

深部地質環境の調査解析技術の体系化に関する研究

—平成 21 年度—

(委託研究)

Study on Systemizing of Technology for Investigation and Analysis of the
Deep Underground Geological Environment, - Japanese Fiscal Year, 2009 -
(Contract Research)

小島 圭二 大西 有三 渡辺 邦夫 西垣 誠
登坂 博行 嶋田 純 青木 謙治 朽山 修
吉田 英一 尾方 伸久 西尾 和久

Keiji KOJIMA, Yuzo OHNISHI, Kunio WATANABE, Makoto NISHIGAKI
Hiroyuki TOSAKA, Jun SHIMADA, Kenji AOKI, Osamu TOCHIYAMA
Hidekazu YOSHIDA, Nobuhisa OGATA and Kazuhisa NISHIO

地層処分研究開発部門
東濃地科学研究ユニット

Tono Geoscientific Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate

February 2011

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2011

深部地質環境の調査解析技術の体系化に関する研究－平成 21 年度－
(委託研究)

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット
小島 圭二^{*1}, 大西 有三^{*2}, 渡辺 邦夫^{*3}, 西垣 誠^{*4}, 登坂 博行^{*5}, 嶋田 純^{*6},
青木 謙治^{*7}, 朽山 修^{*8}, 吉田 英一^{*9}, 尾方 伸久, 西尾 和久[※]

(2010 年 11 月 24 日受理)

本年度は、地表から地下深部にいたる地質環境を把握するための調査・解析技術の体系化を目標に、(1)「第 2 次取りまとめに基づく深部地質環境の調査・解析技術の実用化にむけた課題に関する研究」、(2)「調査・解析手法の高度化・体系化に関する研究」を、継続実施するとともに、これまでの研究成果の取りまとめを行った。

(1)に関しては、処分技術、地質環境、安全評価の各分野の課題について、以下の項目の試験・調査と計測・解析を実施するとともに、これまでの成果を取りまとめた。

- (a) 「処分技術の観点で抽出された深部地質環境の調査・解析技術に関する研究」
- (b) 「地質環境の観点で抽出された深部地質環境の調査・解析技術に関する研究」
- (c) 「安全評価の観点で抽出された深部地質環境の調査・解析技術に関する研究」

また、その成果を踏まえて、安全評価の分野も加えた中間分野の研究課題を抽出して、ニアフィールド (NF) コンセプトの再構築に関する具体的検討と、これまでの成果の取りまとめを行った。

(2)に関しては、日本原子力研究開発機構 (JAEA) の調査研究計画の中から抽出された課題に基づき、調査・解析技術の高度化・実用化の研究開発の観点から、基礎的な要素技術の研究開発の成果を取り込み、より具体的な現場の技術課題に資する研究を実施して、下記の項目について実用化に向けた研究開発を進展するとともに、これまでの成果を取りまとめた。

- (a) 「深地層における硬岩系不連続性岩盤の透水性評価に関する研究」
 - ・実用的な簡易型地下水制御情報化施工システム (SWING-SHAFT) に関する研究
- (b) 「岩盤浸透流の 3 次元特性の調査・解析に関する研究」
 - ・浅層地下水のモニタリング手法としてのニューラル・ネットワークモデル(ANN)と遺伝的アルゴリズム(GA)に関する研究

本報告書は、社団法人資源・素材学会が日本原子力研究開発機構との委託研究契約により実施した研究成果に関するものである。

東濃地科学センター (駐在) : 〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-64

*1 地圏空間研究所 代表 (東京大学名誉教授), *2 京都大学 教授, *3 埼玉大学 教授,

*4 岡山大学 教授, *5 東京大学 教授, *6 熊本大学 教授, *7 地球システム総合研究所,

*8 原子力安全研究協会 処分システム安全研究所 所長, *9 名古屋大学 教授

※ 技術開発協力員

- ・地下水中のフッ素とホウ素濃度のメカニズム解明のための地下水／岩石相互作用の側面研究
- (c) 「水理試験法および水理試験装置の開発に関する研究」
 - ・割れ目系岩盤に対する動的グラウチングを用いたベントナイトスラリー注入試験
- (d) 「深層水理の調査方法およびモデル化に関する研究」
 - ・高レベル放射性廃棄物（HLW）処分の長期安全性評価のための包括的な水理学的モデル化研究
- (e) 「地下水の地球化学的特性調査に関する研究」
 - ・フロン（CFCs）を用いた地下水年代測定手法の開発

これらの調査研究の進展とあわせて、平成 21 年度は、これまでに委員会で実施してきた研究開発の「総括報告書」の取りまとめを行った。なお、委員会においては JAEA が実施予定の第 3 段階の研究開発計画（水平坑道の建設とそこでの原位置試験）に、当委員会の研究成果をどのように反映できるのか、などの寄与の仕方についても議論を行った。

Study on Systemizing of Technology for Investigation and Analysis of the
Deep Underground Geological Environment, - Japanese Fiscal Year, 2009 -
(Contract Research)

Keiji KOJIMA*¹, Yuzo OHNISHI*², Kunio WATANABE*³, Makoto NISHIGAKI*⁴,
Hiroyuki TOSAKA*⁵, Jun SHIMADA*⁶, Kenji AOKI*⁷, Osamu TOCHIYAMA*⁸,
Hidekazu YOSHIDA*⁹, Nobuhisa OGATA and Kazuhisa NISHIO*

Tono Geoscientific Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate, Japan Atomic Energy Agency
Akiyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received November 24, 2010)

This report summarizes studies that have been carried out with the aim of assessing and systemizing the technologies used for the investigation and analysis of the deep underground geological environment in relation to the disposal of radioactive waste. The main studies were:

- (1) a study on the research and development (R&D) topics proven to have practical application for the investigation, and analysis and understanding of the deep underground geological environment, and,
- (2) a study on leading edge technologies that can provide the advanced technical basis for the investigation, analysis and understanding of the deep underground geological environment.

Regarding the R&D topics (1, above), specific investigations, measurements, numerical analyses and chemical analyses were performed and reviewed with respect to the topics,

- (a) Repository design, engineering technology
- (b) Geological environment and
- (c) Safety evaluation.

Based on the result of the review, topics requiring collaboration research in overlapping research fields, including safety assessment, were identified. Also, the near field concept (NFC) was reconsidered in terms of its realistic construction model.

Regarding advanced technology (2, above), based on the objectives of the JAEA (Japan Atomic Energy Agency) research project, the following R&D activities (a) – (e) were implemented. This study contributed to the R&D development and its practical application.

Keywords: Deep Underground, Geological Environment, Geological Disposal, Near Field Concept,
MIU (Mizunami Underground Research Laboratory), Safety Assessment

This work was performed by the Mining and Materials Processing Institute of Japan under contract with Japan Atomic Energy Agency.

*1 Geospace Labo, *2 Kyoto University, *3 Saitama University, *4 Okayama University, *5 The University of Tokyo,

*6 Kumamoto University, *7 Geosystem Research Institute, *8 Radioactive Waste Disposal Safety Research Center, *9 Nagoya University, ※Collaborating Engineer

- (a) Hydraulic analysis of the fractured rock mass.
 - Practical application of a simple observational method system (SWING-SHAFT).
- (b) Three-dimensional analysis of rock mass seepage.
 - Neural network model (ANN) and the genetic algorithm (GA) as methods for monitoring the shallow underground water flow.
 - Investigation of the ground water detention and water-rock interaction to understand the mechanism of fluorine and boron concentration.
- (c) Development on hydraulic testing methods and equipment.
 - Grouting test injecting the bentonite slurry into the fractured rock mass.
- (d) Research on investigations of deep geological environment and modeling technique.
 - Researches on comprehensive hydrologic modeling for long term safety assessment of the HLW disposal et.al.
- (e) Study on geochemical characterization of groundwater.
 - Development of groundwater age dating method using CFCs (Chlorofluorocarbons, Freon group) et.al.

In addition the study group in this committee summarized the results of the studies above carried out after 2000 fiscal year for the “cover-all report” due in 2009 fiscal year, and also discussed how to contribute to Phase III (in situ testing in research galleries) in the Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) research program in the Japan Atomic Energy Agency (JAEA).

目 次

はじめに	1
参考文献	2
1. 第2次取りまとめに基づく深部地質環境の調査・解析技術の実用化に向けた課題に関する研究	3
1.1 処分技術の観点から抽出された深部地質環境の調査・解析技術に関する研究	3
1.1.1 はじめに	3
1.1.2 AE計測による掘削影響領域（EDZ）の評価技術の開発	5
1.1.2.1 はじめに	5
1.1.2.2 実空洞における微小破壊音の計測結果	6
1.1.2.3 岩石の破壊現象とAEパラメータの挙動	7
1.1.2.4 原位置岩盤における応力変化とAEパラメータの挙動	12
1.1.2.5 EDZにおける岩盤の破壊挙動の分析	16
1.1.2.6 岩盤の力学－水理学的連成挙動に着目した水理学的EDZの評価手法の構築	30
1.1.2.7 まとめ	40
1.1.2.8 参考文献	41
1.1.3 低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の開発	44
1.1.3.1 はじめに	44
1.1.3.2 動的注入工法	45
1.1.3.3 岩盤の3次元水理地質モデルの構築	63
1.1.3.4 クロスホール透水試験による岩盤の水理地質構造の評価	69
1.1.3.5 水理地質構造を考慮したグラウト設計手法	77
1.1.3.6 まとめ	84
1.1.3.7 参考文献	85
1.1.4 まとめ	86
1.2 断層活動の影響と断層周辺発達割れ目の特徴（阿寺断層を事例にした研究）	88
1.2.1 経緯	88
1.2.2 はじめに	89
1.2.3 調査地域および阿寺断層概要	89
1.2.4 実施内容	91
1.2.4.1 断層周辺岩盤の割れ目形態（構造，分布密度および走向傾斜）調査	91
1.2.5 主な結果および考察	92
1.2.5.1 岩盤中の微小割れ目解析	92
1.2.5.2 割れ目の構造と方向性	95
1.2.5.3 断層からの距離と割れ目密度・頻度との関係	98
1.2.5.4 阿寺断層近傍における断層運動と割れ目形成の関係	99
1.2.5.5 割れ目と充填鉱物との相関	101
1.2.5.6 阿寺断層形成史	103
1.2.6 総合的考察	104
1.2.6.1 断層周辺の割れ目形態とその特徴	104
1.2.6.2 阿寺断層の運動と割れ目形成との相関	105
1.2.6.3 断層に伴う「ダメージゾーン」の検討	106

1.2.7	まとめ：断層運動に伴う割れ目形成とその影響解析	108
1.2.7.1	「ダメージゾーン」について	108
1.2.7.2	断層活動と割れ目形成との相関について	109
1.2.8	おわりに	109
1.2.9	参考文献	110
1.3	結晶質岩を対象にした処分システム NF コンセプトに関する研究課題の抽出とその体系化	113
1.3.1	はじめに（背景）	113
1.3.2	検討内容	113
1.3.2.1	目的	113
1.3.2.2	検討にあたっての諸条件	113
1.3.3	NF コンセプト (Generic model) と再検討の意義（レビュー）	114
1.3.3.1	地層処分の基本的考え方	115
1.3.3.2	検討対象とする時空間枠の設定	116
1.3.3.3	バリア要素毎の NF コンセプトにおける安全機能と研究課題の検討	119
1.3.3.4	結晶質岩における NF コンセプト検討	122
1.3.4	参考文献	130
2.	調査・解析手法の高度化・体系化	131
2.1	立坑トンネル掘削時の地下水挙動評価における簡易型地下水制御情報化施工システム (SWING-SHAFT) の適用に関する研究	131
2.1.1	はじめに	131
2.1.2	トンネル施工に伴う地下水情報化施工用簡易システムの構築	132
2.1.2.1	SWING-SHAFT 法の開発	132
2.1.2.2	SWING-SHAFT 法（シリンダー）の構築	132
2.1.2.3	瑞浪超深地層研究所における解析	135
2.1.3	シリンダーボリュームの改良（CASE-4-3）	147
2.1.3.1	異方性を考慮したシリンダーボリューム	148
2.1.3.2	LAFZ 分布区間における SWING-SHAFT の適用	152
2.1.4	平成 21 年度の検討内容	156
2.1.4.1	観測湧水量のデータ取得の頻度がトンネル湧水量の予測精度に与える影響の検討	157
2.1.4.2	EnKF で与える透水係数の分散がトンネル湧水量の予測精度に与える影響の検討	158
2.1.4.3	地質調査などによって得られる事前の地質情報が湧水の予測精度に与える影響の検討	160
2.1.4.4	SWING-EnKF の実トンネルへの適用に関するまとめ	160
2.1.5	SWING-SHAFT 法の採用に関する課題	161
2.1.5.1	平成 20 年度モデルによる工事進捗の追跡	161
2.1.5.2	今後の運用方法（施工実績に伴う水理定数分布の簡易予測）	165
2.1.6	参考文献	170
2.2	地下水流動の高精度解析と予測法の開発研究	171

2.2.1	研究概要	171
2.2.2	ANN, GA, Fuzzy などの Soft Computing 手法を用いた地下水, 山地流出解析手法の 開発に関する研究	171
2.2.2.1	目的と考え方	171
2.2.2.2	解析した問題と論文発表	173
2.2.2.3	モデル構造	174
2.2.2.4	解析した間隙水圧変動の特徴	175
2.2.2.5	他地点の変動を入力した場合の解析	178
2.2.2.6	Grey Model による解析	180
2.2.2.7	研究成果のまとめ	184
2.2.3	水質と水理解析の総合化に関する研究	184
2.2.3.1	研究目的	184
2.2.3.2	研究方法と結果	185
2.2.3.3	結論と今後の問題	189
2.2.4	割れ目岩盤内の浸透流評価研究	190
2.2.4.1	Don-Chan モデル	190
2.2.4.2	割れ目および Step 構造の抽出	191
2.2.4.3	結論と今後の問題	193
2.2.5	蒸発計測装置の開発と軟岩の不飽和特性評価の研究	194
2.2.5.1	研究目的概要	194
2.2.5.2	非定常蒸発量変化実験	195
2.2.5.3	結論と今後の問題	196
2.2.6	平成 21 年度の研究	196
2.2.6.1	研究概要	196
2.2.6.2	水質と水理解析の総合化に関する研究－花崗岩中のフッ素の分布形態－	196
2.2.6.3	割れ目岩盤内の浸透流評価研究－ACO による物質移動経路解析の試み－	198
2.2.7	発表論文および参考文献	200
2.2.7.1	ANN, GA などの Soft Computation による地下水, 山地流出解析手法の 開発に関する論文	200
2.2.7.2	地下水水質関係論文	201
2.2.7.3	割れ目系岩盤中の地下水解析等に関する論文	201
2.2.7.4	蒸発に伴う現象の解明	202
2.2.7.5	参考文献	202
2.3	深部岩盤における水理学的調査・試験法に関する研究	203
2.3.1	はじめに	203
2.3.2	ベントナイト混合土の止水性の評価に関する研究 (平成 11 年度)	203
2.3.2.1	概要	203
2.3.2.2	研究の独創性	204
2.3.2.3	今後の課題	204
2.3.3	光ファイバーセンサーによる間隙水圧計の開発 (平成 13 年度～平成 15 年度)	205
2.3.3.1	概要	205
2.3.3.2	研究の特徴	205
2.3.3.3	今後の課題	205

2.3.4	ベントナイト材料の亀裂性岩盤内への注入に関する研究 (平成 16 年度～平成 21 年度)	206
2.3.4.1	ベントナイトスラリーの平行平板への注入試験 (平成 16 年度, 17 年度)	207
2.3.4.2	超微粒ベントナイトグラウトに関する研究 (平成 18 年度, 19 年度)	207
2.3.4.3	超微粒ベントナイトグラウトの流亡特性に関する研究 (平成 20 年度)	208
2.3.4.4	超微粒ベントナイトグラウトの注入後の流亡防止工法に関する研究 (平成 21 年度)	209
2.3.5	おわりに	210
2.3.6	付録	210
2.3.6.1	年度別研究課題	210
2.3.6.2	発表論文 (平成 11 年度～平成 21 年度)	212
2.3.7	岩盤への超微粒ベントナイトグラウチングに関する研究	213
2.3.7.1	はじめに	213
2.3.7.2	注入セメントと模擬地盤の特性	214
2.3.7.3	一次元注入予備試験	216
2.3.7.4	一次元定流量注入試験装置および試験方法	217
2.3.7.5	一次元定流量注入試験結果および考察	218
2.3.7.6	結論	221
2.4	深層水理の調査方法およびモデル化に関する研究	222
2.4.1	はじめに	222
2.4.1.1	研究の年譜および概要	222
2.4.2	基本水循環系の再現・予測技術の研究開発成果の概要	226
2.4.2.1	水循環系の全体プロセスと要素プロセス	226
2.4.2.2	河川と地下の流れの構成則	227
2.4.2.3	水循環系の流動方程式	228
2.4.2.4	蒸発散過程のモデリング	229
2.4.2.5	非定常吸着・脱離過程に関する検討	231
2.4.2.6	移流分散パラメータに関する検討の成果	234
2.4.3	モデル作成のための技術開発の成果の概要	236
2.4.3.1	ハイドロパルストモグラフィに関する検討	236
2.4.3.2	大規模モデリングにおける局所精細離散化手法の検討	236
2.4.4	モデルの検証に関する成果	237
2.4.4.1	日吉川流域モデルによる実解析：再現性の検討	237
2.4.4.2	日吉川流域モデルによる実解析：境界条件の検討	240
2.4.4.3	侵食に伴う流動系の変化に関する検討の成果	244
2.4.5	長期安全性評価の課題と展望	245
2.4.5.1	境界変動の取り扱い	246
2.4.5.2	人工バリア内部および周辺核種移行の評価	246
2.4.5.3	数値モデルの高速性・柔軟性と展望	247
2.4.6	まとめ	247
2.4.7	参考文献	247
2.5	地下水の地球化学的調査に関する研究総括	249
2.5.1	経緯	249

2.5.2	CFCs トレーサーを用いた地下水の滞留時間推定法の開発（その 4）	251
2.5.2.1	はじめに	251
2.5.3	霧島地域における CFCs を用いた地下水・湧水の流動機構評価	252
2.5.3.1	研究地域の概要および地形・地質	252
2.5.3.2	現地調査および採水・分析方法	253
2.5.3.3	測定結果に基づく考察	255
2.5.3.4	LUMPED モデルによる CFCs 滞留時間評価	258
2.5.3.5	まとめと今後の課題	263
2.5.4	参考文献	263
3.	実用化に向けた研究開発課題の提示および調査・解析技術の高度化・体系化の総括	264
3.1	研究結果の検討	264
3.1.1	基盤技術の実用化・高度化の方向のレビュー‘平成 21 年度’	264
3.1.2	平成 21 年度 深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究開発	265
3.1.2.1	研究開発に関する委員会の基本方針	265
3.1.2.2	課題の提示とその調査研究（課題グループ）および 基盤技術研究とその実用化（調査・解析グループ）の研究開発の方針	265
3.1.3	地層処分基盤研究開発に関する全体計画の中での位置付けと研究開発の成果	267
3.1.3.1	日本原子力研究開発機構の全体計画の中での当研究開発の位置付けと 研究開発の経緯	267
3.1.3.2	深部地質環境の調査・解析技術に関する課題の抽出とこれまでの 研究開発の成果	271
3.1.3.3	各分野中間領域の調査研究の連携検討/NF コンセプト再構築	272
3.1.3.4	環境安全評価の地下水シナリオからみた調査・解析技術の 高度化・体系化	272
3.2	平成 21 年度研究結果の取りまとめおよび技術の体系化に関する研究結果の総括	274
3.2.1	「実用化に向けた研究開発課題の研究の検討」の総括	274
3.2.1.1	処分技術	274
3.2.1.2	安全評価	276
3.2.1.3	地質環境	276
3.2.1.4	分野間の連携のまとめ/NF コンセプト再構築の検討	277
3.2.2	「調査・解析技術の高度化・体系化」の総括	278
3.2.2.1	調査技術の高度化に関する研究開発	278
3.2.2.2	調査・解析技術の高度化・体系化のまとめ	281
3.2.3	参考文献	282

Contents

Introduction.....	1
References.....	2
1. Study on practical application of research investigation and analysis technique for deep geological environment based on Report H12.....	3
1.1 Topics on repository design, engineering technology and the geological environment.....	3
1.1.1 Introduction.....	3
1.1.2 Evaluation technique using acoustic emission (AE) to define the excavation disturbed zone (EDZ) in hard fractured rock.....	5
1.1.2.1 Introduction.....	5
1.1.2.2 Acoustic emission monitoring data recorded from underground cavern.....	6
1.1.2.3 Acoustic emission and AE behavior.....	7
1.1.2.4 Changes on in situ stress of rock mass and behavior.....	12
1.1.2.5 Evaluation of failure behavior of the EDZ.....	16
1.1.2.6 Method for assessing rock mechanics-hydrology coupling behavior.....	30
1.1.2.7 Summary.....	40
1.1.2.8 References.....	41
1.1.3 Development of fracture sealing technology for low permeability rock.....	44
1.1.3.1 Introduction.....	44
1.1.3.2 Dynamic grouting method.....	45
1.1.3.3 Three-dimensional hydrogeological modeling.....	63
1.1.3.4 Evaluation of hydrogeological structure by crosshole permeability test.....	69
1.1.3.5 Grouting method takes into account to the hydrogeological structure.....	77
1.1.3.6 Summary.....	84
1.1.3.7 References.....	85
1.1.4 Conclusion.....	86
1.2 Fracturing and the structures developed around the Atera fault.....	88
1.2.1 Background.....	88
1.2.2 Introduction.....	89
1.2.3 Research area and overview of the Atera fault.....	89
1.2.4 Research activities.....	91
1.2.4.1 Investigation of fracture patterns in the bedrock around the fault (structure, distribution density, and geometry).....	91
1.2.5 Research result and consideration.....	92
1.2.5.1 Micro-fracture analyses.....	92
1.2.5.2 Fracture structure and orientation.....	95
1.2.5.3 Relationship between fracture density and distance from the fault core.....	98
1.2.5.4 Relationship between fault movement and fracture formation near the Atera fault.....	99
1.2.5.5 Correlation between fracture and filling minerals.....	101
1.2.5.6 History of Atera fault.....	103
1.2.6 Conclusions.....	104
1.2.6.1 Pattern and character of fracturing around the fault.....	104
1.2.6.2 Correlation between movement of the Atera fault and fracture formation.....	105

1.2.6.3	Damage zones along the fault	106
1.2.7	Summary : Fracture formation caused by fault movement and its analysis	108
1.2.7.1	“Damage zones”	108
1.2.7.2	Correlation between fault activity and fracture formation	109
1.2.8	Conclusions	109
1.2.9	References	110
1.3	Research tasks and systemization – <u>N</u>ear <u>F</u>ield concept for the geological disposal system focused on crystalline rock	113
1.3.1	Introduction	113
1.3.2	Research tasks	113
1.3.2.1	Purpose	113
1.3.2.2	Conditions for the tasks	113
1.3.3	Review of NF generic model concept	114
1.3.3.1	Basic geological disposal concept	115
1.3.3.2	Time-space framework	116
1.3.3.3	Review of research tasks and safety functions with respect to NF concept for each barrier component	119
1.3.3.4	Review of NF concept for crystalline rock	122
1.3.4	References	130
2.	Study on the advanced technical basis for investigations and analyses	131
2.1	Application of a simple observational method system (SWING-SHAFT) to the groundwater response to shaft excavation	131
2.1.1	Introduction	131
2.1.2	Improvement of SWING-SHAFT method according to the shaft construction	132
2.1.2.1	Development of SWING-SHAFT method	132
2.1.2.2	Improvement of SWING-SHAFT method (cylinder)	132
2.1.2.3	Analysis at Mizunami Underground Research Laboratory (MIU)	135
2.1.3	Improvement of cylinder volume (CASE-4-3)	147
2.1.3.1	Anisotropy cylinder volume	148
2.1.3.2	Application of SWING-SHAFT in LAFZ distribution section	152
2.1.4	Review of fiscal year 2009	156
2.1.4.1	Effect of data acquisition frequency on the predicted water inflow rate	157
2.1.4.2	Effect of hydraulic conductivity distribution simulated by EnKF on the predicted water inflow rate	158
2.1.4.3	Effect of prior geological information on the predicted water inflow rate	160
2.1.4.4	Summary : Application of SWING-EnKF to the shaft	160
2.1.5	Tasks regarding adoption of the SWING-SHAFT method	161
2.1.5.1	Tracking of construction progress using the model, fiscal year 2008	161
2.1.5.2	Future operating method (simple forecast of three dimensional hydraulic parameter distribution based on excavation results)	165
2.1.6	References	170
2.2	Association studies for high quality analysis and prediction method of groundwater flow	171
2.2.1	Introduction	171

2.2.2	Method development of groundwater analysis and run-off analysis in a mountainous region using Soft Computing techniques such as ANN, GA, and Fuzzy et.al.	171
2.2.2.1	Purpose	171
2.2.2.2	Tasks analyzed and publications	173
2.2.2.3	Model structure	174
2.2.2.4	Fluctuation in analyzed pore water pressure	175
2.2.2.5	Analysis inputting the fluctuation data observed at different points	178
2.2.2.6	Analysis using Grey Model	180
2.2.2.7	Summary	184
2.2.3	Research on systematization of water quality and hydraulic analyses	184
2.2.3.1	Purpose	184
2.2.3.2	Research activities and results	185
2.2.3.3	Summary and future tasks	189
2.2.4	Analysis of groundwater flow in fractured rock mass	190
2.2.4.1	Don-Chan model	190
2.2.4.2	Extraction of fracture and Step structure	191
2.2.4.3	Summary and future tasks	193
2.2.5	Development of evaporation measurement equipment and evaluation of the unsaturated hydraulic property of soft rock	194
2.2.5.1	Purpose	194
2.2.5.2	Non-stationary evaporation	195
2.2.5.3	Summary and future tasks	196
2.2.6	Review of fiscal year 2009	196
2.2.6.1	Research activities	196
2.2.6.2	Research on systemization of water quality and hydraulic analyses -Fluorine distribution in granite-	196
2.2.6.3	Analysis of groundwater flow in fractured rock mass –ACO mass transfer analysis-	198
2.2.7	Publications and reference	200
2.2.7.1	Publications regarding research on development of groundwater, mountainous discharge analysis that uses Soft Computing techniques such as ANN, GA, and Fuzzy	200
2.2.7.2	Publications regarding groundwater quality	201
2.2.7.3	Publications regarding groundwater flow analysis in fractured rock mass	201
2.2.7.4	Publications regarding evaporation behavior	202
2.2.7.5	References	202
2.3	Research on hydraulics investigation and testing method for deep bedrock	203
2.3.1	Introduction	203
2.3.2	Evaluation of water cut-off character of bentonite mixture soil (fiscal year 1999)	203
2.3.2.1	Introduction	203
2.3.2.2	Originality of research	204
2.3.2.3	Future tasks	204
2.3.3	Development of fiber optic pore water pressure sensor (fiscal year 2001 of 2003)	205
2.3.3.1	Introduction	205
2.3.3.2	Originality of research	205
2.3.3.3	Future tasks	205
2.3.4	Research on injecting the bentonite material in fractured bedrock(fiscal year 2004 of 2009)	206

2.3.4.1	Injection test of bentonite slurry using parallel plate (fiscal year 2004 and 2005).....	207
2.3.4.2	Grout using ultrafine bentonite powder (fiscal year 2006 and 2007).....	207
2.3.4.3	Fluid-loss behavior of ultrafine bentonite powder (fiscal year 2008).....	208
2.3.4.4	Soil loss prevent method prevent after ultrafine bentonite powder grouting (fiscal year 2009)	209
2.3.5	Conclusions.....	210
2.3.6	Appendix	210
2.3.6.1	Research tasks for each fiscal year	210
2.3.6.2	Publications (fiscal year 1999 of 2009)	212
2.3.7	Research on ultrafine bentonite powder grouting adopted for bedrock	213
2.3.7.1	Introduction.....	213
2.3.7.2	Characterization of injection cement and simulated ground.....	214
2.3.7.3	Pre testing for one-dimensional injection	216
2.3.7.4	Injection device of one-dimension steady flow and testing method	217
2.3.7.5	Results of the testing and considerations	218
2.3.7.6	Conclusions.....	221
2.4	Research on investigations of deep geological environment and modeling technique.....	222
2.4.1	Introduction.....	222
2.4.1.1	History and outline of research.....	222
2.4.2	Development of production and prediction techniques for basic water circulation system.....	226
2.4.2.1	Whole and element process of water circulation system.....	226
2.4.2.2	Constitutive equation of river and groundwater flows	227
2.4.2.3	Flow equation of water circulation system	228
2.4.2.4	Modeling of evaporation process.....	229
2.4.2.5	Non-stationary adsorption and desorption	231
2.4.2.6	Results of examination on advection -dispersion parameter	234
2.4.3	Modeling technique development.....	236
2.4.3.1	Hydro-pulse tomography.....	236
2.4.3.2	Local discretization methods applying to large-scale modeling	236
2.4.4	Model evaluation and validation	237
2.4.4.1	Analysis by Hiyoshi river model: Evaluation of reproducibility	237
2.4.4.2	Analysis by Hiyoshi river model: Evaluation of boundary condition.....	240
2.4.4.3	Consideration of changes in flow system caused by denudation	244
2.4.5	Tasks and prospects of the long-term safety assessment	245
2.4.5.1	Dealing with boundary change	246
2.4.5.2	Evaluation of internal engineering barrier and nuclide migration	246
2.4.5.3	High-speed calculation, and flexibility of the numerical model	247
2.4.6	Conclusions.....	247
2.4.7	References.....	247
2.5	Research on geochemical investigation of groundwater	249
2.5.1	Background.....	249
2.5.2	Method development for estimating groundwater residence time using chlorofluorocarbon (CFCs) tracer (Fourth phase).....	251
2.5.2.1	Introduction.....	251
2.5.3	Flow mechanism assessment of groundwater and spring water using CFCs concentration in	

the Kirishima region.....	252
2.5.3.1 Geographical and geological features in the research region.....	252
2.5.3.2 Site investigation and methods for water sampling and, analysis.....	253
2.5.3.3 Consideration of investigation result	255
2.5.3.4 Evaluation of CFCs residence time using LUMPED model.....	258
2.5.3.5 Conclusions.....	263
2.5.4 References.....	263
3. R&D research tasks and the advanced investigation and analysis techniques for practical applications	264
3.1. Research results	264
3.1.1 Review of the practical application of advanced techniques and improvement of their technical basis	264
3.1.2 R&D systemizing technology used for the investigation and analysis for understanding the deep underground geological environment, fiscal year 2009.....	265
3.1.2.1 Basic policy of R&D committee.....	265
3.1.2.2 Task specification and case studies of R&D (Task group) and the policy of R&D for practical application and improvement of technical basis (Investigation and analysis group).....	265
3.1.3 Status of R&D in the overall plan for geological disposal and R&D results	267
3.1.3.1 Status of the R&D carried out by Japan Atomic Energy Agency (JAEA)	267
3.1.3.2 Task specification for technology used for the investigation and analysis of the deep underground geological environment and the R&D results	271
3.1.3.3 Research collaboration in niche areas straddling research fields/ Restructuring of Near Field Concept	272
3.1.3.4 Improvement and systematization of investigation and analysis techniques from the viewpoint of groundwater scenario based on environmental safety assessment	272
3.2 Summary of fiscal years 2009 research results and systematization of investigation and analysis techniques	274
3.2.1 Summary of research tasks for practical application.....	274
3.2.1.1 Repository design and engineering technology.....	274
3.2.1.2 Safety assessment.....	276
3.2.1.3 Geological environment	276
3.2.1.4 Research collaboration/ Restructuring of Near Field Concept	277
3.2.2 Summary of improvement and systematization of investigation and analysis technique.....	278
3.2.2.1 R&D for advanced investigation technology	278
3.2.2.2 Summary of improvements and systematization of investigation and analysis techniques.....	281
3.2.3 References.....	282

目 次

第 1 章	
図 1.1.1	AE 計測による掘削影響領域 (EDZ) の評価技術の開発に関するフロー 6
図 1.1.2	地下空洞の掘削の進行に伴う AE 発生数の変化 7
図 1.1.3	三軸圧縮試験結果の例 8
図 1.1.4	岩石の破壊現象と AE 特性の関係についての検討フロー 10
図 1.1.5	粒状体 DEM 解析によるカーブフィッティング結果の一例 (結晶質岩供試体) 11
図 1.1.6	粒状体 DEM 解析における応力-ひずみ曲線と亀裂発生分布の一例 (結晶質岩供試体) 11
図 1.1.7	H 断面空洞周辺地質図 13
図 1.1.8	H-10 計測線上 3m 地点での計測結果 13
図 1.1.9	粒状体 DEM 解析モデル 14
図 1.1.10	セクターモデルによる解析結果 15
図 1.1.11	亀裂開口量分布 (H-10 計測線) 15
図 1.1.12	応力変化の比較 (H-10 計測線 3m 地点) 15
図 1.1.13	AE 計測結果と解析結果との比較 (H-10 計測線 3m 地点) 15
図 1.1.14	岩石一軸圧縮試験における応力-ひずみ関係と亀裂進展のイメージ 17
図 1.1.15	岩石の载荷過程における AE パラメータと亀裂発生挙動 18
図 1.1.16	硬岩での破壊形態イメージと破壊包絡線の概念 20
図 1.1.17	空洞周辺の地層区分と FEM 解析メッシュ (H 断面) 21
図 1.1.18	定量化した修正 GSI 評価チャート 22
図 1.1.19	AE 計測線の配置と空洞の掘削ステップ (H 断面) 23
図 1.1.20	AE センサーの標準埋設深度 23
図 1.1.21 (a)	H3 測線の応力径路と AE 発生数 (Ch1~6 : 深度 1.5~6.5m) 24
図 1.1.21 (b)	H3 測線の応力径路と AE 発生数 (Ch7~12 : 深度 7.5~12.5m) 24
図 1.1.22 (a)	AE 発生数および卓越周波数の経時変化 (Ch1~3 : 深度 1.5~3.5m) 25
図 1.1.22 (b)	AE 発生数および卓越周波数の経時変化 (Ch4~7 : 深度 4.5~7.5m) 25
図 1.1.23	天井アーチ部切り上げ (A3) 掘削終了時の壁面近傍での最大主応力分布 26
図 1.1.24	H5 測線深部での応力径路と AE 発生数 (Ch7~12 : 深度 10.5~20.4m) 28
図 1.1.25	H2 測線深部での応力径路と AE 発生数 (Ch7~12 : 深度 7.5~12.5m) 28
図 1.1.26	空洞周辺岩盤の応力径路と AE 発生パターン (概念図) 28
図 1.1.27	注水試験時における微小地震波の発生 30
図 1.1.28	注水設備の概略図 34
図 1.1.29	微小地震波の観測システム 34
図 1.1.30	原位置ボーリング透気試験 37
図 1.1.31	原位置ボーリング透気試験時の AE 計測結果 38
図 1.1.32	岩盤内の間隙水圧分布の解析結果 (注気圧=1.41 MPa) 39
図 1.1.33	原位置ボーリング透気試験における実測結果と解析結果の比較 39
図 1.1.34	低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の開発に関するフロー図 44
図 1.1.35	注入圧力の周波数に対する注入流量の改良比 (注入材料の粘性の影響) 46
図 1.1.36	注入圧力の周波数に対する注入流量の改良比 (注入圧力の振幅の影響) 46
図 1.1.37	放射状流れのモデル 50
図 1.1.38	放射状流れのモデル (流れの垂直方向からの視点) 51
図 1.1.39	ルジオン値と平均亀裂幅の関係 54

図 1.1.40	現場実験結果（点）と解析結果（曲線）の比較（w/c=4）	55
図 1.1.41	現場実験結果（点）と解析結果（曲線）の比較（w/c=8）	55
図 1.1.42	セメント粒子の流動モデル	56
図 1.1.43	室内実験結果	57
図 1.1.44	シミュレーション結果	57
図 1.1.45	シミュレーションにおけるセメント粒子の充填過程	58
図 1.1.46	振動圧振幅と注入時間の関係	59
図 1.1.47	振動圧振幅と総セメント注入量の関係	59
図 1.1.48	振動圧周波数と注入時間の増加度（動的／静的）の関係	59
図 1.1.49	振動圧周波数と総セメント注入量の増加度（動的／静的）の関係	59
図 1.1.50	実際の低透水性岩盤の亀裂の顕微鏡写真	60
図 1.1.51	シミュレーションで用いた亀裂モデル	60
図 1.1.52	開口幅を変化させたときの亀裂モデル	60
図 1.1.53	亀裂幅と注入時間効率比（動的／静的）の関係	61
図 1.1.54	亀裂幅と総注入量効率比（動的／静的）の関係	61
図 1.1.55	w/c と総セメント注入量の関係	62
図 1.1.56	w/c と注入効率の関係	63
図 1.1.57	w/c と透水性改良範囲の関係	63
図 1.1.58	研究対象とした水封式燃料地下備蓄基地の空洞配置図	65
図 1.1.59	岩盤内に設置された間隙水圧計の位置図	66
図 1.1.60	間隙水圧の実測値と解析値との比較	67
図 1.1.61	間隙水圧の予測値と実測値の比較	68
図 1.1.62	クロスホール透水試験	69
図 1.1.63	水理学的布置	71
図 1.1.64	幾何学的再構成	71
図 1.1.65	地理的空間に再配置された点群	71
図 1.1.66	点群の密度とイメージング結果	72
図 1.1.67	数値実験モデル	73
図 1.1.68	数値実験の結果	74
図 1.1.69	現場実験の概要	75
図 1.1.70	現場実験に対する手法の適用結果	75
図 1.1.71	3次元イメージング手法	76
図 1.1.72	数値実験による手法の妥当性の検証	76
図 1.1.73	推定ルジオンマップと改良範囲	78
図 1.1.74	最適孔間隔の算出方法	78
図 1.1.75	解析結果の一例	78
図 1.1.76	研究対象地点の水理地質構造	79
図 1.1.77	水封トンネル掘削深度における地質水平断面図	79
図 1.1.78	各領域におけるグラウト注入実績の比較	80
図 1.1.79	各領域における注入量の実測値と解析値との比較	80
図 1.1.80	改良目標を満たす最大の孔間隔	81
図 1.1.81	シミュレーション結果と現場実績結果の比較	81
図 1.1.82	改良目標を満たす最大の孔間隔	82
図 1.1.83	グラウト充填状況の評価に基づくグラウティングシステム	83
図 1.1.84	本研究で開発した要素技術の位置づけ	87

図 1.2.1	断層影響に関する基本的考え方	89
図 1.2.2	阿寺断層分布図・地質図・調査露頭位置図	90
図 1.2.3	阿寺断層帯内の調査露頭全景	92
図 1.2.4	断層近傍で見られる連続性の悪い割れ目の発達する露頭スケッチとコアサンプラーで採取した岩石試料の断面写真	93
図 1.2.5	連続性の悪い割れ目の発達する花崗岩露頭から採取した岩石コア中に認められる微視的割れ目構造	93
図 1.2.6	田畑地域の露頭スケッチ	94
図 1.2.7	田畑地域で採取した岩石コア中に認められる割れ目スケッチ	94
図 1.2.8	コアサンプル中に認められる微小割れ目の分布密度および微小割れ目の連続性と分布量との相関関係	95
図 1.2.9	断層周辺岩盤内に発達する割れ目の方向（付知川周辺）	96
図 1.2.10	横川谷ルートでの割れ目解析結果	96
図 1.2.11	阿寺断層の断層運動と周辺岩盤割れ目への影響と新たに形成される割れ目の形成メカニズムを示した概念モデル	97
図 1.2.12	断層からの割れ目密度分布	98
図 1.2.13	阿寺断層からの距離を横軸にとって割れ目の長さ別にその密度と頻度を解析した結果	98
図 1.2.14	各露頭における割れ目の長さ密度	99
図 1.2.15	断層周辺割れ目の走向傾斜の傾向性	99
図 1.2.16	阿寺断層周辺の割れ目形成と断層運動による影響範囲の概念図	100
図 1.2.17	阿寺断層形成史	103
図 1.2.18	苗木ー上松花崗岩内の断層からの距離と割れ目密度の関係	105
図 1.2.19	断層の長さのプロセスゾーンの幅との関係	107
図 1.2.20	阿寺断層の構造概念モデル	108
図 1.3.1	NF コンセプトを構築するに重要と思われる項目とプロセス	114
図 1.3.2	サイトスケールと NF スケールの相関事例	116
図 1.3.3	地下水シナリオにおける期待されるバリア機能	117
図 1.3.4	安全評価研究における検討項目	117
図 1.3.5	多重バリアシステムの安全機能と時間枠	118
図 1.3.6	断層および割れ目構造、充填鉱物による阿寺断層の形成履歴解析	123
図 1.3.7	阿寺断層の構造概念モデル	123
図 1.3.8	処分場地下空洞建設および閉鎖に伴う状態変化の概念	124
図 1.3.9	300m レベルにおける岩盤の状態および地下水の不均一性	125
図 1.3.10	NF コンセプトを構築する上で示された NF プロセスの一例	126
図 1.3.11	瑞浪超深地層研究所での原位置試験周辺 NF 環境の概念図	126
図 1.3.12	地層処分場掘削に伴う地下環境の擾乱とその変化の状態を概念的に示した「平衡反応図」	128
 第 2 章		
図 2.1.1	SWING-SHAFT におけるシリンダーボリューム	133
図 2.1.2	シリンダー内の水位低下を合わせコンターとして表示	134
図 2.1.3	2 本の立坑がある場合のモデル化と計算手順	134
図 2.1.4	瑞浪超深地層研究所と観測井戸概要	135

図 2.1.5	平成 17 年度の検討ケース (CASE-1~3)	137
図 2.1.6	各ケースの比較 (掘削時の湧水量と地下水位低下量)	138
図 2.1.7	パイロットボーリングのモデル化	139
図 2.1.8	CASE-3, CASE-33 の水理定数の設定	140
図 2.1.9	掘削時に伴う湧水量と地下水位低下 (CASE-3)	141
図 2.1.10	掘削時に伴う湧水量と地下水位低下 (CASE-33)	142
図 2.1.11	パイロットボーリングによる透水係数と検討ケース	143
図 2.1.12	パイロットボーリングの掘削中における湧水量と地下水位低下量 (CASE-4-1)	144
図 2.1.13	各観測孔水位との比較 (CASE-4-1)	144
図 2.1.14	異方性を考慮したシリンダーボリューム (CASE-4-2)	145
図 2.1.15	パイロットボーリングの掘削中における湧水量と地下水位低下量 (CASE-4-2)	146
図 2.1.16	各観測孔水位との対比 (CASE-4-2)	146
図 2.1.17	井戸周辺の水位の時間的変化 (CASE-4-2)	147
図 2.1.18	平成 19 年度のシリンダーモデル (CASE-4-3)	148
図 2.1.19	異方性を考慮したシリンダーボリューム (CASE-4-3)	148
図 2.1.20	平成 19 年度の透水係数の設定 (CASE-4-3)	149
図 2.1.21 (1)	各観測孔水位との対比 (平成 18 年度 CASE-4-2)	150
図 2.1.21 (2)	各観測孔水位との対比 (平成 19 年度 CASE-4-3)	150
図 2.1.22 (1)	地下水位の時間的変化 (平成 18 年度 CASE-4-2)	151
図 2.1.22 (2)	CASE-4-2 と平成 19 年度 (CASE-4-3) の差異	151
図 2.1.23	SWING-SHAFT 法における地盤改良のモデル化	152
図 2.1.24	SWING-SHAFT 法における LAFZ 区間のモデル化	153
図 2.1.25	CASE-4-3 と LAFZ 区間の透水係数の比較	154
図 2.1.26	LAFZ 区間の掘削に伴う湧水量と地下水位低下予測	155
図 2.1.27	カルマンフィルター (KF) の計算プロセス	156
図 2.1.28	アンサンブルカルマンフィルター (EnKF) におけるアンサンブル予報	157
図 2.1.29	解析結果	158
図 2.1.30	SWING-EnKF におけるアンサンブル予報	159
図 2.1.31	解析結果	159
図 2.1.32	解析結果	160
図 2.1.33	200m 以深におけるグラウトの設定	161
図 2.1.34	SWING-SHAFT 法における地盤改良のモデル化	162
図 2.1.35	SWING-SHAFT 法による主立坑の湧水量	163
図 2.1.36	SWING-SHAFT 法による換気立坑の湧水量	163
図 2.1.37	SWING-SHAFT 法による総湧水量	163
図 2.1.38	平成 20 年度モデルのシリンダーボリュームの透水係数分布	164
図 2.1.39	各観測孔における地下水位低下	164
図 2.1.40	立坑周辺の地下水位低下範囲	165
図 2.1.41	SWING-SHAFT 法の運用手順	167
図 2.1.42	SWING-SHAFT 法の計算モデルの推移	167
図 2.1.43	SWING-SHAFT 法の改良 (不均質シリンダーボリュームの導入方法)	168
図 2.1.44	SWING-SHAFT 法の運用 (Ver.3 システム)	169
図 2.2.1	過去 10 年間の研究概要	171
図 2.2.2	間隙水圧変動異常の検知法模式図	172
図 2.2.3	予測の困難さ模式図	172

図 2.2.4	解析法模式図	173
図 2.2.5	解析プロセス模式図	173
図 2.2.6	解析した問題と発表論文	173
図 2.2.7	線形モデル構造	174
図 2.2.8	3層モデルを用いた ANN モデル	174
図 2.2.9	ANFIS モデル	175
図 2.2.10	MIU サイト概略図	175
図 2.2.11	各ボーリング孔の間隙水圧計配置図	176
図 2.2.12	MSB-3 号孔に見られる間隙水圧変動 (2007 年 9 月~12 月)	177
図 2.2.13	観測された間隙水圧分布 (2007 年 9 月~12 月)	177
図 2.2.14	同一ボーリング孔の観測データを用いた場合の解析結果	179
図 2.2.15	異なったボーリング孔の観測データを用いた場合の解析結果	179
図 2.2.16	解析領域と地質モデル	180
図 2.2.17	主立坑 (MS), 換気立坑 (VS) 内の海拔水位と MSB-1 号孔内の間隙水圧変動	181
図 2.2.18	解析結果と実測値の比較	182
図 2.2.19	学習期間の設定	182
図 2.2.20	ANN モデルによる解析結果	183
図 2.2.21	ANFIS モデルによる解析結果	183
図 2.2.22	MIZ-1 号孔で得られたフッ素イオン濃度分布	185
図 2.2.23	研究の構造	185
図 2.2.24	MIZ-1 号孔における試料採取地点	186
図 2.2.25	各試料のフッ素イオン濃度の経時変化	186
図 2.2.26	計算値 (Fc) と実測値 (Fm) の相関	187
図 2.2.27	地下水の涵養域の滞留時間	188
図 2.2.28	地下水の流出域の滞留時間	188
図 2.2.29	解析断面とボーリング孔位置図	189
図 2.2.30	解析した水頭分布	189
図 2.2.31	Don-Chan のパフォーマンス例 (設定した割れ目系と全水頭解析)	190
図 2.2.32	Don-Chan のパフォーマンス例 (平均的な全水頭解析結果)	190
図 2.2.33	Don-Chan のパフォーマンス例 (物質移動経路解析)	191
図 2.2.34	ボーリング孔 (DH-2 号孔) に沿った割れ目の 3 次元表現	191
図 2.2.35	Step 構造模式図	192
図 2.2.36	割れ目パターンを選択手法	192
図 2.2.37	割れ目パターン解析例 (MIU-1 号孔)	192
図 2.2.38	割れ目パターン選別例 (MIU-1 号孔)	193
図 2.2.39	逆推定プロセス	195
図 2.2.40	岩石試料を用いた実験模式図	195
図 2.2.41	蒸発量の経時変化と逆推定	196
図 2.2.42	MIZ-1-G8 の SEM 画像	197
図 2.2.43	Image-2 領域の拡大と小領域設定	197
図 2.2.44	パーティクル・トラッキング法による物質移動解析模式図	198
図 2.2.45	パーティクル・トラッキング法の経路選択と問題点	198
図 2.2.46	割れ目内の充填鉱物と割れ目内混合の困難さ模式図	199
図 2.2.47	ACO の予察的考察	199
図 2.2.48	求められた最短経路	199

図 2.2.49	予察的な流線処理の提案	199
図 2.3.1	掘削空洞周囲の掘削損傷領域	213
図 2.3.2	EDZ の亀裂内へのベントナイト注入とセメント注入	214
図 2.3.3	各種セメントと川砂の粒径加積曲線	214
図 2.3.4	各種セメントの SEM 画像	215
図 2.3.5	セメント凝固割合の経時変化	216
図 2.3.6	一次元定流量注入試験概要図	217
図 2.3.7	浸透距離と注入圧力の関係	218
図 2.3.8	一軸圧縮応力測定装置	218
図 2.3.9	一軸圧縮応力と浸透距離の関係 (水セメント比 100%)	219
図 2.3.10	一軸圧縮応力と浸透距離の関係 (水セメント比 200%)	219
図 2.3.11	周面拘束変水位透水試験装置	220
図 2.3.12	透水係数と浸透距離の関係 (水セメント比 100%)	220
図 2.3.13	透水係数と浸透距離の関係 (水セメント比 200%)	220
図 2.4.1	地圏水循環系の概念図	226
図 2.4.2	水循環の要素プロセス	227
図 2.4.3	地表付近の熱収支・水収支の概念図	229
図 2.4.4	吸着速度式の例	231
図 2.4.5	移流分散+吸着モデル	231
図 2.4.6	出口濃度の比較	233
図 2.4.7	定常・非定常出口濃度	233
図 2.4.8	定常・非定常出口濃度	233
図 2.4.9	カラム内の濃度分布	233
図 2.4.10	カラム内の濃度分布	234
図 2.4.11	均質媒体を仮定した場合の流出曲線の再現 (砂 8 割の場合)	235
図 2.4.12	均質媒体を仮定した場合の流出曲線の再現 (砂 6 割の場合)	235
図 2.4.13	均質媒体を仮定した場合の流出曲線の再現 (砂 4 割の場合)	235
図 2.4.14	日吉川流域モデル平面図	237
図 2.4.15	3次元モデル	237
図 2.4.16	地質分布	238
図 2.4.17	土地利用	238
図 2.4.18	日吉川流量観測値と計算値の比較	238
図 2.4.19	地下水位観測値と計算値の比較 (断層南側: MIU-1, 2, 3号孔)	239
図 2.4.20	地下水位観測値と計算値の比較 (断層北側: DH-9, 11, 13号孔)	239
図 2.4.21	北側 (木曾川) からみた領域地形	240
図 2.4.22	日吉川流域地形・格子システムと2次元断面モデルの位置	241
図 2.4.23	地形断面と従来領域・拡張領域離散化モデル	241
図 2.4.24	従来モデルと拡張領域モデルのポテンシャルの違い	242
図 2.4.25	従来モデルと拡張領域モデルのポテンシャルの違い	243
図 2.4.26	拡張領域モデルで断層がない場合とある場合の違い	243
図 2.4.27	河川の下刻・側方浸食の概念図	244
図 2.4.28	滞留時間と移行距離の変化	245
図 2.5.1	研究地域全体図	253

図 2.5.2	研究地域の地質状況	253
図 2.5.3	採水地点位置図と季節間の水素同位体比濃度差	254
図 2.5.4	採水サンプルの酸素安定同位体比分布	256
図 2.5.5	湧水中の酸素同位体比の高度変化	256
図 2.5.6	湧水水温の高度変化	256
図 2.5.7	湧水のパイパー表示による水質の特徴とその分布状況	257
図 2.5.8	湧水のヘキサダイアグラム分布図	257
図 2.5.9	LUMPED モデルの帯水層モデル組み合わせパターン	258
図 2.5.10	霧島地域における 3 種類の CFCs 濃度のピストン流滞留時間の比較	259
図 2.5.11	3 種類の CFCs による滞留時間 (PLUG モデルを仮定) と地下水中の溶存シリカ濃度 の変化	259
図 2.5.12	Binary Mixing Model 概念図	260
図 2.5.13	八ヶ岳における湧水の流出機構モデル	261
図 2.5.14	霧島火山周辺の湧水の滞留時間分布	262
図 2.5.15	水温や酸素同位体比と高度の関係図上に滞留時間を重ね書きした図	262
第 3 章		
図 3.1.1	「深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究」第 2 次取りまとめ以降の体 系化	269

表・写真 目 次

第 1 章

表 1.1.1	処分施設の工学技術の体系化に関する課題	3
表 1.1.2	粒状体 DEM 解析における入力パラメータ	10
表 1.1.3(a)	解析用物性値一覧表 (弾性係数)	22
表 1.1.3(b)	解析用物性値一覧表 (強度)	22
表 1.1.4	室内実験条件	46
表 1.1.5	現場実験条件	55
表 1.1.6	シミュレーションにおいて設定した注入圧	62
表 1.1.7	間隙水圧の実測値と解析値の誤差	67
表 1.1.8	水理学的距離行列	70
写真 1.2.1	露頭における割れ目の性状と鏡下における脆性破壊に伴う 微小割れ目の性状	101
写真 1.2.2	結晶質岩体 (濃飛流紋岩) 中割れ目に認められる充填鉱物薄片写真	103

第 2 章

表 2.1.1	a) トンネル湧水量の実測値および b) 解析条件	158
表 2.1.2	解析条件	159
表 2.1.3	現時点における SWING-SHAFT 法の運用課題	166
表 2.1.4	今後の SWING-SHAFT 法の運用方法	168
表 2.2.1	同一ボーリング孔のデータを用いた解析ケース	178
表 2.2.2	異なったボーリング孔のデータを用いた解析ケース	178
表 2.2.3	解析した 3 つのモデル (FEMA, FEMB, FEMC) の水理定数組合せ	181
表 2.2.4	解析に用いた共存イオンと寄与度 α	187
表 2.2.5	設定透水係数	189
表 2.2.6	Step 構造の性質	193
表 2.2.7	元素含有量	197
表 2.2.8	小領域の各元素量	197
表 2.3.1	各種セメントの 50%, 85%, 95% 粒径	215
表 2.3.2	各種セメントの密度および化学成分	215
表 2.3.3	分散剤と消泡剤の成分	215
表 2.3.4	SFC および砂地盤の物性	217
表 2.4.1	水循環系における流れの型分類	227
表 2.4.2	解析上の各種パラメータ	233
表 2.5.1	平成 11 年度 - 平成 21 年度の地下水の地球化学特性調査に関する研究レビュー	250

はじめに

本研究は、地表から地下深部にいたる地質環境を効率的かつ合理的に把握するための調査・解析技術の体系化を目標に、現状の技術レベルを評価し、研究開発課題の抽出を行い、各課題の解決に向けた研究開発と調査・解析技術の体系化についての検討を行った。具体的には、

(1)核燃料サイクル開発機構（現：日本原子力研究開発機構，以下，原子力機構）が国に提出した「地層処分研究開発第2次取りまとめ（別名2000年レポート）」¹⁾の内容を「地質環境」，「処分技術」，「安全評価」の各観点で評価した結果と，その後にとまとめられた高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築(2005年)²⁾などの報告書を参考にして抽出された，「深部地質環境の調査・解析技術の実用化に向けた研究開発課題を対象とした研究」および「それぞれの中間分野における研究課題の抽出と各課題の連携方法についての研究」

(2)原子力機構の東濃地科学センターが実施している深地層の科学的研究の成果および研究計画を踏まえ，「広域から局所的なスケールでの浅層・深層地下水の水理・水文，地下水の地球化学・物質移動を効率的かつ合理的に把握するための調査・解析手法の高度化・体系化についての研究」

を実施してきた。

(1)に関する報告は，第2次取りまとめ¹⁾に基づく深部地質環境の調査・解析技術の実用化に向けた個別課題の高度化に関する研究と中間分野の統合化の重要な対象としてとりあげた，ニアフィールド（NF）コンセプトの再構築に関する3分野（地質環境，処分技術，安全評価）の連携研究の具体化の検討などが中核をなす。

(2)に関する報告は，基盤技術の集約化，体系化を試みる一方，東濃地科学センターの調査研究計画（超深地層研究所計画の第2段階計画など）の中から抽出された課題に基づき，瑞浪超深地層研究所の建設データによる解析も含めて，地下水に関する試験・解析を実施するなど，実用化へ向けたより具体的な研究開発成果の報告である。

一方，知識基盤の構築やセーフティケースの構築，東濃と幌延で実施中の深地層の研究施設の建設と研究開発には，NFコンセプトの再構築をはじめとする中間分野の連携研究や実用的な技術のより一層の進展が期待されている。これらの状況を踏まえて，資源エネルギー庁・原子力機構の「高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画(2006年)」³⁾の流れの中で，この研究活動の位置付けと実績の整理，各個別の研究の集約・体系化と基盤研究・実用化研究の成果，中間分野の連携研究，基盤研究の第3段階へ向けた成果の寄与，総括報告書のとりまとめの方向に関する検討も行ってきた。

本研究は，委員会形式での研究の実施により着実に成果を積み重ねてきたが，原子力機構として平成22年度の取りまとめに向けた研究成果の集約・取りまとめを行う必要があることから，本研究で実施してきた第2次取りまとめ¹⁾以降の各研究分野の成果に関して，平成21年度も継続実施された研究成果とともに，総括的な取りまとめを行った。

(参考文献)

- 1) 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次取りまとめ－」, 総論レポート, JNC TN1400 99-020.
 - ・分冊1 わが国の地質環境, JNC TN1400 99-021
 - ・分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022
 - ・分冊3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023
- 2) 核燃料サイクル開発機構 (2005) : 「高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の機構－平成17年度とりまとめ－」.
 - ・分冊1 深地層の科学的研究, JNC TN1400 2005-014
 - ・分冊2 工学技術の技術開発, JNC TN1400 2005-015
 - ・分冊3 安全評価手法の開発, JNC TN1400 2005-016
- 3) 資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構 (2006) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画.

(地圏空間研究所 小島圭二)

1. 第2次取りまとめに基づく深部地質環境の調査・解析技術の実用化に向けた課題に関する研究

1.1 処分技術の観点から抽出された深部地質環境の調査・解析技術に関する研究

1.1.1 はじめに

本研究では、**地層処分の工学技術の分野**において、重点的に取り組むべき研究開発課題（表1.1.1参照）を抽出した上で、平成13年度から以下に示すような体系的な深部地質環境の調査・解析技術に関する研究開発を実施してきた。

表 1.1.1 処分施設の工学技術の体系化に関する課題

<p>処分施設の設計技術の体系化に関する重要研究課題</p>
<p>処分施設の力学的設計体系の確立</p> <ul style="list-style-type: none"> ■大深度における岩盤の物性・地圧データベースの構築 ■各種解析・設計手法の評価と適用方法の体系化 ■掘削影響領域の特性化手法と解析・評価法の統合 ■立坑の地震時安定性の評価と地下構造物の耐震設計手法の確立 <p>処分施設の水理学的設計体系の確立</p> <ul style="list-style-type: none"> ■広域・サイトスケール・局所における地下水の流動評価技術の体系化 ■低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の開発 ■建設・操業時の地下水制御法と長期安定性を有する岩盤グラウト技術の開発 <p>調査技術と設計技術の統合と体系化</p> <ul style="list-style-type: none"> ■調査ボーリング（方向制御ボーリング）技術の高度化 ■力学的・水理学的 MWD・LWD 技術の実用化 ■微小破壊音（AE）による調査・計測，設計，モニタリングシステムの研究 ■新材料・新素材を用いた計測技術の高度化

各年度における研究項目とその内容は以下の通りである。

（平成13年度）

地層処分の工学技術に関する研究・開発課題の抽出

- 処分施設の力学的設計体系の確立
 - ・掘削影響領域の特性化手法と解析・評価法の統合
- 処分施設の水理学的設計体系の確立
 - ・低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の開発
 - ・建設・操業時の地下水制御法と長期安定性を有する岩盤グラウト技術の開発
- 調査技術と設計技術の統合と体系化
 - ・微小破壊音（AE）による調査・計測，設計，モニタリングシステムの研究

（平成14年度）

微小破壊音（AE）計測による掘削影響領域（EDZ）の評価技術の研究

- 大規模岩盤空洞掘削時のAE計測結果の分析
- AEパラメータと岩石および岩盤の掘削時挙動の関連性
- 個別剛体要素法による岩石の高剛性三軸試験のシミュレーション手法の検討

低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の研究

- 動的注入工法に関する室内実験（その1）
- 岩盤の亀裂への注入メカニズムに関する理論的検討
- 動的注入に関する現場実験の実施（花崗岩中の地下空洞サイト）

（平成15年度）

微小破壊音(AE)計測による掘削影響領域(EDZ)の評価技術の研究

- 岩石の三軸圧縮試験時のAE挙動に関する実験的検討
- 岩石の破壊現象に伴う応力とAEの計測と数値解析法の適用性の検討
- 個別剛体要素法による高剛性三軸試験のシミュレーションスキームの検討

低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の研究

- 動的注入工法に関する室内実験（その2）
- 亀裂内への注入材料の流動・充填メカニズムの解明の為の数値解析手法の開発

（平成16年度）

微小破壊音(AE)計測による掘削影響領域(EDZ)の評価技術の研究

- 硬岩におけるEDZ評価のためのAEパラメータに関する詳細検討
- 粒状体個別要素法の空洞掘削解析と設計への適用

低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の研究

- 動的注入工法に関する室内実験（その3）
- 亀裂内の注入材の流動・充填メカニズム（数値解析手法の開発）
- 新しい水理地質構造のイメージング手法の開発

（平成17年度）

微小破壊音(AE)計測による掘削影響領域(EDZ)の評価技術の研究

- 泥岩に関するAE特性についての研究
- 硬岩および軟岩を対象としたAEと亀裂進展のメカニズムに関する研究

低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の研究

- 亀裂形状と亀裂内の注入材料の流動・充填メカニズムの数値解析
- 多次元尺度構成法を利用した3次元水理モデル構築法のシステム化と統合

（平成18年度）

微小破壊音(AE)計測による掘削影響領域(EDZ)の評価技術の研究

- AE発生／AE進展の応力レベルとスポーリング限界に基づく空洞掘削時の岩盤挙動およびEDZの評価手法の構築
- Microseismic monitoringの水理地質構造の調査方法への展開

低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の研究

- 亀裂内の注入材の流動・充填メカニズムの数値解析手法の開発
- 多次元尺度構成法を利用した3次元水理モデル構築法のシステム化と統合

（平成19年度）

微小破壊音(AE)計測による掘削影響領域(EDZ)の評価技術の研究

- 岩盤の力学－水理的連成解析手法の構築
- Microseismic monitoringに関する室内試験および原位置試験の計画

低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の研究

- 新しい3次元水理地質構造のモデル化システムの開発
- 粒状体個別要素法による動的注入におけるグラウト設計手法の開発
(平成20年度)

微小破壊音(AE)計測による掘削影響領域(EDZ)の評価技術の研究

- 岩盤の力学－水理的連成解析手法の原位置岩盤への適用
 - Microseismic monitoringに関する水理地質構造の評価手法への展開
- 低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の研究
- 3次元水理地質構造のモデル化システムの原位置岩盤への適用
 - 水理地質構造を考慮したグラウト設計手法の原位置岩盤への適用

本報告書では、以上に示した研究開発の成果を①微小破壊音(AE)計測による掘削影響領域(EDZ)の評価技術および、②低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の研究に大別して総括した。

1.1.2 AE計測による掘削影響領域(EDZ)の評価技術の開発

1.1.2.1 はじめに

一般に、高地圧化における空洞掘削においては、応力再配分の過程で周辺岩盤内に分布する既存の微小亀裂の開口・進展および新規亀裂の発生によって、掘削影響領域(Excavation Disturbed Zone: EDZ)が形成される。この掘削影響領域の評価は、高レベル放射性廃棄物の地層処分場の設計および性能評価上の重要な課題の一つとなっている。さらに、合理的な処分施設の設計体系を研究する上で、応力評価に基づく空洞設計手法の開発や、空洞掘削時の亀裂の発生・進展を計測により精度良く把握する手法の開発が重要であり、掘削影響領域の評価を軸とした体系的な研究が極めて重要である。

そこで筆者は、亀裂の発生・進展挙動ならびに岩盤内の応力変化に対して鋭敏な反応を示す岩盤破壊音(Acoustic Emission: AE)に着目して掘削影響領域の評価のための研究開発を行ってきた^{1)~5)}。

本研究では、まず高地圧下に掘削された岩盤地下空洞において採取された結晶質岩および軟岩の岩石供試体に対して高剛性三軸圧縮試験(AE計測を同時に行う)を行い、破壊過程における岩石の応力変化とAE挙動の関係を検討した。一方、この高剛性三軸圧縮試験を粒状体個別要素法(粒状体DEM)によってシミュレートし、応力経路の各点で観測される岩石の破壊状況(亀裂の発生・進展状況)とAEパラメータ(発生数・周波数・振幅等)との関係を検討した。これらの検討結果から応力・破壊現象とAEパラメータの関係を明らかにし、AE計測による応力変化・破壊過程の評価技術を構築した。次に、この評価技術を原位置岩盤に適用し、現場計測と空洞掘削解析を総合的に体系化することにより、応力変化に着目した高地圧下における岩盤空洞の情報化設計施工システムを構築した(研究フローを図1.1.1に示す)。

さらに、力学および水理的なEDZの評価・判定を目的として、岩盤の力学－水理的連成挙動に着目し、空洞周辺岩盤における浸透流挙動評価へのMicroseismic monitoringの適用を検討した。

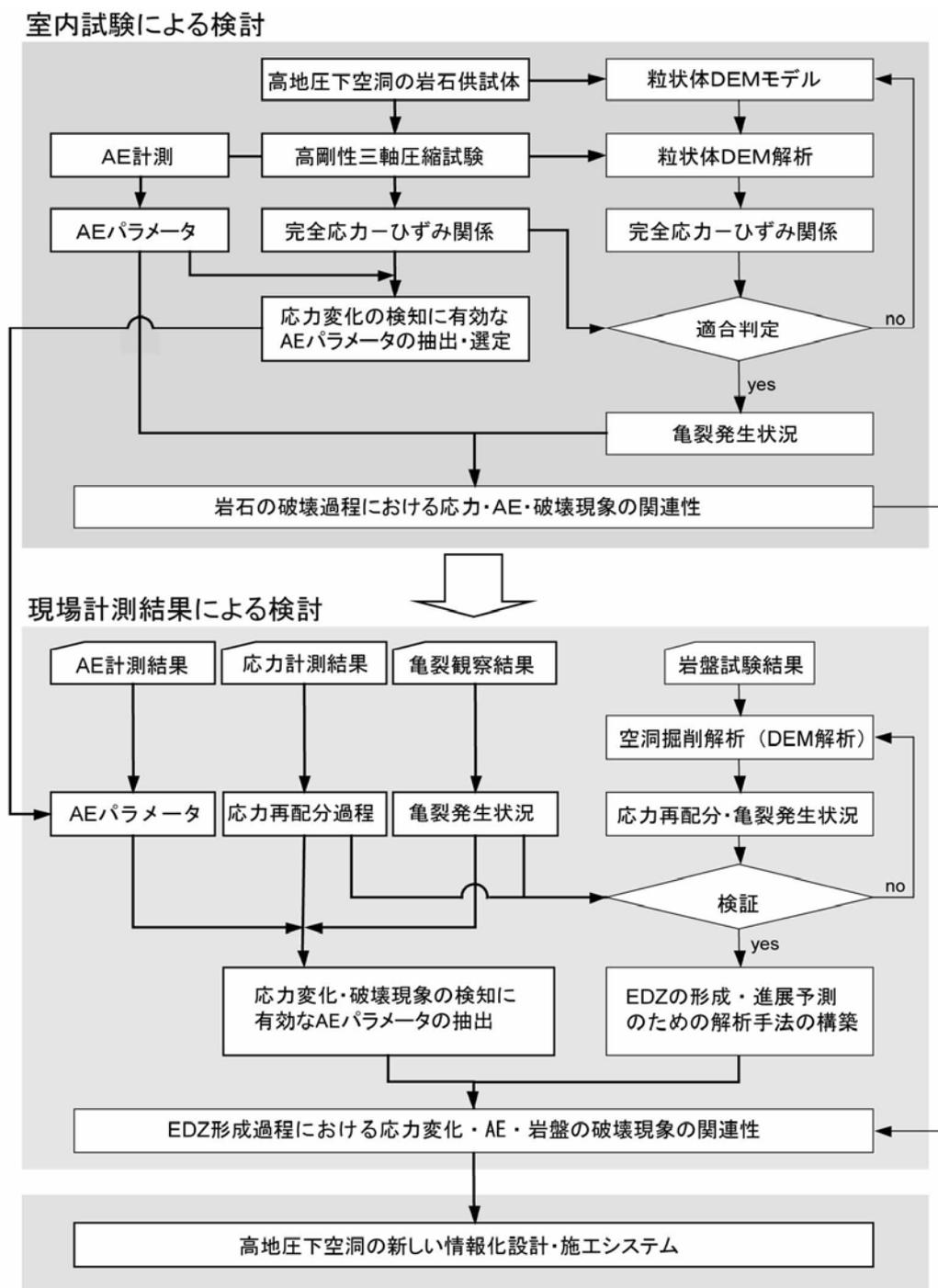


図1.1.1 AE計測による掘削影響領域 (EDZ) の評価技術の開発に関するフロー

1.1.2.2 実空洞における微小破壊音の計測結果¹⁾

図1.1.2は、高地圧下に建設された地下発電所におけるAE計測結果の一例を示したものであり、大断面空洞の掘削時に観測された、掘削の進行に伴うAE発生数の変化をプロットしたものである。また、同位置で実施された岩盤応力変化測定の結果についても併せて示す。この地下発電所では、アーチ掘削の後、ベンチ高さ3mのベンチカット工法により盤下げ掘削が行われたが、この例で示したAE計測位置は、空洞のほぼ中段に位置する第5ベンチにおける空洞側壁から水平深度3m, 6m, 9mの3地点である。

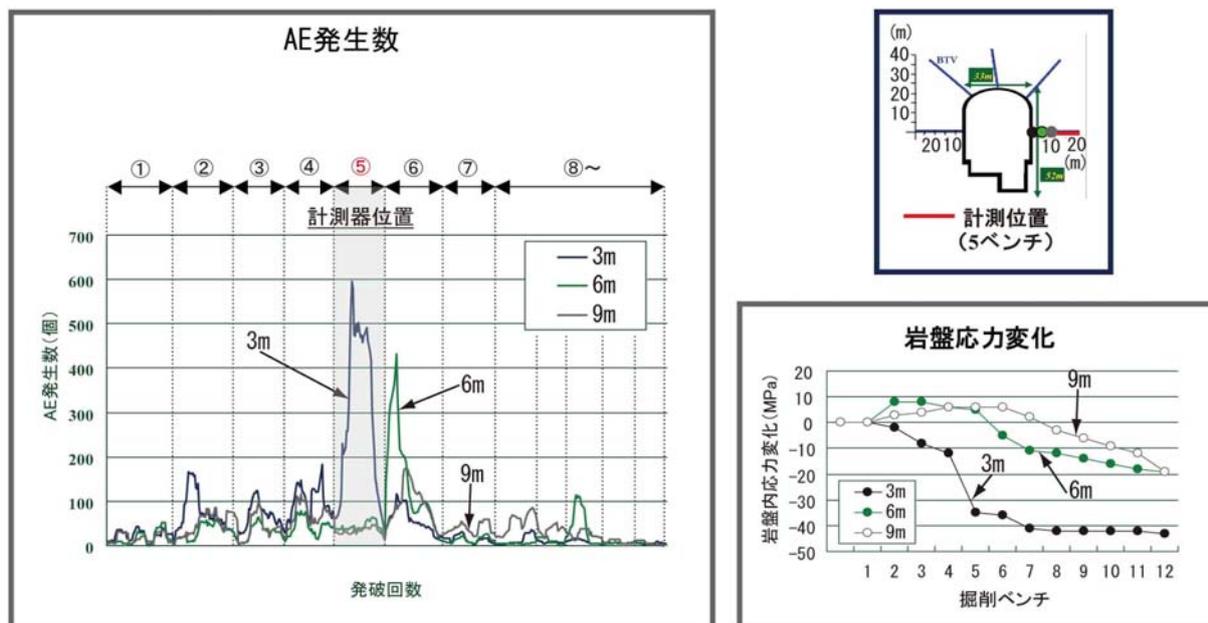


図1.1.2 地下空洞の掘削の進行に伴うAE発生数の変化

本図を見ると、第1ベンチの掘削からAEが観測され、その後第2, 3, 4ベンチと盤下げ掘削の進行に伴ってAE発生数が徐々に増加する傾向が認められる。微小な緩みの発生および進展を検知するのに適しているとされる岩盤内応力変化測定でも、第1ベンチ掘削時にはほとんど変化が認められていないのに対し、AEは明確に岩盤の変化の予兆を検知しているものと推察される。掘削が計測位置に近い第5ベンチに至ると深度3mの地点でAE発生数が最大となり、これに遅れて第6ベンチに至ると深度6mの地点、深度9mの地点の順でAE発生数が最大値を記録している。また、発生数の最大値は、壁面に近い深度3mの地点で大きく、壁面から遠い深度9mの地点で小さな値をとる。これらのことは、AEが各位置における掘削影響領域の進展の時期と岩盤の微小破壊の程度を表しているものと推察される。掘削が第6ベンチを通過すると、AE発生数は急激に減少して最終的に発生が終息することになる。またAE発生数は、深度3mの地点よりも深度6mの地点、深度9mの地点が多くなるが、このことは、深度3mの地点では既に岩盤応力が変化していないのに対して深度6mの地点、深度9mの地点では岩盤応力が引き続き変化していることと対応する。

以上より、AEは、岩盤応力の変化と共に形成される掘削影響領域の進展挙動を把握するための重要な計測項目であると考えられる。

1.1.2.3 岩石の破壊現象とAEパラメータの挙動^{2),3)}

岩石の破壊現象と微小破壊音の関係を検討するために、岩石の室内試験（高剛性三軸圧縮試験）を行い、破壊過程に発生するAEを測定してAEパラメータの分析を実施した。

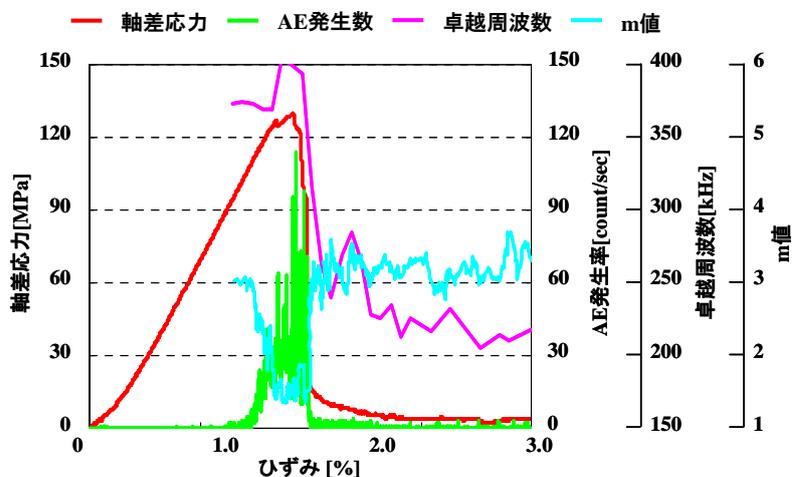
(1) 室内試験による岩石内応力変化とAEパラメータの関係の検討

岩石の高剛性三軸圧縮試験を行い、破壊過程に発生するAEを測定してAE特性の分析を実施した。試験に用いた供試体は、高地圧下の岩盤におけるボーリングコアから採取された結晶質岩²⁾と堆積軟岩³⁾である。

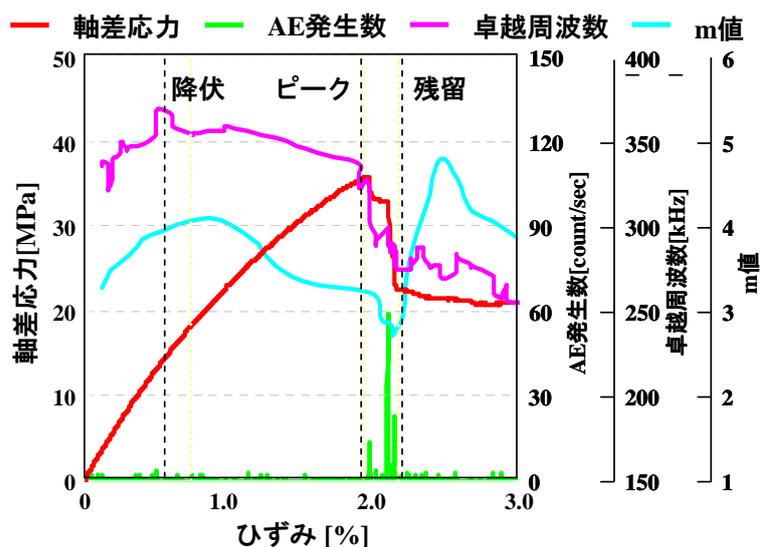
三軸圧縮試験装置としては、100tonf容量のサーボコントロール式剛性材料試験機を用い、ピストンとラム間の変位が0.05%/min (0.05mm/min) の速度で生じるようなひずみ制御方式 (変位制御) で載荷を行った。なお、変位制御に用いる変位計 (ひずみ式) はピストン部分に固定される。また、側圧についてはサーボ制御で10MPaとした。

試験に使用したAEセンサー (直径12mm, 高さ40mm) は、波形解析を考慮してセンサーの特性が比較的表れにくい広帯域型 (100kHz~1MHz間で受振感度が比較的平坦) を用いた。また油圧ポンプからのノイズや電気ノイズを省くために100kHz~1MHzのバンドパスフィルタを使用した。なお、AEセンサーは供試体上部、下部の載荷板の中にスプリングで圧着させた。以上のような方法および条件のもとで、複数の結晶質岩および堆積軟岩に対して試験を実施した。

結晶質岩および堆積軟岩の供試体に対する試験結果 (応力-ひずみ曲線) の例を図1.1.3に示す。本図には観測されたAEパラメータであるAE発生数・m値・卓越AE周波数についても同時に示している。



(a) 結晶質岩²⁾



(b) 堆積軟岩³⁾

図1.1.3 三軸圧縮試験結果の例

岩石内の応力変化と各AEパラメータの間には次のような関係が認められる。

① AE発生数

結晶質岩の場合には、降伏強度付近からAEが発生し始め、ピーク強度付近において発生数が最大となっている。ピーク強度以降は、ひずみがほとんど増大することなく、急激に応力が低下し、残留強度に達していることがわかる。残留強度以降については、AEはほとんど発生していない。したがって、AE発生数の挙動に着目することで、岩石供試体の破壊過程を明瞭に捉えることができ、破壊現象の進行度合を評価することができると考えられる。

堆積軟岩の場合には、AEの発生数は、結晶質岩に比べ非常に少ない。応力経路に従ってその挙動を見ると、まずピーク応力に達するまではAEの発生が極めて少なく、ピーク応力以降にAE発生率は顕著に増加し始め、残留応力付近で最大となり、その後は再びほとんど発生しなくなる。このような挙動は、結晶質岩における挙動とは異なっており、応力集中の過程を正確に捉えることはやや困難であるが、残留応力状態の検知には有効である。

② m値

結晶質岩の場合には、降伏強度付近においてm値の低下が始まり、その後残留強度に達するまではm値が低いレベルを維持している。その後、残留強度において明瞭なm値の急激な反転が確認され、載荷前と同じレベルに達している。したがって、m値についても岩石供試体の破壊過程の評価に有効であると考えられる。

堆積軟岩の場合にも、結晶質岩の場合と同様に、降伏応力付近からm値の低下が始まり、残留応力付近で反転するという挙動が多くのケースにおいて確認されている。したがって、応力変化の評価に対する有効性は認められるものの、一般的には数十個のAEから一つのm値を算出するため発生数自体が少ない堆積軟岩においては、精度がやや低くなる可能性がある。

③ 卓越AE周波数

結晶質岩の場合には、載荷開始からピーク強度までは高周波のAEが卓越するが、その後ピーク強度から残留強度に達する軟化過程において急激に低周波のAEが卓越し、残留強度以降も引き続き低周波のAEが卓越している。これは、岩石の内部における微小亀裂の形成・進展の影響により特に高周波のAEが減衰し、センサーに到達しにくくなったためと考えられる。したがって、卓越AE周波数についても岩石供試体の破壊過程の評価に有効であると考えられる。

堆積軟岩の場合には、降伏応力からピーク応力に達するまで徐々に低下し始め、ピーク応力から残留応力に達するまでに顕著に低下し、残留応力に達すると一定値に収束していくという挙動を示す。これは、結晶質岩の場合と同様に、微小亀裂の形成・進展の影響により特に高周波のAEが顕著に減衰するためと考えられる。なお、不均質な微細亀裂やへき開などを多数含んでいる結晶質岩と比較すると、堆積軟岩は均質性が高いため、複雑な破壊現象が生じにくく、卓越AE周波数は、亀裂の増加に伴う高周波AEの減衰の影響をよく反映するものと考えられる。したがって、このパラメータは堆積軟岩において破壊過程の評価に非常に有効であると推察される。

(2) 粒状体DEMによる岩石の破壊現象とAEパラメータの関係の検討

ここでは、(1)で示した高剛性三軸圧縮試験を粒状体DEM⁹⁾によってシミュレートし、応力経路の各点で観測される岩石の破壊状況（亀裂の発生・進展状況）とAEパラメータとの関係を検討する。

検討のフローを図1.1.4に示す。まず、三軸圧縮試験によって得られた応力-ひずみ関係を粒状

体DEMによってカーブフィッティングできるような粒状体モデルのパラメータ（表1.1.2参照）の値を設定する。次に得られたモデルにおける亀裂発生状況（引張亀裂ならびにせん断亀裂の発生状況）と三軸圧縮試験時に観測されたAE発生状況（AE発生数・AE周波数）とを応力経路の各点で比較することによって、岩石の破壊現象とAEパラメータとの関係について検討を行う。

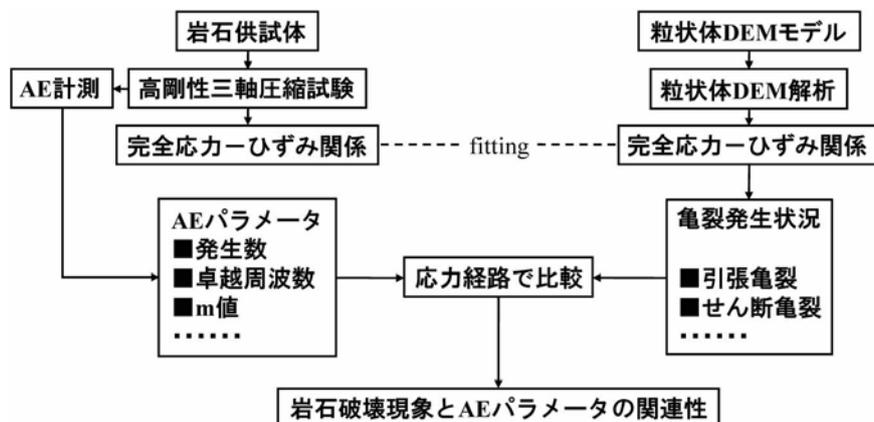


図1.1.4 岩石の破壊現象とAE特性の関係についての検討フロー

表1.1.2 粒状体DEM解析における入力パラメータ

記号	内容	分類
R_{min}	粒子の最小半径	
R_{max}/R_{min}	粒子の最大半径と最小半径の比	粒子の形状
ρ	粒子の密度	
E_c	粒子間の接触におけるヤング率	粒子間の変形性
k_n/k_s	粒子剛性比	
$\sigma_c(\text{mean})$	ボンドの引張り強度の平均値	
$\sigma_c(\text{std.dev})$	ボンドの引張り強度の標準偏差	
$\tau_c(\text{mean})$	ボンドのせん断強度の平均値	粒子間の強度
$\tau_c(\text{std.dev})$	ボンドのせん断強度の標準偏差	
μ	粒子間の摩擦係数	

図1.1.5に室内三軸試験結果に対してカーブフィッティングをした結果の一例を示す。本図には、応力-ひずみ曲線の他に、三軸圧縮試験の結果として試験前後の供試体のスケッチを、粒状体DEM解析の結果として試験前後の粒状体モデルの状況および試験前後のボンドの破断状況を併せて表示している。

図1.1.6に粒状体DEM解析において供試体に発生した引張亀裂ならびにせん断亀裂の累積発生数を示すと同時に、4つの段階（①降伏強度・②ピーク強度・③残留強度にそれぞれ到達する点および④残留強度到達後にひずみがある程度増大した点）における亀裂発生分布を示す。各段階において亀裂の発生に次のような傾向が認められる。

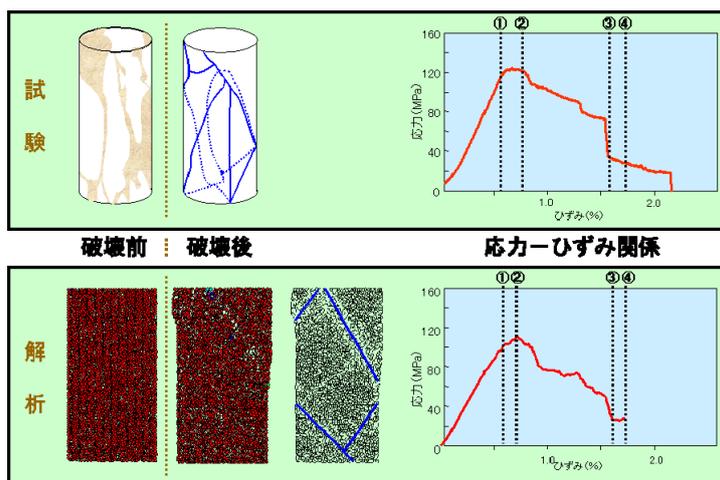


図1.1.5 粒状体DEM解析によるカーブフィッティング結果の一例（結晶質岩供試体）²⁾

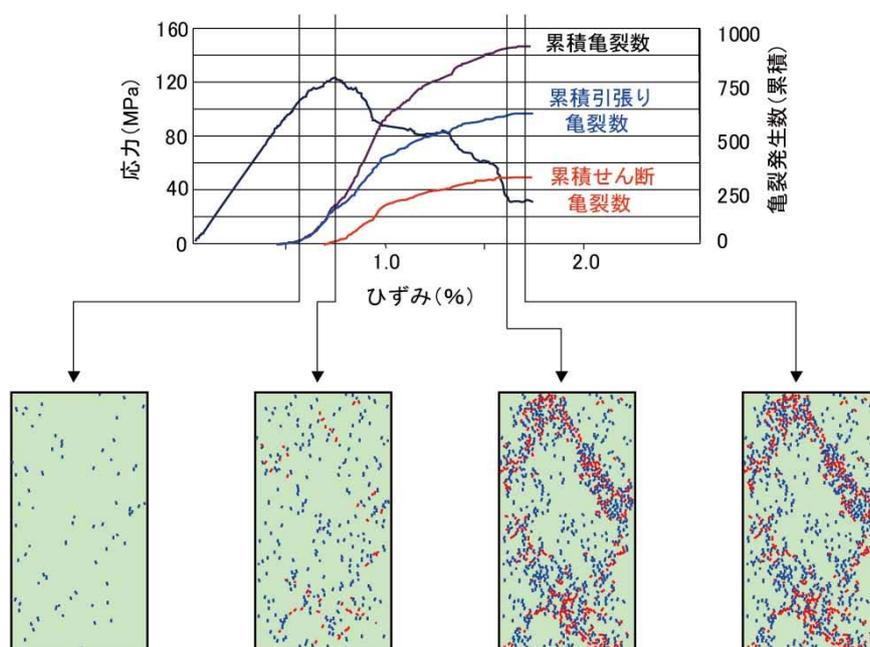


図1.1.6 粒状体DEM解析における応力-ひずみ曲線と亀裂発生分布の一例（結晶質岩供試体）²⁾

①応力が降伏強度に至る前に引張亀裂が発生し始める。

②降伏強度に至ると、引張亀裂の発生数は顕著に増加し、せん断亀裂が発生し始める。ピーク強度に至ると、せん断亀裂の発生数が顕著に増加し、全体の亀裂発生数は最大値をとる。その後、引張・せん断亀裂の発生数は徐々に減少し、残留強度に至るとほとんど発生が認められなくなる。

③亀裂の発生位置は、ピーク強度に至る前までは、供試体全体にほぼ均質に分布するが、ピーク強度を過ぎると特定位置（破壊によって形成される分離面の位置）に集中する。

以上の結果から、先に検討した三軸圧縮試験によるAEの発生モードと粒状体DEM解析によってシミュレートされた亀裂の発生モードとを供試体の破壊過程の各段階において比較して、整理

すると次のようになる。

- ① 載荷初期～降伏強度：岩石内にはほぼ均質に引張亀裂が生じてAEが発生するが、その発生数は少ない。
- ② 降伏強度～ピーク強度：引張亀裂の発生数が顕著に増加するとともに、せん断亀裂が発生し始める。これに伴ってAEの発生数も増加する。またAE波形の振幅値も徐々に大きなものが卓越するようになる。
- ③ ピーク強度～残留強度：せん断亀裂の発生数が顕著に増加し、全体の亀裂発生数はピーク直後に最大値をとる。亀裂の発生位置は特定位置に集中し、これらが連結し合うことによって岩石に分離面が形成される。その後、引張亀裂およびせん断亀裂ともに発生数が徐々に減少する。AEの発生数は全体の亀裂発生数と対応した傾向を示し、ピーク直後に最大値をとる。AE波形の振幅値は残留強度付近まで大きなものが卓越し、周波数は応力の低下とほぼ対応した減少傾向を示す。
- ④ 残留強度到達後：残留強度に至った後は、破壊によって形成された分離面周辺にのみ亀裂が発生するがその発生数は少ない。AE発生数も同様の傾向を示す。AE波形の振幅値は再び小さなものが卓越するようになり、周波数は低いレベルで一定値を呈するようになる。

1.1.2.4 原位置岩盤における応力変化とAEパラメータの挙動⁴⁾

現実の空洞周辺における応力変化とAEパラメータの挙動の関係を把握するために、東京電力(株)神流川地下発電所の本体空洞掘削時の計測結果⁴⁾について検討を行った。

(1) 検討対象地点

高さ52m、幅33m、長さ216mのこの空洞は、土被り約500mの大深度に、アーチ部および12層のベンチごとに逐次掘削が進められた。図1.1.7に示すように、空洞周辺の岩盤は中生代に堆積した泥岩や砂岩などの混在岩（90%以上がCH級）であり、6つの地質に区分することができる。各地質の岩盤物性(弾性係数、破壊強度等)は、原位置岩盤試験などから得た。また、空洞周辺の初期地圧の主応力軸は垂直方向から約26°傾いている。

計測は、空洞掘削に先立って周辺に掘削されたボーリング孔内の多数の地点において行った。その項目としてはAE、応力変化、変位、亀裂開口量などがある。今回は空洞H断面の4ベンチ位置に水平に掘削されたH-10計測線上の空洞壁面から3mの地点において詳細な検討を行った。

(2) AEパラメータの挙動と応力変化・ひずみの関係

H-10計測線上3m地点における応力変化、ひずみ、AEパラメータの計測結果を図1.1.8に示す。これらの関係を、予め行った岩石の三軸圧縮試験におけるAEパラメータの挙動をふまえて検討した。

まず、アーチ部掘削時にはAEの発生は見られず、1ベンチ掘削段階になって発生し始める。このとき、応力はやや集中し始めるものの、ひずみはほとんど認められない。2ベンチ、3ベンチ掘削時にかけてはAE発生数の増加、高周波AEの卓越、m値の低下といった応力集中を示すAEパラ

メータの変化が確認できるが、実際に極めて高い応力が集中しているのがわかる。4ベンチ、5ベンチ掘削時にAE発生数はピークを迎え、卓越周波数は高いレベルを、m値は低いレベルを維持している。これは岩盤にかかる応力がピーク強度に達し、破壊の直前であることを示している。また、このことはひずみが急激に増大していることから確認できる。6ベンチ、7ベンチ掘削段階になると、AE発生数の収束、低周波AEの卓越、m値が急激な増加（反転現象）などから岩盤が破壊に至ったものと考えられる。その後の掘削において応力やひずみが一定のレベルを維持していることからこの地点の岩盤の破壊が終結したことがわかる。以上のことから、AEの各パラメータの挙動が岩盤の応力変化を精度良く捉えていることが確かめられた。

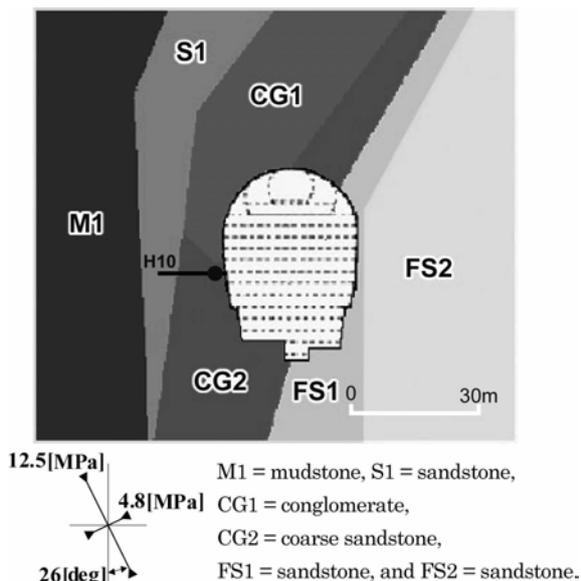


図1.1.7 H断面空洞周辺地質図⁴⁾

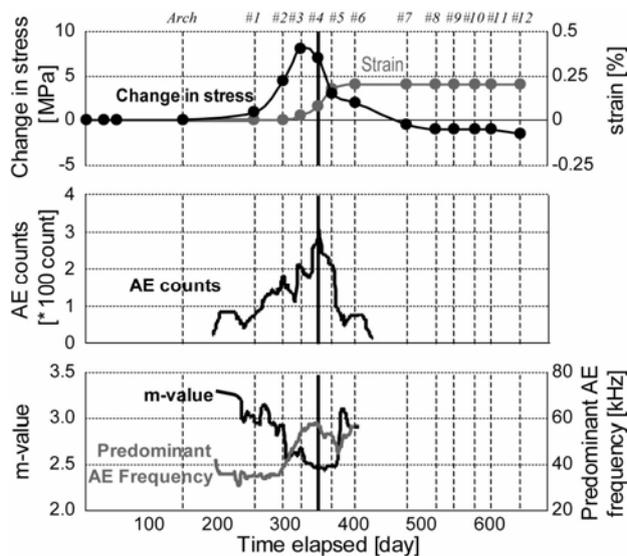


図1.1.8 H-10計測線上3m地点での計測結果⁴⁾

(3) 空洞掘削に伴う岩盤の応力変化・破壊現象とAEパラメータの挙動

次に、粒状体DEM解析による空洞の逐次掘削シミュレーションを行い、ベンチ掘削の各段階での応力状態や亀裂の発生状況を把握した。また解析結果を計測結果と比較することでその妥当性を確かめ、AEパラメータとの関連性もふまえてEDZの形成および進展の過程について考察を行った。

以下にシミュレーションの手順を示す。

- ① 粒状体DEMにおいては、ボンドで結合された個々の粒子の力学特性によって岩盤物性が定まる。個々の粒子の力学特性を設定するにあたっては、二軸圧縮試験を模擬したシミュレーションを繰り返し行い、得られた物性と実際の岩盤物性が一致するように粒子の力学特性を決定する。
- ② 応力再配分や亀裂発生の大局的な傾向を把握するため、図1.1.9の左図に示すグローバルモデルによるシミュレーションを行う。①で決定した粒子の力学特性をもとに空洞周辺の岩盤モデルを作成し、これに初期応力を作用させる。この条件の下で、アーチ部および各ベンチに相当する部分を逐次掘削していく。
- ③ 図1.1.9の右図に示す空洞側壁部のセクターモデルによるシミュレーションを行う。このモ

デルの初期状態はグローバルモデルのアーチ部掘削完了時の応力状態をもとに設定している。セクターモデルでは粒子の直径を非常に小さく（12～20cm）設定することで、局所的な応力変化や亀裂の進展の過程を詳細に検討することが可能となる。実際の計測点に相当する地点には一定の大きさの計測円を設け、その円内での平均値を解析値としている。

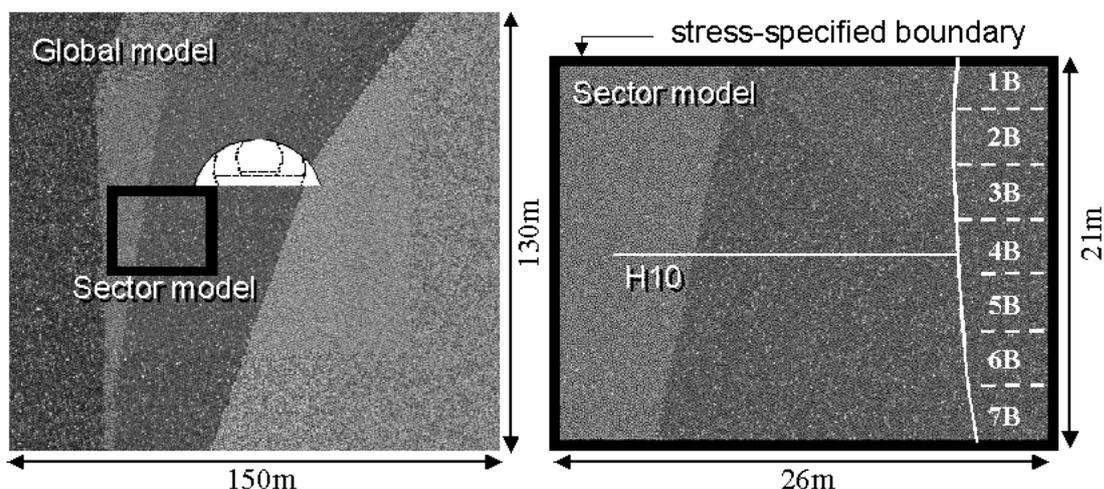


図1.1.9 粒状体DEM解析モデル⁴⁾

図1.1.10はセクターモデルを用いた解析によって得られた(a)差応力および(b)微小亀裂の分布を掘削段階ごとに示したものである。

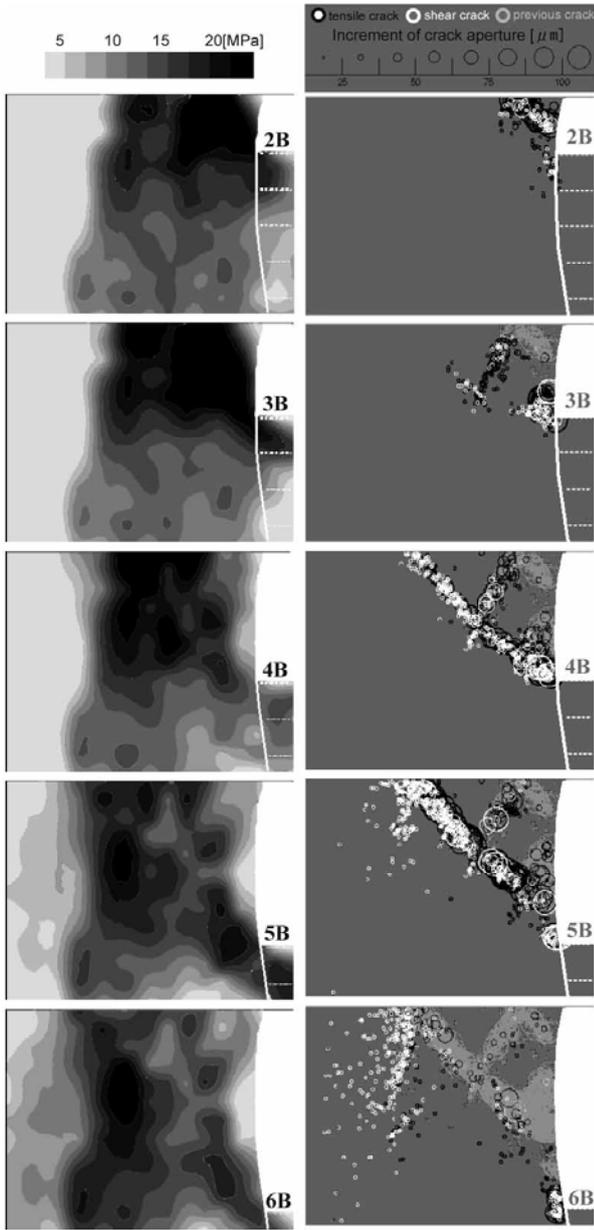
まず1ベンチ、2ベンチ掘削時には掘削ベンチの壁面付近に応力の集中が見られ、応力集中領域において微小亀裂が発生し始める。この段階では引張力による亀裂が卓越している。

3ベンチ掘削時には応力集中および微小亀裂発生範囲が拡大し、4ベンチ掘削段階になると応力集中領域が壁面から離れた位置へと移行し始め、それに伴って微小亀裂がより岩盤深部でも発生するようになる。この際発生する微小亀裂は地質の境界周辺に集中しており、岩盤の不連続面を中心に破壊面が形成されつつあることがわかる。

5ベンチ掘削時には応力集中領域はさらに岩盤深部へと移行し、壁面近傍において応力が低下した領域（ゆるみ領域）が形成されている。また、破壊面に沿って比較的規模の大きな微小亀裂が集中的に発生し、亀裂が進展していく様子が捉えられている。

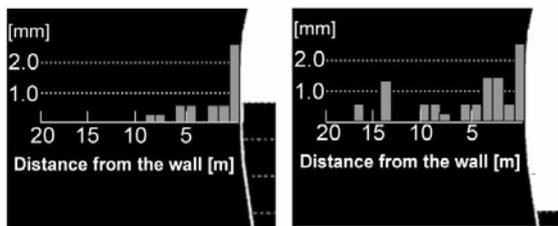
6ベンチ掘削完了段階で破壊面における亀裂の進展はほぼ終結し、さらに深部の地質境界に沿ってせん断力による微小亀裂が新たに発生し始めるが、その規模は小さなものである。解析により以上のような応力の再配分過程および微小亀裂の発生・進展過程を把握することができた。

次に、解析結果と実測結果を比較することにより解析手法の妥当性を確認する。まず亀裂の状況については、H-10計測線においてボアホールテレビにより観測された亀裂開口量の分布（図1.1.11）と比較する。観測結果では、3ベンチ掘削時の亀裂発生は壁面近傍のみであり、6ベンチ掘削段階になると亀裂発生が岩盤深部に及ぶとともに、壁面近傍の亀裂がさらに開口しているが、解析結果（図1.1.10）がこれと良く一致した挙動を示していることがわかる。



(a) Differential stress (b) Initiated crack

図 1.1.10 セクターモデルによる解析結果⁴⁾



(a) Bench No.3 (b) Bench No.6

図 1.1.11 亀裂開口量分布 (H-10 計測線)⁴⁾

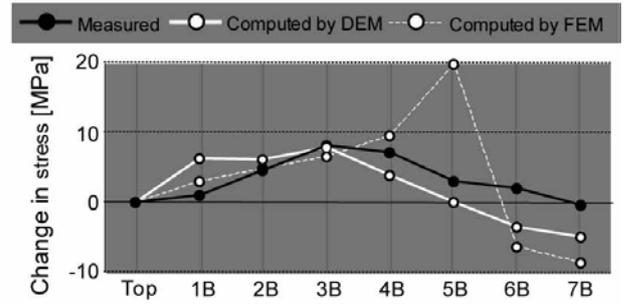
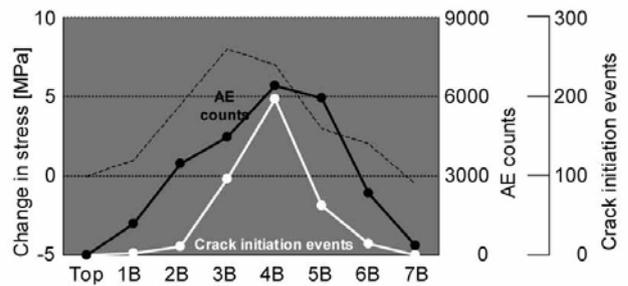
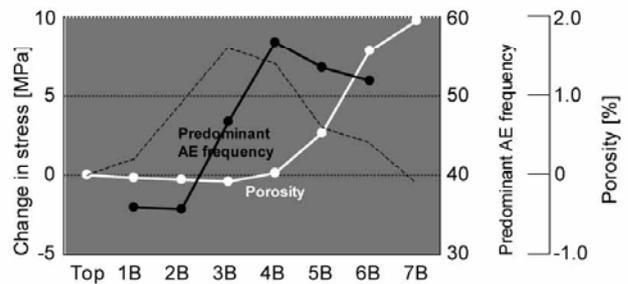


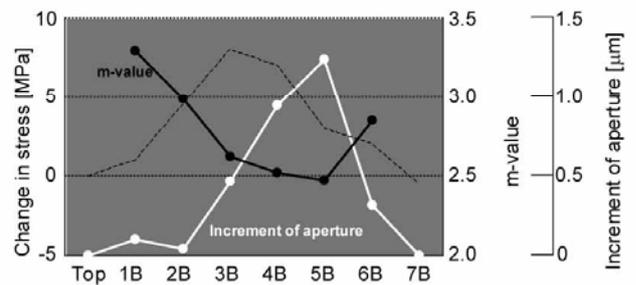
図 1.1.12 応力変化の比較 (H-10 計測線 3m 地点)⁴⁾



(a) AE counts and crack initiation events



(b) Predominant AE frequency and porosity



(c) m-value and total increment of crack aperture

図 1.1.13 AE 計測結果と解析結果との比較 (H-10 計測線 3m 地点)⁴⁾

図1.1.12は、空洞掘削に伴う応力の変化量 (H-10計測線上3m地点) を比較したものである。本

図には有限要素法（FEM）を用いたひずみ軟化解析の結果もあわせて表示してある。実測結果を見ると、3ベンチ掘削時に応力集中がピークを迎えた後、掘削の進行に伴って徐々に低下している。解析結果のうちFEMの場合は、応力変化の傾向は捉えているものの、ピーク時のレベルやその時期および低下時の様子などが実測結果とやや異なっている。一方、本研究で用いたDEMの場合は、そのような細かな部分まで実測結果と極めて良く一致していることがわかる。これは、FEMの場合に比べ個々の要素（粒子）を非常に細かく設定したことで、粒子間に発生する微小亀裂の影響が逐次反映されたためであると考えられる。以上の比較により、解析結果が十分妥当なものであったといえる。

図1.1.13は、計測により得られたAEパラメータの挙動と解析により得られた破壊現象に関するパラメータの挙動とを比較したものである。まず(a)のAE発生数と微小亀裂の発生数については、微小亀裂の発生に伴ってAEが発生するという直接的な関わりがあるため、両者とも応力集中に伴って増加し、破壊後の応力低下に伴って収束するという傾向がみられた。次に(b)の卓越周波数と空隙率については、応力が集中する段階で空隙率がやや減少する（岩盤が緻密になる）ため、高周波AEが卓越するようになるが、岩盤が破壊に至ると空隙率が増加するため、高周波AEが遮断され、結果的に卓越周波数は低下するという関係が示された。また(c)のm値と微小亀裂の発生時間開口量については、岩盤が破壊に至る過程において、発生する微小亀裂の規模が大きくなるため、振幅の大きなAEが発生する割合も多くなり、m値は低下するが、破壊が終結すると微小亀裂の規模は小さくなるため、振幅の大きなAEはほとんど発生せず、m値が急激に増加するという関係が示された。以上の結果から、各AEパラメータの挙動が示す物理的意味をより明確にすることができたといえる。

1.1.2.5 EDZにおける岩盤の破壊挙動の分析⁵⁾

ここでは、空洞掘削時の周辺岩盤において発生する破壊現象の進展をより定量的に評価する手法を構築するため、原位置で計測されたAEパラメータの挙動と数値解析による応力変化を詳細に対比することにより、岩盤の破壊挙動の分析を行った。

AEパラメータとしてはAE発生数に着目し、FEMにより算定した空洞周辺の岩盤要素における応力径路との関連性について、AE発生およびAE進展の2つの応力レベルとKaiser⁷⁾らが提唱するスポーリング限界（Spalling limit）の概念を用いて、前項と同様の実際の地下空洞掘削時に計測された原位置岩盤挙動の分析を行った。

(1) 岩石の破壊過程とAE発生の関係

粒状体DEMを用いた空洞の逐次掘削シミュレーションを行い、ベンチ掘削の各段階での応力状態や亀裂の発生状況を把握した。また解析結果を計測結果と比較することでその妥当性を確かめ、AEパラメータとの関連性もふまえてEDZの形成および進展の過程について考察を行った。

岩盤を構成する岩石は、微視的に見れば空隙やマイクロクラックなどの潜在的な亀裂を内在する。これらの潜在的な亀裂は、岩石がある応力状態に達した際に進展を開始し、その際にAEを発生する。

既往の多数の室内試験による研究事例^{8)~15)}から、岩石の破壊過程とAEの発生については、以下に示す4つの特徴が確認されている。

①応力レベルが、概ね一軸圧縮強さの0.3~0.5倍を超えた段階でマイクロクラック（AE）が発

- 生し始める^{8),9),10),11)}。
- ②供試体に発生するマイクロクラックは、主に最大主応力と平行な方向に形成される。これは、体積ひずみの膨張挙動¹²⁾、顕微鏡による供試体の直接観察¹³⁾および数値解析（例えば、DEM）結果¹⁴⁾からそれぞれ確認されている。
 - ③応力レベルが、概ね一軸圧縮強さの0.7~0.8倍を超えた段階でマイクロクラックが互いに連結し始める^{12),15)}。
 - ④応力レベルがピーク強度に到達した後に、供試体に明確な破断面が形成される。

Martin¹¹⁾は、これらの特徴から、岩石レベルでの応力状態（軸差応力）と亀裂の進展段階の関係を模式的に整理している。図1.1.14に、岩石一軸圧縮試験における応力-ひずみ関係とその載荷過程における亀裂進展の概念図を示す。

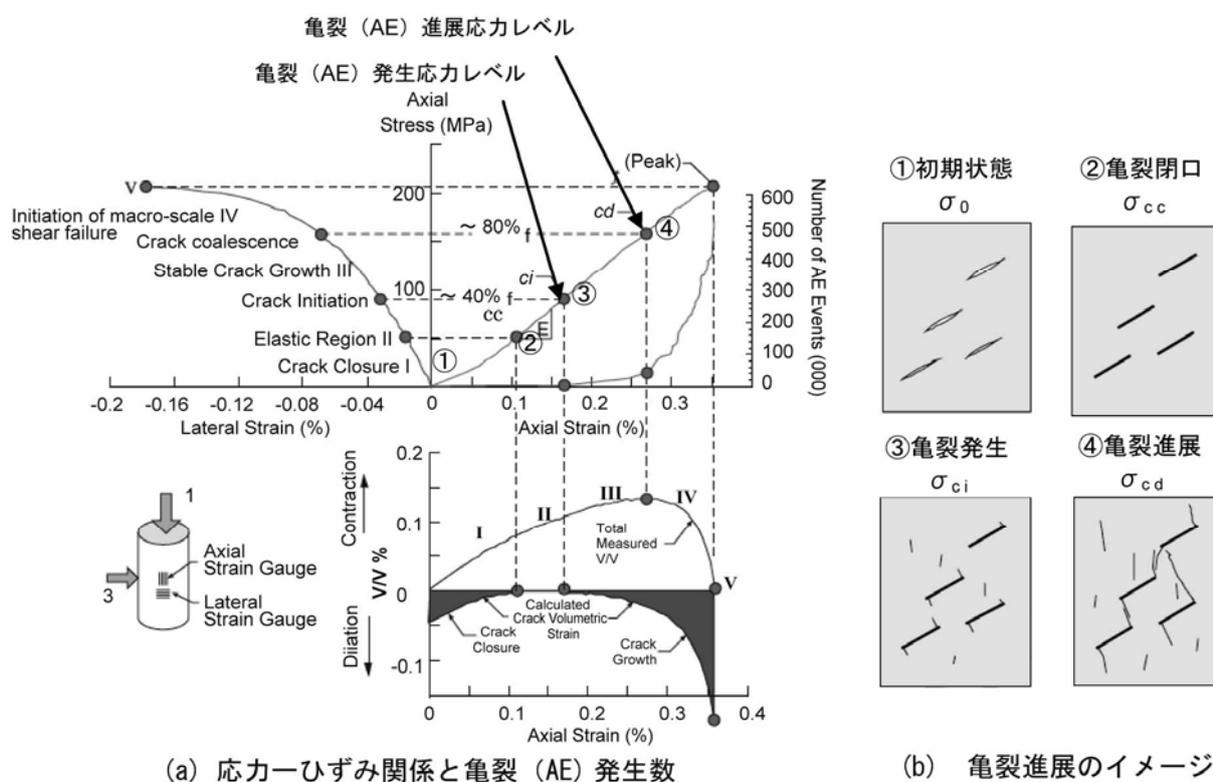


図1.1.14 岩石一軸圧縮試験における応力-ひずみ関係と亀裂進展のイメージ¹¹⁾

ここで、 σ_{cc} は既存亀裂が閉口する応力レベルを示し、 σ_{ci} は岩石内に新規のマイクロクラックが発生する応力レベル（亀裂発生応力レベル）を示す。 σ_{cd} は亀裂同士が連結することによりマクロな亀裂の進展が開始する応力レベル（亀裂進展応力レベル）を示し、最終的にはピーク強度 σ_c に達して破壊に至る。この一連の載荷過程における岩石からのAEの発生は、まず σ_{ci} において開始し、 σ_{cd} に到達すると急激に増加し、ピーク強度 σ_c 付近に到達した時点で最大となっており、載荷過程での亀裂の発生・進展はAEの発生状況と密接に対応している。

ここで示される3段階の応力レベル（亀裂発生応力レベル、亀裂進展応力レベル、ピーク強度）は、岩石における微視的な破壊過程の進展を評価する重要な値となる。

亀裂発生応力レベルは、DEMによる岩石試験のシミュレーション解析において確認された微小

な引張亀裂が一様に発生し始める状態を示すものであり、新規の微小な亀裂の発生に伴いAEが発生し始める応力レベル（AE発生応力レベル）に相当する。また、亀裂進展応力レベルは、DEMにおいて確認された複数の亀裂の結合に伴うマクロなせん断破壊が生じ始める状態を示すものであり、マクロな亀裂の進展に伴いAEの発生が急増し始める応力レベル（AE進展応力レベル）に相当する。このAE進展応力レベルは、岩石材料においてマクロな塑性変形が開始する「降伏応力」に対応する。

(2) AE発生応力レベルとAE進展応力レベル

過去の室内岩石試験結果から、応力状態の変化に伴う岩石材料でのAEの発生モードは、その载荷過程に応じて特徴的に変化することが確認されている（図1.1.15）。

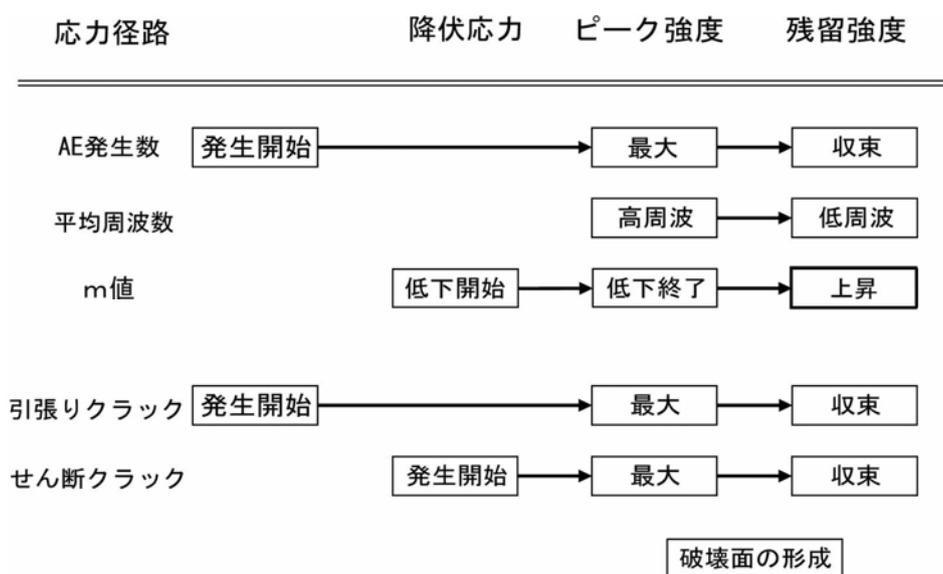


図 1.1.15 岩石の载荷過程における AE パラメータと亀裂発生挙動

これらのAE発生モードの変化に対応する規準（しきい値）を設定することができれば、岩盤内の応力状態の変化をAEによって定量的に評価することが可能となる。

Martin¹¹⁾は、三軸応力下でのインタクトな岩石供試体における亀裂発生応力レベルが次式で定義できることを室内試験により確認している。

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (0.4 \pm 0.05) \sigma_c \tag{1.1.1}$$

ここに、 σ_c は岩石の一軸圧縮強さを示す。

式 (1.1.1)において σ_c に掛かる定数について、Caiら¹⁶⁾は、岩石の場合、粒径が大きい場合では0.4~0.5、小さい場合では0.5~0.6、節理性岩盤の場合、節理密度が低い場合では0.4~0.5、高い場合では0.5~0.6となることを示している。

この岩石における亀裂発生応力レベルの概念を原位置岩盤に適用する場合、原位置では節理や弱層などの不連続面が存在するため、岩盤としての力学特性はこれらの影響を大きく受けることになるため、原位置での力学試験や計測データに基づいて適切なしきい値を設定しなければなら

ない。岩盤内の亀裂発生応力レベルを原位置計測データから分析する場合、取り扱う事象が微視的なマイクロクラックの挙動であることから、岩盤変位計などのひずみ量から分析することは困難であり、AE計測結果を用いることが最も的確であると考えられる。

本研究では、図1.1.14に示した岩石における亀裂の発生および進展と載荷応力との関係を原位置岩盤に拡張して適用するため、式(1.1.1)におけるインタクトな岩石の一軸圧縮強さ σ_c を不連続面の影響を包含した岩盤としての一軸圧縮強さ σ_{cm} に置き換え、以下の式で一般化して検討を進めることとした。

AE (亀裂) 発生応力レベル (σ_{ci}) :

$$\sigma_1 - \sigma_3 = A\sigma_{cm} \quad (1.1.2)$$

AE (亀裂) 進展応力レベル (σ_{cd}) :

$$\sigma_1 - \sigma_3 = B\sigma_{cm} \quad (1.1.3)$$

ここに、 σ_{cm} は岩盤の一軸圧縮強さを示し、不連続面が全く存在しない場合、この σ_{cm} は岩石の一軸圧縮強さと一致することとなる。定数 A および B は、材料特性の影響を受ける低減係数である。

AE (亀裂) 発生および進展の各応力レベルが、式(1.1.2) および (1.1.3) のように $\sigma_1 - \sigma_3$ 空間において線形関係で表わされることについては、Kachanov¹⁷⁾, Horii and Nemat-Nasser¹⁸⁾, Ashby and Hallam¹⁹⁾らにより、マイクロメカニクス理論によって示されている。

ここでの、岩盤としての一軸圧縮強さ σ_{cm} および定数 A および B は、対象となる地点毎に設定されるものであり、不均質な地質条件下であれば測点毎に決定する必要がある。そして、これらの定数を適正かつ普遍的に決定することが、空洞掘削時の計測管理に適用する上で重要となる。

そこで、地下空洞掘削時に原位置でのAE計測を実施した既往の事例を整理し、AE発生および進展の各応力レベル(式(1.1.2) および (1.1.3))における定数 A および B の範囲について分析を行ったところ、AE発生および進展の各応力レベル式と定数の範囲が、以下の式で一般化できることがわかった。

AE 発生応力レベル (σ_{ci}) :

$$\sigma_1 - \sigma_3 = A\sigma_{cm} \quad (A = 0.4 \sim 0.6) \quad (1.1.4)$$

AE 進展応力レベル (σ_{cd}) :

$$\sigma_1 - \sigma_3 = B\sigma_{cm} \quad (B = 0.8 \sim 1.0) \quad (1.1.5)$$

(3) スポーリング限界

Kaiserら⁷⁾は、脆性的な破壊挙動を示す硬岩において、低拘束圧条件で圧縮を受けた場合、地質の不均質性に起因して壁面近傍において最大主応力方向に平行な亀裂が発生し、それらが結合することによる破壊現象(Spalling破壊)が生じる場合があることを報告している。このスポーリング破壊の概念は、岩石供試体の三軸圧縮試験において不均質性に起因して生じる低拘束圧条件下の割裂破壊(Split failure)^{20), 21)}と類似した破壊現象である。

図1.1.16に、Kaiserら⁷⁾が示す硬岩での破壊形態のイメージと破壊包絡線の概念を示す。

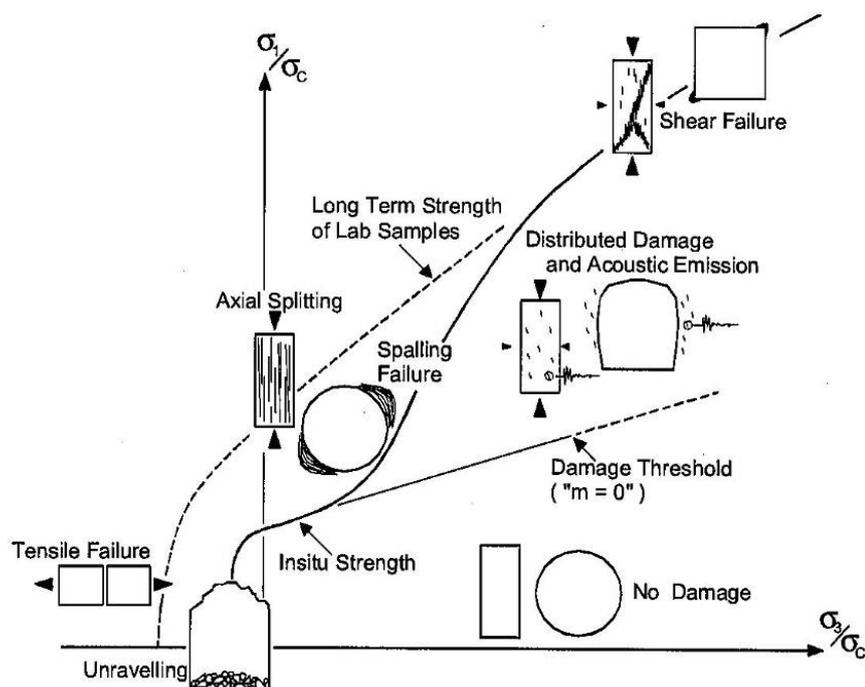


図1.1.16 硬岩での破壊形態イメージと破壊包絡線概念⁷⁾

これに拠れば、硬岩の場合の破壊形態は、従来のせん断破壊、引張破壊とは別にスポーリング破壊を加えた3つで構成されることを示している。Kaiserら⁷⁾は、このスポーリング破壊時の破壊規準（スポーリング限界：Spalling limit）について、 σ_1/σ_3 が一定となる以下の式で一般化できることを原位置での計測結果により確認している。

$$\sigma_1/\sigma_3 = 10 \sim 20 \quad (1.1.6)$$

上式における σ_1/σ_3 の値について、Kaiserら⁷⁾は、岩盤の不均質性や潜在的な亀裂の発達度によって変化し、節理が発達する岩盤において10程度、インタクトな岩盤において20程度と報告している。

ここでのスポーリング限界は、低拘束圧条件下の圧縮応力場においてスポーリング破壊が発生し始める応力レベルと対応するものであり、これを超える応力状態となった場合、破壊現象の発生に伴う顕著なAEが発生することとなる。

本研究で対象としている神流川地点⁴⁾における岩盤も、脆性的な破壊挙動を示す硬岩に属することから、AE計測データに基づき岩盤の応力状態を評価する上で、スポーリング限界の概念はAE発生応力レベルおよびAE進展応力レベルと共に重要となる。

本研究では、(2)で述べたAE発生およびAE進展の各応力レベルにスポーリング限界を加え、これらに基づく空洞周辺岩盤の応力径路とAEの挙動を対比・分析することとした。

(4) 原位置AE挙動と応力径路の関連性の分析

ここでは、空洞掘削時の周辺岩盤において発生する破壊現象の進展を数値解析により定量的に

評価する手法を構築するため、神流川地点の空洞掘削時に計測された原位置のAE挙動と数値解析による応力変化を、AE発生およびAE進展の各応力レベルとスポーリング限界に基づいて対比することにより、両者の関連性の分析を行った⁵⁾。

① 応力経路算定のための解析モデル

応力経路を推定するための数値解析モデルは、空洞掘削時の設計および計測管理において実績があるひずみ軟化モデルによる2次元非線形FEM逐次掘削解析^{22), 23)}を採用した。FEMによるシミュレーションに用いた解析コードは、Rocscience Inc.によって開発されたPhase²を使用した。

AEセンサー設置位置での応力経路は、空洞周辺の地層区分と掘削順序および実際に施された支保工をモデル化した逐次掘削解析により算定し、掘削過程に沿ってAE発生数と共に応力経路上にプロットすることで、AE発生およびAE進展の各応力レベルとスポーリング限界の分析を行った。

解析モデルについては、空洞周辺に分布する岩盤の力学的特性の違いを考慮し、地層を8層に細区分した不均質モデルとし、さらに放水路側に存在する連続性の高い分離面（レンズ層）を薄層としてモデル化した。空洞周辺部の地層区分と解析に使用した解析メッシュを図1.1.17に示す。解析を行った断面は、AE計測を実施したH断面とした。

岩盤物性値については、室内岩石試験結果と原位置での地山区分を用いてGSI値（Geological Strength Index）により評価した。地山区分毎の解析用物性値を表1.1.3 (a), (b)に示す。

GSIシステムは、節理性岩盤を対象とした岩盤評価手法として、E.フックら²⁴⁾により提案されたものであり、不連続面により形成される地盤の構造的（Block Size）と不連続面の表面性状（Wall Condition）からGSI値を決定し、そのGSI値と岩石の一軸圧縮強さから原位置岩盤の強度・変形特性を算定するものである。GSI値は、極めて悪い岩盤からインタクトな岩石までを0～100の数値指標によって分類するものである。今回検討に使用したものは、オリジナルのGSI値の考え方に基づき、Caiら²⁵⁾によりブロックサイズを6カテゴリーに拡張して定量化した評価チャートを使用した。適用した修正GSI評価チャートを図1.1.18²⁶⁾に示す。

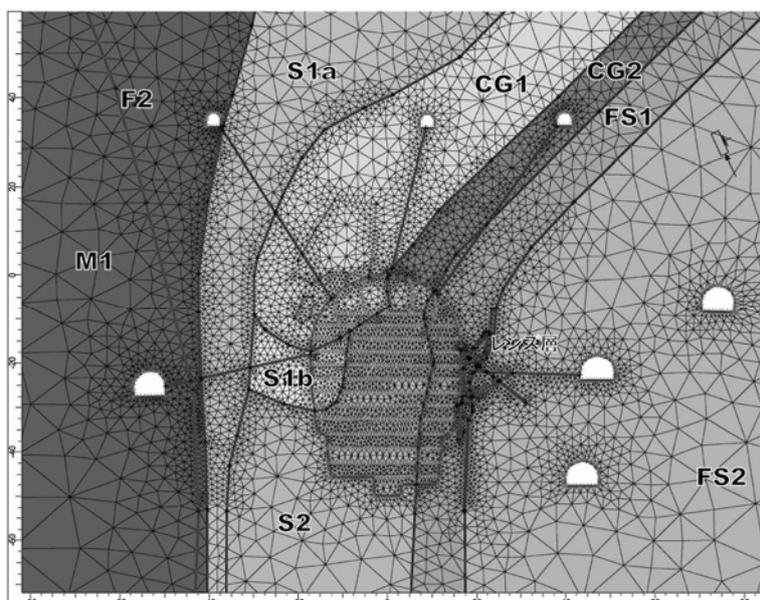


図1.1.17 空洞周辺の地層区分とFEM解析メッシュ（H断面）

表1.1.3(a) 解析用物性値一覧表 (弾性係数)

地層区分	GSI値	等価弾性 係数 (GPa)	弾性係数 (逆解析) (GPa)	ポアソン比
S1a	—	—	30	0.25
CG1	74	40	60	0.25
S2	65	24	30	0.25
CG2	65	24	60	0.25
FS1	65	24	30	0.25

表1.1.3(b) 解析用物性値一覧表 (強度)

地層 区分	GSI値	ピーク強度		残留強度		一軸圧縮 強さ	引張強度
		c_p (MPa)	ϕ_p (°)	c_r (MPa)	ϕ_r (°)	σ_{cm} (MPa)	σ_{tm} (MPa)
S1a	—	3.4	57	0.5	49	23	0.4
CG1	74	4.1	57.8	0.5	49	28.5	0.6
S2	65	3.7	57.5	0.5	49	25.2	0.4
CG2	65	3.7	57.5	0.5	49	25.2	0.6
FS1	65	3.1	56.4	0.5	49	20.2	0.2
FS2	65	3.4	57	0.5	49	23	0.4

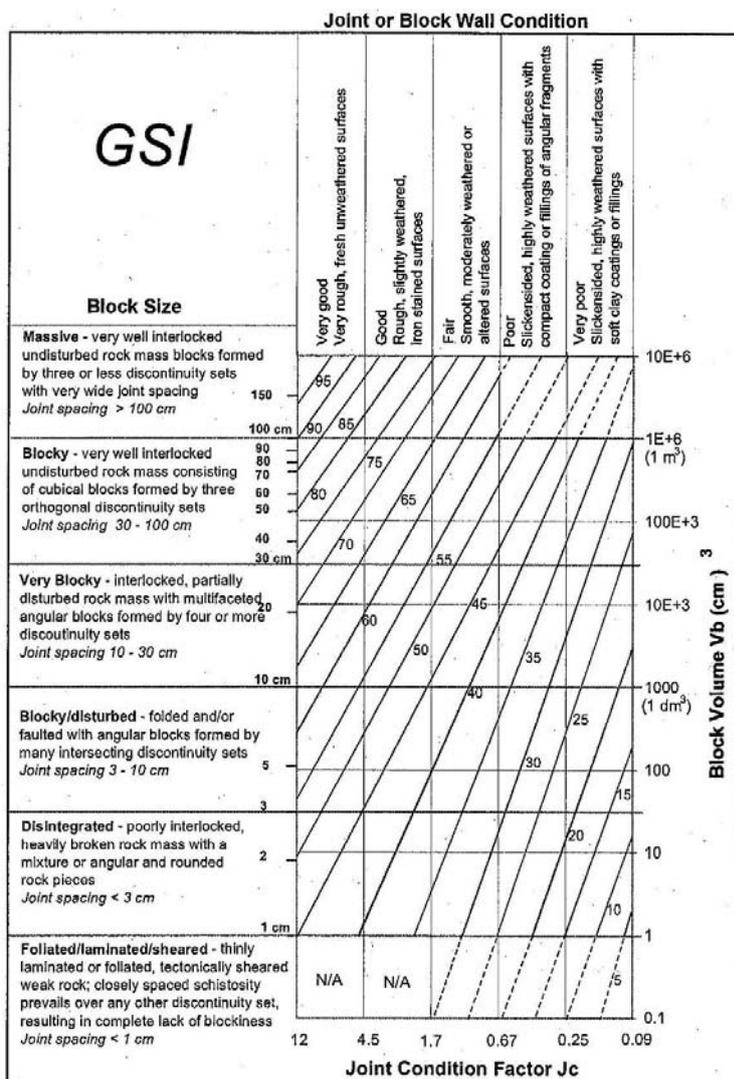


図1.1.18 定量化した修正GSI評価チャート²⁶⁾

② 関連性の分析結果

ここでは、神流川地点の地下発電所空洞⁵⁾におけるH断面の放水路側肩部（H3測線）、放水路側側壁部（H5測線）および鉄管側肩部（H2測線）での実測のAE発生数と解析による応力径路の関連性について分析した結果について述べる。

H断面におけるAE計測線の配置と空洞の掘削ステップを図1.1.19に示す。また、天井アーチ部および側壁部のそれぞれのAEセンサー設置深度を図1.1.20に示す。

空洞の掘削は、まず、天井アーチ部の頂設導坑（A1）の掘削を行い、2回のステップに分けて天井アーチ部の切り拡げを行い（A2, A3）、その後、1段3m程度のベンチ掘削を12ステップに分けて実施した（1～12ベンチ）。挙動分析はこれらの掘削ステップ毎に集約した計測データを用い、数値解析もこれらの掘削ステップを考慮した逐次掘削解析とした。

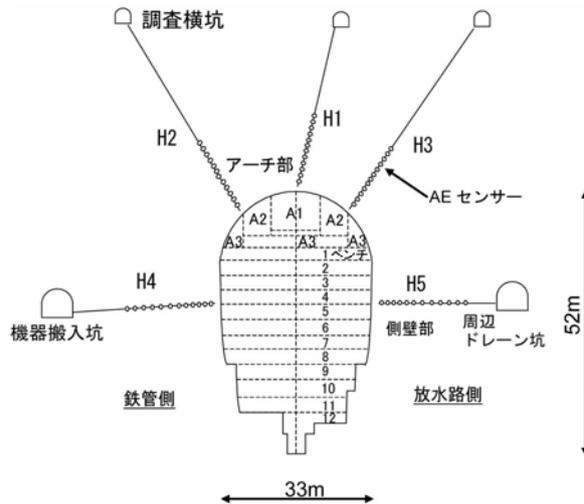


図1.1.19 AE計測線の配置と空洞の掘削ステップ（H断面）

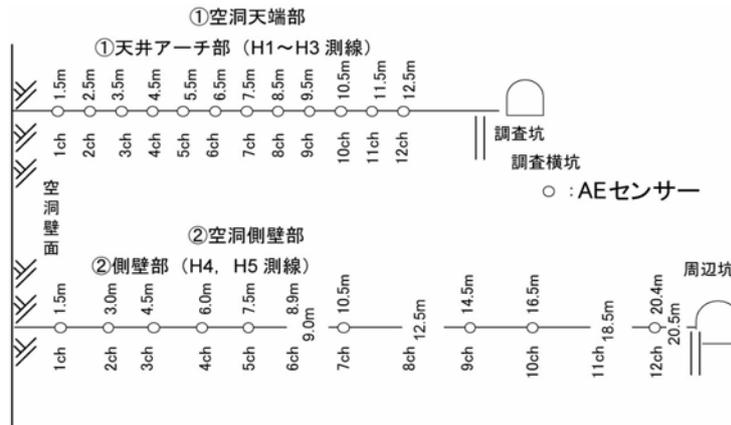


図1.1.20 AEセンサーの標準埋設深度

a) H3測線（放水路側肩部）

図1.1.21(a), (b)にH3測線におけるAEセンサー設置位置での数値解析により算定した応力径路と空洞掘削時の実測のAE発生数を示す。AE発生数については、空洞の掘削ステップ毎に集計し、各深度での応力径路上にプロットした。ここでの各プロットにおける円の面積は、AE発生数の大きさを示している。主要なポイントではAE発生数の値と該当する掘削ステップを記載した。

H3測線の岩盤は、一軸圧縮強さ $\sigma_{cm}=20.2\text{MPa}$ 程度の連続性の高い不連続面を含む細粒砂岩層

(FS1層) 中に位置している。

掘削の進行に伴うAE発生数の変化に着目すると、図1.1.21 (a)よりCh1~Ch6 (深度1.5~6.5m) センサー位置では天井アーチ部切り拡げ(A2)掘削時に、また同図 (b)よりCh7 (深度7.5m) 以深のセンサー位置では同(A3)掘削時にそれぞれAEが発生し始めており、これらの結果から、H3測線 (細粒砂岩層) でのAE発生応力レベル (式 (1.1.4)) は $\sigma_1 - \sigma_3 = (0.5 \sim 0.55) \sigma_{cm}$ と設定できる。なお、同図中には $\sigma_1 - \sigma_3 = 0.55 \sigma_{cm}$ とした場合のAE発生応力レベルのラインを青破線で記載した。

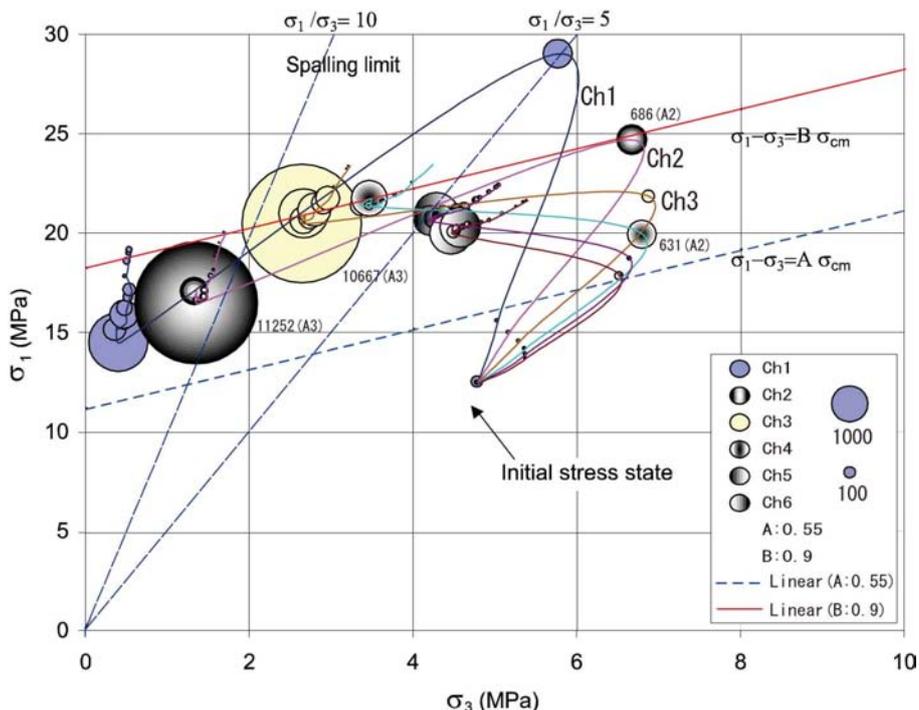


図1. 1. 21 (a) H3測線の応力径路とAE発生数 (Ch1~6 : 深度1. 5~6. 5m)

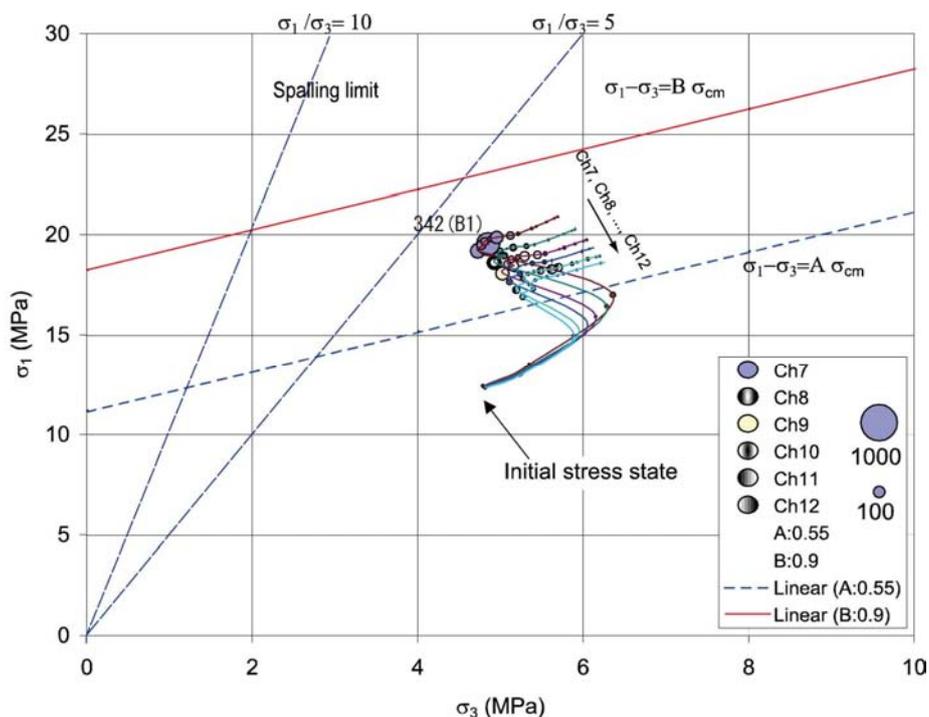


図1. 1. 21 (b) H3測線の応力径路とAE発生数 (Ch7~12 : 深度7. 5~12. 5m)

次に、掘削中にAE発生数が顕著に増大しているCh1～Ch7（深度1.5～7.5m）のセンサーのAE発生数および卓越周波数の経時変化を図1.1.22 (a), (b)に示す。ここでの各プロットにおける円の面積は、AE発生数の大きさを示している。また、主要なポイントについては、AE発生数の数値を併記した。

同図より、Ch1～Ch3（深度1.5～3.5m）のセンサーでのAE発生数および卓越周波数は、天井アーチ部切り上げ(A3)掘削時にピークを示し、その後は低下する傾向（図中青破線）を示していることが確認できる。したがって、これらのセンサー位置での岩盤は、天井アーチ部切り上げ(A3)掘削時に破壊に至ったものと解釈できる。

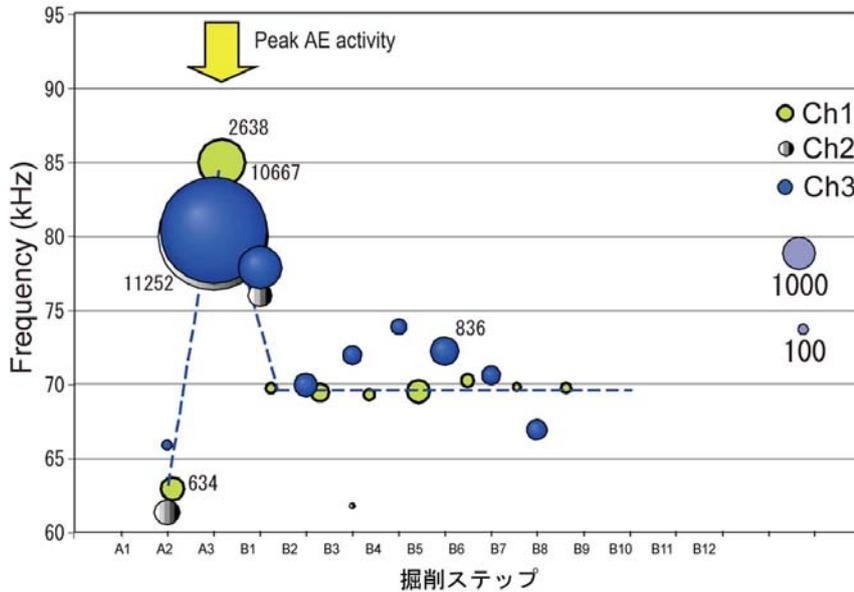


図1.1.22 (a) AE発生数および卓越周波数の経時変化（Ch1～3：深度1.5～3.5m）

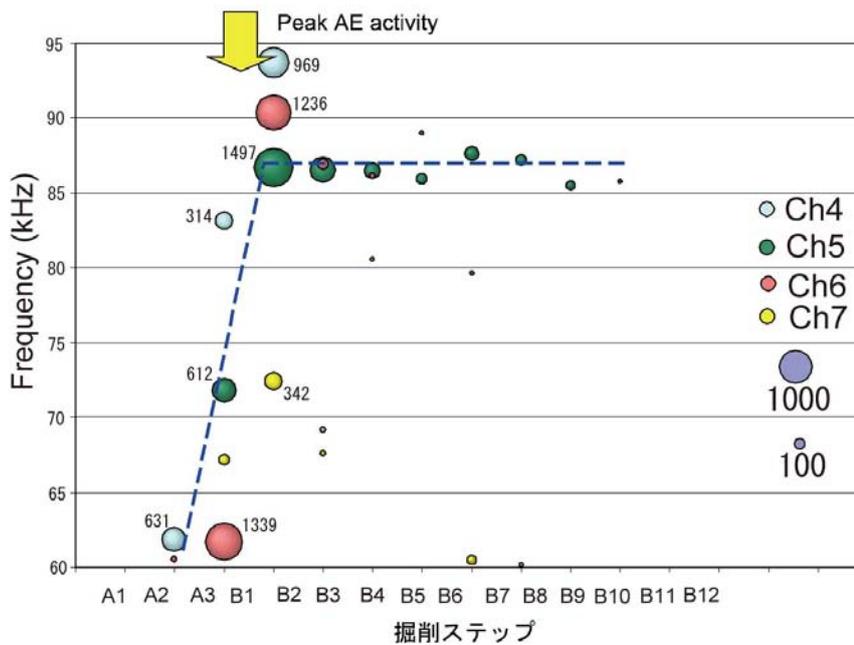


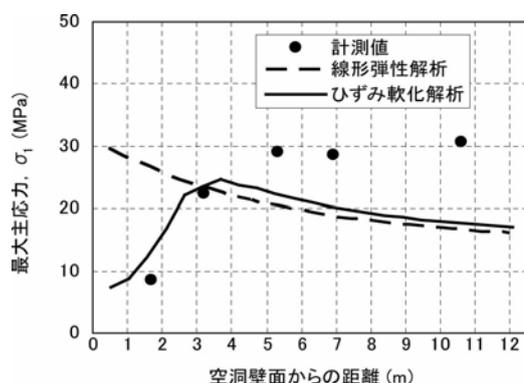
図1.1.22 (b) AE発生数および卓越周波数の経時変化（Ch4～7：深度4.5～7.5m）

これらの挙動を図1.1.21 (a)に示す応力径路と対比した場合、Ch1 (1.5m)とCh2 (2.5m)のセンサー位置では、天井アーチ部切り上げ(A2)掘削時にAE進展応力レベルに達し、同(A3)掘削時にせん断破壊あるいはスポーリング破壊に至っていると推察される。また、Ch3 (3.5m)センサー位置では、同(A3)掘削時にせん断破壊あるいはスポーリング破壊に至っていると推察される。

一方、Ch4～Ch7 (深度4.5～7.5m)のセンサー位置での卓越周波数は、上昇あるいは一定の傾向を示していることから、当該深度における岩盤はAE進展応力レベルに達していないものと考えられ、図1.1.21 (a), (b)に示した応力径路がAE発生応力レベルとAE進展応力レベルの間に留まっていると解釈できる。以上の分析結果から、Ch3 (3.5m)のセンサー位置での天井アーチ部切り上げ(A3)掘削時の破壊をせん断破壊と仮定すれば、AE進展応力レベルは $\sigma_1 - \sigma_3 = (0.9 \sim 1.0) \sigma_{cm}$ 、スポーリング破壊と仮定すれば、スポーリング限界は $\sigma_1 / \sigma_3 = 5 \sim 10$ と推定される。なお、図1.1.21 (a), (b)には、AE進展応力レベルを $\sigma_1 - \sigma_3 = 0.9 \sigma_{cm}$ 、スポーリング限界を $\sigma_1 / \sigma_3 = 5$ および10とした場合のラインを、それぞれ赤実線および紫破線で記載した。

次に、天井アーチ部切り上げ(A3)掘削終了時の当該測線近傍での岩盤の破壊現象の進展状況について、同(A3)掘削終了時にH3測線近傍で実施した円錐孔底ひずみ法による絶対応力測定結果を用いて検証した。絶対応力測定は、空洞壁面から深度1.65～10.6m区間の5点で実施している。

図1.1.23に、数値解析により算定した最大主応力と絶対応力測定による実測の最大主応力を示す。数値解析については、ひずみ軟化モデルによる二次元非線形FEM (ひずみ軟化解析) と線形弾性FEMにより算定した深度分布を記載した。



(H3測線：放水路側肩部)

図1.1.23 天井アーチ部切り上げ(A3)掘削終了時の壁面近傍での最大主応力分布

図1.1.23より、原位置での計測応力は、空洞壁面から5m以浅で低下しており、天井アーチ部切り上げ(A3)掘削終了時には空洞壁面から最大5mまでの範囲において岩盤の破壊が発生し応力再配分が進行していることが確認できる。この現象は、数値解析による応力分布において、破壊強度を考慮したひずみ軟化解析結果が、壁面近傍の3.5m以浅において線形弾性FEMによる解析結果を下回ることと整合するものである。

以上の分析結果から、H3測線でのAE発生状況は、その応力径路がAE発生、AE進展の各応力レベルおよびスポーリング限界に到達することによって顕著に変化することが確認され、これらの応力レベルとスポーリング限界を設定することで応力径路上でのAE発生数の変化を的確に評価できることが明らかになった。

なお、神流川地点⁵⁾における細粒砂岩層 (FS1層) でのAE発生およびAE進展の各応力レベルの

定数 A , B はそれぞれ0.5~0.55, 0.9~1.0と評価できることから, 式(1.1.4)~(1.1.5)に示した既往の事例による変動幅と対応することが確認できた。しかし, スポーリング限界の値については, Kaiserら⁷⁾の提唱する $\sigma_1/\sigma_3=10\sim 20$ よりも小さな値となった。この原因については, 神流川地点⁵⁾でのH3測線での岩盤(一軸圧縮強さで23MPa程度)とKaiserら⁷⁾が対象にした鉱山地点の岩盤(一軸圧縮強さで70~100MPa)との間に, 強度や節理の発達度といった地質条件の差があることに起因しているものと解釈できる。

b) H5測線(放水路側側壁部)

次に, H5測線深部におけるCh7~Ch12(深度10.5~20.4m)のセンサー位置での数値解析により算定した応力径路と空洞掘削時の実測のAE発生数を図1.1.24に示す。

H5測線の壁面から深部の岩盤は, 一軸圧縮強さ $\sigma_{cm}=23.0\text{MPa}$ 程度の比較的マッシュな細粒砂岩層(FS2層)に位置する。

同図から, 1ベンチ(B1)掘削時に, 応力径路がAE発生応力レベル $\sigma_1-\sigma_3=(0.5\sim 0.55)\sigma_{cm}$ を超え, AEが発生し始めることが確認できる。なお, 同図中では $\sigma_1-\sigma_3=0.51\sigma_{cm}$ とした場合のAE発生応力レベルのラインを青破線で記載した。

このように, 壁面から深部のセンサーにおいてAEが発生する場合についても, AE発生応力レベルを設定することで応力径路上でのAEの発生開始を的確に評価できることが明らかになった。

c) H2測線(鉄管側肩部)

さらに, スポーリング限界について, その挙動を確認できる例として, H2測線におけるCh7~Ch12(深度7.5~12.5m)のセンサー位置での数値解析により算定した応力径路と空洞掘削時の実測のAE発生数を図1.1.25に示す。

H2測線の壁面から深部の岩盤は, 一軸圧縮強さ $\sigma_{cm}=28.5\text{MPa}$ 程度のマッシュな礫岩および粗粒砂岩層(CG1層)に位置する。

同図中には, $\sigma_1-\sigma_3=0.45\sigma_{cm}$ とした場合のAE発生応力レベルのラインを青破線で記載した。また, スポーリング限界を $\sigma_1/\sigma_3=5$ および10のラインも併せて記載した。

同図より, Ch7~Ch9(深度7.5~9.5m)のセンサー位置では, 応力径路が一旦AE発生応力レベルを超え, その後の掘削ステップの進行に伴って再びAE発生応力レベル以下に低下したにも拘らず継続的にAEが発生していることが確認できる。

この現象は, 低拘束圧下での圧縮応力場でのAEの発生を示しており, AE進展応力レベルによっては説明できないが, スポーリング破壊の発生(スポーリング限界の存在)を仮定すれば応力径路上でのAE発生数の変化と整合する。すなわち, 岩盤の不均質性が局所的な引張亀裂を発生させ, これらの引張亀裂の発生および進展により継続的なAEが発生したものと解釈できる。

このように, 応力径路とAE発生数の変化の関連性の分析において, スポーリング限界の概念を導入することで, AE発生応力レベルのみでは評価困難であった低拘束圧下の圧縮応力場における顕著なAE発生挙動を解釈できることが確認できた。

これらの関連性の分析を神流川地点での他の測線に対しても実施した結果, 空洞掘削時の周辺岩盤における応力径路は, AEの発生挙動との関連で, 図1.1.26に示すような幾つかのパターンに分類できることが明らかになった。以下に図の説明を示す。

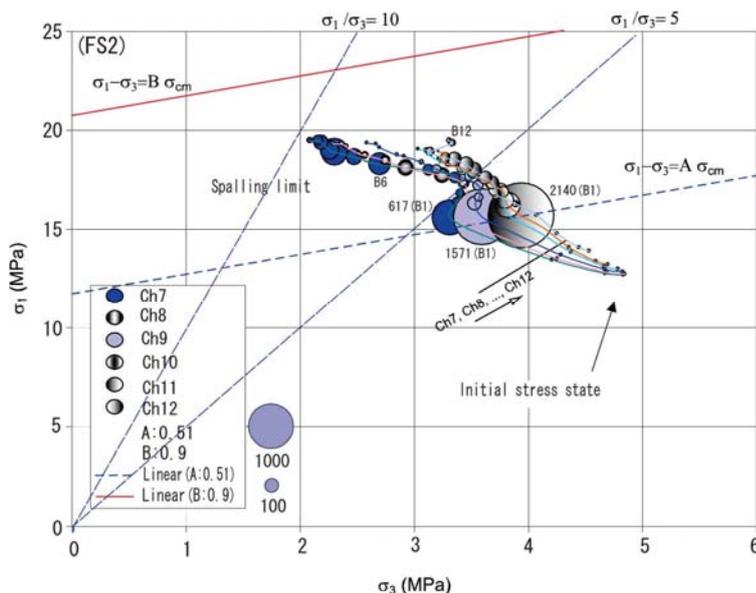


図1. 1. 24 H5測線深部での応力径路とAE発生数(Ch7~12 : 深度10. 5~20. 4m)

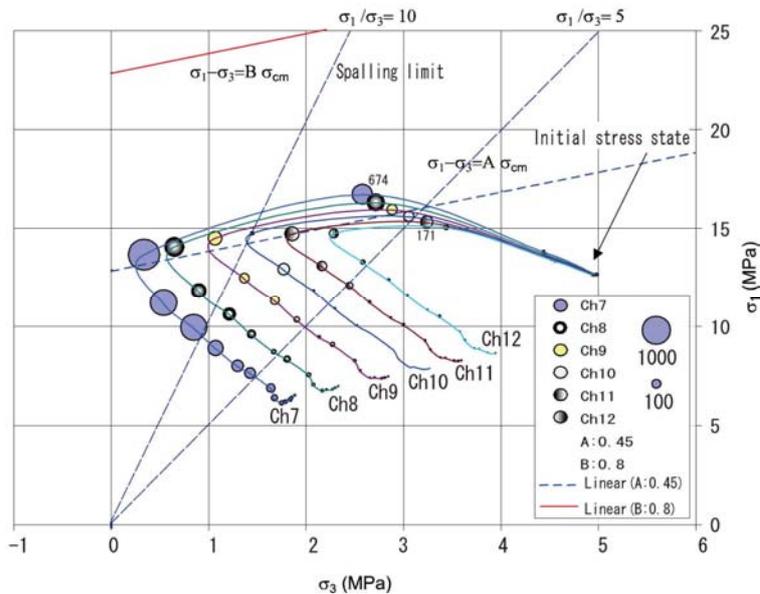


図1. 1. 25 H2測線深部での応力径路とAE発生数(Ch7~12 : 深度7. 5~12. 5m)

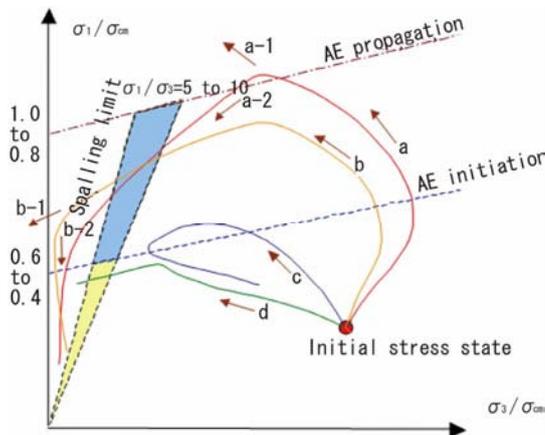


図1. 1. 26 空洞周辺岩盤の応力径路とAE発生パターン (概念図)

- ・ 応力径路a：最初にAE発生応力レベルを超え、次にAE進展応力レベルに達してAE発生数が急増し、破壊に至るケース。このうち、破壊はせん断破壊に至る場合（径路a-1）とスポーリング破壊に至る場合（径路a-2）がある。
- ・ 応力径路b：AE発生応力レベルを超えた後、スポーリング限界に達してAE発生数が急増し、破壊に至るケース。このとき、スポーリング破壊は岩盤の局所的不均質性に起因して発生するため、スポーリング破壊が発生せず引張破壊に至る場合（径路b-1）とスポーリング破壊に至る場合（径路b-2）がある。
- ・ 応力径路c：応力径路がAE発生応力レベルを超えるときにAEの発生は見られるが、応力状態がしきい値以下に低下するとAEの発生も無くなるケース。
- ・ 応力径路d：AE発生応力レベルを超えていないため、AEの発生は見られないケース。

これにより、空洞周辺岩盤において掘削ステップの進行に伴うAE発生数の変化は、AE発生およびAE進展の両応力レベルとスポーリング限界を設定することで、その応力径路上の破壊挙動と関連付けて、定量的かつ明確に解釈できることが明らかになった。

以上の分析結果から、大規模岩盤空洞掘削時のAE挙動の計測により、岩盤の応力状態を定量的に把握することができる見通しが得られた。これらのAE挙動と対応する各種応力レベルの概念と岩盤の応力径路の関係は、空洞周辺の破壊現象の進展の予知に対して非常に有用な情報となる。

(5) まとめ

本項では、空洞掘削時の周辺岩盤において発生する破壊現象の進展を数値解析により定量的に評価する手法を構築するため、原位置で計測されたAEパラメータの挙動と数値解析による応力変化を対比することにより、岩盤挙動の詳細な分析を行った。

まず、岩盤の破壊メカニズムに着目し、AE挙動と岩盤応力の対応を分析した既往の研究事例を整理し、空洞掘削時の岩盤の破壊現象の進展過程におけるAEの挙動について検討を行った。そして、数値解析による空洞周辺の岩盤要素における応力径路と実測のAE発生数の変化との関連性を解明するために、AE発生およびAE進展の2つの応力レベルとスポーリング限界の概念を用いて、神流川地点⁵⁾での空洞掘削時の岩盤挙動の分析を行った。

その結果、空洞掘削時の実測のAE発生状況は、その応力径路がAE発生、AE進展の各応力レベルおよびスポーリング限界に到達することによって顕著に変化することを確認した。特に、AE発生応力レベルのみでは評価困難であった低拘束圧下の圧縮応力場における顕著なAE発生挙動について、スポーリング限界により解釈できることが明らかになった。

空洞掘削時の周辺岩盤における応力径路は、AEの発生との関連で以下に示す幾つかの典型的なパターンに分類できることを確認した。

具体的に要約すると、

- a) AE発生応力レベルを超え、次にAE進展応力レベルに達してAE発生数が急増し破壊に至るケース
- b) AE発生応力レベルを超えた後、スポーリング限界に達してAE発生数が急増し、破壊に至るケース
- c) 応力径路がAE発生応力レベルを超えるときにAEの発生は見られるが、応力状態がしきい値以下に低下するとAEの発生も無くなるケース

d) AE発生応力レベルを超えていないため、AEの発生は見られないケース

の4ケースに大別される。

これにより、空洞周辺岩盤において掘削ステップの進行に伴うAE発生数の変化は、AE発生およびAE進展の両応力レベルとスポーリング限界を設定することで、その応力径路上の破壊挙動と関連付けて、定量的かつ明確に解釈できることが明らかになった。これらのAE挙動と対応する各種応力レベルの概念と岩盤の応力径路の関係は、空洞周辺の破壊現象の進展の予知に対して非常に有用な情報となる。

なお、神流川地点⁵⁾でのAE発生応力レベル（式（1.1.4））における定数Aは、細粒砂岩層（FS1層およびFS2層）において0.5～0.55程度、AE進展応力レベル（式（1.1.5））における定数Bは、細粒砂岩層（FS1層およびFS2層）において0.9～1.0程度、スポーリング限界（式（1.1.6））については、 σ_1/σ_3 が5～10の範囲にあることが、空洞掘削時の挙動分析結果より明らかになった。

1.1.2.6 岩盤の力学—水理学的連成挙動に着目した水理学的EDZの評価手法の構築

地層中に注水を行うと、注水による岩盤変位および地下水の間隙圧変化によって微小地震波（第二種P波であるBiot波）が発生する現象が知られている^{27), 28)}が、地熱分野においては、この現象を利用して貯留層の位置を推定する試みがなされている²⁹⁾。すなわち、この微小地震波の発生位置を経時的に観測することで、岩盤における卓越した透水経路の位置・形状およびその透水性を推定するものである。

本研究では、岩盤内を通過する微小地震波の力学—水理学的連成挙動に着目した水理学的EDZの評価手法の構築を目的として検討を行った。

(1) 注水による媒体の変位と間隙圧拡散速度

Biot理論は^{27), 28)}、多孔質媒体を構成するフレーム部分（骨格：Skeletonとよばれる）と、その間の空隙をそれぞれ別の波が伝わると仮定して、それらの波の伝播挙動を説明しようとするものである。すなわち、飽和した岩盤中に伝達する弾性波は、弾性波の周波数に応じて岩石構成粒子と間隙水の挙動が異なり、速度と減衰率が変化する。この理論に基づき、Silinら²⁹⁾は、岩盤における注水試験時に弾性波が発生するメカニズムを詳細に述べている（図1.1.27に概念図を示す）。

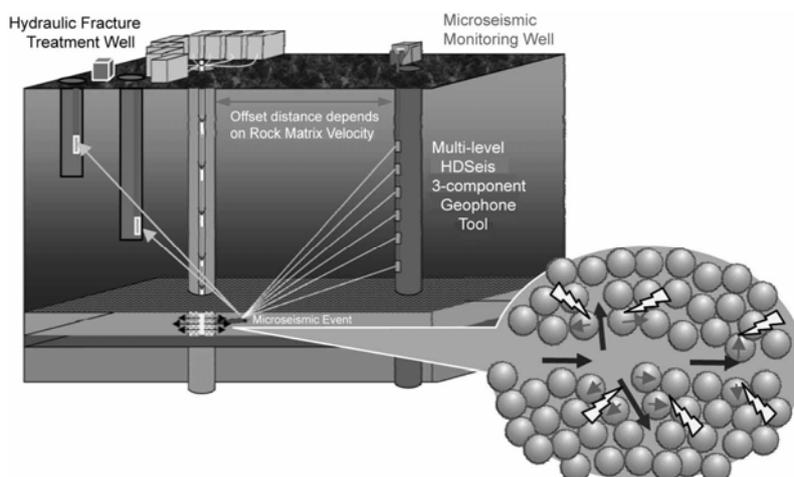


図1.1.27 注水試験時における微小地震波の発生²⁹⁾

骨格部分の変位を u とすると，Newtonの運動法則によって次式が得られる。

$$\rho_b \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \rho_f \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{1}{\beta} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1.1.7)$$

ρ_b : 飽和した媒体の全体密度， ρ_f : 流体の密度， p : 流体圧力， β : 弾性係数
一方，Darcy 速度を W ，浸透率を κ ，流体の粘度を η とすると，非定常状態の場合に次式が成り立つ。

$$W + \tau \frac{\partial W}{\partial t} = -\frac{\kappa}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} - \rho_f \frac{\kappa}{\eta} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1.1.8)$$

このとき，質量保存則から流体と骨格の質量変化を次式で表すことができる。

$$\frac{\partial \rho_f \phi}{\partial t} = -\frac{\partial \left(\rho_f W + \phi \rho_f \frac{\partial u}{\partial t} \right)}{\partial x} \quad (1.1.9)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \frac{\partial u}{\partial t} \right) \quad (1.1.10)$$

ϕ : 間隙率， ρ : 骨格の密度， ρ_f : 流体の密度

式 (1.1.9) における流体の圧縮率を流体の弾性係数 β_f を用いて表すとともに，微小項を省略すると，次式を得る。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \phi \beta_f \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial W}{\partial x} - \phi \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \quad (1.1.11)$$

一方，骨格の密度と粒子の密度の関係 $\rho = (1 - \phi) \rho_g$ を式 (1.1.10) に代入して，微小項を省略すると，次式を得る。

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + (1 - \phi) \frac{1}{\rho_g} \frac{\partial \rho_g}{\partial t} = -(1 - \phi) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \quad (1.1.12)$$

ここで，粒子の圧縮率は，応力および流体圧力の変化量により次式で表され，

$$\frac{1}{\rho_g} d\rho_g = \beta_{gs} d\sigma_x + \beta_{gf} dp \quad (1.1.13)$$

β_{gs} : 粒子の圧縮率， β_{gf} : 流体の圧縮率

これを式 (1.1.12) に代入すると，

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = (1 - \phi) \beta_{gf} \frac{\partial p}{\partial t} + (1 - \phi) \left(1 + \frac{\beta_{gs}}{\beta} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \quad (1.1.14)$$

となり，式 (1.1.11) に代入すると，次式を得る。

$$\left(1 + (1 - \phi) \frac{\beta_{gs}}{\beta}\right) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + (\phi \beta_f + (1 - \phi) \beta_{gf}) \frac{\partial p}{\partial t} = - \frac{\partial W}{\partial x} \quad (1.1.15)$$

さらに、流体および骨格の圧縮率と比較すると、粒子の圧縮率と流体の圧縮率は極めて小さいので、式 (1.1.15) は次式のように表すことができる。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + \phi \beta_f \frac{\partial p}{\partial t} = - \frac{\partial W}{\partial x} \quad (1.1.16)$$

また、小規模の骨格および流体振動を考慮する場合には、流体のDarcy速度と骨格の表面変形 (Superficial Displacement) の間に

$$W = \frac{\partial w}{\partial t} \quad (1.1.17)$$

の関係があるので、この式を式 (1.1.16) に代入して t に対して積分すると次式が得られる。

$$\frac{\partial p}{\partial x} = - \frac{1}{\phi \beta_f} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{\phi \beta_f} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (1.1.18)$$

式 (1.1.17) と式 (1.1.18) を式 (1.1.7) と式 (1.1.8) に代入すると、最終的に次式が得られる。

$$\rho_b \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \rho_f \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \left(\frac{1}{\beta} + \frac{1}{\phi \beta_f} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1}{\phi \beta_f} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (1.1.19)$$

$$\rho_f \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \tau \frac{\eta}{\kappa} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{1}{\phi \beta_f} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1}{\phi \beta_f} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\eta}{\kappa} \frac{\partial w}{\partial t} \quad (1.1.20)$$

これらの式 (1.1.19) と式 (1.1.20) はBiot方程式と等しい^{28), 29), 31)}。

ここで、媒体の寸法に対して骨格の変位は微小であるため、式 (1.1.7) と式 (1.1.8) における変位に対する時間の2階微分およびDarcy速度の時間微分については省略することができる。

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{1}{\beta} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1.1.21)$$

$$W = - \frac{\kappa}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1.1.22)$$

また、式 (1.1.21) を x で積分し、 t で微分すると次式を得る。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x} = \beta \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1.1.23)$$

式 (1.1.22) と式 (1.1.23) を式 (1.1.15) に代入すると、次式を得る。

$$\phi \left(\frac{\beta}{\phi} + \beta_f \right) \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\kappa}{\eta} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (1.1.24)$$

この方程式は水理試験の解析によく用いられる圧力拡散方程式である。したがって、Biot波理論^{28), 29)}によれば、注水における岩盤の微小変位と共に発生した振動は、間隙圧の拡散速度と関連性があり、この岩盤の振動に伴って発生する微小地震波の発生時間および発生位置によって、岩盤における卓越した透水経路を推定することが可能であると考えられる。

(2) Triggering frontと水頭拡散率

岩盤への注水によって、岩盤の各所では微小地震波が発生するが、この発生領域は時間とともに拡大していく。この領域の外周面はTriggering Frontと呼ばれ、微小地震波の時空間分布を表す。ここでは、このTriggering Frontの時間的な変化と水頭拡散率との関連性について述べる。

Biot方程式^{28), 29)}によって、均質媒体における間隙水圧 p の変化は式(1.1.25)によって示される。

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[D_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} p \right] \quad (1.1.25)$$

D_{ij} : 水頭拡散率のテンソル成分, x_i : 注水点－微小地震波観測点間の距離ベクトル

低周波数の波の場合、この方程式は第二種Biot波(緩いP波)に対応し、間隙水圧の減衰を記述する。均質等方性媒体の場合には、次式のようになる。

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D \Delta p \quad (1.1.26)$$

式(1.1.26)は、水頭拡散率が注水圧力に依存することを示している。Shapiro^{30), 31), 32)}は、Triggering Frontを半径 a の球として仮定することにより式(1.1.26)を解き、次式を得た。

$$p(r, t) = p_0 e^{-\omega r} \frac{a}{r} \exp \left[(i-1)(r-a) \sqrt{\frac{\omega}{2D}} \right] \quad (1.1.27)$$

r : 注水点から微小地震波観測位置との距離, ω : 角速度

Shapiro^{30), 31), 32)}は、定圧注水条件のもとで式(1.1.27)を簡略化し、注水から微小地震波発生までの時空間距離と水頭拡散率との関連性を導いた。

$$r = \sqrt{4\pi Dt} \quad (1.1.28)$$

(3) 注水・観測設備

微小地震波を誘発するための注水設備は、注水制御システム (Injection control system) , 水圧増幅システム (Hydraulic pressure amplifier) とパイプおよびパッカー (Pipe and Packer) より構成される (図1.1.28)。

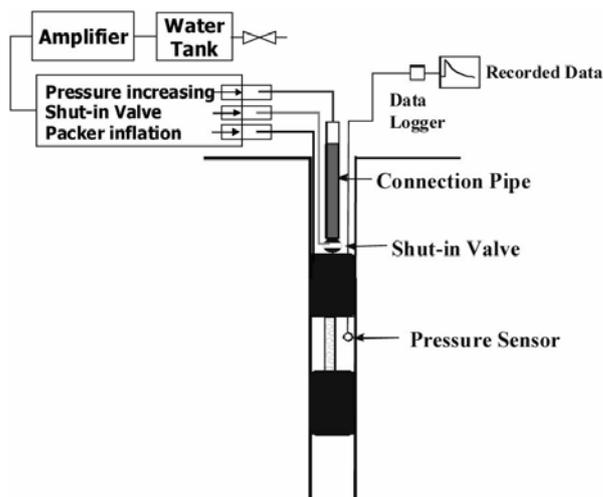


図1.1.28 注水設備の概略図

一方、微小地震波観測設備は、①サイスミック・モニタリング・システム、②サイスミック収録システム、③ジオフォンより構成される（図1.1.29）。

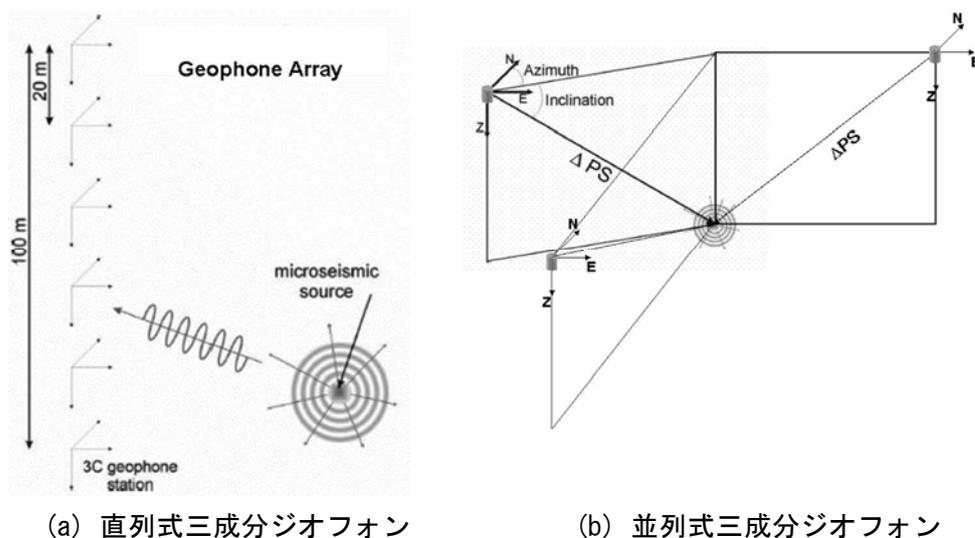


図1.1.29 微小地震波の観測システム³³⁾

ジオフォンのシステムには、観測周波数領域を選択的に抽出することが可能である並列式配置のシステムと観測周波数領域がより広い直列式配置のシステムがある。また、微小地震波観測用ジオフォンは、従来一方向成分のみしか探知できなかったが、近年では、微小地震波が発生した時に発生点からの方向、傾斜および距離の三成分を測ることが可能なシステムが開発されている³³⁾。

(4) 岩盤の力学－水理学的連成挙動の解析手法の構築

岩盤の力学－水理学的連成挙動の評価にあたっては、岩盤－地下水－気体の相互挙動を考慮し、空洞の力学的・水理学的安定性を検討する必要がある。これまでに、岩盤の力学－水理学的連成

挙動の評価には、空洞の力学的安定解析と地下水浸透流解析とをそれぞれ個別に行う方法が用いられてきた。しかしながら、このような方法では、岩盤の亀裂の力学的挙動とそれに伴う間隙水圧・間隙ガス圧変化との関係を十分に考慮することはできない。そこで、本研究では、岩盤-地下水-気体の相互作用を考慮した応力-浸透流連成解析手法の構築を試みた³⁴⁾。

気密試験を含め、貯蔵空洞の気密性を評価するにあたっては、流体の間隙圧による岩盤の変形と地下水・気体の浸透による3次元の応力-浸透流連成挙動を考慮する必要がある。特に、間隙水圧の伝播に伴う選択的な透水経路の発生や進展の現象を適正に評価することが重要である。

そこで本研究では、岩盤の力学的挙動については、3次元の粒状体DEM⁶⁾を適用し、気体・地下水の浸透流のモデル化に際しては、粒状体DEMとの連成を目的として考案されている3次元のChannel-DomainによるNetwork解析手法³⁵⁾を適用した^{36), 37), 38), 39)}。

粒状体DEMは、岩盤を粒子の集合体でモデル化し、岩盤の巨視的な挙動を粒子の挙動によって表す方法である。隣接した粒子間の弾性変位が線形ばね理論に、亀裂発生・岩盤破壊が粒子結合の引張・せん断強度に、破壊後挙動が粒子間の摩擦力に従うことにより亀裂の発生・進展と岩盤の変形を取り扱う。一方、Network解析手法は、流量を計算するChannelと圧力を計算するDomainによって亀裂内を流れる地下水・気体の流れを表す方法である。DomainとChannelは次の仮定条件のもと幾何学的に変化するものとする。

- ①粒子や接点応力の変化によってChannel幅とそれに伴うChannelの水理学的性質が変化する。
- ②Domainの幾何学的体積変化により、Domainの圧力が変化する。
- ③Domainの圧力変化によりDomainを囲む粒子は移動し、新たな構造を構築する。

ここで、この解析手法を定式化して計算手順を示すと次のとおりである。

① 2つの隣り合うDomain間の圧力差をもとにしたChannel内の流量の計算

隣接したDomain間を結ぶChannelは、不連続な岩盤と水理学的に等価な亀裂と考えることができる。ここでこの亀裂を平行平板と仮定すると、気体流量 q_G および液体流量 q_L は流出側Domainの各流体の存在割合を用いて、次式のように表すことができる。

$$q_G = \frac{V_{Gi}}{V_i} \Big|_{source} \cdot \frac{ga^3}{12\nu_G} \frac{\Delta h}{l} \quad (1.1.29)$$

$$q_L = \frac{V_{Li}}{V_i} \Big|_{source} \cdot \frac{ga^3}{2\nu_L} \left(\frac{\Delta h}{l} - \rho_L \mathbf{g} \mathbf{n}_C \right) \quad (1.1.30)$$

ここで、 V_{Gi} 、 V_{Li} =Domainの気体、液体体積、 V_i =Domainの体積、 ν_G 、 ν_L =気体、液体の粘性、 \mathbf{n}_C =Channelの単位方向ベクトル、 \mathbf{g} =重力加速度ベクトル、 a =Channel幅である。 $|_{source}$ は流出側のDomainを示す。なお液体の流量はDomainの圧力差だけでなく重力の影響を受けることとする。Channel幅 a は、基底亀裂開口量を用いたPortyondyとCundallの方法によって粒子の位置や接点応力から計算する。

② Domainの流体体積変化とそれに伴う圧力の計算

各Domainにおけるタイムステップ Δt 毎の流体体積の増分 ΔV は次式とする。

$$\Delta V = \sum q\Delta t + \Delta V_d \quad (1.1.31)$$

ここで、 ΔV_d はDomain体積の幾何学的変化量、 $q\Delta t$ は各Domainにおける周辺Channelからの流体の流入量である。ここで、 Δt を以下の式で与えた。

$$\Delta t = \frac{l_M}{v_M} \quad (1.1.32)$$

ここで、 l_M = 平均Channel長、 v_M = 解析対象地域における平均動水勾配とする。

次に、圧力変化に関して気体（貯蔵ガス）と液体で異なるモデル式を与える。

気体の場合、等温変化式を用いる。

$$P_i V_{Gi} = P_{i-1} V_{Gi-1} \quad (1.1.33)$$

ここで、 P_i = ステップ i におけるDomainの気体圧力、 V_{Gi} = ステップ i におけるDomainの気体体積である。

液体の場合、以下の弾性変化式を用いる。

$$P_i - P_{i-1} = -Kf \frac{V_{Li} - V_{Li-1}}{V_{Li-1}} \quad (1.1.34)$$

ここで、 V_{Li} : ステップ i におけるDomainの液体体積、 Kf : 流体バルク係数である。

また、Domainの体積 V_d' は、初期条件を与える際に見かけDomain体積に間隙率をかけた値として算出される。この体積は周辺粒子の接点を結んだ多角形として求められる。

$$V_d' = w \sum_k \frac{(y_k + y_{k+1})(x_k - x_{k+1})}{2} \quad (1.1.35)$$

ここで、 w は単位幅であり、 (x_k, y_k) は多角形の各頂点である。このときステップ i におけるDomain体積変化は m_d を用いると次式によって与えられる。

$$V_{di+1} - V_{di} = m_d (V_{di+1}' - V_{di}') \quad (1.1.36)$$

③ Domainの圧力変化に伴う粒子の力学的挙動の計算

粒子に働く物体力のベクトルは次式で表される。

$$\mathbf{F}_\kappa = P \mathbf{n}_\kappa s \quad (1.1.37)$$

ここで、 \mathbf{n}_κ = 粒子間接点を結ぶ線分に対する単位法線ベクトル、 s = 線分の長さである。

④ Domainの幾何学的変化に伴う圧力変化の計算

式(1.1.33)および式(1.1.34)を用いてDomainの幾何学的変化に伴う圧力変化を計算する。

(5) 原位置岩盤への適用性の検討

本研究では、Microseismic monitoring技術および解析技術の原位置岩盤への適用性を検討することを目的として原位置試験を実施した。原位置の岩盤内の亀裂を、ガスおよび水が通過するときのAE挙動の特徴を把握するため、原位置岩盤に削孔したボーリング孔に注気/注水を行い、その時に発生するAEの計測を行った。試験における機器の配置は、図1.1.30に示すとおりである。ボーリング孔内に設置した2mの区間から注気を行い、その位置から2mおよび5m離れた位置で、間隙水圧およびAEの計測を実施した。

図1.1.31は、試験時に観測されたAE発生数とAE周波数の変化を試験時の注入量および注入圧力とともに示したものである。本図を見ると、①注気圧力の増加に伴ってAE発生数が増加する、②透気時に低周波数のAEが発生することがわかる。

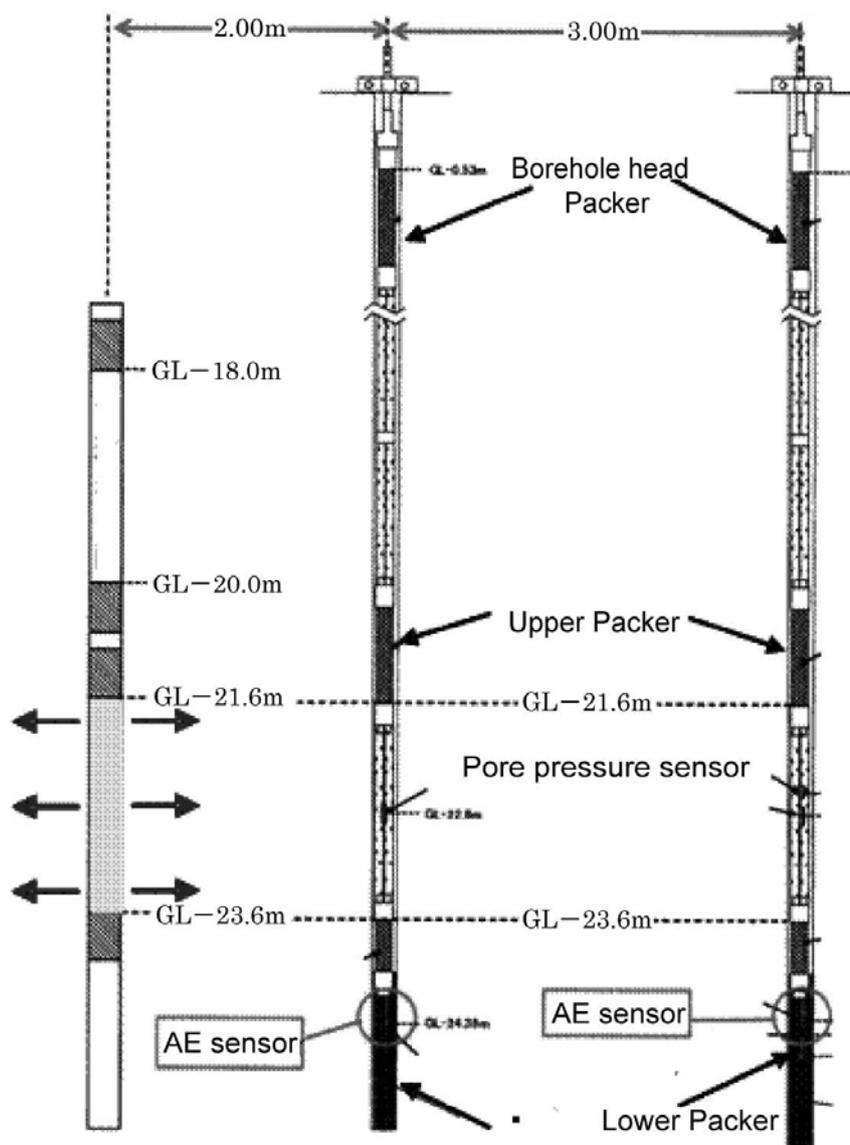


図1.1.30 原位置ボーリング透気試験

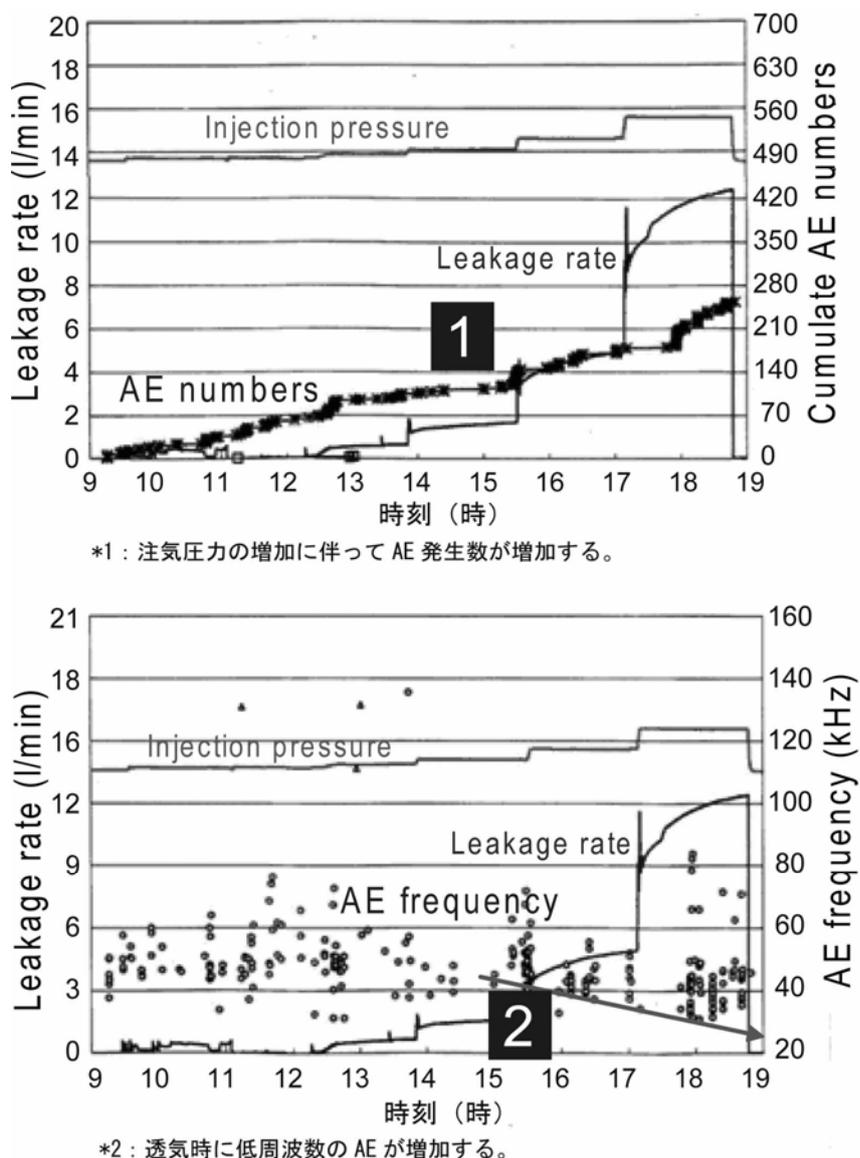


図1.1.31 原位置ボーリング透気試験時のAE計測結果

次に、このボーリング透気試験のシミュレーションに粒状体DEM-CDN解析手法を適用し、解析手法の実用性を検討した。

試験位置の周辺で得られた透水係数の実測値をもとに地球統計学手法を用いて構築した17m×17m×17mの3次元不均質水理地質モデルに対して粒状体DEM-CDN解析を行った。

図1.1.32は、解析の結果得られた間隙水圧分布図（注気圧=1.41MPa）、図1.1.33は間隙水圧（B-1孔）および注気量の実測結果と解析結果の比較を示したものである。図1.1.33を見ると、毛管現象の影響を考慮した場合に、岩盤への注気量および周辺岩盤の間隙水圧変化を精度よく評価できていることがわかる。

以上より粒状体DEM-CDN解析手法とMicroseismic monitoring手法の原位置岩盤への適用性が明らかになり、これらの手法を組み合わせることで、空洞周辺の水理的なEDZの評価・判定を定量的に行えるものと考えられる。

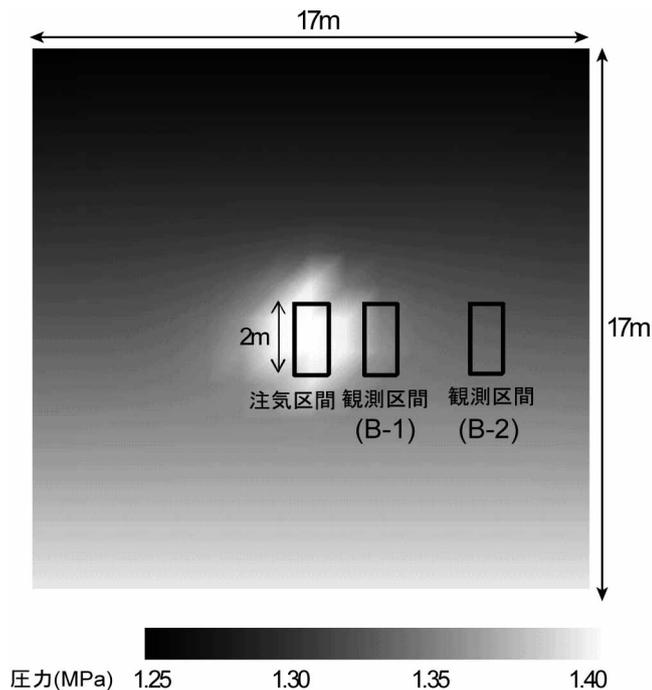


図1.1.32 岩盤内の間隙水圧分布の解析結果 (注気圧=1.41MPa)

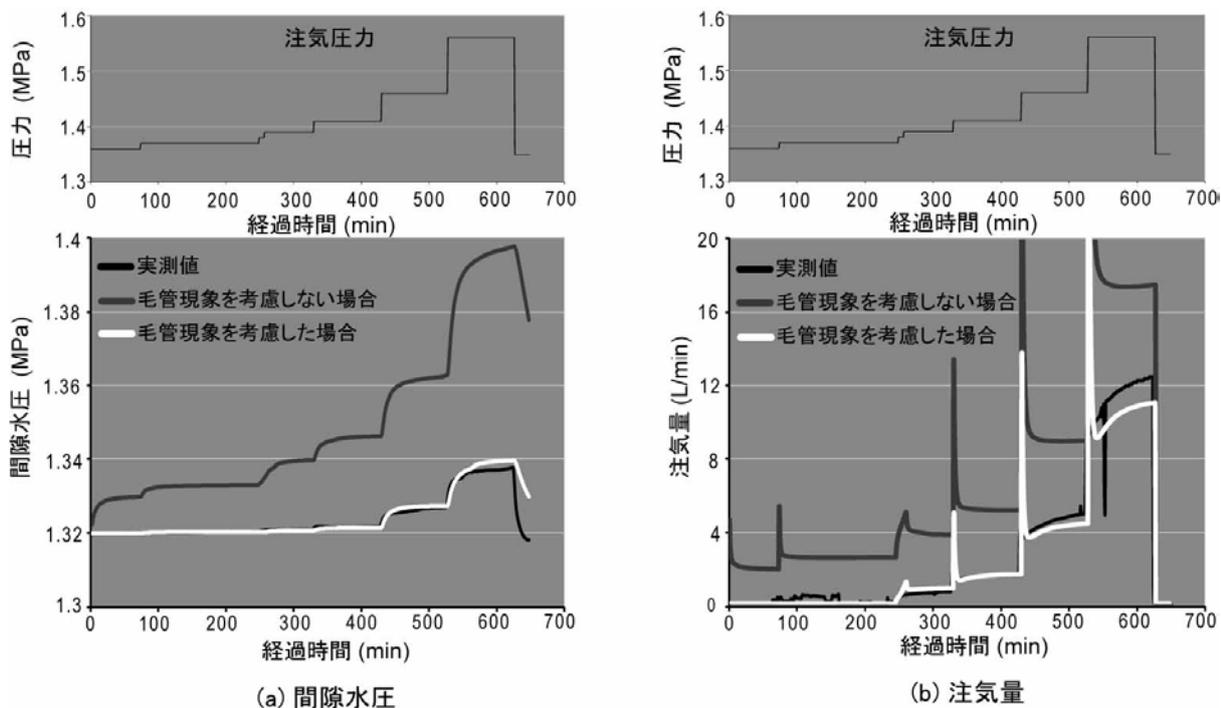


図1.1.33 原位置ボーリング透気試験における実測結果と解析結果の比較³⁹⁾

1.1.2.7 まとめ

本研究においては、AE計測による掘削影響領域（EDZ）の評価技術の開発を目的として検討を行った。研究成果は以下のとおりである。

I) 岩石の破壊過程における応力変化とAE挙動の関連性の解明

結晶質岩および堆積軟岩の室内岩石試験結果を基に、岩石の破壊過程とAEの挙動について、3つのAEパラメータ（AE発生数・卓越AE周波数・m値）に着目して分析を行った。検討の結果、岩石の破壊過程における応力変化に伴い、これら3つのAEパラメータが特徴的な挙動を示すことが明らかになった。特に、結晶質岩についてはAE発生数およびm値が、堆積軟岩については卓越AE周波数が顕著な挙動を示したことから、これらのAEパラメータの挙動を捉えることにより、岩石の破壊過程における応力変化を鋭敏に把握できることが明らかになった。

II) 岩石の破壊過程における応力変化と破壊現象の関連性の解明

粒状体個別要素法(粒状体DEM)による室内岩石試験のシミュレーションを行い、岩石の破壊過程における応力変化と破壊現象の関連性を検討した。その結果、岩石内部の応力が降伏応力に達すると、岩石に局所的な破壊面が形成され、ピーク応力に達した直後にそれらが連結することによって主要な破壊面が形成されること、その後はほぼ主要な破壊面の周辺のみで破壊が進展し、残留応力状態においてほぼ破壊が終結すること、およびクラック発生数やクラックの発生時開口量および供試体モデルの空隙率などのパラメータが破壊過程の評価に有効であることが明らかになった。

III) 岩石の破壊過程におけるAE－応力変化－破壊現象の関連性の解明

室内岩石試験および粒状体DEMシミュレーションの結果を総合的に検討した結果、岩石の破壊過程におけるAE－応力変化－破壊現象相互の関連性、およびその物理的な意味が明らかになった。また、これらの知見を基に、AEパラメータによる応力変化および破壊現象の評価方法を構築した。

IV) AE計測と粒状体DEM解析による原位置岩盤におけるEDZの評価方法の構築

高地圧下における岩盤空洞掘削時の計測結果を分析することにより、AE発生数・卓越周波数・m値の3つのAEパラメータが岩盤の応力変化を鋭敏に捉えていることを確認した。また粒状体DEMによる空洞掘削のシミュレーションを行った結果、応力再配分および亀裂の発生・進展の過程を精度よく把握することができた。これらの結果から、AE計測と粒状体DEM解析を行うことで、岩盤空洞周辺の応力再配分やEDZの形成・進展の過程を評価できることが明らかになった。

V) EDZにおける岩盤の破壊挙動の評価法の構築

空洞掘削時における周辺岩盤の破壊挙動に関する定量的評価法を構築することを目的とし、原位置で計測されたAEパラメータの挙動と数値解析によって得られた応力変化の挙動を対比して検討を行った。その結果、AE発生およびAE進展の両応力レベルとスポーリング限界の概念を導入することで、AE挙動から岩盤の破壊現象を定量的かつ明確に把握できることが明らかになった。

VI) 岩盤の力学－水理学的連成挙動に着目した水理学的EDZの評価手法の構築

微小地震波観測 (Microseismic monitoring) と粒状体DEM-CDN解析を行うことで、サイトスケールにわたる岩盤の水理学的EDZを評価する手法を開発するとともに、その手法の原位置岩盤への適用性を確認した。

1. 1. 2. 8 参考文献

- 1) K. Aoki, Y. Mito, T. Mori, T. Maejima (2004) : Evaluation of behavior of EDZ around rock cavern by AE measurements and PFC simulation, Numerical modelling in Micromechanics via Particle Method 2, pp.73-83.
- 2) K. Aoki, Y. Mito, T. Mori, H. Morioka, T. Maejima (2004) : Evaluation of behavior of EDZ around rock cavern by AE measurements and DEM simulation using bonded particle model, 3rd ARMS, pp.327-333.
- 3) K. Aoki, Y. Mito, C.S. Chnag H. Matusi, S. Niunoya, M. Minami (2007) : Evaluation of fracturing process of soft rocks at great depth by AE measurement and DEM simulation, 11th Congress of the Int. Society for Rock Mechanics, pp.273-276.
- 4) K. Aoki, Y. Mito, C.S. Chang, T. Maejima (2006) : Numerical analysis of rock fracturing process by DEM using bonded particles model, 4th ARMS.
- 5) 森岡宏之・南 将行・前島俊雄・田坂嘉章・Ming CAI・青木謙治 (2005) : AE計測による大規模地下空洞掘削時の岩盤挙動評価手法に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.791/VI-67, pp.81-96.
- 6) Cundall P. A. (1971) : A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems, in Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics, Vol.1, Paper No.II-8.
- 7) Kaiser, P. K., Diederichs, M. S., Martin, C. D., Sharp, J. and Steiner, W. (2000) : Underground Works in Hard Rock Tunnelling and Mining, Keynote lecture at GeoEng2000, Melbourne, Australia 1, pp.841-926.
- 8) Brace, W. F., Paulding, B. and Scholz, C. (1966) : Dilatancy in the fracture of crystalline rocks, J. Geophys. Res., 71(16) : pp.3939-3953.
- 9) Bieniawski, Z. T. (1967) : Mechanism of brittle fracture of rock, Parts I, II and III, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., Abstr, 4(4), pp.395-430.
- 10) Holcomb, D. J. and Costin, L. S. (1987) : Damage in brittle materials: experimental methods, Proc. 10th U.S. National Congress of Applied Mechanics, Lamb, J. P. (editors), University of Texas at Austin.
- 11) Martin, C. D. (1993) : The strength of massive Lac du Bonnet granite around underground opening, Ph.D. thesis, University of Manitoba, p.278.
- 12) Martin, C. D. and Chandler, N. A. (1994) : The progressive fracture of Lac du Bonnet granite, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 31: pp.643-659.

- 13) Wong, T. F. (1985) : Micromechanics of faulting in Westerly granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci Geomech Abstr.*, pp.273-289.
- 14) Diederichs, M. S. (2002) : Stress induced damage accumulation and implications for hard rock engineering, *NARMS2002, Vol.1, Univ. of Tronto*, pp.3-12.
- 15) Lockner, D. A., Byerlee, J. D., Kuksenko, V., Ponomarev, A. and Sidorin, A. (1992) : Observation of quasi-static fault growth from acoustic emissions, *Fault mechanics and transport properties of rocks*, B. Evans & T.-f. Wong (editors), pp.3-31.
- 16) Cai, M., Kaiser, P. K., Tasaka, Y., Maejima, T., Morioka, H. and Minami, M. (2004) : Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 41(5): pp.833-847.
- 17) Kachanov, M.L. (1982) : A microcrack model of rock inelasticity Part II: propagation of microcracks, *Mech Mater*, pp.29-41.
- 18) Horii, H. and Nemat-Nasser, S. (1985) : Compression-induced microcrack growth in brittle solids: axial splitting and shear failure, *J Geophys Res*, 90(B4): pp.3105-3125.
- 19) Ashby, M. F. and Hallam, S. D. (1986) : The failure of brittle solids containing small cracks under compressive stress states, *Acta Metall*, 34(3): pp.497-510.
- 20) Ortlepp, W. D. (1997) : *Rock Fracture and Rockbursts –An Illustrative Study*, Monograph Series M9, South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg.
- 21) Jongpradist, P., Takeuchi, K., Shimura, T., Furuya, Y. and Horii, H. (2002) : Analysis of underground cavern considering the failure behavior of soft rock under low confining stress, 第11回岩の力学国内シンポジウム講演概要集, 岩の力学連合会, CD-Rom: F01.
- 22) 前島俊雄・森岡宏之 (2003) : 大規模岩盤空洞へのゆるみ領域に着目した情報化設計システムの適用, *土木学会論文集*, No.742/VI-60, pp.133-148.
- 23) 工藤奎吾・小山俊博・鈴木康正 (1998) : 大規模地下空洞支保設計への数値解析の適用について, *土木学会論文集*, No.588/VI-38, pp.37-49.
- 24) E.フック, E. T. ブラウン (小野寺他訳) (1985) : 岩盤地下空洞の設計と施工, *土木工学社*, pp.14-24.
- 25) Cai, M., Kaiser, P. K., Uno, H., Tasaka, Y., and Minami, M. (2004) : Estimation of rock mass strength and deformation modulus of jointed hard rock masses using GSI system, *Int. J Rock Mech. Min. Sci.*, 41(1): pp.3-19.
- 26) Hoek, E., Kaiser, P. K. and Bawden, W. F. (1995) : *Support of underground excavations in hardrock*, AA., Balkema, pp.84-98.
- 27) Biot, M. A. (1956) : Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid. I: Low-frequency range. *J. Acoust., Soc., Am.*28, pp.168-178.
- 28) Biot M. A. (1956) : Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid. II : Higher frequency range. *J. Acoust., Soc., Am.*28, pp.179-191.
- 29) Silin D. B., V. A. Korneev, G. M. Goloshubin, AND T. W., Patzek (2004) : A hydrologic view on biot's theory of poroelasticity, Paper LBNL-54459, eScholarship Repository, University of California.

- 30) Shapiro, S. A., Huenges, E., and Borm, G. (1997) : Estimating the crust permeability from fluid-injection-induced seismic emission at the KTB site: *Geophys. J. Internat.*, 131, F15-F18.
- 31) Shapiro, S. A., Royer, J.-J., and Audigane, P. (1998) : Estimating the permeability from fluid-injection induced seismic emission in Thimus, (J.-F., Abousleiman, Y., Cheng, A. H.-D., Coussy, O., and Detournay, E., Eds.), *Poromechanics* : Balkema, pp.301-305.
- 32) Shapiro, S. A., Audigane, P., and Royer, J. J. (1999) : Large scale in situ permeability tensor of rocks from induced microseismicity: *Geophys. J. Int.*, 137, pp.207-213.
- 33) 応用地質会社株式会社(1999): サイスマミックモニタリングシステム (Engineering Seismic Group Canada製品) 紹介.
- 34) Aoki, K., Mito, Y., Chang, C. S., Tasaka, Y. and Maejima T. (2007): Hydromechanical coupled discrete modelling for the assessment of airtightness of unlined large rock cavern, 11th International Congress on Rock Mechanics, Lisbon, Portugal.
- 35) Potyondy D. O. and P. A. Cundall (1999): Modeling of Notch Formation in the URL Mine-By Tunnel : Phase IV - Enhancements to the PFC Model of Rock, Itasca Consulting Group, Inc., Report to Atomic Energy of Canada Limited, Ontario Hydro Nuclear Waste Management Division Report No. 06819-REP-01200-10002-R00.
- 36) K. Aoki, Y. Mito, T. Mori, H. Morioka, T. Maejima (2004) : Evaluation of behavior of EDZ around rock cavern by AE measurements and DEM simulation using bonded particle model, ARMS2004.
- 37) 青木謙治・水戸義忠・松岡哲也・近藤大介 (2005) : 高圧ガス貯蔵岩盤タンク設計のための新しい岩盤の変形・浸透流解析手法の提案, 第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.447-452.
- 38) 青木謙治・水戸義忠・田尾拓也・張傳聖・田坂嘉章・前島俊雄 (2007) : 岩盤タンクの気密性評価における応力-浸透流連成解析手法の適用性, 第36回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.35-38.
- 39) 青木謙治・水戸義忠・張傳聖・田中太一・宇野晴彦・前島俊雄 (2008) : 個別要素法を用いた岩盤空洞の3次元応力-浸透流連成解析手法の適用性, 第12回岩の力学国内シンポジウム.

1.1.3 低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の開発

1.1.3.1 はじめに

高レベル放射性廃棄物の処分施設において、「第2次取りまとめ」¹⁾では、岩盤の湧水を伴う割れ目を埋め戻し時に粘土グラウト等により処理することになっている。しかしながら、建設中、操業時に、湧水を伴う割れ目に適切な止水処理を行わないと、サイト全体の地下水流動が著しい影響を受けるため、深部地下水環境を維持するためのフラクチャーシーリング技術の開発は極めて重要な課題であると考えられる。具体的には、従来のダム建設やトンネル建設などでは透水性改良の対象とされていなかった低透水性の岩盤の微小亀裂についてもシーリングを行い、透水性を改良することが必要となる。しかしながら、従来のグラウチング工法ではこのような低透水性岩盤の微小亀裂を十分に改良することは困難であり、新たなグラウチング工法の開発が必要である。

このような背景のもと、低透水性岩盤の微小亀裂に対するグラウチング工法として、動的注入工法が有用と考えられる²⁾。この工法は一定の注入圧力（定常圧）に振動圧を付加してグラウトを注入する工法である。筆者らの研究グループでは、微細なフラクチャーへのグラウト注入が可能となる実用的な動的注入装置の開発、静的注入工法に対する動的注入工法の優位性の確認、動的注入工法によるグラウト注入メカニズムの解明、対象岩盤に応じた効果的な注入仕様の決定方法の確立、などの課題に取り組んできた^{3)~12)}。研究のフローを図1.1.34に示す。

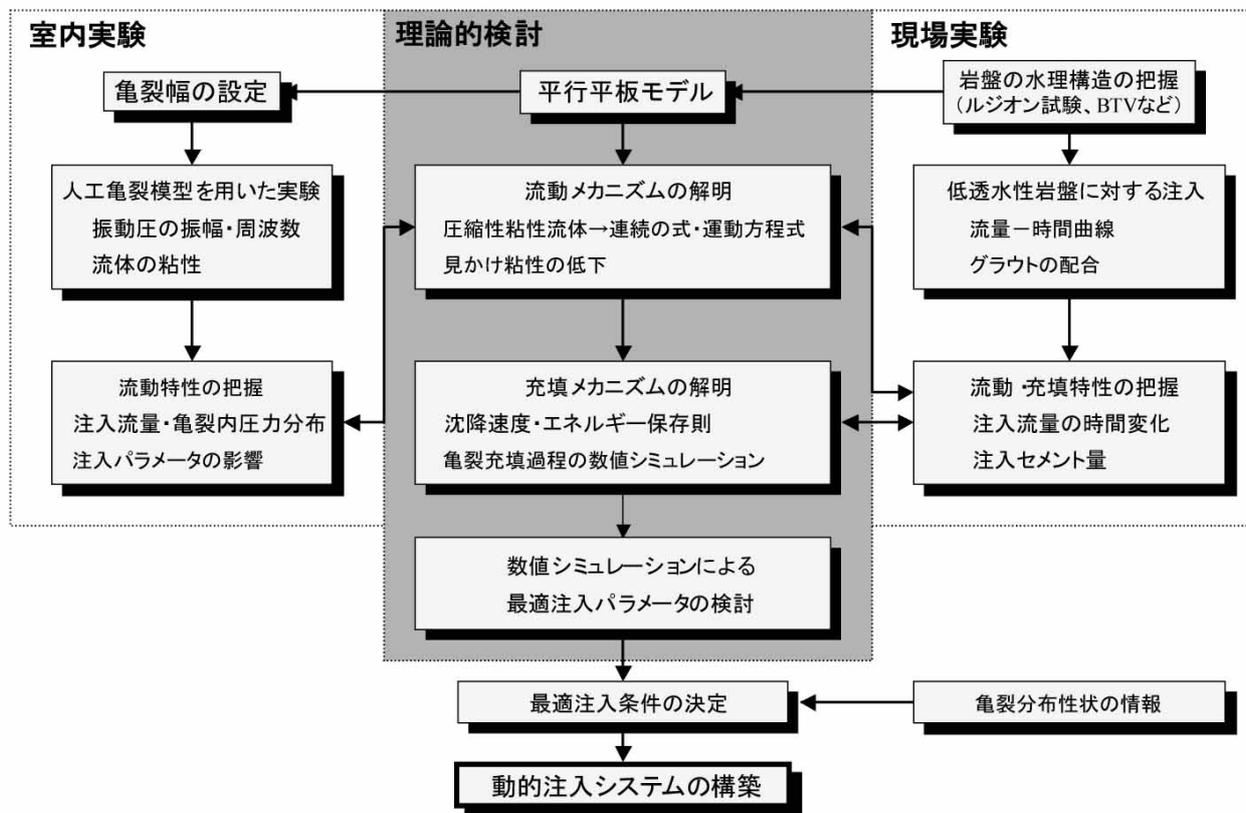


図1.1.34 低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の開発に関するフロー図

一方、このようなフラクチャーシーリングを確実かつ効果的に適用するためには、サイトスケールの岩盤の水理地質構造を明らかにするとともに、坑道周辺岩盤の水理地質特性に大きく影響する水みちの検知が必要不可欠となる。

そこで、筆者らの研究グループは、①地球統計手法を用いて岩盤の3次元的水理地質モデルを合理的に構築する方法^{13)~15)}および、②クロスホール透水試験結果から多次元尺度構成法と空間補間法を用いて不均質な岩盤の水みちを検知する方法^{16)~20)}を新たに提案するとともにその妥当性ならびに実用性を数値実験および現場実験によって検証した。

さらに、構築した動的注入工法および水理地質モデルの構築手法を基に、水理地質構造を考慮したグラウト設計手法を構築し、原位置岩盤に適用することで手法の有用性を示した²¹⁾。

1.1.3.2 動的注入工法^{3)~12)}

本研究では、筆者らが開発した動的注入工法におけるグラウト材の流動および充填のメカニズムを明らかにするために、まず人工亀裂模型を用いた室内実験を行い、動的注入におけるグラウト材の流動メカニズムを検討した。次にこの検討結果をベースに理論的考察を行い、動的注入における亀裂充填過程の数値解析手法を構築した。この数値解析手法を原位置岩盤の動的注入に適用し、手法の妥当性を検証するとともに対象岩盤の透水特性に応じた注入仕様の決定方法を構築した。

(1) 室内実験によるグラウト材の流動メカニズムの検討^{3)~7)}

動的注入におけるグラウト材の流動メカニズムを明らかにするために、人工亀裂模型を用いた室内実験を行い、注入パラメータと流体の見かけ粘性の低下に関する関係を検討した。

動的注入を行った供試体は、流路長は2m、流路幅15cmの平行平板状の人工亀裂模型である。人工亀裂模型は、表面を鏡面仕上げした2枚の鋼製ブロックによって構成されており、面間に銅製スペーサーを挟み込みことによって亀裂幅を100 μ mに設定した。注入口に与える注入圧力は、圧力変換用シリンダからの定常圧にサーボシリンダからの振動圧を、振動装置を介して付与したものである。計測装置としては、注入圧力と亀裂内圧力の測定を目的として、注入口付近の1箇所と上部鋼製ブロックの計7箇所に間隙水圧計を設置し、さらに流出重量を測定する重量秤(ロードセル)を流出口下に設置した。

実験条件を表1.1.4に示す。注入材料には、粘性を容易に設定できる水溶性セルロースを用いた。セルロース水溶液の粘性については、15mPas (超微粒子セメントに分散剤を加えて用いた場合の水セメント配合比w/c=1相当)、2.7mPas (w/c=2相当)、1mPasを基本とした。注入圧力については、静的注入実験では1MPa、動的注入実験では基準圧力1MPaに3通りの振幅 ± 0.5 MPa、 ± 0.3 MPa、 ± 0.1 MPaを与え、周波数については、0.5Hz、1Hz、2Hz、5Hz、10Hz、20Hz、30Hzを基本とした。

図1.1.35および図1.1.36は、注入パラメータ(注入材料の粘性および注入圧力の振幅)毎に、振動圧の付加による注入流量の改良比(動的注入による流量/静的注入による流量)を注入圧力の周波数に対してプロットしたものである。

まず、注入材料の粘性の違いが流動性に与える影響の比較を行った図1.1.35を見ると、注入材料の粘性が大きいほど注入流量の改良比は大きくなり、流動性が向上すると考えられる。次に、注

入圧力の振幅の違いが流動性に与える影響の比較を行った図1.1.36を見ると、注入圧力の振幅が大きいほど注入流量の改良比は大きくなり、流動性が向上すると考えられる。さらに、注入圧力の周波数に関しては、0.5Hz～20Hzにおいては、動的注入効果に顕著な違いは認められなかった。

表1.1.4 室内実験条件³⁾

ケース	動粘性係数	注入圧力	周波数
	mPas	MPa	Hz
1	1.0	1.0±0.3	0
2	2.7	1.0±0.1	(静的注入)
3	2.7	1.0±0.3	0.5, 1.0, 2.0,
4	2.7	1.0±0.5	5.0, 10, 20, 30
5	15	1.0±0.3	(動的注入)

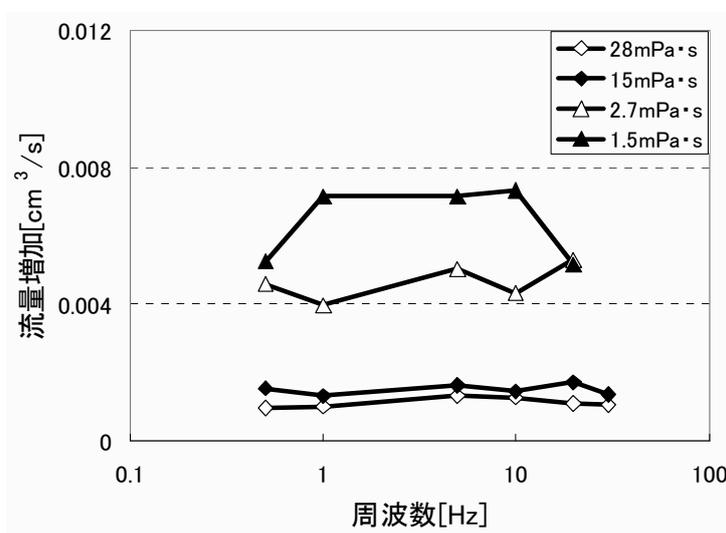


図1.1.35 注入圧力の周波数に対する注入流量の改良比（注入材料の粘性の影響）³⁾

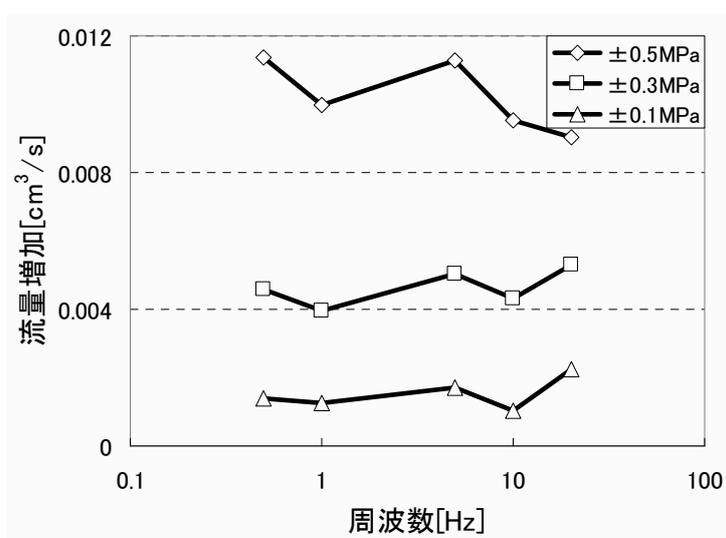


図1.1.36 注入圧力の周波数に対する注入流量の改良比（注入圧力の振幅の影響）³⁾

(2) グラウト材の充填過程モデルの構築^{7)~10)}

ここでは、注入材料が平行平板内を流れる圧縮性粘性流体であると仮定して、亀裂内部での圧力の振幅の変化、ならびに見掛け粘性の変化について理論的に検討する。

開口幅 b 、断面積 A の平行平板内を圧縮性流体が通過する場合、連続の式と運動方程式は式 (1.1.38)、(1.1.39) で与えられる。

$$C \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial t} = 0 \quad (1.1.38)$$

$$L \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + Rq = 0 \quad (1.1.39)$$

但し、

$$C = \frac{gA}{a^2} \quad (1.1.40)$$

$$L = \frac{4}{3gA} \quad (1.1.41)$$

$$R = \frac{32\nu}{gAb^2} \quad (1.1.42)$$

ここで、 p : 注入圧力の振幅、 q : 流量、 t : 時間、 ν : 動粘性係数、 a : 音速である。これより、注入口からの距離 x における振動圧力と流量の振幅はそれぞれ次式によって与えられる。

$$|p(x)| = |p(0)| \sqrt{\frac{\cosh(2f(D-x)) - \cosh(2k(D-x))}{\cosh(2fD) - \cosh(2kD)}} \quad (1.1.43)$$

$$|q(x)| = \frac{|p(0)|}{g\rho\nu} \sqrt{\frac{\cosh(2f(D-x)) - \cosh(2k(D-x))}{\cosh(2fD) - \cosh(2kD)}} \quad (1.1.44)$$

但し、

$$f = \frac{CR\omega}{2k} \quad (1.1.45)$$

$$k = \sqrt{\frac{CL\omega^2}{2} + \sqrt{\frac{C^2L^2\omega^4}{4} + \frac{C^2R^2\omega^4}{4}}} \quad (1.1.46)$$

ここで、 ω : 振動圧の角速度、 D : 亀裂の長さである。

また、式 (1.1.44) によって求められる流量の振幅分布を用いて、せん断ひずみ振幅²²⁾と呼ばれる量が次式のように定義される。

$$\gamma_A = \frac{|q(x)|}{A\omega} \frac{2}{b} \quad (1.3.47)$$

せん断ひずみ振幅は流体のみかけの粘性 μ' との間には、注入圧力の周波数ごとに次式のような関係をもつことが Börgesson²²⁾ による実験から明らかになっている。

$$\mu' = \alpha\gamma_A^\beta \quad (1.3.48)$$

但し, α, β : 流体と注入圧力の周波数に依存する値である ($\alpha > 0, \beta < 0$)。式(1.1.44), (1.1.47), (1.1.48)を用いれば, 図1.1.35, 図1.1.36に示したように, 流体の粘性が高く, 注入圧力の振幅が大きいくほど, 動的注入による流量の増加比が大きくなるという結果が得られる。

ここで, 流体の振動成分の運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (1.1.49)$$

に振動成分の境界条件

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = |p(0)| \exp(i\omega t) \quad (1.1.50)$$

を代入して解くと, 亀裂の中心における流速の振動成分は次式で与えられる。

$$u_{y=0} = \text{real} \left[\frac{|p(0)|\nu}{i\omega^2 \mu} \left\{ 1 - \frac{1}{\cos \left(\sqrt{-\frac{i\omega^2 b}{\nu}} \frac{b}{2} \right)} \right\} \exp(i\omega t) \right] \quad (1.1.51)$$

但し, ρ : 流体の密度, μ : 流体の粘性である。せん断ひずみ振幅は式(1.1.51)で求められる流速の最大値であり, t を変化させてこの値を数値的に求めると, 実験において設定した周波数の範囲ではせん断ひずみ振幅の大きさがほとんど変化せず, 図1.1.35および図1.1.36の結果と整合的である。

ここで, 以上のように流動するグラウト材が亀裂内で充填するメカニズムについて考察する。グラウト粒子の沈降力およびグラウト材の抵抗力は, それぞれ次式で与えられる。

$$F_s = \frac{\pi}{6} d_p^3 \left(\frac{\delta_p}{\delta} - 1 \right) \gamma \quad (1.1.52)$$

$$F_r = C_D \frac{\pi}{4} d_p^2 \frac{v^2}{2g} \gamma \quad (1.1.53)$$

ここで, d_p : グラウト粒子の直径, δ_p : グラウト粒子の比重, δ : グラウト材の比重, γ :

グラウト材の単位体積重量, C_D : 抗力係数, D : 亀裂の長さである。両者が釣り合うときの速度が沈降速度であるので次式が得られる。

$$v = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{1}{C_D} g d_p \frac{\delta_p - \delta}{\delta}} \quad (1.1.54)$$

また, そのときの抗力係数 (層流) は次式で与えられる。

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}} \quad (1.1.55)$$

ただし、 Re はレイノルズ数であり、 μ をグラウト材の粘性係数とすると次式を得る。

$$v = 0.545d_p^2 \frac{1}{\mu} (\delta_p - \delta) \quad (1.1.56)$$

この式は、単位時間あたりのグラウトの堆積量（沈降速度に比例する）は、グラウトの粘性と比重、すなわちグラウトの配合に依存することを示している。

いま、平行平板状の単一亀裂内におけるセメント粒子の堆積を考える。流れ方向の微小長さ区間における単位時間の沈降量は、亀裂内の抗力 F が粒子を拘束すると考えることによりエネルギー保存則から次式のように表せる。

$$F = \frac{1}{2} (s'(t) \Delta d m) u(t)^2 \quad (1.1.57)$$

ここで、 $s'(t)$ ：固有沈降速度、 Δd ：流れ方向の微小長さ、 m ：セメント粒子の質量、 $u(t)$ ：平板と平行な方向の粒子の速度（グラウト材の速度）である。抗力 F は、時間によらず一定値をとることから、

$$F = \frac{1}{2} (s'(0) \Delta d m) u(0)^2 \quad (1.1.58)$$

となり、また、単位時間あたりの堆積量 $s'(t) \Delta d$ は沈降量に比例し、その時刻までに通過したグラウト材の総流量に反比例すると仮定すると、比例定数 c を用いて次式を得る。

$$s(t) = c \frac{s(t)'}{\sum_{t=0}^t q(t)} \quad (1.1.59)$$

但し、 $s(t)$ は、単位時間あたりの堆積幅であり、固有堆積速度と呼ぶ。

時刻における亀裂内の流量 $q(t)$ と流速 $u(t)$ は三乗則からそれぞれ次式で与えられる。

$$q(t) = \frac{gb(t)^3}{12\nu} i \quad (1.1.60)$$

$$u(t) = \frac{q(t)}{b(t)} \quad (1.1.61)$$

ここで、 $b(t)$ ：時刻 t における亀裂の開口幅、 g ：重力加速度、 ν ：グラウト材の動粘性係数、 i ：動水勾配である。式(1.1.57)、(1.1.58)、(1.1.59)より、最終的に次式を得る。

$$s(t) = \frac{q(0)u(0)^2}{\sum_{\tau=0}^t q(\tau)u(\tau)^2} s(0) \quad (1.1.62)$$

この式を

$$b(t+1) = b(t) - s(t) \quad (1.1.63)$$

に代入したものをさらに式(1.1.60), (1.1.61), (1.1.62)に代入すると, $q(t+1)$, $u(t+1)$, $s(t+1)$ が順々に求められる。この手順を $b(t) = 0$ となるまで繰り返すことで流量の経時変化を求めることができる。岩盤内に注入されるグラウト材の流量 $q_{RM}(t)$ は, 次式のように各亀裂に注入される流量を合計することで求められる。

$$q_{RM}(t) = N \sum (f_B(b) q(t|b(0)=b)) \quad (1.1.64)$$

ここで, N : 注入孔と交差する亀裂数, $f_B(b)$: 注入孔と交差する亀裂の開口幅分布の確率密度関数である。したがって, 岩盤内における各亀裂の $b(0)$ を決定するためには, 注入孔と交差する亀裂の開口幅分布が必要となる。概算のため, 全ての亀裂幅が同一であると仮定すると, 平均開口幅 b_M を用いた次式によって注入流量を算出することができる。

$$q_{RM}(t) = NQ(t|b(0)=b_M) b(t) \quad (1.1.65)$$

次に以上で構築した1次元流れの式を, 放射状流れに拡張する。まず図1.1.37のように, 円筒座標系 $X-R-\theta$ 軸を設定する。

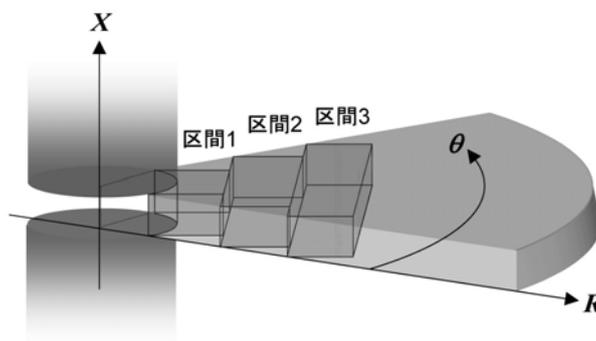


図1.1.37 放射状流れのモデル

放射状流れを考える上で, はじめに図1.1.37に示すように, $\Delta\theta$ の範囲において, 浸透距離に応じて亀裂奥行きを変化させるモデルを考え, それを360度積分することで放射状流れをモデル化する。構築した1次元流れのモデルは, R 方向の単一微小区間を考えたものである。この微小区間モデルを, 単位時間の浸透距離毎に設定し, 各区間のグラウト充填過程を把握し, それぞれを θ 方向に360度積分することで, グラウトの空間的な充填挙動を得る。各区間を, 区間 ξ ($\xi=1, 2, 3, \dots$) とする。

a) 単位時間 $t=1$ における挙動

図1.1.38は図1.1.37を上から見た図である。以降, 記号の () 内を時刻とし, 添字で区間を表す。

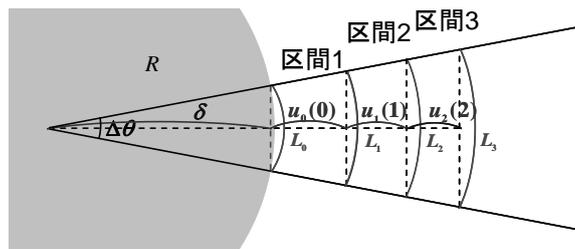


図1.1.38 放射状流れのモデル（流れの垂直方向からの視点）

図中にある，区間1における θ 方向の奥行き L_1 は，

$$L_1 = \sqrt{2R^2(1 - \cos \Delta\theta)} \tag{1.1.66}$$

として求まる。ここで， R ：ボーリング孔半径である。単位時刻 $t = 1$ における流量 $q_1(1)$ ，流速 $u_1(1)$ ，セメント粒子の堆積速度 $s_1(1)$ は，各々

$$q_1(1) = \frac{gb_0^3}{12\nu} \frac{\partial P}{\partial x_1} L_1 \tag{1.1.67}$$

$$u_1(1) = \frac{q_1(1)}{b_0 L_1} \tag{1.1.68}$$

$$s_1(1) = \frac{q_1(1)u_1(1)^2}{\sum_{\tau=1}^1 q_1(\tau)u_1(\tau)^2} s' \tag{1.1.69}$$

となる。ここで， b_0 ：亀裂幅である。

b) 単位時間 $t = 2$ における挙動

時刻 $t = 2$ における浸透距離 ξ_2 は，

$$x_2 = x_1 + u_1(1) \tag{1.1.70}$$

として得られる。時刻 $t = 2$ における区間1の開口幅は，式(1.1.63)より

$$b_1(2) = b_0 - s_1(1)\Delta t \tag{1.1.71}$$

と得られることから，単位時刻 $t = 2$ における流量 $q_1(2)$ は，

$$q_1(2) = \frac{gb_1(2)^3}{12\nu} \frac{\partial P}{\partial x_2} L_1 \tag{1.1.72}$$

流速 $u_1(2)$ ，セメント粒子の堆積速度 $s_1(2)$ は，各々

$$u_1(2) = \frac{q_1(2)}{b_1(2)L_1} \tag{1.1.73}$$

$$s_1(2) = \frac{q_1(1)u_1(1)^2}{\sum_{\tau=1}^2 q_1(\tau)u_1(\tau)^2} s' \quad (1.1.74)$$

と決定される。次に、区間2における奥行き L_2 については図1.1.38より

$$L_2 = \frac{L_1(\delta + u_1(1))}{\delta} \quad (1.1.75)$$

ここで、単位時刻 $t = 2$ において、区間1の流量は、区間2の流量と一致することから、

$$q_2(2) = q_1(2) \quad (1.1.76)$$

時刻 $t = 2$ における区間2の流量 $q_2(2)$ と流速 $u_2(2)$ の関係より、

$$u_2(\xi) = \frac{q_2(2)}{b_0 L_2} \quad (1.1.77)$$

を得て、式(1.1.75)、(1.1.76)、(1.1.77)より、時刻 $t = 2$ における区間2の流速 $u_2(2)$ を決定する。また、式(1.1.76)、(1.1.77)より、時刻 $t = 2$ における区間2のセメント堆積速度 $s_2(2)$ を求める。

$$s_2(2) = \frac{q_2(2)u_2(2)^2}{\sum_{\tau=2}^2 q_2(\tau)u_2(\tau)^2} s' \quad (1.1.78)$$

c) 単位時間 $t = t$ における挙動

以上、同様の計算を繰り返すことにより、単位時刻 $t = t$ における区間1の流量 $q_1(t)$ 、流速 $u_1(t)$ 、セメント堆積速度 $s_1(t)$ 、開口幅 $b_1(t)$ は、

$$q_1(t) = \frac{g b_1(t)^3}{12\nu} \frac{\partial P}{\partial x_1} L_1 \quad (1.1.79)$$

$$u_1(t) = \frac{q_1(t)}{b_1(t)L_1} \quad (1.1.80)$$

$$s_1(t) = \frac{q_1(1)u_1(1)^2}{\sum_{\tau=1}^t q_1(\tau)u_1(\tau)^2} s' \quad (1.1.81)$$

$$b_1(t) = b_1(t-1) - s_1(t-1)\Delta t \quad (1.1.82)$$

区間 ξ ($\xi > 2$) の奥行き、単位時刻 $t = \xi$ における流量 $q_\xi(\xi)$ 、流速 $u_\xi(\xi)$ 、セメント堆積速度 $s_\xi(\xi)$ は、各々

$$L_\xi = \frac{L_1(\delta + \sum_{k=1}^{\xi} u_k(k))}{\delta} \quad (1.1.83)$$

$$q_\xi(\xi) = q_1(\xi) \quad (1.1.84)$$

$$u_{\xi}(\xi) = \frac{q_{\xi}(\xi)}{b_0 L_{\xi}} \quad (1.1.85)$$

$$s_{\xi}(\xi) = \frac{q_{\xi}(\xi)u_{\xi}(\xi)^2}{\sum_{\tau=\xi}^{\xi} q_{\xi}(\tau)u_{\xi}(\tau)^2} s' \quad (1.1.86)$$

単位時刻 $t > \xi + 1$ における流量 $q_{\xi}(t)$ ，流速 $u_{\xi}(t)$ ，セメント堆積速度 $s_{\xi}(t)$ は，次式のようになる。

$$q_{\xi}(t) = \frac{g b_{\xi}(t)^3}{12\nu} \frac{\partial P}{\partial x_t} L_{\xi} \quad (1.1.87)$$

$$u_{\xi}(t) = \frac{q_{\xi}(t)}{b_{\xi}(t)L_{\xi}} \quad (1.1.88)$$

$$s_{\xi}(t) = \frac{q_{\xi}(t)u_{\xi}(t)^2}{\sum_{\tau=\xi}^{\xi} q_{\xi}(\tau)u_{\xi}(\tau)^2} s' \quad (1.1.89)$$

$$b_{\xi}(t) = b_{\xi}(t-1) - s_{\xi}(t-1)\Delta t \quad (1.1.90)$$

式(1.1.87)，(1.1.88)を θ 方向に360度積分することにより，各区間 ξ における放射状流れの流量 $Q_{\xi}(t)$ を求める。($\xi = 1, 2, 3, \dots$)

$$Q_{\xi}(t) = \sum_{\theta=0}^{360} q_{\xi} \quad (1.1.91)$$

また，式(1.1.82)，(1.1.90)より， $b_1(t) = 0$ をとる単位時刻 $t = t$ における各区間の亀裂の開口幅 $b_{\xi}(t)$ を用いて，最終的な透水性改良範囲分布を得ることが可能である。

岩盤内においては，亀裂が複数存在するため，現場実験において注入されるグラウト材の流量 $Q_{RM}(t)$ は，次式のように各亀裂に注入される流量を合計することで求められる。

$$Q_{RM}(t) = N \sum (f_B(b)Q_1(t|b_0 = b)) \quad (1.1.92)$$

ここで， N ：注入孔と交差する亀裂数， $f_B(b)$ ：注入孔と交差する亀裂の開口幅分布の確率密度関数である。したがって，岩盤内における各亀裂 b_0 を決定するためには，注入孔と交差する亀裂の開口幅分布が必要となる。概算のため，全ての亀裂幅が同一であると仮定すると，平均亀裂幅 b_M を用いた次式によって注入流量を算出することができる。

$$Q_{RM}(t) = N \sum (f_B(b)Q_1(t|b_0 = b_M)) \quad (1.1.93)$$

式(1.1.72)を用いるにあたっては、亀裂本数 N と平均亀裂幅 b_M が必要となる。以下に亀裂本数・平均亀裂幅を現場試験によって得られるルジオン値から算出する手順について提案する。

まず、対象とする岩盤において、透水係数 K の対数值と亀裂本数 N の1次関係を求める。例えば、次の(3)で検討対象とするサイトでは、次のように求められている³⁾。

$$N = 35.0 + 4.33 \log(K) \quad (1.1.94)$$

また、ルジオン試験においてダルシーの法則が成立すると仮定すると、ルジオン値 Lu と透水係数 K の関係は次式で求められる。

$$K = \frac{Lu}{120000\pi HL} \ln \frac{L}{r} \quad (1.1.95)$$

この式(1.1.94)、(1.1.95)を用いれば、ルジオン値から亀裂本数を決定することができる。

ここで、3乗則から得た透水係数を式(1.1.94)、(1.1.95)から決定した亀裂本数で除することにより、単一亀裂の平均透水係数を算出し、さらに3乗則から逆算して平均亀裂幅を求める。図1.1.39はルジオン値と平均亀裂幅の関係を表したものである。

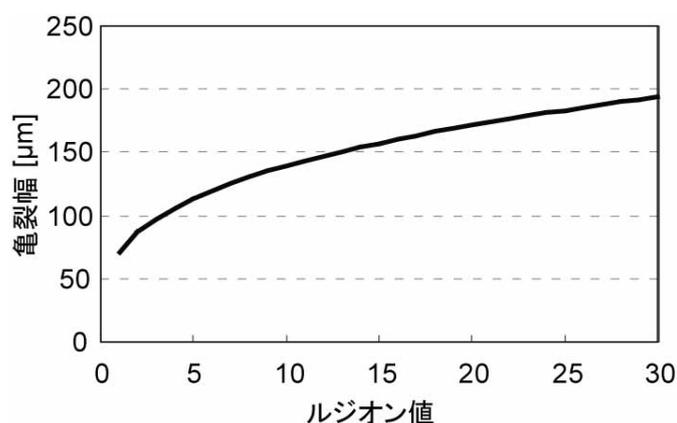


図1.1.39 ルジオン値と平均亀裂幅の関係

以上の式(1.1.93)、(1.1.94)、(1.1.95)より、各単位時刻の注入量 $Q_{RM}(t)$ を求めることによって、グラウト材の時間-注入量曲線を得ることができる。

(3) 原位置岩盤への適用性の検討^{8)~12)}

提案したグラウト充填過程の妥当性を検討するために、原位置で実施した試験結果⁹⁾に対して、本解析モデルの適用を行った。原位置試験では、中生代白亜紀の新鮮な花崗岩より構成されている岩盤を対象として静的注入および動的注入を実施した。試験条件を表1.1.5に示す。グラウト材については、超微粒子セメントを使用し、水セメント比は $w/c=4, 8$ で注入を行った。

図1.1.40、図1.1.41は、それぞれ $w/c=4, 8$ において、静的および動的注入したケースの原位置試験と数値解析結果を比較したものである。図より、数値解析結果は実測値と非常によく対応しており、グラウト充填過程モデルの原位置岩盤への適用性が示されたものと考えられる。

表1.1.5 現場実験条件⁹⁾

水セメント配合比		実施回数	注入圧力 [MPa]	振動圧周波数 [Hz]
4	動的注入	2	0.5±0.3	5
	静的注入	4	0.5	0
8	動的注入	6	0.5±0.3	5
	静的注入	7	0.5	0

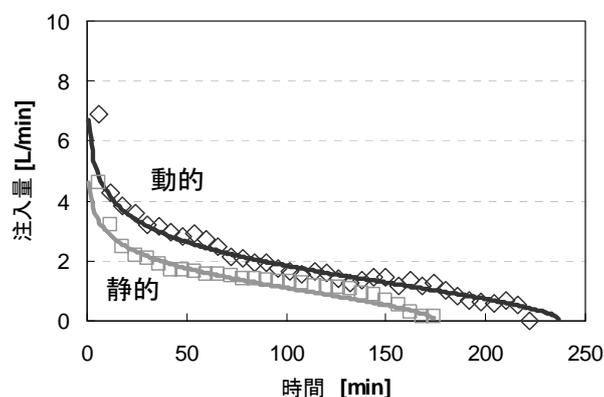


図1.1.40 現場実験結果（点）と解析結果（曲線）の比較 (w/c=4)⁹⁾

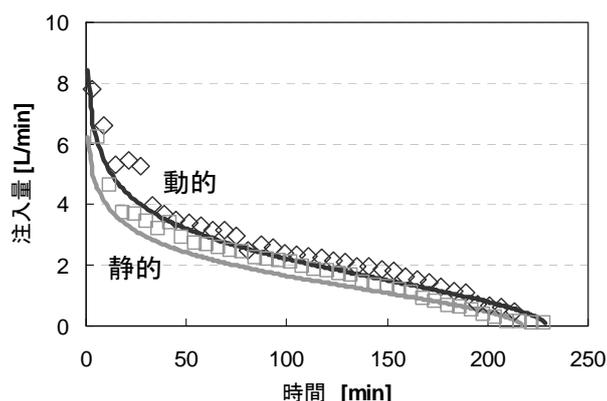


図1.1.41 現場実験結果（点）と解析結果（曲線）の比較 (w/c=8)⁹⁾

(4) 粒状体個別要素法（粒状体DEM）を用いたグラウト材の充填機構の検討¹²⁾

上述の(1)～(3)においては、グラウト材の充填特性に関するメカニズム（以下、グラウト充填機構）についてマクロな視点からセメント粒子の充填過程をモデル化することで検討を進めてきたが、微小亀裂に対するグラウトの充填状況を詳細に評価するには、よりミクロな視点からの充填過程を検討することが必要であると考えられる。ここでは個々のグラウト粒子の流動を直接的にモデル化することができる粒状体個別要素法（粒状体DEM）を用いたシミュレーションを行うことによって、動的注入におけるグラウト充填過程の検討を行った。

①粒状体DEMを用いたセメント粒子の充填過程のモデル化

岩盤内においては、亀裂が複数存在するため、現場実験において注入されるグラウト材の流量

$Q_{RM}(t)$ は、次式のように各亀裂に注入される流量を合計することで求められる。亀裂内の注入流量の経時変化は、セメント粒子の沈降・堆積による亀裂の開口幅変化によって生じると考えられる。そこで、(2)の検討結果を考慮した上で、注入パラメータによって規定される速度分布および体積力を個々のセメント粒子に与えることで、平行平板状亀裂の微小区間内における粒子の流動を粒状体DEMによりモデル化した。

図1.1.42は作成したセメント粒子の流動モデルである。本研究で対象とするような微小な開口幅を有する亀裂内ではポアズイユ流れが生じているとみなすことができる³⁾ので、個々のセメント粒子に対して水平方向の速度分布 u を次式で与えた。

$$u = u_c + u_o \tag{1.1.96}$$

但し、 u_c : 流速の定常成分、 u_o ; 流速の振動成分は、

$$u_c = \frac{\alpha}{2\mu(h^2 - y^2)} \tag{1.1.97}$$

$$u_1 = \frac{\alpha'}{2\mu(h^2 - y^2) \sin(2\pi f)t} \tag{1.1.98}$$

である。ここに、 α : 圧力勾配の定常成分、 α' : 圧力勾配の振動成分、 f : 周波数、 μ : 粘性係数である。また、鉛直方向には、粒子の沈降力 F_s および流体の抵抗力 F_r を体積力として与える。このような条件の下で、セメント粒子を亀裂の一端のランダムな位置から逐次発生させた。なお、単位時間当たりのセメントの発生数は、グラウト材の平均流速と配合から決定する。

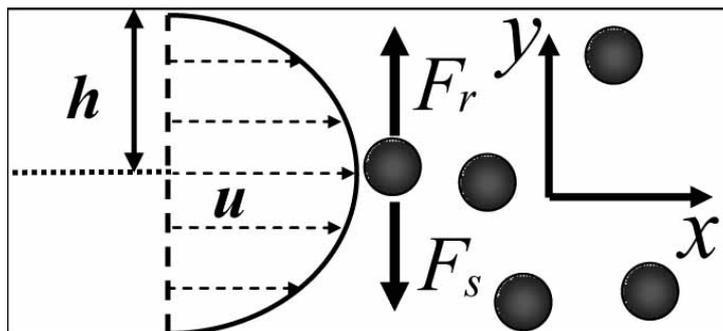


図1.1.42 セメント粒子の流動モデル¹²⁾

②室内実験およびシミュレーション

平行平板状の亀裂モデルに対して静的注入ならびに動的注入を行う室内実験を行うとともに、室内実験のシミュレーションを行うことで、①で作成したセメント粒子の充填過程モデルを用いたシミュレーションの妥当性を確認する。

室内実験装置は、(1)で用いた試験装置である。本実験においては、亀裂幅を $80\mu\text{m}$ 、流路長を 2m 、流路幅を 0.16m と設置した。実験条件として、注入材料には超微粒子セメントを用いた水セメント配合比 $w/c=0.8$ のグラウト材を使用した。注入圧は静的注入の場合 0.3MPa とし、動的注入の場合 0.3MPa に振幅 $\pm 0.03\text{MPa}$ 、周波数 5Hz の振動圧を加えた。

図1.1.43は、室内実験によって得られたセメント注入量の経時曲線である。静的注入と比較して動的注入による注入量の増加および注入時間の延長が認められる。一方、図1.1.44は、シミュレーションによって得られたセメント注入量の経時曲線であり、動的注入による注入量の増加および注入時間の延長の割合が室内実験結果とよく一致している。すなわち、シミュレーションによって得られたミクロな領域での粒子の充填挙動が室内実験で得られたマクロな領域での粒子の充填挙動とよく一致しており、充填過程の検討にあたっての、本モデルの適用性が示された。

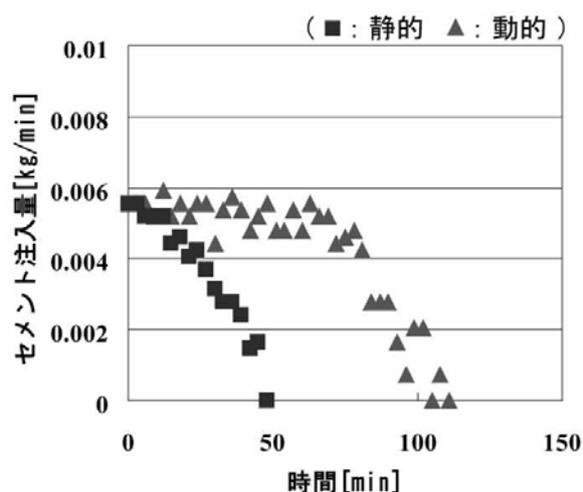


図 1.1.43 室内実験結果¹²⁾

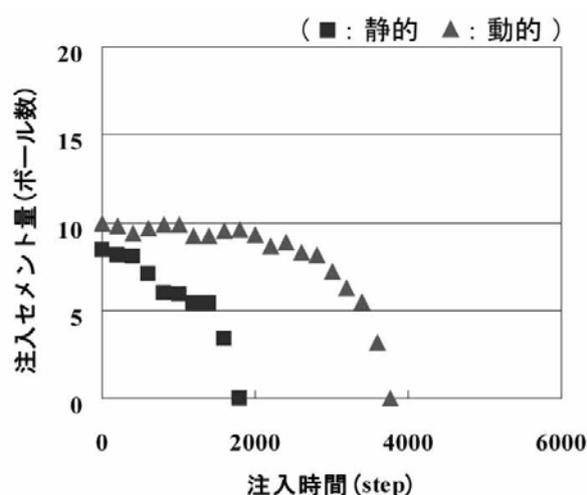


図 1.1.44 シミュレーション結果¹²⁾

③シミュレーションによるグラウト充填機構の検討

提案したセメント粒子の充填過程モデルを用いてシミュレーションを行うことで、注入パラメータ（振動圧の振幅・周波数および水セメント配合比）がグラウト充填過程に与える影響を平行平板状の亀裂において検討した。

まず、水セメント配合比 $w/c=2$ において、静的注入・動的注入のシミュレーションを行い、セメント粒子の挙動を比較することで、グラウト充填過程について検討した。注入圧は静的注入の場合 0.3MPa とし、動的注入の場合 0.3MPa に振幅 $\pm 0.03\text{MPa}$ 、周波数 5Hz の振動圧を加えた。

図1.1.45は、静的注入ならびに動的注入の粒子の流動状況を、500step毎に記録したものである。上段が静的注入、下段が動的注入のシミュレーションの状況を表している。静的注入の場合、 $T=1000\text{step}$ 前後で目詰まりが生じ、そのまま充填が進行し、 $T=3500\text{step}$ で充填が完了する。それに

対して、動的注入の場合、 $T=1000\text{step}$ 前後で一旦目詰まりが発生するが、その後目詰まりが解消されていることが確認できる。その後、再び $T=5500\text{step}$ 前後で目詰まりが生じ、充填が進行し、 $T=9500\text{step}$ で充填が完了している。ここで、静的注入の場合と比較して、動的注入では、目詰まりが発生してから充填が完了するまでの時間が延長されていることが確認できる。これは、振動圧を付加することによって、目詰まりが抑制されるためと考えられる。

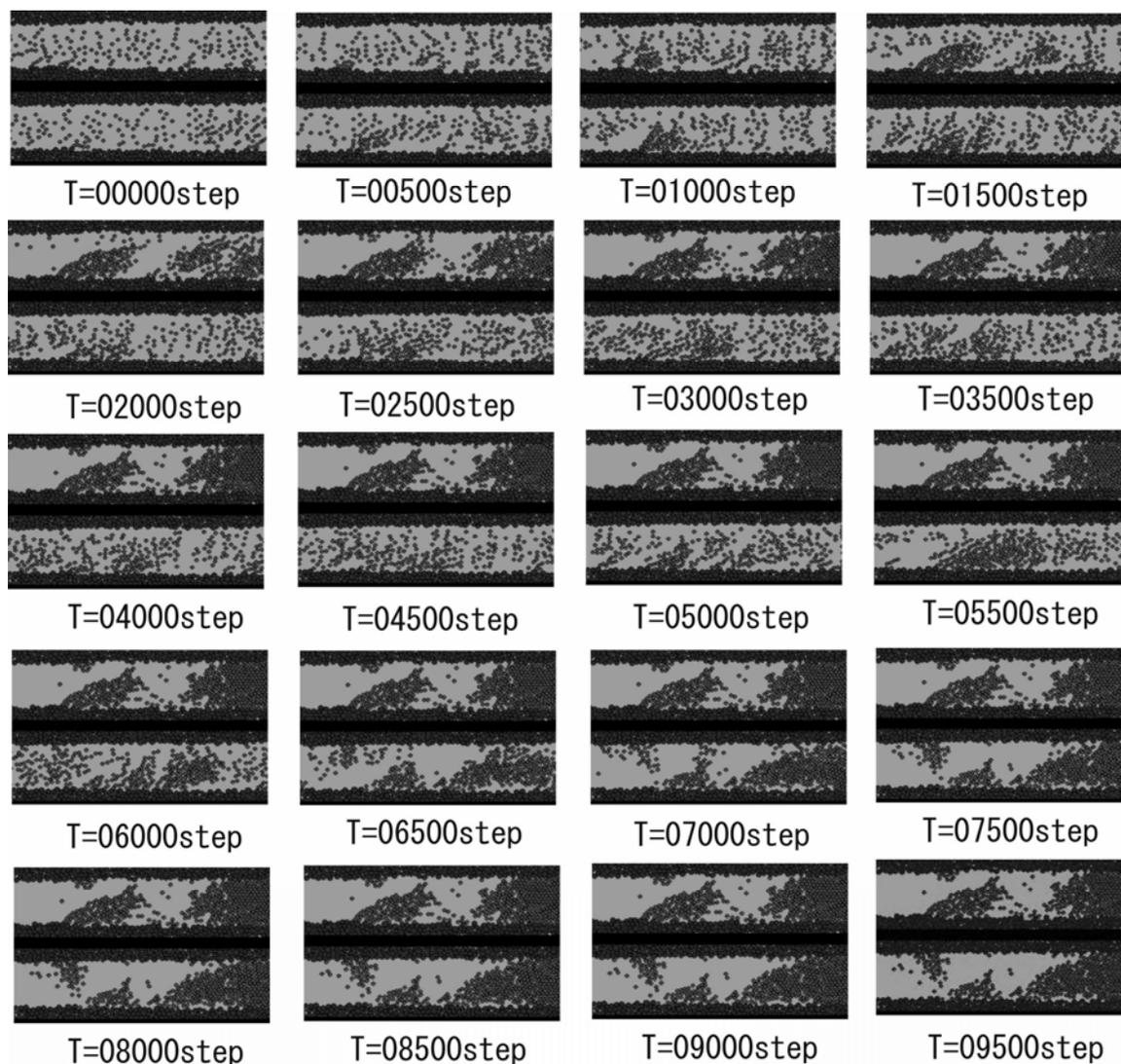


図1.1.45 シミュレーションにおけるセメント粒子の充填過程¹²⁾

ここで、動的注入において目詰まりの抑制および解消が生じる要因を、個々の粒子に着目して考察する。粒子の充填は、粒子が平衡状態（粒子に作用する物体力と抵抗力が釣り合い静止する状態）に達することによって進行すると考えられる。動的注入では、振動圧を付加することによって、粒子に作用する物体力が周期的に変化するため、静的注入と比較して平衡状態に達するまでに時間を要し、目詰まりが抑制されると考えられる。また、動的注入では、振動圧を付加することによって、粒子に作用する物体力の最大値が静的注入時に比べて大きいため、目詰まりの解消も生じると考えられる。

④グラウトの充填に対する注入パラメータの影響

提案したセメント粒子の充填過程モデルを用いてシミュレーションを行うことで、注入パラメータ（振動圧の振幅・周波数および水セメント配合比）がグラウト充填過程に与える影響を平行平板状の亀裂において検討した。

本研究では、注入パラメータを変化させた多数のシミュレーションを行うことにより、グラウトの注入パラメータが充填に与える影響を検討した。以下、その結果を示す。

図1.1.46に振幅と注入時間の関係を、図1.1.47に振幅と総注入セメント量の関係を示す。まず、図1.1.46から、振動圧の振幅が大きくなるに従って注入時間が延長していることがわかる。また、図1.1.47から、振動圧の振幅が大きくなるに従って総注入セメント量が増加していることがわかる。これは、振幅が大きくなるに従って動的効果（目詰まりの抑制および解消）が大きくなっているためと考えられる。また、周波数と注入時間・総注入セメント量との間には明白な関連性を認めることはできなかった。

図1.1.48に動的注入による注入時間の増加度（動的注入における注入時間／静的注入における注入時間）を振幅に対してプロットしたものを、図1.1.49に動的注入によるセメント注入量の増加度（動的注入における注入時間／静的注入における注入時間）を振幅に対してプロットしたものを示す。図1.1.48および図1.1.49から各振幅において、水セメント配合比の値が小さいほど注入時間および総セメント注入量の増加度が大きくなっていることがわかる。これより、水セメント配合比の値が小さいほど、すなわちグラウト材の粘性が高いほど、動的効果が顕著になると考えられる。

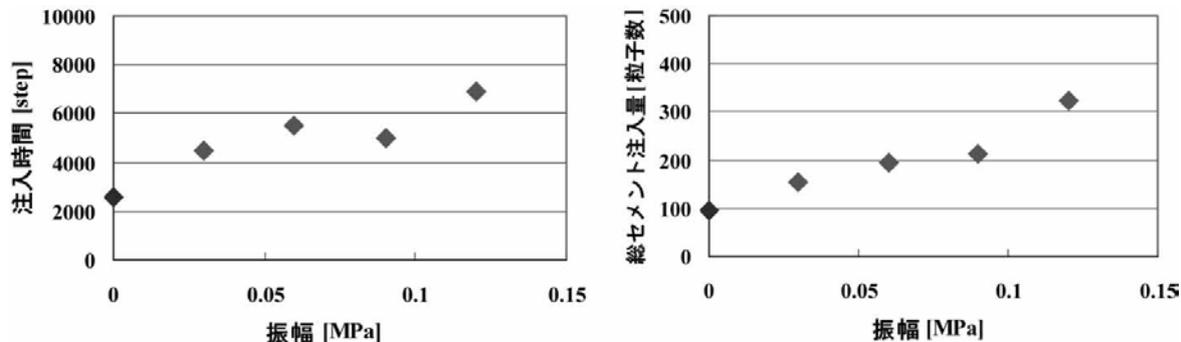


図 1. 1. 46 振動圧振幅と注入時間の関係¹²⁾ 図 1. 1. 47 振動圧振幅と総セメント注入量の関係¹²⁾

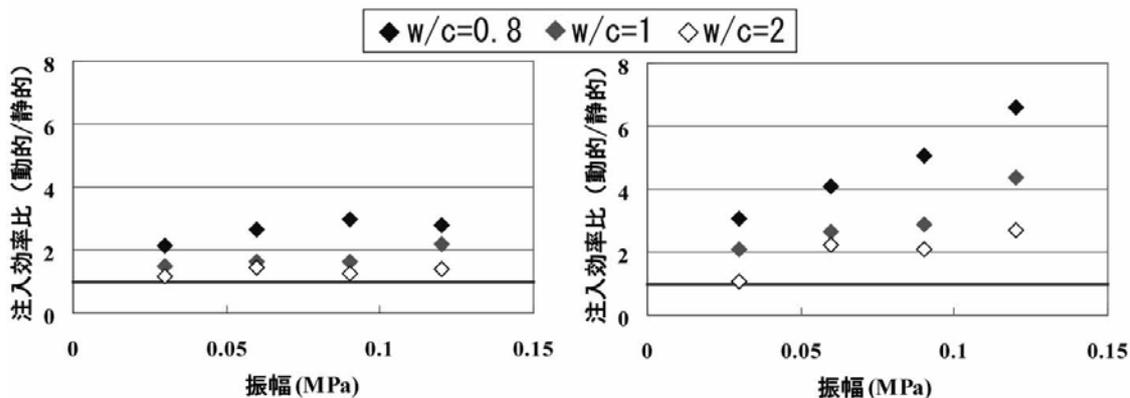


図 1. 1. 48 振動圧周波数と注入時間の増加度（動的／静的）の関係¹²⁾

図 1. 1. 49 振動圧周波数と総セメント注入量の増加度（動的／静的）の関係¹²⁾

⑤亀裂幅とグラウト充填機構の関連性

亀裂幅がグラウト充填過程に与える影響を検討するため、実際の低透水性岩盤の亀裂形状（図1.1.50）を模して作成した粗度の高い亀裂（図1.1.51）を対象として、亀裂幅を $50\mu\text{m}$ 、 $80\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ と変化させて（図1.1.52）シミュレーションを行った。ここで、水セメント配合比を $w/c=1$ と設定した。

図1.1.53に動的注入による注入時間の増加度（動的注入における注入時間／静的注入における注入時間）を亀裂幅に対してプロットしたものを、図1.1.54に動的注入によるセメント注入量の増加度（動的注入における注入時間／静的注入における注入時間）を亀裂幅に対してプロットしたものを示す。図1.1.53、図1.1.54から、亀裂幅が小さいほど注入効率比が大きくなっていることがわかる。これより、亀裂幅が小さいほど、動的効果が顕著になると考えられる。また、このことは、低透水性岩盤の改良に対する動的注入の優位性を同時に示すものである。

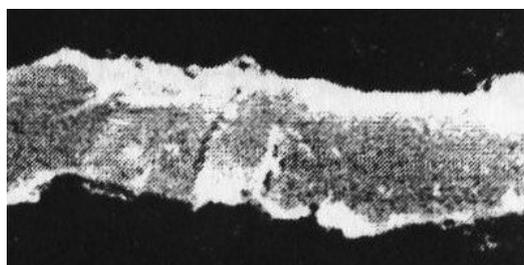


図1.1.50 実際の低透水性岩盤の亀裂の顕微鏡写真²³⁾

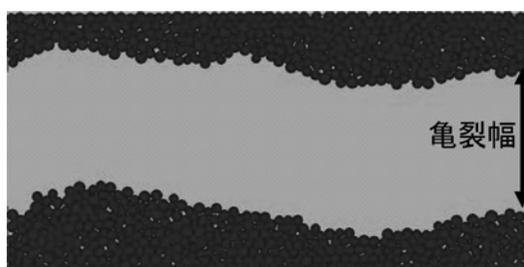
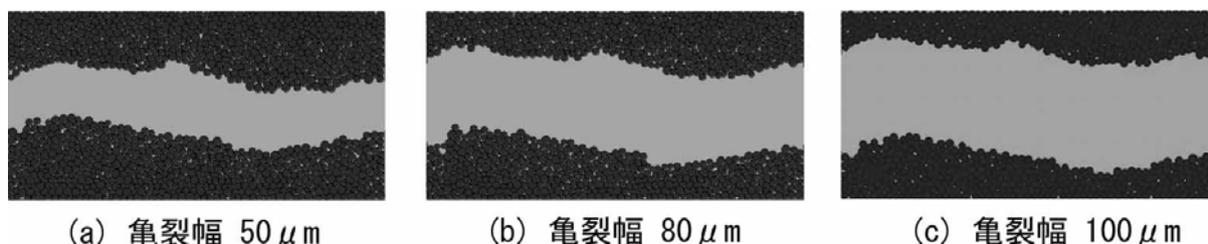


図1.1.51 シミュレーションで用いた亀裂モデル¹²⁾



(a) 亀裂幅 $50\mu\text{m}$

(b) 亀裂幅 $80\mu\text{m}$

(c) 亀裂幅 $100\mu\text{m}$

図1.1.52 開口幅を変化させたときの亀裂モデル¹²⁾

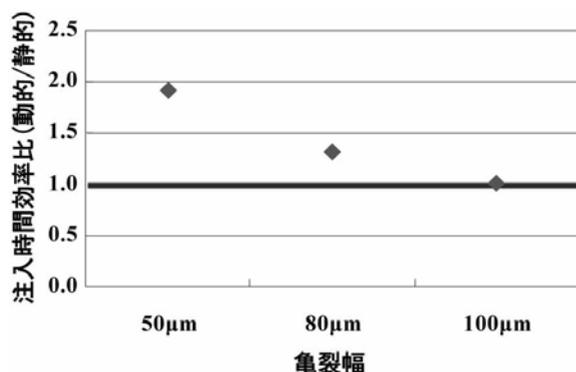


図1.1.53 亀裂幅と注入時間効率比
(動的/静的)の関係¹²⁾

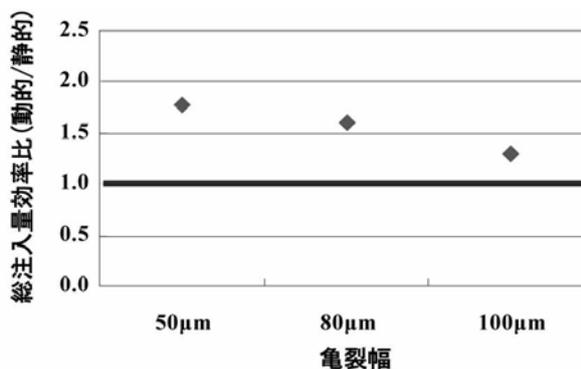


図1.1.54 亀裂幅と総注入量効率比
(動的/静的)の関係¹²⁾

以上、本研究では、低透水性岩盤の微小亀裂を対象とするフラクチャーシーリングに有効と考えられる動的注入工法におけるグラウト充填機構のミクロな視点からの解明を目的として、粒状体DEMを用いたシミュレーションを行い、検討を行った。

その結果、動的注入におけるグラウト充填機構について以下のような知見が得られた。

- ① 動的注入における注入時間の延長は、主として局所的な目詰まりの発生の抑制および解消に起因する。
- ② 振幅が大きいほど目詰まりの発生の抑制および解消効果が生じるため、注入時間の延長度合および注入量の増加度合が大きくなる。
- ③ 水セメント配合比の値が小さいほど、目詰まりの発生の抑制および解消効果が顕著になる。
- ④ 亀裂幅が小さいほど、目詰まりの発生の抑制および解消効果が顕著になる。

以上のことから、動的注入を行うことで、より低い透水性を示す岩盤に対しても、より安定した高濃度のグラウト材を注入できることが示された。また、これらの挙動は、(1)～(3)で検討したマクロな挙動と整合的な結果である。

(5) 最適注入仕様の決定方法¹¹⁾

(3)、(4)の検討により、(2)で構築したグラウト充填過程モデルの妥当性を検証することができた。ここでは、このグラウト充填過程モデルを用いて、対象岩盤に応じた最適注入仕様を決定する方法について述べる。手順は以下の通りである。

- ① 対象岩盤のルジオン値より、亀裂本数・平均亀裂幅を推定する。
- ② 注入パラメータより、グラウト充填挙動を支配するパラメータである見かけ粘性および固有堆積速度を決定する。
- ③ 得られたパラメータを提案したグラウト充填過程モデルに代入してシミュレーションを行うことで、流量および開口幅の経時変化を得る。これより注入仕様の性能の評価指標として次の3つの値を求める。

【セメント総注入量】

亀裂に注入されたセメントの総量

【注入効率】

単位時間あたりの平均セメント注入量

【透水性改良範囲】

亀裂幅が規定値まで改良された範囲

今回、シミュレーションの一例として、注入圧を固定した上で、最適な水セメント配合比を検討したケースを示す。表1.1.6に、シミュレーションにおいて設定した注入圧を示す。セメント配合比をパラメータとして各亀裂幅の総セメント注入量を求めたものを図1.1.55に、注入効率を求めたものを図1.1.56、透水性改良範囲を求めたものを図1.1.57に示す。これらの図には、参考までに静的注入の場合の予測値も示してある。これらの図より、今回のシミュレーションケースにおいては、水セメント配合比 $w/c=2$ または 4 が最適であるという結果を得ることができる。

表1.1.6 シミュレーションにおいて設定した注入圧¹⁾

亀裂幅 [μm]	注入方法	注入圧力 [MPa]	振動圧周波数 [Hz]
80	動的注入	0.5 ± 0.3	5
	静的注入	0.5	0

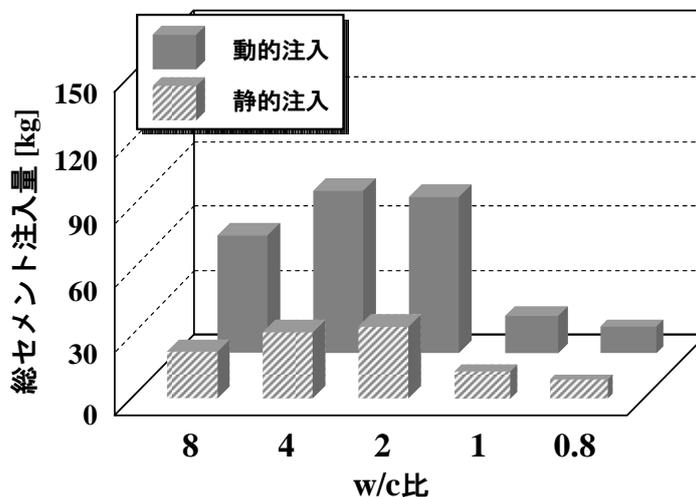


図1.1.55 w/c と総セメント注入量の関係¹⁾

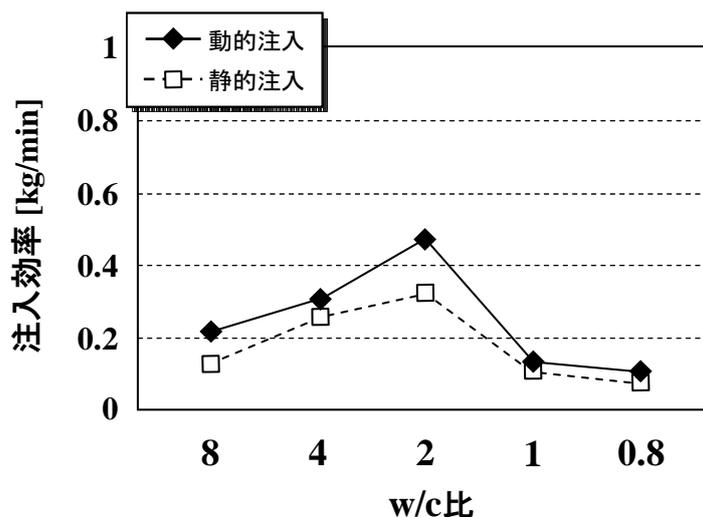


図1.1.56 w/cと注入効率の関係¹¹⁾

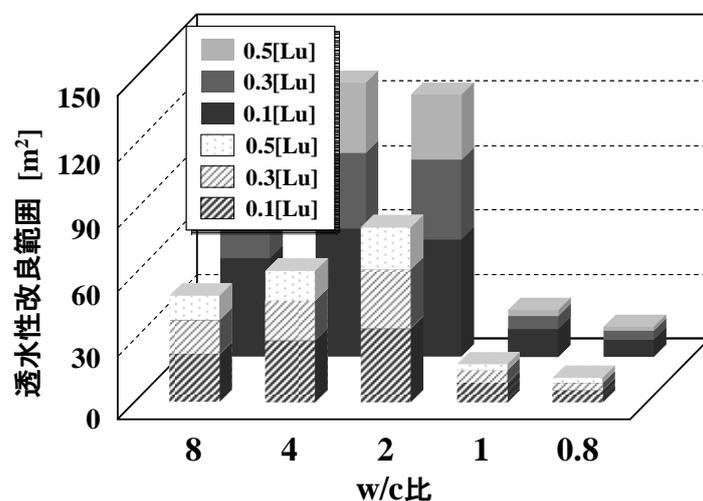


図1.1.57 w/cと透水性改良範囲の関係¹¹⁾

1.1.3.3 岩盤の3次元水理地質モデルの構築^{13)~15)}

これまでに述べてきたようなフラクチャーシーリングを確実にかつ効果的に実施するためには、グラウトを注入する岩盤の水理地質構造を把握し、その水理地質構造に応じた注入仕様でグラウトを注入することが重要である。

筆者は、地下水制御を主目的とする情報化設計施工システムの一環として岩盤の3次元水理地質構造の新しいモデル化手法を構築した^{13)~15)}。このモデル化手法では、透水係数の統計的な関連性（空間的な相関関係）に加えて、地下水位の挙動（間隙水圧変化）に対しても高い適合性を有するように、地球統計学シミュレーションと浸透流解析手法をベースとしている。

ここでは、このモデル化手法の概要を述べた後、手法の原位置岩盤への適用性を検証する。

(1) 水理地質モデルの構築手法

まず、対象とする領域で得られた透水特性のデータを基に地球統計学手法の一つである Sequential Indicator Simulation (SIS) を用いて、複数の水理地質モデルを作成する。

地球統計学手法の中で最も一般的に用いられている Ordinary Kriging は、推定値の空間分布を平滑化させることが知られており、大局的な岩盤の透水性を定量的に評価するにあたっては至便であるが、局所的な水理特性を精度良く推定するにはやや不向きであるといえる。これは、推定値どうしの関係に空間的確率構造が反映されていないため、特に観測データが疎らな箇所において、近傍のデータ間の相関性が過大評価されるためである。そこで、本研究においては、推定値どうしの関係に空間的確率構造を反映させることができる地球統計学手法の一つである SIS を用いる。SIS の特徴としては、乱数列によって推定位置を決定する点と、既に求めた推定値を次の推定に用いる点が挙げられる^{24), 25)}。SIS による推定結果は Realization と呼ばれるが、この Realization においては、推定値どうしの関係にも空間的確率構造が反映されているため、平滑化効果の影響を最小限に抑えることができ、データ間の空間的相関性をより合理的に表現できるといった特長を持っている。一方で乱数列によって異なる Realization が得られることになり、モデルが一意に定まらないという欠点をもつ。

そこで本手法では、複数の乱数列を用いて複数の Realization を作成し、これらの Realization を基に作成した複数のモデルのうち、地下水の実挙動を最も精度良く再現できるモデルを対象領域の水理地質モデルとして同定する。具体的には、それぞれの水理地質モデルに対して 3次元浸透流解析を行い、一定の検証規準を満足するモデルのうち、地下水の実挙動を最も精度良く再現できるモデルを対象領域の水理地質モデルとして同定する。

水理地質モデルの検証と同定に用いる 3次元浸透流解析には、物性値の不均質なモデルを簡易に作成できる有限体積法 (Finite Volume Method) を用いる。有限体積法は、解析領域の離散化やモデル式の離散化においては有限要素法との共通点が多く、汎用性に富む解析法の一つである。複雑形状への適合性は有限要素法も有限体積法もほぼ同等であるが、有限体積法は有限要素法に比べて計算負荷が小さいという利点や物理量の保存法則が直接守られるという利点をもつ。有限体積法では、有限要素法と同様に六面体や四面体で表されるセルの集合体により空間を表現して近似を行う。離散化にあたっては、セル中心での関数値をそのセル全体の関数値と見なす。モデル式を積分方程式に置き換えてセルの範囲で積分することで離散化された差分方程式を求め、この差分方程式を解くことで数値解を求めるものであり、境界条件の設定は有限要素法の場合と同様である。

ここで、水理地質構造のモデル化にあたっては、SIS によって作成した Realization における水理特性の値をセルの物性として用いることで、不均質な水理特性を反映させた解析モデルを作成する。このモデルに対して現実の初期・境界条件を与えることで浸透流解析を行い、一定の検証規準を満足するモデルのうち、地下水の実挙動を最も精度良く再現できるモデルを対象領域の水理地質モデルとして同定する。

このような手順により、岩盤の水理特性の不均質性および地下水の実挙動を反映した水理地質モデルを構築する。

(2) 原位置岩盤への適用性の検討

本研究で検討対象とするサイト¹⁵⁾は、水封式燃料地下備蓄基地の建設地点である（図1.1.58）。具体的な施工手順としては、まず、地表から約12～13%の斜坑で作業トンネルをEL-125m（水封トンネル設置深度）まで掘削する。次に、岩盤に給水する水封トンネルおよび水平・鉛直水封ボーリングを貯槽上部に掘削し、地下水圧の安定化を図るためのウォーターカーテンを設置する。その後、ベンチ掘削により貯槽を掘削する。

本サイトの地質は白亜紀の堅硬緻密な花崗岩で構成されている。サイトスケールにわたって地下水挙動を監視するため、岩盤内の各所において間隙水圧および湧水量が経時的に観測されており、また岩盤の透水特性を詳細に評価するために、調査ボーリングや水封ボーリングを利用して数多くの透水試験が実施されている。

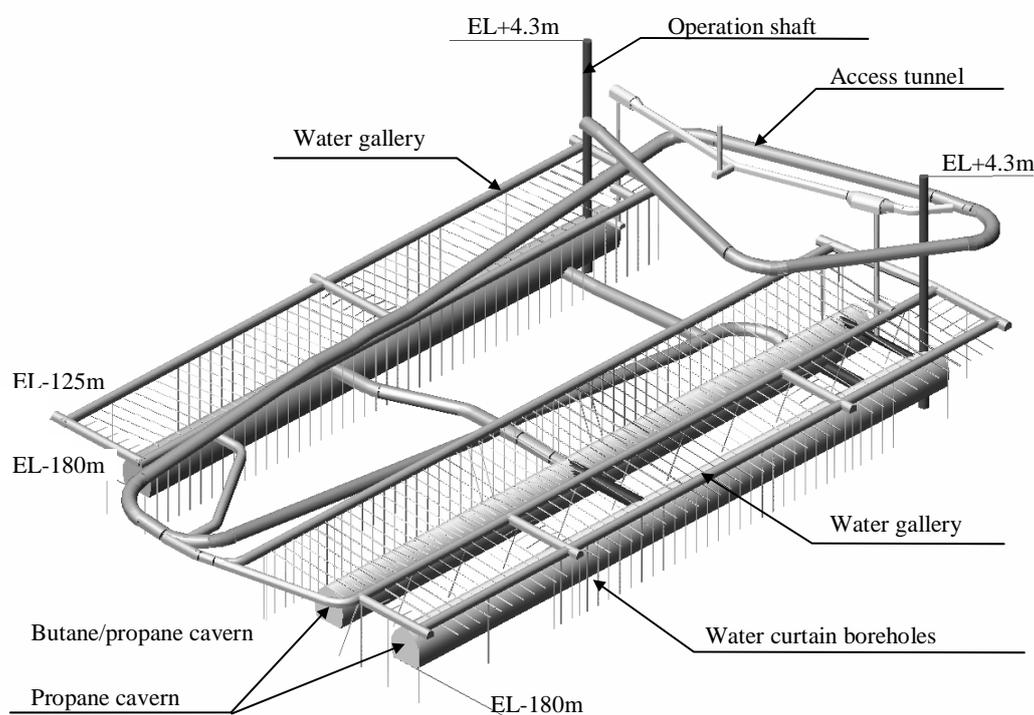


図1.1.58 研究対象とした水封式燃料地下備蓄基地の空洞配置図¹⁵⁾

モデル化にあたっては次のような手順で行った。

①SISによるRealizationの作成

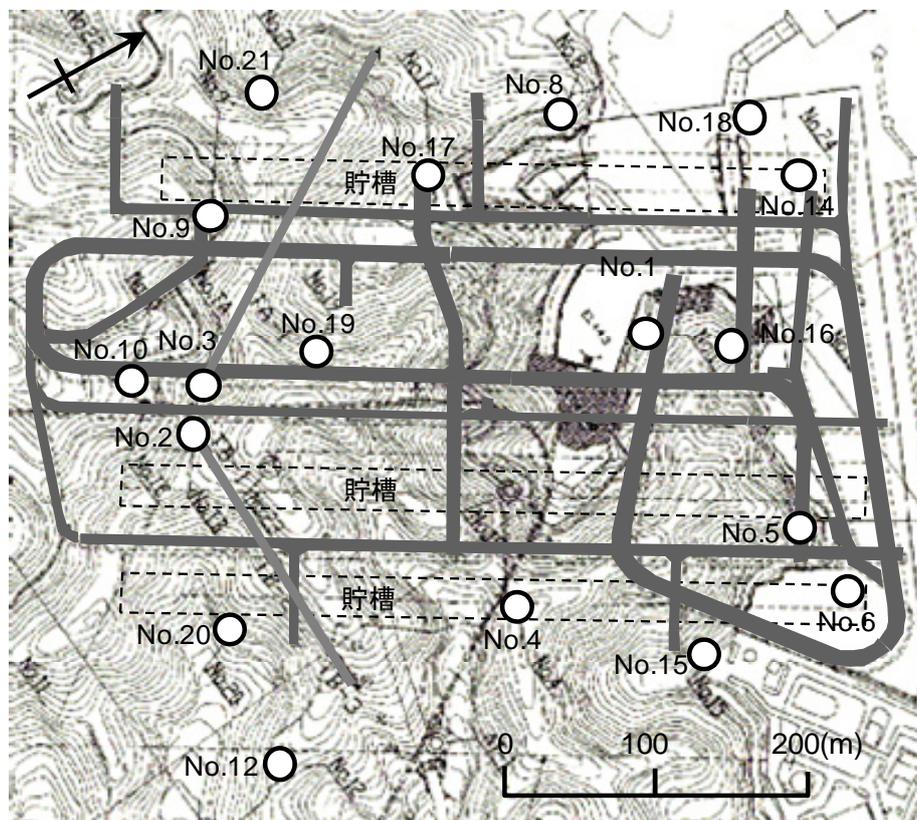
SISにより作成する岩盤水理特性のRealizationの寸法は、貯槽の縦断方向に600m、貯槽の横断方向に500m、深度方向に100mとし、この範囲を一辺10mの立方体セル（計30,000個）に分割した。

この立方体のセルの中心を推定点とするSISを行い、岩盤の透水係数（常用対数値）を各セルに割り当てた。なお今回は、乱数列を変えることにより30通りのRealizationを作成した。

②地下水挙動のシミュレーションとモデルの同定

まず、解析モデルの側面と上下面に、自然地下水圧相当分の固定圧力境界条件を与え、定常状

態の間隙水圧の分布を求める。次に、水封トンネルが掘削される毎に掘削部分に大気圧の境界条件を与えることで、岩盤内の間隙水圧の空間分布を経時的に計算する。複数の間隙水圧の観測地点（図1.1.59）で実測値と解析値とを比較して、その残差標準偏差が最小となるモデルを、この領域の水理地質モデルとして同定した。



（図中の数字は間隙水圧計のID番号を表す）

図1.1.59 岩盤内に設置された間隙水圧計の位置図¹⁵⁾

図1.1.60は、本手法によって同定した水理地質モデルを用いた解析値と実測値を比較したものである。また比較のため、Ordinary Krigingで推定したモデルを用いた解析結果と均質モデルを用いた解析結果も同時に示す。本図をみると、Ordinary Krigingで推定したモデルや均質モデルと比較して、SISによって同定した水理地質モデルを用いた解析値が、実測値の変動をよく再現できていることがわかる。

表1.1.7は、間隙水圧の実測値と各モデルのシミュレーションによって得られた間隙水圧の解析値との間の誤差を平均誤差と残差標準偏差という2つの指標値を用いて各モデルで比較したものである。本表を見ると、平均誤差と残差標準偏差はともに、均質モデル、Ordinary Krigingで推定したモデル、SISで推定したモデルの順に小さくなっていることがわかる。このことから、SISを用いて岩盤の水理特性の空間的不均質性をモデル化することによって、岩盤内の水理挙動をより高精度に解析できることがわかる。

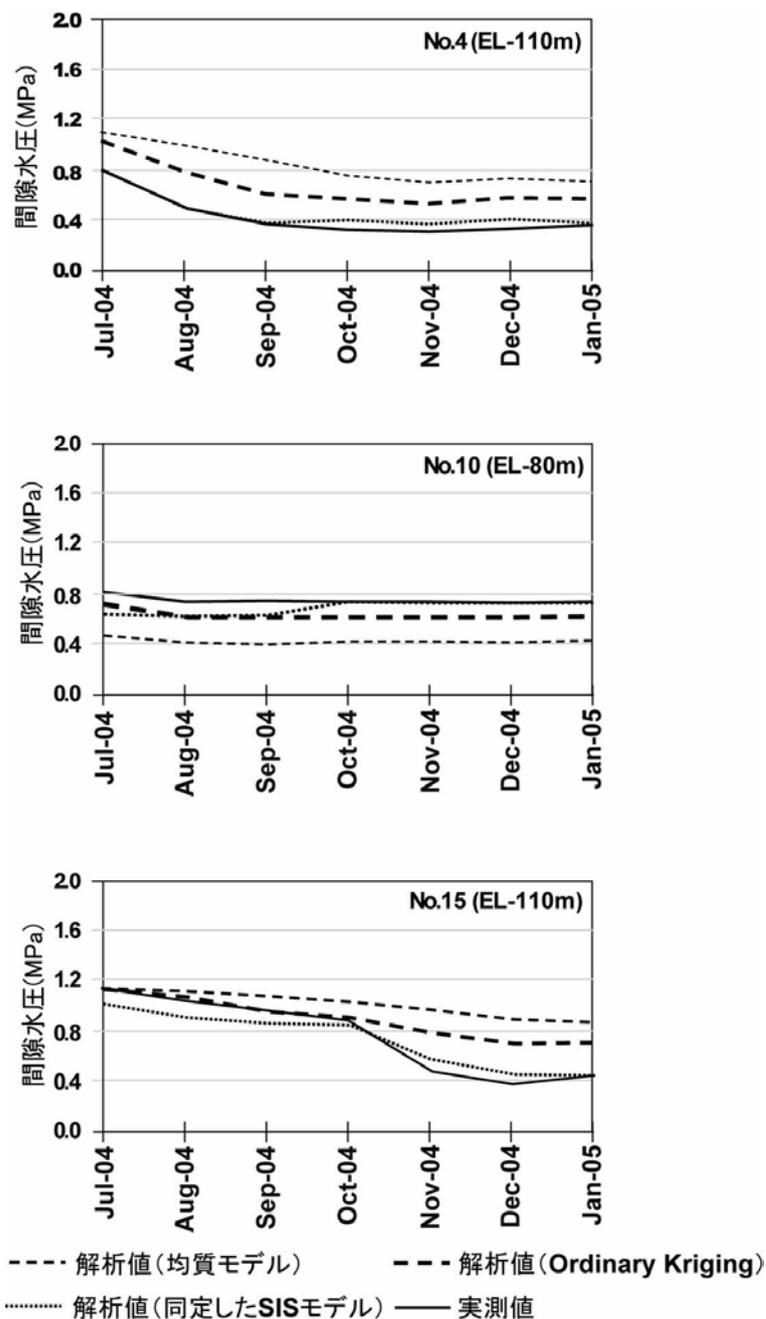


図1.1.60 間隙水圧の実測値と解析値との比較¹⁵⁾

表1.1.7 間隙水圧の実測値と解析値の誤差¹⁵⁾

モデル	間隙水圧の実測値と解析値との誤差	
	平均誤差 [MPa]	残差標準偏差[MPa]
均質モデル	0.224	0.270
Ordinary Kriging モデル	0.175	0.252
SIS モデル	0.132	0.153

次に、水封トンネルの掘削解析と同様の手順で、同定した水理地質モデルを用いて貯槽掘削時の水理挙動の予測を行った。図1.1.61は、SISによって同定した水理地質モデルによる解析値（予測値）と、その後の掘削によって得られた実測値とを比較したものである。本図をみると、実測値の変動に対して解析値がよく合致していることが分かる。また、解析値と実測値との平均誤差は0.115MPaであり、残差標準偏差は0.133MPaであった。この値は、水封トンネル段階でのモデル構築時に得られた値（表1.1.7：平均誤差：0.132MPa，残差標準偏差：0.153MPa）とほぼ同程度の値である。すなわち、モデル構築時に得られた精度とほぼ同様の精度で水理挙動を予測できたことがわかる。

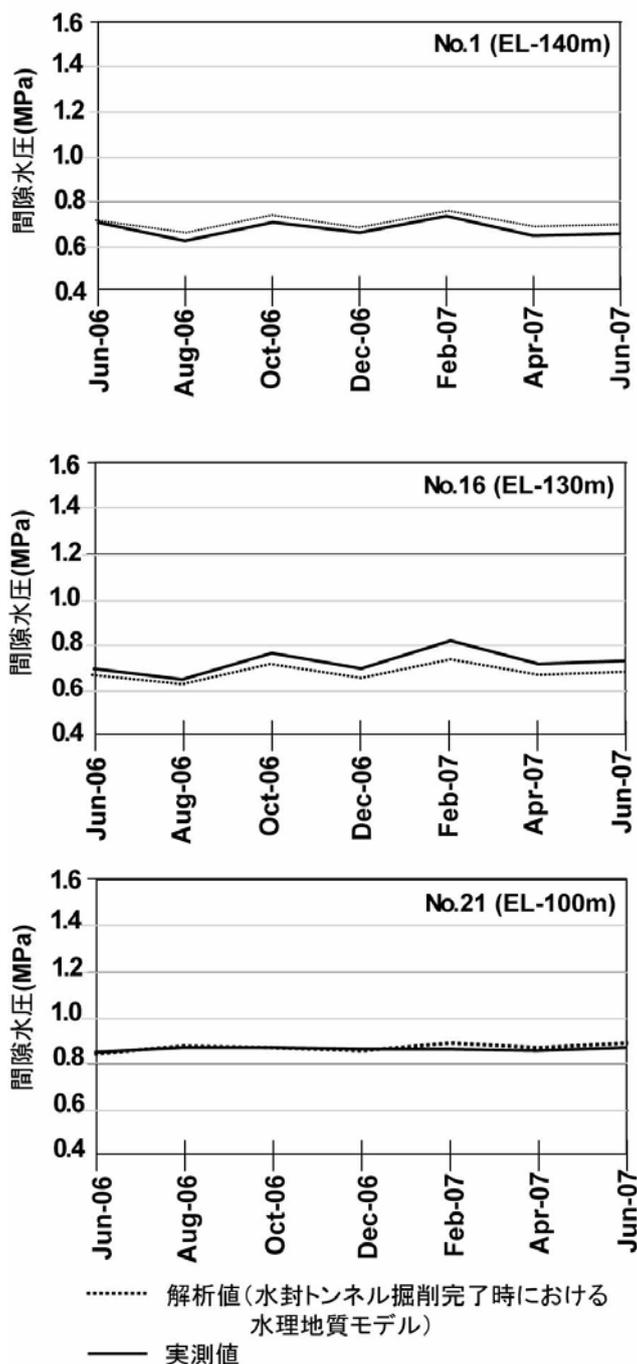


図1.1.61 間隙水圧の予測値と実測値の比較¹⁵⁾

1.1.3.4 クロスホール透水試験による岩盤の水理地質構造の評価^{16)~20)}

卓越する透水経路を有する岩盤に対してフラクチャーシーリングを確実に実施するためには、坑道周辺岩盤の水理特性に大きく影響する水みちの検知が必要不可欠となる。このような坑道周辺岩盤の水理的な調査・試験には、岩盤の巨視的な3次元透水特性を評価することができるクロスホール透水試験が有効と思われる。

現在までにクロスホール透水試験結果から孔間の水理特性の空間分布を推定するためにいくつかの逆解析手法が提案されてきた。しかしながら、一般に初期モデルに対する依存性が大きくより現実の流れと類似した初期モデルを用いない限り、妥当な再構成結果を得ることが保証されないという問題点が残されている。また、格子ベースの解析方法では、水みちの形状に関わりなく格子が設定されるため、格子パターンに適合しないような水みちを経由する地下水の解析には適用性が低い。

これらの問題点を踏まえ、本研究においては、クロスホール透水試験結果から、多次元尺度構成法 (Multidimensional scaling : MDS) と空間補間法 (逆距離補間法 (Inverse distance weight interpolation: IDW)) を利用して、不均質な岩盤の水理的な地質モデルを合理的に構築する方法 (MDS-IDWイメージング手法) を新たに提案し、その実用性を数値実験および現場実験によって検証した^{16)~20)}。

(1) MDS-IDWイメージング手法^{16), 17)}

岩盤の水理特性を把握するための現場試験のうち、孔間水理試験は、複数のボーリング孔を配置することによりボーリング孔間での地下水の変化を直接的に観測できるため、水理特性の空間的な広がりや水理的な連続性を把握するのに適しており、その代表的な試験方法としてクロスホール透水試験がある。

クロスホール透水試験 (図1.1.62) には注水孔と少なくとも1本の観測孔を用いる。試験の準備段階においては、注水孔および観測孔の孔内に止水パッカーと間隙水圧計を設置し、ボーリング孔内を複数の注水区間 (Pumped interval) または観測区間 (Observation interval) に分けておく。注水区間において所与の条件で注水を行い、観測区間において水圧の経時変化を観測することによって対象岩盤の水頭拡散率 (透水係数/比貯留係数: 圧力水頭の拡散の減衰を支配する定数) を評価する。なお本研究では、注水孔においても水圧の経時変化を観測するものとする。

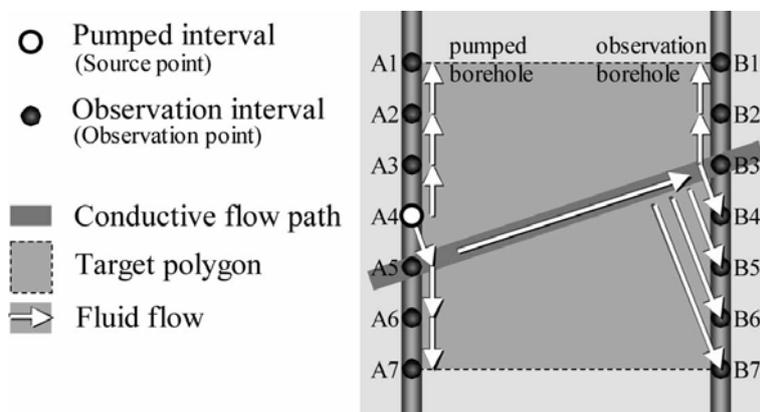


図1.1.62 クロスホール透水試験

水頭拡散率の算定にあたっては、クロスホール透水試験によって得られた水圧の経時変化の実測値から得られる実測水頭変化カーブと理論解によるタイプカーブとをマッチングさせ、そのマッチングポイントの読み取り値から求める。

クロスホール透水試験の観測点の配置は地理的距離が尺度となる現実の地理的空間（Geographical subspace）におけるデカルト座標系で表される。ここで、水理学的距離が尺度となるような水理学的亜空間（Hydraulic subspace）という別の座標系で観測点の配置を表現することを考える。

多次元尺度構成法（MDS）はデータ内に潜在するデータ構造を可視的に解釈することを目的として、データ間の非類似度をあらわす概念である距離行列から多次元空間上での各データの配置を求める方法である。すなわち類似度が大きいほどデータ間での距離が小さくなるという関係を基にデータの空間配置を求めるものである。なお、このときの空間配置のことを布置（Configuration）と呼ぶ。

表1.1.8は算出した水頭拡散率をもとに作成した水理学的距離行列であり、これに多次元尺度法を適用することにより、図1.1.63に示すような水理学的亜空間における観測点の布置を求めることができる。

水理学的亜空間においては距離の等しい任意の2点間の水頭拡散率は等しくなる。そこで、水理学的亜空間内に均一に点群を設置したとき、この点群は流体の流れにとっての、土壌内における土粒子のような障害物と等価な意味を持つ。そこで、図1.1.64に示すように観測点の地理学的布置と水理学的布置の関係に基づいて、これらの点群を地理的空間に再配置することを考える。ここで以下のことを仮定する。

表1.1.8 水理学的距離行列

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	B4	B5	B6
A2	44												
A3	158	44											
A4	794	417	158										
A5	1096	794	417	158									
A6	1514	1096	794	417	44								
A7	2069	1514	1096	794	158	44							
B1	2069	1514	1514	1096	1514	2069	2069						
B2	1514	1514	1096	794	1096	1514	2069	44					
B3	1514	1096	575	302	575	1096	1514	158	44				
B4	1096	794	302	575	302	794	1096	794	417	158			
B5	1514	1096	575	302	575	1096	1514	1096	794	417	158		
B6	2069	1514	1096	794	1096	1514	1514	1514	1096	794	417	44	
B7	2069	2069	1514	1096	1514	1514	2069	2069	1514	1096	794	158	44

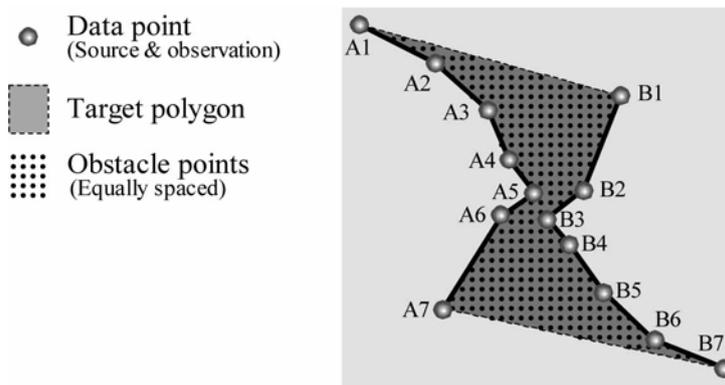


図1.1.63 水理学的布置

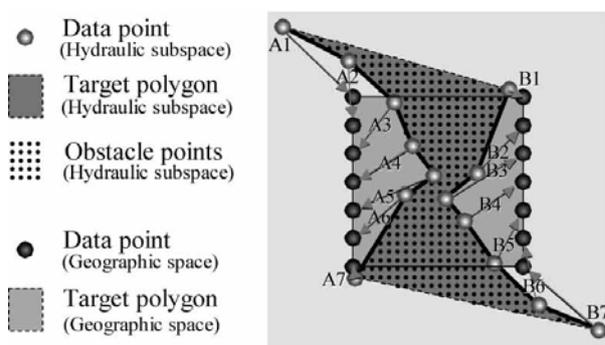


図 1.1.64 幾何学的再構成

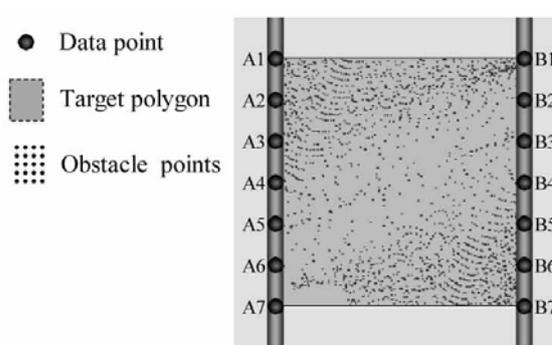


図 1.1.65 地理的空間に再配置された点群

- ①この2つの空間にまたがる布置を対応付けることができる、無次元の幾何学的な距離が尺度となる幾何学的超空間（Geometric hyperspace）において点群の再配置を行う。
- ②それぞれの空間での観測点を結んでできる多角形の面積は、幾何学的超空間で等しい値をとる。
- ③幾何学的超空間においては多角形の重心の位置が同一となるように配置する。
- ④水理学的亜空間から地理的空間の同一点へのベクトルは幾何学的超空間において空間的相関性を持つ。

この仮定のもとに、均一に設置した点群の地理的空間上での配置を決定することができ、水理学的亜空間から地理的空間へ変換することができる。（図1.1.65）

空間補間法の中で最も単純かつ明解な方法として逆距離補間（IDW）を挙げることができる。この方法は、推定位置までの距離の逆数の p 乗（一般に $p=2$ がよく用いられる）によって各データに重み付けする（重みの総和を1とする）ものである。逆距離補間法において、ある任意の位置 x' 補間値 $Z(x')$ は次式により算出される。

$$Z(\mathbf{x}') = \sum_{i=1}^n w_i Z(\mathbf{x}_i) \quad (1.1.99)$$

ここで、 $Z(x_i)$ は既存のデータであり、 n は既存データの数である。また w_i は重み係数であり、

次式で表される。

$$w_i = \frac{h_i^{-p}}{\sum_{j=1}^n h_j^{-p}} \quad (1.1.100)$$

但し、 h_i は位置 x' と x_i との間のユークリッド距離である。逆距離補間は厳密な補間方法であり、推定位置で標本値が得られている場合には、解（推定値）はその値と等しくなる。

地理的空間における点群の密度は岩盤の不透水性の程度を意味すると考えられる。したがって、点群の密度分布図において密度の低い領域は水みちを表していることになる。なお、空間内の密度を表現するに際していくつかの手法が考えられるが、例えばラスター形式の表示方法では図1.1.66のような結果を得る。

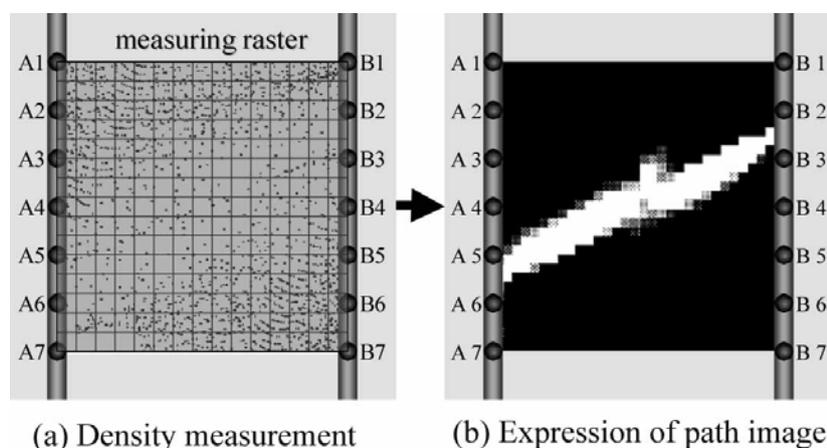


図1.1.66 点群の密度とイメージング結果

(2) 数値実験によるイメージング手法の妥当性の検証^{17), 18)}

検証にあたっては、まず水理的に等方均質な領域内に様々な位置・方向を有する高透水層を配置させた水理地質構造モデルを用い、クロスホール透水試験を模擬した2次元非定常有限要素法浸透流解析を行う。次に解析結果を基に、提案した方法によりイメージングし、水理地質構造モデルと比較することによって手法の妥当性・有効性を検証した。

浸透流解析の手順は以下の通りである。

- ①解析領域の設定：図1.1.67に示すような解析領域を設定し、クロスホール透水試験を想定した孔長45mの鉛直な注水孔および観測孔を水平距離で10m離れるように配置する。注水区間および観測区間については1.67m間隔で1孔あたり7箇所設定している。
- ②水理地質構造の設定：透水層の位置・傾斜角が異なる複数の水理地質構造モデルを作成する。このとき、透水層の透水係数を 10^{-3} cm/s、透水層以外については透水係数を 10^{-5} cm/sとする。なお、比貯留係数については圧力応答の計算値に大きな影響を与えるものと考えられるが、今回は 10^{-4} m⁻¹と一定値を与える。
- ③クロスホール透水試験のシミュレーション：作成した水理地質構造モデルに対して2次元非定常有限要素法浸透流解析を行うことにより、クロスホール透水試験（定流量注水試験）をシミュレートする。境界条件としては、解析領域の上下両端を不透水境界とし、左右両端に80m

の全水頭を与える。これを定常解析することにより領域内各所の水頭の初期条件を設定する。この条件のもと、注水区間において $10\text{cm}^3/\text{s}$ の定流量を境界条件として与えることで非定常解析を行う。なお、注水は注水孔における7つの注水区間から順次行う。

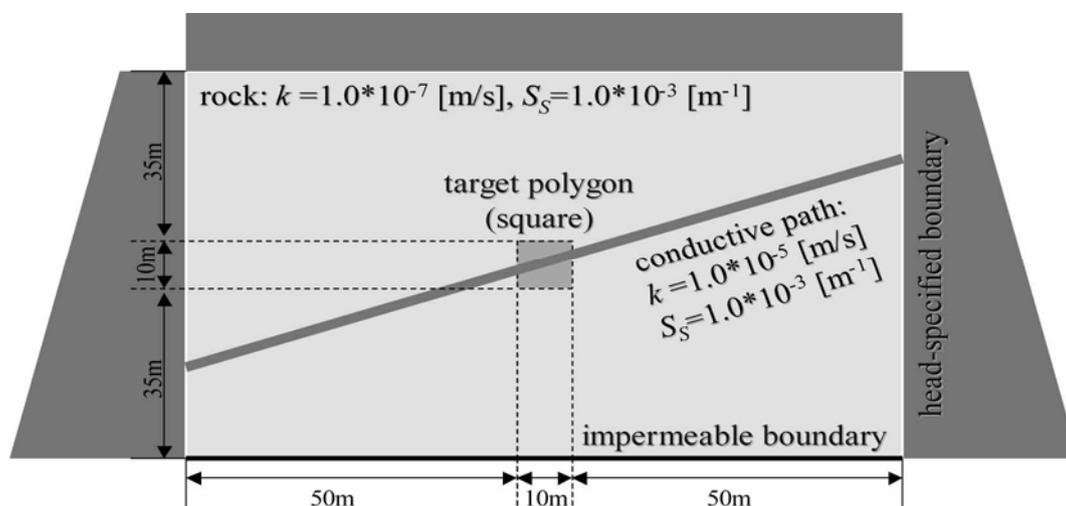


図1.1.67 数値実験モデル

数値実験の結果を図1.1.68に示す。本図においては、左にシミュレーションに用いた水理地質構造モデル、中央に解析の結果得られた水頭拡散率を基に算出した水理的な布置、右に逆距離補間法による幾何学的再構成で得られたイメージング結果をそれぞれ示してある。

まず、図1.1.68(a)は、水平な透水層が上部に位置するものから下部に位置するものまでの7つのモデルについて比較したものである。まず、これらの布置について着目すると、7つのいずれの布置においても水理地質構造モデル上にて透水層によって連結される観測点どうしの距離が小さくなっていることがわかる。すなわち、2点間の水理的な距離が小さいことを表している。また、水理地質構造モデルとイメージング結果を比較すると、いずれも高精度で水理地質構造を再現していると考えられる。これより、提案した方法によって透水層の位置を適正に再現できることが検証された。

次に図1.1.68(b)は、透水層の傾斜が低角度で注水孔－観測孔間を連結するもの、高角度で注水孔－観測孔間を連結するものの2つについて比較したものである。これらの水理的な布置についても、透水層で連結される観測点間の距離が小さくなっていることが確認できる。イメージング結果に関しては良好な精度で水理地質構造を再現していると考えられる。これより、提案した方法によって透水層の傾斜角度を適正に再現できることが検証された。

図1.1.68(c)は、透水層が平行に複数存在するもの、複数存在してX字状に交差するものの2つについて比較したものである。これらの水理的な布置についても、透水層で連結される観測点どうしの距離が小さくなっていることが確認できる。イメージング結果をみると、複数の透水層を有するモデルに対しても高い精度で水理地質構造を再現できることがわかる。

図1.1.68(d)は、注水孔および観測孔と透水層が直接交差しない場合の検討結果を示したものである。このようなケースでは、透水層を通る地下水の挙動が明確な観測結果として得られにくいいため、観測結果から水理地質構造を再構成するのは極めて困難である。しかしながら、本図をみ

ると、高透水層が観測結果に与える小さな影響をも反映した布置が得られているとともに、高透水層の位置が特定できるイメージング結果が得られることが確認された。

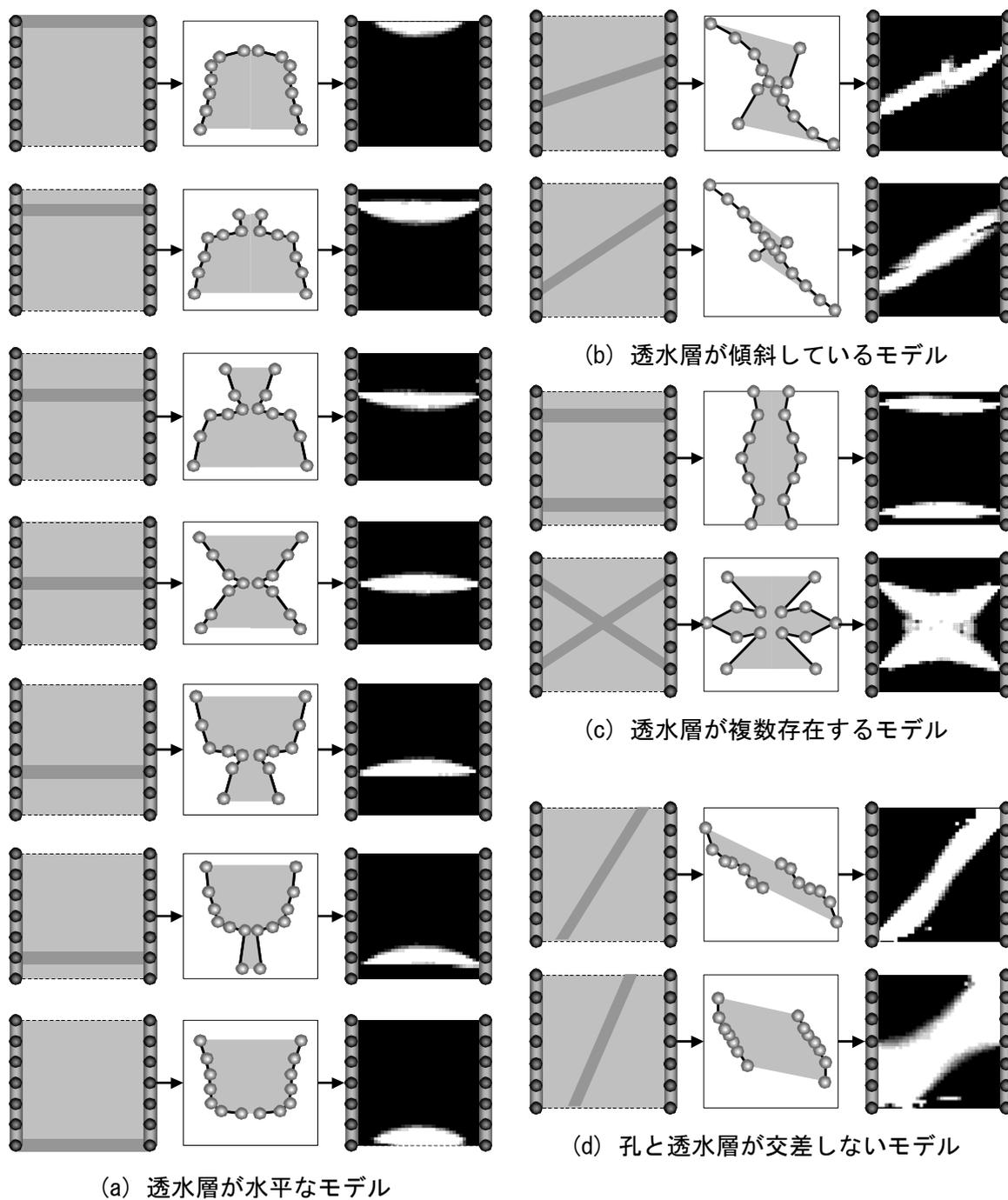


図1.1.68 数値実験の結果

以上の結果から、提案した方法によって各種の水理地質構造を適正に再現できることが判明し、その妥当性・有効性が検証されたものとする。

(3) 原位置岩盤への適用性の検討^{18)~20)}

本手法の実用性を検証するために、地下発電所の調査横坑から削孔した2本のボーリング孔を用いてサイナソイダルクロスホール透水試験を行った。本地点の岩盤は白亜紀砂岩泥岩互層から構成される。図1.1.69は調査横坑から深度25~35mに設定した7つの注水・観測区間の配置を示したものである。横坑壁面の観察やボアホールテレビ観察により、本図に示すような急傾斜した破碎帯の存在が確認されている。なお、注水区間・観測区間とこの破碎帯は直接交差していない。

図1.1.70は、注水点・観測点の水理的布置と対象領域のイメージング結果を示している。これは対象領域において高透水層となりうる唯一の地質構造である破碎帯の位置をよく再現している。このことから提案手法が現場において高い適用性をもつことが確認された。

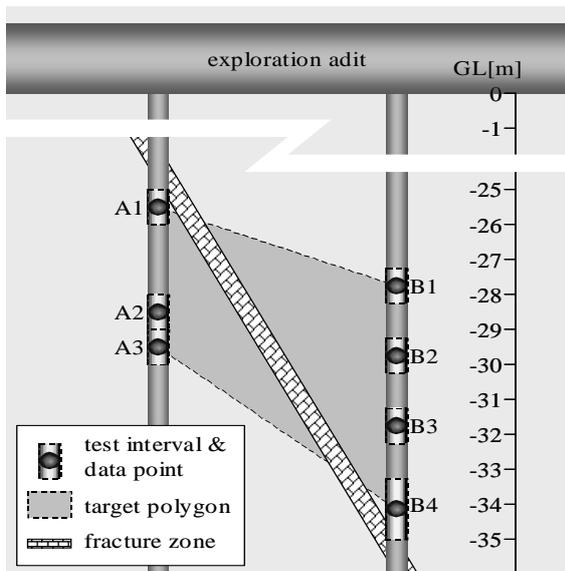


図1.1.69 現場実験の概要

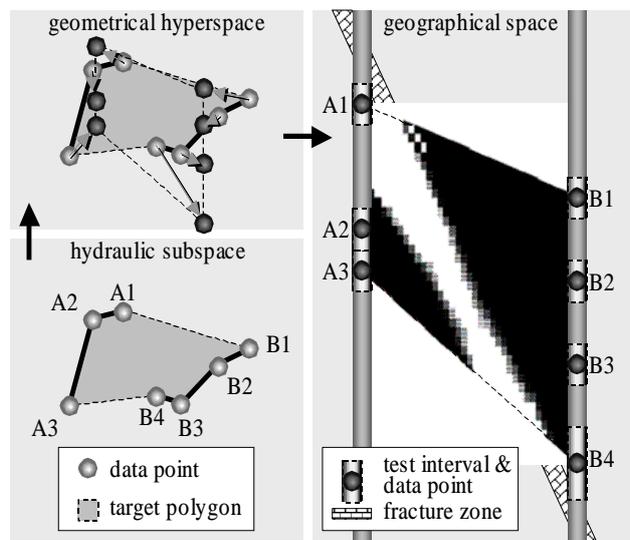


図1.1.70 現場実験に対する手法の適用結果

以上、本研究ではクロスホール透水試験による岩盤の水理地質構造の新しい評価手法を提案した。本手法は観測点間の連結性を示す一連の水理データから多次元尺度構成法（MDS）と逆距離補間法（IDW）を用いて水理特性の空間分布を推定するものであり、主に掘削影響領域周辺の水理挙動を支配する不均質な地下水の流れを高精度に把握することを目的としている。

本手法の妥当性・有効性を検証するために、高透水層が存在する典型的な水理地質構造モデルをいくつか作成し、数値シミュレーションを行ったところ、提案した方法によって各種の水理地質構造を適正に再現できることが判明した。また、この手法の現場での実用性を検証するために、現場データの解釈に適用したところ、高透水層となりうる地質構造とよく一致するイメージング結果をえた。

(4) 3次元への拡張^{19), 20)}

多次元尺度構成法（MDS）および逆距離補間法（IDW）は3次元に対応した数学的手法であるため、これまでに構築してきた方法を3次元へ拡張することは容易である。すなわち、図1.1.71に示すように、地理的空間および水理的空間を3次元デカルト座標で表現することによって、同様の手順によって水理地質構造の3次元イメージを得ることが可能である。

図1.1.72は、(3)で実施した数値実験と同様な方法で水理構造の3次元のイメージングを行った結果である。本図をみると、いずれの場合も対応する水理地質構造モデルを高精度に再現できていることがわかる。

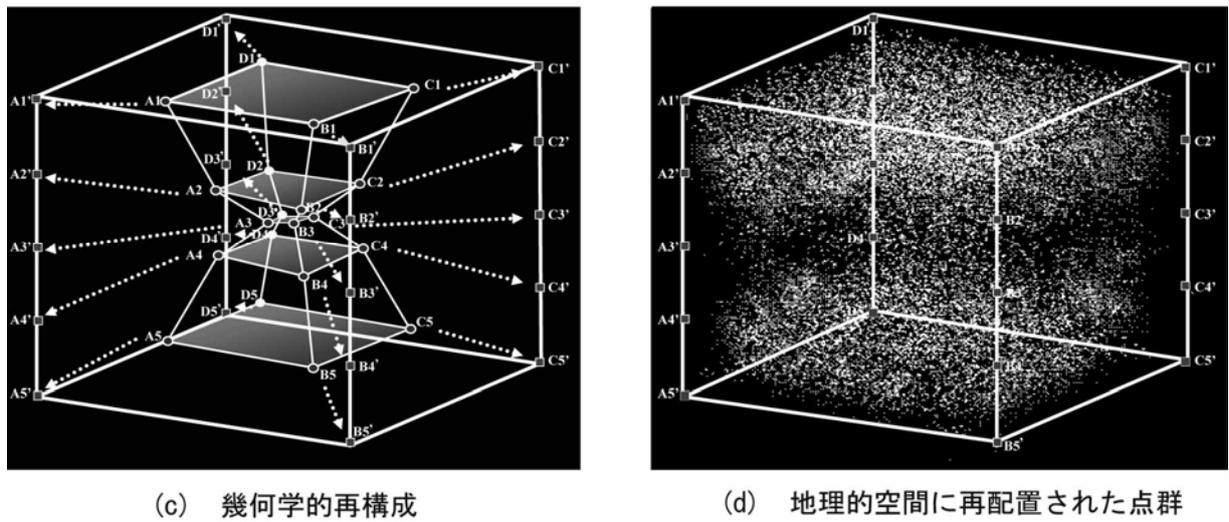
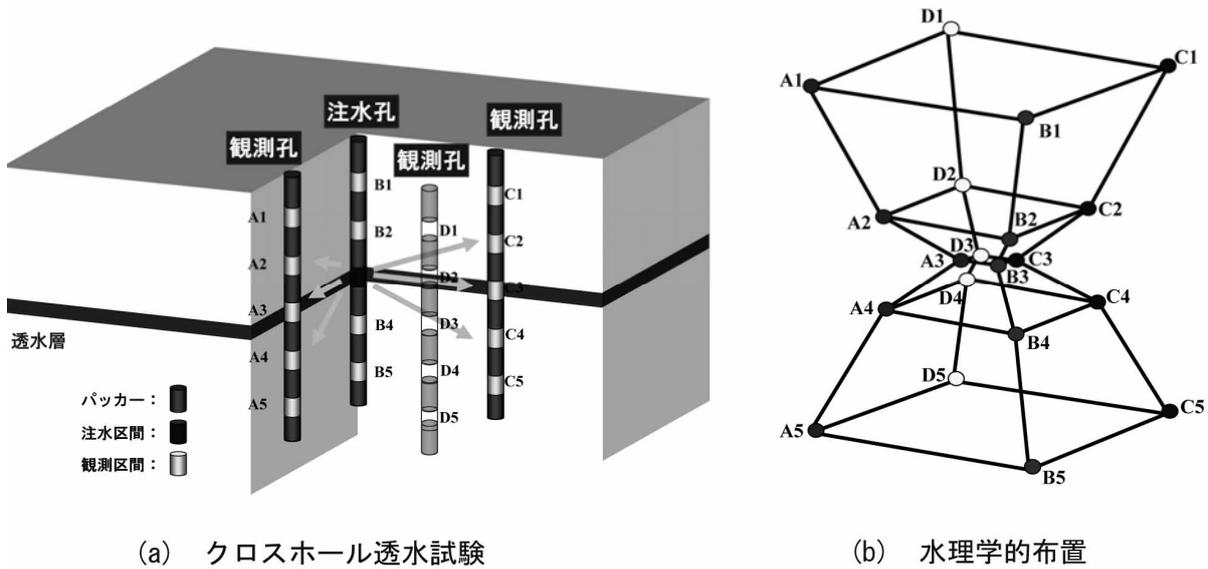
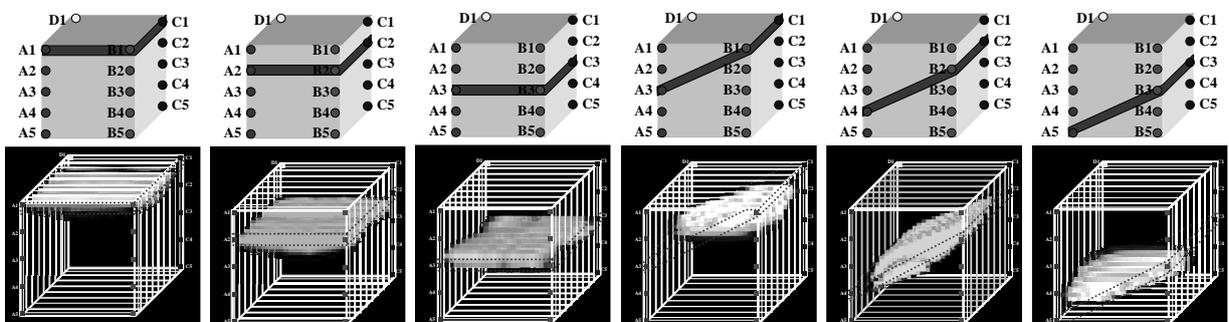


図1.1.71 3次元イメージング手法



(上段：モデル，下段：イメージング結果)
図1.1.72 数値実験による手法の妥当性の検証

1.1.3.5 水理地質構造を考慮したグラウト設計手法¹⁵⁾

合理的に確実かつ効率的なフラクチャーシーリングを行うためには、対象岩盤の水理地質構造に応じたグラウトの充填状況を把握することによって、グラウト孔配置を合理的に決定することが重要である。そこで本研究では、グラウチングシステムの合理化を目的として、対象岩盤におけるグラウト充填状況を予測・評価する手法を構築するとともに、それに基づきグラウト孔間隔を決定する方法を構築した。

(1) 岩盤内の水理地質構造のモデル化

グラウト注入をより効率的に実施するにあたっては、グラウトを注入する岩盤の水理地質構造を把握し、その水理地質構造に応じたグラウト注入方法を構築することが重要である。

ここで、グラウトによるフラクチャーシーリングの対象となる亀裂性岩盤における地下水は、亀裂を主な透水経路として選択的に流れることが知られている。このような水みちの幾何学的特性を定量的に表現するインデックスとして流れの次元がある。

グラウト注入におけるボーリング孔からの流体の流れを考える場合、ボーリング孔の周辺岩盤内に生じる典型的な流れの次元として、次の2つが挙げられる。

- ① 2次元流れ：岩盤内の亀裂の分布が比較的疎らな場合、透水経路の分岐・会合が生じにくいいため、ボーリングと交差する亀裂を主たる透水経路とする2次元状の流れが支配的になるもの。
- ② 3次元流れ：岩盤内に密に分布する網目状の亀裂が存在する場合には、透水経路が分岐・会合することで生じる3次元状の流れが支配的になるもの。

本研究では、この2次元流れおよび3次元流れを、それぞれ平行平板状放射流モデルおよび結合粒状体ネットワークモデルによってモデル化し、原位置においてグラウト改良効果を評価することで合理的なグラウト孔間隔を決定する方法を構築する。

(2) 平行平板状放射流モデルによる改良効果の評価と孔間隔の決定法

流れの次元が2次元流れで近似できる岩盤に対しては、平行平板状放射流モデルを適用する。まず、1.1.3.2で構築したグラウト充填過程モデルを用いて、注入パラメータおよび岩盤の亀裂性状から、隣接2孔間のグラウト充填厚さを算出し、それに基づいて、グラウト注入後の孔周辺の透水性分布を推定する。ここで、グラウト充填厚さとは、孔口がグラウトで充填された時点におけるグラウト堆積幅の孔口からの距離 d の関数とする。

まず、1つのグラウト注入孔によるグラウト充填厚さを求める。式(1.1.101)を参照すると、孔口からの距離 d の関数としてグラウト完了時の亀裂開口幅分布 $b(d)$ が求まる。よって、グラウト注入前の開口幅を b とすると、グラウト充填厚さ分布 $w(d)$ は次式で求められる。

$$w(d) = b - b(d) \quad (1.1.101)$$

次に隣接する2つのグラウト孔(孔A, 孔B)の間に連続する亀裂が存在するとし、この亀裂内部の開口量分布を推定する。まず、孔A, 孔Bのグラウト充填厚さ分布をそれぞれ $w_A(d)$, $w_B(d)$ とする。グラウト孔間の距離を d_{AB} とすると、亀裂内部の開口量分布 $b(x)$ は次式で与えられる。

$$b(x) = b - (w_A(x) + w_B(d_{AB} - x)) \quad (1.1.102)$$

但し、 x は、孔Aの位置を原点として孔Bの位置が d_{AB} となるような1次元の局所座標である。

この亀裂開口量から、流量の3乗則より透水係数を求め、それをルジオン値に変換し、隣接2孔間

の推定ルジオンマップを作成する。また、グラウト設計時に設定されるルジオン値の改良目標値まで改良された範囲を改良範囲とし、2孔間を結ぶ線に対し垂直方向の改良範囲が形成する幅を改良幅とする。

図1.1.73に改良目標値1Luの場合のルジオンマップの例を示す。なお、改良幅がグラウト設計時に設定される改良目標値以下となることを、グラウト充填状況の評価に当たっての改良目標とした。次に図1.1.74に示した方法に従い、改良目標を満たすような最大の孔間隔を求める。

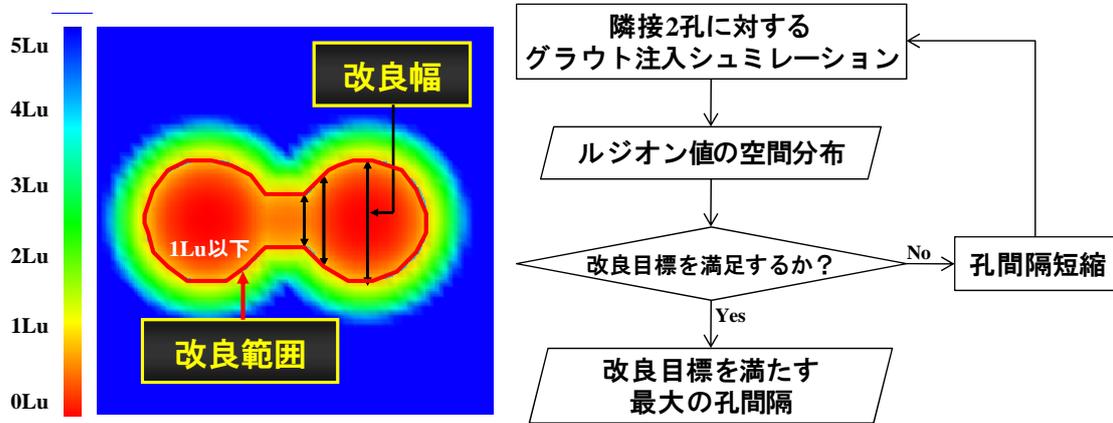
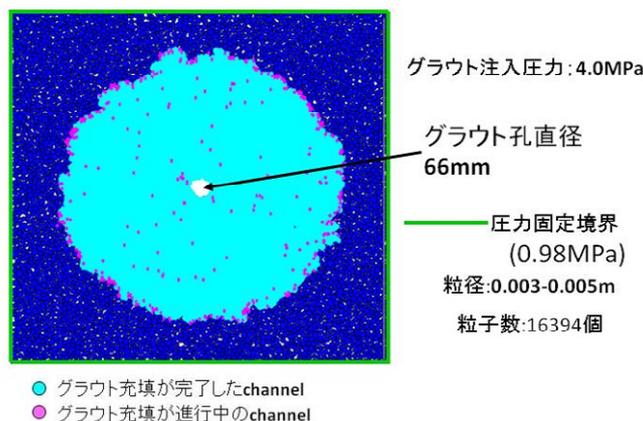


図1.1.73 推定ルジオンマップと改良範囲¹⁶⁾

図1.1.74 最適孔間隔の算出方法¹⁶⁾

(3) 結合粒状体ネットワークモデルによる改良効果の評価と孔間隔の決定法

グラウト材が密に分布する網目状亀裂などに沿って浸透する3次元状の流れの次元を有する岩盤に対しては、結合粒状体ネットワークモデルを適用する。このモデルを用いたグラウトの流動の解析には、著者らが提案しているDEM-CDN連成解析手法¹⁶⁾を用いる。この方法は、岩盤の力学的挙動および亀裂開口量変化のモデル化に際しては、粒状体DEMを適用し、グラウトの浸透流のモデル化に際しては、Channel-Domainによるネットワーク解析手法 (CDN) を適用する方法である。シミュレーションにおいては、各Channelでのグラウト充填過程が平行平板モデルと同様のメカニズムで生じると仮定して、口元の開口幅が0になるまで時間差分の計算を繰り返す。図1.1.75に解析結果の一例を示す。



(解析範囲 : 1.3m × 1.3m)

図1.1.75 解析結果の一例¹⁶⁾

孔間隔の決定にあたっては、まず、対象とする岩盤に対するグラウト注入のシミュレーションによって隣接する2孔間のグラウト充填状況を予測 (図1.1.74参照) した後に、2孔の中点においてルジ

オン試験のシミュレーションを行ってルジオン値を算出する。このルジオン値がグラウト設計時に設定する改良目標値を下回ることを改良目標として改良目標を満たすような最大の孔間隔を求める(図1.1.74参照)。

(4) 原位置岩盤への適用性の検討

上記の評価法の適用性を検討するために、水封式燃料地下備蓄基地の建設地点¹⁵⁾で実施されているグラウチングの施工データを用いて検討を行った。

研究サイトにおいて、まず先進ボーリングにおける調査結果からサイト全域における透水係数の空間分布を推定し、これを基に水理地質構造の領域区分を行なった。次に、区分した各領域に対して、水理特性と地質構造との関連性について考察することで水理地質構造に基づく特性化を行った。

地球統計手法により推定した水封トンネル掘削深度における水理地質構造を図1.1.76に示す。ここで、グラウト施工時において透水性の改良基準値となっている1.0Luを閾値として区分を行った結果、水封トンネル掘削深度においては、中央部に低透水性、その両側に高透水性を呈する水理地質構造となっていることがわかった。

高透水性を呈する各領域について、地質構造およびグラウト注入実績をふまえて、水理地質構造の特性化を行った。まず東側の高透水性領域については、図1.1.77に示す地質水平断面図より熱水変質を伴う断層の存在が確認された。この領域を断層影響領域と呼ぶ。次に、各領域におけるグラウト注入状況を比較すると、図1.1.78に示すように高透水性を呈する2つの領域のグラウト注入実績は概ね同様の傾向を示していた。また、西側の高透水性領域において、非常に多くのグラウト注入を必要としたが、グラウトの注入時間は極めて短く、1孔あたりの注入量が少ない箇所が認められた。このような特徴を有する領域を特異部と呼ぶ。今後のタンク掘削時での影響を考慮し、局所的な分布ではあるが今回この領域についても検討対象とした。

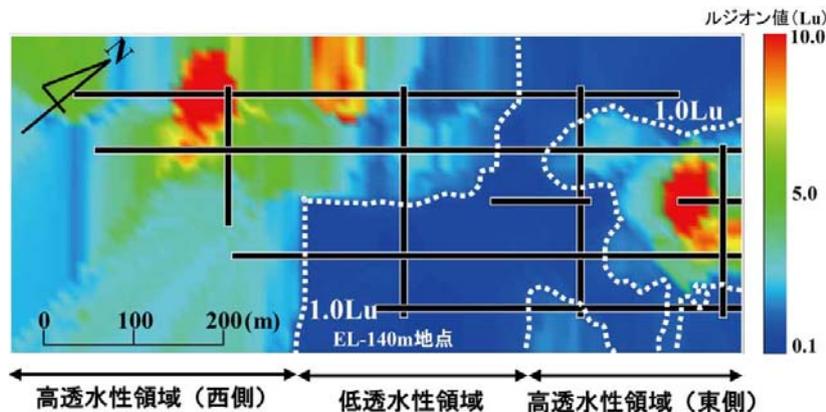


図1.1.76 研究対象地点の水理地質構造¹⁶⁾

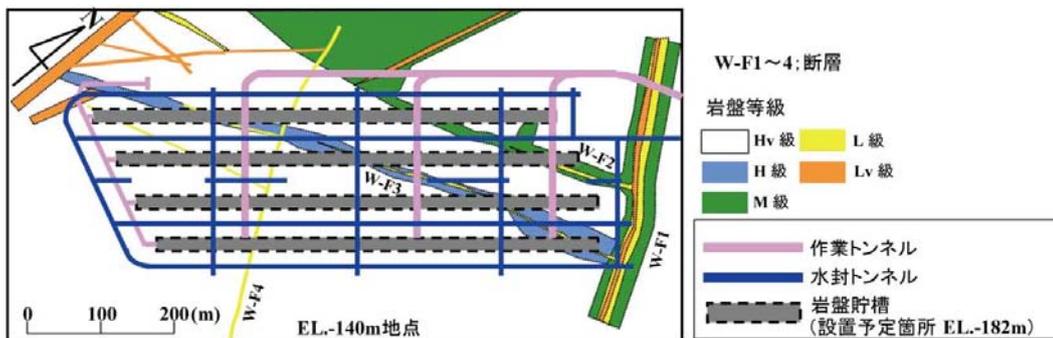


図1.1.77 水封トンネル掘削深度における地質水平断面図¹⁶⁾

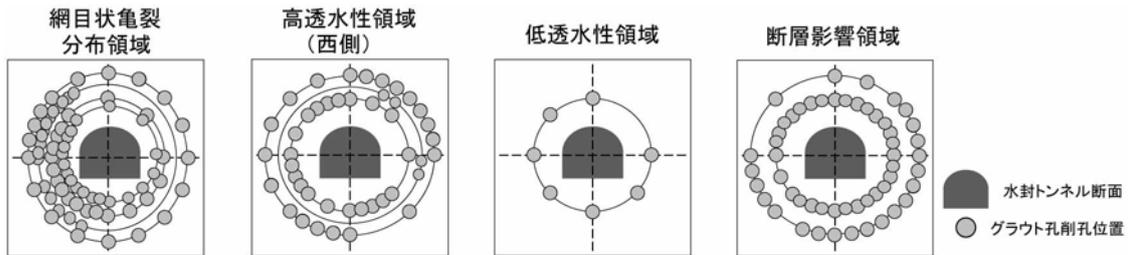


図1.1.78 各領域におけるグラウト注入実績の比較¹⁶⁾

次に、現場においてグラウト孔毎に得られる時間流量曲線から算出されたグラウト注入量と、平行平板状放射流モデルを用いて算出したグラウト注入量とを比較し、その乖離に基づいてグラウタビリティを評価し、モデルの選定を行う。

その結果、図1.1.79に示すように低透水領域、高透水領域、断層影響領域においては両者の一致が見られたものの、特異部については実測値に対して解析値が大きくなるという傾向が見られた。

そこで本研究では、低透水領域、高透水領域、断層影響領域については平行平板状放射流モデルを用いる。また特異部については、コア観察よりフェノール反応によって紫色に変色したグラウト材が網目状に発達したマイクロシーティングに沿って充填されていることが分かった。そこで、ネットワーク状の浸透現象を推定するため、結合粒状体ネットワークモデルを用いる。

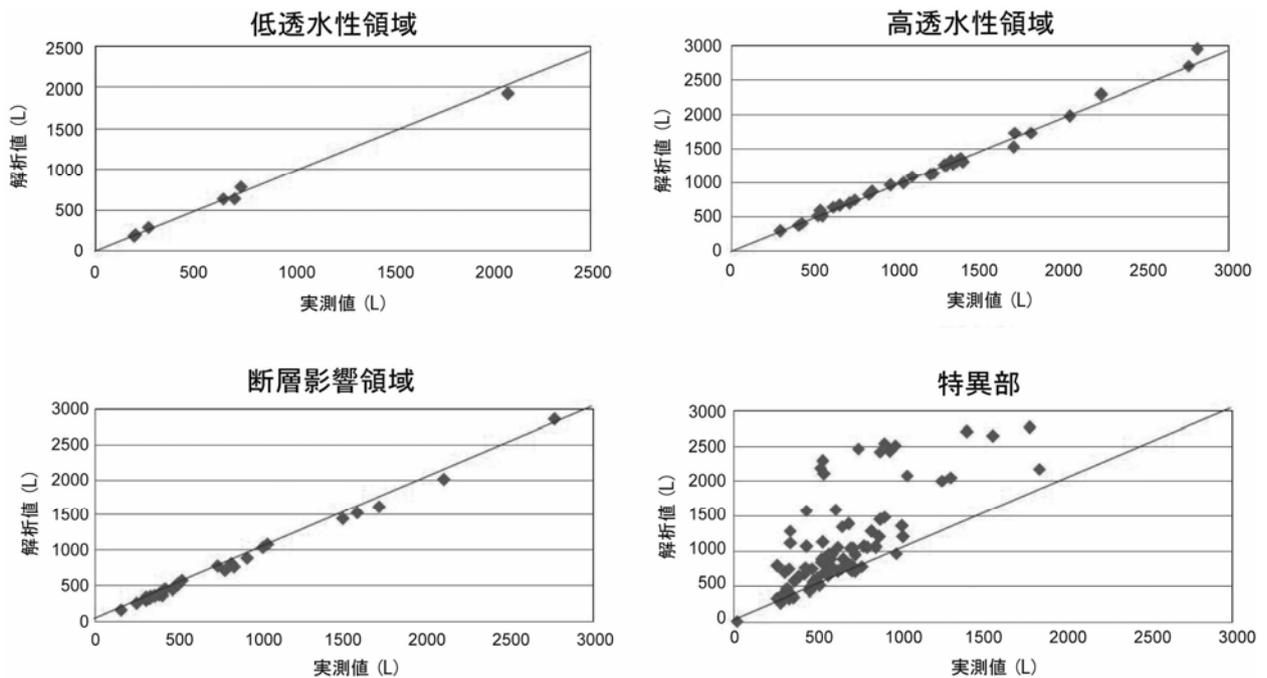
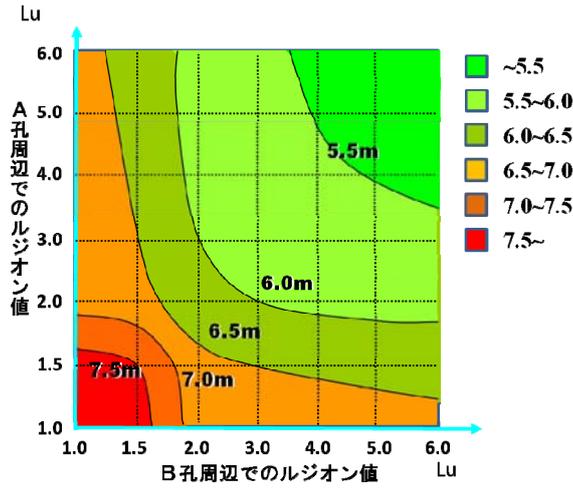


図1.1.79 各領域における注入量の実測値と解析値との比較¹⁶⁾

次に、前章で構築した孔間隔の評価手法を用いて、現場の各隣接1次孔間の透水性を所要の値まで改良するような最大の孔間隔を算出する。この孔間隔と実際の孔間隔を比較することで、各隣接2孔のグラウト注入後の2孔間の透水性の改良状況の評価する。

ここで、研究サイトにおける透水性の改良目標値は1Lu、改良幅の改良目標値は6mと設定されている。この条件下でグラウト孔の透水性を変化させ、それぞれについて改良目標を満たす最大の孔間隔を求めた。その結果を図1.1.80に示す。



(平行平板状放射流モデルより算出)

図1.1.80 改良目標を満たす最大の孔間隔¹⁶⁾

先に構築した評価手法を、対象領域の代表的な切羽でのグラウト実績に適用し、算出される孔間隔と現場における実際の孔間隔と比較することで、透水性の改良状況を評価し、本手法の適用性の検討を行った。その結果を図1.1.81に示す。現場において透水性が目標値まで改良されたケースに関しては、解析結果を見ても最適孔間隔が実際の孔間隔より広がっており、十分な改良がなされていると判断できる。従って、本手法を用いて正しくグラウトの充填状況が評価できているものと考えられる。

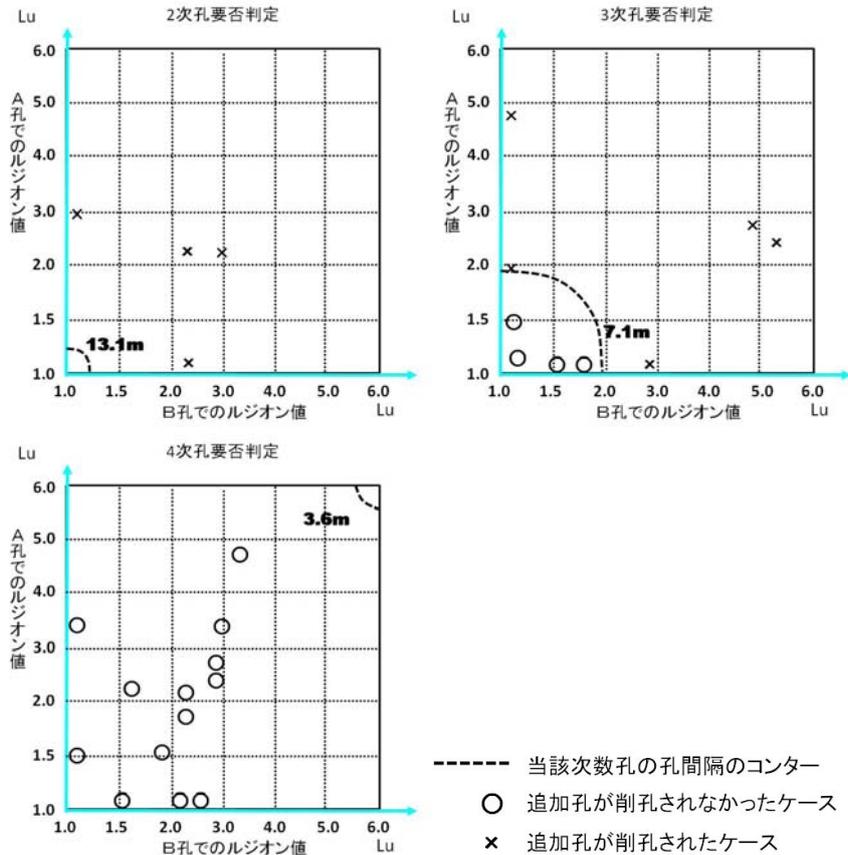


図1.1.81 シミュレーション結果と現場実績結果の比較¹⁶⁾

本研究サイトの高透水領域・低透水領域および断層影響領域の9つの切羽における186回のグラウト施工に対して同様の検討を行った。解析結果から透水性が改良されたと判断された93箇所については、うち91箇所が現場の透水試験結果から、実際に透水性が改良されたと判断された。また解析結果から透水性が改良されなかったと判断された93箇所については、そのすべてが現場の透水試験結果から、実際に透水性が改良されなかったと判断された。

次に特異部についても、透水性の改良目標値の条件下で、改良目標を満たす最大の孔間隔を求めた。その結果を図1.1.82に示す。次に各隣接2孔間の透水性の改良状況の評価を行った結果、解析結果から透水性が改良されたと判断された170箇所については、うち169箇所が現場の透水試験結果から、実際に透水性が改良されたと判断された。また、解析結果から透水性が改良されなかったと判断された141箇所については、うち136箇所が現場の透水試験結果から、実際に透水性が改良されなかったと判断された。以上から、本手法の適用性が検証されたとと言える。

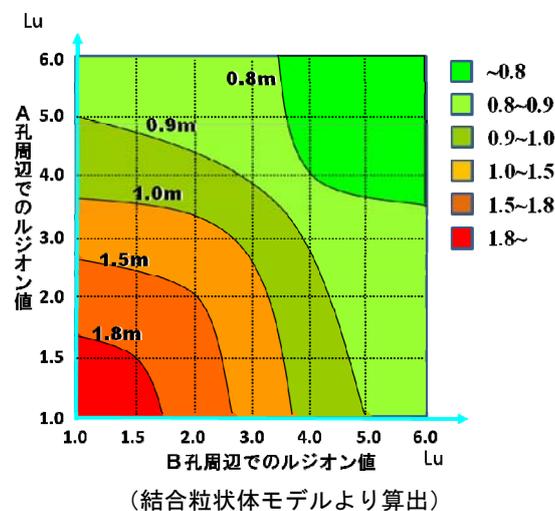


図1.1.82 改良目標を満たす最大の孔間隔¹⁶⁾

(5) グラウト充填状況の評価に基づくグラウチングの合理化

ここでは、これまでに構築したグラウト充填状況の評価手法をベースとするグラウチングシステムについて述べる。

現在グラウチングに際して用いられている中央内挿法は、次数ごとの孔数および孔間隔が一定に定められており、透水性の改良が困難な箇所においては極めて高次のグラウチングを要する。このような現状に対し、岩盤性状に応じた1次孔間隔の決定、またグラウト充填状況に応じた追加孔間隔の決定を行うというグラウチングシステムを提案する（図1.1.83）。

まず対象岩盤を水理地質特性に応じて領域区分し、領域ごとにグラウト充填過程のモデル化を行う。前節までで構築した、モデルを用いたグラウト充填状況の評価手法に基づき、グラウト孔削孔前に得られるルジオン値、および亀裂密度のから1次孔間隔を決定する。次にグラウト孔削孔時に、1次孔ルジオン試験結果から各隣接孔間に削孔する追加孔の孔間隔を算出する。ここで、算出された孔間隔が1次孔間隔以下である2孔については追加孔削孔、1次孔間隔より広い場合は注入終了とする。以降この手順を繰り返す。

このシステムを適用することで、透水性の改良が困難な岩盤に対して岩盤の透水性に応じたグラウト孔の配置ができ、グラウト次数が低減される可能性があると考えられる。

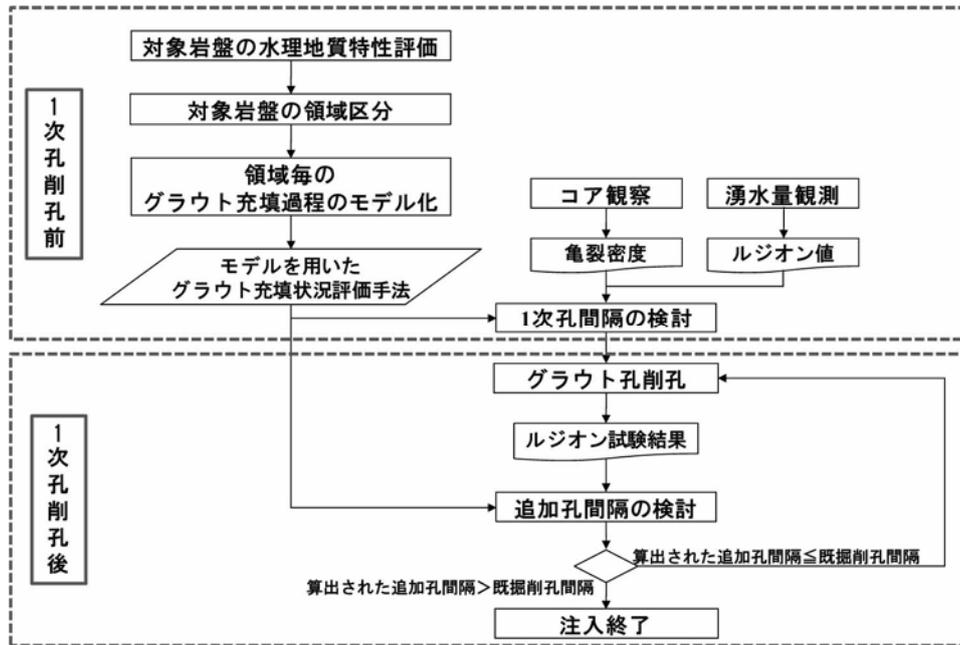


図1.1.83 グラウト充填状況の評価に基づくグラウチングシステム¹⁶⁾

本研究では、対象岩盤においてグラウト充填状況の評価する手法を構築し、それに基づきグラウチングを行うことで、地下水制御システムの合理化を行うことを目的とし、水封式燃料地下備蓄基地の建設地点を対象として検討を行った。本研究で得られた成果は以下の通りである。

①数値解析モデルを用いたグラウト充填状況の評価手法の構築

各領域の水理地質構造を表現したグラウト充填過程モデル(平行平板状放射流モデルおよび結合粒状体ネットワークモデル)を用いて、グラウト充填状況を定量的に評価し、2孔間の最適孔間隔を算出する手法を構築した。

②グラウト充填状況評価手法の原位置岩盤に対する実用性の検証

研究サイトにおいて、水理地質構造に応じた対象岩盤のモデル化を行うために、サイト全域の岩盤の水理地質構造評価に基づく領域区分を行なった。次に各領域について、評価結果に応じたグラウト充填過程モデルを用いて、構築した手法の実用性の検証を行った。手法を各対象領域で行われた現場注入実績に適用した結果、本手法を用いて透水性改良状況を的確に評価することができた。

③充填状況の評価によるグラウト注入の合理化に関する検討

構築した手法を基に中央内挿法でのグラウト施工の非効率性を指摘した。さらに、岩盤性状に応じてグラウト孔配置を検討することで、グラウチングシステムの合理化を行った。

以上より、本研究で構築したグラウト充填状況評価手法を用いることで、岩盤の水理地質構造に応じた効率的なグラウト施工が可能となると考えられ、地下構造物の安全かつ経済的な施工に貢献するものと考えられる。

1.1.3.6 まとめ

本研究においては、低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の開発を目的として検討を行った。研究成果は以下のとおりである。

I) 動的注入工法におけるグラウト材の流動メカニズムの解明

筆者らが開発した動的注入工法におけるグラウト材の動的注入メカニズムを明らかにするために、まず人工亀裂模型を用いた室内実験を行い、注入パラメータ（注入圧力の振幅・周波数、注入材料の粘性）が流体の見かけ粘性の低下に与える影響を明らかにした。

II) グラウト材の充填過程モデルの構築

注入材料を、平行平板内を流れる非圧縮性粘性流体と仮定して、亀裂内部でのグラウト材の流動および充填過程を表現する数値解析モデルを理論的に構築した。このモデルを用いて原位置岩盤におけるグラウチングのシミュレーションを行ったところ、実測の時間-注入量曲線を高精度で予測することができ、構築したグラウト充填過程モデルの原位置岩盤への適用性が示された。

III) 粒状体DEMを用いたグラウト材の充填機構の検討

動的注入工法におけるグラウト充填機構をミクロな視点から解明することを目的として、粒状体DEMによる動的注入のシミュレーションを行った。その結果、動的注入における注入時間の延長は、主として局所的な目詰まりの発生の抑制および解消に起因することが明らかになった。また、注入パラメータおよび亀裂幅とグラウト材の流動・充填過程との関連性についても明らかになった。

IV) 最適注入仕様の決定方法

構築したグラウト充填過程モデルを用いて、対象岩盤に応じた最適注入仕様を決定する方法を構築した。この方法は、セメント総注入量、注入効率、および改良範囲を評価基準としてパラメータスタディを行うことにより、注入パラメータを決定するものである。

V) 岩盤の水理地質モデルの構築

対象岩盤に応じたフラクチャーシーリングを行うためのベースとなる高精度な3次元水理地質モデルの構築を目的とし、地球統計学シミュレーションを用いたモデル化手法を構築した。この方法は、地球統計学シミュレーションの一つであるSIS (Sequential Indicator Simulation) を用いて作成した複数の水理地質モデルに対して3次元非定常浸透流解析を行い、一定の検証規準を満足するモデルのうち、地下水の実挙動を最も精度良く再現できるモデルを対象領域の水理地質モデルとするものである。本手法を原位置岩盤に適用し、従来から用いられている均質モデルやOrdinary Krigingによるモデルによる解析結果と比較した結果、実測の間隙水圧の経時変化を高精度に予測できることを確認した。

VI) クロスホール透水試験による岩盤の水理地質構造の評価手法の構築

フラクチャーシーリングを確実に実施するための水みちの検知を目的とし、クロスホール透水試験結果から、不均質な岩盤の水理学的地質モデルを合理的に構築する方法

(MDS-IDW イメージング手法)を新たに提案し、その適用性を数値実験および現場実験によって検証した。

V) 水理地質構造を考慮したグラウト設計手法の構築

グラウチングシステムの合理化を目的として、対象岩盤におけるグラウト充填状況を予測・評価する手法を構築し、原位置岩盤に適用したところ、本手法によって透水性の改良状況を的確に評価することができた。また、この手法を用いて注入孔間隔を合理的に決定する方法を構築した。

1.1.3.7 参考文献

- 1) 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次取りまとめ—」, 総合レポート, JNC TN1400 99-020.
- 2) R. Pusch, L. Börgesson, A. Fredrikson, I. Markström, M. Erlström, G. Ramqvist, M. Gray, B. Coons (1988) : Rock Sealing - Interim Report on the Rock Sealing Project-, Stripa Project, Technical Report 88-11, SKB, Stockholm.
- 3) K. Aoki, Y. Mito, Y. Kurokawa, T. Yamamoto, K. Date, S. Wakita (2003) : Development of dynamic grouting technique for the improvement of low-permeable rock masses, Environmental Rock Engineering, The First Kyoto Int. Symposium on Underground Environment, pp. 341-348.
- 4) 脇田伸吾・伊達健介・山本拓治・黒川義民・水戸義忠・青木謙治 (2003) : 低透水性岩盤における動的注入工法の基礎的検討, 第32回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.197-202.
- 5) K. Aoki, Y. Mito, T. Yamamoto, K. Date, S. Wakita (2003) : Evaluation of dynamic grouting effect for low-permeable rock, 10th Congress of the Int. Society for Rock Mechanics, pp.39-43.
- 6) K. Date, S. Wakita, T. Yamamoto, Y. Nakajima, Y. Hoshino, K. Aoki, Y. Mito (2003) : Development of dynamic grouting technique for the ground improvement, Claming the Underground Space, pp.929-935.
- 7) 脇田伸吾・伊達健介・山本拓治・中村百合子・水戸義忠・青木謙治 (2004) : 動的注入に関する室内・現場実験とグラウト充填過程モデルを用いた結果の解釈, 第33回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集.
- 8) S. Wakita, K. Date, T. Yamamoto, Y. Nakamura, Y. Mito, K. Aoki (2004) : Development of dynamic grouting technique for the low-permeable rock mass, 3rd ARMS, pp.437-443.
- 9) K. Aoki, Y. Mito, Y. Nakamura, T. Yamamoto, K. Date, S. Wakita (2005) : Dynamic grouting technique for the improvement of low- permeable rock masses, Underground space: Economy & Environment.
- 10) S. Wakita, T. Yamamoto, K. Date, K. Aoki, Y. Mito, Y. Nakamura (2005) : Development of dynamic grouting method effective for construction of underground storage cavern, Int. Symposium on Design, Construction and Operation of Long Tunnels, pp.225-232.
- 11) 青木謙治・水戸義忠・中村百合子・井上祐輔 (2006) : 低透水性岩盤に対する動的注入広報の最適注入条件の決定方法について, 第35回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.243-248.

- 12) 青木謙治・水戸義忠・張傳聖・藤原崇之・清水靖 (2007) : 粒状体個別要素法を用いた動的注入におけるグラウト充填機構の検討, 第36回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.299-304.
- 13) 青木謙治・水戸義忠・張傳聖・宇野晴彦・前島俊雄 (2007) : 大規模LPG岩盤タンクの3次元水理地質モデルの構築に関する研究, 第36回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.1-4.
- 14) T. Maejima, H. Uno, Y. Mito, C. S. Chang, K. Aoki (2007) : Three-dimensional hydrogeological modelling around the large rock cavern for the LPG storage project, 11th Congress of the Int., Society for Rock Mechanics, pp.1273-1277.
- 15) 青木謙治・水戸義忠・張傳聖・前田侑里・宇野晴彦・前島俊雄 (2008) : 地球統計学シミュレーションを用いた岩盤の3次元水理地質モデルの構築, 第12回岩の力学国内シンポジウム.
- 16) K. Aoki, Y. Mito, T. Mori (2004) : New imaging method for hydro-geological structure in rock masses by cross-hole hydraulic test, 3rd ARMS, pp.229-234.
- 17) 青木謙治・水戸義忠・山本真哉 (2004) : クロスホール透水試験による岩盤の水理地質構造の新しい評価方法の提案, 第33回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集.
- 18) 青木謙治・水戸義忠・山本拓治・大場公德・幸岡智也 (2005) : クロスホール透水試験による岩盤の水理地質構造の新しい評価方法とその検証, 第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集.
- 19) 青木謙治・水戸義忠・張傳聖・佐藤健一 (2006) : 岩盤の水理特性分布の評価に対する多次元尺度構成法の適用, 第35回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.249-254.
- 20) K. Aoki, Y. Mito (2006) : Hydrogeological modelling of rock mass by MDS-IDW technique, Multiphysics Coupling and Long Term Behaviour in Rock Mechanics, pp.677-682.
- 21) 青木謙治・水戸義忠・張傳聖・堀部修平・Mohd Ashraf (2008) : 亀裂性岩盤のグラウト充填効果に関する定量的予測手法について, 第12回岩の力学国内シンポジウム.
- 22) Borgesson, L. (1993) : Rheological properties of cement and bentonite grouts with special reference to the use of dy-namic injection, International Symposium on Grouting in rock and concrete, Salzburg, Austria.
- 23) Eva Hakamia and Erik Larssonb (1996) : Aperture measurements and flow experiments on a single natural fracture, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, Vol.33, pp.395-404.
- 24) J. P. Chiles (1999) : Geostatistics, Modeling Spatial Uncertainty, Wiley Inter-Science.
- 25) D. Lloyd and M. Atkinson (1999) : Designing opyimal sampling configurations with ordinary and indicator kriging, Geocomputation 99.

1.1.4 まとめ

本研究においては、深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究のうち、処分技術の観点から処分施設的设计上の重要な研究課題である①掘削影響領域 (EDZ) の評価技術、および②低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の2課題について体系的な研究開発を実施

してきた。主要な成果は次のような要素技術として確立されたと言える（図1.1.84）。

- ①微小破壊音(AE)計測による掘削影響領域(EDZ)の評価技術
 - (a) AE計測システム
 - (b) 粒状体DEM解析手法
 - (c) MS(Microseismic monitoring)モニタリング手法
- ②低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術
 - (d) 水理地質モデルの構築手法
 - (e) 水理地質構造のイメージング手法
 - (f) 動的注入工法

これらのうち、(a) AE計測システムおよび(b) 粒状体DEM解析手法は、坑道周辺岩盤において水理学的な影響を検討する上で重要なEDZの発生および進展の評価を行うための技術である。また、(c) MS(Microseismic monitoring)モニタリング手法および(e) 水理地質構造のイメージング手法は、EDZのうち、水理学的EDZの発生および進展を検知するための技術であり、(d) 水理地質モデルの構築手法とともに用いることで、坑道周辺岩盤における水理学的EDZおよび既存の卓越透水経路の把握に有用である。さらに(f)動的注入工法は、処分施設が対象とする低透水性岩盤内の微小亀裂を確実にシーリングするための重要な技術である。

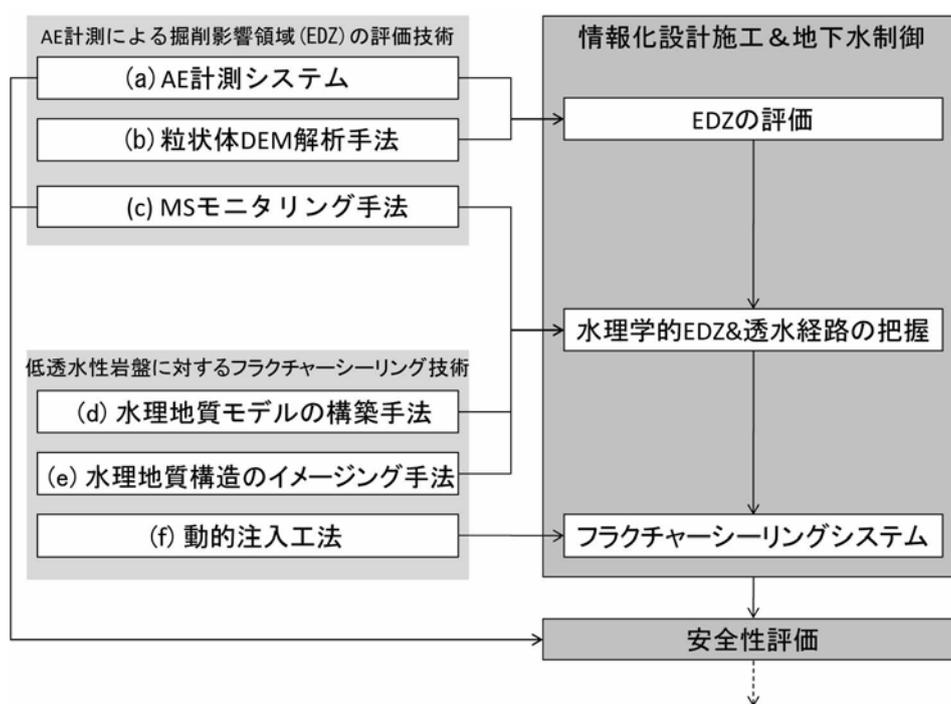


図1.1.84 本研究で開発した要素技術の位置づけ

これらの(a)～(f)の技術は、大深度高地圧下の低透水性岩盤内に建設される処分施設の調査設計および建設において、さらには操業、閉鎖後の安全評価やモニタリングにわたる各段階で必須の工学技術体系の一部を構成するものである。

(京都大学 青木謙治)

1.2 断層活動の影響と断層周辺発達割れ目の特徴（阿寺断層を事例にした研究）

1.2.1 経緯

本研究では、旧核燃料サイクル開発機構（現；日本原子力研究開発機構）が国に提出した第2次取りまとめ¹⁾の内容を地質環境，処分技術，安全評価の各観点で評価した結果抽出された深部地質環境の調査・解析技術の実用化に向けた課題を対象とし，平成13年度から以下に示すような体系的な研究開発を実施してきた。

各年度における研究項目は以下の通りである。

（平成13年度）

- サイト選定に関する調査・解析技術の開発
- サイト特性調査に関する調査・解析技術の開発
- ナチュラルアナログ関連の調査・解析技術の開発

（平成14年度）

- 活断層による影響と新たな割れ目形成に関する調査・解析技術の開発の必要性
- 調査結果と予察的な考察

（平成15年度）

- 地下坑道・空間（地下研究所あるいは処分場両方）において遭遇すると考えられる断層周辺の割れ目特性と長期的な挙動予測方法の検討
- 坑道周辺（ニアフィールド環境）における物質の移動経路の二次的物質（鉄酸化物，炭酸塩など）による自己シーリングプロセスと物質移動毒性への長期的影響の検討

（平成16年度）

- 活断層を含む断層活動に伴う割れ目形成に関する情報収集と現場の調査手法開発に関する研究
- 割れ目シーリングのナチュラルアナログに関する研究

（平成17年度）

- 活断層を含む断層活動に伴う割れ目形成に関する情報収集と現場の調査手法開発に関する研究
- 割れ目シーリングのナチュラルアナログに関する研究

（平成18年度）

- 活断層を含む断層活動に伴う割れ目形成に関する情報収集と現場の調査手法開発に関する研究
- 割れ目シーリングのナチュラルアナログに関する研究

（平成19年度）

- 断層活動に伴う割れ目形成および割れ目シーリングに関する研究

（平成19年度）

- 断層活動に伴う割れ目形成および割れ目シーリングに関する研究

（平成20年度）

- 阿寺断層周辺に発達する割れ目形態とその特徴

本報告書は，以上に示した研究開発の成果を断層活動の影響や割れ目の長期挙動や自己シーリングメカニズムに関する調査・研究成果として総括したものである。

1.2.2 はじめに

断層活動の影響や断層周辺の割れ目解析については、断層面からの垂直距離に応じた密度変化に関する事例やフラクタル特性^{2),3)}、割れ目分布と断層の伸長方向との関係を論じた「プロセスゾーン」に関する報告などがある^{4),5)}。

また最近では、断層破碎帯に発達する割れ目と地下水の透水性との相関に注目した研究例も報告されつつある⁶⁾。地下地質環境中での断層および断層運動で形成された断層近傍の割れ目帯（「ダメージゾーン」）は、水理地質構造的にも重要な要素であり、近年の石油や液化天然ガス（LPG）の地下備蓄プロジェクト⁷⁾や放射性廃棄物の地層処分⁸⁾などといった大規模な地下環境利用においては、避けることのできない重要な地質構造要素である。とくに断層破碎帯や割れ目帯は力学的にも脆弱であり、また選択的な水みちとなる可能性があるなど、地下空間の設計や空洞維持の安全性あるいは水理・物質移動などの観点から適切な対応が求められる。したがって、LPG地下備蓄あるいは地層処分のような長期的な地下空間利用においては、断層運動に伴う破壊現象がもたらす力学的影響だけでなく、断層運動で形成された割れ目の連結や広がりによる地下水流動への影響、また流動状態が変化することによる地下水の地球化学的状態の変化、さらにはそれらの相互作用による物質移動の「場」や遅延現象への影響など、長期的な安全評価の観点に基づいた考え方を構築することが必要である（図1.2.1）。

これらの背景のもと、筆者らは中部地域に分布する阿寺断層（活断層）を事例に、断層周辺での割れ目の発達過程や変質などの「ダメージゾーン」に関しての調査研究を進めている。本報告は、地下水流動や地下水との反応を促進すると考えられる断層近傍での割れ目の性状・分布とそれから判断される「ダメージゾーン」の性状と特徴について述べるとともに、断層活動

がもたらす周辺割れ目の充填鉱物形成（シーリング）をも含めた長期的挙動と周辺岩盤（地質環境）への影響について、これまでの調査研究において得られた成果をまとめたものである。

1.2.3 調査地域および阿寺断層概要

本研究で対象とした阿寺断層は、中部地方における左横ずれセンスを有する活断層の代表的なものであり、総変位量と長さは中部地方で最大である（図1.2.2）。その断層は、岐阜県北東部の岐阜県中津川市付知町にかけて北西方向に発達し、総延長が約70kmにおよぶ⁹⁾。重力調査の結果

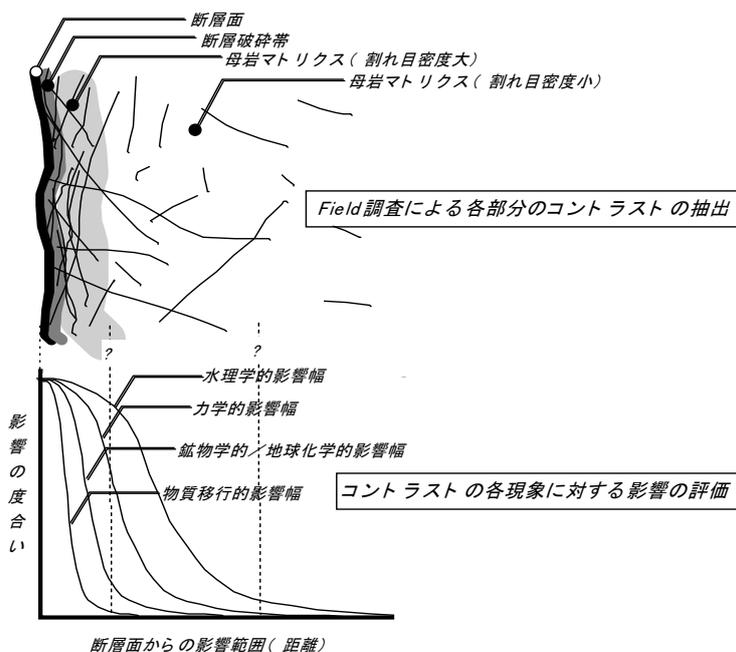


図1.2.1 断層影響に関する基本的考え方

からは、阿寺断層の中央部に沿ってブーゲー異常の急遷部が認められ、断層を挟んで地殻構造が異なることが知られている¹⁰⁾。

阿寺断層の中央部付近では、濃飛流紋岩類を構成する阿寺層に6~7kmの左横ずれが認められる。また南東端でも、苗木-上松花崗閃緑岩が2~3kmの左横ずれを示すオフセット構造が認められる^{11), 12)}。これらの左横ずれに伴って、断層の中央部付近を流れる付知川と加子母川の河川地形が、7kmほど左横ずれに伴って屈曲していることも確認されている。また同様の地形が、北西部の飛騨川と南東部の木曾川沿いの河川地形においても認められる¹³⁾。

阿寺断層の走向は、リニアメント解析および現地調査から北部は北北西(約N20°W)で、北部の岐阜県下呂市付近で南東に方向を変える。断層の傾斜は、全体的にはほぼ鉛直であるが、露頭では低角な部分が一部確認されている^{9), 14)}。断層ガウジを伴う破碎帯の幅は、地域により異なるもののこれまでの地表調査から、数十m¹⁵⁾~約200m^{11), 12)}と見積もられている。

阿寺断層の活動史については、基盤花崗岩の破碎状況や変質状態に基づいて、苗木-上松花崗岩の分布域では、岩体の固結直後(古第三紀初期頃)から、現在の阿寺断層の活動に寄与する破碎構造がすでに形成されていたものと考えられている¹²⁾。これに関しては、断層破碎帯内からカタクレサイトの報告があることや¹⁶⁾、断層ガウジを構成する細粒物質(粘土鉱物)のK-Ar年代として55~39Maが得られていることから裏付けられている¹⁷⁾。また第四紀後半に複数回の断層活動の可能性が指摘されており¹⁸⁾、基本的に阿寺断層は長期にわたって断続的に活動してきたことが推定される。トレンチ調査からは、最新活動時期は1586年の天正地震に相当する活動であることが報告されている。しかし、その形成履歴や時期等については未だ不明な点が多い。

また調査地域内の阿寺断層系に沿って分布する濃飛流紋岩類は、白亜紀後期に形成された厚さ数千m以上に及ぶ岩体であり¹⁹⁾、調査地域内では長石や石英の結晶を伴う結晶質岩として分布する。この岩体に、後濃飛花崗岩類として伊奈川花崗岩と苗木-上松花崗岩が貫入あるいは断層関係で分布する。苗木-上松花崗岩は、白亜紀後期²⁰⁾~古第三紀に貫入した浅所貫入型と考えられる中粒~粗粒の黒雲母花崗岩で、山陽帯とされる^{21), 22)}。本調査地域内においては、これらの両岩体は結晶質であり、複雑な岩相変化はほとんど認められない。これらの結晶質岩体において、長期にわたる阿寺断層の活動に伴って、その周辺岩盤にどのような割れ目形成や地質環境への影響が生じたのか、つまり断層周辺の「ダメージゾーン」の範囲や特徴を把握するために、岐阜県中津川

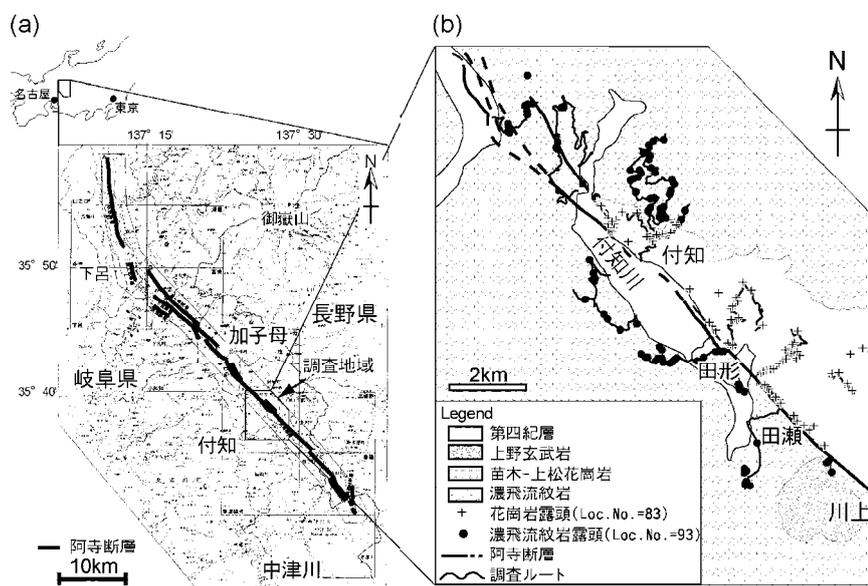


図1.2.2 阿寺断層分布図・地質図・調査露頭位置図

市坂下～加子母地域に分布する濃飛流紋岩～花崗岩分布地域での調査を行ってきた（図1.2.2）。この地域の阿寺断層は、大きくは雁行状に配列する数キロずつ離れた3本の断層から構成される²³⁾。阿寺断層による運動の影響調査においては、露頭状況からこれらの雁行配列をなす断層の影響は少ないと判断し、①割れ目形態・分布密度調査、②岩石組織の微視的変形・破壊状態観察、③割れ目充填鉱物分析を行った。以下にこれらの調査内容について述べる。

1.2.4 実施内容

<割れ目調査実施内容>

これらの地域、岩体を対象に実施した割れ目調査は、次の通りである。

- 断層から直交方向における空間的な割れ目分布密度、形態、走行傾斜の測定
- 数十～数百平方 m 以上の岩盤露頭での割れ目詳細調査（割れ目等の地質情報を取りまとめた‘露頭カルテ’の作成）と割れ目解析
- 断層岩類の試料と母岩の試料を用いた XRF バルク分析による岩石の主要元素測定
- コアリングによる岩石マトリクス中微小割れ目解析

断層運動による影響は、新たな割れ目の形成だけでなく、割れ目の分布、密度、形態そしてその後の地下水などとの二次的な反応によって形成される割れ目充填物などによっても示されるものと考えられる。野外調査では、これらの情報に注目した調査を進めている。また野外での割れ目情報をできるだけ一般化し、客観的に解析するためには、均質化した情報として取りまとめることが重要である。そのために、割れ目に関する各種情報を「露頭／割れ目調査カルテ」として取りまとめている。

以下に、①割れ目形態（構造、分布密度および走向傾斜）調査、②岩石組織の微視的変形・破壊状態観察、③割れ目充填鉱物分析の方法について述べる。

1.2.4.1 断層周辺岩盤の割れ目形態（構造、分布密度および走向傾斜）調査

本研究では、断層運動に伴って形成された割れ目の抽出が可能かどうかを検討するために、走向や連続性、形態的特徴、また後述する割れ目充填鉱物などの鉱物学的特徴を把握するための詳細な割れ目マッピングを行った。これらの調査は、断層からの距離に応じて全割れ目の密度分布がどのように変化するかを示すことで、断層運動に伴う周辺岩盤中の範囲、つまり「ダメージゾーン」を検討することを考え出したものである。また、断層からの距離と割れ目の長さごとの密度分布との相関については、断層からの距離でどのような長さを有する割れ目の頻度が、どう変化するかを示すことによって、断層運動によって形成される後生的な割れ目形態の特徴を示すことを目的に実施したものである。

調査地域内の露頭は、尾根部ほど地表風化が進行し、割れ目調査が困難な場合が多い。しかし、谷部においては比較的新鮮な岩盤が露出していることから、それらのほとんどの露頭で最低数m×数mの範囲で、以下に述べるグリッドによる割れ目密度調査を行うことが可能である。

現地での割れ目マッピングでは、1m²のグリッド枠を用いて、グリッドごとに写真と方眼紙へのスケッチを行った。割れ目に関しては、露頭において目視できる約30cm以上の連続性（長さ）を有する割れ目をすべて記載した。連続性が約30cm以下の割れ目は、ほとんどが岩石表面の被覆物や風化によって不明瞭であることが多く、その本数や連続性の検討には不適切と判断される。割れ目密度に関しては、作成したスケッチから露頭の表面積（m²）を算出し、露頭で認められる

約30cm以上の連続性（長さ）を持つ割れ目の総数（N）で除した値とした。また割れ目の長さに関しても、最低10×10m四方の広さを持つ露頭のデータをもとに、長さごとの割れ目密度と断層からの距離との相関を調べるための解析を行った。

正確な割れ目密度を計測するためには、遭遇率を考慮し、本来十分な空間を有する露頭やボーリングコアを用いた三次元的な計測を行うことが必要である。しかし、野外における露頭調査においては、理想的な統一された空間における調査を行うことは困難なことから、今回はさまざまなスケールと方向（断面）で計測される割れ目密度と、断層からの距離との相関について検討し、空間的な変化の傾向性を明らかにすることに重点を置いた。したがって、露頭面積が1m²を下回る場合でも、グリッド内の約30cm以上の割れ目を計測、スケッチし、観察できる割れ目の本数や連続性（長さ）、割れ目の間隔等から参考値として露頭ごとの割れ目密度の推定を行った（図1.2.3）。

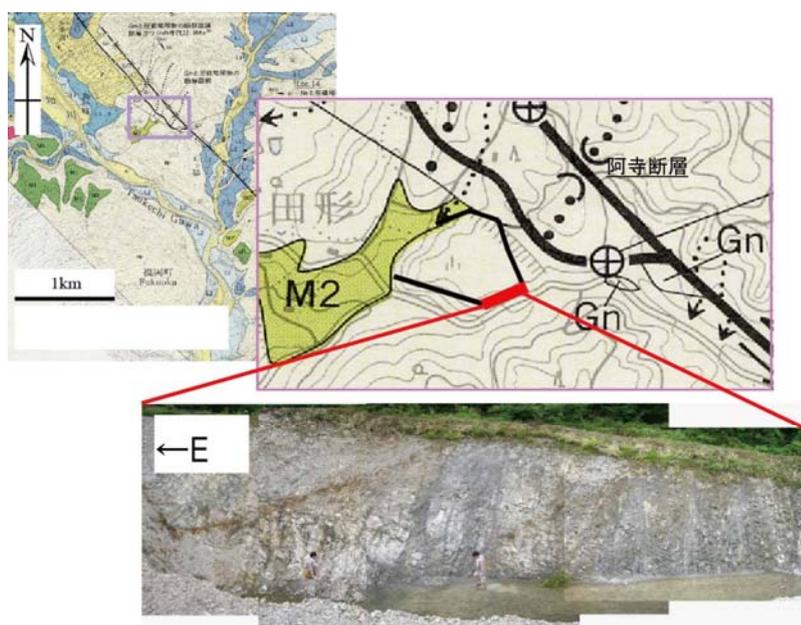


図1.2.3 阿寺断層帯内の調査露頭全景

本研究での調査目的は、阿寺断層の運動に伴って形成される断層破砕帯などの構造を詳細に調査することによって、どのようなプロセスで阿寺断層が形成されてきたのかを示すことである。そして調査研究の最終ゴールは、断層および周辺割れ目の変質や充填鉱物の種類などによって、断層運動、形成に関するどういった情報が取得できるのか、その調査手法を確立することにある。また、断層運動によって岩体中に形成される割れ目の形態調査を行うことによって、断層周辺の岩盤中に形成される割れ目形態やシーリング特性についての一般的な傾向性が存在するものかどうかを確認することである。

1.2.5 主な結果および考察

これまでの主な研究成果の概要および今年度実施した内容と結果について以下に示す。

1.2.5.1 岩盤中の微小割れ目解析

ここでは、この作業仮説の検証を目的に、断層から離れた場所で確認される連続性のよい割れ目と断層近傍で確認される連続性のわるい割れ目の微視的構造（違い）の解析を行った。

まず、断層近傍で見られる連続性のわるい割れ目の事例としては、付知周辺（断層面からの距離：約50m）の露頭で確認することのできる割れ目を対象に調査を行った（図1.2.4）。

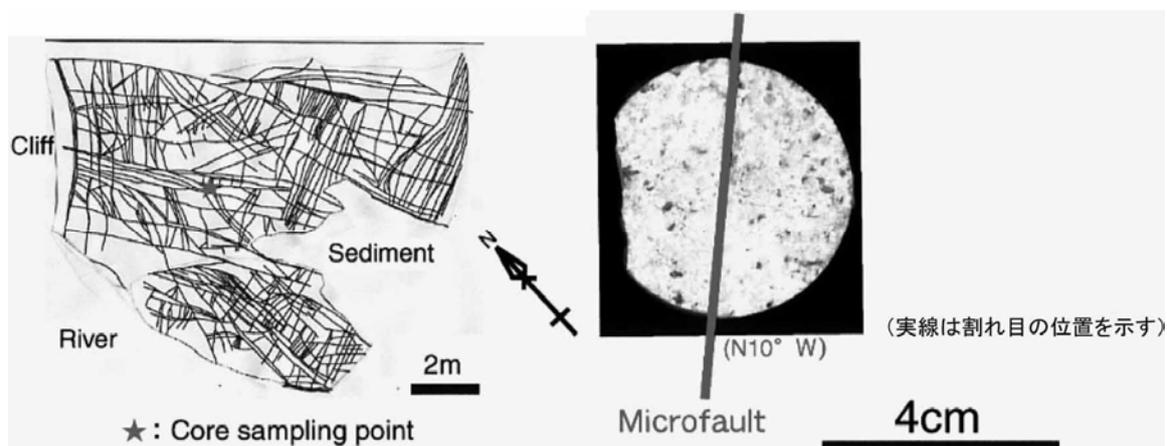


図1.2.4 断層近傍で見られる連続性の悪い割れ目の発達する露頭スケッチとコアサンプラーで採取した岩石試料の断面写真

調査では、現地においてコアサンプラーを用いて、ネットワーク状構造を示す割れ目近傍から、径5センチほどの岩石試料を採取し、その岩石組織中に認められる微視的構造を透過顕微鏡（光学顕微鏡）で確認するという手法を今回は用いた。

この露頭から採取した岩石コア中に発達する割れ目分布のスケッチを図1.2.5に示す。図中に示した割れ目は顕微鏡下で確認した割れ目幅 $100\mu\text{m}$ 、長さ 1mm 以上のものについてスケッチし、まとめたものである。このスケッチからも認められるように、中心の割れ目の周辺に樹枝状に広がっていることが確認できる。またこれらの樹枝状の割れ目形成と中心を走る割れ目とは、構造的な相関（例えば形成順序や階層構造など）がほとんど認められない。

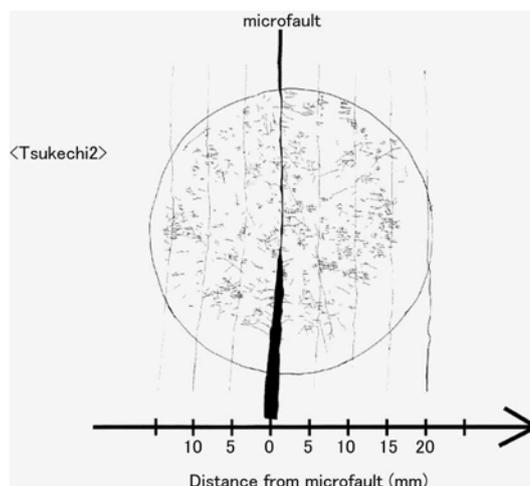


図1.2.5 連続性の悪い割れ目の発達する花崗岩露頭から採取した岩石コア中に認められる微視的割れ目構造

一方、連続の良好な割れ目の発達する露頭、つまり断層面から離れた露頭に認められる割れ目とその周辺に発達する微視的割れ目の構造や分布状態について、断層から約1500m地点の田畑地域に見られる露頭での調査を行った（図1.2.6）。この露頭では、数m以上の連続性を有する単一割れ目が30本以上観測されるのが特徴である。

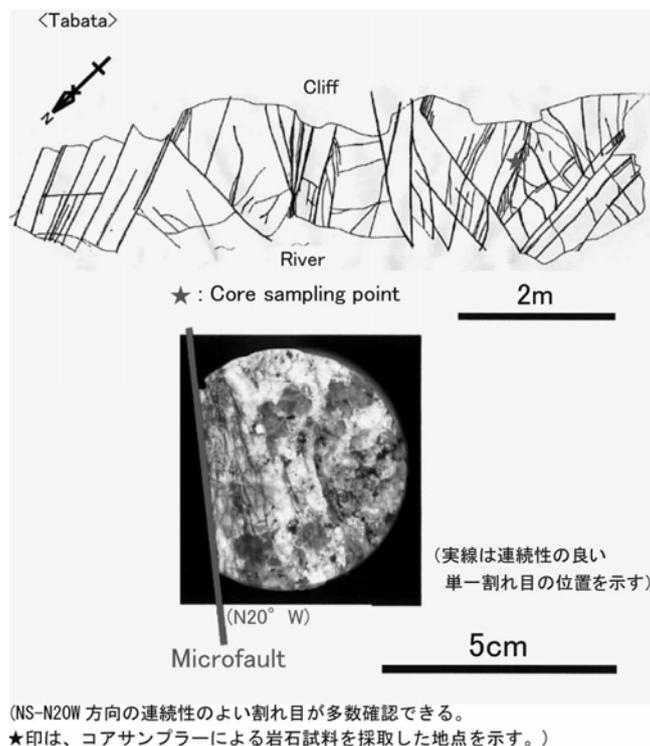
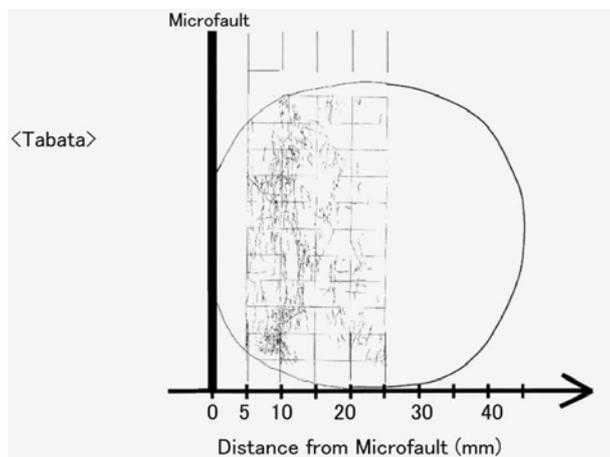


図1.2.6 田畑地域の露頭スケッチ

この露頭内で、単一割れ目（図中では、Microfaultと記述）に沿ってもっとも破壊が進行していると考えられる割れ目沿いの岩石試料を採取し、先に述べた手法と同じ方法で、岩石内部に発生している割れ目の構造と分布状態についての調査を行った。その観察結果を、図1.2.7に示す。スケッチした割れ目は、付知地域の場合と同じ幅約 $100\mu\text{m}$ 、長さ 1mm 以上のものである。



(単一割れ目（図中では Microfault と記述）周辺ほど割れ目密度が高い。
なお、0～5mmの範囲は岩石薄片の作成段階で二次的（人工的）な割れ目と思われる構造が確認されたためデータから排除した。)

図1.2.7 田畑地域で採取した岩石コア中に認められる割れ目スケッチ

スケッチの結果から言えることは、まず割れ目が単一割れ目にそって、ほぼ同じ方向に形成されていること。そして、割れ目周辺ほど割れ目密度が高いことである。また、割れ目の構造も先程の付知地域（断層近傍）のものに比べ、直線的で樹枝状のものが少ないのが特徴である。

さらに、これらの付知（断層近傍）および田畑（断層より離れた地域）での岩石マトリクス中に形成された割れ目密度について、その分布解析を行った。その結果を図1.2.8に示す。

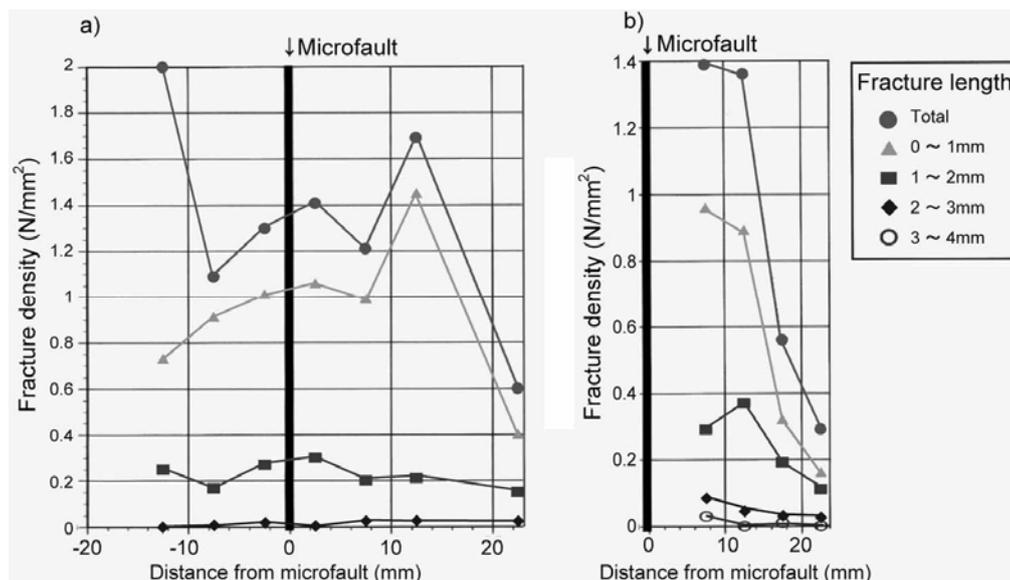


図1.2.8 コアサンプル中に認められる微小割れ目の分布密度および微小割れ目の連続性と分布量との相関関係

この解析結果から示されるように、付知地域（断層近傍）の岩石マトリクス中に認められる微小割れ目は、単一割れ目周辺であってもあまりその分布密度は変化せず、全体的にマイクロクラックが発達（発生）していることを示している。一方、断層から離れた田畑地域の岩石マトリクス中に形成された微小割れ目は、単一割れ目周辺に集中していることが確認できる。この双方の違いについては、現在検討を行っている段階であるが、これまでの研究でも示唆されてきた仮説、つまりNW系の連続性の良好な割れ目は、岩体中により初期の段階から形成されており、その後の阿寺断層の動きによって形成された後生的な割れ目ほど、連続性がわるいとする考えと矛盾しない。たとえば、断層運動にともなう二次的な影響、割れ目形成は、おそらく花崗岩体が地表近くあるいは地表に露出したのちに形成された可能性があり、その場合、地下深部で受けていた封圧からは解放されることとなり、より樹枝状の微小割れ目を多く形成させる要因となるかもしれない。また、田畑地域の割れ目が、連続性の良好な割れ目（初生的な割れ目と考えられる）に沿って、多く派生していることは、初生的な段階でこれらのマイクロクラックも形成されたものである可能性を示唆する。これは、この地域の岩石が阿寺断層本体から遠く、後生的な断層運動の影響を伴いにくいとする考えとも整合的である。

1.2.5.2 割れ目の構造と方向性

本調査研究では、これまでに阿寺断層周辺の露頭約400ヶ所について確認された割れ目約2000本の割れ目データをもとに、岩体中の割れ目の方向と量の関係のローズダイアグラムを図1.2.9、図1.2.10に示す。

これまでの調査結果から、阿寺断層周辺およびその近傍の花崗岩体中に発達する割れ目は、阿寺断層(N30°W)と5~10°ほど斜交するN20°W前後の方向のもの、阿寺断層に対して直交するN60E前後の方向のものが主に確認できる。これらの割れ目の方向として、断層周辺の地域では主にN20°W方向が卓越し、断層から離れるほどNSを中心とした割れ目が卓越する傾向にある。

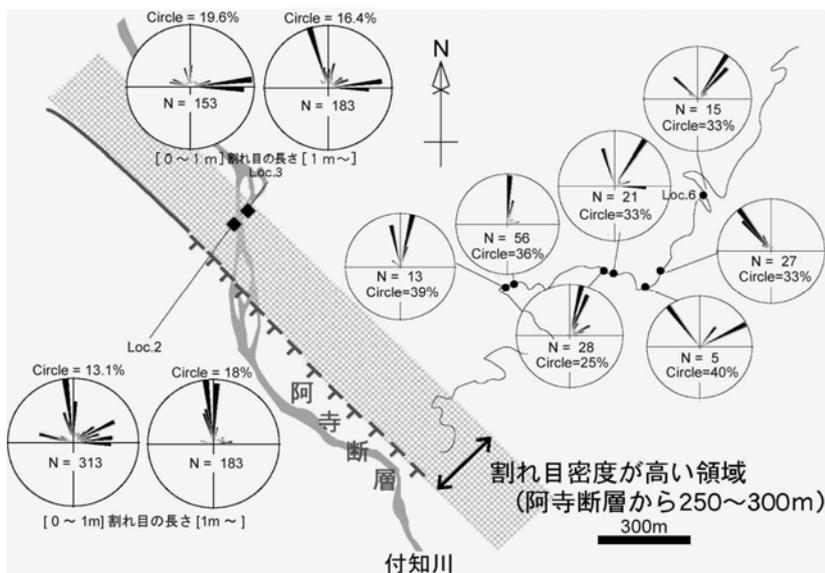


図1.2.9 断層周辺岩盤内に発達する割れ目の方向（付知川周辺）

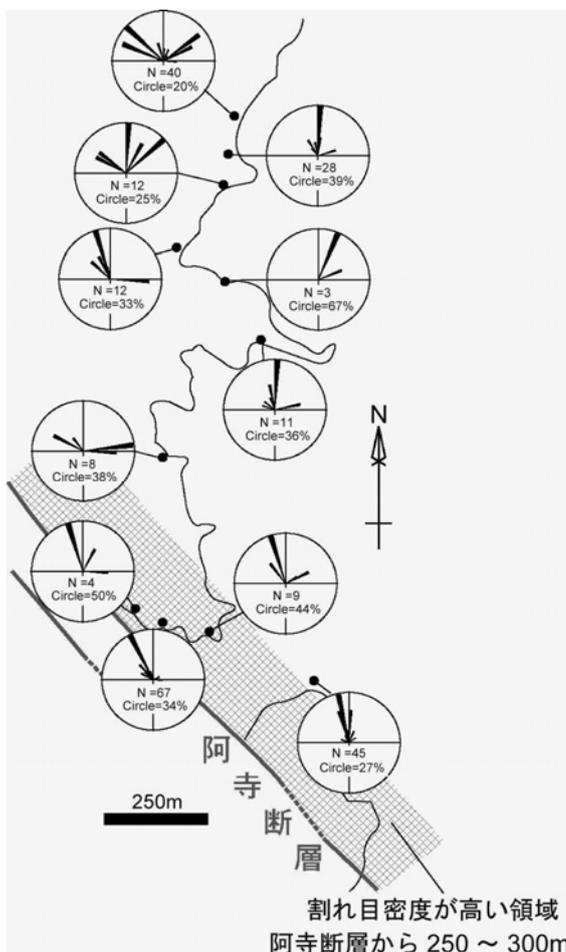


図1.2.10 横川谷ルートでの割れ目解析結果

またこのような割れ目方向の特徴は、調査地域の複数のルートで確認することが可能である。図1.2.10は、調査地域南部の横川谷地域のルートで確認された割れ目調査の結果である。阿寺断層近傍ではN20°W前後の割れ目が卓越しているのに対し、断層から離れるにしたがってNW方向

の割れ目へと変化する傾向が確認できる。

このような卓越する割れ目方向の変化は、この地域全体に認められることから、阿寺断層の左横ずれの運動に伴う回転によって生じた可能性が考えられる。

基本的に花崗岩中の割れ目は、花崗岩が形成された段階、また地上までに上昇してくるプロセスにおいて形成される可能性が考えられる。それらの割れ目が、地表および地表付近に位置したのちに、阿寺断層の第四紀を中心とする左横ずれの断層活動によって連続性のよい割れ目がNW方向から、N20°W方向へと引きずられるように回転した可能性は十分に考えられる。

このようなフィールド観察、データを基に断層運動と引きずりに伴う割れ目方向の回転を模式化したモデルを図1.2.11に示す。

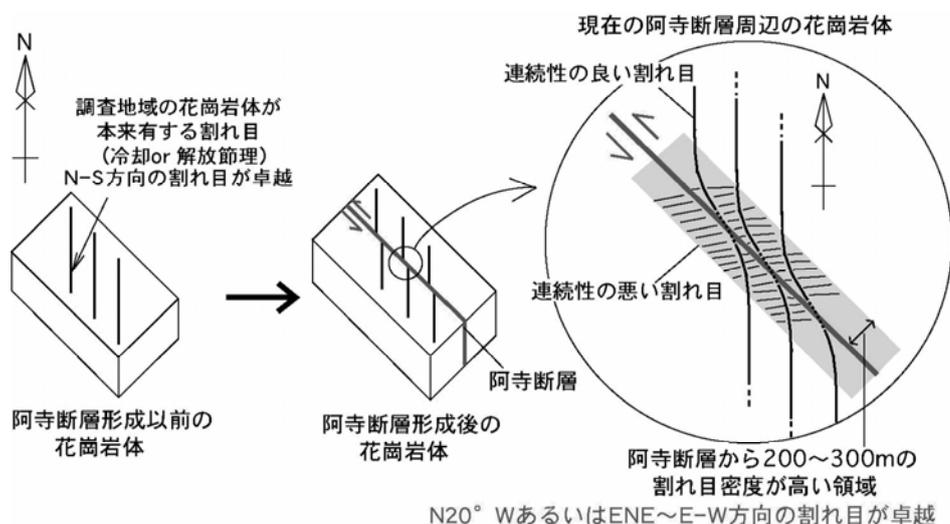


図1.2.11 阿寺断層の断層運動と周辺岩盤割れ目への影響と新たに形成される割れ目の形成メカニズムを示した概念モデル

これまでのフィールドにおける割れ目調査から、阿寺断層周辺の岩体では、割れ目密度の高い領域が約250mの範囲で観察されることが分かってきた。とくにこの断層周辺の領域では、図1.2.11に示すように、花崗岩体全体に分布するNS方向の連続性のよい割れ目が、阿寺断層の運動によって引きずられた様相を示す。さらに、断層周辺ではこの引きずりに伴う回転運動によって、周辺の岩体にさらに小規模の割れ目が新たに形成された可能性が考えられる。もし、このような考え方（モデル）が適応できるならば、断層運動によって後生的に形成された割れ目を抽出することが可能であることを示唆するものである。

また図1.2.12は阿寺断層からの距離に対して、露頭規模での総割れ目本数および密度がどのように変化しているかを示したものである。この図からも明らかのように、断層面から離れるにしたがってその割れ目密度が関数的に現象していることが確認できる。またある程度の距離からは、その現象傾向はほとんど一定となり、岩盤中の割れ目密度がほぼ変化しない状態になる部分（距離）の存在することを示唆する。

なお解析図には、800mおよび1200mの部分に割れ目密度が急増している部分が示されているが、これは、小断層などの形成によってローカルな不均質性が示されているものと思われる。

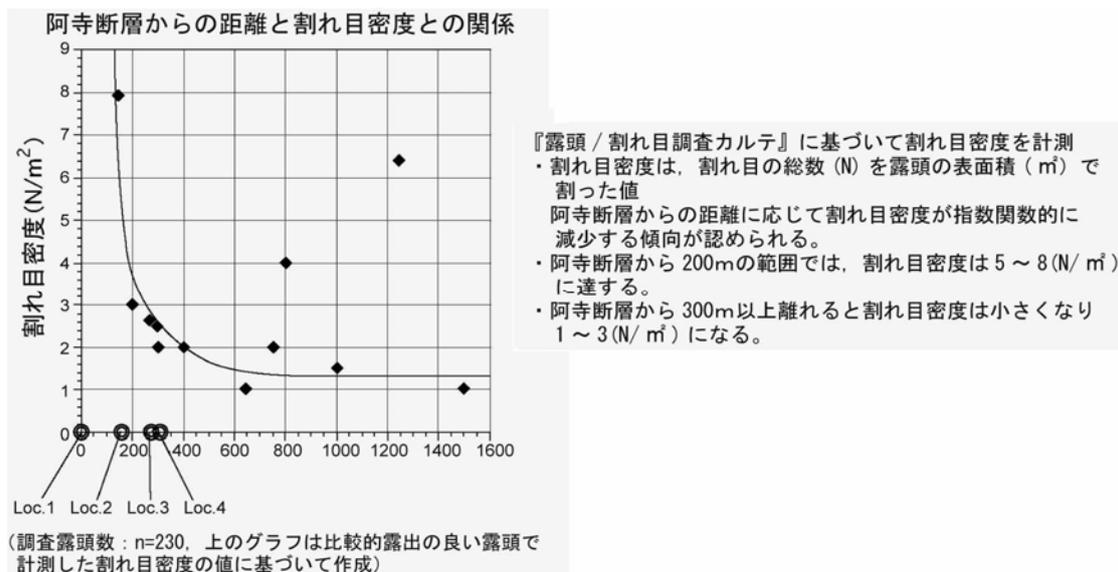
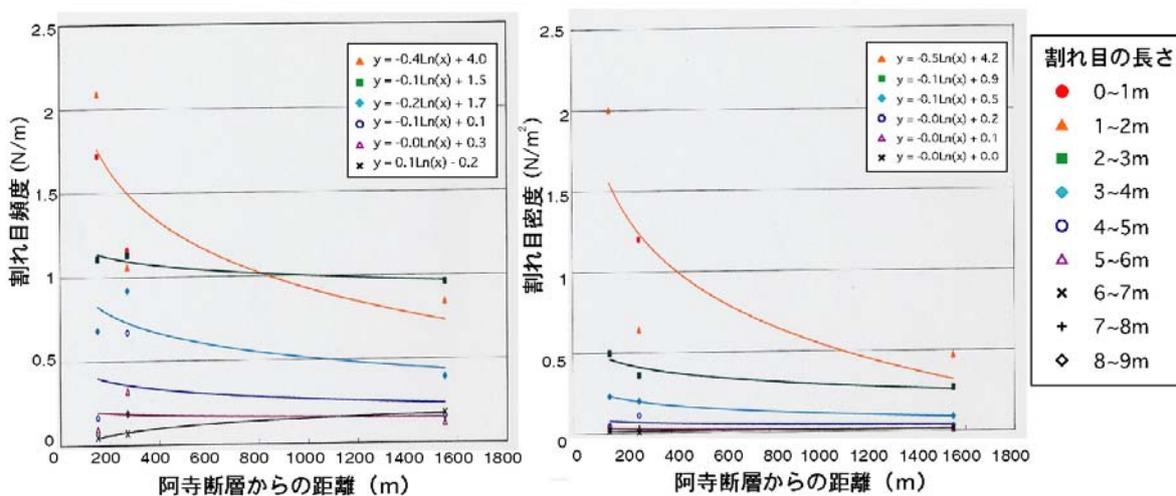


図1.2.12 断層からの割れ目密度分布

1.2.5.3 断層からの距離と割れ目密度・頻度との関係

阿寺断層からの距離に応じて、各露頭で確認できる割れ目について、さらにその密度と頻度を、割れ目の長さごとにまとめた解析結果を図1.2.13、図1.2.14に示した。これは割れ目の長さごとの密度と頻度を、断層からの距離でどのような変化が見られるのかを確認するために行ったものである。この結果からは、まず全体的な傾向として、断層から離れるに従って割れ目密度、頻度ともに減少する傾向にあることが示される。そして減少する割れ目は、連続性がおおよそ3m以下の割れ目において顕著にあらわれる。

断層からの距離と割れ目頻度・密度との関係



- ・頻度のデータはばらつきが多いのに対し、密度のデータはほぼ曲線上に収まっている。
 →密度による割れ目評価方法が妥当であると言える。
- ・連続性の悪い割れ目は断層に近づくほど密度が指数関数的に増加するのに対し、連続性の良い割れ目は断層からの距離に関わらず密度がほぼ一定である。
 →断層の影響により形成されるのは主に連続性の悪い割れ目であると考えられる。

図1.2.13 阿寺断層からの距離を横軸にとって割れ目の長さ別にその密度と頻度を解析した結果

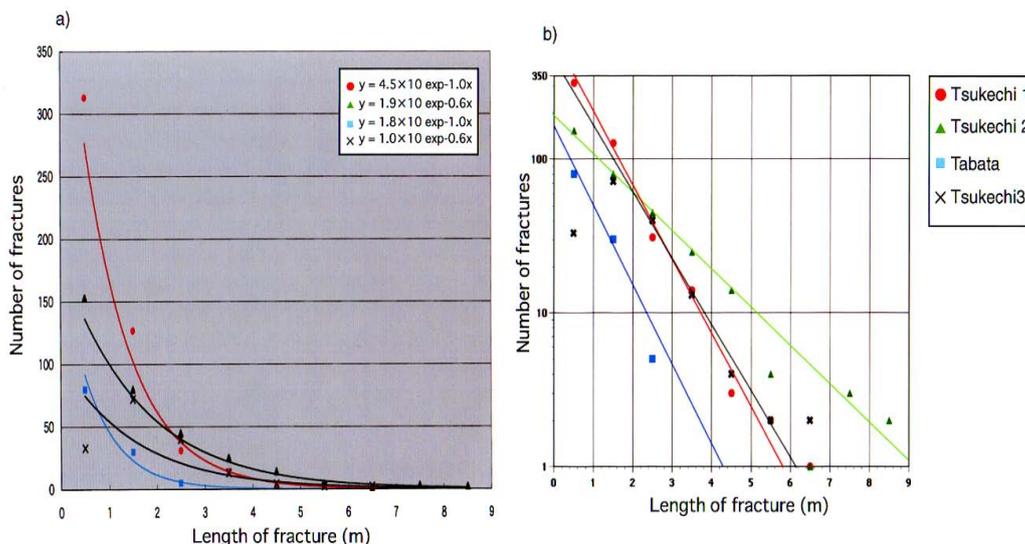


図1.2.14 各露頭における割れ目の長さや密度

一方、それよりも連続性のよい割れ目は、ほとんど断層からの距離とは無関係に、ほぼ一定の割れ目密度と頻度を有していることが確認できる。このことは、先に述べた阿寺断層の運動とそれに伴う二次的な割れ目の変形および形成モデルによる考え方と矛盾しない。つまり、もしこのようなメカニズムで阿寺断層周辺の割れ目の構造と密度が二次的な影響を受けたとすれば、阿寺断層形成以前には、花崗岩体中には、NW系の連続性のよい割れ目が存在しており、その後の阿寺断層の形成と運動に伴って、その周辺には連続性のわるい割れ目が新たに形成されたという仮説を立てることができる。

1.2.5.4 阿寺断層近傍における断層運動と割れ目形成の関係

今回確認した露頭をその位置関係から、阿寺断層の一部を構成していることが確認された。今回確認することのできた露頭では、阿寺断層とほぼ同一の走向傾斜で4本の断層が確認され、それに伴う割れ目が多数確認される。これらの割れ目の100本程度を無作為に抽出し、走向傾斜を測ったものを図1.2.15に示す。

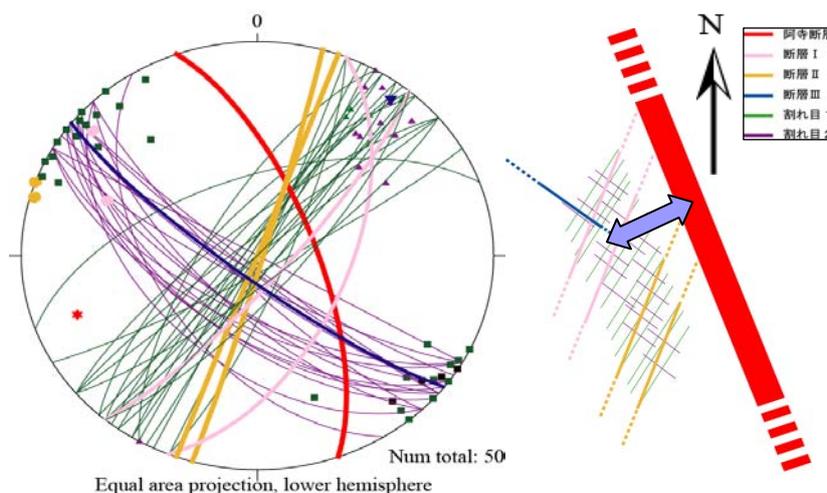


図1.2.15 断層周辺割れ目の走向傾斜の傾向性

阿寺断層（赤）は左横ズレ成分の断層である。その断層運動に伴って周辺岩盤は、基本的に反時計周りのローテーションを行う。このローテーションに伴って、阿寺断層に斜交する断層（I, II）と緑色で示した割れ目が形成されるものと考えられる。さらに、これらの附随断層も基本的には左横ズレ成分を有しており⁵⁾、その運動に伴って附随断層周辺に紫色で示した開口割れ目系が形成されていった可能性が考えられる。つまり、阿寺断層の長期に及ぶ断層運動に伴って、断層周辺に階層を伴う附随断層が形成され、阿寺断層運動に伴う割れ目形成と、附随断層形成に伴う割れ目がオーバーラップした状態で現在の断層露頭として現れている可能性が高い。これまでのフィールドにおける割れ目観察、そしてその方向や頻度などといった割れ目の属性データ解析から示される、阿寺断層近傍での割れ目分布とその形成、そして断層運動による影響については、これまでも示してきたが、図1.2.16に示すようなイメージを構築することが可能である。

この地域の苗木花崗岩体は、約70Ma前後に形成され、その後冷却過程を経て、隆起し現在の地域に位置する。いわゆる阿寺断層が、どの段階で形成されたかについては必ずしも明確ではないが、断層破碎帯中にカタクラサイトなどが確認されていることから、ある程度の地下深部にある段階から「阿寺断層」の前進となる断裂構造が形成されていた可能性は否定できない。これらの段階で形成された断裂構造が、その後も継続的に活動していたかどうかについて議論できるデータは現在のところ確認されていない。しかし、第四紀以降での阿寺断層の左横ずれによる岩盤の移動は、地形にも断層崖などを形成するなど、明確にその活動履歴が確認されており、現在阿寺断層近傍で確認できる割れ目は、これらの長期的な断層活動による影響の積算として考えることが可能である。

そしてこれまでの割れ目形態や分布状態から、NW方向の割れ目ほど、初生的な割れ目である可能性が高い。おそらく岩体の上昇に伴って、比較的連続性の良好な割れ目が形成され、その後の阿寺断層の形成、継続的な運動によって、岩体マトリクス中には樹枝状をなす、より微小な割れ目が形成された可能性が高い。また断層周辺では、断層の左横ずれ運動に伴って、割れ目全体が大きくローテーション（回転運動）したものと考えられる。

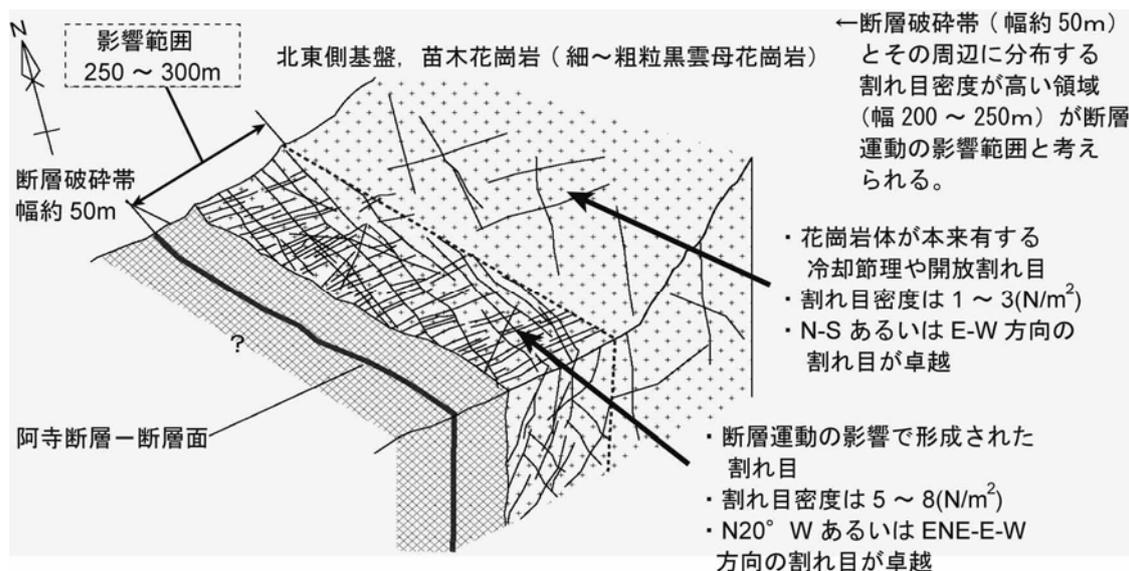


図1.2.16 阿寺断層周辺の割れ目形成と断層運動による影響範囲の概念図

1.2.5.5 割れ目と充填鉱物との相関

(1) 割れ目充填鉱物分析

断層近傍では、断層運動に伴って割れ目が形成され、地下水（雨水を含む）の循環を促進させることが考えられる。地下水の循環に伴って、岩石との反応（溶解や再沈殿）が生じ、それらの痕跡が割れ目などの水みち近傍に残ると考えられる^{24),25)}。これらの二次的な地下水と鉱物との反応は、地球化学的な地質環境状態の形成履歴解析を可能とするだけでなく^{26),27)}、断層近傍での長期的な水理状態の変遷を推測する手がかりにもなる。

本地域に分布する苗木-上松花崗岩においても、割れ目充填鉱物を含む岩石を採取し、エポキシ系レジンを用いた注入法によって岩石薄片を作成し、鉱物観察・同定を行うと伴に、必要に応じてX線回折装置（XRD）や蛍光X線（XRF）による化学組成分析を行った。これらの鉱物解析ならびに化学組成に関する分析結果を用いて、地下水循環についての考察ならびに、断層運動に伴う地球化学的および水理的影響範囲の解析を試みた。

今回の調査結果から、阿寺断層周辺の結晶質岩体中に発達する「ダメージゾーン」において、その割れ目は、比較的直線的で数m以上の連続性を有する割れ目（写真1.2.1-(a)）と、それらの連続性の良い割れ目を連結する数十cm～2m規模のネットワーク状の割れ目（写真1.2.1-(b), (c)）の大きく2種類に分類可能である。数m以上の連続性を有する割れ目は、阿寺断層（N20°W）と斜交するNS～N10°E方向のものと、数は少ないが阿寺断層に対してほぼ直交するN70°E前後の方向のもの2方向が認められる。また、断層周辺から離れるにしたがって、N10°E方向からNW方向へとシフトする傾向を示す。

これらの割れ目において、連続性の良い割れ目中にはプレーナイトや石英（写真1.2.2-(a), (b)）などの相対的に熱水性起源と考えられる充填鉱物が主に形成されている。一方、連続性の悪いネットワーク状の割れ目には、鉄やマンガンの酸化物と考えられる比較的低温の地下水の浸透を示唆する充填鉱物が認められる。このような割れ目形態と割れ目充填との相関は、岩体中における割れ目形成履歴を把握する上で非常に有効と考えられる。これらの割れ目形態と割れ目充填鉱物の形成履歴における相関に関しても考察で議論する。

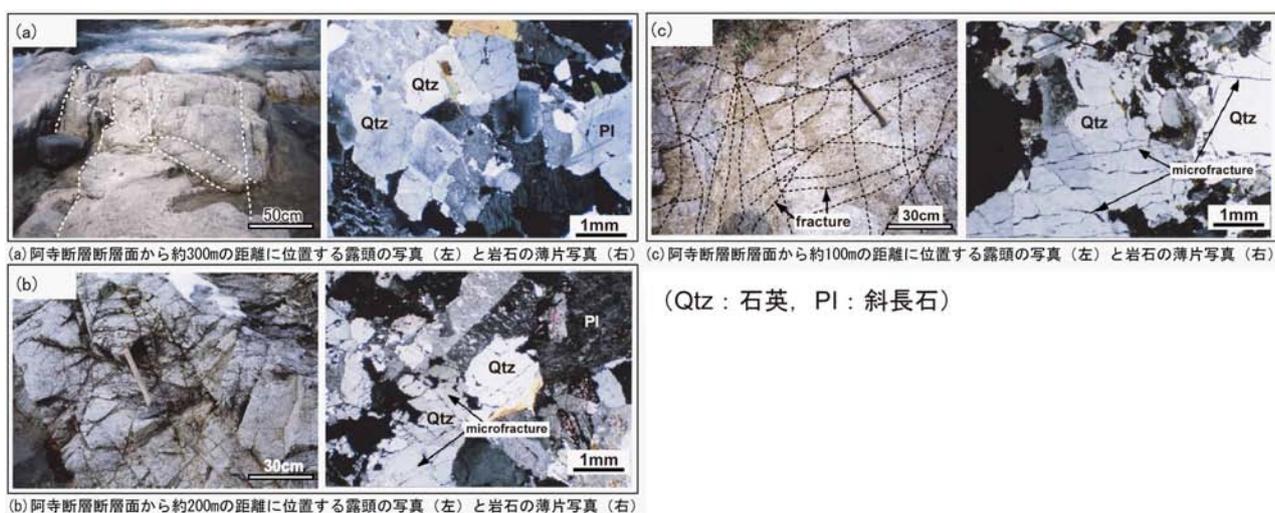


写真1.2.1 露頭における割れ目の性状と鏡下における脆性破壊に伴う微小割れ目の性状

(2) 岩石組織の微視的変形・破壊状態

阿寺断層は、苗木-上松花崗岩と濃飛流紋岩などの結晶質岩を分断するように発達しており、断層運動に伴う造岩鉱物への微視的破壊現象・状態を把握することが容易である。これらの岩石組織の変化・破壊状態について、断層からの距離に応じた状態変化を写真1.2.1に示す。

まず、断層から約500m以上離れた地点で採取した試料の岩石組織には、ほとんど破壊などの擾乱を認めることはできない。しかし写真1.2.1(左側露頭写真)に示すように、約300m地点での岩石組織には、変質は確認されないものの、造岩鉱物中の長石や石英粒子を破断する若干の微小割れ目の形成が確認されるようになる(写真1.2.1-(a))。また、蛍光レジンの注入試験からも、二次的に形成された微小割れ目や鉱物粒子境界が開口していることが確認されている²⁸⁾。断層から約200m地点での試料には、明らかに後生的な脆性破壊によるネットワーク状の微小割れ目が基質全体に発達する(写真1.2.1-(b))。またその割れ目に沿って、一部長石内にセリサイトなどの変質鉱物の形成が確認される。断層近くの約100m付近の岩石試料においては、基質中の造岩鉱物が細かく角礫状に破碎され、力学的変形が進行している様子が明瞭に認められる(写真1.2.1-(c))。

このような造岩鉱物の破壊傾向は、断層からの距離がおおよそ200m以内の濃飛流紋岩および苗木-上松花崗岩両方の岩体に認められる。これはすでに示したように、露頭規模でも確認されている(写真1.2.1：露頭写真)。このような露頭の産状と、顕微鏡下でのマイクロクラックの発達の位置的分布域は良く一致している。

(3) 割れ目充填鉱物の種類と充填(シーリング)状態

上記のような観点から、阿寺断層周辺岩体中に認められる割れ目内充填の産状や種類等の調査を行った結果、地表風化の影響をあまり受けていない露頭において、とくに数m以上の連続性を有している割れ目において、充填鉱物の存在を確認した。

充填鉱物としては、石英、緑泥石やプレーナイトおよび方解石の介在が確認できる(写真1.2.2)。一方、連続性の乏しい割れ目や、顕微鏡下で認められるネットワーク状の割れ目にはほとんど充填鉱物は認められない。充填鉱物の産状は、その多くが層状(サンドイッチ構造)をなす。1つの充填鉱物層の厚さは、0.1~数mmことがおおく、フィルム状に割れ目表面を覆う。

濃飛流紋岩および苗木-上松花崗岩ともに、連続性の良い割れ目には、プレーナイトや石英による割れ目充填がなされていることが多く(写真1.2.2-(a), (b))、それらのほとんどは、割れ目を充填しており早い段階で充填したことを推測させる。一般に、石英脈の充填は熱水循環によるものである可能性が高く²⁹⁾、岩体が未だ地下深部に存在していたときのものであることを示唆するものである。一方、沸石類や方解石においては(写真1.2.2-(c), (d))、これらの初生的に形成されたと思われる石英脈を切るものが認められることから、石英脈が形成された後に開口した割れ目空間を充填したものと考えられる。緑泥石やプレーナイトの充填も、石英脈同様に熱水起源の可能性が高い²⁹⁾。これらの形成プロセスについても次章で考察する。

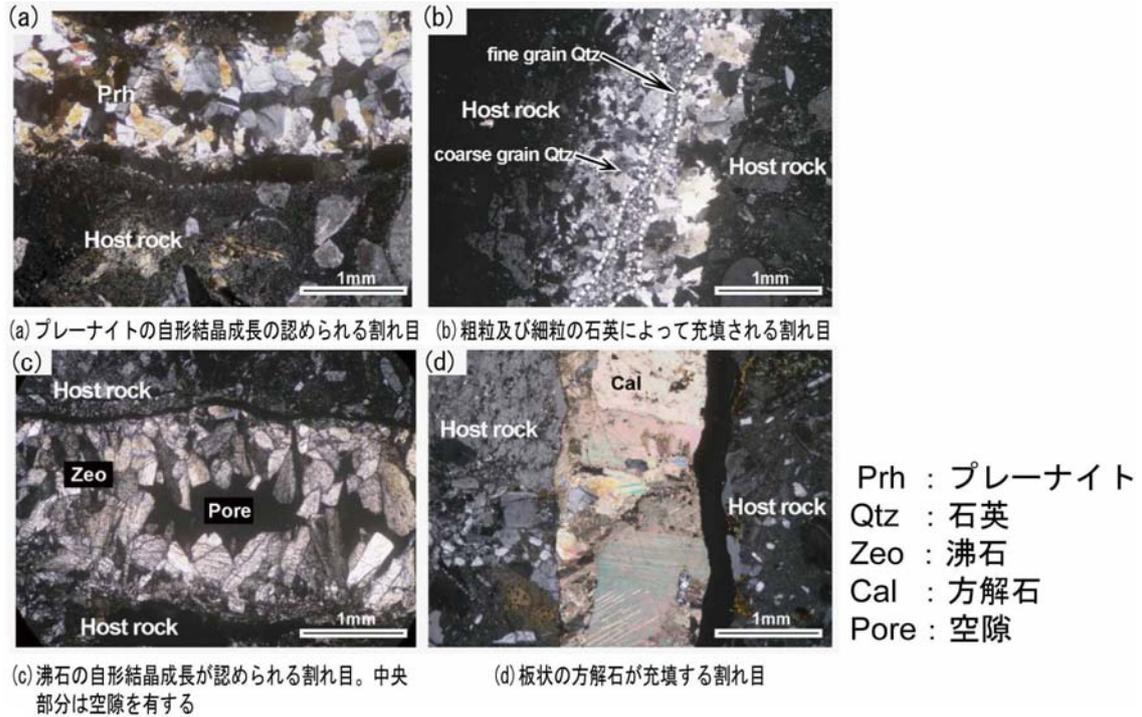


写真1.2.2 結晶質岩体（濃飛流紋岩）中割れ目に認められる充填鉱物薄片写真

1.2.5.6 阿寺断層形成史

現在、これまでの断層調査結果をもとに、阿寺断層の形成史を構築した。阿寺断層には、地下深部で形成されたカタクレーサイトから、現在の地表付近で破砕されたとされるカタクレーサイトの破断粒子を含む断層破砕帯が確認できることから、図1.2.17に示すような阿寺断層形成プロセスが描ける。

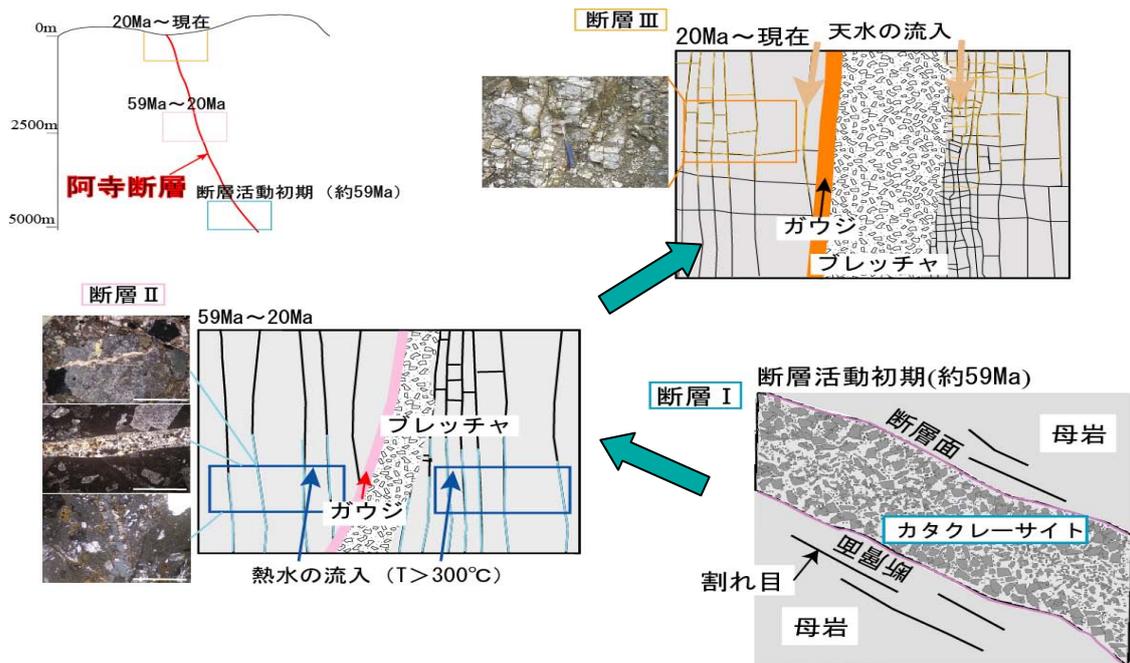


図1.2.17 阿寺断層形成史

ステージ I：地下深部（数 km 以上）での阿寺断層の形成。これはカタクレサイトの同定で判断されるものである。カタクレサイトの報告⁶⁾でもされており、基本的に阿寺断層本体の形成は、地下深部で初めに形成されたものと考えられる⁷⁾。

ステージ II：その後、阿寺断層近傍に形成された開口割れ目に、緑簾石などの熱水に伴うと考えられる充填鉱物の沈殿が形成される。これらの充填状態は、割れ目内に自形結晶で成長、充填していることから、隆起に伴う応力解放も関連している可能性がある。また、一方ではカタクレサイト近傍に断層角礫の形成も伴うことから、一部カタクレサイトが脆性破壊されつつ、断層幅が増大していくプロセスも経ているものと考えられる。

ステージ III：さらに続く隆起と浸食で、地表近傍に接した阿寺断層およびその周辺割れ目は、雨水の浸透によって、酸化物や炭酸塩鉱物の沈殿を伴う。一方、左横ズレの断層活動は継続しており、断層ガウジが成長していくものと考えられる。

1.2.6 総合的考察

阿寺断層は、古くは数千万年もの長期的な形成履歴を有していると考えられる断層である。この長期間における断層運動と周辺岩盤の割れ目形成との相関および履歴をすべて論じることは難しい。しかし、これまでの周辺岩盤中に認められる割れ目形態や特徴から、断層運動によって後生的に生じたと思われる割れ目ならびに、岩体全体に当初から形成されていたと思われる割れ目を区別し、その特徴からそれらの形成履歴を論じることが可能であることが分かってきた。ここでは断層運動によって、岩体内のどの程度の範囲にどのような影響が及んだと考えられるのかについて、つまり「ダメージゾーン」の概念について、その割れ目形態の特徴と併せて検討する。

1.2.6.1 断層周辺の割れ目形態とその特徴

基本的に花崗岩などの結晶質岩中の割れ目は、地下深部で岩体が冷却し固化した後、地上までに上昇してくるプロセスにおいて形成される。これについては、日本国内の複数の年代の異なる花崗岩体の割れ目密度、充填鉱物などを調査し、年代によらず岩体内部に見られる連続性の良い単一割れ目の密度はほぼ一定で、年代の古い岩体ほど割れ目充填鉱物の厚みが増している傾向のあることがその傍証として示されている²⁵⁾。また同YOSHIDA et al.²⁵⁾では、断層周辺の割れ目帯を排除した結晶質岩体内部の割れ目密度は、おおよそ1.8~2.3本/m²であることが示されている。同様に本研究対象の苗木-上松花崗岩体においても、阿寺断層から200m以上離れた位置での岩体内部の割れ目密度は平均2.2本/m²であり（図1.2.18）、またこれまでの調査で濃飛流紋岩においても、連続性の良い割れ目の分布密度は2本/m²前後であることが明らかとなっている。これは、先に述べた他岩体に認められる初期段階で形成されたと思われる割れ目密度とも整合的である。さらに、断層から離れた苗木-上松花崗岩体および濃飛流紋岩体中に認められる連続性の良い割れ目は、充填鉱物として高温性のプレーナイトや石英を有しており（写真1.2.2-(a), (b)）、これらの割れ目が、岩体の冷却段階で形成された可能性の高いことを示唆する。このことは、他地域の結晶質岩体中に確認される割れ目形態および充填鉱物の事例として示される、高温性の割れ目充填鉱物によるシーリング（充填）とも整合的である。

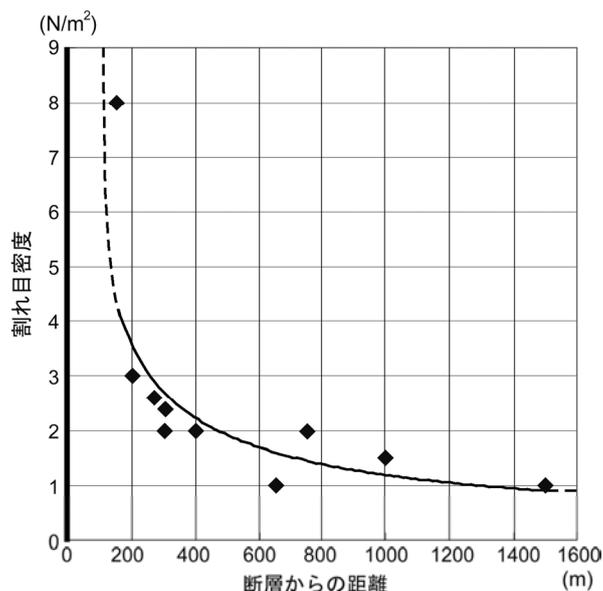


図1.2.18 苗木一上松花崗岩内の断層からの距離と割れ目密度の関係

一方、連続性の悪い断層近傍に形成された割れ目には、赤褐色を帯びた水酸化鉄や黒色のマンガン酸化物と思われる酸化物の充填が特徴的である。これは、酸素を含んだ地表水の循環によって還元状態であった地下水、岩石との反応に伴って生じたものと思われる^{30), 31)}。

これらの割れ目形態と充填鉱物との相関から、岩体中には当初比較的連続性の良い割れ目が形成され、熱水循環・反応による充填鉱物の沈殿／シーリングが生じた後、断層の形成、岩体の上昇あるいは上部侵食による応力解放、そして天水の循環による酸化物の沈殿という履歴を判読することが可能である。その場合、断層運動によって形成された連続性の悪いネットワーク状の構造を有する割れ目が、岩体上昇に伴う応力解放によって開口し、断層周辺に形成されたこれらの割れ目帯（「ダメージゾーン」）に、より酸化された天水を選択的に循環させている可能性が考えられる。このことは、逆説的に酸化物を充填鉱物として伴う連続性の悪い割れ目が、岩体中においてより後時的に形成されたものであることを判断する手がかりになることを示唆している。

1.2.6.2 阿寺断層の運動と割れ目形成との相関

これらの野外における割れ目観察、その方向や頻度などといった割れ目の属性データの解析結果を基に、阿寺断層近傍での割れ目分布とその形成、そして断層周辺の「ダメージゾーン」の形成について、次に示すようなプロセスを示すことが可能である。

まずこの地域に分布する苗木一上松花崗岩体は、約70Ma前後に形成され、その後冷却過程を経て、隆起し現在の地域に位置する。いわゆる阿寺断層が、どの段階で形成されたかについては必ずしも明確ではないが、断層破碎帯中にカタクレーサイトが確認されていることから³²⁾、地下深部にある段階から「阿寺断層」の前身となる断裂構造が形成されていたことが考えられる。これらの段階で形成された断裂構造がその後も連続的に活動していたかどうかについて議論できるデータは現在のところ確認されていない。しかし、第四紀以降での阿寺断層の左横ずれによる岩盤の移動は、地形にも断層崖などを形成するなど、明確にその活動履歴が確認されており、現在、阿寺断層近傍で確認できる割れ目は、これらの長期的な断層活動による影響の積算として考えることが妥当であろう。

また濃飛流紋岩についても、その成因は、大規模なカルデラを埋める溶結凝灰岩と考えられているものの、その岩体規模から冷却に伴う節理などの報告は以前からされている。したがって、岩体中に認められる連続性の良好な割れ目は、岩体の冷却に伴うものや岩体の上昇あるいは上部侵食に伴う応力解放によって、岩体全体にほぼ一様に発達したものであると考えられている。これは、これらの連続性の良いものが熱水性起源の充填鉱物を有していることから初生的に生じたものであることが推測される。そしてそれらの割れ目が、地表付近に位置したのちに、阿寺断層の第四紀を中心とする左横ずれの断層活動によって、「ダメージゾーン」内では初期段階で形成されたNS系の連続性のよい割れ目が、N20°~40°W方向へと引きずられるように反時計周りに回転した可能性が高い。

このような割れ目の観察結果および鉱物分析等の情報を基に、断層運動と引きずりに伴う割れ目方向の回転を模式化した図を示す(図1.2.11)。これまでの割れ目調査から、阿寺断層周辺の岩体では、割れ目密度の高い領域「ダメージゾーン」が、約200mの範囲内で観察されることが分かってきた。とくにこの断層周辺の領域では、図2.5.12の割れ目ローズダイアグラムで示すように、断層周辺岩体全体に分布するNS方向の連続性のよい割れ目が、阿寺断層の運動によって引きずられた様相を示す。さらに、断層周辺ではこの引きずりによって、周辺の岩体にさらに小規模の連続性の悪いネットワーク状の割れ目が新たに形成された可能性が考えられる。このことは先にも述べたように、連続性の良い割れ目ほど、熱水起源の充填鉱物を有していることと矛盾しない。これらの知見は、このような割れ目形態と割れ目充填鉱物との組み合わせによって、岩体中の割れ目形成時期を推定することが可能であることを示している。

1.2.6.3 断層に伴う「ダメージゾーン」の検討

これまでのフィールドでの割れ目調査の結果から、断層運動に伴って形成される「ダメージゾーン」について、①割れ目形成に見る岩石破壊という物理的側面、と②割れ目形成後の地下水流動(浸透)との相関を示す地球化学的変化(岩石の主成分変化)の観点から次に論じる。

(1) 物理的影響範囲

本論では、「ダメージゾーン」を阿寺断層活動に伴う後生的な割れ目形成の場、領域として取り扱っている。そしてこれらの後生的割れ目と初生的割れ目は、その形態と充填鉱物から分類可能であることを述べてきた。またこれら後生的な割れ目の形成範囲は、阿寺断層の場合、断層両側に200mほどであることを示した。しかしこれらの形成幅が、どのように蓄積形成されてきたのかについては、未だ今回の調査結果からは判読できない。

一方、このような断層運動に伴う影響範囲に関しては、「プロセスゾーン」という考え方がある。これは、断層の幅と長さには一定の相関関係が存在するとともに、断層の影響範囲がある程度推測可能であることを示した考え方である。とくに断層と影響幅との関係について、VERMILY & SCHOLZ⁴⁾はその幅と確認されている断層の長さの関係から、幅(W)と長さ(L)には、 $W/L \approx 10^{-2}$ の関係があることを述べている。これに関して、今回調査の結果から示される、断層運動によって形成された連続性の悪いネットワーク状の割れ目が確認される範囲の断層片側約200mを、現在確認されている阿寺断層の長さを用いて、その相関を示したものが図1.2.19である。この図上でみる限りにおいては、阿寺断層においても、幅と断層の長さには上記の関係があり、阿寺断層系においてもプロセスゾーンという概念が見かけ上、適用できるように思われる。しかし、W

$W/L \approx 10^{-2}$ という関係が断層運動と周辺岩盤のこういった現象を表現したものなのかなどといった、基礎的な部分の検証を行うことが重要と思われる。

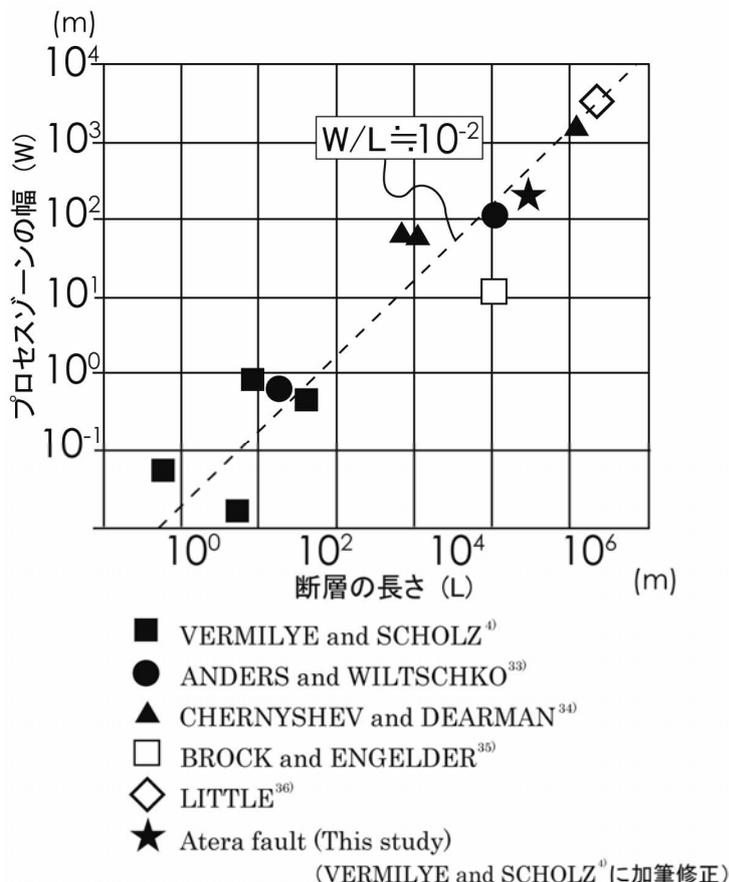


図1. 2. 19 断層の長さ と プロセスゾーンの幅 と の 関 係

(2) 地球化学的影響範囲

各露頭での地表風化の影響の少ない岩石基質の化学成分を分析し、断層からの距離に応じた岩体中での地球化学的状态変化を把握した。その結果から言えることは、全体的な傾向として断層に近くなるにしたがって、Na, Kといった元素が溶出する傾向にあることである⁵⁾。これは、断層運動に伴うマイクロクラックを地下水が浸透することによって、変質しやすい斜長石や黒雲母などからのNa, Kの溶脱に伴うものと考えられる。また断層近傍ではSiも減少しており、熱水による石英の溶脱や含水鉱物の生成が示唆される。このように主要な元素は断層に向かって減少傾向であり、主要造岩鉱物の溶脱が優勢であったと見られることから、水/岩石比が高かったことが推測され、断層に伴う割れ目帯が相対的に熱水等の水みちになっていた可能性が考えられる。また、現在でも活動が続いている断層であることから、断層が動くたびに天水が地下深部にもたらされている可能性も否定できない³⁷⁾。とくに断層近傍での割れ目充填鉱物として、酸化物が認められることは天水の選択的循環を示唆している。このように断層近傍の割れ目帯においては、熱水変質のみならず天水による変質を繰り返し被っている状態が推測される。

本研究では、未だ造岩鉱物中のどういう部分での反応がこのような元素移動に寄与しているのかについては具体的に確認できていないが、これらの結果は、断層近傍岩ほど元素が選択的に移動(全体としては溶脱の傾向)していることを示す。とくにその範囲は、割れ目頻度の非常に高

い約20m程度までの範囲が顕著である。このことは断層運動によって基質にマイクロクラックが形成されることによって、より選択的にこれらの割れ目を経路として元素が移動する可能性を示唆するものである。

断層運動によって形成されたと考えられる花崗岩中の微小空隙（二次的な割れ目等）については、岩石の染色試験によってその存在が確認されている²⁸⁾。これらの顕微鏡下での観察結果は、花崗岩を構成する鉱物の変質はほとんど進行していないものの、それら鉱物粒界が外れるような形で全体の空隙が増加していることを示している。これは、応力解放に伴う条件下で形成されるのではないかと考えられるが、その詳細なメカニズムについてはまだ不明である。

ここまで、断層周辺に認められる「ダメージゾーン」について、割れ目形態等に見る構造的影響と化学的（物質移動）変化からその特徴について述べてきた。それらの情報をもとに「ダメージゾーン」について得られた知見をまとめた概念図を図1.2.20に示す。断層周辺では、岩盤の破壊に伴う割れ目形成が生じる。それらの大小の割れ目を介して地下水が移動し、造岩鉱物のうち、地下水と反応しやすい鉱物や元素が選択的に溶解／溶脱していくとともに、一方では酸化物などの二次的な元素の付加も生じているものと考えられる。このような組成変化、微視的状态変化の検討も断層周辺岩体の「ダメージゾーン」の把握に役立つと考えられる。

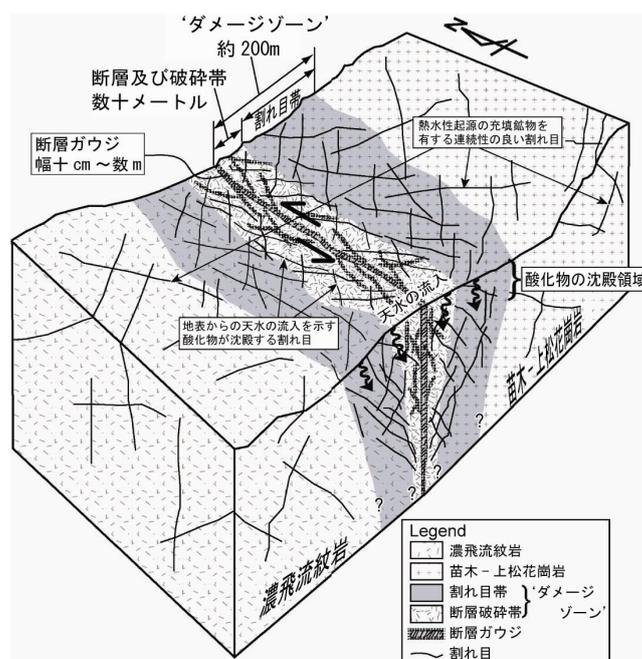


図1.2.20 阿寺断層の構造概念モデル

1.2.7 まとめ：断層運動に伴う割れ目形成とその影響解析

断層周辺に形成される「ダメージゾーン」について、阿寺断層周辺岩盤を事例にとって調査研究を進めてきた。これまでに実施してきた調査から確認されたこと、明らかとなったことを以下にまとめる。

1.2.7.1 「ダメージゾーン」について

① 周辺岩盤における割れ目形態や分布、密度などのデータから、阿寺断層の活動に伴う物理的

影響範囲は断層からおおよそ200m程度と見積もられる。

- ② 阿寺断層における断層運動による影響範囲と考えられる領域は、従来の「プロセスゾーン」の考え方で見積もられる範囲 ($W/L \approx 10^2$; W:幅, L:長さ) と整合的である。
- ③ 化学成分分析結果から示される割れ目充填鉱物などの二次的な元素移動の状態変化から、断層運動に伴う周辺岩盤への地球化学的变化は、割れ目密度などから解析される「ダメージゾーン」よりも狭い範囲に顕著である。また、充填鉱物の種類や充填状態から「ダメージゾーン」が、一部、熱水の水みちとなっていることが考えられる。
- ④ 地下水流動の観点から推定される「ダメージゾーン」については、これまでの調査からは具体的な知見は得られなかった。しかし、割れ目充填鉱物の変化や岩石基質の変質が地下水流動と関連していると考えれば、これらの範囲が水理場として断層運動による影響を被っていると考えられることも可能かもしれない。

1.2.7.2 断層活動と割れ目形成との相関について

- ① 断層に接近するほど関数的に増加する割れ目は、連続性のわるいネットワーク状の割れ目であり、一方、岩体全体にはほぼ普遍的に分布する連続性の良好な割れ目の分布密度はあまり変化しない。このことは、岩体中には初生的な連続性の良好な割れ目が形成されており、地表に隆起・露出したのち、断層運動などで後生的に発生する割れ目は、主に連続性の不良なネットワーク状の割れ目であることを示唆する。
- ② 本調査・研究では、結晶質岩体中に初生的に形成された割れ目を「バックグランド割れ目」として扱った。その割れ目密度はほぼ2本/m²であり、他の地域におけるデータとも整合的である。
- ③ 地表露頭で観察される連続性の良好な割れ目形態・分布は、阿寺断層の左横ずれのセンスと一致した構造をなす。つまり、阿寺断層近傍では、阿寺断層の左横ずれの動きに伴って左回転運動を行っていると同時に、その回転運動に伴う二次的な割れ目が岩体中に新たに形成された可能性が高いことを示す。

1.2.8 おわりに

地層処分などの長期的に地下環境を活用するにあたっては、選定される地域の長期的な安定性を過去の地質現象の履歴から解析し、どういった傾向を有する地域なのかを検討することが重要となる。阿寺断層は、中部地方の一断層であり、この断層周辺に形成された割れ目が有する特徴が、他の地域や岩体にどの程度適応できるかの調査検討も、今後行っていくべき課題であることは言うまでもない。しかしながら、本研究の断層周辺の割れ目調査およびその解析結果は、割れ目の分布や形態といった特徴を把握することにより、将来のあるサイトにおいて断層に遭遇した際に、割れ目構造や充填鉱物を詳細に検討することによって、断層運動の影響範囲だけでなく、地質環境の長期的な安定性についても知見を得ることが可能であることを示していると思われる。

1.2.9 参考文献

- 1) 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次取りまとめ—, 総論レポート, JNC TN1400 99-020.
- 2) 大野博之・小島圭二 (1992) : 岩盤割れ目のフラクタル(その1)—フラクタル分布-, 応用地質, Vol.33, pp.11-24.
- 3) 大野博之・小島圭二 (1993) : 岩盤割れ目のフラクタル(その2)—フラクタル特性と分布のばらつき-, 応用地質, Vol.34, pp.12-26.
- 4) VERMILYE, J. M. and SCHOLZ, C. H. (1998) : The process zone: A micro-structural view of fault growth, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, pp. 12223-12237.
- 5) 金折裕司 (2001) : 断層の影響はどこまで及んでいるか, 応用地質, Vol.41, pp.323-332.
- 6) BILLI, A., SALVINI, F. and STORTI, F. (2003) : The damage zone-fault core transition in carbonate rocks: implications for fault growth, structure and permeability, *Jour. Struct. Geol.*, Vol. 25, pp. 1779-1794.
- 7) 前島俊雄 (2007) : 波方基地LPG地下岩盤貯槽建設の概要, 岩の力学ニュース, pp.1-6.
- 8) Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC) (2000) : H12 : Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan – Supporting Report 3, Safety Assessment of the Geological Disposal System, JNC TN1410 2000-004.
- 9) 佃 栄吉・栗田泰夫・山崎晴雄・杉山雄一・下川浩一・水野清秀 (1993) : 2.5万分の1阿寺断層系ストリップマップ説明書, 構造図(7), 地質調査所, p.39.
- 10) YAMAMOTO, A., NOZAKI, K., FUKAO, Y., FURUMOTO, M., SHICHI, R. and EZAKI, T. (1982) : Gravity survey in the central ranges, Honshu, Japan, *Journal of Physics of the Earth*, Vol.30, pp.201-243.
- 11) 山田直利 (1978a) : 阿寺断層を追って(その1)恵那山トンネルから付知まで, 地質ニュース, Vol.283, pp.37-49.
- 12) 山田直利 (1978b) : 阿寺断層を追って(その2)付知から飛騨川まで, 地質ニュース, Vol. 284, pp. 30-36.
- 13) 岡田篤正 (1975) : 阿寺断層中北部, 舞台峠周辺の地形発達と断層変形地形. 地理評, Vol.48, pp.72-78.
- 14) 遠田晋次・井上大栄・高瀬信一・久保内明彦・富岡伸芳 (1994) : 阿寺断層の最新活動時期 : 1586年天正地震の可能性, 地震, Vol.47, pp.73-77.
- 15) 大嶋章浩・吉田英一 (2004) : 活断層周辺岩盤の割れ目と化学組成の変化-岐阜県付知地域の阿寺断層による事例研究-, 地質環境シンポジウム論文集 (創刊号) , pp.1-10.
- 16) 金折祐司・川上紳一・矢入憲二 (1990) : 阿寺断層周辺の苗木—上松花崗岩に認められるカタクラサイトの葉状構造—塑性変形した黒雲母の発見とその意味, 地質学雑誌, Vol.5, pp.393-396.
- 17) 山田直利・柴田 賢・佃 栄吉・内海 茂・松本哲一・高木秀雄・赤羽久忠 (1992) : 阿寺断層周辺地域の火成岩類の放射年代と断層活動の時期, 地質調査所月報, Vol.43-12, pp.759-779.
- 18) SUGIMURA, A. and MATSUDA, T. (1965) : Atera Fault and Its Displacement Vectors, *Geological Society of American Bulletin*, Vol. 76, pp. 509-522.
- 19) 山田直利・小井土由光・棚瀬充史・原山 智・鹿野勘次 (2005) : 濃飛流紋岩—中部日本にお

- ける白亜紀大規模火砕流の研究－，地団研専報53号。
- 20) 鈴木和博・森下泰成・梶塚 泉・仲井 豊・足立 守・柴田 賢 (1994) : 三河－東濃地域の領家変成岩と花崗岩のCHIMEモナザイト年代，名古屋大学古川総合研究資料館報告，Vol.10, pp.17-38.
 - 21) 石原舜三 (1973) : Mo-W鉍床生成区と花崗岩岩石区，鉍山地質，Vol.23, pp.13-32.
 - 22) ISHIHARA, S. and MATSUHISA, Y. (2002) : Oxygen isotopic constraints on the geneses of the Cretaceous-Paleogene granitoids in the Inner Zone of Southwest Japan, *Bull. Geol. Surv. Japan*, Vol. 53, pp. 421-438.
 - 23) 活断層研究会 (1991) : 新編日本の活断層-分布図と資料，東京大学出版会，pp.222-229.
 - 24) YOSHIDA, H., AOKI, K., SEMBA, T., OTA, K., AMANO, K., HAMA, K., KAWAMURA, M. and TSUBOTA, K. (2000) : Overview of the Stability and Barrier Functions of the Granitic Geosphere at the Kamaishi Mine; Relevance to Radioactive Waste Disposal in Japan, *Jour., Engineering Geology*, Vol.56, pp.151-162.
 - 25) YOSHIDA, H., TAKEUCHI, M., METCALFE, R. (2005) : Long-term stability of flow-path structure in crystalline rocks distributed in an orogenic belt, *Japan, Engineering Geology*, Vol.78, pp.275-284.
 - 26) 吉田英一・西本昌司・長 秋雄・山本鋼志・勝田長貴 (2008) : 地下花崗岩体の変質とその形態－産総研岡山応力測定用深部花崗岩コア試料の変質を例に－，応用地質，Vol.49, pp.256-265.
 - 27) 西本昌司・鶴飼恵美・天野健治・吉田英一 (2008) : 地下深部花崗岩の変質プロセス解析～土岐花崗岩を例にして～，応用地質，Vol.49, pp.94-104.
 - 28) 與語節生・吉田英一・山本鋼志 (2001) : 染色法による岩石中微小空隙構造の同定とその特徴，名古屋大学博物館報告，Vol.17, pp.7-13.
 - 29) REYES, G. A. (1990) : Petrology of Philippine geothermal systems and the application of alteration mineralogy to their assessment, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol.43, pp.279-309.
 - 30) 赤川史典・吉田英一・与語節生・山本鋼志 (2004) : 花崗岩割れ目周辺の酸化還元反応と二次的物質移動現象－地質環境中汚染物質の移動と長期的固定に関するアナログ研究－，地質学雑誌，Vol.110, pp.671-685.
 - 31) AKAGAWA, F., YOSHIDA, H., YOGO, S. and YAMAMOTO, K. (2006) : Redox front formation in fractured crystalline rock: an analogue of matrix diffusion in an oxidizing front along water-conducting fractures, *Geological Society of London*, Vol.6, pp.49-56.
 - 32) 金折裕司・川上紳一・大西小百合・長尾敬介・杉崎隆一・矢入憲二 (1991) : 阿寺断層周辺の苗木－上松花崗岩に認められるカタクラサイトの微細構造とK-Ar鉍物年代，岐阜大学教養部研究報告，Vol.27, pp.79-91.
 - 33) ANDERS, M. H. and WILTSCHKO, D. V. (1994) : Micro-fracturing, paleostress and the growth of faults, *Journal of Structural Geology*, Vol.16, No.6, pp.795-815.
 - 34) CHERNYSHEV, S. N., and DEARMAN, W. R. (1991) : Rock Fractures, Butterworth Heinemann, *Newton Mass.*
 - 35) BROCK, W. G. and ENGELDER, J. T. (1977) : Deformation associated with the movement of the Muddy Mountain overthrust in the Buffington window southeastern Nevada, *Bull., Geol. Soc. Am.*,

Vol.88, pp.1667-1677.

- 36) LITTLE, T. A. (1995) : Brittle deformation adjacent to the Awatere strike-slip fault in New Zealand: Faulting patterns, scaling relationships, and displacement partitioning, *Bull., Geol. Soc. Am.*, Vol.107, pp.1255-1271.
- 37) UDA, S., LIN, A. and TAKEMURA, K. (2001) : Crack-filling clays and weathered cracks in the DPRI 1800m core near the Nojima Fault, Japan: Evidence for deep surface-water circulation near an active fault, *The Island Arc.*, Vol.10, pp.439-446.

(名古屋大学 吉田英一)

1.3 結晶質岩を対象にした処分システムNFコンセプトに関する研究課題の抽出とその体系化

1.3.1 はじめに（背景）

「深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究」での課題グループでは、処分システムニアフィールド（NF）コンセプトの検討を行ってきた。これは、平成12年度レポート¹⁾に示されるNFコンセプトをさらに現実的なものへと改善するだけでなく、実際の地下環境でのより合理的調査・評価手法を整備することを最終的な目的とするものである。またこれらの検討は、とくに瑞浪超深地層研究所（MIU）での来る地下坑道での原位置試験の構想に大きく関わるものであり、変動帯という広域的な地質環境下で形成された我が国の特異な地下地質環境の特性を把握するための独自の技術を整備する上でも非常に重要である。

将来の地層処分場で遭遇すると考えられる坑道周辺は、地下岩盤（岩石・鉱物）と地下水で満たされた地下地質環境とグラウト材やコンクリート支保材など、人工材料とのインターフェースであり、また操業に伴う力学的擾乱や酸化還元反応などといった物理的・化学的变化を伴う環境（場）である。これまでの平成12年度レポート¹⁾をはじめ、我が国の性能評価の概念モデルにおいては、これらの複合状態（より現実的な状態）の理解が明確ではなく、信頼性の高い安全評価体系を整備するためには、実環境をより現実的に示すことのできる情報（データ）と調査技術を早急に準備することが必要と考えられる。またこれらの情報と技術は、多重バリア性能の健全性を明確にするためのニアフィールド（NF）におけるSafety caseを抽出／構築する上でも不可欠である。

本報告は、このような背景のもと、これまで行ってきたNFコンセプトの検討内容と、瑞浪超深地層研究所での第3段階における原位置試験研究を想定し、結晶質岩（花崗岩体）での坑道周辺におけるEDZ（掘削影響領域）環境下での複合的環境における原位置試験方法、意義、考え方等について取りまとめたものである。

1.3.2 検討内容

1.3.2.1 目的

ここでは地下環境評価技術の高度化のために、瑞浪超深地層研究所における結晶質岩の地下坑道周辺を想定した現実的なNF-FEPを再検討／抽出することを目的として実施した。とくに、NF Safety caseの検討において、欧米ではNF水理状態や地球化学的变化、ガス発生やベントナイト変質などが検討項目としてあげられている²⁾。しかしながら、これらは欧米での処分システム（地質環境）を想定した上でのSafety caseの構築のために検討項目として提示されたものであり、日本の地質環境（変動帯等々）を想定したものは独自にその項目を検討／抽出することが必要である。

1.3.2.2 検討にあたっての諸条件

結晶質岩である瑞浪超深地層研究所の地下環境においては、地下水や物質移動経路としての割れ目／断層を想定した状態でのNF環境の検討が不可欠である。また、湧水状態等を考慮した場合のグラウチングやコンクリート吹き付け等の対策も想定される。瑞浪超深地層研究所での最近の

主立坑，換気立坑の状態からも（後述）湧水を避けることはできないであろう。このような条件において，下記に示す項目が掘削～操業～1閉鎖段階（図1.3.1）において従来から指摘されてきた課題である。

- ① EDZ の水理状態（透水係数）と解決すべき問題
 - *飽和・不飽和の状態・・・戻るか／戻らないか？→予測可能か？割れ目との相関は？
 - *ベントナイトの流出を防ぐために必要な最低の水理条件は？
- ② EDZ の力学的状態と解決すべき問題
 - *EDZ の長期的変化や水理にからむ水みちの長期安定性 or 挙動は？
 - *応力の一点集中による廃棄体の物理的破壊の可能性は？（長期的応力再配分）
- ③ セメント，グラウト剤の効果と影響，と解決すべき問題
 - *長期的状態変化・・・注入範囲の把握は可能か？（必要か？）
 - *岩盤力学・水理・地球化学への影響を何処まで想定すべきか？
- ④ コンクリートプラグ，埋め戻し材の効果と影響と解決すべき問題
 - *坑道周辺環境への影響をどこまで想定すべきか？
- ⑤ ガス（ H_2 ， ^{14}C ）移行の影響と解決すべき問題
 - *力学的に想定すべき課題が考えられるか？

Post-closureにおける想定される場および現象の要素

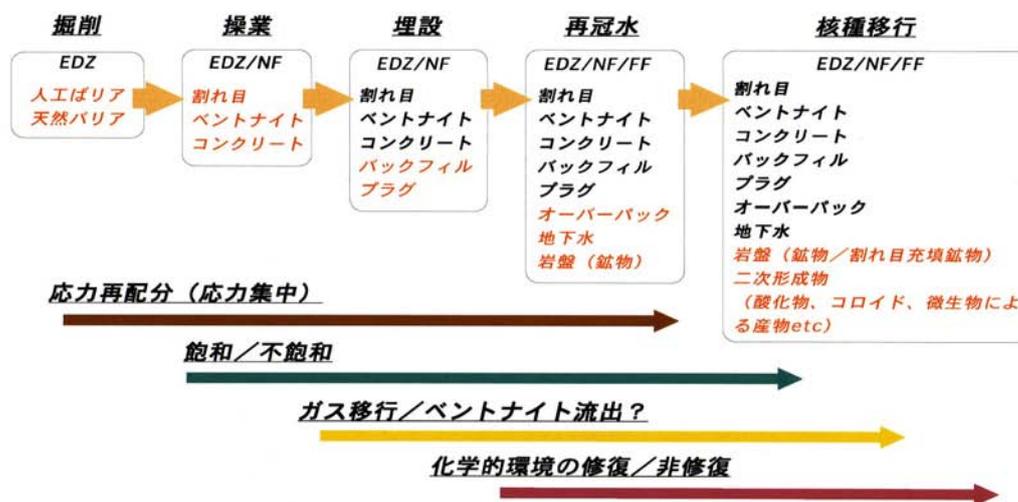


図1.3.1 NFコンセプトを構築するに重要と思われる項目とプロセス

1.3.3 NFコンセプト (Generic model) と再検討の意義 (レビュー)

これらの課題を含めたNFコンセプトを構築する上で，当研究グループでは，まずIdealな結晶質岩におけるNFコンセプトのレビューを行った。ここではレビュー内容と，それらを参考に，瑞浪超深地層研究所における研究事例を基にNFコンセプト構築に向けた検討内容を示した。

1.3.3.1 地層処分の基本的考え方

放射性廃棄物の地層処分システムにおいては、処分された放射性廃棄物は、天然の地質環境だけではなく、地質環境の条件を考慮に入れて適切に設計された工学的な対策を組み合わせることによって人間環境から隔離される。このような何重ものバリアにより廃棄物を隔離するためのシステムが、多重バリアシステムである。このうち工学的に施された対策が人工バリアであり、人工バリアには、安定な形態を持つ廃棄体（ガラス固化体あるいは使用済燃料）、廃棄体を格納する容器（オーバーパック）、地下に埋設する際にオーバーパックと地層との間に充填される物質（緩衝材）が含まれる。地質環境が有する放射性核種の隔離および保持・移行遅延機能は、天然バリア機能あるいは地質バリア機能と呼ばれる。

地層処分における多重バリアシステムは、バリアの多重性という点からいえば、原子炉安全における深層防護の考え方と同様である。しかし、地層処分の安全性は、設けられた多層の防護系それぞれが完全に独立して機能することを求めている深層防護の考え方が、そのまま適用されたものではなく、個々のバリアが放射性核種の閉じ込めや移行の抑制に関連する種々の安全機能を重複してもつことにより、あるバリアが仮に、将来において期待どおり機能しないようなことがあっても、他のバリアによって補償され、システム全体として安全性が確保されるように意図されたものである。この点で、地層処分の安全性を評価する際には、各バリア要素そのものの性能を独立に評価するのではなく、それらの性能の変化がシステム全体にどのような影響を及ぼしうるかを評価するという、システム論的な見方が必要である（多重バリアの深層防護性）。

ニアフィールド（NF）は、人工バリアとその設置などにより影響を受けると考えられる人工バリア近傍の岩盤を合わせた領域である。ここでは、坑道掘削に伴う地下地質環境の変化や、グラウト材やコンクリートの敷設に伴う環境変化が起こる。また処分ピットでは、さらに廃棄体がベントナイトとオーバーパックとともに埋設される。すなわちNFは、処分後において、様々なバリア要素が互いに干渉し合う複合環境（バリアシステム）であり、バリア要素が互いに影響を及ぼしあっても、核種移行における地下水シナリオの中で、バリア要素がお互いに補完し合っ

て全体として長期的なバリア性能を健全に発揮することが期待される。平成12年度レポート¹⁾以降、NFにおける地質環境状態や掘削に伴う環境変化、人工バリアとの相互反応などに関する知見が蓄積されてきた。これにあわせて、NFにおける多重バリア機能の補完状態（深層防護性）をさらに現実に近い形で評価確認し、得られている知見、さらに必要な知見を整理することは、システムの合理性を追求するだけでなく、将来の地下研における地下坑道を用いた原位置試験の具体化には不可欠な作業である。また実施主体に対する技術移転の観点からも、実施しておくべき検討内容と言える。

一方で従来のNFバリア機能とそのコンセプトの健全性は、上記に示したような人工バリアを中心とした坑道周辺までを主たる対象として考えてきた背景がある。しかし、これらNF地質環境の形成は、それらを取り巻くサイトスケール、さらにはサイトスケールを包括する広域的な水理や地球化学的、構造地質学的な地質環境に強く依存する。このことは、処分システムにおけるNFコンセプトを我が国の地質環境に対して最適化を行うにあたっては、NF環境を包含する広域的な地質環境との相関を常に意識した体系化を実施することが必須であることを示している（図1.3.2）。

以上のような観点から、我が国の処分システムにおけるNFコンセプトについて、多重バリア機能に関して求められる要件並びに将来の研究開発に向けての課題と考えられる項目を以下に要約する。

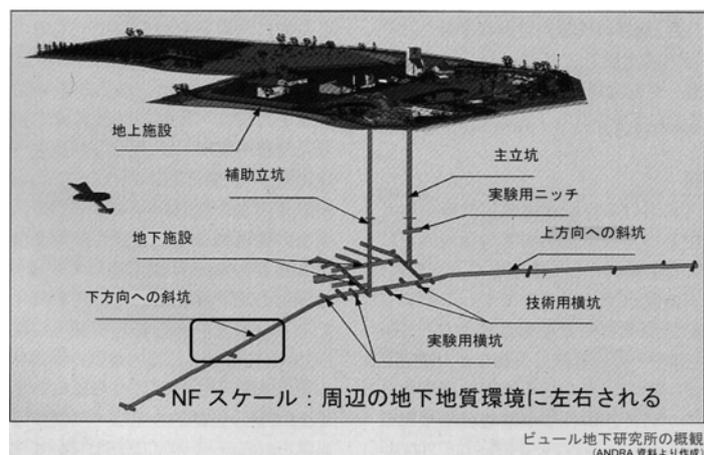


図1.3.2 サイトスケールとNFスケールの相関事例³⁾

1.3.3.2 検討対象とする時空間枠の設定

廃棄体を含む人工バリアおよび周辺岩盤で代表される天然バリアの健全性は、地下水シナリオにおいて期待される基本的な役割／機能の観点から記述される。

放射性廃棄物の潜在的毒性を表す一つの方法は、放射線学的毒性指数（放射能毒性）を用いるものである。これは廃棄体に含まれる核種の放射エネルギーを、その核種の年摂取限度で除した値を全ての核種について加えあわせた値で、廃棄体に含まれる放射能が水に溶けると仮定して、どれだけの水で希釈すればその水を摂取した際の被ばくが 1mSv/y になるかを示している。ガラス固化体4万本の毒性は、数千年で1%のウランを含む鉱石が、地下数平方キロにあるのと同程度になり、数万年で0.1%のウランを含む鉱石が同様の広さにあるのと同程度になる¹⁾。すなわち、ガラス固化体は、初めの千年ほどは希釈して捨てることのできないほどの放射能を含んでおり、その後数万年までは、十分希釈されれば問題のない程度の放射能を含んでいる。したがって、多重バリアは、最初の概ね千年程度は、完全な物理的閉じ込めを保証し、それ以降は、廃棄体からの放射性物質の浸出抑制、移行遅延と、天然バリアでの希釈とあわせて、十分な放射能濃度となるような性能が期待される。地下水シナリオは、このような毒性を持つ廃棄体から、放射性物質が地質環境中の地下水を介して移行する際、多重バリアがどの程度の安全性能を有するかを評価するシナリオである。

これらの核種移行プロセスと地下水シナリオによる核種遅延機能の概要を図1.3.3に示す。とくに地下水シナリオにおいては、多重バリアとしての基本的機能は、溶解／沈殿、収着、拡散、移行、希釈といった現象に集約される。

またこれまでの地層処分安全研究においても、地下水シナリオにおけるバリア機能に関して、果たして予測通りに物事が進むのか、といった観点から；

- バリアの長期安全性
- バリアにおけるシナリオの妥当性
- シナリオ評価に用いるモデルの妥当性
- シナリオ評価に用いるデータの妥当性

に関する検討が実施されてきている（図1.3.4）。

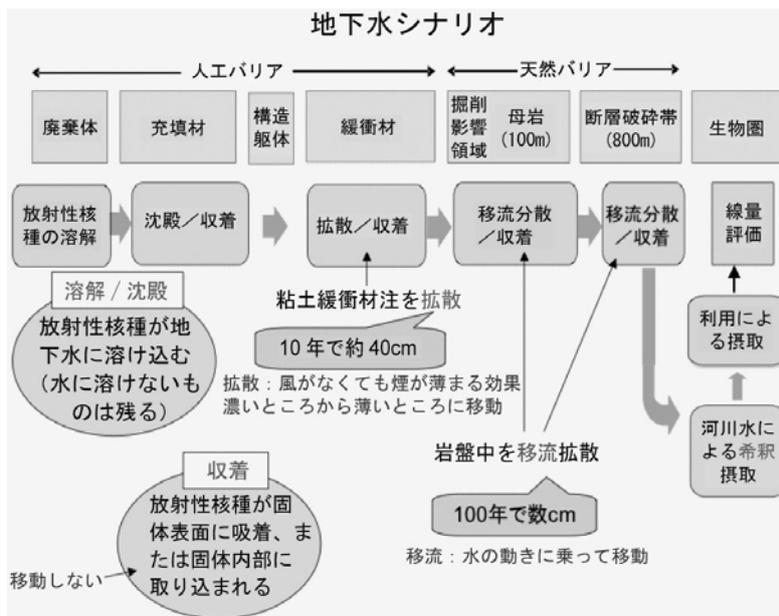


図1.3.3 地下水シナリオにおける期待されるバリア機能

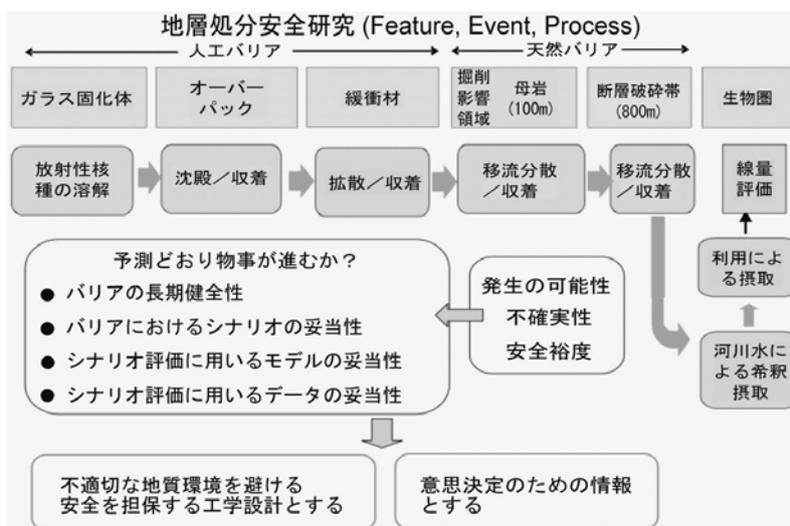


図1.3.4 安全評価研究における検討項目

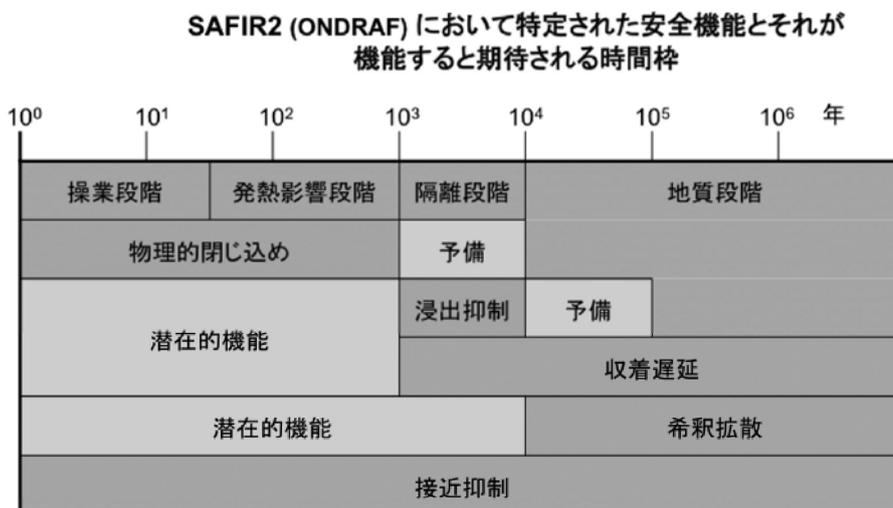
これらの人工バリアならびに天然バリアの多重バリアにおいて、NFに関わる部分として、オーバーパック～緩衝材～掘削影響領域(母岩)～断層破砕帯までの領域において、時間枠としても、処分場閉鎖後(10³年)から天然バリアと人工バリア材との複合反応を主体とした時間スケールであり、おおよそ10⁴年オーダーでの現象を対象に各種現象とNFプロセスの検討を当研究グループでは行ってきた。とくに検討を行うにあたっては、処分場操業以降の時間ステージにおける各種バリア機能に対して期待される役割と時間枠との相関を意識しつつ、NF環境での各種プロセスに関する知見の過不足や将来に向け検討すべき項目についての抽出を行った。このような試みは、海外でも試行されている(参考として図1.3.5にSAFIR2での基本的な考え方を提示する⁴⁾)。

ここで重要なのは、各種バリアの基本的安全機能として期待される；

- 物理的封じ込め

- 浸出抑制
- 収着遅延
- 希釈拡散
- 接近抑制

といった役割とその時間枠である。



Fulfilment of the Long-term Safety Functions by the Different Barriers during the Main Time Frames after Repository Closure, P. De Preter and P. Lalieux, in *The Handling of Timescales in Assessing Post-closure Safety of Deep Geological Repositories*. Workshop Proceedings, Paris, France, 16-18 April 2002

図1.3.5 多重バリアシステムの安全機能と時間枠⁴⁾

本報告では、NFコンセプトに直結するバリア機能に関する前半の3つの項目（物理的封じ込め／浸出抑制／収着遅延）に注目して検討を行った（後半の、希釈拡散および接近抑制については、サイトスケールでの地質環境状態や長期安定性に関する項目であり、現時点ではその検討対象から除外した）。

これらの安全機能において、先に示した地下水シナリオでの人工バリアおよび天然バリアの各種材料、要素を重ね合わせた場合の各種検討要素、境界条件は以下の通りである。

- 時間スケール：10⁰年～10⁵年
- 物理的封じ込めに関する要素／バリア機能：オーバーパック，ガラス固化体，ベントナイト，セメント
- 浸出抑制に関する要素／バリア機能：ガラス固化体，ベントナイト，セメント，バックフィル
- 収着遅延に関する要素／バリア機能：ベントナイト，セメント，バックフィル，周辺母岩

一方、これらのバリア材、要素に対して、処分場としての日本の地質環境およびサイトが決定していない状況にあって、例えば地下水の水質が淡水環境であるのか、塩水環境にあるのかによって、それぞれの要素に対する安全機能が大きく変化することは十分に考えられる。そのような不確実的な要素もあることから、ここでは現時点で想定されうる幅広い地質環境下での汎用性の高いプロセスに注目しつつ、Genericな観点からNFコンセプトの検討内容としての概念を示した。

1.3.3.3 バリア要素毎のNFコンセプトにおける安全機能と研究課題の検討

各種バリア機能における安全機能に関して、上記観点からそれぞれのバリア要素におけるNFコンセプトにおける安全機能を補完するという観点から、今後検討が必要と思われる点について以下に示す。(なおここでは先にも述べたように、NF環境におけるバリア機能に関わる現象や要素に関するものを列挙したものであり、いわゆる瑞浪超深地層研究所における原位置試験実施に絡んだ研究テーマとしての観点で、その優先順位を示しているわけではない。瑞浪超深地層研究所の原位置試験内容を念頭においた実施テーマに関しては、これらのGenericな検討の後にその関連をも含めてまとめた)。

(1) ガラス固化体

ガラス固化体については、オーバーパックの閉じ込め健全性が失われた後から数千年から数万年までの、溶解度の大きい放射性核種に対する重要な浸出抑制バリアであるにも関わらず、その溶解の速度および機構や固化体の比表面積の変化、固化されたガラスの不均質性の影響などについて十分な検討がなされていない。これまでのガラス溶解に対する評価が十分妥当であるかどうかを含め次のようなプロセスの検討が必要と考えられる。

- 拡散支配の環境におけるガラス浸出の速度と機構
- オーバーパック内で熱、圧力の影響下にあるガラス固化体の力学的破壊挙動と比表面積の変化
- ガラス固化体製造時の固化体のガラスとしての均質性、不均質部分（結晶粒、イエローフェーズ等）の特定とガラス溶解に対する影響
- ガラスからの溶解物質による地下水条件の変化（シリカその他の物質によるコロイド形成の有無とその影響）

(2) オーバーパック

オーバーパックに期待されているバリア機能は、廃棄体の放射能レベルが非常に高い初期の概ね千年程度の時間における物理的封じ込め機能である。したがってこの機能に対して上記の影響が、概ね千年程度の時間にどの程度進むかを検討するとともに、このような反応が顕著に進行したときに、隣接するバリアであるガラス固化体と緩衝材にどのような影響を与えるかを検討する必要がある。

これらの観点からこれまでの知見と併せて、さらに検討すべきプロセス（項目）を示す。

- 操業期間中の酸素の浸透に伴う腐食程度と速度
- 微生物影響に伴う腐食程度と速度
- 放射線影響に伴う腐食の加速
- 溶接部分の腐食速度の定量的見積もりの確からしさの確認
- 地圧による破壊の可能性

これまでの検討により、オーバーパック母材に対して腐食形態は全面腐食であり、腐食速度は十分に遅いことが、室内実験やナチュラルアナログにより支持されている。今後は、とくに溶接部等の腐食の形態と進行や、高地圧下、微生物存在下の腐食の形態と進行など、部位や条件が通常と異なる場合について検討することが必要と考えられる。

(3) ベントナイトセメント相互作用

人工バリアのうち、ベントナイトは、天然に産する材料を工学的に配置したものであり、その物理化学的性状は、外からの擾乱がなければ長期にわたって健全に保たれるという意味で、人工バリアの他の要素とは異なっている。このバリア材については、物理的閉じ込め期間（概ね千年程度）におけるオーバーパックに対する力学的緩衝性、それ以降の期間における浸出抑制（溶解／沈殿に対する拡散場の確保）バリア、収着遅延バリアとしての機能が期待されている。浸出抑制および収着遅延機能に対しては、性能評価がなされるほぼ全期間（数十から数百万年）に対してそのバリア健全性が期待され、評価において仮定されている。物理的閉じ込め期間におけるオーバーパックに対する力学的緩衝性については、これまでの検討により十分機能が維持されると考えられるが、浸出抑制および収着遅延機能に対しては、セメントとの相互反応が注目されているように、安全機能が損なわれるかどうかも含めて、相互作用の観点から検討されることが必要と思われる。とくに性能については、依然、工学的というよりは化学的影響に関する知見が不十分と思われる。とくに以下の観点に関する議論、知見の整備が安全機能を担保する上で重要と考えられる。また一方では、セメント支保による工学的安全機能の面も避けることのできない観点と思われる。これらの観点から今後検討すべきプロセスを示す。

- 高pHによるベントナイト変質現象
- 高pHによる周辺岩盤鉱物の変質現象
- 高pH形成に伴うシリカ溶解およびシリカコロイドの形成と核種移行への影響
- オーバーパック腐食に伴う鉄コロイドのベントナイト中拡散ならびに周辺岩盤中への拡散と核種移行への影響

（セメント影響に関しては、TRUの場合、セメントも収着機能を有するバリア機能の1つとして考慮している。一方HLWの場合は、現時点では考慮していない。将来の地下環境において、空洞の長期安全性を担保する上でセメントの使用が不可避な場合、セメント自体をバリア機能の1つとしてカウントすることもNFコンセプトの再検討としてはあり得ると思われる）

- 長期的な地下空洞安全性を担保する上で（とくに地震活動に伴う震動対策など）現在の手法や支保手法が適切かどうかの検討も必要と考えられる。

(4) バックフィル

これまでのNF環境設定において、バックフィルの存在、影響についてはあまり議論されてきていないのが実情である。しかしバックフィルは、処分ピット以外の坑道空間の多くを埋設材として占める可能性があり、その成分や地下水との反応による空隙水の状態など、NF環境に影響を及ぼす要因の1つとして具体的に考慮／検討される時期にあると思われる。以下に、これまでの議論／検討によって示されている検討事項を示す。

- 閉鎖方法の検討
- バックフィルの素材／準備方法（ズリの活用方法）／保管方法の検討
- 核種吸着（バリア）材としての検討
- 水みちとしての検討
- 酸化還元反応領域として緩衝作用の検討

(5) ガス発生

廃棄体周辺での、放射線分解に伴うガス発生（水素ガスなど）の影響として、ベントナイト中への浸透による優先的経路の形成が考えられている。とくに微小経路の形成としても拡散支配の環境が破壊される可能性があることから、ベントナイト中への高圧ガス浸透プロセスの確認が必要と思われる。

(6) 掘削影響領域（EDZ）

現在のEDZは、NF坑道周辺に均一にある幅を有して分布する形状を想定している。また、水理的にも優先的経路になる可能性を有しているものとしてNF概念モデルの検討がなされているが、果たして同様の均一モデルをサイト全体に広げることが現実的なのかどうか。また水理的にも、優先的経路がEDZ全体に均一に広がるという想定がどの程度現実的なのかを具体的に評価することが必要である。またこの評価は、対象とする地下岩盤（岩種）によっても大きくその性状が異なる。今回、後述する結晶質岩におけるEDZと幌延の堆積岩におけるEDZは、地質構造（岩盤力学）的にもまた地球化学的にも異なることは容易に理解できることである。とくに結晶質岩では、岩体中に分布する割れ目や割れ目帯、あるいは小断層などの分布や広がり・方向など、さらにはそれらが水みちとして機能しているものかどうかによっても、地下で遭遇した場合でNF環境は大きく異なってくる。これらの検討内容は、瑞浪超深地層研究所での原位置試験構想に直結するものであり、次章以降で詳述する。

(7) コロイド形成と移行

コロイド形成に関しては、真性コロイド、ベントナイトコロイド、Feコロイド、シリカコロイド、無機-有機混合コロイド等、ガラスの溶解やコンクリートの変質の過程でのコロイド形成が想定されるが、コロイドの形成条件や経時的変化（または安定性）等については、未だ定性的な知見の領域を出ていないのが実状と思われる。これまでの評価では、有機物等の地質環境に存在する地下水コロイドは、ベントナイトのろ過効果により、沈殿/溶解場にまで侵入しないとされているが、この論拠についても検討しておく必要がある。またベントナイトを通過した核種は、NF環境で、コンクリートが変質しつつあるアルカリ環境を通過することになるが、このような条件の下で生成する可能性のあるコロイドについては、その安定性について検討する必要がある。これまでの例では、ネバダの原爆実験の直後に生成したと考えられるプルトニウム-シリカコロイドが予想よりも遠くにまで移行しているとの報告⁵⁾や、ロシアのMayakプルトニウム生産工場（原子炉、再処理工場等の複合体）における中レベル廃液貯留池からのプルトニウムの移行⁶⁾など、無機コロイドあるいは混合コロイドと思われる擬似コロイドがかなりの期間安定で、核種の移行遅延を阻害する例が見られている。このように、NF環境は、これらの混在生成を生じさせる可能性を有しており、原位置での確認調査が重要になる。

(8) 酸化還元反応

酸化還元フロントに関しては、酸化還元反応に伴う環境変化のみならず、微生物活動や副産物としての酸化物による収着、酸化物の長期保持と移動（Migration）に伴う岩盤中の鉱物の溶解や環境変化などといった現象が想定される。これらに対してどのような安全機能の変化（の有無も含めて）が生じるのかを定性・定量的に把握することが必要である。酸化還元は、錯生成などに

比べて、反応速度が注目する反応に応じて極めて大きく変化するため、実験室研究の結果の外挿や熱力学的考察だけでは十分な予測は不可能である。このため、より長期の時間軸に対しては、システム論的なアプローチとして、反応機構の解明と地球科学的な現象の観察（ナチュラルアナログ）を併用し、説得力のある論拠とともに、長期の性能を評価する必要がある^{7),8)}。

(9) 塩水の影響

地下環境における地下水の性質として「塩水」が一義的に存在する場合、オーバーパックの腐食やベントナイトの膨潤性の低下に関する知見を整備するだけでなく、坑道の工学的長期安定性（例えばコンクリートの物理的性質の変化など）を阻害する可能性のある現象やその対策についての知見を整備することが必要である。

1.3.3.4 結晶質岩におけるNFコンセプト検討

結晶質岩におけるNFコンセプトについて検討するにあたって、我が国の結晶質岩の地質構造（割れ目や断層などの地下水流動系に影響を及ぼすと考えられる岩体内構造をここでは指す）を無視することはできない。ここでは、「深部地質環境の調査・解析技術の体系化研究」で別途進めてきた、阿寺断層を事例にした結晶質岩内での断層や割れ目構造の特徴に関する知見にも触れつつ以下に将来に向けた実施内容の基本的考え方を述べる。

(1) 我が国の結晶質岩中の断層および割れ目の特徴

我が国の結晶質岩の特徴は、割れ目（帯）密度（頻度）が高いことである。我が国の結晶質岩（ここでは主に花崗岩および花崗閃緑岩などの深成岩類を対象として示す）中の割れ目頻度の多くは、その岩体の形成年代が比較的若い（ジュラ紀以降）のにもかかわらず1~2本/m程度と高く⁹⁾、欧米の楯状地を形成する数億年~数十億年の古期花崗岩体中の割れ目のそれよりも一桁その頻度（密度）は高い。この違いは、我が国の変動帯という特異的な地質環境下において結晶質岩が長期に渡るストレス（応力変化・履歴）を経てきた結果と言えるものである^{9), 10)}。また割れ目充填鉱物に関しても、おおよそそれらの種類は熱水による沈殿鉱物とその主体となるものの、わが国のそれには粘土鉱物や粘土状の「ペースト状」のものといった特徴的な充填鉱物が認められる。

また結晶質岩中の断層についても、断層運動に伴う断層内部の構造発達や周辺岩盤への割れ目発達過程が明らかになってきた。図1.3.6は阿寺断層における断層内部構造、周辺割れ目および断層や割れ目内の充填鉱物の種類や地球化学的特徴について取りまとめたものである¹¹⁾。阿寺断層は、過去数十Maという長期にわたって活動してきたものであり、断層周辺に形成される割れ目やその他の断層活動に伴う「影響」は、その長期の蓄積として認識されなければならない。活断層としての活動期間における「影響」は、したがって総体として示される「影響範囲」の一部に留まるであろう。このような断層活動履歴解析が、断層内部の組織や充填鉱物から漸く可能となつつある。このような情報をもとに断層周辺の構造モデルとして提示したのが図1.3.7である¹²⁾。

このような我が国における構造的特徴を有する断層や割れ目といった、工学的にも地下空間利用において影響を及ぼす「地質環境要素」は、従来から経験的にもいわゆる「Japan Specificな要素」として知られていたものである。したがって、日本の変動帯における地下環境では、欧米の安定した陸塊での地下環境利用では遭遇しにくい要素を考慮することが重要となる。

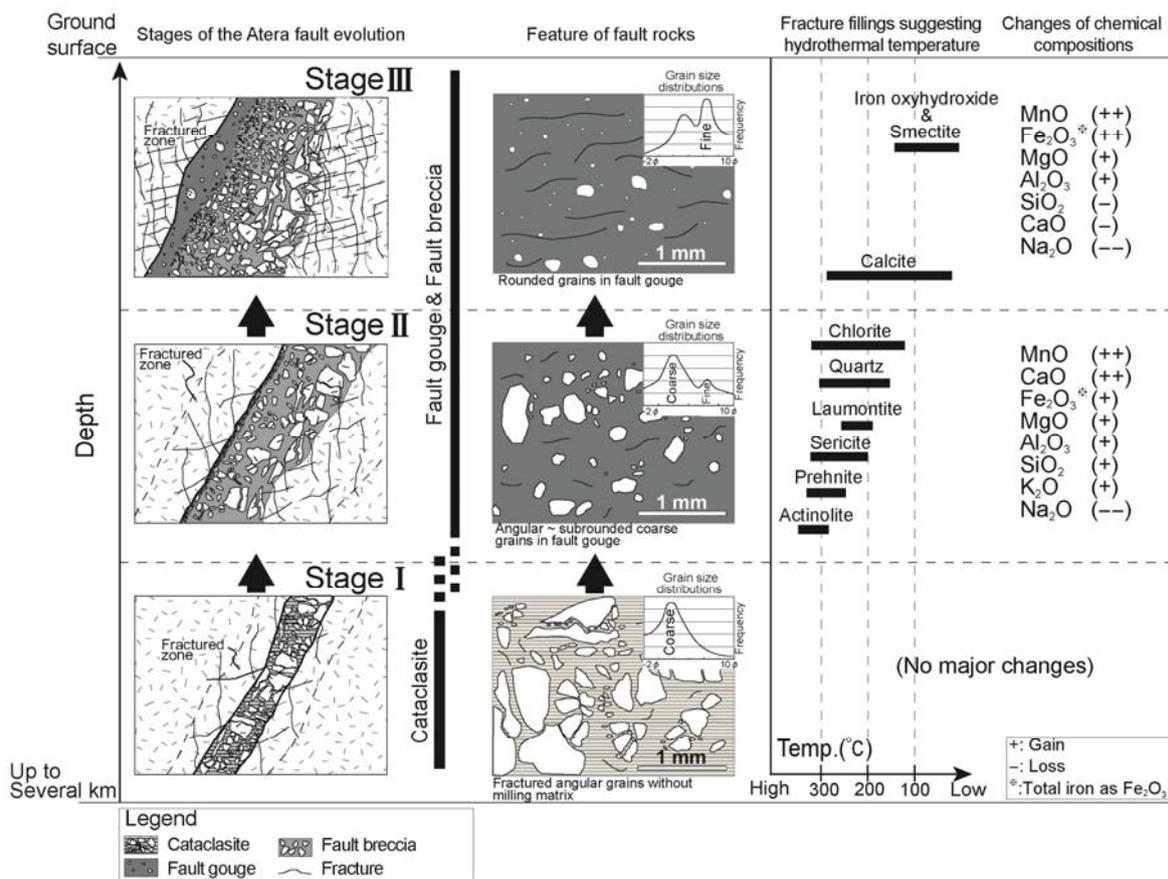


図1.3.6 断層および割れ目構造，充填鉱物による阿寺断層の形成履歴解析¹¹⁾

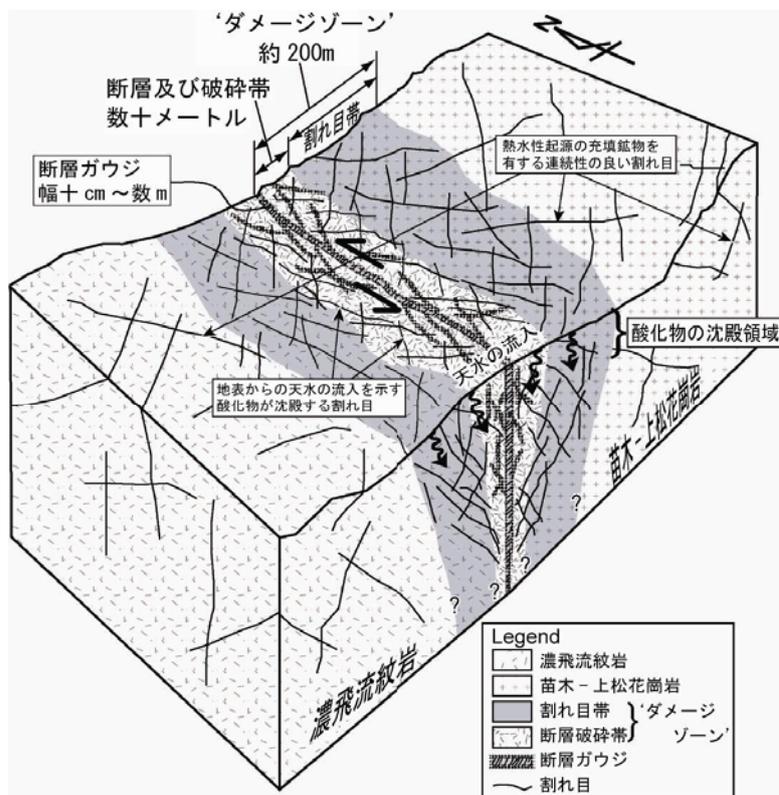


図1.3.7 阿寺断層の構造概念モデル¹²⁾

このような地下環境に地下空洞を建設することは、長期にわたる地質時間（ここでは地層処分
で検討するおおよそ数万年～数十万年の時間スケールを想定）に地下環境を形成する岩石・鉱物
および地下水との反応によってある種の平衡状態にある「場」を擾乱し、処分場閉鎖までの期間
に掘削前とはことなつた地下地質環境に変化させることに等しい（図1.3.8参照）¹³⁾。

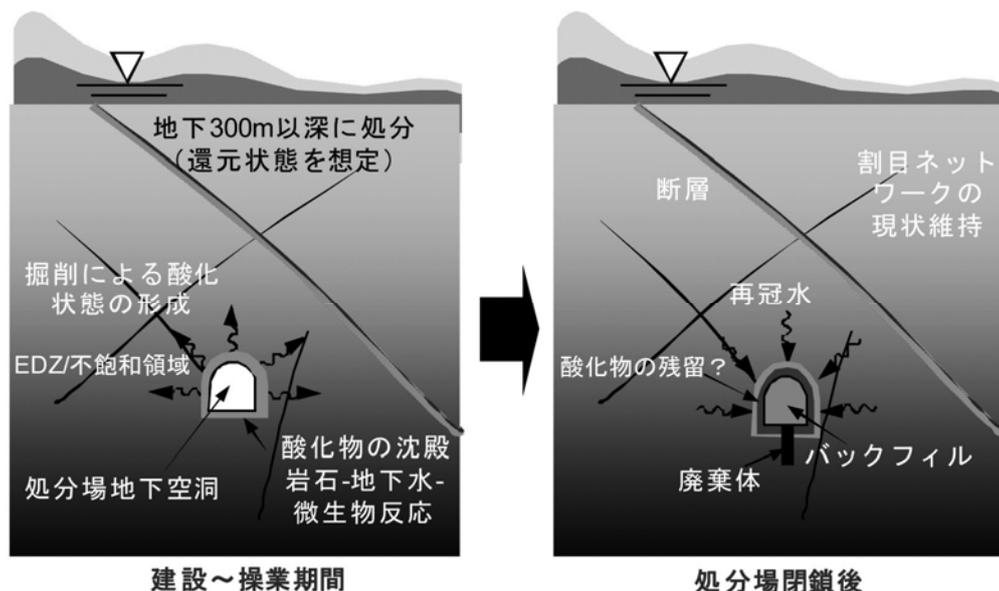


図1.3.8 処分場地下空洞建設および閉鎖に伴う状態変化の概念¹³⁾

その状態変化は、我が国のそれと欧米の安定した陸塊のそれとは、そこにある割れ目や断層の
性状が異なるのであれば、必ずしも同様なものになるとは限らない。またそのような状態変化は、
最終的には閉鎖後にどのように元の状態へと戻っていくのか、あるいは戻らずに掘削前とは異な
つた平衡状態へと移行していくのかなどといった、長期的視点に立脚した処分場全体の安全評価
のフレームワークを構築することが、処分場の数万年という長期的安全性を評価するという観点
からはなされるべきであろう。

(2) 瑞浪超深地層研究所におけるNFコンセプト構築のための原位置試験研究の考え方

上記のGenericな観点での検討課題をベースに、瑞浪超深地層研究所の300m深度で、結晶質岩の
NFコンセプトを構築すべく将来実施する予定の原位置試験構想との整合性をも含めて、結晶質岩
におけるNFコンセプト構築に重要と考えられる研究テーマを以下に示す。

瑞浪超深地層研究所では、主立坑および換気立坑での掘削深度は、平成21年6月現在で約350m
であり、ここにおいても結晶質岩中の一般的特性である断層を避けることはできない。そこでの
地質状況は、主立坑と換気立坑との両方において、断層帯と健岩部と非常に対称的なものとな
っているものの（図1.3.9）、このような地質状況は、土岐花崗岩という変動帯環境で形成され、育
まれてきた白亜紀の花崗岩が有する一般的特徴と考えられる。これらの立坑周辺においては、
100mレベルごとに予備ステージの設置が検討されており、現在原位置試験を将来的に実施する予
定としているのは、深度300mレベルの研究アクセス坑道である。

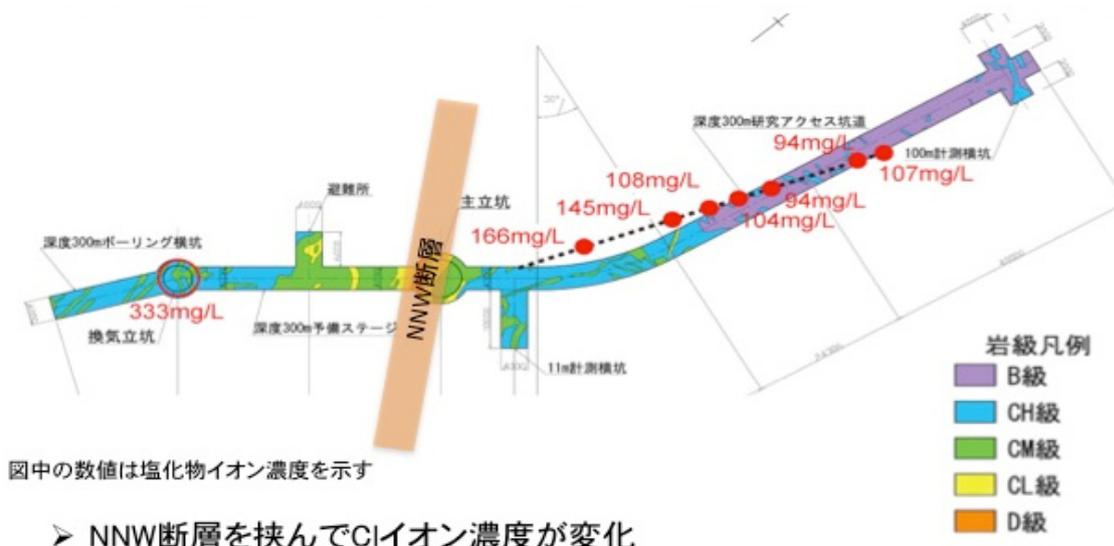


図1.3.9 300mレベルにおける岩盤の状態および地下水の不均一性

将来の処分場環境で、このような300mレベルで認められる断層および割れ目帯をはじめとする地質状態、環境の不均一性は、これまでの釜石原位置試験場や、国内でのボーリングコア調査、地下備蓄サイトでも同様に確認されており、我が国の地下地質構造を鑑みた場合、基本的には避けることはできないと考えられる。

今回の瑞浪超深地層研究所で遭遇した地下地質構造は、事前に一部予測されていたものの必ずしも地表調査の段階から明らかとなっていた訳ではない。したがって、将来の処分場においても、このような地質構造に遭遇した場合の練習問題として、瑞浪超深地層研究所での事例は非常に参考になるものである。とくに先に述べたNF Safety caseの構築と併せて、状態把握とその後展開される安全評価として、このような地下地質構造（断層や割れ目帯）を処分場パネルに取り込むことが可能か否か、安全評価上リスクと考えるべきか否か、例えば断層粘土が充填された断層の透水性は低く、また核種吸着能についても健岩部より期待されることも考えられる。したがって、「断層（帯）イコール排除すべきもの」という先入観で対応するのではなく、その判断基準を地下環境での原位置試験で確認するというスタンスが重要であると共に、原位置試験によってそれらの基本的考え方や評価のための調査手法を整備することが大切である。そういった観点から、地質学的状態に併せてグラウチングやコンクリート等、人工材料との相互反応をも考慮した上でのNF原位置試験研究のあり方、将来のあるべきNF安全評価（核種移行をも含めた）の基本的考え方を検討することが必要である。

このような割れ目（帯）に関する特徴を有する岩体におけるNFコンセプトと、またそれを具体的に検討／把握するための原位置試験とデータも、欧米における安定陸塊を対象とした調査手法や取得データとは異なったものであることが想定される。昨年度までの検討事項についても、結晶質岩を想定したNFにおける概念とそこでの現象は図1.3.10に示すように、Genericなものであり必ずしも網羅性において十分ではない。例えば、坑道掘削に伴うEDZや坑道の空間維持のために必ず用いられるロックボルトやコンクリート、その他の支保材や人工物等との反応、あるいは地下水の湧出に伴う化学的応答や周辺地下環境の変化など、例えば核種移行に影響を及ぼすと考えられる様々な実際的問題の検討が未だ不備な状態にある。

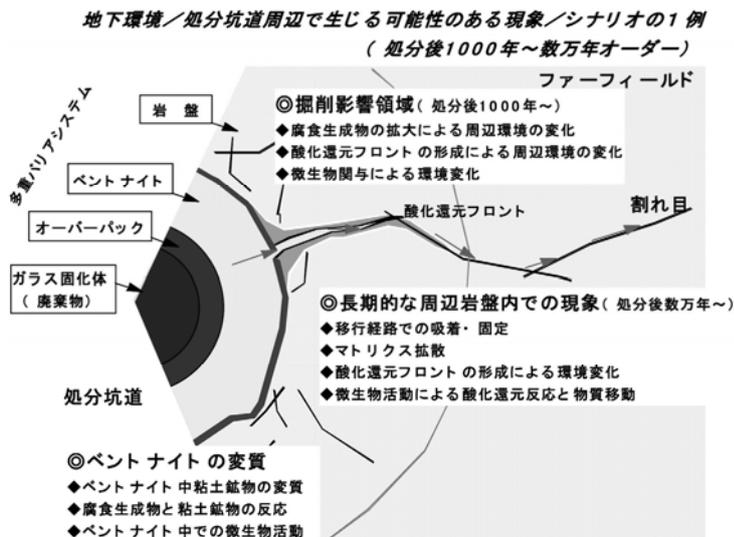


図1.3.10 NFコンセプトを構築する上で示されたNFプロセスの一例

また結晶質岩において必ず遭遇する割れ目（帯あるいは小断層）の規模や頻度などの地質学的／地球科学的性状に関しては、昨年度までの検討ではほとんど範疇に含まれていない。これらの性状（規模，頻度，鉱物学的性質など）は，原位置試験を実施するにあたってはもっとも重要な要素であり，またこれらの性状をどのように位置づけるかが，瑞浪超深地層研究所での原位置試験を行うことによって，将来の処分場に技術移転することのできる我が国の変動帯地下地質環境下での一般的特性を理解することにつながるものと考えられる。

瑞浪超深地層研究所における原位置試験においては，したがってこれらの地質学的，地球科学的ならびに工学的背景を念頭に，結晶質岩環境での，より現場に即した現実的施工プロセスおよびそれによって生じると考えられる不可避の地下環境状態を考慮に入れた上で，現実的なNFコンセプトを構築するための原位置試験を実施することが重要と思われる。このような観点から，現在，瑞浪超深地層研究所の実務担当者との議論を継続的に実施してきており，その検討の中で示されつつある結晶質岩の坑道周辺概念図を図1.3.11に示す。

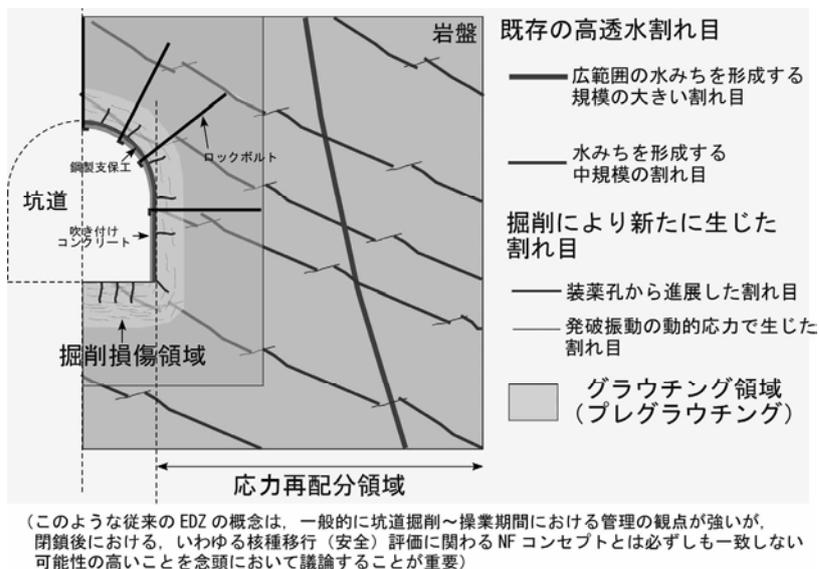


図1.3.11 瑞浪超深地層研究所での原位置試験周辺NF環境の概念図

この概念図には、坑道周辺を構成する人工材としての「吹き付けコンクリート」、「鋼製支保工」「ロックボルト」や掘削に伴う「掘削影響領域」、「グラウチング領域」、「応力再配分領域」が含まれる。処分場建設においても、おおよそこれらの人工材料は地下空間を維持するためには不可欠であり、処分場の数十年に及ぶと考えられる操業期間ならびに閉鎖後も存在し続けるものである。また核種移行の観点においても、NF岩盤に放射性核種が到達する以前に核種が遭遇し、何らかの物理的・化学的反応を経るものと考えられるものである。

また割れ目（帯）に関しても、単一割れ目および割れ目帯レベルの高透水性割れ目との遭遇が期待されることから、これらの性状把握と併せて原位置試験のレイアウトを具体化することが重要となる。しかしながら、これらの場を構成する環境、素材（材料）、そしてそれらの相互反応（プロセス）について、その安全評価における取り扱いが部分的には想定され、また検討されてはいるものの（Generic modelの検討項目参照）、現場に即した状態でのNF環境、あるいは核種移行に関する性能評価を実施する上での、より現実的な「場」のモデルを構築する上で検討（その必要、不必要性の検討も含め）がなされてきているとは言いがたい。したがって、ここではこれらの場を原位置試験で検討、調査・解析し、将来の処分場評価に耐えうる技術としてのNFコンセプトを再検討／構築するための検討項目について、これまでの議論をまとめるために、以下のI)「場」の特性把握、II)坑道内敷設人工材料の影響およびIII)「場」の短期的および長期的変化、という括りから以下に列挙する。

I) 「場」の特性把握

結晶質岩における「場」の把握においては、水みちとなる割れ目や割れ目帯（あるいは小断層など）の地質構造の分布や構造、そしてそれらの結晶質岩体における汎用的性質（特性）を明らかにすることが必要である。とくにこれらの地質学的あるいは鉱物学的特徴に関する知見は、将来の処分場の特性評価、安全評価手法において移転することのできる非常に重要な技術になるものと考えられる。

- 割れ目（帯）…分布や頻度（密度）、形態的特徴、割れ目充填鉱物など
- 小断層……………分布、断層構造としての特徴、断層内水みち構造、断層内充填鉱物など

II) 坑道内敷設人工材料の影響

結晶質岩中および空洞維持に関する人工材料（支保材など）は、地層処分場には不可欠である。これらの材料は、地下空間建設後、操業期間そして閉鎖後においてもそのまま埋設される可能性が非常に高い。これらの人工材料と坑道周辺岩盤や地下水などとの反応に伴う、坑道周辺環境への影響についてはほとんど把握されていないのが実状である。瑞浪超深地層研究所での原位置試験においては、長期にわたる人工材料の坑道周辺環境への影響調査は行えないものの、数年規模の短期の影響調査・解析を考慮した原位置試験は十分に実施可能である。以上の観点において、現在検討対象となる坑道周辺環境における人工材料は以下の通りである。

- ロックボルト…ロックボルトと岩盤との相互反応
- グ라우チング（ポスト&プレ）…グラウト材と岩盤との相互反応
- 吹き付けコンクリート…コンクリートと岩盤との相互反応
- 支保鋼材…鋼材と岩盤、あるいは鋼材と吹き付けコンクリート（立坑周りのコンクリートも含む）および岩盤との相互反応

III) 「場」の短期的および長期的変化

結晶質岩中の空洞掘削に伴う「場」の変化は、短期的には力学的変化が考えられる。そして中～長期的変化としては、応力再配分や地下水の水理場の変化が、そして最終的には、新たに形成された割れ目（水みち）をも含む割れ目中を透過する地下水と岩盤との反応や、坑道から岩盤内への酸化反応などに伴う地球化学的変化が挙げられる。これらの理解は、いわゆるEDZ範囲の理解に直結するものであり、NFコンセプトを構築する上でも非常に重要な部分である。また、一方で、応力再配分領域とEDZの関係など、NF領域の定義的な検討にも関わる部分を含んでいる。これらの現象やプロセスの検討／理解は、変動帯地下地質環境における割れ目媒体の独自のNFコンセプトを構築する上で不可欠である。また、地球化学的および鉱物学的にも、割れ目（水みち）のシーリングや水みち近傍鉱物の溶解など、数百年～数千年、あるいは数万年オーダーで生じ続ける現象もこの範疇には含まれるものであり、限られた期間での原位置試験に置いて如何にその速度や量に関する知見を導き出すかが重要になる。それらの時空間の変化や状態を概念的に示したのが図1.3.12である。

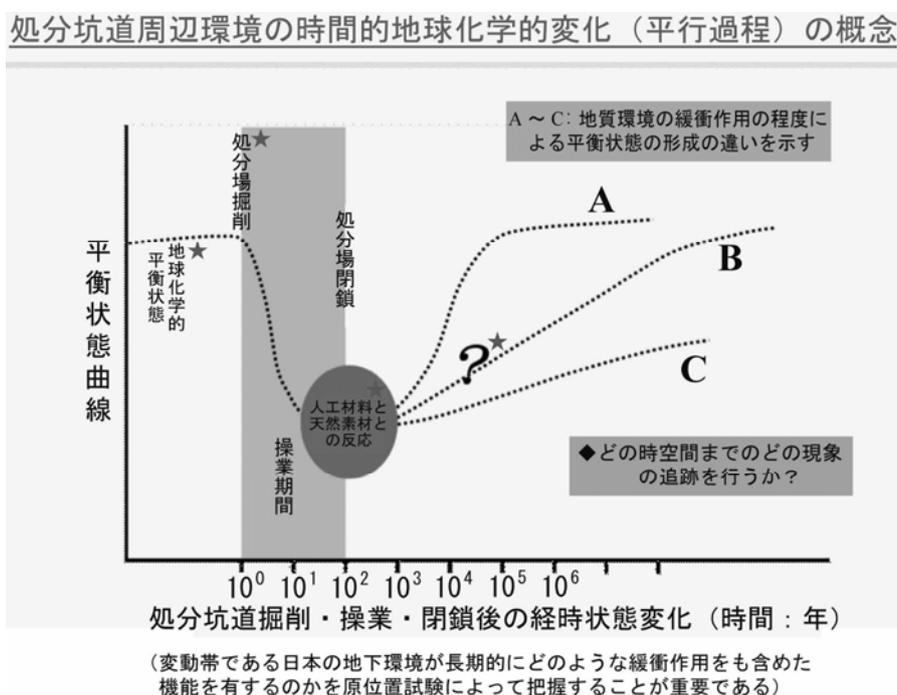


図1.3.12 地層処分場掘削に伴う地下環境の擾乱とその変化の状態を概念的に示した「平衡反応図」

地下空間、坑道を掘削するにあたって、地下環境はいわゆるサイトスケールの地下地質環境が長期にわたって育んできた、初期段階としての「(みかけの) 平衡状態」として認知される。しかし、掘削と同時にその環境（状態）は擾乱され、処分場においては操業期間も含め、閉鎖されるまでは何らかの擾乱が進行するフェーズにあるものと思われる。この段階において、また人工バリア材に代表される様々な物質が持ち込まれ、これらと地下岩盤や鉱物、地下水との短期的～長期的な反応が進行することになる。そして、閉鎖とともに再冠水し、それまでに投入された様々な物質と地下環境との反応が、いわゆる「次の段階の平衡」を目指して進行することとなる。この次の段階の平衡状態が、どのような速度と程度で進行するのか、選定された地下環境が掘削の

擾乱に対するどの程度の緩衝作用（能力）を有しているのかに関しては、最終的には選定されたサイトの地下環境特性に負うところが大きいと考えられる。したがって、NF環境はサイト（スケール）の特性に左右されるものであり、構築されるNFコンセプトもこのようなサイトスケールの特性を反映したものとして基本的には構築されるべきであろう。

しかしながら、そのような観点での長期的なバリア機能の回復や、安全機能の維持という調査手法、あるいは考え方を検討した（原位置試験の）事例は非常に少ない（皆無に等しい）。将来の地下処分場の長期的な安全性をどのような手法によってどのように評価すべきか、これこそが変動帯の地下環境に設けられた深地層の研究施設における原位置試験の本質であると考えられる。

このような観点から、以下に、坑道周辺環境の総合的变化に関する調査解析課題について、一部I)、II)の内容とも重複するが、以下に列挙する。

- EDZ範囲の検討…掘削に伴う明らかな変化の領域の明示と、下記に示す飽和不飽和領域や応力再配分領域との違いの明記。
- 飽和不飽和領域の検討…EDZとの関連での定義の再検討
- 応力再配分領域の検討…EDZとの関連での定義の再検討
- 地下水流動の変化範囲の検討…短期的、長期的影響の確認
- 地下水地球化学条件の変化範囲の検討…長期的な現象変化のインデックスの抽出
- 長期的割れ目シーリング…鉱物溶解や沈殿反応（炭酸塩反応など）

IV) その他の検討課題

その他の検討課題として、結晶質岩中の空洞掘削に伴う「場」の変化（力学的および水理、地球化学的）は、その坑道掘削方法とも密接に関連するものと考えられる。したがって掘削工法の違いによる周辺岩盤への影響の相違をどう理解するのか、またどう判定するのかなどの手法も含めて開発されることが重要となる。

またこれらの工法と絡んで、試験場のレイアウトは、そこにおける結晶質岩の割れ目（帯）や小断層などの構造的不均質性の特性をどのように把握するのか、その明らかとすべき（あるいは目論む）科学的論拠・作業仮説と密接に関わるものであり、十分な検討を行うことが重要と考えられる。

- 掘削工法…発破工法による機械掘削かTBMによる掘削の影響の相違の検討
- 試験場レイアウト…将来のNF環境をどのように調査するのかの技術移転の観点の検討も必要

さらには、地層処分のPassiveな考え方とは相反する、いわゆる廃棄体の「再取り出し」を考慮した場合の、NFコンセプトについても、果たしてPassiveな考え方を基本とする考え方と同等でいいのかどうか（おそらく取り出しを念頭においたレイアウトやNF環境、バリア機能に対する追加的な考え方を準備することが必要となるものと思われる）を検討することが今後の、当委員会での継続的課題として提示された。

以上、当課題グループの検討においては、NFコンセプトを構築することを目的に、NF環境とそこでの人工バリアおよび天然バリアの機能の健全性という観点において、どのような現象に対して知見が不足しているのか、またそれらが多重バリアの深層防護性に対してどのような影響を及ぼすと想定されるのかといったGenericな検討内容をベースに、瑞浪超深地層研究所での結晶質岩を対象とした調査・研究項目の検討を行った。とくに瑞浪超深地層研究所では、地下300m地点

での坑道周辺環境を用いた原位置試験を計画・準備中であり、将来的には上記検討内容にさらに検討を加え、どのような原位置試験を実施していくべきか、今後もその検討を引き続き行っていく予定である。

1.3.4 参考文献

- 1) 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－地層処分研究開発等2次取りまとめ－」，総論レポート，JNC TN1400 99-020.
- 2) Nagra (2005)：Project Opalinus Clay; Safety Report –Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste, NTB02-05.
- 3) 経済産業省資源エネルギー庁監修(2008)：「諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について」.
- 4) De Preter, P. and P. Lalieux (2002)：Fulfilment of the Long-term Safety Functions by the Different Barriers during the Main Time Frames after Repository Closure, in The Handling of Timescales in Assessing Post-closure Safety of Deep Geological Repositories, Workshop Proceedings, Paris, France, pp.16-18 April.
- 5) Kersting, A. B., D. W. Efurud, D. L. Finnegan, D. J. Rokop, D. K. Smith, J. L. Thompson (1999)：Migration of plutonium in ground water at Nevada Test Site, Nature, 397, p.56.
- 6) Novikov, A. P., S. N. Kalmykov, S. Ustunomiya, R. C. Ewing, F. Horreard, A. Merkulov, S. B. Klark, V. V. Tkachev, B. F. Myasoedov (2006)：Colloid Transport of Plutonium in the Far-Field of the Mayak Production Association, Russia, Science, 314, p. 638.
- 7) Yoshida, H., Yamamoto, K., Amano, Y., Katsuta, N., Hayashi, T. and Naganuma, T. (2008)：The persistence of Fe-oxyhydroxides in a reducing geological environment: implications for the post-closure safety of radioactive waste repositories, Environmental Geology, 55, pp. 1363-1374.
- 8) Yoshida, H., Metcalfe, R., Yamamoto, K., Murakami, Y., Hoshii, D., Kanekiyo, A., Naganuma, T., Hayashi, T. (2008)：Redox front formation in an uplifting sedimentary rock sequence：An analogue for redox-controlling processes in the geosphere around deep geological repositories for radioactive waste, Applied Geochemistry, 23, pp.2364-2381.
- 9) Yoshida, H., Takeuchi, M., Metcalfe, R. (2005)：Long-term stability of flow-path structure in crystalline rocks distributed in an orogenic belt, Japan, Engineering Geology, 78, pp.275-284.
- 10) 吉田英一・西本昌司・長 秋雄・山本鋼志・勝田長貴(2008)：地下花崗岩体の変質とその形態－産総研岡山応力測定用深部花崗岩コア試料の変質を例に－，応用地質, Vol.49, pp.256-265.
- 11) 長友晃夫・吉田英一(2009)：断層と割れ目系およびその充填鉱物を用いた阿寺断層の地質的履歴解析，地質学雑誌, Vol.115, pp.512-527.
- 12) 吉田英一・大嶋章浩・吉村久美子・長友晃夫・西本昌司(2009)：断層周辺に発達する割れ目形態とその特徴－阿寺断層における‘ダメージゾーン’解析の試み－，応用地質, Vol.50, pp.16-28.
- 13) 吉田英一(2007)：総説：地層処分システムと微生物－地下研究施設における微生物影響研究の考え方－，原子力バックエンド研究, Vol.14, pp.31-41.

(名古屋大学：吉田英一，京都大学：青木謙治，原子力安全研究協会：朽山 修)

2. 調査・解析手法の高度化・体系化

2.1 立坑トンネル掘削時の地下水挙動評価における簡易型地下水制御情報化施工システム (SWING-SHAFT) の適用に関する研究

2.1.1 はじめに

放射性廃棄物の地層処分技術に関連するものは多種にわたるが、国と日本原子力研究開発機構が取りまとめた「地層処分基盤研究開発に関する全体計画（全体マップ）」¹⁾が総括をしている。工学技術に関しては、処分場の総合的な工学技術、処分場の設計・施工技術、長期健全性評価技術の3つに分類がなされている。我々研究グループが目指してきたものは、その中に細目としてあげられている「建設技術」に関するもの、特に坑道の設計、施工に関連する研究である。対象としては、初期には、岩盤の不連続性のモデル化に関する研究、不連続面マップの数量化、これらのデータを用いた岩盤透水性の評価方法の開発と研究が継続し、現時点では、岩盤の透水性を評価した上で、それをいかに設計・施工段階で活用するかについて研究開発を進めている。

先述の「全体マップ」¹⁾では、達成目標として、深地層の研究施設（URL）の設計事例等を踏まえ具体的な地質環境を想定した建設技術の選定および対策工の事例を提示できるレベルを掲げており、坑道の設計・施工について検討を進めている。得られた成果として、

- 地下施設の設計手法の提示【原子力機構】

- ・第2次取りまとめ²⁾における地下施設の設計例をベースとし、新たに地上からの調査段階で得られた具体的な情報を反映させ更新した設計手法を提示した。

- ・幌延（堆積岩）、瑞浪（結晶質岩）という具体的な地質環境条件を対象とし、地上からの調査段階で得られた地質環境情報を用いて、立坑周辺部を対象とした地下施設設計用の物性値の設定事例を提示した。

- ・幌延（多孔質・低透水性の堆積岩）、瑞浪（結晶質岩）という具体的な地質環境に対応し詳細化した単一坑道の設計手法を示すとともに、防災設計、耐震設計も含めた地下研究施設における一連の試設計事例を提示した。

- 設計上の留意点等の抽出【原子力機構】

- ・情報化施工（掘削段階における設計の見直し）に関する手法の整備，実践

- ・地質環境の特徴および長期安全性を考慮した地下施設の施工技術の整理，設計および施工技術選択時の留意点の抽出

- ・地下深部の坑道群に対する設計手法の詳細化

が示されていることは、承知の通りである。

最近の「立坑トンネルにおける簡易型地下水制御情報化施工システム（SWING-SHAFT）の適用に関する研究」は、「国内URLの中間深度までの坑道掘削時の調査研究段階で得られた地質環境情報や施工実績などを基に、詳細化かつ実用化の観点から検証した地下施設の設計手法の一例を提示するとともに、設計上の留意点を抽出する。」という目標に沿って、現在掘削が進行中の瑞浪超深地層研究所の立坑掘削時の湧水状況をモニターした結果を用いて、合理的な坑道（特に立坑）の地下水制御型情報化施工の方法を構築する目的で行われている。

2.1.2 トンネル施工に伴う地下水情報化施工用簡易システムの構築

2.1.2.1 SWING-SHAFT法の開発

地下工事においては、もっとも注意しなければならない事項は、地下水の取り扱いである。しかし、地下水の挙動は、地下は目に見えないという特性から非常に捉えにくい。従来、地下水解析は、膨大なデータからなる地盤モデルを基に数値解析を行うことが多く、工事開始前の事前評価として多用されていた。したがって、工事開始以降は、事前予測結果との整合性を議論することはあっても、解析時間等の関係から掘削実績を再評価するまでには至らないケースが多かった。トンネル施工に関しては、地下水の厳密な3次元浸透挙動よりも、降雨～浸透～地下水流動などの水収支量の変動を計算するタンクモデルや修正タンクモデル法による簡易計算が重宝する^{3), 4), 5)}。ただし、これらの方法は、水循環系の要素は考慮しているが、地下水流動メカニズムを考慮できないことは注意が必要である⁶⁾。

そこで、水循環系を考慮した地盤の水理情報システム簡易版として地下水情報化施工システムの一部、SWING法（System for Water Information of Ground；SWING-SHAFT法の原型で横坑・トンネル掘削用）を開発した⁷⁾。SWING法は、簡便に掘削実績を組み入れることが可能であり、掘削実績を基に周辺の水環境問題や経済的かつ効果的な施工に有益な地下水評価ができる。また最新データを迅速に将来予測に用いて施工に反映させ、施工面、周辺環境面を考慮したきめ細かい評価が可能である。SWING法は、水循環系を考慮した工事の進捗に応じた地下水挙動評価とその検証実績を同時に行うものであり、施工実績に合致した最終的な影響評価を検証できる利点があり、いくつかのトンネルに適用して本解析法が十分実用レベルにあることも確認できている^{8), 9)}。

今回解析の対象としている立坑トンネル掘削で最も注意を要するのは、地下水の制御である。一般的な水平方向のトンネルの排水は、自然流下も含め制御するのがそれ程難しくはない。しかし、立坑では人工的な排水以外に手だてはなく、ポンプがなければ水没してしまうので、地下水の制御が重要となる。

立坑トンネル用のSWING法として、SWING-SHAFT法は、立坑トンネル掘削時の水循環系を考慮した工事の進捗に応じた地下水挙動評価とその検証・実績評価を同時に行うものであり、施工実績に合致した最終的な影響評価を検証できる利点がある。

今年度は、昨年度に引き続き、原子力機構の瑞浪超深地層研究所の立坑トンネルならびに周辺の井戸の観測情報を基に、SWING-SHAFT法でどの程度のシミュレーションによる再現性があるかを検討した。

2.1.2.2 SWING-SHAFT法（シリンダー）の構築

これまでトンネル等の掘削に関する周辺への水環境保全やトンネル工事の地下水問題について、特に山岳トンネルにおいて水循環系を踏まえた簡易影響予測評価手法であるSWING法を開発・実用化している。本研究は、このSWING法を基に、立坑トンネルへの適用を図ったSWING-SHAFT法を開発したものである。

ここでSWING法の有利な点を改めて示すと以下のとおりである。

- ① 従来の簡易予測法では、恒常湧水量や湧水影響範囲の予測は可能であるが、施工実績による修正が困難であり、また定量的な評価ができない。これを補う予測評価法であること、さらに工事实績が迅速にフィードバックできる解析法であること。

- ② 水循環系の要素であるトンネル湧水や表流水などの定量的評価が可能であること、既往の地下水数値解析法は、工事実績や水量的な評価が可能であるが、地盤モデルが複雑になることやパラメータ自体が煩雑となり、随時工事に適合させて予測評価を行うためにはある程度の解析期間が必要になる。これを補って迅速、且つ数量的な評価が可能な解析方法であること。
- ③ 可能な限り工事実績を基にした精度のあるトンネル湧水予測および湧水予測を評価する必要性が高く、この評価結果を基に工事中においても周辺水環境への具体的な保全対応を行うことが可能な解析方法であること。

したがって、SWING法の利点は、立坑掘削問題にも当てはまることになる。

SWING-SHAFT法の基本的な考え方を以下に述べる。解析の対象となる領域を細分して、ボリューム毎に透水特性を割り振り、水理解析を行うが、まず図2.1.1に示すように幾つかのシリンダーボリューム(n等分に分割された領域)に分割する。分割数は計算精度や対象領域でのデータの量によって随時変更することが出来る。同図には平成16年度以降のモデルを比較して示している。シリンダーボリュームの中心に、経過時間毎に井戸深度が変化する水を汲み上げるための井戸を配置し、非定常井戸理論を適用して、地下水位や揚水量を計算する。

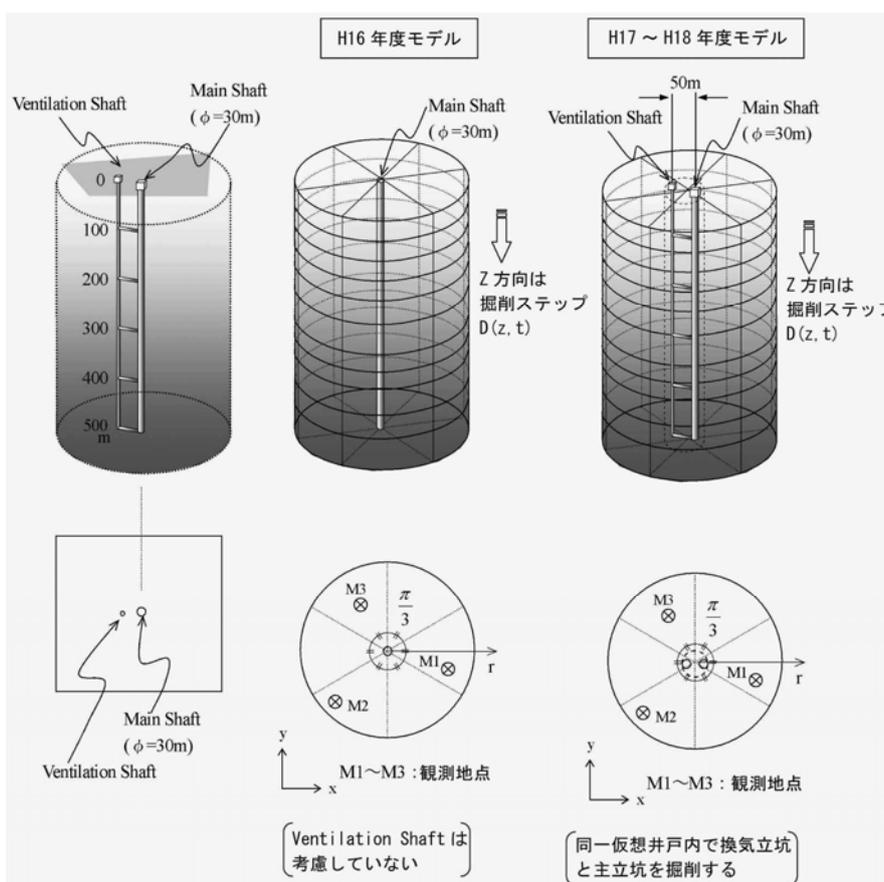


図2.1.1 SWING-SHAFTにおけるシリンダーボリューム

各シリンダーボリュームに非定常井戸理論を以下のとおり適用すると、

$$Q_n(z,t) = \frac{4\pi K_n (H_n - h_n)}{\ln \frac{2.25 T_n t}{r^2 \lambda}} \dots \dots \dots (2.1.1)$$

$$S_n(r,t) = \frac{Q_n}{2\pi T_n} \ln\left(\frac{R_n}{r}\right) \dots \dots \dots (2.1.2)$$

$$R_n(r,t) = \sqrt{\frac{2.25T_n}{S_n} \cdot \sqrt{t}} \dots \dots \dots (2.1.3)$$

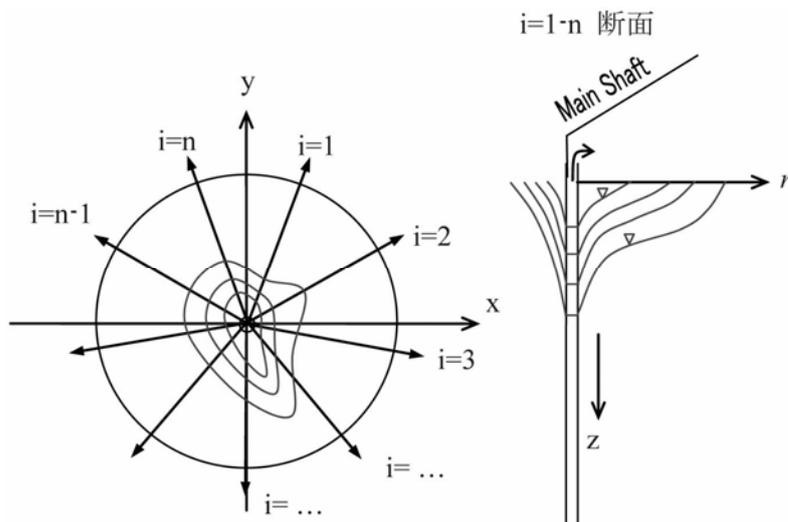
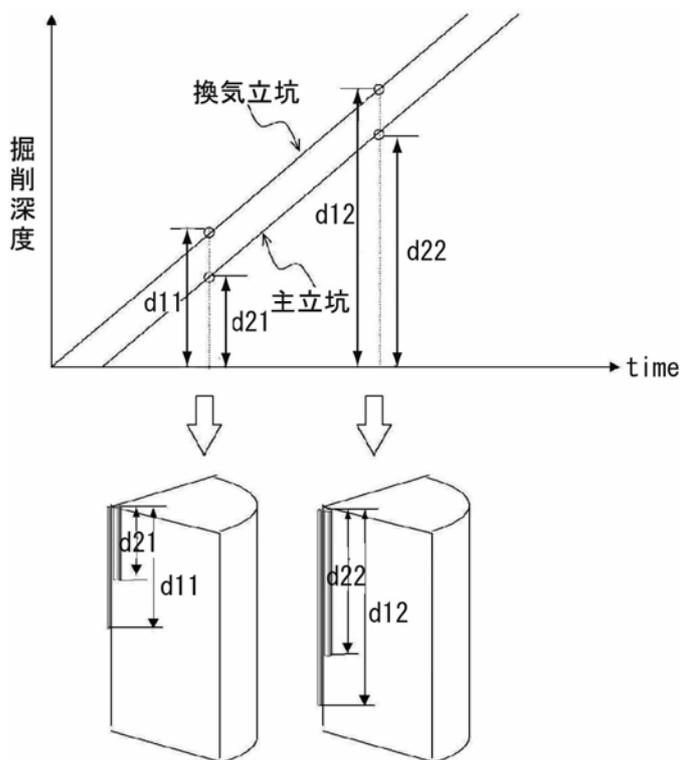


図2.1.2 シリンダー内の水位低下を合わせコンターとして表示



同一シリンダーボリューム内を2本の立坑が掘削される条件、且つ同ステップ中に2本の掘削を行う。

【課題】 2本の立坑の井戸干渉を考慮する必要

図2.1.3 2本の立坑がある場合のモデル化と計算手順

これらの式から揚水量および地下水位低下量が算定される。それぞれ式 (2.1.1) は湧水量, 式 (2.1.2) は任意地点における地下水位低下量であり, 式 (2.1.3) は影響範囲である (図2.1.2)。さらに, これらの式を全周回に順次適用することで, 各シリンダーボリュームの Q (湧水量) と r : 地下水位 (任意地点の水頭) を求める。

$$\sum Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_{n-1} + Q_n \dots \dots \dots (1.2.4)$$

立坑掘削時に発生する $\sum Q$ は, 理論式から得られた Q を各シリンダーボリュームの総和と仮定する。

図2.1.3のように, 近接して立坑が2本ある場合は, 重ね合わせの原理を用い, 時間差を設けて, 同じ位置で井戸からの汲み上げが行われているように設定する。計算上は同じ時間ステップにおいて, 2回の計算手順を繰り返すことで, 相互の重ね合わせを行うことになる。なお, 2つの井戸の位置が現実には相当離れている場合は, 群井戸と同じように相互井戸の干渉を考慮する必要がある。

上記に説明した方法を用いて, 平成17年度の検討結果を踏まえて, 以下に示す手順で, 日本原子力研究開発機構の瑞浪超深地層研究所の立坑掘削に伴う地下水の挙動解析を実行する。

2.1.2.3 瑞浪超深地層研究所における解析

概要ならびに立坑の位置と周辺観測井戸の配置関係を図2.1.4に示す。

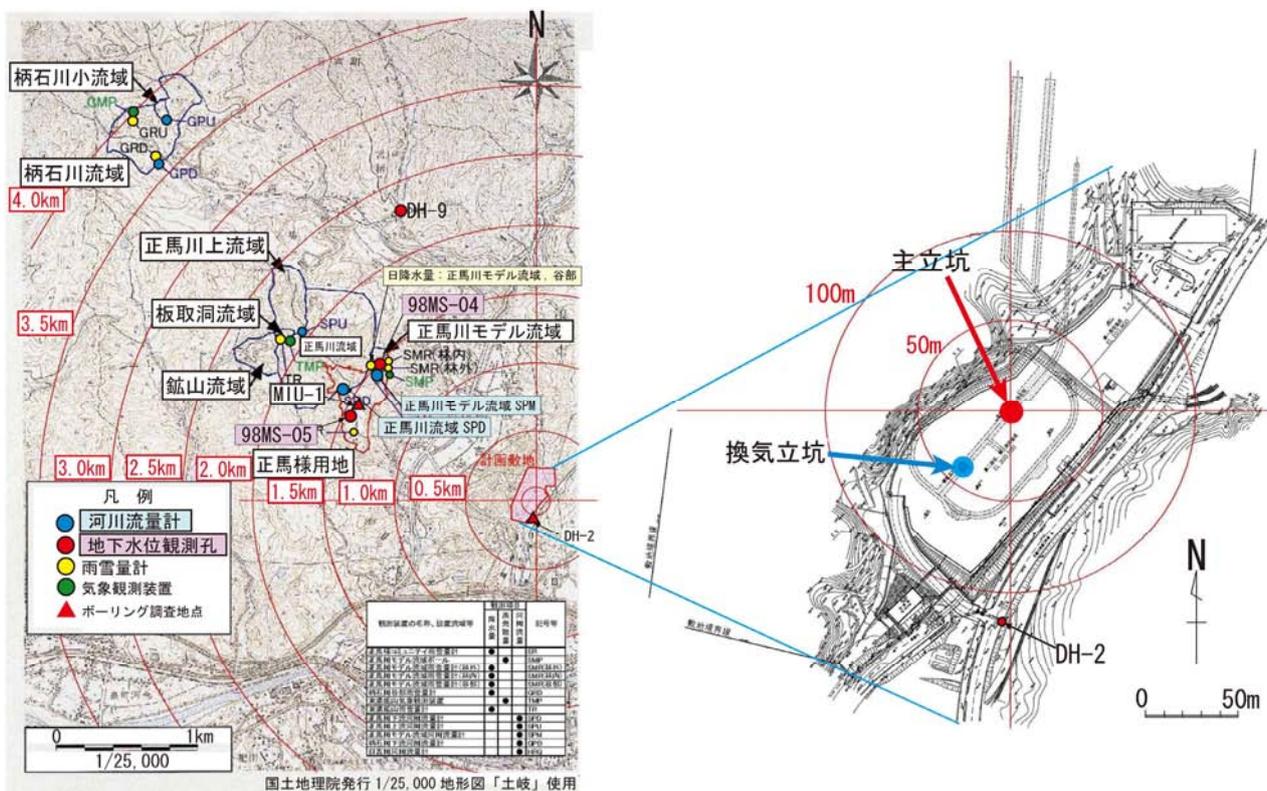


図2.1.4 瑞浪超深地層研究所と観測井戸概要

(1) 平成17年度の予測結果と評価

瑞浪超深地層研究所の立坑では、平成17年後半に排水ストップを余儀なくされ、水位が回復する状況になった。SWING-SHAFT法による再現として、立坑水位変動をパラメータとして、揚水停止に伴う水理挙動を再現し、評価結果を基に水理物性値を見直した。検討ケースとしては、以下の3ケースである。各ケースの水理定数は次の図2.1.5に示す。CASE-1は、既往調査による透水係数の中央値、体積含水比を0.2の場合、CASE-2とCASE-3は、透水係数の中央値を1.3倍し、体積含水比をそれぞれ0.1、と0.15のケースである。図2.1.6は、湧水量と地下水位低下量を3ケースについて比較したものである。立坑の湧水量は、3つのケースではほとんど差はないが、MSB-3号孔とDH-2号孔の観測井戸水位は相当異なる。MSB-3号孔で比べると、CASE-1は解析値が小さすぎるし、CASE-2は水位低下量が大きすぎる。一方、DH-2号孔ではCASE-1が、最も水位低下量をよく表現している。CASE-2、3ではパラメータを修正したにもかかわらず、実測値との乖離が大きくなっている。さらなる検討が必要であることは言うまでもない。

結果としてシリンダーボリュームの配置や深度方向の水理定数が十分吟味されていないので、最終の結論は出せないが、幾つかの試行解析の結果、CASE-3が最も適切と思われる。

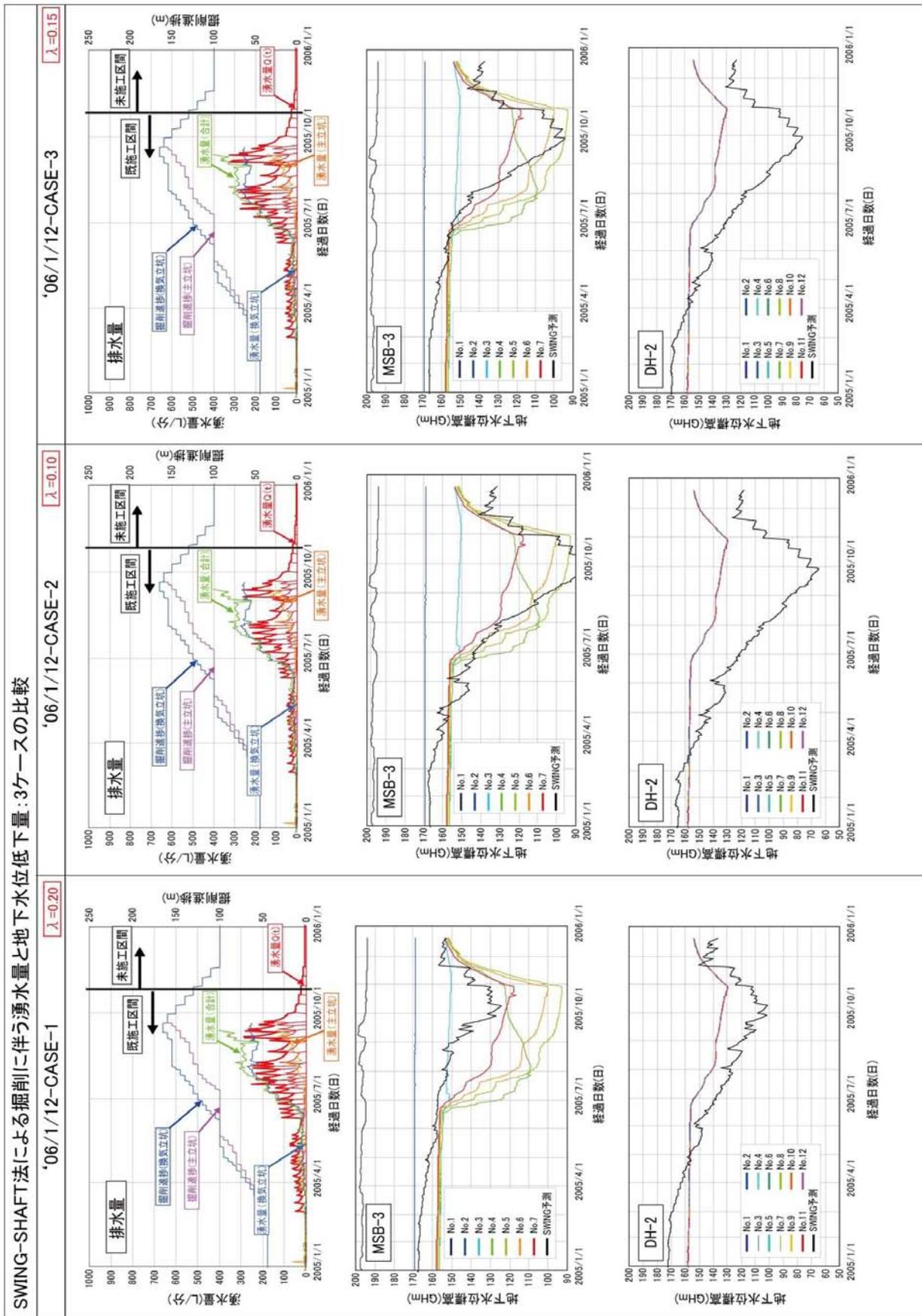


図 2. 1. 6 各ケースの比較 (掘削時の湧水量と地下水位低下量)

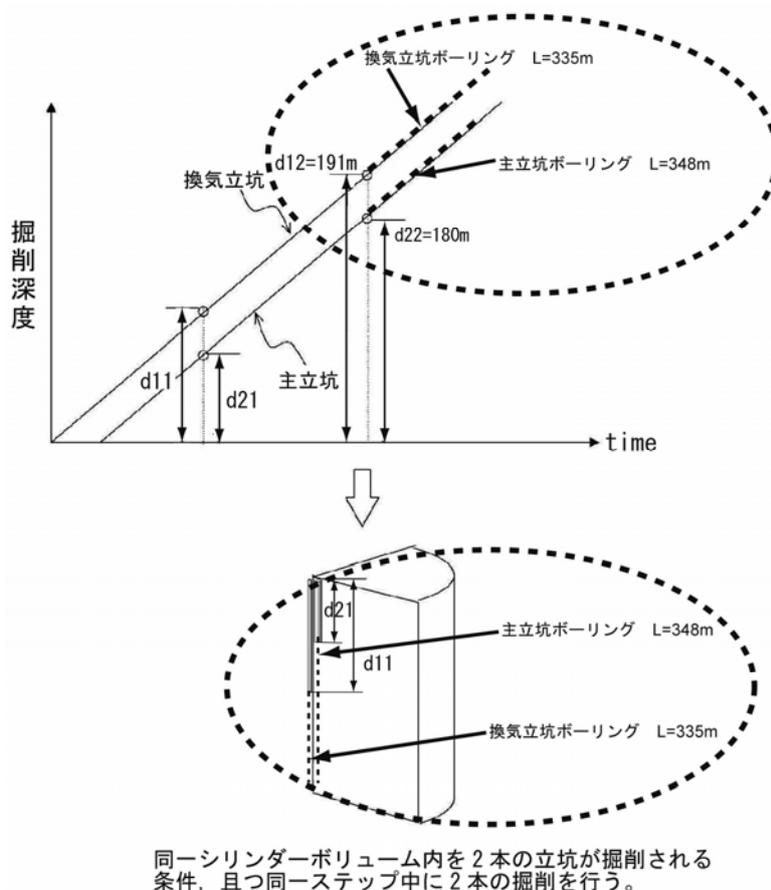
(2) 平成18年度の第1回予測結果（パイロットボーリング実施中の解析）

瑞浪超深地層研究所の立坑工事における平成18年度は、揚水停止に伴う水位回復から揚水再開、さらにパイロットボーリングの掘削が開始されている。SWING-SHAFT法では、平成17年度成果を基に、パイロットボーリング実施過程をモデル化し、ボーリング実績との対比を行った。パイロットボーリングのモデル化は、図2.1.7に示すとおり主立坑および換気立坑の基底面から所定の口径で掘削するとし、パイロットボーリングの実績（平成18年7月～10月）に伴う湧水量、観測孔水位と検証させている。

検討ケースは以下の2ケースである。各ケースで想定した水理定数は図1.2.8に示している。

CASE-3：平成17年度報告（透水係数は既往調査結果の中央値）

CASE-33：ボーリング実施区間のみCASE-3の20倍の透水係数



同一シリンダーボリューム内を2本の立坑が掘削される条件、且つ同ステップ中に2本の掘削を行う。

図2.1.7 パイロットボーリングのモデル化

SWING-SHAFT法による予測結果を図2.1.9、図2.1.10に示した。各図とも掘削時の湧水量、周辺の観測孔水位と比較している。

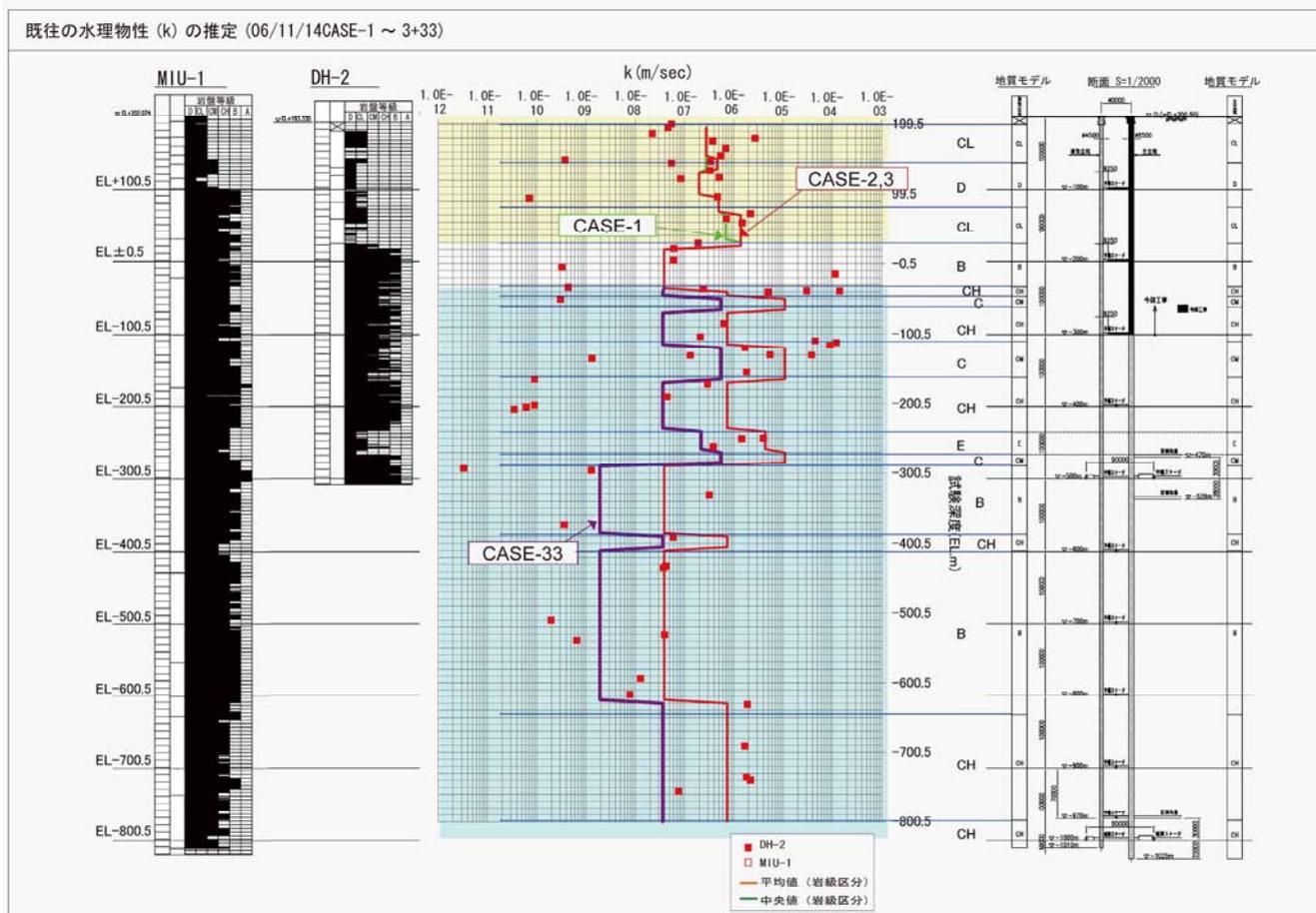
① CASE-3（既施工区間の検証値～未施工区間の推定値）

主立坑および換気立坑の既施工区間（約200m）の掘削実績には整合するが、パイロットボーリング区間の湧水実績と計算値は、大きな差異（約10倍程度）が発生する。また、立坑周辺の地下水位低下も大きく、半径200m範囲は、ボーリング孔底（深度500m）まで低下してしまうことが予測され、少なくとも透水係数は図1.2.7に示したCASE-3より小さいことが推定された。

② CASE-33 (パイロットボーリング区間 : CASE-3の1/20の透水係数)

CASE-3の予測結果より、立坑周辺の地下水位(不圧地下水位)が低下しすぎること、および湧水量自体が多いことから、透水係数がより小さい可能性が高いため、CASE-3の1/20に相当するものとして感度解析を行った。CASE-33をみると、湧水量は実績に近似した傾向を示したが、このケースにおいても周辺観測孔の地下水位(水頭)に対して合致していない。

すなわち、これらの検討ケースにより立坑水位変動をパラメータとして、揚水停止～パイロットボーリング実施に伴う水理挙動の再現、水理物性値の見直しを行って見たが、これらの検討ケースでは、未だ実用的な現況再現までは至っていない。つぎに、主立坑と換気立坑の中間部の断層分布に伴う改良、具体的にはシリンダーボリュームの異方性を考慮するための改良を試みた。



(CASE-1, -2 は平成 17 年度解析)

図2.1.8 CASE-3, CASE-33の水理定数の設定

SWING-SHAFT法による掘削に伴う湧水量と地下水位低下'06/1/12-CASE-3(ΣQ)

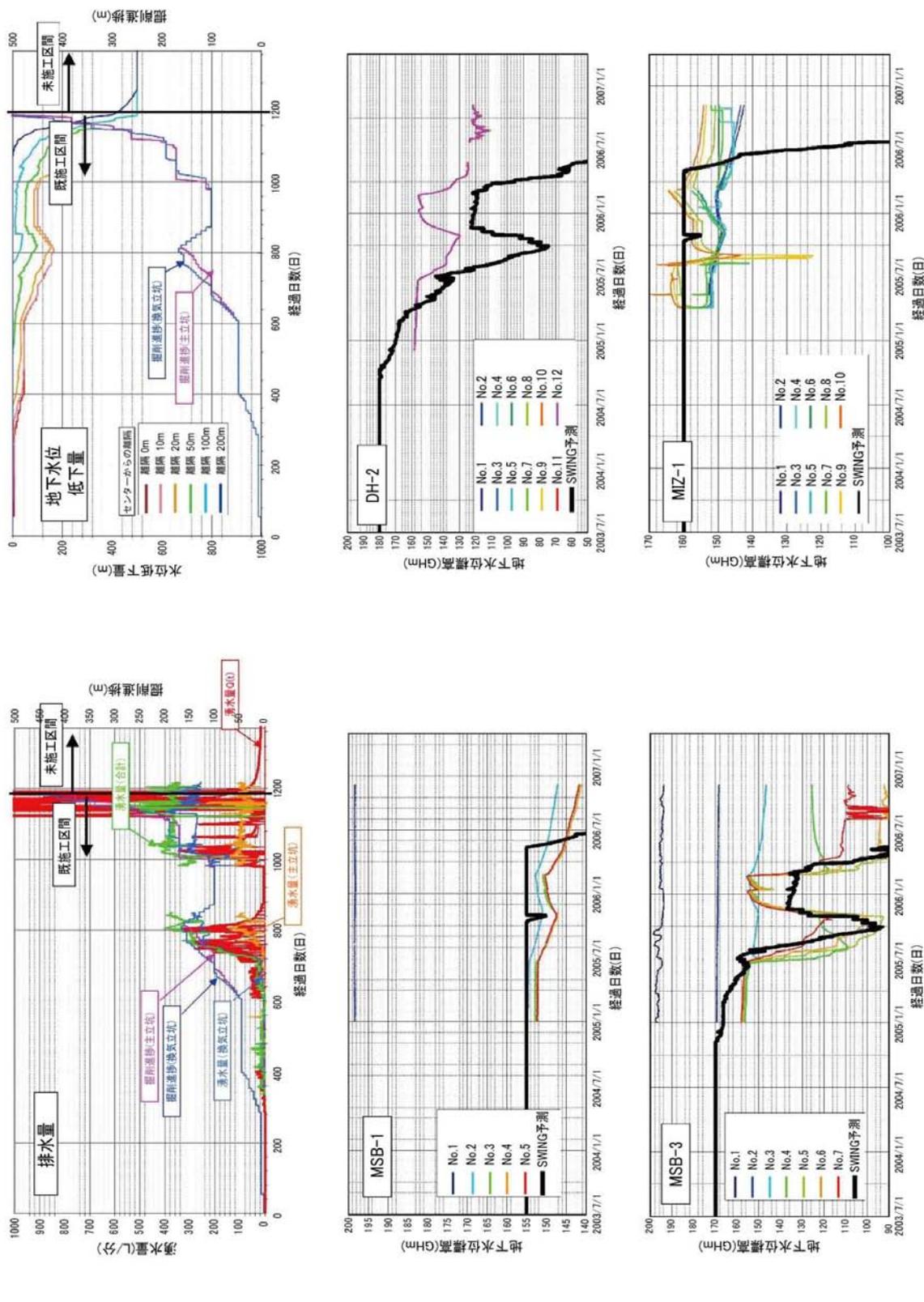


図2.1.9 掘削時に伴う湧水量と地下水位低下 (CASE-3)

SWING-SHAFT法による掘削に伴う湧水量と地下水位低下'06/11/14-CASE-33(ΣQ)

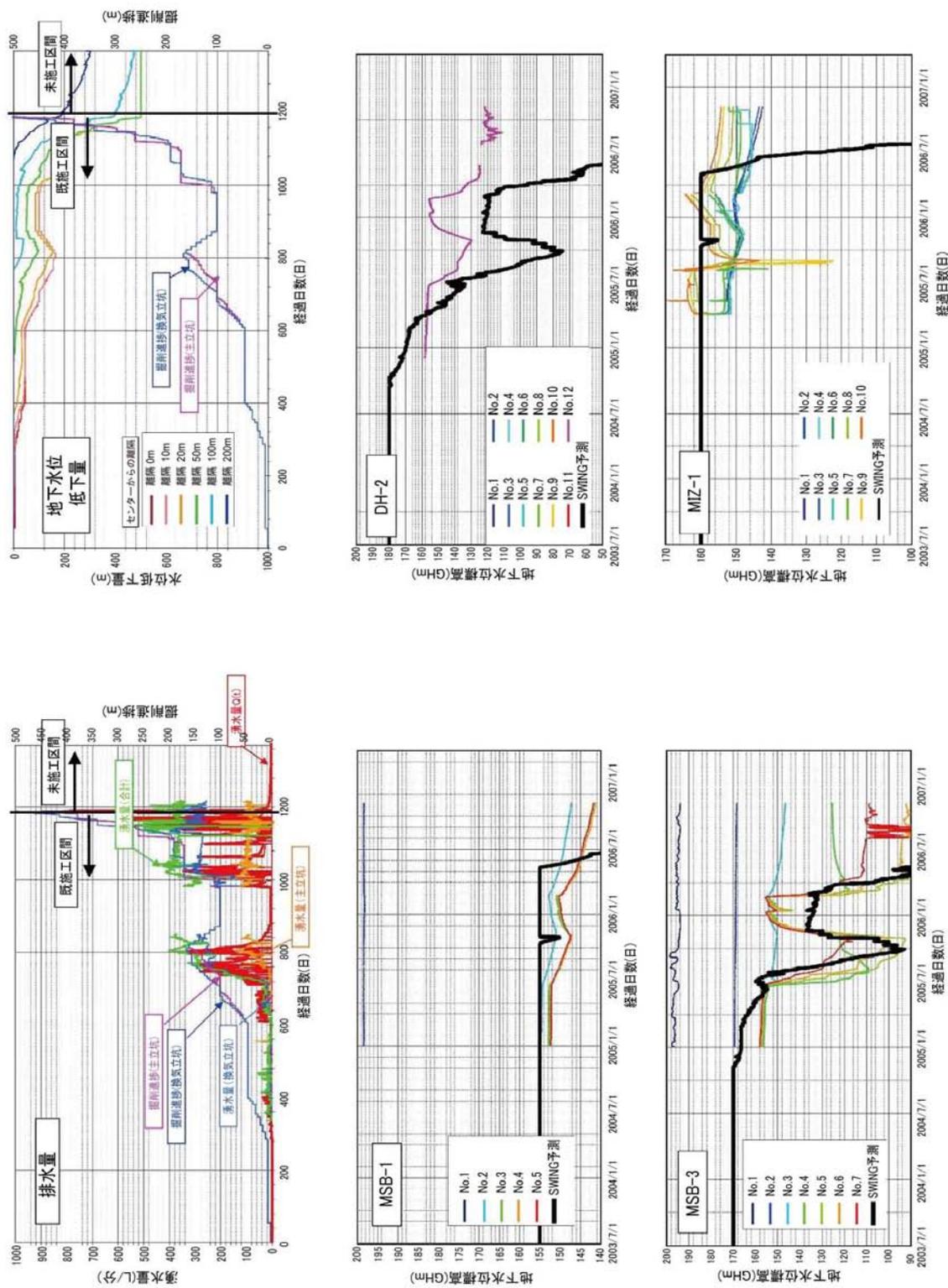


図2.1.10 掘削時に伴う湧水量と地下水位低下 (CASE-33)

(3) パイロットボーリング実績を基にした予測解析

ここではパイロットボーリング（06MI01号孔，06MI02号孔）により得られた透水係数を基に，パイロットボーリングの掘進工程を考慮した検証を行った。検討ケースは，既施工区間をCASE-4（約200m）として掘削実績に整合させた上で，順次2箇所のパイロットボーリングを実施するケースである。SWING-SHAFTの設定値は図2.1.11に示した。

CASE-4-1では，パイロットボーリング区間の湧水実績と計算値は，最大で400L/min程度の差異が発生する（図2.1.12）。特に深度300～400m区間における較差が大きく，立坑周辺の地下水位低下も大きい。MSB-3号孔以外の観測孔では，計測値に比べて著しく低下している。少なくとも，同観測地点方向に至る透水性はCASE4-1より小さいことが推定される（図2.1.13）。

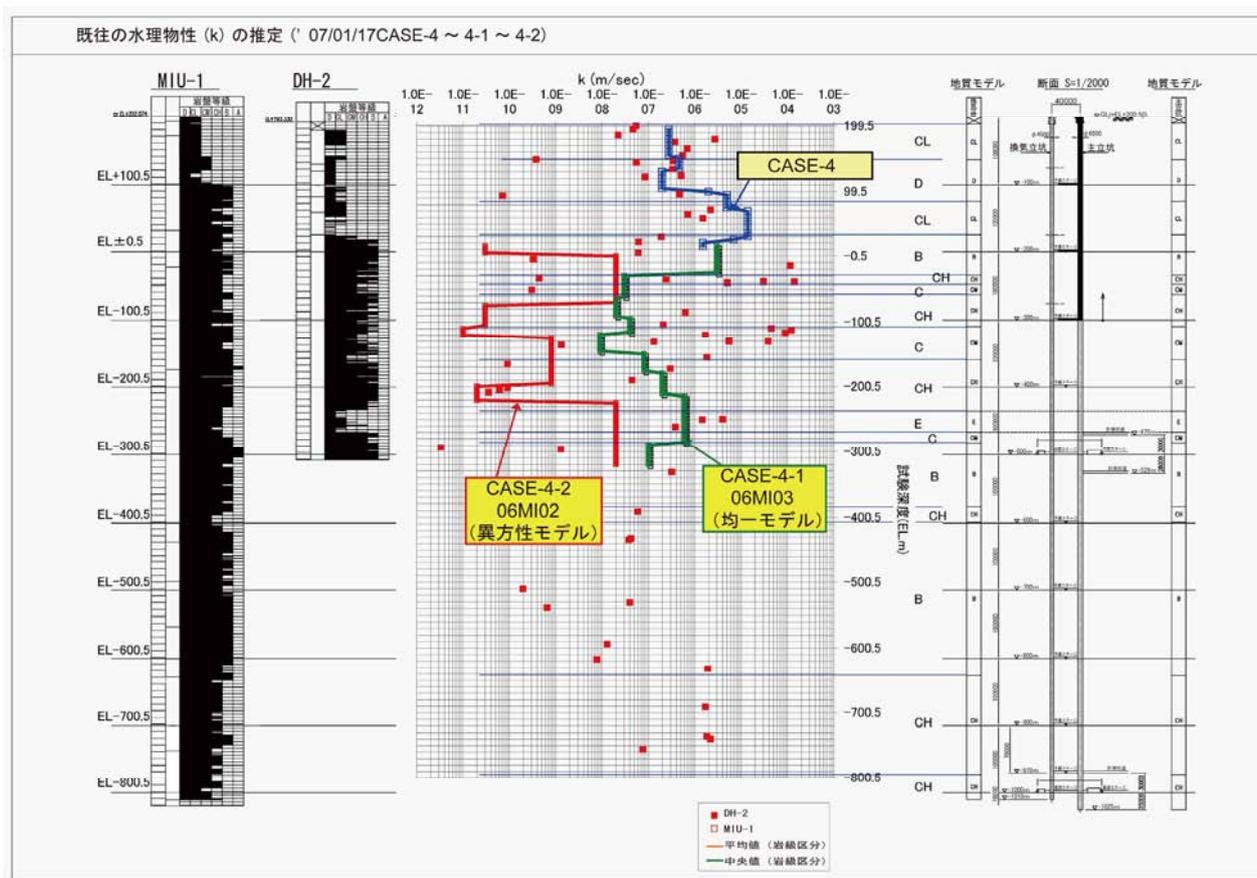


図2.1.11 パイロットボーリングによる透水係数と検討ケース

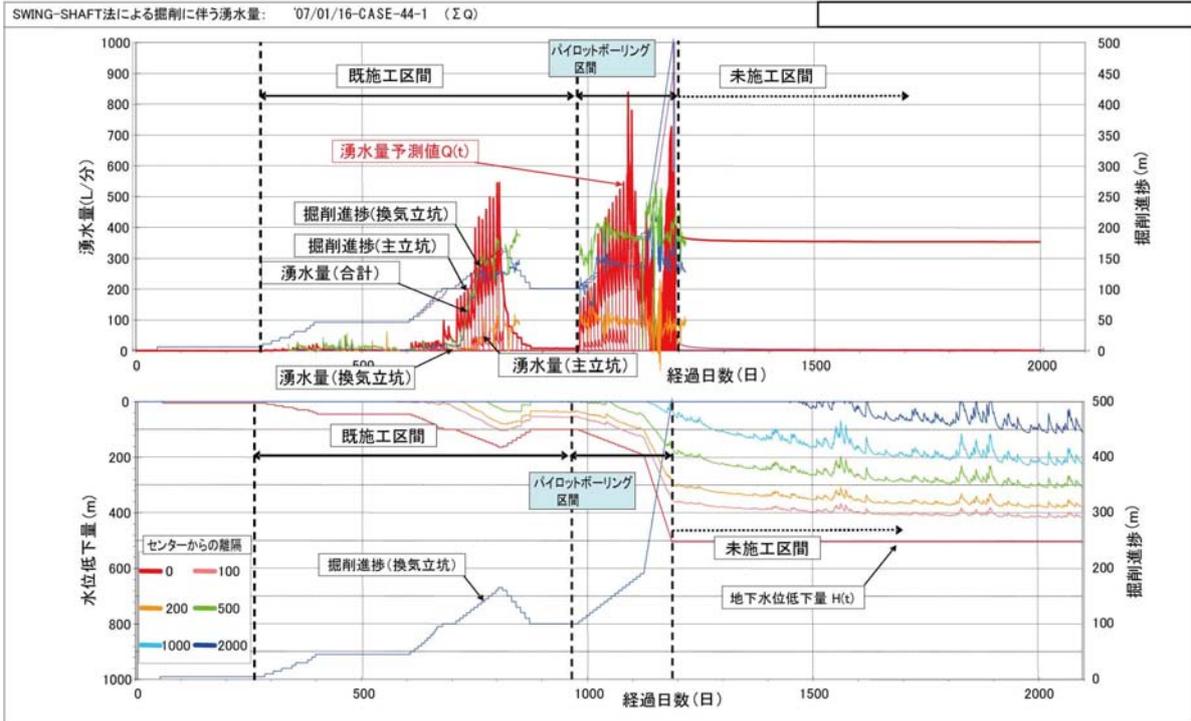


図 2.1.12 パイロットボーリングの掘削中における湧水量と地下水位低下量 (CASE-4-1)

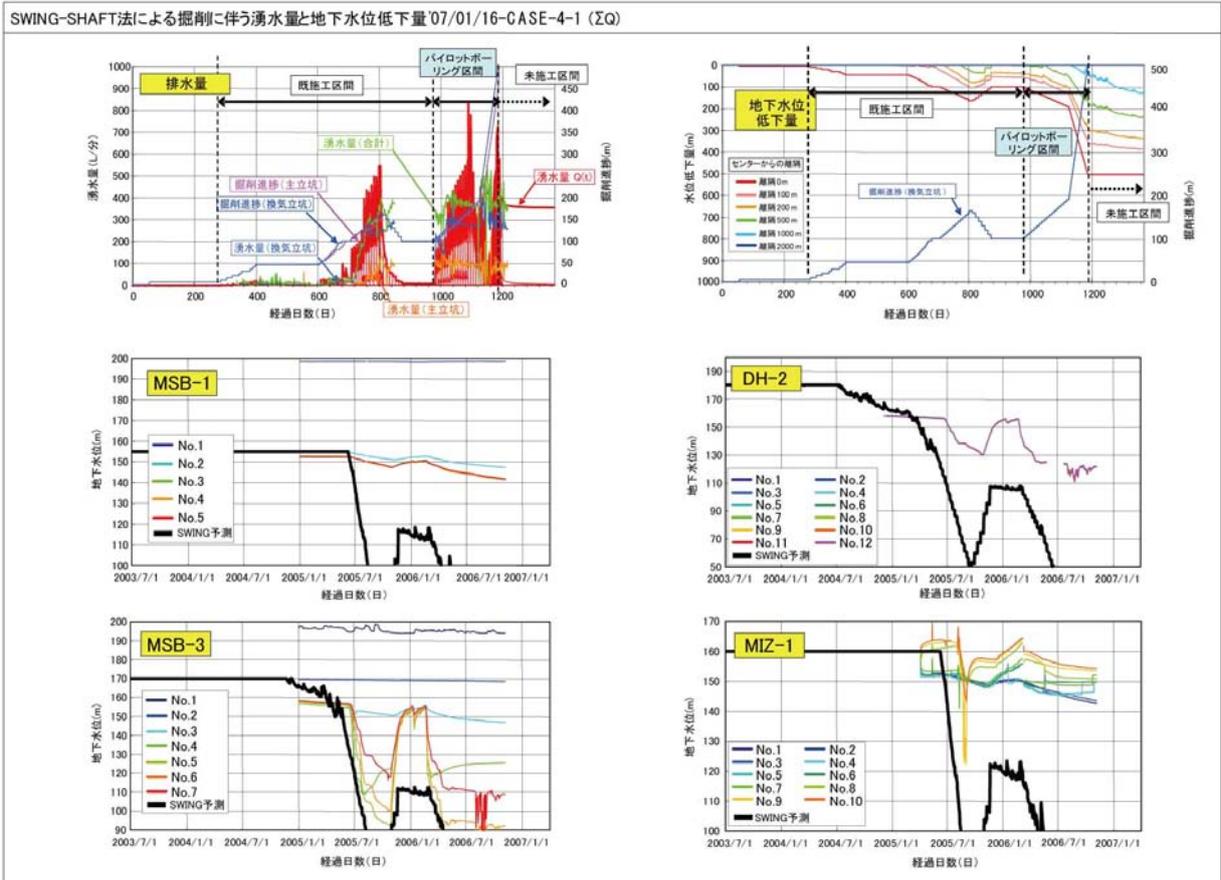


図2.1.13 各観測孔水位との対比 (CASE-4-1)

(4) シリンダーボリュームの異方性 (CASE-4-2)

CASE-4-1の結果 (図2.1.13) をみると、各観測地点の水位変動は、主立坑と換気立坑の中央部を貫く断層破碎帯 (難透水性) の影響から水位低下量に明瞭な差異が発生している。特に、パイロットボーリングの透水係数にみられるように、主立坑側の透水性が極めて小さく、主立坑側の水位低下量が少ない。したがって、CASE-4-2ではSWING-SHAFT法のシリンダーモデルにおいても、異方性 (実は不均質性) を考慮することを試みた。具体的には図2.1.14に示すとおり、断層破碎帯に沿って主立坑側の右半分に主立坑のパイロットボーリング (06MI02号孔) の透水係数を採用している。すなわち、主立坑側の地下水位が低下しすぎることから、単純に主立坑方向と換気立坑に区分し、シリンダーモデルの異方性を考慮した。

予測結果は図2.1.15, 図2.1.16に示している。異方性を考慮すると、湧水量は実績に比べてやや少なくなるとともに、近傍の観測孔水位に対して近似しつつある傾向を示した。図2.1.17には地下水位の低下量について、異方性を考慮していないCASE-4-1と比較して示している。

但し、このケースにおいてもすべての周辺観測孔の地下水位 (水頭) に対して合致していないことから、CASE-4-2のような単純な異方性モデルでは十分に現況を再現できていない。今後の課題であるが、断層破碎帯の分布位置や近傍観測孔の水位変動の評価を行った上で、異方性モデルを構築する必要がある。

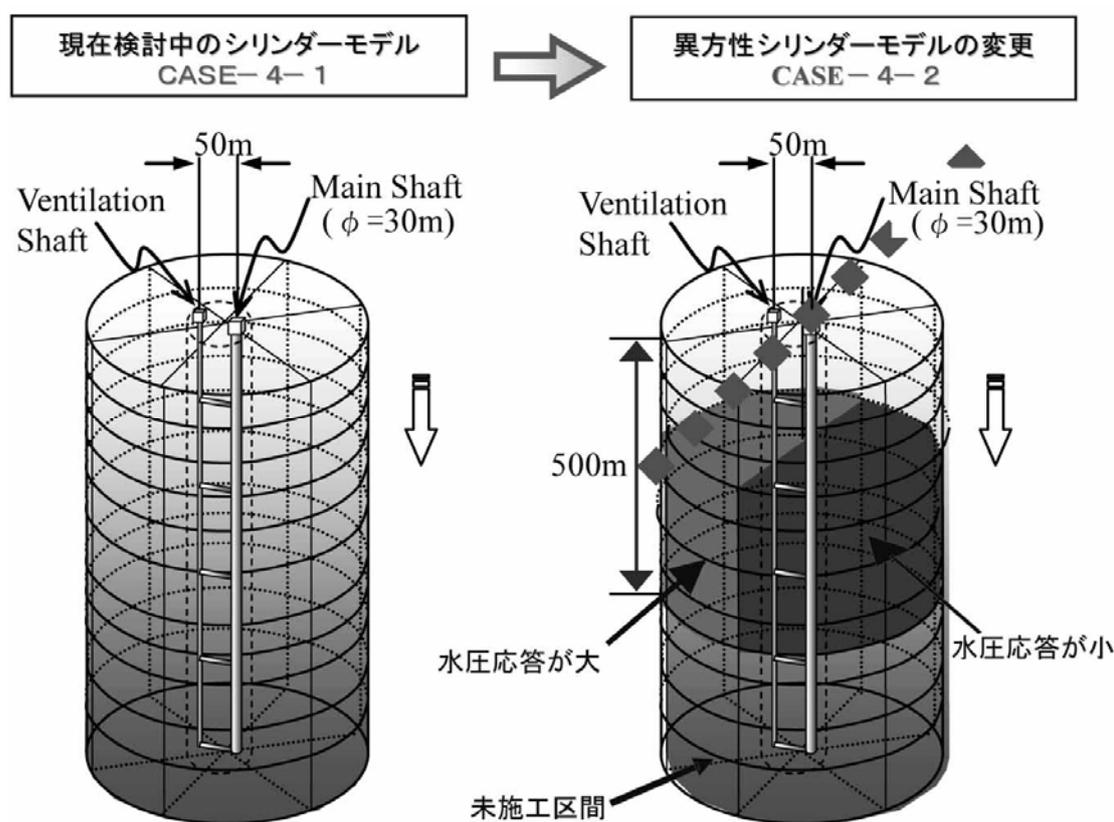


図2.1.14 異方性を考慮したシリンダーボリューム (CASE-4-2)

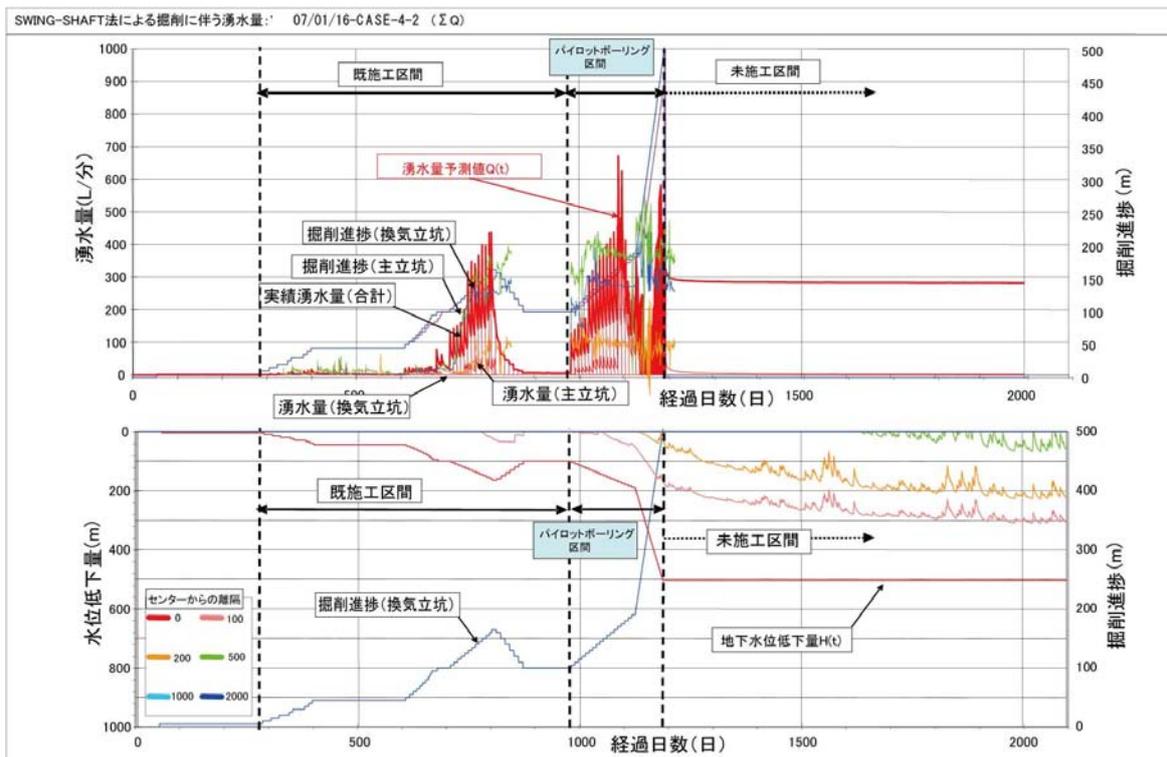


図2.1.15 パイロットボーリングの掘削中における湧水量と地下水位低下量 (CASE-4-2)

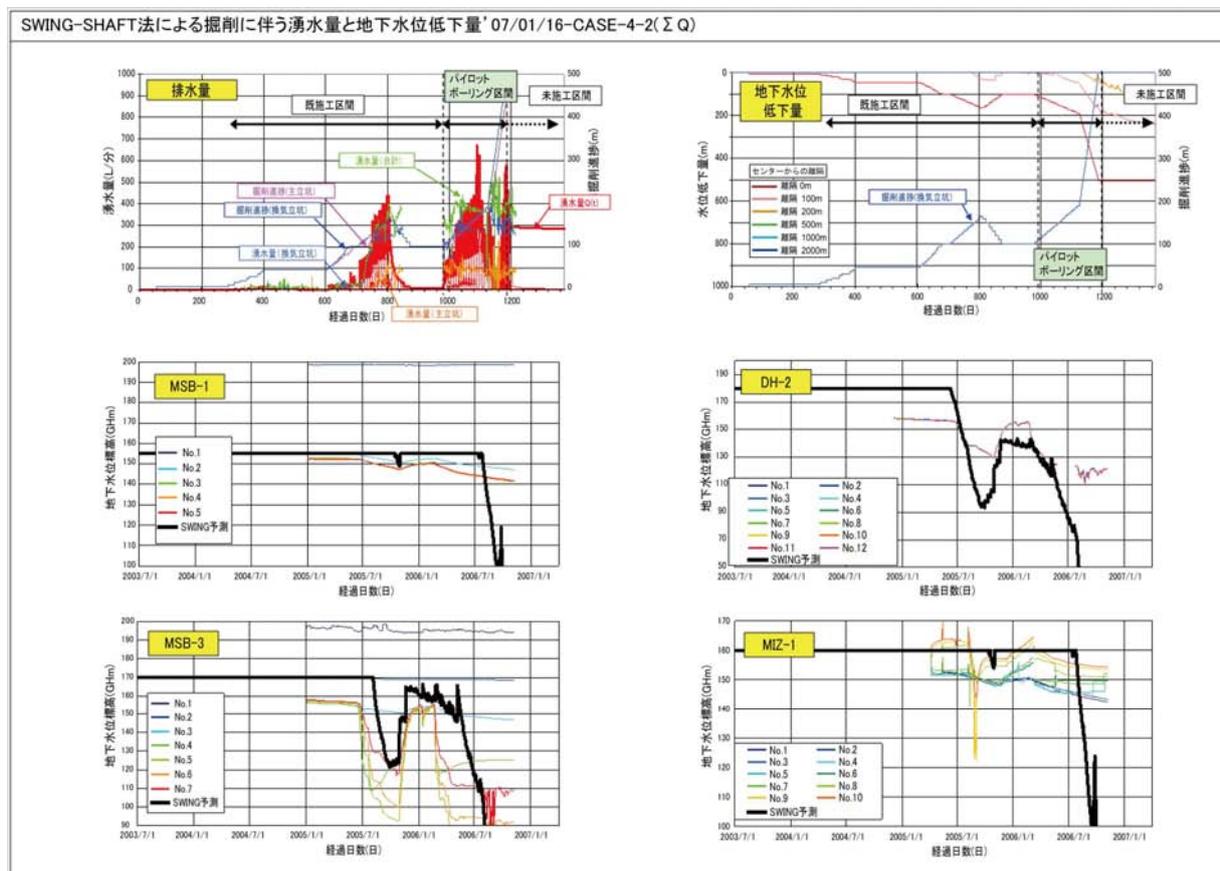


図2.1.16 各観測孔水位との対比 (CASE-4-2)

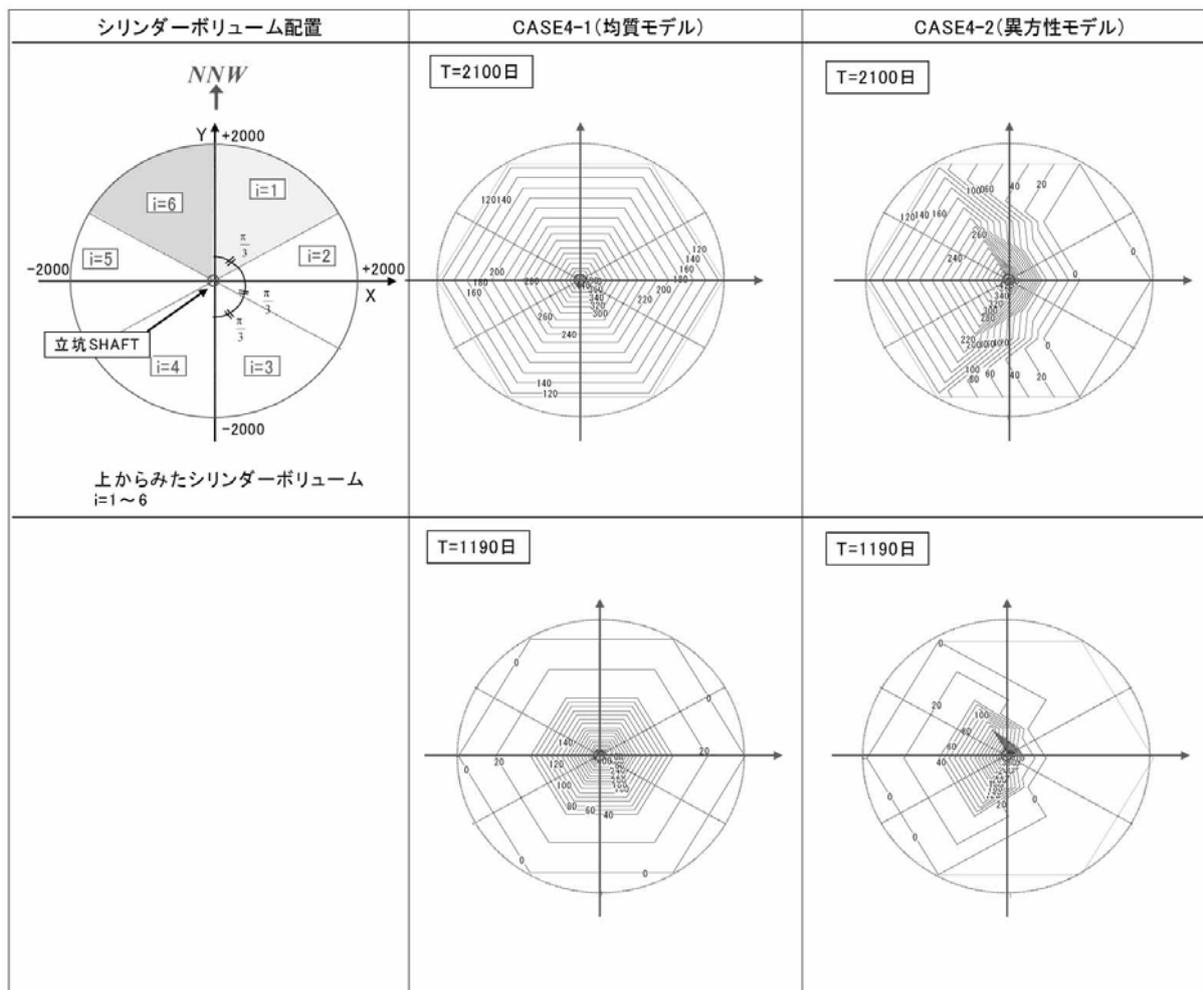


図2.1.17 井戸周辺の水位の時間的变化 (CASE-4-2)

2.1.3 シリンダーボリュームの改良 (CASE-4-3)

各観測地点の水位変動は、主立坑と換気立坑の中央部を貫く断層破碎帯（難透水性）の影響から水位低下量に明瞭な差異が発生している。平成18年度の異方性モデル（CASE-4-2）では、断層破碎帯に沿って主立坑側の右半分に主立坑のパイロットボーリング（06MI02号孔）の透水係数を採用したが、解析結果によると、湧水量は実績に比べてやや少なくなるとともに、近傍の観測孔水位に対して近似しつつある傾向を示した。但し、このケースにおいても、すべての周辺観測孔の地下水位（水頭）に対して合致していないことから、CASE-4-2のような単純な異方性モデルでは十分に現況を再現できていないこと、また、パイロットボーリングの実施に伴い、急激な水位低下の発生などが課題として挙げられた。

平成19年度では、断層破碎帯の分布位置や近傍観測孔の水位変動の評価を行った上で、異方性モデルを構築する必要があることから、図2.1.18に示す3次元地盤モデルから、深度50m毎の層別シリンダーボリュームを採用し、特に地下水位の再現性の検討を行った。

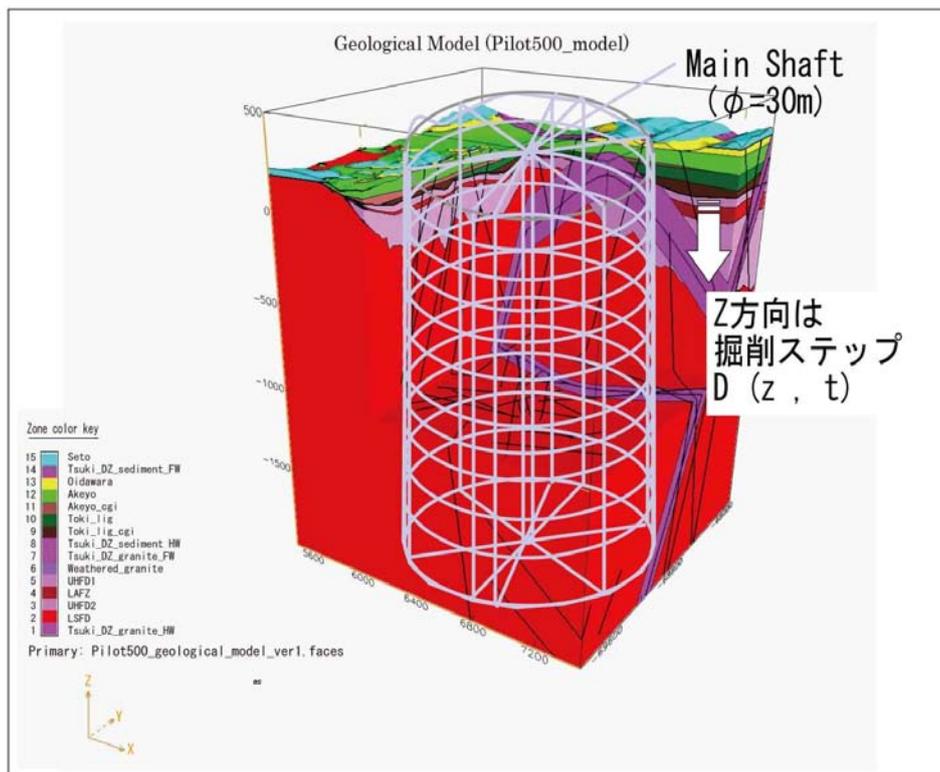


図2.1.18 平成19年度のシリンダーモデル (CASE-4-3)

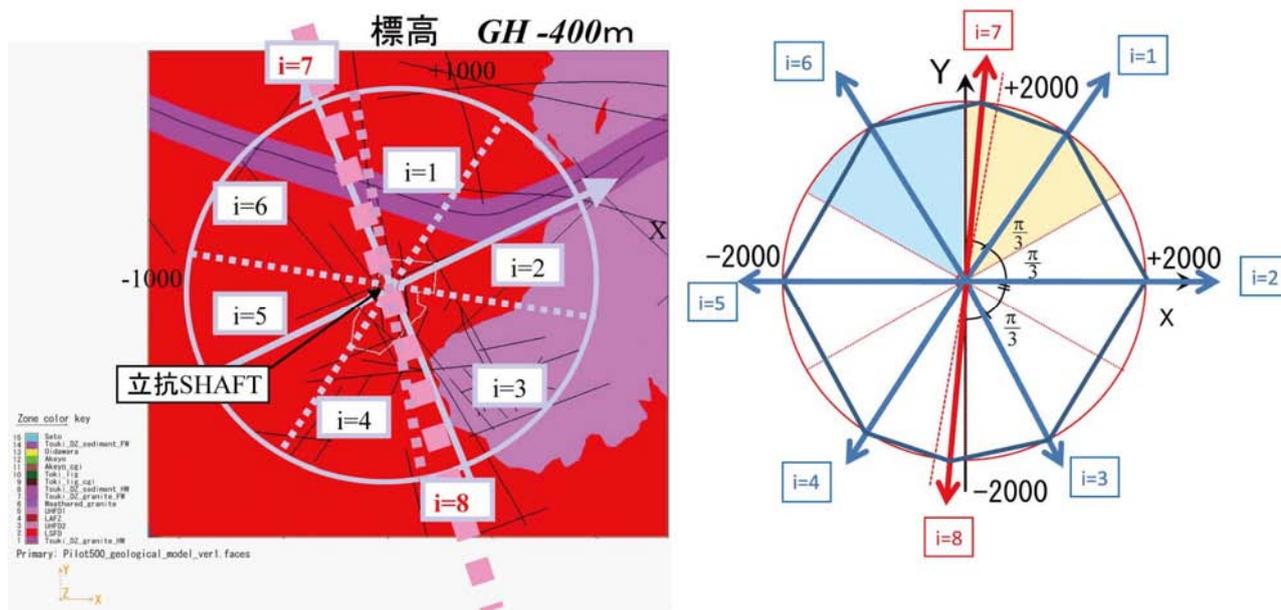


図2.1.19 異方性を考慮したシリンダーボリューム (CASE-4-3)

2.1.3.1 異方性を考慮したシリンダーボリューム

① シリンダーモデルの改良 (CASE-4-3)

平成18年度でも、断層を考慮した異方性モデルを試行したが、平成19年度では、さらに既往の3次元広域地質モデルを用いて、深度別の異方性シリンダーを作成し、その適用性を検討した (図2.1.19)。深度別異方性のシリンダーボリュームは、8方向とし、50m深度毎のシリンダーである。以下に示す各検討内容は、トータル湧水量と周辺への地下水位低下状況を試行的に行った結果で

ある。なお、各シリンダーボリュームの透水性は、図2.1.20に示すように、以下の4つのグループで検討している。

- i=7とi=8：断層破碎帯（透水性 $K=10^{-6}$ cm/sec）
- i=1～i=3：MBS-3号孔の地下水位変化（但し、MIZ-1号孔は考慮していない）
- i=4～I=5：DH-2号孔の地下水変化
- i=6：MSB-1号孔の地下水位変化

図2.1.21(1)，(2)～図2.1.22(1)，(2)に前章のCASE-4-2と比較して、湧水量と各観測孔の地下水位低下および立坑周辺における地下水位低下量分布を示している。これらの検討結果をみると、MSB-3号孔の地下水位低下量と総湧水量を確保するために、I=1～i=3のシリンダーボリュームの透水性を大きくしていることが原因で、平成18年度の異方性モデル（CASE-4-2：換気立坑側の透水性>主立坑側の透水性）のケースとまったく逆の地下水位低下傾向が認められている。今後、各シリンダーと地下水位変動の相関性を評価するとともに詳細に検討する必要がある。

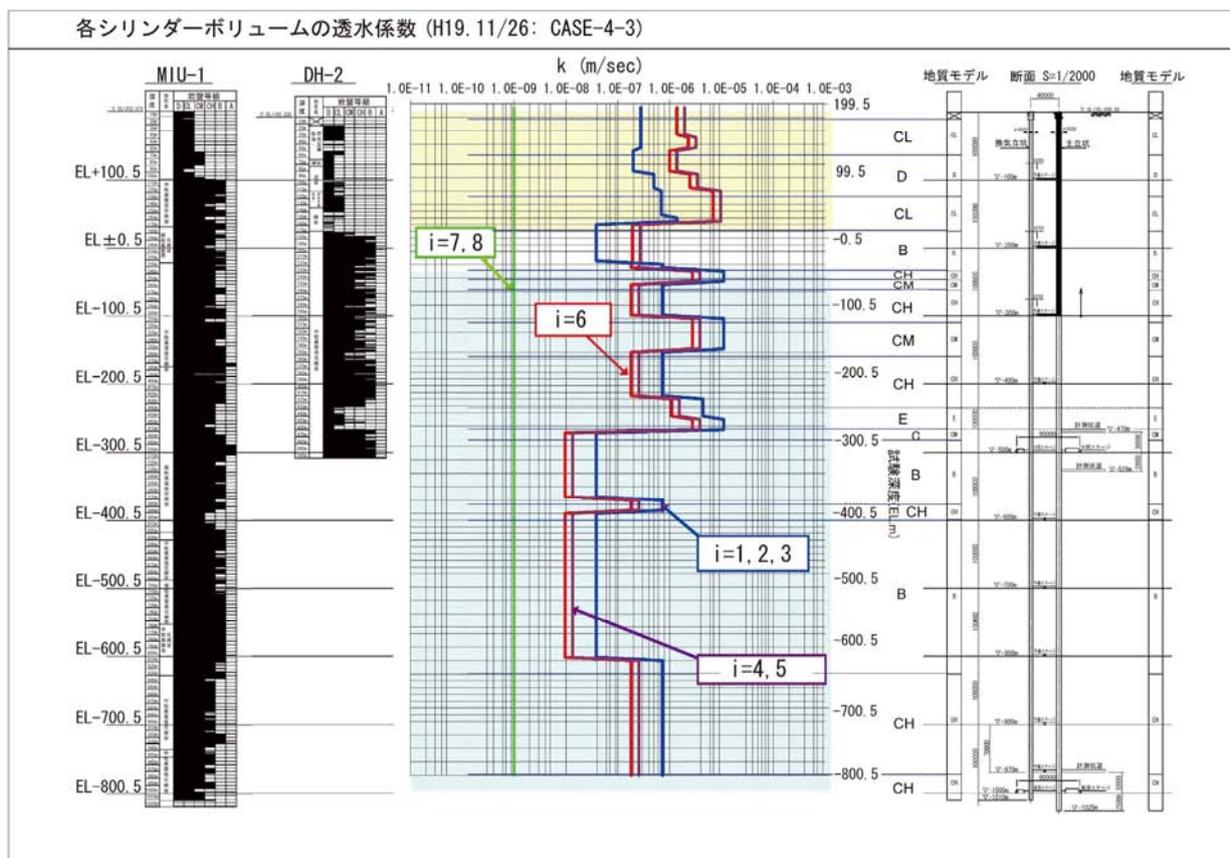


図2.1.20 平成19年度の透水係数の設定 (CASE-4-3)

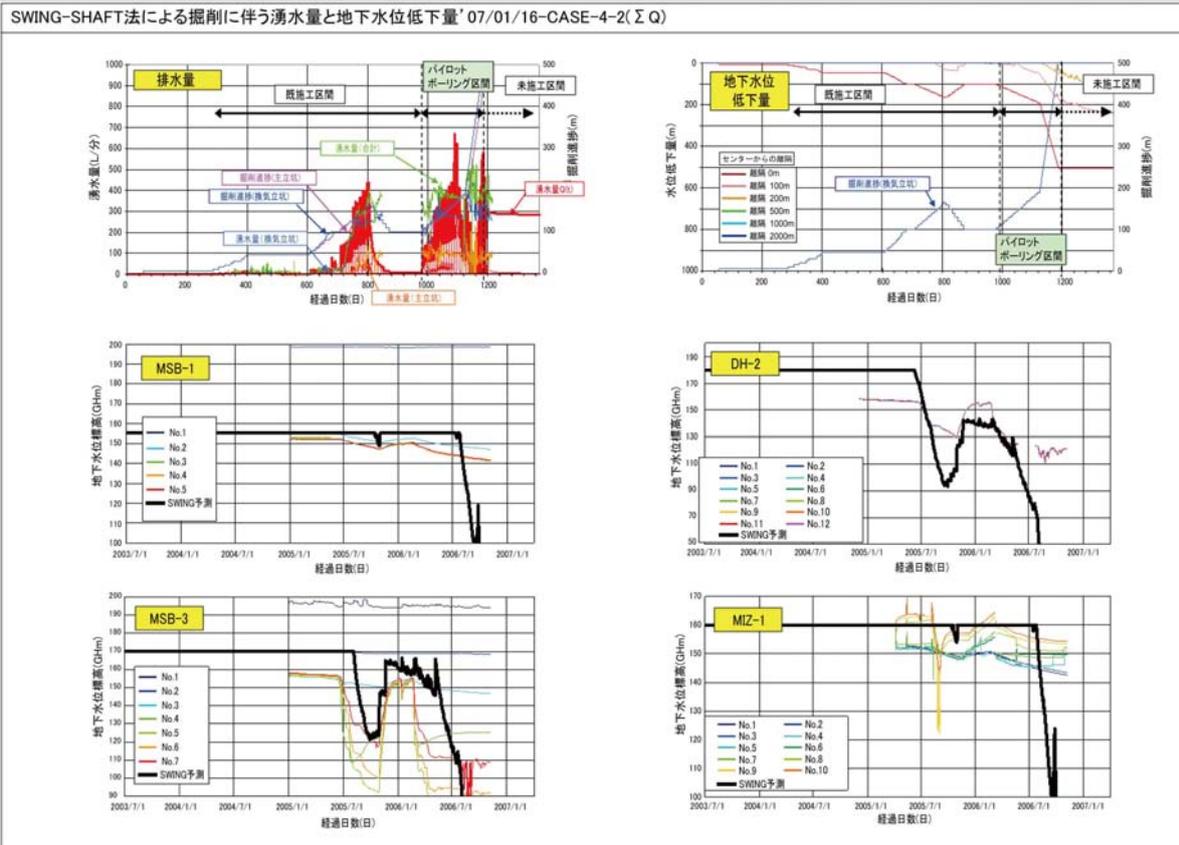


図2. 1. 21(1) 各観測孔水位との対比 (平成18年度 CASE-4-2)

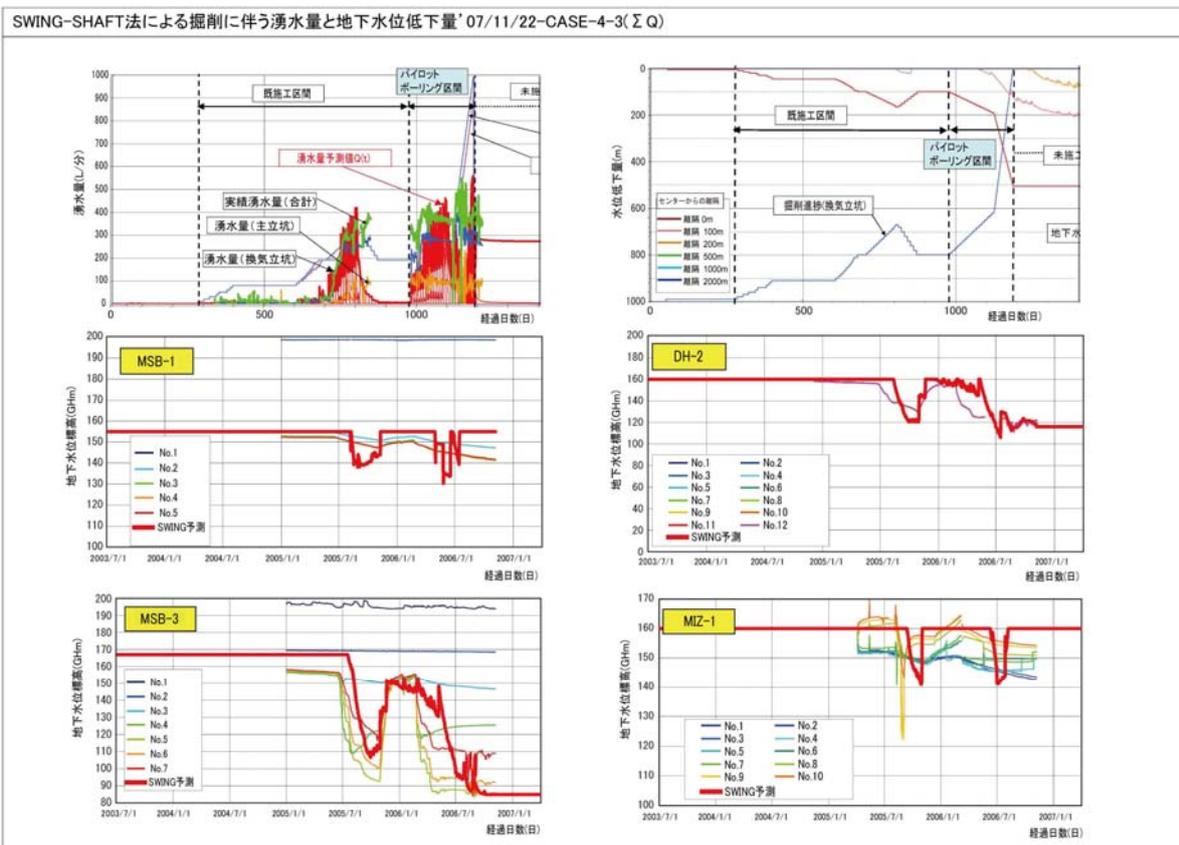


図2. 1. 21(2) 各観測孔水位との対比 (平成19年度 CASE-4-3)

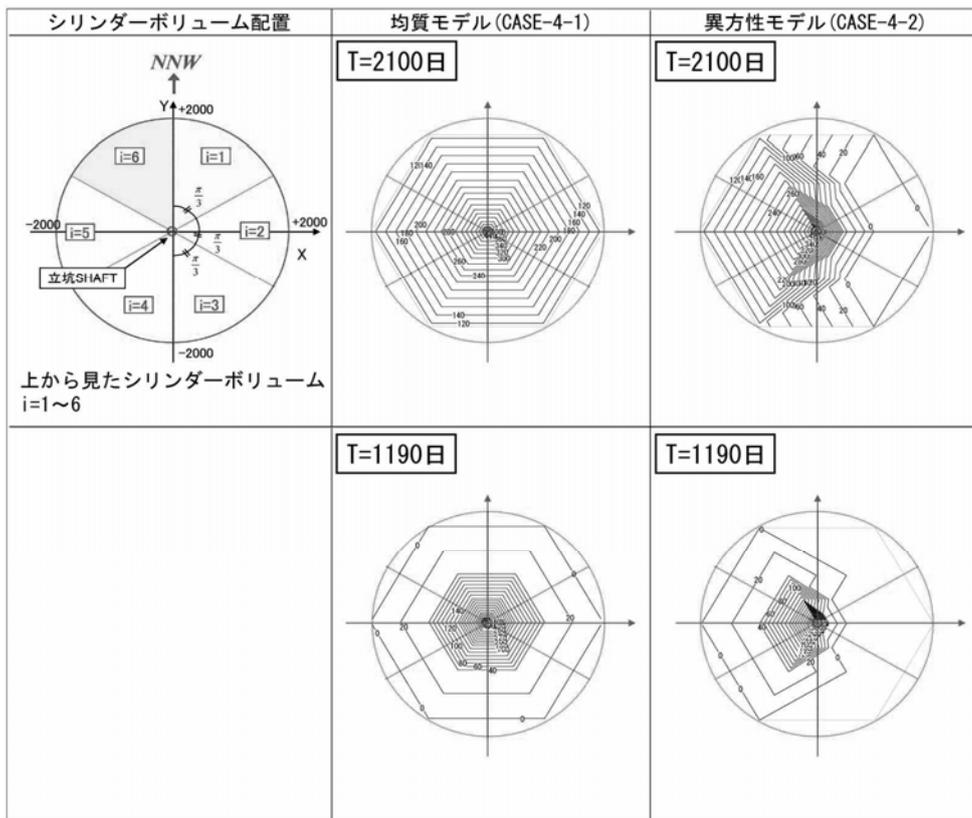


図2. 1. 22(1) 地下水位の時間的变化 (平成18年度 CASE-4-2)

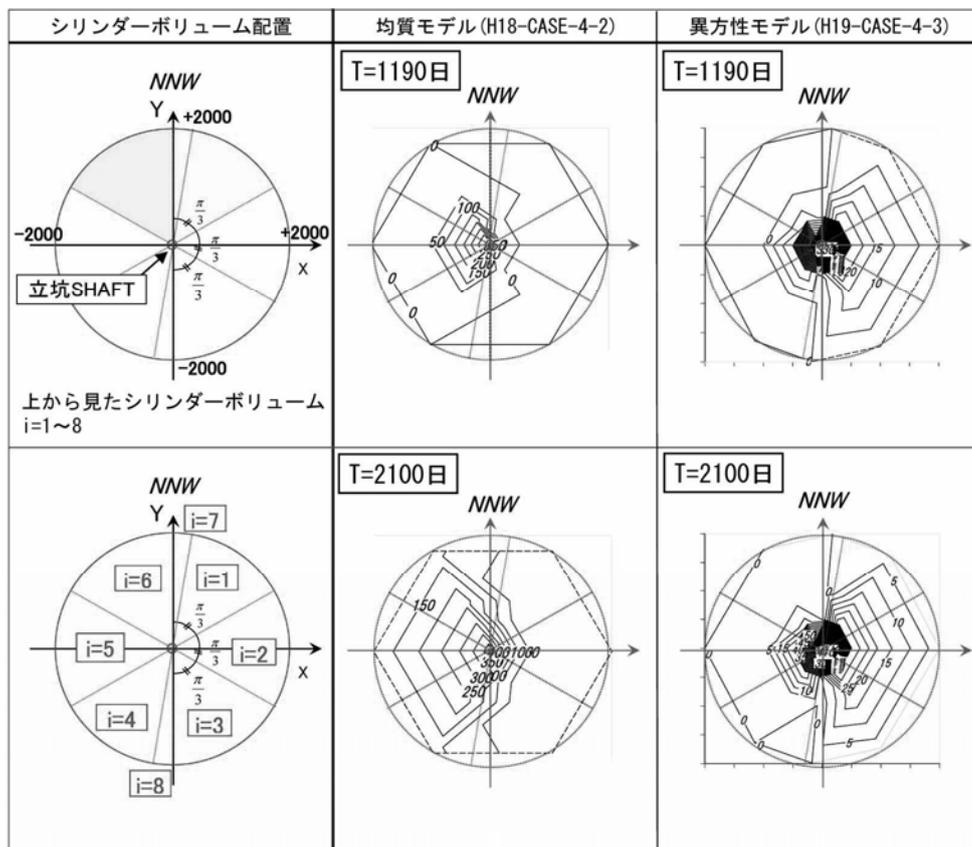


図2. 1. 22(2) CASE-4-2と平成19年度 (CASE-4-3) の差異

2.1.3.2 LAFZ分布区間におけるSWING-SHAFT法の適用

ここでは、前述のCASE4-3を用いて、Low Angle Fracture Zone (LAFZ) 区間をモデル化したうえで、換気立坑におけるLAFZ分布区間(掘削深度200~250m区間)の掘削に伴う湧水量を予測した。具体的なLAFZ区間のモデル化は、図2.1.24に示すとおり、深度200~250m間に厚さ30mの高透水シリンダーを仮想している。

また、透水係数は、LAFZ②~⑤区間の試験結果のうち、 $k=5.0 \times 10^{-4} \text{ cm/sec} = 5.0 \times 10^{-6} \text{ m/sec}$ を適用し、各深度の透水係数は、図2.1.25に示している。ここでの掘削条件は、グラウト注入等の湧水対策をしない無対策である。

解析結果によれば、LAFZ区間の通過に伴う湧水量は、大前提として無対策で掘削した場合、

$$\text{LAFZ分布区間の湧水量} = 900 \sim 1400 \text{ L/min} = 1296 \sim 2016 \text{ m}^3/\text{日}$$

と予想される。また、これだけの湧水量に伴い、周辺地下水位(水頭)の低下も顕著に現れ、図2.1.26に示すとおり、各観測地点とも現状に比べて40~80m程度低下することが予測される。特に、DH-2号孔、MSB-3号孔では、海面下付近まで低下する。

但し、実際の施工は、グラウト注入を行い施工される計画であり、今後、グラウトの注入効果を考慮した検討を行っている。なお、SWING-SHAFT法の場合、図2.1.23に示すとおり注入効果モデルを採用している。壁面近傍に薄い自然地盤を残し、グラウトで内部にドーナツ状の止水域を形成させて、注入効果を示すものであり、トンネル湧水量の抑制モデルと言われる青函トンネル方式に近似したモデルである⁹⁾。なお、このモデルは簡易な適用で済むが、改良幅や改良値の解釈に難があるので、さらなる考察が必要である。また、水理定数を環状に低下させ、効果を表現することも可能であるが、適切な定数の設定、入力の高難さなどが問題点として残る。

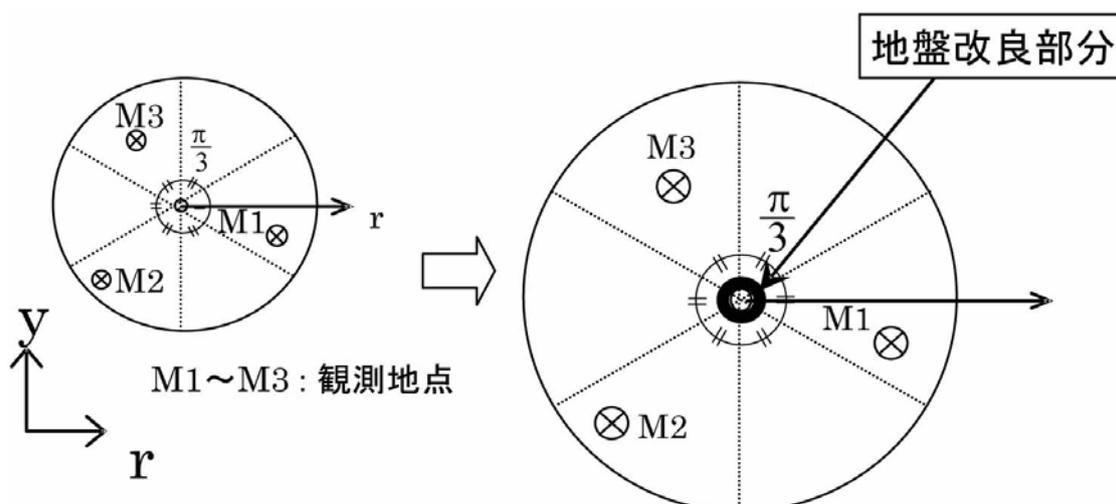


図2.1.23 SWING-SHAFT法における地盤改良のモデル化

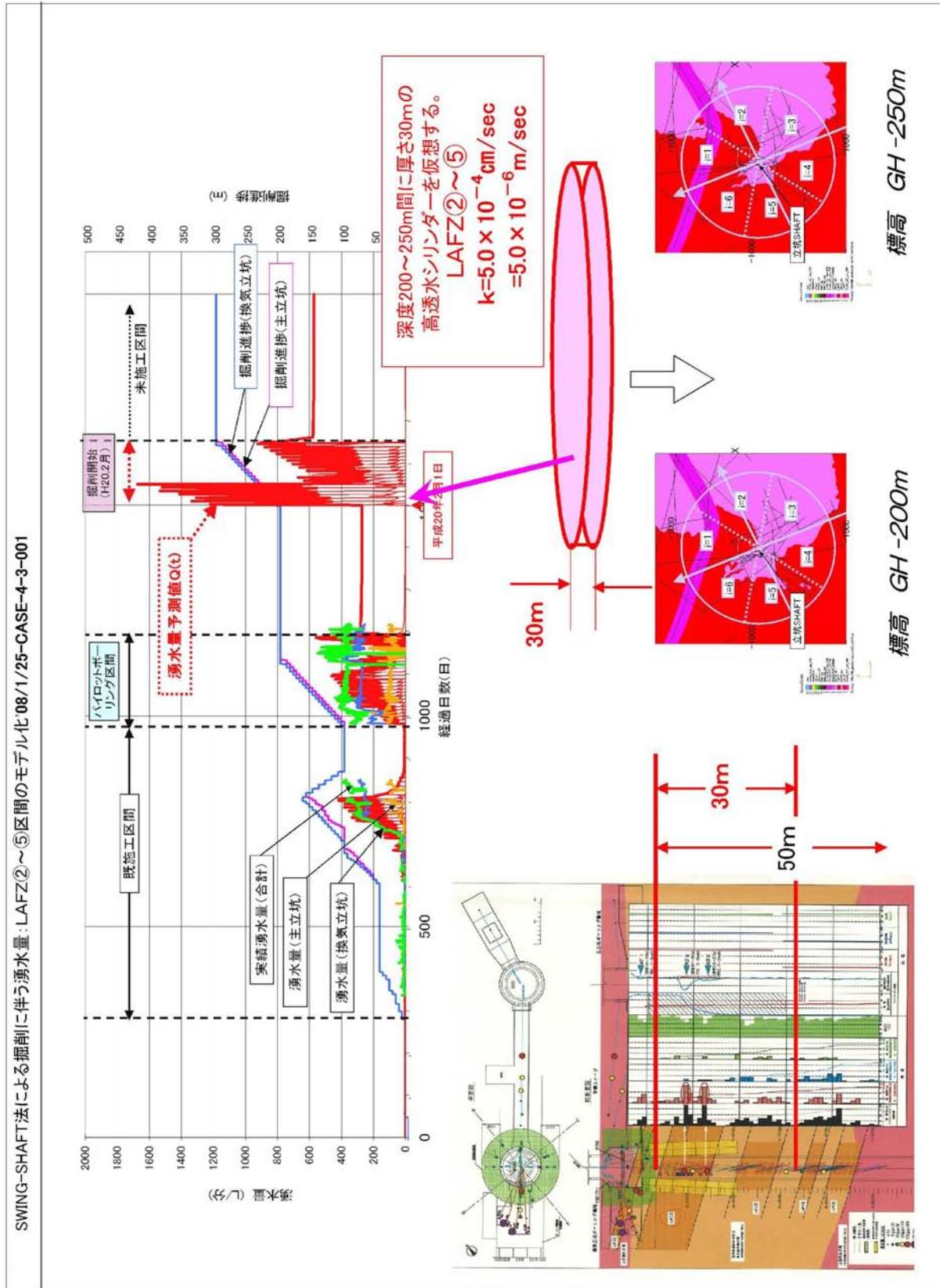


図2.1.24 SWING-SHAFT法におけるLAFZ区間のモデル化

各シリンダーポリュームの透水係数 (H20. 1. 25: CASE-3-4 と LAFZ 区間のモデル化 CASE-4-3-1)

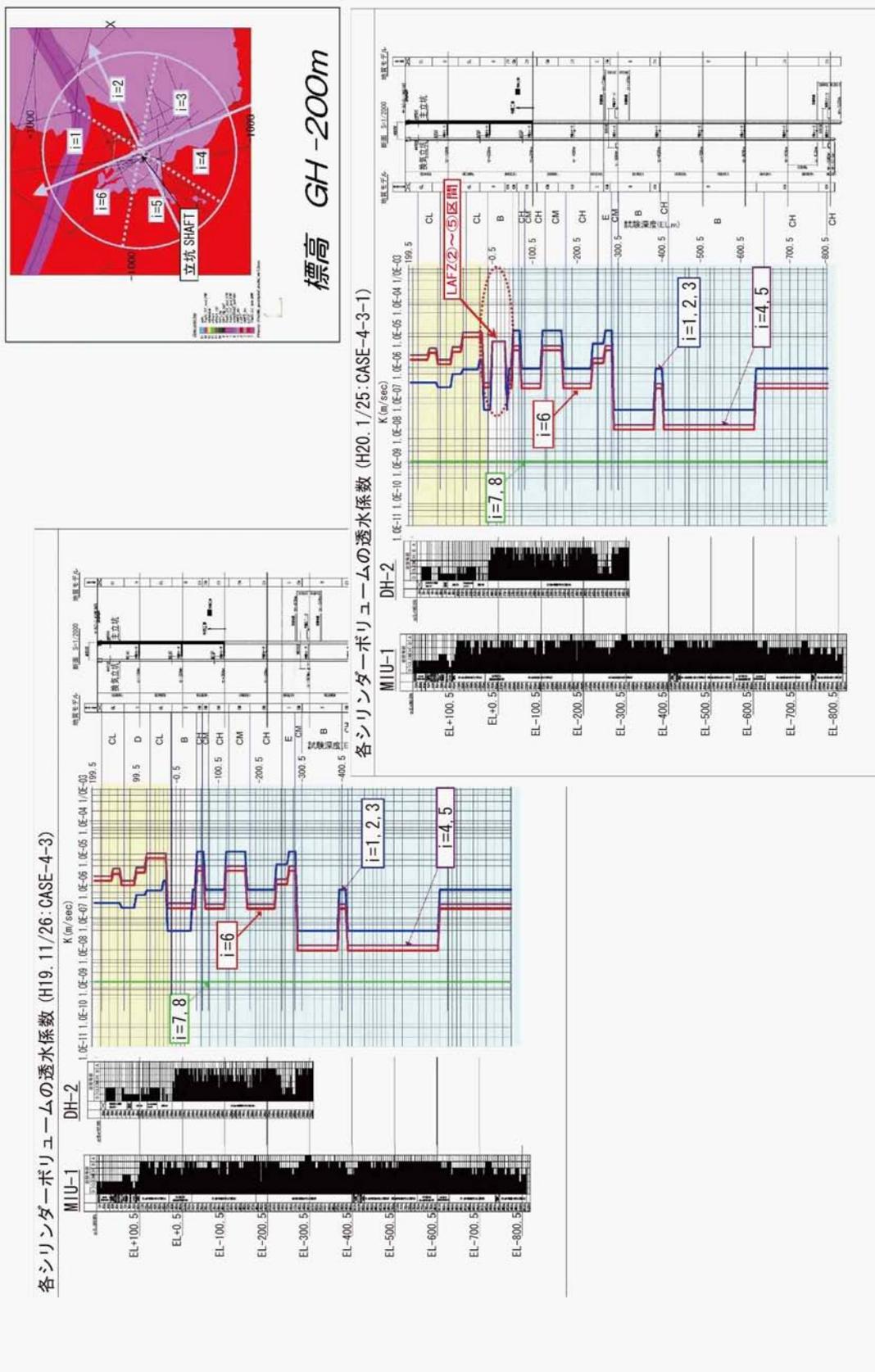


図2. 1. 25 CASE-4-3とLAFZ区間の透水係数の比較

掘削開始に伴うSWING-SHAFT法による掘削に伴う湧水量と地下水水位低下: '08/1/25-CASE-4-3-001(ΣQ)

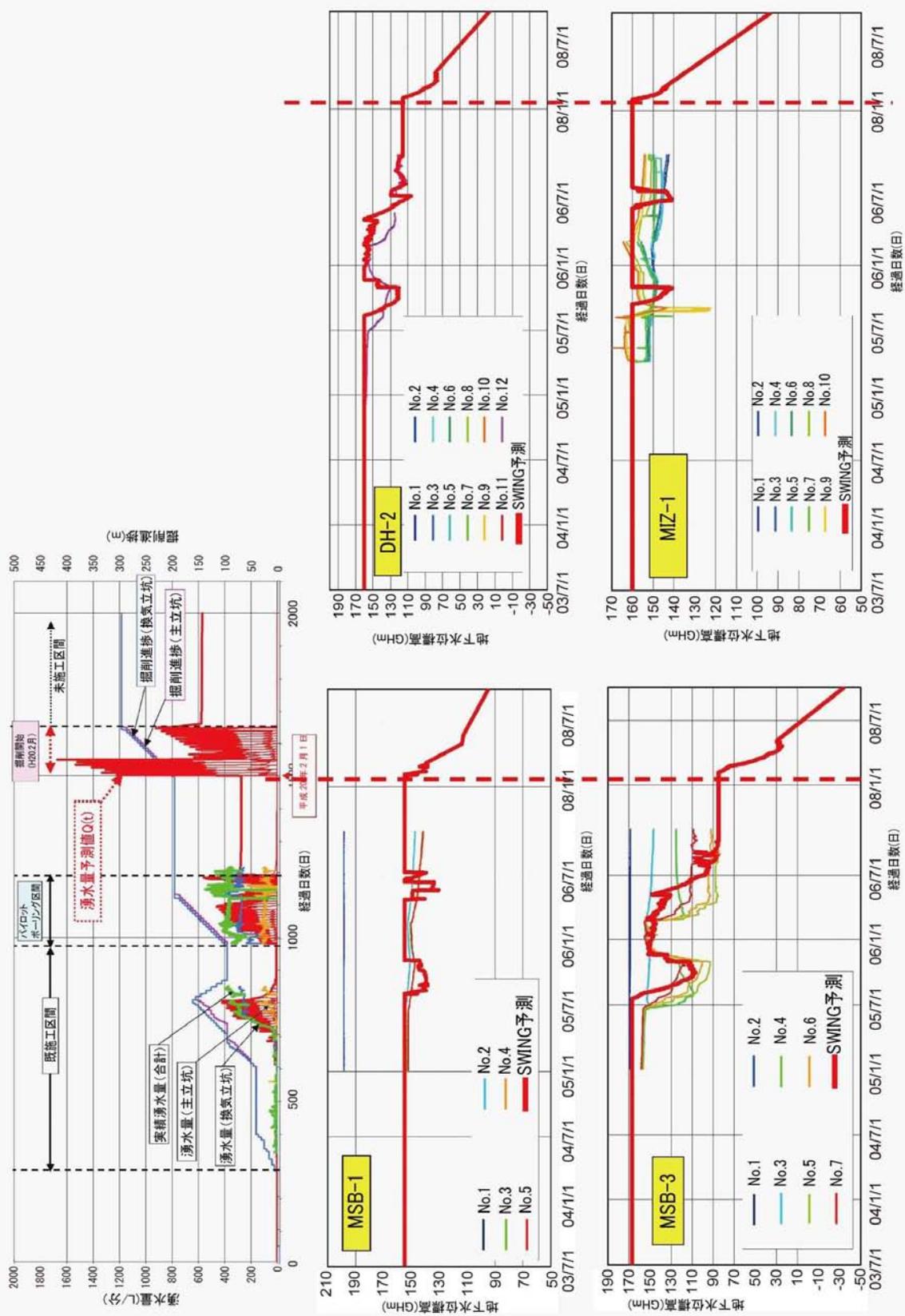


図2.1.26 LAFZ区間の掘削に伴う湧水量と地下水水位低下予測

2.1.4 平成21年度の検討内容

トンネル湧水量の予測精度の向上およびパラメータの最適化プロセスの自動化を目的として、逐次型データ同化手法の1つであるアンサンブル・カルマンフィルター（以下、EnKF）をSWING法およびSWING-SHAFT法への導入を試みた。カルマンフィルター（以下、KF）は観測値が得られるたびに、その観測値・モデル予報値・それぞれの誤差を用いて、線形最小分散定理により解析値を求めるデータ同化手法であり、予報誤差の統計的情報の時間発展をモデルで計算することが特徴である。KFの計算部分は、

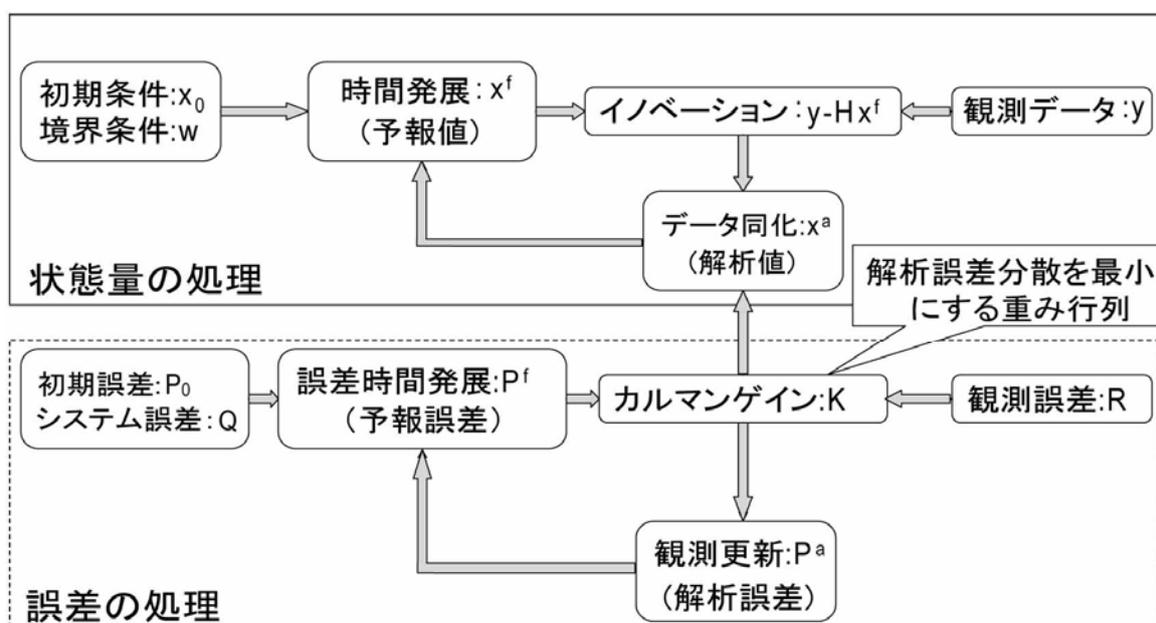
- a) 線形最小分散推定の理論に基づいて観測データや数値モデルの結果（予報値）より高精度な解析値を計算する部分および、
- b) リカッチ方程式に基づいて予報誤差の時間変化を計算する部分

から成り、KFの計算プロセスを図2.1.27に示す。EnKFは非正規分布の観測誤差に対してKFを適用させたもので、「アンサンブル予報」を用いるという点がKFと異なる。「アンサンブル予報」とは、異なる誤差を与えた多数のモデル計算の集合体から誤差共分散行列を求めるプロセスのことである（図2.1.28参照）。

また、EnKFを導入したSWING法（以下、SWING-EnKF）を実トンネル工事に適用し、以下に示す3つの項目がトンネル湧水量の予測精度に与える影響について検討を行った。

- (1) トンネル掘削中に得られる観測湧水量の頻度
- (2) EnKF（アンサンブル予報）で与える透水係数の分散（正規乱数の分散の大きさ）
- (3) 地質調査によって得られる事前の地質情報

さらに、EnKFをSWING-SHAFT法への導入を試み、瑞浪超深地層研究所の立坑トンネルにおける湧水予測を行った。



H: 観測行列 モデル格子点から観測点への空間内挿

図2.1.27 カルマンフィルター(KF)の計算プロセス

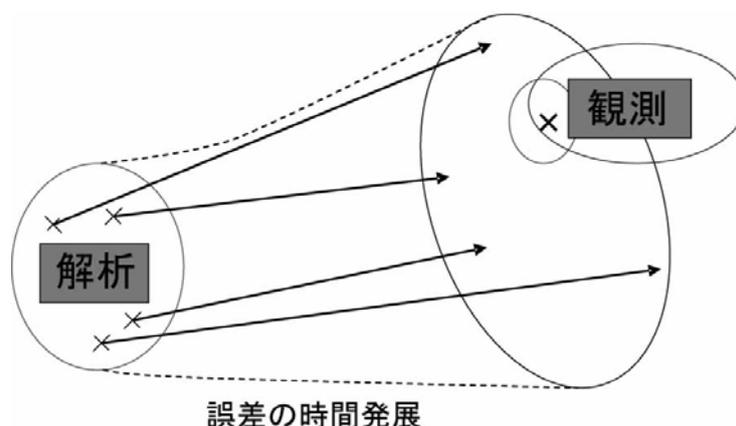


図2.1.28 アンサンブルカルマンフィルター(EnKF)におけるアンサンブル予報

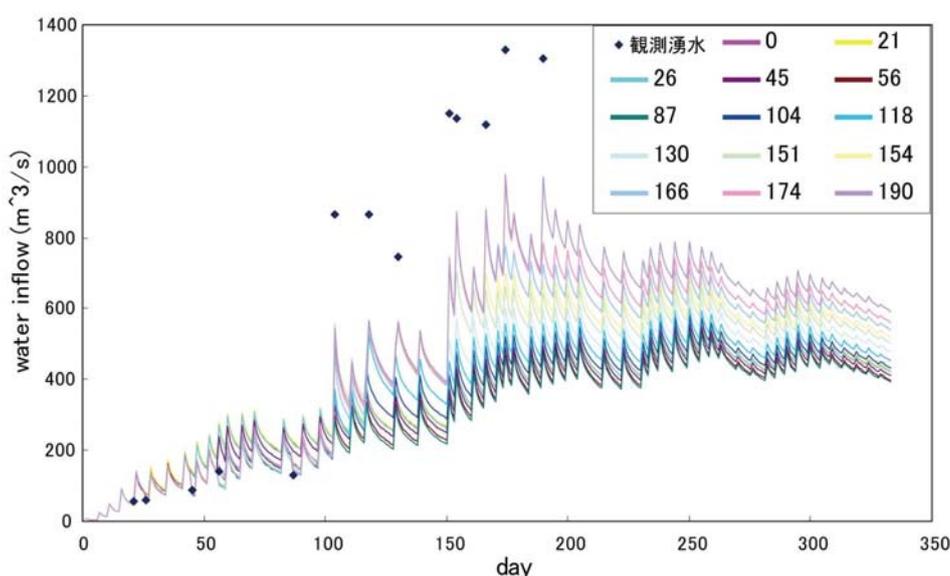
2.1.4.1 観測湧水量のデータ取得の頻度がトンネル湧水量の予測精度に与える影響の検討

SWING-EnKFでは観測湧水量が得られるごとにデータ同化，すなわちパラメータ（スライスの透水係数）の最適化を行い，将来のトンネル湧水量の予測を行う。したがって，トンネル湧水量の予測精度は観測湧水量のデータ取得頻度に大きく影響される。よって，本節では，観測湧水量のデータ取得頻度を変更することで，トンネル湧水量の予測値がどのように変化するかについて検討を行った。実トンネルでの観測湧水量および解析条件を表2.1.1 a), b)にそれぞれ示す。表2.1.1に示すとおり，トンネル湧水量の実測値は掘削開始21日目から190日までの間で13回計測されている。そこで，トンネルの湧水予測に用いる観測値の数を変更し（例えば，表2.1.1 b)）中の「観測湧水量～日まで」が104は，104日までの観測湧水量のデータを全て用いてEnKFによるデータ同化を行い，以降はデータが得られないとして将来予測を行ったことを意味する），全く得られていないケースを含めて計14通りの解析を行った。ただし，EnKFで与える透水係数の分散は1，各スライスに与える初期透水係数は $1.0 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ （事前の地質情報なし）とした。

解析結果を図2.1.29に示す。本図より，観測値の数が増えるに従って解析値（すなわち将来のトンネル湧水量の予測値）は観測値に近似するように遷移しており，観測湧水量は解析結果の精度を向上させるためにも多くの日に採取した方が良いということがわかる。また，トンネル湧水量が急激に変化する104日目より前の観測値だけを用いた解析結果を見ると，解析結果は観測値に非常によく一致しているが，それ以降のトンネル湧水量の予測は観測値の値を再現するような解析結果は得られていない（この点に関する改善については後述する）。本検討では時系列に沿って行っているため観測値として入力した観測湧水量を取得した日以降は将来予測になっている。そのことを考慮すると，観測湧水量が前の観測値と比較して急激に変化した場合には，それ以降の観測値を多くとる（すなわち，密な観測）が必要であると考えられる。

表2.1.1 a) トンネル湧水量の実測値および b) 解析条件

a)		b)				
日	観測湧水 m ³ /day	透水係数 10 ⁻⁶ cm/s	観測湧水量 ~日まで	平均	正規乱数 分散	偏差
21	57.6	10	0	0	0	0.0
26	60.4	10	21	0	0	0.0
45	86.4	10	26	0	0	0.0
56	141.1	10	45	0	0	0.0
87	129.6	10	56	0	0	0.0
104	864	10	87	0	0	0.0
118	864	10	104	0	0	0.0
130	745.9	10	118	0	0	0.0
151	1150	10	130	0	0	0.0
154	1137	10	151	0	0	0.0
166	1119	10	154	0	0	0.0
174	1328	10	166	0	0	0.0
190	1306	10	174	0	0	0.0
		10	190	0	0	0.0



(データの取得頻度がトンネル湧水量の予測精度に与える影響)

図2.1.29 解析結果

2.1.4.2 EnKFで与える透水係数の分散がトンネル湧水量の予測精度に与える影響の検討

EnKFの処理を行うにあたり、アンサンブル予報を行う。すなわち、初期値に意図的な誤差を与え、アンサンブルメンバーを作成し、そのそれぞれのアンサンブルメンバーについて解析し、その平均を計算する。SWING-EnKFでは、初期値として与えられている透水係数に誤差を与え、アンサンブルメンバーを作成し、それらを用いて湧水量を計算し、その平均値を予測湧水量としている(図2.1.30参照)。透水係数に与える誤差は正規乱数で与えるため、本節では、その正規乱数の分散の違いがトンネル湧水量の予測にどのような影響を及ぼすかについて検討を行った。表2.1.2に解析の条件をまとめた。本表に示すとおり、データ同化には全ての観測湧水量データを用い、各スライスの初期透水係数は 1.0×10^{-6} cm/sec(事前の地質情報なし)とし、EnKFで与える透水係数の正規乱数の分散を1, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200と変化させた。

図2.1.31に解析結果を示す。本図より分散が大きくなるにしたがい、観測湧水量に解析値が近似していく様子がわかる。トンネル湧水量が急激に変化した104日目(突発的な湧水)の時点で解析

値が観測値に鋭敏に反応するという現象は十分再現できなかつたが、それ以降経過日数を重ねるにつれて、比較的精度の高い予測ができています。本検討により、観測湧水量変動が大きい場合には、正規乱数の分散を大きく設定した方が、予測の精度が高くなるということがわかった。また、いくら分散を変化させてもその解析には限界があることがわかった。透水係数の分散を大きくするということは、透水係数の不確実性が増大することを意味する。

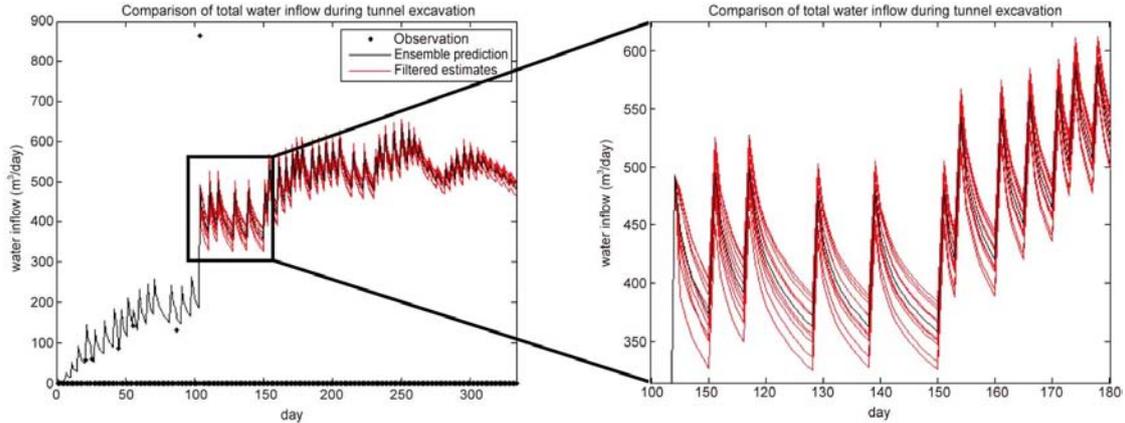
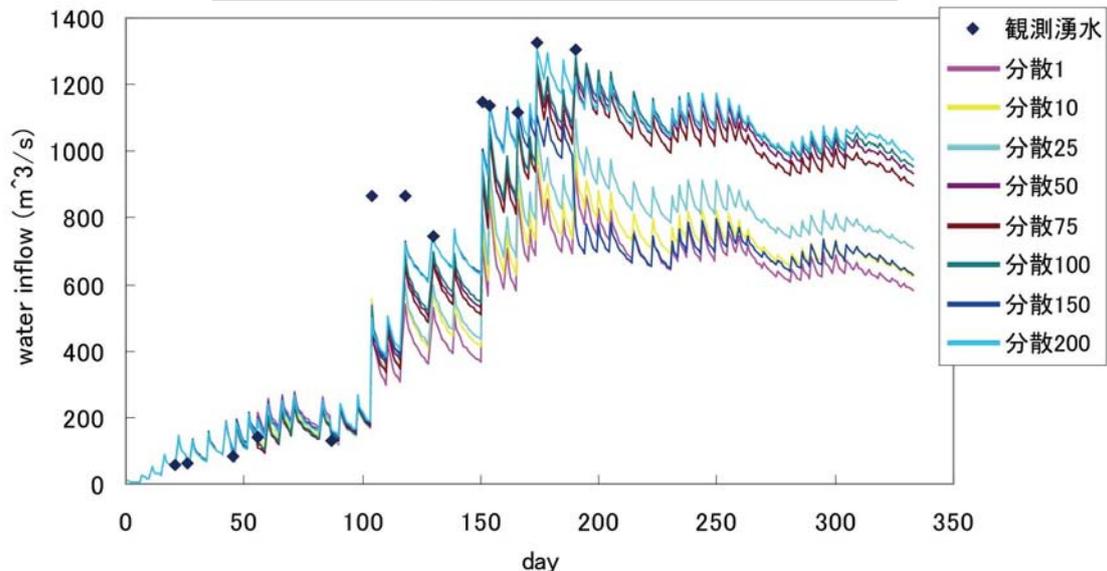


図2.1.30 SWING-EnKFにおけるアンサンブル予測

表2.1.2 解析条件

透水係数 10^{-6} cm/s	観測湧水量	正規乱数		
		平均	分散	偏差
10	観測値全て	0	1	1.0
10	観測値全て	0	10	3.2
10	観測値全て	0	25	5.0
10	観測値全て	0	50	7.1
10	観測値全て	0	75	8.7
10	観測値全て	0	100	10.0
10	観測値全て	0	150	12.2
10	観測値全て	0	200	14.1



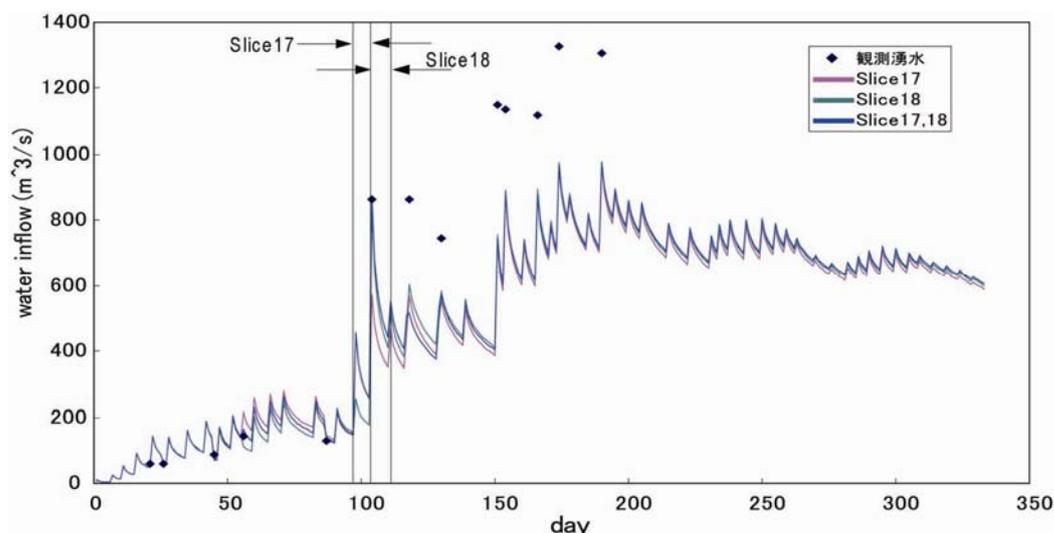
(EnKFで与える透水係数の分散が湧水量の予測精度に与える影響)

図2.1.31 解析結果

2.1.4.3 地質調査などによって得られる事前の地質情報が湧水の予測精度に与える影響の検討

水理モデルの作成には地質調査などによって得られる地質情報が湧水の予測には非常に重要である。前節までは、SWING法における各スライスに任意の透水係数として $1.0 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ が与えられたが、地質調査などにより事前に初期透水係数の情報があれば、スライスの初期透水係数として与えることが可能である。本解析事例で観測されたような突発湧水の予測については、EnKFで与える透水係数の分散のみでは再現することは難しいと考えられ、事前に得られる地質情報を組みこむことによって、トンネル湧水の予測精度を向上させることができると考えられる。よって、本節では、急激に湧水量が変化した掘削後87日～104日のスライス（スライスNo.17-18）について、地質調査などにより得られた透水係数を初期透水係数として与え、他のスライスについては $1.0 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ を与えて解析を行った。なお、データ同化には全ての観測データを用い、EnKFで与える分散は1とした。先のパラメータスタディで分散を大きくすることで急激に変化する湧水のある程度再現できる可能性が示されたが、ここでは事前に得られる地質情報の有無による予測結果の違いを顕著に示すため分散は1とした。

解析結果を図2.1.32に示す。本図より、事前に地質調査などで得られる地質情報（ここでは透水係数のオーダー）を各スライスに初期値として与えることで、突発湧水のような急激に変化するトンネル湧水量に対応できるものと考えられる。また、本検討では、104日以降に解析地と観測値に乖離が見られるが、これについては前節で述べたように、EnKFで与える透水係数の分散を大きくすることで対応が可能であると考えられる。



(事前の地質情報が湧水量の予測精度に与える影響)

図2.1.32 解析結果

2.1.4.4 SWING-EnKFの実トンネルへの適用に関するまとめ

平成21年度の検討課題として、SWING法にデータ同化手法の1つであるEnKFの導入を行った。これにより、水理地質モデルの修正、パラメータ最適化を自動的に行うことが可能となった。また、新たに開発したSWING-EnKFを実トンネルに適用し、トンネル湧水量の予測精度に影響を与える要因について検討を行った。検討の結果、観測値の取得頻度、EnKFのアンサンブル予報における透水係数の分散、各スライスに与える初期透水係数（地質調査などによって得られる事前の地質情報）が大きな湧水の予測精度に大きな影響を与えることがわかった。特に、突発湧水のと

うにトンネル湧水量が突然、急激に変化する場合については、EnKFで与える分散を大きくするだけでは対応できず、事前に地質調査などで得られる地質情報、例えば透水係数のオーダーなどをスライスの初期値としてモデルに繁栄させる必要があると考えられる。

2.1.5 SWING-SHAFT法の採用に関する課題

2.1.5.1 平成20年度モデルによる工事進捗の追跡

(1) SWING-SHAFT法におけるグラウト効果

平成19年度に示したLAFZ区間を含めて深度200m以深の施工は、パイロットボーリングの実績から、グラウトを前提に掘削されている。ここではグラウトによる止水効果についてSWING-SHAFT法を用いて検討した。

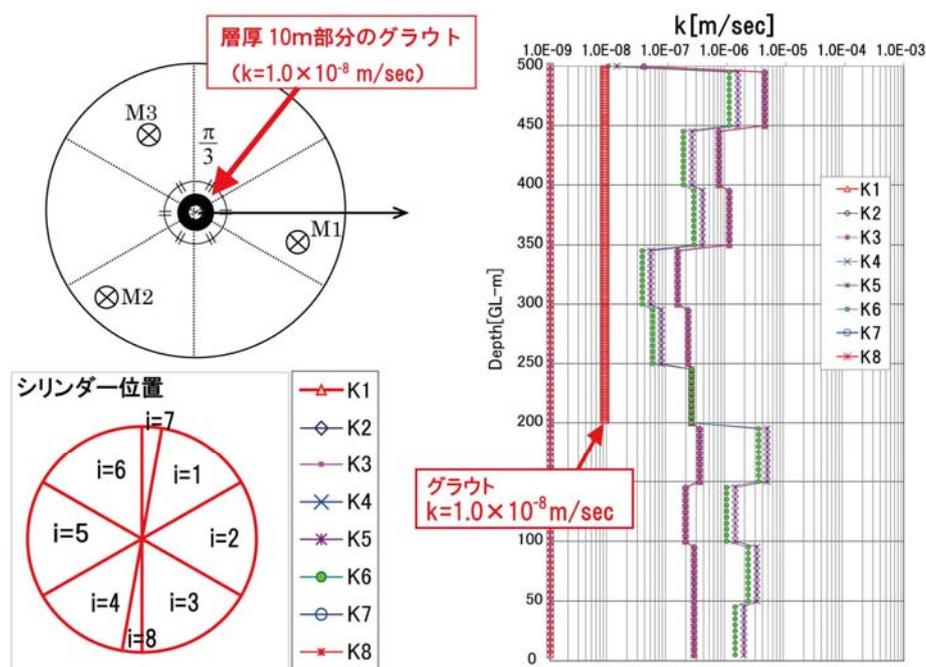


図2.1.33 200m以深におけるグラウトの設定

グラウト条件は、図2.1.33に示すとおり、深度200mから両立坑の周囲10m区間を $k=1.0 \times 10^{-8}$ m/secまでグラウトで改良された場合である。注入前の透水係数に比べて1~2オーダー改良された状態である。

(2) 立坑掘削に伴う湧水量の予測

図2.1.34はSWING-SHAFT法により換気立坑と主立坑における総湧水量について、グラウトした場合と無対策で掘削した場合を比較して示した。両図をみるとグラウトした区間の湧水量が明瞭に減少している。無対策では深度および未施工区間における透水係数に応じて最大 $1.6 \text{ m}^3/\text{min}$ まで増加するが、グラウトを行うことで200m以深では殆ど湧水量が増加していない予測値である。但し、本ケースでは、グラウトによる改良値（このケースの場合 $k=1.0 \times 10^{-8}$ m/sec）を一義的に設定しているため、立坑周辺における断層部シリンダー（i=7と8）を除く、全方位のシリンダーボリュームにこの改良値を適用している。

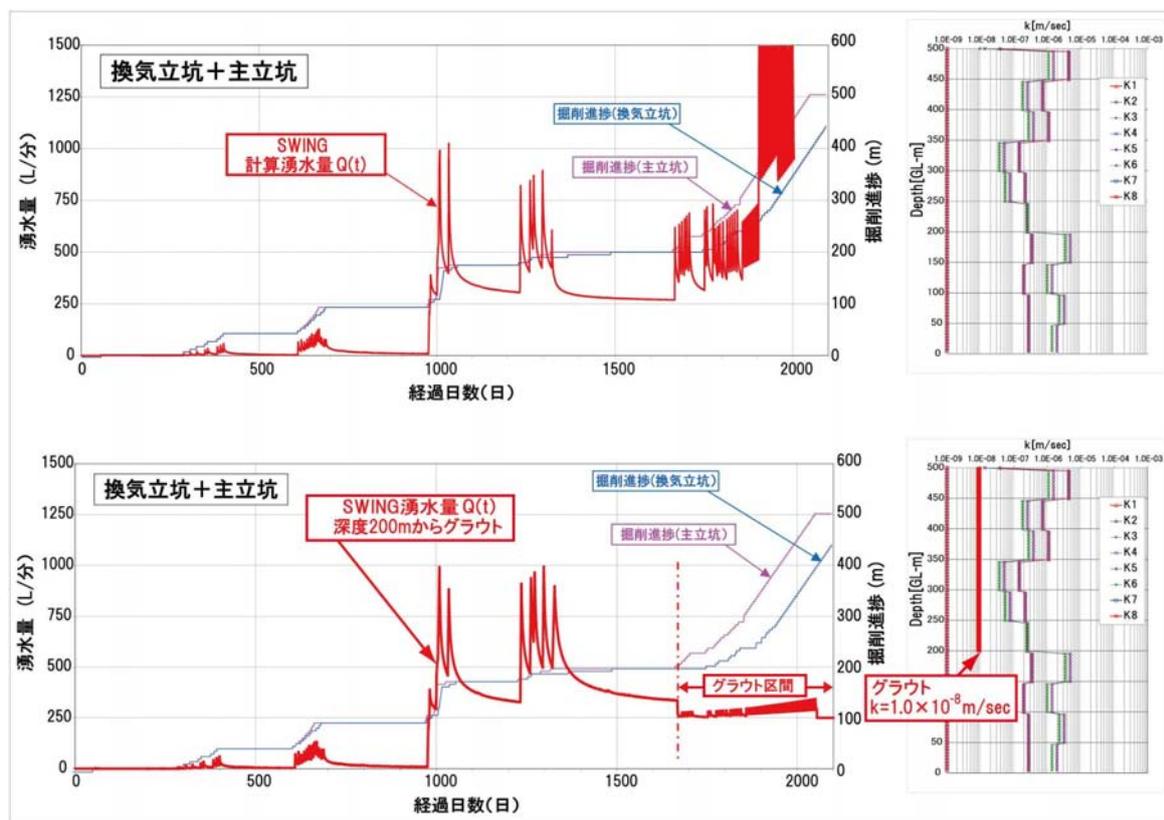


図2. 1. 34 SWING-SHAFT法における地盤改良のモデル化

さらに、図2.1.35～図2.1.36には主立坑と換気立坑における実測湧水量と対比して示した。同図によれば、SWING-SHAFT法では、切羽の進行とともに急激に増加する傾向が顕著であるが、切羽進捗が安定したときの水量（例えば、主立坑の200L/min，換気立坑の230L/min）では、比較的実測値に合致した傾向を示している。両立坑とも解析条件として、前述の深度200m以深はグラウトを考慮しているため、掘削に伴う湧水量の増加は殆ど認められない予測結果である。また、図2.1.37には両立坑の総湧水量について、実測値と計算値を比較して示している。なお、予測に使用した工事進捗は、実績値（実績掘削工程）を使用しているが、実測湧水量とSWING-SHAFT法による予測値を比べると、やや異なった挙動が認められている。SWING-SHAFT法は適用式の性格上、切羽の進行に伴い湧水量が増加する原理であり、予測結果についてもその特徴が現れているが、実測湧水量の変化は、切羽の進捗と無関係で増減している。おそらくは、水抜きボーリング等々の実施が要因と推定されるが、今後、湧水量データの吟味や確認の必要がある。

他方、平成20年度モデルでは、前述のグラウトを評価するモデルに改良するとともに、図2.1.38に示すとおり、各深度におけるシリンダーボリュームの不均質性を考慮している。同図には平成19年度モデルと対比して示している。平成20年度モデルの特長は、こうしたモデル化を行うことから、立坑湧水量（＝他切羽周辺の透水性）と各シリンダーにおける地下水位低下量（立坑～観測孔の間の透水性）を区別して評価することが可能である。また、少なくとも立坑周辺における各観測孔の水位変動量についての評価が容易になる。現時点では、各深度別シリンダーボリュームにおける地質区分の割合を基に、平均透水係数を求める手順を採用しているが、今後、個々のシリンダーボリュームにおける地質構成（水理地質分布）と観測孔の水位変動量をもとに、各種最適化手法の援用から地山の透水性区分を求めることが可能である。

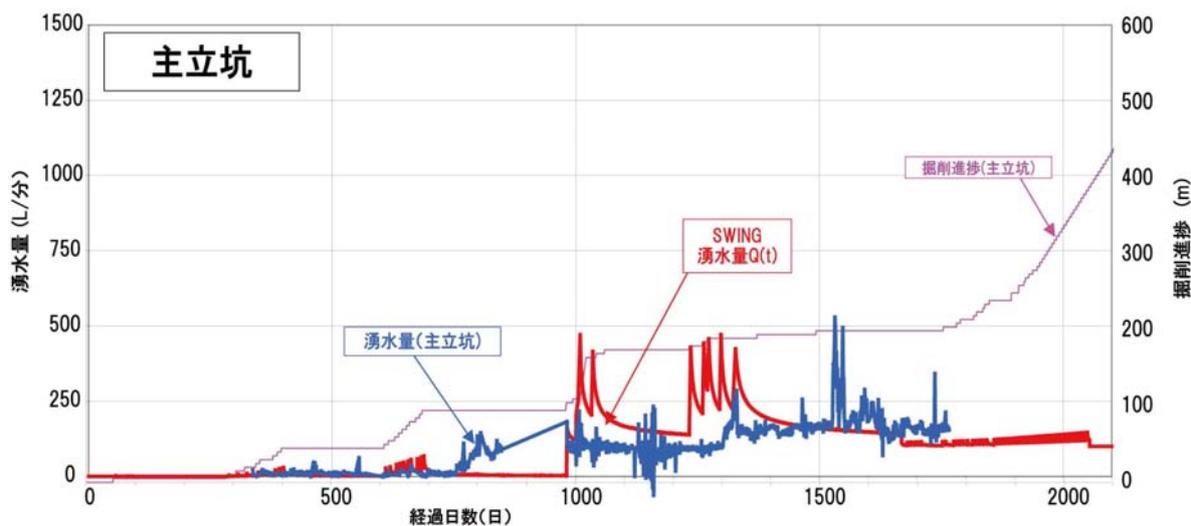


図2. 1. 35 SWING-SHAFT法による主立坑の湧水量

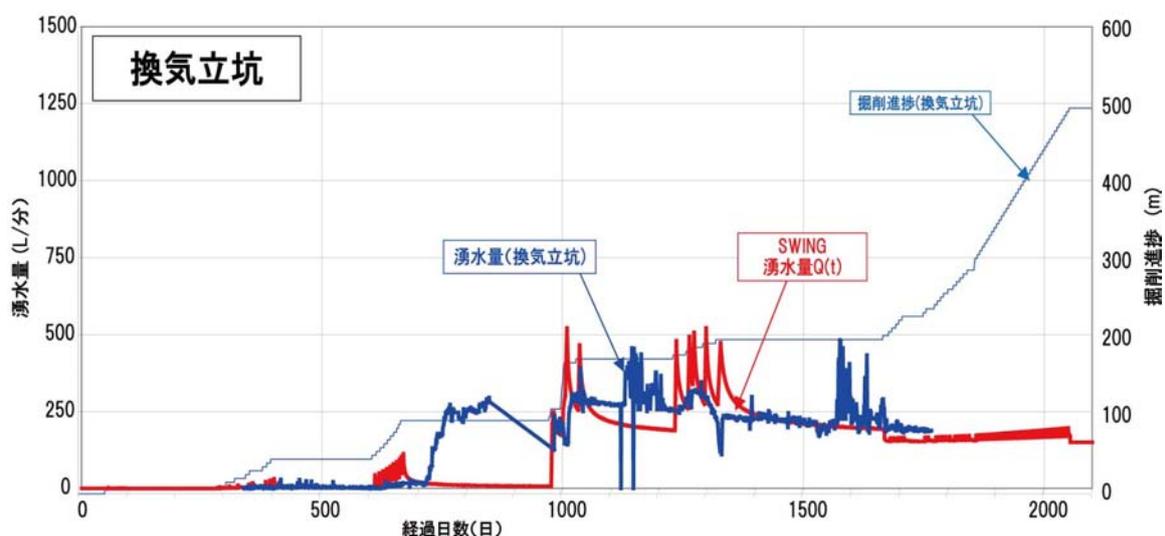


図2. 1. 36 SWING-SHAFT法による換気立坑の湧水量

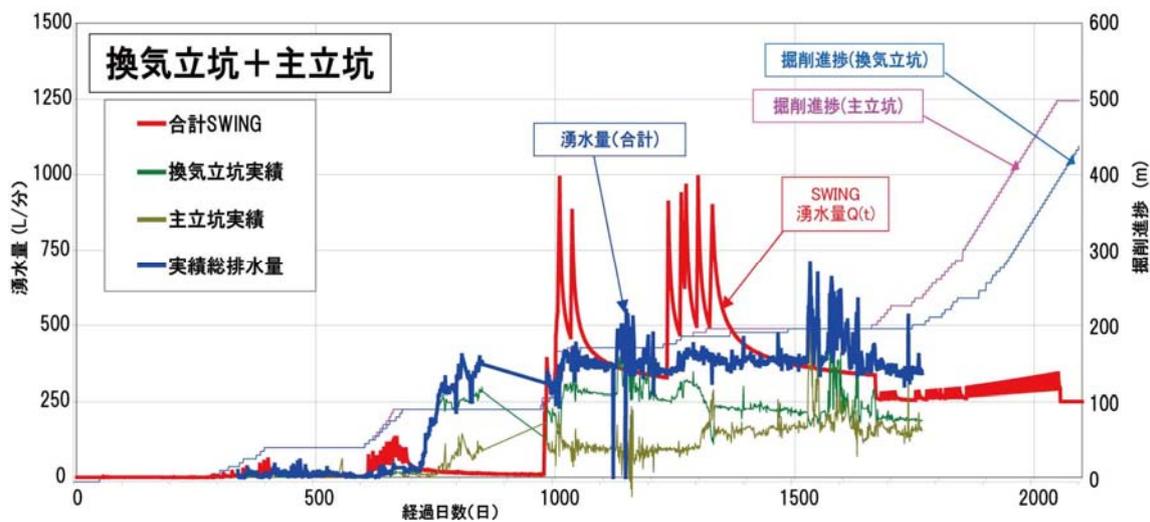


図2. 1. 37 SWING-SHAFT法による総湧水量

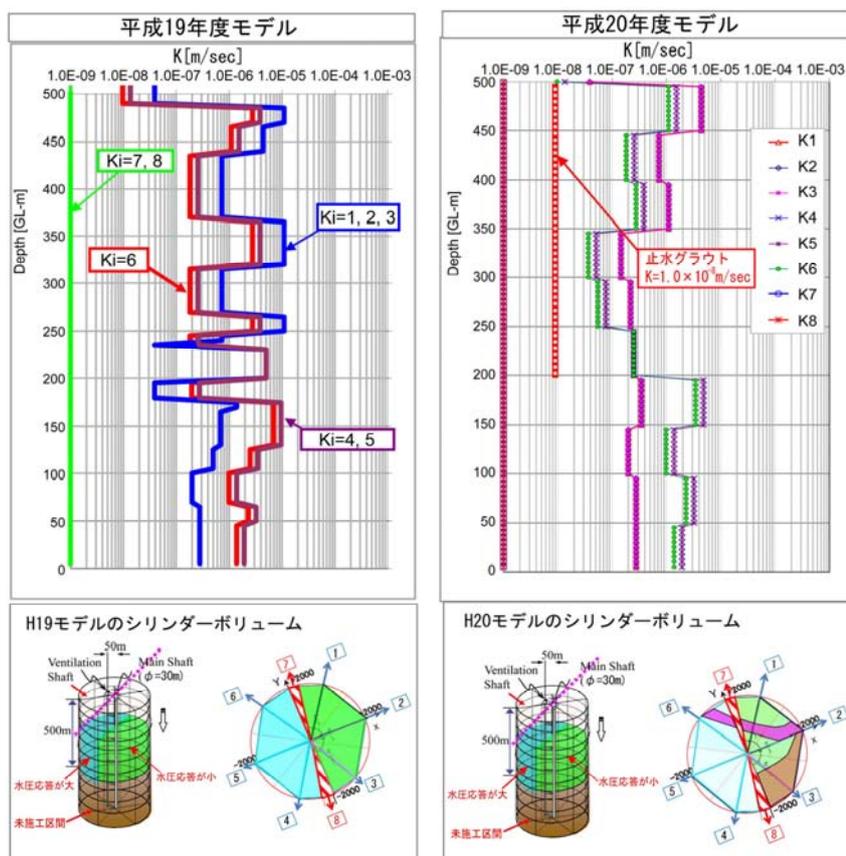


図2.1.38 平成20年度モデルのシリンダーボリュウムの透水係数分布

(3) 立坑周辺における地下水位低下

一方， SWING-SHAFT法による地下水位低下予測は図2.1.39に示した。各地点とも SWING-SHAFT法による予測値と実績値を対比して示している。

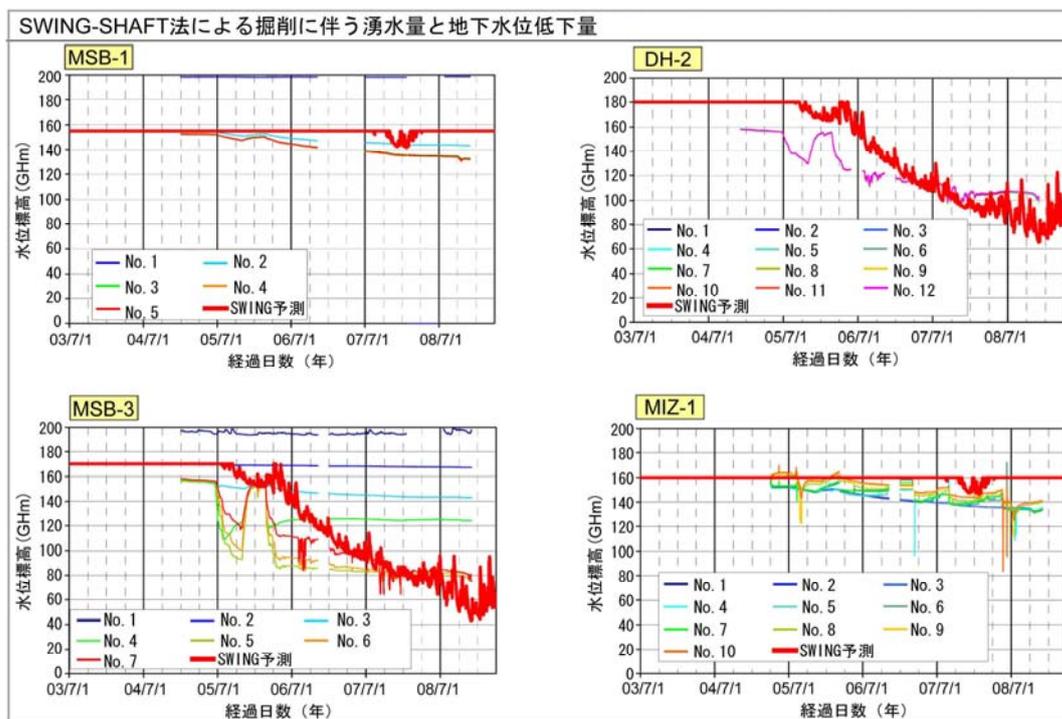


図2.1.39 各観測孔における地下水位低下

同図によれば、既施工区間における低下量は近似している。また、平成17年度の実測値において、一時地下水位の回復が認められているが、同時期の排水停止に伴う坑内の水位回復に起因した減少であり、本検討におけるSWING-SHAFT法の計算では、立坑内の復水過程を考慮していない。また、図2.1.40には、立坑周辺に発生している地下水位低下分布を示している。同図は半径2kmの円グラフの中心に両立坑が位置しているものとして、その周辺に発生している地下水位低下分布を示している。各ステップ（ $T=500$ 日等々）は湧水量変化図の期日に相当している。同図によれば、現在（ $T=1700\sim 2000$ 日付近）は、断層部のシリンダーボリューム（ $i=7, 8$ ）を挟んで、換気立坑側（ $i=4, 5, 6$ ）への低下影響が顕著であり、影響半径としては450~600mまで波及している。特に、 $T=1700$ の影響は、南側シリンダー（ $i=4, 5$ ）でみると、最大800~950m付近まで波及している。なお、 $T=2100$ 日では影響範囲がやや減少している傾向であるが、これは降雨量の多寡によるものと推定される。

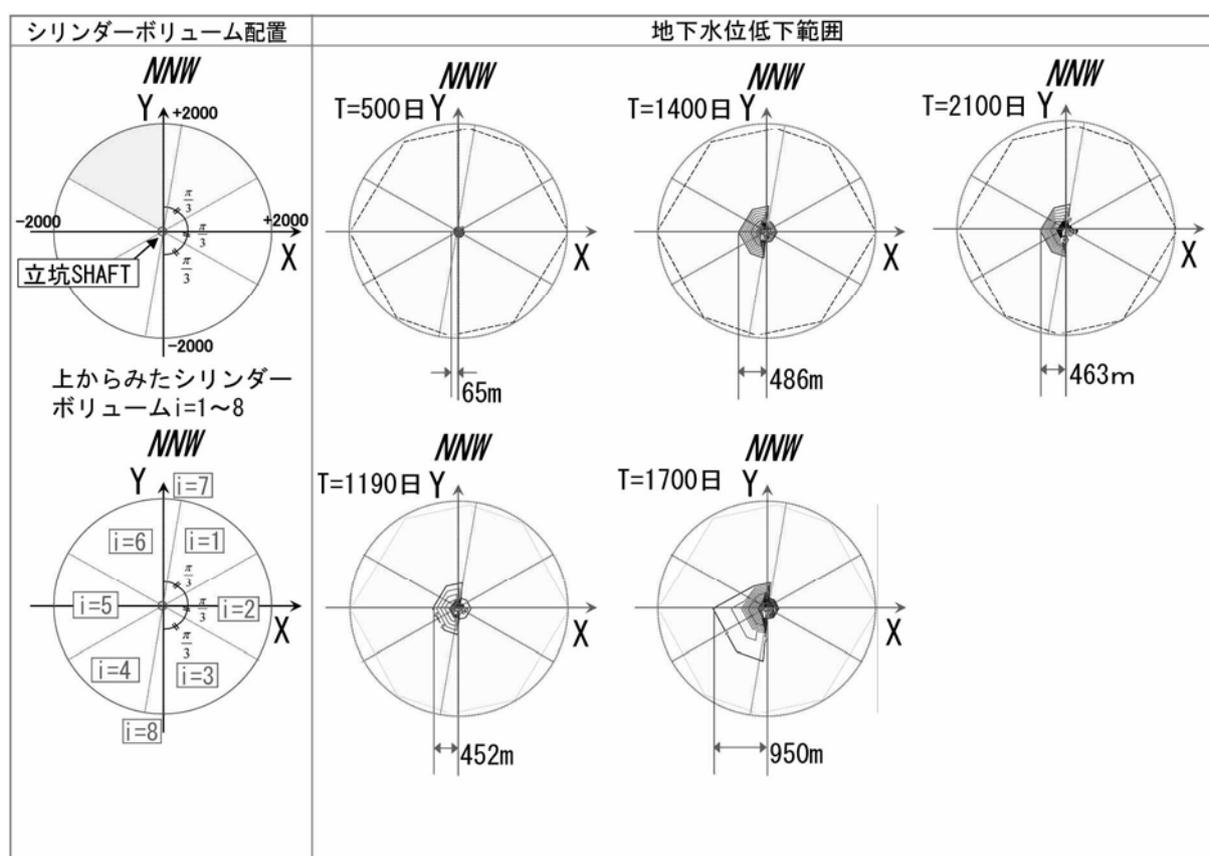


図2.1.40 立坑周辺の地下水位低下範囲

2.1.5.2 今後の運用方法（施工実績に伴う水理定数分布の簡易予測）

(1) SWING-SHAFT法の運用（利便性）

現時点におけるSWING-SHAFT法を現場のパーソナルコンピュータ（PC）を使用して援用可能とする以下の改良を加えた。改良するための留意点は、230m以深の施工では、湧水とグラウトの繰り返しのため、こうした工事状況を反映しないと使えないことから、現場で発生している水理現象の簡易判断を可能とし、迅速な水理現象の解釈のための速さおよび監視体制の構築とした。

表2.1.3 現時点におけるSWING-SHAFT法の運用課題

形式	システムの概要と援用に対する評価	稼動時間
Ver.1	2本の立坑を1本に見立てて計算する。現場状況からすると、異方性は重要な検討項目であるため、分割シリンダーが必要となり、システムの教材としての利用が考えられる。	45分
Ver.2	実際の掘削工程や異方性を有する分割シリンダーにおける実工程（換気立坑および主立坑の掘削工程）が考慮できるが、実用的にやや問題（計算が遅い）がある。そのため、現在、図化計算部分を軽量化して、計算速度を改善している（改良中）。このバージョンであれば、現場における援用（短時間評価）が可能と推定できる。	2～3時間
Ver.3	現在、完成しているシステムであるが、非常に解析時間を有し、現場でのシステム稼動にはやや無理がある。但し、現行の施工状況からみて、以下の課題が挙げられる。 <ul style="list-style-type: none"> ・湧水とグラウトの繰り返しなので（この工事状況を反映しないと使えない） ・現場で発生している水理現象の簡易判断が可能 	8時間

なお、本年度に改良を加えたシステムとしては、表2.1.3に示した3つのシステムを構築したが、実際問題としてPCの処理能力の制約が著しく、Ver.3の援用には多く課題があることが判明した。また、Ver.2についても全方位（8つのシリンダーボリューム）の計算に要する時間が2～3時間程度を要し、現時点では少なくとも、SWING-SHAFT法の優位性である迅速対応が可能なレベルまでには至っていない。したがって、今後も瑞浪超深地層研究所における運用試行を行いながら改良することが望まれる。

平成18年度以降、SWING-SHAFT法に関する検討では、特に、施工現場における迅速な水理状況の判断および評価の援用ツールとして役立つシステムの構築を目的として、改良を重ねている。基本的な援用手順としては、図2.1.41に示すとおり、工事実績に伴う両立坑の湧水量や各観測孔の水位低下データを基に、既施工区間における水理定数（透水係数、有効間隙率）を算定し、未施工区間への予測評価を施工進捗に準じて、繰り返し算定評価を行う手順である。また、計算のモデルについても図2.1.42に示すとおり、当初の均質モデルから現場状況に即した評価が可能なように、異方性シリンダーボリュームの導入（図2.1.43参照）とともに、現時点では主立坑と換気立坑、パイロットボーリングの実施および今後の掘削で頻繁に実施されると考えられるグラウトや地山改良等々の掘削工程も考慮できる計算モデルに至っている。反面、多数の機能を導入したことで、本来の目的である迅速な予測評価については、解析時間に関する不合理も認められている。この様な検討経緯を鑑み、今後の運用方法を考察して以下にとりまとめた（図2.1.44参照）。現時点では、現地援用システムとしては、表2.1.4に示すVer.2の試行を優先し、Ver.3では現地での迅速評価を目的とした運用よりも、湧水量や地下水位変動データを基に、最適化評価を導入することで、既施工区間および未施工区間における3次元水理定数分布の早期評価を優先させることを検討していく必要がある。

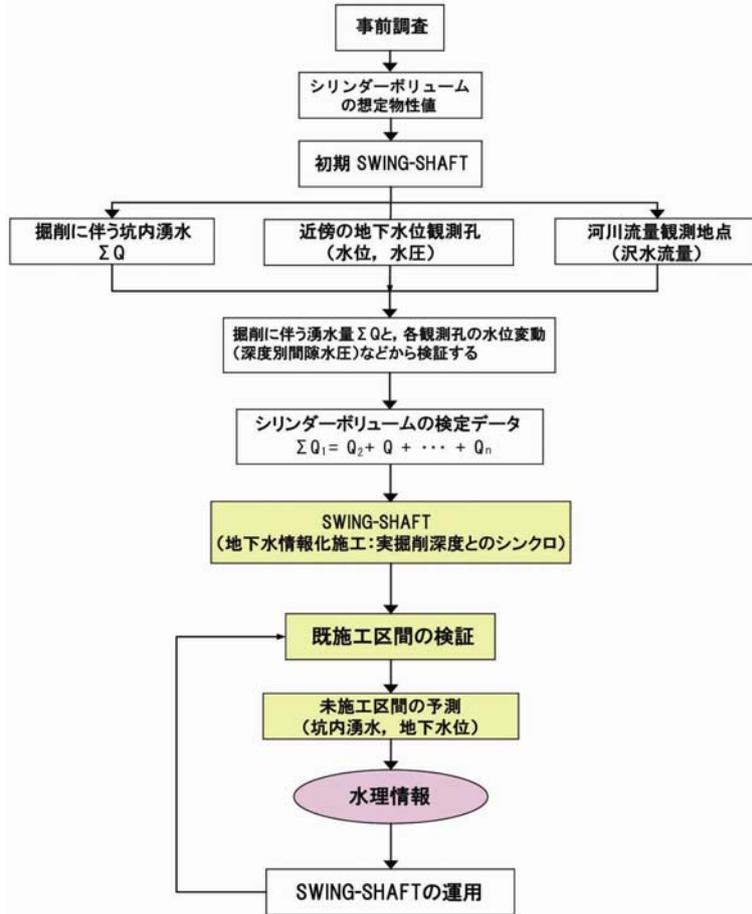


図2. 1. 41 SWING-SHAFT法の運用手順

	H16-H17 モデル	H18-H19 モデル	H20 モデル
目的	立坑掘削に伴うトンネル湧水量、地下水位低下を簡易的に予測する方法を助業する。水平トンネルの実績があるSWING法を援用して、立坑用のSWING-SHAFTを構築する。	施工実績からSWING-SHAFTのシリンダーボリュームの異方性をさらに細分割を行い、湧水量、地下水位の低下実績との整合性を検討した。さらに、3次元地盤モデルを考慮可能とするシステムの構築を図る。	現地における利便性のある使用マニュアルの簡略化を図る。さらに、施工実績から地盤改良を考慮可能とする改良および単一シリンダーボリュームにおける透水性の不均質性を考慮可能とするシステムおよびモデルの最適化 (Simplex法など) を適用可能とするSWING-SHAFTの構築を図る。
概要	<p>SWING-SHAFTの初期モデル (立坑1本)</p> <p>立坑1本の簡易モデルを構築し、さらに、主立坑と換気立坑の実績をも考慮したSWING-SHAFTシステムを構築した。また、実用化を図るためマニュアル等の整備を開始した。</p> <p>H17~H18年度モデル</p> <p>主立坑と換気立坑を考慮したSWING-SHAFT</p>	<p>H19のシリンダーモデル CASE-4-1 → 異方性シリンダーモデルの変更 CASE-4-2</p> <p>シリンダーボリュームの細分割 (断層を考慮する)</p> <p>立坑3次元地質モデルの取り込み</p> <p>断層を境にして、大きく2分割の異方性を考慮したモデルを構築し、整合性の確認、検証を実施した。</p>	<p>シリンダーボリュームの細分割 (断層を考慮する)</p> <p>立坑</p> <p>シリンダーボリュームの不均質モデル</p>

図2. 1. 42 SWING-SHAFT法の計算モデルの推移

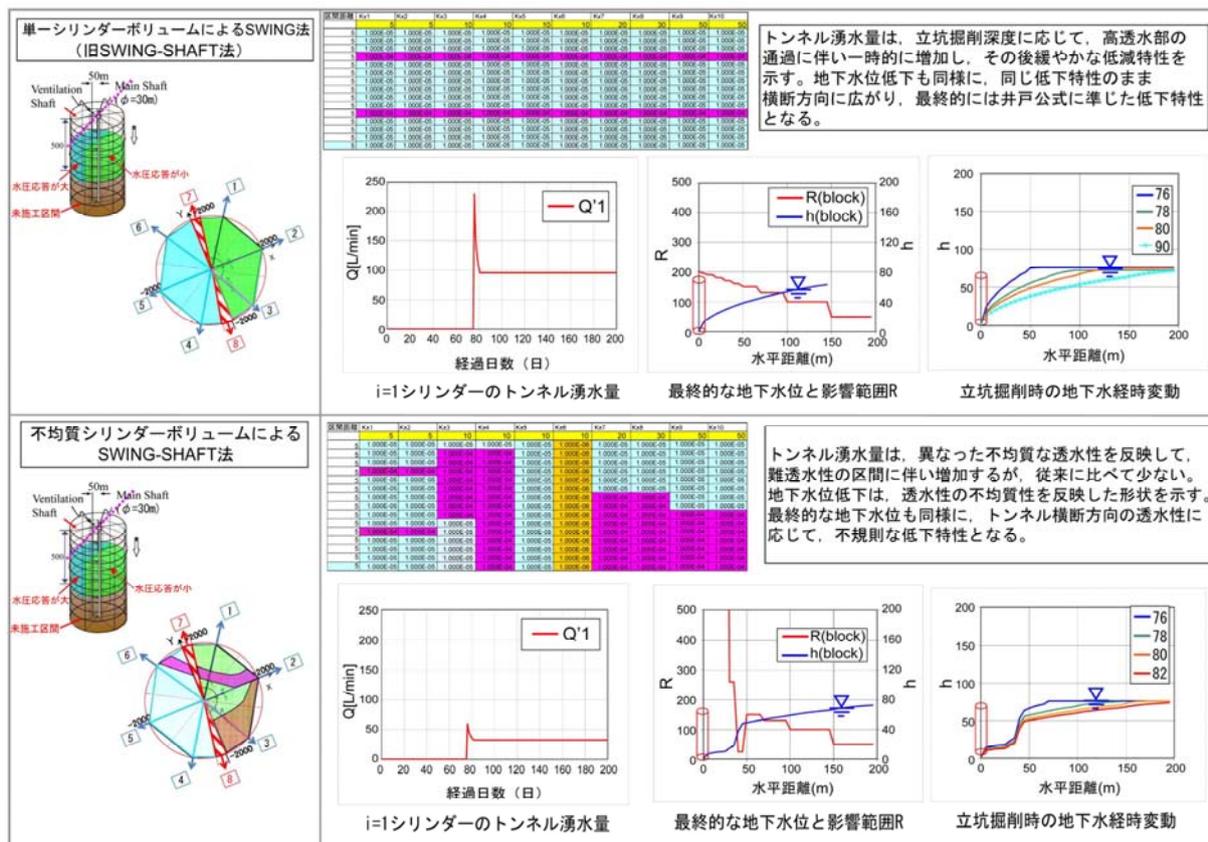


図2.1.43 SWING-SHAFT法の改良 (不均質シリンダーボリュームの導入方法)

表2.1.4 今後のSWING-SHAFT法の運用方法

形式	システムの概要と採用方法	出力関係	稼働時間
Ver. 1	<ul style="list-style-type: none"> 2本の立坑を1本に見立てて計算する。 システムの教材としての利用 	<ul style="list-style-type: none"> 総湧水量 周辺地下水位低下 (異方性なし) 	45分
Ver. 2	<ul style="list-style-type: none"> 掘削工程や異方性評価が可能である。 現場における援用の推奨 (短時間評価) パイロットボーリング, グラウトを評価すると演算時間が長くなる。 	<ul style="list-style-type: none"> 総湧水量 換気立坑の湧水量 主立坑の湧水量 各観測孔の水位低下量 (異方性を考慮) 地下水位低下量分布 	2～3時間
Ver. 3	<ul style="list-style-type: none"> 掘削工程や異方性評価が可能である。 非常に解析時間を必要とし、現場でのシステム稼働にはやや無理がある。 最適化手法との統合により、水理定数の3次元空間分布の評価が可能 (図2.1.18に示す不均質シリンダーボリュームの導入) 	<ul style="list-style-type: none"> 総湧水量 換気立坑の湧水量 主立坑の湧水量 各観測孔の水位低下量 (異方性を考慮) 地下水位低下量分布 パイロットボーリングを考慮可能 グラウトを考慮可能 	8時間

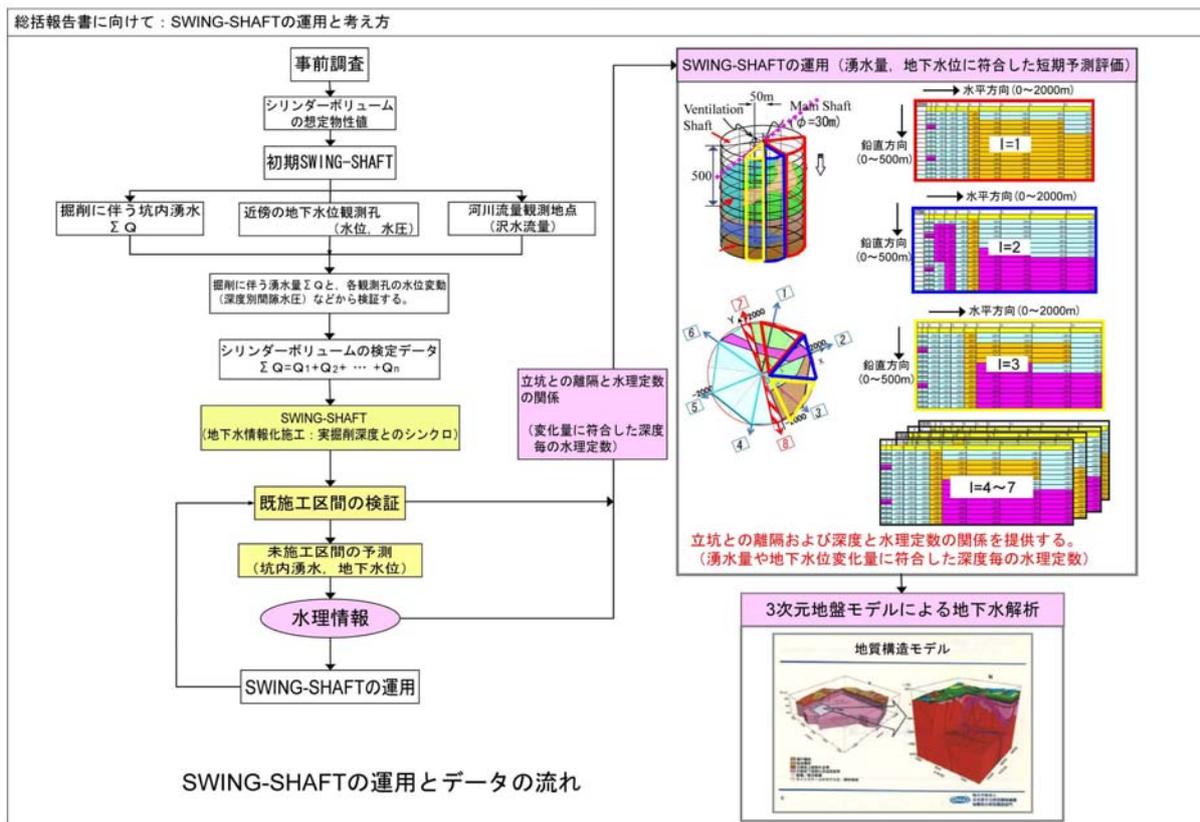


図 2.1.44 SWING-SHAFT 法の運用 (Ver. 3 システム)

(2) EnKFのSWING-SHAFT法への導入

2.1.4節で述べたように、平成21年度の検討課題として、SWING法にデータ同化手法の1つであるEnKFの導入を行うことで、水理地質モデルの修正、パラメータ最適化を自動的に行うことが可能となった。また、湧水予測の精度に影響を与える要因（すなわち、湧水量の観測頻度、EnKFで用いる透水係数の分散、事前の地質情報）について検討を行った。検討の結果を踏まえ、EnKFをSWING-SHAFT法に導入し、同様の検討を行う必要がある。

(3) SWING法とSWING-SHAFT法の統合

これまでの検討の結果、複数の横坑群（SWING法）や立坑群（SWING-SHAFT法）への適用は可能であることが判明した。次のステップとして、立坑群～横坑群への連続掘削などの複雑な施工条件への展開が予想される。そうした場合、立坑計算および横坑計算における境界条件（水理式の計算条件）の連成が必要となるが、掘削時間ステップに対応した境界条件を適用することで充分可能と推察される。但し、現行の計算ファイルシステム（主としてEXCELファイル）を用いる場合、相当複雑なファイル操作が必要となるため、現場仕様としては不向きと考えられるため、改良が必要と考えられる。

2.1.6 参考文献

- 1) 資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構 (2006) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画
- 2) 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次取りまとめ—」, 総論レポート, JNC TN1400 99-020.
 - ・分冊1 わが国の地質環境, JNC TN1400 99-021
 - ・分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022
 - ・分冊3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023
- 3) 樗木 武(1979) : トンネル湧水に関する基礎研究, 九州大学工学部, 一般研究255191, p.171.
- 4) 石井政次・大島洋志・永橋健三(1967) : Geology and Hydrology of Rokko Tunnel in New Sanyo Trunk Line, Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, Vol.8 No.4, pp.188-194.
- 5) 大西有三・大津宏康・高橋健二・安田 亨(2004) : 山岳トンネルにおける地下水情報化施工の提案, 土木学会第59回年次学術講演会講演集, pp.785-786.
- 6) 松井 保・磯崎弘治・早坂 毅・安田 亨(2003) : 箕面トンネルにおける地下水情報化施工 (SWING法) の開発, 土木学会第58回年次学術講演会講演集, pp.31-32.
- 7) 大西有三・大津宏康・高橋健二・安田 亨(2006) : Observational Method for Tunnel Construction Considering Environmental Impact to Groundwater Using The SWING Method, ISRM International Symposium 2006, pp.121.
- 8) 大西有三・大津宏康・高橋健二・安田 亨(2004) : 山岳トンネルにおける地下水情報化施工の実例, 土木学会土木建設技術シンポジウム2004論文集, pp93-100.
- 9) 福島啓一(1993) : わかりやすいトンネルの力学, トンネルと地下, 第24巻No.3, pp.65-79.

(京都大学 大西有三)

2.2 地下水流動の高精度解析と予測法の開発研究

2.2.1 研究概要

深部地質環境の調査・解析技術の体系化を目的として、地下水流動の高精度解析と予測法について研究を行ってきた。研究の体系を概略的に纏めたものが図2.2.1である。研究は、主に下記の4項目よりなる。

- ① ANN (Artificial Neural Network), GA (Genetic Algorithm), FuzzyなどのSoft Computing手法を用いた地下水, 山地流出解析手法の開発に関する研究
- ② 水質と水理解析の総合化に関する研究
- ③ 割れ目岩盤内の浸透流評価研究
- ④ 蒸発計測装置の開発と軟岩の不飽和特性評価の研究

である。勿論、これらは独立した研究項目ではなく、相互に関連しているし、高レベル放射性廃棄物の地層処分の技術を確立する上で不可欠である。これらのうち、特に力を入れたのが①の項目である。この研究により、地下水圧変動解析ソフトTDAN (Total Data Analyzing System) が開発でき、同時に地下工事に伴う地下水環境管理システム開発の展望が示された。また、②の研究によって、地下水質を考慮して解析を行う総合化の必要性が明らかとなった。③、④は、以前の研究の高度化である。

以下、各研究項目の成果概要について述べる。

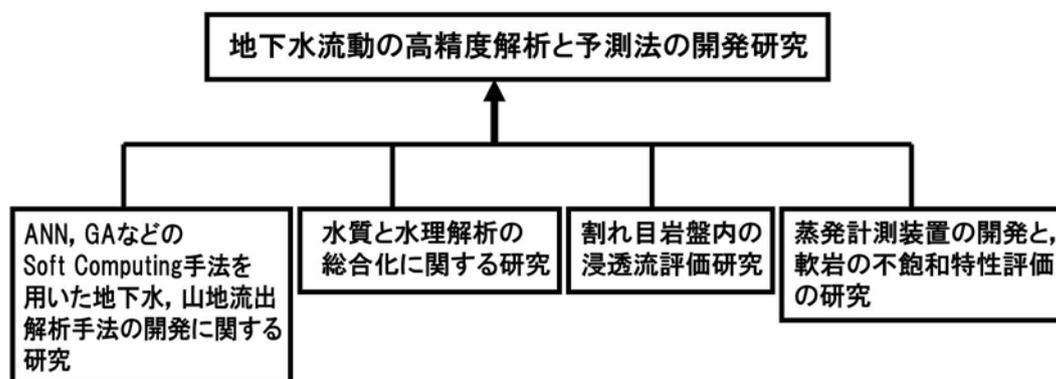


図2.2.1 過去10年間の研究概要

2.2.2 ANN, GA, FuzzyなどのSoft Computing手法を用いた地下水, 山地流出解析手法の開発に関する研究

2.2.2.1 目的と考え方

地下のトンネルや立坑掘削においては、それら工事の地下水環境に与える影響を監視するために工事現場周辺で間隙水圧変化が測定される。問題は、間隙水圧変動に何らかの異常が生じた場合である。この問題では、

- ① 異常が何時から生じたのか
- ② 異常の大きさはどの程度か

を的確に把握することが必要である。しかしこれらの把握は困難である。唯一、実用的な方法としては、図2.2.2に模式的に示すように、予測データと比較しながら監視することである。比較を

することによって、例え変動が小さくともこれらの異常を検知できる。この場合に問題となるのは、予測を精度良く行うことである。これには2つの方法がある。

- ① 他地点の間隙水圧変動や降雨などから、大まかに変動を予測する
- ② 有限要素法や割れ目モデルなどを用いて、間隙水圧変動を予測する

事である。しかし、図2.2.3(a), (b)に模式的に示すように、実際には実測変動を予測することは難しい。②の解析の問題点は、透水係数分布などの対象岩盤の水理地質構造に不確実性が大きいことである。このため、予測値の精度が高くなく、監視目的には使い難い。

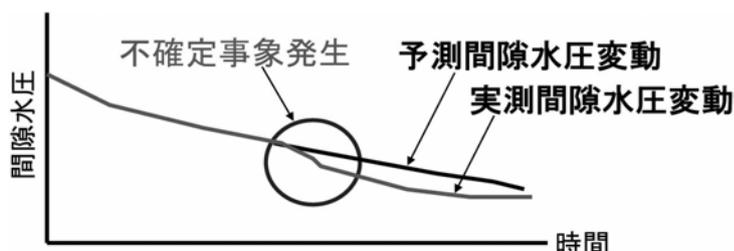
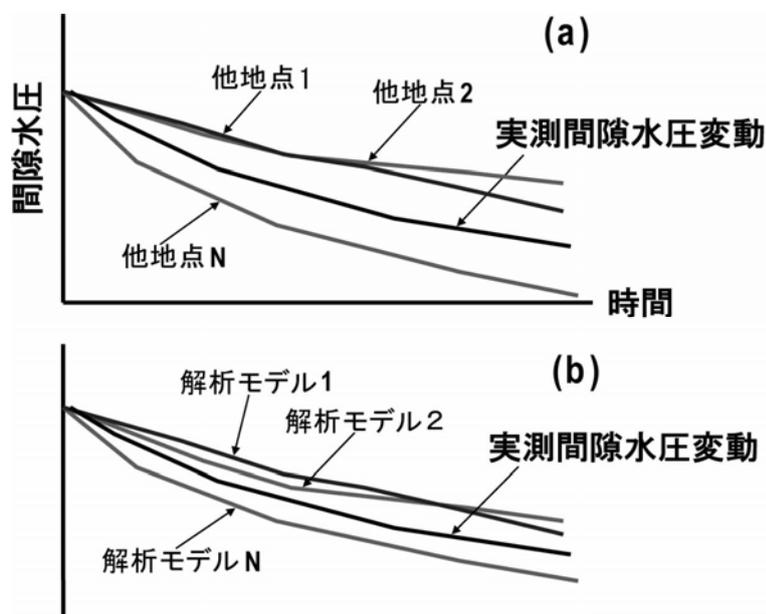


図2. 2. 2 間隙水圧変動異常の検知法模式図



(a) 他地点の間隙水圧で予測, (b) 解析値で予測

図2. 2. 3 予測の困難さ模式図

高精度で予測を行うため、図2.2.4に示すように、Soft Computing手法を取り入れた。この考えは、他地点データ、降水量、種々の水理地質構造モデルや解析法による結果などを重合して、実測値に極めて近い予測を行うものである。Soft Computingの手法として、ANN、GAおよびFuzzy理論を用いた。このうち、ANNとGAによる解析を実用的なソフトとしたものが、TDANである。具体的な予測方法を図2.2.5に示す。この方法では、まず学習（Training）期間を設定する。その期間の実測変動を他のデータや解析値を重合して再現する。良く再現できるモデル（用いるANNやGAに内在されるパラメータにより構成される）を用いて、他の期間で予測（Test）の精度を確認し、予測に用いる。なお、FEMなどによる解析モデルとSoft Computing手法を併せた方法をGrey Modelと名づけている¹⁾。Grey Modelと言う名は、国際学術誌でも認知された。

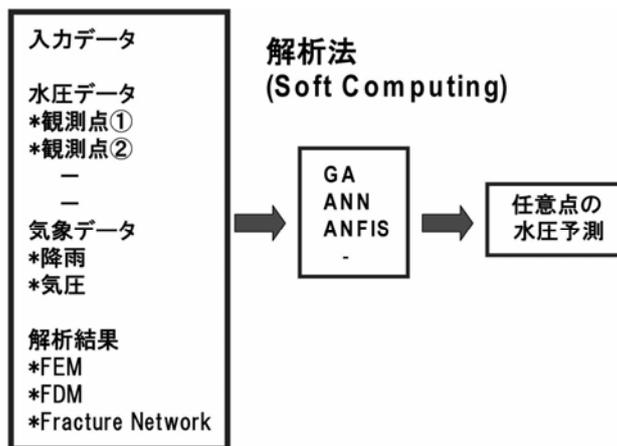


図2.2.4 解析法模式図

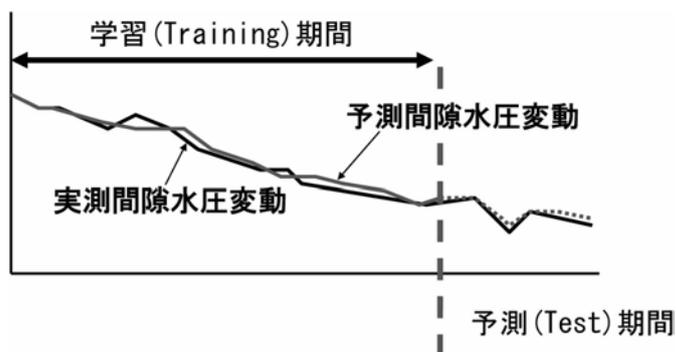


図2.2.5 解析プロセス模式図

2.2.2.2 解析した問題と論文発表

「ANN, GA, FuzzyなどのSoft Computing手法を用いた地下水, 山地流出解析手法の開発に関する研究」に関して, 2000年以降に発表した査読付論文を2.2.7.1の参考文献に示す。研究で取り扱った問題を図2.2.6にまとめて示す。図中, 併せて, 該当問題の論文番号を示している。



図2.2.6 解析した問題と発表論文

取り扱った問題は,

- ・ 正馬様地域の降雨流出解析^{2), 10), 14)}
- ・ 多摩川の橋梁建設に伴う地下水変動評価^{4), 7)}
- ・ フィルダム建設時の間隙水圧予測^{8), 9), 11)}
- ・ 平野部地下水位変動解析^{12), 13), 15), 16), 18)}
- ・ 湧水およびボーリング地質状況予測^{3), 5)}
- ・ 瑞浪超深地層研究所 (MIU) の立坑掘削に伴う間隙水圧解析^{6), 17), 18), 19), 20)}

これら多様な問題を解析することによって、広域から局所的問題に至るまで、Soft Computingの手法の地下水問題への適用性を明らかにすることができた。

2.2.2.3 モデル構造

用いたモデルは、大きく、線形モデルと非線形モデルの2つに大別できる。図2.2.7に、まず線形モデルの構造を示す。線形モデルでは、各入力値（他地点での観測値、解析値など）に重み W_i を乗じ、それらを足し合わせて出力値とする。問題は、出力である、目的とする観測地に良く合うような重み W_i （最適組み合わせ）を求めることである。最適な重みの組み合わせをGAで求める。

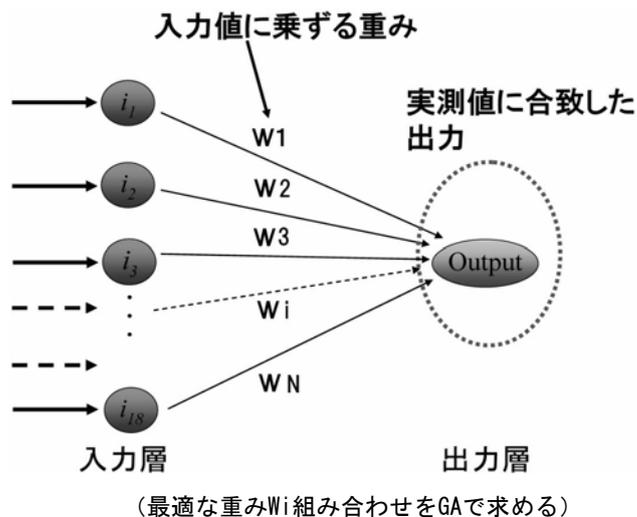


図2.2.7 線形モデル構造

一方、非線形モデルとして、ANNおよびANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System) を用いた。それらの構造を図2.2.8, 図2.2.9に示す。ここでは説明は引用文献¹⁹⁾に譲り、詳しく説明しないが、出力の推定が複雑になっていることがわかる。一般に言って、システムが複雑なほど推定すべきパラメータが多くなり、精度が向上する。

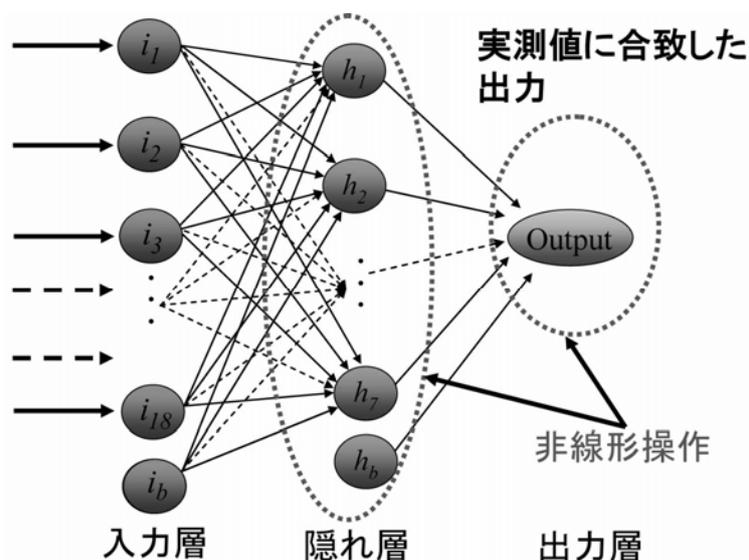
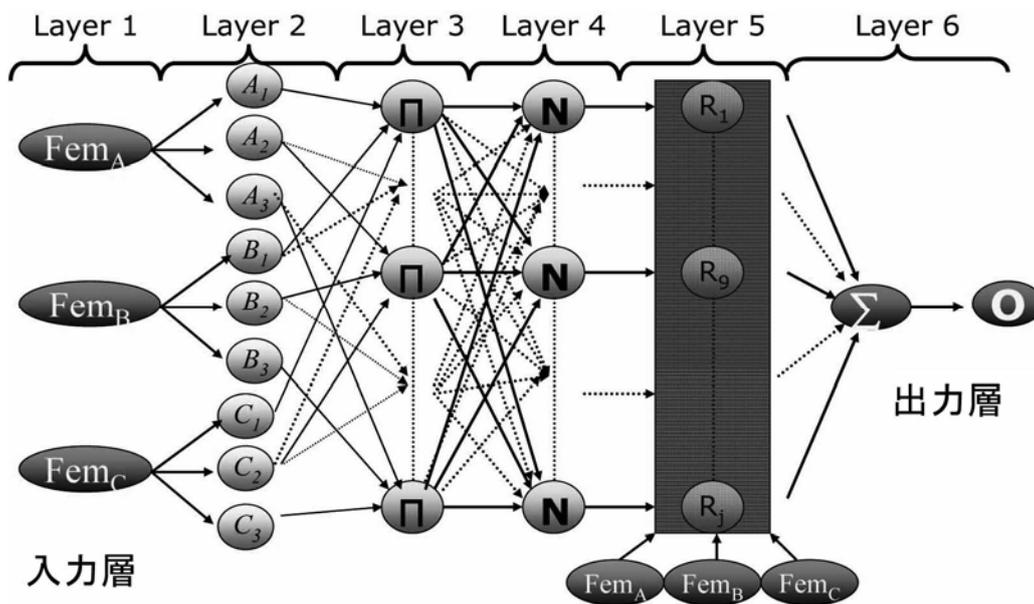


図2.2.8 3層モデルを用いたANNモデル



(ANNとFuzzy理論を組み合わせている)

図2.2.9 ANFISモデル

2.2.2.4 解析した間隙水圧変動の特徴

解析例として、とくに最近研究を行っている、MIUでの立坑掘削に伴う間隙水圧変化について示す。図2.2.10に立坑および周辺の間隙水圧測定が行われているボーリング孔の位置図を示す。MIZ-1号孔、MSB-3号孔は斜めボーリングである。

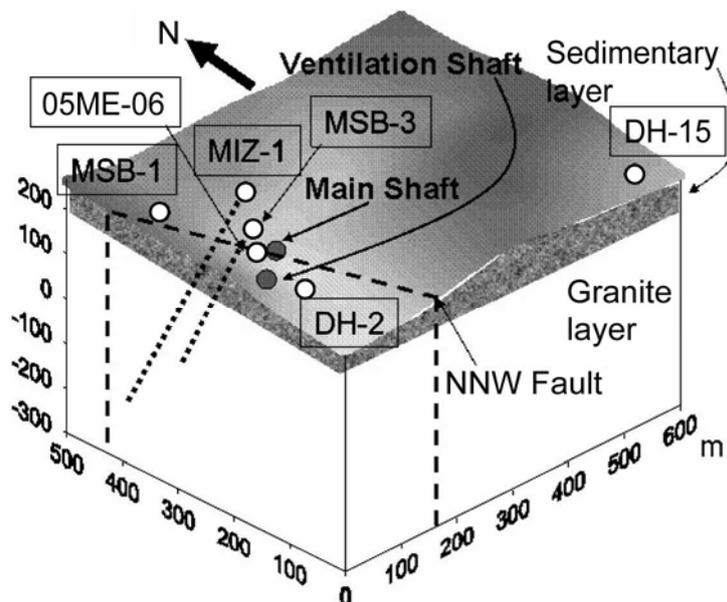
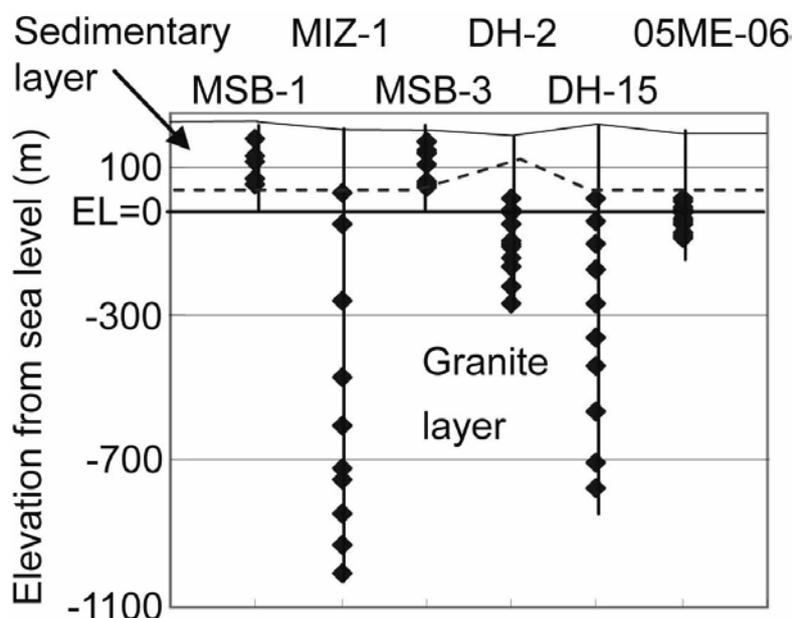


図2.2.10 MIUサイト概略図

図2.2.11に、各ボーリング孔内の間隙水圧計のセンサー位置を示す。MIUサイトは上位の堆積岩と下位の花崗岩よりなる。なお、斜めボーリングのMSB-3号孔については、No.1~No.4までを示

している。No.5～No.7は下位の花崗岩内に設置されている。MSB-3号孔内で2007年9月から12月までの観測間隙水圧変動を図2.2.12に示す。この図から、この孔内で観測された間隙水圧変動が3つのパターンに分けられることがわかる。Pattern-1は、地表に近い位置での変動であり、降雨応答が見られる。Pattern-2は透水性の小さい堆積岩中の変動であり、立坑掘削に伴って、ゆっくりと低下している。降雨に対応した変動は見られない。一方、Pattern-3は透水性の大きい花崗岩中の変動であり、大きな変動が見られる。この変動は立坑内の揚水やボーリング掘削などに対応している。立坑および調査ボーリング孔の影響が急速に伝播したものと考えられる。

なお、このような間隙水圧変動パターンは、図2.2.13に見られるように、他のボーリング孔でも共通して認められる。なお、MIZ-1号孔だけに見られるPattern-4は、途中で水圧上昇するなどの説明のできない変動が認められ、これは、間隙水圧測定センサーのエラーと考えられる。



(MSB-3号孔については、花崗岩中に3本の間隙水圧計がある)

図2.2.11 各ボーリング孔の間隙水圧計配置図

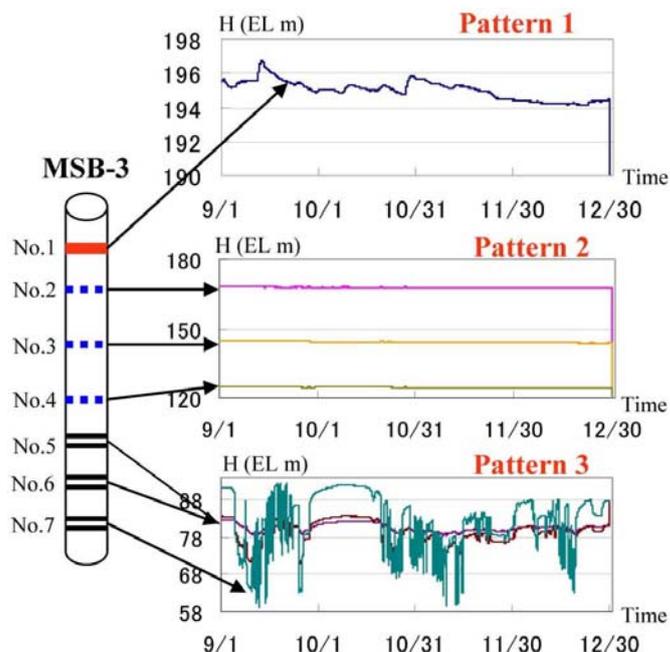


図2. 2. 12 MSB-3号孔に見られる間隙水圧変動 (2007年9月~12月)

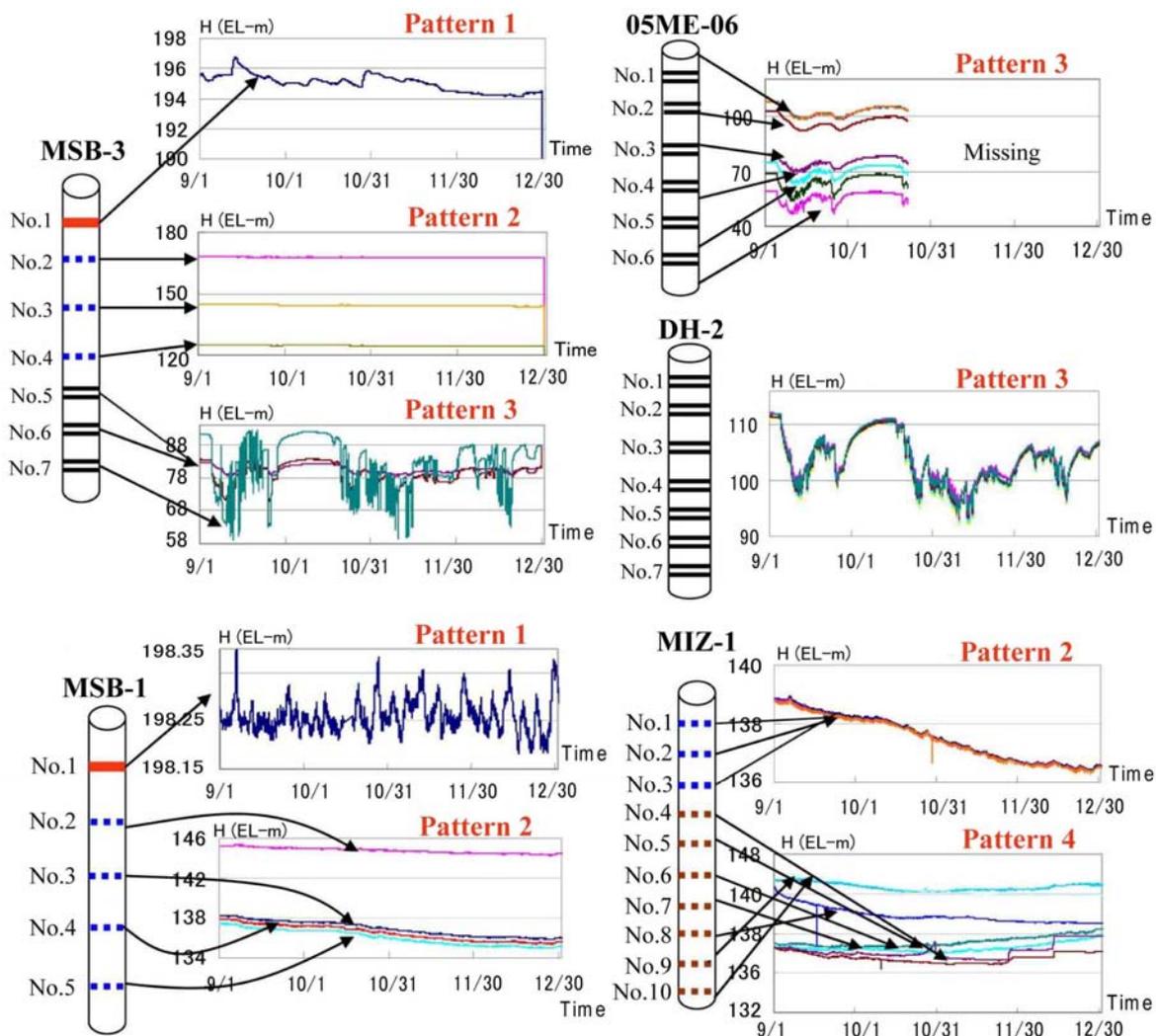


図 2. 2. 13 観測された間隙水圧分布 (2007年9月~12月)

2.2.2.5 他地点の変動を入力した場合の解析

ここで、他地点の変動を入力とした場合の解析を、ANNとGAを用いて行った結果を示す。解析は下記の2つの方法で行った。

- ・ 同一ボーリングの他地点データを用いる場合
- ・ 他のボーリング孔で得られたデータを用いる場合

表2.2.1に、同一ボーリングを用いた場合の、入力、出力（Target）の関係を示す。また、それぞれの変動パターンを示す。表2.2.2は、他のボーリング孔で得られた実測値を入力とした場合を示す。表2.2.1と同様、入力、出力関係を示している。

表2.2.1 同一ボーリング孔のデータを用いた解析ケース

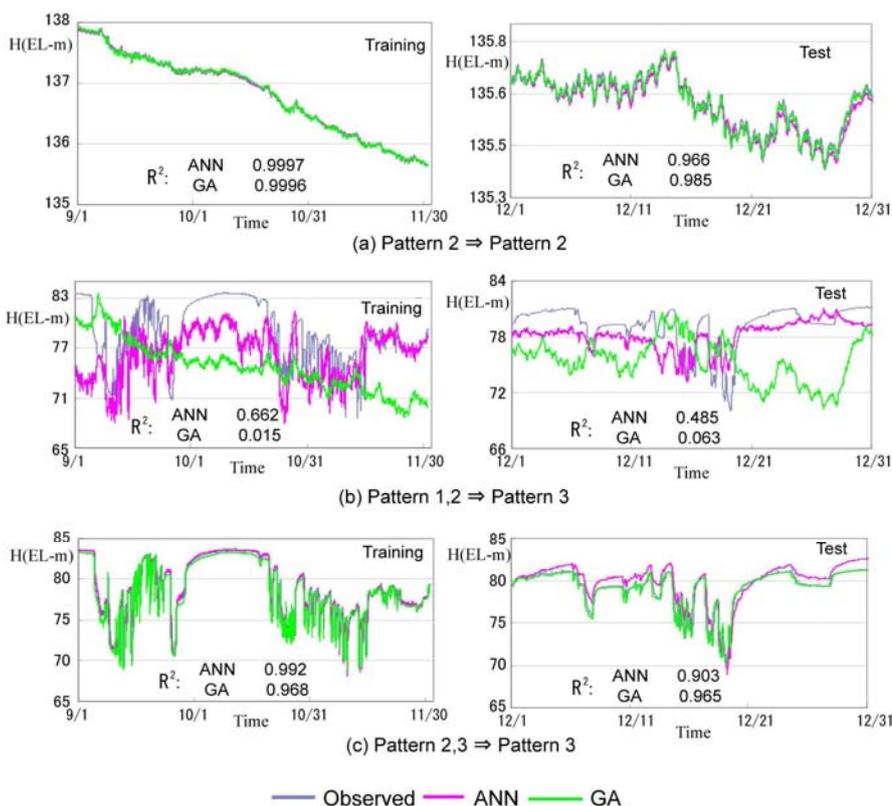
	Input pattern	Target pattern	Target	Inputs
(a)	2	2	No.5 (MSB-1)	No.1 - 4 (MSB-1)
(b)	1, 2	3	No.6 (MSB-3)	No.1 - 4 (MSB-3)
(c)	2, 3	3	No.6 (MSB-3)	No.4, 5, 7 (MSB-3)

表2.2.2 異なったボーリング孔のデータを用いた解析ケース

	Input pattern	Target pattern	Target	Inputs
(a)	3	2	No.5 (MSB-1)	No.1 - 7 (DH-2)
(b)	2, 3	2	No.5 (MSB-1)	No.1 - 7 (DH-2), No.1 - 3 (MIZ-1)
(c)	3	3	No.4 (DH-2)	No.1 - 6 (05ME-06)

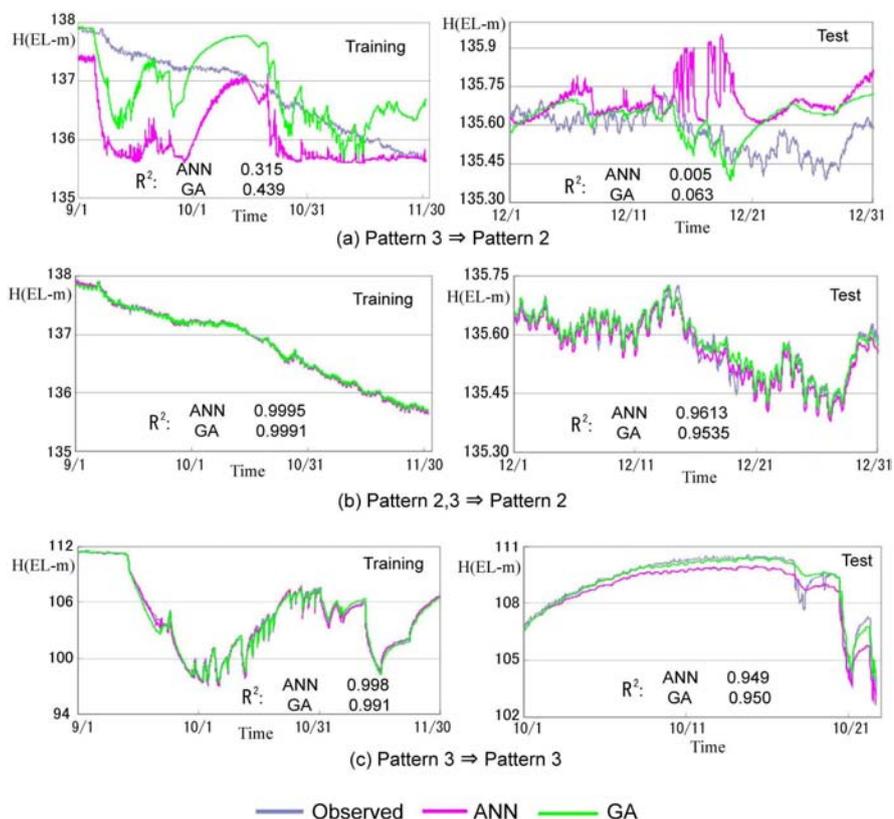
表2.2.1の入力と出力の結果（学習期間の再現）と予測結果を図2.2.14に示す。解析は2007年9月から11月を学習（Training）期間とし、12月を予測（Test）期間とした。図中、入力と出力のパターンおよび実測値と再現・予測値とのR²値を示している。図2.2.15は、異なったボーリングのデータを入力とした場合の解析結果であり、表2.2.2に対応している。

2つの図から、入力の中に、出力と同じパターンがあった場合、極めて高い精度で再現・予測ができていることを示している。一方、入力と出力が異なる場合、あまり良い再現・予測とはなっていない。このことから、Soft Computing手法を用いて同じパターンの入力値から予測した値と実測値とを比較して、間隙水圧変動の異常を検知しうる可能性が示唆されたと考える。



(入力に出力と同じパターンが含まれていると再現・予測精度が高い)

図2.2.14 同一ボーリング孔の観測データを用いた場合の解析結果



(入力に出力と同じパターンが含まれていると再現・予測精度が高い)

図2.2.15 異なったボーリング孔の観測データを用いた場合の解析結果

2.2.2.6 Grey Modelによる解析

Grey Modelでは、まず、いくつかの水理地質構造を仮定して、実際の立坑掘削に併せた解析値を求めることが必要である。今回、解析を有限要素法で行った。また、解析対象として、MSB-1号孔とした。図2.2.16に解析領域と大まかな地質モデルを示す。解析は、日吉川、土岐川および尾根線に囲まれた領域とした。地質は、解析を簡単にするため、堆積岩と花崗岩よりなる2層モデルとした。地質モデルとしては極めて簡略なものである。そのため、MSB-1号孔における実測値には必ずしも合致しない。しかし、提案しているGrey Modelでは最終的なフィッティングは、Soft Computingの手法で行われるため、解析結果が多少実測値から外れても良い。研究の目的は、地質モデルが極めて簡単であっても、実測値に合わせる事が可能かを調べるものである。もし、高い精度で実測値に合わせる事ができれば、解析のための調査を少なくすることも可能となる。一般に割れ目系岩盤は極めて複雑であり、精緻なモデルを構築するためには、極めて多くの調査が必要となる。しかし、実際には予算等の制約から、このような調査は不可能であることが多い。このような問題に対して、ある程度ラフなモデルでも、高い精度で間隙水圧変動の予測ができることがGrey Modelの利点である。

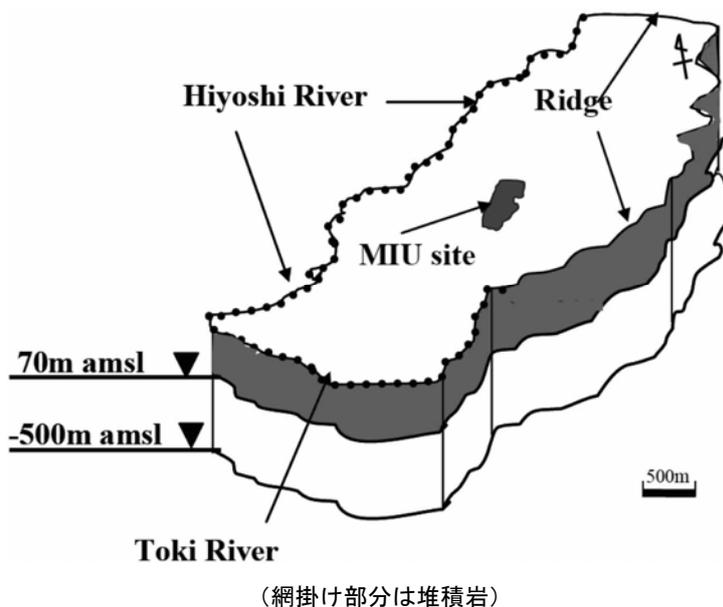
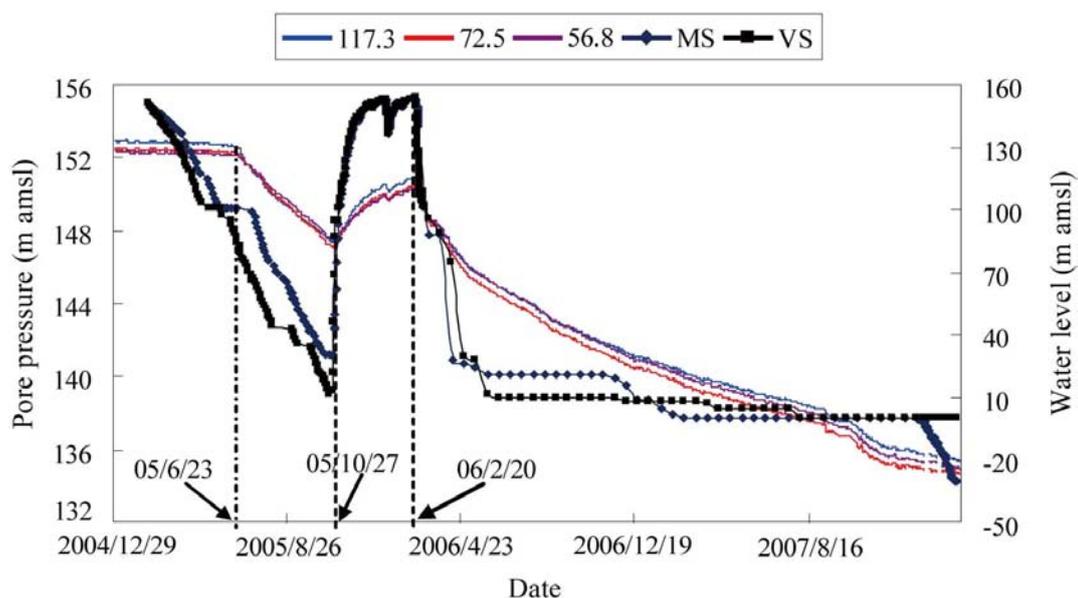


図2.2.16 解析領域と地質モデル

次に、解析にあたっては堆積岩、花崗岩に透水係数を与える必要がある。今回の解析では、堆積岩、花崗岩とも、鉛直 (KV)、水平方向 (KH) で透水異方性を持ちながらも、一様な分布とした。つまり、水理地質モデルとしては極めて簡単なものと言える。表2.2.3に、与えた3種類の水理定数の組み合わせを示す。表中、Topとは堆積岩を表し、Botは花崗岩である。図2.2.17は、立坑掘削の進行と、それに伴うMSB-1号孔内3地点（海拔標高）の間隙水圧データである。解析では、56.8mでの観測値を出力 (Target) と考えた。なお、解析では、2つの立坑、主立坑と換気立坑内の水位を変化させて、MSB-1号孔内各点の間隙水圧を計算した。用いた水理定数の組み合わせは表2.2.1に示すように3種類考え、それぞれについて有限要素法解析を行った。計算された間隙水圧変動をそれぞれ、FEMA, FEMB, FEMCとする。解析は、2004年12月から、2008年10月まで行った。

表2.2.3 解析した3つのモデル (FEMA, FEMB, FEMC) の水理定数組合せ

Model	Layer	KH ($\times 10^{-7}$)	KV ($\times 10^{-7}$)	SS ($\times 10^{-5}$)
FEMA	Top	3.65	0.001	30
	Bot	1.0	50	0.6
FEMB	Top	3.65	0.001	50
	Bot	1.0	50	0.6
FEMC	Top	3.65	0.001	105
	Bot	1.0	50	0.03



(立坑内の水位を境界条件として与えて非定常計算を行った)

図2.2.17 主立坑 (MS), 換気立坑 (VS) 内の海拔水位とMSB-1号孔内の間隙水圧変動

解析結果と実測値の比較を図2.2.18に示す。地質および水理地質モデルがかなりラフなため、大まかな変動傾向は表現しているが、異なることがわかる。

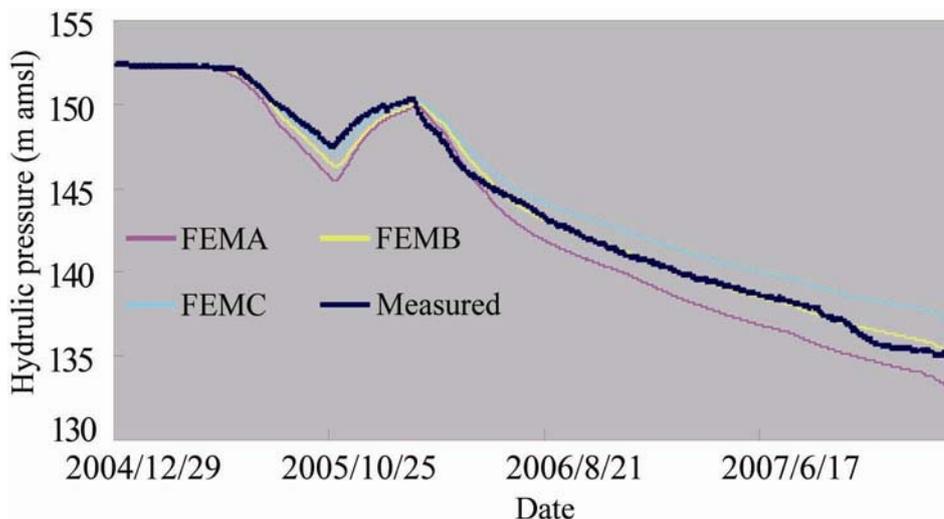


図2. 2. 18 解析結果と実測値の比較

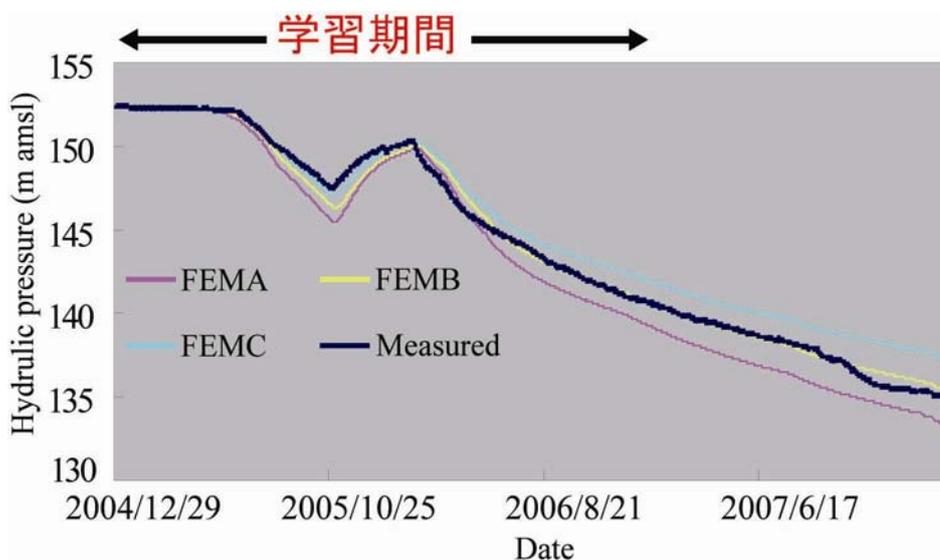


図2. 2. 19 学習期間の設定

次に、図2.2.19に示すように、学習期間を設定し、その期間で実測値を良く再現しうるようにANN、ANFISモデルのパラメータを求めた。そのパラメータを用いて、学習期間以降を予測し、実測値と比較した。その結果を図2.2.20、図2.2.21に示す。図2.2.20がANNモデル、図2.2.21がANFISモデルによる結果である。なお、図中に予測値と実測値との差（Residual）も表示した。

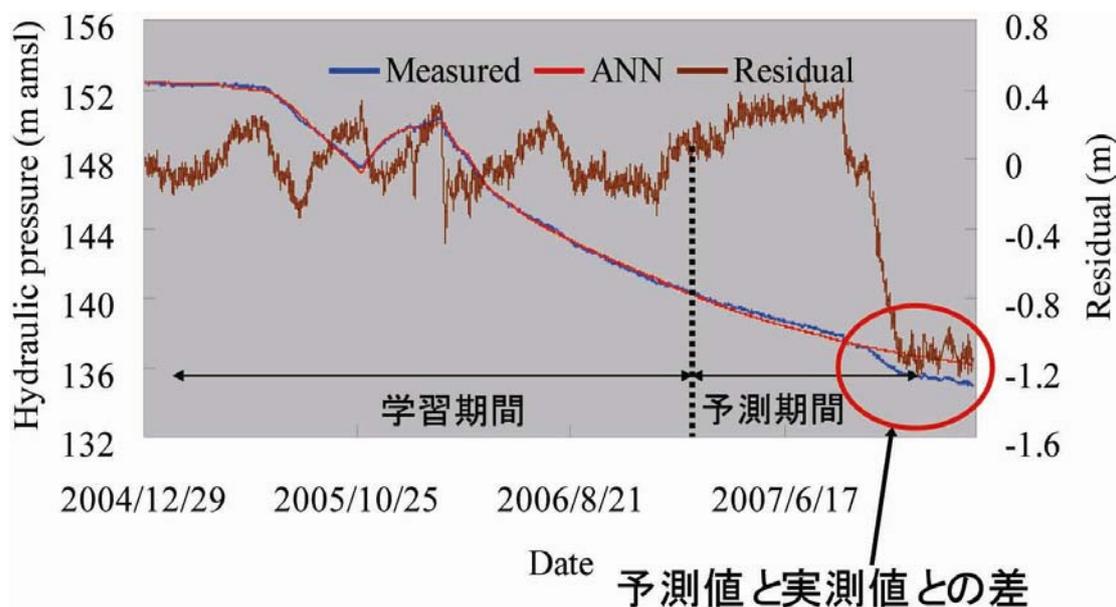


図2.2.20 ANNモデルによる解析結果

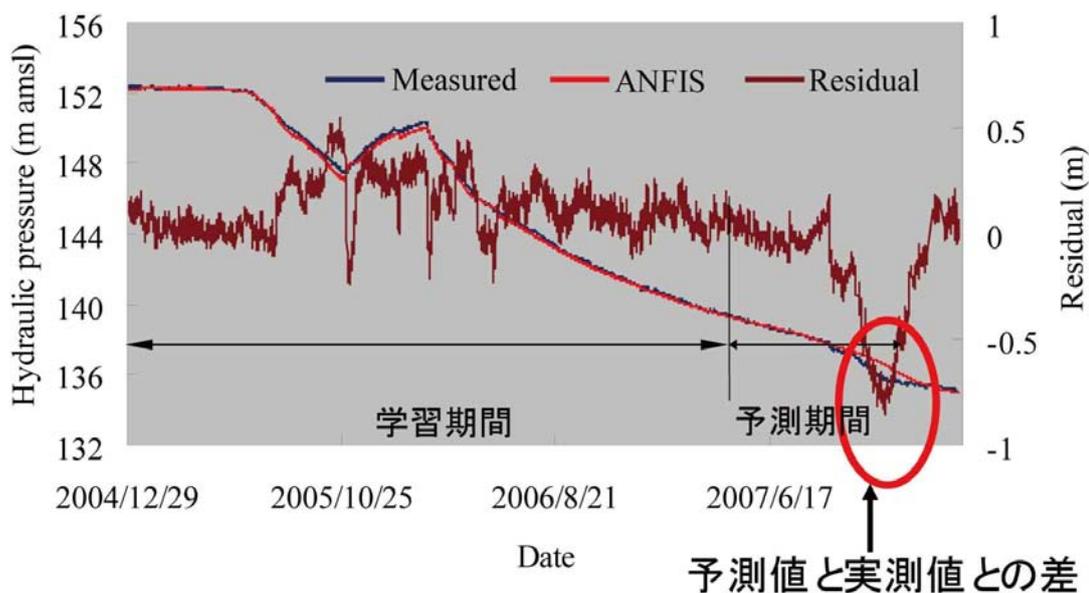


図2.2.21 ANFISモデルによる解析結果

これらの図から、ANN、ANFISモデルとも高い精度で再現および予測ができていていることがわかる。ANNとANFISでは、ANFISの方がやや良い精度であった。図2.2.20から、予測期間の最後の方で予測と実測が異なっており、Residual値が大きくなっていることがわかる。

この差は、ANFISモデルでも認められるが、ANNに比べて全体に小さい。これは、モデルの特性によるものであり、ANFISの方が解析精度が高いことによるものと考えている。ここで発生した観測値と予測値との差の特徴は、実測値が急激に低下することである。このような急激な低下の原因としては、

- ・ センサーのエラー
- ・ 立坑が、今までにない地質構造（例えば高透水性割れ目）に遭遇した
- ・ 井戸試験などの人為的な擾乱が与えられた

などが考えられる。センサーエラーや、人為的擾乱は、ある程度評価できるから、リアルタイムで観測値と予測値とを比較しながら監視できれば、高透水性割れ目の存在が把握しうる可能性がある。この点については、今後解析例を増やして検討することが必要である。このような問題があるものの、図2.2.20、図2.2.21の結果は、ANNやANFISモデルの導入により、間隙水圧変動が数ヶ月先までは良く予測できることを示している。Residual値からもわかるように、ANFISであれば、予測期間の初期ではせいぜい20～30cm程度である。これから、極めて精度が高いことが分かり、Grey Modelの1つの利点と言え、十分監視・管理に使ううると考える。

2.2.2.7 研究成果のまとめ

前述したように、10年間でSoft Computing手法を地下水ばかりでなく、流出解析や地質の前方予知など多くの問題に適用してきた。その結果、

- ・ 流出解析が高精度でできる
- ・ 地質の前方予知は、一部推定可能なもののまだ問題がある
- ・ 地下工事の地下水に与える影響が定量評価できる
- ・ 平野部の広域地下水流動が把握しうる

などが明らかとなった。そして、本報告で述べたように、間隙水圧変動が他地点のデータや解析結果からうまく再現・予測しうることがわかった。

それらの成果を踏まえて、地下水管理システムに結実していくことが、放射性廃棄物処分にとっても重要と考える。

2.2.3 水質と水理解析の総合化に関する研究

2.2.3.1 研究目的

MIUサイトで立坑掘削に伴って、環境基準値を超えるフッ素濃度の地下水が湧出した。そのため、地上にフッ素濃度を十分に低減する排水処理施設を建設するまでの間、立坑掘削は停止した。

この高フッ素濃度の地下水の存在が掘削前に把握されていなかったかと言えば、そうではない。図2.2.22に示されているように、岩月ら^{36), 37), 38)}は、MIZ-1号孔で得られた深度方向の水質分布から、高フッ素濃度の地下水の存在を報告している。このことは、水質情報を実際の工事に反映することの難しさを示していると考えられる。例えば、立坑掘削に伴う湧水を考える。工事に先立って水理解析が行われ、湧水量が試算されると、それに沿って排水計画がなされ、ポンプなどが用意される。しかし、水質については、砒素など毒性の強い物質を除いて、必ずしも十分な対策が計画されない場合がある。これは一例であるが、やはり対策を考えた時、水理と水質の情報を総合して考える事が必要と思われる。また、水理と水質の情報は独立したものではなく、相互に密接に関係しており、このことから総合解析が必要である。この総合化を考えるため、本研究の中で、「何故、MIUサイトの地下水がフッ素イオンを多く含むか」に着目して基礎的な研究を行った。

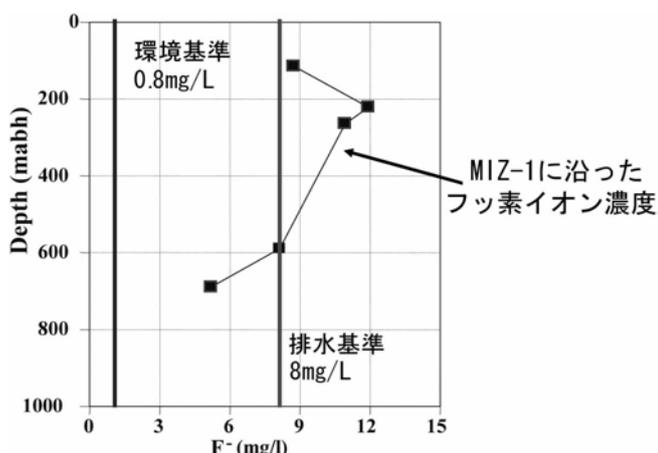


図 2.2.22 MIZ-1 号孔で得られたフッ素イオン濃度分布 ^{36), 37), 38)}

2.2.3.2 研究方法と結果

全体の研究方法を図2.2.23に示す。水質と水理の総合化を図るために、地下水滞留時間に着目した。水質は、ある一定の濃度に達するまでは地下水と岩石の反応によって変化する。したがって、水質、例えばフッ素イオン濃度などは反応時間と共存イオン濃度によって、ある程度定式化できると考えた。仮に定式化できれば、野外のデータから、滞留時間が推定できることになる。一方、地下水の流下時間は、パーティクル・トラッキング法などを用いれば水理解析できる。これらを比較することにより、水質と水理の総合化が可能になると考えた。勿論、この考えは挑戦的なものである。しかし、最近になって、参考文献^{23), 24)}に示されるように、本研究成果が国際学術誌に掲載されており、本手法が総合化研究の第一歩となると考える。

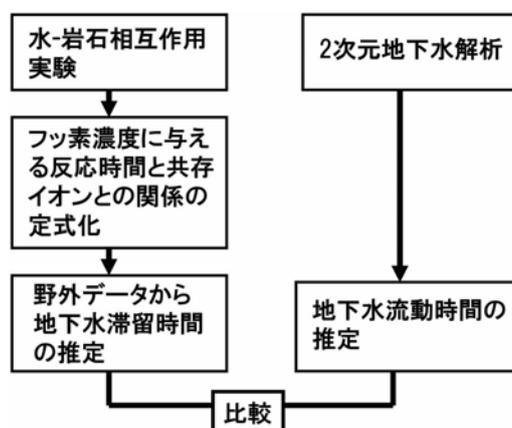
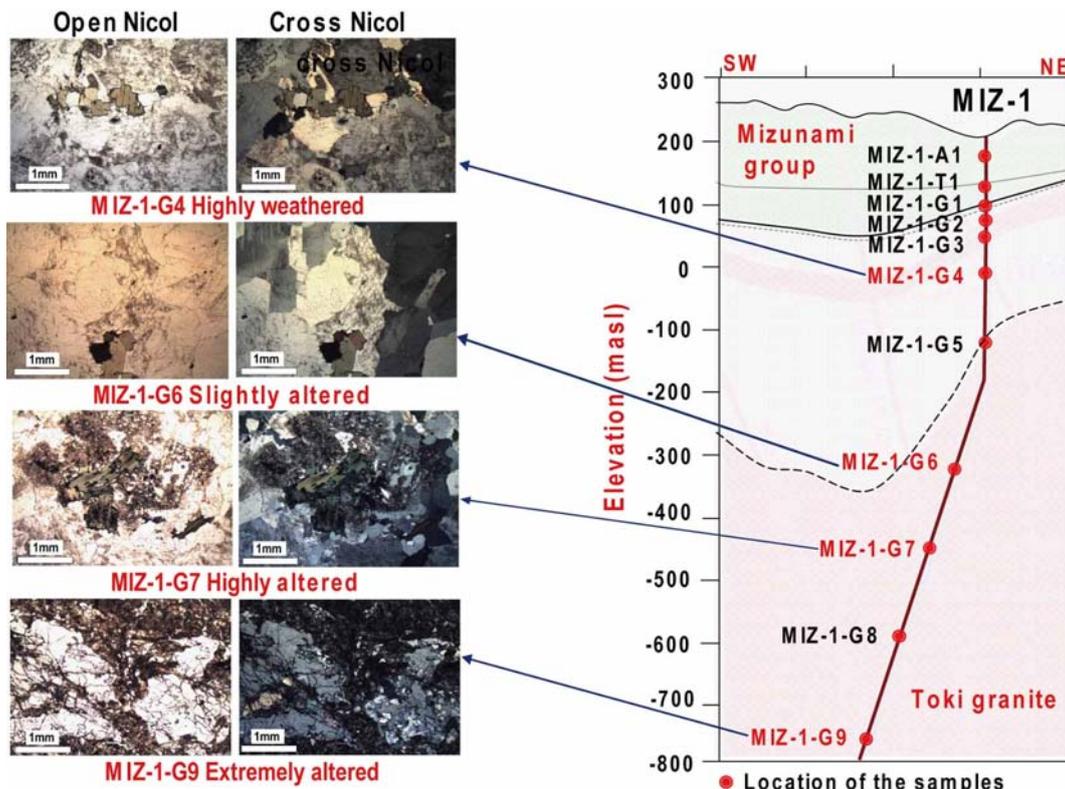


図2.2.23 研究の構造

水-岩石相互作用実験のために、MIZ-1号孔から9個の岩石試料を採取した。採取位置と試料の概略的な性質を図2.2.24に示す。なお、水-岩石反応実験は、三角フラスコに主に蒸留水と岩石粉末を10:1の割合で入れて振動台(180rpm)の上で行った。岩石粉末の径は、150~300μmとし、温度は20℃に設定した。水の分析は、パックテストの他、50mlの水試料をMIUに送り、ICP-OESとイオンクロマトグラフィー(Dionex DX1201C)を用いて分析した。今回の報告では、80日までの試験結果について述べる。

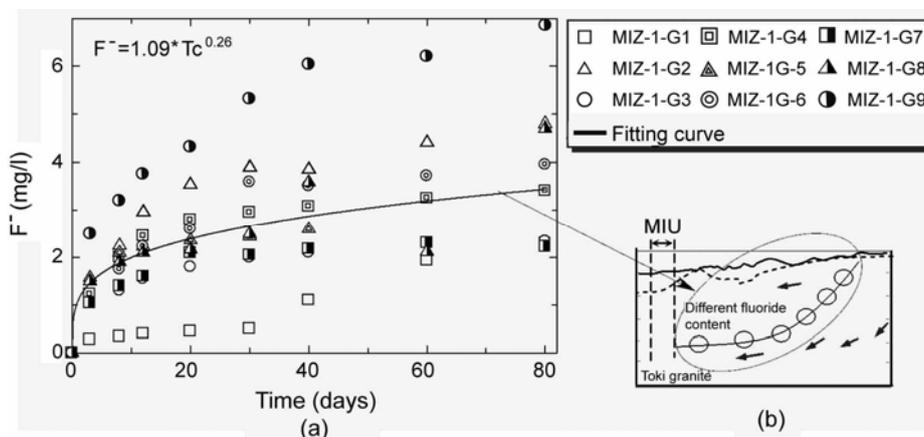
図2.2.25に、フッ素濃度の経時変化を示す。各試料は、時間と共にフッ素濃度が上昇していることがわかる。しかし、その変化には試料によって大きく異なり、各花崗岩試料によって一様でないことがわかる。とくに上昇の大きいのは試料MIZ-1-G9であり、これは熱水変質の過程で起こ

ったフッ素の局所濃縮などによるものと考えられる。つまり元々の試料中のフッ素濃度が高かったことによると考えられる。一方、試料MIZ-1-G1は風化の著しい試料であり、フッ素イオン濃度の上昇は小さい。風化により、フッ素が過去に溶脱されていたものと考えられる。他の花崗岩試料についても、フッ素イオン濃度の上昇は一樣ではない。これは、元々の花崗岩に含まれるフッ素量が一樣ではないことによるものと解釈できる。地下水は異なったフッ素濃度の花崗岩中を流れるものと考えられるから、これらの平均的なものと想定できる。つまり、図中に模式的に示すように、もし、地下水が、これらの試料の中を平均的に通過していると考えられるならば、フッ素濃度と時間の関係を近似的に図中の実線のように引くことができる。



(試料の性質の記載は日本原子力研究開発機構による)

図2. 2. 24 MIZ-1号孔における試料採取地点



(実線は平均的な関係)

図2. 2. 25 各試料のフッ素イオン濃度の経時変化

次に、地下水中のフッ素イオン濃度が図2.2.25に示す反応時間と、共存イオンの関数であると仮定した。共存イオンは、例えば、初期の鉱物組成やpHなどで決定されるものと考え、第一次近似として、それらが下記の式2.2.1のように線形で書き表しうるとした。

$$F^- = \sum_{i=1}^n \alpha_i C_i + 1.09 * T^{0.26} \tag{2.2.1}$$

式中の第一項は共存イオンの違いを表す、Cは各種の共存イオン濃度であり、 α は寄与度である。第二項は、実験で得られた平均のフッ素濃度の経時変化である。 α を実験に合うように、GA（遺伝的アルゴリズム）で求めた。GAでは、各共存イオン濃度を15桁の2進法で表し、今回9種のイオンを用いた。表2.2.4は、解析に用いた共存イオンとそれに対する α 値を示す。図2.2.26は、フッ素濃度の解析値と実測値との相関であり、必ずしも良い値とは言えない。この点が今後の改良課題である。

表2.2.4 解析に用いた共存イオンと寄与度 α

ions	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Si ⁴⁺	Al ³⁺	Fe ^{2+/3+}	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
α_i	0.054	0.004	0.022	0.165	-0.097	0.101	0.026	-0.041	0.066

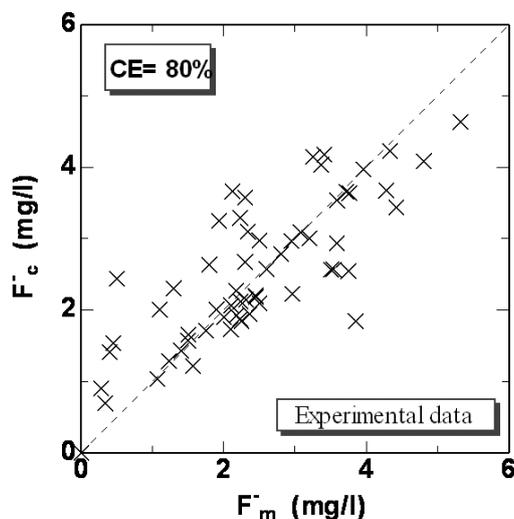
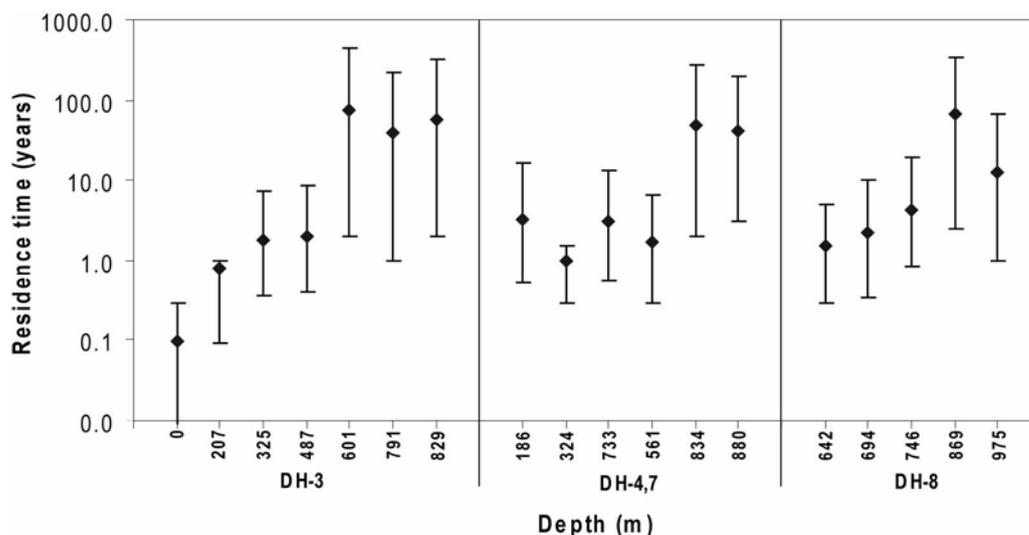


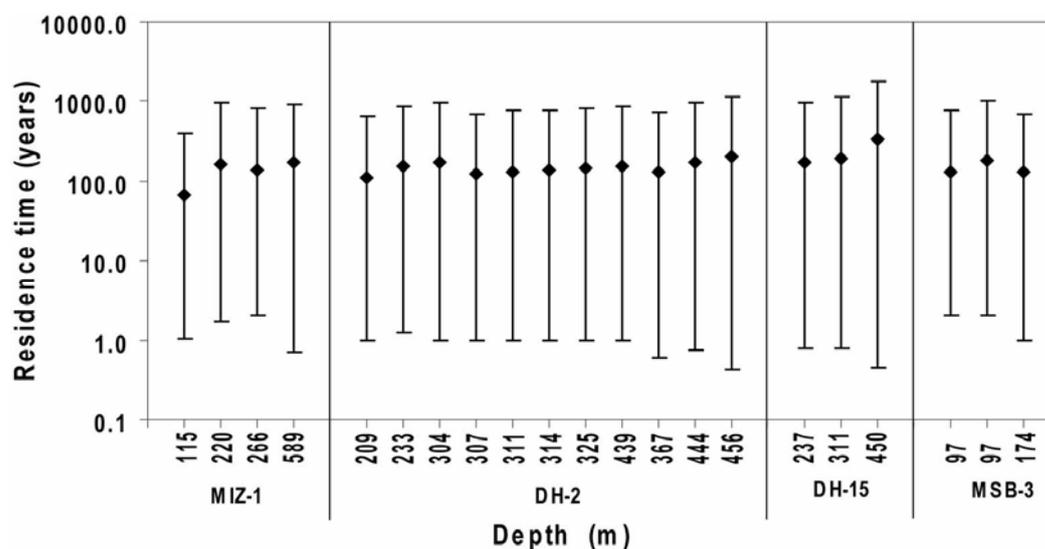
図 2.2.26 計算値 (Fc) と実測値 (Fm) の相関

次に、この式を用いて、実測の地下水のフッ素イオン等から推定した滞留時間を図 2.2.27、図 2.2.28 に示す。図 2.2.27 は地下水涵養地域内にあると考えられるボーリング孔（DH-3, 4, 7, 8 号孔）、図 2.2.28 は地下水流出域である。縦軸は滞留時間、横軸は地表からの深度を示す。誤差の範囲は、定式化した式の精度から推定した。この図から、涵養地域では深度が大きくなるほど滞留時間が長くなる事がわかる。一方、流出地域では、深度によらずほぼ一定値となる。つまり、涵養域では、降雨浸透の効果が大きいことを表していると考えられる。



(DH-3に見られるように深度と共に滞留時間が長くなる)

図2.2.27 地下水の涵養域の滞留時間



(深度によらずほぼ一定値)

図2.2.28 地下水の流出域の滞留時間

今回の推定式を用いれば、まだ精度上の問題も多く残るが、フッ素濃度や共存イオン濃度から、それらが平衡状態に達しておらず、また、地下水の性質が基本的に雨水起源と考えられれば、地下水滞留時間を求めることができる。この結果から、滞留時間は数年から十数年とかなり短くなった。

この短時間の妥当性を、2次元地下水解析で検証することを試みた。図2.2.29は断面線位置である。図2.2.30は表2.2.5の水理定数を与えた場合の水頭分布解析例である。この解析では、2次元解析であることと、上部の堆積岩の透水係数が小さいため、例えば図中に示すMIZ-1号孔上部には日吉川から地下水が涵養される結果となった。パーティクル・トラッキング法によれば、間隙率が5%程度であれば、MIUサイトのボーリング孔には、深度400m以浅であれば、1年以内で到達する結果となった。

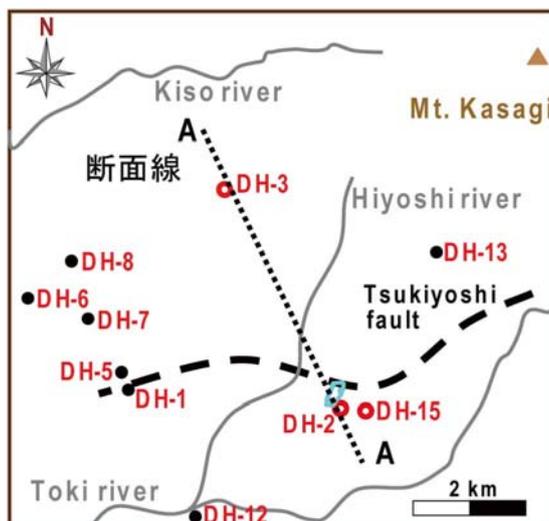


図2.2.29 解析断面とボーリング孔位置図

表2.2.5 設定透水係数

(KV, KHはそれぞれ鉛直, 水平方向透水係数)

Layer	KV ($\times 10^{-7}$ m/s)	KH ($\times 10^{-7}$ m/s)
Sedimentary	0.02	60
Granite	5	1

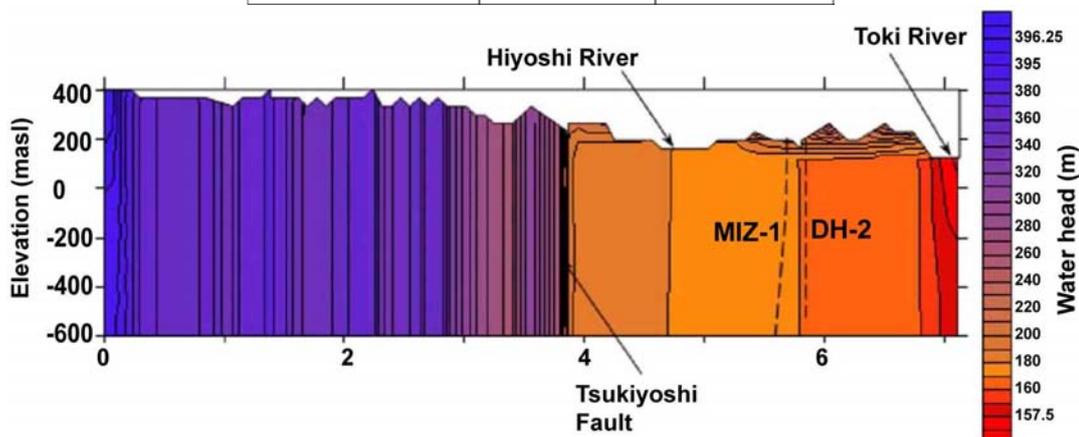


図2.2.30 解析した水頭分布

2.2.3.3 結論と今後の問題

今回、水質、とくにフッ素イオン濃度から推定した地下水滞留時間と、水理解析とパーティクル・トラッキング法を用いて算定した地下水流下時間には差が見られ、水理解析の方が短時間であることがわかった。この差の理由として、下記が考えられる。

- ① 水質から滞留時間を算定する式にまだ誤差が大きい
- ② 共存イオンのフッ素濃度に与える影響が線形で近似できるか問題である
- ③ 水理解析によれば、MIUサイト地下の地下水は日吉川から供給されている。これは、2次元解

析で日吉川に一定水頭境界を与えたことによるものである。この条件についての妥当性を、2次元解析の妥当性と併せて検討することが必要である。

- ④ このように、水質情報と水理解析情報を総合的に検討することによって、何が問題かが明示され、より現実性の高い地下水流動把握が可能となる。
- ⑤ 今回の試みは、まだ初期段階ではあるが、水質と水理解析を総合化する第一歩となったと考える。

2.2.4 割れ目岩盤内の浸透流評価研究

2.2.4.1 Don-Chanモデル

10年間の研究成果は、開発した割れ目モデルDon-Chanの実用性を高めたことである。

さらに、日本原子力研究開発機構によって、東濃地域を対象として他のモデルとの比較検討がなされ、ある程度の妥当性が明らかとなった²⁹⁾。そのパフォーマンスの例を、図2.2.31、図2.2.32、図2.2.33に示す。これらの図に例示されるように、主要割れ目が選択できるならば、地下水流動や物質移動解析が可能となることが示された。

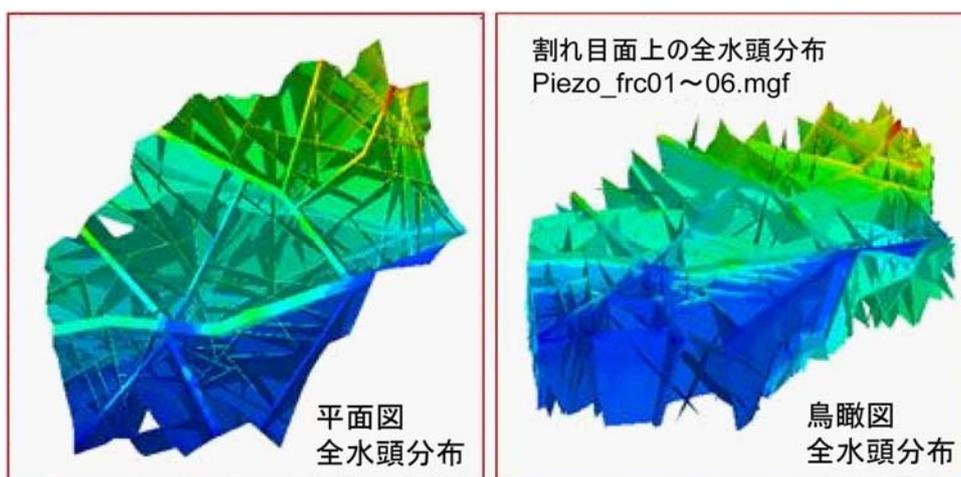


図2.2.31 Don-Chanのパフォーマンス例（設定した割れ目系と全水頭解析）²⁹⁾

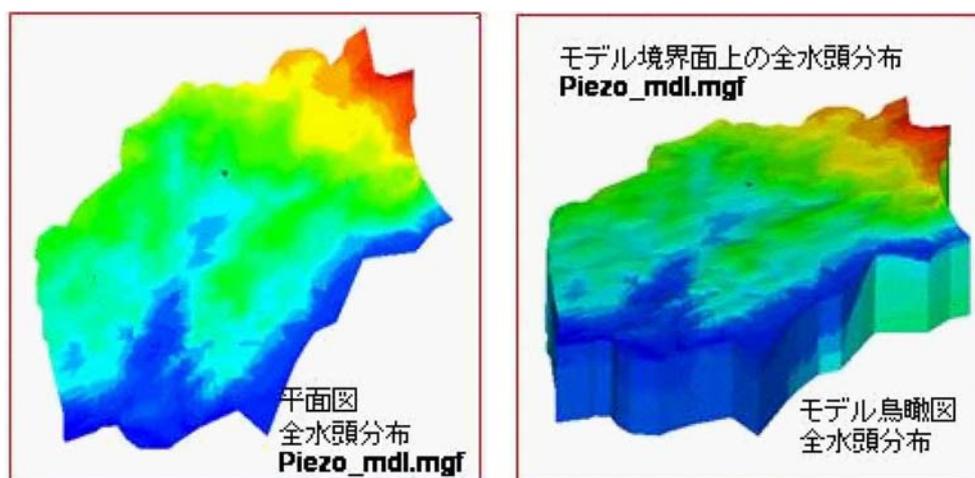
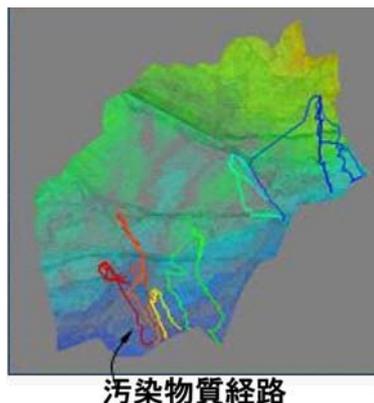


図2.2.32 Don-Chanのパフォーマンス例（平均的な全水頭解析結果）²⁹⁾



汚染物質経路

図2. 2. 33 Don-Chanのパフォーマンス例 (物質移動経路解析) ²⁹⁾

2. 2. 4. 2 割れ目およびStep構造の抽出

透水経路となる割れ目の選択は、Don-ChanモデルなどのFracture Networkモデルでは極めて重要となる。しかし、この選択は極めて難しい。日本原子力研究開発機構では、ボアホール・テレビの画像から、不連続面を、割れ目、明瞭割れ目、開口割れ目、破碎带上盤、破碎帯下盤、鉍物脈などに分けて記述している。図2.2.34は、DH-2号孔の約500m区間に現れた割れ目を3次元的に見たものである。極めて多くの割れ目が存在していることがわかる。図中 (c) は、小さな間隔で多くの同一方向の割れ目があった時に、それらを1つの割れ目と捉える選別法をとった場合である。それでも割れ目数は極めて多い。

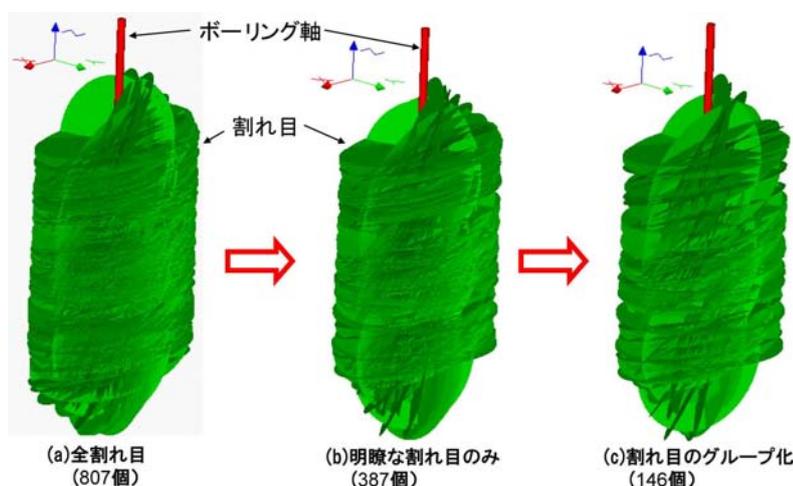


図2. 2. 34 ボーリング孔 (DH-2号孔) に沿った割れ目の3次元表現

この割れ目の選別の基準として、本研究では、Step構造を基礎にした方法を提案した。Step構造部では、図2.2.35に示すように、割れ目の極方向が、ひとつの大円上に並ぶはずである。これが割れ目方向のパターンであり、選別とは同一パターンがどの程度続いているかを調べるものである。その方法を図2.2.36に示す。まず、ボーリングに沿って、図中 (a) のように、5m区間の割れ目の方向分布を調べる。5m区間として、(b)に示すように、1mずつ区間をずらしながら調べてゆく。ずらしていった、(c)に示すように同じ割れ目方向パターンを持つところを取り出し、(d)のようにそれがStep構造部と考え、単一の割れ目で置き換える。

東濃地域で掘削されたMIU-1孔を対象にした解析例を図2.2.37、図2.2.38に示す。いずれの図に

おいても、同一の割れ目方向パターンが何区間か続き、やがて全く別のパターンに移行するか、もしくは割れ目のない区間に移行することがわかる。同一パターンの部分をStepと考えた。表2.2.6は、東濃地域のボーリング、AN-1号孔、MIU-1号孔、MIU-2号孔、MIU-3号孔について、このような処理を行い、Step構造部の大きさを明らかにしたものである²⁵⁾。その結果、Stepの平均幅が1.96m、その中には平均して1mあたり2.79本の割れ目が存在していることが明らかとなった。

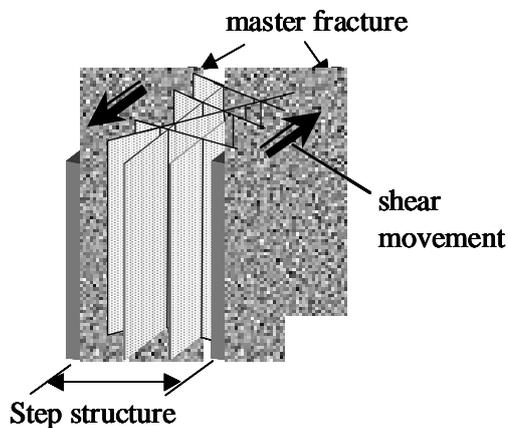


図2.2.35 Step構造模式図

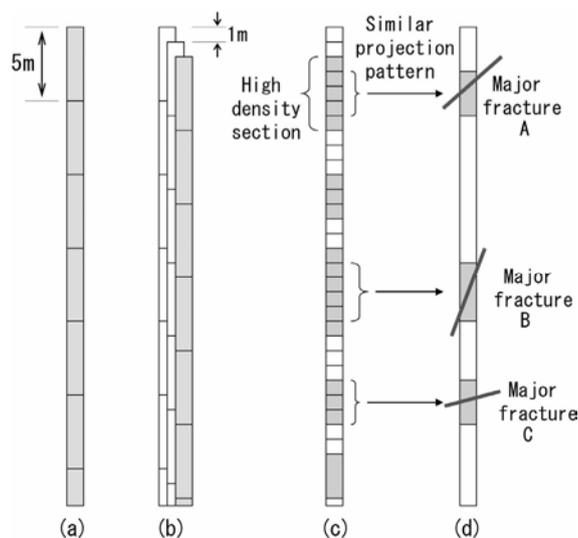


図2.2.36 割れ目パターンの選択手法

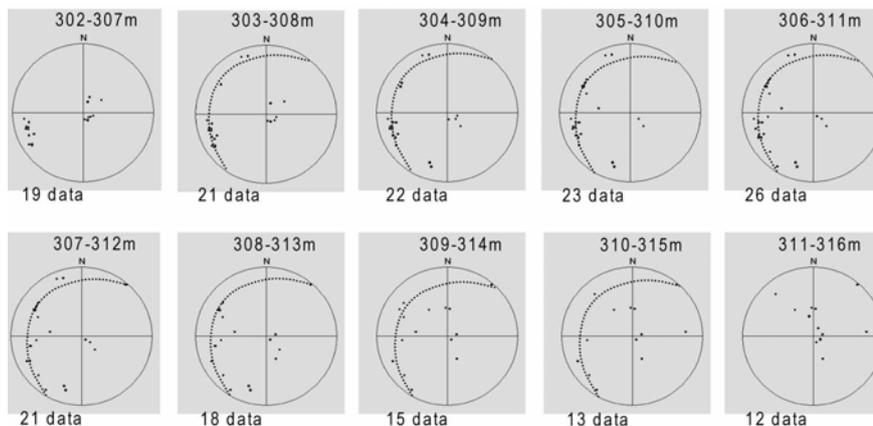


図2.2.37 割れ目パターン解析例 (MIU-1号孔)

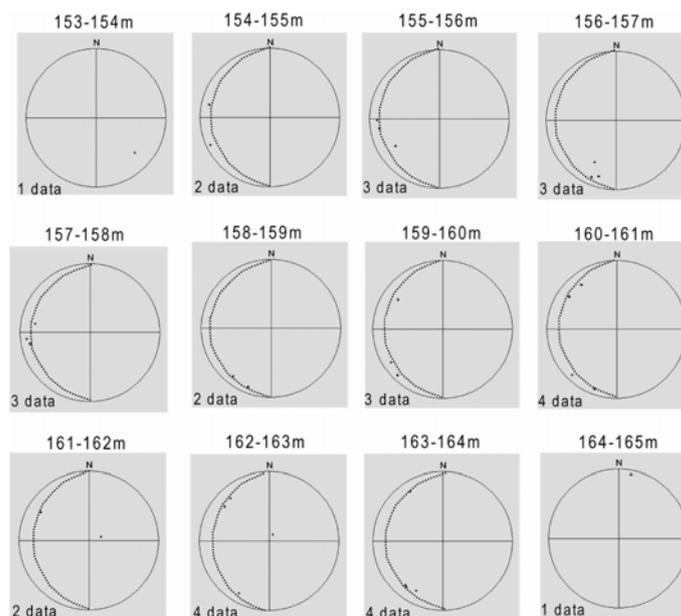


図2. 2. 38 割れ目パターン選別例 (MIU-1号孔)

表2. 2. 6 Step構造の性質

Borehole	No.	Section location		Length (m)	Dip (degree)	Width (m)	Number of fractures in section	Fracture density (m ⁻¹)
		Top (mbgl)	Bottom (mbgl)					
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
AN-1	1	61	66	5	75	1.29	10	2.0
	2	263	272	9	75	2.33	15	1.7
MIU-1	3	411	419	8	75	2.07	15	1.9
	4	90	102	12	75	3.11	24	2.0
	5	137	148	11	75	2.85	20	1.8
	6	154	165	11	75	2.85	28	2.5
	7	276	280	4	75	1.04	11	2.8
	8	303	310	7	75	1.81	21	3.0
	9	316	325	9	75	2.33	21	2.3
	10	592	598	6	75	1.55	15	2.5
	11	649	658	9	75	2.33	22	2.4
	12	879	890	11	75	2.85	35	3.2
MIU-2	13	935	942	7	75	1.81	26	3.7
	14	979	982	3	75	0.78	8	2.7
	15	208	213	5	75	1.29	14	2.8
	16	319	323	4	75	1.04	12	3.0
	17	929	935	6	75	1.55	14	2.3
	18	937	945	8	75	2.07	23	2.9
MIU-3	19	136	140	4	75	1.04	9	2.3
	20	144	148	4	75	1.04	15	3.8
	21	187	194	7	75	1.81	16	2.3
	22	299	304	5	75	1.29	9	1.8
	23	571	576	5	75	1.29	10	2.0
	24	605	610	5	75	1.29	16	3.2
	25	641	649	8	75	2.07	20	2.5
	26	676	681	5	75	1.29	13	2.6
	27	779	783	4	75	1.04	14	3.5
	28	809	819	10	75	2.59	21	2.1
	29	823	846	23	75	5.95	53	2.3
	30	870	880	10	75	2.59	72	7.2
	31	921	926	5	75	1.29	29	5.8
	32	953	965	12	75	3.11	28	2.3
Average						1.96		2.79

2. 2. 4. 3 結論と今後の問題

Fracture Networkを用いて地下水解析を行う場合、必ず問題となるのは割れ目の選別である。勿論、確率モデルを用いて割れ目の方向分布や長さ分布から、擬似的な割れ目モデルを構築する方法がある。しかしながら、その方法を取るにしても、主要な割れ目と副次的な割れ目を分ける事は大事である。本研究によって、まだStep構造に限るが、ある程度選別の可能性が示されたことは特筆されるべきものとする。今後は、さらに選別の方法を地質学的な基礎にたって開発することが必要である。

2.2.5 蒸発計測装置の開発と軟岩の不飽和特性評価の研究

2.2.5.1 研究目的概要

蒸発計測は、元々、結晶質岩からの微小湧水量を測定するために開発したものである。実際、スウェーデンのStripa鉱山、釜石鉱山等で測定してきた。最近では、堆積軟岩を対象として、六ヶ所村で建設中の余裕深度処分場のアクセストンネルなどで測定を行ってきた。また、室内実験で、堆積軟岩の不飽和特性を逆推定する目的で用いてきた。最近では、とくに不飽和特性同定の目的の研究が多い。この逆推定とは、下記のCampbellモデルやVan-Genuchtenモデル内のパラメータを推定することである。これらに関する発表論文は2.2.7.4に示す。

(1) Campbellモデル

$$k(\theta) = k_s \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^m \quad (2.2.2)$$

$$\theta = \theta_s \left(\frac{\psi_e}{\psi} \right)^{1/b} \quad (2.2.3)$$

$$m = 2b + 3 \quad (2.2.4)$$

ここで、 θ は体積含水率、 θ_s は飽和時の含水率、 ψ_e は空気侵入ポテンシャル (Air entry potential of soils : $\text{JKg}^{-1} \sim 0.102 \text{ m of water}$)、 $\psi(\theta)$ は水のマトリック・ポテンシャル ($\text{JKg}^{-1} \sim 0.102 \text{ m of water}$)、 b と m はモデルに内在するパラメータ、 $k(\theta)$ は不飽和透水係数 (ms^{-1})、 k_s は飽和透水係数 (ms^{-1})である。

(2) Van-Genuchten モデル

$$k(\theta) = k_s \theta_e^{1/2} [1 - (1 - \theta_e^{1/l})^{l-2}] \quad (2.2.5)$$

$$\theta_e = (1 + |\alpha\psi|^n)^{-l} \quad (\alpha > 0) \quad (2.2.6)$$

$$\theta_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \quad (0 \leq \theta_e \leq 1) \quad (2.2.7)$$

$$n = 1/(1-l) \quad (0 < l < 1, n > 1) \quad (2.2.8)$$

ここで、 α (m^{-1})、 l は係数、 θ_r と θ_s は最小および最大含水率 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)である。 θ_e は有効含水率 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)である。

以前は、Campbell式を用いてきたが、最近ではVan-Genuchten式のパラメータを推定できるように改良した。方法は、これらの式を基礎として蒸発量変化を計算し、計算値が実測値に合うように内在するパラメータを決定するものである。パラメータ同定では、GAを用いている^{34), 35)}。

逆推定の流れは図2.2.39のフロー図である。

計算では、両モデルを用い、モデルのパラメータは仮定して与える。実測蒸発量変化と計算蒸

発量変化との2乗誤差(SSD)を計算し、与えるパラメータを改良してSSDが設定の値如何になるまで再計算を続ける。このパラメータ改良プロセスに遺伝的アルゴリズムを用いた。

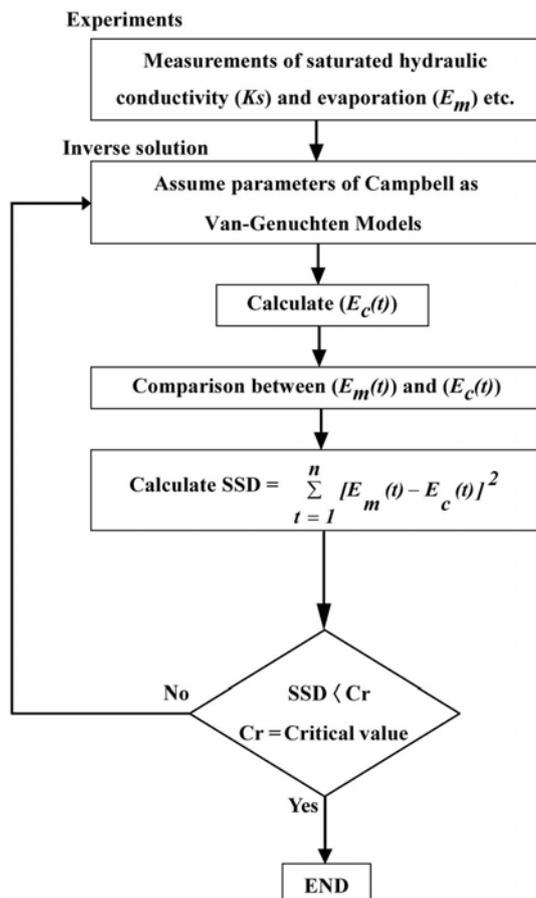


図2.2.39 逆推定プロセス

2.2.5.2 非定常蒸発量変化実験

逆推定を行うため、実験は簡単な方が良い。実験装置の概要を図2.2.40に示す。まず試料として、高さ2~3cmの薄い円筒状試料を用いる。この試料は上面を除いてシリコン・シーラントで遮水されている。そのため、上面からのみ蒸発することになる。試料内では上向き1次元流れとなり解析が容易である。実験では飽和した試料を用い、乾燥過程での蒸発変化を求める。蒸発量は、重量変化から求めた。なお、試料を温度25°C、相対湿度40%に設定した恒温・恒湿槽内で行った。

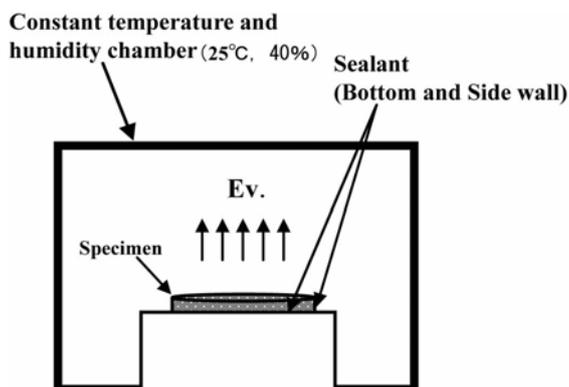


図2.2.40 岩石試料を用いた実験模式図

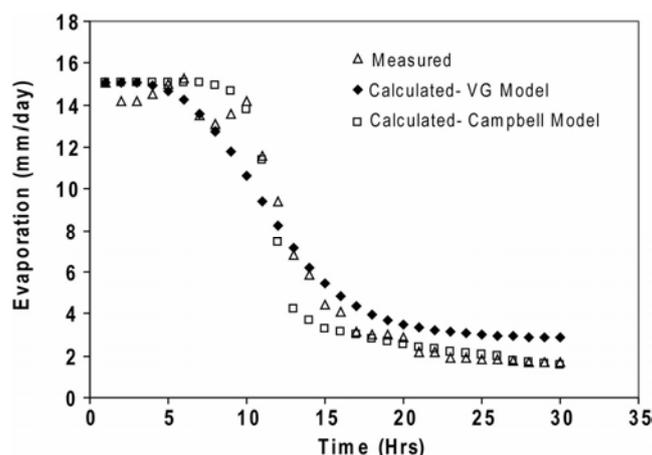


図2.2.41 蒸発量の経時変化と逆推定

図2.2.41に、蒸発量の経時変化と、Campbell, Van-Genuchtenモデルを用いた逆推定結果を示す。このように、蒸発量変化を用いて逆推定しうることを明らかにした。この図を見る限り、Campbellモデルの精度が高いと思えるが、この点については更なる研究が必要である。

2.2.5.3 結論と今後の問題

蒸発計測は、微小湧水量の計測ばかりでなく、岩石、特に堆積軟岩の不飽和特性評価で重要である。本研究ではそのことを明らかにしてきた。ただ、逆推定の基礎式として、Campbell, Van-Genuchtenモデルのいずれがより妥当かはまだ結論に至っていない。これについては、逆推定に用いる基礎式の検討と併せて、さらに研究を進める必要がある。

2.2.6 平成21年度の研究

2.2.6.1 研究概要

本年度は、前述の過去10年間の研究を進化させた。これまでの研究は下記の4点に大別できる。

- ① ANN, GA, FuzzyなどのSoft Computing手法を用いた地下水、山地流出解析手法の開発に関する研究では、Grey Modelの提案、ANFISの導入を行った。
- ② 水質と水理解析の総合化に関する研究
- ③ 割れ目岩盤内の浸透流評価研究
- ④ 蒸発計測装置の開発と軟岩の不飽和特性評価の研究では、Van-Genuchten式を用いた逆推定法の開発を行った。

本章では、特に②、③の研究成果について報告する。

2.2.6.2 水質と水理解析の総合化に関する研究—花崗岩中のフッ素の分布形態—

2.2.3.2で述べたように、地下水中のフッ素イオン濃度上昇と時間との関係は、試料によって大きく異なる。この理由として、フッ素を含む蛍石などの鉱物の分布が極めて局所的であることが考えられる。その分布形態を走査型電子顕微鏡 (SEM: Scanning Electron Microscope) で調べた。試料としては、図2.2.24中のMIZ-G8を用いた。図2.2.42にSEM写真を示す。図中のImage-1, 2, 3の部分の元素分析結果を表2.2.7に示す。表2.2.7から、フッ素がImage-2にのみ含まれていることが

わかる。この部分では、微小な空隙の中に蛍石と考えられる鉱物が充填している。図2.2.43は、Image-2部分の拡大である。その中に3ヶ所の小領域、Area-1、-2、-3を設定し、各々の小領域の元素分布を調べた。その結果を表2.2.8に示す。この表から、各領域でフッ素量がかかなり異なっている事がわかる。この研究により、フッ素分布に極めて局所性が大きく、水-岩石相互作用実験に用いる試料によって、地下水中のフッ素イオン濃度の上昇に大きな差が生ずることがわかった。

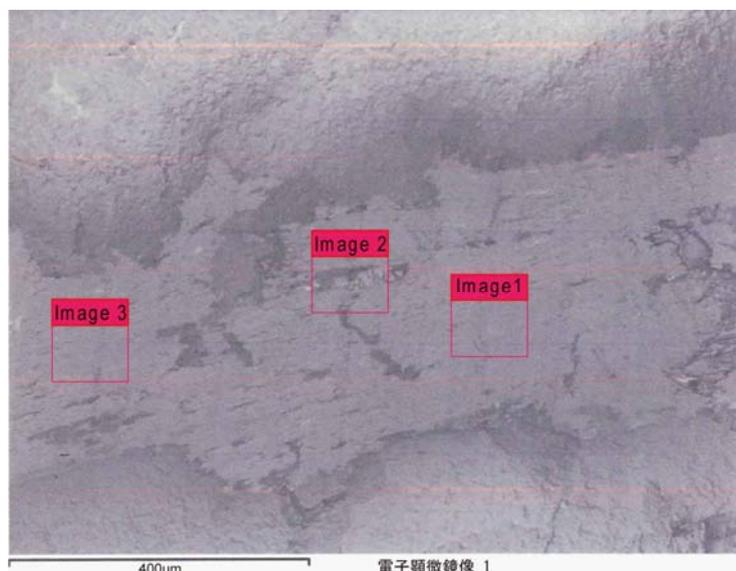


図2. 2. 42 MIZ-1-G8のSEM画像

表2. 2. 7 元素含有量

	Element Composition wt. %		
	Image 1	Image 2	Image 3
O	40.91	51.74	40.14
F	0.0	11.64	0.0
Na	0.0	0.18	0.19
Mg	2.53	2.08	2.56
Al	6.15	5.68	6.25
Si	11.1	17.06	12.43
Cl	0.0	0.0	0.19
P	0.32	0.0	0.0
K	2.41	3.46	3.52
Ca	0.75	4.97	0.0
Ti	1.66	1.77	1.42
Fe	34.17	0.0	33.3
W	0.0	1.41	0.0
Total	100.0	99.99	100.0

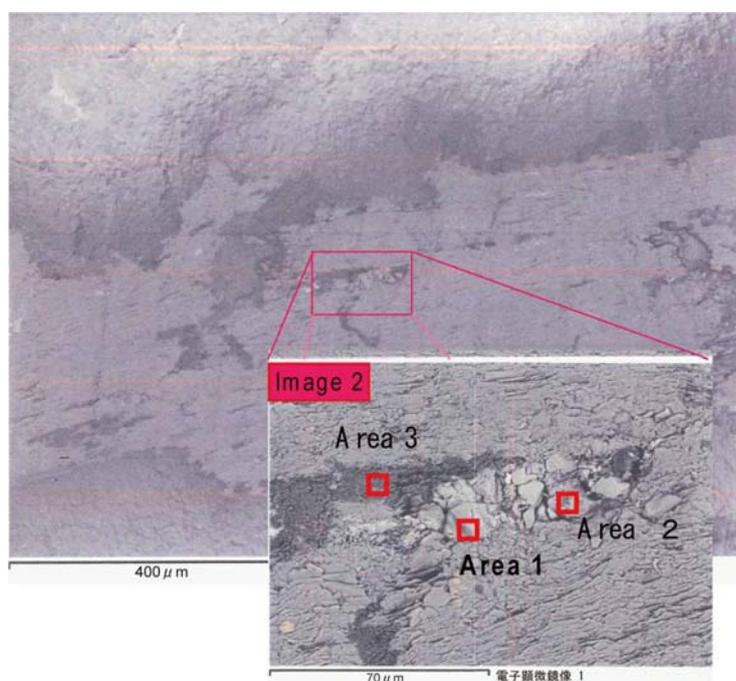


図2. 2. 43 Image-2領域の拡大と小領域設定

表2. 2. 8 小領域の各元素量

	Element Composition wt. %		
	Area 1	Area 2	Area 3
O	3.35	16.19	53.79
F	62.09	32.93	0.0
Na	0.0	0.24	0.0
Mg	0.0	0.35	0.53
Al	0.0	1.36	1.34
Si	0.57	3.88	35.72
Cl	-	-	-
P	-	-	-
K	0.0	0.19	0.0
Ca	33.99	21.78	0.46
Ti	-	-	-
Fe	0.0	23.08	8.14
W	-	-	-
Total	100.0	100.0	99.98

今後の問題としては、フッ化鉱物の起源を基にして、花崗岩中の分布をさらに詳しく調べることである。

2.2.6.3 割れ目岩盤内の浸透流評価研究—ACOによる物質移動経路解析の試み—

割れ目岩盤中の汚染物質移動を解析する手法に、パーティクル・トラッキング法がある。その考えを図2.2.44に模式的に示す。この方法はFracture Networkに基づく地下水解析に使いやすい。問題は経路選択である。図2.2.45に示すように、汚染物質が割れ目交点に来たとき、一般的にはその交点に繋がる割れ目内の流量比によって、汚染物質が入るとしている。この過程は、交点に流入してくる水が完全混合する場合に成立する。実際には、完全混合せず、また、流線が互いに切りあわない条件から、汚染物質が流入する割れ目が決まるはずである。また、図2.2.46に示すように、割れ目内には充填物があるから、たとえ同一割れ目を汚染物質を含んだ水と含まない水が流れていても、全混合するかどうかは確定的にいけない。つまり、パーティクル・トラッキング法は物質移動を解析する魅力的な方法とは言え、その適用にはまだ問題も多い。この問題を解決するために、ACO (Ant Colony Optimization) の考えを導入する。

ACOの基本的な考え方は、蟻は餌に到達した場合、フェロモンを分泌しながら巣に帰り、次の蟻はそのフェロモンの多い経路を辿って餌に到達すると言うものである。例えば、図2.2.47のようなネットワークがあり、左側の一点から入った蟻を右側の点に最短で到達する条件を課して解析すると、図2.2.48に示す経路を辿ることになる。この考えに、例えば流線が切りあわない条件を入れるために、図2.2.49に示すように、「敵の蟻」を入れて考えている。この条件下での計算を現在実行中であり、近い将来報告する予定である。

いずれにせよ、物質移動解析も、より実際に近い条件下で解析することが必要であり、この点について今後も研究を続ける所存である。

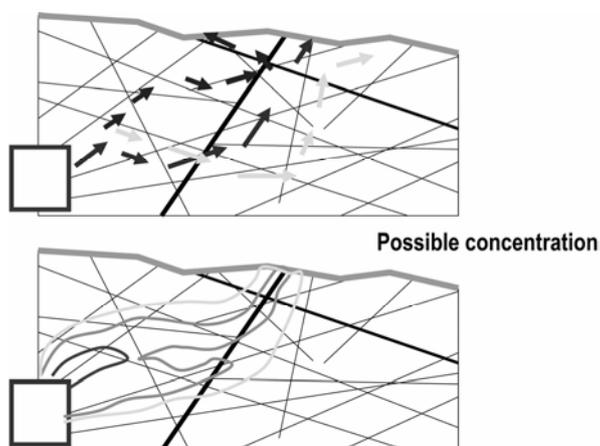


図2.2.44 パーティクル・トラッキング法による物質移動解析模式図

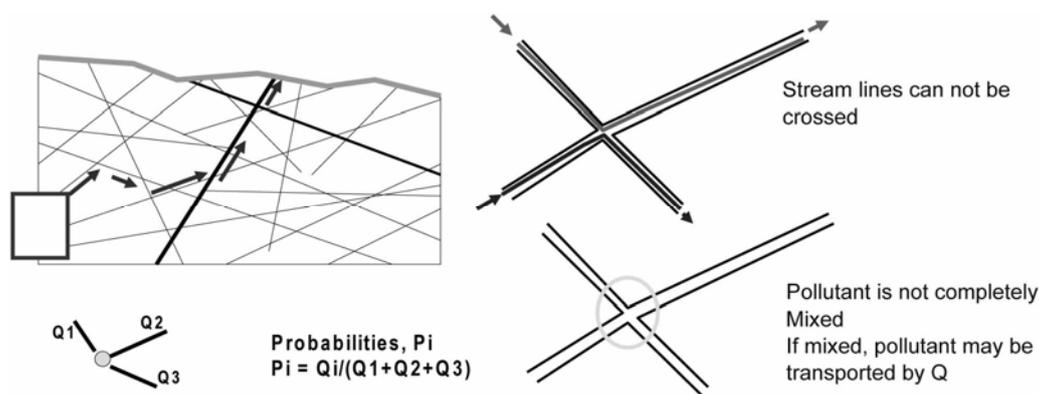


図2.2.45 パーティクル・トラッキング法の経路選択と問題点

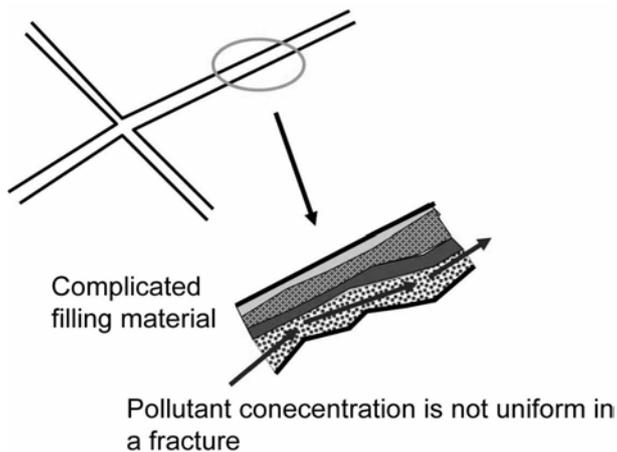
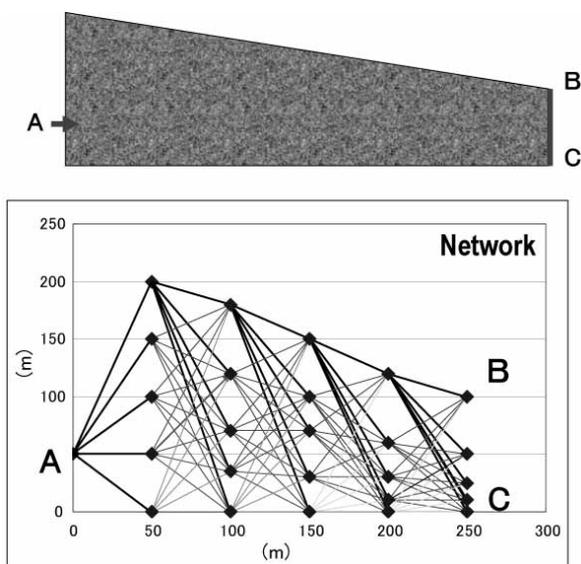


図2.2.46 割れ目内の充填鉱物と割れ目内混合の困難さ模式図



(A点からB-Cへの最短経路を見つける)

図2.2.47 ACOの予察的考察

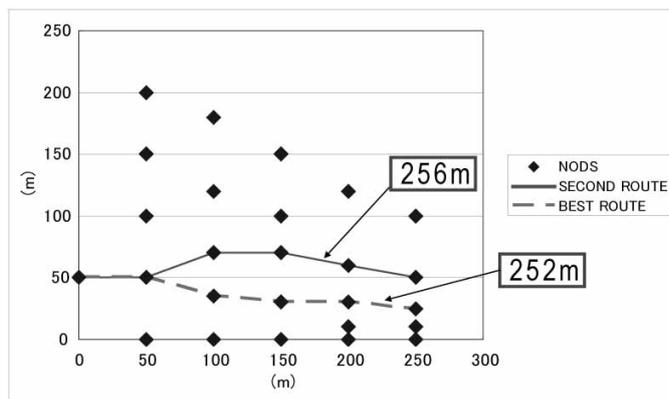


図2.2.48 求められた最短経路

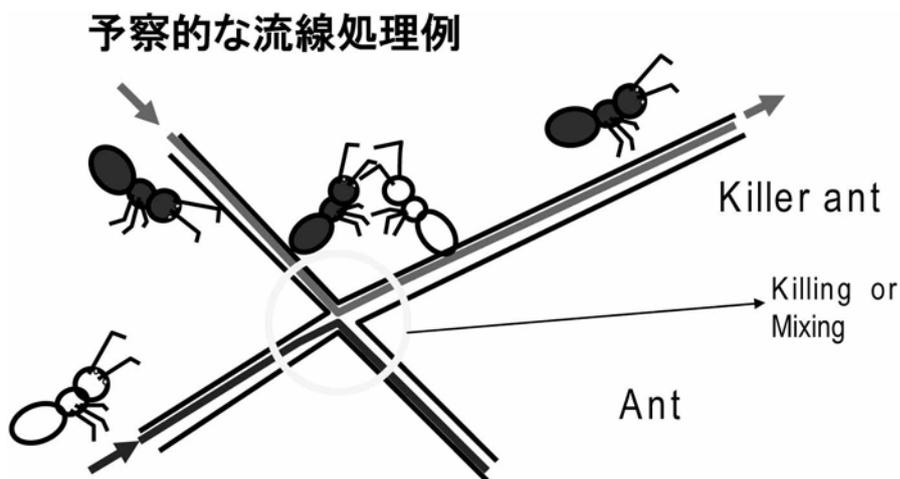


図2.2.49 予察的な流線処理の提案

2.2.7 発表論文および参考文献

ここでは、まず本件の研究に関連した過去10年間の発表論文を示し、その後今年度の研究にあたって参考とした文献を明示する。発表論文については研究分野毎に示す。

2.2.7.1 ANN, GAなどのSoft Computationによる地下水, 山地流出解析手法の開発に関する論文

- 1) Mebruck M., Watanabe K. Takeuchi S. (2009) : Grey model for prediction of pore pressure change, Environmental Earth Science, (in Press).
- 2) Gautam M. R., Watanabe K., Saegusa H.(2000) : Runoff analysis in humid forest catchment with artificial neural network, Jour. Hydrology, 235, pp.117-136.
- 3) 斎藤和春・渡辺邦夫・Mahesh Raj Gautam (2001) : 数量化理論およびニューラルネットワーク(ANN)によるトンネル湧水量予測に関する考察, 応用地質, Vol.42, No.3, pp.170-180.
- 4) 大野博之・対馬孝治・小倉紀雄・渡辺邦夫(2002) : 橋脚工事による河川敷内の流水変化について, 応用地質, Vol.43, No.3, pp.156-167.
- 5) 斎藤和春・三枝博光・渡辺邦夫・宋元泰(2002) : 推移確率行列と情報論的エントロピーを用いた岩盤割れ目系の解析, 応用地質, Vol.43, No.3, pp.143-155.
- 6) Gautam R. M., Watanabe K., Saegusa H. (2003) : Analysis of hydraulic pressure fluctuation in deep geologic formations in Tono area, Japan, Journal of Hydrology, Vol.284, pp.174-192.
- 7) Gautam R. M., Watanabe K., Saegusa H. (2004) : Effect of bridge construction on floodplain hydrology-assessment by using monitored data and artificial neural network models-, Jour. Hydrology, Vol.292, pp.182-197.
- 8) 星野吉昇・内田善久・渡辺邦夫・藤井健知(2005) : 解析解を入力値としたANNによるロックフィルダム初期湛水時の間隙水圧挙動予測, 土木学会論文集No.805/69, pp.77-90.
- 9) 星野吉昇・内田善久・渡辺邦夫(2005) : ANNによるロックフィルダム初期湛水時の間隙水圧挙動予測に関する一考察, 電力土木, No.319, pp.1-10.
- 10) Sohail A., Watanabe K., Takeuchi S. (2006) : Stream flow analysis by artificial neural network (ANN) model trained by real coded generic algorithm (GA), 地下水学会誌, Vol.48, No.4, pp.233-262.
- 11) 星野吉昇・内田善久・渡辺邦夫・藤井健知(2006) : ANNモデルの学習の高度化とロックフィルダムの間隙水圧の挙動予測, 土木学会論文集F, Vol.62, No.2, pp.387-404.
- 12) Affandi A. K. and Watanabe K. (2007) : Daily groundwater level fluctuation forecasting using soft computing technique, Nature & Science, Vol.5 (2), pp.1-10.
- 13) Affandi A. K. and Watanabe K. (2008) : Analysis of groundwater level fluctuation in a plain area using genetic algorithms and an artificial neural network, Journal of Lowland Technology International (accepted).
- 14) Sohail A., Watanabe K. and Takeuchi S. (2008) : Runoff analysis for a small watershed of Tono area Japan by back propagation artificial neural network with seasonal data, Water Resources Management Vol.22 (1), pp.1-22.
- 15) Affandi A. K., Watanabe K. and Tirtomihardjo H. (2008) : Application of an artificial network to estimate groundwater level fluctuation, Spatial Hydrology, Vol.7 (2), (06-0340).
- 16) Affandi A. K., Watanabe K. and Tirtomihardjo H. (2008) : Use of back-propagation artificial networks

for groundwater level fluctuation, Asian Journal of Water, Environment and Pollution, Vol.5, No.1, pp.57-65.

- 17) 若松尚則・渡辺邦夫・竹内真司・三枝博光(2008) : 線形回帰モデルと遺伝的アルゴリズムを用いた観測井戸の地下水位変動データ分類, 応用地質, Vol.49, No.3, pp.126-138.
- 18) A. K. Affendi, K. Watanabe (2008) : Analysis of groundwater level fluctuation in a plain area using genetic algorithms and an artificial neural network, Lowland Technology Int., Vol. 10, No.2, pp.76-85.
- 19) Mebruck M., Watanabe K., Takeuchi S. (2010) : Adaptive Neuro Fuzzy Inference System approach for prediction of hydraulic pressure change, Ann. Jour. Hydraulic Engineering (CD-ROM), JSCE, Vol.54.
- 20) 竹内真司・乳根達矢・Mebruck M.・渡辺邦夫 (2010) : 人工知能技術を用いた坑道掘削に伴う間隙水圧の変動予測解析, 水工学論文集(CD-ROM), 54巻.

2.2.7.2 地下水水質関係論文

- 21) Tsushima K., Ueda S., Ohno H., Ogura N., Katase K., Watanabe K., Nitrate (2006) : Decrease with Isotopic Fractionation in Riverside Sediment Column During Infiltration Experiment, Water, Air & Soil Pollution, Springer, Vol.174, No.1-4, pp.47-61.
- 22) Abdelgawad A. M., Watanabe K. and Takeuchi S. (2008) : Laboratory tests on the occurrence of fluoride rich groundwater of Tono area, Japan, Ann. Jour. Hydraulic Engineering, JSCE, CD-ROM.
- 23) Abdelrahman M. Abdelgawad, Kunio Watanabe, Shinji Takeuchi, Takashi Mizuno (2009) : The origin of fluoride-rich groundwater in Mizunami area, Japan -Mineralogy and geochemistry implications-, Engineering Geology, 108, pp.76-85.
- 24) Abdelrahman M. Abdelgawad, Kunio Watanabe, M. N. Mebruck, Shinji Takeuchi (2009) : Estimating groundwater residence time using multiple regression model based on fluoride dissolution an exploration of possibilities, Environmental Earth Sciences, (in press).

2.2.7.3 割れ目系岩盤中の地下水解析等に関する論文

- 25) Khang, N. D., Watanabe, K., Saegusa, H. (2004) : Fracture step structure: geometrical characterization and effects on fluid flow and breakthrough curve, Engineering Geology, Vol.75, pp.107-127.
- 26) Gamage K. M. K. D., Yamada H., Watanabe K., Hata Y. (2004) : Analysis of groundwater flow in a fractured rock mass in Pahala Mattala area, Sri Lanka using Don-Chan, a three dimensional channel network model, J., 地下水学会誌, Vol.46, pp.277-297.
- 27) Nohara T., Tanaka H., Watanabe K., Furukawa N., Takami A. (2006) : In situ hydraulic test in the active fault survey tunnel, Kamioka Mine, excavated through the active Mozumi-Sukenobu fault zone and their hydrogeological significance, Island Arc, Vol.15, pp.537-45.
- 28) 若松尚則・渡辺邦夫・高瀬博康・松井裕哉(2007) : 水理地質にかかわる地下環境影響評価へのEvidential Support Logicの適用, 応用地質, Vol.48, No.1, pp.2-14.
- 29) Yuji Ijiri, Hiromitsu Saegusa, Atsushi Sawada, Makoto Ono, Kunio Watanabe, Kenji Karasaki, Christine Daughy, Michito Shimo, Kenichi Fumimura (2009) : Evaluation of uncertainties originating from the different modeling approaches applied to analyze regional groundwater flow in the Tono area, Japan, Jour. Contaminant Hydrology, Vol.103, pp.168-181.

2.2.7.4 蒸発に伴う現象の解明

- 30) Ali A. Mohamed, Sasaki T., Watanabe K. (2000) : Solute transport through unsaturated soil due to Evaporation, Jour. Environmental Engineering, ASCE, 126, pp.842-848.
- 31) Aluwihare S., Mohamed, A. and Watanabe, K. (2001) : New Open Chamber for Measuring Evaporation, Ann. J. Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.45, pp.217-222.
- 32) Shriyangi Aluwihare and Kunio Watanabe (2003) : Measurement of evaporation on bare soil and estimating surface resistance, J. Environmental Engineering, ASCE., Vol.129, pp.1157-1168.
- 33) Watanabe K., Min M. M., Fujii Y. and Fodde E. (2008) : Evaporation measurement for the preservation of historical Buddhist Monastery Ajina Tepa, Tajikistan, Ann. Jour. Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.52.
- 34) Min Maung Maung, Kunio Watanabe, Tai Sasaki, Masahiko Osada (2008) : Combination of genetic algorithm and inverse solution technique for estimating hydraulic properties of unsaturated soft rock, 応用地質, Vol.49, No.2, pp.64-77.
- 35) Amarasinghe R., Watanabe K., Abouzeid G. (2010) : Inverse estimation of unsaturated properties from evaporation based on Campbell and van-Genuchten models, Ann. Jour. Hydraulic Engineering (CD-ROM), JSCE, Vol.54.

2.2.7.5 参考文献

- 36) Iwatsuki T., Yoshida H. (1999) : Groundwater chemistry and fracture mineralogy in the basement granitic rock in the Tono uranium mine area, Gifu Prefecture, Japan -Groundwater composition, Eh evolution analysis by fracture filling minerals-, Geochemical Journal, Vol.33, pp.19-32.
- 37) Iwatsuki T., Satake H., Metcalfe R., Yoshida H., Hama K. (2002) : Isotopic and morphological features of fracture calcite from granitic rocks of the Tono area, Japan, a promising paleohydrogeological tool, Applied Geochemistry, Vol.17, pp.1241-1257.
- 38) 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, Vol.20, pp.2283-2302.

(埼玉大学 渡辺邦夫)

2.3 深部岩盤における水理学的調査・試験法に関する研究

2.3.1 はじめに

平成11年度より平成21年度までの間、放射性廃棄物の地層処分において、処分の方法とその処分方法の妥当性の検証に関する水理学的調査と試験法を中心としての研究を行って来た。

実際に地層処分をする際に工学的に問題となる課題を列挙すると以下のような課題が考えられる。

- (i) 深部地盤内への掘削する技術
- (ii) 掘削の際の止水工法
- (iii) 浸出水の処理工法
- (iv) 地山安定工法
- (v) 処分坑道の掘削技術
- (vi) 処分技術
- (vii) 埋めもどし技術
- (viii) 掘削影響領域の処理技術
- (ix) 再冠水時のモニタリング技術
- (x) 安全評価技術

ここで、これらの課題は、あくまで処分適地として選定された所を対象としたもので、既知の断層や火山等の影響を受けない所を対象としている。一般に、掘削する地盤が十分に安定した地盤であるかの評価は、地表からの施工中の数段階の地盤調査によって推定されるが、ここでは、このような調査の中での水理に関する調査について検討する。

深部岩盤を対象とした水理試験法としては、単孔式透水試験法が主たる試験法として実施され、その試験孔間の浸透特性に対しても孔間トモグラフィ技術が一般に用いられるようになってきている。

また、掘削中の周囲の地盤内の間隙水圧の反応から地盤のモデルの妥当性の評価手法に関しても確立されようとしている。したがって、掘削の前に十分な水理試験を実施すれば、掘削による突発湧水も予測でき、それに対して、ある程度の止水対策も可能になって来ている。

しかし、放射性廃棄物を地層処分するにはまだまだ検討しなければならない課題は多くあるが、ここでは上記の課題の内の以下の3つの課題に対して取り組んだ。

- (a) 地層処分の埋めもどし技術に関する研究
- (b) 地盤内の間隙水圧の変動のモニタリング技術に関する研究
- (c) 掘削影響領域の処理技術

ここでは、それらの研究で得た結果について論述する。結果の詳細については各年の報告書を参考にしてほしい。

2.3.2 ベントナイト混合土の止水性の評価に関する研究（平成11年度）

2.3.2.1 概要

放射性廃棄物の地層処分において、ベントナイト材料は止水性材料として極めて重要な材料である。このベントナイト材料を用いて、掘削した空洞やキャニスター周囲の埋め戻し工法が将来実施されるが、その施工管理が問題となる。ベントナイトは天然材料であり人工的な材料ではな

いので、掘削するベントナイトの地層によってある程度の品質のばらつきがある。また、現場の施工においても、ある程度のばらつきが生じる。このように埋め戻しがされた場の品質を管理する手法として放射性同位体 (RI : Radioisotope) による現場密度、水分量の管理が今後一般的になされてくる。しかし、施工された場の透水性の評価となると、現行のE-19法 (ロックフィルダムのセンターコアの透水係数の評価試験法) しかない。ダムのコア材では 1.0×10^{-7} m/s 程度の透水性を原位置で計測しているが、それでも、計測に一日間の時間を要している。これに対して、ベントナイト混合土の埋めもどし材による締め固めた場の透水係数は 1.0×10^{-9} m/s以下程度であり、その品質の現場での管理にはもっと長時間を要することになる。したがって、現在では、締め固めた地盤からコアを採取してその透水係数を室内試験で実施する方法が実施されている。このような手法では供試体の乱れが影響する。

本研究ではこのような現状を鑑みて、短時間で原位置でのベントナイト混合土の透水性を評価する方法を開発した。

2.3.2.2 研究の独創性

本研究で開発した手法は、ベントナイト混合土で作成された地盤表面に直径30cm程度の浸透円筒を設置し、その円筒の中心に浸透の浸透前線の進行を計測するためにセンサーを深さ5cm程度まで挿入しておき、浸透前線がそこに到達した時間より、その層の透水係数をGreen-Amptモデルにより求める手法を開発した。ここで地盤への流入流量に対し、高感度の荷重計で計測した。浸透前線の到達に関しては、ベントナイトのような材料の水分量の変化を計測するために、複素誘電法 (FDR-V法) 等の誘電率計測装置により、浸潤による水質の変化による誘電率の変化を同時に計測した。

本研究で用いたセンサーは特殊なセンサーであるが、浸透前線がある深さまでいつ到達するだけを計測するのであれば、地中の電気抵抗を計測する簡易なセンサーであっても計測は可能である。

ここで開発した試験法によって、実際に模擬地盤に対しての原位置透水試験を実施した。その結果、 1.0×10^{-9} m/s程度の地盤に対しては、その試験時間に数日要することが判明した。これは、ベントナイト中に水が浸透することによってベントナイトが膨潤することから、浸潤にきわめて長い時間を要するためである。

このような状況の改良として、膨潤していない場の透水性の評価として、浸透水として4%の塩水 (海水と同程度の塩水) を用いて透水試験を実施した。その結果、浸潤は数時間で計測でき、試験も数時間で終了することが分かった。

2.3.2.3 今後の課題

従来、低透水性材料の透水係数を求める試験の試験時間の短縮化について議論されて来たが、まだその解決には至っていない。ここで示した新しい試験法でも、本来浸透する水に対しての試験では、5cmの深さまで浸潤するのに数日の時間を要してしまう。その短縮化としてベントナイトが膨潤しない塩水を用いて場の透水性を評価したが、その結果から、真水に対する透水係数を推定するためには、その値を推定するキャリブレーションカーブが必要となってくる。

また、原位置での計測では、もし、水を用いて透水試験を実施すると、ベントナイトの試験層は自由に膨潤し、その膨潤した状態での透水係数を求める事となる。しかし、現実には、埋めも

どしが終了した後、周囲からの水の浸透によって膨潤するため、膨潤は拘束された状態となり、ベントナイトの密度は変化しないで、ベントナイト内の間隙の空隙径の分布が変化するだけで、浸潤して来ても、もっと低い透水係数の遮水層が構成されると考えられる。設計には、大きい透水係数を用いる事は安全側の設計になるが、今後は、原位置試験でも地盤の膨潤を許さない状態での透水試験法の開発が必要となってくる。

2.3.3 光ファイバーセンサーによる間隙水圧計の開発（平成13年度～平成15年度）

2.3.3.1 概要

地層処分場の建設当初から最後の埋め戻し課程までの地盤内での間隙水圧の計測を長時間実施可能な計測機器の開発として、「光ファイバーセンサー（FBG）による間隙水圧計の開発」を実施した。特に、ボーリング孔内の複数の点での間隙水圧の計測を目的としてFBGセンサーを用いた間隙水圧計の開発を行なった。その間隙水圧計の改良タイプは、現在、岡山県下の高梁川の左岸の河川堤防内にも設置され、約3年間継続して河川の水位、河川堤防内の間隙水圧の計測を実施している。現在は、この間隙水圧計によって負圧の計測が可能であるかについての研究を行っている。また、FBGセンサーによる土中や岩盤の不飽和状態での飽和度のモニタリングセンサーの開発にも現在取り組んでいる。

2.3.3.2 研究の特徴

(1) 耐久性について

FBGセンサーの材料は、比較的新しい材料に分類される天然のシリカであり、その材料の安定性は海底通信ケーブル等の耐久性から、長期の計測の可能性を十分に持った材料と考えられる。

現在の電気式の間隙水圧計は現場に長期間設置していると、いくら防水処理を行っていても水圧計の受圧センサーやケーブルの腐食によって、一般的なダムの現場でも電気式センサーは5年程度の耐久性しか期待されていない。このような電気式センサーの現状に対してFBGセンサーを用いた間隙水圧計は、湿度の高い地盤内においても腐食の心配もない。また、シール部より水がセンサーセル内に漏水しても、電気系とは異なり圧力の計測にはそれほど大きな影響はない。このFBGセンサー型間隙水圧計の耐久性については、現在、岡山大学内で観測井を設けて、その耐久性について検討を行っている。

(2) 負の水圧の計測

電気式間隙水圧計では、水圧計の先端部を改良すると正の水圧と同時に負の間隙水圧の計測も可能となっている。しかし、FBGセンサーは伸びに対しての計測は可能であるが、収縮に関しての変位を計測する事は困難であった。本研究では、FBGセンサーのこのような弱点を克服する手法として、圧縮においてもセンサーが伸張する構造を用いて、正圧、負圧に対して間隙水圧の計測が可能な間隙水圧計を開発した。

2.3.3.3 今後の課題

FBGセンサーによる間隙水圧計は、まだ数年の計測実績しかない。したがって、今後、長期間

の計測を実施することによって、その耐久性を確認し、もし問題が生じた場合、そこで生じた問題に対して対応する必要がある。また、FBGセンサーの精度を一層高めるためにセンサーの構造の改良が必要である。

2.3.4 ベントナイト材料の亀裂性岩盤内への注入に関する研究（平成16年度～平成21年度）

(1) 概要

放射性廃棄物の地層処分において、岩盤内を掘削することによって坑道の周囲に、掘削する事による影響、あるいは掘削後の応力解放による影響が生じる。これらを「掘削影響領域」と称している。もし、この掘削影響領域の岩盤が地山より力学強度が弱くなったり、透水係数の値が大きくなったりすると、この領域は「掘削損傷領域（EDZ）」と呼ばれている。深部岩盤内の掘削では、掘削によって十分に初期の応力が開放されるため、応力解放によるEDZが発生する。また、掘削手法のうち発破工法では周囲の岩盤に過剰な影響を与えるため、トンネルボーリングマシン（Tunnel Boring Machine：TBM）工法のような無発破工法によりその損傷領域は広くなるとも考えられている。

このようなEDZがどの程度の範囲まで広がっているかについては、それぞれの場所で異なり、同じ場所でも、岩盤の亀裂の方向や初期の主応力の方向等の要因で、掘削する方向によってもEDZの範囲は当然異なってくると考えられる。したがって処分の為に横坑を掘削する場合には、あまり大きなEDZを生じさせない場所から、大きなEDZを生じさせない方向に掘削するように今後は事前に十分な検討を行う必要があり、またそのための調査手法の確立も今後の課題である。

一般的なトンネル掘削に対してはEDZの影響はそれほど重要な課題にならないが、地層処分においては、処分後の安全評価の際に、このEDZをどのように取り扱うかが大きく影響する。特にEDZの水理学的な要素（EDZの幅、EDZの透水性）をどのように評価モデルの中に取り込んで行くのかも今後の課題である。

一般の廃棄物と異なり地層処分では放射性廃棄物の減衰が安全評価上重要であり、この減衰を考慮するために場の非定常な物質移動を評価しなければならない。従って、EDZをできるだけ地山と同じ程度の透水係数の場に修復しておく必要がある。また、その修復のために用いた注入材料は数万年の間、その止水機能を保持する必要がある。

一般の土木構造物では、止水材料と言うと薬剤注入やセメント系の注入材を用いるが、セメント系の注入材であっても、数千年後には内部のCaが溶出し、その止水能力は激減すると考えられている。したがって、数万年間の止水性を保持する材料でEDZを修復する技術開発が必要である。

本研究では、このような状況を考え、天然材料であるベントナイトを亀裂性岩盤の中に注入し、透水性が大きくなった地盤の透水性を小さくする方法を研究した。しかし、ベントナイトを岩盤内に注入するにはスラリー状にする必要があるが、ベントナイトは水によってスラリー状になると膨潤・凝集して粘性が増すため、亀裂の中への注入は困難である。

したがって本研究では、ベントナイトを塩水でスラリー状にして、ベントナイトを膨潤させない状態で懸濁液を作成し、亀裂の中に注入後、真水によってベントナイト中の塩分濃度が低下するとベントナイトが膨潤することを確認する研究を行った。人工の平行平板への注入試験を実施して、塩水ベントナイトは容易に亀裂内に注入でき、その透水係数が時間と共に低くなることを

確認した。

しかし、我国で一般的に用いられているベントナイトでは、亀裂幅の狭い亀裂には注入が困難であった。その解決法としては、もっと粒子が小さいベントナイトの存在を調べた結果、米国のワイオミング産のベントナイトが粒径1~10 μm でこのスラリーは、数10 μm の亀裂にも注入が可能であることがわかった。

超微粒ベントナイトのスラリー液が狭い亀裂の中に注入可能である事がわかったが、注入後、ベントナイトが膨潤しても、ベントナイトはセメントミルクと異なって固化はしない。一方ベントナイトが膨潤すると注入された領域の岩盤の透水係数が小さくなるため注入した領域の地山側の間隙水圧が徐々に増加して、ベントナイトが空洞内に押し出されて流亡する可能性が考えられる。このような状況でベントナイトの亀裂への注入によって、どれくらいの圧力あるいは動水勾配に耐えられるかを室内試験で確認した。

また、このようなベントナイトの空洞への流亡を防止するために、ベントナイトを注入した領域の空洞側に速強の極超微粒粒子セメント等を注入してベントナイトの流亡を防止する工法についても確認した。

2.3.4.1 ベントナイトスラリーの平行平板への注入試験（平成16年度，17年度）

(1) 概要

亀裂性岩盤内に処分空洞を掘削したことによって生じたEDZへの注入とその透水性の変化を求めるために、平行平板モデルを用いて、その亀裂幅を200 μm ，100 μm ，80 μm と3種類に変えて普通のベントナイトのエタノール溶液スラリーと塩水スラリーを用いて注入実験を実施した。その結果注入が可能である事がわかった。

(2) 研究の特徴

本研究では亀裂内にベントナイトを膨潤させないで注入する試験を行った。その結果、200 μm ，100 μm には容易にベントナイトスラリーは注入できた。また、注入後に数時間、真水を注入する事により、その透水係数は初期が 1.0×10^{-3} m/sから、 1.0×10^{-5} m/sまで低下する事がわかった。

(3) 今後の課題

普通のベントナイトでは、粒径が大きいため80 μm の亀裂までは注入できなかった。今後の課題としては、もっと粒径の小さいベントナイトを用いて注入する必要があることがわかった。注入に関しては、ベントナイトのエタノール懸濁液も塩水による懸濁液も亀裂内に同様に注入され、ベントナイトの団粒現象も生じなかった。

2.3.4.2 超微粒ベントナイトグラウトに関する研究（平成18年度，19年度）

(1) 概要

普通のベントナイトでは80 μm 等の狭い亀裂には注入が不可能であることがわかったため、さらに微粒子のベントナイトを世界中で探索して、粒径が1~10 μm の米国ワイオミング産のベントナイトを見つけた。このベントナイトを4%の塩水でスラリー状にして、ベントナイトの膨潤を抑えて100 μm ，80 μm ，60 μm の平行平板の亀裂モデルに注入をした。

(2) 研究の特徴

本研究では超微粒ベントナイトの4%塩水スラリーを用いて3種類（100 μm 、80 μm 、60 μm ）の亀裂モデル内に注入試験を実施した。その結果、ほぼすべての亀裂にベントナイトスラリーは注入可能となり、透水係数も当初の 2.0×10^{-9} m/sから約20時間程度の真水の浸透によってその透水係数は 2.0×10^{-11} m/sまで低下する事がわかった。

本研究では注入時に7Hz程度の周期で動的に注入する手法を用いた。その結果、注入したベントナイトから簡単に塩水がブリージングし、注入したベントナイトは動的注入によって、より密な注入層になることから、その透水係数がきわめて低い値になることがわかった。

(3) 今後の課題

ベントナイトを狭い亀裂内に注入する事が可能になったが、注入した領域の透水係数が低下して空洞と反対側の地山内の間隙水圧が大きくなり、注入したベントナイト層にきわめて高い浸透水圧が作用し、固結しないベントナイトが分散、浸透水圧によって押し出されてしまう可能性がある。そのような可能性を今後は探求する必要がある。

2.3.4.3 超微粒ベントナイトグラウトの流亡特性に関する研究（平成20年度）

(1) 概要

ベントナイトの4%塩水スラリーを亀裂内に注入し、真水の浸透によって、その透水係数が徐々に低下することが判明したが、注入したベントナイトの浸透水圧による流亡限界についての検討を行う必要がある。本研究ではベントナイトの注入層に対して、上流側の水位を徐々に増加させ、その限界動水勾配を探求した。

すなわち、長さが25cmの平行平板亀裂モデルと長さ5cmの円筒に川砂（100 μm ～2600 μm の粒径）を詰めた試験供試体に4%塩水スラリーのベントナイトを注入し膨潤させ、そのモデルの注入側の水位を徐々に増加させてモデル内の透水係数の経時的な変化を計測する実験を実施した。

(2) 研究の特徴

① 亀裂モデル

平行平板モデルでは、平板の注入面がスムーズであるため動水勾配が2以上になると亀裂内のベントナイトは流亡した。この限界動水勾配の値では、ベントナイトをスラリー状態で亀裂内に注入すると極めて低い動水勾配でベントナイトが流亡してしまう事がわかる。

この原因は、平行平板の材料がアクリル板であり、その表面がなめらかであるため、注入されたベントナイトは底を滑るようにして、下流側に向かって注入水圧によって押し出されてしまったためである。

② 砂層カラムモデル

川砂（粒径：100 μm ～2600 μm ）を間隙率0.33で詰めた試験供試体内の間隙径の分布を求め、間隙内にレジンを注入し、供試体のスライスモデルを作成して計測すると、代表的な間隙径が60 μm 程度であることがわかり、ベントナイト注入にて膨潤した透水係数が 1.0×10^{-9} m/sになった後、上流側の水位を徐々に上昇させ、その透水係数の上昇を計測したが、動水勾配を30近くにしても、その透水係数の値には変化はなかった。このような結果から、亀裂の表面に粗度や様々な亀裂幅がある場合には、ある程度の動水勾配に対してもベントナ

イトは流亡しないことがわかった。

(3) 今後の課題

ベントナイトを多孔質の砂層カラムモデルの中に注入した結果、その透水係数が 1.0×10^{-9} m/s程度の地盤に改良されることがわかった。そして、その地盤に30程度の動水勾配を加えても、ベントナイトは流亡しない事がわかった。

この結果を拡大解釈すると、仮にベントナイトの注入区間が10mであれば、深度300mの水圧が注入区間の外に作用してもベントナイトは流亡しない事になる。しかし、この限界の動水勾配の値は、あくまで砂層カラムモデルから得られた値であって実際の現地ではEDZの亀裂は種々の幅を持っているため、ベントナイトのグラウトが水によって流亡しない確実な手法を探求する必要がある。

2.3.4.4 超微粒ベントナイトグラウトの注入後の流亡防止工法に関する研究（平成21年度）

(1) 概要

EDZの亀裂内に注入したベントナイトグラウト材の地下水の浸透による流亡を防止するために、掘削を行った後の吹き付けセメントの地山側に3種類のセメントミルクを注入する方法を考えた。その注入の可能性を検討するために超微粒ベントナイトの注入を行なった砂質カラムモデルへの3種類のセメントミルクの注入を行なった。その結果、粒子の粒径が大きいコロイドセメントミルクの注入は不可能であった。また、セメントの粒子の粒径が小さい極超微粒子セメントミルクも、セメントが固化する前に重力によって流出してしまう事がわかった。セメント粒子の粒径（D50）が $50\mu\text{m}$ の超微粒子セメントだけが、今回の砂質カラムモデル内に注入可能で、その透水係数も注入前が 1.0×10^{-4} m/s程度の透水係数であったものを 1.0×10^{-7} m/sまで低減できることがわかった。しかし、超微粒子セメントの水セメント比が200%の淡い注入セメントミルクでは、透水係数は注入されてもほとんど改善されなかった。

これらの結果より、超微粒ベントナイト（粒子径 $1 \sim 2\mu\text{m}$ ）が注入できるような地盤（実際はEDZの亀裂であるが）に対してもベントナイトの流亡防止のために注入できるセメント系材料がある事がわかり、注入することによって透水係数が改善され、セメントによる一軸圧縮強度も十分に発生することがわかった。

この結果より、ベントナイトの塩水スラリーをEDZに注入する前に、EDZ内の透水性、亀裂密度、亀裂幅等を事前に調査しておき、その場に適した材料を選定することによってEDZの修復が可能となると結論づけた。

(2) 研究の特徴

ベントナイトの塩水スラリーを注入した同様の砂質カラムモデルにセメントミルクを注入した。このような砂質地盤（砂質カラムモデル）へのセメントミルクの注入は一般には不可能と考えられていた。しかし、十分に粒径の小さいセメント粒子を団粒化させないように良質の分散材を用いてスラリー化すると、乾燥状態のセメント粒子の粒径に近いセメントミルクの作成が可能となり、そのようなセメントミルクは容易に砂質カラムモデル内に低圧で湿潤状態で注入が可能であることがわかった。

(3) 今後の課題

このようにEDZにセメント系材料を注入することによって、ベントナイト注入材の注入後の流出を防止する工法を提案したが、以下のような今後の課題が考えられる。

- ① セメントミルクやベントナイトスラリーの注入範囲の特定が現状では困難である。
- ② セメントは高アルカリ性であるため、ベントナイトへの影響が未知である。
- ③ 100年後にセメント注入層からCaが溶脱した時のセメント注入層の透水性の変化による全体の安全評価への影響が未知であり、セメント注入層の透水係数が大きくなっても全体の安全評価が変わらない対策が必要である。EDZを連続させない恒久的な止水プラグが必要となる。

2.3.5 おわりに

約10年間「深部岩盤における水理学的調査・試験法に関する研究」を行って来た。その中で、実際の地層処分において遭遇する課題の中で、まだだれも解決していない地層処分の地下水の浸透に関するハード上の問題について研究を行って来た。前述の「はじめに」の所で課題について列挙したが、それぞれは奥深い課題であり、これらの課題に対して真摯に取り組まないと解決できない課題である。

最後に余談ではあるが、エネルギー問題は全世界の大きな課題である。先進国がクリーンなエネルギーとして原子力発電を推進しているが、その先進国ですら、その発電から出て来る放射性廃棄物の地層処分を実施していないのが現状である。先進国が原子力発電所の建設ビジネスを行っているが、その際には当然、廃棄物の処分方法もペアーで行うべきである。それはこれからの地球にとって大切な課題であって急務な課題である。先進国の一員としてこの課題は一日も早く解決してその模範を示すべきと考える。

2.3.6 付録

2.3.6.1 年度別研究課題

(平成11年度)

水理試験法および水理試験装置の開発研究 — 工業材料の現場透水試験法の開発 —

- 試料の物理特性 (ベントナイト混合土)
- 複素誘電法 (FDR-V 法) における水分量の測定
- 施工直後の現場水分量の測定精度の検討
- 原位置透水試験装置の試作
- 原位置透水試験装置の妥当性の検討

(平成13年度)

水理試験法および水理試験装置の開発研究

- 光ファイバーセンサー (FBG) による地盤の諸量の計測
- FBG センサーによる間隙水圧の計測の原理
- FBG センサーの歪み計測例
- FBG 式間隙水圧の設定

(平成 14 年度)

水理試験法および水理試験装置の開発研究

- 電気式間隙水圧計の問題点
- FBG センサーによる長期地下水圧計測システムの開発
- FBG センサーの周辺機器

(平成 15 年度)

水理試験法および水理試験装置の開発研究

- FBG センシングによる間隙水圧計測装置の概要
- 観測状況とメンテナンス履歴
- 観察結果と今後の課題

(平成 16 年度)

水理試験法および水理試験装置の開発研究

- 従来の研究 (ベントナイトグラウトに関する従来の研究)
- グラウト材の基礎物性
- ベントナイトスラリーに対する透水試験
- ベントナイトスラリーを用いた平行平板定圧注入試験
- 施工方法における検討
- 砂層内への塩水ベントナイトの注入試験

(平成 17 年度)

水理試験法および水理試験装置の開発研究

- 従来の研究 (ベントナイトの物理特性, ベントナイトスラリーの浸透特性・膨潤量に関する研究)
- 塩水ベントナイトスラリーの通水試験

(平成 18 年度)

超微粒ベントナイトグラウトに関する研究

- 超微粒ベントナイトグラウトの細粒化に関するフィージビリティスタディ (FS)
- ベントナイトグラウトのグラウト材としての適用に関する FS

(平成 19 年度)

超微粒ベントナイトグラウトに関する研究

- 全体研究計画
- ベントナイトの亀裂モデルへの注入試験

(平成 20 年度)

超微粒ベントナイトグラウトに関する研究

- ベントナイト注入層の水圧による耐久性に関する研究

(平成 21 年度)

超微粒ベントナイトグラウトに関する研究

- ベントナイト注入層の流亡防止のための極超微粒子セメントの亀裂のプラグに関する研究

2.3.6.2 発表論文（平成11年度～平成21年度）

- 1) Larry Pax CHEGBELEH, Makoto NISHIGAKI, John Apambilla AKUDAGO, Tatsuo Katayama (2009) : Experimental Study on Ethanol/Bentonite Slurry Injection into Synthetic Rock Fractures: Application to Seepage Control, Applied Clay Science (Accepted).
- 2) 延藤 遵・西垣 誠・見掛信一郎・小林伸司・佐藤稔紀(2008) : 注入圧力によるグラウトの目詰まり減少抑制効果, 土木学会論文集C, Vol.64, No.4, pp.813-832.
- 3) 西垣 誠・小松 満(2007) : ベントナイト混合土ライナーの原位置透水試験法に関する研究, 土木学会論文集C, Vol.63, No.1, pp.299-311.
- 4) M. Nishigaki, S. Takeuchi, Y. Kashiwai, Y. Yoshida (2005) : Feasibility study for a multi-level pore water pressure monitoring system using FBG sensor, Proceedings of the Symposium, WFOPC2005, Italy, pp.393-398.
- 5) 西垣 誠・小松 満・見掛信一郎・中島朋宏・金谷賢生・龍田圭亮(2005) : 坑道の掘削影響に対する修復技術としてのベントナイトグラウトの適用性に関する評価, 土木学会論文集, No.806/III-73, pp.56-66.
- 6) 西垣 誠・小松 満・見掛信一郎・田岡 洋・中島朋宏(2004) : エタノールを用いたベントナイトスラリーの亀裂性岩盤へのグラウト効果, 土木学会論文集 No.764/III-67, pp.221-233.
- 7) 西垣 誠・見掛信一郎・小松 満・Kwabena KANKAM-YEBOAH (2003) : 亀裂性岩盤におけるグラウトの注入範囲と有効間隙率の評価, 土木学会論文集 No.743/III-64, pp.199-212.
- 8) 西垣 誠・小松 満・山本浩志・見掛信一郎(2002) : 亀裂性岩盤におけるグラウトの浸透特性と目詰まり特性に関する研究, 土木学会論文集No.715/III-60, pp.311-321.
- 9) 西垣 誠・見掛信一郎(2002) : 複数亀裂モデルにおけるグラウトの流動特性のメカニズムに関する研究, 土木学会論文集No.715/III-60, pp.323-332.
- 10) Nakaya, S., T. Yohmei, A. Koike, T. Hirayama, T. Yoden, M. Nishigaki (2002) ; Determination of anisotropy of spatial correlation structure in a three-dimensional permeability field accompanied by shallow faults, Water Resources Research, Vol.38, No.8.
- 11) 西垣 誠・内田義久・蓮本清二・平 治・大橋 昭・高田 徹(2001) : ダム基礎グラウチングにおける動的注入工法の開発, 大ダム No.177, (社)日本大ダム会議, pp.108-115.
- 12) Nishigaki, M., Y. Uchida, O. Taira, A. Ohashi, T. Takata (2001) : Dynamic injection method for dam foundation grouting, ICOLD-69th annual meeting Dresden, DTK Workshop 2001-Vol.1, pp.217-229.
- 13) 西垣 誠・平 治・大橋 昭・寺戸康隆・高田 徹(1999) : 動的グラウチング工法の開発, ダム工学Vol.9, No.3, pp.164-174.

(岡山大学 西垣 誠)

2.3.7 岩盤への超微粒ベントナイトグラウチングに関する研究

2.3.7.1 はじめに

放射性廃棄物を地層処分する際に図2.3.1に示すように、掘削周囲に応力解放等により掘削損傷領域（EDZ）が発生すると考えられている。このEDZでは、その透水係数が元の地山の値より大きくなる事が多い。したがって、キャニスター近くで汚染した水やガスが、このEDZを通過して速い速度で移動するため、地層処分においては、このようなEDZの修復が必要である。

一般に地層処分の事業は、安全評価が数万年まで保障される必要があるため、損傷を受けて、その透水性が大きくなった領域にグラウチングするにしても、その材料はセメントでは無理であることから、天然材料であるベントナイトが考えられている。

一連の本研究では、ベントナイトを塩水でスラリー化して、EDZ内に注入する手法についてその有用性を示している。また、それによってEDZの透水性は 1.0×10^{-11} m/sまで改善できる事も確認している。

しかし、処分空洞が閉塞されていない場合、ベントナイトはセメントのように硬化しないために、注入領域の透水係数が低くなると注入領域の山側の間隙水圧が上昇し、その浸透圧によってベントナイトが注入された亀裂より押し出されてしまう現象が考えられる。特に放射性廃棄物の地層処分ではGL-300m以深に処分するために、処分坑道の周囲には30気圧程度の間隙水圧が作用していると考えて良い。

このような状況で、坑道を閉塞しない間、確実に注入したベントナイトの流亡を防止するためには、図2.3.2に示すように注入孔の孔口付近に速強性のセメントを注入する方法が考えられる。

本研究では上記の観点より、砂質材料に種々のセメント材料を注入した。ここで砂質材料のカラムを用いたのは平成20年度の研究と同じ材料への注入を考えたからである。亀裂への注入の平行平板モデルであれば、亀裂幅と注入材料であるセメントの粒度特性がわかると、その材料が注入可能であるかどうかは、現象では簡単に判断できるので、もう少し複雑な間隙径の分布をしている砂質カラムへのセメント系材料の注入の可能性を探求した。

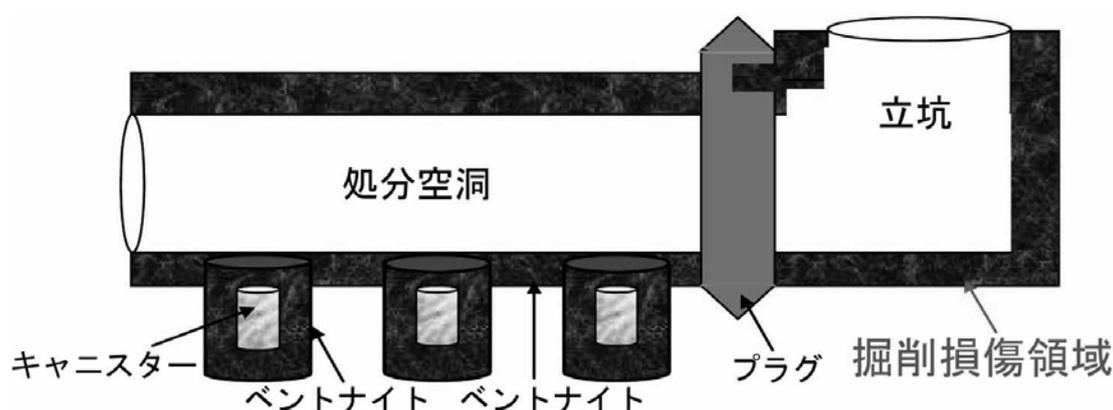


図2.3.1 掘削空洞周囲の掘削損傷領域

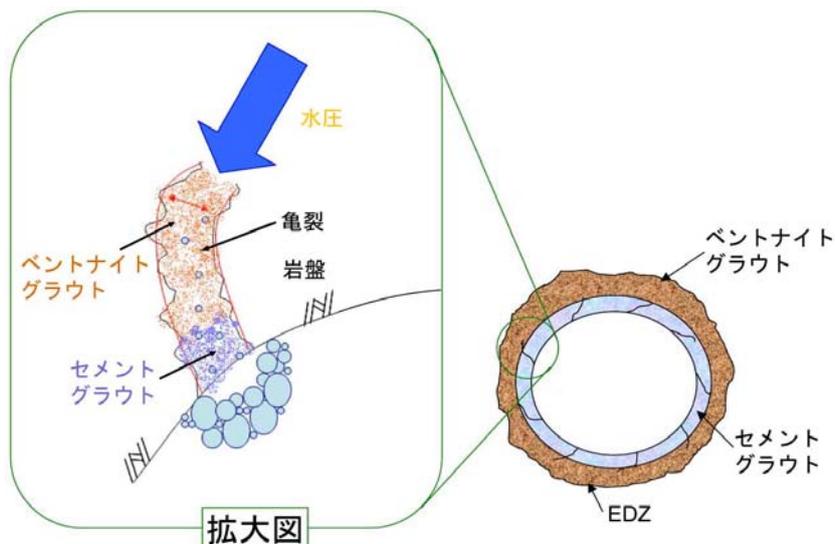


図2.3.2 EDZの亀裂内へのベントナイト注入とセメント注入

2.3.7.2 注入セメントと模擬地盤の特性

(1) 注入セメントの特性

本研究で用いた極超微粒子セメント (USFC) は、最大粒径 (85% 粒径) が $2.4\mu\text{m}$ 、50% 粒径が $1.7\mu\text{m}$ 、超微粒子セメント (SFC) は最大粒径 (85% 粒径) が $7.0\mu\text{m}$ 、50% 粒径が $4.2\mu\text{m}$ であり、従来の普通ポルトランドセメントに比べ粒径が約10~100分の1以下である (表2.3.1)。そのため、どちらも従来の注入材 (普通ポルトランドセメント) よりもより地盤に浸透することができ、懸濁型グラウトの課題である浸透中における目詰まりについて克服できると予想される。またコロイドセメントも従来のセメントと比べるとUSFC、SFCほどではないが粒径は細かく、地盤への浸透可能性があるため、ここで検討した。USFC、SFCおよびコロイドセメントの粒度分布を普通ポルトランドセメントと合わせて図2.3.3に示す。また、USFC、SFC、コロイドセメントの密度および化学成分を表2.3.2、SEM像を図2.3.4に示す。表2.3.3には、混和剤として使用した分散剤および消泡剤の成分を示す。混和剤は、セメント粒子が凝集・凝結するのを抑えるために混入するもので、分散剤については、超微粒系注入材用に開発されたメタクリル酸系分散剤を使用した。

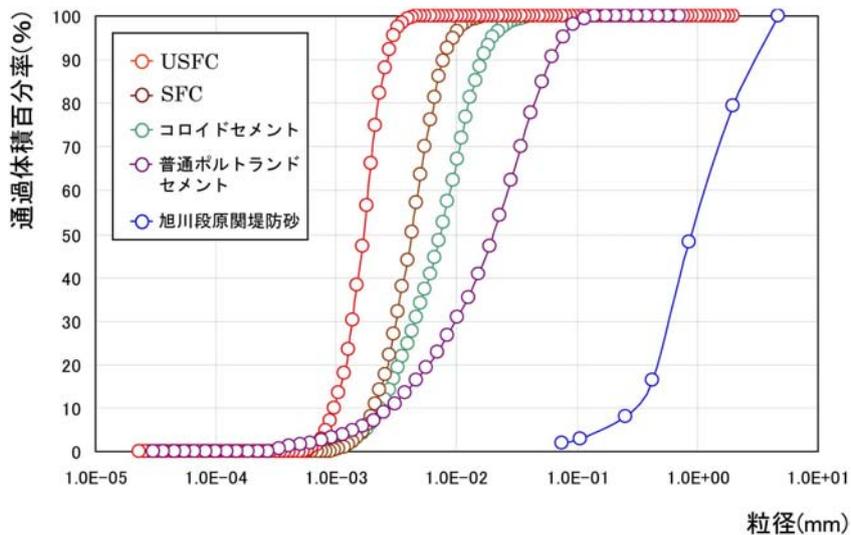


図2.3.3 各種セメントと川砂の粒径加積曲線

表2.3.1 各種セメントの50%, 85%, 95%粒径

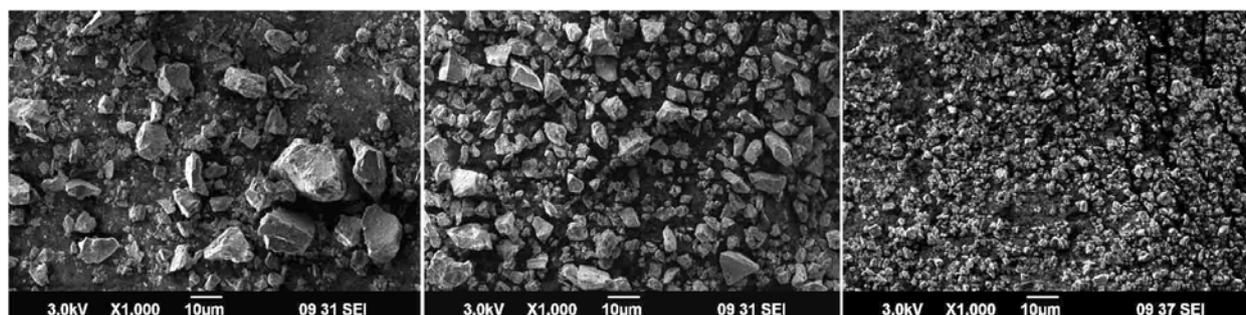
セメントの種類	50%粒径(μm)	85%粒径(μm)	95%粒径(μm)
コロイドセメント	7.345	14.22	20.09
超微粒子セメント	4.209	6.991	9.281
極超微粒子セメント	1.679	2.402	2.965

表2.3.2 各種セメントの密度および化学成分

	コロイドセメント	超微粒子セメント	極超微粒子セメント
密度(g/cm ³)	3.03	3	2.94
SiO ₂	26.6	29.8	32.1
Al ₂ O ₃	10.4	11.7	15.0
CaO	52.4	49.7	44.9
SO ₃	1.84	0.91	1.01
Fe ₂ O ₃	1.58	1.86	0.91
MgO	3.66	4.46	5.55

表2.3.3 分散剤と消泡剤の成分

	分散剤	消泡剤
成分, 含有量	メタクリル酸系ポリマー(20~30wt%) 水(70~80wt%)	非イオン界面活性剤
色	淡褐色透明	淡黄色透明
pH	4(5%水溶液)	6.0~8.0



コロイドセメント

SFC

USFC

図2.3.4 各種セメントのSEM画像

(2) 模擬地盤の基礎物性

模擬地盤には、岡山県の旭川段原関堤防砂(4.75mmふるい通過分; 以下旭川砂)を使用した。今回使用した旭川砂の粒度分布を図2.3.3に示す。この間隙率0.36の透水係数は 1.2×10^{-4} m/sであった。

2.3.7.3 一次元注入予備試験

(1) 予備試験

本研究では3種類のセメント材料を用いて、図2.3.5に示すように一次元の水平および鉛直で砂質地盤の中に注入を行なった。しかし、3種類のセメント材料の内コロイドセメントは、この砂質地盤への注入が不可能であった。また、USFC懸濁液は、セメント粒径が小さいため、セメントが固化するまでに注入地盤から水と一緒に下流にセメントまで流出してしまった。すなわち、USFCはもっと細粒度分を持ったような材料すなわち、もっと狭い亀裂幅の岩盤への注入に適しているものと考えられる。

したがって、今回の地盤への今後の注入材料はSFCを主体として用いた。

(2) 注入材の懸濁試験と砂地盤の特性

多孔質な媒体中での液体の浸透性は、一般に液体の粘度に支配される。懸濁型グラウトは、液体中に粉末状の固体粒子が混合されているため、その懸濁状態によって注入状況が異なってくる。特に、固体粒子が沈殿を起こしやすい状況では、間隙中で固体粒子が目詰まりを起こし、後から注入されてくるグラウトの浸透を阻害するようになる。したがって、懸濁型グラウトは、粘性を低い状態に保ちながら、固体粒子が十分に分散しているような懸濁状態を維持することが必要とされる。

そこで、今回使用するSFC懸濁液の懸濁試験を行った。図2.3.5に懸濁試験結果を示す。SFC懸濁液に分散剤を混合したものは、5時間経過しても分離がほとんど発生しておらず、水セメント比100%および200%のどちらにおいてもセメント凝固割合は10%程度である。この結果より、本研究で使用する分散剤は、SFC懸濁液の懸濁状態を維持する効果が非常にあり、浸透性に関しても優れていることがわかる。表2.3.4にSFCおよび砂地盤の物性を示す。

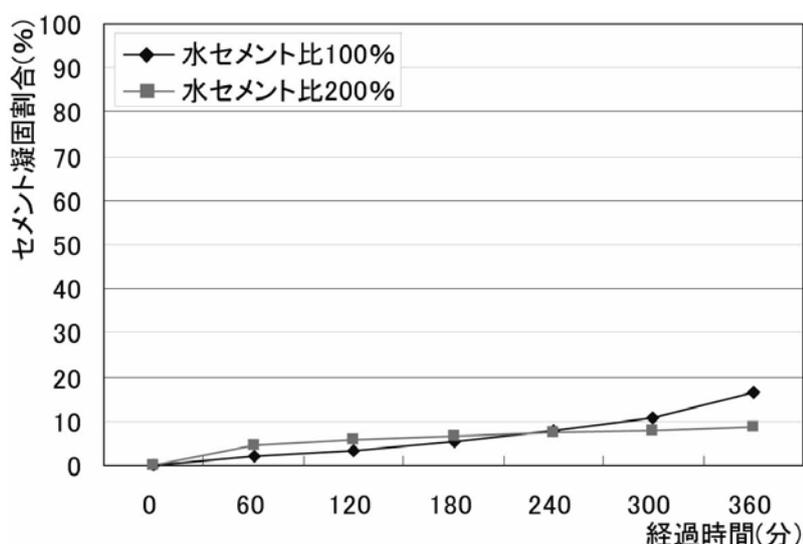


図2.3.5 セメント凝固割合の経時変化

表2.3.4 SFCおよび砂地盤の物性

グラウト(SFC)				
水セメント比	分散材		消泡材	
100%, 200%	SFC × 0.6%		SFC × 1.05%	
旭川砂				
粒径 d(mm)	土粒子密度 ρ (g/cm ³)	飽和度 Sr(%)	間隙率 n	透水係数(cm/s)
d ≤ 4.75	2.64	30	0.36	1.23 × 10 ⁻²

2.3.7.4 一次元定流量注入試験装置および試験方法

(1) 注入試験装置

図2.3.6に一次元定流量注入試験装置図を示す。

本試験では、内径 $\phi=5\text{cm}$ 、長さ $L=50\text{cm}$ のモールドを使用し、間隙率 $n=0.36$ となるように調整して模擬地盤を作製した。注入は、定流量フローポンプを用いた。さらに、注入孔付近に圧力計を設置し、注入圧力の計測を行った。排出側には、電子天秤の上に排水タンクを置き、排水流量の計測を行った。

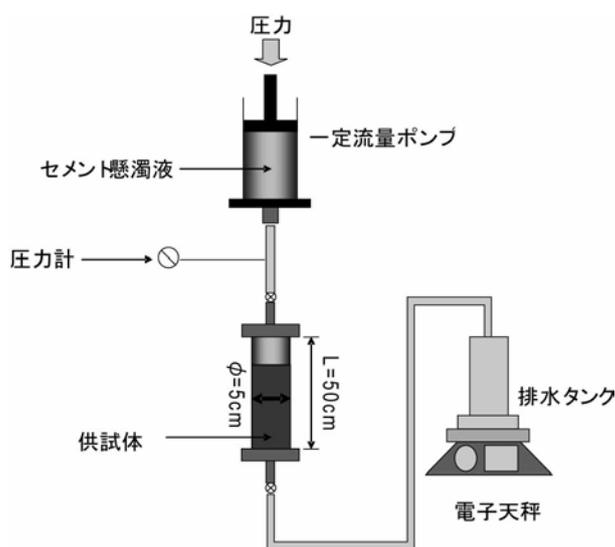


図2.3.6 一次元定流量注入試験概要図

(2) 注入試験方法

以下に、試験手順を説明する。

- ① 川砂を間隙率 $n=0.36$ となるように、5cmずつ10層に分けてモールドに詰める。
- ② SFCセメント懸濁液を作製し（水に分散剤と消泡剤を加え攪拌1分、その後SFCを加えて攪拌5分）、注入タンクに充填する。
- ③ 注入速度 q を所定の値（ $0.61\text{cm}^3/\text{s}$ ）に設定し注入を開始する。
- ④ 経過時間とともにSFC懸濁液の浸潤前線および注入圧力を計測する。また、排出口より排水を確認した後、経過時間とともに排水の重量およびpHも計測する。
- ⑥ SFC懸濁液がモールド内を浸透し終え、設定した注入時間を経過後に注入を終了する。
- ⑦ 注入後、モールドの両端を密閉し養生する。
- ⑧ 注入を行った供試体について、所定の期間養生後に10cmずつカットし、一軸圧縮試験および透水試験を行う。

次に、試験条件について記述する。SFC懸濁液の水セメント比は100%および200%とした。また、分散剤は重量比でSFCの0.6%、消泡剤は1.05%とした。注入速度 $q=0.61 \text{ cm}^3/\text{s}$ で行った。

2.3.7.5 一次元定流量注入試験結果および考察

(1) 注入圧力

図2.3.7に、各水セメント比における注入圧力の経時変化を示す。各水セメント比とも、注入時間の経過にともなって注入圧力は増加していることがわかる。

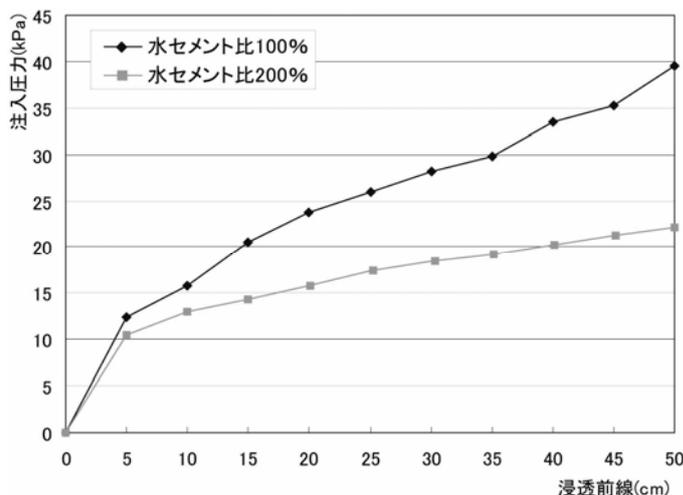


図2.3.7 浸透距離と注入圧力の関係

(2) 一軸圧縮試験結果

JSFT511にしたがって図2.3.8の装置を用いて一軸圧縮試験を実施し、養生期間3日と7日、28日の一軸圧縮応力の比較を行った。すなわち供試体を10cmの長さにて5等分して注入口からそれぞれの一軸圧縮応力を求めた。一軸圧縮試験から得られた結果を図2.3.9、図2.3.10に示す。これらより養生期間が長くなるにつれて、一軸圧縮応力も増加していることが分かる。また、注入口の近くの一軸圧縮応力が大きい事がわかる。また、水セメント比の違いによる一軸圧縮応力に大きな違いが見られる。水セメント比100%では28日養生後の一軸圧縮応力を平均した場合約1400kPa程度生じているが、水セメント比200%では平均約300kPaとかなり小さくなっている。このことから水セメント比の選定が強度に大きな影響を与えることがわかる。

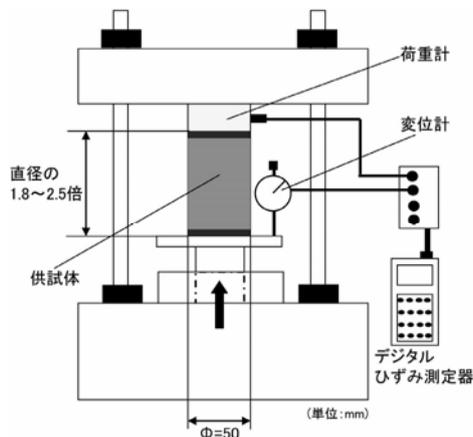


図2.3.8 一軸圧縮応力測定装置

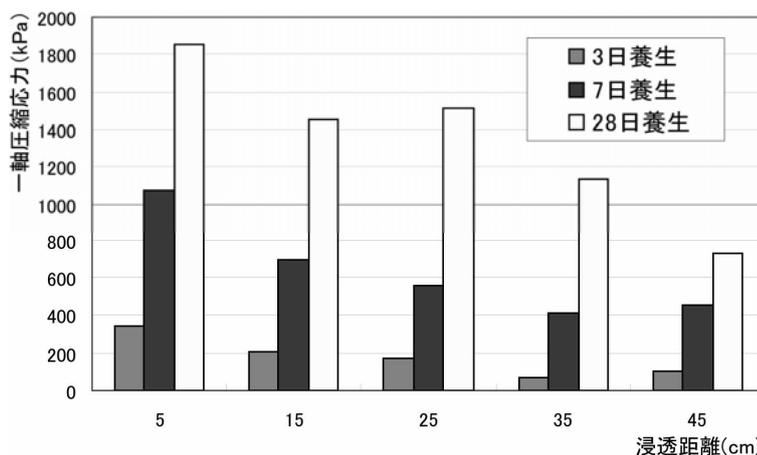


図2.3.9 一軸圧縮応力と浸透距離の関係（水セメント比100%）

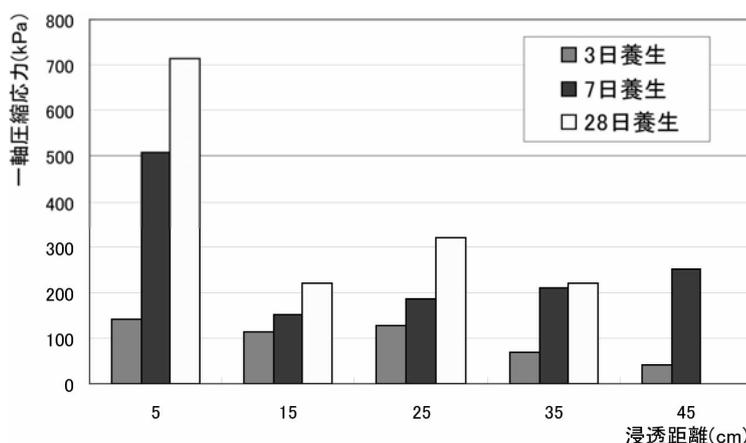


図2.3.10 一軸圧縮応力と浸透距離の関係（水セメント比200%）

(3) 周面拘束変水位透水試験結果

改良前後の透水係数を測定して改良効果を確認するために変水位透水試験を実施した。養生期間3日、7日、28日の透水係数の変化を把握した。なお、グラウト材注入による固結土という特殊性から、通常とは異なる図2.3.11に示す周面拘束変水位透水試験を行った。この試験が通常の試験と最も大きく異なる点は、透水円筒の代わりにゴムスリーブを用い、加圧水によりゴムスリーブを供試体に密着させる点である。

グラウト注入による固結度は、間隙がゲル状物質で充填されているために気泡が密閉されている。よって、脱気に時間がかかり、100%近くの飽和度にするのは困難であることが分かっている。そこで本試験では24時間の真空吸引を行い、ある程度脱気した。

その後、側圧を加えて供試体とゴムスリーブを密着させた。本試験では、側圧は50kPa程度とした。そして、JSFT311にしたがって変水位透水試験を行った。

変水位透水試験から得られた結果を図2.3.12、図2.3.13に示す。図2.3.12より養生日数の増加に伴って透水係数が低下していることがわかる。図2.3.13では養生日数に関わらず一定の値を示していることがわかる。このことから水セメント比を200%で注入した場合には、空隙を残したまま固化しており、そのため透水係数が変化しなかったことが考えられる。ここでは、水セメント比が200%とグラウトが薄いため、地盤へのグラウト効果が出ていないことがわかる。水セメント比が100%でも、最終的には 1.0×10^{-7} m/sまでしか地盤の透水係数を改良することが出来なかった。

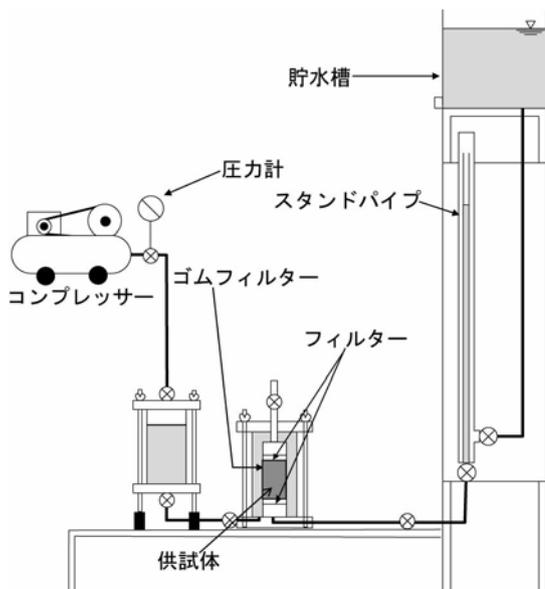


図2. 3. 11 周面拘束変水位透水試験装置

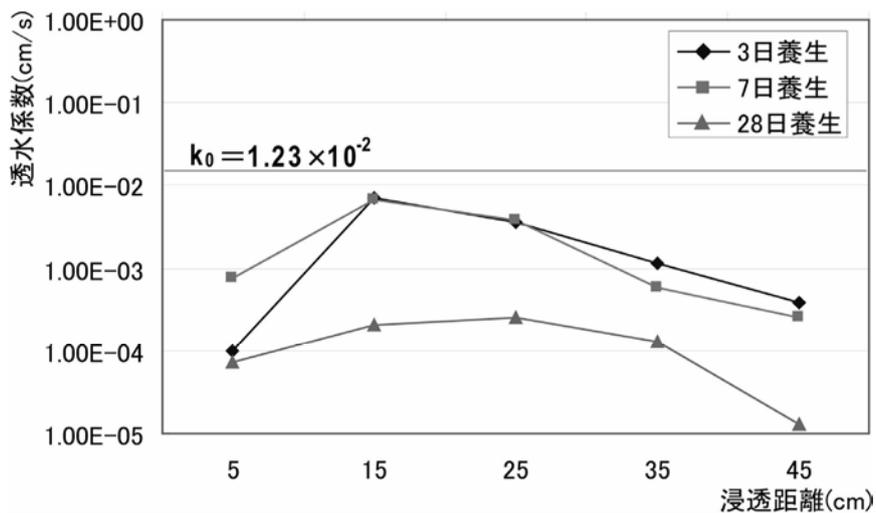


図2. 3. 12 透水係数と浸透距離の関係 (水セメント比100%)

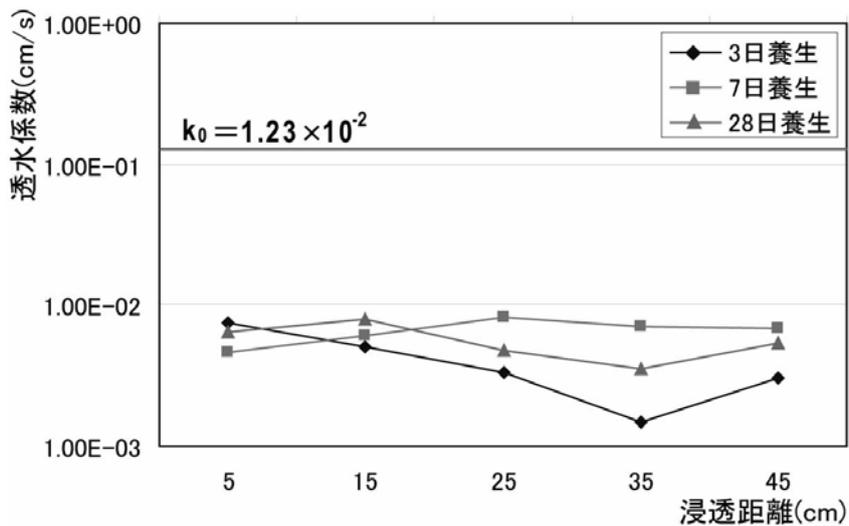


図2. 3. 13 透水係数と浸透距離の関係 (水セメント比200%)

2.3.7.6 結論

本研究ではEDZにベントナイトを注入する際に注入後のベントナイトが浸透水によって流亡しないために、EDZにセメントを注入する方法を検討した。

実際のフィールドでは、地盤を掘削する際に、掘削孔内の作業性を良くするために表面にセメントモルタルの吹き付けを行うが、その吹き付けの後、吹き付けセメントモルタルをバルクヘッドとして低い注入圧で地盤内に1m程度の厚さで、ここで用いたようなUSFCやSFCを注入する方法が考えられる。

現状ではSFCによるグラウチングは一般的になっているが、ベントナイトの流亡を防ぐため、ベントナイトの注入時の注入圧を高くするためのSFCやUSFCの注入と言う所までの検討をされた例はない。

ここで、本研究で得た結論を以下に示す。

- ① USFC, SFC, コロイドセメントの3種類を、川砂（粒径：0.1～2.6mm, 間隙率：0.36）への注入試験に用いた結果、コロイドセメントの注入は困難であった。
- ② USFC, SFCは、本報告で対象とした砂層カラムに注入が可能であった。しかし、USFCはその粒径が小さすぎるため、注入後に水流によって下流に流亡した。これらの結果より、EDZの亀裂の密度、亀裂の幅等の調査データから、それぞれのEDZでどのようなセメント系材料を注入するのかを事前に検討する必要があることがわかる。
- ③ SFC（水セメント比が100%と200%）を注入したが、水セメント比が200%の材料は、注入は可能であったが、ほとんど透水係数の改善に寄与しないことがわかった。このような透水係数の改善効果に関しては、一般的には注入濃度を逐次変化させて注入しているので、本実験のような結果は回避できると考えられる。
- ④ 今回のSFC注入では、それほど高い圧力で注入を行わなくても50cm程度までは簡単に注入可能であることがわかったため、EDZの空洞側（坑道側）にSFCを低圧で注入する工法も十分可能であることがわかった。

今後の課題として以下のことが考えられる。

- ① セメントの高アルカリ性がベントナイトへ与える影響度の評価
- ② セメントやベントナイトの注入範囲の特定手法
- ③ 数100年後にセメント注入層からCaが溶脱した時のセメント注入層の透水性の変化による影響

（岡山大学 西垣 誠）

2.4 深層水理の調査方法およびモデル化に関する研究

2.4.1 はじめに

本章では、「第2次取りまとめ」までの研究成果を踏まえ、平成11年度から平成20年度までの研究を総括する。

本研究は放射性廃棄物地下処分（特に余裕深度処分，地層処分などの大深度処分）における長期安全性の予測・評価技術の開発を目的としたものである。放射性廃棄物処分に特徴的なことは

- ・対象となる時間，空間スケールが大きいこと
- ・様々な地球科学的不確実性（地質，水文，変動）を取り扱わねばならぬこと
- ・人工系（人工バリア）と自然系（天然バリア）の現象の双方を扱わねばならぬこと
- ・不均質であいまいな場における処分地周辺地下水の流れと核種移行過程の追跡が必要なこと
- ・地表生物圏への影響評価の客観性，説得力のある評価モデルが必要なこと

などが挙げられよう。このような観点から，大きくは以下のように分類される研究を行った。

①基本水循環系の再現・予測技術の研究開発

- ・水循環モデル主要プロセスのモデル化（河川・地下水・蒸発散）
- ・非定常吸着・脱離過程を組み入れた定常・非定常移流分散モデル
- ・陸域蒸発散物理モデルに関する検討
- ・地下深部岩盤中の放射性核種移行過程に関する研究
- ・移流分散に関わる基礎的検討

②モデル作成のための技術開発

- ・地下物性の把握技術（ハイドロパルストモグラフィ）
- ・パラメータ逆解析に関するフィールド実験
- ・大規模水理解析における離散化手法に関する研究（平成11年度）

③開発したモデルの検証

- ・東濃地域詳細モデルの構築
- ・表層水理観測データを用いた日吉川流域水循環のモデル化（モデル構築，再現性，境界条件の検討）
- ・浸食過程のモデル化に関する検討

ここでは，年度を追って研究の概要をまとめると共に，上記①，②，③の主要な成果を示し，最後に安全評価における技術の現状・課題・展望を述べる。

2.4.1.1 研究の年譜および概要

当該研究期間中に行なった研究内容の概要を年度ごとに以下に示す。

平成11年度：水理解析における空間表現および核種移行に関する研究

広域の水循環解析において，精度の高い解析を必要とする領域の自然形状や人工物を表現するための手法としてLocal Mesh Refinementの手法を開発した。また，地下深部の還元雰囲気下での核種移行を追跡するため，Eh-pH条件を考慮した沈殿溶解モデルと地下水流れの結合を図った。

平成13年度：ハイドロパルステストのフィールド実験およびパラメータ逆解析

地下の大規模・高度利用では岩盤の力学的安定性と共に、割れ目・断層破碎帯などによる水理学的不均質性に依存した地下水流れを十分に捉えることが必要である。一般に、単一孔の井戸試験では分布を把握することはできない。そこで、複数の井戸と圧力の伝播の違いを利用したハイドロパルストモグラフィーの適用を試みた。調査地は神奈川県相模原市郊外に建設された地下空間・ジオドームであり、地下空間を挟んだ位置にある数本の井戸を利用して、水の圧入・水圧変化の計測を行い、得られた非定常圧力データを利用し、場の浸透率分布の数値的な逆解析を試みた。

平成14年度：河川流れのモデル化に関する基礎的検討および非定常吸着・脱離過程の検討

水循環系において、地表水（河川、湖沼、湧水）は最大の要因であり、またその存在は地形および地質を反映しており、深層水理を検討する際にも良い情報源となると考えられる。本検討では、特に地表水流れの表現の方法につき実験および数値解析から考察を加えた。河床の形、材質（砂、玉石、砂利、コンクリートなど）、幅、傾斜、蛇行など非常に不確定性の強い部分を物理モデルとして表現するため、いくつかの形状の水路を使い河川流出模擬実験を行い、数値計算による再現性を検討した。

地下水に乗った溶質の拡がりには、通常、分子拡散効果、および流速による機械的分散効果により表現されている。後者は、縦分散長、横分散長などのパラメータを与え計算することが一般的である。しかし、機械的分散の流速依存性がどの程度妥当であるか、不均質媒体内ではどのような広がりが起こるか、実現象をこのような移流分散モデルがどこまで再現し得るか、など十分確かめられていない部分が多い。本検討では、流速や不均質性を変化させた実験および数値解から、分散効果の定式化につき検討を加えた。

平成15年度：移流分散に関わる基礎的検討、および陸域蒸発散物理モデルに関する検討

地下水に乗った溶質の拡がりには、流動に乗った移行中に媒体の不均質性による機械的分散の影響を大きく受ける。しかし、地下の地層の不均質性・異方性・岩体の割れ目などの様相は我々の予想が難しいものである。移流分散解析の最も大きなパラメータは分散長であるが、媒体自体の不均質性に依存し、移行距離にも影響されるものである。これは我々が計算上与えるマクロ的なパラメータであるが、対数グラフ上でもバラツキが大きいことが知られている。長期核種移行予測などにおいて必要なのは、あくまでマクロパラメータ（格子・要素スケールの見積り）であり、ミクロレベルの不均質性ではない。マクロパラメータの値は格子（要素）の大きさとも関連し、そのとり得る範囲をより明らかにすることは、予測の信頼性を確保する上で重要な課題であろう。本検討では、まず、地層中のミクロな不均質性に伴う機械的分散の効果を調べるため、堆積層中の砂、シルト、粘土の割合を変化させた媒体を数値的に発生させて分散の変化を検討した。次に、よりマクロ化された分散長のとりえる値の範囲に関し考察を行った。ランダムな不均質性の媒体の分散挙動は均質化したモデルによる再現性が大きく低下することがわかった。

浅部から深部にわたる地下水の流動系を推定する上で、地下浸透量は大きな要因であるが、現在のところ局所の観測も領域全体としての見積りも非常に難しい状況にある。蒸発散量の計測は地表の多点で観測可能であるが、地表面付近の微気象に大きく依存する点で物理モデルを構成しにくいという難しさがある。しかし、観測のやりやすさの点

から考え、蒸発散量を推定することが、領域の地下水系を知る上でも有用な情報となろう。従来から、水循環モデリングでは蒸発散量推定は水文統計、経験式などにより行われているが、今後より物理的なモデルをプログラムに組み入れて推定することは十分可能と考えられる。以上に鑑み、ここでは蒸発散量推定プログラムを構成するために必要な理論式と経験式をまとめ、特に大きな影響を及ぼす表層土壌水分との関係を実験的に検討した結果を報告した。多数の砂・土壌試料を用い、いくつかの室内・室外環境下で蒸発計測を行った結果、土壌水分、蒸発量、土壌厚さに関する経験的關係を明らかにした。また、実流域に適用できる蒸発散モデルの開発もあわせて行った。

平成16年度：地形情報を利用した東濃地域・日吉川流域詳細モデルの構築

核燃料サイクル研究開発機構（現：日本原子力研究開発機構）東濃地科学センター、東濃鉱山、瑞浪超深地層研究所等を含む日吉川流域において取得されている水文・水理観測データや地質データを利用して、地表から地下深部までの精細水循環モデルを作成した。このモデルは流域の水収支（河川流出、蒸発散、地下浸透）のより定量的な把握。地下涵養量の平面的な分布の幅、流域の地下浸透量分布の推定、花崗岩体への地下浸透量の推定、表層の水理状態の明確化。深地層の研究施設の掘削影響評価などの把握に利用することを目的としたものである。作成されたモデルは、地表部の土地利用、河川流れ、表土や浅層地質、および深部の花崗岩の3次元構造を反映し、地表の涵養量・湧出量の分布、地下の任意の深度における涵養量の推定、平成15年度の表層観測データを用いた非定常解析などを行った。その結果、地下水位については概ね整合がとれていること、河川流量については表層の高透水土壌の影響が大きいこと、地下深部の水頭分布には地表から深度40m程度までの水循環現象を適切に説明できるモデルの構築が重要であることなどがわかった。

平成17年度：表層水理観測データを用いた東濃地域・日吉川流域水循環のモデル化に関する研究

前年度に引き続き、瑞浪超深地層研究所等を含む日吉川流域において取得されている水文・水理観測データや地質データを利用して精細水循環モデルを作成し、再現解析を行なった。その結果、平成15年の降雨-日吉川ハイドログラフ観測記録が、非常に良好に再現され得ること、深度-地下水位観測記録の水循環モデルによる再現性が悪いこと。多くの観測井戸の観測水位より計算値は高い傾向を示すこと。作成した精細流域モデルは、基本的に既存情報をもとに設定されており、特に修正や新たな判断・知見を加えたものではないが、主河川（日吉川）の河川流量の良好な再現性、初期化時の地下水位ポテンシャルの観測値の良好な再現性が得られ、既存フィールド観測値（地質構造、水理物性、河川流量、地下水位などの観測値）がある程度信頼性のあるものであることが計算モデルからもサポートされた。また、モデルの設定（物性分布、境界条件）には必ずしも適切ではない部分（境界条件の設定など）があることが判明した。

平成18年度：表層水理観測データを用いた日吉川流域モデルの境界条件の検討

平成16年度、平成17年度には、本流域の精細離散化モデルを作成し、流域地質・水理情報を入力し、水循環再現シミュレーションを行った。その結果、平成15年の降雨-日吉川ハイドログラフ地下水位の観測記録が良好に再現され得ることがわかったが、再現性が悪い井戸観測値の原因を検討した。その理由として、①シミュレーションモデルにおける蒸発散量が水文学的に期待されるものより小さめであること、②領域境界位置が

地形や地下構造と整合的であるか、などが考えられ、より適切な流域水循環モデルの確立を試みた。その結果、①北側境界に関しては、木曾川低地の影響が流域内の内部まで及んでいる可能性が示され、モデルの境界を拡大し、木曾川を流出境界とした3次元モデルスタディが望まれることが判明した。また、②蒸発散量の多寡が地下水ポテンシャルに与える影響を検討するため、土壌面からの蒸発を最大化し、樹体根系からの吸引・蒸散を土壌層1～2m程度から一定量行うケースを設定し計算を行った。その結果、蒸発散量は増加したが、各観測井の地下水ポテンシャルは1年間で増加傾向にあり、観測値よりは高目となった。この現象は、北側境界および南側境界の設定とも強く関係していると考えられ、今後の本流域モデリングの精細化の良い情報と考えられた。

平成19年度：表層水理観測データを用いた日吉川流域水循環のモデル化に関する研究

日吉川流域モデル（平成17年度作成）を用いて、瑞浪超深地層研究所の立坑掘削過程における周辺の水位変化を追跡した。掘削時の水位変動の観測は、地下の不均質性を把握するための良い情報となる。特に地表調査段階での情報からおおよそ観測値が再現できれば、地下流動場の推定の信頼性も向上すると考えられる。具体的には、瑞浪超深地層研究所の2本の立坑（主立坑および換気立坑）の周辺の状態変化を追跡するため、両坑の周辺で新たな分割を行ったモデルを作成した。その結果、①立坑周辺の分割を、水平、鉛直両方に精細分割する必要があること、②モデルに反映されていない地質構造・水理構造の存在（掘削により得られた透水性の高いゾーンなど）を考慮すること、などが必要であることが判明した。今後は、本流域モデルの形を残しつつ、両立坑を中心に1km程度の部分領域を精細化したモデルを作成する方向を考えたい。計算負荷もそれほど大きくなるものとは予想される。

平成20年度：浸食過程のモデル化に関する検討

本研究では、放射性廃棄物処分において、10万年オーダーにわたる埋設環境の境界条件の変化（地形の隆起・浸食・堆積・変形など）が長期の安全性評価にどの程度の影響を与えるかを基礎的なモデル計算から検討した。特に、地形変化に伴う地下水流動場の変化、それに伴う流速・流向の変化、それに乗った物質の移行距離や移行時間の変化を、以下の様なケーススタディから検討した。

- ・2次元断面モデルを使い、地形標高、涵養量、透水性、間隙率の変化に伴う地下水系の変化を検討した。その結果、定常状態の地下水位は涵養量の多寡、透水性の程度に敏感であり、間隙率には鈍感である。
- ・2次元断面モデルにより、河川の下刻、側方浸食に伴う流動場の変化を検討した。その結果、10万年間の継続的な下刻の影響は遠方まで流動場に長期的な影響を与える可能性が示唆された。
- ・実地形の2次元モデルを利用し、浸食による地形低下が地下水系に与える影響を検討した。山地の標高の高い部分での地下水位は浸食の程度である程度変化するが、低地を含めた流動場への影響は小さいと考えられる。

2.4.2 基本水循環系の再現・予測技術の研究開発成果の概要

2.4.2.1 水循環系の全体プロセスと要素プロセス

一般に水文・水理学の分野で水循環モデルと称されるものは、流域の降雨－流出応答に関与する主要なプロセス（降雨遮断や蒸発散，地表流出，地下水流出）をモデル化したもので，集中型モデル（タンクモデルなど），分布型モデル（流域を多数の斜面と河道に分割し，水理的方法で洪水を追跡するもの）がある。これらの他に，洪水氾濫モデル（浅水流モデル），湖沼流動・生態系モデル，土砂移動モデル（土砂崩壊，地すべり，土石流など），地下水モデル（飽和不飽和地下水解析，地下水汚染解析など）があるが，これら単独では水循環モデルとは呼ばれない。

本研究においては，水循環系のモデリングでは次のような現象を考慮した^{1)~9)}。

- ①降水の入力：低気圧，台風などに伴う降水（雨，雪）の入力，森林地帯での植生・リターによる遮断
- ②地表におけるプロセス：太陽輻射，長波放射，大気圧変動，水の蒸発散，顕熱移動
- ③斜面における水の浸透・地表流による流出
- ④河川による流出
- ⑤地下水系からの流出，地中熱，深部地熱の影響
- ⑥水圏との接触部（海岸部）に於ける相互作用（塩淡境界における流れ）
- ⑦人間活動：河川からの取水，地下水揚水，地表改変，地下利用などによる状態変化

図2.4.1は陸域を中心とした水循環の概念図である。図2.4.2には地表付近の要素プロセスを示した。

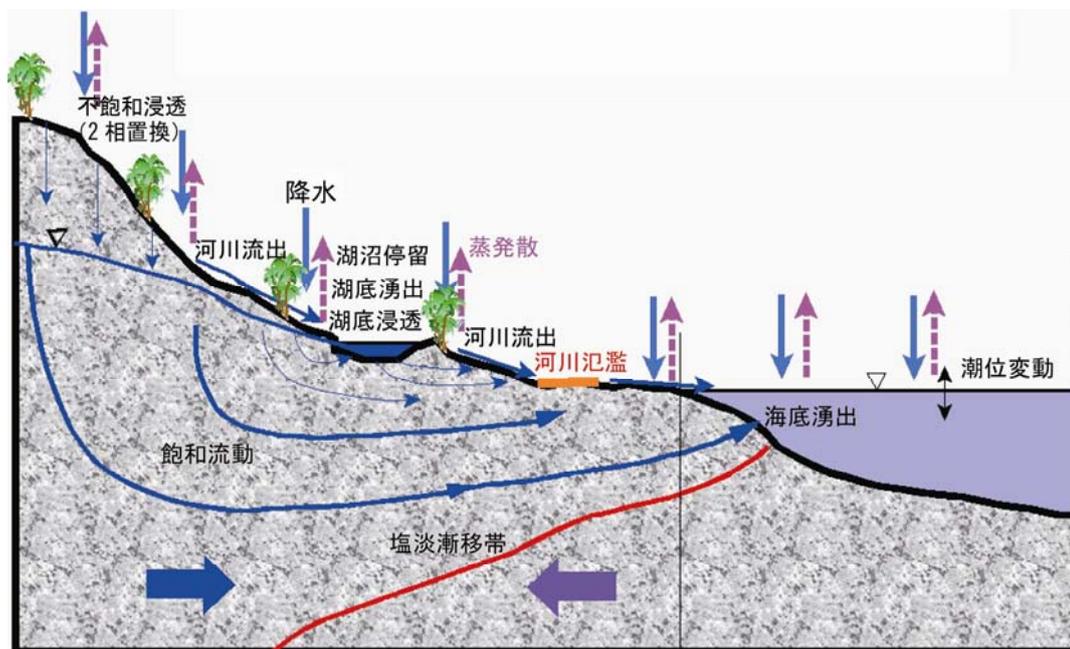


図2.4.1 地圏水循環系の概念図

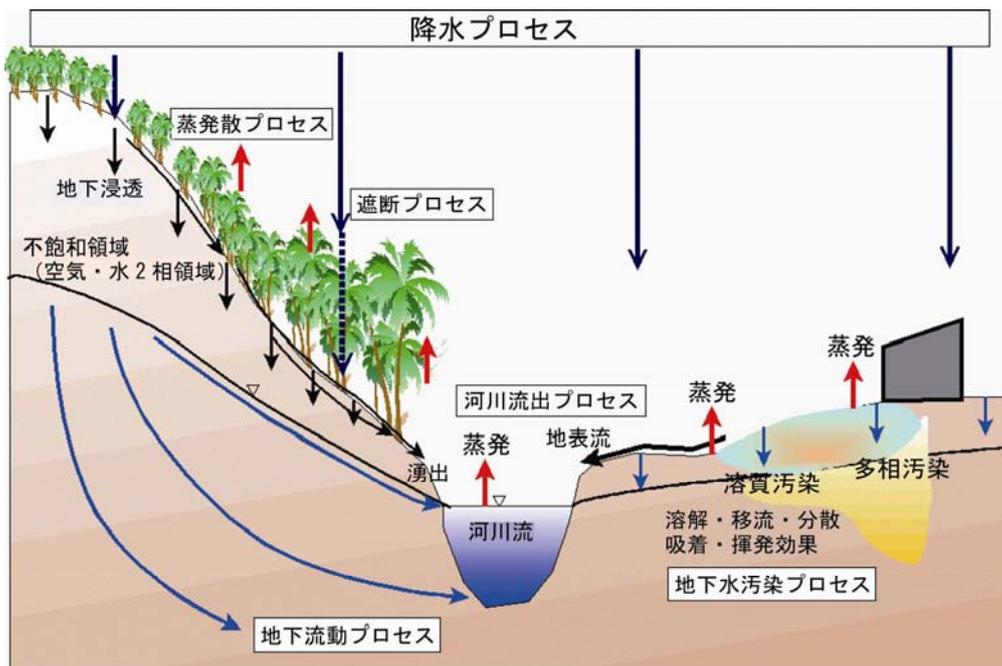


図2.4.2 水循環の要素プロセス

2.4.2.2 河川と地下の流れの構成則

陸域では、大きく地表と地下の違いが存在し、流れの様子が著しく異なる。表2.4.1には陸域水循環中の流れを個々にいくつかの型に分類したものである。

表2.4.1 水循環系における流れの型分類

現象	流れの領域	流れの型
降水	自由空間中	ソース項
蒸発散	自由空間中	ソース項
取水・揚水	自由空間、地質媒体	ソース項
地表の浅水流	自由空間中	マニング型流れ
河川の流れ	自由空間中	マニング型流れ
トンネル内流れ	自由空間中	マニング型流れ
割れ目中の流れ	パイプ中+地質媒体中	混合型流れ
速い中間流出	パイプ中と地質媒体中	混合型流れ
降雨の地下浸透	自由空間から地質媒体へ	多相ダルシー型流れ
地下水の湧出	地質媒体から自由空間へ	多相ダルシー型流れ
地下の流れ	地質媒体中	多相ダルシー型流れ

(1) 河川流れ

河川の流れは、基本となる開水路浅水流運動方程式の拡散波近似、およびマニングの平均流速公式を用いて以下のように表現される。

$$v = -\frac{R^{2/3}}{n} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial x} \right|} \operatorname{sgn} \left[\frac{\partial H}{\partial x} \right], H = h \cos^2 \theta + z \tag{2.4.1}$$

(2) 地下流動

地下の流動は、地下水の流れと不飽和帯の空気（およびガス）の流れを同時に扱う多相解析によって一般化される。水と気体の構成則は以下のように表現される。

$$v_{ai} = -\frac{K_i k_{ra}}{\mu_a} \frac{\partial \Psi_a}{\partial x_i} \quad (2.4.2)$$

$$v_{cwi} = -\frac{K_i k_{rcw}}{\mu_{cw}} \frac{\partial \Psi_{cw}}{\partial x_i} \quad (2.4.3)$$

ここで、 i : 流れの方向, 添え字 a, cw : 空気相・溶質を含む水相, K : 絶対浸透率, k_r : 相対浸透率, μ : 粘性係数, Ψ : ポテンシャルをあらわす。

(3) 溶質の移流分散の基礎式

$$v_{ci} = v_{cwi} C - D_i \frac{\partial C}{\partial x_i} \quad (2.4.4)$$

ここで、 C : 溶質濃度, D : 分散係数 (分子拡散+機械的分散) をあらわす。

(4) 地表と地下の相互作用 (浸透と湧出)

地表と地下の間の水の往来は、地表水のポテンシャルと地下水のポテンシャルの差によって起こる。地表水のポテンシャルは地表面にかかる水圧から計算でき、直下の多孔質体の水理ポテンシャルは気相圧力、飽和率、毛管効果を基に表現できる。この勾配によりダルシー型流動による相互交換が行われると考えられる。他の流体に関しても同様である。具体的な計算方法は参考文献⁷⁾を参照いただきたい。

2.4.2.3 水循環系の流動方程式

$$-\nabla \cdot ((\rho_{cw} - C)v_{cw}) + q_{w,rain} - q_{w,evap} = \frac{\partial}{\partial t} ((\rho_{cw} - C)\phi S_w) \quad (2.4.5)$$

$$-\nabla \cdot (\rho_a v_a) + q_{a,ini} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_a \phi S_a) \quad (2.4.6)$$

$$-\nabla \cdot (v_{cw}) + q_{w,rain} - q_{w,evap} = \frac{\partial}{\partial t} ((\rho_{cw} - C)\phi S_w) \quad (2.4.7)$$

ここで、 ρ : 相の密度, S : 相の飽和率, ϕ : 間隙率である。

非線形の一般化流量公式と質量保存則から流れの支配方程式が考える流体成分や汚染成分個々に立てられ、連立して解かれる。

- ① 通常の水循環のみ (汚染物質がない) を考える場合は、水と空気に関する (2.4.2) 式を圧力、水飽和率に関して解く。地表水深は飽和率から換算される。これにより、地表の河川流と地下の不飽和・飽和流動系の同時追跡、準動的氾濫解析が可能となる。

- ② 塩分など溶質が入り込む時には、溶質の移流分散方程式を加え（2.4.3）式を解く。これにより、河川や地下の汚染溶質輸送、沿岸域塩淡水境界問題などが追跡できる。
- ③ 三相系のモデリングも可能である。石油や有機塩素系溶剤などによる汚染問題では、3相流動問題として（2.4.4）式を解く。これにより、河床・地表からの水の浸透と同時に起こる地下NAPL（非水相液体：Non-Aqueous-Phase Liquids）汚染が追跡可能となる。
- ④ いずれの場合も、地表面より上に、河川・地表流の流れる格子、およびその上方に大気層をおき、地下と数値的に一体化する。

このような定式化は、計算付加の増大が避けられないが、地圏の水の動きを自然らしく表現でき、信頼性・説明性を格段に向上させることができる。

数値解法としては、非線形性や多相流動を考慮し、有限差分法による同時完全陰解法を用いる。

2.4.2.4 蒸発散過程のモデリング

現在まで、流域の河川流出、地下水解析、あるいはそれを総合化した水循環モデルが世界的にいくつか開発されている。しかし、特に、蒸発散に関わる部分は物理的にモデル化が難しく統計や経験に基づく推定法が一般的に利用されている。

熱収支法の基礎となる方程式は、エネルギー収支式である。太陽からの直接日射と大気中からの長波放射が地表に到達すると、顕熱フラックス、潜熱フラックス、地中流入熱に分配されて消費される。地表付近の大気を温めるために使用された熱量を顕熱フラックス、土壌中の水分を蒸発させるために利用された熱量を潜熱フラックス、地表付近の土壌を温めるために使用された熱量を地中流入熱と考えることができる。図2.4.3に地表付近の熱と水の収支の概念図を示した。

熱の動きを考えない一般的な水循環モデルにおいては、蒸発散量を見積もる方法として、ハーモン法、マッキング法、ペンマン法、空気力学的方法などがある。

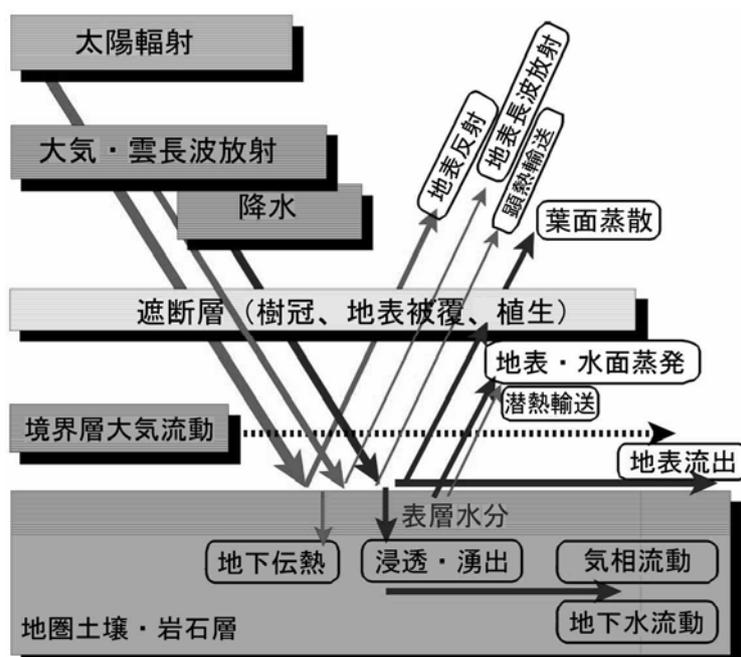


図2.4.3 地表付近の熱収支・水収支の概念図

蒸発フラックス E はバルク式を用いると以下のように表される。

$$E = \rho_a \beta C_H U (q_{surf} - q_a) \quad (2.4.8)$$

ここに、 ρ_a : 対象地点での空気の密度 (kg/m³), C_H : バルク係数, U : 対象地点での風速 (m/s), β : 蒸発効率, q_{surf} : 地表面温度 T_s に対する飽和比湿 (kg/kg), q : 対象地点の気温に対する比湿 (kg/kg) である。 C_H , U , q_a は観測地の季節的観測値などを平均化して入力する。 q_{surf} は水がある地表では飽和比湿にちかく、蒸発効率 β とバルク係数 C_H は土地利用や水分量によって変化する経験値である。

蒸発効率 β はバルク式を考慮すると次のようになる¹⁰⁾。

$$\beta = \left(1 + \frac{C_H U F(\theta)}{D_{ATM}} \right)^{-1} \quad (2.4.9)$$

$F(\theta)$ は土壌における実験の結果、以下のような実験式で表現される。

$$F(\theta) = F_1 (\theta_{sat} - \theta)^{F_2} \quad (2.4.10)$$

体積含水率は水循環モデルの計算から得られる。体積含水率が蒸発量に与える影響を考慮することができれば、蒸発散量推定プログラムは水循環モデルに結合されてフィードバックが可能となる。しかし、体積含水率は深さのパラメータを持つスケールパラメータであるため、深さごとに θ と β の関係を知っていなければならない。

本研究ではこの $\theta - \beta$ 曲線を求めるために室内での蒸発量測定実験を行った。

第1の実験は、室外での蒸発量測定実験である。観測された気象データを入力した数値計算結果と実際の蒸発量の比較を行うことで、蒸発散量推定手法の妥当性と数値計算の動作確認をすることが目的である。気温、湿度、風速、気圧を観測している環境の中での土壌中の水分蒸発量を測定した。

第2の実験は、室内での蒸発量測定実験である。特定の条件下において簡略化できる理論式と実際の蒸発量から、蒸発距離 F と体積含水率 θ の関係を得ることを目的としている。気温、湿度、風速、日射量をコントロールした3つの条件下で実験を行った。

第3の実験は、複数の土壌種類による蒸発量測定実験である。これは実流域でのケーススタディに用いるデータ取得を目的として、第2の実験と同様に気象データをコントロールした実験環境で、土壌種類ごとに土壌パラメータを推定した。

実流域に適用できる蒸発散モデルの開発もあわせて行った。蒸発散モデルは従来から一般水解析に利用されているGETFLOWSに組み込み、現在適用性を検討中である。数種類の気象・水文データの入力、樹冠遮断・リター遮断、日照に対する斜面方位、土壌水分の影響、が考慮されている。今後は、いくつか実流域でのシミュレーションに適用することでその妥当性を検証し、陸域水循環系評価に役立てたいと考えている。蒸発散モデルに関する定式化を行い、蒸発現象に関与するさまざまな現象をモデルとして組み込んだ。また、多数の砂・土壌試料を用い、室内・室外環境下で蒸発計測を行った。その結果、土壌水分、蒸発量、土壌厚さに関する経験的關係を明らかにした。

2.4.2.5 非定常吸着・脱離過程に関する検討

一般の溶質や核種などの移流分散は、吸着・脱離を含む遅延方程式として表されるが、多くの場合Henry型線形吸着等温式¹²⁾ (図2.4.4) を基礎に議論が行われている。しかし、溶質の濃度範囲が広い場合は非線形的吸着等温式 (FreundlichやLangmuir型, 図2.4.4)¹²⁾が必要で、さらに地下水の移動速度が大きい場合には吸着過程を速度論的に考える必要性があろう。本検討では、流速、溶質、吸着媒 (土壌の種類) を変化させた実験および数値解から、吸着過程、脱離過程の両者を考察し、速度論的定式化を行った。

(1) 非定常吸着

吸着等温線は、吸着・脱離が平衡状態に至ったときの濃度と吸着量の関係を表すものであるのに対し、流体流れが速く吸着が平衡状態になる前に濃度変化の起こる場合を考慮したものが非定常吸着である。非定常吸着を考慮する必要性が生じるのは、①揚水による汚染物質の回収、②割れ目などを汚染物質が大きな速度で移流、③エアスパーキング法による揮発性汚染物質の回収、などであり、いずれも流体の移動が速く、平衡が達成されるより前に濃度変化が生じると考えられるものである。非定常状態における吸着量と流体濃度の関係を表す式には、図2.4.4のようなものがある。

(2) 非定常吸着過程を組み入れた定常・非定常移流分散モデル化の検討

移流分散による濃度変化の伝達が吸着の影響によりどのくらい遅れるか、また吸着等温式および、非定常吸着式をモデルに適用した場合どのような違いが生じるのかを検討するため1次元移流分散+吸着・脱離のモデルを作成した (図2.4.5)。モデル化に際して用いた支配方程式は以下の式で示される。

1. Henry型	$\frac{\partial W_s}{\partial t} = k_r (k_d C - W_s)$
2. Freundlich型	$\frac{\partial W_s}{\partial t} = k_r (k_1 C^n - W_s)$
3. Langmuir型	$\frac{\partial W_s}{\partial t} = k_r \left(\frac{k_1 C}{1 + k_2 C} - W_s \right)$

図2.4.4 吸着速度式の例

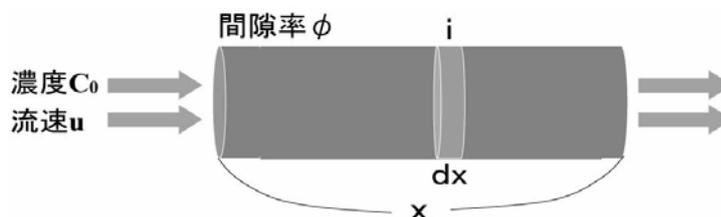


図2.4.5 移流分散+吸着モデル

$$-u \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} + D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} - m = \frac{\partial C(x,t)}{\partial t} \quad (\text{液相における物質収支}) \quad (2.4.11)$$

$$m - \frac{\partial C_s(x,t)}{\partial t} = 0 \quad (\text{固相における物質収支}) \quad (2.4.12)$$

u : 流速 (m/s), C : 流体濃度 (kg/m³), D : 分散係数 (m²/s), C_s : 単位体積の多孔質体中に吸着される量 (kg/m³), ϕ : 間隙率

(3) 数値計算の手法

(2.4.12) 式の C_s の部分に吸着等温式もしくは、吸着速度式を代入することにより、(2.4.11)

(2.4.12) 式を解析的に解く。代入する吸着等温式は Freundlich 型のもの、および Langmuir 型のものがあり、吸着速度式に関しても同様に Freundlich 型のものおよび Langmuir 型のものを用いた (2.4.13 ~ 2.4.16) 式。

Freundlich 型

$$m_{ad} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_s (1 - \phi) k_1 C^n) \quad (2.4.13)$$

$$m_{ad} = k_r (\rho_s (1 - \phi) k_1 C^n - C_s) \quad (2.4.14)$$

Langmuir 型

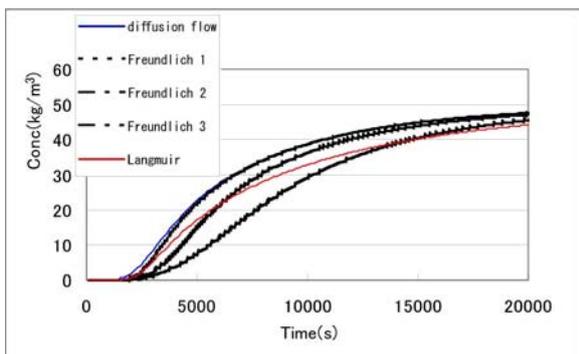
$$m_{ad} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_s (1 - \phi) \frac{W_{s \max} k_2 C}{1 + k_2 C} \right) \quad (2.4.15)$$

$$m_{ad} = k_r \left(\rho_s (1 - \phi) \frac{W_{s \max} k_2 C}{1 + k_2 C} - C_s \right) \quad (2.4.16)$$

① 解析条件および数値解析の結果

移流分散 + 吸着・脱離モデルの数値解析の結果を図 2.4.6 ~ 図 2.4.10 に掲載する。図 2.4.6 は、各吸着等温式、吸着速度式による吸着量の違いを表している (参考のため、移流分散モデルの計算結果も掲載)。出口における濃度の解析解であるため、流出濃度が低いほどカラム内における吸着量が多い。吸着量の多い Freundlich 3 のモデルが、最も出口における流出が遅いことがわかる。図 2.4.7, 図 2.4.8 は定常・非定常吸着・脱離の流速による変化を表したものである。経過時間が短いときは非定常モデルの吸着量が少ないことがわかる。次第に時間が経過するにつれて、吸着量が増え定常状態に近づく。図 2.4.9, 図 2.4.10 は定常・非定常状態におけるカラム内の濃度分布を表したものである。全般的に非定常モデルの方がカラム内濃度の変化、すなわち吸着量の変化が緩やかであることがわかる。

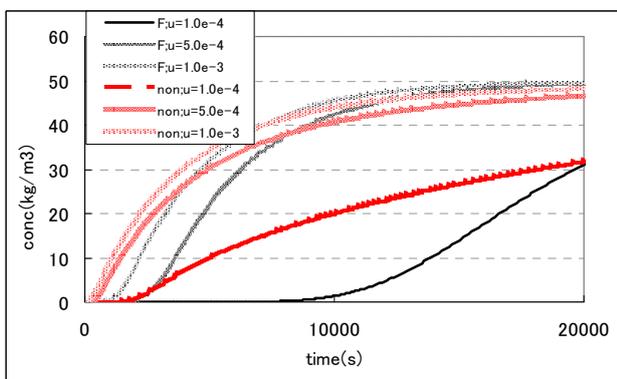
表2.4.2 解析上の各種パラメータ



model name	parameter
flow	
diffusion flow	$D=1.0e-6m^2/s$
Freundlich adsorption1	$D=1.0e-6m^2/s$ $n=0.5$
Freundlich adsorption2	$D=1.0e-6m^2/s$ $n=1$
Freundlich adsorption3	$D=1.0e-6m^2/s$ $n=1.25$
Langmuir adsorption	$D=1.0e-6m^2/s$ $k_2=1.4e-7$ $W_{smax}=7e-4$
nonstationally Freundlich	$D=1.0e-6m^2/s$ $n=1$ $kr=0.1$
common	$u=1.0e-4m/s$ $x=0.5m$ $\rho s=2500kg/m^3$
initial condition	$\phi=0.5$ $k_1=2e-4m^3/kg$
	$C_0=50kg/m^3(0 \leq t < 5000)$
	$C_0=0kg/m^3(5000 \leq t)$

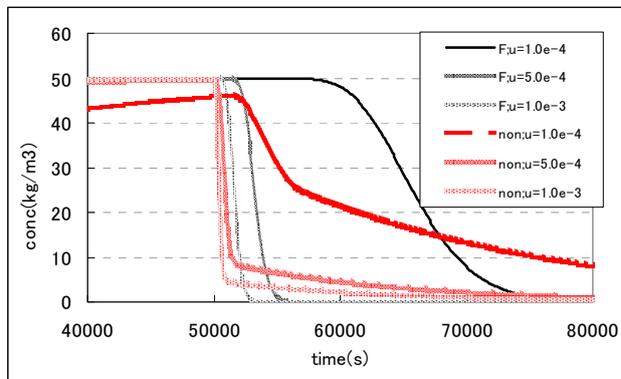
(各種パラメータについては表2.4.2参照)

図2.4.6 出口濃度の比較



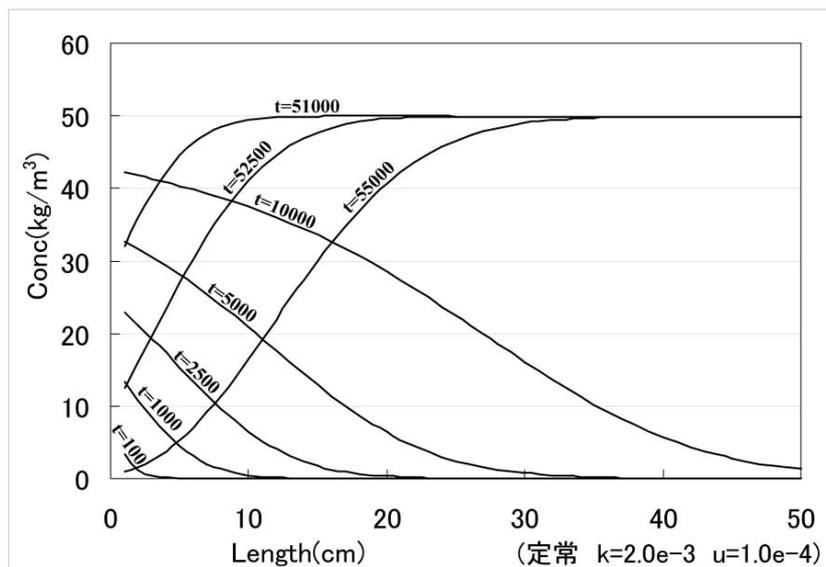
(吸着過程 $k=2.0e-3$)

図2.4.7 定常・非定常出口濃度



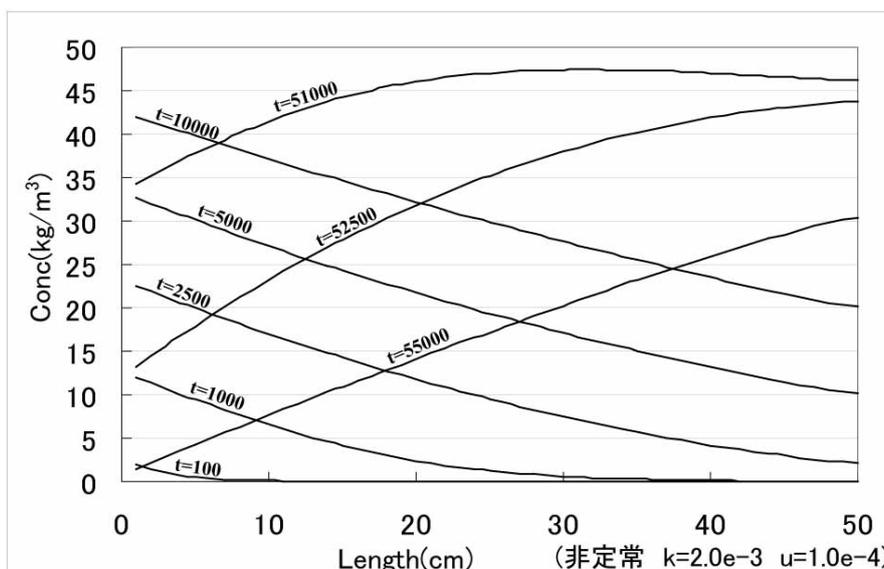
(脱離過程 $k=2.0e-3$)

図2.4.8 定常・非定常出口濃度



(定常 $k=2.0e-3$ $u=1.0e-4$)

図2.4.9 カラム内の濃度分布



(非定常 $k=2.0e-3$ $u=1.0e-4$)

図2.4.10 カラム内の濃度分布

2.4.2.6 移流分散パラメータに関する検討の成果

地下水中の溶質の移行は地層中のマイクロなスケールでの吸着・脱離，分子拡散，機械的分散に支配される。しかし，實際上我々は内部のミクロ的不均質性は知りえず，知りえたとしてもそれを直接評価には利用できない。われわれに必要なのは，離散化されたスケールでの平均的なパラメータの値やとり得る範囲である。

地層中には様々な不均質性や異方性がある。それらを格子スケールで平均化した媒体（等価均質媒体）は，どの程度本来の挙動を表現し得るかは明らかではない。

図2.4.11～図2.4.13には，砂泥の入り混じった地層中の移流分散を細かく計算したものと，大まかな格子で計算した溶質流出曲線である。砂の割合が8割程度卓越していると，均質と見立てても流出曲線をほぼ再現するような分散長が見つかることがわかる（図2.4.11）。砂が6割，4割程度に減ると，均質化した媒体に与える分散長だけでは流出は再現できないことがわかる（図2.4.12，図2.4.13）。このような結果より，移流分散モデルとして，通常モデルではなく，2領域モデルなどの検討が今後とも必要であることが判明した。

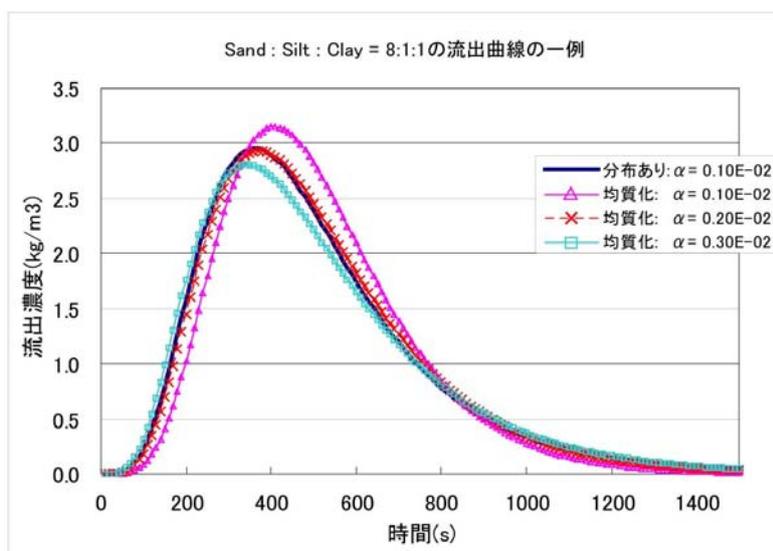


図2.4.11 均質媒体を仮定した場合の流出曲線の再現（砂8割の場合）

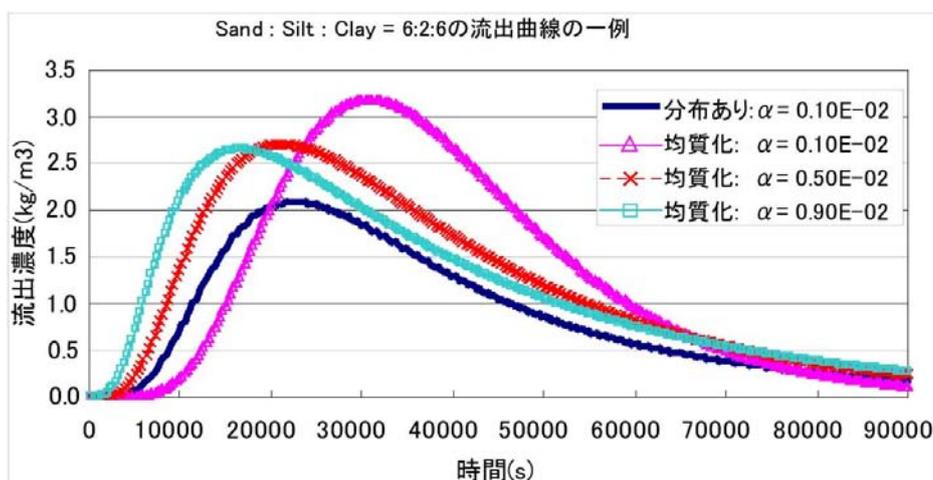


図2.4.12 均質媒体を仮定した場合の流出曲線の再現（砂6割の場合）

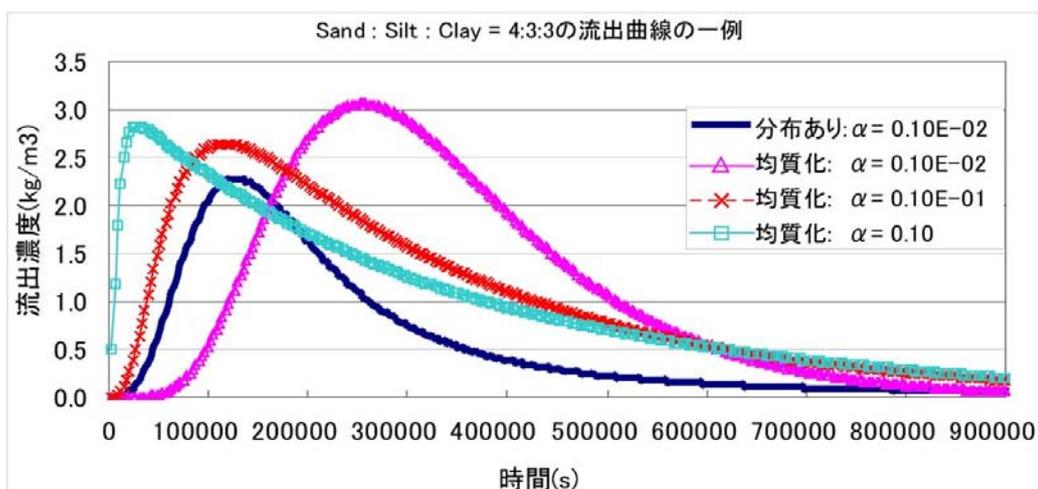


図2.4.13 均質媒体を仮定した場合の流出曲線の再現（砂4割の場合）

2.4.3 モデル作成のための技術開発の成果の概要

2.4.3.1 ハイドロパルストモグラフィに関する検討

地層処分事業における概要調査の段階では、地下地質の把握を目的として適当な数のボーリング孔が掘削され、コアの収集や水理試験、力学試験などが行われることとなっている。一般に、ボーリング孔から得られる情報は点的であり、それらをつなぐ情報は得られない。このため、水理物性分布のモデル化には大きな不確定性が避けられない。

ここでは、複数のボーリング孔での圧力観測値を利用した逆解析技術（ハイドロパルストモグラフィ）について、数値解析の手法、様々な条件下の情報量、フィールド試験による適用可能性の検討を行った。

逆解析には、地下水流れの方程式、および最適化制御理論を利用した高速逆解析技術を利用した^{4), 11)}。この手法により、三次元的に分布する多数の浸透率値を揚水・注水時の圧力変化情報から同定することができる。

数値解析的検討として、

- ①どのような形の揚水・注水試験が情報収集のためにより有効か。
- ②地層中のどの程度の距離にある不均質物体が見分けられるか。
- ③地層中のどの程度の大きさの不均質物体が見分けられるか。
- ④地層中の不均質媒体がどの程度の差異（コントラスト）を持てば識別できるか。

などのケーススタディを行った。

2.4.3.2 大規模モデリングにおける局所精細離散化手法の検討

地層処分場を含む流域の大規模な3次元解析では、①処分場内の廃棄体・人工バリアなどの形状・物性などの表現、②周辺の天然バリアの地質・水理構造の表現、③より遠方の天然バリアの多少粗い地質水理物性表現、④地表面、海岸線、海底地形・地質などの表現、をできるだけ滑らかかつリアルスティックに行うことが好ましい。

数値解析手法としてみた場合、有限要素法（FEM）は格子の形成が柔軟であり、部分的に非常に細かくすることも粗くすることもできる。しかし、FEMの弱点は、①非線形問題における安定性が悪い場合多相流れの解析などでは差分法に頼らざるを得ないこと、②物質の保存性が必ずしも保たれないこと、③演算量が多く高速でないこと、などがある。

このような点の改良を図るため、ここでは、構造型格子を基礎とする差分法で空間表現の柔軟性を獲得するため、局地精細格子システム（LMR：Local Mesh Refinement）の開発、適用性を検討した。

検討内容の要点は次の通りである。

- ・局地精細型では、構造格子型の差分展開から出てくる7重対角行列の形が大幅に変わってくる。しかし、行列構造をよく調べると、いつでも三重対角構造の繰り返しにより作られていることがわかる。各要素は、それ自身が大きさの違う行列となっているが、入れ子構造に着目すれば、Nested Factorizationによる前処理法を修正することで適用可能である。また、ORTHOMINを適用することで、7重対角行列と同様の手間で解くことが可能である。
- ・流路面積の違う媒体における流れに関し、局所精細型格子は一般構造格子より自然な流れを表現できること、河川が平野部に出る地形、即ち扇状地を模した計算例、汚染物質の流下計算、圧縮気体の岩盤空洞からの漏洩計算などによりその適用性を示した。

2.4.4 モデルの検証に関する成果

2.4.4.1 日吉川流域モデルによる実解析：再現性の検討

本研究は、原子力機構 東濃地科学センター、東濃鉱山、瑞浪超深地層研究所等を含む日吉川流域において取得されている水文・水理観測データや地質データを利用して精細水循環モデルを作成し、地表から地下深部までの流動系の定量的理解を深めることを目的としたものである。具体的には以下の作業および検討を行った。

- ①地表部の土地利用、表土や浅層堆積層、および深部の花崗岩の3次元構造が反映された精細モデルの作成
- ②水文素過程（降水・蒸発散・地表水・地下水）を連成したシミュレータによる流域水文挙動の再現
- ③流域内で取得されている詳細な水文観測値の再現性の検討
- ④流域水収支（河川流出、蒸発散、地下浸透）のより定量的な把握
- ⑤流域モデルの妥当性など、今後の水文水理調査・観測への指針の提示。

図2.4.14は日吉川流域の平面図および格子分割であり、図2.4.15は3次元モデルである。また、図2.4.16は地質分布、図2.4.17は本流域の土地利用図である。

このようなモデルを作成し、平均降水量を与えながら領域の初期化を行った。さらに、平成15年の降雨量記録を与えながら、当該期間の河川流量・地下水位観測値との比較を試みた。図2.4.18は日吉川のハイドログラフを示している。モデルの水理物性などを作り変えることはなく、最初の計算で観測値をよく再現する結果を得た。また、初期化計算の結果は、多くの井戸で観測された地下水位の深度分布をよく再現していた。このことは、本モデルに与えた水理物性分布や地質構造、地表粗度分布などが適切であったことを示唆している。

しかし、モデルの不具合も明らかとなった。図2.4.19、図2.4.20の1年後計算水位に示したように、降雨が1年以上入力された後に、水位が上昇しており、断層南側（MIU-1, 2, 3号孔）で上昇量は20m程度、断層北側（DH-9, 11, 13号孔）は30m～50m程度あることが見られる。

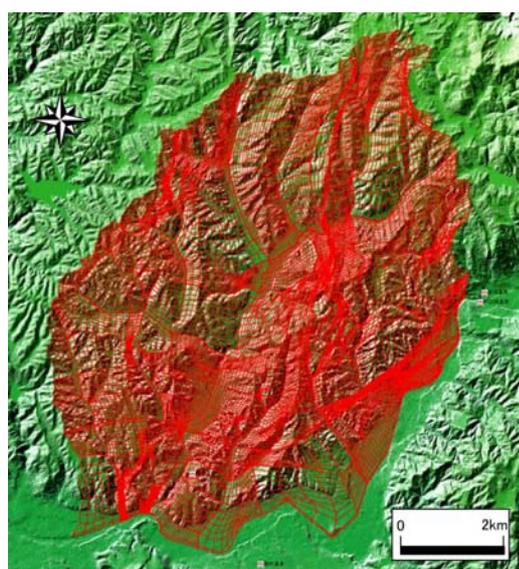


図2.4.14 日吉川流域モデル平面図

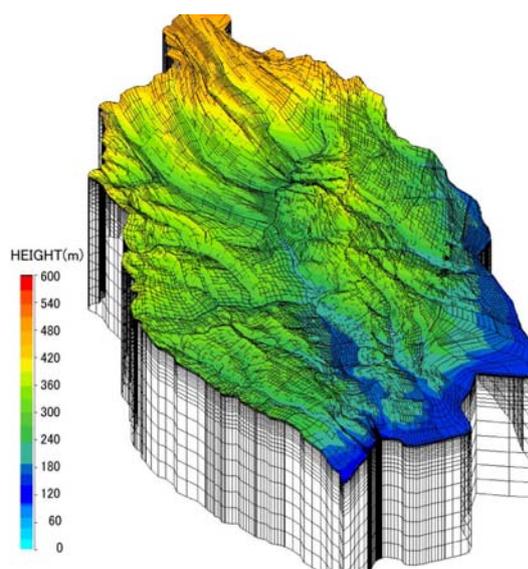


図2.4.15 3次元モデル



図2.4.16 地質分布

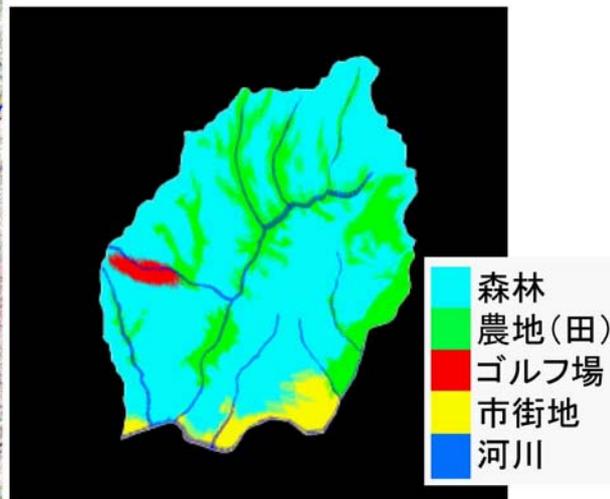


図2.4.17 土地利用

一般に、降雨の多い6月ごろから秋にかけては水位が上昇し、冬季には水位が低下し、その変動が10mオーダーで起こることは不思議ではない。しかし、水文学的には、約1年間の降雨の最後の段階では、最初の状態付近に回帰することが一般的と考えられる。この点に関しては、次年度に境界条件の適切性に関し検討を行った。

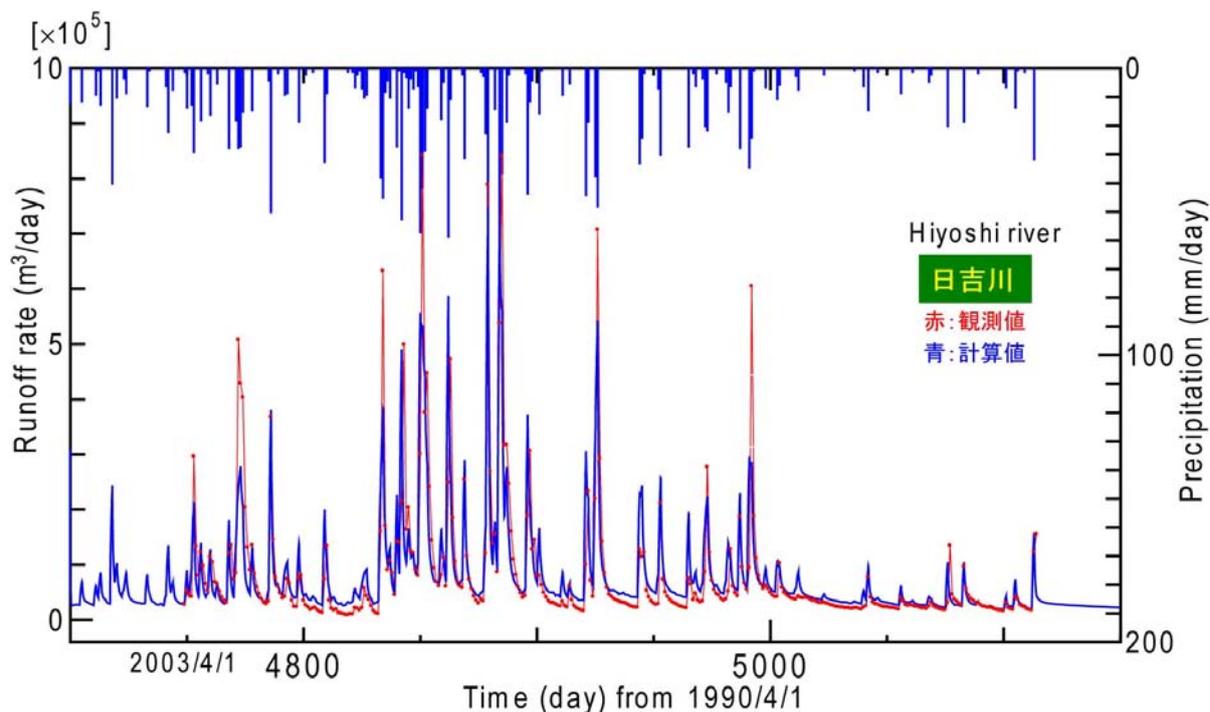


図2.4.18 日吉川流量観測値と計算値の比較

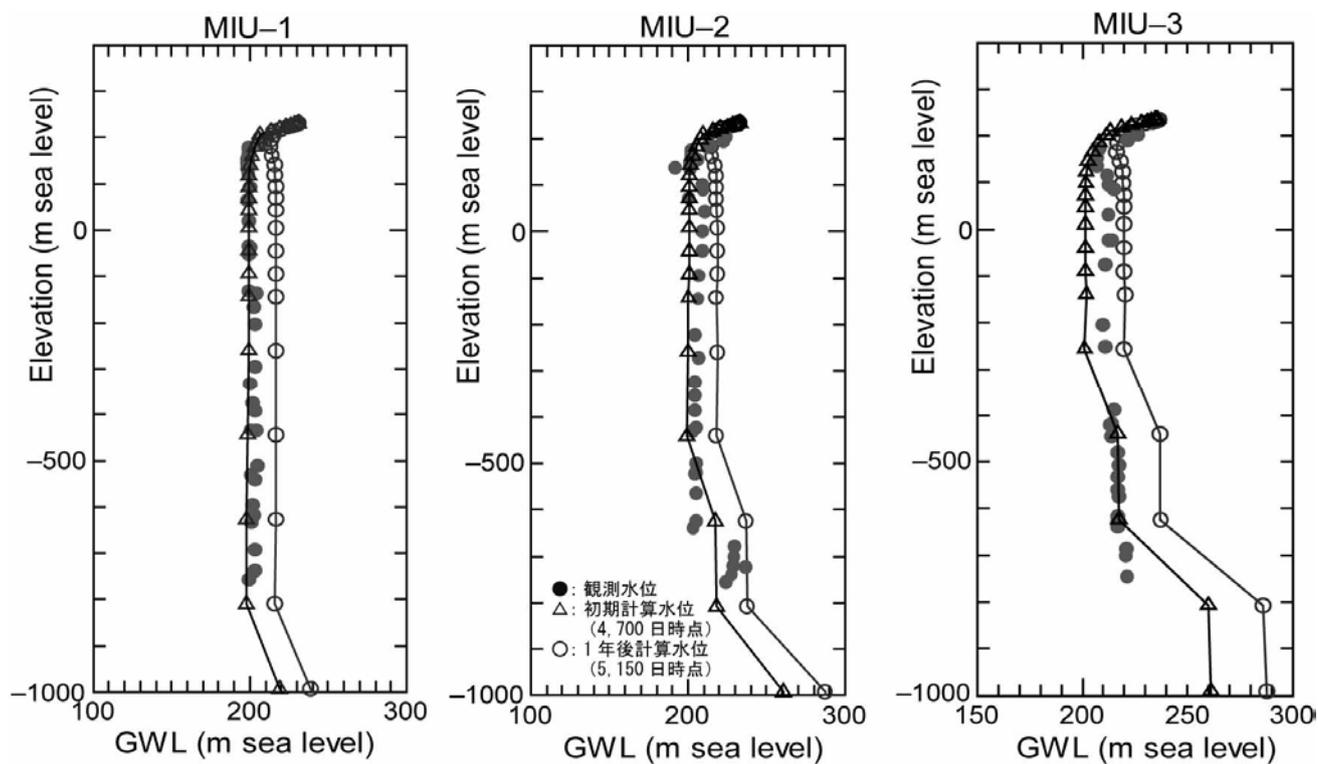


図2.4.19 地下水位観測値と計算値の比較（断層南側：MIU-1, 2, 3号孔）

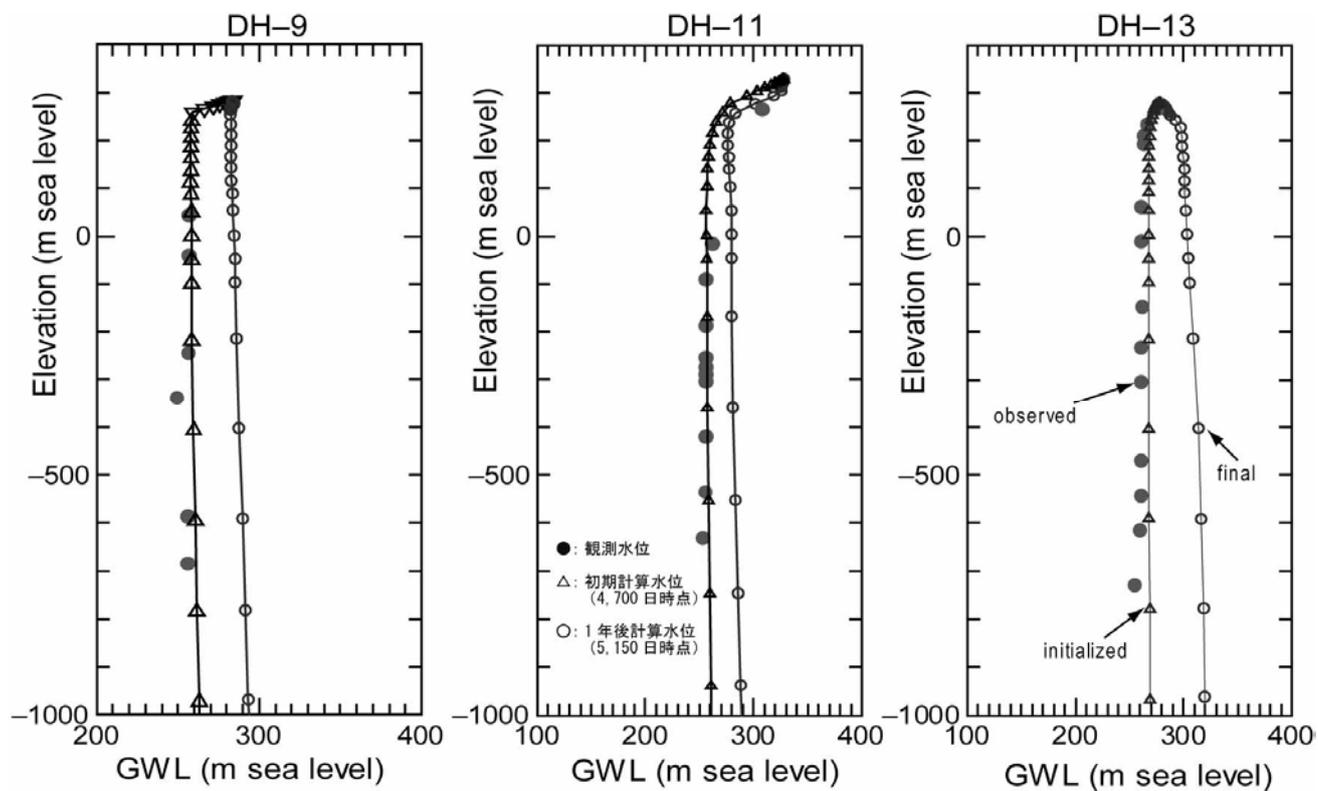


図2.4.20 地下水位観測値と計算値の比較（断層北側：DH-9, 11, 13号孔）

2.4.4.2 日吉川流域モデルによる実解析：境界条件の検討

前年度の日吉川流域3次元モデルの側方境界は、地形的な表流水の分水嶺、および大きな河川(土岐川)に沿って設定され、全て閉境界として取り扱っている。しかし、一般に地下水系を対象とする場合、分水嶺は地下の閉境界とならないことも多く、観測値の再現性に大きく影響する場合がある。

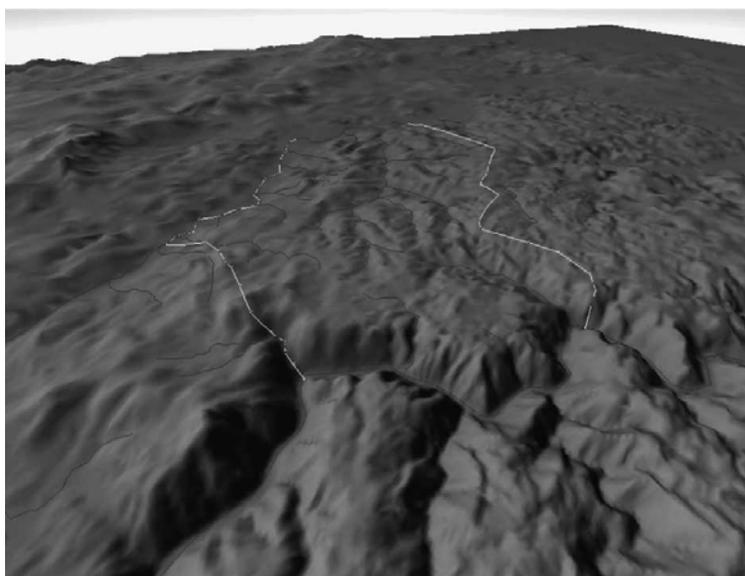
本流域モデルの北側境界は450m程度の標高の分水嶺であるが、その2km程度北方には170m程度の河床標高で木曾川が深い谷を形成しており、地形的に見て現在の3次元モデルの北側境界は必ずしも適当ではないことが考えられた。実際、北側の位置にあるDH-9, 11, 13号孔などの観測孔での地下水位は計算地下水位よりかなり(40m程度)低く、木曾川低地の影響の可能性が否定できない。そこで、流域の地形断面を検討し、平成16年度、平成17年度モデルの流域境界が妥当であるか否かを2次元断面モデルによる感度解析から検討した。

(1) 境界設定

北側には木曾川があり、河床付近の標高が170m程度、その南側で500m弱の標高の山岳地が形成されている。平成17年度モデルは木曾川南部の尾根筋を分水境界として取られているが、図2.4.21に見られるように、木曾川の急激な標高低下が、地下水流動に影響する可能性が考えられる。

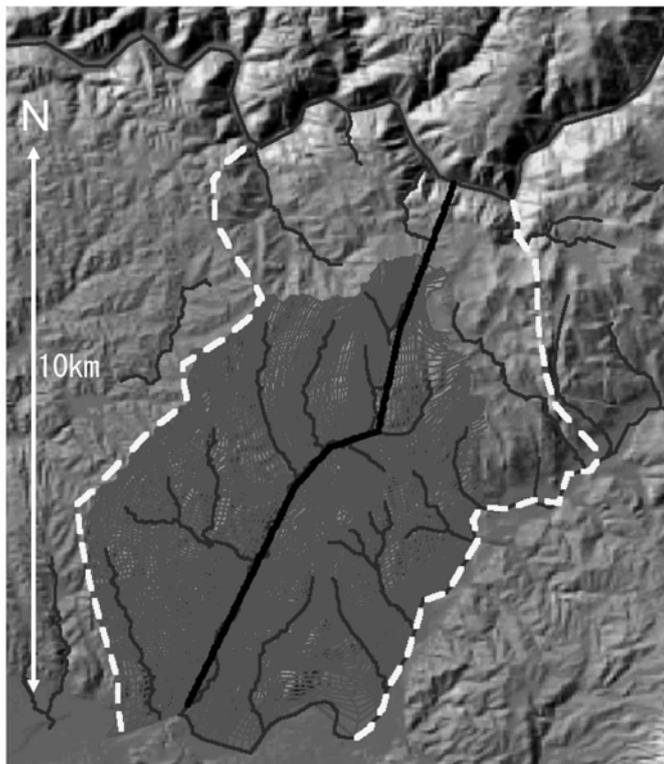
(2) 2次元断面モデルの選定

図2.4.22の様に、木曾川から日吉川流域中央部を通り土岐川に至る断面線上の地形を2次元感度解析モデルとして設定した。図2.4.22の断面に沿う地形を図2.4.23に示した。断面線の長さは約11.5kmであり、木曾川河谷が急激に低くなっている様子がよくわかる。拡張領域モデルの北側は木曾川まで伸ばしたものであり、平成16年度のモデルと計算結果を比較することで、境界の影響を検討することにする。



(国土地理院 50mDEM, カシミール3Dにより描画)

図2.4.21 北側(木曾川)からみた領域地形



(中央の黒線、白い点線は地形から好ましいと考えられるモデル境界線)

図2. 4. 22 日吉川流域地形・格子システムと2次元断面モデルの位置

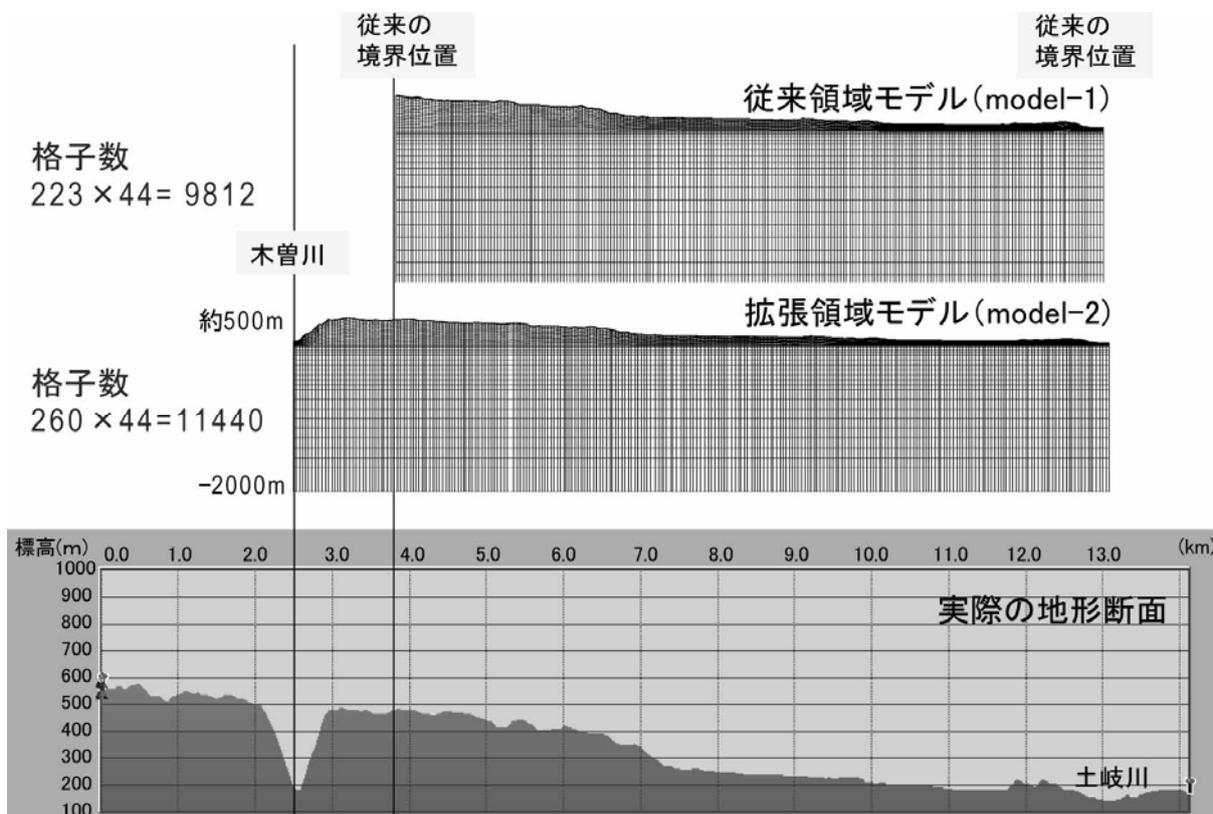


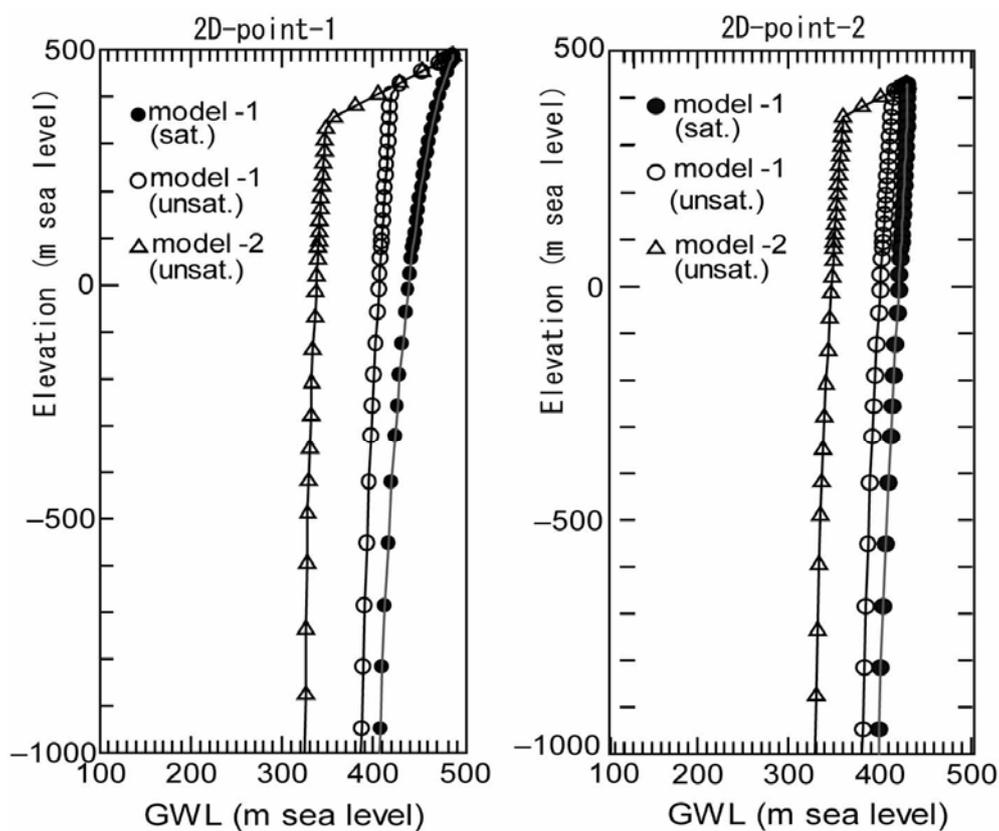
図2. 4. 23 地形断面と従来領域・拡張領域離散化モデル

(3) 解析結果の違い

図2.4.24～図2.4.26に従来領域モデルと拡張領域モデルのポテンシャル分布を示した。二次元モデルによるポテンシャル分布の比較から以下のことが判明した。

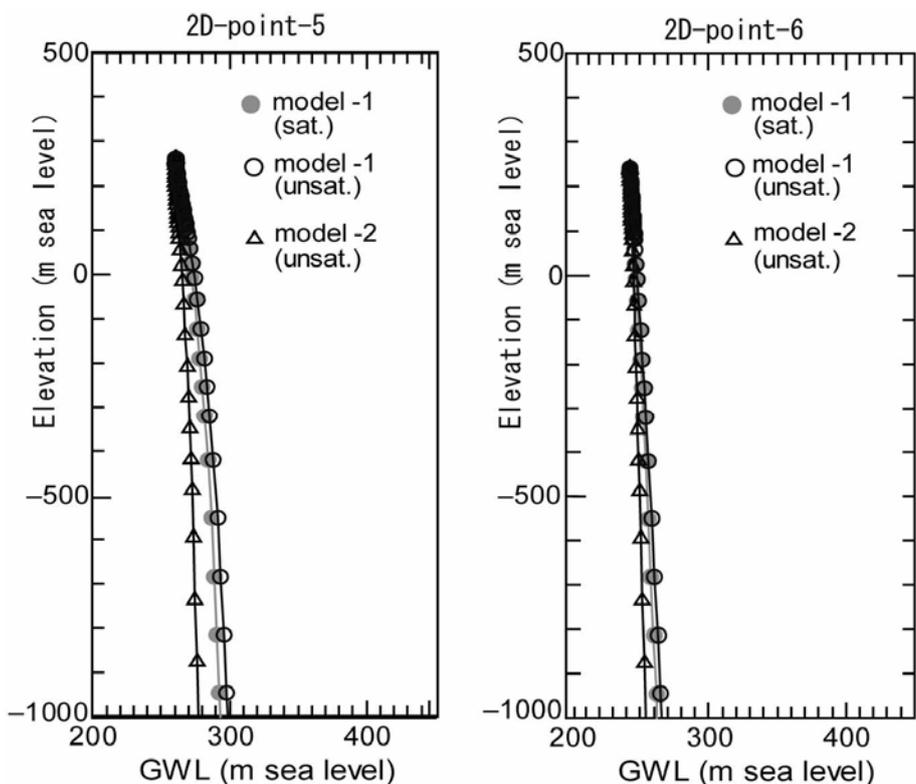
- ① 北側の木曾川低地部の影響は、分水嶺から南に数km程度（5km程度）まで及ぶ可能性が考えられる。尚、ポテンシャルの分布形状は、地下浅部の土壌、風化層、堆積層の透水性、異方性、深部岩体の透水性、異方性に敏感であるから細かな議論は出来ないが、このような境界の影響はモデル上考慮することが望ましいと考えられる。
- ② 従来領域の北部閉境界付近では、その北側の木曾川低地（河谷）の影響を大きく受け、河谷がないとした場合より計算上数十m水頭が低くなるようである。よって、この位置は閉境界とすることは、モデル化上好ましくない可能性が強い。
- ③ 上記より、北側に位置するDH-10、13号孔の観測水位は、木曾川の影響を受けている可能性が強い。また、それ以南では境界の影響は小さくなり、断層の影響が強くなるものと考えられる。
- ④ 月吉断層の存在は、その北側の深部ポテンシャルを増加させ、南側の深部ポテンシャルを低下させる効果を持つ。しかし、断層の存在だけでは、DH-2、4号孔、MIU-1、2、3号孔の観測水位の低さは説明仕切れず、南側の境界が必ずしも閉境界ではない可能性がある。

このような検討から、自然の水循環モデルの作成においては、適切な境界を用いることの重要性が指摘された。



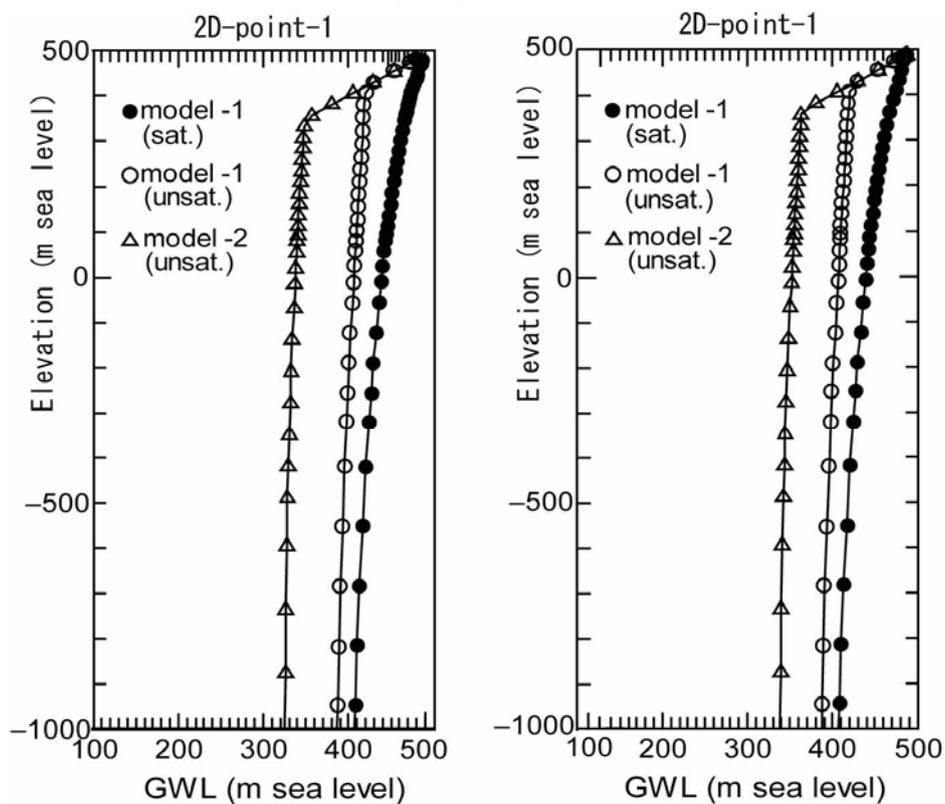
(左図は従来モデルの北側分水界の位置、右図はそこから1km程度南)

図2.4.24 従来モデルと拡張領域モデルのポテンシャルの違い



(左図は従来モデルの北側分水界から5km程度, 右図は6km程度南の地点)

図2.4.25 従来モデルと拡張領域モデルのポテンシャルの違い



(分水嶺付近のポテンシャルであり, 左図は断層がない場合, 右図はある場合)

図2.4.26 拡張領域モデルで断層がない場合とある場合の違い

2.4.4.3 浸食に伴う流動系の変化に関する検討の成果

本研究では、放射性廃棄物処分において、10万年オーダーにわたる埋設環境の境界条件の変化（地形の隆起・浸食・堆積・変形など）が長期の安全性評価にどの程度の影響を与えるかを基礎的なモデル計算から検討する。特に、地形変化に伴う地下水流動場の変化、それに伴う流速・流向の変化、それに乗った物質の移行距離や移行時間の変化を、以下の様なケーススタディから検討した結果を報告する（図2.4.27, 図2.4.28）。

(1) 地下水位形成に関する基本検討

流域の地下水位は、地形（標高分布）・降雨涵養量・岩盤透水性・間隙率の相互バランスで決まる。各々が変化した場合、地下水位・地下水流れがどのように変化するかについてモデル解析を行う。

(2) 側方浸食が地下深部流動場に与える影響

長期の河川の下刻、谷の拡大（図2.4.27の左側が浸食されている）による流動場の変化の様子を検討する。

(3) 実地形断面による地形浸食効果の検討

東濃地区の地形断面を利用し、浸食による地形低下を想定し、地下水流動場に与える影響を検討する。

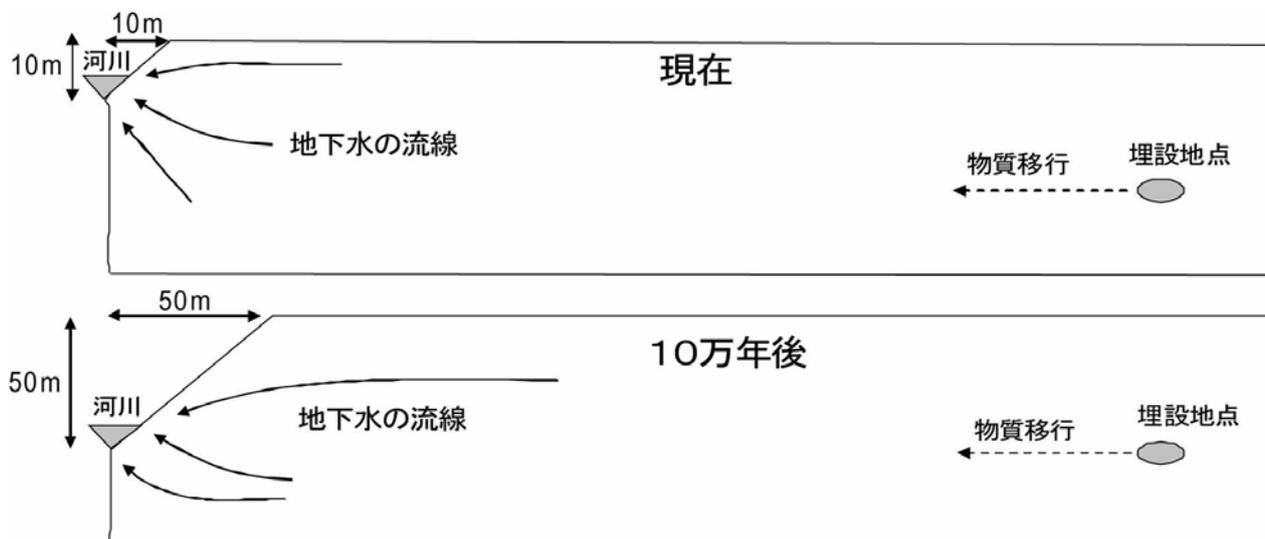
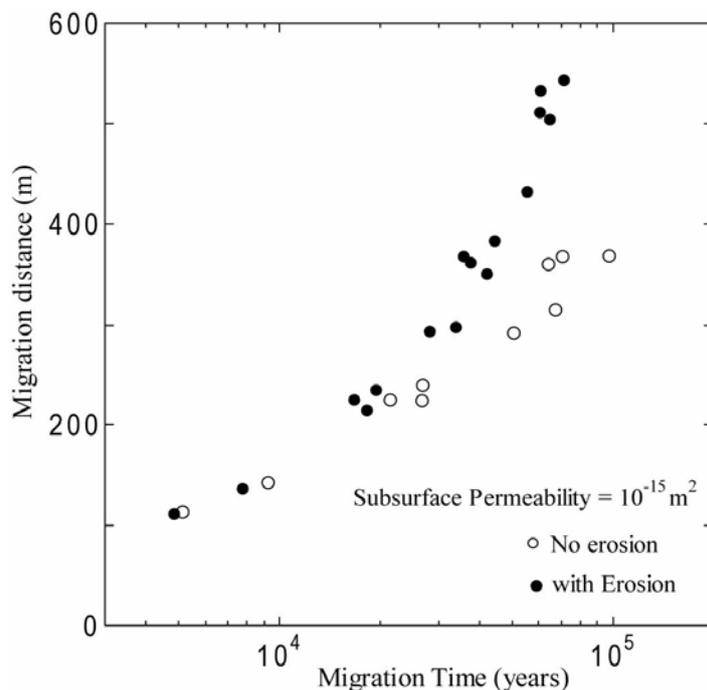


図2.4.27 河川の下刻・側方浸食の概念図



(下刻・側方浸食の拡大と共に地表までの移行時間が短くなる様子がわかる)

図2.4.28 滞留時間と移行距離の変化

本検討の結果は以下のようにまとめられる。

- ①2次元断面モデルを使い、地形標高、涵養量、透水性、間隙率の変化に伴う地下水系の変化を検討した。その結果、定常状態の地下水位は涵養量の多寡、透水性の程度に敏感であり、間隙率には鈍感である。
- ②2次元断面モデルにより、河川の下刻、側方浸食に伴う流動場の変化を検討した。その結果、図2.4.27のように、長期の河川の下刻、谷の拡大が起こる場では、図2.4.28に示したように、浸食が起こる場合には、浸食のない場合に比べ、同じ移動時間でも移動距離が大きくなることがわかった。10万年間の継続的な下刻の影響は遠方まで流動場に長期的な影響を与える可能性が示唆された。
- ③実地形の2次元モデルを利用し、浸食による地形低下が地下水系に与える影響を検討した。山地の標高の高い部分での地下水位は浸食の程度である程度変化するが、低地を含めた流動場への影響は小さいと考えられる。

なお、長期の浸食は流域の分水界を変化させるため、3次元シミュレーションでは対象地域をより大きな分水界で囲う必要が生じる。

2.4.5 長期安全性評価の課題と展望

ここでは、これまでの研究を通じて得られた成果や他の研究における成果などを踏まえ、現状の技術レベル、課題および展望をまとめる。放射性廃棄物処分の安全性評価には様々な制約条件下での評価が求められている。長寿命核種が含まれる地層処分や余裕深度処分での評価は10万年を超える時間スケールの予測が求められる。

2.4.5.1 境界変動の取り扱い

(1) 降水量変動・海水準変動などの水文変動

沿岸域の処分を想定した場合、10万年オーダーでの氷河期の再来による降水量変化、100mオーダーの海水準低下および上昇は、地下水の流動の様子を大きく変える変動である。

このような境界変動を表現することは、三次元的な水循環シミュレーションにおいても可能である^{8),9)}。具体的には、以下のような方法が考えられる。

- ①数値モデルには海底地形・地質を含めてモデル化する。
- ②氷河期への緩慢な進行と急速な間氷期の変動はパターン化し、降水量の変動、海水準の変動として入力データを準備する。
- ③本研究で述べたシミュレーションでは、海水も地表水として扱い、その水位を入力にあわせ連続的に変化させることができる。海水準低下により露出する海底地形やそこへの淡水の湧出、塩淡境界の位置・形態の変化、地下水流動場の変化が追跡され、核種移行の変化も予測計算ができる。

現在の課題としては、以下があげられよう。

- ④海水準の変化は陸域の侵食・堆積の変化を誘起するが、それがどこまで予測に影響するか、どのように表現すべきかは不明である。

(2) 陸域の隆起・浸食・堆積に伴う変化

- ①陸域の構造地質学的隆起は、特に余裕深度処分では問題となる可能性がある。処分地周辺の第四紀における隆起速度はおおよそ推測できる。問題となるのは、どの程度の広さの隆起が起こるか、処分地はそのどの辺にあたるか（段丘ができるとした場合、その中央部か段丘崖付近か）を予測できないことにある。また、隆起自体は必ずしも安全性を損なうことにはならないが、周辺での浸食がどのように起こるか、という予測しにくい状況もある。
- ②緩慢な隆起を数値シミュレーションで表現すること自体は可能である。また、それに付随した水理物性の変化（間隙率や浸透率の変化）を入力することも可能である。
- ③水による浸食、土砂移動と堆積のプロセスは大きな不確定性を含むため、そのモデル化は浸食が現在の地表分水界を変え、土砂の堆積は表流水の動きにも影響するため、モデルの境界のとり方が問題となる。

2.4.5.2 人工バリア内部および周辺核種移行の評価

(1) 人工バリア内部の変化

- ①腐食ガスの生成速度、それに伴う人工バリア充填材の物性変化・破損などの予測
- ②ガスの生成に伴う圧力変化、ガスの流動、周辺岩盤への漏洩などは、ここで述べたシミュレーションモデルにより追跡は可能である。

(2) 自然バリアへの漏洩量の推定

廃棄体を構成するガラス固化体やオーバーパック、ベントナイトの人工バリアは長期間で多少の劣化をするものの消滅するわけではないので、かなりの核種を保持し続けるものと考えられる。

地表生物圏での線量を評価する場合には、人工バリアから天然バリアへの移行が時間的にどの程度の割合で起こるか、その範囲を適切に捉えることが重要となろう。

(3) 核種移行の評価

天然バリアに漏れ出た核種が地質媒体中をどのように移流分散・吸着脱離により動くか、どのようなパラメータを使うべきか、が問題となる。すでに記したように、不均質な媒体中でのマクロパラメータに関しては適切なものは明確ではない。ある範囲で確率的に発生させたパラメータを使い多数のケーススタディから確率的な予測を行うことが必要となろう。

2.4.5.3 数値モデルの高速性・柔軟性と展望

非常に長期の安全性評価においては、その客観性・説明性を向上させるためには、次のような観点が重要となろう。

- ① 処分地における人工バリアと天然バリアの双方を同時にモデル化した計算
- ② かなり精細なメッシュ分割によるリアリスティックなモデルの作成
- ③ 地下の水理物性分布の不確実性を確率的に扱う多数のケーススタディ

このような点を満たすため

- ④ 三次元的に百万個を超える離散化
- ⑤ 並列化による高速演算
- ⑥ 結果のリアリスティックな可視化
- ⑦ 多数のケーススタディの統計処理とグラフ化
- ⑧ 動的画像による流線などの可視化

2.4.6 まとめ

本章では、過去に行なった研究の内容をまとめると共に、予測解析の課題と展望を述べた。大深度処分の長期安全性の評価は適切な数値シミュレーション技術に託されたものである。今後は、実スケールを想定した事例の積み重ねと新たな技術の開発を進めたいと考えている。

2.4.7 参考文献

- 1) 登坂博行・小島圭二・三木章生・千野剛司(1996a)：地表流と地下水流を結合した3次元陸水シミュレーション手法の開発，地下水学会誌，第38巻第4号，pp.253-267.
- 2) 登坂博行・伊藤一誠・蝦原雅之・稲葉 薫・伊藤 彰・小島圭二(1996b)：多成分多相型移流拡散モデルによる包括的な地下水汚染解析，地下水学会誌，第38巻，3号，pp.167-180.
- 3) 登坂博行・伊藤 彰・田中将希・岩井 卓(1998a)：自然水理系の流体・熱移動統合モデルの試み その1，流体・熱移動の新しい定式化と実験的検討，地下水学会誌，第41巻第3号，pp.147-158.
- 4) 増本 清・登坂博行・小島圭二(1998b)：多点非定常圧力の時間変化率同時自動マッチングによる岩盤水理特性逆解析－3次元基本アルゴリズムの開発－，地下水学会誌，第40巻第3号，pp.273-288.

- 5) Kazumasa Itoh, Hiroyuki TOSAKA, Kitao NAKAJIMA and Masahiro Nakagawa (2000a) : Application of surface-subsurface flow coupled with numerical simulator to runoff analysis in an actual field, Hydrological process, 14, pp.417-430.
- 6) TOSAKA Hiroyuki, ITOH Kazumasa and FURUNO Takashi (2000b) : Fully Coupled Formulation of Surface flow with 2-Phase Subsurface Flow for Hydrological Simulation, Hydrological Process, 14, pp.449-464.
- 7) 登坂博行(2002c) : 地下水と地表水・海水との相互作用 その9, 地表水流れと地下水流れの結合解析, 地下水学会誌, 第44巻1号, pp.45-52.
- 8) 登坂博行(2002a) : 地質時間にわたる淡塩漸移帯の形成過程と形態変化に関する数値解析的検討 その1, 静的境界条件下における感度解析と一般的議論, 応用地質, 第43巻5号, pp.293-305.
- 9) 登坂博行(2002b) : 地質時間にわたる淡塩漸移帯の形成過程と形態変化に関する数値解析的検討 その2, 動的境界条件下における感度解析と一般的議論, 応用地質, 第43巻5号, pp.306-315.
- 10) 近藤純正(1994) : 水環境の気象学, 朝倉書店.
- 11) 登坂博行, 増本 清(1993) : 自動ヒストリーマッチングによる貯留層キャラクターゼーション, 石油技術協会誌, 第58巻, 6号, pp.494-501.
- 12) 登坂博行(2006) : 地圏水循環の数理, 東京大学出版会.

(東京大学 登坂博行)

2.5 地下水の地球化学的調査に関する研究総括

2.5.1 経緯

水循環において水分子そのものと行動を共にするいわゆる水の同位体を用いることにより、同位体の持つDATING能・TRACER能を活用し、水文循環の各プロセスにおける水の挙動の実態を詳細に把握することができる。このような同位体としては、水素の放射性同位体であるトリチウムと、水素・酸素の安定同位体である重水素（デュテリウム）・重酸素があり、自然界に普遍的に存在していることから、環境同位体と呼ばれている。平成11年度～平成21年度の11年間に渡って実施してきた『地下水の地球化学的調査に関する研究』は、全てこの環境同位体を用いた水循環プロセス把握に関するものである。以下に年度毎の研究テーマをリストすると共に、表2.5.1にこれまでの研究の系譜を一覧で示す。

（平成11年度）

- 環境同位体（トリチウムと安定同位体）による金子台関東ローム土壌水の滞留時間・浸透機構の解明
- 地下水中の安定同位体比から推定したローム台地の地下水涵養機構に関する研究（相模原ローム層を利用した温暖化指標としての安定同位体比の利用）

（平成13年度）

- 地下水の安定同位体比から推定した熊本平野の地下水流動機構に関する研究
- 不飽和火砕流堆積物層中の同位体プロファイル（トリチウムおよび安定同位体比）に基づく阿蘇火砕流台地の地下水涵養機構の研究
- 坑道掘削に伴う水理学的影響領域に関する研究（その1）

（平成14年度）

- 間隙水中の安定同位体比を用いた坑道掘削に伴う水理学的影響領域に関する研究
- 菊池台地の河川水に占める地下水流出成分の評価

（平成15年度）

- 低透水性堆積岩盤における間隙水中の安定同位体比を用いた広域地下水流動の把握に関する研究（幌延地区の堆積岩中間隙水による古水文情報の解析）

（平成16年度）

- 降水中の安定同位体比変動に基づく変成岩源流域に於ける降雨一流出過程の解明に関する研究（森林地域における樹幹流の涵養効果の評価）

（平成17年度）

- 熊本県宇土半島の火山岩流域における広域地下水流動の実態解明に関する研究（火山岩帯水層の広域地下水流動の実態把握とシミュレーション）

（平成18年度）

- CFCs トレーサーを用いた地下水の滞留時間測定法の開発
 - CFCsの起源と大気中のCFCs
 - CFCsによる地下水の滞留時間推定法の開発
 - CFCs濃度を变化させる要因
 - CFCsによる地下水滞留時間推定例

○採水・分析法

(平成19年度)

CFCs トレーサーを用いた地下水の滞留時間測定法の開発 (その2)

○地下水中のCFCs濃度分析法

○入力として用いる大気中のCFCs濃度の検討

○霧島地域におけるCFCsを用いた地下水・湧水の滞留時間評価

(平成20年度)

CFCs トレーサーを用いた地下水の滞留時間推定法の開発 (その3)

○幌延地域におけるCFCsを用いた地下水・湧水の滞留時間評価

○新潟県十日町蒲生地域におけるCFCs年代を用いた地下水流動について

○釜石鉾山における別途調査で分析した地下水中のCFCs測定結果についての考察

(平成21年度)

CFCs トレーサーを用いた地下水の滞留時間推定法の開発 (その4)

○霧島地域全域におけるCFCsを用いた地下水・湧水の滞留時間評価に基づく湧水流出機構

表2.5.1 平成11年度～平成21年度の地下水の地球化学特性調査に関する研究レビュー

		水循環プロセス				人為的水循環変化
		涵養機構	涵養機構	流動機構	流出機構	人為的地下水擾乱
		樹幹流涵養効果	土壌水浸透機構	(広域)地下水流動	河川流出	空洞周辺地下水挙動
環境同位体手法	水素・酸素安定同位体比	H16:樹幹流環境機構(熊本・鹿北森林)	H11:関東ローム降下浸透 H13:熊本AS04降下浸透機構	H13:熊本平野広域地下水流動 H15:幌延地区堆積岩間隙水古水文情報解析	H14:菊池台地河川流出機構	H14:土岐堆積岩空洞掘削影響
	放射性同位体(トリチウム)		H11:関東ローム降下浸透	H17:不知火地区火山岩岩盤地下水		
	CFCs			H18:CFCs分析システム確立 H19:日本の大気CFCs入力検証・不知火地区火山岩岩盤地下水 H20:CFCs年代測定法検証(釜石) H21:湧水CFCs年代実証研究(霧島)		

この11年間は、涵養域から流出域までの広範囲に渡る水循環のプロセス把握を目的として、各地における環境同位体を用いた実証的な研究を遂行してきた。特に、平成13～14年度に実施した土岐地区の堆積層岩盤中に掘削された空洞周辺の間隙水中の安定同位体比分布から掘削に伴う空洞壁面からの蒸発効果の影響把握を行った研究や、平成15年度に実施した幌延地域における堆積岩間隙水中の安定同位体比特性から当該地域の古水文情報の抽出を試みた研究、さらに平成17年度に実施した熊本県宇土半島不知火地区の火山岩系流域の岩盤地下水の広域流動特性の総合的調査(環境同位体やポテンシャル観測、地下水流動シミュレーション等)等が注目すべき成果と言えよう。さらに平成18年度からは、減衰傾向にあるトリチウム濃度に代わる新たな若い地下水年代トレーサー手法としてCFCs法に注目し、その分析法の確立、採水方法、入力となる大気CFCs変動状況を確認した上で、幌延、釜石、新潟、熊本、霧島と日本各地で適応研究を実施した。我が国の地下水では人工起源CFCsの影響の少ない釜石のような非都市域では、本手法が十分な精度で利用できることを検証した。さらに本年度実施中の霧島地域の地下水においてCFCsの繰り返し

測定結果をLUMPEDモデルに適宜応用することで、帯水層の流動構造を踏まえた滞留時間の解析が可能であることを検証している。環境同位体を用いた広域の地下水流動を解明する手法は、技術的にはほぼ確立してきているといえるが、問題は岩盤を含む広域地下水流動に関しての実績が少ないことである。特に、我が国のように地質状況が複雑で地形起伏が大きく且つ湿潤気候下であるため地下水涵養量が大きく地下水流動が複雑且つ活発な地域における3次元的な広域地下水流動の実態把握には、多くのデータの蓄積が必要である。地層処分の観点からは、広域地下水の流動把握は天然バリアの評価上極めて重要な課題であり、この種の環境同位体手法を用いた広域地下水流動調査は、我が国特有の流動特性を把握するうえで必須の技術である。本手法を多くの岩盤地下水に適応して、今後ともデータ蓄積を図って行くことが肝要である。これまでの11年間の研究成果として関連学術誌に公表した報文・論文リストを以下に示す。

- 1) 嶋田 純 (2004):熊本地域の地下水－70万都市を支える地下水との共生－, 日本水文科学会誌, No.34, pp.81-90.
- 2) 嶋田 純 (2005): 同位体を利用した古水文情報の抽出, 日本水文科学会誌, No.35, pp.103-110.
- 3) 小坂寛・嶋田 純・花室孝広・濱 克宏 (2005): 第三紀堆積岩における空洞掘削に伴う間隙水の挙動, 応用地質, No.45, (6), pp.216-323.
- 4) 寺本雅子・嶋田 純・国丸貴紀 (2006): コア間隙水中の安定同位体比をもとにした低透水性堆積岩盤における地下水挙動の兆候, 応用地質, No.47, (2), pp.68-76.
- 5) Shimada J., Inoue D., Satoh S., Takamoto N., Sueda T., Hase Y., Iwagami S., Tsujimura M., Ishitobi T. and Taniguchi M. (2007) : Basin-wide groundwater flow study in a volcanic low permeability bedrock aquifer with coastal submarine groundwater discharge, IAHS publication, No.312, pp.75-85.
- 6) 嶋田 純 (2007): 環境同位体を用いた地下水循環プロセスの研究, 細胞工学, Vol.26, No.1, pp.98-99.
- 7) 嶋田 純(2009): 環境トリチウムによる地下水年代測定, 小特集『施設起源トリチウムの移行モデルと環境トリチウム分布』, プラズマ・核融合学会誌, No.85, (7), pp.431-433.

2.5.2 CFCsトレーサーを用いた地下水の滞留時間推定法の開発 (その4)

2.5.2.1 はじめに

地下水の滞留時間推定には、水に含まれる様々な物質をトレーサーとして用いることが有効である。その代表的なものの一つに、水素の放射性同位体である ^3H (トリチウム) を用いた方法がある。 ^3H は宇宙線の作用により大気上層中で恒常的に生産されるが、1950年代から60年代にかけて行われた大気圏内における核実験により、大気中に ^3H が大量に放出され、その結果としてとくに北半球の各地で降水の ^3H 濃度が急激に上昇し、実験終息とともに指数関数的に低下した。このような ^3H 濃度の高い降水は、我が国においても地下水の滞留時間を導出するうえで、重要なトレーサーとしての役割を果たしてきた。しかし、 ^3H の半減期は12.43年と短いことから、近年我が国では降水の ^3H 濃度が天然レベルにまで低下してきており、 ^3H のトレーサーとしての有効性が希薄になってきている。我が国のように降水量が多く、浅層地下水の滞留時間が数十年程度のオーダ

一を示すような地域においては、滞留時間の推定に支障をきたすことが大いに考えられることから、 ^3H に代わり滞留時間の短い、新しい地下水に適用できる滞留時間推定方法の開発が求められている。

このような観点から、近年新たなトレーサーとして、フロン類（Chlorofluorocarbons：CFCs）を利用し地下水の滞留時間を推定する方法が利用されている。CFCsを利用した方法は欧米において研究が行われ、その有効性がBusenberg and Plummer¹⁾等により確認されている。CFCsは人工的にのみ生産された物質で、非常に安定な性質を有し、さらに大気中のCFCs濃度は規制前までほぼ単調に増加しているなど、トレーサーとして非常に有利であることから、とくに滞留時間の短い、浅層地下水の滞留時間推定に有効であると考えられる。しかし国内においては、CFCsを地下水の滞留時間の推定に適用した例は皆無であり、地下水中のCFCs分析手法さえ確立されていないのが現状である。平成18年度からはCFCsをわが国における地下水の滞留時間の推定に適用するため、地下水中のCFCsの分析手法および採水方法等の確立と、国内におけるCFCsを用いた滞留時間推定のフィールド研究事例を増やすことで、その有効性の検討を開始している。今年度は対象地域として霧島火山地域の湧水を対象に採水・分析を行い、無機溶存成分・水素・酸素安定同位体比および地下水中のCFCs測定結果に基づく地下水滞留時間情報を基に火山山麓湧水の流動機構に関する総合的な考察を行った。

2.5.3 霧島地域におけるCFCsを用いた地下水・湧水の流動機構評価

2.5.3.1 研究地域の概要および地形・地質

霧島火山は鹿児島・宮崎の両県境に位置する火山群の総称である（図2.5.1）。最高峰の韓国岳（標高1700m）や高千穂峰など、20以上もの独立した火山体と火口からなり、北西—南東方向にのびた楕円形の地域（長径30km、短径20km）に分布する。霧島火山には大浪池をはじめ、爆発的な噴火によってもたらされた火口湖が多くみられる。その火山活動は今なお続いており、硫黄山など多くの地域で噴気をもたらし、地熱地帯を形成している。本研究地域の霧島火山周辺には湧水が約137ヵ所存在し、20余の河川が流下している。大浪池（標高1400m）や栗野岳（標高1100m）、えびの岳（標高1300m）など多数の山体が存在する。北に栗野岳、東に韓国岳を臨む標高700～900mの丘陵地には大霧地熱発電所がある。えびの岳、韓国岳、大浪池には火口のほぼ中央を通して山体を北東—南西方向に切る断層が見られる。霧島火山の直接の基盤岩は、西南日本外帯に広く分布する白亜系の四万十層群に属する堆積岩類および更新世前～中期の火山岩類であるが、肥薩火山岩類や霧島溶結凝灰岩なども分布していることが確認されている。霧島溶結凝灰岩の上位には、佐賀利安山岩や牧園安山岩などと呼ばれた火山岩類と、それと指交関係にある堆積岩類が認められており、これらを加久藤火山岩類としている²⁾。本研究地域である霧島火山西部の地質を図2.5.2に示した。霧島火山を構成する火山体は、その火山地形の保存状況と浸食の程度によって、古期霧島火山と新期霧島火山とに大別できる。栗野岳・烏帽子岳および湯之谷岳周辺には主に安山岩溶岩と火砕岩（古期火山岩類）が分布している。白鳥山・大浪池および、えびの岳周辺には安山岩溶岩と火砕岩（新期火山岩類：前入戸火砕流）が分布しており、このうち大浪池は溶岩を主体とした小型の成層火山とそれを覆って形成された火砕丘で構成される。飯盛山・韓国岳周辺にもまた安山岩溶岩および火砕岩（新期火山岩類：後入戸火砕流）が広がっており、韓国岳は大浪池同様、主に溶岩からなる小型の成層火山とそれを覆うように形成された火砕丘から構成されている²⁾。

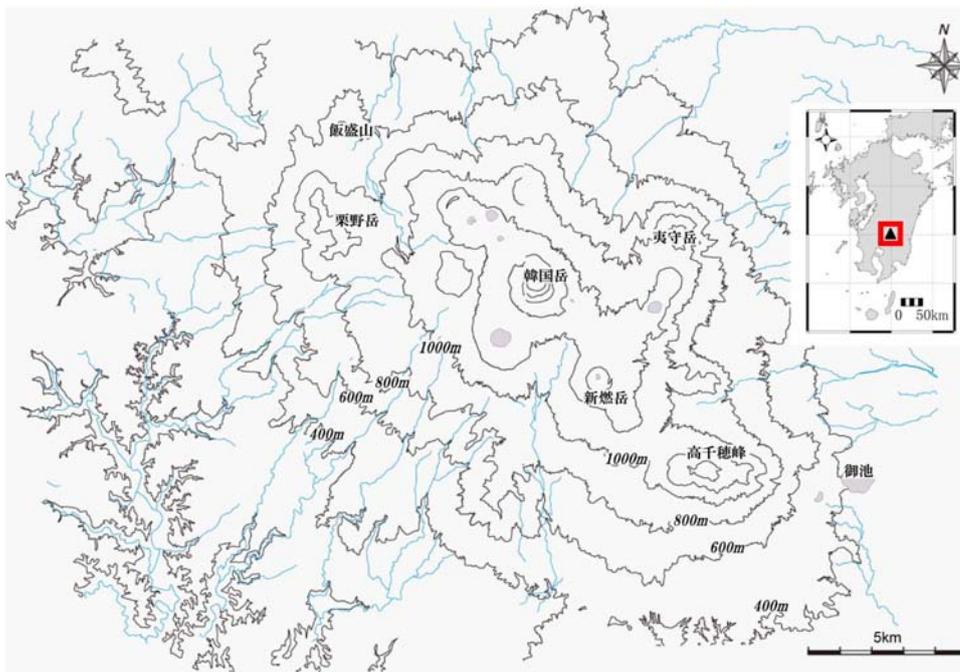


図2.5.1 研究地域全体図

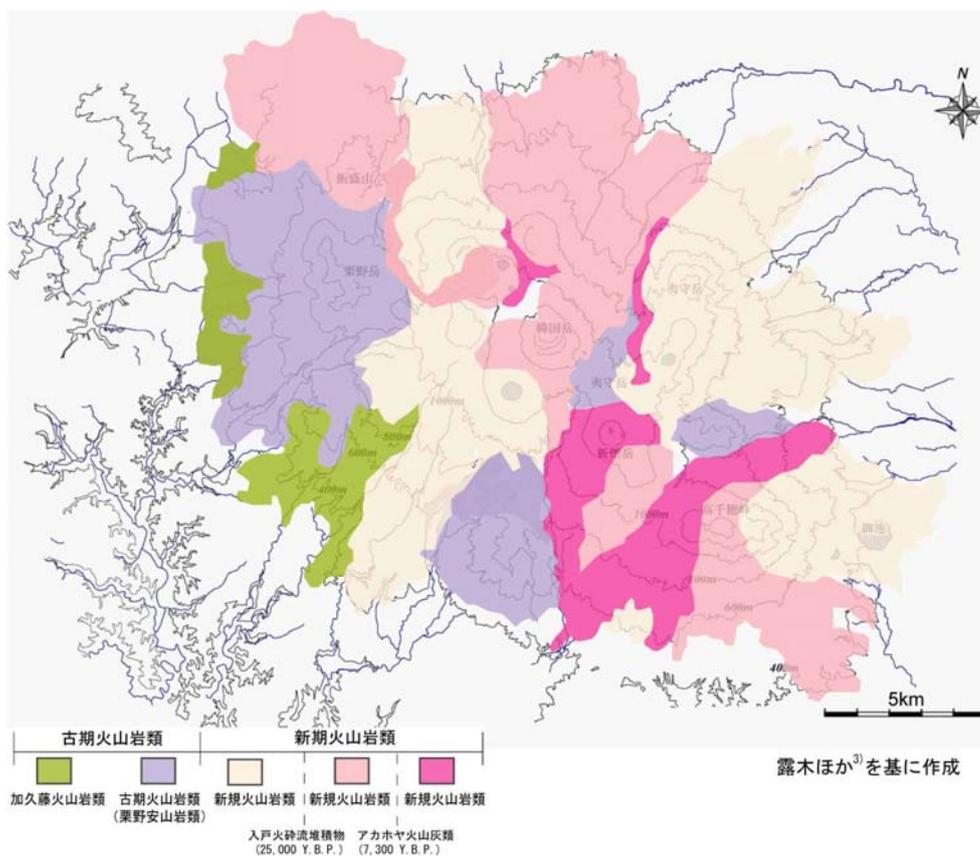


図2.5.2 研究地域の地質状況

2.5.3.2 現地調査および採水・分析方法

平成19年7月～平成21年8月にかけての3年間に渡り都合4回、異なる季節に図2.5.3に示される地

点において現地調査および採水を行った。現地調査の対象地点には、山頂から山麓にかけて広がる湧水、研究地域を流れる複数の主要河川の上・下流、山頂の湖、標高600～800m付近で湧出している温泉の湧出口等が含まれる。水温、pH、電気伝導度（EC）、溶存酸素（DO）、酸化還元電位（ORP）に関しては現地にて採水を行う際に同時に測定し、無機溶存イオン濃度、酸素・水素安定同位体比に関しては、実験室での測定用に塩化ビニル性のポリビンにそれぞれ100ml（無機溶存イオン濃度および酸素・水素安定同位体比）ずつ採水し、溶存フロン（CFCs）濃度に関しては、専用のガラスビン3本にペリスタポンプを用いて大気と接触しないよう、ステンレスバケツ内で水中置換させながら125mlボトルを満水に採水した。持ち帰ったサンプルは実験室において下記の項目の分析を行った。

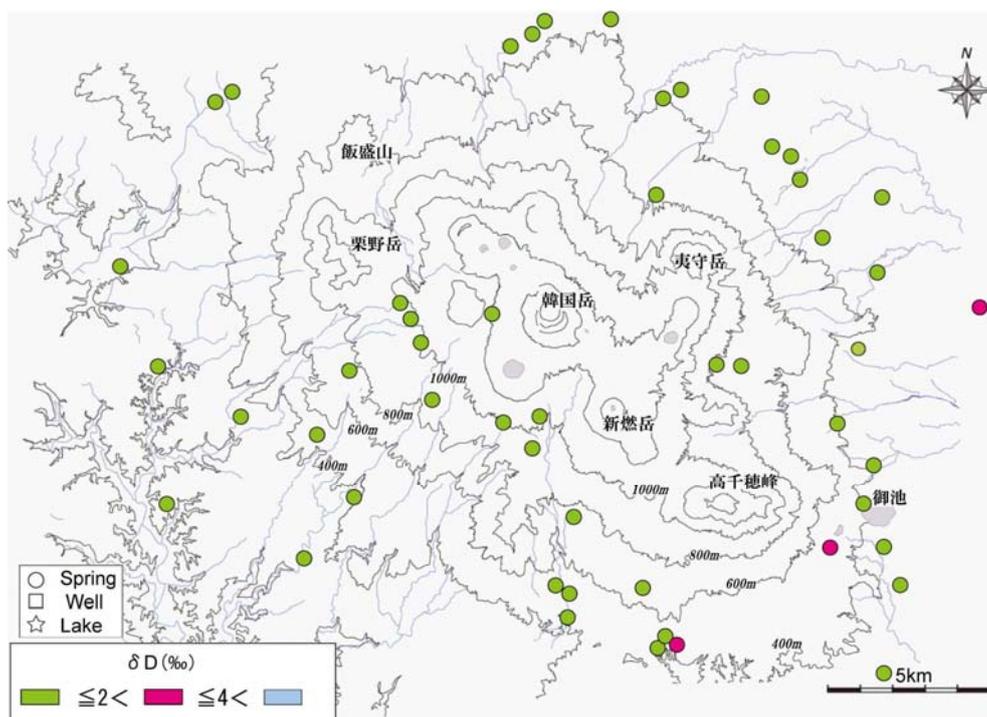


図2.5.3 採水地点位置図と季節間の水素同位体比濃度差

(1) 無機溶存イオン濃度

採取した試料水すべてについて無機溶存成分8項目（ Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 HCO_3^- ）の分析を行った。 HCO_3^- の測定は1/100N硫酸によるpH4.8のアルカリ度滴定法にて行い、その他のイオンについては熊本大学理学部理学科のイオンクロマトグラフ（メトローム社製761 Compact Ic）にて行った。

(2) 溶存Si濃度

採水した試料水の溶存シリカ（ SiO_2 ）濃度を、（独）九州沖縄農業センターのセイコー電子工業株式会社製誘導結合プラズマ発光分析装置（ICP-AES）SPS4000を用いて測定した。濃度の測定精度は $\pm 0.1\text{mg/l}$ である。

(3) 安定同位体比分析

環境における水素と酸素の安定同位体はそれぞれ ^1H (H)、 ^2H (D)、 ^{16}O 、 ^{17}O 、 ^{18}O があり、これ

らの同位体から構成される水の同位体分子には9種類存在する。その主なものには H_2^{16}O , HD^{16}O , H_2^{18}O があり、これらの水の同位体分子は一部の場合を除いて化学的に、溶存化学成分のように周囲の物質との反応により変化することはない。つまり、水におけるDおよび ^{18}O の依存度の変化は水そのものの挙動を直接反映するため、地下水流動の解明において有効なトレーサーとして用いられている。

酸素・水素安定同位体比分析に関しては熊本大学理学部理学科の安定同位体比測定用質量分析計「Thermo electron社製DeltaS」を用いて行った。酸素安定同位体比分析に関しては同位体平衡法により試料水と平衡になった CO_2 ガスを、水素安定同位体比分析に関してはクロミウム還元法により作成した H_2 ガスを質量分析計で測定した。観測期間3年間の異なる季節毎の安定同位体比の差は、図2.5.3に示されるように、水素同位体比で2‰（酸素同位体比で0.2‰）以下の分析誤差程度の範囲にあり、季節的な変化はほぼ無視できると考えられたため以降の考察では、異なる季節に採取されたサンプルのすべてを等価に評価して議論を進めた。

(4) CFCs濃度分析

CFCsは工業用に人工的に合成された有機化合物で、その大気中濃度は生産量の増加に伴い1940年代～1990年代まで単調増加している。降水のトリチウムと比較して最近の年代に濃度ピークがあるため、若い地下水の年代を推定できるトレーサーとして近年注目されている。CFCsは化学的に安定であるため、基本的には涵養されたときの濃度は地下水中で保存される。年代推定に用いられるCFC-11 (CFCl_3), CFC-12 (CF_2Cl_2), CFC-113 ($\text{C}_2\text{F}_2\text{Cl}_3$) の3種類である。

濃度分析に関しては、標準ガス（太陽日酸社製標準ガスCPB-28663, CPB-00240）で検量線を作成した後、Purge and Trap法によって試料水中のCFCsを抽出する。高純度 N_2 にて試料水中の溶存ガスを追出し、冷媒（エタノール+液体窒素）によって -30°C ～ -40°C に冷却されたトラップにCFCsを捕集・濃縮する。その後 95°C の温浴槽で加熱し、一定時間トラップをECD検出器付のガスクロマトグラフ（島津社製GC-8A）に接続しCFCsを導入する。 70°C のカラムでCFC-11・12・113に分離させた後、それぞれのピークから地下水中のCFCs濃度を求める。濃度の再現性が良い場合は1地点につき3本、再現性に問題があった場合は4～5本の試料水の分析を行った。得られた濃度から地下水が涵養されたときの大気濃度を算出し、その値と過去の大気CFCs濃度曲線³⁾と対比させて涵養年代の推定を行った。

2.5.3.3 測定結果に基づく考察

(1) 安定同位体比

水素・酸素安定同位体比に基づくデルタダイアグラムは、異なる季節の採水のすべてが殆ど同じ範囲に分布しており、かつ霧島に近い都城市の降水による夏季および冬季天水線に挟まれた範囲にあることから、採水された地下水サンプルはすべて降水起源であることが分かる。また採水地点に対する分布は、図2.5.4に示すように、採水地点標高の高いサンプルほど相対的に軽い同位体比を示す高度効果が認められ、図2.5.5に見られるように、湧水中の酸素安定同位体比の高度変化には、高い標高の湧水は相対的に軽い同位体比を反映しているが、低い標高の湧水には様々な同位体比が存在しており、湧水の流動規模が高標高域からの広範囲なものから低標高域を主体とする比較的小規模な流動まで多岐に渡っていることを示唆している。同様の傾向は、図2.5.6に示した湧水水温と標高の関係にも認められる。

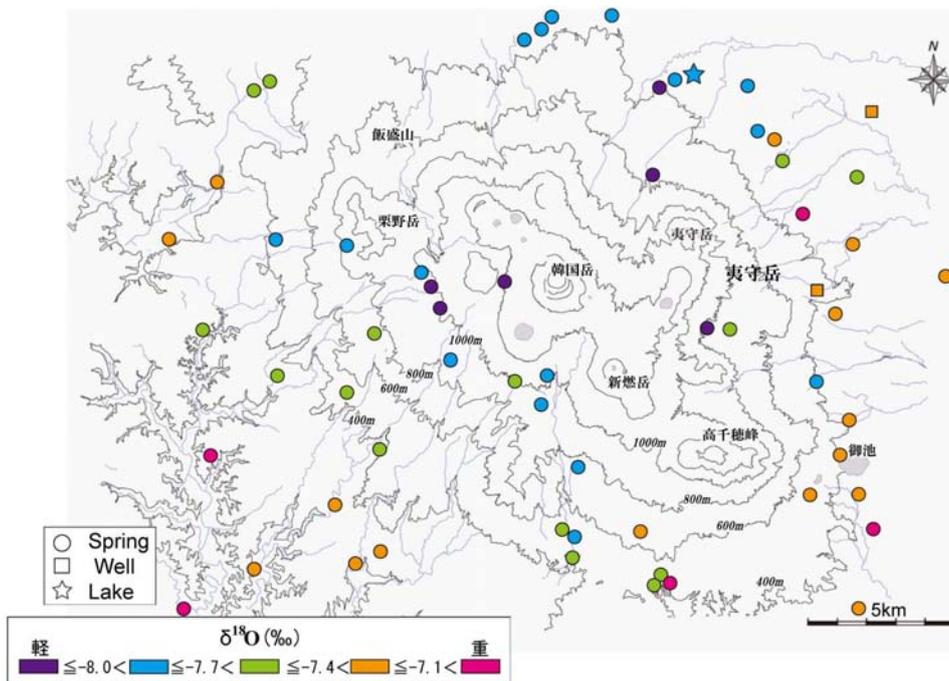


図2.5.4 採水サンプルの酸素安定同位体比分布

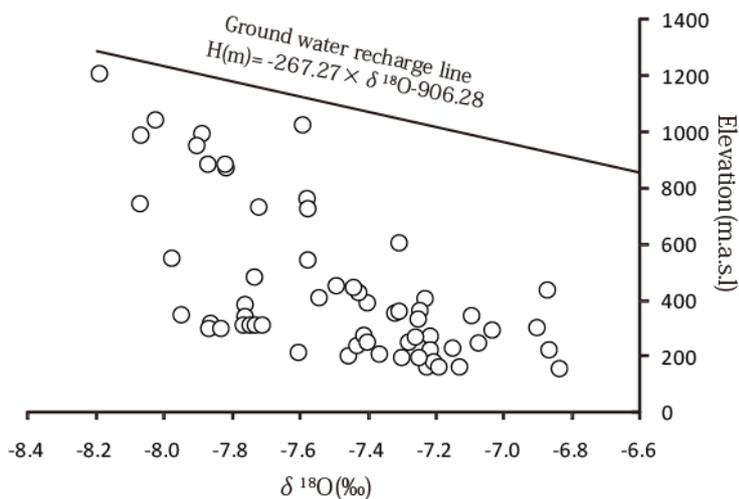


図2.5.5 湧水中の酸素同位体比の高度変化

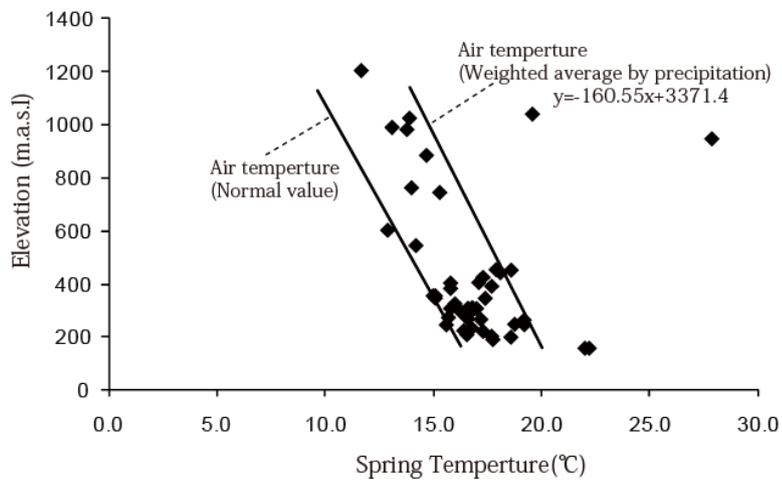


図2.5.6 湧水水温の高度変化

(2) 湧水水質の特徴

図2.5.7に湧水のパイパー表示による水質の特徴とその分布状況および図2.5.8にヘキサダイアグラムの分布図を示す。これらの図から読み取れる湧水の水質的な特徴として、地質年代の相対的に若い新規火山岩類からの湧水には火山起源の硫酸成分を主体とした相対的に高い濃度の溶存成分が検出されており、一方解析の進んだ古期の火山岩類からの湧水では、これらの火山岩系の水質の特徴が消えて溶存成分が重炭酸-カルシウム型の一般的な地下水に変化しており、さらに山麓部の湧水の一部では、地下水の水質進化に伴う陽イオン交換によって重炭酸-ナトリウム型の水質組成も見られるようになってきている。このように湧水の水質と地質およびその流動規模にはある一定の関係が存在していることが示唆される。

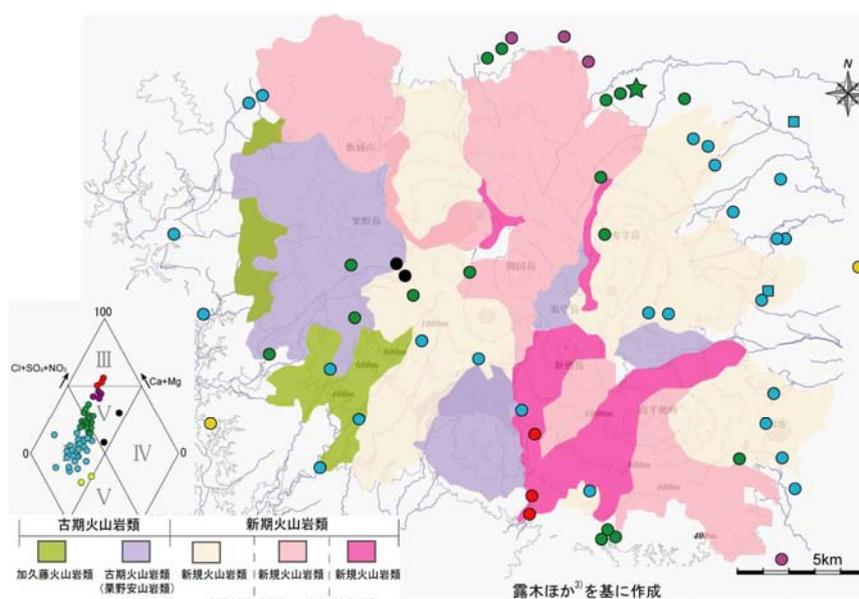


図2.5.7 湧水のパイパー表示による水質の特徴とその分布状況

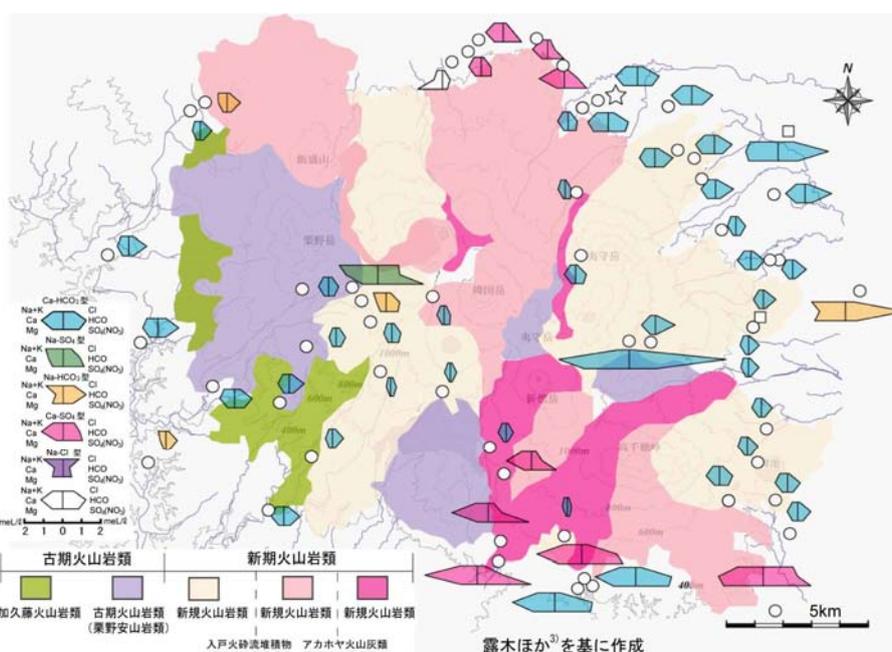


図2.5.8 湧水のヘキサダイアグラム分布図

2.5.3.4 LUMPEDモデルによるCFCs滞留時間評価

N. N. Ozyurt & C. S. Bayari⁵⁾は、地下水の滞留時間に関するモデルを組み合わせ、実際の帯水層の状況に最も近いと思われる状態を再現することで、トリチウム、CFCs、Kr85等の年代トレーサーを用いた平均滞留時間解析コードを公開している。対象となる帯水層モデルの組み合わせとして図2.5.9に示した14通りを想定し、涵養量や地下水貯留量、バイパスやデッド貯留量等のパラメータを適宜変動させて、それぞれの年代トレーサーの入力関数（降水あるいは大気中の濃度長期変化）を基に、地下水中のトレーサー濃度を算出し、実測とトレーサー濃度変化パターンに最もフィットする時の滞留時間を算定することを可能としている。

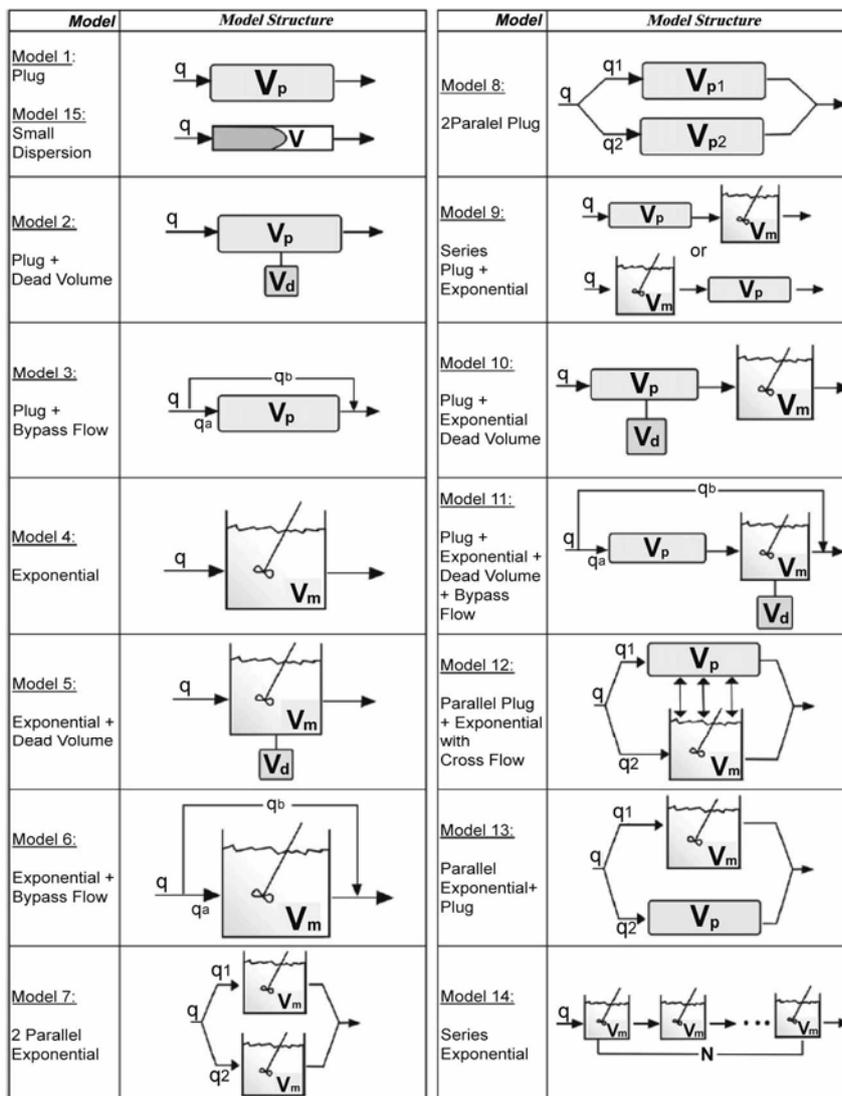


図2.5.9 LUMPEDモデルの帯水層モデル組み合わせパターン⁵⁾

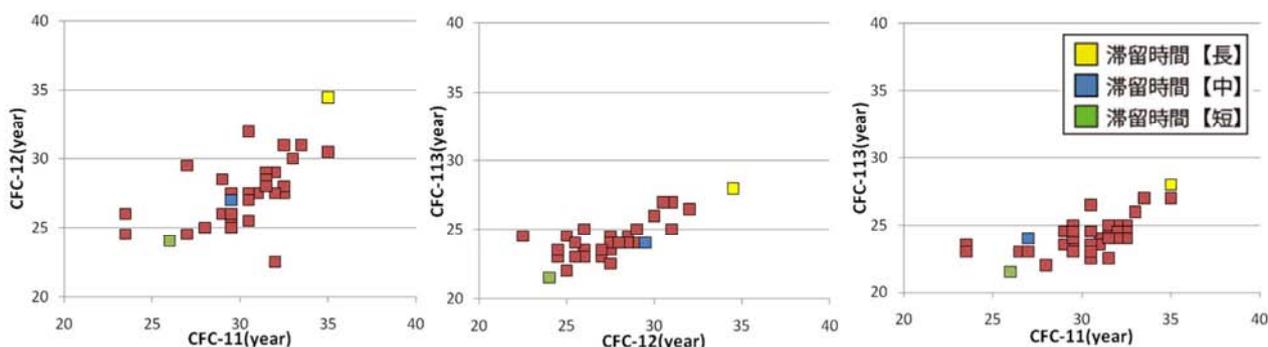
図2.5.10は、霧島地域において測定されたCFCs濃度について、ピストン流（LUMPEDモデルではPLUG流と称す）を仮定して算定した地下水滞留時間の3種類のCFCsの対応関係を示している。

図から分かるようにCFC-113は明らかに分解に伴う濃度低下がみられ、またCFC-12が相対的に最も乱れが少なく、滞留時間とCFCs濃度の間の線形性が高く安定している。これは従来から指摘されていたことで、今回の調査のように多数の測定結果が出ることで改めて確認できた。そこで、

CFC-12の濃度値を基本として以下の滞留時間の考察を進めた。

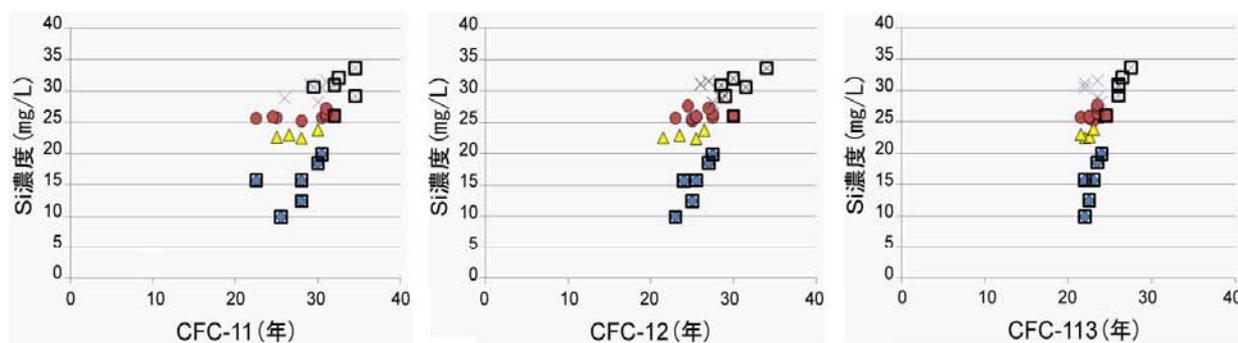
図2.5.11は、3種類のCFCsによる滞留時間（PLUGモデルを仮定）と地下水中の溶存シリカ濃度の変化を示したものである。シリカ濃度は、降水中には殆ど検出されず帯水層中を地下水が流動する過程で母岩より供給される溶存成分であるため、同一母岩の帯水層を流動する地下水の滞留時間を示す指標の一つと考えられている。図中□印で示した点は、各湧水地点において測定された2種類のCFCsの濃度の時間変化を入力となる大気中のCFCs濃度変化との関係で検討したモデル（Binary Mixing Model, 図2.5.12参照）上でPLUG流（PMで表示）のみで説明可能なポイントを示している。□印で示されたPLUG流のみで説明可能な湧水ポイントにおける滞留時間には、溶存シリカ濃度との間に明確な線形関係が示されているのに対し、それ以外の湧水ポイントではその関係が不明瞭であり、PLUG流以外の流動機構を考える必要があることが示唆される。

火山帯湧水の地下水構造モデルとして提唱されているものには、PLUG流に加えて図2.5.13に示されるように帯水層中に貯留構造をもつとされるものが一般的であり、本研究においても溶岩噴出後の地質時代を経過した火山岩類では解析の進行に伴うある程度の貯留構造が発達しているものと想定し、図2.5.9のModel: 9に示すような、PLUG流+貯留モデルによる滞留時間をLUMPEDモデルによる解析を試みた。



(図中の滞留時間の長・中・短は滞留時間の明確に異なる3つのサンプル例)

図2.5.10 霧島地域における3種類のCFCs濃度のピストン流滞留時間の比較

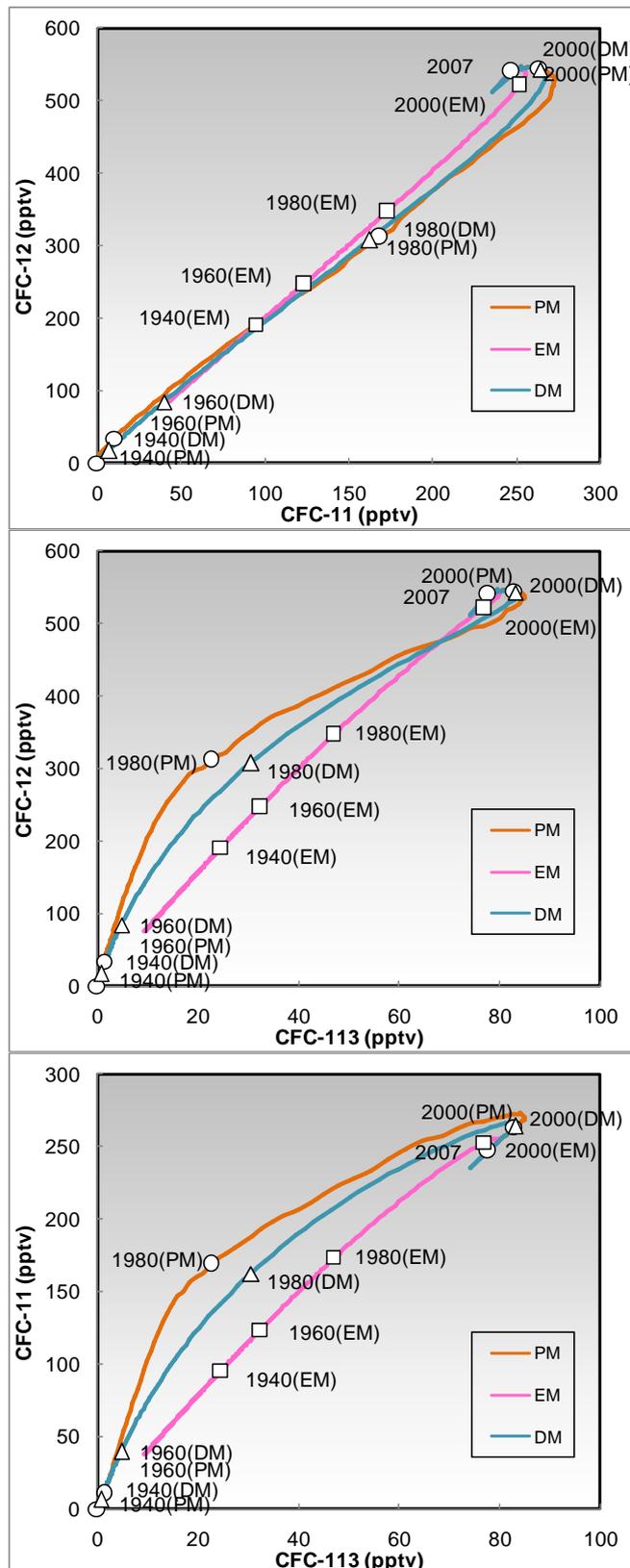


Si濃度 ×:28mg/L以上 O:20~25mg/L Δ:20~25mg/L ◇:20mg/L以下

□:2種類のCFCs濃度の変化によって作成されるBinary Mixing Modelにおいて、CFCs濃度変化が大気濃度曲線上にプロットされたもの(PLUGモデルが成立する条件)

(図中の色はSi濃度の違いを明確にさせるための着色で×・O・Δ・◇と同じ)

図2.5.11 3種類のCFCsによる滞留時間（PLUGモデルを仮定）と地下水中の溶存シリカ濃度の変化



(図中のPM, EM, DMはそれぞれピストン流モデル, 指数モデル, 拡散モデルを示す。それぞれのモデル出力曲線上の数字は、そのモデルによる涵養年を示す。測定された2種類のCFCs濃度がこれらの曲線上にプロットされずに外れた場合は他の水との混合等を考える必要がある)

図2.5.12 Binary Mixing Model概念図

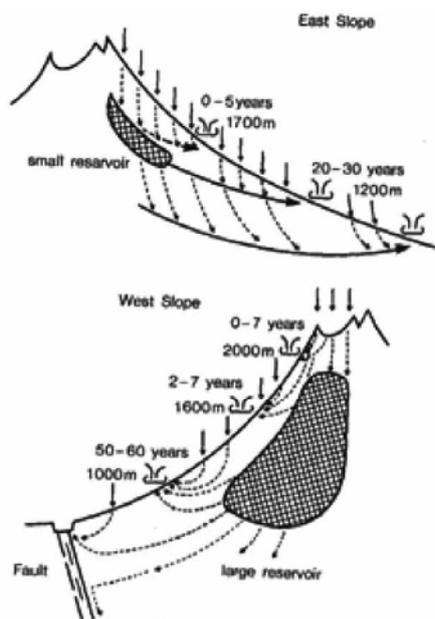


Fig. 9 Scheme of the groundwater flow system in southern parts of the Mt. Yatsugatake area obtained by this work. Upper part indicates the east slope, and lower part is the west slope.

垣内・丸井⁶⁾: トリチウム年代

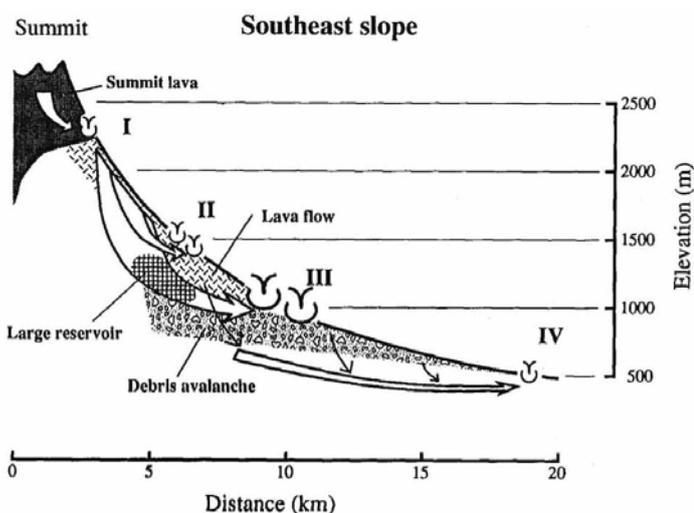


Fig. 10 Schematic representation of groundwater flow paths (arrows) in the Southeast slope of Mt. Yatsugatake. Thicker arrow indicates a larger flow rate.

風早・安原⁷⁾: 安定同位体比から推定した流動系

図 2.5.13 ハヶ岳における湧水の流出機構モデル^{6), 7)}

図2.5.14は、このようにして求めた霧島火山周辺の湧水の滞留時間分布である。新規火山岩類の末端湧水や比較的高い標高域の湧水では、PLUG流による流出機構(図中□で表示)が卓越するのに対して、アカホヤ火山灰層以前(7300BP)の火山岩類からなる湧水では、主としてPLUG+貯留モデル(図中、Si濃度レベルに応じて×○△で表示)が卓越しており、噴火後の時間進行に伴う火山岩類の解析によってより貯留性の高い帯水層構造が発達してきたことが示唆される。また、図2.5.15に示した、水温や酸素同位体比と高度の関係図上にこれらの滞留時間を重ね書きした図をみると、高い標高の湧水では相対的に涵養標高も高く水温が低いことと整合して、滞留時間が短めであるのに対し、低い標高の湧水では様々な標高からの涵養を反映した同位体比、水温分布がみられ、滞留時間においても様々な分布から構成されていることと矛盾しない。

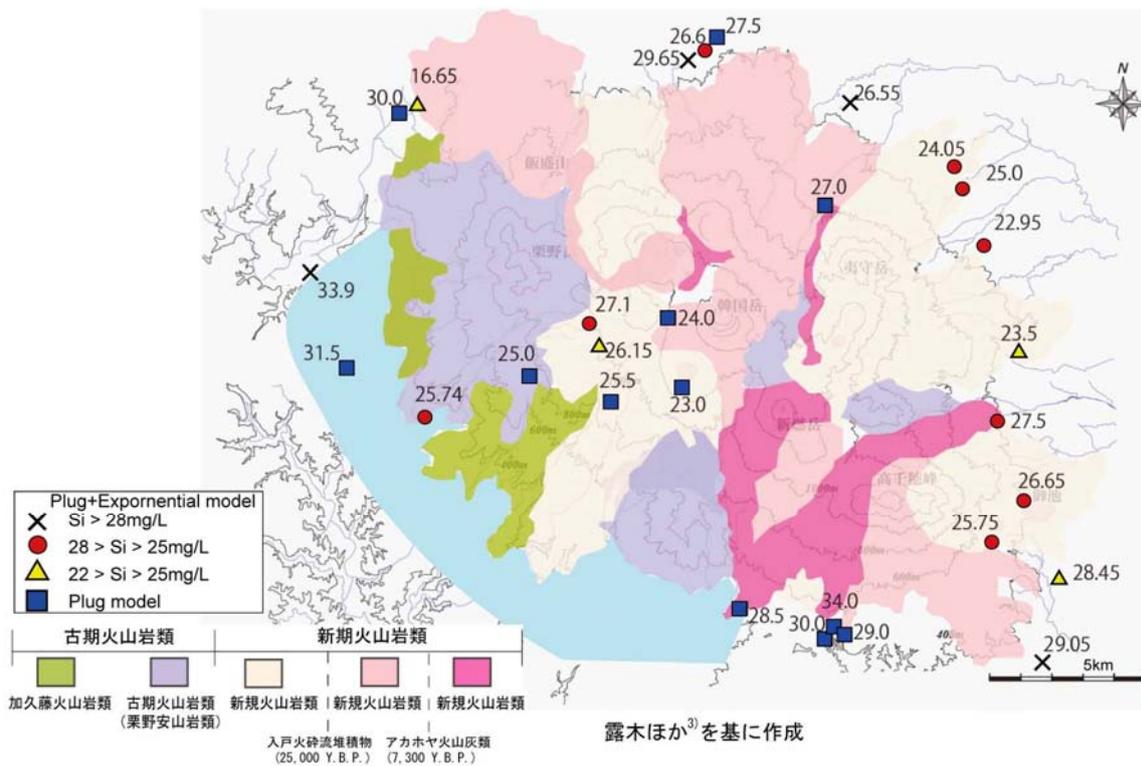


図 2.5.14 霧島火山周辺の湧水の滞留時間分布

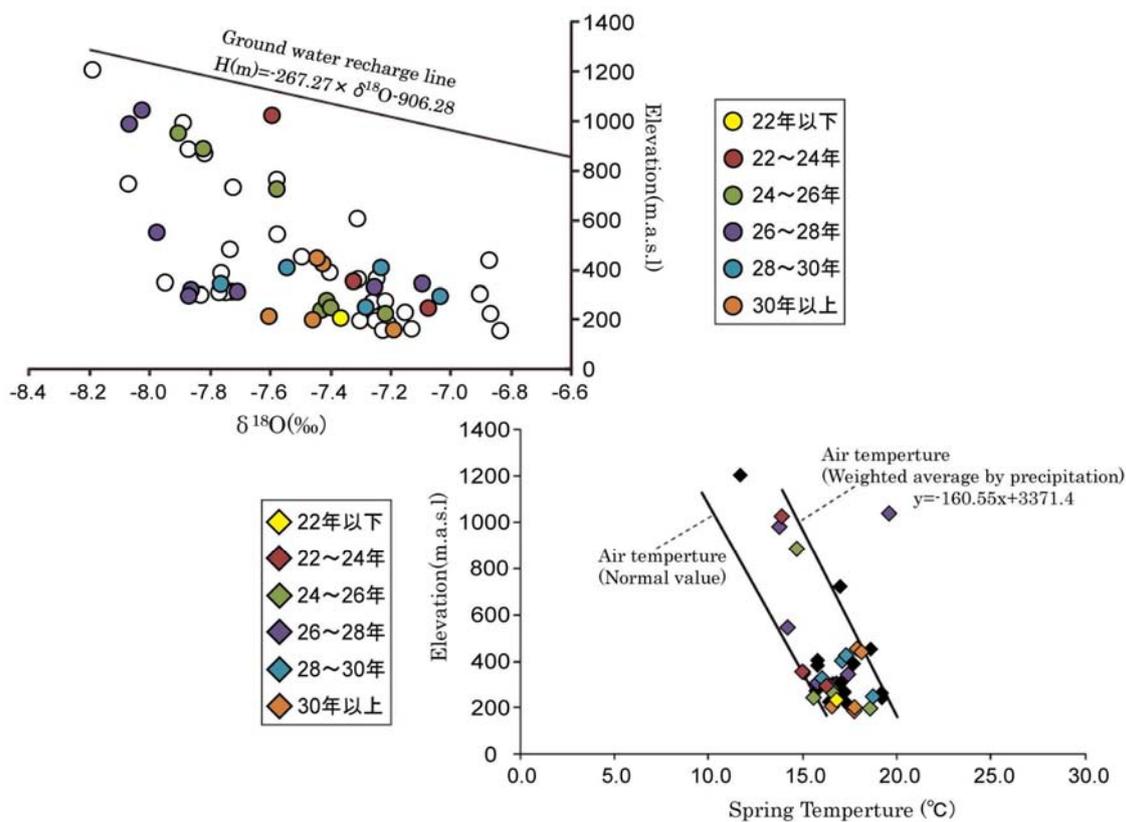


図2.5.15 水温や酸素同位体比と高度の関係図上に滞留時間を重ね書きした図

2.5.3.5 まとめと今後の課題

火山帯の湧水流出機構を詳細に検討するため、霧島火山を対象に3カ年にわたる現地採水調査と湧水の水質・環境同位体測定を実施した。火山帯周辺の湧水には、様々な流出形態が存在しているが、その水質は主として流動帯水層に相当する火山岩の噴出年代に起因しており、相対的に若い噴出年代の帯水層では火山性の硫酸イオンが卓越した水質特性が示されたが、地質年代の進展に伴う帯水層母岩の解析によって、より貯留構造が卓越した淡水性地下水の特性を有する傾向が認められた。同一湧水地点におけるCFCsの繰り返しサンプリングの結果、LUMPEDモデルによる地下水の滞留時間解析が可能となり、それらの解析結果もまた新規の火山岩帯水層におけるPLUG流卓越型から、地質年代の進展に伴う貯留構造の発達によって、貯留タイプを伴う構造に転化している傾向が認められた。この流動機構の違いは、霧島火山湧水の東西特性として把握されており、新規火山岩の発達した東部には硫酸成分の卓越したPLUG流タイプの湧水と比較的流動規模の小さな淡水性地下水タイプである炭酸一カルシウム型の湧水が存在しているのに対し、古期火山岩の多い西部では、より滞留時間と流動規模の大きな水質進化した地下水特性の特徴である炭酸一ナトリウム型湧水が見られ、また風化に伴って標高の高い地域にも小規模な湧水構造の発達が確認された。本研究で用いられたLUMPEDモデルの適応精度を高めるために、より長い期間でのCFCs濃度の繰り返し測定を行うことにより、より精度の高い滞留時間解析が可能であると思われる。

2.5.4 参考文献

- 1) Busenberg, E. and Plummer, L.N. (1992): Use of chlorofluorocarbons (CCl₃F and CCl₂F₂) as hydrologic tracers and age-dating tools : The alluvium and terrace system of central Oklahoma, *Water Resources Research*, No.28, pp.2257-2283.
- 2) 井村隆介(1994) : 霧島火山の地質, 地震研究所彙報, No.69, pp.189-209.
- 3) 露木利貞・金田良則・小林哲夫(1980) : 火山地域にみられる地盤災害とその評価(1), 鹿児島大学理学部紀要 地学・生物学, No13, pp.91-103.
- 4) United States Geological Survey Web Site: <http://water.usgs.gov/lab/chlorofluorocarbons/>
- 5) N.N. Ozyurt & C.S. Bayari (2003) : LUMPED : a visual basic code of lumped-parameter models for mean residence time analyses of groundwater systems, *Computers Geosciences*, No.29, pp.79-90.
- 6) 垣内正久・丸井敦尚(1994) : 八ヶ岳の湧水および地下水のトリチウム濃度, 日本水文科学会誌, 第24巻, 第2号, pp.93-106.
- 7) 風早康平・安原正也(1994) : 湧水の水素同位体比からみた八ヶ岳の地下水の涵養・流動過程, 日本水文科学会誌, 第24巻, 第2号, pp.107-119.

(熊本大学 嶋田 純)

3. 実用化に向けた研究開発課題の提示および調査・解析技術の高度化・体系化の総括

3.1 研究結果の検討

3.1.1 基盤技術の実用化・高度化の方向のレビュー ‘平成21年度’

地層処分の研究開発は、「地層処分のための実用的技術の開発」、「地層処分のための技術の高度化へむけた基礎的研究開発」および「長期の自然現象の計測・観測による、地道な地球科学的知見の蓄積」に大別される。また研究開発の対象を空間の大きさと時間の長さで捉えると、多重バリアのFar fieldよりの研究か、Near fieldよりの研究かによって、また、処分場の建設／操業および閉鎖時の管理処分段階と閉鎖後の隔離処分段階とでは、研究開発の性格が異なってくる。そして地層処分施設構築の流れ「サイト選定」、「建設／操業」、「処分（閉鎖後）」から見た、それぞれの分野の研究開発を、地層処分実現への研究開発プログラムに、どのような配分と時間で組み込んでいくかといった、技術の実用化へのシナリオをより具体的に構築することが、深地層の研究施設の建設がはじまった現時点では当面の急務である。

当委員会は、これらの研究開発に関して、「課題グループ」と「調査・解析グループ」を設けて検討を重ねている。

「実用化に向けた研究開発課題に関する研究」（課題グループ）に関しては、上記の地層処分施設構築の流れの中で、「第2次取りまとめ」¹⁾の体系の大項目である、「地質環境」、「処分技術」、「安全評価」の中で、それぞれ課題となっている具体的な研究開発項目を抽出し、調査研究課題の現状をより深く分析するとともに、それぞれの中間領域の調査研究内容と各分野の連携の仕方について、項目を絞った、より詳細な検討をおこなってきた。その結果得られた重要課題の一つが、ニアフィールド（NF）のコンセプト再構築であり、今年度は、より具体的な内容の検討をおこなった。NFコンセプトの再構築とは、従来のコンセプトがどちらかという、上記の各分野の要素技術毎の安全評価に関するものであったのを、各分野間の相互関連性を考慮した安全評価の考え方へ移行することにある。この再構築の中には、「短期の建設／操業の安全」と「長期の環境安全」の考え方とリンクの仕方の再整理や「工学的時間軸または人間の生活の時間軸」から「地質学的時間軸」への移行に伴う時間スケールと安全性の評価に関する考え方の再整理も含まれるし、地層処分シナリオのオプションや施設の設計コンセプトの変更に関するものも含まれる。

一方、「調査・解析技術の高度化・体系化」（調査・解析グループ）に関しては、「処分場を造るための技術の高度化・実用化」を目指して、地下水の水理・水文に関する研究・開発を実施している。最近では、研究開発の目標を、より実用的な高度化技術にシフトさせてきたが、ここ数年は、さらにその方向を加速させ、超深地層研究所計画の第2段階の進行に合わせた研究課題を抽出し、立坑の掘削に伴う調査研究で得られたデータも加えて、研究成果の実用化への道を進めてきた。本調査・研究の成果を反映させて、第2段階の調査研究計画の評価も行いながら、より具体的・実用的な調査・解析技術の高度化を行い、地下水に関する調査・解析技術の体系の構築をめざしている。なお、平成21年度には、これまでに得られた研究開発の成果の総括報告書を作成した。これに向けて、これまでに得られた成果を、資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構の「高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画（2006）」²⁾の流れの中での位置付けを整理・認識するとともに、第3フェーズの水平坑道掘削と原位置試験計画への研究成果の反映に

についても検討をおこなった。

3.1.2 平成21年度 深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究開発

3.1.2.1 研究開発に関する委員会の基本方針

今年度の研究開発を実施するに当たり、基礎技術から実用技術へ、要素技術から中間領域を含むシステム技術へ、各分野の技術の連携・統合と体系化への展開を基本方針とする。また平成21年度は、今年度の研究開発に加えて、現時点までの成果の総括を行い「総括報告書」とする。

3.1.2.2 課題の提示とその調査研究（課題グループ）および基盤技術研究とその実用化（調査・解析グループ）の研究開発の方針

(1) 各分野中間領域の調査研究の課題と連携の仕方の検討

平成17年度に検討した地層処分の研究開発課題は、「第2次取りまとめ」¹⁾の研究分野、「地質環境」、「地層処分の工学技術」、「安全評価」から、それぞれ最重要研究課題のいくつかを取り出し、地層処分施設構築の視点から、一つの事例として、具体的な検討を試みてきた。各分野の技術の実用化に加え、中間領域の高度化も重要な問題として検討を重ねてきた。

地質環境の観点からは、「断層周辺の割れ目の幾何学的形状と割れ目充填鉱物の特性」、処分技術からは、「掘削にともなう力学的な掘削影響領域（EDZ）の微小破壊音（AE）による計測・解析とモニタリング手法」および「割れ目やEDZのシーリング技術としてのグラウチングとグラウトの充填メカニズムの試験・解析」そして性能評価の観点からは、「割れ目充填物の形成と変化が分配係数におよぼす影響」や「建設・操業に伴う酸化性地下水・物質等の混入の影響評価」に関する研究などが提示された。またそれぞれの分野間にも重要な研究課題があることが確認された。

これらの調査・研究からNFコンセプト再構築の重要性が指摘され、そのための中間分野の研究開発の必要性と各分野間の研究開発の連携のありかたが検討されてきた。また日本原子力研究開発機構が目指している“Safety Case”の構築に関する知識ベースの構築にも、中間分野の相互関係を考慮したNFコンセプトの論理の展開は重要な課題である。NFコンセプトの再構築へ向けて、より具体的な中間分野の研究開発項目の提示と各分野の研究開発の連携の仕方の検討が重要であるとされた。

(2) 環境安全と建設・操業安全に関する地下水技術の実用化（閉鎖後／長期と建設・操業時／短期 および Far field とNear fieldの統合）

地層処分の研究開発には、「環境安全の地下水技術」と「建設・操業安全の地下水技術」がある。前者は、放射線安全の「地下水シナリオ」の中核である、「閉鎖後の核種の移行と生活圏の放射線安全」に密接に係った技術であり、Far fieldよりの技術である。後者は、どちらかという「構築された処分場の性能」や「労働災害」に関する技術であり、どちらかというNear fieldよりの技術である。前者については、従来から地層処分特有の技術として、多岐にわたる研究開発がなされており、現状の研究・開発の方向は、地質環境、処分場構築の工学技術、安全評価の各領域の統合へ向けて、中間領域の課題をつめるべき段階にきている。後者については、既成の実用技術の適用が可能であることから、深地層の研究施設（URL）の構築を通じて、深部・長期の工学へ

向けて、具体的な高度化が望まれる技術も少なくない。環境安全、建設／操業の両分野について、当研究会の「課題グループ」でも、研究開発の課題が検討されており、「調査・解析グループ」の基礎的・要素的研究開発の諸項目の目標も、両者にまたがるものである。

現時点で早期の解決が望まれる「処分場をつくるための基礎的・実用的な技術の研究開発」のテーマのうち、「URLの建設と諸試験・調査での重点技術の抽出とその研究開発の実施」、「地下水理解析（物理現象）と地化学分析（化学現象）との整合性に関する研究開発」、「深部淡塩境界にみる移流と拡散現象の実態の研究開発」などに関しては、調査・解析技術の高度化は重要なテーマであり、これらの検討の過程で、閉鎖後の環境安全の論理と建設・操業時の安全の論理をどう結びつけるかも重要な課題となろう。「操業安全上のグラウチング技術と地下水環境の安全評価との統合論理」、「掘削に伴う岩盤の擾乱と広域地下水環境の安定性に関する時系列の統合論理」などがその事例である。

(3) 重要技術と中間分野の技術の高度化と体系化

課題グループの目標の一つは、中間分野の技術の高度化に向けて、それぞれの分野で研究開発が手薄な項目、中間分野の共同研究でより明確な方向性が打ち出せるであろう課題を見出すことにある。その一例として、各分野にわたる具体的な課題を、課題グループが抽出し、それぞれの分野で実施してきた課題の高度化の研究開発とともに、課題グループのメンバーによる連携研究に関する議論を通じて、より具体的な中間分野の研究開発の方向を探ってきた。また地下水技術に限定したいくつかの課題に関しては、調査・解析グループの研究開発方向とあわせて、分野内の連携研究も本格化させたい。これらをたたきだいでにして、相互の検討を更に進め、サイト選定／処分場の設計、建設／操業、処分／閉鎖（後）それぞれの段階で、どうしても必要な、重要な研究開発の具体的な内容と手法および、それらを実用技術として達成させる共同研究体制等について議論を重ねてきた。また中間分野の課題に関する研究開発の進展により、従来の要素の安全を積み重ねた評価では捕らえにくかった、相互の要素が関連したより現実的な性能評価の構築を目指したい。また日本原子力研究開発機構が目指すSafety Caseの構築にむけた知識ベースに寄与することも期待される。一方、課題の中には、例えばEDZ（とくに水理・水質のEDZ）のように、閉鎖後の処分場の性能、長期の核種移行にどれだけ重要な意味をもつか、議論がわかれている項目もある。緩衝材の流出、酸化した地下水の浸透・混合の影響、マイクロクラックへのシーリングなどについても同様な問題が含まれている。処分場の性能評価の観点から、原点にかえて議論しておくべき問題も少なくない。

調査・解析グループの研究の方向としては、従来はどちらかというと、基礎的な研究開発をすすめてきたが、ここ数年は、その成果の実用化を目指した研究を展開してきた。研究開発の内容は、Near field, Far fieldの水理に関する計測・解析、地化学に関する計測・解析および地下水に関する計測法と地下水制御技術などである。基礎的な研究開発の段階から、成果の実用化へ向けて、瑞浪超深地層研究所の研究坑道建設に伴う計測データなどを用いた研究開発の成果を積み重ねてきた。今後は、実績を蓄積すると共に、成果が得られた個別技術の統合と体系化に向けて、的を絞った研究開発が重要である。

3.1.3 地層処分基盤研究開発に関する全体計画の中での位置付けと研究開発の成果

3.1.3.1 日本原子力研究開発機構の全体計画の中での当研究開発の位置付けと研究開発の経緯

「高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画(2006)」²⁾に示された、「研究開発全体マップ」に「深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究」の「第2次取りまとめ」¹⁾以降の研究の体系化を計る資料として、当委員会のメンバーが今までにおこなってきた研究開発の項目を入れて、「研究開発全体マップ」の計画の流れの中でのそれぞれの研究開発の位置付けを再認識した(図3.1.1)。

この「研究開発全体マップ」は、従来おこなってきた要素技術の研究の流れと計画の達成状況を知るためのものであり、NFコンセプトの再構築などの中間分野の研究開発に関する分野は、深部地質環境の体系化の項目の枠に一括記入されることになり、検討結果の詳細が見えない。今後は、フェーズ3の研究開発計画へ向けて、「研究開発全体マップ」の中に中間分野研究に関する新しい枠組みと研究開発に関する流れを組み込みたい。

本研究の委員会のこれまでの成果を総括するに当たり、委員会の経緯とこれまでに実施してきた研究開発の流れを概説する。

平成11年度～平成12年度：「第2次取りまとめ」¹⁾の内容が概ね定まってきた平成11年度からは、「第2次取りまとめ」¹⁾以降の研究開発目標である「深部地質環境の調査・解析技術の高度化・実用化およびそれらの技術の体系化」をテーマに専門家による個別技術の先進的な研究開発に取り組むとともに、東濃地科学センターの地層科学研究に対する個別技術の応用や指導・支援をおこなってきた。平成12年度からは、「深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究(平成12年度～平成21年度)」として年次報告が作成されている(例えば⁴⁾)。

平成13年度～平成21年度：平成13年度からは、個別技術だけでなく、地質環境、処分技術、安全評価という分野間の連携や総合的な検討を行うという趣旨から、「第2次取りまとめ」¹⁾の内容を地質環境、処分技術、安全評価の各観点で評価した結果から抽出された、深部地質環境の調査・解析技術の実用化に向けた課題を対象とした研究を実施するグループ(「課題グループ」)を新たに設置し、「調査・解析グループ」との2つの体制で、次の研究を実施してきた。

「調査・解析グループ」(調査・解析手法の高度化・体系化に関する研究)

- ①深地層における硬岩系不連続岩盤の透水性評価に関する研究
- ②岩盤浸透流の3次元特性の調査・解析に関する研究
- ③深部岩盤における水理学的調査・試験法に関する研究
- ④深層水理の調査方法およびモデル化に関する研究
- ⑤地下水の地球化学的特性調査に関する研究

「課題グループ」(第2次取りまとめに基づく深部地質環境の調査・解析技術の実用化に向けた課題に関する研究)

- ①処分技術の観点で抽出された深部地質環境の調査・解析技術に関する研究
- ②安全評価の観点で抽出された深部地質環境の調査・解析技術に関する研究
- ③地質環境の観点で抽出された深部地質環境の調査・解析技術に関する研究
- ④わが国の広域地質環境下における処分システムのニアフィールド(NF)コンセプトに関する研究課題の抽出とその体系化

This is a blank page.

研究開発要素			各研究開発要素の研究開発目標と課題					備考	
分野	分類	細目	第2次取りまとめまでの達成レベル	フェーズ1: 第2次取りまとめ以降5年程度の成果【平成17年度頃まで】		フェーズ2: 当面5年程度の計画【平成22年度頃まで】		備考	
				深部地質環境の調査・解析技術の体系化 (各委員の調査・研究)	達成目標と達成レベル	課題の設定、進め方、成果	深部地質環境の調査・解析技術の体系化 (各委員の調査・研究)		達成目標
【地質環境調査評価技術】									
(A) 地質環境調査評価技術	(1) 総合的な調査評価技術	① 多様な地質環境を対象とした調査評価技術	結晶質岩 堆積岩 沿岸域						
		② 特定の地質環境を対象とした調査評価技術							
	(2) 地質環境特性調査評価技術	① 地質・地質構造		【吉田委員】 ●活断層による影響と新たな割れ目形成に関する調査・解析技術の開発 ●断層周辺の割れ目特性と長期的な挙動予測方法の検討		【吉田委員】 ●活断層を含む断層活動に伴う割れ目形成に関する情報収集と現場での調査手法開発に関する研究 ●割目シーリングに関する研究			
		② 地下水流動特性		【大西委員】 ●深地層における硬岩系不連続性岩盤の透水性評価に関する研究 【渡辺委員】 ●岩盤深透流の三次元解析の研究 ●地下開発が広域地圏環境に与える影響評価モニタリングシステムの開発 【西垣委員】 ●水理試験法及び水理試験装置の研究開発 【倉坂委員】 ●深層水理の調査方法及びモデル化に関する研究 ●表層水理データを用いた日吉川流域循環のモデル化 【橋田委員】 ●地下水の地球化学特性調査に関する研究		【大西委員】 ●立坑トンネルにおける簡易型地下水制御情報化施工システム(SWING-SHAFT)の適用に関する研究 【渡辺委員】 ●岩盤深透流の三次元解析の研究 【倉坂委員】 ●表層水理データを用いた日吉川流域循環のモデル化 ●地形変化および気候変動が地下水流動特性の長期変遷に与える影響の検討			
		③ 地球化学特性		【橋田委員】 ●地下水の地球化学特性調査に関する研究		【渡辺委員】 ●フッ素濃度を用いた花崗岩中の地下水年代に関する基礎研究 【橋田委員】 ●OFCレーザーを用いた地下水の滞留時間推定法の開発			
		④ 物質移動特性		【吉田委員】 ●活断層による影響と新たな割れ目形成に関する調査・解析技術の開発 ●断層周辺の割れ目特性と長期的な挙動予測方法の検討		【吉田委員】 ●活断層を含む断層活動に伴う割れ目形成に関する情報収集と現場での調査手法開発に関する研究 ●割目シーリングに関する研究			
		⑤ 岩盤の熱・力学特性		【青木委員】 ●AE計測による掘削影響領域(EDZ)の評価技術の開発		【青木委員】 ●AE計測による掘削影響領域(EDZ)の評価技術の開発			
	(3) 地質環境の長期安定性調査評価技術	① 地震・断層活動		【吉田委員】 ●活断層による影響と新たな割れ目形成に関する調査・解析技術の開発 ●断層周辺の割れ目特性と長期的な挙動予測方法の検討		【吉田委員】 ●活断層を含む断層活動に伴う割れ目形成に関する情報収集と現場での調査手法開発に関する研究 ●割目シーリングに関する研究			
		② 火山・熱水活動(非火山地帯の熱水活動に関連するものも含む) ③ 隆起・侵食/気候・海水準変動				【倉坂委員】 ●地形変化および気候変動が地下水流動特性の長期変遷に与える影響の検討			
	(4) 深地層における工学技術	① 結晶質岩							
② 堆積岩									
【処分場の工学技術】									
分野	分類	細目	第2次取りまとめまでの達成レベル	フェーズ1: 第2次取りまとめ以降5年程度の成果【平成17年度頃まで】		フェーズ2: 当面5年程度の計画【平成22年度頃まで】		備考	
				深部地質環境の調査・解析技術の体系化 (各委員の調査・研究)	達成目標と達成レベル	課題の設定、進め方、成果	深部地質環境の調査・解析技術の体系化 (各委員の調査・研究)		達成目標
(B) 工学技術	(1) 処分場の総合的な工学技術	① URIにおける適用性検討							
		② 工学技術オプション							
	(2) 処分場の設計・施工技術	① 人工バリア(オーバーバック/緩衝材)	a) オーバーバック b) 緩衝材						
		② 支保/グラウト/シーリング	全体 a) シーリング b) 支保(低アルカリ性セメント) c) グラウト	【西垣委員】 ●ベントナイトグラウトに関する研究 【青木委員】 ●低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の研究		【西垣委員】 ●超微粒ベントナイトグラウトに関する研究 【青木委員】 ●低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の研究			
	(3) 建設・操業・閉鎖等の工学技術	③ 建設・操業・閉鎖等の工学技術	全体						
			a) 建設技術	【青木委員】 ●AE計測による掘削影響領域(EDZ)の評価技術の開発 ●低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の研究		【大西委員】 ●立坑トンネルにおける簡易型地下水制御情報化施工システム(SWING-SHAFT)の適用に関する研究			
			b) 操業技術						
			c) 閉鎖技術						
			d) 品質管理 e) 回収技術						
	(3) 長期健全性評価技術	① ガラス固化体							
② 緩衝材		a) 緩衝材の長期力学的変形挙動 b) 緩衝材の長期変質挙動 c) 緩衝材の流出・侵入挙動							
③ セメント・コンクリート (本項目はTRUの研究事項であり、TRUでのマップ検討案を転載した)									
④ 岩盤									
⑤ 熱・水・応力・化学連成評価技術									
⑥ ガス移行挙動									
⑦ 人工バリアせん断応答挙動									
					HLWとTRUの研究分担				
【性能評価技術】									
分野	分類	細目	第2次取りまとめまでの達成レベル	フェーズ1: 第2次取りまとめ以降5年程度の成果【平成17年度頃まで】		フェーズ2: 当面5年程度の計画【平成22年度頃まで】		備考	
				深部地質環境の調査・解析技術の体系化 (各委員の調査・研究)	達成目標と達成レベル	課題の設定、進め方、成果	深部地質環境の調査・解析技術の体系化 (各委員の調査・研究)		達成目標
(C) 性能評価技術	(1) 評価手法	① シナリオ解析技術		【折山委員】 ●性能評価の観点で抽出された深部地質環境の調査・解析技術に関する研究		【折山委員】 ●安全評価の観点で抽出された深部地質環境の調査・解析技術に関する研究 ●放射性廃棄物地層処分セーフティーケース			
		② 不確実性評価技術							
		③ 総合的な性能評価技術		【折山委員】 ●性能評価の観点で抽出された深部地質環境の調査・解析技術に関する研究		【折山委員】 ●安全評価の観点で抽出された深部地質環境の調査・解析技術に関する研究 ●放射性廃棄物地層処分セーフティーケース 【青木・折山・吉田委員】 ●ニアフィールドコンセプトの再構築			
	(2) モデル化技術	① 人工バリア中の核種移行	a) 地下水化学/間隙水化学 b) ガラス固化体からの核種溶出 c) 緩衝材中の核種移行						
		② 天然バリア中の核種移行	a) 岩盤中の核種移行 b) コロイド・有機物・微生物						
(3) データベース開発	③ 生物圏での核種移行/汲び								
	① 放射性元素の熱力学データベースの整備								
	② 収集・拡散データベースの整備 ③ 処分場システムデータベースの整備								

図3.1.1 「深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究」第2次取りまとめ以降の体系化(研究開発全体マップ²⁾をもとに加筆作成)

これらの研究テーマの詳細と原子力機構の地層処分の全体計画の中での位置付けは、図3.1.1に記述した。また、これまでに述べてきた研究開発の実施体制は、以下の通りである。「調査・解析グループ」は、昭和63年度の設立以来、研究開発を継承してきた以下のメンバーであり、「課題グループ」は、平成13年度から参画したメンバーである。委員会の経緯に記述した研究テーマの順序は、ほぼ次の担当委員の名簿の順に対応している。なお所属等は、平成22年3月現在のものである。

「調査・解析グループ」

委員長	東京大学名誉教授，地圏空間研究所	代表	小島圭二
委員	京都大学名誉教授，京都大学大学院工学系研究科	副学長	大西有三
	埼玉大学 地圏科学研究センター	教授	渡辺邦夫
	岡山大学大学院環境学研究科	教授	西垣 誠
	東京大学大学院工学系研究科	教授	登坂博行
	熊本大学大学院自然科学研究科	教授	嶋田 純

「課題グループ」

委員長	東京大学名誉教授，地圏空間研究所	代表	小島圭二
委員	京都大学大学院工学研究科	教授	青木謙治
	原子力安全研究協会 処分システム安全研究所	所長	朽山 修
	名古屋大学博物館環境学研究科	准教授	吉田英一

3.1.3.2 深部地質環境の調査・解析技術に関する課題の抽出とこれまでの研究開発の成果

(1) 地質環境の観点から抽出された課題による事例研究

課題1：断層周辺の割れ目特性；活断層／阿寺断層周辺の割れ目分布を計測し，フラクタル分布も考慮して分布特性を求め，断層周辺の割れ目密度分布の実態を把握した。断層の大きな露頭／切り取り斜面での観察によって，主断層の運動に伴う，小断層系の破碎帯性状の規則性が見出された。断層物質の種々の化学的分析によって，長期の断層形成プロセスが推定された。

課題2：物質移動経路の2次的物質（鉄酸化物，炭酸塩）による，自己シーリングプロセス（長期的影響）を明らかにするため，野外調査による実態の調査研究を進めているが，上記の断層群の露頭での破碎帯物質／断層物質の知見がこれに加えられた。

課題3：NFのコンセプト再構築；これに関する検討項目を抽出し，各分野の連携の仕方を検討した。

(2) 処分技術の観点から抽出された課題と事例研究

深部地下施設の建設時には，地下空洞に大きな地圧と水圧がかかる。建設・操業を安全に実施するには，これらのモニタリングと地山の押し出し・崩壊，出水等の異常に対する手当てが必要である。特に一般の構造物にとっては良好岩盤，低透水性岩盤に対する，地層処分施設が要求する性能を満たすこれらの手法，地下水環境擾乱の許容度等も含めた考え方の整理が当面の重要課題である。

課題1：掘削影響領域（EDZ）の評価；解析・評価手法と微小破壊音（AE）やMicroseismic monitoringによる調査・計測システムの研究を進展させた。

課題2：低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の高度化；実験，解析を引続き実施した。さらに，岩盤の水理地質構造を推定，評価する新しい手法を提案し，数値解析と現場実験によって妥当性と実用性を検証した。

課題3：NFのコンセプト再構築；これに関する考え方の検討と再構築のための中間分野の研究開発項目を抽出した。

(3) 安全評価の観点から抽出された課題と事例研究

地層処分サイト評価，処分施設の設計・閉鎖後の安全評価手法は，当面は従来の決定論的手法の踏襲となろう。決定論的な評価／工学的判断の拠り所の原点は，不確実性に対する安全尤度である。人が納得する安全尤度を決める重要なレファレンスケースに，多重バリアの設計にからむ，核種の移流・拡散に関する実用的運用の考え方の構築がある。

放射性核種を含む元素が，地下水条件下で形成する溶解度制限固相の特定およびその固相の溶解度と種々の岩石表面に対する収脱着分配係数は，地層処分の安全評価解析における重要な入力データとして，その整備がもとめられている。

課題1：鉄含水酸化物の長期変化；鉄含水酸化物の沈殿の生成および非晶質含水酸化物の安定性とその結晶性酸化物への変化についてのデータを蓄積した。

課題2：処分場構築に関連した酸化性地下水の影響；処分場建設時の酸化性地下水の浸入，操業時の酸化性物質混入などの影響評価に関する検討を試みた。

課題3：NFのコンセプト再構築；これに対応したセーフティケースと知識ベースの構築を具体化するための基盤として，地層処分のシナリオ全体の流れをレビューした。またNFコンセプト構築の検討項目を抽出した。

3.1.3.3 各分野中間領域の調査研究の連携検討／NFコンセプトの再構築

以上のべてきた課題は，「第2次取りまとめ」¹⁾の研究分野である「地質環境」，「地層処分の工学技術」，「安全評価」から，それぞれ最重要研究課題のいくつかを取り出し，地下施設構築の視点から，一つの事例として，具体的な検討を試みてきた。それぞれの技術の実用化に加え，中間領域の高度化も重要な問題として検討を重ねてきた。

地質環境の観点からは，「断層周辺の割れ目の幾何学的形状と割れ目充填鉱物の特性」，処分技術からは，「掘削にともなう破壊音（AE）や“微小地震”の計測・解析とモニタリング手法およびフラクチャーのシーリング技術とグラウトの充填メカニズムの試験・解析，水理地質構造の解析評価」，そして性能評価の観点からは，「割れ目充填物の形成と変化が分配係数に及ぼす影響」や「建設・操業に伴う酸化性地下水・物質等の混入の影響評価」などが提示された。またそれぞれの中間分野の共同研究，ないしは研究の方向に関する検討がなされ，それぞれの分野間にも重要な研究課題があることが確認された。これらの調査研究からNFのコンセプト再構築の重要性が認識され，それぞれの分野からの重要項目の抽出と今後の具体的な進め方，連携のありかたが検討された。

3.1.3.4 環境安全評価の地下水シナリオからみた調査・解析技術の高度化・体系化

(1) 地下水調査・解析技術の地下水シナリオFEPの高度化・体系化

「第2次取りまとめ」¹⁾の総論報告には，地下水シナリオ構築の包括的FEPがまとめられている。

この解析で抽出された重要項目を参考にしながら、当研究会の「調査・解析グループ」が現在実施している、どちらかという、基礎的、要素的な技術の高度化に関する研究・開発（R&D）の成果を検討・評価して、地下水に関する調査・解析技術の体系化と実用化への道を進展させてきた。

(2) 地下水の基盤技術／要素技術の高度化と実用化

「調査・解析グループ」は、地下水に関する計測技術、広域・局所の解析技術、および地化学分析に関して、必ずしも現状の地層処分技術開発の基本方針、時限にとらわれない立場で、基盤技術の高度化を試みてきた。基礎的研究の常として、成果がすぐに見えるとは限らないが、高度化の芽を大切に評価をおこなってきた。そして最近、最新の知見を実用技術へ取り込む方向で、瑞浪超深地層研究所の第2段階の研究開発とも連携しながら、実用化に向けた研究開発を進展させてきた。また、この研究会で培ってきた基盤技術／要素技術も多岐にわたり、蓄積されてきており、技術の体系化へ向けた準備もかなり整ってきたと認識される。

(3) 環境安全の地下水技術と建設・操業安全の地下水技術／実用化・統合化への転進

地層処分の研究・開発には、「環境安全の地下水技術」と「建設・操業安全の地下水技術」がある。前者の地下水技術は、放射線安全の「地下水シナリオ」の中核、核種の移行に密接に係った技術であり、後者の技術は、どちらかという「構築された処分場の性能」や「労働災害」に関する技術である。前者については、従来から地層処分特有の技術として、多岐にわたる研究・開発がなされており、現状の研究・開発の方向は、地質環境、処分場構築の工学技術、安全評価の各領域の統合へ向けて、中間領域の課題をつめるべき段階にきている。後者については、既成の実用技術の適用が可能であることから、サイトが特定していない、一般論の段階では検討が進まなかったが、深部・長期の工学へ向けて、高度化が望まれる技術も少なくない。瑞浪と幌延の深地層の研究施設（URL）の建設が始まって、この方面の、原位置での研究開発が出来るようになってきた。当委員会の「課題グループ」でも、環境安全、建設／操業の両分野について、研究開発の課題が検討されており、「調査・解析グループ」の基礎的・要素的研究・開発の諸項目の目標も、両者にまたがるものとして統合化への研究開発の進展が期待される。

第2章で総括する内容を踏まえて考えると、現時点で早期の解決が望まれる「処分場をつくるための基礎的・実用的な技術の研究開発」のテーマのうち、「深地層の研究施設（URL）の建設と諸試験・調査での重点技術の抽出とその研究開発の実施」、「地下水解析（物理現象）と地化学分析（化学現象）との整合性に関する研究開発」などに関して、調査・解析技術の高度化は重要なテーマであり、これらの検討の過程で、環境安全の論理と建設・操業安全の論理をどう結びつけるかも重要な課題であろう。「操業安全上のグラウチング技術と地下水環境の安全評価との統合論理」、「掘削に伴う岩盤の擾乱と地下水環境の安定性の統合論理」などがその事例であることに変わりはない。

3.2 平成21年度研究結果の取りまとめおよび技術の体系化に関する研究結果の総括

3.2.1 「実用化に向けた研究開発課題の研究の検討」の総括

「地質環境」、「処分技術」、「安全評価」それぞれの専門の立場から、「第2次取りまとめ」¹⁾以後の技術の高度化、分野内および各分野にまたがる科学・技術も含めた実用化への重点課題を抽出した。現時点でも処分サイトは特定されていないが、地下実験の地点を特定した、深地層の研究施設（URL）の建設は、東濃、幌延で実施されている。処分場をつくるための、建設／操業、処分／閉鎖（後）にいたる、具体的なサイト特性調査の手順、設計・施工や操業技術、安全評価とモニタリングなどに関して、「第2次取りまとめ」¹⁾では、可能性を示したにとどまったが、これらの技術を実証する場が整いつつある。

本年度も、各分野の重点課題の事例研究を更に進展させると共に、中間領域の課題の研究開発と各分野の統合と連携の仕方を念頭に、次の研究開発項目に的を絞って、具体的な試験・調査を実践し、中間分野の研究開発項目と各分野間の連携・統合の仕方について、具体的な成果を踏まえた検討を進めた。そして今年度の報告は、これに加えて、現時点での研究成果を総括し、総括報告書としてまとめたものである。なお、それぞれの研究開発成果の詳細は、第I章、第II章の各項の総括に記述されている。

3.2.1.1 処分技術

今年度の研究は、NFコンセプトの再構築を目的とした「深部地質環境の調査」、「安全評価」の両分野との連携・体系化を進め、下記(1)、(2)の研究開発を実施するとともに、現時点までに実施してきたこれまでの研究開発の成果を(1)微小破壊音(AE)計測によるEDZの評価技術および(2)低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の研究に大別して総括した

(1) 微小破壊音(AE)計測による掘削影響領域(EDZ)の評価技術に関する研究

力学および水理学的EDZの評価・判定を目的とした、「岩盤の応力-浸透流連成解析手法」を構築し、原位置試験によって、その手法の実用性を検証した。また「Microseismic monitoring」手法を用いて、亀裂性岩盤内での地下水およびガスの挙動を評価する手法を開発する目的で、理論的検討と室内および原位置試験を通じて、実用性の検討を行い成果を得た。また、これまでの研究成果を総括すると以下のとおりである。

① 岩石の破壊過程における応力変化とAE挙動の関連性の解明

結晶質岩および堆積軟岩の室内岩石試験結果を基に、岩石の破壊過程とAEの挙動について、3つのAEパラメータ(AE発生数・卓越AE周波数・m値)に着目して分析を行った。これらのAEパラメータの挙動を捉えることにより、岩石の破壊過程における応力変化を鋭敏に把握できることが明らかになった。

② 岩石の破壊過程における応力変化と破壊現象の関連性の解明

粒状体個別要素法(粒状体DEM)による室内岩石試験のシミュレーションを行い、岩石の破壊過程における応力変化と破壊現象の関連性から、これが破壊過程の評価に有効であることが明らかになった。

③ 岩石の破壊過程におけるAE-応力変化-破壊現象の関連性の解明

室内岩石試験および粒状体DEMシミュレーションの結果を総合的に検討し、AEパラメータによる応力変化および破壊現象の評価方法を構築した。

④AE計測と粒状体DEM解析による原位置岩盤におけるEDZの評価方法の構築

AE計測と粒状体DEM解析を行うことで、岩盤空洞周辺の応力再配分やEDZの形成・進展の過程を評価できることが明らかになった。

⑤EDZにおける岩盤の破壊挙動の評価法の構築

AE発生およびAE進展の両応力レベルとスポーリング限界の概念を導入することで、AE挙動から岩盤の破壊現象を定量的かつ明確に把握できることが明らかになった。

⑥岩盤の力学－水理学的連成挙動に着目した水理学的EDZの評価手法の構築

微小地震波観測（Microseismic monitoring）と粒状体DEM-CDN解析を行うことで、サイトスケールにわたる岩盤の水理学的EDZを評価する手法を開発するとともに適用性を確認した。

(2) 低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術に関する研究

今年度は、合理的な地下水制御システムのサブシステムとして、「3次元水理地質構造のモデル化システム」を構築し、原位置岩盤へ適用することで、手法の有効性を検証した。次に水理地質構造を考慮した、グラウチング設計手法を構築し、原位置岩盤に適用することで、手法の有用性を示した。本研究の研究成果を総括すると以下のとおりである。

①動的注入工法におけるグラウト材の流動メカニズムの解明

人工亀裂模型を用いた室内実験を行い、注入パラメータ（注入圧力の振幅・周波数、注入材料の粘性）が流体の見かけ粘性の低下に与える影響を明らかにした。

②グラウト材の充填過程モデルの構築

亀裂内部でのグラウト材の流動および充填過程を表現する数値解析モデルを構築し、原位置岩盤におけるグラウチングのシミュレーションを行い、原位置岩盤への適用性が示された。

③粒状体DEMを用いたグラウト材の充填機構の検討

動的注入工法におけるグラウト充填機構をミクロな視点から解明することを目的として、粒状体DEMによる動的注入のシミュレーションを行い、グラウト材の流動・充填過程を明らかにした。

④最適注入仕様の決定方法

構築したグラウト充填過程モデルを用いて、対象岩盤に応じた最適注入仕様を決定する方法を構築した。

⑤岩盤の水理地質モデルの構築

対象岩盤に応じたフラクチャーシーリングを行うためのベースとなる高精度な3次元水理地質モデルの構築を目的とし、地球統計学シミュレーションを用いたモデル化手法を構築した。本手法を原位置岩盤に適用し、実測の間隙水圧の経時変化を高精度に予測できることを確認した。

⑥クロスホール透水試験による岩盤の水理地質構造の評価手法の構築

フラクチャーシーリングを確実かつ効果的に実施するための水みちの検知を目的とし、クロスホール透水試験結果から、不均質な岩盤の水理学的地質モデルを合理的に構築する方法（MDS-IDW イメージング手法）を新たに提案し、その適用性を数値実験および現場実験に

よって検証した。

⑦水理地質構造を考慮したグラウト設計手法の構築

グラウチングシステムの合理化を目的として、対象岩盤におけるグラウト充填状況を予測・評価する手法を構築し、透水性の改良状況を的確に評価することができた。また、この手法を用いて注入孔間隔を合理的に決定する方法を構築した。

(3) NFのコンセプトの再構築の検討

これらの研究開発に基づいて、サイト選定から処分施設の設計、安全評価に至る一連の流れの中にNFのコンセプトを再構築するための検討項目を抽出した。

3.2.1.2 安全評価

NFコンセプトの再構築にむけて、議論してきた内容を整理し、現時点までに実施してきた成果のとりまとめをおこなった。

(1) 中間領域の課題の抽出とNFコンセプト再構築のための基盤整備

NFのコンセプト再構築の具体化に向けて、重要な中間分野の項目の抽出と他分野との連携・統合について検討を加えた。

(2) これまでに検討した重要項目を総括

- ①鉄含水酸化物の長期変化；鉄含水酸化物の沈殿の生成および非晶質含水酸化物の安定性とその結晶性酸化物への変化についてのデータを蓄積した。
- ②処分場構築に関連した酸化性地下水の影響；処分場建設時の酸化性地下水の浸入、操業時の酸化性物質混入などの影響評価に関する検討を試みた。
- ③NFのコンセプト再構築；これに対応したセーフティケースと知識ベースの構築を具体化するための基盤として、地層処分のシナリオ全体の流れをレビューした。またNFコンセプト構築の検討項目を抽出した。

3.2.1.3 地質環境

地質環境に関して抽出した課題の研究とNFコンセプトの再構築にむけて、議論してきた内容を整理し、現時点までに実施してきた、これまでの成果のとりまとめをおこなった。

(1) 阿寺断層周辺に発達する割れ目形態とその特徴に関するまとめ

中部地方に分布する阿寺断層／活断層を事例に、断層周辺での割れ目の発達過程や岩盤や破碎帯の変質などの、「ダメージゾーン」に関して調査研究を進めた。地下水流動や地下水との化学反応を促進すると考えられる、断層近傍での割れ目の性状・分布とそれから考えられる「ダメージゾーン」の性状と特徴について述べるとともに、断層活動がもたらす周辺割れ目の長期的挙動と周辺岩盤（地質環境）への影響について記述し、断層運動に伴う割れ目形成とその影響解析成果を総括する。

①「ダメージゾーン」について

- ・周辺岩盤における割れ目形態や分布、密度などのデータから、阿寺断層の活動に伴う物理的影響範囲は断層からおおよそ200m程度と見積もられる。

- ・阿寺断層における断層運動による影響範囲と考えられる領域は、従来の「プロセスゾーン」の考え方で見積もられる範囲 ($W/L \approx 10^{-2}$; w 幅, L 長さ) と整合的である。
- ・化学成分分析結果から示される割れ目充填鉱物などの二次的な元素移動の状態変化から、断層運動に伴う周辺岩盤への地球化学的変化は、割れ目密度などから解析される「ダメージゾーン」よりも狭い範囲に顕著である。また、充填鉱物の種類や充填状態から「ダメージゾーン」が一部、熱水の水みちとなっていることが考えられる。
- ・地下水流動の観点から推定される「ダメージゾーン」については、これまでの調査からは具体的な知見は得られなかった。しかし、割れ目充填鉱物の変化や岩石基質の変質が地下水流動と関連していると考えれば、これらの範囲が水理場として断層運動による影響を被っていると考えることも可能かもしれない。

②断層活動と割れ目形成との相関について

- ・断層に接近するほど指数関数的に増加する割れ目は、連続性のわるいネットワーク状の割れ目であり、一方、岩体全体にほぼ普遍的に分布する連続性の良好な割れ目の分布密度はあまり変化しない。このことは、岩体中には初生的な連続性の良好な割れ目が形成されており、地表に隆起・露出したのち、断層運動などで後生的に発生する割れ目は、主に連続性の不良なネットワーク状の割れ目であることを示唆する。
- ・本調査・研究では、結晶質岩体中に初生的に形成された割れ目を‘バックグランド割れ目’として扱った。その割れ目密度はほぼ2本/ m^2 であり、他の地域におけるデータとも整合的である。
- ・地表露頭で観察される連続性の良好な割れ目形態・分布は、阿寺断層の左横ずれのセンスと一致した構造をなす。つまり、阿寺断層近傍では、阿寺断層の左横ずれの動きに伴って左回転運動を行っていると同時に、その回転運動に伴う二次的な割れ目が岩体中に新たに形成された可能性が高いことを示す。

(2) 地下処分施設周辺（とくにNF）の物質移動経路の二次的充填物質（鉄酸化物や炭酸塩など）による、長期的な自己シーリングプロセスと物質移動特性への影響に関する研究

XRF（蛍光X線）分析を一步進めて、処分施設の坑道周辺の水みちである割れ目（掘削に伴う新たに発生した割れ目も含めて）の、二次鉱物充填（鉄酸化物や炭酸塩）による地質環境の長期的な変化の定量化と自己シーリングに関するナチュラルアナログ研究のパイロット研究を実施した。

3.2.1.4 分野間の連携のまとめ/NFコンセプト再構築の検討

(1) 結晶質岩を対象とした処分システムNFコンセプトに関する研究課題の抽出とその体系化

花崗岩体（結晶質岩）を事例に坑道周辺におけるEDZ環境下での、物質移動も考慮した複合的環境における、原位置試験方法、意義、考え方について検討した。「場の特性把握」、「坑道内施設／人工材料の影響」、「場の短期的および長期的変化」などについて、各分野の研究開発の連携と統合について検討した。

(2) NFコンセプト構築の目的におけるNF環境とそこでの人工バリアおよび天然バリアの機能

人工バリアと天然バリアの健全性という観点において、どのような現象に対して知見が不足しているのか、またそれらが多重バリアの深層防護性に対してどのような影響を及ぼすと想定されるのかといったGenericな検討内容をベースに、瑞浪超深地層研究所での結晶質岩を対象とした調査・研究項目の検討を行った。とくに瑞浪超深地層研究所では、地下300m地点での坑道周辺環境を用いた原位置試験を計画・準備中であり、将来的には上記検討内容にさらに検討を加え、どのような原位置試験を実施していくべきか、今後もその検討を引き続き行っていく予定である。

なお、NFコンセプト再構築の検討の詳細は、第I章-3の「結晶質岩を対象とした処分システムNFコンセプトに関する研究課題の抽出とその体系化」を参照されたい。

3.2.2 「調査・解析技術の高度化・体系化」の総括

3.2.2.1 調査技術の高度化に関する研究開発

(1) 深地層における硬岩系不連続岩盤の透水性評価に関する研究

本年度は、割れ目系岩盤の水理解析に関する研究／実用的手法としてのSWING (System for WaterInformation for Ground) 法の研究を引き続き実施するとともに、これまでの研究開発の総括をおこなった。

トンネルの地下水挙動の予測に試みられているSWING法を、立坑・処分坑道掘削にともなう地下水の挙動予測に適用する基礎研究を実施した。SWING法は豊富な地下水情報を使った、簡易な水理解析手法であり、実用的アルゴリズムとして期待される。従来の亀裂ネットワークモデルによる地下水流れのアルゴリズムは、計算が複雑であり、諸定数の設定が困難であるなど、いまだ実用化には難がある。また遺伝的アルゴリズムの研究を積み重ねているが、まだ基礎的研究の段階である。これとは別の、実用化の観点から、上記の手法の研究を、瑞浪超深地層研究所に関連付けて取り組んでいる。本年度は、SWINGを進展させて、異方性や地質の不均質性を組み込んだ、より実用的な「簡易型地下水制御情報化システム (SWING-SHAFT)」の、ツールの改良を試みた。瑞浪超深地層研究所の立坑の建設に伴う、試験調査や掘削時のデータを用いて解析を行い、グラウチングなどの施工条件の変化にも対応できるモデルへ向けた試行錯誤を実施中である。

当研究グループが目指してきたものは、資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構の地層処分全体計画マップ²⁾の細目としてあげられている「建設技術」に関するもの、特に坑道の設計、施工に関連する研究である。対象としては、初期には、岩盤の不連続性のモデル化に関する研究、不連続面マップの数量化、これらのデータを用いた岩盤透水性の評価方法の開発と研究を継続し、現時点では、岩盤の透水性を評価した上で、それをいかに設計・施工段階で活用するかについて研究開発を進めている。

先述の「全体計画マップ」²⁾では、達成目標として、深地層の研究施設 (URL) 設計事例等を踏まえ具体的な地質環境を想定した建設技術の選定および対策工の事例を提示できるレベルを掲げており、坑道の設計・施工について検討を進めている。

最近の「立坑トンネルにおける簡易型地下水制御情報化施工システム (SWING-SHAFT) の適用に関する研究」は、“国内URLの中間深度までの坑道掘削時の調査研究段階で得られた地質環境情報や施工実績などを基に、詳細化かつ実用化の観点から検証した地下施設の設計手法の一例を提示するとともに、設計上の留意点を抽出する。”という目標に沿って、現在掘削が進行中の瑞浪

超深地層研究所の立坑掘削時の湧水状況をモニターした結果を用いて、合理的な坑道（特に立坑）の地下水制御型情報化施工の方法を構築する目的で行われている。

(2) 岩盤浸透流の3次元特性の調査・解析に関する研究

本年度は、広域地下水流れの簡易型モニタリング技術の開発と岩石－水反応に関する基礎研究のうち、立坑掘削時の排水の環境基準値を超えるフッ素、ホウ素の含有を解明するため、これを地下水の滞留時間と岩石－水反応の側面から捉える基礎実験と地下水の滞留時間算定式の定式化を試みた。瑞浪超深地層研究所のMIZ - 1号孔から得られた試料による岩石－水反応の室内実験を行い、高フッ素濃度地下水の形成過程の定量評価をおこなった。またこれを用いた滞留時間の短い地下水の滞留時間を推定する手法を開発し、改良を重ねている。

これまで行ってきた地下水流動の高精度解析と予測法についての研究を総括すると、主に下記の4項目よりなる。

- ①ANN(Artificial neural network), GA(Genetic algorithm), FuzzyなどのSoft Computing手法を用いた地下水、山地流出解析手法の開発に関する研究
- ②水質と水理解析の総合化に関する研究
- ③割れ目岩盤内の浸透流評価研究
- ④蒸発計測装置の開発と軟岩の不飽和特性評価の研究

である。これらのうち、特に力を入れたのが①の項目である。この研究により、地下水圧変動解析ソフトTDAN (Total Data Analyzing System) が開発でき、同時に地下工事に伴う地下水環境管理システム開発の展望が示された。また、②の研究によって、地下水質を考慮して解析を行う総合化の必要性が明らかとなった。③、④は以前の研究の高度化である。

(3) 深部岩盤における水理学的調査・試験法に関する研究

本年度は、水理試験法および地下水制御法に関する研究として、亀裂性岩盤に対するベントナイトスラリー注入試験(水みちの地下水制御に重要な割れ目シール方法の実用化を目指した試験)を実施している。グラウト材には天然の材料で、長期安定を図れるベントナイトスラリーを用いた。スラリーは塩水やエタノールを混ぜ合わせてつくり、粘性の低下をはかった。その材料特性は、室内試験を実施して求めた。注入は、振動(動的)グラウチングを基本とし、岩盤亀裂モデルで最適注入条件の実験を行い、注入圧や注入周波数などに関する基礎データを取得した。これに基づき、瑞浪超深地層研究所の立坑の止水等具体的な目標設定の基礎実験を継続実施した。また、亀裂内に注入したベントナイトグラウトの安定性を確かめるため、亀裂内のグラウト材が「流亡する限界の動水勾配」を求める室内実験を実施した。その結果、十分大きな動水勾配でも、表面に粗度があり、いろいろな幅がある通常の亀裂ではグラウト材の再流失は起こらないことが確かめられた。

また、これまでに得られた研究開発の成果のうち、本報告では以下の3つの課題に関して論述した。

- ①地層処分の埋めもどし技術に関する研究
- ②地盤内の間隙水圧の変動のモニタリング技術に関する研究
- ③掘削影響領域の処理技術

水理試験法および水理試験装置の研究開発に関する、これまでの主な研究成果を総括すると、次のような項目がリストアップされる。詳細は、第Ⅱ章-3の年度別研究課題に詳しい。

- ①ベントナイト混合土などの工業材料の現場透水試験法、水分量の測定法の開発と試験装置の試作
- ②光ファイバーセンサー(FBG)による地盤の諸量・間隙水圧の計測、FBGセンサーによる長期地下水圧計測システムの開発
- ③超微粒ベントナイトグラウトに関する研究

(4) 深層水理の調査方法およびモデル化に関する研究

本年度は、深層水理の調査方法およびモデル化に関する研究として、侵食による地形変化が深部地下水流動系に及ぼす影響に関する予備的検討のうち、長期の埋設環境の状態変化（地形の隆起・侵食、堆積と変形など）の予測と、それらが地下水流動場に与える影響について、基礎的な数値解析をおこなった。「地下水位形成に関する基本的な検討」、「側方侵食が地下深部流動場に与える影響」、「実地形断面による地形侵食効果の検討」などに関するケーススタディである。今後は、これらをベースにして、瑞浪超深地層研究所周辺の日吉川流域3次元モデルによる計算を行い、侵食が地下水流動場へ与える影響について、物質移行の観点（流路の変化、滞留時間）から検討することを考えている。

これまでにおこなってきた研究開発を総括すると、

- ①基本水循環系の再現・予測技術の研究開発
 - ・水循環モデル主要プロセスのモデル化（河川・地下水・蒸発散）
 - ・非定常吸着・脱離過程を組み入れた定常・非定常移流分散モデル
 - ・陸域蒸発散物理モデルに関する検討
 - ・地下深部岩盤中の放射性核種移行過程に関する研究
 - ・移流分散に関わる基礎的検討
- ②モデル作成のための技術開発
 - ・地下物性の把握技術（ハイドロパルストモグラフィ）
 - ・パラメータ逆解析に関するフィールド実験
 - ・大規模水理解析における離散化手法に関する研究
- ③開発したモデルの検証
 - ・東濃地域詳細モデルの構築
 - ・表層水理観測データを用いた日吉川流域水循環のモデル化（モデル構築、再現性、境界条件の検討）
 - ・侵食過程のモデル化に関する検討

本報告では、年度を追って研究の概要をまとめると共に、上記①、②、③の主要な成果を示し、最後に安全評価における技術の現状・課題・展望を述べた。

(5) 地下水の地球化学的特性調査に関する研究

本年度は、安定同位体分析による地下水流動機構の研究として、降水中の安定同位体比変動に基づく降雨流出過程の解明に関する研究、低透水性岩盤における間隙水中の安定同位体比を用いた広域地下水流動の把握に関する研究を行いデータの蓄積をはかっている。昨年度からは、これらの一連の研究に必要な滞留時間の短い、浅層地下水の滞留時間を計測できるとして注目されているCFCs (Chlorofluorocarbons, フロン類) トレーサーを用いた地下水の滞留時間推定法の開発をおこなって、データの蓄積をはかっている。今年度は、対象地域として、堆積岩地域および花崗岩地域を選定して、採水・分析した実測事例を報告した。

これまでにおこなってきた研究開発の項目を総括すると、

- ①トリチウムと安定同位体比による滞留時間・地下水涵養／流出機構に関する研究
 - ・金子台・相模原の関東ローム台地，熊本平野，阿蘇火砕流台地での事例研究
- ②坑道掘削に伴う水理学的影響領域に関する研究
 - ・間隙水中の安定同位体比を用いた坑道掘削に伴う水理学的影響領域に関する研究など
- ③低透水性堆積岩盤における間隙水中の安定同位体比を用いた広域地下水流動の把握に関する研究
 - ・幌延地区の堆積岩中間隙水による古水文情報の解析
- ④降水中の安定同位体比変動に基づく降雨－流出過程の研究
- ⑤広域地下水流動の実態把握に関する研究（熊本県宇土半島）
- ⑥CFCs トレーサーを用いた地下水の滞留時間測定法の開発
- ⑦地下水・湧水の滞留時間評価とそれに基づく流出機構の研究
 - ・霧島火山地域，幌延地域，新潟県十日町蒲生地域，釜石鉾山などでのケーススタディーの蓄積

3.2.2.2 調査・解析技術の高度化・体系化のまとめ

以上の各委員の研究開発内容は、かなり実用化を意図した方向へシフトされた。「簡易地下水制御情報化システム (SWING-SHAFT) の開発」, 「瑞浪で観測された、高フッ素濃度地下水の形成に関する岩石－水反応の研究」, 「ベントナイトスラリーと振動グラウチングを基本として、現地条件を組み込んだ止水に関する基礎実験」, 「東濃地域・日吉川流域の流域水循環モデルに基づく、長期の地形侵食の深部地下水に与える影響の連携研究」, 「フロン類トレーサーを用いた地下水滞留時間推定法の開発」などがそれである。地層処分事業のどの段階で使うか／使えるかの目標、達成度は、それぞれ異なっているものの、3.2.2.1で述べたそれぞれの成果は、平成21年度の総括報告に組み込んで、「まとめ」とした。全体を統合した実用的な体系ができあがるには、まだ時間を要するが、それぞれの個別研究成果の内容検討と実用化の見通し、および瑞浪超深地層研究所のフェーズ3の研究開発計画への寄与の検討も含めて、これからも議論を展開していきたい。

さらに、研究開発の目標は、現時点での実用化と当面の建設・操業段階の安全に的を絞ったため、地層処分の本命である閉鎖後を念頭においた、地層処分特有の技術の開発には手が回らないきらいがある。閉鎖後にも目を向けることも今後の課題として提示する。

3.2.3 参考文献

- 1) 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次取りまとめ－」, 総論レポート, JNC TN1400 99-020.
- 2) 資源エネルギー庁・(独) 日本原子力研究開発機構(2006): 高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画
- 3) 核燃料サイクル開発機構(2000): 深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究, JNC TJ7400 2000-015.
- 4) 小島圭二・大西有三・渡辺邦夫・西垣 誠・登坂博行・嶋田 純・青木謙治・朽山 修・吉田英一・尾方伸久・西尾和久(2010): 深部地質環境の調査解析技術の体系化に関する研究(平成20年度), JAEA-Research 2009-055.

(地圏空間研究所 小島圭二)

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照度	ルーメン	lm		cd sr ^(c)
放射線量	ルクス	lx		lm/m ²
放射線種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		m ² cd s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についての、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎平方メートル	J/m ²	m kg s ⁻³ A ⁻¹
表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値	
		名称	SI単位による値
分	min	1 min=60s	
時	h	1h=60 min=3600 s	
日	d	1 d=24 h=86 400 s	
度	°	1°=(π/180) rad	
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad	
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad	
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²	
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³	
トン	t	1t=10 ³ kg	

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
ファオトル	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ³ /4π)A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≐」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ) 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

