレーサー試験に関する感度解析を行ったが、ここでは割れ目調査技術のラドン濃度計測法との組み合わせについて検討するため、ラドン濃度に関して感度解析を行う。ラドンは、母岩中に存在するウラン (^{238}U) などの崩壊過程で発生し、(^{238}U) 系列の中では唯一気体でかつ水溶性であるため、母岩から割れ目を満たしている地下水に移行し、地下水中に溶存する。母岩中のラドンの親核種であるラジウム (^{226}Ra) とラドンが放射平衡に達しているとすれば、母岩中から地下水へ溶解する時間当たりのラドン量も一定であるとみなすことができ、定常状態ではラドン濃度と開口幅に関する関係性があると考えられる。

放射性崩壊と生成を伴う場合、次式が成立する。

$$\frac{dC}{dt} = -\lambda C + M \quad (20)$$

ここで、 C : ラドン濃度[-]、 t : 時間[T]、 λ : 崩壊定数[1/T]、 M : 単位体積当たり発生速度[$\text{L}^{-3}\text{T}^{-1}$]である。

ラドン濃度が平衡状態に至っている場合、 $dC/dt = 0$ となり、式(20)は次式のように変形される。

$$C = \frac{M}{\lambda} \quad (21)$$

割れ目表面からのラドンフラックスを $F[\text{L}^{-2}\text{T}^{-1}]$ とすると、表面積 $A[\text{L}^2]$ である割れ目からのラドン発生量は $F \times A[\text{T}^{-1}]$ となり、割れ目は上下母岩からなることを考慮すると、定常時の割れ目内ラドン濃度は、 $2FA$ となる。従って、体積 $V[\text{L}^3]$ を持つ割れ目内における、単位体積当たりのラドン発生速度は、次式で表される。

$$\frac{2FA}{V} = \frac{2F}{b} \quad (22)$$

これは、式(20)、(21)内で用いた M と同意であるため、式(21)、(22)より、

$$b = \frac{2F}{\lambda C} \quad (23)$$

となる。

以上の概念に基づき、地下水に溶存するラドン濃度を計測する割れ目探査手法の開発が進められている。

4.4.5.1 解析概要

ラドン濃度の感度解析では、「4.4.2 割れ目モデルによる感度解析」で使用した解析モデルを用いた。解析は以下の手順で行った。

- 1) 定常解析：割れ目底部からのラドンフラックスを、 $1[\text{day}^{-1}]$ として定常計算を行い、初期のラドン濃度分布を求める。
- 2) 水の注入：水（ラドン濃度が0）を200mL/minで注入し、非定常解析を行う（0～8時間20分）。
- 3) 揚水：200mL/minで揚水する非定常解析を行う（8時間20分～48時間）。

単孔式トレーサー試験では、まず始めに水を一定流量で注入し、定常状態に至った後、トレーサー注入に切り替える。しかし、今回は水の注入を伴う定常解析は行わず、始めにラドン濃度が0の水を一定流量で注入する。その後、待機時間は設けず、すぐに揚水に切り替えることとした。

感度解析項目は、割れ目幅（0.2、0.5、1.0、2.0mm）、縦分散長（0.1、0.2、0.5、1.0、2.0m）とし、動水勾配が0%と10%の場合について計算を行った。表4.4.5-1に感度解析項目以外の共通パラメータを示す。

表 4.4.5-1 ラドン濃度の感度解析における共通パラメーター

項目	単位	値
割れ目間隙率	%	100
透水量係数	m^2/sec	$1.0\text{e-}6$
待機時間	hour	0

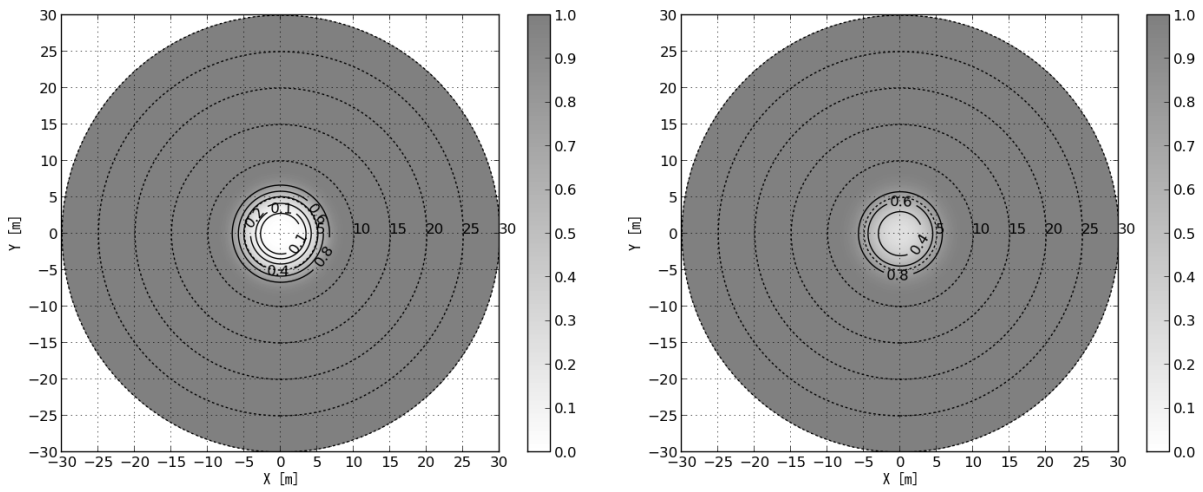
4.4.5.2 解析結果

定常計算で得られた割れ目内のラドン濃度と、式(23)を用いてラドン濃度から割れ目幅を求めた結果を表4.4.5-2に示す。なお、ラドンの崩壊定数には $0.182[\text{day}^{-1}]$ を、ラドンフラックスFは1を用いた。ラドン濃度から算定した割れ目幅は、ほとんど設定割れ目幅に等しくなった。このことから、定常計算の結果は概ね正しいと考えられる。

動水勾配が0%と10%で、割れ目幅を1mm、縦分散長を0.5mとした場合のラドン濃度のコンター図を、トレーサー注入後（8時間20分後）、12時間後（揚水開始から3時間40分後）について図4.4.5-1～図4.4.5-2に示す。なお、ラドン濃度のコンター図は、表4.4.5-2に示した各割れ目幅での定常解析結果のラドン濃度 C_0 を用いて比濃度 (C/C_0) として表した。

表 4.4.5-2 ラドン濃度による割れ目幅の算定結果

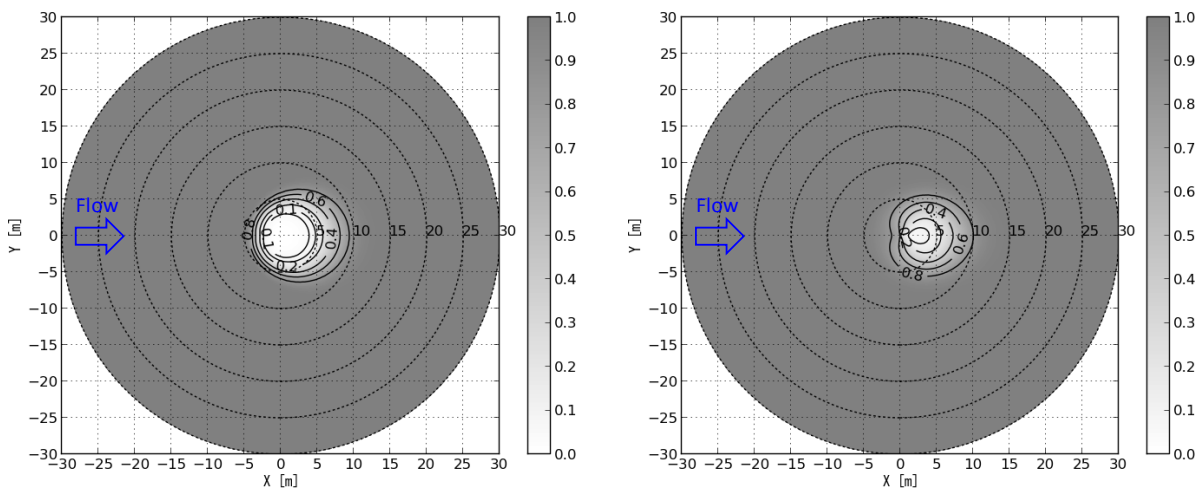
設定割れ目幅 [mm]	ラドン濃度 [-]	算定割れ目幅 [mm]
0.2	55.161	0.199
0.5	22.065	0.497
1	11.032	0.994
2	5.516	1.988



(a) チェーサー注入後 (8 時間 20 分)

(b) 12 時間後

図 4.4.5-1 ラドン濃度の濃度コンター図 (割れ目幅 1.0mm、動水勾配 0%)



(a) チェーサー注入後 (8 時間 20 分)

(b) 12 時間後

図 4.4.5-2 ラドン濃度の濃度コンター図 (割れ目幅 1.0mm、動水勾配 10%)

(1) 割れ目幅に関する感度解析結果

動水勾配が0%と10%の場合における、割れ目幅感度解析の破過曲線について、図4.4.5-3、図4.4.5-4に示す。なお、破過曲線は比濃度 (C/C_0) とラドン濃度の両方について示した。ラドン濃度は、揚水開始初期は低く、揚水量の増加に伴って上昇を始め、徐々に定常時のラドン濃度に近づく結果となった。動水勾配が0%と10%の両方の場合で割れ目幅の大きさに応じた破過曲線が得られた。

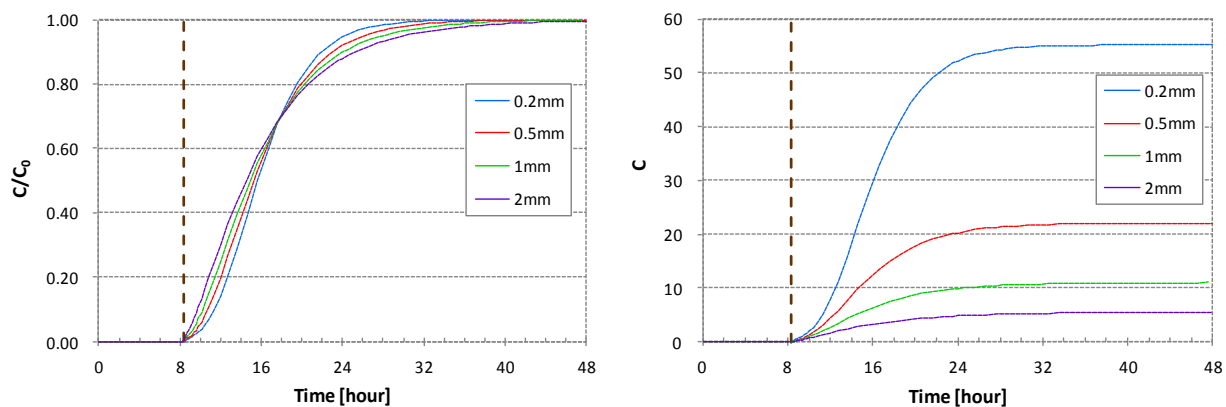


図 4. 4. 5-3 ラドン濃度の割れ目幅感度解析における破過曲線（動水勾配 0%）

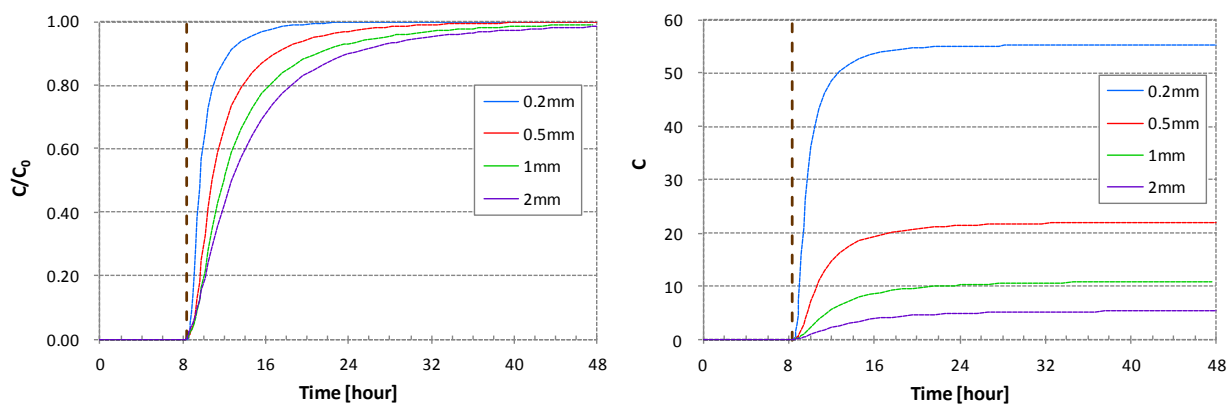


図 4. 4. 5-4 ラドン濃度の割れ目幅感度解析における破過曲線（動水勾配 10%）

(2) 縦分散長に関する感度解析結果

動水勾配が0%と10%の場合における、縦分散長感度解析の破過曲線について、図4.4.5-5、図4.4.5-6に示す。動水勾配が0%の場合、縦分散長の違いによって破過曲線は異なるものの、その違いはあまり大きくなく、動水勾配が10%の場合は、更にその差は小さくなった。これは、「4.4.2 割れ目モデルによる感度解析」の解析結果と同様に、バックグラウンド地下水流れによって縦分散長の感度が低くなる傾向と同じである。

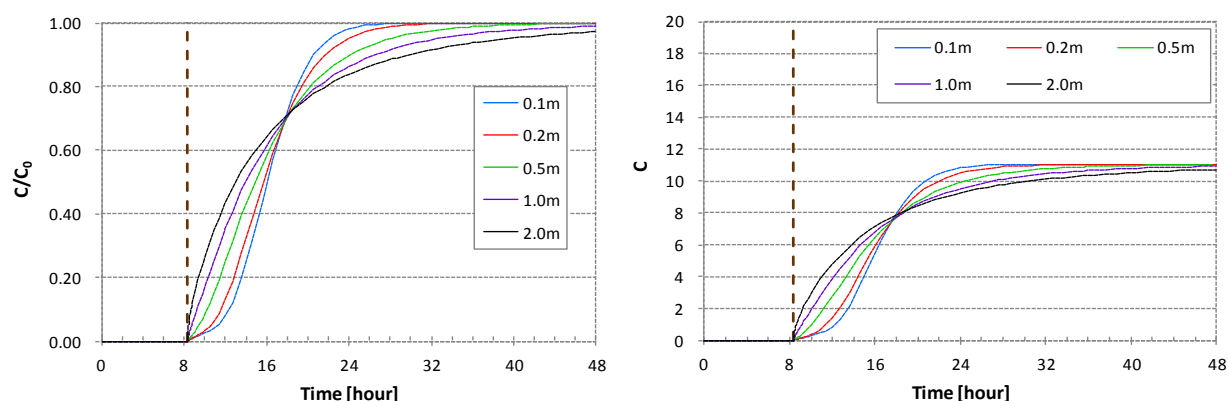


図 4.4.5-5 ラドン濃度の縦分散長感度解析における破過曲線（動水勾配 0%）

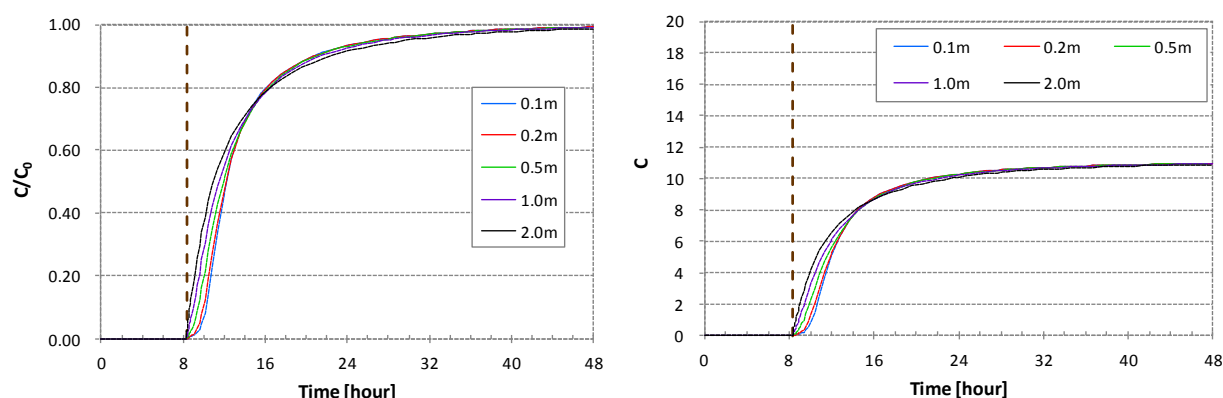


図 4.4.5-6 ラドン濃度の縦分散長感度解析における破過曲線（動水勾配 10%）

(3) 単孔式トレーサー試験とラドン濃度計測法の組み合わせに関する検討結果

縦分散長が破過曲線に及ぼす影響は小さく、割れ目幅の方が破過曲線に及ぼす影響が大きいことから、ラドン濃度の破過曲線は概ね割れ目幅に関する情報を反映した結果であると考えられる。従って、単孔式トレーサー試験とラドン濃度計測法による割れ目幅調査技術を組み合わせることで、効率よく割れ目幅に関する情報を取得できる可能性が高いと考えられる。しかし、今回検討を行った手法では、始めにラドン濃度が0の水を一定流量で注入し、揚水時のラドン濃度を計測する。一方、単孔式トレーサー試験では、まず始めに水を一定流量で注入し、定常状態に到達後、トレーサー注入に切り替えることが必要である。従って、単孔式トレーサー試験とラドン濃度計測法を同時に行うには、試験手順に何らかの工夫が必要であり、今後の課題である。

4.5 まとめ

単孔式トレーサー試験の技術開発を目的とし、過去の報告書、論文についてレビューを行った。次に、パラメーターが破過曲線に与える影響を明らかにするため、割れ目モデル、複合モデル、不均質モデルを用いて感度解析を行った。最後に、これまで開発を行ってきた割れ目調査技術のうち、ラドン濃度計測法と単孔式トレーサー試験の組み合わせに関する検討を行うため、ラドン濃度の感度解析を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- ・ 文献調査を行った結果、単孔式トレーサー試験は、孔間式トレーサー試験で明らかにされる水理的連結性に関する評価は難しいが、比較的簡便に行える試験法であることが明らかになった。また、1本のボーリング孔を使って行う試験であるので、1回あたりのコストを低く抑えることができ、複数地点、複数深度で行うことによって、効率よく物質移行に関するデータを増やすことができる可能性があることが明らかになった。
- ・ 割れ目モデルを用いて感度解析を行い、動水勾配、割れ目幅、透水量係数、待機時間、縦分散長、遅延係数が破過曲線に与える影響を明らかにした。動水勾配が大きいと、割れ目内に注入されたトレーサーがバックグラウンドの地下水に流されて回収率が低減し、各パラメーターの感度が低くなることが明らかになった。
- ・ 割れ目と岩盤マトリクスを併せた複合モデルを用いて感度解析を行い、マトリクス拡散係数、同位体分別係数が破過曲線に与える影響について明らかにした。動水勾配が大きいと、マトリクス拡散係数に対する感度が低くなることが明らかになった。感度を改善する方法として、チェーサー注入後に待機時間を設ける方法が示されたが、動水勾配が大きい場合、待機の間バックグラウンドの地下水流れによって流されて回収率が低減し、感度が改善しない可能性もあるので、現地の水理情報を考慮して待機時間を決める必要がある。
- ・ 透水性の不均質性を考慮した割れ目モデルを用いて感度解析を行って、不均質性が破過曲線に与える影響について明らかにした。感度解析の結果、破過曲線に対する不均質性の影響はそれほど大きくないが、動水勾配が大きい場合、不均質性の影響が徐々に現れることが明らかになった。
- ・ ラドン濃度の感度解析を行った結果、縦分散長が破過曲線に及ぼす影響は小さく、割れ目幅の方が破過曲線に及ぼす影響が大きいことが明らかになった。従って、ラドン濃度の破過曲線を評価することで、割れ目幅を求めることができる可能性が示された。単孔式トレーサー試験とラドン濃度計測法を組み合わせることで、効率よく割れ目幅に関するデータを得られる可能性が高いが、試験手順を工夫する必要があり、今後の課題である。

参考文献

- Becker, M. W., Shapiro, A. M. (2000) : Tracer transport in fractured crystalline rock: Evidence of nondiffusive breakthrough tailing, *Water Resources Research*, 36(7), pp.1677-1686.
- Reimus, P. W., Haga, M. J., Adams, A. I., Callahan, T. J., Turin, H. J., Counce, D. A. (2003) : Testing and parameterizing a conceptual solute transport model in saturated fractured tuff using sorbing and nonsorbing tracers in cross-hole tracer tests, *Journal of Contaminant Hydrology*, 62-63, pp.613-636.
- Eggenkamp, H. G. M., Coleman, M. L. (2009) : The effect of aqueous diffusion on the fractionation of chlorine and bromine stable isotopes, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(12), pp.3539-3548.
- Istok, J.D (2013) : Push-Pull tests for site characterization, *Lecture notes in earth system sciences*, Springer.
- Nordqvist, R., Gustafsson, E., Geosigma, AB. (2002) : Single-well injection-withdrawal test (SWIW) Literature review and scoping calculations for homogeneous crystalline bedrock conditions, SKB-Report R-02-34.
- Tomich, J. F., Dalton Jr., R. L., Deans, H. A., Shallenberger, L. K. (1973) : SINGLE-WELL TRACER METHOD TO MEASURE RESIDUAL OIL SATURATION, *JPT, Journal of Petroleum Technology*, 25, pp.211-218.
- Davis, B. M., Istok, J. D., Semprini, L. (2002) : Push-pull partitioning tracer tests using radon-222 to quantify non-aqueous phase liquid contamination, *Journal of Contaminant Hydrology*, 58(1-2), pp.129-146.
- Davis, B. M., Istok, J. D., Semprini, L. (2003) : Static and push-pull methods using radon-222 to characterize dense nonaqueous phase liquid saturations, *Ground Water*, 41(4), pp.470-481.
- Davis, B. M., Istok, J. D., Semprini, L. (2005) : Numerical simulations of radon as an in situ partitioning tracer for quantifying NAPL contamination using push-pull tests, *Journal of Contaminant Hydrology*, 78(1-2), pp.87-103.
- Istok, J. D., Humphrey, M. D., Schroth, M. H., Hyman, M. R., O'Reilly, K. T. (1997) : Single-well, 'push-pull' test for in situ determination of microbial activities, *Ground Water*, 35(4), pp.619-631.
- Downs, W. F., McAtee, R. E., Capuano, R. M., Sill, W. (1982) : Hydrothermal injection experiments at the raft river KGRA IDAHO, *Proceeding 8th Workshop Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University SG , pp.275-278.

- Capuano, R., M., Adams, M. C., Wright, P. M. (1983) : Tracer recovery and mixing from two geothermal injection-backflow studies, Proceeding 9th Workshop Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, pp.299-304.
- Kocabas, I., Horne, R.N. (1987) : Analysis of injection-backflow tracer tests in fractured geothermal reservoirs, Proceeding 12th Workshop Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, pp.233-240.
- Jung, Y., Pruess, K. (2012) : A closed-form analytical solution for thermal single-well injection-withdrawal tests, Water Resources Research, 48(3).
- Pickens, J. F., Jackson, R. E., Inch, K. J., Merritt, W. F. (1981) : Measurement of distribution coefficients using a radial injection dual-tracer test, Water Resources Research, 17(3), pp. 529-544.
- Schroth, M. H., Istok, J. D., Haggerty, R. (2001) : In situ evaluation of solute retardation using single-well push-pull tests, Advances in Water Resources, 24(1), pp.105-117.
- Gelhar, L. W., Collins, M. A. (1971) : General analysis of longitudinal dispersion in nonuniform flow, Water Resources Research, 7(6), pp.1511-1521.
- Schroth, M. H., Istok, J. D. (2005) : Approximate solution for solute transport during spherical-flow push-pull tests, Ground Water, 43(2), pp.280-284.
- Gelhar, L. W., Welty, C., Rehfeltdt, K. R. (1992) : A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers, Water Resources Research, 28(7), pp.1955-1974.
- Becker, M. W., Shapiro, A. M. (2003) : Interpreting tracer breakthrough tailing from different forced-gradient tracer experiment configurations in fractured bedrock, Water Resources Research, 39(1), SBH141-SBH1413.
- Tsang, Y. W. (1995a) : Study of alternative tracer tests in characterizing transport in fractured rocks, Geophysical Research Letters, 22(11), pp.1421-1424.
- Tsang, Y. W. (1995b) : Discriminating effects of heterogeneity and matrix diffusion by alternative tracer design, Lawrence Berkely Laboratory report LBL-36831.
- Umari, A., Earle, J. D., Fathy, M. F. (2006) : Analysis of single-hole and cross-hole tracer tests conducted at the Nye country early warning drilling program well complex, Nye country, Nevada, Proceedings of the 11th International High Level Radioactive Waste Management Conference, pp.307-314.
- Meigs, L. C., Beauheim, R. L. (2001) : Tracer tests in a fractured dolomite 1. Experimental design and observed tracer recoveries, Water Resources Research, 37(5), pp.1113-1128.

- Haggerty, R., Fleming, S. W., Meigs, L. C., McKenna, S. A. (2001) : Tracer tests in a fractured dolomite 2. Analysis of mass transfer in single-well injection-withdrawal tests, Water Resources Research, 37(5), pp.1129-1142.
- McKenna, S. A., Meigs, L. C., Haggerty, R. (2001) : Tracer tests in a fractured dolomite 3. Double-porosity, multiple-rate mass transfer processes in convergent flow tracer tests, Water Resources Research, 37(5), pp.1143-1154.
- Drever, J. I., McKee, C. R. (1980) : PUSH-PULL TEST – A METHOD OF EVALUATING FORMATION ADSORPTION PARAMETERS FOR PREDICTING THE ENVIRONMENTAL EFFECTS ON IN-SITU COAL GASIFICATION AND URANIUM RECOVERY, In Situ, 4(3), pp.181-206.
- Nordqvist, R. (2008) : Evaluation and modeling of SWIW tests performed within the SKB site characterization program, SKB Report R-08-104.
- Hjerne, C., Nordqvist, R., Harrstrom, J., Geosigma, AB. (2010) : Complication and analyses of results from cross-hole tracer tests with conservative tracers, SKB Report R-09-28.
- Nordqvist, R., Hjerne, C., Andersson, P. (2012) : Single-well and large-scale cross-hole tracer experiments in fractured rocks at two sites in Sweden, Hydrogeology Journal, 20(3), pp. 519-531.
- 日本地下水学会(2009) : 地下水のトレーサー試験 2.4 トレーサー試験方法の選定, pp. 46-50.
- 熊本創, 下茂道人 (2012) : 単一亀裂を対象としたトレーサー試験による亀裂内移流・分散とマトリクス拡散の評価手法、土木学会論文集C(地圏工学)、Vol. 68、No. 3, pp. 535-546.
- 河西基、田中靖治、五十嵐敏文(1994) : 高レベル廃棄物処分の天然バリア性能評価手法の開発 (その1) -割れ目系岩盤中の地下水流動解析手法-, 電力中央研究所 研究報告 U93054.
- 河西基、田中靖治、五十嵐敏文(1995) : 高レベル廃棄物処分の天然バリア性能評価手法の開発 (その2) -割れ目系岩盤中の熱および核種の移行解析手法-, 電力中央研究所 研究報告 U94053.

5. ラドン濃度計測による割れ目調査技術の開発

5.1 はじめに

岩盤中の割れ目の間隙幅は様々な方法で推定がなされているが、いずれも不確実性が存在する。例えば、ボアホール TV 計測は、ボーリング孔壁の割れ目の幅を計測するものであるが、掘削によるダメージにより、孔壁の割れ目幅は岩盤内部より大きくなり、実際の間隙幅を大きく見積もる傾向がある。また、割れ目を平行平板の間隙構造モデルとした場合、水理試験によって、水理的開口幅が算出することが可能であるが (Snow 1965)、実際の割れ目の間隙構造とは異なる。このほか方法を含めて間隙幅の推定方法にはそれぞれ不確実性を有しており、決定的な手段は存在しない。このため、様々な手法を組み合わせることで相補的に割れ目の間隙幅を推定することが必要となる。本事業において提案をしている岩石から発生するラドンを用いる手法は、割れ目間隙中に存在するラドン濃度を計測する手法である。ラドンは他の元素との化学的な反応がほとんどなく、緻密な岩石では割れ目表面から発生すると見なせるため、人工のトレーサーとは異なり、繰り返しの測定が可能なパッシブな手法と言える。また、ボアホール TV と異なり、ボーリング孔壁の箇所のみならず、適切な採水や循環試験によって、岩盤内の割れ目の間隙水も計測することが可能である。したがって、ラドン濃度計測による間隙幅の推定方法は既存手法を補うことが可能であるため、本事業ではラドンを用いた割れ目の開口幅推定法の開発と原位置試験での適用性の提示を目指している。

5.2 ラドン濃度計測による割れ目幅の推定の概念

ラドンによる割れ目の幅の評価は、岩盤中に存在するウラン (U-238) の崩壊過程で発生するラドン (Rn-222) を用いて推定する。ラドンは水溶性でかつ不活性のため、地下水の溶存物質や岩盤を構成する鉱物との化学反応の影響は受けず、岩盤中の親核種であるラジウム (Ra-226) から反跳して割れ目の間隙中の地下水へ溶存する。岩盤中のラドンとラジウムとが放射平衡に達していると仮定できれば、母岩中から地下水へ溶解する時間当たりのラドンの量 (ラドンフラックス) も一定と見なすことができる。この際、ラジウムの地下水への溶解度は非常に低いことから、溶存ラジウムの溶存ラドン濃度への影響はほとんど無視することができる。実際に、Cecil et al. (1987) によって、地下水中の溶存ラジウムと溶存ラドンの関係に相関がみとめられないことが知られている。したがって、地下水中のラドンを用いた割れ目幅の推定では、地下水のラジウムの影響を考慮する必要がなく、岩盤から発生したものと見なせる。

岩盤中のラジウムから発生し、反跳するラドンの移動距離は小さく、結晶質岩の様な緻密な岩盤においては、地下水に溶存しているラドンは、割れ目の表面から発生したものと考えることができる。割れ目を平行平板と仮定し、割れ目表面から供給されるラドンの量と割れ目の面積には図 5.2. -1 に示すような関係が成り立つ。本事業で提案する手法は原位置での割れ目間隙からの採水よりラドン濃度 ($[Rn]$) を得ると同時に、室内試験によって岩石からのラドン発生量をラドンフラックス (F) として得ることで、間隙幅 (w) を評価しようとするものである。

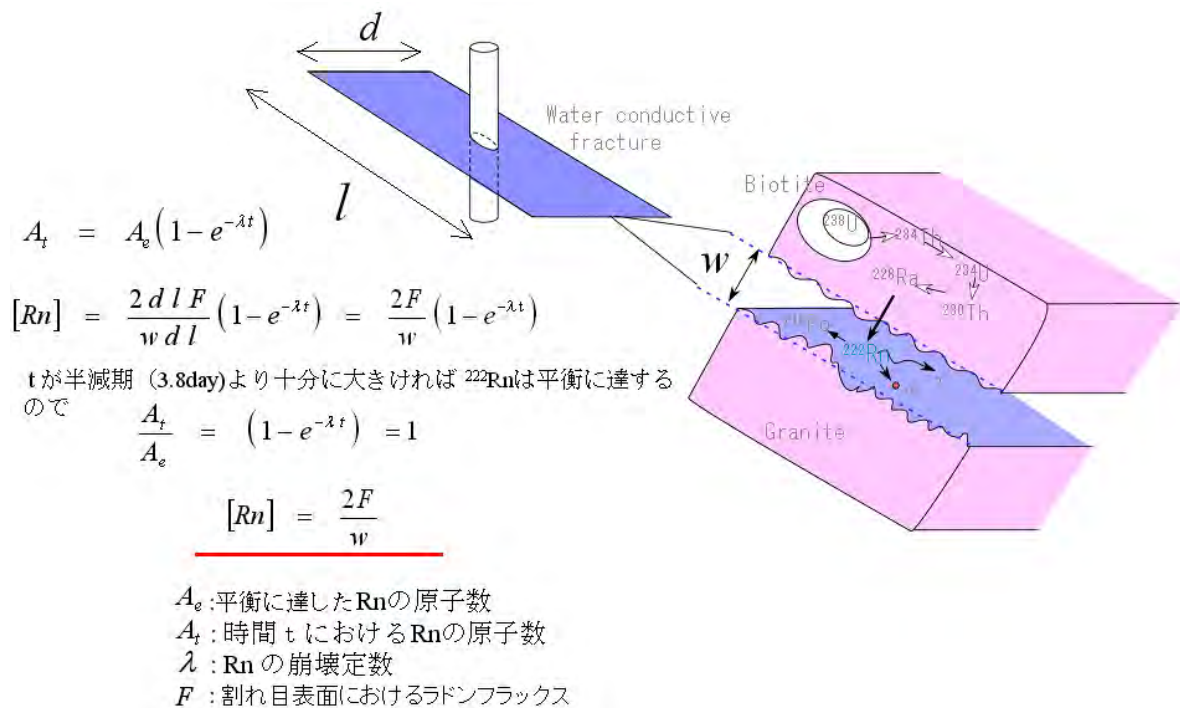


図 5.2-1 ラドンによる割れ目幅計測の原理

5.3 今年度の実施概要

本事業ではこれまでラドン濃度計測による割れ目の幅の推定手法を開発し、スイスグリムゼルのテストサイトへ適用した。その結果、トレーサー試験、高粘性流体を用いた水理試験から得た間隙幅や、その後に評価対象の割れ目に樹脂（レジン）を注入後、ボーリング掘削により得たコアなどから評価した割れ目の間隙と比較し、相補的にラドン濃度計測による割れ目の幅の推定手法の適用性を確認した。この手法を我が国の岩盤にも適用するためには、我が国の代表的な岩石や岩盤での検討を行い、その適用性を評価していく必要がある。

我が国における溶存地下水のラドン濃度は変化に富み、胚胎する地質によってその濃度が異なる。特に堆積岩地域の地下水のラドン濃度の分布範囲は3オーダーにも及ぶ。割れ目間隙幅の推定手法を広く適用するためには、堆積岩への適用性を検討しておく必要がある。このため、今年度は堆積岩試料を用い、室内試験により岩石のラドンフラックスを計測した。

5.4 ラドンによる割れ目間隙幅の推定手法の堆積岩への適用性検討

5.4.1 岩石の物理化学特性

ラドンフラックスの測定のため、使用した岩石試料は大谷産の凝灰岩、藤枝産の砂岩、石巻産の頁岩、である。大谷産の凝灰岩（以降、凝灰岩と呼称）は新第三紀前期中新世の軽石質凝灰岩であり、このうち孔などが少なく均質な部分を用いた。藤枝産の砂岩（以降、砂岩と呼称）は新第三紀前期中新世の中粒～

細粒砂岩で膠結が良いものを使用した。石巻産の頁岩（以降、頁岩と呼称）は中生代三畳紀の緻密な黒色の頁岩で砂質部分などがない均質な部分を用いた。

5.4.1.1 元素分析

岩石の元素分析においては、主要元素を蛍光 X 線分析（XRF）で分析するとともに、微量元素は、誘導結合プラズマ質量分析（ICP-MS）もしくは誘導結合プラズマ発光分析法（ICP-AES）によって分析した。これらの分析はカナダにある ALS Canada Ltd. 社にて、以下の分析コード（パッケージ分析）を使用した。詳細は以下のとおりである。

(1) 蛍光 X 線分析：分析コード ME-XRF06

分析元素：SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O, Cr₂O₃, TiO₂, MnO, P₂O₅, SrO, BaO, LOI

分析方法：粉末状にした試料について、ホウ酸リチウムを使用して溶融した後、ガラス試料を作成した。これを蛍光 X 線分析法（XRF）により試料を酸化物の形で分析した。

(2) 誘導結合プラズマ質量：分析コード MS-MS61

分析元素：Ag, Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Cs, Fe, Ga, Ge, Hf, In, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn, Zr

分析方法：粉末状にした試料について、4種混合酸（塩酸・フッ化水素酸、硝酸、過塩素酸）にて溶解した後、酸溶液試料を作成した。これを誘導結合プラズマ質量分析法（ICP-MS）もしくは誘導結合プラズマ発光分析法（ICP-AES）により元素分析した。

(3) 分析コード：ME-MS81

分析元素：Ba, Ce, Co, Cr, Cs, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, Hf, Ho, La, Lu, Mo, Nb, Nd, Pr, Rb, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Th, Tl, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zr

分析方法：粉末状にした試料について、ホウ酸リチウムを使用して溶融した後、ガラス試料を作成した。さらにこのガラス試料を再度粉末化し、酸溶液によって溶解したのちに酸溶液試料を作成した。これを誘導結合プラズマ質量分析法（ICP-MS）により元素分析した。

試験岩石の主要元素蛍光 X 線分析による主要構成元素を表 5.4.1-1 に示す。凝灰岩はケイ素を主要元素としてアルミ、カルシウム、カリウムなどで構成される。これらの元素構成は試料の凝灰岩が流紋岩質であり、石英、長石、および火山ガラスを起源とする沸石などの鉱物を反映した結果と考えられる。岩石の構成鉱物については鉱物分析（XRD）の箇所で述べる。砂岩はケイ素を主体としており、石英、長石類が主要鉱物であることを反映している。頁岩はケイ素のほか、カルシウム、鉄、マグネシウムなどが砂岩、凝灰岩よりも多く泥質物質を起源とした岩石の特徴を反映している。

微量元素としては、特にラドンの親核種として存在するウランおよびトリウムについて表 5.4.1-1

に示した。分析手法に係わらず、3岩種の中ではウランは頁岩に多く、トリウムは凝灰岩に相対的に多いが、ウラン、トリウムともに含有量としてはいずれも微量である。

表 5. 4. 1-1 試験岩石の主要元素

岩石	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	SrO	BaO	LOI	Total
凝灰岩	68.00	11.66	1.98	2.24	0.62	2.42	2.62	<0.01	0.11	0.06	0.023	0.02	0.06	9.67	99.49
砂岩	80.77	8.97	2.16	0.37	0.57	2.12	2.15	<0.01	0.23	0.02	0.04	0.01	0.05	1.8	99.27
頁岩	52.41	13.3	5.07	10.92	2.6	2.92	1.93	<0.01	0.61	0.07	0.199	0.05	0.04	9.38	99.50

表 5. 4. 1-2 ウラン、トリウムの含有量

岩石	U (ME-MS61)	Th (ME-MS61)	U (ME-MS81)	Th (ME-MS81)
凝灰岩	1.4ppm	7.5ppm	1.40ppm	8.67ppm
砂岩	1.2ppm	4.9ppm	1.41ppm	5.38ppm
頁岩	1.8ppm	4.9ppm	2.09ppm	5.75ppm

5. 4. 1. 2 鉱物分析

試料とした岩石の構成鉱物を明らかとするために X 線回折 (XRD) 分析を実施した。分析方法は下記の通りである。また、図 5. 4. 1-1 に分析のフロー図を示す。

(1) 全岩分析方法

- ① 岩石試料をめのう乳鉢で粉体化し、アルミ試料ホルダーに充填し、分析試料とする。
- ② 測定回折角 (2θ) は $3\sim 60^\circ$ で XRD 分析を行なう。
- ③ ②の結果、粘土鉱物が認められた場合は、以下の定方位分析を行なう。

(2) 定方位分析方法

- ① 1L のビーカーに粉体化した試料を蒸留水とともにいれて十分に攪拌し、試料を分散させる。その後、約 4 時間静置した後、水面から 4.5 cm までの上ずみを採取する。
- ② ①の上ずみ液を遠心分離機で試料粒子を沈下させて、スラドグラスに塗り、これを風乾させて試料とする。残った試料は後の分析のため取り置く。
- ③ 測定回折角 (2θ) は $3\sim 40^\circ$ で XRD 分析を行なう。
- ④ ③の結果、スメクタイトまたは緑泥石の存在が疑われる場合は以下の分析を行なう。
- ⑤ スメクタイトが存在する可能性がある場合、③で使用した試料 (スライドグラスに塗ったもの) にエチレングリコールを噴霧し、半乾きの状態で XRD 分析を行なう。この際の測定回折角 (2θ) は $3\sim 40^\circ$ とする。

⑥ 緑泥石の存在する可能性がある場合、②で取り置いた水ひ試料を6規定の塩酸溶液にいれ、80°Cで湯煎し約2時間静置する。その後、塩酸を良く洗浄してスライドグラスへ塗り、XRD分析を行なう。この際の測定回折角(2θ)は3~40°とする。

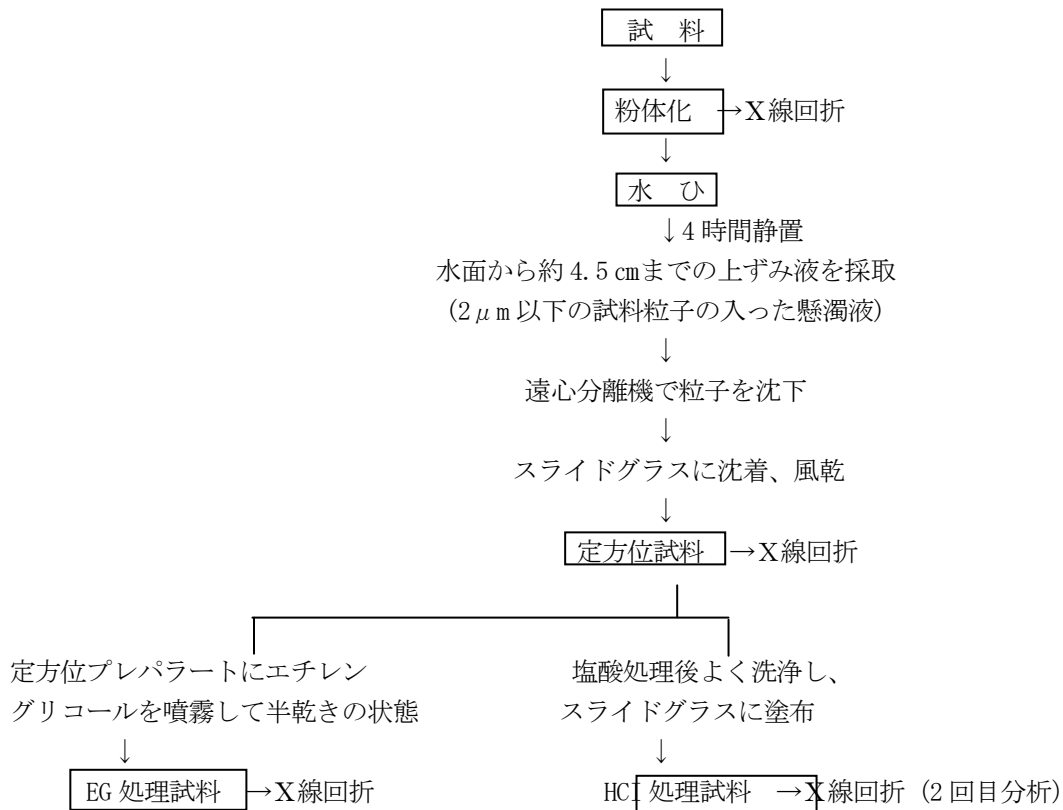


図 5.4.1-1 X線回折分析フロー図

各試料の全岩分析の結果を図 5.4.1-2 に、また、定方位分析として水ひとエチレングリコール処置、水ひと塩酸処理をそれぞれ比較したものを図 5.4.1-3 および図 5.4.1-4 に示す。この結果によれば、凝灰岩には石英、長石のほか火山ガラスが変質して2次鉱物として形成された斜プチロル沸石(クリノプチロライト)が多く存在している。斜プチロル沸石は火山ガラスの置換や軽石などの間隙構造に結晶化している可能性がある。また、水ひ試料の6°~7°付近のピークはエチレングリコール処理により低角度にシフトしており、スメクタイトが存在すると考えられる。砂岩は石英が主体となっており、他の鉱物種が相対的に少ないが、水ひと塩酸処理の結果からセリサイト、緑泥石も微量ながら存在する。頁岩は全岩分析や定方位分析から、石英や長石のほか、方解石をはじめとして、雲母(もしくはイライト)や緑泥石などが存在すると推定される。これらの鉱物は埋没の圧力や温度により剥離面に層状に存在すると考えられる。

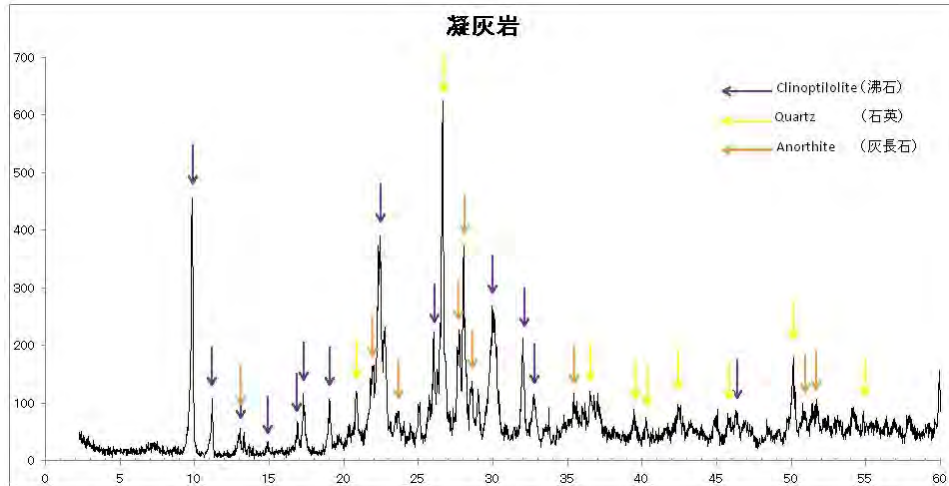


図 5. 4. 1-2(a) 凝灰岩の全岩分析結果

横軸は 2θ 、縦軸は反射強度

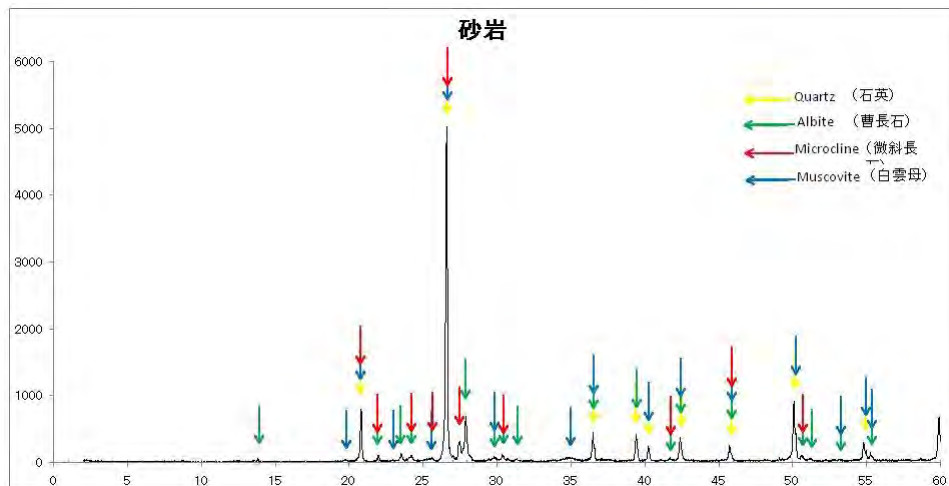


図 5. 4. 1-2(b) 砂岩の全岩分析結果

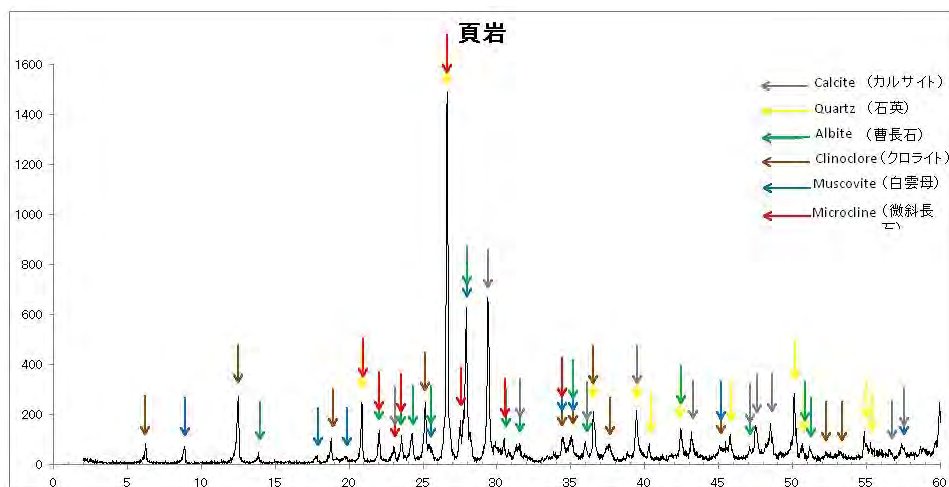


図 5. 4. 1-2(c) 頁岩の全岩分析結果

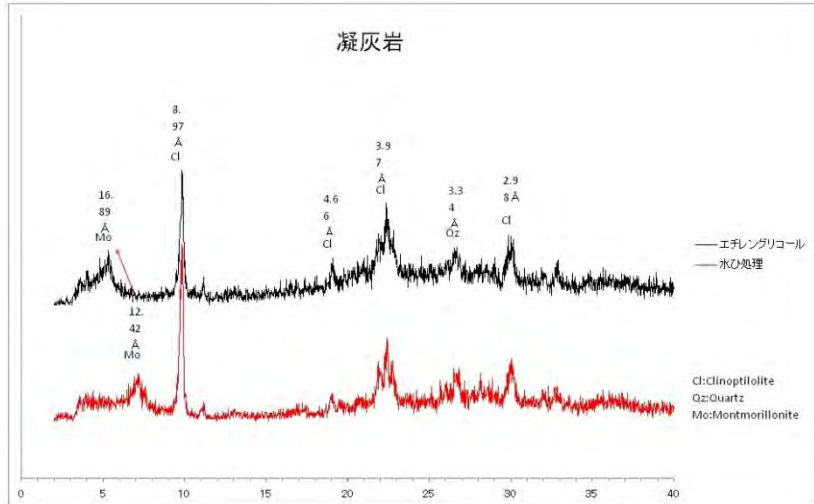


図 5.4.1-3(a) 凝灰岩の水処理およびエチレングリコール処理結果

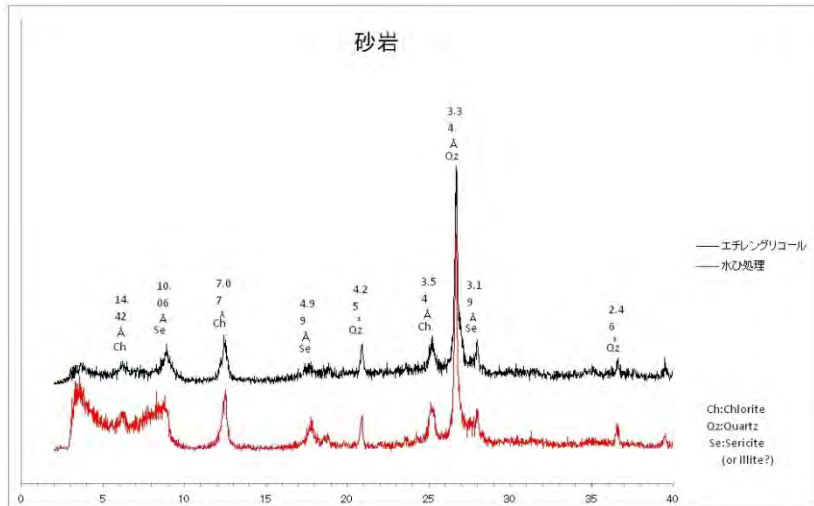


図 5.4.1-3(b) 砂岩の水処理およびエチレングリコール処理結果

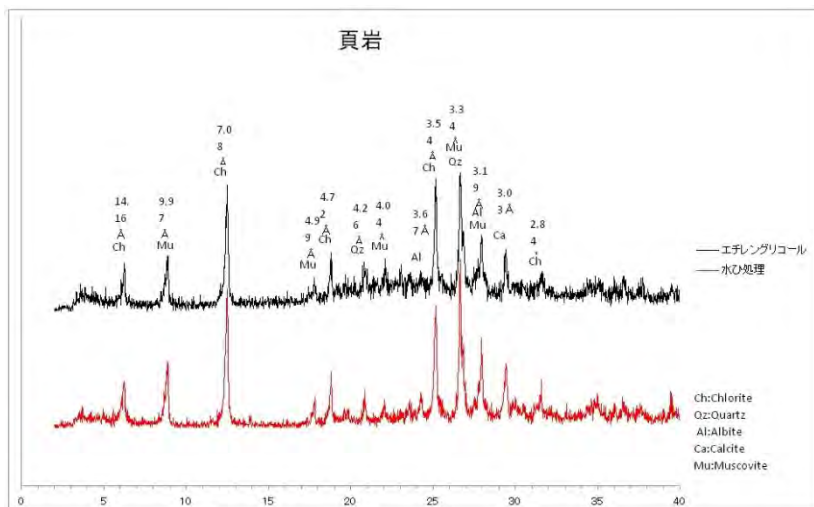


図 5.4.1-3(c) 頁岩の水処理およびエチレングリコール処理結果

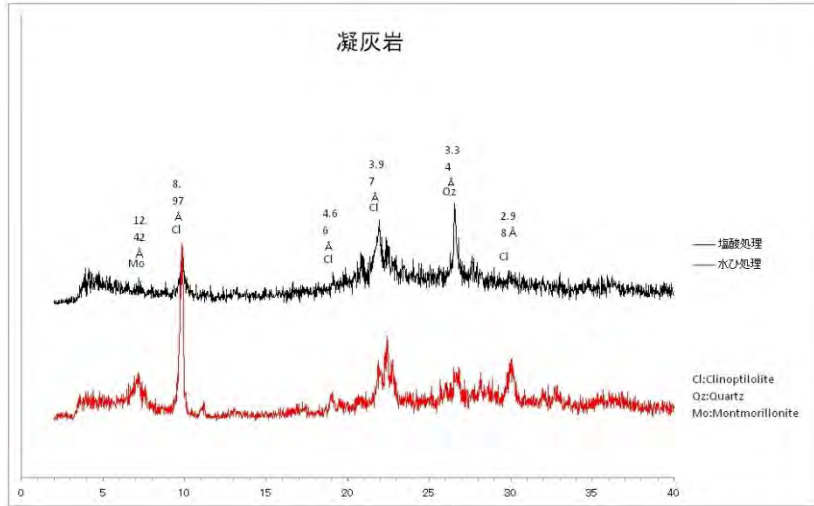


図 5. 4. 1-4(a) 凝灰岩の水処理および塩酸処理結果

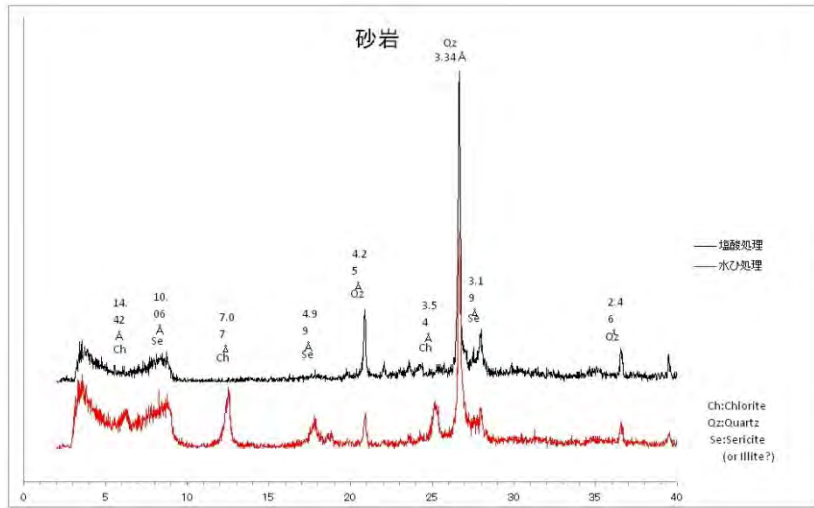


図 5. 4. 1-4(b) 砂岩の水処理および塩酸処理結果

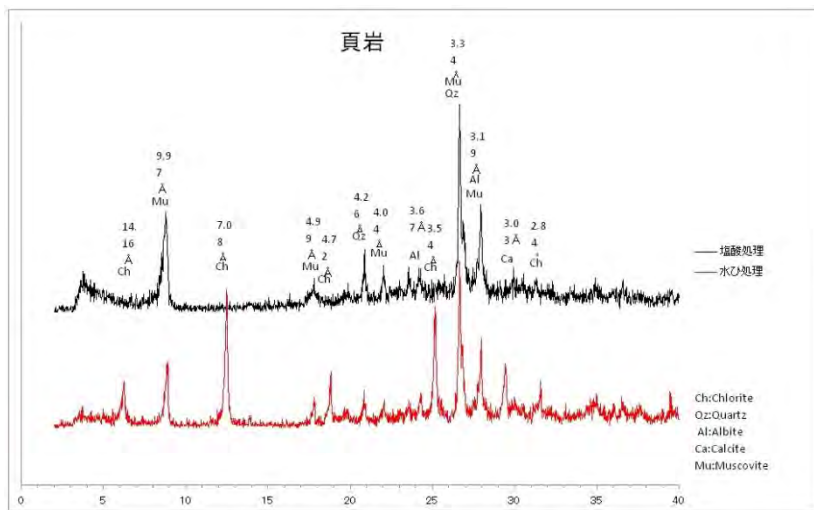


図 5. 4. 1-4(c) 頁岩の水処理および塩酸処理結果

5.4.1.3 ラジウム分析

凝灰岩、砂岩、頁岩について、ラドンの親核種であるラジウムの含有量を分析した。ラジウムの分析方法は文部科学省（1990 および 1990）に準拠し、U-8 容器に粉碎した試料岩石を入れて約 1 ヶ月間放置後、Ra-226 と放射平衡に達した Bi-214 の濃度をガンマ線スペクトロメトリによって測定し、この値を Ra-226 濃度として表 5.4.1-3 に示す。また、分析時に同時に得られた同じウラン系列の Pb-214、また、トリウム系列の Ac-228、Pb-212、Bi-212 を示すとともに、同じ粉体試料を ICP-MS によって分析したウラン、トリウムの値も併せて同表に示す。この結果によれば、Bi-214 の含有量から推定されるラジウムの量は頁岩（24.2Bq/Kg）が最も多く、次に砂岩（16.9 Bq/Kg）、凝灰岩（15.9 Bq/Kg）となる。試料のウランとラジウムが放射平衡に達していると考え、ICP-MS から推定されるウランの含有量は頁岩（24Bq/Kg）、砂岩（15 Bq/Kg）、凝灰岩（16 Bq/Kg）と Bi-214 と同程度の放射能が得られており、分析結果が妥当であること示している。凝灰岩、砂岩、頁岩中のラジウムの量は表 5.4.1-4 に参考として示した結晶質岩（花崗岩）に比べて小さいが、泥岩や頁岩は堆積岩の中でも比較的ラジウム含有量が大きい傾向がある。

表 5.4.1-3 試料の放射能分析結果

分析法	γ線スペクトロメトリ			ICP-MS	γ線スペクトロメトリ			ICP-MS	
	U	Bi-214 (Ra-226)	Pb-214		Th	Ac-228	Pb-212	Bi-212	U
単位	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	mg/kg	mg/kg
凝灰岩	16	15.9 ±0.7	18.7 ±0.7	29	32.9±1.4	36.9±0.9	23.7±3.0	1.2	4.6
砂岩	15	16.9 ±0.6	20.1 ±0.6	19	20.5±1.0	23.8±0.8	28.5±3.0	2.0	5.3
頁岩	24	24.2 ±0.6	28.3 ±0.6	21	24.1±1.0	25.5±0.7	24.7±4.0	1.3	7.3

表 5.4.1-4 花崗岩、泥岩の放射能分析（参考）

分析法	γ線スペクトロメトリ			ICP-MS	γ線スペクトロメトリ			ICP-MS	
	U	Bi-214 (Ra-226)	Pb-214		Th	Ac-228	Pb-212	Bi-212	U
単位	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	mg/kg	mg/kg
花崗岩①	186	131.3	154.2	175	132.7	153.6	147.2	15	43
花崗岩②	136	313.2	389.1	138	173.4	196.3	205.6	11	34
花崗岩③	73	67.3	80.9	97	133.7	155.6	153.5	5.9	24
花崗岩④	50	87.9	102.0	61	101.8	118.7	110.6	4.0	15
泥岩	20	25.5	28.6	12	15.6	19.6	19.0	1.6	3.0

花崗岩①：蛭川石（新鮮）、花崗岩②：蛭川石（半風化）、花崗岩③：蛭川石（風化）、花崗岩④：グリムゼル、泥岩：声間層

5.4.1.4 物性測定

昨年度における本事業では、間隙率がラドンフラックスへ影響を与える可能性について述べた。本年度は試料とした堆積岩の間隙率とともに、ラドンの発生量に影響を与える可能性がある比表面積についても測定した。測定は数 cm 程度の試料のバルク密度と間隙率、岩石チップへの細孔分析によるミクロンオーダーの間隙率と比表面積を、また、サブミクロンオーダーの比表面積を BET 法によって行なった。

バルク密度と間隙率は JIS A 1110 (2006) に準拠して、粗骨材の密度及び吸水率試験法試料重量を空气中で測定し、2 日間蒸留水中で含水させ、水中で試料重量を測定し、表面水を拭き取った後、再度重量を測定した。その後、試料を 105°C で 2 日間乾燥させ、乾燥重量を測定した。試料はそれぞれの岩種について直方体に整形したもの（縦×横を 20cm×5cm とし、厚さを 2cm、3cm、4cm、5cm の 4 種類）を用いた。測定結果を表 5.4.1-5 に示す。この結果によれば、凝灰岩は全体の平均で 13.7% の間隙率を有するが、4 試料で 11%～18% と値はばらついている。この理由としては、内部に「ミソ」と呼ばれる大谷産の凝灰岩特有の孔（空隙）が影響している可能性がある。砂岩は平均 2.5% の間隙を有しており、比較的膠結が良い新第三紀の砂岩としては一般的な間隙率を有している。頁岩は平均間隙が 0.4% と小さく、また密度も 2.7g/cm³ と大きく、間隙が少ない緻密な特性を示している。

表 5.4.1-5 試料の間隙率、密度測定結果

Sample Name	質 量			物 理 特 性					
	湿潤重量 (表乾)	水中重量	乾燥重量 (絶乾)	試験用純水		コア密度		間隙率	吸水率
	(g)	(g)	(g)	温度 (°C)	密度 (g/cm ³)	絶乾 (g/cm ³)	表乾 (g/cm ³)		
凝灰岩 2cm	334.34	175.87	310.45	17	0.9989	1.957	2.107	10.95	7.70
凝灰岩 3cm	470.15	242.21	433.83	17	0.9989	1.901	2.060	11.84	8.37
凝灰岩 4cm	683.78	341.46	608.00	17	0.9989	1.774	1.995	17.59	12.46
凝灰岩 5cm	809.37	413.23	734.74	17	0.9989	1.853	2.041	14.40	10.16
砂岩 2cm	563.41	344.48	558.28	17	0.9989	2.547	2.571	2.20	0.92
砂岩 3cm	858.55	524.03	849.90	17	0.9989	2.538	2.564	2.44	1.02
砂岩 4cm	1094.41	663.85	1079.54	17	0.9989	2.504	2.539	3.30	1.38
砂岩 5cm	1350.34	822.49	1338.88	17	0.9989	2.534	2.555	2.04	0.86
頁岩 2cm	746.27	474.40	745.14	17	0.9989	2.738	2.742	0.41	0.15
頁岩 3cm	1026.40	652.78	1024.98	17	0.9989	2.740	2.744	0.38	0.14
頁岩 4cm	1414.38	898.04	1412.66	17	0.9989	2.733	2.736	0.33	0.12
頁岩 5cm	1708.57	1086.37	1706.62	17	0.9989	2.740	2.743	0.31	0.11

「凝灰岩 4cm」は厚さ 4cm の試料を意味する。（試料の縦と横の長さは一律に 20cm、5cm である）

BET 法による比表面積の測定は BET 1 点法によって実施した。測定方法は以下の通りである。

- ① 測定装置内において、サンプルが入った U 型セルをセットし、混合ガスを連続的に流す。混合ガスは、窒素とヘリウム (N₂ 30% He 70%) を使用する。
- ② セル部を液体窒素温度に冷却し、混合ガス中の窒素を試料表面に吸着させる。これにより混合ガス中の窒素ガス濃度が減少する。

- ③ 一定量のガスが吸着すると平衡状態となるので、この時の窒素ガスの減少を熱伝導度検出器を用いて測定する。
- ④ 次に吸着平衡に達したセル部を常温に戻すと窒素ガスの脱離が始まり、混合ガス中の窒素濃度が増加する。
- ⑤ 一定量のガスが脱離すると平衡状態となるので、この時の窒素ガスの濃度を熱伝導度検出器を用いて測定する。

比表面積の測定結果を表 5. 4. 1-6 示す。凝灰岩、砂岩、頁岩の平均比表面積は試料粒径を 1.34mm とした場合、それぞれ 13.35 m²/g、6.43 m²/g、0.54m²/g となった。また試料粒径をほぼ半分の 0.64mm とした場合、14.64 m²/g、5.38 m²/g、0.57m²/g となっている。凝灰岩、砂岩、頁岩を比較すると、凝灰岩、砂岩は頁岩の 25～29 倍、9～12 倍の比表面積を有している。

表 5. 4. 1-6 比表面積測定結果

使用岩石試料					脱着過程			
試料名	岩種	粒径	平均粒径 (mm)	重量 (g)	全表面積 (m ²)			比表面積 (m ² /g)
					1st	2nd	Ave.	
頁岩(1)	頁岩	#9>X>#20	1.34	1.10010	0.548	0.567	0.558	0.506772
頁岩(2)	"	"	"	1.15860	0.629	0.631	0.630	0.543760
頁岩(3)	"	"	"	1.15470	0.620	0.619	0.620	0.536503
頁岩(4)	"	"	"	1.11800	0.618	0.634	0.626	0.559928
砂岩(1)	砂岩	"	"	0.94870	6.138	6.142	6.140	6.472014
砂岩(2)	"	"	"	1.11760	7.197	7.179	7.188	6.431639
砂岩(3)	"	"	"	1.03760	6.674	6.700	6.687	6.444680
砂岩(4)	"	"	"	1.03660	6.580	6.615	6.598	6.364557
凝灰岩(1)	凝灰岩	"	"	0.74770	11.160	11.260	11.210	14.992644
凝灰岩(2)	"	"	"	0.74970	11.520	11.650	11.585	15.452848
凝灰岩(3)	"	"	"	0.74720	11.580	11.780	11.680	15.631692
凝灰岩(4)	"	"	"	0.74940	11.430	11.510	11.470	15.305578
頁岩(1)	頁岩	#20>X>#30	0.64	1.02410	0.580	0.611	0.596	0.581486
頁岩(2)	"	"	"	1.02100	0.594	0.611	0.603	0.590108
頁岩(3)	"	"	"	1.01500	0.564	0.570	0.567	0.558621
頁岩(4)	"	"	"	1.01840	0.578	0.575	0.577	0.566084
砂岩(1)	砂岩	"	"	1.03170	5.585	5.558	5.572	5.400310
砂岩(2)	"	"	"	1.02330	5.526	5.537	5.532	5.405551
砂岩(3)	"	"	"	1.02860	5.495	5.510	5.503	5.349504
砂岩(4)	"	"	"	1.03310	5.528	5.551	5.540	5.362017
凝灰岩(1)	凝灰岩	"	"	0.62890	9.010	9.134	9.072	14.425187
凝灰岩(2)	"	"	"	0.62780	9.230	9.463	9.347	14.887703
凝灰岩(3)	"	"	"	0.62390	9.146	9.353	9.250	14.825293
凝灰岩(4)	"	"	"	0.63050	9.023	9.144	9.084	14.406820

凝灰岩、砂岩、頁岩の間隙径分析は水銀圧入法によって実施した。この方法では、1岩種あたり4つの岩石チップを作成して試料とした。測定結果を表 5. 4. 1-7 に示す。この測定から得た空隙率は凝灰岩 30.4%、砂岩 8.4%、頁岩 0.8%であり、それぞれバルクの間隙率よりも大きく見積もられている。一方、空隙径分析の際に、併せて得られた全細孔表面積は、凝灰岩は約 13.204 m²/g～14.800m²/g、砂岩は 1.357 m²/g～

1.884 m²/g、頁岩は 0.003 m²/g ~0.005m²/g である。凝灰岩、砂岩、頁岩の全細孔表面積を比較すると、凝灰岩、砂岩、頁岩の順で小さいが、頁岩の値は凝灰岩、砂岩に比べて著しく小さく、有意な値を示していないと考えられる。また、表 5.4.1-6 の BET 法による比表面積との比較では、どの試料も水銀圧入法より低い傾向がある。このことから、頁岩に存在する主な間隙は水銀圧入法で評価できないサブミクロンサイズである可能性が考えられる。

表 5.4.1-7 細孔分布測定結果

試料名称 :	凝灰岩①	凝灰岩②	凝灰岩③	凝灰岩④	
かさ密度	1.491	1.560	1.553	1.485	g/cc
真密度	2.159	2.221	2.213	2.151	g/cc
気孔率(間隙率)	30.946	29.770	29.831	30.973	%
全細孔体積	0.208	0.191	0.192	0.209	cc/g
全細孔表面積	13.298	14.800	13.204	14.011	m ² /g
メディアン径(体積基準)	0.224	0.134	0.215	0.227	μm
メディアン径(表面積基準)	0.023	0.022	0.021	0.021	μm
平均細孔直径(4V/A)	0.062	0.052	0.058	0.060	μm
モード径(体積基準)	0.438	0.034	0.469	0.034	μm
モード径(表面積基準)	0.032	0.032	0.032	0.006	μm
試料名称 :	砂岩①	砂岩②	砂岩③	砂岩④	
かさ密度	2.381	2.383	2.374	2.382	g/cc
真密度	2.598	2.590	2.607	2.601	g/cc
気孔率(間隙率)	8.372	7.997	8.915	8.396	%
全細孔体積	0.035	0.034	0.038	0.035	cc/g
全細孔表面積	1.623	1.357	1.884	1.464	m ² /g
メディアン径(体積基準)	0.566	0.558	0.634	0.592	μm
メディアン径(表面積基準)	0.018	0.022	0.016	0.020	μm
平均細孔直径(4V/A)	0.087	0.099	0.080	0.096	μm
モード径(体積基準)	0.784	0.778	0.887	0.807	μm
モード径(表面積基準)	0.011	0.014	0.011	0.014	μm
試料名称 :	頁岩①	頁岩②	頁岩③	頁岩④	
かさ密度	2.698	2.711	2.707	2.724	g/cc
真密度	2.724	2.739	2.719	2.747	g/cc
気孔率(間隙率)	0.957	1.009	0.452	0.865	%
全細孔体積	0.004	0.004	0.002	0.003	cc/g
全細孔表面積	0.004	0.004	0.003	0.005	m ² /g
メディアン径(体積基準)	59.478	72.186	67.331	89.467	μm
メディアン径(表面積基準)	0.401	0.315	0.368	0.274	μm
平均細孔直径(4V/A)	3.198	4.040	2.532	2.674	μm
モード径(体積基準)	144.578	84.167	242.228	232.675	μm
モード径(表面積基準)	0.100	0.124	0.366	0.159	μm

5.4.2 岩石のラドンフラックス

5.4.2.1 ラドンフラックスの測定方法

室内試験におけるラドンフラックスの測定では、凝灰岩、砂岩、頁岩を直方体に整形し、その表面積と体積を計測すると共に、金属の気密容器に水とともに1ヶ月間浸漬した後（岩石から発生し、水に溶存したラドンは1ヶ月で放射平衡状態に達する）、浸漬水のラドン濃度を計測する。この濃度からラドン発生量を計算し、これを表面積で除することでラドンのフラックスを得る。図5.4.2-1に測定例を示す。

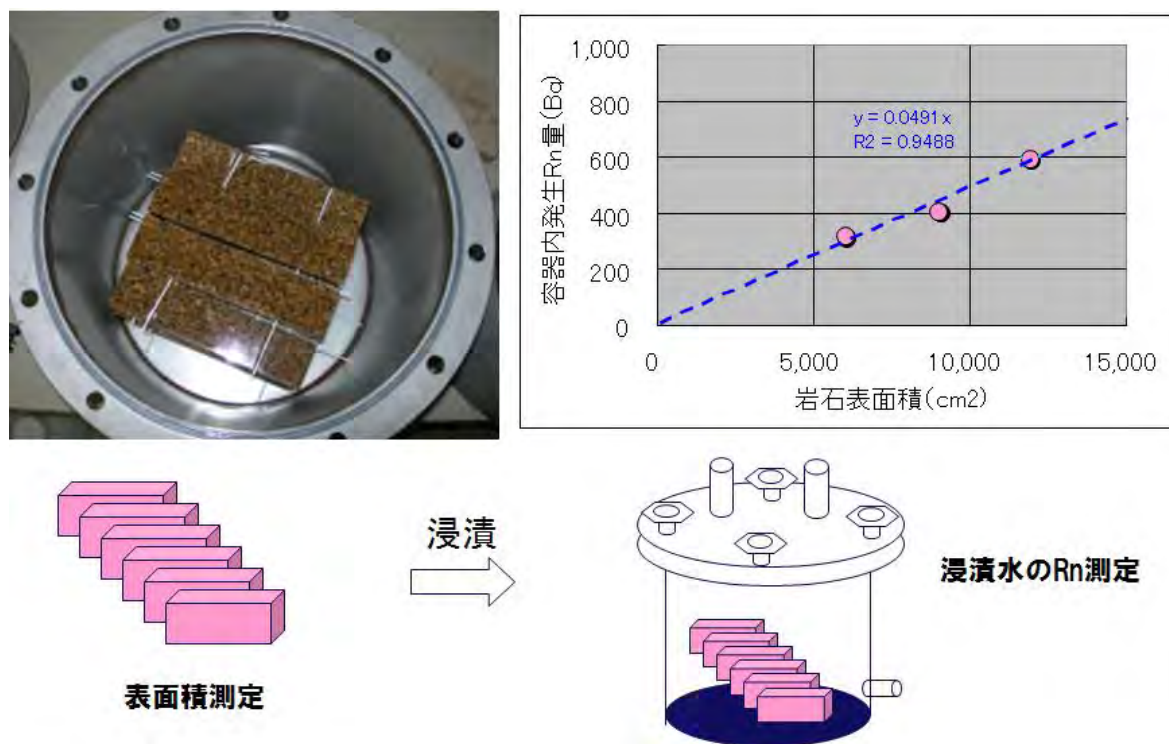


図 5.4.2-1 岩石からのラドンフラックスの測定例

写真は気密容器に花崗岩をセットした例である（本年度は堆積岩を試料とした）。下の概念図に示すように試料の表面積を測定し、浸漬後のラドン発生量を得て、右上のグラフの関係（傾き＝フラックス）を得る。

計測はラドンの測定方法としては感度と精度が良い液体シンチレーション法 (LSC) によって行なった。また、低濃度のラドンの計測手法を検討するために、ラドンを活性炭に吸着させた試料のガンマ線スペクトロメータによる分析、静電捕集型計測装置である Rad7 による計測を併せて実施した。

(1) ラドン溶解水の作成

- ① 凝灰岩、砂岩、頁岩を縦 20cm、横 5cm で厚さ 2cm、3cm、4cm、5cm に整形した岩石をそれぞれ、40 枚、24 枚、20 枚、16 枚用意する。
- ② それぞれの岩種、厚さ、枚数が異なる岩石をエアタイト容器に完全に浸るまで蒸留水で浸漬す

る。

- ③ エアタイト容器を水で飽和し、蓋を密閉した後、ラドンが放射平衡に達するまで1ヶ月間静置する。

(2) 液体シンチレーションによるラドンの測定

- ① 各エアタイト容器のそれぞれから1000ccのラドン溶解水を回収する。
- ② 各溶解水のpHと温度を測定する。
- ③ シンチレータが添加されたトルエン20ccと溶解水を攪拌、トルエンにラドンを吸着させて回収し、それぞれの第1検体とする。
- ④ さらに②でトルエンを回収した後の残水に、さらにトルエン20ccを注入し、残ったラドンを吸着させ回収、第2検体とする。
- ⑤ 回収した第1検体と第2検体をシンチレーションカウンタにてラドン濃度を計測する。

(3) ガンマ線スペクトロメータによる分析

- ① アルミセルに充填する活性炭を200°Cで24時間乾燥させる。
- ② アルミセルに活性炭を各5.5g程度充填する。
- ③ 各容器から3000ccを採集し、チャンバー内で5分間噴霧した後、チャンバー内のラドンを含む空気を各アルミセルに通気し、ラドンを活性炭に吸着させる。
- ④ 各アルミセルを密閉し、ガンマ線量をスペクトロメータで計測する。

(4) 静電捕集器 (RAD7) による測定

- ① 各エアタイト容器から専用ビンに250CCのラドン溶解水を3セット回収する。
- ② 1本目の試料が入った専用ビンとRAD7をつなぎ、エアバブルによってラドンを遊離させて、装置内の静電捕集器で計測する。計測は4回の平均で行なう。
- ③ 2本目、3本目の試料についても同様に行い、計12回の計測の平均でラドン量を計測する。

5.4.2.2 ラドンフラックスの測定結果

凝灰岩、砂岩、頁岩のラドンフラックスの測定結果を、フラックスを別途に測定した蛭川花崗岩ならび多胡砂岩とともに表5.4.2-1に示す。試料サイズ、枚数が同等な凝灰岩40枚(2cm)、砂岩40枚(2cm)、頁岩40枚(2cm)および蛭川花崗岩40枚、多胡砂岩40枚を比較した場合、蛭川花崗岩、多胡砂岩凝灰岩、砂岩、頁岩の順でラドンフラックスが大きい。また、最もラドンフラックスの大きい蛭川花崗岩と頁岩とは3オーダーの違いが認められる。凝灰岩、砂岩、頁岩で比較した場合、ウランの含有量(表5.4.1-2)、ラジウムの含有量(表5.4.1-4)が最も多い頁岩が最もラドンフラックスが低い結果が得られており、必ずしもラドンの親核種が多い試料がフラックスも大きい傾向が認められない。むしろラドンフラックスは、間隙率の大きさに依存している可能性がある(表5.4.1-5、表5.4.1-5)。

表 5.4.2-1 ラドンフラックスの測定結果

単位	表面積 cm ²	体積 cm ³	幅 cm	全ラドン量 Bq	ラドン濃度 Bq/L	Rn Flux Bq/cm ²	Rn/体積 Bq/cm ³	Rad7 Bq/L	γ-s.m. Bq/L
凝灰岩 16枚(5cm)	7,390	8,345	5	19.18	1.04	2.60E-03	2.30E-03	0.86	0.98
凝灰岩 20枚(4cm)	8,381	8,679	4	38.15	2.16	4.55E-03	4.40E-03	1.95	0.79
凝灰岩 24枚(3cm)	8,697	7,640	3	20.21	1.06	2.32E-03	2.65E-03	1.15	0.73
凝灰岩 40枚(2cm)	12,493	8,710	2	18.44	1.02	1.48E-03	2.12E-03	1.17	0.84
砂岩 16枚(5cm)	7,785	9,120	5	6.49	0.37	8.33E-04	7.11E-04	0.52	0.58
砂岩 20枚(4cm)	8,649	9,134	4	10.80	0.61	1.25E-03	1.18E-03	1.95	0.40
砂岩 24枚(3cm)	9,140	8,326	3	13.00	0.72	1.42E-03	1.56E-03	0.65	0.48
砂岩 40枚(2cm)	12,968	9,279	2	12.27	0.72	9.46E-04	1.32E-03	0.94	0.53
頁岩 16枚(5cm)	8,171	9,914	5	0.71	0.04	8.64E-05	7.12E-05	0.22	0.36
頁岩 20枚(4cm)	9,180	10,135	4	0.89	0.05	9.68E-05	8.77E-05	0.23	0.33
頁岩 24枚(3cm)	9,645	9,222	3	1.41	0.08	1.46E-04	1.53E-04	0.2	0.29
頁岩 40枚(2cm)	14,023	10,927	2	0.48	0.03	3.39E-05	4.35E-05	0.22	0.30
砂岩(多胡) 40枚	12,000	8,000	2	37.15	2.06	3.10E-03	4.64E-03	2.06	1.03
花崗岩(蛭川)①40枚	12,000	8,000	2	323.12	17.95	2.69E-02	4.04E-02	28.4	11.50
花崗岩(蛭川)②40枚	12,000	8,000	2	408.34	22.69	3.40E-02	5.10E-02	28.55	12.10

凝灰岩、砂岩、頁岩の縦×横×(厚さ) = 5cm×20cm×(2cm、3cm、4cm、5cm)

砂岩(多胡)、花崗岩(蛭川)の縦×横×(厚さ) : 5cm×20cm×2cm

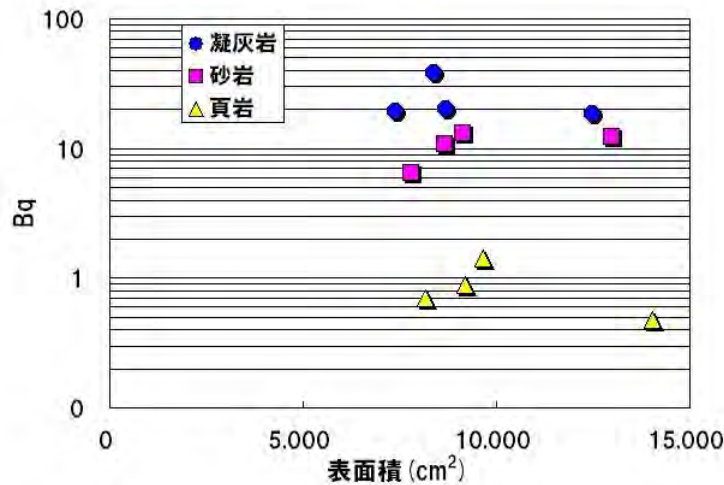


図 5.4.2-2 試料表面積とラドン発生量との関係

各試験のラドン発生量と試料表面積の関係を見た場合、表面積とラドン発生量の関係は明瞭でない(図 5.4.2-2)。このため、試料の表面積および体積とラドンフラックスを比較した(図 5.4.2-3、図 5.4.2-4)。表面積とラドンフラックスの関係(図 5.4.2-3)は、表面積とラドン発生量との関係(図 5.4.2-2)とほぼ同じで、関係が明瞭でない。一方、体積とラドンフラックスとの関係のうち、頁岩は体積に対してラドンフラックスが低下する傾向にある。これは頁岩の間隙率が低いことによって、ラドンが発生する箇所が岩石表層に限られ、体積の増加割合に対してラドンの発生量は増加しないために体積と逆比例している可能性がある。

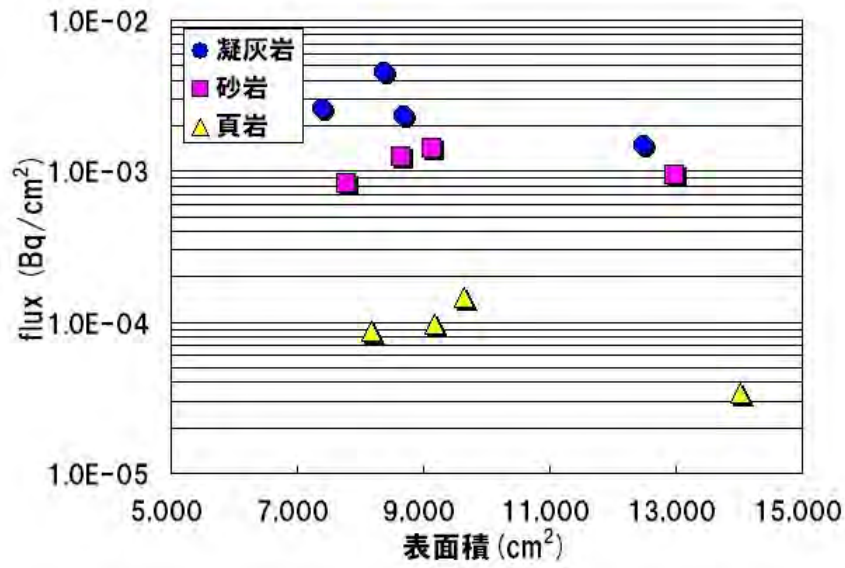


図 5.4.2-3 試料表面積とラドンフラックス関係

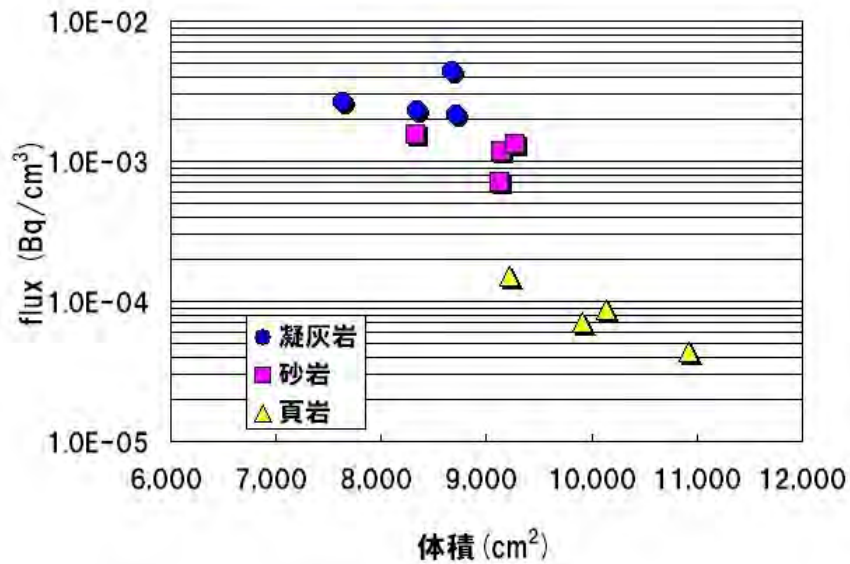


図 5.4.2-4 試料体積とラドンフラックス関係

次にラドンの内部からのフラックスの影響を見るために、試料の厚さとラドンフラックスの関係を検討した(図 5.4.2-5) 凝灰岩は全体的には厚さの増加に対してフラックスも増加すると見なすことが可能であるが、砂岩については厚さとラドンフラックスの関係は明瞭でなく、相関がない可能性もある。頁岩については厚さ 3cm の箇所には屈曲があるように見えるが、測定点数が少なく明らかでない。したがって、堆積岩のうち間隙率の大きい凝灰岩は内部からのラドンフラックスの影響が示唆されるが、砂岩や頁岩では明示的ではない。このため、今後、試験数を増やすなどして間隙率の影響について再確認をする必要がある。

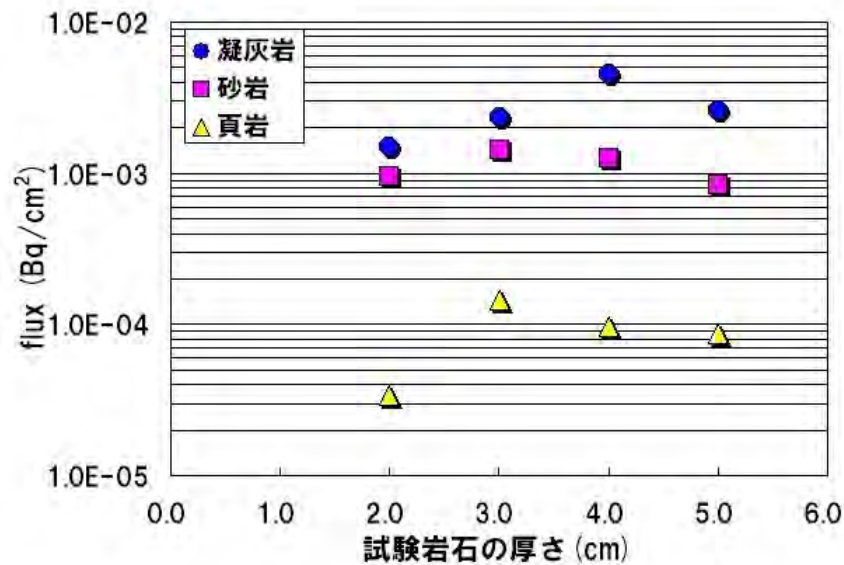


図 5.4.2-5 試料厚さとラドンフラックス関係

5.4.3 低濃度のラドン溶解水の測定方法の検討

現状での溶存ラドンの測定は、液体シンチレーションカウンター (LSC) による測定が最も感度と精度が良いと考えられるが、原位置ではトルエンが使用できない場合があること（坑道内では爆発性の薬品の使用が制限されることが多い）、LSC は可搬ではないため試料採取から室内測定まで長時間とならないように留意が必要である。一方、静電捕集型の測定器 (Rad7) は可搬でバッテリー駆動のため、原位置測定に適する。また、 γ 線スペクトロメトリは室内でしか測定はできないが、小型のバブリング装置を原位置で利用すれば、ラドンを活性炭へ十分に吸着させて、室内へ持ち帰ることが可能である。以上の理由から、Rad7 と γ 線スペクトロメトリによるラドンの測定について検討を進めている。本年度は、堆積岩を対象として、低濃度領域のラドン測定について LSC と Rad7、 γ 線スペクトロメトリとの比較と検討を行なった。

表 5.4.2-1 において、LSC で概ね 2.5Bq/L 以下のラドン濃度となる試料の Rad7 および γ 線スペクトロリ の計測値について図 5.4.3-1 に整理した。この結果によれば LSC に対して、Rad7 では 8 割程度のラドン濃度、 γ 線スペクトロメトリについては 3 割程度の値に留まった。これは低濃度領域において γ 線スペクトロメトリと Rad7 によるラドンの計測が困難であり、それぞれの手法を使用するとすれば、改良を必要とすることを示している。Rad7 については測定がパッシブな方法であるため、1 試料の測定回数を増やすことで値のばらつきを抑え、精度を向上させることが最も簡便な方法である。また、 γ 線スペクトロメトリについては、活性炭を増量することにより、吸着するラドン量を多くすることが考えられるが、 γ 線スペクトロメトリで計測できる試料セルのサイズに制限があるため、この方法は難しい。このため、より現実的な方法として、バブリング後のラドンを含む空気の湿度が高いと活性炭を濡らし、ラドンの吸着を妨げることから、脱湿材や温度の制御によって湿度をより低下させて、吸着性能を改善することが考えられる。

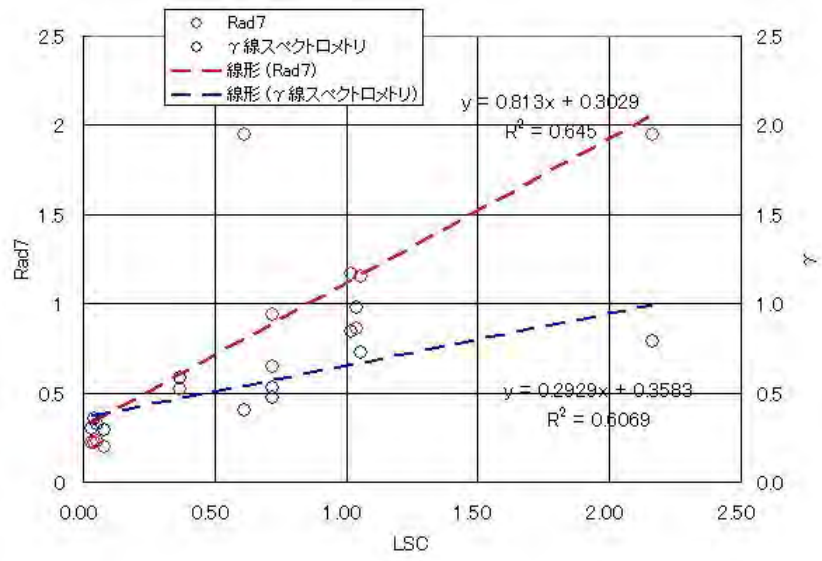


図 5.4.3-1 液体シンチレーションカウンタ (LSC)、Rad7、γ線スペクトロメトリによる同一試料の測定

5.5 まとめ

岩盤中の割れ目における複雑な間隙構造に対して、既存の間隙幅の決定手法に不確実性があるため、この低減が望まれている。また、割れ目中の物質移行における拡散係数に寄与する表面積の評価手法が必要とされている。本事業では、上記の必要性に鑑み岩盤中の割れ目の開口幅の推定をこれまでと異なるラドンを用いた手法で推定し、従来手法の補完を目指すことを目的に検討を実施してきている。昨年度まで事業では、室内試験およびグリムゼルでの原位置試験を実施し、ラドンを用いた割れ目の開口幅推定法と原位置試験での適用性を確認した。

今年度はラドンを用いた手法の国内の岩盤への適用性を把握するため、国内の岩石を用いたラドンの室内試験により、岩石表面からのラドンフラックスの測定を行ない、国内岩石への適用性の検討を行なった。また、併せてラドンの溶存濃度の低い試料の測定方法についても検討した。

国内の岩石を用いた室内試験では、グリムゼルで対象とした花崗岩と異なる鉱物学的特徴や岩石物性を有する我が国の堆積岩を試料として、ラドンのフラックスの測定を試みた。試料は新第三紀前期中新世の砂岩と凝灰岩、および中生代三畳紀の頁岩である。これらの試料の間隙率は凝灰岩、砂岩、頁岩の順に大きく、ラドンの親核種であるラジウムの含有量は頁岩が最も大きく、砂岩と凝灰岩はほぼ同等である。試験の結果得られたラドンのフラックスは、間隙率と同じ順で大きく、親核種の含有量よりも、間隙率がラドンのフラックスにより寄与すると考えられた。そこで凝灰岩、砂岩、頁岩を直方体に整形し、それぞれ厚みが異なる試料でラドンフラックスを計測した。その結果、凝灰岩については、厚さの増加に対してフラックスも増加すると見なすことが可能であったが、砂岩、頁岩には厚さとの明瞭な関係は認められなかった。したがって、間隙率が高い岩石は内部からのラドンの影響があることが示唆されるが、間隙率の低い試料を含めた堆積岩としてのラドンフラックスの特性は今回の試験では明確にならなかったため、今後、試験数を増やすなどして確認をする必要がある。

ラドン濃度の低い試料の測定方法の検討については、液体シンチレーションカウンタ法、ガンマ線スペクトロメトリ法、静電捕集法の3種類の手法で比較した。手法では低濃度の計測を目指すために、ラドン濃度が概ね2.5Bq/L以下の試料を用いることとした。最も計測精度が良いと考えられる液体シンチレーションカウンタと他の2手法とを比較した場合、静電捕集法では液体シンチレーションカウンタの値の8割程度の値、ガンマ線スペクトロメトリ法では3割程度の値に留まった。静電捕集法は濃度が低いと、値のばらつきが顕著となる傾向があり、同一サンプルの測定回数を増やすことにより誤差を低減できる可能性がある。また、ガンマ線スペクトロメトリ法では、計測セルの活性炭を増量することは難しいため、湿度などの活性炭へのラドンの吸着する要因を低減することなどにより、蓄積量を大きくすることが現実的な解決方法と考えられた。

残された課題としては、我が国の堆積岩のうち、間隙率が比較的大きいと考えられる新第三紀の堆積岩などを用いたラドンフラックスの測定をさらに進め、間隙率のラドンフラックスへの影響を考慮した測定

方法を開発していく必要がある。また、ラドンの溶存濃度の低い試料の測定法については、静電捕集法では測定回数を増やすことで精度を高めること、また、ガンマ線スペクトロメトリ法では、湿度管理により活性炭への吸着性能を向上させることなどを今後の課題として検討していく。

参考文献

- Snow D. 1965, “A parallel plate model of fractured permeable media, University of California”, Berkeley, Ph. D
- Cecil L.D., Smith, R.C. II, Reilly, M.A., and Rose, A.W., 1987, Radium-228 and radium-226 in ground water of the Chickies Formation, southeastern Pennsylvania IN Graves, Barbara, ed., Radon, radium, and other radioactivity in ground water: Chelsea, Michigan, Lewis Publishers, p. 437-447.
- 文部科学省、1990、ラジウム分析法 放射能測定シリーズ 19
- 文部科学省、1992、ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリ 放射能測定法シリーズ 7 3 訂
- 日本工業規格 2006 JIS A 1110 粗骨材の密度及び吸水率試験法

6. 割れ目間隙の可視化手法

6.1 はじめに

亀裂を有する岩盤においては、地下水は岩盤基質部に比べて透水性の高い割れ目を選択的に流れていく。高レベル放射性廃棄物の地層処分では、地下水が核種のキャリアーになることから、上記岩盤での核種の移行経路となる割れ目の幾何学的情報を精度よく評価することが重要となる。

この課題に対して、トレーサ試験技術の開発とともに、割れ目の分布や開口幅、割れ目内での流動形態等を推定する技術として、溶存ラドン濃度計測技術、高粘性流体注入試験技術などを開発し、国外サイトにおいて適用試験を実施してきた。その結果、開発した手法の有効性をある程度示すことができたが、特に、割れ目の開口幅の評価に関しては各手法ともモデルに依存するため、結果の解釈について課題が残った。また、これらの推定結果を検証するために蛍光染料を添加したエポキシ樹脂（以下、レジン）を割れ目に注入し、固化後にボーリング孔を掘削して、割れ目内のレジンの充填状況を直接ないし間接的に観察する試みも行われた。具体的には、高精度ボアホール TV 調査、コア観察、薄片観察、X線 CT 撮影が行われた。数 m スケールでのレジンの充填幅は複雑な断層構造を反映したものが得られ、割れ目の間隙構造の地質学的な解釈に有用な知見が得られた。レジン充填分布に関しては、X線 CT 画像からその分布の傾向を捉えることができたが、レジン充填幅に関しては、天然の割れ目に充填された一次レジンと削孔のダメージやコアのハンドリングにより開口した人工的な割れ目に充填された二次レジンとの区別ができないことや、画像の空間分解能が低いことなどにより、レジン充填幅の定量的評価には至らなかった。また、コア観察や高精度ボアホール TV 調査の直接観察により評価したレジン充填幅も測定した箇所が非常に少なく、その信頼性は乏しい。

そこで本研究では、割れ目の開口幅や形状を高精度に取得することを目的として、国外サイトで得た割れ目内レジン充填コアを用いて、平面研削とその研削面の撮影を繰返す手法による割れ目間隙の可視化を試みるとともに、レジン充填幅の測定を行った。つぎに、原位置レジン注入試験で用いるレジンに関する検討を行った。割れ目間隙に充填させるレジンは、広範囲かつ幅の狭い割れ目にも充填できる性能を有し、割れ目内が水で飽和した状態であっても良好に接着できることが望まれる。後述するように、国外サイトで用いたレジンは入手が困難である。そこで、国外サイトで使用したレジンと類似した性能を有するレジンを調査し選定するとともに、選定したレジンの粘度および可使時間の測定を行った。さらに、国外サイト適用時に問題となったレジンへの蛍光染料添加に関する問題についても検討を行った。最後に、割れ目を有する岩石コアへ選定したレジンを注入し、割れ目間隙を可視化する上での問題点について検討を行った。

6.2 Grinding Tomography による割れ目間隙の可視化

6.2.1 概要

これまで、割れ目内のレジンの充填状況から割れ目間隙の情報を取得してきた。具体的には、高精度ボアホール TV 調査、デジタルカメラによるコア観察、顕微鏡による薄片観察、そして医療用 X 線 CT スキャナによる非破壊観察により取得してきた。特に、X 線 CT スキャナによる非破壊観察では、割れ目の三次元的な分布形態、展開画像表示によるボーリングコアの方位の修正、割れ目面の三次元可視化による透水卓越方向の同定などを行ってきた。しかしながら、割れ目の間隙幅に関しては、非常に弱い密度コントラストを画像化することが困難であることや、画像分解能が低いことなどにより、信頼性の高い高精度なデータを取得することができなかった。この問題の解決には、割れ目断面の直接観察が有力であると考えられる。

そこで本研究では、割れ目内にレジンが充填された岩石コアの切断面のみを観察し割れ目間隙の情報を取得するのではなく、岩石コアを一定間隔で平面研削していき、その研削面の撮影を繰り返すことによって岩石コア内部の割れ目間隙の情報を取得する。さらに、それらの研削断面画像を積み重ねて三次元画像を構築する「Grinding Tomography」による割れ目間隙の三次元可視化にも取り組んだ。「Grinding Tomography」は研削面の数に比例して労力と時間を要するが、精度の高い割れ目の開口幅や形状のデータを取得できることや、密度に依存しない色調を捉えることができるため被写体の組織構造を画像化できるなど、信頼性の高いデータが得られることが分かっている。すでに本手法を割れ目間隙に適用した事例（例えば、Hakami et al. (1996)、鐵ら (2005)）は存在するが、単一割れ目ではない複雑な割れ目形状を有する岩石に対しては初めての試みとなる。

6.2.2 研削・撮影装置

(1) 研削装置

岩石コアの研削には、成形研削盤 (PFG-450DXC、株式会社岡本工作機械製作所) を用いた。図 6.2.2-1 に成形研削盤の外観写真を示す。この成形研削盤のマグネットチャック (試料を設置するテーブル) の寸法は長さ 450mm×幅 150mm である。砥石 (直径 175mm、厚さ 15mm) は上下方向に約 200mm 移動させることができ、0.005mm の精度で研削可能である。また、砥石はマグネットチャックの表面まで移動可能であるため、本研究で用いる岩石コアの厚みであれば全てを研削することが可能である。研削盤は図に示すように、サドルが前後、テーブルが左右、砥石軸頭 (砥石) が上下に動く。この研削盤は、テーブルは自動制御、もしくはテーブル左右送りハンドルを用いて手動で左右に動き、サドルはサドル前後送りハンドルを用いて手動で前後に動き、砥石は砥石軸頭上下送りハンドルを用いて手動で上下に動かせる。なお、サドル前後送りハンドルは一回転で 5mm サドルを動かす、砥石は前述したように 0.005mm の精度で動かすことができる。また、テーブルの移動幅は、

「テーブル用ドグ」で調整する。砥石の周速度は変更できず、固定されている。また、テーブルの送り速度はテーブル送り速度調整レバーで変化させることができる。

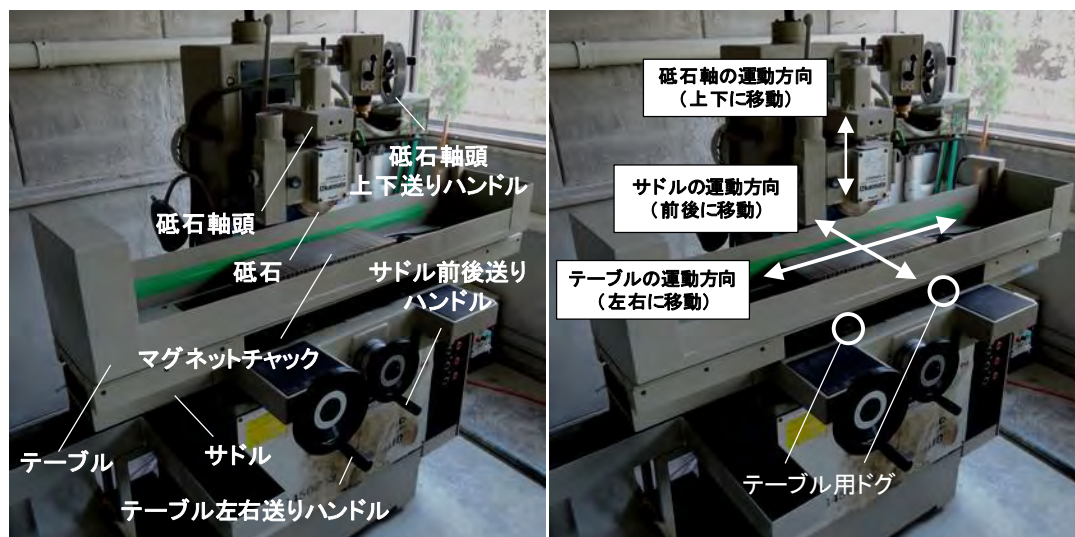


図 6.2.2-1 成形研削盤の外観写真

(2) 撮影装置

研削面のデジタル画像データを取得するために、簡易な撮影装置を構築した。撮影装置の外観写真を図 6.2.2-2 におよび主な仕様を表 6.2.2-1 示す。研削面のデジタル画像撮影には、有効画素数 1620 万画素 (4928×3264 ピクセル) のデジタル一眼レフカメラ (D7000、株式会社ニコン) を用いた。レンズは焦点距離 40mm のマクロレンズ (AF-S DX Micro NIKKOR 40mm f/2.8G、株式会社ニコン) を用いた。また、レンズには 410nm 以下の紫外線を吸収する UV カットフィルター (Zeta UV L41、株式会社ケンコー・トキナー) を取付けた。撮影中のバッテリー切れを防ぐためにパワーコネクター (EP-5B、株式会社ニコン) と AC アダプター (EH-5b、株式会社ニコン) をカメラに取付け、常時電源を供給できるようにした。カメラはカメラスタンド (SFC マルチカメラホルダーS・金属台板 530×650、株式会社エス・エフ・シー) に固定した。また、カメラスタンドの左右には蛍光灯光源 (テクニカルライト 2、株式会社エス・エフ・シー) を、その直交方向には UV ランプ (UVL-28、UVP) を取り付けた。なお、外乱光の影響を取り除くため、撮影装置を組立式暗室 (森本化成株式会社) の中に設置した。撮影時の手ブレを抑えるために、カメラの制御はフリーソフト「digiCamControl」を使って、組立式暗室の中に設置したノートパソコンで行った。digiCamControl はパソコン上で撮影条件の変更、撮影、画像収録が可能なソフトである。なお、ノートパソコンとカメラの接続は、付属の USB ケーブル (UC-E4) を用いた。暗室内にパソコンを設置しているため、パソコンのモニターからの光が画像に影響を与える。したがって、その光を遮断するために、市販のノートパソコン

用遮光フードでノートパソコンを覆い、さらに冠布で覆った。

カメラスタンドに設置したカメラで平面研削とその研削面の撮影を繰り返す場合、撮影のたびにカメラの位置を下へ動かす必要がある。本研究で使用した SFC マルチカメラホルダーS は上下、前後に動かすことも可能であるが、六角穴付ボルトを使用して重量のあるカメラや倍率の高いカメラを強力固定する方式を採用している。カメラを上下に動かすためには六角穴付きボルトを緩締しなければならず、その作業がデータ取得の弊害となることが予想される。すなわち、カメラの位置あわせが十分な精度で行えず、画像データの質が担保できない可能性が考えられる。また、撮影工程で余分な時間を要し、効率よくデータを取得できないという問題も生じる。なお、カメラを上下に微動させることができるカメラスタンドも存在するが、それでもやはり位置合わせの煩雑さは避けられない。

カメラの位置を固定した環境下で、カメラと研削面との距離をほぼ一定に保つために、図 6. 2. 2-3 に示すように、研削の切込み量とほぼ同等の厚さを持つ 0. 95mm のアルミニウム板 (SUS430、1mm 厚、公差±0. 1mm) を用いた。すなわち、撮影のたびに岩石コアの下にこのアルミニウム板を重ねていき、岩石コアをカメラ側に移動させることでカメラと研削面の距離をほぼ一定になるようにした。また、図 6. 2. 2-3 に示すように、撮影のたびに岩石コアが同じ位置にくるように、岩石コア固定用治具 (マグネットベース) を L 字に配置した。

画像の寸法調整用のスケール (株式会社エス・エフ・シー) を画像内に写しこむために、岩石コアの厚さに応じてスケールの高さを調整できるフリーアーム式のスケールホルダー (株式会社エス・エフ・シー) とそれを固定するマグネットベース (株式会社エス・エフ・シー) を台板上に設置した。また、画像色調補正のためのカラーチャートは、ケニス株式会社の「画像補正用カラーチャート CASMATCH」を用いた。このカラーチャートは寸法 10mm×10mm と小さく場所を取らない。また、シールタイプのカラーチャートであるため、寸法調整用のスケールの中央部に貼り付けるとカラーチャートを画像内に容易に写しこませることができる。なお、撮影で得られた画像の補正は、株式会社ニコンが公開中の無償のソフトウェア「Capture NX-D (ベータ版)」を用いた。正式版は今夏リリース予定であり、正式版も無償で提供される。

図 6. 2. 2-4 に示すように、カメラのフラッシュ取付け部には水準器を取付け、カメラの水平を確保した。また、ファインダーから光が入り、露出が変わるのを防ぐために、カメラ付属のアイピースキャップ DK-5 (株式会社ニコン) をファインダー一部に取付けた。

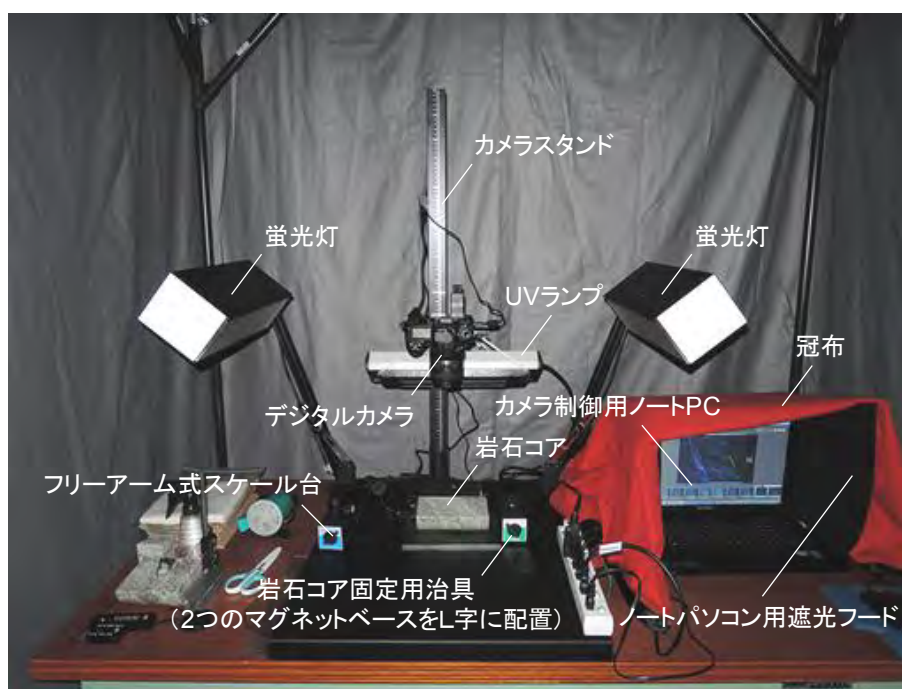


図 6. 2. 2-2 撮影装置の外観写真

表 6. 2. 2-1 撮影装置の主な仕様

デジタルカメラ	NIKON D7000 <ul style="list-style-type: none"> ・ 撮像素子の方式：23.6×15.6mm サイズ CMOS センサー ・ 総画素数：1620 万画素 ・ 記録画素数：4928×3264 ピクセル ・ 保存ファイル形式：RAW および JPEG の同時収録
レンズ	AF-S DX Micro NIKKOR 40mm f/2.8G <ul style="list-style-type: none"> ・ 焦点距離：40mm ・ 開放絞り (F 値)：f/2.8 ・ 最短撮影距離：0.163m (等倍) ・ 最大撮影倍率：1 倍
レンズフィルター	UV カットフィルター Zeta UV L41 <ul style="list-style-type: none"> ・ 410nm 以下の紫外線を吸収
画像制御・収録ソフトウェア	digiCamControl <ul style="list-style-type: none"> ・ ダウンロード URL：http://digiCamcontrol.com/
Raw 現像・調整ソフト	NIKON Capture NX-D (ベータ版) <ul style="list-style-type: none"> ・ ダウンロード URL：http://beta.nikonimglib.com
画像補正用カラーチャート	画像補正用カラーチャート CASMATCH <ul style="list-style-type: none"> ・ サイズ：10×10mm ・ 基準色：9 色 ・ スケール：1mm 単位
UV ランプ	UVP UVL-28 <ul style="list-style-type: none"> ・ ワット数：8W ・ UV 波長：365nm ・ UV 強度：2300 μW/cm² (フィルター表面から 7.6cm での測定値)

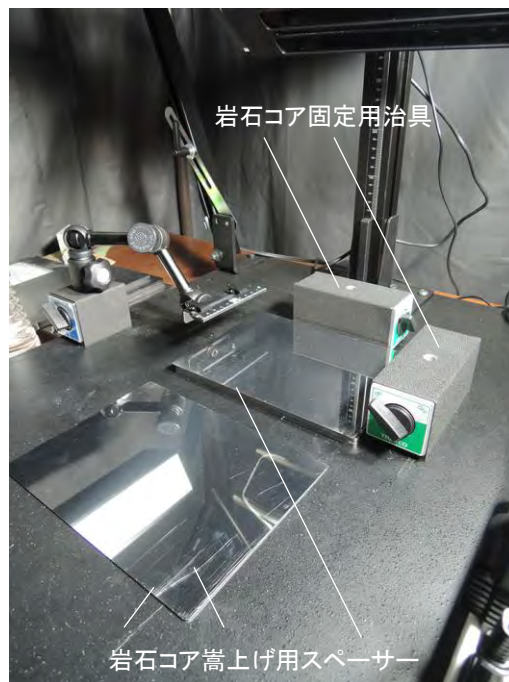


図 6.2.2-3 岩石コア嵩上げ用スペーサー



図 6.2.2-4 ファインダーからの光の進入防止とカメラの水平の確保

(3) 岩石コア

岩石コアは、2012年度にスイスのグリムゼルテストサイトで掘削したボーリング孔 C-FRS12.001 孔および C-FRS12.003 孔で採取されたものであり、対象割れ目 FZ2 を内包している (図 6.2.2-5)。これら 2 つのボーリング孔で得られた岩石コアは別の目的で使用されたため、半割にされている。岩石コアを研削するにあたり、研削する面積が可能な限り小さくなるように (研削時間の短縮)、一次レジンが充填された箇所を中心に、適当な長さにカットした (図 6.2.2-6)。図中の緑色の箇所が、2012 度にボーリング孔から注入したフルオレセインナトリウム (ウラニン) を添加したレジン (一次レジン) であり、岩石コアの端に見える半透明色の箇所が削孔してボーリングコアとして

採取した後に注入したナフチオン酸ナトリウムを添加したレジン（二次レジン）である。二次レジンは削孔のダメージやコアのハンドリングによって開口した人工的な割れ目と、一次レジンが充填された天然の割れ目を区別する目的で注入されている。また、ボーリングコアは採取時 PVC 製のインナーパイプに収納されているので、このインナーパイプと岩石との隙間にも二次レジンが充填されている。なお、レジンは、Nagra がメーカー（Sika）と共同で開発した Sika Injection-26 である。超低粘度形のレジン（初期粘度：100cP 程度）であり、可使時間が長いという特徴を有している。しかし、正式な製品ではなく、研究目的での入手はほぼ不可能である。

研削盤のマグネットチャックに非磁性体である岩石を固定するために、岩石コアの切断面に 200mm×150mm×5.70mm の鉄板（SPHC、6mm 厚、公差±0.3mm）をエポキシ樹脂系接着剤（ボンド E セット、コニシ株式会社）で接着した（図 6.2.2-7）。なお、この鉄板の表面には黒皮と呼ばれる酸化皮膜のスケールが存在する。この黒皮が接着不良の原因となるため、接着箇所の黒皮を事前に研削盤で除去した。岩石と鉄板との接着の際には、それぞれの接着面をアセトンあるいはエタノールで脱脂、洗浄している。

鉄板を貼り付けた岩石コアはかまぼこ形の形状である。研削は岩石コアの弧背から行われ、研削に伴い研削面が拡大していく。図 6.2.2-8 に研削盤への岩石コアの設置状況と研削時の様子を示す。

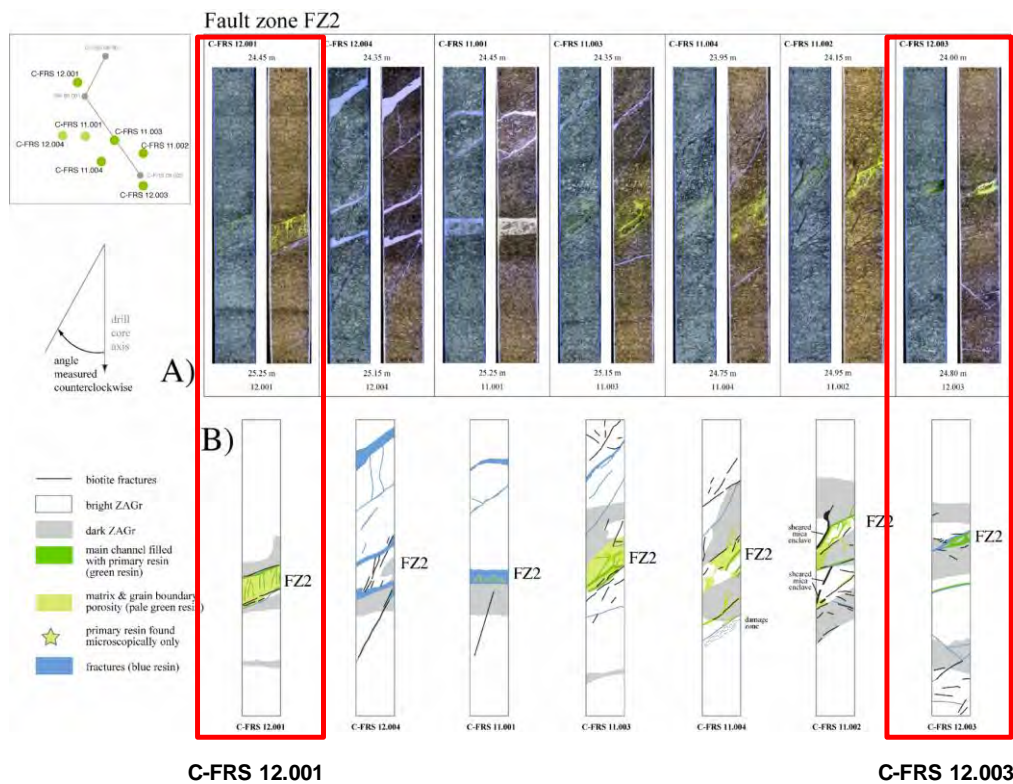


図 6.2.2-5 本研究で用いた岩石コア（赤枠）

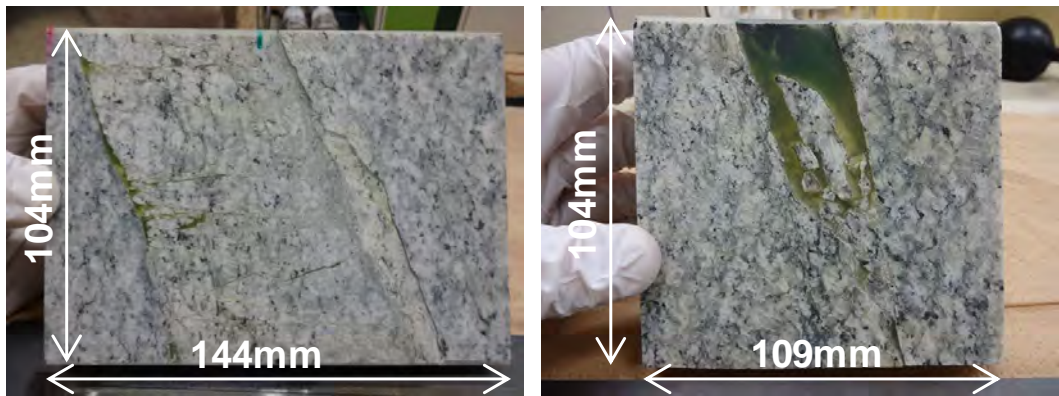


図 6.2.2-6 切断された岩石コア（左：C-FRS 12.001、右：C-FRS 12.003）

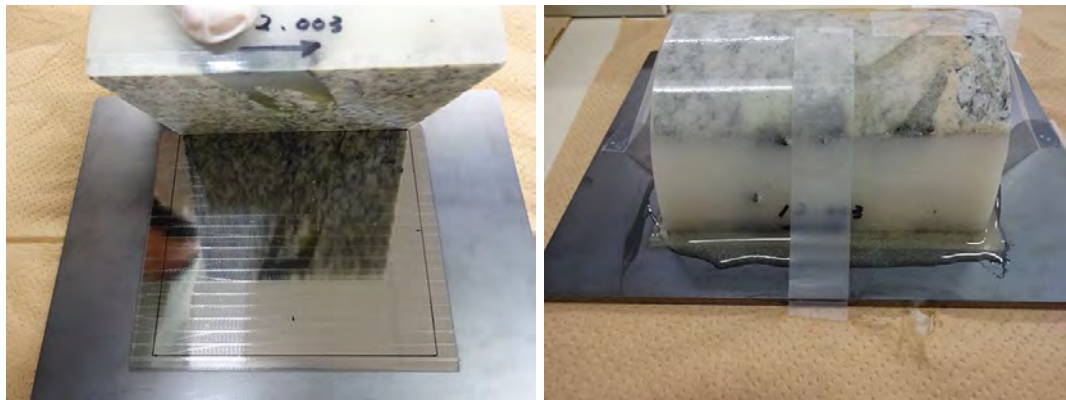


図 6.2.2-7 岩石と鉄板との接着状況（左：クロカワの除去、右：接着および固定）

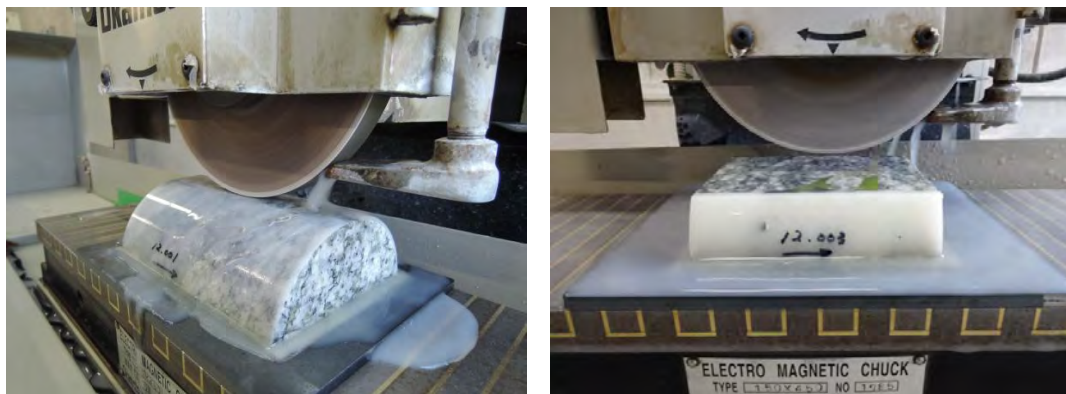


図 6.2.2-8 岩石コアの研削盤への設置状況と研削の様子

6.2.3 研削・撮影の手順

平面研削および撮影は以下の手順で行った。

- 1) 鉄板を貼り付けた岩石コアを研削盤に固定する。
- 2) レジン（二次レジン）で覆われた部分を研削するとともに、面出しを行なう。
- 3) 2)の研削により二次レジンが全面にわたって削り取られた位置を基準研削面とする。
- 4) 岩石コアを研削盤から取り外し、研削面をエアークンプレッサーで清掃した後、カメラスタンドの台板上に岩石コアを設置する（初回の撮影時に岩石コアの位置をマグネットベースで固定し、撮影のための位置決めを行なう）。
- 5) 撮影前に霧吹き等を用いて研削面を湿らせる。
- 6) 蛍光灯光源下で研削面をデジタルカメラで撮影する。
- 7) 蛍光灯を消し、UV ランプを照射して研削面をデジタルカメラで撮影する。
- 8) UV ランプを照射した状態で、蛍光灯を天井に向けて照射し（バウンス撮影）、蛍光灯+UV ランプ照射下で研削面をデジタルカメラで撮影する。
- 9) 再び岩石コアを研削盤に固定し、岩石コアの基準研削面から 1mm 研削する。
- 10) 岩石コアを研削盤から取り外し、研削面をエアークンプレッサーで清掃した後、4)で設置したマグネットベースを目印に岩石コアを4)と同じ位置に固定する。
- 11) 撮影前に霧吹き等を用いて研削面を湿らせる。
- 12) 蛍光灯光源下で研削面をデジタルカメラで撮影する。
- 13) 蛍光灯を消し、UV ランプを照射して研削面をデジタルカメラで撮影する。
- 14) UV ランプを照射した状態で、蛍光灯を天井に向けて照射し（バウンス撮影）、蛍光灯+UV ランプ照射下で研削面をデジタルカメラで撮影する。
- 15) 岩石コアの厚さが約 1mm になるまで、9)～14)の作業を繰り返す。

6.2.4 研削条件および撮影条件

(1) 研削条件

本研究で用いた岩石コアは前述したようにかまぼこ型をしており、その周囲は二次レジンで覆われている。二次レジンの厚みは場所によって多少異なるが、1.5mm 程度である。研削によって岩石コアが全面にわたって現れることが前提になるが、岩石コアの弧背部の最も高い位置から 2.0mm 程度研削した。この作業により、岩石の表面を覆っていた二次レジンの除去と面出しが行われる。その後、1mm 毎の研削を岩石コアの厚さが 1mm 程度になるまで繰り返した。C-FRS 12.001 孔のコアは基準研削面から 44mm、C-FRS 12.003 孔のコアは基準研削面から 48mm まで研削した。

一般に平面研削加工は、図 6.2.4-1 に示す「トラバースカット研削」、「バイアス研削」の 2 つ

に分類される。「トラバースカット研削」はテーブル送り方向に平行な方向に砥石を運動させ研削するとともに、間欠的にサドル送り方向に砥石を運動させる研削方法である。一方、「バイアス研削」は間欠的にはなく、連続的にサドル送り方向に砥石を運動させる研削方法である。本研究では、表面粗さおよび寸法精度を向上させる目的では「バイアス研削」を、それ以外では、「トラバースカット研削」を採用した。

平面研削加工では、切込み量を小さくしながら荒研削、仕上げ研削、スパークアウト研削（ゼロ研削）と順に行っていく。スパークアウト研削とは、研削の終了直前に行われる作業で、切りこみを与えず（砥石を下げずに）に砥石を回転させて研削することをいい、削り残しの除去や仕上げ精度を上げるために行われる。工業製品で行われている切込み量の目安で研削していくと膨大な時間を要するため、本研究では、研削対象である岩石コアや砥石へのダメージを抑えつつ、研削時間を短縮する切込み量を探りながら研削を行なった。具体的な手順としては、1mm の研削深さのうち0.95mm までは切込み量0.1mm の「トラバースカット研削」を1回ずつ行ない（砥石が研削面をサドル送り方向に1往復すると0.2mm 研削される）、研削深さが0.95mm に達した時点で、「バイアス研削」でのスパークアウト研削を8回行なった（砥石が研削面をサドル送り方向に4往復する）。その後、切込み量を小さくして、研削深さ1mm まで「トラバースカット研削」、「バイアス研削」を併用して研削していった。このとき、トラバースカット研削時のサドルの送り量は5mm、バイアス研削時のサドル送り速度は約500mm/min とした。テーブルの移動幅は、テーブル用ドグで岩石コアの端から50mm 程度大きくするように設定した。

上記の切込み量の設定は、研削加工ができる期間が限られていたためのやむを得ないものであり、推奨できない。研削条件と研削現象の関係をよく理解し、研削条件を各自で設定することが望ましい。

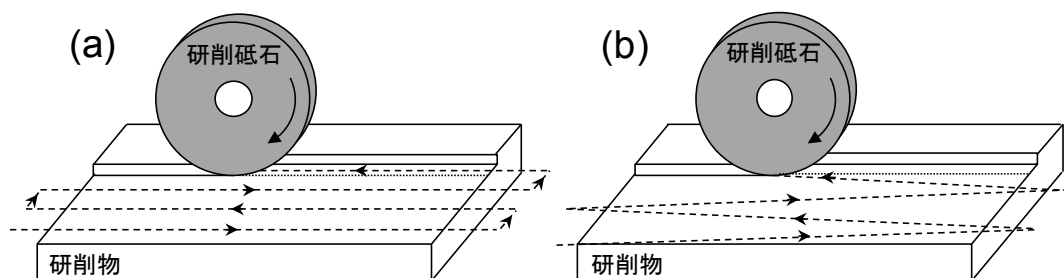


図 6.2.4-1 平面研削加工の種類 (a: トラバースカット研削、b: バイアス研削)

(2) 撮影条件

デジタルカメラの設定を表 6.2.4-1 に示す。カメラ側で自動的に画像を処理してしまう項目に関してはその機能を停止させた。Raw 形式のデータを収録する設定にしているため、撮影後に露出等の補正が可能である。ただし、限界を越えたピントの補正、カメラブレ（ミラーショックによる微細なブレ）の補正、限界を越えた露出の補正は Raw 形式のデータを用いても補正できない。この点に注意して撮影条件を設定した（表 6.2.4-2）。

まず、カメラブレに関しては、撮影時のカメラブレを最小限に抑えるための機能「露出ディレイモード」を用いた。「露出ディレイモード」とは、シャッターボタンを押すと（本研究では、カメラ制御ソフトウェアの撮影ボタンを押すことを意味する）、まずミラーが作動し、約 1 秒後にシャッターが切れるという撮影方法である。

つぎに、画像の明るさを左右する露出については、シャッタースピードと絞り値（F 値）を手動で指定するマニュアルモードで行なった。露出は、シャッタースピード、絞り値、そして ISO 感度の組み合わせにより決定される。その組み合わせで得られる露出を数値的に示したものを EV（Exposure Value）と呼ぶ。EV は、シャッタースピード（T）を 1 秒、F 値（F）を 1.0、ISO 感度（ISO）を 100 とした場合に 0 となる値であり、次式で表される。

$$EV=Av+Tv+Sv \quad (6.2.3-1)$$

ここに Av は「Aperture Value」、Tv は「Time Value」、Sv は「Sensitivity Value」であり、それぞれ次式で表される。

$$Av=\log_2(F^2)、Tv=-\log_2(1/T)、Sv=-\log_2(ISO/100) \quad (6.2.3-2)$$

EV が同じであれば同じ露出（明るさ）が得られるが、速いシャッタースピードはブレ易く、F 値は大きくすると被写界深度が深くなる反面、コントラストが落ちる。ISO 感度は上げ過ぎると画像にノイズが乗る。したがって、同じ EV であっても同じ画像は得られない。

本研究では、蛍光灯光源下、紫外線光源下、蛍光灯＋紫外線光源下の 3 つの条件下での撮影を行う。したがって、効率よくデータ取得する上で、よりシンプルな設定が求められる。上記の 3 つのパラメータのうち F 値と ISO を固定し、シャッタースピードのみを変化させて異なる条件下での撮影を実施した。ISO 感度は上げ過ぎると画像にノイズが乗るため、本研究では使用するカメラで設定できる最小値である 100 を採用した。F 値は、一般に開放 F 値から 1 段から 2 段絞った F 値がそのレンズでの解像力のピークと言われている。また、「GANREF」と呼ばれる Web サイト（<http://ganref.jp/>）では種々のレンズの性能テストを実施しており、それによると、今回使用したレンズでは f/5.6 がよりシャープな画像が得られるようである。本研究で撮影する対象は平滑な研削面であるため、凹凸が殆どない。したがって、被写界深度ではなくコントラストを重視し、開放 F 値から 2 段絞った F 値でもある f/5.6 を採用した。シャッタースピードは、撮影後の補正が可

能な範囲（露出アンダー・露出オーバーにならない範囲）とし、蛍光灯光源下での撮影では 1/15 秒、それ以外は 2 秒とした。ピント合わせは、パソコンのモニター（digiCamControl のライブビュー上）に表示された画像を拡大表示させて、レンズのフォーカスリングを使って行なった。このピントの微調整は、蛍光灯光源下、紫外線光源下、蛍光灯+紫外線光源下の撮影前に、撮影環境が変わるたびに行なった。撮影距離は、最後に現れる研削面が全て写り込む距離とした。この撮影距離で撮影した画像の解像度は画像内に写し込ませたスケールから 30pixel/mm (33 μ m/pixel) であった。

表 6.2.4-1 デジタルカメラの設定

画質モード	Raw+F	
画像サイズ	L	
JPEG 圧縮	サイズ優先	
Raw 記録	記録方式	ロスレス圧縮 RAW
	記録ビットモード	14bit
自動ゆがみ補正	OFF	
色空間	Adobe RGB	
長時間ノイズ低減	OFF	
高感度ノイズ低減	OFF	
ISO 感度設定（感度自動制御）	OFF	
イルミネーター点灯	OFF	
露出ディレイモード	ON	
モデリング発光	OFF	

表 6.2.4-2 撮影条件

絞り値 (F 値)	f/5.6
ISO 感度	100
シャッタースピード	蛍光灯光源下：1/15 秒 紫外線光源下：2 秒 蛍光灯+紫外線光源下：2 秒
測光モード	マルチパターン測光
ピント合わせ	マニュアル
画像解像度	30pixel/mm (33 μ m/pixel) ※カメラと研削面間固定

6.2.5 撮影結果

(1) C-FRS 12.001 孔

平面研削と研削面の撮影の繰り返しで得られた画像とその研削面にほぼ対応した X 線 CT 画像を図 6.2.5-1～図 6.2.5-8 に示す（印刷用に実際の画像よりも解像度を落としている）。なお、これらは研削した断面の一部であり、5mm 間隔の画像を掲載している。

蛍光灯光源下で撮影した画像はカラーチャートを用いてホワイトバランスの補正を行っている。

一次レジンを充填されている割れ目が、蛍光灯に含まれる微量の紫外線に反応し緑色に発光していることが観察できる。対象割れ目 FZ2 と交差するせん断割れ目にも一次レジンが充填されており、薄い黄色に発光していることが確認できる。しかし、蛍光強度が弱く、割れ目の形態を詳細に捉えることは難しい。

紫外線光源下で撮影した画像は、一次レジン、二次レジンともにそれぞれの蛍光色で鮮やかに発光しており、蛍光灯光源下で識別できなかった割れ目を鮮明に抽出できていることが分かる。割れ目以外にも発光している箇所を確認することができるが、この点については後述する。

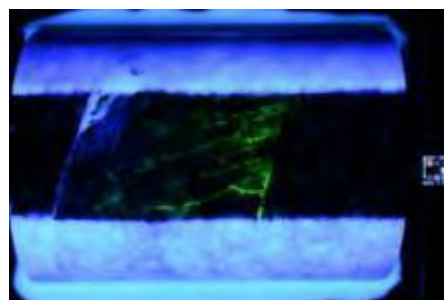
蛍光灯+紫外線光源下で撮影した画像は、紫外線光源下で撮影した画像と同様に、蛍光灯光源下では判別できなかった割れ目を抽出することができている。また、紫外線光源下の画像とは異なり、割れ目と周辺組織との関係も観察することができる。

X線CT画像は断面ではなく厚みを持った断層画像（スライス厚0.5mm）であるので、厳密には研削面画像との比較はできないが、割れ目の分布は研削面画像のそれと調和的である。有色鉱物等の余分な情報が削ぎ落とされて、密度が低い割れ目間隙が鮮明に可視化されていることが特徴的である。また、脆性破壊で生じたカタクラサイトの存在も、容易に確認することができる（灰色）。なお、研削面画像で確認された二次レジンは、一次レジンと密度差がないため、X線CT画像からは両者の違いを判断することはできない。

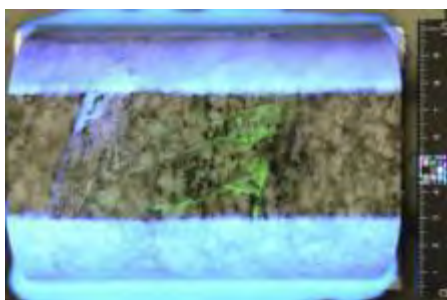
(a) 蛍光灯光源



(b) 紫外線光源



(c) 蛍光灯+紫外線光源



(d) X線CT画像 (WL:1700, WW:2000)

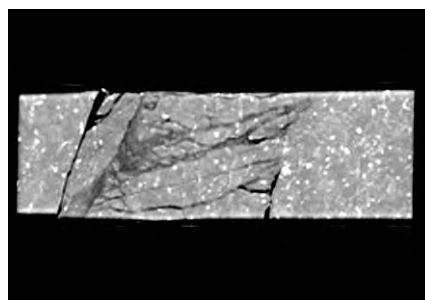
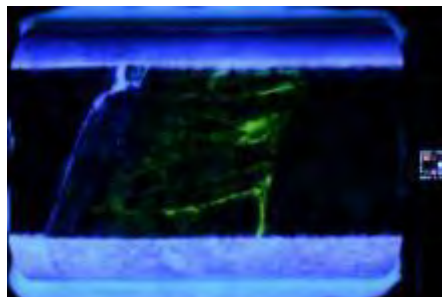


図 6.2.5-1 研削深さ 5mm の研削断面画像と X線 CT 画像 (C-FRS 12.001 孔)

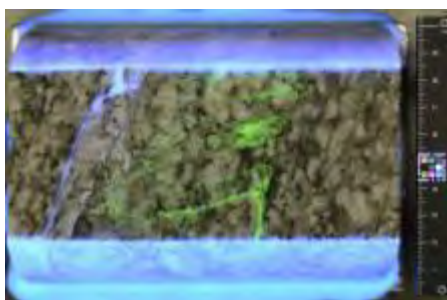
(a) 蛍光灯光源



(b) 紫外線光源



(c) 蛍光灯+紫外線光源



(d) X線 CT 画像 (WL:1700, WW:2000)

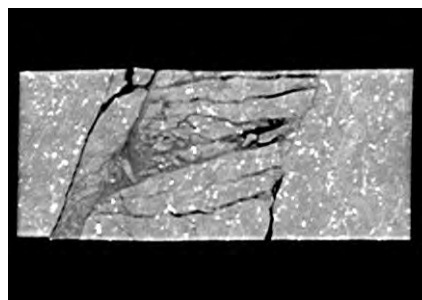
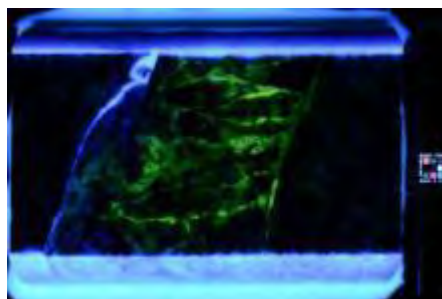


図 6.2.5-2 研削深さ 10mm の研削断面画像と X 線 CT 画像 (C-FRS 12.001 孔)

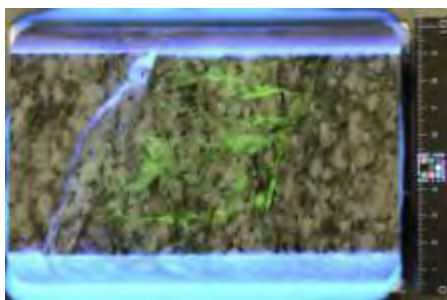
(a) 蛍光灯光源



(b) 紫外線光源



(c) 蛍光灯+紫外線光源



(d) X線 CT 画像 (WL:1700, WW:2000)

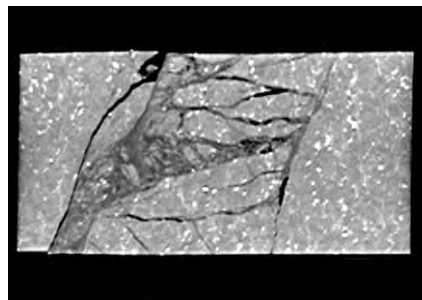
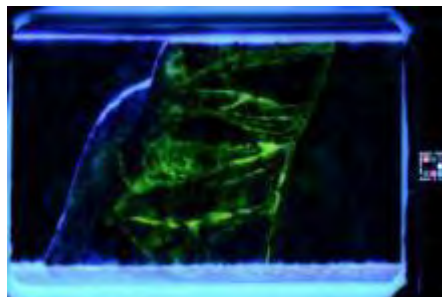


図 6.2.5-3 研削深さ 15mm の研削断面画像と X 線 CT 画像 (C-FRS 12.001 孔)

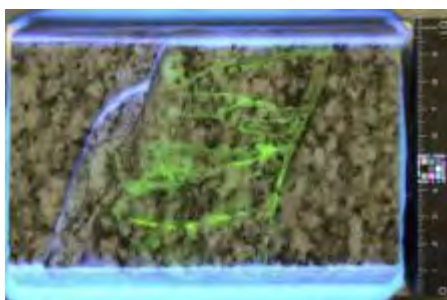
(a) 蛍光灯光源



(b) 紫外線光源



(c) 蛍光灯+紫外線光源



(d) X線 CT 画像 (WL:1700, WW:2000)

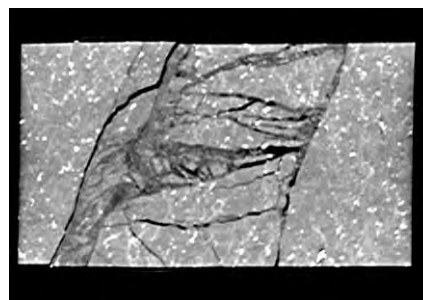
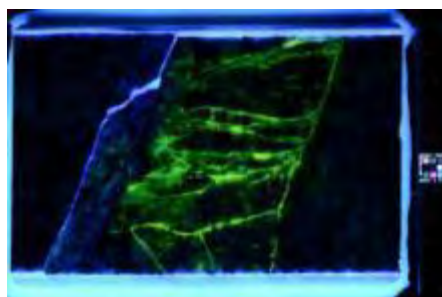


図 6.2.5-4 研削深さ 20mm の研削断面画像と X 線 CT 画像 (C-FRS 12.001 孔)

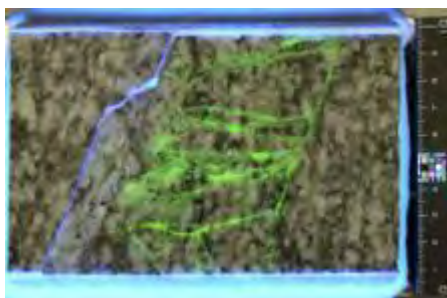
(a) 蛍光灯光源



(b) 紫外線光源



(c) 蛍光灯+紫外線光源



(d) X線 CT 画像 (WL:1700, WW:2000)

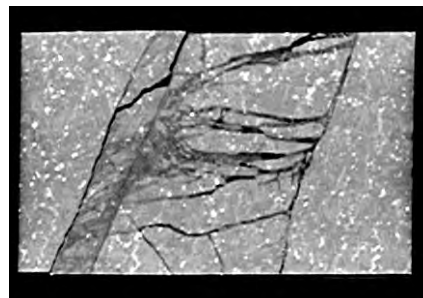
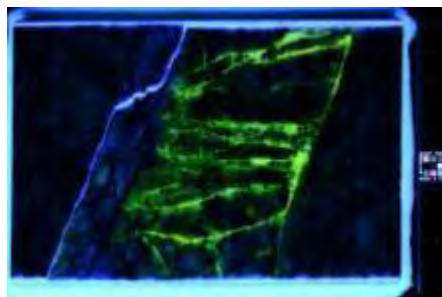


図 6.2.5-5 研削深さ 25mm の研削断面画像と X 線 CT 画像 (C-FRS 12.001 孔)

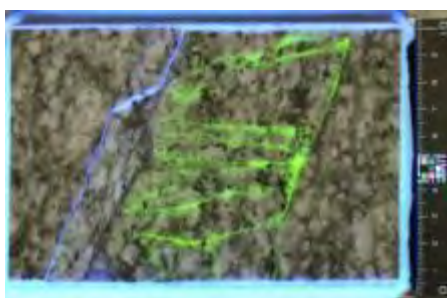
(a) 蛍光灯光源



(b) 紫外線光源



(c) 蛍光灯+紫外線光源



(d) X線 CT 画像 (WL:1700, WW:2000)

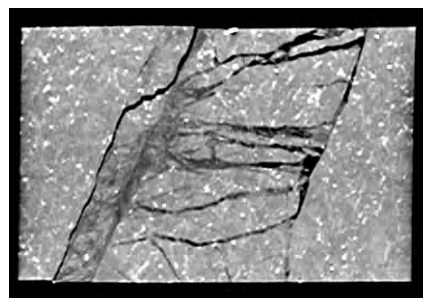
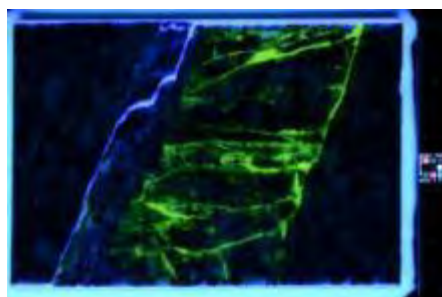


図 6.2.5-6 研削深さ 30mm の研削断面画像と X 線 CT 画像 (C-FRS 12.001 孔)

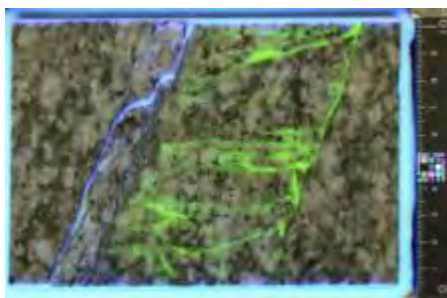
(a) 蛍光灯光源



(b) 紫外線光源



(c) 蛍光灯+紫外線光源



(d) X線 CT 画像 (WL:1700, WW:2000)

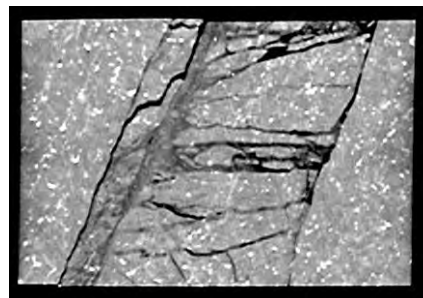
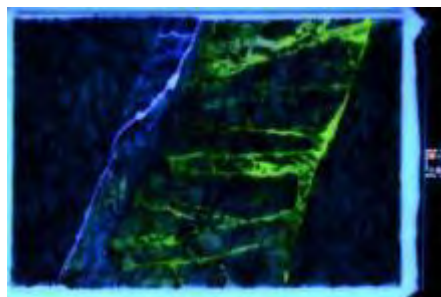


図 6.2.5-7 研削深さ 35mm の研削断面画像と X 線 CT 画像 (C-FRS 12.001 孔)

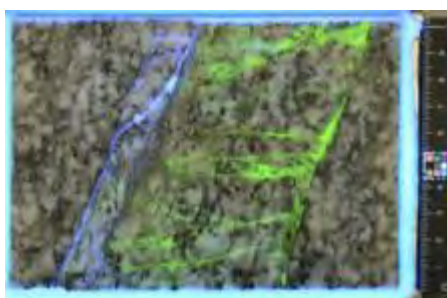
(a) 蛍光灯光源



(b) 紫外線光源



(c) 蛍光灯+紫外線光源



(d) X線 CT 画像 (WL:1700, WW:2000)

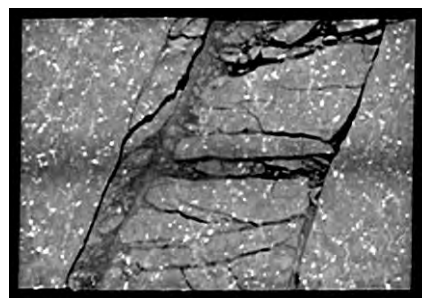


図 6.2.5-8 研削深さ 40mm の研削断面画像と X 線 CT 画像 (C-FRS 12.001 孔)

研削の終了直前になると、図 6.2.5-9 に示すように、岩石基質部での青色の発光が目立つようになった。これは、岩石コアと鉄板を接着する際に使用した接着剤に青色に蛍光する物質が混入されているため、岩石コアの厚みが薄くなると、この青色の光が岩石内部を透過したか、岩石内部にこの接着剤が浸透し、それに伴って岩石基質部が青色に発光したことが考えられる。鉄板との接着面から数ミリ程度の研削面は観察対象から除外するか、その他の研削面とは違う画像処理を施すことが必要であると考えられる。

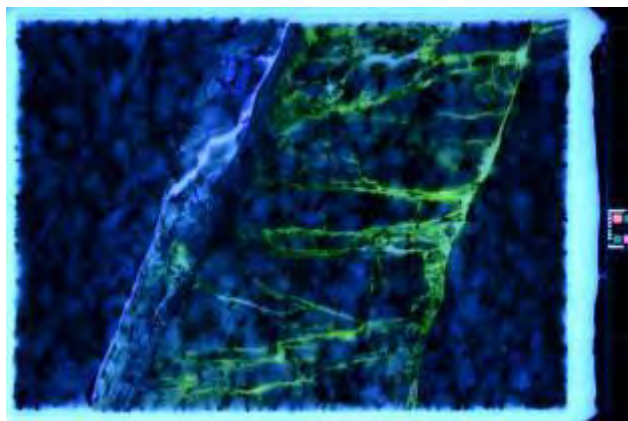


図 6.2.5-9 研削最終断面の紫外線蛍光画像

レジンの岩石基質部への浸潤状況を観察した。図 6.2.5-10 は研削深さ 4mm、図 6.2.5-11 は研削深さ 14mm、図 6.2.5-12 は研削深さ 34mm の画像から抽出したものである。また、左側の画像が蛍光灯光源下で撮影したものであり、右側の画像が紫外線光源下で撮影したものである。これらの画像は長辺が 45.63mm、短辺が 34.2mm の画像であり、蛍光灯光源下の画像は、鉱物の状況を見やすくするために、輝度を撮影時の設定から 1 段下げ、紫外線光源下の画像は、基質部へのレジンの浸潤を際立たせるために、撮影時の設定から 2 段上げている。その結果、昨年度報告した顕微鏡によるレジンの調査結果と類似した結果が得られた。割れ目面近傍に黒雲母が存在する場合、それがレジンの浸潤のバリアとなっていること、幅の狭い割れ目のほとんどが鉱物粒子を横切って進展している粒間クラックであること、粒間クラックから鉱物粒子内に存在する粒内クラックにレジンが浸潤していること、浸潤している箇所が間隙率の高い長石に多いこと、密なカタクラサイトにはレジンが浸潤していかないことなどが確認できる。また、一部にはレジンの浸潤のバリアであった黒雲母にもレジンの浸潤が認められる箇所が存在することも確認できる。

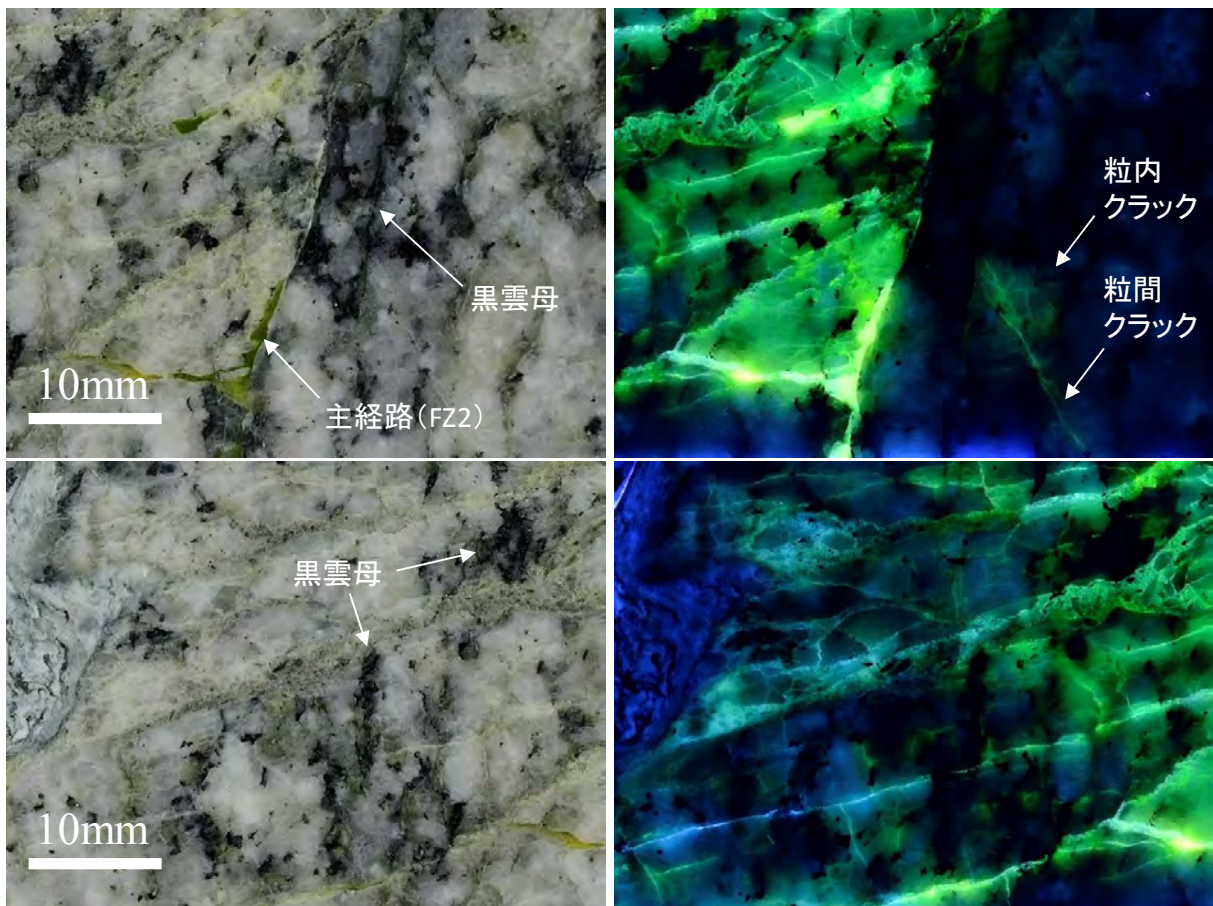


図 6.2.5-10 y=4mm の研削面の拡大写真 (C-FRS 12.001 孔)

(上段：主経路、下段：主経路に交差するせん断割れ目)

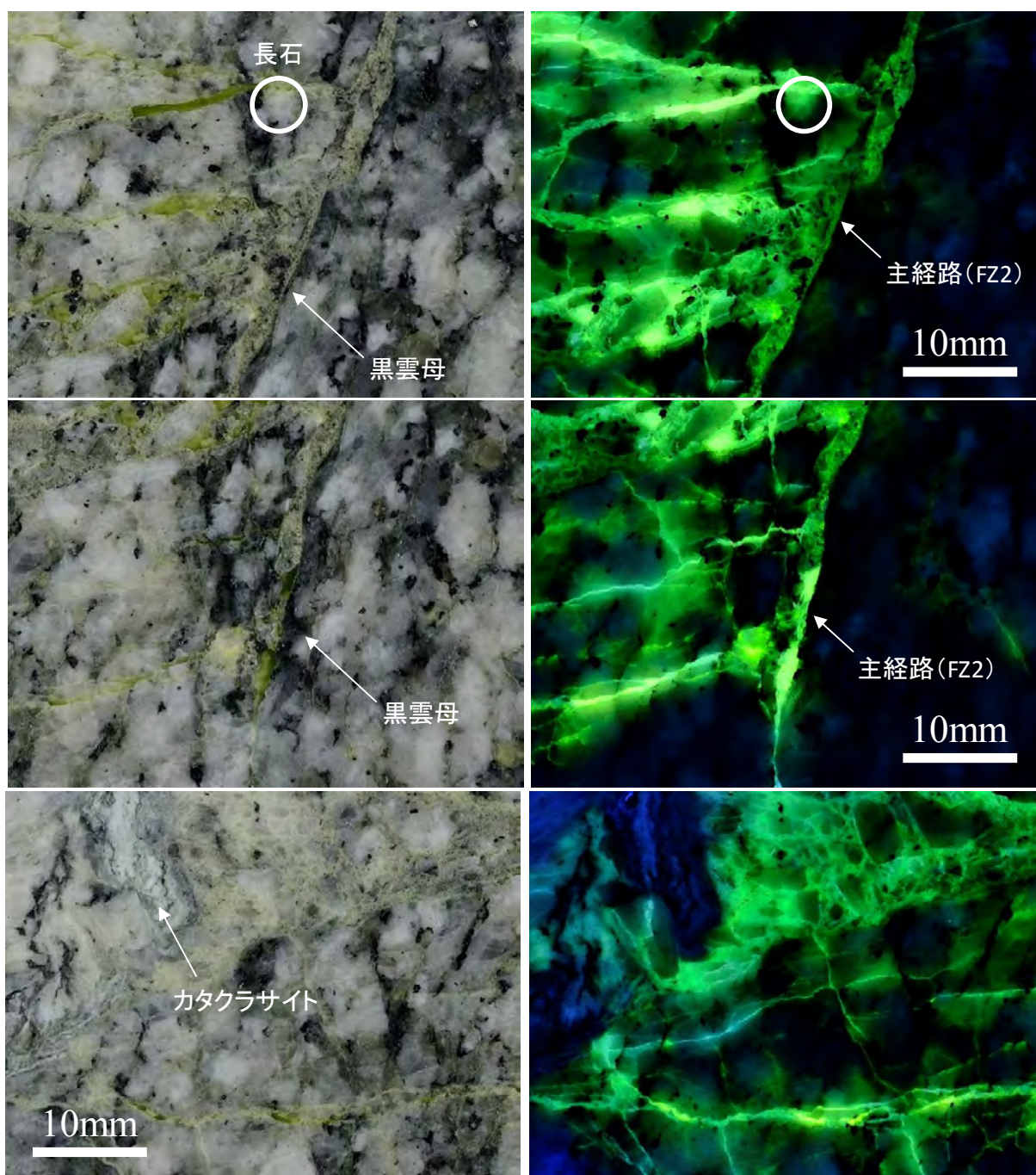


図 6.2.5-11 y=14mm の研削面の拡大写真 (C-FRS 12.001 孔)
 (上段・中絶：主経路、下段：主経路に交差するせん断割れ目)

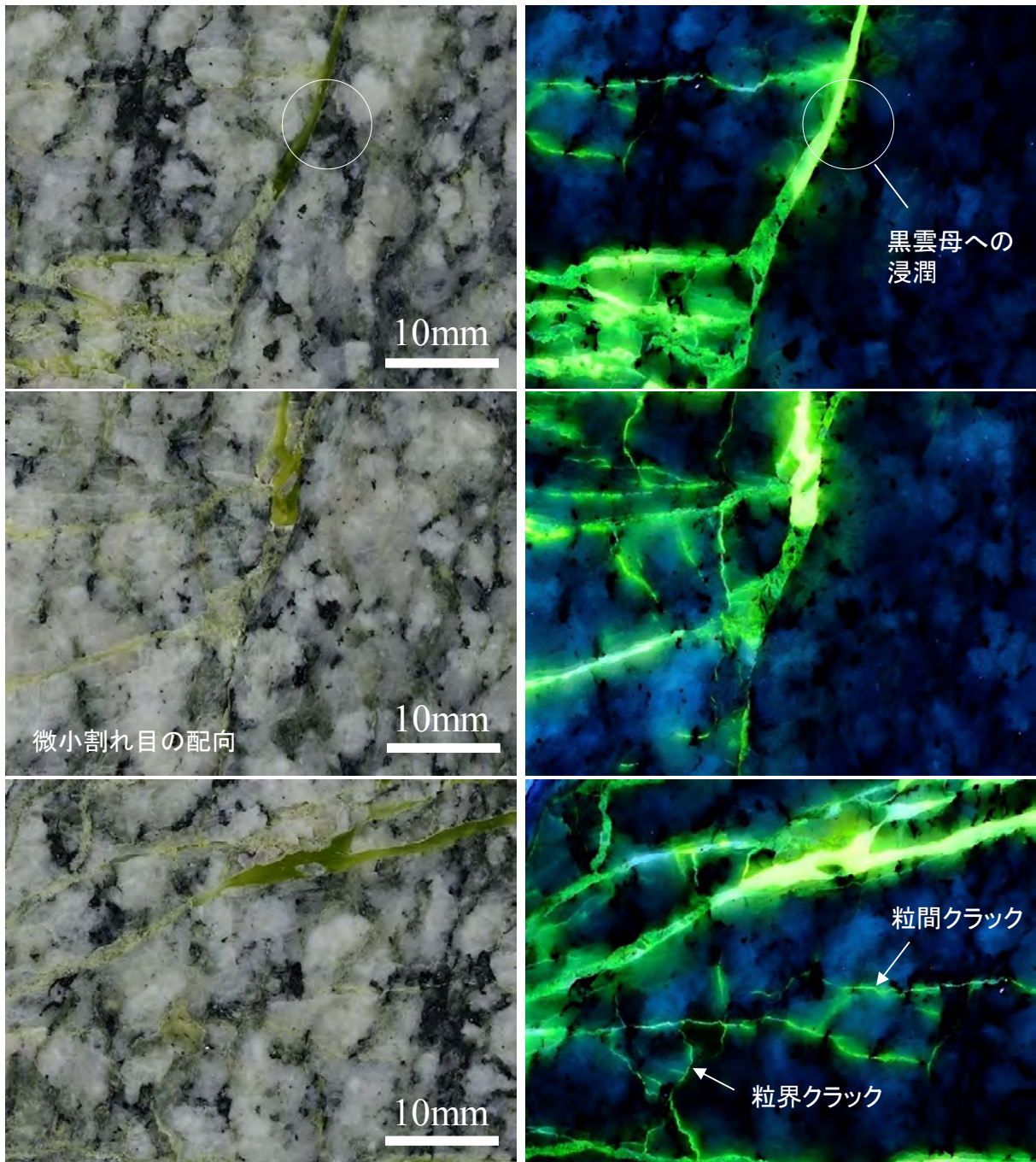


図 6.2.5-12 y=34mm の研削面の拡大写真 (C-FRS 12.001 孔)

(上段・中絶：主経路、下段：主経路に交差するせん断割れ目)

1mm 間隔の研削で得られた研削面画像を用いて MPR (Multi Planar Reconstruction) 画像を作成した。図 6.2.5-13 に蛍光灯光源下、図 6.2.5-14 に紫外線光源下、図 6.2.5-15 に蛍光灯+紫外線光源下の MPR 画像を示す。また、参考のために、X 線 CT 画像の MPR 画像を図 6.2.5-16 に示す。この X 線 CT 画像の MPR 画像は、研削面画像の研削間隔に合わせてスライス間隔 1.0mm で作成したものである。図

中の z 軸は掘削方向と同じ向きを示している。それぞれ、中央に配置された画像が研削断面画像であり、右および下に配置された画像は、中央の画像に付記した黄色の線上の断面画像である。1mm 間隔の研削断面画像を重ね合わせて作成したため、割れ目と岩石基質部との境界などにジャギー（階段状のギザギザ）が多少目立つが、各断面でのレジンの充填状況を詳細に確認することができる。また、岩石コアの表面にあった二次レジンは岩石コア部と周辺との境界を際立たせており（xy 断面）、研削の際は、この部分が剥離しないように慎重に研削することが望ましいものと思われる。yz 断面画像では z 軸方向に横筋が見られるが、これは、カメラスタンドに岩石を設置した際のずれではなく、露出の異なる画像が混在しているためである。シャッタースピード、絞り値、ISO 感度以外に、測光モード（カメラに内蔵された測光センサーで被写体の明るさを測る方法）の設定が露出に影響しているものと考えられ、この点に関しては今後の課題としたい。

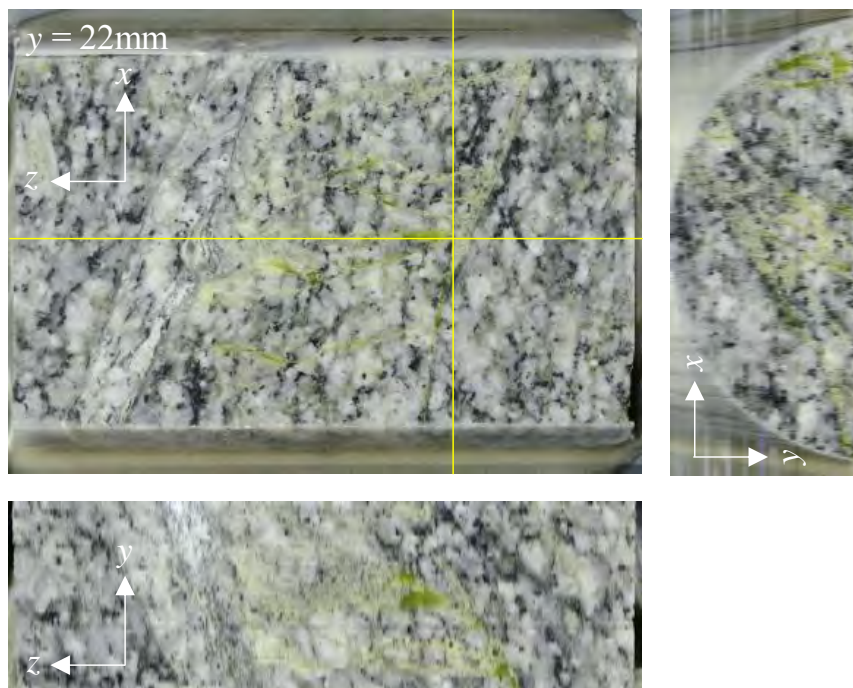


図 6.2.5-13 研削断面画像から作成した割れ目間隙の MPR 画像
(C-FRS 12.001 孔, 蛍光灯光源)

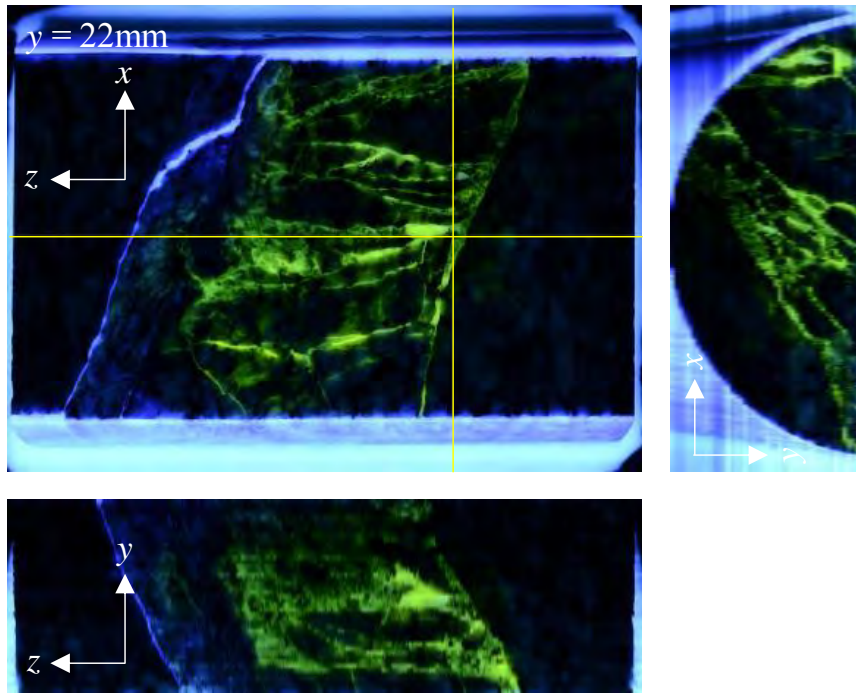


図 6.2.5-14 研削断面画像から作成した割れ目間隙の MPR 画像
(C-FRS 12.001 孔, 紫外線光源)

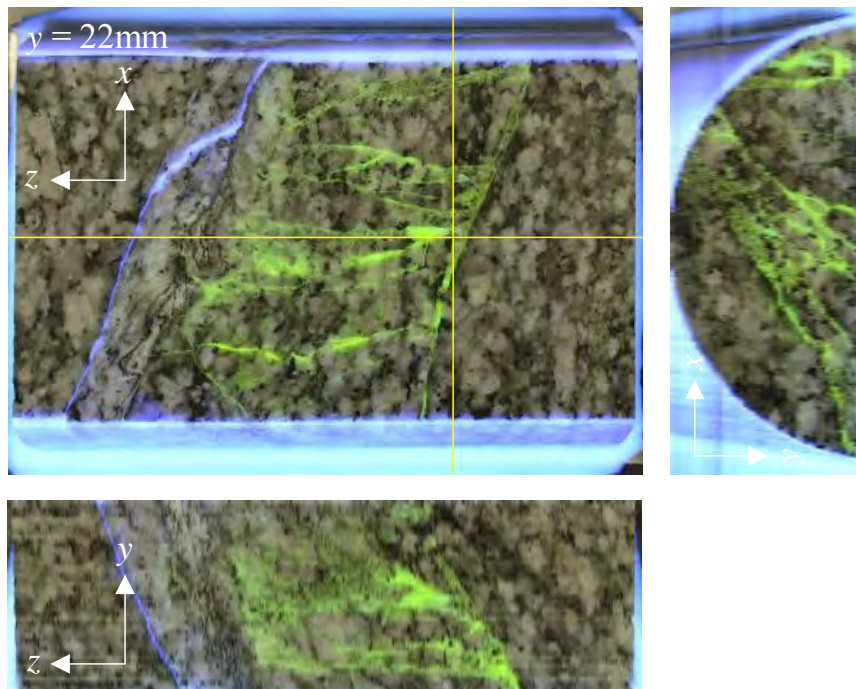


図 6.2.5-15 研削断面画像から作成した割れ目間隙の MPR 画像
(C-FRS 12.001 孔, 蛍光灯+紫外線光源)

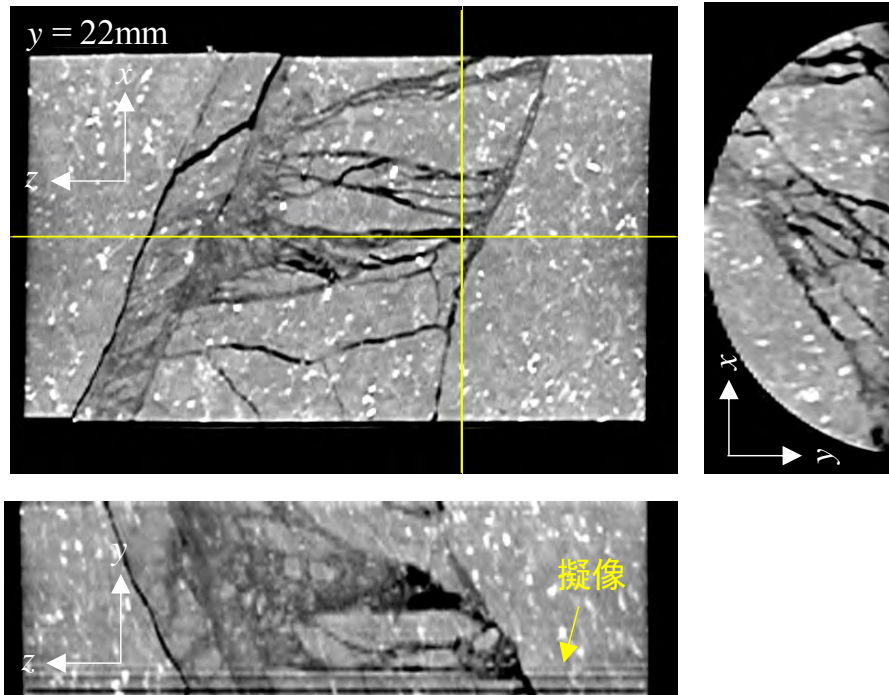


図 6.2.5-16 割れ目間隙の X 線 CT 画像の MPR 画像
 (C-FRS 12.001 孔、スライス厚 : 0.5mm、スライス間隔 : 1.0mm)

1mm 間隔の研削で得られた研削面画像から一次レジンの領域だけを抽出し、三次元画像を作成した。図 6.2.5-17 に紫外線光源下、図 6.2.5-18 に蛍光灯+紫外線光源下の三次元画像を示す。また、参考のために、X 線 CT 画像の三次元画像を図 6.2.5-19 に示す。なお、座標系は研削面画像に合わせている。前述したように、一次レジンは割れ目沿いの岩石基質部や粒内クラックに浸潤しているため、その箇所も蛍光する。したがって、紫外線光源下の画像から作成した三次元画像は、その箇所も割れ目として識別されてしまう。一方、蛍光灯+紫外線光源下のものは、これらの箇所での蛍光が弱まるため、紫外線光源下のものに比べてレジンの浸潤の影響が目立たない。X 線 CT 三次元画像では、この浸潤の影響を受けないので割れ目の形状が鮮明であるが、一次レジンと二次レジンは密度差が殆ど無いため、二次レジンが充填された割れ目も画像に表示されてしまっている。それぞれにメリット・デメリットが存在するため、現状では、それぞれを見比べながら、割れ目の三次元的な分布を把握する必要があるものと思われる。

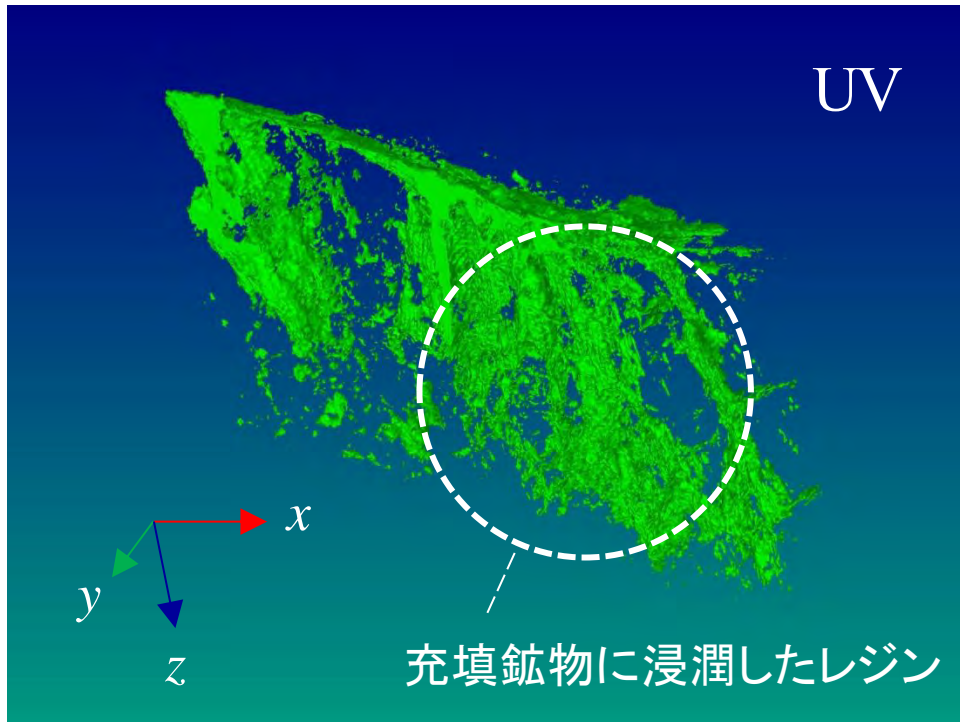


図 6.2.5-17 研削断面画像から作成した割れ目間隙の三次元画像
(C-FRS 12.001 孔、紫外線光源)

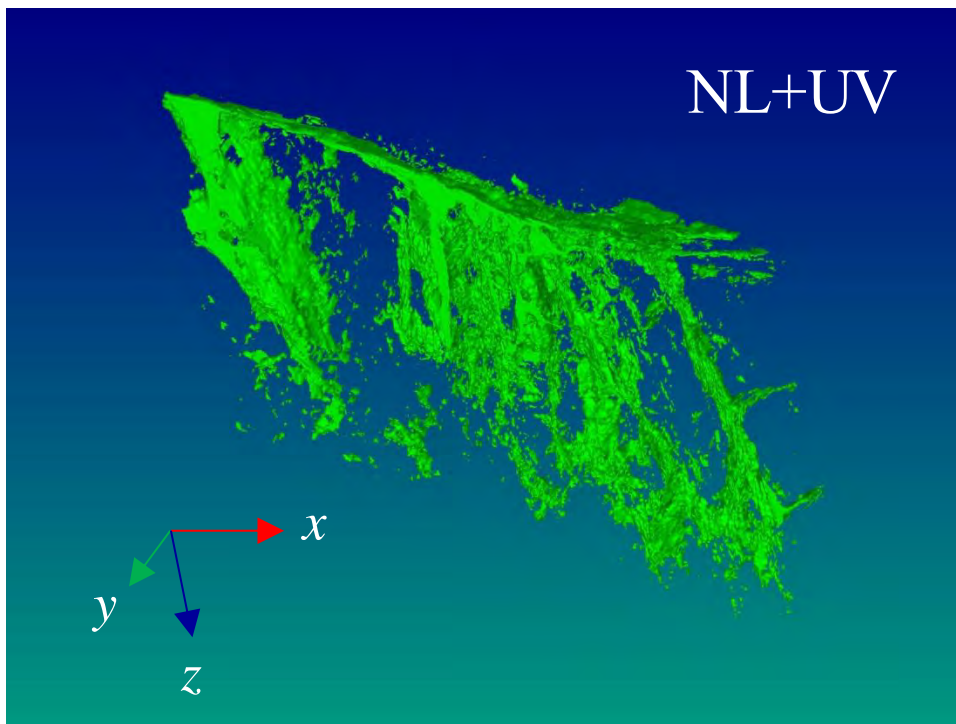


図 6.2.5-18 研削断面画像から作成した割れ目間隙の三次元画像
(C-FRS 12.001 孔、蛍光灯+紫外線光源)

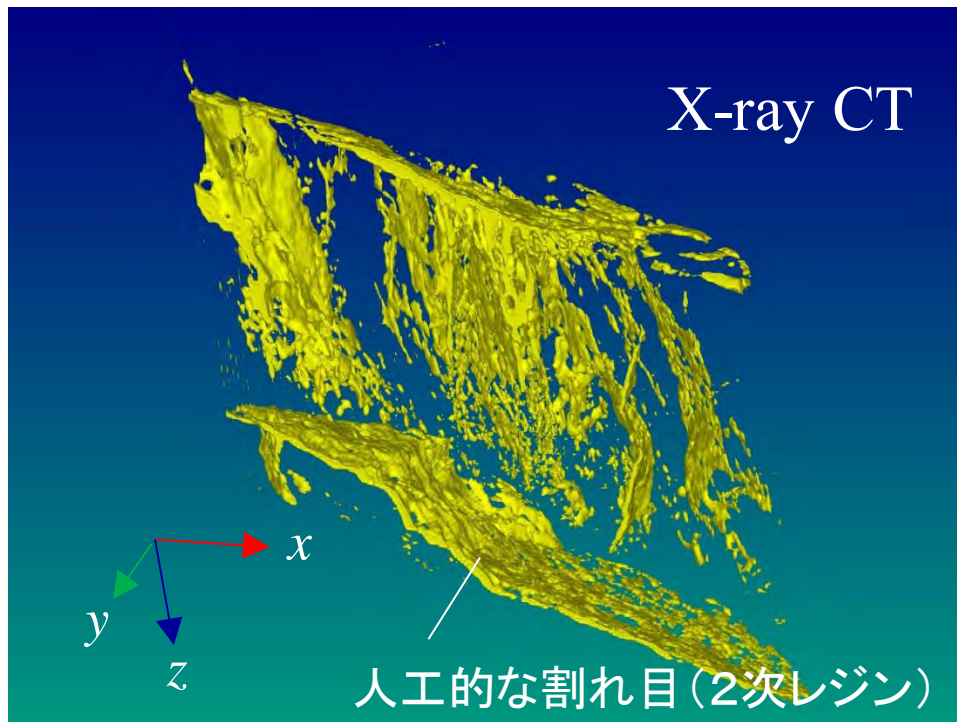


図 6.2.5-19 割れ目間隙の X 線 CT 三次元画像

(C-FRS 12.001 孔、スライス厚：0.5mm、スライス間隔：0.5mm)

(2) C-FRS 12.003 孔

平面研削と研削面の撮影の繰り返しで得られた画像とその研削面にほぼ対応した X 線 CT 画像を図 6.2.5-20～図 6.2.5-28 に示す（印刷用に実際の画像よりも解像度を落としている）。これらは、研削した断面の一部である。この岩石コアは、レジン注入孔に隣接したボーリング孔から採取されたものであり、画像上部の濃い白色の部分がレジン注入孔の一部である。

蛍光灯光源下で撮影した画像はカラーチャートを用いてホワイトバランスの補正を行っている。一次レジンが充填されている割れ目が、蛍光灯に含まれる微量の紫外線に反応してウラニンの蛍光色で発光していることが観察できる。C-FRS 12.001 孔の岩石コアに比べて、一次レジンの蛍光色の濃淡が激しいが、これは、一次レジンからウラニンが分離したことによるものであると考えられる。一次レジンからのウラニンの分離については後述する。

紫外線光源下で撮影した画像は、一次レジン、二次レジンともにそれぞれの蛍光色で鮮やかに発光しており、割れ目間隙の分布を鮮明に抽出できていることが分かる。また、蛍光灯光源下で撮影した画像からは識別できなかった幅の狭い割れ目の存在も確認できる。蛍光灯光源下で撮影した画像よりも一次レジンの濃淡の違いが際立っており、割れ目と基質部の境界や充填物の周囲が強く蛍

光していることが確認できる。C-FRS 12.001 孔での結果と同様に、割れ目沿いの岩石基質部へのレジンの浸潤による発光も確認することができる。

蛍光灯+紫外線光源下で撮影した画像は、紫外線光源下で撮影した画像と同様に割れ目間隙の分布を鮮明に識別できていることが分かる。また、紫外線光源下で撮影した画像と同様に、幅の狭い割れ目の存在を確認することができる。さらに、どの鉱物粒子を横切りながら進展していったかも確認することができる。

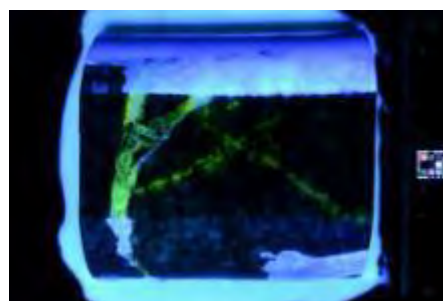
X線 CT 画像では、研削面画像と同様に割れ目の形態を鮮明に可視化できていることが分かる。紫外線光源下および蛍光灯+紫外線光源下で得た画像で確認された幅の狭い割れ目の一部も鮮明ではないが確認することができる。また、割れ目内に密度の低い充填物が存在することも確認できるが、これは細粒・未固結のガウジであると思われる。C-FRS 12.001 孔での結果と同様に、X線 CT 画像からは一次レジンと二次レジンの違いを判断することはできない。

研削深さが 45mm (図 6.2.5-28) の画像から、充填幅の大きい領域が薄い青色に発光していることが確認できる。これは、ウラニンが一次レジンから分離したことによって、ウラニンの蛍光強度が弱まり、代わりに岩石コアと鉄板の接着に用いた接着剤に含まれる蛍光剤の蛍光が検出されたためであると考えられる。

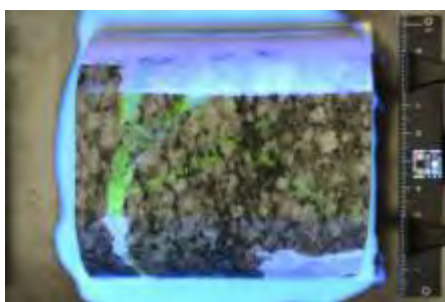
(a) 蛍光灯光源



(b) 紫外線光源



(c) 蛍光灯+紫外線光源



(d) X線 CT 画像 (WL:1700, WW:2000)

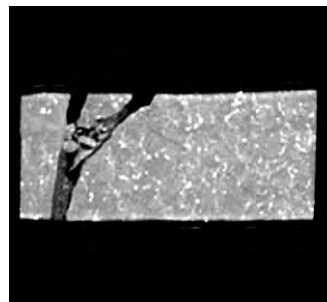
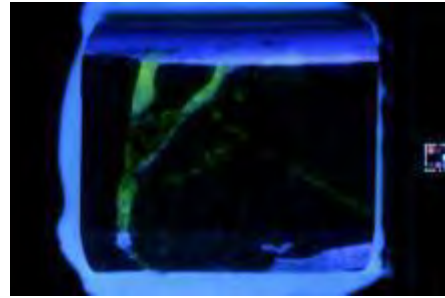


図 6.2.5-20 研削深さ 5mm の研削断面画像と X線 CT 画像 (C-FRS 12.003 孔)

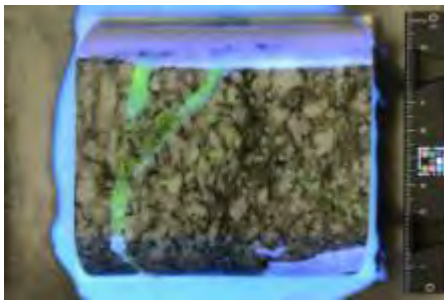
(a) 蛍光灯光源



(b) 紫外線光源



(c) 蛍光灯+紫外線光源



(d) X線 CT画像 (WL:1700, WW:2000)

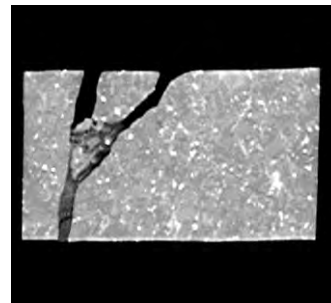
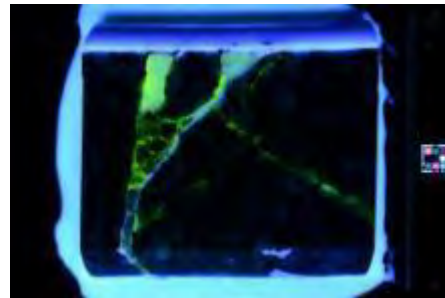


図 6.2.5-21 研削深さ 10mm の研削断面画像と X線 CT 画像 (C-FRS 12.003 孔)

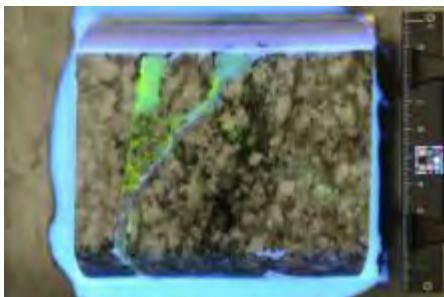
(a) 蛍光灯光源



(b) 紫外線光源



(c) 蛍光灯+紫外線光源



(d) X線 CT画像 (WL:1700, WW:2000)

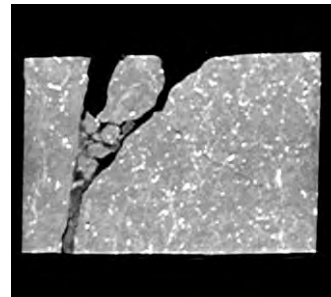
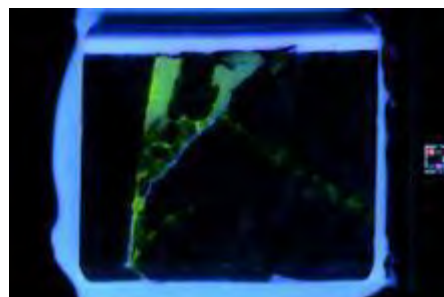


図 6.2.5-22 研削深さ 15mm の研削断面画像と X線 CT 画像 (C-FRS 12.003 孔)

(a) 蛍光灯光源



(b) 紫外線光源



(c) 蛍光灯 + 紫外線光源



(d) X線 CT 画像 (WL:1700, WW:2000)

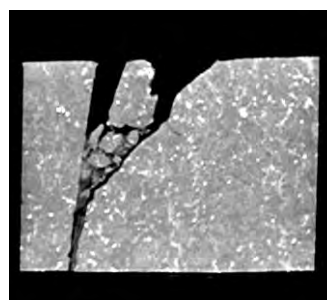
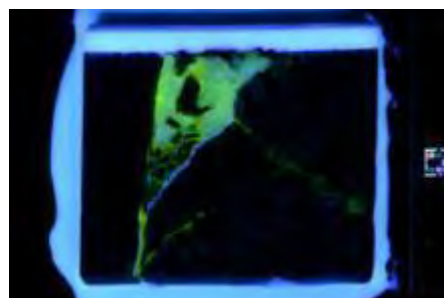


図 6.2.5-23 研削深さ 20mm の研削断面画像と X 線 CT 画像 (C-FRS 12.003 孔)

(a) 蛍光灯光源



(b) 紫外線光源



(c) 蛍光灯 + 紫外線光源



(d) X線 CT 画像 (WL:1700, WW:2000)

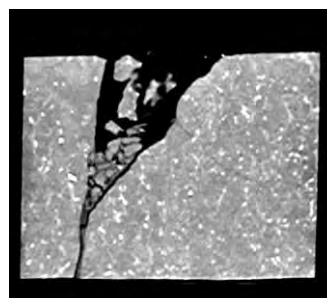
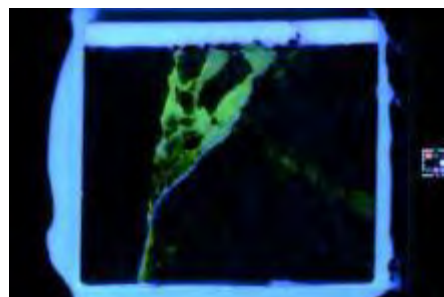


図 6.2.5-24 研削深さ 25mm の研削断面画像と X 線 CT 画像 (C-FRS 12.003 孔)

(a) 蛍光灯光源



(b) 紫外線光源



(c) 蛍光灯 + 紫外線光源



(d) X線 CT 画像 (WL:1700, WW:2000)

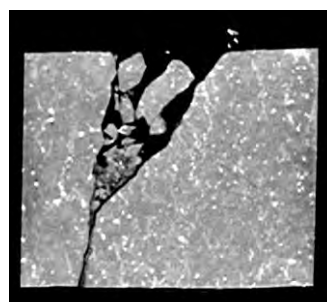
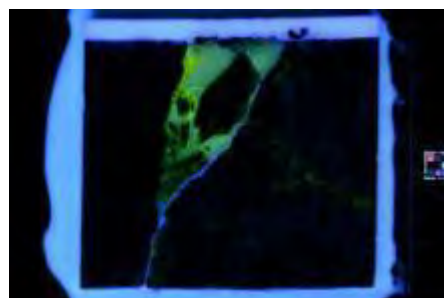


図 6.2.5-25 研削深さ 30mm の研削断面画像と X 線 CT 画像 (C-FRS 12.003 孔)

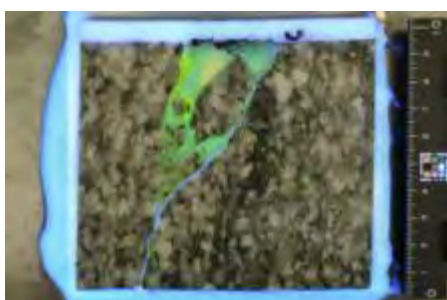
(a) 蛍光灯光源



(b) 紫外線光源



(c) 蛍光灯 + 紫外線光源



(d) X線 CT 画像 (WL:1700, WW:2000)

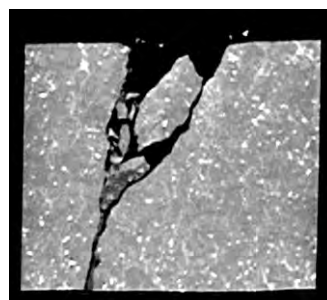
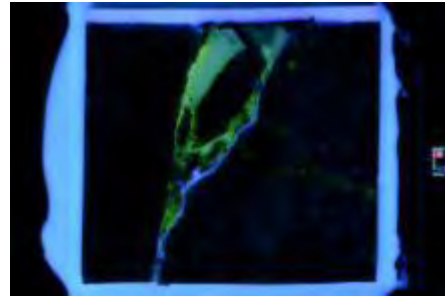


図 6.2.5-26 研削深さ 35mm の研削断面画像と X 線 CT 画像 (C-FRS 12.003 孔)

(a) 蛍光灯光源



(b) 紫外線光源



(c) 蛍光灯 + 紫外線光源



(d) X線 CT 画像 (WL:1700, WW:2000)

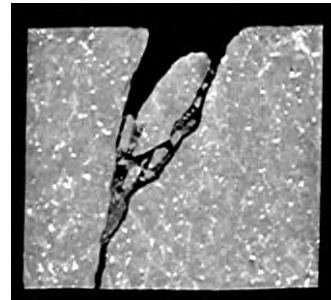
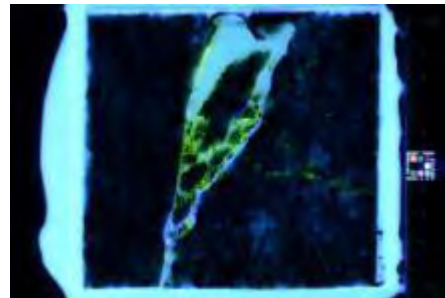


図 6.2.5-27 研削深さ 40mm の研削断面画像と X 線 CT 画像 (C-FRS 12.003 孔)

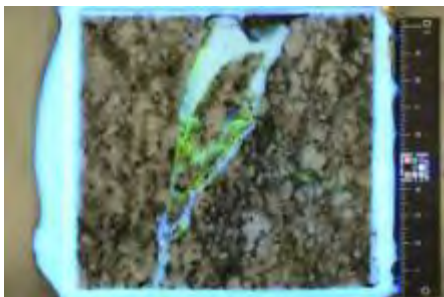
(a) 蛍光灯光源



(b) 紫外線光源



(c) 蛍光灯 + 紫外線光源



(d) X線 CT 画像 (WL:1700, WW:2000)

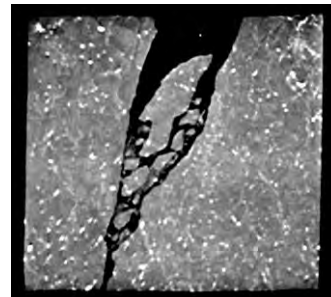


図 6.2.5-28 研削深さ 45mm の研削断面画像と X 線 CT 画像 (C-FRS 12.003 孔)

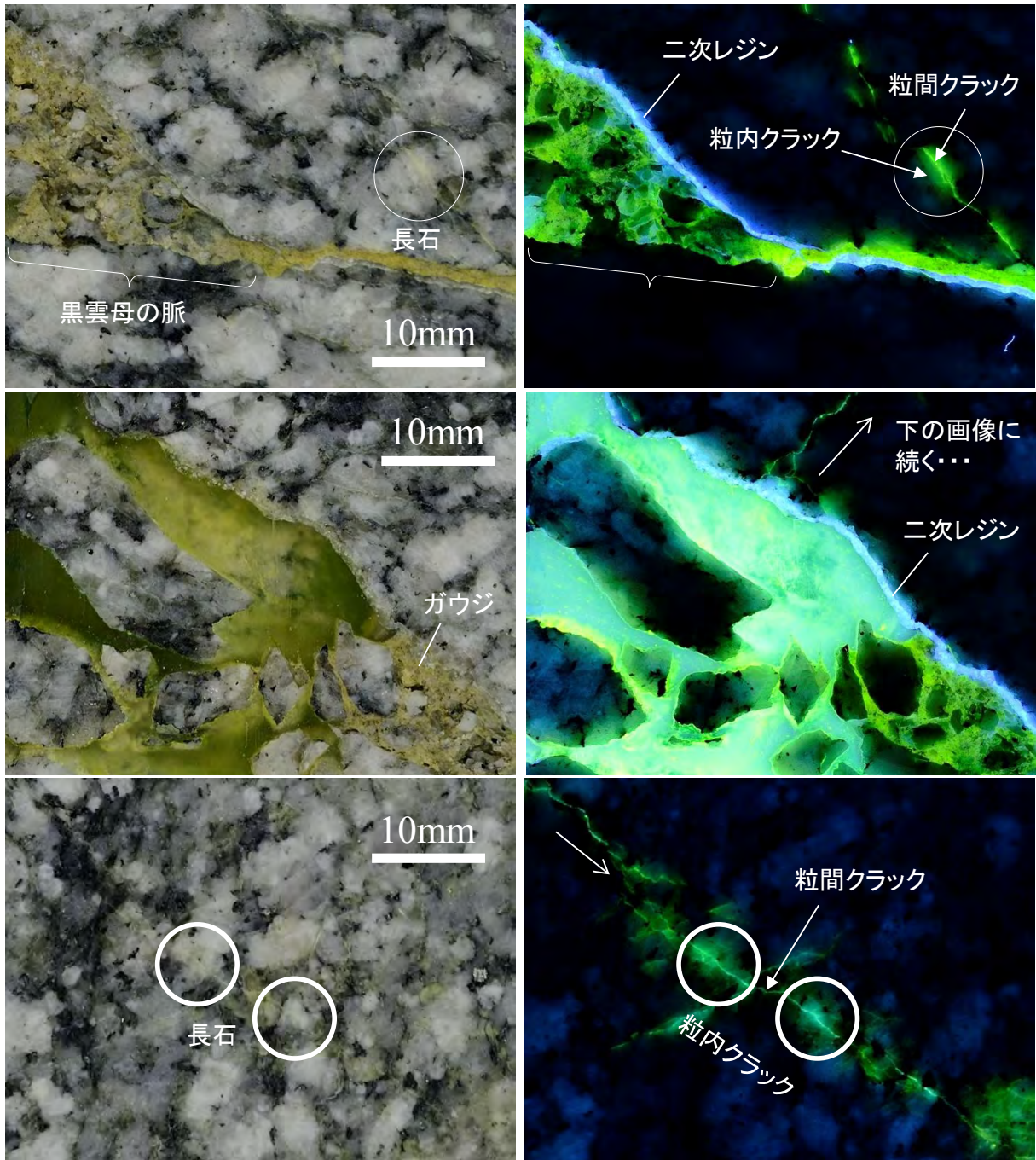


図 6.2.5-29 y=29mm の研削面の拡大写真 (C-FRS 12.003 孔)

(上段：主経路 (ガウジ充填部)、中断：主経路 (Wash-out 部)、下段：主経路から分岐した割れ目)

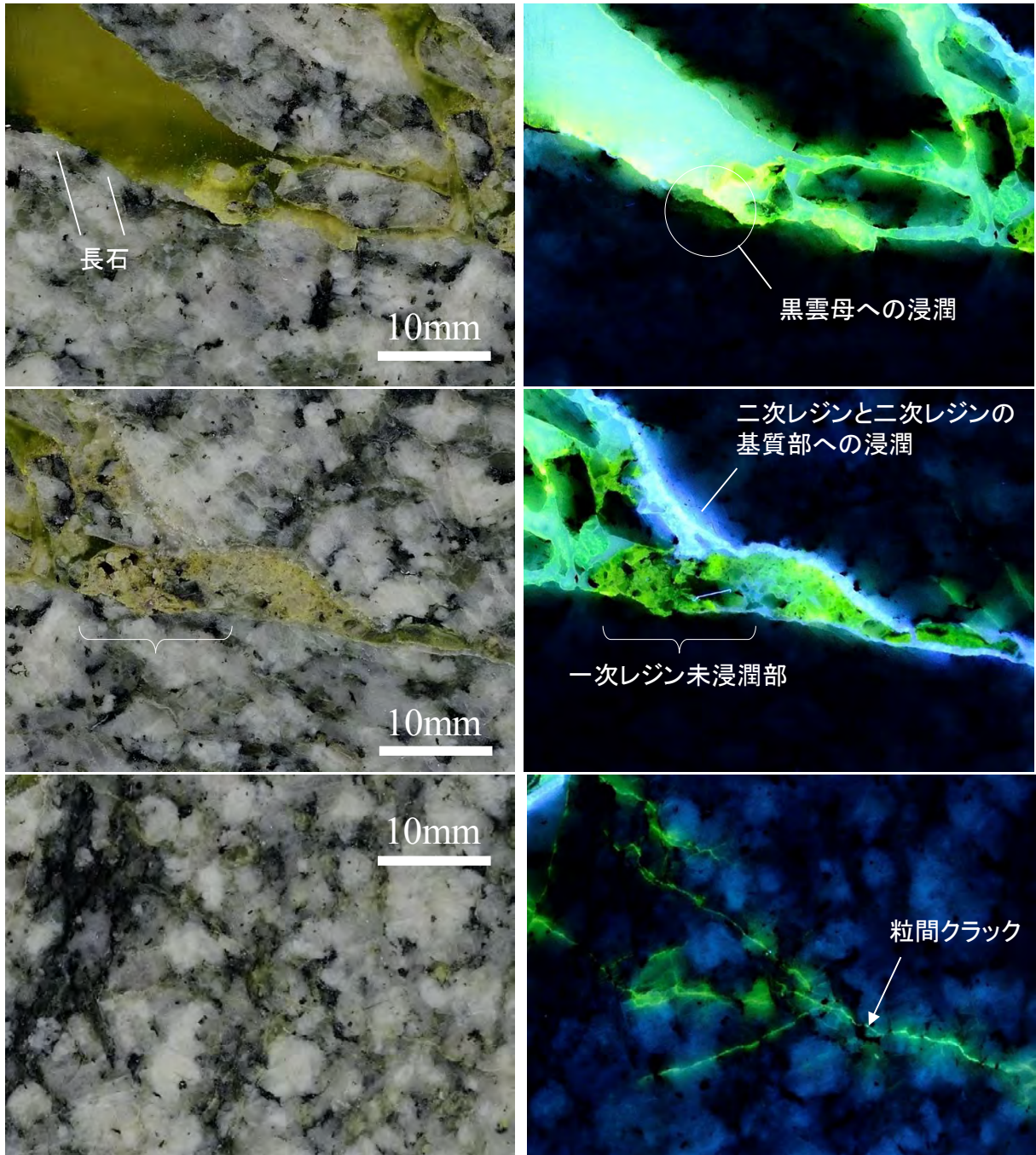


図 6.2.5-30 y=39mm の研削面の拡大写真 (C-FRS 12.003 孔)

(上段：主経路 (Washout 部)、中段：主経路 (ガウジ充填部)、下段：主経路から分岐した割れ目)

レジンの岩石基質部への浸潤状況を観察した。図 6.2.5-29 は研削深さ 29mm、図 6.2.5-30 は研削深さ 39mm の画像から抽出したものである。また、左側の画像が蛍光灯光源下で撮影したものであり、右側の画像が紫外線光源下で撮影したものである。これらの画像は長辺が 45.63mm、短辺が 34.2mm の画像である。蛍光灯光源下の画像は、鉱物の状況を見やすくするために、輝度を撮影時の設定から 1 段下げ、紫外線光源下の画像は、基質部へのレジンの浸潤を際立たせるために、撮影時の設定から 2 段上げている。C-FRS 12.001 孔の結果同様に、割れ目面近傍に黒雲母が存在した場合、それがレジン浸潤のバリアとなっていること、幅の狭い割れ目のほとんどが鉱物粒子を横切って進展している粒間クラックであること、粒間クラックから鉱物粒子内に存在する粒内クラックにレジンが浸潤していること、浸潤している箇所が間隙率の高い長石に多いこと、ガウジにレジンが浸潤していることなどが確認できる。また、一部にはレジン浸潤のバリアであった黒雲母にもレジンの浸潤が認められる箇所が存在することも確認できる。レジンが厚く充填されている箇所では、ウラニンの蛍光色が不均一に分布しており、割れ目面沿いや充填物の表面に色の濃いウラニウムが付着している様子が確認できる。

1mm 間隔の研削で得られた研削面画像を用いて MPR (Multi Planar Reconstruction) 画像を作成した。図 6.2.5-31 に蛍光灯光源下、図 6.2.5-32 に紫外線光源下、図 6.2.5-33 に蛍光灯+紫外線光源下の画像の MPR 画像を示す。また、参考のために、X 線 CT 画像の MPR 画像を図 6.2.5-34 に示す。この X 線 CT 画像の MPR 画像は、研削面画像の研削間隔に合わせてスライス間隔 1.0mm で作成したものである。図中の z 軸は掘削方向と同じ向きを示している。それぞれ、中央に配置した画像が研削断面画像であり、右および下に配置された画像は、中央の画像に付記した黄色の線上の断面画像である。1mm 間隔の研削面画像を重ね合わせて作成したため、割れ目と岩石基質部との境界などにジャギー（階段状のギザギザ）が多少目立つが、それぞれの断面から割れ目の状態や割れ目充填物の分布状況を詳細に確認することができる。また、紫外線光源下の xy 断面画像の境界が C-FRS 12.001 孔のものに比べて鮮明でないが、既出の研削断面画像から分かるように、岩石コアの表面に付着していた二次レジンの一部が剥がれていたために、境界が不鮮明になったものと考えられる。MPR 画像を作成する際に、岩石の領域だけを画像から切り出すなどの処理を行えば問題はないが、前述したように本研究のようなかまぼこ型の形状をしたコアを弧背部から研削していく場合は、この岩石コアの表面に付着した二次レジンが極力剥がれないようにすることが望ましい。

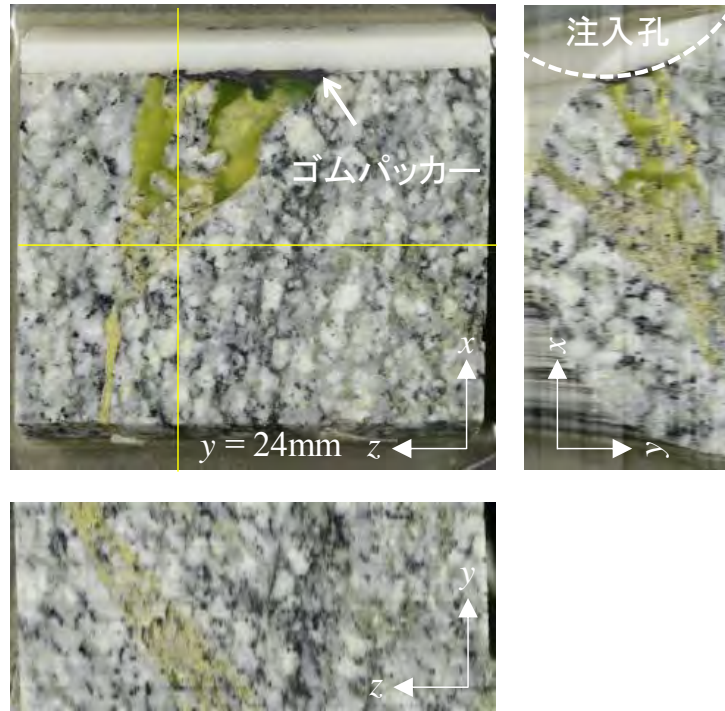


図 6.2.5-31 研削断面画像から作成した割れ目間隙の MPR 画像
(C-FRS 12.003 孔、蛍光灯光源)

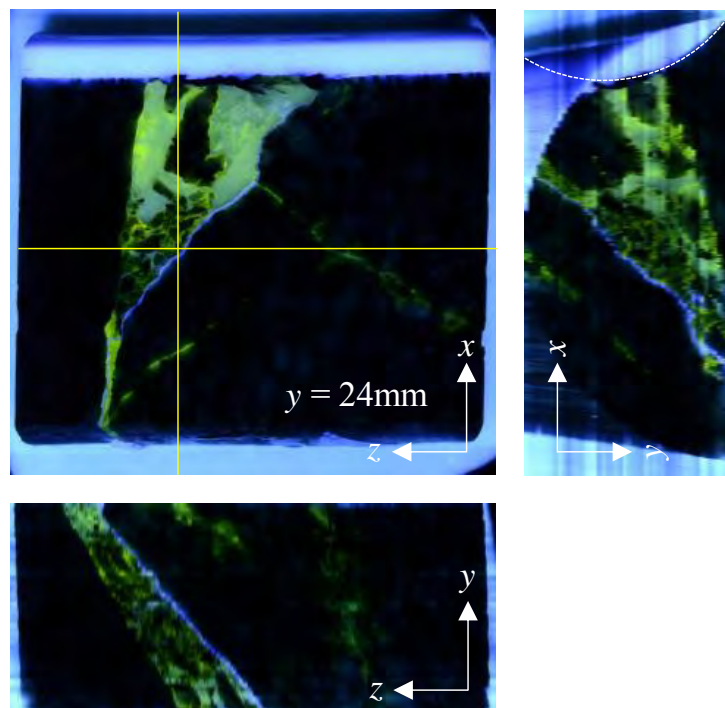


図 6.2.5-32 研削断面画像から作成した割れ目間隙の MPR 画像
(C-FRS 12.003 孔、紫外線光源)

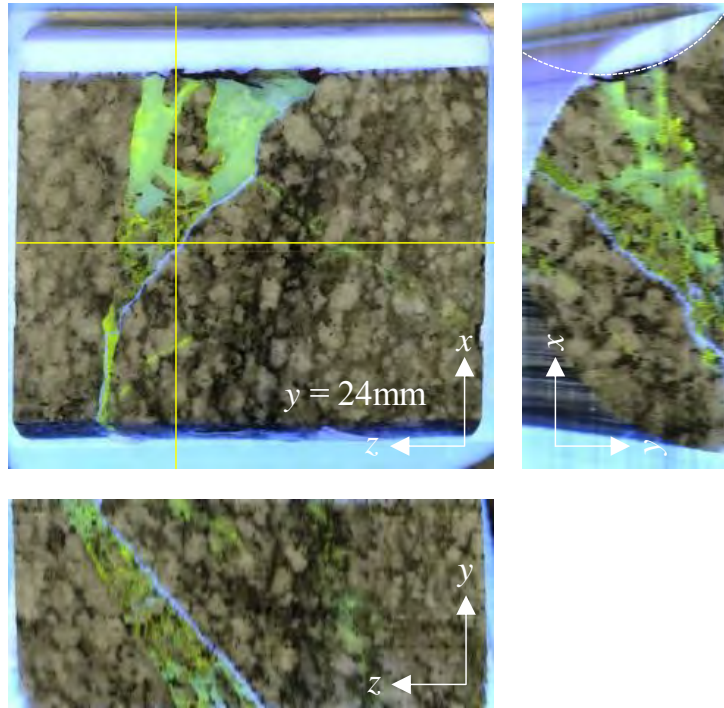


図 6.2.5-33 研削断面画像から作成した割れ目間隙の MPR 画像
(C-FRS 12.003 孔、蛍光灯+紫外線光源)

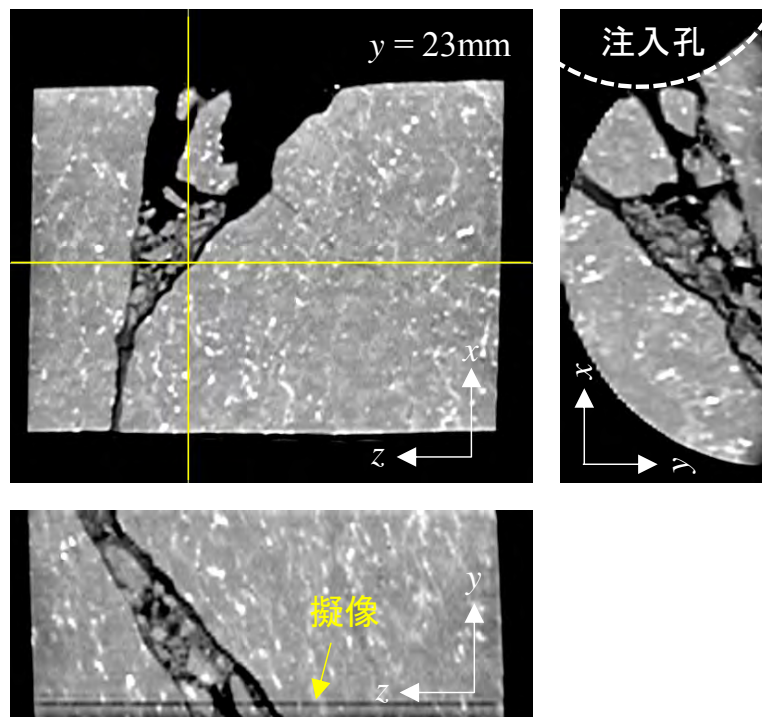


図 6.2.5-34 割れ目間隙の X 線 CT 画像の MPR 画像
(C-FRS 12.003 孔、スライス厚：0.5mm、スライス間隔：1.0mm)

1mm 間隔の研削で得られた研削面画像から一次レジンの領域だけを抽出し、三次元画像を作成した。図 6. 2. 5-35 に紫外線光源下、図 6. 2. 5-36 に蛍光灯+紫外線光源下の三次元画像を示す。また、参考のために、X 線 CT 画像の三次元画像を図 6. 2. 5-37 に示す。なお、座標系は研削面画像に合わせている。

研削断面画像から作成した三次元画像は、割れ目の主経路の分布に加えて、主経路から分岐した割れ目の分布も確認できる。しかし、C-FRS 12.003 孔のコアは、一次レジンのからのウラニンの分離が激しいコアであるため、紫外線光源下の画像から作成したものは、その箇所にレジンが充填されていないかのように表示されている。このウラニンの分離による影響に加えて、割れ目沿いの岩石基質部への一次レジンの浸潤による影響もあり、研削断面画像から作成した三次元画像は凹凸が激しい。蛍光灯+紫外線光源下のものも同様に、一次レジンのからのウラニンの分離による影響が確認できる。蛍光灯+紫外線光源下の画像では、画像の左上に紫外線光源下の画像ではなかった粒状の分布を確認できる。これは、蛍光灯+紫外線光源下の画像では岩石基質部も明るく表示されるため、岩石基質部に存在する一次レジンと同色のものを研削断面画像から抽出してしまったことによるものと考えられる。一方、X 線 CT 画像はこの浸潤の影響や蛍光色の濃淡に影響しないため、割れ目の形状がシャープであり、ウラニンの分離によるレジンの欠損もない。しかし、一次レジンと二次レジンには密度差が殆ど無いため、二次レジンも画像に表示されている。

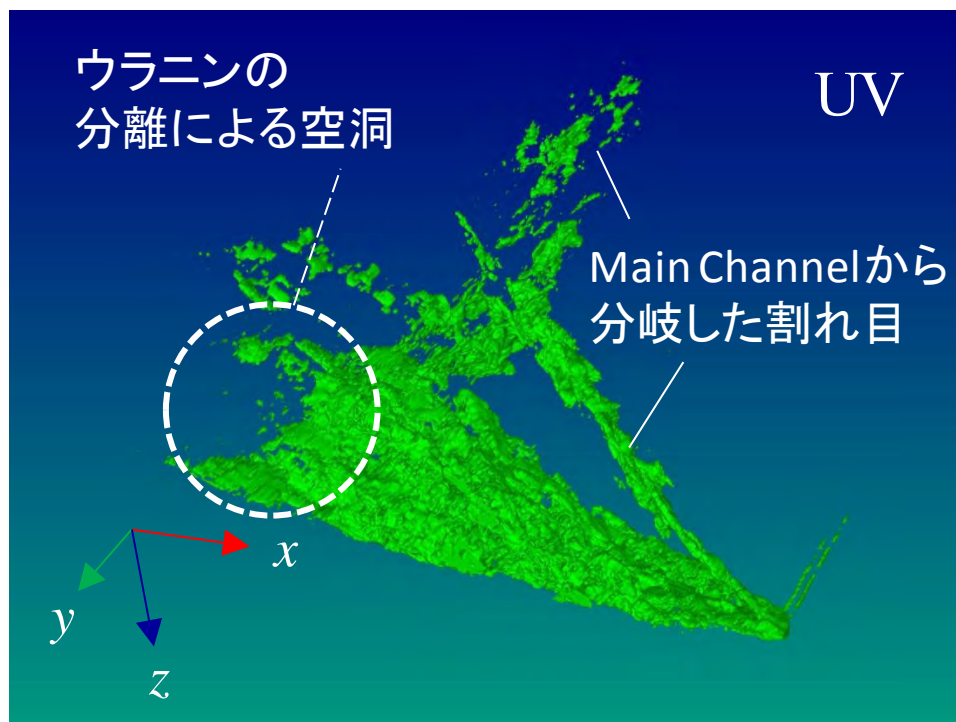


図 6. 2. 5-35 研削断面画像から作成した割れ目間隙の三次元画像

(C-FRS 12.003 孔、紫外線光源)

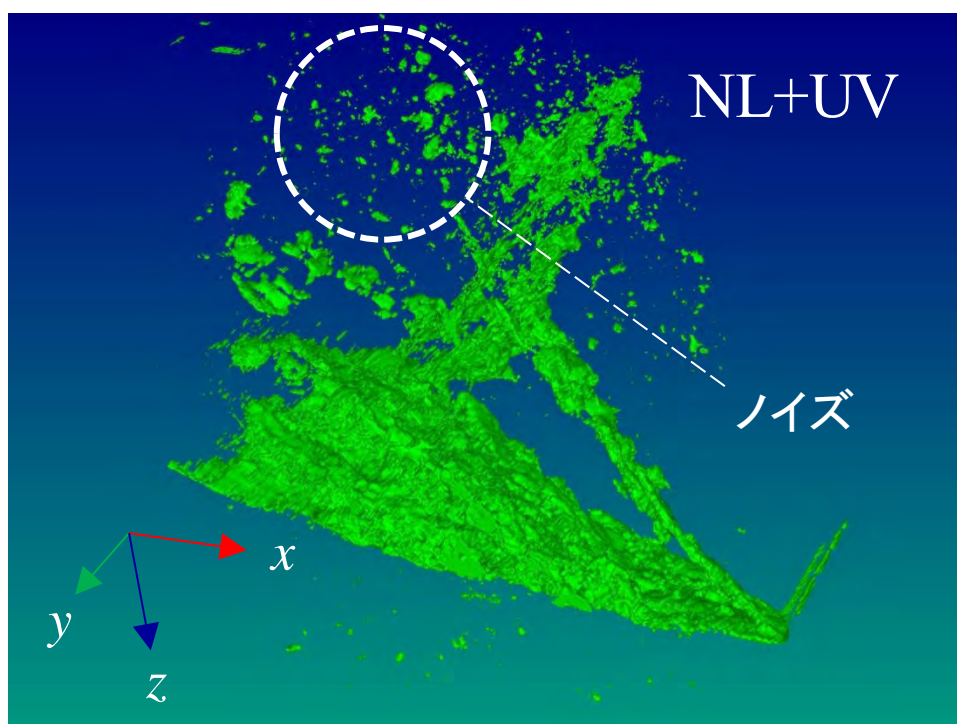


図 6. 2. 5-36 研削断面画像から作成した割れ目間隙の三次元画像
(C-FRS 12. 003 孔、蛍光灯+紫外線光源)

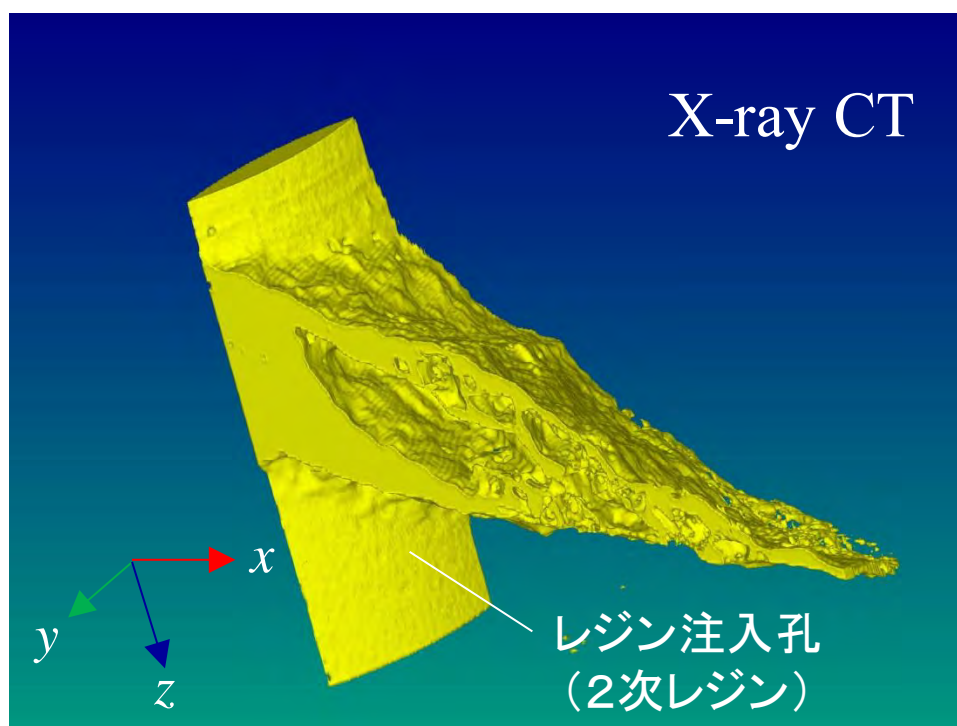


図 6. 2. 5-37 割れ目間隙の X 線 CT 三次元画像
(C-FRS 12. 003 孔、スライス厚：0. 5mm、スライス間隔：0. 5mm)

6.2.6 レジン充填幅の計測

研削断面画像からレジンの充填幅を計測した。計測には NIH (National Institute of Health) が開発したオープンソフトウェア「ImageJ」を用いた。具体的な計測手順は以下の通りである。

- 1) 全ての研削断面画像を ImageJ に読み込ませる (stack 画像)。
- 2) 画像内に写し込ませたスケールをもとに画像に実寸法の情報を組み込む。
- 3) 着目する割れ目が画面上でほぼ水平になるように画像を回転させる。
- 4) 5mm 間隔のグリッドを画像にオーバーラップ表示させる。
- 5) ラインツールを用いて着目する割れ目とグリッドが交差する箇所を手動で計測する。
- 6) 5) の作業を全ての研削断面画像で実施する。

図 6.2.6-1 に計測の概念図を示す。この画像は C-FRS 12.001 孔で得た画像の一部である。また、レジンの充填幅の計測位置を示す赤線は説明のために便宜上表示させたものである。

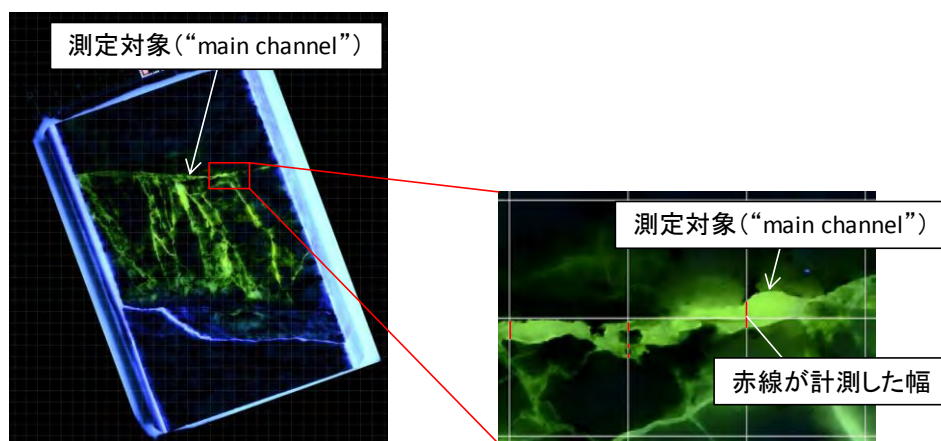


図 6.2.6-1 割れ目幅計測の概念図

C-FRS 12.001 孔では主経路である割れ目 (“main channel”) の開口幅を計測した。充填物を内包する割れ目や、“main channel” から分岐したせん断割れ目は計測対象から除外した。また、計測に用いた画像は紫外線光源下で撮影した画像を主として用いたが、割れ目から基質部へのレジンの浸潤が認められる箇所は、その部分が淡く発光するために識別が難しい。したがって、蛍光灯光源下で撮影した画像や、蛍光灯+紫外線光源下で撮影した画像でクロスチェックをしながら開口幅を計測した。

C-FRS 12.003 孔は、掘削やこれまでの水理試験等により孔壁の脆弱な部分が洗い流された (“Wash-out”) 箇所以外で開口した割れ目に一次レジンの充填が確認できなかったため、割れ目に介在するガウジの厚みを計測した。その際、一次レジンが浸潤していないガウジも確認されたが、その箇所も除外せず計測した。

C-FRS 12.001 孔の開口幅の頻度分布を図 6.2.6-2 に、累積頻度分布を図 6.2.6-3 に示す。計測点は

293点である。表 6.2.6-1 に開口幅の最小値、最大値、平均値、中央値、標準偏差、分散を示す。図 6.2.6-2 から開口幅分布が対数正規分布に類似した分布をしていることが分かる。図 6.2.6-3 から 1mm 以上の割れ目は全体の 30%を占めることが読み取れる。開口幅の平均値は 0.93mm であった。なお、過去に計測した C-FRS 12.001 孔を含む対象割れ目 FZ2 の平均開口幅は、高粘性流体注入試験で 1.4mm、ラドン濃度計測で 0.55~0.76mm であった。測定したコアが 1 つであり、” main channel ” の開口部のみを測定した結果であるので、これらの測定値との厳密な比較はできないが、単一割れ目ではない複雑な割れ目であっても、平均的な割れ目幅を見積もることが可能であると考えられる。

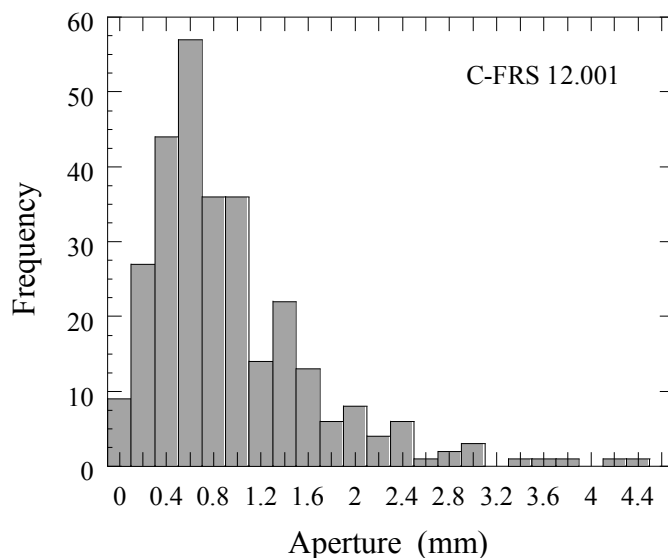


図 6.2.6-2 C-FRS12.001 孔で採取された岩石コアの割れ目開口幅の頻度分布

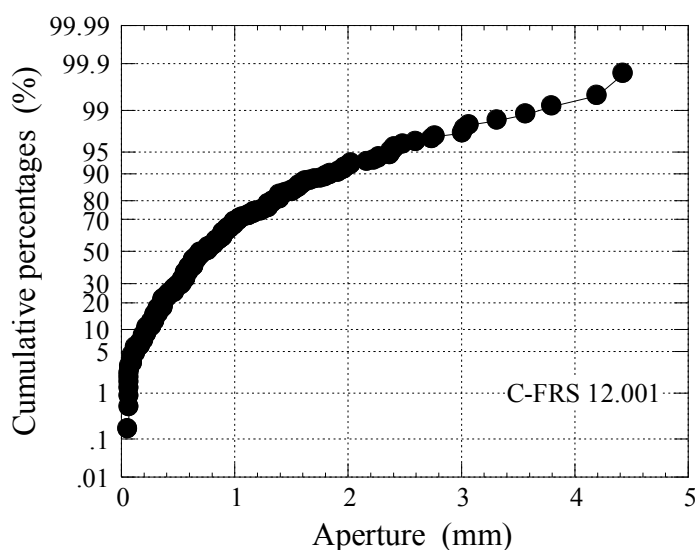


図 6.2.6-3 C-FRS12.001 孔で採取された岩石コアの割れ目開口幅の累積頻度分布

表 6.2.6-1 割れ目開口幅の統計

最小開口幅	0.06mm
最大開口幅	4.43mm
開口幅の平均値	0.93mm
開口幅の中央値	0.74mm
開口幅の標準偏差	0.72mm
開口幅の分散	0.52

C-FRS 12.003 孔のガウジ幅の頻度分布を図 6.2.6-4 に、累積頻度分布を図 6.2.6-5 に示す。計測点は 268 点である。表 6.2.6-2 にガウジ幅の最小値、最大値、平均値、中央値、標準偏差、分散を示す。図 6.2.6-4 からガウジ幅も対数正規分布に類似した分布をしていることが分かる。図 6.2.6-5 から 2mm 以上の幅を持つガウジが全体の 50% を占めることが読み取れる。ガウジ幅の平均値は 2.81mm であった。計測したコアが 1 つであることや、レジン注入孔に隣接した位置での計測結果であるため、議論はできないが、ガウジの幅は断層の変位量と密接な関係が有ることから、割れ目の開口幅だけでなく、充填物の幅も合わせて計測することは、透水性割れ目の地質学的解釈をする上で重要であると思われる。

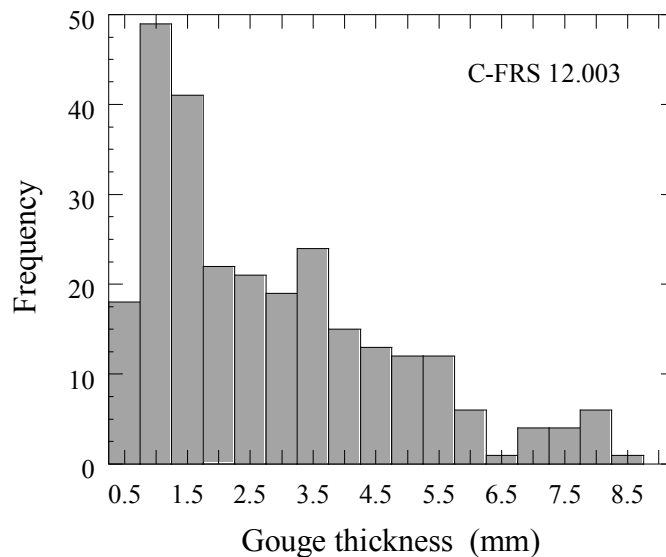


図 6.2.6-4 割れ目内のガウジ幅の頻度分布 (C-FRS12.003 孔)

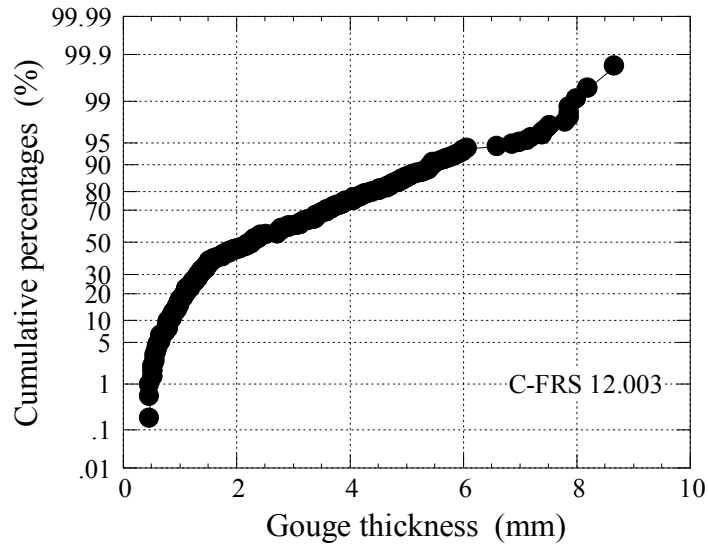


図 6.2.6-5 割れ目内のガウジ幅の累積頻度分布 (C-FRS12.003 孔)

表 6.2.6-2 割れ目内のガウジ幅の統計

最小値	0.47mm
最大値	8.67mm
ガウジ幅の平均値	2.81mm
ガウジ幅の中央値	2.27mm
ガウジ幅の標準偏差	1.92mm
ガウジ幅の分散	3.69

6.2.7 まとめ

スイスのグリムゼルテストサイトで掘削したボーリング孔で得た岩石コアに対して、平面研削と研削面の撮影を繰り返す手法を適用し、割れ目間隙の開口幅の測定および割れ目間隙の三次元可視化を行った。

C-FRS 12.001 孔の岩石コアの研削面画像から割れ目の開口幅を測定した結果、開口幅分布が対数正規分布に類似した分布をしていたことや、1mm 以上の割れ目は全体の 30% を占めることが分かった。また、開口幅の平均値は 0.93mm であり、これは過去に計測した高粘性流体注入試験で得られた平均開口幅 1.4mm、ラドン濃度計測で得られた平均開口幅 0.55~0.76mm に近い値であった。計測したコアが 1 つであること、”main channel” のみを計測した結果であること、割れ目面間の最短距離を計測した結果ではないので、これらの測定値との比較を議論することはできないが、本手法を用いれば、単一割れ目ではない複雑な割れ目であっても平均的な割れ目幅を見積もることが可能であると考えられる。C-FRS 12.003 孔の岩石コアの研削断面画像から割れ目に充填されたガウジ幅を測定した。ガウジ

幅も対数正規分布に類似した分布をしていることや、2mm以上の幅を持つガウジが全体の50%を占めることが分かった。また、ガウジ幅の平均値は2.81mmであった。計測したコアが1つであることやレジン注入孔に隣接した位置での計測結果であるため、これらが何を意味するのかわからないが、ガウジの幅は、断層の変位量と密接な関係が有ることから、割れ目の開口幅だけではなく、充填物の幅も合わせて計測することで、透水性割れ目の地質学的解釈や特性を理解する上で重要なデータが得られるものと考えられる。

研削面画像から作成したMPR (Multi Planar Reconstruction) 画像や三次元画像は、1mm間隔の粗さを反映したものではあったが、X線CT画像では困難であった幅の狭い割れ目の分布を抽出することができ、割れ目間隙の精密な可視化が可能であることが分かった。しかし、割れ目沿いの岩盤基質部へ浸潤したレジンや粒内クラックに浸潤したレジンが割れ目として識別され、単純な画像処理で三次元画像を構築した場合は、割れ目間隙の三次元分布が実態と異なることが課題として残った。この点に関しては、適切な画像処理を施すことにより解決できるものと思われる。

6.3 レジン材の選定および基礎的検討

6.3.1 レジン材の選定

割れ目間隙に充填させるレジン材は、広範囲かつ幅の狭い割れ目にも充填できる性能を有し、割れ目内が水で飽和した状態であっても良好に接着できることが望まれる。前述したように、国外サイトで使用したSika Injection-26は国内で調達することが困難であることから、Sika Injection-26と仕様が類似したレジン材を日本シーカ株式会社が製造・販売している製品の中から選定した。表6.3.1-1に本研究で用いたレジン材の性状を示す。一つは低粘度形のエポキシ樹脂系接着剤「エバーボンド EP-300」で可使用時間が150分と長い製品である。二つ目は超低粘度形のエポキシ樹脂系接着剤「エバーボンド EP-400」で微細な間隙への注入に優れた製品である。両製品ともに湿潤面への接着が可能でレジン材である。また、それぞれ一般用と冬用があり、一般用は春・夏・秋季(10℃~40℃)に使用され、冬用は冬季(5℃~20℃)に使用される。その他にも、水中や湿潤面への接着に優れているエバーボンド SS#1 といった製品もあったが、メーカーが公開している粘度の測定結果が660 mPa・sと高く、0.2mm以下の幅の割れ目やガウジ等に充填できる可能性が低いと判断し、今回の検討では除外した。なお、JIS A 6024:2008 (建築補修用注入エポキシ樹脂)によると、粘度は低粘度形、中粘度形、高粘度形に区分され、低粘度形は23±0.5℃の環境下で測定された粘度が100~1000 mPa・sの範囲にあるもの、中粘度形は23±0.5℃の環境下で測定された粘度が5000~20000 mPa・sの範囲にあるものとしている。低粘度形の中でも粘度の低いものを超低粘度形と呼び、粘度の範囲は各社独自の規格が存在するようである。

表 6.3.1-1 本研究で用いたレジンの性状 (試験温度:23±2°C)

製品名		エバーボンド EP-400		エバーボンド EP-300	
		一般用(M)	冬用(W)	一般用(M)	冬用(W)
主成分	主剤	ビスフェノール F 型エポキシ樹脂		ビスフェノール A 型エポキシ樹脂	
	硬化剤	変性脂環式アミン 変性脂肪族アミン		ポリアミドアミン 変性脂肪族アミン	
外観	主剤	無色透明液体		無色透明液体	
	硬化剤	淡黄色透明液体		淡褐色透明液体	
	混合物	淡黄色透明液体		淡褐色透明液体	
混合比(重量比)		主剤:硬化剤=3:1		主剤:硬化剤=2:1	
比重	主剤	1.15		1.11	
	硬化剤	0.97		0.98	
	混合物	1.10±0.10		1.10±0.10	
粘度(mPa・s)	主剤	180±70	180±70	1000±400	1000±400
	硬化剤	40±20	40±20	200±80	300±120
	混合物	100±40	100±40	480±200	580±230
可使時間(分)		80±30	50±20	150±60	110±45

6.3.2 可使時間および粘度の測定方法

原位置レジン注入試験に用いるレジン材の要求性能を決定する上での参考資料を得る目的で、選定したレジン材の可使時間および粘度を測定した。

選定したレジン材は二液混合型の熱硬化性エポキシ樹脂系接着剤である。このタイプのレジン材は、エポキシ樹脂(主剤)と硬化剤とを混ぜ合わせると重合反応により発熱をしながら粘度が上昇していく。したがって、この反応による発熱の経時変化を測定することによって、可使時間を測定することが可能となる。そこで、可使時間を温度上昇法により測定した。測定にはデータロガー (TR-71wf、株式会社ティアンドデイ) と温度センサー (TR-1320、株式会社ティアンドデイ) を用い、図 6.3.2-1 のように、混合物の試料 300g を 500ml のポリ容器に採取し、試料の中央部に温度センサーを設置後、一定時間間隔 (1 秒もしくは 2 秒) で試料の発熱温度を測定した。なお、温度上昇法とは主剤と硬化剤を混合した後の温度変化から可使時間を求める方法である。測定開始時刻は混合開始からとし、発熱温度が急速に立ち上がる試料は、その立ち上り時間の 70% を可使時間とする。発熱温度の急速な立ち上がりが試料は、最高発熱温度到達時刻の 50% を可使時間とする。本検討で使用したレジン材は、発

熱温度が急速に立ち上がる試料であったため、可使時間はその立ち上り時間の70%とした。

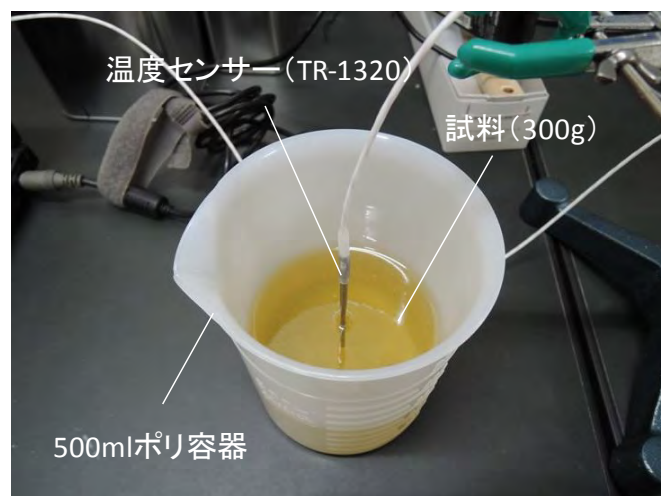


図 6.3.2-1 温度上昇法による可使時間測定の様子

粘度の測定にはデジタル B 型粘度計 (LV DV-II+Pro、Brookfield Engineering Laboratories, Inc.) を用いた。この粘度計は、液体中のスピンドル (回転子) を一定角速度で回転させた時のトルクを測定して見掛けの粘度を測定するものである。オプションのソフトウェア Rheocalc32 を用いることで、無段階での回転速度の切替え、測定条件の設定、データの収録が可能である。測定は、図 6.3.2-2 のように試料を 500ml のガラス製のグリフィンビーカに採取し、試料の中心にスピンドルを取り付けた粘度計を設置して行われる。また、スピンドルの保護および安定した測定を行うために粘度計にはガードが取り付けられている。このガードには RTD 温度センサーを取り付けられ、粘度の測定と同時に温度の測定も行われる。なお、この粘度計の精度はトルクのフルスケールの±1%である。この粘度計には標準で、図 6.3.2-3 に示す 4 つのスピンドル (LV1、LV2、LV3、LV4) が付属している。それぞれのスピンドルで測定できる粘度範囲は回転数に応じて決まっているため、試料の粘度と量に応じて、今回の検討では LV1 と LV2 を用いた。また、レジン材 (混合物) の粘度は、主剤と硬化剤を混合した直後の粘度だけを測定するのではなく、粘度が急上昇する直前までを連続して測定した。その際、回転数を 10rpm とし、連続回転させながら 1 分毎の粘度を測定した。



図 6.3.2-2 デジタルB型粘度計の外観写真



図 6.3.2-3 デジタルB型粘度計の標準スピンドルセット

6.3.3 可使時間の測定結果

温度上昇法による可使時間測定で得た発熱温度と時間の関係を図 6.3.3-1 に示す。左図がエバーボンド EP-300 の結果であり、右図がエバーボンド EP-400 の結果である。赤色の曲線が一般用 (M) の結果であり、青色の曲線が冬用 (W) の結果である。また、後述する粘度測定と同時に測定した発熱温度の経時変化の結果も同色の破線で示している。それぞれの結果の最高温度に違いがある理由は、温度

センサーおよび回転粘度計を回収するために、最高温度に達する前（硬化する前）に温度センサーおよび回転粘度計を引き抜いたためである。ただし、測定したもののうち、二つは発熱温度が最高温度に達するまで測定し、さらに、そのうちの一つは発熱温度が最高温度に達した後も一定時間測定を継続した。

図 6.3.3-1 より、発熱温度が線形に上昇した後、ある時刻で発熱温度が急激に上昇していることが分かる。また、発熱温度は百数十度まで上昇していることが分かる。EP-300 に比べ、EP-400 は再現性が高い。これは、粘度の低い EP-400 の方が攪拌しやすく、主剤と硬化剤との混合が良好であったためであると考えられる。図中に示した発熱温度の立ち上がり時刻から可使用時間を算出した。その結果（平均値）を表 6.3.3-1 に示す。測定結果は、メーカーが公開している規格値の範囲内に収まっている。可使用時間はメーカーが公開している規格値から分かるように、かなりの幅を有している。可使用時間のバラつきを抑えることは、原位置レジジン注入試験を実施する際に重要であるため、今後、現場環境を想定しながら、試験時の温度・湿度、混合量、攪拌方法および攪拌時間などの影響を検討していく予定である。また、JIS K 6870:2008（接着剤-多成分接着剤のポットライフ（可使用時間）の求め方）に記載されている“見掛け粘度変化による求め方”によると、「接着剤のポットライフは、混合終了から、受渡当事者間の合意の粘度に到達するまでの間の時間をいう。一般に受渡当事者間の合意の粘度は、開始点の粘度の 2 倍とする」となっている。この可使用時間の定義や温度上昇法による可使用時間の決定方法は非常に単純である一方、曖昧なものであり、今後は測定の再現性も含めて、どの時刻を可使用時間とするかについても検討していく予定である。

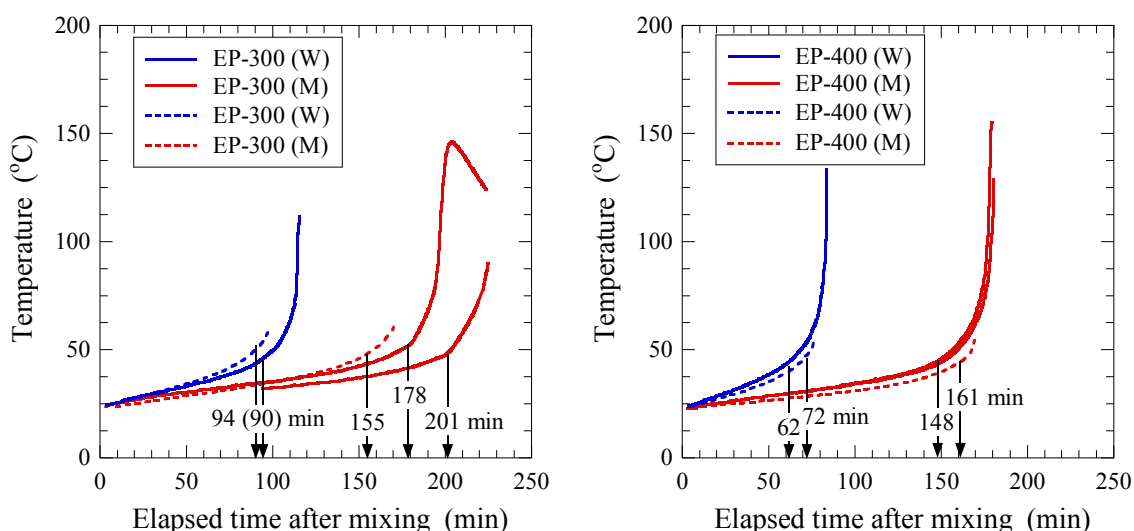


図 6.3.3-1 温度上昇法による可使用時間測定（発熱温度と時間の関係）

表 6.3.3-1 可使時間の測定結果

製品名	エバーボンド EP-300		エバーボンド EP-400	
	一般用(M)	冬用(W)	一般用(M)	冬用(W)
測定値(分)	124	64	106	46
規格値(分)	150±60	110±45	80±30	50±20

6.3.4 粘度校正用標準液の測定結果

レジン材の粘度を測定するにあたり、デジタルB型粘度計の特性を把握する目的で、ブルックフィールド社製の粘度校正用標準液の粘度を測定した。この粘度校正用標準液は、NIST規格に準じて25℃で校正された安定した無毒性のシリコン液である。本検討では、粘度100 mPa・s (96.7 mPa・s at 25℃) と粘度1000 mPa・s (986 mPa・s at 25℃) の標準液を用いた。なお、標準液の粘度の精度は±1%である。

図6.3.4-1に100 mPa・sの粘度校正用標準液の測定結果を示す。左図はスピンドルLV1を用いて測定した結果、右図はスピンドルLV2を用いて測定した結果である。スピンドルLV1を用いた測定では、5分置きに10 rpm、0 rpm、20 rpm、0 rpm、40 rpm、0 rpm、20 rpm、0 rpm、10 rpmと回転数を変化させて粘度を測定した。スピンドルLV2を用いた測定では、5分置きに50 rpm、0 rpm、100 rpm、0 rpm、200 rpm、0 rpm、100 rpm、0 rpm、50 rpmと回転数を変化させて粘度を測定した。温度の制御は恒温槽などを用いることが望ましいが、本検討では空調機で制御した室温下で行った。

図6.3.4-2に100 mPa・sの粘度測定結果から得た粘度と測定条件との関係を示す。左図が粘度と温度の関係、右図が粘度と回転数との関係である。厳密な条件で測定を行っていないので、絶対値に関して議論するのは心許ないが、スピンドルLV1は許容誤差（装置の誤差+標準液の誤差）の範囲を超え、標準液の校正値よりも大きな値になった。これは、スピンドルLV1の表面に傷があったためであると考えられる。ただし、同じ回転数での再現性は良好であった。一方、スピンドルLV2に関しては、回転数200 rpmの結果が許容誤差の範囲を超え、少し大きな値になった。測定可能な回転数であっても、回転数が大きすぎる場合、試料内部が乱流状態になるため、測定される粘度が標準液の校正値よりも大きくなったものと考えられる。なお、乱流状態になる回転数と粘度の関係（RPM/cP比）については取扱説明書に記載されているので、詳しくは取扱説明書を参照されたい。

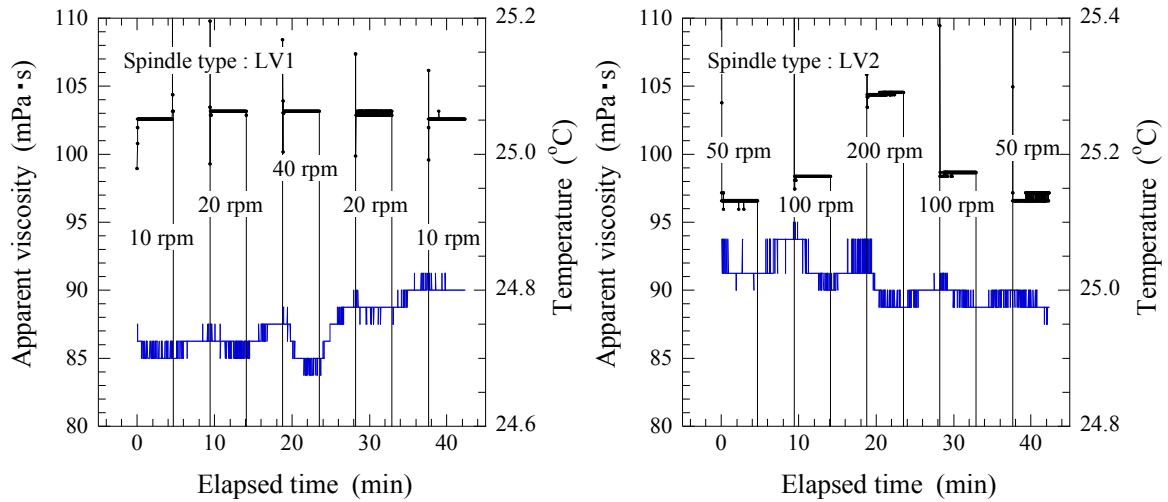


図 6.3.4-1 粘度校正用標準液 (96.7 mPa・s) の粘度測定結果

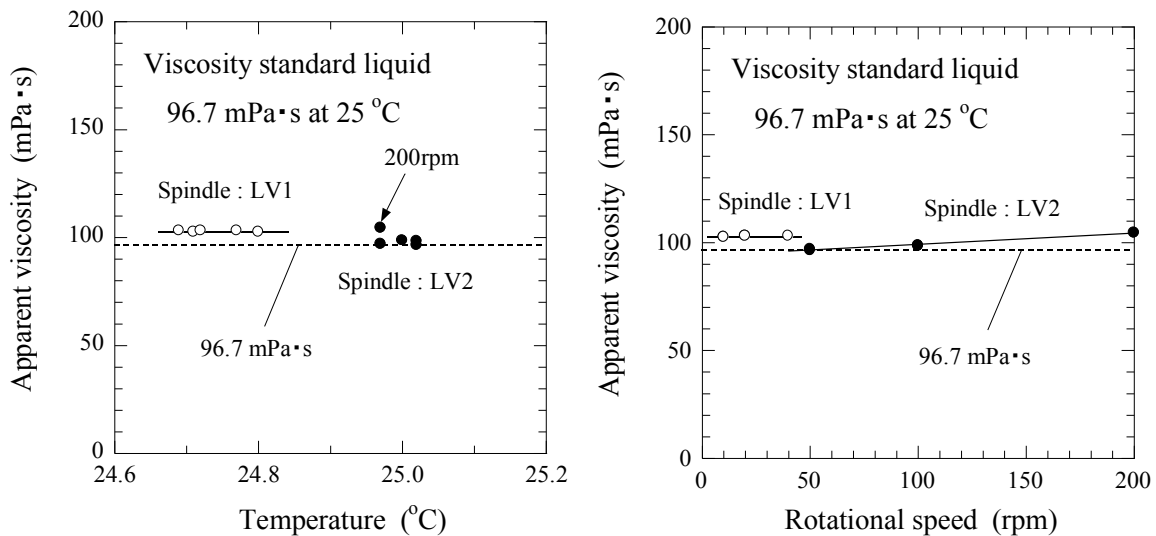


図 6.3.4-2 粘度校正用標準液 (96.7 mPa・s) の粘度と温度・回転数との関係

図 6.3.4-3 に 1000 mPa・s の粘度測定結果から得た粘度と測定条件との関係を示す。左図が粘度と温度の関係、右図が粘度と回転数との関係である。スピンドル LV1 を用いた測定では、5 分置きに 1 rpm、0 rpm、3 rpm、0 rpm、5 rpm、0 rpm、3 rpm、0 rpm、1 rpm と回転数を変化させて粘度を測定している。スピンドル LV2 を用いた測定では、5 分置きに 5 rpm、0 rpm、10 rpm、0 rpm、20 rpm、0 rpm、10 rpm、0 rpm、5 rpm と回転数を変化させて粘度を測定している。また、別途、25 rpm と 30 rpm の回転数でもマニュアル操作による測定を行っている (図に黒四角でプロットしている)。1000 mPa・s の粘度校正用標準液の粘度は、測定した温度の範囲では、LV1 を用いた結果および LV2 を用いた結果ともに温度との明確な相関は見られなかったが、回転数とは正の相関関係が見られた。100 mPa・s の結果と同様に、LV1 を用いた測定結果は、許容誤差 (装置の誤差+標準液の誤差) の範囲を超え、標準液の校

正值よりも大きな値であった (3 rpm、5 rpm)。試験数が少ないため、LV1 を用いた測定結果が回転数の増大に伴って標準液の校正値から離れていく原因については不明であるが、B 型粘度計で測定する際、スピンドルが最低 5 回転した後に測定することが望ましく、測定可能な回転数であっても、5rpm 以下の回転数では粘度値が安定せずこのような結果になったものと考えられる。LV2 を用いた測定結果はすべて許容誤差の範囲内であったが、回転数の増加とともに、標準液の校正値との差が小さくなった。これは温度が多少影響していると思われるが、回転数 30 rpm 近傍がこの粘度 (986 mPa・s) を測定する上で最適な回転数であったと考えられる。

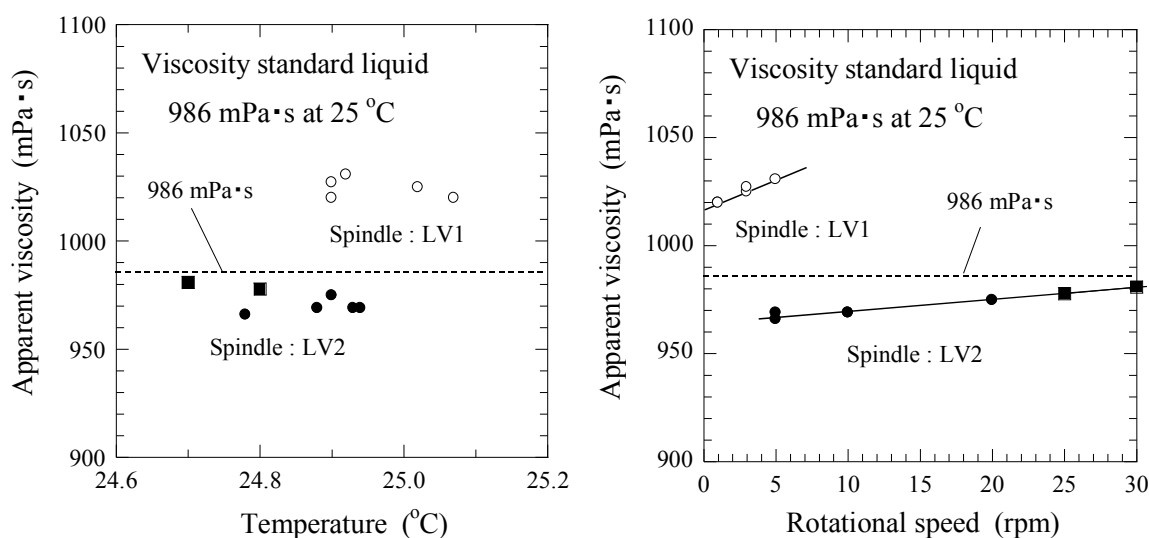


図 6.3.4-3 粘度校正用標準液 (986 mPa・s) の粘度と温度・回転数との関係

6.3.5 主剤および硬化剤の粘度測定結果

エポキシ樹脂 (主剤) と硬化剤それぞれの粘度を測定した。ただし、エパーボンド EP-400 (M) の硬化剤の粘度は、準備した硬化剤の配分ミスにより測定できなかった。一般用 (M) と冬用 (W) は配合が若干異なるものの、性能上は硬化時間 (可使時間) が異なるのみで、粘度に関しては、両者に違いはほとんどない。したがって、EP-400 (M) の硬化剤の粘度は EP-400 (W) の硬化剤の粘度と同程度のものが得られるものと思われる。

図 6.3.5-1 に EP-300 の主剤の粘度測定結果、図 6.3.5-2 に EP-300 の硬化剤の粘度測定結果、図 6.3.5-3 に EP-400 の主剤の粘度測定結果、図 6.3.5-4 に EP-400 の硬化剤の粘度測定結果を示す。すべての図の縦軸のスケールは、粘度は 200 mPa・s、温度は 1.0°C に揃えている。粘度計は、粘度校正標準液の測定の時と同様に、5 分置きに回転数を変化させて粘度を測定した (EP-400 (W) の主剤の計測のみ 10 分置き)。

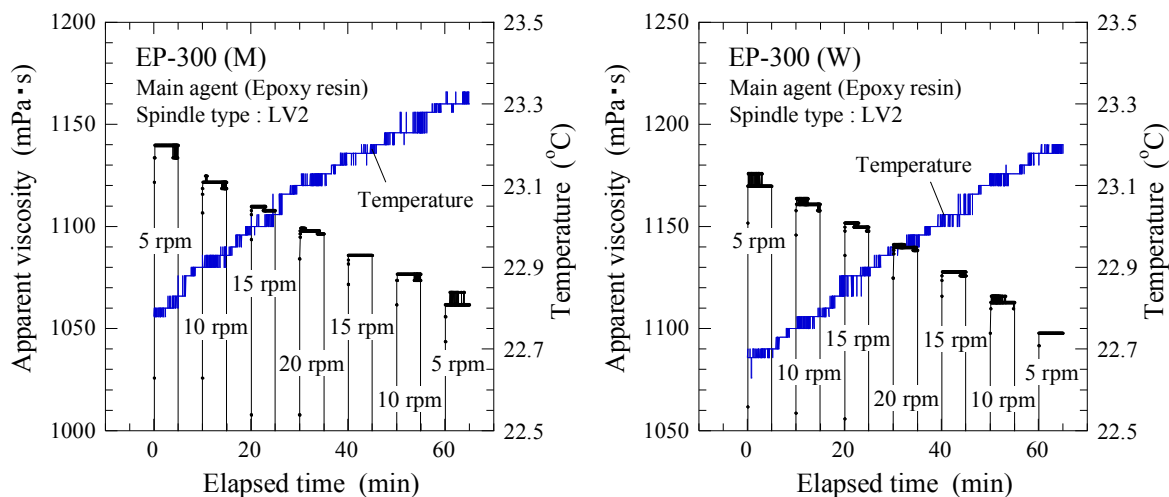


図 6.3.5-1 主剤 (エポキシ樹脂) の粘度測定結果 (EP-300)

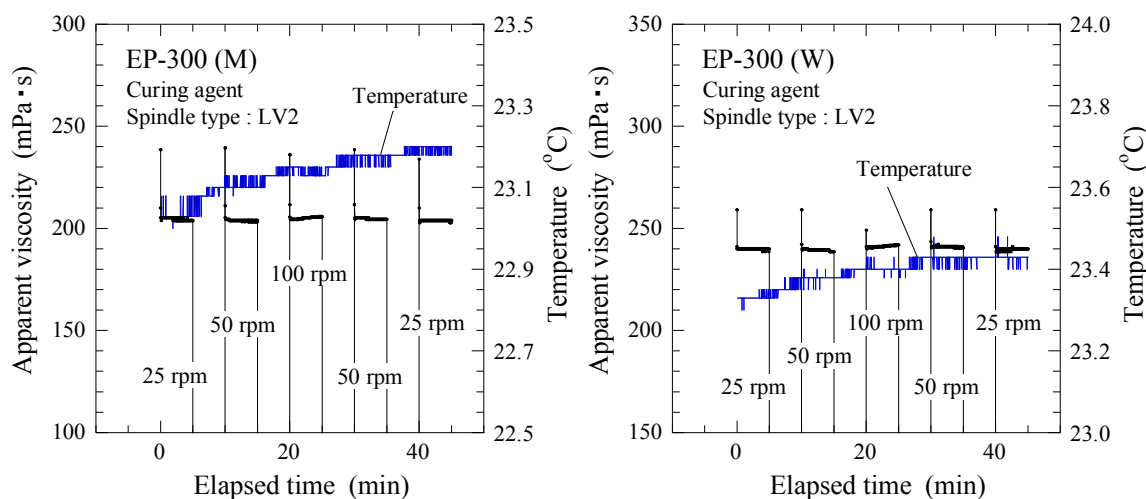


図 6.3.5-2 硬化剤の粘度測定結果 (EP-300)

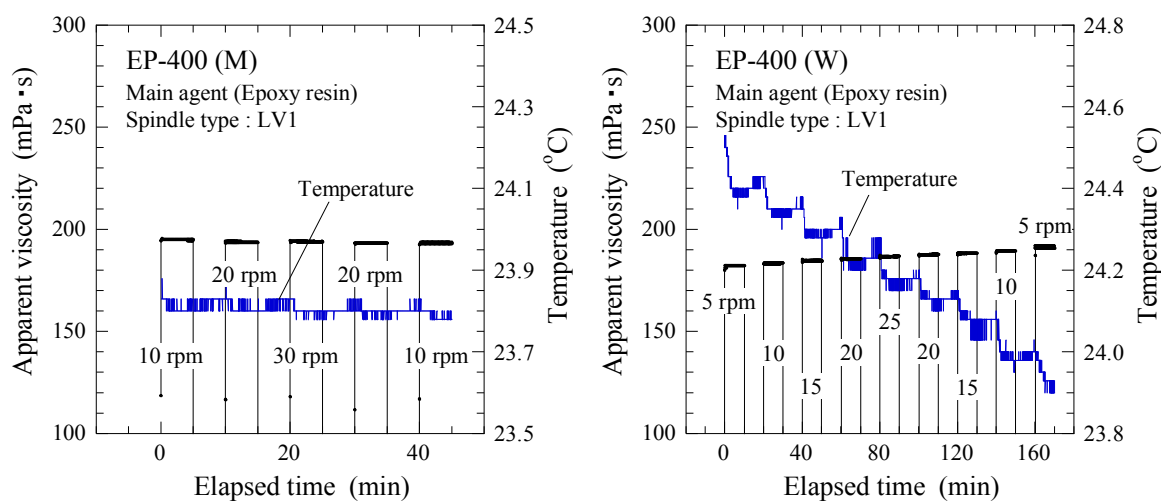


図 6.3.5-3 主剤 (エポキシ樹脂) の粘度測定結果 (EP-400)

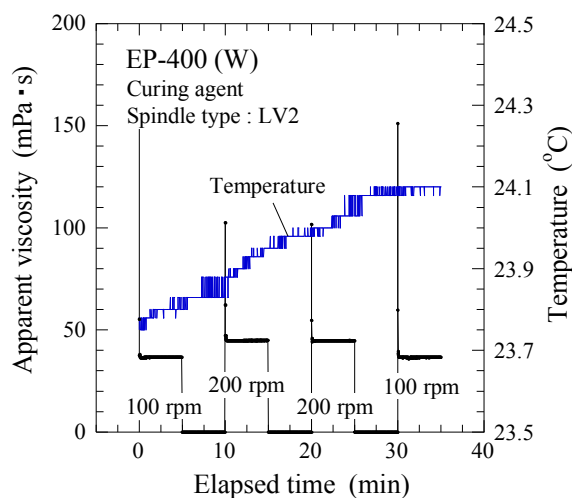


図 6.3.5-4 硬化剤の粘度測定結果 (EP-400)

図 6.3.5-5 に EP-300 の主剤および硬化剤の粘度と温度の関係を示す。左図は主剤の粘度と温度の関係、右図は硬化剤の粘度と温度の関係である。主剤の粘度は温度と負の相関関係を示し、温度の上昇に伴って粘度が低下していることが分かる。一方、硬化剤は、温度変化が主剤と比べて小さいため一概には言えないが、温度との相関関係は認められなかった。

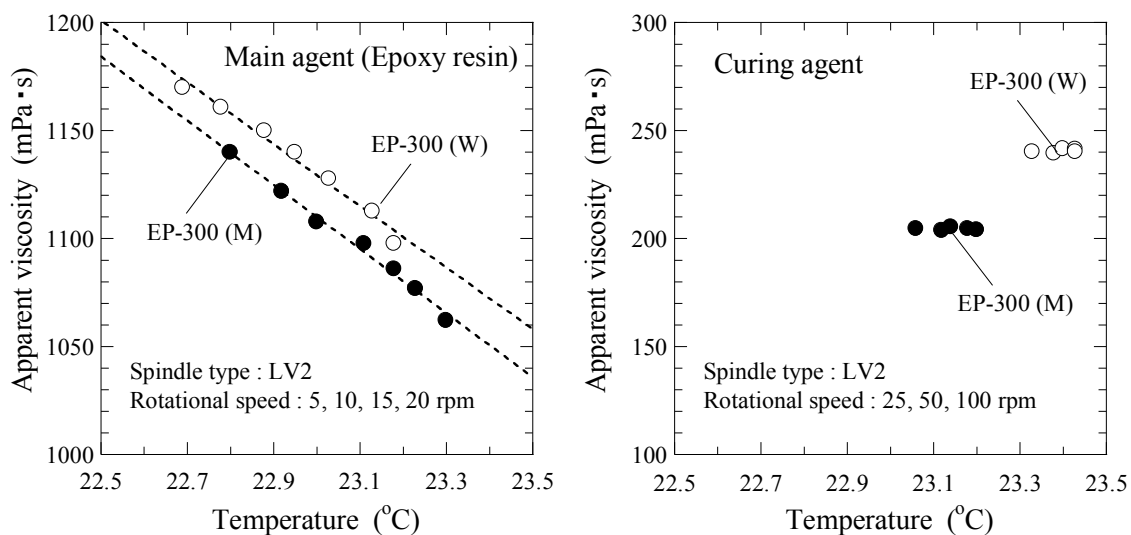


図 6.3.5-5 主剤および硬化剤の粘度と温度の関係 (EP-300)

図 6.3.5-6 に EP-400 の主剤および硬化剤の粘度と温度の関係を示す。左図は主剤の粘度と温度の関係、右図は硬化剤の粘度と温度の関係である。主剤の粘度は、EP-400 と同様に温度と負の相関関係を示し、温度の上昇に伴って粘度が低下していることが分かる。ただし、その低下の割合は、EP-300 に

比べて小さい。EP-400の主剤は低粘度化を実現させるため、ビスフェノールF型エポキシ樹脂が成分の大半を占めている。一方、EP-300の主剤は、一般的なエポキシ樹脂の主成分であるビスフェノールA型エポキシ樹脂が成分の大半を占めている。この違いが粘度と温度との関係に表れたものと思われる。硬化剤はEP-300の結果と同様に温度の影響は小さい。また、回転数200rpmで粘度が回転数100rpmに比べて大きな値になったが、これも1000 mPa・sの標準液の測定結果と同様に、試料内部が乱流状態になったためであると考えられる。

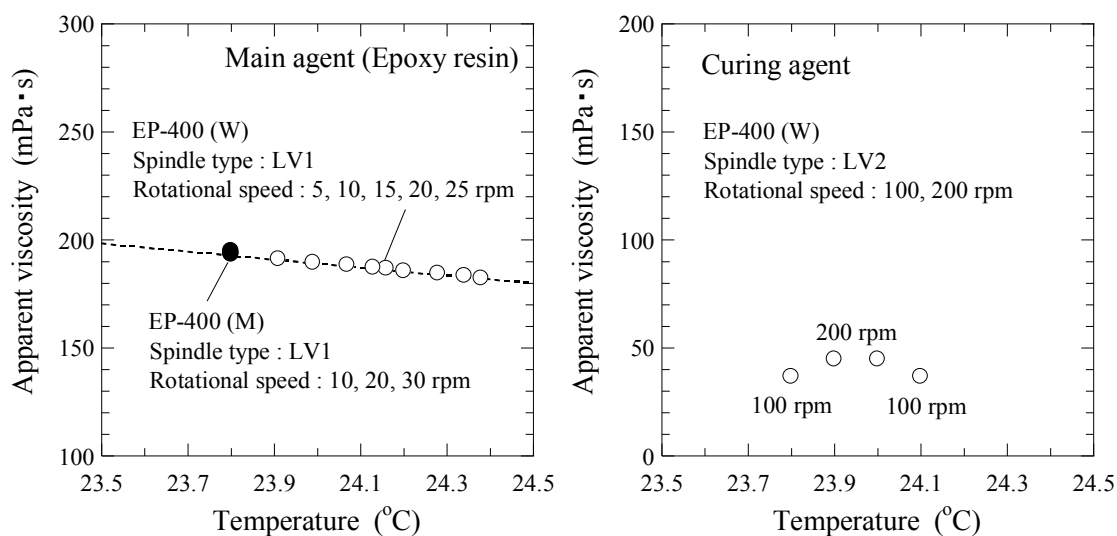


図 6. 3. 5-6 主剤および硬化剤の粘度と温度の関係 (EP-400)

6. 3. 6 レジン材 (混合物) の粘度の経時変化

図 6. 3. 6-1 および図 6. 3. 6-2 に混合物の粘度と温度の経時変化を示す。図 6. 3. 6-1 が EP-300 の結果であり、図 6. 3. 6-2 が EP-400 の結果である。それぞれ左図が一般用 (M) の結果、右図が冬用 (W) の結果である。EP-300 はスピンドル LV2 を用いて回転数 10 rpm で測定している。一方、EP-400 はスピンドル LV1 を用いて回転数 10 rpm で測定している。測定は、混合開始時刻を 0 として 1 分間隔で行った。EP-400 (W) を除いて、粘度の経時変化は下に凸の形状をしている。この形状は、伊奈ら (1999) による熱硬化樹脂の密度変化の説明を参考にすると次のように説明できる。まず、混合開始から混合物の温度の上昇により混合物が液相状態で熱膨張し、見掛けの粘度が低下する。ある時刻になると見掛けの粘度の低下が収束し、今度は体積収縮を伴いながら見掛けの粘度が上昇する。発熱温度の立ち上がり時刻付近になると、見掛けの粘度は急激に上昇をはじめ、混合物は 2 次元的架橋の終点であるゲル化点に到達し、液体から固体としての挙動に移行する。その後の測定は粘度計回収のために実施できていないが、3 次元的架橋に移行し、これの終点である硬化点に到達し、冷却過程を経て室温に戻る。

図 6.3.6-3 は、粘度の低下が収束し始めた時刻に撮影したものであり、スピンドル周辺にゲル化に伴う揺らぎを確認することができる。混合開始とともに重合反応は開始される（2 次元的架橋が始まる）が、目に見える形で確認できるのは、粘度の低下が収束する時刻のようである。また、図 6.3.6-1 の EP-300 (W) の図中に示した黒丸の箇所では、粘度が不連続な挙動をしているが、これは、スピンドル周辺に生成されたゲル状の物質がスピンドルの回転で動かされたためであると考えられる。また、全てのレジン材で粘度が急激に上昇するときの温度が、50℃付近であることも確認できる。

本研究のようにレジン材を広範囲かつ幅の狭い割れ目に充填する場合は、レジン材注入時の粘度がどのように変化するかを事前に押さえておくことが重要である。したがって、メーカーが公開している JIS 規格に定められた混合直後の一点のみの粘度ではなく、混合後の粘度変化を測定すべきである。また、粘度と併せて温度を測定することも可使時間を理解する上で重要であると考えられる。

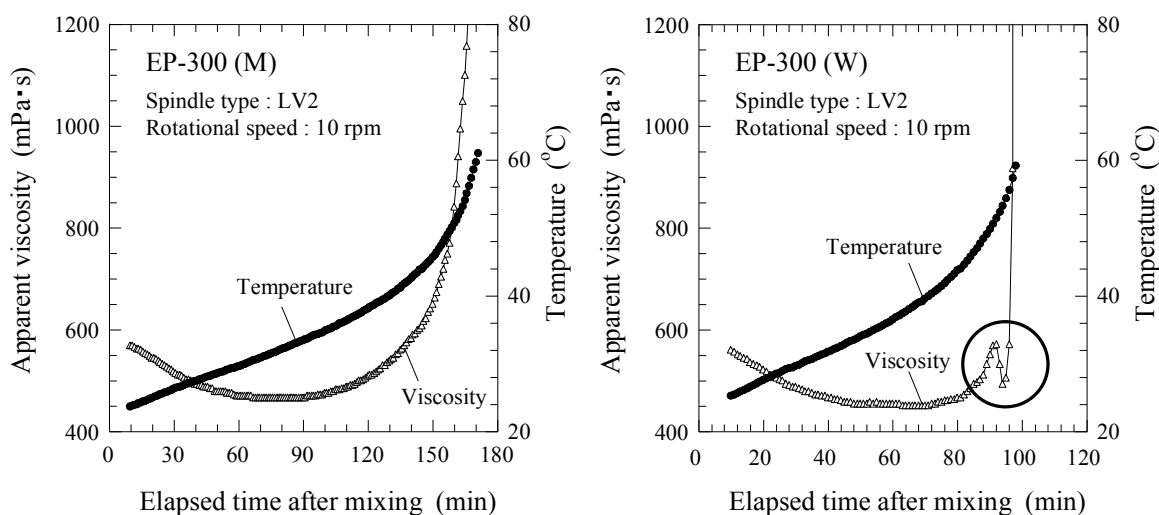


図 6.3.6-1 レジン（混合物）の粘度と温度の経時変化（EP-300）

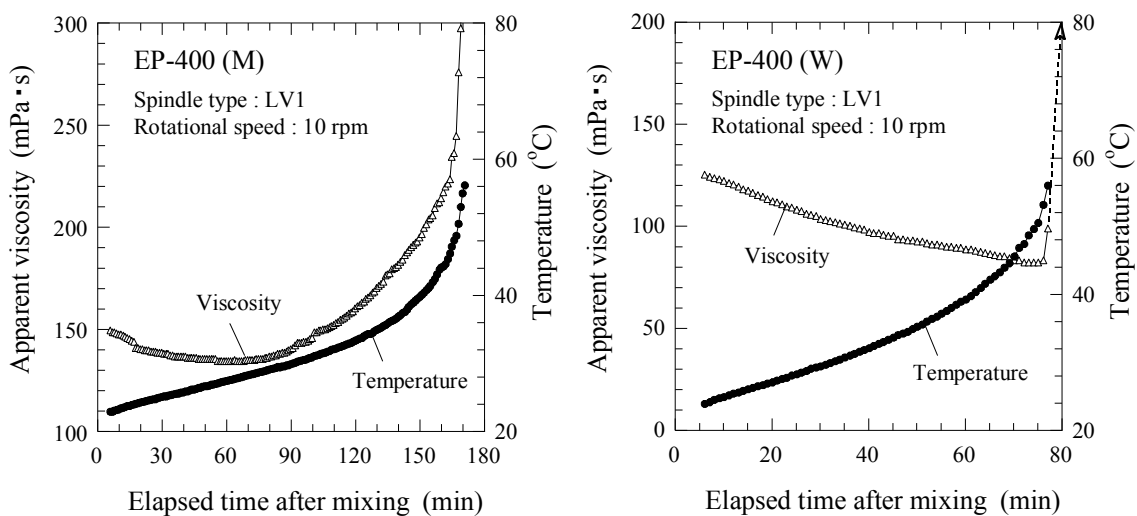


図 6.3.6-2 レジン（混合物）の粘度と温度の経時変化（EP-400）



図 6.3.6-3 レジン（混合物）の粘度変化収束時の様子

6.3.7 蛍光染料添加に関する検討

(1) 背景と目的

国外サイトで行われた原位置レジン注入試験では、ウラニンを添加したレジン材が用いられたが、前述の研削断面画像の観察結果でも示したように、高濃度のウラニンが割れ目面や割れ目内の充填物に付着していた。これは、図 6.3.7-1 に示すレジン材充填コア回収後に実施された C-FRS 12.003 孔に隣接する C-FRS 08.002 孔（レジン注入孔）のボアホールカメラ観察から分かるように、レジン材からのウラニンの分離によるものである。レジン材からのウラニンの分離は、その後のデジタルカメラによる観察（画像処理）において問題となるため、本研究ではレジン材からウラニンが分離する原因について調査した。また、レジン材へ蛍光剤を添加する手順についても検討した。作業効率上、主剤と硬化剤を混合した後に蛍光剤を添加するのではなく、事前に主剤、硬化剤のどちらかに蛍光剤を添加しておくことが望ましい。そこで、主剤、硬化剤それぞれにウラニンを添加し、ウラニンとの親和性およびウラニン添加後の蛍光性について検討した。



図 6.3.7-1 レジン材充填コア回収後のレジン注入孔（C-FRS 08.002 孔）のボアホールカメラ観察

(2) 主剤へのウラン添加

ウラン添加前後の主剤の自然光下での画像を図 6.3.7-2 に示す。この主剤はエバーボンド EP-400 (W) の主剤である。また、ウランの濃度は 100ppm である。ウランを添加していない主剤は、表 6.3.1-1 に記載したように無色透明の液体であり、赤茶色の粉体であるウランを主剤に添加すると、その混合物は桃色を呈し、添加 14 時間後にはオレンジ色に変色した。

ウラン添加前後の主剤の紫外線光源下での画像を図 6.3.7-3 に示す。ウランを添加していない主剤は青色の蛍光を発した。ウランの添加直後はその青色が薄まり、徐々に黄色味を帯び、12 時間 55 分後には黄緑色の蛍光を発した。さらに、12 時間 55 分後から 14 時間後の 1 時間の間にその蛍光強度は弱まった。蛍光強度が弱まった原因は二つ考えられる。一つ目は、ウランの光退色である。ウランは、分子吸光係数や蛍光量子収率が非常に大きく、人間の眼にとって最も観察しやすい緑色の蛍光を発するが、光安定性が悪く蛍光の退色が非常に早いと言われている。細胞生物学の分野では、その問題の解決のために、退色が遅いフルオレセインの誘導体を用いているようである。また、杉田ら (2003) は、ウランを含有する試料を無色透明ガラス製容器、褐色ガラス製容器、アルミ箔で覆ったガラス製容器に保管し、蛍光強度の経時変化を測定している。それによると、無色透明ガラス製容器で保管したものは蛍光強度が時間の経過に伴い大きく減少すると報告している。1 時間程度で蛍光強度が低下するのかわ不明であるが、アルミ箔で覆わず、無色透明のガラス製容器に試料を入れたままにしていたために、ウランの蛍光が退色したものと思われる。二つ目は、主剤そのものの蛍光色である青色との混色である。このような現象が試料内部で生じているかは不明であるが、ウランの蛍光色である緑色と主剤の蛍光色である青色は、混色すると空色 (シアン) もしくは白色になるため、見かけ上、混色により蛍光強度が低下した可能性も考えられる。

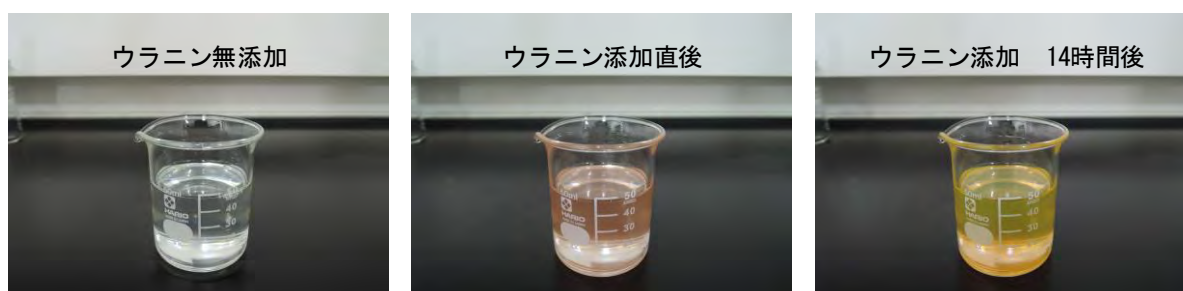


図 6.3.7-2 主剤へのウラン添加前後の自然光下での様子



図 6. 3. 7-3 主剤へのウラン添加前後の紫外線光源下での様子

(3) 硬化剤へのウラン添加

ウラン添加直後の硬化剤の自然光下および紫外線光源下での画像を図 6. 3. 7-4 に示す。左の画像が自然光下での画像であり、右の画像が紫外線光源下での画像である。この硬化剤はエバーボンド EP-400 (W) の硬化剤である。ウラン濃度は 400ppm である。淡黄色透明液体の硬化剤にウランを添加すると、自然光下ではオレンジ色を呈し、紫外線光源下では主剤に添加した時とは異なり、添加直後すぐに黄色の蛍光を発した。

図 6. 3. 7-4 のウランを添加した硬化剤を主剤と混合した混合物の画像を図 6. 3. 7-5 に示す。上段がウランを添加した硬化剤を主剤へ投入した直後の画像であり、下段がそれを混合した直後の画像である。また、左側が自然光下での画像、右側が紫外線光源下での画像である。混合後のウランの濃度は 100ppm である。

硬化剤投入直後は、主剤に比べて比重の軽い硬化剤は沈殿せず、主剤と硬化剤は分離した状態である。紫外線光源下で撮影したものはその様子がより明瞭であり、硬化剤は黄色の蛍光を発し、主剤は淡い青色の蛍光を発した。攪拌すると両者は均等に混じりあい、自然光下では淡いオレンジ色を呈し、紫外線光源下では濃い黄緑色の蛍光を発した。



図 6.3.7-4 硬化剤へのウラン添加直後の様子
(左：自然光下、右：紫外線光源下)

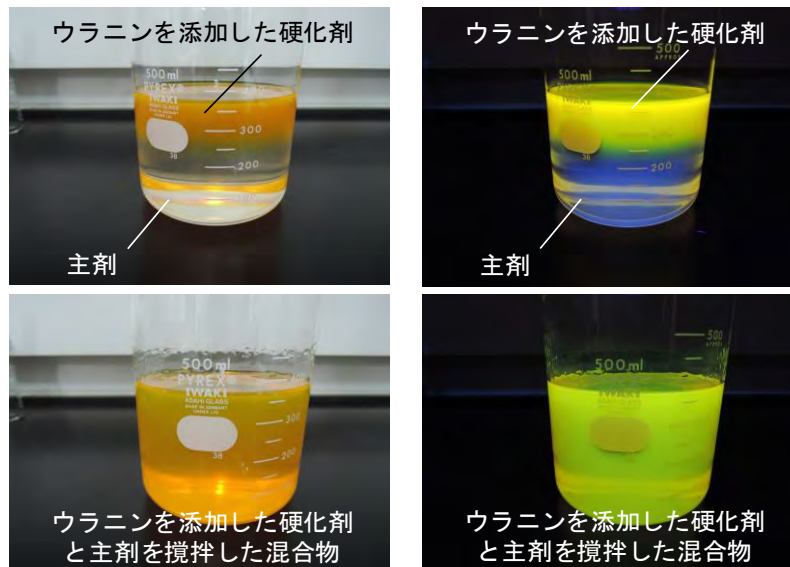


図 6.3.7-5 ウランを添加した硬化剤と主剤の攪拌後の様子
(左：自然光下、右：紫外線光源下)

(3) 混合物からのウラン分離に関する検討

国外サイトでは、レジン注入試験を実施する前日にイソプロピルアルコールを注入し、半日ほど滞留させた後、レジン注入試験直前に水でイソプロピルアルコールを排出させている。イソプロピルアルコールの注入は、割れ目表面でのレジン材の濡れ性を良好にし、レジン材が割れ目表面に接着しやすくするために行っている。レジン注入試験直前の水による洗い流しは、イソプロピルアルコールが上記の利点がある一方、レジン材を溶解する作用もあることから、高濃度のイソプロピルアルコールを排出する目的で行っている。しかし、割れ目や割れ目内の比較的大きな充填物の表面やガウジ等の幅の狭い間隙には、水の洗い流しで排出できなかった高濃度のイソプロピルアルコールが残留していた可能性があり、これらの箇所でのウランの分離はイソプロピルアルコールが原因ではないかと考えられた。そこで、図 6.3.7-4 で示した混合物を 50ml のポリ容器に移し、硬化させたものをイソプロピルアルコールおよび蒸留水に浸漬させ、その後の様子を観察した。図 6.3.7-6

にその結果を示す。左図が硬化後のレジンを蒸留水に浸漬させたもの、右図が硬化後のレジンを消毒用 50%イソプロピルアルコールに浸漬させたものである。それぞれ浸漬開始から 2 時間経過した時の紫外線光源下での画像である。イソプロピルアルコールに浸漬させたものからはウラニンが溶出し、溶液の色がウラニンの蛍光色である黄緑色に染まっている様子が分かる。一方、蒸留水に浸漬させたものからは、ウラニンの溶出は確認されず溶液の色に変化は見られなかった。また、硬化後のレジン材の蛍光色が、主剤と硬化剤を混合した直後の色（図 6. 3. 7-5 の右下の画像）と異なっていることも確認できる。これは、主剤へのウラニン添加の際に述べたように、主剤の蛍光色である青色とウラニンの蛍光色である黄緑色が混色した可能性が考えられる。この点に関しては、ウラニンを添加する量を増やし、ウラニンの蛍光色を強めることで解決できるものと思われる。今後の課題としたい。また、レジン材は硬化過程で百数十度まで発熱する。ウラニンは熱により分解され退色することが知られており、この熱の影響も硬化後のレジン材の蛍光色に影響している可能性が考えられる。杉田ら（2006）によると、フルオレセイン（ウラニン）の濃度が 0.1mg/1 の試料では 150℃付近まで、1mg/1 および 100mg/1 の試料については 175℃付近まではほとんど熱分解を生じなかったと報告しているが、これは液体に溶解させたウラニンの事例であり、レジン材に添加したウラニンの熱分解については別途検討すべきであると考えられる。この点に関してもレジン材に添加するウラニンの量を増やすことで解決できると考えられるが、今後の課題としたい。

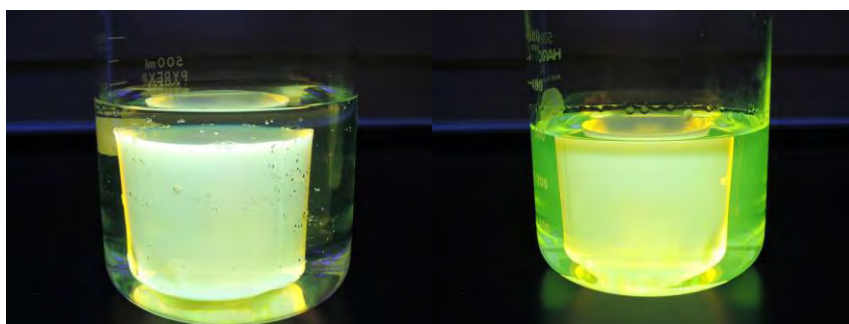


図 6. 3. 7-6 硬化後のレジン材をイソプロピルアルコールに浸漬させた時の様子
(左：蒸留水、右：イソプロピルアルコール)

6. 3. 8 まとめ

国外サイトで使用した Sika Injection-26 と仕様が類似したレジン材を選定し、可使時間および粘度の測定を行った。また、国外サイトで確認されたレジン材からウラニンが分離する原因についても調査した。得られた結果をまとめると以下の通りである。

可使時間の測定結果：

粘性が低いものほどバラツキが小さく、測定の再現性が良いことが分かった。ただし、可使時間は、

試験時の温度・湿度、混合量、攪拌方法および攪拌時間などにより変化することが予想されることから、今後は現場環境を想定しながらこれらの影響を検討していく必要がある。また、可使時間の決定方法は非常に単純である一方、曖昧なものであり、測定の再現性も含めて、どの時刻を可使時間とするかについても検討していく必要がある。

粘度の測定結果：

混合後の粘度および温度の経時変化を測定した。その結果、温度が急激に上昇する時刻に粘度も急激に上昇すること、また、粘度が下に凸の曲線を描くように変化することが分かった。粘度が急激に上昇する温度は50℃付近であり、レジンを注入時に孔内の温度を測定することが可能であれば、注入時のレジンの状態を大まかに把握することが可能であり、より安全かつ確実な注入が行えるものと考えられる。レジン材の粘度が初期の段階では温度の上昇に伴って低下することから、この段階ではニュートン流体として取り扱えるものと思われる。したがって、注入時の圧力、流量、温度から、流れの次元、割れ目幅のデータを取得できる可能性がある。ただし、高粘性流体とは異なりやり直しが利かないため、実施可能かどうかを含めて今後検討していきたい。発熱温度が最大値を取る頃には、レジン材はほぼ固体状態であり、また、注入ライン（ダブルパッカーシステム）をレジンが完全に硬化するまで回収する必要がないので、レジン材を注入し続ければ、幅の広い割れ目にもレジン材を充填することが可能であると考えられる。そのためには、レジン材を大量に注入することができ、主剤と硬化剤の混合を制御できる機能や流量や圧力を精密に制御できる機能を持つ注入システムの構築が望まれる（核燃料サイクル開発機構(1999)）。

レジン材への蛍光染料添加に関する検討：

レジン材へ蛍光染料（ウラニン）を添加する方法および問題点について検討した。主剤にウラニンを添加した結果、蛍光を発するまでに時間を要することが分かった。一方、硬化剤にウラニンを添加した場合は、主剤で見られた蛍光の時間遅れは生じず、混合後直ちに蛍光を発した。このことから、硬化剤にウラニン添加の方が作業効率の上で望ましいものと考えられる。ウラニンがレジン材から分離する原因を調査するため、ウラニンを添加したレジン材を硬化させた後、その硬化物をイソプロピルアルコールおよび水に浸漬させた。その結果、イソプロピルアルコールに浸漬したものはウラニンの溶出が確認された。また、硬化したレジン材の蛍光色は、混合直後の蛍光色とは異なり、主剤そのものの蛍光色である青色と混色したような蛍光色を発していた。混色以外にも硬化時の発熱によるウラニンの分解が影響している可能性もあり、この点に関しては、今後検討していきたい。

6.4 X線CT観察下でのレジジン注入試験

6.4.1 概要

選定したレジジンを用いて、室内試験レベルでのレジジン注入試験を実施した。割れ目へのレジジン注入および注入後の割れ目の可視化までの一連の作業を行い、レジジン注入試験における問題点や割れ目間隙の可視化における問題点について検討を行った。なお、割れ目間隙の可視化では、「Grinding Tomography」を適用する時間がなかったため、今回は、実験後のコアを縦割りにして、その切断面のみを観察した。

6.4.2 割れ目開口幅と空間分解能

医療用X線CTスキャナを用いてどの程度の割れ目幅まで検出可能か検討した。供試体は、図6.4.2-1に示す二対のカマボコ型をした稲田花崗岩である。それらを重ね合わせたものは、直径100mm、長さ100mmの円柱形である。また、重ね合わせる面はバフ研磨により平滑に仕上げている。

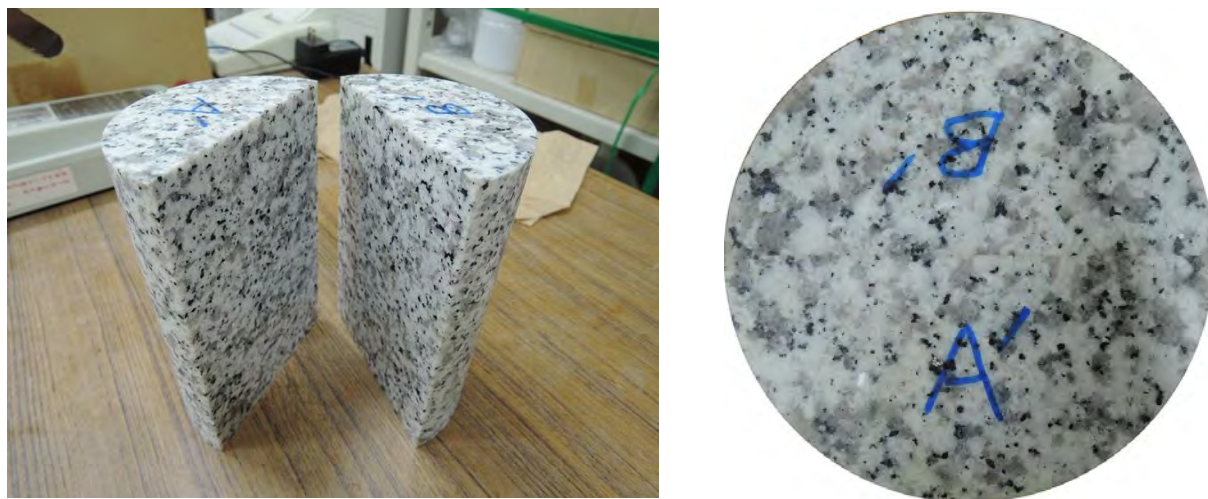


図 6.4.2-1 模擬亀裂花崗岩試料の外観写真

模擬亀裂は、隙間ゲージを二対の花崗岩試料の間に挟み込むことで作成した。すなわち、図6.4.2-2に示すように、カマボコ型の花崗岩試料を平滑面が水平になるようにX線CTスキャナの寝台に設置し、その平滑面の両端に隙間ゲージを配置する。隙間ゲージを設置後、もう片方の花崗岩試料を重ね合わせることで模擬亀裂を作成した。撮影には電力中央研究所が所有する医療用X線CTスキャナ（Aquilion64、東芝メディカルシステムズ株式会社）を用いた。この装置は0.5mmスライス厚による64列同時収集が可能であり、短時間での撮影が可能である。空間分解能（雑音が無視出来る条件下で、どの程度細かいものを分離して認識できるかという識別限界を数値化したもの）は撮影条件等で変化するため正確な値は明言できないが、メーカーによると0.35mm程度である。撮影条件は、管電圧135kV、

管電流 300mA、DFOV（表示視野）139.26mm、スライス厚 0.5mm、照射時間 1 秒/回転とし、撮影後の画像再構成処理は再構成関数 FC30 を使用し、表示画素数を 512 x 512pixel、再構成スライス間隔を 0.5mm とした。

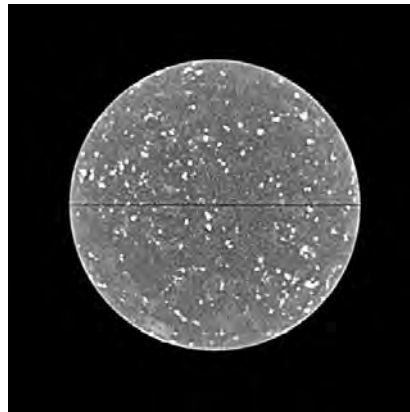


図 6.4.2-2 模擬亀裂花崗岩試料と隙間ゲージ配置状況

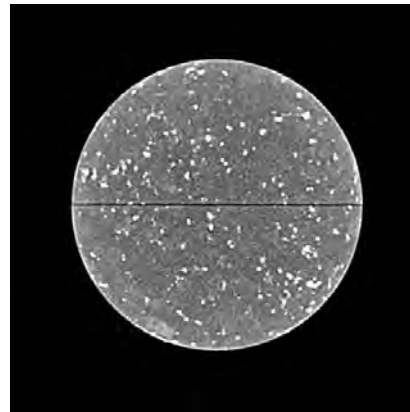
撮影で得られた画像を図 6.4.2-3 に示す。画像のしきい値は Window Level が 2000、Window Wide が 3000 である（CT 値の表示範囲：500～3500）。上段左から二対の花崗岩試料を重ねあわせたもの、隙間ゲージ 0.05mm、0.1mm、0.2mm を挟んで撮影したもの、下段左から隙間ゲージ 0.3mm、0.4mm、0.5mm、1.0mm を挟んで撮影したものである。隙間ゲージを挟んでいないものでも、画像の矢印の位置に模擬亀裂が存在していることがうっすらとであるが確認することができる。0.05mm の幅になると視認は容易である。連続性が良く単一の割れ目であり、さらに割れ目内が空気の状態であれば、数十 μm の幅を可視化することができるが分かった。しかし、天然の割れ目は、模擬亀裂のように幅が一定に分布していることはなく、単一の割れ目であることは稀である。また、割れ目内に介在する物質も様々である。さらに、撮影条件が変わると空間分解能が変化するので、今回の検討はあくまでも理想的な条件下での結果であることに注意されたい。空間分解能の定義や空間分解能以下の幅が検出できる理由については、関連する文献を参照されたい。なお、オーム社から出版されている「標準 X線 CT 画像計測」は、空間分解能について非常にわかりやすく記載している。



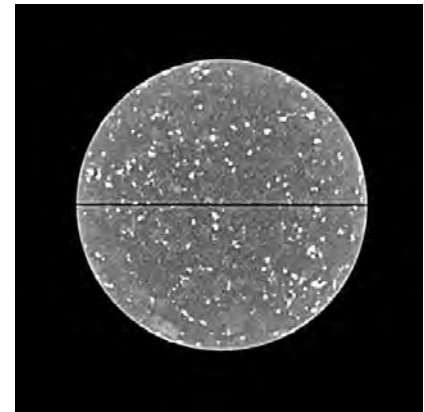
隙間ゲージ：なし



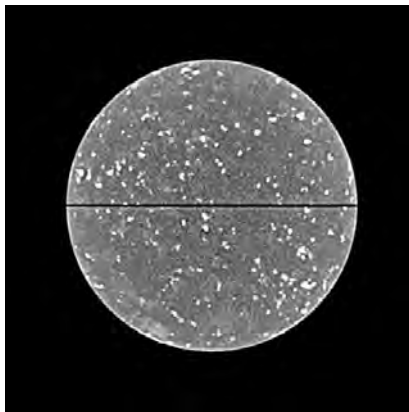
隙間ゲージ：0.05mm



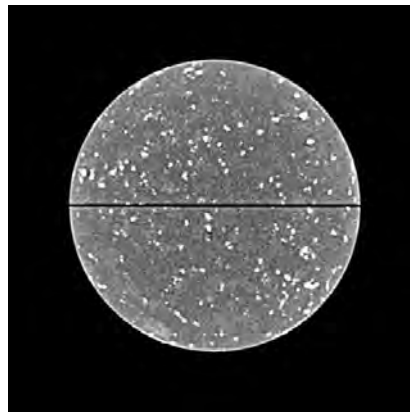
隙間ゲージ：0.1mm



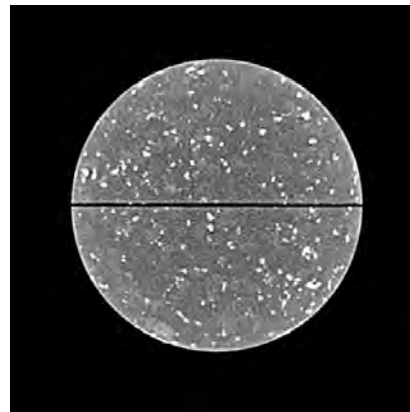
隙間ゲージ：0.2mm



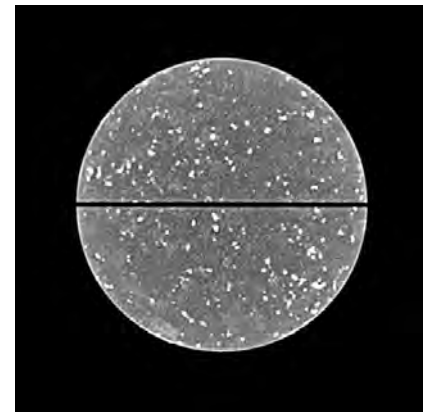
隙間ゲージ：0.3mm



隙間ゲージ：0.4mm



隙間ゲージ：0.5mm



隙間ゲージ：1.0mm

図 6.4.2-3 隙間ゲージを挟んだ模擬亀裂花崗岩試料の X 線 CT 画像 (WL:2000、WW:3000)

6.4.3 実験方法

(1) 透水セル

X線 CT スキャナを用いて割れ目内の流体の状態を可視化するために、廣野らが用いた透水セルを参考に、図6.4.3-1に示すアクリル樹脂製の透水セルを準備した。流入面および排出面は、図6.4.3-1に示すように円形および十字の溝が切られ、岩石コア端面のほぼ全域に流体が行き渡る構造である。耐圧は 0.2MPa である。また、注水側には、レジン注入時の圧力変化および温度変化を計測するために、圧力センサーおよび温度センサーが設置した。なお、今回の実験ではデータロガーの不調により圧力および温度は測定できなかった。

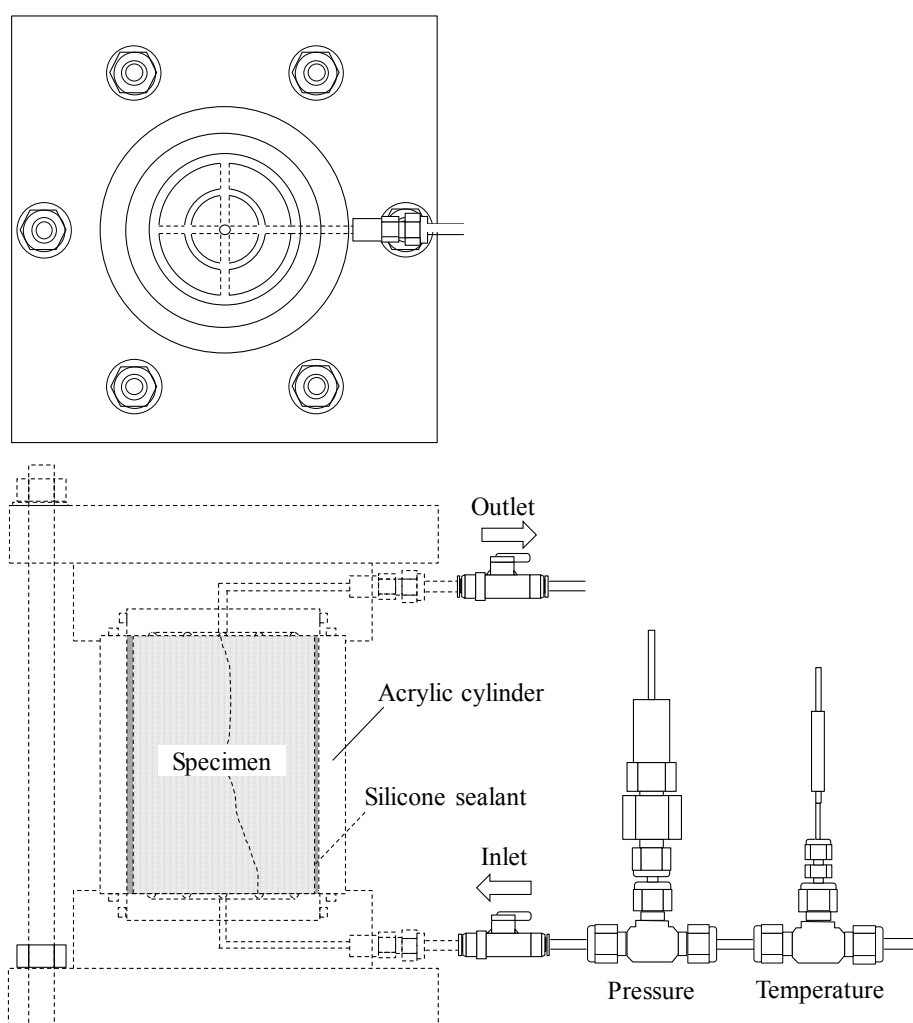


図 6.4.3-1 透水セルの模式図

(2) 岩石コア

岩石コアは JAEA の瑞浪超深地層研究所の深度 300m ボーリング横坑で掘削された 12MI30 号孔のボーリングコア (15.00mabh~16.00mabh) から高角度の割れ目を含む領域 (15.15mabh~15.25mabh)

をカットし、直径 70mm×長さ 100mm に成形したものをを用いた (図 6.4.3-2)。成形後の岩石コアは透水セル中央部のアクリル円筒の内側にシリコンシーリング材 (シーラント 45、信越化学工業株式会社) で接着し固定した。接着作業は、割れ目が動かないに岩石コアを結束バンドで拘束して行った。座標系は図に示すように右手座標系で、透水方向を z 軸に、撮影方向を x 軸とした。なお、排出面側がボーリング孔での浅深度側である。

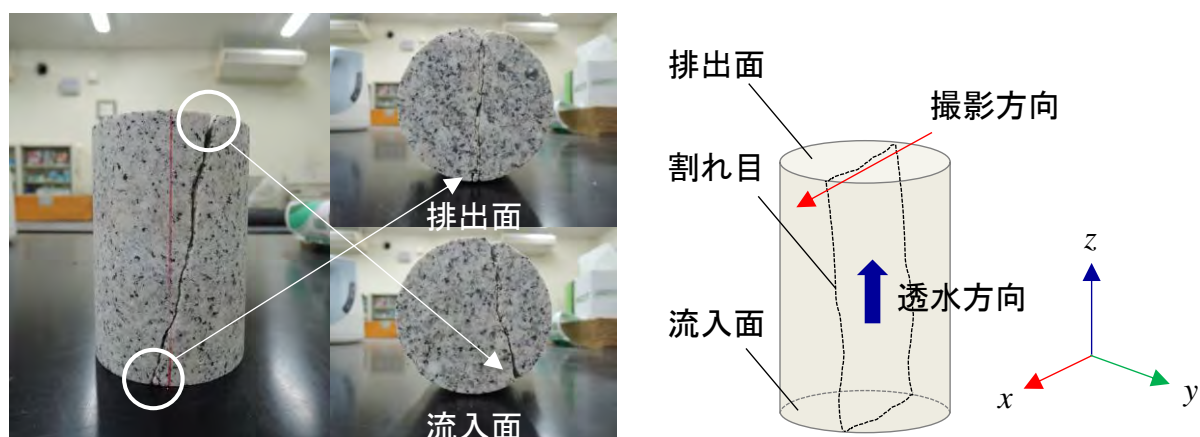


図 6.4.3-2 岩石コアの外観写真と座標系

(3) X線 CT スキャナ

観察には、電力中央研究所が所有する医療用 X 線 CT スキャナ (Aquilion64、東芝メディカルシステムズ株式会社) を用いた。撮影条件は、管電圧 135kV、管電流 350mA、DFOV (表示視野) 116.74mm、スライス厚 0.5mm、照射時間 1 秒/回転とし、撮影後の画像再構成処理は再構成関数 FC30 を使用し、表示画素数を 512 x 512pixel、再構成スライス間隔を 0.2mm とした。

(4) 造影剤

X 線 CT 観察下でのレジンを注入試験では、水で満たされた割れ目に対してレジンを注入していく。しかし、表 6.3.1-1 に示した比重から推定できるように、レジンの密度と水の密度にはほとんど差がないため、割れ目内の水をレジンで置換する様子を可視化することができない。そこでレジンと水との間に密度差を付けるために、水にヨウ化ナトリウムを溶解させた水溶液を水の代わりに用いた。ヨウ化ナトリウム水溶液の濃度は、重量パーセント濃度で 10% である。図 6.4.3-3 にヨウ化ナトリウム水溶液の濃度と CT 値の関係を示す。この図の CT 値は 50ml のバイアル瓶中の種々の濃度のヨウ化ナトリウム水溶液から、ビームハードニング効果の影響を考慮してバイアル瓶の中央部付近の CT 値から算出した平均値である。撮影時の管電圧は 135kV、管電流は 350mA であり、撮影後の画像再構成処理は再構成関数 FC30 を使用した。図を見て分かるように、ヨウ化ナトリウム水溶液の濃度の増加とともに CT 値が増加していることが分かる。これは、X 線と物質との相互作用のうち、

光電効果によるものであり、CT 値が物質の原子番号に依存することを意味している。また、その関係は、広いダイナミックレンジの下では非線形である。この値は撮影条件により大きく変化する。特に、同じ装置を使用しても管電圧、再構成関数、容器のサイズが異なれば、その関係は全く異なるものとなるので、例えば、拡散係数や分散長といったパラメータ取得のための定量的な評価を行う場合は注意が必要である。

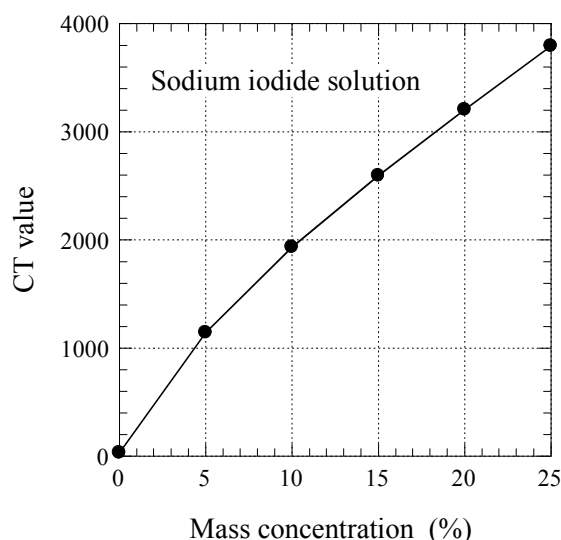


図 6. 4. 3-3 ヨウ化ナトリウム水溶液の濃度と CT 値の関係

(5) 実験手順

X 線 CT 観察下でのレジン注入試験は次の手順で行った。まず、図 6. 4. 3-4 に示すように透水セルを X 線 CT スキャナの寝台に割れ目面が鉛直になるように設置した。次に、注水側に高精度シリンジポンプ (260D、Teledyne ISCO) を、排出側に排水用タンクを接続し、透水セル下側から上側に向かって注水し割れ目内を水で満たした。その後、ポンプ内の流体を濃度 10% のヨウ化ナトリウム水溶液に入れ替え、排水用タンクにエアーコンプレッサーで 60kPa の圧力を加えた状態で、割れ目内をヨウ化ナトリウム水溶液で満たしていった。最後に、注水側のポンプをマイクロシリンジポンプ IC-3100 に切り替えて、ウラニンを添加したレジン材を割れ目内に注入した。当初、ヨウ化ナトリウム水溶液の割れ目内での流動過程を可視化することを目指したが、割れ目幅が小さく有意な出力を得ることができなかった。また、レジン注入試験でも、レジン材の割れ目内での流動過程を可視化することを目指したが、図 6. 4. 3-5 に示すように排出側からレジン材を伴わないウラニンが排出されたため、流量速度を上げて速やかに割れ目内をレジン材で充填させた。以上の理由から後述の実験結果では、それぞれの実験で得た最終画像のみを示す。なお、図 6. 4. 3-5 の右側の写真は、ウラニンを添加したレジン材にヨウ化ナトリウム水溶液を投入した直後の写真であり、上側と下側

で色の濃さが異なっている様子が確認できる。排出側からレジン材を伴わないウランが排出されたことと考え合わせて、ヨウ化ナトリウム水溶液とレジン材が混じり合った後、レジン材に添加したウランがレジン材から分離された可能性が考えられる。この点に関しては今後の課題としたい。

レジン材充填後は、未硬化のレジン材が割れ目から流出しないように、注水側および排水側に取付けたバルブを閉じて実験を終了した。なお、レジン注入試験に用いたレジン材はエバーボンド EP-400 (M)にウランを 200ppm 添加したものをを用いた。また、X線 CT 撮影は割れ目に直交する断面で行った。

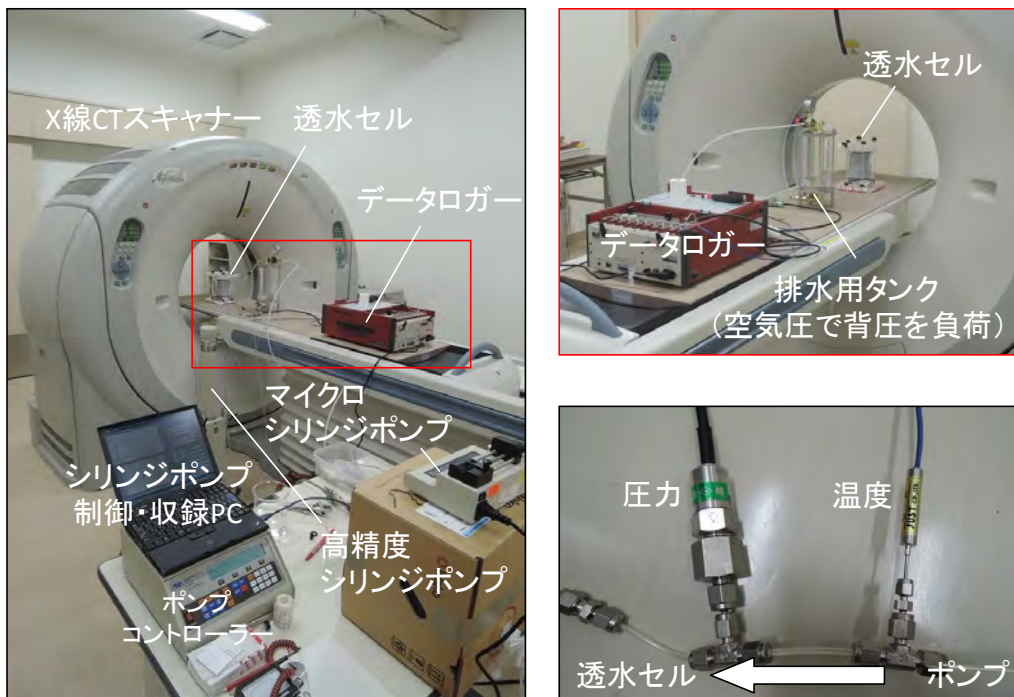


図 6. 4. 3-4 レジン注入試験時の装置の設置状況

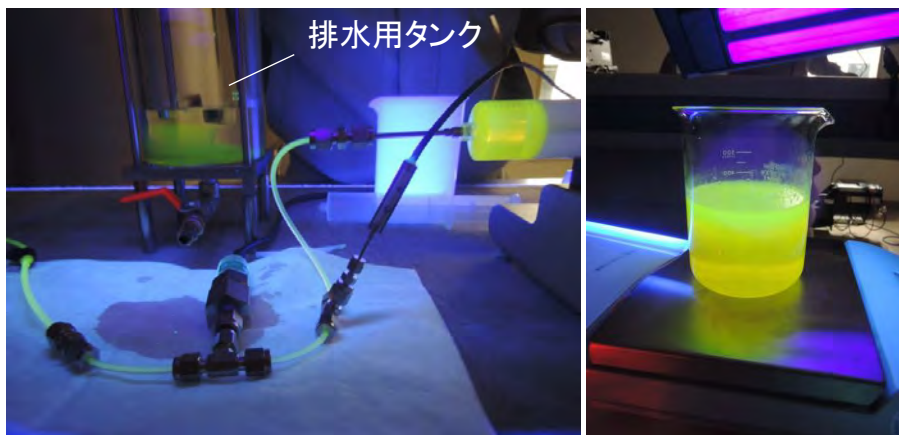


図 6. 4. 3-5 レジン材からのウランの分離

6.4.4 実験結果

図 6.4.4-1 に撮影で得られた X 線 CT 原画像を示す。左の画像が yz 断面であり、右の画像が複数枚の yz 断面から再構成した xy 断面である。画像のしきい値は WL が 1800、WW が 1000 である (CT 値の表示範囲 : 1500~2300)。これまで、直径 100mm の岩石コアをコア軸に直交する断面 (本研究での xy 断面) で行ってきたが、yz 断面を見て分かるように 100mm の寸法であってもコア軸に水平な方向で撮影すると、コアの角部からシャワー状のノイズが生じることが確認できる。また、yz 断面から再構成した xy 断面も割れ目部分にシャワー状のノイズがオーバーラップされ、その鮮明さが低下していることが確認できる。割れ目を含む試料を撮影する場合は、角のない試料を準備し、コア軸に直交する断面で行うことが望ましい。その他にも造影剤の重力依存性や拘束圧を付加させるためのセル水の影響など、割れ目を含む試料を撮影する際に注意すべき点があるが、それらについては、関連する文献を参照されたい。

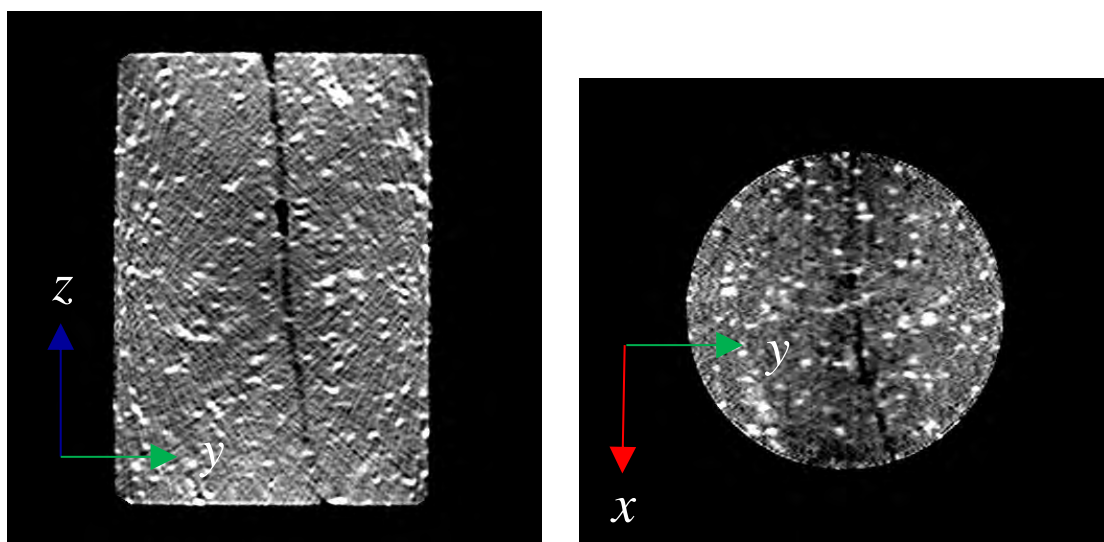


図 6.4.4-1 岩石コアの X 線 CT 原画像 (左 : yz 断面、右 : xy 断面)

図 6.4.4-2 に X 線 CT 原画像に $7 \times 7 \times 7$ の三次元ガウシアンフィルター処理を施した画像を示す。画像のしきい値は Window Level が 1800、Window Wide が 1000 である (CT 値の表示範囲 : 1500~2300)。左から割れ目内が水、ヨウ化ナトリウム水溶液、レジンの画像である。X 線 CT 原画像で見られた激しいシャワー状のアーチファクトやスパイク状のノイズが抑制されていることが分かる。ノイズを多分に含む画像同士の差分を行った場合、このノイズの影響で割れ目のエッジ部分を検出することが困難になる場合が多い。実際、X 線 CT 原画像で差分を行った結果、割れ目の抽出が出来なかった。したがって、ノイズを含む画像同士の差分を取る場合は、事前にノイズ処理を施すことが望ましい。

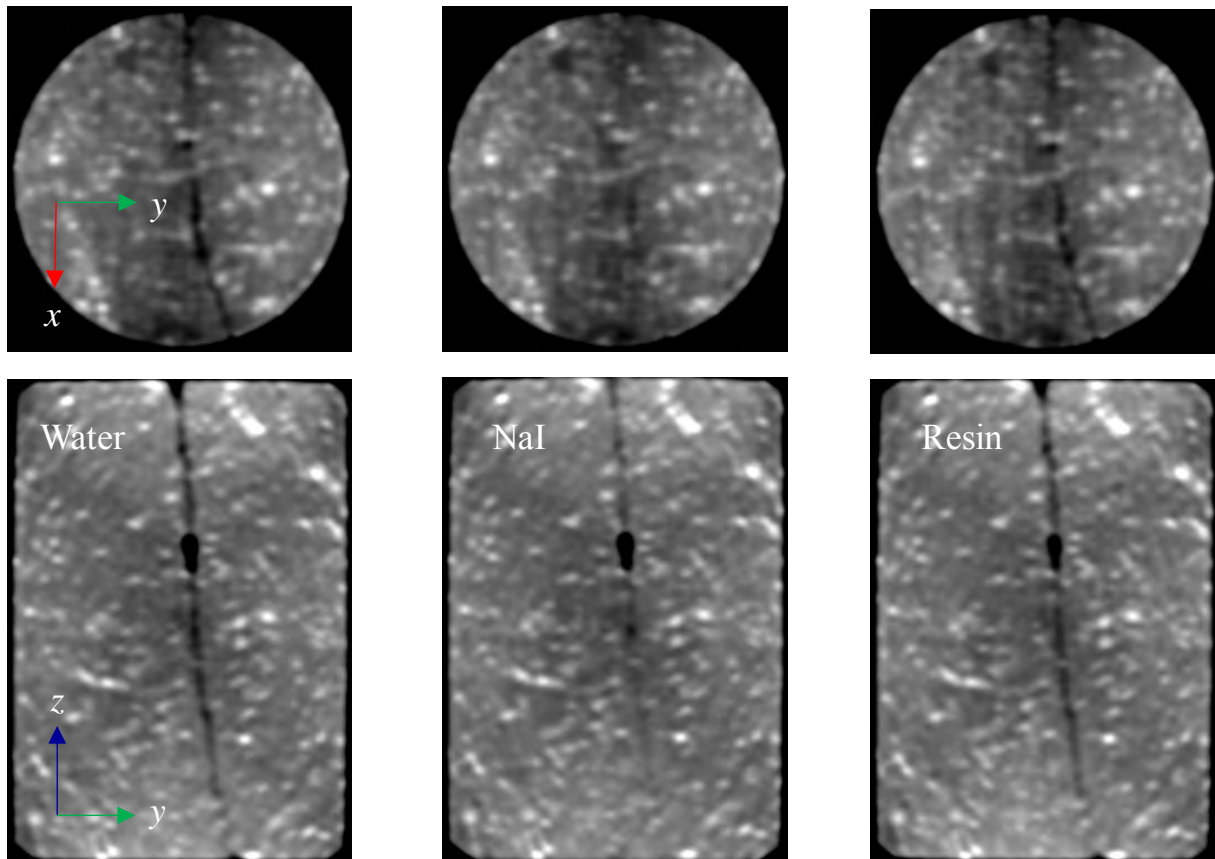


図 6. 4. 4-2 ガウシアンフィルター処理を施した X 線 CT 画像

(左：割れ目内が水、中央：割れ目内がヨウ化ナトリウム水溶液、右：割れ目内がレジン材)

図 6. 4. 4-3 に画像間差分による割れ目領域の抽出結果を示す。左が割れ目内の流体がヨウ化ナトリウム水溶液と水との差分画像であり、右が割れ面内の流体がヨウ化ナトリウム水溶液とレジン剤との差分画像である。すなわち、左の画像が水の移行経路を表し、右の画像がレジン材の移行経路を表している。なお、両画像とも同じしきい値 (CT 値 < 60) で処理された二値化画像である。両画像から読み取れる割れ目の形状は概ね一致している。したがって、水と性質が異なるレジン材であっても、レジン材が充填された部分を水みちとして判断しても差支えがないものと考えられる。ただし、主剤と硬化剤との混合からレジン注入試験終了までに要した時間は約 60 分である (可使時間以内) ので、可使時間以内に割れ目の全域を充填できていなければその限りではない。なお、レジン材の移行経路を示す画像の方が充填されていない箇所が目立つが、これには二つの理由が考えられる。一つ目は、レジン材が水に比べて密度が高くヨウ化ナトリウム水溶液との差が水との差に比べて小さかったこと、二つ目は、レジン注入試験時に高濃度のヨウ化ナトリウム水溶液中のヨウ素イオンがウラニウムと交換され、レジン材にヨウ素イオンが取り込まれたことによって、レジン材の密度が増加したこと (レジン材とヨウ化ナトリウム水溶液の差が小さくなったこと) が考えられる。

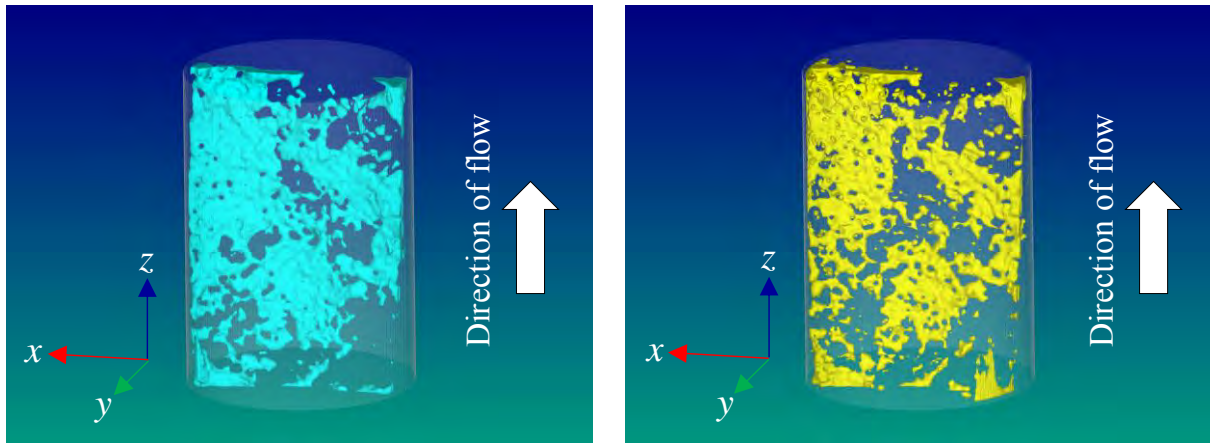


図 6. 4. 4-3 画像間差分による割れ目領域の抽出結果

(左：造影剤と水との差分画像、右：造影剤とレジン材との差分画像)

レジン注入試験後、約1ヶ月程度割れ目内のレジン材を養生した後、岩石コアを透水セル（アクリルパイプ）から回収した。回収した岩石コアに対して、デジタルカメラによる観察を行った。図 6. 4. 4-4 に岩石コアの表面観察結果を示す。左から流入面、排出面、側面（X線CT撮影開始側）、側面（X線CT撮影終了側）から撮影した画像である。流入面の画像からは、割れ目近傍の岩石基質部にレジン材から分離したウランが浸潤している様子が確認できる。自然光下でのウランが浸潤している箇所の色は、国外サイトで得た岩石コアのウランの分離が疑われた部分と同色である。また、割れ目に充填されているレジン材もウランが分離したためかウランの蛍光強度が弱い。排出面では、岩石基質部へのウランの浸潤は少なく、割れ目に充填されているレジン材の色は流入面よりも濃い黄緑色を呈している。側面では、下側（流入側）でウランの浸潤が認められ、割れ目の部分は、黄緑色と青色とがまばらに分布している。この青色は、アクリルパイプとの接着に用いたシリコンシーリング材であり、アクリルパイプとの接着時に側面に存在した幅の広い割れ目に充填されていたものである。岩石コアの側面に存在する幅の広い割れ目は、ボーリングコア掘削時に生じた人工的な割れ目であると考えられる。流入面および排出面も同様に、端面成形やアクリルパイプとの接合作業時に割れ目が拡大しているため、表面からの観察結果からは正確な割れ目幅を評価することはできない。

岩石コアを縦割りにして、その切断面のみを観察した結果を図 6. 4. 4-5 に示す。

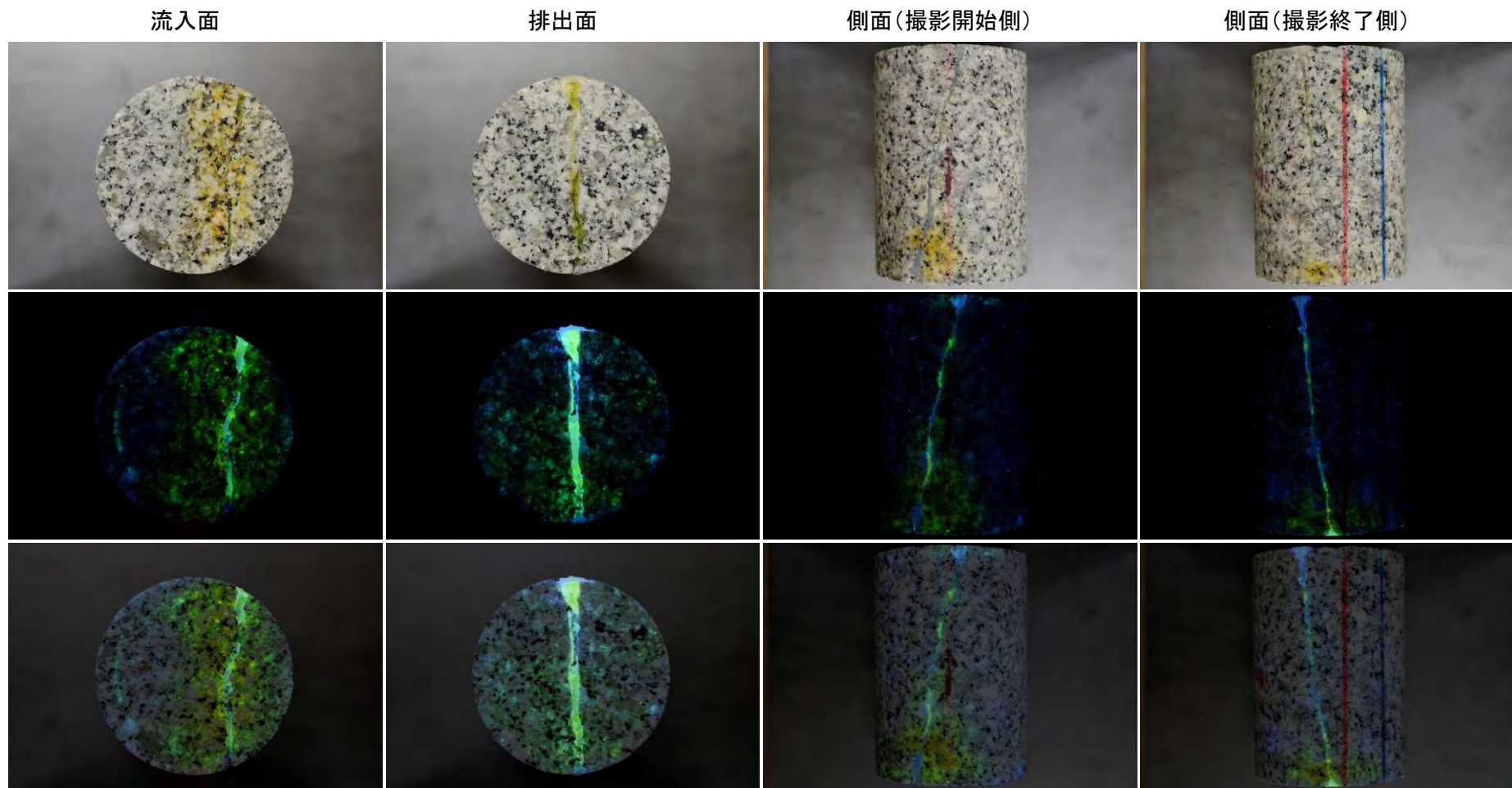


図 6. 4. 4-4 レジン注入試験後の岩石コアの表面観察結果

(上段：自然光下、中段：紫外線光源下、下段：自然光画像と紫外線蛍光画像の重ね合わせ)

自然光下の画像では、流入側でレジン材から分離したウラニン（黄色）を確認することができる。それ以外はウラニンの蛍光色である黄緑色のレジンが割れ目内を充填している様子が確認できるが、割れ目幅が非常に狭いため、その分布を鮮明に確認することが難しい。割れ目は、鉱物粒子内を通過しながら進展しており、その多くは長石を選択的に進展しているようである。

紫外線光源下の画像は、割れ目の部分だけが鮮明に抽出されており、自然光下では確認が難しかった割れ目の分布を確認することができる。ただし、レジン材からのウラニンの分離の影響を受けてか、一様な蛍光色でないことが確認できる。蛍光染料は酸やアルカリと反応して変質しやすく、耐久性に問題があることが知られている。今回の分離はそれに関連した化学的な反応によるものと思われる。

前述したように、レジン材からのウラニンの分離は、デジタルカメラによる観察において問題となるため、レジン材に馴染みやすく、安定した蛍光物質（蛍光顔料等）を選定する必要があると考えられる。レジン材が硬化過程で水中でどのような状態であるかも含めて今後検討していきたい。

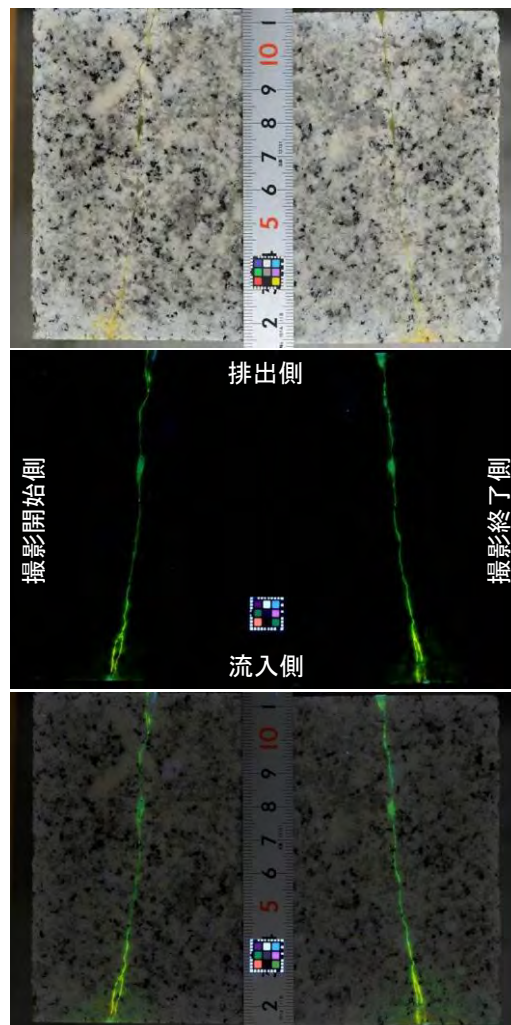


図 6.4.4-5 レジン注入試験後の岩石コア切断面の観察結果

(上段：自然光下、中段：紫外線光源下、下段：自然光画像と紫外線蛍光画像の重ね合わせ)

切断面を紫外線光源下で撮影した画像からレジンの充填幅を計測した。計測にはNIH (National Institute of Health) が開発したオープンソフトウェア「ImageJ」を用いた。計測点は184点である。

レジンの充填幅の頻度分布を図 6. 4. 4-6 に示す。表 6. 4. 4-1 にレジンの充填幅の最小値、最大値、平均値、中央値、標準偏差、分散を示す。開口幅の平均値は 0. 28mm であり、全体の 9 割が 0. 5mm 以下であった。次章の HR-BTV で計測された 12MI30 孔の割れ目の開口幅は全体の半数が 0. 1mm 以下である。このような幅の小さな割れ目の分布を医療用の X 線 CT スキャナで抽出することは、前述の割れ目間隙の可視化で示したように困難を伴うことが予想される。したがって、時間分解能が格段に劣るが、マイクロフォーカス X 線 CT スキャナなど、空間分解能に優れたものを用いることも検討すべきであると思われる。

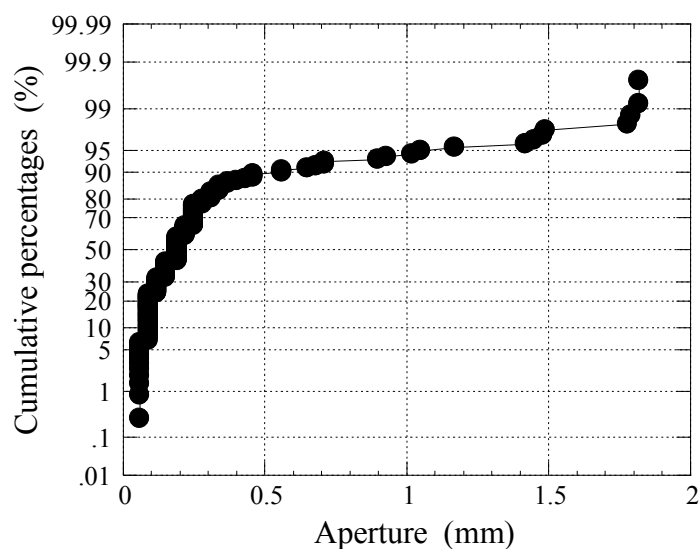


図 6. 4. 4-6 割れ目開口幅の累積頻度分布

表 6. 4. 4-1 レジン充填幅の統計

最小開口幅	0. 06mm
最大開口幅	1. 82mm
開口幅の平均値	0. 28mm
開口幅の中央値	0. 19mm
開口幅の標準偏差	0. 34mm
開口幅の分散	0. 12

6.4.5 まとめ

選定したレジンと国内サイトで得た岩石コアを用いて、X線CT観察下でのレジン注入試験を行った。また、レジン注入試験後にコアを切断し、その切断面の観察も行った。X線CT観察下でのレジン注入試験では、割れ目内の水の移行経路とレジンの移行経路の三次元画像から、その移行経路の形態が概ね一致することが分かった。すなわち、水と性質が異なるレジン材であっても、可使時間内の注入であれば、レジン材が充填された部分を水みちとして判断しても差支えがないことが分かった。また、レジン注入試験時にレジン材からウラニンが分離する現象も確認された。蛍光染料は酸やアルカリと反応して変質しやすく、耐久性に問題があることが知られていることから、今回の分離もそれに関連した化学的な反応によるものと思われる。今後、レジン材に対してより安定した蛍光物質を選定する必要がある。また、水中でのレジン材の硬化反応についても早急に検討する必要がある。つぎに、切断面の観察結果からは、今回使用した超低粘度形のレジンであれば、幅の狭い割れ目に低圧で充填させることが可能であることが分かった。また、割れ目の開口幅を測定した結果、平均開口幅が0.28mmであり、国外サイトの岩石に比べて非常に幅の狭い割れ目を有することが分かった。このような幅の狭い割れ目を医療用X線CTスキャナで精密に可視化するには困難を伴うことが予想されることから、場合によっては、空間分解能に優れるマイクロフォーカスX線CTスキャナを用いることも検討する必要がある。

6.5 まとめと今後の課題

平面研削と研削面の撮影を繰り返す手法を国外サイトで得た岩石コアに対して適用するとともに、割れ目の開口幅や形状を精度よく取得する方法について検討した。研削面画像から開口幅を測定した結果、開口幅分布が対数正規分布に類似した分布であった。また、開口幅の平均値は0.93mmであり、これは過去に計測した高粘性流体注入試験で得られた平均開口幅1.4mm、ラドン濃度計測で得られた平均開口幅0.55~0.76mmに近い値であった。計測したコアが1つであること、“main channel”のみを計測した結果であること、割れ目面間の最短距離を計測した結果ではないので、これらの測定値との比較を議論することはできないが、本手法を用いれば、単一割れ目ではない複雑な割れ目であっても平均的な割れ目幅を見積もることが可能であると考えられる。研削面画像から作成したMPR (Multi Planar Reconstruction) 画像や三次元画像は、1mm間隔の粗さを反映したものではあったが、X線CT画像では困難であった幅の狭い割れ目の分布を抽出することができ、割れ目間隙の精密な可視化が可能であることが分かった。しかし、割れ目沿いの岩盤基質部へ浸潤したレジンや粒内クラックに浸潤したレジンが割れ目として識別され、単純な画像処理で三次元画像を構築した場合は、割れ目間隙の三次元分布が実態と異なることが課題として残った。

国外サイトで使用したSika Injection-26と仕様が類似したレジン材を選定し、可使時間および粘

度の測定を行った。また、国外サイトで確認されたレジン材からウラニンが分離する原因についても調査した。可使時間は、粘性が低いものほどバラツキが小さく、測定の再現性が良いことが分かった。ただし、可使時間の決定方法は非常に単純である一方、曖昧なものであり、測定の再現性も含めて、どの時刻を可使時間とするかについても検討していく必要がある。混合後の粘度および温度の経時変化を測定した結果、温度が急激に上昇する時刻に粘度も急激に上昇すること、また、粘度が下に凸の曲線を描くように変化することが分かった。粘度が急激に上昇する温度は50℃付近であり、レジン注入時に孔内の温度を測定することが可能であれば、注入時のレジンの状態を大まかに把握することが可能であり、より安全かつ確実な注入が行えるものと考えられる。ウラニンを添加したレジン材を硬化させた後、硬化物をイソプロピルアルコールに浸漬した結果、ウラニンの溶出が確認された。レジン材に蛍光染料（ウラニン）そのものを添加する方法は、蛍光の退色やレジン材からのウラニンの分離など安定性に問題があることが確認された。レジン材にどのような蛍光物質を添加するかに関して検討が必要である。

選定したレジンと国内サイトで得た岩石コアを用いて、X線CT観察下でのレジン注入試験を行った。X線CT法により割れ目内の水の移行経路とレジンの移行経路を可視化した結果、その形態が概ね一致し、水と性質が異なるレジン材であっても、可使時間内の注入であれば、レジン材が充填された部分を水みちとして判断しても差支えがないことが分かった。また、デジタルカメラによる直接観察の結果、割れ目の開口幅の9割が0.5mm以下であったことから、医療用X線CTスキャナによる割れ目間隙の三次元分布の取得が困難なことが予想された。したがって、空間分解能に優れたマイクロフォーカスX線CTスキャナを用いることも検討する必要がある。

以上、顕微鏡による薄片試料の観察を除き、レジン充填コアの観察（可視化）手法はほぼ確立できたと考えられる。個々の課題のうち、レジン材へ添加する蛍光物質の選定に関しては早急に検討すべきである。その後、水中環境下でのレジン材の注入特性や力学特性について検討し、擾乱の少ない天然割れ目を回収するためのレジン注入方法を確立する必要がある。また、レジン材を大量に注入することができ、主剤と硬化剤の混合を制御できる機能や、流量や圧力を精密に制御できる機能を持つ注入システムの構築も必要である。レジン注入試験を計画しているサイトは、割れ目内を流れる地下水流量が比較的大きく水圧も高い。このような条件下で確実なレジン注入が行えるか懸念されるが、自然状態の流れに捉われず、割れ目内の流れを人工的に制御した状態でレジン注入を実施することも選択肢として検討すべきであろう。その他の試験との兼ね合いもあるが、今一度原点に立ち戻って、何を優先して評価すべきか、そのために何を取舍選択する必要があるのかを議論する必要があると考えられる。

参考文献

- E. Hakami and E. Lansson, (1996): Aperture measurements and flow experiments on a single natural fracture, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 33 (4), pp395-404.
- 鐵桂一、澤田淳(2005): 研削した岩体亀裂開口部の観察による開口幅の測定 - NETBLOCK 試験報告 - 、サイクル機構技術資料、JNC-TN8430-2005-001.
- 鐵桂一、澤田淳(2008): 研削により測定した 50cm スケール岩体中の天然亀裂の形状に関する研究、日本原子力研究開発機構技術資料、JAEA-Research 2008-079.
- 鐵桂一、澤田淳(2010): 研削により測定した 50cm スケール岩体中の天然亀裂の形状と開口幅の分布に関する研究、日本原子力研究開発機構技術資料、JAEA-Research 2010-041.
- 澤武一(2008): 目で見てわかる研削盤作業、日刊工業新聞社.
- 赤堀邦晃、内田雅大(1997): エポキシ樹脂注入による亀裂開口幅の測定について、動燃技術資料、PNC TN841097-004.
- B. Frier, W. R. Alexander, H. Dollinger, C. Bühler, P. Haag, A. Möri, K. Ota, (1998): In situ resin impregnation for investigating radionuclide retardation in fractured repository host rocks, *Journal of Contaminant Hydrology*, 35, pp.115-130.
- 太田久仁雄、W. R. Alexander (2001): 結晶質岩を対象とした放射性核種の移行・遅延モデルの構築と妥当性評価 - Nagra/JNC 原位置試験研究の概要 - 、サイクル機構技報 No. 11.
- 核燃料サイクル開発機構(1999): 釜石原位置試験総括報告書、JNC TN7410 99-001.
- 日本工業規格 JIS K 6833-1(2008): 接着剤-一般試験方法-第1部: 基本特性の求め方.
- 日本工業規格 JIS A 6024(2008): 建築補修用注入エポキシ樹脂.
- 日本工業規格 JIS K 6870(2008): 接着剤-多成分接着剤のポットライフ(可使時間)の求め方.
- 日本工業規格 JIS Z 8803(2011): 液体の粘度測定法.
- 日本工業規格 JIS K 7117-1(1999): プラスチック-液状、乳濁状又は分散状の樹脂-ブルックフィールド形回転粘度計による見掛け粘度の測定方法.
- 伊奈治、石川智則、成田量一、竹中治(1999): エポキシ樹脂注型品の硬化プロセス解析技術の開発、*センサーテクニカルレビュー*、Vol. 4、No. 1、pp. 94-100.
- 杉田創、松永烈、柳沢教雄、田尾博明、山口勉、青木一男(2003): フルオレセインの蛍光強度に及ぼす pH および溶存イオンの影響、*日本地熱学会誌*、Vol. 25、No. 3、pp. 211-225.
- 杉田創、松永烈、柳沢教雄、駒井武(2006): フルオレセインの熱分解挙動に関する一次反応速度式による解析、*資源と素材*、Vol. 122、pp. 101-106.

7. 適用性試験場の地質環境調査

7.1 はじめに

本事業において開発した各種調査技術を、平成 20 年より割れ目の分布が比較的単純なスイスの Grimsel Test Site に適用し、平成 24 年度までに技術の有効性をほぼ確認することができた。次の目標は、日本国内の岩盤に対してもこれらの技術が適用できることを示すことである。本章では、適用性試験場として選んだ独立行政法人日本原子力研究開発機構 瑞浪超深地層研究所の深度 300m 付近に分布する中～粗粒土岐黒雲母花崗岩を対象にした地質環境調査について報告する。

7.1.1 瑞浪超深地層研究所の研究施設の概要

超深地層研究所計画は、独立行政法人日本原子力研究開発機構（JAEA）により進められてきた結晶質岩と淡水系地下水を対象とした深地層の研究施設計画である。瑞浪超深地層研究所の研究坑道については、平成 20 年度までに深度 300m にボーリング横坑および研究アクセス坑道が完成し、平成 24 年度までに立坑部は深度約 500m まで達している。瑞浪超深地層研究所の位置と研究坑道の構造図を図 7.1.1-1 に示す。本研究所周辺の地質は、基盤をなす後期白亜紀の土岐花崗岩体を新第三紀中新世の堆積岩（瑞浪層群）が不整合で覆っている。瑞浪層群は下位より土岐夾炭累層、本郷累層、明世累層、生俵累層に分けられる（糸魚川、1980）。研究用地周辺における瑞浪層群の層厚は百数十 m であり、深度 300m ボーリング横坑は土岐花崗岩体中に建設されている（田上ほか、2009）。

7.1.2 深度 300m ボーリング横坑の概要

深度 300m ボーリング横坑の長さは換気立坑中心から約 20m であり、坑道高さ約 3m、坑道幅約 4m の馬蹄形坑道である。また、端部から 5m は坑道高さが 3.8m、その底部は土岐花崗岩が観察できるように露出させている（図 7.1.2-1）。深度 300m ボーリング横坑は、主立坑脇の遮水性断層（S200_M_SHAFT）と南西側の遮水性断層（S200_13 および S200-13-2）に囲まれた比較的割れ目の多い上部割れ目帯に掘削されている（石橋ほか、2010）。ただし、主立坑脇の遮水性断層の北東側に比べて、緑泥石化が顕著な領域は確認されていない。また、坑道掘削時の壁面観察から約北西方向の走向を示す割目が卓越しており、数 m 程度の連続性を有することが確認された。

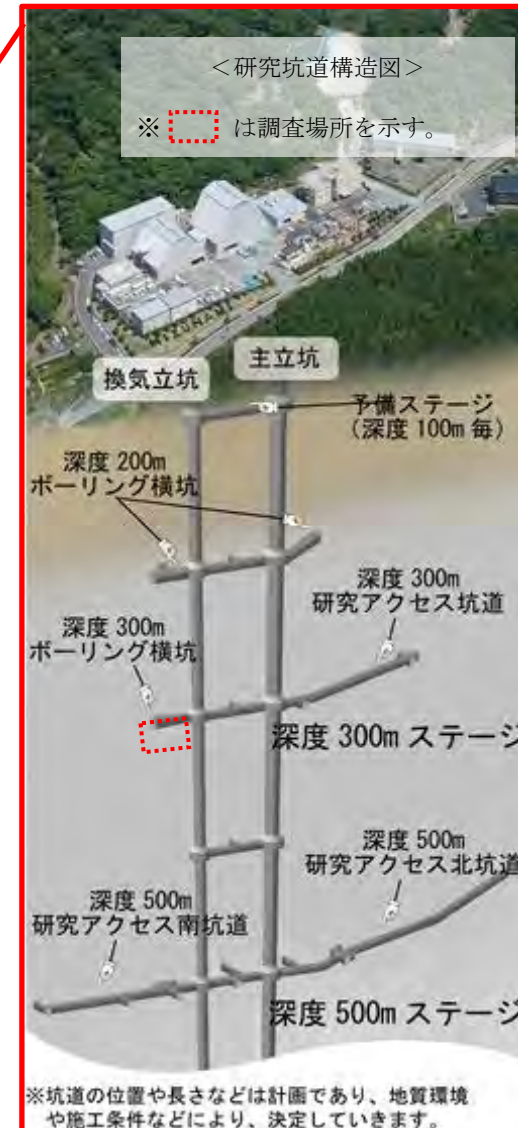


図 7.1.1-1 岐阜県瑞浪市における瑞浪超深地層研究所の位置と地下研究施設

(JAEA ホームページより)

BM: No.300B10
X: -69,046.629
Y: 6,413.941
(世界測地系)

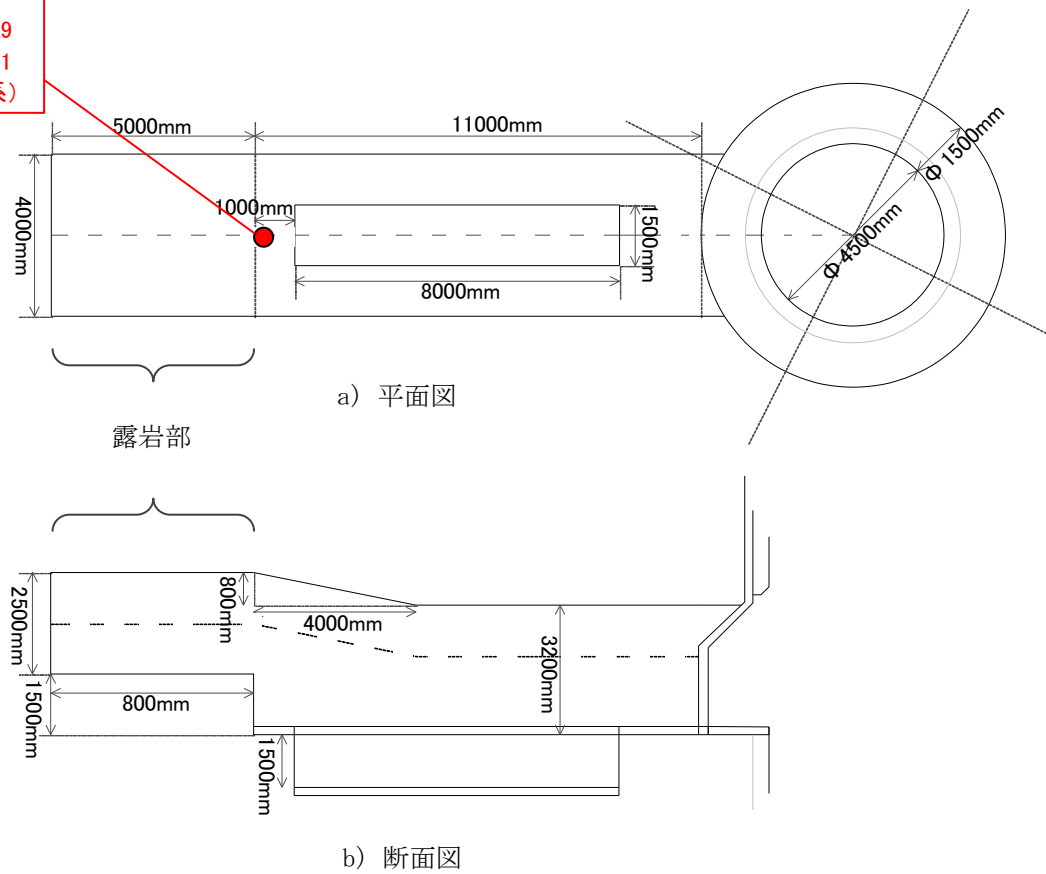


図 7.1.2-1 深度 300m ボーリング横坑構造図

7.2 適用性試験場の地質環境調査概要

7.2.1 調査の目的

トレーサ試験装置等の適用性試験を実施するためには、以下に示す割れ目の条件が望ましい。

- ・ 単一割れ目
- ・ 割れ目が2～4mは連続していること
- ・ 割れ目の透水量係数が $1 \times E-07 \text{m}^2/\text{sec}$ オーダー程度
- ・ 坑道壁面からの距離深度で30m以内（最大50m）

この条件の内、透水性を考えると掘削中の湧水量として2～20L/min程度の場所を選ぶための調査を実施する。

深度300mボーリング横坑エリア周辺においては、ボーリング調査による透水試験データが少なく割れ目の性状と透水性の情報が得られていない。このことから、トレーサ試験等の適用性試験場の調査エリアは深度300mボーリング横坑とし、この中で他のボーリング調査で乱されていないことや、坑道掘削時の壁面観察結果等から西側壁面を選定した（図7.2.1-1）。

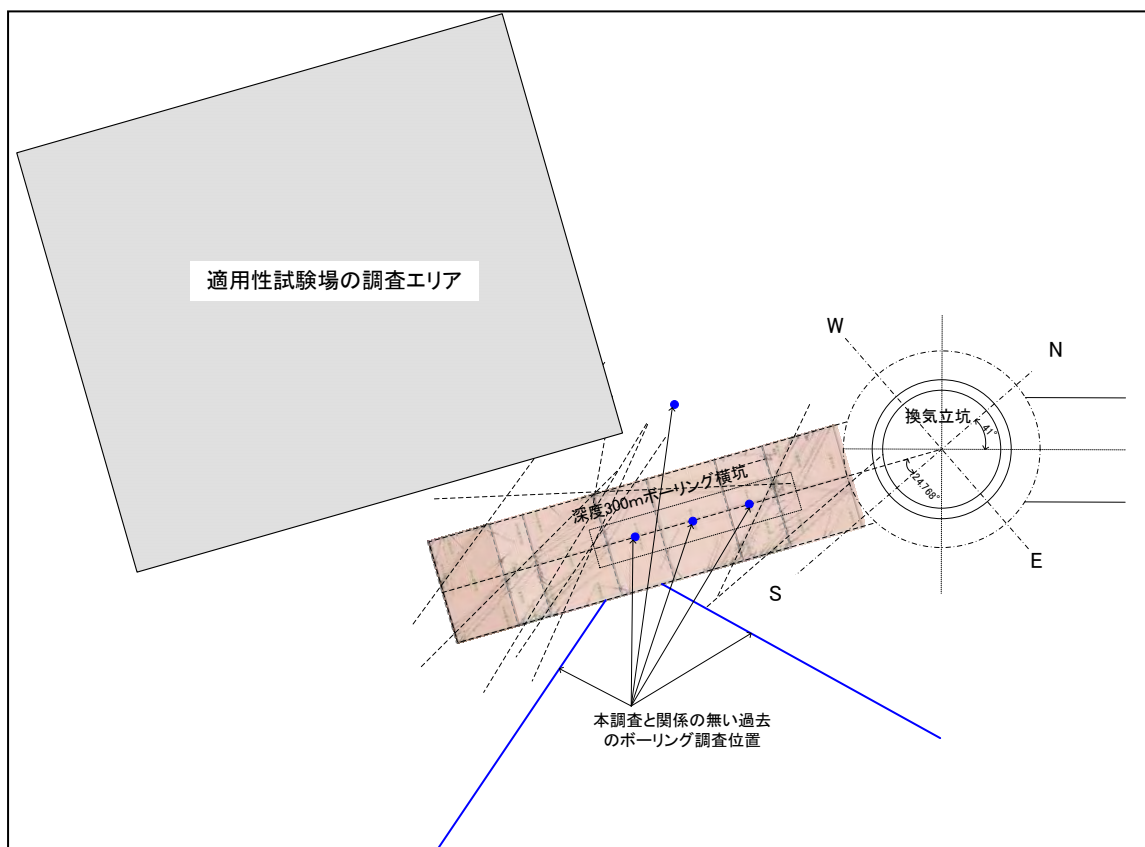


図 7.2.1-1 深度300mボーリング横坑における調査エリア

7.2.2 調査項目

平成 25 年度は、トレーサ試験装置、高粘性流体注入試験、ラドン計測装置、音響トモグラフィ装置の適用性試験に先立ち、深度 300m ボーリング横坑の坑道壁面から約 30m の範囲における水理地質特性および岩盤性状等の地質環境特性調査を目的として、平成 24 年度に続いて 2 本のボーリング孔(孔名: 13MI36 号孔、13MI37 号孔) の掘削作業と掘削したボーリング孔を用いた各種検層、透水試験および、間隙水圧のモニタリングを行った。図 7.2.2-1 に調査フローを示す。

実施した調査の内容は、以下の通りである。

- ・ ボーリング掘削位置の設定
- ・ ボーリング孔口測量
- ・ ボーリング掘削および孔曲がり検層
- ・ コア観察
- ・ キャリパー検層
- ・ BTV・フローメータ検層
- ・ 透水試験（単孔式、孔間）
- ・ 間隙水圧モニタリング装置の設置および観測
- ・ ポイント希釈試験
- ・ 12MI30 号孔（平成 24 年度に掘削）の透水試験の追加
- ・ 高精度孔曲がり検層
- ・ 高精度 BTV 検層
- ・ 音響トモグラフィ

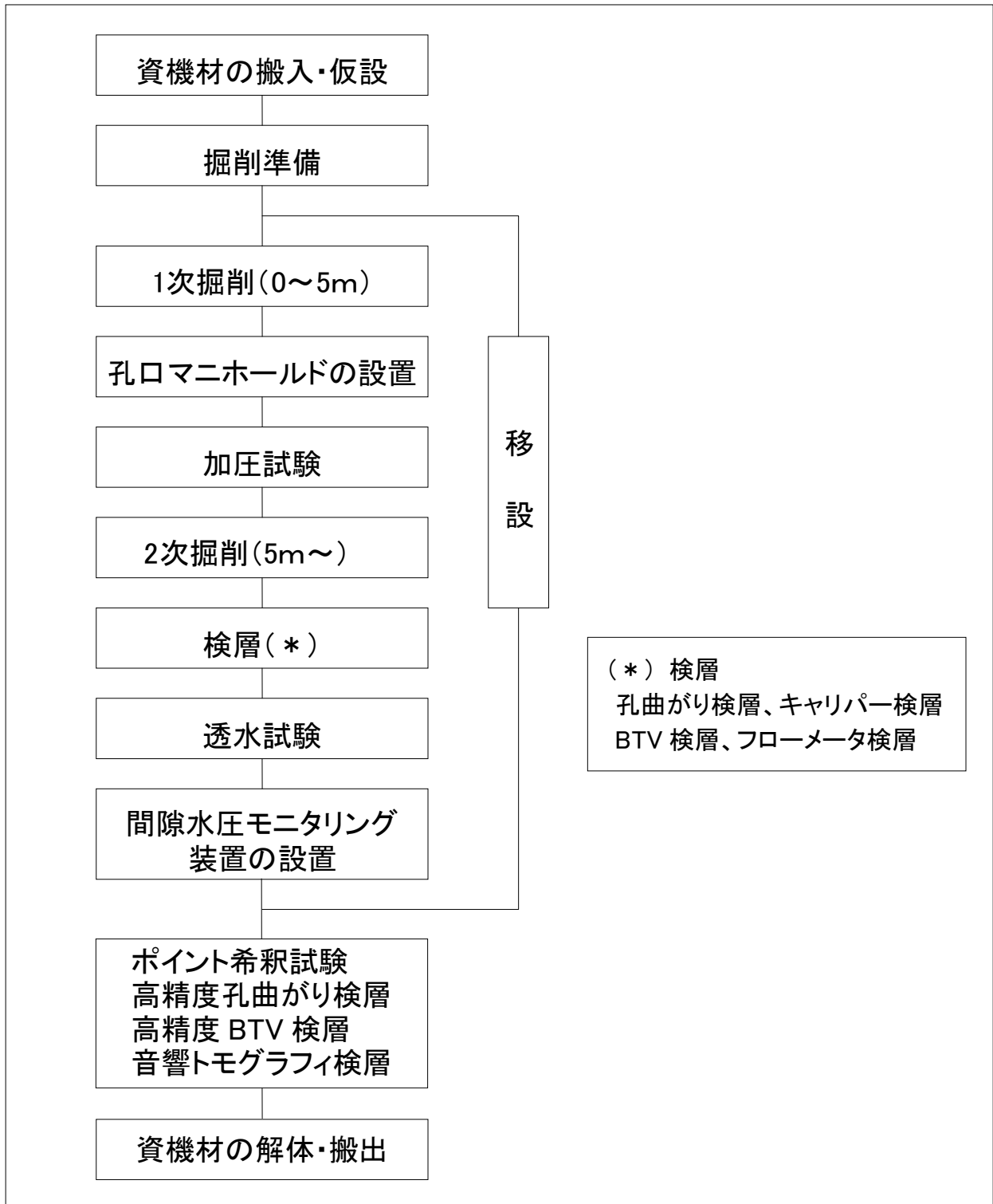


図 7.2.2-1 調査フロー

7.2.3 調査手順

7.2.3.1 ボーリング調査

(1) ボーリング掘削位置の設定

13MI36号孔、13MI37号孔のボーリングの掘削位置は、平成24年度に掘削した12MI30号孔および12MI31号孔の調査結果（割れ目の分布および、走向傾斜）と周辺の観測設備設置状況等を考慮して決定した。

(2) 主要ボーリング資機材

表7.2.3-1にボーリング作業で使用した主要資機材の一覧を、図7.2.3-1にボーリングマシンを、図7.2.3-2に孔口部の4インチケーシングを、図7.2.3-3にボーリングロッドを、図7.2.3-4にボーリングビットを示す。

表 7.2.3-1 主要ボーリング機材一覧表

品名	型式	数量	単位	寸法 (H×W×L)	重量	備考
ボーリングマシン	東邦地下工機 D2-K-92	1	台	1570×870×1546	750 Kg	能力250m モーター含む(7.5kW)
ボーリングポンプ	東亜利根 NAS-2	1	台	670×480×1600	190 Kg	最大圧力 3Mpa モーター含む(3.7kW)
H鋼	150H × 1.5m	4	本	30kg/m	180 Kg	ボーリングマシン架台用
H鋼	150H × 1.0m	2	本	30kg/m	60 Kg	ボーリングマシン架台用
ロッド類	NQ ロッド × 2.0m	16	本	8kg/m	256 Kg	掘削用
ロッド類	NQ ロッド × 1.0m	6	本	8kg/m	48 Kg	
ロッド類	NQ ロッド × 0.5m	6	本	8kg/m	24 Kg	
ロッド類	AQ ロッド × 2.0m	15	本	5kg/m	150 Kg	検層用
ロッド類	AQ ロッド × 0.5m	15	本	5kg/m	38 Kg	
ロッド類	AQ ロッド × 0.3m	15	本	5kg/m	23 Kg	
コアチューブ	φ 86mm	1	本	L=1.5m	7 Kg	掘削用 インナーチューブ1.0m
ケーシング類	φ 114.3mm × 1.0m	8	本	12kg/m	96 Kg	ステンレス製
ケーシング類	φ 114.3mm × 0.5m	2	本	12kg/m	96 Kg	
フロートシュー	φ 114.3mm × 0.59m	2	本		30 Kg	
タンク類	サクシオンタンク(掘削用)	1	台	600×600×1220		鉄製
タンク類	清水タンク	1	台	760×870×1070		掘削水貯水用
タンク類	排水タンク(排水貯水用)	1	台	760×870×1070		排水貯水用
タンク類	ドラム缶	1	台			トレーサー作液用
タンク類	半ドラム缶	1	台			孔口出口 中継用タンク
足場パイプ	φ 48.6mm L=3m	10	本	2.5kg/m	25 Kg	
足場パイプ	φ 48.6mm L=2.5m以下	30	本	延べ30m	75 Kg	
クランプ	φ 48.6mm (直交、自在)	60	個	0.5kg/個	30 Kg	
水中ポンプ	2吋 100V用	5	台		50 Kg	
ホース類	1-1/2吋 サクシオンライン	1	本	5m	3 Kg	
ホース類	1吋 デリベリライン	1	本	10m	10 Kg	
ホース類	2吋 サニーホース	1	本	50m	30 Kg	
道具類・吊り具類	スィベル、ケーシングバンド、 パイプレンチ・滑車	1	式		150 Kg	
孔口装置	メインバルブ、フリハンター	1	式		100 Kg	



図 7.2.3-1 ボーリングマシン



図 7.2.3-2 孔口ケーシング



図 7.2.3-3 一般部（孔口部以外）ボーリングロッド



図 7.2.3-4 ボーリングビット

(3) 資機材の搬入・仮設

深度 300m ボーリング横坑における作業区域および、予備ステージ側の仮置き場区域を図 7.2.3-9 に、資機材の配置および掘削時の掘削水の給排水ルート概念図を図 7.2.3-10 に示す。

掘削中は掘削水が深度 300m ボーリング横坑のピット内に流出しないように、ピットのグレーチング部はシート養生した（図 7.2.3-5）。掘削に使用する坑内湧水は、使用量を把握し、日報等に記載した（図 7.2.3-6）。また、ボーリング孔から出る掘削水はスライム溜め用ドラム缶や掘削水用タンク（図 7.2.3-7）を継由させ、スライムを分離した後、試錐ポンプから再度送水し、掘削水として再利用した。また、湧水で掘削水が増加した場合は、A 工区排水ピットに排水した。排水量は電磁流量計（図 7.2.3-8）で計測した。



図 7.2.3-5 シート養生状況



図 7.2.3-6 掘削水量の計測状況



図 7.2.3-7 掘削水用タンク



図 7.2.3-8 排水側の電磁流量計

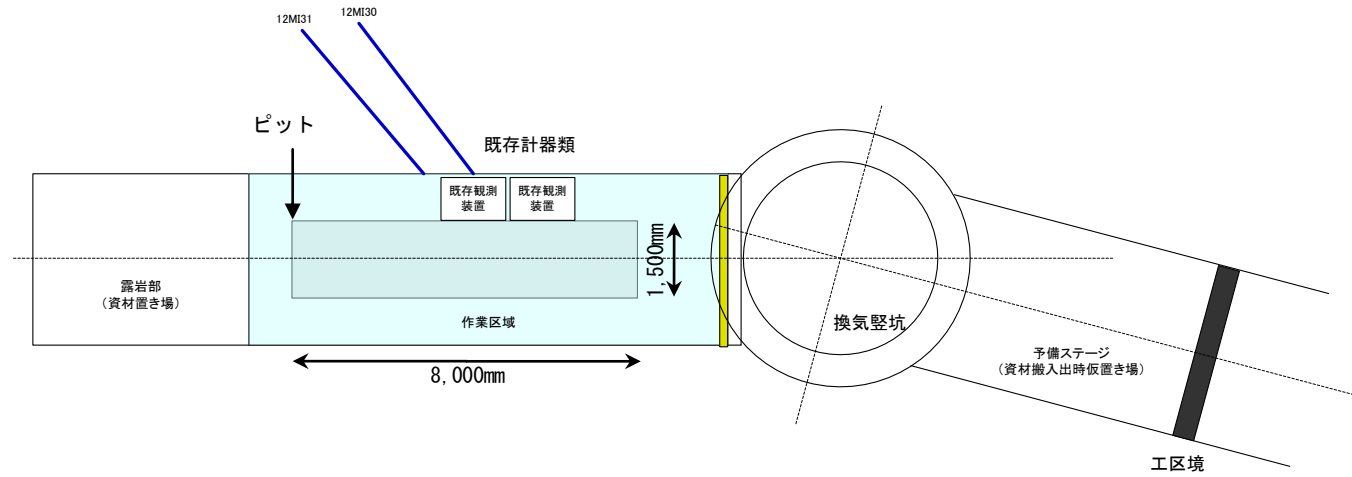


図 7.2.3-9 深度 300m ボーリング横坑作業区域概念図

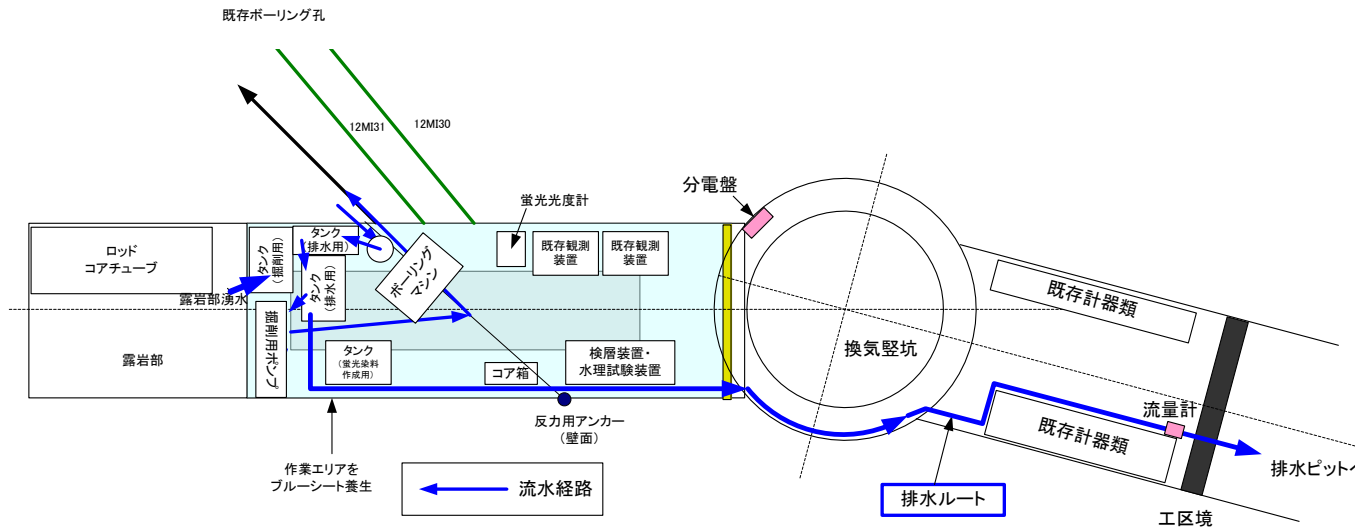


図 7.2.3-10 ボーリング資機材配置および掘削水の給排水ルート概要図

(4) ボーリングの孔口測量

図 7.1.2-1 中に示す BM (Bench Mark) 点より位置出し測量を行い、設定位置通りのボーリング位置を求めた (図 7.2.3-11)。なお、BM 点の座標は、 $X=-69,046.629$ 、 $Y=6,413.941$ である (世界測地系)。



図 7.2.3-11 ボーリング位置の位置出し測量状況

(5) ボーリング掘削および孔曲がり検層

a. ボーリング掘削の概要

- ・ 掘削は二重管普通工法 (外径 86mm、コア径 : 72mm) で坑内湧水を用いた清水掘削とした。
- ・ 掘削編成は、ビット (外径 86mm) × コアチューブ (二重管) × センターリーマー × ロッドを基本編成とし、多量のスライムが発生した場合はマッドチューブ、セジメントチューブを使用した。また、坑内レイアウトの制約から 0.5m、1.0m、2.0m のロッドを使用した。ビットは、過去のボーリング実績に基づきインプタイプを使用した。
- ・ 掘削によって発生したスライムは、土嚢袋等に集積してから地上へ搬出し、産業廃棄物として適切に処理処分した。

b. 1 段目 (坑道掘削損傷領域部) の掘削

坑道周辺には、坑道掘削時に発生した掘削損傷領域 (以下、EDZ と示す) が存在するため、ボーリング掘削で発生する湧水が EDZ を介して逸水しないように口元から EDZ もしくは、割れ目が減少するまでの範囲を 1 段目の掘削としてケーシングを設置した。1 段目の掘削は、 $\phi 86\text{mm}$ でコア採取したのち、孔内からの湧水対策として $\phi 101\text{mm} \rightarrow \phi 140\text{mm}$ で拡孔後、図 7.2.3-12 に示す孔口ケーシングを設置した。ケーシング長は 5.0m を目安としたが、採取したコアの状況に応じて調整して決定した。

ケーシングはセメントで岩盤に固定し、セメント固定後には孔内からの最大 3MPa の湧水圧に対して十分な耐性を有すことを確認するために加圧試験を行った。

掘削から加圧試験までの手順は次に示すとおりである（図 7.2.3-13）。

- ① ϕ 86mm 掘削・コア採取（1 段目）（図 7.2.3-14）
- ② ϕ 140mm 拡孔（1 段目）
- ③ 孔口ケーシング挿入・口元固定（図 7.2.3-15, 図 7.2.3-16）
- ④ セメント充填
- ⑤ セメント硬化養生
- ⑥ セメント浚渫
- ⑦ 加圧試験（図 7.2.3-17）
- ⑧ 2次掘削・コア採取

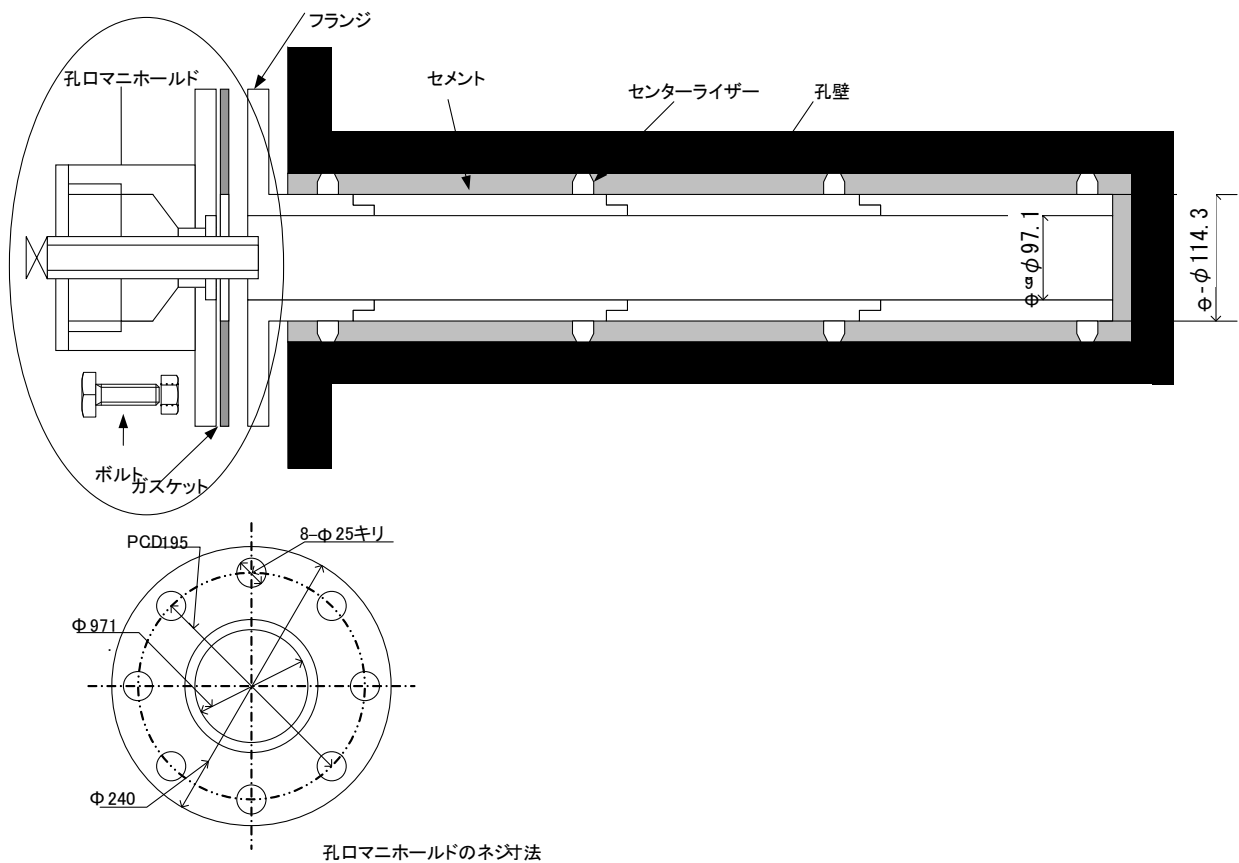
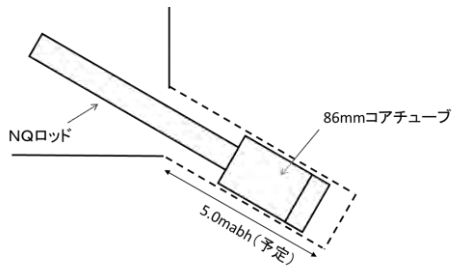
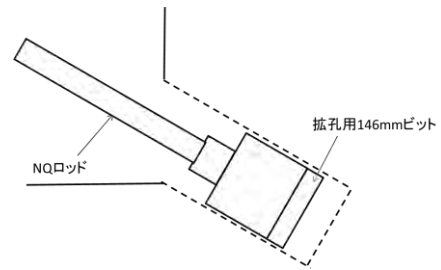


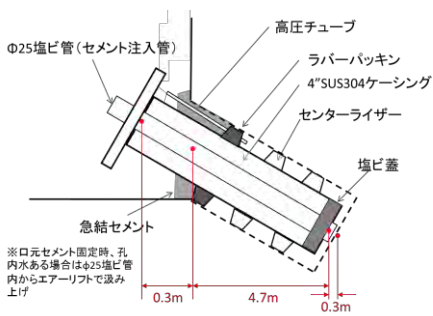
図 7.2.3-12 孔口ケーシング仕上げ概念図



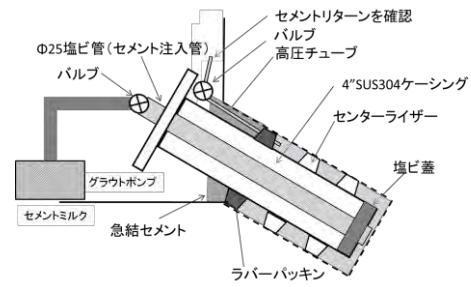
①φ86mmコア採取(0~5mabh)



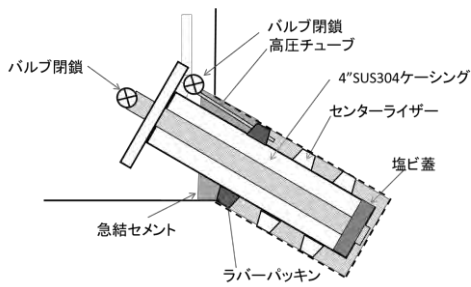
②φ146mm拡孔(0~5mabh)



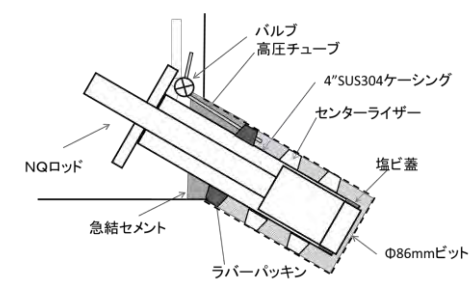
③孔口ケーシング挿入・口元固定



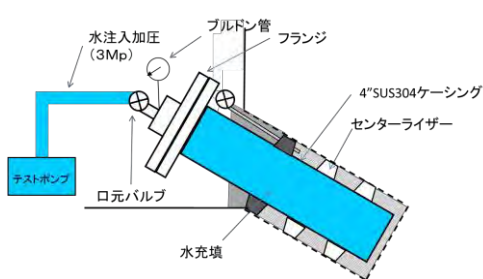
④セメント充填



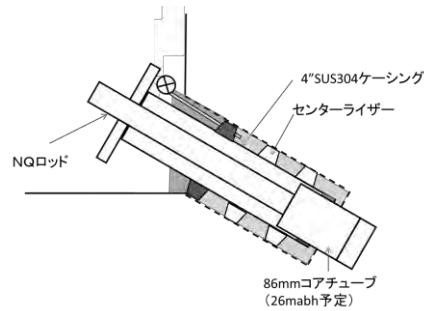
⑤セメント硬化養生



⑥セメント浚渫



⑦加圧試験



⑧2次掘削

図 7.2.3-13 1 段目の作業手順



図 7.2.3-14 $\phi 86\text{mm}$ (1 段目) 掘削状況



図 7.2.3-15 孔口ケーシング挿入状況



図 7.2.3-16 ケーシング設置状況



図 7.2.3-17 加圧試験状況

c. 2 段目の掘削

2 段目の掘削は、 $\phi 86\text{mm}$ のダブルコアチューブを用いてコア採取しながら掘削を行った。掘削に伴い、孔曲がり検層を掘削長 5m 程度毎に 1 回の頻度で実施して孔曲がり状況を確認した。孔曲がり対策として $\phi 86\text{mm}$ センターリーマー（図 7.2.3-18）をコアチューブに装着した。また、掘削では最大 3MPa の水圧を伴う湧水が予想されたため、突発性湧水発生時の孔口からの湧水突出を抑えるために、孔口にはプリベンダーとゲートバルブからなる孔口装置を設置した（図 7.2.3-19）。



図 7.2.3-18 センターリーマー

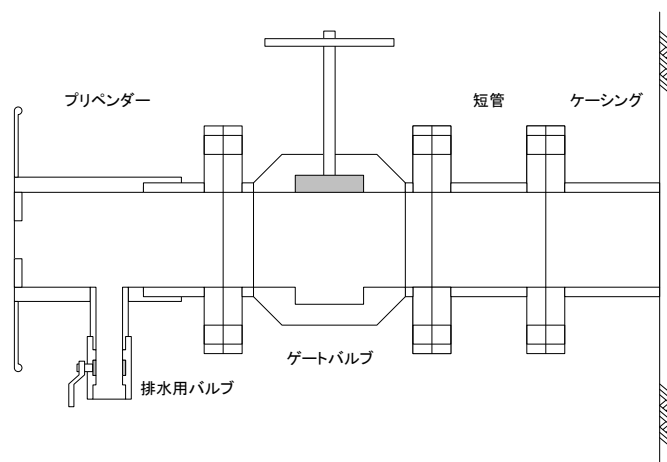


図 7.2.3-19 孔口装置概要図

掘削中の湧水量を把握するために、1 掘進長ごとに掘削水の影響が無視できると判断された時点（具体的には孔口から流出する水量がほぼ安定したとみなされた時点）の孔口から出る湧水を測定した。湧水量の測定は、孔口からの湧水をバケツ等で受けて、計量カップ等を用いて計量した。

d. 掘削水のアミノ G 酸濃度管理

- ・ボーリング掘削時に使用する掘削水や孔内洗浄等孔内で使用する全ての水には、蛍光染料のアミノ G 酸を濃度が $5\text{mg/L} \pm 10\%$ となるように調整して添加した。
- ・蛍光染料掘削水は、掘削直前に横坑内に設置した掘削水用タンクで作成した。作成時には分光蛍光光度計（日立 F-2500、図 7.2.3-20、表 7.2.3-2）により濃度分析を行い、蛍光染料濃度が

5mg/L の±10%以内の範囲にあることを確認した。

- ・掘削中は、1時間以下の間隔でリターン水をサンプリングし、蛍光染料濃度が 5mg/L の±10%以内の範囲にあることを確認した。
- ・リターン水の蛍光染料濃度が指定濃度範囲外となった場合は、掘削を一時中断し蛍光染料濃度を調整することとした（ただし、掘削水を送水する必要がない程度の湧水が確認され、蛍光染料の濃度管理が困難と判断された場合は、この限りではない）。
- ・2L/min 程度に湧水量が増え、濃度調整が困難となった場合は、掘削水へのアミノ G 酸の添加および濃度管理を中止することとした。



図 7.2.3-20 分光蛍光光度計（日立 F-2500）

表 7.2.3-2 分光蛍光光度計（日立 F-2500）の仕様

【仕様】		【機能】	
感度	S/N: 800以上 (RMS) 水のラマン光: 励起波長350nm、バンド幅5nm レスポンス2秒 S/N: 450以上 (Peak to Peak) 水のラマン光: 励起波長350nm、バンド幅10nm レスポンス2秒	波長スキャン測定	励起/蛍光/同期スペクトル 繰り返し測定/CAT スペクトル補正 励起/蛍光側共220~600nm トレース、スケール変更、グラフ軸変換 ピーク・バレー検知 スムージング ファイル間演算 (+, -, ×, ÷) 微分 (1次~4次) 面積計算
最少試料量	0.6mL (標準10nm角セル使用時)	時間変化測定	トレース、スケール変更 微分 (1次~4次) レート演算 ファイル間演算 (+, -, ×, ÷) スムージング 面積計算
測光方式	単色光モニター比演算方式	定量測定	検量線 (1, 2, 3次、折れ線)、係数入力可 検量線トレース 統計演算 割込み測定、サンプルブランク測定、データ削除 ピーク比、ピーク面積、微分による定量 2, 3波長演算 データ積算平均化
光源	150Wキセノンランプ オゾン自己解消ランプハウス	その他	感度の自動測定機能 プリスキャン Microsoft Excelへのデータ転送、グラフコピー 印刷プレビュー機能
測定波長範囲 (励起、蛍光側共)	220~730nmおよび90次 (標準検出器) 220~800nmおよび90次 (オプション検知器使用時)		
バンドパス	2.5、5、10、20nm (励起、蛍光側共)		
分解	2.5nm		
波長精度	±3.0nm以内		
波長走査速度	15、60、300、1500、3000nm/min		
波長移動速度	約12000nm/min		
測光値表示範囲	0.000~9999		
データ処理部	PC: WindowsXP Professional		
プリンタ	WindowsXP 対応プリンタ		
大きさ/重量	幅500×奥行VI30×高さ270mm/35kg		
消費電力 (光度計本体)	AC100、115、220、230、240V 50/60Hz 400VA		
波長走査範囲	220~900nmおよび90次		

e. 孔曲がり検層

孔曲がり検層はボーリング孔の軌跡を確認することを目的とし、ケーシング設置後 5m の掘削ごとを目安に実施することとした。測定器は村田製作所製シングルショット測定器を使用した（図 7.2.3-21）。シングルショット測定器は、時計と電池部分、カメラ部分、アングルユニット部からなり、孔井方位、傾斜角、偏距具のフェイスを記録するフィルムディスクは特殊な耐熱フィルムで作られ、坑底において撮影され、地上に引き上げてから 4 分以内で現像し記録を得る。



- ① シングルショット計測器本体、②シングルショット測定機専用アルミロッド
- ③現像用タンク、フィルム充填器

図 7.2.3-21 村田製作所製シングルショット測定器

7.2.3.2 コア観察

(1) コアの回収

コア回収の手順を以下に示す。

- ① ボーリング掘削により採取したコアは、坑内にてコアチューブから取り出し、コア表面に基準線(図 7.2.3-22)を記入し、コア箱へ収めた。コアチューブからの取り出しおよびコア箱への収納時には、コアの上下方向やコア長の確認を行った。特にコア方向のとり違えを防止するために、コア取り出し直後にコア下側に養生テープなどで目印をつけた。
- ② コアへの基準線記入作業は坑内で実施した。基準線は、先に採取したコアとの連続性を確認するための目印およびコアの上下方向防止用とした。基準線の引き始めは任意の位置からとした。基準線は赤線にて記入し、基準線から浅深度を上に見て、向かって右側へ 1cm 程度間隔を開けた位置に青線を引いた(図 7.2.3-23)。基準線を記入する際は、先に採取したコアがある場合はそのコアの下端と新たに採取したコアの上端を合わせ、連続線として記入を行った。また、基準線には記録上番号を付与(コア採取・観察日報にて管理)し、コアの欠損などによって基準線の連続が途切れた場合は新たな基準線を設定し、新たな番号を付与した。
- ③ コア箱は、1箱に1列 1m×3 列収納できる木製のコア箱を使用し、コアをコア箱へ収納する際は、コア箱にビニールシートを引き、極力コアが崩れないように収めた(図 7.2.3-23)。また、コア箱の両横外外面にはボーリング孔名と収納深度区間を明記した。
- ④ コアが採取できなかった部分は、相当する部分に深度を記入した発砲スチロール等をコア箱内に収めた。

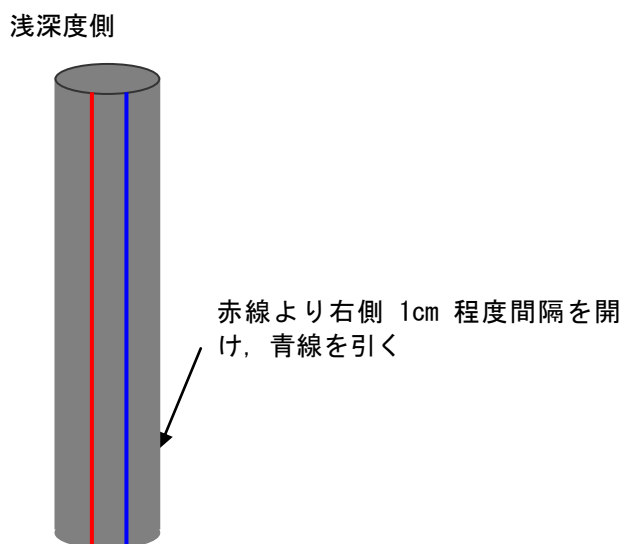


図 7.2.3-22 コアへの基準線記入例

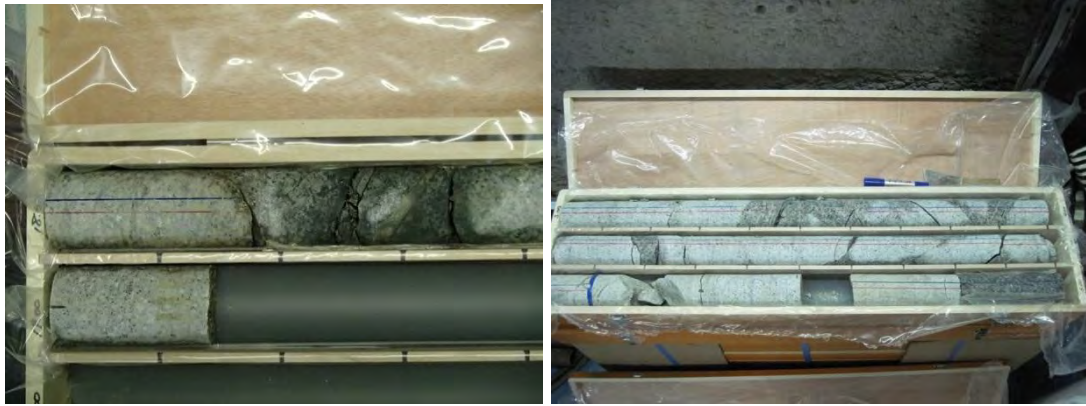


図 7.2.3-23 コアへの基準線記入状況およびコア箱への収納状況

(2) コア記載

岩芯地質記載は、JAEA の岩芯地質記載要領に従い、以下の留意事項に注意し、1/20 スケールでコア記載を行った。

- ・ コア記載はコア箱を並べて行った。
- ・ 観察に際しては、ボーリング日報を参照しながら実施し、特に掘削中に逸水や湧水が生じた箇所のコアについては入念に割れ目の状態を観察した。
- ・ コア記載は原則 1/20 スケールで行い、割れ目の多い箇所等により 1/20 スケールでは記載できない場合は 1/10 スケール等に縮尺を変更して記載した。

(3) コア記載の補足事項

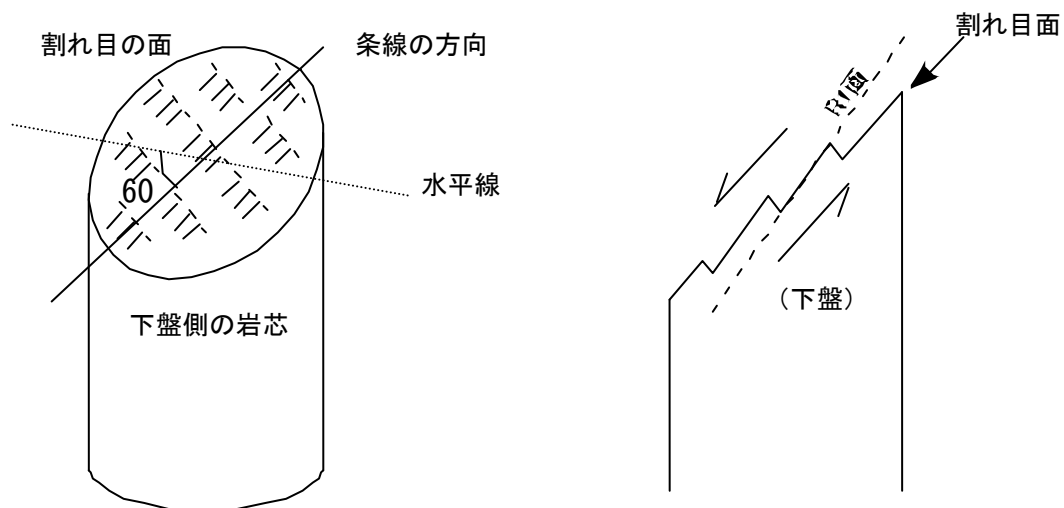
コア記載は、JAEA の岩芯地質記載要領に準拠して実施したが、要領に示されていない細部の記載上の判断基準について以下に補足する。

a. 割れ目の角度

割れ目の角度は孔芯に直行する面と割れ目との交差角（孔芯と平行な割れ目が割れ目角度 90° ）で表したものである。

b. 条線

図 7.2.3-24 に条線およびステップの計測の一例を示す。条線は、割れ目の走向線を基準とし、左右下側に $0\sim 90^\circ$ で記述した。図 7.2.3-24 の(a)図の例では「SL(L60)」と記述する。ステップ構造を持つ場合は「ST(L60)」と示し、その形状から水平方向の移動センスを判断し備考欄に「右ズレ」または「左ズレ」の記述を示した。



(a) 割れ目面に観察される条線およびステップ、条線はSL(L60)と記載。

(b) 条線の断面：
割れ目断面にステップが認められる場合の相対的なずれの方向を記載

図 7.2.3-24 条線およびステップの計測の一例

c. 割れ目成因

割れ目の成因は、せん断による割れ目 (Shear: S)、引張による割れ目 (Tension: T) を次のように分類・記載した。

- ・ 割れ目面に鏡肌・条線を伴う場合や明らかな変位が認められる場合および断層岩 (ガウジ、断層角礫、カタクラサイト等) を伴う場合は「せん断による割れ目:S」と分類した。
- ・ これに対し、上記の構造をもたず、岩盤のほぼ水平な初生構造 (後述) に伴う剥離面は、「引張による割れ目:T」と記載した。
- ・ 以上の判断がつかないケースでは、せん断あるいは引張による割れ目として、成因を「S or T」と記載した。つまり、断層やせん断節理が「成因 S」で、節理や断層に付随する割れ目が「成因 S or T」の割れ目となる。
- ・ 岩芯尻、リフター部分で破損した割れ目、コアチューブの中での回転等による「掘削誘発割れ目 (Drilling induced fracture)」は成因を D(Drilling induced の略) として記載した。これは、新鮮な破断面で上下を密着・接合できる場合に限っている。
- ・ このほか、引張による割れ目か掘削時の割れ目かが判断できない場合があり、これは「T or D」と記載した。

(4) 総合柱状図

コア観察結果から孔毎に総合柱状図を作成した。総合柱状図には、変質、岩盤等級、RQD および割れ目の分布状況等を示した。以下にこれらの項目について補則する。

【変質】

岩石が広範囲に被った変質の強弱についてバーで表示した。変質の強弱の基準は、記載マニュアルの「割れ目沿いの母岩の変質」で基準とする個々の鉱物の評価方法を用いて、m スケール程度の区間を総合的に評価した。

【割れ目沿いの母岩の変質】

割れ目沿いに変質が認められた場合、セリサイト、緑泥石、粘土化についての深度分布を示した。

【割れ目充填物】

割れ目を充填する変質鉱物のうち、方解石、緑泥石、粘土の深度分布を示した。

【割れ目密度】

コア観察時に分離している割れ目の本数を示した。構造的な割れ目と掘削中の破壊による割れ目とを区分して示した。

【割れ目角度別密度】

1m 毎の割れ目本数を 30 度区切りの角度別に示した。割れ目の角度は孔芯に直行する面と割れ目との交差角で表したものである。

【割れ目成因別密度】

1m 毎の割れ目本数を成因別に示した。

【断層岩及び断層岩の幅】

断層岩を断層ガウジ、断層角礫およびカタクラサイトに区分し、その深度分布と断層岩の幅について示した。

(5) コアの写真撮影

コア写真撮影の手順を以下に示す。

- a. コア記載を行う前に写真撮影を実施した。
- b. コア写真撮影にはデジタルカメラ(1200 万画素以上)を使用し、図 7. 2. 3-25 に示すコア写真撮影台を用いて写真撮影を行った。
- c. コア写真には孔番と深度表示を行い、カラーチャートをつけた状態で写真撮影を行った。

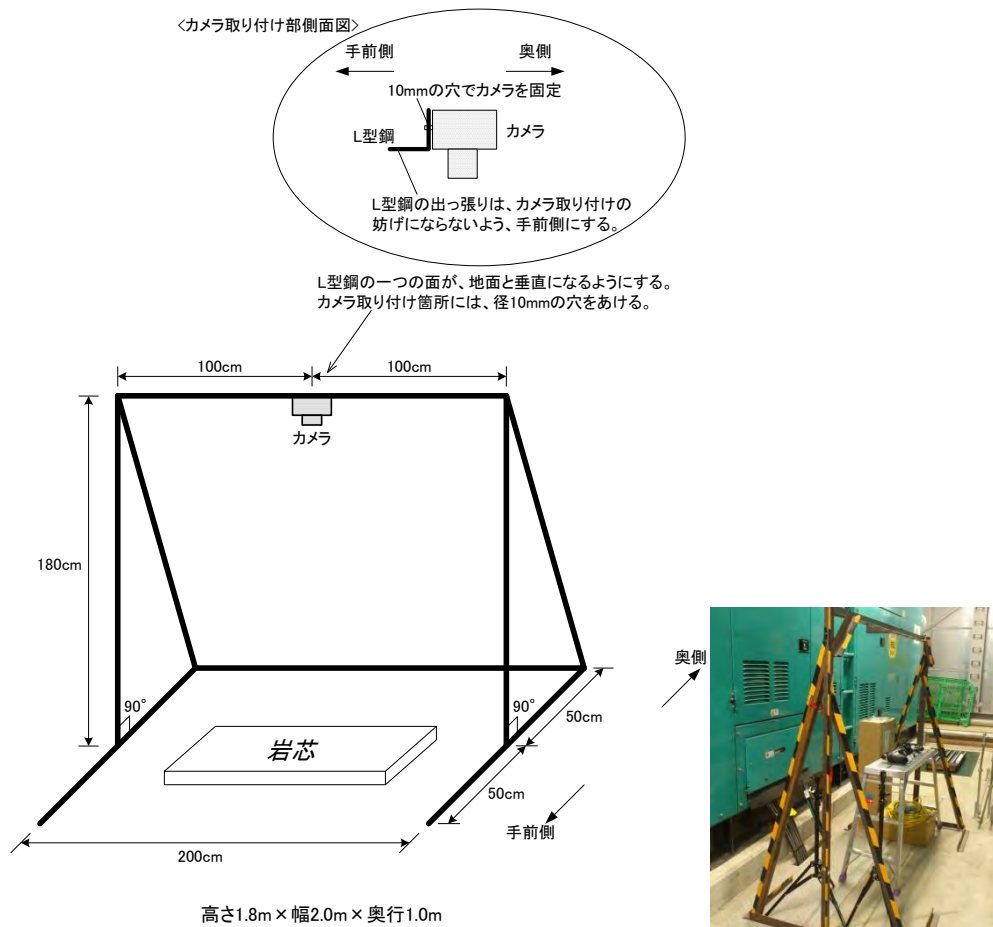


図 7. 2. 3-25 コア写真撮影台

(6) コアの収納

コア写真撮影およびコア記載の際に取り出したコアは、作業終了後速やかにコア箱へ収納した。

7.2.3.3 キャリパー検層

キャリパー検層は孔口マニホールドの先端深度から孔底までの範囲で実施した。

(1) キャリパー検層の測定原理および、測定方法

キャリパー検層（X-Y 孔径検層）は、孔径の変化を深度に対して連続的に測定記録し、孔内における空洞、崩壊の位置やその形状・程度を把握できるほか、その検層結果は、孔径による補正を必要とする他の検層結果の解釈等に用いられる。

キャリパー検層に用いられる測定器は、内部に電磁石を内蔵し、地上（ここでは、深度 300m ボーリング横坑坑道内を示す）からの遠隔操作により測定用アームの開閉を行う。測定はアームを閉じた状態で孔内に測定器を降下し、測定区間の最深部となる箇所であームを開き、測定器を巻き上げながら、孔壁の凹凸によるアームの開閉状況から、孔径の変化を測定する。

一般に破碎帯や断層、軟弱地質においては、孔壁が崩壊し易く孔径拡大が顕著に認められる。ま

た、キャリパー検層から得られた測定値より水理試験や間隙水圧モニタリング装置等のパッカー設置深度等の情報として利用する。図 7.2.3-26 にキャリパー検層装置を、表 7.2.3-3 にキャリパー検層装置の性能を、図 7.2.3-27 にキャリパー検層装置の挿入状況をそれぞれ示す。



図 7.2.3-26 キャリパー検層ツール

表 7.2.3-3 キャリパー検層装置の性能一覧表

項目	性能
適応孔径	φ 70~140mm
プローブ全長	2.53 m
プローブ外径	φ 66 mm
測定最大深度	500m
測定方式	4アーム式
測定誤差	1 mm以内
深度測定精度	0.25 mm/パルス※

※ 深度測定プーリーユニットの精度



図 7.2.3-27 キャリパー検層ツール挿入状況

7.2.3.4 BTV・フローメータ検層

(1) 装置概要

ボアホールテレビ（以下、BTV）検層は、BTV 機能付きフローメータ検層装置を用いて、孔口マニホールドの先端深度から孔底までの範囲で実施した。BTV カメラで撮影した孔内壁面画像を BIP システムにより画像解析し、各孔の岩盤分離面について、深度、方向（走向・傾斜）、区分、開口幅または充填幅、分離面形状および、状態を記載した。なお、ボーリング掘削時に他孔の水圧応答か

ら割れ目の連結性が明らかとなった深度周辺においては、特に注意を払って画像を取得した。

BTV 機能付きフローメータ検層装置は、ボアホールテレビカメラを装備しており、フローメータ検層と同時に孔壁の状況を観察可能である。BTV カメラは、(株)リアックス社製の BIP システムを使用した。

表 7.2.3-4 にフローメータ検層装置を、表 7.2.3-5 に BTV カメラの性能を、図 7.2.3-28 に本検層装置の概要図を示す。

フローメータ検層装置は、検層プローブ部（フローメータプローブ、BTV カメラ、ケーブル）、地上コントロール部（ウィンチコントローラー、ケーブルドラム）、地上計測部（パソコン、ビデオデッキ等）によって構成される。

検層プローブ部はボーリングロッドに接続し、孔内の移動はボーリングマシンを使用した。センタライザーは、検層プローブ部を孔中心に保つためのツールである。センタライザーおよびラバーディスクは、プローブ移動時のスポンジパッカーの摩耗を低減する効果がある。

フローメータプローブのスポンジパッカーは、地下水を流速センサー部へ効率よく誘導し、また、センサーを孔内中央部に保つ機能がある。図 7.2.3-29 にスポンジパッカーの機能を示す。

表 7.2.3-4 フローメータ検層装置の性能一覧表

項目	性能
適応孔径	φ 66～200mm
プローブ全長	3.15m(BTVユニットを含む)
プローブ外径	φ 50mm
測定最大深度	500m
測定範囲(流速)	1～2000 mm/sec [※]
付属性能	BIPシステム

※ 流速測定範囲は流量計単体としての性能

表 7.2.3-5 BTV カメラの性能一覧表

項目	性能
画像取得方式	側方展開画像
画像精度	0.5mm(φ 60mm) 360° 円周
色解像度	R・G・B 各8bit
深度測定精度	0.25 mm/パルス [※]

※ 深度測定プーリーユニットの精度

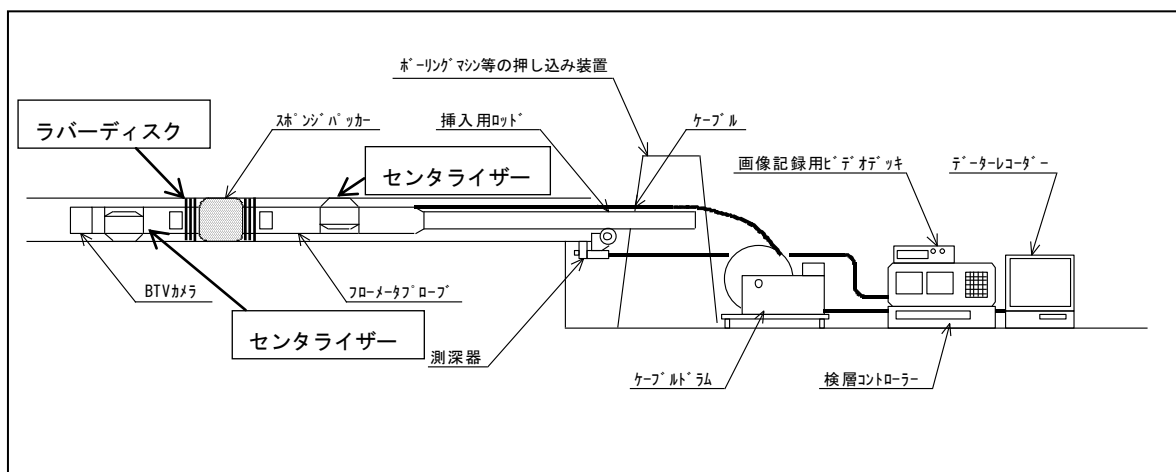


図 7.2.3-28 BTV 機能付きフローメータ検層装置の概要図

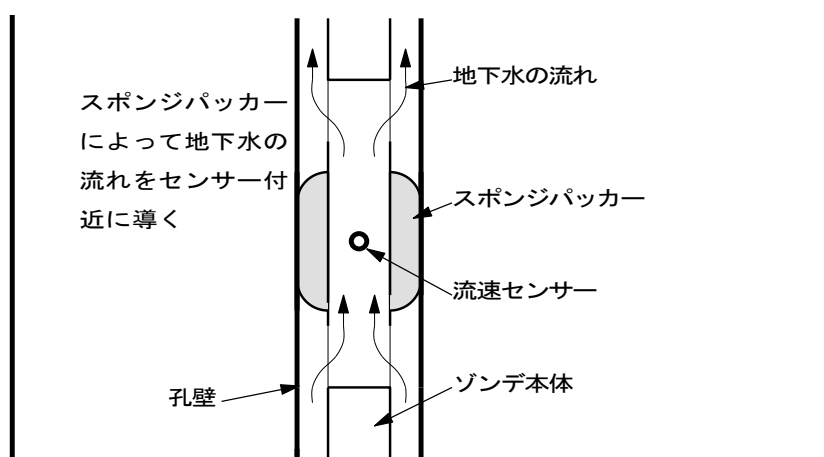


図 7.2.3-29 スポンジパッカーの機能

(2) BTV 検層

BTV 検層は、前述した BTV 機能付きフローメータ検層装置を用いて、孔口マニホールドの先端深度から孔底までの範囲で実施した。測定（孔壁画像撮影）はプローブに接続したロッドを、ボーリングマシンまたは人力により孔底まで押し込み、孔底より低速（1.5m/分以下）で引く抜くことにより行った。

測定結果は、割れ目の性状、割れ目の本数、割れ目区分といった割れ目情報について、1/20 地質記載上の割れ目と BTV 測定結果とが一致するように解析し、整理した情報を一覧表にまとめた。整理した割れ目情報については、ステレオネット、累積図、分布図、分散図、傾斜図等を用いた統計学的な解析を実施した。

以下に BTV 検層の流れを示す。

a. 検層準備

測定開始の直前にボーリング孔内を洗浄した。

b. 撮影準備

(a) 機材の接続

外部装置に孔内に挿入する測定プローブを接続した。

(b) 機材の動作確認

測定プローブの接続後、通电して機材の動作確認を行った。

(c) 孔内状況の確認

機材動作の確認後、測定プローブをボーリング孔内に挿入し（図 7.2.3-30）、押し込みに使用するロッドをプローブに接続し、孔内が測定可能な状態にあるかどうかをモニター上で確認した。

c. 孔壁画像撮影

- ・ モニター上において孔壁が十分に撮影可能な状態にあることを確認した上で、孔壁画像撮影を開始した（図 7.2.3-31）。
- ・ 撮影された画像は、デジタル情報として記録し、VTR 装置によりバックアップ画像として記録した。
- ・ 孔壁画像撮影は、プローブに接続したロッドを、ボーリングマシンまたは人力により孔底まで押し込み、孔底より低速（1.5m/分以下）で引く抜くことにより行った。



図 7.2.3-30 測定プローブ（BTV・フローメーター）の挿入状況



図 7.2.3-31 BTV 孔壁画像取得状況

d. 記録データの確認・機材回収

孔壁画像撮影の終了後、取得データ（VTR 他）の最終確認を行い、機材を回収して解体した。

e. 観察データの整理・解析

観察データの整理・解析は、孔内壁面観察の終了後に以下の手順により実施した。

f. 割れ目情報の整理

次の割れ目情報について、1/20 地質記載上の割れ目とボアホールテレビ測定結果とが一致するように解析し、整理した情報を一覧表にまとめた。

- ・ 割れ目の性状：深度、走向・傾斜、開口幅、充填幅、充填物の有無
- ・ 割れ目の本数、頻度、密度：開口割れ目、充填割れ目
- ・ 割れ目区分：明瞭割れ目、開口割れ目、ヘアークラック、破碎帯上盤及び下盤、鉱物脈、流理構造、層理面、境界面

g. 割れ目情報の解析

整理した割れ目情報については、ステレオネット等を用いた統計学的な解析を実施した。

(3) フローメータ検層

フローメータ検層は、前述した BTV 機能付きフローメータ検層装置を用いて、孔口マニホールドの先端深度から孔底までの範囲で 1m 毎に流速を計測した。計測に際しては孔口からの湧水量とフローメータから得られた流量を確認し、ダイバーターの効果を確認して作業した。

流速変化（アノマリー）が得られた深度では、BTV 機能を用いて割れ目を確認しながら測定間隔を調節し割れ目との関係を調査することとした。なお、孔間での水圧応答から割れ目の連結性が明らかとなった深度周辺において特に注意を払って流速を取得することとした。

以下にフローメータ検層の流れを示す。

a. 検層準備

孔口に検層装置を設置し、孔口からの湧水量とフローメータから得られた流量を確認し、ダイバーターの効果を確認する。

b. 検層の実施

- ・ 所定の深度まで検層装置を挿入する。
- ・ フローメータ検層装置を静止させ、流量測定値が安定するまで待機し、安定後の数値を記録する。
- ・ 以後、1m ごとに上記手順（静止から測定）をケーシング下端部まで繰り返す。
- ・ 孔口まで検層装置を引き上げ、キャリブレーション用の湧水量を測定する。

c. 記録データの確認・機材回収

- ・ フローメータ検層の終了後、取得データの概算換算流量とキャリブレーション用湧水量を比較し測定結果を確認した。

- ・各データの最終確認を行い、機材を回収して解体した。

7.2.3.5 透水試験（単孔式、孔間）

透水試験数は、1孔当り6カ所程度を基本とし、深度、試験方法等については、掘削時の水圧応答、フローメータ検層およびBTVからの情報から設定することとした。ただし、2本目に掘削した13MI37号孔では、掘削中に200L/minもの湧水が確認されたことから、透水試験等の調査を中止した。

単孔式透水試験は、定圧揚水試験を基本とし、透水性割れ目の深度および大まかな透水性を求めるとともに、間隙水圧モニタリング装置を用いて透水試験時の水圧応答を観測した。

孔間透水試験は、ボーリング孔間で明らかとなった連結性の割目に対して試験区間を形成した後、翌朝まで間隙水圧を観測してから定流量揚水試験を実施した。試験時は、間隙水圧モニタリング装置を用いて水圧応答を観測した。なお、単孔式透水試験の結果、透水量係数が $1E-08m^2/sec$ 以下の場合には、定流量揚水試験の実施が困難であると判断しパルス試験を実施した。

(1) 透水試験の使用機器

表7.2.3-6に透水試験に使用する機器を示す。

表7.2.3-6 透水試験使用機器一覧表

分類	装置	主要部品 数量等	仕様
孔内部	パッカーユニット	3台	スライド式 適用孔径φ86mm
	ストレーナ	ステンレス製ガス管	3/4" ガスネジ
中継部	JFT ロッド	長さ:2.0m および 1.0m ステンレス製	外形φ42.7mm 内径φ35.8mm 連結部φ49.0mm
	パッカー用 チューブ	約50m (切断可)	ナイロン製 4×2.5mm 最高使用圧力 3.7MPa
	圧力用チューブ	//	//
地上部	電磁流量計	1台	MAX:30L/min 精度FS:0.1%
	モノポンプ	1台	MAX:2L/min
	データ収録用PC	ノートパソコン	
	データロガー	キーエンス NR1000	
	チャンバータンク	3台	パッカー拡張用
	圧力計	3台	ひずみ型 MAX:3MPa
	口元バルブ	1台	ボールバルブ

(2) 透水試験方法

a. 装置構成と機能・役割

調査現場は、深度300mの坑道内に位置しているため常時ボーリング孔から地下水が湧水する状況にあると考えられた。そこで、孔内に設置する装置は湧水を想定して圧力計やバルブ等の部品を孔外に配置するシンプルな構造となっている。

透水試験は、試験区間に対してダブルパッカー形式を基本とし、試験区間上方の湧水が非常に多

い場合に限り、口元パッカーを設けたトリプルパッカー編成とすることとした。図 7.2.3-32 に透水試験の装置設置の概念を示す。

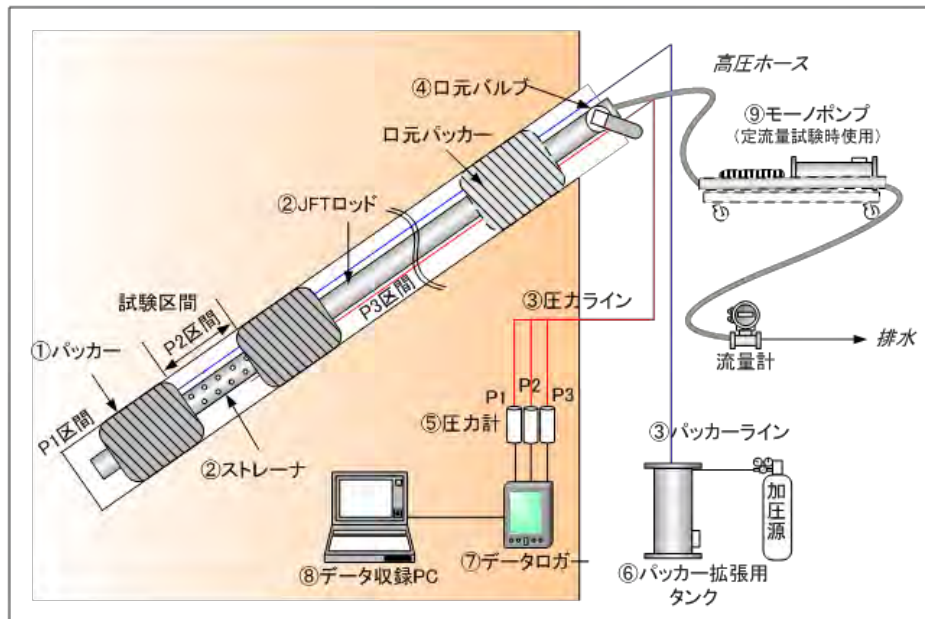


図 7.2.3-32 透水試験装置の設置概念図

以下に透水試験装置の各主要機器の役割を示す。

(a) パッカー

パッカーは、拡張して遮水域を設置することで試験区間を形成する。拡張は、パッカー拡張用タンクの水を高圧窒素ガス等で加圧して行う。パッカー圧力はタンクに取り付けたブルドン管圧力計で確認する。原則としてダブルパッカー編成とするが、試験区間上位で湧水量が非常に多い場合は、口元パッカーを追加して口元からの湧水を止める。

(b) JFT ロッド／ストレーナ

ロッドの継手部は O リングによるシール機能を有する。ロッドはパッカー挿入ツール・挿入尺度としての役割、および透水試験時の導水パイプとして利用する。

ストレーナは、試験区間のパッカー連結ツールとして使用する。ストレーナには穴あきパイプを使用し、ロッド（孔外）と試験区間の導水を可能とする。

(c) 圧カライン（圧力計測用チューブ）、パッカーライン（パッカー拡張用チューブ）

圧カライン、パッカーラインは共に内径 2.5mm のナイロンチューブを使用する。ロッドに抱き合わせて挿入し、圧カラインは圧力計に接続、パッカーラインはパッカー拡張用タンクに接続する。ライン（チューブ）の耐圧性能は、内圧に対して 3.0～3.7MPa である。

(d) 口元バルブ

ロッド口元に手動のボールバルブを設置し、試験区間からの流路の開放／閉鎖を行う。透水試験の開始・停止などの主要な役割を担う。

(e) 圧力計

圧力ライン（圧力計測用チューブ）の先端に圧力計を取り付け、試験区間の水圧を計測する。圧力データはデータロガーを介してパソコンに記録される。

(f) パッカー拡張用タンク

パッカー拡張用の耐圧水タンクで、耐圧性能は5MPaである。タンク内の水位を目視確認できる目盛りを取り付けており、タンク内の残水量が把握できる。

(g) データロガー

圧力データ、流量データ（使用時）を処理する。

(h) データ収録PC

圧力データ、流量データを収集、保存、グラフ表示を行う。

(i) モーノポンプ

定流量揚水試験を実施する場合に使用し、ローターの回転数を一定にして定流量制御を行う。使用するモーノポンプの仕様は表 7.2.3-7 に示す通りである。

(j) 電磁流量計

定圧試験を実施する場合に使用し、流量の経時変化を計測する。

表 7.2.3-7 モーノポンプの仕様

項目	性能
形式	9NE10型(兵神装備株式会社製)
流量制御範囲	100～2000 mL/min
最大使用圧力	5 MPa
回転速度	27～600 /min
駆動機	インバータ制御モーター
モーター電源	AC 200V/60Hz/三相 (インバータを介して供給)
インバータ電源	AC 200V/50Hz/単相

b. 透水試験の手順

透水試験のフローを図 7.2.3-33 に、透水試験の名称と試験内容の一覧を表 7.2.3-8 に示す。

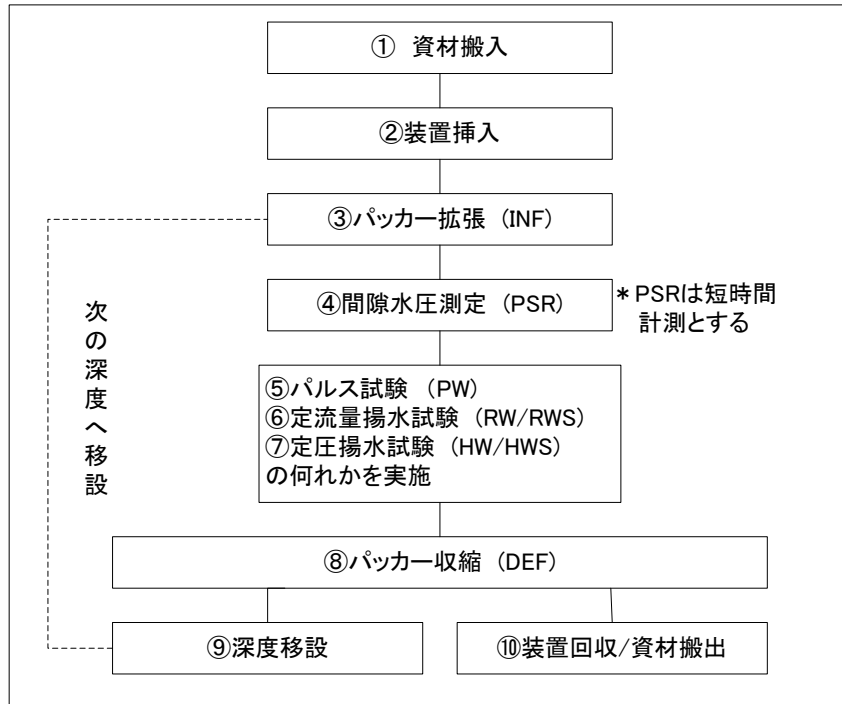


図 7. 2. 3-33 透水試験の基本作業フロー

表 7. 2. 3-8 透水試験の名称と試験内容

試験名称		試験内容
INF	Packer Inflation	パッカー拡張
PSR	Static Pressure Recovery (shut-in)	間隙水圧測定 (メインバルブ閉鎖)
PW	Pulse Withdrawal	パルス試験 (回復法)
RW	Constant Rate Withdrawal	定流量揚水試験
RWS	Pressure Recovery after Constant Rate Withdrawal (shut-in)	定流量揚水試験後の圧力回復試験
HW	Constant Head Withdrawal	定圧揚水試験
HWS	Pressure Recovery after Constant Head Withdrawal (shut-in)	定圧揚水試験後の圧力回復試験
DEF	Packer Deflation	パッカー収縮

① 資材搬入

坑内用クレーン (キブル) で搬入を行った。

② 装置挿入

挿入は、深度間違いのないよう所定のロッド本数、パッカー編成および、残尺を確認の上挿入した (図 7. 2. 3-34)。

③ パッカー拡張 (INF)

湧水圧による試験装置の浮き上がり防止のため、ロッド残尺部に固定したバンド等を介して、レバブロックでアンカーを取り、口元バルブを開放したままパッカーを拡張した。拡張の完了は、

パッカー圧および区間圧の変化やタンクの水量により確認した。拡張圧力は、水圧+1.0MPa 前後とした。

④ 間隙水圧測定 (PSR)

口元バルブを閉鎖し、区間を完全閉鎖した時点から間隙水圧の測定を開始した。今回単項式透水試験においては、水圧安定までは確認せずに次試験へ移行した。

⑤ パルス試験 (PW)

パルス試験は、単孔式透水試験時で透水量係数 $1E-08m^2/sec$ 以下（定流量、定圧試験では測定が困難な）場合に実施した。試験は、口元バルブを開閉して試験区間の圧力を減圧させ、その後の回復過程を計測する。

⑥ 定流量揚水試験 (RW/RWS)

モノポンプ（図 7.2.3-35）で流量を一定に制御し、所定時間排水後、ポンプを停止して回復過程を計測した。同試験は湧水量が非常に多い場合に適用した。

⑦ 定圧揚水試験 (HW/HWS)

口元バルブを全開放して流量制御を行わないで排水し、流量変化を計測した。湧水量が約 50L/min 以下であれば、内管抵抗が少なく実施可能と判断した。

⑧ パッカー収縮 (DEF)

全ての試験を終了後、パッカー拡張用タンク内の窒素ガスを排気し、パッカーを収縮させた。タンクの戻り液量から収縮の確認を行った。パッカーの収縮を確認した後に、固定用のアンカーを外した。

⑨ 設置位置の移設

設置深度の移設は、目的の深度までロッドを追加、あるいは抜管して行った。

⑩ 装置回収

各データの最終確認を行い、機材を回収して解体した。



図 7.2.3-34 透水試験設置前の検尺



図 7.2.3-35 定量試験用モノポンプ

c. 試験方法

(a) 間隙水圧測定 (PSR)

パッカー拡張後、口元バルブを閉鎖して圧カライン（圧力計測用チューブ）のチューブ内のエア抜きを行った。エア抜き完了後、圧カライン末端に取り付けた圧カラインバルブを閉じて区間を完全閉鎖し、本測定を行った。図 7.2.3-36 に間隙水圧測定方法の概念図を示す。

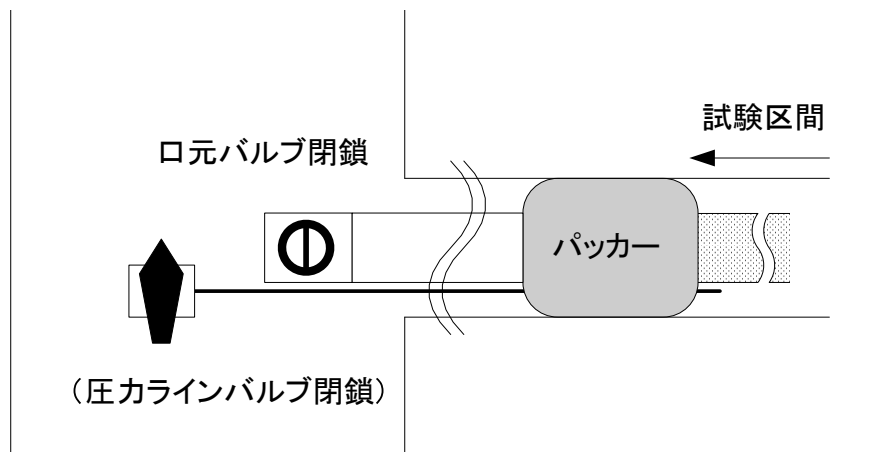


図 7.2.3-36 間隙水圧測定時の概念

(b) パルス試験 (PW)

パルス試験は、水圧収束を測定する試験である。試験は、間隙水圧に対し水頭差（水位差）を与えた状態で、口元バルブあるいは圧カラインのバルブの開閉操作により区間を瞬間的に減圧させ、試験初期の間隙水圧（以後、初期圧）への収束過程を測定する。原則として初期圧まで収束すれば試験は終了である。試験水頭差は、初期圧と操作したバルブ高さとの差となる。同試験は、試験に伴う水の移動量が少なく、かつ水圧収束は早いので透水性の低い箇所での試験に適している。図 7.2.3-37 にパルス試験方法の概念図を示す。

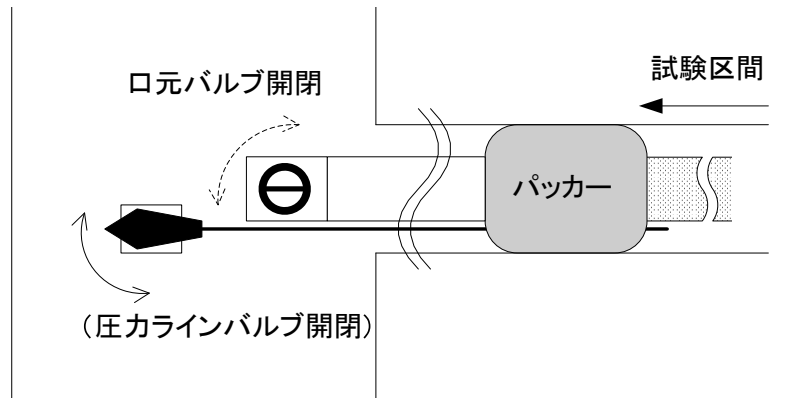


図 7.2.3-37 パルス試験の概念

(c) 定流量揚水試験 (RW/RWS)

定流量揚水試験は、揚水流量を一定に保ち圧力変化を測定する試験である。対象区間の湧水量に対して、モノポンプで定流量制御により排水量を調整して試験を行った。

所定時間まで排水した後、ポンプを停止し回復試験へ移行した。原則として試験区間の水圧が初期圧まで収束、もしくは排水時間と同じ時間経過をもって試験終了とした。

透水係数は揚水過程、回復過程のそれぞれより算出できる。図 7.2.3-38 に定流量揚水試験方法の概念図を示す。

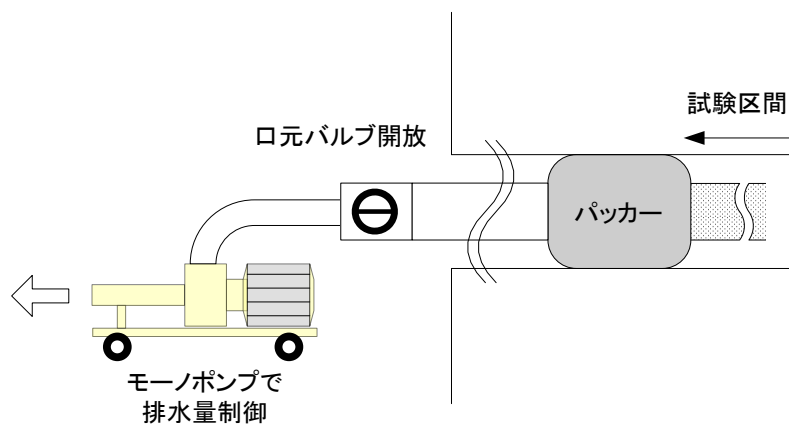


図 7.2.3-38 定流量試験の概念

(d) 定圧揚水試験 (HW/HWS)

定圧揚水試験は、排水水頭を一定として流量変化を測定する試験である。ロッド口元のレベルは一定であるため、口元バルブを全開放とすればそのまま定水頭となる。所定時間排水後は、バルブを閉鎖して回復試験を実施した。図 7.2.3-39 に定圧試験方法の概念図を示す。

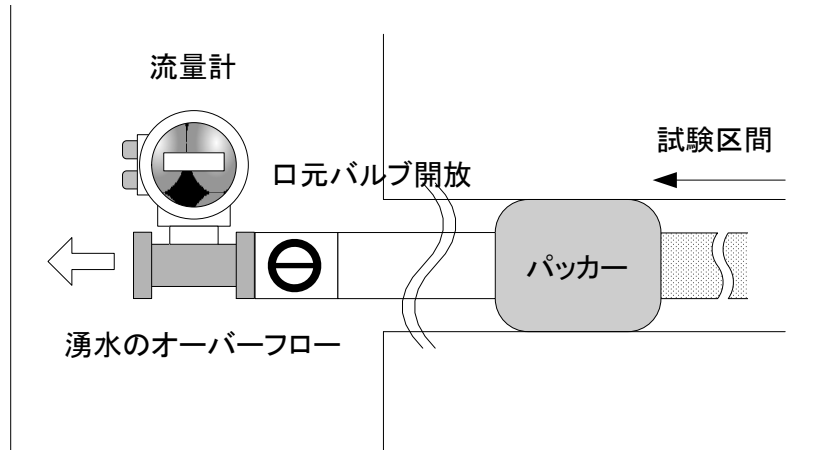


図 7. 2. 3-39 定圧試験の概念

d. データ整理・解析

圧力計により測定されたデータは気圧補正（測定圧力－実気圧）を行った上で整理・解析を行った。

(a) パルス試験（PW）の解析

直線勾配法の Hvorslev の解析式と、曲線一致法の Cooper らの解析式を用いた。

1) Hvorslev の解析方法

Hvorslev の解析式は、貯留性の影響を受けていないと判断される場合に適用した。本式は、半無限の深さと幅の帯水層を仮定している。

以下に解析手順を述べる（地盤調査の方法と解説：2004 より）。

- ・ 片対数グラフの算術目盛り X 軸に時間 t (sec)を、対数目盛り Y 軸に平衡水位に対する水位差 s (m)をとり、図 7. 2. 3-40 に示すような t -Log(s)曲線を作成し、図中のプロットに直線勾配が認められることを確認する。
- ・ 得られた直線の任意の 2 点の座標から直線の勾配を求め、次式より透水係数を算出する。

$$k = \frac{(2R_w)^2 \cdot \text{Ln}(m \cdot L / r)}{8L(t_2 - t_1)} \cdot \text{Ln}(s_1 / s_2)$$

ここに、

k : 透水係数 (m/sec)

R_w : ピエゾメーター管内半径 (m)

r : 試錐孔の半径 (m)

m : 鉛直方向の透水係数比 (通常は 1 : 等方性)

L : 試験区間長 (m)

t : 経過時間 (sec)

s : 経過時間に対応する平衡水位との水位差 (m)

※注 パルス法の解析では後述する仮想半径をピエゾメーター管内半径とする。

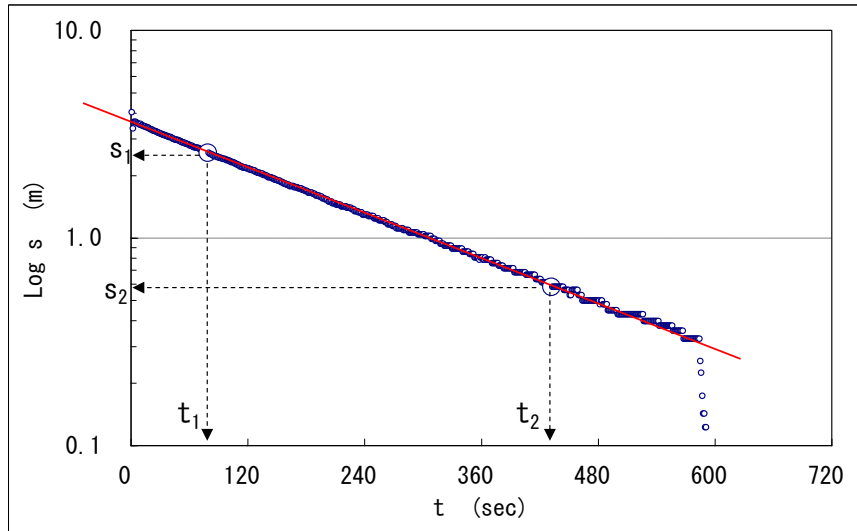


図 7.2.3-40 Hvorslev の t -Log s 曲線

2) Cooper らの解析方法

Cooper らの解析式は、地盤の貯留性の影響を受けて t -Log(s) 曲線に明確な直線がみられない時に適用する。以下に解析手順を述べる。(地盤調査の方法と解説：2004)

- ・ 平衡水位に対する、試験中の水位差 s (m) と試験開始時の水位差 s_0 (m) を求め、さらに水位差比 s/s_0 を求める。
- ・ 片対数グラフの対数目盛り X 軸に経過時間 t (sec) を、算術目盛り Y 軸に水位差比 s/s_0 をとって、実測データを $\text{Log}(t) - s/s_0$ のグラフにプロットする。
- ・ 図 7.2.3-41 に示す標準曲線群を実測データと同じスケールで準備する。
- ・ 片方のグラフを時間軸方向 (横軸) に平行移動させ、測定値と最も合致する標準曲線を選び、この標準曲線に対応する α と、任意の合致点に対応する時間軸座標 β_0 と t_0 の値を読み取り、次式より透水係数と比貯留係数を算出する。

$$k = \frac{R_w^2 \cdot \beta_0}{L \cdot t_0} \quad Ss = \frac{R_w^2 \cdot \alpha}{L \cdot r_w^2}$$

ここに、 k : 透水係数 (m/sec)

R_w : ピエゾメーター管内半径 (m)

r_w : 試錐孔の半径 (m)

L : 試験区間長 (m)

Ss : 比貯留係数 (1/m)

t_0 : 時間 (sec)

α : 貯留係数によって変化する係数 $[=S \cdot (r_w/R_w)^2]$

β_0 : 透水係数によって変化する係数 $[=T \cdot t_0/R_w^2]$

※注 パルス法の解析では後述する仮想半径をピエゾメーター管内半径とする。

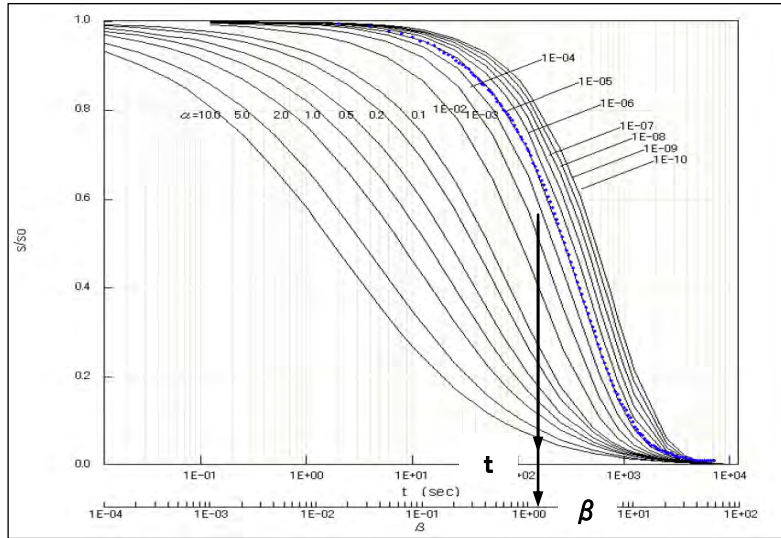


図 7.2.3-41 Cooper らの曲線一致法

3) Hvorslev 法と Cooper 法の選択

「地盤調査の方法と解説（地盤工学会）2004 p431」では、以下のような判断基準が示されている。

「Hvorslev 法の $t-\log(s)$ グラフが凹形状となる要因が岩盤の貯留性によるものであれば、基本的には Cooper 法を採用する。ただし、Hvorslev 法、Cooper 法の適用範囲については検討がなされており、貯留係数比 α が 10^{-3} より大きい場合は、Cooper 法の適用が望ましい。一方、 α が 10^{-3} より小さい場合は、Hvorslev 法の適用が望ましい」

解析式の選択は、原則として上記判断基準を参考とする。

4) 仮想半径の算定について

パルス試験の場合は、ピエゾメーターの管内半径を、仮想半径 R_w と仮定して水理定数を求める（柳澤ほか、1989）。仮想半径 R_w の計算式を以下に示す。

$$R_w = \sqrt{\left(\frac{V_w}{E_w} + \alpha\right) \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta H}}$$

ここに、 R_w : 仮想半径 (m)

V_w : 閉鎖区間内の水の体積 (m^3)

E_w : 水の変形係数 ($=2.3 \times 10^{11} \text{gf}/m^2$)

α : パッカーの弾性係数 (m^5/gf)

ΔP : 単位圧力 (=10000 gf/m²)

ΔH : 単位水頭 (=0.01m)

試験区間内の体積は、主にメインバルブ以深の JFT ロッド内部容積と、遮水パッカーで区切られる試錐孔の内容積の和である。

(b) 定圧揚水試験 (HW) の解析

定圧揚水試験 (HW) の排水過程の解析は、Hvorslev の定常法を用いた。以下に解析手順を述べる。

以下に解析手順を述べる (Jacob, C. E. and S. W. Lohman 1952 より)。

- ・ 口元バルブより湧水する地下水の平均湧水量を計測した。
- ・ 試験開始前の P1 圧力を計測し、口元の圧力が 0 となるよう圧力値を水位に換算する。
- ・ 以下の式より透水量係数 T を算出する。

$$T = \frac{Q \times \ln\left[(m \times L / (2r)) + \{1 + (m \times L / (2r))^2\}^{1/2}\right]}{2\pi \times \Delta s}$$

ここに、

T : 透水量係数 (m²/ sec)

Δs : 水位低下量 (m)

L : 試験区間長 (m)

Q : 平均流量 (m³/ sec)

m : 縦横方向の透水係数比 (通常は 1)

r_w : 試錐孔半径 (m)

(d) 定流量揚水試験 (RW) の解析

定流量揚水試験は、Cooper-Jacob 法を用いて行う。

図 7.2.3-42 に $\text{Log}(t/r^2) - s$ 曲線と Derivative Plot の例を示し、以下に解析手順を述べる (地盤調査の方法と解説: 2004)。

- ・ 片対数グラフの対数目盛り X 軸に t(sec) を、算術目盛り Y 軸に初期水位からの水位低下量 s(m) をとり、 $\text{Log}(t/r^2) - s$ 曲線を作成する。同時に、両対数グラフの X 軸に t(sec) を、Y 軸に水位低下量 s(m)、および Y2 軸に ds/dLn(t) をとり、 $\text{Log}(t/r^2) - s$ 曲線のプロットの傾きを示す Derivative Plot を作成する。
- ・ Derivative Plot より、 $\text{Log}(t/r^2) - s$ 曲線の直線勾配に対応する時間の ds/dLn(t) は、ほぼ一定値を示す。これより、 $\text{Log}(t/r^2) - s$ 曲線の直線勾配を選定する。
- ・ 選定した $\text{Log}(t/r^2) - s$ 曲線の直線勾配の、1 サイクル間における水位差 Δs (m) を求め、以下の左

式より透水量係数を算出する。

- $\text{Log}(t/r^2) - s$ 曲線の直線勾配の延長が、 $\Delta s = 0$ と交わる点 $(t/r^2)_0$ (sec) を求め、以下の右式より貯留係数 S を算出する。

$$T = \frac{2.3 \cdot Q}{4\pi \cdot \Delta s} \qquad S = 2.25 \cdot T \cdot (t/r^2)_0$$

ここに、

T : 透水量係数 (m²/sec)

S : 貯留係数 (-)

Q : 平均流量 (m³/sec)

Δs : $\text{Log}(t)$ の 1 サイクル間における水位低下量 (m)

$(t/r^2)_0$: $s=0$ における経過時間 (sec)

R : 試錐孔半径 (m)

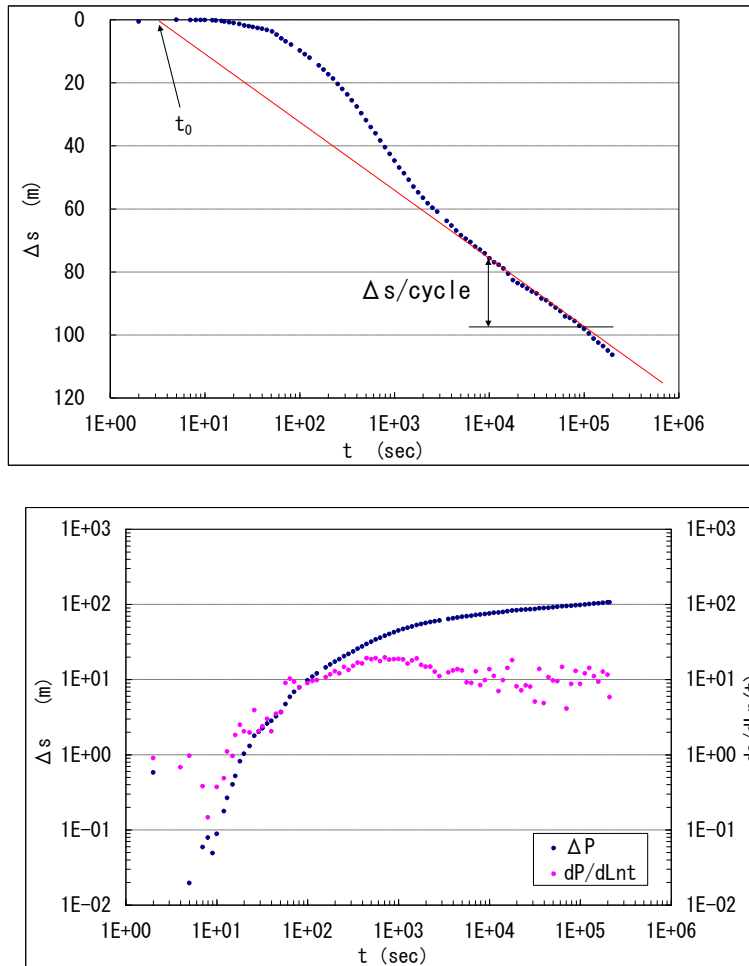


図 7.2.3-42 $\text{Log}(t) - s$ 曲線(上)、Derivative Plot(下)の例

7.2.3.6 間隙水圧モニタリング装置の設置および観測

間隙水圧モニタリング装置を図 7.2.3-43 と図 7.2.3-44 に、モニタリング装置の孔内設置例を図 7.2.3-45 に示す。パッカー中央部にピストン式の水圧観測・採水用ポートを有するパッカー一体型モニタリングユニットを使用することで、観測区間長を極力短く（5～50 cm 程度で調整）することが可能である。これにより観測区間を特定の割れ目のみを対象とすることができることや観測区間体積を極力小さくすることができ、トレーサ試験を実施するうえで非常に有利となる。

設置深度および装置の構成は、ボーリングのコア状況、掘削時の湧水量、および各種検層および簡易透水試験結果を基に決定した。間隙水圧モニタリングの観測間隔は、各イベントに応じて調整することとした。

なお、13MI37 号孔では、深度 27.0mabh 付近掘削中に約 200L/min 程度の湧水が発生した。この湧水が妨げとなり、当初設置を予定していた $\phi 78\text{mm}$ のモニタリング装置では湧水に押し戻されて挿入することが出来なかった。このため、新たに $\phi 66\text{mm}$ のモニタリング装置を作成した。

$\phi 66\text{mm}$ の装置が完成するまでの期間は、水理試験用のパッカーを用いて区間の形成・止水を行い、割れ目を保護した（湧水による割れ目充填物の洗脱等からの保護を目的）。

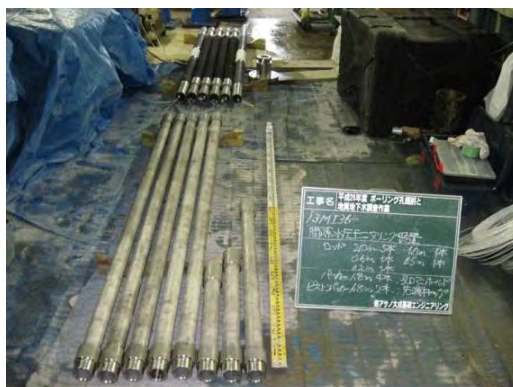


図 7.2.3-43 間隙水圧モニタリング装置孔内部



図 7.2.3-44 間隙水圧モニタリング装置（記録装置部）

間隙水圧モニタリング装置の設置深度例

試験区間	INT8		INT7		INT6		INT5		INT4		INT3		INT2		INT1	
	上端*	下端	上端	下端	上端	下端	上端	下端	上端	下端	上端	下端	上端	下端	上端	下端
深度mabh	5.070	5.835	7.035	7.530	8.080	8.180	8.730	17.605	18.855	19.350	19.900	20.000	20.550	21.045	22.245	30.000
区間長(m)	0.765		0.495		0.100		8.875		0.495		0.100		0.495		7.755	

上端*) 孔口マニホールドの設置先端深度とする

孔口マニホールド

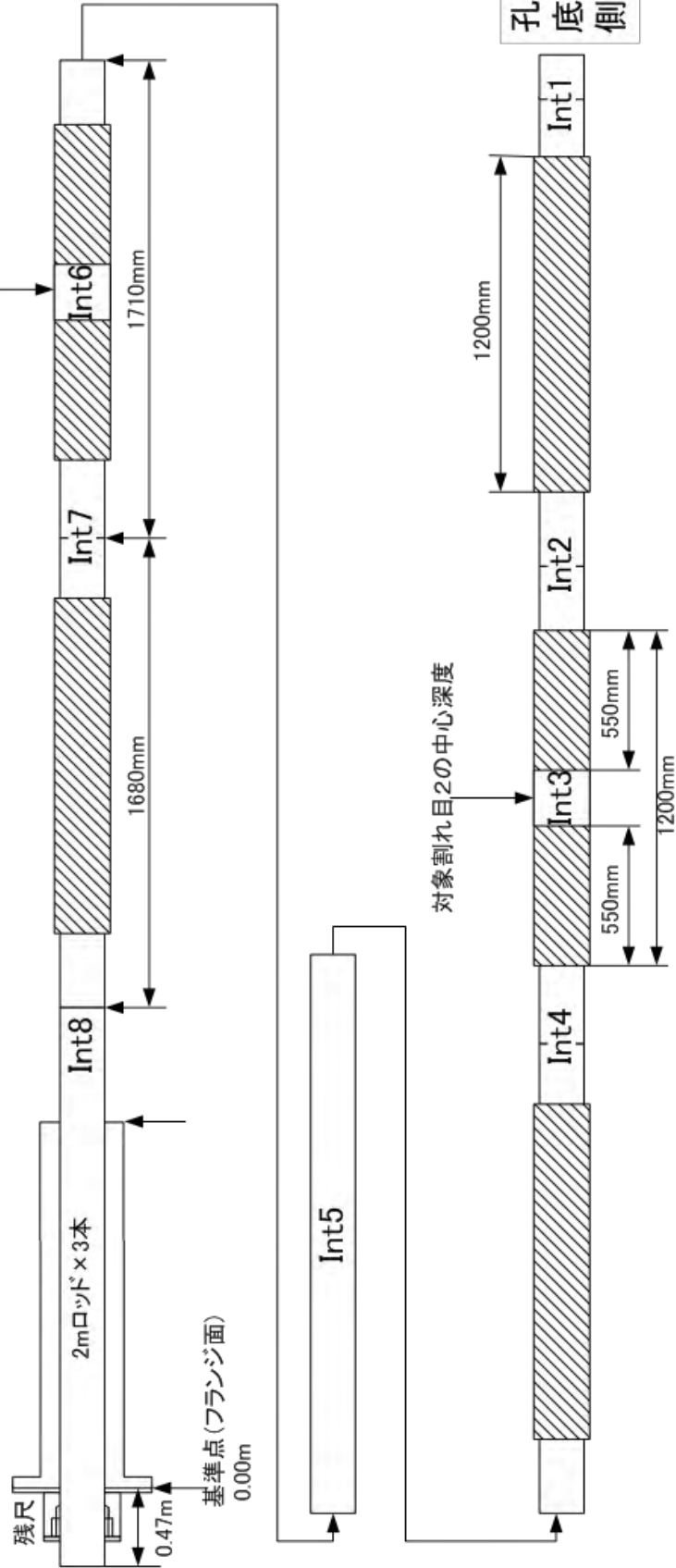


図 7.2.3-45 間隙水圧モニタリング装置の設置例

7.2.3.7 ポイント希釈試験

ポイント希釈試験は、平成 24 年度までに開発したトレーサ試験装置の地上設備と、ボーリング孔に設置している間隙水圧モニタリング装置（孔内装置）を用いて実施した。

(1) ポイント希釈試験の概要

ポイント希釈試験は、試験区間内をトレーサ溶液で満たした後に自然の流速によりトレーサ溶液が希釈される過程を計測することで自然の流動状態を把握するための試験である。

(2) 試験手順

a. 試験準備

- ・ウラニンをトレーサとし、原位置で採水した地下水を用いて蛍光セルのキャリブレーションを実施し、蛍光セルごとに検量線を作成した。
- ・トレーサ溶液として約 6～8mg/L 濃度のウラニン溶液を作成した。
- ・試験を実施する間隙水圧モニタリング装置の観測区間に繋がる採水口と圧力測定口の双方に蛍光セルを設置して両セルの間にトレーサ置換タンクと循環用の無脈動ポンプを設置した（図 7.2.3-48 を参照）。
- ・試験区間から湧水する地下水を用いて地上部の配管内の気泡を除去した。

b. 試験手順

ポイント希釈試験は図 7.2.3-46 の a)～e) の手順に従い実施した。

試験装置の概要を図 7.2.3-47 に、使用した設備状況を図 7.2.3-48 示す。

- 無脈動ポンプを用いて試験区間と地上部配管内の地下水を一定の流量で循環させる
- 流量が安定した時点でトレーサ置換タンクのパルプを循環側からトレーサ置換タンク側に切り替えトレーサタンク内のトレーサ溶液を同じ流量で地下水と置換する
- 圧力観測口側の蛍光セルの蛍光濃度と、採水口側の蛍光セルの濃度が等しくなるまで、トレーサ溶液に置換する
- 圧力観測口側と採水口側の蛍光セルの濃度が等しくなった時点でトレーサ置換タンクのパルプを循環側に切り替え、トレーサ濃度が自然の地下水の流速で希釈されるのを 2 台の蛍光セルで計測する
- 8 時間以上計測してトレーサ溶液の希釈が十分に希釈されたと判断した時点で試験を終了し、次の試験区間へ移行する

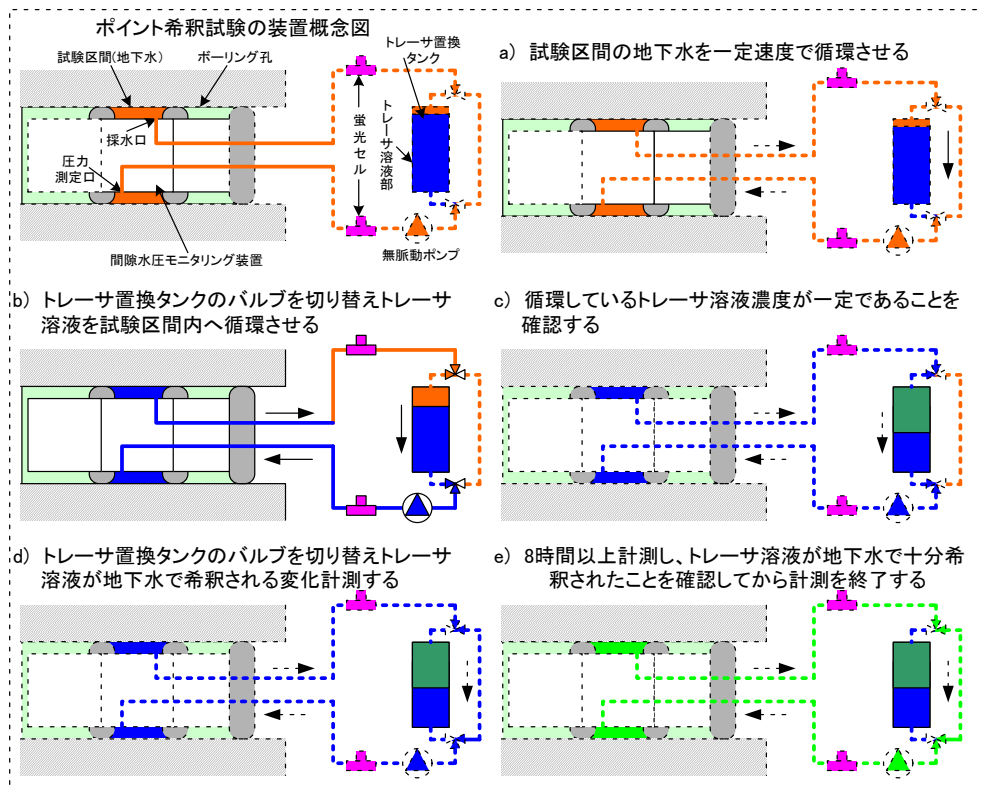


図 7.2.3-46 ポイント希釈試験の試験手順

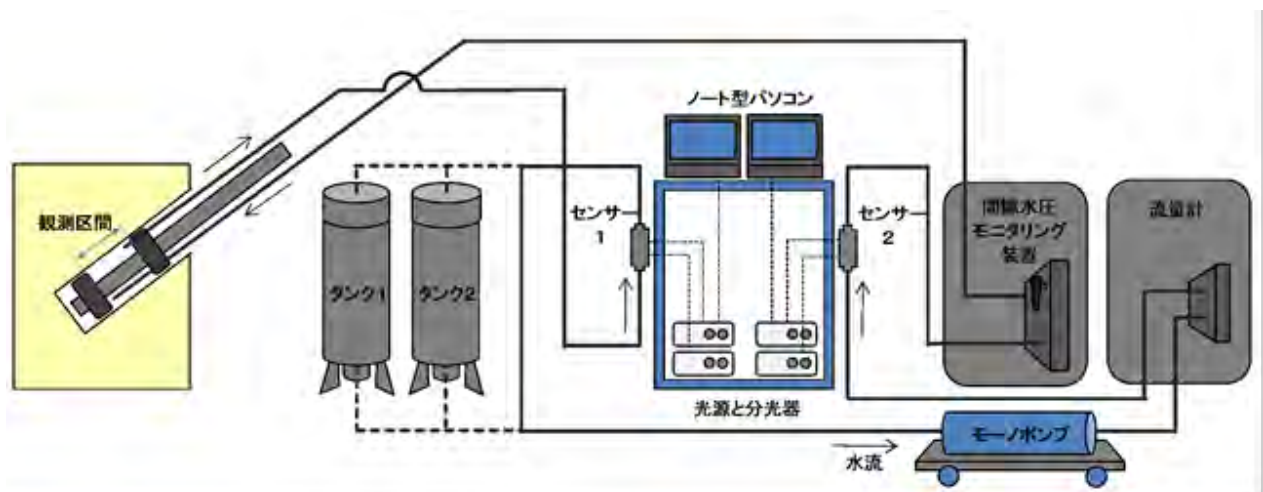


図 7.2.3-47 ポイント希釈試験実施概要図

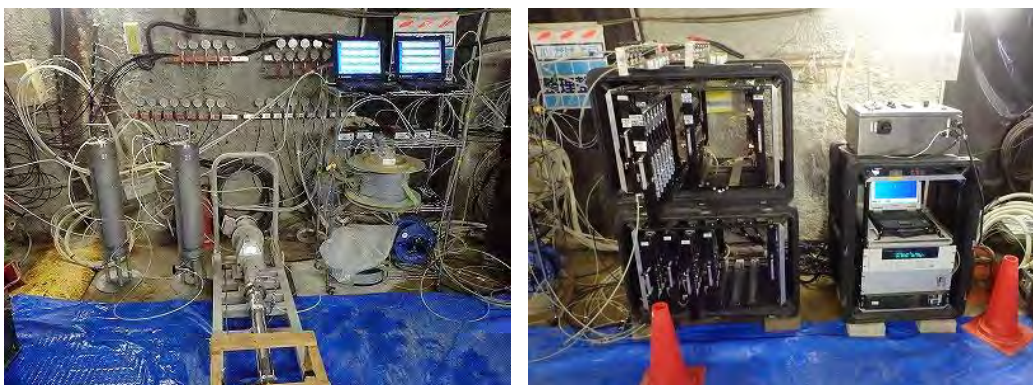


図 7.2.3-48 ポイント希釈試験設備

(左：タンク、モノポンプ等，右：間隙水圧モニタリング装置)

7.2.3.8 12MI30号孔の透水試験

平成24年度に続いて、12MI30号孔の透水試験を実施した。試験は、高精度孔曲検層、音響トモグラフィ、高精度BTV検層のために間隙水圧モニタリング装置を撤去する前の周囲の水圧が安定した状態で実施した。試験は、12MI30号孔の間隙水圧モニタリング装置の観測区間Int5(10.68~19.07mabh)の範囲内から試験区間を選定して実施した(図7.2.3-49)。孔内装置としては12MI30号孔の間隙水圧モニタリング装置で観測区間Int4の形成に使用したパッカーセット(試験区間長60cm)を、孔外装置としては間隙水圧モニタリング装置の機材を使用した。

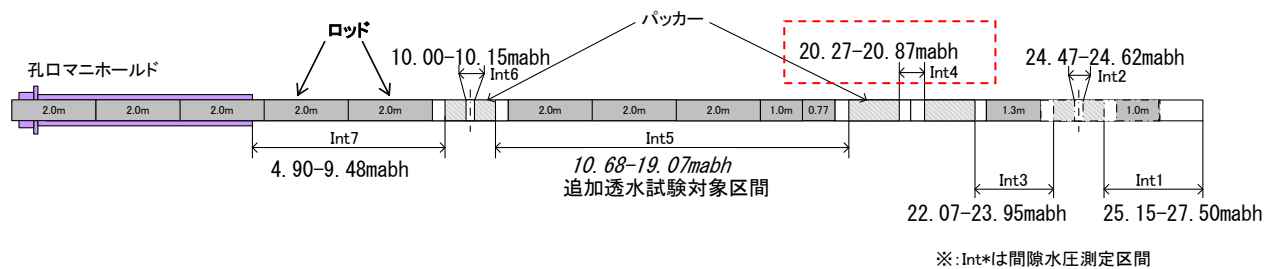


図7.2.3-49 12MI30号孔の追加透水試験の対象区間

7.2.3.9 高精度孔曲がり検層

高精度孔曲がり検層は、平成24年度掘削した12MI30号孔、12MI31号孔と、平成25年度新たに掘削した13MI36号孔の計3孔において実施した。

検層は孔口から孔底(プローブの計測最大深度)までを連続で計測し、50cmごとに3次元での孔跡を求めた。

検層には、ロール角制度:±0.1、傾斜角精度:±0.1、計測精度1/400~1/500と高精度な村田式ジャイロ孔曲がり計測機(図7.2.3-50)を用いた。



図7.2.3-50 村田式ジャイロ孔曲がり計測機

7.2.3.10 高精度 BTV 検層

(1) 調査孔と計測区間

高精度ボアホール BTV は表 7.2.3-9 に示す孔とその孔内区間において実施した。

表 7.2.3-9 高精度 BTV 検層数量

孔 番	計 測 区 間	延 長	備 考
12MI30	4.70m～27.20m	22.50m	斜め下向き-34度
12MI31	4.80m～25.80m	21.00m	斜め下向き-35度
13MI36	4.80m～22.33m	17.53m	斜め下向き-33度
合 計		61.03m	

(2) 測定機器と測定方法

ボアホール TV による高精度 BTV 検層は、孔壁の展開画像を計測区間全体で取得する BIPS 計測と、特定の割れ目の全周を高解像度で得る HR-BTV 計測によって行なわれる。ボアホール TV 装置は、株式会社レアックス社製 BIPS SYSTEM (BIP-V) を使用し、ボーリング孔の壁面観察をおこなった。本システムは、展開画像記録装置 (ODS)、詳細観察記録装置[以下 DVS]から構成される。ODS では、ボーリング孔壁の全周を連続孔壁面展開画像として観察記録をおこなうことができ、DVS では、前方視カメラとともに、高解像度の側方視カメラによって割れ目の詳細な観察をおこなうことができる。

ODS により取得されたデータは室内解析システムのディスプレイ上に表示し、割れ目の走向傾斜計測などの解析をおこなうことが可能である。DVS により取得されたデータは、VTR に記録されるほか、現場で必要箇所をキャプチャー記録することもできる。システム構成は図 7.2.3-51 に示すとおり、現場システムと室内システムから構成される。その構成を以下に示す。

<現場システム>

- ・ ODS プローブ (孔壁面展開画像を撮影するカメラ)
- ・ DVS プローブ (孔壁面詳細画像を撮影するカメラ)
- ・ ウインチコントローラおよびケーブル・ウインチ
- ・ 電動押し込み機 (深度計測機能付き)
- ・ 画像処理・プローブコントロールユニット (プローブ制御)
- ・ ノートパソコン (画像データ記録)

<室内システム>

- ・ Windows パソコン

- ・ カラーコピー機 (カラープリンタ)
- ・ 専用解析ソフトウェア

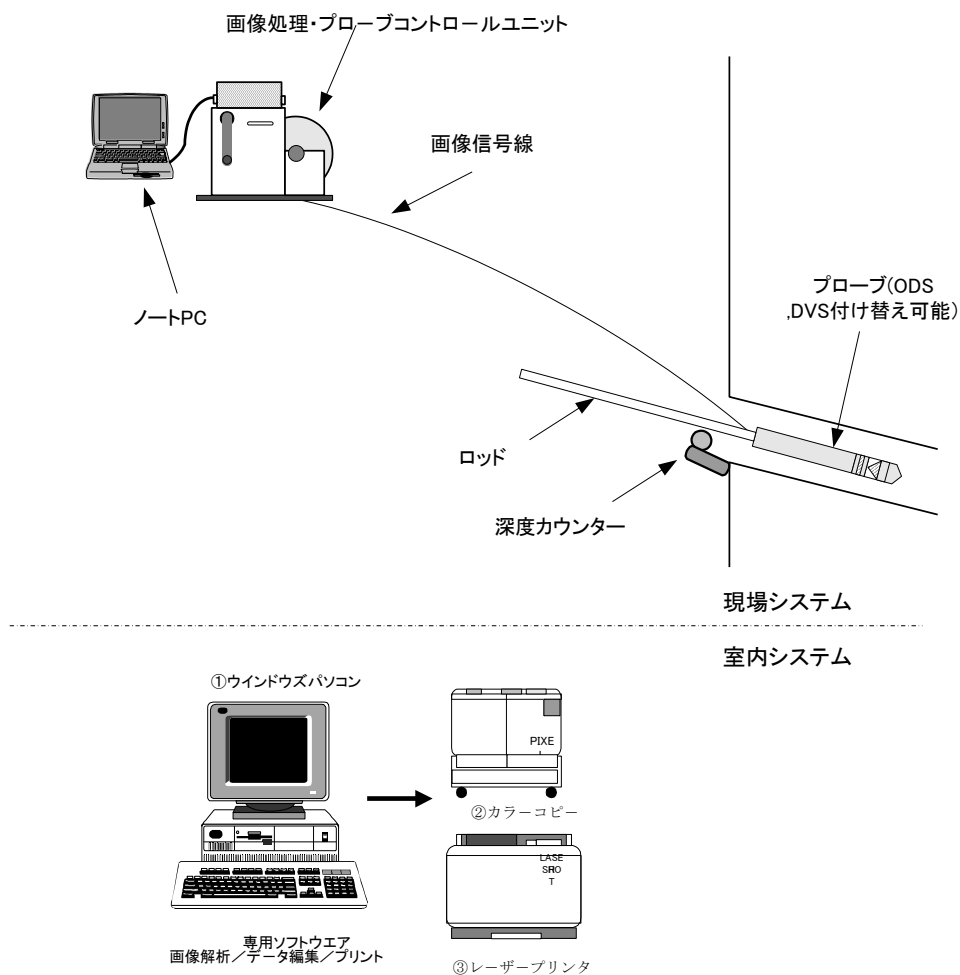


図 7.2.3-51 BIP-Vシステム構成

(3) ODS 画像解析方法

ODS 画像解析方法について以下に示す。

(a) 画像処理および割れ目データの取得

岩盤分離面の走向傾斜の測定は、画像データを読み出して室内解析システムのディスプレイ上に表示し、孔壁との切合線として示される岩盤分離面にフィットするトレースライン(サインカーブ)を求めることにより行う(図 7.2.3-52)。計算された該当面の走向傾斜はディスプレイに表示され、ファイルに記録される。また、開口幅もポイントした2点間の実距離として示される。

・ボーリング孔と不連続面
との切合い

展開画像

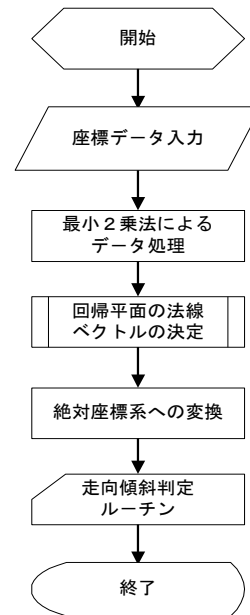
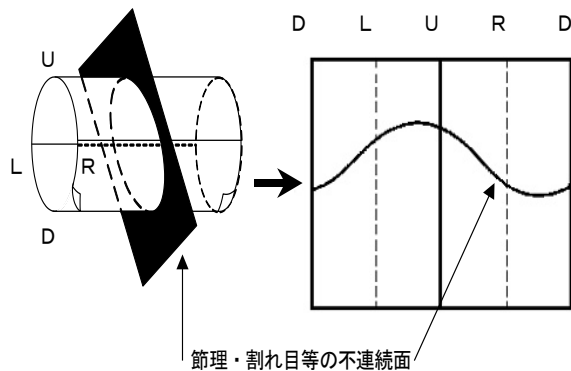


図 7.2.3-52 面構造の走向傾斜の解析ルーチン

(b) 深度

深度は岩盤分離面の出現上端、消滅下端、および中間深度によって示す。

(c) 分類

面要素は以下に区分する。

- ① 初生構造：堆積岩の層理・葉理、火山岩や深成岩などに見られる流理構造、変成岩に見られる片理構造、岩相境界等
- ② 開口割れ目：割れ目のうち画像上で 1mm 以上の開口性が認められ、開口幅の測定が可能なもの
- ③ 割れ目：画像上 50%以上連続している割れ目
- ④ 破碎部：破碎した部分が 5cm 以上の幅を持つ場合
- ⑤ 鉱物脈：鉱物が脈状に割れ目を充填しているもの
- ⑥ 開口幅：幅 1mm 以上の分離面の開口幅は最大傾斜位置（孔軸に対する最大交差角位置）において、境界面上・下盤の正距離とする。

(d) ODS データ解析方法

分離面の統計的なデータとして以下のステレオネット図(ウルフネット下半球)を作成した。

- ① π ダイアグラム：極をウルフネットにプロットしたもの。
- ② カウントプロット：投影面内のグリッド上で、投影面外周の10分の1の小円内にあ
る極の個数(あるいは全体の個数に対する百分率)をプロットしたもの。
- ③ コンターマップ：カウントダイアグラムを元に等分布線を描いたもの。
- ④ ローズダイアグラム：走向の頻度を10度刻みで示したもの。
- ⑤ 大円：投影点を連ねた線で、傾斜の構造を示したもの。

(4) DVS 画像解析方法

DVS 画像解析方法について以下に示す。

(a) 幅の計測方法

DVS 画像の解析は ODS 解析を補助し、より詳細な岩盤分離面の特性を得ることを目的とした。岩盤分離面のうち開口割れ目を対象に、0.1mm 精度で割れ目幅を計測した。幅の計測箇所は最大傾斜位置(孔軸に対する最大交差角位置)の2か所を基本とし、幅が一定でない場合は、さらに2か所以上の箇所で計測し、その平均値を岩盤分離面一覧表に記載した。幅の計測値の精度を確認するため、スケールプレートを孔口にセットし別途撮影、計測した。計測結果を図 7.2.3-53 に示す。なお、図の画像がやや見にくいですが、これは孔内より気泡が出ていることにより、スケールプレートに気泡が付着したためである。

(b) 詳細観察シートおよび詳細全周画像

DVS の観察対象区間のうち、透水性が認められ、且つ開口幅の計測が可能な割れ目については、幅を計測した箇所を展開画像上に明示した、詳細観察シートを A3 横で作成した。幅の計測は対象開口割れ目1本に対して36度刻みに10箇所計測した。また、各孔で対象となった開口割れ目に対し、DVS 画像のキャプチャーデータを合成し、全周画像を作成した。

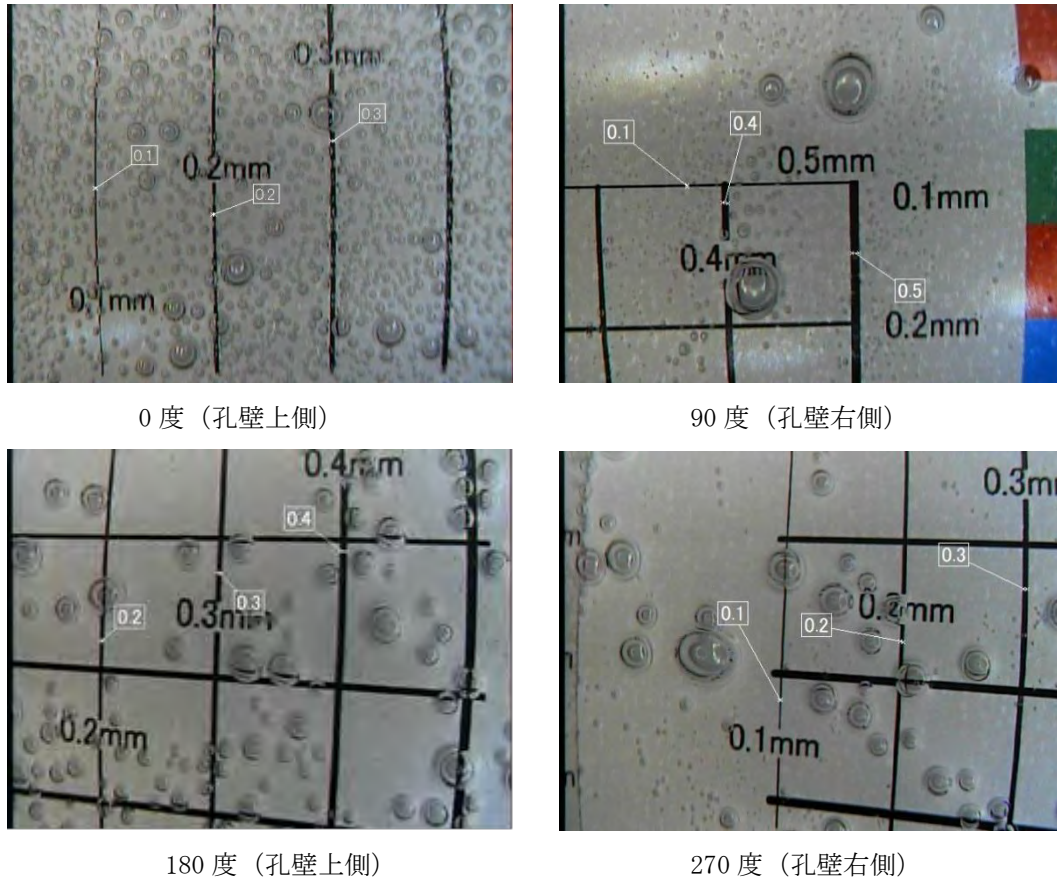


図 7.2.3-53 幅の計測結果

7.2.3.11 音響トモグラフィ法

音響トモグラフィは圧電式の孔内発振器（ピエゾ震源）と多連の受信器（ハイドロフォン）を2つの計測孔に配置して、この断面間の地盤情報を可視化する技術であり、弾性波クロスホールトモグラフィに分類することができる。本手法は超音波と地震波の中間の周波数帯域である音響波（可聴波）を用いることに特長があり、ボーリングに近い精度を維持しながら従来の弾性波探査と同等の計測距離を維持することが出来る。通常の弾性波探査や地震探査法と異なり、発振波形にパルス波ではなく連続波の一種である疑似ランダム波を用いている。疑似ランダム信号は、①周波数を任意に制御した計測、②精度の高い計測、③信号を数万倍に増幅、という特長を持つ。これにより、出力の小さい孔内発振器でも数10～数100mの計測を行うことができる。

計測フローを図7.2.3-54に示す。計測作業は受信器を所定の深度に設置した後、発振・受信と発振器移動を繰り返すことにより音の走査線が対象断面全体を切るように計測を行った。受信器に設置したセンサーの受信波形からセンサー毎に到達時間とその振幅を読み取り、このデータから逆計算により速度分布と減衰率分布を計算することで計測結果をトモグラムとして出力した。

本計測で仕様する主な計測機器を表7.2.3-10に示す。また、計測装置の外観を図7.2.3-55、図7.2.3-56に示す。計測データに対する解析は、図7.2.3-57に示すフローに基づいて行った。

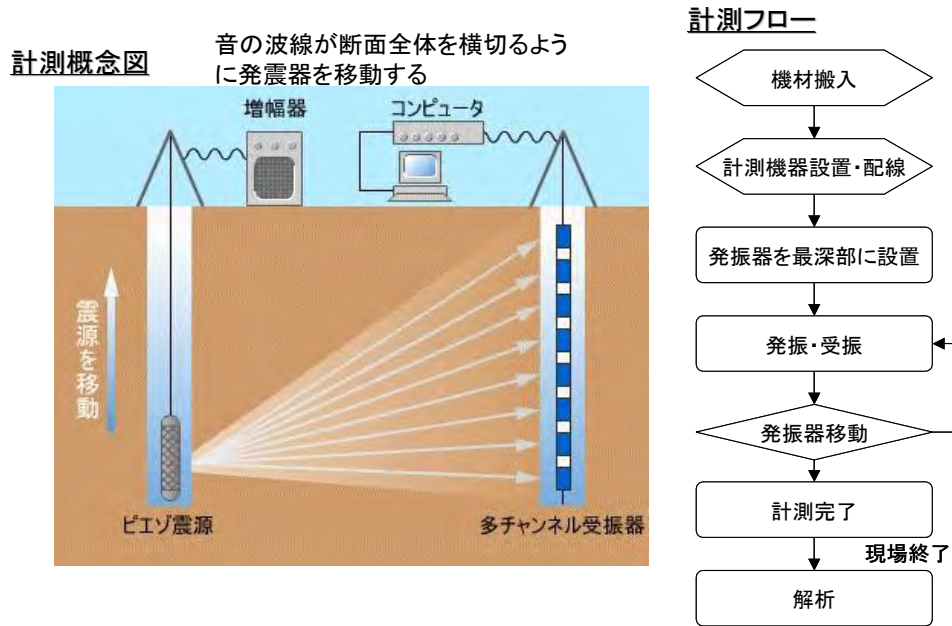


図 7.2.3-54 音響トモグラフィ法の計測フロー図

表 7.2.3-10 計測機器一覧

機器名称	仕様・明細	備考
ピエゾ発振器	φ 44mm×1 600mm	ケーブル長 100m、トーキン製
24ch 受信器	φ 30mm×1 250mm、 センサー間隔 1m	ケーブル長 100m ターミナルボックス
データロガー	8ch マルチ(同時)計測	8ch 切替により 24ch 計測まで対応
受信器ノイズフィルター	24ch	バンドパスフィルター
発振器用増幅器	出力 150Vrms、電源 100Vrms	FOSTEX
オシロスコープ	ソニーテクトロ	発振信号モニター用
信号延長ケーブル	150m×6 本	最長 1000m まで延長可能



図 7.2.3-55 音響トモグラフィ法計測機器

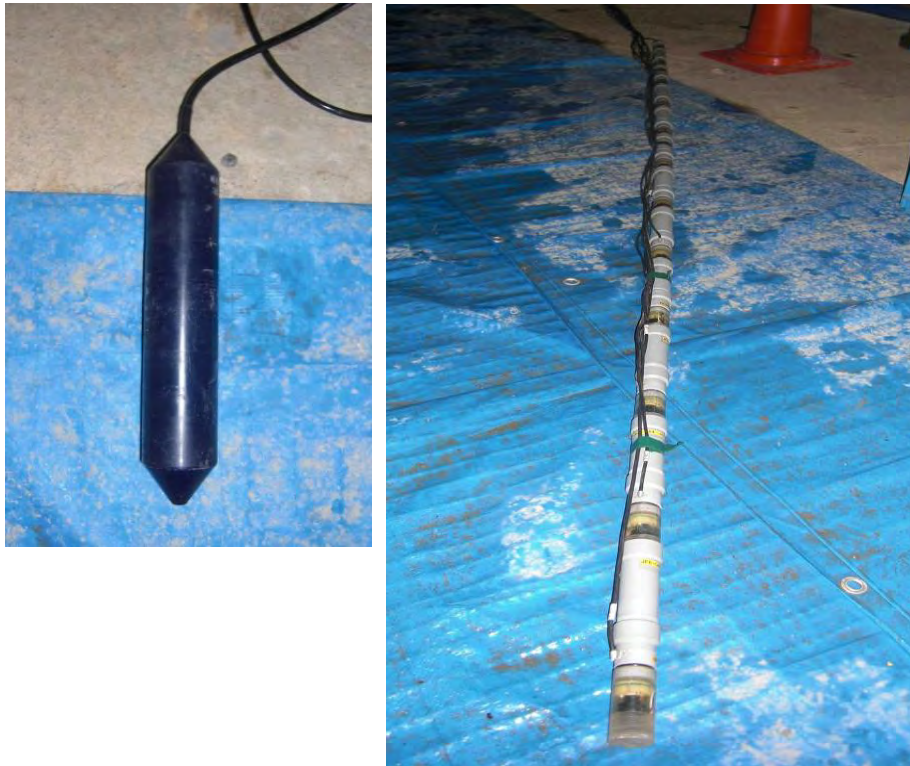


図 7.2.3-56 発振器(左)と受信器(右)

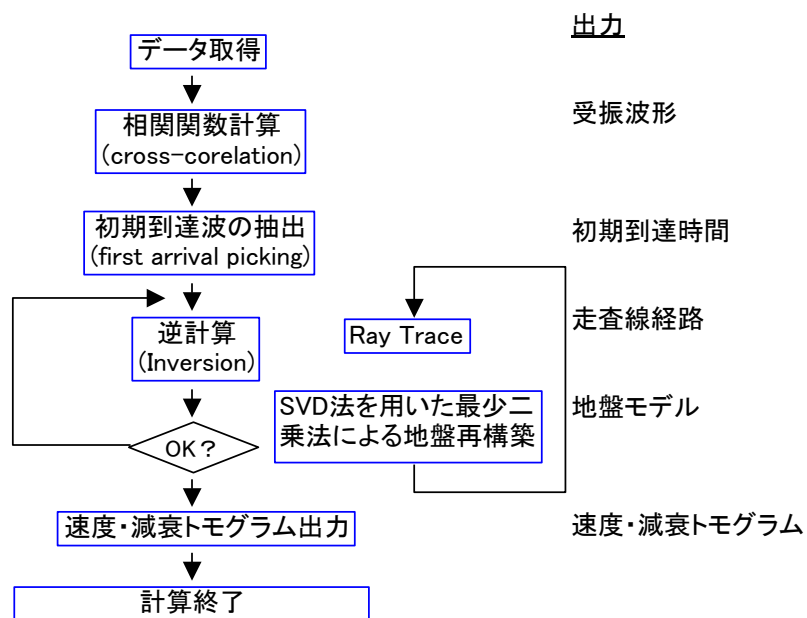


図 7.2.3-57 音響トモグラフィ法の解析フロー

7.3 調査結果

7.3.1 調査の概要（実施工程）

表 7.3.1-1 に実施工程を示す。実施工程表には、予定（紺色線）と実績（赤色線）を併記した。

表 7.3.1-1 全体工程表



<凡例>

- : 実績
- : 予定

7.3.2 13MI36号孔の調査結果

7.3.2.1 ボーリング掘削位置の設定

13MI36号孔のボーリング掘削位置や掘削角度、掘削方向は、平成24年度に実施した12MI30号孔と12MI31号孔の調査結果および周辺の観測設備設置状況等を考慮して決定した。

表7.3.2-1に13MI36号孔の仕様一覧を、図7.3.2-1に13MI36号孔の掘削方向図を示す。

表 7.3.2-1 13MI36号孔の仕様

孔名	13MI36号孔
掘削方法	オールコア、清水掘削
主要孔径	86mm
掘削長	22.55mabh
掘削方向	鉛直方向：-33°（下向き） 水平方向：方位 S75° W
掘削位置	X=-69048.731 Y=6419.441（世界測地系） 標高 EL-99.10m

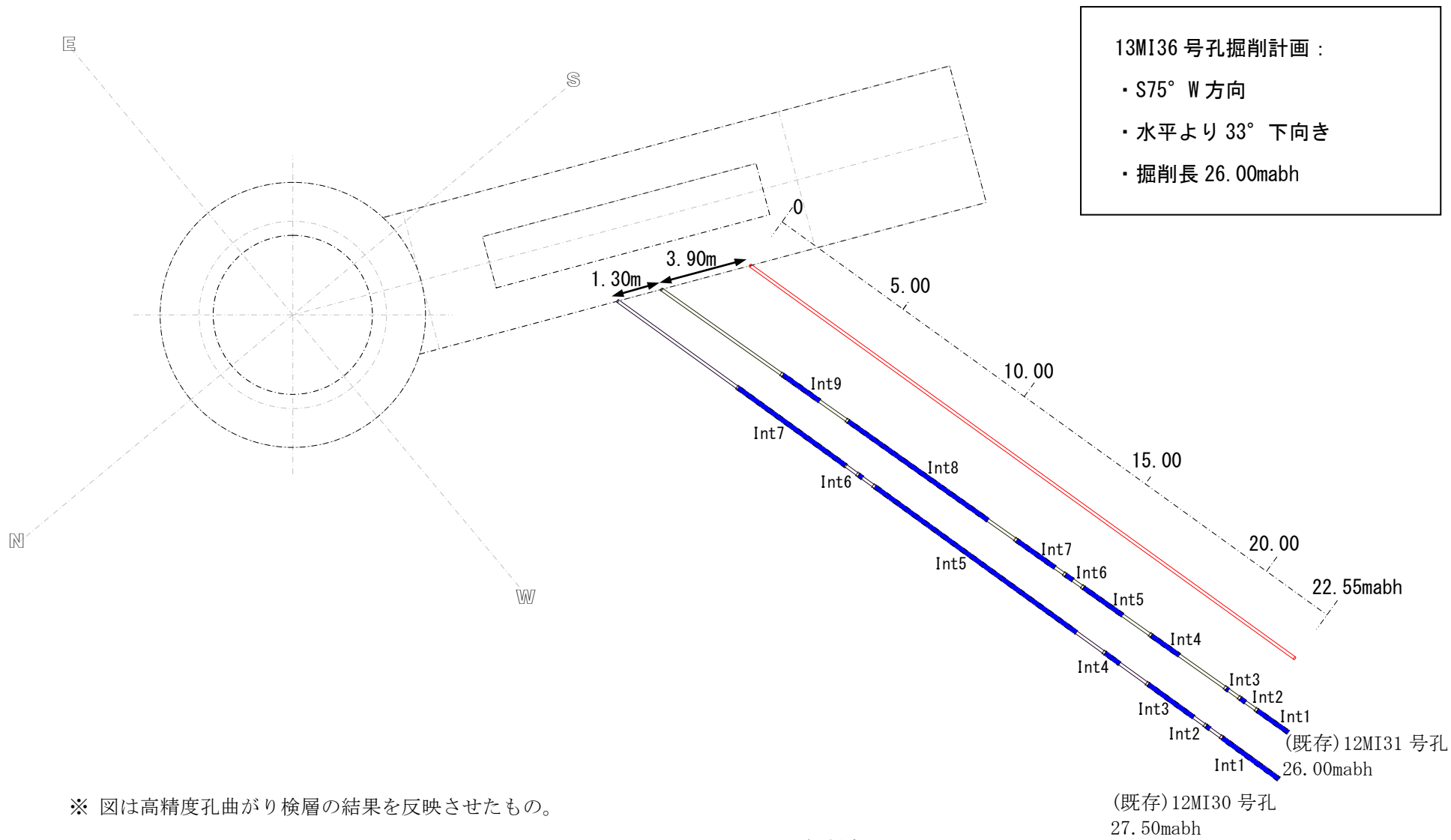


図 7.3.2-1 13MI36号孔の掘削方向平面図

7.3.2.2 ボーリング掘削位置の設定

(1) 1 段目掘削

1 段目の掘削は、孔口から 5.00mabh の計画としていたが、採取したコアの亀裂状況から、孔口ケーシングのセメントによる固定に配慮し、5.20mabh までとした。

掘削は掘削外径 $\phi 86\text{mm}$ 、コア径 $\phi 72\text{mm}$ でコア採取を行った。

コア採取後は $\phi 101\text{mm} \rightarrow \phi 141\text{mm}$ ダイヤモンドビットを用いて 3 段階で拡孔し、4 インチ SUS 製のフランジ付孔口ケーシングを挿入した。

孔口ケーシング挿入後は、岩盤とケーシングを固定するためにケーシング外側の孔内部にセメントを充填した。セメント硬化養生後、加圧試験（水圧 3Mpa を 10 分間維持）を行い、遮水性能を確認した。

孔口ケーシングの設置概念図を図 7.3.2-2 に示す。

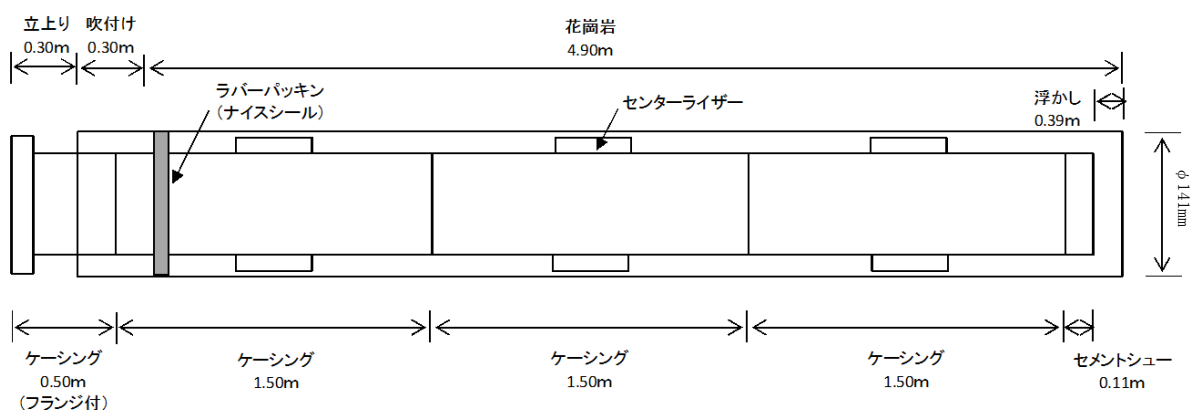


図 7.3.2-2 13MI36 号孔 孔口ケーシング設置概念図

(2) 2 段目掘削

2 段目の掘削は、1 段目掘削深度から 26.00mabh までの計画であったが、本孔では 22.07mabh～22.55mabh 掘削中に 41.1L/min の湧水が確認された。湧水量が多いと、今後実施する各種試験や検層に影響を与える可能性が高いため掘削を終了した。

(3) コア採取率

孔口～22.55mabh までの掘削に対して、全深度でコア採取率 100%であった。

(4) 掘削時の湧水量

掘削時に 1 掘進長ごとに孔口からの湧水量を測定した。測定結果を表 7.3.2-2 および、図 7.3.2-4 に示す。

孔口から湧水が確認されたのは 7.25mabh～8.25mabh を掘削した後であり、最終湧水量は 41.1L/min であった。

また、掘削区間ごとに0.5L/min以上の湧水量が認められたのは、以下の6区間であった。図7.3.2-3に当該区間のコア写真を示す。

- 8.25mabh～9.25mabh(1.3L/min)
- 12.20mabh～13.10mabh(0.5L/min)
- 14.15mabh～14.90mabh(3.5L/min)
- 18.15mabh～19.15mabh(9.6L/min)
- 21.05mabh～21.70mabh(5.0L/min)
- 22.05mabh～22.55mabh(22.9L/min)

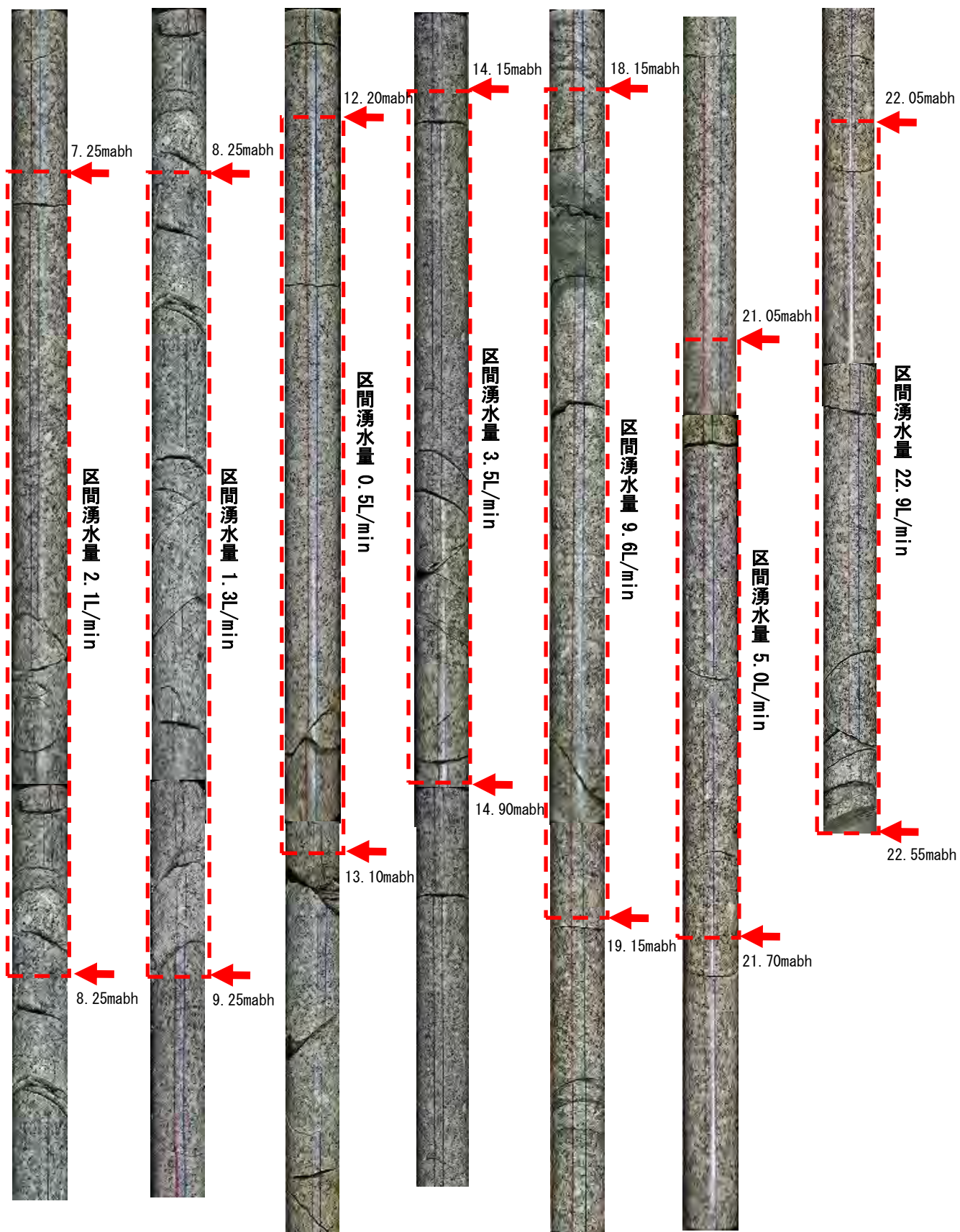


図 7.3.2-3 13MI36 号孔区間コア写真

表 7.3.2-2 13MI36 号孔掘削時孔口湧水量測定結果

掘削区間			測定湧水量	区間湧水量
mabh			L/min	L/min
0.00	~	0.40	0.00	0.00
0.40	~	1.20	0.00	0.00
1.20	~	2.20	0.00	0.00
2.20	~	3.20	0.00	0.00
3.20	~	4.20	0.00	0.00
4.20	~	5.20	0.00	0.00
5.20	~	5.70	0.00	0.00
5.70	~	6.30	0.00	0.00
6.30	~	7.25	0.00	0.00
7.25	~	8.25	2.10	2.10
8.25	~	9.25	3.36	1.26
9.25	~	10.25	3.30	-0.06
10.25	~	11.25	3.50	0.20
11.25	~	12.20	3.00	-0.50
12.20	~	13.10	3.50	0.50
13.10	~	14.15	3.30	-0.20
14.15	~	14.90	6.80	3.50
14.90	~	15.30	7.60	0.80
15.30	~	15.80	7.60	0.00
15.80	~	16.75	6.60	-1.00
16.75	~	17.40	6.60	0.00
17.40	~	18.15	6.60	0.00
18.15	~	19.15	16.20	9.60
19.15	~	19.70	13.00	-3.20
19.70	~	20.10	13.00	0.00
20.10	~	20.55	12.60	-0.40
20.55	~	21.05	13.00	0.40
21.05	~	21.70	18.00	5.00
21.70	~	22.05	18.24	0.24
22.05	~	22.55	41.10	22.86

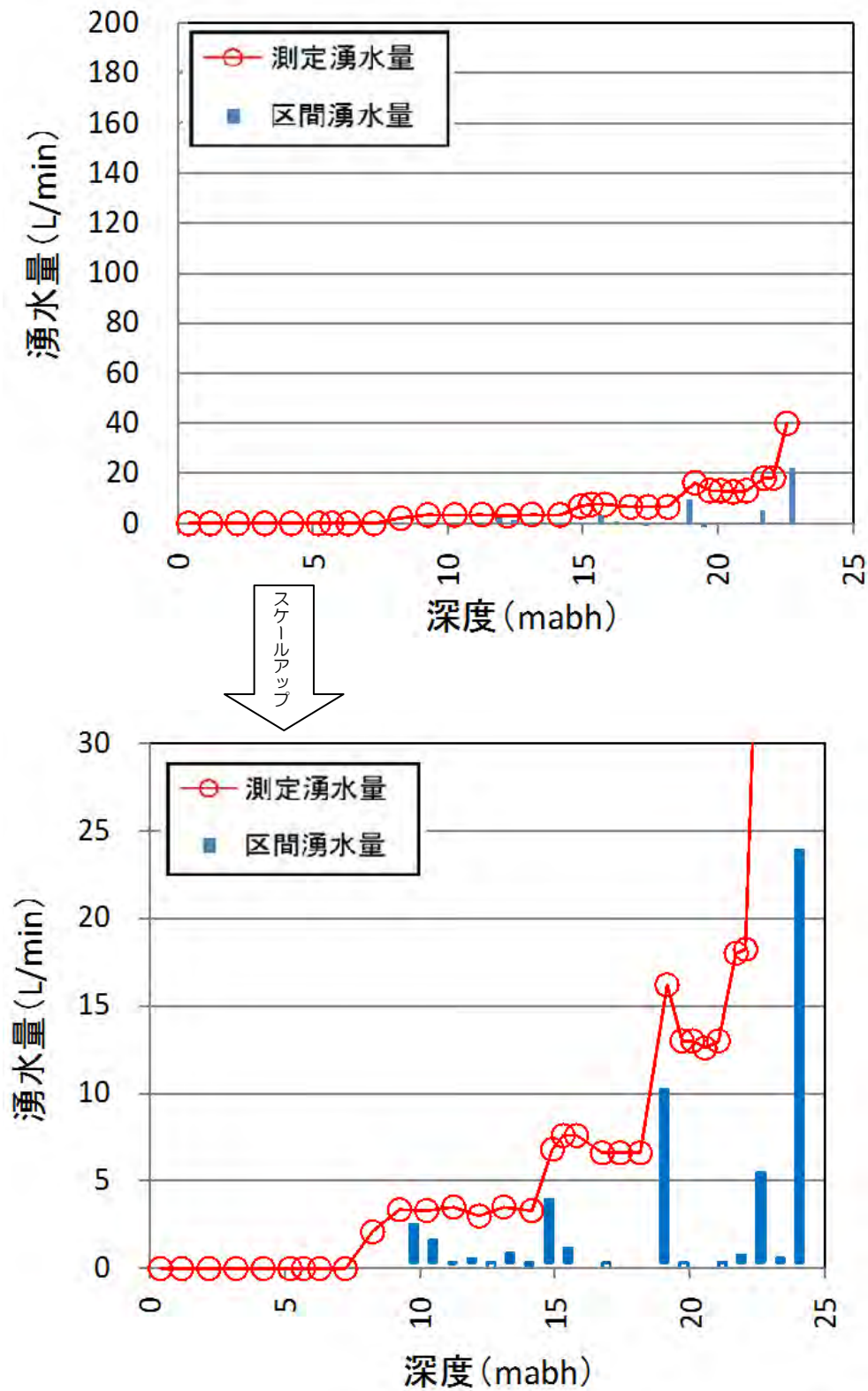


図 7.3.2-4 13MI36 号孔掘削時孔口湧水量測定結果

(5) 12MI30 号孔、12MI31 号孔への水圧挙動

図 7.3.2-5、図 7.3.2-6 に 13MI36 号孔掘削時の 12MI30 号孔、12MI31 号孔への水圧挙動を示す。水圧の応答としては深度 8mabh 付近、深度 14～15mabh 付近、深度 17～18mabh 付近、深度 21～22mabh 付近の 4 深度で変化が見られた。12MI30 号孔、12MI31 号孔ともに単一区間への応答はなくボーリング掘削によって調査地周辺の水圧が変化したものと言える。

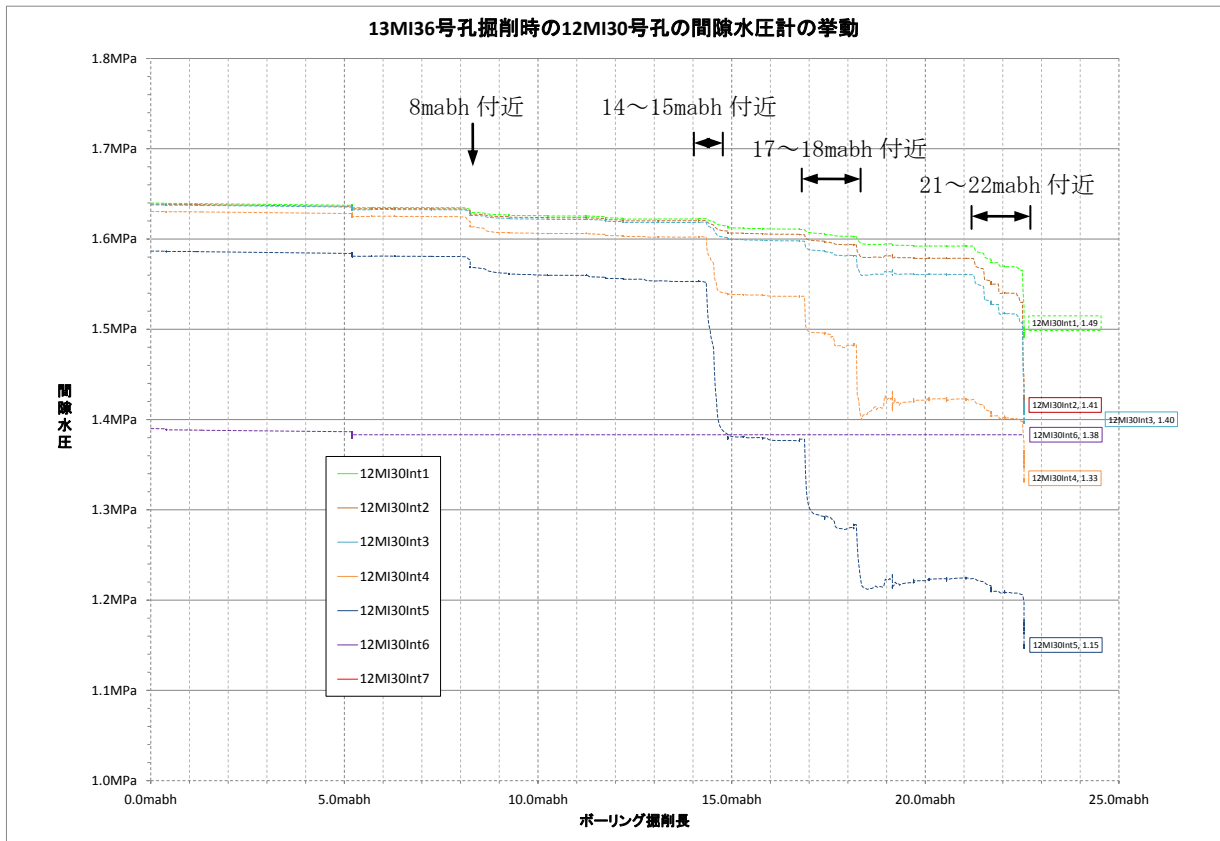


図 7.3.2-5 13MI36 号孔掘削中の 12MI30 号孔の水圧挙動

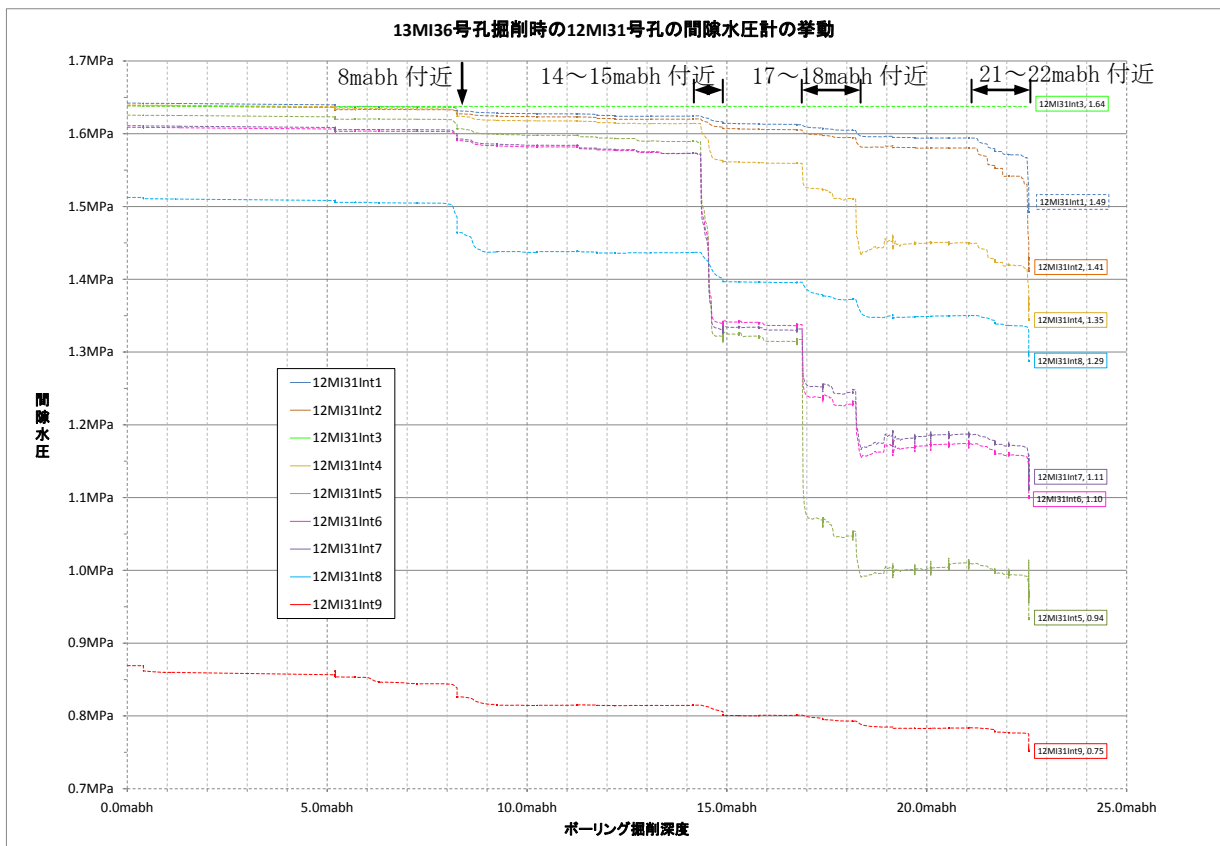


図 7.3.2-6 13MI36 号孔掘削中の 12MI31 号孔への水圧挙動

(6) 掘削水の蛍光染料の濃度管理

ボーリング掘削水には蛍光染料であるアミノ G 酸をトレーサ剤として添加して掘削を行った。掘削中は 1 時間以下の間隔でリターン水をサンプリングし、濃度が 5mg/L \pm 10%以内の範囲にあることを確認した。

図 7.3.2-7 にアミノ G 酸濃度と湧水量の深度変化を示す。

13MI36 号孔においてトレーサ濃度管理を行った区間は、孔口から 8.25mabh までである。

孔口から 7.25mabh 間では湧水は認められず、濃度調整の結果、概ね 5mg/L \pm 10%の範囲に収めることが出来た。8.25mabh 付近にて湧水量が 2.1L/min と多くなり、濃度調整が困難となったため、アミノ G 酸の添加および、濃度計測を終了した。なお、添加したアミノ G 酸の総量は 8.90g であった。

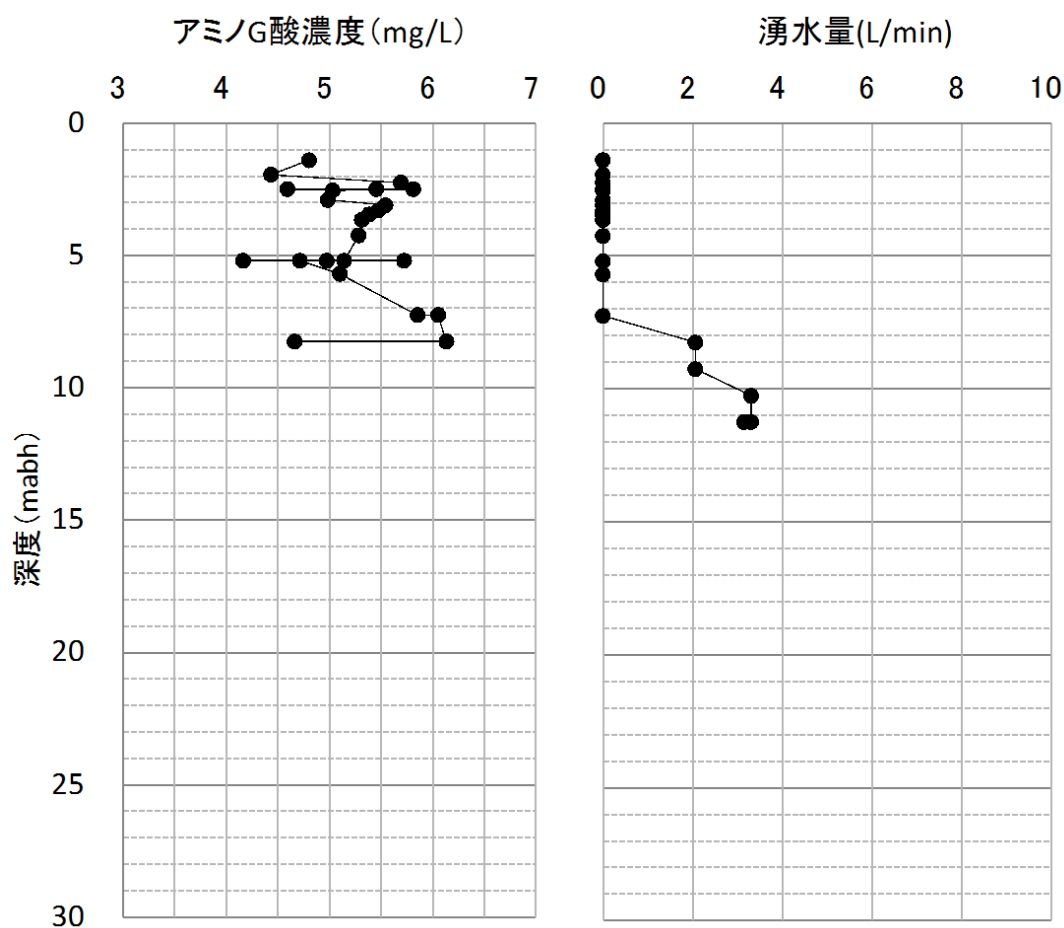


図 7.3.2-7 13MI36 号孔掘削水のアミノ G 酸濃度と湧水量

7.3.2.3 コア観察結果

コアの採取および記載を 13MI36 号孔にて掘削した 0.00mabh～22.55mabh 間の深度について実施した。13MI36 号孔の総合地質柱状図を図 7.3.2-8 に、コア写真を図 7.3.2-9～図 7.3.2-11 に示す。

(1) 岩相

13MI36 号孔の孔口から深度 0.39mabh 間はコンクリートである。それ以深～深度 22.55mabh 間の地質は、中粒黒雲母花崗岩（土岐花崗岩）より構成され、弱い変質といくつかの時期の異なる変形作用を被っている。

花崗岩は石英、長石類および黒雲母を主体として構成され、まれに角閃石が認められる。岩石の組織は中粒の等粒状組織もしくは、長石の斑晶を伴う斑状組織を示し、斑晶は最大径 30mm 程度のものが認められる。

(2) 変質

図 7.3.2-8 の 13MI36 号孔総合地質柱状図に母岩の変質の程度、割れ目沿いの変質および割れ目充填鉱物の分布を示す。

本孔の全体的な変質の特徴としては、母岩全体に長石のセリサイト化が認められ弱い変質を受けている。割れ目の密度の高い個所の母岩には、細脈への緑泥石の充填が認められる。割れ目の充填鉱物としては緑泥石や方解石が認められるが、断層や割れ目の集中する区間には、割れ目の充填鉱物として母岩を構成する鉱物やその破片とともに、セリサイト、緑泥石、方解石および黄鉄鉱が認められ、一部は未固結で粘土化した状態で割れ目を充填する。

深度 0～22.55mabh 間は長石の白濁化が認められるので弱変質と判断した。なお、この区間のうち、深度 3.38～4.27mabh 付近は斜長石の白濁化が見られ中変質、深度 9.08～9.22mabh 間は長石の白濁化および岩盤の脆弱化が見られ中変質を示す。深度 18.22～18.34mabh 間は、カタクラサイト化した部分に緑泥石が濃集し、黄鉄鉱の析出も見られたため中変質と判断した。

以下に割れ目沿いの変質と、割れ目充填鉱物の観察結果について述べる。

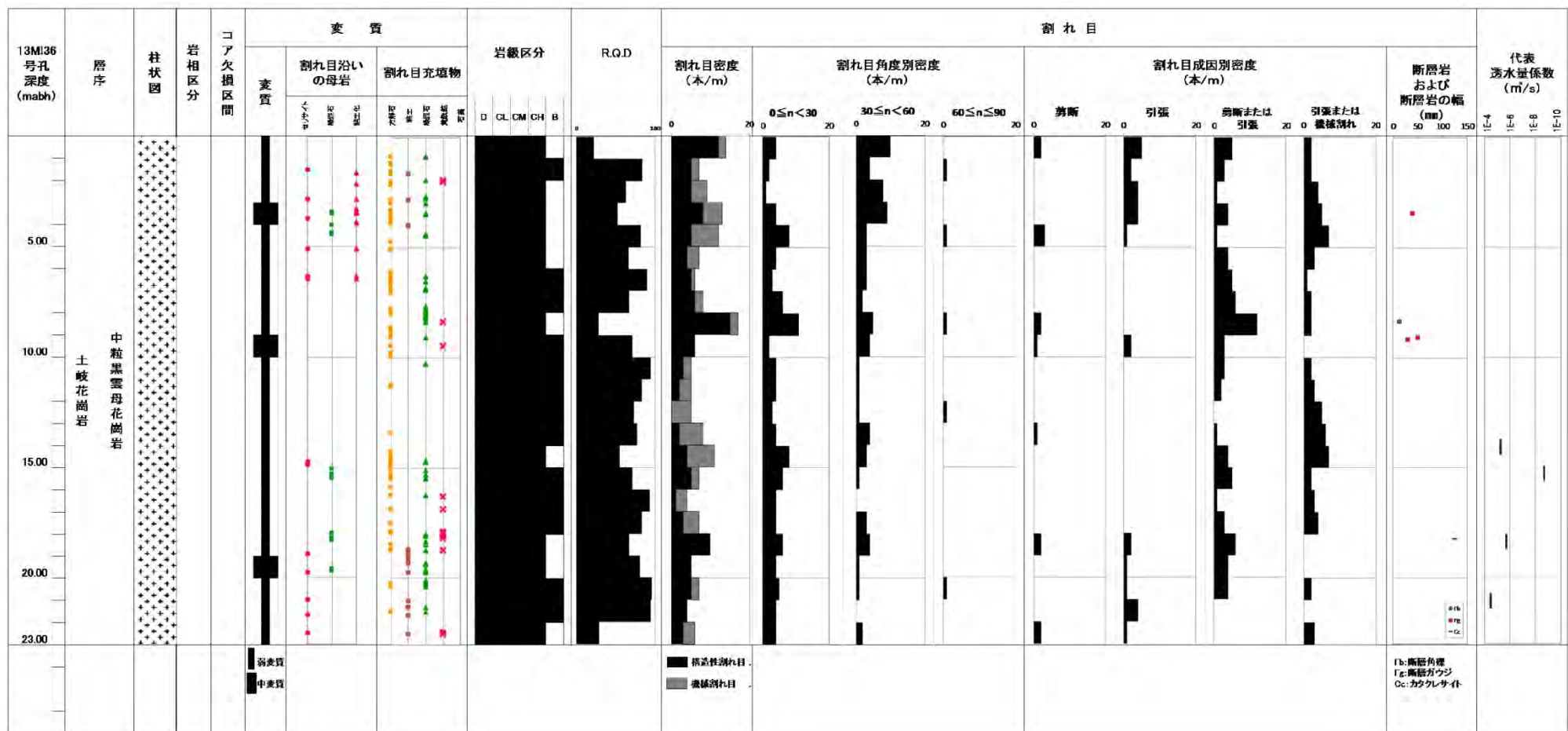


図 7.3.2-8 13MI36 号孔総合地質柱状図



図 7.3.2-9 コア写真 13MI36 号孔 (0~9mabh)



図 7.3.2-10 コア写真 13MI36 号孔 (9.00~18.00mabh)



図 7.3.2-11 コア写真 13MI36 号孔 (18.00~22.55mabh)

a. 割れ目沿いの変質

割れ目沿いの変質は割れ目が発達する区間で認められ、割れ目の少ない区間では認められない。以下に、主な割れ目沿いの変質について特徴を述べる。

(a) 深度 3.44～3.48mabh 間

割れ目沿いの幅約 20mm の範囲で中変質程度のセリサイト化、弱変質程度の緑泥石化が認められる。

(b) 深度 9.08～9.13mabh 間

割れ目沿いに幅 40mm の範囲で弱変質程度のセリサイト化が認められる。

(c) 深度 9.18～9.21mabh 間

割れ目沿いに幅約 20mm の範囲で弱変質程度のセリサイト化が認められる。

(d) 深度 18.22～18.35mabh 間

割れ目沿いに幅約 125mm の範囲で強変質程度の緑泥石化および黄鉄鉱化が認められる。黄鉄鉱は深度 18.28～18.29mabh の割れ目を充填する。

(e) 深度 19.60～19.67mabh 間

割れ目沿いに幅約 62mm の範囲で細脈沿いに弱変質程度の緑泥石化が認められる。

b. 割れ目充填鉱物

割れ目充填鉱物は、緑泥石、方解石を主体とし、粘土、黄鉄鉱が認められた。

以下に充填鉱物の主体を成す緑泥石および方解石について、分布区間や特長について述べる。

(a) 緑泥石

主な分布区間は、18.00～18.08mabh 間、18.24～18.26mabh 間、18.34mabh、19.32mabh、19.60～19.66mabh 間および 22.51mabh に認められる。図 7.3.2-12 に代表的な緑泥石の写真を示す。右写真の割れ目面を被う暗緑色の鉱物が緑泥石である。また、本孔において 3 箇所認められたカタクラサイトの基質部は、いずれも緑泥石化している。

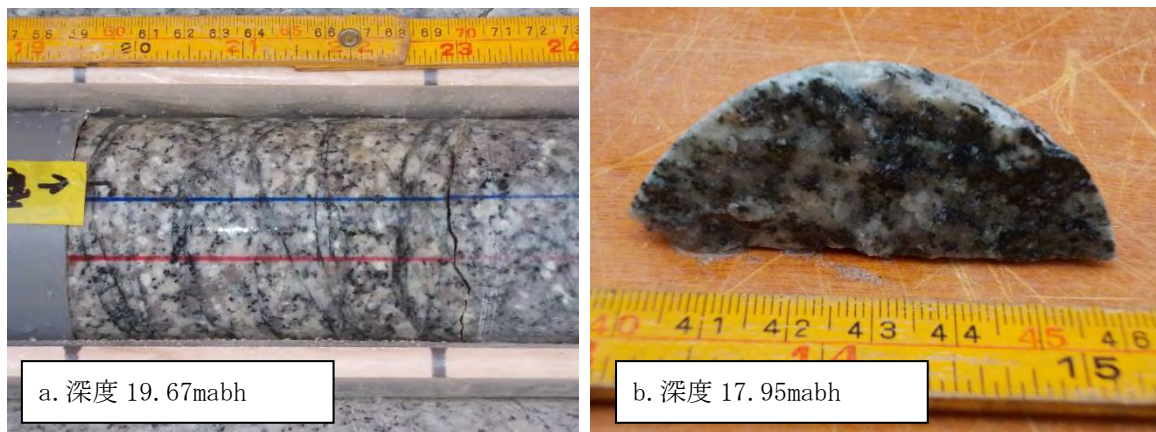


図 7.3.2-12 13MI36 号孔 緑泥石脈と緑泥石の付着する引張割れ目

(b) 方解石

方解石は塩酸との反応により確認した。方解石は、灰色の未固結な粉末状および、粘土状の充填物として、または希に灰色で固結した充填物として産する。なお、粘土状の充填物は方解石以外の緑泥石やセリサイトなどの粘土鉱物の混在も考えられる。方解石の分布については、割れ目が多い区間でやや多く認められる傾向がある。また、一部の割れ目では、緑泥石が付着する割れ目の内側に入り込むように方解石が充填されていることが確認された。この割れ目では緑泥石が形成された後に方解石が晶出ないし、沈殿したことが推測される。

図 7.3.2-13 の写真は、細粒未固結な方解石が淡灰色軟質な粘土状の付着物として割れ目を充填する様子を示す。

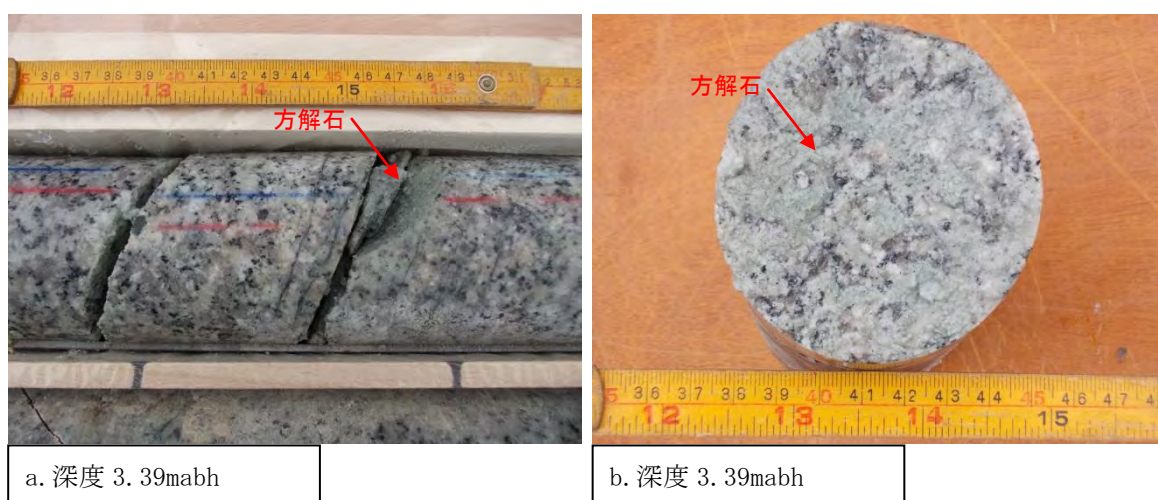


図 7.3.2-13 13MI36 号孔 粘土および方解石の付着する引張割れ目

(c) 黄鉄鉱

黄鉄鉱は割れ目充填鉱物として産する。割れ目内部にごく少量薄く産する形態が主だが、18.28～18.29mabh 間のみ 13 mm 程度の厚みを持ち、割れ目内部を完全に充填している。図 7.3.2-14 の写真は、黄鉄鉱が割れ目を充填する様子を示す。

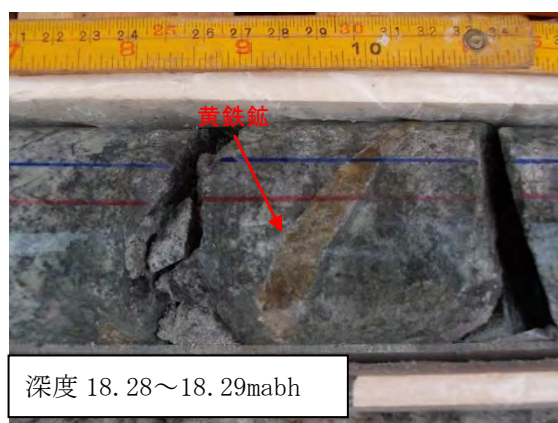


図 7.3.2-14 13MI36 号孔 割れ目を充填する黄鉄鉱

(3) 割れ目

13MI36号孔の割れ目の発達状況に基づき、5区間に区分して記述する。5区間の深度は、割れ目が発達する深度0～1.00mabh間、割れ目が少ない深度1.0～8.00mabh間、割れ目が発達する深度8.00～9.00mabh間、割れ目が少ない深度9.00～22.00mabh間および、割れ目が発達する深度22.00～22.55mabh（コア観察最終深度）である。

以下に記述する割れ目密度は、コア観察時に分離した状態（非密着）の構造的割れ目の本数であり、「TorD（引張または、機械割れ目）」と判定した割れ目もこれに含まれる。

(a) 深度0～1.00mabh間（0～0.39m間はコンクリート）

本区間は、割れ目が発達する区間であり、割れ目密度14本/mである。割れ目の傾斜角は中角なものに富む。他区間と比べ坑道壁面に近いため、応力解放により割れ目密度がやや高くなったと考えられる。

(b) 深度1.00～8.00mabh間

本区間は、割れ目密度は6～13本/m、平均8.9本/mであり、健岩部が連続する。割れ目の傾斜角は低角から中角のものが多く、成因については引張割れ目が主体である。

断層岩については、深度3.44～3.48mabh間で断層ガウジが確認された。傾斜は15～30°、幅は40mmであり、粘土化した緑泥石と方解石の挟在が認められる。

(c) 深度8.00～9.00mabh間

本区間は割れ目が発達する区間であり、割れ目密度は17本/mである。割れ目の傾斜角は低角なものに富み、割れ目の成因は剪断または引張割れ目が主体である。断層岩については、深度8.36～8.37mabh間で断層角礫岩が確認された。（図7.3.2-15）。傾斜は30°、幅は13mmであり、方解石と黄鉄鉱の挟在が認められる。

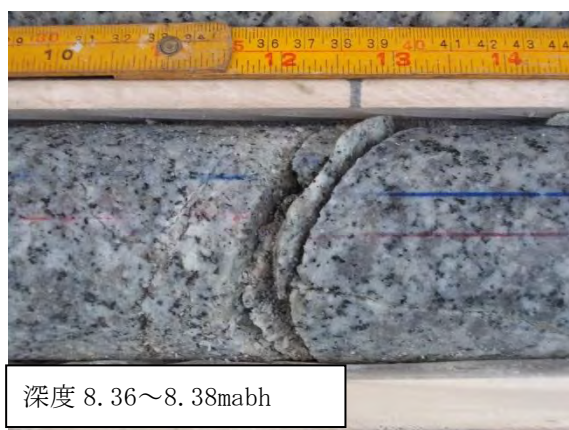


図 7.3.2-15 13MI36号孔 断層角礫岩

(d) 深度 9.00～22.00mabh 間

本区間は、割れ目密度は 4～11 本/m、平均 6.5 本/m であり、健岩部が連続する。割れ目の傾斜角は低角のものが多く、成因については剪断または引張割れ目が主体である。

断層岩については、断層ガウジおよびカタクラサイトが確認された。深度 9.08～9.13mabh 間で断層ガウジが確認され(図 7.3.2-16)、傾斜は 30°、幅は 13mm であり、方解石と黄鉄鉱の挟在が認められる。深度 9.18～9.21mabh 間で断層ガウジが確認され(図 7.3.2-16)、幅は 30mm であり、土砂状～角礫状を呈し脆弱化しており、方解石が認められる。深度 18.22～18.35mabh 間でカタクラサイトが確認され、幅は 12.5mm であり、全体的に緑泥石の分布が認められる。また、この区間に含まれる深度 18.28～18.29mabh 間の亀裂には、黄鉄鉱が充填している。



深度 9.08～9.13mabh 間、深度 9.18～9.21mabh 間

図 7.3.2-16 13MI36 号孔 断層ガウジ

(e) 深度 22.00～22.55mabh 間

本区間は割れ目が発達する区間であり、割れ目密度は 11.9 本/m である(この区間対象は 0.55m 長)。割れ目の傾斜角は低角のものが多く、成因については圧縮あるいは引張割れ目である。

(4) 岩盤等級および RQD

13MI36 号孔の岩盤等級は記載マニュアルに基づき変質の程度から、深度 1.00～2.00mabh 間、深度 6.00～8.00mabh 間、深度 9.00～14.00mabh 間、深度 15.00～18.00mabh 間、深度 20.00～22.00mabh 間が B 級、深度 0～1.00mabh、深度 2.00～6.00mabh 間、深度 8.00～9.00mabh、深度 14.00～15.00mabh 間、深度 18.00～20.00mabh、深度 22.00～22.55mabh 間は CH 級と判定した。

RQD については、浅部で割れ目の発達する深度 0～1.00mabh では 22 を示し低い。割れ目の少ない区間である深度 1.00～8.00mabh 間の RQD は 52～90 の範囲を示し平均は 72 である。割れ目が発達する深度 8.00～9.00mabh 間の RQD は 28 である。割れ目の少ない区間である深度 9.00～22.00mabh 間の RQD は 55～96 の範囲を示し平均は 80 である。割れ目が発達する深度 22.00～22.55mabh 間の

RQD は 29 である。

7.3.2.4 孔曲検層

13MI36 号孔の孔曲がり検層結果を表 7.3.2-3 に示す。掘削中に 5m 程度に 1 回の頻度で孔曲がり検層を実施した。

本孔における孔跡は、掘削角度は当初設置の -35° に対して若干上向きに変位した。掘削方向は当初設置の $S75^\circ W$ に対して大きな変位はなかった (図 7.3.2-17)。

表 7.3.2-3 13MI36 号孔 孔曲がり検層結果

測定月日	掘削深度 (mabh)	孔曲がり測定深度 (mabh)	測定方向 (水平より下向き)	測定方位 (磁北基準)	偏差角	測定基準 (真北基準)
11月13日	5.20	5.00	$-34^\circ 00'$	$S83^\circ W$	7°	$S76^\circ W$
11月19日	7.25	7.00	$-34^\circ 00'$	$S84^\circ W$	7°	$S74^\circ W$
11月19日	11.25	11.00	$-33^\circ 00'$	$S83^\circ W$	7°	$S76^\circ W$
11月20日	16.74	16.00	$-33^\circ 00'$	$S82^\circ W$	7°	$S75^\circ W$
11月21日	21.05	21.00	$-33^\circ 00'$	$S82^\circ W$	7°	$S75^\circ W$

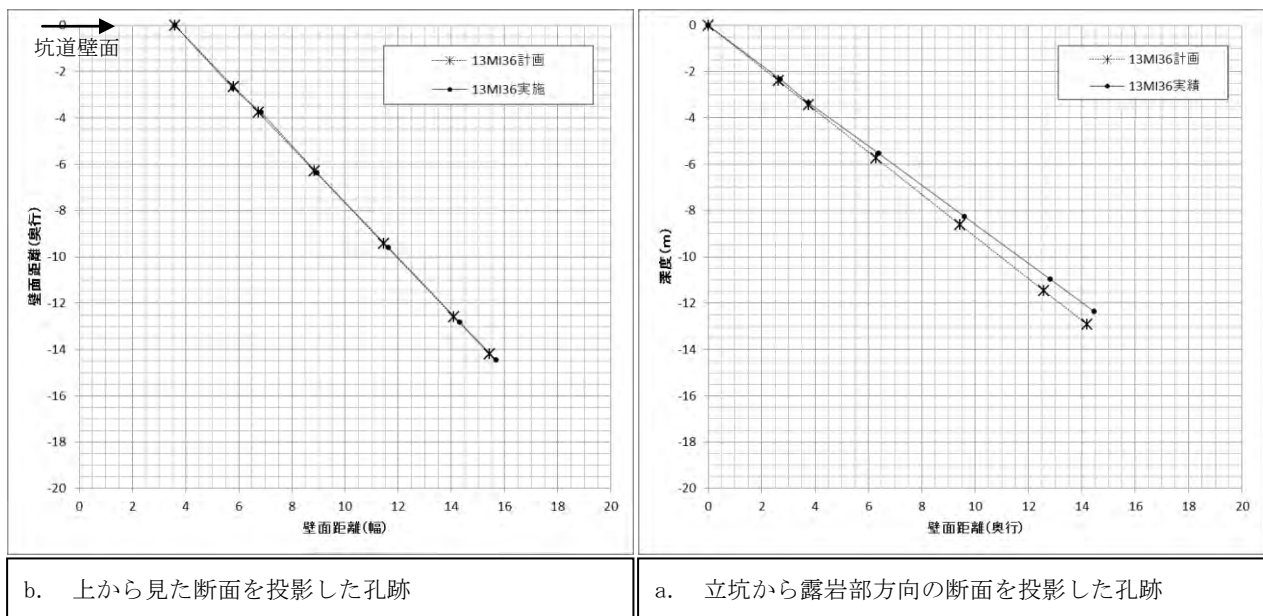


図 7.3.2-17 13MI36 号孔 孔曲がり検層結果

7.3.2.5 キャリパー検層

掘削終了後に孔径を把握するためにキャリパー検層を実施した。13MI36号孔のキャリパー検層結果を図7.3.2-18に示す。

5.00mabhまで孔口ケーシング～フロートシュー～セメンチング部である。5.00mabh以深の孔内裸孔部の検層結果では、深度8.00～9.00mabh付近で掘削孔径 ϕ 100mm近くまで拡孔している。深度8.00～9.00mabh付近はRQDが28、割れ目密度が17本/mを示し、とくに亀裂が発達した脆弱部であった。

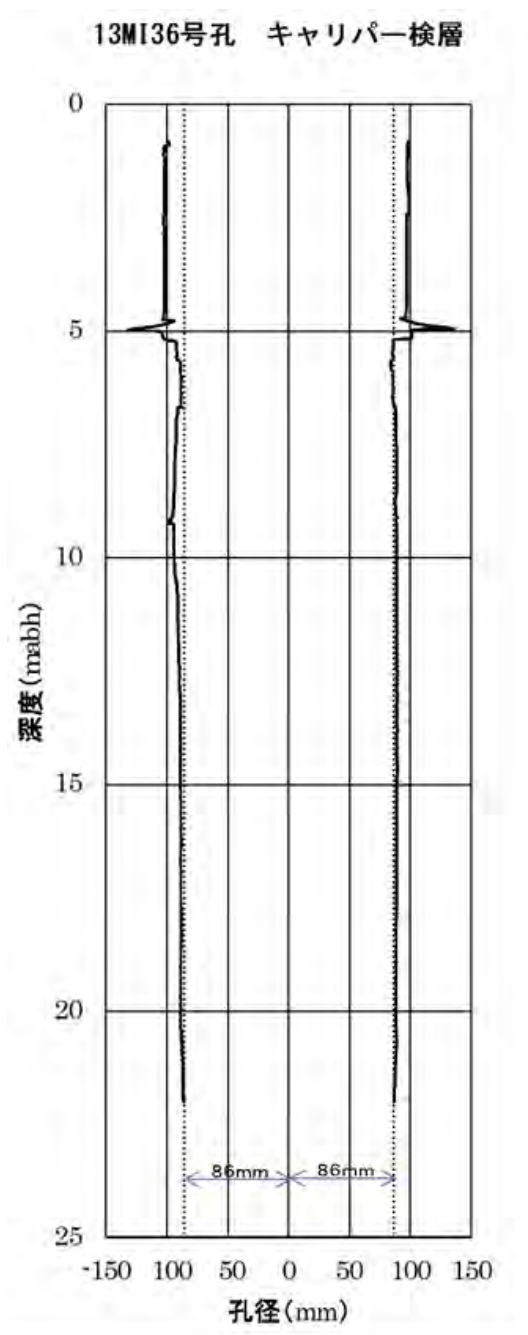


図7.3.2-18 13MI36号孔キャリパー検層結果

7.3.2.6 フローメーター検層

13MI36号孔のフローメーター検層結果の一覧を表7.3.2-4に、検層結果を図7.3.2-19に示す。検層結果から流量変化が見られた深度は7.46～8.46mabh、14.15～14.66mabh、14.66～16.66mabh、17.66mabh、18.06mabh、20.31mabh、21.06mabh、22.36～22.55mabhの8深度である。

流量変化が認められた8深度のうち、7.46～8.46mabh間にはBTVから7本の割れ目が認められ、流量変化量は4.0L/minであった。また、14.15～14.66mabhではBTVから4本の割れ目が認められ、流量変化量は2.6L/minであった。14.66～16.66mabhでは、BTVから3本の割れ目が認められ流量変化量は0.4L/minであった。

他に17.66mabhから1.8L/min、18.06mabhから2.9L/min、20.31mabhから0.7L/min、21.06mabhから4.2L/min、22.36～22.55mabhから25.5L/minの流量変化量が確認されたが、BTVから割れ目は確認されなかった。

これらの結果を踏まえ8m、14m、17m、21m付近の4か所において透水試験を実施することとした。

表7.3.2-4 13MI36号孔のフローメーター検層結果一覧

孔名	検層区間 (mabh)	流量変化点 (mabh)	流量変化量 (L/min)	対象割れ目等 (BHTV)	コア観察結果から一致する割れ目番号
13MI36	5.70～22.16	7.46～8.46	4.0	N 13 W 81 E	対応割れ目見られず
				N 11 W 85 E	対応割れ目見られず
				N 19 W 89 E	対応割れ目見られず
				N 14 W 82 E	対応割れ目見られず
				N 21 W 85 E	0-68
				N 19 W 87 W	対応割れ目見られず
				N 4 W 25 E	対応割れ目見られず
				N 22 W 84 E	0-70
				N 83 E 40 W	0-71
				N 33 E 8 E	0-73
				N 69 W 7 E	0-74
				N 11 W 15 E	0-76
				N 46 W 21 E	対応割れ目見られず
				N 25 W 17 E	対応割れ目見られず
		N 8 W 20 E	0-70		
		14.15～14.66	2.6	N 49 W 76 E	0-24
				N 33 W 84 E	対応割れ目見られず
				N 34 W 87 W	0-25
				N 18 W 78 W	対応割れ目見られず
				N 32 W 89 W	対応割れ目見られず
				N 22 W 88 W	対応割れ目見られず
				N 22 W 89 W	対応割れ目見られず
				N 24 W 89 E	対応割れ目見られず
				N 27 W 86 E	対応割れ目見られず
				N 29 W 89 W	対応割れ目見られず
				N 19 W 86 E	1"-25
				N 21 W 89 E	対応割れ目見られず
				N 17 W 89 E	対応割れ目見られず
N 23 W 88 W	対応割れ目見られず				
N 66 E 17 E	対応割れ目見られず				
14.66～16.66	0.4	N 26 W 88 E	1"-12		
		N 22 W 88 W	対応割れ目見られず		
		N 27 W 82 E	1-38		
		N 29 W 85 W	1"-14		
		N 34 W 89 E	対応割れ目見られず		
17.66	1.8	N 42 E 3 E	対応割れ目見られず		
		N 36 W 85 W	1-41		
		対応割れ目見られず	対応割れ目見られず		
		対応割れ目見られず	対応割れ目見られず		
		対応割れ目見られず	対応割れ目見られず		
		対応割れ目見られず	対応割れ目見られず		
		対応割れ目見られず	対応割れ目見られず		
		対応割れ目見られず	対応割れ目見られず		
18.06	2.9	対応割れ目見られず	対応割れ目見られず		
		対応割れ目見られず	対応割れ目見られず		
20.31	0.7	対応割れ目見られず	対応割れ目見られず		
		対応割れ目見られず	対応割れ目見られず		
21.06	4.2	対応割れ目見られず	対応割れ目見られず		
		対応割れ目見られず	対応割れ目見られず		
22.36～22.55	25.5	対応割れ目見られず	対応割れ目見られず		
		対応割れ目見られず	対応割れ目見られず		

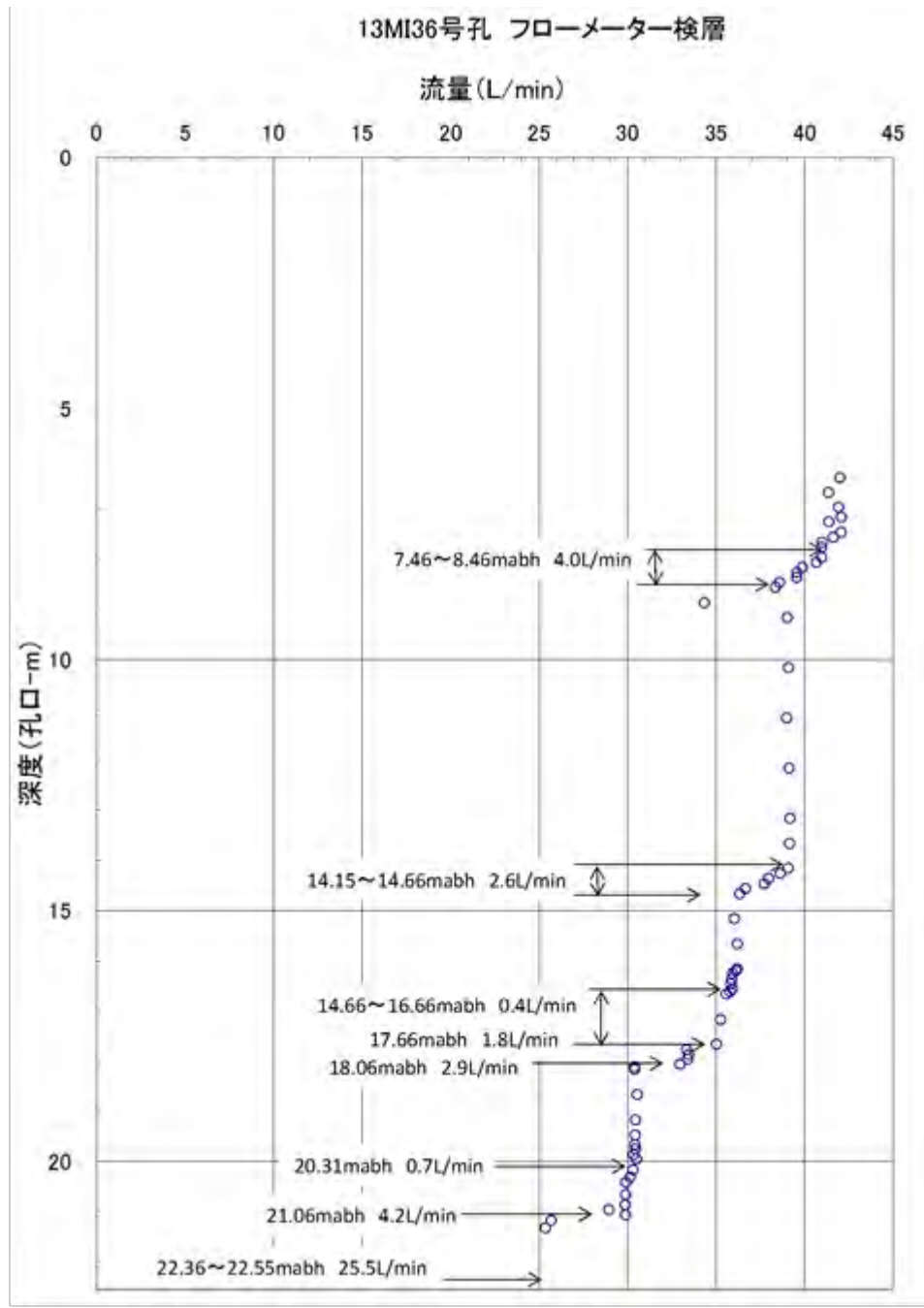
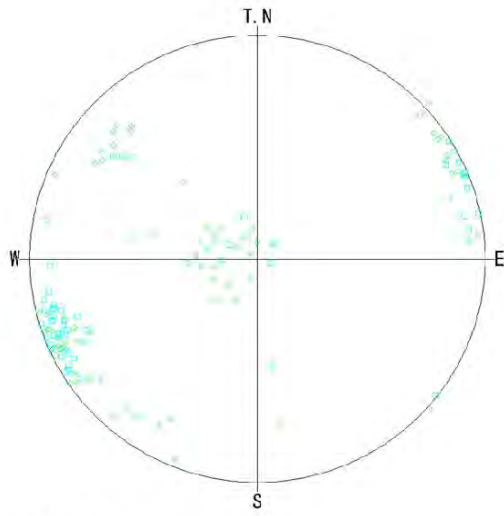


図 7.3.2-19 13MI36 号孔のフローメーター検層結果

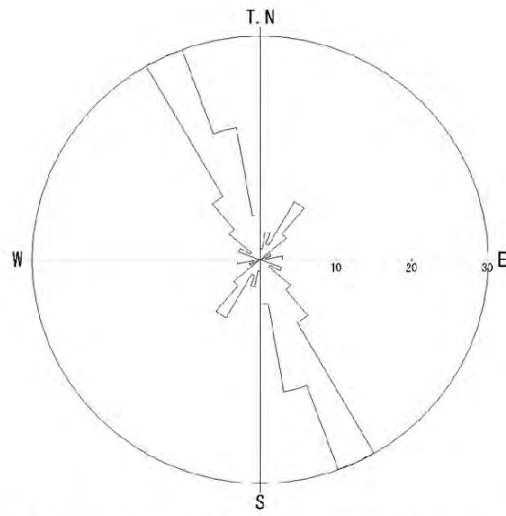
7.3.2.7 BTV 検層

13MI36 号孔の BTV 検層から取得した不連続面の方向データをシュミットネット（下半球投影）に表示した。図 7.3.2-20 にシュミットネットを示す。

取得した不連続面は合計 133 本であり、1m あたりの割れ目本数は 5.85 本であった。図 7.3.2-20 より、本孔における全不連続面の集中点は $N21^{\circ} W86^{\circ} E$ と現れたが、13MI36 号孔の掘削方向 ($S75^{\circ} W$ 、下向き -34°) による不連続面の出現し易さの影響であると考えられる（掘削方向に対し垂直に近い面ほど検出されやすい）。



データ数 : 133/133

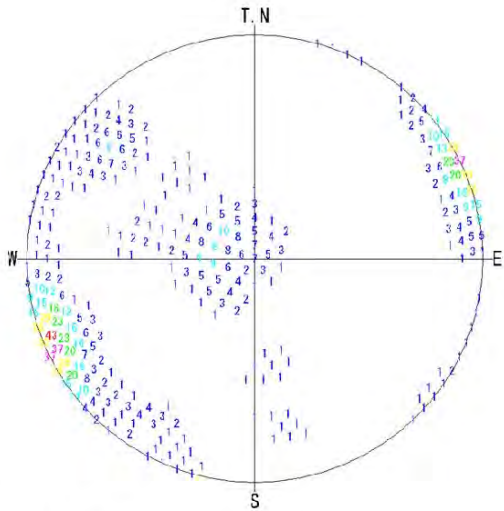


データ数 : 133/133 最大値 : 30.1% グルーピング角度 : 10°

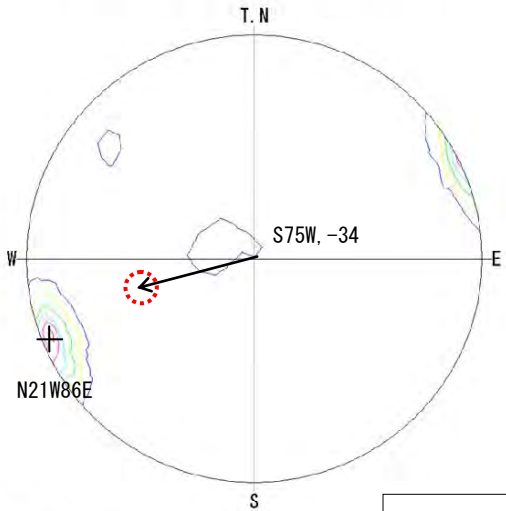
<凡例>

- : 初生構造 — 0
- ◇ : 開口亀裂 — 66
- : ハーフクラック — 67
- △ : 破碎帯 — 0
- ▽ : 鉱物脈 — 0

角度区分	個数	%	角度区分	個数	%
0- 9	2	2	90- 99	0	0
10- 19	5	4	100-109	0	0
20- 29	3	2	110-119	4	3
30- 39	12	9	120-129	2	2
40- 49	6	5	130-139	7	5
50- 59	0	0	140-149	13	10
60- 69	2	2	150-159	40	30
70- 79	1	1	160-169	24	18
80- 89	4	3	170-179	8	6



データ数 : 133



データ数 : 133

<凡例> 数値 (個)

1 ~ 43 個

コンター値 (%)

- コンター 1 : 5
- コンター 2 : 10
- コンター 3 : 15
- コンター 4 : 20
- コンター 5 : 25
- コンター 6 : 30

不連続面の集中点

N21W86E

ボーリング掘削方向

S75W, -34 下向き

図 7.3.2-20 13MI36 号孔シュミットネット

7.3.2.8 透水試験（単孔式、孔間）

(1) 単孔式透水試験と試験区間選定

試験対象とする割れ目は、コア観察やBTVの画像、フローメーター検層結果および掘削時の水圧応答や湧水量変化より、12MI30号孔、12MI31号孔、13MI37号孔の掘削（予定）箇所との連結性が期待される21mabh、17mabh、14mabh、8mabh付近の割れ目を抽出した。

単孔式の透水試験は、抽出した割れ目の深度と湧水量を詳細に把握し、概略な透水量係数を得る目的で実施し、その結果から孔間透水試験区間を選定した。単項式透水試験の試験実施深度と湧水量も関係図を図7.3.2-21～図7.3.2-24に、試験結果を表7.3.2-5示す。

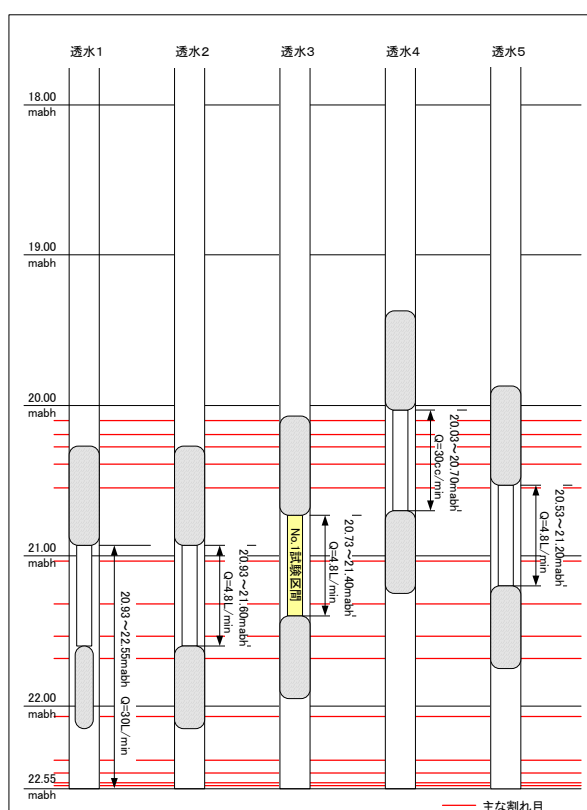


図 7.3.2-21 13MI36 号孔 21mabh 付近の単項式透水試験深度図

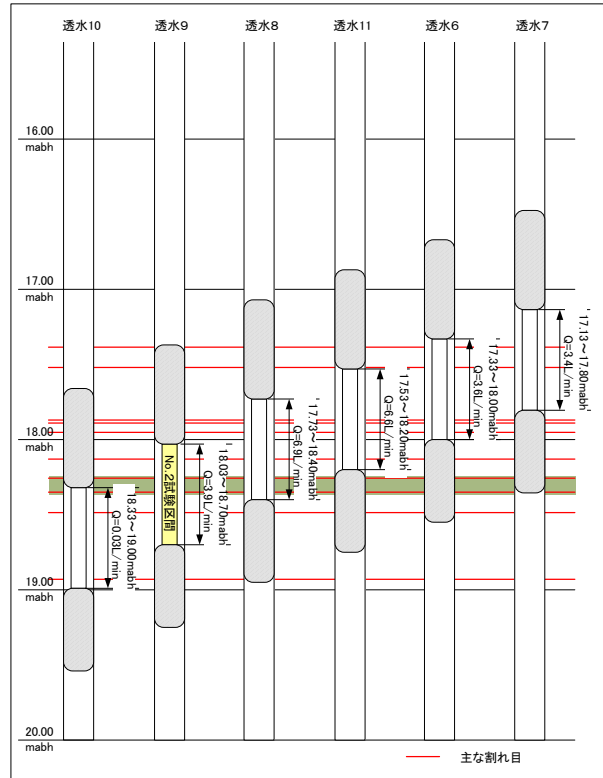


図 7.3.2-22 13MI36 号孔 17mabh 付近の単項式透水試験深度図

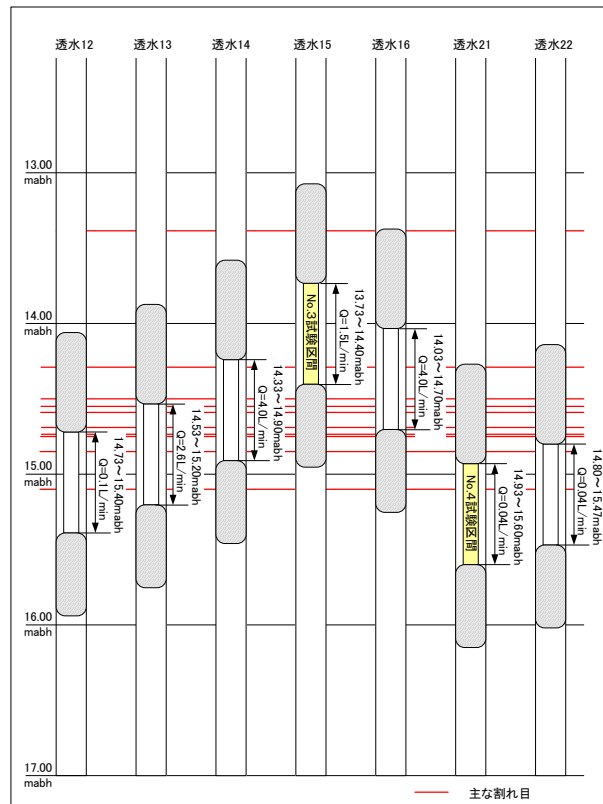


図 7.3.2-23 13MI36 号孔 14mabh 付近の単項式透水試験深度図

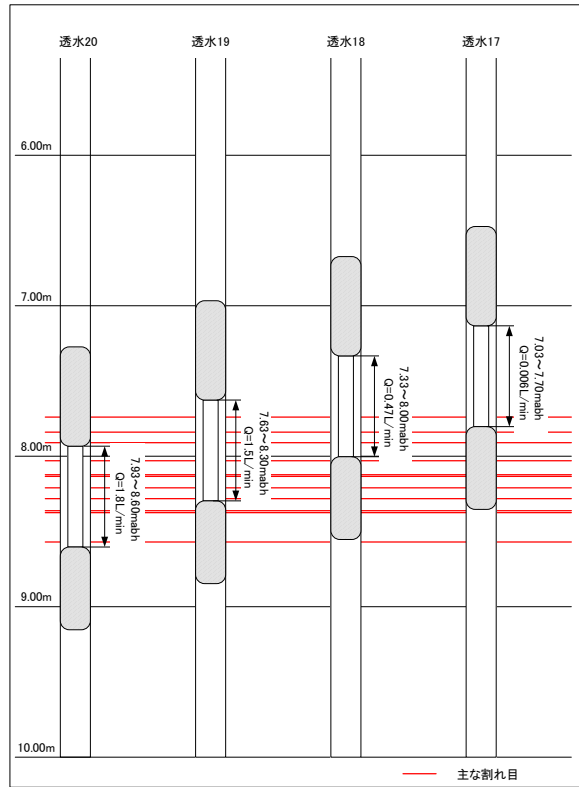


図 7.3.2-24 13MI36 号孔 8mabh 付近の単項式透水試験深度図

表 7.3.2-5 13MI36 号孔単項式透水試験の結果

試験番号	試験深度		区間長 m	割れ目番号	透水量係数 m ² /sec	湧水量 m ³ /sec	水圧 mH ₂ O	
	上端(mabh)	下端(mabh)						
透水1	20.93	22.55	0.67	2-8~2-17	1.93E-06	5.00E-04	149.41	
透水2	20.93	21.60		2-8~2-10	2.33E-07	8.00E-05	150.43	
透水3	20.73	21.40		2-8、2-9	2.30E-07	8.00E-05	152.16	←試験番号 No. 1
透水4	20.03	20.70		2-1~2-7	1.44E-09	5.00E-07	152.31	
透水5	20.53	21.20		2-7、2-8	2.30E-07	8.00E-05	152.31	
透水6	17.33	18.00		1-47~1-53	1.75E-07	6.00E-05	150.51	
透水7	17.13	17.80		1-47、1-48	1.65E-07	5.67E-05	150.41	
透水8	17.73	18.40		1-49~1-56	3.31E-07	1.15E-04	152.14	
透水9	18.03	18.70		1-53~1-57	1.87E-07	6.50E-05	152.06	←試験番号 No. 2
透水10	18.33	19.00		1-56~1-60	1.44E-09	5.00E-07	151.83	
透水11	17.53	18.20		1-49~1-53	3.17E-07	1.10E-04	152.04	
透水12	14.73	15.40		1-31~1-39	4.75E-09	1.66E-05	153.06	
透水13	14.53	15.20		1-26~1-36	1.25E-07	4.33E-05	151.73	
透水14	14.33	14.90		1-25~1-34	1.90E-07	6.66E-05	153.87	
透水15	13.73	14.40		1-23、1-24	7.17E-08	2.50E-05	152.75	←試験番号 No. 3
透水16	14.03	14.70		1-23~1-30	1.92E-07	6.66E-05	151.52	
透水17	7.03	7.70		0-61~0-63	2.89E-09	1.00E-06	151.63	
透水18	7.33	8.00		0-63~0-68	2.26E-08	7.83E-06	151.73	
透水19	7.63	8.30		0-63~0-77	7.24E-08	2.50E-05	151.12	
透水20	7.93	8.60		0-69~0-80	8.50E-08	3.00E-05	154.59	
透水21	14.93	15.60		1-36~1-39	1.90E-09	6.67E-07	154.14	←試験番号 No. 4
透水22	14.73	15.40		1-36	1.89E-09	6.67E-07	154.45	(No. 4-1, No. 4-2)

※ 試験番号の透水試験深度または区間透水試験実施区間また、表の右に孔間透水試験の試験番号を示す。

(2) 孔間透水試験結果

単孔式透水試験結果から選定した4深度において孔間水理試験を実施した。

No. 1～3 では定流量揚水試験による孔間透水試験を実施した。No. 4 では、単孔式透水試験の結果、透水量係数が $1.90E-09m^2/sec$ と非常に低かったことから、定流量揚水試験の実施が困難と判断し、パルス試験を実施した。

なお、試験中は間隙水圧モニタリング装置のサンプリングインターバルを1秒に変更して孔間透水試験時の水圧応答を計測した。

水理試験結果を表 7.3.2-6 に、12MI30 号孔と 12MI31 号孔の圧力応答結果を表 7.3.2-7 に示す。

表 7.3.2-6 13MI36 号孔透水試験結果一覧表

試験番号	試験深度		試験方法	解析法	透水量係数	貯留係数	初期間隙水圧	揚水量
	上端(mabh)	下端(mabh)			m^2/sec		Mpa	m^3/sec
No.1	20.73	21.40	定流量 揚水試験	Jacob	3.42E-05	-	1.5308	2.66E-05
				Agarwal	3.31E-05			
No.2	18.03	18.70	定流量 揚水試験	Jacob	2.02E-06	-	1.5227	1.44E-05
				Agarwal	1.94E-05			
No.3	13.73	14.40	定流量 揚水試験	Jacob	8.31E-07	-	1.5237	1.51E-05
					5.90E-06			
				Agarwal	2.89E-06			
No.4-1	14.93	15.60	非定常試験	Hvorslev	2.06E-09	-	1.5217	
No.4-2					2.17E-09		1.5207	

※ 透水量係数の太文字の値を場の値として採用した。

表 7.3.2-7 12MI30 号孔、12MI31 号孔への圧力応答結果一覧表

試験番号	12MI30 (mH ₂ O)						
	Int1 25.15~27.50mabh	Int2 24.47~24.62mabh	Int3 22.07~23.95mabh	Int4 20.27~20.87mabh	Int5 10.68~19.07mabh	Int6 10.00~10.15mabh	Int7 4.90~9.48mabh
No.1 20.73~21.40mabh	0.494	0.643	0.726	0.511	0.474		変化なし
No.2 18.03~18.70mabh	0.205	0.267	0.348	0.961	1.181		変化なし
No.3 13.73~14.40mabh	0.206	0.262	0.313	0.727	0.236		変化なし
No.4-1 14.93~15.60mabh	変化なし	変化なし	変化なし	0.014	0.035		変化なし
No.4-2 14.93~15.60mabh	変化なし	変化なし	変化なし	0.020	0.03		変化なし

試験番号	12MI31 (mH ₂ O)								
	Int1 24.72~26.00mabh	Int2 24.02~24.22mabh	Int3 22.67~23.52mabh	Int4 20.32~21.47mabh	Int5 17.50~19.12mabh	Int6 16.75~17.05mabh	Int7 14.72~16.30mabh	Int8 7.72~13.52mabh	Int9 5.00~6.52mabh
No.1 20.73~21.40mabh	0.491	0.644		0.875	0.492	0.474	0.474	0.337	0.148
No.2 18.03~18.70mabh	0.205	0.246		0.805	1.072	1.121	1.150	0.45	0.155
No.3 13.73~14.40mabh	0.207	0.249		0.590	3.772	4.139	4.681	0.652	0.207
No.4-1 14.93~15.60mabh	変化なし	変化なし		0.015	0.186	0.135	0.143	変化なし	変化なし
No.4-2 14.93~15.60mabh	変化なし	変化なし		0.006	0.159	0.124	0.200	変化なし	変化なし

(a) No. 1 区間 (20.73~21.40mabh) の孔間透水試験結果

No. 1 区間の湧水量は 4.8L/min であり、揚水量 1.6L/min の定流量揚水試験を実施した。

試験区間 P2 とその上下区間 P3、P1 の圧力変化を図 7.3.2-25 に示す。図に示すように、揚水試験時の P1~P3 の水圧応答は、P2 の水頭差 16.75mH₂O に対して P1 : 0.67mH₂O、P3 : 0.51mH₂O であった。

揚水過程の Derivative Plot を図 7.3.2-26 に、Jacob 法による解析結果を図 7.3.2-27 に、回復過程の Derivative Plot を図 7.3.2-28 に、Agarwal 法による解析結果を図 7.3.2-29 に示す。揚水過程において、図 7.3.2-27 に示す直線勾配から Jacob の式を用いて透水量係数 T を求めると $T=3.42E-05(m^2/sec)$ が得られた。また、回復過程においても図 7.3.2-29 に示す直線勾配から Agarwal の式を用いて透水量係数 T を求めると $T=3.31E-05(m^2/sec)$ が得られた。

No. 1 の試験区間における透水量係数の代表値は、揚水過程と回復過程ともにほぼ同じ値であることからより大きな透水性を表す Jacob の式で求めた $T=3.42E-05(m^2/sec)$ とした。

12MI30 号孔の水圧応答結果図を図 7.3.2-30 に 12MI 31 号孔の水圧応答結果図を図 7.3.2-31 に示す。

水圧の応答の詳細な水位低下量は表 7.3.2-7 に示す。No. 1 透水試験時で最も水圧が応答した区間は 12MI30 号孔の Int3 と 12MI31 号孔の Int4 (12MI31 号孔 Int3 はシステム上のトラブルにより計測できなかった) であった。

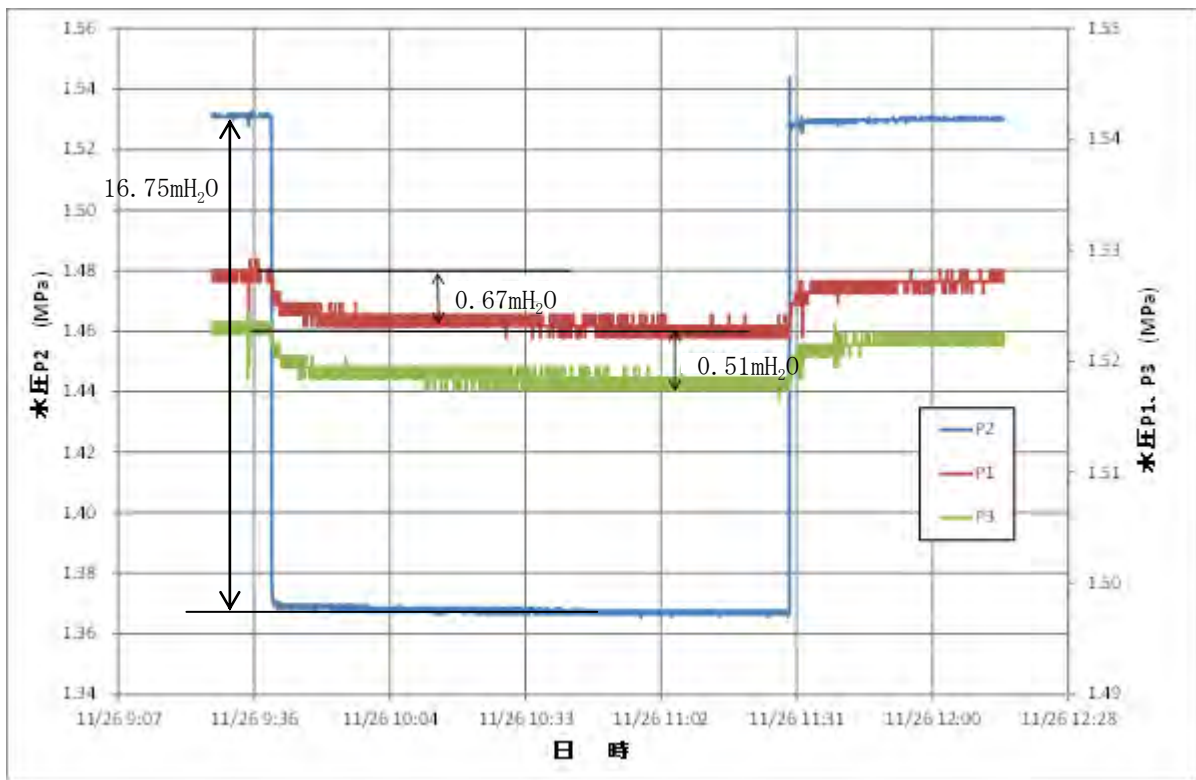


図 7.3.2-25 13MI36 号孔 No. 1 区間の試験時における圧力変化

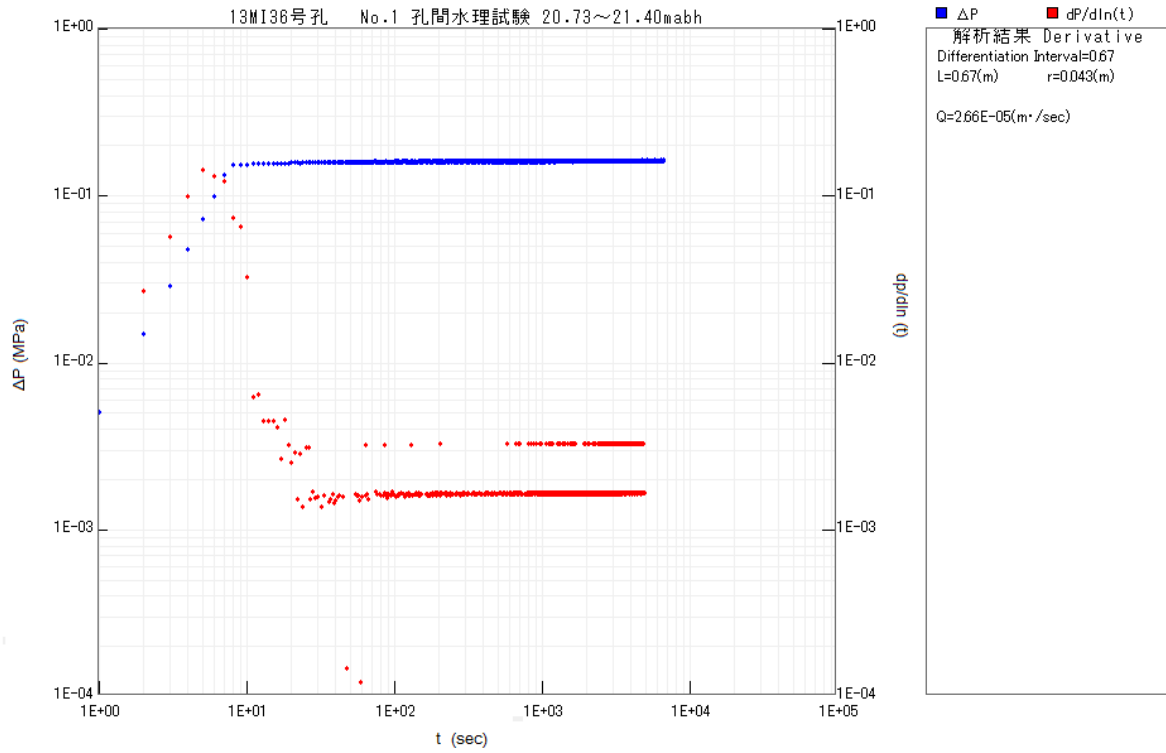


図 7.3.2-26 13MI36 号孔 No.1 区間定流量揚水試験の揚水過程の Derivative Plot

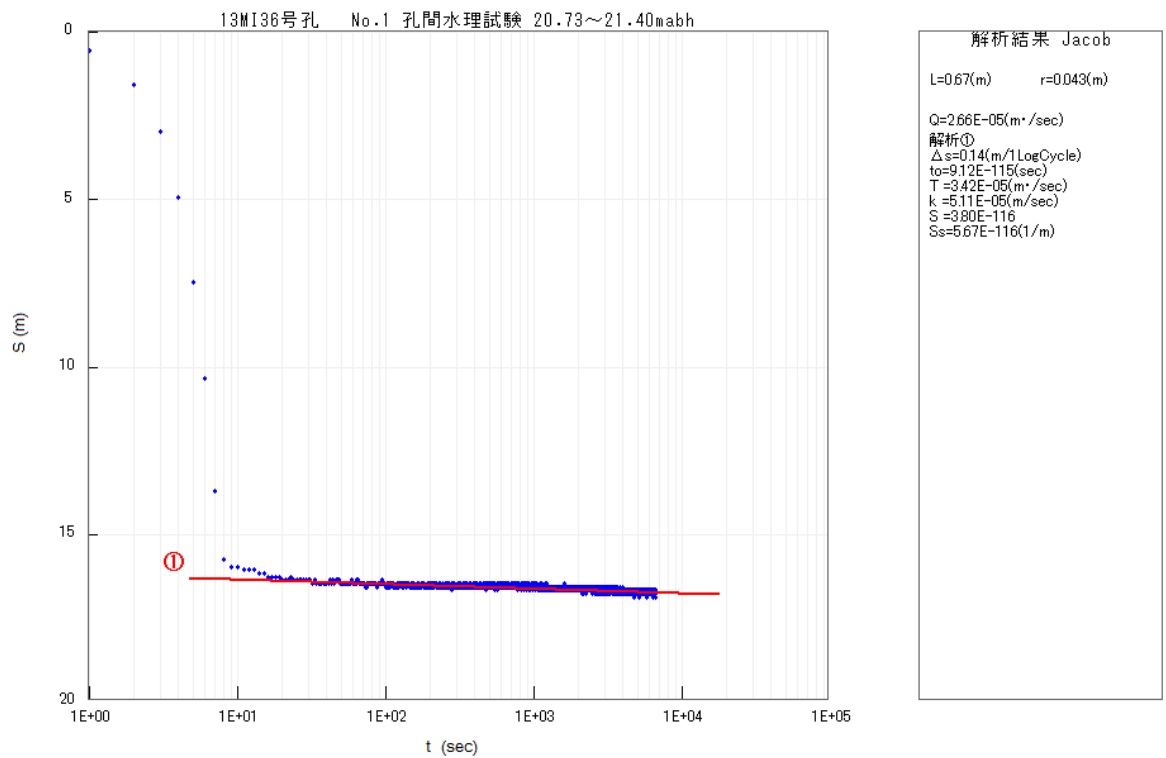


図 7.3.2-27 13MI36 号孔 No.1 区間定流量揚水試験の揚水過程の Jacob 法による解析結果

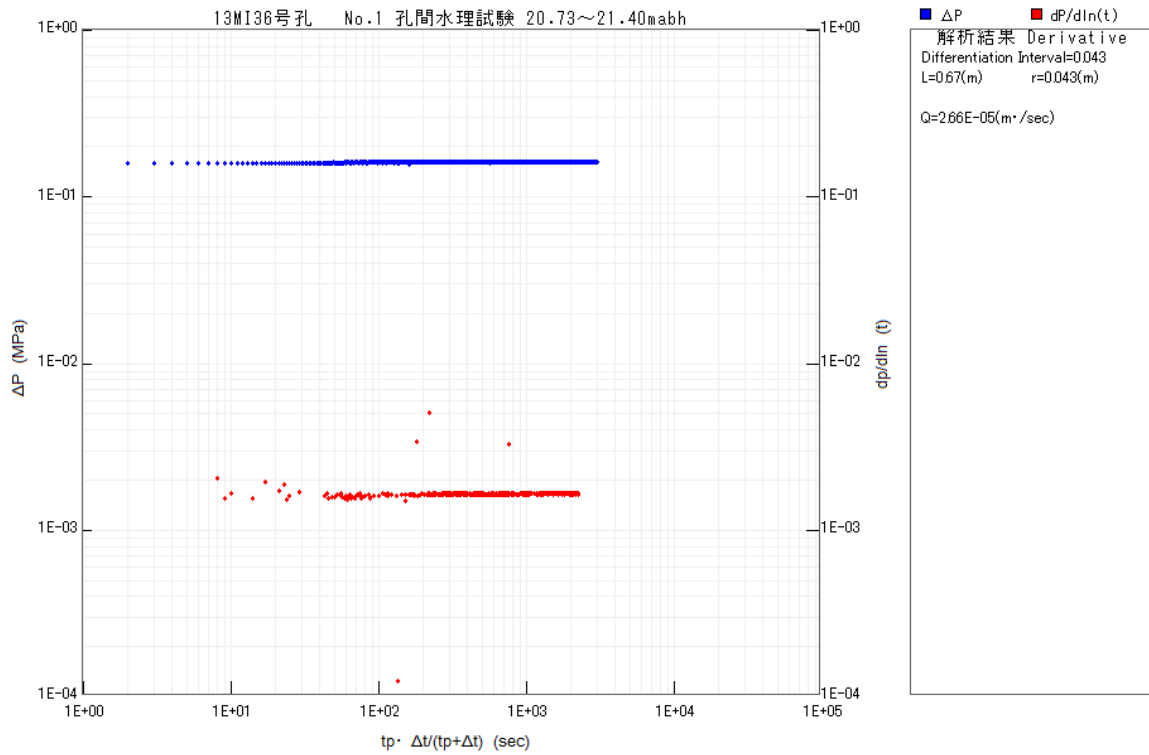


図 7.3.2-28 13MI36 号孔 No.1 区間定流量揚水試験の回復過程の Derivative Plot

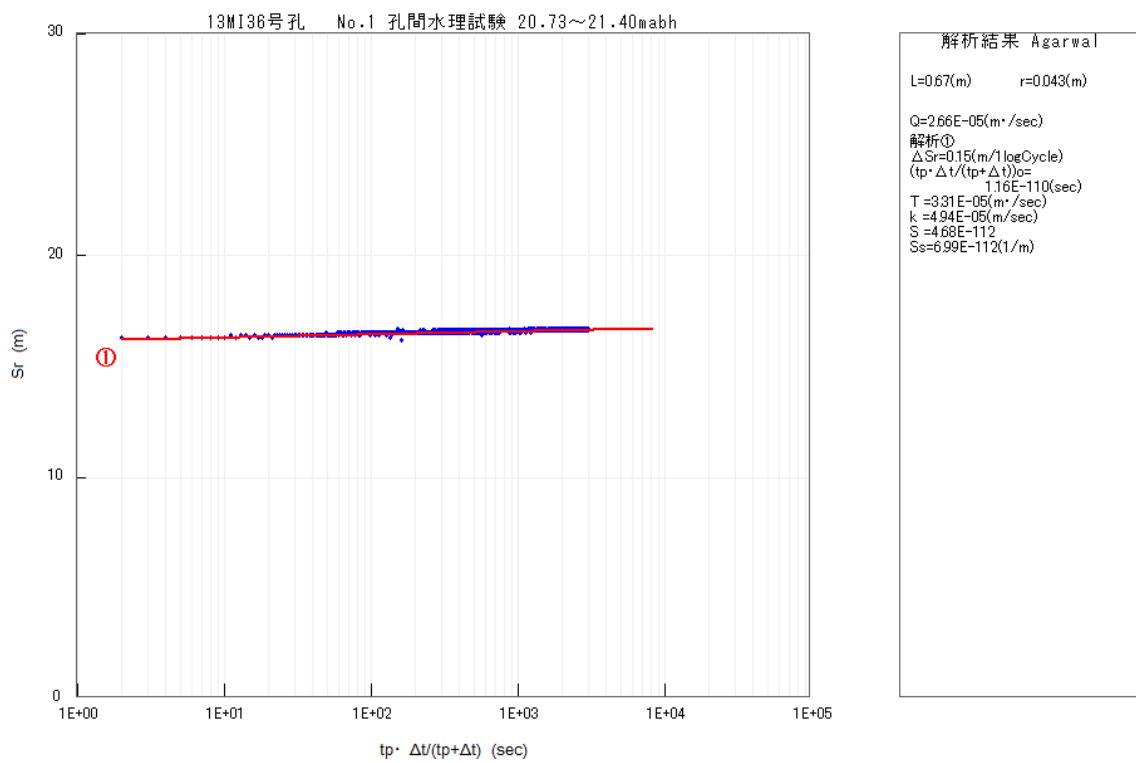


図 7.3.2-29 13MI36 号孔 No.1 区間定流量揚水試験の回復過程の Agarwal 法による解析結果

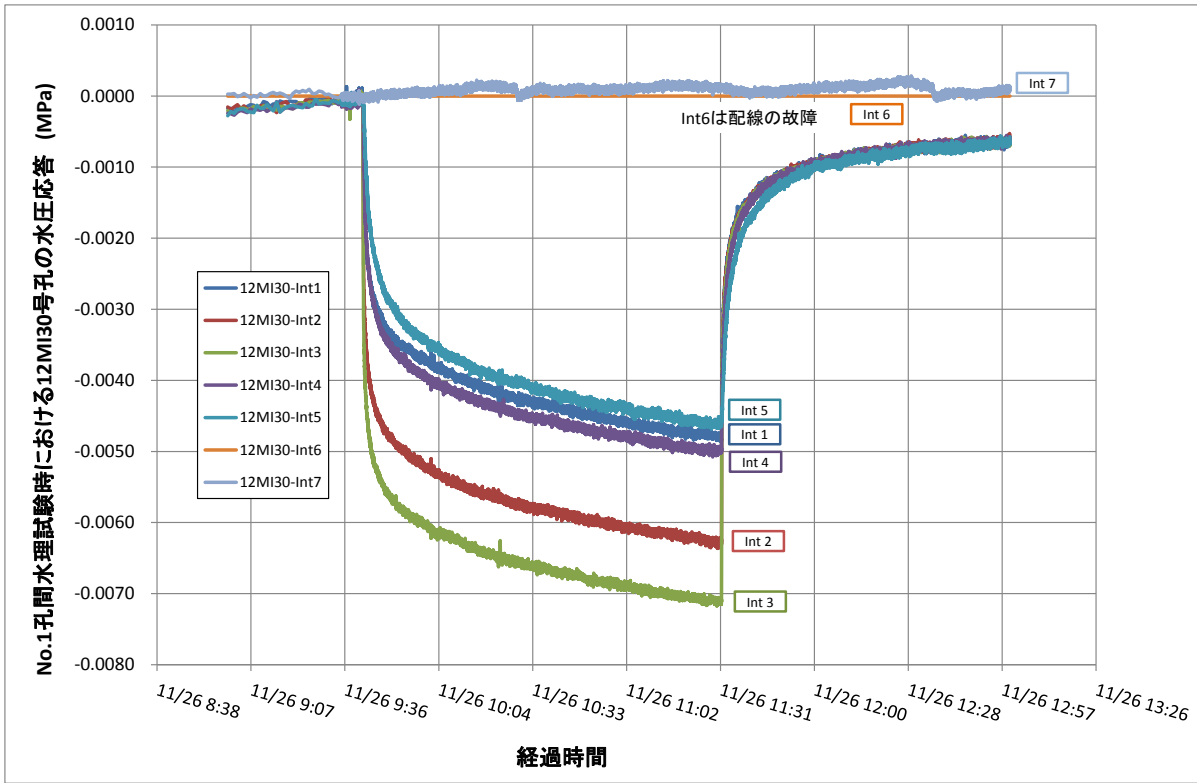


図 7.3.2-30 13MI36 号孔 No. 1 区間定流量揚水試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図の結果

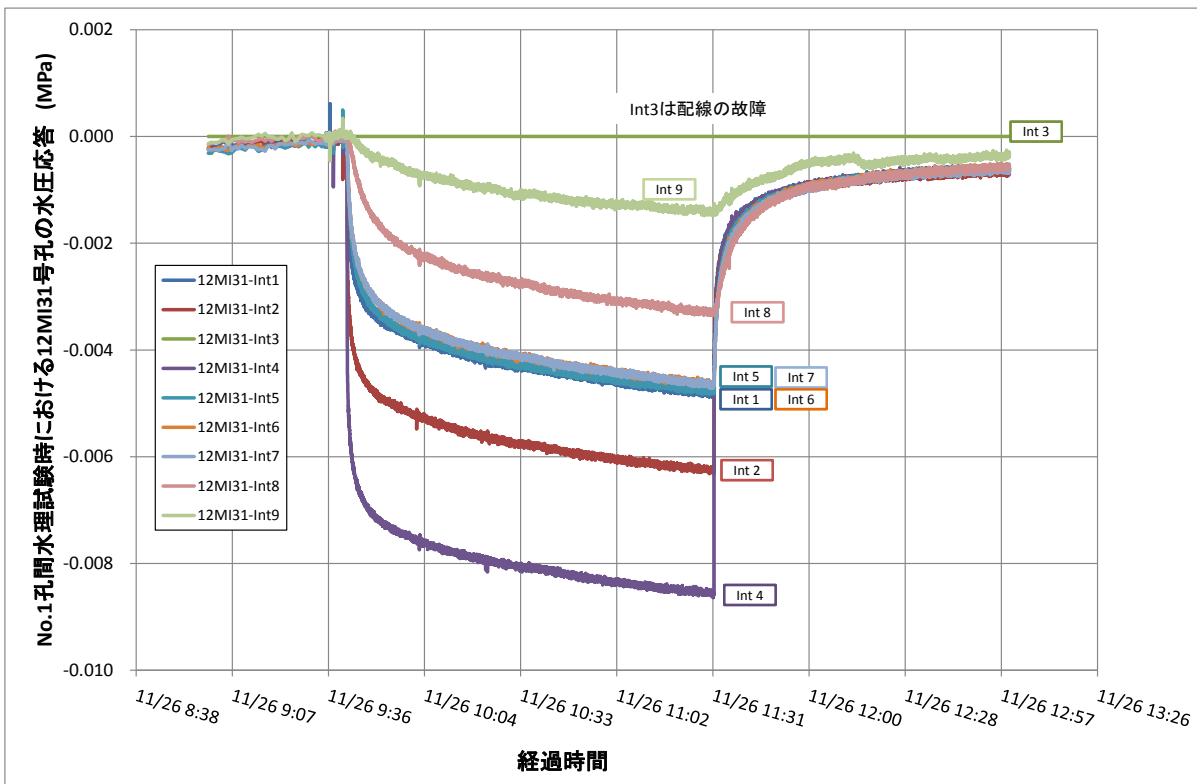


図 7.3.2-31 13MI36 号孔 No. 1 区間定流量揚水試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図の結果

(b) No. 2 区間 (18.03~18.70mabh) の透水試験結果

No. 2 区間の湧水量は 3.9L/min であり、揚水量 0.864L/min の定流量揚水試験を実施した。

試験区間 P2 とその上下区間 P3、P1 の圧力変化を図 7.3.2-32 に示す。図に示すように、揚水試験時の P1~P3 の水圧応答は、P2 の水頭差 75.28mH₂O に対して P1 : 0.20mH₂O、P3 : 1.02mH₂O であった。定流量揚水試験中に揚水量の変化がないにもかかわらず、P2 圧力に 3 段階の変化が生じたのは、揚水における影響圏の広がりの中に透水性の異なる割れ目が存在したためと考えられる。

揚水過程の Derivative Plot を図 7.3.2-33 に、Jacob 法による解析結果を図 7.3.2-34 に、回復過程の Derivative Plot を図 7.3.2-35 に、Agarwal 法による解析結果を図 7.3.2-36 に示す。揚水過程において図 7.3.2-34 に示すように 2 つの直線勾配が見出され、Jacob の式を用いて透水量係数 T を求めると①T=2.02E-06 (m²/sec)、②T=2.59E-07 (m²/sec) が得られた。また、回復過程において図 7.3.2-36 に示す直線勾配から Agarwal の式を用いて透水量係数 T を求めると T=1.94E-05 (m²/sec) が得られた。No. 2 の試験区間における透水量係数の代表値は、揚水過程における遠方の透水性を表す T=2.02E-06 (m²/sec) とした。

12MI30 号孔の水圧応答結果図を図 7.3.2-37 に 12MI31 号孔の水圧応答結果図を図 7.3.2-38 に示す。

水圧の応答の詳細な水位低下量を表 7.3.2-7 に示す。No. 2 透水試験時で最も水圧が応答した区間は 12MI30 号孔の Int5 と 12MI31 号孔の Int7 であった。

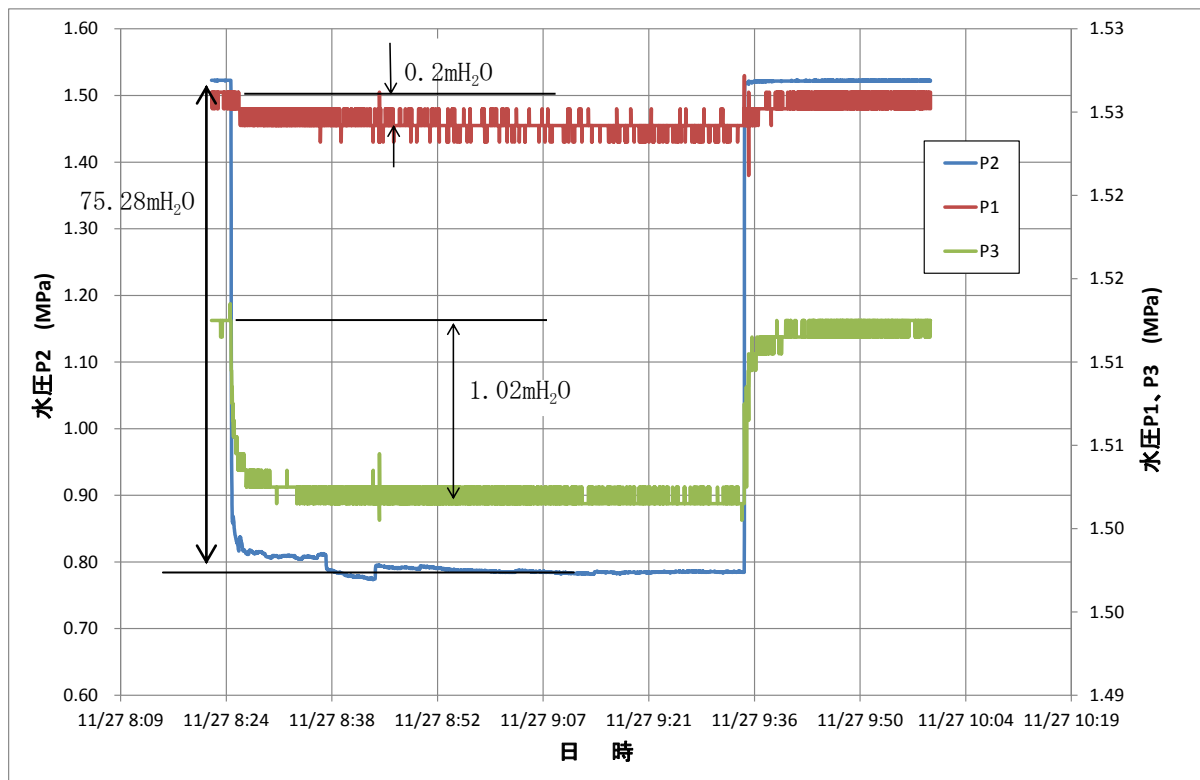


図 7.3.2-32 13MI36 号孔 No. 2 区間の試験時の圧力変化

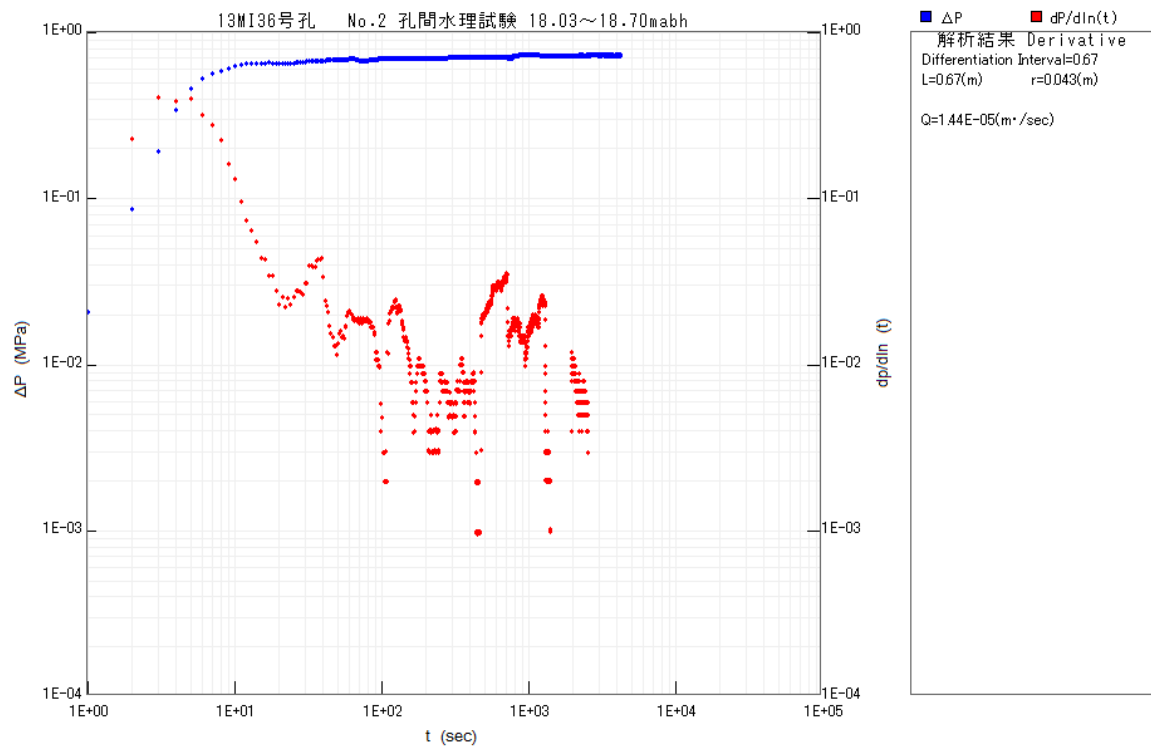


図 7.3.2-33 13MI36 号孔 No.2 区間定流量揚水試験の揚水過程の Derivative Plot

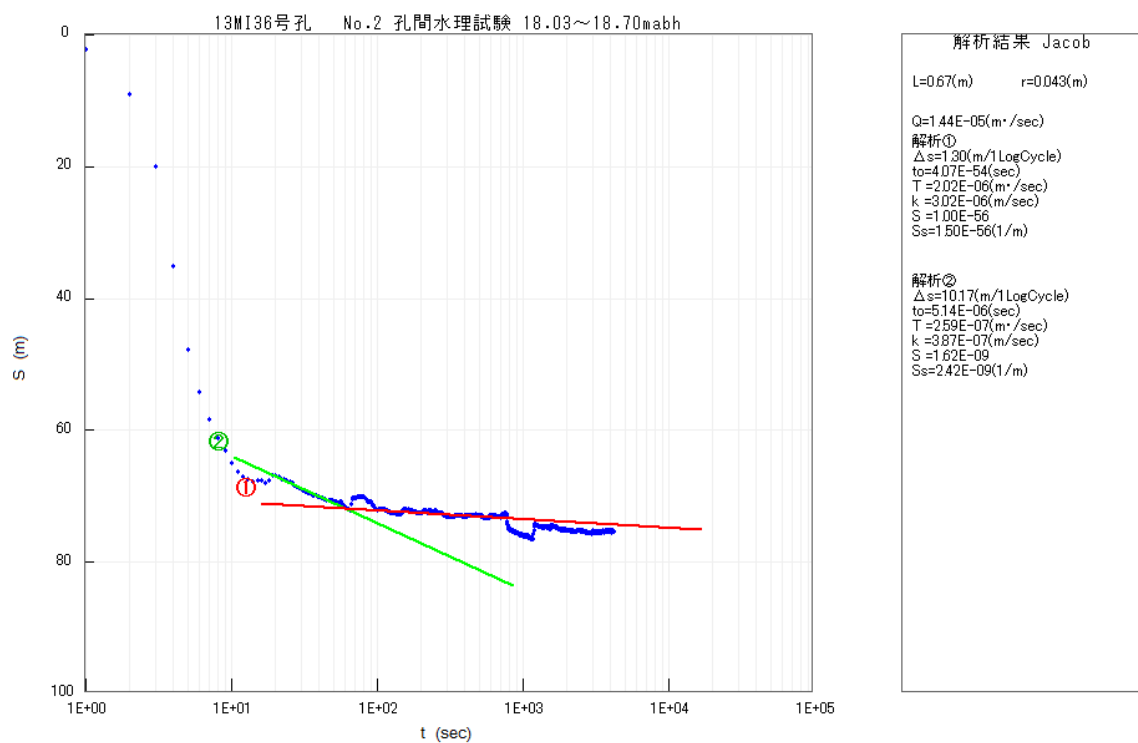


図 7.3.2-34 13MI36 号孔 No.2 区間定流量揚水試験の揚水過程の Jacob 法による解析結果

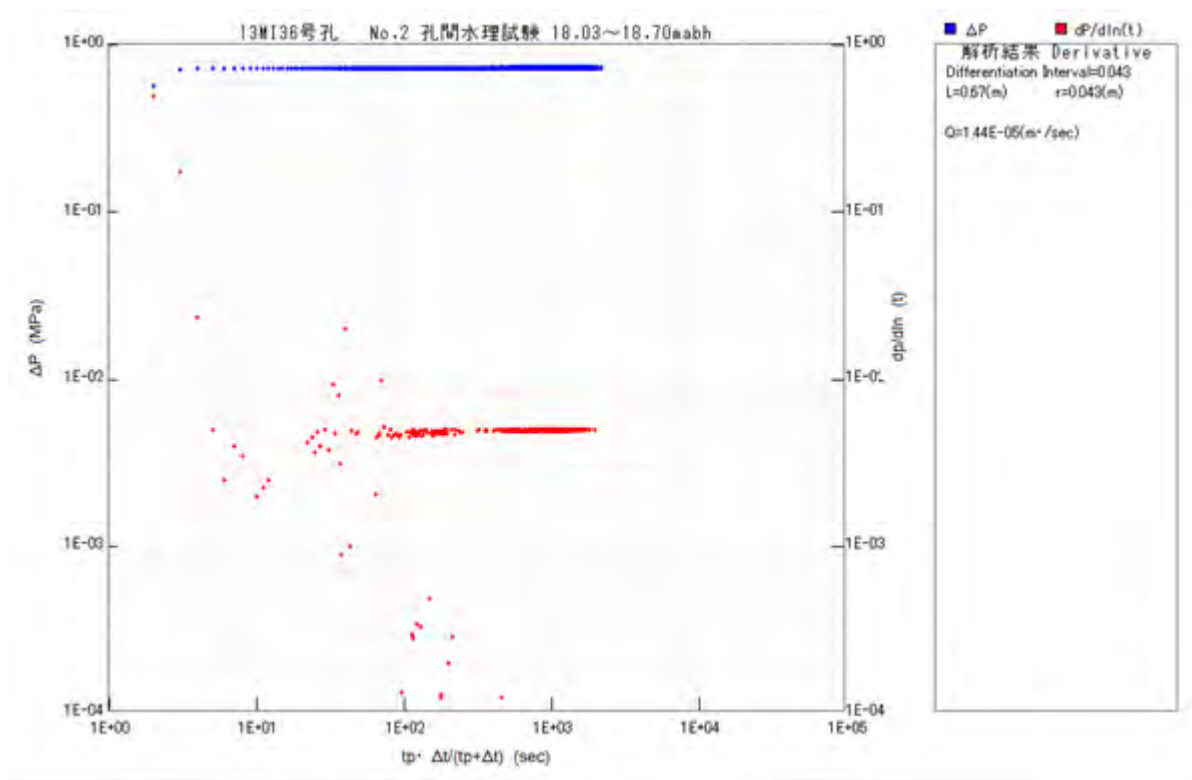


図 7.3.2-35 13MI36 号孔 No.2 区間定流量揚水試験の回復過程の Derivative Plot

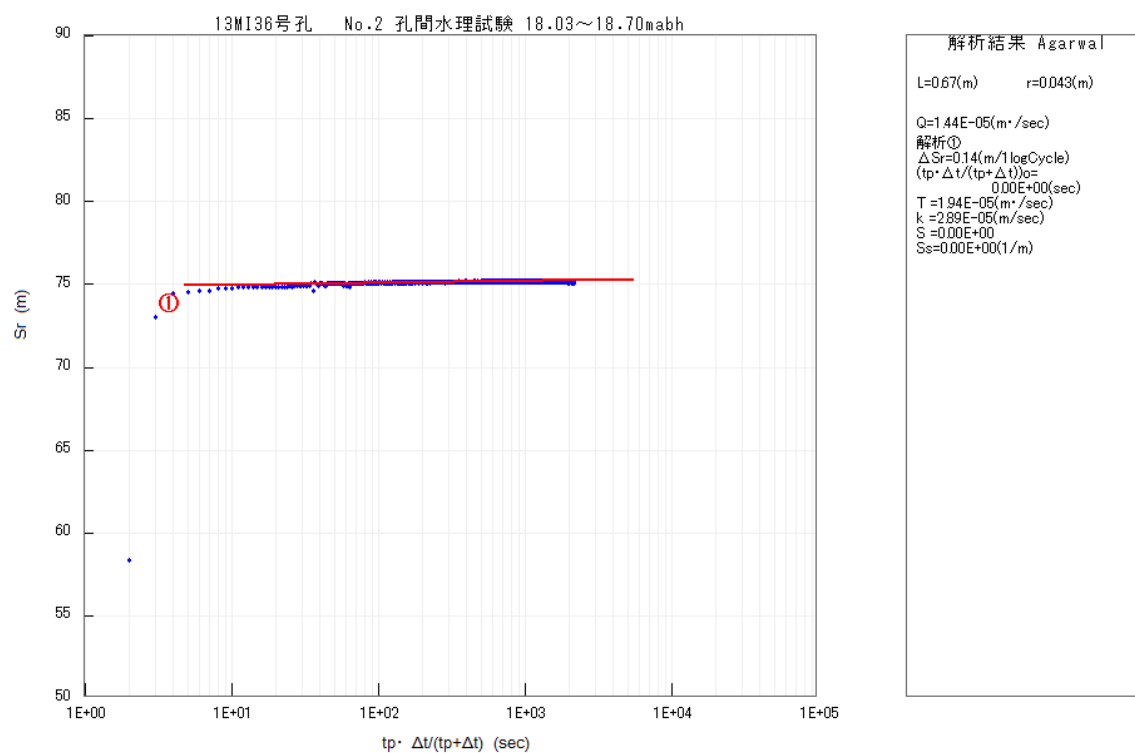


図 7.3.2-36 13MI36 号孔 No.2 区間定流量揚水試験の回復過程の Agarwal 法による解析結果

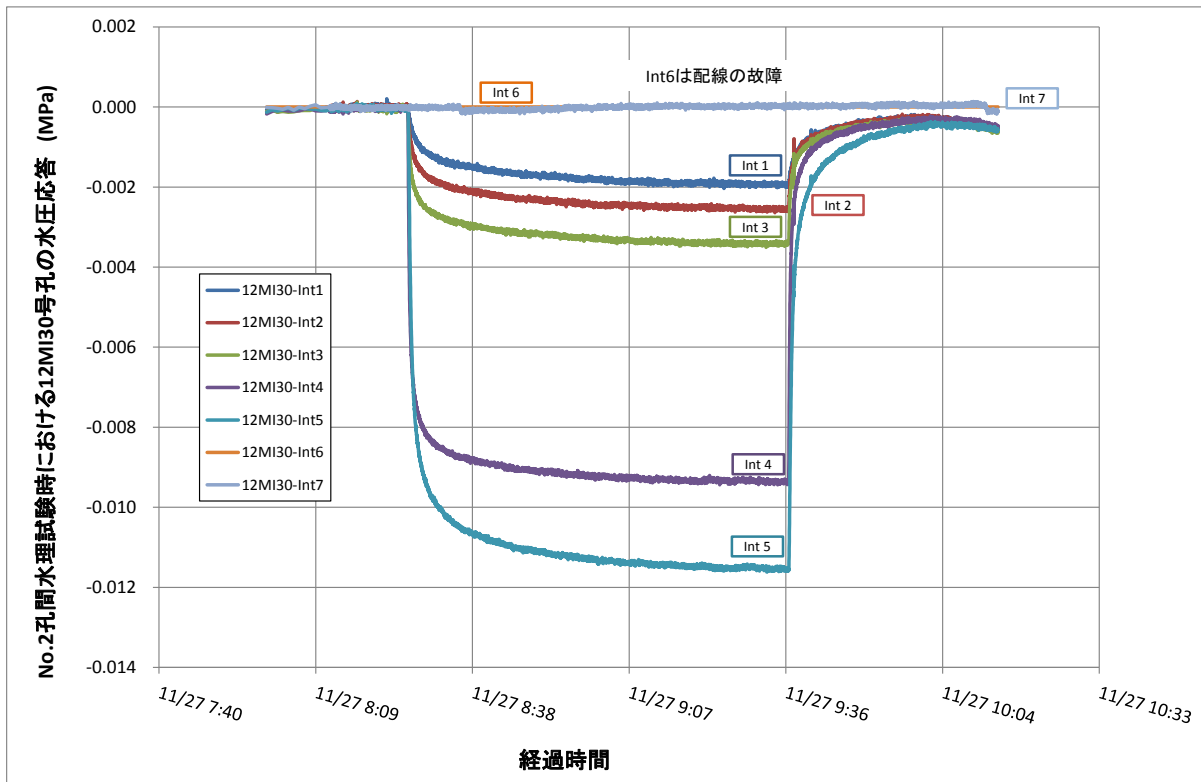


図 7.3.2-37 13MI36 号孔 No.2 区間定流量揚水試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図の結果

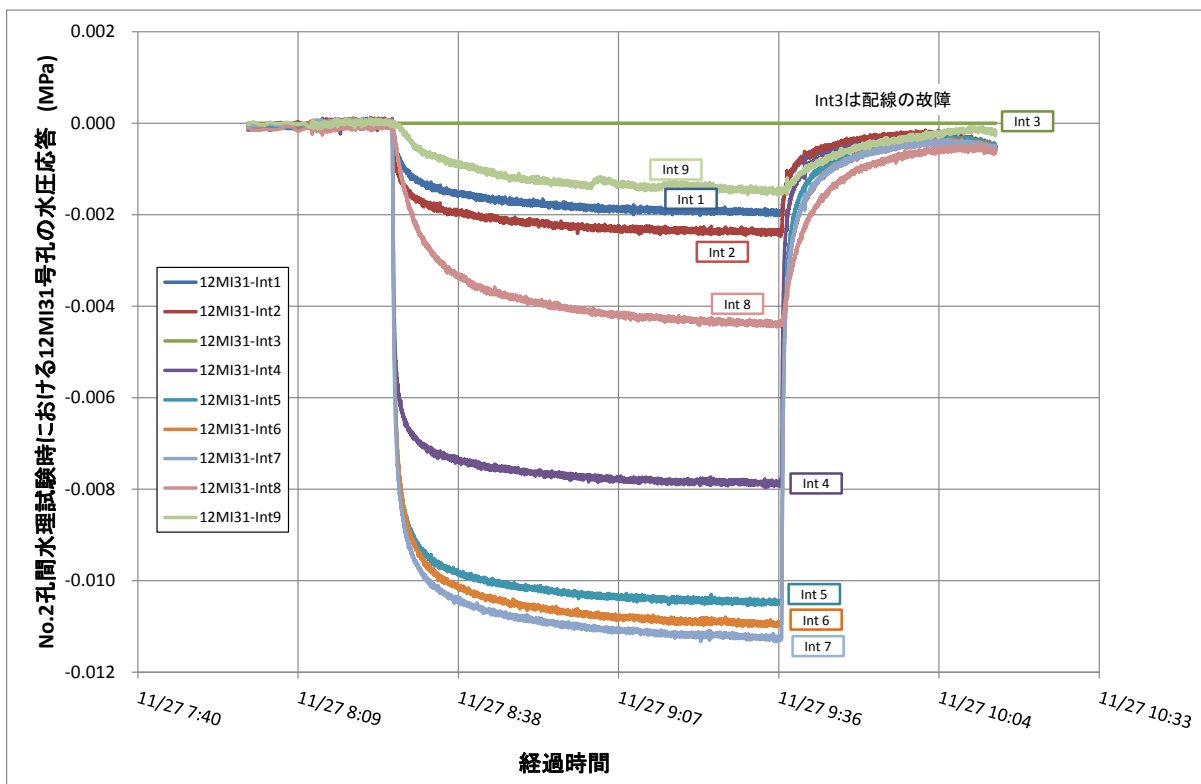


図 7.3.2-38 13MI36 号孔 No.2 区間定流量揚水試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図の結果

(c) No. 3 区間 (13.73~14.40mabh) の透水試験結果

No. 3 区間の湧水量は 1.5L/min であり、揚水量 0.906L/min の定流量揚水試験を実施した。

試験区間 P2 とその上下区間 P3、P1 の圧力変化を図 7.3.2-39 に示すように、揚水試験時の P1~P3 の圧力応答は、P2 の水頭差 78.04mH₂O に対して P1:0.31mH₂O、P3 : 1.43mH₂O であった。

揚水過程の Derivative Plot を図 7.3.2-40 に、Jacob 法による解析結果を図 7.3.2-41 に、回復過程の Derivative Plot を図 7.3.2-42 に、Agarwal 法による解析結果図を図 7.3.2-43 に示す。

揚水過程において、図 7.3.2-41 に示すように 2 つの直線勾配が見出され、Jacob の式を用いて透水量係数 T を求めると①T=8.31E-07(m²/sec)、②T=5.90E-06(m²/sec) が得られた。また、回復過程においても図 7.3.2-43 に示すように 2 つの直線勾配が見出すことができ、Agarwal の式を用いて透水量係数 T を求めると①T=2.89E-06(m²/sec)、②T=1.40E-05(m²/sec) が得られた。

No. 3 の試験区間における透水量係数の代表値は、揚水過程における遠方の透水性を表す T=5.90E-06(m²/sec) とした。

12MI30 号孔の水圧応答結果図を図 7.3.2-44 に 12MI 31 号孔の水圧応答結果図を図 7.3.2-45 に示す。

水圧の応答の詳細な水位低下量は表 7.3.2-7 に示す。No. 3 透水試験時で最も水圧が応答した区間は 12MI30 号孔の Int4 (12MI30 号孔 Int6 はシステム上のトラブルにより計測できなかった) と 12MI31 号孔の Int7 であった。

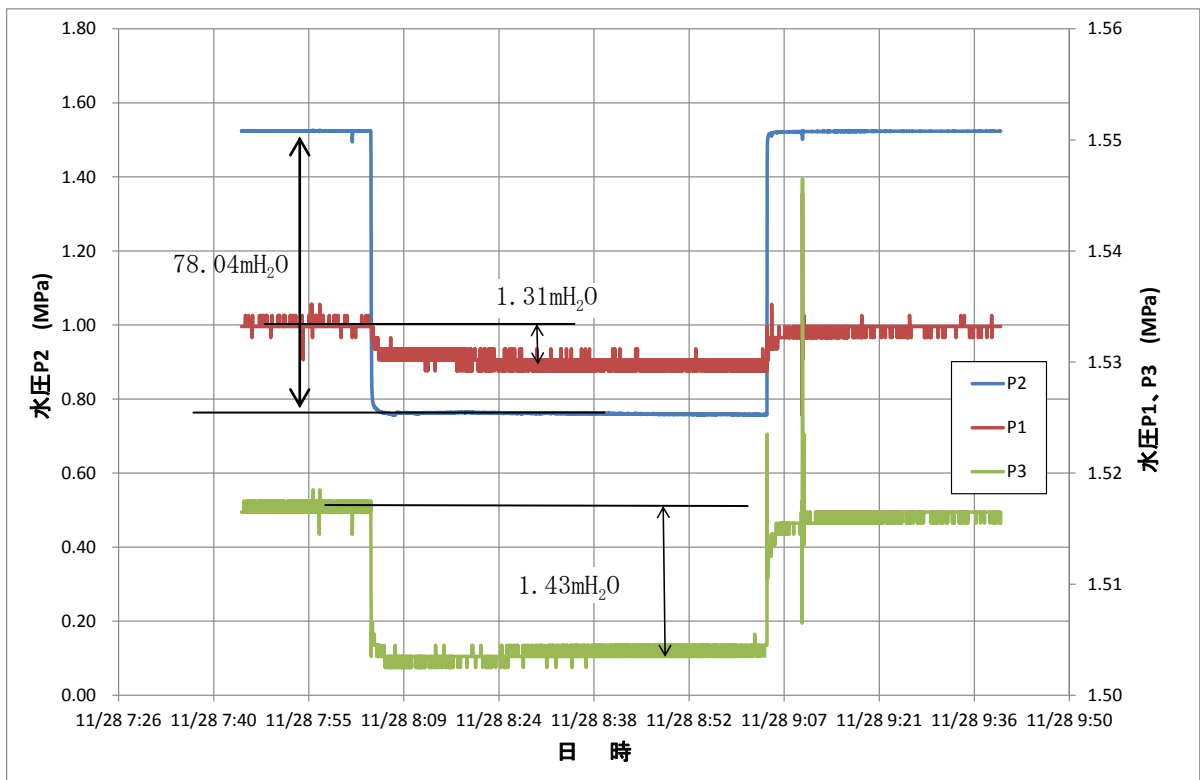


図 7.3.2-39 13MI36 号孔 No. 3 区間の試験時における圧力変化

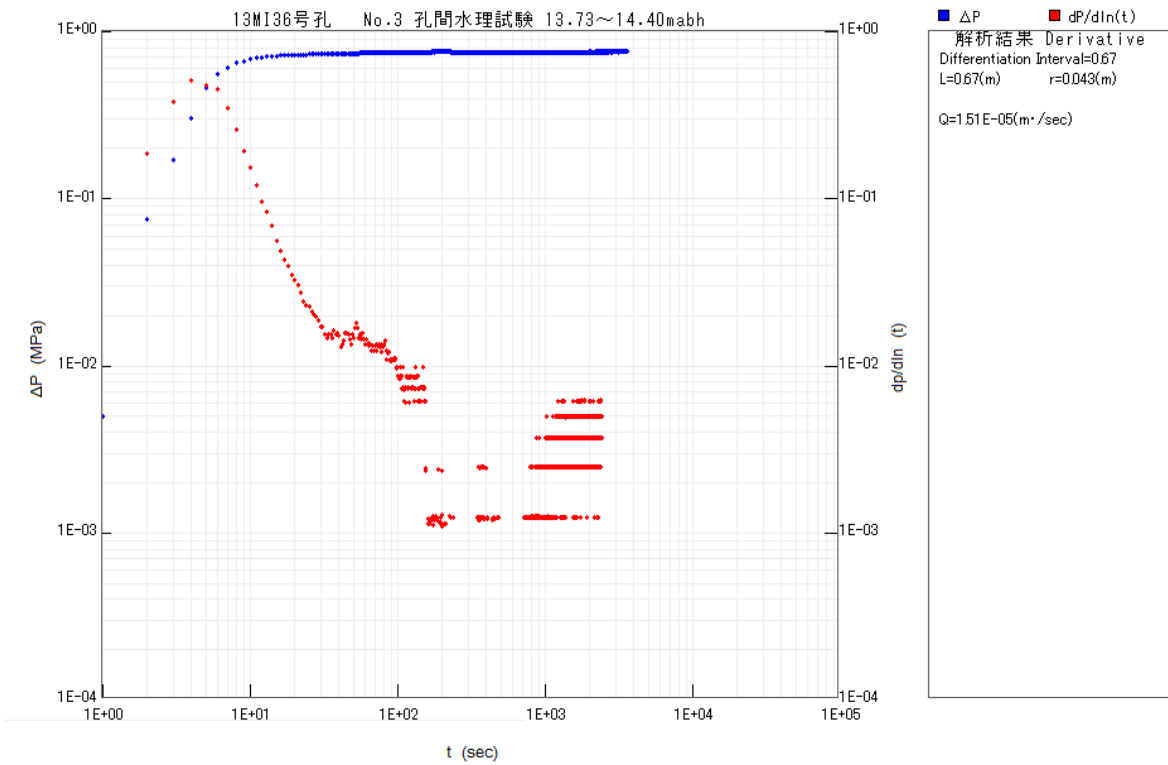


図 7.3.2-40 13MI36 号孔 No.3 区間定流量揚水試験の揚水過程の Derivative Plot

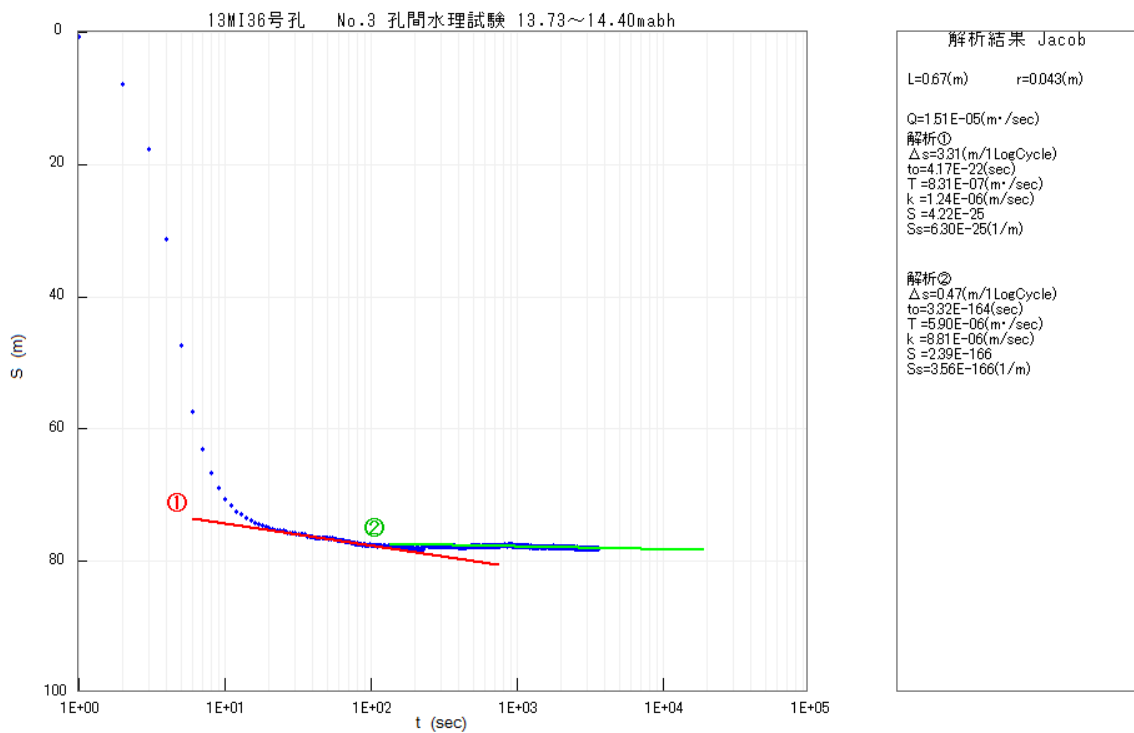


図 7.3.2-41 13MI36 号孔 No.3 区間定流量揚水試験の揚水過程の Jacob 法による解析結果

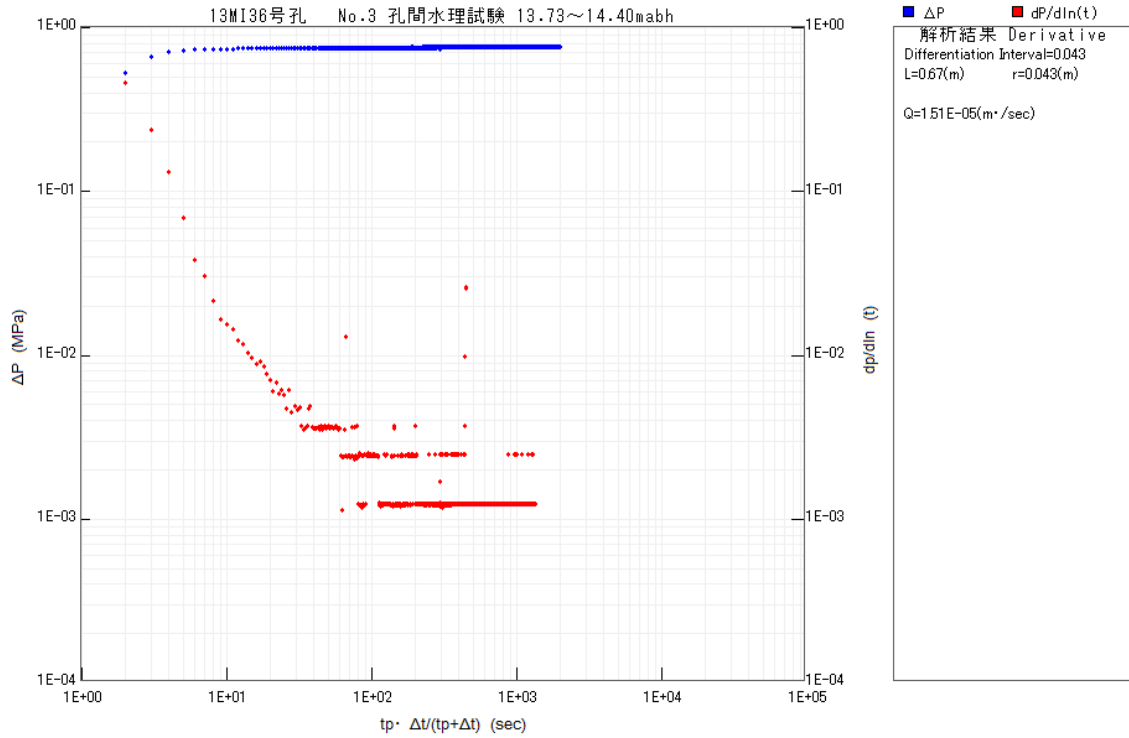


図 7.3.2-42 12MI30 号孔 No.3 区間定流量揚水試験の回復過程の Derivative Plot

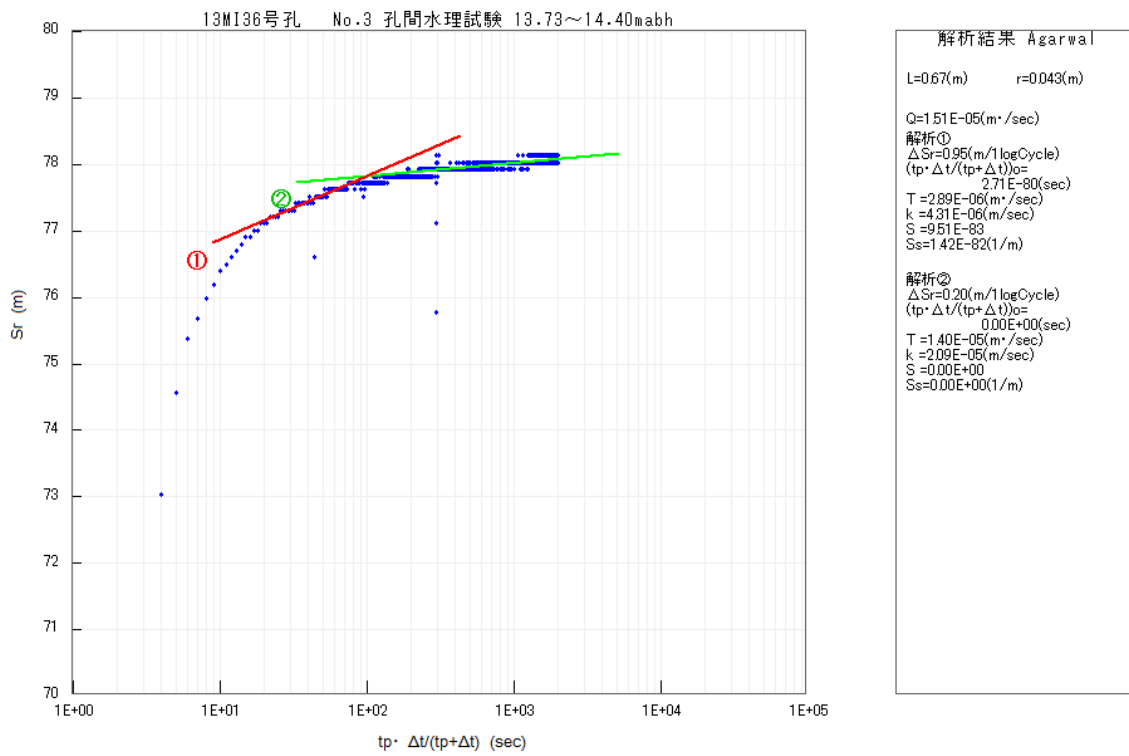


図 7.3.2-43 12MI30 号孔 No.3 区間定流量揚水試験の回復過程の Agarwal 法による解析結果

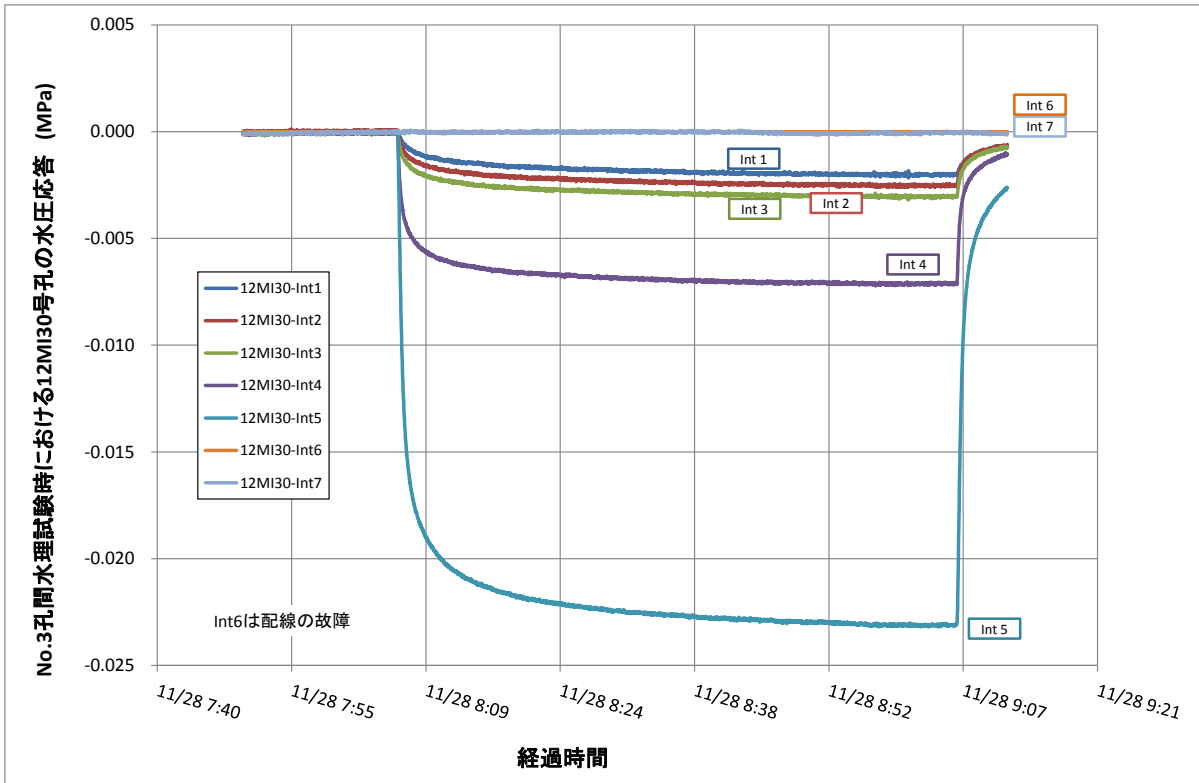


図 7.3.2-44 13MI36 号孔 No. 3 区間定流量揚水試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図の結果

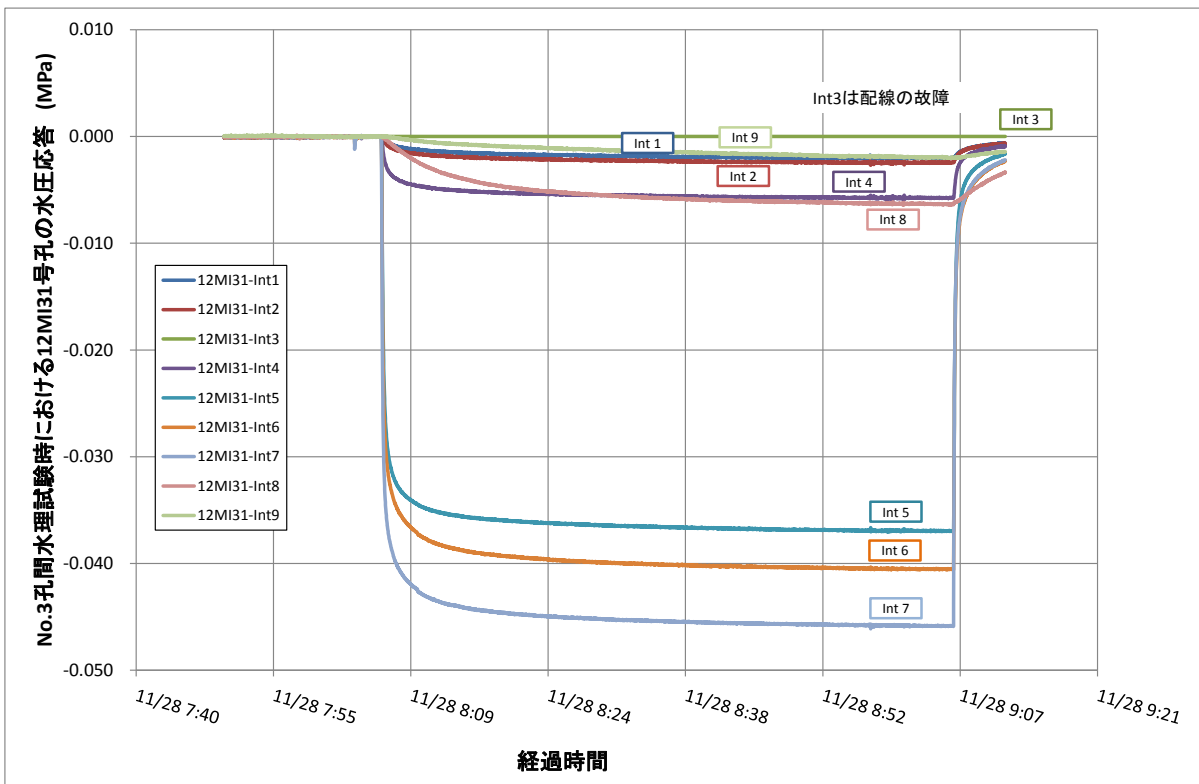


図 7.3.2-45 13MI36 号孔 No. 3 区間定流量揚水試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図の結果

(d) No. 4 区間 (14.93~15.60mabh) の透水試験結果

No. 4 区間の湧水量は 0.04L/min であり、単項式の透水試験時に Hvorslev の定常法で求めた透水量係数が $1.9E-9 \text{ m}^2/\text{sec}$ と非常に低かったことから、定流量揚水試験の実施が困難と判断された。このことから、No. 4 区間ではパルス試験による孔間透水試験を実施した。

なお、試験は 2 回実施した。パルス試験時の試験区間 P2 の水頭差は 1 回目の $153.74\text{mH}_2\text{O}$ 、2 回目の水頭差 $144.03\text{mH}_2\text{O}$ に対してその上下区間 P3、P1 は、ともに圧力応答を受けなかった (図 7.3.2-46)。

1 回目のパルス試験時の Hvorslev の解析結果を図 7.3.2-47 に、2 回目の解析結果を図 7.3.2-48 に示す。解析図より透水量係数 T を求めると 1 回目 $T=2.06E-09 (\text{m}^2/\text{sec})$ 、2 回目 $T=2.17E-09 (\text{m}^2/\text{sec})$ が得られた。No. 4 の試験区間における透水量係数の代表値は、2 回共にほぼ同じ値を示したことから、より大きな透水性を表す $T=2.17E-06 (\text{m}^2/\text{sec})$ とした。

12MI30 号孔の水圧応答結果図を図 7.3.2-49 に 12MI 31 号孔の水圧応答結果図を図 7.3.2-50 に示す。

水圧の応答の詳細な水位低下量を表 7.3.2-7 に示す。No. 4 透水試験時で最も水圧が応答した区間は 12MI30 号孔の Int5 (12MI31 号孔 Int6 はシステム上のトラブルにより計測できなかった) と 12MI31 号孔の Int5 と 7 であった。

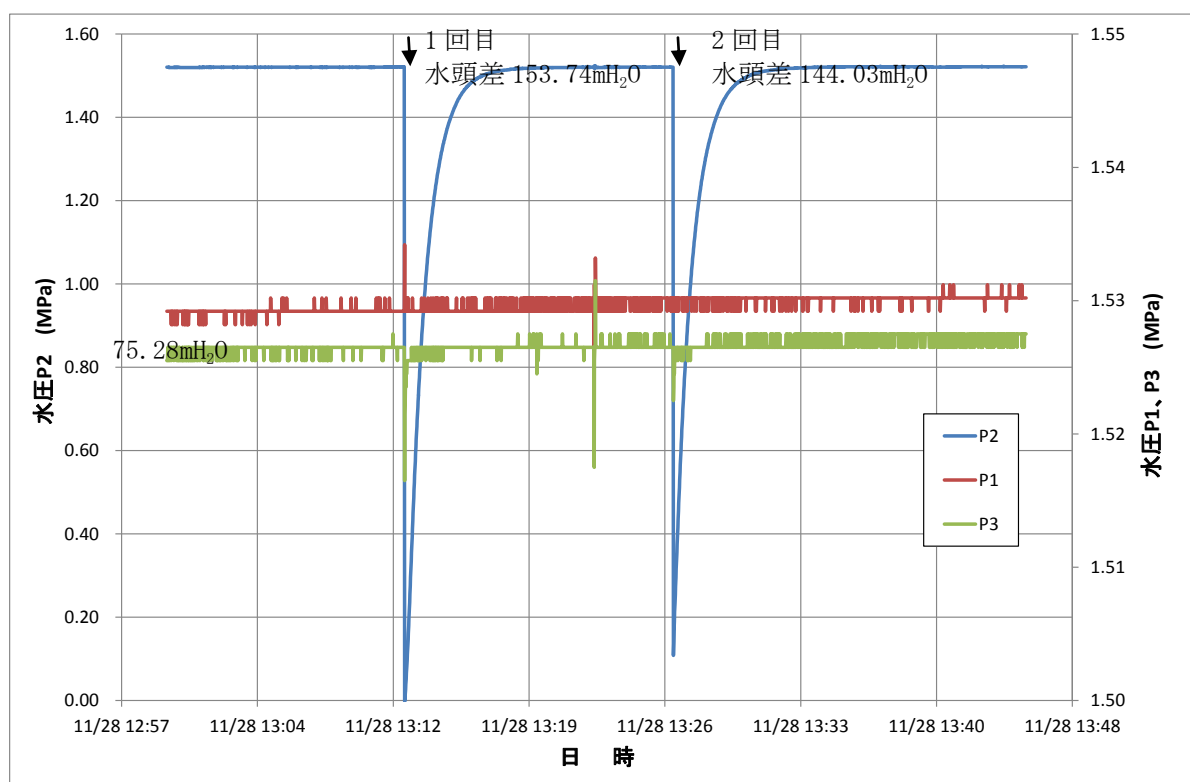


図 7.3.2-46 13MI36 号孔 No. 4 区間試験時における圧力変化

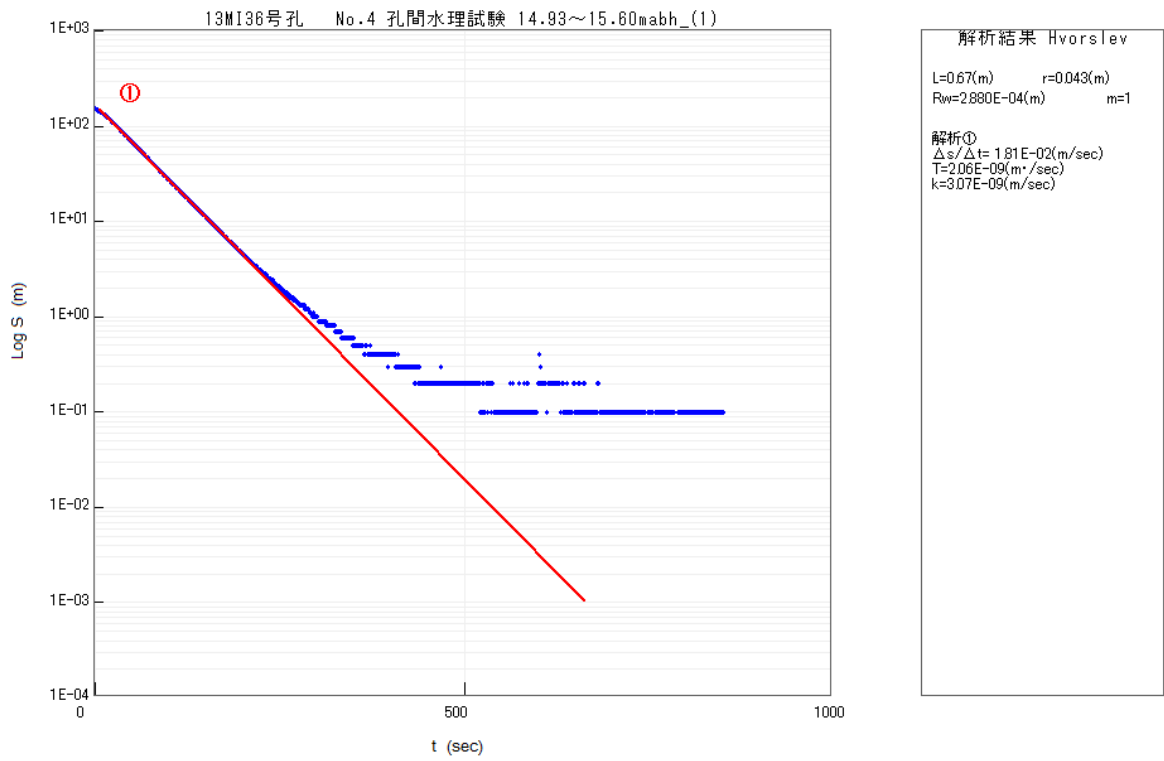


図 7.3.2-47 13MI36 号孔 No.4 区間 1 回目のパルス試験の t-Log s Plot

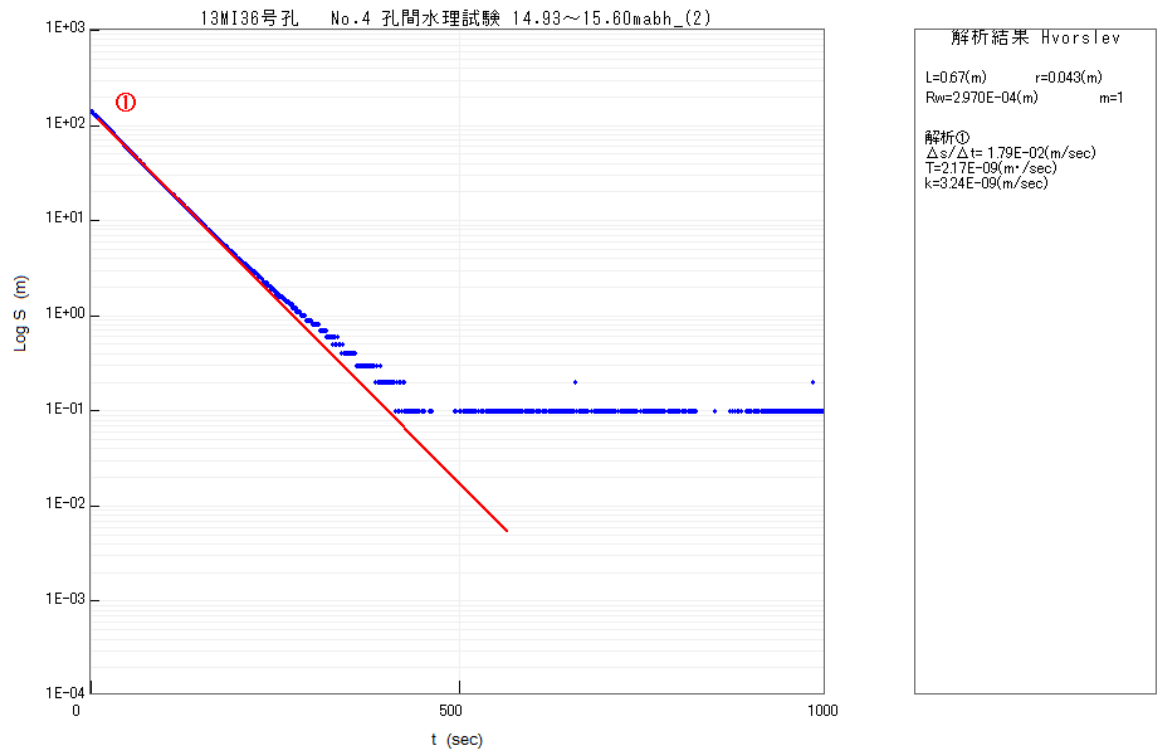


図 7.3.2-48 13MI36 号孔 No.4 区間 2 回目のパルス試験の t-Log s Plot

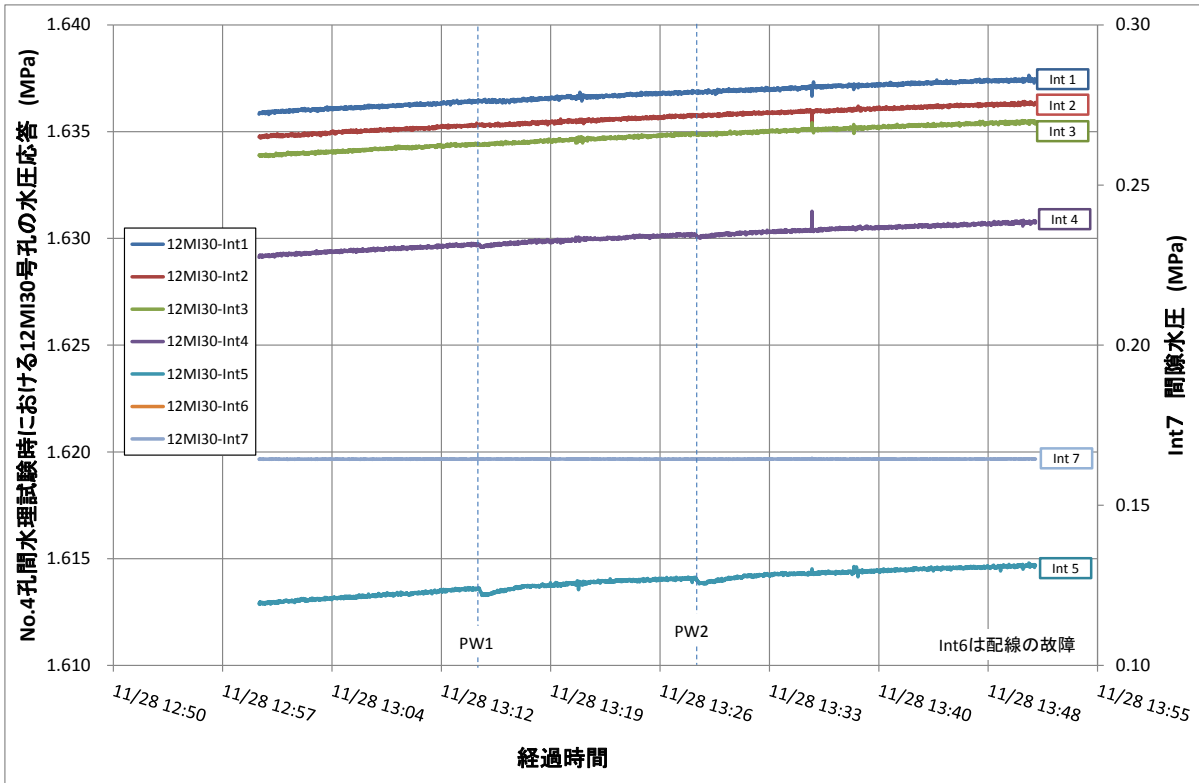


図 7. 3. 2-49 13MI36 号孔 No. 4 区間パルス試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図の結果

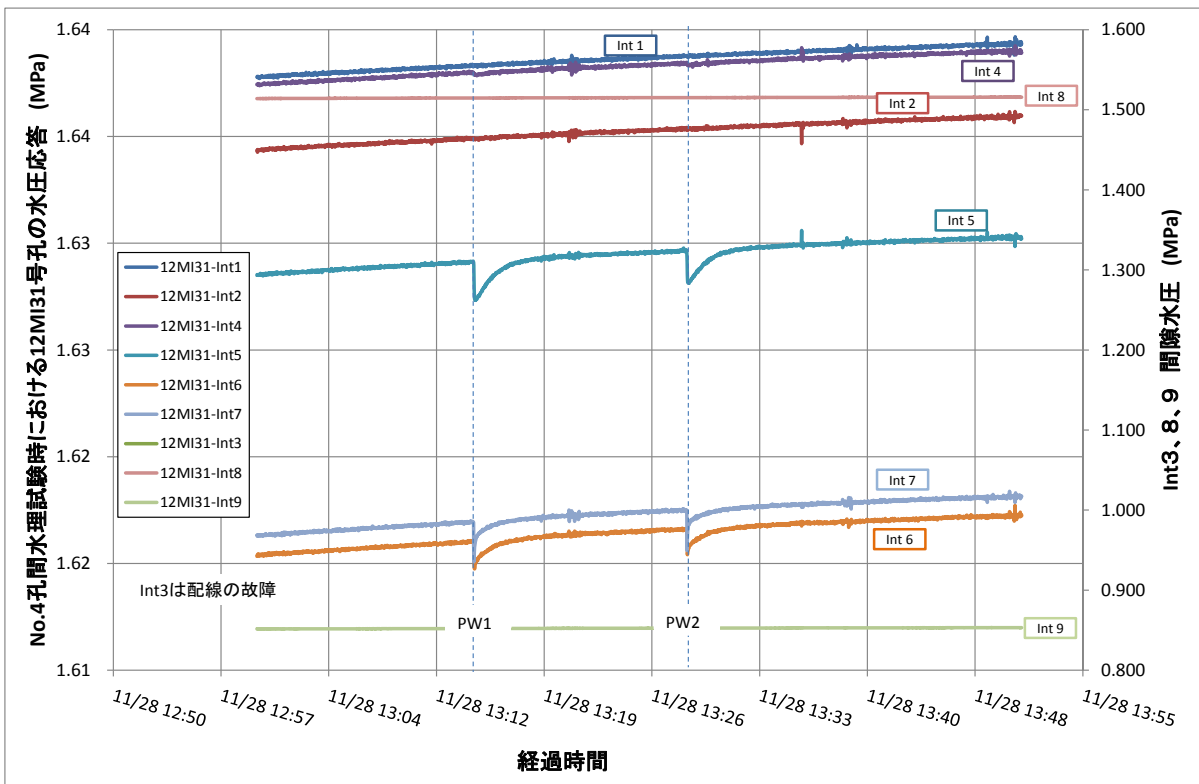


図 7. 3. 2-50 13MI36 号孔 No. 4 区間パルス試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図の結果

7.3.2.9 間隙水圧モニタリング装置の設置

13MI36号孔掘削中に観測した12MI30号孔と12MI31の間隙水圧応答結果や湧水量測定結果および掘削後に実施した各種検層の結果や水理試験結果から、透水性割れ目とその連続性を検討した。

ターゲットとした割れ目を観測するために、図7.3.2-53に示す構成で間隙水圧モニタリング装置を設置した。モニタリング装置の設置状況を図7.3.2-51、図7.3.2-52に示す。

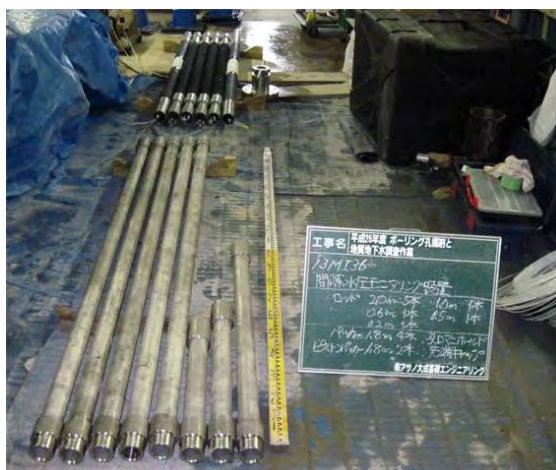


図 7.3.2-51 間隙水圧モニタリング装置の検尺

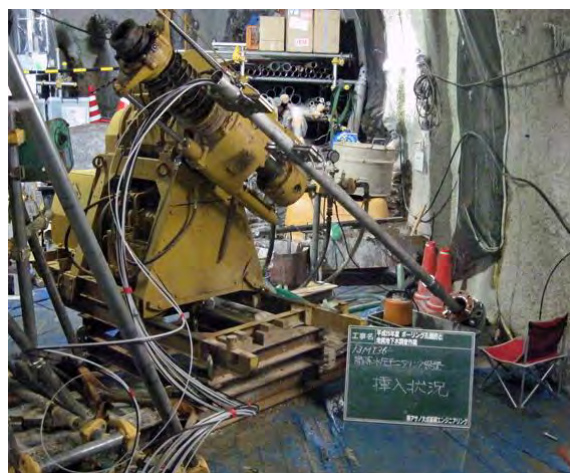


図 7.3.2-52 間隙水圧モニタリング装置の設置

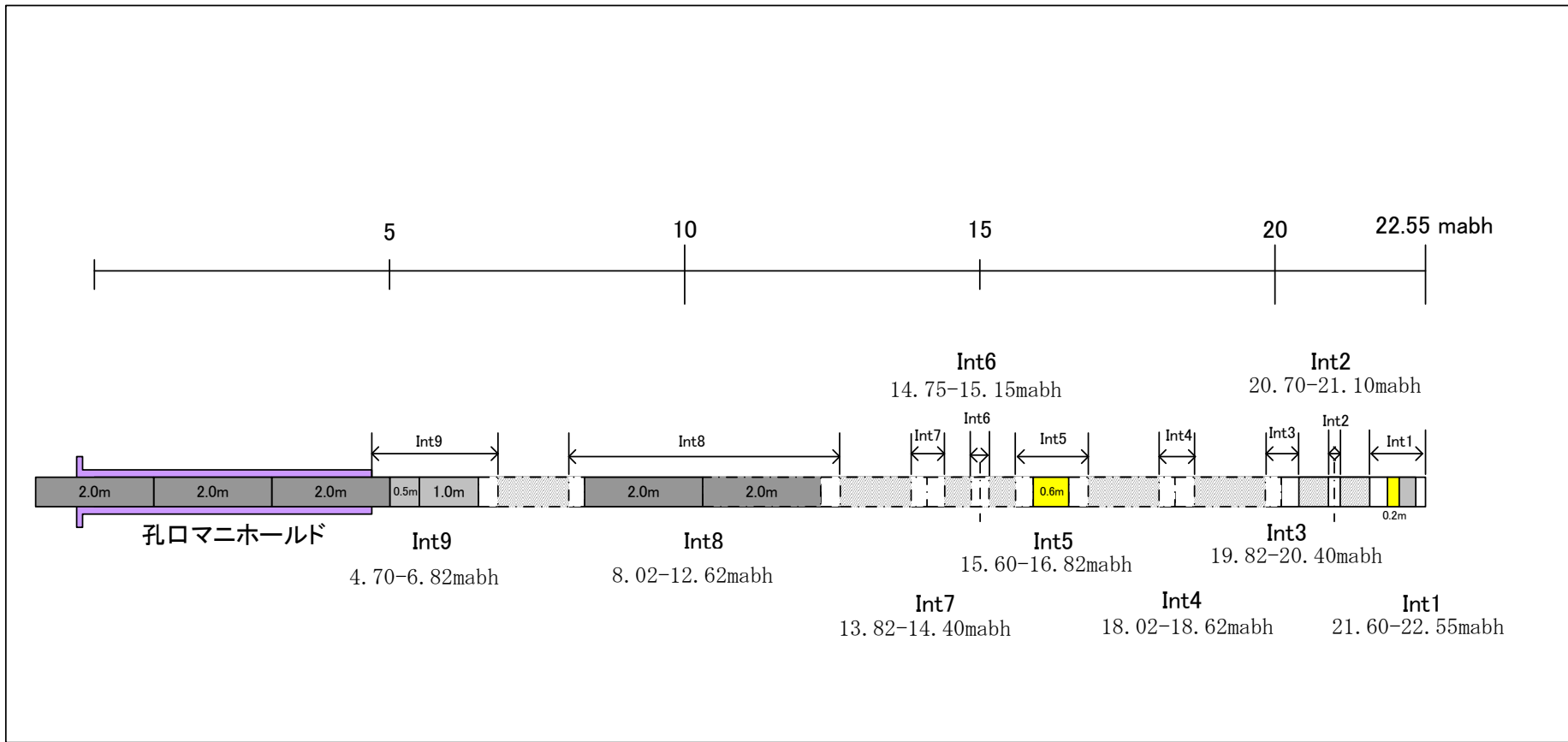


図 7.3.2-53 13MI36 号孔の間隙水圧モニタリング装置の構成概念図

7.3.3 13MI37号孔の調査結果

7.3.3.1 ボーリング掘削位置の設定

13MI37号孔のボーリング掘削位置や掘削角度、掘削方向は、平成24年度に実施した12MI30号孔と12MI31号孔の調査結果、先に掘削した13MI36号孔の調査結果および周辺の観測設備設置状況等を考慮して決定した。

表7.3.3-1に13MI37号孔の仕様一覧を、図7.3.3-1に13MI37号孔の掘削方向図を示す。

表 7.3.3-1 13MI37号孔の仕様

孔名	13MI37号孔
掘削方法	オールコア、清水掘削
主要孔径	86mm
掘削長	27.00m
掘削方向	鉛直方向：-40°（下向き） 水平方向：方位 S80° W
掘削位置	X=-69047.447 Y=6420.034（世界測地系） 標高 EL-99.10m

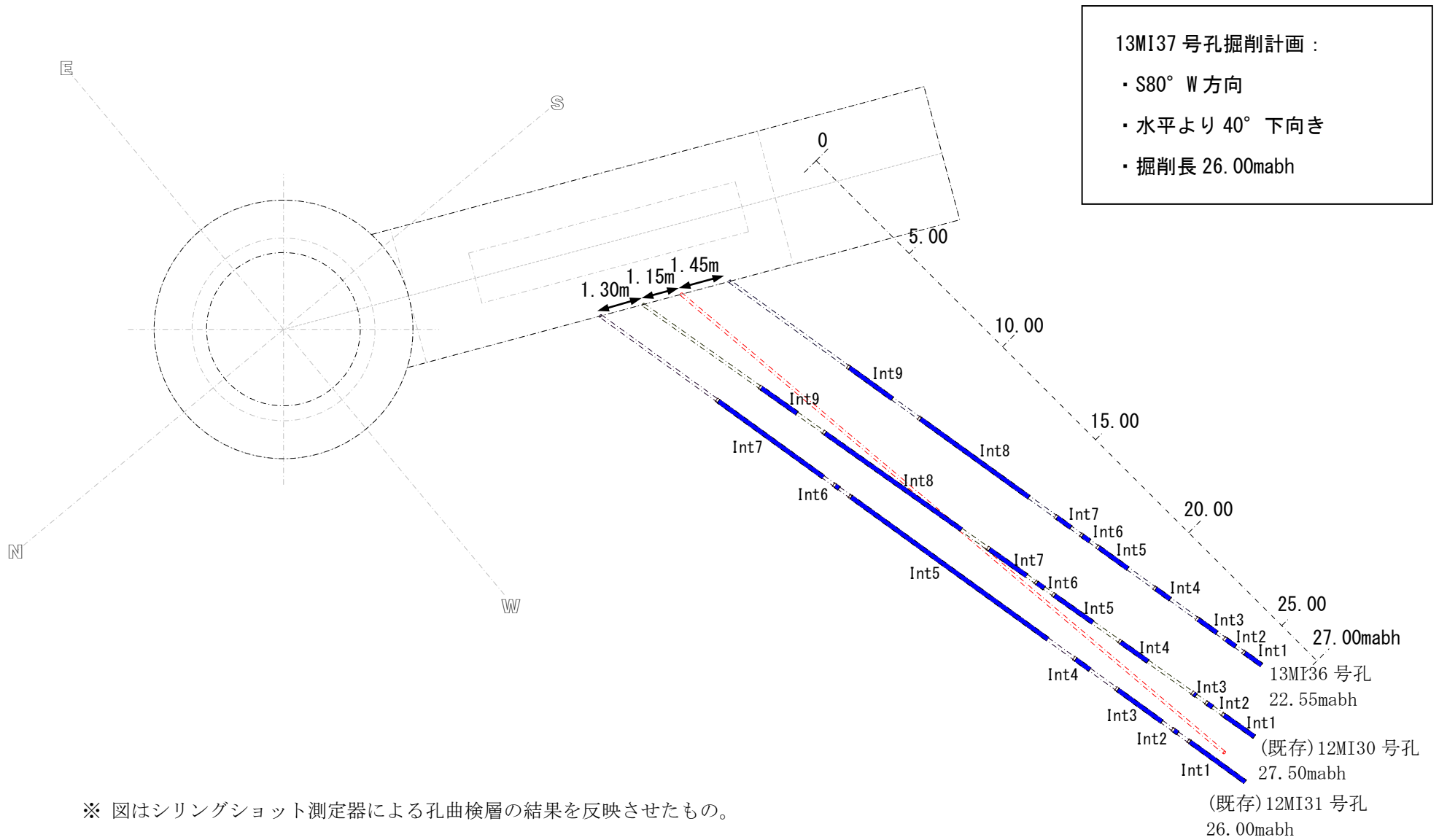


図 7.3.3-1 13MI37号孔の掘削方向平面図

7.3.3.2 ボーリング孔掘削

13MI37号孔のボーリング掘削位置や掘削角度、掘削方向は、平成24年度に実施した12MI30号孔と12MI31号孔の調査結果、先に掘削した13MI36号孔の調査結果および周辺の観測設備設置状況等を考慮して決定した。

(1) 1段目掘削

1段目の掘削は、採取したコアの亀裂状況を観察しながら孔口から5.0mabhまで行った。

掘削は、掘削外径 $\phi 86\text{mm}$ とし、コア径 $\phi 72\text{mm}$ でコア採取を行った。

コア採取後は $\phi 101\text{mm} \rightarrow \phi 141\text{mm}$ ダイヤモンドビットを用いて2段階で拡孔した。拡孔は、ケーシング設置の目的であるEDZ（坑道掘削損傷領域）の深度が1.0m付近までと比較的浅いことから、3.2mabhで終了した。ケーシング長を調整後に4インチSUS製のフランジ付孔口ケーシングを挿入した。

孔口ケーシング挿入後は、岩盤とケーシングを固定するためにケーシング外側の孔内部にセメントを充填した。

セメント硬化養生後、加圧試験（水圧3MPaを10分間維持）を行い、遮水性能を確認した。

孔口ケーシングの設置概念図を図7.3.3-2に示す。

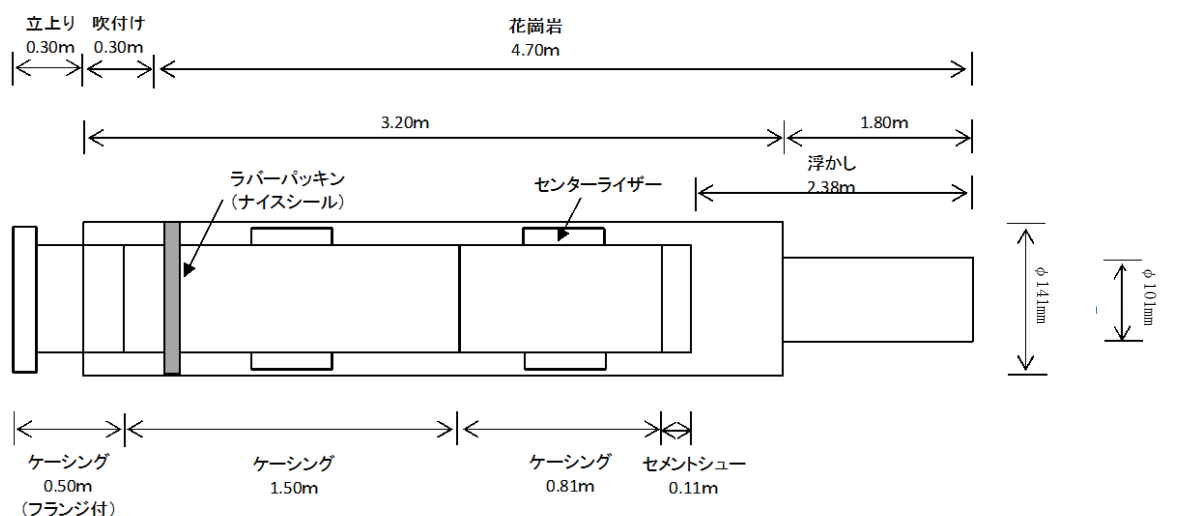


図 7.3.3-2 13MI37号孔 孔口ケーシング設置概念図

(2) 2段目掘削

2段目の掘削は、1段目掘削深度から26.00mabhまでの計画であったが、1.00mabh分追加し深度27.00mabhまでの掘削とした。掘削中、27.00mabh付近で約200L/minの湧水が確認されたため掘削を終了した。

(3) コア採取率

孔口～27.00mabh までの掘削に対して、コア採取率は 100%であった。

(4) 掘削時の湧水

掘削時に 1 掘進長ごとに孔口からの湧水量を測定した。測定結果を表 7.3.3-2 および、図 7.3.3-4 に示す。孔口から湧水が確認されたのは 17.26mabh～18.25mabh を掘削した後であり、最終湧水量は 200L/min であった。掘削区間ごとに 0.5L/min 以上の湧水量が認められたのは、以下の 6 区間であった。図 7.3.3-3 に当該区間のコア写真を示す。

- 17.26mabh～18.25mabh(2.1L/min)
- 18.89mabh～19.55mabh(2.4L/min)
- 19.90mabh～20.56mabh(11.3L/min)
- 22.31mabh～23.15mabh(3.4L/min)
- 24.68mabh～25.50mabh(3.2L/min)
- 26.00mabh～27.00mabh(177.8L/min)

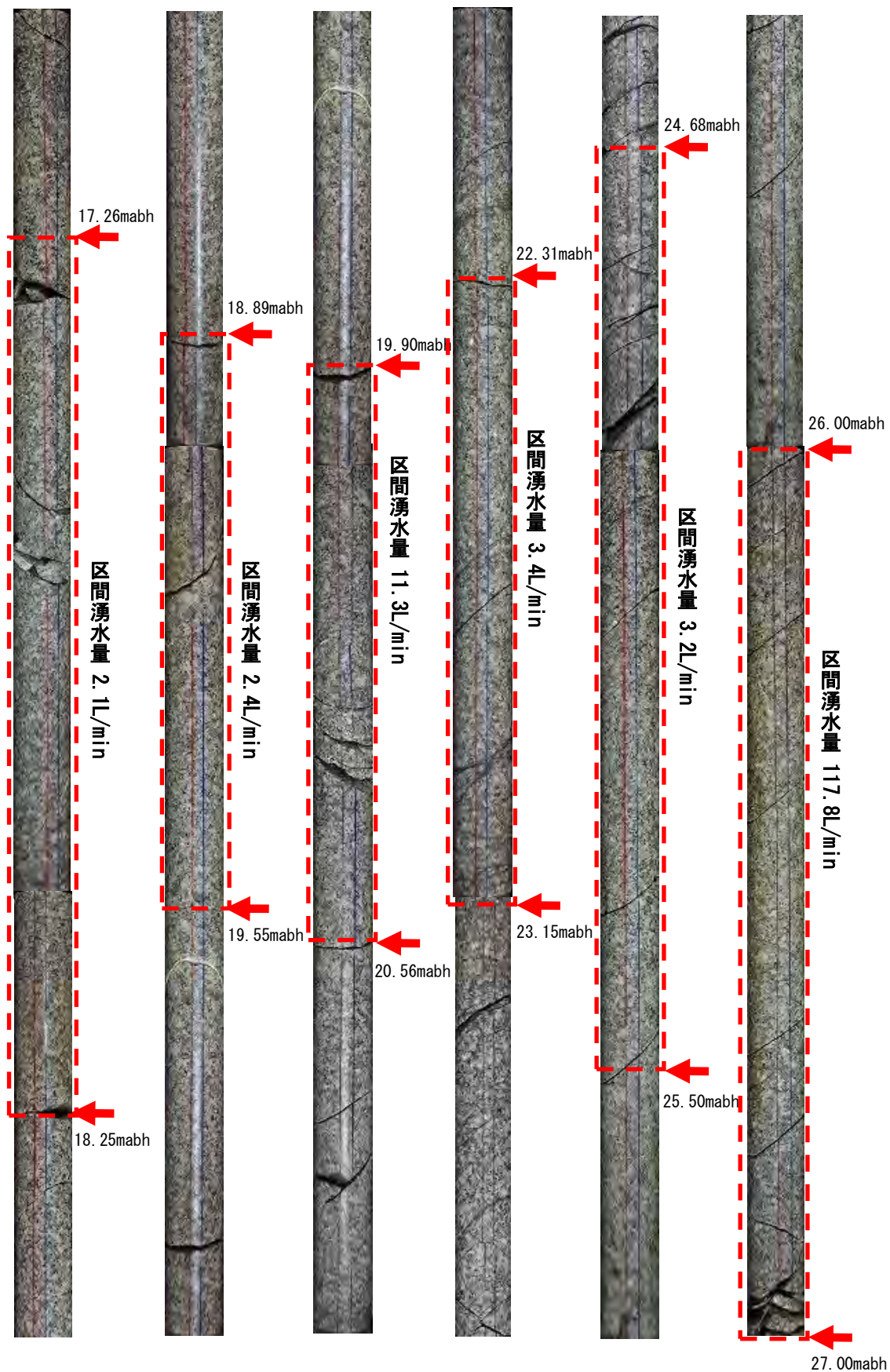
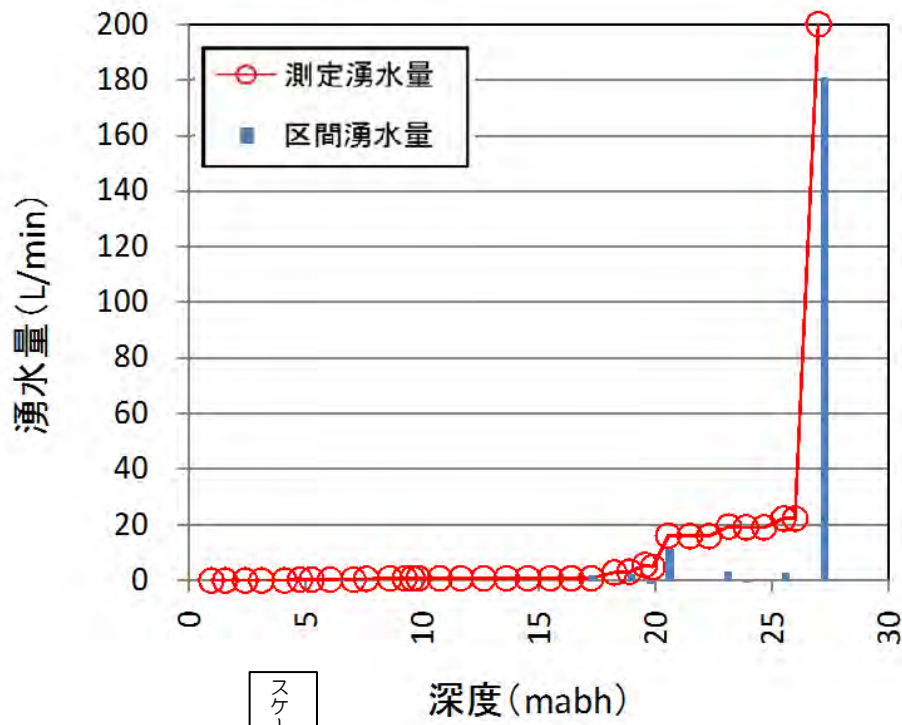


図 7. 3. 3-3 13MI37 号孔区間コア写真

表 7.3.3-2 13MI37 号孔掘削時孔口湧水量測定結果

掘削区間			測定湧水量	区間湧水量
mabh			L/min	L/min
0.00	~	0.95	0.00	0.00
0.95	~	1.55	0.00	0.00
1.55	~	2.40	0.00	0.00
2.40	~	3.10	0.00	0.00
3.10	~	4.10	0.00	0.00
4.10	~	4.75	0.28	0.28
4.75	~	5.25	0.28	0.00
5.25	~	6.05	0.28	0.00
6.05	~	7.05	0.28	0.00
7.05	~	7.60	0.50	0.22
7.60	~	8.60	0.75	0.25
8.60	~	9.25	0.75	0.00
9.25	~	9.60	0.75	0.00
9.60	~	9.85	0.75	0.00
9.85	~	10.75	0.75	0.00
10.75	~	11.65	0.75	0.00
11.65	~	12.63	0.75	0.00
12.63	~	13.63	0.75	0.00
13.63	~	14.53	0.75	0.00
14.53	~	15.50	0.75	0.00
15.50	~	16.40	0.75	0.00
16.40	~	17.26	0.75	0.00
17.26	~	18.25	2.88	2.13
18.25	~	18.89	3.06	0.18
18.89	~	19.55	5.50	2.44
19.55	~	19.90	4.80	-0.70
19.90	~	20.56	16.10	11.30
20.56	~	21.49	15.90	-0.20
21.49	~	22.31	15.90	0.00
22.31	~	23.15	19.30	3.40
23.15	~	23.88	19.00	-0.30
23.88	~	24.68	19.00	0.00
24.68	~	25.50	22.22	3.22
25.50	~	26.00	22.22	0.00
26.00	~	27.00	200.00	177.78



スケールアップ
↓

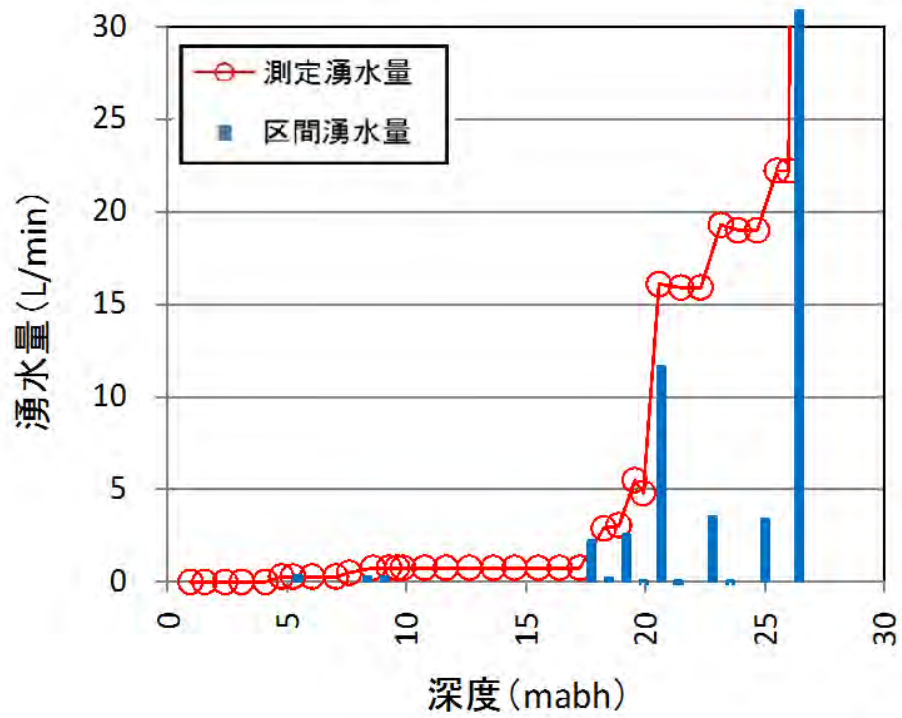


図 7.3.3-4 13MI37 号孔掘削時孔口湧水量測定結果

(5) 12MI30 号孔、12MI31 号孔、13MI36 号孔への水圧挙動

13MI37 号孔掘削時の 12MI30 号孔、12MI31 号孔、13MI36 号孔の水圧挙動を図 7.3.3-5、図 7.3.3-6、図 7.3.3-7 に示す。水圧の応答としては、深度 8mabh 付近、深度 13mabh 付近、深度 17～18mabh 付近、深度 21mabh 付近、深度 23mabh 付近、深度 27mabh 付近の 6 深度で 12MI30 号孔、12MI31 号孔、13MI36 号孔の観測点への変化が見られた。その中で深度 8mabh では 12MI31 号孔 Int8 が大きく応答し、深度 20～21mabh 付近では 12MI30 号孔 Int4 および 12MI31 号孔 Int4 が大きく応答している。

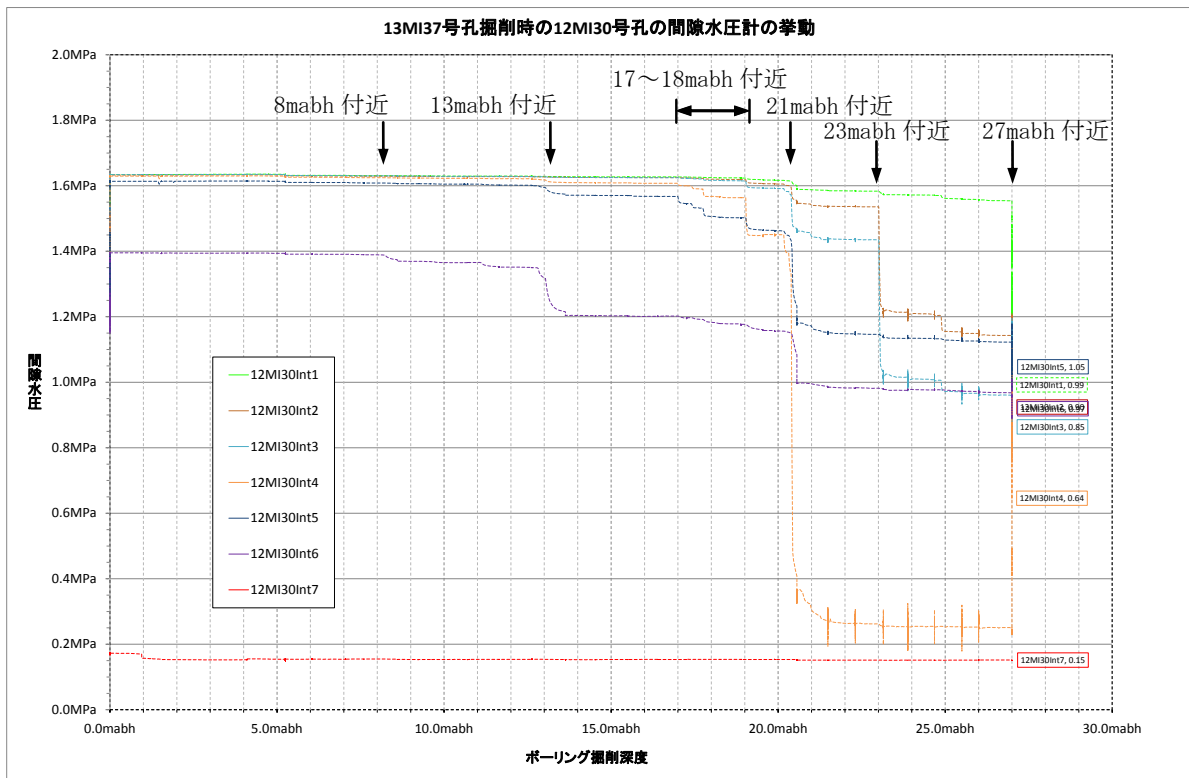


図 7.3.3-5 13MI37 号孔掘削中の 12MI30 号孔の水圧挙動

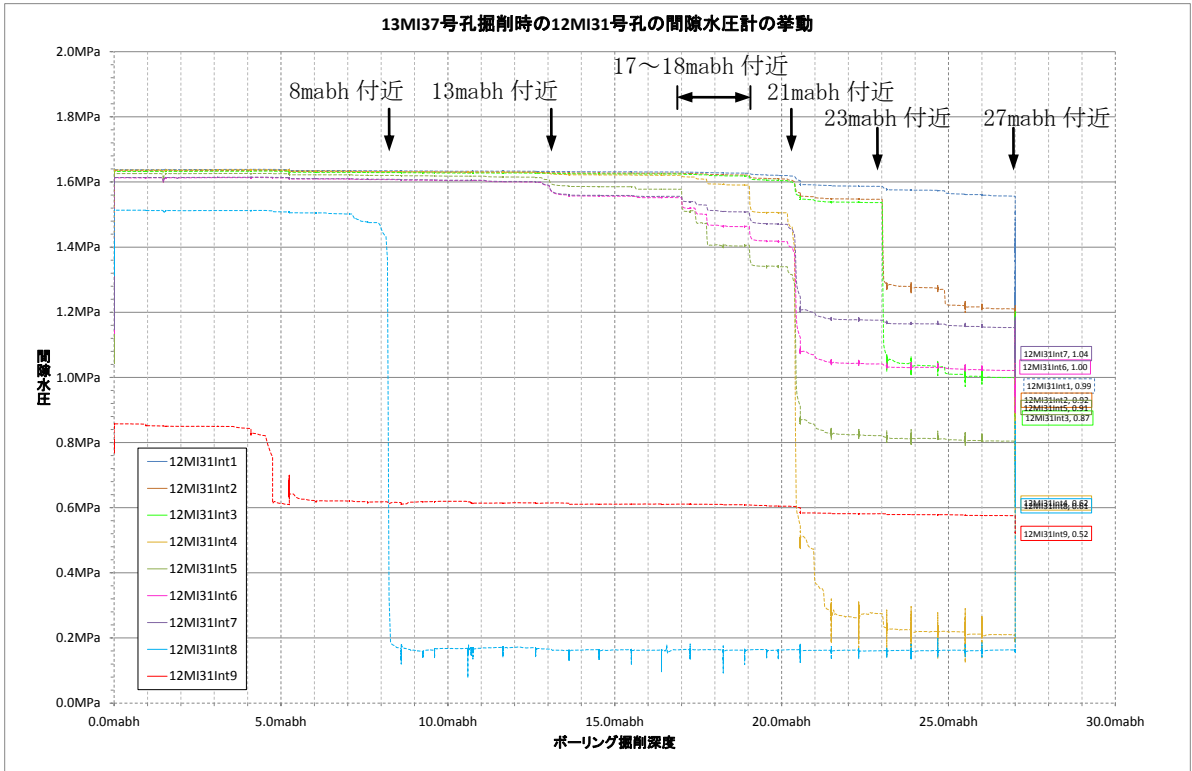


図 7. 3. 3-6 13MI37 号孔掘削中の 12MI31 号孔の水圧挙動

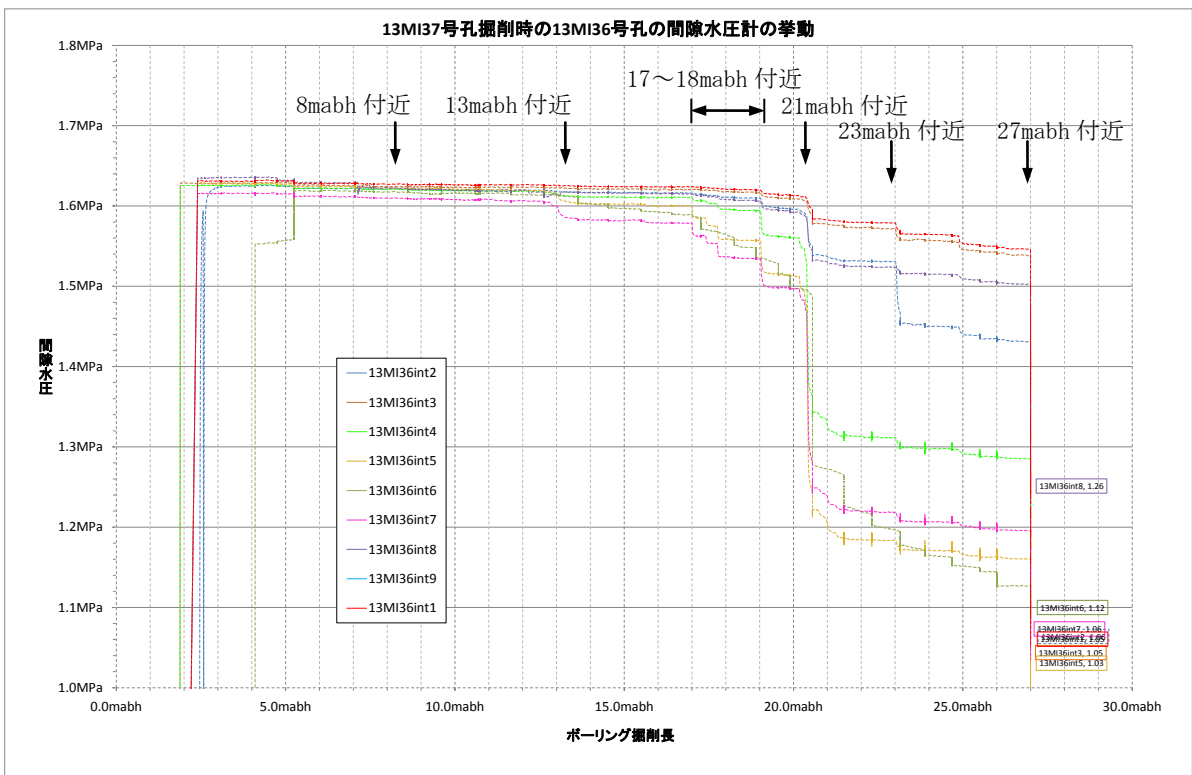


図 7. 3. 3-7 13MI37 号孔掘削中の 13MI36 号孔の水圧挙動

(3) 掘削水の蛍光染料の濃度管理

13MI36 号孔と同様に、掘削水にアミノ G 酸を添加し蛍光染料の濃度管理を実施した。アミノ G 酸の管理濃度は $5\text{mg/L} \pm 10\%$ とした。

13MI37 号孔においてトレーサ濃度管理を行った区間は、孔口から 18.30mabh までである。孔口から 16.30mabh 間は、 1.36L/min の湧水が認められたが、概ね $5\text{mg/L} \pm 10\%$ 以内で管理することができた。18.30mabh 付近で湧水量が 3.0L/min となり、濃度調整が困難となったため、アミノ G 酸の添加および濃度管理を終了した。なお、添加したアミノ G 酸の総量は 15.10g であった。

図 7.3.3-8 にアミノ G 酸濃度と湧水量の深度変化を示す。

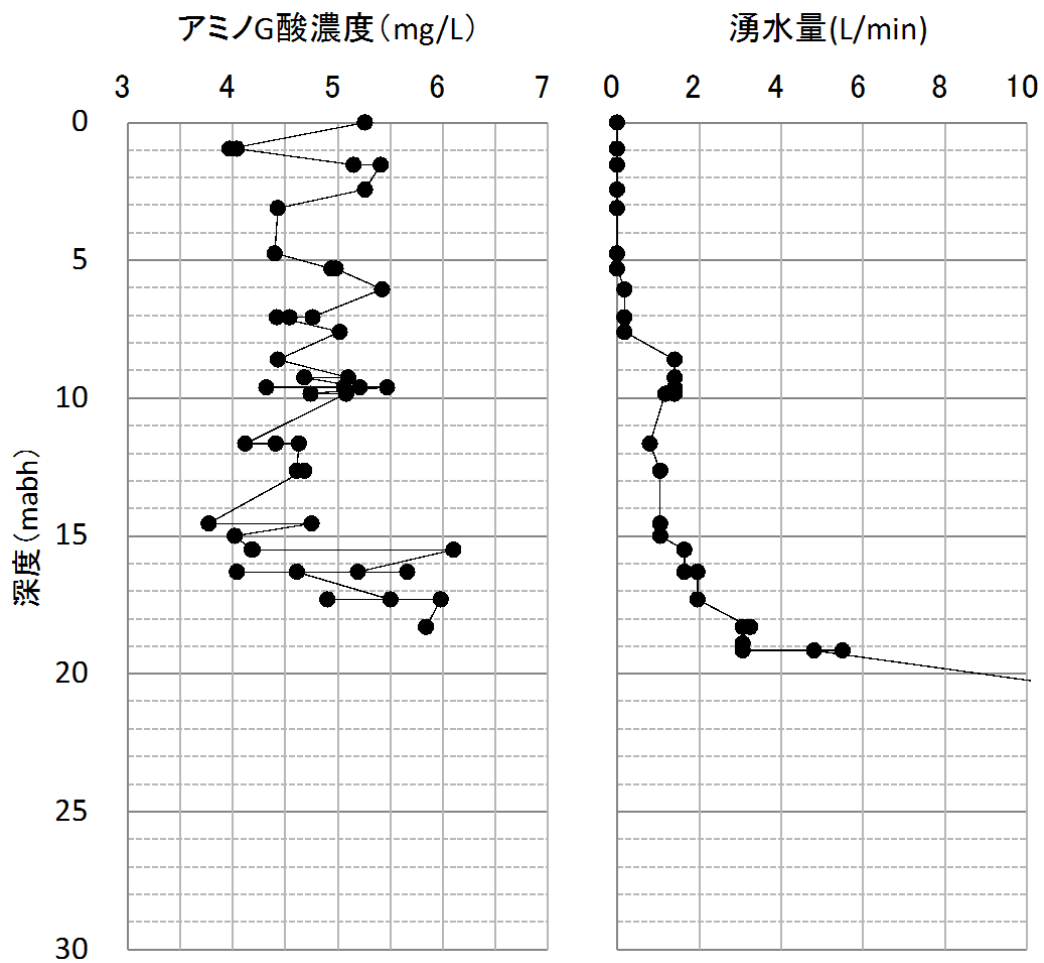


図 7.3.3-8 13MI37 号孔掘削水のアミノ G 酸濃度と湧水量

7.3.3.3 コア観察結果

コアの採取および記載を 13MI37 号孔にて掘削した 0.00mabh～27.00mabh 間の全深度について実施した。13MI37 号孔の総合地質柱状図を図 7.3.3-9 に、コア写真を図 7.3.3-10～図 7.3.3-12 に示す。

(1) 岩相

13MI37 号孔の孔口から 0.23mabh 間はコンクリートである。それ以深～27.00mabh 間の地質は、中粒黒雲母花崗岩（土岐花崗岩）より構成され、弱い変質といくつかの時期の異なる変形作用を被っている。

花崗岩は石英、長石類および、黒雲母を主体として構成され、まれに角閃石が認められる。岩石の組織は中粒の等粒状組織もしくは長石の斑晶を伴う斑状組織を示し、最大径 55mm 程度、径 20～30 mm 程度の長石の斑晶が認められる。

(2) 変質

図 7.3.3-9 の 13MI37 号孔総合地質柱状図に母岩の変質の程度、割れ目沿いの変質および、割れ目充填鉱物の分布を示す。

本孔の全体的な変質の特徴としては、母岩全体に長石のセリサイト化が認められ弱い変質を受けている。割れ目の密度の高い個所の母岩には、細脈への緑泥石の充填が認められる。割れ目の充填鉱物としては緑泥石や方解石が認められるが、断層や割れ目の集中する区間には、割れ目の充填鉱物として母岩を構成する鉱物やその破片とともに、セリサイト、緑泥石、方解石および黄鉄鉱が認められる、一部は未固結で粘土化した状態で割れ目を充填する。

本孔で認められる変質を区分すると、深度 0～6.56mabh 間は弱変質、深度 6.56～6.98mabh 間は中変質、深度 6.98～7.83mabh 間は弱変質、深度 7.83～8.32mabh 間は中変質、深度 8.32～27.00mabh 間は弱変質である。深度 6.56～6.98mabh 間は長石の白濁化が強く、割れ目には粘土が認められる。7.83～8.32mabh 間はセリサイト化および長石の白濁化が比較的強く、鉱物間の結合が弱まり砂状コアを呈している。

以下に割れ目沿いの変質と、割れ目充填鉱物の観察結果について述べる。

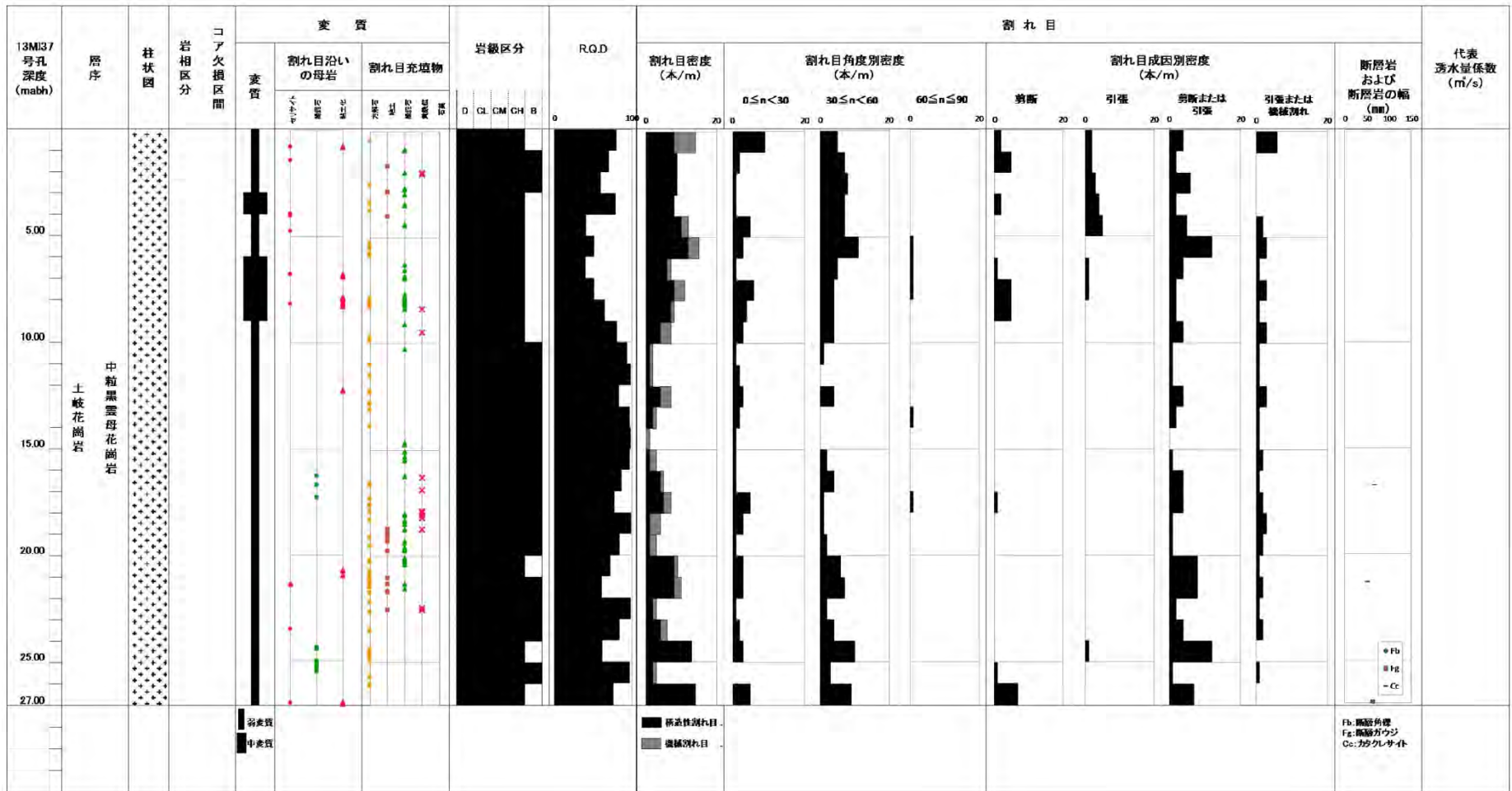


図 7.3.3-9 13MI37 号孔総合地質柱状図



図 7.3.3-10 コア写真 13MI37 号孔 (0~9.00mabh)



図 7.3.3-11 コア写真 13MI37 号孔 (9.00~18.00mabh)



図 7.3.3-12 コア写真 13MI37 号孔 (18.00~27.00mabh)

a. 割れ目沿いの変質

割れ目沿いの変質は、割れ目の発達する区間である 6.56～6.98mabh 間、7.83～8.32mabh 間や、カタクラサイト沿いで長い区間にわたり認められる。以下に、主な割れ目沿いの変質について特徴を述べる。

(a) 深度 0.80～0.81mabh 間

割れ目沿いに幅約 5mm の範囲で弱変質程度の粘土化が認められる。

(b) 深度 6.56～6.98mabh 間

割れ目沿いに幅 10～20mm の範囲で中変質程度の長石の白濁化が認められる。

(c) 深度 7.16～7.20mabh 間

割れ目沿いに幅約 30mm の範囲で中変質程度のセリサイト化が認められる。

(d) 深度 7.83～8.06mabh 間

割れ目沿いに幅約 10mm の範囲で弱変質程度のセリサイト化が認められる。

(e) 深度 8.10～8.32mabh 間

割れ目沿いに幅約 220mm の範囲で中変質程度のセリサイト化が認められる。

(f) 深度 16.73～16.80mabh 間

カタクラサイト沿いに発達する。幅約 65mm の範囲で強変質程度の緑泥石化が認められる。

(g) 深度 21.28～21.33mabh 間

カタクラサイト沿いに発達する。幅約 50mm の範囲で強変質程度の緑泥石化が認められる。

b. 割れ目充填鉱物

割れ目充填鉱物は、緑泥石、方解石を主体とし、粘土、黄鉄鉱が認められた。以下に充填鉱物の主体を成す緑泥石および方解石、粘土について、その分布区間や特長について述べる

(a) 緑泥石

主な分布区間は、深度 1.01～1.04mabh 間、深度 4.86～4.93mabh 間、深度 5.11～5.25mabh 間、深度 5.42～5.47mabh 間、深度 5.63～5.64mabh 間、深度 9.28～9.52mabh 間、深度 16.73～16.80mabh 間、深度 17.56～17.65mabh 間、深度 21.45～21.46mabh 間、深度 21.83～21.34mabh 間、深度 23.13～23.15mabh 間、深度 23.48～23.50mabh 間、深度 24.58～24.96mabh 間、深度 25.05～25.48mabh 間、深度 26.03～26.40mabh 間および深度 26.93～26.99mabh に認められる。図 7.3.3-13 の写真に示すように細脈を充填して線上に暗緑色を呈するものが多いが、図 7.3.3-17 の写真に示すようにカタクラサイトの基質充填鉱物として濃集しているものもある。



図 7.3.3-13 13MI37 号孔 カタクラサイトを充填する緑泥石

(b) 方解石

方解石は塩酸との反応により確認した。方解石は、灰色の未固結な粉末状および、粘土状の付着物、または希に灰色で固結した充填物として産する。なお、粘土状の付着物は方解石以外の粘土鉱物の混在も考えられる。分布については、割れ目の密度とは無関係にほぼ全深度に認められる。また一部の割れ目では、緑泥石が付着する割れ目の内側に、方解石が入り込むように充填されていることが確認された。この割れ目では緑泥石が形成された後に方解石が晶出ないし沈殿したことが推測される。

(c) 粘土

粘土は割れ目充填鉱物として産する。割れ目内部に1mm程度の厚みをもつ形態が主だが、深度6.56～6.99mabh間では厚さ3mm程度の割れ目内部を完全に充填している。図7.3.3-14に割れ目を充填する粘土を示す。

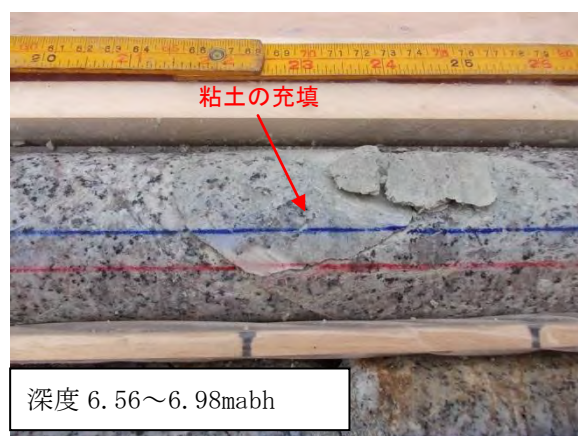


図 7.3.3-14 13MI37 号孔 割れ目を充填する粘土

(3) 割れ目

13MI37号孔の割れ目の発達状況に基づき、以下に3区間に区分して記述する。3区間の深度は、割れ目が発達する深度0～4.00mabh間、割れ目が少ない深度4.00～8.00mabh間および、割れ目が発達する深度8.00～27.00mabh間（コア観察最終深度）である。

以下に記述する割れ目密度は、コア観察時に分離した状態（非密着）の構造的割れ目の本数であり、「TorD（引張または、機械割れ目）」と判定した割れ目もこれに含まれる。

(a) 深度0～4.00mabh間（0～0.23m間はコンクリート）

割れ目密度は8～14本/m、平均10本/mであり、比較的健岩部が連続する。割れ目の傾斜角は低～中角なものに富む。成因については引張割れ目が主体である。なお、本区間での断層岩は認められないが、深度0.75～0.82mabh間は2本の割れ目間が脆弱で角礫状～粘土状コアを示す。図7.3.3-15の写真に割れ目形成による角礫状～粘土状コアを示す。

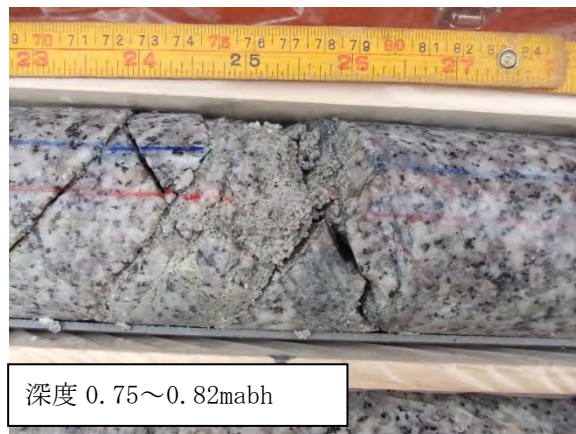


図 7.3.3-15 13MI37号孔 角礫状～粘土状コア

(b) 深度4.00～8.00mabh間

本区間は割れ目が発達する区間であり、割れ目密度は7～15本/m、平均11本/mである。割れ目の傾斜角は中角のものが多く、成因については剪断または引張割れ目である。なお、本区間での断層岩は認められないが、深度7.84～8.00mabh間および深度8.05～8.32mabh間は軟質で角礫状コアを示す。図7.3.3-16の写真に割れ目形成による軟質な角礫状コアを示す。



図 7.3.3-16 13MI37 号孔 角礫状コア

(c) 深度 8.00~9.00mabh 間

本区間は割れ目密度 1~14 本/m、平均 6 本/m であり、健岩部が連続する。割れ目の傾斜角は低角から中角なものに富み、割れ目の成因は剪断または引張割れ目が主体である。断層岩については、カタクラサイトが深度 16.73~16.80mabh 間および深度 21.29~21.34mabh 間、断層角礫岩が深度 26.93~27.00mabh 間に認められる。深度 16.73~16.80mabh 間のカタクラサイトは緑泥石化が認められ、傾斜は 35°、全体の幅は約 60mm である。深度 21.29~21.34mabh のカタクラサイトも緑泥石化が認められ、傾斜は 35°、全体の幅は 150mm で分布する (図 7.3.3-17)。深度 26.93~27.00mabh 間の断層角礫岩は傾斜 15° および 35° に割れ目が発達し、一部の割れ目には緑泥石等鉱物が特定方向に伸長しており、剪断方向を示す条線が確認できる (条線方向 : SL(R15)) , 図 7.3.3-18)

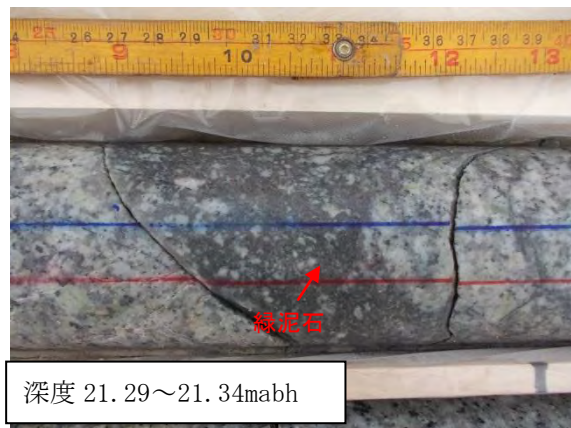


図 7.3.3-17 13MI37 号孔 カタクラサイト

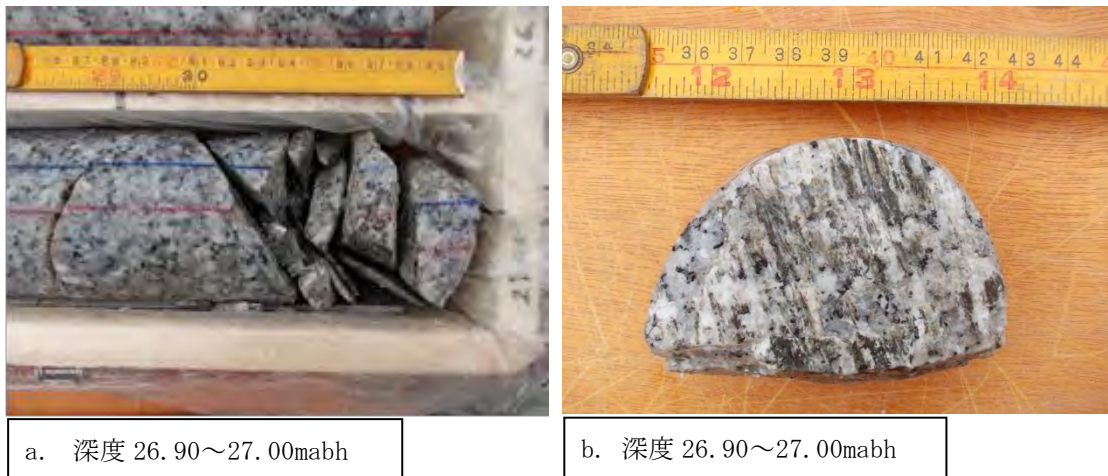


図 7.3.3-18 13MI37 号孔 断層角礫岩と条線 SL(R15)

(4) 岩盤等級および RQD

13MI37 号孔の岩盤等級は記載マニュアルに基づき変質の程度から、深度 1.00~3.00mabh、深度 10.00~20.00mabh、深度 21.00~24.00mabh および深度 25.00~26.00mabh 間は B 級、深度 0~1.00mabh 間、深度 3.00~10.00mabh、深度 20.00~21.00mabh、深度 24.00~25.00mabh、深度 26.00~27.00mabh を CH 級と判定した。RQD については、浅部で割れ目の少ない区間である深度 0~4.00mabh 間の RQD は、60~80 の範囲を示し、平均は 72 と高くほぼ健岩部である。割れ目が発達する深度 4.00~8.00mabh 間の RQD は、40~53 の範囲を示し、平均は 45 と低い。深部で割れ目の少ない区間である深度 8.00~27.00mabh 間の RQD は 61~99 の範囲を示し、平均は 85 である。

7.3.3.4 孔曲検層

13MI37号孔の孔曲がり検層結果を表7.3.3-3に示す。掘削中に5m程度に1回の頻度で孔曲がり検層を実施した。

本孔における孔跡は、掘削角度は当初設置 -41° に対して、最深部となる26mabh付近で -39° となった。また、掘削方向は当初設置 $S80^\circ W$ に対して全深度で変位はなかった(図7.3.3-19)。

表 7.3.3-3 13MI36号孔 孔曲がり検層結果

測定月日	掘削深度 (mabh)	孔曲がり測定深度 (mabh)	測定方向 (水平より下向き)	測定方位 (磁北基準)	偏差角	測定基準 (真北基準)
12月5日	5.30	5.00	$-41^\circ 00'$	$S87^\circ W$	7°	$S80^\circ W$
12月9日	7.06	7.00	$-41^\circ 00'$	$S87^\circ W$	7°	$S80^\circ W$
12月10日	11.65	11.00	$-41^\circ 00'$	$S87^\circ W$	7°	$S80^\circ W$
12月10日	16.40	16.00	$-41^\circ 00'$	$S87^\circ W$	7°	$S80^\circ W$
12月11日	21.49	21.00	$-40^\circ 00'$	$S87^\circ W$	7°	$S80^\circ W$
12月11日	26.10	26.00	$-39^\circ 00'$	$S87^\circ W$	7°	$S80^\circ W$

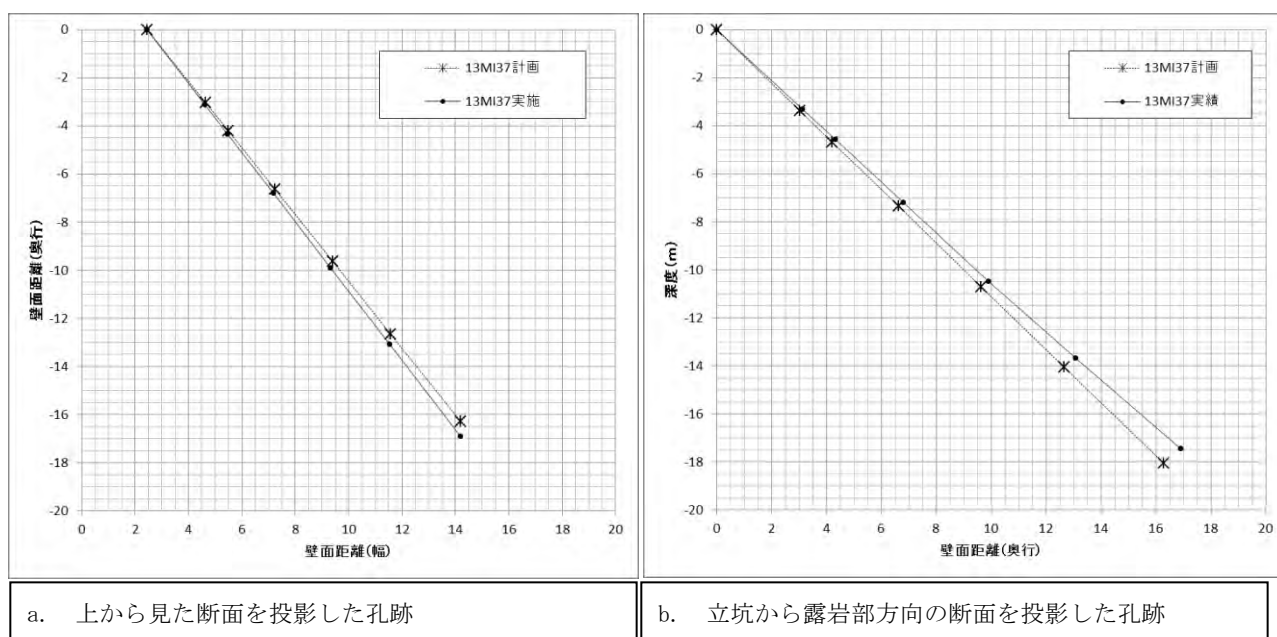


図 7.3.3-19 13MI36号孔 孔曲がり検層結果

7.3.3.5 間隙水圧モニタリング装置の設置

13MI37号孔では、深度27mabh付近掘削中に約200L/min程度の湧水が発生した。この湧水が妨げとなり、当初設置を予定していた $\phi 78\text{mm}$ のモニタリング装置では湧水に押し戻されて挿入することが出来なかった。このため、新たに $\phi 66\text{mm}$ のモニタリング装置を作成した。

$\phi 66\text{mm}$ の装置が完成するまでの期間は、水理試験用のパッカーを用いて区間の形成・止水を行い、

割れ目を保護した。

なお、 $\phi 66 \text{ mm}$ のモニタリング装置の設置はポイント希釈試験、音響トモグラフィ検層、BTV 検層の後に実施した。

止水目的で設置した水理試験装置の孔内部構成図を図 7.3.3-20 に示す。

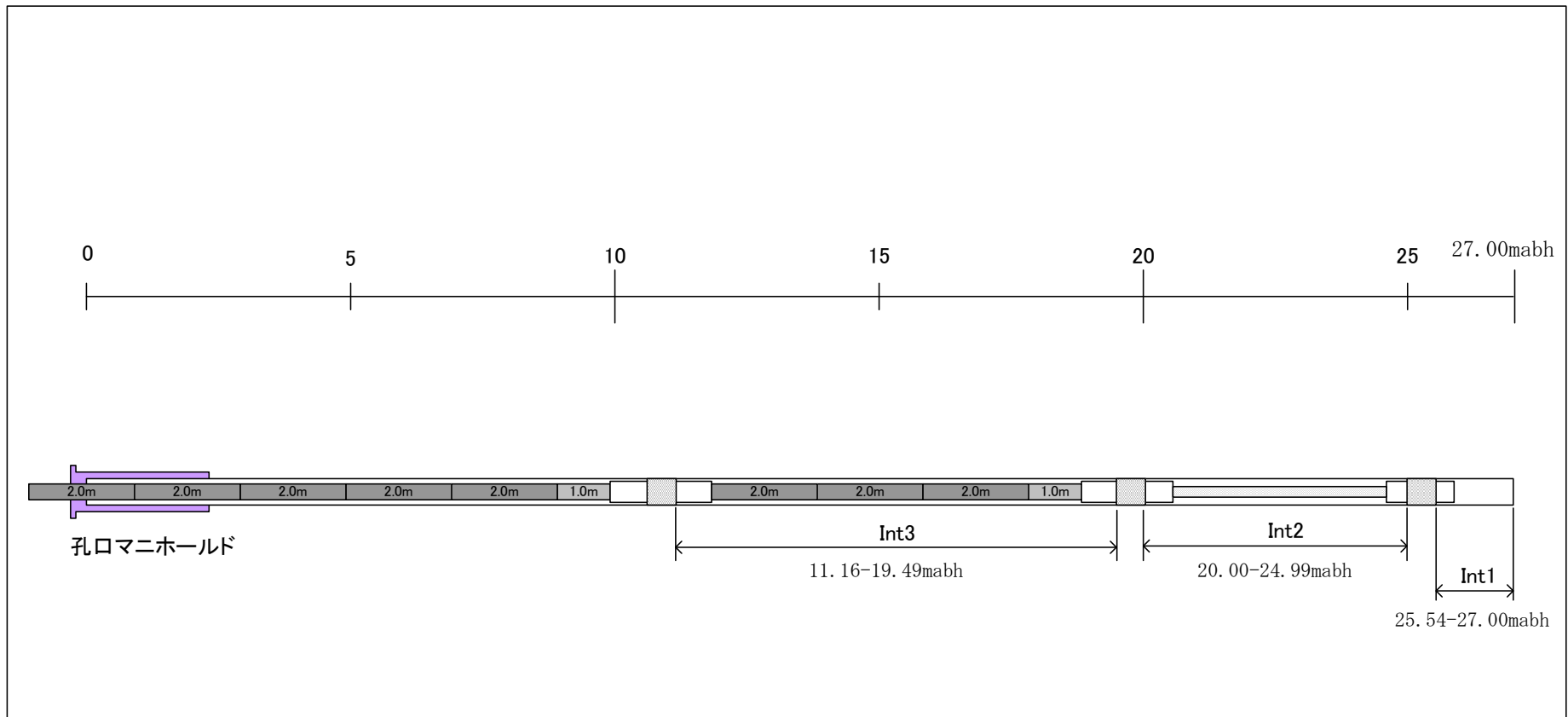


図 7. 3. 3-20 13MI37 号孔の水理試験装置の構成概念図

7.3.4 ポイント希釈試験の試験結果

ポイント希釈試験は、12MI30号孔、12MI31号孔、13MI36号孔に設置した間隙水圧モニタリング装置の観測区間のうち、9区間で実施した。対象とした試験区間は、コア観察やBTVの画像、フローメータ検層結果および掘削時の湧水量変化を基に、割れ目の連続性を考慮して選択した。

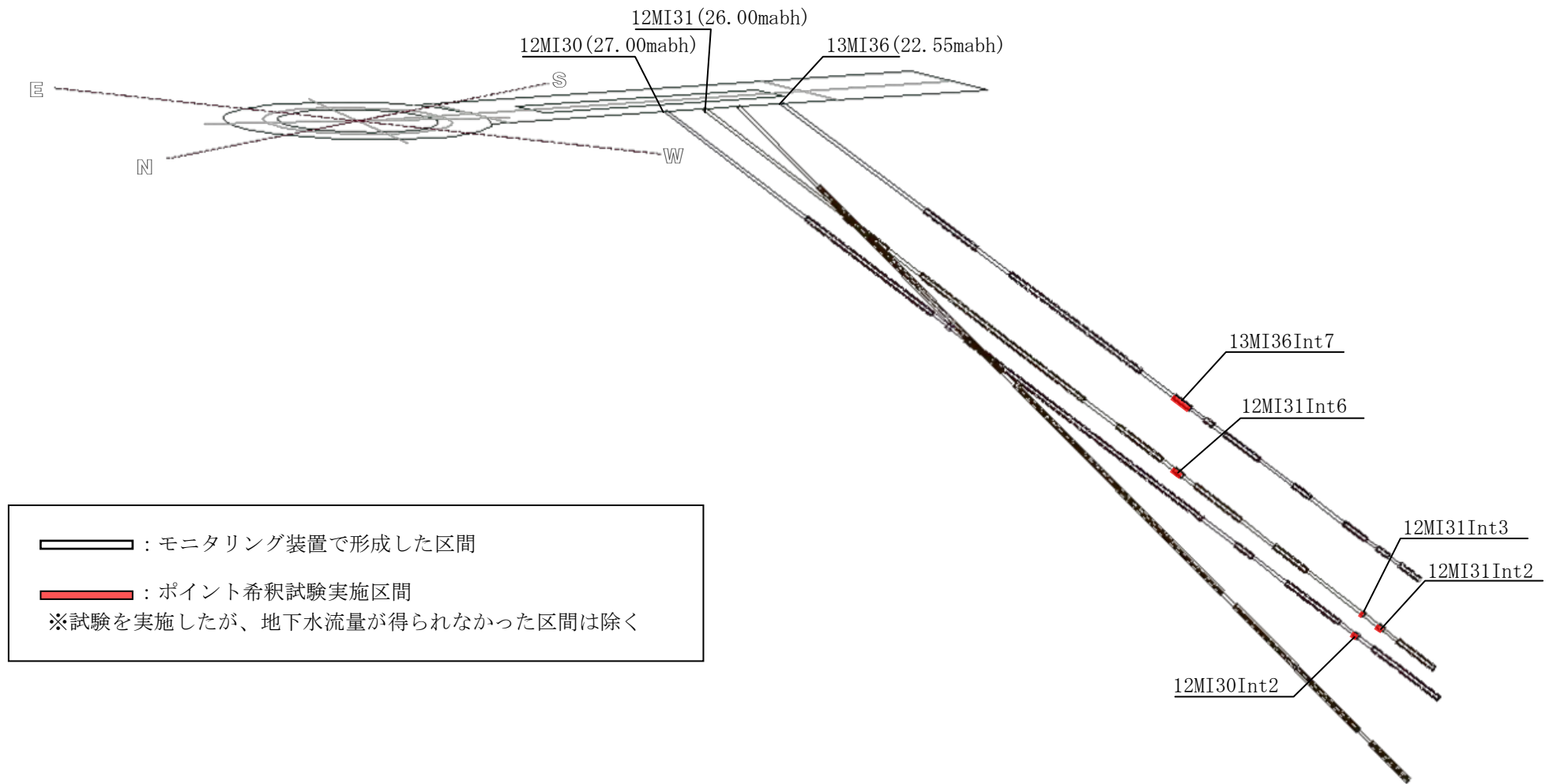


図 7.3.4-1 ポイント希釈試験実施箇所

(1) 検量線の作成結果

蛍光強度からウラン濃度を算出する検量線の作成のため、300m坑道内でウラン溶液を配管内で循環させて計測した。その結果を図 7.3.4-2 に示す。

センサー1、センサー2 ともに、検量線作成中と実測の希釈試験中での 3mg/L 以上の領域では、ウラン濃度と蛍光強度に差が生じることが判明した。このため、検量線の作成にあたっては 0～9mg/L の全濃度域ではなく、比較的低濃度（3 mg/L 以下）で得られた蛍光濃度を用いた（図 7.3.4-3 (a) (b)）。センサー1、センサー2 の検量線をそれぞれ式(1)、式(2)に示す。

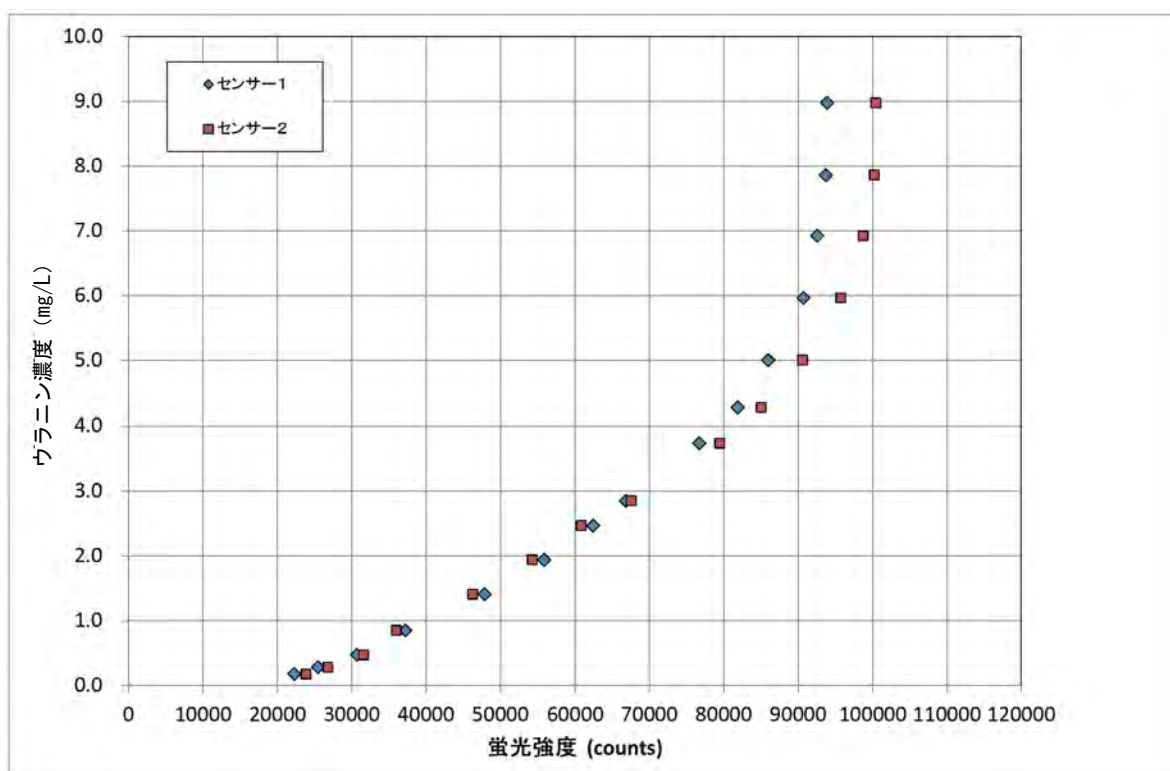
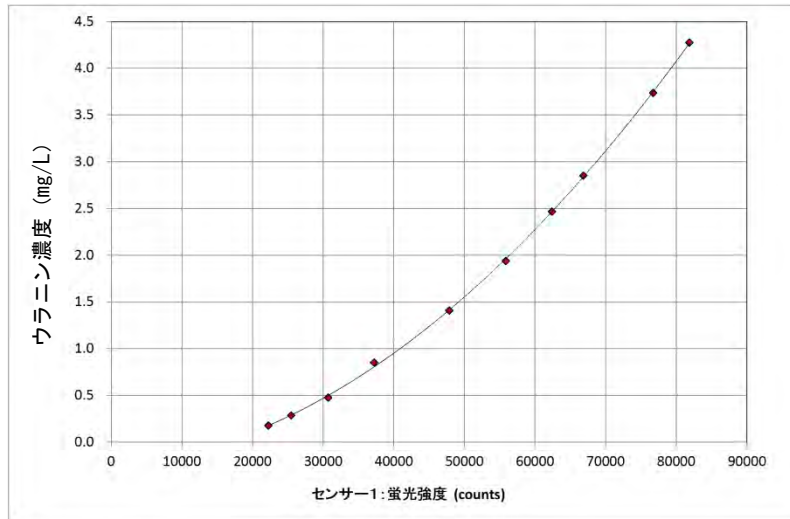
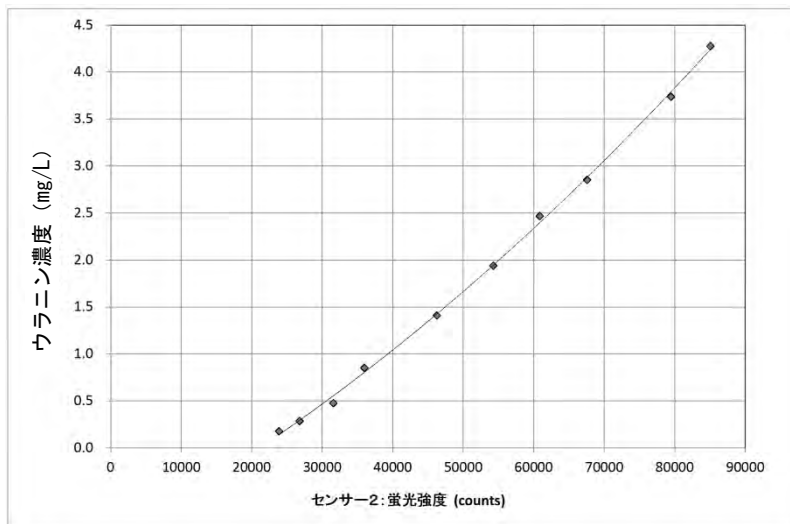


図 7.3.4-2 蛍光強度とウラン濃度の関係



(a) センサー 1 の検量線



(b) センサー 2 の検量線

図 7.3.4-3 ウラニン濃度の検量線

検量線①：センサー1

$$Cu = 5.96634802340185E-10 * Cf^2 + 6.51156663164401E-06 * Cf - 0.263582629727675 \quad (1)$$

検量線②：センサー2

$$Cu = 2.48096285338514E-10 * Cf^2 + 3.99928322482435E-05 * Cf - 0.956197763089653 \quad (2)$$

Cu：ウラニン濃度 (mg/L)

Cf：蛍光強度 (counts)

(2) ポイント希釈試験結果

センサー1、センサー2で観測区間におけるウラン濃度希釈過程を追跡したところ、蛍光強度は時間経過とともに概ね直線的に減少した（図7.3.4-4～図7.3.4-12）。

検量線から算出したウラン濃度は、高濃度域ではセンサー1、センサー2で濃度の差異がみられた。その一方、3 mg/L以下の低濃度域を算出した結果では、センサー1、センサー2のウラン濃度は互いに近似した結果となった。試験の実施概要を表7.3.4-1に示す。

表 7.3.4-1 ポイント希釈試験の実施区間

孔名	観測区間	ウラン濃度 (分光蛍光光度計)		計測機器		ウラン濃度算出 (3ppm以下)	観測期間	観測時間
		開始時	終了時	センサー1	センサー2			
12MI30	Int2	6.00	1.39	○	○	○	2014/1/20 14:42 ~ 2014/1/21 10:35	19:53
	Int3	(8.00) ^{※1}	3.61	○	※2	-	2014/1/17 17:20 ~ 2014/1/18 13:24	20:04
12MI31	Int2	8.93	0.60	○	○	○	2014/1/18 18:25 ~ 2014/1/20 8:46	14:21
	Int3	5.83	1.95	○	○	○	2014/1/25 14:28 ~ 2014/1/27 8:41	42:13
	Int4	(8.00) ^{※1}	3.60	○	※2	-	2014/1/16 14:40 ~ 2014/1/17 14:25	23:45
	Int5	5.91	2.94	○	○	-	2014/1/21 17:50 ~ 2014/1/22 8:30	14:40
12MI36	Int6	5.75	1.30	○	○	○	2014/1/24 14:35 ~ 2014/1/25 8:16	17:41
	Int4	6.09	2.96	○	○	-	2014/1/22 15:10 ~ 2014/1/23 8:20	17:10
	Int7	6.00	1.44	○	○	○	2014/1/23 14:22 ~ 2014/1/24 8:18	17:56

※1 分光蛍光光度計による濃度計測を実施していない

※2 センサー2に不具合が生じた観測期間（2014/1/16～2014/1/17）は原因追及のためデータ欠測

流量は全ての試験区間を対象に算出した。ただし、試験を実施した9区間中、4区間については3mg/L以下の試験結果が得られていないため、算出した結果は比較的誤差が大きくなっていると考える。

ポイント希釈試験で得られたウラン濃度の低下量から算出した割れ目内を通過する単位幅あたりの地下水流量は、9区間のうち0.1 ml/min/cm未満の区間が3区間、0.1以上0.2 ml/min/cm未満の区間が4区間、0.2ml/min/cm以上の区間が2区間であった。表7.3.4-2にポイント希釈試験から算出した区間ごとの流量を示す。また、地下水流量の算出式を式(3)、式(4)に示す。

$$Q_{bh} = -V * (dLnC/dt) \quad (3)$$

Q_{bh} : 地下水流量 (mL/min)

V : 区間容量 (mL)

C : 時刻 t における試験区間内のトレーサ濃度

$$q_f = Q_{bh} / \alpha * 2r_w \quad (4)$$

q_f : 岩盤割れ目内の単位幅あたりに流れる地下水流量 (mL/min/cm)

Q_{bh} : 地下水流量 (mL/min)

α : 集水効果を表す係数 (2.0)

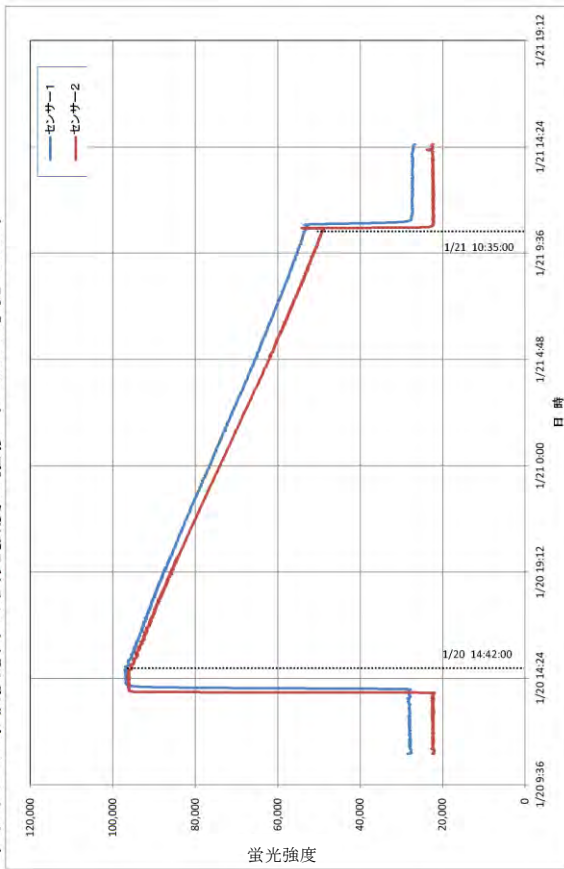
r_w : ボーリング孔半径 (cm)

表 7.3.4-2 ポイント希釈試験結果

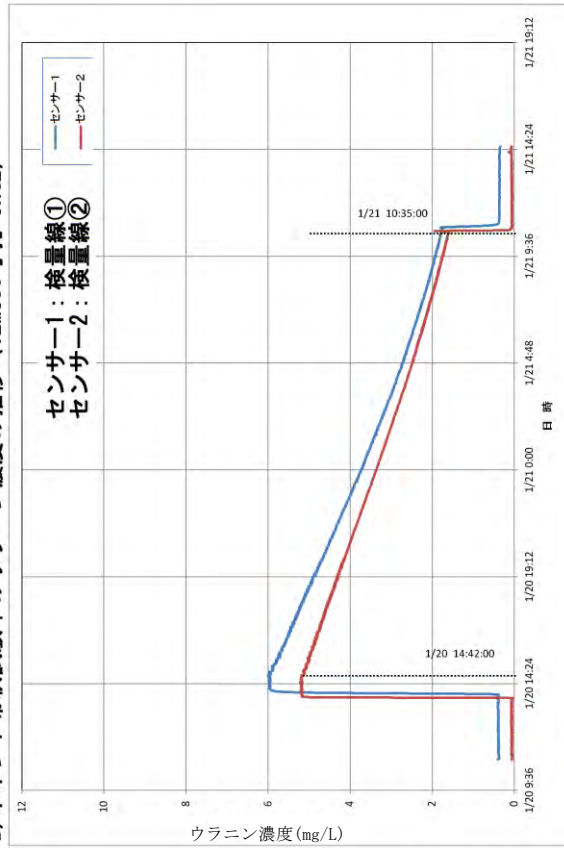
孔名	観測区間	ウラン濃度 Ln曲線 直線部傾き dLnC/dt	地下水流量 Q_{bh} (mL/min)	係数 α	孔半径 r_w (cm)	地下水流量 q_f (mL/min/cm)
12MI30	Int2	-1.6963	1.9908	2.0	4.5	0.1106
	Int3	-0.3395	1.6032	2.0	4.5	0.0891 ←
12MI31	Int2	-1.7161	2.0617	2.0	4.5	0.1145
	Int3	-1.9570	4.3489	2.0	4.5	0.2416
	Int4	-0.4879	1.5586	2.0	4.5	0.0866 ←
	Int5	-1.0266	4.2775	2.0	4.5	0.2376 ←
	Int6	-2.1739	2.7476	2.0	4.5	0.1526
13MI36	Int4	-0.8023	1.6157	2.0	4.5	0.0898 ←
	Int7	-2.0327	3.5290	2.0	4.5	0.1961

※ ← で示す結果は、3mg/L以下の結果が得られていないため、比較的誤差が大きいと考
える。

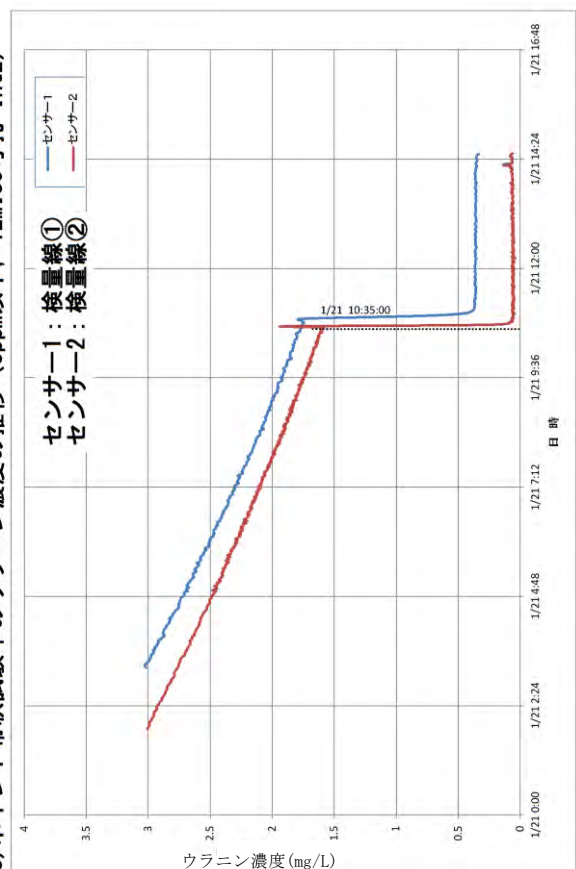
a) ポイント希釈試験中の蛍光強度の推移 (12MI30号孔 Int2)



b) ポイント希釈試験中のウラン濃度の推移 (12MI30号孔 Int2)



c) ポイント希釈試験中のウラン濃度の推移 (3ppm以下, 12MI30号孔 Int2)



d) ポイント希釈試験中のウラン濃度の推移 (3ppm以下, 対数グラフ 12MI30号孔 Int2)

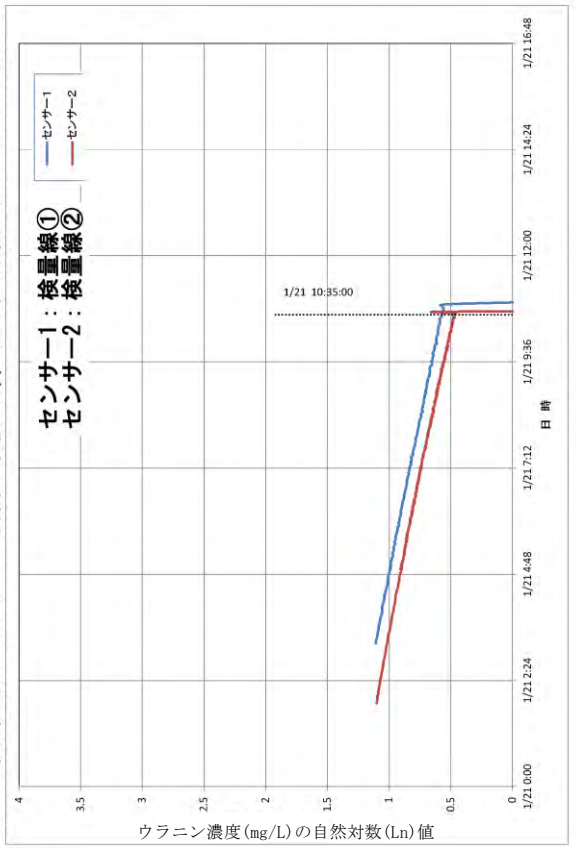
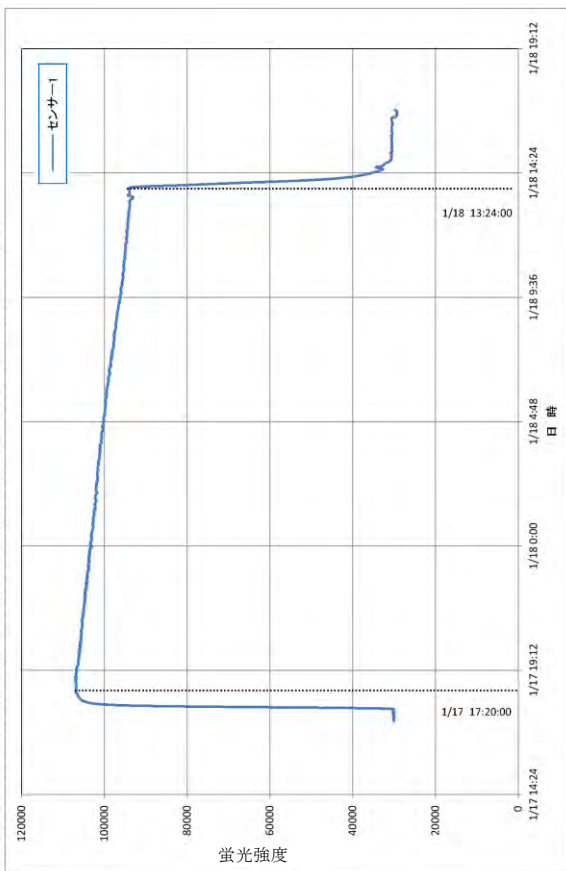
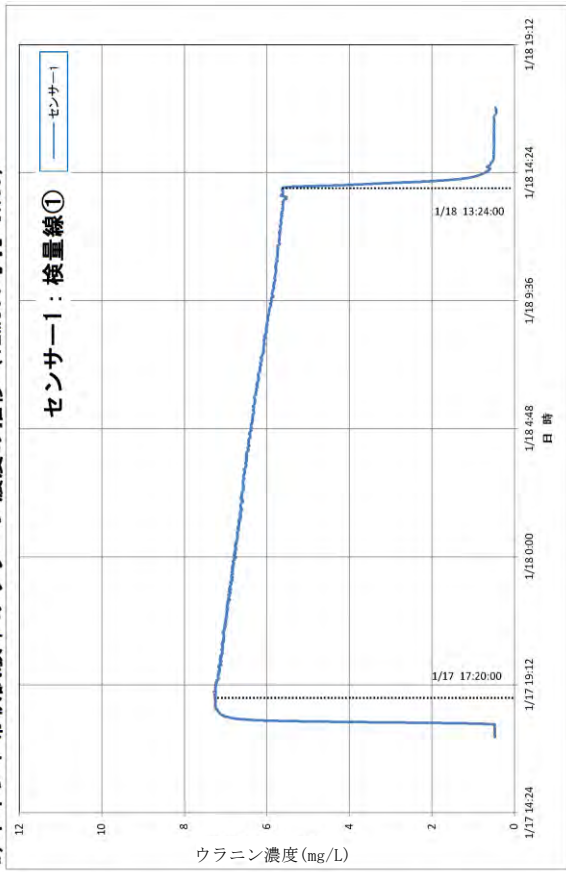


図 7.3.4-4 ポイント希釈試験結果 (12MI30号孔 Int2)

a) ポイント希釈試験中の蛍光強度の推移 (12MI30号孔 Int3)



b) ポイント希釈試験中のウラン濃度の推移 (12MI30号孔 Int3)



c) ポイント希釈試験中のウラン濃度の推移 (対数グラフ 12MI30号孔 Int3)

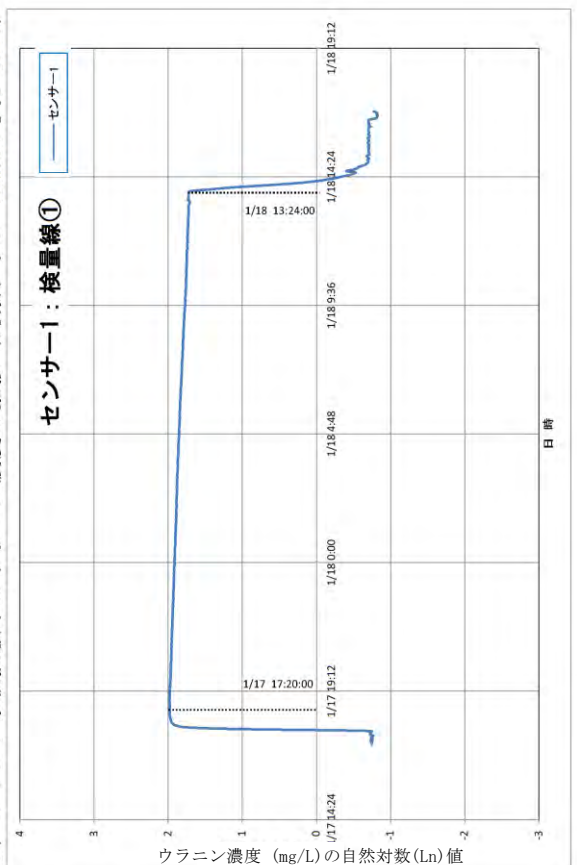
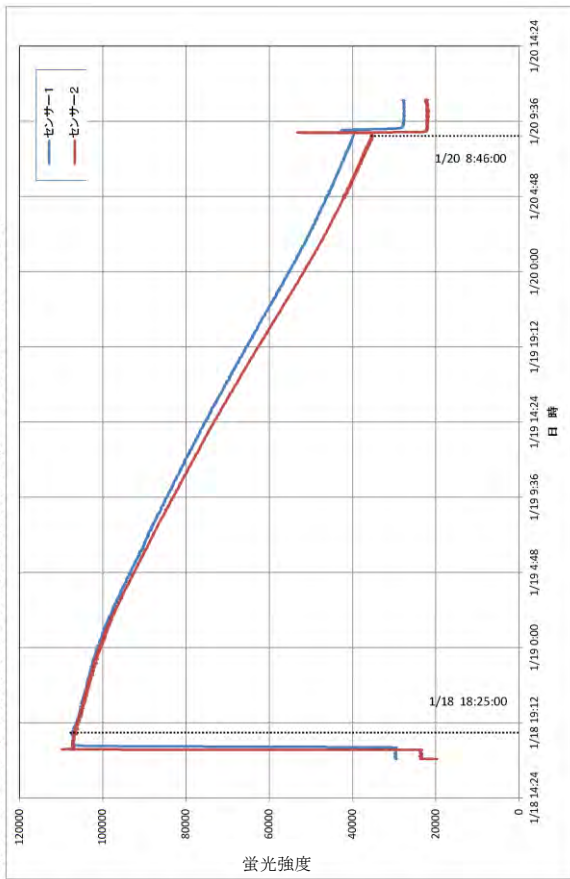
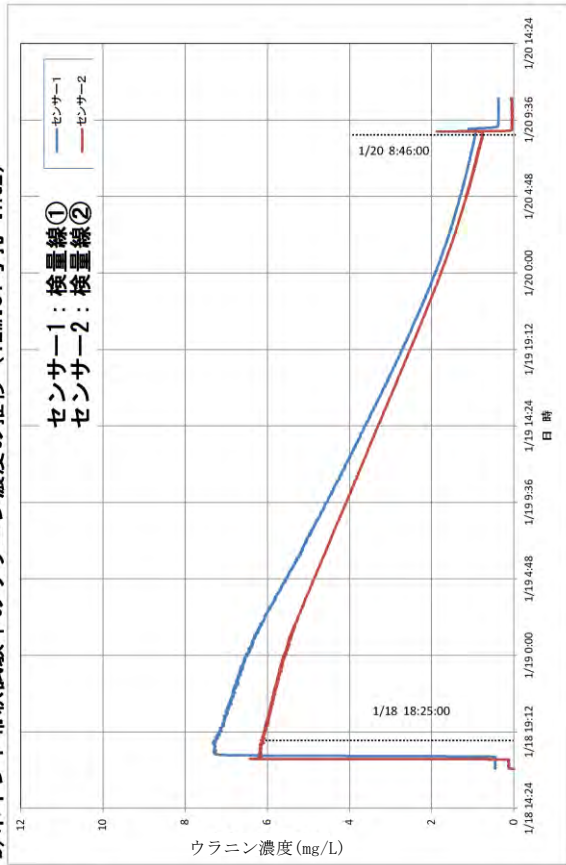


図 7.3.4-5 ポイント希釈試験結果 (12MI30 号孔 Int3)

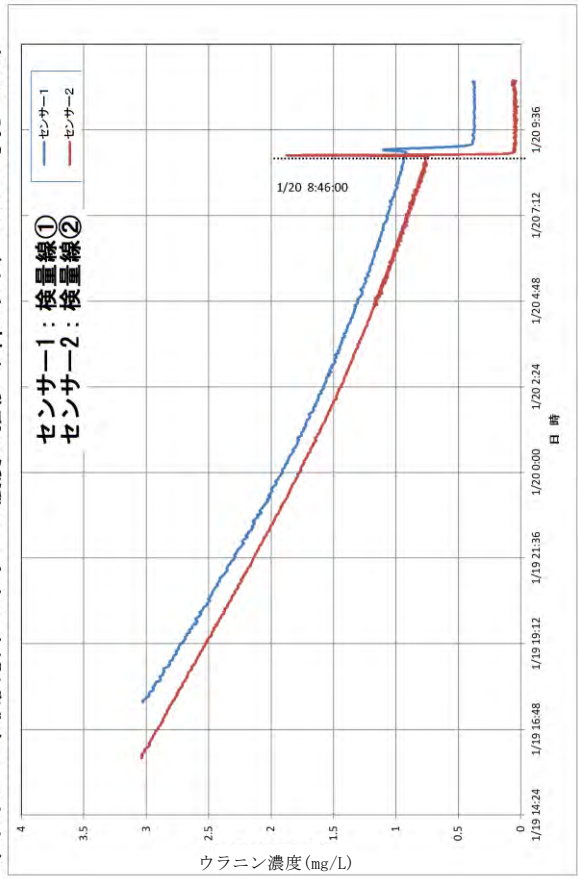
a) ポイント希釈試験中の蛍光強度の推移 (12MI31号孔 Int2)



b) ポイント希釈試験中のウラン濃度の推移 (12MI31号孔 Int2)



c) ポイント希釈試験中のウラン濃度の推移 (3ppm以下, 12MI31号孔 Int2)



d) ポイント希釈試験中のウラン濃度の推移 (3ppm以下, 対数グラフ 12MI31号孔 Int2)

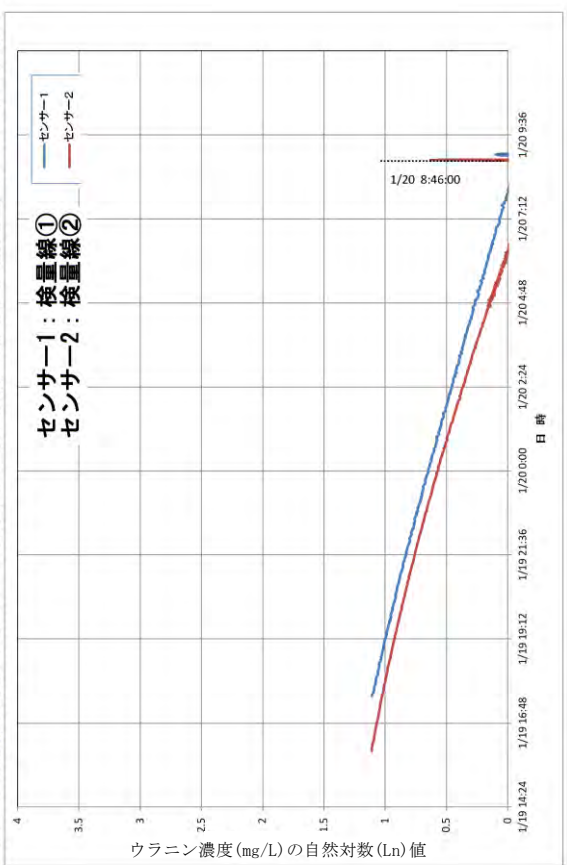
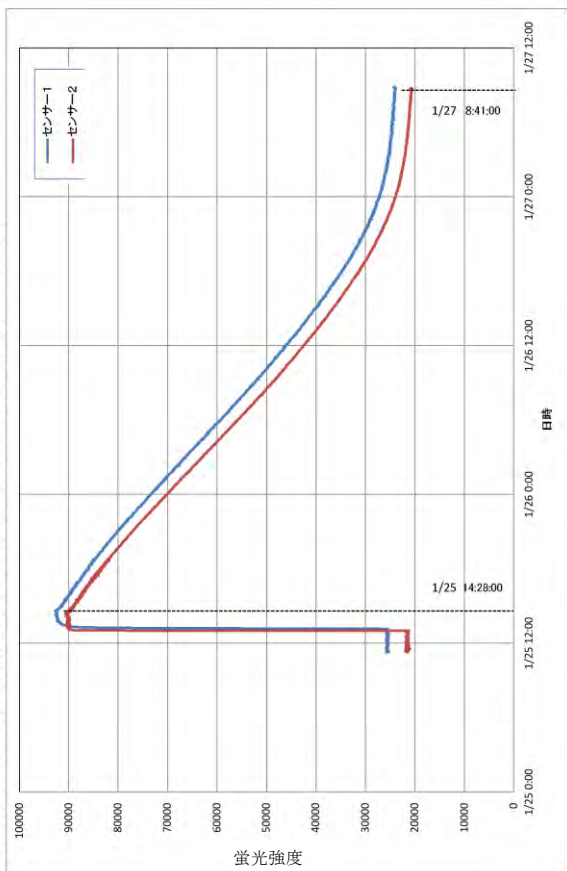
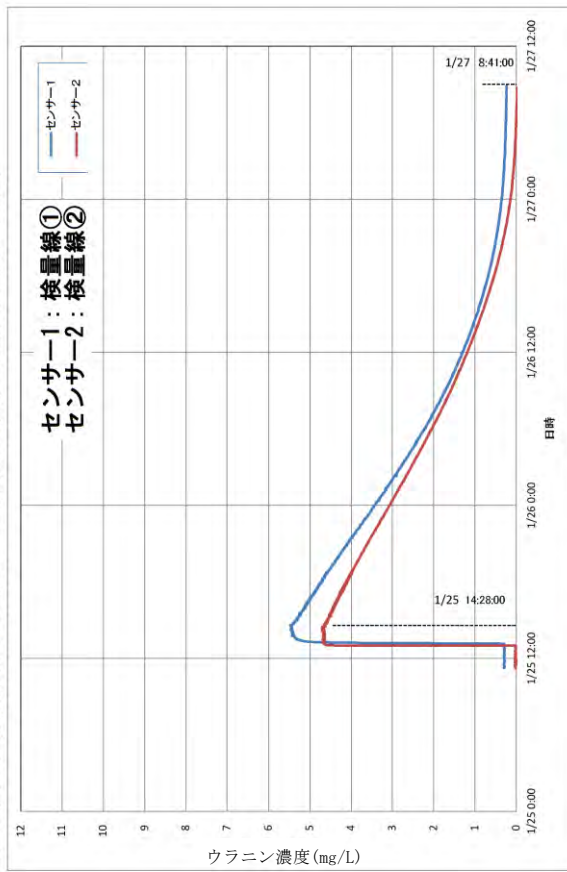


図 7.3.4-6 ポイント希釈試験結果 (12MI31号孔 Int2)

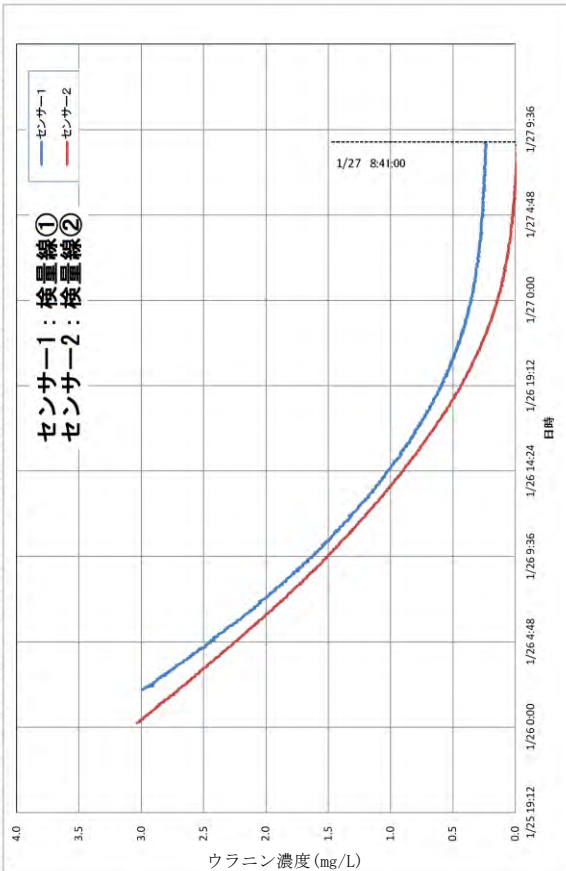
a) ポイント希釈試験中の蛍光強度の推移 (12MI31号孔 Int3)



b) ポイント希釈試験中のウラン濃度の推移 (12MI31号孔 Int3)



c) ポイント希釈試験中のウラン濃度の推移 (3ppm以下, 12MI31号孔 Int3)



d) ポイント希釈試験中のウラン濃度の推移 (3ppm以下, 対数グラフ 12MI31号孔 Int3)

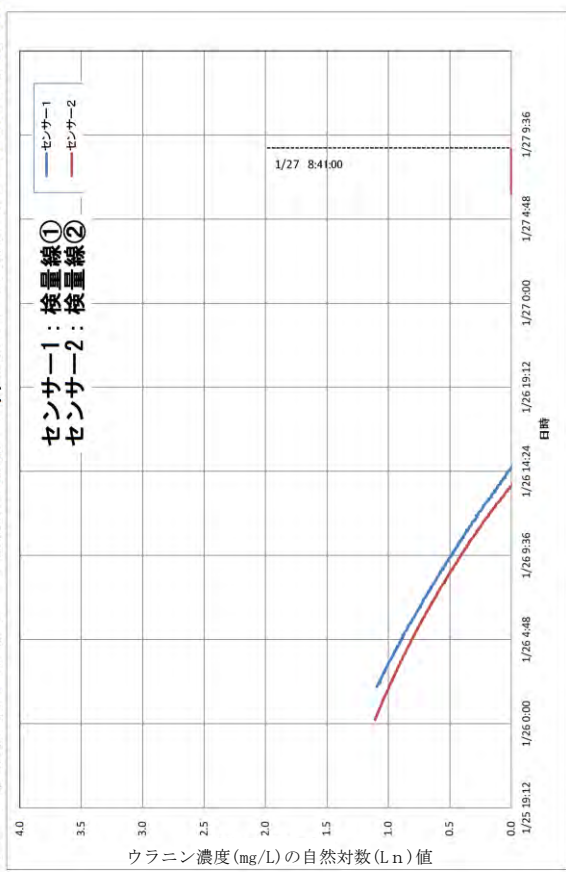
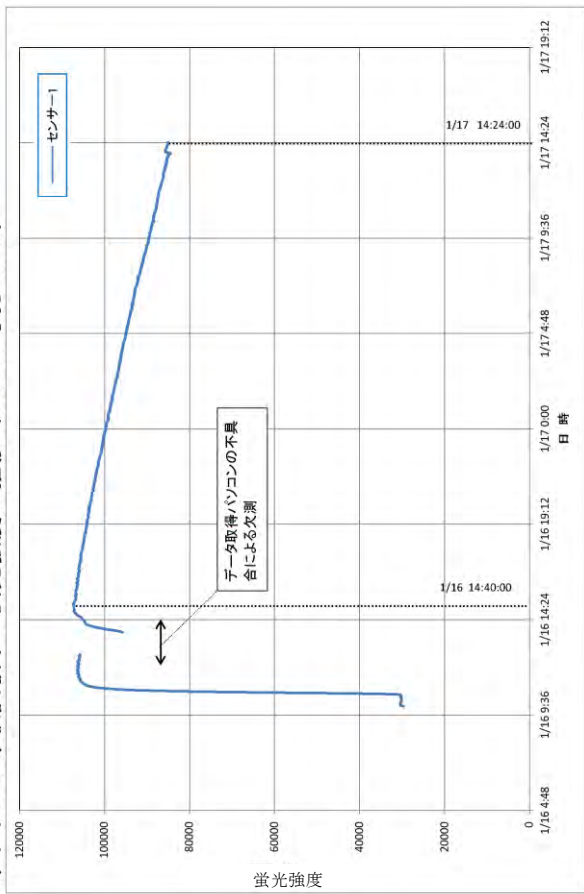
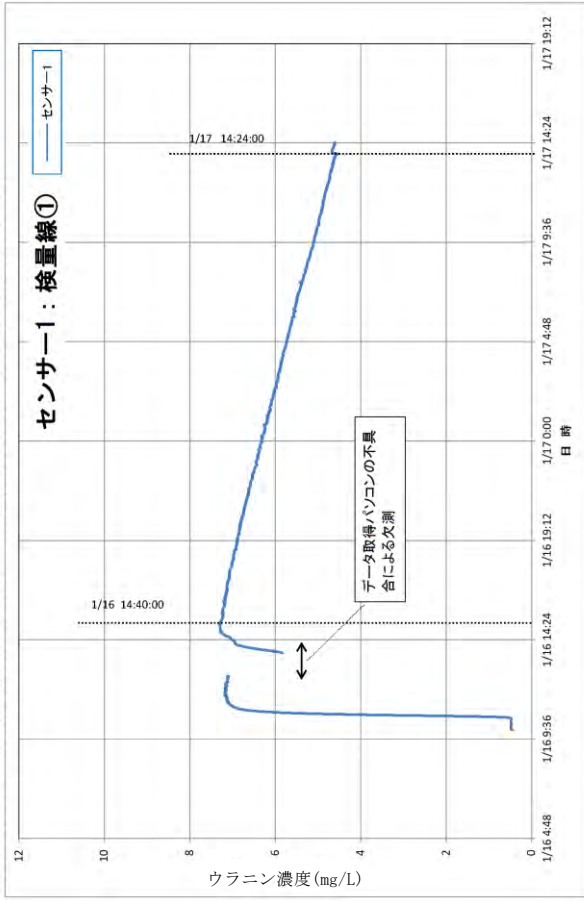


図 7.3.4-7 ポイント希釈試験結果 (12MI31号孔 Int3)

a) ポイント希釈試験中の蛍光強度の推移 (12MI31号孔 Int4)



b) ポイント希釈試験中のウラン濃度の推移 (12MI31号孔 Int4)



c) ポイント希釈試験中のウラン濃度の推移 (対数グラフ 12MI31号孔 Int4)

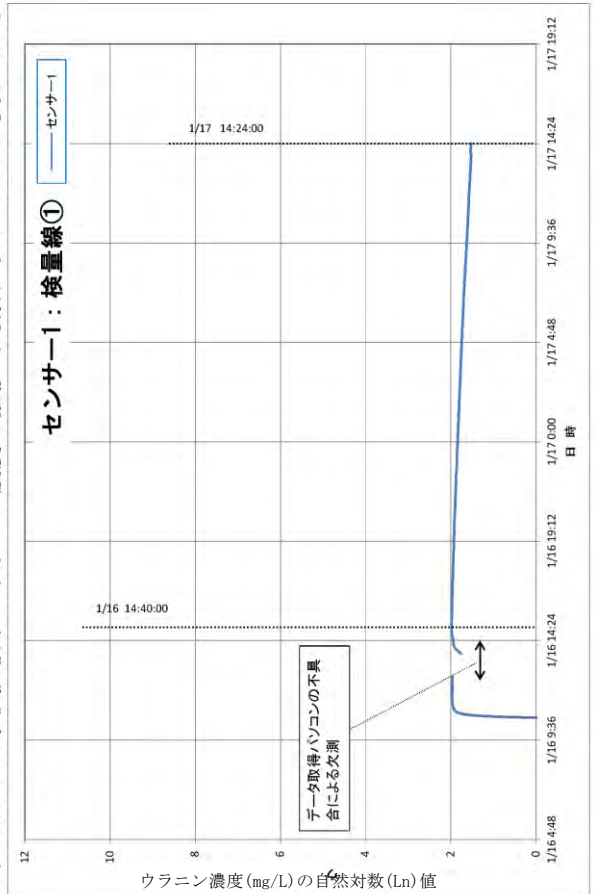
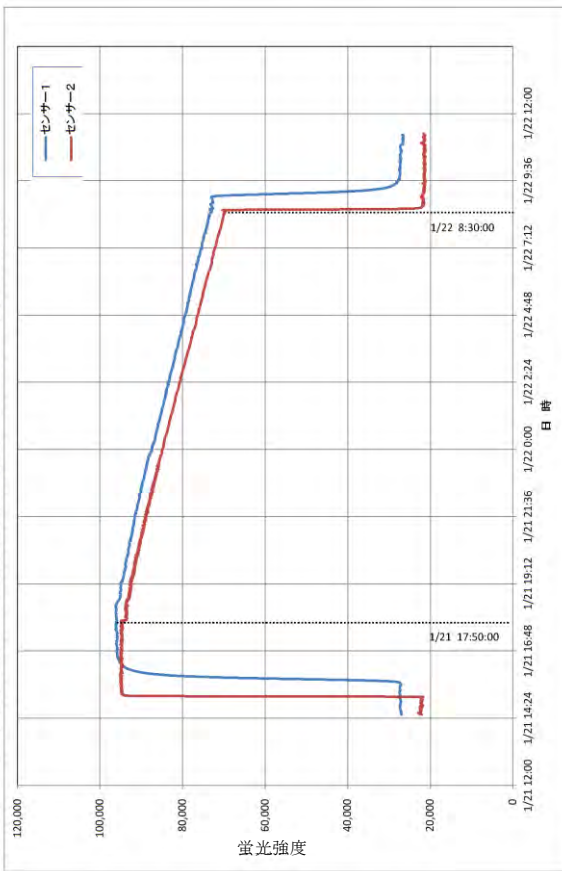
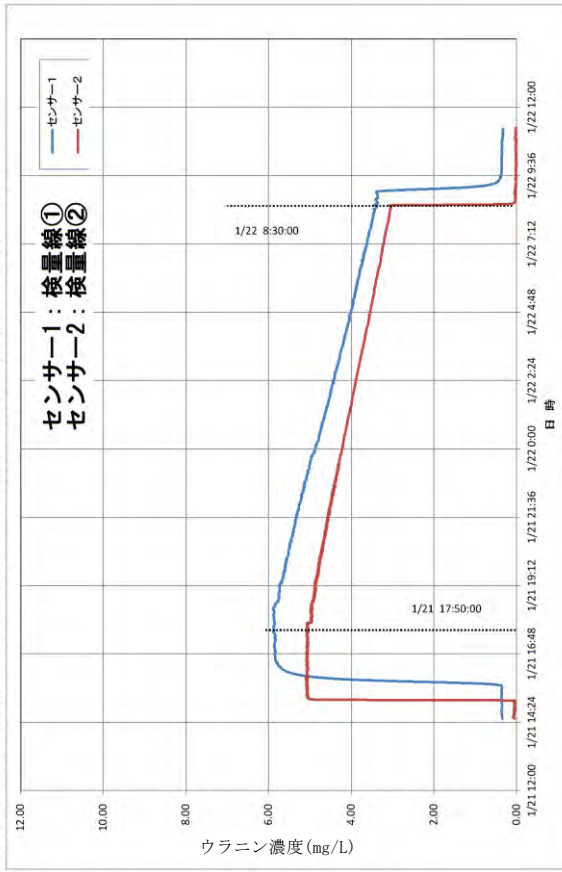


図 7.3.4-8 ポイント希釈試験結果 (12MI31 号孔 Int4)

a) ポイント希釈試験中の蛍光強度の推移 (12MI31号孔 Int5)



b) ポイント希釈試験中のウラン濃度の推移 (12MI31号孔 Int5)



c) ポイント希釈試験中のウラン濃度の推移 (対数グラフ 12MI31号孔 Int5)

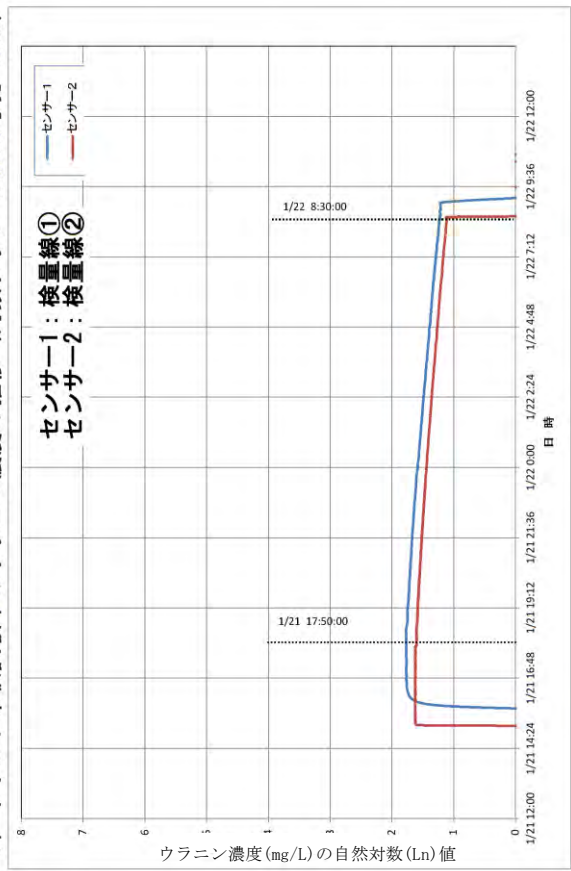
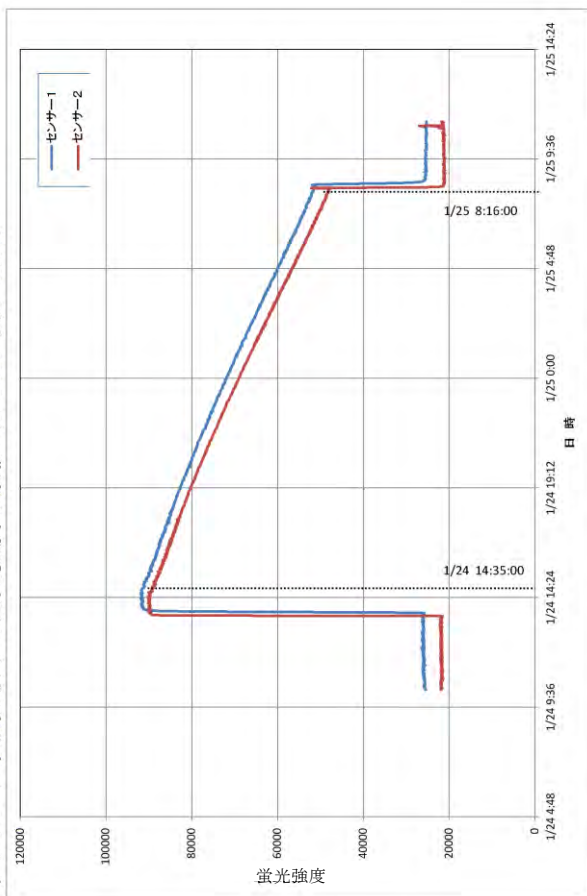
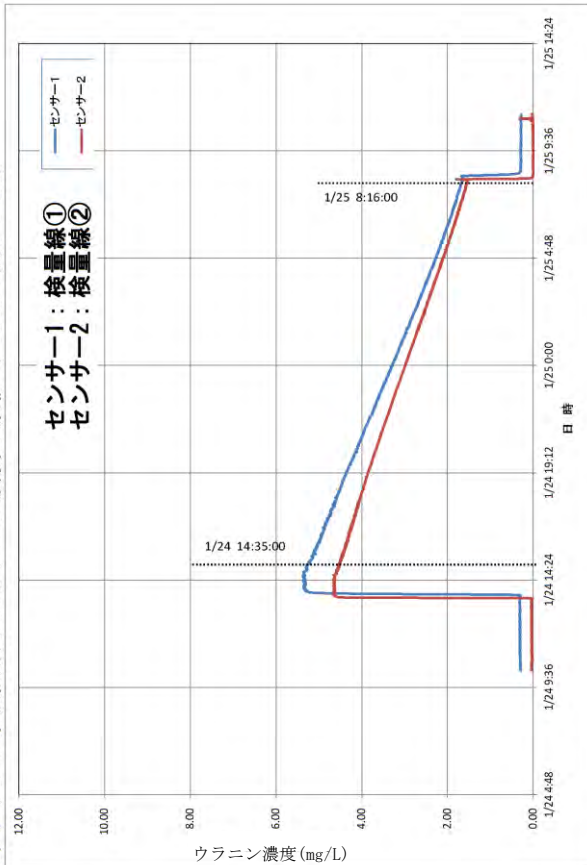


図 7.3.4-9 ポイント希釈試験結果 (12MI31号孔 Int5)

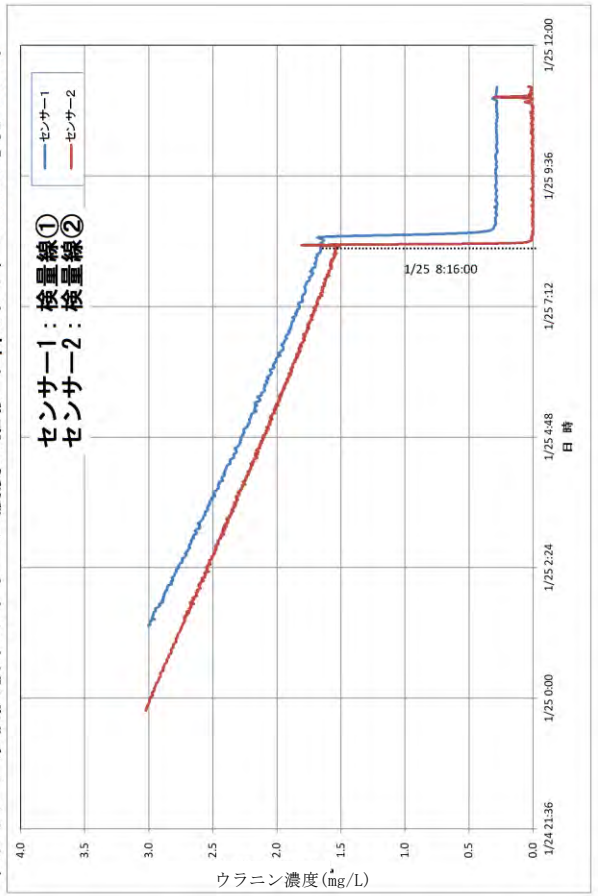
a) ポイント希釈試験中の蛍光強度の推移 (12MI31号孔 Int6)



b) ポイント希釈試験中のウラン濃度の推移 (12MI31号孔 Int6)



c) ポイント希釈試験中のウラン濃度の推移 (3ppm以下, 12MI31号孔 Int6)



d) ポイント希釈試験中のウラン濃度の推移 (3ppm以下, 対数グラフ 12MI31号孔 Int6)

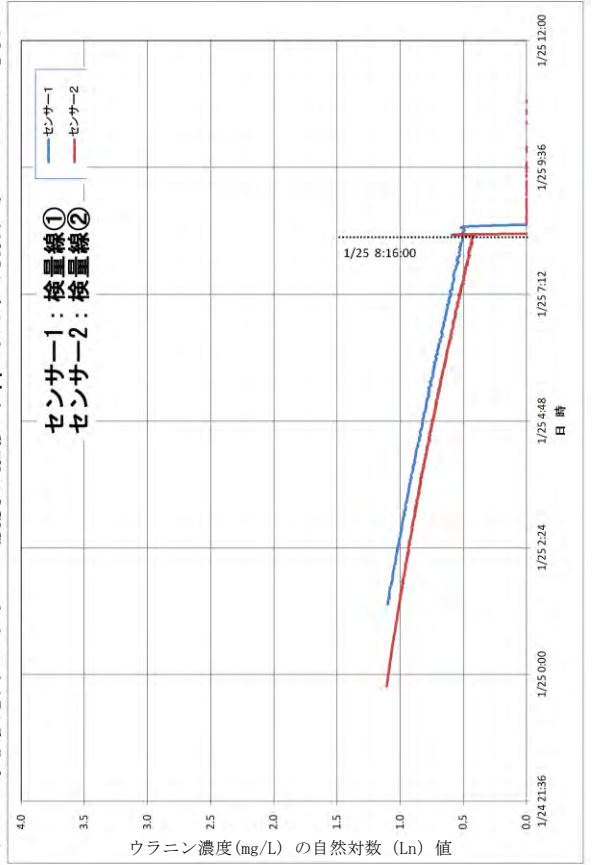
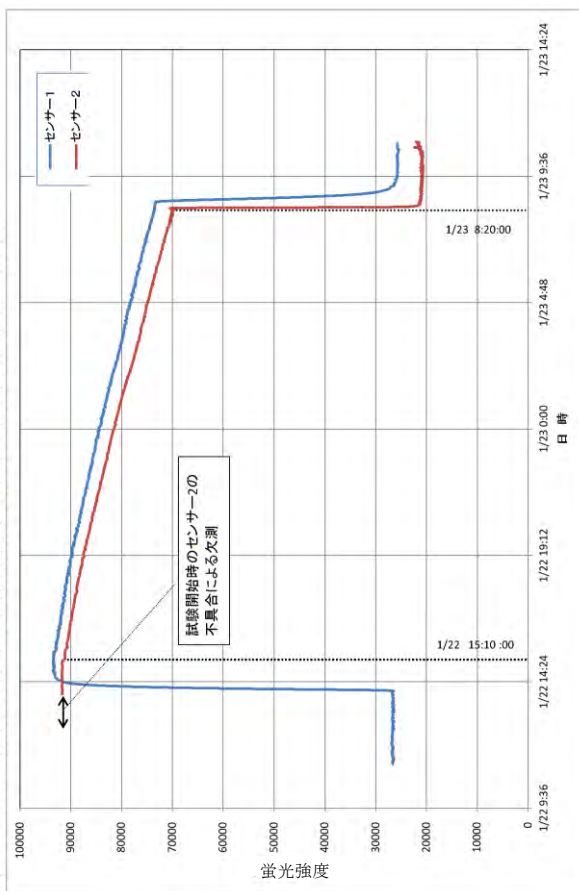
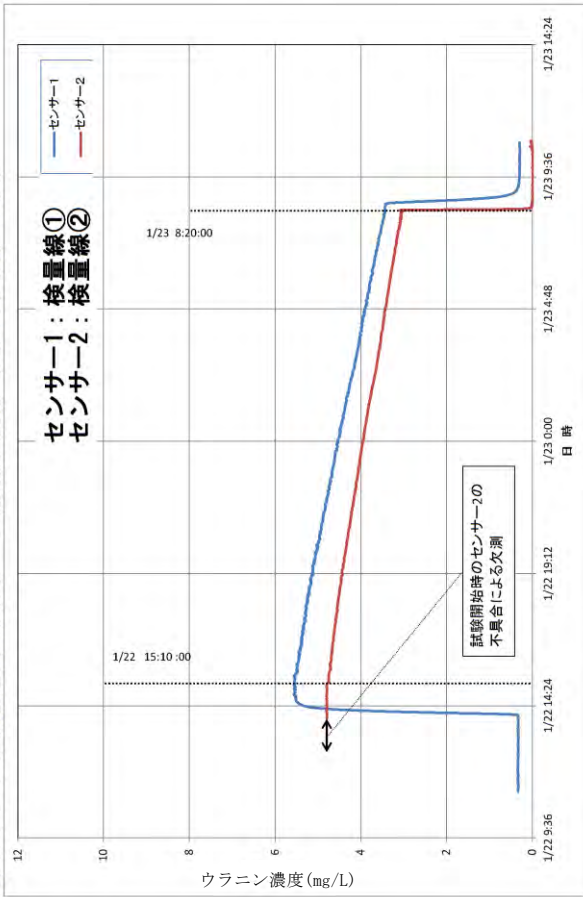


図 7.3.4-10 ポイント希釈試験結果 (12MI31号孔 Int6)

a) ポイント希釈試験中の蛍光強度の推移 (12MI36号孔 Int4)



b) ポイント希釈試験中のウラン濃度の推移 (13MI36号孔 Int4)



c) ポイント希釈試験中のウラン濃度の推移 (対数グラフ 13MI36号孔 Int4)

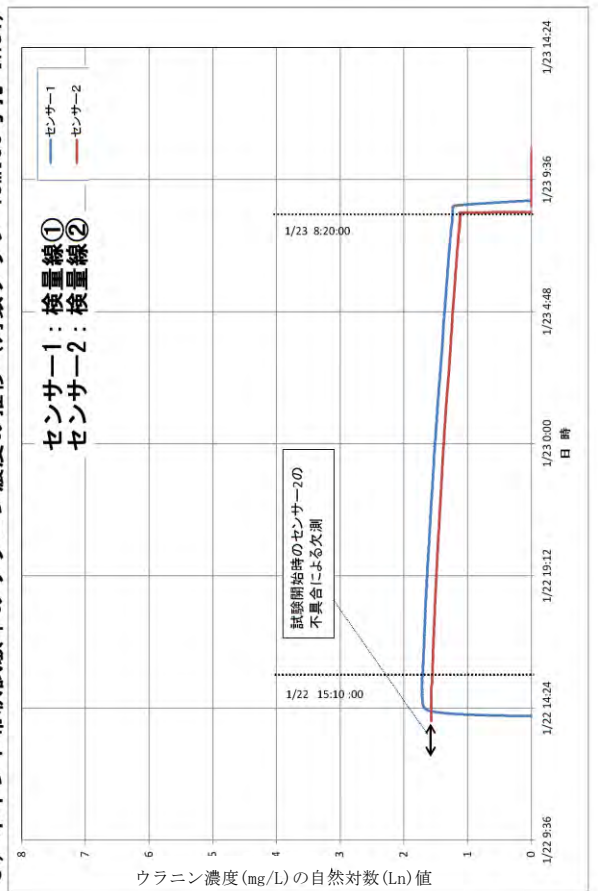
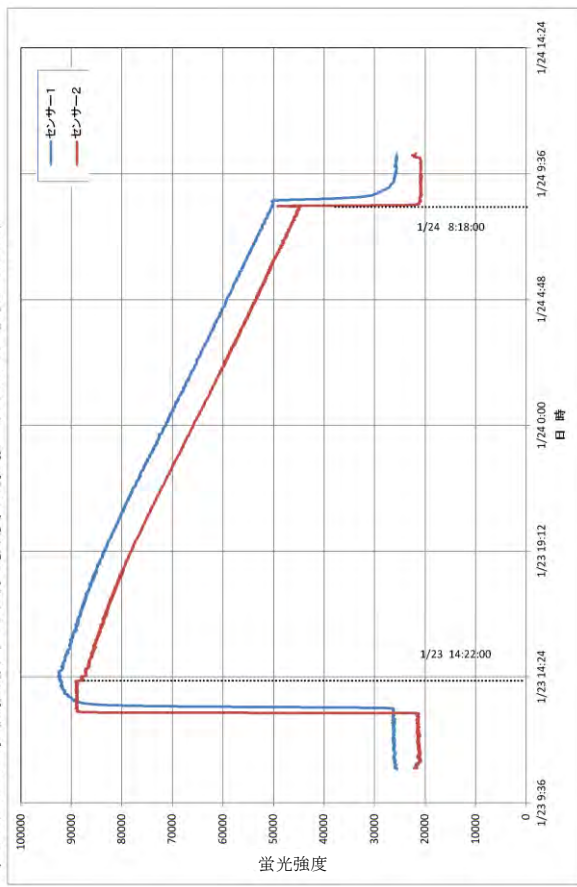
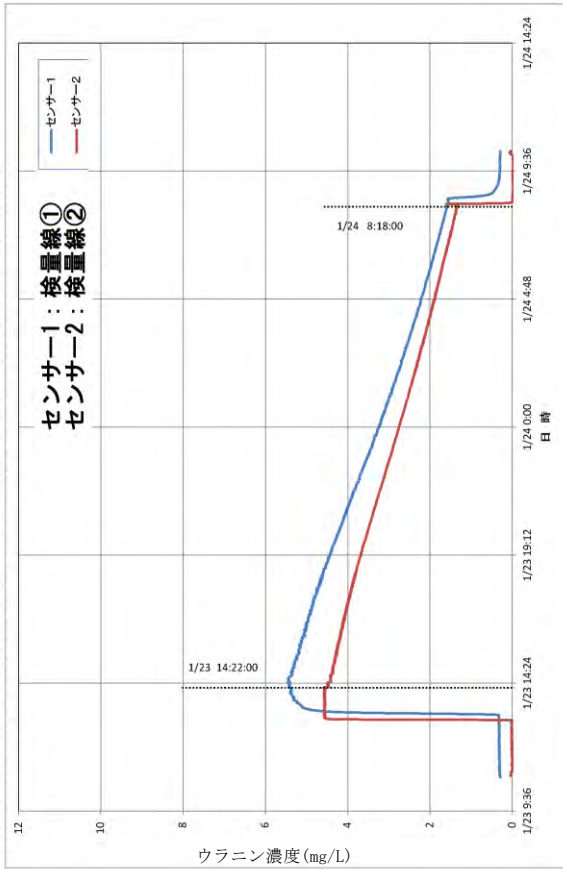


図 7.3.4-11 ポイント希釈試験結果 (13MI36号孔 Int4)

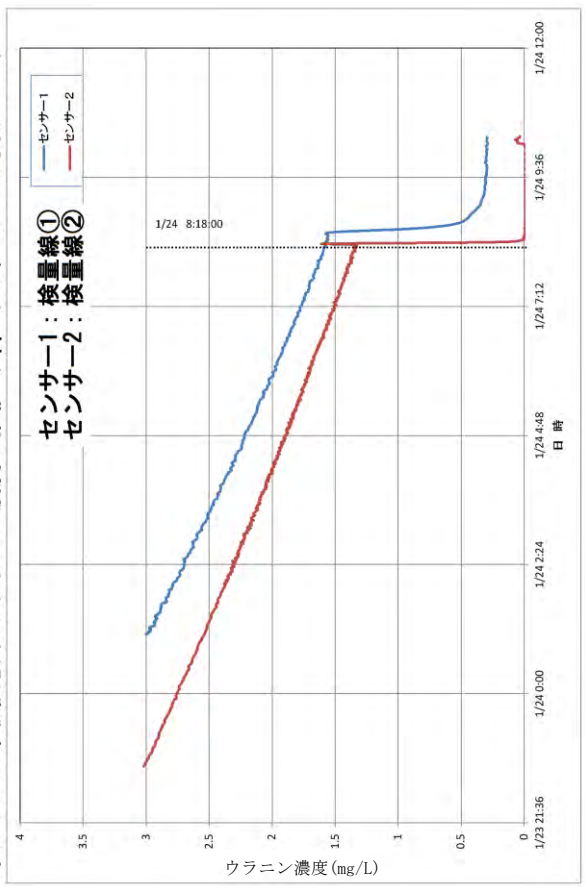
a) ポイント希釈試験中の蛍光強度の推移 (13MI36号孔 Int7)



b) ポイント希釈試験中のウラン濃度の推移 (13MI36号孔 Int7)



c) ポイント希釈試験中のウラン濃度の推移 (3ppm以下, 13MI36号孔 Int7)



d) ポイント希釈試験中のウラン濃度の推移 (3ppm以下, 対数グラフ 13MI36号孔 Int7)

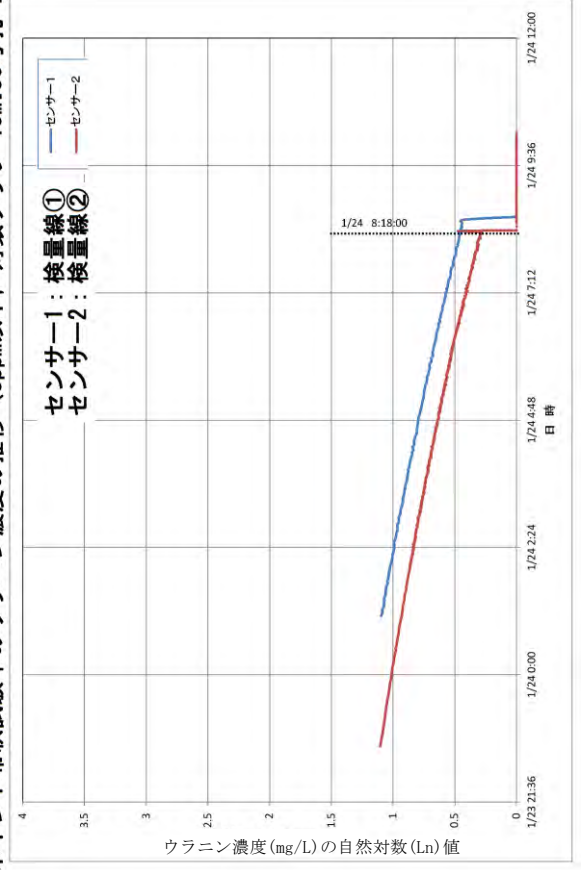


図 7.3.4-12 ポイント希釈試験結果 (13MI36号孔 Int7)

(2) ウラニン置換時間の検討

試験区間の容積、ウラニン溶液が循環する配管内流量、地下水流量の関係は本試験において重要な因子であることから、これらの関係を検討した。

試験区間の容積とウラニン溶液の循環流量の関係を表す指標として、観測区間+配管内の全容量のウラニン溶液の置換に要した時間（ウラニン置換時間）を求めた。

ウラニン置換時間（グラフ読取）は、蛍光強度およびウラニン濃度の突発的上昇から、一定値で安定し始めるまでの期間として整理した。その結果を表 7.3.4-3 に示す。また 2 台のセンサーのうち、センサー1 は観測区間の下流側に設置しており置換プロセスを示すことから、センサー1 でのウラニン置換時間を求めた。その結果、ウラニン置換時間には 8~80 分の開きがみられた。

また、ウラニン置換時間は、区間容量（観測区間+配管の全容量）と配管内の循環流量から推定できるため、容積からウラニン置換に要したと考えられる時間（ウラニン置換時間（容量））を算出した。このウラニン置換時間（容量）とウラニン置換時間（グラフ読取）の比較を図 7.3.4-13 に示す。この図において、12MI31 Int3 と 13MI36 Int7 の 2 区間は、ウラニン置換時間（容量）と比べウラニン置換時間（グラフ読取）の方が他の区間より置換時間を要したことがわかる。しかし、この 2 深度とほぼウラニン置換時間（容量）が同じ 12MI31 Int2（12MI31 Int3）と 13MI36 Int4（13MI36 Int7）は置換時間（容量）と置換時間（グラフ読取）がほぼ等しい位置にプロットされている。この差異が生じた要因は、置換時間（グラフ読取）と地下水流量の関係を示した図 7.3.4-14 から見出すことができる。この図からわかるように 12MI31 Int3 と 13MI36 Int7 は 12MI31 Int2 や 13MI36 Int4 に比べ地下水流量 Q_{bh} が大きい。このことから地下水流量の大小が置換時間に影響したと考えられる。なお、12MI31 Int5 は、地下水流量 Q_{bh} が大きくウラニンを設定濃度まで置換する前に試験を開始したため図 7.3.4-14 では区間内置換速度が 1 に近い位置にプロットされたと考える。

また、ピストンパッカーで形成した観測区間は、区間内置換速度が 1 を大きく超えていることから、トレーサを早く置換できることを証明した。

表 7.3.4-3 ウラニン置換時間、ウラニン濃度グラフの傾き

孔名	観測区間	区間容量 (mL)	置換時間 (グラフ読取) (min)	配管内 流量 (mL/min)	置換時間 (容量) (min)	区間内 置換速度	ウラニン濃度 Ln曲線 直線部傾き dLnC/dt
12MI30	Int2	1,690	13.33	85.83	19.69	1.48	-1.6963
	Int3	6,800	31.32	165.42	41.11	1.31	-0.3395
12MI31	Int2	1,730	8.53	97.29	17.78	2.08	-1.7161
	Int3	3,200	49.53	179.76	17.80	0.36	-1.9570
	Int4	4,600	54.25	83.38	55.17	1.02	-0.4879
	Int5	6,000	58.43	100.02	59.99	1.03	-1.0266
	Int6	1,820	10.60	99.45	18.30	1.73	-2.1739
13MI36	Int4	2,900	30.75	96.16	30.16	0.98	-0.8023
	Int7	2,500	76.70	96.19	25.99	0.34	-2.0327

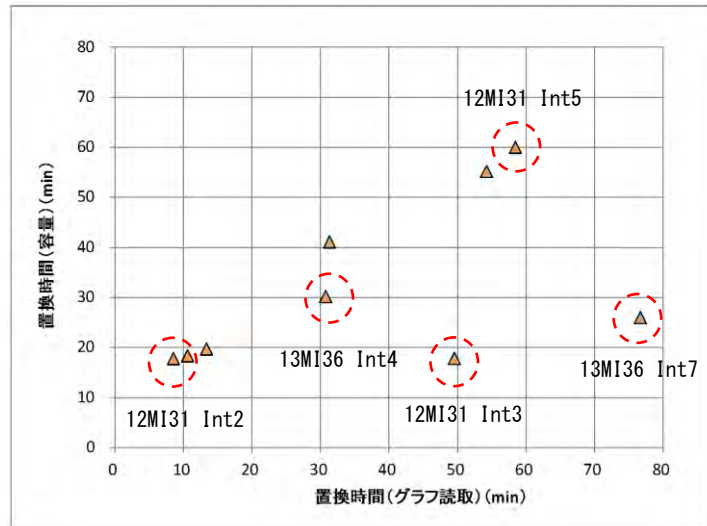


図 7.3.4-13 ウラニン置換時間（グラフ読取-容量）の比較

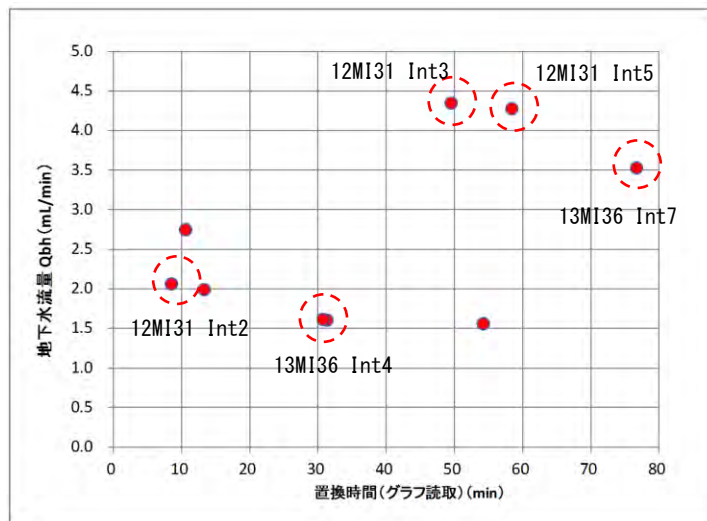


図 7.3.4-14 区間内置換速度と地下水流量の関係

(4) 試験条件の確認

ポイント希釈試験を9区間にわたって実施した2014年1月16日～1月27日における12MI30号孔、12MI31号孔、13MI36号孔と13MI37号孔の間隙水圧変化を図7.3.4-15～図7.3.4-18に示す。

いずれのポイント希釈試験期間においても、各々の試験実施区間で無脈動ポンプによる振動や配管内の圧力損失により、間隙水圧の微小な変動や圧力変化が確認できるが、試験終了時には水圧が試験開始時とほぼ同圧まで戻っている。また、他の試験区間における間隙水圧のレスポンス変化は確認されないことから、ポイント希釈試験中は試験区間内外への注排水なしでウラン溶液を循環できたと判断され、ポイント希釈試験の実施条件を満たしたことを確認できた。

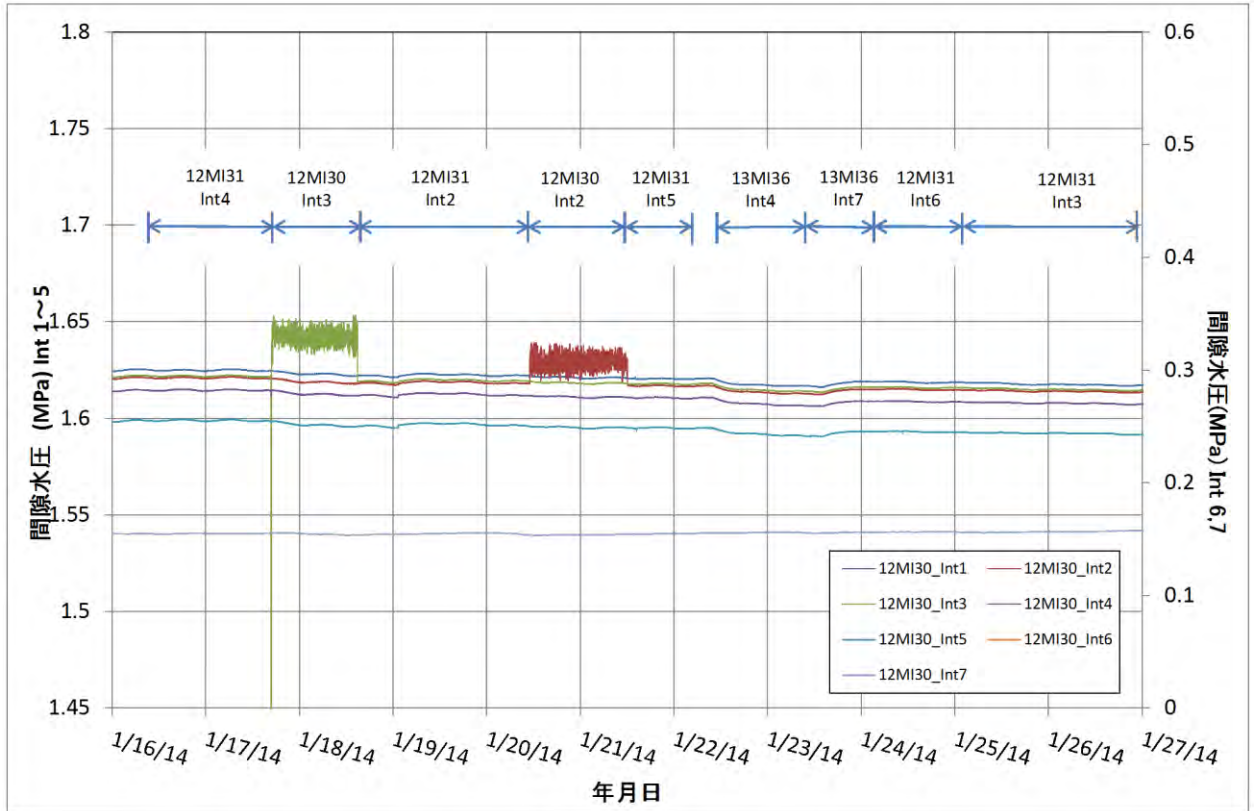


図 7.3.4-15 ポイント希釈試験中の 12MI30 号孔の間隙水圧変化

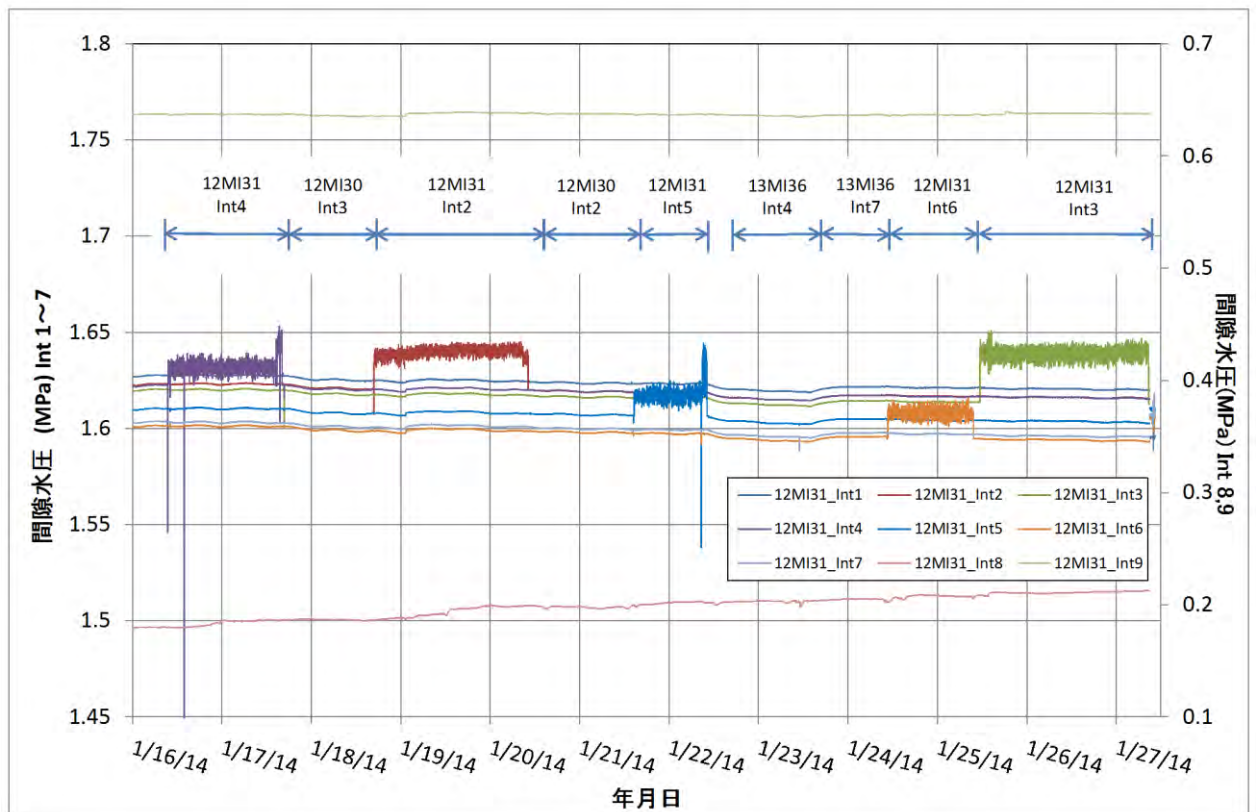


図 7.3.4-16 ポイント希釈試験中の 12MI31 号孔の間隙水圧変化

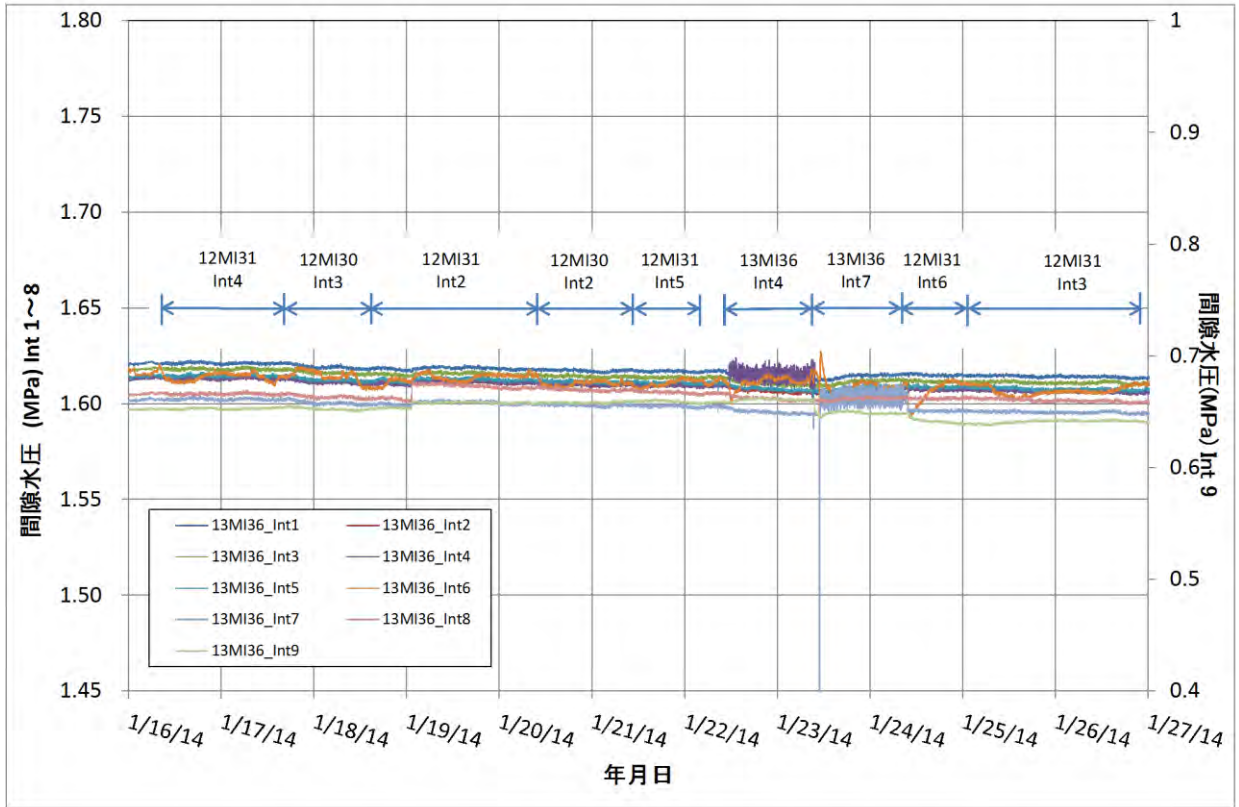


図 7.3.4-17 ポイント希釈試験中の 13MI36 号孔の間隙水圧変化

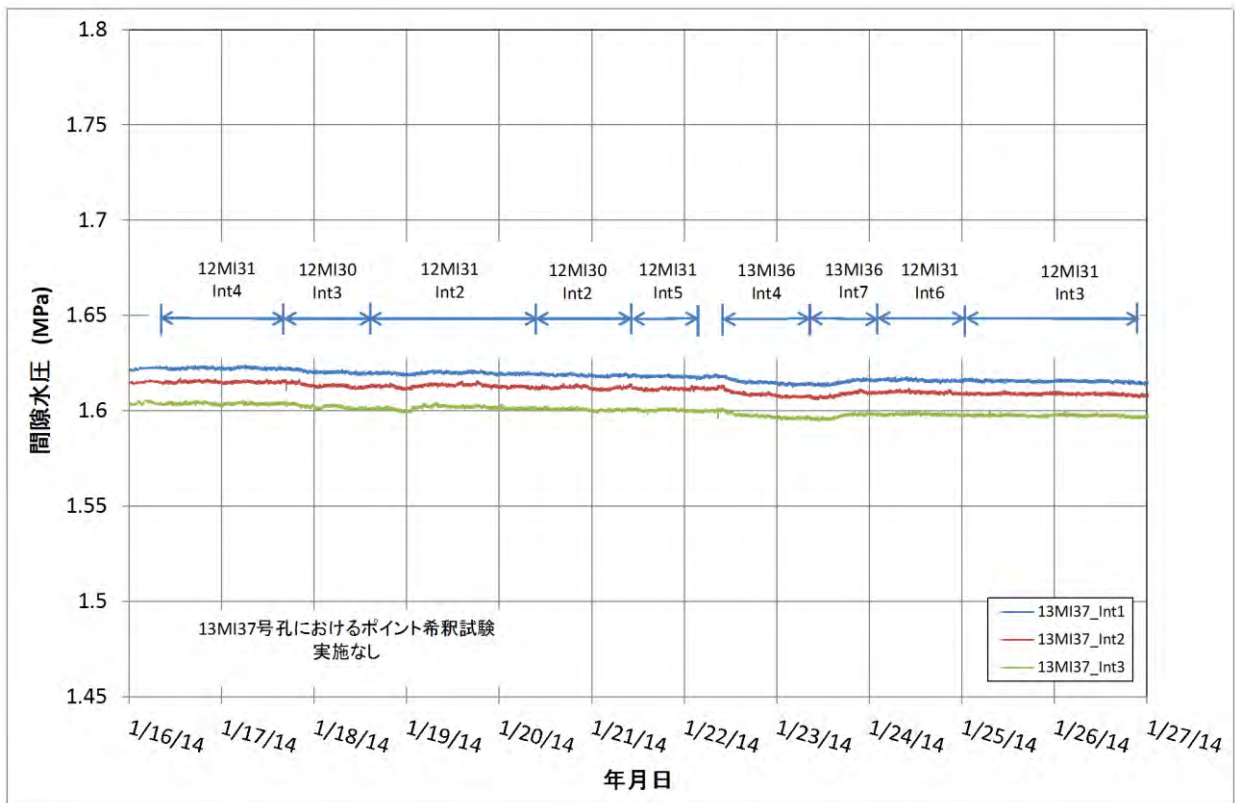


図 7.3.4-18 ポイント希釈試験中の 13MI37 号孔の間隙水圧変化

7.3.5 12MI30 号孔の透水試験結果

12MI30 号孔の透水試験は、10.67～19.07 mabh の間隙水圧モニタリング区間、Int5 を対象に実施した。

透水試験深度は、H24 年度の掘削時の水圧応答、フローメータ検層および BTV からの情報から 12MI31 号孔とのレスポンスに寄与した割れ目を推定し、以下の 3 深度で透水試験を実施することとした。

- ① 18.90mabh～19.50mabh
- ② 18.00mabh～18.60mabh
- ③ 16.00mabh～16.60mabh

本試験は、既設のモニタリング装置を用い、移動させながら区間を形成する計画であったが、モニタリング装置の移動中に装置が一時的に孔内に抑留するトラブルが発生した。このため、予定していた上記②、③の試験は実施できなかった。

(1) ①区間 (18.90mabh～19.50mabh) の透水試験結果

①区間は、12MI31 号孔の掘削レスポンスを受けた割れ目が交差すると考えられる 19.37mabh の割れ目を内包するように設定した。試験区間設定用のパッカー拡張後、間隙水圧の回復が遅いことから、パルス法によって透水量係数を求めた。

パルス試験時の試験区間 P2 の水頭差 31.59mH₂O に対してその上下区間 P3、P1 は、ともに圧力応答を受けなかった (図 7.3.5-1)。

パルス試験時の Hvorslev の解析結果を図 7.3.5-2 に、Cooper らの解析結果を図 7.3.5-3 に示す。Hvorslev の解析図より透水量係数 T を求めると $T=4.04E-11$ (m²/sec) となり、Cooper らの解析では、 $T=7.18E-11$ (m²/sec)、 $S=9.75E-09$ が得られた。Hvorslev の t-Log s 曲線から、下に凸状態の曲線となり、貯留性の有る地盤と判定できたことから、No.1 の試験区間における水理定数は、Cooper らの解析による、 $T=7.18E-11$ (m²/sec)、 $S=9.75E-09$ とした。

12MI31 号孔の水圧応答結果図を図 7.3.5-4 に 13MI36 号孔の水圧応答結果図を図 7.3.5-5 に示す。

①区間の透水性が低いこともあるが、両孔の観測区間全てにおいて 12MI30 号孔からの水圧応答は得られなかった。よって、19.37mabh の割れ目は、調査領域において水理的連続性の小さいことが判明した。

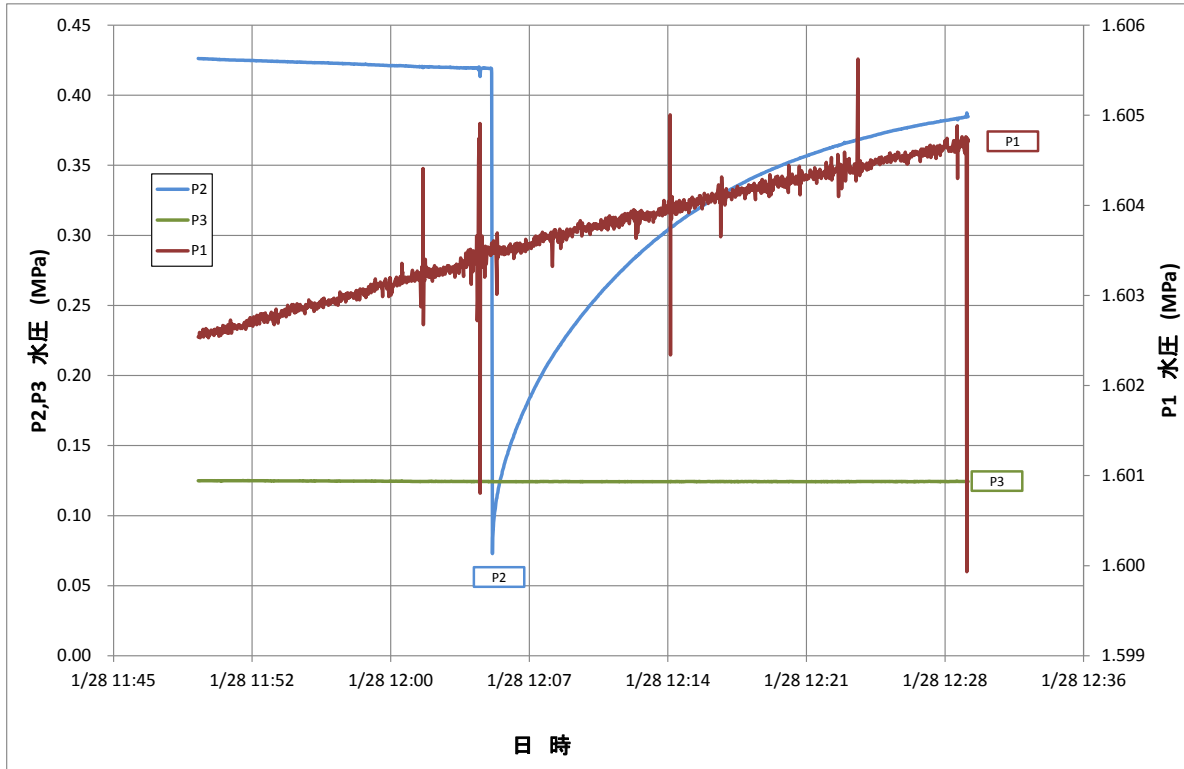


図 7.3.5-1 12MI30 号孔①区間試験時における圧力変化

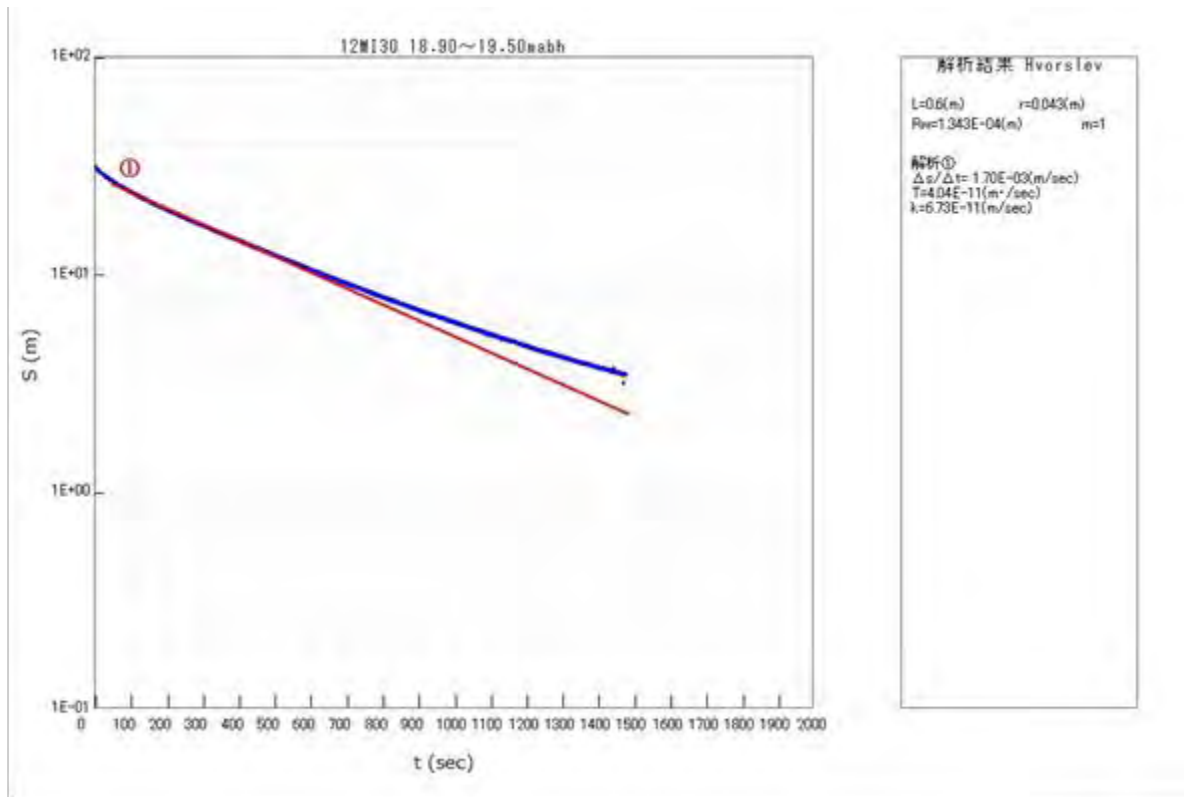


図 7.3.5-2 12MI30 号孔①区間の Hvorslev の t-Log s 曲線

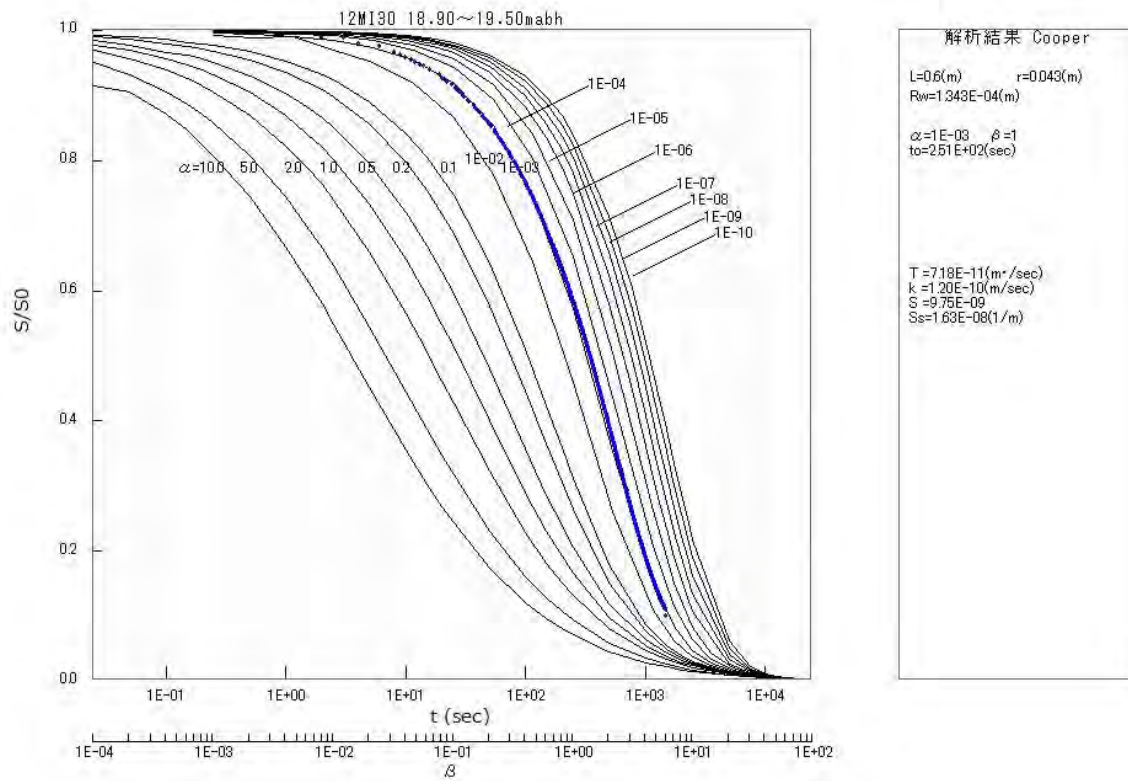


図 7.3.5-3 12MI30 号孔①区間の Cooper らの曲線一致法

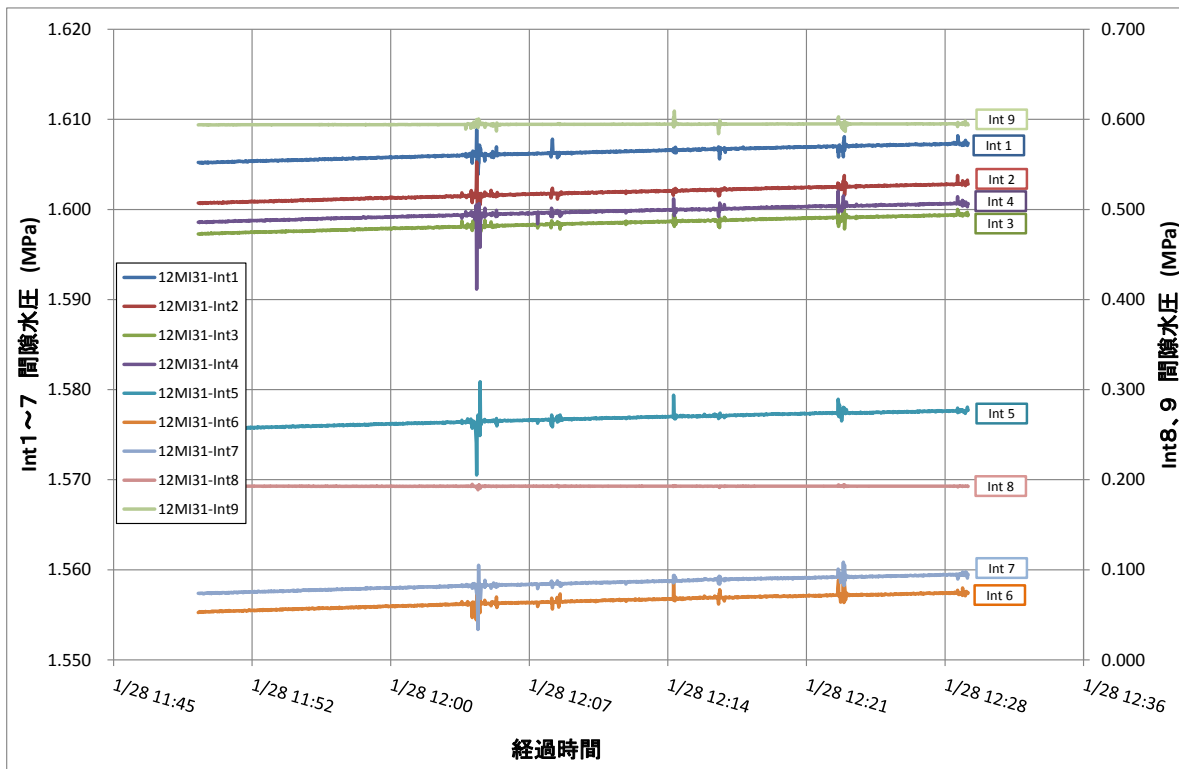


図 7.3.5-4 12MI30 号孔①区間パルス試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図の結果

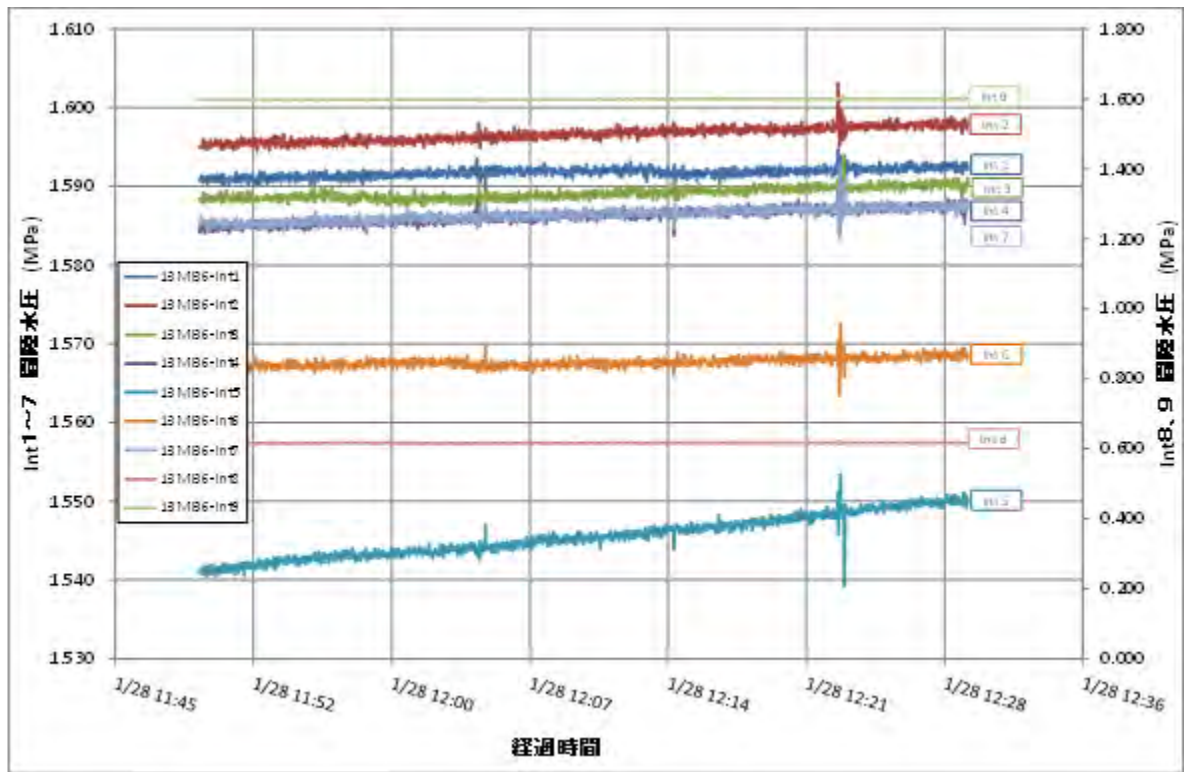


図 7.3.5-5 12MI30 号孔①区間パルス試験時の 13MI36 号孔の水圧応答結果図の結果

7.3.6 高精度孔曲り検層結果

高精度孔曲がり検層は、既存ボーリング孔の 12MI30 号孔、12MI31 号孔と新規掘削した 2 孔のうちの 13MI36 号孔の計 3 孔で計測した。

検層には、ロール角制度： $\pm 0.1^\circ$ 、傾斜角精度： $\pm 0.1^\circ$ 、計測精度 1/400～1/500 と高精度な村田式ジャイロ孔曲り計測機を用いた。計測風景を図 7.3.6-1 に示し、ジャイロの測定長の概念図とジャイロの軸線の概念を図 7.3.6-2 に示す。

ジャイロ孔曲り計測は、孔口のケーシング上端を計測開始の 0 点としているが、ジャイロのプロープ 1.5m の中心を計測ポイントと仮定して、孔口ケーシングの先端から 0.75m を解析の開始点とした。約 1m 毎に求めた方位角と傾斜角を基にしたボーリングの孔跡をボーリング孔毎に図 7.3.6-3～図 7.3.6-5 に示した。今回実施した高精度孔曲り検層結果は、ボーリング掘削時に約 5m 間隔で計測した孔曲り検層結果（表 7.3.2-3 (p.7-77)、表 7.3.3-3(p.7-124)）とは異なり、大きな孔曲りがないことが確認された。



図 7.3.6-1 村田式ジャイロ計測風景

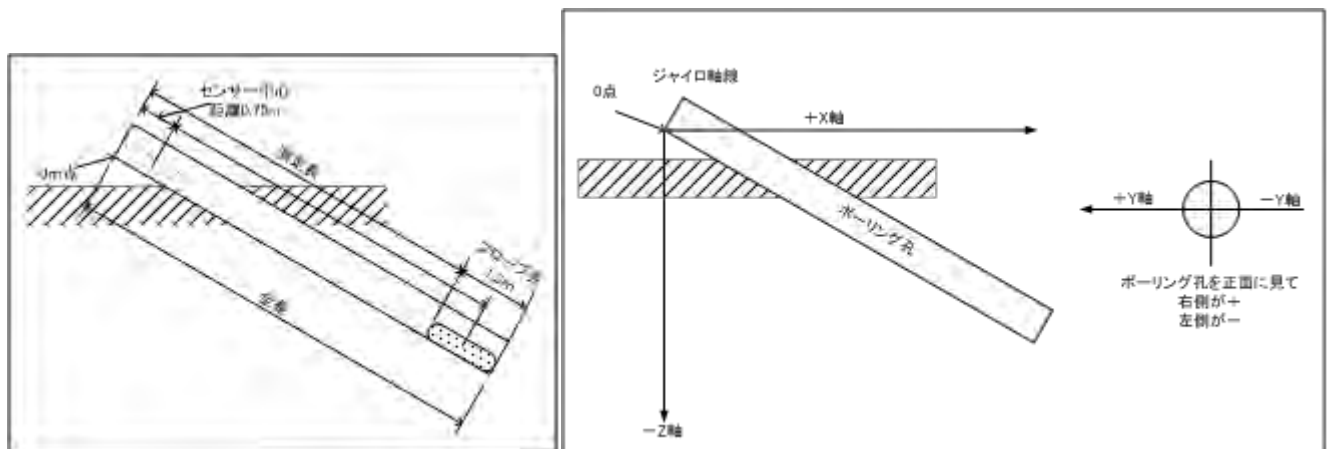


図 7.3.6-2 ジャイロの測定長および軸線の概念図

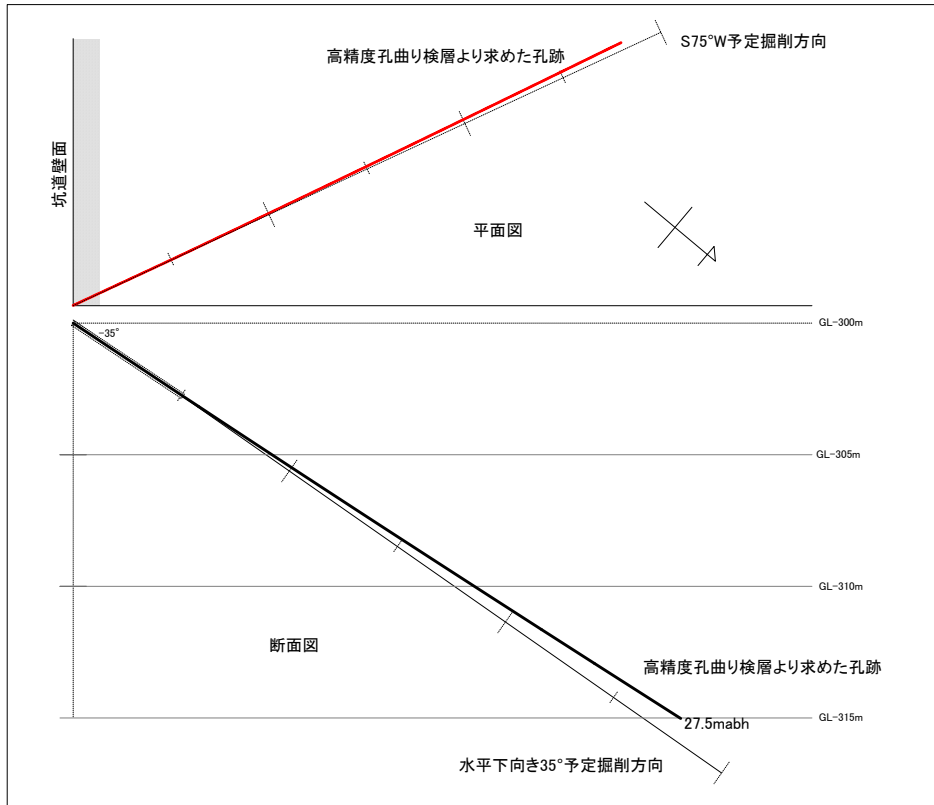


図 7.3.6-3 12MI30 号孔のボーリング孔跡図

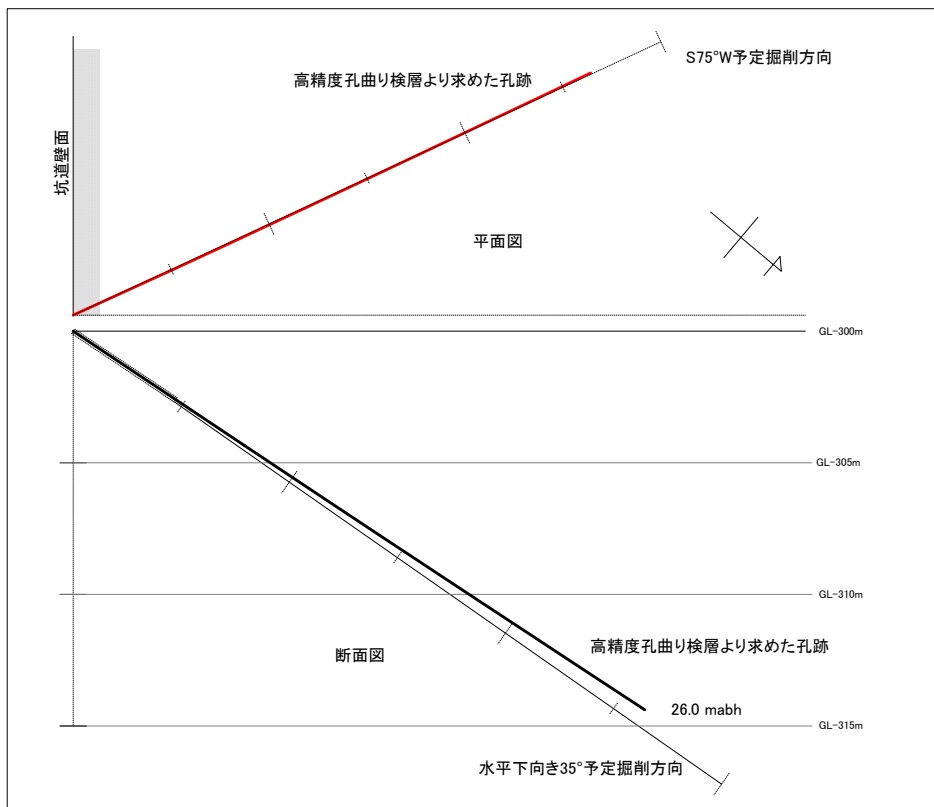


図 7.3.6-4 12MI31 号孔のボーリング孔跡図

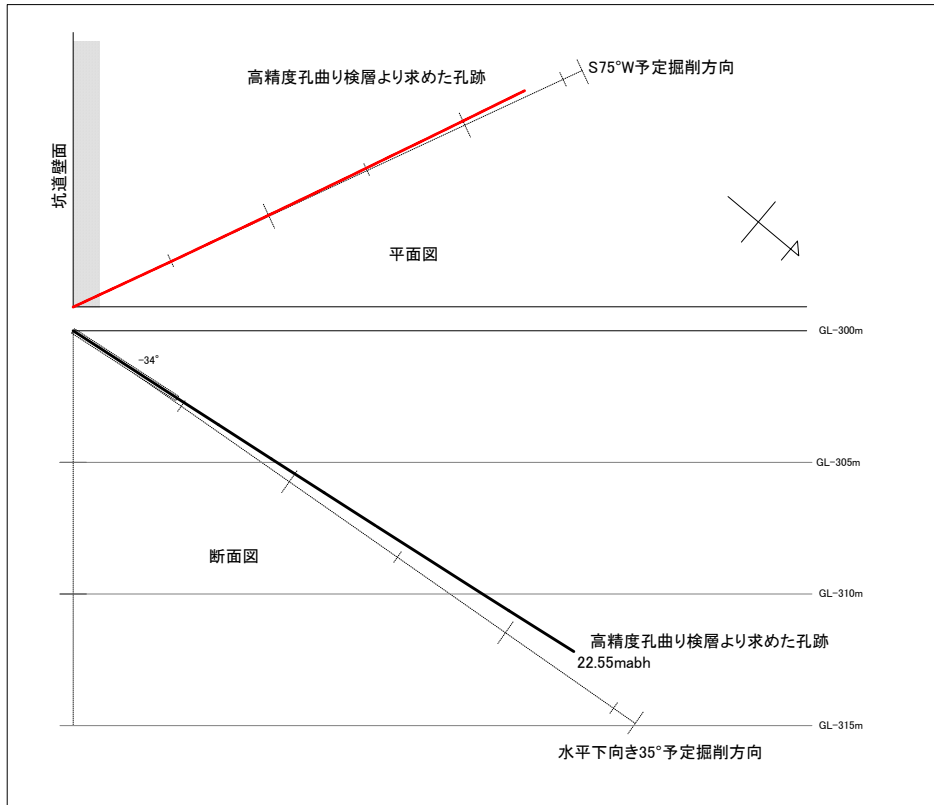


図 7.3.6-5 13MI36 号孔のボーリング孔跡図

7.3.7 音響トモグラフィ検層結果

7.3.7.1 座標変換による計測孔のねじれ補正

使用した計測孔間(12M30号孔, 12M31号孔, 13M36号孔)は互いに3次的にねじれの位置にあり、孔跡も曲がっている。本業務では2次元での解析を行うため発振点、受信点を2次元平面に落とす必要がある。例として図7.3.7-1に12M30号孔(発振孔)と12M31号孔(受信孔)の孔跡を示すが、孔跡の座標とXY平面との距離が最も小さくなるように、(1)から(4)の手順で回転、反転、平行移動した。

- (1)受信孔(青色)がYZ平面と平行になるように、Z軸を中心に左回りに140.13度回転させた(図7.3.7-2)。なお回転量は受信孔とXZ平面の距離が最小となるように決定した。
- (2)受信孔(青色)がY軸と平行になるように、X軸を中心に左回りに29.00度回転させた(図7.3.7-3)。なお回転量は受信孔とY軸との距離が最小となるように決定した。
- (3)発振孔(赤色)とXY平面の距離が最小になるように、Y軸を中心に右回りに9.78度回転させた(図7.3.7-4)。なお回転量は発振孔とXY平面の距離が最小となるように決定した。
- (4)発振孔の最深部のX座標が0となるように、Y軸を対象軸として反転した後、X軸方向に2.8235m平行移動した(図7.3.7-5)。

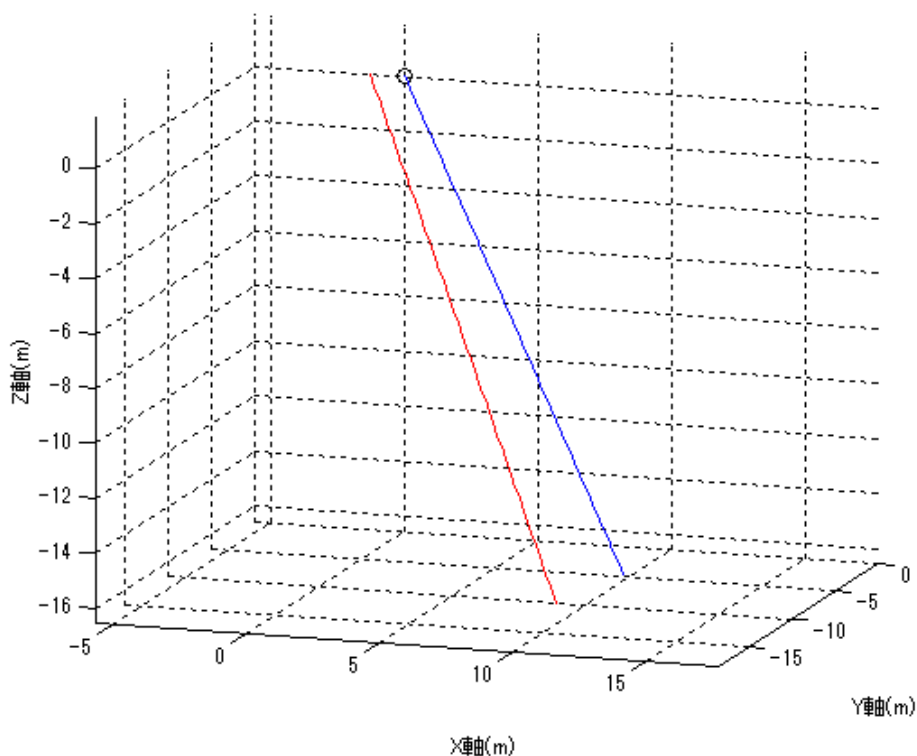


図 7.3.7-1 発振孔(12M30孔、赤線)と受信孔(12M31孔、青線)とXY平面(太線)の関係

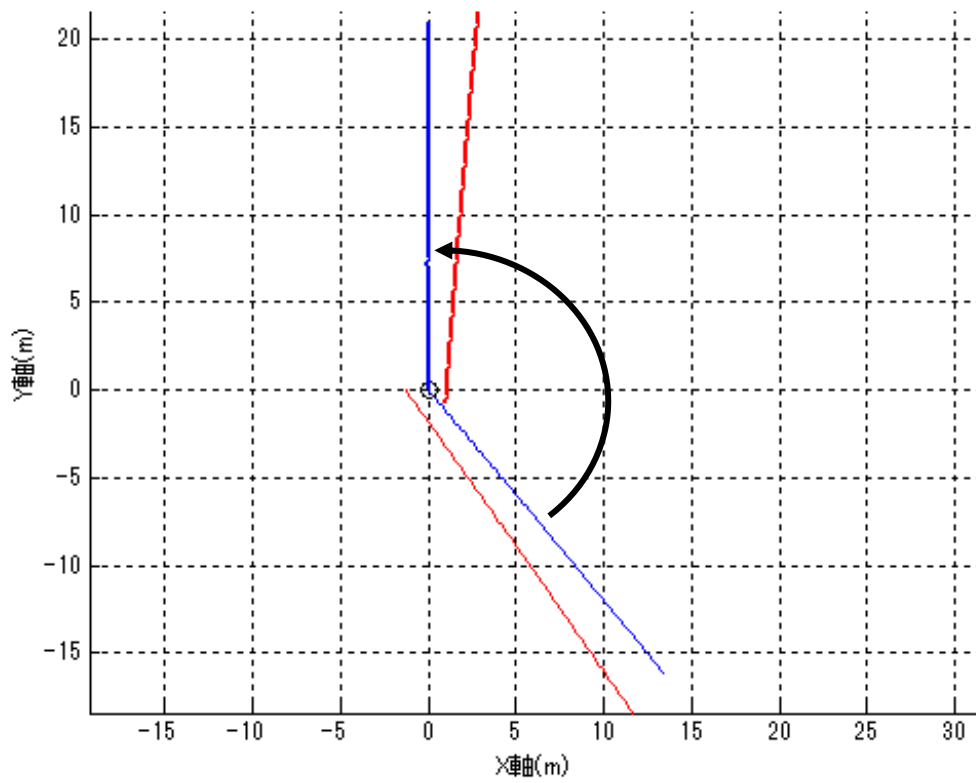


図 7.3.7-2 発振点と受振点の補正, (1)Z 軸を中心に 140.13 度左回転

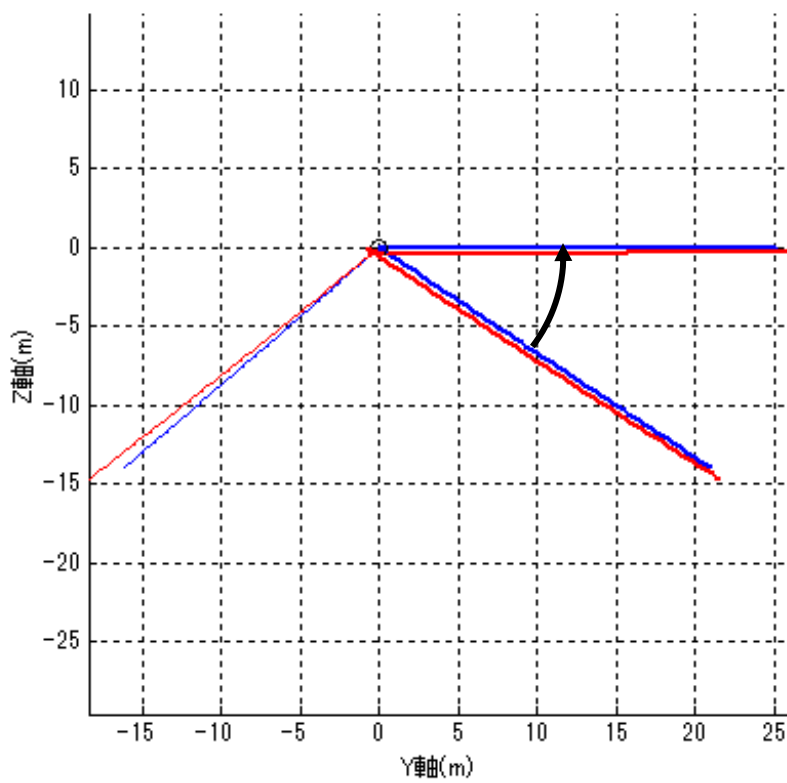


図 7.3.7-3 発振点と受信点の補正, (2)X 軸を中心に 29.00 度左回転

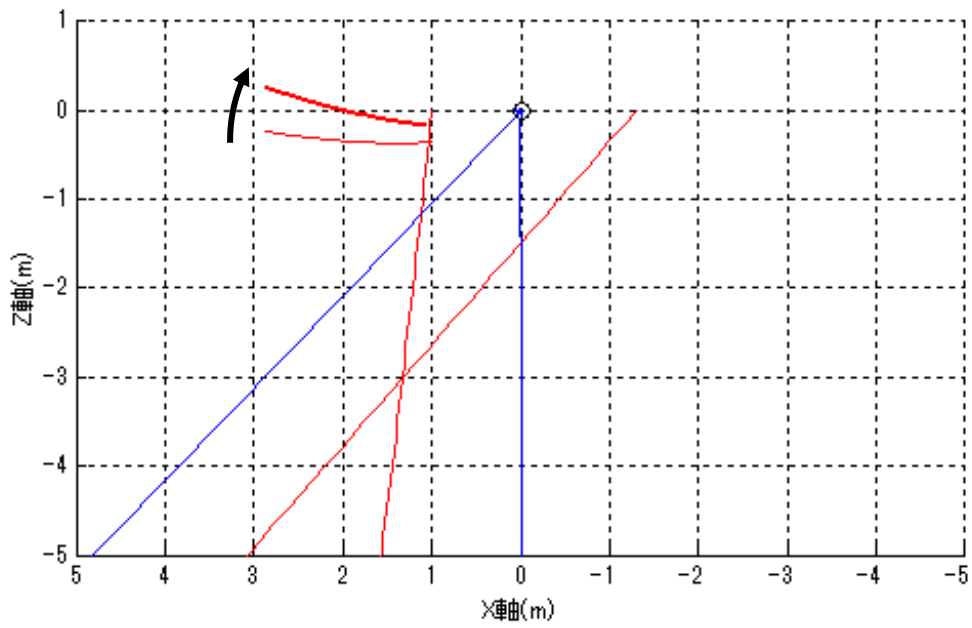


図 7.3.7-4 発振点と受信点の補正、(3)Y 軸を中心に 9.78 度右回転

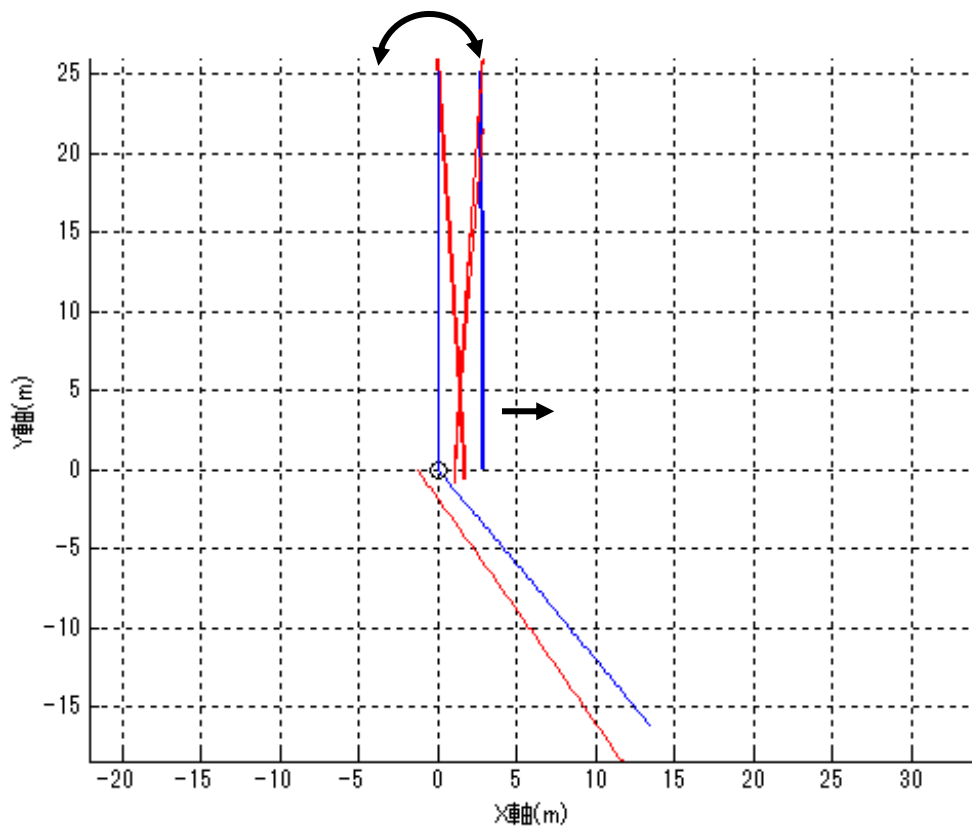


図 7.3.7-5 発振点と受信点の補正、(4)Y 軸を対象軸として反転し、X 軸方向に 2.8235 m 平行移動

7.3.7.2 測定および解析結果

(1) 断面1の結果

12M30号孔-12M31号孔間を断面1、12M31号孔-13M36号孔間を断面2として測定および解析作業を行った。

発振周波数10kHz、20kHz、39kHzの受信波形の例を図7.3.7-6～図7.3.7-14に示す。ほぼ全ての深度において良好な波形が計測できていることが分る。縦軸は受信器深度(孔口からの距離)、横軸は時間を示している。

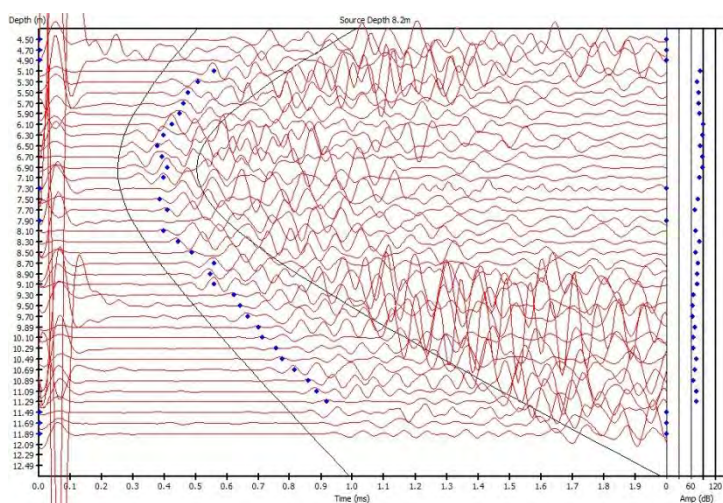


図 7.3.7-6 受信波形(孔口からの距離 8.00m、周波数 10kHz)

※ 縦軸は受信器深度(孔口からの距離)、横軸は時間

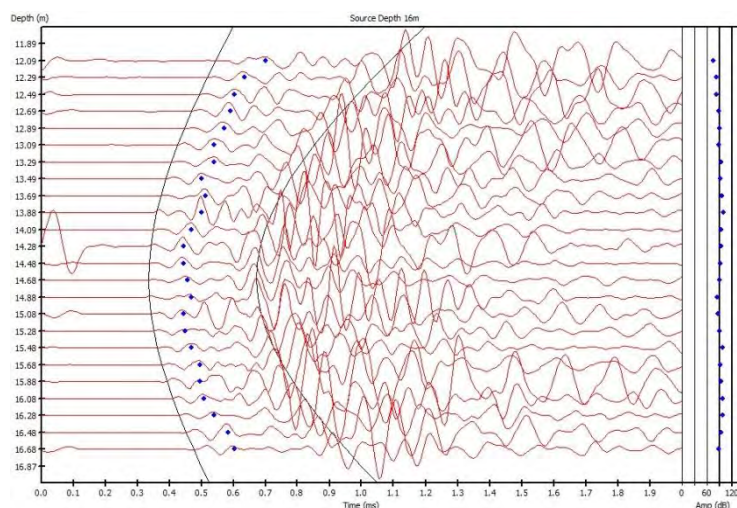


図 7.3.7-7 受信波形(孔口からの距離 16.00m、周波数 10kHz)

※ 縦軸は受信器深度(孔口からの距離)、横軸は時間

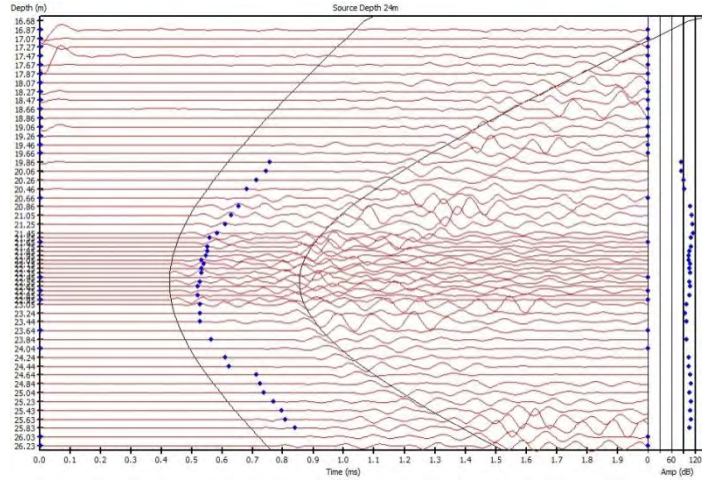


図 7.3.7-8 受信波形(孔口からの距離 24.00m、周波数 10kHz)

※ 縦軸は受信器深度(孔口からの距離)、横軸は時間

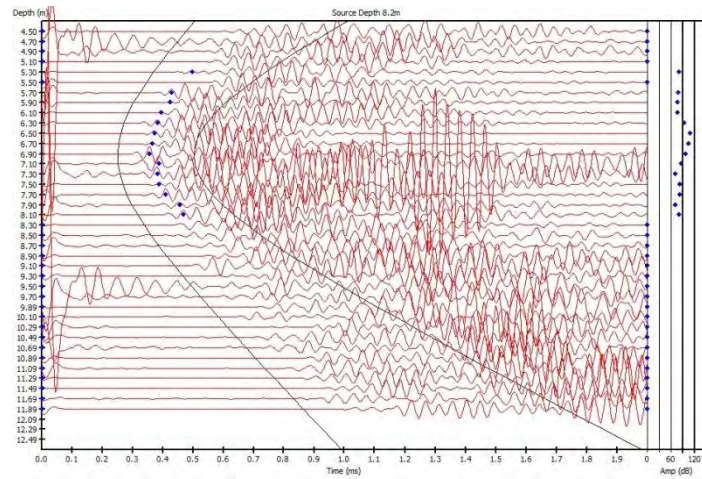


図 7.3.7-9 受信波形(孔口からの距離 8.00m、周波数 20kHz)

※ 縦軸は受信器深度(孔口からの距離)、横軸は時間

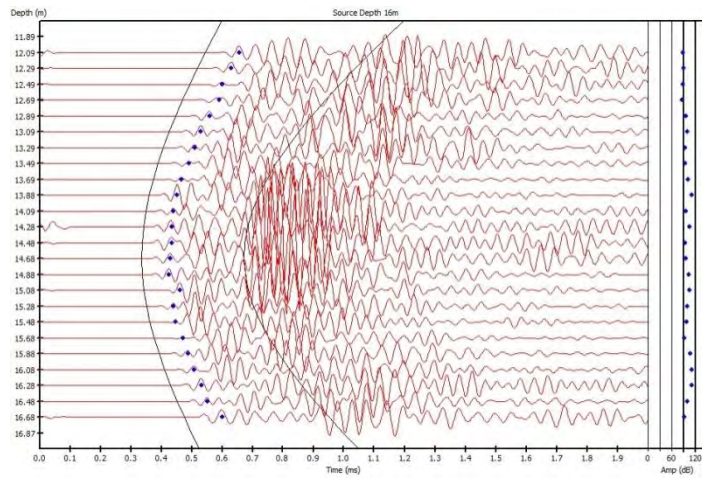


図 7.3.7-10 受信波形(孔口からの距離 16.00m、周波数 20kHz)

※ 縦軸は受信器深度(孔口からの距離)、横軸は時間

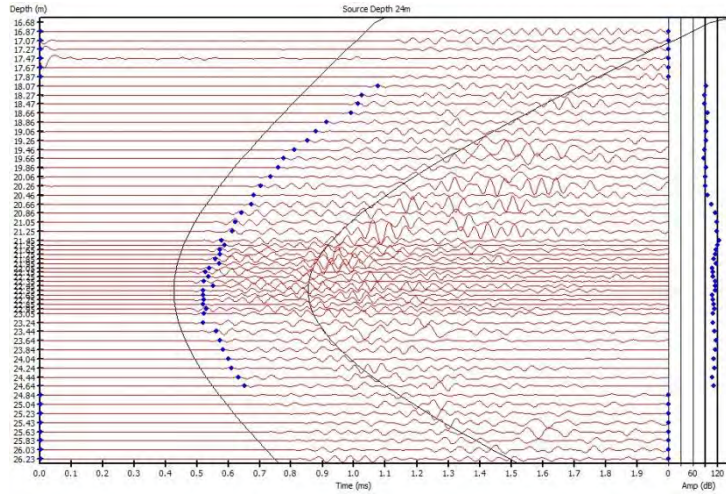


図 7.3.7-11 受信波形(孔口からの距離 24.00m、周波数 20kHz)

※ 縦軸は受信器深度(孔口からの距離)、横軸は時間

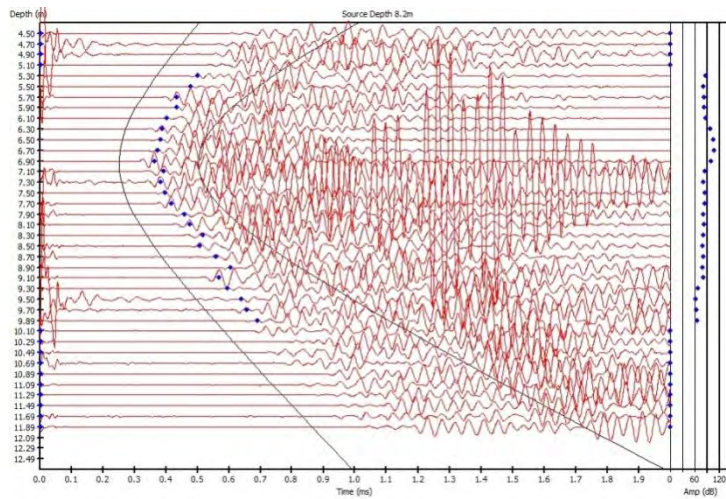


図 7.3.7-12 受信波形(孔口からの距離 8.00m、周波数 39kHz)

※ 縦軸は受信器深度(孔口からの距離)、横軸は時間

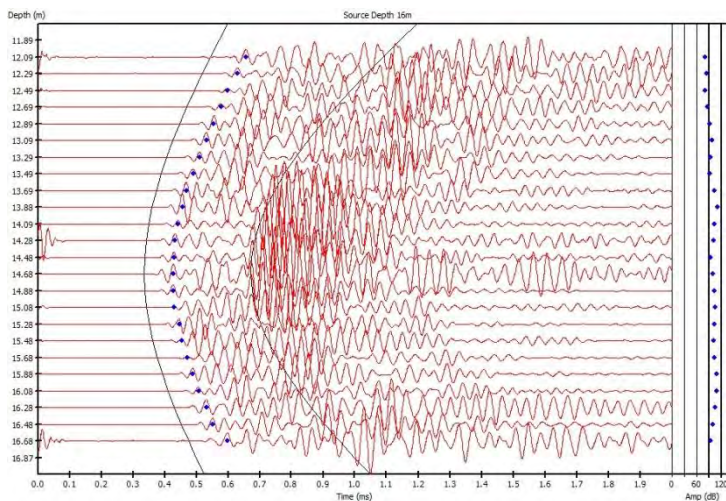


図 7.3.7-13 受信波形(孔口からの距離 16.00m、周波数 39kHz)

※ 縦軸は受信器深度(孔口からの距離)、横軸は時間

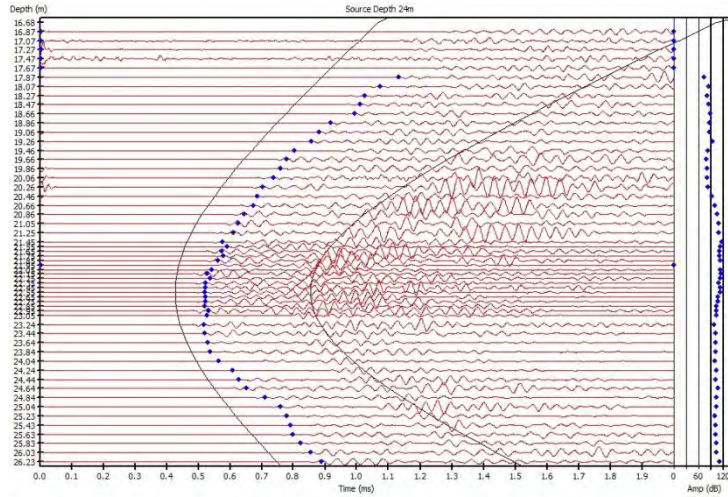


図 7.3.7-14 受信波形(孔口からの距離 24.00m、周波数 39kHz)

※ 縦軸は受信器深度(孔口からの距離)、横軸は時間

水平波線の読取り結果として、孔口からの距離毎の速度および振幅(距離減衰の影響を取除いた振幅)をまとめた。これを図 7.3.7-15～図 7.3.7-17 に示す。水平波線の読取り結果とは「同じ深度にある発振点と受信点の記録」をプロットしたものであり、孔内検層の記録と似ている。この結果と逆計算の結果を比較することで、計算の妥当性を検証することができる。

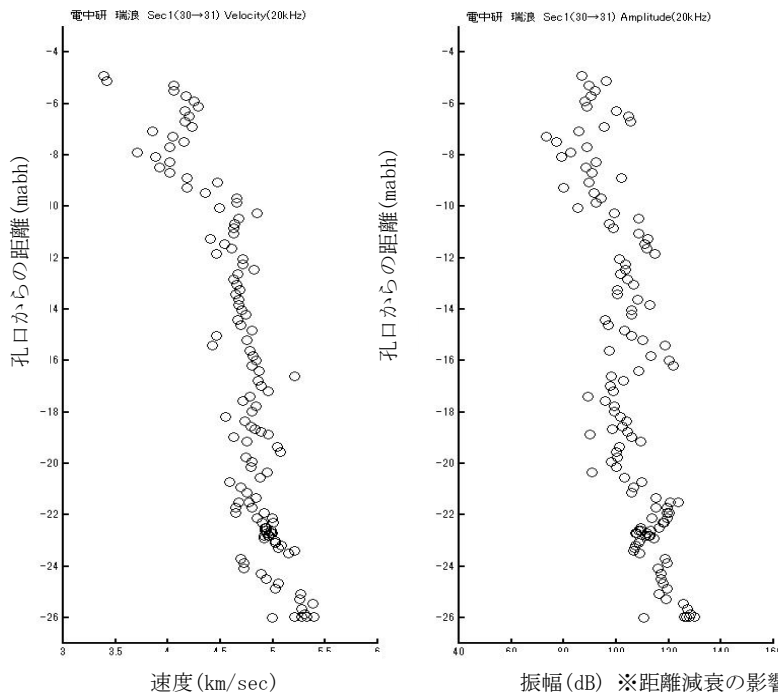


図 7.3.7-15 水平波線の読取り結果(sec1)、発振周波数 10kHz(左 速度、右 振幅)

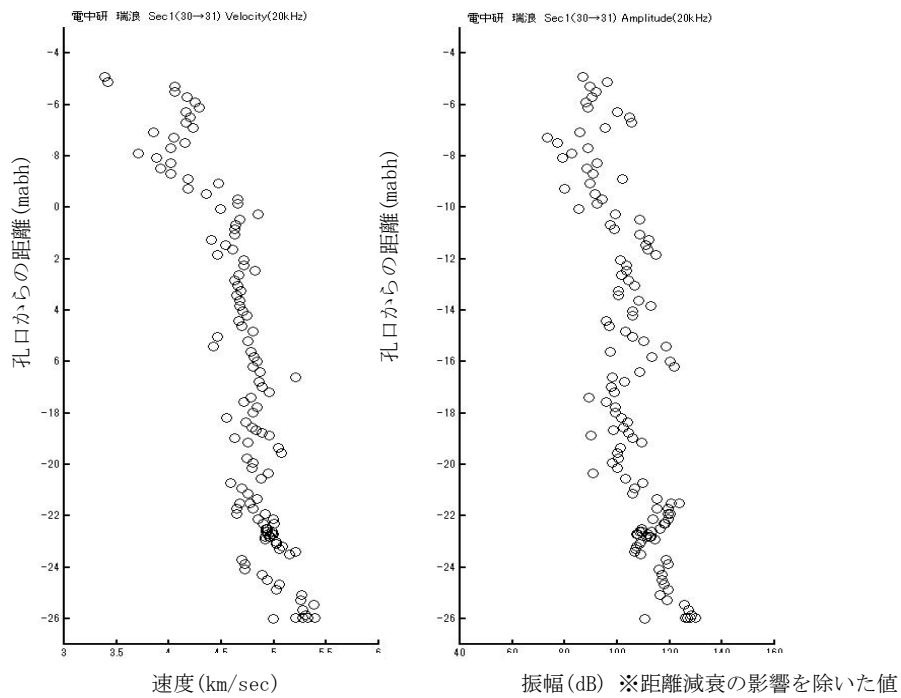


図 7.3.7-16 水平波線の読取り結果(sec1)、発振周波数 20kHz(左 速度、右 振幅)

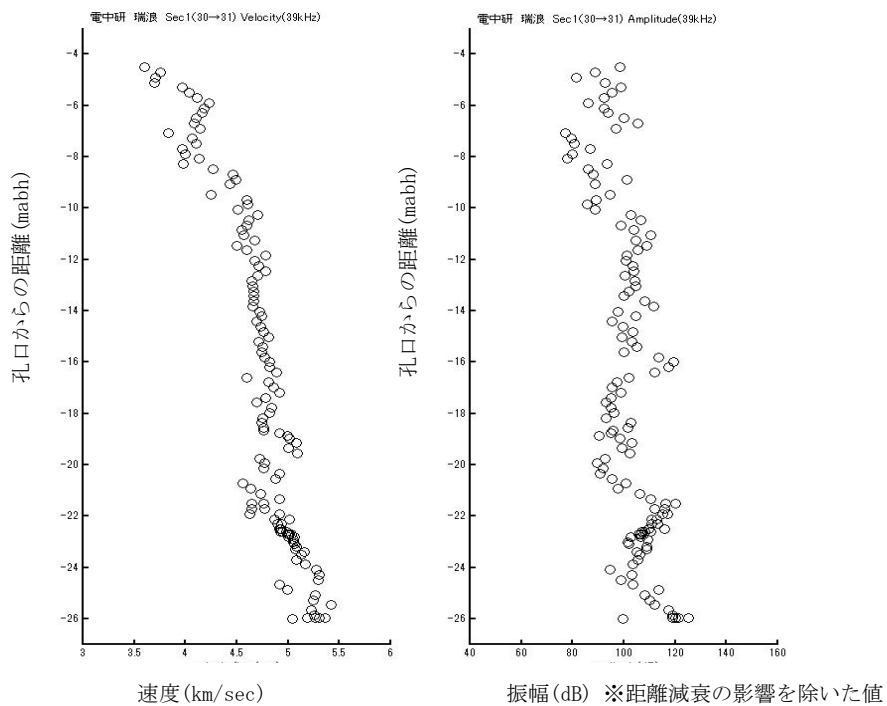


図 7.3.7-17 水平波線の読取り結果(sec1)、発振周波数 39kHz(左 速度、右 振幅)

逆解析は発振周波数 10kHz、20kHz、39kHz について実施した。逆解析を行うために受信波形記録から到達時間と振幅を読取り、波線解析を行った。これを周波数毎に図 7.3.7-18 に示す。計測断面内をまんべんなく波線が網羅していることが分る。

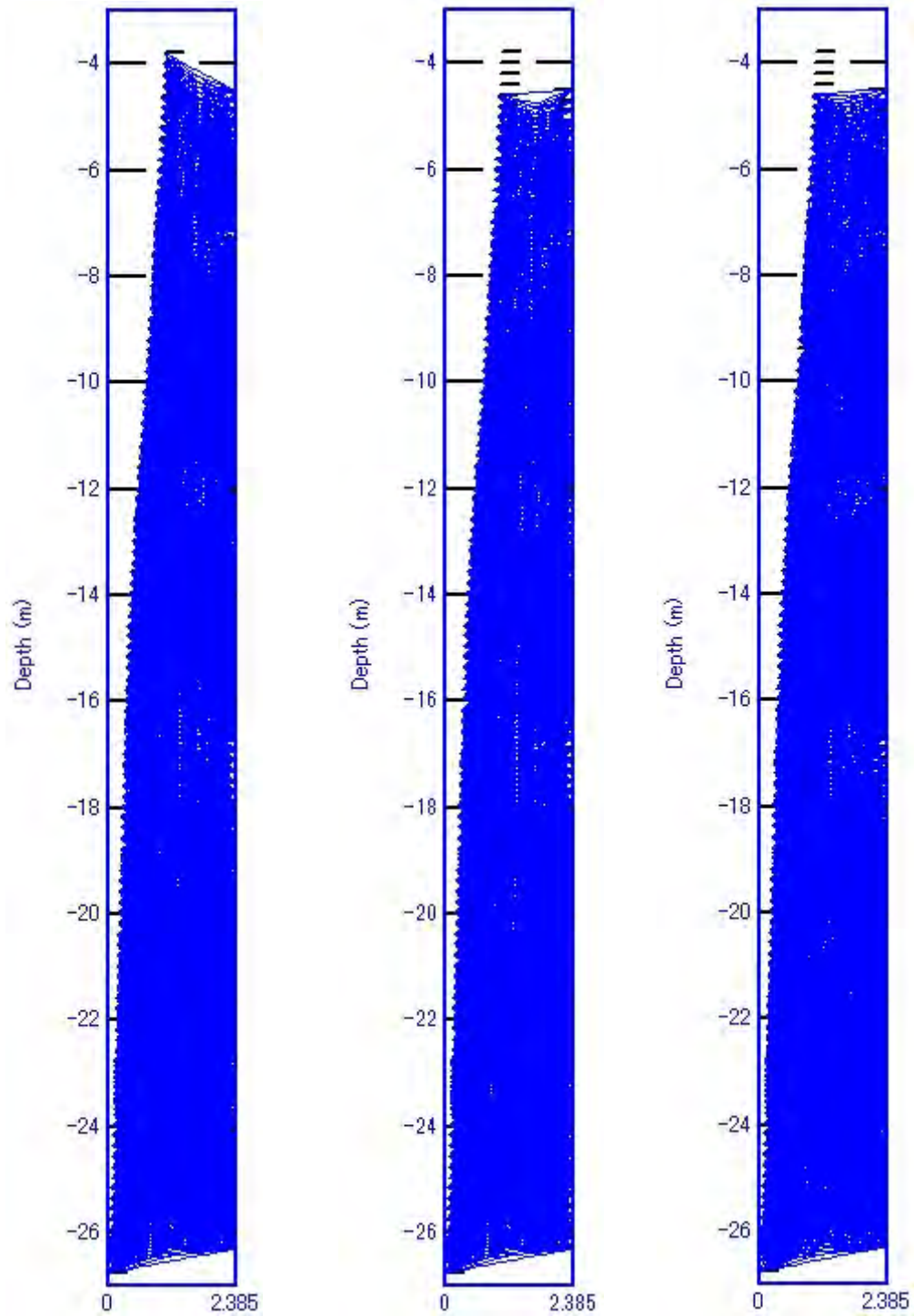


図 7.3.7-18 波線解析結果(sec1)、発振周波数(左)10kHz, (中)20kHz, (右)39kHz

発振周波数 10kHz、20kHz および 39kHz の時の速度分布図と減衰率分布図を図 7. 3. 7-19～図 7. 3. 7-21 に示す。

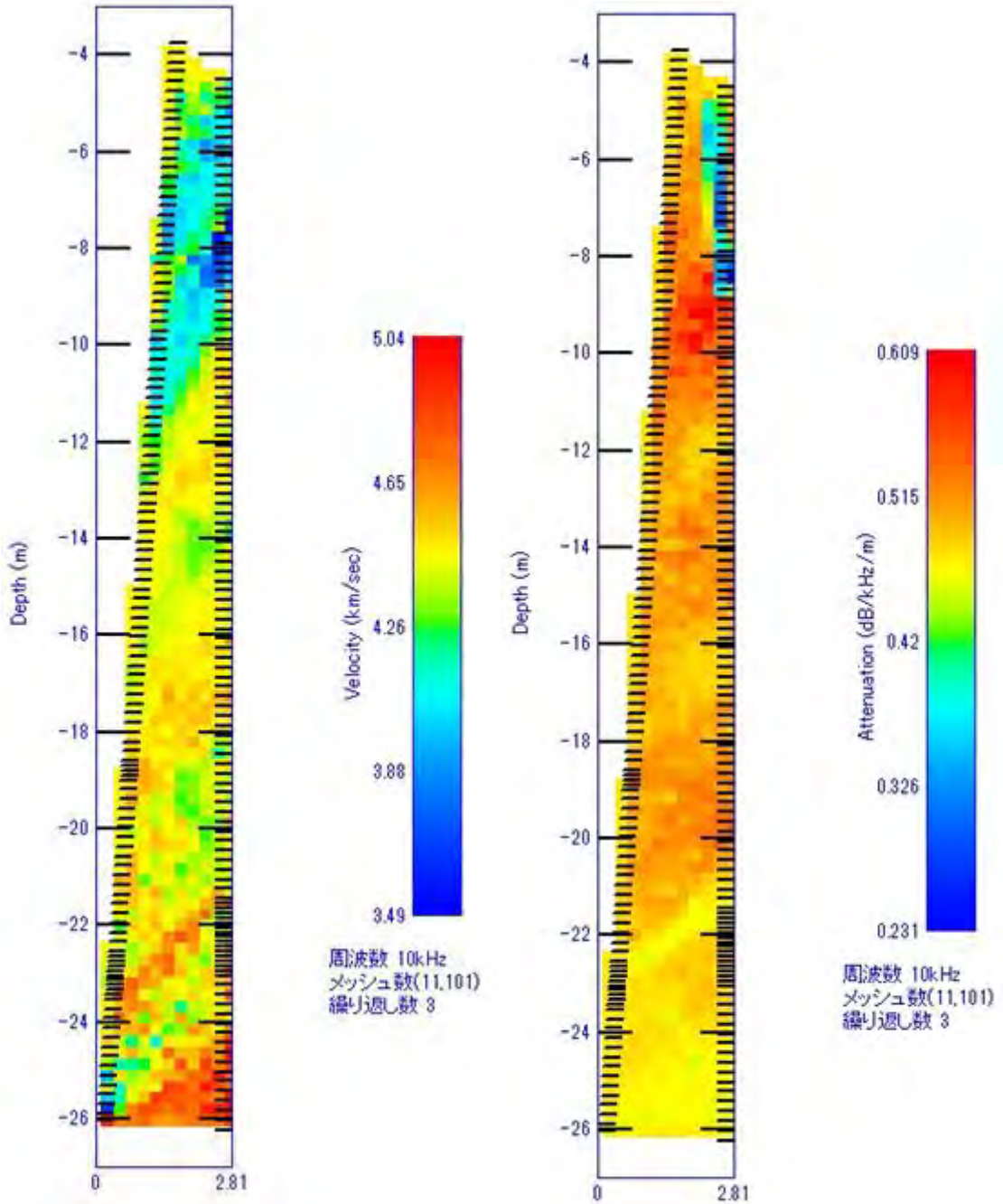


図 7. 3. 7-19 速度分布図(左)および減衰率分布図(右) (sec1)、発振周波数 10kHz

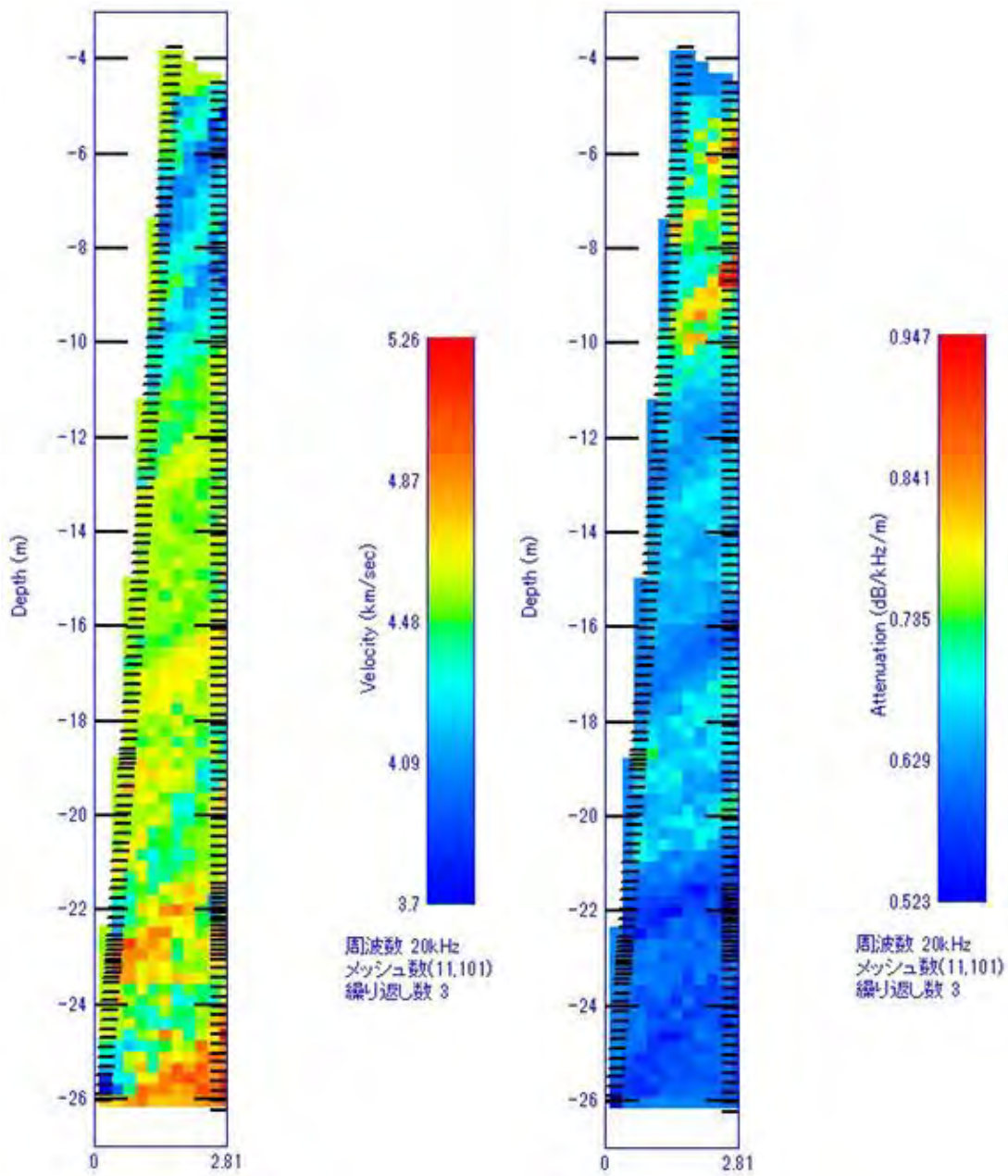


図 7. 3. 7-20 速度分布図(左)および減衰率分布図(右) (sec1)、発振周波数 20kHz

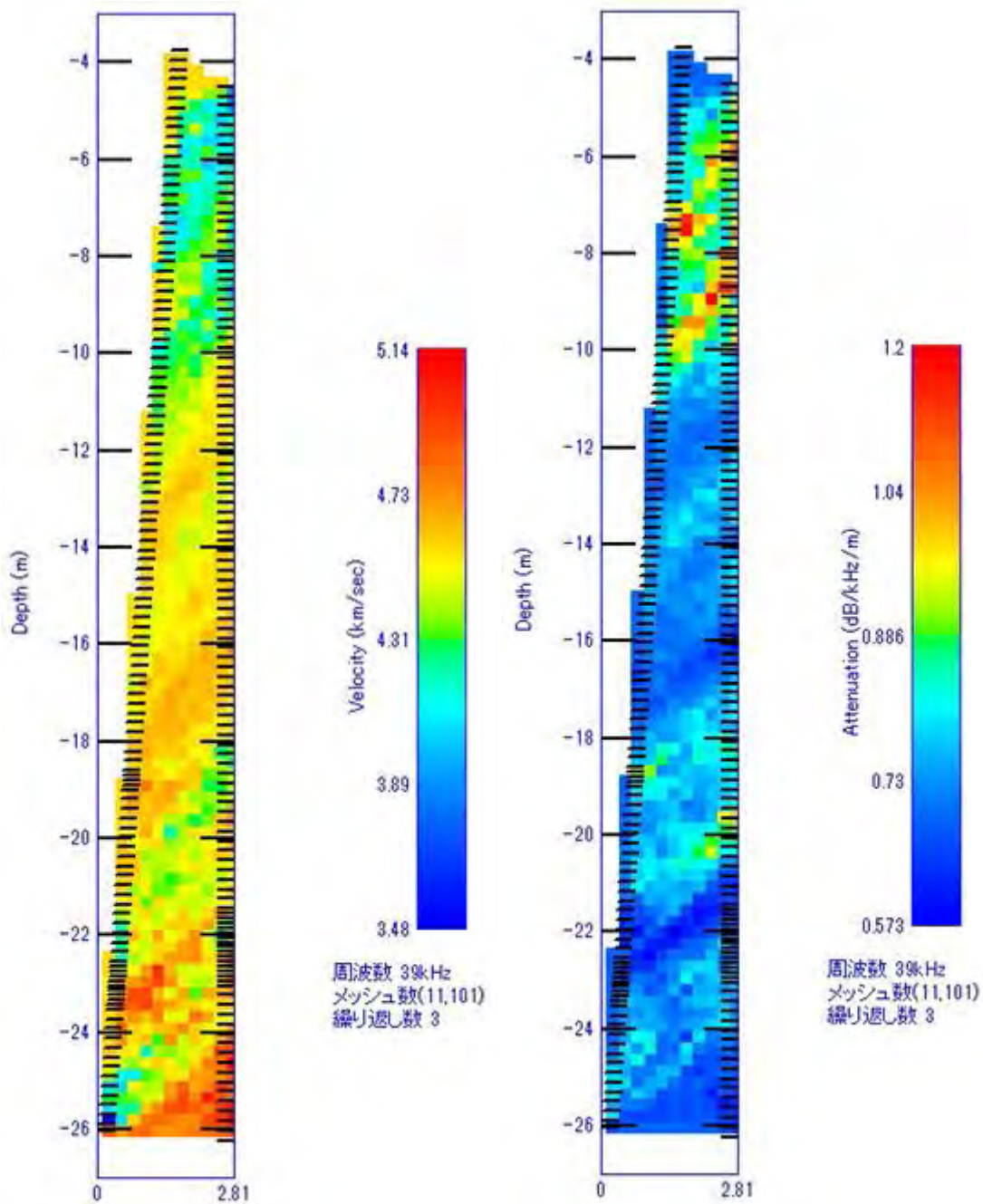


図 7.3.7-21 速度分布図(左)および減衰率分布図(右) (sec1)、発振周波数 39kHz

(2) 断面 2 の結果

発振周波数 10kHz、20kHz、39kHz の受信波形の例を図 7.3.7-22 ～図 7.3.7-30 に示す。ほぼ全ての深度において良好な波形が計測できていることが分る。縦軸は受信器深度(孔口からの距離)、横軸は時間を示している。

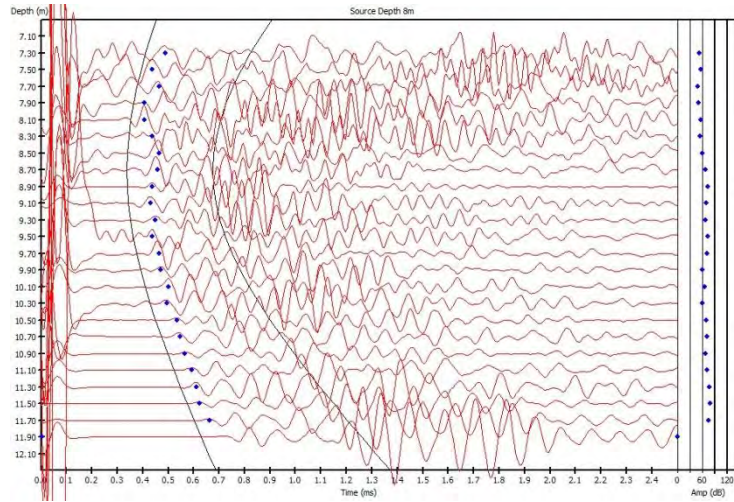


図 7.3.7-22 受信波形(発振器位置 孔口から 8.0m、周波数 10kHz)

※ 縦軸は受信器深度(孔口からの距離)、横軸は時間

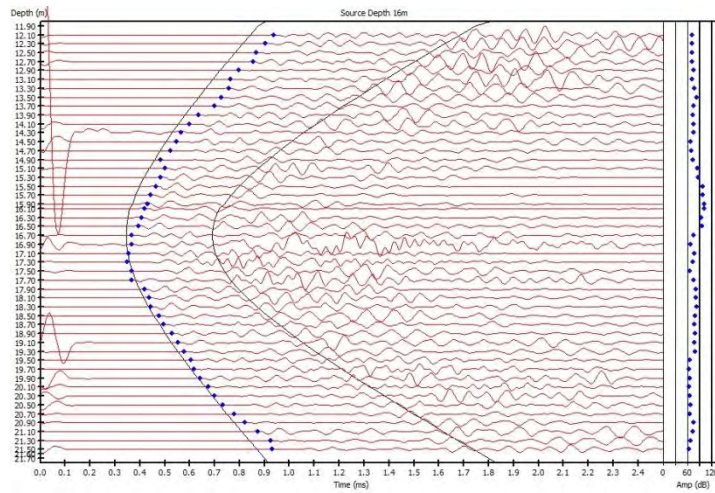


図 7.3.7-23 受信波形(発振器位置 孔口から 16.0m、周波数 10kHz)

※ 縦軸は受信器深度(孔口からの距離)、横軸は時間

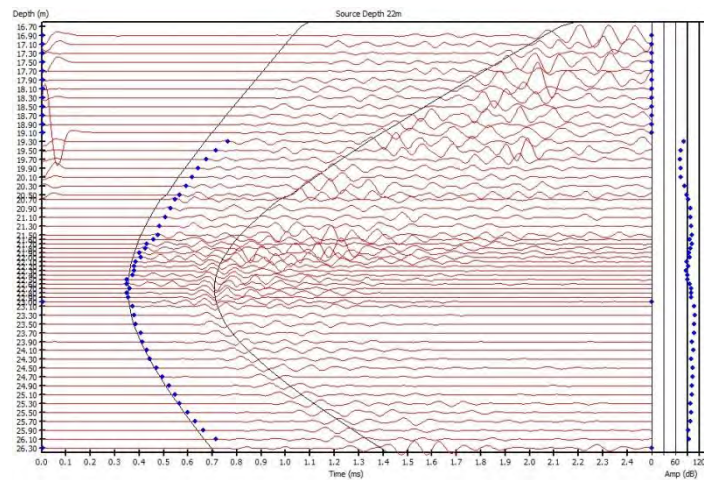


図 7.3.7-24 受信波形(発振器位置 孔口から 22.00m、周波数 20kHz)

※ 縦軸は受信器深度(孔口からの距離)、横軸は時間

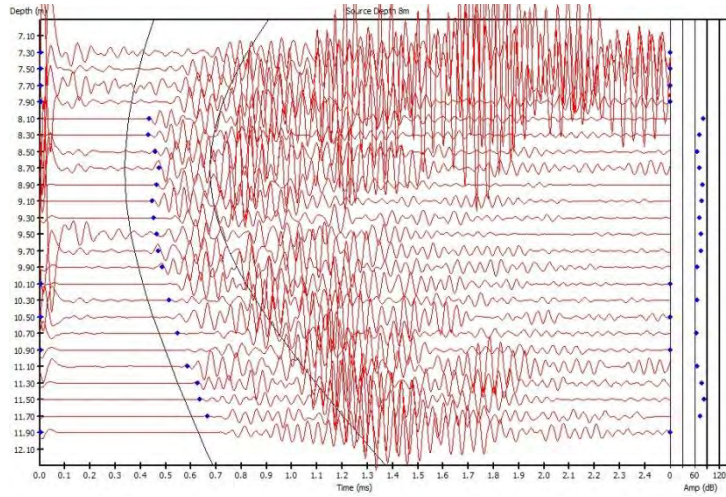


図 7.3.7-25 受信波形(発振器位置 孔口から 8.00m、周波数 39kHz)

※ 縦軸は受信器深度(孔口からの距離)、横軸は時間

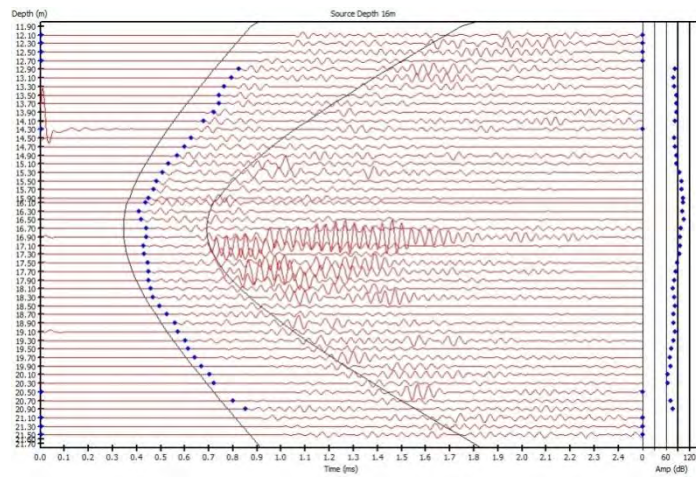


図 7.3.7-26 受信波形(発振器位置 孔口から 16.00m、周波数 39kHz)

※ 縦軸は受信器深度(孔口からの距離)、横軸は時間

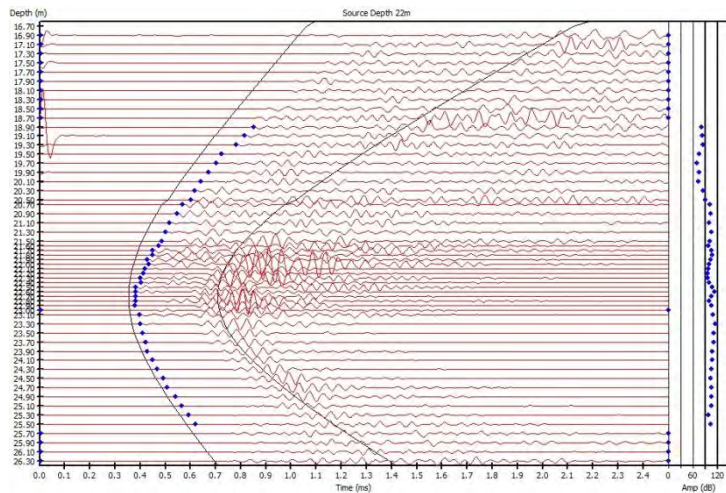


図 7.3.7-27 受信波形(発振器位置 孔口から 22.00m、周波数 39kHz)

※ 縦軸は受信器深度(孔口からの距離)、横軸は時間

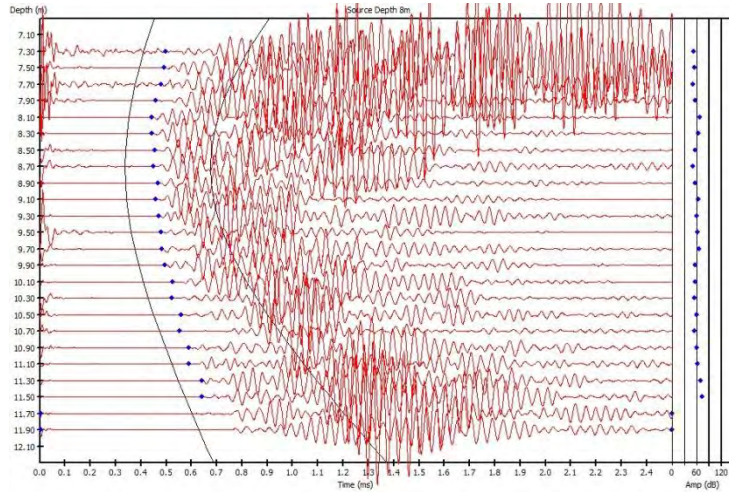


図 7.3.7-28 受信波形(発振器位置 孔口から 8.00m、周波数 39kHz)

※ 縦軸は受信器深度(孔口からの距離)、横軸は時間

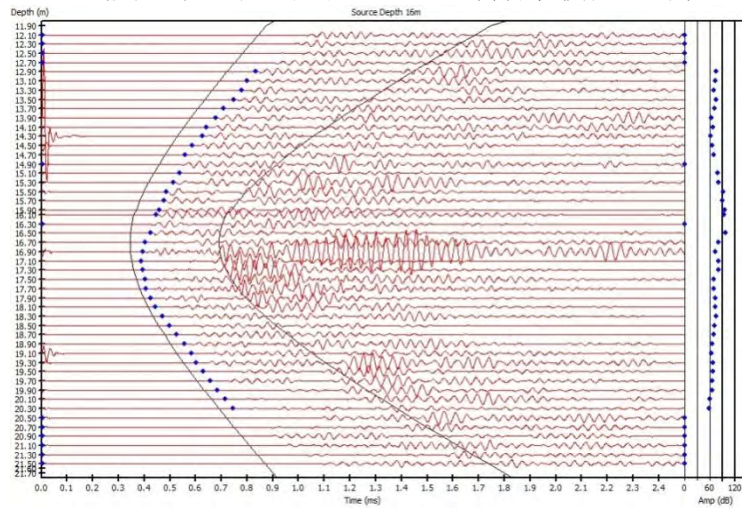


図 7.3.7-29 受信波形(発振器位置 孔口から 16.00m、周波数 39kHz)

※ 縦軸は受信器深度(孔口からの距離)、横軸は時間

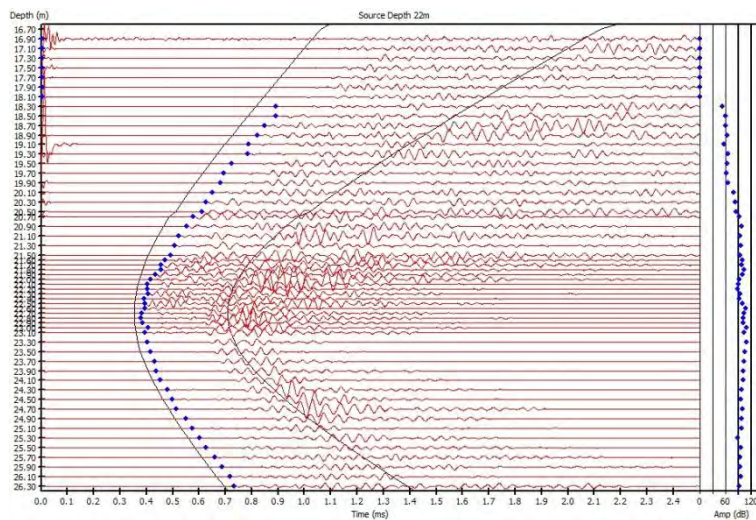


図 7.3.7-30 受信波形(発振器位置 孔口から 22.00m、周波数 39kHz)

※ 縦軸は受信器深度(孔口からの距離)、横軸は時間

水平波線の読取り結果として、孔口からの距離毎の速度および振幅(距離減衰の影響を取除いた振幅)をまとめた。これを図 7.3.7-31~図 7.3.7-33 に示す。水平波線の読取り結果とは「同じ深度にある発振点と振点の記録」をプロットしたものであり、孔内検層の記録と似ている。この結果と逆計算の結果を比較することで、計算の妥当性を検証することができる。

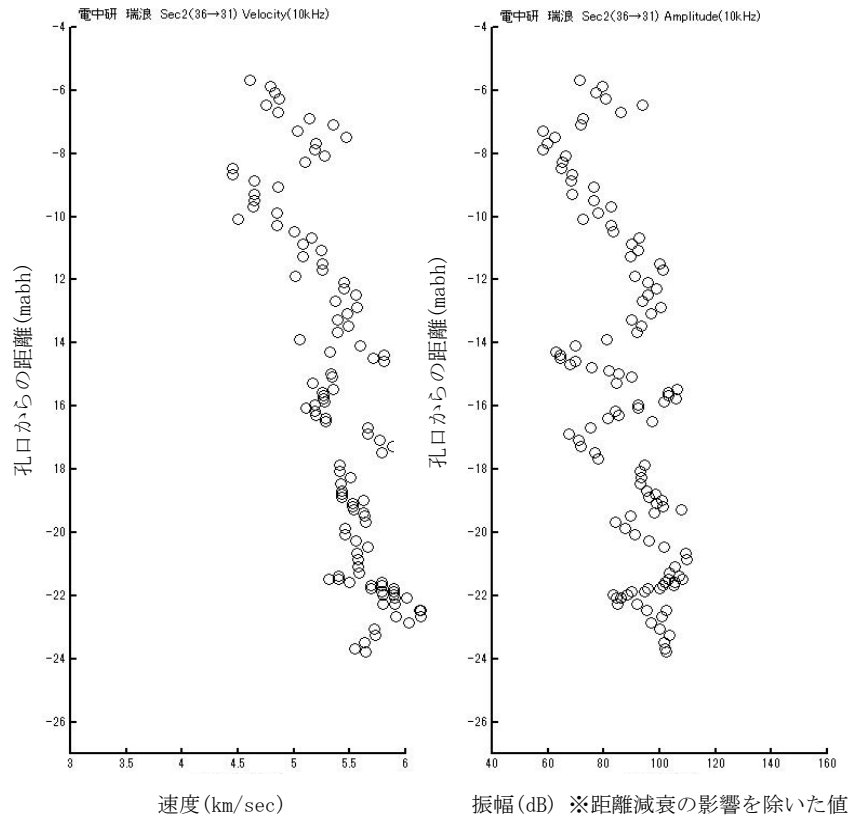


図 7.3.7-31 水平波線の読取り結果(sec2)、発振周波数 10kHz(左 速度、右 振幅)

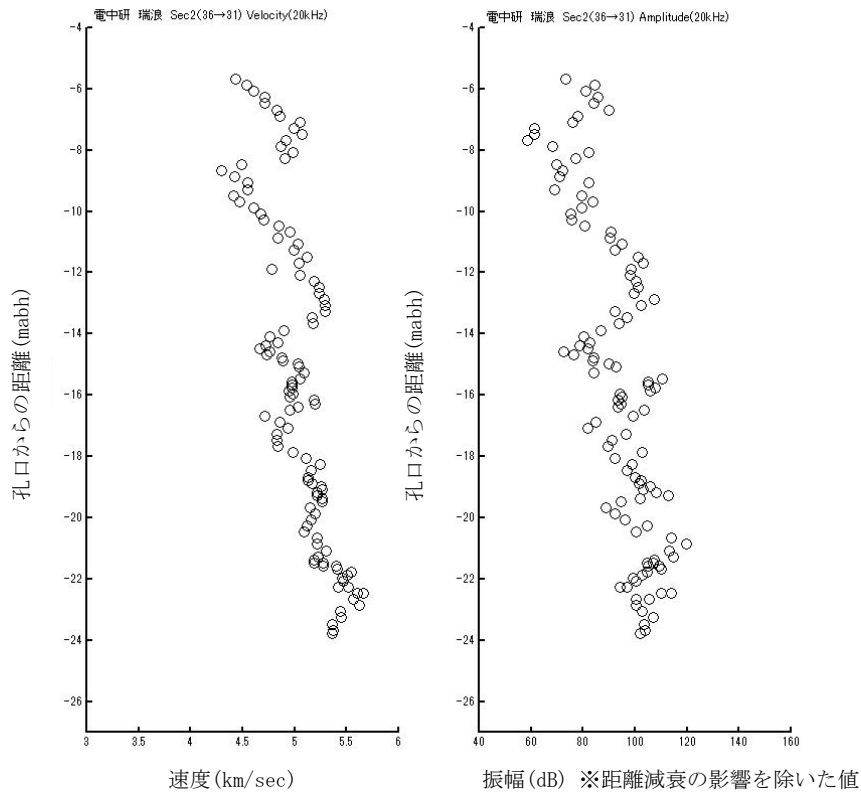


図 7.3.7-32 水平波線の読取り結果(sec2)、発振周波数 20kHz(左 速度、右 振幅)

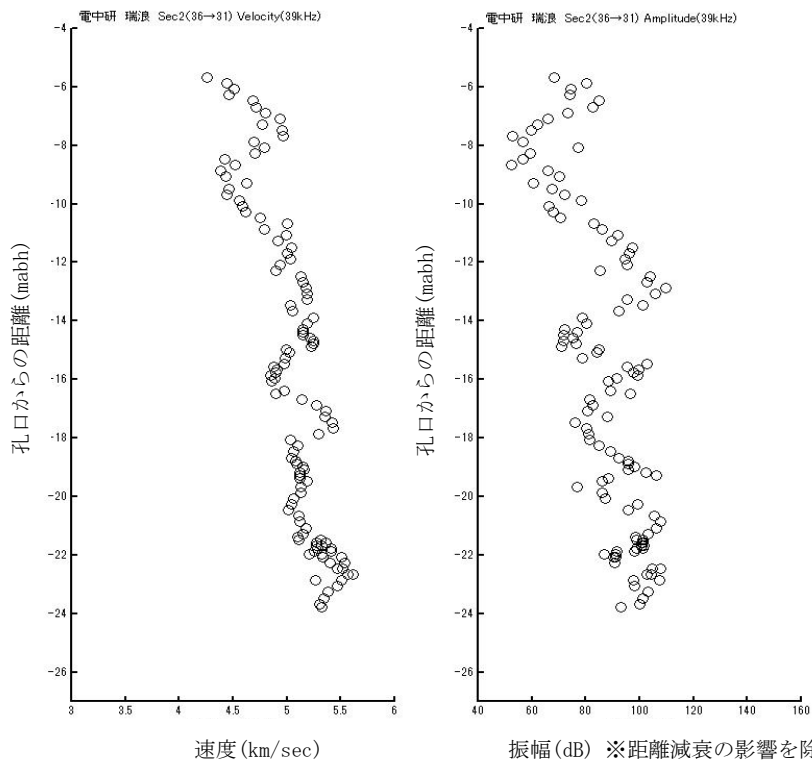


図 7.3.7-33 水平波線の読取り結果(sec2)、発振周波数 39kHz(左 速度、右 振幅)

逆解析は発振周波数 10kHz、20kHz、39kHz について実施した。逆解析を行うために受信波形記録から到達時間と振幅を読み取り、波線解析を行った。これを周波数毎に図 7.3.7-34 に示す。これらの結果から計測断面内をほぼまんべんなく波線が網羅していることが分る。

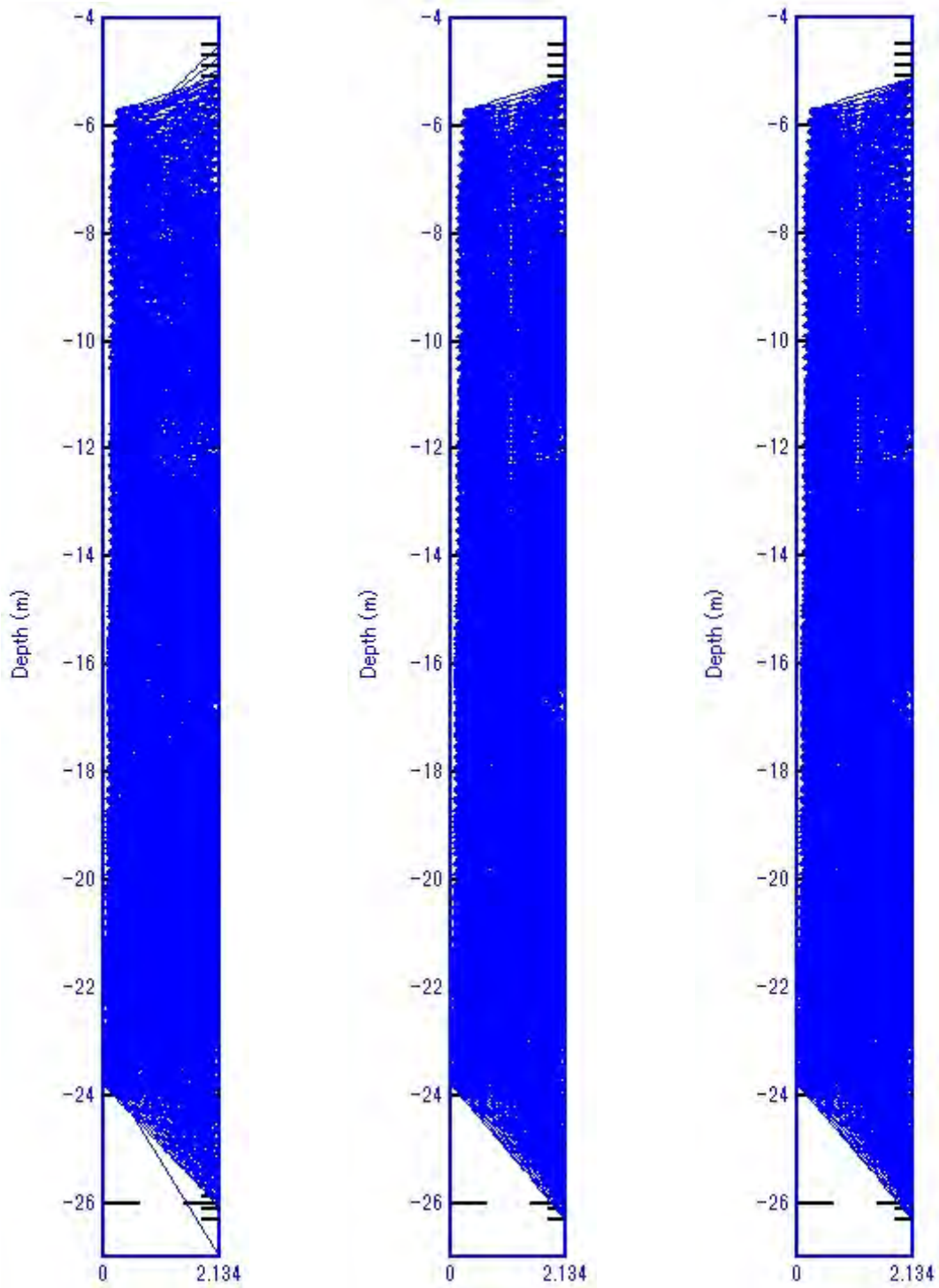


図 7.3.7-34 波線解析結果(断面 2)、発振周波数(左)10kHz、(中)20kHz、(右)39kHz

発振周波数 10kHz、20kHz および 39kHz の時の速度分布図と減衰率分布図を図 7.3.7-35～図 7.3.7-37 に示す。

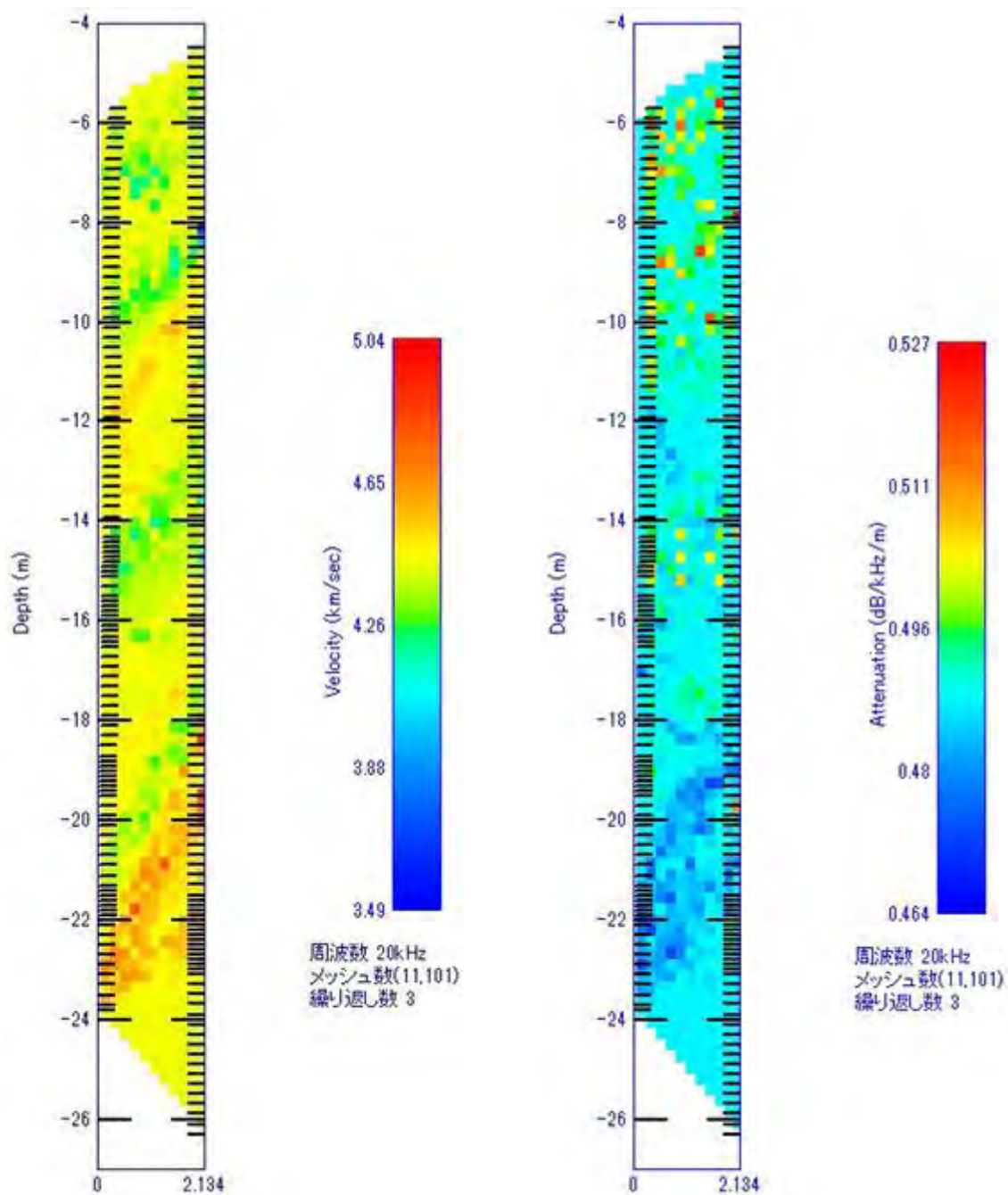


図 7.3.7-35 速度分布図(左)および減衰率分布図(右) (断面 2)、発振周波数 10kHz

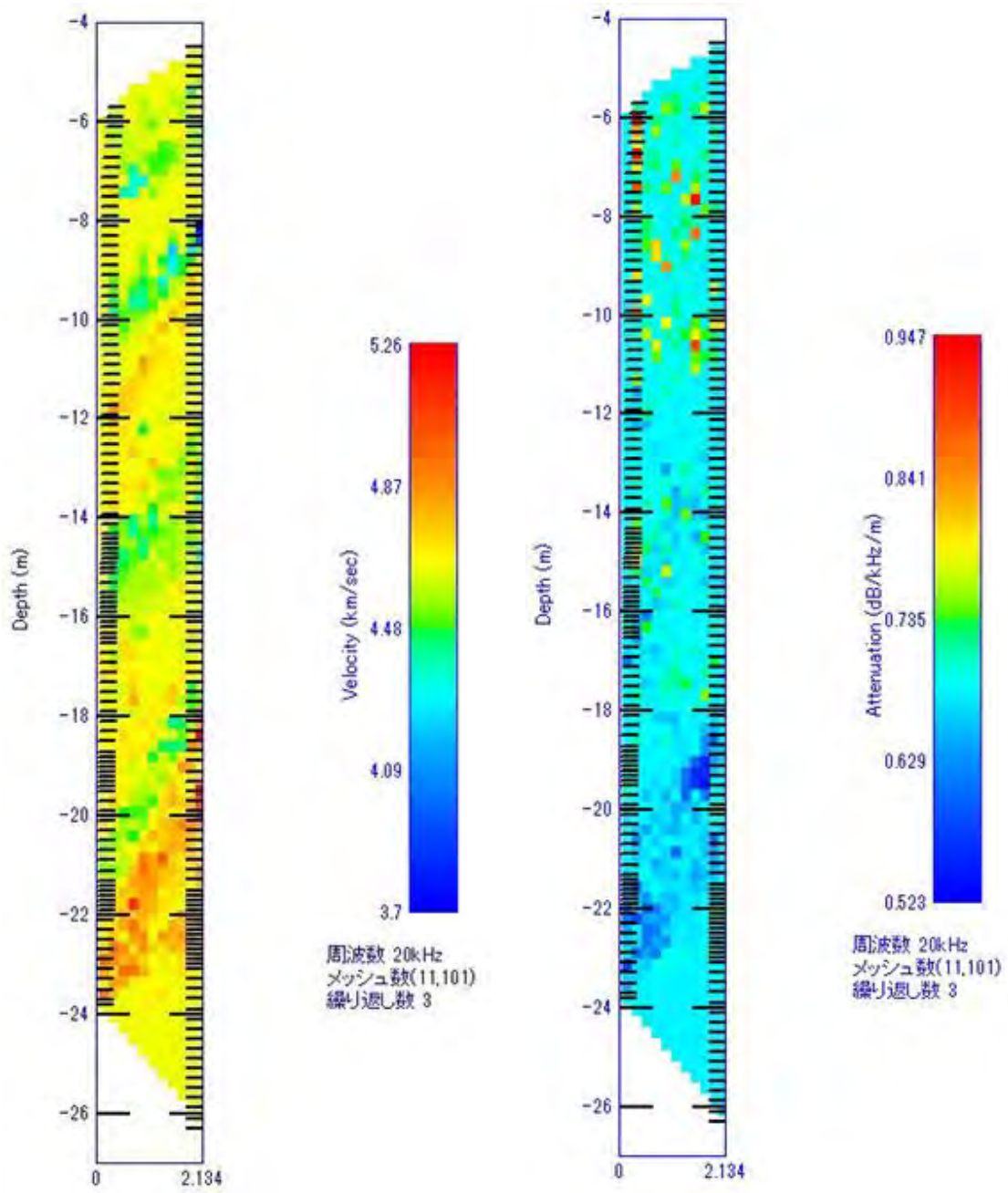


図 7.3.7-36 速度分布図(左)および減衰率分布図(右) (断面 2)、発振周波数 20kHz

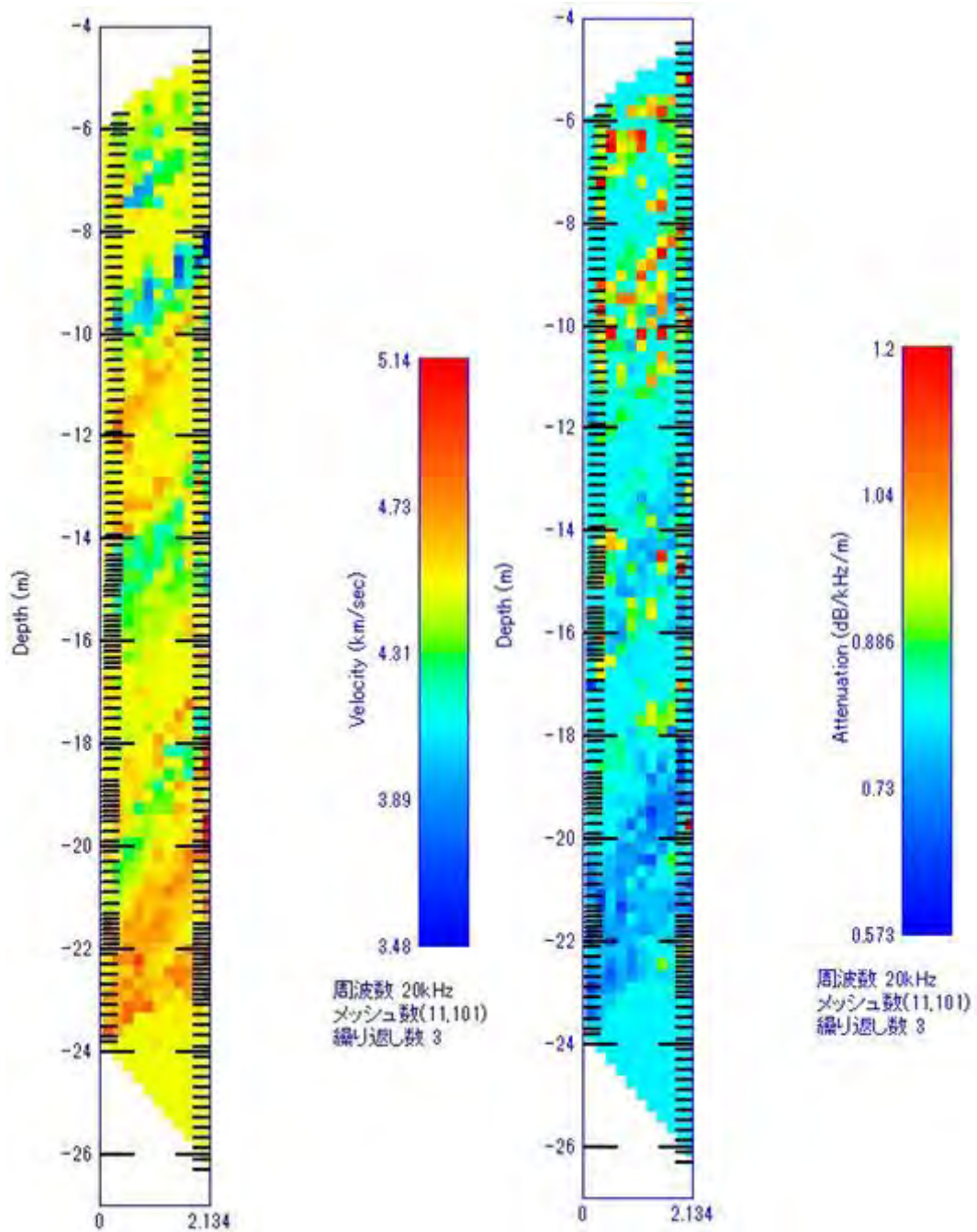


図 7.3.7-37 速度分布図(左)および減衰率分布図(右) (断面 2)、発振周波数 39kHz

7.3.7.3 考察

(1) 各断面の結果

断面 1 は孔口に近づくほど速度は低下し、減衰率は大きくなっている。また孔底では速度は速く減衰率も小さくなっている。これは掘削による岩盤の緩みが孔口から孔口からの距離 10m 程度まで広がっていることを示唆していると考えられる。また、減衰率では孔口から 20m～22m の範囲でやや減衰率が大きくなっている個所があるが、速度ではこの部分は顕著な速度低下は認められない。細かい亀裂があると速度はあまり変化せず減衰率のみ大きくなることから、この部分は岩盤の緩みはないが亀裂が存在することを示唆しており、透水係数が局所的に高くなっている可能性がある。なお、断面 1 については発振周波数の違いによる顕著な変化は認められない。

断面 2 も孔口ほど速度が低下し減衰率が大きくなり、孔底では速度は速く減衰率も小さい。断面 1 と同様に掘削による岩盤の緩みが孔口からの距離 10m まで広がっていることを示唆している。また、減衰率は孔口から 16m～18m の部分で減衰率がやや大きくなっている。断面 1 と同様にこの部分は速度の低下は認められないため、岩盤の緩みはないが亀裂が存在しており、透水係数が局所的に高くなっている可能性がある。なお、断面 2 についても発振周波数の違いによる顕著な変化は認められない。

周波数 39kHz の速度断面および減衰率断面と高透水性区間 ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ 以上) とを対比した結果を図 7.3.7-38 および図 7.3.7-39 に示す。速度断面では高透水性区間との整合性は不明瞭である。減衰率断面において、13MI36 孔の深度 13.73～14.40m および 12MI31 孔の深度 16.25～16.95 の高透水性区間が孔間で連続しているように見える。

その他の高透水性区間については孔間での連続性は不明瞭である。

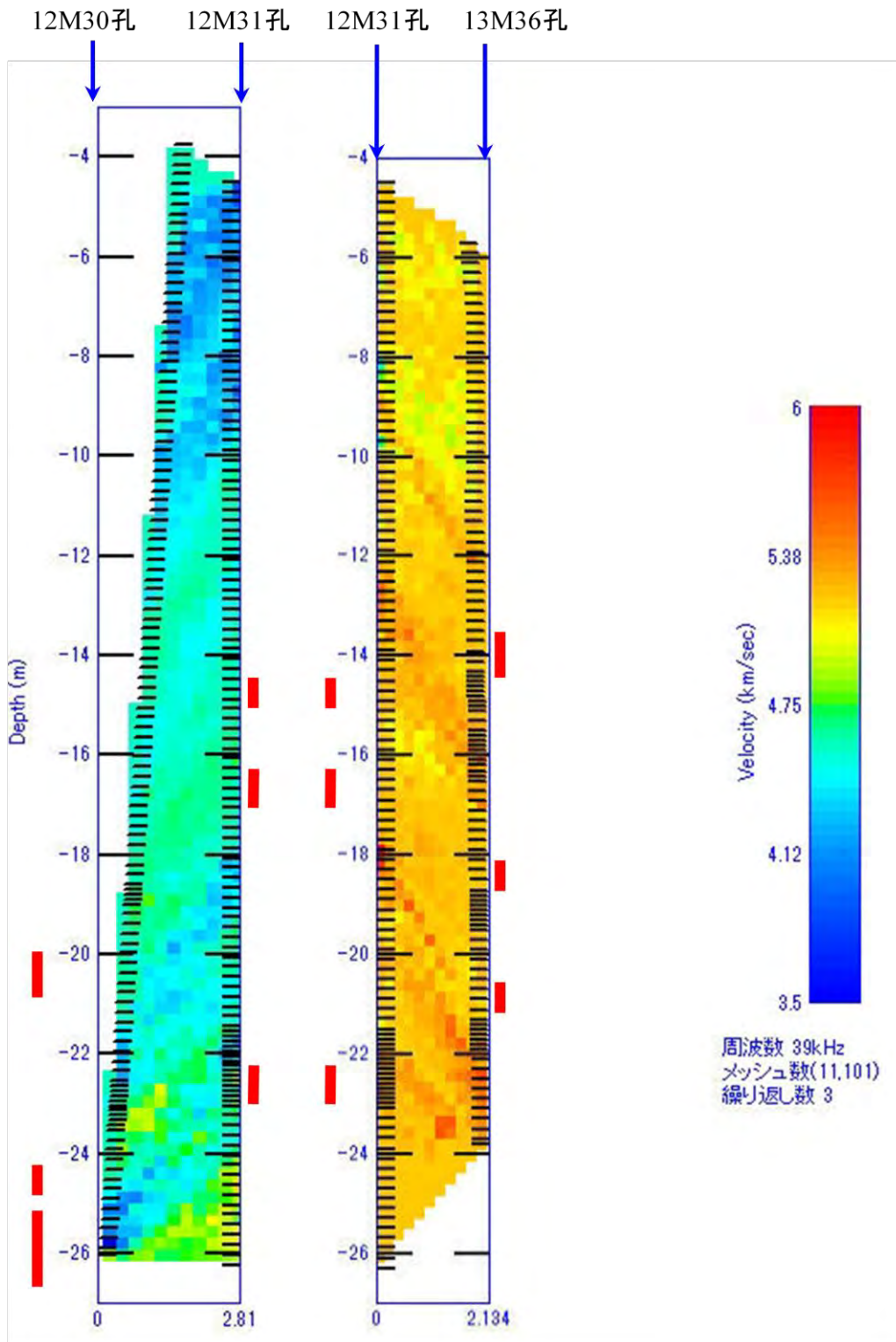


図 7.3.7-38 速度断面と高透水性区間との対比 (39kHz)

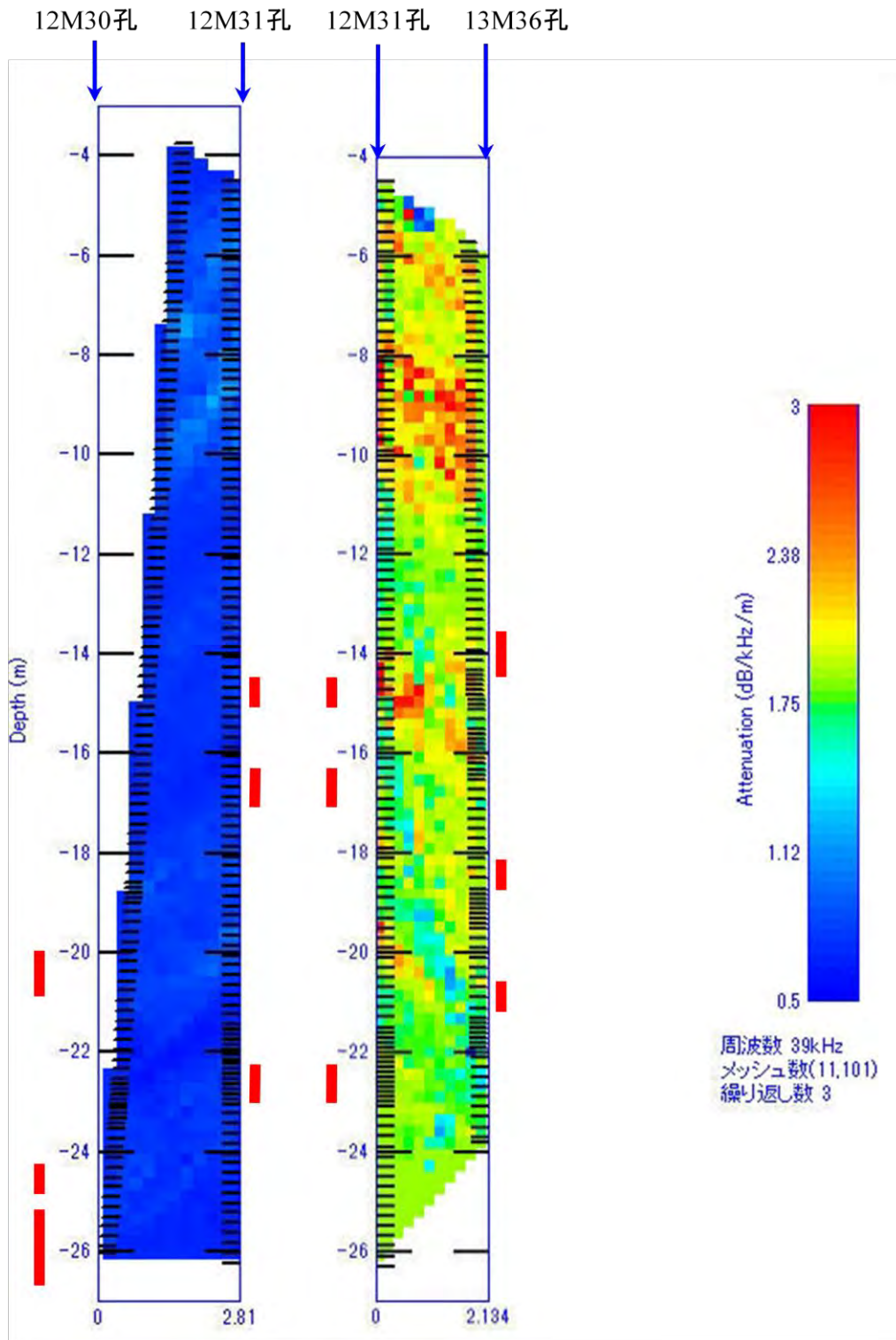


図 7.3.7-39 減衰率断面と高透水性区間との対比 (39kHz)

(2) ボーリング孔の孔跡データについて

速度の逆計算の結果が断面1と断面2で大きく異なったため、計測データの比較を行った。

図7.3.7-40～図7.3.7-42は水平波線の読取り結果から得られた速度を断面1と断面2で比較したものである。これらの図から計測データが断面1と断面2で異なっていることが分かる。隣り合う断面で速度が大きく異なる可能性は少ないと考えられることから、孔跡データがずれている可能性が考えられる。このため、ボーリング孔の位置や掘削方向の角度について、次年度以降、改めて確認することが望ましいと考える。

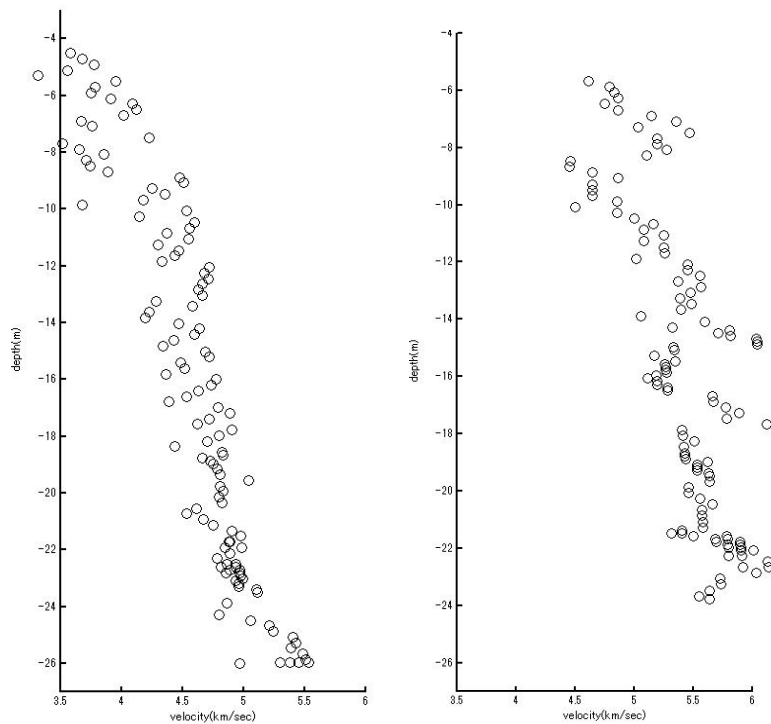


図7.3.7-40 水平波線の読取り結果の比較 (10kHz)
(左側：断面1、右側：断面2)

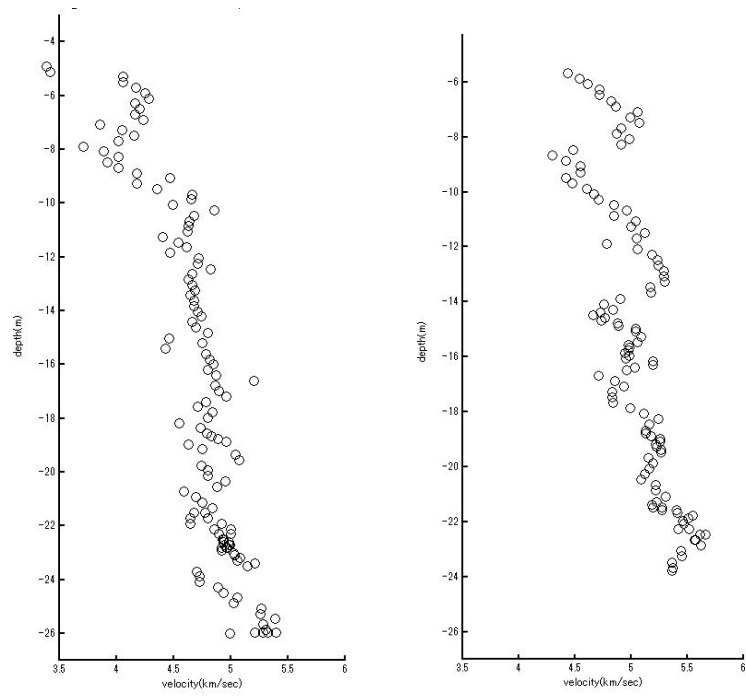


図 7.3.7-41 水平波線の読取り結果の比較 (20kHz)
(左側：断面 1、右側：断面 2)

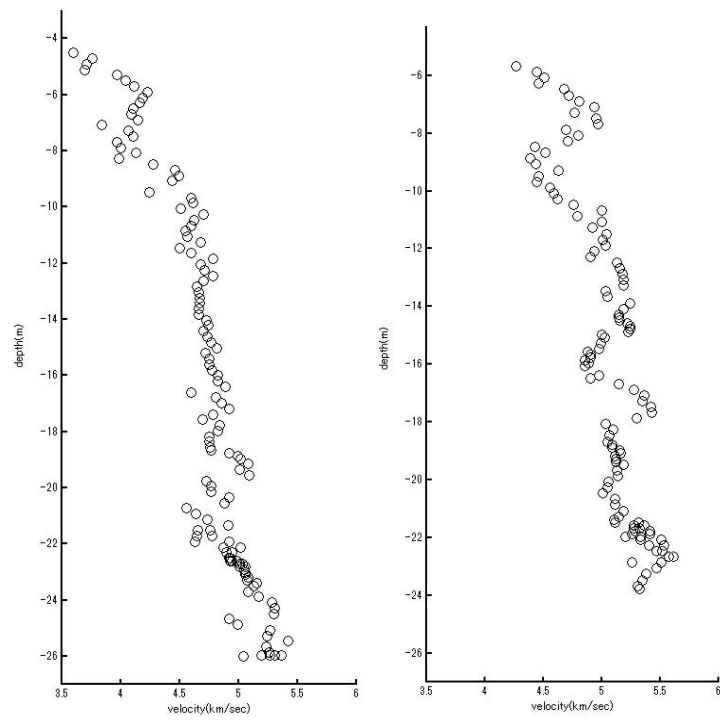


図 7.3.7-42 水平波線の読取り結果の比較 (39kHz)
(左側：断面 1、右側：断面 2)

7.3.8 高精度 BTV 検層結果

7.3.8.1 割れ目の分布

調査結果は、割れ目の開口の有無や鉱物の充填の有無などを問わず「全岩盤分離面」として整理した。また、全岩盤分離面のうち開口しているものを「開口割れ目」とし、それ以外を「割れ目」とした。BIPS 計測した 12MI30 孔、12MI31 孔、13MI36 孔の孔内展開画像を割れ目の方向と共にそれぞれ図 7.3.8-1、図 7.3.8-2、図 7.3.8-3 に示す。

各孔の全岩盤分離面の分布状況を表 7.3.8-1 に示す。13MI36 号孔の岩盤分離面の密度は、12MI30 号孔および 12MI31 号孔に比べてやや小さく、岩盤分離面の平均間隔はやや大きい。13MI36 号孔の掘削方向は 12MI30 号孔や 12MI31 号孔とほぼ同じで、また全岩盤分離面の卓越方向も概ね同じである。したがって、13MI36 号孔付近の岩盤分離面の空間的な集中度（離散度）がわずかながら違う可能性がある。岩盤分離面の方向ならびに分布特性については後述する。

表 7.3.8-1 各孔の全岩盤分離面、割れ目、開口割れ目計測結果

孔	計測区間長	全岩盤分離面	割れ目	開口割れ目	岩盤分離面の分布密度	岩盤分離面の平均間隔
12MI30	22.50m	169	162	7	7.51/m	0.13m
12MI31	21.00m	165	158	7	7.86/m	0.13m
13MI36	17.53m	121	112	9	6.90/m	0.14m

※ 岩盤分離面の平均間隔：孔内の岩盤分離面の深度を a、b、c・・・z とした場合、b の岩盤割れ目の間隔は (c-a) / 2 である。a～z の岩盤分離面の間隔を平均したものを岩盤分離面の平均間隔とした。

孔番号: 12MI30

8,000m - 12,000m
(4,000m - 27,201m)
孔方位: 259 孔傾斜: -34

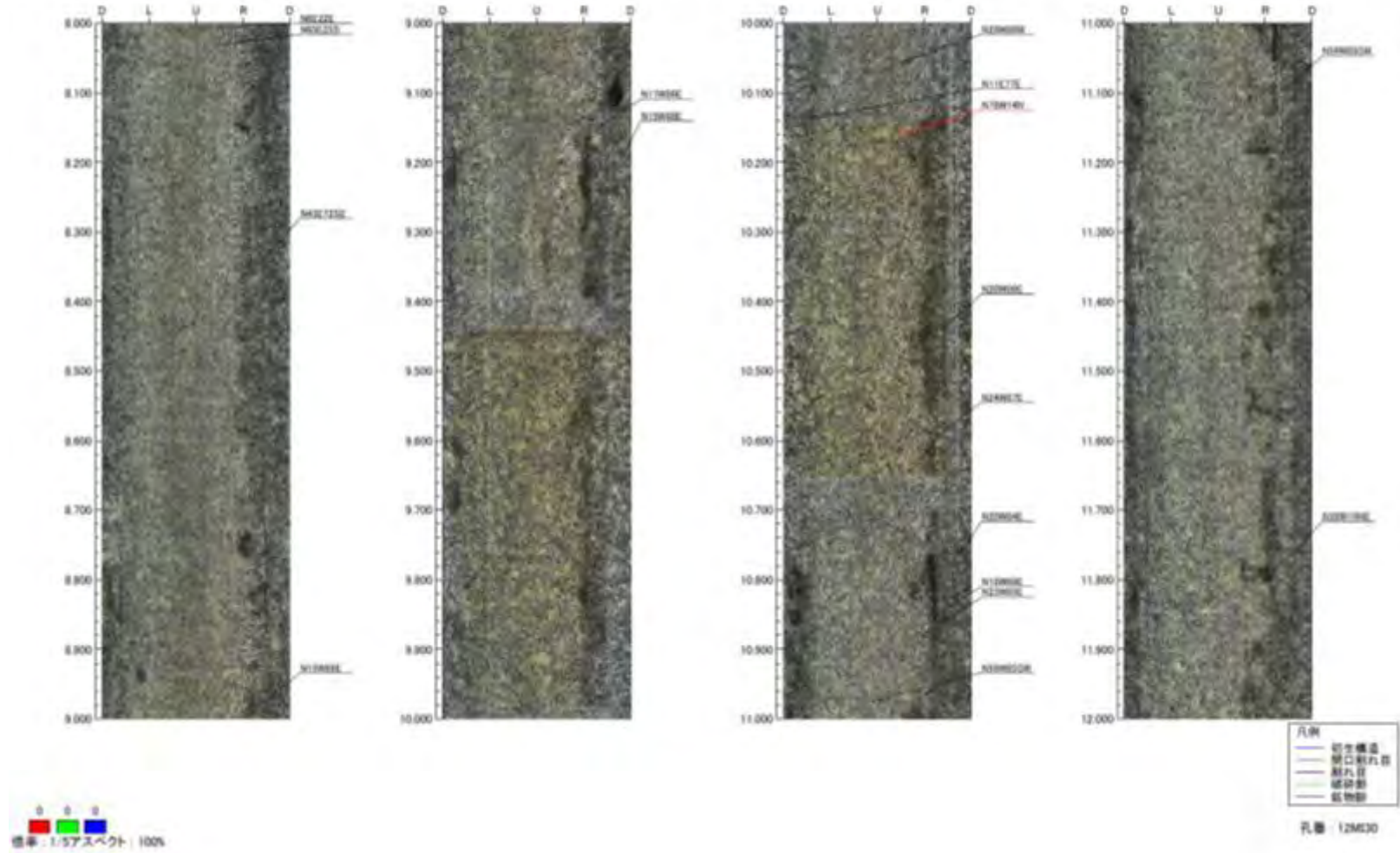


図 7.3.8-1(b) 12MI30 号孔 孔壁展開図 8.00~12.0mabh

孔番：12MI30

12,000m - 16,000m
4,000m - 27,201m
孔方位：250 孔傾斜：-34

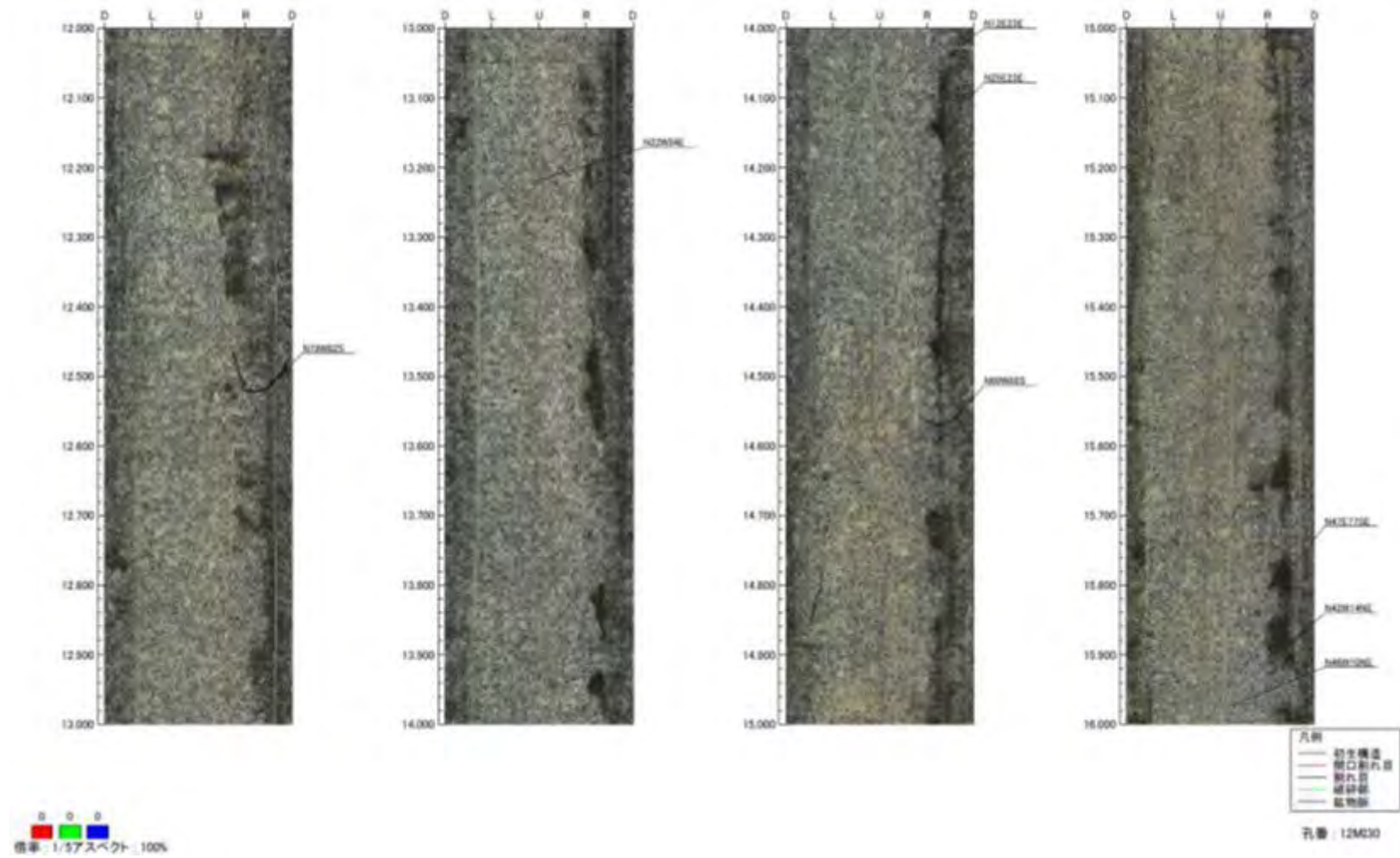


図 7.3.8-1(c) 12MI30 号孔 孔壁展開図 12.00~16.0mabh

孔番：12MI30

16,000m - 20,000m
 (4,000m - 27,201m)
 孔方位：259 孔傾斜：-34

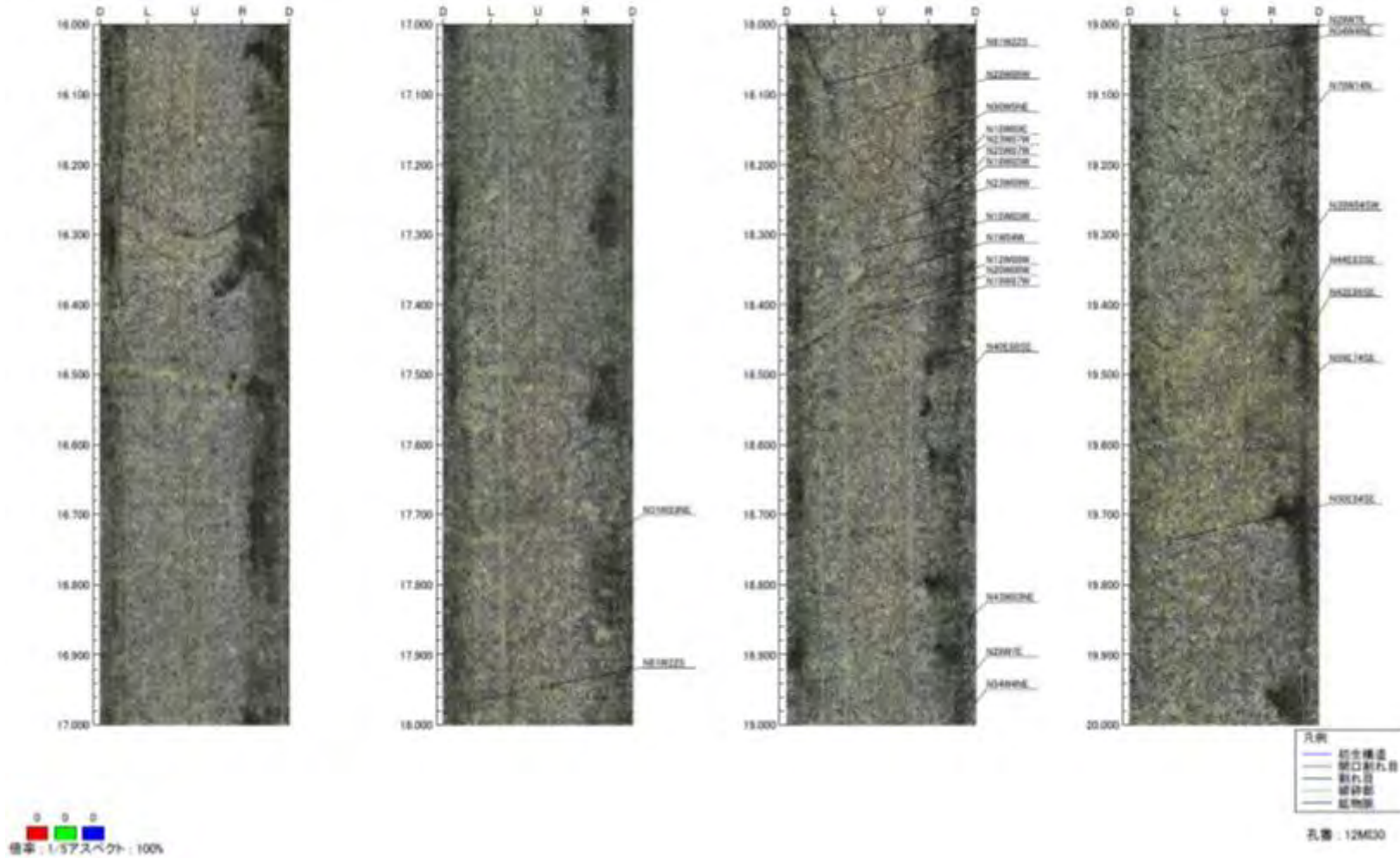


図 7.3.8-1(d) 12MI30 号孔 孔壁展開図 16.00~20.00mabh

孔番号: 12MI30

20,000m - 24,000m
(4,000m - 27,201m)
孔方位: 259 孔傾斜: -34

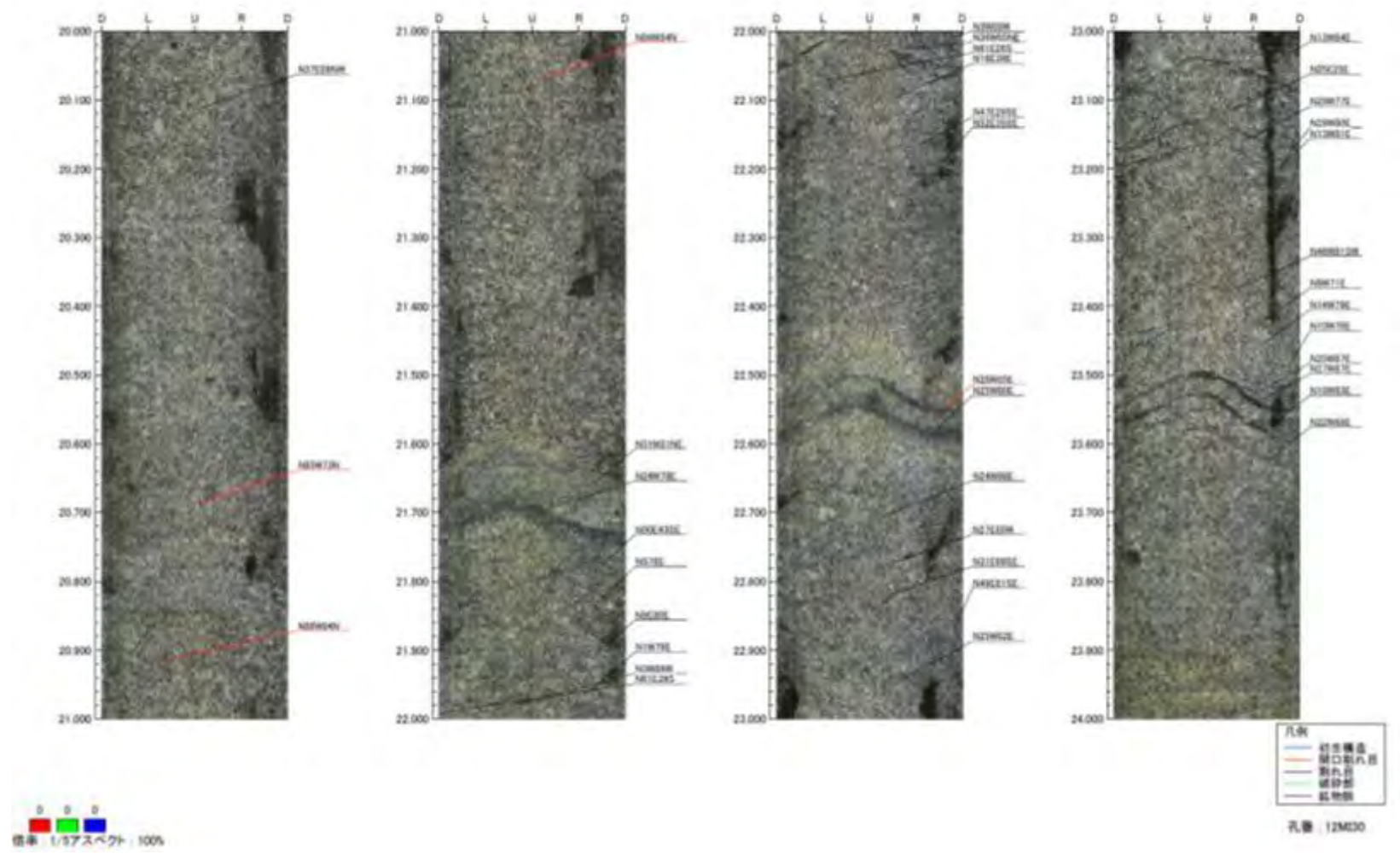


図 7.3.8-1(e) 12MI30 号孔 孔壁展開図 20.00~24.00mabh

孔番号：12MI30

24,000m - 28,000m
(4,000m - 27,201m)
孔方位：259 孔傾斜：-34

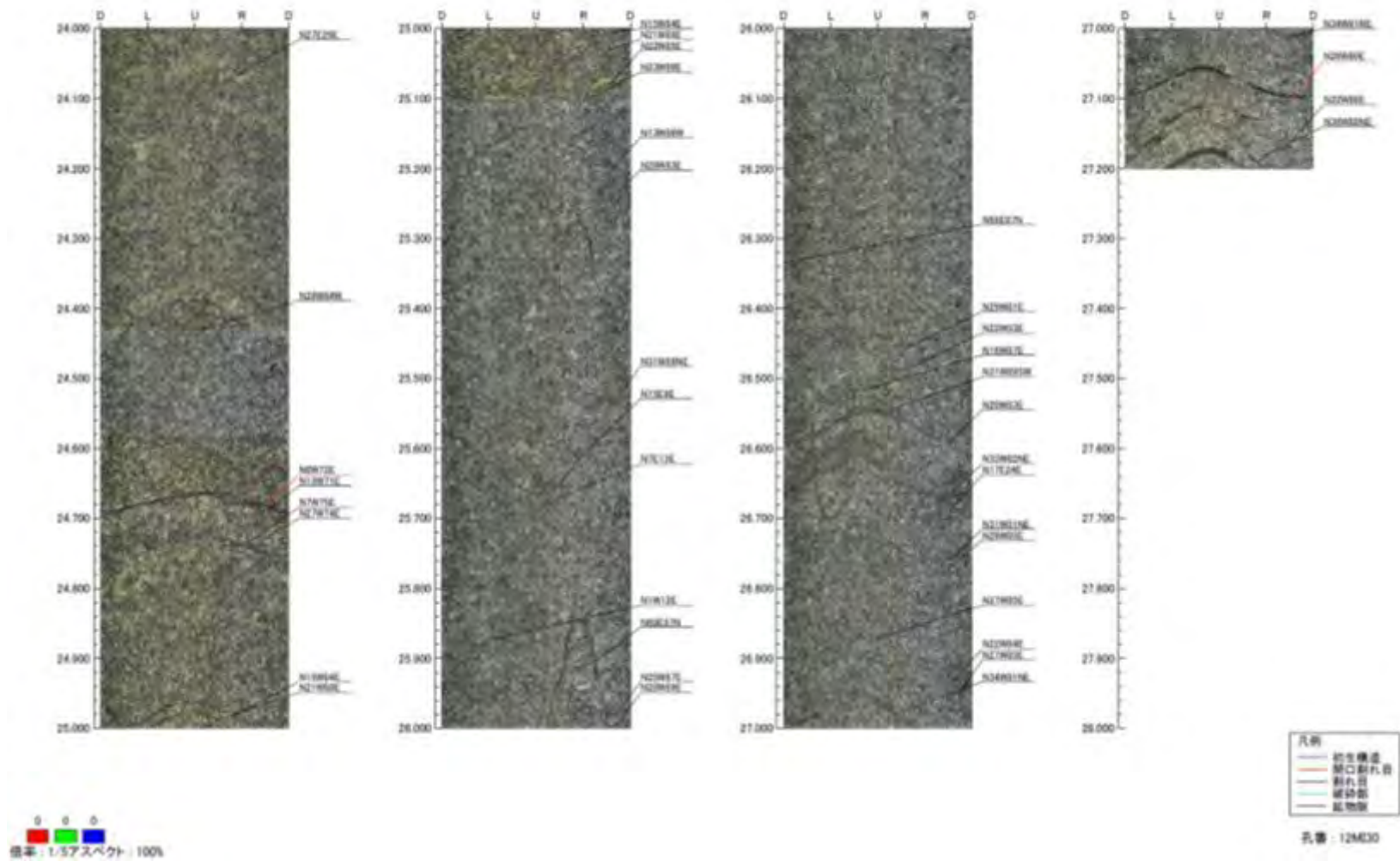


図 7.3.8-1(f) 12MI30 号孔 孔壁展開図 24.00m~27.20mabh

孔番：12MI31

4.000m - 8.000m
(4.000m - 25.807m)
孔方位：255 孔傾斜：-35

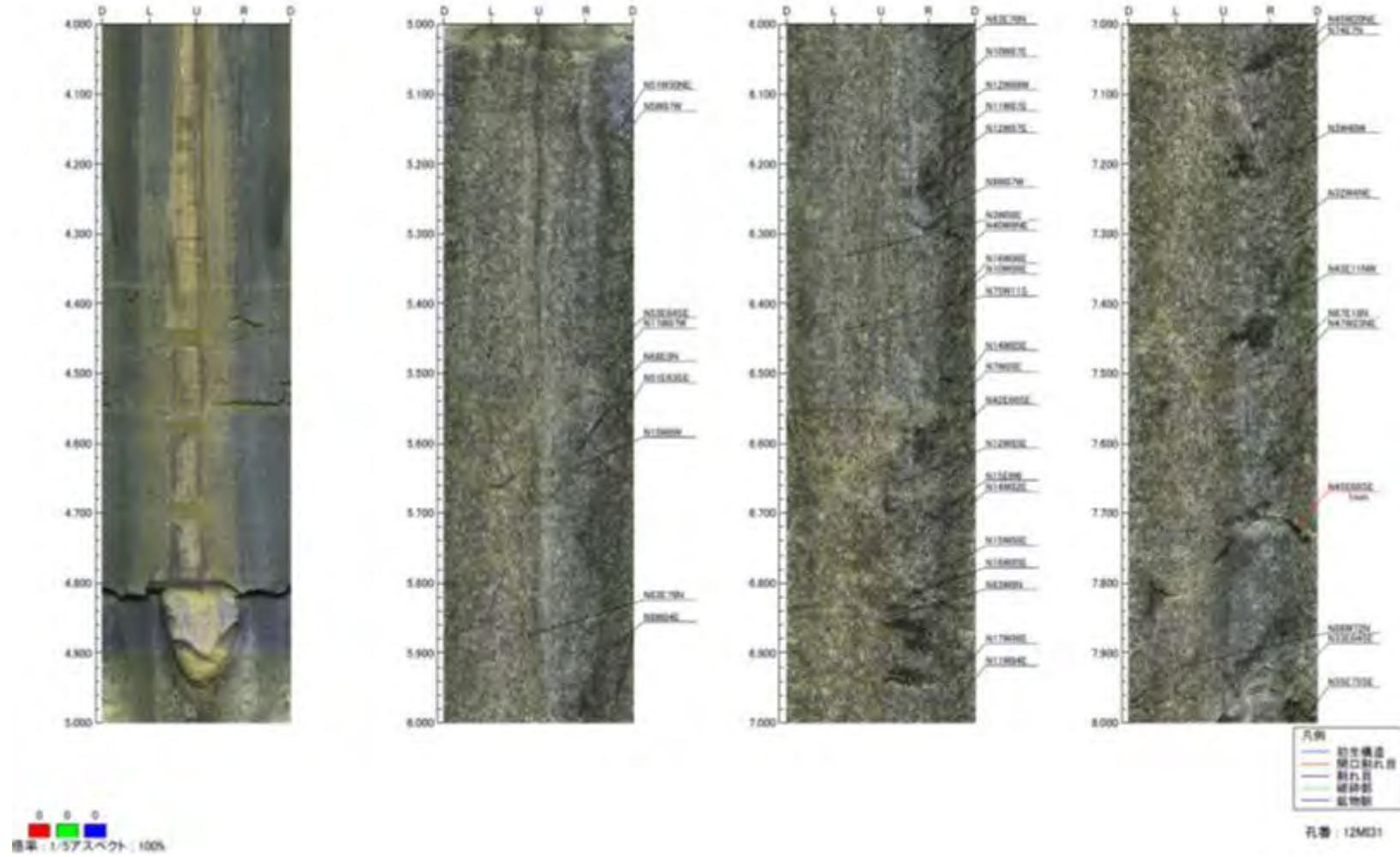


図 7.3.8-2(a) 12MI31 号孔 孔壁展開図 4.00～8.00mabh

孔番号: 12MI31

8,000m - 12,000m
 (4,000m - 25,807m)
 孔方位: 255 孔傾斜: -35

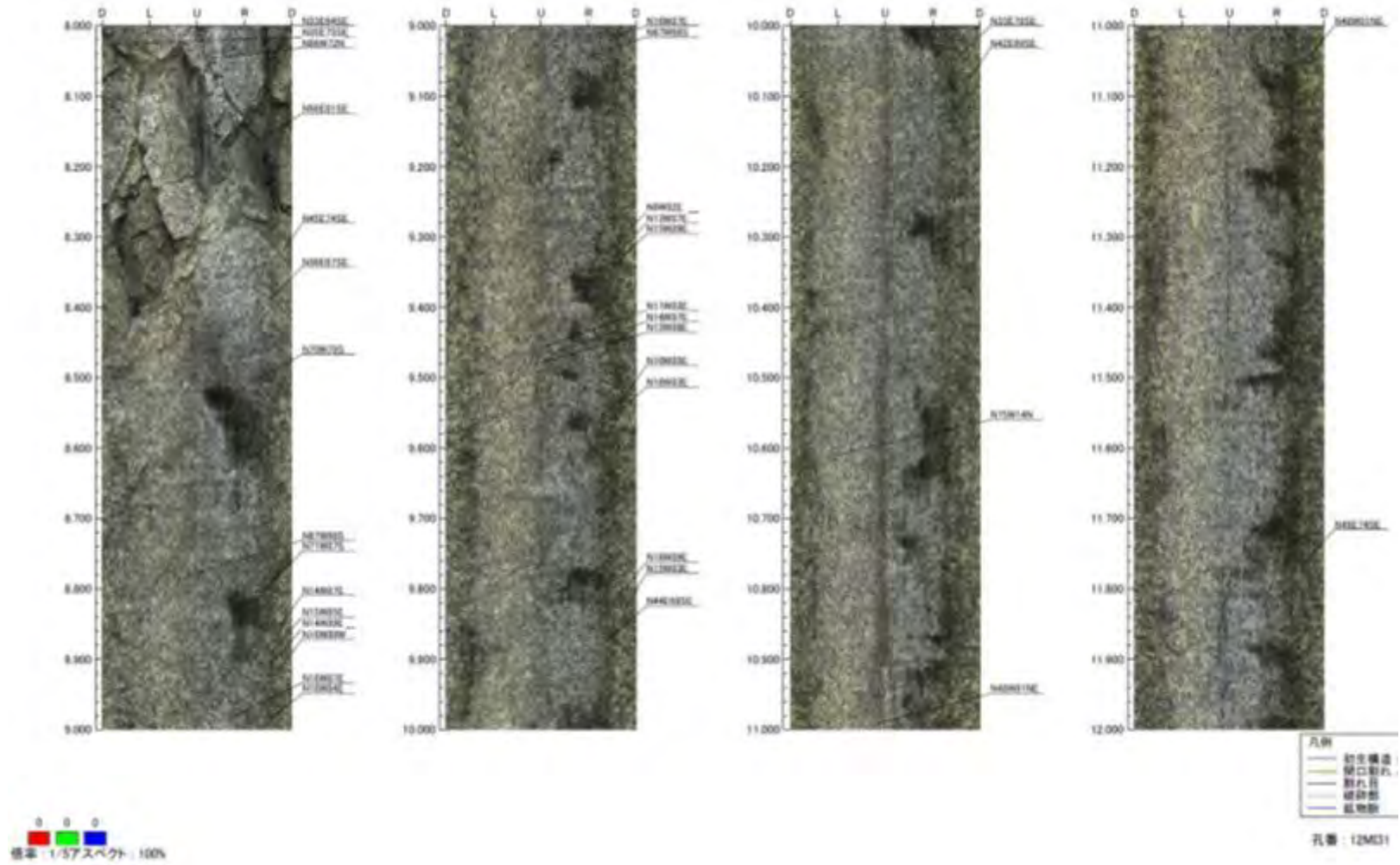


図 7.3.8-2(b) 12MI31 号孔 孔壁展開図 8.00~12.00mabh

孔番号: 12MI31

12,000m - 16,000m
(4,000m - 25,807m)
孔方位: 255 孔傾斜: -35

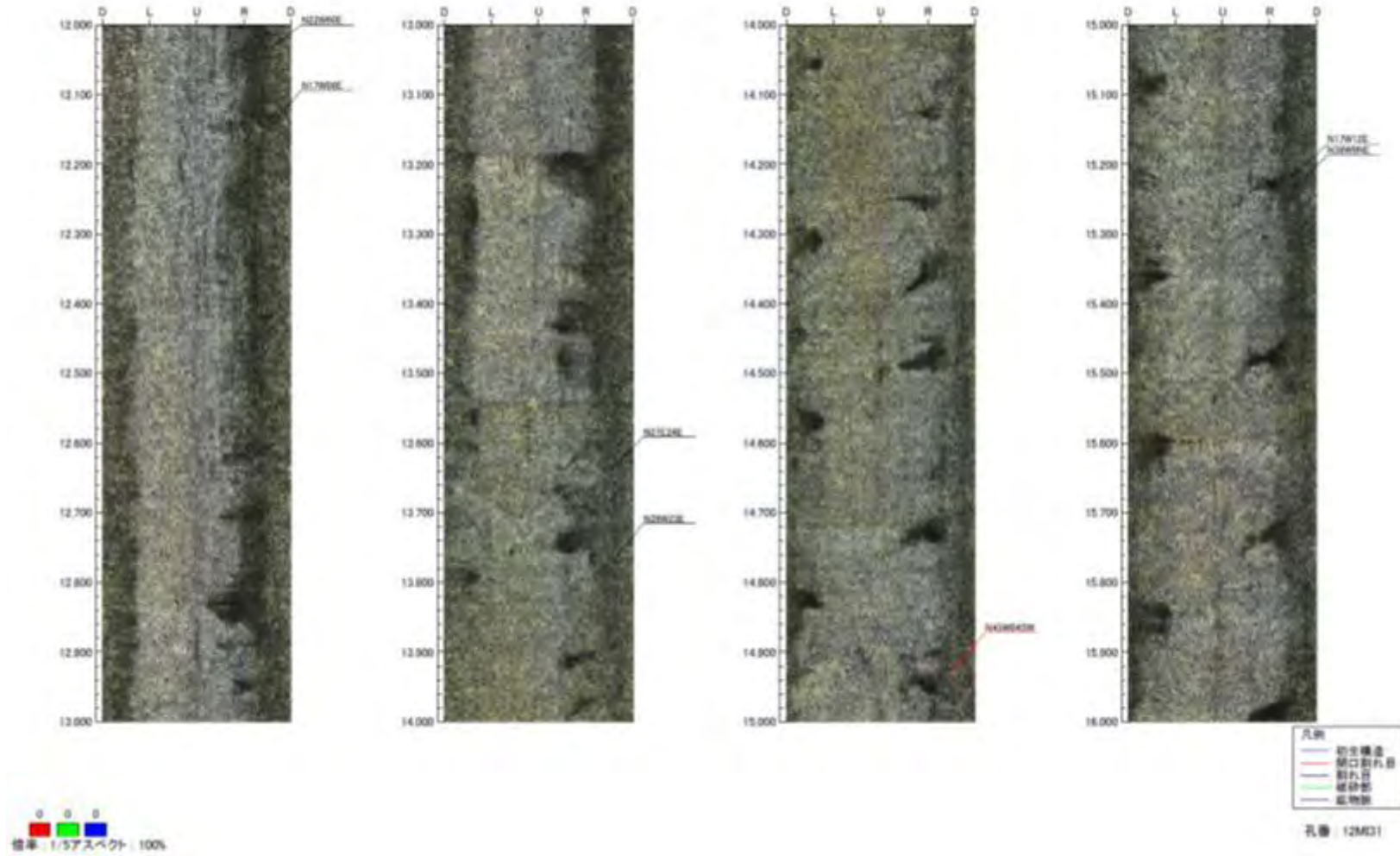


図 7.3.8-2(c) 12MI31 号孔 孔壁展開図 12.00~16.00mabh

孔番：12MI31

16,000m - 20,000m
(4,000m - 25,807m)
孔方位：255 孔傾斜：-35

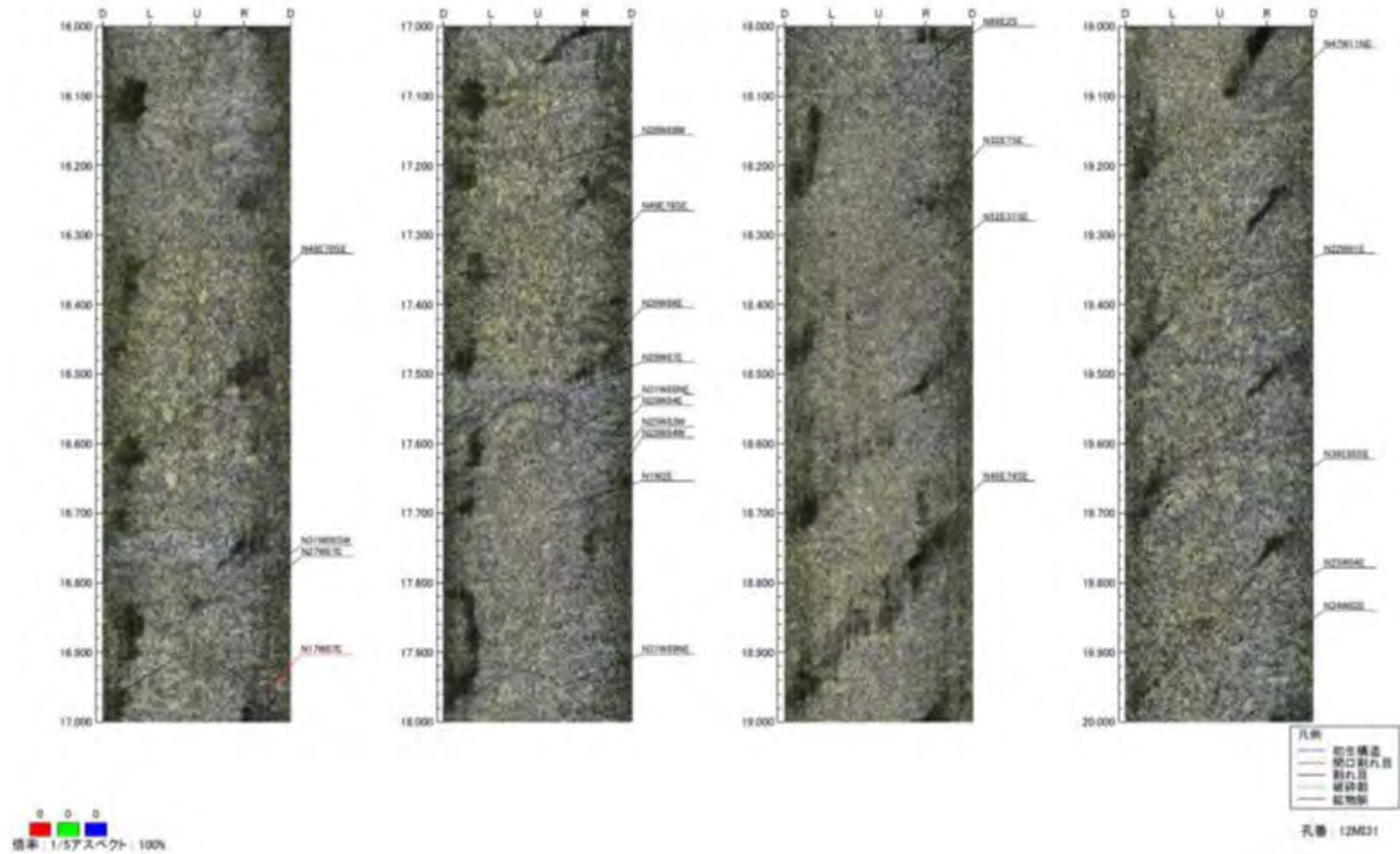


図 7.3.8-2(d) 12MI31 号孔 孔壁展開図 16.00~20.00mabh

孔番号: 12MI31

20,000m - 24,000m
 (4,000m - 25,907m)
 孔方位: 255 孔傾斜: -35

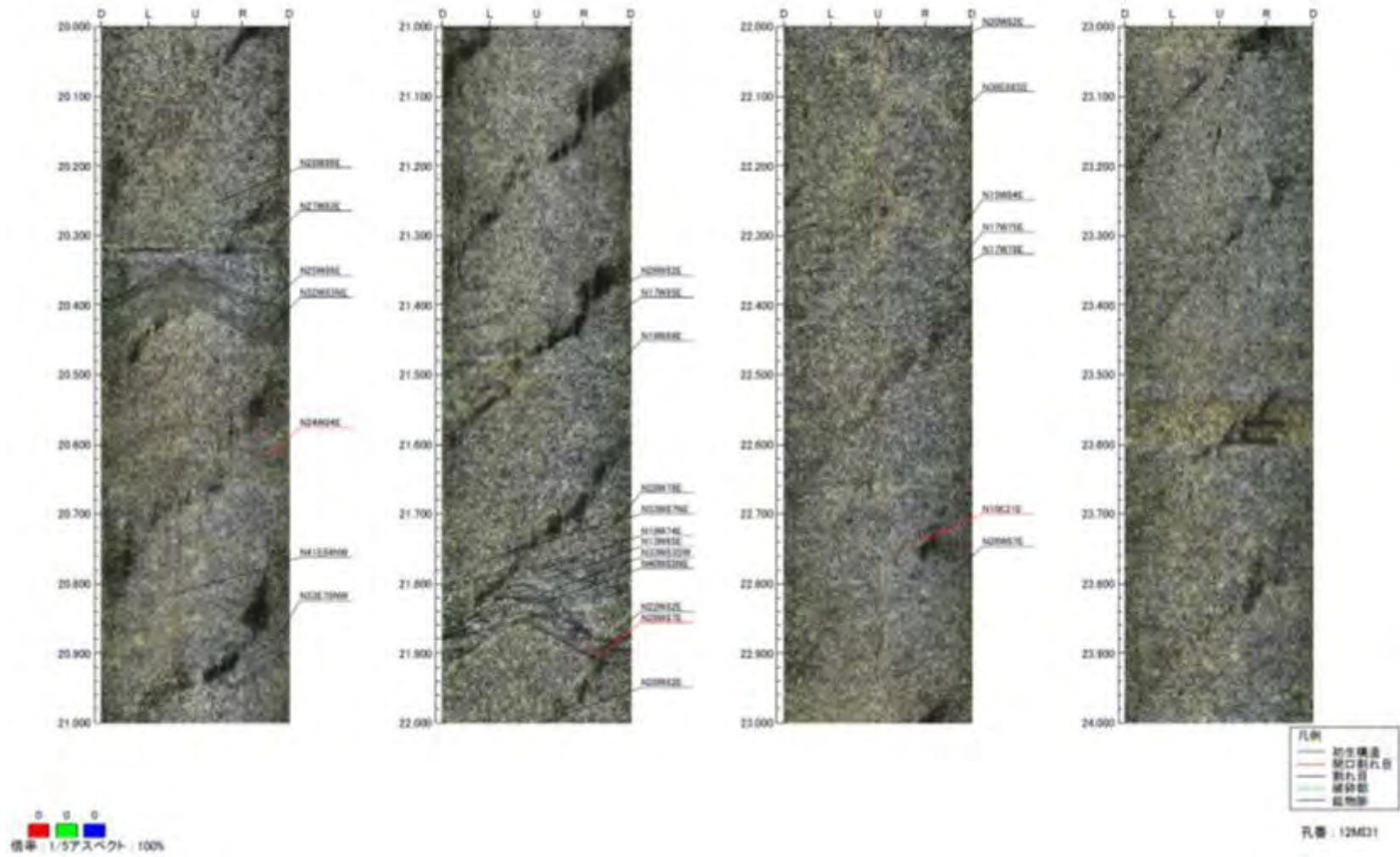


図 7.3.8-2(e) 12MI31 号孔 孔壁展開図 20.00~24.00mabh

孔番：12MI31

24,000m - 26,000m
(4,000m - 25,607m)
孔方位：255 孔傾斜：-35

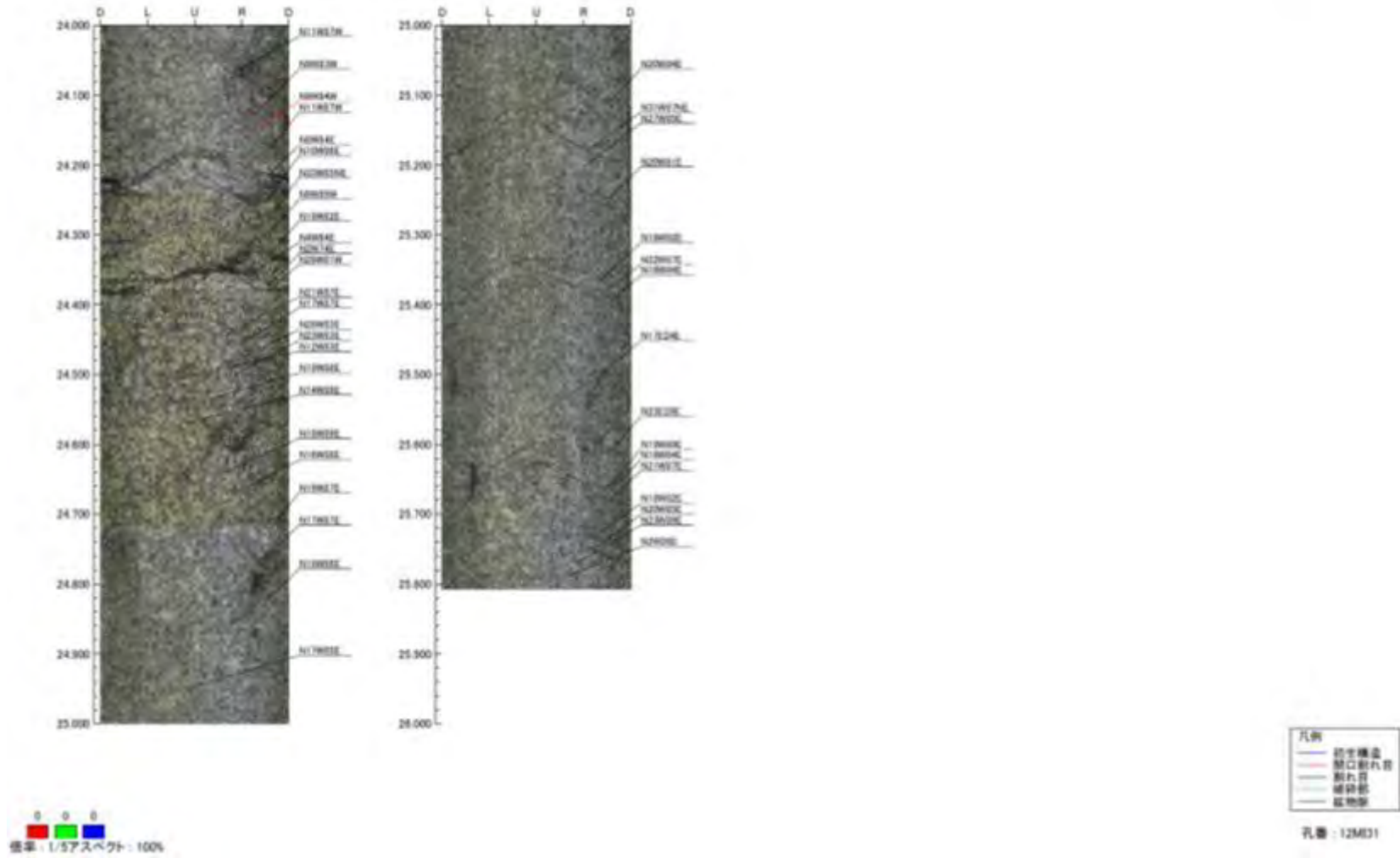


図 7.3.8-2(f) 12MI31 号孔 孔壁展開図 24.00~26.00mabh

孔番：13MI36

4.600m - 8.000m
(4.000m - 22.331m)
孔方位：255 孔傾斜：-33

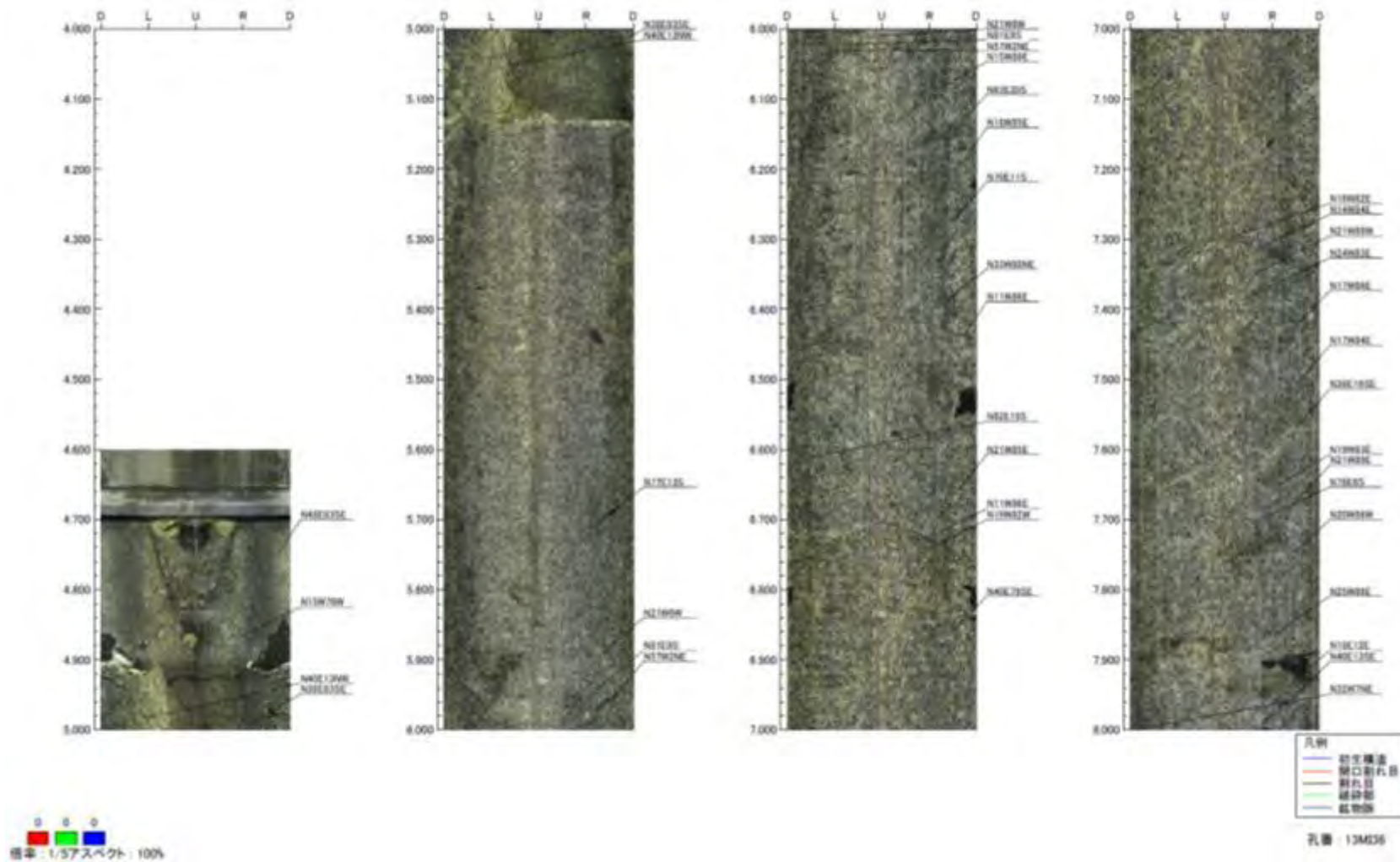


図 7.3.8-3(a) 13MI36 号孔 孔壁展開図 4.60~8.00mabh

孔番：13MI36

8.000m - 12.000m
(4.000m - 22.337m)
孔方位：255 孔傾斜：-33

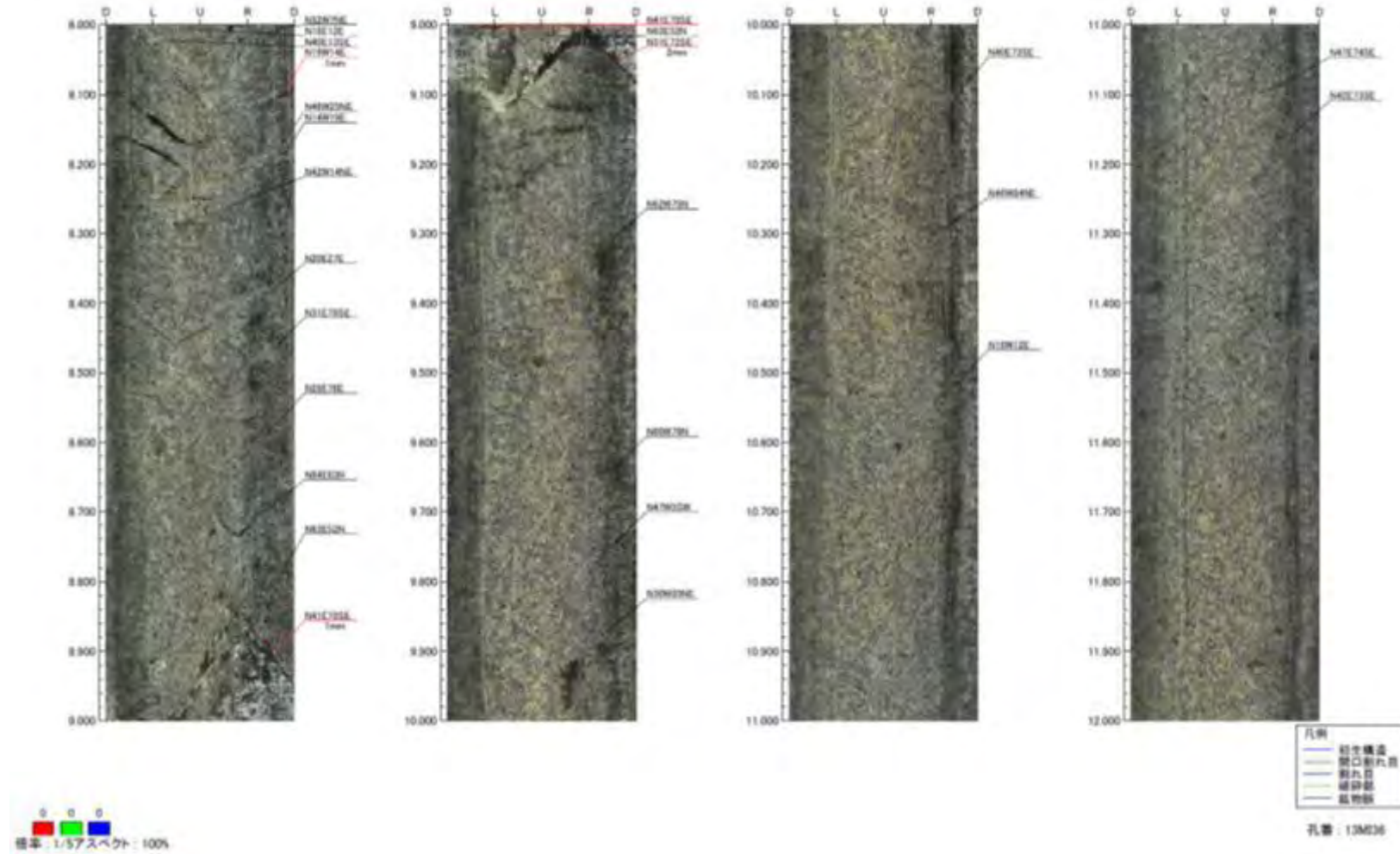


図 7.3.8-3(b) 13MI36 号孔 孔壁展開図 8.00～12.00mabh

孔番：13MI36

12.000m - 16.000m
(4.000m - 22.331m)
孔方位：255 孔傾斜：-33

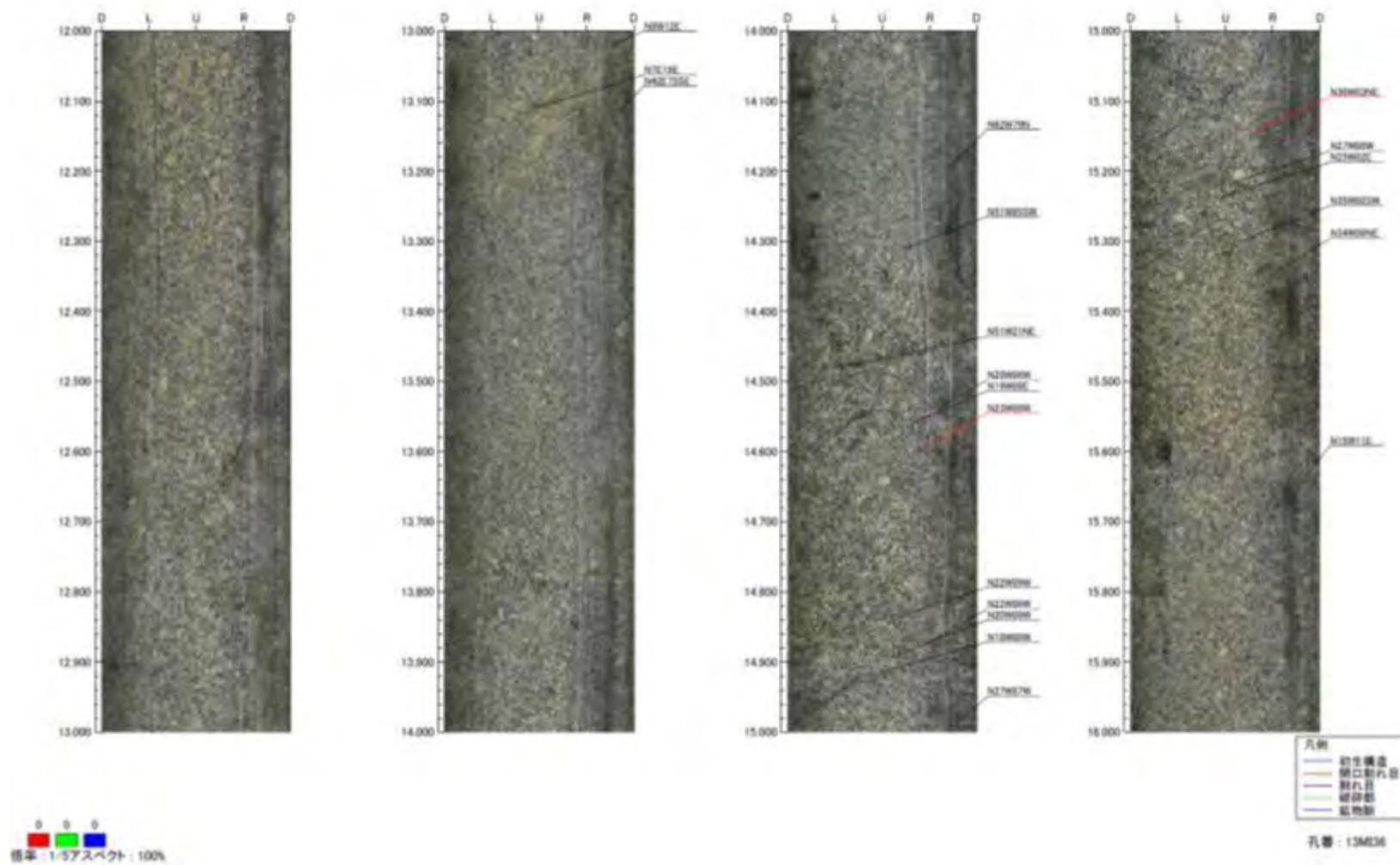


図 7.3.8-3(c) 13MI36 号孔 孔壁展開図 12.00~16.00mabh

孔番：13MI36

16.00m - 20.00m
 (4.000m - 22.331m)
 孔方位：255 孔傾斜：-33

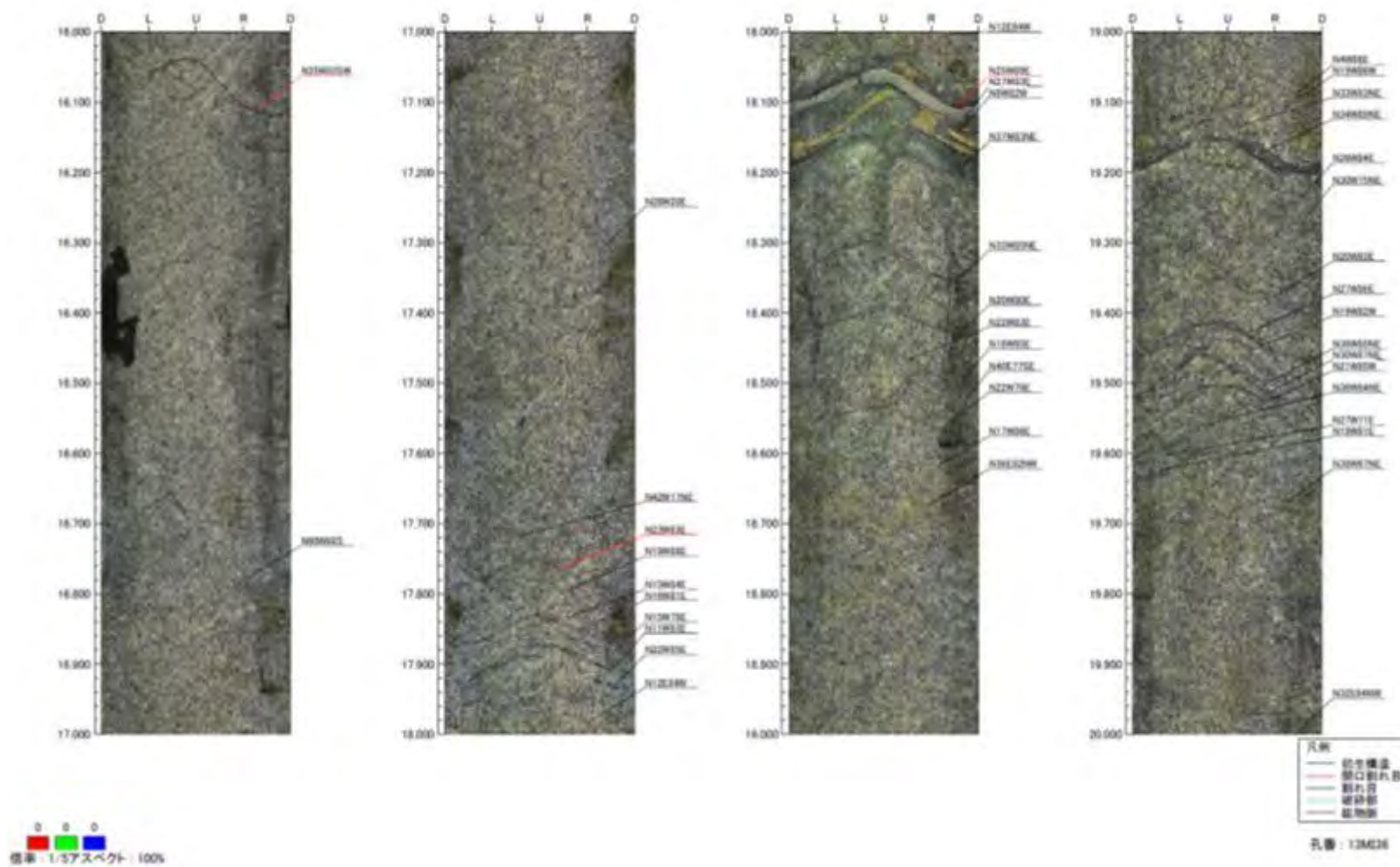


図 7.3.8-3(d) 13MI36 号孔 孔壁展開図 16.00~20.00mabh

孔番：13MI36

20,000m - 22,000m
(4,000m - 22,331m)
孔方位：255 孔傾斜：-33

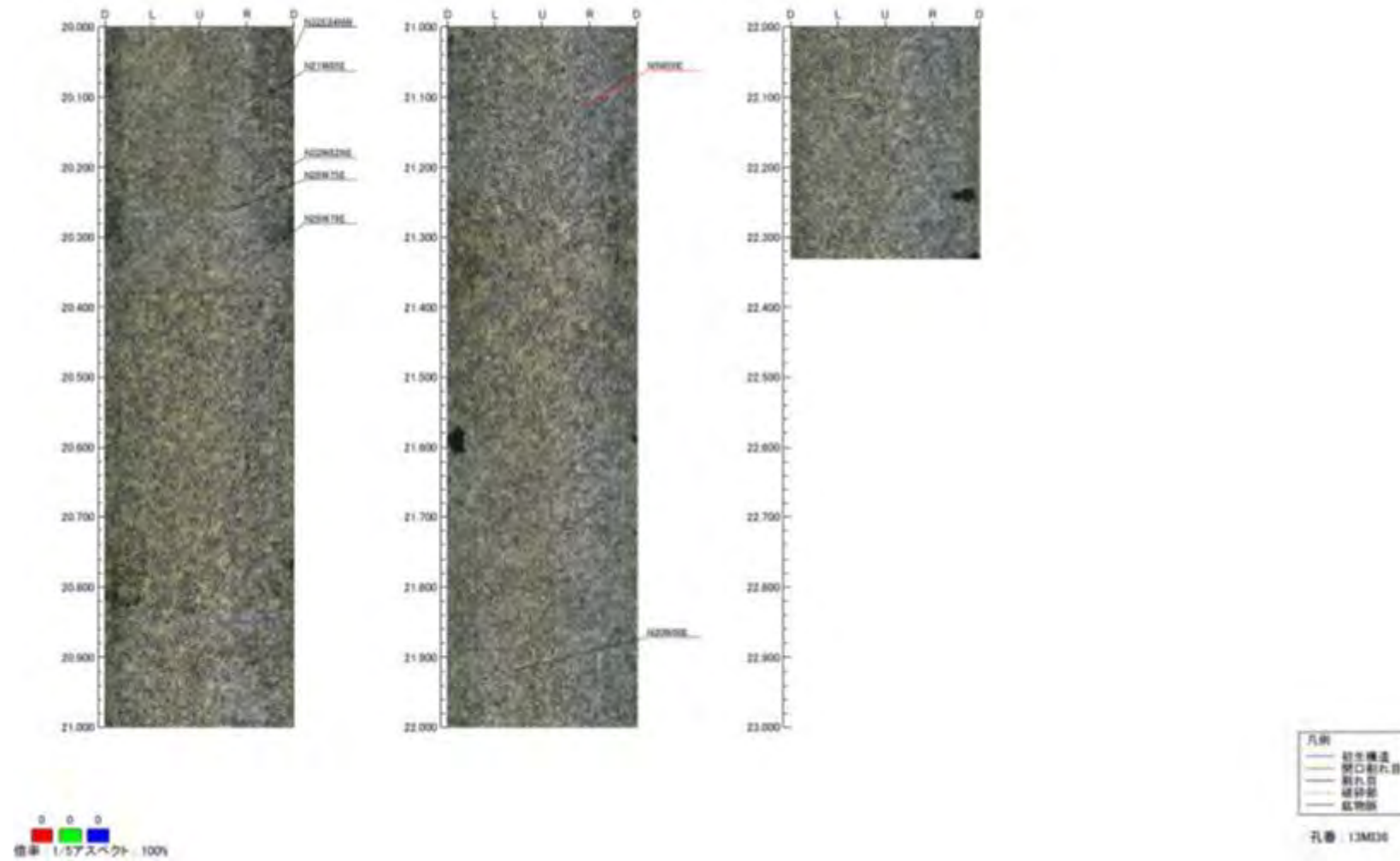


図 7.3.8-3(e) 13MI36 号孔 孔壁展開図 20.00~22.30mabh

7.3.8.2 割れ目の方向

12MI30号孔、12MI31号孔、13MI36号孔に認められた全岩盤分離面、割れ目、開口割れ目を統計的に整理した結果を図7.3.8-4、図7.3.8-5、図7.3.8-6に示す。また、各孔の全岩盤分離面、割れ目、開口割れ目の主な卓越方向を表7.3.8-2示す。全岩盤分離、割れ目、開口割れ目の主な卓越方向は、各孔ともにほぼ同じである。これらの第1卓越方向は第2、第3卓越方向に比較して相対的に集中度が高いが、第1卓越方向がボーリングの掘削方向とほぼ直交するため、孔と遭遇する確率が高いことの影響も受けていると考えられる。これに対して第2、第3卓越方向を構成するNE走向高傾斜および水平な全岩盤分離面は、よりボーリング孔に対して小さい角度で交差するために卓越度が相対的に低い可能性もある。

表 7.3.8-2 各孔の全岩盤分離面、割れ目、開口割れ目の主な卓越方向

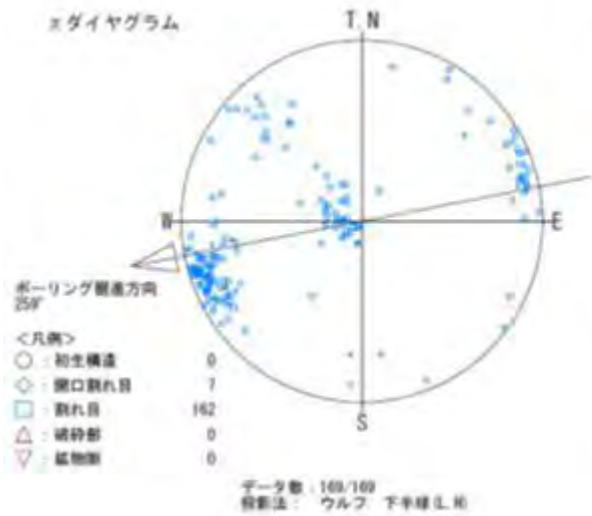
孔	全岩盤分離面の第1卓越方向	割れ目の第1卓越方向	開口割れ目の第1卓越方向	全岩盤分離面の第2、第3卓越方向
12MI30	N19W/88E (31%)	N18W/89E (31%)	N23W/85E (42%)	N47E/77EW (3%) N5W/19E (3%)
12MI31	N19W/85E (38%)	N17W/85E (39%)	N24W/87E (42%)	N45E/73EW (3%) N45W/15NE (3%)
13MI36	N20W/87E (28%)	N20W/87E (28%)	N25W/87E (24%)	N35E/77EW (4%) N5W/15E (4%)

() はステレオネットのポイントカウティングの集中度を示し、大きいほど集中度が高い。

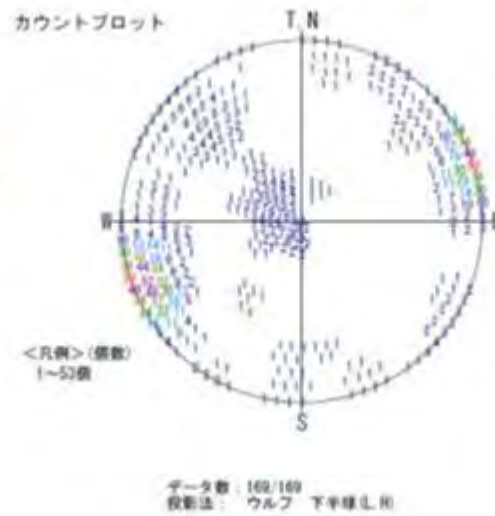
区分：全不連続面

孔番：12MI30

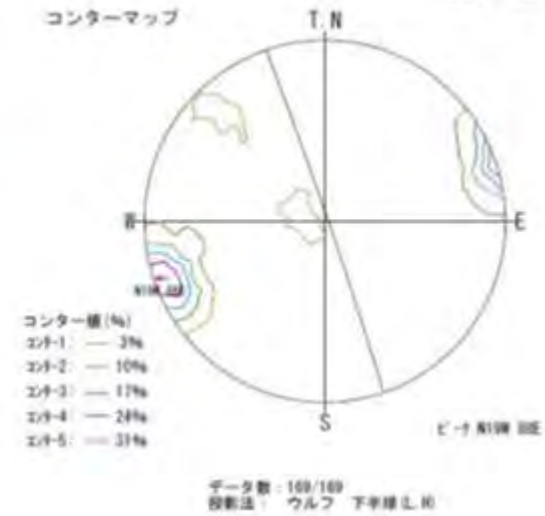
エディヤグラム



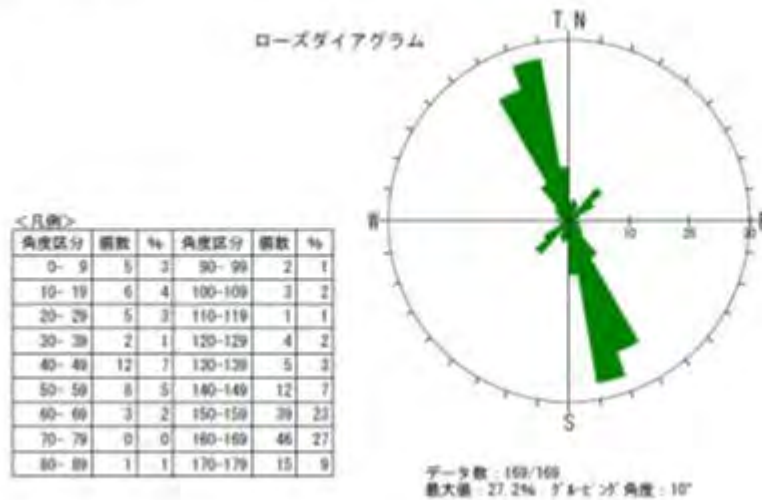
カウントプロット



コンターマップ



ローズダイアグラム



大円

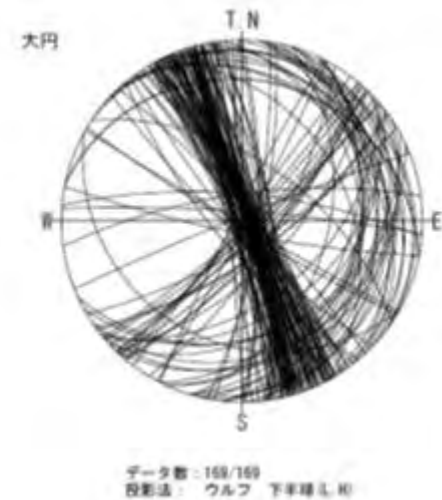


図 7.3.8-4(a) 12MI30 孔ステレオネット図 - 全不連続面-

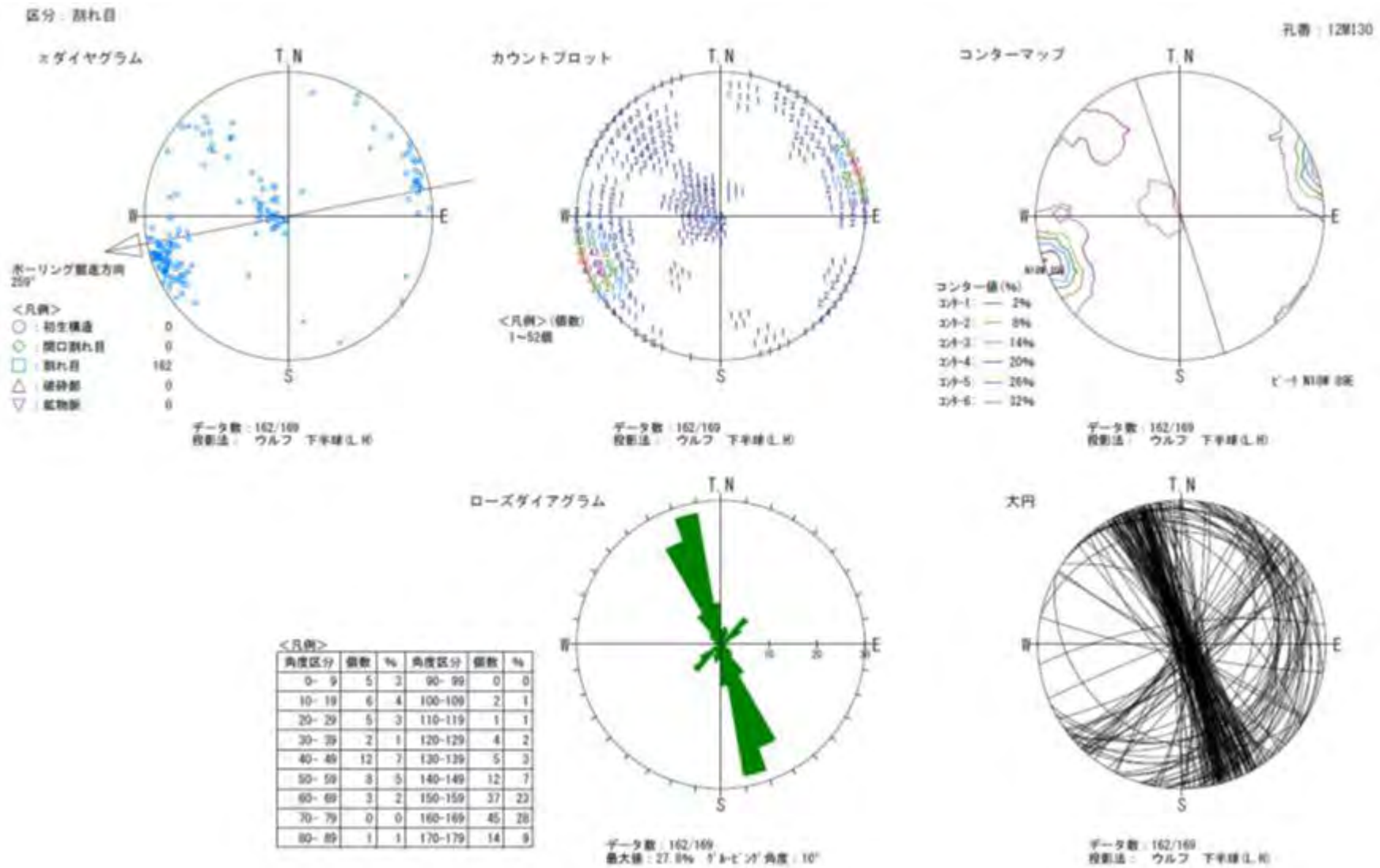


図 7.3.8-4(b) 12MI30 孔ステレオネット図 - 割れ目-

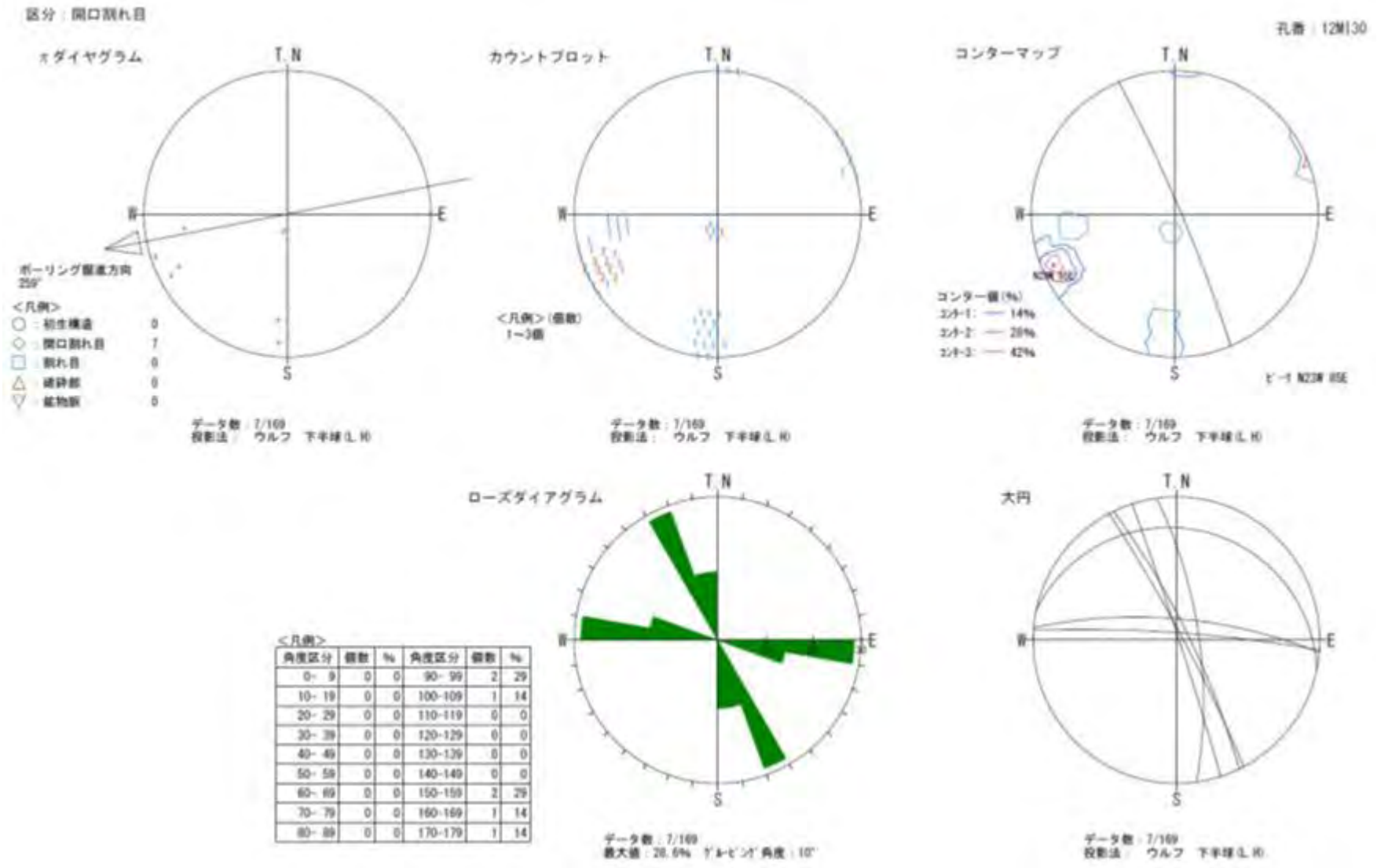
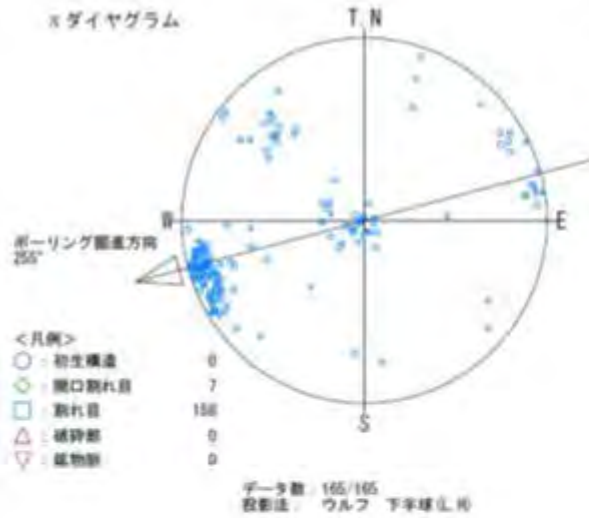


図 7.3.8-4(e) 12MI30 孔ステレオネット図 - 開口割れ目-

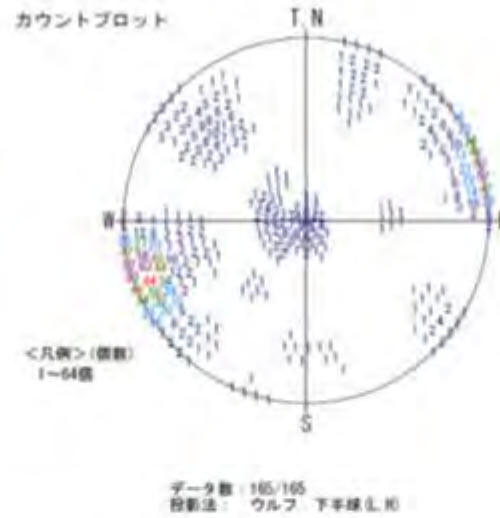
区分：全不連続面

孔番 12MI31

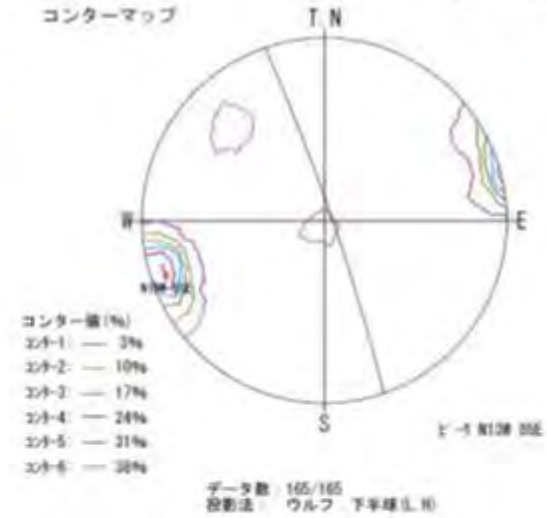
※ダイヤグラム



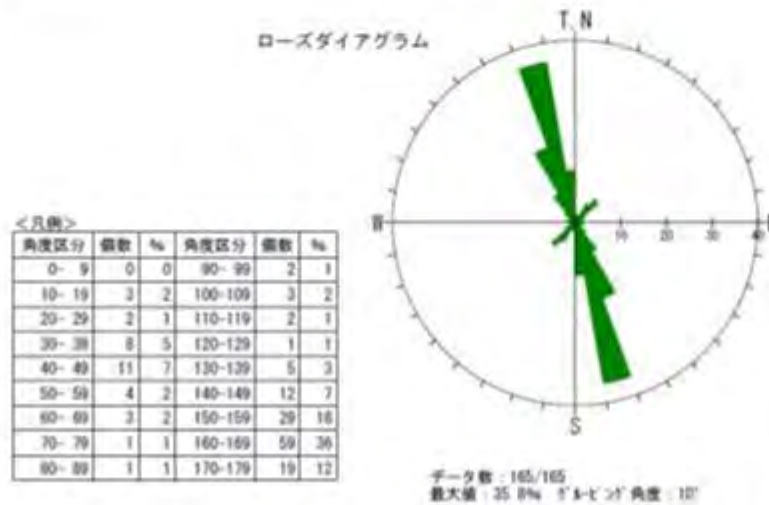
カウントプロット



コンターマップ



ローズダイヤグラム



大円

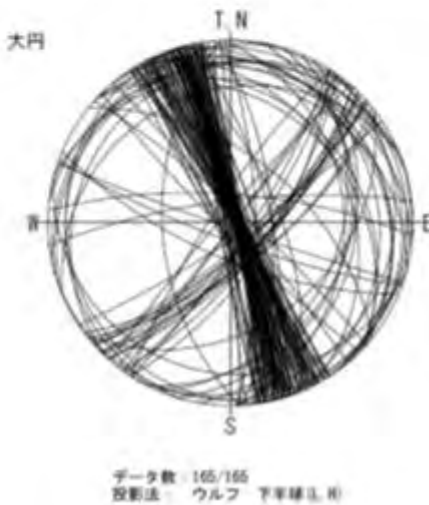
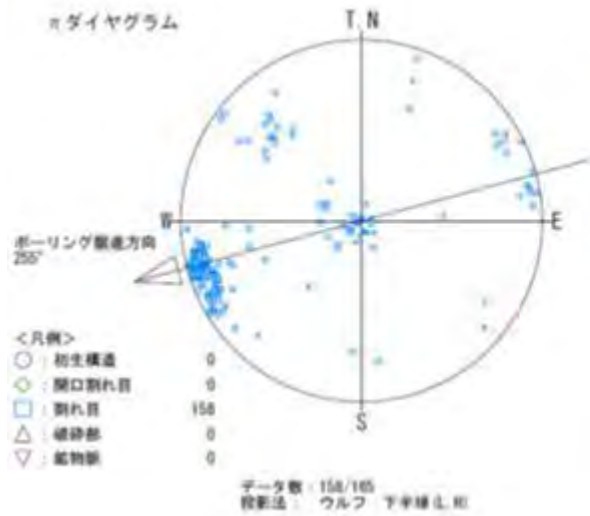


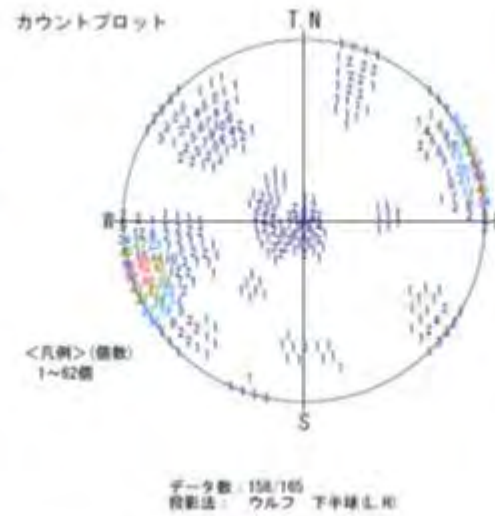
図 7.3.8-5(a) 12MI31 孔ステレオネット図 - 全不連続面-

区分：割れ目

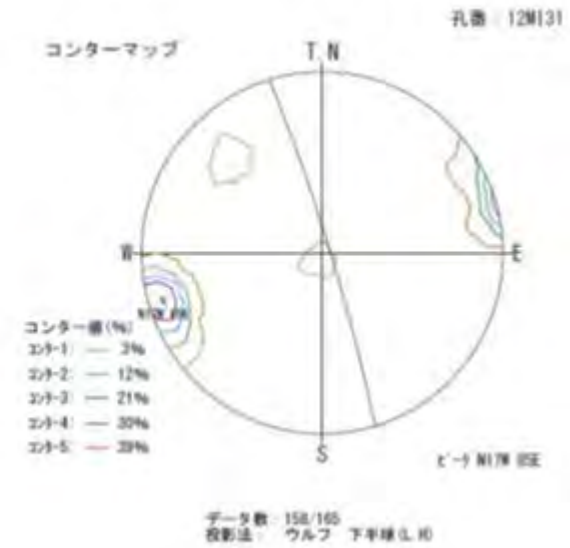
σダイヤグラム



カウントプロット



コンターマップ



ローズダイヤグラム

角度区分		個数	%	角度区分		個数	%
0-9	0	0	0	90-99	2	1	
10-19	2	1	100-109	3	2		
20-29	2	1	110-119	2	1		
30-39	6	5	120-129	1	1		
40-49	10	6	130-139	4	3		
50-59	4	3	140-149	12	8		
60-69	2	2	150-159	27	17		
70-79	1	1	160-169	58	37		
80-89	1	1	170-179	18	11		



大円

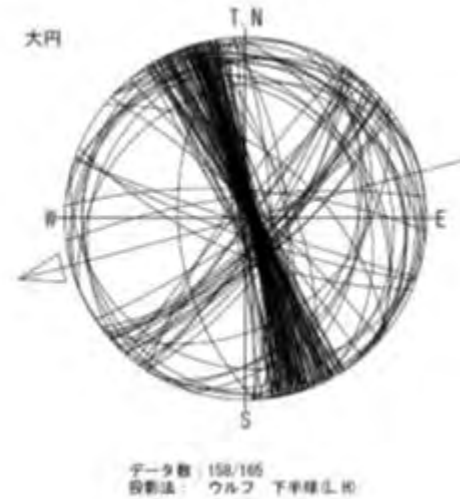


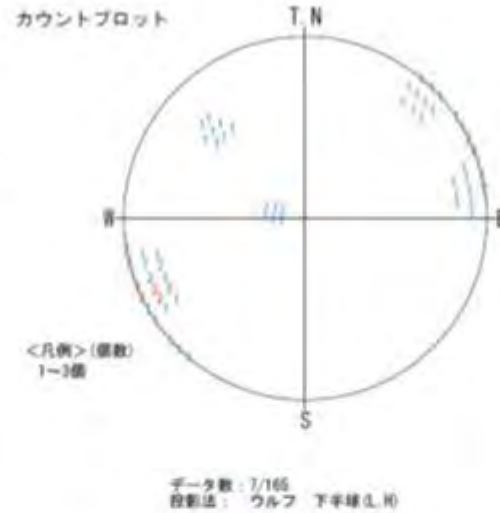
図 7.3.8-5(b) 12MI31 孔ステレオネット図 - 割れ目-

区分：開口割れ目

σダイヤグラム



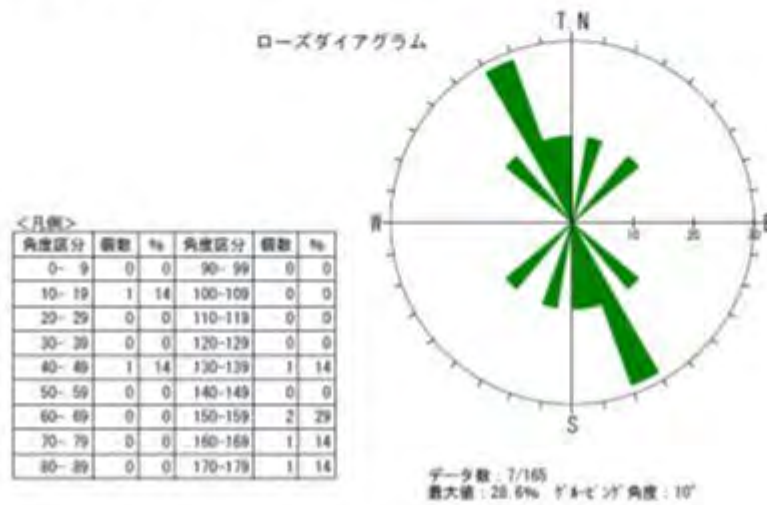
カウントプロット



コンターマップ



ローズダイヤグラム



大円

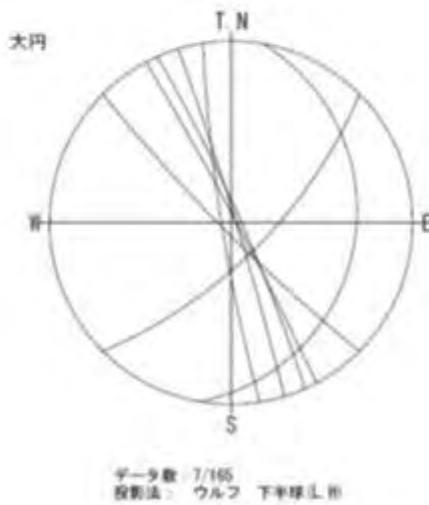
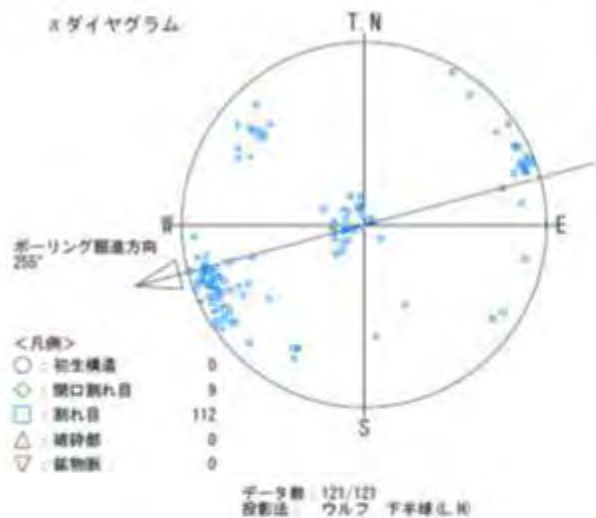


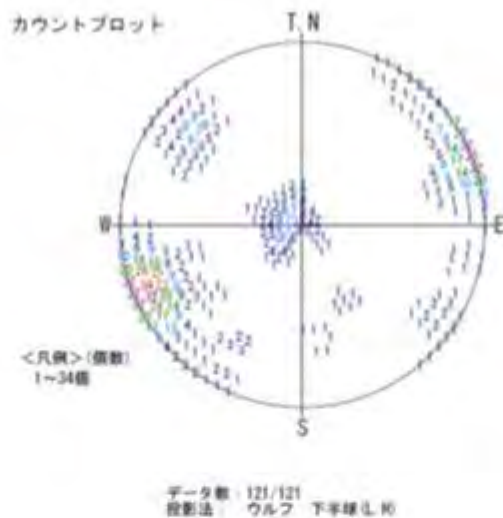
図 7.3.8-5(c) 12MI31 孔ステレオネット図 - 開口割れ目-

区分：全不連続面

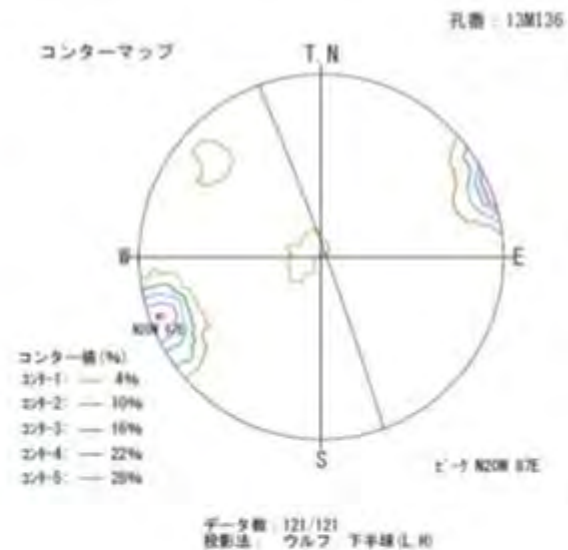
αダイヤグラム



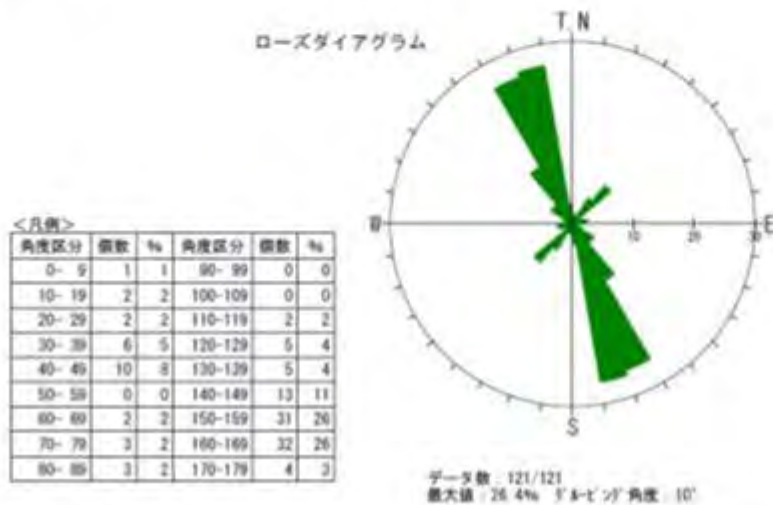
カウントプロット



コンターマップ



ローズダイヤグラム



大円

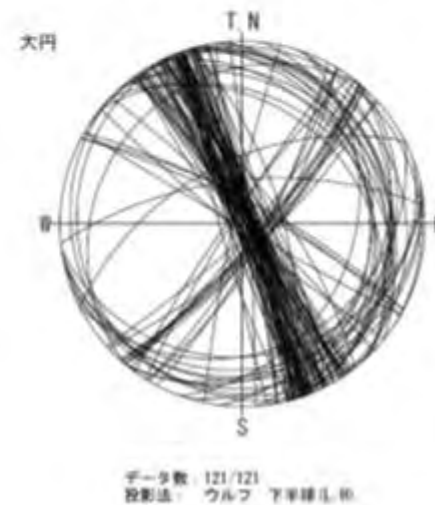
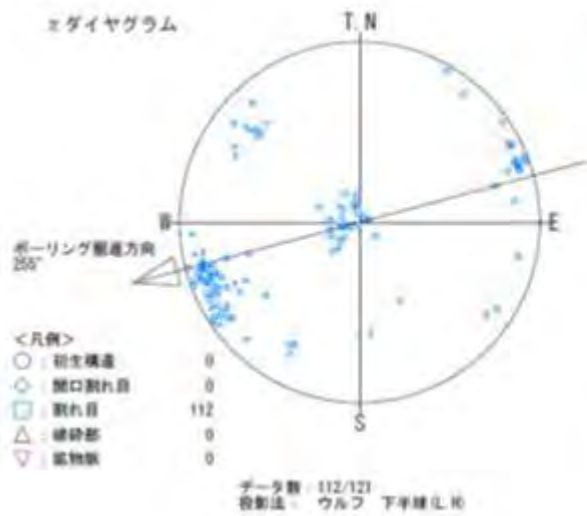


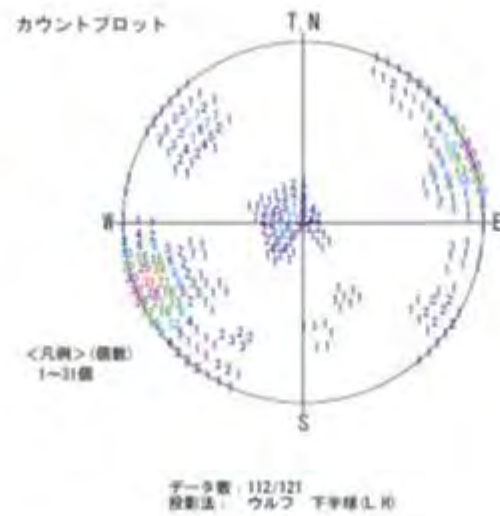
図 7.3.8-6(a) 13M136 孔ステレオネット図 - 全不連続面-

区分：割れ目

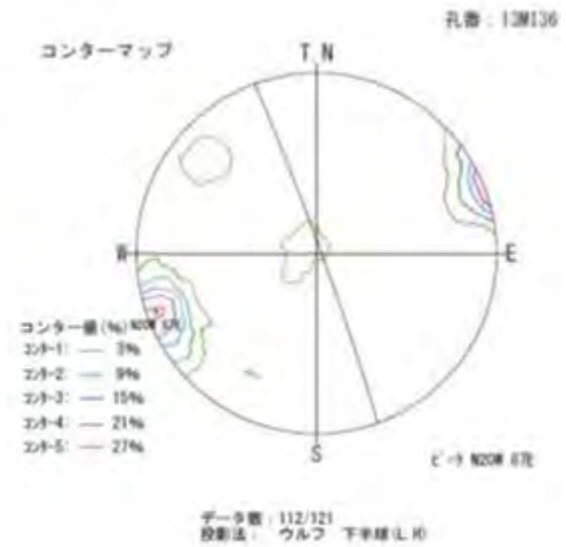
エディヤグラム



カウントプロット



コンターマップ



ローズダイアグラム

<凡例>					
角度区分	個数	%	角度区分	個数	%
0- 9	1	1	90- 99	0	0
10- 19	2	2	100-109	0	0
20- 29	2	2	110-119	2	2
30- 39	5	4	120-129	5	4
40- 49	9	8	130-139	5	4
50- 59	0	0	140-149	12	11
60- 69	2	2	150-159	27	24
70- 79	3	3	160-169	31	28
80- 89	3	3	170-179	3	3



大円

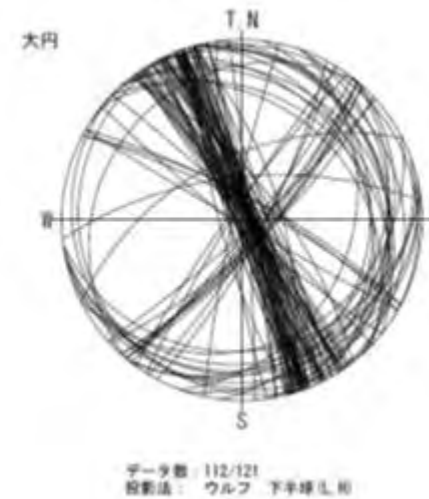
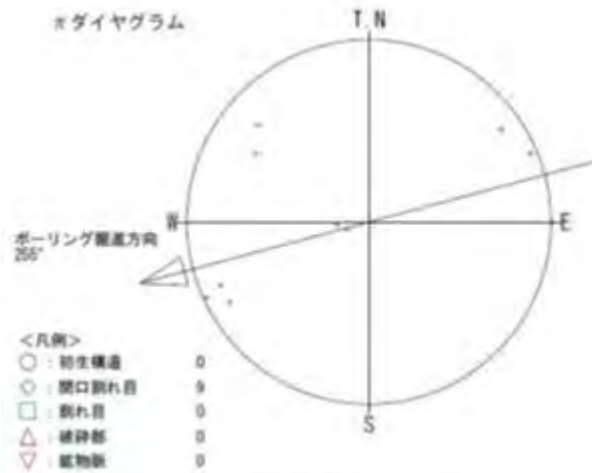


図 7.3.8-6(b) 13MI36 孔ステレオネット図 - 割れ目-

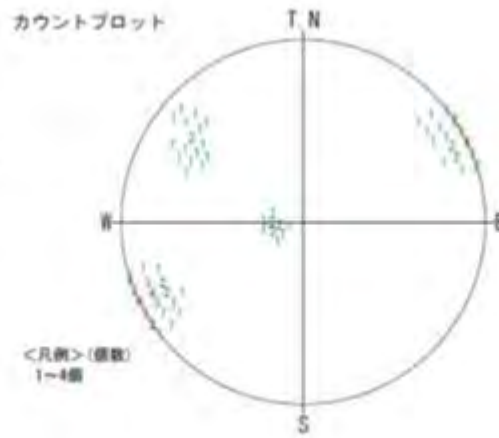
区分：開口割れ目

※ダイヤグラム



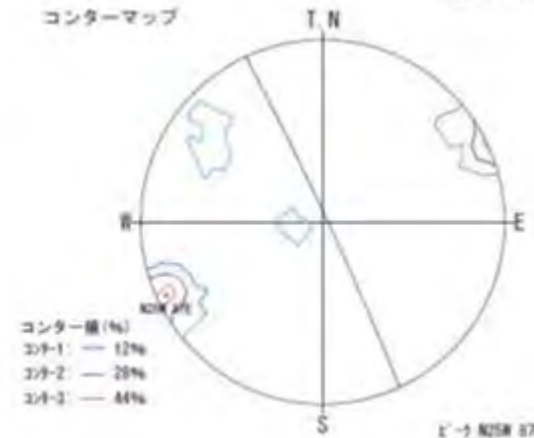
データ数：9/121
投影法：ウルフ 下半球LH

カウントプロット



データ数：9/121
投影法：ウルフ 下半球LH

コンターマップ



コンター値(%)
コン1：12%
コン2：28%
コン3：44%

データ数：9/121
投影法：ウルフ 下半球LH

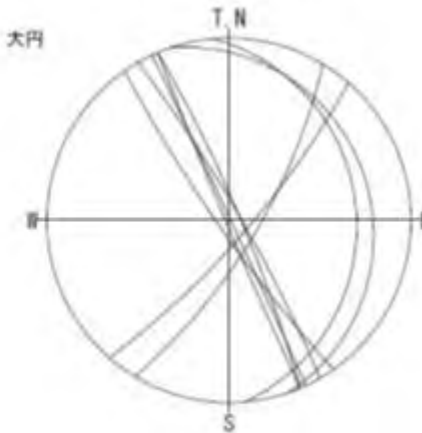
ローズダイヤグラム

角度区分		個数	%	角度区分		個数	%
0-9	0	0	0	90-99	0	0	0
10-19	0	0	0	100-109	0	0	0
20-29	0	0	0	110-119	0	0	0
30-39	1	11	11	120-129	0	0	0
40-49	1	11	11	130-139	0	0	0
50-59	0	0	0	140-149	1	11	11
60-69	0	0	0	150-159	4	44	44
70-79	0	0	0	160-169	1	11	11
80-89	0	0	0	170-179	1	11	11



データ数：9/121
最大値：44.4% トーリング角度：10°

大円



データ数：9/121
投影法：ウルフ 下半球LH

図 7.3.8-6(c) 13MI36 孔ステレオネット図 - 開口割れ目-

7.3.8.3 割れ目の分布特性

ボーリング孔内に分布する割れ目には離散的である一方で、割れ目が集中する箇所も認められる。図7.3.8-7に全岩盤分離面の間隔(定義は表7.3.8-1の説明を参照)の分布を示すとともに、図7.3.8-8と図7.3.8-9に深度-方位分布および深度-傾斜分布をそれぞれ示す。図7.3.8-7に示した岩盤分離面の間隔は、孔における割れ目の分布は均質ではなく集中箇所が偏在するクラスター的な分を呈する。岩盤分離面の集中箇所を抜き出し、図7.3.8-8と図7.3.8-9から集中箇所を構成する岩盤分離面の方向を整理した。その結果を表7.3.8-3に各孔の全岩盤分離面の集中箇所とその主な方向として示す。割れ目の集中箇所の多くは、孔全体の岩盤分離面の方向をステレオネットで統計処理した際の第1卓越方向にあたるNNW系の岩盤分離面で構成される。これに比べてH(水平～緩傾斜)系やNE系の岩盤分離面は、より離散的である。ただし、12MI30号孔の区間②、13MI36号孔の区間①はH系の岩盤分離面がNNW系に比べてより多く占める。H系の岩盤分離面はNNW系やNE系と比べて孔との遭遇率が低いことを考慮すれば、より高い空間分布密度を有する可能性がある。

表7.3.8-3 各孔の全岩盤分離面の集中箇所とその主な方向

孔	区間①	区間②	区間③	区間④	区間⑤	区間⑥	区間⑦
12MI30	5.70 -6.30mabh	7.40 -7.80mabh	18.20 -18.50mabh	21.90 -22.00mabh	22.80 -23.60mabh	24.60 -25.00mabh	26.50 -27.10mabh
	NNW	H、NNW	NNW	NNW、H	NNW、NE	NNW	NNW
12MI31	5.50 -6.80mabh	8.00 -9.50mabh	17.40 -17.60mabh	21.40 -21.90mabh	24.10 -24.70mabh	25.20 -25.80mabh	
	NNW、H	NNW、NE	NNW	NNW	NNW	NNW、H	
13MI36	5.90 -6.30mabh	7.30 -8.20mabh	14.40 -15.30mabh	17.80 -18.50mabh	19.10 -19.70mabh		
	H、NNW	NNW、H	NNW	NNW	NNW		

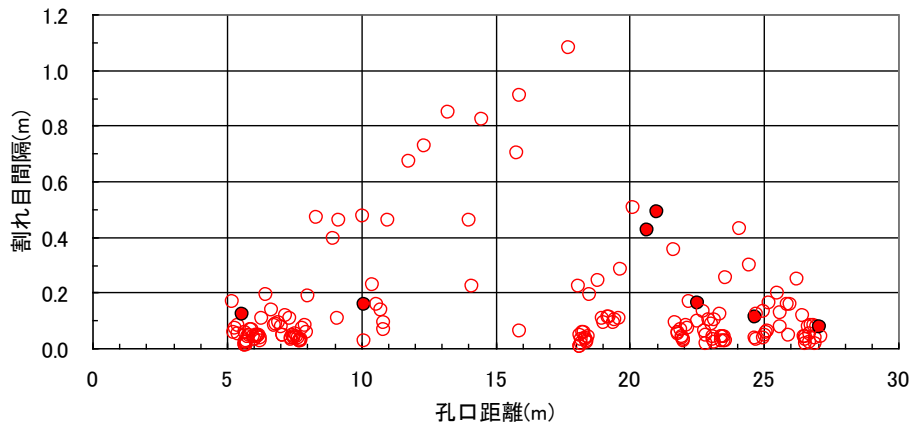
区間の下に数字は孔口距離を示す(単位m)。

NNW: N20W/85Eの方向を中心として分布する割れ目。孔全体では第1卓越方向で、最も遭遇確率が大きい。

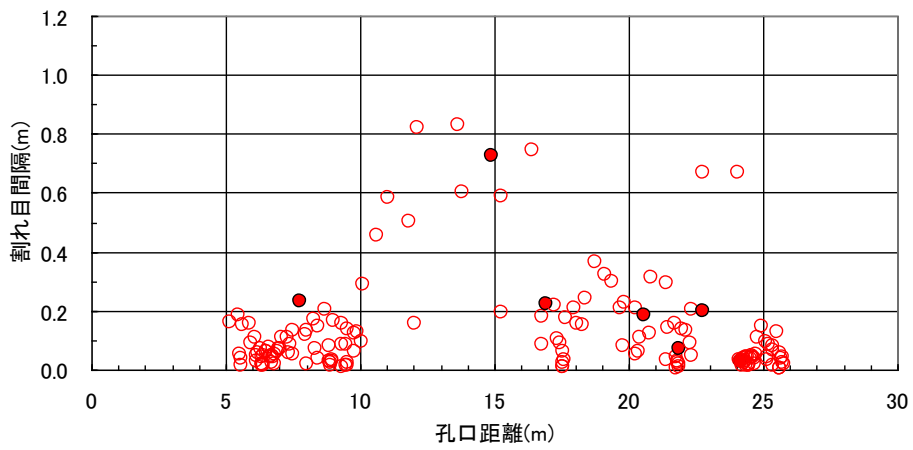
H: 主に水平から30度以下の緩傾斜(主にE～SE傾斜)を中心として分布する割れ目。孔全体では第2もしくは第3越方向でNNW系、NE系の主要に比べて遭遇確率が低い。

NE: N45E～N35E /75EWの方向を中心として分布する割れ目。孔全体では第2もしくは第3越方向で、遭遇確率はNNW系より低く、水平系に比べて遭遇確率が高い。

12MI30 号孔



12MI31 号孔



13MI36 号孔

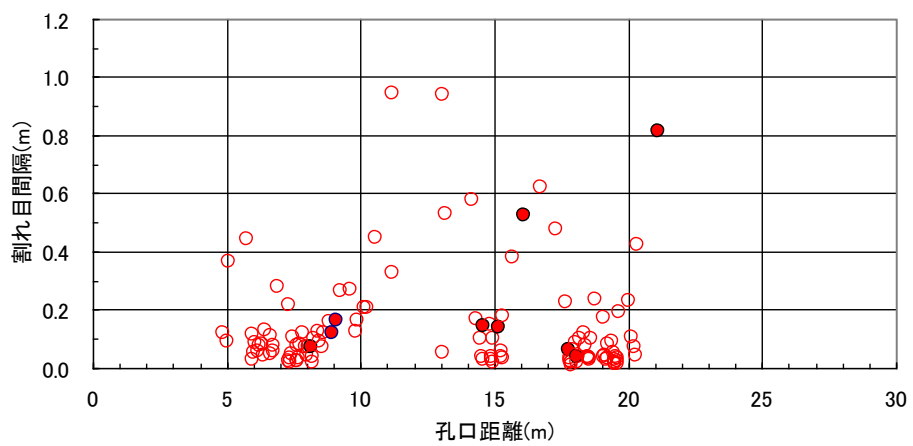


図 7.3.8-7 全岩盤分離面の間隔分布

※ 赤丸の塗りつぶしは開口割れ目

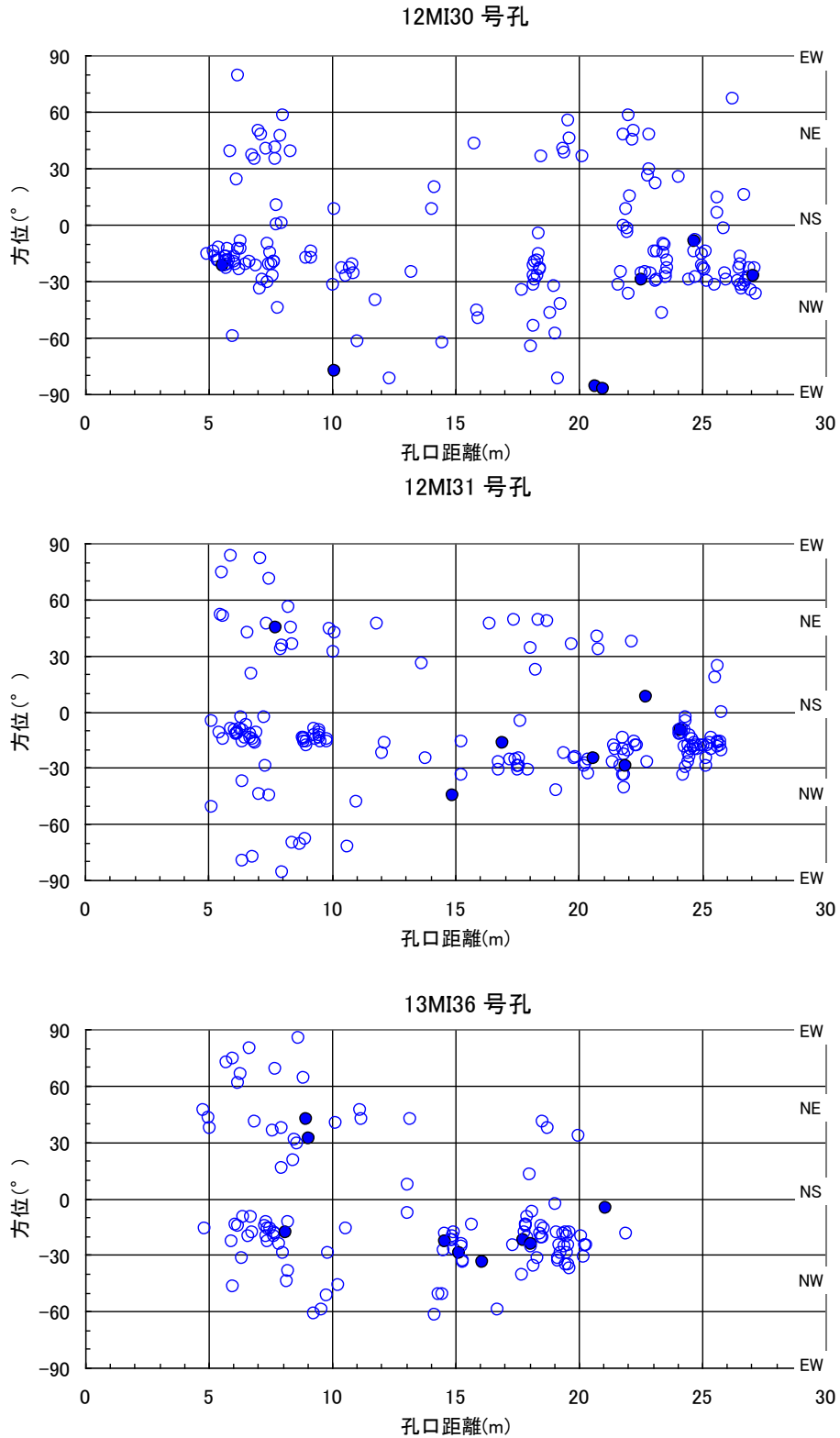


図 7.3.8-8 全岩盤分離面の深度-方位分布

※ 青丸の塗りつぶしは開口割れ目。Y軸の方位は、 0° は NS 走向、 $\pm 90^\circ$ は EW 走向を示し、 $0^\circ \sim 90^\circ$ までの正の値が NW 走向、 $0^\circ \sim -90^\circ$ までの負の値が NE 走向の値を示す。

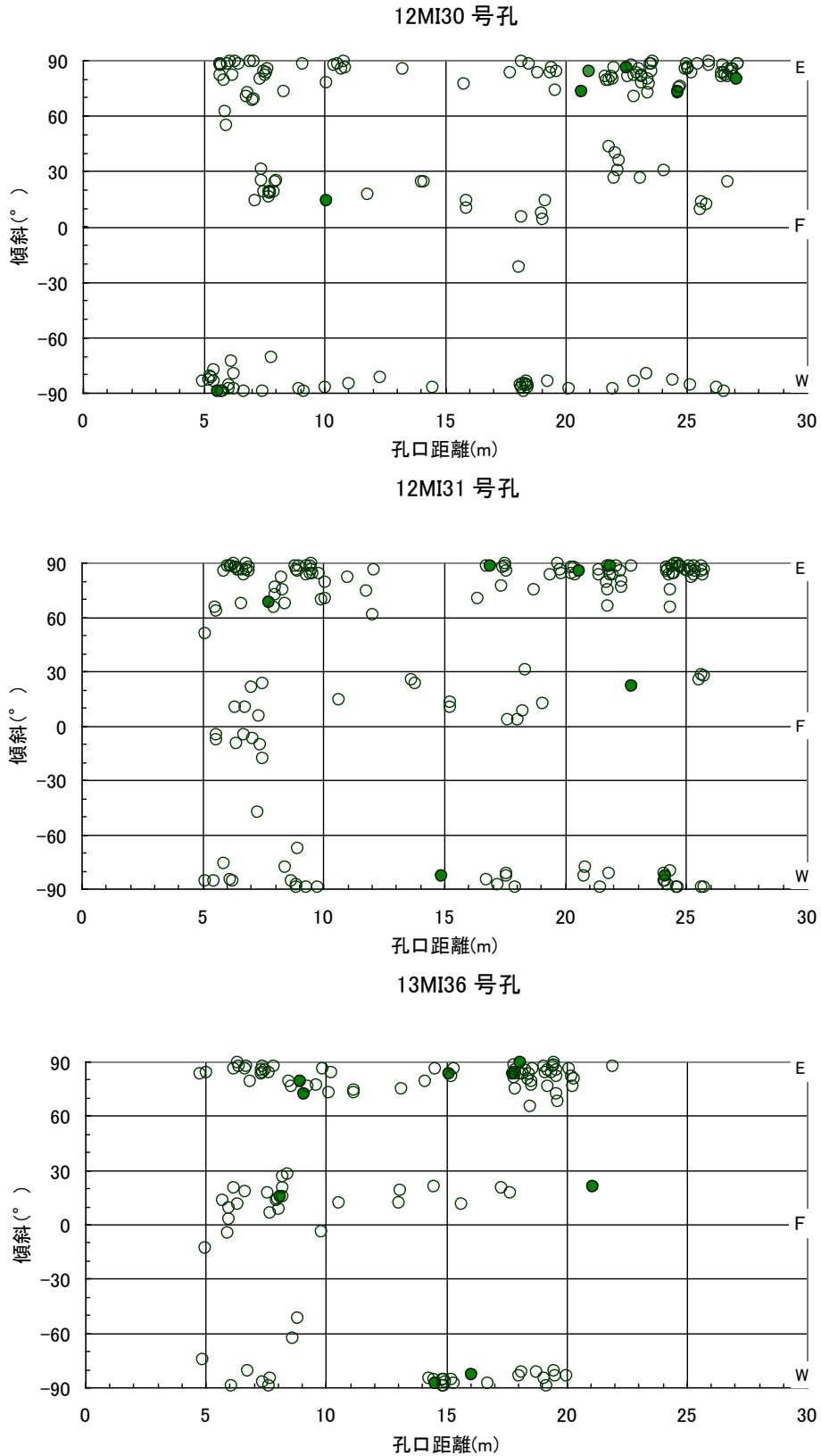


図 7.3.8-9 全岩盤分離面の深度-傾斜分布

※ 緑丸の塗りつぶしは開口割れ目。Y軸の方位は、 0° は水平、 $\pm 90^{\circ}$ は鉛直傾斜を示し、 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ までの正の値がE傾斜（もしくはNE傾斜）、 $0^{\circ} \sim -90^{\circ}$ までの負の値がW傾斜（もしくはNW傾斜）を示す。

7.3.8.4 割れ目の開口幅

割れ目の開口幅の計測については、水理試験によって透水性が相対的に大きく、湧水のある割れ目について、その開口幅（間隙幅）を計測した。図 7.3.8-10～図 7.3.8-12 に 12MI30 号孔、12MI31 号孔、13MI36 号孔の開口幅を HR-BTV 画像とともに示す。また、表 7.3.8-4 に割れ目の開口幅の計測結果の一覧を示す。開口が認められる割れ目の多くは、各孔の全岩盤分離面の第 1 卓越方向と同じ NNW の走向で高傾斜であるが、水平な開口割れ目（12MI30 号孔の①、13MI36 号孔の⑥）や、NE 走向で高傾斜（12MI30 号孔の②、③）も認められる。これらの割れ目の最大の開口幅は、0.46 mm（13MI36 孔の③ 開口割れ目）であるが、全体の半数は 0.1mm 以下である。開口幅が 0.1mm 以下の割れ目については、孔壁面全体で連続して開口していることは希であり、鉱物充填や上下盤が密着していることによって開口が認められない箇所もあり、部分的な開口となっている場合が多い。

表 7.3.8-4 開口割れ目の開口幅の計測結果の一覧

孔番	開口割れ目 ①	開口割れ目 ②	開口割れ目 ③	開口割れ目 ④	開口割れ目 ⑤	開口割れ目 ⑥
12MI30	10.11 m	20.66 m	21.00 m	22.53 m	24.67 m	27.08 m
	N78W/14N	N86W/73N	N87W/84N	N29W/86E	N9W/73E	N27W/80E
	0.18 mm	0.11 mm	0.09 mm	0.08 mm	0.05 mm	0.03 mm
12MI31	14.88 m	16.93 m	20.59 m	21.89 m	22.74 m	24.15 m
	N45W/83SW	N17W/88E	N25W/85E	N29W/88E	N8E/22E	N10W/83W
	0.11 mm	0.13 mm	0.13 mm	0.15 mm	0.09 mm	0.06 mm
13MI36	14.58 m	15.15 m	16.08 m	17.7 m	18.08 m	21.11 m
	N34W/83SW	N29W/83E	N34W/83SW	N22W/83E	N24W/89E	N5W/21E
	0.08 mm	0.03 mm	0.46 mm	0.30 mm	0.38 mm	0.02 mm

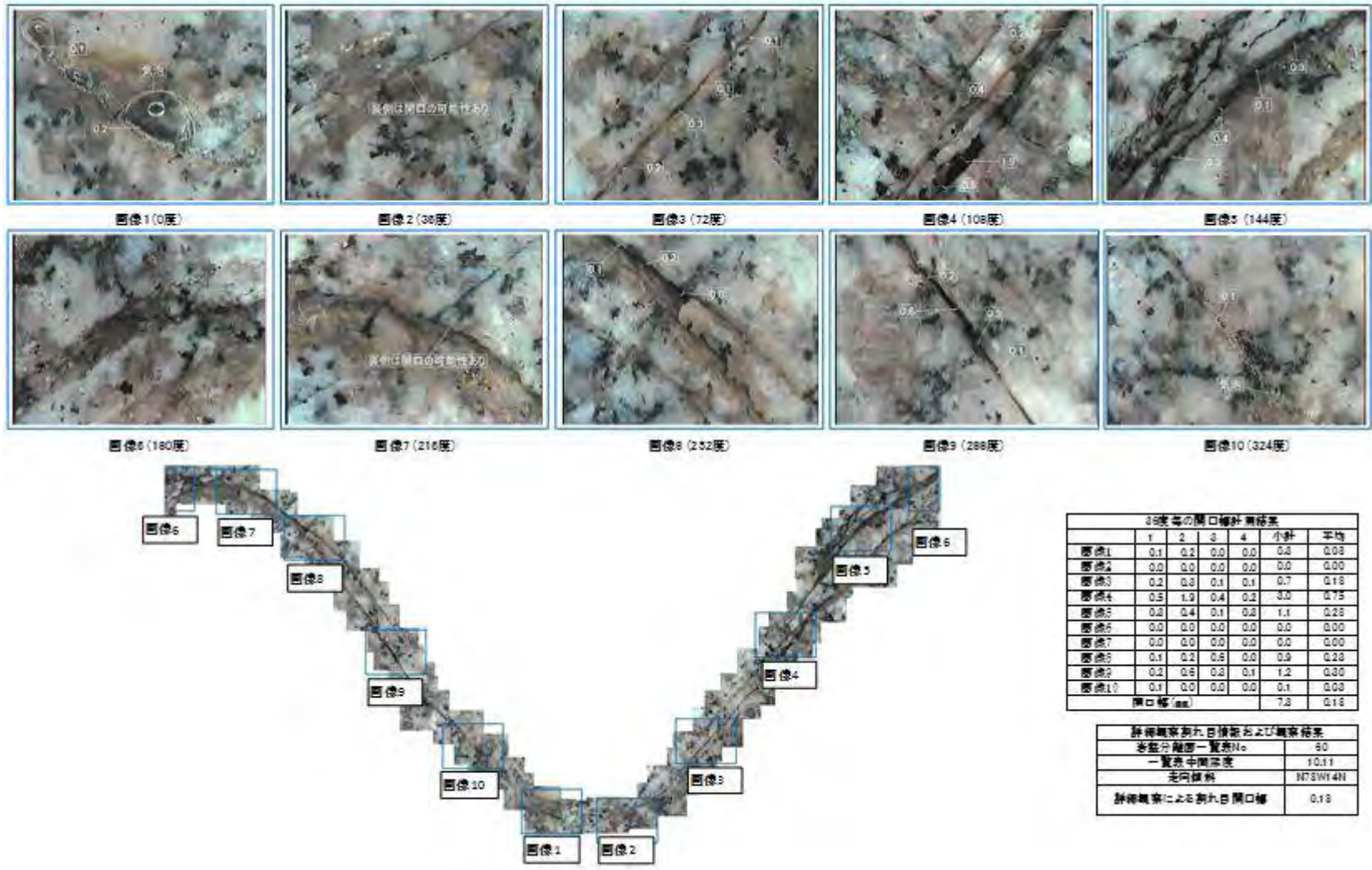


図 7.3.8-10 (a) 12MI30 号孔の詳細観察画像 (10.11m、N78W14N)

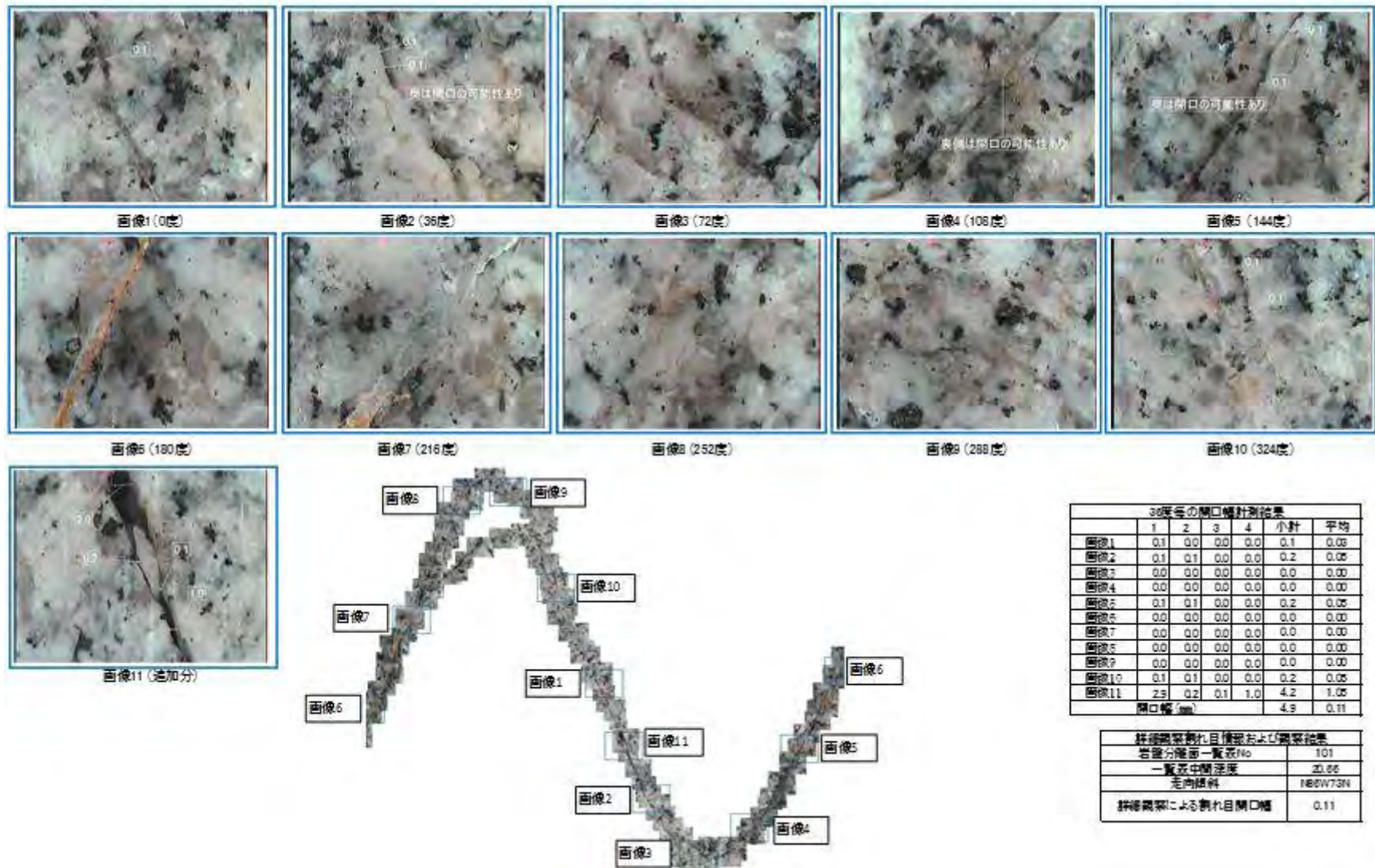


図 7.3.8-10(b) 12MI30 号孔の詳細観察画像 (20.66m、N86W73N)

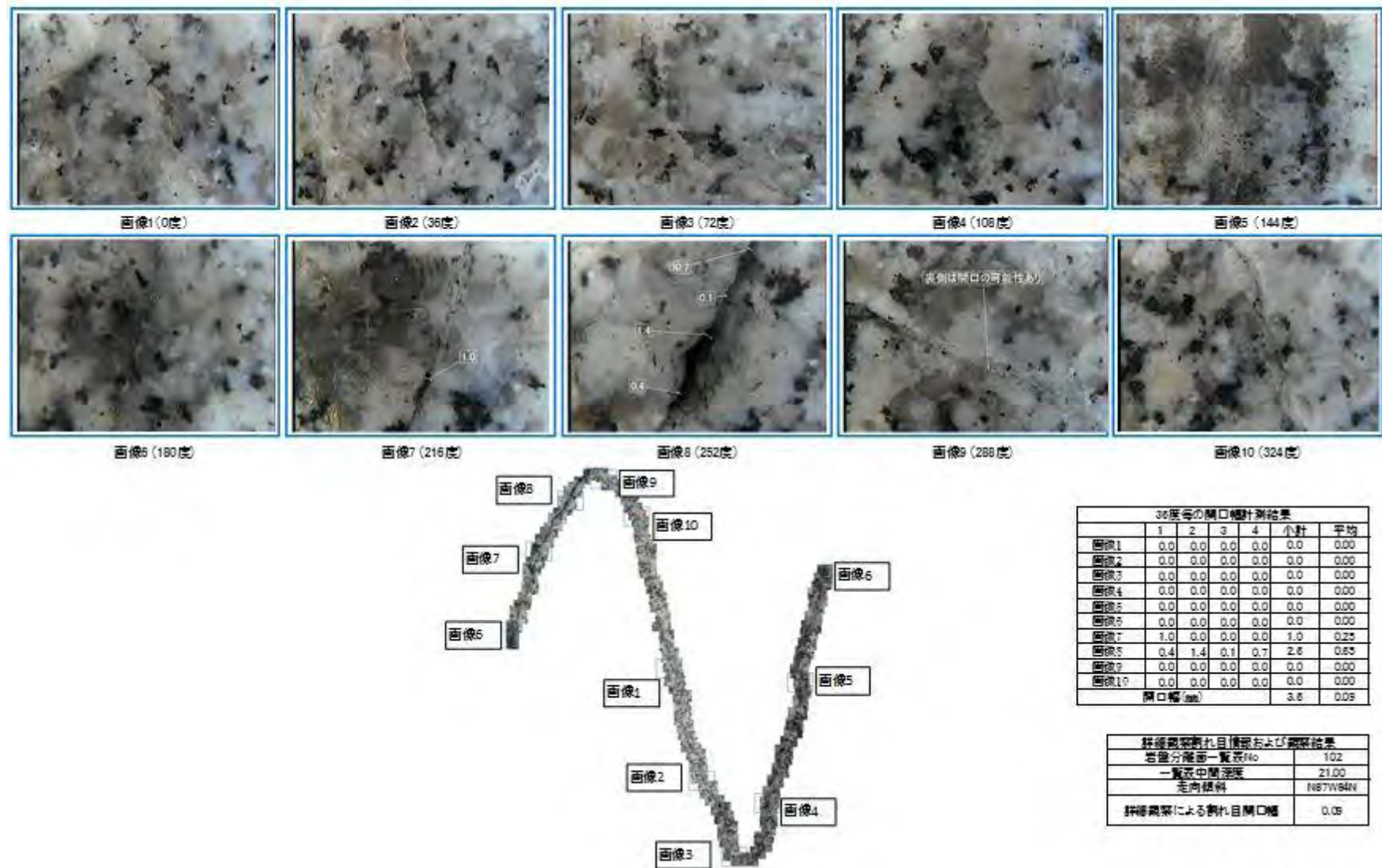
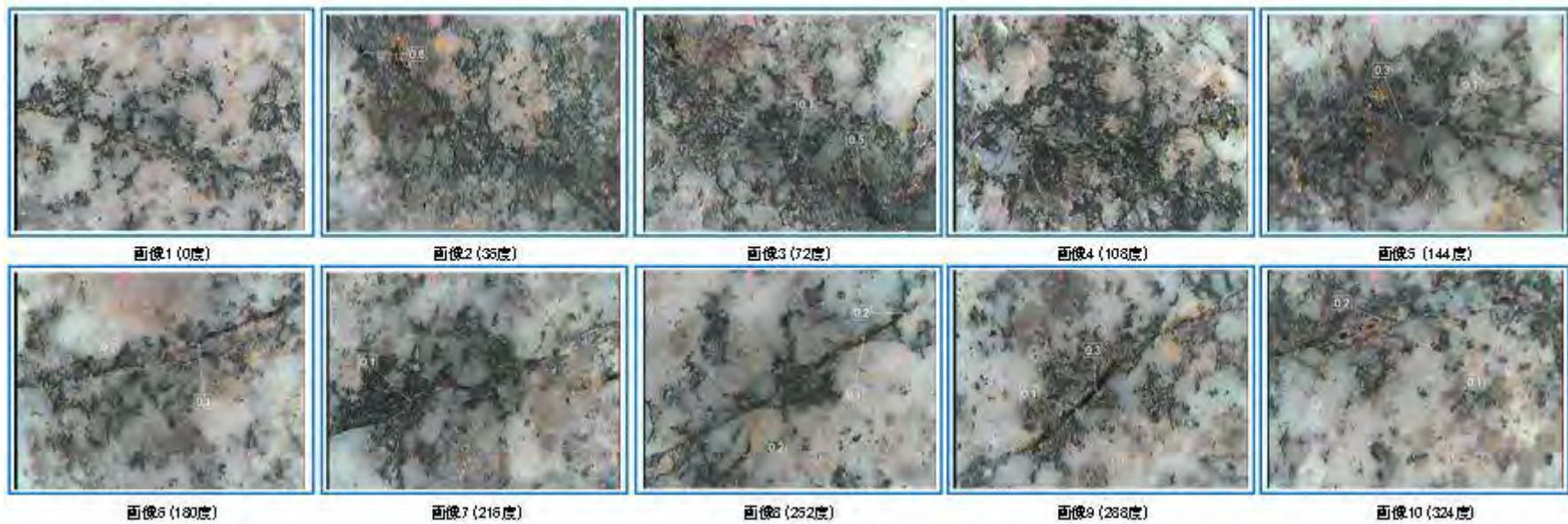


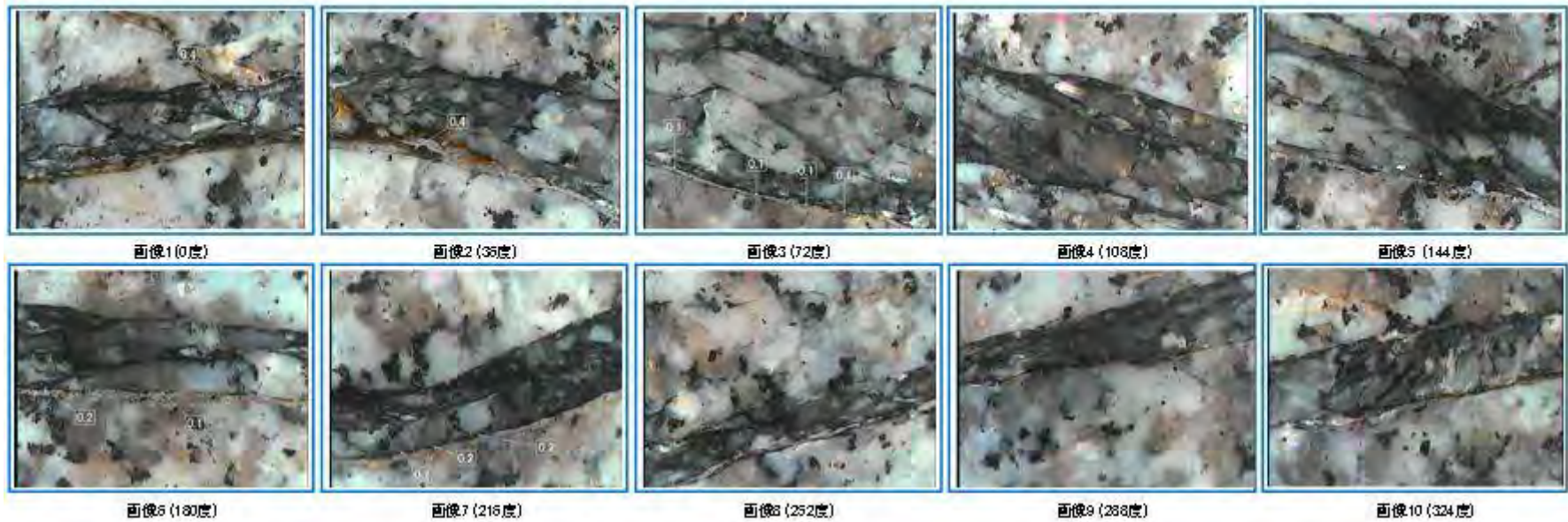
図 7.3.8-10(c) 12MI30 号孔の詳細観察画像 (21.00m、N87W84N)



	1	2	3	4	合計	平均
画像1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.13
画像3	0.1	0.3	0.0	0.0	0.4	0.13
画像4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像5	0.3	0.1	0.0	0.0	0.4	0.10
画像6	0.2	0.1	0.0	0.0	0.3	0.08
画像7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.03
画像8	0.2	0.1	0.2	0.0	0.5	0.13
画像9	0.1	0.3	0.0	0.0	0.4	0.10
画像10	0.2	0.1	0.0	0.0	0.3	0.08
開口幅 (mm)					3.2	0.08

岩塊分種前-観察No	113
一覽表中間深度	22.53
走向傾斜	N29W38E
詳細観察による割れ目開口幅	0.08

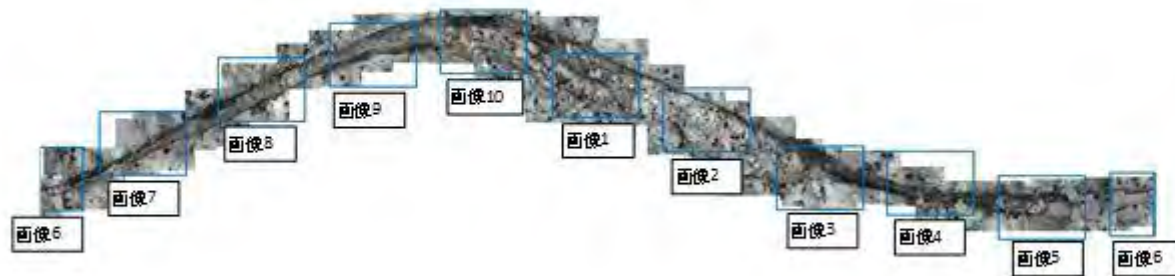
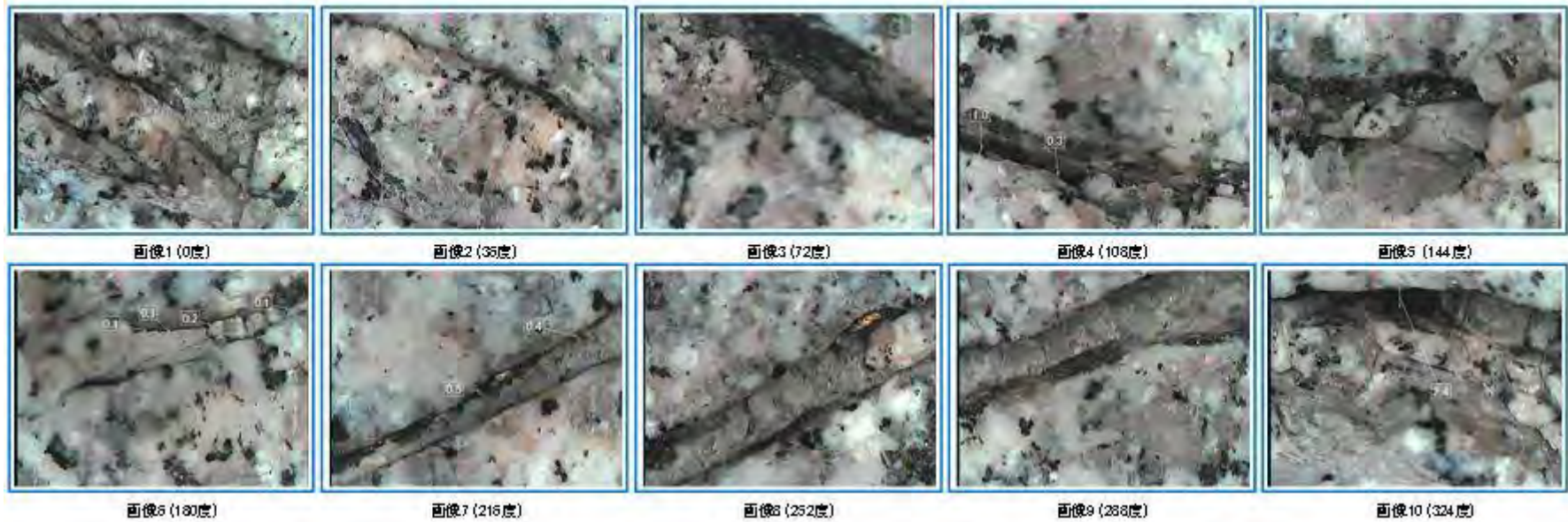
図 7.3.8-10(d) 12MI30 号孔の詳細観察画像 (22.53m、N29W86E)



	1	2	3	4	合計	平均
画像1	0.4	0.0	0.0	0.0	0.4	0.10
画像2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.4	0.10
画像3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	0.10
画像4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像6	0.2	0.1	0.0	0.0	0.3	0.08
画像7	0.1	0.2	0.2	0.0	0.5	0.13
画像8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
開口幅 (mm)					2.0	0.05

岩塊分層面一覧表No	137
一覧表中間深度	24.67
走向傾斜	N9W73E
詳細観察による割れ目開口幅	0.05

図 7.3.8-10(e) 12MI30 号孔の詳細観察画像 (24.67m、N9W73E)



	1	2	3	4	合計	平均
画像1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像4	1.0	0.3	0.0	0.0	1.3	0.33
画像5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像6	0.1	0.1	0.2	0.1	0.5	0.13
画像7	0.5	0.4	0.0	0.0	0.9	0.23
画像8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像10	2.4	0.0	0.0	0.0	2.4	0.60
開口幅 (mm)					5.1	0.13

岩塊分層面-割れ目No	187
一割れ目間深さ	27.08
走向傾斜	N27W30E
詳細観察による割れ目開口幅	0.13

図 7.3.8-10(f) 12MI30 号孔の詳細観察画像 (27.08m、N27W80E)

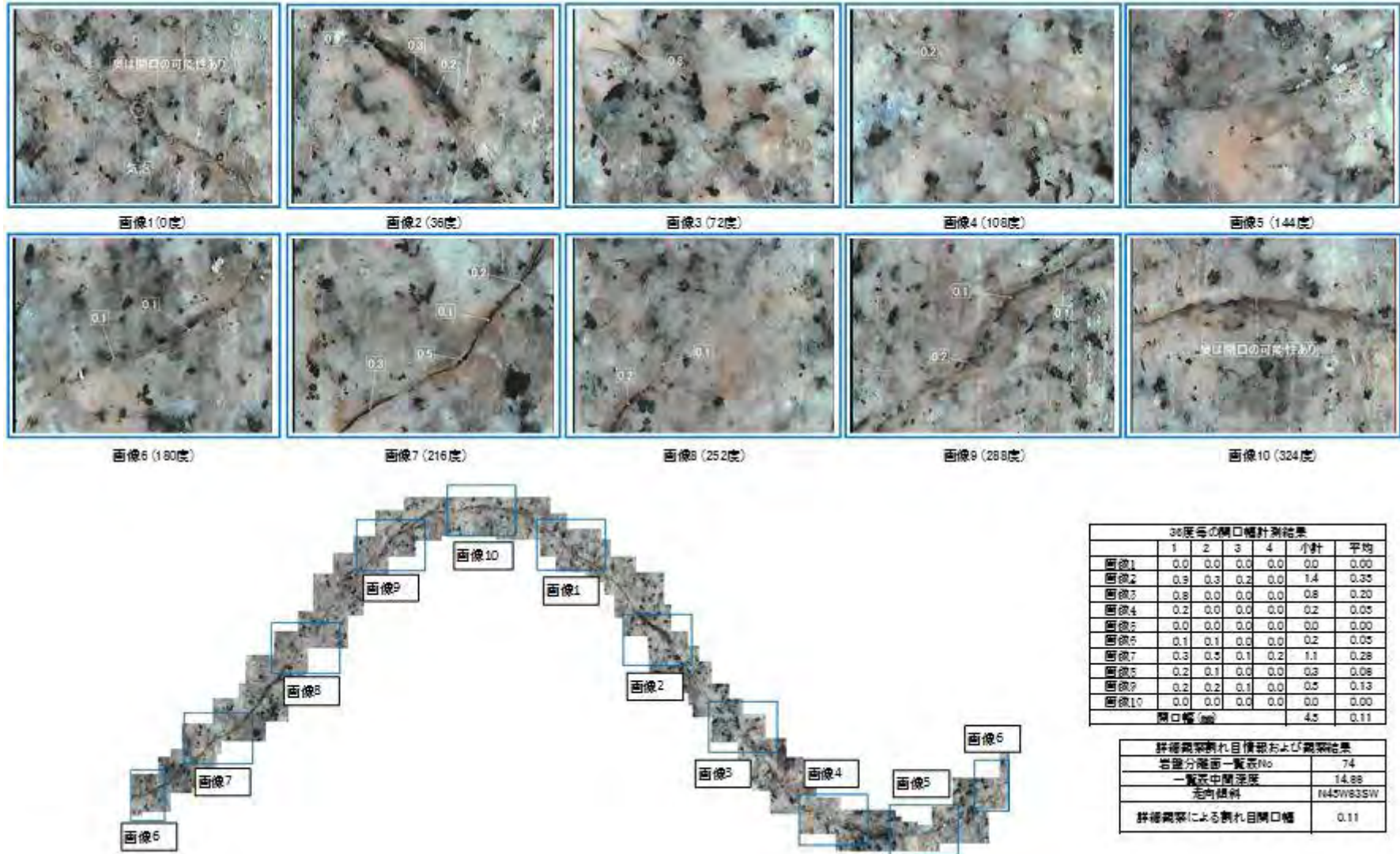
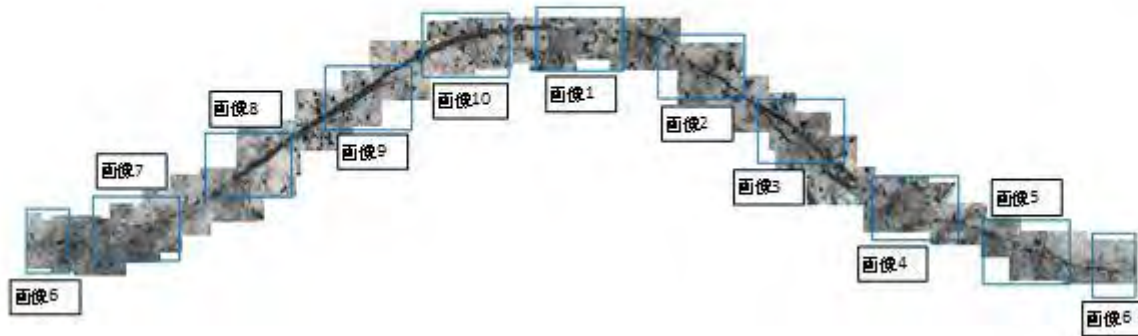
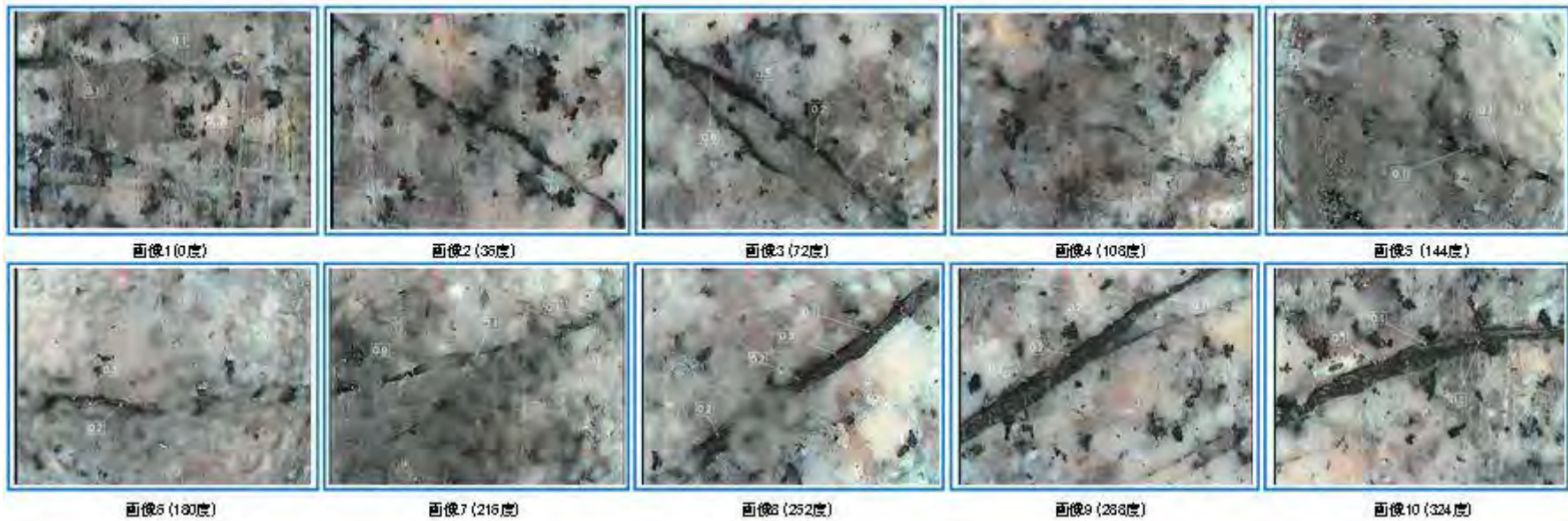


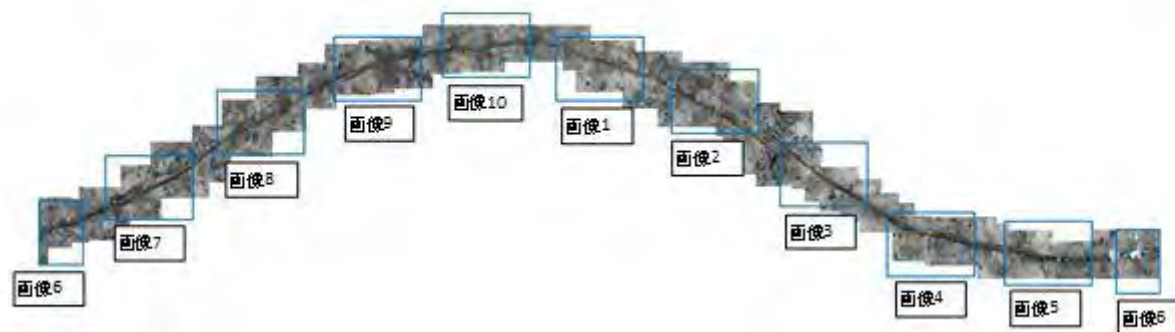
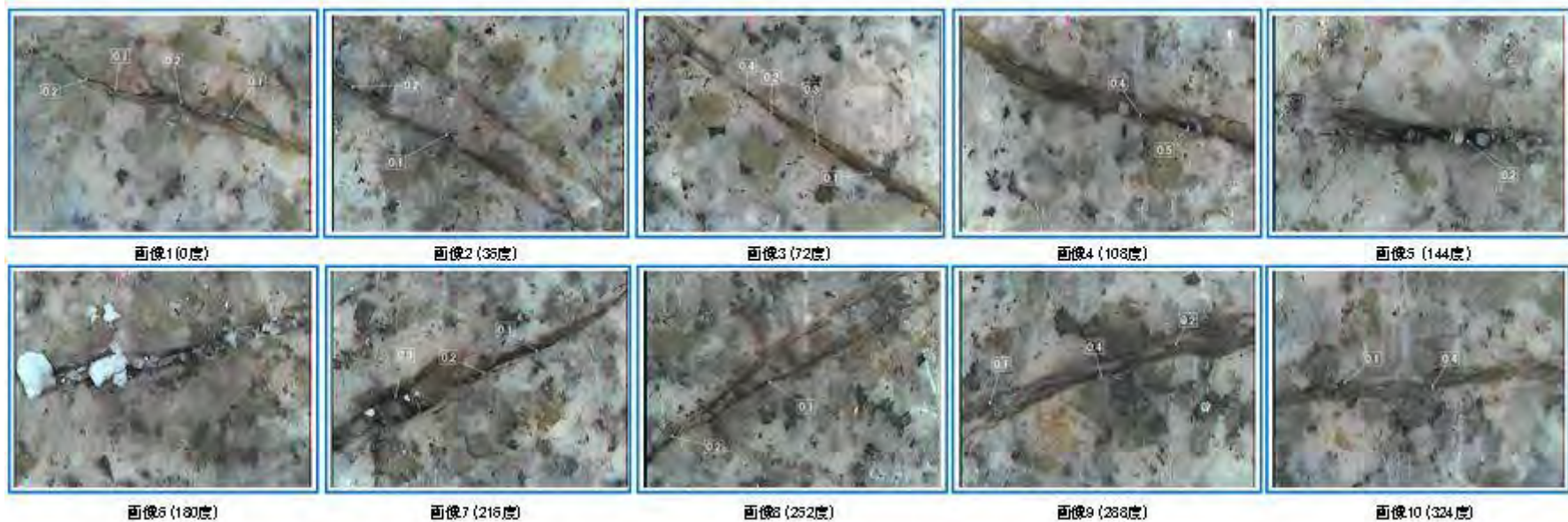
図 7.3.8-11 (a) 12MI31 号孔の詳細観察画像 (14.88m、N45W83SW)



	1	2	3	4	小計	平均
画像1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	0.05
画像2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像3	0.0	0.3	0.2	0.0	1.3	0.33
画像4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像5	0.1	0.3	0.0	0.0	0.4	0.10
画像6	0.3	0.2	0.0	0.0	0.5	0.13
画像7	0.9	0.1	0.1	0.0	1.1	0.28
画像8	0.2	0.2	0.3	0.1	0.8	0.20
画像9	0.2	0.2	0.2	0.1	0.7	0.18
画像10	0.1	0.1	0.1	0.0	0.3	0.08
開口幅 (mm)					5.3	0.13

岩種分類面一覽表No	90
一覽表中間深度	16.93
走向傾斜	N17W38E
詳細観察による割れ目開口幅	0.13

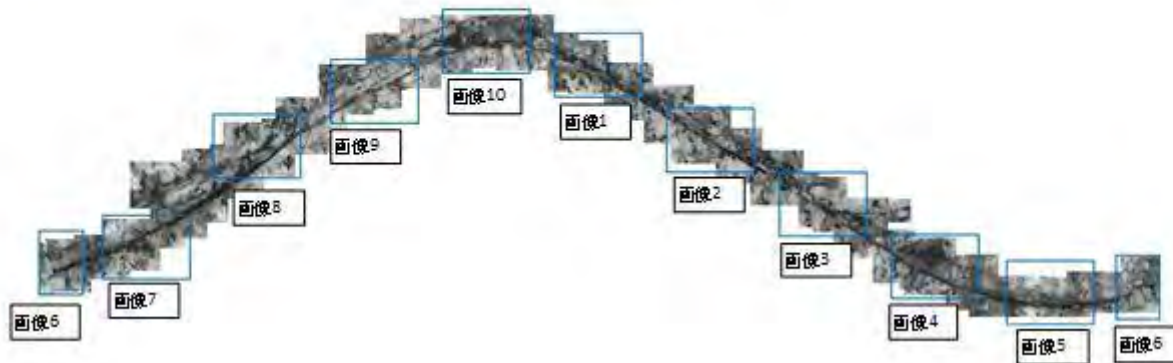
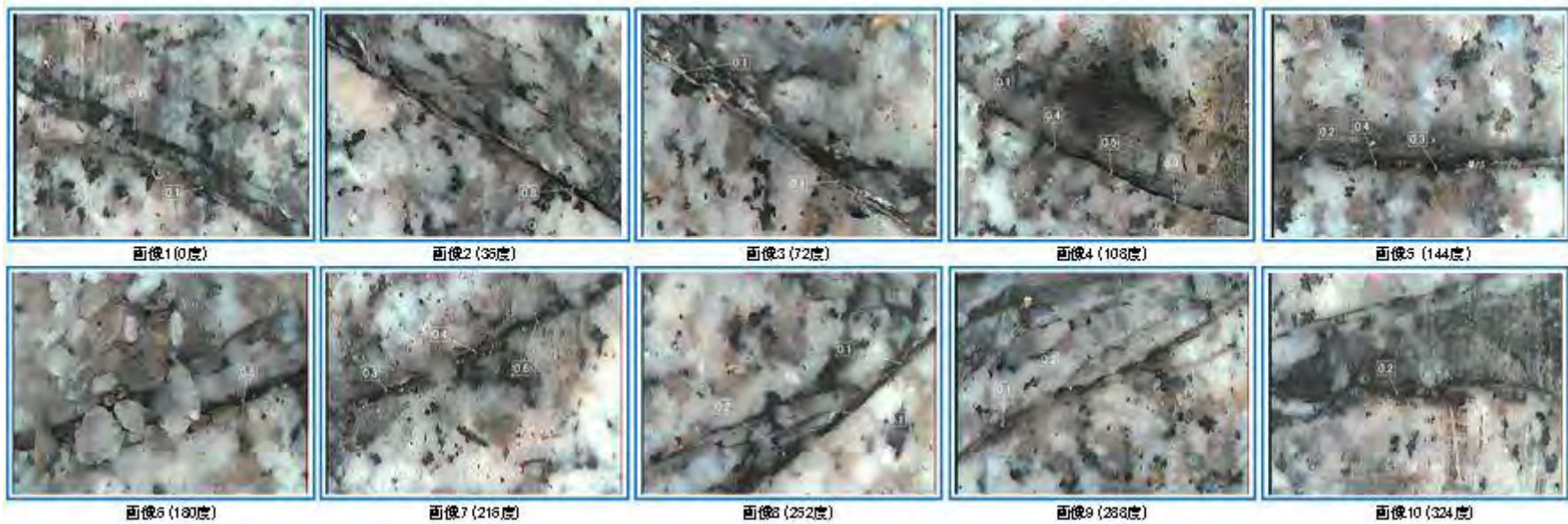
図 7.3.8-11(b) 12MI31 号孔の詳細観察画像 (16.93m、N17W88E)



	1	2	3	4	小計	平均
画像1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.8	0.13
画像2	0.2	0.1	0.0	0.0	0.3	0.08
画像3	0.4	0.2	0.3	0.1	1.0	0.25
画像4	0.4	0.3	0.0	0.0	0.9	0.23
画像5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	0.05
画像6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像7	0.3	0.2	0.1	0.0	0.8	0.15
画像8	0.2	0.1	0.0	0.0	0.3	0.08
画像9	0.1	0.4	0.2	0.0	0.7	0.18
画像10	0.1	0.4	0.0	0.0	0.5	0.13
開口幅 (mm)					5.1	0.13

岩種分類面一覽表No	104
一覽表中間深度	20.59
走向傾斜	N25W85E
詳細観察による割れ目開口幅	0.13

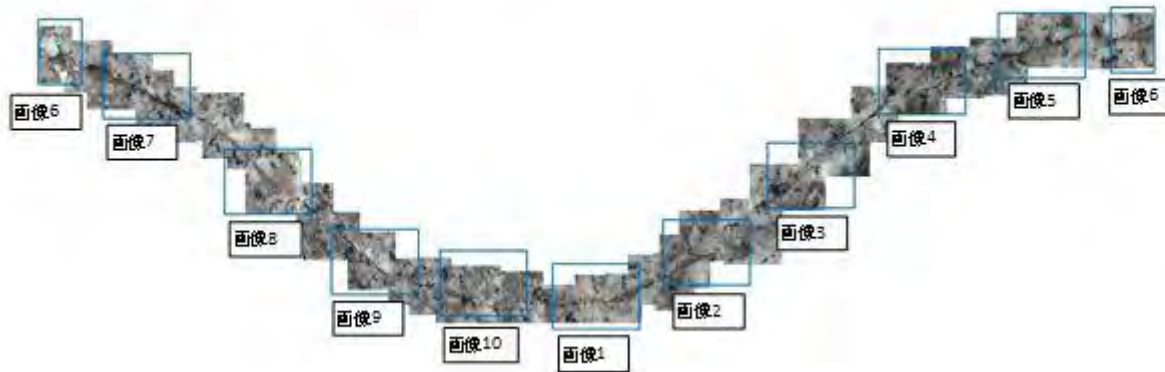
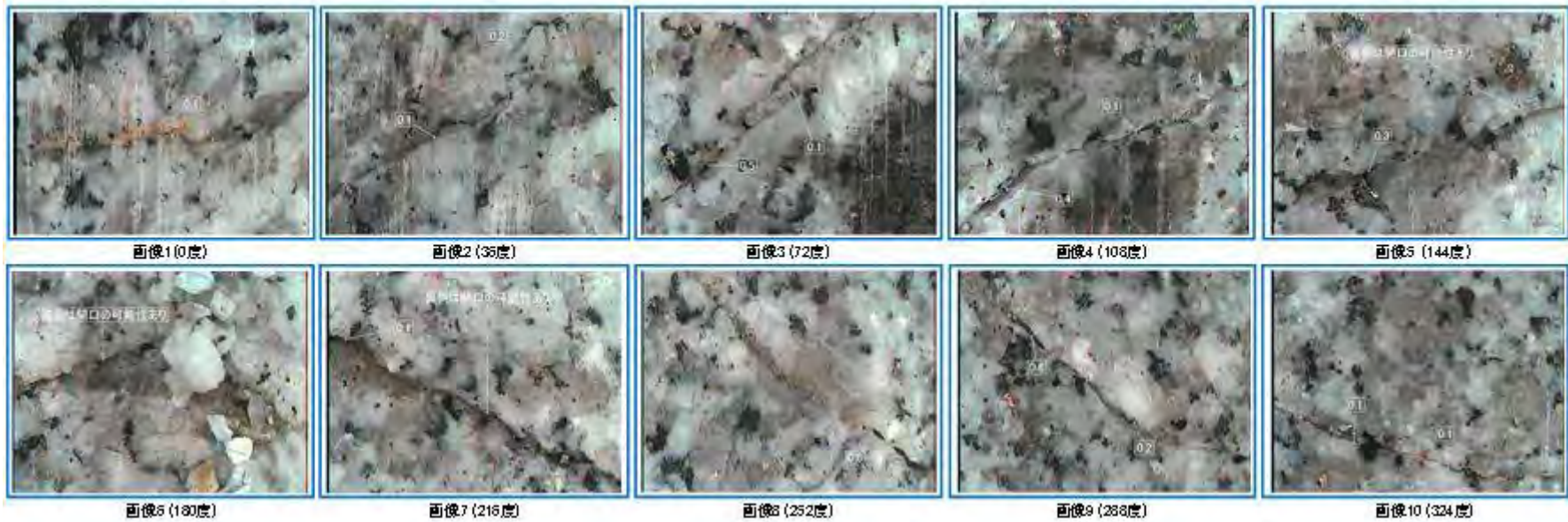
図 7.3.8-11(c) 12MI31 号孔の詳細観察画像 (20.59m、N25W85E)



	1	2	3	4	小計	平均
画像1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	0.05
画像2	0.8	0.0	0.0	0.0	0.8	0.20
画像3	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	0.05
画像4	0.1	0.4	0.5	0.3	1.3	0.33
画像5	0.2	0.4	0.3	0.0	0.9	0.23
画像6	0.5	0.0	0.0	0.0	0.5	0.13
画像7	0.3	0.4	0.8	0.0	1.3	0.33
画像8	0.2	0.1	0.0	0.0	0.3	0.08
画像9	0.1	0.2	0.0	0.0	0.3	0.08
画像10	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	0.05
開口径 (μm)					8.0	0.15

岩種分類前一般岩No	117
一般岩中間深度	21.89
走向傾斜	N29W38E
詳細観察による割れ目開口径	0.15

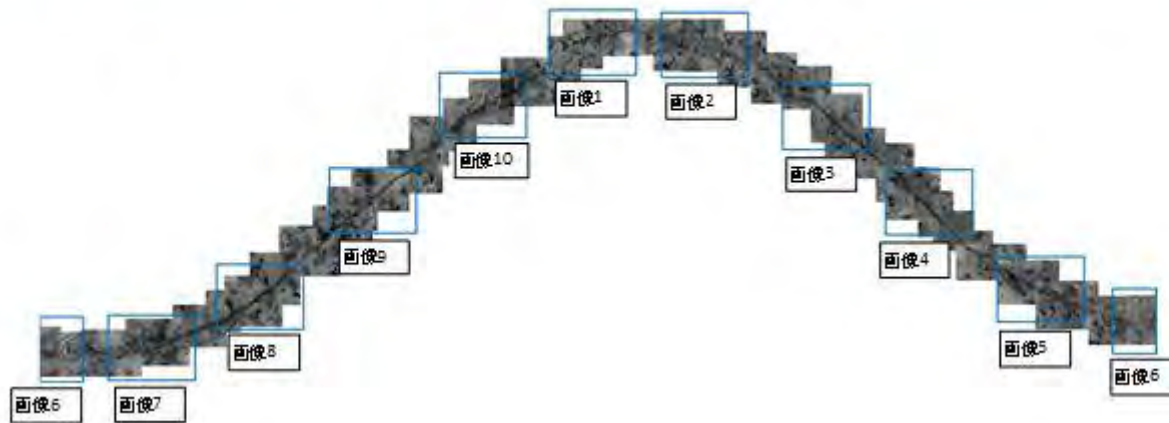
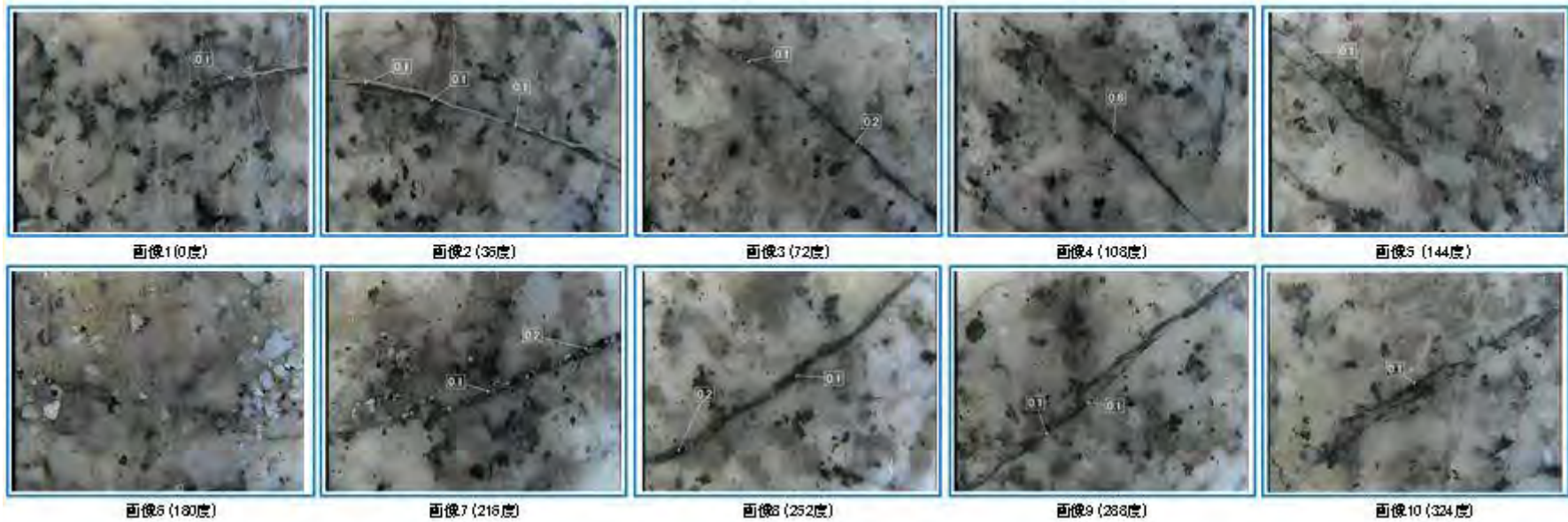
図 7.3.8-11(d) 12MI31 号孔の詳細観察画像 (21.89m、N29W88E)



	1	2	3	4	小計	平均
画像1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.03
画像2	0.1	0.2	0.0	0.0	0.3	0.08
画像3	0.5	0.1	0.0	0.0	0.6	0.15
画像4	0.4	0.1	0.0	0.0	0.5	0.13
画像5	0.3	0.0	0.0	0.0	0.3	0.08
画像6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.03
画像8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.13
画像9	0.0	0.2	0.0	0.0	0.2	0.20
画像10	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	0.05
開口幅 (μm)					3.5	0.09

岩塊分種前-割れ目No	123
一割れ目間深度	22.74
走向傾斜	N8E22E
詳細観察による割れ目開口幅	0.09

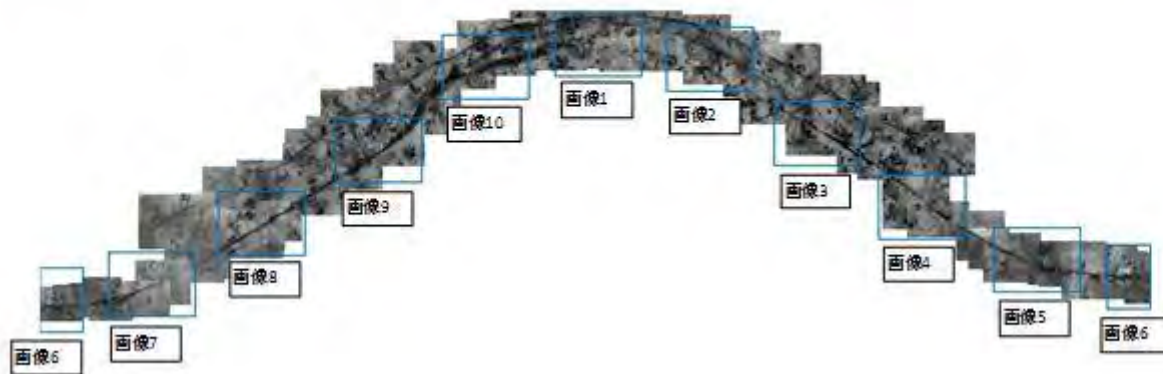
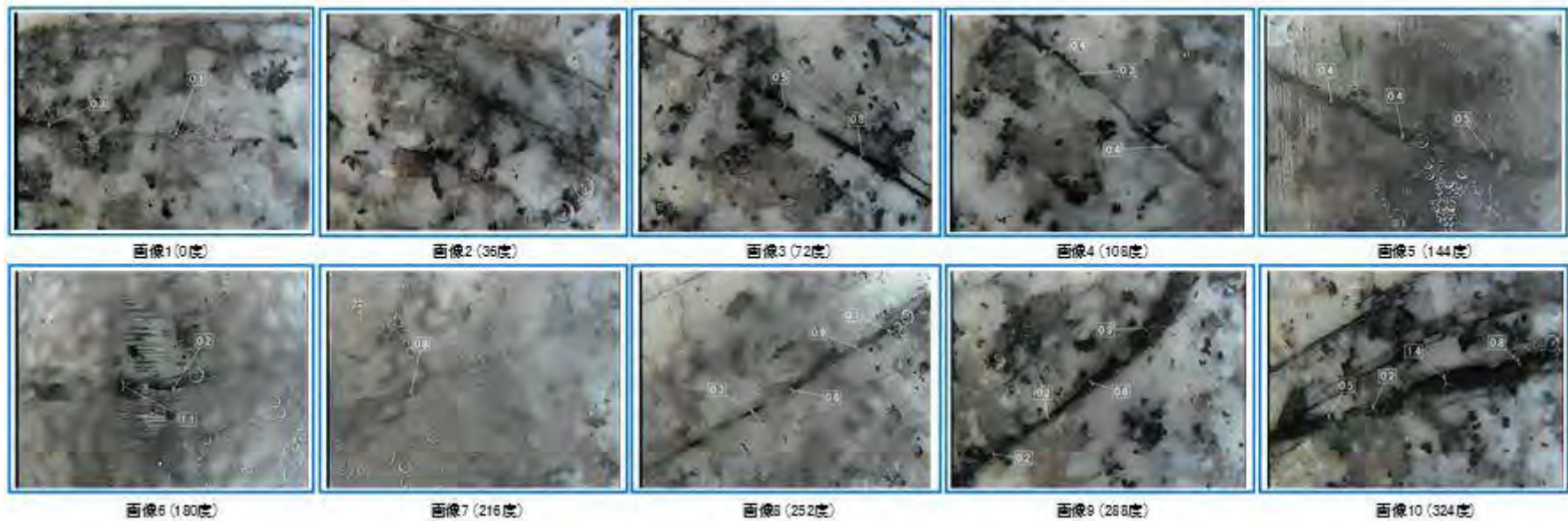
図 7.3.8-11(e) 12MI31 号孔の詳細観察画像 (22.74m、N8E22E)



	1	2	3	4	小計	平均
画像1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.03
画像2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.3	0.08
画像3	0.1	0.2	0.0	0.0	0.3	0.08
画像4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.13
画像5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.03
画像6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像7	0.1	0.2	0.0	0.0	0.3	0.08
画像8	0.2	0.1	0.0	0.0	0.3	0.08
画像9	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	0.05
画像10	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.03
開口径 (μm)					2.3	0.08

岩種分類前—観察No	127
—観察中間深度	24.15
走向傾斜	N10W83W
詳細観察による割れ目開口径	0.08

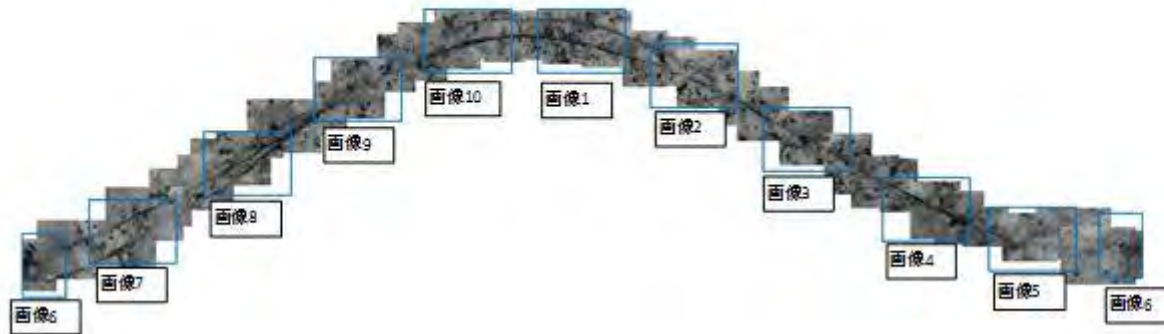
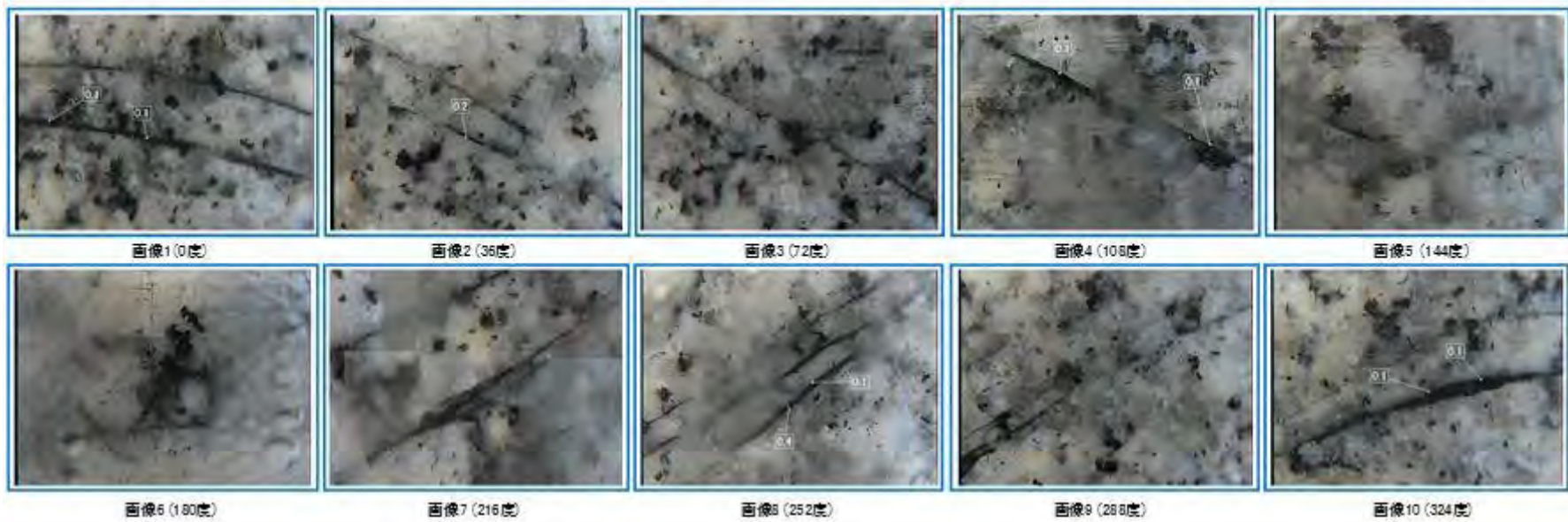
図 7.3.8-11(f) 12MI31 号孔の詳細観察画像(24.15m、N10W83W)



	1	2	3	4	小計	平均
画像1	0.3	0.1	0.0	0.0	0.4	0.10
画像2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像3	0.5	0.8	0.0	0.0	1.3	0.33
画像4	0.4	0.3	0.4	0.0	1.1	0.28
画像5	0.4	0.4	0.5	0.0	1.3	0.33
画像6	1.1	0.2	0.0	0.0	1.3	0.33
画像7	0.8	0.0	0.0	0.0	0.8	0.20
画像8	0.3	0.8	0.9	0.1	1.3	0.48
画像9	0.2	0.2	0.8	0.9	1.9	0.48
画像10	0.5	0.2	1.4	0.8	2.9	0.73
開口幅 (mm)					12.9	0.32

岩壁分層面一覧表No	63
一覧表中間深度	14.58
走向磁針	N23W88W
詳細調査による割れ目開口幅	0.32

図 7.3.8-12 (a) 13MI36 号孔の詳細観察画像(14.58m、N23W88W)



	1	2	3	4	小計	平均
画像1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	0.05
画像2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	0.05
画像3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像4	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	0.05
画像5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像8	0.4	0.1	0.0	0.0	0.5	0.13
画像9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像10	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	0.05
開口幅 (mm)					1.3	0.03

岩盤分類面一覧表No	09
一覧表中間深度	15.15
走向傾斜	N25W83E
詳細観察による割れ目開口幅	0.03

図 7.3.8-12(b) 13MI36 号孔の詳細観察画像(15.15m、N29W83E)

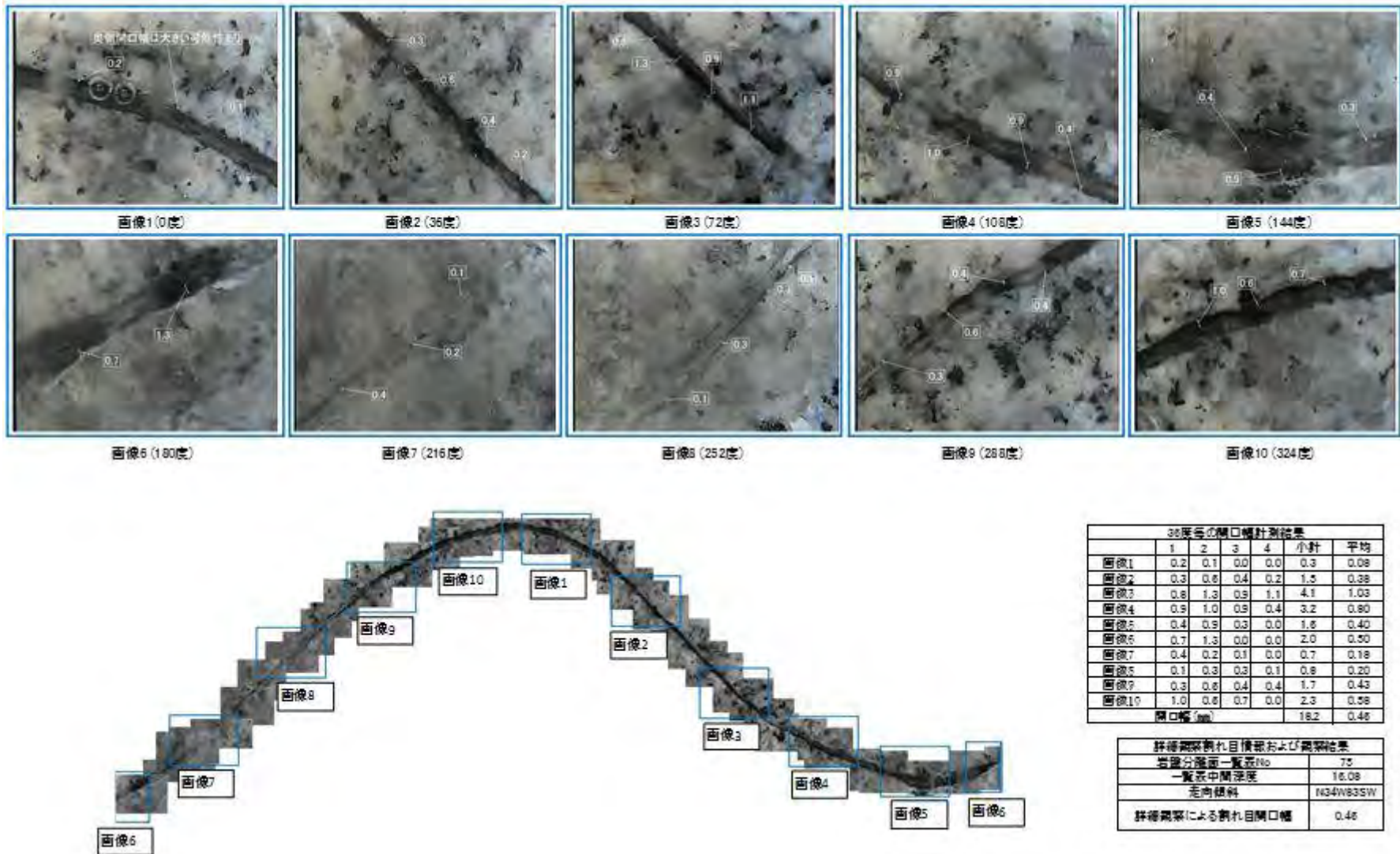
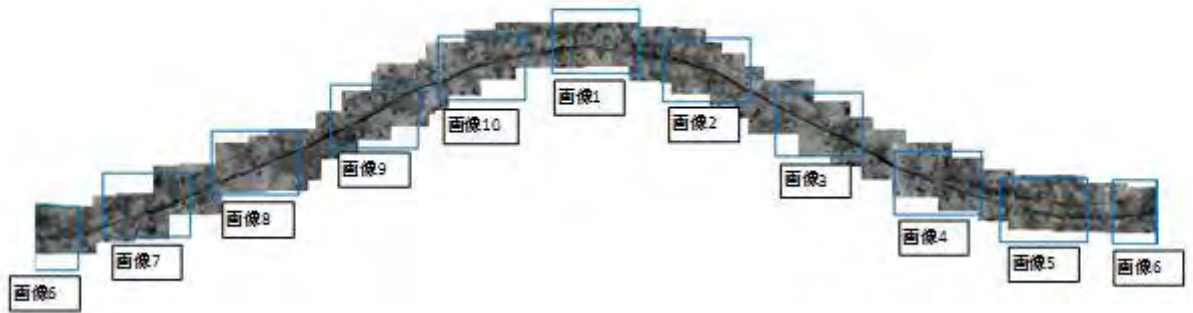
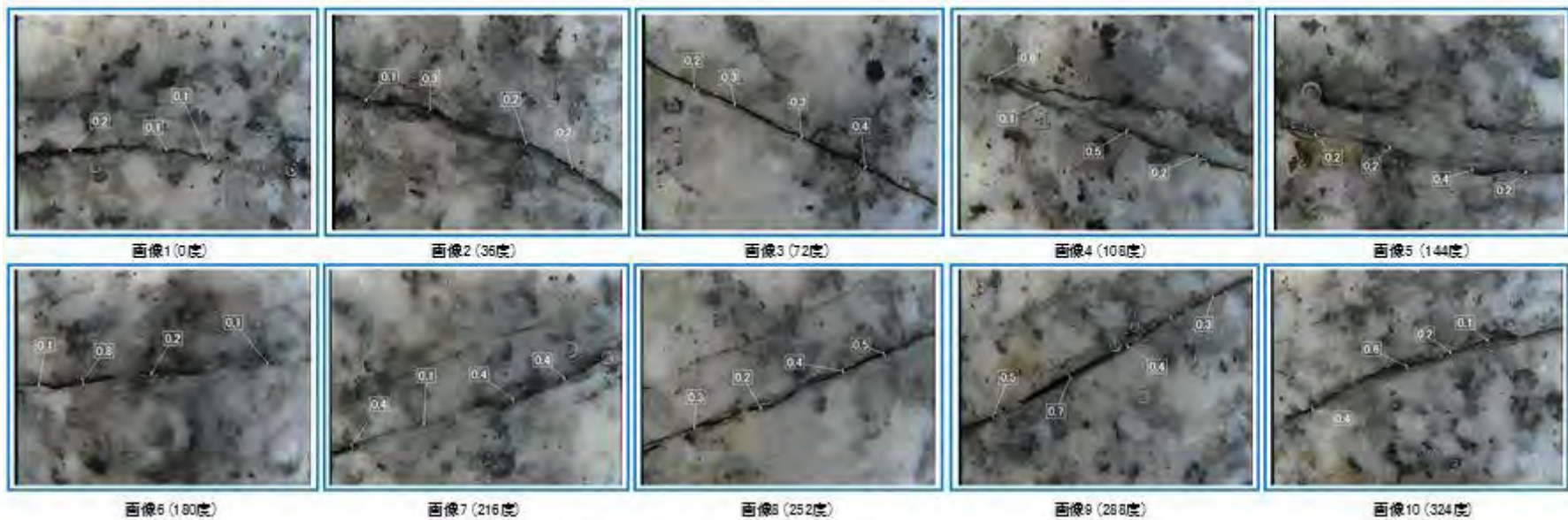


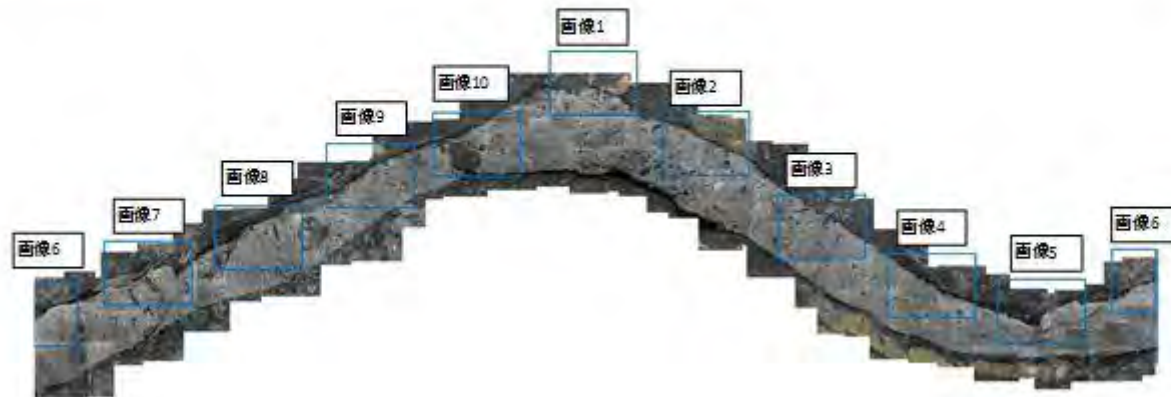
図 7.3.8-12(c) 13MI36 号孔の詳細観察画像(16.08m、N34W83SW)



	1	2	3	4	小計	平均
画像1	0.2	0.1	0.1	0.0	0.4	0.10
画像2	0.1	0.3	0.2	0.2	0.8	0.20
画像3	0.2	0.3	0.3	0.4	1.2	0.30
画像4	0.6	0.1	0.5	0.2	1.4	0.35
画像5	0.2	0.2	0.4	0.2	1.0	0.25
画像6	0.1	0.8	0.2	0.1	1.2	0.30
画像7	0.4	0.1	0.4	0.4	1.3	0.33
画像8	0.3	0.2	0.4	0.5	1.4	0.35
画像9	0.5	0.7	0.4	0.3	1.9	0.48
画像10	0.4	0.6	0.2	0.1	1.3	0.33
開口幅 (mm)					11.9	0.30

岩盤分層面一覧表No	79
一覧表中間深度	17.78
走向傾斜	N22W83E
詳細観察による割れ目開口幅	0.30

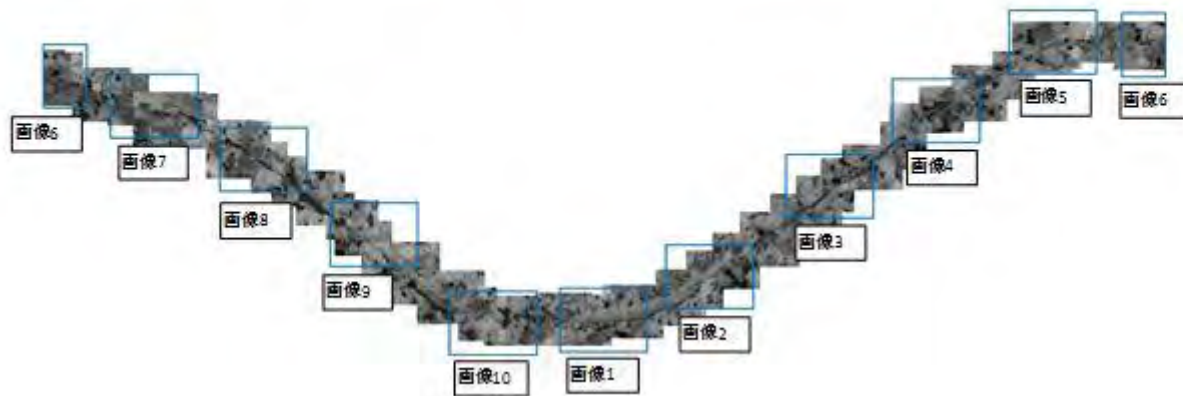
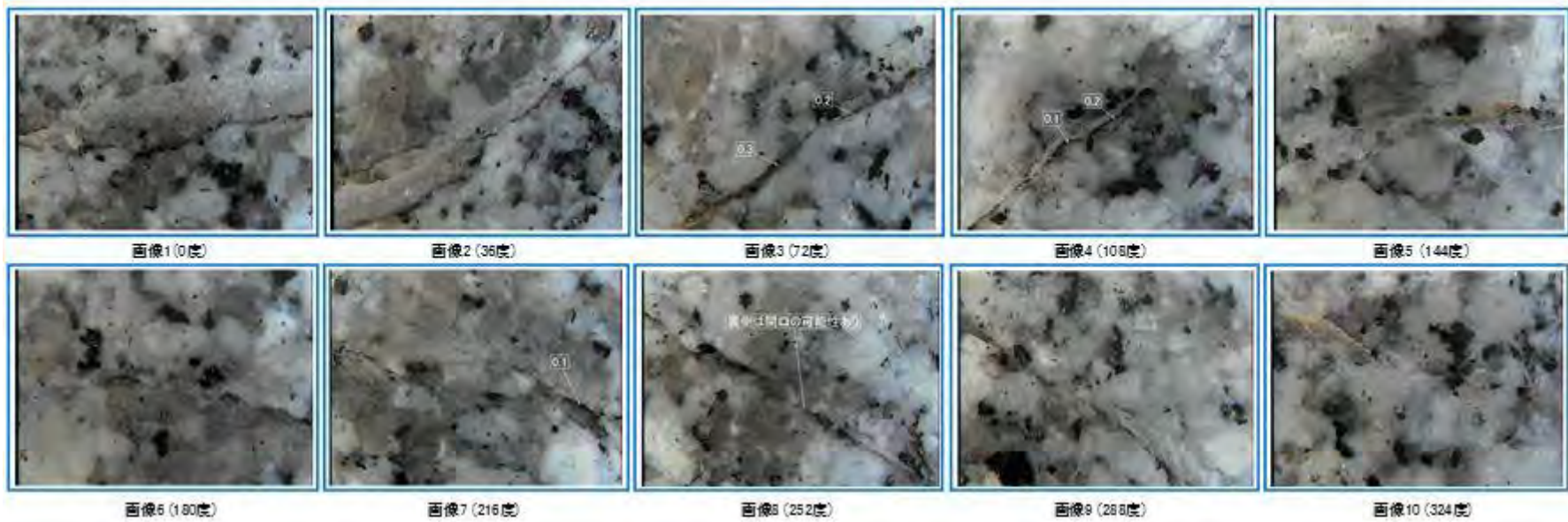
図 7.3.8-12(d) 13MI36 号孔の詳細観察画像(17.78m、N22W83E)



	1	2	3	4	小計	平均
画像1	0.1	0.3	0.0	0.0	0.4	0.10
画像2	0.2	0.3	0.0	0.0	0.5	0.13
画像3	0.3	0.2	0.0	0.0	0.5	0.13
画像4	0.1	0.8	1.2	1.1	3.0	0.75
画像5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像6	0.4	0.9	0.5	0.0	1.8	0.45
画像7	0.3	0.7	0.1	1.7	2.8	0.70
画像8	1.5	1.0	0.6	0.0	3.1	0.78
画像9	0.3	0.8	0.4	0.3	1.8	0.45
画像10	0.7	0.3	0.3	0.0	1.3	0.33
開口幅 (mm)					15.2	0.38

岩壁分層面一覧表No	87
一覧表中間深度	18.08
走向傾斜	N24W89E
詳細観察による割れ目開口幅	0.38

図 7.3. 8-12(e) 13MI36 号孔の詳細観察画像(18.08m、N24W89E)



	1	2	3	4	小計	平均
画像1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像3	0.3	0.2	0.0	0.0	0.5	0.13
画像4	0.1	0.2	0.0	0.0	0.3	0.08
画像5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.03
画像8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
画像10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
開口幅 (mm)					0.9	0.02

岩壁分層面一覧表No	120
一層表中間深度	21.11
走向傾斜	N5W21E
詳細観察による割れ目開口幅	0.02

図 7. 3. 8-12(f) 13MI36 号孔の詳細観察画像 (21.01m、N5W21E)

7.3.9 間隙水圧のモニタリング装置の再設置

全ての検層が完了した後に、間隙水圧モニタリング装置の再設置を行った。

モニタリング装置の抜管時に、一時的にボーリング孔内に抑留するトラブルが発生し、一部ピストンパッカーが破損した。このため、この時設置したモニタリング装置は、編成変えを行って、ピストンパッカーを使用しない編成とした。また、水理試験用の装置で止水を行っていた 13MI37 号孔についても、φ66 mmのモニタリング装置に入れ換えた。

このため、再設置したモニタリング装置の編成は、当初設置していたものと異なる。

モニタリング装置の設置状況を図 7.3.9-1、図 7.3.9-2 に、再設置したモニタリング装置の編成を図 7.3.9-3～図 7.3.9-6 に、設置後の平面図を図 7.3.9-7 に示す。



図 7.3.9-1 間隙水圧モニタリング設置風景



図 7.3.9-2 設置後の間隙水圧モニタリング装置地上部

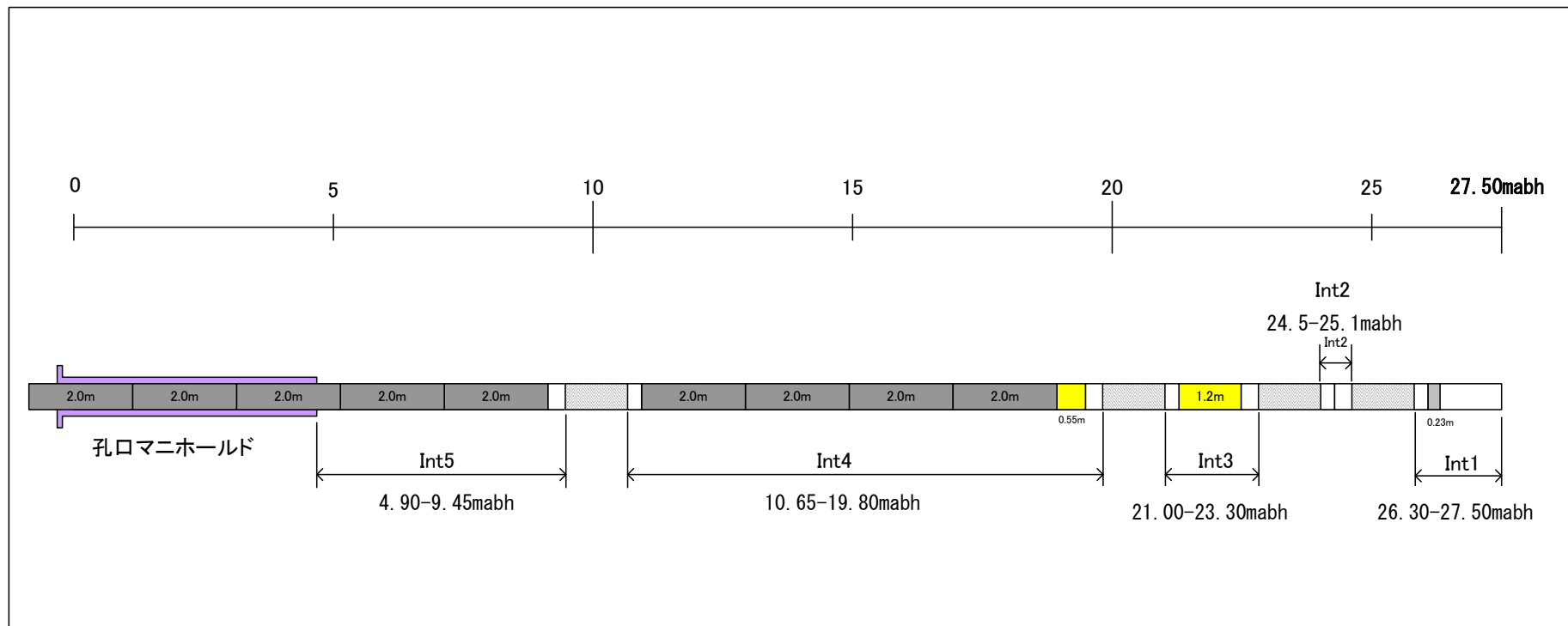


図 7.3.9-3 12MI30 号孔間隙水圧モニタリング装置の再設置孔内部構成図

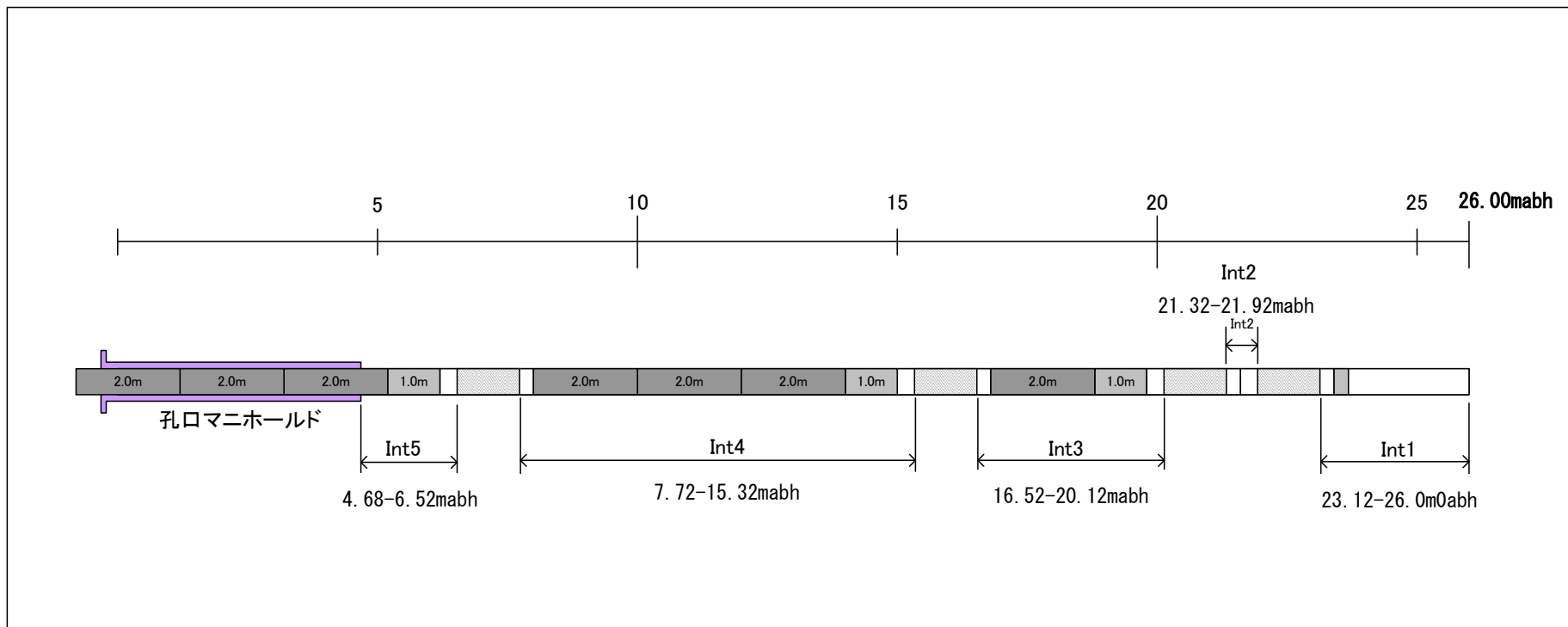


図 7.3.9-4 12MI31 号孔間隙水圧モニタリング装置の再設置孔内部構成図

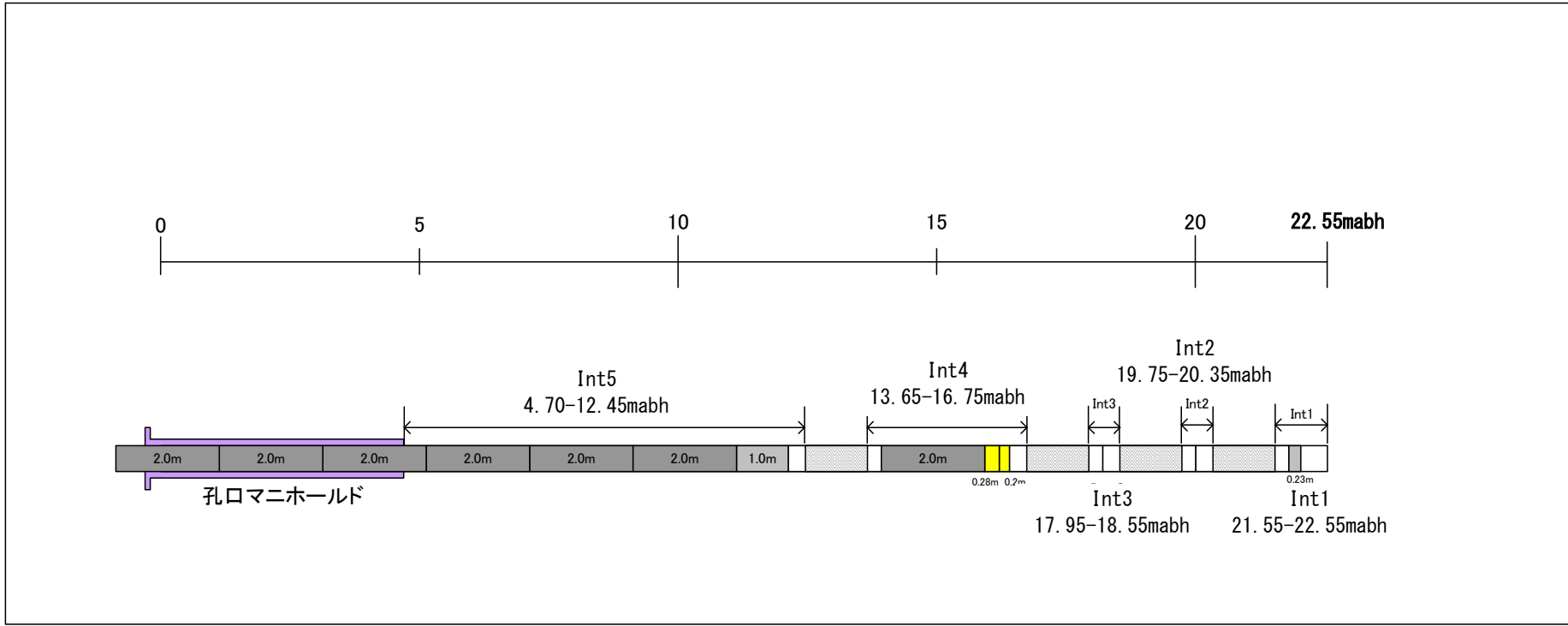


図 7.3.9-5 13MI36 号孔間隙水圧モニタリング装置の再設置孔内部構成図

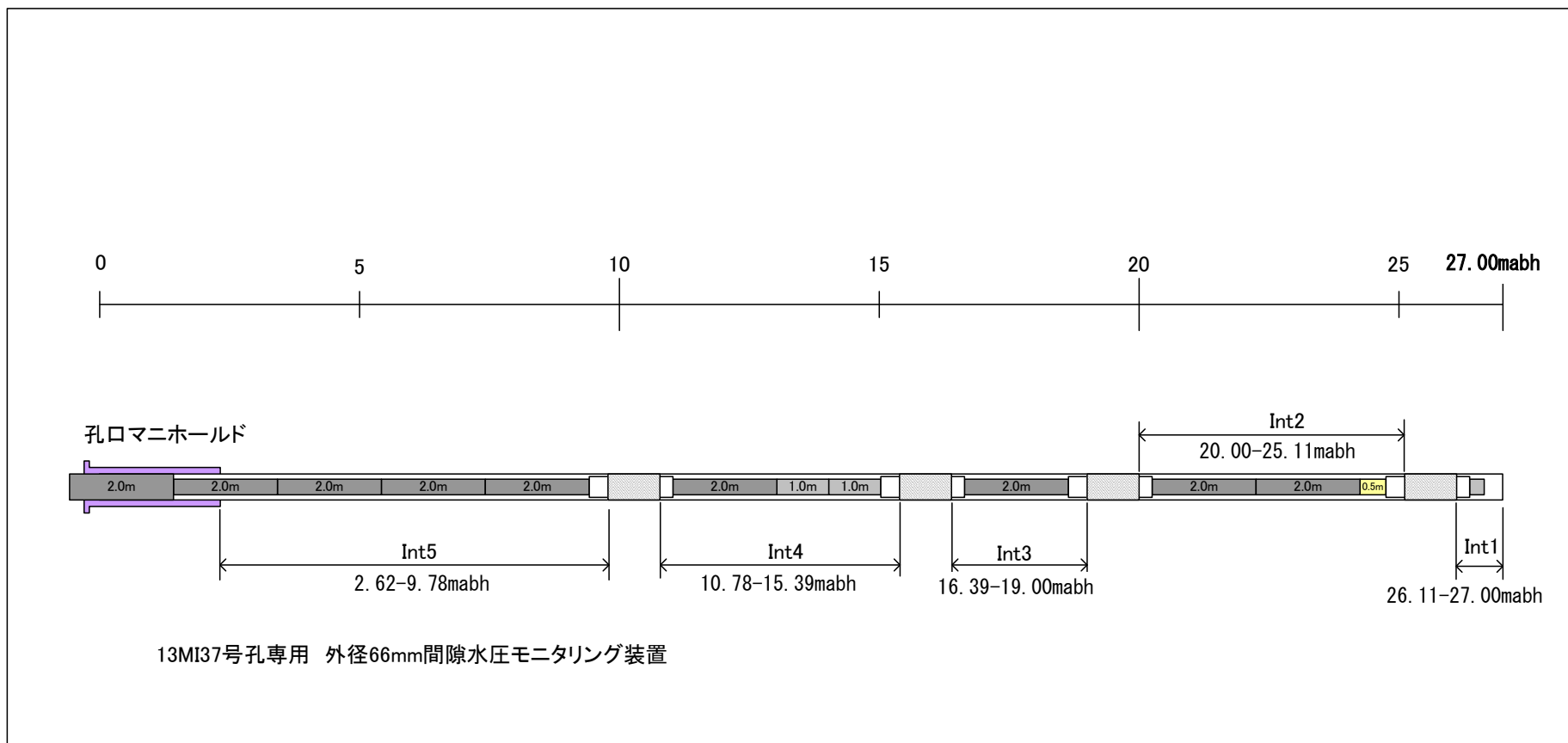
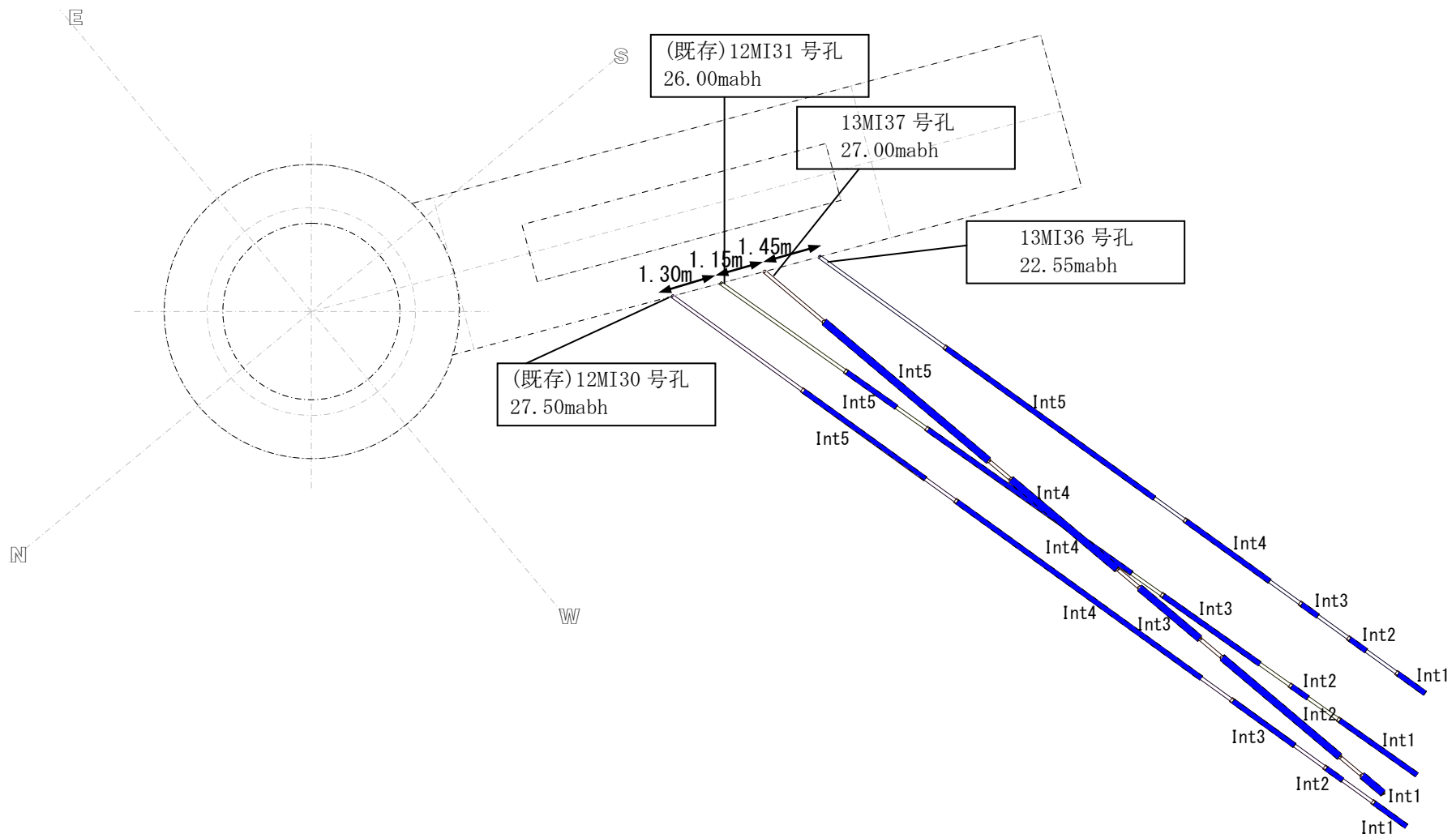


図 7.3.9-6 13MI37 号孔間隙水圧モニタリング装置の再設置孔内部構成図



※ 13MI37 号孔の孔跡については、高精度孔曲検層を実施していないため、シングルショット測定器による孔曲測定結果を基にしている。

図 7.3.9-7 調査領域における隙水圧モニタリング区間の配置図

7.3.10 間隙水圧モニタリング結果

本業務期間中の間隙水圧モニタリング結果を図 7.3.10-1～図 7.3.10-8 に示す。

なお、図 7.3.10-1～図 7.3.10-4 はボーリング掘削開始前からモニタリング装置抜管まで、図 7.3.10-5～図 7.3.10-8 はモニタリング装置の再設置後の結果を示す。

掘削完了後に設置した間隙水圧モニタリングの結果において、全ての孔で、孔口 10mabh までの区間では 0.19～0.66MPa と比較的低い圧力を示し、孔口 15mabh よりも先の区間については、1.49MPa～1.61MPa の間隙水圧を維持していることが確認できた。

間隙水圧モニタリング装置再設置後の平成 26 年 2 月 27 日～平成 26 年 3 月 10 日までに観測したモニタリング結果と対象区間深度を表 7.3.10-1 に示す。

表 7.3.10-1 掘削完了後の間隙水圧モニタリング結果

	Int1.		Int2.		Int3.	
	設置深度 (mabh)	間隙水圧 (MPa)	設置深度 (mabh)	間隙水圧 (MPa)	設置深度 (mabh)	間隙水圧 (MPa)
12MI30	26.30-27.50	1.61	24.50-25.10	1.60	21.00-23.30	1.60
12MI31	23.12-26.00	1.60	21.32-21.92	1.60	16.52-50.12	1.56
13MI36	21.55-22.55	1.60	19.75-20.35	1.61	17.95-18.55	1.60
13MI37	26.11-27.00	1.61	20.00-25.11	1.60	16.39-19.00	1.60

	Int4.		Int5.	
	設置深度 (mabh)	間隙水圧 (MPa)	設置深度 (mabh)	間隙水圧 Mpa
12MI30	10.65-19.80	1.58	4.90-9.45	0.19
12MI31	7.72-15.32	1.49	4.68-9.52	0.66
13MI36	13.65-16.75	1.59	4.70-12.45	1.59
13MI37	10.78-15.39	1.52	2.62-9.78	0.25

※ 上表は平成 26 年 2 月 27 日～平成 26 年 3 月 10 日までに観測したモニタリング結果の平均値を示す。

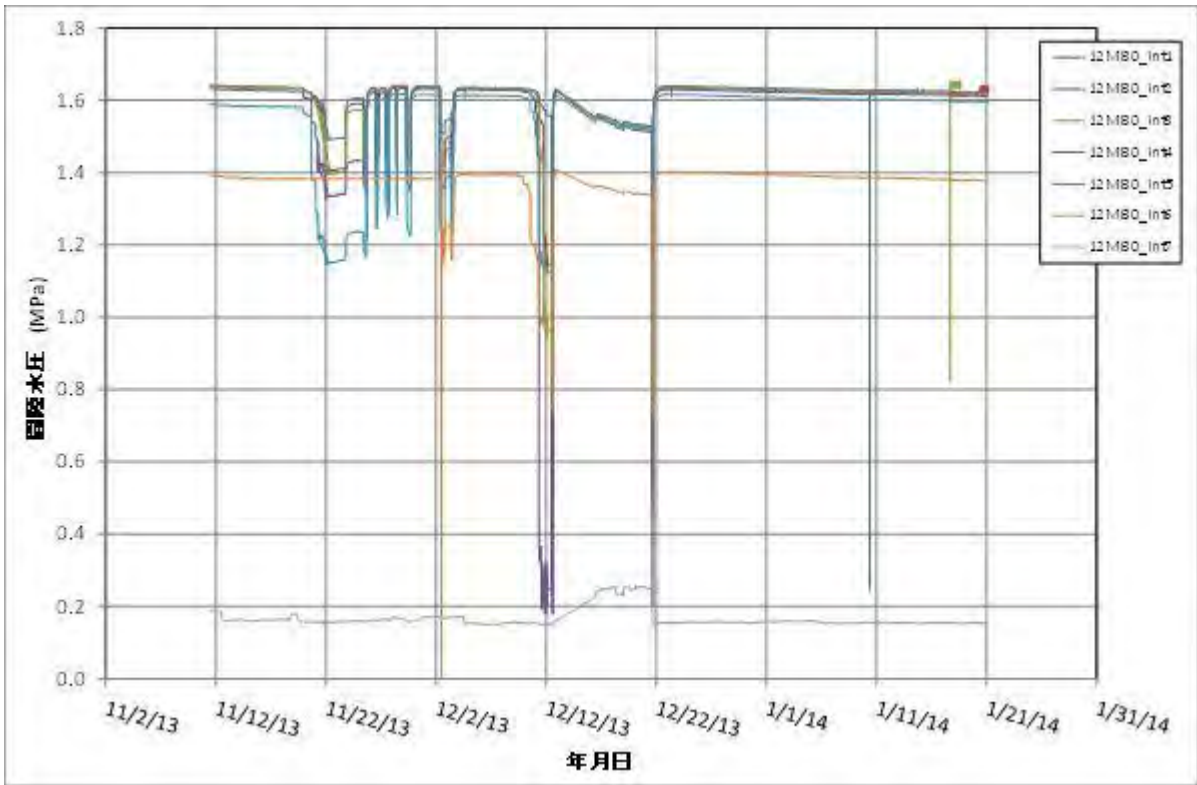


図 7.3.10-1 12MI30 号孔 間隙水圧モニタリング装置抜管までの水圧経時変化

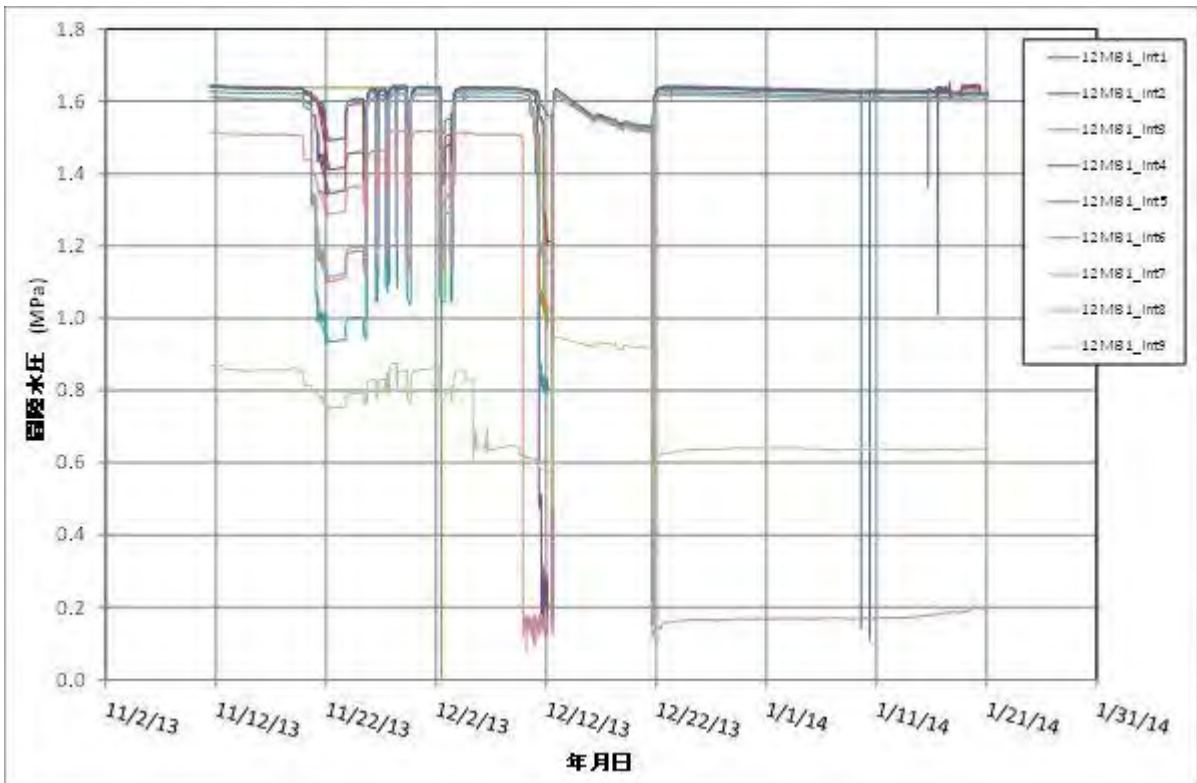


図 7.3.10-2 12MI31 号孔 間隙水圧モニタリング装置抜管までの水圧経時変化

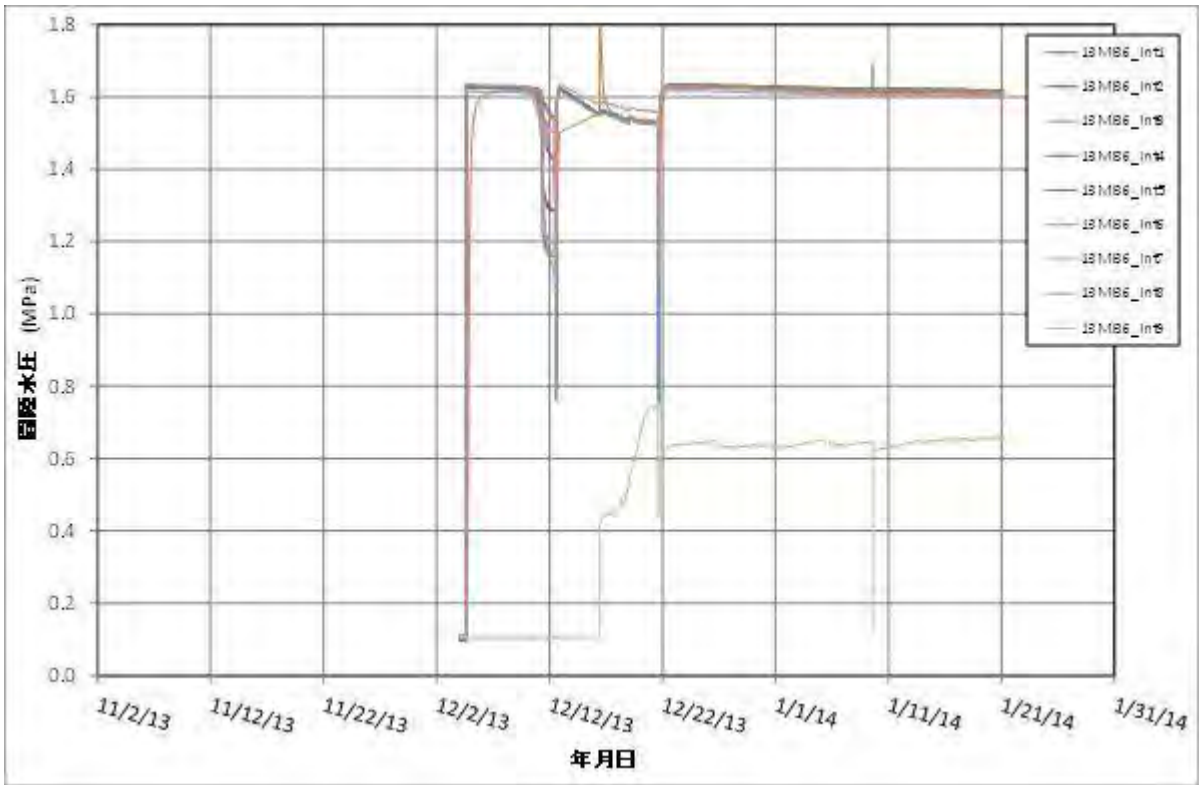


図 7.3.10-3 13MI36 号孔 間隙水圧モニタリング装置抜管までの水圧経時変化

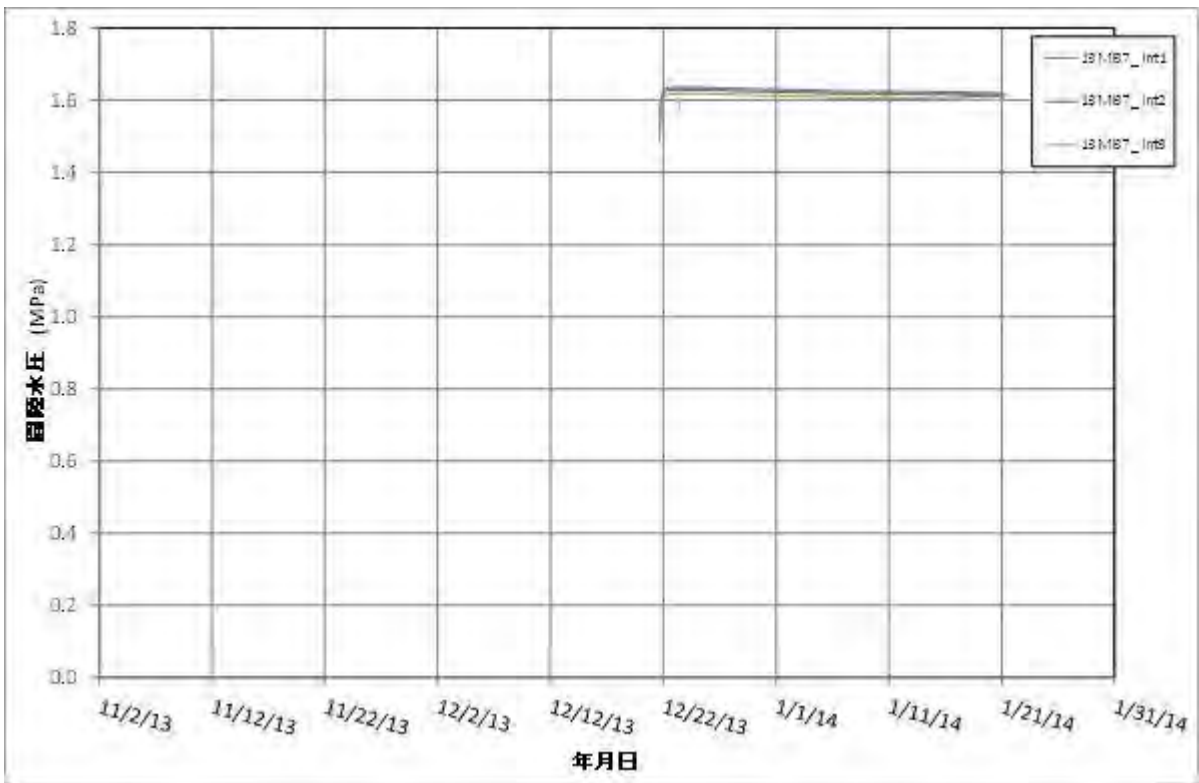


図 7.3.10-4 13MI37 号孔 間隙水圧モニタリング装置抜管までの水圧経時変化

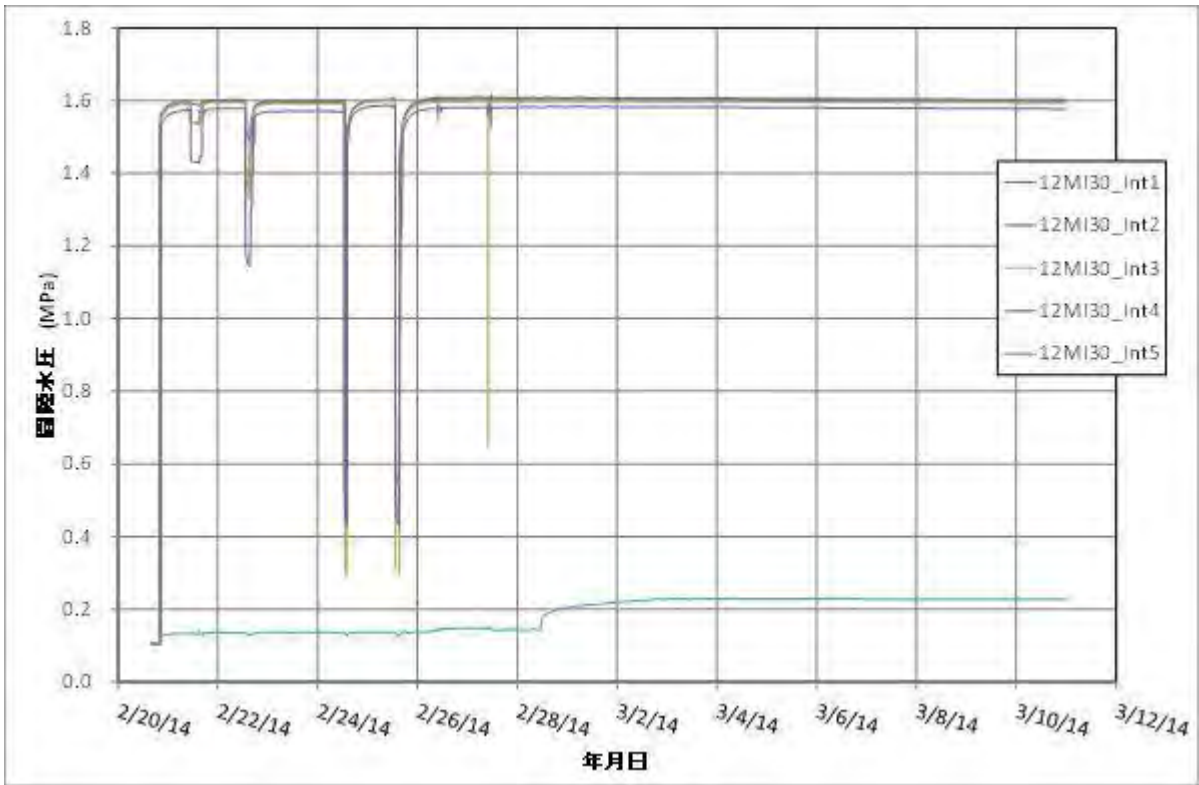


図 7.3.10-5 12MI30 号孔 間隙水圧モニタリング装置再設置後の水圧経時変化

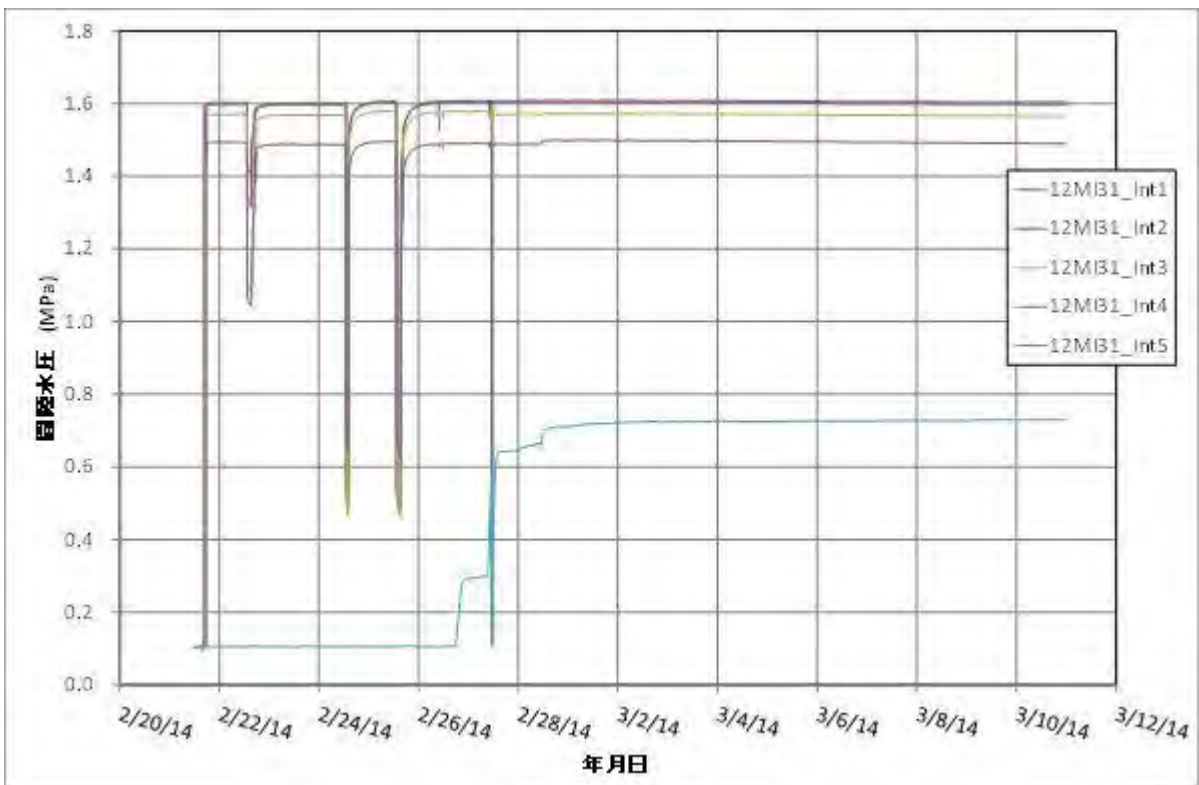


図 7.3.10-6 12MI31 号孔 間隙水圧モニタリング装置再設置後の水圧経時変化

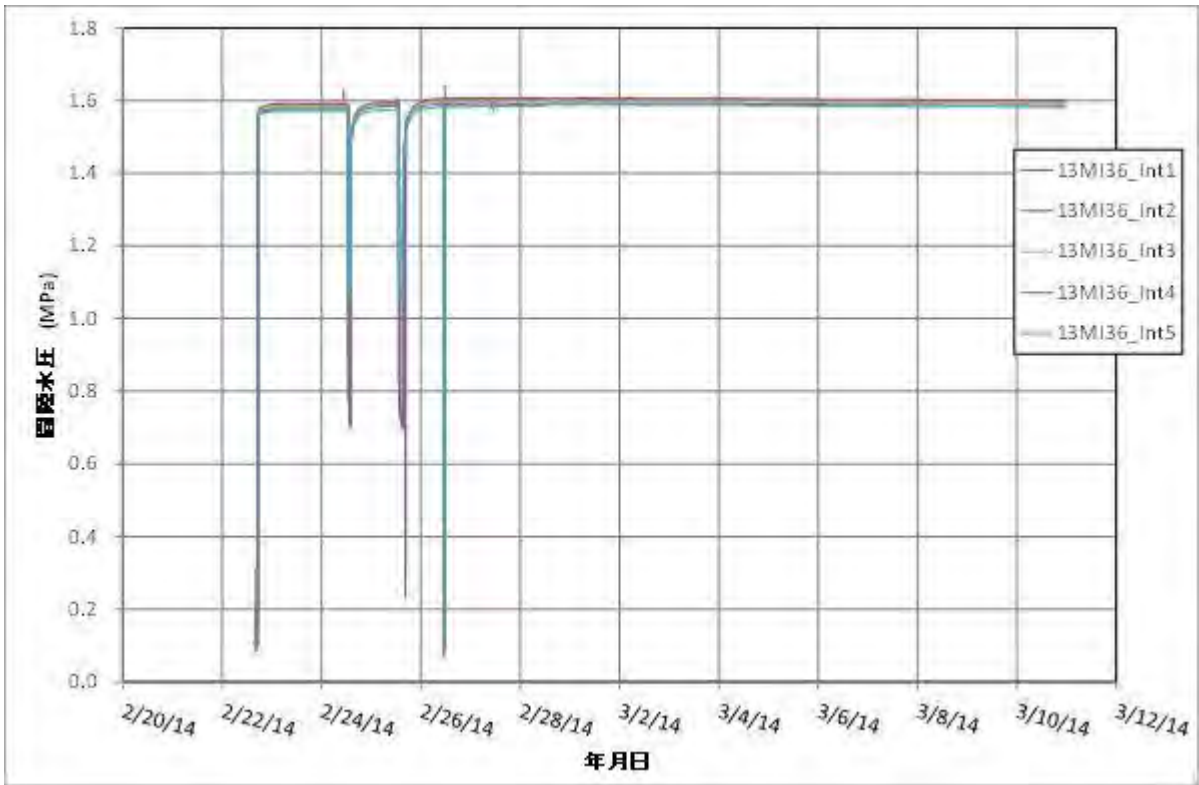


図 7.3.10-7 13MI36 号孔 間隙水圧モニタリング装置再設置後の水圧経時変化

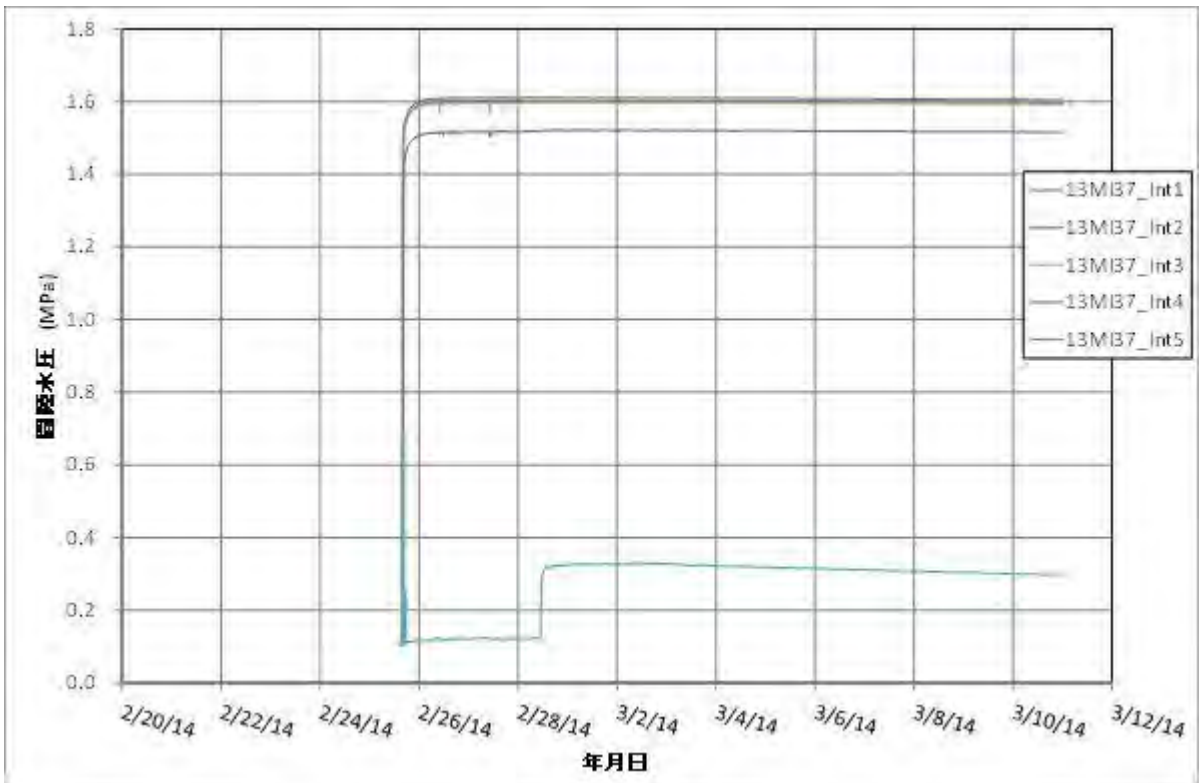


図 7.3.10-8 13MI37 号孔 間隙水圧モニタリング装置再設置後の水圧経時変化

7.4 まとめ

平成 25 年度は、トレーサ試験装置、高粘性流体注入試験、ラドン計測装置、音響トモグラフィ装置の適用試験に先立ち、平成 24 年度に続いて深度 300m ボーリング横坑から約 30m の範囲における水理地質特性および岩盤性状等の地質環境特性調査を目的として、2 本のボーリング孔（孔名：13MI36 号孔、13MI37 号孔）の掘削作業と、ボーリング孔を利用した各種調査を実施した。

以下にボーリング孔掘削、地質学的調査、水理学的調査の観点から、本調査のまとめおよび、今後の課題と展望について述べる。

7.4.1 ボーリング孔掘削

- ・ 各ボーリング孔の仕様は以下の通りである。

<13MI36 号孔>

- ・ ボーリング孔口測量結果：X=-69048.731、Y=6419.441（世界測地系）標高 EL-99.10m
- ・ 掘削方向：S75° W、水平下向き 33°
- ・ 掘進長：22.55mabh
- ・ 孔径：86mm

<13MI37 号孔>

- ・ ボーリング孔口測量結果：X=-69047.447、Y=6420.034（世界測地系）標高 EL-99.10m
 - ・ 掘削方向：S80° W、水平下向き 40°
 - ・ 掘進長：27.00mabh
 - ・ 孔径：86mm
- ・ 13MI36 号孔において、深度 22.05～22.55mabh 掘削中に湧水量が 20L/min を超え孔口湧水量が 41.1L/min となったため、深度 22.55mabh にて掘削を終了した。
 - ・ 13MI37 号孔において、深度 26.10～27.00mabh 掘削中に湧水量が 20L/min を超え孔口湧水量が 200L/min となったため、深度 27.00mabh にて掘削を終了した。
 - ・ コア採取率は、両孔とも全区間において 100%であった。
 - ・ 高精度孔曲り検層を実施した 3 孔（12MI30、12MI31、13MI36 号孔）では、大きな孔曲りがないことが確認された。13MI37 号孔については、大量の湧水のために高精度孔曲り検層を実施できなかった。

7.4.2 地質学的調査

総合地質柱状図を図 7.4.2-1、図 7.4.2-2 に示すとともに、地質学的調査の結果を以下に述べる。なお、13MI37 号孔においては、大量の湧水のために BTV 検層や高精度 BTV 検層を実施することができなかった。

- ・ 採取したコアは、孔口付近のコンクリートを除き、全て中粒黒雲母花崗岩（土岐花崗岩）より構成される。この中粒黒雲母花崗岩は弱い変質といくつかの時期の異なる変形作用を被っている。
- ・ 花崗岩は石英、長石類および黒雲母を主体として構成され、まれに角閃石が認められる。
- ・ 全体的な変質の特徴としては、母岩全体に長石が白濁化する弱い変質を受け、断層や一部の割れ目の集中する区間には、長石のセリサイト化、緑泥石および黄鉄鉱、方解石の形成が認められる。
- ・ 割れ目充填鉱物は、緑泥石、方解石を主体とし、粘土、黄鉄鉱が認められる。
- ・ 断層岩は、カタクラサイトおよび断層ガウジ、断層角礫が認められる。
- ・ 岩盤等級は、13MI36 号孔では B 級 13m、CH 級 10m、13MI37 号孔では B 級 16m、CH 級 11m である。
- ・ RQD は、13MI36 号孔の割れ目の少ない区間では 72～80%、割れ目の発達する区間では 22～29%を示す。また、13MI37 号孔の割れ目の少ない区間では 60～99%、割れ目の発達する区間では 40～53%を示す。
- ・ 割れ目の密度は、13MI36 号孔では平均 7.95 本/m、13MI37 号孔では平均 7.22 本/m である。表 7.4.2-1 に深度別に見た割れ目密度とその成因を示す。
- ・ 割れ目の集中箇所の多くは、NNW 系急傾斜の岩盤分離面で構成される。ただし、ボーリング掘削方向（S75° W、下向き-34°）の垂直に近い不連続面が高い頻度で検出されやすいことに留意する必要がある。これに比べて H（水平～緩傾斜）系や NE 系急傾斜の岩盤分離面は、より離散的である。13MI37 号孔においては、大量の湧水のために BTV 検層を実施できなかった。
- ・ 13MI36 号孔の岩盤分離面の密度は、12MI30 号孔および 12MI31 号孔に比べてやや小さく、岩盤分離面の平均間隔はやや大きい。13MI36 号孔の掘削方向は 12MI30 号孔や 12MI31 号孔とほぼ同じで、また全岩盤分離面の卓越方向も概ね同じである。したがって、13MI36 号孔付近の岩盤分離面の空間的な集中度（離散度）がわずかながら違う可能性がある。

表 7. 4. 2-1 深度別に見た割れ目密度とその成因

13MI36 号孔

深度 (mabh)	割れ目 密度 (本/m)	割れ目成因別密度(本/m)				
		剪断	引張	機械割れ	剪断 または 引張	引張 または 機械割れ
0 ~ 1	14	2	5	2	5	0
1 ~ 2	7	0	2	1	3	1
2 ~ 3	9	0	4	1	1	3
3 ~ 4	13	0	4	0	4	5
4 ~ 5	12	3	1	0	1	7
5 ~ 6	7	0	0	1	4	2
6 ~ 7	6	0	0	1	5	0
7 ~ 8	8	0	0	0	6	2
8 ~ 9	17	2	0	0	12	2
9 ~ 10	6	1	2	0	3	0
10 ~ 11	5	0	0	0	3	2
11 ~ 12	5	0	0	3	2	0
12 ~ 13	5	0	0	2	0	3
13 ~ 14	8	1	0	2	1	4
14 ~ 15	11	0	0	1	4	6
15 ~ 16	7	0	0	1	5	1
16 ~ 17	4	0	0	1	1	2
17 ~ 18	7	0	0	0	3	4
18 ~ 19	10	2	2	0	6	0
19 ~ 20	5	0	1	0	4	0
20 ~ 21	7	0	1	0	4	2
21 ~ 22	4	0	4	0	0	0
22 ~ 23	6	2	1	1	0	2

13MI37 号孔

深度 (mabh)	割れ目 密度 (本/m)	割れ目成因別密度(本/m)				
		剪断	引張	機械割れ	剪断 または 引張	引張 または 機械割れ
0 ~ 1	14	2	2	4	4	2
1 ~ 2	9	5	2	0	2	0
2 ~ 3	9	0	3	0	6	0
3 ~ 4	8	2	4	0	2	0
4 ~ 5	12	0	5	2	5	0
5 ~ 6	15	0	0	1	12	2
6 ~ 7	7	1	1	1	4	0
7 ~ 8	11	5	1	2	2	1
8 ~ 9	8	5	0	1	2	0
9 ~ 10	7	0	0	1	4	2
10 ~ 11	2	0	0	0	1	1
11 ~ 12	2	0	0	1	1	0
12 ~ 13	7	0	0	1	4	2
13 ~ 14	3	0	0	1	2	0
14 ~ 15	1	0	0	1	0	0
15 ~ 16	3	0	0	1	1	1
16 ~ 17	5	0	0	0	4	1
17 ~ 18	7	1	0	2	4	0
18 ~ 19	4	0	0	3	1	0
19 ~ 20	3	0	0	1	1	1
20 ~ 21	9	0	0	1	8	0
21 ~ 22	10	0	0	0	8	2
22 ~ 23	3	0	0	1	2	0
23 ~ 24	6	0	0	1	4	1
24 ~ 25	13	0	1	0	12	0
25 ~ 26	3	1	0	1	1	0
26 ~ 27	14	7	0	0	7	0

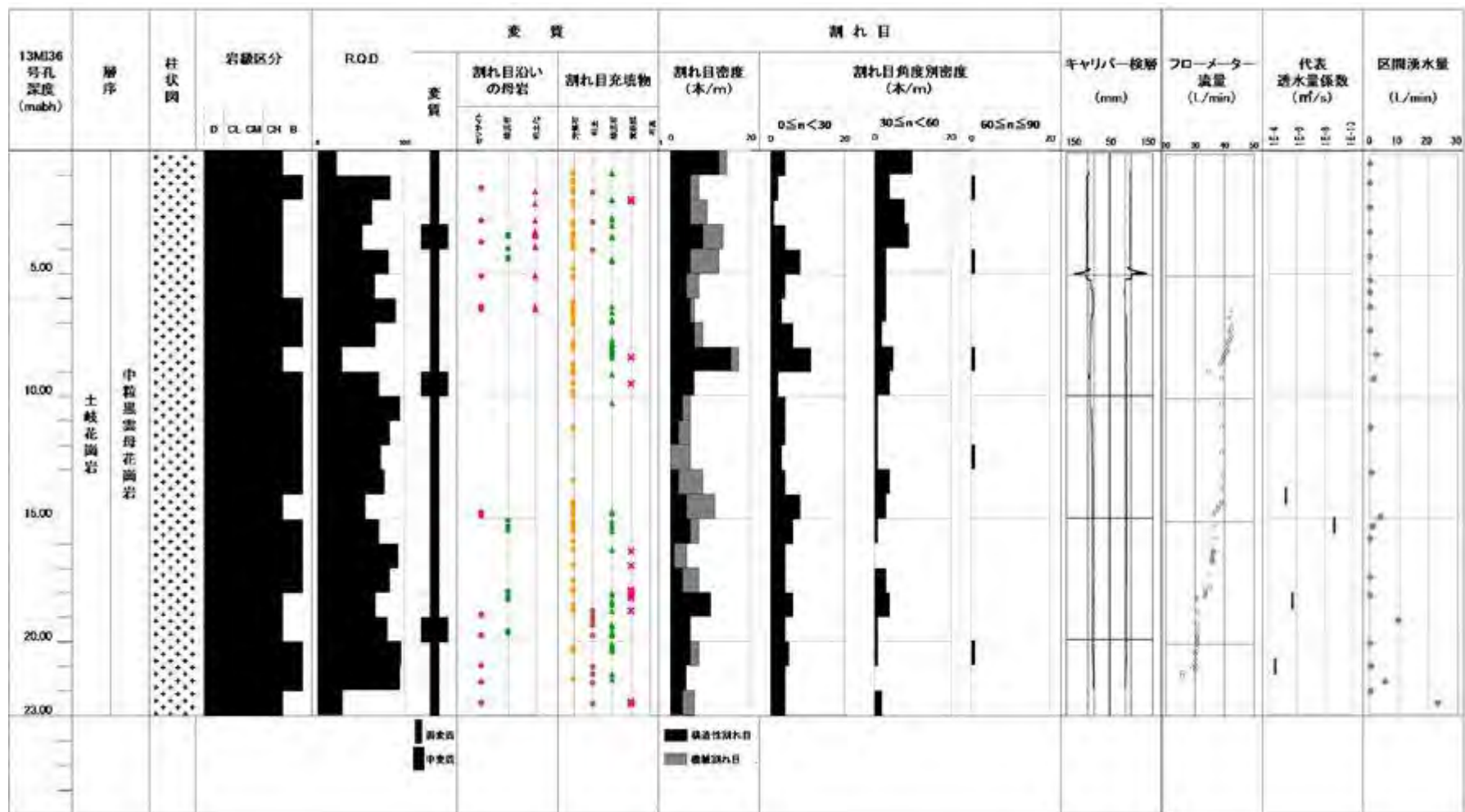


図 7. 4. 2-1 13MI36 号孔の総合地質柱状図

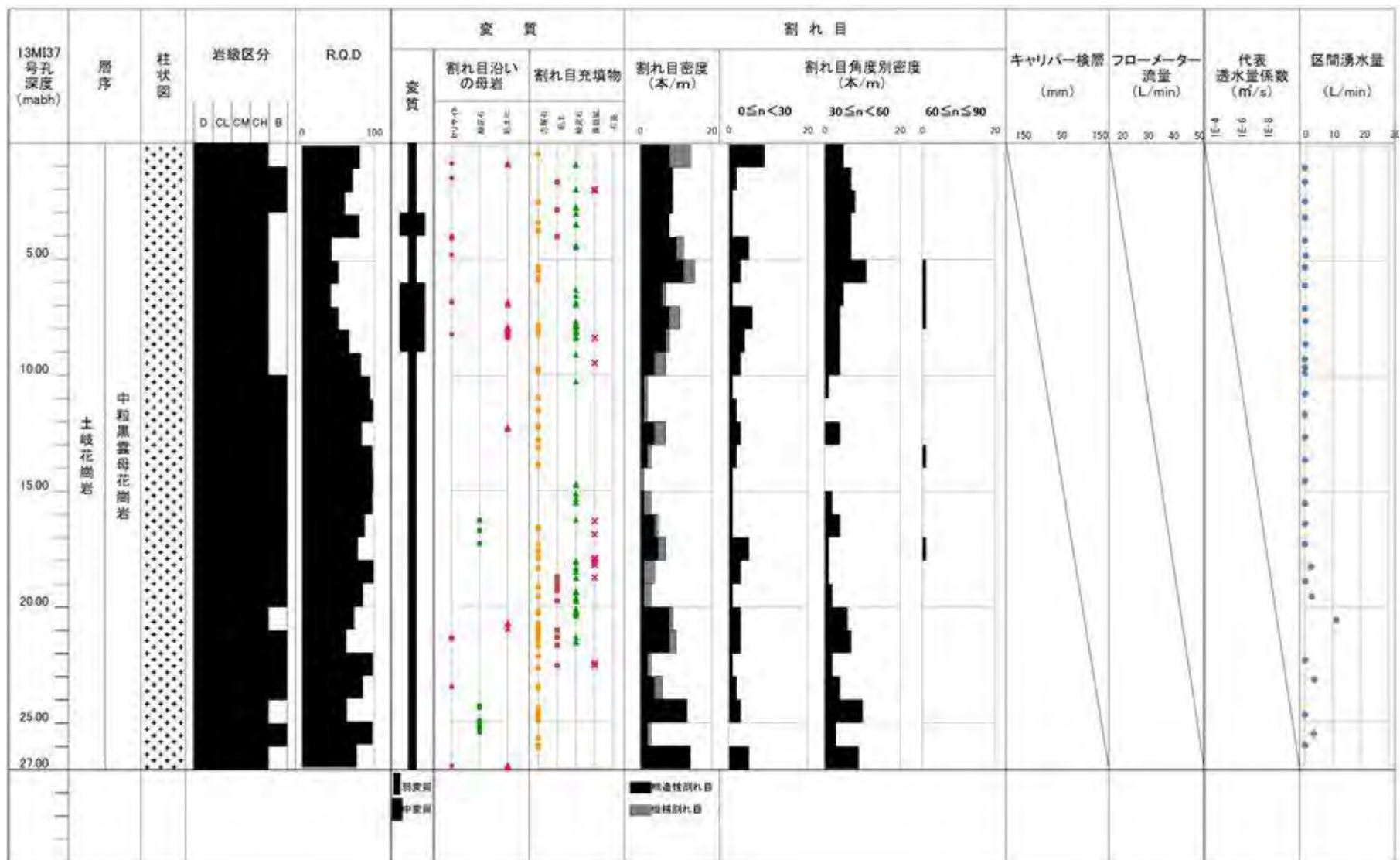


図 7.4.2-2 13MI37 号孔の総合地質柱状図

7.4.3 水理学的調査

水理学的調査の結果を以下に述べる。なお、13MI37 号孔においては、大量の湧水のためにフローメーター検層、透水試験やポイント希釈試験を実施することができなかった。

- ・ フローメーター検層の結果、13MI36 号孔では 7.46～8.46mabh 間 (4.0L/min) 、14.15～14.66mabh 間 (2.6L/min) 、14.66～16.66mabh 間 (0.4L/min) 、17.66mabh (1.8L/min) 、18.06mabh (2.9L/min) 、20.31mabh (0.7L/min) 、21.06mabh (4.2L/min) 、22.36～22.55mabh 間 (25.5L/min) の 8 深度において流量の変化が確認された。
- ・ 13MI36 号孔では、コア観察やボアホールカメラの画像、フローメーター検層結果および掘削時の湧水量変化より、12MI30 号孔、12MI31 号孔との連結性が期待される 21mabh、18mabh、15mabh、14mabh 付近の割れ目を、透水試験の対象として選定した。透水試験の結果は、表 7.4.2-2 に示すように $2.17\text{E}-09\sim 3.42\text{E}-05\text{ m}^2/\text{sec}$ の透水量係数が得られた。
- ・ 透水量係数の大きい 13MI36 号孔の 21mabh、18mabh、14mabh 付近の割れ目を対象とした透水試験時には、12MI30 号孔と 12MI31 号孔の複数の間隙水圧計測区間で水圧の応答が確認された。透水量係数の小さい 15mabh 付近の割れ目を対象とした透水試験時にも、水圧の応答量は小さいが 12MI30 号孔と 12MI31 号孔との水理学的な連結は確認できた。
- ・ 12MI30 号孔では、深度 18.90mabh～19.50mabh 区間でパルス試験による透水試験を実施し、透水量係数 $7.18\times 10\text{E}-11\text{ m}^2/\text{sec}$ が得られた。試験区間の透水性が低いこともあり、12MI31 号孔や 13MI36 号孔のすべての観測区間において水圧応答が見られなかった。
- ・ 掘削完了後に設置した間隙水圧モニタリングの結果において、全ての孔で、孔口 10mabh までの区間では 0.19～0.66MPa と比較的低い圧力を示し、孔口 15mabh よりも先の区間については、1.49MPa～1.61MPa の間隙水圧を維持していることが確認できた。
- ・ ポイント希釈試験で得られたウラン濃度の低下量から算出した割れ目内を通過する単位幅あたりの地下水流量は、9 区間のうち 0.1 ml/min/cm 未満の区間が 3 区間、0.1 以上 0.2 ml/min/cm 未満の区間が 4 区間、0.2ml/min/cm 以上の区間が 2 区間であった。

表 7.4.2-2 定圧揚水試験、パルス試験の解析結果の代表値

試験番号	試験深度		試験方法	解析法	透水量係数	貯留係数	初期間隙水圧	揚水量
	上端(mabh)	下端(mabh)			m ² /sec		Mpa	m ³ /sec
No.1	20.73	21.40	定流量 揚水試験	Jacob	3.42E-05	-	1.5308	2.66E-05
				Agarwal	3.31E-05			
No.2	18.03	18.70	定流量 揚水試験	Jacob	2.02E-06	-	1.5227	1.44E-05
				Agarwal	2.59E-07			
No.3	13.73	14.40	定流量 揚水試験	Jacob	8.31E-07	-	1.5237	1.51E-05
					5.90E-06			
				Agarwal	2.89E-06			
No.4-1	14.93	15.60	非定常試験	Hvorslev	2.06E-09	-	1.5217	
No.4-2					2.17E-09		1.5207	

※ 透水量係数の太文字の値を場の値として採用した。

表 7.4.2-3 ポイント希釈試験結果

孔名	観測区間	ウラン濃度 Ln曲線 直線部傾き dLnC/dt	地下水流量 Q _{bh} (mL/min)	係数 α	孔半径 r _w (cm)	地下水流量 q _f (mL/min/cm)
12MI30	Int2	-1.6963	1.9908	2.0	4.5	0.1106
	Int3	-0.3395	1.6032	2.0	4.5	0.0891
12MI31	Int2	-1.7161	2.0617	2.0	4.5	0.1145
	Int3	-1.9570	4.3489	2.0	4.5	0.2416
	Int4	-0.4879	1.5586	2.0	4.5	0.0866
	Int5	-1.0266	4.2775	2.0	4.5	0.2376
13MI36	Int6	-2.1739	2.7476	2.0	4.5	0.1526
	Int4	-0.8023	1.6157	2.0	4.5	0.0898
	Int7	-2.0327	3.5290	2.0	4.5	0.1961

7.4.4 今後の課題と計画

今後の課題と計画について以下に示す。

(1) 高精度孔曲り検層の利用について

ジャイロによる高精度孔曲り検層を実施した結果、ボーリング掘削中に 5m 間隔で実施した方位磁石と傾斜計による計測とでは大きな差が生じることが判明した。この原因として、測定間隔の違いと方位磁石や傾斜計の読み取り限界（計測精度）が考えられる。測定間隔に起因する誤差は、掘削作業において煩雑にはなるが、測定間隔を 1 m にするなど短くすることで対応できるが、磁石等の読み取り精度には限界があると考ええる。ボーリングの孔跡は BTV 画像による割れ目の走向傾斜解析などに影響を及ぼすことから、できるだけ精度の良い手法により計測する必要がある。

(2) 湧水量対策について

これまで深度 300m ボーリング横坑で掘削した 4 本のボーリング孔において、湧水量が 20L/min 以下であった孔は 12MI31 号孔のみであった。特に、13MI37 号孔においては 200L/min もの大量の湧水が発生し、ほとんどの孔内試験を実施することができなかった。間隙水圧の計測結果からは深度 300m の岩盤での水圧として 1.6MPa という大きな値が得られており、次年度以降に追加でボーリング孔を掘削した場合にも大量の湧水が懸念される。したがって、突発的な大量湧水に備え、湧水のある孔底をプラグして、ボーリング孔のそれよりも浅い部分を活用できる止水方法を検討することが必要と考ええる。

参考文献

- AGARWAL, R. G. (1980): A New Method to Account for Producing Time Effects When Drawdown Type Curves Are Used to Analyze Pressure Buildup and Other Test Data, Soc. of Petroleum Engineers, SPE Paper 9289, presented at SPE-AIME Meeting, Dallas, Texas, Sept. 21-24
- COOPER, H. H. & JACOB, C. E.: (1946): *A generalised graphical method* for evaluating formation constants and summarising well-field history. Transactions of the American Geophysical Union, Vol. 27, No IV, pp. 526-532.
- ENACHESCU, C. ET AL. (2004): A New Visual Synthesis Tool for Transient Test Data. NGWA Conference, Portland Maine.
- GUSTAFSSON, E. ET AL. (2006): GROUNDWATER FLOW MEASUREMENTS AND SWIW TEST IN BOREHOLE KFM08A, SKB P-06-90.
- JACOB, C. E. & LOHMAN, S. W. (1952): Non-steady Flow to a Well of CONSTANT DRAWDOWN IN an Extensive Aquifer. Trans Amer. Geophys. Union, Vol. 33, pp. 556-569.
- HVORSLEV, M. J. (1951): Time lag and soil permeability in ground water observations, U.S. Army.
- 田上雅彦 他 2 名 (2009)、瑞浪超深地層研究所の花崗岩中に分布する高角度割れ目の特性、応用地質学会 2009 年 10 月。
- 糸魚川淳二 (1980) : 瑞浪地域の地質、瑞浪市化石博物館専報、第 1 号、pp. 1-50.
- 鶴田忠彦 他 4 名 (2009) : 瑞浪超深地層研究所における立坑内からのパイロットボーリング調査報告書、JAEA-Research 2008-098.
- 石橋正祐紀 他 3 名 (2013) : 超深地層研究所計画におけるサイトスケール地質構造モデルの構築、—第 2 段階における Shaft460 および Shaft500 地質構造モデルへの更新—、JAEA-Technology 2013-019.
- 吉田栄一・大澤英昭・柳澤孝一・山川稔 (1989) : 深部花崗岩中の割れ目解析—岐阜県東濃地域に分布する花崗岩類を例にして—、応用地質 第30巻第3号、pp. 11-22.
- JAEA ホームページ : <http://www.jaea.go.jp/04/tono/miu/mium.html>

8. 岩石コアを用いた室内吸着・拡散試験

8.1 背景

高レベル放射性廃棄物処分の安全評価では、核種が地下水に溶解し地下水流動とともに移動する「地下水シナリオ」が主要な評価対象であると考えられている。地下水シナリオにおいては、核種の移行は岩石との相互作用（吸着やマトリクス拡散）による遅延が期待されており、岩石が持つ核種の遅延能力を評価することが精密調査段階においても重要であると考えられる。

通常岩石による核種移行の遅延能力は、室内で実施されるバッチ試験等の吸着試験で評価される。日本原子力学会が提案している標準的な手法では（日本原子力学会, 2006）岩石を 2mm 以下の粉末に粉砕し、1g の岩石粉末に対して 10mL の溶液を添加して吸着試験を実施し、吸着試験の結果からある核種の固液での分配係数を算出する。バッチ法は比較的实施が容易であることから、多くの試験で用いられた実績があり、条件を複数変えた試験を同時並行に実施できるなどのメリットがある。一方、上記の粉体を用いるバッチ試験では岩石コアを取得してそれを粉砕するなどの操作があり、実際の地下環境とは異なる条件下で試験を実施することになる。このため、実験室で取得した分配係数から実際の地下での核種移行を評価するには、なにかしらの方法でこれを規格化し、実スケールにスケールアップしていく必要がある。規格化・スケールアップの考え方、例えば岩石 1kg あたりの吸着量でスケールアップするのか、実際に流動する地下水が接触する岩石の表面積で規格化しスケールアップするのか、はサイト特性にも依存していると考えられ、明確な方針が確定していないのが現状である。

一方、トレーサー試験においても核種の遅延能力を評価することが可能である。トレーサー試験において、非吸着性トレーサーと吸着性トレーサーの到達時間（あるいはピーク）の差異、あるいはピーク高さの差異を利用してある核種の遅延係数を評価することができる。評価された遅延係数から分配係数を算出することが可能である。トレーサー試験は実際に地下にある割れ目を用いて実施するため、実際の地下環境に近い条件で、割れ目充填鉱物などが付着している実割れ目を使って試験を実施するため、上記の意味からはより処分の安全評価に近い条件で岩石が持つ核種の遅延能力を評価できる手法であると言える。しかし、トレーサー試験ではトレーサーを回収できないと試験の評価が難しくなることから、特に流速の速い場においては十分にトレーサーの回収率が高くなる汲み上げの条件を設定されることが多い。また、同じく回収率を上げる理由から、吸着性トレーサーの濃度も高めに設定されることが多い。上記のようにトレーサー試験では岩石との接触時間は短めに、トレーサー濃度は高めに設定されることが多く、上記の室内試験等と比較して核種の遅延能力を低く評価する可能性が高い。このため、実際の割れ目を用いることができるというメリットがあるものの、実際に安全評価に使うのに適切な分配係数評価となっているかについては疑問が残る。トレーサー試験によって核種移行遅延能力を評価するためには、どの程度の時間をかけて、どの程度の濃度のトレーサーを流せば良いのか、条件が設定できることが望ましい。

上記のような考えに基づき、本研究ではトレーサー試験において核種の分配係数を評価するための最適な条件を設定することを最終的な目的とした。上記の最終的な目標を達成するために、今年度は種々の条件設定によって分配係数がどの程度の範囲を持ちうるかを把握することを目標とした。また、種々の試験方法・試料形状で分配係数を評価した場合の、分配係数の値がとりうる範囲を併せて把握することを試みた。核種としてセシウム (Cs) とストロンチウム (Sr) を評価対象とし、岩石は実際にトレーサー試験を実施する瑞浪地域の花崗岩に加え (以下花崗岩と記述する)、和泉砂岩、吉井砂岩の 3 種を使用した。将来的に以下の全ての方法で分配係数を取得・比較することを目指し、今年度は一部の条件や試料で分配係数を取得したほか、試験系の確立を目的とした予備的な試験を実施した。

- ① バッチ式吸着試験 (粉体、板状試料)
- ② カラム試験 (粉体を充填したカラムを使用)
- ③ 拡散試験 (板状試料をもちいた Through Diffusion 法)
- ④ 模擬トレーサー試験 (柱状岩石周囲に溶液を流す模擬的なトレーサー試験)
- ⑤ 実地下水と岩石中濃度の比較

8.2 試験に供する岩石の評価

実際の吸着試験を開始する前に、ここではまず岩石試料を準備し、それぞれの特性を把握した。

8.2.1 岩石試料の準備

岩石試料は以下の手順で準備した

- ・岩石試料の入手：花崗岩は昨年度実施したボーリング孔「12MI31 号孔」のコアの健岩部を 2m 程度取得した。和泉砂岩、吉井砂岩は岩本鉱産物商会から外径 5cm 長さ 10cm 程度のものを複数個購入した。

- ・粉末状試料の準備：岩石試料の一部をタングステンカーバイドのミルで粉砕して、岩石の粉末を得た。粉砕中に岩石中鉱物の分別が生じることを避けるため、粉砕は一定量の岩石が全て 2mm のメッシュを通過するまで実施した。粉砕した岩石は比表面積計を用いて比表面積を評価した (表 8.2.1-1)。

- ・ディスク状・円柱状試料の整形

花崗岩は外径が 5cm になるようにコア抜きをした後、厚さが 1cm のディスク状になるように試料を切断した。和泉砂岩、吉井砂岩についても購入した外径 5cm のコアを厚さが 1cm のディスク状になるように切断した。また、花崗岩については、模擬トレーサー試験に用いるため外径 14mm 長さ 70mm の円柱状試料を 15 本整形した。

表 8. 2. 1-1 比表面積の測定結果

試料	セル重量 (g)	セル+試 料重量 (g)	試料重量 (g)	全表面積 (m ²)	比表面積 (m ² /g)	平均比表面積 (m ² /g)
花崗岩	10.93	15.64	4.71	1.12	0.24	0.23
	11.43	16.88	5.45	1.22	0.22	
	10.98	15.67	4.69	1.10	0.23	
和泉砂岩	9.94	11.69	1.75	7.75	4.44	4.39
	9.84	12.06	2.22	9.54	4.30	
	9.87	11.37	1.51	6.68	4.43	
吉井砂岩	9.53	9.97	0.44	4.62	10.45	10.27
	9.94	10.35	0.42	4.27	10.21	
	10.10	10.64	0.54	5.48	10.17	

8. 2. 2 陽イオン交換容量 (CEC) の測定

粉末状およびディスク状岩石試料については、吸着試験の濃度を決定するために以下の手順で CEC を評価した。

(1) 粉末状試料の CEC 測定

粉末状試料の CEC 測定は以下の手順で実施した。以下に示す方法は土壌標準分析・測定法委員会 (1986) が示した方法を基にして、岩石粉末用にアレンジしたものである。

- ・溶液の調製：1.0mol/L の塩化アンモニウム溶液を調製し、溶液の pH をアンモニア水または塩酸を用いて 7.0 に調整した。また、エタノールと純水を 4：1 で混合し、混合液の pH を硝酸またはアンモニアを用いて 7.0 としたものを準備した。さらに、1.0mol/L の臭化カリウム溶液を調製した。

- ・アンモニウムイオンによる陽イオン交換サイトの占有：50mL の遠沈管に 10g の岩石を秤量した後、25ml の塩化アンモニウム溶液を添加した。24 時間岩石と溶液がまんべんなく接触するように、緩やかに振盪した。24 時間後 2000rpm×30 分間遠心分離して、上澄み液を取り除いた。上記の操作をのべ 4 回繰り返し、陽イオン交換サイトがアンモニウムイオンで占有されるようにした。

- ・塩化アンモニウム溶液の洗い流し：上記の操作後上澄みを除去した固相に 12.5mL のエタノール溶液を加えて振り混ぜた。その後、岩石粉末が完全に沈降するまで静置した。岩石の沈降を確認後、上澄み液を除去しさらにエタノール溶液を加えた。上記の操作をのべ 4 回繰り返し、岩石に残った塩化アンモニウム溶液を除去した。

・アンモニウムの脱離：上記の巣長終了後、上澄み液を除去した固相に臭化カリウム溶液を 25mL 入れ、24 時間緩やかに振盪した。24 時間後 2000rpm×30 分間遠心分離して、上澄み液をサンプルとして取得した。この操作をのべ 4 回繰り返し 4 つの試料を得た。

・アンモニウムイオン濃度の定量：上記の操作で得られた溶液に存在するアンモニウムの量を定量するため、IC によってアンモニウムイオンを定量した。カリウムイオンとアンモニウムイオンはピークが近接しており、測定に干渉する可能性が考えられたため、溶液にはクラウンエーテルを添加してカリウムのピークを後ろにずらしアンモニウムイオン濃度を定量した。併せて塩化物イオンの濃度も測定した。

(2) ディスク状試料の CEC 測定

ディスク状試料の CEC 測定は粉末状試料と同様の方法で実施した。粉末状試料の場合と固液比を合わせるため、塩化アンモニウムや臭化カリウム溶液は岩石 10g に対して 25ml を、エタノール溶液は岩石 10g に対して 12.5mL を添加した。

いずれの CEC 測定においても、吸着と岩石空隙内に拡散したアンモニウムイオンを区別するため、塩化物イオン濃度を用いて補正を行った。つまり、モル濃度で表したときの塩化物イオン濃度と同量のアンモニウムイオンが、岩石空隙内に残存していたと考え、塩化物イオン濃度分を抽出されたアンモニウムイオン濃度から差し引いた。

$$[\text{NH}_4]_{\text{cor}} = [\text{NH}_4] - [\text{Cl}] \quad (1)$$

ここで、 $[\text{NH}_4]_{\text{cor}}$ ：補正後のアンモニウムイオン濃度 (mol/L)、 $[\text{NH}_4] \cdot [\text{Cl}]$ ：測定時のアンモニウムイオンおよび塩化物イオンの濃度(mol/L)である。

CEC の測定結果を表 8.2.2-1 および 2 に示した。粉末状とディスク状試料の CEC を比較すると、いずれの岩石においても粉末状試料の方がディスク状試料よりも高い値を示した。吉井砂岩においては、ディスク状試料の CEC が粉末状試料の 92%程度だったのに対し、和泉砂岩では 87%、花崗岩では 44%であった。和泉砂岩、花崗岩健岩部はいずれも透水係数が $1.0 \times 10^{-12}(\text{m/s})$ (小出と前田 2001) のオーダーであるが、花崗岩ではディスク状の試料における CEC が大きく減少している。この結果から、和泉砂岩と花崗岩が同程度の透水係数であるが、和泉砂岩はディスク状であってもアンモニウムイオンが接触できる箇所が粉末とディスクで同程度であるのに対し、花崗岩ではそれが大きく減少していると考えられる。以上の結果から花崗岩においては、岩石の塊を対象として試験するトレーサー試験において粉末で評価するよりも低い分配係数が得られる可能性が高いと推定される。

表 8.2.2-1 粉末状試料における CEC の測定結果

サンプル	臭化アンモニウム溶液中の濃度		補正後濃度	岩石 100g あたりのアンモニア吸着量
	アンモニウムイオン (mol/L)	塩化物イオン (mol/L)	アンモニウムイオン (mol/L)	meq/100g
花崗岩-1 回目	1.56	0.60	0.96	0.25
花崗岩-2 回目	0.37	0.31	0.06	
花崗岩-3 回目	0.25	0.28	0.00	
花崗岩-4 回目	0.21	0.27	0.00	
吉井砂岩-1 回目	16.33	7.21	9.12	2.70
吉井砂岩-2 回目	3.01	1.50	1.50	
吉井砂岩-3 回目	0.66	0.48	0.18	
吉井砂岩-4 回目	0.33	0.33	0.00	
和泉砂岩-1 回目	11.52	0.83	10.69	3.15
和泉砂岩-2 回目	2.09	0.33	1.76	
和泉砂岩-3 回目	0.39	0.28	0.11	
和泉砂岩-4 回目	0.30	0.27	0.03	

表 8.2.2-2 ディスク状試料における CEC の測定結果

サンプル	臭化カリウム溶液中アンモニウムイオン濃度		溶液中のアンモニウム量	岩石 100g あたりのアンモニア吸着量
	mg/L	mmol/L	meq	meq/100g
花崗岩-1 回目	1.06	0.60	0.46	0.11
花崗岩-2 回目	0.00	0.32	0.00	
花崗岩-3 回目	0.00	0.31	0.00	
花崗岩-4 回目	0.00	0.30	0.00	
吉井砂岩-1 回目	44.50	36.38	8.12	2.51
吉井砂岩-2 回目	2.21	0.28	1.92	
吉井砂岩-3 回目	0.26	0.63	0.00	
吉井砂岩-4 回目	0.07	0.38	0.00	
和泉砂岩-1 回目	11.28	0.28	11.00	2.75
和泉砂岩-2 回目	0.43	0.42	0.01	
和泉砂岩-3 回目	0.30	0.35	0.00	
和泉砂岩-4 回目	0.17	0.28	0.00	

8.3 バッチ式吸着試験

8.3.1 試験方法

バッチ式吸着試験では、粉体およびディスク状試料を用いた吸着試験を実施し、それぞれの固体へのセシウムやストロンチウムの分配係数の経時変化を明らかにした。8.2 で明らかにした粉体およびディスク状試料の CEC を基にして、添加する Cs および Sr の濃度は以下の 5 種類を設定した。①CEC に対して 10%の Cs や Sr を含む濃度、②CEC に対して 50%の Cs や Sr を含む濃度、③CEC に対して 100%の Cs や Sr を含む濃度、④CEC に対して 200%の Cs や Sr を含む濃度、⑤CEC に対して 1000%の Cs や Sr を含む濃度、である。岩石と実際の濃度条件を表 8.3.1-1 にまとめた。

また、液相には瑞浪地域で得られた地下水（DH9-1 深度 199m）中の主要なイオン組成を参考にして、以下の手順で調整した。硫酸マグネシウム 7 水和物 0.25g、塩化カリウム 0.25g、塩化マグネシウム 6 水和物 0.25g、フッ化ナトリウム 0.15g を 500mL の水に溶解させた。1L のメスフラスコに 9 分目程度純水

を添加し、上記の混合液 10mL を加えた。さらに純水を標線の少し手前まで加えた後、 $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ -0.13g を少しずつ添加し、フラスコを振り混ぜて完全に溶解させた。さらに、炭酸カルシウム 0.06g を加えて振り混ぜ、完全に溶解したことを確認して標線までメスアップした。調製した模擬地下水は吸着試験前に $0.45 \mu\text{m}$ のフィルタでろ過して使用した。使用直前に水酸化ナトリウムまたは塩酸溶液を用いて、模擬地下水の pH を 8.5 に調整した

吸着試験の手順は下記の通りである（日本原子力学会（2006）の手順を参考にした）。

・岩石と模擬地下水の接触：容量 100mL のポリプロピレン容器に岩石 10.0g を秤量した。模擬地下水 100mL を加えてさらに攪拌子を入れ、溶液を緩やかに攪拌しながら pH を 8.5 に調整した。シェイカーで振とうしながら、48 時間程度岩石と模擬地下水を接触させた。

・Cs および Sr の添加：予め調製した Cs あるいは Sr を含むストック溶液（塩化セシウムまたは塩化ストロンチウム・6 水和物を溶解して作製）を添加して、設定した濃度になるように Cs あるいは Sr を溶液に加えた。添加後に再度 pH を 8.5 に調整した。また、岩石粉末を入れないブランク試験も併せて実施した。

・サンプリング：所定の時間経過後、以下の手順でサンプルを取得した。シェイカーをとめ、岩石粉末がある程度沈降するまで静置した後、 $0.45 \mu\text{m}$ のフィルタに上澄み液 $500 \mu\text{L}$ を通し、ろ液を廃棄した。この作業はろ過によって Cs や Sr 濃度が影響を受けないように実施した。さらに同じフィルタに $500 \mu\text{L}$ の上澄み液を通じ、ろ液を取得した。ろ液のうち $100 \mu\text{L}$ をはかりとり、予め 1% の硝酸溶液 9.9mL を入れた容器に添加した。

・測定：ICP-MS を用いて上記で取得したサンプルの Cs あるいは Sr 濃度を定量した。測定は水素モードを用いて Cs や Sr の妨害要因となる多原子イオンなどの影響を除去し、マトリクス濃度の違いによる差を補正するためタリウムを内標準物質としてカウントを補正した。

表 8.3. 1-1 バッチ式吸着試験における初期セシウムおよびストロンチウム濃度条件のまとめ

岩石名	粉末状試料		ディスク状試料	
	セシウム試験開始濃度 (mg/L)	ストロンチウム試験開始濃度 (mg/L)	セシウム試験開始濃度 (mg/L)	ストロンチウム試験開始濃度 (mg/L)
花崗岩	8	2.5	8	2.5
	40	12.5	40	12.5
	80	25	80	25
	160	50	160	50
	800	250	800	250
吉井砂岩	70	24	70	24
	350	120	350	120
	700	240	700	240
	1400	480	1400	480
	7000	2400	7000	2400
和泉砂岩	50	16	50	16
	250	80	250	80
	500	160	500	160
	1000	320	1000	320
	5000	1600	5000	1600

8.3.2 試験結果と考察

(1) 粉末状試料

粉末状試料の試験における上澄み液中の Cs および Sr 濃度の経時変化を図 8.3.2-1~3 に示した。図の横軸は吸着が平衡になるまでの時間が視覚的に理解できるように、対数表示にしている。また、グラフの縦軸の濃度は初期に添加した Cs あるいは Sr 濃度を 1.0 として正規化した数値である。

各岩石において、Cs と Sr 濃度の経時変化は類似しており、今回試験を実施した全てのケースにおいて 24 時間程度で液相中の Cs や Sr 濃度の変化が顕著で無くなることがわかる。このため、粉体を用いた試験では、吸着は 24 時間程度で平衡に達すると考えて良い。吸着率の経時変化について濃度依存性を見ると、高濃度（CEC の 1000% や 200%）では、吸着は 2~3 時間程度で平衡に達するのに対し、CEC より低い濃度での試験では 8 時間程度まで Cs や Sr 濃度の顕著な減少が見られる。このように吸着量の経時変

化には濃度依存性があり、濃度が低い試験ほど平衡に達するのに時間を要することがわかった。これは低濃度での試験では、模擬地下水中に存在する他陽イオンと Cs や Sr の競合反応の経時変化を見ているのに対し、高濃度では Cs や Sr 濃度が圧倒的に高く Cs や Sr が吸着するだけの経時変化を見ているためであると推察される。

一方吸着率と濃度の関係を見ると、濃度に対して明確な依存性が見られ、低濃度ほど吸着率が高くなる傾向が見られた。濃度と分配係数の関係を表 8.3.2-1 にまとめた。花崗岩では分配係数の濃度依存性は顕著ではなく、ほぼ同程度の値となったが、吉井および和泉砂岩では濃度依存性が顕著であり、分配係数は最大で 30 倍程度の差が見られた。この結果から、回収するための条件を優先してトレーサー試験の濃度を決定した場合、実際の処分条件に近い比較的低濃度での分配係数に比べて小さな分配係数を評価してしまう可能性がある。

上記の試験結果から、8.4 に記述するカラム試験については粉末での試験結果を基にして、24 時間の岩石-トレーサー接触時間を基準として試験時間を設定することとした。

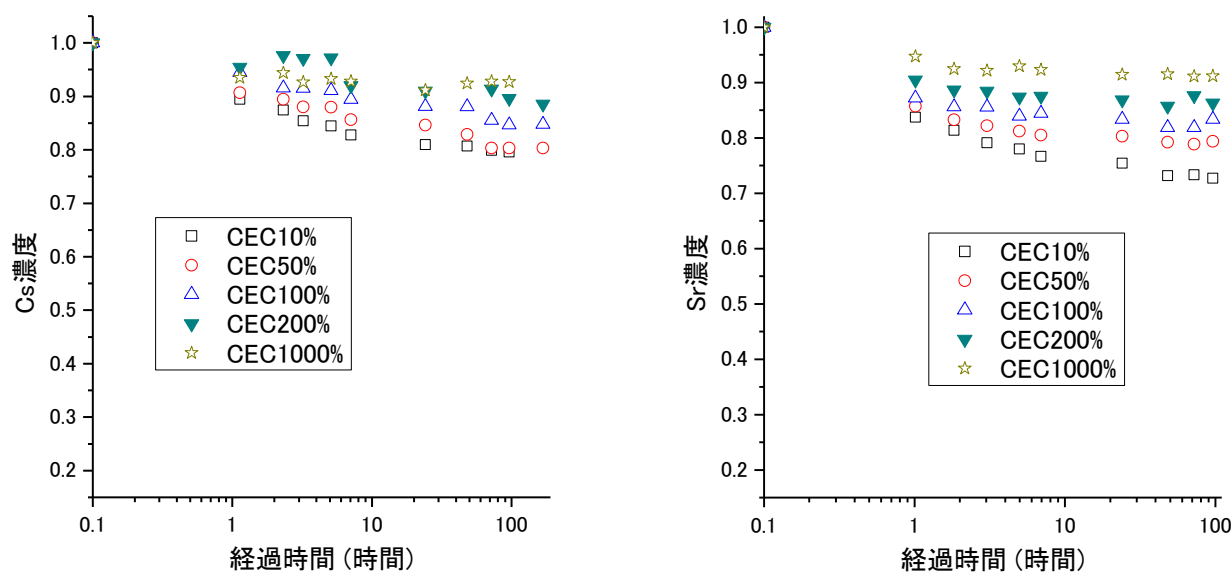


図 8.3.2-1 粉末状岩石試料への吸着試験における上澄み液中 Cs または Sr 濃度の経時変化 (花崗岩)

Cs の濃度変化 (左)、Sr の濃度変化 (右)

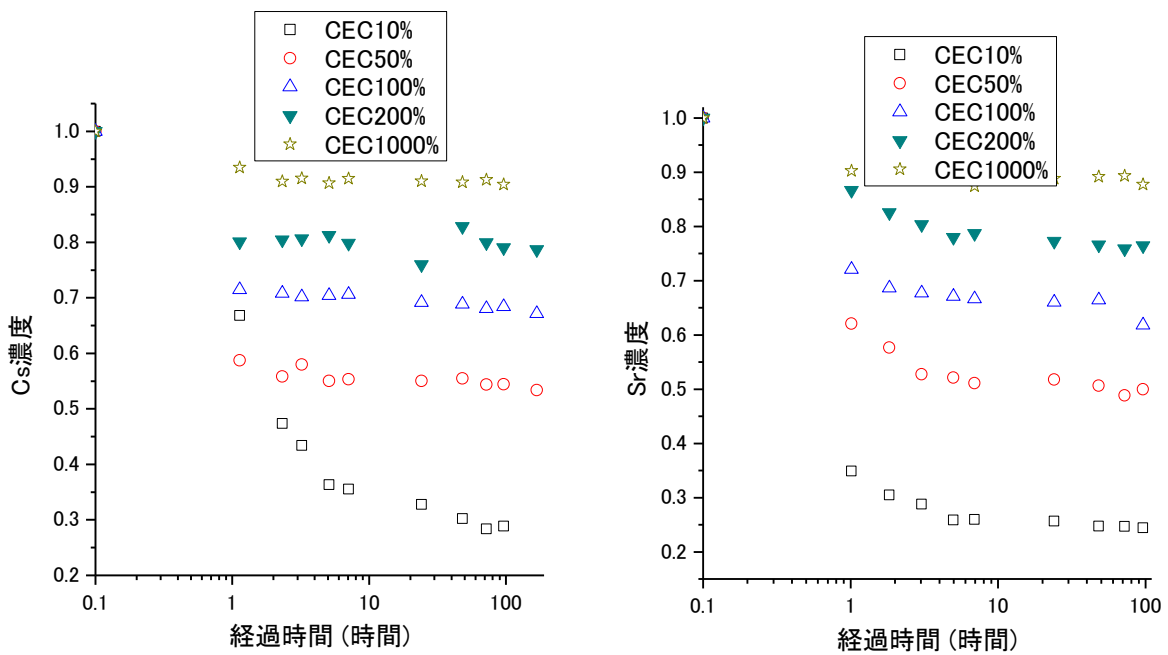


図 8.3.2-2 粉末状岩石試料への吸着試験における上澄み液中 Cs または Sr 濃度の経時変化 (吉井砂岩)

Cs の濃度変化 (左)、Sr の濃度変化 (右)

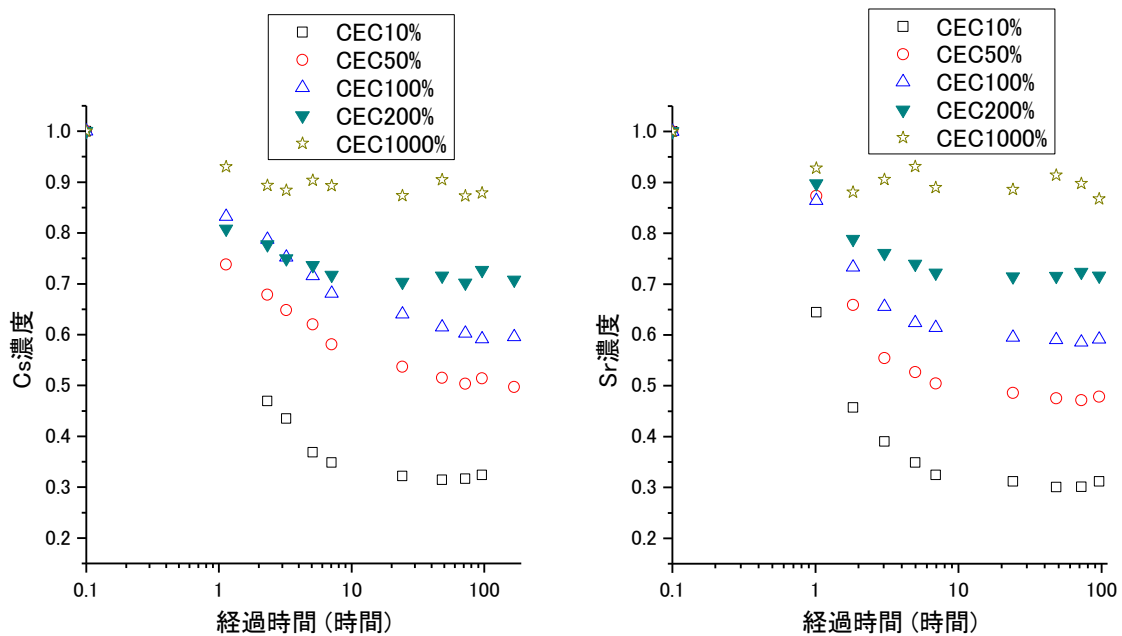


図 8.3.2-3 粉末状岩石試料への吸着試験における上澄み液中 Cs または Sr 濃度の経時変化 (和泉砂岩)

Cs の濃度変化 (左)、Sr の濃度変化 (右)

表 8.3.2-1 バッチ式吸着試験における初期セシウムおよびストロンチウム濃度条件のまとめ

岩石	セシウム		ストロンチウム	
	初期濃度(mg/L)	分配係数(ml/g)	初期濃度(mg/L)	分配係数(ml/g)
花崗岩	8	2.57	2.5	3.75
	40	2.45	12.5	2.59
	80	1.79	25	1.99
	160	1.29	50	1.59
	800	0.79	250	0.96
吉井砂岩	70	24.65	24	30.89
	350	8.73	120	10.00
	700	4.89	240	6.17
	1400	2.71	480	3.08
	7000	1.06	2400	1.40
和泉砂岩	50	20.84	16	22.06
	250	10.11	80	10.90
	500	6.78	160	6.90
	1000	4.13	320	3.96
	5000	1.38	1600	1.53

(2) ディスク状試料

粉末状試料の試験における上澄み液中の Cs および Sr 濃度の経時変化を図 8.3.2-4~6 に示した。粉体での試験結果と同様に、図の横軸は対数表示にしており、縦軸の濃度は初期に添加した Cs あるいは Sr 濃度を 1.0 として正規化した数値である。ディスク状試料での吸着試験では、平衡に達するまでの時間が 10 日間では十分でないものもあり、CEC の 50%濃度の試料については~40 日間程度試験を継続した。

(1)に記述したように、粉体での吸着試験では岩石と Cs や Sr が接触してから 8 時間以内程度で Cs や Sr の濃度変化が顕著ではなくなり、24 時間以内に吸着は平衡に達していると考えられた。一方、ディスク状の試料を用いた吸着試験では、最初の 10 時間程度で濃度が減少し、その後さらに時間をかけて上澄み溶液中の Cs・Sr 濃度が減少していく様子が観察された。これは、岩石表面に Cs や Sr が吸着した後、岩石内部の空隙へと拡散していく様子が観察されたものと考えられる。このため、10 時間以上で生じる濃度変化は拡散が律速する反応であると推察される。

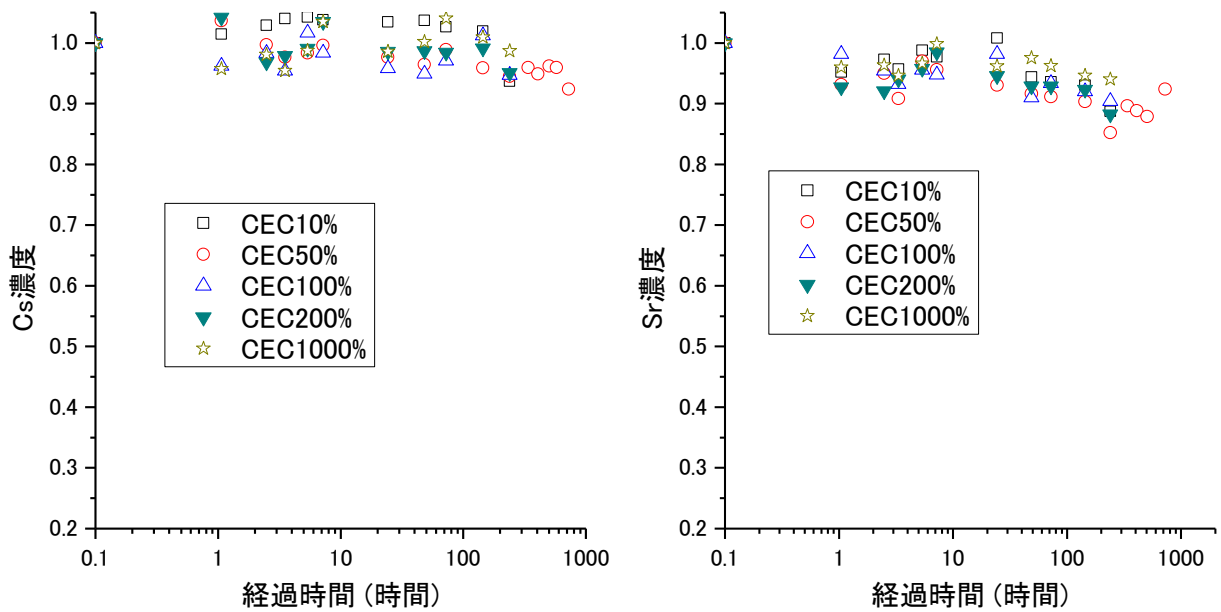


図 8. 3. 2-4 ディスク状岩石試料への吸着試験における上澄み液中 Cs または Sr 濃度の経時変化 (花崗岩)
Cs の濃度変化 (左)、Sr の濃度変化 (右)

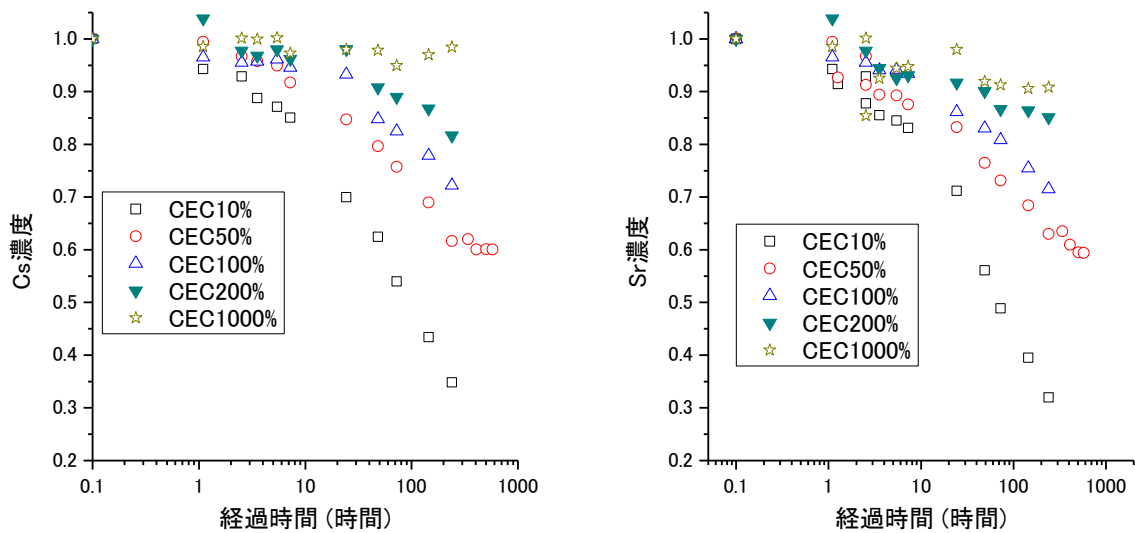


図 8. 3. 2-5 ディスク状岩石試料への吸着試験における上澄み液中 Cs または Sr 濃度の経時変化 (吉井砂岩)
Cs の濃度変化 (左)、Sr の濃度変化 (右)

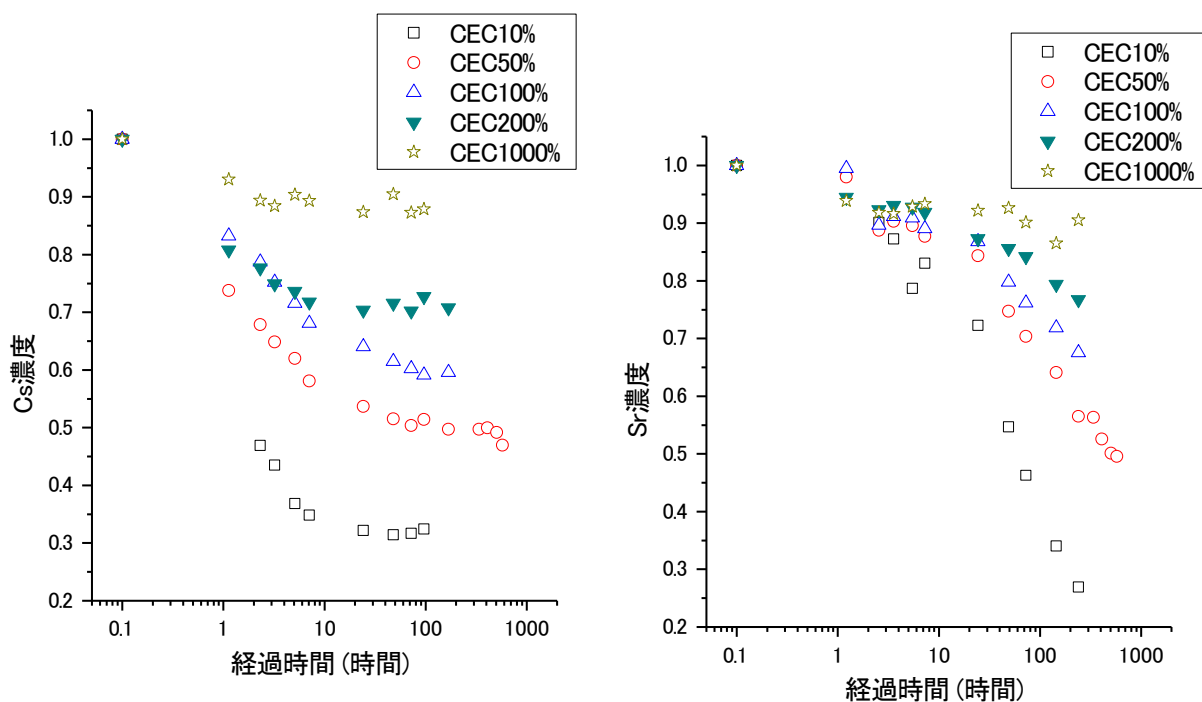


図 8.3.2-6 ディスク状岩石試料への吸着試験における上澄み液中 Cs または Sr 濃度の経時変化 (和泉砂岩)
Cs の濃度変化 (左)、Sr の濃度変化 (右)

吉井砂岩における Cs 濃度を見ると、200～300 時間経過後に溶液中の濃度変化が顕著ではなくなっている。このため ϕ 5cm、厚さ 1cm のディスク状の吉井砂岩においては、Cs の拡散および吸着が 300 時間程度で平衡に達するものと考えられる。一方、Sr 濃度を見ると Cs よりも若干遅れて 400～500 時間で濃度変化が顕著ではなくなっている。表 8.3.2-1 に示したように、粉体を用いた吸着試験において、今回実施した試験条件では Sr は Cs よりも高い分配係数を示した。このため、今回の試験条件下では Sr は Cs よりも岩石へ吸着しやすく、拡散・吸着が平衡に達するまでに時間を要したのと考えられる。

和泉砂岩においては、Cs 濃度は同じく数百時間程度で濃度変化が顕著ではなくなったが、Sr は 500 時間程度でも濃度変化が顕著である。和泉砂岩は吉井砂岩よりも拡散係数が小さく (東原ら, 2005)、平衡に達するのにより時間を要している。さらに、花崗岩においては、わずかな濃度減少傾向が継続しており、吸着が平衡に達していない可能性が高いと推察された。

上記のように、試料がディスク状になった場合には粉体状の試料と比較して吸着が平衡に達するまでの時間が伸び、砂岩の試料で数百時間を要することが分かった。また、花崗岩の試料においては 1000 時間以内の試験では吸着平衡に達する様子が観察できなかった。実際のトレーサー試験においては、バックグラウンドの流速にトレーサーが流されてしまわないように試験時間・流速等を設定するため、1000 時間以上の試験時間を設定できることは極めてまれである。このため、特に花崗岩を対象とするトレーサー試験で

は、岩石がもつ割れ目のごく表面近傍におけるイオンの吸着能力を評価しており、マトリックス部への拡散を含む本来岩石が持ちうる核種保持能力を低く見積もる可能性がある。

CEC の 50%濃度試料について、粉末状とディスク状試料での Cs や Sr 濃度の経時変化を比較した結果を図 8.3.2-7~9 に示した。吉井砂岩および和泉砂岩においては、~1000 時間程度の試験を実施することで、粉末状試料での濃度とディスク状試料での濃度がほぼ一致した。一方花崗岩試料においては接触時間が 1000 時間を超えても濃度が顕著に減少を続けており、今回試験を実施した時間内で最終的に吸着量がどの程度に達するのかを明らかにすることはできなかった。砂岩の試料においては、上澄み溶液中の Cs・Sr 濃度が粉末試料のものと近くなることから、放射性廃棄物の安全評価の時間スケールで考えると、粉末状で取得した分配係数を安全評価に用いることができるものと考えられる。また、この結果から砂岩においては、最終的に核種を吸着できるサイトの数が粉末とディスク状試料ではほぼ同程度であると考えられる。一方花崗岩のディスク状試料においては、現時点までのデータでは、最終的に分配係数がどの程度になるかを明らかにすることができていない。さらに長期の試験を実施し、拡散試験の結果と併せての考察が必要である。

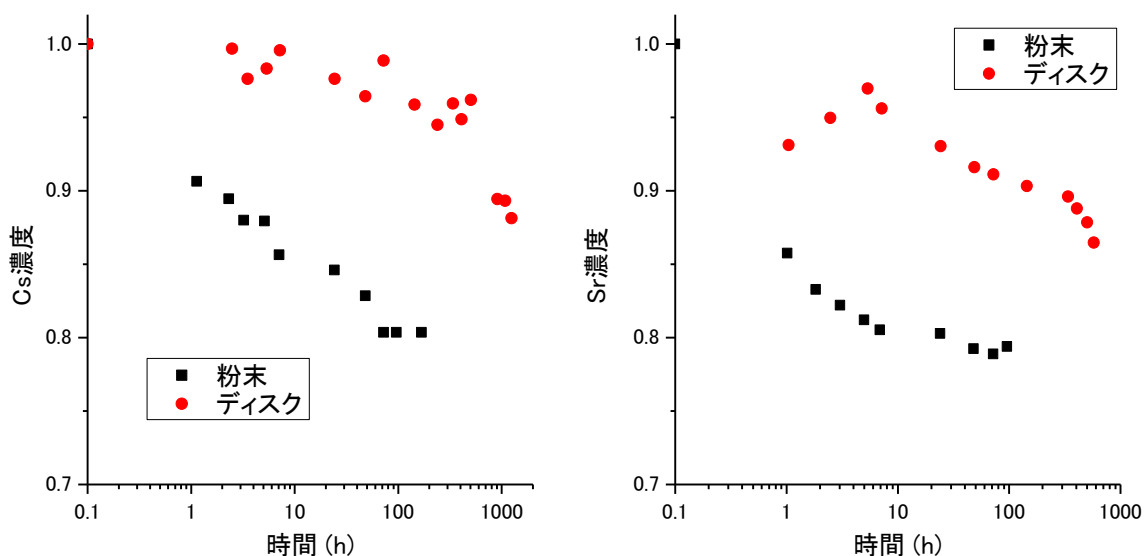


図 8.3.2-7 粉末状とディスク状試料における Cs・Sr 濃度の経時変化比較 (花崗岩)

Cs の濃度変化 (左)、Sr の濃度変化 (右)

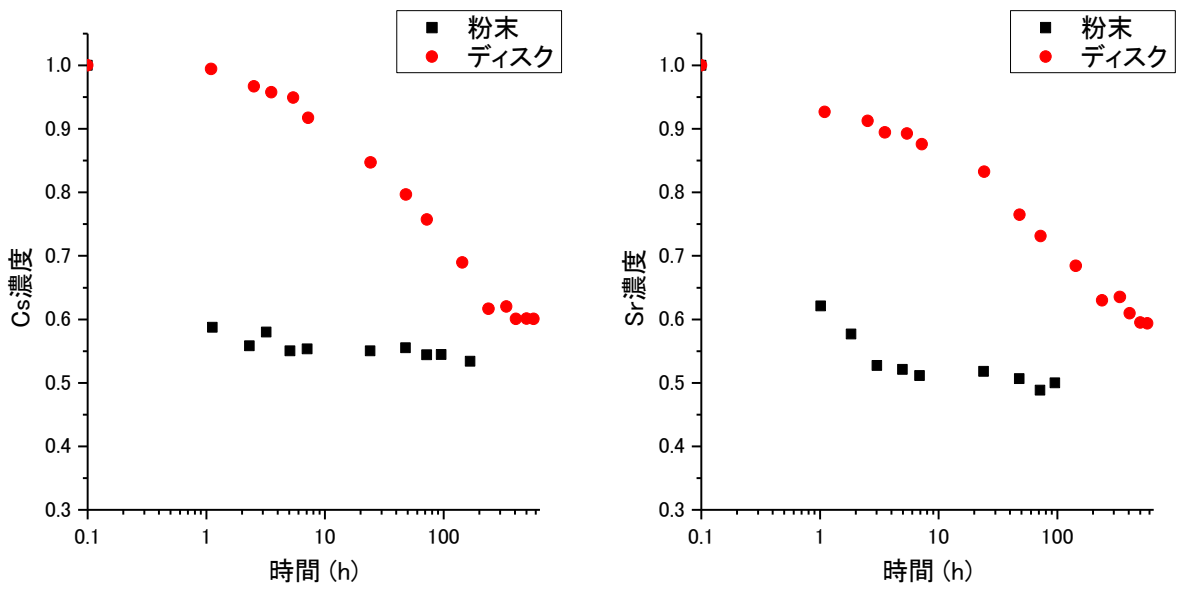


図 8. 3. 2-8 粉末状とディスク状試料における Cs・Sr 濃度の経時変化比較 (吉井砂岩)

Cs の濃度変化 (左)、Sr の濃度変化 (右)

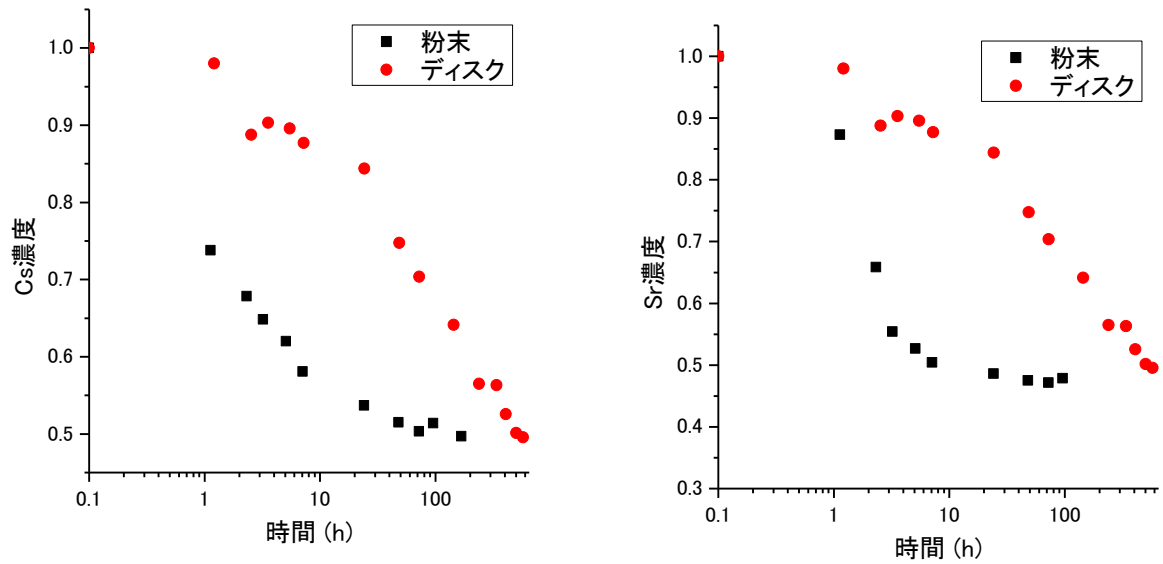


図 8. 3. 2-9 粉末状とディスク状試料における Cs・Sr 濃度の経時変化比較 (和泉砂岩)

Cs の濃度変化 (左)、Sr の濃度変化 (右)

8.3.3 バッチ式吸着試験のまとめ

バッチ式吸着試験では、花崗岩、吉井砂岩、和泉砂岩の3種の岩石を対象とし、粉体およびディスク状試料を用いた吸着試験を実施した。その結果、以下のような知見を得た。

(1) 粉末状試料ではほぼ24時間以内程度で吸着は平衡に達することがわかった。また、試験を実施した範囲では分配係数は濃度が低いほど高くなる傾向を示し、対象とするイオンの量がCECの10~1000%の範囲では最大で30倍程度の差が生じた。

(2) ディスク状試料では、吉井砂岩が数百時間程度で吸着の平衡状態が確認されたのに対して、和泉砂岩ではより長い時間がかかることが示唆された。また、花崗岩では1000時間を超えても濃度の減少が継続的に観察され、吸着が平衡に達するのにさらに時間を要することが分かった。

(3) (1)および(2)の情報を合わせて考えると、回収するための条件を優先して高濃度・高流速で実施される傾向があるトレーサー試験では、分配係数を低く見積もる可能性が高い。

8.4 カラム試験

トレーサー試験と同じく、流れがある場での吸着挙動を把握するためにカラム試験を実施した。カラム試験では花崗岩試料を対象とし、8.3で示したバッチ試験と同様に2mm以下に粉碎した岩石粉末を、カラムに充填して試験を実施した。8.3で明らかになった粉末状試料への吸着における濃度および時間依存特性から、試験条件を設定して実施した。

8.4.1 試験方法

花崗岩粉末のバッチ試験におけるCs・Srの吸着率の経時変化を図8.4.1-1に示した。図8.3.2-1と異なり、ここでは横軸の経過時間を線形で記述している。図から分かるように、吸着率は24時間でほぼ平衡に達している。このため、試験時間としては24時間を基準として現実的なトレーサー試験が実施される可能性が高い、それより短い時間で溶液がカラムを通過するように流速を決定してを実施した。また、溶液中のCsおよびSrの濃度は1g/10mLの条件でバッチ試験を実施した場合、CECの10%にあたる濃度を採用した。試験条件を表8.4.1-1にまとめた。試験手順を下記に示す

- ・岩石粉末充填カラムの準備：8.2.1で準備した花崗岩の粉末(<2mm)を内径1cm高さ30cmの亚克力製カラムに充填した。充填した岩石の重量は57.3gであった。カラムの写真を図8.4.1-2に示した。
- ・カラムの rinse：カラムに試験を実施するのと同様の流量で模擬地下水を100mL通水した。
- ・試験溶液の調製：試験溶液は模擬地下水をベースとして、Sr・Csのストック溶液を加えて所定の濃度としたほか、重水を加えてδD値を550%程度に調整したものをを用いた。
- ・試験の実施：ポンプを用いて、模擬地下水が充填している流路についてカラム手前までを試験溶液と入れ替えた。その後、カラム下部のバルブを開け、ポンプを稼働させるとともにフラクションコレクターを

動作させ、所定の量ずつカラムを通過した後の液を採取した。

・サンプルの測定：上記で取得した各フラクションについて、一部を δD 測定のために取り分け、一部を硝酸溶液で適切に希釈して Cs あるいは Sr 濃度測定用の試料とした。 δD はレーザー吸収ガス分析装置を、Cs・Sr は ICP-MS を用いて定量した。

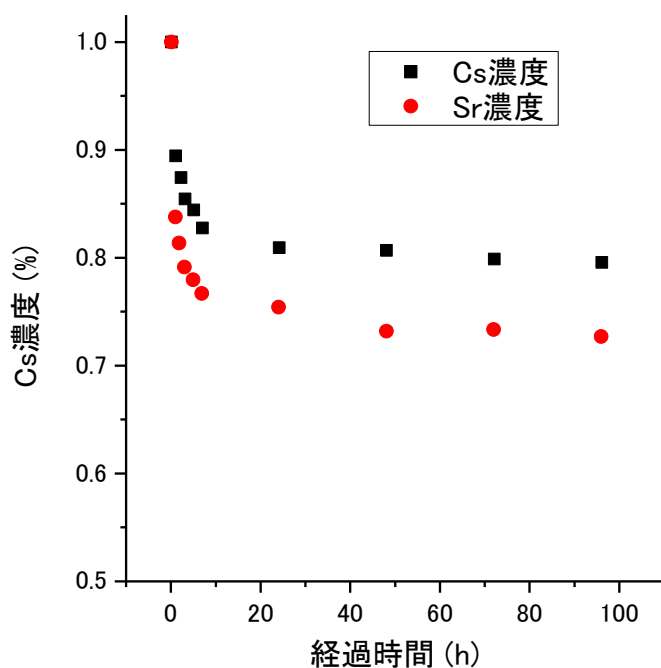


図 8.4.1-1 粉末状試料における Cs・Sr 濃度の経時変化比較 (花崗岩)

Cs および Sr の濃度変化は 24 時間ではほぼ平衡に達している

表 8.4.1-1 カラム試験条件のまとめ

条件番号	非吸着性 トレーサー	核種	流速 (mL/min)
1	重水	Cs (8mg/L)	0.05
2			0.2
3			1.0
4		Sr (2.5mg/L)	0.05
5			0.2
6			1.0

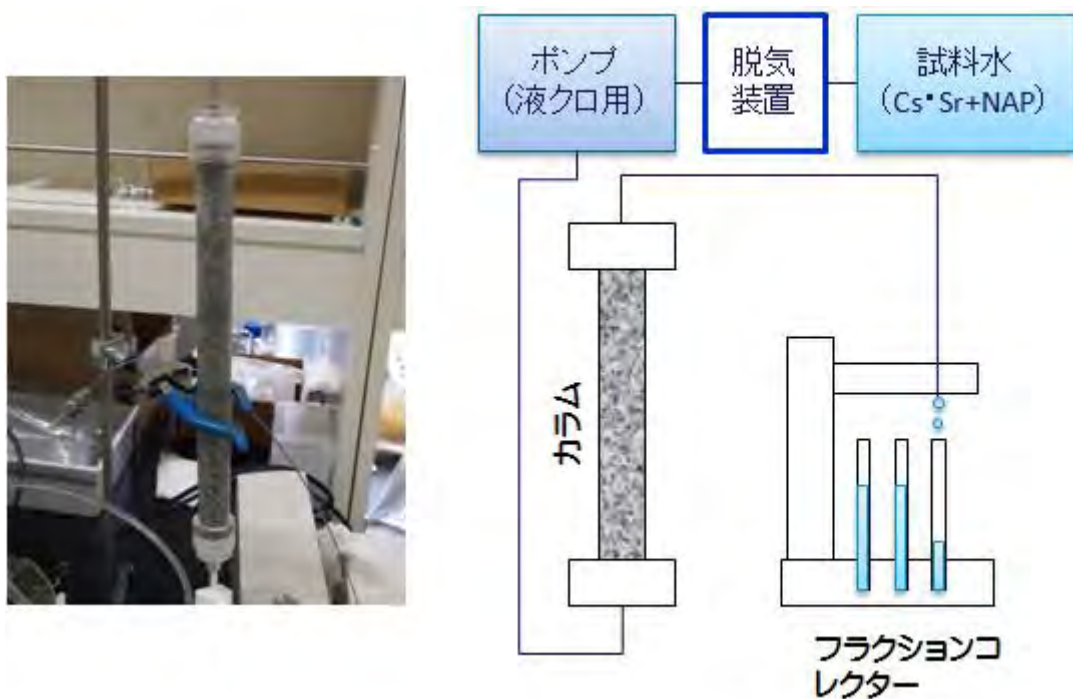


図 8.4.1-2 カラム試験のカラム写真 (左) と試験系概念図 (右)

8.4.2 結果と考察

0.05~1.0(mL/min)の流速で溶液をカラムに流したときの非吸着性トレーサーの濃度変化を図 8.4.2-1 に示した。図から分かるように、流速 0.2mL/min および 0.05mL/min での濃度変化曲線はほぼ一致しており、溶液量 12mL 付近で急激に上昇し、22mL 程度でほぼ 100%に達することがわかった。50%に達するまでの液量は 18mL である。一方、流速 1.0mL/min の場合には上記の流速で試験した場合と比較して、より早く流出する成分とより遅く流出する成分が観察され、カラムの中でも早く通過できる流路と遅く通過できる流路に差が生じていることがわかる。流速 1.0mL/min の場合、流した溶液の濃度 50%に達するまでの液量は 15mL になる。このため、非吸着性トレーサーがカラム内で岩石と接触する時間は流速 0.05、0.2、1.0mL/min の場合でそれぞれ 6 時間、1.5 時間、0.25 時間である。これらの時間とバッチ吸着試験における濃度変化の関係を図 8.4.2-2 に示した。図から分かるように、6 時間の接触時間は吸着が見かけ上ほぼ平衡に達している時間であるのに対して、1.5 時間あるいは 0.25 時間は吸着が平衡に達するのにはまだ時間を要するような試験時間である。

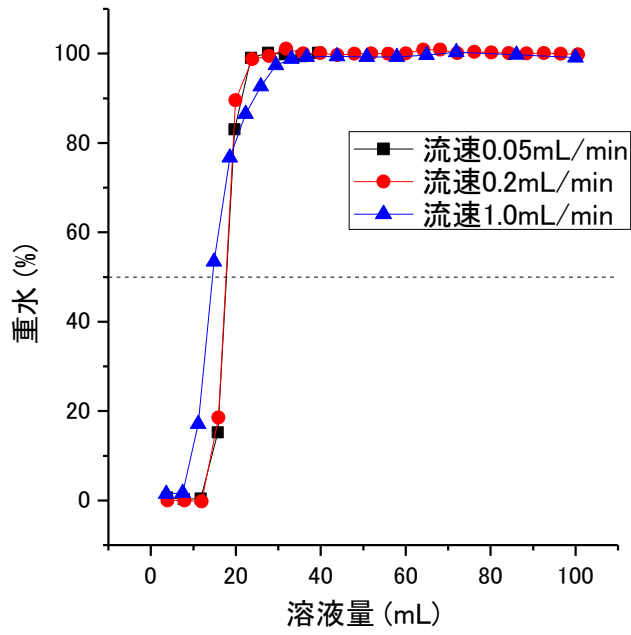


図 8.4.2-1 カラム試験における非吸着性トレーサー濃度と溶液量の関係

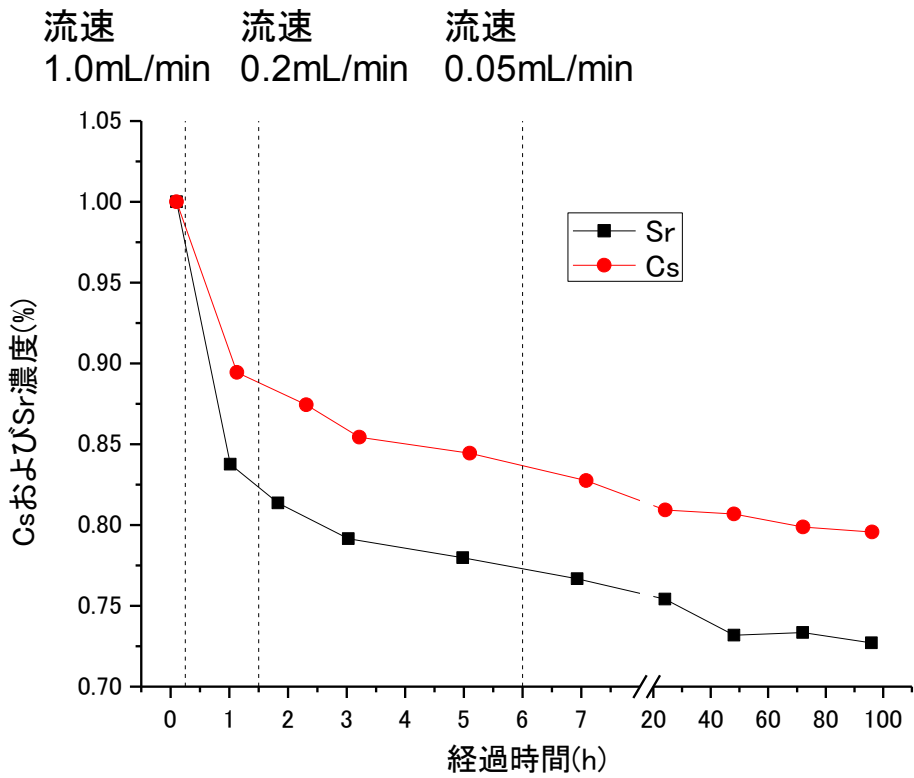


図 8.4.2-2 バッチ吸着試験における Cs・Sr 濃度経時変化とカラム試験時間の関係

カラムからの流出液量と Cs 濃度との関係を図 8.4.2-3 に示した。Cs が流出し始める液量と流速には明確な依存性があり、流速 1.0mL/min の場合には非吸着性トレーサーが流出し始めてわずか 10mL 程度の流出量で Cs が流出し始める様子が確認された。また流出の際の破過曲線をみると、溶液量に対して上に凸になるような形状で Cs が流出することがわかった。一方、流速 0.2m/min 以下の場合には Cs の流出が確認されたのは、60~75mL 程度の溶液がカラムを通過した後であった。破過曲線は 50%程度の濃度まではほぼ直線的に上昇する様子が確認された。流速 0.05mL/min の場合は、液量を全部で 200mL まで採取した(図 8.4.2-4)。吸着量 60~70%くらいまでは流出する液量に対してほぼ直線的に増加する様子が観察されたが、その後いったん勾配が減少し(~175mL)その後再度直線的に Cs 濃度が増加した。

カラム試験における分配係数は、添加溶液の Cs 濃度(8.0mg/L)に対して、1g あたりの岩石に吸着した Cs 量(mg)で算出することができる。岩石に吸着した Cs 量は非吸着性トレーサーと Cs の破過曲線で囲まれた部分の面積であると考えることができる。カラムから流出する溶液量に対して、Cs 濃度がパルス的に上昇するような破過曲線や 100%まで直線的に濃度が上昇するような破過曲線であれば、濃度 50%に達するまでの溶液量を用いて上記の面積を近似的に算出することが可能である。しかし、図 8.4.2-4 に示したように今回の試験で得られた Cs の破過曲線はやや複雑な形状をしており、正確に面積を計算するには、全ての濃度領域からの積分値を用いることが必要と考えられる。流速を速めた場合のカラム試験では、破過曲線が上に凸の形状になるため、特に面積の算出には留意が必要である。

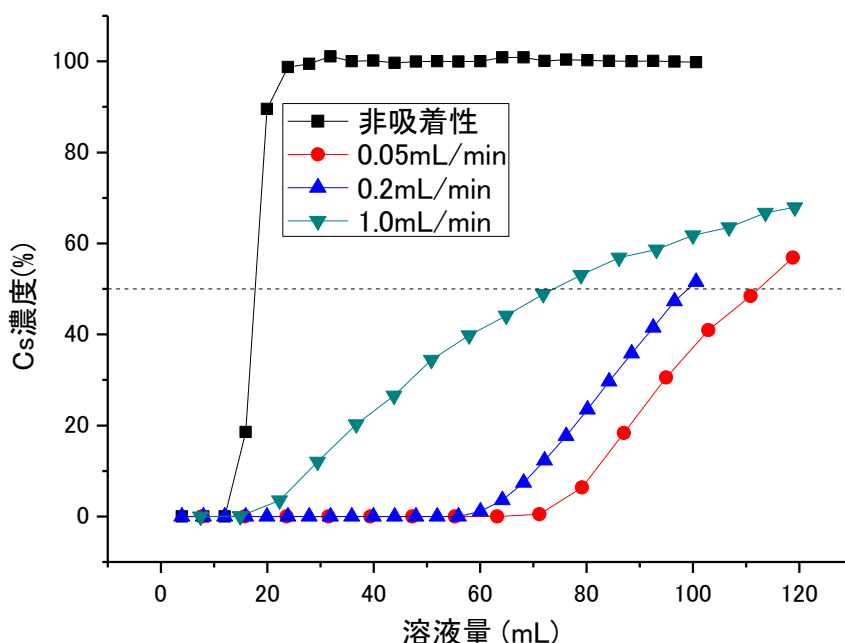


図 8.4.2-3 カラム試験における流出溶液量と Cs 濃度の関係

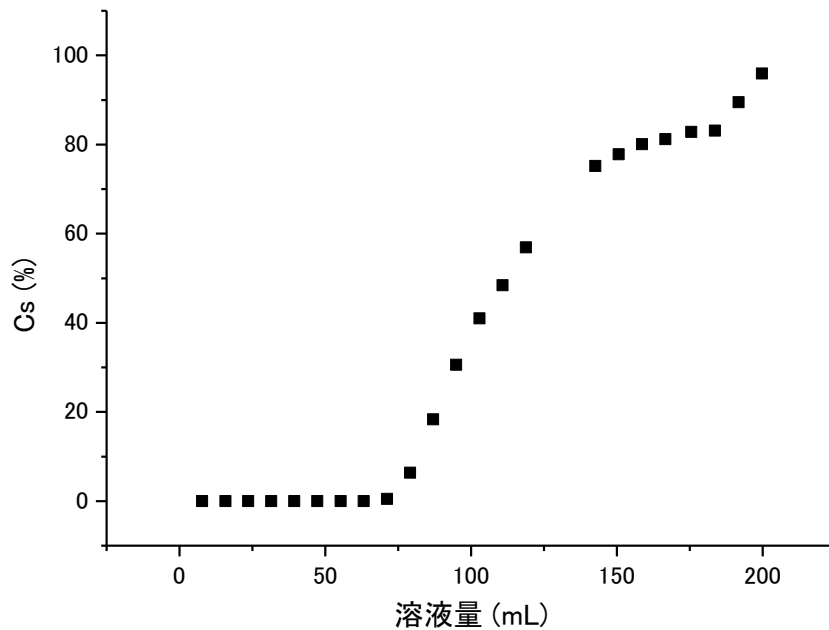


図 8.4.2-4 カラム試験における流出溶液量と Cs 濃度の関係 (流速 0.05mL/min)

今回実施したカラム試験では、100%近くまで濃度が達していない条件があるため、濃度 50%に達するまでの液量と添加した Cs 濃度から分配係数を以下のような式で算出した。上述のように流出した溶液量とともに Cs 濃度はパルスのように上昇したり、直線的に上昇しないため、下記の式では分配係数をやや低めに算出してしまふ可能性がある。

$$\text{分配係数} = \frac{[C]_0 \times (V_1 - V_0) \div M}{[C]} = (V_1 - V_0) \div M \quad (1)$$

ここで、 $[C]_0$: 試験溶液中の Cs 濃度、 V_1 : Cs が 50%濃度に達する溶液量、 V_0 : 重水が 50%濃度に達する溶液量、 M : カラムの中の岩石質量、である。式(1)を用いて算出した分配係数は、流速 0.05mL/min の場合で 1.64(mL/g)、流速 0.5mL/min の場合で 1.4 (mL/g)、流速 1.0mL/min の場合で 1.02(mL/g)、となった。岩石粉末を用いたカラム試験では、今回試験を実施した範囲において、流速を変えても分配係数に大きな差異は認められなかった。これは花崗岩の岩石粉末に対しては Cs の吸着は瞬時に起きる成分が多くを占めており、接触時間が 1~6 時間の間では流速の依存性が明確ではなかったためであると考えられる。また、粉末の花崗岩試料において、バッチ法で分配係数を取得した場合、1~6 時間での分配係数は 1.2~1.8 となり、今回得られた値とほぼ一致する。このように岩石粉末を用いたカラム試験では、時間依存性を考慮すればバッチ試験とほぼ同じ分配係数が得られることがわかった。しかし、バッチ試験での分配係数はこのあと 24 時間程度の時間をかけて 2.57 まで上昇することから、流速のある場での試験は遅い吸着の影響を捉えることができず、分配係数を低めに見積もっている可能性が高いと推察される。

カラムからの流出液量と Sr 濃度との関係を図 8.4.2-5 に示した。流速は Cs における試験と同じ、0.05、0.2、1.0mL/min である。Cs では 100mL 程度の流出量で濃度が 50%に達するのを観察することができたが、Sr においては 100mL までの流出で濃度が 50%に達するのを観察することができなかった。特に流速 0.2mL/min の試験では、100mL までの試験を実施した結果、有意な Sr の流出を観察することができなかった。ここでは、流出液量と Sr の濃度変化のグラフを外挿し、50%に達するまでの液量を推察した。その結果を用いて、カラム試験における分配係数を算出した。その結果、流速 0.05mL/min では 4.20(mL/g)、流速 1.0mL/min では 2.96(mL/g)という分配係数が得られた。Sr のカラム試験における流速の依存性は Cs におけるそれと同程度であった。また、1～6 時間での Sr の分配係数は 1.93～3.04 程度であり、Cs の場合と同様バッチ試験とカラム試験で同程度の分配係数が得られた。

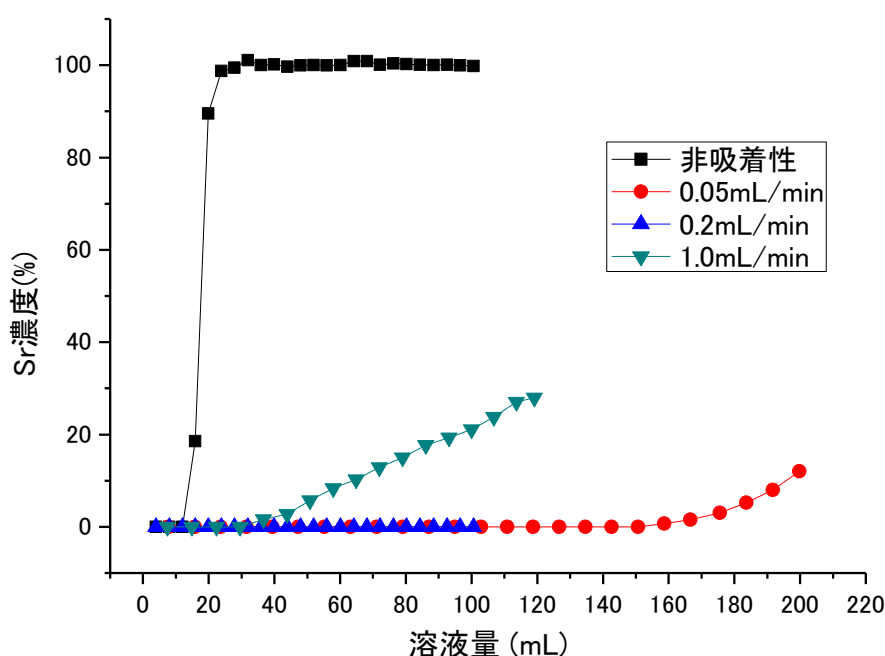


図 8.4.2-5 カラム試験における流出溶液量と Cs 濃度の関係

8.5 拡散試験

拡散試験では、主にマトリクス拡散の影響やそれに伴う分配係数の取得を目的として実施した。今回実施した拡散試験は、2つのセル間に挟まれた媒体中の物質移行を調べる「Through Diffusion 法」を採用した(Kross and Schaefer, 1987,;1988)。今年度は試験時間の関係から、拡散係数が比較的大きいと考えられる吉井砂岩について試験を実施した。

Through Diffusion 法では、2つのセルにおける濃度差を高く保ち、高濃度側セルに対して低濃度側セルにおける対象物質の濃度がほぼ 0 と見なせる条件で試験を実施する必要がある。このため、実際に処分

の安全評価を想定した場合に評価が必要な、低い濃度での試験が実施しにくい。過去の研究で取得された拡散試験における分配係数は、上記の理由から比較的高濃度で試験された結果から算出されている。本試験では今後実施する予定である低濃度での拡散試験を実施するため、今年度はまず低濃度での拡散試験を実施する方法について検討した。また、吉井砂岩について拡散試験を実施し、拡散係数と拡散の時間遅れから拡散試験中の Cs および Sr の分配係数を算出し、バッチ試験から得られた値と比較した。

8.5.1 低濃度での拡散試験の実施

1) 実施の概要

Through Diffusion 法を用いて、低濃度の溶質に対して拡散試験を実施するためには、以下の3つの点が必要な問題となる。つまり、①対象となる溶質の濃度低下、②低濃度側セルと高濃度側セルの濃度差の担保、③低濃度側セルでの対象溶質の定量、である。これらの問題を解決するため、以下の方法を採用して拡散試験を実施することを試みた。

①「高濃度側セル」の大容量化：対象となる溶質が岩石に吸着しても濃度低下が顕著とならないためには、高濃度側セルに大量の対象となる溶質が存在することが必要である。このために、低濃度側セルに対して高濃度側セルの大きさを大容量化した。

②低濃度側セルの対象溶質回収：①によって高濃度側セルにおける対象溶質の濃度を一定に保つとともに、低濃度側のセル濃度を抑えるための操作を実施した。つまり、低濃度側セルにはイオン交換樹脂を充填したカラムを取り付け、対象となる溶質を樹脂に吸着させることで対象となる物質の濃度をほぼゼロに抑えるようにした。また、イオン交換樹脂に吸着させることで対象となる物質は濃縮されるため、上記③の低濃度側セルでの対象溶質の定量が容易になることが期待できる。

今年度はまず試験系を確立するための検討として、非吸着性のトレーサーである臭化物イオン(Br)を対象とした試験を実施した。

2) 試験方法

低濃度の溶質を用いた Through Diffusion 法による拡散試験方法確立を目的として、以下のような手順で試験を実施した。

・岩石の亚克力板への固定と脱気：エポキシ系樹脂を用いて穴の開いた亚克力板へディスク状の吉井砂岩を固定した。この状態で純水へと浸漬し、純水を入れた容器ごと真空引きした（図 8.5.1-1）。この状態を 24 時間程度維持した後ポンプを止め、試料を純水中で保管した。

・板の取り付け：亚克力板を 2 つのセルで挟むように設置し、両方のセルに純水を 360mL ずつ入れた。この状態を 12 時間程度保持し、セルからの水漏れがないことを確認した。拡散試験に用いた試験セルの外観を図 8.5.1-2 に示した。

- ・**拡散試験の開始**：高濃度側セルの純水をポンプで抜き、代わりに KBr を溶解して調製した 1mg/L 臭化物イオン溶液 360mL を添加した。添加を終了した時間を試験開始時間とした。
- ・**溶液循環と低濃度側 Br イオンの回収**：高濃度側のセルはあらかじめ 1mg/L 臭化物イオン溶液を満たした 10L のタンクと接続し、ポンプで溶液を循環させた。低濃度側のセルには、あらかじめ洗浄済みの陰イオン交換樹脂 (Dowex1×8) を充填したカラムを接続し、ポンプで容器内の溶液と樹脂が接触するようにした。試験系の概念図を図 8.5.1-3 に示した。

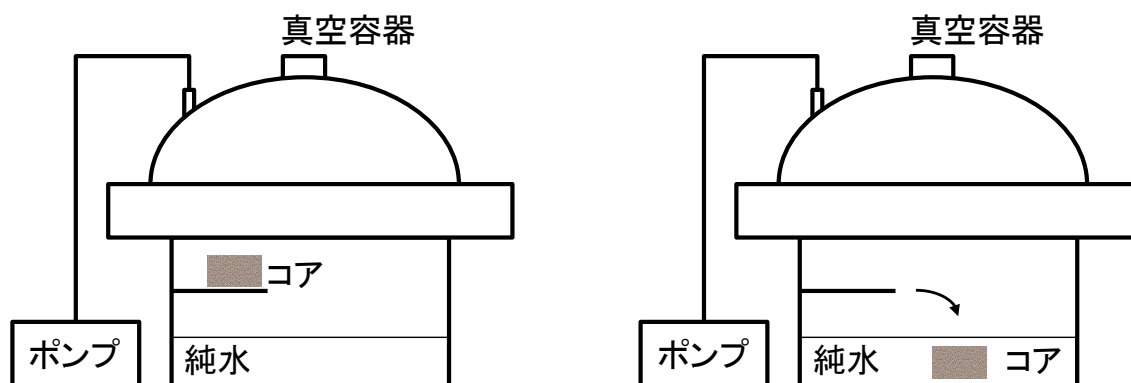


図 8.5.1-1 真空脱気操作の概念図

十分時間コアを乾燥状態で真空引きする (左)。その後コアを水中に落としさらに真空引きする (右)。

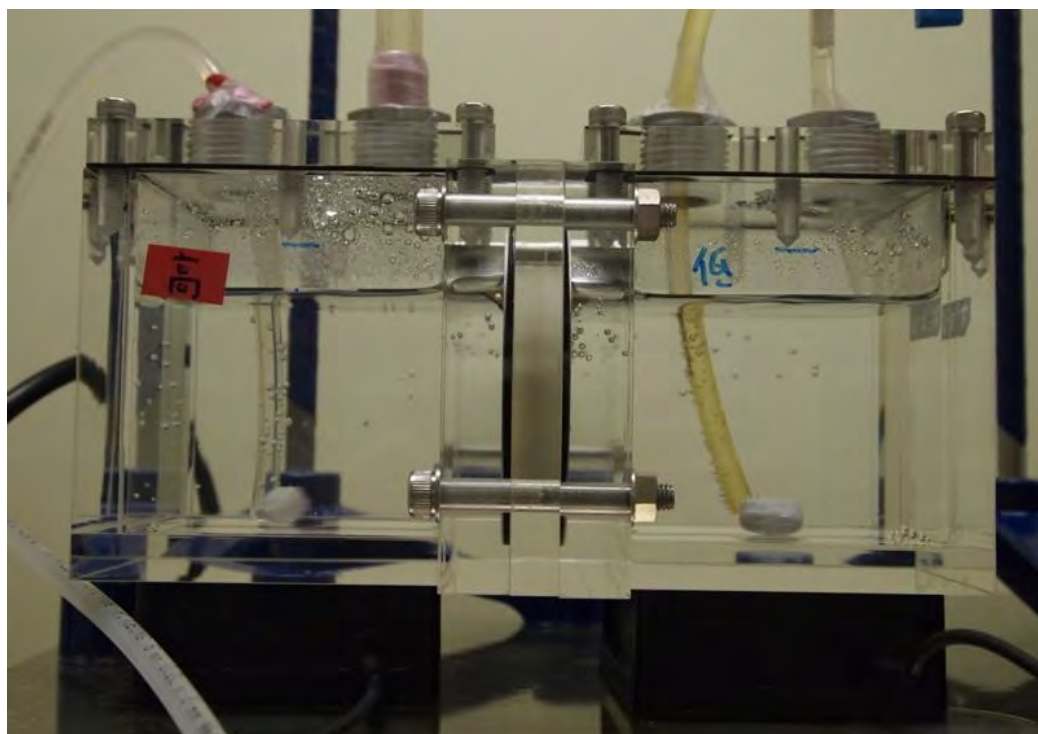


図 8.5.1-2 拡散試験に用いるセルの外観

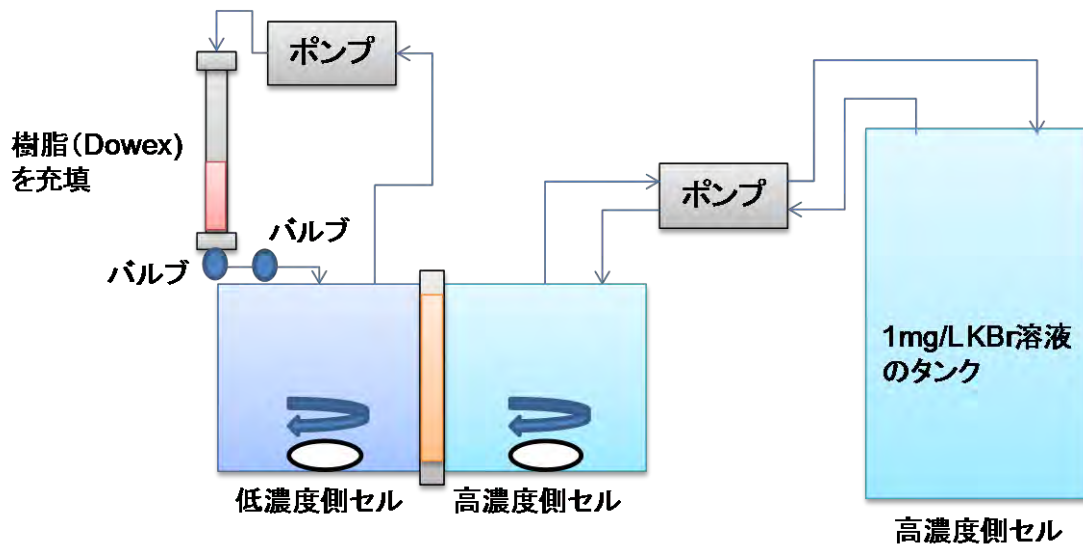


図 8.5.1-3 低濃度拡散試験の試験系概念図

・ イオン交換樹脂の回収と Br 濃度の測定 : 1 回/24 時間の頻度で低濃度側の陰イオン交換樹脂を回収し、新しいものに付け替えた。回収した陰イオン交換樹脂に硝酸を滴下して、吸着した Br イオンを回収し、硝酸溶液中の Br イオン濃度を ICP-MS を用いて定量した。

3) 結果と考察

低濃度拡散試験においては、試験結果として樹脂に吸着した Br 量を得ることができる。樹脂に吸着した Br 量は樹脂をとりつけてから交換するまでに低濃度側に流入した Br 量を表すことになるため、これを高濃度側セルの液量で除することで、樹脂をとりつけてから交換するまでの濃度上昇量を算出することが可能である。濃度上昇量を積算していくことで、実際には低濃度側セルにおける Br 濃度を低く抑えたままで、仮想的に低濃度側セルにおける Br 濃度の経時変化を得ることができる。

「低濃度側セル」における Br 濃度の経時変化を図 8.5.1-4 に示した。図には比較のため、高濃度側セルの Br 濃度を 1000 あるいは 10000mg/L とした場合の経時変化を併せて示した。図から分かるように、Br 濃度が 1000 や 10000mg/L の場合と比較して、1mg/L の場合は、①Br 濃度の立ち上がりが遅くなる、②傾きが大きくなる（つまり拡散係数が大きくなる）という結果が得られた。Br はアニオンであるため、一般的に岩石への吸着による遅延の影響を受けないと考えられる。しかし、特に低濃度で他イオンが存在しない場合、電氣的に Br だけの移動はできないため、Br の対イオンである K の移動が遅延されることで Br も遅延する可能性があると考えられる。上記のように考えれば、低濃度でより Br が遅延されたことは妥当な結果であると考えられる。一方、イオン濃度が高い溶液を拡散試験に用いた場合、岩石の電気二重層が薄くなるため (Israelachvili, 1991)、Br イオンが通過できる領域が拡がり拡散係数が上昇すると考え

られた。実際に 1000mg/L と 10000mg/L での試験結果を比較すると、10000mg/L の方がやや拡散係数が高くなる結果となった。しかし一方で、1mg/L での拡散係数は 1000 や 10000mg/L の場合と比べて顕著に拡散係数が上昇する結果が得られた。この現象の原因については現在の所不明であり、実験の再現性を含めて再度検証する予定である。

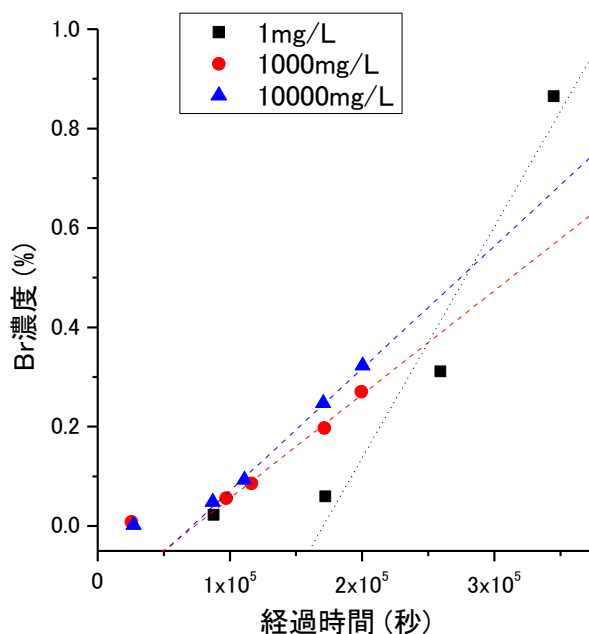


図 8.5.1-4 拡散試験の低濃度側セルにおける Br 濃度の経時変化

8.5.2 Cs および Sr を用いた拡散試験と分配係数の算出

1) 実施の概要

8.5.1 で記述したように Cs および Sr の濃度を下げて拡散係数および分配係数を取得するには、まだ検討すべき課題が多い。このため、今年度は比較的高い濃度での拡散試験を実施し分配係数の算出を試みた。試験方法としては、上記と同じ Through Diffusion 法を採用した。

試験手順は 8.5.2 2) に示した手順と同じであるが、高濃度側セルの Cs あるいは Sr 濃度がそれぞれ 7000 および 2500mg/L となるように、高濃度側セルに塩化セシウムあるいは塩化ストロンチウムの溶液を入れた。今年度はまず比較的拡散係数の大きい吉井砂岩について試験を実施した。上記の濃度は吉井砂岩が粉体の場合、1g/10mL の固液比において CEC の 10 倍に相当する Cs・Sr が存在するような濃度である。

2) 結果と考察

拡散試験における低濃度側セルの Cs 濃度経時変化を図 8.5.2-1 に、Sr 濃度経時変化を図 8.5.2-2 に示した。Cs については 5×10^5 秒過ぎあたりから経過時間に対して線形的に低濃度側セルにおける濃度が上昇している様子が観察された。Sr については立ち上がり時間が明瞭ではないものの、 6×10^3 秒過ぎあたりから低濃度側セルにおける Sr 濃度が線形的に上昇する様子が見られた。

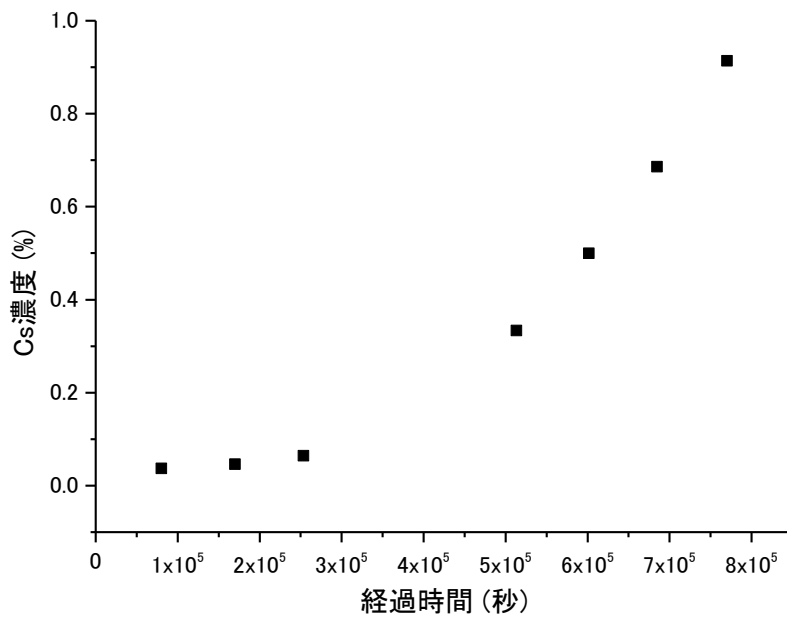


図 8.5.2-1 拡散試験の低濃度側セルにおける Cs 濃度の経時変化
縦軸の濃度は高濃度側セルの濃度を 100%として規格化した数値である

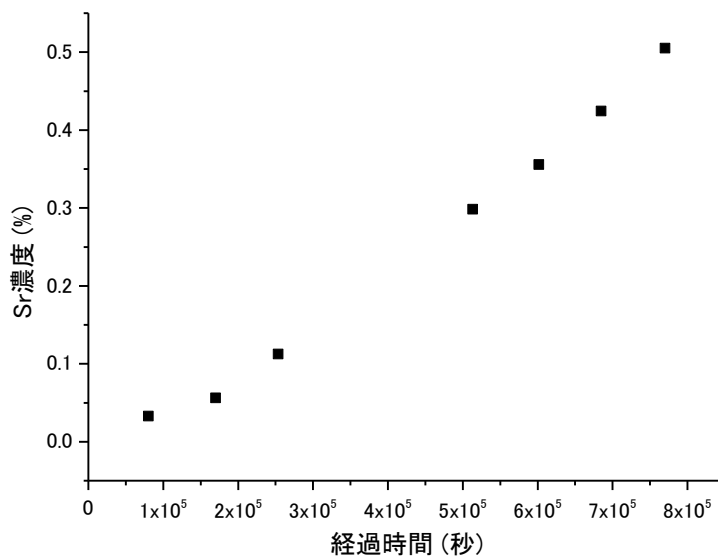


図 8.5.2-2 拡散試験の低濃度側セルにおける Cs 濃度の経時変化
縦軸の濃度は高濃度側セルの濃度を 100%として規格化した数値である

Through Diffusion 法における拡散試験では、図中の直線の傾きから実行拡散係数(De)を、図中の直線と X 軸 (時間軸) が交わる点から遅延係数に関する情報を得ることができる。直線と X 軸が交わる時間を T1 としたとき、T1 と保持因子 α の間には以下のような関係がある (核燃料サイクル開発機構, 1999)

$$T_1 = \frac{L_2 \alpha}{6D_e} \quad (8.5.2-1)$$

ここで L : 拡散媒体の長さ (m) である。さらに保持因子 α は分配係数 Kd と以下のような関係にある。

$$\alpha = \varepsilon + \rho Kd \quad (8.5.2-2)$$

ここで e : 間隙率、 ρ : 乾燥密度 (Kg/m³) である。

図 8.5.2-1 および 2 の結果を用いると、吉井砂岩に対する実行拡散係数を算出することができる。Cs における D_e は 4.0×10^{-11} (m/s)、Sr における D_e は 1.5×10^{-11} (m/s) となった。これらの値を式(8.5.2-1)、式(8.5.2-2)に代入して分配係数 Kd を計算したところ、Cs においては 0.30(mL/g) という値が算出されたが、Sr においては有意な値を得ることができなかった。

吉井砂岩においては、粉体およびディスク状試料のバッチ試験で得られた、7000mg/L に対する分配係数は 1.0~1.1 程度でありお互いに良く一致していた。これに対して拡散試験から得られる分配係数は 0.3 とわずかに低い値を示した。これは拡散という核種の移動があるプロセスで得られる分配係数がバッチ試験から得られる分配係数に比べて低くなることを示していると考えられる。このため、安全評価において核種の移行の拡散における遅延を評価する場合には、バッチ式の吸着試験からではなく、拡散試験を用いた分配係数の算出が必要であると考えられる。

8.6 模擬トレーサー試験

室内で模擬的にトレーサー試験を実施し、流速等が分配係数や破過曲線の形状に与える影響について検討するため、模擬トレーサー試験を実施した。模擬トレーサー試験には花崗岩の試料を用いた。

8.6.1 試験方法

模擬的なトレーサー試験を実施するため、花崗岩のコア表面を水が流れながら接触するような試験装置を準備した。まず花崗岩は得られたコアから、外径 14mm、長さ 70mm のコアを十本以上切りだした。このコアを入れたときに容器壁とコアの間に 1mm の隙間ができるように、1mm のスペーサーを入れたカラムを作製し、これにコアを入れた。コアを入れた状態のカラムを図 8.6.1-1 に示した。

実際の模擬トレーサー試験では、このカラムを 10 本連結して試料水を流した (図 8.6.1-2)。これによって長さ 70cm のコア表面を 1mm の隙間を試料が通過していく試験系を構築することができた。この試験系を用いて、模擬トレーサー試験は、以下の手順で実施した。

・模擬地下水によるコンディショニング : 8.3.1 に示したのと同じ方法で模擬地下水を調製した。岩石を入れ、10 本連結したカラムに約 0.5mL/min の速度で模擬地下水を通水した。模擬地下水は 12 時間程度通水した。その後流速が所定の値となるように、ポンプ出力を調整し、模擬地下水でのコンディショニングを終了した。

- ・試験溶液の調製：模擬地下水をベースとして、Cs 濃度 8mg/L あるいは Sr 濃度 2.5mg/L となるように塩化セシウムあるいは塩化ストロンチウムのストック溶液を添加した。さらに、試験溶液 100mL に対して 10 μ L の重水を加えた。これによって試験溶液中の δ D 値は約 550 (‰) になる。
- ・試験の実施：カラム手前のバルブを閉鎖した上でカラム手前の配管を外した。ポンプの吸い込み口を上記の試験溶液へと移し、カラム手前の配管までの流路を試験溶液で満たした。その後配管を再度接続し、ポンプを稼働させると同時に、カラム手前のバルブを開け、ポンプ稼働時間を試験開始時間とした。ポンプの流速は 1.0mL/min または 0.1mL/min とした。カラム内で岩石と接触している水は約 50mL 程度であるため、1.0mL/min の場合には岩石と試験水の接触時間は 50 分程度、0.1mL/min の場合には 500 分程度である。最初の 50mL 程度には重水・Cs・Sr が検出されない可能性が高いことからこれを別途取り分け、フラクションコレクターを動作させ 50mL 以降の溶液を 4mL ずつ、のべ 250mL の溶液が流れるまで試験を実施した。
- ・分析：試験終了後容器+溶液の重量を測定して、各フラクションで採取した溶液量を評価した。各フラクション約 4mL のうち 2mL をガラスビンに注ぎ分け、Liquid-Water Isotope analyzer (Los Gatos Research) を用いて試料の δ D 値を測定した。また、残りの 2mL を適切に希釈し、ICP-MS を用いて Cs あるいは Sr 濃度を測定した。



図 8.6.1-1 模擬トレーサー試験に用いた試験用カラム

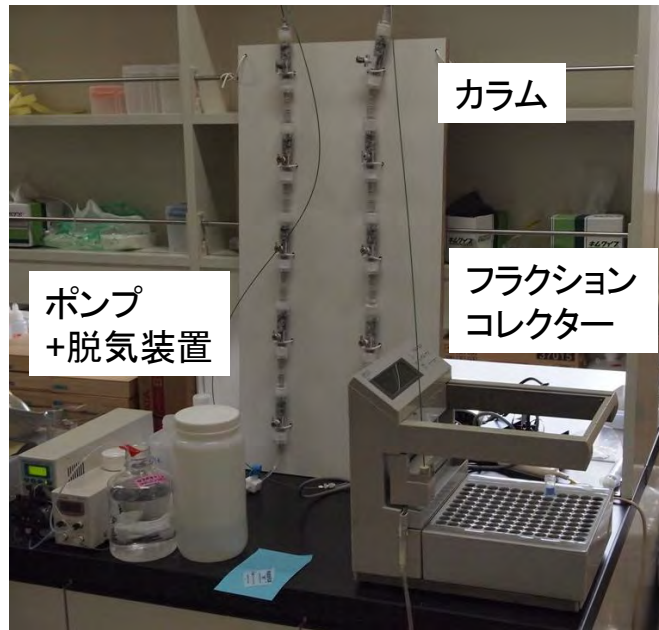


図 8.6.1-2 模擬トレーサー試験の試験系

8.6.2 結果と考察

流速 $1\text{mL}/\text{min}$ の試験におけるカラムから滴下される液量と Cs および Sr 濃度の関係を図 8.6.2-1 および図 8.6.2-2 に示した。さらに、流速 $0.1\text{mL}/\text{min}$ での結果を図 8.6.2-3 および図 8.6.2-4 に示した。前述のようにディスク状試料を用いたバッチ試験では、 1g の岩石に対して 10mL の溶液を接触させて試験を実施したが、Cs や Sr の減少はわずかであり、ディスク状の試験体によって有意な分配係数を算出することが困難であった。このため、流速 $1\text{mL}/\text{min}$ 、岩石への接触時間 50 分程度という比較的速い条件下での試験では、非吸着性トレーサーに対して有意な遅れが発生しないことが想定された。しかし、図からわかるように、Cs・Sr とともに非吸着性トレーサーからの時間遅れが生じている様子が観察されており、模擬トレーサー試験によって有意な分配係数を算出可能であることがわかった。

非吸着性トレーサーからの時間遅れを利用して、Cs・Sr の分配係数を算出した。まずは濃度 50% に達するまでの時間の差異を用いて分配係数を算出する。流速 $1\text{mL}/\text{min}$ の場合、非吸着性トレーサーの濃度が 50% に達するのは 76mL のときであり、Cs・Sr の濃度が 50% に達するのはそれぞれ 108mL 、 182mL のときである。これらの数値から、Cs・Sr における分配係数はそれぞれ、0.13 および 0.44 と算出される。流速が $0.1\text{mL}/\text{min}$ の場合には非吸着性トレーサー、Cs、Sr がそれぞれ 76mL 、 125mL 、 250mL で 50% に到達する。このため、Cs・Sr の分配係数はそれぞれ 0.20、0.72 と算出される。これらの値は粉体のバッチ試験で得られる値と比較して 1 オーダー程度低い値であるが、ディスク状の試験体で得られた分配係数とほぼ同等の値を示した。このため、花崗岩のディスク状試験体での試験および模擬トレーサー試験では、二つの試験ともに花崗岩表面への吸着のみを捉えた結果、両者の分配係数が一致したものと推察され

た。比較的速い流速においては、流速の分配係数への影響はわずかであったが、やはり流速が遅い方が大きな分配係数を示すことが分かった。さらに遅い流速にした場合にどのような分配係数が得られるのかについて、将来的に明らかにしていく予定である。

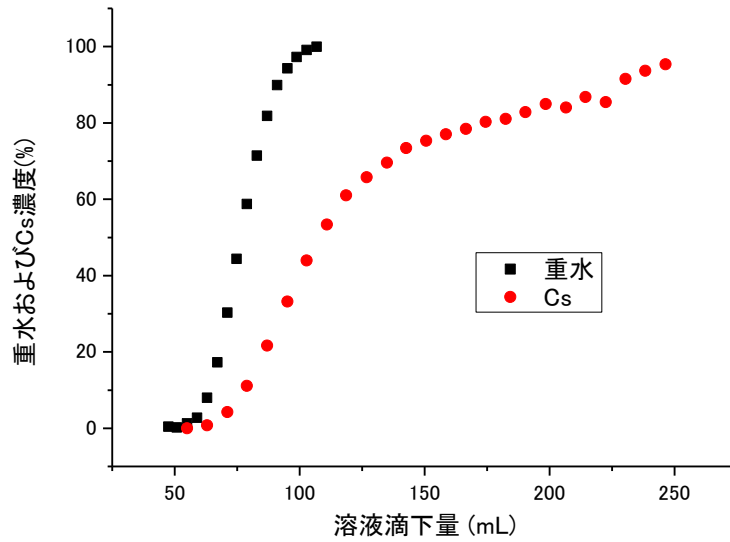


図 8.6.2-1 模擬トレーサー試験における滴下量と Cs および重水濃度の関係 (流速 1.0mL/min)

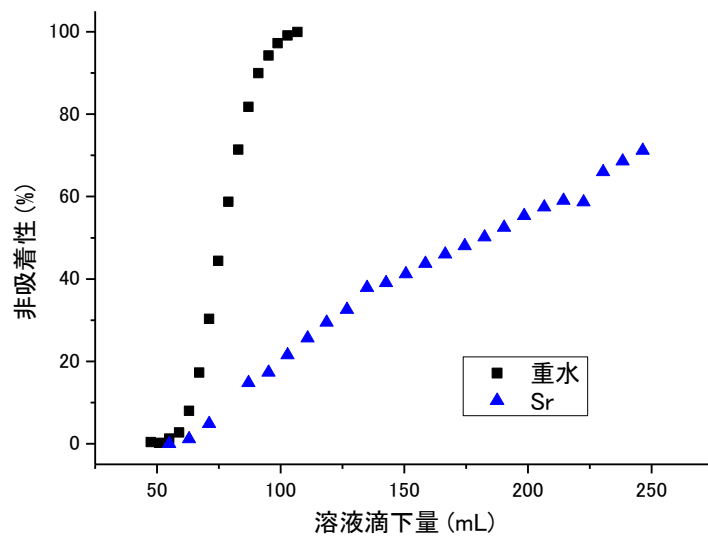


図 8.6.2-2 模擬トレーサー試験における滴下量と Sr および重水濃度の関係 (流速 1.0mL/min)

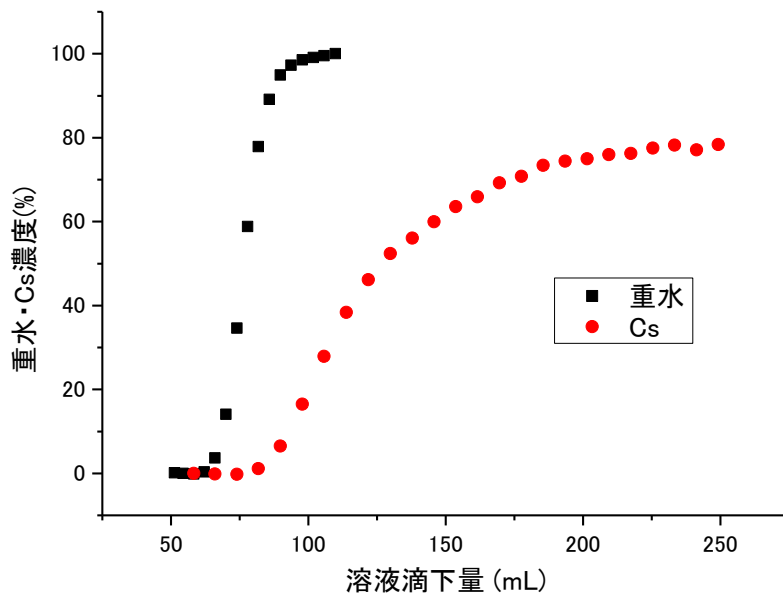


図 8.6.2-3 模擬トレーサー試験における滴下量と Cs および重水濃度の関係 (流速 0.1mL/min)

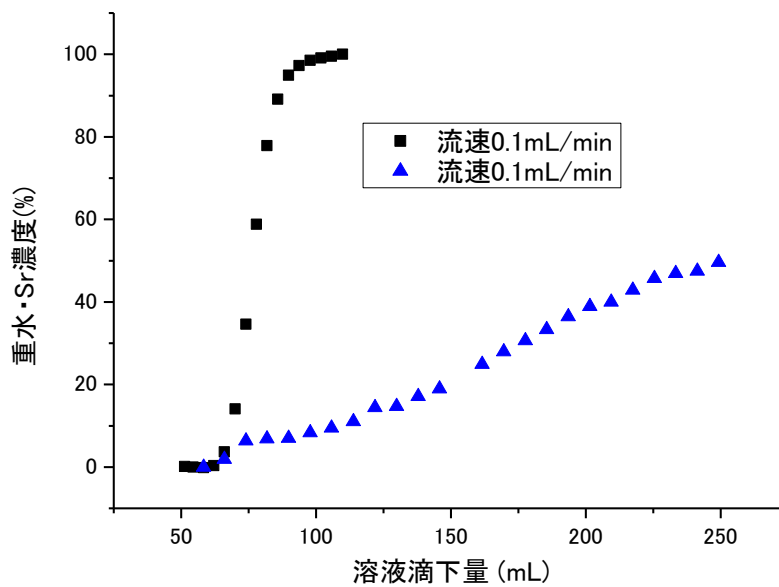


図 8.6.2-4 模擬トレーサー試験における滴下量と Sr および重水濃度の関係 (流速 0.1mL/min)

8.7 実地下水および岩石データからの分配係数の算出

今回の試験では、天然の岩石・地下水間での分配係数に関する情報をえるため、実地下水における Sr 濃度と岩石中の Sr 濃度を比較する試験を実施した。

8.7.1 試験方法

花崗岩と岩と接触している地下水における Sr 濃度をそれぞれ測定し、分配係数の算出を試みた。岩石に存在する Sr については、地下水との相互作用に関与していない成分も存在すると考えられる。このためここでは、模擬地下水に塩化アンモニウムの溶液を加えた溶液を用いて岩石から Sr を抽出し、その量と地下水中濃度を用いて分配係数を算出した。試験手順を以下に示した。

- ・地下水中 Sr 濃度の測定：現場で採取した地下水をよく共洗いしたフッ素コーティングされたプラスチック容器にいれ、実験室へと輸送した。実験室で容器を開封したあと、濃度 1%になるように硝酸を加えた。これは、容器壁に吸着したり空気中の炭酸と反応して炭酸塩として沈殿している成分を溶出させるためである。上記の硝酸溶液を適切に希釈したあと、ICP-MS を用いて Sr 濃度を定量した。
- ・岩石からの Sr 抽出：花崗岩の岩石コアを粉碎し、粒径を 2mm 以下としたものについて、1g に対して 10mL の模擬地下水+塩化アンモニウム溶液を添加した。塩化アンモニウムの濃度は 0.1mol/L である。1回/日ハンドシェイクしながら 1週間静置し、1週間後上澄み溶液を取り出した。0.45 μm のフィルタで上澄み溶液をろ過後、適切に希釈して Sr 濃度を測定した。

8.7.2 試験結果と考察

測定の結果、地下水に含まれる Sr 濃度は 64 $\mu\text{g/L}$ であった。これに対して、1g の岩石から模擬地下水+塩化アンモニウムの溶液で抽出された Sr の量は 1.429 μg であった。これらの濃度から算出した分配係数は 22(mL/g)である。

上記の値は、花崗岩粉末を用いたバッチ試験の結果から得られた分配係数 (0.96~3.75) と比較して、1オーダー大きな値となった。今回の試験では岩石コアのうち実際に地下水と接触している割れ目部分や充填鉱物を試験に用いておらず、主に健岩部から試料を採取している。このため、粉碎-模擬地下水との接触によって地下水-岩石間の Sr 分配に無関係な Sr を岩石から抽出した可能性がある。また、実地下水よりもイオン濃度が高い溶液で全ての交換可能な Sr を抽出したため、このような結果が得られた可能性もある。

実際の割れ目近辺の岩石や割れ目充填鉱物を用いて、実地下水と近いイオン濃度を持つ溶液での脱離試験との組み合わせによって分配係数を算出する試験を今後実施していく予定である。

8.8 まとめ

本研究ではトレーサー試験において核種の分配係数を評価するための最適な条件を設定することを最終的な目的として、方法や濃度、時間等の条件を変えて Cs および Sr の分配係数評価を実施する。本年度はこれらの条件のうち一部のデータを取得し、また適切な試験方法を設定するための予備的な検討を実施した。結果の概要は以下の通りである。

- ・粉体を用いたバッチ吸着試験では、Cs・Sr の場合 24 時間以内程度で吸着が平衡に達することがわかった。CEC を基準として 10~1000%が液相に存在する場合、分配係数は最大で 30 倍程度異なることが分かった。
- ・ディスク状の試料で吸着試験を実施した場合、砂岩での吸着試験では数百時間の時間を要するものの、分配係数は粉体のものと近くなった。これに対して花崗岩の試料では約 1000 時間の試験時間が経過しても、ディスク状試料の分配係数は粉体のものよりも顕著に低かった。
- ・拡散試験で得られる分配係数は、ディスク状の分配試験での分配係数よりも 1 桁程度低い値となった。
- ・天然岩石および地下水に含まれる Sr 濃度から、分配係数を算出した結果、花崗岩では粉体のバッチ試験のときと比べて 10 倍程度の分配係数が得られた。吸着や核種の分配に係わりのない Sr を抽出している可能性があるため、岩石割れ目近傍から地下水に近い組成の溶液で Sr を抽出する必要があると考えられた。
- ・岩石粉末を充填したカラム試験から得られた分配係数は、粉体のバッチ試験から得られたある時間での分配係数と近い値となった。このため、今回試験した条件下では、流れによる影響は少なく、流速によって分配係数に変化するの、岩石との接触時間が変化する影響によるものであると考えられた。
- ・岩石コアの周辺に試料水を流す「模擬トレーサー試験」で得られた花崗岩における分配係数は、ディスク状試料から得られた分配係数と近い値を示した。花崗岩は岩石コア表面近傍のみが、試験時間内での核種分配に関与し、結果として流速、および流速を変えることによる核種と岩石との接触時間の変化が分配係数に及ぼす影響は少なかった。

以上の結果から、以下のような知見を得た。

- ・トレーサー試験の条件設定：バックグラウンドとして流れのある場でのトレーサー試験は、周囲の流れの影響が少なくなるようにある程度の流速で試験を実施する必要がある。バッチ試験と流れのある場での試験との比較から分かるように、今回試験を実施した範囲では流速そのものが分配係数に与える影響は少なく、流速が速く吸着が平衡に達するまでの時間が十分に確保するのが難しい場合に分配係数の低下が見られることがわかった。ディスク状の試料の試験から分かるように、花崗岩は岩石内部も含めて吸着が平衡に達するのに長い時間を要するため、トレーサー試験の時間スケールではごく表面近傍への吸着のみを評価していることになる。逆に砂岩等へのトレーサ試験を実施する場合は、表面への吸着を評価するのか岩

石内部への吸収・拡散を含めて評価するのかの目標を明確にし、試験時間を設定する必要がある。

・安全評価に用いるための分配係数の取得：砂岩試料においては、透水係数が小さな試料であっても数百時間経過後にはディスク状試料と粉末状試料とで分配係数がほぼ一致した。この結果から、処分の安全評価スケールで考えれば、粉末状バッチ試験で得られた分配係数を安全評価に使用できるものと推察される。一方、花崗岩においては 1000 時間程度のスケールでは、粉末状試料とディスク状試料との分配係数が大きく異なっており、より長いスケールでの試験が必要であるが、粉末状試料から安全評価の分配係数を算出するとやや過大に分配係数を評価している可能性があると考えられる。

参考文献

- 核燃料サイクル開発機構 (1999):地層処分研究開発第2次取りまとめにおける緩衝材への放射性元素の分配係数の設定、JNC TN8400 99-072.
- 小出馨、前田克彦 (2001):東濃地域を対象とした広域地下水流動研究の現状(その2)、サイクル機構技報 12 102-122.
- 土壤標準分析・測定法委員会(編)(1986):土壤標準分析・測定法, 日本土壤肥料学会監修, 博友社出版、150-154.
- 日本原子力学会(2006):収着分配係数の測定方法—深地層処分のバリア材を対象とした測定方法の基本手順、日本原子力学会深地層分配係数分科会
- 東原知広, 中田弘太郎, 長谷川琢磨・後藤和幸(2005):地下水年代測定評価技術の開発(その3), 一岩石柱における溶存 He の拡散係数決定法の提案と陰イオンを用いた拡散係数の間接的評価法の適用性—, 電力中央研究所報告書:N05067.
- Israelachvili, J., Intermolecular & Surface force 2nd Ed., 1991 Academic Press, London 238.
- Kross, B. M., and Schaefer, R. G., (1987).Experimental measurements of diffusion parameters of light hydrocarbons in water-saturated sedimentary rock-I. A new experimental procedure, Organic Geochemistry, 11, 193-199.
- Kross, B. M., and Schaefer, R. G., (1988).Experimental measurements of diffusion parameters of light hydrocarbons in water-saturated sedimentary rock-II. Results and geochemical significance, Organic Geochemistry, 12, 91-108.

9. 天然トレーサーによる調査技術の開発

9.1 背景

これまでに高レベル放射性廃棄物処分の概要調査技術として、天然に存在する安定同位体、放射性同位体、希ガスなどを用いた地下水年代測定技術を開発してきた。地下水年代測定技術は、概要調査の地表調査やボーリング調査において、候補岩体の地下水の流動性が十分に低いことを示すための技術であり、候補岩体の選定において有効な技術になり得ると考えられる。このため、特に、数万年～百万年のような非常に古い地下水年代が評価できる技術を開発するとともに、国内の地点に適用し、開発してきた技術の妥当性を確認してきた。

精密調査段階においても、地下水年代測定技術は、概要調査での調査結果の妥当性の確認に用いられると考えられる。また、候補岩体が十分な広がりを持つこと、水みちとなりうる高透水帯が存在しないことを確認する技術としても利用される可能性が高い。このような適用を想定した場合、概要調査段階での地表調査やボーリング調査とは異なり、坑道などにおいて調査が実施される。このため、坑道などにおいて地下水年代測定技術を適用する方法を整備しておく必要がある。また、坑道での調査においては、水みちなど局所的に地下水流動の早い部分の検出と、その特性評価も重要な評価事項となる。これは、このような局所的かつ選択的な地下水の流動経路が存在する場合には、主要な核種の漏洩経路となり得るためである。このような調査においても、若い地下水年代を評価できる地下水年代測定技術であれば、その水みちが有意な漏洩経路になり得るかどうかなを確認することが可能であると考えられる。このため、このような若い地下水の流入に着目した地下水年代測定技術についても検討することとした。

一方で、地下水年代測定技術は、天然の物質を利用した広域的なトレーサー試験とも見なすことができる。本研究では、トレーサー試験技術の開発を実施しており、比較的狭い範囲において人工トレーサーを用いて、割れ目や高透水帯の物質移行特性を評価している。ただし、人工的な試験だけでは、広域的な地下水流動・物質移行特性の評価には多大な時間を要するため、天然トレーサーによる評価によって、トレーサー試験を補っていく必要がある。天然トレーサーによる評価では、人工トレーサーよりも大きいスケールでの物質移行現象を評価可能であると考えられる。また、精密調査段階においては、調査坑道などを建設して調査が行われるため、坑道にむけて地下水流動が発生し、このような比較的大きな地下水流動による物質移行特性を評価できる可能性がある。

以上のような概要調査における地下水年代測定結果の確認、水みちの特性評価、トレーサー試験技術の補間を目的として、精密調査における地下水年代測定の開発を行うこととした。

9.2 研究項目

精密調査における地下水年代測定法を開発するために、天然トレーサーによる調査、坑道における地下

(1) 指標となる天然トレーサーの調査

1) 表層水・若い(60年未満)地下水の年代測定法

立坑・坑道などの掘削によって新しい地下水が流入する場合に有効なトレーサーについて、ここでは示す。表層水や若い地下水の識別に有効なトレーサーに ^3H (トリチウム)、CFCs(フロンガス)、 SF_6 (六フッ化硫黄)がある。CFCs と SF_6 は地球温暖化ガスであり排出が規制されているガスでもある。

・ ^3H (トリチウム)

^3H (トリチウム)は、水素(H)の放射性同位体であり、水分子($^3\text{H}^1\text{H}_2\text{O}$)として地下水中に存在するため、化学反応の影響を受けず、地下水とともに移動する。このためトレーサーとして非常に優れている。

^3H の半減期は12.3年であり、 ^3H 年代測定では、 ^3H の放射壊変による濃度低下に着目して地下水年代を評価する。このため、5半減期程度まで分析可能($1/2^5 \approx 3\%$)だとすると、滞留時間が60年程度までの地下水の評価に有効である。

^3H の単位には、トリチウムユニット(TU)が用いられる。1 TUは、水分子 10^{18} 個に対して、1個のトリチウムが存在する状態を示す。1 TUは、SI単位系の約0.12 Bq / l に相当する。

^3H は、図9.3.1-1に示すように1960年代の核実験によって大気中に放出され、環境中の濃度が高くなったが、近年では環境中の濃度が低下し、核実験前の状態に近づいており、現在の降水の ^3H は5TU程度である(IAEA/WMO, 2014;放射線医学総合研究所, 2014)。このように初期値の変動が大きいため、定量的な年代評価が難しい。

^3H の分析は、地下水試料では濃度が低いいため、電解濃縮した後に液体シンチレーションカウンティングが一般的であり、計測精度は0.1TUである。また、 ^3H が壊変後に ^3He になることを利用したHe-ingrowth法も用いられている(Solomon and Cook, 1999)。 ^3He の分析は希ガス用の質量分析器で実施される。ただし、この方法では、 ^3H が壊変するために待ち時間を要するため、計測までに時間を要する。精度も初期濃度、壊変待ち時間などに影響する。

・ ^3H - ^3He (トリチウム-ヘリウム)

^3H は、核実験の影響などにより近年では環境中の変動が大きく、初期値の設定が難しい。これを解決する方法として、He-ingrowth法と同様に、 ^3H が崩壊することにより生成する ^3He を利用した ^3H - ^3He 法がある(Solomon and Cook, 1999)。この方法は採取した地下水の ^3H と ^3He をそれぞれ計測し、 ^3H 起源の ^3He から初期値を推定することで、初期値の精度を高める方法である。ただし、地殻起源やマントル起源などの ^3He の混合が大きい場合には、 ^3H 起源の ^3He の分離が難しい場合がある。

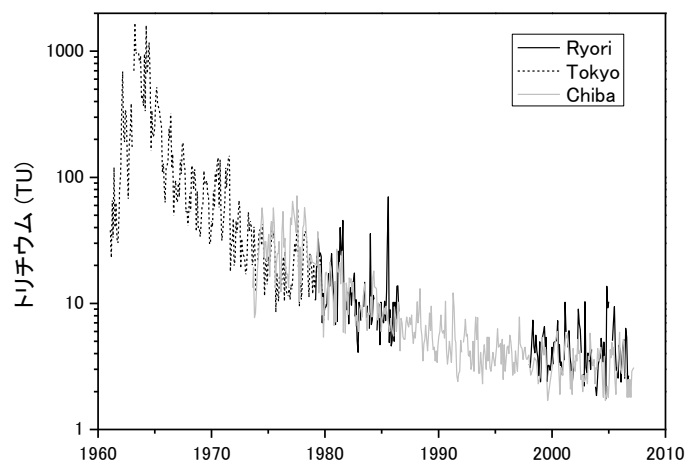


図 9. 3. 1-1 トリチウム濃度の経時変化

(IAEA/WMO, 2014;放射線医学総合研究所, 2014)

・ CFCs、SF₆

フロンガス(CFCs: CFC-11, 12, 113)や SF₆は、それぞれ冷媒や絶縁材として、約 50 年前から使用されてきた。しかしながら、これらのガスは地球温暖化ガスとして問題視され近年ではその使用が中止されている。ただし、近年まで盛んに使用されてきたため、大気中での濃度は図 9. 3. 1-2 に示すように単調に増加している(Plummer et al., 2006)。濃度とともにガス圧も増加しているため、地下水中への溶存量も時間とともに増加している。このため、地下水中の溶存量から大気中の濃度に換算し、過去の大気中の濃度と対比することで滞留時間が推定できる。溶存量に着目するだけでなく、フロンガスや SF₆ の溶存比に基づいて涵養年を推定することも可能である。

測定単位は、フロンガスでは pg/kg が用いられる。これは、水 1 kg 中に pg の重量のフロンガスが溶解していることを表す。p(ピコ)は 10⁻¹²を表す。SF₆は fmol/kg が用いられる。これは水 1kg 中に fmol の分子量の SF₆ が溶解していることを意味する。f(フェムト)は 10⁻¹⁵を表す。これらの濃度から大気中の濃度 pptv を求め、濃度曲線とフィッティングする。ここに、pptv は体積率で 10¹²分の 1 を表す。

CFCs と SF₆の分析は、パージトラップ方式で捕集し、電気捕集型ガスクロマトグラフで分析する。計測限界は、CFC-11, 12, 113 についてそれぞれ 0. 3pg/kg である。SF₆については、1~3%である。

CFCs は、50 年未満の地下水の年代を評価する上で非常に有望であるが、近年では、微生物による分解(硫酸還元、メタン生成など)、有機物への吸着などで減衰することが知られている。SF₆は安定であるが、花崗岩などから発生する可能性がある。このため、適用に当たってはこれらの影響に注意が必要である。

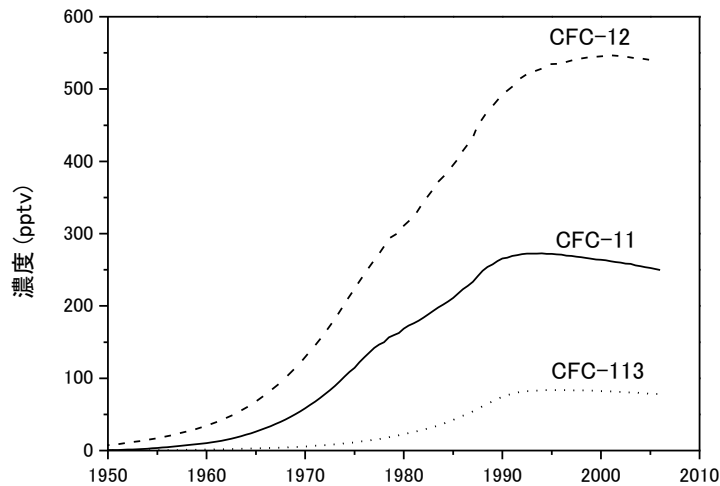


図 9.3.1-2 フロンガス濃度の経時変化(Plummer et al., 2006)

・⁸⁵Kr

クリプトン(Kr)は、無色の不活性ガスであり、化学的に安定な希ガスの一種である。Kr は水への溶解度が高く、溶解度の温度依存性が高いため、地下水への溶存量から涵養温度を求める希ガス温度計としても用いられる。Kr には、放射性同位体として⁸¹Kr と⁸⁵Kr があり、半減期はそれぞれ 229,000 年と 10.76 年である。⁸⁵Kr は比較的短い滞留時間の評価に用いられる(Kazemi et al., 2006)。

⁸⁵Kr は、大気中で⁸⁵Kr の核破砕と中性子の放射化によって生成するが、主な起源は、原子爆弾実験、原子力発電所の運転などである。このため、大気中での濃度は近年上昇傾向にある。³H は近年減少傾向にあるが、⁸⁵Kr は増加傾向にあり、新しい地下水を判別するうえではより有効である。

⁸⁵Kr を地下水の滞留時間評価に使うには非常に多くの地下水を必要とする。これは地下水中での濃度が低いためである。まず、地下水からガスを分離し、Kr を精製、その後計測するという手順をとる。

⁸⁵Kr の分析は、低レベルのガスプロポーションアルカウンティングで実施される。⁸⁵Kr は大気中の濃度が変化しているため、これを考慮して滞留時間を評価する必要がある。⁸⁵Kr 年代は、⁸⁵Kr /Kr で求めるため、脱ガス、空気の混入、涵養温度に対して感度が低い。また、CO₂ や CH₄ ガスなどの溶存ガスの影響も受けにくい。ただし、処理する地下水量、ウランが豊富な地層では発生する可能性、不飽和帯での遅れなどの課題がある。

2) 古い地下水の年代測定法

・³²Si

³²Si は、Si の放射性同位体であり、半減期は約 140 年である。大気中で⁴⁰Ar の宇宙線による核破砕によって生成される(Lal et al., 1960, Phillips and Castro, 2003)。酸化して降雨とともに地表に供給される。

自然状態での放射能レベルは、2-20 mBq/m³である(Morgenstern et al., 1996)。これは、1TUが120,000 m Bq/m³(0.12 Bq/L)であることを考えると非常に低いレベルである。

Siは地中のシリカ鉱物と交換する可能性があり、不飽和帯を移動中に非常に大きく減衰する。このように、地化学反応が複雑かつ放射能レベルが非常に低いため、現状では適用されていない(Morgerstan, 2000)。

・ ³⁹Ar

³⁹Arは希ガスArの放射性同位体であり、半減期は269年である。³⁹Arは、大気中で生成し、Arの溶解率に従って地下水に溶解する。現在の大气における³⁹Arの放射能レベルは、16.7 mBq/m³である(Loosli et al., 2000)。20°Cでは2000Lの水を処理しても放射能レベルは1.2 mBqと非常に小さい(Phillips and Castro, 2003)。³⁹Arは地中においても³⁹K(n,p)³⁹Arによって生成する。堆積岩ではこの寄与は小さいが、花崗岩ではこの寄与が大きいため評価が複雑になる(Andrews et al., 1989; Lehman et al., 1993)。

・ ⁸¹Kr

⁸¹Krは希ガスKrの放射性同位体であり、半減期は2.3×10⁵年である。宇宙線と原子核の相互作用で発生するため、大気中でほぼ一定であり、地中での生成もほぼ無視できる。しかしながら、大気と平衡な水中での⁸¹Krの放射能レベルは0.11nBqであり、滞留時間評価に用いられるトレーサーとしては最も低い。⁸¹KrはCollon et al.(2000)が加速器質量分析器を用いた計測を開発し、Lehmann et al.(2003)によって、オーストラリア大鑽井盆地において適用されている。

・ ¹²⁹I

¹²⁹Iはヨウ素の放射性同位体であり、半減期は15.7×10⁶年である。¹²⁹Iは大気中と地中の両方で発生し、大気中ではXeの宇宙線による核破砕によって、地中ではウランの自発核分裂によって生成する。また、¹²⁹Iは火山、近年の核実験や原子力産業からによる供給も重要である(Kazemi et al., 2006)。

岩塩ドーム、化石海水、油田などの閉鎖系では年代測定が成功している。しかしながら、ヨウ素に係わる地化学反応、地中での自発核分裂による生成、有機物からの分離は複雑なため、地下水の滞留時間の評価としては上手くいかない場合もある(Phillips and Castro, 2003)。

海水を起源とする場合には、¹²⁹I/Iは1500×10⁻¹⁵程度である(たとえば、Muramatsu et al., 2001)。しかしながら、実際には幌延地区での既存の調査では、64~194×10⁻¹⁵が観測されているおり、海水を起源として年代を求めると46~72Maとなり、地質年代よりも古くなる(産業技術総合研究所, 2011)。これは、初期値による影響と考えられ、初期値を適切に評価することが課題である。

3) 拡散場の識別

放射性廃棄物処分の安全評価では地下水流動が遅いことを示すことが重要である。地下水流動が十分に小さくなると物質は移流ではなく拡散による輸送が支配的となる。拡散は物質の輸送形態として最も遅い輸送形態のため、拡散が支配的であることを示すことができれば、物質の輸送が遅いことを示すうえで有効である。

ここでは、 ^{37}Cl と ^{81}Br とを取り上げるが、これらの物質は両者とも一価の陰イオンであり、拡散によって同位体分別することが知られている。

・ $\delta^{37}\text{Cl}$

Cl は一価の陰イオンで岩盤への吸着がほとんど無く、化学的にも安定なため、地下水のトレーサーとしてよく用いられる。Cl は ^{35}Cl (75.53%) と ^{37}Cl (24.47%) からなり、両者は原子量が異なるため、同位体分別がイオンフィルトレーションや拡散によって生じることが知られている (Kaufmann et al., 1984)。このため、長期にわたり地層中に閉じ込められている海水や拡散場の評価に有効な指標となると考えられる。

自由水中での分別係数 ($\alpha = D_{\text{Cl-}^{35}}/D_{\text{Cl-}^{37}}$) は、1.00128~1.00192 が Eggenkamp and Coleman (2009) によって報告されている。また、地層中での分別係数は、1.0012~1.0030 である (Weaver, 1999)。

^{35}Cl と ^{37}Cl の率は一般的に以下の標準海水 (SMOC) からのズレの千分率によって表される。

$$\delta^{37}\text{Cl}_w = \frac{R_w - R_s}{R_s} \times 10^3 \quad (9.3.1-1)$$

ここに、 R_s は SMOC の $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ 比、 R_w は地下水試料の $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ 比である。

イオンフィルトレーションによる分別では、マイナスに帯電した地層界面を通り抜ける際に、重量の重い ^{37}Cl の方が選択的に通り抜けるため、地層内には相対的に ^{35}Cl が多くなり、 $\delta^{37}\text{Cl}$ がマイナスにシフトすると考えられている (Phillips and Bentley, 1987)。一方で、拡散による分別では、 ^{35}Cl と ^{37}Cl とでは、 ^{35}Cl が軽いため拡散係数が少し大きく、拡散先(濃度フロント)では ^{35}Cl が先行して到達し、拡散元(ソース)では ^{37}Cl の残留率が高くなるため、拡散先では $\delta^{37}\text{Cl}$ がマイナスにシフトし、拡散元では $\delta^{37}\text{Cl}$ がプラスにシフトする (Desaulniers et al., 1986, Eggenkamp et al., 1994)。

・ $\delta^{81}\text{Br}$

Br は、Cl と同様に一価の陰イオンとして存在するため、吸着の影響を受けにくく、化学的にも安定である。Br には ^{79}Br (50.69%) と ^{81}Br (49.31%) とがある。Br も Cl と同様に拡散によって同位体分別が発生することが確認されている (Eggenkamp and Coleman., 2009)。しかしながら研究例は非常に限られており、計測に関するものが主である (Eggenkamp and Coleman., 2000; Shuakar-Stash et al., 2005; Sylva et al., 2007)。これは、環境中の Br 濃度が Cl と異なり低いためと考えられる。ちなみに、海水の Br/Cl 比は 0.00347 である。このため、計測するために十分な Br の確保が難しいという問題がある。ただし、環境中

の濃度が低いということは、人工的なトレーサーとしては有効であるということを示している。特に環境中の Cl 濃度が高く、Cl が試験に使えない場合には、Br は有効な拡散の指標になると考えられる。

(2) サンプルング方法

地下水中のガスのサンプルングは、採取時の脱ガス、大気の混入など様々な要因によって誤差が生じる。特に、幌延周辺のボーリング孔では、メタンガスや圧力開放による脱ガスが顕著であり、希ガス濃度に有意な影響があった。原位置サンプラーを用いた分析結果では、脱ガスの少ない結果が得られているがサンプルング方法については検討が必要である。今後、立坑および坑道での採取を想定した場合でも同様の影響があると考えられたため、サンプルング方法について調査を実施した。

1) 圧力制御式サンプルング

立坑や坑道でのボーリング孔から採水する場合には、地下水圧から大気圧まで解放される可能性が高く、脱ガスが発生する可能性が高い。このため、Stripa 鉱山で Andrews et al. (1989) が採用している圧力制御サンプルングを示す。

この方法は、図 9.3.1-3 に示すように、ボーリングからのチューブをバルブ、銅管、バルブ、圧力計、レギュレーターを通してセットする。レギュレーターを制御することにより、地下水の圧力低下を抑えながら、地下水をボーリング孔から銅管に流す。十分な量の地下水を銅管に流した後、バルブを下流側から締める。その後、銅管の両端をクランプする。このような操作により、採水時のガスの状況、圧力などを確認しながらの採水が可能である。

2) 原位置平衡式サンプルング

原位置平衡式サンプルングは、Seldom et al. (2003) により考案された方法であり、サンプルング装置は Diffusion sampler と呼ばれており、ガス透過性のメンブレン、スライド式バルブ、銅管という構成になっている。図 9.3.1-4 は同時に 2 つのサンプルをとる際のサンプラーの例である。このサンプラーをボーリング孔などに挿入し、メンブレンを通じて銅管と外部との希ガス濃度が平衡に達するのを待つ。その後、スライド式バルブを作動させメンブレンと銅管との連結を切断する。この状態でサンプラーを回収し、地上で銅管をクランプする方法である。一般的な銅管に地下水を流してとる方法に対して、平衡になるのを待ってからとる方法のため Passive sampling などとも呼ばれている。

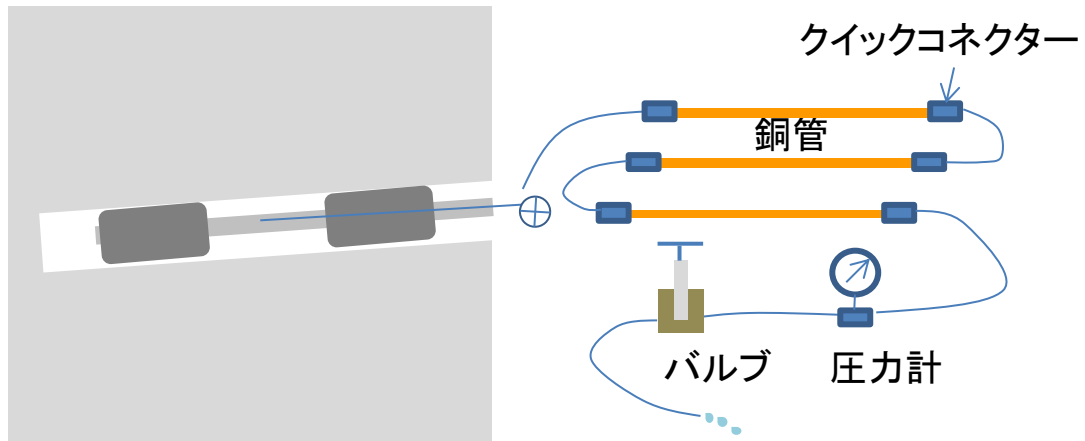


図 9.3.1-3 圧力制御サンプリングの概念図 (Andrews et al., 1989)

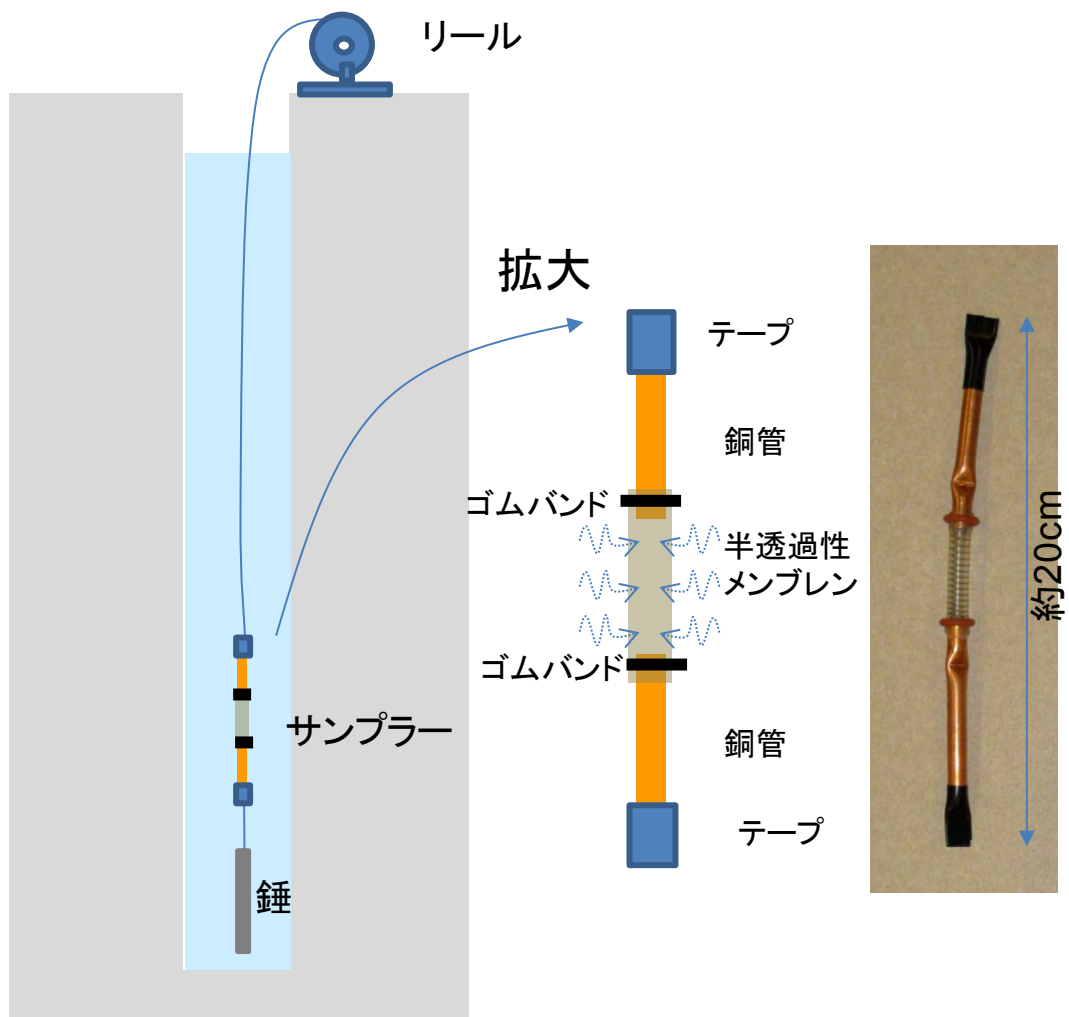


図 9.3.1-4 原位置平衡式サンプラーの概念図 (Seldom et al., 2003)

(ゴムバンドの部分をクランプなどで締めて採取)

9.3.2 技術開発

(1) 背景

9.1 に記述したように、処分場候補地の精密調査においては局所的に地下水流道が速い箇所が存在の有無を明らかにすることが必要とされる可能性が高い。このため、①表層水や若い（60年未満）の地下水が処分場候補岩体に流入するケース、②比較的若い（～1万年）地下水が処分場候補岩体に流入するケース、③古い地下水および化石海水が処分場候補岩体に流入するケース、についてそれぞれ指標となりうるトレーサーを選定し、それらを用いて得られる情報について整理した上で、正確に測定するための技術や地下水の流入を評価するために必要な情報を取得するための技術を開発しておく必要がある。

概要調査を目的とした地下水年代の評価法開発における知見や、9.3 で示した文献調査の結果を基にして、本研究では対象とするトレーサーをそれぞれ以下のように選定した。

- ・表層水・若い(60年未満)地下水の識別： ^3H 、CFCs、 SF_6
- ・比較的若い（～1万年）の識別：有機 ^{14}C および無機 ^{14}C
- ・古い地下水および化石海水の識別： ^{36}Cl および ^{87}Sr
- ・拡散場の識別： ^{37}Cl および ^{81}Br

このうち、①の表層水や若い地下水の識別に用いる ^3H 、CFCs、 SF_6 については、既往の研究において知見が集積されつつあり、若い地下水の流入を判断するには十分に利用可能な手法であることが明らかになってきている。しかし、3つの指標における整合性がとれないケースがあること、そのために若い地下水の混合量において定量的な評価が難しくなるケースがあることが問題として挙げられる。これらのトレーサーについては、実際に掘削中の深地層の研究施設（岐阜県瑞浪市）において挙動を把握し、改めてこれらのトレーサーを使用する際の問題点を抽出する。瑞浪における調査については、9.4 に記述している。

②の比較的若い地下水の識別には、有機 ^{14}C が最も有用な指標の一つになりうると考えられる。これは、 ^{14}C が約6000年の半減期を持ち（Mook and Van Der Plicht, 1999）2万年程度までの年代測定に有用な指標であり、地下水に溶存する有機物（DOC: Dissolved Organic Carbon）が岩石と相互作用を起こしにくく地下水流動とともに移動する可能性が高いためである（Wassenaar, 1999; 1991）。実際、地下水年代の評価法開発において、瑞浪地域の地下水における有機 ^{14}C 年代と He 年代を比較して、両者は良く一致することから、有機 ^{14}C 年代が地下水年代の指標として有用であることを示した（図9.3.2-1: 富岡ら, 2007）。上記の性質から、1万年程度の年代を持つ若い地下水が処分場候補岩体の地下水に流入した場合、有機 ^{14}C が検出されることが予測され、有機 ^{14}C の有無によって若い地下水の流入の有無を判断することが可能であると考えられる。DOC の地下水からの回収方法については、地下水年代の評価法開発においてすでに検討している。しかし、既往の研究は主に淡水からのDOC回収方法について検討されており、海水起源の溶存イオン濃度が高い地下水に対しての回収方法は十分に検討されているとは言えない。日本のように

周囲を海に囲まれた環境では、処分候補地で海水由来の地下水が存在する可能性が高く、海水由来の地下水からの有機物の回収方法の検討が必要である。

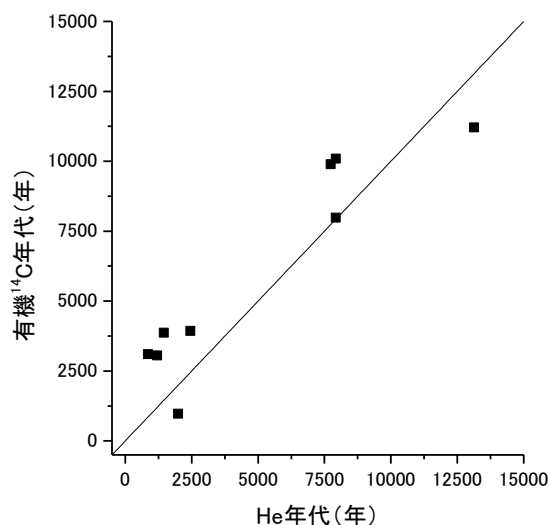


図 9.3.2-1 瑞浪地域の地下水における He 年代と有機 ¹⁴C 年代の関係 (富岡ら 2007 に加筆)

無機の ¹⁴C についても、上記の有機 ¹⁴C と同様に新しい地下水の指標となることが期待される。一般的に地下水中の無機 ¹⁴C は溶液をアルカリ性にした後で、濃塩化ストロンチウムの溶液を加え、炭酸ストロンチウム沈殿として濃縮・回収される。しかし、地下水年代評価法開発においては、無機炭素濃度は高いのに沈殿が生じにくい地下水が存在することが確認されている。沈殿が生じにくい地下水用に、He のバブリングで二酸化炭素を追い出して回収する「バブリング法」を検討し、二酸化炭素回収に最適な条件を決定した。しかし、沈殿法とバブリング法で得られた試料で ¹⁴C の値が異なるケースが見られることがわかった。どちらの方法で取得された ¹⁴C 値がより正しいものであるかを判断するためには、これら二つの方法で処理された地下水におけるデータを蓄積し、比較していく必要がある。

③の古い地下水の識別には、³⁶Cl や ⁴He が有用であると考えられる (中田と長谷川, 2010)。このうち ³⁶Cl については、処分候補岩体と接触する地下水の ³⁶Cl の放射平衡値と、実際に処分候補地点で得られた ³⁶Cl の値との差を評価することが重要である。日本の地下環境でしばしば見られる「堆積岩体に海水由来の地下水が接触している」ケースでは、³⁶Cl の放射平衡値は低い値になることが予測される (図 9.3.2-2 : 中田と長谷川, 2010)。このため、上記のケースで ³⁶Cl を正確に評価し、³⁶Cl を用いて古い新しい地下水が流入している可能性を検討するためには、低い値の ³⁶Cl/Cl を正確に定量する方法あるいは定量の前処理方法の確立および、³⁶Cl /Cl の放射平衡値が低い場合でも正確に平衡値を予測できる手法の開発、が必要である。既往の研究において、岩石の特性 (ウラン・トリウム濃度、中性子吸収断面積が大きい元素 (ガドリウムなど) の濃度、および空隙率など) から岩盤中における中性子の輸送および中性子フラックスを

解析的に予測し、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ の平衡値を予測する方法が提案されている（例えば Phillips, 1999）。しかし、それらの方法は $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ をオーダーで予測できる程度の精度であり、上記のように低い $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ の放射平衡値をもつ岩体に対して適用することは難しい（図 9.3.2-3：中田と長谷川, 2010）。このため、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ の放射平衡値を解析的に予測する手法をさらに詳細に検討するとともに、実験的に $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ の放射平衡値を知る方法を開発し、相補的に $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ の放射平衡値予測の精度を高めていく必要がある。

④の拡散場の識別では、 ^{37}Cl や ^{81}Br は拡散により分別することが知られており (Eggenkamp and Coleman, 2009)。特に ^{37}Cl は拡散によって分別するため、 Cl と $\delta^{37}\text{Cl}$ の分布を用いて拡散が支配的な場の評価 (e. g., Desaulniers et al., 1986; Lavaster et al., 2005)、過去の堆積環境・塩水環境の評価 (e. g., Eggenkamp et al., 1994; Groen et al., 2000; Beekman et al., 2011)、 Cl の起源の評価 (e. g.; Lehmann et al., 2003; Hendry et al., 2003; Zhang et al., 2007) などに用いられている。しかしながら、同位体分別係数については明確になっていないため、これらについて評価する方法を確立する必要がある。これにより、評価方法の高度化を図ることができると考えられる。

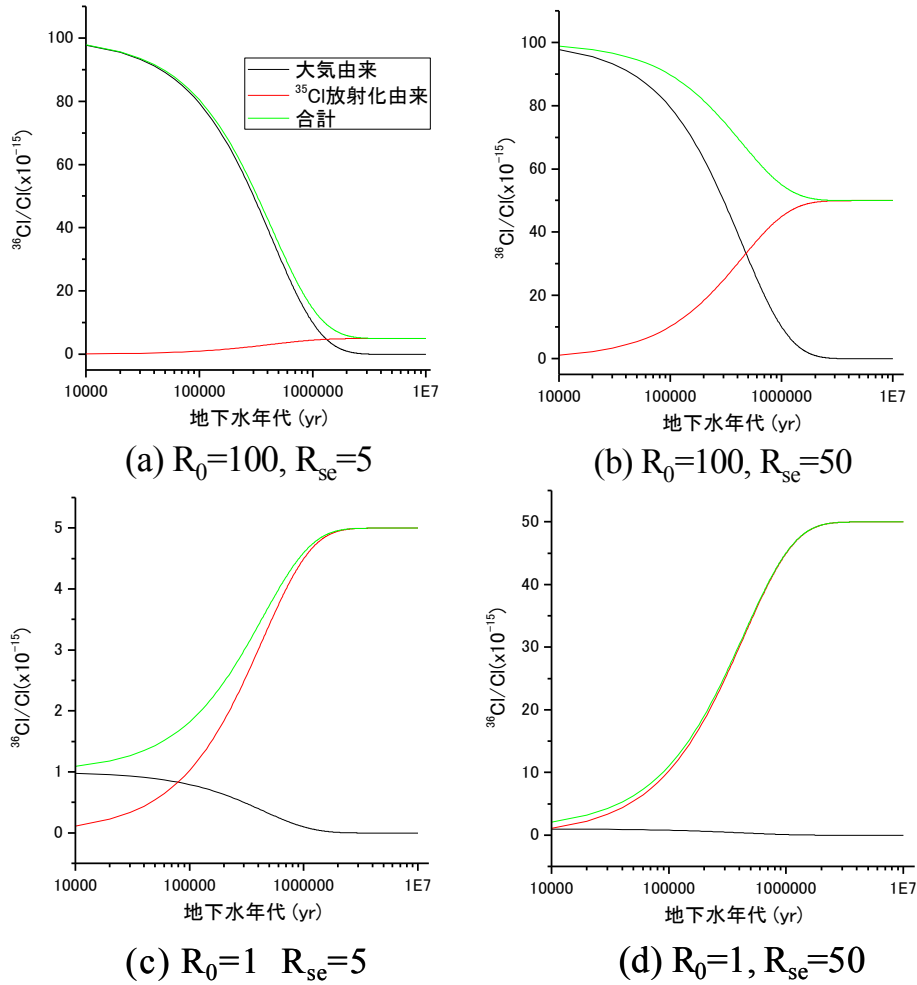


図 9.3.2-2 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ の経時変化

図中の R_0 : 初期の $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ の値 ($\times 10^{-15}$)、 R_{se} : ある岩体での放射平衡値 ($\times 10^{-15}$) である。(a) 天水由来の地下水がウラン・トリウム濃度の低い岩体 (主に堆積岩) に涵養したあるいは堆積時に閉じこめられた場合、(b) 天水由来の地下水がウラン・トリウム濃度の高い岩体 (主に花崗岩) に涵養したあるいは堆積時に閉じこめられた場合、(c) 海水由来の地下水がウラン・トリウム濃度の低い岩体に涵養したあるいは堆積時に閉じこめられた場合、(d) 海水由来の地下水がウラン・トリウム濃度の高い岩体に涵養したあるいは堆積時に閉じこめられた場合、を示す。

周囲を海に囲まれた日本では(c)のケースになる場合が多く、このような地下水において年代測定や混合評価を行うには極低範囲 ($\sim 10 \times 10^{-15}$) において初期値と放射平衡値の差異を明らかにする必要がある。

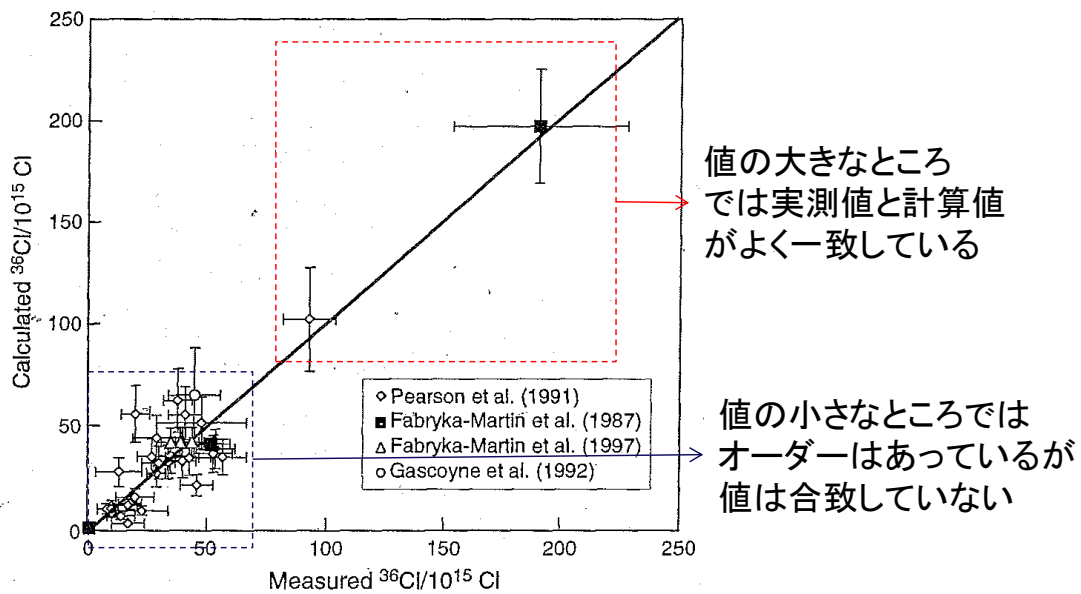


図 9.3.2-3 ^{36}Cl 放射平衡値の解析的予測と実測値の比較(Phillips, 1999 に加筆)

(2) 海水起源地下水からの有機 ^{14}C の回収・精製方法の検討

1) 検討の背景および目的

通常地表水や地下水から DOC を採取するには、主に 3 つの方法が用いられる (長尾, 2008)。つまり、①合成吸着樹脂による疎水性吸着を用いる方法、②陰イオン交換樹脂を用いた回収方法、③膜を用いた濃縮法、である。海水起源の地下水は一般的にイオン濃度が高くイオン交換サイトが少量の試料で飽和してしまうため、②の陰イオン交換樹脂を用いる方法を適用することは現実的ではない。また、イオン強度が高い環境下では合成吸着樹脂への吸着が阻害されるため、①の合成吸着樹脂を用いる方法も適用が難しいと考えられる。このため、海水由来の地下水から有機物を濃縮するには、膜を用いて有機物を濃縮する方法が現時点で最も現実的である (Gurtler et al., 2008)。また、平成 24 年度まで検討してきた地下水年代測定技術開発において、瑞浪地域の地下水に対して種々の有機物取得法を適用し、採水現場では膜による濃縮が最も現実的であることを示しており、海水起源の地下水に限らず膜濃縮が地下水からの DOC 取得方法として採用される可能性が高い。

膜で濃縮した有機物 (膜で濃縮した地下水に含まれる有機物) における有機 ^{14}C を測定するためには、サンプルを測定できる形態に精製する必要がある。通常 ^{14}C を測定するためには、加速器質量分析(AMS) が用いられる (例えば Nagaswa et al., 2013)。AMS のターゲットはグラファイト (黒鉛) であるため、最終的にはこの形態にサンプルを精製する必要がある。有機物を粉末の形状に精製することができれば、有機物の粉末を加熱して二酸化炭素に変換した後、鉄粉末等で還元してグラファイトを得ることができる。

このため、膜で濃縮した有機物を粉末の形状に精製できれば最終的に AMS 測定用のサンプルを作製することが可能である。しかし、膜で濃縮した有機物を含む溶液は、以下のような要因により粉末の作製や ^{14}C の正確な定量が阻害される。

- ① 炭素を含む無機微粒子:有機物を濃縮したときに C を含む無機微粒子も濃縮されている可能性が高い。C を含む無機微粒子中炭素は有機物中炭素と異なる ^{14}C の値を持つ可能性が高いため、混入した場合には ^{14}C の正確な定量に影響を与えることになる。
- ② 陰イオン (硫酸イオン): 有機物濃縮時に陽・陰イオンも濃縮される。イオン濃度が高い場合には最終的に粉末を得るための乾燥処理 (凍結乾燥) が上手く行かない場合が多い。このため、凍結乾燥前には溶液のイオン強度を下げるため「透析」が実施されることが多い。透析は、イオンは通過し有機物は通過しにくい孔径の膜内に溶液を封入して、膜を純水に浸漬する作業であるが、透析で用いる膜の孔径より小さな有機物は透析のプロセスで失われることになる。このため、可能な限り小さい孔径の膜を利用することが望ましいが、現在市販されている透析膜のうち最小の孔径 (MWCO: 100-500) のものは 2 価以上のイオンが通過しにくい可能性が高い。海水には比較的多くの硫酸イオンが含まれるため、透析で硫酸イオンが残存する可能性があり、凍結乾燥のプロセスを阻害する可能性がある。
- ③ 陽イオン (二価陽イオン): 上記②と同じ理由で 2 価以上の陽イオンも溶液中に残存し、凍結乾燥のプロセスを阻害する可能性がある。海水中にはカルシウム・マグネシウムが比較的多く含まれており、これらが残存する可能性がある。

上記のように、膜で有機物を濃縮した溶液には有機物粉体取得の阻害要因となる物質が含まれており、これを取り除いた上で凍結乾燥し粉体を得ることが望ましい。今年度は、膜を使って有機物を濃縮した溶液から有機物粉体を精製する方法を確立することを目的として、各阻害要因を除去する方法とそれらの方法を適用した結果溶存有機物に生じる変化について検討した。対象としたサンプルは海水起源の地下水から膜を用いて有機物を濃縮した溶液で、この溶液の総有機炭素 (TOC: Total Organic Carbon) 濃度は 266mg/L である。

2) 阻害要因の除去方法と TOC 濃度の変化

・炭素を含む無機微粒子の除去

無機炭素を含む微粒子として、炭酸塩鉱物が考えられる。炭酸塩鉱物は一般的に酸性の溶液に溶解しやすく、溶解した炭酸、炭酸・重炭酸イオンも酸性溶液中では溶液への溶解度が低く、溶液中に留まることができない。このため、有機物を濃縮した溶液から炭酸塩鉱物を除去するには、溶液に酸を添加し、溶液の pH を下げれば良い。本検討では、フミン酸・フルボ酸を精製するプロセスの灰分除去法にならい (長尾ら, 2008)、フッ化水素酸を用いて溶液の pH を 1.0 として 24 時間静置後中和する方法を採用した。

上述のように溶液には高濃度の Ca が含まれており、フッ化水素酸を添加するとフッ化カルシウムと考

えられる白色の沈殿が生じた。pH を 1.0 にしてから 24 時間静置し、中和した後も沈殿は消えずに残っていた。上澄みを採取し、上澄み液中の TOC 濃度を測定した結果、TOC 濃度は 261mg/L となった。これは、フッ化水素酸添加前の濃度 (266mg/L) とよく一致しており、フッ化水素酸添加、中和の処理が溶存有機物にほとんど影響がないことを示している。

・硫酸イオンの除去

硫酸イオンの除去方法として、本検討では硫酸バリウムの溶液中での溶解度が低いことを利用する方法を採用した。つまり、溶液中にバリウムイオンを入れることで、硫酸バリウムイオンの沈殿を生成させ、溶液の硫酸イオン濃度を低下させるという方法である。予備的に直接バリウムイオンを添加する方法と、バリウム型にした陽イオン交換樹脂を接触させる方法を比較したが、直接バリウムイオンを添加の方が DOC 減少量が少なく、硫酸除去効果も高かった。このため、ここでは、フッ化水素酸処理後の有機物濃縮液に塩化バリウム溶液を添加し、生じた硫酸バリウムの沈殿を除去する手法を採用した。

有機物濃縮液 350mL に対して、1.0mol/L の塩化バリウム溶液 35mL を添加した。添加後、溶液は白濁し硫酸バリウムの沈殿が生じていることが示唆された。硫酸イオンを確実に除去するため、24 時間静置後上澄みを取得してさらにこの操作を繰り返した。バリウム添加前は 10570mg/L の硫酸イオン濃度があったが、1 回目の添加で硫酸イオン濃度は 877mg/L に、2 回目の添加で検出下限以下にまで低下した。(図 9.3.2-4)

一方、TOC 濃度は 260mg/L から 183mg/L にまで低下した。塩化バリウム溶液の添加による TOC 濃度の希釈を考えると、処理後の溶液中 TOC 濃度は 210mg/L 程度まで低下すると考えられるが、上記の 150mg/L はそれよりもさらに低い濃度である。このため、硫酸除去のプロセスにおいて溶存有機物の一部が硫酸バリウムとともに沈殿した可能性が高い。

・2 価陽イオンの除去

2 価の陽イオンは一般的に炭酸塩の溶解度が低いことが知られている。このため、溶液中の炭酸濃度を増加させることで 2 価イオンは炭酸塩として沈殿し、溶液から除去できる可能性がある。本検討では、有機物濃縮液に対してフッ化水素酸およびバリウム添加処理後の溶液に炭酸ガスをバブリングして溶液をアルカリ性にし、炭酸塩の沈殿を生成させて 2 価陽イオンを除去する方法を採用した。

試験手順を以下に示す。

①溶液のバブリング：硫酸イオン除去処理を実施した溶液 4000mL をビーカーに入れ、バブラーを用いて流速 500mL/min で炭酸ガスをバブリングした。このとき溶液の pH が 11~13 になるように、水酸化ナトリウム溶液を滴下した。

②バブリングの維持：バブリングを 30 分間維持する。二酸化炭素の溶解にともなって溶液の pH が低下

するため、適宜水酸化ナトリウム溶液を滴下し、pHを上記の範囲に維持する。

③固液の分離：1000回転×5分間の遠心分離をして固液を分離し、上澄み液を取得する。

④2価イオン濃度の評価：上澄み液を0.45 μ mのフィルタでろ過した後、ろ液を適切に希釈してIC (Ion Chromatography) でマグネシウム、カルシウム、バリウムの濃度を定量した。

⑤TOC濃度の評価：上澄み液を適切に希釈し、TOC計を用いてTOC濃度を評価した。

上記の試験の結果、2価イオン濃度が大きく低減していることを確認することができた。また、TOC濃度は183mg/Lであり硫酸イオン除去処理後のものと一致した、この結果からこの操作が有機物濃度に影響を与えないことが分かった。

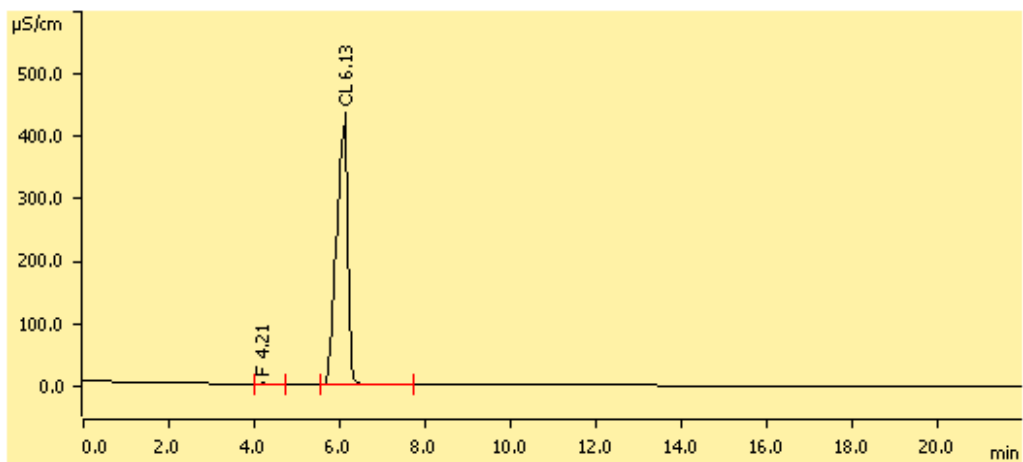
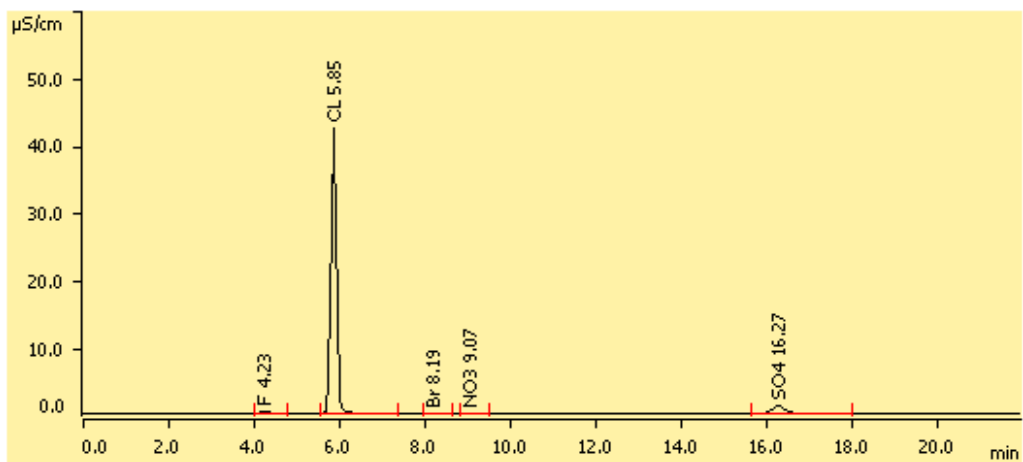
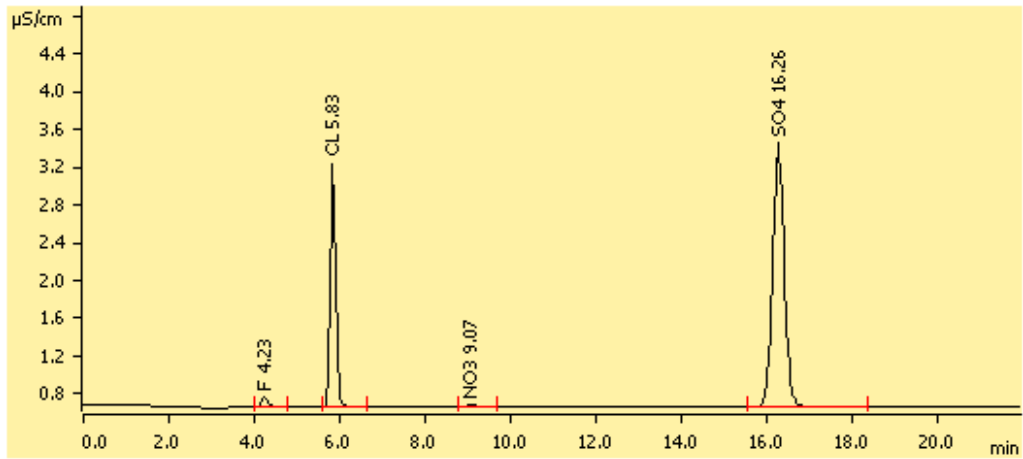


図 9.3.2-4 Ba 処理前後溶液の IC クロマトグラム の比較

上：処理前の溶液を 5000 倍に希釈したもの、中：1 回 Ba 処理した溶液を 1000 倍に希釈したもの、下：2 回処理した溶液を 100 倍に希釈したもの。

・透析における有機物の変化

上記の処理によって、有機物を濃縮した溶液は陽・陰イオンともに 2 価イオン濃度が減少し、塩化ナトリウムを主要成分とする溶液となった。凍結乾燥によって粉末状の有機物を得るには、さらに塩化ナトリウムの濃度を低減していく必要がある。ここでは、市販されている透析膜のうち最も孔径が小さい膜（分画分子量 100～500）を用いて溶液を透析し、透析の前後で有機物の特性がどのように変化するかを調べた。

試験手順を以下に示す。

①透析膜への封入：分画分子量 100～500 の筒状の膜の片方をクリップで閉じ、中に 10mL 程度の 2 価イオン除去処理後の溶液を入れた。もう片方の口をクリップで閉じ、溶液を膜内に封入した後、この膜を、純水を満たした 10L のビーカーに浸漬した。

②透析：1 回/1 日純水を交換しながら、膜を純水に浸漬し続けた。膜の外側の純水における電気伝導度が数 μ S/cm になったのを確認し、透析膜を純水から引き上げた。膜内から溶液を回収した。

上記の手順で透析を実施した結果、溶液中の TOC 濃度は 11.0mg/L にまで低下した。これは、濃縮した有機物のほとんどが分子量 500 以下の大きさであり透析によって純水中に流れ出したか、透析中に膜に吸着したものと考えられる。このように海水起源の地下水中の有機物を取得した場合、多くの成分が分子量の小さい成分であり、通常の透析では脱塩することが難しいことがわかった。海水起源地下水の有機物を含む溶液からの脱塩には、さらに検討が必要である。

各試験手順における TOC 濃度およびイオン濃度の変化を表 9.3.2-1 にまとめた (TOC の変化を図 9.3.2-5 に示した)。また、各処理段階で三次元蛍光スペクトルを取得し (図 9.3.2-6)、そのピーク強度の変化をまとめたものを図 9.3.2-7 に示した。当初の目的通り、有機物を濃縮した溶液における 2 価の陽イオン・陰イオン濃度を減少させ、塩化ナトリウムを主体とした溶液に変換することができた。しかしここから透析を実施することにより、ほとんどの有機物が流出してしまうことがわかった。今後、各処理段階でどのような有機物が失われており、その結果 ^{14}C がどのように変化するかを明らかにしていくことで、有機 ^{14}C 測定を目的とした最適な処理法を提案していく予定である。

表 9.3.2-1 処理前後の溶液中イオンおよび TOC 濃度の測定結果

試料名	濃度(mg/L)										
	TOC	Na	K	Mg	Ca	Ba	F	Cl	Br	NO ₃	SO ₄
濃縮液	270	2515	92.1	2315	1361	0.0	0.0	2631	13.9	3.98	13765
無機微粒子除去後	244	698	7.63	51.8	2.2	7.74	14.4	259	1.28	0.37	1289
硫酸イオン除去後	183	1220	4.13	0.0	0.0	6.71	8.05	1528	0.69	0.38	48.9
2価イオン除去後	183	1368	4.35	0.0	0.0	6.03	6.03	1544	0.68	0.41	49.1
透析後	11	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM

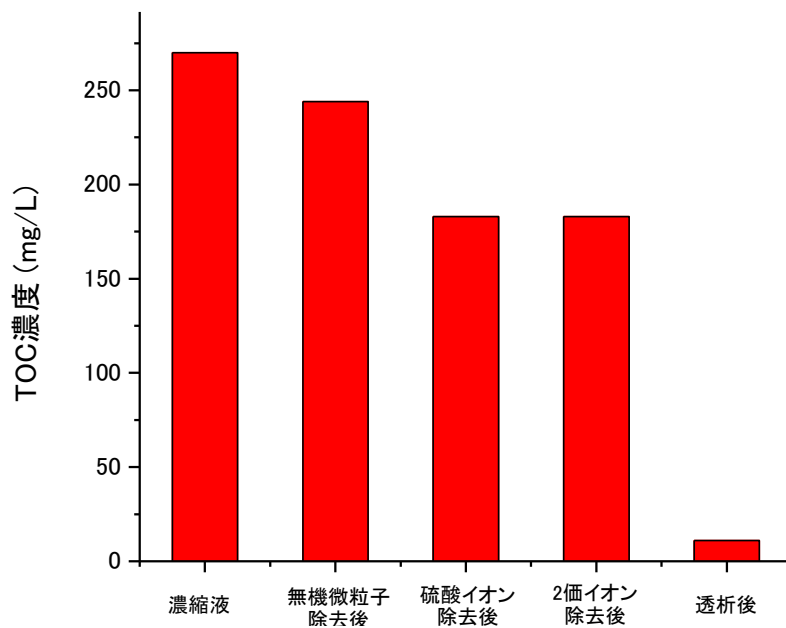


図 9. 3. 2-5 各処理後の TOC 濃度の比較

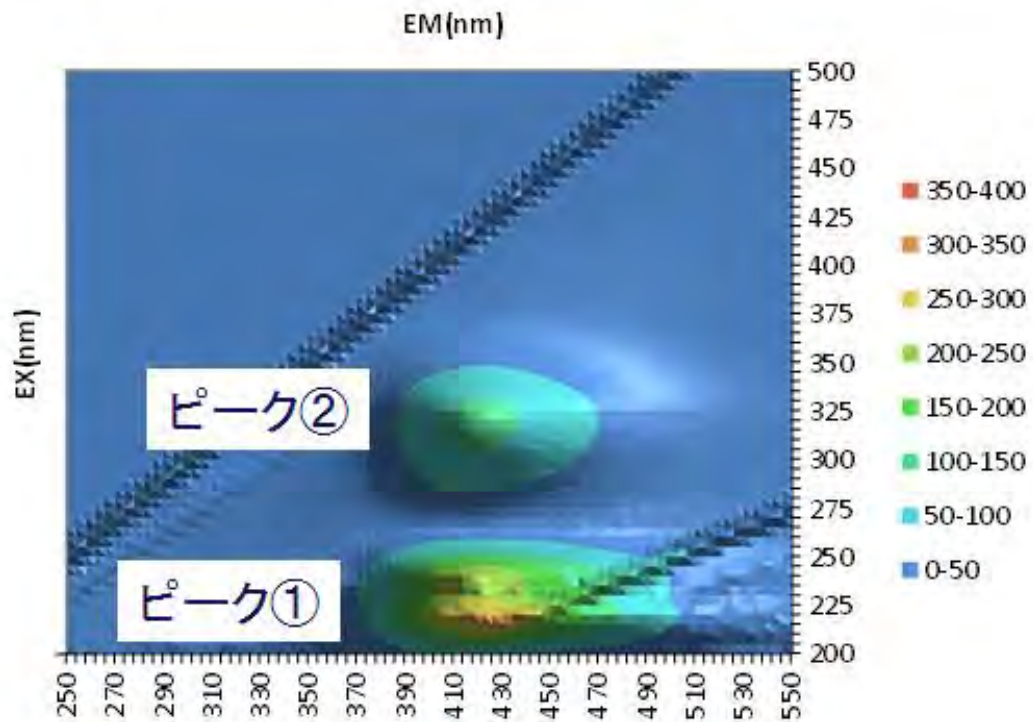


図 9. 3. 2-6 濃縮液の 3 次元蛍光スペクトル

励起波長 220nm、蛍光波長 418nm のピーク（ピーク 1）と、励起波長 320nm、蛍光波長 418nm のピーク（ピーク 2）が観察された。

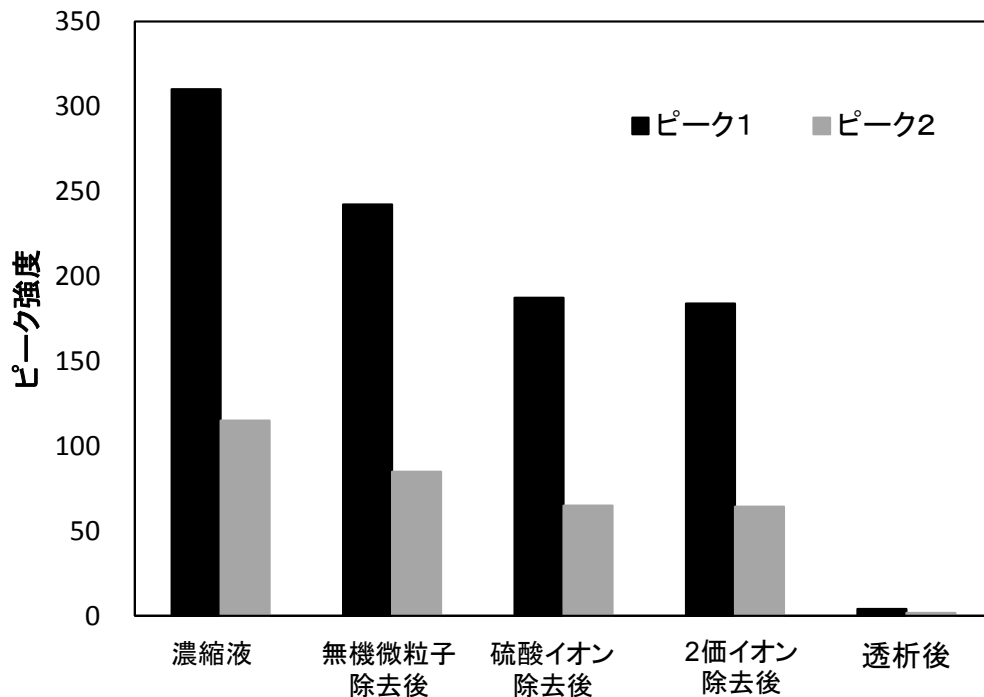


図 9.3.2-7 各処理後の蛍光ピーク強度の変化

3) 起源の異なる有機物分離の試み

今回試験に供した有機物は Cl 濃度 2300mg/L、TOC 濃度 1.83mg/L の地下水から濃縮されたものである。Cl 濃度 2300mg/L は海水における Cl 濃度 (19000mg/L 程度) と比べて有意に低く、TOC 濃度 1.83mg/L は海水における TOC 濃度 (概ね 1mg/L 程度) と比べてわずかに高い値を示している。このため、採取した場の地下水においては、地表由来の有機物と海水起源の有機物が混合している可能性がある。これらを分離し、それぞれについて有機 ^{14}C 年代を測定することができれば、海水起源の地下水に若い地表水が混入したことを示しかつ、それぞれの地下水の年代を推定することが可能である。

今年度はこの地下水中の有機物について、その特性によって分離することができるかについて予備的な検討を実施した。検討した手法は、①DAX-8 樹脂への吸着挙動の違いを利用した分離、②分子量の違いによる分離、である。

○DAX-8 樹脂への吸着挙動の違いを利用した分離方法の検討

DAX-8 樹脂は合成吸着樹脂の 1 種であり、フミン酸やフルボ酸の吸着・脱離挙動が明らかになっていることから、天然の有機物を回収するためによく用いられる (Thurman and Malcolm, 1981)。DAX-8 樹脂への有機物の吸着は疎水的な吸着であるため、低い pH で疎水性が親水性より顕著な有機物は樹脂へと捕捉され、親水性の高い有機物は DAX-8 に捕捉されない。このため、有機物の起源によって顕著に親水性・

疎水性が異なる場合には、これらを分離できる可能性がある。今年度は、DAX-8 樹脂に吸着する有機物と吸着しない有機物を分離して、それぞれの性質 (^{14}C を含む) を明らかにするための試験の予備的検討として、DAX-8 に吸着する成分・しない成分の量を把握するための試験を実施した。試験手順は以下のとおりである。

・DAX樹脂カラムの準備:内径1cmのアクリル製カラムにあらかじめ所定の手順(Thurman and Malcolm, 1981)で洗浄したDAX-8樹脂を高さ5cmになるように充填した。その後塩酸・水酸化ナトリウム・純水を流し、カラムおよび充填した樹脂を洗浄した。

・pHの調整:通常有機物はOH基やCOOH基を持ち、これらの官能基からHが乖離することによって水中に安定して存在することになる。低いpH領域では、これらの官能基からHが乖離しないため、有機物の疎水的性質が強まることになる。ここでは天然の有機物からDAX-8樹脂を用いて有機物を抽出する手順に従って(Thurman and Malcolm, 1981)溶液のpHを2.0に調整した。

・樹脂への吸着:上記で準備したカラムに、pHを調整した溶液を滴下した。そのとき、カラムから流出する溶液をビーカーに受けて採取した。

・吸着した有機物の回収:有機物の一部が吸着したカラムに1.0mol/Lの水酸化ナトリウム溶液を滴下し、カラムから流出する水酸化ナトリウム溶液をテフロン製のビーカーに採取した。

・含まれる有機物量の測定:pH2.0の溶液通液時にカラム下流から取得された溶液、水酸化ナトリウムをカラムに滴下して得られた溶液の2種類をそれぞれ、ホウ砂水溶液で希釈し(柏谷ら, 2009)3次元蛍光スペクトルを取得した。それぞれの溶液における蛍光ピーク強度を比較した。

溶液のpHを2.0としてDAX樹脂と接触させた場合、疎水性が比較的強い有機物はDAX樹脂に捕捉されるものと考えられる。このため、pH2.0とした溶液をカラムに滴下したときにカラムから流出する溶液には比較的疎水性の弱い(親水性の強い)有機物が多く含まれる。一方、DAX樹脂に吸着し、水酸化ナトリウム溶液で回収された溶液中に含まれる有機物は疎水性が比較的強いものである。それぞれの溶液における三次元蛍光スペクトルを図9.3.2-8および9に示した。

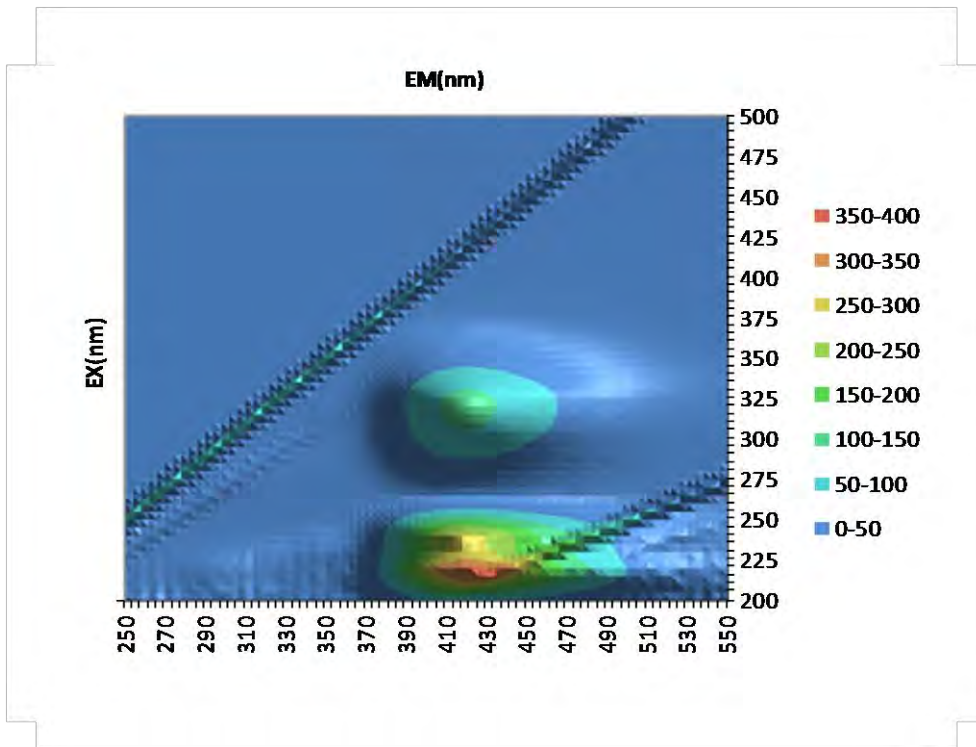


図 9.3.2-8 DAX 樹脂に吸着しなかった有機物成分の三次元蛍光スペクトル

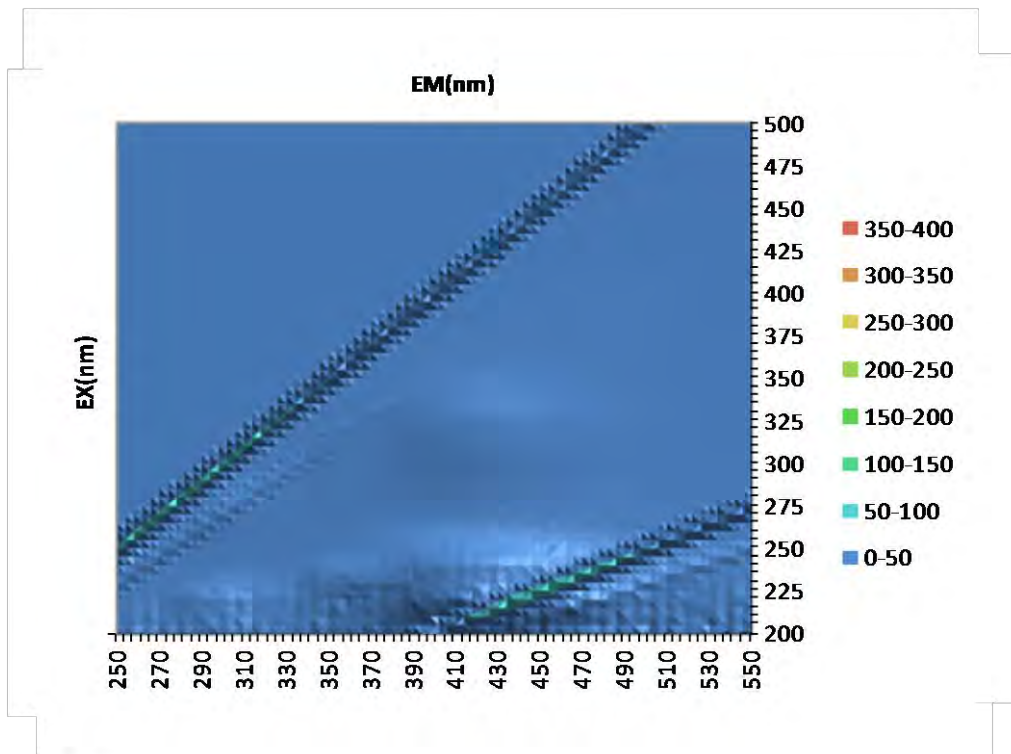


図 9.3.2-9 水酸化ナトリウム溶液で抽出された有機物成分の三次元蛍光スペクトル

図 9.3.2-9 におけるピークは明瞭ではないが、図 9.3.2-6 の DAX 樹脂と接触前の有機物と比較しても、ピークが現れる位置には大きな差異が認められない。ピークの高さは DAX 樹脂に吸着されなかった溶液で 566 であったのに対し、水酸化ナトリウムで回収した溶液では 255 程度であった。

○分子量の違いによる分離の検討

地下水中の有機物は地下中で分解等の反応により、大きさが変化する可能性がある。このため、滞留時間の異なる地下水に含まれる有機物あるいは、起源の異なる有機物においてはその分子量が大きく異なる可能性がある。今年度は対象溶液中有機物が大きさによって分離できる可能性について検討するため、サイズ排除クロマトグラフでの分離を試みた。

サイズ排除クロマトグラフに使用したカラムは、Shodex 社製「Asahipak GS-320 HQ」である（プルランでの排除限界 40000）。このカラムにおけるプルランによる校正曲線を図 9.3.2-10（Shodex 社ホームページより引用）に示した。前述の DAX 樹脂への吸着試験の結果から、対象とする有機物は低い pH で疎水性が相対的に強くなる有機物を含んでいることが示唆された。このため、測定はアルカリ性の溶液で実施するのが良いと考えられた。このため、ここではホウ砂溶液を用いてサンプルの pH を 9.0 に調整し、溶離液も 0.025mol/L のホウ砂水溶液にして測定を実施した。有機物の検出は 254nm の吸光強度を用いた。

サイズ排除クロマトの結果を図 9.3.2-11 に示した。クロマトグラフ中に観察されるピークは全てが 10 分以降のものであり、溶液に含まれる有機物の分子量が 1000 以下のものが主要な成分であることがわかる。サイズ排除クロマトグラフィにおけるピークは遅延時間 13 分のピーク、14 分のピーク、17 分のピークが主要なものである。一方図 9.3.2-12 には、透析後のサイズ排除クロマトグラフィにおけるクロマトグラムを示した。100-500 の分画分子量で透析をした結果、多くの有機物が失われており、13 分付近の有機物がわずかに検出された。

以上のことから、海水起源の地下水から採取された有機物の多くは 1000 以下の分子量であり、大きく大ききの異なる分子量の有機物は検出されなかった。しかし、上記の条件で実施したサイズ排除クロマトグラフィでは、大きく 3 つのピークが観察された。これらのピークについてそれぞれの有機物特性を明らかにし、起源の異なる有機物混入の可能性について検討していくことが今後の課題である。

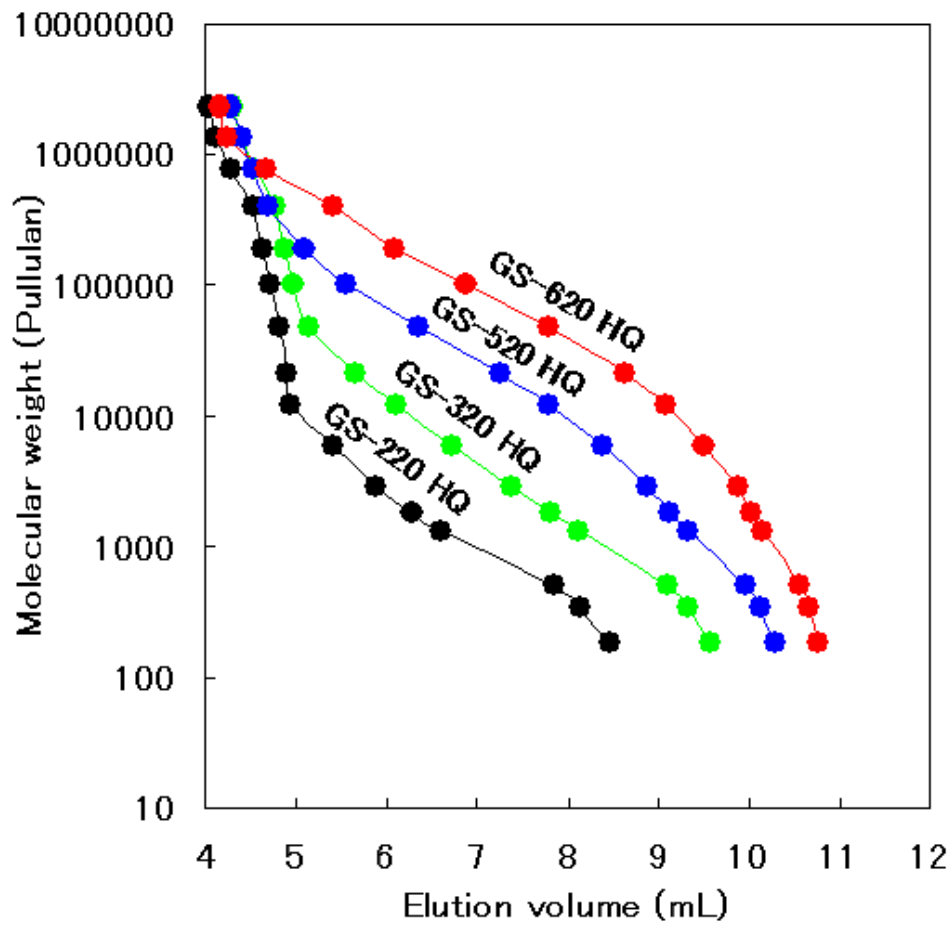


図 9.3.2-10 サイズ排除クロマトグラフィの校正曲線

Shodex ホームページからの引用。今回用いたカラムは図中の GS-320HQ である。ここではプルランというポリマーを用いて分子量を校正している。

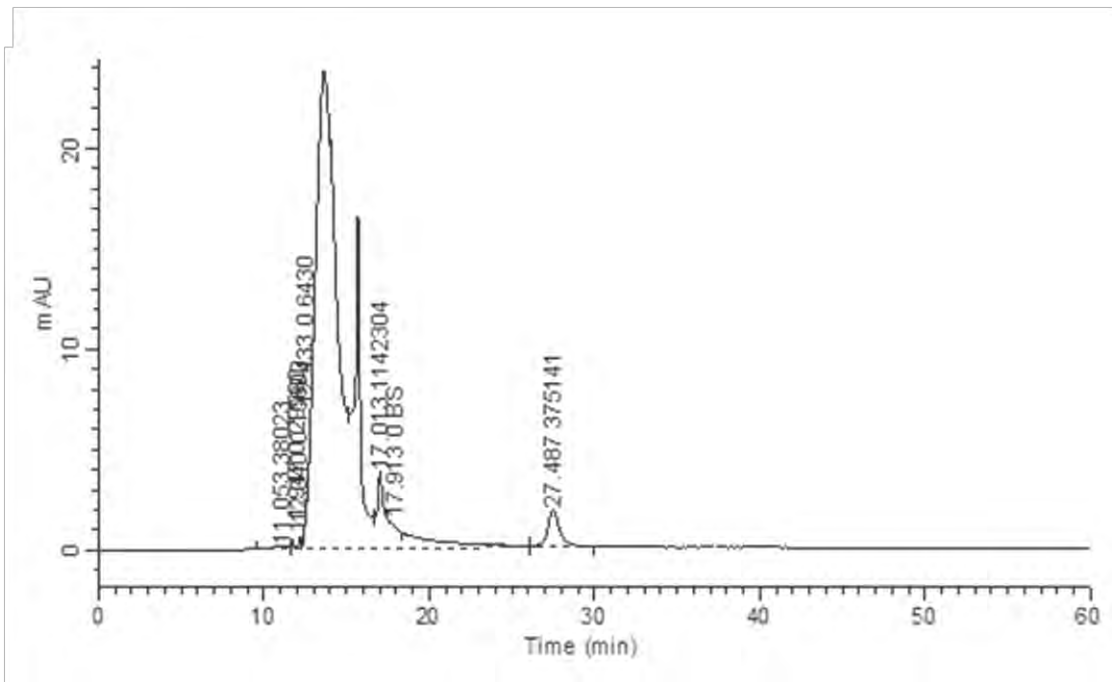


図 9.3.2-11 サイズ排除クロマトグラフィ測定結果（有機物濃縮液）

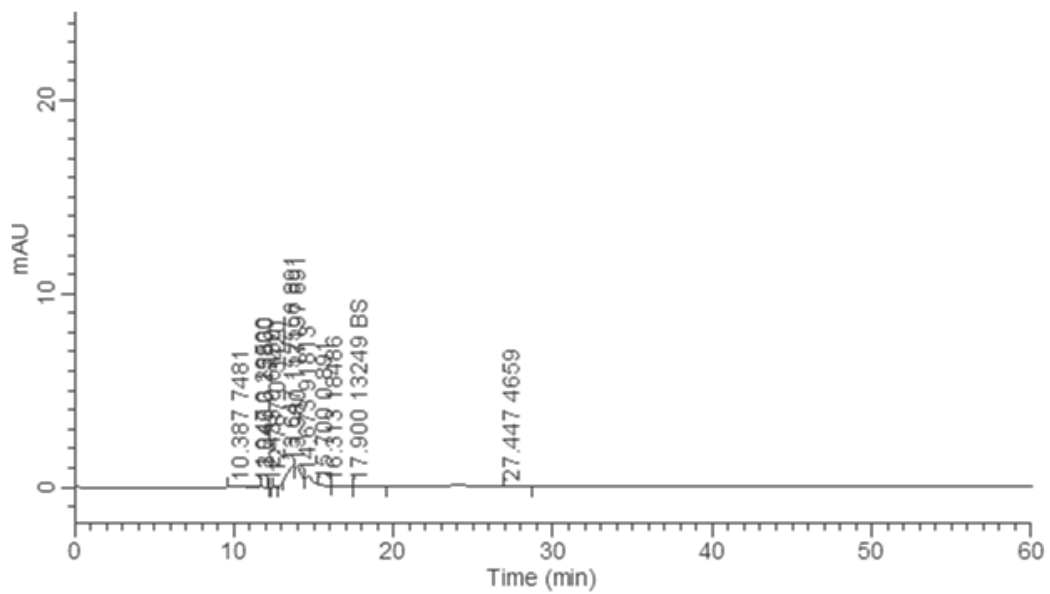


図 9.3.2-12 サイズ排除クロマトグラフィ測定結果（透析後）

(3) 無機 ^{14}C の地下水試料からの回収方法の検討

1) 検討の背景および目的

通常地表水や地下水から無機炭素を回収するには、溶液をアンモニア等でアルカリ性にした後、高濃度の塩化ストロンチウムを添加し、炭酸ストロンチウムとして回収する。しかし、①炭酸ストロンチウム沈殿ができにくい地下水が存在すること、②炭酸ストロンチウム沈殿とバブリング法（(1) 背景に記述）で作製したサンプルにおける ^{14}C の値が異なること、が種々のサイトに ^{14}C を適用する際の課題となっている。

本研究では、沈殿法とバブリング法のどちらがより正しい ^{14}C の値を示すことができるかを検討し、その方法を無機 ^{14}C の前処理方法として提案することを目的とした。今年度は瑞浪地域の地下水について溶存無機炭素を回収する方法を確立することを目的として、2L 程度の地下水から無機 ^{14}C を回収する方法について検討した。

2) バブリング法の最適化

バブリング法と沈殿法の比較対象とする試料は、現在のところ以下のように想定している。

①瑞浪超深地層研究所 研究坑道深度 400m のボーリング孔で取得した地下水

②海水を起源とする地下水（とくに炭酸ストロンチウムの沈殿ができにくかったもの）

③炭酸水素ナトリウム等を溶解させ、人工的に調製した試料

いずれの試料も濃度として 10mg/L 程度の無機炭素を含んでおり、1~2L を処理して溶存する二酸化炭素を回収することができれば、十分に ^{14}C を測定することが可能である。このため、ここでは処理する量を 2L として、バブリング法の試験条件を最適化することにした。

・試験方法

バブリング法の試験方法は以下の通りである。

① 試験溶液の準備：炭酸水素ナトリウムを純水に溶解させ、無機炭素濃度約 10mg/L の溶液を 2L 程度調製した。この溶液を試験手順検討のための試料とした。

② 試験容器の接続：反応容器（図 9.3.2-13）、水トラップ、二酸化炭素トラップをこの順番に接続した（図 9.3.2-14）。反応容器は試料を封入した後、リン酸溶液を添加して He をバブリングし、溶液から二酸化炭素を追い出すための容器である。水トラップは内部に細い銅管が 3 段になって入っており、 -10°C 程度に冷却することで反応容器で追い出したガスに含まれるガスに含まれる水蒸気を取り除くことができる。二酸化炭素トラップは U 字型の構造で内部に水トラップと同様細い銅管が封入されている。液体窒素で冷却することで二酸化炭素ガスをトラップすることが可能である。水トラップおよび二酸化炭素トラップは予め 110°C に加熱し、内部に付着した汚れやガスを除去した。

- ③ Heによるガス置換：反応容器、水トラップ、二酸化炭素トラップ内に存在する二酸化炭素ガスを完全に追い出すため、上記の系内に He を流し中のガスを He で置換した。He の流速を 500mL/min に調整し 30 分間ガスを流した後、全てのバルブを閉鎖した。
- ④ 反応容器への試料の導入：反応容器をポンプにつなぎ、容器内の圧力が大気圧に対して-0.06MPa になるまで排気した。その後反応容器と試料をチューブでつなぎ、負圧を駆動力として容器内に試料を導入した。負圧中に溶液が放出されることにより、脱ガスが進む効果も期待できる。容器内に試料が入ったら、圧力が大気圧になるように He でガス圧を調整した。試料をいれた容器ごとの重量を、試料導入前後で測定することにより、導入した試料量を定量した。
- ⑤ リン酸の添加：容器内にリン酸を 10mL 添加し、溶液の pH を下げた。予備的な試験により、この操作によって溶液の pH が 2 程度まで低下することを確認している。pH の低下によって溶存している二酸化炭素を追い出すことができる。
- ⑥ 二酸化炭素の回収（その①）：この時点で容器上部のヘッドスペースに存在する二酸化炭素ガスを回収するため、水トラップ、二酸化炭素トラップへのバルブを開け、30 分間静置した。
- ⑦ 二酸化炭素の回収（その②）：反応容器中の二酸化炭素ガスを完全に追い出して回収するため、反応容器に He を流速 100mL/min でバブリングした。二酸化炭素トラップ出口のバルブを開け、He ガスをフローさせながら二酸化炭素ガスを回収した。このとき 1 時間おきに反応容器から少量の水サンプルを取得し、無機炭素濃度を測定した。
- ⑧ 二酸化炭素トラップからアルカリトラップへの再回収：リン酸添加から 4 時間後、バブリングを止めて二酸化炭素トラップ前後のバルブを閉鎖した。その後二酸化炭素トラップとアルカリトラップ（0.5mol/L 水酸化ナトリウム溶液を封入した容器）2 個を接続し、ポンプでガスを循環させた。二酸化炭素トラップは加熱し、冷却されてトラップされたガスをトラップから完全に除去した。
- ⑨ 溶存二酸化炭素濃度の評価：アルカリトラップおよび試験中に採取したサンプルに含まれる二酸化炭素濃度を評価するため、試料の総無機炭素(TIC Total Inorganic Carbon)濃度を、TOC 計を用いて測定した。



図 9.3.2-13 二酸化炭素回収用反応容器

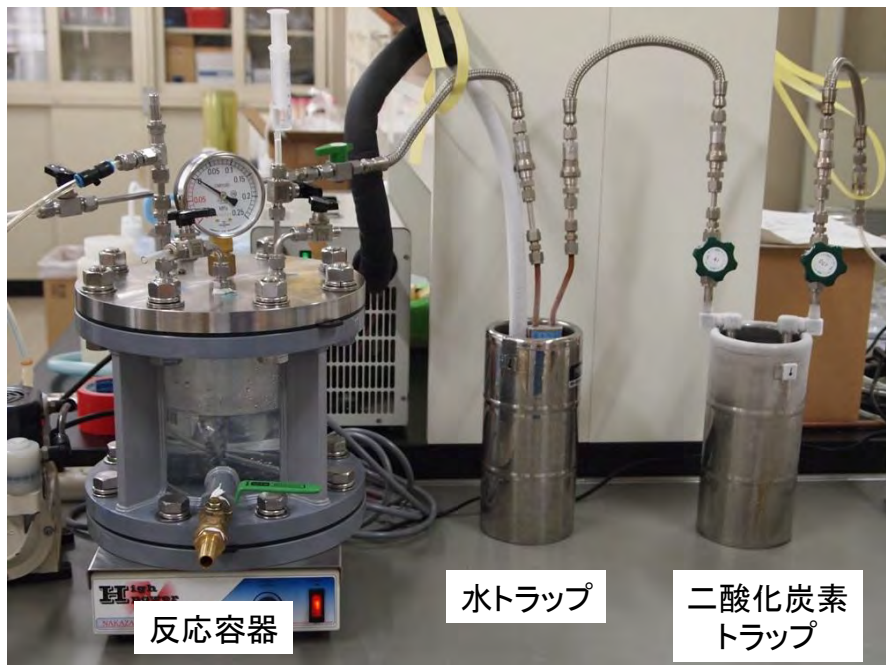


図 9.3.2-14 二酸化炭素回収試験の試験系

・試験結果

リン酸添加後の経過時間と反応容器内 TIC 濃度の関係を図 9.3.2-15 に示した。図からわかるように、リン酸添加後 30 分の攪拌および 3.5 時間の He バブリングによってほとんど全ての二酸化炭素を溶液から追い出すことができた。また、アルカリトラップにおける TIC 濃度を表 9.3.2-2 に示した。アルカリトラップにおける二酸化炭素の回収率はほぼ 100%に近く、この方法でほとんどの二酸化炭素を回収することができていることが分かった。

以上の結果から、上記の「試験方法」で示した手順により、2L の試料から二酸化炭素を回収することができることがわかった。

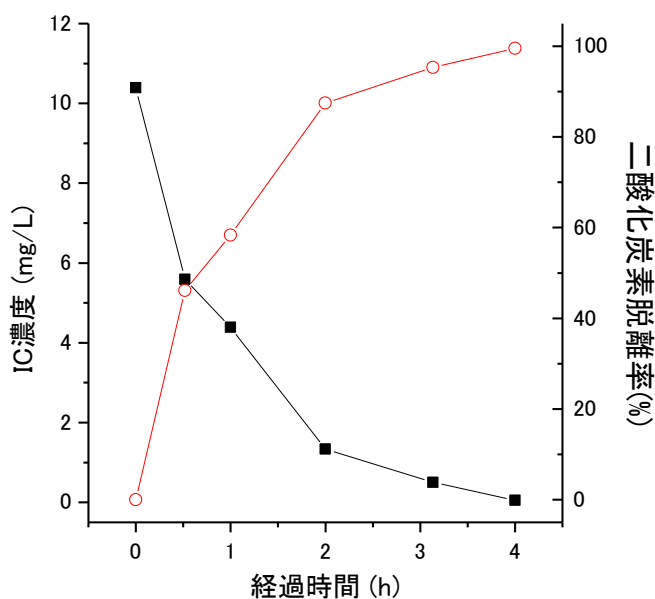


図 9.3.2-15 二酸化炭素回収試験における溶液中無機炭素濃度の経時変化

表 9.3.2-2 二酸化炭素回収試験における回収率まとめ

溶液	IC (mg/L)	BLK補正後 (mg/L)	溶液量 (mL)	C量 (mg)	C回収率 (%)
試験前NaHCO3溶液	10.39		1901.7	19.76	
試験後NaHCO3溶液	0.05		1805.7	0.09	
試験後アルカリトラップ-1	101.7	97.70	200	19.54	98.4
試験後アルカリトラップ-2	9.6	5.63	200	1.13	5.7
試験後アルカリトラップ-ブランク	4.00			回収率合計	104.1

アルカリトラップ分析値のばらつきから、4%は誤差の範囲であると推定される

3) まとめ

沈殿法とバブリング法のどちらがより正しい ^{14}C の値を示すことができるかを検討し、その方法を無機 ^{14}C の前処理方法として提案することを目的として検討を実施した。今年度はまず2Lの溶液から二酸化炭素を追い出し、回収する方法について検討した。密封した容器を真空引きして、そこに試料となる溶液を引き込み、リン酸を添加して攪拌することで、4時間程度で溶液中の二酸化炭素をほぼ100%追い出すことができることがわかった。また、追い出すことができた二酸化炭素のキャリアガスとしてHeガスを流速100mL/minで流したところ、液体窒素に浸漬した二酸化炭素トラップによって追い出した二酸化炭素ガスのほぼ100%を回収できることがわかった。

今後は今年度確立した上記の方法を、種々の溶液や実地下水サンプルへと適用し、炭酸ストロンチウムとして溶液中の二酸化炭素を回収する「沈殿法」で得られた ^{14}C の値との比較を実施していく予定である。

(4) $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ 放射平衡値の実験的予測方法の検討

1) 検討の背景および目的

ある岩体と接触している地下水の放射平衡値を知ることにより、 ^{36}Cl を用いた地下水年代を評価したり、他の岩体と接触している地下水の流入を評価することが可能になる。(1)の背景に記述したように、解析的な手法によって $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ の放射平衡値をオーダーで予測可能であるが、日本の環境でしばしば見られる「堆積岩の岩体に海水起源の地下水が接触しているケース」では、低い $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ の領域($\sim 10 \times 10^{-15}$)での評価が必要であり、精度が不足している。ここでは、実験的に放射平衡値を評価する方法の確立が可能かを評価することを目的として、検討を実施した。

^{36}Cl の半減期は約30万年であり、ある環境下で100年以上が経過するとほぼ放射平衡値に達すると考えて良い。このため、ある環境下で100年以上が経過したClを取り出して $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ を測定すればその場の放射平衡値を評価できる可能性がある。本研究では上記のような考えに基づいて、堆積岩の岩石コアからClを抽出し、その $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ を測定することにした。

岩石マトリクス部分に含まれるClは岩石堆積時から岩石と共存しているため、数百万年以上の堆積年代を持つ岩体から得られたコアの岩石であれば十分に放射平衡値に達していると考えられる。しかし、特に堆積岩は種々の成分の集合体であり、含まれる成分によって $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ の値が異なる可能性が考えられる。このため、本研究では岩石から逐次的にClを抽出し、それぞれの $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ を測定する。

堆積岩には外部と繋がって溶質の移流や拡散に関与する空隙と、堆積時に閉塞し外部と溶質のやりとりにくい「閉鎖空隙」が存在すると考えられる(図9.3.2-16: Evbuomwan, 2009)。閉鎖空隙に含まれるClは堆積時から同じ環境にあり、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ が十分に放射平衡値に達していることが期待できるうえ、岩石マトリクスから抽出したClに比べて溶液に存在しているという理由から地下水中のClに状態に近い。このため、ある岩体の閉鎖空隙からClを抽出して $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ を測定できればこの値はこの岩体と接触している地下

水の放射平衡値と近い値を示すと考えられる。

以上の考えから、本研究では岩石コアから逐次抽出した Cl および閉鎖空隙から抽出した Cl における $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ の値を比較し、実験的に $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ の放射平衡値を評価できる可能性について検討した。対象とした岩石は、①幌延地域 HDB-11 号孔から取得した岩石コア（幌延コア）、②オーストラリア大鑽井盆地リッチモンドのボーリングで取得した岩石コア（RM コア）の 2 つである。

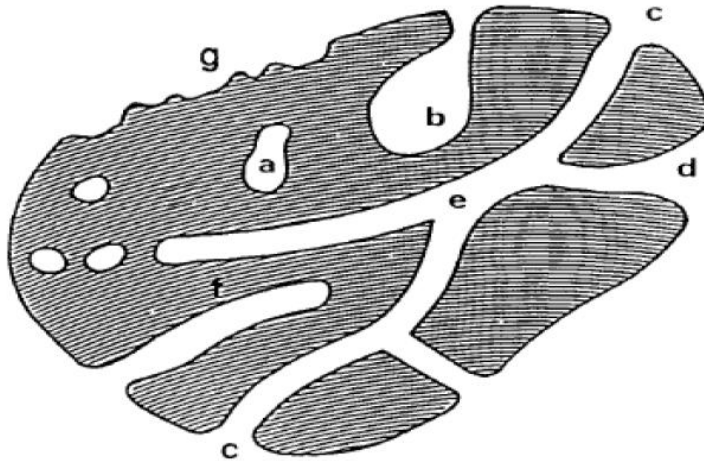


図 9.3.2-16 閉鎖空隙の概念図 (Evbuomwan, 2009)

(a)閉鎖空隙 (Closed pore) (b)~(f)開放空隙 (Opened pore) を形状によって分類

2) 岩石からの Cl の逐次抽出

本研究では堆積岩を①過酸化水素水、②硝酸、③フッ化水素酸をこの順番で接触させ、それぞれの溶液に抽出された Cl を集めて $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ 測定に供した。既往の知見から、これらの薬液を岩石に接触させた場合、以下のような成分を抽出可能であると考えられる。

ー過酸化水素水での抽出：岩石に含まれる有機物および易溶性の鉱物（pH を 2.0 に調整するため、酸性で溶解しやすい鉱物）に含まれる Cl を抽出しているものと考えられる。

ー硝酸での抽出：粘土鉱物・長石の一部・鉄およびマンガン鉱物を溶解させ、これらに含まれる Cl を抽出しているものと考えられる。

ーフッ化水素酸での抽出：長石・石英などのシリカ鉱物が溶出し、これらに含まれる Cl を抽出しているものと考えられる。

今年度は上記の逐次抽出法を幌延コアおよび RM コアに適用し、それぞれから Cl を抽出することを試

みた。

・小規模試験

各岩石の処理量を決定するために、まずは小規模（各 20g の岩石）での逐次抽出試験を実施した。試験手順以下に示す。

岩石試料の準備：岩石コアを粉碎して 2mm のメッシュを通過するようにした。粉碎後の試料は乾燥させないようポリエチレン製の袋に保管した。

間隙水影響の排除：幌延コア・RM コア共に海成の地層から取得されたものであり、岩石の間隙水には多くの Cl が含まれる。これらの Cl は岩石からの逐次抽出において汚染要因となるため、これを除去する必要がある。ここでは粉碎後のコアを硝酸ナトリウム溶液に浸漬し、溶液中に Cl が検出されなくなるまで、遠心分離と上澄み液の交換を繰り返した。岩石の易溶成分が溶解するのを少しでも防ぐため、硝酸ナトリウムは間隙水のイオン濃度と硝酸ナトリウムのイオン強度が等しくなるように添加している。

過酸化水素水による抽出：間隙水影響排除後の岩石に対して過酸化水素水溶液を添加し、発泡が収まったところでフタをして 110℃で加熱した。加熱後遠心分離器にかけて上澄み溶液を取得し、0.45 μm のフィルタでろ過した。ろ液を「過酸化水素水による抽出液」とした。

硝酸による抽出：過酸化水素水と接触後の岩石に対して硝酸溶液を添加し、110℃で加熱した。加熱後遠心分離器にかけて上澄み溶液を取得し、0.45 μm のフィルタでろ過した。ろ液を「硝酸による抽出液」とした。

フッ化水素酸による抽出：硝酸と接触後の岩石に対してフッ化水素酸溶液を添加し、110℃で加熱した。加熱後遠心分離器にかけて上澄み溶液を取得し、0.45 μm のフィルタでろ過した。ろ液を「フッ化水素酸による抽出液」とした。

Cl の濃縮と測定：特に硝酸やフッ化水素酸で処理した溶液は、酸性が強く装置への影響が懸念されたため、そのまま測定を実施することができなかった。ここでは、溶液中の Cl をいったん塩化銀として沈殿させ、アンモニアで溶解してから溶液中の Cl 濃度を評価した。

小規模試験の結果抽出することができた Cl の量およびそこから算出した Cl-2mg を抽出するために必要な岩石量を表 9.3.2-3 に示した。表からわかるように、リッチモンド岩石から過酸化水素水を用いて抽出される Cl の量は岩石 20g あたり 0.0048mg とごく少量であり、リッチモンド岩石から過酸化水素水を用いて Cl を抽出することは現実的ではないことがわかった。他の岩石については、500g 以上程度の岩石を処理することで 2mg 以上の Cl を抽出することが可能である。ここでは、各岩石について 1000g 強の岩石を処理し、Cl を抽出することとした。

・実規模試験

実規模試験では上記の結果を受けて、岩石処理量を 1200g まで増やして試験を実施した。各溶液で Cl を抽出するプロセスは上記の小規模試験と同様である。得られた溶液から、以下の手順で Cl を濃縮・精

製した。

塩化銀沈殿の調製:各抽出で得られた溶液 40mL を容量 50mL の遠沈管に入れ、60%硝酸を 2mL、0.3mol/L 硝酸銀溶液 2mL を添加した。軽くハンドシェイクした後、48 時間以上静置し溶液中の Cl を塩化銀として沈殿させた。

固液分離と沈殿の溶解:上記の遠沈管を 3500 回転×30 分で遠心分離器にかけ、沈殿を容器底部に集めた。沈殿を吸わないように注意して上澄み液を除去した後、3.0mol/L アンモニア溶液を 2.0mL 加え、容器底部や容器壁に付着した塩化銀沈殿を溶解させた。

溶液の回収と再沈殿:上記の溶液を 1 つの遠沈管に集めた。集めた溶液に、白色の塩化銀沈殿の生成が確認されるまで硝酸を添加した。

沈殿のリンス:上記の遠沈管をさらに遠心分離器にかけ (3500 回転×30 分) 上澄み液を除去したあと、純水を加えて沈殿をリンスし、さらに遠心分離器にかけたあと上澄み液を除去する操作を繰り返した。純水でのリンスは合計 2 度実施した。

上記のような手順で得られた沈殿は着色している場合が多く、塩化銀以外の不純物が混入している可能性が高いと判断された。このため、以下の手順で「カラム法」(Nakata and Hasegawa, 2011) を適用し、塩化銀沈殿を精製した。

カラムの準備:陰イオン交換樹脂 Dowex1×8 をよく洗浄し、硝酸型にした後、内径 1cm、高さ 30cm のカラムに 15cm 充填した。使用する前に、ポンプで純水を滴下して樹脂およびカラムを洗浄した。(カラム試験に用いた試験系を図 9.3.2-18 に示した。)

塩化銀沈殿の溶解:上記で得られた塩化銀の沈殿に 3.0mol/L アンモニア溶液を入れ、沈殿を溶解させた。このとき一部の溶液では沈殿が生じたが、そのまま次のステップへと進めた。

カラムへの添加:塩化銀の沈殿をアンモニア溶液で溶解させたものをカラム上部に滴下した。カラム下部のバルブを操作して樹脂面と液面が一致するまで溶液を滴下させた後、純水 2mL を加えてカラム上部をリンスし、再度バルブを操作して樹脂面と液面が一致するようにした。純水でのリンスを 2 回繰り返した。

硝酸の滴下:流速 2.0mL/min で 1500mg/L の硝酸を滴下した。このときカラム下流から流出する溶液を、0-50、50-100、100-150、150-350、350-400、400-450、450-500mL の各フラクションに分けて採取した。

濃度測定と塩化銀沈殿の生成:上記の各フラクションの一部を適切に希釈した後、イオンクロマトグラフィ (IC) を用いて Cl 濃度を定量した。有意な Cl 量が入っているフラクションに対して、硝酸および硝酸銀を加え、塩化銀の沈殿を調製した。

表 9.3.2-3 二酸化炭素回収試験における回収率まとめ

岩石	抽出液	W-Cl (mg)	W-rock (g)
リッチモンド	過酸化水素	0.005	8351
	硝酸	0.111	360
	フッ化水素酸	0.082	486
幌延	過酸化水素	0.195	205
	硝酸	0.703	57
	フッ化水素酸	0.737	54

W-Cl : 岩石 20g から抽出できた Cl の量(mg)

W-rock : Cl=2mg を抽出するために必要な岩石量 (g)



図 9.3.2-17 カラム試験の実験系の外観

上記の操作によって、リッチモンドの岩石に対しては硝酸およびフッ化水素酸で抽出した溶液から、幌延岩石にたいしては、過酸化水素水、硝酸およびフッ化水素酸で抽出した溶液から塩化銀の沈殿を得ることができた。結果の一例として、リッチモンド岩石からフッ化水素酸で Cl を抽出した溶液のカラム処理の結果を表 9.3.2-4 に示した。表からわかるように、Cl のほとんどは 150-400mL のフラクションに存在しており、またこの間 IC で硫酸イオンのピークは観察されなかった。硫酸イオンに含まれる S は ^{36}S という同位体を含んでおり、これが ^{36}Cl の同重体であるため、 ^{36}Cl の正確な測定を阻害する要因となる。カ

ラム法で処理した溶液は硫酸イオンを含まないため、より正確な³⁶Clの測定が期待できるサンプルである。

表 9.3.2-4 カラム処理結果の一例（リッチモンドフッ化水素酸処理）

フラクション	溶液量 (mL)	Cl濃度 (mg/L)	溶液中の Cl量(mg)	沈殿作製
0-50	48.2	0.0	0.0	-
50-100	48.9	0.0	0.0	-
100-150	48.5	0.8	0.0	-
150-350	202.2	12.3	2.5	○
350-400	52.5	3.8	0.2	○
400-450	51.3	0.4	0.0	-
450-500	52.6	0.3	0.0	-

3) 閉鎖空隙からの Cl の逐次抽出

2 種類の岩石から閉鎖空隙に含まれる Cl を抽出するため、以下の操作を実施した。

岩石の整形：上述のリッチモンドおよび幌延の岩石コアを長さ 14cm 程度にカットした。

閉鎖空隙以外の空隙からの Cl 除去：閉鎖空隙以外の空隙から Cl を除去するため、コアを硝酸ナトリウムの溶液に浸漬し拡散によって Cl を浸漬した溶液へと抽出した。浸漬に用いた硝酸ナトリウム溶液は、間隙水のイオン強度と同じになるように濃度を調整しており、浸漬時のコアのスレーキングを防ぐために用いた。7 日間の浸漬と上澄みの交換を合計 12 回繰り返し、濃度が顕著に低下しないことを確認してこの操作を終了した。図 9.3.2-18 には幌延岩石における浸漬回数と Cl 濃度の変化を図示した。

岩石コアの乾燥と粉砕：閉鎖空隙以外の空隙から Cl を除去した後のコアを 60°C で 1 週間程度恒温炉に入れ、乾燥させた。乾燥した後のコアを閉鎖空隙の構造が壊れるようにボールミルで細かく粉砕した。

Cl の抽出：上記のように粉砕したコアに純水を加えて振盪し、純水中に Cl イオンを抽出した。48 時間後、純水と粉砕後のコアが入った容器を遠心分離器にかけ（4000 回転×60 分）、固液を分離した後さらに上澄み液を 0.45 μm のフィルタでろ過した。ろ過した溶液中の Cl 濃度を IC で測定した。

塩化銀沈殿の作製と精製：上記の溶液に硝酸と硝酸銀を加えて塩化銀の沈殿を生成させた後、塩化銀の沈殿をアンモニア溶液で溶解させ、「カラム法」を用いて精製した。

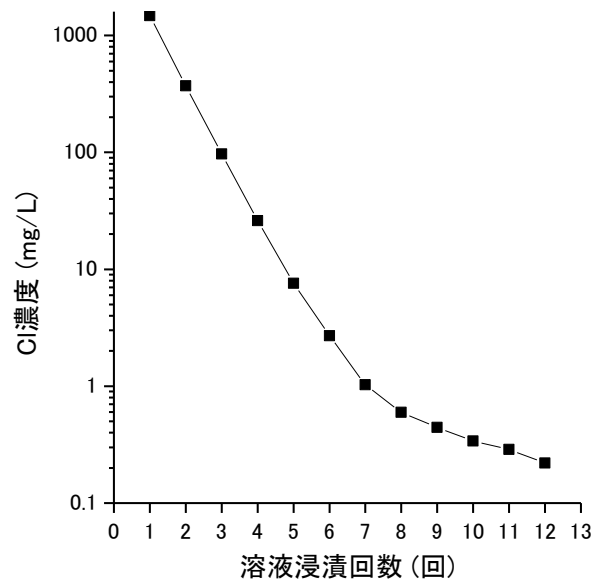


図 9. 3. 2-18 浸漬回数と溶液中 Cl 濃度の関係

図 9.3.2-19 には幌延岩石における閉鎖空隙以外の空隙からの Cl 除去操作とその後粉碎・純水への浸漬で得られた Cl の量を比較した結果を図示した。図から分かるように、粉碎・純水への浸漬で得られた Cl の量は、コア状態で浸漬した 12 回目の浸漬時に得られた Cl 量よりも大きな値を示し、閉鎖した空隙からも Cl を抽出できた可能性が高いと考えられた。

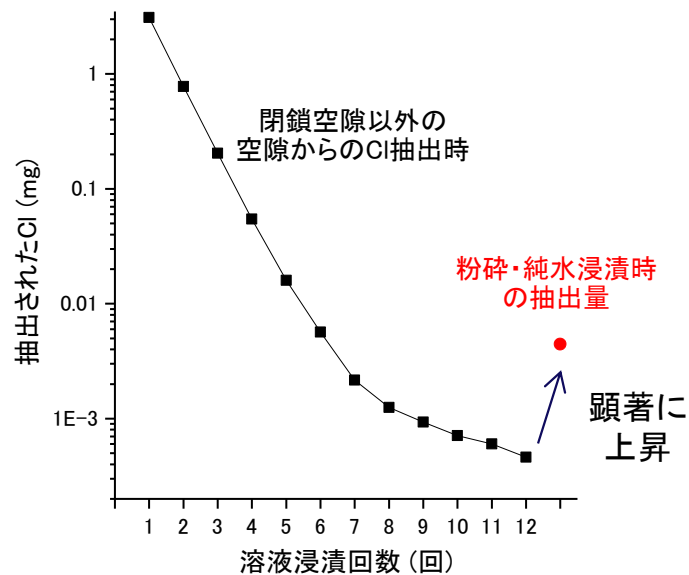


図 9. 3. 2-19 閉鎖空隙とそれ以外の空隙から抽出した Cl 量の比較

(5) 海水/化石海水存在地点における $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ の把握

1) 検討の背景および目的

海に囲まれた日本において沿岸域に処分サイトを選定した場合、処分場の建設によって古い海水（化石海水）に新しい海水が混入する可能性があると考えられる。このため、古い海水と新しい海水が混合していることを評価したり、それらの混合割合を評価するための指標を確立することは、精密調査において重要であると考えられる。ここでは、ストロンチウム（Sr）の安定同位体の比率である $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ に着目し、これが海水と化石海水の指標となりうる可能性について検討した。

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ および Sr は(1)岩石中に含まれることが多く、岩石-地下水相互作用の結果地下水中にも有意な量が存在することが多いこと、(2) ^{87}Rb が放射壊変して ^{87}Sr となるため、地下水が接触する岩石の種類によって $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ が異なっていること、(3)ある程度原子量が大きいため、様々な反応において同位体分別がほとんど起きないと考えて良い、という特徴のため、地下水調査で幅広く用いられている（McNutt, 1999）。上記のような理由から長い時間岩石と接触した地下水における $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ と海水における $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ は異なっている可能性がある。また、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ は温泉への海水の混入評価に用いられた例もあり（由佐ら, 2004）海水と地下水の区別に利用できる可能性が高いと考えられる。

本研究では、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ が海水と化石海水の混合・混入指標として利用できる可能性を検討することを $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 検討における目的とした。今年度は海水起源の地下水と地下水が接触する岩石における $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ を把握することを目標とし、①海水起源の地下水と接触する岩石における $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ を把握するために岩石から逐次的に Sr を抽出し精製すること、②逐次抽出に用いる塩酸の溶液から Sr を抽出・精製できる方法を確認すること、を実施した。

2) 塩酸溶液からの Sr の抽出方法検討

後述のように、地下水と Sr の相互作用が認められる岩石中の鉱物等を特定するために、岩石から種々の薬液を用いて Sr を抽出する「逐次抽出試験」を実施した。逐次抽出試験では、岩石粉末に対して、模擬地下水、酢酸 6.0mol/L 塩酸を逐次的に接触させた。岩石と接触後の塩酸は黄色を呈し、種々のイオンを含んでいることが示唆された。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ を正確に定量するためには、この溶液から Sr を可能な限り単離することが必要である。

昨年度までに実施した地下水年代の評価法開発においては、蒸発乾固させた塩酸溶液に硝酸を加えた後、Sr Spec 樹脂(Eichrom 社)を充填したカラムに通じて Sr を回収しようと試みたが、種々のイオン濃度が高く、コロイド等が共存するためか、溶液通液中にカラムが目詰まりし溶液を十分量流すことができなくなった。このため、ビーカーに入れた溶液と樹脂を直接接触させる「バッチ法」を採用したが、溶液からの Sr の回収率は数%に留まった。

以上のことから、岩石に対して逐次抽出を適用し、地下水と相互作用している Sr についての情報を得

るには、逐次抽出に用いた塩酸溶液からある程度の高い回収率で Sr を抽出・精製する方法が必要とされる。今年度はこの方法について検討するため、2 種類の方法を適用した。適用した方法は、①陽イオン交換樹脂を用いる方法、②Sr Spec 樹脂を用いる方法、である。

・陽イオン交換樹脂を用いる方法

①の陽イオン交換樹脂を用いる方法は、Takahashi et al., (2009)によって報告された方法を採用し、岩石を塩酸で溶解した溶液を 2 段階で精製する。1 段階目は陽イオン交換樹脂を用いて溶液のマトリクスや REE などを除去する。2 段階目はさらに Sr Spec 樹脂を用いて Sr のみを単離する。上記の報告では、岩石を蒸発乾固した固形物に 2.5M 塩酸 1mL を滴下して溶解させた後、1mL の陽イオン交換樹脂 (AG50W-X8) に吸着させ、ここに 2.5M 塩酸 3mL を滴下して主要マトリクスを除去し、さらに 2.5M 塩酸を 5.5mL 滴下して Sr を回収する方法である。本検討ではこれを 5 倍にスケールアップし、5mL の樹脂を用いて 5mL の溶液を処理する試験を実施した。試験方法を以下に示す。

模擬溶液の準備：岩石と接触後の Sr を含む溶液を模擬するため、以下の 2 種類の溶液を調製した。一つは 2.5mol/L 塩酸に 100 μg/L となるように Sr を添加した溶液 (溶液①)、もう一つは実際に岩石と塩酸を直接接触させて得られた溶液 (溶液②) である。

溶液の蒸発乾固：上記の溶液①・②をそれぞれ 100mL テフロン製ビーカーにはかりとり、90℃で蒸発乾固させた。蒸発乾固後の固体に 2.5mol/L 塩酸を 1.0mL ずつ添加し、目視で固体が完全に溶解するまで滴下した。溶液①では 2mL、溶液②では 10mL で固体がほぼ溶解したことが確認された。

陽イオン交換樹脂と溶液の接触：洗浄した AG50W-X8 樹脂をシリンジを用いて作製した簡易カラムに 5mL 充填し、上記の塩酸溶液 2mL(溶液①)あるいは 5mL (溶液②) を 1mL ずつ滴下した。このときカラムから流出する溶液を回収した。

マトリクスの除去：溶液を流した後のカラムに 3mL ずつ 5 回 (合計 15mL) の 2.5mol/L 塩酸溶液を滴下し、カラム下流から流出する溶液を回収した。

Sr の回収：さらに 2.5mol/L の塩酸溶液 5.5mL を合計 5 回カラムに滴下し、それぞれの溶液をサンプルとして取得した。

Sr の定量：上記の溶液をそれぞれ適切に希釈し、Sr 濃度を ICP-MS を用いて定量した。

蒸発乾固後の溶液を滴下中のカラム流下液から検出された Sr 濃度は溶液①で 2.7 μg/L、溶液②で 23 μg/L であり、蒸発乾固の操作を実施する前の溶液から算出した、それぞれ添加した溶液に含まれる Sr 量の 0.1%となった。このため、蒸発乾固後の溶液を樹脂に滴下することで、溶液に含まれる Sr のうちのほとんどが樹脂に吸着していることがわかった。

さらに塩酸を滴下した場合に回収される Sr 量の、添加した Sr に対する割合を図 9.3.2-20 および 21 に示した。図から分かるように、溶液①ではマトリクス除去の段階で溶出した Sr の割合は少なく、最終的な回収率は 80%近くに達している。一方、模擬溶液を用いた場合では、マトリクス除去処理の段階ですで

に Sr が溶出しており、回収率も低い値に留まった。溶液の色はマトリクス除去処理の段階で黄色になったが、Sr 回収時には無色透明に変化した。このことから、マトリクス除去処理段階で Sr をはじめとする種々のイオンが樹脂から溶出していることがわかる。この結果から、上記の方法はバックグラウンドとなるマトリクス成分が薄い場合には極めて有効であるが、マトリクス成分が濃い場合にはマトリクスと Sr 成分が同時に溶出するため、樹脂の量や処理する溶液の量などを再度調整した上で適用することが必要とされることが考えられる。

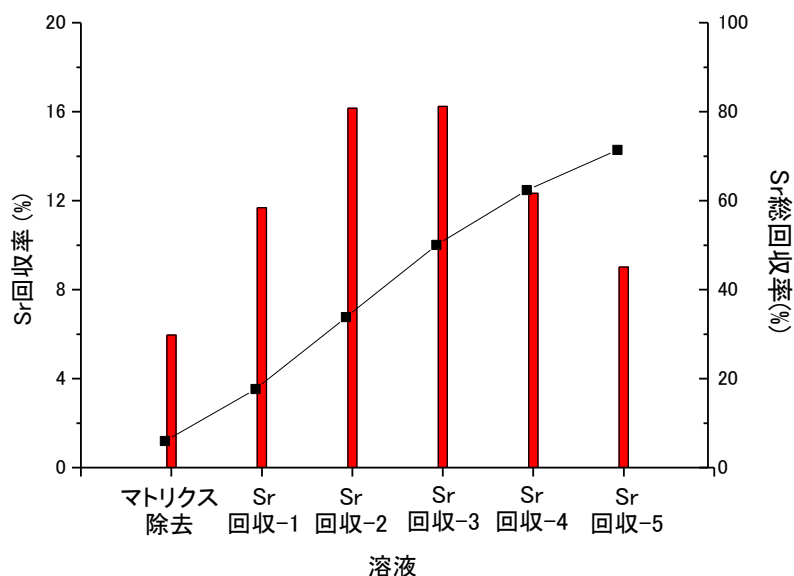


図 9.3.2-20 塩酸滴下時のカラム流下液中 Sr 量 (溶液①)

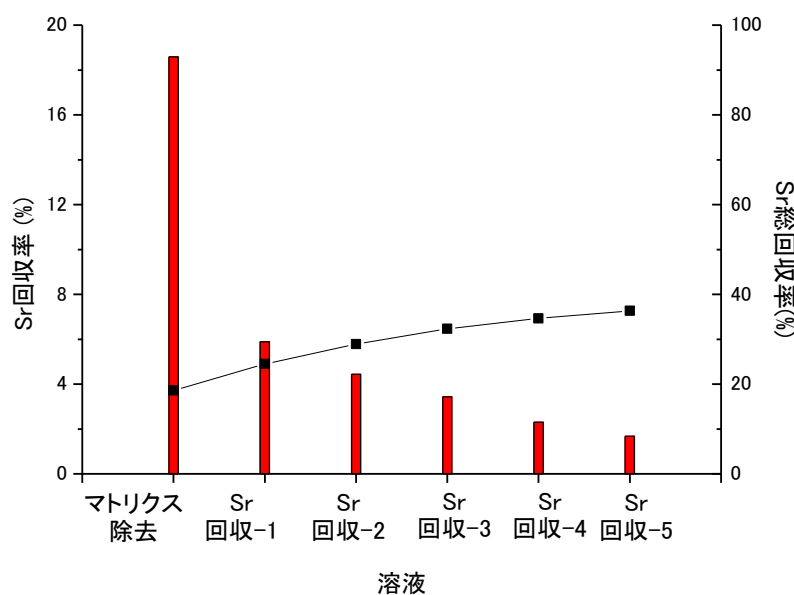


図 9.3.2-21 塩酸滴下時のカラム流下液中 Sr 量 (溶液②)

・ Sr Spec 換樹脂を用いる方法

Sr Spec 樹脂は Eichrom 社から発売されている製品で、高濃度の硝酸溶液中で Sr に対する選択性が高いという特性を持っている (Horwiz et al., 1992-a, b : 図 9.3.2-22)。このため、今回対象としている岩石と塩酸が接触した後の溶液においても、Sr を単離するのに有用であると考えられる。前述のように、地下水年代の評価法開発においては、蒸発乾固し 6.5M 硝酸溶液で乾固物を溶かした溶液にこの樹脂を適用したが、カラムに充填する方法ではカラムが閉塞し、バッチ法では回収率が低い値に留まった。これは、蒸発乾固によって一部不溶性の微粒子が形成されたことと、バッチ法では樹脂が十分に効果を発揮できなかったためであると考えられる。

このため、今年度は一度蒸発乾固を経ることなく、塩酸溶液と硝酸を直接混合して比較的多量の溶液を処理した場合に、回収率等がどのように変化するかを検討した。検討のための試験手順は以下の通りである。

溶液の準備：後述のように、模擬地下水-酢酸を用いてそれぞれ Sr を逐次抽出した岩石に、6.0mol/L 塩酸を接触させ、0.2 μm のフィルタでろ過したろ液をサンプルとした。サンプル溶液 100mL に対して 13M 硝酸を 100mL 添加し、サンプルを 6.5M の硝酸溶液とした。この時点で一部の溶液を取り分け、Sr 濃度およびその他のイオン濃度を分析した。

樹脂とカラムの準備：購入した Sr 樹脂は温水で 10 回程度繰り返し洗浄した。テフロンホースと 0.45 μm のフィルタを用いた簡易カラムを組み立て、ここに 2mL の洗浄済み樹脂を充填した。

樹脂のコンディショニング：充填後の樹脂を再度洗浄するため、10mL の純水をカラム上部から流す操作を 3 回繰り返した。その後 6.5M 硝酸 10mL を 3 回カラム上部から流した。

溶液の滴下：6.5M としたサンプル 200mL を 10 回に分けてカラム上部から滴下させた。このときカラム下部から流出する溶液を取得し、Sr 濃度を測定した。

他元素の排除：3.5MHNO₃+0.005mol/L(0.01M)シュウ酸溶液を調製し、1.0mL ずつ 3 回カラムに滴下させた。このときカラム下部から流出する溶液は捨てた。その後、この溶液 6.0mL を 5 回カラムに流し、このときの溶液をサンプルとして取得した。

Sr の回収：0.05mol/L 硝酸溶液 5mL を 6 回に分けてカラムに滴下し、このときカラム下部から流出する溶液を 6 回に分けて採取した。溶液に含まれる Sr 濃度や他イオン濃度を測定した。

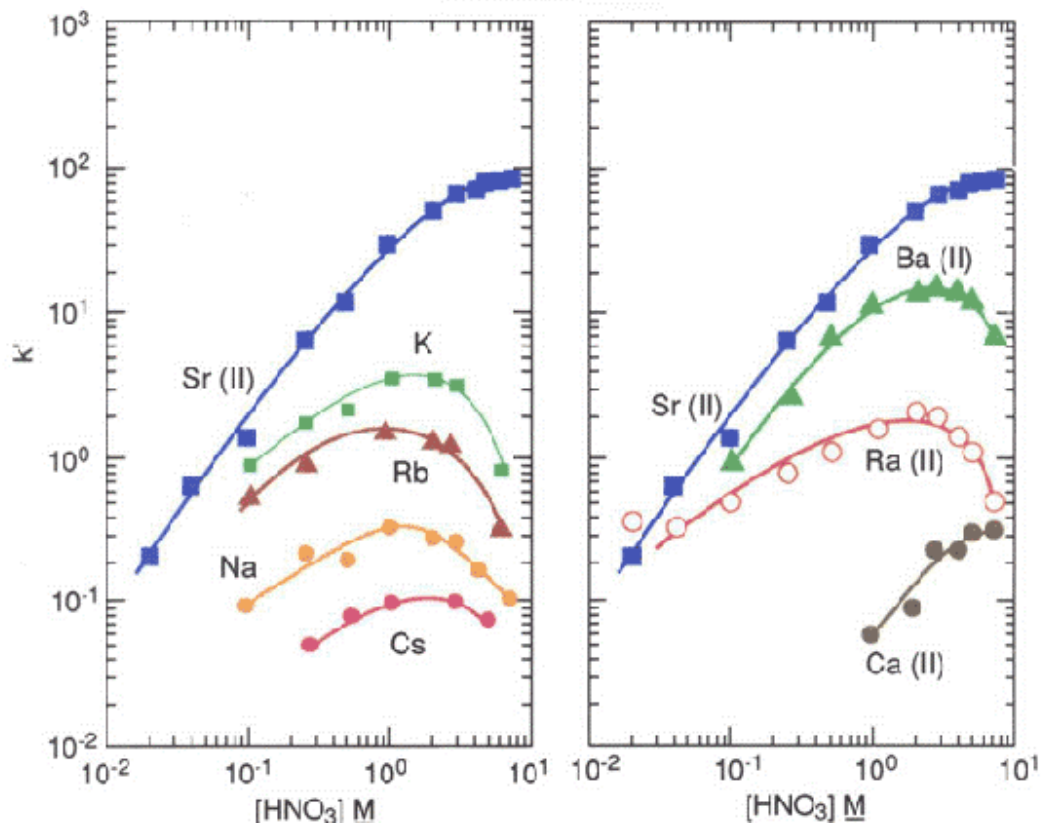


図 9.3.2-22 Sr Resin における硝酸濃度と選択係数の関係 (Horwitz et al., 1992-a, b)

左：I 価の陽イオンに対する選択係数、右：II 価の陽イオンに対する選択係数である。硝酸濃度が 6.0M を超えると、他元素に対する Sr の選択性が顕著となる。

カラム通過前の 6.5M 硝酸溶液としたサンプル溶液中の Sr 濃度は、0.30(mg/L)であった。これに対し、カラムを通過した溶液における Sr 濃度は 0.19(mg/L)であった。このため、約 37%の Sr が樹脂に吸着されたことになる。さらに、0.05mol/L の硝酸溶液で取得された Sr 量の、吸着した Sr 量に対する割合を表 9.3.2-5 にまとめた。表からわかるように、Sr は溶液 1~3 に集中して存在しており、これらの溶液 15mL を回収すると吸着した Sr に対する Sr の回収率は 55%程度になることが分かった。

もともとの溶液の色は濃い黄色であったが、Sr 回収の段階では溶液はほぼ無色透明となっていた。バックグラウンドの低減効果を確認するため、岩石から生じると考えられる主要なイオンの濃度をカラム通過前の溶液と Sr 回収液で比較した結果を表 9.3.2-6 に示した。表から分かるように、主要なイオンの濃度は上記の処理によって著しく低下しており、この方法がマトリクス低減に有用であることが確認できた。

Sr 樹脂を用いる方法では Sr の回収率が 20%程度であり、蒸発乾固物を硝酸で溶解させて得られた溶液からバッチ法で Sr を回収する方法と比較して回収率が顕著に上昇した。また、この方法で溶液中のその

他のイオン濃度を大きく低減させることができることが分かった。使用する樹脂の量と溶液量を変えて試験を繰り返すことにより、さらに回収率を上げることができる可能性があるが、ここではこの方法を用いて塩酸溶液から Sr を抽出・精製することにした。

表 9.3.2-5 Sr 回収率の結果まとめ

溶液名	溶液量 (mL)	Sr 濃度 (mg/L)	Sr 回収率 (%)
Sr 回収-1	5	0.37	8.9
Sr 回収-2	5	1.21	29.3
Sr 回収-3	5	0.71	17.2
Sr 回収-4	5	0.11	2.6
Sr 回収-5	5	0.06	1.6
Sr 回収-6	5	0.06	1.4

表 9.3.2-6 Sr 精製処理試験の結果

イオン種類	試験溶液 濃度 (mg/L)	Sr回収液-1 濃度(%)	Sr回収液-2 濃度(%)	Sr回収液-3 濃度(%)
ナトリウム	160	0.7	0.5	0.6
マグネシウム	200	0.1	0.1	0.1
アルミニウム	320	0.1	0.1	0.1
カリウム	53	0.1	0.2	0.1
カルシウム	120	0.7	0.5	0.7
マンガン	12	0.1	0.1	0.1
鉄	1300	0.2	0.1	0.1
ストロンチウム	0.3	123.3	403.3	236.7

回収液 1~3 の濃度は試験溶液濃度を 100%として表示した。Sr 濃度が上昇しているのに対して、他の岩石主要成分の濃度は著しく減少していることがわかる。

3) 岩石からの逐次抽出

海水起源の地下水とその地下水と接触している岩石中の Sr における $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ の関係を明らかにするために、逐次抽出試験を実施した。逐次抽出試験には以下の薬液を用いた。

模擬地下水に塩化アンモニウムを添加したもの：岩石を取得した現場の地下水に近い組成となるように、塩化ナトリウム、塩化カリウム、炭酸水素ナトリウム、硫酸マグネシウム、塩化マグネシウム、塩化カルシウムを混合し「模擬地下水」を調製した。ここに、アンモニウムイオンの濃度が 1.0mol/L になるように塩化アンモニウムを添加した。この溶液によって、アンモニウムイオンと交換可能な Sr を溶液中に抽出することが可能であるため、この溶液で得られる Sr を「交換可能な Sr」とした。

1.0mol/L 酢酸ナトリウム溶液：酢酸ナトリウムを純水に溶解して 1.0mol/L とした溶液について、岩石と接触直前に pH を 5.0 とした。既往の研究（伊藤（1981、1982）、金井ら（1993、1996））によってこの溶液は炭酸塩鉱物を選択的に溶解させることが可能であり、この溶液で抽出された Sr は炭酸塩鉱物に含まれる Sr であると考えられることができる。

6.0mol/L 塩酸：6.0mol/L 塩酸に浸漬することで多くの造岩鉱物を溶出することが可能であり、マトリクス部に含まれる以外の Sr を抽出していると考えられる。マトリクス部に比べて溶解しやすい鉱物を溶解していると考えられるため、ここでは 6.0mol/L 塩酸で抽出された成分を「易溶性鉱物に含まれる Sr」とした。

逐次抽出試験は、岩石からの逐次抽出と抽出した Sr に対して抽出に用いた成分を低減する精製処理の 2 段階で実施した。低減処理が必要とされるのは、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ の測定には蒸発乾固等の操作が必要であるが、多量の共存イオン (NH_4Cl など) や共存有機物 (酢酸など) がこのプロセスを阻害するためである。

以下ではまず逐次抽出の手順について記述する。

岩石の粉碎：海水由来の地下水と接触している岩石 2 箇所を対象とし、これらの岩石コアの一部を粉碎してコアの全てが 2mm のふるいを通過するようにした。岩石コアの全てが 2mm のふるいを通過するようにしたのは、この時点で固い鉱物と柔らかい鉱物との間で分別が起きないようにするためである。

岩石のリンス：海水と接触していた岩石はその間隙に海水由来の Sr を含むと考えられる。このため、本試験では岩石粉末と模擬地下水を接触させて遠心分離し、上澄みを廃棄する操作を実施した。この操作で間隙水由来の Sr の影響を低減することができるが、一部の岩石鉱物が溶出したり、遠心分離で沈降させることができない粘土鉱物が失われた可能性がある。

模擬地下水による抽出：リンス後の岩石を模擬地下水と接触させて交換可能な Sr を抽出した。交換可能な Sr を十分に抽出するため、ある試料に対して 3 日間模擬地下水を接触させた後遠心分離して上澄み液を取り出し、さらに模擬地下水を添加して 4 日間模擬地下水と接触させた。模擬地下水と接触後、遠心分離で上澄み液と分離した岩石試料は次の酢酸ナトリウムによる抽出試験に用いた。

酢酸ナトリウム溶液による抽出：模擬地下水と接触・遠心分離後の岩石に酢酸ナトリウム溶液を加えて、

酢酸ナトリウムと岩石を合計7日間接触させた。模擬地下水の場合と同様に3日後に上澄み溶液を分離して交換した。7日後、遠心分離で上澄み液と分離した岩石試料は次の塩酸による抽出試験に用いた。

塩酸による抽出：酢酸ナトリウム溶液と接触・遠心分離後の岩石に塩酸溶液を加えて、塩酸と岩石を合計7日間接触させた。接触方法は酢酸ナトリウム溶液の場合と同様である。

それぞれの操作によって抽出された溶液中のSr濃度を表9.3.2-7に示した。岩石を模擬地下水でリンスしたときの溶液に比べて、アンモニウムイオンを添加した場合の模擬地下水では20~50倍近くのSr濃度が得られていることがわかる。このため、海水中に含まれるSrの影響は大きくないと考えることができる。測定機関にもよるが、一般的に $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ の測定に必要なSr量は $20\mu\text{g}$ 程度である。それぞれの溶液は1000mL程度の量があるため、上記のSr量は十分に確保ができていることがわかる。しかし、模擬地下水に含まれるアンモニウムイオン濃度は14000mg/L程度であり、酢酸溶液にはTOCにして20mg/Lの酢酸が含まれている。また、塩酸溶液は黄色に変色しており、種々のマトリクスが溶解していることが示唆された。このため、さらに以下の手順でSrを濃縮・精製した。

表 9.3.2-7 Sr 逐次抽出試験の結果まとめ

サンプル	Sr 濃度(mg/L)	
	岩石-1	岩石-2
模擬地下水リンス時	0.01	0.05
模擬地下水+KCl -1	0.44	1.89
模擬地下水+KCl -2	0.21	0.53
1M酢酸Na -1	0.31	5.36
1M酢酸Na -2	0.02	0.73
6M塩酸 -1	0.52	0.80
6M塩酸 -1	0.55	0.40

共存イオン濃度の低減と濃縮：アンモニウムイオンや酢酸濃度を低減し、必要な量のSrを確保するためにここではまず、キレート樹脂（Muromac OT-65）を用いてSrの濃縮とその他のイオン濃度の低減処理を実施した。Muromac OT-65を充填したカラムに上記の試験で得られた抽出液を滴下してSrを樹脂に吸着させた後、徐々に希塩酸を流して他イオン等を流し、最後に比較的高濃度の塩酸（2.0mol/L）を用いてSrを溶出させた。

Srの単離：共存イオン濃度を低減させたSr溶液に対して、さらにSr Spec樹脂を用いたSrの単離操作を実施した。試験手順の詳細を表9.3.2-8に示した。

塩酸溶液の処理：塩酸溶液については、上述の2)の方法を使ってSrを単離した。

表 9.3.2-8 Sr 単離操作のまとめ

条件	
カラム	内径8mmテフロンチューブ 長さ20cm
使用樹脂	Sr Spec樹脂
樹脂高	2cm
樹脂の洗浄	(1)純水 500mL/樹脂 20g をガラスビーカーにはかり取る (2)温度を50°Cにして一晩放置 (3)上澄み交換 (4)(1)~(3)を5回繰り返し、洗浄後は純水中で保管する。
手順	
0	樹脂洗浄 純水 5mL×3回
1	樹脂コンディショニング 6.5mol/L硝酸 5mL×3回
2	サンプル溶液滴下 減量処理後のサンプルを5mL以下3~5回に分けて滴下する。
3	他元素の排除1 3.5mol/L硝酸+0.005mol/Lリゅう酸溶液 0.5mL×3回
4	他元素の排除1 3.5mol/L硝酸+0.005mol/Lリゅう酸溶液 3mL×5回
5	Srの回収 0.05mol/L硝酸 5mL×3回 3本に分けて取得する。

共存イオン濃度低減処理・単離処理の結果を表 9.3.2-9 に示した。表に示したようにアンモニウムイオンや酢酸イオンの量を低減し、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ の測定に耐えるような溶液に精製することができていることがわかる。溶液に含まれる Sr 量は 40~60 μg 程度であり、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ の測定が十分実施できる量である。今後これらの Sr および地下水に含まれる Sr における $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ を測定し、海水を起源とする地下水における新しい地下水と古い地下水の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ および岩石における $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ の測定結果から、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ が古い海水と新しい海水の混合指標と成りうる可能性について検討していく。

表 9.3.2-9 共存イオン濃度低減処理・単離処理の結果まとめ

模擬地下水溶液	試料1			試料2		
	Sr		NH ₄	Sr		NH ₄
	($\mu\text{g}/\text{L}$)	(μg)	(mg/L)	($\mu\text{g}/\text{L}$)	(μg)	(mg/L)
初期溶液	320	80	14300	1219	86.7	14000
Muromac処理後	3810	75.4	4700	2676	60.2	N.D.
Sr spec処理後	3600	54.9	N.D.	2430	43.8	N.D.
酢酸溶液	試料1			試料2		
	Sr		TOC	Sr		TOC
	($\mu\text{g}/\text{L}$)	(μg)	(mg/L)	($\mu\text{g}/\text{L}$)	(μg)	(mg/L)
初期溶液	312	93.6	20	5360	82.5	22
Muromac処理後	4300	74.8	-	3321	71	-
Sr spec処理後	3920	66.5	N.D.	3002	52.3	N.D.

(4) 拡散による同位体分別

9.3.1 の文献調査でも示したように、地下水流動が非常に遅い場合には、拡散が支配的な物質輸送形態となる。このような場合には、拡散によって分別する物質を指標として評価するのが有効であると考えられる。このようなものの代表的なものに、 $\delta^{37}\text{Cl}$ と $\delta^{81}\text{Br}$ がある。Cl は ^{35}Cl と ^{37}Cl の比率が 75.53% と 24.47% となっており、Br は ^{79}Br と ^{81}Br の比率が 50.69% と 49.31% となっている。これらは、質量数が異なるため、拡散係数によって分別することが知られている (Eggenkamp and Coleman., 2009)。自由水中でのこれらの分別係数は計測されているが、岩盤を対象とした値については、評価方法が確立されていなかったため、前フェーズからこの評価方法を提案するとともに、岩盤を対象に分別係数の計測を実施している。

1) 分別係数の計測方法

提案した分別係数の計測方法は、一般的に拡散係数を求める際に実施される Through diffusion test と同じであり、図 9.3.2-23 のように表される。拡散係数を計測する試料を挟んで、一方を Cl の高濃度溶液、もう一方を Cl 濃度 0 とする。このような系での拡散によるフラックスは Fick の法則から次式で与えられる。

$$F_{\text{Cl-35}} = D_{\text{Cl-35}} \frac{\partial C_{\text{Cl-35}}}{\partial x} \quad (9.3.2-1a)$$

$$F_{\text{Cl-37}} = D_{\text{Cl-37}} \frac{\partial C_{\text{Cl-37}}}{\partial x} \quad (9.3.2-1b)$$

このとき、低濃度側へのフラックスの $\delta^{37}\text{Cl}_L$ は、上式を用いて以下のように表される。

$$\delta^{37}\text{Cl}_L = \frac{F_{\text{Cl-37}} - R_s}{F_{\text{Cl-35}}} \times 10^3 \quad (9.3.2-3)$$

ここで、高濃度側の ^{35}Cl と ^{37}Cl の質量比を R_H 、 ^{35}Cl と ^{37}Cl の拡散係数比 ($\alpha = D_{\text{Cl-35}}/D_{\text{Cl-37}}$) を α とすると $F_{\text{Cl-37}}/F_{\text{Cl-35}}$ は次のように表される。なお、低濃度側は高濃度側に比べて有意に小さいと仮定している。

$$\frac{F_{\text{Cl-37}}}{F_{\text{Cl-35}}} = \frac{D_{\text{Cl-37}}}{D_{\text{Cl-35}}} \frac{\frac{\partial C_{\text{Cl-37}}}{\partial x}}{\frac{\partial C_{\text{Cl-35}}}{\partial x}} = \frac{D_{\text{Cl-37}}}{D_{\text{Cl-35}}} \frac{C_{\text{Cl-37}}}{C_{\text{Cl-35}}} \frac{L}{L} = \frac{1}{\alpha} R_H \quad (9.3.2-4)$$

式(9.3.2-4)を式(9.3.2-3)に代入すると以下の式が導かれる。

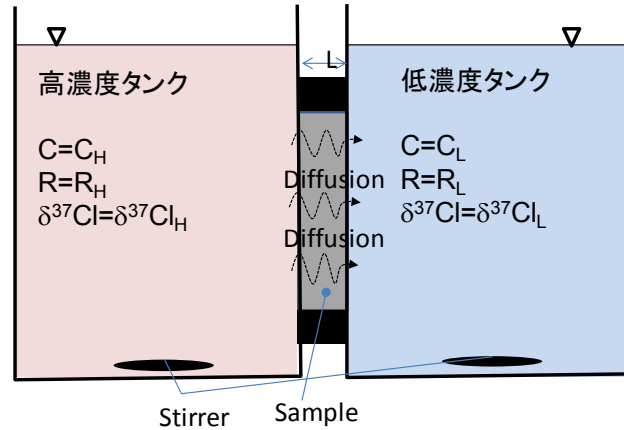


図 9.3.2-23 Through diffusion 試験の概念図

Cl は高濃度タンクから低濃度タンクに試料を通して拡散する。低濃度タンクの濃度は拡散係数を求めるために観測される R_H/R_L と $\delta^{37}\text{Cl}_H - \delta^{37}\text{Cl}_L$ が分別係数 ($\alpha = D_{\text{Cl-35}}/D_{\text{Cl-37}}$) に関する情報を与える。

$$\delta^{37}\text{Cl}_L = \frac{F_{\text{Cl-37}} - R_s}{R_s} \times 10^3 = \frac{1}{\alpha} \frac{R_H - R_s}{R_s} \times 10^3 = \left(\frac{1}{\alpha} \frac{R_H}{R_s} - 1 \right) \times 10^3 \quad (9.3.2-5)$$

拡散係数比 α は、次式で与えられる。

$$\alpha = \frac{R_H}{\left(\frac{\delta^{37}\text{Cl}_H}{10^3} + 1 \right) R_s} = \frac{\left(\frac{\delta^{37}\text{Cl}_H}{10^3} + 1 \right)}{\left(\frac{\delta^{37}\text{Cl}_L}{10^3} + 1 \right)} = \frac{R_H}{R_L} \quad (9.3.2-6)$$

上式は、高濃度側から低濃度側への分別係数を示しており、分別係数の定義では、以下のように与えられる。

$$10^3 \ln \alpha = 10^3 \ln \frac{R_H}{R_L} \approx \delta^{37}\text{Cl}_H - \delta^{37}\text{Cl}_L \quad (9.3.2-7)$$

上記は定常状態を仮定しているが、実際の試験で定常状態を確立することは難しい。非定常状態では、1) 初期の非定常的フラックス、2) タンクの濃度変化が問題となる。

1) 初期の非定常的なフラックスは、試験初期のフラックスの立ち上がり時に発生する ^{35}Cl と ^{37}Cl の分別に起因する。非定常拡散試験での累積フラックスは、Crank (1975) によれば、 $Dt/L^2 > 0.45$ では以下のように与えられる。

$$\frac{Q_t}{LC} = \frac{Dt}{L^2} - \frac{n}{6} \quad (9.3.2-8)$$

ここに、 Q_t は低濃度タンクへの累積フラックスであり、 t は経過時間、 n は間隙率である。 Q_t を用いて、

低濃度タンクでの $\delta^{37}\text{Cl}_L$ の時間変化は以下のように与えられる。

$$\delta^{37}\text{Cl}_{L,t} = \frac{Q_{\text{Cl-}37,t} / Q_{\text{Cl-}35,t} - R_s}{R_s} \quad (9.3.2-9)$$

ここに、 $Q_{\text{Cl-}37,t}$ と $Q_{\text{Cl-}35,t}$ は、式(9.3.2-8)にそれぞれ、 $D_{\text{Cl-}37}$ と $D_{\text{Cl-}35}$ を与えて求めた ^{37}Cl と ^{35}Cl に対する累積フラックスである。この初期フラックスによる誤差は以下のように与えられる。

$$\text{Error} = \frac{(\delta^{37}\text{Cl}_{H,0} - \delta^{37}\text{Cl}_{L,t}) - 10^3 \ln \alpha}{10^3 \ln \alpha} \quad (9.3.2-10)$$

ここで、定常状態では $\delta^{37}\text{Cl}_H - \delta^{37}\text{Cl}_L$ は $10^3 \ln \alpha$ となることから、これを基準として誤差を求めた。ここに、初期段階では高濃度タンクの $\delta^{37}\text{Cl}$ は大きく変化しないため、 $\delta^{37}\text{Cl}_{H,0}$ を高濃度タンクの値として用いた。

この誤差は、式(9.3.2-8)から Dt/nL^2 で規格化でき、この誤差は時間とともに減少する。これは、初期的なフラックスがその後の定常的なフラックスでマスクされるためである。この誤差は、 α が一般的な範囲(1.001~1.003)では、 $Dt/nL^2 > 4$ で5%以下である。このため、サンプルを $Dt/nL^2 > 4$ で採取するか、定常状態になるまで、低濃度側のタンクを循環しておくことが好ましい。

2) タンクの濃度変化は、長期間試験を実施することにより、高濃度タンクの濃度低下、低濃度タンクの濃度増加発生することによる影響である。この誤差は低濃度タンクの濃度の増加とともに大きくなる。最終的には高濃度と低濃度タンクの濃度が同じになり、分別も観測できなくなる。

この誤差は以下の条件で検討した。1) フラックスは定常状態である、2) 高濃度と低濃度タンクは同じ体積である、3) 試料の間隙率はタンクの体積に比べて十分小さい、4) 初期の低濃度タンクの濃度は $0\text{mg}/1$ である。この条件下では、高濃度タンクから低濃度タンクへのフラックスと低濃度タンクの時間変化は以下で与えられる。

$$J = \frac{DA(C_{H,0} - \beta C)}{L} \quad (9.3.2-11)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{J}{V} = \frac{DA(C_{H,0} - \beta C)}{VL} \quad (9.3.2-12)$$

ここに β は試験条件を示したものであり、 $\beta=1$ は高濃度側のタンクが一定濃度の場合(濃度が変化しないように循環しているもしくは定期的に入れ替えを行っている)、 $\beta=2$ は高濃度側のタンク濃度が低濃度側のタンクの濃度とともに変化する場合である。高濃度側濃度の低下は低濃度側濃度の増加と同じになる。式(2.2.5-13)を積分すると、低濃度側のタンクの濃度と $\delta^{37}\text{Cl}$ は以下で与えられる。

$$C_{L,t} = \frac{1}{\beta} C_{H,0} \left[\exp\left(-\frac{\beta DA}{VL} t\right) - 1 \right] \quad (9.3.2-13)$$

$$\delta^{37}\text{Cl}_{L,t} = \frac{C_{\text{Cl-}37L,t} / C_{\text{Cl-}35L,t} - R_s}{R_s} \quad (9.3.2-14)$$

ここに、Aはサンプルの面積、Vはタンクの体積、Lはサンプルの長さ、 $C_{\text{Cl-}37L,t}$ と $C_{\text{Cl-}35L,t}$ はそれぞれ、式(9.3.2-13)に拡散係数 $D_{\text{Cl-}37}$ と $D_{\text{Cl-}35}$ を入れて求めた低濃度タンクでの ^{37}Cl と ^{35}Cl 濃度である。この誤差は、初期フラックスの誤差と同様に式(9.3.2-10)で表すことができる。また、式(9.3.2-13)から $\beta \text{DA}t/\text{VL}$ で規格化できる。この誤差は、 $\beta \text{DA}t/\text{VL} < 0.1$ で5%以下に抑えることができる。

このように、拡散による分別係数は Through-Diffusion 法で計測でき、1)初期の非定常的フラックス、2)タンクの濃度変化誤差を抑制するためには、それぞれ、 $\text{Dt}/\text{nL}^2 > 4$ 、 $\beta \text{DA}t/\text{VL} < 0.1$ の条件で試験を実施すれば良い。

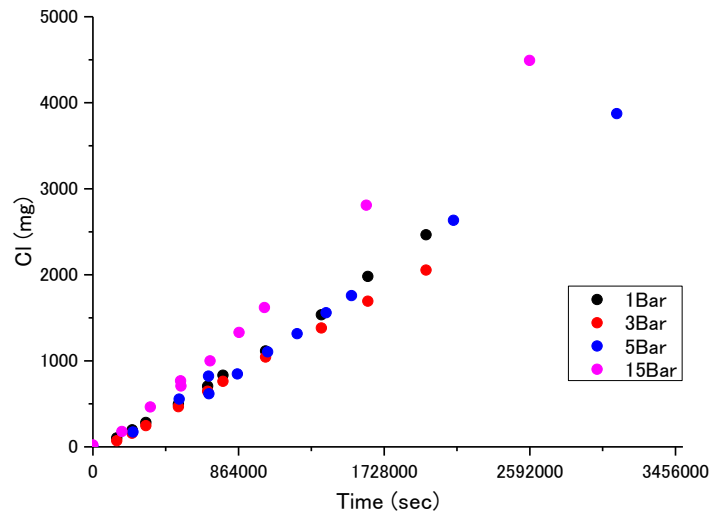
2) 分別係数の計測

分別係数の計測をセラミックディスク、勇知層について実施した。試験手順は、試料を外形 50 mm、高さ 10mm に整形後、脱塩のために硝酸ナトリウム溶液(Na_2NO_3)に浸漬した。硝酸ナトリウム溶液を用いたのは、蒸留水などに浸漬すると、粘土鉱物の膨潤などの影響で岩石試料が破損するためである。脱塩時間は、拡散係数を考慮して、セラミックディスクと勇知層では2日、稚内層では3日毎とし、硝酸ナトリウム溶液は3回交換した。

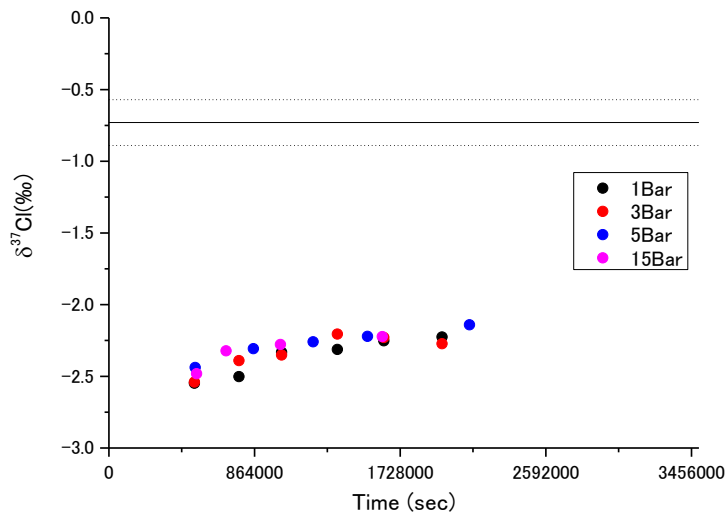
試料を前述の図 9.3.2-23 に設置して拡散試験を実施した。セラミックディスクの試験では、高濃度側を NaCl (20000ppm)として、1, 3, 5, 15 Bar の試料を用いて試験を実施した。この結果を表 9.3.2-10 と図 9.3.2-24 に示す。拡散試験に用いた試料と試験装置のタンク容量が異なるため、濃度変化と拡散係数とは必ずしも一致しないが、セラミックディスクのエア-エントリーバリューの増加にともない拡散係数が増加しているのがわかる。図 9.3.2-25 は、タンクでの濃度変化の影響を補正するために、横軸を $\text{DA}t/\text{VL}$ によって基準化したものである。この図に示すように、分別係数は 1.0015~1.0019 に分布している。結果にはややバラツキがあるが、これは $\delta^{37}\text{Cl}$ の計測精度が $\pm 0.1\%$ 程度であり、この誤差が分別係数の 0.0001 に相当するためである。セラミックディスクでの分別係数は水中の分別係数 1.0012~1.0013 に比べてやや大きい、昨年度の来待砂岩や吉井砂岩などの岩石試料に比べるとやや小さくなっている。

表 9.3.2-10 Cl 拡散試験条件

試料	試料寸法 (mm)		タンク容量 (ml)		高濃度側溶液		拡散係数 (m^2/s)
	外径	高さ	高濃度側	低濃度側	Cl (mg/l)	$\delta^{37}\text{Cl}$ (‰)	
1Bar	50	10	300	300	20000	0.73 ± 0.16	9.5E-11
3Bar	50	10	300	300			8.4E-11
5Bar	50	10	200	200			6.5E-11
15Bar	50	7	200	200			6.3E-11



(1) 拡散試験時の濃度変化



(2) 拡散試験時の同位体比変化

図 9.3.2-24 セラミックディスクを対象とした拡散試験の濃度と同位体比変化

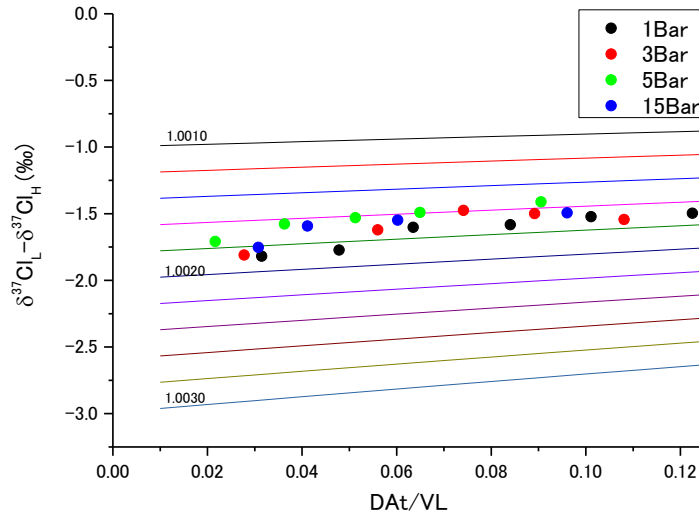


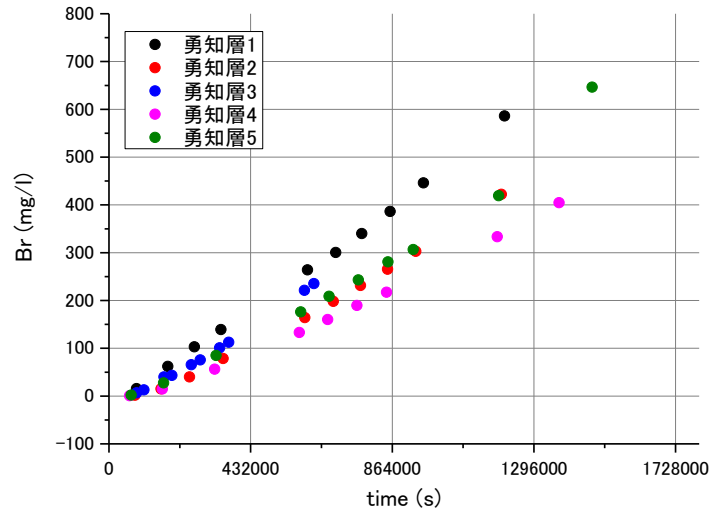
図 9.3.2-25 セラミックディスクの $\delta^{37}\text{Cl}$ 分別係数
(縦軸は $\delta^{37}\text{Cl}_L - \delta^{37}\text{Cl}_H$ 、横軸は DA_t/VL で正規化)

次に、勇知層と稚内層について Br を対象に Through Diffusion 試験を実施し、拡散係数と分別係数を計測した。この結果を表 9.3.2-11 と図 9.3.2-26 に示す。

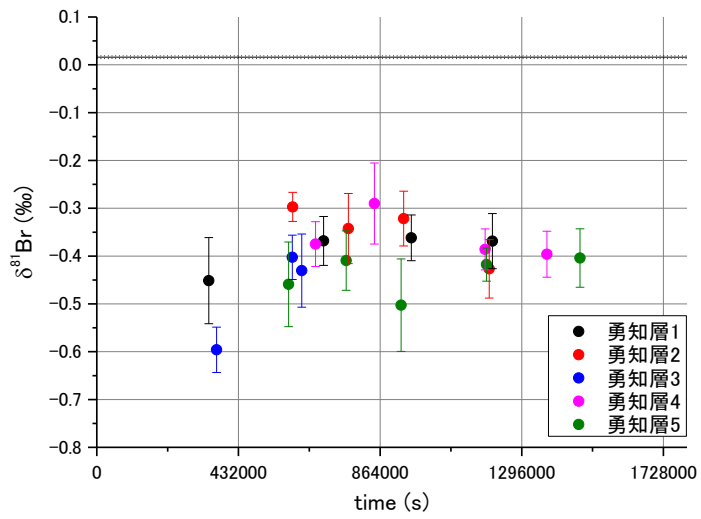
Br による拡散係数は概ね $1.0 \sim 1.5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ となっており、ほぼ一定である。分別係数もバラツキはあるものの $-0.5 \sim -0.3\%$ に収まっている。Br の拡散による分別係数を求めるために、 DA_t/VL で規格化して図 9.3.2-27 に示した。この結果、勇知層の Br の拡散による分別係数は 1.0005 程度と推定される。既存研究では、自由水中で 21°C で 1.00064 ± 0.00013 (Eggenkamp and Coleman., 2009) が得られており、実験で得られた値がやや小さくなっている。

表 9.3.2-11 Br 拡散試験条件

試料	深度 (m)	試料寸法 (mm)		タンク容量 (ml)		高濃度側溶液		拡散係数 (m^2/s)
		外径	高さ	高濃度側	低濃度側	Br (mg/l)	$\delta^{81}\text{Br}$ (‰)	
勇知層1	800.6	50	10	1000	1000	21000	0.016 ± 0.003	1.2E-10
勇知層2	994.1	50	10	1000	1000			1.4E-10
勇知層3	1049.4	50	10	1000	1000			1.0E-10
勇知層4	1151.5	50	10	1000	1000			1.1E-10
勇知層5	1199.2	50	10	1000	1000			1.2E-10



(1) 拡散試験時の濃度変化



(2) 拡散試験時の同位体比変化

図 9.3. 2-26 勇知層を対象とした拡散試験の濃度と同位体比変化

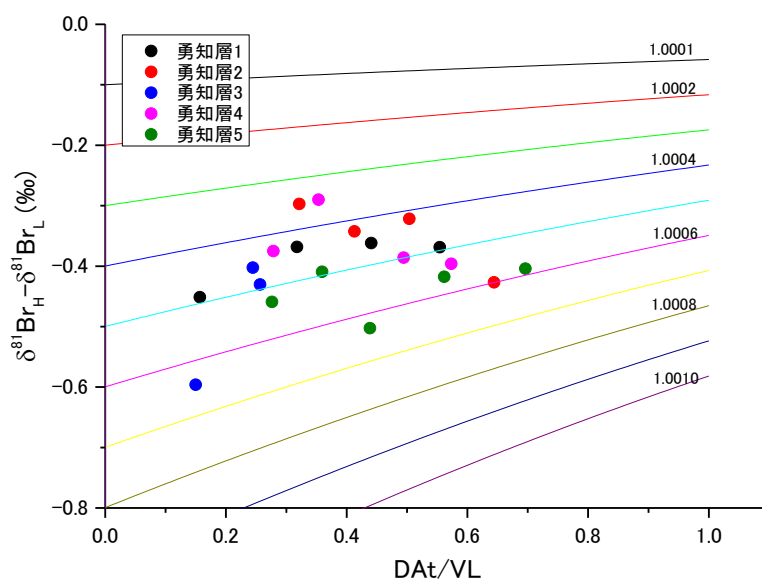


図 9.3.2-27 勇知層の $\delta^{81}\text{Br}$ 分別係数

(縦軸は $\delta^{81}\text{Br}_L - \delta^{81}\text{Br}_H$ 、横軸は DA_t/V_L で正規化)

3) 拡散による分別係数計測のまとめ

セラミックディスクと勇知層を対象に、それぞれ Cl と Br の分別係数を計測した。この結果、セラミックディスクでは Cl の分別係数が 1.0015~1.0019、勇知層では Br の分別係数が 1.003~1.005 程度が得られた。Cl と Br とでは質量数比が Cl の方が大きいいため、Cl の分別係数の方が大きい結果となった。自由水中の分別係数と比べて、セラミックディスクでは大きく、勇知層では小さくなっている。今後、種々の試料について拡散試験を行い、分別係数を計測し、拡散によって分別が有意になる岩石を明らかにしていく予定である。

9.3.3 まとめと今後の課題

天然トレーサーについて、若い地下水の年代測定法、古い地下水の年代測定法、拡散場の識別できる方法について調査した。また、脱ガスなどを起こし原位置での採取に課題がある希ガスの採取方法を調査した。

若い地下水の年代測定法では、環境中の濃度が低下してきている ^3H に代わって CFCs (フロンガス) や SF_6 (六フッ化硫黄) など地球温暖化ガスが近年では良く用いられている。また、原始産業由来の ^{85}Kr なども適用例が増えているが捕集に大量の水が必要である。

古い地下水の年代測定法も従来から開発している ^{14}C 、 ^{36}Cl 、 ^4He の他に、 ^{81}Kr 、 ^{129}I などが有望であるが、 ^{81}Kr は捕集に大量の水が必要であり、 ^{129}I は適用例は多いものの、初期値が明確でないという課題がある。

拡散場を識別できる ^{37}Cl と ^{81}Br は、遅い流動場を識別するうえで有望であると考えられた。特に、これらは、トレーサー試験などに適用することにより、拡散の寄与を明確するうえでも有望であると考えられた。

これらの内、近年適用例が増えている ^{85}Kr 、 ^{129}I 、本研究で開発してきた有機 ^{14}C 、 ^{87}Sr 、拡散場を識別するための ^{37}Cl と ^{81}Br については、適用性の向上が図られていることから、有望ではないかと考えられた。

希ガスの採取方法については、圧力制御式と原位置平衡式の 2 種類があり、原位置平衡式は、従来の方法と異なり圧力を低下させることがないため、特に溶存ガスの多い環境では有望ではないかと考えられた。

技術開発については、上記の天然トレーサーを用いた評価や分析における問題を解決するため、①海水起源の有機 ^{14}C の回収方法、②沈殿が出来にくい地下水における無機 C 回収方法、③ $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ 平衡値の実験的な評価方法、④海水由来の地下水混合指標としての $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 有用性、⑤拡散による同位体分別、について検討した。それぞれ、①精製プロセスにおける有機物散逸量の評価、②2L 規模のサンプルに対する回収方法の最適化、③岩石マトリクスからの逐次抽出および閉鎖空隙からの Cl 抽出、④海水由来の地下水およびそれと接触する岩石からの Sr 抽出、⑤拡散試験により Cl と Br の分別係数の計測、を実施した。今回検討した方法を実地下水に適用し、抽出・精製した試料における特性を今後明らかにすることによって、それぞれの有用性・適用範囲などについて検討していく予定である。

9.4 坑道における地下水調査

精密調査段階においては、概要調査段階での調査結果の確認が重要となる。地下水年代調査においても、坑道などから地下水を採取し、事前のボーリング調査結果の妥当性を確認することが重要である。また、精密調査段階では、主要な水みちとなる割れ目や断層の調査も重要である。これは、候補岩体が十分な広がりをもつ、核種のパスとなりうる水みちを有していないことを確認するという観点から重要である。このため、地下水年代調査のこのような水みちの調査やその特性評価の適用性を確認する。

ここでは、JAEAが建設を進めている瑞浪超深地層研究所、幌延深地層研究所を対象に地下水の採水を実施し、これまで実施してきた地下水年代測定結果の妥当性の確認を行うとともに、地下水年代調査によって主要な水みちが評価できるかについて検討する。

9.4.1 瑞浪における地下水調査

(1) 採水地点

採水は、図9.4.1-1に示す研究坑道から掘削されたボーリング孔を利用した。調査地点および区間は以下の通りである。

- ・ 深度 300m 地点：12MI30 孔区間 1, 2, 3, 4, 6
- ・ 深度 300m 地点：12MI31 孔 区間 1, 3, 5, 7
- ・ 深度 200m 地点：07MI07 号孔区間 1, 3, 5
- ・ 深度 300m 地点：09MI20 号孔区間 1, 3, 5
- ・ 深度 400m 地点：10MI26 号孔区間 1, 3, 5
- ・ 深度 500m 地点：12MI27 号孔区間 1, 4, 5

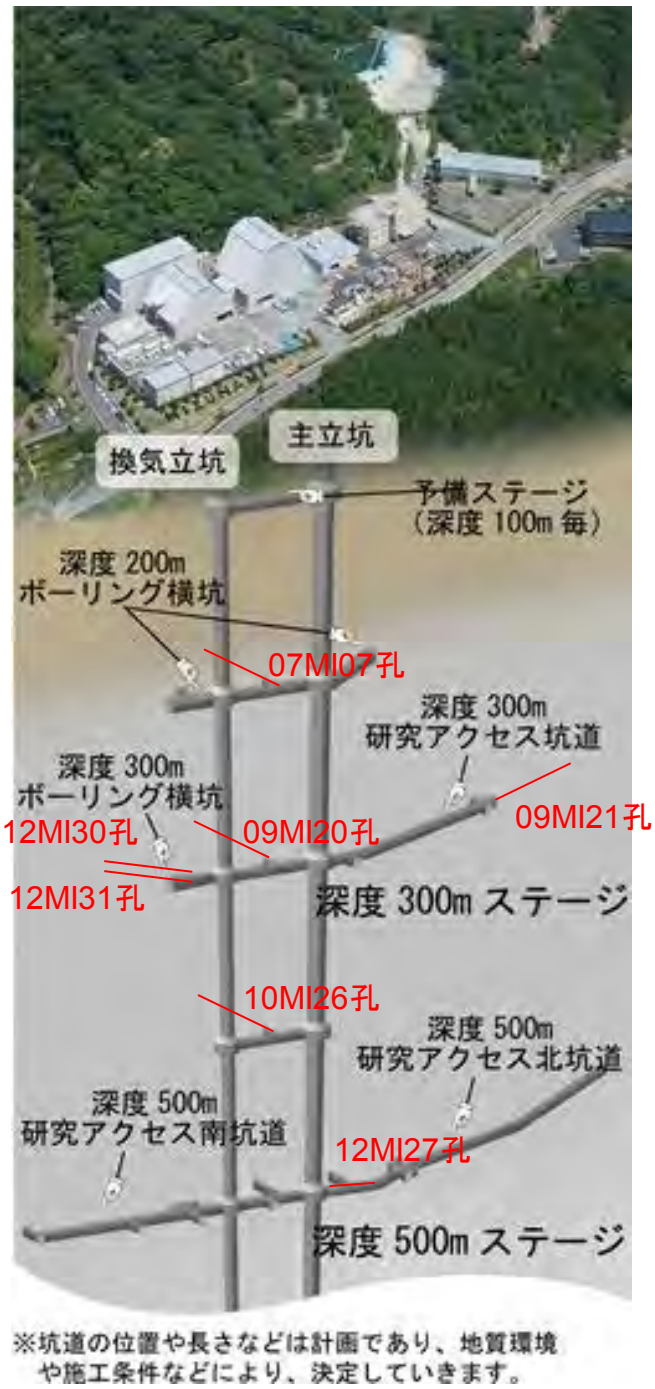


図 9. 4. 1-1 採水地点位置図 (日本原子力研究開発機構(2014) に加筆)

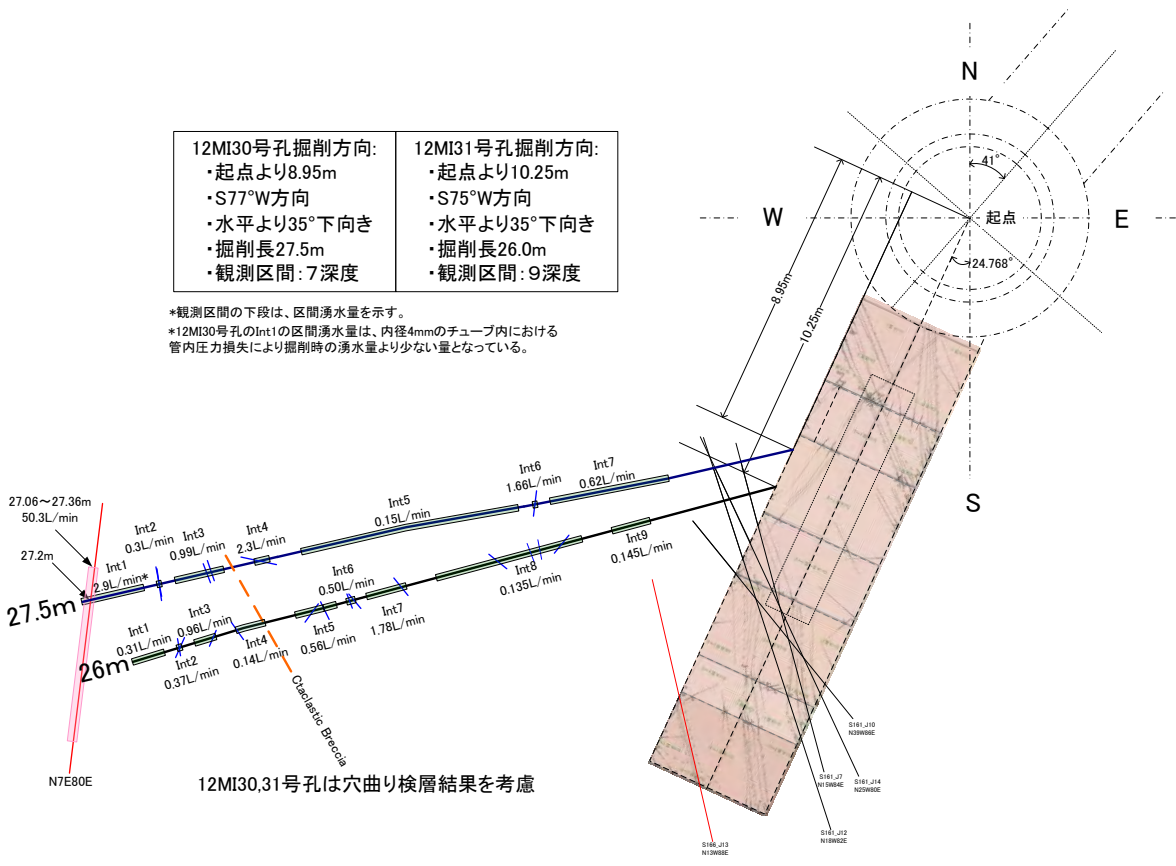


図 9. 4. 1-2 12MI30&31 号の区間と湧水量 (300m ボーリング横坑)

(2)採水方法

各採水区間の水圧が高く、湧出することから、各採水区間へ繋がっている外径 6mm 内径 4mm のナイロンチューブのバルブを解放して採水した。採水方法はポンプによる採水と同じである。また、坑道内での希ガス採水は、一般採水と同様にナイロンチューブのバルブに希ガス採水用の装置を接続して採水した。以下に採水方法について説明する。

なお、採取したサンプルは、トリチウム (^3H) と ^{36}Cl 、希ガスのサンプルを除き、環境温度 4°C 前後に保持して実験室に送付した。

主要溶存イオンなど (Na、K、Mg、Ca、 SO_4 、Cl、I、F、Si、B) の分析用サンプルは以下のように採取した。100ml のプラスチック製ボトルに容器の 1/10 程度地下水を入れ、フタをして共洗いをする。共洗いを三度実施した後、チューブの外側を地下水で洗浄し、ボトルの底までチューブを差し込んで、ボトル内を地下水で満たす。チューブを差し込んだままで、さらに容器の 3 倍量の地下水をオーバーフローさせる。その後、静かにチューブを引き抜き、気泡が入らないようにフタをする。ビニールテープでフタが閉まる方向(時計回り)に数回巻いて密封する。

微量元素 (Sr、Ba、Fe、Mn、Se、As、Se、Al、Cs) の分析用のサンプルの採取方法と使用ボトルは、一般水質と同じである。この試料では、使用ボトルの壁面への陽イオンの吸着を抑制するために、採取後に 2ml の水を捨て、そののち、濃硝酸 1ml を添加した。

TOC (TC、DIC、TOC(NPOC)) の分析用のサンプルは、50ml のゴム製内蓋つきの褐色ガラス製ねじ口ビン瓶に採取した。採取方法は、一般水質と同じである。

水素・酸素同位体比の水素・酸素同位体比の測定用のサンプルは、採取容器が 25ml のガラス製ねじ口バイアルビンに採取した。採取方法は一般水質と同じである。

^3H 試料の採水には、1L のプラスチック製ボトルを 2 本使用した。共洗いは行わず、地下水で外側をよく洗浄したチューブを底まで入れ、ボトルからオーバーフローする直前にチューブを静かに引き抜きながら、容器を満たし、なるべく空気が入らないようにフタをした。

^{14}C と $\delta^{13}\text{C}$ の分析用の採取方法は、一般水質と同じであるが、採水後に NaOH を添加し、pH を高く保つことにより、炭酸ガスとしての流出を防いだ。採水容器には、1L のフロロバリアボトルを 2 本使用した。また、採取後容器内に、NaOH 粒(和光純薬製、特級)を 1L の試料に対して 1 粒入れ、空気を入れないよう注意してフタをした。

^{36}Cl 試料には 1L のポリビンを使用した。作業者の皮膚に付着している塩分が混入する可能性があるため、作業時は地下水でよく洗浄したゴム製手袋を装着して行った。表 9.4.1-1 に採水による分析項目と水量を示す。

CFCs の採取は USGS (2012) の推奨する方法に準じた。ボーリング孔の各採水区間に繋がっているナイロン製チューブの先にバイトン®チューブを接続した。

5L のプラスチック製ビーカーの底までバイトンチューブを導入し、静かに 5L ビーカーを地下水で満たした。その後、バイトンチューブを取り出し、CFCs 採取専用容器の底までバイトンチューブを導入し、3 回程度静かにオーバーフローさせたのち、バイトンチューブを刺したまま地下水が満たされた 5L ビーカーへ静かに CFCs 採取専用容器を沈める。さらに数回分のオーバーフローを行い、5L ビーカーの中で密栓する。

表 9.4.1-1 採水項目と採取目的および取得量

項目	目的	取得量	備考
一般水質	主要なイオン濃度評価	100mL×2 本	
微量元素	微量に含まれる金属元素を定量	100mL×1 本	
水素・酸素同位体比	水素・酸素同位体比を評価	10mL×2 本	
無機 ^{14}C $\delta^{13}\text{C}$	地下水年代測定のために地下水中の無機炭素の ^{14}C 、 ^{13}C を評価	1000mL×1 本	
^{36}Cl $\delta^{37}\text{Cl}$	地下水年代評価や、塩化物イオンの起源情報となる、塩化物イオン同位体 (^{36}Cl 、 ^{37}Cl) を評価	1000mL×2 本	
TOC	地下水中溶存有機炭素量を評価	50mL×1 本	
アルカリ度	アルカリ度を評価し、その結果から炭酸水素イオン濃度を評価	50mL×1 本	
希ガス濃度	地下水年代指標となる希ガス (He、Ne) 濃度を評価	銅管×3 本	地表でクランプ留め
CFCs	溶存クロロフルオロカーボン量から、若い地下水の混入を評価	125mL×3 本	
SF6	六フッ化硫黄量から、若い地下水の混入を評価	1000mL×1 本 500mL×1 本	
トリチウム	トリチウム濃度から、若い地下水の混入を検討する	1000mL×2 本	

希ガス採水は以下の手順により行った。また、採取後のサンプルの写真を図 9. 4. 1-3 に示す。

- ①銅管(外形 12mm、内径 10mm) の両側に自動閉鎖機構付きのワンタッチソケットカプラー (以後ソケットと称す) を接続する。
- ②各採水区間へつながっている 3 方バルブの片側のラインに片端に自動閉鎖機構の無いワンタッチプラグカプラー (以後プラグと称す) が付いた透明のテフロンチューブ (外径 12mm) をつなぎバルブの流路を変えて自然排水させる。
- ③銅管の片端のソケットに②と同じ透明のテフロンチューブの付いたプラグを接続する。
- ④銅管のもう一方のソケットと採水区間につないだプラグを接続する。
- ⑤銅管の排水側を上側に傾け、銅管前後に接続した透明のテフロンチューブ内に地下水と共に気泡が存在していないかを確認する。
- ⑥銅管の排水側のバルブ(図 9. 4. 1-3) を閉じ、水圧を確認する。水圧が深度から想定される圧力を示すことを確認する。但し、深度が深く、圧力が高い場合はワンタッチカプラーのソケットが外れなくなる恐れがあるので、バルブを若干開けつつ、出来る限り高い圧力で採取するように努力する。
- ⑦気泡の存在の無いことを確認後、銅管の下流側(排水側) のソケットからプラグを外す。プラグは自動閉鎖機構付きのため閉鎖されるが、水漏れ等で閉鎖を確認する。
- ⑧次に銅管の上流側(採水区間側) のソケットからプラグを外し、銅管内を密閉状態とする。この時もソケットからの水漏れが無いことを確認する。
- ⑨ソケットが付いた状態で銅管にクランプを取り付け、クランプ締め架台に両端の長さが均等になるようセットする。
- ⑩油圧ポンプを徐々に押していき、クランプの隙間がみえなくなった時点で終了とする。さらに、レンチでクランプのナットを締め付ける。終了した後、油圧を緩め、銅管を慎重に取り出す。
- ⑪取り出した銅管からソケットを外す。
- ⑫切断した銅管に、採取深度、孔番、採取日、採取番号を記入する。

なお、希ガスの分析結果は、脱ガスや空気の混入の恐れがあるため、Ne による補正を実施した。補正方法は、地下水中の Ne 量が大気平衡値であると仮定し、試料中の Ne 量が大気平衡値よりも大きければ、大気が混入したと仮定して、式(9. 4. 1-1)に示すように、過剰量に相当する He 量を差し引く。また、Ne 量が大気平衡値よりも小さければ、式(9. 4. 1-2)に示すように、脱ガスしたとして減少した Ne 量とどのように He 量を割り戻す。

$$He_c = He_m - (Ne_m - Ne_0) \frac{He_a}{Ne_a} \quad (9. 4. 1-1)$$

$$He_c = He_m \frac{Ne_0}{Ne_m} \quad (9.4.1-2)$$

ここに、 He_c は脱ガス補正したHe濃度、 He_m は地下水中のHe濃度、 Ne_0 は大気との溶解平衡に達したNe濃度(2×10^{-7} cc_{STP}/g_w)、 Ne_m は地下水中のNe濃度の計測値、 He_g/Ne_g は0.288である。

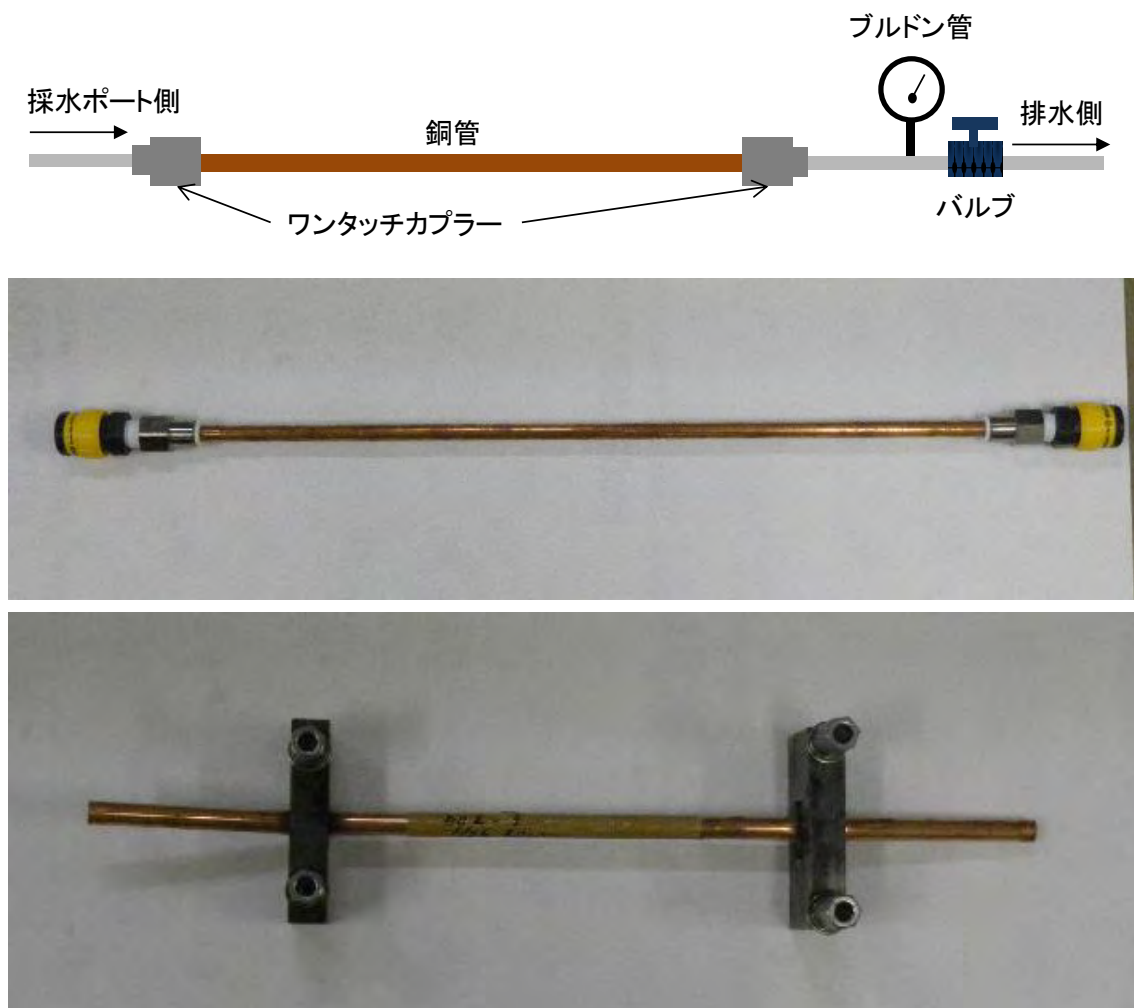


図 9.4.1-3 希ガス採取システムの概念図と銅管

上側) 希ガス採取システムの概念図

中側) 銅管の両側に接続した自動閉鎖機構付きのワンタッチソケットカプラー

下側) クランプにより密閉状態になった銅管のサンプラー

(3) 分析方法

地下水の主要イオンの内、 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Br^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 、 F^- 、 I^- 、アルカリ度を分析した。この内、 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 F^- はイオンクロマトグラフ法、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} は ICP 発光分光分析法、他は ICP 質量分析法で求めた。アルカリ度 pH4.8 アルカリ度である。また、別途 TOC 計を用いて、NPOC 濃度を測っている。

水の水素同位体比分析は水を金属亜鉛で水素ガスに還元し、その水素ガスを質量分析計によって測定する「金属亜鉛還元－質量分析法」によって実施した。酸素同位体比分析は直接水の酸素同位体を測定するかわりに水と同位体交換平衡にある二酸化炭素について測定し、その値から間接的に求める「二酸化炭素－水平衡法」によって実施した。計測された同位体比は、世界共通の標準平均海水 (SMOW) の同位体比から千分偏差で表す δ 値で示した。

^3H 分析は、まず試料水中の不純物を（一次）蒸留操作によって除去した後、過酸化ナトリウムを加え、電解濃縮法によって ^3H を濃縮させる。次に、濃縮した強塩基性電解液の液性を中性にするために、塩化鉛を加えて（二次）蒸留を行う。液性が中性であることを確認した後に試料溶液と液体シンチレータをテフロンバイアルに分取、低バックグランド液体シンチレーションカウンタで ^3H の β 線を測定した。

^{14}C は、採水後、まず 1 リットルにつき 1.2g の塩化ストロンチウムを加え、試料水中の無機炭素を炭酸ストロンチウムとして沈殿させる。沈殿物は中性になるまで洗浄し、乾燥させた後リン酸と反応させ CO_2 ガスを生成させる。得られた CO_2 ガスを精製した後、コバルト触媒をもちいて 600°C に加熱しグラファイトを調製した。それらグラファイトをターゲットとし加速器質量分析 (AMS : Accelerator Mass Spectrometry) によって定量した。

^{36}Cl は、水試料に含まれる塩素イオンを塩化銀として回収し、それをターゲットとして AMS によって定量する。まず、水試料の pH を酸性側に調整した後に、過剰量の硝酸銀を加えることにより、水試料中の塩素イオンを白色の塩化銀として沈殿させ回収する。一般的に水試料の塩素イオン濃度が 20 mg/L 以上ならば、煩雑な手間をかけずに直接沈殿させることにより塩素イオンを回収することができる (Philips, 2000)。 ^{36}Cl の分析では、 ^{36}S が AMS 測定に影響する可能性が指摘されている (Elmore et al., 1979)。この ^{36}S の ^{36}Cl 測定への影響を小さくするために塩化銀の精製を行う (Philips, 2000)。精製手順として、回収された塩化銀をアンモニア水に溶解させ、硝酸バリウムを加えることにより不純物として微量に含まれる硫酸イオンを硫酸バリウムとして沈殿させる。この工程は硫酸イオン濃度によっても異なるが概ね 3 回程度繰り返される。

希ガスの定量は、希ガス質量分析装置 GV-5400 (GV instruments) とその前処理ラインを用いて行った。地下水サンプルを封入した銅管をスウェジロック社の継ぎ手を用いて、直接装置へと接続する。これにより、銅管内の希ガスを散逸させることなく前処理ライン内へ導入することが可能である。抽出ライン内では、まず、サンプルに超音波をあてることで、地下水サンプルからガス成分のみを抽出する。抽出された

ガス成分に対して、コールドトラップ（液体窒素温度）・チタンゲッターを作用させ、水分や反応性のガスを取り除き希ガス成分のみを取り出すことができる。さらに、ステージ内温度を 20 K まで低下させることができるクライオスタッドを用いて希ガスを各成分に単離し、各希ガスごとに質量分析装置へと導入する。質量分析装置では希ガスをイオン化し、適切な磁力をかけることによって設定した質量数のみをカウントすることができる。既知量(0.13cc)の空気に含まれる希ガスにおけるカウント数と、サンプルに含まれる希ガスにおけるカウント数を比較し、サンプルに含まれる希ガス量および同位体比を決定した。

^4He 年代測定では、岩石中に含まれる U および Th が ^4He の生成量を評価するうえで重要である。また、 ^{36}Cl 年代では、原位置での平衡値を求める際には、U・Th の壊変時に生成する中性子やそれに伴って発生する (α, n) 反応による中性子による放射化が重要である。このため、岩石中の U・Th 量など元素の成分を求めることは重要である。

ここでは、岩石に含まれる主要鉱物の 13 鉱物 (SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MnO 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 、 Cr_2O_3 、 P_2O_5 、 SrO 、 BaO)、微量元素の 29 成分 (S, Zr, Ga, Co, B, Sr, Ba, As, P, Li, Be, Cr, V, Ni, Cu, Zn, Rb, Y, Nb, Pb, Cd, Sm, Eu, Gd, Dy, Yb, Lu, Th, U) を求めた。

主要鉱物は、ホウ酸リチウムを添加して約 1100°C 溶融させることでガラスビードを製作し、蛍光 X 線分析を実施した。C と S については、燃焼法で推定した。微量元素については、Ba, Ce, Cr, Cs, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, Hf, Ho, La, Lu, Nb, Nd, Pr, Rb, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Th, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zr, Ag, Cd, Co, Cu, Li, Mo, Ni, Pb, Sc, Zn は酸で溶解したもの、As, Bi, Hg, Sb, Se, Te, Tl は王水で溶解したものの、B は HNO_3 と HF で溶解したものをを用いて、ICP-MS および ICP-AES で定量した。

(4) 分析結果

原位置において、ポータブルのメータを用いて、pH、ORP (酸化還元電位)、EC (電気伝導度)、DO (溶存酸素)、温度を分析した結果を表 9.4.1-2 に示す。また、地下水の採取結果を表 9.4.1-3 に示す。一部の区間では湧水量が少なく、採取が困難な項目もあった。採取状況を図 9.4.1-4 と図 9.4.1-5 に示す。

研究坑道における水質、同位体および希ガスの分析結果を表 9.4.1-4 と表 9.4.1-5 に示す。

表 9. 4. 1-2 原位置計測結果

項目	呼称	pH	ORP	EC	DO	T
区間			mV	mS/cm	mg/l	°C
12M130-1	30-1	8.67	-287	0.580	0.35	24.4
12M130-2	30-2	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.	N.M.
12M130-3	30-3	8.73	-316	0.726	0.06	23.9
12M130-4	30-4	8.64	-323	0.706	0.04	24.1
12M130-6	30-6	8.70	-263	0.772	0.28	23.2
12M131-1	31-1	8.70	-212	0.795	0.03	23.6
12M131-3	31-3	8.60	-260	0.656	0.18	24.0
12M131-5	31-5	8.67	-304	0.804	0.05	23.6
12M131-7	31-7	8.68	-302	0.787	0.07	23.4
07M107-1	200-1	8.8	-327	0.358	0.04	20.4
07M107-3	200-3	8.83	-321	0.478	0.04	20.4
07M107-5	200-5	8.85	-323	0.555	0.01	19.8
09M120-1	300-1	7.98	-232	0.415	0.05	22.4
09M120-3	300-3	8.72	-319	0.469	0.03	23.4
09M120-5	300-5	8.53	-304	0.596	0.04	23.3
10M126-1	400-1	8.62	-343	0.449	0.04	24.7
10M126-3	400-3	8.55	-346	0.466	0.05	24.8
10M126-5	400-5	8.72	-361	0.386	0.03	25.2
12M127-1	500-1	8.46	-381	N.M.	N.M.	28.4
12M127-4	500-4	8.39	-338	N.M.	N.M.	28.2
12M127-5	500-5	8.38	-348	N.M.	N.M.	28.3
09M121-1	21-1	10.45	-334	0.791	0.13	21.2
09M121-2	21-2	8.70	-327	0.760	0.09	21.9
09M121-3	21-3	8.81	-318	0.587	0.00	22.5
09M121-4	21-4	8.68	-303	0.672	0.03	20.4

表 9.4.1-3 採水結果

区間	呼称	Major ion	Minor element	δD & $\delta^{18}O$	DIC ^{14}C · $\delta^{13}C$	^{36}Cl · $\delta^{37}Cl$	TOC	Alkalinity	Noble gas	CFCs	SF ₆	3H
12MI30-1	30-1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
12MI30-2	30-2	○	○	○	○	△	○	○	×	×	×	○
12MI30-3	30-3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
12MI30-4	30-4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
12MI30-6	30-6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
12MI31-1	31-1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○
12MI31-3	31-3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
12MI31-5	31-5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
12MI31-7	31-7	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
07MI07-1	200-1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
07MI07-3	200-3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
07MI07-5	200-5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
09MI20-1	300-1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
09MI20-3	300-3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
09MI20-5	300-5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
10MI26-1	400-1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
10MI26-3	400-3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
10MI26-5	400-5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
12MI27-1	500-1	○	○	○	○	○	○	○	△	○	○	○
12MI27-4	500-4	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○
12MI27-5	500-5	○	○	○	○	○	○	○	△	○	○	○
09MI21-1	21-1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
09MI21-2	21-2	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○
09MI21-3	21-3	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○
09MI21-4	21-4	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○

○：所定量を採取、△：一部のみ採取、×：未採取



図 9. 4. 1-4 ボトルへの採水状況



図 9. 4. 1-5 希ガス採取状況

表 9. 4. 1-4 瑞浪超深地層研究所における地下水の分析結果

(1)主要溶存イオン

サンプル名	Na mg/L	K mg/L	Mg mg/L	Ca mg/L	B mg/L	F mg/L	Cl mg/L	NO3 mg/L	SO4 mg/L	Si mg/L	ALK meq/L	TOC mg/L	TC mg/L	TIC mg/L	NPOC mg/L
12MI30-1	120	0.56	0.15	26	1.2	8.7	180	<0.01	4.8	6.7	0.61	-1.0	5.3	6.3	0.51
12MI30-2	120	0.63	0.22	29	1.2	8.5	200	<0.01	5.1	6.7	0.61	-0.1	5.8	5.9	0.18
12MI30-3	120	0.71	0.18	32	1.3	8.6	210	0.01	4.8	6.7	0.56	0.27	5.8	5.5	0.13
12MI30-4	120	0.67	0.35	30	1.3	8.5	200	0.01	4.5	6.6	0.65	-0.1	6.0	6.1	0.13
12MI30-6	120	0.63	0.17	29	1.3	8.5	190	<0.01	5.0	6.6	0.59	0.34	6.3	6.0	0.35
12MI31-1	120	0.56	0.16	28	1.2	8.5	190	0.02	5.1	6.7	0.61	0.22	6.2	6.0	0.16
12MI31-3	120	0.64	0.16	28	1.3	8.6	190	0.01	4.9	6.7	0.64	0.28	6.3	6.0	0.14
12MI31-5	130	0.69	0.28	33	1.3	8.4	210	<0.01	4.4	6.7	0.60	0.22	5.7	5.5	0.24
12MI31-7	120	0.62	0.23	30	1.3	8.5	200	<0.01	4.6	7.2	0.58	0.18	5.9	5.7	0.10
200m-1	69	0.35	0.09	9	1.1	9.2	45	<0.01	15	6.8	1.30	0.46	15	14	0.47
200m-3	80	0.40	0.11	12	1.2	9.1	78	0.01	12	7.0	1.10	0.75	13	12	0.22
200m-5	95	0.47	0.09	15	1.1	9.1	120	<0.01	8.2	7.0	0.85	0.69	9.5	8.8	0.36
300m-1	77	0.42	0.17	11	1.3	9.1	65	<0.01	13	7.0	1.20	0.66	14	13	0.47
300m-3	85	0.53	0.41	13	1.4	10	84	<0.01	11	6.9	1.20	0.55	14	13	0.36
300m-5	100	0.73	0.79	17	1.3	8.5	130	0.01	9.0	7.0	1.00	0.75	12	11	0.16
400m-1	100	0.70	0.61	15	1.5	8.9	110	0.56	11	7.2	1.30	0.47	15	14	0.17
400m-3	96	0.70	0.58	14	1.3	8.7	97	0.01	12	7.4	1.40	0.54	17	16	0.17
400m-5	85	0.55	0.33	13	1.2	8.7	84	<0.01	13.0	7.2	1.20	1.00	14	13	0.20
500m-1	200	0.98	0.21	110	1.6	5.6	460	0.01	0.14	7.0	0.31	0.55	3.4	2.9	0.10
500m-4	170	0.84	0.14	58	9.1	6.4	330	<0.01	0.19	7.1	0.36	0.59	4.2	3.6	0.08
500m-5	210	1.10	0.26	120	1.5	5.4	500	0.59	0.17	7.1	0.31	1.10	4.1	3.0	0.01
09MI21-1	120	0.98	<0.025	33	9.1	8.4	190	<0.01	0.44	7.7	1.1	0.78	1.7	0.9	0.57
09MI21-2	120	0.42	0.09	22	9.1	8.9	200	<0.01	0.12	6.1	0.48	1.00	5.3	4.3	0.78
09MI21-3	99	0.36	0.08	16	9.1	10	150	<0.01	0.12	6.4	1.3	1.30	6.4	5.1	0.22
09MI21-4	110	0.34	0.10	19	9.1	9.4	160	<0.01	0.11	6.2	0.57	1.70	7.1	5.5	0.69

(2)微量溶存イオン

サンプル名	Br	I	Cs	Sr	Li	Al	Mn	Fe	Zn	Cu	As	Se	Rb	Ba
	μ g/L	μ g/L	μ g/L	μ g/L	μ g/L	μ g/L	μ g/L	μ g/L	μ g/L	μ g/L	μ g/L	μ g/L	μ g/L	μ g/L
12MI30-1	360	59	0.9	290	68	25	3.4	1.1	0.8	0.3	0.4	<0.1	4.0	2.3
12MI30-2	390	69	1.0	320	76	28	5.8	4.2	4.4	0.3	0.3	<0.1	4.3	1.1
12MI30-3	440	72	1.0	340	78	26	8.1	6.3	2.5	0.5	0.4	<0.1	4.5	1.4
12MI30-4	420	79	1.0	330	76	29	8.3	13	0.8	0.3	0.4	<0.1	4.4	1.9
12MI30-6	410	76	1.0	310	75	20	5.5	9.1	3.2	0.7	0.4	<0.1	4.2	1.3
12MI31-1	410	68	0.9	300	76	24	4.8	4.9	0.4	0.4	0.3	<0.1	4.3	2.4
12MI31-3	410	75	1.0	300	76	25	4.4	2.3	0.9	0.3	0.4	<0.1	4.3	1.2
12MI31-5	450	86	1.0	350	82	27	7.9	11	4.1	0.9	0.4	<0.1	4.6	1.4
12MI31-7	420	88	1.0	320	76	26	5.2	25	140.0	0.5	0.4	<0.1	4.3	2.5
200m-1	100	21	0.3	80	40	7	1.5	2.9	0.6	0.4	0.3	<0.1	1.7	0.4
200m-3	160	31	0.3	110	44	9	1.9	1.0	0.3	0.3	0.4	<0.1	2.1	0.5
200m-5	190	43	0.4	120	45	11	2.1	8.3	2.7	0.4	0.4	<0.1	2.2	0.6
300m-1	150	25	0.4	96	44	9	3.0	1.5	<0.1	0.4	0.4	<0.1	2.2	0.4
300m-3	180	32	0.3	120	49	7	5.6	20	<0.1	0.3	0.5	<0.1	1.9	0.6
300m-5	270	48	0.4	180	60	5	12.0	23	0.2	0.3	0.4	<0.1	2.6	1.3
400m-1	240	42	0.4	170	60	8	6.8	4.6	0.3	0.4	0.5	<0.1	2.8	1.5
400m-3	210	36	0.4	160	55	7	8.9	4.0	0.2	0.3	0.4	<0.1	2.5	1.4
400m-5	190	32	0.3	130	51	9	5.2	4.1	1.0	0.3	0.3	<0.1	2.1	1.0
500m-1	950	140	2.2	1100	180	17	16.0	19	3.5	0.7	0.3	<0.1	8.3	3.4
500m-4	750	100	1.7	560	140	22	9.4	39	0.5	0.3	0.3	<0.1	6.6	2.7
500m-5	1100	160	1.9	1200	180	11	19.0	25	0.3	0.6	0.3	<0.1	9.1	3.8
09MI21-1	430	57	0.33	230	88	230	1.0	5.4	<0.1	0.79	1.1	<0.1	3.4	11.9
09MI21-2	480	55	0.39	190	87	14	2.3	3.4	<0.1	<0.5	1.1	<0.1	1.9	<0.5
09MI21-3	350	46	0.77	140	76	54	21	69	<0.1	<0.5	2.3	<0.1	2.3	0.6
09MI21-4	400	46	0.52	140	85	13	3.6	2.0	<0.1	<0.5	1.2	<0.1	1.4	<0.5

(3)安定および放射性同位体

サンプル名	³ H	¹⁴ C	$\delta^{13}\text{C}$	³⁶ Cl/Cl	$\delta^{37}\text{Cl}$	δD	$\delta^{18}\text{O}$
	T.U.	pMc (%)	‰	$\times 10^{-15}$	‰	‰	‰
12MI30-1	0.5 ±0.1	30.0% ±0.2%	-18.0	52.0 ±2.5	-0.30 ±0.07	-60	-8.7
12MI30-2	0.6 ±0.1	35.1% ±0.2%	-18.6	47.1 ±2.5	-0.28 ±0.11	-59	-8.9
12MI30-3	0.5 ±0.1	34.2% ±0.2%	-18.0	50.7 ±2.5	-0.17 ±0.05	-59	-8.8
12MI30-4	0.4 ±0.1	28.0% ±0.2%	-18.2	50.4 ±2.5	-0.26 ±0.04	-59	-8.8
12MI30-6	0.4 ±0.1	30.6% ±0.2%	-19.0	43.1 ±2.4	-0.06 ±0.09	-59	-8.7
12MI31-1	0.5 ±0.1	-	-	43.0 ±2.3	-0.28 ±0.06	-60	-9.1
12MI31-3	0.6 ±0.1	28.5% ±0.2%	-19.1	44.5 ±2.3	-0.09 ±0.11	-60	-9.1
12MI31-5	0.4 ±0.1	33.4% ±0.2%	-18.3	47.0 ±2.4	-0.10 ±0.10	-60	-9.0
12MI31-7	ND	31.7% ±0.2%	-20.2	50.6 ±2.5	-0.25 ±0.08	-60	-9.0
200m-1	1.1	32.3% ±0.2%	-19.4		-0.15 ±0.07	-57	-8.4
200m-3	1.0	29.8% ±0.2%	-18.5		-0.14 ±0.06	-58	-8.7
200m-5	0.9	33.6% ±0.2%	-21.5		-0.39 ±0.10	-59	-8.7
300m-1	1.1	28.4% ±0.2%	-17.8		-0.24 ±0.09	-58	-8.7
300m-3	1.1	26.5% ±0.2%	-15.5		-0.35 ±0.06	-58	-8.8
300m-5	1.2	28.9% ±0.2%	-17.4		-0.27 ±0.02	-59	-8.6
400m-1	0.6	16.0% ±0.1%	-13.1		-0.42 ±0.14	-59	-8.2
400m-3	0.5	23.0% ±0.1%	-13.7		-0.27 ±0.07	-58	-8.3
400m-5	0.8	28.0% ±0.2%	-16.8		-0.58 ±0.04	-58	-8.3
500m-1	ND	NM	NM		-0.05 ±0.08	-60	-8.7
500m-4	ND	NM	NM		-0.04 ±0.07	-60	-8.7
500m-5	ND	NM	NM		-0.07 ±0.07	-60	-8.7
09MI21-1	ND	NM	NM		-0.02 ±0.07	-61	-8.9
09MI21-2	ND	15.0% ±0.1%	-10.3		-0.01 ±0.05	-61	-8.8
09MI21-3	ND	14.1% ±0.1%	-10.8		-0.09 ±0.05	-62	-9.1
09MI21-4	ND	14.2% ±0.1%	-12.6		+0.01 ±0.05	-62	-9.1

(4)溶存ガス

サンプル名	CFCs 濃度			SF ₆ 濃度	計測値			補正值 (Ne補正)	
	CFC-12	CFC-11	CFC-113		⁴ He	³ He/ ⁴ He	Ne	⁴ He	³ He/ ⁴ He
	pg/kg			fmol/kg	CC _{STP} /g _w	-	CC _{STP} /g _w	CC _{STP} /g _w	-
12MI30-1	1.8	1.4	0.0	0.34	4.5E-5	5.0E-7	2.1E-7	4.5E-5	5.0E-7
12MI30-2	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	-	-
12MI30-3	1.4	1.4	0.0	0.30	6.1E-5	4.6E-7	2.6E-7	6.1E-5	4.6E-7
12MI30-4	1.0	0.7	0.0	0.25	6.3E-5	4.7E-7	2.5E-7	6.3E-5	4.7E-7
12MI30-6	2.3	1.2	0.0	0.30	7.2E-5	4.7E-7	2.6E-7	7.2E-5	4.7E-7
12MI31-1	1.1	1.4	0.0	NM	5.5E-5	4.2E-7	2.4E-7	5.5E-5	4.2E-7
12MI31-3	0.4	1.4	0.0	0.27	5.9E-5	4.7E-7	2.6E-7	5.9E-5	4.7E-7
12MI31-5	3.9	4.2	0.0	0.36	4.7E-5	4.3E-7	2.9E-7	4.7E-5	4.3E-7
12MI31-7	0.7	1.4	0.0	0.23	6.4E-5	4.6E-7	2.8E-7	6.4E-5	4.6E-7
200m-1	1.2	0.3	0.0	0.48	2.0E-5	4.2E-7	2.6E-7	2.0E-5	4.2E-7
200m-3	1.4	0.5	0.0	0.47	1.8E-5	3.9E-7	1.3E-7	2.9E-5	3.9E-7
200m-5	0.4	0.2	0.0	0.46	4.9E-5	5.1E-7	1.9E-7	5.1E-5	5.1E-7
300m-1	2.0	1.7	0.0	1.01	2.3E-5	4.5E-7	1.4E-7	3.3E-5	4.5E-7
300m-3	1.3	4.3	0.0	0.46	4.1E-5	5.0E-7	1.3E-7	6.1E-5	5.0E-7
300m-5	0.6	1.2	0.0	0.41	5.1E-5	4.8E-7	1.7E-7	6.2E-5	4.8E-7
400m-1	1.7	0.9	0.0	0.56	8.3E-5	4.5E-7	2.7E-7	8.3E-5	4.5E-7
400m-3	1.4	0.8	0.0	0.73	4.5E-5	4.9E-7	1.2E-7	7.7E-5	4.9E-7
400m-5	1.3	0.7	0.0	0.93	5.2E-5	4.8E-7	4.5E-7	5.2E-5	4.8E-7
500m-1	202	288	28	0.33	6.1E-5	4.9E-7	2.4E-7	6.1E-5	4.9E-7
500m-4	0.9	1.2	0.0	0.39	N.M	N.M	N.M	-	-
500m-5	1.8	2.2	0.0	0.37	4.3E-5	4.8E-7	1.8E-7	4.7E-5	4.8E-7
09MI21-1	0.0	0.4	0.0	0.67	6.0E-5	5.0E-7	1.5E-7	8.3E-5	5.0E-7
09MI21-2	NM	NM	NM	NM	6.9E-5	5.5E-7	2.8E-7	6.9E-5	5.5E-7
09MI21-3	NM	NM	NM	NM	5.2E-5	4.9E-7	2.0E-7	5.7E-5	4.9E-7
09MI21-4	NM	NM	NM	NM	2.0E-5	3.9E-7	1.7E-7	2.2E-5	3.9E-7

(5)全岩分析

鉱物	単位	12M30孔 3.12~3.18m 充填鉱物			12M30孔 6.00~6.10m 充填鉱物			12M30孔 7.30~7.45m 充填鉱物			瑞浪12M30孔 9.55~ 9.70m 母岩			瑞浪12M30孔 16.10~ 16.25m 母岩			瑞浪12M30孔 25.85~ 26.00m 母岩		
		試料1	試料2	試料3	試料1	試料2	試料3	試料1	試料2	試料3	試料1	試料2	試料3	試料1	試料2	試料3	試料1	試料2	試料3
SiO ₂	%	73.6	73.7	73	74.1	74	74.5	73.6	73.4	73.5	73.4	73	73.1	75.1	74.6	74.1	73.4	73.6	73.4
Al ₂ O ₃	%	13.35	13.4	13.15	13	12.9	13	13.45	13.35	13.35	13.5	13.75	13.6	12.7	12.75	12.75	13.3	13.35	13.3
Fe ₂ O ₃	%	1.97	1.97	1.9	1.62	1.65	1.66	2	2.07	2.05	2.09	2.08	2.08	2.11	2.14	2.14	1.86	1.89	1.87
CaO	%	1.48	1.52	1.42	1.4	1.42	1.42	1.3	1.28	1.3	1.42	1.46	1.42	1.24	1.22	1.22	1.24	1.24	1.24
MgO	%	0.34	0.34	0.32	0.2	0.2	0.2	0.25	0.25	0.25	0.27	0.28	0.28	0.3	0.27	0.27	0.24	0.25	0.24
Na ₂ O	%	3.02	3.02	3.02	3.31	3.31	3.33	3.49	3.45	3.48	3.57	3.67	3.62	3.39	3.39	3.41	3.4	3.41	3.38
K ₂ O	%	4.4	4.53	4.6	4.65	4.62	4.69	4.56	4.49	4.48	4.29	4.4	4.39	4.27	4.23	4.21	4.71	4.74	4.72
Cr ₂ O ₃	%	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
TiO ₂	%	0.16	0.16	0.16	0.13	0.13	0.13	0.15	0.16	0.16	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18	0.17	0.15	0.15	0.15
MnO	%	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.07	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06
P ₂ O ₅	%	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
SrO	%	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
BaO	%	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.05	0.05	0.05
LOI	%	1.7	1.77	1.57	0.69	0.77	0.77	0.41	0.45	0.44	0.36	0.45	0.44	0.46	0.56	0.45	0.49	0.45	0.46
Total	%	100.3	100.7	99.39	99.4	99.3	100.05	99.49	99.21	99.3	99.31	99.5	99.36	99.94	99.56	98.89	99.14	99.43	99.11
S	%	0.02	0.02	0.02	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.05	0.05	0.05
C	%	0.22	0.26	0.23	0.11	0.11	0.11	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Ba	ppm	427	444	458	488	502	499	429	424	416	431	450	426	359	359	363	487	499	524
Ce	ppm	82.2	88.3	80.4	68.6	71.3	69.9	48.6	49.7	46.7	71.5	74.9	67.6	57.8	57.1	57.9	60.3	63.3	65.6
Cr	ppm	<10	<10	<10	<10	60	<10	10	10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Cs	ppm	16.3	17.7	15.7	7.16	7.24	7.31	9.01	9	8.97	7.21	7.71	7.39	6.84	6.84	6.88	8.02	8.1	8.88
Dy	ppm	8.95	9.32	8.61	6.33	6.29	6.41	5.93	5.99	5.72	6.78	7.08	6.52	7.08	6.98	7.14	5.25	5.36	5.75
Er	ppm	6.12	6.53	6.47	4.57	4.49	4.58	4.35	4.24	4.23	4.79	4.89	4.69	5	5.01	4.98	3.47	3.67	3.83
Eu	ppm	0.69	0.71	0.76	0.62	0.65	0.66	0.6	0.53	0.57	0.64	0.6	0.62	0.49	0.49	0.54	0.59	0.78	0.73
Ga	ppm	16.7	16.9	17.2	15.8	16.2	15.5	16.9	16.4	16.5	16.7	16.8	16.5	16.6	15.6	16.5	16.5	16.1	17.6
Gd	ppm	7.31	7.6	7.32	5.19	5.51	5.1	4.61	4.71	4.49	6.09	6.24	5.69	5.63	5.66	5.64	4.59	4.84	5.03
Hf	ppm	6.7	6.6	6.5	5.8	5.8	5.5	5.2	4.9	4.8	5.3	5.3	5.3	5.5	5.5	5.7	4.2	4.5	4.8
Ho	ppm	1.96	2.01	1.92	1.38	1.43	1.37	1.31	1.32	1.26	1.54	1.51	1.43	1.52	1.53	1.62	1.12	1.2	1.26
La	ppm	40.8	43.3	39.5	34.7	36.2	35.4	24.5	24.6	23.3	35.6	36.7	33.4	28.2	27.7	28.1	30.5	31.8	32.9
Lu	ppm	1.08	1.08	1.04	0.76	0.74	0.75	0.76	0.73	0.73	0.78	0.77	0.77	0.83	0.8	0.81	0.6	0.65	0.63
Nb	ppm	18	18.2	17.4	10.8	11.3	11.3	13.8	13.8	13.3	14	14.1	13.9	15.4	14.7	15.1	11.2	11.6	12
Nd	ppm	33.6	36.2	32.3	26.2	26.7	26.6	19.9	19.7	19.4	28	29.7	27.5	24.4	24.1	24.7	22.9	24.7	25.1
Pr	ppm	9.59	9.98	9.26	7.51	7.98	7.64	5.41	5.45	5.3	7.99	8.29	7.52	6.55	6.45	6.43	6.7	7.14	7.42
Rb	ppm	217	223	228	234	242	241	227	227	221	219	225	219	214	213	215	242	244	259
Sm	ppm	7.44	8.15	7.03	5.5	5.73	5.62	4.6	4.84	4.3	6.2	6.34	6.18	5.35	5.61	5.69	4.98	4.98	5.43
Sn	ppm	6	6	5	4	4	4	5	5	5	6	6	5	5	5	5	5	5	5
Sr	ppm	107.5	108	111	107.5	112	111	124.5	124.5	123.5	132	139	133.5	105	105	106.5	130	131	139.5
Ta	ppm	1.9	1.9	1.9	1.5	1.6	1.5	1.7	1.7	1.7	1.6	1.6	1.6	1.8	1.7	1.7	1.2	1.2	1.3
Tb	ppm	1.29	1.33	1.27	0.92	0.96	0.92	0.87	0.88	0.87	1.09	1.08	1.01	1.04	1.01	1.06	0.79	0.82	0.85
Th	ppm	25.1	25	26.4	27.9	30.6	28.3	19.05	19.7	19.85	31.7	28.2	27.5	25	24.8	25.3	23.7	24.6	26.5
Tm	ppm	1.01	1.04	1.01	0.7	0.71	0.68	0.7	0.67	0.64	0.72	0.75	0.7	0.81	0.81	0.81	0.55	0.56	0.59
U	ppm	15.4	15.6	14.65	6.46	7.29	6.73	6.8	6.47	6.41	6.14	5.18	5.34	6.22	6.15	6.49	4.86	4.94	5.61
V	ppm	11	11	11	9	8	9	11	12	11	12	13	13	12	11	14	11	11	12
W	ppm	8	6	8	35	38	37	28	27	27	48	41	40	14	16	14	12	12	13
Y	ppm	61.6	63.3	60	42.5	44.7	43.7	41.3	41.7	40.3	45.6	45.4	43.4	48.2	47.8	48.9	34.8	36.2	38.2
Yb	ppm	6.38	6.58	6.44	4.6	4.76	4.5	4.71	4.67	4.77	4.99	5	4.84	5.39	5.31	5.43	3.48	3.86	3.67
Zr	ppm	184	177	180	180	188	186	155	160	147	173	182	168	171	167	178	145	144	151
Ag	ppm	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Cd	ppm	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Co	ppm	1	1	1	1	2	1	2	3	1	2	1	2	1	2	1	2	1	1
Cu	ppm	3	3	3	3	3	4	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	2	2	2
Li	ppm	30	30	30	30	30	30	40	40	40	50	40	40	40	40	40	40	40	40
Mo	ppm	<1	<1	<1	1	<1	1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Ni	ppm	<1	<1	<1	<1	<1	<1	1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Pb	ppm	28	28	28	26	30	27	24	27	29	31	28	33	26	29	27	26	27	28
Sc	ppm	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Zn	ppm	37	38	38	28	28	29	36	36	36	59	56	55	43	44	43	34	35	35
As	ppm	<0.1	0.2	0.1	2.3	2.5	2.4	0.5	0.2	0.7	0.2	0.2	0.3	0.2	<0.1	0.1	1.4	1.3	1.2
Br	ppm	0.15	0.14	0.14	0.93	1.16	0.86	0.17	0.24	0.21	0.58	0.56	0.26	0.03	0.02	0.02	0.09	0.09	0.1
Hg	ppm	0.013	0.009	0.012	0.045	0.047	0.036	0.029	0.031	0.03	0.053	0.048	0.039	0.017	0.029	0.021	0.015	0.018	0.019
Sb	ppm	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.05	0.05	0.05
Se	ppm	0.7	0.7	0.7	0.6	0.5	0.6	0.5	0.5	0.7	0.7	0.8	0.6	0.9	0.8	0.8	0.6	0.5	0.5
Te	ppm	<0.01	0.03	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	0.03	0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Tl	ppm	0.12	0.12	0.12	0.36	0.39	0.36	0.38	0.38	0.39	0.46	0.48	0.43	0.47	0.44	0.45	0.44	0.44	0.46
B	ppm	10	<10	10	30	20	20	10	10	<10	10	<10	10	<10	10	20	<10	<10	10

(5) 考察

瑞浪超深地層研究所は、広域的な地下水流動場では、流出域に位置する。流出域の地下水の特徴は、主要溶存イオンがNa-Cl型でCl濃度が高く(100~1000 mg/l)、水素・酸素同位体比が軽い($\delta D \approx -60\%$ 、 $\delta^{18}O \approx -9\%$)、He濃度が高い(10^{-5} cc_{STP}/g_w)、 3H 、CFCs、SF₆を含まないという特徴があり、一方で、若い地下水は、主要溶存イオンがCa-HCO₃型でCl濃度が低く(0~2 mg/l)、水素・酸素同位体比が重い($\delta D \approx -50\%$ 、 $\delta^{18}O \approx -8\%$)、He濃度が低い(10^{-8} cc_{STP}/g_w)、 3H 、CFCs、SF₆を含むという特徴がある(長谷川ほか、2010)。

若い地下水の流入を評価するために、主に保存性物質と地下水年代の指標になるものの分布について図9.4.1-6に示す。図では、坑道からのボーリング孔での調査結果と、既存のボーリング孔での調査結果とを比較した。既存ボーリングでの調査結果には、研究所周辺にあるDH-2孔の調査結果を用いた(JNC, 2003)。ただし、DH-2孔の調査結果は、掘削水の混入率が不明である。

Clは反応性が低く、保存性が高いと考えられており、前述のように若い地下水ではCl濃度が低く、研究所周辺の流出域ではCl濃度が高いと考えられる。Clの起源は、瑞浪層群などが堆積する際に存在した海水であり、これが残留したものと考えられている(Iwatsuki et al., 2005)。DH-2孔ではCl濃度が深度とともに増加傾向にある。同様に坑道からのボーリング孔での調査結果でもCl濃度は深度とともに増加傾向にある。坑道からのボーリング孔での調査結果では、Cl濃度が低く、立坑から少し離れた09MI21や12MI33ではCl濃度が高い傾向にあり、Cl濃度は若い地下水の流入に対応していると考えられる。ただし、Cl濃度は深度方向に増加しており、若い地下水の流入で低下するものの、深部からの地下水の流入で増加するため、Cl濃度から若い地下水の流入の評価は難しいと考えられる。

δD も反応性が低く、保存性が高いと考えられている。前述のように、若い地下水では δD が重く($\delta D \approx -50\%$)、研究所周辺の流出域では δD が軽い($\delta D \approx -60\%$)。研究所周辺で δD が軽いのは、氷期に涵養した地下水の影響と考えられる(Iwatsuki et al., 2005)。DH-2孔では δD はバラツキはあるものの、比較的一定で -60% 程度の値をとる。坑道からのボーリング孔での調査結果では、 -56% ~ -60% の値をとっており、浅層地下水の流入を示唆していると考えられる。若い地下水を -50% 、流出域の地下水を -60% とした場合の混合率は、 3H などから推定される若い地下水の混合率ともおおむね一致している。 δD は流出域でおおむね一定値であり、若い地下水とも異なる値をとるため、混合率を評価する指標として有効であると考えられる。ただし、 δD は分析精度が1%程度であるため、混合率の解像度は良くない。

3H は半減期12.4年を持つ、若い地下水を評価する際の有効な指標である。 3H は降水・河川水など若い地下水には3.7TU程度含まれる(JNC, 2003)。ただし、流出域ではほとんど検出されない。坑道からのボーリング孔での調査結果では、09MI21、500m坑道を除き有意に検出されている。言い換えると09MI21と500m坑道には有意に若い地下水が流入していないと考えられる。降水・河川水程度の 3H を持つ地下水が流入したとすると、数十パーセントの地下水が流入していると考えられる。 3H は、立坑周辺で高く、立坑から少し離れた12MI33では低いことから、立坑から離れると若い地下水の流入は小さくなると考えられる。また、

09MI21 と 500m 坑道では検出されないことから、掘削後間もない 500m 坑道には新しい地下水が有意に浸入しておらず、立坑から離れている 09MI21 でも新しい地下水が有意に侵入していないと考えられる。

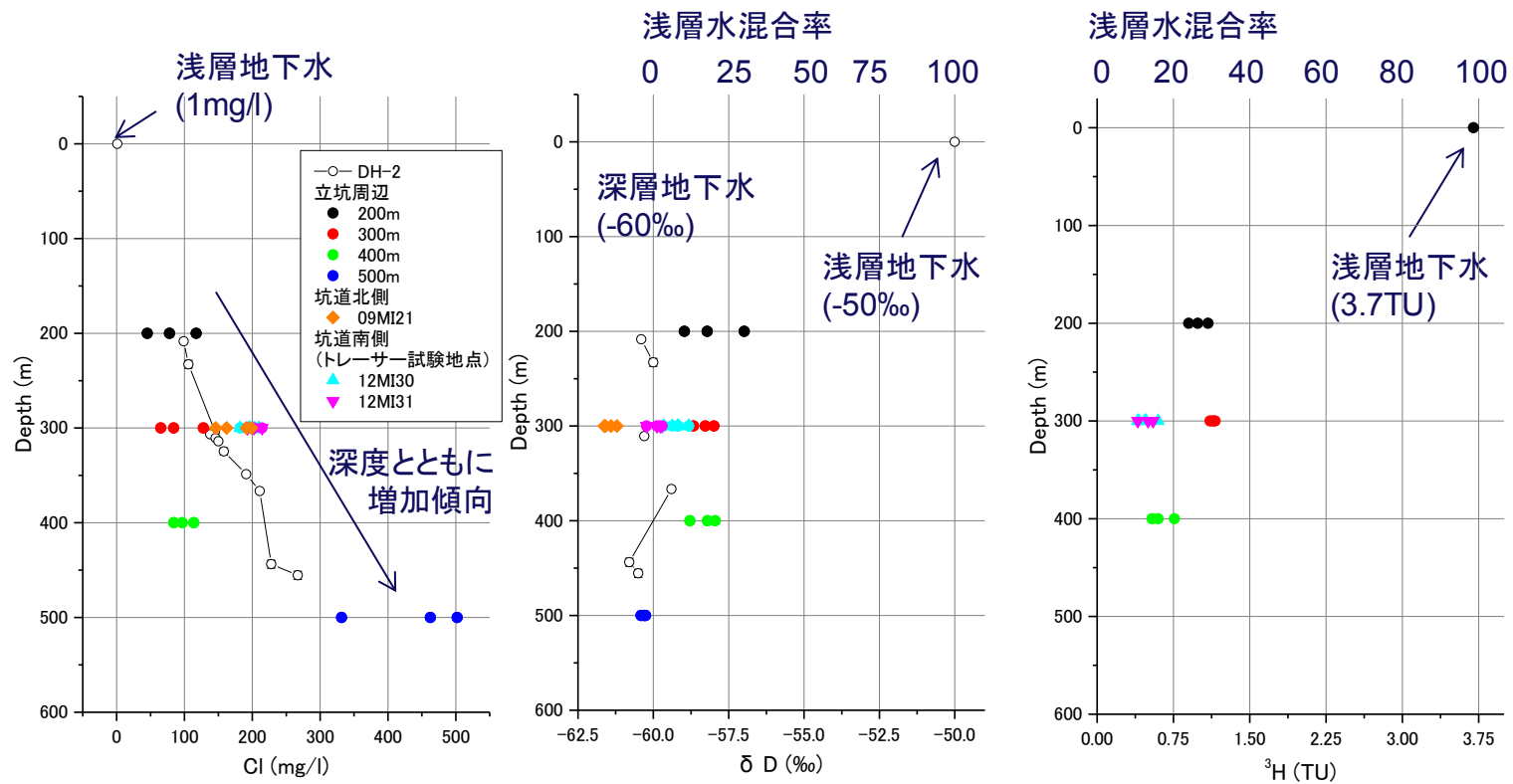


図 9. 4. 1-6 若い地下水の指標となる物質の深度分布

(線図は DH-2 孔での調査結果)

温暖化ガス (CFCs と SF₆) については、³H との相関性を示した。ここでは、若い地下水の ³H を 3.7TU と仮定して、若い地下水の混合率を求めたものと、若い地下水の CFC や SF₆ を現在の大気と平衡と仮定して、若い地下水の混合率を求めたものとを図 9.4.1-7 のように比較した。ここで、CFCs については、最も安定と考えられている CFC-12 を対象とした。

CFC-12 から求めた混合率は数パーセント程度であり、³H から求めた混合率に対して有意な相関がなかった。特に ³H の混合率の増加に対して CFC-12 の混合率の増加が見られないことから、CFC-12 は地中内で分解され濃度が低下していると考えられた。CFCs は、還元環境では主に硫酸還元反応などにより分解されることが知られている (Plummer and Bunsenberg, 2006)。このような影響で分解されていると考えられた。

一方で、SF₆ は、³H の混合率の増加に対して、増加率が概ね一致する傾向が見られた。このため、SF₆ は反映しているのではないかと考えられた。SF₆ については、花崗岩などでは原位置で発生する可能性なども指摘され、過去の調査結果ではそのような調査結果も得られていたが、研究所周辺ではそのような影響が小さかったのではないかと考えられる。

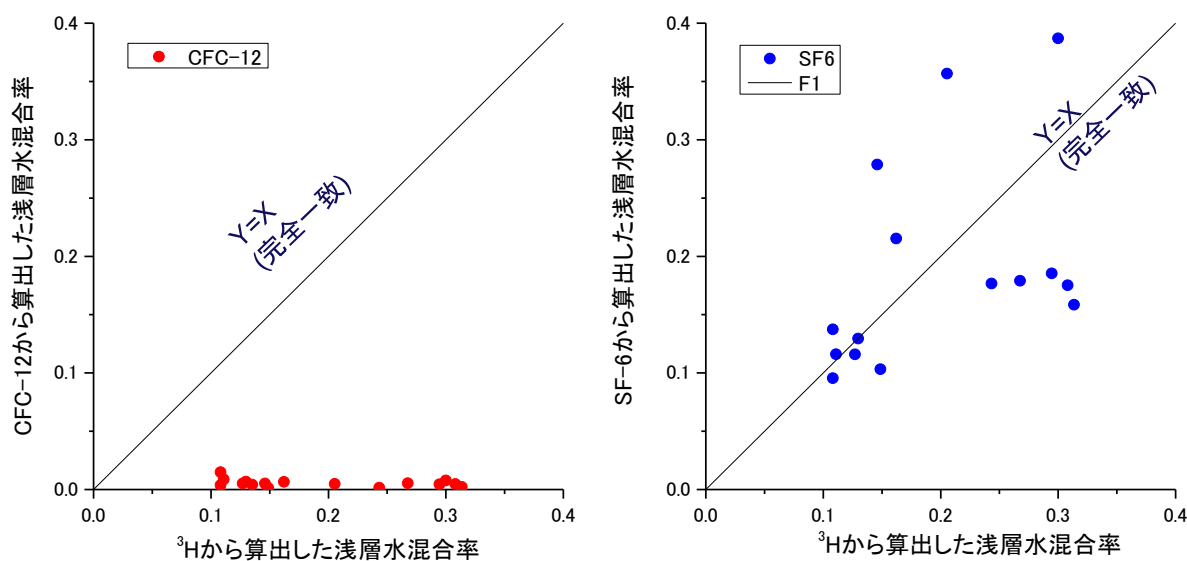


図 9.4.1-7 ³H と CFC-12、SF₆ から算出した浅層水混合率の比較

地下水年代の指標となる ^{14}C 、 ^4He の深度分布について、図 9.4.1-8 に示した。

^{14}C は、半減期 5730 年の放射性同位体であり、研究所周辺での地下水流動を評価する際の重要な指標である。ただし、 ^{14}C は涵養時に地化学反応による影響を受けており、これを補正して評価する必要がある。立坑周辺では、トリチウムが検出された地点では ^{14}C の計測が可能であったが、トリチウムが検出されなかった 500m 坑道や 09MI21 では、 ^{14}C の計測ができないところもあった。過去の調査でも流出域周辺では、 ^{14}C の捕集が困難で、計測ができない場合があった。これは、流出域の地下水では ^{14}C の捕集は困難だが、若い地下水が混合することにより、 ^{14}C の捕集が可能になったとも考えられる。また、研究所周辺での ^{14}C は、中間域で計測された ^{14}C 濃度の 20pMC よりも有意に大きくなっていることから、このような若い地下水の流入の影響を受けていると考えられる。

$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ は、半減期 30.1 万年の放射性同位体である。研究所周辺の海水は、瑞浪層群堆積時に流入した海水であると考えられるため、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ は放射平衡に達していると推定される。 ^{36}Cl はおおむね $40\sim 60\times 10^{-15}$ の値を示している。土岐花崗岩での平衡値は、岩石の主要鉱物や含有物質から $52\pm 7\times 10^{-15}$ と推定されるため、放射平衡に達していると考えられる。測定結果は 10%程度の誤差を含むため、ややバラツキがある分布になっていると考えられる。 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ は若い地下水のような Cl 濃度の低いものと混合しても影響が少ない。これは、希釈されても同位体比は変化しないためである。

^4He は、希ガスであり、地盤中の U・Th の壊変によって生成する。研究所周辺は、流出域にあたり外部フラックスの影響を強く受けており、 ^4He は 10^{-5} ccSTP/g_w オーダーの高い濃度である。若い地下水と混合すると ^4He 濃度は低下するが、研究所周辺では、 ^4He 濃度は深度とともに増加する傾向があり、Cl と同様に、若い地下水の混合率を識別するのが難しくなっている。ただし、Cl と ^4He に明確な相関はない。これは、Cl が海水の残留したものであるのに対して、 ^4He は主に深部から供給されたものであり、起源が異なるためと考えられる。

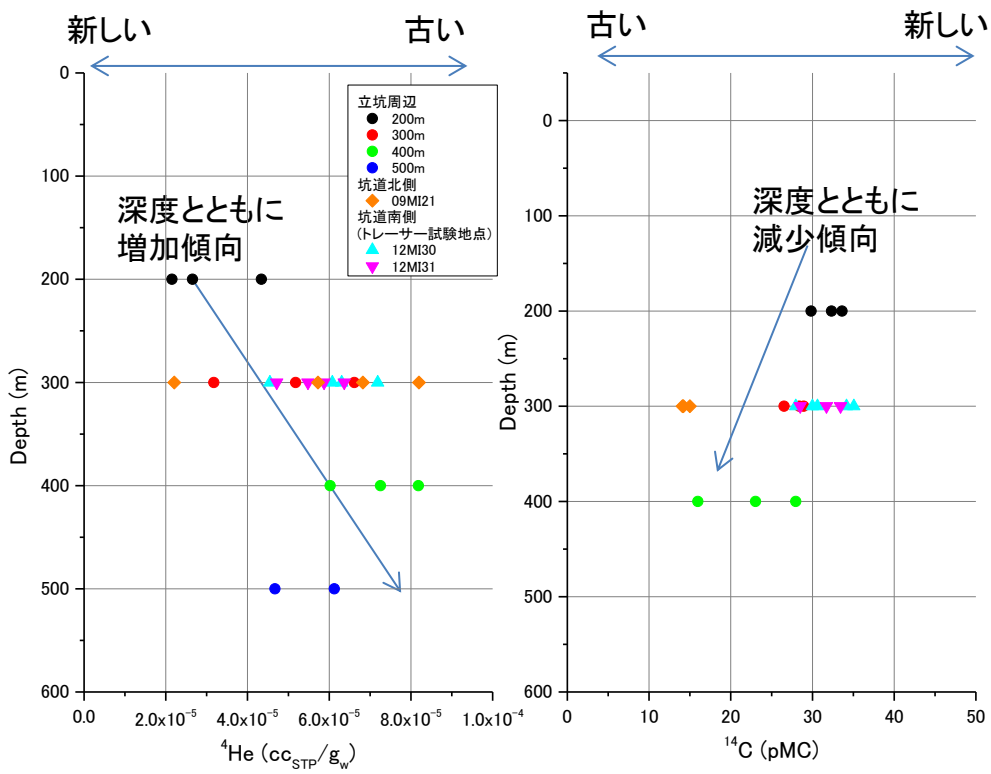


図 9.4.1-8 地下水年代指標 (^{14}C 、 ^4He) の深度分布

9.4.2 幌延における地下水採水

(1) 採水地点

採水は、図 9.4.2-1 に示す幌延深地層研究所において、坑道内のボーリング孔から地下水採取を実施した採取地点は以下の通りである。採水区間は表 9.4.2-1 に示すように主に循環機能付きの地点とした。

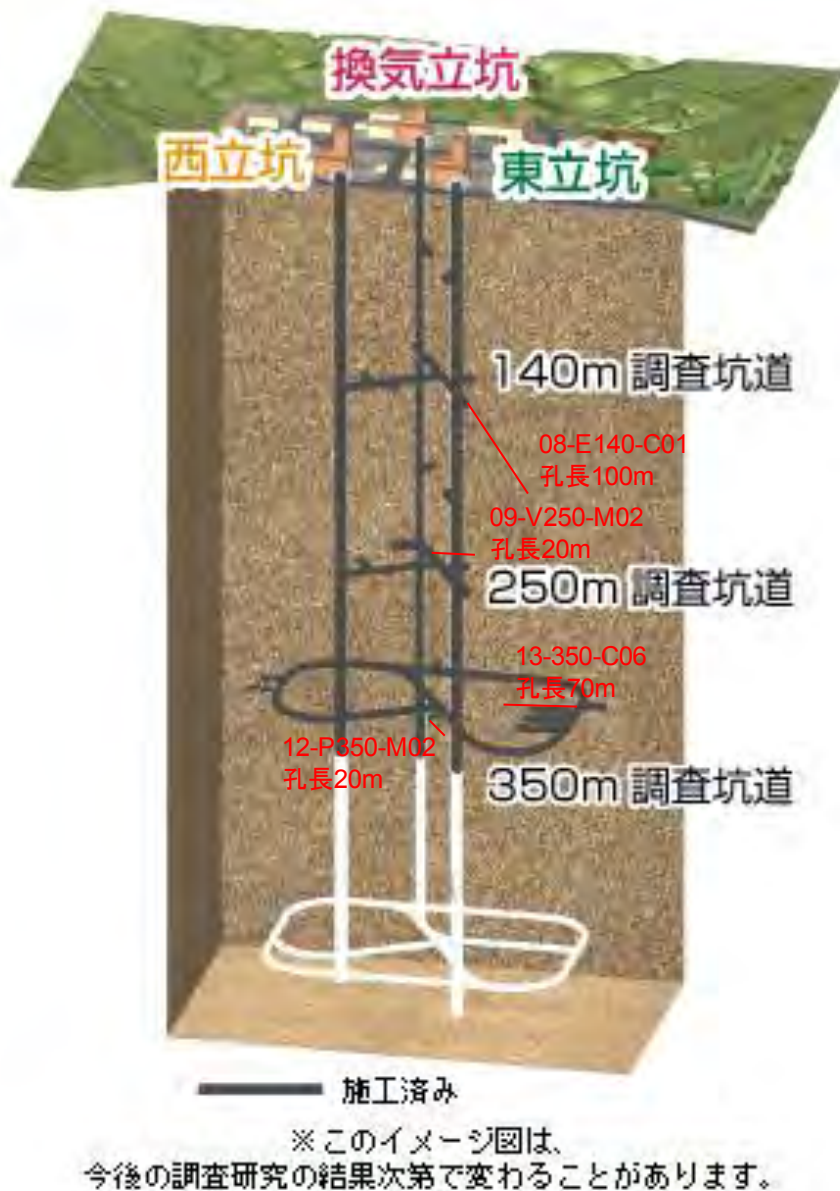


図 9.4.2-1 幌延深地層研究所における採水地点

(日本原子力研究開発機構(2014)に加筆)

表 9. 4. 2-1 採取地点一覧

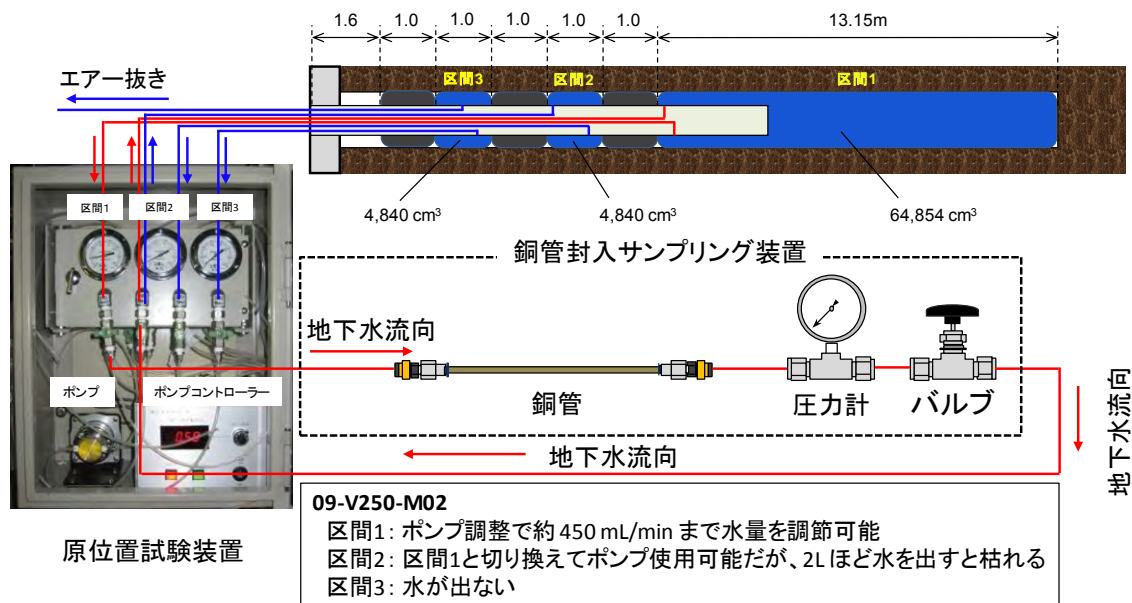
区間名	ボーリング地点	対象地層	孔長	備考
08-E140-C01#3	140m調査坑道	声間	100m	循環式
09-V250-M02#1	250m調査坑道	声間/稚内境界	20m	循環式
13-350-C06#3	350m調査坑道	稚内	70m	循環式
12-P350-M02	350m調査坑道	稚内	20m	

(2)採水方法

循環機能付きの採水区間の採水ラインの全体図を図 9. 4. 2-2 に示す。採水区間はパッカーなどに区切られており、区間からのラインが坑道内の制御盤へとつながっている。区間圧力は大気圧よりも高いため、ラインを解放すると地下水が流出する。ただし、幌延深地層研究所周辺の地下水はガス水比が大きいため、ラインを大気圧に解放すると、溶存ガスが分離し、区間内に溜まる。最終的には分離したガスが区間内に蓄積し、ガスのみが噴出するようになる。このため、十分に地下水が確保できない区間も多い。特にガスについては、採取時に分離するために採取が困難である。このため、図 9. 4. 2-2 に示す循環装置を用いて、孔内の銅管を配管の一部として、銅管と区間とを地下水を循環させて採取する方法を試みた。ただし、この方法で採取できたのは、循環装置が存在するところに限られる。以下に希ガス用採水の手順を示す。

- ① 銅管の両端に逆止弁を取り付ける。
- ② アタッチメントを使って、銅管と採水チューブ等を接続し、銅管封入サンプリング装置の組み立てを行う。
- ③ 銅管封入サンプリング装置の送水側を原位置試験装置左側の区間1のライン(図9. 4. 2-2の赤線)に接続する。ポンプでの流量調整が可能であれば、サンプリング装置の排水側を区間1から延びるもう一つのラインに接続し、地下水を循環させる。
- ④ 銅管に気泡が入らないように銅管を縦にした状態で軽く叩きながら、地下水を銅管へと導く。(1本目のサンプリング時に、採水前の排水量を計測する。)
- ⑤ 一定時間(4週間程度経過後)、排水側に取り付けたバルブを閉める。
(3本目のサンプリング時に、採水後の排水量を計測する。)
- ⑥ 排水側→送水側の順で銅管に接続したチューブを取り外す。
- ⑦ 深度、日時等を記載したラベルを銅管に付ける。
- ⑧ 地表に持ち帰り、銅管の両端をクランプで封じる。
- ⑨ 銅管の両端に取り付けた逆止弁を取り外す。

上記の方法で、極力脱ガスを抑制して試料が採取できたと考えられる。



例) 深度 250m のボーリング孔 (09-V250-M02 孔)

図 9. 4. 2-2 孔内部・調査坑道部の循環ライン

(3) 分析方法

地下水の分析は前節(3)と同様に実施した。

(4) 分析結果

原位置において、ポータブルのメータを用いて、pH、ORP(酸化還元電位)、EC(電気伝導度)、DO(溶存酸素)、温度を分析した結果を表 9. 4. 2-2 に示す。本地点ではガスの湧出が多く、ORP、DO などの計測が困難であった。また、地下水の採取状況を表 9. 4. 2-3 に示す。一部の区間では湧水量が少なく、ガスの噴出が顕著であったため、溶存ガス試料(希ガス、フロンガス、SF₆)の採取が困難であった。地下水の分析結果を表 9. 4. 2-4 に示す。

表 9. 4. 2-2 原位置計測結果

区間名	pH	EC	T	ORP	DO	区間圧力	特記事項
		mS/m	℃	mV	mg/l	Mpa	
08-E140-C01#3	7.20	9.36	15.1	N.M.	N.M.	0.95	循環式
09-V250-M02#1	7.25	8.05	19.3	-31	0.05	0.35	循環式
13-350-C06#3	7.04	15.50	21.7	N.M.	N.M.	0.90	循環式
12-P350-M02	6.87	15.75	17.0	N.M.	N.M.	0.90	ガス噴出

表 9.4.2-3 地下水試料の採取状況

区間	Major ion	Minor element	δD & $\delta^{18}O$	DIC ^{14}C · $\delta^{13}C$	^{36}Cl · $\delta^{37}Cl$	TOC	Alkalinity	Noble gas	CFCs	SF ₆	3H
08-E140-C01#3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
09-V250-M02#1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
13-350-C06#3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
12-P350-M02	○	○	○	×	○	○	○	×	×	×	○

表 9.4.2-4 地下水の分析結果

(1) 主要溶存イオン

サンプル名	Na mg/L	K mg/L	Mg mg/L	Ca mg/L	B mg/L	F mg/L	Cl mg/L	NO ₃ mg/L	SO ₄ mg/L	ALK meq/L
08-E140-C01#3	2100	70	39	47	73	<10	1800	4.8	<50	50
09-V250-M02#1	2000	55	38	53	48	<10	2100	9.3	<50	38
13-350-C06#3	3400	70	78	89	94	<10	4100	<5	<50	48
13-P350-M02	3600	78	86	94	96	<10	4500	<5	<50	48

(2) 微量溶存イオン

サンプル名	Si mg/L	Br mg/L	I mg/L	Cs $\mu g/L$	Sr $\mu g/L$	Li $\mu g/L$	Al $\mu g/L$	Fe $\mu g/L$	Mn $\mu g/L$	Zn $\mu g/L$
08-E140-C01#3	34	12	6.0	<0.1	600	5400	26	410	22	9.1
09-V250-M02#1	30	13	7.0	<0.1	610	4900	39	360	23	4.1
13-350-C06#3	25	28	13	0.77	1300	8600	36	720	26	8.6
13-P350-M02	25	31	14	0.75	1500	9200	35	3200	19	2.6

(3) 安定および放射性同位体

サンプル名	3H T.U.	^{14}C pMc (%)	$\delta^{13}C$ ‰	$^{36}Cl/Cl$ $\times 10^{-15}$	$\delta^{37}Cl$ ‰	δD ‰	$\delta^{18}O$ ‰
	08-E140-C01#3	N.D.	0.9% ± 0.1%	+14.9	3.6 ± 0.7	-2.60 ± 0.05	-57
09-V250-M02#1	N.D.	1.0% ± 0.1%	+15.4	3.8 ± 0.7	-0.95 ± 0.07	-63	-6.7
13-350-C06#3	N.D.	1.2% ± 0.1%	+14.5	5.0 ± 0.8	-1.03 ± 0.10	-44	-1.9
13-P350-M02	N.D.	-	-	4.7 ± 0.8	-1.23 ± 0.08	-42	-1.5

(4) 溶存ガス

サンプル名	CFCs 濃度			SF ₆ 濃度	計測値			補正值 (Ne補正)	
	CFC-12	CFC-11	CFC-113		4He	$^3He/^4He$	Ne	4He	$^3He/^4He$
	pg/kg			fmol/kg	cc _{STP} /g _w	-	cc _{STP} /g _w	cc _{STP} /g _w	-
08-E140-C01#3	*	*	*	*	3.4E-07	1.8E-07	9.3E-09	7.3E-06	1.8E-07
09-V250-M02#1	0.9	6.4	0.0	0.00	6.8E-08	4.4E-07	2.4E-08	6.1E-07	4.4E-07
13-350-C06#3	3.1	11.5	0.0	0.00	1.1E-07	2.3E-07	1.0E-08	2.2E-06	2.3E-07
13-P350-M02	*	*	*	*	7.0E-08	2.7E-08	1.1E-08	1.2E-06	2.7E-08

(5) 全岩分析

鉱物	単位	幌延東立坑 HE150m			幌延東立坑 HE200m			幌延東立坑 HE271m			幌延東立坑 HE301m		
		試料1	試料2	試料3	試料1	試料2	試料3	試料1	試料2	試料3	試料1	試料2	試料3
SiO ₂	%	70.5	70.5	71.3	72.5	72.6	72.6	75	75.4	75.1	72.3	72.9	72.4
Al ₂ O ₃	%	10.25	10.25	10.35	9.61	9.61	9.62	8.61	8.63	8.62	9.76	9.85	9.78
Fe ₂ O ₃	%	3.88	3.88	3.92	3.57	3.59	3.6	2.96	2.99	2.94	3.8	3.83	3.8
CaO	%	0.53	0.53	0.54	0.43	0.44	0.44	0.46	0.46	0.45	0.48	0.48	0.47
MgO	%	1.42	1.42	1.45	1.22	1.22	1.22	1.2	1.21	1.19	1.41	1.43	1.42
Na ₂ O	%	1.54	1.54	1.55	1.39	1.38	1.4	1.4	1.41	1.4	1.42	1.44	1.42
K ₂ O	%	1.74	1.75	1.77	1.64	1.65	1.65	1.49	1.49	1.49	1.68	1.68	1.68
Cr ₂ O ₃	%	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
TiO ₂	%	0.46	0.46	0.47	0.44	0.44	0.44	0.4	0.4	0.39	0.45	0.45	0.45
MnO	%	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
P ₂ O ₅	%	0.07	0.07	0.08	0.06	0.07	0.06	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07
SrO	%	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
BaO	%	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
LOI	%	7.98	7.89	7.9	7.41	7.42	7.4	6.74	6.8	6.74	6.99	7.06	6.98
Total	%	101.35	101.25	102.35	101.35	101.55	101.55	100.5	101.05	100.55	101.4	102.1	101.45
S	%	1.11	1.12	1.08	1.18	1.13	1.19	0.79	0.77	0.82	1.13	1.1	1.14
C	%	1.53	1.57	1.53	1.54	1.55	1.52	1.56	1.57	1.6	1.49	1.48	1.49
Ba	ppm	311	330	321	303	284	298	279	281	283	310	304	297
Ce	ppm	38.8	40.4	39.2	37.4	35	36.4	33.8	33.2	33.9	39	38.5	36.6
Cr	ppm	80	80	80	80	70	70	70	70	70	80	70	70
Cs	ppm	5.71	5.98	5.8	5.78	5.28	5.67	4.92	5.03	5	5.94	5.71	5.55
Dy	ppm	2.81	2.78	2.76	2.54	2.45	2.46	2.21	2.46	2.41	2.61	2.64	2.46
Er	ppm	1.67	1.79	1.76	1.57	1.48	1.53	1.42	1.44	1.5	1.67	1.66	1.58
Eu	ppm	0.69	0.71	0.76	0.67	0.63	0.66	0.65	0.61	0.65	0.64	0.66	0.59
Ga	ppm	12.5	13.3	12.8	12	11.1	11.4	10.4	10.5	11	12.3	12.1	11.5
Gd	ppm	2.81	2.95	2.82	2.71	2.53	2.67	2.43	2.52	2.36	2.76	2.77	2.69
Hf	ppm	3	3.1	2.9	2.8	2.6	2.8	2.7	2.4	2.7	3	2.9	2.8
Ho	ppm	0.57	0.61	0.6	0.53	0.46	0.54	0.5	0.47	0.5	0.53	0.56	0.5
La	ppm	18.4	19.3	18.8	18	16.9	17.5	16.7	16.5	16.9	18.8	18.6	17.7
Lu	ppm	0.26	0.26	0.25	0.24	0.23	0.23	0.23	0.24	0.24	0.25	0.25	0.24
Nb	ppm	7	7.5	7.3	7	6.6	6.7	6.2	6.3	6.4	7.3	7.1	6.8
Nd	ppm	15.7	16.3	16.2	15.2	14.5	15.3	14.1	14.4	14.5	16.1	15.5	14.9
Pr	ppm	4.46	4.73	4.54	4.28	4.06	4.23	4.05	4.08	4.17	4.45	4.49	4.27
Rb	ppm	79.7	84.2	81.1	78.1	73	76.8	68	69	69.5	80.5	79.2	76.2
Sm	ppm	2.97	3.32	3.26	3.09	2.89	3.05	2.72	2.96	2.92	2.99	3.08	3.18
Sn	ppm	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2
Sr	ppm	91.4	94.8	93	83	77.5	81.8	83.7	84	85.2	88.8	87.9	84.9
Ta	ppm	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.7	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Tb	ppm	0.43	0.44	0.47	0.39	0.4	0.39	0.38	0.4	0.38	0.43	0.42	0.39
Th	ppm	7.37	7.68	7.55	7.28	6.81	7.21	6.65	6.69	6.76	7.7	7.66	7.26
Tm	ppm	0.26	0.27	0.27	0.24	0.19	0.22	0.21	0.22	0.2	0.24	0.21	0.23
U	ppm	4.16	4.42	4.24	3.96	3.65	3.91	4.31	4.32	4.43	5	4.92	4.58
V	ppm	92	96	93	88	81	86	74	74	75	89	87	83
W	ppm	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	3	2
Y	ppm	15.5	16.5	15.8	14.3	13.6	14.1	13.6	13.5	13.5	14.7	15.1	14.3
Yb	ppm	1.61	1.51	1.63	1.5	1.43	1.47	1.32	1.39	1.33	1.56	1.59	1.47
Zr	ppm	104	109	106	99	90	95	90	90	91	101	100	98
Ag	ppm	0.5	<0.5	<0.5	0.5	0.5	0.6	0.5	<0.5	0.7	0.5	<0.5	0.5
Cd	ppm	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Co	ppm	5	6	5	5	5	5	4	5	5	4	5	6
Cu	ppm	24	24	25	23	23	23	23	23	23	23	23	23
Li	ppm	50	50	50	50	50	50	30	30	30	40	40	40
Mo	ppm	3	3	3	6	6	6	4	4	3	6	6	5
Ni	ppm	36	35	34	28	31	30	26	25	25	34	33	34
Pb	ppm	11	13	13	13	10	10	11	7	10	11	13	10
Sc	ppm	10	10	10	9	9	9	8	8	8	9	9	9
Zn	ppm	82	82	83	76	76	77	75	76	75	78	79	79
As	ppm	6.8	7.1	7.2	7.7	7	7.7	9	6.2	8.4	7.3	7.4	8
Bi	ppm	0.22	0.22	0.24	0.23	0.23	0.23	0.19	0.13	0.19	0.23	0.24	0.24
Hg	ppm	0.051	0.063	0.058	0.058	0.063	0.05	0.039	0.029	0.046	0.046	0.05	0.048
Sb	ppm	0.24	0.23	0.22	0.3	0.3	0.32	0.18	0.1	0.16	0.19	0.19	0.19
Se	ppm	1.7	2	1.9	2	1.8	1.7	1.9	1.8	1.8	1.8	1.7	1.8
Te	ppm	<0.01	0.04	0.03	0.06	0.04	0.02	0.03	0.04	0.02	<0.01	0.03	<0.01
Tl	ppm	0.07	0.08	0.08	0.08	0.09	0.08	0.06	0.04	0.06	0.06	0.07	0.06
B	ppm	320	290	320	290	290	290	190	190	150	230	210	210

(5) 考察

幌延深地層研究所周辺は、化石海水が残留しており、Cl 濃度が海水の 1/4~1/2 程度、酸素同位体比が有意にプラスにシフトしているなどの特徴がある（岩月ほか、2009）。また、地下水年代測定結果から、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ は原位置での放射平衡に達していることから百万年以上、 ^4He は原位置生成を仮定すると堆積年代と同程度の蓄積があるため、地下水は堆積時からほとんど動いていないと考えられている（中田・長谷川、2010）。浅層地下水は、Cl 濃度が低い、 δD が $-70\pm 5\%$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ が $-10\pm 1\%$ であり、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ が原位置平衡に比べて高い、 ^4He が低い（大気平衡程度）などの特徴がある。

幌延深地層研究所周辺で、若い地下水の流入や古い地下水の残留を評価するために、主に保存性物質と地下水年代の指標になるものの分布を示す。ここでは、坑道内のボーリング孔での調査結果と、既存のボーリング孔での調査結果とを比較したものを図 9.4.2-3 に示した。既存ボーリングでの調査結果には、研究所周辺にある先行ボーリング孔の調査結果を用いた（舟木ほか、2008）。

Cl 濃度は、先行ボーリングでの調査結果と概ね一致している。研究所周辺は比較的浅層水の流入が顕著な領域で、Cl 濃度が低い傾向にあるが、250m 坑道からのボーリング孔（09-V250-M02#1）、350m 坑道からのボーリング孔（13-350-C06#3）ともに、先行ボーリングでの調査結果と良く一致している。

δD についても、先行ボーリングでは深度方向への変化が大きいが、250m 坑道からのボーリング孔、350m 坑道からのボーリング孔ともに調査結果は良く一致している。

先行ボーリング孔での調査結果には、岩石コアだけでなく地下水の調査結果もあるが、これらも研究坑道からの調査結果と良く一致していることから、坑道掘削による若い地下水の流入は有意ではないと推定される。また、若い地下水の流入が顕著でないことは、坑道からのボーリング孔から ^3H が検出されないことから明らかである。

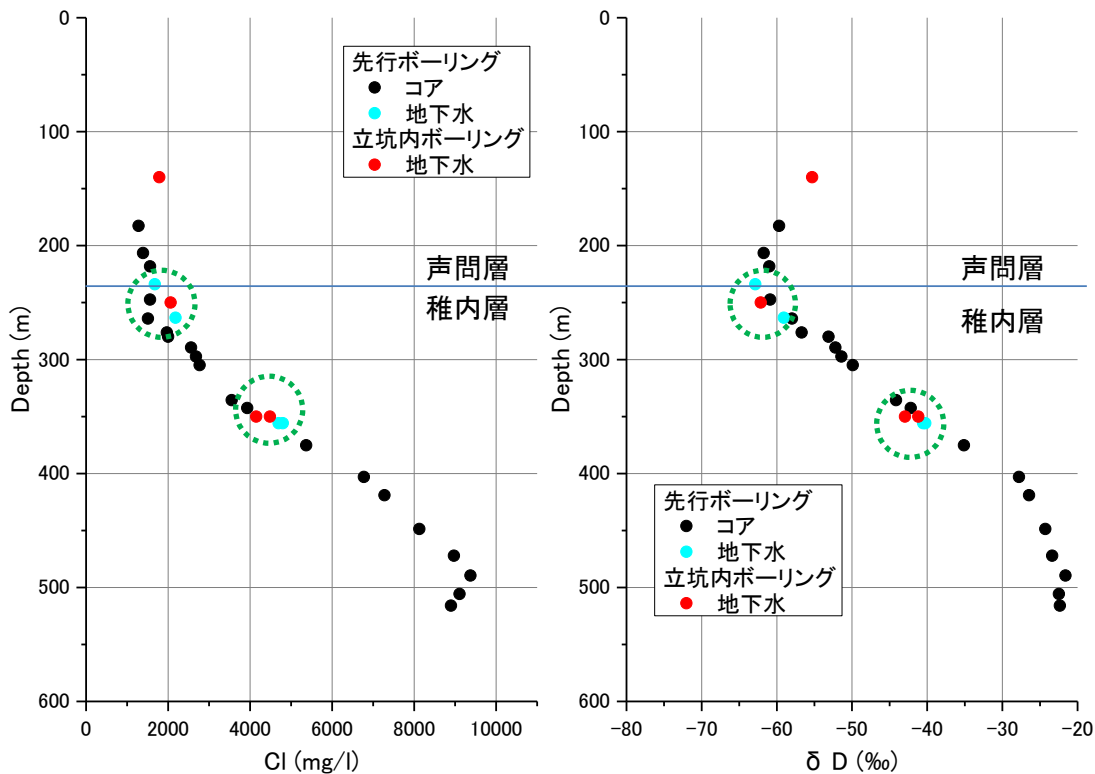


図 9.4.3-3 先行ボーリングと立坑内ボーリングの保存性物質の調査結果の比較

次に、地下水年代の指標となる $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ と ^4He について先行ボーリングと坑道からのボーリングとを比較した。この結果を図 9.4.3-4 に示す。

$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ は、前述の岩石分析結果から計算した結果、声問層で 4.2×10^{-15} 、稚内層で 7.8×10^{-15} である(電力中央研究所、2013)。 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ は変動が大きく、先行ボーリングの深度 250m 付近では声問層の平衡値に比べても比較的低い値($2 \sim 3 \times 10^{-15}$)を示し、周辺深度に比べて岩石コア・地下水ともに比較的低い値を示している。ただし、立坑からのボーリングの調査結果も同様の結果となっている。声問層と稚内層の境界にあたる深度 240m 付近では、比較的割れ目が多く地下水流動が顕著なことから、声問層から比較的流動性が高い地下水が流入していると推定できる。このため、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ も周辺深度とはことなり低い値を示していると考えられる。後述する ^4He についても声問層と稚内層との境界で濃度が低いことから、流動性が高い地下水が存在している可能性が高い。

^4He は、250m 坑道での立坑からのボーリングでの調査結果は、先行ボーリングの岩石コア・地下水と同程度である。ただし、周辺の ^4He 濃度に対して低いことから、前述のように声問層と稚内層の境界にあたる 240m 付近では、流動性が高いと推定される。350m 坑道での結果は、岩石コアおよび地下水と一致

していない。幌延での ^4He 濃度については、Ne濃度が大気平衡濃度の $2 \times 10^{-7} \text{ cc}_{\text{STP}}/\text{g}_w$ に対して $1/10 \sim 1/20$ まで低下しており脱ガスがかなり大きい。このため、 ^4He 濃度は前述のNe補正によって脱ガスを補正しているが、350m地点では脱ガス率が大きいため十分に元に戻っていない可能性も考えられる。この脱ガスの影響を抑制するために、今後、原位置において平衡式サンプラーなどを適用する予定である。

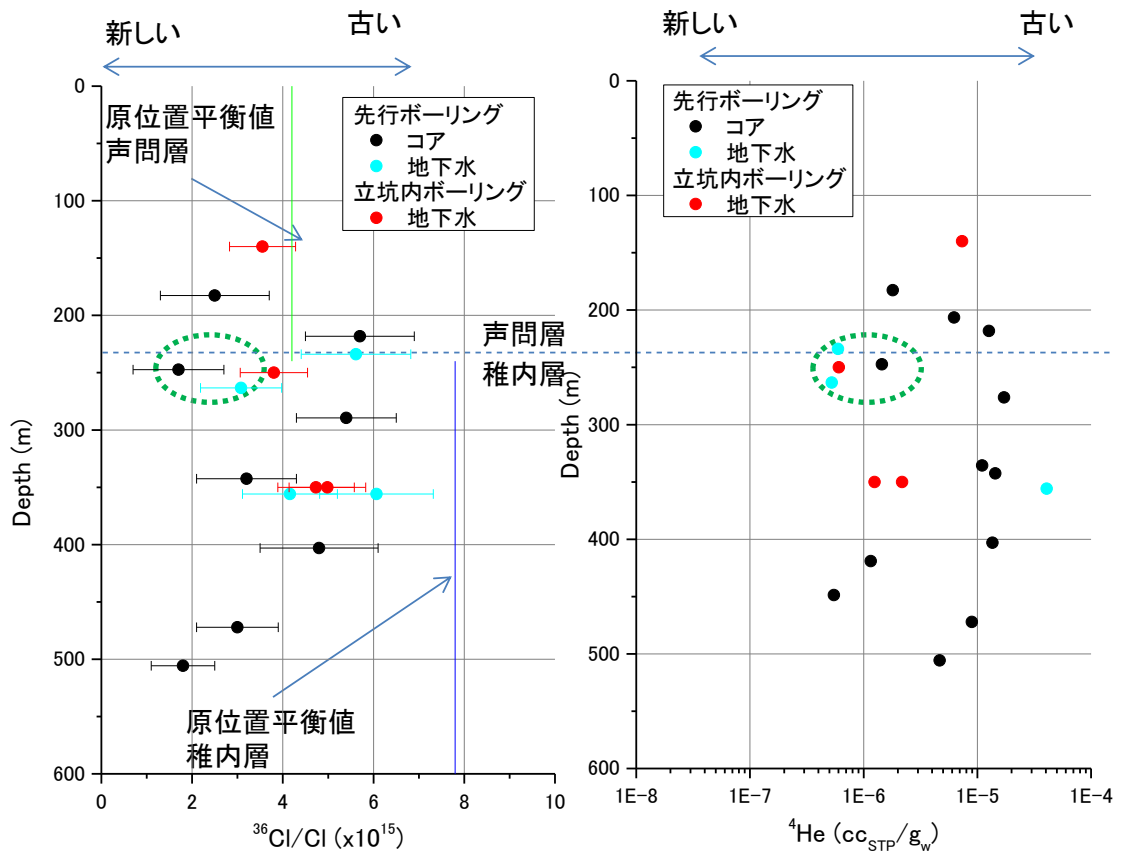


図 9.4.3-4 先行ボーリングと立坑内ボーリングの地下水年代指標の調査結果の比較

9.4.3 まとめと今後の課題

瑞浪超深地層研究所では、原位置での地下水年代調査として、岩盤中の物質移行に関するボーリング孔（12MI30号孔、12MI31号孔）、研究坑道300mの12MI30孔、12MI31孔、200m、300m、400、500mm予備ステージの水質モニタリング孔、（それぞれ07MI07孔、09MI20孔、10MI26孔、12MI33孔）において調査を実施した。

既存のボーリング調査結果と研究所での調査結果を比較した結果、流出域の地下水（Na-Cl型、Cl濃度が高い（100～1000mg/l）、 δD と $\delta^{18}O$ が現在の降水よりも軽い（ $\delta D=-60\text{‰}$ 、 $\delta^{18}O=-9\text{‰}$ ）、 3H を含まない、 4He 濃度が高いという特徴を持つ地下水）に若い地下水（Ca-HCO₃型、Cl濃度が低い（0～2mg/l）、 δD と $\delta^{18}O$ が現在の降水程度（ $\delta D=-50\text{‰}$ 、 $\delta^{18}O=-8\text{‰}$ ）、 3H が3.7TU程度、 4He 濃度が低いという特徴を持つ地下水）が最大数十%混合していると考えられた。また、新しい地下水の指標として、 3H と δD が有効であると考えられた。Clや 4He は深度依存性などが有り、若い地下水の混合指標としては適用が難しいと考えられた。SF₆は、 3H と相関があることから、若い地下水の指標として使える可能性があること、CFCsは硫酸還元などの影響などにより分解されており、若い地下水の指標としては使用が難しいことが示唆された。今後、若い地下水の流入の指標として有効と考えられる物質を検討するとともに、濃度分布の時間的な変化から、どのような輸送形態で地下水が流入しているかを検討する予定である。

幌延深地層研究センターでは、原位置での地下水年代調査として、140m調査坑道の08-E140-C01、250m調査坑道の09-V250-M02、350m調査坑道の13-350-C06、12-P350-M02で調査を実施した。

既存のボーリング調査結果とセンターの調査結果を比較した結果、両者は概ね一致し、若い地下水の指標となる 3H 、CFCs、SF₆なども検出されなかったため、新しい地下水の流入はほとんどないと考えられた。ただし、声間層と稚内層の境界部では、既存ボーリングの結果だけでなく、センターでの調査結果でも $^{36}Cl/Cl$ と 4He が周囲に比べて低く、比較的流動性が高い領域があることが示唆された。今後、このような領域の特性を評価するうえで有効な物質について検討するとともに、物質分布などから地下水の輸送形態について検討する予定である。また、 4He の分析結果については、脱ガスの影響をかなり強く受けているため、原位置平衡式サンプラーなど脱ガスを抑制するためのサンプリング方法を適用する予定である。

参考文献

- 伊藤和男 (1981): 河口域底でい中の金属の化学形に基づく選択的溶解 I. 鉄とマンガン, 分析化学, 30, 518-524.
- 伊藤和男 (1982): 河口域底でい中の金属の化学形に基づく選択的溶解 II. 亜鉛、銅および鉛, 分析化学, 31, 657-662.
- 岩月輝希、石井英一、新里忠史 (2009): 北海道幌延地域における深部地球化学環境の長期変遷シナリオの構築、地学雑誌、118, 700-716.
- 柏谷 公希, 中田 弘太郎, 長谷川 琢磨 (2009): 簡便で高精度な地下水の蛍光染料濃度測定法の提案—ボーリング調査における信頼性の高い地化学データ取得のために—. 電力中央研究所報告 N09026.
- 金井豊 (1993): 選択的分別溶解法による堆積物中のキャラクタリゼーション, ぶんせき, 1993, p980-982.
- 金井豊, 奥山康子, 坂巻幸雄 (1996): 分別溶解法による堆積物中の元素の存在形態の研究—実験的検討と花崗岩質礫岩への応用, 地質調査月報, 47, 413-425.
- 電力中央研究所 (2013): 平成 24 年度地層処分技術調査等 (地層処分共通技術調査: 岩盤中物質移行評価技術高度化開発—地下水年代測定技術調査—) 報告書、403p.
- 長尾 誠也, 2008 水中腐食物質の分離法 in 環境中の腐食物質—その特徴と研究法—, (監修) 日本腐食物質学会, (編著) 石渡 良志, 米林 甲陽, 宮島 徹, 三共出版株式会社 発行.
- 中田 弘太郎, 長谷川 琢磨 (2010): 地下水年代測定評価技術の開発 (その 10) —北海道幌延地域における ^4He ・ ^{36}Cl 法適用の試み—. 電力中央研究所報告 N09027.
- 日本原子力研究開発機構 (2014): 瑞浪超深地層研究所、Accessible at:
<http://www.jaea.go.jp/04/tono/shisetsu/miu.html>
- 日本原子力研究開発機構 (2014): 深地層研究計画の現状—地下施設整備の工事状況—、Accessible at:
http://www.jaea.go.jp/04/horonobe/shisetsuseibi_kouji.html
- 長谷川琢磨・中田弘太郎・富岡祐一・後藤和幸・柏谷公希・濱 克宏・岩月輝希・武田匡樹・小坂 寛 (2010): 地下水年代測定評価技術の開発 (その 12), —東濃地域における ^4He と ^{14}C 地下水年代測定の適用性検討—. 研究報告: N10001. 電力中央研究所, 20p.
- 舟木泰智、常磐哲也、石井英一、羽出山吉裕、松尾重明、津田和康、小泉朗、石井泰己、大條裕一、杉山和稔 (2008): 幌延深地層研究計画 換気立坑先行ボーリング (PB-V01 孔) 調査報告書—地質調査—、地層処分研究開発部門、幌延深地層研究ユニット、日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2008-013.
- 放射線医学総合研究所 (2014): 環境中のトリチウム測定調査データベース (NETS DB), Accessible at:
<http://www.nirs.go.jp/db/anzendb/AnzenkenkyuDB.php> .
- 由佐 悠紀, 柴田 知之, 芳川 雅子 (2004): 別府温泉南部域の温泉水への海水混入の検出 (1) ストロンチ

ウム同位体による試み. 大分県温泉調査研究会報告 第55号.

- Beekman, H. E., Eggenkamp, H. G. M., Appelo, C. A. J. (2011): An integrated modelling approach to reconstruct complex solute transport mechanisms - Cl and $\delta^{37}\text{Cl}$ in pore water of sediments from a former brackish lagoon in The Netherlands, *Appl. Geochem.* **26**, 257-268.
- Desaulniers D. E., Cherry J. A., Kaufmann R. S., and Bentley H. W. (1986): ^{37}Cl - ^{35}Cl variations in a diffusion-controlled groundwater system. *Geochim. Cosmochim. Acta* 50, 1757-1764.
- Eggenkamp H. G. M., Middelburg J. J., and Kreulen R. (1994): Preferential diffusion of ^{35}Cl relative to ^{37}Cl in sediments of Kau Bay, Halmahera, Indonesia., *Chem. Geol.*, 116, 317-325.
- Eggenkamp, H. G. M., Coleman, M. L. (2009): The effect of aqueous diffusion on the fractionation of chlorine and bromine stable isotopes., *Geochim. Cosmochim. Acta*, 73, 3539-3548.
- Eggenkamp H. G. M. and Coleman M. L. (2000): Rediscovery of classical methods and their application to the measurement of stable bromine isotopes in natural samples., *Chem. Geol.*, 167, 393-402.
- Elmore, D., Fulton, B. R., Clover, M. R., Marsden, J. R., Gove, H. E., Naylor, H., Purser, K. H., Kilius, L. R., Beukens, R. P. and Litherland, A. E. (1979) : Analysis of Cl-36 in environmental water samples using an electrostatic accelerator., *Nature*, 277 (4) , 22-25.
- Evbuomwan, I. O. (1995): The Structural Characterisation of Porous Media for use as model Reservoir Rocks, Adsorbents and Catalysts, Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, University of Bath Department of Chemical Engineering.
- Groen, J., Velstra, J., Meesters, A. G. C. A. (2000): Salinization processes in paleowaters in coastal sediments of Suriname: evidence from $\delta^{37}\text{Cl}$ analysis and diffusion modelling. *J. Hydrol.* **234**, 1-20.
- Gurtler, B. K., Vetter, T. A., Perdue, E. M., Ingall, E., Koprivnjak, J. -, Pfromm, P. H., 2008. Combining reverse osmosis and pulsed electrical current electrodialysis for improved recovery of dissolved organic matter from seawater. *J. Membr. Sci.* 323, 328-336.
- Hendry, M. J., Wassenaar, L. I., Kotzer, T. (2000): Chloride and chlorine isotopes (^{36}Cl and $\delta^{37}\text{Cl}$) as tracers of solute migration in a thick, clay-rich aquitard system. *Water Resour. Res.* **36**, 285-296.
- Horwitz, E. P., Dietz, M. L., and Chiarizia, R., (1992-a): The application of novel extraction chromatographic materials to the characterization of radioactive waste solutions, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 161 (2), 575-583.
- Horwitz, E. P., Chiarizia, R., and Dietz, M., (1992-b): Novel strontium-selective extraction chromatographic resin, *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 10 (2), 313-336.

- IAEA/WMO(2014): Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. Accessible at: <http://www.iaea.org/water> (2014/1/16).
- Iwatsuki, T., Furue, R., Mie, H., Ioka, S., Mizuno, T. (2005): Hydrochemical baseline condition of groundwater at the Mizunami underground research laboratory(MIU), *Applied Geochemistry* 20, 2283-2302.
- JNC(2003): Data book on groundwater chemistry in the Tono area, Tono Geoscience Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC TN 7450 2003-001.
- Kaufmann, R. S., Long, A., Bently, H. and Davis, S., 1984, Natural chlorine isotope variations. *Nature*, 309, 338-340.
- Kazemi, G. A., Lehr, J.H. and Perrochet, P. (2006): *Groundwater age*, Wiley-Interscience, 325p.
- Lavastre, V., Jendrzejewski, N., Agrinier, P., Javoy, M., Evrard, M. (2005): Chlorine transfer out of a very low permeability clay sequence (Paris Basin, France): ^{35}Cl and ^{37}Cl evidence. *Geochim. Cosmochim. Acta* **69**, 4949-4961.
- Lehmann, B.E., Love, A., Purtschert, R., Collon, P., Loosli, H.H., Kutschera, W., Beyerle, U., Aeschbach-Hertig, W., Kipfer, R., Frapce, S.K., Herczeg, A., Moran, J., Tolstikhin, I.N., Gröning, M. (2003): A comparison of groundwater dating with ^{81}Kr , ^{36}Cl and ^4He in four wells of the Great Artesian Basin, Australia, *Earth and Planet. Sci. Lett.* **211**, 237-250.
- MueNutt, R. H. (2001): *Strontium isotopes in Environmental Tracers in Subsurface Hydrology* published by Kluwer Academic Publishers, P 233.
- Mook, W.G., Van Der Plicht, J. 1999. Reporting ^{14}C activities and concentrations. *Radiocarbon*, 41, 227-239
- Nagasawa, S., Kitagawa, H., Nakanishi, T., Tanabe, S., Hong, W. (2013): An approach toward automatic graphitization of CO_2 samples for AMS ^{14}C measurements. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 294, 266-269.
- Nakata, K., Hasegawa, T., 2011 Improvement of pre-treatment method for $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ measurement of Cl in natural groundwater by AMS, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 269 (3), pp. 300-307.
- Phillips, F. (1999) : Chlorine-36. in *Environmental Tracers in Subsurface Hydrology* edited by Cook, P. and Herczeg, A.L., Kluwer Academic Publishers, 299-348.
- Phillips, F.M. and Bentley, H.W. (1987): Isotopic fractionation during ion filtration: I. Theory, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51, 683-695.
- Plummer L.N. and Bunsenberg(2006): Chlorofluorocarbons in the atmosphere (Chapter 2) in *Use of*

- chlorofluorocarbons in hydrology –a guide book–, IAEA, 9–15.
- Shouakar–Stash O., Frapce S. K. and Drimmie R. J. (2005): Determination of bromine stable isotopes using continuous–flow isotope ratio mass spectrometry., *Anal. Chem.*, 77, 4027–4033.
- Solomon, D.K. and Cook, P.G. (1999): ^3H and ^3He , Environmental tracers in subsurface hydrology (edited by Cook, P. and Herczeg, A.L.), Kluwer Academic Publishers, 397–424.
- Sylva S. P., Ball L., And Nelson R. K. and Reddy C. M. (2007): Compound–specific $^{81}\text{Br}/^{79}\text{Br}$ analysis by capillary gas chromatography/multicollector inductively coupled plasma mass spectrometry., *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, 21, 3301–3305.
- Thurman, E.M., Malcolm, R.L. (1981): Preparative isolation of aquatic humic substances. *Environmental Science and Technology* 15 (4), 463–566.
- Wassenaar, L., Aravena, R., Fritz, P. (1990): The geochemistry and evolution of natural organic solutes in groundwater. *Radiocarbon* 31 (3), 865–876.
- Wassenaar, L., Aravena, R., Hendry, J., Fritz, P. (1991): Radiocarbon in dissolved organic carbon, a possible groundwater dating method: case studies from western Canada. *Water Resour. Res.* 27 (8), 1975–1986.
- Zhang, M., Frapce, S.H., Love, A.J., Herczeg, A.L., Lehmann, B.E., Beyerle, U., Purtschert. (2007): Chlorine stable isotope studies of old groundwater, southwestern Great Artesian Basin, Australia, *Appl. Geochem.* 22, 557–574.

10. まとめと今後の課題

10.1 原位置トレーサー試験装置の試作

本研究では、平成 17 年度より収着性トレーサーの使用も可能な原位置トレーサー試験装置の開発を行い、平成 20～22 年度には割れ目の分布が比較的単純なスイス Nagra の Grimasel Test Site において適用性試験を行い、試験装置が良好に機能することを確認した。平成 26 年度以降は日本国内での適用性試験を計画しており、我が国の地質環境への対応を可能とするための装置の改良を重ねている。本年度は、坑道内装置から試験孔内への送水チューブ内でのトレーサー溶液の分散を抑制するための循環バルブの試作と孔内装置への組み込み、揚水装置側の無脈動ポンプの試作を行った。

まず、トレーサー循環バルブについては、内部のピストンを水圧で移動させることにより、バルブに 6 箇所設けた注水、回収ポートの流れのパターンを変更することが可能となるように試作した。そして、試作したバルブについて、室内試験により、流路が設計通りに切り替わること、5 MPa の耐水圧性を有することを確認した。また、500 回以上の動作確認試験を実施し、その際 50 回毎にバルブポート間の漏洩検査を行いバルブから漏水がないこともチェックし、循環バルブの耐久性を確認した。これらの確認の後、循環バルブを孔内装置に組み込んだ。循環バルブの組み込み位置は、孔内装置のトレーサー注入・揚水ポートとの距離ができるだけ短くなるように、孔内装置のマンドレル内の蛍光濃度センサーの直近とした。改良前の原位置トレーサー試験装置では、坑道内に設置するトレーサー溶液タンクとボーリング孔内の注入装置とをつなぐ往復約 100 m もの長さの注入・回収チューブや注水ポンプ、流量計等の内部において、トレーサー溶液の分散が生じていた。それに対し今回の改良では、坑道に設置する装置と孔内の注入装置との間で、改良前には地下水とトレーサー溶液の兼用としていた注入チューブと回収チューブは地下水専用とし、トレーサー溶液専用の注入チューブと回収チューブを新たに設けた。そして、孔内装置に循環バルブを組み込むことにより、試験区間へ送る地下水とトレーサー溶液との切り替えを孔内装置の中で行うことが可能となり、トレーサーの分散が生じるチューブの長さを往復約 0.7 m に縮減することができた。単孔注水揚水試験を模した室内性能確認試験では、循環バルブの組み込みにより矩形状にトレーサー注入を行えることが確認できた。また、ポイント希釈試験を模した室内試験では、坑道と孔内の間の循環経路内の地下水とトレーサー溶液の切り替えを僅かな時間で行うことが可能となり、循環経路内でのトレーサー濃度の偏りに起因する計測濃度の周期的な変動を回避できることが確認できた。

また、揚水装置側のポンプについて、国内での適用性試験に向け 5 MPa の水圧下でも使用可能となるように、無脈動ポンプを新たに設計、試作した。その際、無脈動ポンプの機動性と操作性を向上させるために、架台や制御盤の小型化に努めた。そして、室内試験において 5 MPa の水圧環境下でポンプを 1 時間程度作動し、メカニカルシール部より漏水しないことを確認した。さらに、ポンプの回転数を 10 段階に変化させて水の吐出量を計測し、設定した回転数に応じて線形に水が吐出され、最大吐

出量は約 2,200 ml/min となることを確認した。

今後は、国内での原位置適用性試験を通じて新たな課題を抽出し、我が国の地質環境に対応できるように装置の改良・高度化を図る予定である。

10.2 トレーサー試験結果の評価手法の開発

本研究では、平成 26 年度以降に原位置でのトレーサー試験技術の適用性試験を予定しており、本年度は適用性試験場の地質環境特性調査を実施した。そこで、その調査で得られた情報を基に、原位置での孔間トレーサー試験の予備解析を数値シミュレーションにより実施した。また、平成 20～24 年度にスイス Nagra の Grimsel Test Site で実施した原位置トレーサー試験およびその評価解析では、収着性物質を用いたトレーサー試験の破過曲線を十分に再現することができなかった。そのため、収着性物質を用いたトレーサー試験の破過曲線から分配係数を同定する手順について検討を行った。

孔間トレーサー試験の予備解析では、単一の割れ目のみを考慮した 2 次元モデルにより、孔間距離 2.5m でのダイポール試験を想定して解析を行った。トレーサーとしては非収着性物質である蛍光染料ウランを用いるものとした。最初に自然状態での（バックグラウンドの）地下水流れが存在しない場合の解析を行ったところ、理論上は無限大時間後にはトレーサーの回収率は 100 %になるはずであるが、揚水孔でのトレーサー濃度がピークに達するのに要した時間の 6 倍の時間が経過しても、回収率は 60 %に過ぎなかった。次に、適用性試験場でのポイント希釈試験で計測されたバックグラウンドの地下水流量を考慮した解析を実施したところ、地下水流量が比較的大きいため揚水孔でのトレーサー回収率に大きく影響することがわかった。バックグラウンドの流れが注水孔から揚水孔に向かう場合にトレーサーの回収率が最も高く、揚水孔から注水孔に向かう場合に最も低くなる。ただし、バックグラウンドの流れが揚水孔から注水孔に向かう場合には揚水孔と注水孔を入れ替えることで対処することが可能であり、トレーサーの回収が最も難しくなるのは注水孔と揚水孔を結ぶ線分に対しバックグラウンドの流れが直交する場合である。揚水流量を増やすことによりトレーサーの回収率を上げることができるが、孔間でのトレーサーの移行時間も短くなり、岩石基質への収着を期待する収着性物質を用いたトレーサー試験ではあまり好ましいことではない。収着性物質を用いるトレーサー試験では、高い回収率を保ちつつ孔間でのトレーサーの移動時間をできるだけ長くすることが課題となる。

収着性物質を用いたトレーサー試験の破過曲線から分配係数を同定する手順については、単一の割れ目と近傍の岩石基質を考慮した 3 次元モデルにより、孔間距離 5m でのダイポール試験を想定して検討を行った。まず、①非収着性物質を用いたトレーサー試験の破過曲線から割れ目の開口幅と分散長を同定し、②その開口幅と分散長で固定して収着性物質を用いたトレーサー試験の破過曲線から分配係数のみを同定した。それに対し、③収着性物質を用いたトレーサー試験の破過曲線のみから割れ目の開口幅と分散長、分配係数の 3 パラメーターの値を同定した。解析は、割れ目の透水量係数場を変

更したケース、注水・揚水流量を変更したケース、岩石基質への分配係数を変更したケースなど、5 ケース実施した。①で得られた割れ目の開口幅と分散長を既知として分配係数のみを同定した②の方法では、収着性トレーサーの破過曲線を良好に再現することができず、分配係数の同定値も“真値”（設定値）とは隔たりが見られた。それに対し、③で得られた分配係数は、1 ケースを除いて①、②の手順で得られた同定値よりも“真値”に近いものであった。そのため、岩石基質に対する分配係数を精度良く推定するためには、収着性物質を用いたトレーサー試験の破過曲線を基に逆解析を行う際に、分配係数だけでなく割れ目の開口幅と分散長も変更パラメーターとする必要があると考えられる。

10.3 単孔式トレーサー試験技術の開発

単孔式トレーサー試験の技術開発を目的とし、過去の報告書、論文についてレビューを行った。次に、パラメーターが破過曲線に与える影響を明らかにするため、割れ目モデル、複合モデル、不均質モデルを用いて感度解析を行った。最後に、これまで開発を行ってきた割れ目調査技術のうち、ラドン濃度計測法と単孔式トレーサー試験の組み合わせに関する検討を行うため、ラドン濃度の感度解析を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- ・ 文献調査を行った結果、単孔式トレーサー試験は、孔間式トレーサー試験で明らかにされる水理的連結性に関する評価は難しいが、比較的簡便に行える試験法であることが明らかになった。また、1本のボーリング孔を使って行う試験であるので、1回あたりのコストを低く抑えることができ、複数地点、複数深度で行うことによって、効率よく物質移行に関するデータを増やすことができる可能性があることが明らかになった。
- ・ 割れ目モデルを用いて感度解析を行い、動水勾配、割れ目幅、透水量係数、待機時間、縦分散長、遅延係数が破過曲線に与える影響を明らかにした。動水勾配が大きいと、割れ目内に注入されたトレーサーがバックグラウンドの地下水に流されて回収率が低減し、各パラメーターの感度が低くなることが明らかになった。
- ・ 割れ目と岩盤マトリクスを併せた複合モデルを用いて感度解析を行い、マトリクス拡散係数、同位体分別係数が破過曲線に与える影響について明らかにした。動水勾配が大きいと、マトリクス拡散係数に対する感度が低くなることが明らかになった。感度を改善する方法として、チェーサー注入後に待機時間を設ける方法が示されたが、動水勾配が大きい場合、待機の間バックグラウンドの地下水流れによって流されて回収率が低減し、感度が改善しない可能性もあるので、現地の水理情報を考慮して待機時間を決める必要がある。
- ・ 透水性の不均質性を考慮した割れ目モデルを用いて感度解析を行い、不均質性が破過曲線に与える影響について明らかにした。感度解析の結果、破過曲線に対する不均質性の影響はそれほど大きくないが、動水勾配が大きい場合、不均質性の影響が徐々に現れることが明らかになった。

- ・ ラドン濃度の感度解析を行った結果、縦分散長が破過曲線に及ぼす影響は小さく、割れ目幅の方が破過曲線に及ぼす影響が大きいことが明らかになった。従って、ラドン濃度の破過曲線を評価することで、割れ目幅を求めることができる可能性が示された。単孔式トレーサー試験とラドン濃度計測法を組み合わせることで、効率よく割れ目幅に関するデータを得られる可能性が高いが、試験手順を工夫する必要がある、今後の課題である。

10.4 ラドン濃度計測による割れ目調査技術の開発

岩盤中の割れ目における複雑な間隙構造に対して、既存の間隙幅の決定手法には不確実性が、この不確実性を低減することが望まれている。また、割れ目中の物質移行における拡散係数に寄与する表面積の評価手法が必要とされている。本事業では、上記の必要性に鑑み岩盤中の割れ目の開口幅をこれまでと異なるラドンを用いた手法で推定し、従来手法の補完を目指すことを目的に検討を実施してきた。昨年度までは、室内試験およびスイスのグリムゼルで原位置試験を実施し、ラドンを用いた割れ目の開口幅推定法と原位置試験での適用性を確認した。

今年度は、国内の岩石を用いたラドンの室内試験により、岩石表面からのラドンフラックスの測定を行ない、ラドンを用いた手法の国内の岩盤への適用性の検討を行なった。また、併せてラドンの溶存濃度の低い試料の測定方法についても検討した。

国内の岩石を用いた室内試験では、グリムゼルで対象とした花崗岩と異なる鉱物学的特徴や岩石物性を有する我が国の堆積岩を試料として、ラドンのフラックスの測定を試みた。試料は新第三紀前期中新世の砂岩と凝灰岩、および中生代三畳紀の頁岩である。これらの試料の間隙率は凝灰岩、砂岩、頁岩の順に大きく、ラドンの親核種であるラジウムの含有量は頁岩が最も大きく、砂岩と凝灰岩はほぼ同等である。これらの岩石を直方体に整形し気密容器に水とともに入れた浸漬試験の結果得られたラドンのフラックスは、間隙率と同じ順で大きく、親核種の含有量よりも、間隙率がラドンのフラックスにより寄与すると考えられた。さらに、凝灰岩、砂岩、頁岩について、それぞれ厚みが異なる試料でラドンフラックスを計測した。その結果、凝灰岩では厚さの増加とともにフラックスも増加するようにも見えたが、砂岩、頁岩では厚さとの明瞭な関係は認められなかった。したがって、間隙率が高い岩石では内部からのラドンの影響があることが示唆されるが、間隙率の低い試料を含めた堆積岩としてのラドンフラックスの特性は今回の試験では明確にならなかったため、今後、試験数を増やすなどして確認をする必要がある。

ラドン濃度の低い試料の測定方法の検討について、液体シンチレーションカウンター法、ガンマ線スペクトロメトリ法、静電捕集法の3種類の手法を比較した。その際、低濃度の計測を目指すために、ラドン濃度が概ね2.5 Bq/L以下の試料を用いることとした。最も計測精度が良いと考えられる液体シンチレーションカウンターと他の2手法とを比較した場合、静電捕集法では液体シンチレーションカ

ウンター法の8割程度の値、ガンマ線スペクトロメトリ法では3割程度の値に留まった。静電捕集法では、濃度が低いと値のばらつきが顕著になる傾向があり、同一サンプルでの測定回数を増やすことにより誤差を低減できる可能性がある。また、ガンマ線スペクトロメトリ法では、計測セルの活性炭を増量することは難しいため、湿度などの活性炭へラドンが吸着する要因を低減することなどにより、ラドンの蓄積量を大きくすることが現実的な解決方法と考えられた。

残された課題としては、我が国の堆積岩のうち、間隙率が比較的大きいと考えられる新第三紀の堆積岩などを用いたラドンフラックスの測定をさらに進め、間隙率のラドンフラックスへの影響を考慮した測定方法を開発していく必要がある。また、ラドンの溶存濃度の低い試料の測定法について、静電捕集法では測定回数を増やすことで精度を高めること、また、ガンマ線スペクトロメトリ法では湿度管理により活性炭への吸着性能を向上させることなどを、今後の課題として検討していく。

10.5 割れ目の可視化技術の開発

まず、平面研削と研削面の撮影を繰り返す手法をスイスのグリムゼルテストサイトで得た岩石コアに対して適用するとともに、割れ目の開口幅や形状を精度よく取得する方法について検討した。研削面画像から開口幅を測定したところ、開口幅分布は対数正規分布に類似した分布であった。また、測定した開口幅の平均値は、過年度に計測した高粘性流体注入試験で得られた平均開口幅や、ラドン濃度計測で得られた平均開口幅に近い値であった。そのため、本手法を用いれば、単一割れ目ではない複雑な割れ目であっても平均的な割れ目幅を見積もることが可能と考えられる。研削面画像から作成したMPR (Multi Planar Reconstruction) 画像や三次元画像は、1 mm 間隔の研削の粗さを反映したものであったが、X線CT画像では困難であった幅の狭い割れ目の分布を抽出することができ、割れ目間隙の精密な可視化が可能であることが分かった。しかし、割れ目沿いの岩盤基質部へ浸潤したレジンや粒内クラックに浸潤したレジンが割れ目として識別され、単純な画像処理で三次元画像を構築した場合は、割れ目間隙の三次元分布が実態と異なることが課題として残った。

続いて、グリムゼルで使用したレジン材と類似したレジン材を選定し、可使時間および粘度の測定を行うとともに、グリムゼルで確認されたレジン材からウラニンが分離する原因について調査した。可使時間は、粘性が低いものほどバラツキが小さく、測定の再現性が良いことが分かった。ただし、可使時間の決定方法は非常に単純である一方、曖昧なものであるため、測定の再現性も含めて、どの時刻までを可使時間とするかについても検討していく必要がある。レジン材の混合後の粘度および温度の経時変化を測定した結果、温度が急激に上昇する時刻に粘度も急激に上昇すること、また、粘度が下に凸の曲線を描くように変化することが分かった。粘度が急激に上昇する温度は50℃付近であり、レジン注入時に孔内の温度を測定することが可能であれば、注入時のレジンの状態を概略的に把握することが可能であり、より安全かつ確実な注入が行えるものと考えられる。ウラニンを添加したレジ

ン材を硬化させた後、硬化物をイソプロピルアルコールに浸漬した結果、ウラニンの溶出が確認された。レジン材に蛍光染料（ウラニン）そのものを添加する方法は、蛍光の退色やレジン材からのウラニンの分離など安定性に問題があることが確認された。そのため、レジン材にどのような蛍光物質を添加するかに関して検討が必要である。

さらに、選定したレジンと JAEA 瑞浪超深地層研究所の深度 300m ボーリング横坑で取得した岩石コアを用いて、X 線 CT 観察下でのレジン注入試験を行った。X 線 CT 法により割れ目内の水の移行経路とレジンの移行経路を可視化し比較した結果、その形態が概ね一致していた。したがって、水と性質が異なるレジン材であっても、可使時間内の注入であれば、レジン材が充填された部分を水みちと見なし得ることが分かった。

以上、顕微鏡による薄片試料の観察を除き、レジン充填コアの観察（可視化）手法はほぼ確立できたと考えられる。個々の課題のうち、レジン材へ添加する蛍光物質の選定に関しては早急に検討すべきである。その後、水中環境下でのレジン材の注入特性や力学特性について検討し、擾乱の少ない天然割れ目を回収するためのレジン注入方法を確立する必要がある。また、レジン材を大量に注入することができ、主剤と硬化剤の混合を制御できる機能や、流量や圧力を精密に制御できる機能を持つ注入システムの構築も必要である。レジン注入試験を計画しているサイトは、割れ目内を流れる地下水流量が比較的大きく水圧も高い。このような条件下で確実なレジン注入が行えるか懸念されるが、自然状態の流れに捉われず、割れ目内の流れを人工的に制御した状態でレジン注入を実施することも選択肢として検討すべきであろう。その他の試験との兼ね合いもあるが、今一度原点に立ち戻って、何を優先して評価すべきか、そのために何を捨選択する必要があるのかを議論する必要があると考えられる。

10.6 適用性試験場の地質環境調査

平成 25 年度は、JAEA 瑞浪超深地層研究所の深度 300m ボーリング横坑付近の適用性試験場の水理地質環境特性を明らかにするために、坑道壁面から 2 本のボーリング孔（孔名：13MI36 号孔、13MI37 号孔）を掘削し、平成 24 年度に掘削した 2 本のボーリング孔と併せて、各種の地質地下水調査を実施した。ただし、13MI37 号孔においては、大量の湧水のためにコア観察や間隙水圧計測以外の試験を実施できなかった。

調査の結果、以下のことが明らかとなった。

- ・ 採取したコアは、すべて中粒黒雲母花崗岩（土岐花崗岩）であり、石英、長石類および黒雲母を主体として構成され、まれに角閃石が認められる。
- ・ 花崗岩は弱い変質といくつかの時期の異なる変形作用を被っている。全体的な変質の特徴としては、母岩全体に長石がセリサイト化する弱い変質を受け、割れ目の密度の高い個所の母岩には、細脈へ

の緑泥石の充填が認められる。割れ目の充填鉱物としては緑泥石や方解石が認められるが、断層や割れ目の集中する区間には、割れ目の充填鉱物として母岩を構成する鉱物やその破片とともに、セリサイト、緑泥石、方解石および黄鉄鉱が認められ、一部は未固結で粘土化した状態で割れ目を充填する

- ・ 割れ目の集中箇所の多くは、NNW系急傾斜の割れ目で構成される。これに比べてH(水平～緩傾斜)系やNE系急傾斜の割れ目は、より離散的である。
- ・ 13MI36号孔では、コア観察やボアホールカメラの画像、フローメーター検層結果および掘削時の湧水量変化より12MI30号孔、12MI31号孔との連結性が期待される21 mabh、18 mabh、15 mabh、14 mabh付近の割れ目を、透水試験の対象として選定した。透水試験の結果、 $2.17 \times 10^{-9} \sim 3.42 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$ の透水量係数が得られた。
- ・ 透水量係数の大きい13MI36号孔の21 mabh、18 mabh、14 mabh付近の割れ目を対象とした透水試験時には、12MI30号孔と12MI31号孔の複数の間隙水圧計測区間で水圧の応答が確認された。また、透水量係数の小さい15 mabh付近の割れ目を対象とした透水試験時にも、水圧の応答量は小さいが12MI30号孔と12MI31号孔との水理的な連結は確認できた。
- ・ 間隙水圧モニタリングの結果、すべての孔で孔口から10 mabhまでの区間では0.19～0.66MPaと比較的低い水圧であったが、15 mabhよりも深い区間では1.49～1.61MPaであった。
- ・ ポイント希釈試験で得られたウラン濃度の低下量から算出した割れ目内を通過する単位幅あたりの地下水流量は、9区間のうち0.1 ml/min/cm未満の区間が3区間、0.1以上0.2 ml/min/cm未満の区間が4区間、0.2ml/min/cm以上の区間が2区間であった。

なお、今回の調査において、ボーリング孔から大量の湧水が発生した場合の対策や、トレーサー試験に使用する蛍光センサーの精度良い検量線の作成が課題として挙げられた。

今回の調査を通じて、孔間トレーサー試験を将来実施するにあたり、試験孔間での水理的な連続性や、坑道壁面から15 m程度離れた岩盤では安定した水圧が維持されていることが確認できた。一方、割れ目内を流れる地下水流量が比較的大きく、トレーサーの回収が十分行えるか懸念される。また、試験孔間の水理的な連続性には独立した単一の割れ目ではなく複数の割れ目が関与している可能性が高く、トレーサー試験結果の評価を行う際には、その点に留意する必要があると考える。

10.7 岩石コアを用いた室内吸着・拡散試験

岩石への分配係数評価を目的とした場合のトレーサー試験条件(流速やトレーサー濃度)を最適化すること、および処分の安全評価に用いるために最適な分配係数取得方法について検討することを目的として、岩石へのセシウム(Cs)およびストロンチウム(Sr)の吸着挙動・拡散挙動を調べた。目的達成のために、今年度はまず種々の試験系を構築して分配係数を取得すること、3種の岩石(吉井砂岩、

和泉砂岩、土岐花崗岩)を対象とし、いくつかの条件において分配係数を明らかにすることを検討の目標とした。

分配係数を評価するための方法として、①バッチ吸着試験(粉末状試料)、②バッチ吸着試験(ディスク状試料)、③拡散試験、④粉末を充填したカラム試験、⑤コアを充填したカラム試験(模擬トレーサー試験)、⑥天然岩石および地下水濃度からの算出、を採用した。

粉末状試料を用いたバッチ法による分配係数評価では、吸着が24時間程度で平衡に達することがわかった。砂岩の試料について、ディスク状試料でのバッチ試験を実施したところ、吸着が平衡に達するまでに数百～千時間程度を要するものの、粉末状の試料で得られた分配係数は、ディスク状試料で得られた分配係数とほぼ等しくなった。一方、花崗岩では1000時間以内程度の試験時間では粉末状試料とディスク状試料との分配係数は大きく異なっており、ディスク状試料の分配係数は1オーダー程度小さな値を示した。

室内において実施したカラム試験や模擬トレーサー試験では、分配係数は流速が遅くなるとともに微増したが、試験を実施した流速範囲では分配係数の劇的な変化は観察されなかった。上記の吸着試験の結果と併せて考えると、流速への依存性が顕著ではない理由として、花崗岩の試料においては現実的な試験時間(例えば～1000時間程度)の中においては、表面への速い吸着が支配的であり、マトリクスへの拡散等の影響が顕著ではないためであると考えられた。

上記のように花崗岩を対象としてトレーサー試験を実施した場合、得られるのは界面近傍への吸着挙動の情報であり、1m程度の試験範囲であれば非吸着性トレーサーが50分以上かけて流れるような試験系で十分にCsやSrの遅れを観察することができることがわかった。

一方、安全評価に用いる分配係数については、砂岩の場合には粉体での分配係数を安全評価に適用することに問題はないと考えられたが、花崗岩においては粉体でのバッチ試験から得られる分配係数は実際のものよりも過大である可能性がある。

今年度の試験はいくつかの条件を選定して実施したが、より長い時間のかかる試験等を実施していない。種々の条件で試験を実施し、花崗岩以外の拡散の影響がある可能性が高い試料を用いた試験等を実施することで、さらに様々なケースでのトレーサー試験あるいは単孔式試験の最適化や安全評価に用いる分配係数についての検討を進める予定である。

10.8 天然トレーサーによる調査技術の開発

精密調査段階における地下水年代測定技術を開発するために、天然トレーサーの調査と技術開発を実施するとともに、幌延および瑞浪の研究坑道において地下水調査を実施した。

天然トレーサーの調査では、地下水の滞留時間などを評価できる物質、特に若い地下水の浸入や物質の移行特性を評価できる物質、坑道での採水方法を調査した。この結果、若い地下水の浸入の評価

では CFCs や SF₆ が、物質の移行特性評価では ³⁷Cl や ⁸⁷Br が有望であることがわかった。また、脱ガスを抑制して希ガスを採取する方法として、原位置平衡式サンプラーが有望であることがわかった。

天然トレーサーの技術開発では、海水において有機物を回収・精製し、有機 ¹⁴C を評価する手法を検討した。また、沈殿が出来にくい地下水での無機 C 回収方法の最適化、³⁶Cl/³⁵Cl 平衡値を実験的に求めるための閉鎖空隙からの Cl 抽出方法、化石海水の指標としての ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr の可能性について調査した。さらに、³⁷Cl、⁸¹Br のように、拡散により分別する物質について、拡散試験により分別係数を調査した。

地下水調査では、瑞浪超深地層研究所において研究坑道内のボーリングから地下水を採取し、若い地下水の流入を評価した。この結果、若い地下水の流入を評価するには、³H、 δ D、SF₆ が有望であると考えられた。一方で、CFCs は分解などの影響を受け、若い地下水の評価には不適であることがわかった。調査の結果、研究所建設によって最大数十%程度若い地下水が流入していると考えられた。幌延深地層研究センターでも研究坑道内のボーリングから地下水を採取し、先行ボーリングでの調査結果と比較した。この結果、Cl、 δ D、³⁶Cl は、研究坑道内のボーリングと先行ボーリングとで概ね一致することが確認できた。また、³⁶Cl/³⁵Cl や ⁴He の分布から、声問層と稚内層の境界部は、地下水の流動性が高いことが確認できた。希ガスについては、圧力を制御して採取したが、脱ガスが激しく、ガス量が本来の 1/10~1/20 程度になっており、採取方法の見直しが必要と考えられた。

これらの結果から、今後の課題として以下が挙げられる。

天然トレーサーの調査では、有望と考えられたトレーサー、CFCs、SF₆、⁸⁵Kr、¹²⁹I、³⁷Cl、⁸⁷Br など、および原位置平衡式サンプラーを原位置に適用し、その有効性を確認する。

また、天然トレーサーの技術開発では、今回開発した手法を原位置での分析や取得した実サンプルに適用し、既存の方法と比較することにより、その有効性を確認する。

幌延および瑞浪の研究坑道における地下水調査では、調査を継続し、水質・地下水年代の変化を確認することにより、研究坑道掘削による影響の評価と、評価に有効な物質を調査する。瑞浪では、若い地下水の流入の指標として有効と考えられる物質を調査するとともに、濃度分布の時間的な変化から、どのような輸送形態で地下水が流入しているかを検討する。幌延では、声問層と稚内層の境界のような地下水の流動性が高い部分の特性を評価する上で有効な物質について検討するとともに、物質分布などから地下水の輸送形態について検討する。また、⁴He の分析結果が、脱ガスの影響を強く受けているため、原位置平衡式サンプラーなど脱ガスを抑制するためのサンプリング方法を適用し、データの高精度化を図る。