JNC TJ7400 2005-081

12

図書室

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16年度)

(核燃料サイクル開発機構　業務委託報告書)

2005年2月

社団法人　資源・素材学会

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1194　茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部　技術協力課
電　　話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4 - 49 Muramatsu, Tokai - mura, Naka - gun, Ibaraki 319 - 1184 , Japan

©核燃料サイクル開発機構（Japan Nuclear Cycle Development Institute）2005

JNC TJ7400 2005-081
2005年2月

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１６年度）

（核燃料サイクル開発機構　業務委託報告書）

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・杤山　修・吉田　英一

要　旨

本年度は，地表から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）「深部地質環境の調査・解析技術の実用化にむけた研究開発課題に関する研究」（２）「深部地質環境の調査・解析手法の高度化・体系化に関する研究」を，前年度に引き続き実施して次のような成果を得た。

（１）に関しては，これまでに抽出した①処分技術，②安全評価，③地質環境の各分野の課題のうち，次の項目について，具体的な試験・計測と解析・分析を実施した。またその成果を踏まえて，それぞれの中間分野の研究課題についての検討をおこなった。

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：
・微小破壊音（ＡＥ）計測による、掘削影響領域（ＥＤＺ）の評価技術
・低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術

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：
・放射性核種の移行過程で重要な，金属含水酸化物（非晶質）の沈殿生成と安定性，結晶性酸化物への変化および処分施設構築に関する中間分野の課題検討

③　地質環境の観点で抽出された深部地質環境の調査・解析に関する研究：
・地下施設で遭遇すると考えられる断層周辺の割れ目分布特性と長期的な挙動予測
・岩盤割れ目の２次的物質（鉄酸化物・炭酸塩など）による自然のシーリング過程と物質移動への長期的影響

また，上記，処分技術，安全評価，地質環境の各分野間にまたがる問題の研究開発／相互協力に関しては，以下の課題についての検討を開始した。

・「自然または人工の割れ目充填材料の長期的変化がニアフィールドの核種移行に与える影響の研究」
・「掘削影響領域（EDZ）がニアフィールドの核種移行に与える影響の研究

（２）に関しては，核燃料サイクル開発機構（以下，サイクル機構）が計画・実施中の瑞浪超深地層研究所における調査・解析の高度化・体系化の研究開発の流れに，当委員会メンバーが常日頃おこなっている，どちらかというと基礎的な要素技術の研究・開発の成果を高度化技術として取り込めるか，下記の項目の研究・開発について，その成果の評価と実用化への道を議論した。

①地下水情報化施工用簡易システム（SWING）の構築
②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
③亀裂性岩盤に対するベントナイトスラリー注入試験
④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

⑤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－流出過程の解明に関する研究

またこれらの調査研究の進展とあわせて，サイクル機構が実施中の超深地層研究所計画第２段階の計画に関する意見交換をおこない，処分技術の実用化への糧とした。

本報告書は、社団法人資源・素材学会が核燃料サイクル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。
契約番号：1606A00509
機構担当課室：東濃地科学センター　瑞浪超深地層研究所　研究情報化グループ
＊社団法人　資源・素材学会

JNC TJ7400 2005-081
February, 2005

Study on systemizing the technology on the investigation and analysis of deep underground geological environment, 2005.

Keiji Kojima・Yuzo Oonishi・Kunio Watanabe・Makoto Nishigaki・Hiroyuki Tosaka・Jun Shimada・Kenji Aoki・Osamu Tochiyama・Eiichi Yoshida

ABSTRUCT

The following study was done in this year with the aim of systemizing the technology on the investigation and analysis to grasp deep underground geological environment in relation to the radioactive waste disposal.

(1) The study to extract the research and development (R&D) subjects turned to the practical investigation and analysis of deep underground geological environment.

(2) The study on the advanced technical basis of the investigation and analysis of deep underground geological environment.

It continued in the former year and got the following results.

Concerning (1), the concrete investigation, measurement, numerical analyses and chemical analyses were enforced about the following item and extracted some subjects with the viewpoint of radioactive waste disposal. More over, the way to make the co-operative program among each field of the following ①, ② and ③ was discussed.

① The subjects extracted with the viewpoint of the repository design and engineering technology

- The evaluation technique of the excavation disturbed zone (EDZ) of hard fractured rock using acoustic emission (AE) or micro seismicity measurement and so on. The evaluation was enlarged to the soft sedimentary rock in this year.
- The fracture sealing technique such as vibration grouting toward low permeable rock mass.

② The subject extracted with the viewpoint of the safety assessment.

- The precipitation of the metal hydroxide(non-crystallized) through migration process in rock mass and change to the crystallized oxide. The examination of Fe-hydroxide was the target study in this year.
- The evaluation of corrosion affected by high- Eh ground water and/or oxidized substances.

③ The subjects extracted with the viewpoint of the geological environment.

- The fracture distribution characteristics around the fault that is thought to meet in the underground facilities and the prediction of long term activities of the fault.
- Natural sealing process by the secondary filling materials (iron oxide and carbonate and so on) in the fracture of rock mass, and that influence which may be given to the long-term migration and release of nuclides.

The following joint research subjects among the each field of ①, ②, ③ were also discussed.

- Research on the influence which the long term change of natural and man-made fracture filling materials gives to the nuclide migration in the near field.
- Research on the influence which EDZ of fractured zone gives to the nuclide migration in the near field.

Concerning (2), the evaluation of the results and a way to the practical use were discussed on the R&D activities of the following item.

① The hydraulic analysis on the fractured rock mass using the practical SWING (System for Water Information for Ground) method.
② Research on the technology using field observation and numerical analysis based on the neural network model for the water run off in the mountain district as a part of the research which monitors over all environment change attendant on the underground construction works.
③ The examination of poring bentonite slurry into the fractured rock mass with vibration grouting.
④ Modeling on the migration of material and the regional ground water circulation: the integration analysis with the surface water run off and the groundwater flow around the MIU (Mizunami Underground Research Laboratory).
⑤ Grasping of the ground water flow mechanism by stable isotope: research on the rain water run off through the tree trunk which is thought to give important affect to the stable isotope ratio of groundwater.

The R&D activities of the study group concerning (2) are related to the fundamental and elemental technology. It was discussed if these results could be taken into the practical investigation program which characterizes the geological environment and engineering technology in the Tono Geoscience Center, the Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC).
The study group also discussed and gave the comment on the 2nd stage (the shaft construction stage of the MIU research program in the Tono Geoscience Center. And the results were described briefly at the section 2.3 of chapter III in this paper.

This work was performed by the Mining and Materials processing Institute of Japan under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.
Contract Number : 1606A00509
JNC Liaison : Geoscience Research Integration and Dissemination Group
*Mining and Materials processing Institute of Japan.

はじめに ····· 1

第Ⅰ章　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．　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 ····· 4
１．１　はじめに ····· 4
１．２　AE 計測による掘削影響領域(EDZ)の評価技術の開発 ····· 5
1.2.1　はじめに ····· 5
1.2.2　岩石の破壊現象と微小破壊音 ····· 6
1.2.3　個別剛体要素法による解析 ····· 16
1.2.4　堆積軟岩における AE ····· 23
1.2.5　現場計測結果に基づく応力変化と AE パラメータの挙動 ····· 24
1.2.6　粒状体個別剛体要素法を用いた空洞掘削解析 ····· 25
1.2.7　まとめ ····· 29
1.2.8　参考文献 ····· 29
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 ····· 30
1.3.1　はじめに ····· 30
1.3.2　動的注入工法に関する室内実験 ····· 31
1.3.3　グラウト材の注入メカニズムに関する理論的検討 ····· 35
1.3.4　動的注入工法に関する現場実験 ····· 39
1.3.5　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とその検証 ····· 41
1.3.6　まとめ ····· 48
1.3.7　参考文献 ····· 49
１．４　まとめ ····· 50

２．　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 ··· 52
２．１　はじめに ····· 52
2.1.1　研究の背景および目的 ····· 52
2.1.2　各バリア性能の評価 ····· 54
2.1.3　人工バリアの健全性を保証するものとしての地質環境の評価 ····· 58
２．２　自然界における鉄の分布と挙動－岩石および鉱石 ····· 65
2.2.1　序論 ····· 65
2.2.2　岩しょう岩，変成岩中の分布 ····· 65
2.2.3　堆積物および堆積岩中の分布 ····· 68

2.2.4 最近の地質環境中の分布 …… 74
2．3 自然界における鉄の分布と挙動－土壌 …… 77
2.3.1 序論 …… 77
2.3.2 土壌中の鉄酸化物の形成 …… 79
2.3.3 熱力学的安定性と速度 …… 80
2.3.4 鉄酸化物の含有量と土壌の発達 …… 81
2.3.5 土壌中の鉄酸化物の分布と形成 …… 82
2．4 まとめ …… 89
2．5 参考文献 …… 89

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 …… 90
3．1 はじめに …… 90
3．2 研究課題１～３に関する調査・解析技術の開発の必要性 …… 90
3．3 研究課題１：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 …… 91
3.3.1 研究目的 …… 91
3.3.2 これまでの主な実施内容および今年度の成果 …… 91
3.3.3 調査結果と主な考察について …… 92
3．4 研究課題２：割れ目シーリングのナチュラルアナログに関する研究 …… 99
3.4.1 研究目的 …… 99
3.4.2 今年度実施内容および予察的検討結果 …… 100
3．5 今後の予定 …… 101
3．6 参考文献 …… 102
4． ニアフィールド（NF）コンセプトの再構築に関する研究 …… 103
4．1 背景と目的 …… 103
4．2 検討内容および結果 …… 103

第Ⅱ章 調査・解析手法の高度化・体系化 …… 104

1． 山岳トンネル 地下水情報化施工用 簡易システム（SWING)の構築 …… 105
1．1 はじめに …… 105
1．2 SWING 法の開発 …… 106
1．3 SWING 法によるトンネル横断方向の水収支解析モデル …… 107
1．4 SWING 法によるトンネル湧水，地下水位，表流水の変動解析 …… 116
1．5 まとめ …… 124
1．6 参考文献 …… 125
1．7 立坑掘削における SWING 法の説明（SWING－SHAFT：立坑モデル） …… 126

1.7.1　SWING-SHAFT（シリンダーボリューム）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・126
1.7.2　SWING-SHAFTの運用・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・128
1.7.3　SWING-SHAFTの適用式（シリンダーボリューム）・・・・・・・・・・・・・・・・・131
1.7.4　例題・・134

2．　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・・・・149
2．1　はじめに・・149
2．2　モニタリングシステムの考え・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・149
2．3　解析データと解析方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・151
2．4　季節ごとの流出特性の解析・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・152
2．5　各季節のモデルの他季節流出解析への適用性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・160
2．6　植林による流出変化モニタリングの試み・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・161
2．7　結論・・164

3．　水理試験法および水理試験装置の開発研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・165
3．1　序論・・165
3.1.1　緒言・・・165
3.1.2　本論文の目的と構成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・166
3．2　従来の研究・・167
3.2.1　概要・・・167
3.2.2　ベントナイトに関する従来の研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・167
3.2.3　グラウトに関する従来の研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・170
3.2.4　本研究の課題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・173
3．3　グラウト材の基礎物性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・174
3.3.1　概要・・・174
3.3.2　ベントナイト・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・174
3.3.3　ベントナイトスラリーの粘性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・175
3.3.4　ベントナイトスラリーの圧密特性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・181
3.3.5　考察・・・183
3．4　ベントナイトスラリーに対する透水試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・184
3.4.1　概説・・・184
3.4.2　試験装置と試験手順および評価手法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・185
3.4.3　ベントナイトスラリーに対する透水試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・187
3.4.4　各種スラリーに対する溶液置換透水試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・195
3.4.5　考察・・・198
3．5　ベントナイトスラリーを用いた平行平板定圧注入試験・・・・・・・・・・・・・・・・・199
3.5.1　概説・・・199

3.5.2 注入可能亀裂幅把握試験 …… 199
3.5.3 ベントナイトスラリーの平行平板亀裂定圧注入試験 …… 203
3.5.4 流亡に対する検討 …… 210
3.5.5 考察 …… 215
3．6 施工方法における検討 …… 216
3.6.1 概説 …… 216
3.6.2 配合段階型注入試験 …… 216
3.6.3 加振下におけるスラリーの粘性 …… 219
3.6.4 動的注入試験 …… 220
3.6.5 考察 …… 224
3．7 砂層内への塩水ベントナイトの注入試験 …… 225
3.7.1 概説 …… 225
3.7.2 試料 …… 225
3.7.3 試験方法 …… 225
3.7.4 まとめ …… 229
3．8 結論 …… 230
3．9 参考文献 …… 231
3．10 別添付写真 …… 232
付写真 3.3.1～2 …… 232
3.4.1～2 …… 233
3.5.1～6 …… 233
3.6.1～2 …… 236

4． 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 …… 237
4．1 はじめに …… 237
4．2 作業フロー …… 237
4．3 表層水文・水理調査の概要 …… 238
4．4 地形情報を利用した東濃地域詳細モデルの構築 …… 239
4.4.1 地形情報 …… 239
4.4.2 地質情報 …… 240
4.4.3 水理情報 …… 241
4．5 流域水文情報 …… 245
4.5.1 観測地点位置図 …… 245
4.5.2 降水量記録および蒸発散量記録 …… 246
4.5.3 河川流量観測値 …… 247
4.5.4 河川流量値の補完 …… 247

4.5.5　地下水位観測値 …… 251
4．6　初期化シミュレーション …… 252
4.6.1　入力パラメータの設定 …… 252
4.6.2　河川流量の変化 …… 252
4.6.3　調整後の粗度係数 …… 254
4.6.4　河川系の発達 …… 256
4.6.5　水飽和度 …… 257
4.6.6　鉛直フラックス分布 …… 258
4.6.7　地下水位 …… 259
4．7　予備解析モデルの信頼性に関する考察 …… 260
4.7.1　河川流量（年平均値） …… 260
4.7.2　地下水位 …… 261
4.7.3　地下水頭分布 …… 261
4.7.4　岩盤浸透量 …… 263
4．8　非定常解析 …… 265
4.8.1　入力パラメータの設定 …… 265
4.8.2　解析結果 …… 265
4．9　まとめと今後の課題 …… 268

5．　地下水の地球化学特性調査に関する研究 …… 269
5．1　はじめに …… 269
5．2　鹿北流域試験地の位置および水文環境 …… 269
5．3　研究方法 …… 270
5．4　研究結果 …… 270
5.4.1　安定同位体比から見た試験流域の流出特性 …… 270
5.4.2　試験流域の降雨流出特性 …… 271
5.4.3　タンクモデルによる流出解析 …… 272
5.4.4　樹冠貯留による遮断蒸発量の評価 …… 272
5.4.5　タンクモデルによる結果と成分分離結果との比較 …… 273
5.4.6　タンクモデルを用いた樹幹流の定量評価 …… 276
5．5　まとめ …… 277
5．6　参考文献 …… 278

第Ⅲ章　実用化に向けた研究開発課題の提示及び調査・解析技術の高度化・体系化の総括 …… 302

1．研究結果の検討 ····· 303
1．1　基盤技術の実用化・高度化の方向 ····· 303
1．2　課題の提示／調査研究と基盤技術実用化への研究開発 ····· 303
1.2.1　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 ····· 303
1.2.2　性能評価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 ····· 304
1.2.3　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 ····· 304
1.2.4　各分野中間領域の調査研究の連携検討 ····· 304
1．3　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 ····· 305
1.3.1　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 ···· 305
1.3.2　地下水の基盤技術／要素技術の高度化 ····· 305
1.3.3　環境安全の地下水技術と建設・操業安全の地下水技術 ····· 305

2．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 ····· 306
2．1　「実用化に向けた研究開発課題の提示」の総括 ····· 306
2.1.1　処分技術 ····· 306
2.1.2　安全評価 ····· 307
2.1.3　地質環境 ····· 307
2.1.4　分野間の連携のまとめ ····· 307
2．2　「調査・解析技術の高度化・体系化」の総括 ····· 308
2.2.1　調査技術の高度化に関する研究開発 ····· 308
2.2.2　調査・解析技術の高度化・体系化のまとめ ····· 309
2．3　瑞浪超深地層研究所の第二段階の調査研究計画に関するコメント ····· 310
2.3.1　第二段階の調査研究計画に関する一般的なコメント ····· 310
2.3.2　第二段階の調査研究計画に関する分野毎，分野間の視点で見たコメント ····· 312

図表目次

第Ⅰ章

表 1.1.1　処分施設の工学技術の体系化に関する課題 …… 4
表 1.2.1　AE 測定装置の仕様 …… 9
表 1.2.2　PFC 解析における入力パラメータ …… 17
表 1.3.1　室内実験の条件 …… 31
表 1.3.2　水理学的距離行列 …… 42
表 2.1.1　アクチノイドの溶解度と分配係数の設定値 …… 59
表 2.2.1　種々の鉄酸化物の地層中の主な分布 …… 65
表 2.2.2　岩漿岩中の磁鉄鉱およびイルメナイトの平均濃度（g/kg） …… 66
表 2.2.3　堆積物中の鉄の分布と化学形 …… 68
表 2.2.4　堆積性鉄鉱床の型 …… 70
表 2.3.1　種々の土壌中の鉄酸化物の分布 …… 78
表 2.3.2　一次岩石中の主な含鉄鉱物 …… 78

図 1.2.1　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図 …… 6
図 1.2.2　地下空洞の掘削の進行に伴う AE 発生数の変化 …… 7
図 1.2.3　高剛性三軸圧縮試験装置 …… 8
図 1.2.4　AE 計測システム …… 9
図 1.2.5　三軸圧縮試験結果 …… 10
図 1.2.6　AE 波形の振幅値の変化 …… 11
図 1.2.7　AE 発生数の比較 …… 12
図 1.2.8　AE 周波数の比較 …… 13
図 1.2.9　m 値の比較 …… 14
図 1.2.10　岩石の破壊現象と AE 特性の関係についての検討フロー図 …… 16
図 1.2.11　PFC 解析によるカーブフィッティング結果 …… 19
図 1.2.12　応力－ひずみ曲線と亀裂発生分布（PFC 解析） …… 20
図 1.2.13　拘束圧を変化させた三軸圧縮試験の結果 …… 21
図 1.2.14　シミュレーションにおいて観測された亀裂の累積発生数 …… 21
図 1.2.15　拘束圧による亀裂の発生・進展過程の差異（DEM 解析結果） …… 22
図 1.2.16　堆積軟岩を対象とした室内岩石試験における AE 発生状況（赤色の線） …… 23
図 1.2.17　H 断面空洞周辺地質図 …… 24
図 1.2.18　H－10 計測線上 3m 地点での計測結果 …… 24
図 1.2.19　グローバルモデルとセクターモデル …… 26
図 1.2.20　セクターモデルによる解析結果 …… 28

図 1.2.21　H－10 計測線における亀裂開口量分布 …… 28
図 1.2.22　H－10 計測線上 3m 地点での応力変化の比較 …… 28
図 1.2.23　H－10 計測線上 3m 地点での計測結果 …… 28
図 1.3.1　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 …… 30
図 1.3.2　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） …… 32
図 1.3.3　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） …… 32
図 1.3.4　亀裂内部の振動圧の振幅（注入材料の粘性の影響） …… 33
図 1.3.5　亀裂内部の振動圧の振幅（注入圧力の振幅の影響） …… 34
図 1.3.6　亀裂内部の振動圧の振幅（注入圧力の周波数の影響） …… 34
図 1.3.7　亀裂内部の振動圧の振幅（注入材料の粘性の影響） …… 36
図 1.3.8　亀裂内部の振動圧の振幅（注入圧力の振幅の影響） …… 36
図 1.3.9　亀裂内部の振動圧の振幅（注入圧力の周波数の影響） …… 36
図 1.3.10　現場実験の結果 …… 40
図 1.3.11　注入流量－時間曲線の数値解析結果と実測結果との対応 …… 40
図 1.3.12　クロスホール透水試験 …… 42
図 1.3.13　水理学的布置 …… 43
図 1.3.14　幾何学的再構成 …… 44
図 1.3.15　地理的空間に再配置された点群 …… 44
図 1.3.16　点群の密度とイメージング結果 …… 44
図 1.3.17　数値実験モデル …… 45
図 1.3.18　透水層が水平なモデル …… 46
図 1.3.19　透水層が傾斜しているモデル …… 47
図 1.3.20　透水層が複数存在するモデル …… 47
図 1.3.21　注水孔・観測孔と透水層が交差しないモデル …… 47
図 1.3.22　現場実験の概要 …… 48
図 1.3.23　現場実験に対する手法の適用結果 …… 48
図 2.1.1　レファレンスケースの解析結果 …… 55
図 2.1.2　地層処分システムの全体性能の解析 …… 55
図 2.1.3　掘削影響領域通過流量に対する Np-237 の最大移行率の違い …… 56
図 2.1.4　ガラス溶解速度および掘削影響領域通過流量と Cs-135 の最大移行率 …… 57
図 2.1.5　鉄とイオウの化学種の酸化還元ダイアグラム …… 61
図 2.1.6　平衡計算より求めた溶解度制限固相と溶存支配種 U …… 61
図 2.1.7　平衡計算より求めた溶解度制限固相と溶存支配種 Np …… 62
図 2.1.8　平衡計算より求めた溶解度制限固相と溶存支配種 Pu …… 62
図 2.2.1　種々の岩漿岩中のチタノマグネタイトとイルメナイトの組成 …… 66
図 2.2.2　赤色層の CIE *L*a*b** 色空間での位置 …… 69

図 2.2.3　潟環境における鉄酸化物の鉄鉱物としての析出の位置 …… 71
図 2.2.4　２つの連結した鉄酸化物のウーイド中の元素の分布 …… 72
図 2.2.5　未固結の砕屑堆積物中の組織（Eh）の不連続部分における鉄酸化物の模式図 …… 73
図 2.3.1　一般的な鉄の変換経路 …… 82
図 2.3.2　ゲーサイトと赤鉄鉱の生成条件 …… 84
図 2.3.3　土壌中の種々の鉄鉱物生成に対する有機物含有量および鉄の供給速度の影響の模式図 …… 87
図 3.3.1　岐阜県東部の阿寺断層の分布と断層周辺の地質・調査地域 …… 91
図 3.3.2　断層および周辺岩盤内に発達する割れ目の方向（付知川周辺） …… 92
図 3.3.3　横川谷ルートでの割れ目解析結果 …… 93
図 3.3.4　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 …… 94
図 3.3.5　阿寺断層からの距離と露頭で観察される割れ目密度との相関 …… 94
図 3.3.6　阿寺断層からの距離を横軸にとって，各露頭ごとの割れ目の長さ別に
その密度と頻度を解析した結果 …… 95
図 3.3.7　阿寺断層からの距離を横軸にとって，各露頭ごとの割れ目の長さ別に
その密度を頻度を解析した結果 …… 95
図 3.3.8　断層近傍で見られる連続性のわる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 …… 96
図 3.3.9　連続性のわる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 …… 96
図 3.3.10　田畑地域の露頭スケッチ …… 97
図 3.3.11　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 …… 97
図 3.3.12　コアサンプル中に認められる微少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 …… 98
図 3.3.13　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 …… 99
図 3.4.1「食い違い礫」：食い違い段差約 5mm …… 100
図 3.4.2「食い違い礫」：褐色の充填物拡大 …… 100
図 3.4.3「食い違い礫」：割れ目を充填する細粒の砕屑物 …… 101

第Ⅱ章

表 2.4.1　春季の解析に用いたデータ …… 153
表 2.4.2　異なった入力組み合わせを用いた解析 …… 153
表 2.4.3　夏季の解析に用いたデータ …… 155
表 2.4.4　夏季流出の解析モデルと結果 …… 156
表 2.4.5　秋季の解析に用いたデータ …… 157
表 2.4.6　秋季流出の解析モデルと結果 …… 157

表 2.4.7　大きな流出を省いたモデル ····· 157
表 2.4.8　冬季のデータ ····· 159
表 2.4.9　冬季の流出解析結果 ····· 159
表 2.5.1　冬季，夏季のテスト期間データを他の季節のモデルで評価 ····· 161
表 2.5.2　春季，秋季のテスト期間データを他の季節のモデルで評価 ····· 161
表 2.6.1　春季における年毎の R2 値，EI 値 ····· 162
表 2.6.2　春季における年毎の R2 値，EI 値 ····· 163
表 2.6.3　冬季における年毎の R2 値，EI 値 ····· 163
表 2.6.4　夏季における年毎の R2 値，EI 値 ····· 164
表 3.3.1　塩水エタノールスラリー粘性試験における配合条件 ····· 179
表 3.4.1　溶液試料の物性 ····· 191
表 3.4.2　溶液置換透水試験条件 ····· 195
表 3.5.1　目詰まり試験ケース ····· 201
表 3.5.2　試験条件 ····· 206
表 3.5.3　注入試験結果 ····· 207
表 3.5.4　流亡試験条件 ····· 211
表 3.6.1　配合段階試験条件 ····· 217
表 3.6.2　動的注入試験条件 ····· 221
表 3.7.1　注入前後の透水係数の変化と注入量とそれによる排水流量 ····· 228
表 4.3.1　表層水理観測流域の規模 ····· 239
表 4.4.1　地表面粗度係数（初期値） ····· 242
表 4.4.2　浸透率および間隙率 ····· 243
表 4.5.1　各河川流量（補完後） ····· 249
表 4.5.2　日吉川河川流量（補完後） ····· 249
表 4.6.1　観測値と予備解析結果の比較（河川流量） ····· 254
表 4.6.2　地表面粗度係数（調整後） ····· 254
表 4.6.3　観測値と解析値の比較（地下水面標高） ····· 260
表 4.7.1　各流域の涵養量と鉛直フラックス平均値の比較（mm/y） ····· 264
表 4.7.2　各流域の表層水理観測データと涵養量推定値(mm/y) ····· 264
表 5.4.1　遮断損失を推定するためのパラメータ ····· 301

写真 3.3.1　Ｂ型回転粘度計 ····· 176
写真 3.4.1　キャノンフェンス計 ····· 186
写真 3.7.1　ベントナイト動的注入試験装置 ····· 227
写真 3.7.2　供試体と定水位タンク ····· 227

図 1.3.1　トンネル湧水に伴う地下水の流れ ····· 108
図 1.3.2　単位スライスボリュームにおけるトンネル湧水量の算定方法 ····· 109
図 1.3.3　トンネル進捗に伴う単位スライスボリュームの累積 ····· 110
図 1.3.4　SWING 法によるトンネル湧水の累積 ····· 110
図 1.3.5　Dupuit の非定常流の q(t), h(t)経時特性 ····· 111
図 1.3.6　表流水への影響量の算定 ····· 112
図 1.3.7　SWING 法に援用する水理式 ····· 113
図 1.3.8　SWING 法における出力要素 ····· 114
図 1.3.9　SWING 法の現地援用イメージ ····· 115
図 1.4.1　SWING 法によるトンネル坑口湧水量の検証 ····· 116
図 1.4.2　SWING 法によるトンネル湧水量の予測 ····· 118
図 1.4.3　SWING 法による貫通後のトンネル湧水量の推移 ····· 119
図 1.4.4　SWING 法によるトンネル湧水の３軸表示 ····· 120
図 1.4.5　SWING 法による地下水位低下影響範囲と沢水減少流域 ····· 121
図 1.4.6　SWING 法による表流水と地下水位の変動予測結果（降雨を考慮しない場合） ····· 122
図 1.4.7　SWING 法による表流水と地下水位の変動予測結果（降雨を考慮した場合） ····· 123
図 1.7.1　SWING-SHAFT(シリンダーボリュームによる) ····· 126
図 1.7.2　SWING-SHAFT の適用結果 ····· 127
図 1.7.3　SWING－SHAFT の運用 ····· 129
図 1.7.4　SWING-SHAFT 法運用方法 ····· 130
図 1.7.5　上部不飽和領域への降雨涵養の適用条件 ····· 133
図 1.7.6　上部からの漏水涵養の適用条件 ····· 133
図 1.7.7　立坑モデルの例題 ····· 134
図 1.7.8　SWING-SHAFT 法による掘削に伴う湧水量と影響範囲 CASE-① ····· 135
図 1.7.9　SWING-SHAFT 法による掘削に伴う水位低下量：CASE-① ····· 136
図 1.7.10　検討地区概要（1） ····· 137
図 1.7.11　検討地区概要（2） ····· 138
図 1.7.12　既往の水理物性（k）の推定 ····· 139
図 1.7.13　岩級区分と k の関係 ····· 140
図 1.7.14　SWING-SHAFT 法による掘削に伴う湧水量：CASE-① ····· 141
図 1.7.15　SWING-SHAFT 法による掘削に伴う湧水量と影響範囲：CASE-① ····· 142
図 1.7.16　SWING-SHAFT 法による掘削に伴う水位低下量：CASE-① ····· 143
図 1.7.17　１次元タンクモデルによる降雨浸透量の制御 ····· 144
図 1.7.18　現地水文データ例 ····· 145
図 1.7.19　SWING-SHAFT 法による掘削に伴う湧水量：
CASE-①タンクモデルによる降雨考慮 ····· 146

図 1.7.20　SWING-SHAFT 法による掘削に伴う湧水量と影響範囲：
CASE-①タンクモデルによる降雨考慮 …… 147
図 1.7.21　SWING-SHAFT 法による掘削に伴う水位低下量：
CASE-①タンクモデルによる降雨考慮 …… 148
図 2.2.1　地下研究所や処分坑道建設と地下水流動変化模式図 …… 150
図 2.2.2　小流域の降雨－流出応答によるモニタリングの模式図 …… 150
図 2.2.3　解析システムの概念図 …… 150
図 2.3.1　研究対象流域。（b）中のⅡ流域 …… 151
図 2.3.2　解析手順の概略図 …… 151
図 2.3.3　２つのモデル模式図 …… 152
図 2.4.1　流出量の学習結果 …… 154
図 2.4.2　学習結果。積算流出量 …… 154
図 2.4.3　テスト期間の予測結果 …… 154
図 2.4.4　テスト期間の積算流出量 …… 155
図 2.4.5　トレーニング期間の学習精度 …… 156
図 2.4.6　トレーニング期間の積算流出量 …… 156
図 2.4.7　テスト期間の予測精度 …… 158
図 2.4.8　テスト期間の予測値と実測値（積算流出量） …… 158
図 2.4.9　テスト期間の流出予測結果 …… 160
図 2.4.10　テスト期間の積算流出量の予測と実測値 …… 160
図 2.6.1　植林状況 …… 162
図 3.1.1　本研究の流れ …… 167
図 3.2.1　透水試験装置 …… 169
図 3.2.2　注入可能亀裂開口幅と水セメント比の関係 …… 171
図 3.2.3　地層処分における掘削損傷領域(高透水性ゾーン)へのグラウチング概念図 …… 173
図 3.3.1　ベントナイト試料の粒経加積曲線 …… 175
図 3.3.2 塩分濃度とスラリーの粘性の関係（Sa/Be=2/1，22～23℃） …… 176
図 3.3.3　エタノール濃度とスラリーの粘性の関係（Et/Be=2/1，22～23℃） …… 177
図 3.3.4　Sa/Be スラリーの流動曲線（Sa/Be＝2/1，22～23℃） …… 177
図 3.3.5　各種溶液ベントナイトスラリーの配合比と粘性の関係（22℃） …… 178
図 3.3.6　ベントナイトスラリーの各種溶液濃度と粘性の関係（21～23℃） …… 179
図 3.3.7　スラリーの粘性の経時的変化と再攪拌による効果 …… 180
図 3.3.8　圧密試験装置 …… 181
図 3.3.9　e-log P 曲線 …… 182
図 3.3.10　間隙比と透水係数の関係（圧密試験） …… 182
図 3.4.1　グラウトによる透水性の改良効果目標 …… 184

図 3.4.2　圧密併用加圧型透水試験装置 ····· 185
図 3.4.3　溶液の粘度と温度の関係 ····· 187
図 3.4.4　水ベントナイトスラリーの配合比と透水係数の関係（純水） ····· 187
図 3.4.5　水ベントナイトスラリーの間隙比と透水係数の関係（純水） ····· 188
図 3.4.6　塩水ベントナイトスラリーの配合比と透水係数の関係(Sa=4%) ····· 188
図 3.4.7　塩水ベントナイトスラリー間隙比と透水係数の関係(Sa=4%) ····· 189
図 3.4.8　エタノールベントナイトスラリーの配合比と透水係数の関係(Et=60%) ····· 189
図 3.4.9　エタノールベントナイトスラリーの間隙比と透水係数の関係(Et=60%) ····· 190
図 3.4.10　沿岸部地下の地下水の様相 ····· 190
図 3.4.11　溶液試料の粘性と温度の関係 ····· 191
図 3.4.12　海水ベントナイトスラリーの配合比と透水係数の関係 ····· 191
図 3.4.13　海水ベントナイトスラリーの間隙比と透水係数の関係 ····· 192
図 3.4.14　海底深層水ベントナイトスラリーの配合比と透水係数の関係 ····· 192
図 3.4.15　海底深層水ベントナイトスラリーの間隙比と透水係数の関係 ····· 193
図 3.4.16　60%エタノール，４%塩水と水での透水性の比較 ····· 193
図 3.4.17　60%エタノール，4%塩水，海水と海底深層水での透水性の比較 ····· 194
図 3.4.18　エタノール濃度と比誘電率の関係 ····· 195
図 3.4.19　エタノールの水への置換における供試体の膨潤圧の経時的変化 ····· 196
図 3.4.20　エタノールの水置換における排水濃度の経時的変化 ····· 196
図 3.4.21　飽和塩水，エタノールから水への置換における経時的な透水係数の変化 ·· 197
図 3.5.1　目詰まり確認試験装置 ····· 199
図 3.5.2　一次元亀裂におけるベントナイト注入形態 ····· 200
図 3.5.3　4%塩水ベントナイトスラリーの配合比と注入可能亀裂幅の関係 ····· 201
図 3.5.4　60%エタノールベントナイトスラリーの配合比と注入可能亀裂幅の関係 ··· 202
図 3.5.5　経時的な流出流量の変化（Sa＝4%，150μm） ····· 202
図 3.5.6　経時的な流出流量の変化（Et＝60%） ····· 203
図 3.5.7　平行平板亀裂注入試験装置全体図 ····· 204
図 3.5.8　一次元平行平板亀裂モデル解体図 ····· 204
図 3.5.9　試験フロー ····· 205
図 3.5.10　理論透水係数と実測透水係数の関係(15℃) ····· 207
図 3.5.11　目詰まりの様相 ····· 208
図 3.5.12　亀裂開口幅の違いによる注入距離の経時的変化(Sa＝4%) ····· 208
図 3.5.13　配合比の違いによる流出流量の経時的変化（150μm） ····· 209
図 3.5.14　同配合比，亀裂条件での塩水とエタノールの比較 ····· 209
図 3.5.15　流亡試験装置全体図 ····· 210
図 3.5.16　経時的流出流量の変化（Sa=4%，d=200μm） ····· 211

図 3.5.17　流亡状況の経時的変化の様相 …… 212
図 3.5.18　配合比と流亡導水勾配の関係(注入停止一時間後) …… 212
図 3.5.19　注入後経過時間と導水勾配の関係 …… 213
図 3.5.20　空気の体積変化による流亡 …… 214
図 3.5.21　復水による流亡 …… 214
図 3.6.1　配合段階式注入試験装置 …… 216
図 3.6.2　経時的流出流量の変化 …… 217
図 3.6.3　流出配合比と時間の関係 …… 218
図 3.6.4　吸着・沈降現象による亀裂内密度の増加 …… 218
図 3.6.5　加震下粘度試験装置 …… 219
図 3.6.6　周波数と粘度の関係 …… 219
図 3.6.7　動的注入試験装置 …… 220
図 3.6.8　脈動発生装置 …… 220
図 3.6.9　Sa/Be 注入時の圧力波形 …… 221
図 3.6.10　Et/Be 注入時の圧力波形 …… 222
図 3.6.11　経時的注入距離の変化 (Sa/Be=2/1) …… 222
図 3.6.12　経時的注入距離の変化 (Et/Be=1.5/1) …… 223
図 3.6.13　目詰まりの解消のメカニズム …… 223
図 3.7.1　川砂の粒経加積曲線 …… 225
図 3.7.2　注入供試体 …… 226
図 3.7.3　動的注入試験装置システム …… 227
図 3.7.4　動的と静的の注入圧力 …… 228
図 3.7.5　塩水ベントナイトスラリーの注入供試体の透水係数の経時的低下 …… 228
図 4.2.1　作業フロー …… 237
図 4.3.1　表層水理観測流域位置図 …… 238
図 4.4.1　地表格子分割 …… 239
図 4.4.2　東濃地域の地質図 …… 240
図 4.4.3　地質モデル …… 241
図 4.4.4　土地利用分布図 …… 242
図 4.4.5　モデル地表面における土地利用区分 …… 242
図 4.4.6　不飽和パラメータ …… 244
図 4.5.1　観測地点位置図 …… 245
図 4.5.2　雨雪量および蒸発散量観測値 …… 246
図 4.5.3　河川流量および雨雪量観測値 …… 247
図 4.5.4　各河川流量と雨雪量の関係 …… 248
図 4.5.5　正規化河川流量と正規化雨量の関係 …… 250

図 4.5.6　地下水位観測結果 …… 251
図 4.6.1　初期化シミュレーションにおける上部境界条件概念図 …… 252
図 4.6.2　予備解析進行状況（ケース１） …… 253
図 4.6.3　予備解析進行状況（ケース２） …… 253
図 4.6.4　予備解析進行状況（ケース３） …… 254
図 4.6.5　河川流量観測値と解析値の比較 …… 255
図 4.6.6　地表面水位分布（左：Case1，中：Case2，右：Case3） …… 256
図 4.6.7　水飽和度分布（左：Case1，中：Case2，右：Case3） …… 257
図 4.6.8　鉛直フラックス分布（左：Case1，中：Case2，右：Case3） …… 258
図 4.6.9　地下水位観測孔位置図 …… 259
図 4.6.10　地下水面深度観測値と解析値の比較 …… 260
図 4.7.1　地下水頭観測孔位置図 …… 261
図 4.7.2　地下水頭観測値と解析値の比較 …… 262
図 4.8.1　2003 年度の降雨量，蒸発散量観測データ …… 265
図 4.8.2　日吉川ハイドログラフ …… 266
図 4.8.3　正馬川ハイドログラフ …… 266
図 4.8.4　正馬川上流域ハイドログラフ …… 267
図 4.8.5　柄石川流域ハイドログラフ …… 267
図 4.8.6　柄石川上流域ハイドログラフ …… 268
図 5.2.1　研究地域位置図 …… 279
図 5.2.2　３つの試験流域地形図 …… 280
図 5.2.3　研究流域における年降水量・流出量・蒸発散量（1992－1999） …… 281
図 5.3.1　観測器配置図 …… 282
図 5.3.2　樹幹流・林内雨時間別採水装置構造概念図 …… 283
図 5.4.1　2004 年度における林外雨・林内雨のデルタダイヤグラム …… 284
図 5.4.2　林外雨・林内雨・樹幹流の d 値月変動図 …… 285
図 5.4.3　試験流域３における河川水と林内雨のデルタダイヤグラム …… 286
図 5.4.4　２つの試験流域における流出高の季節変化（2004 年 4 月～11 月） …… 287
図 5.4.5　タンクモデルの基本構造概念図 …… 288
図 5.4.6　タンクモデルの構造 …… 289
図 5.4.7　タンクモデルによる推定流出量変化 …… 289
図 5.4.8　タンクモデル推定値による直接流出成分と地下水流出成分の分離 …… 290
図 5.4.9　SiO2 濃度およびタンクモデル推定値による地下水流出率の比較 …… 291
図 5.4.10　河川水中の $\delta^{18}O$ 濃度変化に関する実測値とタンクモデル推定値の比較 …… 291
図 5.4.11　タンクモデルの構造 …… 292
図 5.4.12　タンクモデルによる推定流出量変化 …… 292

図 5.4.13　タンクモデル推定値による直接流出成分と地下水流出成分の分離 ····· 293
図 5.4.14　Si02 濃度およびタンクモデル推定値による地下水流出率の比較 ····· 293
図 5.4.15　河川水中の $\delta^{18}O$ 濃度変化に関する実測値とタンクモデル推定値の比較 ····· 294
図 5.4.16　タンクモデルの構造 ····· 295
図 **5.4.17**　タンクモデルによる推定流出量変化 ····· 295
図 5.4.18　タンクモデル推定値による直接流出成分と地下水流出成分の分離 ····· 296
図 5.4.19　Si02 濃度およびタンクモデル推定値による地下水流出率の比較 ····· 296
図 5.4.20　河川水中の $\delta^{18}O$ 濃度変化に関する実測値とタンクモデル推定値の比較 ····· 297
図 5.4.21　タンクモデルの構造 ····· 298
図 5.4.22　タンクモデルによる推定流出量変化 ····· 298
図 **5.4.23**　タンクモデル推定値による直接流出成分と地下水流出成分の分離 ····· 299
図 5.4.24　Si02 濃度およびタンクモデル推定値による地下水流出率の比較 ····· 299
図 5.4.25　河川水中の $\delta^{18}O$ 濃度変化に関する実測値とタンクモデル推定値の比較 ····· 300

深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究委員会

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 都市環境工学専攻	教　授	大西　有三
委　員	埼玉大学	地圏科学研究センター	教　授	渡辺　邦夫
委　員	岡山大学	環境理工学部 環境デザイン工学科	教　授	西垣　誠
委　員	東京大学	工学系研究科 地球システム工学専攻	助教授	登坂　博行
委　員	熊本大学	理学部地球科学科	教　授	嶋田　純
委　員	京都大学	大学院工学研究科 都市環境工学専攻	教　授	青木　謙治
委　員	東北大学	多元物質科学研究所	教　授	杤山　修
委　員	名古屋大学	博物館	助教授	吉田　英一

深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究

はじめに

本研究は，地表から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おこない，各課題の解決に向けた研究開発および調査・解析技術の体系化について検討するものである。まず，サイクル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“の内容を地質環境，処分技術，性能評価の各観点で評価し，それに基づき，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提示する。また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（地層科学研究）の成果および研究計画を踏まえ，広域から局所的な地下水流動まで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・体系化について検討するものである。

上記の“地層処分研究開発第２次取りまとめ（別名 2000 年レポート)”は，動燃／サイクル機構が，およそ 20 年間実施してきた，地層処分に関する研究開発を含めた国内外の現状技術の集大成であり，現状の技術で地層処分は実現可能，その基盤技術は整ったと評価されている。これに加えて「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」の制定，これに伴う地層処分の実施主体と資金管理センターの設立は，まさに 21 世紀のはじまりを，地層処分実現へむけてのキックオフの年とした。

しかしながら，これまでの研究開発は，基盤技術，要素研究に重点がおかれた，どちらかというと，サイトを特定していない段階の一般論であり，事例研究的な色彩が強い。地層処分実現へ向けて，サイトを特定し，地層処分場を建設／操業するためには，“第２次取りまとめ“に集大成された技術を，より具体化し，また要素技術を体系化するなど，実用化へ向けて磨きをかけることが当面急がれる課題である。また従来，いわば縦糸として分野を分けて実施してきた「地質環境」「処分技術」「性能評価」の間に横糸を通す仕事も残っている。これらの課題に対して重点的に検討を加えるために，本委員会では，第２次取りまとめに基づき今後の研究課題を抽出し，実用化に向けた研究を行う「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に関する研究」をテーマ１，第２次取りまとめ以降の研究開発目標である「深部地質環境の調査・解析手法の高度化・体系化に関する研究」をテーマ２として実施している。

テーマ１では，上記の各分野間にまたがる研究開発を視野にいれて，地層処分の実用技術の重点課題のいくつかをこれまでに具体的に抽出して，それらの技術の詳細な分析と調査・解析を試み，また分野間にまたがる問題の研究開発／相互協力に関する情報交換を重ねてきた。

一方，テーマ２では，東濃地科学センターが計画・実施中の，瑞浪超深地層研究所における調査・解析の高度化・体系化の研究開発の流れに，当委員会メンバーが常日頃おこな

っている，どちらかというと基礎的な要素技術の研究・開発の成果を高度化技術として取り込めるか，その実用化へ向けた研究開発を前進させた。また，東濃地科学センターの研究開発も実験立坑の掘削がはじまり，立坑での調査研究という第二段階に入ろうとしている。今後は，本調査・研究の成果を反映させて，第二段階の調査研究計画の評価もおこないながら，より具体的・実用的な調査・解析技術の高度化・体系化を構築していきたい。

第Ⅰ章

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 はじめに

核燃料サイクル開発機構による“地層処分研究開発第 2 次取りまとめ”の内容をレビューし，主に**地層処分の工学技術の分野**において今後実用化に向けて取り組むべき研究開発課題を抽出した上で(**表 1.1.1**)，具体的な研究開発への取り組みを実施中である。

今年度の研究では，深部地質環境の調査及び性能評価の両分野との連携･体系化を考慮しながら，重点的に取り組むべき下記 3 項目の研究開発課題を引き続き継続すると共に，特に(1)に関して堆積軟岩における AE 挙動の研究に着手することにした。

(1) 微小破壊音(AE)計測による掘削影響領域(EDZ)の評価技術の研究
  ① 硬岩における各種 AE パラメータの詳細検討
  ② AE と亀裂進展のメカニズムに関する研究
  ③ 堆積軟岩に関する同種の研究の推進と新しい空洞設計技術としての体系化
(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
  ① 長期耐久性を有する新しいグラウト材に関する材料特性および注入効果の検討
  ② 堆積軟岩中におけるフラクチャーシーリング技術の開発（動的限界注入圧とその付加方法に関する検討）

表 1.1.1 処分施設の工学技術の体系化に関する課題

処分施設の設計技術の体系化

処分施設の力学的設計体系の確立
■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

処分施設の水理学的設計体系の確立
■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

調査技術と設計技術の統合と体系化
■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

1.2 AE 計測による掘削影響領域(EDZ)の評価技術の開発

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，本研究においては，第一段階として亀裂の発生・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を行うことを試みた。本研究の全体的なフローを図1.2.1に示した。

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岩石供試体に対する高剛性三軸圧縮試験（AE 計測を同時に行う）の結果得られた応力ーひずみ曲線を個別剛体要素法の解析（PFC 解析）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）との関係を把握する。

この検討結果から応力・破壊現象とAEパラメータの関係を検討し，AEデータによる応力変化・破壊過程の評価技術を構築する。本研究の最終的な目標は，この研究成果を基にして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，応力に着目した高地圧下における岩盤空洞の設計手法を構築することである。

なお，今回は，高地圧下に掘削された岩盤地下空洞で得られている現場計測結果ならびに当該空洞において採取された岩石供試体に対する高剛性三軸圧縮試験結果の例を用いてAEパラメータと岩盤ならびに岩石の破壊状況との関連性を検討した。また，これらのうち高剛性三軸圧縮試験結果については，個別剛体要素法による解析を基に詳しい検討を行った。

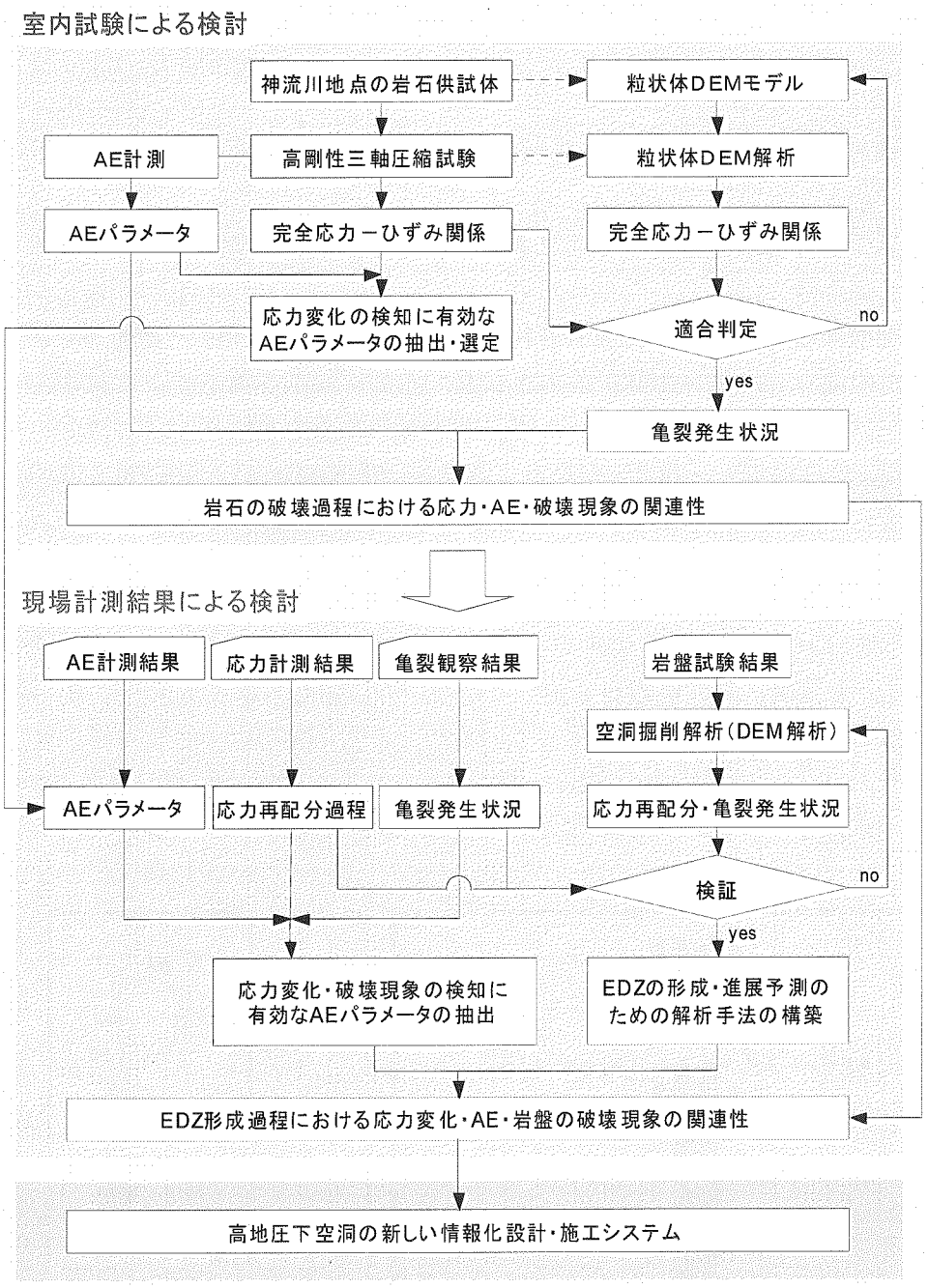


図 1.2.1　AE 計測による掘削影響領域(EDZ)の評価技術の開発に関するフロー図

1.2.2 岩石の破壊現象と微小破壊音

(1) 実空洞における計測結果

図 1.2.2 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。

本図を見ると，第 1 ベンチの掘削からすでに 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。微小な緩みの発生及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パラメータであると考えられる。

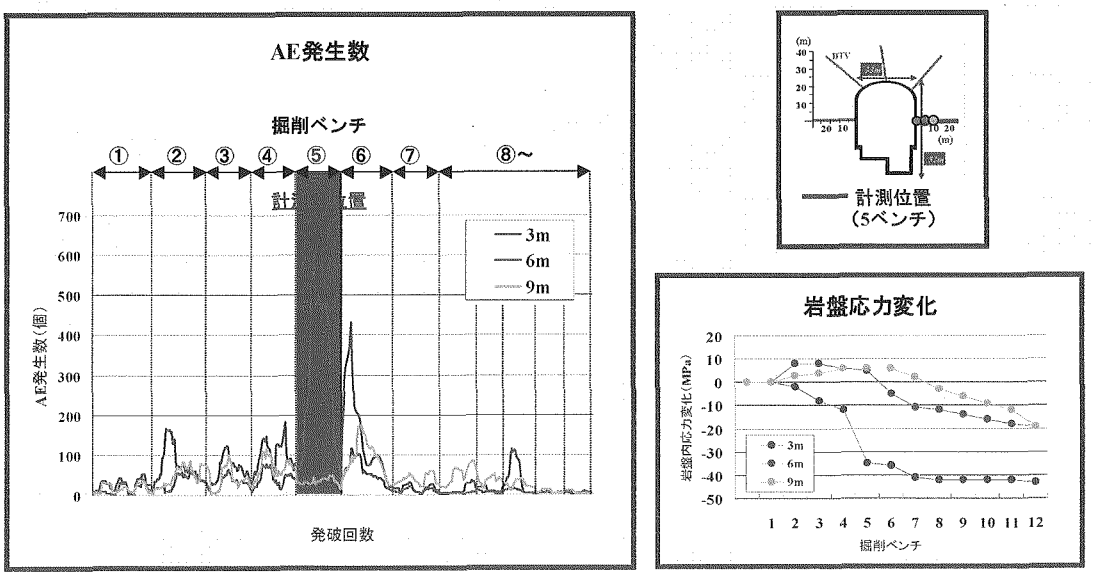


図 1.2.2　地下空洞の掘削の進行に伴う AE 発生数の変化

(2) 三軸圧縮試験時の AE 計測

岩石の室内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。室内岩石三軸試験に用いる供試体は，(1)で述べた地下空洞の調査坑で実施されたボーリングのコアより採取された。ここでは，3 つの供試体（Case-1, Case-2, Case-3）についての試験結果を述べることにする。

三軸圧縮試験装置（**図 1.2.3**）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。

また，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）を選定して用いた。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ーを使用した。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。**図 1.2.4** に AE 計測システムの概要図，**表 1.2.1** に AE 測定装置の仕様を示す。

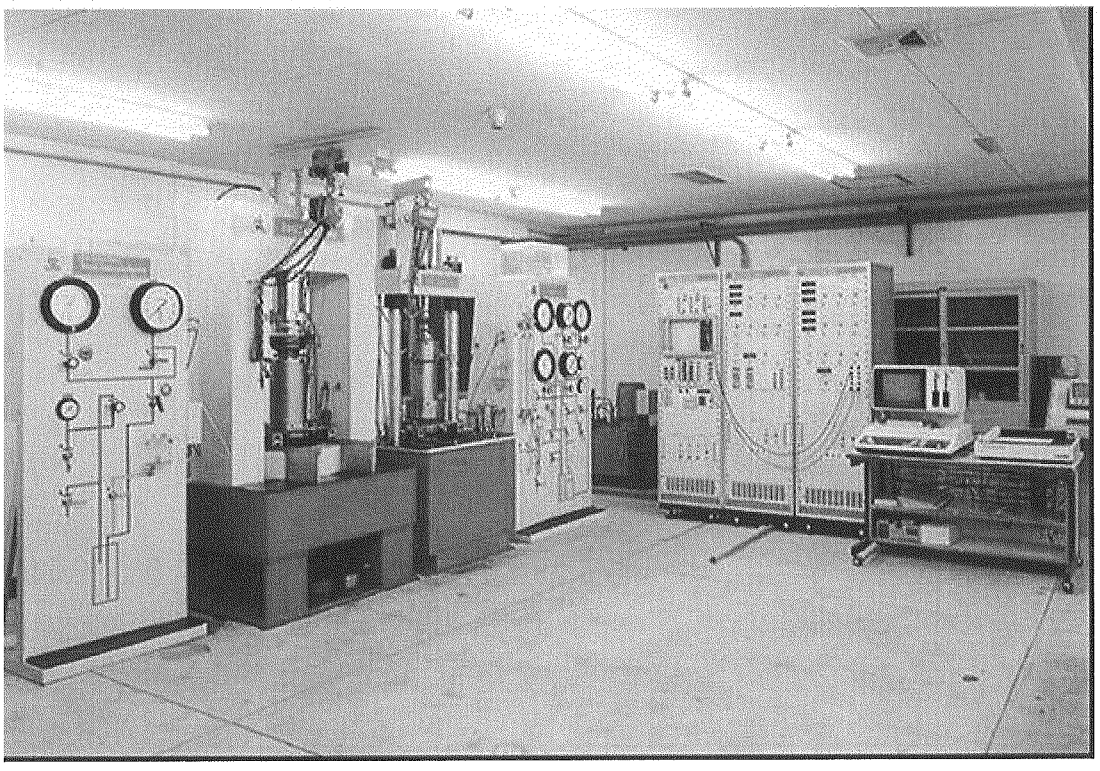


図 1.2.3　高剛性三軸圧縮試験装置

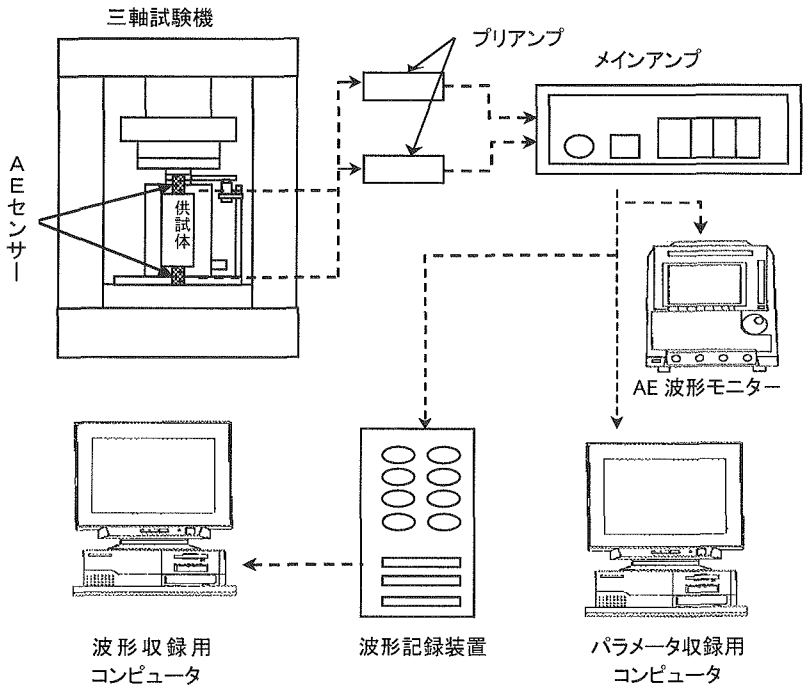


図 1.2.4　AE 計測システム

表 1.2.1　AE 測定装置の仕様

	機器名		型式名	仕　様		メーカー
AE測定装置	AEセンサー		AE900	・広帯域(100～1000kHz)		(株)昭和電気研究所
	プリアンプ		5100	・高周波(50kHz～2MHz) ・増幅度(20dB or 40dB)		(株)昭和電気研究所
	AE信号処理装置	ﾒｲﾝｱﾝﾌﾟ	NAIS5000	・増幅度 ・周波数特性 ・入力ｲﾝﾋﾟｰﾀﾞﾝｽ ・最大出力	最大60dB(f=200kHz) 10kHz～1MHz(-3dB) 75Ω 20VP-P以上	(株)昭和電気研究所
		AEしきい値		・設定範囲 ・分解能 ・精度	0～5V 10mV 0.1%FS	
		ﾌﾟﾘｱﾝﾌﾟ電源保護		・出力電圧 ・電源遮断電流	DC28V 約150mA	
	AE波形処理装置			・チャンネル数 ・入力レンジ ・サンプリング ・記録長 ・分解能 ・プレトリガー ・バッファ容量 ・波形ﾄﾘｶﾞ到着ﾛｼﾞｯｸ ・検出レベル	8 ±5V 10ks/s～10Ms/s 1Kw,2Kw,4Kw,8Kw 10ﾋﾞｯﾄ 0,25,50,75% 1~256kワード AND,OR 0V,0.1V,…,9.8V,9.9V	
変位　測定装置	A-D変換器		ADC-120	・チャンネル数 ・入力電圧 ・分解能 ・変換精度 ・ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ形式 ・ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞﾀｲﾑ ・変換速度 ・電源	4CH ±5V 12 bit ±0.025%FS 同時ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ 5μS～10S 5μS/ch AC90～130V　50/60Hz	(株)共和電業

3 つの供試体に関する試験結果（応力ひずみ曲線）を図 1.2.5 に示す。また，本図には観測された AE の発生数・周波数・m 値についても同時に示している。これより，応力経路の各点において AE の発生に次のような傾向が認められる。

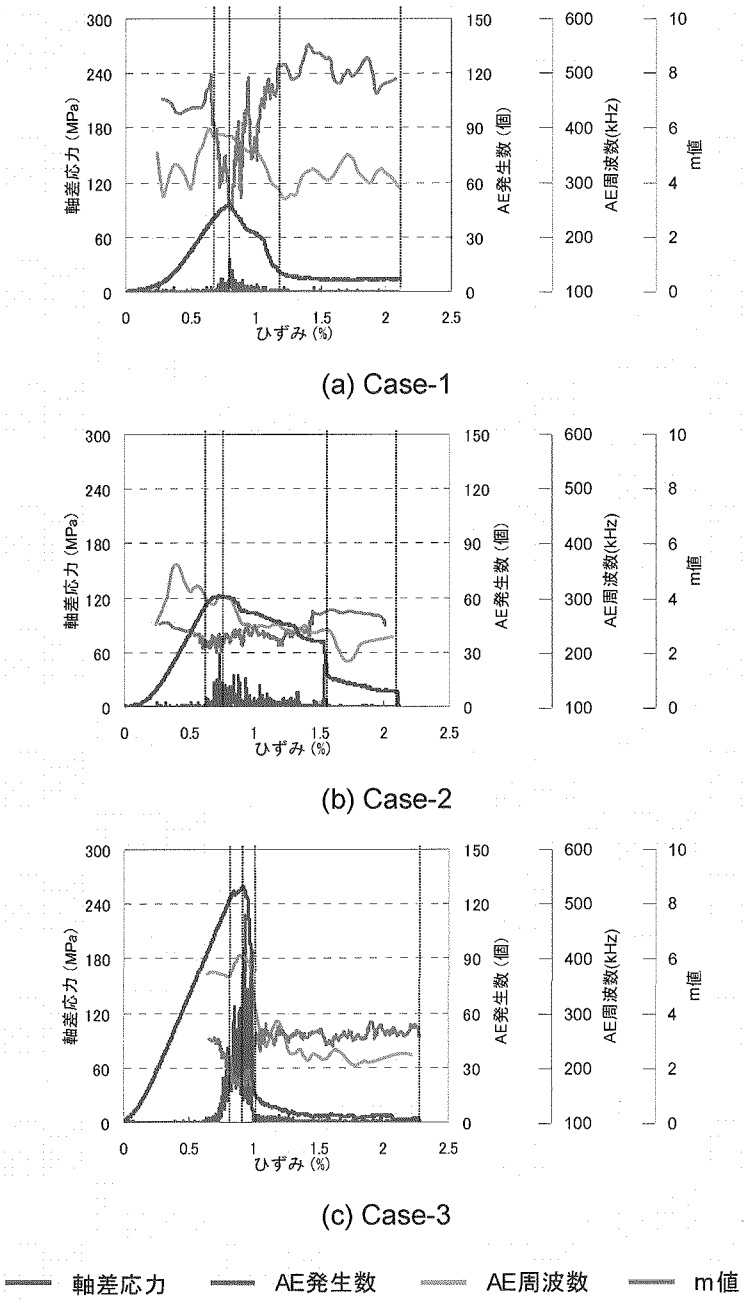
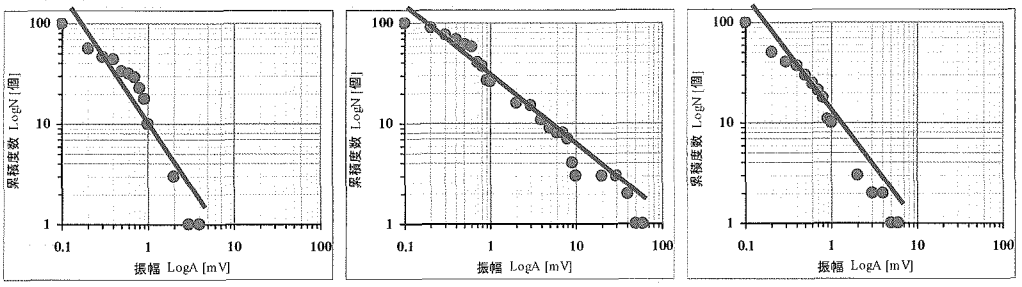


図 1.2.5　三軸圧縮試験結果

① 応力が降伏強度に至る前にAEが発生し始める。
② AE発生数は降伏強度に至ると顕著に増加し，ピーク強度に至った直後に最大値をとる。その後，残留強度に至るまでAE発生数は減少し，ほとんど発生が認められなくなる。
③ AE周波数についてはピーク強度に達するまで大きな変化が認められないが，ピーク強度に達すると残留強度に至るまで応力の低下とほぼ対応した減少傾向を示す。

なお，AE発生数および周波数の他にm値を用いてAE信号の振幅値の変化に注目した検討も行った。m値とはAE発生総数と最大振幅値との関係を図1.2.6のように両対数グラフ上で示し，直線近似したときの勾配である。

（青丸は観測値，赤線は観測値から求められた回帰線である。）



(a) 載荷直後　　(b) 破壊直前　　(c) 破壊後

図1.2.6　AE波形の振幅値の変化

岩石試験におけるAE波形の振幅値の変化は破壊との関連で次のようなメカニズムを反映している。

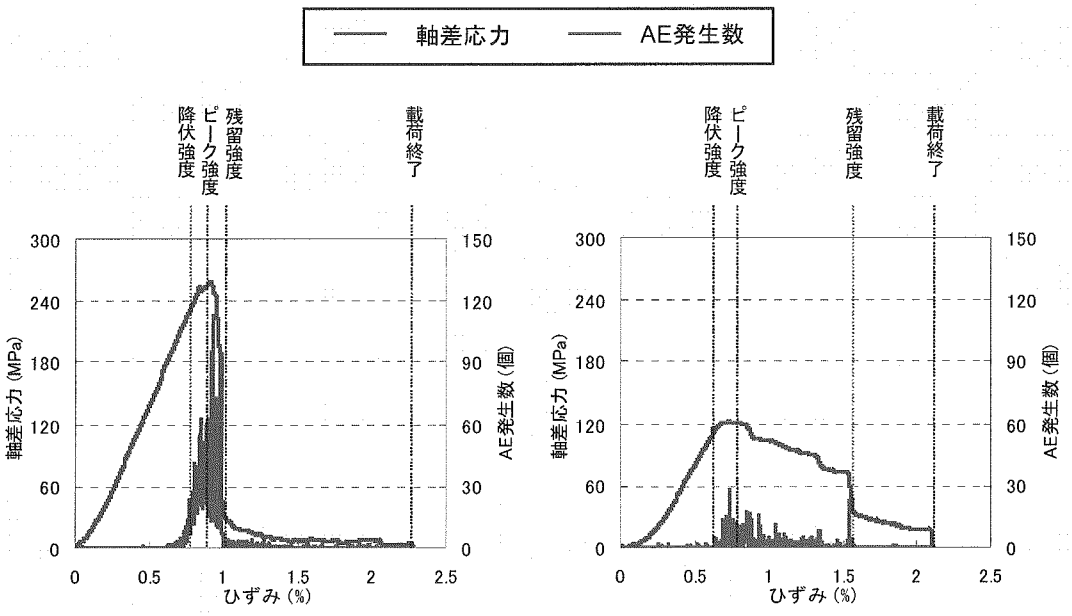
① 載荷初期の低い応力レベルにおいては，岩石内マイクロクラックなどの初期欠損部の閉合や開口進展によるAEが発生するが，これらは極めて局部的なものであることから，ひずみエネルギーが小さく，発生するAEの振幅値も小さくなる。
② 応力レベルが増加すると微小破壊が累積されていき，これらが互いに連結することによって供試体に分離面が形成されて破壊に至る。この破壊時には蓄積された大きな弾性ひずみエネルギーが放出されるので，発生するAEの振幅値も大きくなる（m値が減少する）。
③ 破壊後には，破断面の滑動に伴う局所的な微小破壊が発生し，発生するAEの振幅値も小さくなる。結果として，載荷の初期段階のAE波形と同様に振幅値が小さなものが卓越することになる（m値が増加する）。

(3) 応力と AE パラメータの関係

ここでは脆性的な破壊挙動を示す Case-3 の供試体とやや延性的な破壊挙動を示す Case-2 の供試体を例にとり，AE パラメータ（AE 発生数・卓越周波数・m 値）の挙動について詳しく検討する。

①AE 発生数

図 1.2.7 に Case-2 と Case-3 の供試体について応力 - ひずみ曲線と AE 発生数をプロットしたグラフを示す。



(a) Case-3　　(b) Case-2

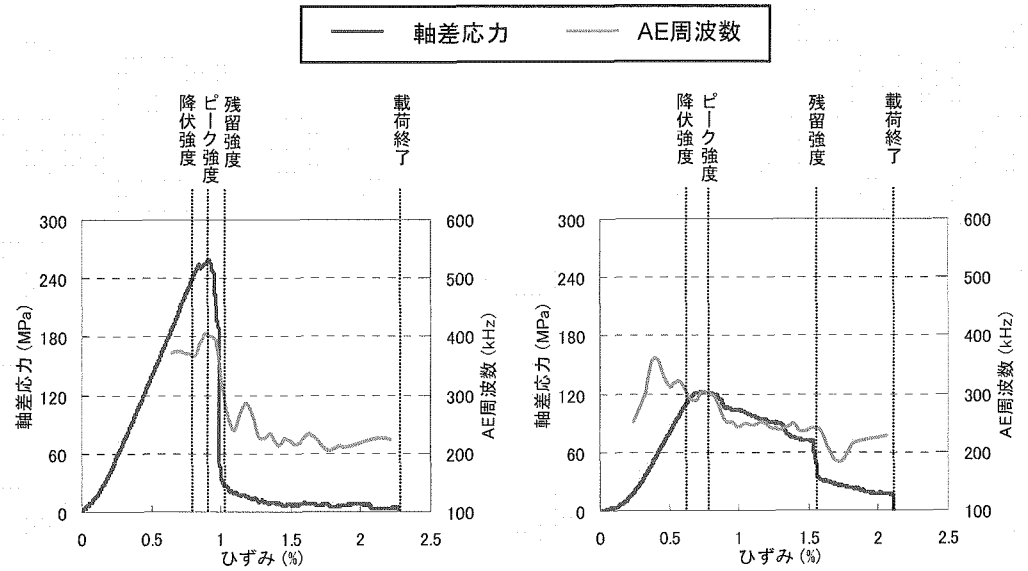
図 1.2.7 AE 発生数の比較

脆性的な破壊を示す Case-3 においては，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。

やや延性的な破壊を示す Case-2 については，Case-3 と同様にピーク強度前後に AE 発生数が最大となっているが，ひずみがある程度増大する（1.5%程度）まで緩やかに応力が低下しており，この間に AE が断続的に発生していることがわかる。残留強度以降についてはこちらも Case-3 と同様に AE はほとんど発生していない。

②卓越周波数

図 1.2.8 に Case-2 と Case-3 の供試体について応力 - ひずみ曲線と卓越周波数をプロットしたグラフを示す。



(a) Case-3　　(b) Case-2

図 1.2.8 AE 周波数の比較

脆性的な破壊を示す Case-3 については，載荷開始からピーク強度までは約 400kHz の高周波の 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。

やや延性的な破壊を示す Case-2 については，載荷開始直後から徐々に高周波の AE が卓越し始め，その後，Case-3 と同じように軟化過程において低周波の AE が卓越しているが，Case-2 の場合は低周波の AE が徐々に卓越しており，卓越周波数の平均値は緩やかに低下している。なお，残留強度以降については引き続き低周波の AE が卓越している。

③m 値

図 1.2.9 に Case-2 と Case-3 の供試体について応力 - ひずみ曲線と m 値をプロットしたグラフを示す。なお，1 つの m 値を算出するにあたっては，50 個の AE データを用いており，さらに前後 2 データ（計 5 データ）の移動平均処理を施している。

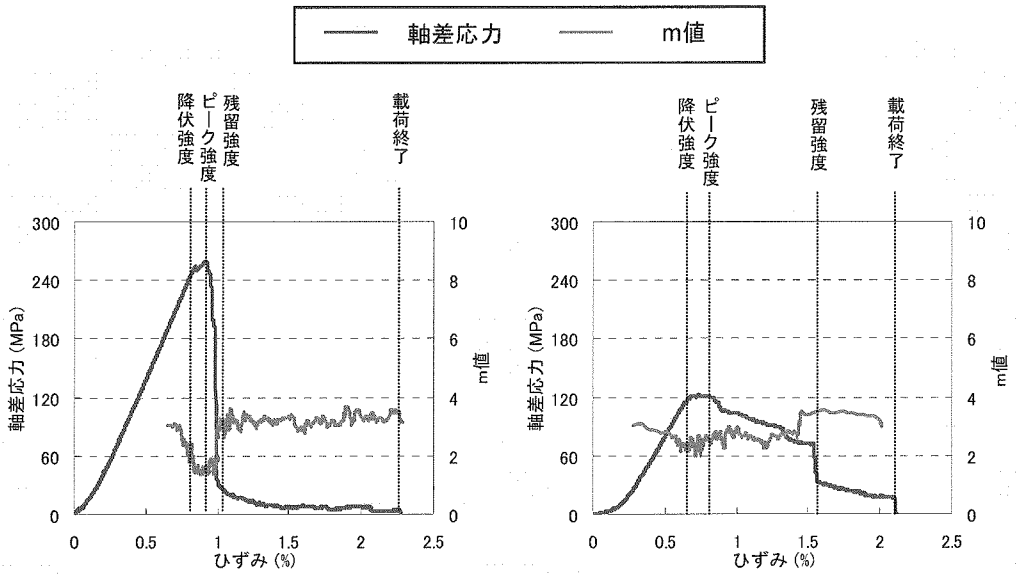


図 1.2.9 m 値の比較

まず，脆性的な破壊を示す Case-3 においては，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。

やや延性的な破壊を示す Case-2 についても，残留強度付近において m 値の低下が確認された。しかしながら，その後ある程度ひずみが増大する間にわたり，低いレベルを維持し続ける。こちらに関しても残留強度付近で明瞭な反転が確認され，載荷前のレベルに戻っていることがわかる。

このように，m 値に注目することによって，破壊過程における降伏強度点や残留強度点を AE パラメータから判定することができる。

以上，破壊過程とAEの挙動の差異について，3つのAEパラメータ（AE発生数・卓越周波数・m値）に着目し分析をおこなった結果，応力経路におけるAEパラメータの挙動について次のような知見を得た。

まず，岩種・破壊過程の差異にかかわらず，降伏強度に達する付近において，まずAEの発生が開始し，m値の低下が起こる。その後，ピーク強度に達する間に，AE発生数が急増し，m値の低下がいったん止まる。この段階においては，高周波のAEが卓越している。これは応力集中により岩石の構造が緻密となり，発生したAEのうち高周波のものであっても遮断されることなく計測されたためであると考えられる。m値の低下に関しては応力集中状態にある岩石には大規模のエネルギーが蓄積されていることから，発生するAEの振幅が大規模なものになったためであると考えられる。ピーク強度を超えると，AE発生数は徐々に減少に転じ，低周波のAEが卓越し始める。更に破壊が進行し，残留強度に達すると，m値が反転し，破壊前のレベルに戻る。これは岩石に破壊面が形成されたことにより集中した応力が急激に解放されたため，m値が載荷前のレベルへ戻ったものであると考えられる。この段階において，AEの発生は収束に向かい，AE周波数も低いレベルで推移を続ける。このように，AE発生数の他に，卓越周波数・m値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。

次に，脆性的な破壊を示すような岩石については，ピーク強度直後，ひずみがほとんど増大することなくAE発生数が急激に減少し，低周波のAEが急激に卓越する。これは供試体の強度が非常に高く，蓄積された応力が大規模な破壊面の形成と共に急激に解放され，供試体の強度が低下しているからであると考えられる。

一方，やや延性的な破壊を示すような岩石については，ピーク強度に達した後，ひずみがある程度増大するまでAEが発生し続け，周波数についても，低周波のAEが徐々に卓越している。つまり，ひずみがある程度増大するまで，供試体内で小規模な破壊が断続的に発生し，その蓄積によって供試体が強度を失っていると考えられる。

1.2.3 個別剛体要素法による解析

ここでは，前項 1.2.2 (2)において示した高剛性三軸圧縮試験の結果得られた応力－ひずみ曲線を個別剛体要素法の解析（PFC 解析）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さらに詳しく検討する。

ここで，本研究においては，次のような特徴をもつ PFC(Particle Flow Code)と呼ばれる解析コードを用いて個別剛体要素法による解析を実施した。

- 粒状体をベースとした個別要素法の解析コードである。
- 結合力（ボンド）をもつ円形要素の集合体で各種材料をモデル化する。
- 運動則と力－変位関係則を交互に用いた陽解法により，粒子の位置・接触力等を経時的に算出することができる。
- 引っ張りまたはせん断応力によって粒子間の結合が切れることで亀裂進展や破壊など不連続体挙動のシミュレーションが可能である。
- ユーザー構成則の組み込みが可能である。

すなわち，この解析コードを用いることによって，応力経路の各点で引張亀裂ならびにせん断亀裂の発生状況を推定することができる。

以上を踏まえた上で，今回実施した検討のフローを述べる（図 1.2.10 参照）。まず，三軸圧縮試験によって得られた応力－ひずみ関係を個別剛体要素法（PFC）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 1.2.2 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 特性との関係について検討を行う。

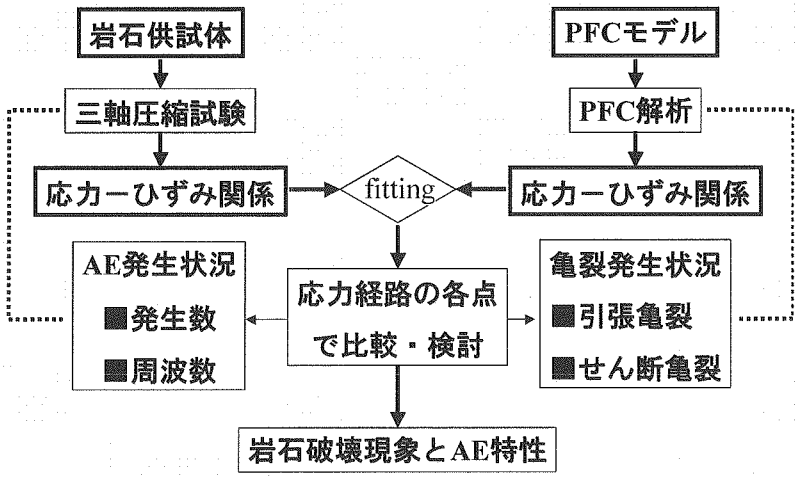


図 1.2.10　岩石の破壊現象と AE 特性の関係についての検討フロー図

表 1.2.2　PFC 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	
σ_c(mean)	ボンドの引張り強度の平均値	
σ_c(std.dev.)	ボンドの引張り強度の標準偏差	
τ_c(mean)	ボンドのせん断強度の平均値	粒子間の強度
τ_c(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	

ここで，PFC 解析における入力パラメータとカーブフィッティングの方法について述べる。まず，入力パラメータについては，**表 1.2.2** に示すように粒子の形状・粒子間の変形性・粒子間の強度を設定するパラメータに大別される。これらのパラメータを次のような手順で適切に設定することで，カーブフィッティングを行うことができる。

① E_c の値を変化させて供試体のヤング率を設定する。
② k_n/k_s を変化させてポアソン比を設定する。
③ σ_c(std.dev.) =0 , τ_c(std.dev)=0 とし，σ_c(mean) , τ_c(mean)を変化させて載荷し，ピーク強度を仮に設定する。
④ σ_c(std.dev.) , τ_c(std.dev)を変化させて降伏点を決定する。これらの値を大きく設定すると低い応力レベルで降伏が発生するようになる。この場合ピーク強度も低下するので調整が必要となる。実際には③④の設定を数回繰り返すことによって決定する。
⑤ μを変化させて残留強度を決定する。

なお，試験前の供試体に顕著な亀裂が存在し，応力の載荷後にこの面を介して破壊が進行したような場合（脆性的な破壊挙動を示すことが多い）には，粒状体モデルにおいて亀裂相当部分の強度値を低く設定し，カーブフィッティングを行う。

図 1.2.11 に Case-1, Case-2, Case-3 の各実験結果に対してカーブフィッティングをした結果を示す。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，PFC 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。また，Case-3 については，供試体の破断状況を参考にして，あらかじめ潜在亀裂を供試体に設定してカーブフィッティングを行った。図を見ると，いずれのケースも比較的高い精度でフィッティン

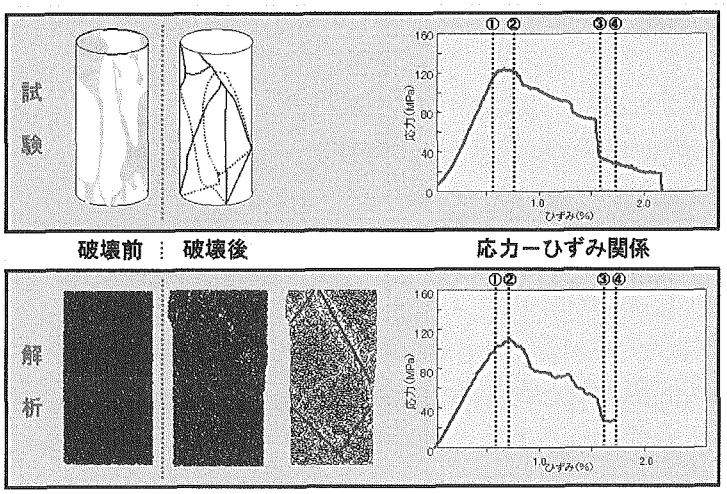
グできているものと考えられる。また，亀裂の発生位置も両者で整合した結果となった。

図 1.2.12 に Case-1, Case-2, Case-3 の PFC 解析結果として，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。

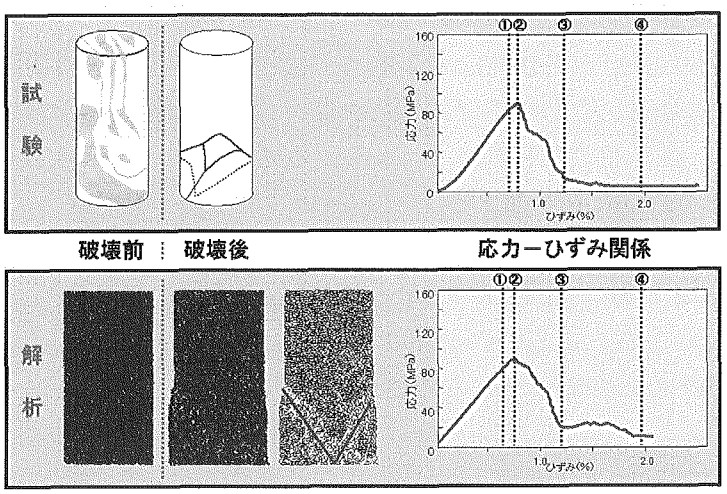
① 応力が降伏強度に至る前に引張亀裂が発生し始める。
② 引張亀裂の発生数は降伏強度に至ると顕著に増加し，せん断亀裂が発生し始める。ピーク強度に至るとせん断亀裂の発生数が顕著に増加し，全体の亀裂発生数は最大値をとる。その後，引張・せん断亀裂の発生数は徐々に減少し，残留強度に至るとほとんど発生が認められなくなる。
③ 亀裂の発生位置は，ピーク強度に至る前までは，供試体全体にほぼ均質に分布するが，ピーク強度を過ぎると特定位置（破壊によって形成される分離面の位置）に集中する。なお，潜在亀裂が存在する Case-3 の場合には，全体を通して潜在亀裂の周辺に亀裂の発生が集中する。

以上の結果から，1.2.2(3)で検討した三軸圧縮試験による AE の発生モードと PFC 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岩石供試体の破壊の各段階において比較して，整理すると次のようになる。

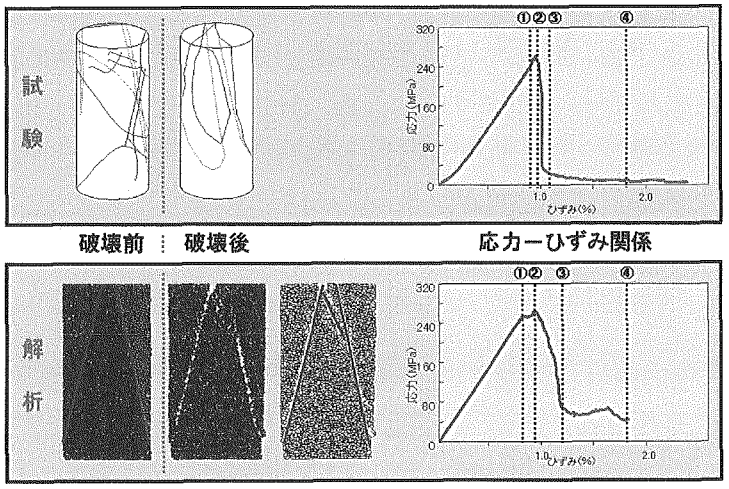
① 載荷初期～降伏強度：岩石内にほぼ均質に引張亀裂が生じて AE が発生するが，その発生数は少ない。
② 降伏強度～ピーク強度：引張亀裂の発生数が顕著に増加するとともに，せん断亀裂が発生し始める。これに伴って AE の発生数も増加する。また AE 波形の振幅値も徐々に大きなものが卓越するようになる。
③ ピーク強度～残留強度：せん断亀裂の発生数が顕著に増加し，全体の亀裂発生数はピーク直後に最大値をとる。亀裂の発生位置は特定位置に集中し，これらが連結し合うことによって岩石に分離面が形成される。その後，引張亀裂およびせん断亀裂ともに発生数が徐々に減少する。AE の発生数は全体の亀裂発生数と対応した傾向を示し，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。



(a) Case-1

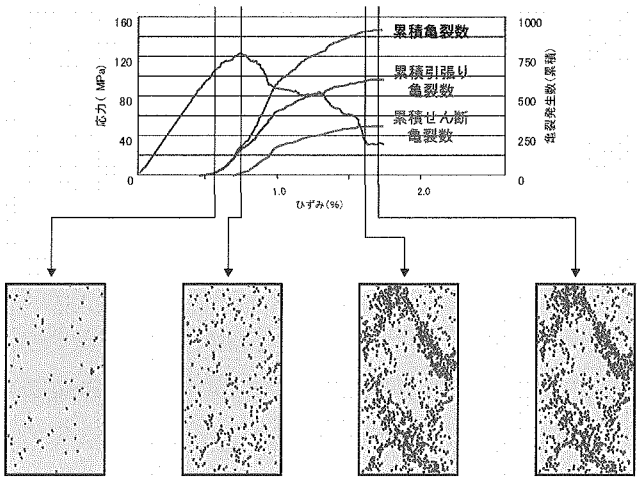


(b) Case-2

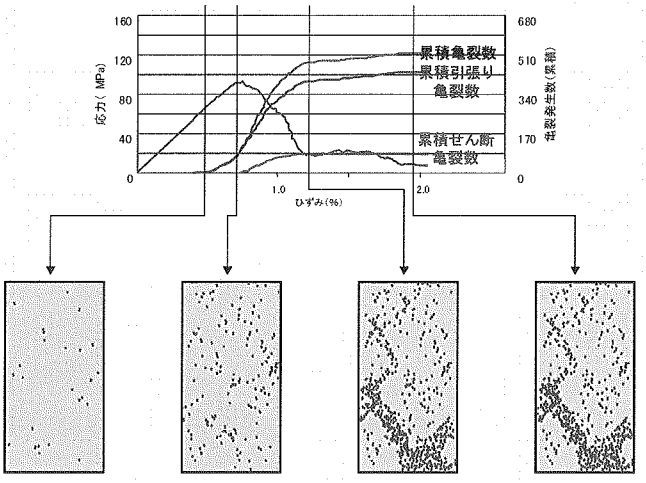


(c) Case-3

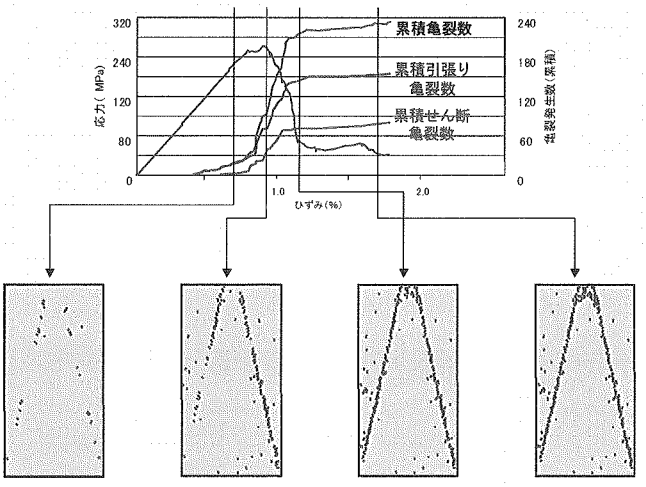
図 1.2.11　PFC 解析によるカーブフィッティング結果



(a) Case-1



(b) Case-2

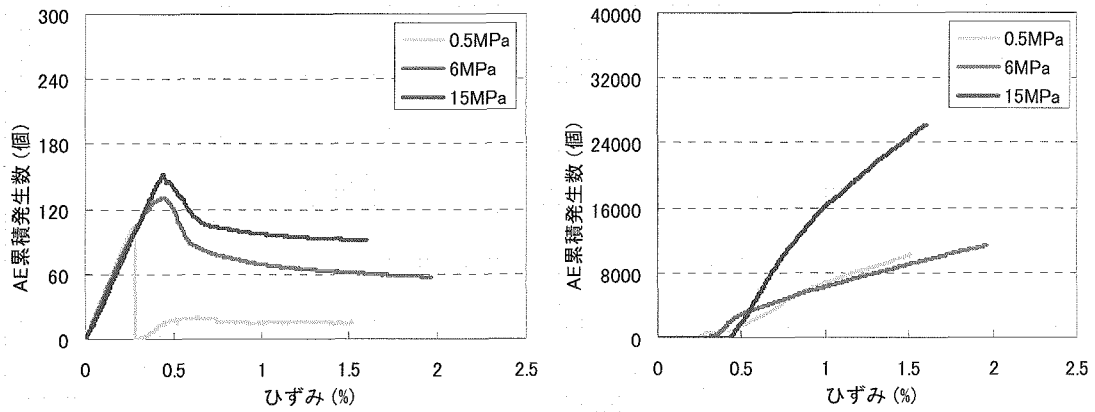


(c) Case-3

図 1.2.12　応力－ひずみ曲線と亀裂発生分布（PFC 解析）

筆者らの研究グループでは，岩石の破壊過程・AE の挙動に対する拘束圧の影響を検討するために，異なる拘束圧を作用させた三軸圧縮試験を行い，上述と同様の方法で検討を行っている。ここでは，その結果の一部を紹介する。

図 1.2.13 は，ほぼ同一の層準で採取された中粒砂岩の供試体に対して異なる拘束圧（0.5MPa・6MPa・15MPa）を作用させた三軸圧縮試験によって得られた応力－ひずみ曲線と AE 発生数（累積）の推移を示したものである。まず，応力－ひずみ曲線を見ると，拘束圧の増加に伴って，ピーク応力および残留応力が増加し，ピーク応力から残留応力へ至るまでのネガティブスロープが緩くなっていることがわかる。一方，AE 発生数の推移を見ると，拘束圧が大きい場合（15MPa）に発生数が高くなっている。

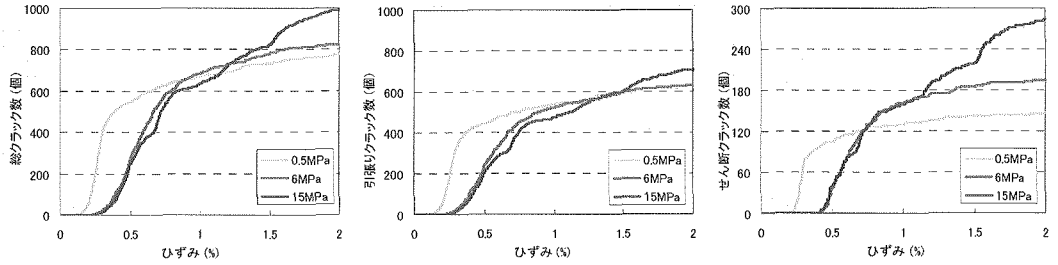


(a) 応力－ひずみ関係　　(b) AE 累積発生数

図 1.2.13　拘束圧を変化させた三軸圧縮試験の結果

このような応力および AE の挙動と破壊現象との関連性を検討するために，個別剛体要素法によるシミュレーションを行い，三軸圧縮試験で得られた応力－ひずみ曲線にカーブフィッティングすることで，亀裂の発生・進展状況を推定した。

図 1.2.14 は，シミュレーションにおいて観測された亀裂累積発生数の推移を(a)全亀裂（引張り亀裂+せん断亀裂），(b)引張り亀裂，(c)せん断亀裂の別に示したものである。



(a) 全亀裂　　(b) 引張り亀裂　　(c) せん断亀裂

図 1.2.14　シミュレーションにおいて観測された亀裂の累積発生数

まず，拘束圧が増大するに従い，供試体内に発生する全亀裂の発生数が増加していることがわかる。また，拘束圧が大きいものについては，特に残留強度以降で多数の亀裂が発生しており，特にせん断亀裂の増加割合が大きい。このことから，拘束圧が増加すると，広範囲のひずみ領域にわたって破壊が継続され，せん断力による破壊が起こりやすくなるものと考えられる。

ここで，拘束圧 6MPa の場合の粒状体モデルと拘束圧 15MPa の場合の粒状体モデルには同一の micro parameter が設定されている。これは，①両供試体の初期状態が類似していたこと，②同一の micro parameter で十分に応力－ひずみ関係をカーブフィッティング可能であったことによる。このような状況から，この 2 ケースにおける亀裂発生状況を比較すれば，拘束圧の違いによる破壊現象の差異を同一材料条件のもとで検討できるものと考えられる。

図 1.2.15 は，降伏応力やピーク応力といった応力が特徴的な点およびピーク応力以降のひずみ 0.2%毎の点で囲まれた区間における亀裂発生個所を拘束圧 6MPa の場合と拘束圧 15MPa について示したものである。まず，拘束圧 6MPa の場合については，ピーク応力に達した直後に供試体下部および中央部に明瞭な破壊面が形成され，その後ひずみが増大すると，形成された破壊面周辺部に限りわずかに亀裂の発生が認められる。一方，拘束圧 15MPa の場合にも，ピーク応力に達した直後に供試体下部に明瞭な破壊面が形成されているが，応力は引き続き高い値を維持し，次の破壊面が供試体上部に形成され，その後ひずみがある程度増大した段階において供試体中央部に高角度の破壊面が形成されるといった逐次破壊の傾向が認められる。また，破壊面周辺におけるせん断亀裂の発生が顕著になっている。

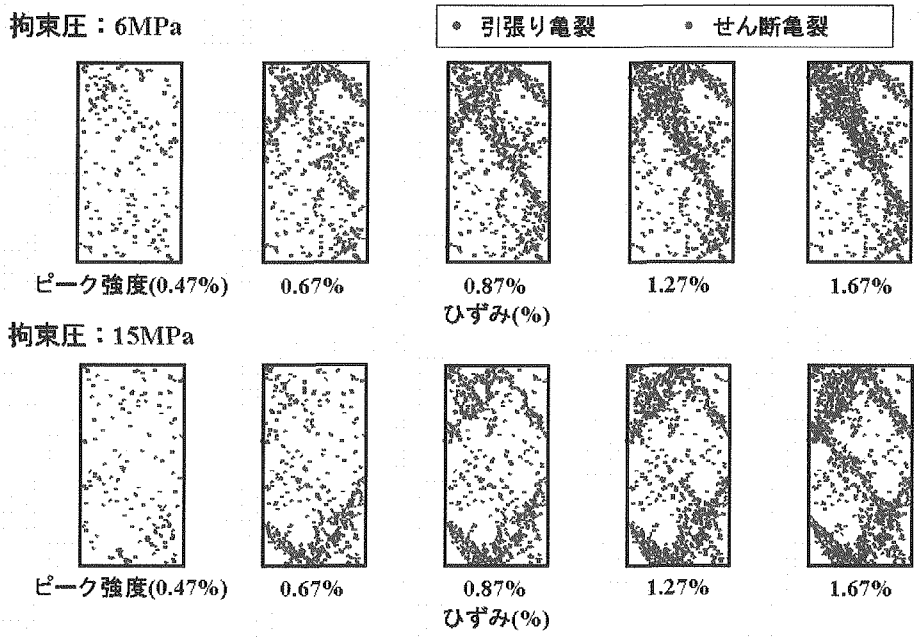


図 1.2.15　拘束圧による亀裂の発生・進展過程の差異（DEM 解析結果）

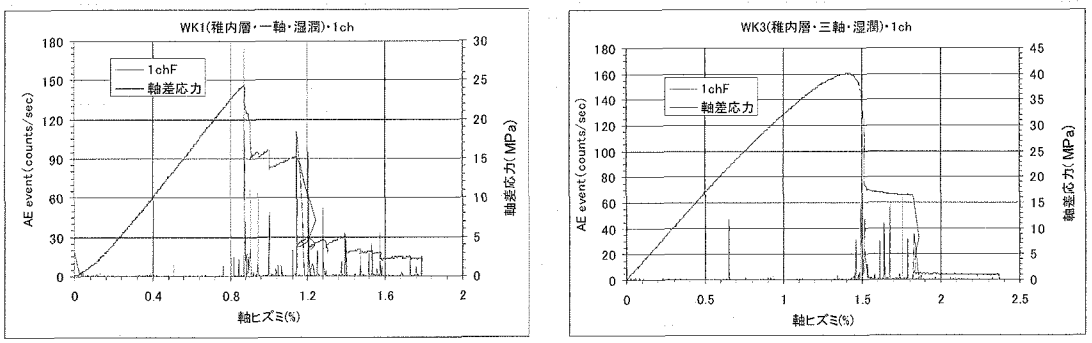
以上より，拘束圧が大きくなるほど，供試体内に発生する亀裂が増加する傾向にあり，特にピーク応力後のせん断亀裂の発生が著しい。これは，拘束圧が大きい場合には，拘束圧が小さい場合と比較して破壊面が形成された後にも破壊面の摩擦力が大きくなるため，破壊面周辺部により大きなせん断力が発生しやすく，結果としてせん断破壊が他のインタクトな部分へ進行しやすくなるためと考えられる。

1.2.4 堆積軟岩における AE

AE は，硬岩に対しては，空洞周辺の亀裂の発生･進展挙動ならびに応力変化に関する物理的指標として有効であることが明らかになってきているが，軟岩に対しては，原位置測定の困難さ（AE 発生数が少ない，エネルギーが小さく到達距離が短い等）から計測事例が少なく，AE の物理的指標として有効性が明らかになっていない。そこで，筆者らの研究グループは，幌延で採取された新第三紀堆積軟岩のボーリングコアを用いて室内岩石試験を実施し，AE 計測を行った。

図 1.2.16 は，その結果の一部を示したものであり，稚内層のボーリングコア（湿潤状態）を用いて実施した一軸圧縮試験と三軸圧縮試験の結果である。AE は上下の載荷板に設置された AE センサによって測定されたが，硬岩の場合と同様に，ピーク応力前に発生が始まり，ピーク応力から残留応力に至るまでの区間で多く発生し，残留応力に至るとほぼ発生が終息するという挙動を示した。また，発生数は硬岩と比較するとやや少ないものの，周波数や m 値を算出するにあたって十分な個数の AE が発生していることは明らかである。

このような AE の発生状況から，堆積軟岩に対しても硬岩の場合と同様に，AE が空洞周辺の亀裂の発生･進展挙動ならびに応力変化を推定する有効な指標となる可能性が十分に高いことが判明した。今後は，硬岩の場合と同様に，応力－AE－破壊現象の関連性を明確にして，その適用性を検証することが重要であると考えられる。



(a) 一軸圧縮試験　　(b) 三軸圧縮試験

図 1.2.16　堆積軟岩を対象とした室内岩石試験における AE 発生状況（赤色の線）

1.2.5 現場計測結果に基づく応力変化と AE パラメータの挙動

(1) 計測地点と現場計測の概要

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㈱神流川地下発電所の本体空洞掘削時の計測結果について検討を行った。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 1.2.17 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。

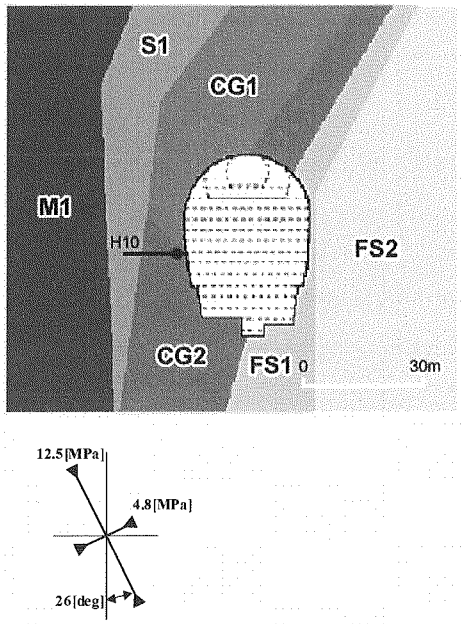


図 1.2.17　H 断面空洞周辺地質図

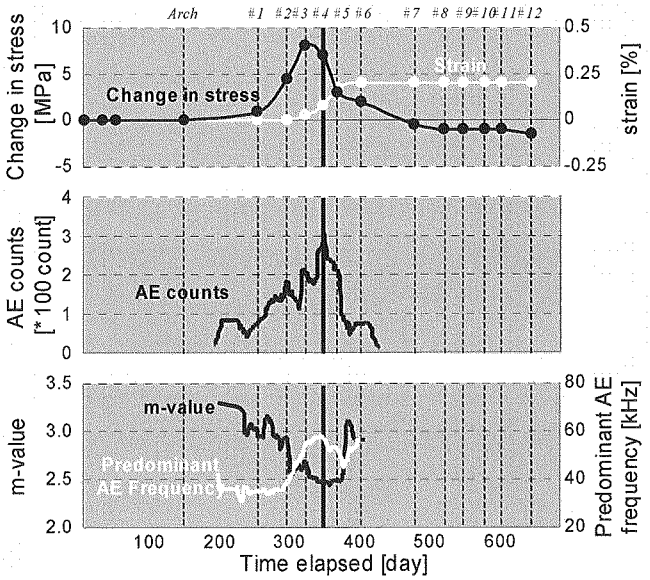


図 1.2.18　H－10 計測線上 3m 地点での計測結果

M1 = mudstone, S1 = sandstone,
CG1 = conglomerate,
CG2 = coarse sandstone,
FS1 = sandstone, and FS1 = sandstone.

(2) AE パラメータの挙動と応力変化・ひずみとの関係

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 1.2.18 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。この際応力はやや集中し始めるものの，ひずみはほとんど見られない。 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もわかる。6 ベンチ，7 ベンチ掘削段階になると，AE 発生の収束，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も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。

1.2.6 粒状体個別剛体要素法を用いた空洞掘削解析

(1) 解析の概要

粒状体による個別剛体要素法（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。

以下にシミュレーションの手順を示す。

① 粒状体個別剛体要素法において岩盤物性はボンドで結合された個々の粒子の力学特性によって決まるため，まず個々の粒子の力学特性を設定する必要がある。二軸圧縮試験を模擬したシミュレーションを行い，得られた物性と実際の岩盤物性とを比較し，それらが一致するように粒子の力学特性を更新する，という一連の作業を何度も繰り返すことにより，適切な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 1.2.19 の左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。

④ 図 1.2.19 の右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。

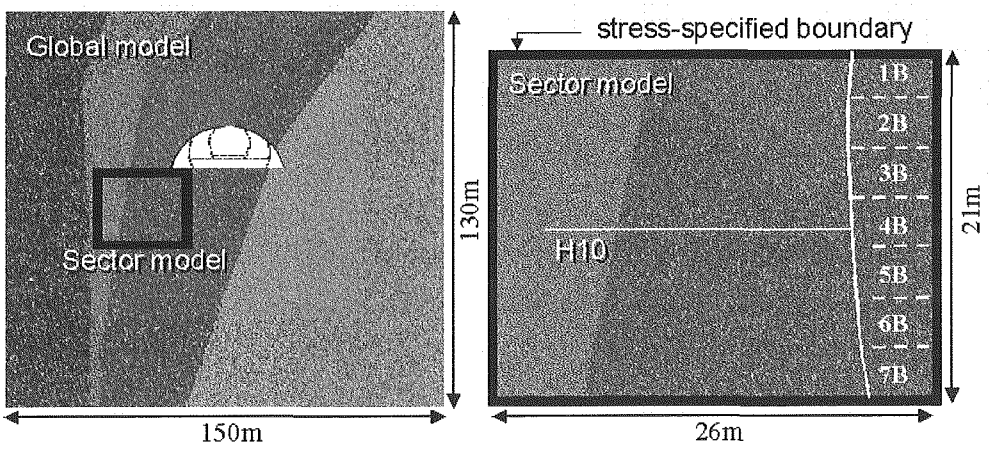


図 1.2.19　グローバルモデルとセクターモデル

(2) 解析結果および計測結果との比較

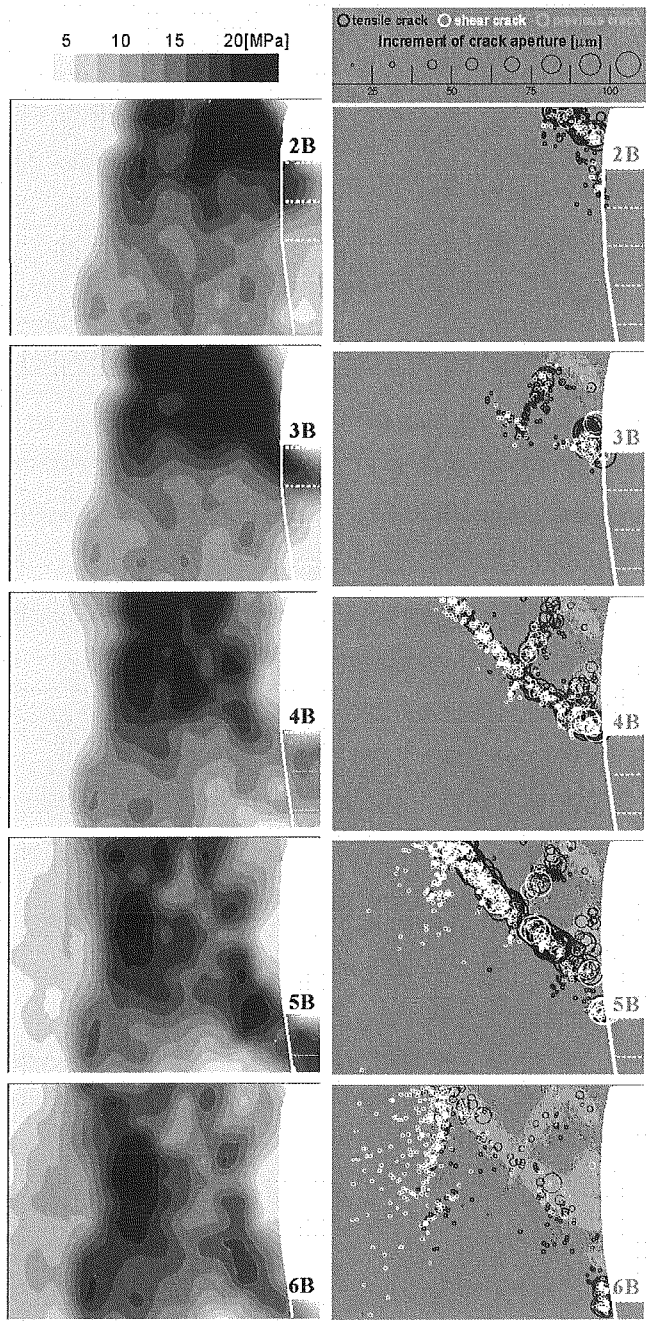
はじめに，セクターモデルによる解析結果について，図 1.2.20 に（a）差応力および（b）微小亀裂の分布を掘削段階ごとに示す。まず 1 ベンチ，2 ベンチ掘削時には掘削ベンチの壁面付近に応力の集中が見られ，応力集中領域において微小亀裂が発生し始める。この段階では引張力による亀裂が卓越している。3 ベンチ掘削時には応力集中および微小亀裂発生の範囲が拡大する。4 ベンチ掘削段階になると応力集中領域が壁面から離れた位置へと移行し始め，それに伴って微小亀裂がより岩盤深部でも発生するようになる。この際発生する微小亀裂は地質の境界周辺に集中しており，岩盤の不連続面を中心に破壊面が形成されつつあることがわかる。つづく 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 1.2.21）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 1.2.20）がこれと良く一致した挙動を示していることがわかる。また応力に関しては，H－10 計測線上 3m 地点における変化量を比較する（図 1.2.22）。図中には有限要素法（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

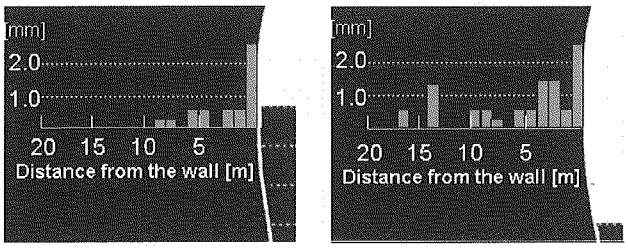
て徐々に低下している。解析結果のうち FEM の場合は，応力変化の傾向は捉えているものの，ピーク時のレベルやその時期および低下時の様子などが実測結果とやや異なっている。一方，本研究で用いた DEM の場合は，そのような細かな部分まで実測結果と極めて良く一致していることがわかる。これは，FEM の場合に比べ個々の要素（粒子）を非常に細かく設定したことで，粒子間に発生する微小亀裂の影響が逐次反映されたためであると考えられる。以上の比較により，解析結果が十分妥当なものであったといえる。

最後に，各 AE パラメータの物理的意味に基づいて，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（図 1.2.23），応力変化をふまえて考察を行った。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。
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。



(a) Differential stress (b) Initiated crack

図 1.2.20 セクターモデルによる解析結果



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

図 1.2.21 H−10 計測線における亀裂開口量分布

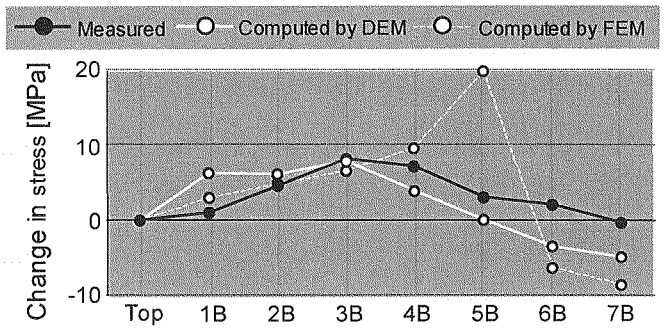
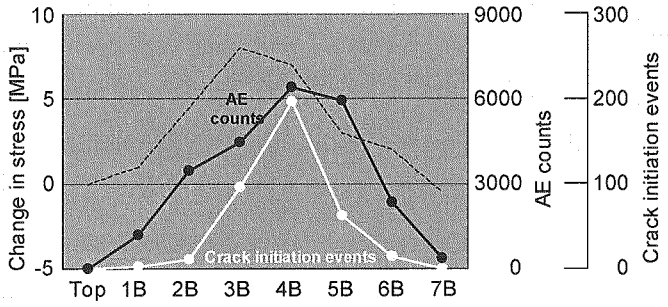
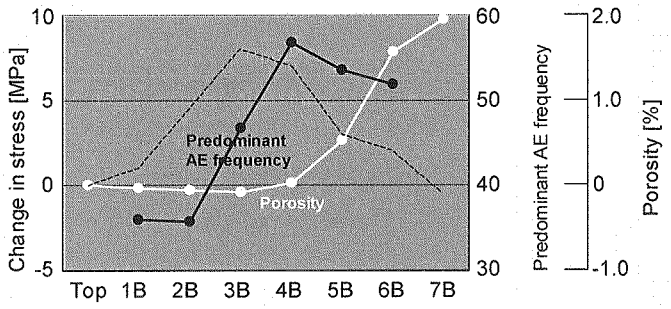


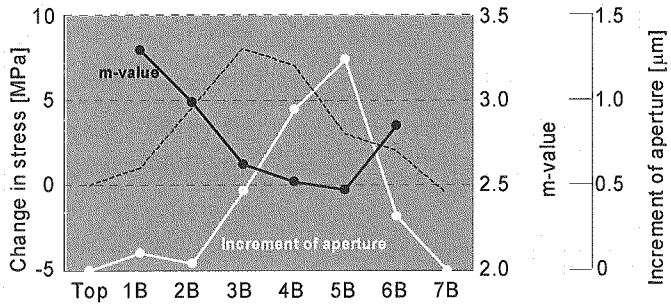
図 1.2.22 H−10 計測線上 3m 地点での応力変化の比較



(a) AE counts and crack initiation events



(b) Predominant AE frequency and porosity



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

図 1.2.23 H−10 計測線上 3m 地点での計測結果

1.2.7 まとめ

従来から地下発電所空洞など大規模岩盤地下空洞における掘削影響領域の評価にあたっては，様々な計測方法によって多角的な検討を実施して来た。最近では大深度,高地圧下の地下発電所空洞に対して，応力再配分現象を直接把握するための「岩盤応力測定」,「岩盤応力変化測定」，応力変化や破壊に至る過程を間接的に把握するための「AE測定」，応力再配分過程で発生する岩盤変位挙動を把握するための「岩盤変位測定」，応力解放や破壊による亀裂開口現象に注目した「BTV 測定」，応力履歴を受けた岩盤材料の物理的性状を把握するための「マイクロサイスミック弾性波速度測定」,「透水・透気試験」などを統合した計測・評価システムをほぼ確立した[1) 2) 3) 4) 5)]。

本研究において対象とした「AE 測定」に着目すると，これまでにいくつかの地下発電所の建設において，微小な緩みから比較的大規模な緩みまでの広い範囲の緩みを高精度で検知することが可能であること，その計測結果を応力変化と関連付けることにより，掘削の各段階での掘削影響領域の発生・進展挙動を高い精度で評価できることが実証されている[6)]。なお,本研究では，高剛性三軸圧縮試験と，その個別要素法による数値解析を行い,岩石の破壊現象とAEとの関係について検討した結果についてもとりまとめた。

高レベル放射性廃棄物地層処分場として大深度かつ亀裂の少ない岩盤を対象とした場合，高地圧下における応力再配分の過程で生じる亀裂の発生・進展のメカニズム，ならびに形成される掘削影響領域を正確に評価し，設計及び性能評価に取り込む体系的な研究が今後一層重要であると考えられる。

さらに，堆積軟岩を対象とした場合には大深度における挙動の適切な評価のためのAE を指標とする破壊現象の解明は極めて重要と考えられる。

1.2.8 参考文献

1) Kenji AOKI et al., (2003) : Application of Borehole Seismic and AE monitoring technique to the rock cavern excavation, 10th ISRM Congress.

2) Takayuki MORI, Kenji AOKI, (2003) : Estimation of joint behavior by monitoring AE and numerical analysis around the rock cavern, 10th ISRM Congress.

3) Toshio MAEJIMA, Kenji AOKI et al., (2001) : Evaluation of the loosened zone on excavation of the large underground rock cavern, Proceeding of the International Symposium on Modern Tunneling Science and Technology (IS-KYOTO 2001).

4) Toshio MAEJIMA, Kenji AOKI et al., (2001) : Application of the observational construction technique for large underground cavern excavation, Proceeding of the ISRM Regional Symposium Eurock 2001 Espoo.

5) 前島敏雄，青木謙治他，(2001)：神流川地下発電所空洞掘削時の AE 測定による岩盤挙動の評価，第31 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集.

6) Kenji AOKI et al, (2004) : Evaluation of behavior of EDZ around rock cavern by AE measurements and DEM simulation using bonded particle model, ARMS2004.

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 1.3.1 はじめに

高レベル放射性廃棄物の処分施設においては，“第 2 次取りまとめ”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している。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，古くは STRIPA プロジェクト[1]でも検討された動的注入工法が有用と考えられる。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，長時間にわたってグラウト注入が可能であ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[2) 3) 4) 5) 6) 7) 8)]。

本研究では，動的注入メカニズムの解明および最適注入条件の検討のため，主として理論面からの検討を行った。研究のフローを図 1.3.1 に示す。

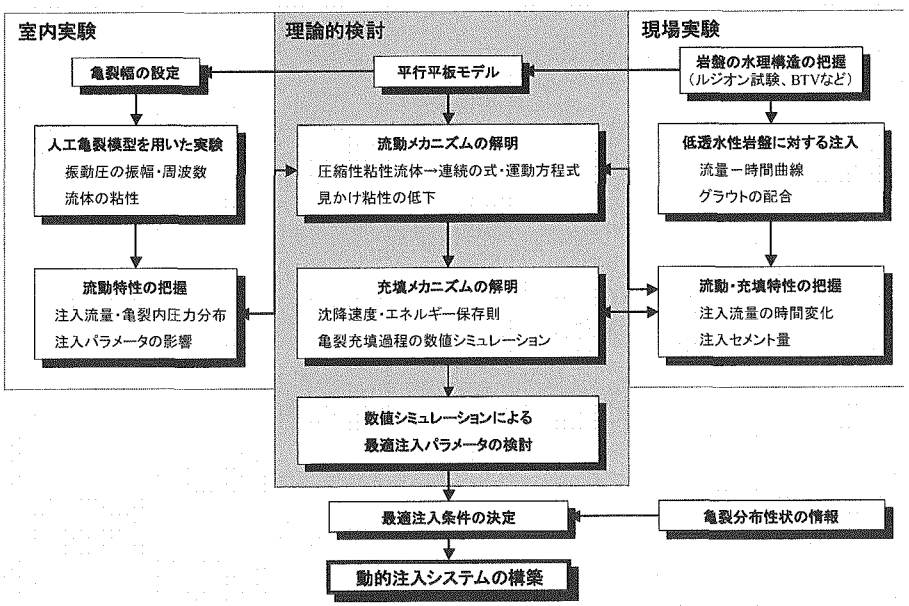


図 1.3.1　低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の開発に関するフロー図

本研究では，グラウト材の動的注入メカニズムをグラウト材の①流動メカニズムと②充填メカニズムの2つに分けて検討を行う。まず①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および理論的検討を行い，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明らかにする。次に②充填メカニズムを明らかにするために，現場実験および理論的検討を行い，注入流量の時間変化および注入パラメータとの関係を明らかにする。これにより，対象とする亀裂に対する最適注入パラメータを数値シミュレーションにより決定し，注入システムの構築を行うものである。

1.3.2 動的注入工法に関する室内実験

(1) 実験装置

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100μm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。

(2) 実験条件

実験条件を**表 1.3.1** 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±0.5MPa，±0.3MPa，±0.1MPa 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。

表 1.3.1　室内実験の条件

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)

(3) 実験結果

図 1.3.2 および図 1.3.3 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 1.3.2 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 1.3.3 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。

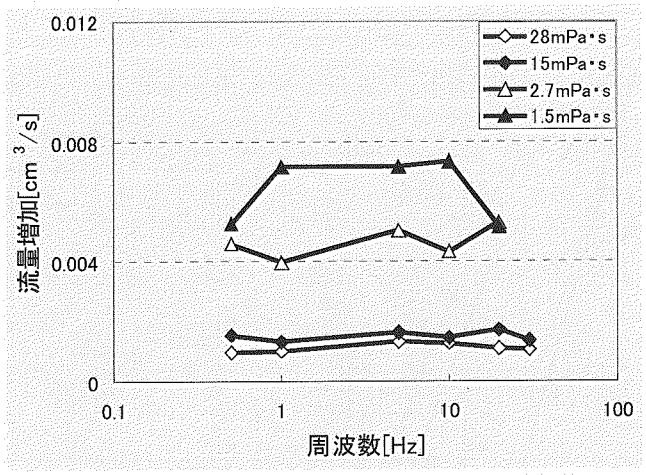


図 1.3.2　注入圧力の周波数に対する注入流量の改良比（注入材料の粘性の影響）

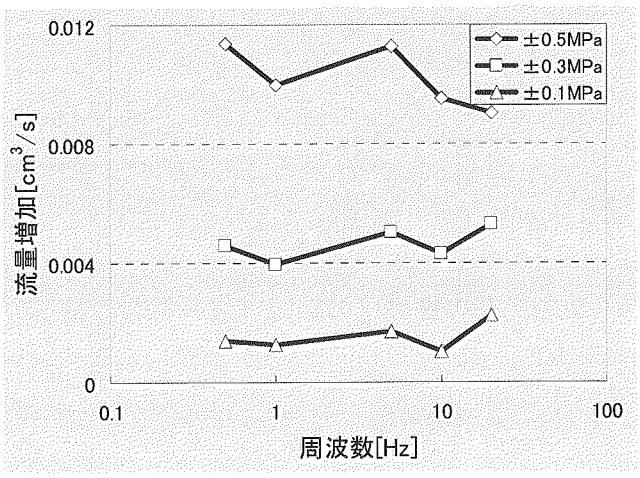


図 1.3.3　注入圧力の周波数に対する注入流量の改良比（注入圧力の振幅の影響）

図 1.3.4, 図 1.3.5, 図 1.3.6 は，注入パラメータ（注入材料の粘性，注入圧力の振幅，注入圧力の周波数）毎に，亀裂内部の振動圧の振幅を注入口からの距離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亀裂内部における振動圧の振幅に与える影響の比較を行った図 1.3.4 を見ると，注入材料の粘性が小さいほど亀裂内部における振動圧の振幅が大きい，すなわち振動圧の影響範囲が大きいと考えられる。

同様に，注入圧力の振幅および周波数の違いが亀裂内部における振動圧の振幅に与える影響の比較を行った図 1.3.5 および図 1.3.6 を見ると，注入圧力の振幅が大きいほど，また周波数が小さいほど亀裂内部における振動圧の振幅が大きい，すなわち振動圧の影響範囲が大きいと考えられる。

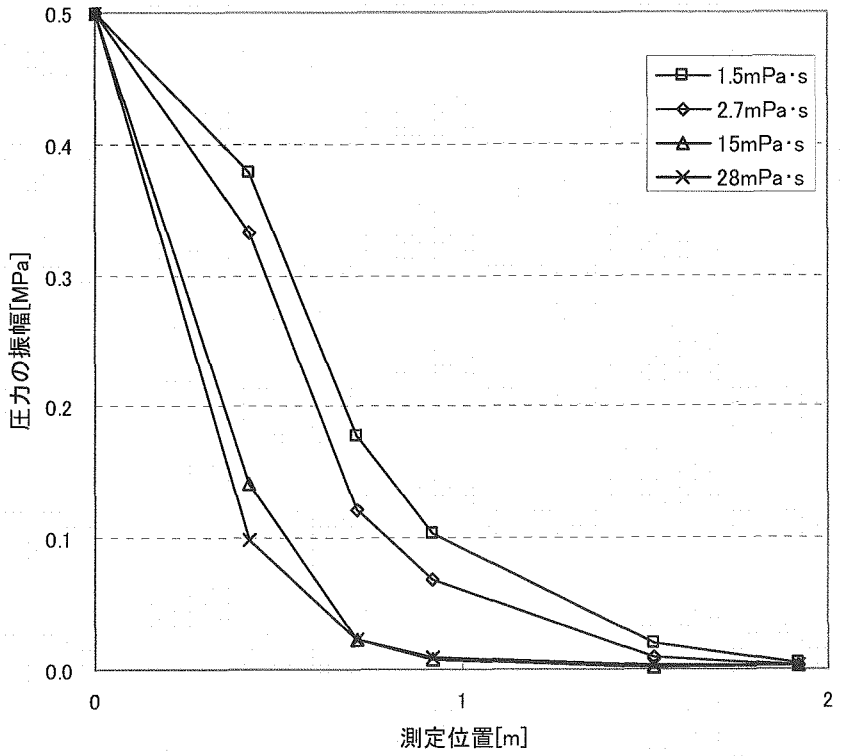


図 1.3.4　亀裂内部の振動圧の振幅（注入材料の粘性の影響）

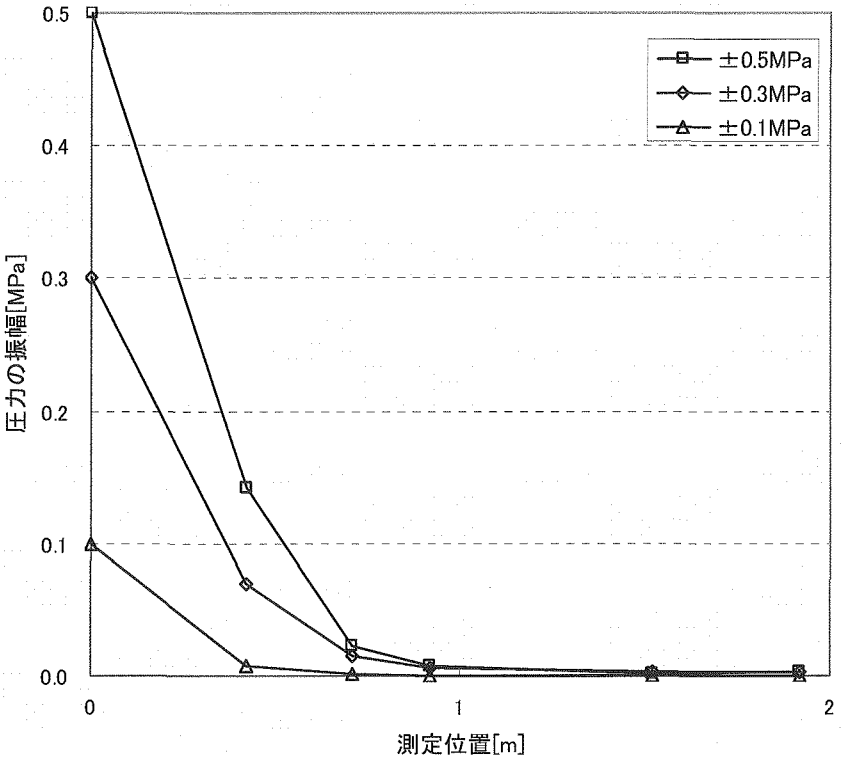


図 1.3.5　亀裂内部の振動圧の振幅（注入圧力の振幅の影響）

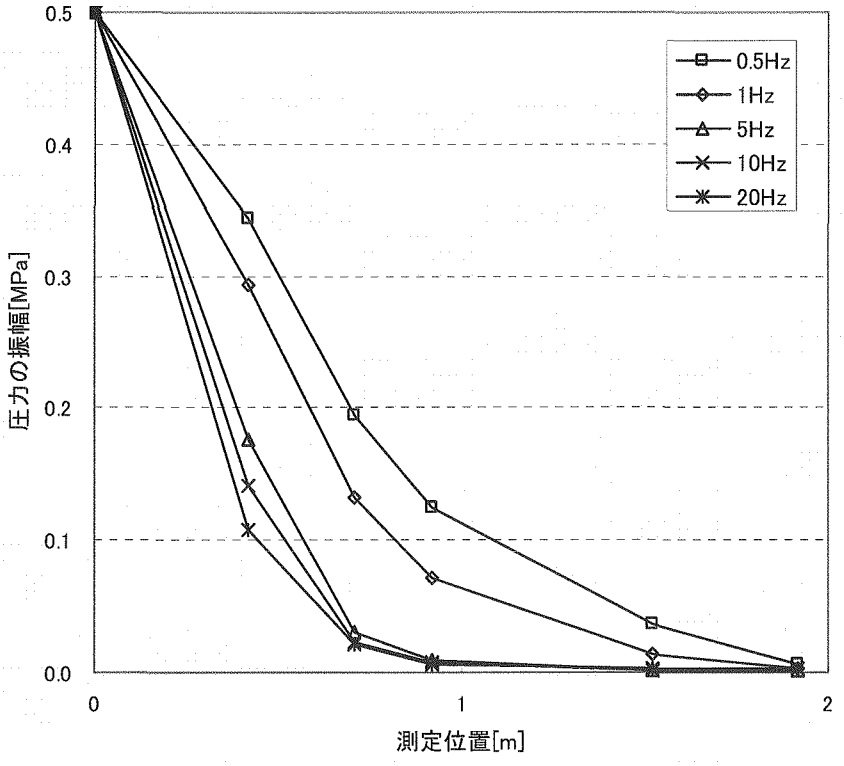


図 1.3.6　亀裂内部の振動圧の振幅（注入圧力の周波数の影響）

1.3.3 グラウト材の注入メカニズムに関する理論的検討

(1) 亀裂内におけるグラウト材の流動メカニズム

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(1.3.1)(1.3.2)で与えられる。

$$C\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial q}{\partial t}=0 \tag{1.3.1}$$

$$L\frac{\partial q}{\partial t}+\frac{\partial p}{\partial x}+Rq=0 \tag{1.3.2}$$

但し，

$$C=\frac{gA}{a^2} \tag{1.3.3}$$

$$L=\frac{4}{3gA} \tag{1.3.4}$$

$$R=\frac{32\nu}{gAb^2} \tag{1.3.5}$$

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。

$$|p(x)|=|p(0)|\sqrt{\frac{\cosh(2f(D-x))-\cosh(2k(D-x))}{\cosh(2fD)-\cosh(2kD)}} \tag{1.3.6}$$

$$|q(x)|=\frac{|p(0)|}{g\rho_\nu}\sqrt{\frac{\cosh(2f(D-x))-\cosh(2k(D-x))}{\cosh(2fD)-\cosh(2kD)}} \tag{1.3.7}$$

但し，

$$f=\frac{CR\omega}{2k} \tag{1.3.8}$$

$$k=\sqrt{\frac{CL\omega^2}{2}+\sqrt{\frac{C^2L^2\omega^4}{4}+\frac{C^2R^2\omega^4}{4}}} \tag{1.3.9}$$

ここで，ω：振動圧の角速度，D：亀裂の長さである。

式(1.3.6)から算出した振動圧の振幅分布を注入パラメータごとに整理して，**図 1.3.7**，**図 1.3.8**，**図 1.3.9** に示す。これらの結果は，室内実験結果と整合的な傾向にある。

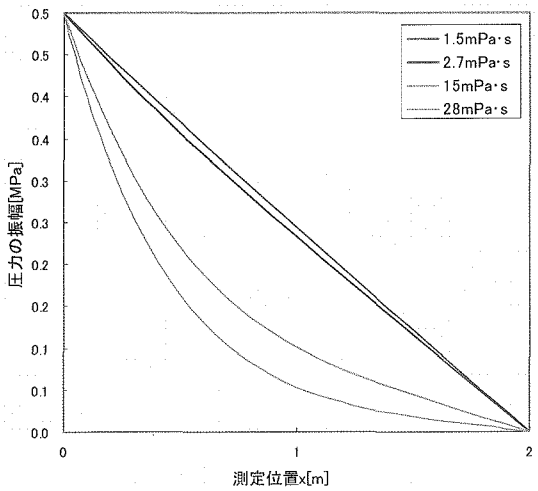


図 1.3.7　亀裂内部の振動圧の振幅（注入材料の粘性の影響）

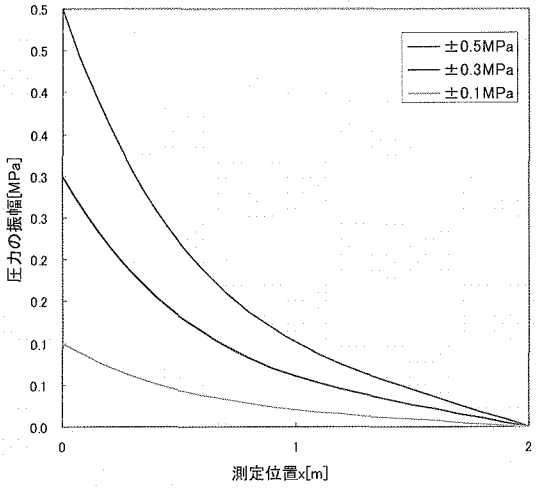


図 1.3.8　亀裂内部の振動圧の振幅（注入圧力の振幅の影響）

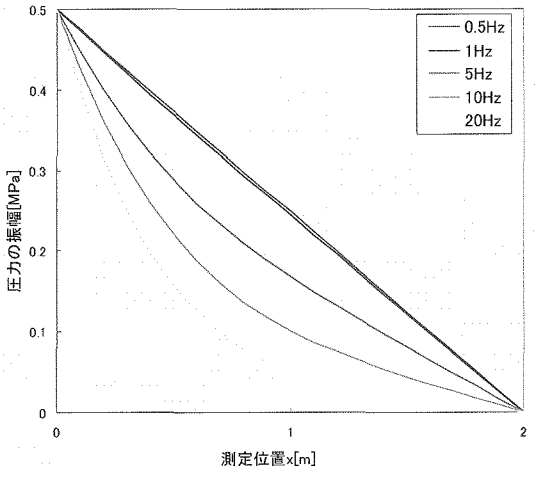


図 1.3.9　亀裂内部の振動圧の振幅（注入圧力の周波数の影響）

また，式(1.3.7)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。

$$\gamma_A = \frac{|q(x)|}{A\omega}\frac{2}{b} \tag{1.3.10}$$

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(Börgesson, 1993[9])による実験から明らかになっている。

$$\mu' = \alpha\gamma_A^{\beta} \tag{1.3.11}$$

但し，α, β: 流体と注入圧力の周波数に依存する値である（α>0, β<0)。式(1.3.7) (1.3.10) (1.3.11)を用いれば，**図 1.3.2**，**図 1.3.3** 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

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \nu\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \tag{1.3.12}$$

に振動成分の境界条件

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = |p(0)|\exp(i\omega t) \tag{1.3.13}$$

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。

$$u_{y=0} = real\left[\frac{|p(0)|\nu}{i\omega^2\mu}\left\{1 - \frac{1}{\cos\left(\sqrt{-\frac{i\omega^2}{\nu}}\frac{b}{2}\right)}\right\}\exp(i\omega t)\right] \tag{1.3.14}$$

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(1.3.14)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 1.3.2** および**図 1.3.3** の結果をよく説明することができる。

(2) 亀裂内におけるグラウト材の充填メカニズム

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。

$$F_s = \frac{\pi}{6}d_p^3\left(\frac{\delta_p}{\delta} - 1\right)\gamma \tag{1.3.15}$$

$$F_r = C_D \frac{\pi}{4} d_p{}^2 \frac{v^2}{2g} \gamma \tag{1.3.16}$$

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。

$$v = \sqrt{\frac{4}{3}\frac{1}{C_D} g d_p \frac{\delta_p - \delta}{\delta}} \tag{1.3.17}$$

また，そのときの抗力係数（層流）は次式で与えられる。

$$C_D = \frac{24}{\mathrm{Re}} \tag{1.3.18}$$

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。

$$v = 0.545 d_p{}^2 \frac{1}{\mu}\left(\delta_p - \delta\right) \tag{1.3.19}$$

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。

$$F = \frac{1}{2}(s'(t)\Delta d\ m)u(t)^2 \tag{1.3.20}$$

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，

$$F = \frac{1}{2}(s'(0)\Delta d\ m)u(0)^2 \tag{1.3.21}$$

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。

$$s(t) = c\frac{s(t)'}{\sum_{t=0}^{t} q(t)} \tag{1.3.22}$$

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。

$$q(t) = \frac{g b(t)^3}{12\nu} i \tag{1.3.23}$$

$$u(t)=\frac{q(t)}{b(t)} \tag{1.3.24}$$

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(1.3.20) (1.3.21) (1.3.22)より，最終的に次式を得る。

$$s(t)=\frac{q(0)u(0)^2}{\sum_{\tau=0}^{t} q(\tau)u(t)^2}s(0) \tag{1.3.25}$$

この式を

$$b(t+1)=b(t)-s(t) \tag{1.3.26}$$

に代入したものをさらに式(1.3.23) (1.3.24) (1.3.25)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可能となる。

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。

$$q_{RM}(t)=N\Sigma\left(f_B(b)q(t|b(0)=b)\right) \tag{1.3.27}$$

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。

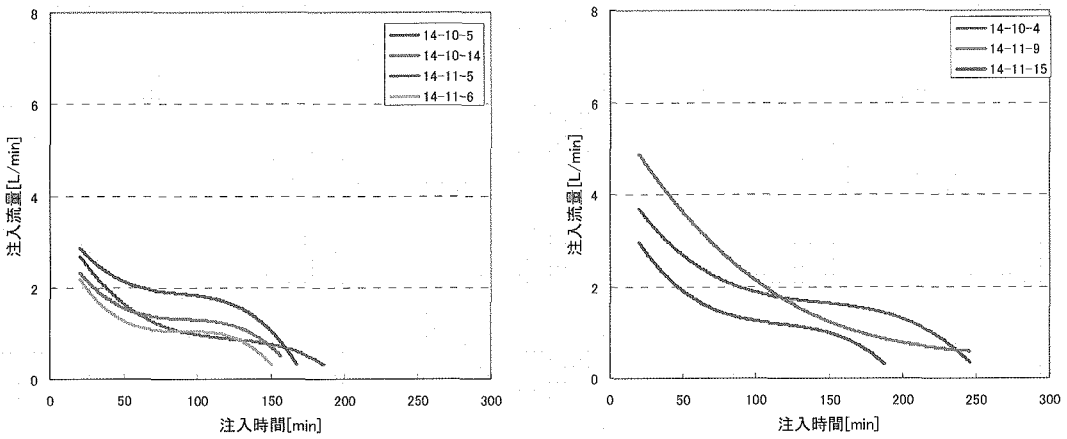
$$q_{RM}(t)=NQ(t|b(0)=b_M)b(t) \tag{1.3.28}$$

1.3.4 動的注入工法に関する現場実験

中生代白亜紀の新鮮な花崗岩（ルジオン値は2~3ルジオン）より構成されている地下空洞内において動的注入試験ならびに静的注入試験を行い，注入効果の比較を行った。試験数については，静的注入が4回，動的注入が3回である。注入圧力については，静的注入と動的注入で基準圧力を0.5MPaとし，動的注入においては，振幅0.3MPa・周波数5Hzの振動圧を付与した。また，グラウト材については，超微粒子セメントを用い，水－セメント比をw/c=4とした。

静的注入，動的注入の別に，注入流量－時間曲線を**図 1.3.10** に示す。静的注入と比較して動的注入では初期注入流量が増加し，また総注入時間も増加していることがわかる。これは動的注入によって流動性が向上することにより，初期注入流量が増加し，さらに目詰まりの発生が抑制された結果であると考えられる。なお，動的注入における平均の単位セメント注入量は静的注入の約150%となった。

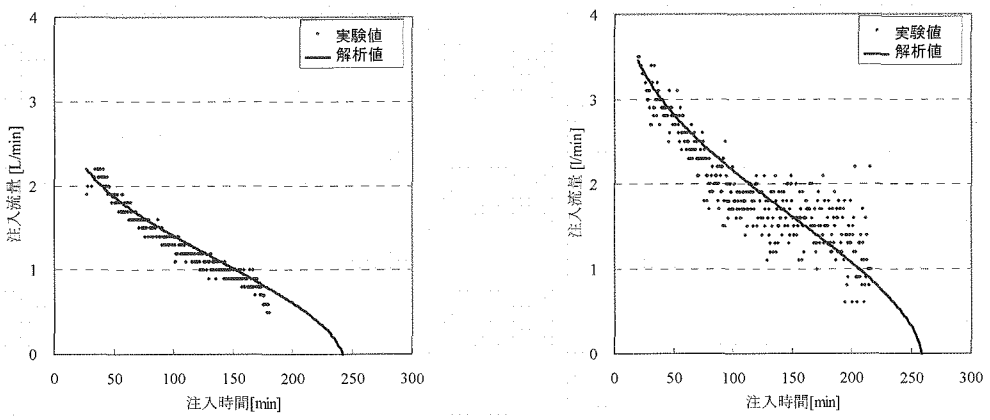
また，いずれの結果についても，注入開始から注入流量は減少傾向を示すが，途中いったん減少が緩やかになり，注入終了間際で再び減少が大きくなるという特徴がみられた。



(a) 静的注入　　(b) 動的注入

図 1.3.10　現場実験の結果

本研究では，岩盤への注入流量が式(1.3.28)によって与えられるという仮定のもとで，1.3.3 で述べた数値解析の方法を用いて現場実験のシミュレーションを行った。亀裂の数 N については，周辺岩盤のボアホールテレビ観察によって推定された亀裂密度（約 3 個/m）から決定した。また，平均開口幅 b_M については，水押し試験によって得られたルジオン値と亀裂密度を基に 3 乗則から逆算して求めた（約 70μm）。図 1.3.11 は，解析によって算出された注入流量－時間曲線に対して実測結果をプロットしたものの例である。本図を見ると，理論曲線は実測値とよく対応しており，このことから解析手法の妥当性が示されたものと考えられる。



例(1)　　例(2)

図 1.3.11　注入流量－時間曲線の数値解析結果と実測結果との対応

1.3.5 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とその検証

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かつ効果的に止水処理を行うためには，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。特に坑道周辺岩盤の水理学的な評価には，岩盤の巨視的な3次元透水異方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されている。

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いる。しかし，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場合には，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をもっている。また，格子ベースの方法では，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不向きである。

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，多次元尺度構成法と空間補間法を利用して，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を提案する。また，その妥当性を数値実験によって，その実用性を現場実験によって検証する[10]。

(1) イメージング手法

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学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 1.3.12**）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。なお本研究で提案する手法においては，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。

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。

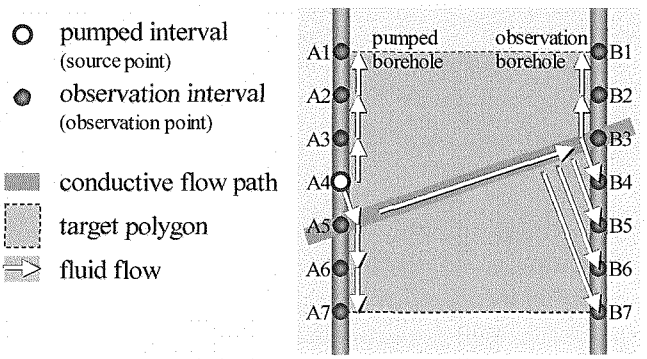


図 1.3.12　クロスホール透水試験

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（Multidimensional Scaling : 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[4]。なお，このときの空間配置のことを布置（configuration）と呼ぶ。

表 1.3.2 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 1.3.13** 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。

表 1.3.2　水理学的距離行列

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
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	

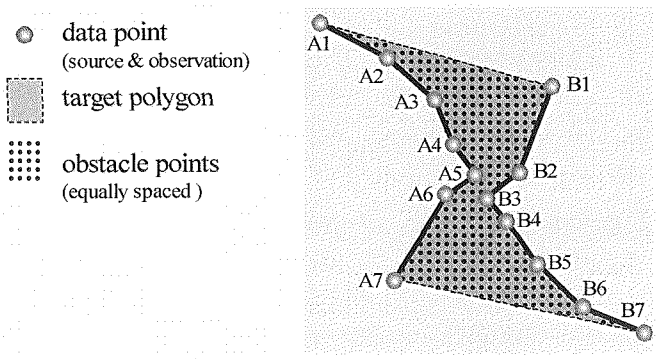


図 1.3.13　水理学的布置

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 1.3.14 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。

(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町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 1.3.15）

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（inverse distance weight interpolation: 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 $Z(\mathbf{x}')$は次式により算出される。

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

ここで，$Z(\mathbf{x}_i)$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。

$$w_i = \frac{h_i^{-p}}{\sum_{j=1}^{n} h_j^{-p}} \qquad (2)$$

但し，h_iは位置 $\mathbf{x}'$と $\mathbf{x}_i$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。

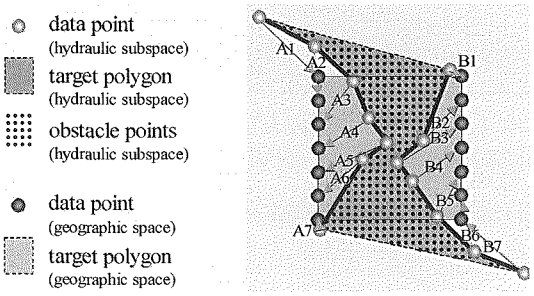


図 1.3.14　幾何学的再構成

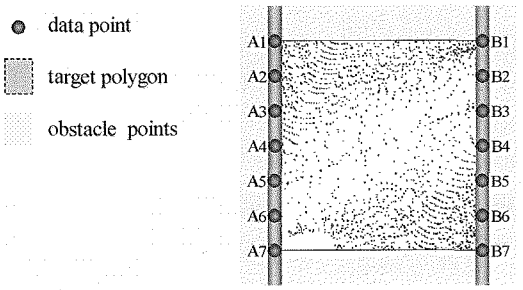
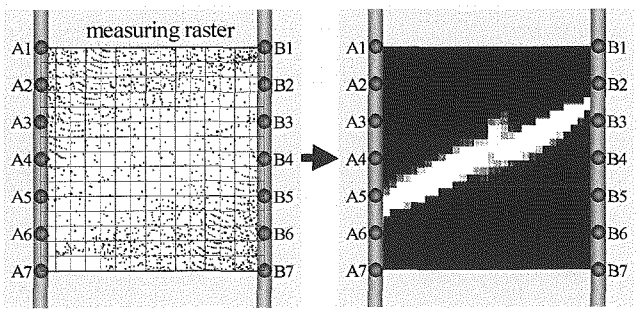


図 1.3.15　地理的空間に再配置された点群

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 1.3.16 のような結果を得る。



(a) density measurement　　(b) expression of path image

図 1.3.16　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検証

検証にあたっては，まず水理学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。

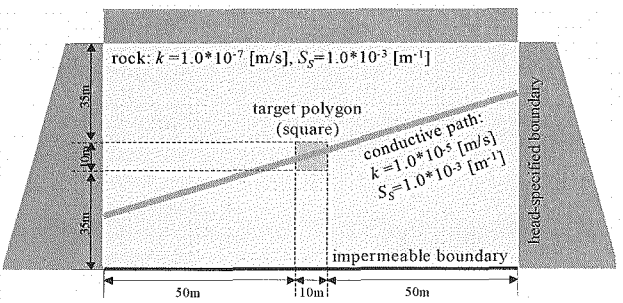


図 1.3.17　数値実験モデル

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-1.3.17** 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 10cm^3/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。

数値実験の結果を**図 1.3.18**，**図 1.3.19**，**図 1.3.20**，**図 1.3.21** に示す。これらの図においては，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学的布置，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 1.3.18** 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 点間の水理学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 1.3.19 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。これらの水理学的布置についても，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 1.3.20 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。これらの水理学的布置についても，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 1.3.21 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。

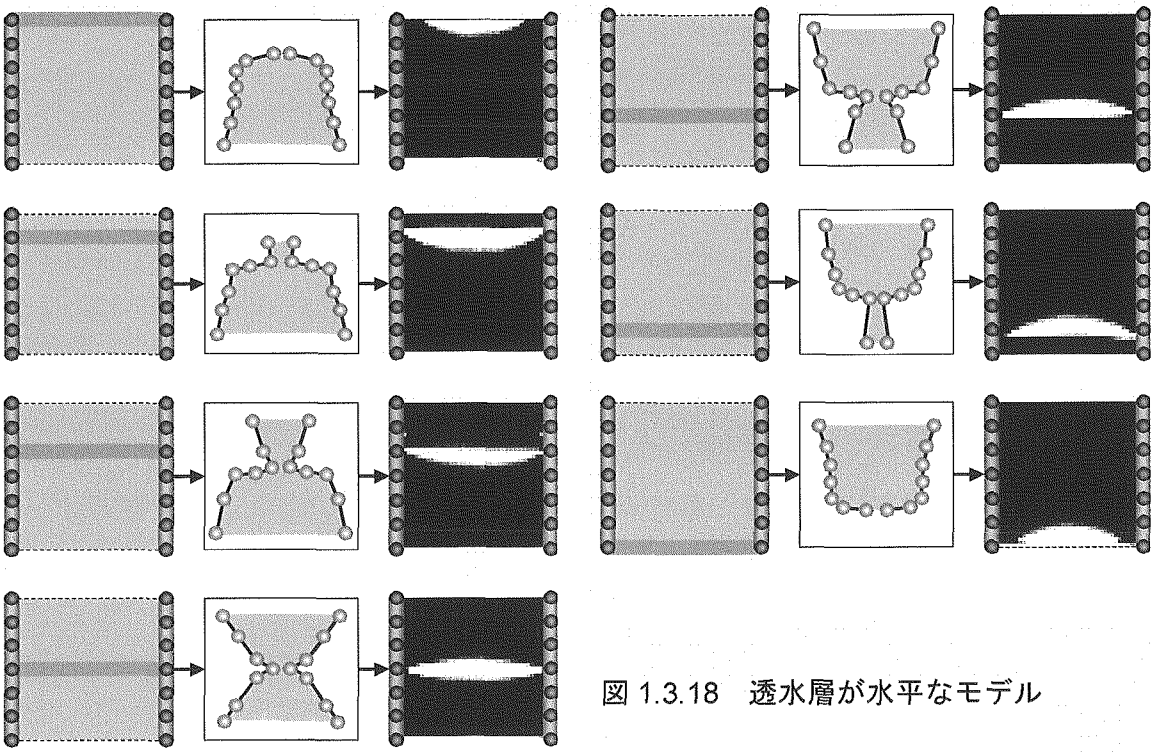


図 1.3.18　透水層が水平なモデル

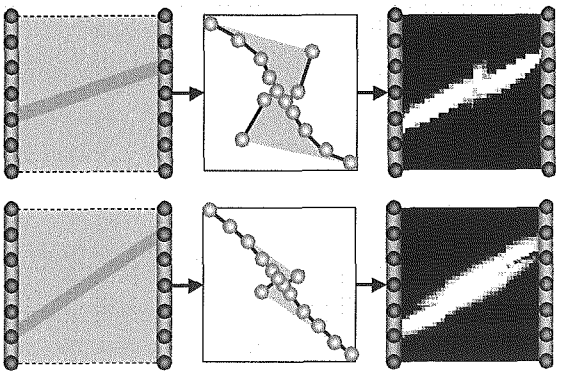


図 1.3.19　透水層が傾斜しているモデル

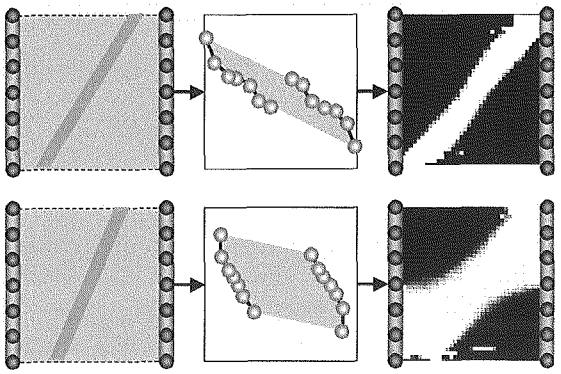


図 1.3.21　注水孔・観測孔と透水層が交差しないモデル

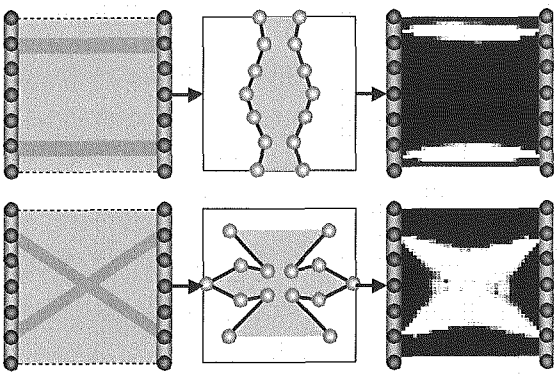


図 1.3.20　透水層が複数存在するモデル

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考える。

(3) 現場実験によるイメージング手法の検証

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 1.3.22 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砕帯の存在が確認されている。なお，注水区間・観測区間とこの破砕帯は直接交差していない。

図 1.3.23 は注水点・観測点の水理学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砕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。

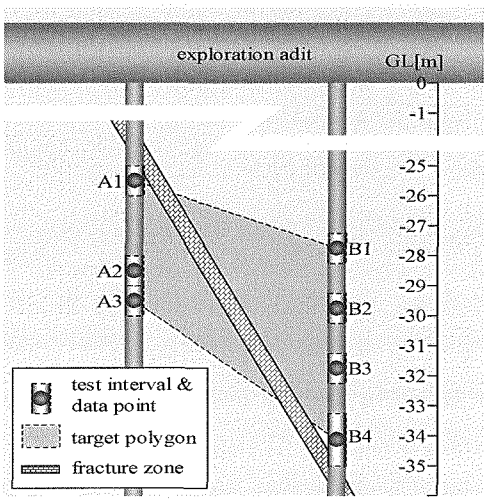


図 1.3.22 現場実験の概要

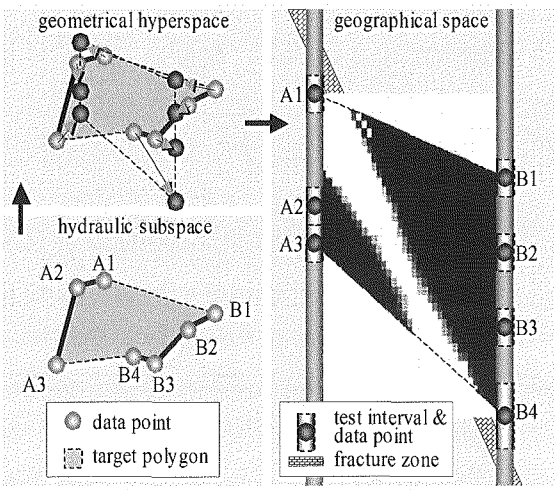


図 1.3.23 現場実験に対する手法の適用結果

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あらわす一連の水理データから多次元尺度法と逆距離補間法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。

この方法の特徴は，①不均質岩盤を対象とする推定方法であること，②ベクトルベースの推定方法であるため，不連続面の交差によって形成される複雑な水みちを推定するのに有利であること，③初期モデルを必要としないこと（初期モデル依存性がない），④3 次元への拡張が容易であること，⑤極めて簡易な手法であることなどである。

今後は①イメージング結果と水理物性値との関連付け，②空間補間法の選定などを通した推定精度の向上，③3 次元空間への拡張，を行っていく所存である。

1.3.6 まとめ

本研究では，動的注入メカニズムの解明および最適注入条件の検討のため，主として理論面からの検討を行ったところ，以下の点が明らかになった。

① 動的注入においては，振動圧の付加によってグラウト材の見掛けの粘性が低下し，流動性が向上する。

② 注入材料の粘性が小さいほど，注入圧力の振幅が大きいほど，そして注入圧力の周波数が小さいほど，亀裂内部における振動圧の振幅が大きい，すなわち振動圧の影響範囲が大きいと考えられる。

③ 注入材料の粘性が大きいほど，注入圧力の振幅が大きいほど，動的注入の静的注入に対する注入流量の増加比は大きくなる。

④ 亀裂内におけるグラウトの充填メカニズムを説明するために，エネルギー保存則に基づくグラウト堆積厚の計算と 3 乗則に基づいた流量・流速の計算とを交互に行うことによって亀裂幅を逐次減少させていく数値解析手法を構築した。

⑤ 構築した数値解析手法を用いて，現場実験のシミュレーションを行ったところ，実測値とよい対応を示したことから，解析手法の妥当性が示されると同時にグラウトの充填メカニズムが明らかになった。

⑥ 現場実験の結果，静的注入と比較して動的注入では初期注入流量が増加し，また総注入時間も増加した。これは動的注入によって流動性の向上によって初期注入流量が増加し，さらに目詰まりの発生が抑制された結果であると考えられる。

⑦ 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あらわす一連の水理データから多次元尺度法と逆距離補間法を用いて水理特性の空間分布を推定するものである。

1.3.7 参考文献

1) Pusch, R. et al., (1988) : Rock Sealing – Interim Report on the Rock Sealing Project. Stripa Project, Technical Report 88-11. SKB, Stockholm.

2) 脇田伸吾,青木謙治他, (2004) : 動的注入工法に関する室内・現場実験とグラウト充填過程モデルを用いた結果の解析, 第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム.

3) 青木謙治他, (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.

4) Kenji AOKI et al., (2003) : An Evaluation of the grout effect by dynamic injection method, 10th ISRM Congress.

5) K. Aoki et al., (2003) : Development of dynamic grouting system, ITA World Tunnelling Congress 2003.

6) Kenji AOKI et al, (2003) : Development of dynamic grouting technique for the improvement of low-permeable rock masses, THE 1st UE KYOTO, 2003.

7) 脇田伸吾,青木謙治他, (2003) : 動的注入工法の注入特性に関する基礎的検討, 第 32 回岩盤力学シンポ.

8) 山本拓治,青木謙治他, (2003) : 3 次元孔間弾性波トモグラフィによるグラウト効果の評価, 第 32 回岩盤力学シンポジウム.

9) 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.

10) Kenji AOKI et al, (2004) : New imaging method for hydro-geological structure in rock masses by cross-hole hydraulic test, ARMS2004.

1.4 まとめ

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実用化に向けた重要な研究課題として抽出した課題のうち，調査・性能評価分野との体系化に対する優先度を評価した結果，次の(1)(2)のテーマについて研究を実施した。

(1) 微小破壊音(AE)計測による掘削影響領域(EDZ)の評価技術の研究

従来から地下発電所及び原油岩盤タンクなどの大規模岩盤地下空洞における掘削影響領域の評価にあたっては，様々な計測方法によって多面的な検討がなされて来た。筆者らの研究グループでは大深度，高地圧下の地下発電所空洞に対して，応力再配分現象を直接把握するための「岩盤応力測定」，「岩盤応力変化測定」，応力変化や破壊に至る過程を把握するための「AE 測定」，応力再配分過程で発生する岩盤変位挙動を把握するための「岩盤変位測定」，応力解放や破壊による亀裂開口現象に注目した「BTV 測定」，応力履歴を受けた岩盤材料の物理的性状を把握するための「マイクロサイスミック測定」，「透水・透気試験」などを統合した計測・評価システムの確立に取り組んできた。

特に，本研究において対象とした「AE 測定」に着目すると，これまでにいくつかの地下発電所の建設において，微小な緩みから比較的大規模な緩みまでの広い範囲の緩みを高精度で検知することが可能であること，その計測結果を応力変化と関連付けることにより掘削の各段階での掘削影響領域の発生・進展挙動を高い制度で評価できること，が実証されつつある。このような技術的ストックを活用し，高レベル放射性廃棄物地層処分場が対象とする大深度かつ亀裂の少ない岩盤に対して，高地圧下における応力再配分の過程で生じる亀裂の発生・進展によって形成される掘削影響領域の評価技術研究の一環として，AE と岩石の破壊機構についての試験及び解析を行った。***なかでも各種 AE パラメータの特性を詳細に検討することによって，岩石・岩盤の微小破壊現象の検知が可能となることを明らかにし，処分施設の調査から設計，安全評価のためのモデル構築に至るプロセスを通して地質環境評価のための重要な指標とすることができることを示した。さらに,堆積軟岩に関しても AE パラメータの特性を評価することで，新しい地質環境評価技術としての体系化を図って行くことが今後重要となるものと思われる。***

(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開発

処分施設の調査・設計及び建設・操業段階で，サイトの地下水環境を可能な限り維持すると共に，地下水流動の制御技術として必須と思われる，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を実施して来た。本研究ではそのうち動的グラウト工法に関して，動的注入メカニズムの解明および最適注入条件の検討のため，主として室内試験及び理論面からの検討を行った。研究の結果明らかになった知見は以下のとおりである。

① 動的注入においては，振動圧の付加によってグラウト材の見掛けの粘性が低下し，流動性が向上する。

② 注入材料の粘性が小さいほど，注入圧力の振幅が大きいほど，さらに注入圧力の周波数が小さいほど，亀裂内部における振動圧の振幅が大きい，すなわち振動圧の影響範囲が大きいと考えられる。

③ 注入材料の粘性が大きいほど，また注入圧力の振幅が大きいほど，動的注入による注入流量は静的注入に比べて増加する。

④ 亀裂内におけるグラウトの充填メカニズムを説明するために，エネルギー保存則に基づくグラウト堆積圧の計算と 3 乗則に基づいた流量・流速の計算とを交互に行うことによって亀裂幅を減少に伴う亀裂充填過程の数値解析手法を構築した。

⑤ 構築した数値解析手法を用いて,現場実験のシミュレーションを行ったところ，実測値とよい対応を示したことから，解析手法の妥当性を確認すると同時にグラウトの充填メカニズムを明らかにすることが出来た。

⑥ 現場実験の結果，静的注入と比較して動的注入では初期注入流量が増加し，また総注入時間も増加した。これは動的注入によって流動性の向上によって初期注入流量が増加し，さらに目詰まりの発生が抑制された結果であると考えられる。

⑧ 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あらわす一連の水理データから多次元尺度法と逆距離補間法を用いて水理特性の空間分布を推定するものである。

今後，長期耐久性を有する新しいグラウト材に関する材料特性及び注入効果の検討と共に，堆積軟岩中における動的限界注入圧を始めとする注入工法に関する検討を進める必要がある。さらに，グラウト効果の長期的安定性を評価するために，地質環境調査研究領域及び性能評価研究領域との連携による評価システムの構築が重要であると考えられる。

(3) 深部地質環境の調査・解析技術の体系化

以上の研究成果は，処分施設の工学技術に関して重要な項目であるが，今後，深部地質環境の調査ならびに性能評価の両分野との連携，体系化を図るためには，次年度に研究スキームの再構築を行う必要がある。具体的には，例えば瑞浪超深地層研究所計画の第 2 段階や幌延深地層研究センターでの立坑を用いた研究計画について決定されている個別テーマを，体系的な取り組みとして構築するための検討作業を実施することが望ましいと考えられる。

2. 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

2.1 はじめに

2.1.1 研究の背景および目的

本研究では表記の題目で

(1) 安全評価・環境安全に関する短期・長期の自然現象諸要因の感度と評価期間に応じた定量化の研究

(2) 地質環境の変化の範囲に対応したアクチニド等の吸着・脱着のメカニズムを考慮した実用的な安全評価に関する研究

を行うことを目的としている。すなわち(1)では，第２次取りまとめ[1)]では概念として抽象的，定性的であったシナリオやモデル，データの不確実性の取扱いについて，(2)では，核種移行評価における，酸化還元反応等に対する速度論的なアプローチについて考える。

高レベル放射性廃棄物の処分システムの性能評価，あるいはさらに広く安全評価の目的は，大きくいって

① 安全基準：国や国民が処分の実施の是非を判断したり，国や実施主体が特定の候補地が安全上処分地として適しているかどうかを判断したり，地方住民が処分候補地として応募したり受け入れたりすることの是非を判断したりする際の判断材料を提供すること

② 合理的地層処分システムの設計の技術的拠り所：安全を脅かすシナリオ，要素を抽出してシステム設計やその合理化および防災対策に反映させること

の２点にある。これに対して，第２次取りまとめは，今後地層処分を実施していくことが妥当で実現性のあることかどうかを国が判断するための材料を提供したものであり，この結果実施主体が設立され，今後のスケジュールとして

① 概要調査地区選定

② 精密調査地区選定

③ 処分地選定

の段階を経て地層処分を実施していく計画がたてられた。このような全体計画を背景として考慮すると，第２次取りまとめでは主として国が地層処分の実施の是非を判断するための材料を与えるというどちらかといえば概念的，抽象的な妥当性に主眼が置かれていたのに対し，今後は各選定段階それぞれに応じた形での判断材料を具体的に提供する必要がある。特に今後の判断主体は，保安基準の策定における国や，処分地選定における地方住民など，地層処分工学に関する専門家ではない人々となるので，彼らがよりよい判断を下すために，

① 科学的信頼性と論理の首尾一貫性を明確にした提示

② 非専門家にも理解できる形での提示

が重要になると考えられる。

第２次取りまとめの性能評価では，評価の際に問題となる，地質環境，設計の多様性およびシナリオ，モデル，データの不確実性について，その不確実性に応じた保守性を導入し，評価の結果を線量により判定している。具体的には，考慮するシナリオを，

① 接近シナリオ

② 地下水シナリオ（基本シナリオ，変動シナリオ）

に整理し，接近シナリオに対してはサイトの選定により避け得る希頻度事象であるとして，そのもたらす影響を付録の what if? シナリオで解析している。一方，地下水シナリオのうちの基本シナリオについては，「5.6 バリア性能の検討」において，解析ケースの比較基準として，中心的かつ保守的なシナリオと代表的地質環境，設計，データを用いたレファレンスケースについて評価解析し，これに対して感度解析（データの不確実性について）を行い，性能に重要な影響を与える要件を抽出している。「5.7 システムの安全性の検討」では，この結果に基づき，安全に関連する代表的シナリオを設定してこの評価結果を総合安全評価として提示している。

このような形で，シナリオやモデル，データの不確実性は，それぞれにある程度定性的に重要性が区別されつつ性能評価がなされているが，それぞれの不確実性，特にシナリオやモデルの生起確率，妥当性が十分定量化されておらず，その相対的重要性が分かり易く示されていないという限界がある。この結果，付録にまわされたような出来事が生起することと，例えば地下水の流動についての知識が不確実であることのいずれが安全にとってより重大であるのかとか，各バリア成分の性能の安全性へのインパクトがどの程度であるのかといったことが，分かりにくくなっている。また今後は，高レベル放射性廃棄物に限らず，TRU 核種を含む廃棄物やウラン廃棄物，RI・研究所等廃棄物などについても一貫した考え方で処分法を選択していく必要があるが，この場合には，地表の諸活動からの擾乱を処分の深さによりどの程度避け得るのかを，少なくともある程度は定量化する必要がある。このような問題は，第２次取りまとめの不備ということではなく，むしろ第２次取りまとめにより明確にされた今後の重要課題と考えることができる。

このような考慮に従えば，完全にすべてをリスク等に数値化することは困難であるが，それぞれの事象のもたらすインパクトを種々のレベルに分類し，相対的に並べる等の整理は可能ではないか考えられる。また，この際には評価の時間枠を考慮して，問題とする事象の起こる時期の現在からの時間の遠さ，例えば

① 現在から数百年：管理が続いている期間，

② 数百年から数千年：現在と類似した文明や歴史が続いている期間，

③ 数千年から数万年：現在の地形，環境や気象が持続し，人類が存続していると予想される期間，

④ 数万年から数十万年：氷期をはさむ期間，

⑤ 数十万年以降：地質環境（例えば現在の国境を決めている地形そのもの）が変化し，生物学的にも人類が変化している可能性の高い時期，

等に従って各シナリオの重み付けを行うことも重要と考える。これらのそれぞれの時期に応じて処分廃棄物の危険性とシナリオの重みは異なっている。

地震・断層活動，火山活動などの天然現象の影響回避の方法・論理立てについて考えると，あらゆる影響を全て回避するというのは不可能であり，すべての現象の影響が，何の措置もしないで十分無視しえるほど小さいと期待することにも無理がある。従って，ある程度以下の生起確率の現象に対しては，“事象”ではなく“事故”あるいは“災害”と考えて，これに対して何らかの措置がとられると期待し，次のような形で整理するのが良いと考える。

① これらの天然現象による影響シナリオを整理して，断層が処分場やその近傍に生成することやマグマが貫入することと，ある程度の距離で断層活動があったり，火山が活動したりするときに起こる処分場への影響を区別して定量的に評価する。

② 現在知られている活断層や火山フロントからの距離に応じて，上記のシナリオが生起する確率をできる限り定量化する。

③ それぞれの生起確率，そのシナリオが問題となる現在からの時間の遠さ（数百年まで，数千年まで，数万年まで，数十万年まで，それ以降）およびそのシナリオによる影響の大きさ等を考慮して，安全に対する重要度をランク付けする。

④ 生起確率がある程度より小さいシナリオや人間侵入など不確かさにより避けることを保証し得ないシナリオについては，“事象”ではなく“事故”あるいは“災害”と考えて，これを絶対に避けるというのではなく，このようなことが起こったらどうなるかを考える（原子炉におけるシビアアクシデントに相当すると考えられる）。

⑤ 事故あるいは災害に対しては，これに対してなし得る措置，対策を開発すると共に，現在からの時間の遠さに応じて，将来世代に対して期待される介入措置（災害対策）を考慮する。

2.1.2 各バリア性能の評価

ここでは，人工バリアと天然バリアの性能を出来る限り分離して評価するため，第２次取りまとめで行われた性能評価の結果を見方を変えて整理する。第２次とりまとめでは 2.1.1 で述べたような形で性能評価が進められており，地下水シナリオに関するレファレンスケースについては，**図 2.1.1** のような解析結果が得られており，代表的な条件では，約 80 万年後に生態圏にもたらされる放射能は最大となりこれによる被ばくはおよそ 5×10^{-3} μSv/y になると計算されている。これは既にある自然放射線レベルや諸外国で示されている安全基準に比べてはるかに低いものであるが，これは人工バリアや天然バリアの条件が一般的な場合でかつ安全上問題となる放射性核種の移行経路を仮定した場合についてであり，問題は種々の不確実性がこの値をどの程度変化させるかということである。

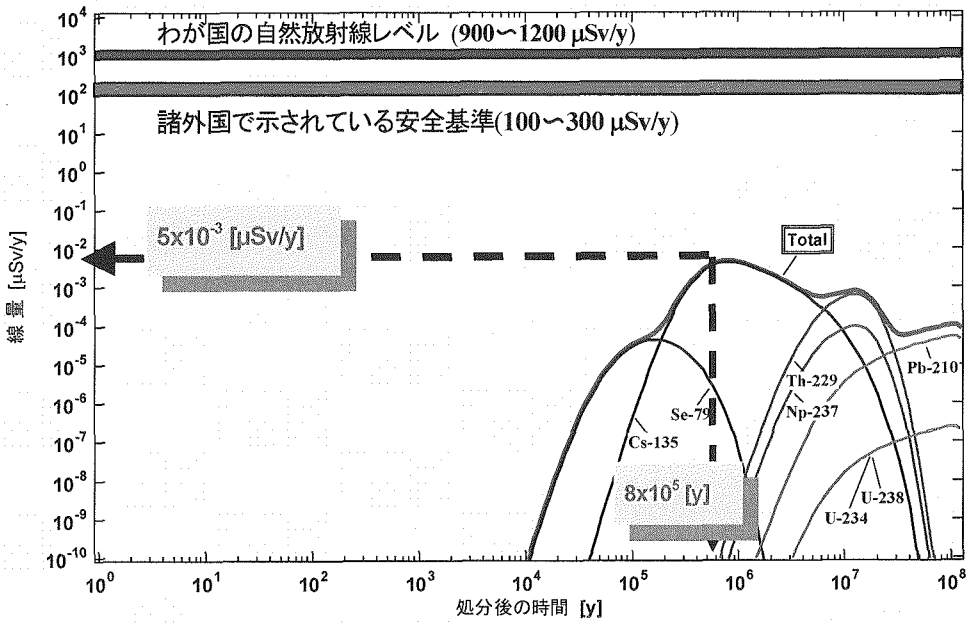
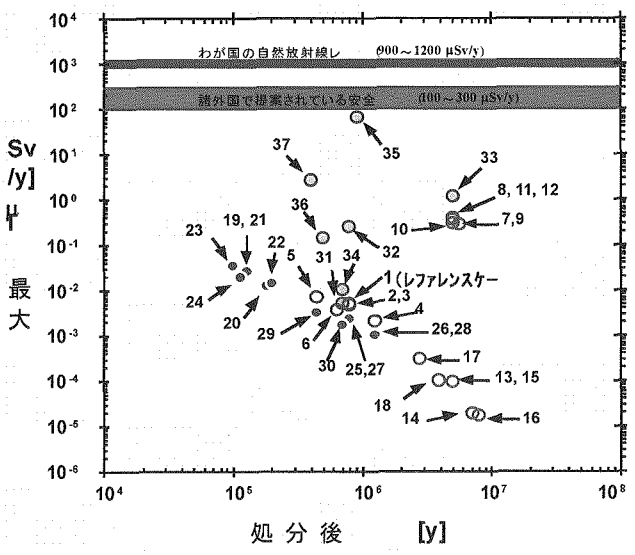


図 2.1.1　レファレンスケースの解析結果



Case #1: レファレンスケース

- 岩種:結晶質岩(塩基性)
- 地下水/GBI:降水系/河川水
- 地形:平野

Case #2- #32: システムの多様性

以下の可能性ある組み合わせより構成

- 岩種: 6種類
- 地下水/GBI:

  [降水系, 海水系]／[河川水, 沿岸海域, 深井戸]

- 地形: 平野, 丘陵, 山地

図 2.1.2 地層処分システムの全体性能の解析（地下水シナリオに対する最大線量の分布）
(40,000 本の廃棄体を処分する場合を想定)

これについて考察して示されているのが，図 2.1.2 の結果である。この結果は，人工バリア，天然バリアの様々な不確実性を考慮して条件を設定し，計算した結果である。この結果様々な不確実性を考慮しても，地層処分システムは十分な安全性能を有することが示されている。一方，ここで考慮されていない不確実性がある場合にはいったいどうなるかが議論の焦点となる場合がある。このような場合については，ここで行ったのと同様の性能評価計算を行えば評価

が可能であるが，計算は容易ではなくかつ直感的にその結果が予測できるわけでもない。このような評価をより行いやすく，各事象のインパクトや各バリアの性能をよりわかりやすくするには，処分システムを出来る限り構成要素に分解して，個々について独立に性能を評価することが望ましい。しかしこのようは評価が行われているわけではない。それは，地層処分における多重バリアでは各バリアのバリア性能は独立ではなく，例えば人工バリアの健全性は天然バリア（地質環境）により保証されているため，多層防護の議論のようにそれぞれのバリアの性能を単独で評価できないという理由によっている。

しかし，人工バリアの健全性は地質環境によって保証されるといっても，性能評価で考慮する地質環境の天然バリアの全ての機能に依存しているわけではない。すなわち，性能評価では，天然バリアの核種移行に対するバリア機能は重要な要素で，地下水の流速，性質，岩石への核種の分配係数等々がこれに重要な影響を与えるが，これらは人工バリアの健全性には影響しない。すなわちバリア間の干渉は特定の機能に限定される。そこで天然バリアの機能を，人工バリアの健全性（緩衝材が地下水に対して亀裂性経路を作らず，核種の移動が還元性雰囲気の中で拡散により支配されておこる場を与えること）を保つことのみに限定し，人工バリアの機能を評価してみることにする。これに相当するのが**図 2.1.2** のケース 37（天然バリア機能を考慮しないケース）で，4×10^5 年で 2 μSv/y のところにピーク（支配核種 Th-227）が現れている。ただしこの場合にも天然バリア中の地下水流速（掘削影響領域の地下水流量）が仮定されており，緩衝材外側で放射性核種の濃度がゼロになって粘土緩衝材中の拡散が起こっているわけではない。そこで極端な場合として掘削影響領域で地下水の流量が無限大で放射性核種の濃度がゼロとなり最も速く粘土緩衝材中の拡散が起こる場合（ゼロ濃度境界）を考えてみる。第２次とりまとめではこのような場合について，緩衝材外側での地下水流量の不確実性として取り扱っている（分冊３6.1.2.1.3）。**図 2.1.3**（分冊３の図 6.1.2.1-3（VI-28））の感度解析の結果によれば，このような条件では Th-229 の親核種である Np-237 の最大移行率が２桁増加する。

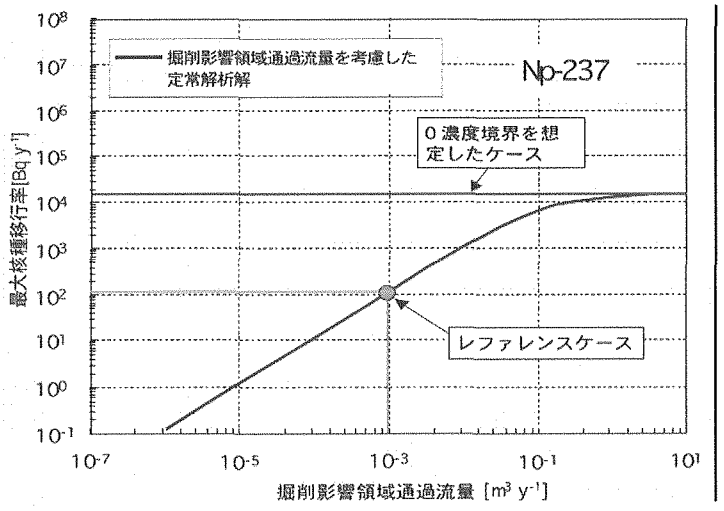


図 2.1.3　掘削影響領域通過流量に対する Np-237 の最大移行率の違い

このような場合には，供給されるNp-237の濃度は，ガラス固化体の有無にかかわらずNp(IV)の水酸化物固体の溶解度に依存して決まり，この濃度と緩衝材外側の濃度との差により粘土緩衝材中での拡散が起こる。溶解度が非常に大きいCs-135のような核種の場合はガラスの溶解速度に支配されてガラス固化体からの溶出率が決まりこれにより核種が供給される（図 2.1.4（分冊3の図6.1.2.1-4（VI-29））。

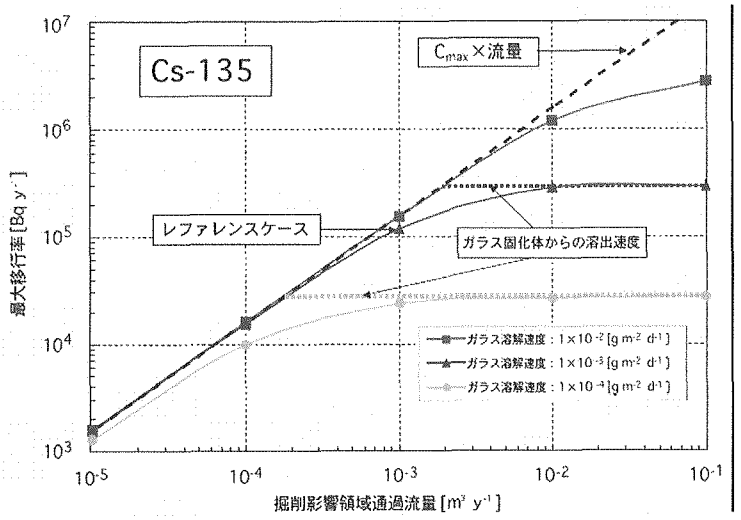


図 2.1.4 ガラス溶解速度および掘削影響領域通過流量とCs-135の最大移行率

実際には地下水流速がそんなに速くなれば核種は希釈されることになるのであるが，このような効果を無視し，天然バリアの遅延機能を一切考慮しないような極端な場合でも，与えられる線量は200 μSv/y（諸外国で提案されている安全基準の程度）ということになる。深部地下において地下水流速がそのように極端に大きくなることは考えられないので，線量は上の値より小さくなり，一般的な地下水流速を考えた場合のケース37の2 μSv/yとの間の値となる。言い換えれば地層環境の安定性により，人工バリアにおける粘土緩衝材での拡散による核種移行と還元性雰囲気が保証されれば，地層環境の天然バリア機能にどのような不確実性があろうと，この線量を超えることはありえない。この線量を基準に考えるとすれば，天然バリアの機能はバリアの冗長性とみなすことも出来るし，この値は地層処分システムのロバスト性かつ深層防護性を示していると考えることも出来る。さらに，この結果より，天然バリアの機能を評価するために，ケース37とレファレンスケースの最大線量位置を見ると，レファレンスケースはケース37のおよそ倍の時間に約2桁低い最大線量が与えられている。このことから，天然バリアの代表的な条件におけるバリア機能は，代表的な地下水流速で評価した人工バリアの機能とほぼ同等であるということがわかる。

2.1.3 人工バリアの健全性を保証するものとしての地質環境の評価

前節で，極端な仮定を置いて処分システムのロバスト性を示したが，これによれば，人工バリアにおける粘土緩衝材での拡散による核種移行と還元性雰囲気が保証されれば，地層環境の天然バリア機能にどのような不確実性があろうと，200 μSv/y という線量を超えることはありえない。天然バリアは標準的な地下水流速の場合の人工バリアとほぼ同等のバリア機能を持つので，実際の処分システムのバリア性能はこれよりはるかに大きいし，これをもとに天然バリアのみのバリア性能も評価できる可能性もあるが，これを別として，前節で示したロバスト性を脅かす因子を考えると，拡散場としての粘土緩衝材が損なわれることと，粘土緩衝材中の地下水の性状が変化し酸化性になることの２点のみと考えることが出来る。前者は，普通に考えれば大変起こりにくいことであるが，周囲の岩盤が亀裂等の間隙を非常に多く含んでいる場合（掘削影響などにより緩み領域が出来，かつ工学的なシーリングが不備である場合）に粘土緩衝材が散逸して失われるという可能性については慎重に考慮しておく必要がある。後者もまた深地下では通常はありえないことであるが，掘削等により酸化性となった坑道が何らかの原因で還元性に復帰しない可能性は考えられる。例えば，掘削ずりは，地表に置かれると

$$4FeS_2 + 15O_2 + 14H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3 + 16H^+ + 8SO_4^{2-}$$

という反応が起こる可能性がある。個々に分けるとこの反応は次のような反応で構成されている。

$$(1)\ FeS_2(s) + \frac{7}{2}O_2 + H_2O \rightarrow Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 2H^+ \text{ (イオウの酸化)}$$

$$(2)\ Fe^{2+} + \frac{1}{4}O_2 + H^+ \rightarrow Fe^{3+} + \frac{1}{2}H_2O \text{ (鉄の酸化、} t_{1/2} \approx 1000\,\text{days)}$$

$$(3)\ Fe^{3+} + 3H_2O \square\ \ Fe(OH)_3 + 3H_2O \text{ (加水分解)}$$

$$FeS_2(s) + 14Fe^{3+} + 8H_2O \rightarrow 15Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 16H^+ \text{ (硫化物の酸化)}$$

$$(4)\ Fe(OH)_3 \rightarrow FeOOH, Fe_2O_3$$

このようにして酸化されたずりが埋め戻し材として坑道に戻された場合には，この鉄が再び還元されて坑道が還元性雰囲気に戻るかどうかは不明である。後述するように自然界の地下深部の還元性は，どのような物質によって担保されているか不明であり，もしもFe(Ⅱ)でこれが成立しているのであれば，掘削ずりと共に戻されたFe(Ⅲ)は，Fe(Ⅱ)によっては還元できないのでそのまま坑道中に残留する。**表 2.1.1** に示すように，地下水シナリオでは酸化性雰囲気では安全上重要となるアクチノイド核種は高酸化状態となるため溶解度等が増し，坑道は優先的にこれらが動く経路となる。さらにこの経路による影響が粘土緩衝材中の地下水にまで及べば，前節の評価における人工バリアのロバスト性さえも保証できなくなる。一方，地下の還元性を成立させるのに地表と同様有機物（または微生物）との反応が有効であれば次のような反応が期待できる。

$$4FeOOH + "CH_2O" + 8H^+ \rightarrow 4Fe^{2+} + CO_2 + 7H_2O$$

表 2.1.1 アクチノイドの溶解度と分配係数の設定値（第２次取りまとめより）

元素	溶解度 /(mol/L)			緩衝材中分配係数 /(m^3/kg)			岩盤中分配係数 /(m^3/kg)		
	降水系	酸化性	海水系	降水系	酸化性	海水系	降水系	酸化性	海水系
U	**8×10^{-9}**	**5×10^{-3}**	**2×10^{-9}**	1	0.005	1	1	0.005	1
Np	**2×10^{-8}**	**4×10^{-5}**	**3×10^{-9}**	1	0.005	1	1	0.005	1
Pu	3×10^{-8}	6×10^{-9}	3×10^{-8}	10	10	10	1	0.05	1
Am	2×10^{-7}	2×10^{-7}	4×10^{-7}	10	10	10	5	5	5
Cm	2×10^{-7}	2×10^{-7}	4×10^{-7}	10	10	10	5	5	5

この場合にはこのような反応がどの程度期待できるのか，その速度はどのようなものかが問題となる。

このように，地下の還元性が何らかの原因により維持されなくなることは極めて深刻な安全を脅かすシナリオである。これに関して第２次とりまとめでは，分冊１において，地質的に代表的な地域の地下水をサンプリングし化学組成や酸化還元電位等を測定している。そして，これより得られた酸化還元雰囲気に対応する原子価を決定し，この原子価について分冊２にて実験室系で得られたデータ等を基に評価を行い，地下環境中でのアクチノイドの化学種や溶解度を導出し安全評価を行っている。

まず，以下に分冊１中で挙げられている調査事例についてまとめる。なお，参考のため Eh (mV)を導出する式を書き加えた。

• 深部地下水の酸化還元雰囲気に関する調査事例　分冊１-III 章より

※ 酸化還元電位のデータが他の地球化学的パラメータと比べ非常に少ない

1.茂原地域（泥岩層）

深度：500～1300m　　Eh: −73～34 mV　pH: 7.74～7.94

還元雰囲気支配反応：　　$CH_4 + H_2O = CH_2O + 4H^+ + 4e^-$

$$Eh\,(mV) = 356 - 59pH + 59\log\frac{[CH_2O]}{[CH_4]} \quad : Eh^0(7.8) = -104\ mV$$

2.幌延地域（堆積岩層）

深度：1000m　　Eh: −225 mV　　pH: 8.4

還元雰囲気支配反応：　　$HS^- = 9H^+ + SO_4^{2-} + 8e^-$

$$Eh\,(mV) = 248 - 66.4pH + 7.38\log\frac{[SO_4^{2-}]}{[HS^-]} \quad : Eh^0(8) = -283mV$$

3.東濃地域 (1)　堆積岩層（瑞浪）

深度：160m　　Eh: –300 mV　　pH: 8～9

還元雰囲気支配反応：　$HS^- = 9H^+ + SO_4^{2-} + 8e^-$

4.東濃地域 (2)　花崗岩層

a) 深度：180～ 330 m　　Eh: 0 mV　　pH: 8

還元雰囲気支配反応：　$Fe^{2+} = 3H^+ + e^- + Fe(OH)_3$

$$Eh\,(mV) = 1509 - 177pH + 59\log\frac{[Fe(OH)_3]}{[Fe^{2+}]} \quad : Eh^O(8) = 93\ mV$$

b) 深度：500～ 1000 m　　Eh: –260～ –385 mV　　pH: 8～9.5

還元雰囲気支配反応：　$HS^- = 9H^+ + SO_4^{2-} + 8e^-$

$FeS_2(c) + 8H_2O = 2SO_4^{2-} + Fe^{2+} + 16H^+ + 14e^-$

$$Eh\,(mV) = 361 - 67.4pH + 4.189\log[Fe^{2+}][SO_4^{2-}] \quad : Eh^O(8.5) = -212\ mV$$

5.釜石鉱山　花崗岩層

深度：　250 m　　Eh: –320 mV　　pH: 9.8

還元雰囲気支配反応：　$HS^- = 9H^+ + SO_4^{2-} + 8e^-$

$FeS_2(c) + 8H_2O = 2SO_4^{2-} + Fe^{2+} + 16H^+ + 14e^-$

第二次とりまとめでは，各フィールドでの地下水サンプルより測定されたpH, Ehと酸化還元対となりうる化学種の存在分布から，**図 2.1.5**（第二次取りまとめ分冊1 III章　図3.4-6）のように測定された電位の付近に条件付標準電位（$Eh^O(x)$；pH = x の際の標準電位）が位置する反応を同定し，その反応が還元雰囲気支持している反応であると考えている。例えば，幌延地域(堆積岩層)の深度1000mという条件では測定された酸化還元電位と$HS^- = 9H^+ + SO_4^{2-} + 8e^-$という反応の条件付標準電位が近いため，この反応によって還元雰囲気が構成されていると考えられているが，後述する理由から還元雰囲気を支持する反応を正確に把握することは非常に重要であり，実際に硫化水素—硫酸という一種類の酸化還元対のみにより還元雰囲気が構成されているかに関しては，現時点より詳細な評価が今後必要となると思われる。各地点・各深度において硫化水素イオンと硫酸イオンの濃度を測定し，その濃度分布を

$$Eh\,(mV) = 248 - 66.4pH + 7.38\log\frac{[SO_4^{2-}]}{[HS^-]}$$

という式にあてはめ，求まる電位と実測された電位を比較し，この反応のみで実際の環境が記述可能であるか検証することができる。

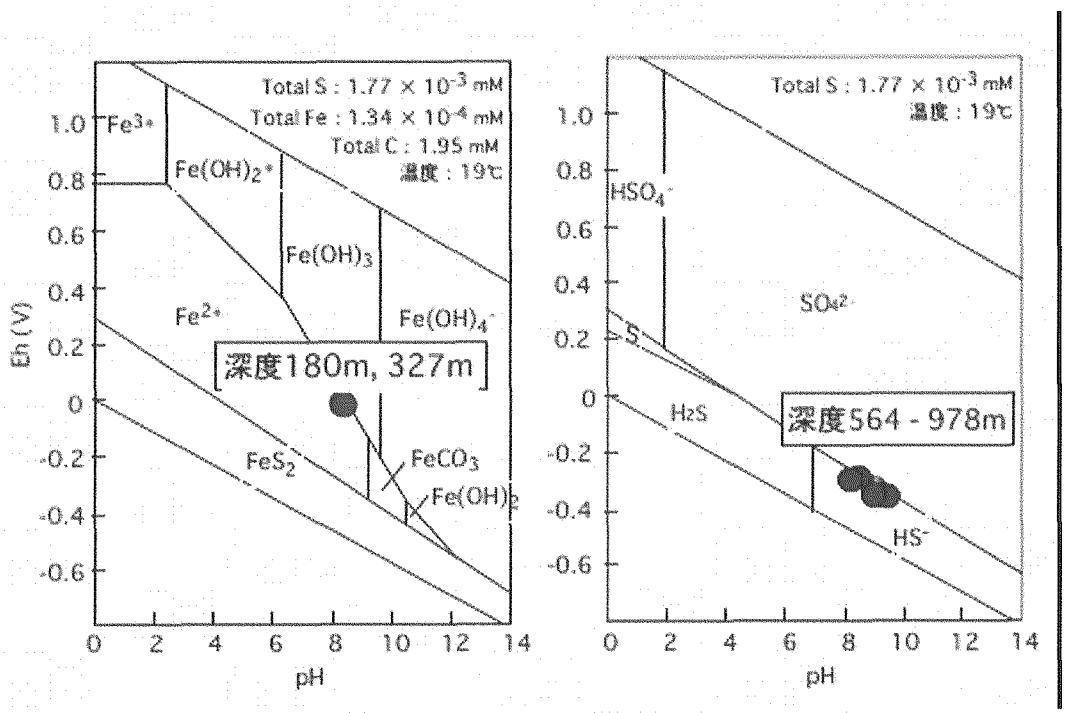


図 2.1.5 鉄とイオウの化学種の酸化還元ダイアグラム

東濃地域の花崗岩中の地下水の酸化還元電位測定値は浅部で鉄の化学種の酸化還元境界に，深部でイオウの化学種の酸化還元境界に位置する。

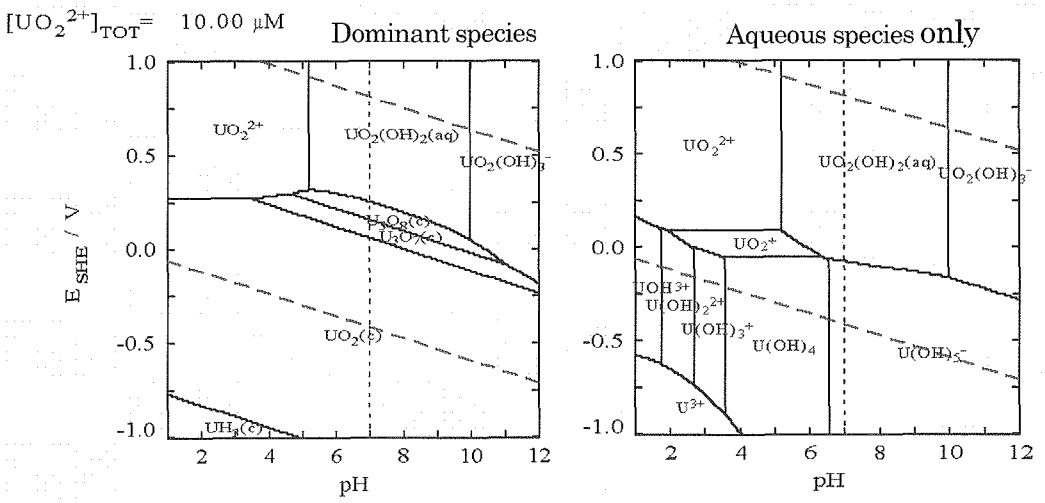


図 2.1.6　平衡計算より求めた溶解度制限固相と溶存支配種 U

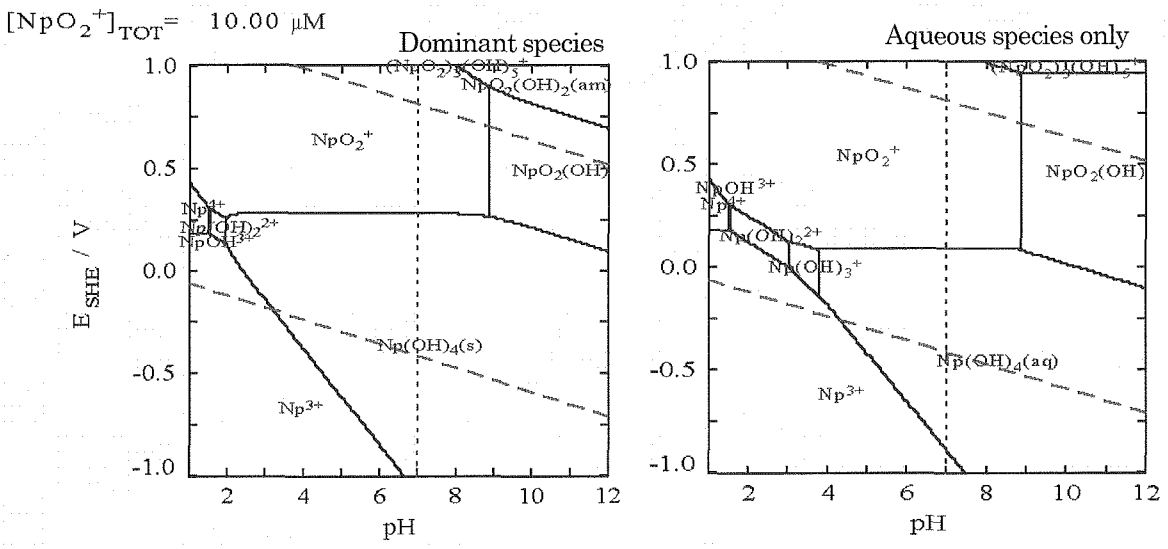


図 2.1.7　平衡計算より求めた溶解度制限固相と溶存支配種 Np

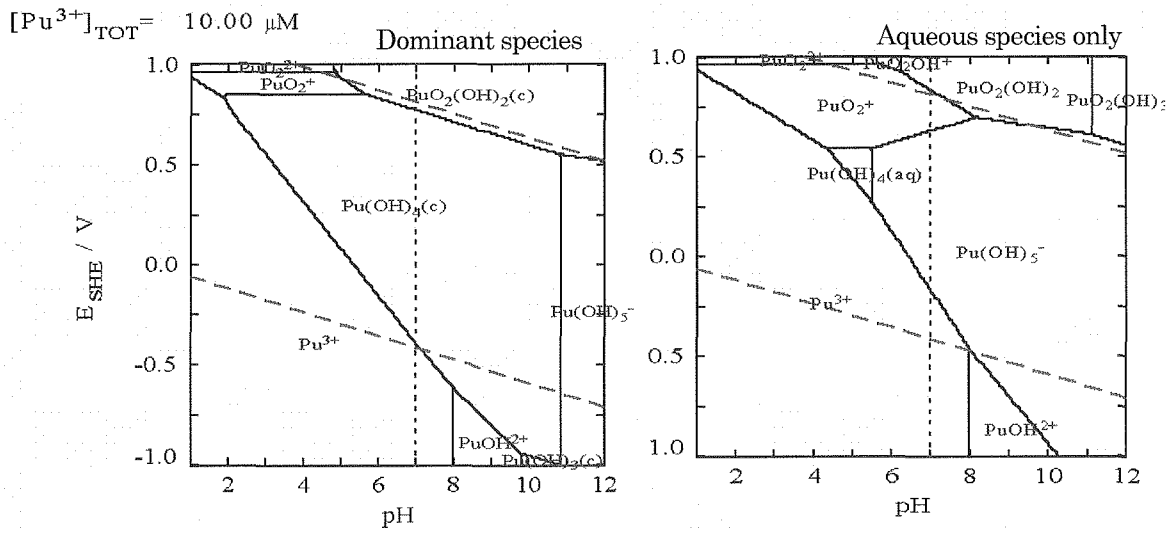


図 2.1.8　平衡計算より求めた溶解度制限固相と溶存支配種 Pu

第二次取りまとめ分冊 1 で述べられているフィールド調査の結果等から深度 200m 以下の地下水は 0 mV 以下の酸化還元電位を示し，いわゆる還元性雰囲気であることは確かである。U, Np, Pu に対して平衡計算を行うと図 2.1.6−2.1.8 に示したような結果が得られ，地層中ではこれらの軽アクチノイドの原子価は固相成分，溶存成分とも全てIV価となると考えられる。このため，第二次取りまとめの安全評価ではU, Np, Pu はIV価のみが評価対象とされ，An(IV)に関する各種の熱力学的データから，これらの核種の溶解度等が評価されている。さらなる評価の高度化のために現在も内外で An(IV) に関する熱力学的データの取得が進められているところである。この目的に対して，実験室系で地下の還元雰囲気を再現するために雰囲気制御グローブボックスを用い，アルゴンガスをパージし，水素や各種金属，亜二チオン酸等の非常に強い還元剤によりウラン，ネプツニウム，プルトニウムの原子価を IV 価に還元し実験が行なわれているが，この際多くの研究グループの実験において，実験中に他の原子価 U(VI), Np(V) 等が共存することが障害となっている。例えば，U(IV) の溶解度試験で，還元剤として亜二チオン酸を用い，水素ガスをフローさせ電位を -350mV 以下(at pH 8.5) に保っていたにもかかわらずU(VI)を排除しきれなかったという報告もある。一般的にこのV価，VI価の共存は実験の諸過程で混入した微量の酸素により，地下の還元環境が構成されなくなり起こると考えられている。しかし，これらの実験系が地下で還元雰囲気を構成すると考えられている化学種と比べ非常に強い還元剤を用い，バルクの電位測定値が常に強い還元状態，これも場合によっては実際の地下環境よりもかなり低い電位を示しているのにもかかわらず，U(VI)や Np(V)が共存してくるという実験結果は，実際の地下環境において IV 価以外の原子価が存在する可能性があることを示唆しているとも考えられる。軽アクチノイドの安全評価は IV 価の非常に小さな溶解度による遅延効果に頼るところが大きいため，原子価分布の正確な把握は極めて重要な課題であるといえる。

現時点では地下環境を再現するために，前述したような実際に地質中で還元雰囲気を構成する物質（鉄化学種，硫黄化学種等）を還元剤として用いた系における実験がほとんどなされていない。現在の安全評価のためのアクチノイド研究は，各原子価の酸塩基反応に関する熱力学データを正確に取得することが中心になっており，この目的に対しては，均一な原子価を調製することができる適切な酸化剤・還元剤を用いるべきである。しかしその一方で，地下環境においてアクチノイドがどのような酸化還元反応挙動を示すかを評価する必要もある。アクチノイドの酸化還元反応は，反応速度や反応容量が溶液中の電子授受の相手となる化学種の種類や錯生成配位子となる共存化学種の存在等に依存するため，結果的にバルクが同じ電位に設定される場合でも，還元剤の種類が異なるとアクチノイドの反応挙動も異なる可能性がある。ゆえに地下環境で起こると思われるアクチノイドの酸化還元反応を評価するためには，単純に Eh と pH を地下環境と同じ値に設定することだけではなく，これらの諸条件をも考慮する必要がある。

以上の考察より放射性廃棄物地層処分の安全評価に対して，以下のアクチノイドの酸化還元反応に関する課題が挙げられる。

1. 地下環境における還元雰囲気構成物質を正確に把握する
2. 地下環境条件を構成する物質で還元雰囲気を整えた系において，実験を行い，U, Np, Pu がどのような原子価分布をとるか，本当に均一な IV 価となるのか，また反応速度はどのようになるかを調査する必要がある。
3. 核種移行評価において，アクチノイドの酸化還元反応に対する速度論的なアプローチの必要性について検討する。

ただし，実験室で追跡できる反応速度は極めて限られており，物質移行に制限された場で極めて徐々に起こる反応について考察するには極めて不十分である。このため，出来る限り自然界において通常の元素について起こっている反応の例を観測して，実際に起きるであろう事柄を推測する必要がある（ナチュラルアナログ）。

このような目的に適した元素について考えてみると，鉄がその候補として考えられる。鉄は非常に古い時代から存在し，地球表面が酸化性雰囲気に変わると共に Fe(Ⅲ)に変化して様々な形態で分布するようになった元素であり，Fe(Ⅱ)，Fe(Ⅲ)の酸化還元形が存在すること，地殻中に比較的高濃度で分布すること，生成時の条件により様々な鉱物が様々な状態で存在することなどから，環境の酸化還元雰囲気に関する情報，元素の移行に関する情報，結晶の成長速度に関する情報などが得られる可能性がある。幸い環境中の鉄の鉱物形と分布についてはこれまで地質学の分野で非常に多くの詳しい研究がある。ここではこれらの情報が，地層処分の対象とする時間空間（溶解度制限固相が形成される時間：数年から数万年まで，核種が収着遅延を起こす場の時空間：数年から数千年，数 cm から数百 m，廃棄体から生態圏までの移行の時空間＝安全評価の評価期間：数 km，数万年）に対して有効な情報を与えうるかどうかを考えるための第１歩として，既存の情報を調査した。ただしこれに関する論文情報は膨大であり，これをすべて調査するのは不可能であるので，これについて述べているレビューとして

1) Cornell, R. M., Schwertmann, U.: "*The Iron Oxide*", VCH (1996).
2) Schwertmann, U., Taylor, R. M.: "*Iron Oxide*" Chapter 8 in "Minerals in Soil Environments, 2nd ed. (eds. Dixon, J. B. and Weed, S. B.)" Soil Science Society of America Book Series: 1, SSSA, Wisconsin, USA (1989).

の２つの鉄酸化物に関する総説が入手できたので，これらによって関連部分を調査した。2.2 および 2.3 はその結果である。

2.2 自然界における鉄の分布と挙動 － 岩石および鉱石[2)]

2.2.1 序論

地球の地殻，すなわち岩石圏は岩石（天然に生成する固結または未固結物質（土壌を除く）で，何らかの度合いで鉱物学的および化学的な恒常性を有するもの）より成っている。鉄（51 g/kg）はSi(269 g/kg)，Al(81 g/kg)についで３番目に存在度の高い陽イオン元素である。したがって，完全に鉄を含まない岩石はほとんど存在せず，岩石が風化すればいつでもどこでも鉄が地球上の循環に運び込まれる。

慣習により，岩石は(1)岩漿岩（火山岩／噴出岩と深成岩／貫入岩），(2)変成岩，(3)堆積岩に分類される。鉱石は資源として意味のあるものであり，この３つのグループのいずれにも見られる。大部分の岩石は鉄酸化物鉱物を異なった性状と存在度で含んでいる（表 2.2.1）。ここではその分布について述べる。

表 2.2.1　種々の鉄酸化物の地層中の主な分布

ゲーサイト（針鉄鉱，Goethite） α-FeOOH	すべての年代（古生代以前の岩石にはより少ない）の固結，未固結岩石に少量濃度で広汎に分布
鱗鉄鉱（Lepidocrocite） γ-FeOOH	ミネット，オーリス状岩石，ラテライト殻，トリメレルツェ，沼鉱床
赤金石（Akaganeite）β-FeOOH	未固結第四紀岩中のバンド
シュベルトマナイト（Schwertmannite） $Fe_{16}O_{16}(OH)_y(SO_4)_z \cdot nH_2O$	熱かん水
フェリハイドライト（Ferrihydrite） $Fe_5HO_8 \cdot 4H_2O$	酸性の黄鉄鉱風化水や鉱山水
赤鉄鉱（Hematite）α-Fe_2O_3	赤色層，縞状鉄鉱床，ラテライト殻，熱かん水
磁鉄鉱（Magnetite）Fe_3O_4/マグヘマイト（Maghemite）γ-Fe_2O_3	岩石中に広汎に分布

2.2.2 岩しょう岩，変成岩中の分布

岩漿岩中で重要な酸化鉄は，Fe-Ti酸化物すなわちチタノマグネタイト（titanomagnetite）およびイルメナイト（ilmenite，$FeTiO_3$）およびこれより重要性の低いヘマタイトのみである。チタノマグネタイトという用語は，真のチタノマグネタイト（$Fe_{3-x}Ti_xO_4$）およびそれらの酸化を受けた対応物（チタノマグヘマイト：titanomaghemite）に対して用いられる。その組成は大きく変化しｘは０（マグネタイト）から0.8までにわたる。この端成分のウルボスピネルFe_2TiO_4（x＝1)は稀である。Feは Tiの他にも多くの陽イオン特にMg，Mn，Ni，Zn，Al，Cr，Vによっても置換され得る。

岩漿岩中のチタノマグネタイトの存在度は約 10 から 70 g/kg で，玄武岩が最も高く，岩石の苦鉄質性が低くなるほど濃度も減少する。trachite，石英粗面岩（liparites），フォノライト（phonolites）はずっと濃度が低く流紋岩（rhyolites）はその中間である。組成とともに変化する傾向が貫入岩についても見られ，全体的な濃度は火山岩に比べて低いが，gabbros（斑レイ岩）では磁鉄鉱濃度は花崗岩より高い（表 2.2.2）。

表 2.2.2　岩漿岩中の磁鉄鉱およびイルメナイトの平均濃度（g/kg）

	花崗岩	中間の岩石	斑レイ岩－玄武岩	橄欖岩－斜長岩	アルカリ岩
磁鉄鉱	12－33	33－56	37－46	37; 12	33－74
イルメナイト	3－14	12－29	24－50	15; 9	12－62

イルメナイト（ilmenite）も，磁鉄鉱と同様の濃度範囲で，岩漿岩中に広汎に分布している。イルメナイト（$Fe_{2-x}Ti_xO_3$）はずっと理想的組成に近い（$0.75 < x < 0.95$）。固溶体はチタノヘマタイトまたはヘマトーイルメナイトと呼ばれる。酸性岩中ではこれらは塩基性岩中より酸化されている（Fe^{III}/Fe^{II}比がより高い）。

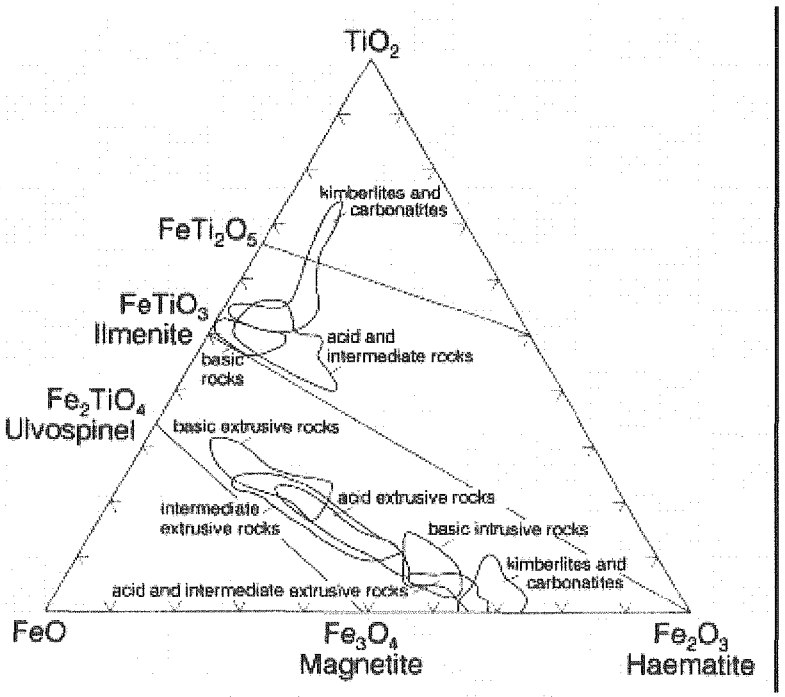


図 2.2.1　種々の岩漿岩中のチタノマグネタイトとイルメナイトの組成

図 2.2.1 は，種々の岩漿岩中のチタノマグネタイトの組成を，Fe^{II}，Fe^{III}，Ti^{IV}を軸として表したものである。これらの組成を決める因子は，融解物の組成，冷却速度および酸素フガシティーである。非常に還元性の強い溶岩中ではウルボスピネル($x = 0.8$)に近い相が見られるのに対して，ケイ酸性の火成岩融解物では酸素のフガシティーが高いため，Fe^{3+}が高く Ti の低い

Fe-Ti 酸化物が見られる。たとえば，ソレアイト性（アルカリに乏しい）玄武岩では Ti 含有量が安山岩やデイサイト溶岩やアルカリ性玄武岩中よりも高い。鉄橄欖石（$Fe^{II}_2SiO_4$）に伴う流紋岩中のチタノマグネタイトは黒雲母や角閃石に伴う岩石中よりもより多くの Ti を含有している。

チタノマグネタイトやイルメナイトは融点が高い（約 1300℃）ため，岩石結晶化の初期に結晶化する。その結晶サイズは冷却速度により，冷却が速いほど結晶は小さくなる。火山岩では 1 μm 以下のサイズが見られ，より冷却速度の遅い貫入岩では 100 μm までのサイズが見られる。しかし，低温では組成の開きがあるため，チタノマグネタイトは冷却とともに離溶して分解する。冷却速度が遅いほど離溶は著しくなる。そのような場合には，Ti に富む相と Ti に欠ける相またはその端成分（イルメナイトと赤鉄鉱）のゾーン状配置が形成され，複合粒が生成する。これと同時に酸化が起こる場合もある（酸化離溶）。たとえば 750℃ c で 10^{-6}－10^{-7} MPa の酸素フガシティーでは，最初に生成した酸化物よりも Ti がより高いイルメナイトゾーンと Fe^{III}がより高いチタノマグネタイトが生成することがある。Ti-ヘマタイトは離溶してルチル（TiO_2）と赤鉄鉱，時には擬板チタン石（pseudo-brookite）を生成することもある。しかし分別は鈍いため低温では混合相がそのまま残留する。これはイルメナイトよりチタノマグネタイト（離溶が非常に遅い 600℃以下でのみ分別が起こる）においてより著しい。チタノマグネタイトが低温で酸化されるとチタノマグヘマイト（titanomaghemites）が生成する。x ~ 0.6 のチタノマグヘマイトはチタノマグネタイトから生成する風化を受けた海洋性の柱状玄武岩の最も存在度の高い Fe-Ti 酸化物である。これらはまた陸上の風化でも生成し土壌中に分布する。

要約すれば，岩漿岩中の Fe-Ti 酸化物の組成は，マグマの酸素フガシティー，温度，ケイ素活量に関する重要な情報を与えてくれる。これはまたこれらの相の磁気的性質にも強く影響する。

磁鉄鉱，イルメナイト，赤鉄鉱はまた変成岩中の主要な Fe-(Ti)酸化物である。磁鉄鉱を含む岩石としては，メタ橄欖岩（metaperidotite），metabasite，アイアンフォーメーション（低品位堆積性鉄鉱体，iron-formation），片麻岩（gneiss）およびある種のメタ泥質岩（metapelite）がある。純粋な磁鉄鉱は通常変成岩中に分布しているが，高度に変成を受けた変成岩ではイルメナイトを随伴しチタンを含んでいる。イルメナイトはメタ泥質岩やメタ塩基性岩中に分布しメタ橄欖岩にも見られるが，変成を受けた炭酸塩岩にはほとんど見られない。赤鉄鉱は変成を受けたアイアンフォーメーション，変成の程度の低い metabasite，酸化性雰囲気下での粘土岩，変成を受けた含マンガン岩に分布し，Ti を随伴する（titanohematite）。岩漿岩同様 Fe-Ti 酸化物は地質温度計として利用できる可能性がある。

チタノマグネタイトおよびその他の磁性を持つ鉱物は岩石磁気の起源であり，古地磁気学の基礎であるため，莫大な量の文献がある。古地磁気により，大陸や海洋プレートの過去の位置や動きに関する定量的データが得られ，プレートテクトニクスに貢献している。これはまた岩

石の層序を知る情報にもなる。このように地磁気はテクトニクスおよび地質年代学の重要な武器となっている。また考古学（archeomagnetism）や環境研究にも有用となっている。

2.2.3 堆積物および堆積岩中の分布

表 2.2.3　堆積物中の鉄の分布と化学形

起源	含有量（g/kg）		鉱物
砕屑（detrital）酸化物	砂岩	～10	酸化物
新生(neoformed)　酸化物	粘土岩	～50	炭酸塩
	炭酸塩岩	～4	粘土ケイ酸塩
	深海底堆積物（炭酸塩）	～9	硫化物
	深海底堆積物（粘土岩）	～65	堆積岩鉱物中の不純物

堆積物中の鉄酸化物は砕屑鉱物および新生酸化物を含む（**表 2.2.3**）。砕屑鉱物中には，その高い安定性のために地表環境における風化を生き延びたものが含まれる。チタノマグネタイトとイルメナイトが最も重要なものである。これらの鉱物は，高い濃度（採鉱に見合うほどの）で海岸砂などの砂状堆積物中に分布することがある。岩漿岩，変成岩同様チタノマグネタイトがこれらの堆積物の大部分の磁性の起源となっており古地磁気研究に重要となっている。

堆積物および堆積岩中の新生 Fe^{III} 酸化物の形と生成については，濃度が低く結晶性が低いため同定や記述が難しくよく知られていないのが現状である。鉄を含有する堆積物としてより興味深いのは，赤色層（red bed）と堆積性鉄鉱床である。

赤色層

赤色層とは，目にとまる赤色をした大陸性の堆積岩である。これらは世界中に広く分布しており，主として後期古生代（570 から 254 Ma 前），初期中生代（243～65 Ma 前），後期新生代（65 Ma ～現在）に属している。マンセル色相によれば赤色層の色は通常 5 YR～2.5 YR（赤褐色～赤色）であるが，10 RP～7.5 RP(赤紫)になることもある。より詳細な CIE $L^*a^*b^*$ システムを用いた測定では，赤色層の色は合成赤鉄鉱の範囲に属している（**図 2.2.2** 参照）。このことより赤色層の色は赤鉄鉱により決まっていると考えられ，実際に赤色層では赤鉄鉱が確認されることが多い。様々な観測例より，赤鉄鉱の粒径により色が変わっていると考えられ，粒径が増加するほど色は赤色から紫色になると思われる。より大きな粒径の赤鉄鉱の生成は続成作用により一次鉱物が溶解したのち自生（authigenic）自形（idiomorphic）の結晶が Ostwald 熟成により成長すると考えられている。しかし自然界で得られた赤色層については赤鉄鉱結晶と紫色の度合いのよい相関が得られないことから，平面状の赤鉄鉱結晶の方向を揃えた集合体は大きな結晶と同様の光学的性質を持つのではないかと考えられている。このことはこの集合

体を粉砕すると色が紫から赤色や黄赤色に変化することによっても支持されている。

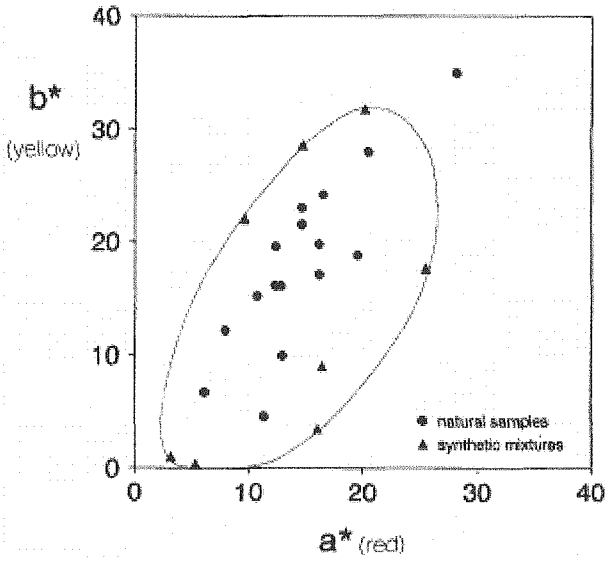


図 2.2.2　赤色層の CIE $L^*a^*b^*$ 色空間での位置
（合成赤鉄鉱 0.03 g/g－カオリナイト 0.97 g/g 混合物中との比較）

赤色相中の赤鉄鉱が砕屑生成物であるか自生生成物であるかは，その全体としての起源の理解に重要な意味を持つ。砕屑赤鉄鉱は侵食された赤色土壌（古土壌）に由来するすなわち大陸での風化に起源を持っていると考えられている。これらの大陸性の堆積物の生成および赤鉄鉱の新生に有利な条件は，湿期と乾期のサイクルを持ち炭素の少ない半乾燥の気候であり，フェリハイドライトを通じて赤鉄鉱の生成が起こりやすい条件であると考えられる。この機構では，続成作用の間に鉄の再流動化が必要である。赤色層が灰色あるいは緑色の層の間に挟まれていることは，そのような Fe^{III}からの Fe の流動化が有機物の還元的溶解により起こり赤鉄鉱の自生の生成のための鉄が供給されたことを示している。残りの灰緑色は基盤すなわち粘土鉱物によるものである。おそらく有機物起源と思われる脱色された還元チャネルが前期ペルム紀の赤色層で観察されている。

堆積性鉄鉱床

採鉱に値する堆積性の鉄鉱床は世界の鉄鉱生産の約 80 %, 世界の資源の約 90 %を占めている。採鉱に値するためには鉱石は少なくとも 0.6 g/g の鉄を望むらくは酸化物の形で含有している必要がある。赤鉄鉱と磁鉄鉱はゲーサイトに比べて単位重量あたりの鉄含有量が高いのでより好ましい。

表 2.2.4　堆積性鉄鉱床の型

発生	鉄の起源	組織	主鉱物	地質環境	型名
熱水－堆積	深成	縞状（banded）	Mt, Hm	緑色岩帯 縞状鉄鉱床	Algona
熱水－堆積	深成	層状（layered） 砕屑性(clastic)	Hm	優地向斜 顕世代層	Lahn-Dill
海洋－堆積	深成	縞状（banded）	Mt, Hm	弱地向斜 前期原生代層	Superior
海洋－堆積	浅成	魚卵状（oolithic） 岩屑性（detrital）	Hm, Gt, Ch	浅い棚状地層	Clinton Lothringen (Minette) Salzgitter Peine-Ilsede
海洋－堆積	浅成	砂（sands）	Mt, Im	沿岸帯	
陸上－堆積	浅成	塊状（massive） 土（earthy）	Gt	淡水湖沼	Amberg
交代作用	中間	塊状（massive）	Sd, Hm, Mt	種々	Marquesado
陸上－土壌	浅成	塊状（massive） 多孔質（vesicular） 豆状（pisolithic）	Gt, Hm, Fh	土壌	Laterite Bog iron Ferricrete

Mt: magnetite, Hm: hematite, Gt:goethite, Ch: chamosite,
Sd: siderite, Im: ilmenite, Fh:ferrihydrite

2 種類の堆積鉱床は，慣習的にアイアンフォーメーション（iron formation）およびアイアンストーン（iron stone，オーリス状，ミネット型）と呼ばれて区別されている（表 2.2.4）。縞状アイアンフォーメーション（banded iron formation, BIF）またはイタビライトと呼ばれるものは，先カンブリア紀の薄い層状の化学的堆積物で mm の厚さの赤鉄鉱または磁鉄鉱の層が石英またはチャートにより挟まれている。典型的にはそれらは世界中の先カンブリア紀マッシーフのほぼすべてにおいて形成された。堆積の後それらはさまざまな程度の変成作用を受け，赤鉄鉱の結晶性増大（鏡赤鉄鉱）やチャートからの石英の形成が起こっている。赤鉄鉱－石英ウーイド，シデライト，グリーナライト（greenalite），黄鉄鉱も共存する。

BIF の形成では，有機物を伴う Si と Fe の深成溶液が大陸棚，礁湖，湖に供給され，そこでの酸化還元電位，水相の組成に従って，シデライト，赤鉄鉱，磁鉄鉱，Fe^{II}ケイ酸塩（たとえばグリーナライト $Fe_3Si_2O_5(OH)_4$ やミネソタアイト $(Fe, Mg)_3Si_4O_{10}(OH)_2$），黄鉄鉱，チャートが季節沈殿により生成されると考えられている。図 2.2.3 ではこれらの相が海岸からの距離の増加と深さの増加にしたがって観察されている。これらの情報は，pH，Eh と溶存種の活量を考慮することによりある程度それぞれの安定度から導くことが出来る。チャートやフェリハイドライトなどの初生の固体は準安定相である。Si 濃度によりフェリハイドライトはケイ酸塩

を吸着し，変成と転移により赤鉄鉱に変化する際にSiが放出され異なる相すなわちチャートや最終的には石英として沈殿する。BIF中の磁鉄鉱は磁性バクテリアにおけるのと同様のプロセスで形成される生物起源のものであると考えられている。堆積後のプロセスによりチャートの溶脱に伴って磁鉄鉱から同心円状の赤鉄鉱が形成されると考えられる。

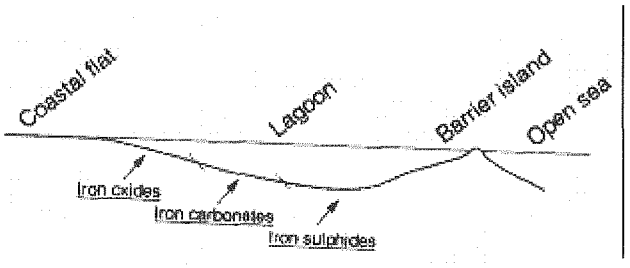


図 2.2.3　潟環境における鉄酸化物の鉄鉱物としての析出の位置

経済的に重要なもうひとつの鉄鉱石はいわゆるスカルンとして分布する。スカルン（skarn）は始生代に炭酸塩岩の溶液による交代作用による置換で生成する脈鉱床の古いスウェーデン語である。鉄の含有量が高い場合には溶液は赤鉄鉱や磁鉄鉱を主たる鉄酸化物とする鉄鉱石の沈殿を生成する。

熱水－堆積起源で年代が古生代に属する赤鉄鉱は西および中央ヨーロッパの Lahn-Dill 型のものである。海底の火山活動に伴われる熱水溶液は鉄を $FeCl_3$ として海洋環境に運び，そこで加水分解の後，海盆の辺縁に赤鉄鉱がフェリハイドライトを経て形成され，中央には還元の後シデライトが形成された。これらは堆積鉱床とは異なり，Al, Ti 微量元素の含有量が低く，火山起源であることの証拠となる。

第2のグループの鉄鉱であるアイアンストーンはもっぱら浅成起源の鉄に富む硬い堆積岩である。これらは顕世代（カンブリア以後：古生代，中生代，新生代）に属し，オルドビス紀（510～439 Ma 前）と第三紀（65 ～23.3 Ma 前）の時期にわたっている。現在のところこれらの経済的価値は低い。

これらのグループに典型的なものは，海洋，河川または陸上の Lothringen(Minette)および Clinton 型の塁層である。鉱石は通常 < 0.5 g/g の鉄，> 10 g/kg の P，> 20 g/kg の Al を含有しており主たる鉱物はゲーサイト，赤鉄鉱，シデライト，ベルチェリン（berthierine），シャモサイト（chamosite）などで，磁鉄鉱は稀である。それらに含有されている鉄の起源はたとえばラテライト性フェリクリート（lateritic ferricrete）のような Fe^{III} 酸化物を多く含む陸生の風化生成物である。これらが海に溶け出して最終的に複雑な還元/再酸化プロセスを経て鉄鉱物に変化したと考えられる。アイアンストーン中のゲーサイトは主として酸化雰囲気の沿岸域で形成されたと思われる。鉱床もまたシデライトや他の Fe^{II} 鉱物の酸化による二次的なものである可能性もある。

アイアンストーンは往々にして魚卵状の（oolithic）組織すなわちウーイド（ooid）と呼ばれる完全に球状の組織から成っている。鉄酸化物ウーイドはサイズがmmからcmで硬いもので，周期的な鉄酸化物の沈殿を示唆する同心円状の鉄の蓄積が見られる。図 2.2.4 に示すように電子マイクロプローブによる化学分布解析では，鉄酸化物中にTi, P, Vの濃集がありSiやAlの濃度は非常に低いことが示されている。完全な球形の魚卵状の形成については様々な議論がなされてきた。原理的には陸上および海洋のいずれでも生成が可能で，球状のためには特に機械的な動きすなわち砕屑が必ずしも必要とはされないように思われる。この代わりに，鉄の供給源として移動しやすいFe^{2+}が必要である。砕屑殻の周囲で起こるFe^{III}酸化物としてのFeの蓄積が，酸化還元電位の局所的な勾配によりもたらされる。酸化還元電位は，Fe^{II}を供給しているマトリックス中では低く，より大きな空隙中ではより大気が侵入しやすいために局所的に高くなっており，ここでFe^{III}酸化物が生成する。このような同心円状の沈殿は，地上（土壌中），淡水湖床，海洋のいずれの条件でも起こりうる。言い換えれば，たとえば地上のより高地のラテライトの砕屑物からの砕屑生成Fe^{III}酸化物が，より低地の湿地（氾濫原，沿岸域）に機械的に運ばれそこで鉄が還元により移動しやすくなりウーイドとして再沈殿することとなるのである。

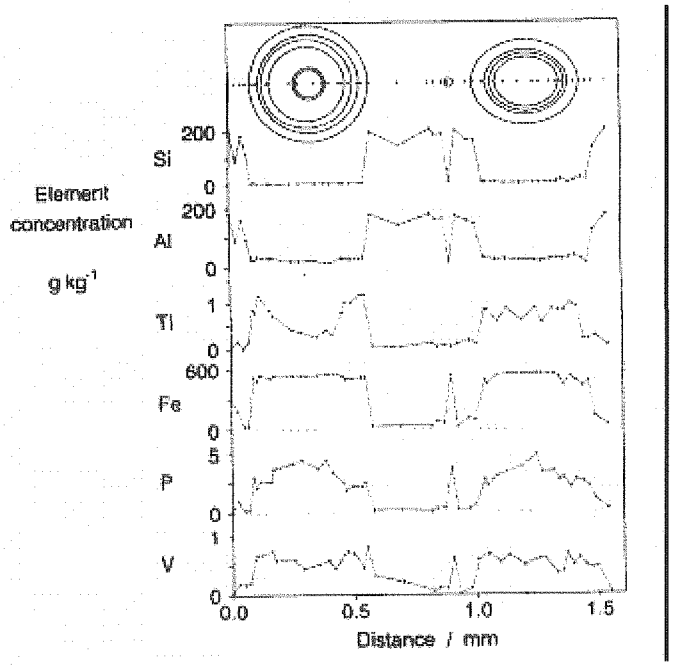


図 2.2.4　２つの連結した鉄酸化物のウーイド中の元素の分布

ウーイド中の他の元素は，成長の際の環境を反映すると考えられる。海洋性のウーイドはCa, P（リン灰石apatiteの形で），Mn，Co，Niなどを陸上で形成されるものより多く含むと考えられる。V^{III}やCr^{III}のような還元形の微量元素が鉄酸化物の構造中に含まれる場合は，環境が無酸素状態であったことを反映している。ゲーサイト中のAlの置換の程度は，酸化鉄がもとも

と形成された陸上での置換の程度に比べて，海水のより高いpHとより低いAl濃度により海水中で形成されたものの方が低くなる。このようにウーイドは，堆積物や土壌，湖沼で見られるノジュール（nodule），コンクリーション（concretion），ピソイド（pisoid），ジオード（geode）などの広汎に見られる球状の酸化鉄濃集と特に異なるわけではない。したがって，鉄鉱石の形成の際の古環境は一般的な地表環境と類似していたと考えられる。

その他の堆積物

深海の堆積物は磁鉄鉱を含んでいることがあり，これは砕屑性起源に限らず古い時代の磁性バクテリアからの寄与によるものもあると考えられる。

未固結の粗粒堆積物（砂，礫）はしばしば数十cmの厚さの黄色または赤色のバンドを含んでいる。これらのバンドにおけるFe^{III}酸化物の含有量は堆積物の残りの部分に比べて相対的に高く，酸化物は鉱物粒を膠結する。鉄のバンド自身はMnをほとんど含まないが，これらのバンドはMn酸化物（brinessite, vernadite）に富む黒色部を随伴することが多い。このようなバンドは第三紀（65～1.64 Ma前）および更新世（1.64～0.01 Ma前）の未固結または弱固結の堆積物に広く見られ，それよりも古い砂岩にも見られる。前者は以前の地下水位を示すものとして説明されている。これらのバンドは流れによる侵食により地下水位がさらに低下した際に化石化された。このようなバンドは，今日の地下水土壌（グライ土gley：地表下粘土層）が毎年の地下水の変動と鉄酸化物の生成を記録するのと同じである。典型的には，バンドは集合組織の不連続性（水平ではなくても）に従って形成される。すなわち，集合組織の不連続は酸化還元電位の短距離での変化をもたらし，密度の高い細かい堆積物のところでは低く，粗い堆積物のところでは高い酸化還元電位となっていると考えられる。このためFe^{2+}はEhが変化するところで酸化されFe^{III}酸化物が不動化されるのであろう（図2.2.5）。

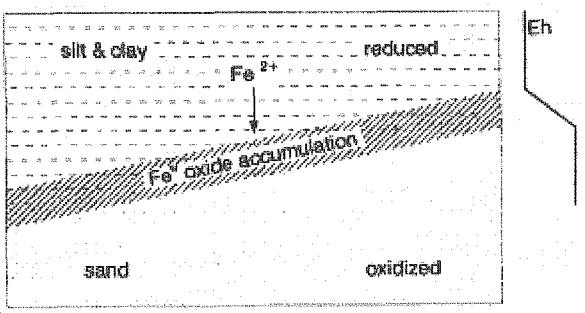


図2.2.5　未固結の砕屑堆積物中の組織（Eh）の不連続部分における鉄酸化物の模式図

鉄酸化物に富むバンド内の鉄酸化物鉱物に関する研究によれば，温帯ではゲーサイトが主たるFe^{III}酸化物で，鱗鉄鉱およびフェロキシハイト（feroxyhyte）も随伴する。第三紀砂岩中のオーカー（ocher，黄土中の鉄酸化物）のバンド中のゲーサイトは置換したAlをAl/(Fe+Al)

比で 0.2 まで含んでいることが観察されている。後期更新世の 20,000 年前の砂岩では，角閃石（amphibole）と輝石（pyroxene）がゲーサイトと鱗鉄鉱の生成の起源となっている。無酸素条件下で，地下水は二つの鉄ケイ酸塩に関して不飽和となっており，新たに形成される酸化物が鉱物粒を球顆状に覆う形で析出していることが観測されている。

フェリクリート（ferricrete）

岩石風化帯では鉄酸化物の濃集が広く見られる。こうした濃集は，相対的（relative）すなわち他の岩石成分の除去によるものおよび絶対的（absolute）すなわち溶存した鉄の流入によるものがある。前者の型はその場で起こるもので，風化において沈殿した鉄酸化物の高い安定度（低い溶解度）によって起こる。第 2 の型では，鉄はより濃集され，主に低地で起こる。典型的な例は，熱帯，亜熱帯で広く見られる強く風化された地形を覆う鉄酸化物殻（いわゆるフェリクリート）である。それらは主に第 3 紀から更新世にかけての地質年代に徐々に形成されたもので，土壌（古土壌）とみなすことが出来る。それ以後この地域が河川の浸食を受けると，かつて周囲より低かったフェリクリートに覆われた部分が露出して高い台地（メサ mesa）となって残る。このような地形学的変化は地形の逆転（relief inversion）と呼ばれている。そっらを構成する鉄酸化物鉱物は，赤鉄鉱およびゲーサイトでマグヘマイトもいくらか随伴する。生成時の条件を反映して，結晶サイズや Al 置換の程度は広い範囲にわたる。温帯における類似のより年代の若い塁層には，氷食谷の跡に広く見られるいわゆる沼鉄鉱がある。より低温の気候と若い年代を反映して，沼鉄鉱には赤鉄鉱は含まれず，ゲーサイトとフェリハイドライトが主成分である。フェリクリートは，広い地域に薄い殻として分布し P の含有量が高いため，鉄鉱石としての経済的価値は無い。

2.2.4 最近の地質環境中の分布

地球上では，種々の環境で，より新しい時代に形成された Fe^{III}酸化物が広く観察される。そのような環境としては，活火山，土壌，河川，湖沼，海洋，熱水温泉，冷泉，生物などがある。これらの環境は全て今日のアナログと考えられる過去の地質年代における Fe^{III}酸化物の生成経路に関する有用な情報を与えてくれる。最近では，火星表面における鉄酸化物の形成すなわち風化の可能性についても議論がなされている。

地表

現在でも，地表の風化により，親物質からの砕屑生成物からなる赤色層および鉄鉱石が形成されている。例えば赤鉄鉱は，温暖気候において岩石の風化により生成され続けている。種々の熱帯地方から得られた赤い砂丘の放射能および考古学的年代決定によれば，赤鉄鉱を含まない砂の赤化（赤色化作用 rubefaction）年代は $<20{,}000$ 年とされた。しかし，赤い砂丘の赤鉄鉱

発色物は，砂および塵の移動によってももたらされた可能性もある。

泉および地下水

Fe^{2+}を含む泉水や地下水が大気を含む地表またはその近くに現れるときには，鉄酸化物の生成の一般的初期生成相であるフェリハイドライトの生成が典型的に見られる。このような条件の下では，Fe^{2+}は非生物的に非常に速く酸化されるため，より結晶性の高い酸化物の形成は抑制される。これらの水中に含まれることの多い溶解シリカは，フェリハイドライトの表面に吸着され，その相転移を遅延する。高濃度の鉄を含む地下水による，高度の低い地域を横切る天然または人工の排水路ではフェリハイドライトを主成分とするオーカー状鉄酸化物が生成する。鉄酸化物による土管の閉塞は人工の排水系の機能不全をもたらす。最近の鉄鉱に比べ，年代のより古い堆積性の鉄鉱にはフェリハイドライトは見られないことから，フェリハイドライトは時間と共に地下でより結晶性の高い形に転換すると考えられる。

火山活動に伴う初生の温泉水中では，化学的環境が大きく異なっている（噴気孔，噴気プール，泉)。安山岩巨礫上の黄色および褐色の表面析出物は，非常に酸性で塩化物，硫酸塩濃度が高い鉄を含む溶液から形成されたジャロサイト（jarosite 鉄明礬石)，赤金石および一部ゲーサイトから成っている。

大陸棚

幾つかの研究例がある。Northern New South Wales の外側大陸棚の鉄分に富む堆積物（70－250 g/kg）は，初生鉱物，自生のベルチェリン$(Fe,Al)_3(Si,Al)_2O_5(OH)_4$を含み，ゲーサイトに変化している。ニュージーランドの Southwestern Pacific Basin NE 中の遠洋性粘土堆積物中のフェリハイドライトは堆積速度の低下すなわち埋没速度の減少と共に増大している。Long Island Sound および Mississippi Delta の無酸素の海洋堆積物で砕屑起源と生物起源の両方の磁鉄鉱が見出され，硫化物濃度と磁鉄鉱の表面積に比例した速度で黄鉄鉱に変化している。

河川・湖沼

最近の鉄酸化物の生成は淡水特に海岸付近でも起こっている。これらのいわゆる湖沼性鉄鉱はスカンジナヴィアなどの更新世氷河地域に広く見られる。ここでは鉄は，周囲を取り囲む氷堆石（モレーンヒル）地形のポドゾル化された土壌中で，有機物錯体として可動化され湖に運ばれていると考えられている。炭素を含む底土中の無酸素雰囲気下で鉄は還元され Eh の勾配に従って上方に拡散し，酸素を含む水柱に至り Fe^{III}酸化物として沈殿する。酸化物は 400－450 g/kg の鉄を含むノジュールまたは殻として存在している。^{14}C 法によるノジュールの成長速度は $3-4 \times 10^{-3}$ mm/yr と求められた。鉱石はゲータイトおよびフェリハイドライトを様々な割合で含んでおり，これはおそらく鉄酸化物の成長速度に関連していると思われる。この地域の

寒冷気候と高い水の活量のため，赤鉄鉱の生成は抑制される。ゲータイト中の Al による置換は，砂質の底の堆積物中では程度が低く，粘土堆積物中では中程度で，後者では Al がより多く供給されるためではないかと考えられている。

湖は通常その水柱中に懸濁した鉄酸化物を含んでいる。酸素が供給され pH > 5 のときは，鉄は Fe^{III}酸化物または鉄－フミン錯体として存在する。富栄養化された湖における鉄に富む懸濁物の観測によれば，バクテリア細胞に似た，幅約 0.1 μm 長さ 0.2～0.5 μm の楕円形で，鉄を 300 ～ 400 g/kg，フミン酸炭素を 40～70 g/kg 含む粒子が，1 L あたり 10^{11} ～ 10^{12} 個（3 mg Fe /L に相当する）の濃度で見出された。これらの粒子は，おそらく吸着したフミン酸，ケイ酸塩，リン酸塩のため，pH 4 ～ 10 で負に帯電している。これらの粒子中の鉄酸化物の性質は不明であるが，粒子の形状からおそらくフェリハイドライトではないかと考えられる。

河川水が鉄を含む場合には，底の巨礫がその巨礫の如何に関わらず鉄酸化物で被覆されることが多い。鉄酸化物の析出量はおよそ数 mg/cm² で，年成長速度は 100 μg/ cm² 程度である。その他の河川における Fe^{III}酸化物形成は，黄鉄鉱採掘跡や廃坑道に浸透して黄鉄鉱を酸化する天然水や雨水によるものである。これらの水は H_2SO_4 および Fe^{2+}を多量に含む。酸化性雰囲気では，Fe^{2+}は非常に低い pH (2 ～ 3) でさえもバクテリア (特に Thiobacillus ferrooxidans) により酸化され，pH と SO_4^{2-} 濃度に依存して一連の鉄鉱物が生成する。生成鉱物としては，種々の Fe^{III}硫酸塩，ジャロサイト（鉄明礬石），シュベルトマナイト，ゲーサイト，フェリハイドライトが見出されている。これらの鉱物は，表面に露出した黄鉄鉱を含む頁岩から流れ出す天然の小川でも見出されている。非酸性の淡水が流れに入るほど，ジャロサイトとシュベルトマナイトの生成はゲーサイトとフェリハイドライトの生成により置き換えられる。

熱水海洋環境

火道からの熱水海洋性鉄酸化物の生成は，Lahn-Dill 型の鉄鉱を形成するプロセスであると考えられているが，世界中の様々な場所で観測されている。これらの条件下で非常に広い範囲の鉱物が形成されるが，Fe^{III}酸化物が支配的であることが多い。紅海の海淵すなわちアトランティス海淵，テティス海淵，南西太平洋バヌアツの海底火山，ギリシャのサントリニ周辺の温暖湧泉などの沈殿が調べられている。

ゲーサイト，赤金石，ビュスタイトが同定されているが，Fe^{III}を含む溶液が弱アルカリ性の熱海水環境に導入されて起きる酸化物の形成速度が速いため，酸化物は非晶質で規則性が低い。大西洋II海淵の沈殿では，自形の結晶より成る非常に秩序性の高い赤鉄鉱と共に，極度に秩序性の低い赤鉄鉱がカラムの上方に随伴している。テティス海淵では，赤金石，鱗鉄鉱と磁鉄鉱が確認されている。異なる鉄酸化物が層状に分布していることから，塩水の化学組成，温度，酸化還元電位，生成速度などの異なる条件下で，堆積物カラム中の生成が起こっていると考えられる。鉄分に富むスメクタイトは，秩序性の悪い FeIII酸化物と溶解シリカの反応により生成している。

2.3 自然界における鉄の分布と挙動 －土壌[2) 3)]

2.3.1 序論[2)]

土壌マントルいわゆる土壌圏（pedosphere）は大陸の大部分を覆っており，大気圏，生物圏，水圏と岩石圏の長期にわたる相互作用の結果生まれたものである。岩石は通常地球の表面とは異なる条件で生成し，表面に露出すると不安定で劣化すなわち風化する。自発的に起こる風化プロセスではエンタルピーは減少し，一連の新たな安定鉱物が形成される。これらの変化を支配するパラメータは，大気圏の構成成分（大気圧，降水量，酸素，温度，霜，雨水中の溶存成分）および生物圏の構成成分（有機無機化合物，植物の根，土壌の動植物相）である。

ほとんど全ての岩石は少なくともある程度の鉄を含んでいる。鉄が主要成分となる重要鉱物を**表 2.3.1**, **表 2.3.2** に示す。磁鉄鉱を除きこれら全ての鉱物において鉄は主として 2 価の状態である。風化の際に，鉄はこれらの鉱物から放出され二次の鉄鉱物が形成される。最も重要な鉱石は含鉄粘土ケイ酸塩と鉄酸化物であるが，還元条件では鉄の炭酸塩，硫化物も形成される。

土壌中の鉄酸化物は，鉱物種，濃度，結晶特性について大きく異なっている。それらは土壌の環境条件に依存し，空間時間によって変化する。このような変化は，土壌が，固体と，気体（土壌大気）および水相（土壌溶液）を満たした空隙（約 0.65 m^3/m^3）とを不均質に配したものであるためである。

土壌の温度は主として地形的位置によって決まり，ツンドラ地帯や極圏の永久凍土から乾燥熱帯の表面土壌の約 60℃にわたる。温度は，土壌の深さと共に減少し季節と共に変動する。水の熱容量は空気よりも高いため乾燥土壌は湿った土壌よりも暖かい。土壌大気の組成は大気のものと同様のことも多いが，かなり異なる場合もある。土壌中では生物相により O_2 が消費され CO_2 が生産され，これらのガスの拡散は抑制されることがあるので，O_2 の圧力（大気では 21 kPa）はゼロまで，CO_2 の圧力（大気では 30 Pa）は約 2 kPa まで変化することがある。

土壌溶液は，土壌中では粒子表面に結合し，表面張力により空孔に捉えられているため重力に逆らって土壌中に保たれる。このため，水の蒸気圧（水の活量）は自由水（活量 = 1）に比べて低く，鉄酸化物の脱水に影響を及ぼす可能性がある。また土壌中の水相は種々の化合物を種々の濃度で溶存させている希薄電解質溶液であるので，これも鉄酸化物の生成に影響を与える可能性がある。土壌の pH は弱アルカリ性から強酸性にわたり，酸化還元電位 Eh は強還元性から酸化性にわたる。土壌溶液中のケイ酸塩，リン酸塩，有機物は結晶表面と相互作用するため，結晶成長を妨げる可能性がある。鉄酸化物は他の鉱物を核生成の鋳型としてその表面に沈殿することも多い。

表 2.3.1　種々の土壌中の鉄酸化物の分布

鉱物	主な土壌
ゲーサイト	全ての地域の好気性および嫌気性の土壌
鱗鉄鉱	寒冷地温暖地における嫌気性，粘土質，非石灰性土壌
フェリハイドライト	温帯および寒冷帯の地下水，停滞水（グライと擬似グライ）およびポドゾル，水田土壌
赤鉄鉱	亜熱帯，地中海，湿潤，亜湿潤熱帯の好気性土壌（ラテライト質，プリンサイト質土壌，赤色地中海土壌，オキシゾル，アルティゾル）通常温暖地域，寒冷地域の土壌には存在しない。
マグヘマイト	熱帯亜熱帯の好気性土壌

表 2.3.2　一次岩石中の主な含鉄鉱物

名称	組成式	鉄含有量　／ (mg/g)	
		FeO	Fe_2O_3
黒雲母（biotite）	$K(Fe^{II},Mg)_3Si_3AlO_{10}(OH)_2$	30－280	1－210
輝石（puroxene）（オージャイト augite）	$(Ca,Mg,Fe^{II},Al,Ti)_2(Si,Al)_2O_6$	40－210	4－76
角閃石（amphibole）（ホルンブレンド hornblende）	$Ca_2(Mg,Fe,Al)_5(Si,Al)_8O_{22}(OH)_2$	＜90	2－230
橄欖石（olivine）	$(Mg,Fe^{II})_2SiO_4$	80－120	—
イルメナイト（ilmenite）	$FeTiO_3$	473	—
磁鉄鉱，チタノマグネタイト	Fe_3O_4, $Fe_{3-x}Ti_xO_4$	310	690
黄鉄鉱（pyrite）	FeS_2	817	

鉄酸化物生成に影響を与える物理的，化学的パラメータは時間と空間により，すなわち水/空気含有量と共に変化する。空隙のサイズや充填の程度の違いにより，空隙中には異なる微視的環境が出来る。たとえば，玄武岩巨礫の（乾燥した）表面では赤鉄鉱の被覆が見られるのに，その近傍の（より湿った）亀裂ではゲーサイトが見られる。他の場合には，根の表面に近いところでゲーサイトが主たる酸化物として見られるのに，そこから数 mm 離れた所では鱗鉄鉱が支配的となる。ただし多くの場合，鉄酸化物の生成する明確な条件を決めることは難しい。

結論として，土壌圏は鉱物の形成や変換が活発に起こる環境であり，空間と時間に従って生成パラメータは大きく変化する。ある環境は閉じているわけではなく開放系として，隣接する生態系の区画と相互作用するため，平衡は通常達成されない。このため，どのような鉄酸化物

（およびその他の鉱物）が生成するかを熱力学的情報から予測するには限界がある。

2.3.2 土壌中の鉄酸化物の形成[2)]

元来，鉄は一次（初生）のケイ酸塩や硫化物鉱物が風化により岩石圏から土壌を含む地表環境に放出される。O_2 と H_2O の存在下で地表環境の通常の pH（>2）において放出された Fe^{II} は Fe^{III} へと酸化され直ちに加水分解して Fe^{III} の酸化物やオキシ水酸化物になる。Fe^{II} のケイ酸塩についてはこれらの反応は，$Fe^{II}-O-Si$ の結合の解裂と $Fe^{III}OH$ および SiOH グループの生成を伴う。例えば，ゲーサイトは，次のような，橄欖石(ファヤライト fayalite)の酸化と加水分解により生成する。

$$Fe_2SiO_4 + (1/2)\,O_2 + 3\,H_2O \rightarrow 2\,FeOOH + Si(OH)_4$$

Fayalite　　goethite

同様に，硫化物（黄鉄鉱）の分解は次のように書ける。

$$4\,FeS_2 + 15\,O_2 + 10\,H_2O \rightarrow 4\,FeOOH + 8\,H_2SO_4$$

pyrite　　goethite

これらの反応で酸素は電子受容体として働く。Fe^{II} から Fe^{III} への酸化には微生物が関与する場合もあればそうでない場合もある。溶液の pH が高くなるほど。溶解している Fe^{2+} イオンの酸化は速くなり，非生物的な反応が主体となる。一方，非常に酸性の条件（pH < 3）では Fe^{III} 鉱物の生成は微生物により媒介される必要がある。

種々の岩石由来の Fe^{II} 鉱物の酸化と加水分解による風化に対する安定性は大きく異なる。これは主として，結晶構造に依存し，粒子サイズにも依存する。Fe^{II} ケイ酸塩は一般に硫化物（黄鉄鉱，白鉄鉱（marcasite））や炭酸塩（シデライト，アンケライト（ankerite））よりも安定である。岩石を形成している大きなグループであるケイ酸塩のうち，Fe^{II} を含むものは最も安定性が低いものである。これは土壌で広く見られる水性の酸化性環境では Fe^{II} は容易に酸化されるため構造を弱めるからである。Fe^{II} ケイ酸塩のうち，ネオケイ酸塩（オリビン olivine）は鎖状ケイ酸塩（バイオパイリボール pyribole）やフィロケイ酸塩（黒雲母）などより抵抗性が低い。一次の鉄酸化物である磁鉄鉱，チタノマグネタイト，イルメナイトは通常かなり安定である。

上記の鉄鉱物からの鉄酸化物の生成機構は，鉱物間の空間分布の型から導かれている。研究例としては，オリビン，黒雲母（biotite），ホルンブレンド，緑泥石（chlorite），イルメナイト，柘榴石（garnet），磁鉄鉱などに関するものがある。元の鉱物から鉄酸化物への考えられる経路は次のようなものである。

(1) 磁鉄鉱からマグヘマイトへの転換のようなトポケミカル（結晶中の分子配列により生成物が支配される，固相での反応）な転換

(2) オリビンからゲーサイトへの転換のような，酸化の後配列をほとんどそのままにして鉄

を残しケイ素が除かれる変化

(3) 黒雲母上の赤金石の成長やゲーサイト[001]//ケイ酸塩[010]の緑泥石のフレークのようなトポタクチックな方向性を持つ鉄酸化物の親結晶表面での結晶化

(4) 黄鉄鉱やシデライトからのゲーサイトや磁鉄鉱やイルメナイトからの赤鉄鉱のような仮像（仮晶：外形を保ったまま成分の一部あるいは全部が置換して新しい鉱物になったもの）形成

(5) 親鉱物の表面への方向性の無い被覆形成。(6) Fe^{2+}イオンの放出の場所では酸化が起こらず，ある程度の移行の後に起こるような場合の，元の鉱物の構造とは無関係で環境条件に依存しての酸化物形成。

一旦形成されると，熱力学的な安定性が高いためFe^{III}酸化物は長期間すなわち酸化性雰囲気が維持される限り存在し続ける。土壌マントルや地形中でのそれらの移動は，他の土壌粒子の移動例えば粘土の移動や表面浸食などと共に機械的になされる。その他の可能性として，有機化合物との錯生成や還元により再溶解が起こることもある。還元は，無酸素の環境中で微生物の活動によってのみ起こりうる。

$$4\,FeOOH + CH_2O + 8\,H^+ \rightarrow 4\,Fe^{2+} + CO_2 + 7\,H_2O$$

この反応には代謝されうるバイオマスが必要である。このプロセスでは通常，微生物の酵素による，分解しつつあるバイオマス（上の式ではCH_2Oと表現）からFe^{III}酸化物中のFe^{III}への電子の移動が起こる。式に示されるようにこの反応ではプロトンが消費されるので，より低いpHでより起こりやすい。このような反応は通常，水が飽和した土壌や湖沼，河川，沼中の無酸素領域で起こる。

このようにして形成されるFe^{2+}は土壌マントル中を拡散により移動したり，土壌水と共に移動（移流により）したりして，空気を含む環境に至り，再び酸化され多くの場合Fe^{III}酸化物としての再沈殿が起こる。このようなプロセスは，土壌マントルに，可動化と不動化のプロセスを反映した特有の色のパターンを生み出す（redoximorphosis）。Fe^{2+}の移動の距離は，土壌断面での10^{-3} ～ 1 mから地形空間での10^4 mにわたっている。

2.3.3 熱力学的安定性と速度[3)]

どの鉱物が優勢となるかは通常熱力学データから予想できる。鉄酸化物については，最も重要な条件は，鉄（Fe^{2+}, Fe^{3+}）濃度，pH，Ehおよび水の活量である。鉄酸化物に対して他の化合物が競争する場合には，炭酸塩，硫化物，ケイ酸塩，リン酸塩などの溶質の濃度も考慮する必要がある。

熱力学データによれば好気性土壌ではゲーサイトが最も安定な相である。鱗鉄鉱，フェリハイドライト，マグヘマイトはより不安定でゲーサイトに対して準安定である。

ゲーサイトと赤鉄鉱の相対的安定性を熱力学データにより論じることが出来る。

$$\alpha\text{-}Fe_2O_3 + H_2O = 2\ \alpha\text{-}FeOOH$$

この反応の$\Delta G_r°$については様々なデータがあり値は+1.7から−0.4 kJ / molまでである。負の値は,水の活量が1の時,ゲーサイトのほうが赤鉄鉱よりも安定であることを意味している。水の活量が1より小さくなると赤鉄鉱がより安定となる。ちょうど反応がバランスするときの水の活量は$\Delta G_r°$の値により異なるが−0.31 kJ / molという値を使えば,水の活量として0.88という値が得られる。これは間隙孔径約10から15 nmに相当する。

標準の熱力学データはより大きい結晶についてのみ正しく,このような状況は土壌中ではめったに実現されない。したがって粒子のサイズを考慮する必要があり,2つの型の表面エンタルピーの粒子サイズの関数としてギブズ自由エネルギーを計算した例では,同じ粒子サイズについて比べると,>76 nmの径ではゲーサイトの方が安定であるとの結論が得られている。大部分の土壌ではゲーサイトは76 nmよりかなり小さい粒子径であるので,理論的には赤鉄鉱に変化すべきであるが,実際にはそのような例は観測されていない。

赤鉄鉱とゲーサイトの安定性に影響するもう一つの因子は共存イオンの含有量で,特にFe3+を置換するAlの濃度が問題となる。それぞれの端成分(ゲーサイトとダイアスポアおよび赤鉄鉱とコランダム)およびその固溶体に関する熱力学データはない。得られる熱力学データと理想的固溶体の仮定を用いた計算ではAlによる置換は平衡での水の活量を下げ,赤鉄鉱に比べゲーサイトの方を安定化する。したがってAlの置換が進むと,水の活量が低くてもゲーサイトがより安定となる。

合成からの結果とフィールドの結果は必ずしもこれらの予測と一致しない。不一致は次のようなものである。

(1) 4から25 ℃で水の活量が約1すなわち液体の水の存在下で赤鉄鉱が容易に生成する。

(2) 生成するゲーサイトと赤鉄鉱の比は水の活量のみでなくpHにも非常に強く依存する。

(3) 共存するゲーサイトと赤鉄鉱に対するAlの置換は,熱力学データの予測と一致しない。

これらの不一致の原因は,熱力学データの不備や遅い速度による平衡への未達と考えられる。このため,準安定な相であるフェリハイドライトや鱗鉄鉱が土壌の時間尺度にわたって土壌中に存在することになる。これらの準安定相の溶解度積が土壌溶液中の鉄の活量を支配することも多い。

2.3.4 鉄酸化物の含有量と土壌の発達[2)]

土壌中の鉄の含有量は約1から数百 g/kgまでにわたっている。これは親となる岩石の型と鉄含有量および土壌の熟成度に依存する。土壌の発達に伴い元の鉄含有鉱物の分解が進み,それらの鉄の大部分は土壌性鉄酸化物として沈殿する。したがって非常に風化の進んだ土壌では,イルメナイトのような最も安定な岩石起源の鉱物のみが残り,残りは土壌性の鉄酸化物に変化してしまう。最終的には,最初に生成した鉄を含む粘土鉱物もまた分解して鉄を放出し鉄酸化

物を形成する。

この状況は，酸化物中の鉄（一般には強い還元剤のジチオン酸ナトリウムにより抽出される（Fe_d））の全鉄（Fe_t）に対する比を求めることにより分析的に定量化することが出来る。年代と共に Fe_d/Fe_t 比は 1 に近づき，土壌の熟成度の尺度となる。たとえば以前に北半球で氷河で覆われていた領域の若い土壌（約 $1\sim2\times10^3$ 年）では，Fe_d/Fe_t 比は約 0.2 ～ 0.3 であり，ずっと長い期間（10^7 ～ 10^8 年）すなわち先のゴンドワナ古陸上で形成された非常に熟成した湿潤熱帯の深部土壌では 0.9 までの Fe_d/Fe_t 比が見出されている。

2.3.5 土壌中の鉄酸化物の分布と形成[3)]

どのような鉱物形の鉄酸化物が形成されるかは，その土壌環境から考えることが出来る。フィールドの観測を確かめるために環境条件を実験的に模擬した研究が数多くなされている。土壌中の鉄酸化物については，実験室で地表に近い条件を模擬して様々な相の鉄酸化物を容易に合成できるためこのようなアプローチが大変有効である。

実験室からの情報を加え合わせた鉄酸化物の生成経路を図 2.3.1 に要約する。この図では鉄の起源を簡略化して Fe^{2+} と Fe^{3+} にしている。これらは一次の鉄ケイ酸塩，Fe^{2+} の炭酸塩（シデライト），Fe^{2+} と Fe^{3+} の水酸化物化合物や Fe^{3+} の酸化物などである。

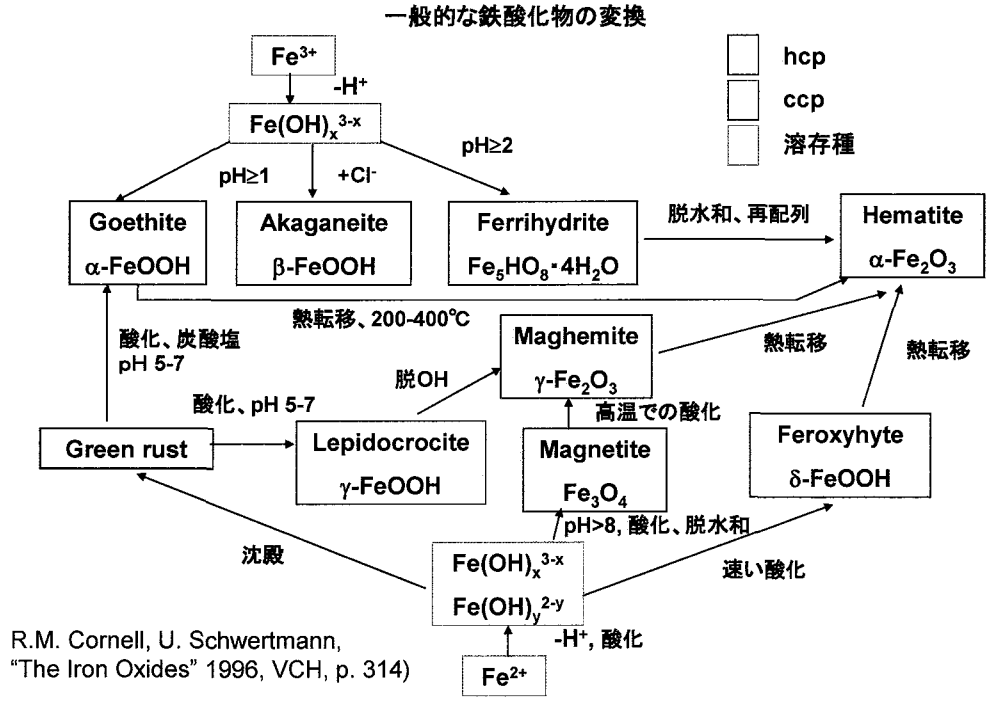


図 2.3.1　一般的な鉄の変換経路

ゲーサイトと赤鉄鉱の共存

ゲーサイトは土壌および鉱物が風化を受ける環境中に最も広汎に分布する鉄酸化物で，寒冷帯および温帯の土壌中の唯一の土壌性の鉄酸化物である。しかし，より温暖な地域では赤鉄鉱が随伴することが多い。この随伴は，熱帯および亜熱帯の地域の土壌の大部分に共通して見られるもので，温帯のより温暖な地域でもある程度見受けられる。これに対して，これらの領域の赤色をした赤鉄鉱土壌がゲーサイトを随伴していない例はほとんどない。赤鉄鉱を含む土壌と含まない土壌の地域的な分布は，ゲーサイトと赤鉄鉱の比に気候が強く影響していることを示している。この影響は気候が土壌自身の環境条件に影響することによっている。これらの変化は，おなじ気候帯の緯度の違いや地勢的な位置，土壌断面の位置等によっても現れる。したがってゲーサイトと赤鉄鉱の比は気候帯による場合もあればそうでない場合もある。

ゲーサイトと赤鉄鉱の比に影響する土壌環境因子としては，起源となる鉄の初期の原子価（2価か3価か），溶液中の濃度および pH，Eh，温度，土壌中の水の活量，土壌中の有機物，土壌溶液中の Al の活量，イオン雰囲気などがある。

低い温度，高い水の活量，高い有機物濃度などはゲーサイトの生成を有利とするので，おそらくこれが寒冷帯や温帯土壌中に赤鉄鉱が見られない理由と考えられる。これらの地域で土壌中に赤鉄鉱が見られる場合は，一般に砕屑性（赤い砂岩など）であり溶解－再沈殿により徐々に失われる。赤鉄鉱が失われ，代わりにゲーサイト，鱗鉄鉱，フェリハイドライトが生成する。

赤鉄鉱 / ゲーサイトの比は，通常土壌温度の上昇と共に増加する。これは，南ブラジルの横断面（年平均温度 14 から 20 ℃），南ドイツ（8.7 から 13.6 ℃），タスマニア（9 から 12 ℃）南アフリカ（8 から 22 ℃）などで確認されている。

土壌の水分活量も赤鉄鉱 / ゲーサイトの比に影響し，中央ブラジルのオキシゾル（熱帯の風化した水を通しやすい土壌）の地形に伴う比の変化はこれによっていると考えられる。ここでは，乾燥した高地の土壌は赤く赤鉄鉱が主で，谷地では黄色の赤鉄鉱を含まない土壌が見られる。このような例はその他にも世界の各地で観測されており，実験室でも再現されている。フェリハイドライトは 45 ℃で相対湿度が 100 から 74 %に減少するのに伴い，180 日かけて徐々に赤鉄鉱に変化する。同時にゲーサイトと赤鉄鉱の和は減少し，結晶化特にゲーサイトの結晶化が水の活量の減少により妨げられていることを示している。さらにこの実験では，温度の上昇がゲーサイトに比べて赤鉄鉱がより安定となることが示されている。

湿度の高い低温の土壌はまた有機炭素を多く含むことが多い。したがって有機物がゲーサイトや赤鉄鉱の生成に直接影響することも考えられる。赤色の土壌が下となり黄色の土壌が上に重なっている例が広く見られることは，有機物の存在下でゲーサイトの生成が有利となることを示唆している。赤色の下層土中の根溝が黄色の周縁により囲まれているのが多く見られるのは同様の影響であろう。後の例は多分，O_2 の供給が制限されたところで根の微生物による分解が起こり赤鉄鉱が選択的に溶かされていることによるのであろう。これが，赤鉄鉱が通常 Al

の置換の程度がゲーサイトに比べて低いことにより起こっていることが合成酸化物の溶解実験で示されている。

pH 4 から 6 の範囲で，土壌の pH とゲーサイト/赤鉄鉱の比の間には負の相関があることが南ブラジルの土壌において見出されている。実験室で室温のもとで，pH を変えて，フェリハイドライトをゲーサイトと赤鉄鉱に変換させた実験ではフィールドと一致する結果が得られた。pH 4 付近でゲーサイトの生成が極大となり，pH 7 から 8 で赤鉄鉱の生成が極大（ゲーサイトは極小）となった。

Al は Fe^{3+}の酸化物の生成の際に構造中の鉄を置換するが，Al のゲーサイト/赤鉄鉱の比に対する直接の影響は実験室でのみ確認され，土壌中では観測されていない。ゲーサイトをフェリハイドライトから生成させる場合には，小さい割合の Al は完全にゲーサイトの生成を抑制し赤鉄鉱の生成に有利に働く。しかし，Fe^{2+}の溶液の酸化によりゲーサイトを得る場合には，Al はゲーサイト生成に有利に働く。土壌中には Al が置換したゲーサイトが広く見られるのでこの結果は重要である。つまり易動化した Fe^{2+}の酸化のプロセスで Al が関与したと考えられるからである。

鉄に富む塩基性火成岩に赤鉄鉱を含む土壌が随伴し，鉄含有量の小さい頁岩には赤鉄鉱が含まれない土壌が随伴することは，鉄の放出速度が高い（玄武岩 > 頁岩）ほど赤鉄鉱が生成しやすくなることを示唆している。また黄色と赤色のまだら模様が付随しているところでは，赤色には鉄がより多く含まれている。

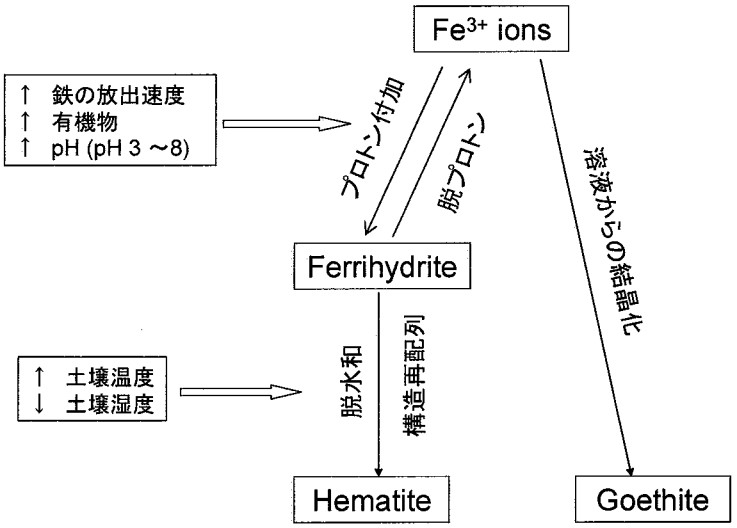


図 2.3.2　ゲーサイトと赤鉄鉱の生成条件

図 2.3.2 に示されているようにゲーサイトの生成は溶液内を通じてのもので，単量体の Fe^{3+}の一価のイオン，$Fe(OH)^{+}$と $Fe(OH)_4^{-}$ を通じての核生成と結晶成長であると考えられている。

これらの単量体は適した条件の下で任意の鉄の供給源（フェリハイドライトを含む）から得られる。これに対して赤鉄鉱は，フェリハイドライトまたはその前駆体から凝集，脱水和と小さなフェリハイドライト粒子の固体内の構造再配列を通じて形成される。このプロセスは，フェリハイドライトが，秩序性が非常に低く水を含んでいることを別として，既に赤鉄鉱型の構造を有していることからも大いにありそうである。このように今日では，赤鉄鉱が形成されるにはフェリハイドライトが前駆体として必要であると考えられている。

したがって，フェリハイドライトの生成とその凝集，脱水和，構造再配列に有利な条件ではゲーサイトに比べ赤鉄鉱がより生成しやすくなる。土壌の温度の上昇と水の活量の減少はフェリハイドライトの脱水和と再配列に影響して赤鉄鉱の生成をもたらす。pH が 4 から 8 に上昇すると，$Fe(OH)^{2+}$イオンの活量は減少しゲーサイトの生成速度が減少し赤鉄鉱の生成が有利になる。鉄－有機物錯体が比較的安定（寒冷で湿潤気候のように）な場合は，Fe^{3+}が徐々に放出されフェリハイドライトの溶解度積を超える可能性が低くなり赤鉄鉱の生成が抑制される。しかし，放出される可溶性の$Fe(OH)^{2+}$イオンからの核生成が可能なためゲーサイトの生成は促進される。これらの化学種や関連化学種はまた安定な Al－Fe^{3+} 水酸化物錯体の生成のため溶液中により長く留まることが出来，ゲーサイト生成に有利に働く。これに反して，供給源からの鉄の放出速度が増加するか，高温で乾燥条件で鉄－有機物錯体の分解が加速されれば，フェリハイドライトの溶解度積を超える可能性が大きくなる。フェリハイドライトが一旦生成すると，これはゲーサイトの他に赤鉄鉱の供給源ともなる。したがって一般に赤鉄鉱とゲーサイトは２つの競争的なプロセスを通じて形成される。

このような機構は，フィールドの観測の大部分をよく説明しているが，完全に確認されているわけではない。特に，熱帯亜熱帯の土壌では，前駆体として赤鉄鉱に伴うべきフェリハイドライトが観測されていない。これは，一次鉱物からの鉄の放出速度に支配されるフェリハイドライトの生成速度がその赤鉄鉱への変換速度に比べてずっと遅いためではないかと考えられる。溶液中に適度に供給される Fe^{2+}の迅速な酸化によりフェリハイドライトが生成するようなときに限りフェリハイドライトが蓄積する。このような場合には，ケイ酸塩，リン酸塩，有機物が吸着しこれを安定化することができる。温暖または寒冷な気候の下で，このフェリハイドライトは溶液を通じて徐々にゲーサイトに変化し，赤鉄鉱は生成しない。Fe^{2+}の急速な酸化により形成されるフェリハイドライトは，Fe^{3+}の急速な加水分解により合成されるフェリハイドライトの色よりも，天然のフェリハイドライトの色に似た色を呈する。

ゲーサイトと鱗鉄鉱の共存

ゲーサイトと鱗鉄鉱は温帯から熱帯の還元形態の土壌において広く共存している。この二つの相の混合物は土壌に近い条件下で容易に合成できる。ゲーサイトはFe^{2+}およびFe^{3+}のいずれの陽イオンからも生成されうるが，鱗鉄鉱については２価の鉄が必要と思われる（**図 2.3.3**）。し

たがって，鱗鉄鉱は，その橙色により容易に確認できるが，土壌が還元環境に支配されていることを示している。可動性のFe^{2+}はより大気にさらされている場所に移動して，そこで酸化されて鱗鉄鉱となる。たとえば，ウェールズの古生代頁岩中の還元性土壌中では，上方のより還元性の強い下層土では鱗鉄鉱が支配的で，還元性の弱い下部の下層土ではゲーサイトが支配的であることが見出されている。2価の鉄はまた既に沈殿しているFe^{3+}の酸化物を部分的に鱗鉄鉱に転換する速度を速めることができる。

種々の土壌中の鱗鉄鉱：ゲーサイトの比を決めている因子については完全にはわかっていない。ある報告では，鉄酸化物によってセメント化された根の細管において，根に近いほうではゲーサイトの濃度が高く，これから遠くなると鱗鉄鉱の濃度が高くなっていることが観察されている。この分布は，根の近くではCO_2の分圧がより高いためと考えられ，実験によりFe^{2+}が酸化されるときにはCO_2の分圧がより高いほど鱗鉄鉱よりもゲーサイトが生成しやすくなることが確認されている。合成において，炭酸塩緑錆や$FeCl_2$溶液が固体の$CaCO_3$の存在下で酸化されるときには鱗鉄鉱が支配的に生成する。どちらの場合にも，CO_3^{2-}の溶液中の濃度は低すぎて鱗鉄鉱の生成を抑制することはできない。このことは，温帯の石灰性の土壌で鱗鉄鉱がほとんど全く見られないことにはあてはまっていないようである。

ゲータイトの生成はまた，酸化速度の増大や系におけるAlによっても促進される。後者は，強い酸性の土壌では鱗鉄鉱はほとんど見られないことと一致している。さらにClは鱗鉄鉱の生成に有利に働くがこのことは土壌にはあまり関係が無い。

実験室における合成では，Fe^{2+}からの鱗鉄鉱やゲーサイトの生成は，緑錆（green rust）として知られる青緑色の(Fe^{2+}, Fe^{3+})水酸化物の生成を経て起こることがしばしば見受けられる。緑錆の組成，特に層間にある陰イオン（Cl, SO_4, CO_3），AlによるFeの置換，酸化の速度と環境などが鱗鉄鉱：ゲーサイトの比を決める主な因子であると考えられる。

フェリハイドライトと，ゲーサイトおよび鱗鉄鉱との共存

土壌中のフェリハイドライトと関連する環境が，地衣類による風化殻，湧出Fe^{2+}を含む水の酸化によるオーカー状沈殿，沼や湖鉄鉱，アンデプト（火山灰または降灰の含有量の高い表土に生成する土壌），ポドゾルB層位（滲出した淡色の表層と，粘土およびアルミニウムと鉄の酸化物を含む下部層を含む酸性の帯状土壌の種類。赤色から黄色味を帯びた赤，明るい黄色味を帯びた褐色までさまざまな色がある），プラシック層位（黒色ないし黒赤色の土壌層準，通常は鉄で膠結されており透水性はあまり高くない），などで観測されている。これらの生成は，地球上に広汎に分布しており，フェリハイドライトが一般的な天然の鉄酸化物であることを示している。

その分布は，常に，環境にFe^{2+}が含まれており，これらが高濃度の有機物またはケイ酸塩の存在下で急速に酸化されていることを示している。これらの化合物とその他のなんらかの化合

物がFeOOH相の生成を阻害してフェリハイドライトが生成しているものと思われる。実験室での検討でもこのことが指示されており，ゲータイトと鱗鉄鉱が通常なら最終生成物になる条件下で，ケイ酸塩，リン酸塩または有機物を加えると，フェリハイドライトの生成が増加する。例えば，10から20 mg/L の Fe^{2+} の人工地下水中での急速な酸化では，Siの濃度が <5 mg/L のときは鱗鉄鉱が生成するのに対して，より高い濃度のSiの共存下ではフェリハイドライトが生成する。このようなSi濃度は天然水中で通常見られるものである。生成時には，2 から5 nm のフェリハイドライト粒子は特異的にケイ酸塩を吸着しFe-O-Si結合を形成する。

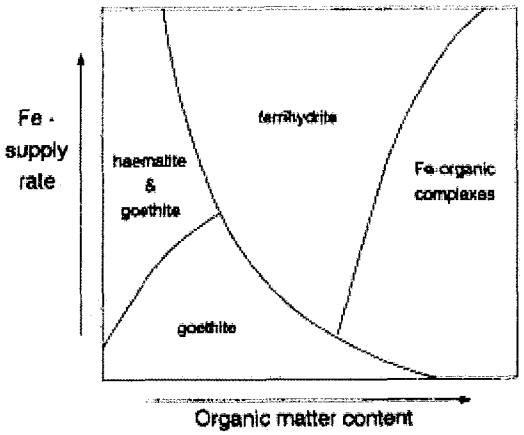


図2.3.3 土壌中の種々の鉄鉱物生成に対する有機物含有量および鉄の供給速度の影響の模式図

Siと有機物の吸着は，フェリハイドライトの，より安定な鉄酸化物への最終的な変換を遅延し阻害する。ゲーサイトの場合のように，変換が溶液を通じてなされる場合には，これらの陰イオンの表面吸着はフェリハイドライト粒子の表面を遮断することにより必要な溶解を遅らせるか，ゲーサイトの核生成を妨げる。この結果，プラシック層位では試料中のC濃度が増加するほどゲーサイトに対するフェリハイドライトの濃度が増加し，土壌有機物がフェリハイドライトの安定化に強く影響していることを示している。これとは対照的に，熱帯の土壌はSiや有機物などの妨害が小さいためフェリハイドライトを含んでいない。有機物はフェリハイドライトの微粒子を結び付けて動きにくい網状組織にするため，有機物はまたフェリハイドライトからの赤鉄鉱の凝集や合着を妨げる。しかし，土壌生成の時間尺度の上では，初期の阻害があっても，フェリハイドライトはより安定な鉄酸化物に変換する。すなわちフェリハイドライトは一般的に若い鉄酸化物であると考えられる。

フェリハイドライトのゲータイトとの共存は一般に，環境条件が結晶成長にあまり有利でないことを示しており，随伴するFeOOH相も結晶性がよくない。ゲーサイトまたは鱗鉄鉱とフェリハイドライトの共存は，どちらの生成経路も実験室でたびたび見られることから，同時生成または逐次生成のいずれかの結果と考えることが出来る。

マグヘマイトと磁鉄鉱

a. マグヘマイト　Fe_2O_3の立方晶のフェリ磁性型であるマグヘマイトは，多くの異なる型の土壌中，特に熱帯，亜熱帯に一般的に見られる。温帯でも一部の地域に見られている。多くの場合，マグヘマイトは土壌断面の表面側に濃集しているが，深い側に分布していることもある。土壌マグヘマイトは一般に全体の鉄のうちの少量（平均 100 g/kg）が2価で，完全にFe_2O_3に酸化されているわけではないことを示している。

土壌中のマグヘマイトの生成経路はいくつか考えられる。(1) 磁鉄鉱の酸化，(2) 鱗鉄鉱の脱水和，(3) 有機物の存在下でその他の土壌起源の鉄酸化物の 300 から 425 ℃での加熱による変換。

岩石起源の磁鉄鉱の酸化（トポケミカルの単相での反応）は，二つの相の間の変換がある時やマグヘマイトが親となる相からある元素を受け継ぐとき（例えばチタノマグネタイトからのTi）などのときには特にわかりやすい。このような生成経路は，親となる岩石中の磁鉄鉱含有量が低いときや含まれないとき，あるいは磁鉄鉱粒子が粗く風化における酸化が一般に赤鉄鉱を生成するときに対しては説明できない。

鱗鉄鉱の脱水和はマグヘマイトの生成源としては考えにくい。一般に鱗鉄鉱は地表下の斑紋中に分布し地表の火災には影響を受けるとは考えられない。有機物存在下でのその他の鉄酸化物の熱による転換はより可能性が高く，マグヘマイトとゲーサイトや赤鉄鉱が共存する例が多く見られる。温帯では炭がマグヘマイト土壌中に共存する例が多く見られ，これらの場合には火災がマグヘマイトの存在の原因となったと思われる。草原火災は一般に変換に必要な高温には至らないが，森林や泥炭の火災やある種の植物からの生成物（ゴムや石油）では可能性がある。このようにして生成されるマグヘマイトは，土壌ゲーサイトを種々の有機物や元素状イオウや亜鉛と共に熱したときに得られるものと類似しており，幅が広く弱い構造線が示される。Al で置換されたゲーサイトの有機物存在下での Al 置換マグヘマイトへの変換も実験室で確かめられているので，このプロセスにより熱帯や亜熱帯の土壌に見られる低間隔の Al 置換マグヘマイトが生成したと考えられる。ただし Al 置換マグヘマイトは Al 置換磁鉄鉱の直接の酸化によっても生成する。

低温でのマグヘマイトや磁鉄鉱の合成はこれまでのところ実験室でのみなされている。これらの鉱物はいずれも，Fe^{2+}溶液が中性から弱アルカリ性で中程度のFe^{2+}濃度で酸化された時に生成する。中間相として緑錆も生成しうる。同じ条件で，種々のFe^{3+}酸化物が共存すると，溶液中のFe^{2+}と反応して微粒子の磁鉄鉱が生成し，酸化されてマグヘマイトになる。このような経路が土壌中に観測されないのは土壌溶液中でFe^{2+}濃度がそれほど高くないためであろう。Al はFe^{2+}系でのマグヘマイト生成を阻害するので，この機構は，Al 置換のマグヘマイトについてもありそうもない。

b 磁鉄鉱　土壌中の磁鉄鉱は通常，親鉱物に由来しており土壌起源というよりは岩石起源であ

ると考えられている。これは，海洋の磁性バクテリアのように地表条件でも生成しうるが，土壌中の新生鉱物としては確認されていない。熱力学的には，これは強還元性で中程度のアルカリ条件で生成するべきである。このようにして生成する磁鉄鉱は非常に小さな微粒子で容易に酸化されてマグヘマイトになると予測されるので，そのような土壌に由来する磁鉄鉱を土壌中に確認するのは困難である。

2.4 まとめ

以上 2.2 および 2.3 節において自然界の鉄の分布についてどのようなことが知られているかを調べた結果を示した。ここに述べたように，鉄はFe(II)またはFe(III)の鉱物として非常に様々なものが様々な物理形状で地表および地下に分布している。このような状態を与える条件も非常に複雑で現在得られたままの情報では，これらから，酸化還元環境に関する現在及び過去の状態を推定したり，鉄鉱物の変遷の状況から諸反応の速度を抽出したりすることは困難であり，本調査ではよい結論は得られなかった。また依拠した文献も鉄の酸化物について述べたものであるので，より深部で問題となるFe(II)鉱物については情報が不十分である。

しかし，Fe(II)またはFe(III)の多様な鉱物形，多様な物理形状での地表および地下の分布があり，これらの観測事実が，地層処分の安全評価（特にシナリオの考察）において有用となるであろう情報を内包しているのは確かであるので，地層処分の安全評価におけるナチュラルアナログとしての視点を保ちながら情報をさらに詳しく調べ整理することは大いに価値がある。特に酸化還元状態が変化する環境での，２種類以上の鉱物の共存や，鉱物の分布の不均質性（析出のバンド構造など）などにおける情報はさらに詳しく調べる価値があると思われる。

2.5 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.

2) Cornell, R. M., Schwertmann, U. (1996) : "*The Iron Oxide*", VCH.

3) Schwertmann, U., Taylor, R. M. (1989) : "*Iron Oxide*" Chapter 8 in "Minerals in Soil Environments, 2nd ed. (eds. Dixon, J. B. and Weed, S. B.)" Soil Science Society of America Book Series: 1, SSSA, Wisconsin, USA.

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

3.1 はじめに

本研究員会では，超深地層研究所で実施すべき研究のみならず，地層処分の実施の段階で必要と考えられる深部地質環境の調査・解析技術に関する研究開発課題を提示し，かつ具体的に調査研究および手法等の開発を行うことを目的としている。本研究では，これまでの当委員会での議論，検討を踏まえ，以下に示した研究課題 1ー3 を設置し調査研究を実施してきている。本報告書は，それらの調査研究成果について，平成 16 年度に実施した内容についてまとめたものである。

研究課題の設定

研究課題1: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

研究課題2:割れ目シーリングのナチュラルアナログに関する研究

研究課題3:ニアフィールドコンセプトの再構築に関する検討(立ち上げ)

3.2 研究課題１～３に関する調査・解析技術の開発の必要性

我が国の地下深部地質環境では，地下坑道や処分場建設の段階で，断層や割れ目帯といった地層処分場の設計や安全性に影響を及ぼすと考えられる地質構造に遭遇することは避けられない。これらに関しては，これまでも様々な地質学的および地球化学的な研究成果が報告されているものの，地層処分におけるサイト選定や安全評価などに直接的に活用できる地質学的な情報が必ずしも得られているわけではない。とくに将来的な処分場の設計や建設・操業などの段階に対して求められる情報は，断層周辺の断裂構造，断層運動に伴う新たな割れ目形成の有無や，新たな割れ目が形成された場合の範囲と量，そしてそれらの割れ目の長期的な挙動（成長やシーリング）などに関するものである。また新たな割れ目形成における地下施設や設計等への影響がどの程度あると考えられるのか，などといった疑問に対する解答を準備しておくことも処分技術の実用化の観点から必要と考えられる。

そのためには実際の断層周辺での緻密な地質調査を実施し，岩盤中に認められる割れ目の形態と分布などから空間的な割れ目発生に関する情報を得ることが有効と考えられる。本研究ではこのような背景のもと，現地における割れ目形態の詳細調査を実施し，併せて断層活動に伴う新たな割れ目の発生をどのように調査するのか，また新たに発生した割れ目をどのように定義するのか，といったフィールドでの調査方法についての検討を進めている。

また今年度からは，２つ目の研究課題として新たに発生した割れ目が天然の環境下でシールドされる可能性があるのか。またシールドされる場合，どのようにシールドされるのかについて，その可能性と現象に関して，ナチュラルアナログ的観点からの調査研究を開始した。

そして３つ目の研究課題として，これらの新たに発生した割れ目が設計やニアフィールド(NF)環境にどういった影響を及ぼすのか，また物質移動現象との複合現象として，NF においてどのようなシナリオを想定することが現実的なのかの検討も併せて開始した。とく

に NF における操業期間や処分場閉鎖，坑道埋設後での工学的，地球化学的ならびに物質移動に関する現象を再検討し，現実的な解析シナリオを準備することは，今後の地層処分研究において不可欠の課題であると言える。

本年度は，これらの 3 つの研究課題について，これまでの研究成果の取りまとめを行いつつ，実施した調査研究の結果を以下に述べる。

3.3 研究課題 1 ：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

3.3.1 研究目的

研究課題 1 における調査研究の目的は以下の通りである。

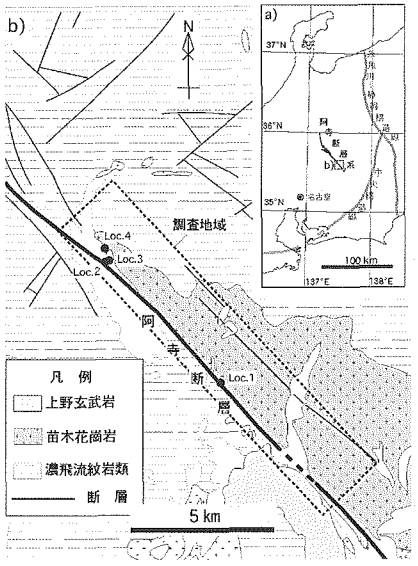
- **断層運動による新たに発生したと思われる割れ目を抽出し，その特徴的形態を明らかにし，新たな割れ目形成の可能性とその形態的特徴を把握すること**
- **断層運動による割れ目発生の量，密度等の定量的変化の傾向性を把握すること**
- **上記のための，簡便な現地調査手法を構築すること**

またこれらの調査結果を用いて，最終的には地下処分場の設計施工方法との連携やニアフィールド環境における物質移動との複合現象評価手法の構築を目指す。

3.3.2 これまでの主な実施内容および今年度の成果

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。

本調査研究では，断層運動およびその影響によって生じたと考えられる割れ目について，天然の実例をもとにした研究を行っている。その事例として，中部地方において明らかに活断層と認知されているものの中から阿寺断層を調査対象として抽出し，調査研究を進めている。



阿寺断層周辺に分布する主な地質

調査地域は，岐阜県付知町から同県川上村を走る NW-SE 方向の阿寺断層の北東側に基盤として広く苗木花崗岩体が分布する範囲である（**図 3.3.1**）。これは，これらの地域の岩体が嶺家帯の花崗岩としてほぼ均一と考えられ，断層に直交した距離からの割れ目分布特性が把握しやすいと思われたことによる。また阿寺断層に関する調査も，トレンチ調査など過去にいくつもの現地地質調査が行われており [1) 2) 3)]，これらの情報が活用可能であることが調査場所としての選定理由である。

図 3.3.1　岐阜県東部の阿寺断層の分布と断層周辺の地質・調査地域（右図：点線範囲）

＜調査地域概説＞

現地調査は，上記地域の阿寺断層沿いの幅約 1.5 km，長さ約 14 kmの範囲で行った(**図 3.3.1**：Index map 及び地質図ならびに地質調査地点参照)。阿寺断層周辺の断層岩類等に関する記載は，金折ら(1990, 1991)[4) 5)] によって報告されているが，断層破砕帯の幅に関する広域的な調査はこれまで行われていない。

阿寺断層は広域的な特徴として，３本の断層セグメントとして左雁行配列することが示されているが[6) 7)]，調査地域内には他の断層が存在せず，阿寺断層を構成する単一の断層による運動の影響を検討することが可能と考えられる。

これらの既知データをもとに抽出した調査地域には，阿寺断層にほぼ直交する方向に谷地形が発達しており，その谷ぞいに多くの露頭が確認される。これまでに調査を行った露頭地点は，約 400 地点に及ぶ。

＜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
- 数十ー数百平方メートル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少割れ目解析

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，均質下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」（平成 15 年度成果報告書参照）などいったデータベースとして取りまとめている。以下にこれまでに得られた調査，解析結果を示す。

3.3.3 調査結果と主な考察について

＜割れ目の構造と方向性＞

阿寺断層周辺の露頭約 400 ケ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 3.3.2** および**図 3.3.3** に示す。

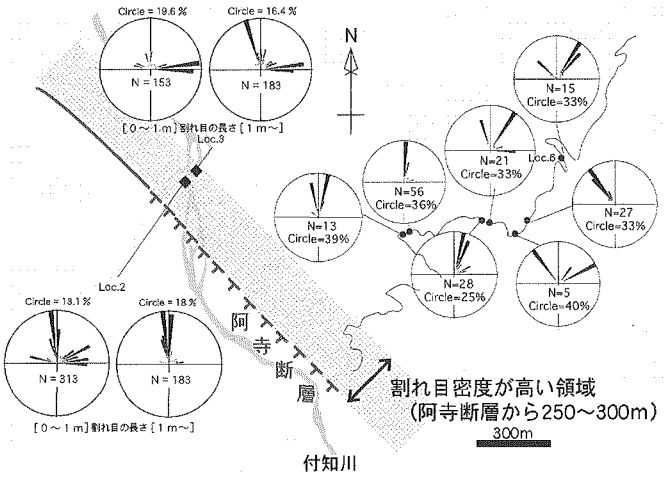


図 3.3.2　断層および周辺岩盤内に発達する割れ目の方向（付知川周辺）

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ー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。

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 3.3.3** 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。

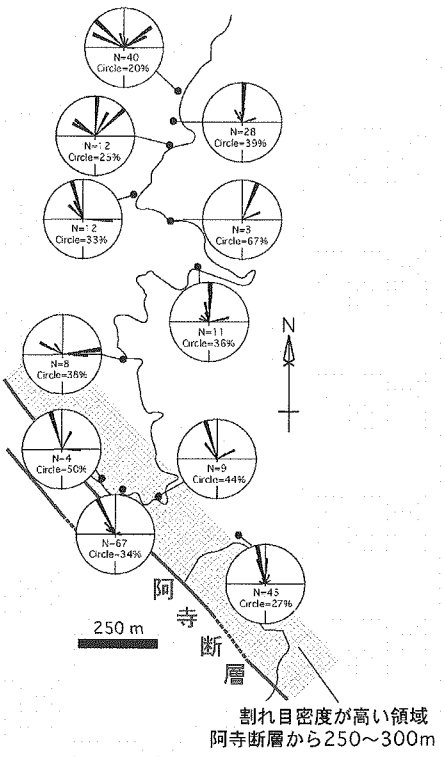


図 3.3.3　横川谷ルートでの割れ目解析結果
このルートでも，断層から離れるにしたがって連続性のよい割れ目が NS 方向に回転している状況が認められる。

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 3.3.4** に示す。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 250 メートルほど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 3.3.4** 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。

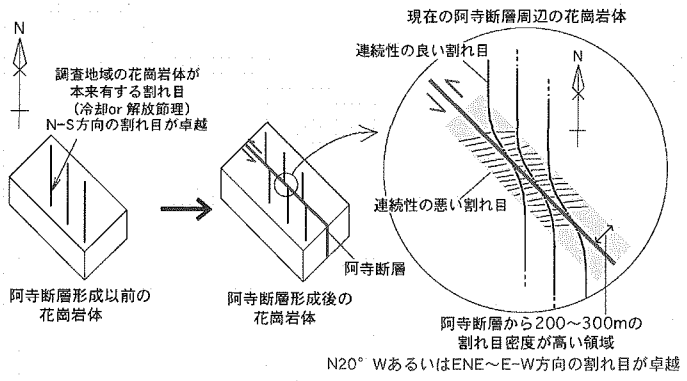
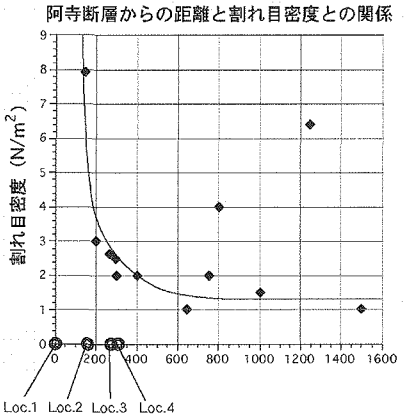


図 3.3.4　阿寺断層の断層運動と周辺岩盤割れ目への影響と，新たに形成される割れ目の形成メカニズムを示した概念モデル

また図 3.3.5 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。

解析図には，800 メートルおよび 1200 メートル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。



↑『露頭/割れ目調査カルテ』に基づいて割れ目密度を計測した．割れ目密度とは，割れ目の総数(N)を露頭の表面積(㎡)で割った値である．阿寺断層断層からの距離に応じて割れ目密度が指数関数的に減少する傾向が認められる．阿寺断層から200mの範囲では，割れ目密度は5～8(N/㎡)に達する．阿寺断層から300m以上離れると割れ目密度は小さくなり1～3(N/㎡)になる．

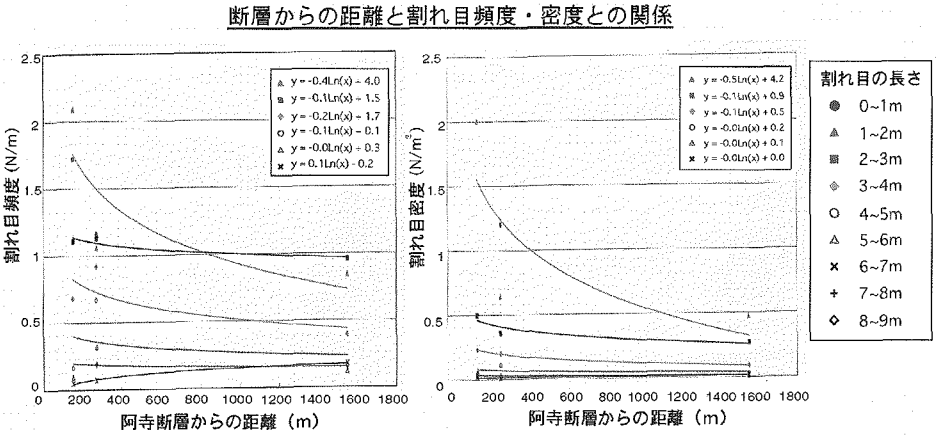
調査露頭数ｎ＝230　上のグラフは比較的露出の良い露頭で計測した割れ目密度の値にもとづいて作成

図 3.3.5　阿寺断層からの距離と露頭で観察される割れ目密度との相関

＜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 3.3.6 および 3.3.7 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３メートル以下の割れ目において顕著にあらわれる。



・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 3.3.6　阿寺断層からの距離を横軸にとって，各露頭ごとの
割れ目の長さ別にその密度と頻度を解析した結果

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。

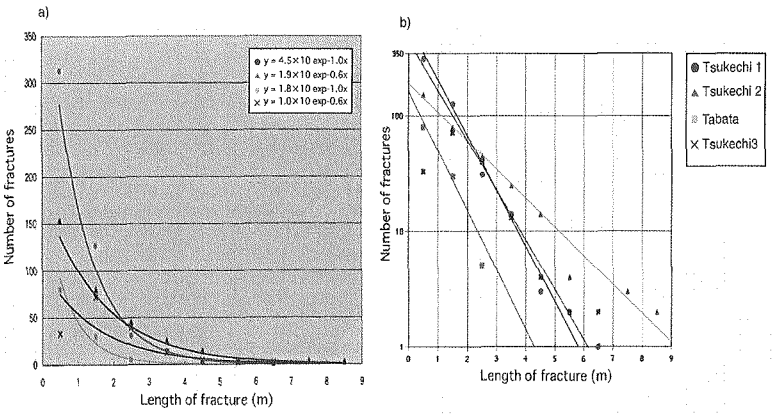
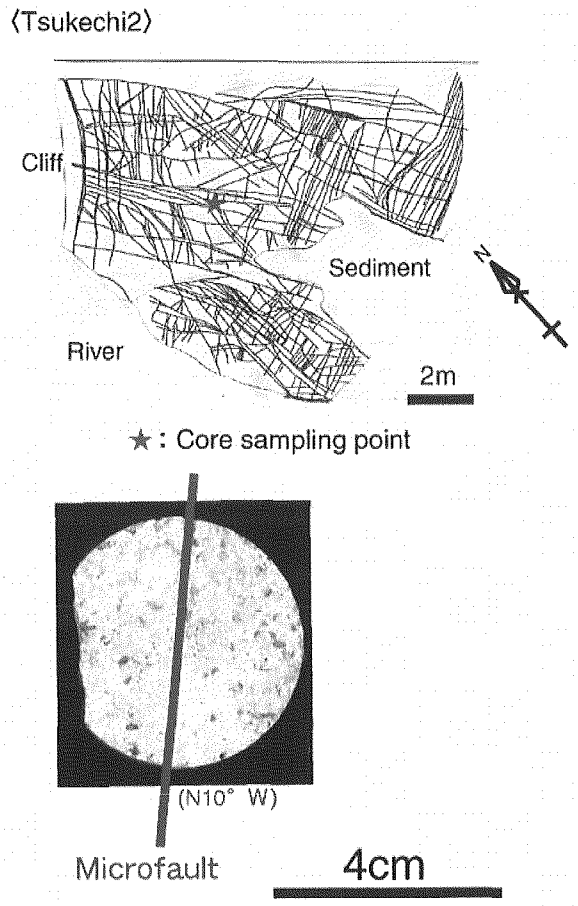


図 3.3.7　阿寺断層からの距離を横軸にとって，各露頭ごとの
割れ目の長さ別にその密度を頻度を解析した結果

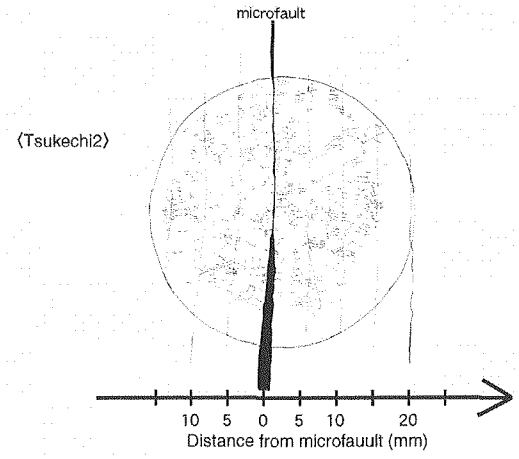
今年度（平成１６年度）はこの作業仮説の検証を目的に，断層から離れた場所で確認される連続性のよい割れ目と断層近傍で確認される連続性のわるい割れ目の微視的構造（違い）の解析を行った。



まず，断層近傍に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５０メートル）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3.3.8）。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。

図 3.3.8　断層近傍で見られる連続性のわる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。赤線は割れ目の位置を示す。

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 3.3.9 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 ミクロン，長さ 1 ミリ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（赤線）の割れ目の周辺に樹技状に広がっていることが確認できる。またこれらの樹技状の割れ目形成と中心を走る割れ目とには，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。



また，分布密度に関しても中心割れ目周辺ほど多くなるなどの相関はほとんど認められない。これについては，解析結果を後述する。

図 3.3.9　連続性のわる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 1500 メートル地点の田畑地域に見られる露頭での調査を行った（図 3.3.10）。

この露頭では，数メートル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。

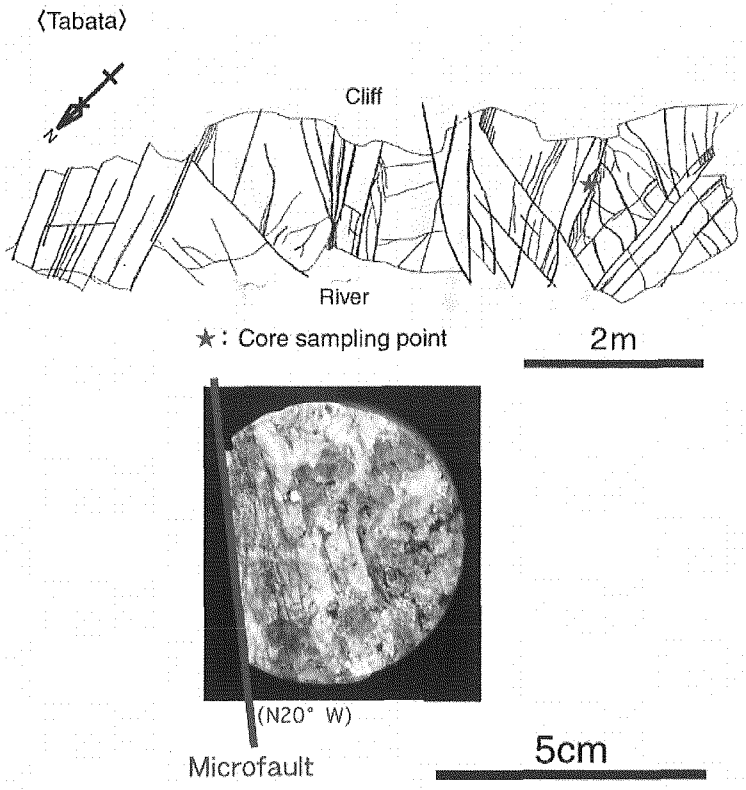


図 3.3.10　田畑地域の露頭スケッチ。NS-N20W 方向の連続性のよい割れ目が多数確認できる。★印は，コアサンプラーによる岩石試料を採取した地点を示す。またコア写真に示した赤線は，連続性のよい単一割れ目の位置を示す。

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 3.3.11 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 ミクロン，長さ１ミリ以上のものである。

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。

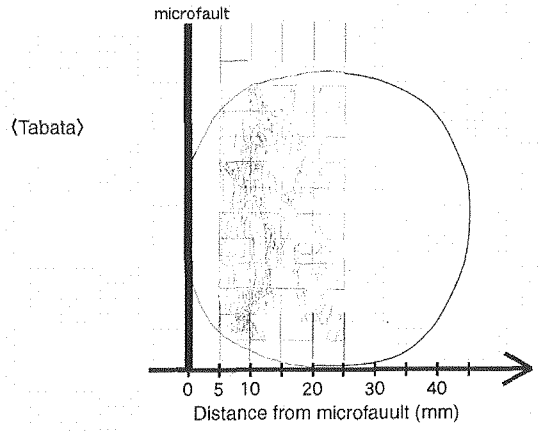
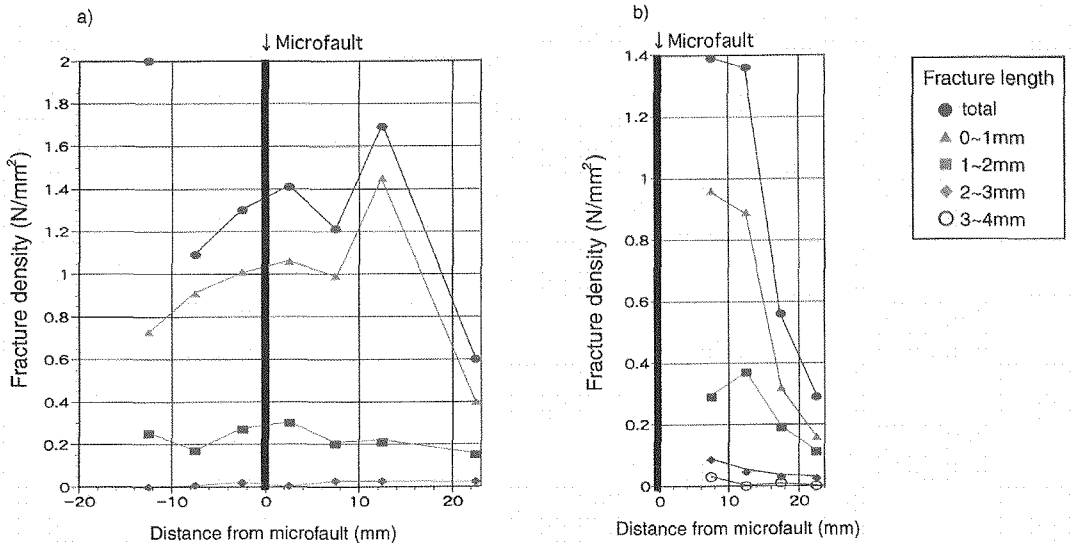


図 3.3.11　田畑地域で採取した岩石コア中に認められる割れ目スケッチ。単一割れ目（図中では microfault と記述）周辺ほど割れ目密度が高い。なお，0-5mm の範囲は，岩石薄片の作成段階で二次的（人工的）な割れ目と思われる構造が確認されたためデータから排除した。

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 3.3.12 に示す。



付知地域のコアサンプル　　田畑地域のコアサンプル

図 3.3.12　コアサンプル中に認められる微少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。

＜阿寺断層近傍における断層運動と割れ目形成の関係＞

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 3.3.13 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，断層破砕帯中にマイロナイトなどが確認されていることから，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。

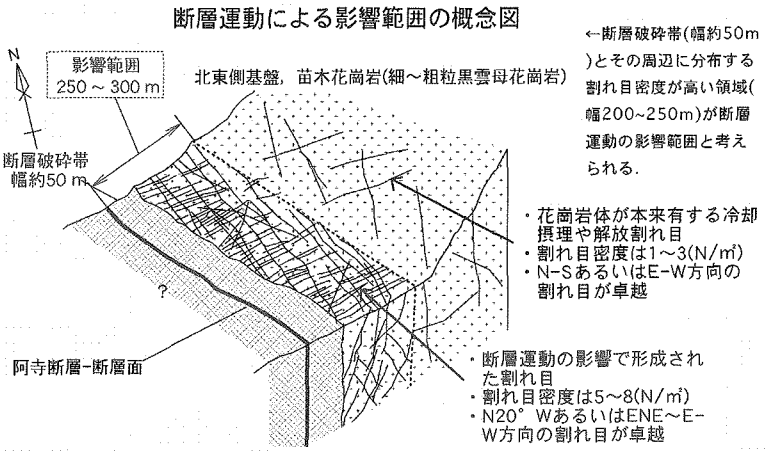


図 3.3.13 阿寺断層周辺の割れ目形成と断層運動による影響範囲の概念図

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。

このような断層運動およびそれに伴う割れ目形成については，今後も検証を進めていくことが必要であり，今後は，割れ目の微小構造と充填鉱物解析などがその手法として挙げられる。

3.4 研究課題２：割れ目シーリングのナチュラルアナログに関する研究（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特性への長期的影響の検討）

3.4.1 研究目的

研究課題２における研究目的は次ぎの通りである。

- ●岩盤力学，地球化学，物質移動などの境界領域として，これらの複合現象についての現実的なデータ，解析手法，モデルの構築を行う
- ●地下水-岩石反応に伴うシーリング材，炭酸塩鉱物の沈澱や酸化還元反応に伴う水酸化鉄等酸化物の沈澱による坑道周辺環境の長期的な変化を検討する
- ●現実的な物質移動（吸着・固定）現象に即したKd等のデータセットの構築を行なう
- ●“ナチュラルアナログ”による現実的な現象の洗い出しを行なう

これらは，研究課題１で得られる「新たに発生する割れ目」という情報をもとに，将来

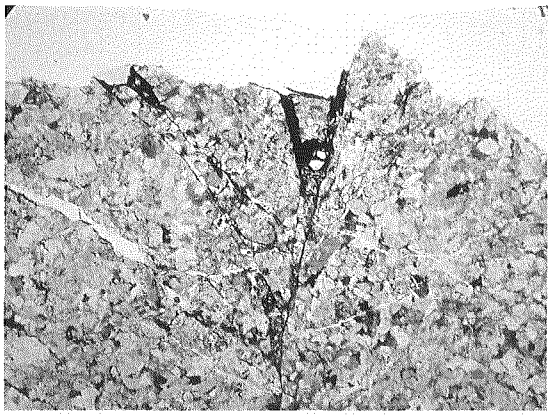
の地下空間において，とくにニアフィールド近傍で遭遇し，処分システムに影響を与えると考えられる割れ目の分類と，それらの割れ目を介した人工バリア材等と天然バリアとの反応についてのより現実的な情報，そしてニアフィールドの概念モデルを構築することを最終的な目的として実施するものである。またこの領域において，「深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究」を体系的に進めることを想定している。

3.4.2 今年度実施内容および予察的検討結果

今年度は，割れ目シーリングに関するナチュラルアナログ的材料の候補として，「食い違い礫」の調査を予察的に実施した。

「食い違い礫」とは，断層運動に伴って堆積岩中の礫が多くの場合，単一かあるいは複数の割れ目によって壊されたものである。今回調査に用いたものは，その破壊された礫が，その後の地下水などとの反応によって，割れ目に二次的な充填物が沈澱・形成され，シーリングされたもので，その構造や仕組みの検討を行った。

図 3.4.1「食い違い礫」：上部の段差の部分が「食い違い」を示す。段差は約 5mm。



次に示す図 3.4.1ー3.4.3 は，食い違い礫の断面構造を顕微鏡下で撮ったものである。断面構造からも示されるように，脆性的な破壊によって，礫が割れているのが理解できる。そしてその割れた部分に，褐色の充填物が確認できる。

図 3.4.2「食い違い礫」：褐色の充填物拡大

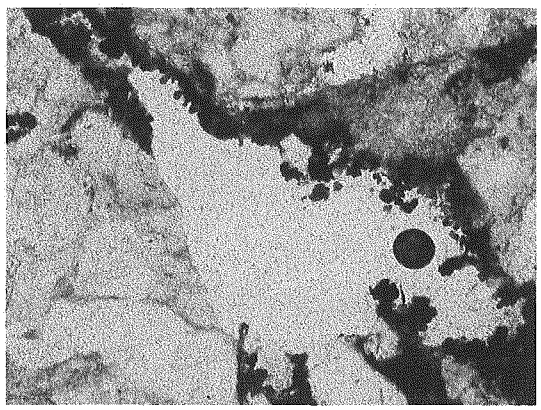
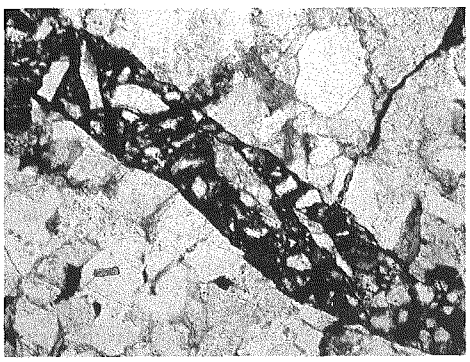


図 3.4.2 に示すように，割れ目を充填する鉱物は，鉄酸化物と考えられる。また，図 3.4.3 には，割れ目内を充填する細粒の石英や長石の粒子が確認できる。

図 3.4.3「食い違い礫」：割れ目を充填する細粒の砕屑物。



ここで示した割れ目充填物が，一度形成された割れ目をどのように充填し，シーリングするのかについては，今後詳しく検討する予定であるが，このような「材料」によって微小割れ目などのシーリングプロセスが明らかにできれば，将来における坑道周辺での二次的形成割れ目の自己修復作用として活用することが可能となるかもしれない。

3.5 今後の予定

今後，本調査研究は，まず課題１である，これまで進めてきた断層活動に伴う割れ目形成等，断層運動の影響研究については，断層運動によって形成される割れ目の同定をさらに進め，地質学的，地球化学的手法と併せて，将来的な地下研究での手法として適用できるものを構築していく予定である。そのために，今後とも次の調査研究を継続および新たに実施する。

-現地割れ目データの追加と解析の継続
-割れ目構造の変型と全体の地質構造との関係調査（モデルの詳細化）
-新たに発生した割れ目の同定と特徴の把握（仮説の検証）
-充填鉱物等，二次鉱物の調査手法の構築

断層活動に伴う割れ目発生のメカニズムやその特徴について，これまでおよび今回の調査から幾つかの仮説をたてることができた。今後の調査によって，仮説の検証を行うべく，野外調査での系統的な割れ目の把握と一般化を行うことが必要である。また発生割れ目の同定方法や判断のクライテリアについても，引き続き併せて検討していくことが必要である。

また，今年度から開始した課題２，３についても研究委員会委員と連携ととりつつ進めていく予定である。とくに NF 現象の再検討については，地下研究所での研究による検証を必要とする事項であり，近々に行われるであろう研究段階に向け，具体的な準備を開始しておくことが必要と考える。

3.6 参考文献

1) 佃　栄吉・山崎晴雄・加藤完・粟田泰夫(1986)：1981 年阿寺断層（倉屋地区）トレンチ調査，活断層研究，Vol. 3，pp. 37-43.

2) 佃　栄吉・山崎晴雄・粟田泰夫・水野清秀(1988)：1985 年阿寺断層（坂下地区）トレンチ調査，活断層研究，Vol. 5，pp. 55-59.

3) 山崎晴雄・水野清秀・佃栄吉・粟田泰夫・渡辺和明・宮崎純一・可長清美(1988)：1985 年阿寺断層（小和知地区）トレンチ調査，活断層研究，Vol. 5，pp. 60-64.

4) 金折裕司・矢入憲二（1990）：阿寺断層中央部周辺に認められる変形構造の特徴．岐阜大学教養部研究報告，**25**，111-138.

5) 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 鉱物年代．岐阜大学教養部研究報告，**27**，79-91.

6) 佃　栄吉・粟田泰夫・山崎晴雄・杉山雄一・下川浩一・水野清秀（1993）：2.5 万分の 1 阿寺断層ストリップマップ説明書．構造図(7)，地質調査所，39p.

7) 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，222-229.

4. ニアフィールド（NF）コンセプトの再構築に関する研究

4.1 背景と目的

今年度より，坑道周辺における EDZ（掘削影響領域），割れ目形成あるいはそれらの環境下での物質移動をも考慮した，複合的環境のより現実的な解析を行うこととした。これは，従来の NF 環境の概念モデルや核種移行解析シナリオの非現実性などが挙げられるとともに，地下研究所をより有効に活用することを目的に行うものである。

今年度は，来年度からの具体的な研究を実施するにあたっての予察的検討段階として，課題グループの各研究メンバーと検討した結果を報告する。

4.2 検討内容および結果

各研究分野，委員とのすりあわせを開始した結果，今後進めるべき研究の方向として；

◆坑道周辺環境／現象の現実的

概念モデルの構築

*EDZの語句／定義の統一

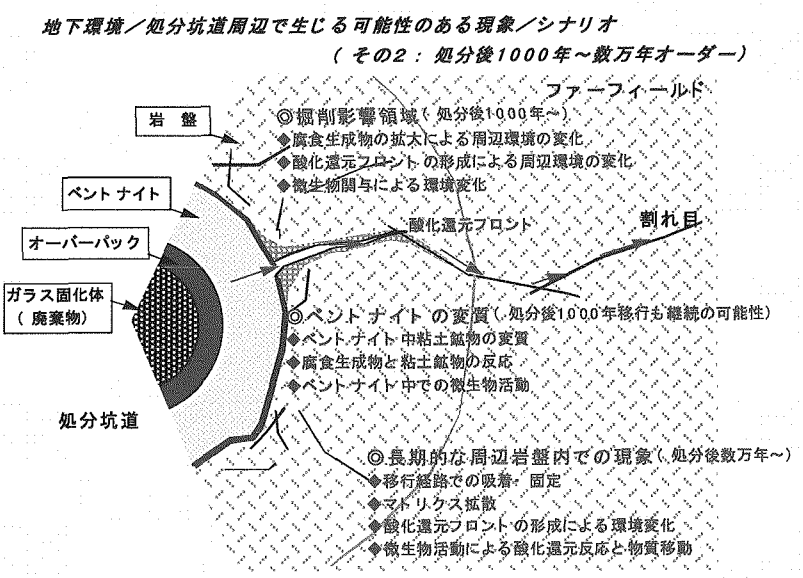
*概念モデルの構築

◆物質移動に影響を及ぼすと考えられるNF現象の抽出

*選択的な地下水流動経路と地下水の移動に伴う緩衝剤の流出の可能性

*酸化した埋め戻し材の使用による地下環境への影響解析

*地下への酸素あるいは酸化した地下水の浸透が及ぼす影響解析



◆EDZにおけるマイクロクラックに対するシーリング技術開発とその長期的ニアフィールドで想定される現象（化学的／物理的）変化の把握

*グラウト材と岩石／地下水の長期的反応の調査と評価手法を構築する

*グラウト材やその他，酸化物が及ぼす物質移動への影響とその評価を行う

などが，将来的に検討されるべき課題として提示された。今後は，これらについても本研究を通してより具体化して行く予定である。

第Ⅱ章

調査・解析手法の高度化・体系化

1. 山岳トンネル 地下水情報化施工用 簡易システム（SWING）の構築

1.1 はじめに

一般的に，トンネルでは工事前に地山の安定性，透水特性を見極めることが困難であることから，地下水に関わるトラブルを余儀なくされる事例が多い。このような課題に対して，施工途上におけるトンネルの坑内坑外で発生した地下水や地表水の挙動を観察，計測し，迅速に設計・施工に反映させる方法が重要な役割を担うことになる。

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。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の一部，SWING 法を開発した。

SWING 法（System for Water INformation of Ground）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可能であり，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。

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，降雨ー浸透ー地下水流道などの水収支量の変動を計算するタンクモデル[1)]や修正タンクモデル法[2)]による簡易計算が重宝する[3)]。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，地下水流道メカニズムを考慮できないことは注意が必要である。

提案した 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。

1.2 SWING 法の開発

トンネル工事に関する地下水問題は，施工面では大量湧水に伴う切羽崩落防止 やトンネル排水の処理，及び安全施工するための地下水対策工の必要性が課題である。また，周辺環境面では地下水排水に伴う周辺水環境への損傷，既設水源に及ぼす地下水低下影響が挙げられ，これらの自然環境保全はトンネル工事に関わる重要課題である[4]。

以前にはタンクモデルのもつ貯留効果を基に，山岳トンネルの掘削に伴う水収支変動を評価する修正タンクモデルの解析事例を通して予測精度や優位性を示した。しかしながら，修正タンクモデルや３次元浸透流解析にしても，ある規模の地盤モデルの作成が必要となること，また，演算性能が向上したとしても解析時間やデータ処理などの労力が必要となる。したがって，地下水解析に関しては，実際のトンネル掘削工事中の実績データによるによる逆解析や検証解析は，変形解析等に比べて実施されたケースは少なく，殆ど事前評価に始終している[5)6)]。ましてやトンネルの掘削進行に応じて，施工中の実績データを反映した影響評価を行うことは，現状の解析ツールを用いても困難である[7)8)]。

一方，これまで記述した様に地下水流動を考える場合，斜面のような小規模の要素サイズにしても，トンネルの様な数 km に及ぶ大規模な要素サイズにしても，水循環や水収支を考慮する必要性が高く，最重要課題である。ここではこうした背景を鑑み，トンネル周辺の水環境保全やトンネル工事の地下水問題について水循環系を踏まえて，簡易に予測精度を有する評価法（SWING 法と呼ぶ）を開発した。すなわち，水循環系を考慮しつつ，経済的，合理的な施工を目的として開発した SWING 法の内容，それに関する解析法の開発，並びに評価手法について記述する。解析事例とする箕面トンネルは，前述の修正タンクモデルの解析例と同じトンネルであり，繰り返しになるが，トンネルルートは，好水生貴重種が生息する水系，及び観光名所の滝が分布し，環境保全に留意しなければならない条件である。

SWING 法の開発の背景として，箕面トンネルは，施工時の湧水対策，及び周辺水環境問題に対して，次の基本方針を満足できる地下水解析が必要とされていた。

① 従来の水文学的方法では，施工後の恒常湧水量や渇水影響範囲の予測は可能であるが，工事中の施工実績による修正が困難であり，渇水対策水量等の水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，且つ工事実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水量的な評価が可能なシステムであること。従来の地下水解析は工事実績や水量的な評価が精度を持って可能であるが，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，及び渇水予測評価す

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。

1.3 SWING 法によるトンネル横断方向の水収支解析モデル

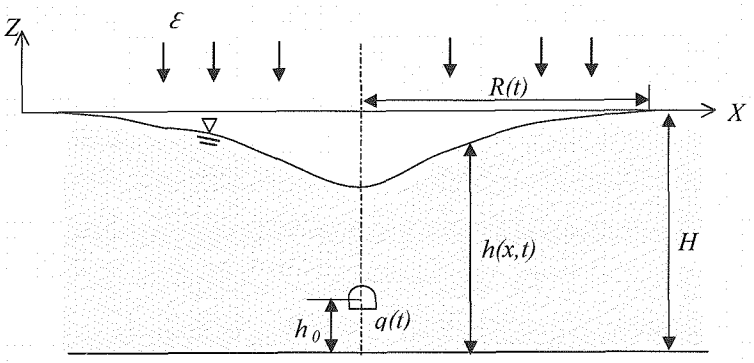
SWING 法は，浸透流解析や修正タンクモデル等に代表される地盤モデルを用いた数値解析法ではなく，実際のトンネル掘削により発生した湧水量を基に，トンネル進行距離 50m を単位スライスボリュームとしてモデル化し，このスライスボリューム内において水理式を適用して透水係数や有効間隙率を求める。さらに実績から得られた水理定数を基に，スライスボリュームにおける地下水位低下範囲や低下量，及び沢水減少量を求める方法である。さらにトンネル工事中において予測結果と現地観測値（沢水流量，地下水位），及び現況の渇水影響と検証するものである。

箕面トンネルの場合，着工前の入力値はトンネル縦断における弾性波速度，比抵抗値等の物理探査結果からトンネル縦断方向における水理地質区分を設定し，その初期設定を基に SWING 法を適用して予測し，進捗に合わせて施工実績から既施工区間の見直し，及び未施工区間の予測を繰り返し行った。この解析事例では入力データの修正を含めてトンネル湧水，地下水位低下範囲，沢水減少量について 2～3 時間程度で既施工区間の同定と未施工区間の予測評価を行っている。したがって，切羽における水抜ボーリングの実績を迅速に取り込み，本坑掘削時の湧水やそれに伴う渇水影響予測を即座に行ったケースもある。以下に SWING 法における各水収支要素の算定式を示す。

(1)トンネル湧水量と地下水位低下量の算定

掘削に伴うトンネル湧水の基本的な性質や発生した場合の地下水流動メカニズムを捉えるために**図 1.3.1** に示す 1 次元非定常流を考える。すなわち，水平不透水性基盤上の帯水層中に，地盤サイズに比べて十分小さい径のトンネルを設けたものと仮定する。初期水位 H が一定である地下水位は，掘削後の経過時間とともにトンネル直上から徐々に低下する。この場合の地下水流は 2 次元非定常流であるが，SWING 法では Dupuit の準一様流解析に置き換える。なお，トンネル掘削における地下水問題で SWING 法と同様に，スライス座標系で解析する方法は，西垣ら[9]や佐藤[10]による方法がある。

図 1.3.1 に示すとおり，降雨浸透量 ε を伴う帯水層は初期 t=0 では地下水位は水平であると仮定すると，t=0 における地下水面は Dupuit の準一様流の式(1)から求められる。



ε：降雨浸透量
K：地山の透水係数
$K=(Kx^2+Kz^2)^{1/2}$
H_0, h_0：地下水頭
$q(t)$：単位長当りの湧水量
$R(t)$：地下水位低下区間長
$h(x,t)$：任意地点の水位
λe：有効間隙率
$L(t)$：水位低下範囲長

図 1.3.1　トンネル湧水に伴う地下水の流れ

$$\left.\begin{aligned}\frac{(h^2-h_0^{\,2})}{(H_0^{\,2}-h_0^{\,2})}&=\frac{x}{L}\\ q&=k\frac{(H_0^{\,2}-h_0^{\,2})}{2L}\end{aligned}\right\}\qquad(1)$$

ここに，k：地盤の透水係数
h：地下水位
h_0：不透水性基盤からトンネル底盤までの距離
H_0：初期地下水位
q：単位スライスボリュームのトンネル湧水量
L：単位スライスボリューム内で発生する地下水位低下区間

また，t=t+dt 後には図 1.3.2 に示す水位低下域の水量は，トンネル湧水量 q に等しいことから，dt 間の地下水位低下区間の増加を dL とすると式(2)が成立する。

$$qdt=k\frac{(H_0^{\,2}-h_0^{\,2})}{2L}dt=\lambda e\frac{(H_0-h_0)}{3}dL+\varepsilon L dt\qquad(2)$$

ここに，λe：有効空隙率
ε：降雨浸透率

さらに，t で積分すると，下式(3)に示すとおりとなる。

$$L(t)=\left[\frac{k(H_0{}^2-h_0{}^2)}{2\varepsilon}\left\{1-e^{-6\varepsilon t/\lambda e(H_0-h_0)}\right\}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

t→∞，L→∞とすると，次式で表すことができる。

$$L_\infty=\left[\frac{k(H_0{}^2-h_0{}^2)}{2\varepsilon}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

すなわち，経時変化を考慮したトンネル湧水量 q(t)は，式(5)に示すとおりである。

$$q(t)=\frac{k(H_0{}^2-h_0{}^2)}{2L(t)}=\frac{k(H_0{}^2-h_0{}^2)}{2\left[\frac{k(H_0{}^2-h_0{}^2)}{2\varepsilon}\left\{1-e^{-6\varepsilon t/\lambda e(H_0-h_0)}\right\}\right]^{\frac{1}{2}}} \tag{5}$$

したがって，各スライスボリューム内におけるトンネル湧水量の低減特性が計算できることになる。

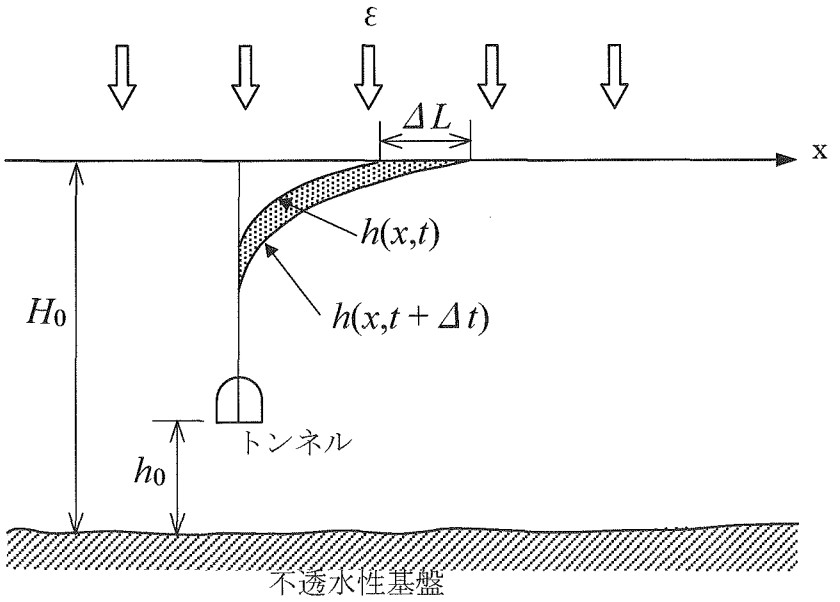


図 1.3.2　単位スライスボリュームにおけるトンネル湧水量の算定方法

但し，ここで水循環要素として降雨浸透率 ε を考慮する必要があり，この降雨浸透率については地表部における限界貯留高，及びホートン流出を再現した 1 次元タンクモデルを適用し，降雨量に応じた降雨浸透率を採用する。この手順を**図 1.3.3～図 1.3.4** に示すとおり，トンネル掘削スライス毎に求め，トンネル掘削距離を経時変化パラメータとして順次算出する。当然，既施工区間のトンネル湧水は経時的には低減特性を維持することになる。各スライスボリュームにおける積算した水量は，トンネル坑口湧水量である。

一方，トンネル湧水に伴って地下水位低下量や低下範囲は拡大するが，各スライス毎に式(5-3)に示した水理式から求めることができる。図 1.3.5 にはトンネル湧水量と地下水位低下の低減特性を示した。トンネル湧水は周辺地山の地下水や地質と密接な関係を持つわけであり，トンネル湧水の経時変動や降雨応答は極めて重要な地山情報の 1 つである。また，切羽湧水は掘削部先端の切羽とその周辺の未覆工部から湧出しているため，工事の進行に伴って順次変動していくことが通例である。

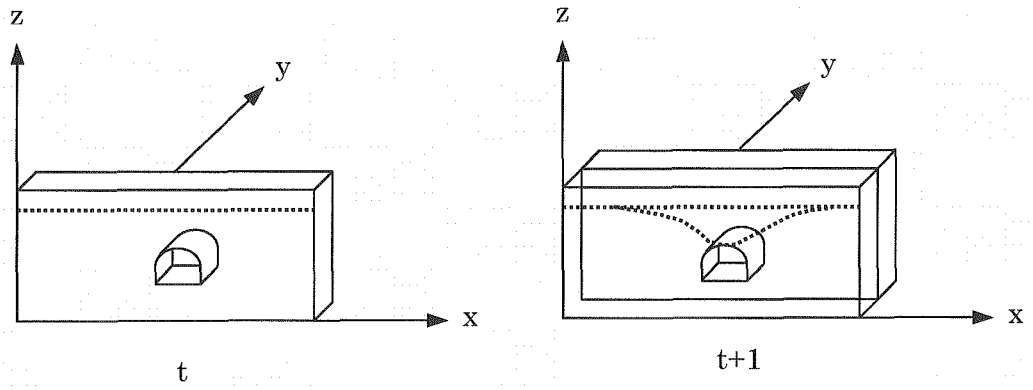


図 1.3.3　トンネル進捗に伴う単位スライスボリュームの累積

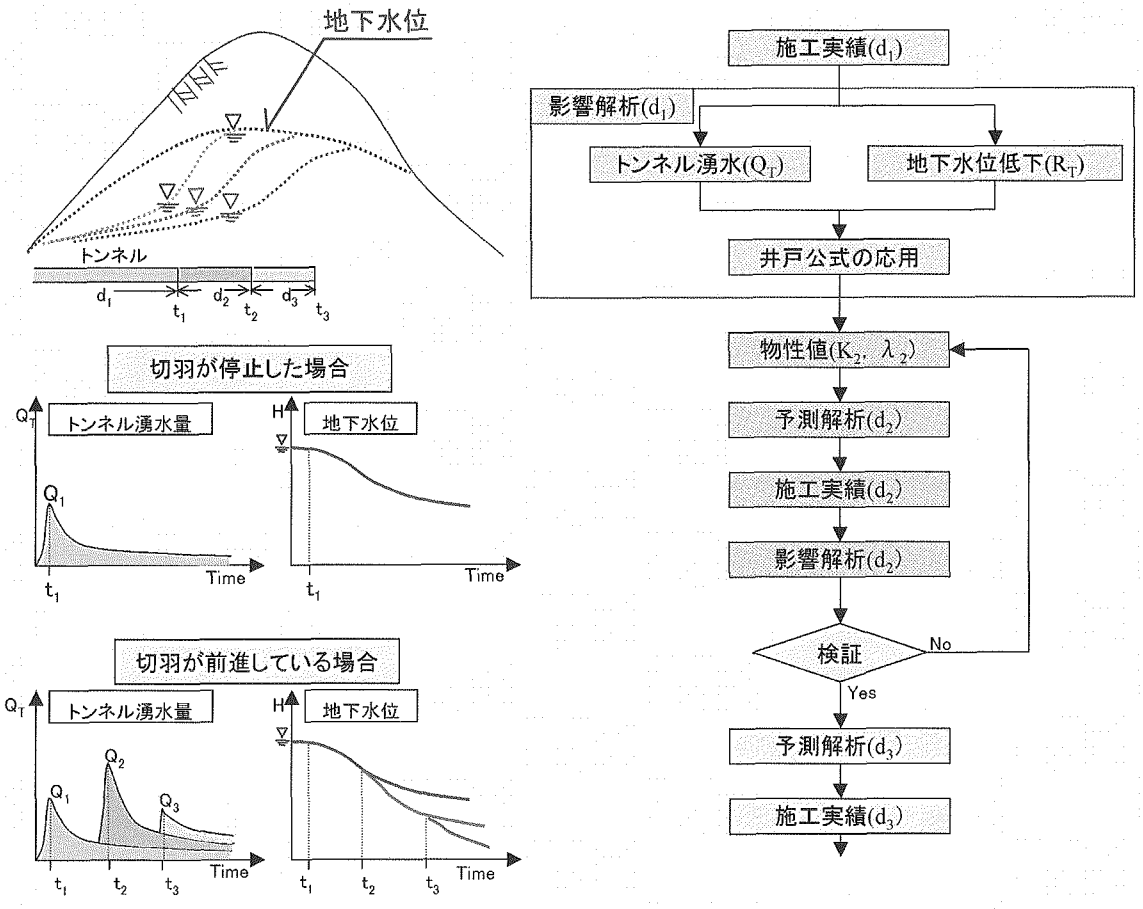
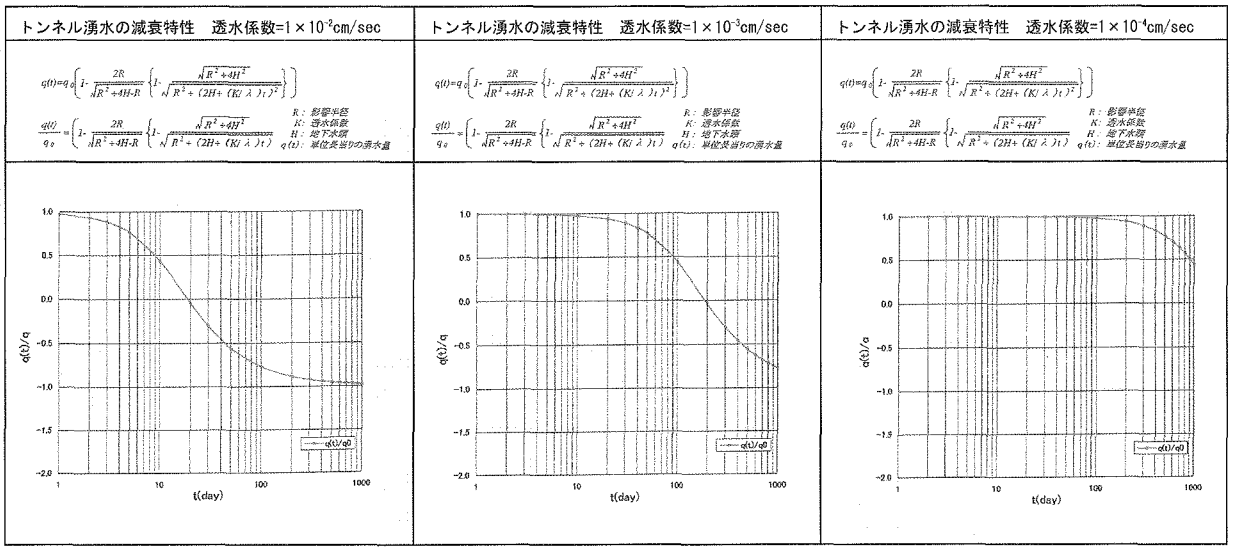


図 1.3.4　SWING 法によるトンネル湧水の累積



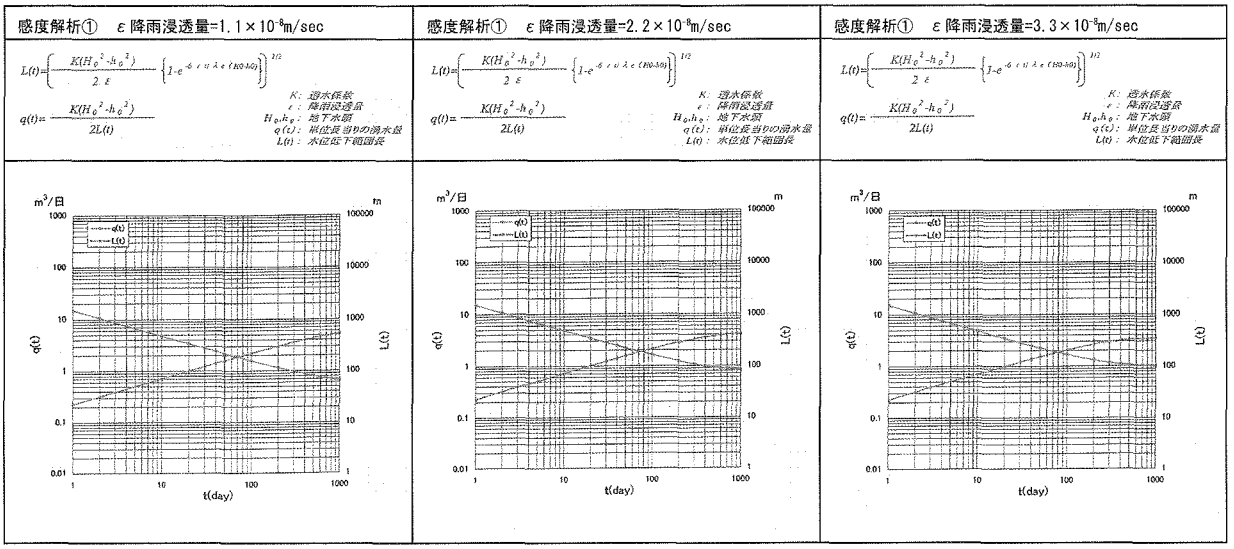
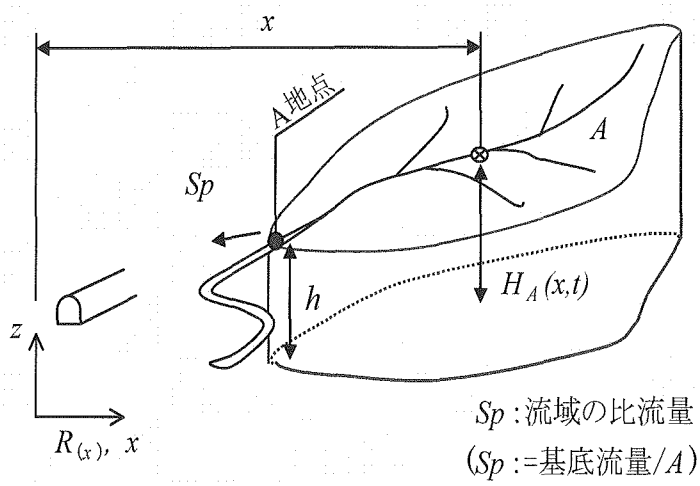


図 1.3.5　Dupuit の非定常流の q(t)，h(t)経時特性

(2)表流水への影響評価

ここではSWING法における表流水への影響量の算定手順を示す。いま，図 1.3.6 に示す谷地形における基底流量を考える。通常，基底流量は流域における地下水流出量と同意であるから，表流水の内基底流量は谷地形の形状から不貫通井戸や開渠の水理公式で近似される。したがって，トンネル掘削の影響による地下水位低下は，流域内の地下水位低下に置き換えられ，その低下量を用いて基底流量の減少が算定できることになる。すなわち，流域内の地下水位低下量に応じて平均地下水位低下量を算定し，任意流域における基底流量の減少量を算定する手順である。表流水は降雨に伴う変動が著しく，基底流量への影響が直接現地調査における表流水の流量と異なるため，流量観測地点毎にタンクモデルを結合し，基底流量の減少に伴う表流水本来のハイドログラフから流量変動を求める[11]。



$$Sp(t)=\frac{\pi K(H_A{}^2-h^2)}{Ln(R/r)}\cdot\frac{\theta}{360}\cdot\frac{1}{A}$$

R：流域幅

r：河道幅

θ：流域開口角

A：流域面積

Sp：流域の比流量

(Sp：=基底流量/A)

図 1.3.6　表流水への影響量の算定

図 1.3.7 にはSWING法で用いた各水循環要素における水理式を示し，トンネル進捗距離の増加分のスライスボリュームにおける湧水モードと地下水位低下，及び任意地点の地下水位低下量と沢水影響量の算定式を示している。図 1.3.8 にはSWING法による出力要素を示す。同図に示すとおりトンネル坑内で発生した湧水量を基に，地下水位低下量と低下範囲を算出し，さらに地表部の流域では波及してきた地下水位低下量から表流水の基底流量を求める手順である。特に，トンネル湧水の変動について時系列，及び平面座標系を合わせた３軸表示が可能である。こうした湧水の捉え方は，トンネル区間湧水量と坑口湧水量との相関など工事管理の面からも有効な施工情報である。図 1.3.9 にはSWING法の運用イメージを示す。

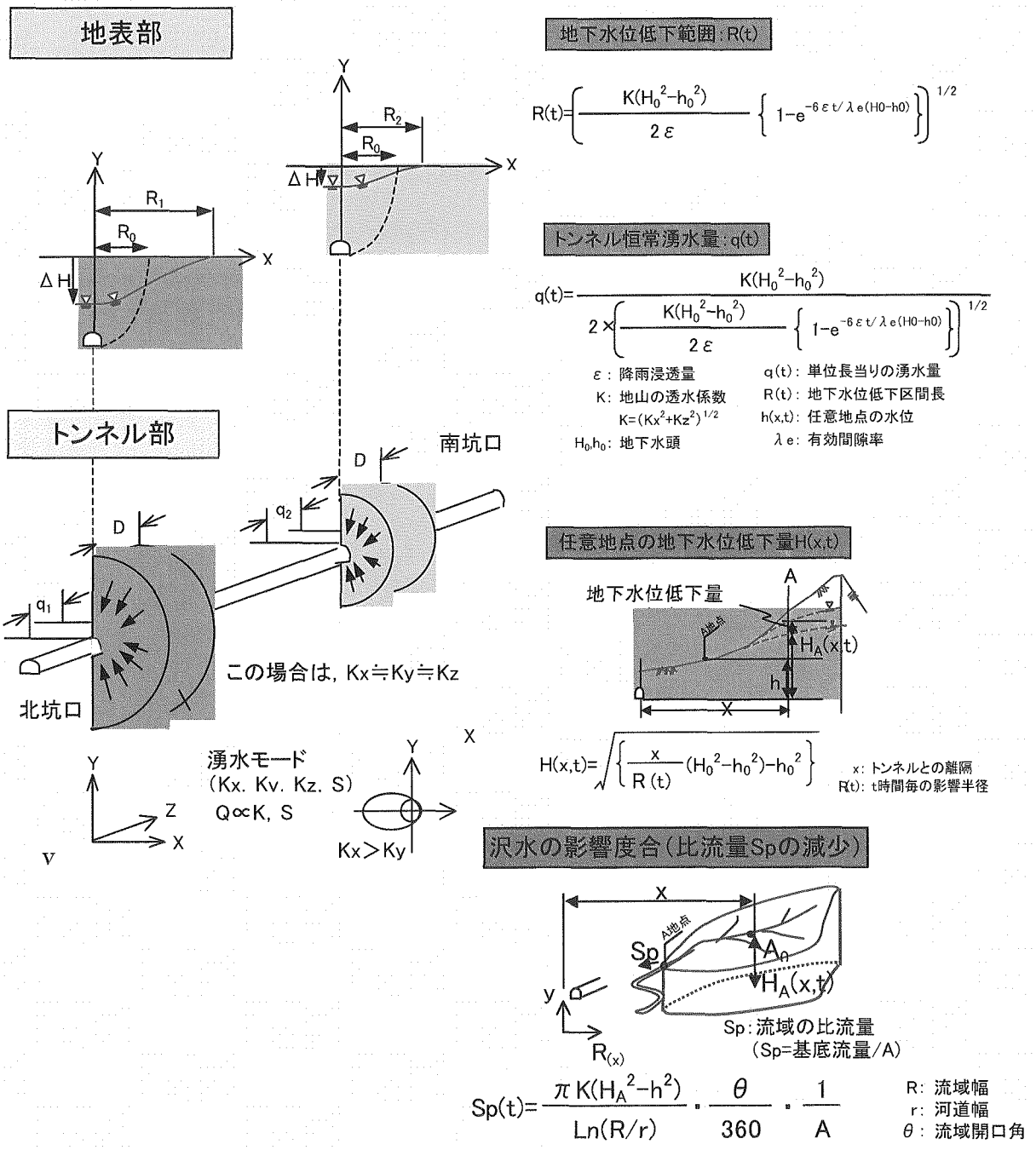


図 1.3.7　SWING 法に援用する水理式

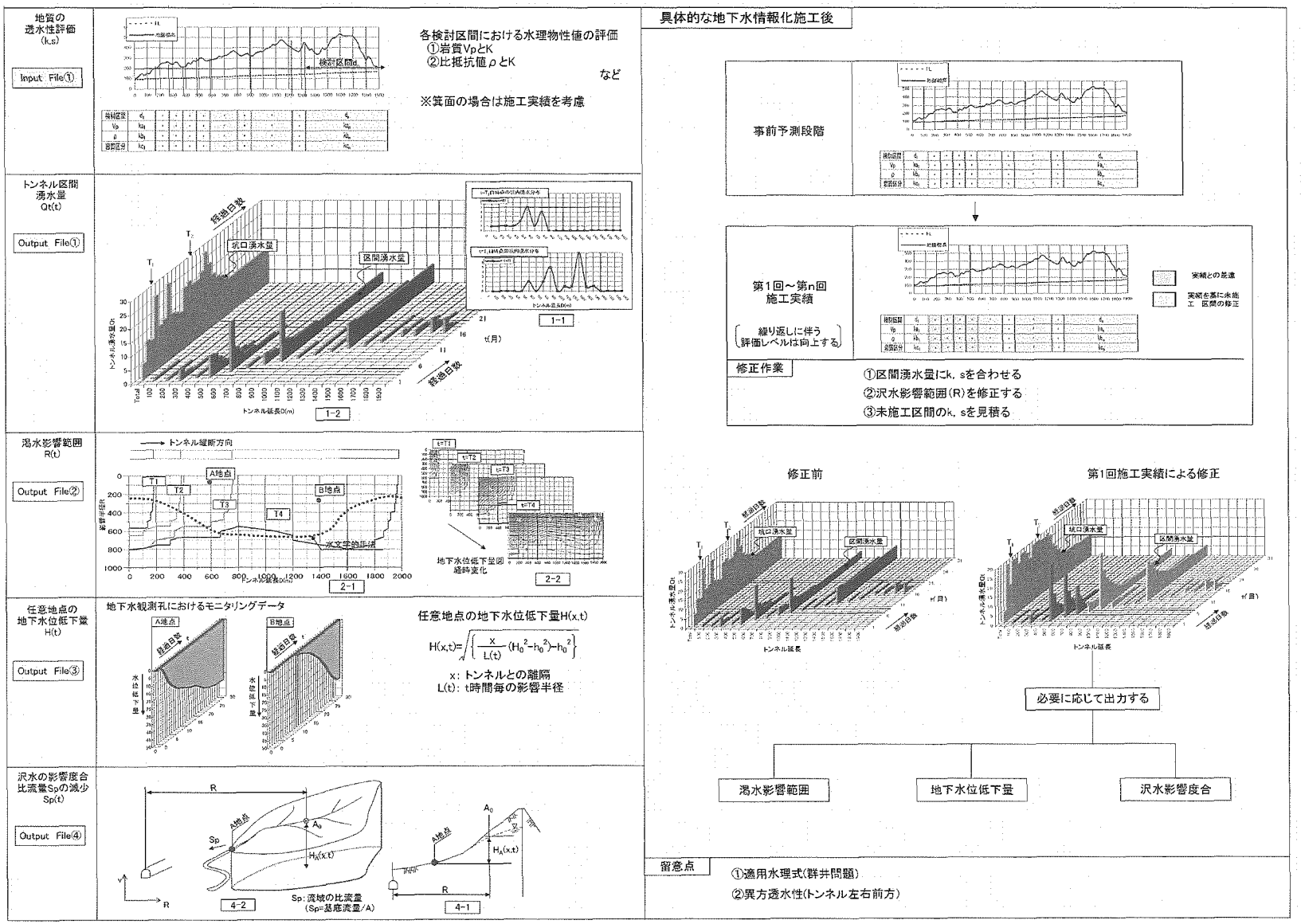


図 1.3.8 SWING 法における出力要素

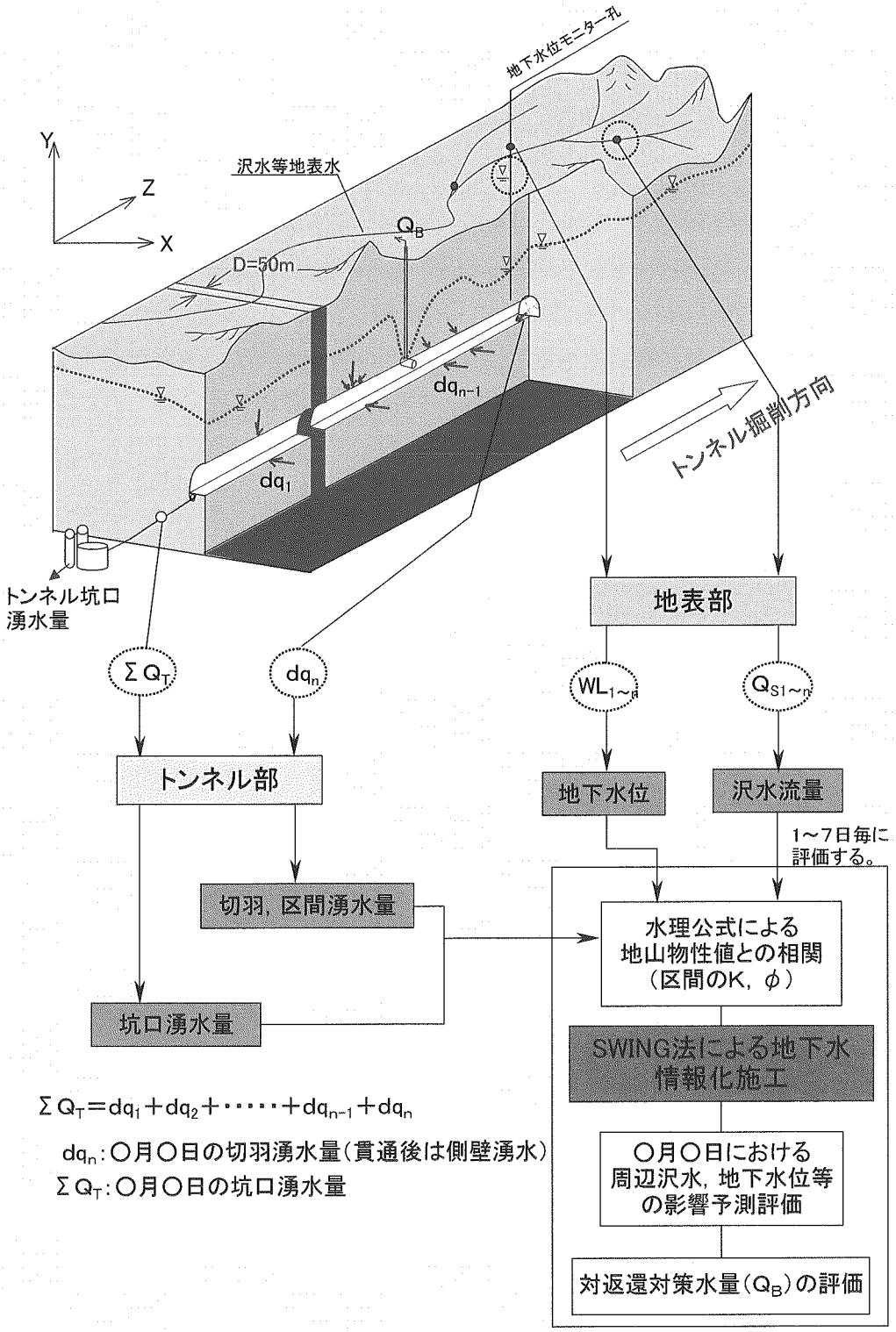


図 1.3.9　SWING 法の現地援用イメージ

1.4 SWING 法によるトンネル湧水，地下水位，表流水の変動解析

(1)トンネル湧水量の変動解析結果

トンネル進捗に伴うトンネル湧水について，実績値と SWING 法による予測値を対比して図 1.4.1 に示す[12]。同図は施工中における工事の進行距離とトンネル湧水量であり，実績値は南北工区の両坑口湧水量である。多数の重なりが認められる湧水量は，SWING 法による予測値であり，各スライスボリュームにおける区間湧水量とそれらを積算した坑口湧水量である。各掘削ステップ（STEP-1～STEP-3）における南北工区の工事進捗に伴う既施工区間の実績値との検証，未施工間の予測結果を示し，各ステップにおける実績値との検証とその検証結果に伴い，順次未施工区間の予測結果の推移が確認できる。すなわち，SWING 法は施工実績を基にして未施工区間を予測している。STEP-1 は，掘削開始から 1 ヶ年後の検証を行ったうえで，トンネルルートの水理定数を想定した場合に相当し，STEP-2，STEP-3 は各々トンネル工事が進行しているケースである。

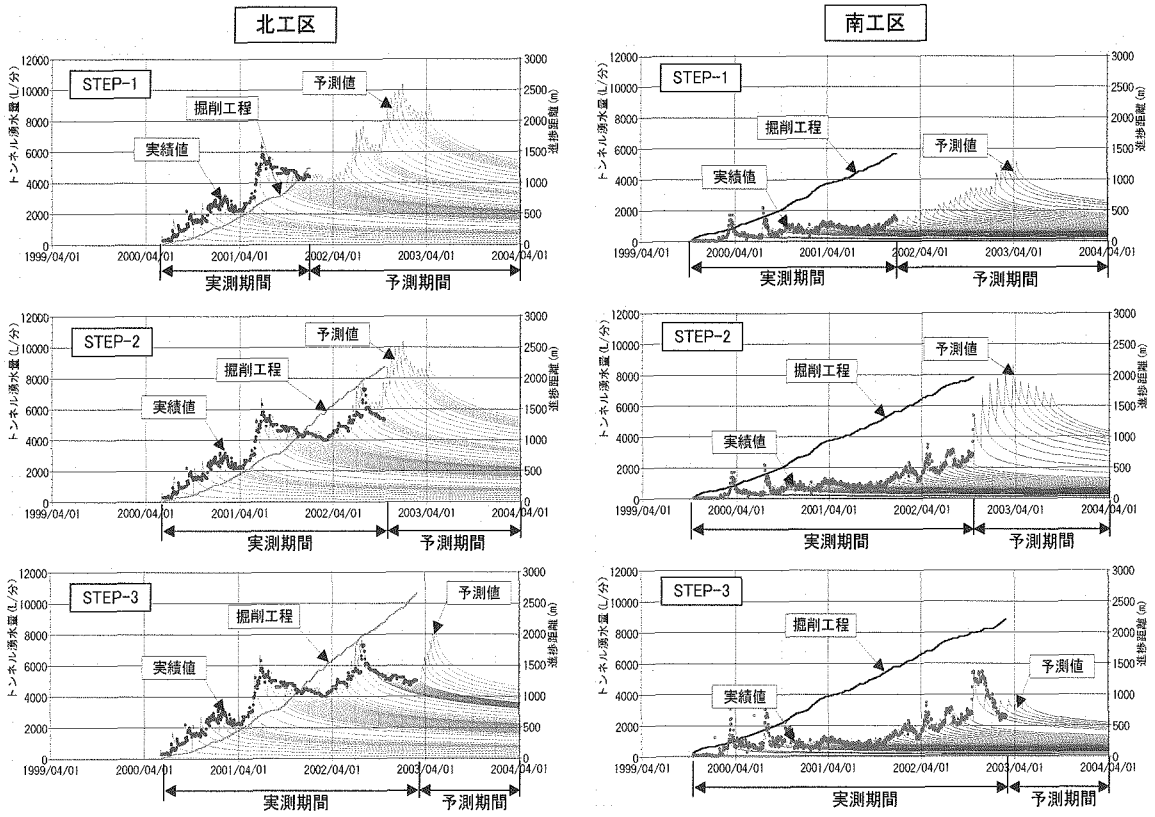


図 1.4.1　SWING 法によるトンネル坑口湧水量の検証

図 1.4.2 は工事が完了した時点の最終的なトンネル坑口湧水量と区間水理定数を示している。当然であるが SWING 法によるトンネル湧水量は殆ど実績値に合致している。さらにトンネル貫通後における将来的な水量の推移を予測結果を図 1.4.3 に示す。施工

時に集中湧水が発生した区間やトンネル全体の湧水量の減衰傾向が予測されている。この場合の降雨条件は，施工中の降雨を繰り返して用いている。

また，前述のとおりSWING法の特徴であるトンネル湧水の3軸評価を図1.4.4に示す。同図によれば工区毎の坑口湧水量，区間湧水量，掘削距離を全て掘削開始以降の経時変化として総括し，実際のトンネル工事における定点観測が常識化している坑口湧水量を検証データとして，坑内における区間湧水量の構成を示していることになる。

実際のトンネル工事では進行と伴に，順次吹付けや覆工が実施されるため，区間湧水量が計測できないことが多く，トンネル施工に伴う厳密な影響評価のためには，坑口の合計湧水量だけ指標とするSWING法を援用することで，坑口湧水量と区間湧水量の相関が評価可能となる。さらに，トンネル完成後の坑内湧水量の評価や長期的なトンネル湧水量の推移も把握できる。

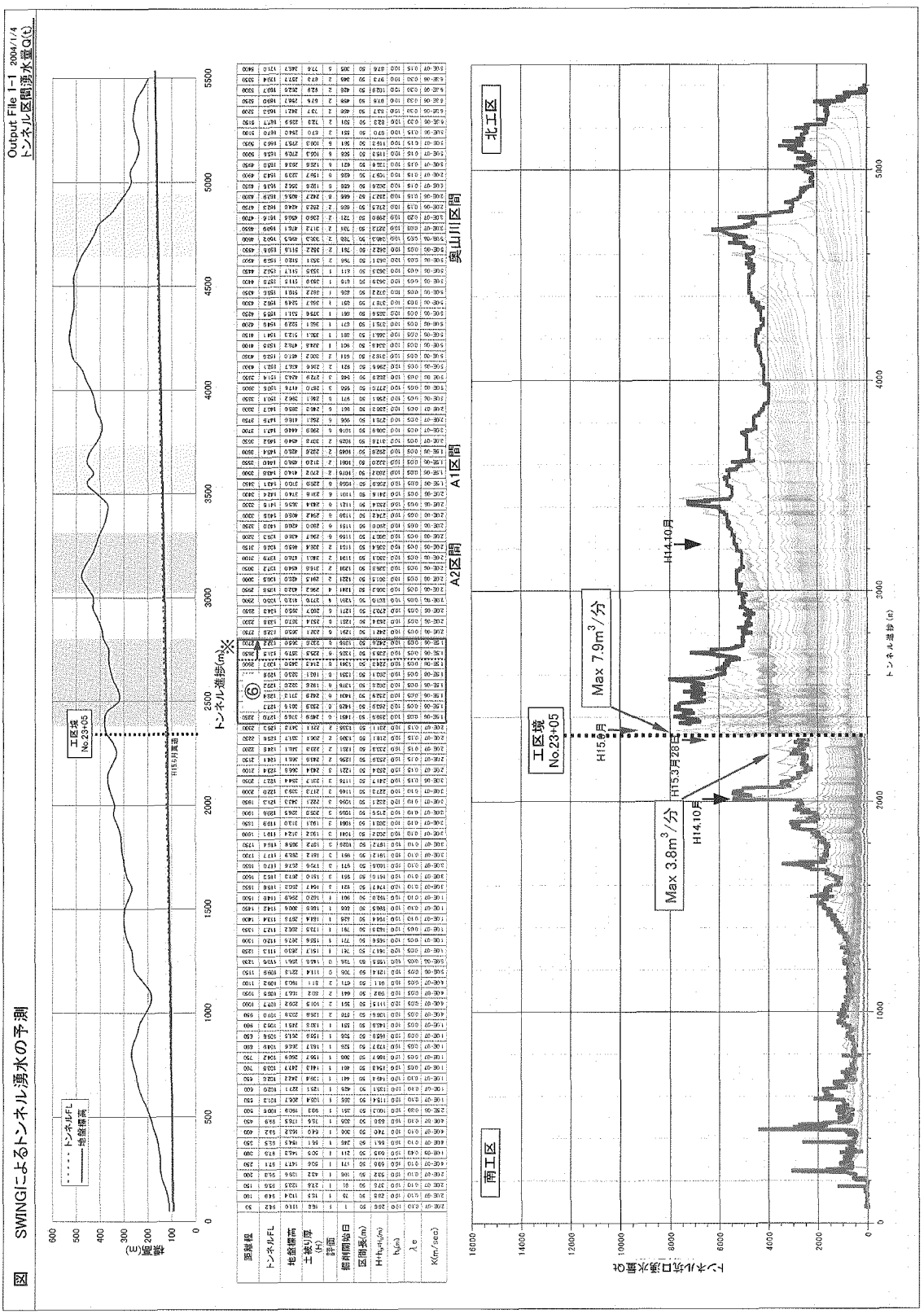


図 1.4.2　SWING 法によるトンネル湧水量の予測

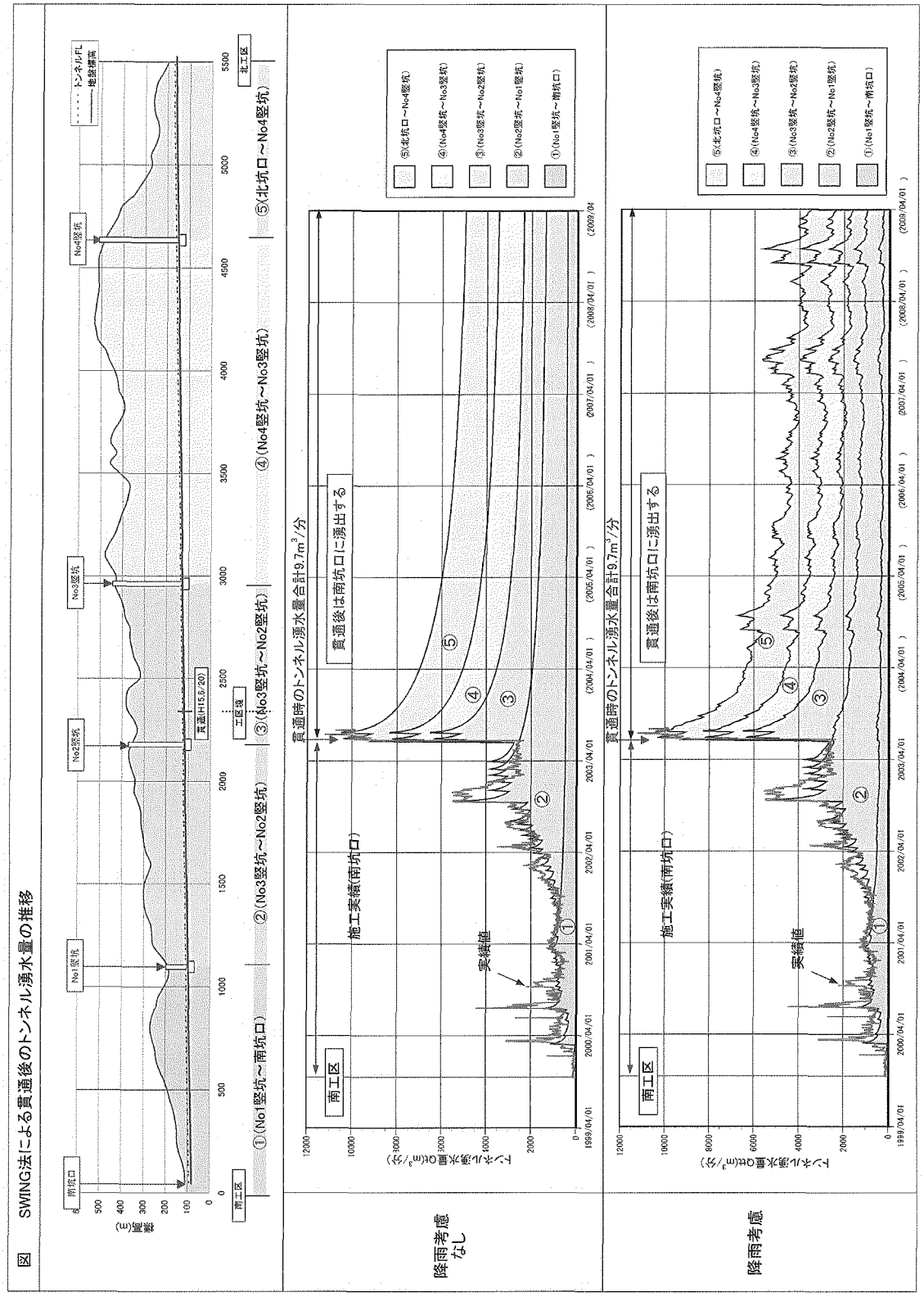


図 1.4.3　SWING 法による貫通後のトンネル湧水量の推移

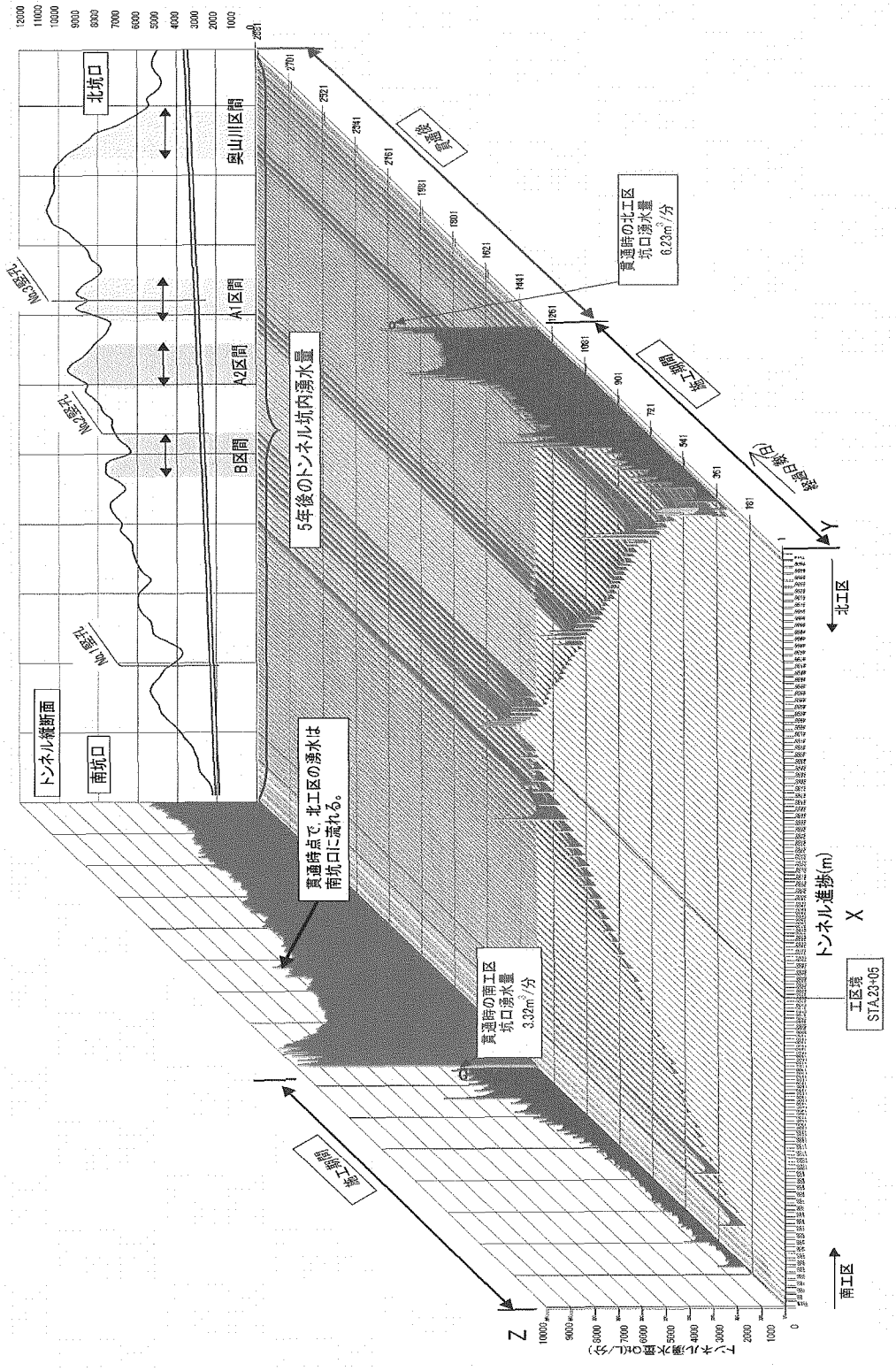


図 1.4.4　SWING 法によるトンネル湧水の３軸表示

(2)地下水位，表流水の変動解析結果

ここではSWING法における渇水影響評価の1例を示す。地下水位，及び表流水の流量とも予測結果と実績値を対比して示している。地下水位低下範囲は**図 1.4.5** に示し，**図 1.4.6～図 1.4.7** に表流水，地下水位の低下量を示した。地下水位低下範囲については現地観測では定性的な評価でしかないが，地下水位や表流水の低下量は，実績値と対比して示している。同図からみて実績影響と細部の微変動は再現されていないが，充分に実用レベルで合致した予測結果である。すなわち，SWING法による予測結果の実用性が証明されている。このモニタリング地点は，SWING法におけるスライス座標系の任意地点の予測結果であり，ここ解析事例である箕面トンネルではトンネル周辺に設置した約90箇所余りの実測地点の全てを網羅している。トンネル湧水と同様に，地下水位低下範囲や沢水減少範囲について，既施工区間の渇水影響実績の検証と未施工区間の影響予測が同時に確認できることになる。

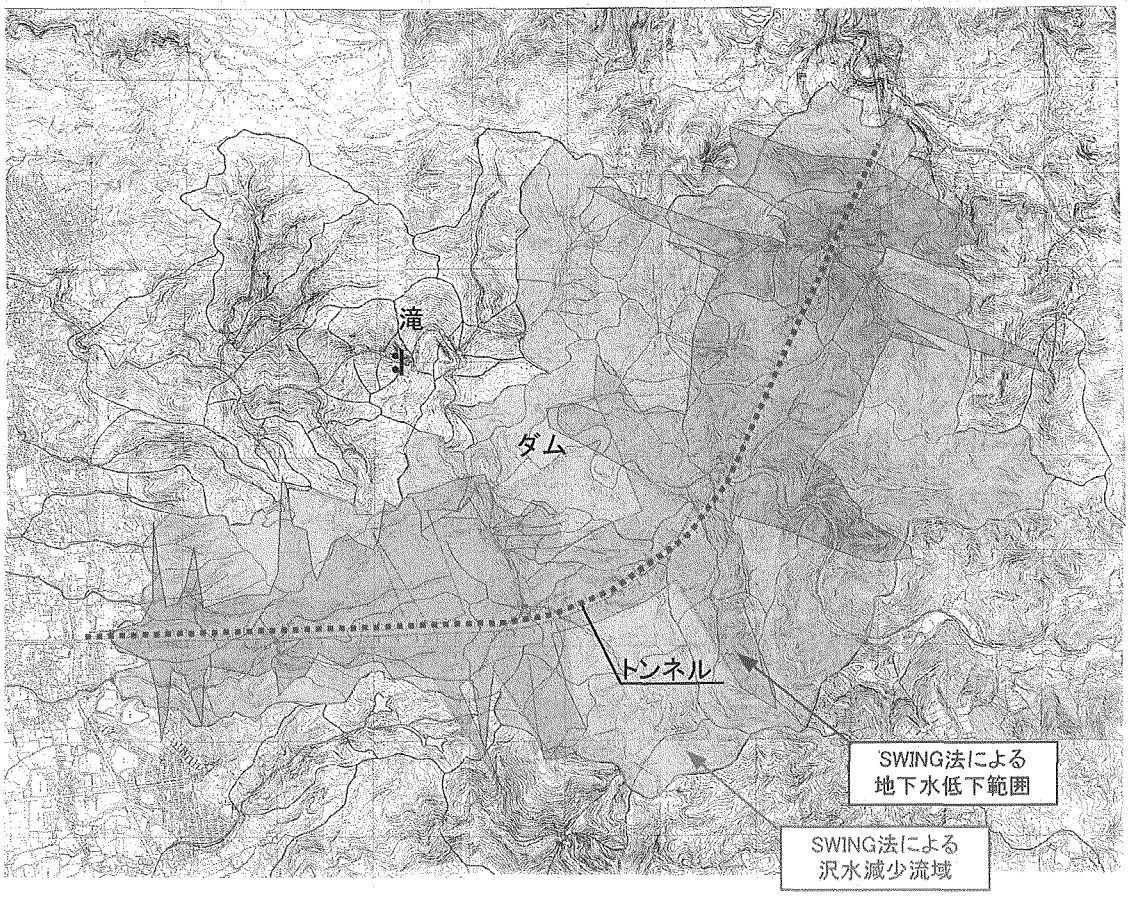


図 1.4.5　SWING法による地下水位低下影響範囲と沢水減少流域

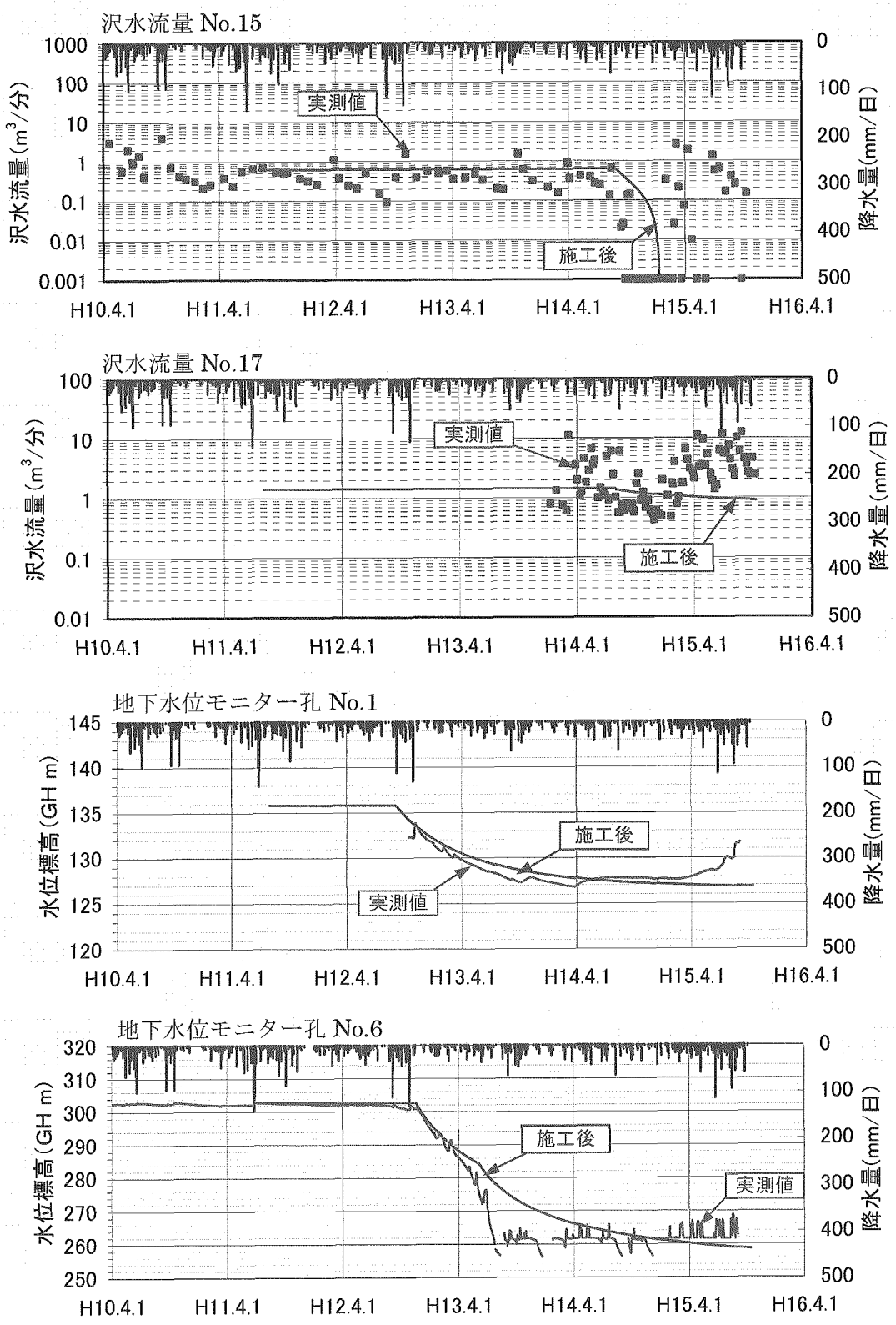


図 1.4.6　SWING 法による表流水と地下水位の変動予測結果
(降雨を考慮しない場合)

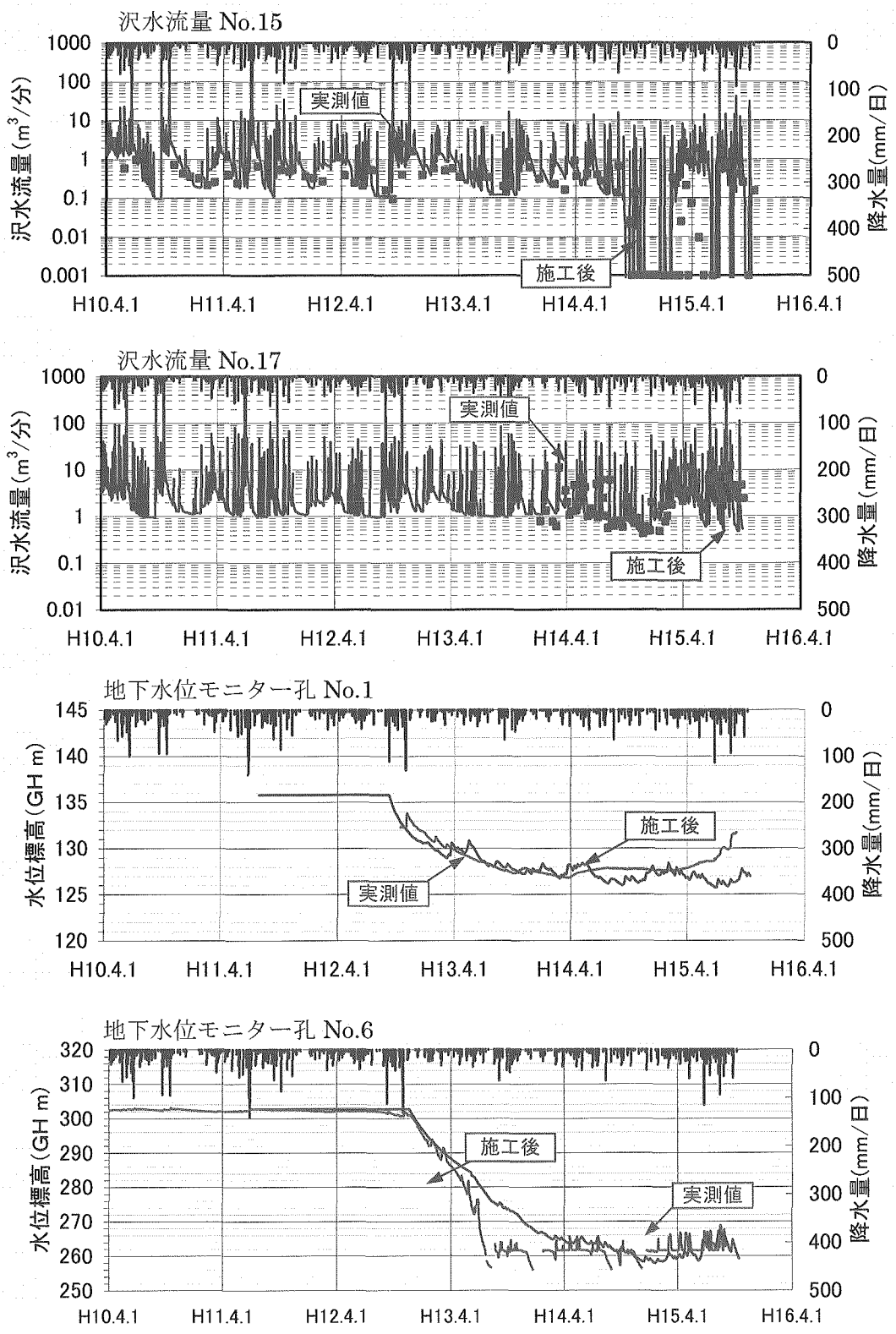


図 1.4.7　SWING 法による表流水と地下水位の変動予測結果
(降雨を考慮した場合)

1.5 まとめ

以下に，まとめを記す。

SWING 法による地下水情報化施工

SWING 法の適用により，水環境系を考慮した工事の進捗に応じた地下水挙動評価と施工実績に合致した最終的な影響評価を検証できていることから，この解析法が十分実用的な解析法に位置付けされると考えている。一般的に，トンネルでは工事前に地山の安定性，透水性を見極めることは困難なことから，地下水に関わるトラブルが余儀なくされる事例が多い。こうした課題に対して，施工途上におけるトンネルの坑内外で発生した地下水や地表水の挙動を観察，計測し，迅速に設計・施工に反映させることが可能な SWING 法が，今後，重要な役割を担うことになるものと考えている。

一方，浸透流解析や修正タンクモデルなどの地下水解析は，工事開始前の事前評価として多用され，工事開始以降は，予測結果との整合性を議論することはあっても，解析所要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い。これに対して SWING 法は，利便性を挙げれば，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，且つ施工に有益な地下水評価が可能である。すなわち，SWING 法は，施工面，周辺環境面を考慮したきめ細かい評価が可能な解析法である。

水収支解析法の利便性

ここで取り上げた修正タンクモデル法，及び SWING 法の利便性や解析上の課題を列挙する。利便性については，

- 水循環系の要素が組み込まれていることから，トンネル湧水の影響が地下水だけでなく，地表水まで波及する特徴が再現可能である。すなわち，水収支量の変化に限定されるが，トンネル掘削に伴う地表水や地下水などの水循環系の中で評価ができる。なお，実用的な面からみると，表流水などは比較的広域，但し，経時変化をデータとして観測し易いことも重要な利点である。
- 修正タンクモデルでは地表水は，地表要素に設けた限界貯留高をタンク高さにもつ地表面１次タンクを用いて降雨時の地表面貯留効果と地下浸透量を算出する手法である。したがって，地盤データ等により流域区分や流下線が比較的容易に設定可能である。
- 修正タンクモデルによる地盤モデルは，単位ブロックから構成されているためモデルの作成は３次元浸透流解析の有限要素分割に比べて容易であり，解析対象が広域の場合も容易にモデル化が可能である。

が挙げられる。また，課題としては以下のとおりである。

- 地盤モデルの作成が容易である反面，モデルの自由度が制限され，複雑な地盤モデルは作成できない。
- 地盤内の地下水流動は，地下水位を変数とした関数から透水量係数を算出する準

3次元流である。そのため飽和域のみの解析であり，不飽和域は評価していない。降雨浸透や多層帯水層構造の解析はできない。

・ 厳密な3次元浸透理論ではないことから，地盤内部における流動メカニズムは評価できない。

すなわち，修正タンクモデルやSWING法は，前章のマルチタンクモデルと同様に，水循環系の要素は考慮しているものの，地下水の流動メカニズムを考慮していない解析法である。したがって，本研究の目的である水循環系を考慮した統合型地下水数値解析法の構築には，前述の課題を補う必要がある。

1.6 参考文献

1) Sugawara,M・Watanabe,I（1984）：Tank model with snow component, Notes, N,R,C No-65,pp.293-298.
2) 大島洋志（1983）：トンネル掘削に伴う湧水とそれに伴う水収支変化に関する水文地質学的研究,鉄研報告 No.1228.
3) 高橋彦治（1962）：トンネル湧水に関する応用地質学的考察,鉄研報告 No.279.
4) 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, pp.171.
5) 池田和彦・大島洋志・石井政次（1974）：渇水調査法の総合的研究　鉄道技術研究報告 No.937，pp.89.
6) 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.
7) 高橋彦治（1962）：トンネル湧水に関する応用地質学的研究　鉄道技術研究報告 No. 279，pp.103.
8) 高橋彦治・石井政次・小林栄（1968）：渇水調査の要領と水文地質資料　鉄道技術研究所速報　No.634，pp.47.
9) 西垣誠・矢野耕一郎（1997）：トンネル掘削時の地下水予測法に関する研究，地盤環境に関するシンポジウム，pp.39-58.
10) 佐藤邦明（1983）：山岳トンネル地下水のモデル化とシミュレーション手法の応用，応用地質，第23巻No.3，pp. 50-56.
11) 山本荘毅（1962）：地下水調査法　地球出版，320pp 角屋　睦・永井明博（1980）：流出解析手法（その12），農土誌，48，pp.51～59.
12) 松井保・磯崎弘治・早坂毅・安田亨(2003)：土木学会第 58 回年次学術講演会講演集, pp.31-32

1.7 立坑掘削における SWING 法の説明（SWING−SHAFT：立坑モデル）

1.7.1 SWING-SHAFT（シリンダーボリューム）

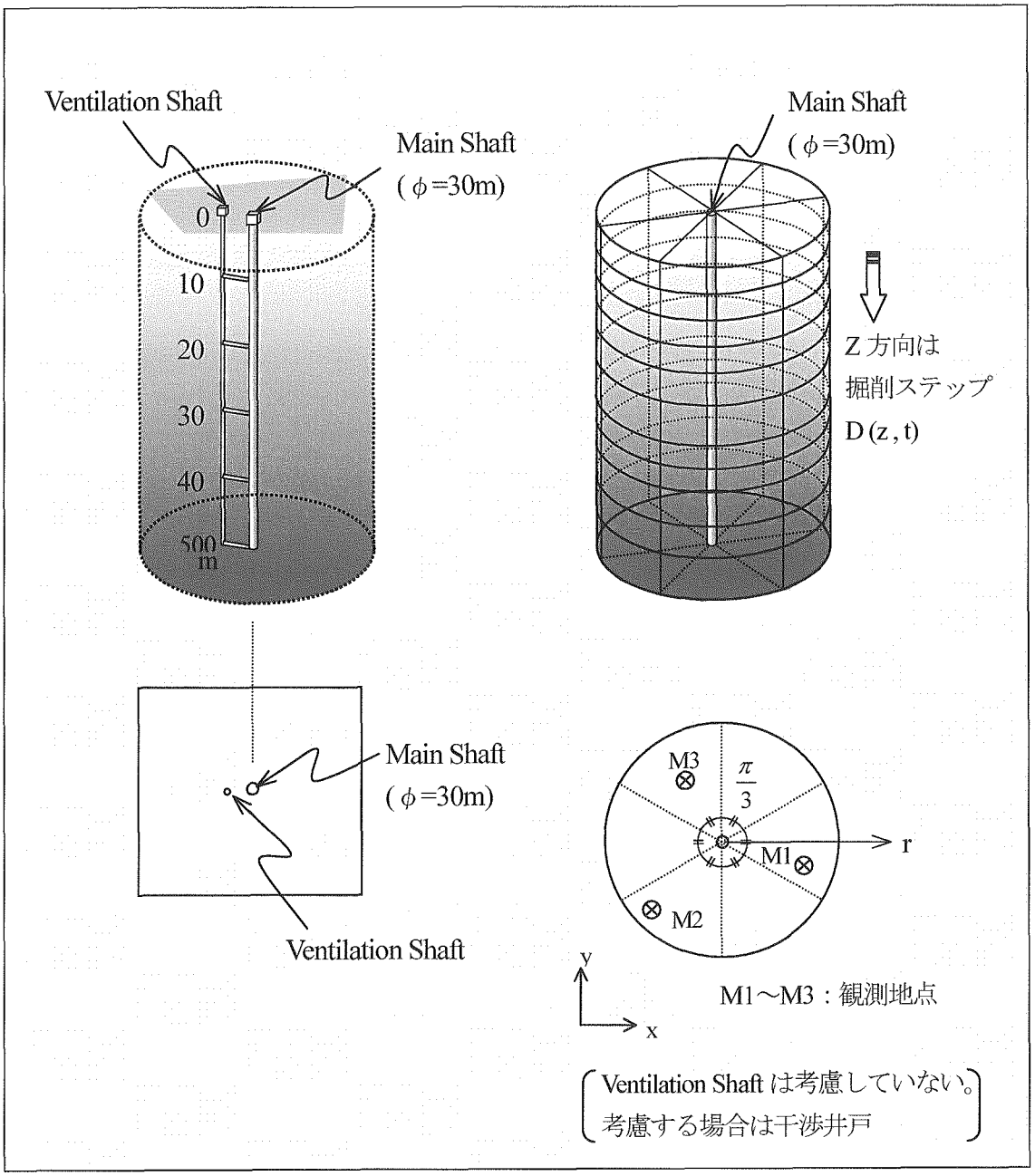


図 1.7.1　SWING-SHAFT(シリンダーボリュームによる)

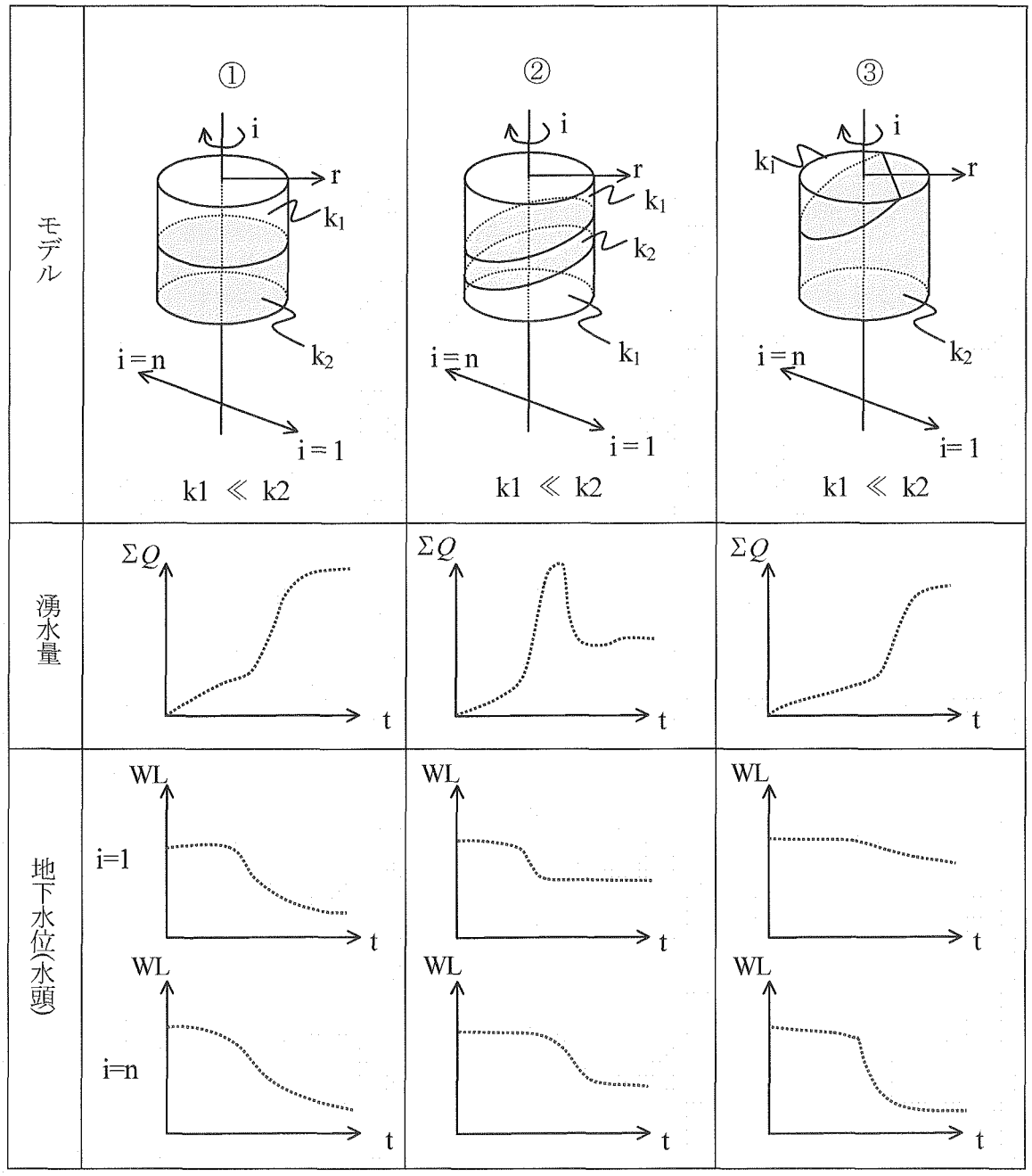


図 1.7.2　SWING-SHAFT の適用結果

1.7.2 SWING-SHAFT の運用

今後の改良点

①坑内展開図，及び坑内湧水の配分　⇒　水理定数等の物性値，区分方法

- 放射流条件 → 亀裂モデル
- シリンダー内の水理式の変更（断層の分布）

②シリンダーボリュームの適正形状

③境界条件（不圧，被圧等の区分）の設定方法

④水循環系要素（降雨，池や河川などの局所涵養など）の考慮

- 流域タンクモデルとの統合
- 1ヶ月～5日期間単位の水収支追跡（降雨浸透量，岩盤浸透量）

⑤シリンダーボリュームの相互干渉

- 鉛直方向の漏水
- 立坑に無関係な地質不連続面の対処

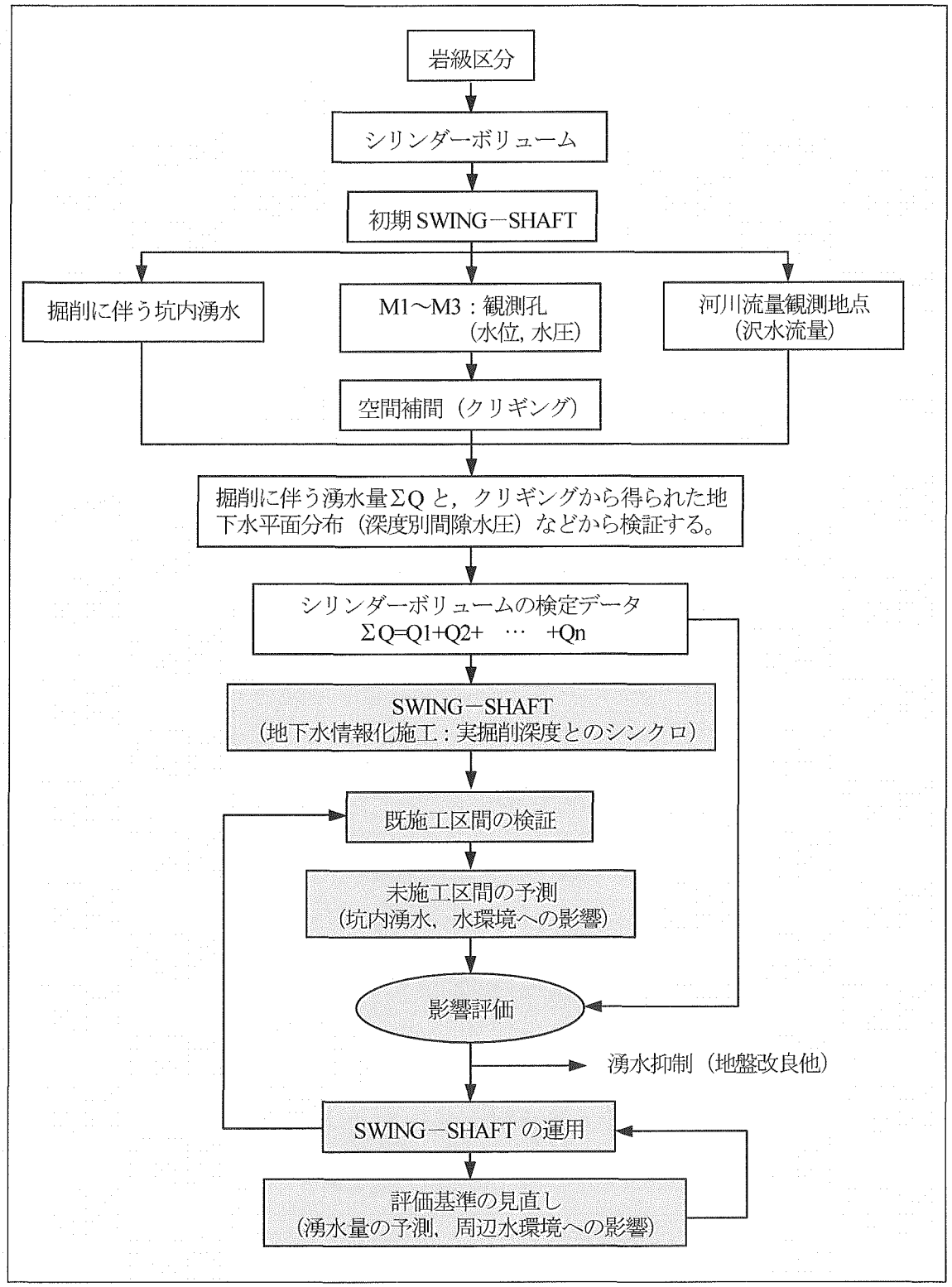
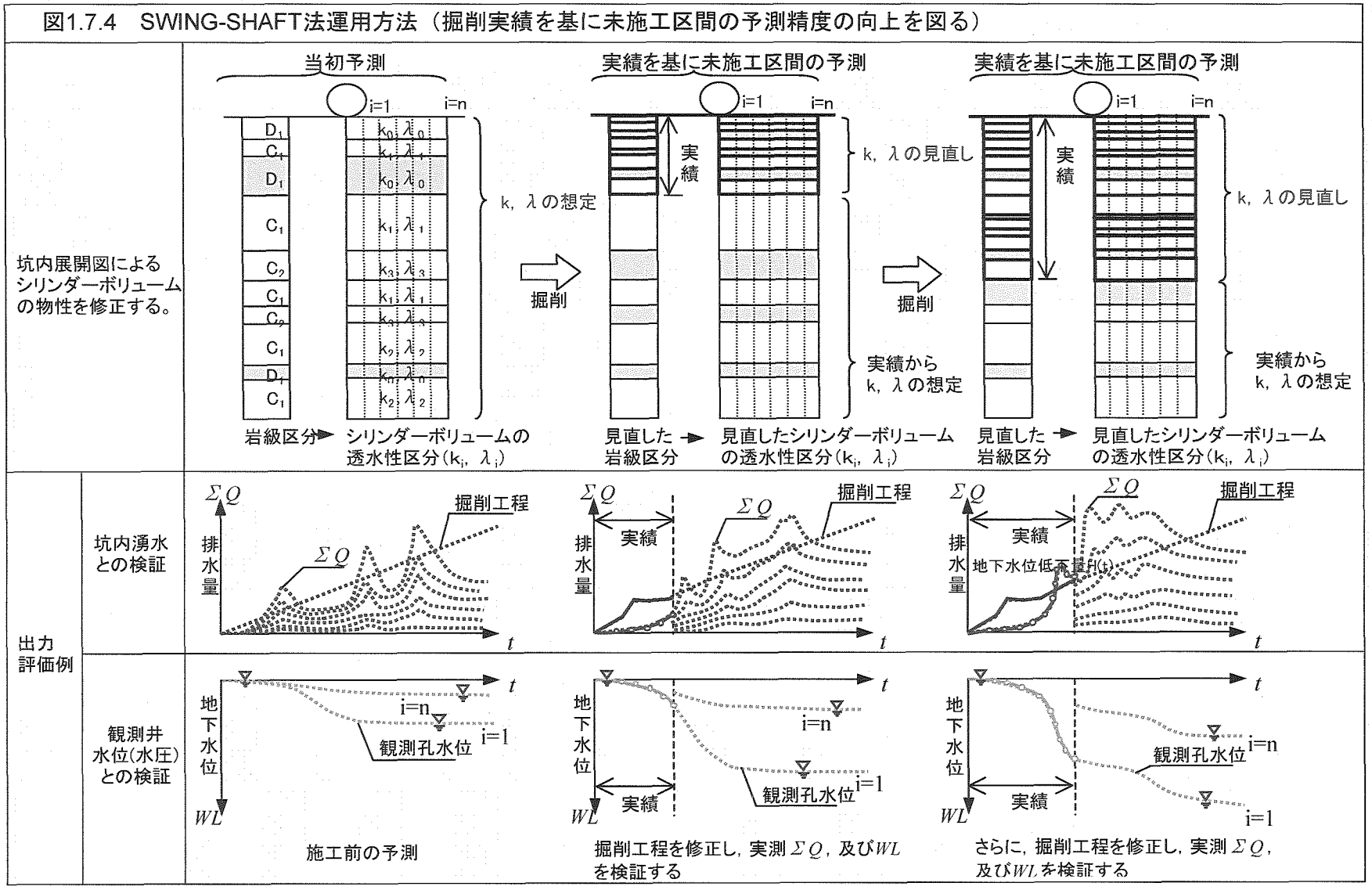


図1.7.3　SWING－SHAFTの運用

図1.7.4　SWING-SHAFT法運用方法（掘削実績を基に未施工区間の予測精度の向上を図る）



1.7.3 SWING-SHAFT の適用式（シリンダーボリューム）

(1) タイスの非定常井戸理論～ヤコブの非平衡式の導出

Unconfined～ $S=\dfrac{Q}{4\pi kH}W(u)$ $u=\dfrac{\beta r^2}{4kHt}$

Confined～ $S=\dfrac{Q}{4\pi \underline{\underline{kD}}}W(u)$ $u=\dfrac{\mu r^2}{4kDt}$

T（透水量係数）

μ ：貯留係数

$W(u)$: Well function

$W(u)$の近似値を適用すると，

Confined の場合，

$$S(r,t)=\frac{Q}{4\pi T}\left(-0.5772-\ln\frac{r^2S}{4Tt}\right)=\frac{Q}{4\pi T}\ln\frac{2.25Tt}{r^2\mu}$$

↓

ヤコブの非平衡式と呼ぶ

更に，$S(r,t)=const$ の等ポテンシャル領域では，円の方程式であり，

$$x^2+y^2=r^2$$

$$S=\frac{Q}{4\pi T}\ln\frac{2.25Tt}{r^2\mu}$$

$$\frac{2.25Tt}{r^2\mu}=e^{\frac{4\pi T}{Q}S}$$

$$r^2=\frac{2.25Tt}{\mu\cdot e^{\frac{4\pi T}{Q}\mu}}=\frac{2.25Tt}{\mu}e^{-\frac{4\pi T}{Q}\mu}$$

$$\therefore S=\frac{Q}{4\pi T}\ln\left(\frac{2.25Tt}{r^2\mu}\right)=\frac{Q}{2\pi T}\ln\left(\frac{2.25Tt}{r^2\mu}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{1.5\left(\frac{Tt}{\mu}\right)^{\frac{1}{2}}}{r}$$

$\therefore S = 0$ のとき,

$$S(u) = \phi(k) - \phi(r) = \frac{Q}{2\pi T} \ln\left(\frac{R}{r}\right)$$

であるから,

$$R = 1.5\sqrt{\frac{Tt}{\mu}} = \sqrt{\frac{2.25T}{\mu}} \cdot \sqrt{t} \qquad \text{①}$$

次に，立坑部の水頭低下 $S = H - h$ とすると,

$$\begin{cases} \text{Unconfined} & \therefore H - h(r,t) = \dfrac{Q}{4\pi k H} W(u) \qquad u = \dfrac{\beta r^2}{4kHt} \\ \text{Confined} & \therefore H - h(r,t) = \dfrac{Q}{4\pi k D} W(u) \qquad u = \dfrac{\mu r^2}{4kDt} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{Unconfined} & Q(z,t) = \dfrac{4\pi k H(H-h)}{W(u)} W(u) = \dfrac{4\pi k H(H-h)}{\ln \dfrac{2.25Tt}{r^2 \mu}} \\ \text{Confined} & Q(z,t) = \dfrac{4\pi k D(H-h)}{W(u)} W(u) = \dfrac{4\pi k D(H-h)}{\ln \dfrac{2.25Tt}{r^2 \beta}} \end{cases} \qquad \text{②}$$

上述の①，②より $R(r,t)$，$Q(t)$を求め，さらに，$S(r,t)$から地下水位（水頭）を求めることが可能である。

他方，実際の理論式の適用にあたり，以下の条件が必要となる。

①上部不飽和領域への降雨涵養

降雨強度：N とすると，

$$Q(z,t)=2\pi k H\frac{\partial h}{\partial r}+\pi\left(r^2-r_w^2\right)N$$

$$S(r,t)=\frac{Q}{2\pi T}\ln\frac{R}{r}-\frac{N}{2k}\left(R^2-r^2\right)+\frac{r^2N}{k}\ln\frac{R}{r}$$

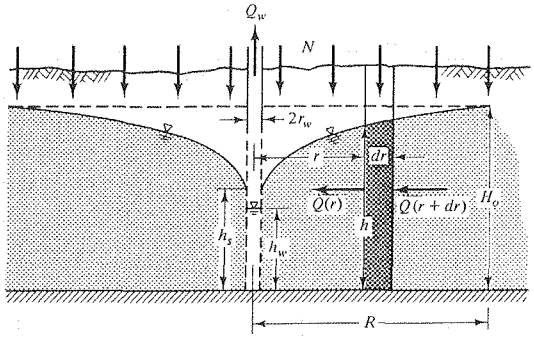


図 1.7.5　上部不飽和領域への降雨涵養の適用条件

②上部からの漏水涵養

漏水量強度：qu とすると，

$$Q(z,t)=\frac{2\pi r B k\beta k_1\left(\frac{r}{\lambda}\right)}{\lambda}\qquad \lambda^2=\frac{B'Bk}{k'}$$

$$S(r,t)=\frac{Q}{2\pi T}\frac{k_0\left(\frac{r}{\lambda}\right)}{\left(\frac{r}{\lambda}\right)k_1\left(\frac{r}{\lambda}\right)}\qquad k_1,k_0：\text{ベッセル関数}$$

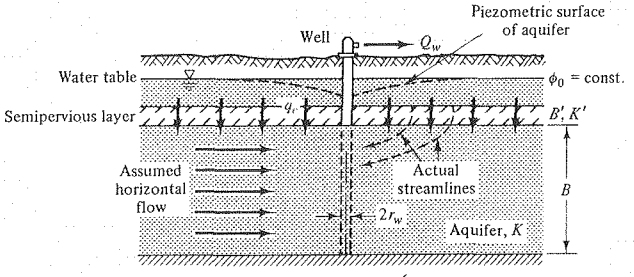


図 1.7.6　上部からの漏水涵養の適用条件

1.7.4 例題

掘削方法：1m/日
解析条件：不圧帯水層
シリンダーボリューム：θ ＝60°　6分割　鉛直方向は5m
地山条件：深度200m，層厚50m，傾斜角45° の高透水層（K2）
と遭遇した場合
K2＝1.0×10^{-4} cm/sec（高透水性）
K1＝1.0×10^{-5} cm/sec（通常岩盤）

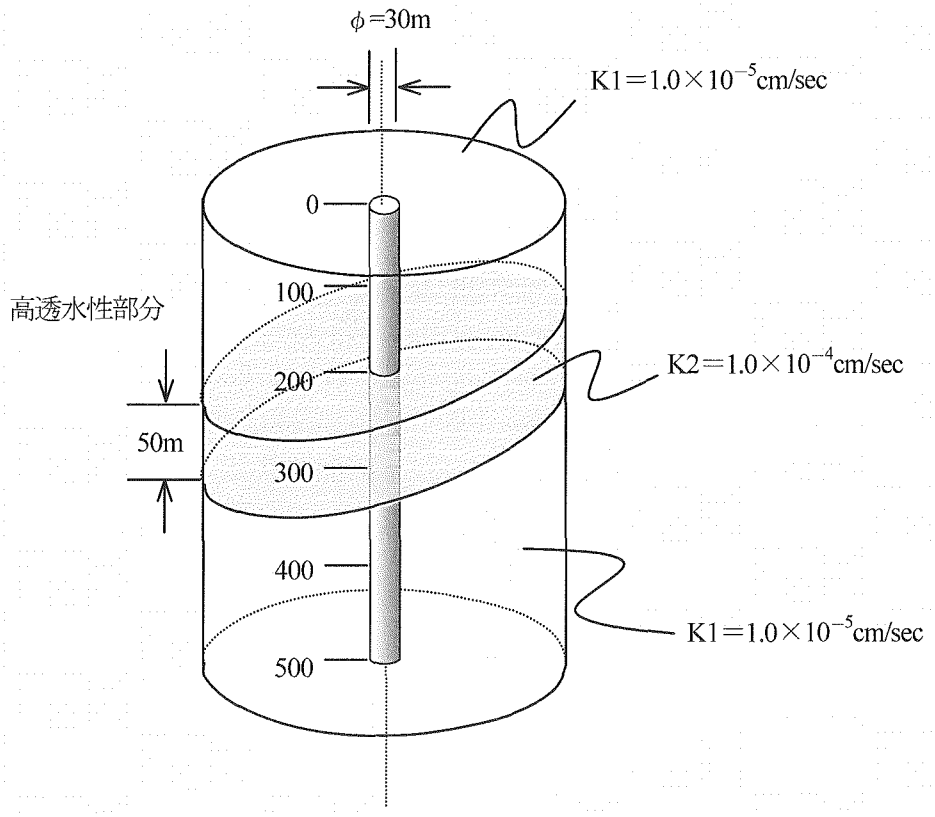


図 1.7.7　立坑モデルの例題

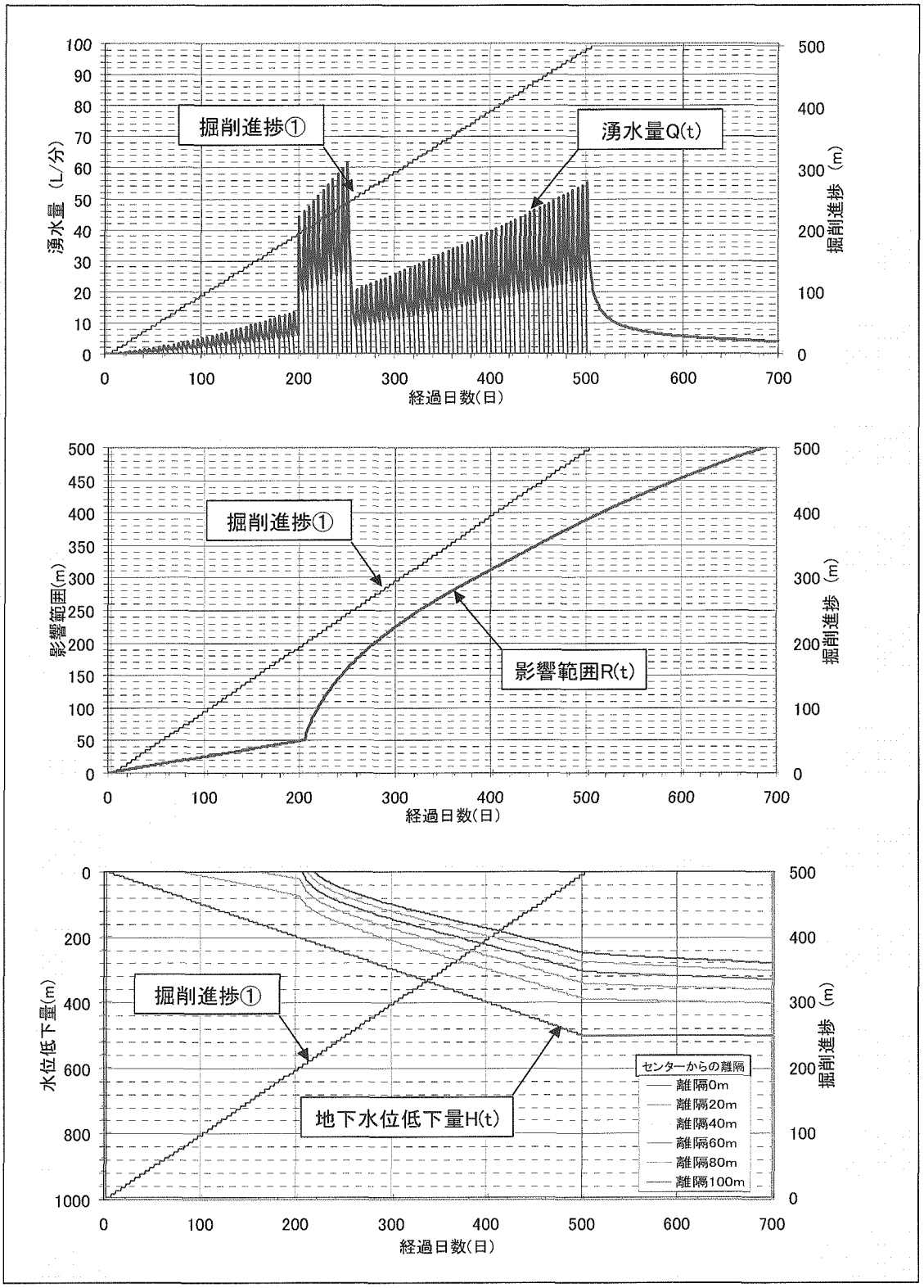
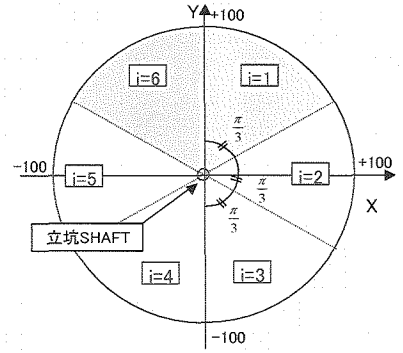
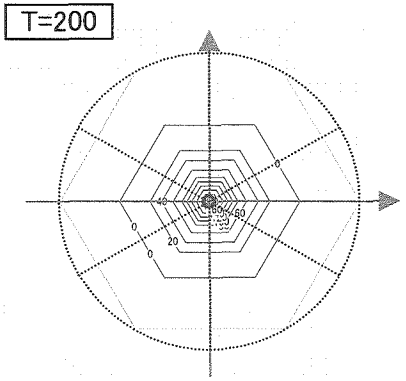


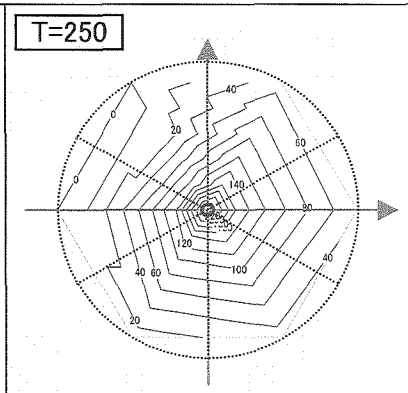
図1.7.8　SWING-SHAFT法による掘削に伴う湧水量と影響範囲
CASE-①

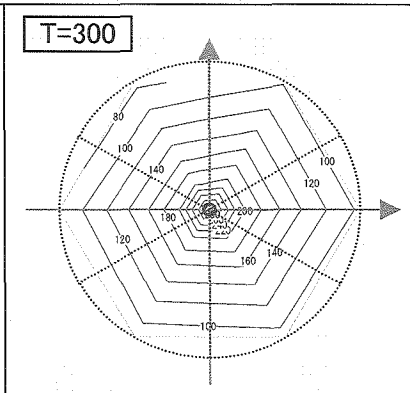
図1.7.9　SWING-SHAFT法による掘削に伴う水位低下量：CASE-①(シリンダーボリューム)



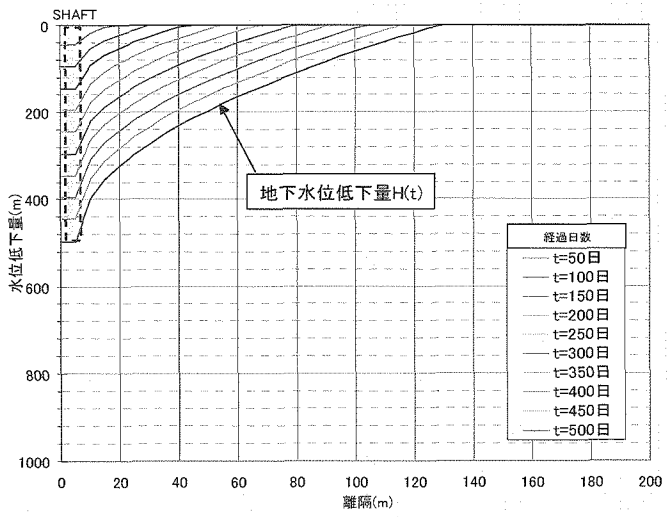
上からみたシリンダーボリューム
i=1～6



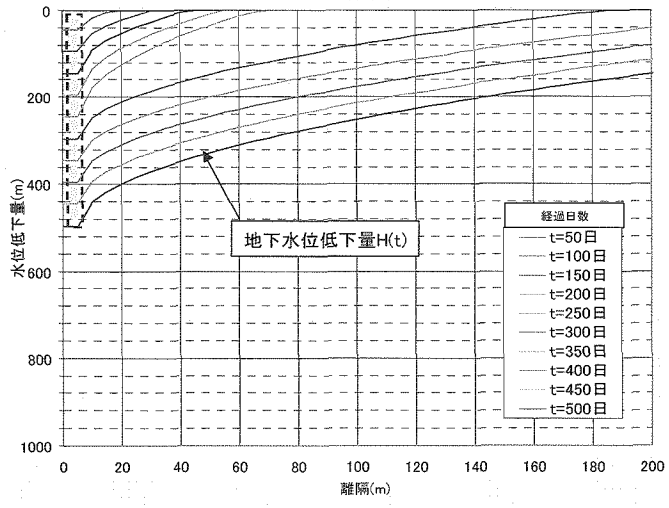


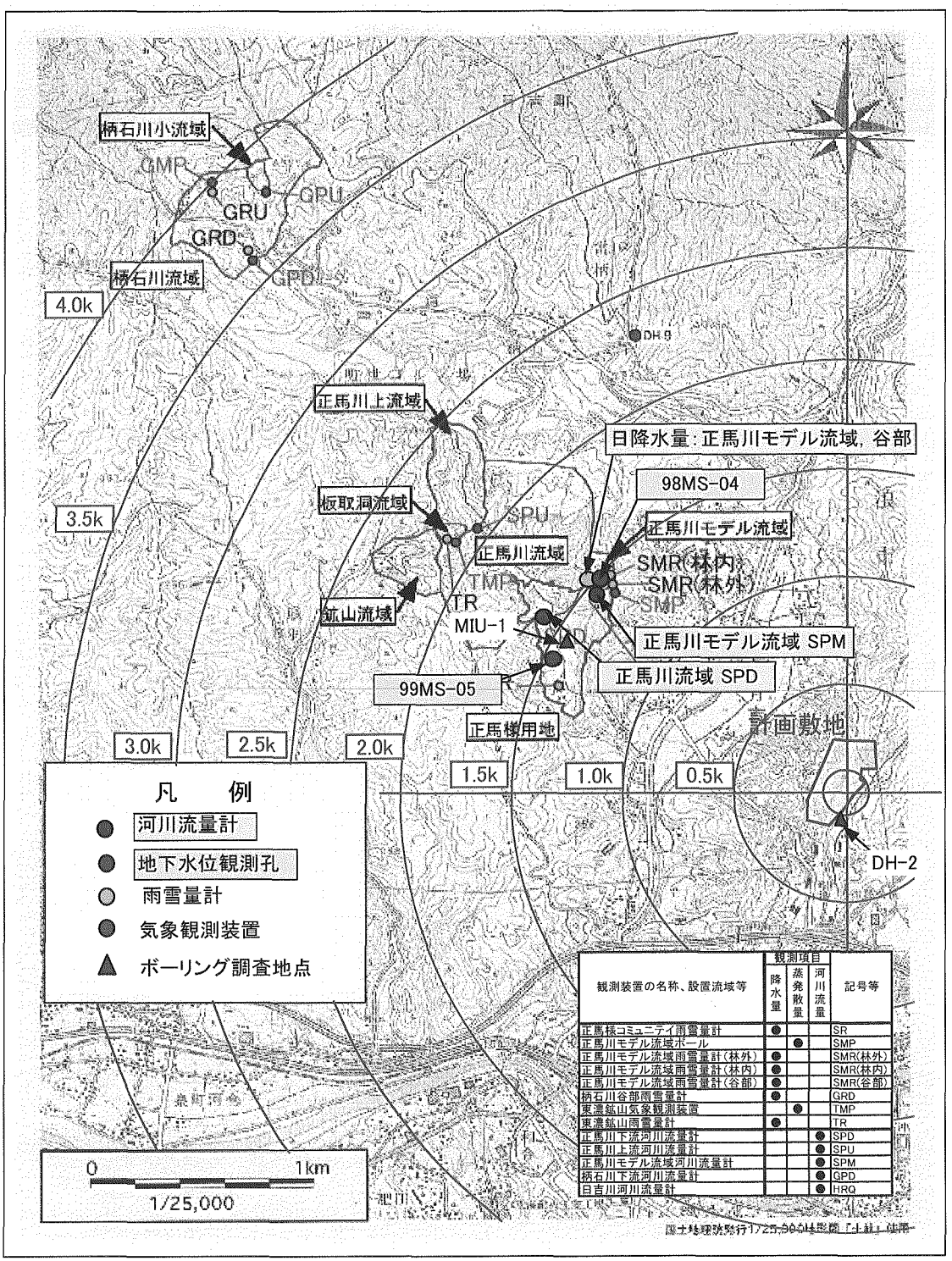


シリンダーボリュームi=1



シリンダーボリュームi=6





観測装置の名称、設置流域等	観測項目 降水量	蒸発散量	河川流量	記号等
正馬様コミュニティ雨雪量計	●			SR
正馬川モデル流域ポール		●		SMP
正馬川モデル流域雨雪量計(林外)	●			SMR(林外)
正馬川モデル流域雨雪量計(林内)	●			SMR(林内)
正馬川モデル流域雨雪量計(谷部)	●			SMR(谷部)
柄石川谷部雨雪量計	●			GRD
東濃鉱山気象観測装置		●		TMP
東濃鉱山雨雪量計	●			TR
正馬川下流河川流量計			●	SPD
正馬川上流河川流量計			●	SPU
正馬川モデル流域河川流量計			●	SPM
柄石川下流河川流量計			●	GPD
日吉川河川流量計			●	HRQ

図1.7.10　検討地区概要（1）

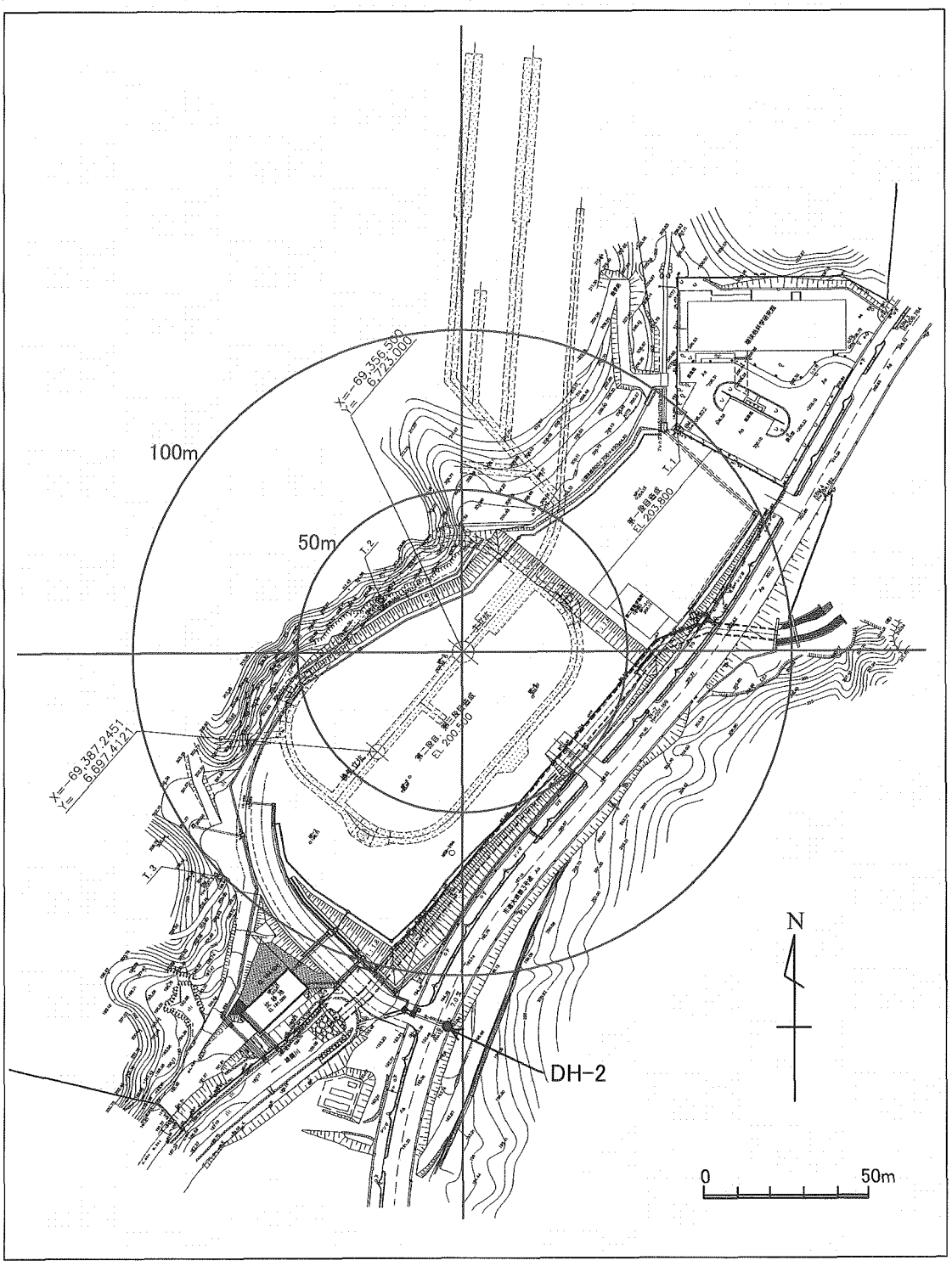


図1.7.11　検討地区概要（2）

図1.7.12　既往の水理物性（k）の推定

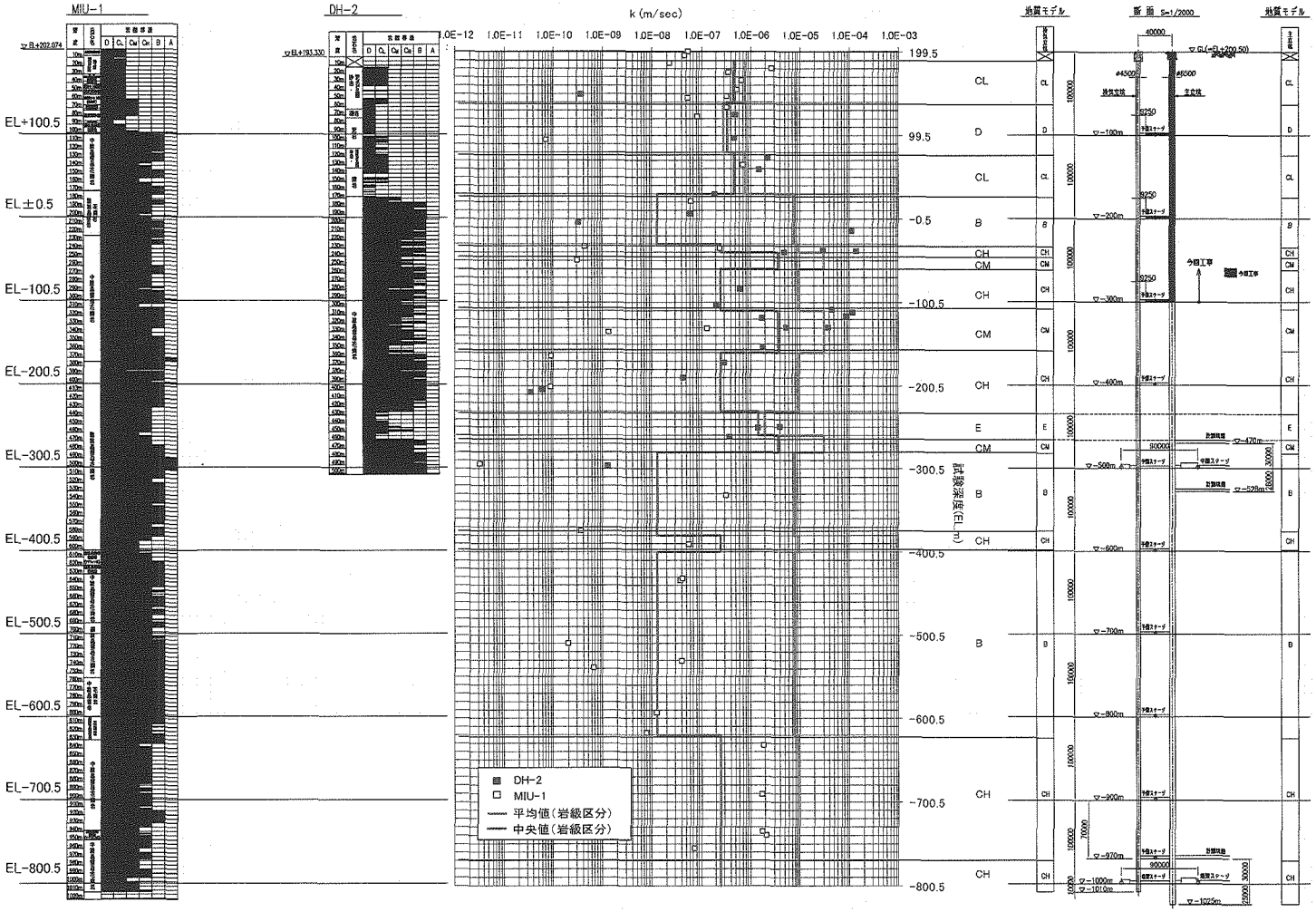
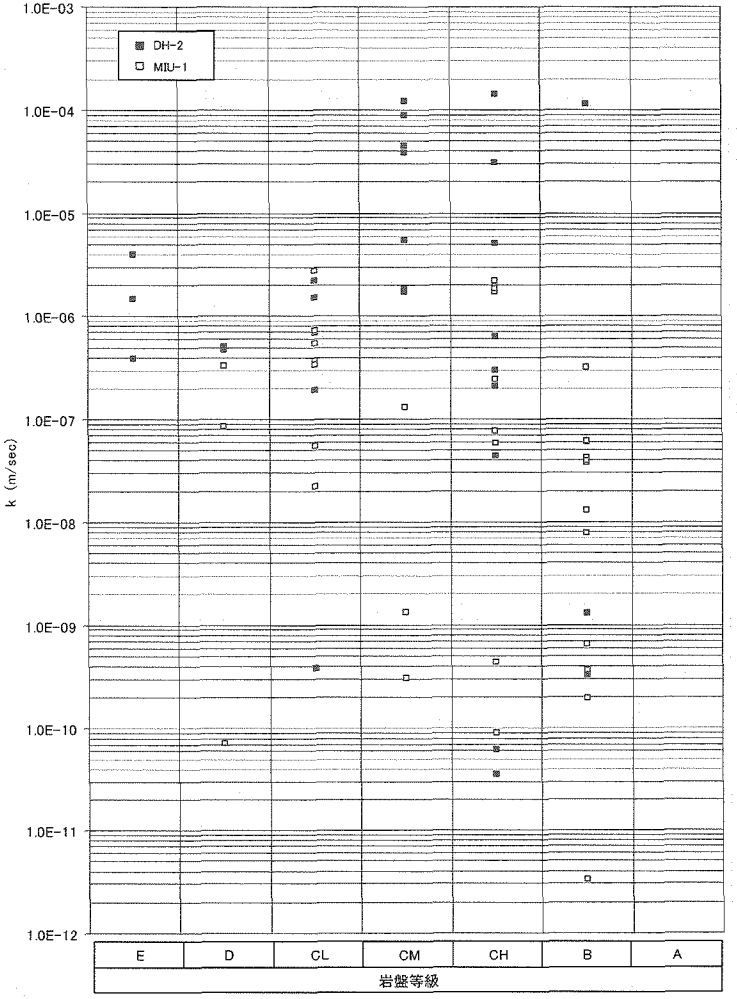


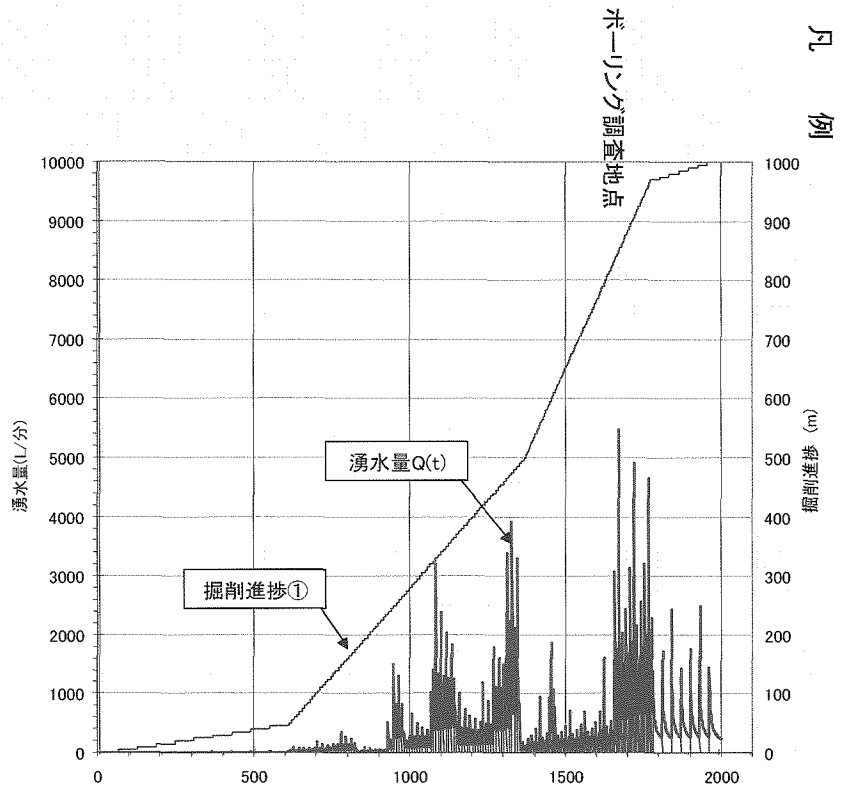
図1.7.13　岩級区分とkの関係



試験番号	岩級区分	試験深度 (E.L. m)	K(m/sec)	平均値 (μ)	中央値 (m)	標準偏差 (σ)	分散 (σ^2)
DH2-28	E	-250.12	4.00E-06	1.95E-06	1.46E-06	1.86E-06	3.45E-12
DH2-11		-250.79	1.46E-06				
DH2-29		-261.82	3.85E-07				
DH2-02	D	123.33	5.10E-07	2.79E-07	3.30E-07	2.28E-07	5.19E-14
DH2-03		95.58	4.70E-07				
MIU1-09		133.07	3.30E-07				
MIU1-10		121.57	8.53E-08				
MIU1-11		93.32	7.20E-11				
DH2-01	CL	148.08	3.80E-10	7.81E-07	4.61E-07	8.95E-07	8.01E-13
DH2-04		71.58	2.20E-06				
DH2-05		58.33	1.50E-06				
DH2-06		28.63	1.90E-07				
MIU1-03		185.77	2.24E-08				
MIU1-04		179.27	2.73E-06				
MIU1-05		175.07	3.74E-07				
MIU1-06		164.77	6.91E-07				
MIU1-07		153.77	5.47E-07				
MIU1-08		145.77	3.42E-07				
MIU1-29		143.32	5.50E-08				
MIU1-30		64.22	7.15E-07				
DH2-21	CM	-110.07	4.50E-05	3.04E-05	3.65E-06	4.36E-05	1.90E-09
DH2-18		-112.92	1.22E-04				
DH2-19		-117.07	8.98E-05				
DH2-20		-120.37	1.71E-06				
DH2-13		-130.79	5.48E-06				
DH2-26		-131.02	3.84E-05				
DH2-22		-155.17	1.83E-06				
MIU1-14		-51.18	3.07E-10				
MIU1-32		-131.53	1.32E-07				
MIU1-15		-136.18	1.33E-09				
DH2-27	CH	-39.12	3.04E-05	9.77E-06	2.43E-07	3.25E-05	1.06E-09
DH2-25		-39.27	1.41E-04				
DH2-14		-40.79	5.03E-06				
DH2-15		-85.79	6.33E-07				
DH2-08		-104.42	2.10E-07				
DH2-23		-172.87	2.97E-07				
DH2-12		-190.79	4.43E-08				
DH2-09		-205.42	6.20E-11				
DH2-24		-208.77	3.57E-11				
MIU1-13		-34.18	4.41E-10				
MIU1-31		-36.48	2.43E-07				
MIU1-16		-165.68	9.12E-11				
MIU1-17		-202.68	9.12E-11				
MIU1-20		-391.68	5.87E-08				
MIU1-36		-632.28	1.90E-06				
MIU1-26		-691.68	1.70E-06				
MIU1-37		-736.15	1.83E-06				
MIU1-27		-740.18	2.19E-06				
MIU1-28		-756.18	7.60E-08				
DH2-16	B	4.21	6.08E-08	7.67E-06	1.29E-08	2.96E-05	8.73E-10
DH2-07		-5.42	3.30E-10				
DH2-17		-14.87	1.15E-04				
DH2-10		-296.92	1.30E-09				
MIU1-12		20.82	6.17E-08				
MIU1-18		-294.18	3.33E-12				
MIU1-33		-331.98	3.20E-07				
MIU1-19		-374.18	3.66E-10				
MIU1-34		-432.73	4.22E-08				
MIU1-21		-434.68	3.78E-08				
MIU1-22		-510.68	1.98E-10				
MIU1-35		-531.68	3.98E-08				
MIU1-23		-539.68	6.52E-10				
MIU1-24		-594.18	1.29E-08				
MIU1-25		-617.68	7.83E-09				

図1.7.14　SWING-SHAFT法による掘削に伴う湧水量：CASE-①(ΣQ)

k=中央値



k=平均値

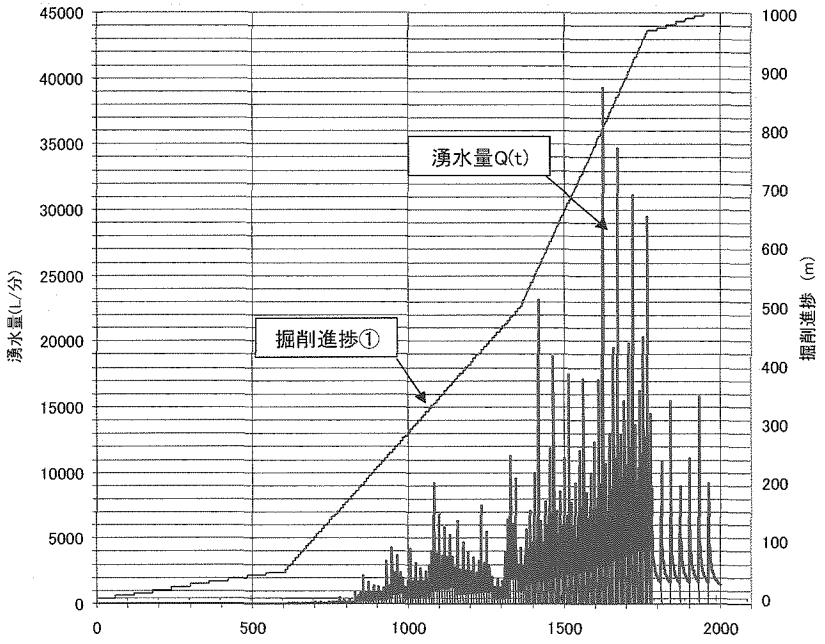


図1.7.15　SWING-SHAFT法による掘削に伴う湧水量と影響範囲：CASE-①(シリンダーボリュームi=1)

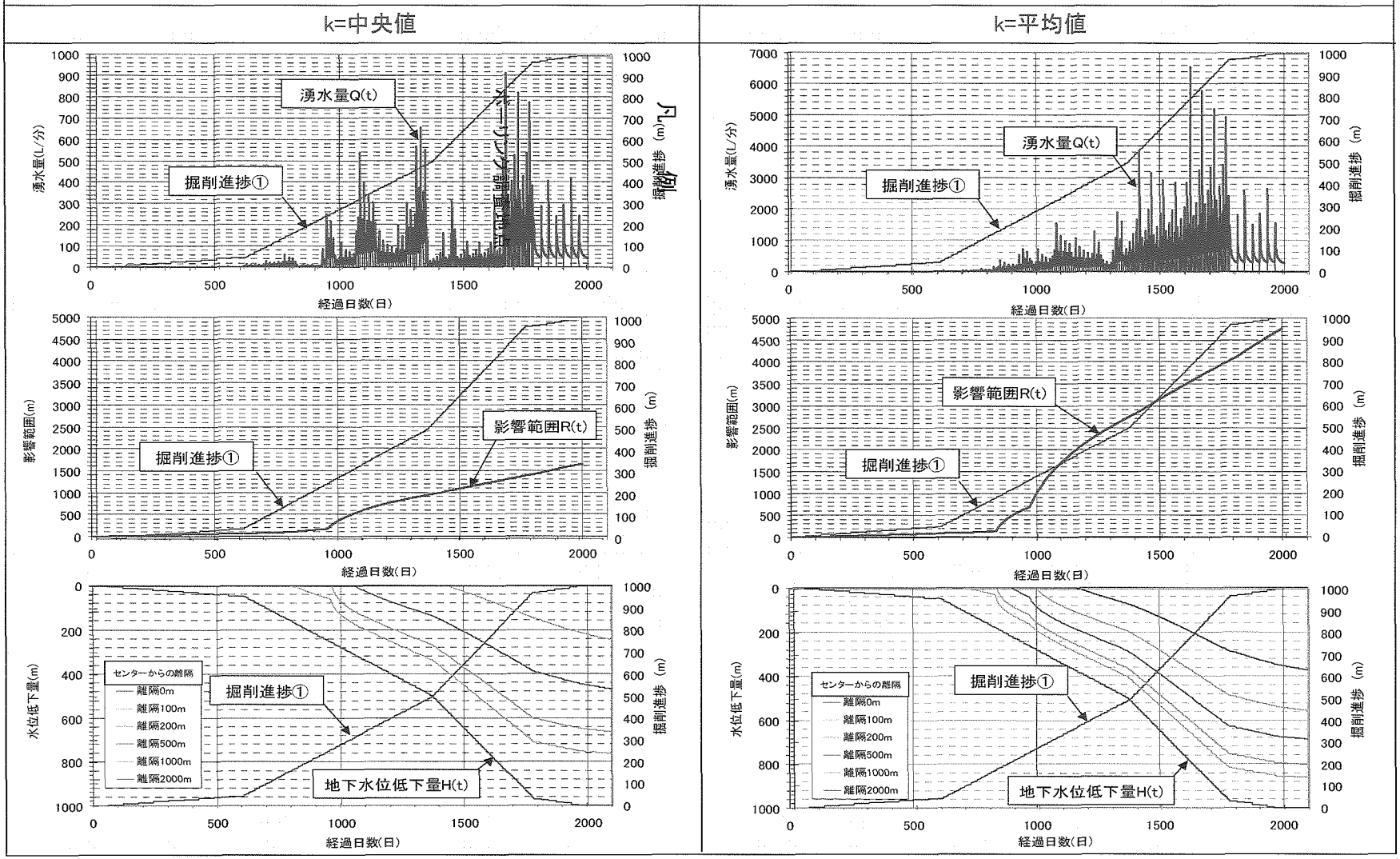
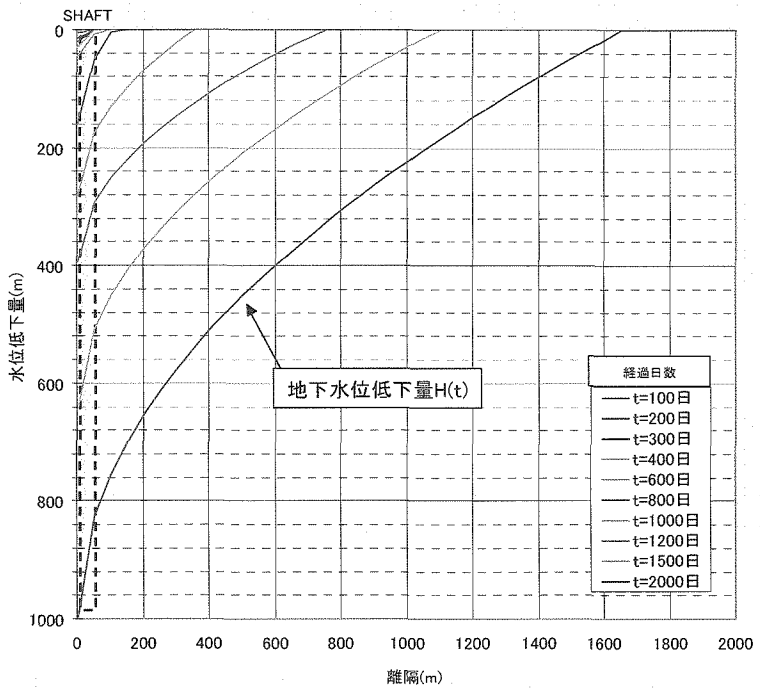


図1.7.16　SWING-SHAFT法による掘削に伴う水位低下量：CASE-①(シリンダーボリュームi=1)

k=中央値



k=平均値

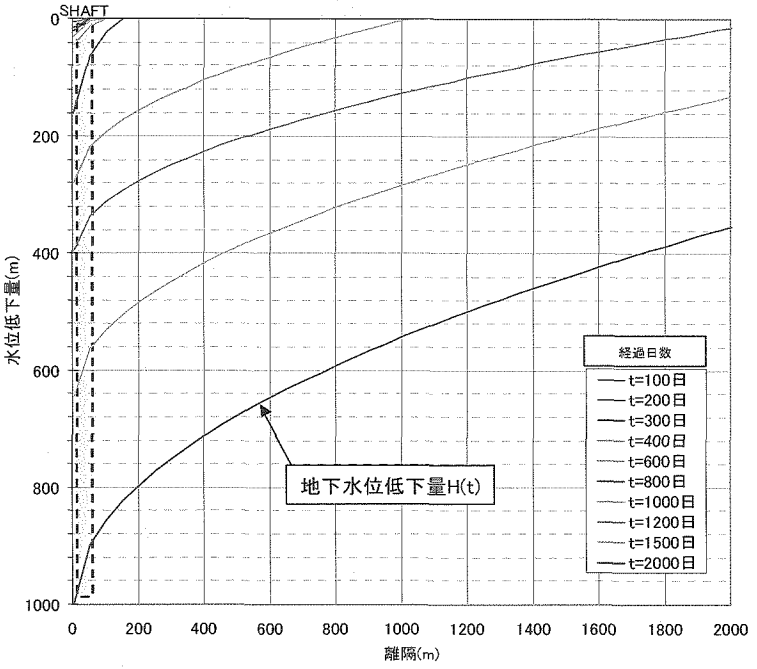
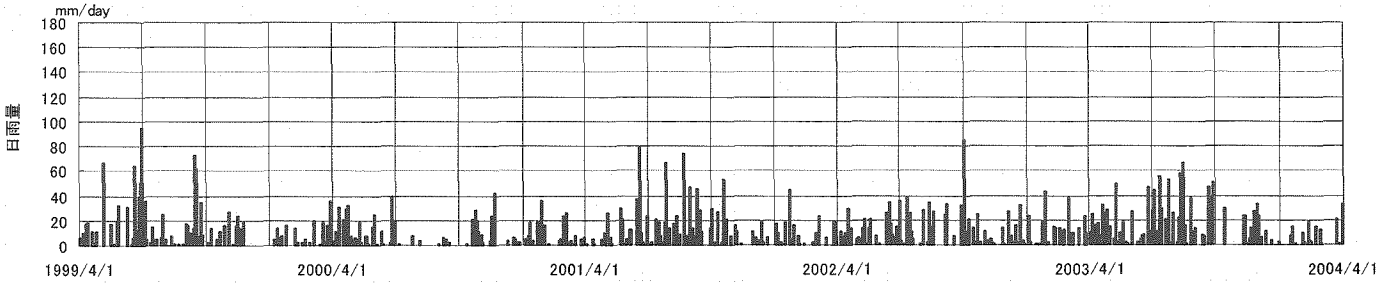
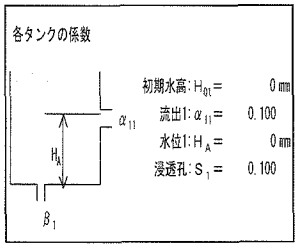
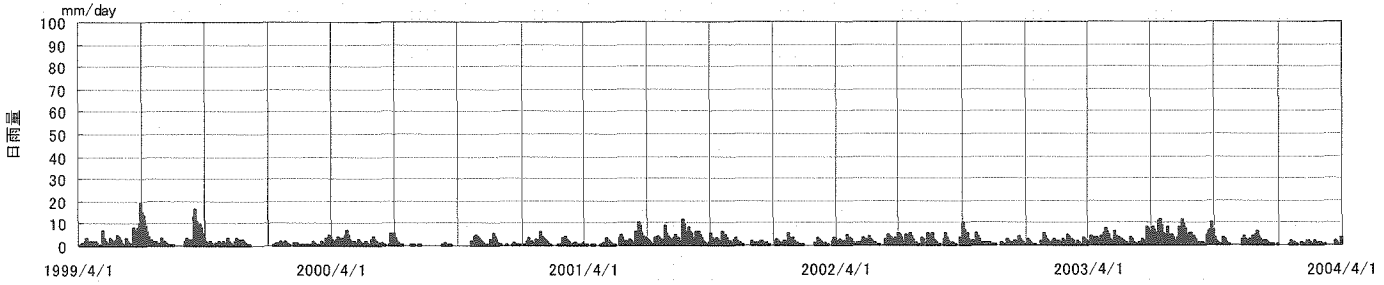


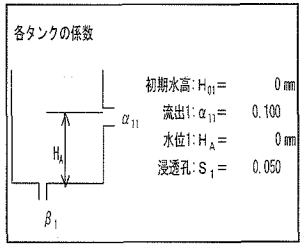
図1.7.17　1次元タンクモデルによる降雨浸透量の制御

実績降水量









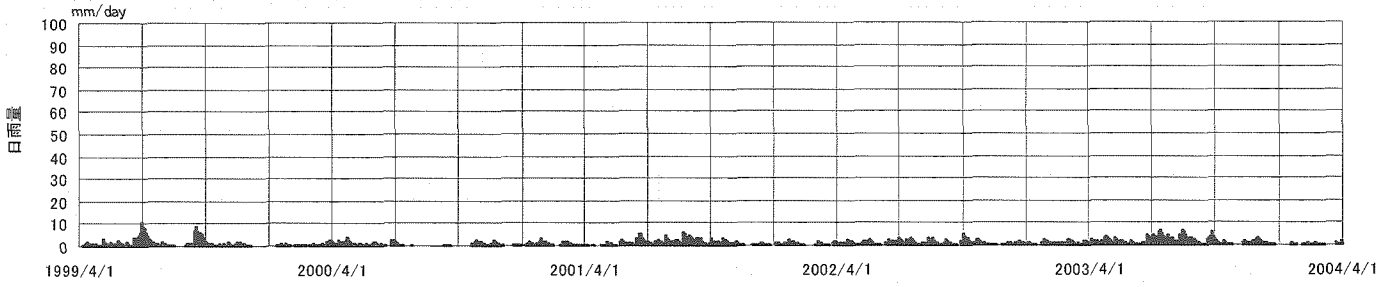


図1.7.18　現地水文データ例

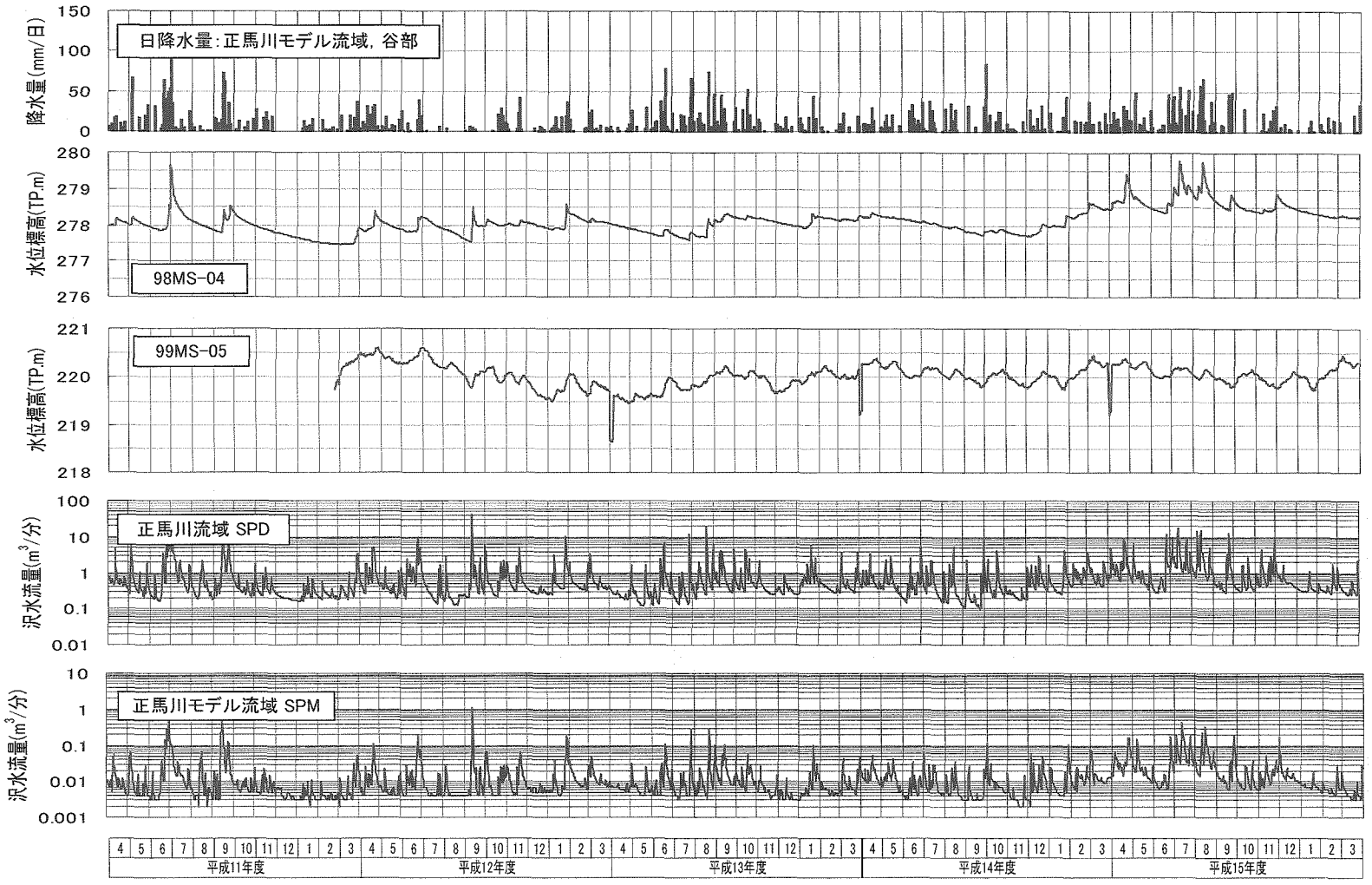
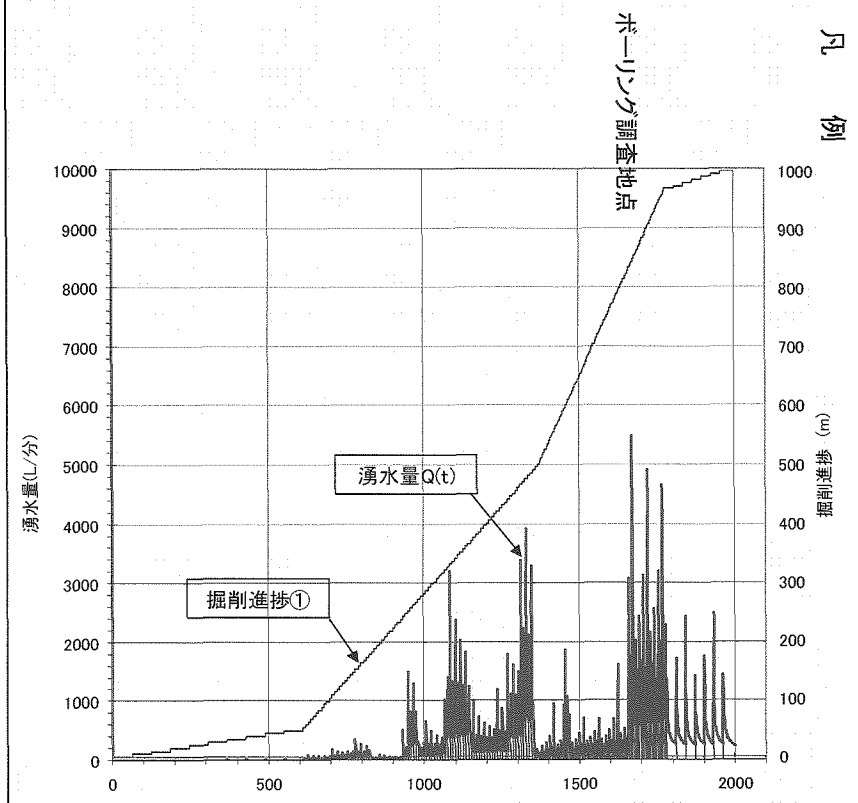


図1.7.19　SWING-SHAFT法による掘削に伴う湧水量：CASE-①(ΣQ)

タンクモデルによる降雨考慮

k=中央値



k=平均値

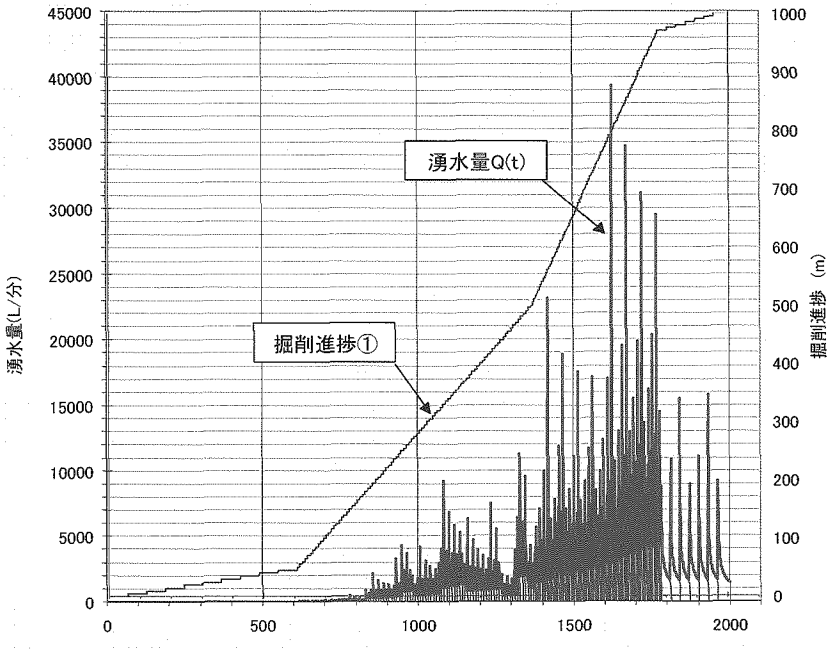
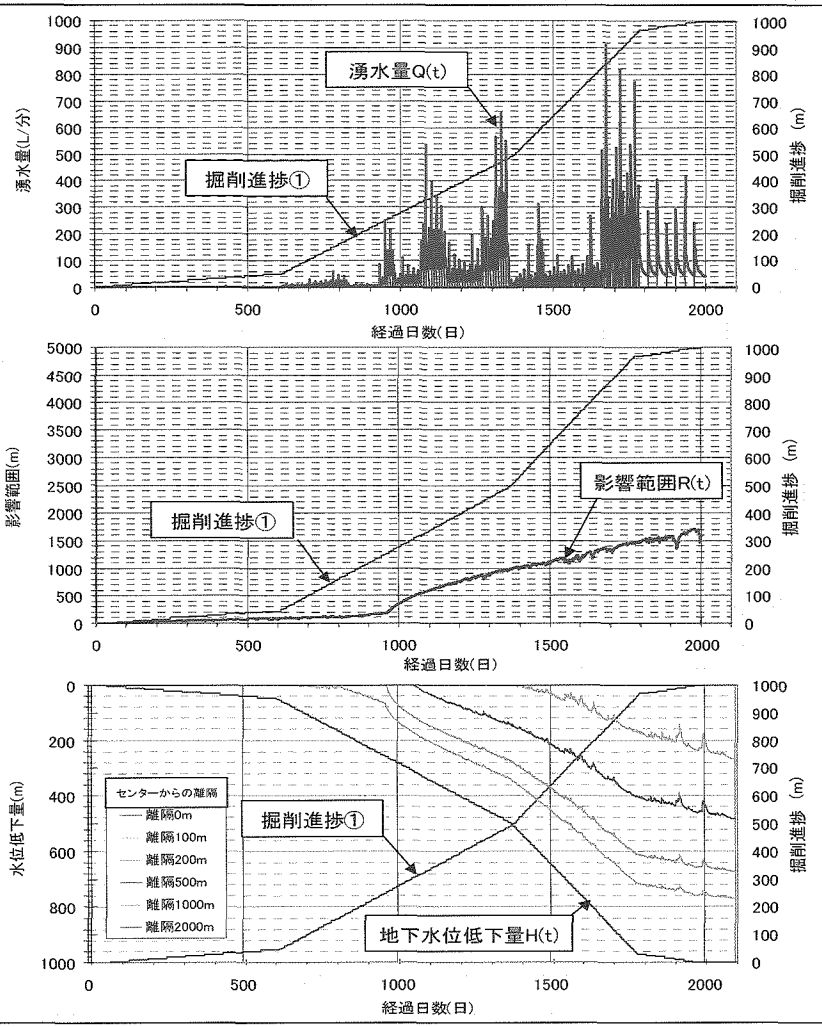


図1.7.20 SWING-SHAFT法による掘削に伴う湧水量と影響範囲：CASE-①(シリンダーボリュームi=1)

タンクモデルによる降雨考慮

k=中央値



k=平均値

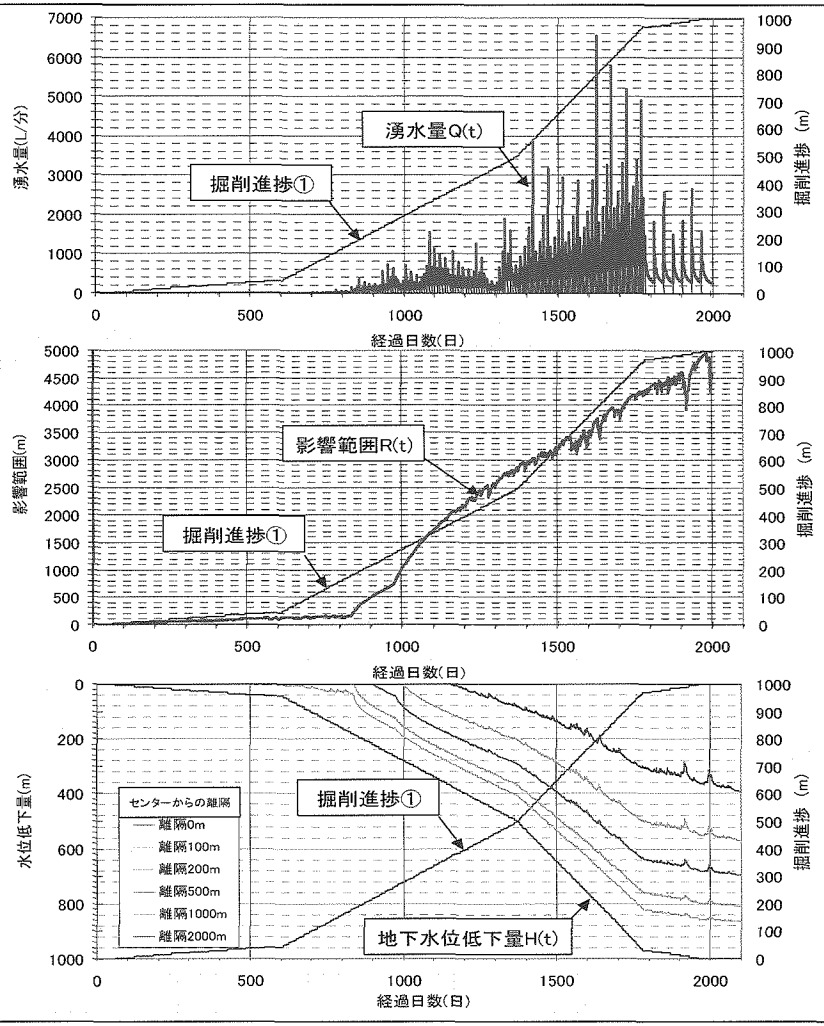
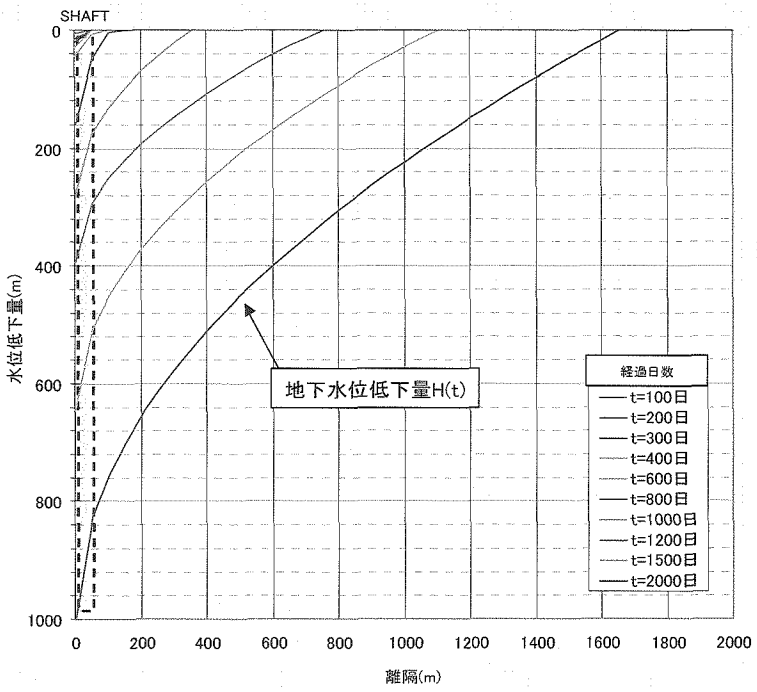


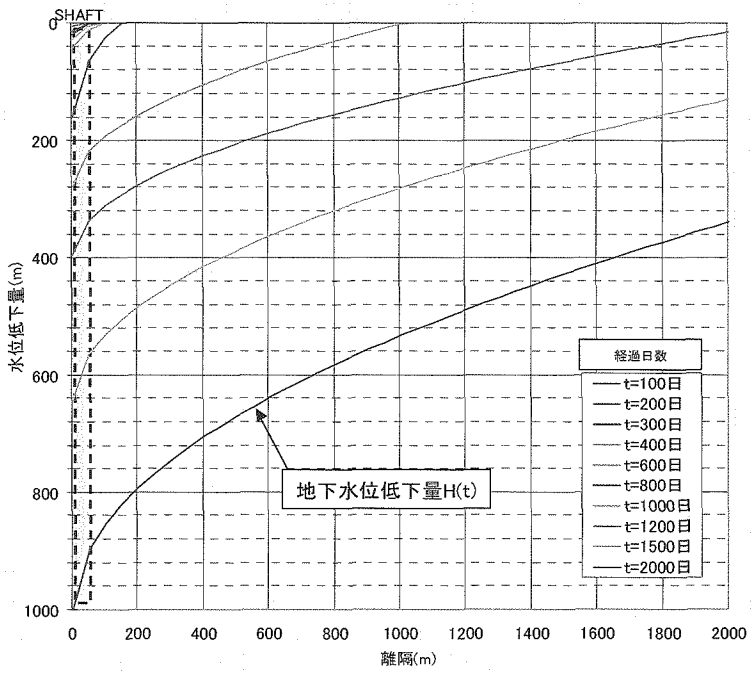
図1.7.21 SWING-SHAFT法による掘削に伴う水位低下量：CASE-①(シリンダーボリュームi=1)

タンクモデルによる降雨考慮

k=中央値



k=平均値



2. 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

2.1 はじめに

地下研究所の建設など，地下開発に伴う環境影響を評価する事に関しては極めて難しい側面がある。例えばトンネル建設を考えると，それが火山岩地域に掘られたような場合，トンネル路線近傍では地下水位が低下するなどの影響がある。では，この影響がどこまで及ぶか，どこまで保証すべきかとなると，評価が難しい点がある。井戸の場合はそれでも水位変化などの計測によってある程度評価が可能となる。しかし，瑞浪地下研究所のように周囲が植林地帯となっており，もし森林に何らかの被害が出た場合，研究所建設の影響の有無を論ずるのは難しい点がある。一般には，岩盤中の深層地下水と，樹木が利用する浅層の地下水との関係は小さいと考えられているものの，全く関係ないとは断定が難しい。この場合，浅層の地下水流動の変化を的確に評価するシステムを設置し，影響の有無を定量的に把握しておくことが必要となる。

今年度の研究は，小流域の降雨と流出応答を解析し，浅層の地下水状態変化が評価できるかについて検討したものである。これは，小流域の降雨－流出応答が基本的に浅層の地下水に影響されていると考えられるからである。今後の地下研究所や処分場の建設に当たっては，あらかじめこのような解析を行い，浅層の地下水に与える影響を評価するシステムを設置する事が不可欠と考えている。今回の研究では，降雨－流出応答をニューラル・ネットワークを用いて構築した。

2.2 モニタリングシステムの考え

図 2.2.1 に，対象とする問題を模式的に示す。図では，処分場建設に伴う地下水位（水圧）低下を示している。このような地下水位低下によって，地表付近の地下水流動に変化が現われるかどうかをモニタリングにより調べる。**図 2.2.2** は，その影響を小流域の降雨－流出応答により調べる事を書いたものである。

図 2.2.3 は，開発した解析システムの概念図である。流出に関係する量は極めて多様であるため，主要に影響する量を遺伝的アルゴリズム（GA）を用いて絞り込む。次に，選ばれた量によりニューラル・ネットワーク（ANN）構造を構築し，ANN 解析を行って全体のモニタリングシステムを組み立てる。ANN により降雨－流出応答がうまく解析でき，時間 t 時点の流出がそれ以前の流出や降雨で精度良く予測できるならば，予測値と実測値との比較により，流出，換言すれば，浅層地下水流動メカニズムの変化が把握できる事になる。具体的には，実測値が，流動メカニズムが変化しない前の情報を用いて算定された予測値から傾向的に異なってくるはずである。

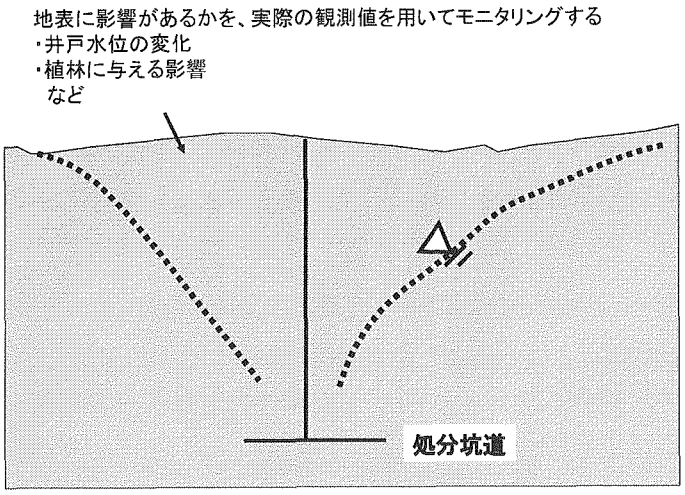


図 2.2.1　地下研究所や処分坑道建設と地下水流動変化模式図

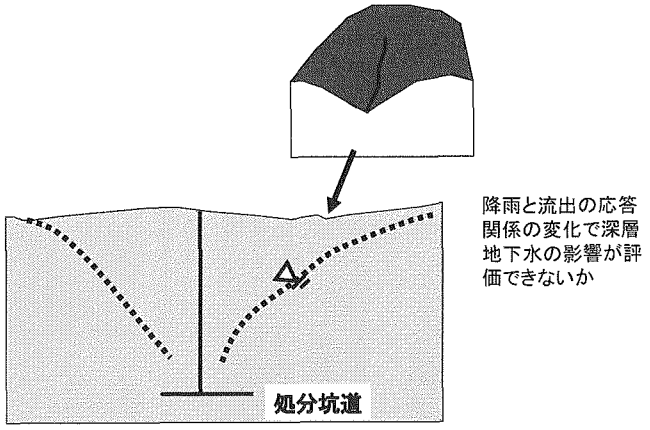


図 2.2.2　小流域の降雨－流出応答によるモニタリングの模式図

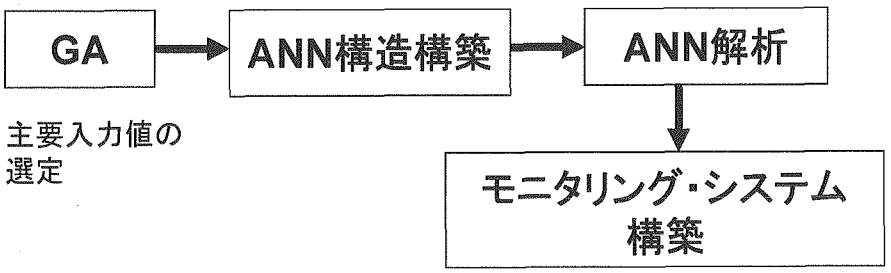


図 2.2.3　解析システムの概念図

2.3 解析データと解析方法

今回の解析は，図 2.3.1 のⅡ流域（SPU 流域）を対象に行った。流出データとしては，1991 年から 2003 年までを用いた。

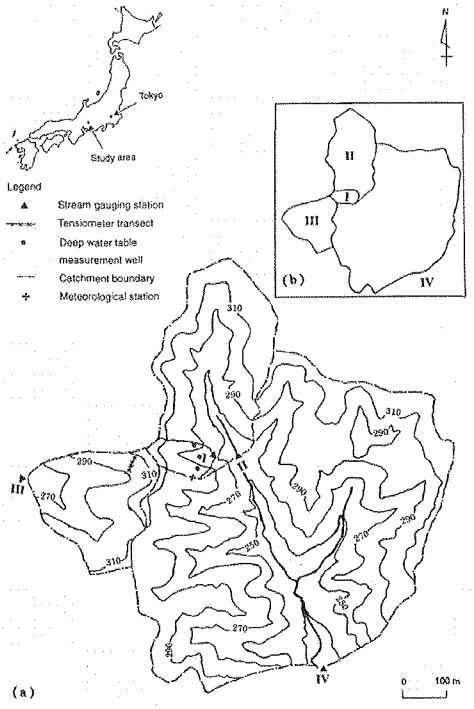


図 2.3.1　研究対象流域。（ｂ）中のⅡ流域

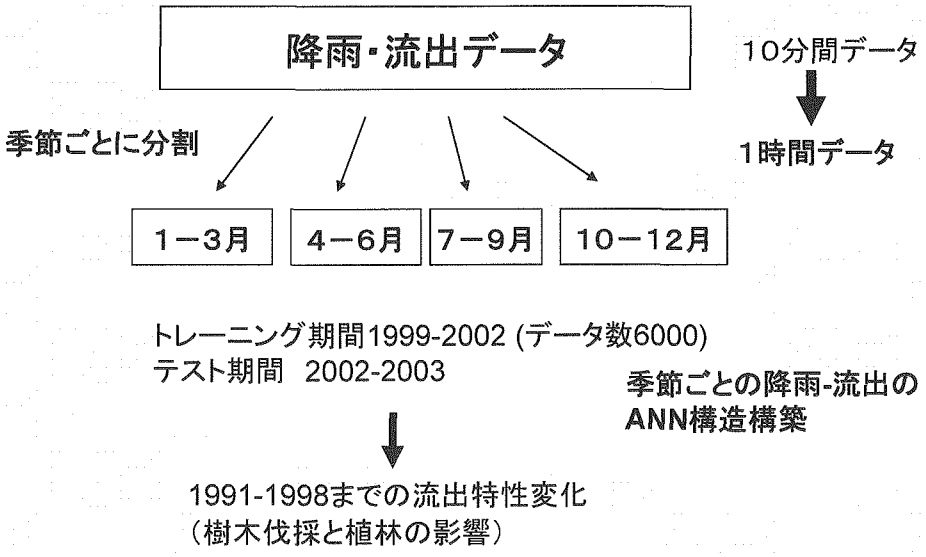


図 2.3.2　解析手順の概略図

降雨－流出応答は季節によって変化する。これは，樹木の状態，表層の落ち葉等による被

覆状態が季節によって変化するからである。そのため，図 2.3.2 に示すように，全データを４つの季節に分け，季節毎に解析を行うこととした。この流域では 10 分毎のデータが取られている。今回の解析では，そのデータから 1 時間データに直して用いた。

ANN パラメーターの同定（トレーニング）には，1999-2002 までの 6000 個のデータを用い，2002 年後半から 2003 年の約 2000-3000 個のデータを，予測値と実測値の類似度の評価（テスト）に用いた。ANN パラメーターの同定に先立って，最も予測が実測に近くなるような，ANN 構造の構築が必要となる。この中で難しいのは，入力データとして何を用いるかである。入力データの選定を，遺伝的アルゴリズムにより行うことを考えているが，今回は試行錯誤的に行うこととした。トレーニングとテストにより，最も予測精度の高い ANN 構造及びパラメーターを用いて 1991-1998 の間を解析する。この期間は，Ⅱ流域において植林されたヒノキの生育期にあたり，その，降雨－流出に与える影響を評価できると考えた。

ANN 構造を構築するに当たって図 2.3.3 に示す２つの考え方がある。１つは予測ベースモデルであり，もう１つはモニタリングベースモデルである。通常流出解析は，河川流量などの予測に用いられる。従って，例えば，ある時点 t の流出量を予測するための入力データとしては，t 時点の降雨もしくはその時点より前の，t-1, t-2,t-3 などの降雨や流出量を用いることになる。一方，流域の流出特性そのもの変化，例えば，地下水の流れや森林伐採などによる変化の評価では，t 時点の後の観測データも使えるはずである。これを，今回，モニタリングベースモデルと呼ぶこととする。本研究では，予測ベースモデルを中心に取り扱った。

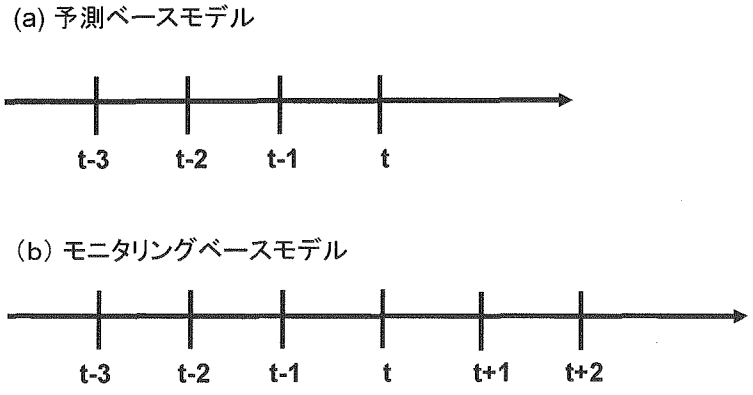


図 2.3.3　２つのモデル模式図

2.4 季節ごとの流出特性の解析

まず，春の期間（４月から６月）の流出データの解析を行った。表 2.4.1 は，トレーニング及びテストに用いたデータ数，各々のデータ期間の最大流出量と最小流出量を纏めたものである。ANN 解析では，基本的にトレーニング期間の最大値と最小値の間でしか良い推

定が行えない。従ってトレーニング期間とテスト期間の値に大きな違いがあると良い推定が出来ない事になる。このケースでは，トレーニング期間の最大値，最小値がそれぞれ 5.621，0.026 であり，テスト期間の最大値と最小値の 5.316 及び 0.033 を含んでいる。そのため，妥当な解析が可能である。

解析を，入力値を変えて９ケース行った。その結果を**表 2.4.2** にまとめて示す。図中，Q(t-1:t-3)は，Q(t-1),Q(t-2),Q(t-3)，つまり，１，２，３時間前の流出量全てを入力として用いた事を示す。P(t)は t 時間の降雨量，P(t-12),P(t-24),P(t-72),P(t-168)は，それぞれ t 時点以前の 12,24,72,168 時間の総降雨量を示す。表中，トレーニングとテストにおける R^2 値と EI 値(Efficiency Index)を示している。これらの値から，1 PQ のケース，つまり，Q(t-1)，Q(t-2),P(t)を入力値とした ANN モデルが最も妥当と考えた。この場合，テストに対しても，

表 2.4.1　春季の解析に用いたデータ

Training			Testing		
Data points	Maximum Discharge	Minimum Discharge	Data points	Maximum Discharge	Minimum Discharge
6000	5.621 m3/min	0.026 m3/min	3868	5.3164 m3/min	0.033 m3/min

表 2.4.2　異なった入力組み合わせを用いた解析

Name	Inputs (Q-discharge, P- Total Rainfall at a given time),	Training		Testing	
		R2	EI	R2	EI
A11	Q(t-1:t-3), P(t), P(t-12),P(t-24),P(t-72),P(t-168)	0.94	0.94	0.88	0.86
Q13	Q(t-1), Q(t-2), Q(t-3)	0.915	9.914	0.92	0.92
Q33	Q(t-3)	0.59	0.59	0.67	0.67
Q12	Q(t-1), Q(t-2)	0.91	0.91	0.92	0.92
Q11	Q(t-1)	0.891	0.891	0.90	0.90
Q22	Q(t-2)	0.73	0.73	0.78	0.78
2PQ	Q(t-1),Q(t-2),P(t),P(t-12)	0.93	0.93	0.926	0.926
Q2P	Q(t-1),Q(t-2),P(t),P(t-1)	0.94	0.94	0.92	0.92
1PQ	Q(t-1),Q(t-2),P(t)	0.94	0.94	0.94	0.94

R^2値，EI 値共 0.94 ときわめて高く，良い予測である事を示している。図 2.4.1，図 2.4.2 はこの 1 PQ モデルにおける，トレーニング（学習）解析の結果を示す。図 2.4.2 は積算流出量を示している。この図から，実際の流出量を良く学習していることがわかる。

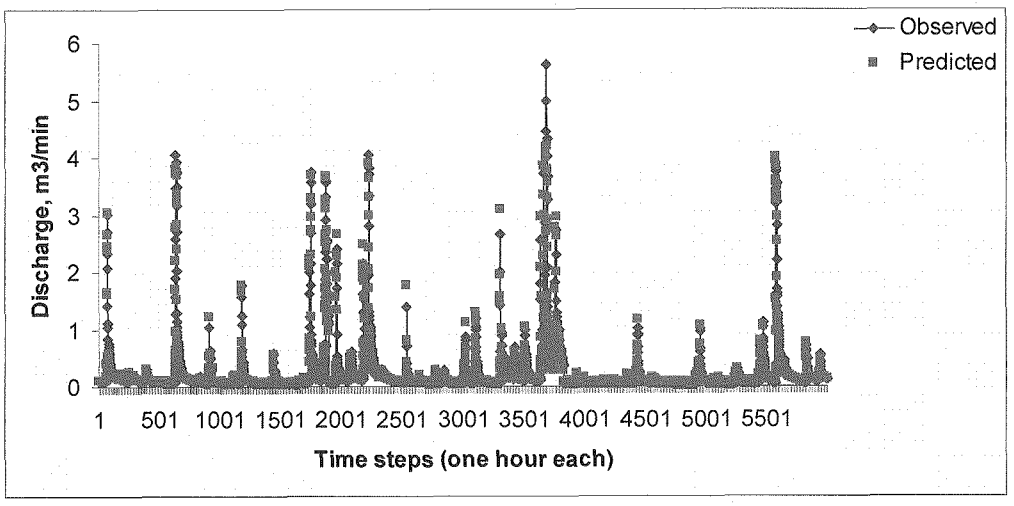


図 2.4.1　流出量の学習結果

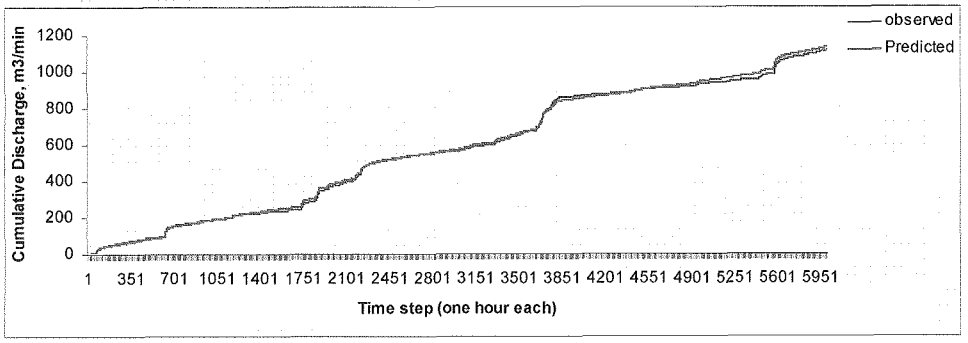


図 2.4.2　学習結果。積算流出量

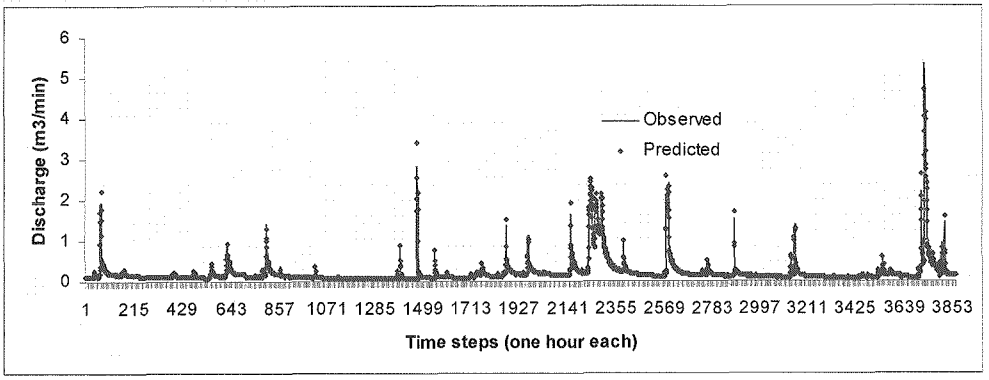


図 2.4.3　テスト期間の予測結果

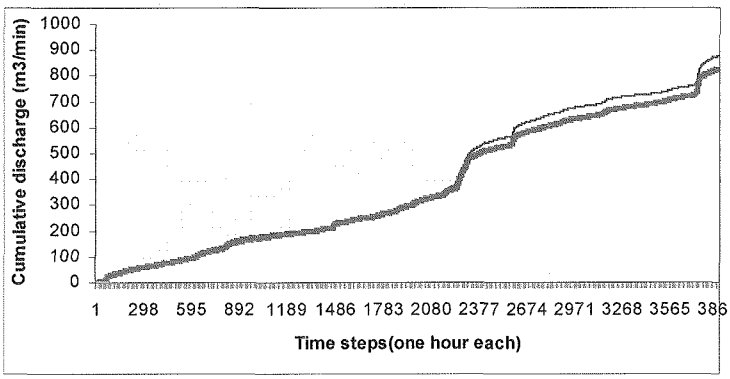


図 2.4.4　テスト期間の積算流出量

図 2.4.3, **図 2.4.4** はテスト期間の予測結果を示す。良く現象を予測している事がわかる。図－１０の積算流出量について，図中 2200 ステップ付近より，予測値と実測値に差が認められる。これは，**図 2.4.3** に見られるように連続した大きい流出が良く推定できなかった事を示している。

表 2.4.3, **表 2.4.4** は，夏季（７月から９月）の結果である。**表 2.4.3** から，トレーニング期間の最大流量と最小流量が 32.77 及び 0.0073 と大きく変動している事が見られる。またテスト期間の最小流量が 0.0064 とトレーニング期間の最小値を下回っている事がわかる。表－４から，８ケースの入力を行っても，トレーニング，テストとも R^2 値 EI 値共あまり高くない結果となった。表中，F11 ケース，つまり，１時間前の流出量のみ用いる単純なモデル F１１が最も高い R^2 値，EI 値となっている。流出量予測に降雨を考慮しないモデルも現実的でないと思われる。そのため，春季と同じ Q(t-1),Q(t-2),P(t)を入力値としたモデル P1F についても解析したが，テスト期間の予測値と実測値との R^2 値 EI 値が 0.68,0.57 とかなり小さい。この事は，夏季の流出の予測が難しい事を示している。流出予測が難しい理由として，降雨のバラつきが大きく，大降雨の場合と小降雨の場合の流出過程が異なることが考えられる。**図 2.4.5**, **2.4.6** は，トレーニング期間の実測値と学習値の関係を示している。

表 2.4.3　夏季の解析に用いたデータ

Training			Testing		
Data points	Maximum Discharge	Minimum Discharge	Data points	Maximum Discharge	Minimum Discharge
6000	32.77 m3/min	0.0073 m3/min	3702	7.468 m3/min	0.0064 m3/min

表 2.4.4　夏季流出の解析モデルと結果

Name	Inputs (Q-discharge, P- Total Rainfall at a given time),	Training		Testing	
		R2	EI	R2	EI
B11	Q(t-1:t-3), P(t), P(t-12),P(t-24),P(t-72),P(t-168)	0.80	0.80	0.32	0.268
F13	Q(t-1), Q(t-2), Q(t-3)	0.89	0.89	0.82	0.73
F12	Q(t-1), Q(t-2)	0.86	0.86	0.86	0.68
1PF	Q(t-1), Q(t-2), Q(t-3),P(t)	0.88	0.88	0.64	0.63
2PF	Q(t-1),Q(t-2),P(t),P(t-12)	0.84	0.84	0.61	0.55
F11	**Q(t-1)**	**0.88**	**0.88**	**0.86**	**0.80**
P1F	Q(t-1),Q(t-2),P(t)	0.86	0.86	0.68	0.57
F2P	Q(t-1),Q(t-2),P(t),P(t-1)	0.85	0.85	0.36	0.28

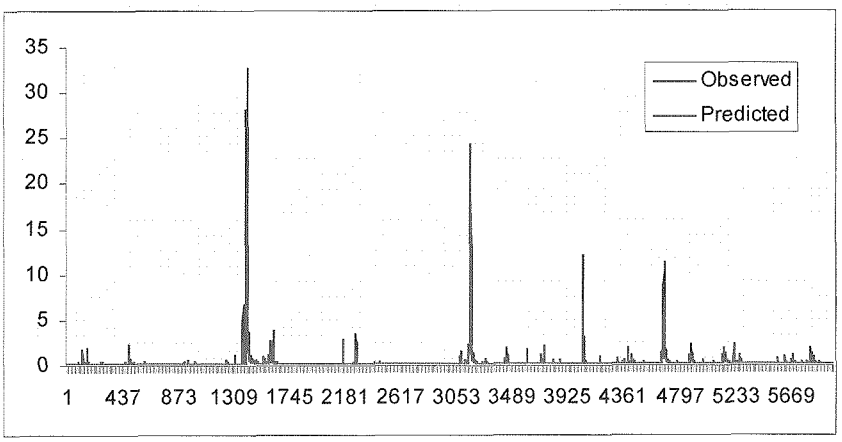


図 2.4.5　トレーニング期間の学習精度

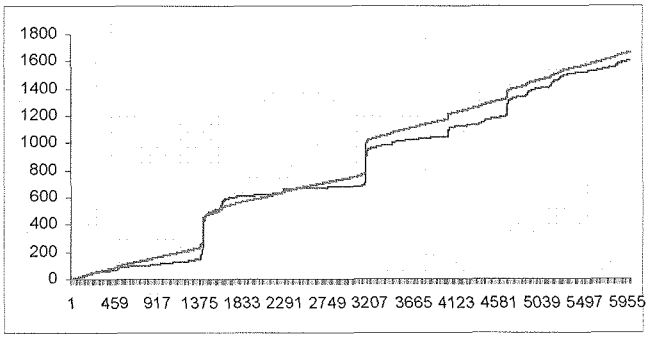


図 2.4.6　トレーニング期間の積算流出量

次に，秋季（１０月から１２月）の解析を行った。**表 2.4.5**，**表 2.4.6** は，春季，夏季と同様，計算条件を示す。**表 2.4.5** から，トレーニング期間の最大流量，最小流量がそれぞれ 1.668 及び 0.0214 であるのに対して，テスト期間の最大流量が 5.09 と大きくトレーニング期間の値を超えている事がわかる。このため，表―６に見られるように，各モデルに対するテスト解析の R^2 値，EI 値が小さい。例えば 1 PR のケースを見ると，トレーニングでは R^2 値，EI 値が 0.94 であるのに対し，テストでは 0.86,0,76 となっている。このため，テスト期間からトレーニング期間の最大流量を超えるものを除外して 1 PR のモデルを用いて計算しなおした結果を**表 2.4.7** に示す。その結果，テストの R^2 値，EI 値が 0.93 となった。このケースを 1 ZZ と記す。

表 2.4.5　秋季の解析に用いたデータ

Data points	Maximum Discharge	Minimum Discharge	Data points	Maximum Discharge	Minimum Discharge
6000	1.668 m3/min	0.0214 m3/min	3368	5.09 m3/min	0.0460 m3/min

表 2.4.6　秋季流出の解析モデルと結果

Name	Inputs (Q-discharge, P- Total Rainfall at a given time),	Training		Testing	
		R2	EI	R2	EI
C11	Q(t-1:t-3), P(t), P(t-12),P(t-24),P(t-72),P(t-168)	0.94	0.94	0.75	0.72
R13	Q(t-1), Q(t-2), Q(t-3)	0.93	0.92	0.80	0.76
R12	Q(t-1), Q(t-2)	0.92	0.92	0.83	0.79
1PR	Q(t-1), Q(t-2), Q(t-3),P(t)	0.94	0.94	0.80	0.76
R2R	Q(t-1),Q(t-2),P(t),P(t-1)	0.93	0.93	0.80	0.75

表 2.4.7　大きな流出を省いたモデル

1ZZ	Q(t-1), Q(t-2), Q(t-3),P(t)	0.94	0.94	0.93	0.93

図 2.4.7，2.4.5 は，1PR モデルについて，テスト期間の予測値と実測値を示したものである。図 2.4.7 から，大きな流量の予測が出来ていないことがわかる。また図 2.4.8 の積算流出についても，春季と同様，大きな流出後に予測値と実測値の乖離が見られる。

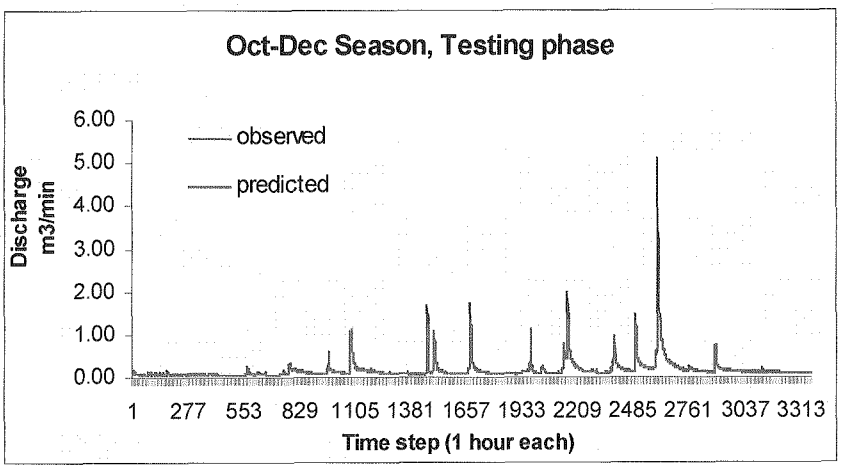


図 2.4.7　テスト期間の予測精度

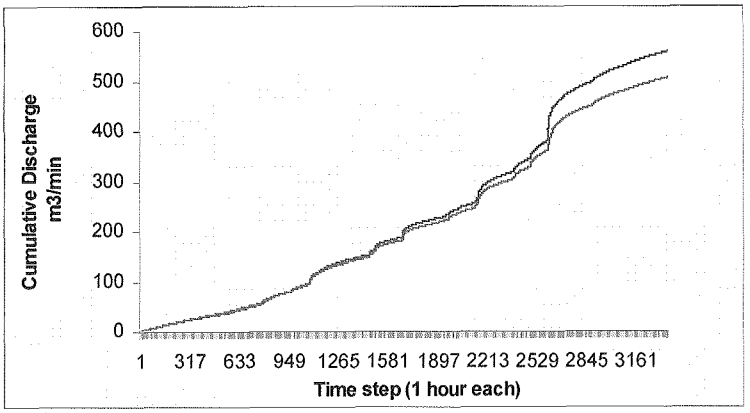


図 2.4.8　テスト期間の予測値と実測値（積算流出量）

冬季（1月から3月）の解析についてのデータを表 2.4.8, 表 2.4.9 に示す。表 2.4.8 から，トレーニング期間の最大流量がテスト期間の値に比べてやや大きいことがわかる。しかし，この程度の差は結果にあまり本質的な影響を与えない。表 2.4.9 から，冬季の流出解析がかなり大きい R^2 値，EI 値で行われている事がわかる。また表中 IRR のモデル，つまり，春季のモデルと同様，Q(t-1),Q(t-2),P(t)を用いた予測モデルがとくに大きい R^2 値，EI 値を示すことがわかる。図 2.4.9，図 2.4.10 は，テスト期間の流出予測と実測であり，良い予測が出来ている事がわかる。テスト期間内に大きな流出が無かったこともあって，積算流出量

にも傾向的なズレも見られない。

表 2.4.8　冬季のデータ

Training			Testing	
Data points	Maxm. Discharge	Minimum Discharge	Data points	Maxm Dischar
6000	4.2466 m3/min	0.013m3/min	3779	2.05 m3/min

表 2.4.9　冬季の流出解析結果

Name	Inputs (Q-discharge, P- Total Rainfall at a given time),	Training		Te
		R2	EI	R
D11	Q(t-1:t-3), P(t), P(t-12),P(t-24),P(t-72),P(t-168)	0.89	0.89	0.
D13	Q(t-1), Q(t-2), Q(t-3)	0.95	0.95	0.
1PD	Q(t-1), Q(t-2), Q(t-3),P(t)	0.94	0.94	0.
1RR	Q(t-1), Q(t-2), P(t)	0.95	0.95	0.
D2D	Q(t-1),Q(t-2),P(t),P(t-1)	0.93	0.93	0.

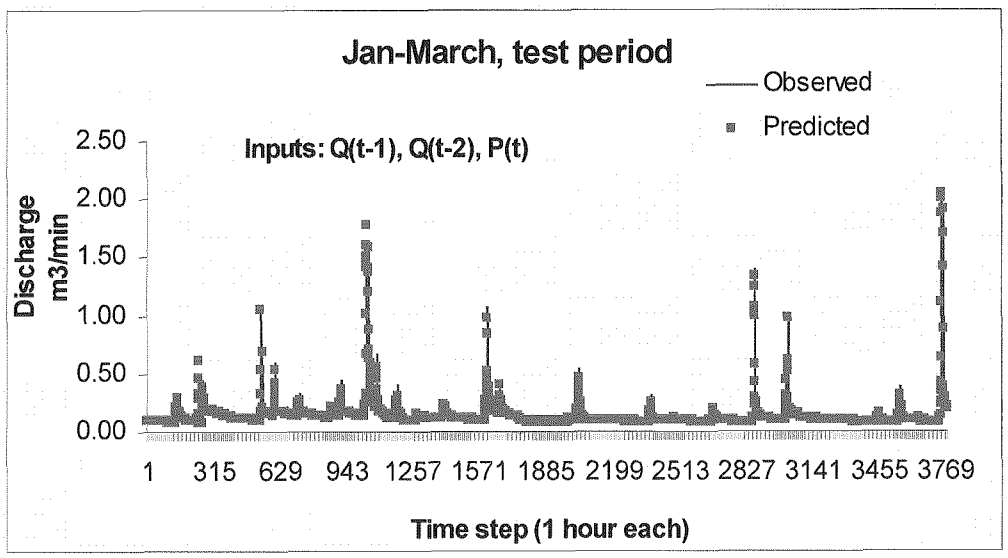


図 2.4.9　テスト期間の流出予測結果

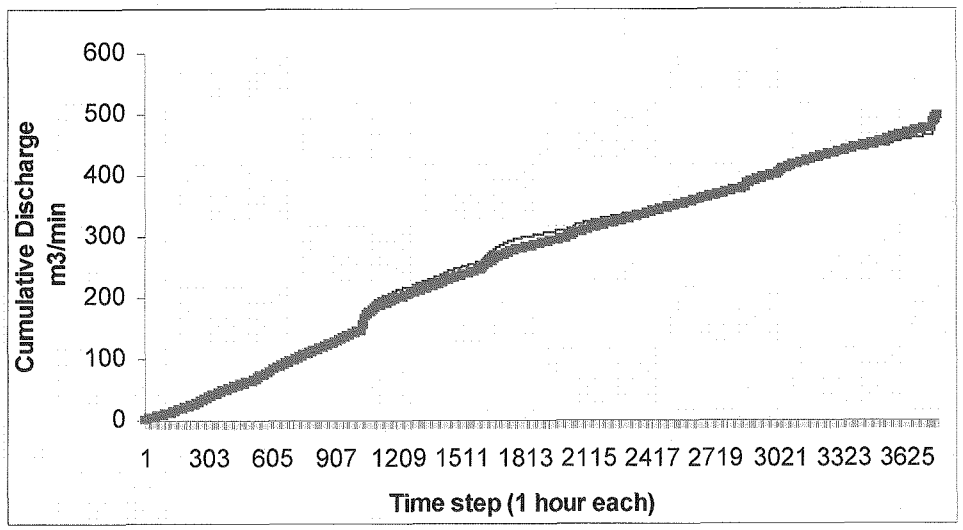


図 2.4.10　テスト期間の積算流出量の予測と実測値

2.5 各季節のモデルの他季節流出解析への適用性

3章で，季節毎の流出解析を行った結果を紹介した。問題は，各季節で構築された ANN モデルで，他の季節の流出予測がどの程度できるかを検討することである。この検討により，もし他季節のモデルで予測が出来ないならば，流出特性が季節によって大きく変化する事を意味する事になる。**表 2.5.1** は，冬季（1月－3月），夏季（7月－9月）のテスト期間のデータを，他の季節で構築された ANN モデルで予測したものである。各表中，太字は，R2 値，EI 値が

0.9 を越えている場合である。これらの表から，冬季のモデルは夏季以外の流出を良く予測している事がわかる。春季，秋季のモデルもほぼ夏季以外の流出をかなり良く予測していると言える。この事から，**表 2.5.2** の夏季の流出特性は他の季節とは異なった性質を持っている事が推定される。具体的には，雷雨などの夏季特有の突発的な降雨の流出メカニズムが，例えば他の季節とは異なり表面流出分が大きいなどの影響が考えられる。

表 2.5.1　冬季，夏季のテスト期間データを他の季節のモデルで評価

Testing JAN-MAR data with models of other seasons.
- **using Model of Apr-Jun : R2=0.94, EI=0.93**
- **using Model of Oct-Dec: R2=0.94, EI = 0.93**
- using Model of July-Sept: R2=0.86, EI = 0.68

Testing JULY-SEPT data with models of other seasons.
- using Model of Apr-Jun : R2=0.90, EI=0.90
- using Model of Oct-Dec: R2=0.68, EI = 0.56
- using Model of Jan-Mar: R2=0.88, EI = 0.87

表 2.5.2　春季，秋季のテスト期間データを他の季節のモデルで評価

Testing APR-JUNE data with models of other seasons.
- using Model of Oct-Dec : R2=0.81, EI=0.768 (AIO)
- **using Model of Jan-Mar: R2=0.93, EI = 0.93 (AIJ)**
- using Model of July-Sept: R2=0.85, EI = 0.74 (AIU)

Testing OCT-DEC data with models of other seasons.
- **using Model of Apr-Jun : R2=0.96, EI=0.957 (OIA)**
- **using Model of Jan-Mar: R2=0.95, EI = 0.95 (OIJ)**
- using Model of July-Sept: R2=0.93, EI = 0.77 (OIU)

2.6 植林による流出変化モニタリングの試み

前述したように，今回の研究対象とした流域では，昭和６２年(1987)から平成４年(1992)にかけて植林が行われた。植林に先立って流域の雑木が切られた。このような流域の変化によって，流出特性が変化したかどうか，変化したのであれば，ANN 解析によって把握できるかどうかを調べた。その方法は，すでに植林がかなり大きく成長した 1999-2003 に対して構築された季節毎の ANN モデルにより，植林直後の過去の流出がどの程度把握できるかを調べる事により行った。

図 2.6.1 に，本流域の植林の状況を示す。図中の数字は，植林を行った年度を示している。また図中，流出観測点 SPU の位置を示す。**表 2.6.1** は，春季における，流出の実測と予測値の R2 値及び EI 値を年毎に調べたものである。この表から，1991 と 1992 年の値が

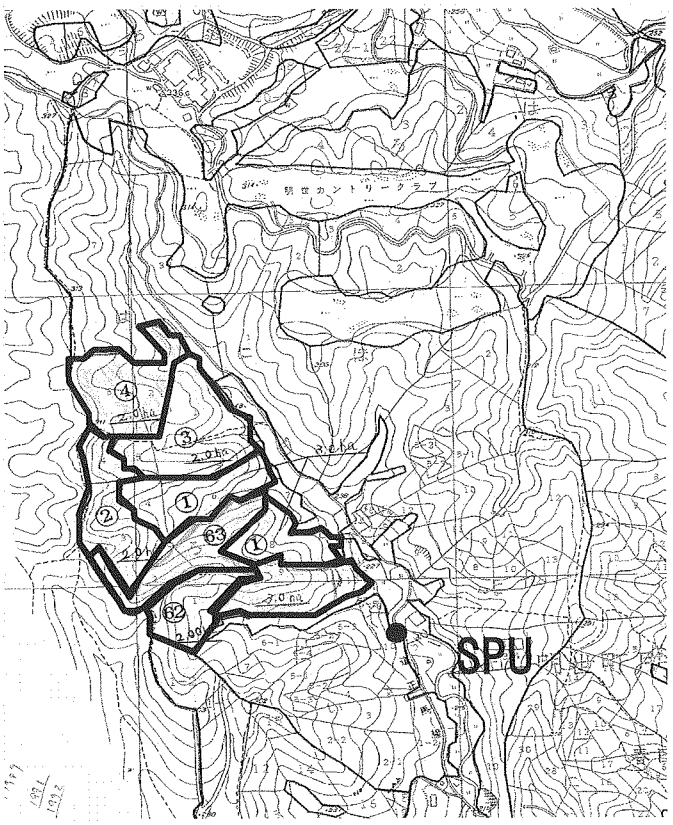


図 2.6.1　植林状況

表 2.6.1　春季における年毎の R2 値，EI 値

Year	R-Square	EI
1990	0.95	0.95
1991	0.88	0.87
1992	0.89	0.87
1993	0.94	0.94
1994	0.94	0.94
1995	0.98	0.95
1996	0.93	0.92
1997	0.97	0.96
1998	0.95	0.93

0.9 より小さくなっている事が見られる。あるいは，これが植林の影響かとも思われる。今後は，予測値と実測値がどのように異なっていたかを詳細に検討する事が必要である。

表 2.6.2 は秋季における値であり，1990 と 1991 年でとくに R2 値，EI 値が小さく，1996 年から急に良い推定になっている事がわかる。

表 2.6.2　春季における年毎の R2 値，EI 値

Year	R-Square	EI
1990	0.74	0.74
1991	0.76	0.65
1992	0.83	0.82
1993	0.8	0.74
1994	0.8	0.66
1995	0.83	0.72
1996	0.94	0.93
1997	0.92	0.92
1998	0.94	0.94

表 2.6.3　冬季における年毎の R2 値，EI 値

Year	R-Square	EI
1990	0.97	0.95
1991	0.9	0.88
1992	0.88	0.88
1993	0.96	0.93
1994	0.9	0.85
1995	0.96	0.955
1996	0.94	0.78
1997	0.96	0.95
1998	0.88	0.88

表 2.6.4　夏季における年毎の R2 値，EI 値

Year	R-Square	EI
1990	0.82	0.80
1991	0.85	0.85
1992	0.71	0.51
1993	0.82	0.72
1994	0.86	0.84
1995	0.84	0.78
1996	0.84	0.74
1997	0.80	0.78
1998	0.92	0.86

表 2.6.3，表 2.6.4 は，それぞれ冬季，夏季における R2 値，EI 値の変化である。これらによれば，年による差異はあまり明瞭ではない。

表 2.6.1，表 2.6.2 に見られる変化が，植林による流出特性の変化を表現しているとするならば，全体的な傾向として下記が言える。

・　植林の影響は，季節や流出イベントによって現われ方に差がある。

この点を，予測と実測との比較からさらに検討する事が必要である。

2.7 結論

今回の研究は，流出解析を，外的変化に対する広域の地下水変化のモニタリングに使用する可能性を調べたものである。今回，外的変化として植林を考えた。その結果，影響と思われる現象が認められたものの，植林の影響は，季節や流出イベントによって現われ方に差があることもわかり，さらに検討を加える必要がある。

一般に地下工事では，工事の，地表付近の地下水流れに対する影響が係争事になる事が多い。このようなモニタリング・システムを構築しておく事によって，その影響の程度を客観的に判断する材料を提供する事が出来る。手法としてはまだ不十分な点は残るものの，将来的な発展性が大きいと考えられる。

3．水理試験法および水理試験装置の開発研究

3.1 序論

3.1.1 緒言

我が国は総発電量のおよそ1/3を原子力発電に依存しており，原子力発電によるエネルギー生産に伴って発生する放射性廃棄物の対策は，社会が避けることのできない課題として，関係者による総力をあげた取り組みが進められている。高レベル放射性廃棄物を処分し人間環境に影響が無いように永久隔離するためには，まず意識，無意識を問わず人間が容易に接近できない場所が適しているといえる。またそのような隔離機能が将来の人間の生活する社会環境や自然現象により影響を受けることがないよう，場の条件はできるだけ安定であるほうがよい。そのような観点から，これまでに宇宙空間，海洋底下，極地の氷床，深部の地層などに処分する方法が検討されてきた。1976年には，長期にわたる安全性，自国領土内での実現性，国際法的観念から，我が国で「地層処分に重点を置く」ことが高レベル放射性廃棄物対策の国の基本方針とされた[1)]。近年では「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（2000年5月）」が国会において可決・成立し，同年10月には「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針（通商産業省告示第591号）」の告示，さらに11月には原子力委員会により新たな原子力長計が決定されるなど，地層処分の事業化に向け具体的な取り組みが着実に進められてきている[1)2)]。

我が国における地層処分概念は，不確実性を考慮した安定な地質環境に，性能に余裕を持たせた人工バリアを含む多重バリアシステムを構築するものである。地層処分システムの安全性は基本的にガラス固化体，オーバーパック，緩衝材および地質環境が有している機能によって提供される。処分場が建設される地下深部の地質環境は長期にわたって地質構造学的に安定で，地下水は還元性であり，地下水フラックスは小さい。また地表における気象変動や人間活動によって影響を受けにくく，資源が存在しない場所に選定されるため偶発的な人間侵入が発生する可能性は極めて小さい。このような地質環境の中にガラス固化体，オーバーパック，緩衝材からなる人工バリアが構築され，緩衝材は低透水性を有するため，人工バリア中では地下水の流れがほぼ生じない。また，還元性環境下ではオーバーパックの腐食速度は小さく，少なくともガラス固化体の放射能レベルが高い初期の期間において，ガラス固化体が地下水と接触しないようにすることができる。放射性各種がガラス固化体から溶出した場合，緩衝材中では地下水の流れがほとんど無いため拡散によってのみ移動し，さらに緩衝材により吸着されるため移動が制限される。人工バリア外側の岩盤では，地下水の動きが緩慢であるため，物質を収着するという岩石の性質によって放射性核種の移動は制限される。また岩盤中を地下水によって運ばれる間に放射性核種は分散し，次第に希釈される[3),4)]。

しかし，周辺岩盤に対し坑道を掘削することにより，坑道周辺には掘削の影響を受けた領域が存在する。周辺岩盤への影響としては，掘削に伴う衝撃による岩盤の損傷，水理学的不飽和領域，岩盤応力の再配分などが発生し，周辺岩盤の性状が変化する。これら掘削の影響を受けた領域（掘削損傷領域）は，高レベル放射性廃棄物の地層処分において，直

接人工バリアと接する領域であり，地層処分技術の基盤研究において重要な研究対象である。その掘削損傷領域に対しては従来よりダム基礎部の透水性改良材として用いられているセメント系材料では，高レベル放射性廃棄物の半減期を問題にするような 1 万年～10 万年という長期間の止水性が期待できないため，長期の安定性と難透水性を有するグラウト材の確立が必要であり，そのグラウト材に対する最も適したグラウト工法の仕様と仕法の確立も同様である。

3.1.2 本論文の目的と構成

前述でも述べたように掘削損傷領域に対する，グラウト材の提案およびグラウト手法の確立が求められている。そこで本研究では，グラウト材として緩衝材としても研究されているベントナイトに着目した。しかしベントナイトは水によってスラリー化を行う場合，膨潤・粘性の上昇・低密度などの問題点が生じる。すなわち水を用いたベントナイトスラリー（以下 Wa/Be）では，掘削損傷領域に対する注入は困難であり，注入できた場合でも低密度なため難透水性を得られる可能性低い。そこでベントナイトの膨潤を抑制し，低粘性かつ高密度にてスラリー作成が可能な溶媒，エタノールおよび塩水を用いてスラリー化したエタノールベントナイトスラリー（以下 Et/Be），塩水ベントナイトスラリー（以下 Sa/Be）の物理特性および浸透特性，注入特性の検討を行い，掘削損傷領域に対するグラウト材として有用性の検討を行った。またそのグラウト材に対する施工方法の検討も行い適用性の探究を行った。以下に内容を各章ごとに概説し，**図 3.1.1** に本研究の流れを示す。

3.3.1 では，本研究の位置付けを記す。

3.3.2 では，ベントナイトおよびグラウト手法に関する従来の研究についてまとめる。

3.3.3 では，ベントナイトの粒径，スラリー化時の粘性，および圧密特性についてまとめ基礎物性の把握を行った。

3.3.4 では，ベントナイトの浸透特性について，各種溶媒についてまとめ，また各溶媒における相互関係について把握を行った。

3.3.5 では，一次元平行平板亀裂モデルに対する注入試験を行い，注入可能亀裂幅，注入距，注入密度，流亡圧の把握を定圧条件下で行った，

3.3.6 では，施工方法に関する検討とし，配合段階式注入試験と動的注入試験を一次元平行平板亀裂モデルにて注入効果の検討を行った。

3.3.7 では，砂層内へ静的と動的に塩水ベントナイトを注入する試験を行ない，その透水係数の経時的な低下を計測した。

3.3.8 では，本研究で得られた知見をまとめ結論とした。

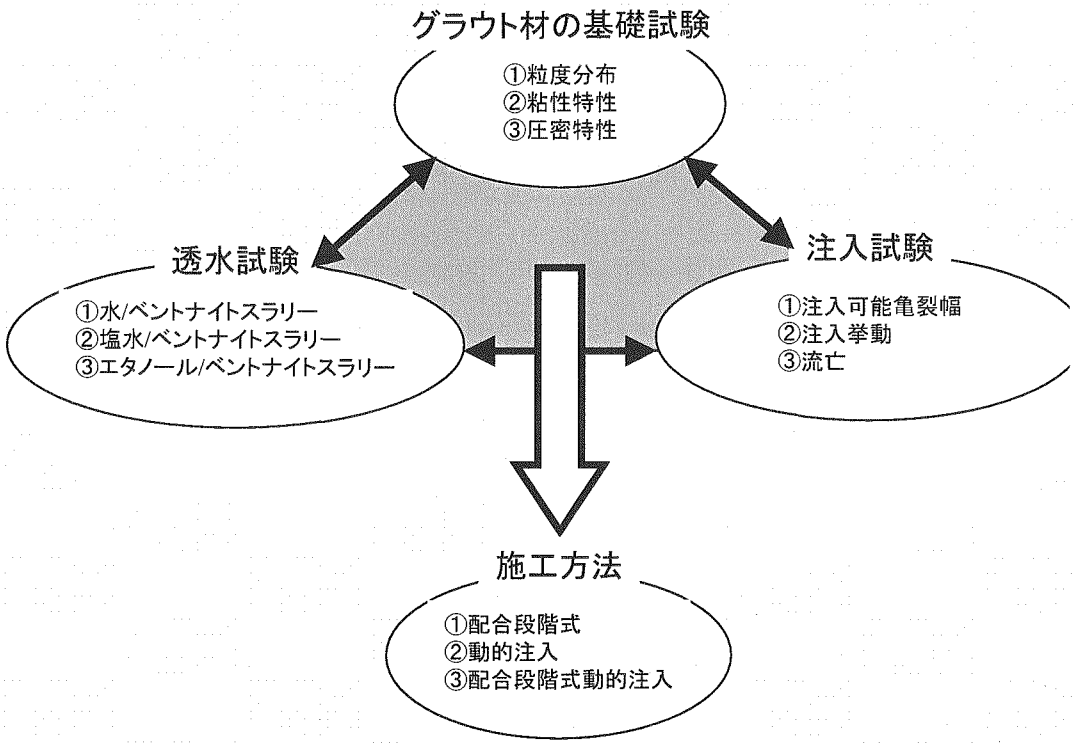


図 3.1.1　本研究の流れ

3.2 従来の研究

3.2.1 概要

高レベル放射性廃棄物の地層処分後のニアフィールド環境における特性把握，およびグラウチング技術の確立について検討することの重要性を前章について述べた。ここでは従来の研究を以下の項目に分類し，その内容について簡単に説明すると共に，現状での問題点を抽出し，本研究の課題を整理する。

（1）　ベントナイトに関する従来の研究

（2）　グラウトに関する従来の研究

3.2.2 ベントナイトに関する従来の研究

(1)　緒方，小峰らの研究[5)]

緒方，小峯は，Na 型ベントナイトと珪砂の混合材料を用い，ベントナイト配合率（全試料乾燥重量に対するベントナイトの乾燥重量の百分率）が，5，10，20，30%の 4 種類を用意して，それぞれの配合の混合材料について，膨潤変位量の経時変化を計測した。さらに，膨潤変位量がほぼ一定になったあとに，透水試験を行っている。その結果，ベントナイト配合率が 20%までは，ベントナイト量の増加に伴い透水係数が小さくなり，20%以上になると透水係数の低下の割合は小さくなると報告している。また，膨潤変形前後の透水係数も求めており，ベントナイト配合率 10%の試料においては，供試体の膨潤に起因する間隙

比の増加により透水係数の増加が認められるが，20%，30%の場合においては，その変化は非常に小さいと報告している。

(2)　浅田の研究[6)]

豊浦砂とベントナイトを所定配合で混合した後，濃度を5，10，20%に調整したエタノール水溶液を加え混合したエタノール／ベントナイトスラリー混合土の透水係数及び水とエタノールの置換を測定している。透水試験装置は直径 12.5cm×高さ 20cm のアクリルパイプにスラリー混合土を乾燥密度約 1.28g/cm^3 で高さ 10cm まで充填しコンプレッサーを用いて動水勾配約 50，間隙比 1.12 の条件下で試験を行っている。水とエタノール置換の測定については，透水試験後スラリー混合土を輪切りにし，それぞれの含水比とエタノール濃度を測定している。さらに，上澄み液のエタノール濃度を計測している。結果は，エタノール濃度の変化に対する透水係数の差は見られなかった。エタノールの置換に関しては，初期透水係数が 1.0×10^{-8}cm/s 程度で難透水性であるため，地下水流によるエタノールと水の置換は緩慢に進むことがわかったとしている。

(3)　堀内らの研究[7)]

ベントナイトを水で分散すると高い表面電位を持つことが知られているが，高い表面電位はベントナイトを構成するモンモリロナイトの吸着水の厚さを大きくしており，ベントナイトを水でスラリー化する場合には大量の水が必要となる。一方エタノールはエタノールモンモリロナイトの電化の発現を抑えている可能性があり，これがエタノールベントナイトスラリーの密度増加に大きく寄与していると考えられる。そこで，ベントナイトスラリーの表面電位を超音波振動電位法によって測定し，考察している。測定には，3 種の市販ベントナイトを使用し，0～92.5 質量%のエタノール水溶液を用い，懸濁液の pH は塩酸または水酸化ナトリウム水溶液を用いて 2～12 段階に調整した。結果として，①エタノール濃度が高くなるに従って表面電位は小さくなるが，無水エタノールスラリーでも負電荷はもっている。②エタノールは特にモンモリロナイト縁辺部の電荷発生サイトを多い電荷の発生を抑制する。③エタノールを添加しながらベントナイトをスラリー化すると湿潤が速やかに進むようになり，水をベントナイトで直接スラリー化した場合に比べて負の表面電位も大きくなる。これらの結果から，スラリー中のエタノールを水と置換させれば，ベントナイトを水と直接的に混合したとき以上の特性を持たせることが可能である点が証明されたとしている。

(4)　田中らの研究[8)]

Na 型ベントナイトの塩水化処理(イオン交換)をバッチ式で行い，塩水化ベントナイトに対して透水試験，膨潤圧試験，膨潤量試験を行い，Na 型ベントナイトと塩水化ベントナイトとの比較を行っている。結論として Na 型ベントナイトが人工海水と接触することで透水係数及び膨潤量は変化するが，その後塩水化ベントナイトに変質しても，特性変化は小さいとしているが，塩水化したベントナイトの透水係数と膨潤圧は Na 型と比較して劣化している。

(5)　千々松らの研究[9)]

高レベル放射性廃棄物の地層処分における緩衝材の候補材料であるベントナイトを対処とした水理試験を実施している。飽和状態での水理特性として透水試験を行っている。試験は直径 50mm，高さ 10mm の透水試験用拘束セルを用い，恒温槽に設置することで温度変化をつけている。試験装置を図 3.2.1 に示す。試験用水は蒸留水を用い，透水係数，固有透過度を求めている。温度変化によって透水係数に変化が見られるが，固有透過度は温度変化の影響がほとんどないという結果を得ている。温度変化の透水係数に及ぼす影響は，水の粘性変化に起因しており，固有透過度には粘性と密度を考慮したものであるため，温度変化の影響を受けないとしている。さらに，乾燥密度が 1.0～1.8(mg/m^3) で締め固められたベントナイトの固有透過度は $1.0\times10^{-19\sim-21}$(m^2)程度であると示し，結論として，飽和状態における緩衝材の透水性は，有効粘度密度で整理できることが分かったとしている。

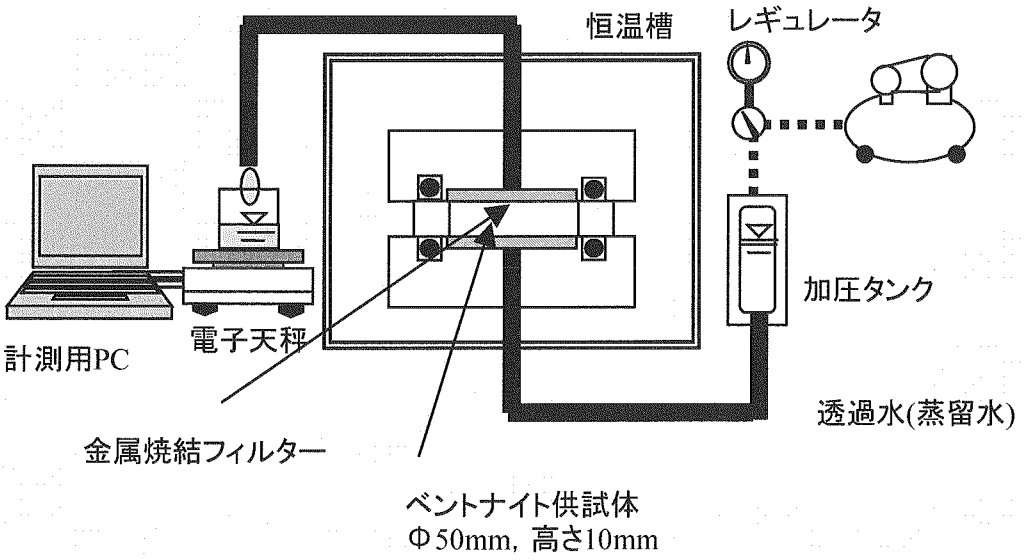


図 3.2.1　透水試験装置

(6)　菊池らの研究[10)]

海水系に対するベントナイトの透水係数を取得するとともに，温度依存性に関する関係式の一般化を行った。また，海水系のような高イオン強度の間隙水がベントナイトの間隙構造に及ぼす影響について考察を行っている。結果として，人工海水を用いた場合，蒸留水に比べ透水係数が一桁程度大きくなるとしている。また試験温度 25℃，乾燥密度 1.2～1.8Mg/m3 の範囲における有効粘土密度 ρ_b と透水係数 k との関係は，$k=\exp\left(-25.64+8.29\rho_b-5.689\rho_b^{\,2}\right)$ となるとしている。その透水性の変化の要因として考えられる間隙構造の変化を，X 線解析装置を用いてベントナイト底面の測定を行ったが，両者において顕著な変化は見られなかった。また透水係数に見られる温度依存性は，圧縮ベントナイトの構造特性による変化によるものではなく，透過する溶媒と密度と粘性係数の温度による物質変化が原因であるとしている。

(7)　浅田，石川らの研究[11)12)]

エタノール/ベントナイトスラリー止水壁の実用性，設計方法検討のため 20m³ 土槽モデルを用いた実験と解析結果の比較を行っている。止水壁にはエタノール/ベントナイトスラリー(密度 1.24g/cm³)と砂質土をベントナイト量が砂の乾燥質量の 10%となるように混合している。排水側の水位を 10cm，非排水側の水位を 185cm に設定し，3 ヶ月放置している。結果より非排水側に接している部分のエタノール濃度は 10%(100g/L)以下に低下しており，打設直後の壁のせん断強度は 3kN/m² であったが解体時(3 ヵ月後)には 4～8kN/m² に増加している。一方解析は密度流れを考慮した移流・拡散解析を実施している。解析結果は排水側で底面近くの濃度が高くなる傾向をよく表せているが，不飽和部分の濃度分布はエタノールの蒸発等の影響でうまく表現できなかったとしている。スラリー内の濃度分布は高い精度で実験結果と一致しており，本解析がエタノール/水置換状況の再現に適しているとしている。

(8)　早川らの研究[13)]

緩衝材として有望視されているベントナイトは，海水系環境下のようなイオン濃度の高い溶液中では陽イオン交換により鉱物的変化は生じ，緩衝材としての性能が変化することが知られている。地層処分の設置地点における NaCl 濃度の違いによるベントナイトの膨潤圧特性の影響を調査している。試験試料としてケイ砂との混合体（ベントナイト：ケイ砂＝7：3）MX-80 単体の 2 種類を対象として試験を行い，塩分濃度（重量%）0，1，3%溶液にて膨潤圧試験，膨潤力試験を行った結果，膨潤圧は NaCl 濃度が低いほど高く，ケイ砂混合体と MX-80 では MX-80 が NaCl 濃度による影響が大きいと示している。一方，膨潤力も同様に NaCl 濃度が高いほど低く，MX-80 は濃度による影響が大きいことを示している。

3.2.3 グラウトに関する従来の研究

(1) STRIPA Project における研究[14)]

高レベル放射性廃棄物の地層処分施設の止水工法として，スウェーデンの STRIPA Project では，グラウト材にベントナイトスラリーを取り上げた。ここで，ベントナイトスラリーが選ばれた理由として，材料が凡用的かつ永久的であること，核物質を吸着しやすいこと，また，吸水性があるため核物質の拡散の媒体となる地下水との隔絶を図る上で，混合用に使う水をできるだけ少なく出来ることなどが挙げられる。STRIPA Project の最終報告書では，ベントナイトスラリーなどの高粘性グラウトを注入する際，グラウトの脈動を与えた動的注入は，効果的であるという報告がされている。STRIPA Project では，ベントナイトスラリーの振動を与えた状態でのレオロジー特性試験より，振幅の増大に対応しての周波数の減少がせん断抵抗を減少させるとしている。また，動的注入において 25μm から 40μm 程度の微細な亀裂にも注入が可能であることを，人工亀裂モデルを用いた室内実験，原位置試験において確認している。さらに，グラウトに脈動を与えたときのグラウト材の流動時の理論も導いている。その結果，40Hz 程度の周波数をグラウト材に与えると最も効果的であるとの結論を示した。

(2) 西垣，山本らの研究 [15)16)17)]

注入孔において目詰まりを生じさせずに理論的根拠に基づくグラウチングを行うためには，対象とする岩盤の亀裂密度分布と亀裂性岩盤に注入されたグラウトがどのような特性により注入・浸透しているのかを把握することが必要であるとして，グラウト注入孔において岩盤への水あるいは高粘性流体による定流量注入実験を実施した。その結果，注入孔内の水頭上昇の経時変化を計測することにより注入区間の岩盤の浸透特性（透水係数，有効間隙率）を求め，その結果とボアホールテレビによる亀裂本数の計測をもとに注入区間における平均的な亀裂開口幅を推定する方法を提案している。この平均的な亀裂開口幅から，実験により得られた注入可能な亀裂開口幅と水セメント比の関係に基づき，注入孔で目詰まりを生じさせずにグラウトできる水セメント比の配合の設定が可能となることを示した。また，普通ポルトランドセメント，超微粒子セメントのみと超微粒子セメントに分散剤を添加したセメントミルクの目詰まりの生じる亀裂開口幅と水セメント比の関係を実験により明確に示している。ここで，定圧注入試験によって得られた，注入可能となる限界の亀裂開口幅と水セメント比の関係を図 3.2.2 に示す。

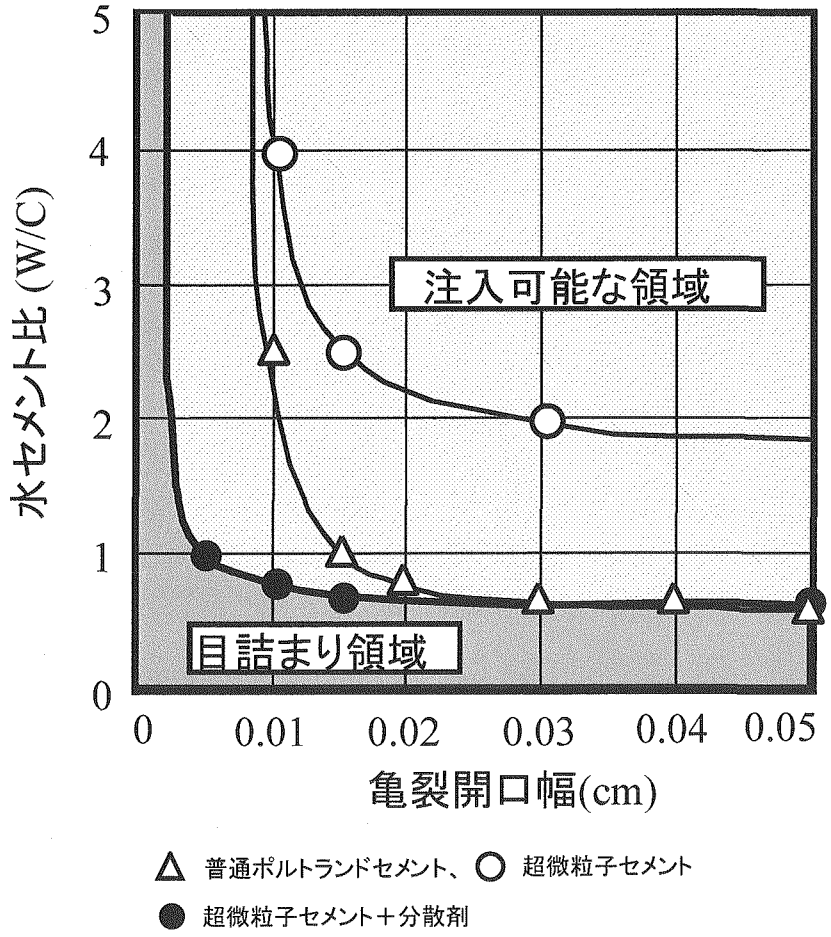


図 3.2.2　注入可能亀裂開口幅と水セメント比の関係

さらに，動的注入の技術をモルタルに適用し，モルタルグラウト材に高周波の脈動を与えることによって粘性を低下させ，改良範囲を広げることに対する可能性についての検討を行った。

結果として，高粘性のモルタルを動的注入することは，静的注入と比較して多くの流量を注入することが可能であった。また，10Hz 以上の周波数の脈動を与えても注入流量に大きな変化はなく，10Hz の脈動が最適な周波数であると結論付けている。さらに，静的，動的に関して注入口で目詰まりが生じ，目詰まりの生じる亀裂開口幅は，モルタル作成に用いた砂の D_{50} と D_{85} の3～5倍程度であるとしている。静的注入でも動的注入でも同じ亀裂開口幅で目詰まりが生じ，注入圧力を上昇させても(最大 1Mpa) 更なる注入は不可能であるとしている。

(3) 内田らの研究 [18]

セメントミルクを用いた動的グラウチングの有効性を室内及び原位置試験より確認している。室内試験より亀裂入り口部や亀裂幅の変化部における目詰まりがほとんど発生せず，さらに高濃度のグラウト注入が可能であると結論付けている。また，原位置試験においてルジオン値の次数逓減では，静的注入が5次孔で改良目標値に達しているのに対し，動的注入では，4 次孔で改良目標値に達している。動的グラウチングは静的グラウチングと比較して約2倍の流量が注入可能であるためコスト削減のための有効な注入工法であり，動的注入において最適な脈動は 5～7Hz 程度と報告している。

(4) 大橋，平らの研究 [19]

微小な平行間隙間内の非定常流解析を行い，脈動流れ固有の流動特性を明らかにし，解析結果と動的注入試験結果と比較することから動的の効果，振動圧成分の振動数と振幅がグラウト材の流動性に及ぼす影響を示している。その比較の結果，超微粒子セメント(SFC)で W/C＝0.5，H＝100 μ m では両者はほぼ一致し，動的注入の効果は現れていない。f＝30Hz における W/C=0.75，1.0，H＝50 μ m では計算値を上回る結果となった。カオリン(KA)；W/KA=4.0，H＝50 μ m とシリカフューム(SF)；W/SF＝1.0，H＝50 μ m では実験値が振動圧成分の振幅に対し出口の平均流速が右上がりの傾向をもち，10Hz 程度の動的注入が効果的であるとしている。

(5) 浅田，中島らの研究 [20][21]

エタノール/ベントナイトスラリー（BES）とセメントミルク（CM）との岩盤注入特性を比較・検討するため，現場注入試験を行い，ダムグラウト工事に用いる一般的な注入システムを利用して，現実の岩盤亀裂への注入性に問題は無く，岩盤の遮水性改善効果を確認することができたことを示した。実験場所は花崗岩を主体とする岩盤であり，初期ルジオン 0.04～4.73Lu であり，BES，CM を用いて注入を行った結果，単位注入粉体量に関して BES は 5.85 kg/m/Lu と，CM (2.53 kg/m/Lu) の2倍以上注入可能であった。平均注入時間は BES で 202 分，CM で 135 分であり，注入 40 日後の試験孔でのルジオン値は CM で 0.26Lu，BES で 0.26 未満となり遮水改善効果は BES が優れているとしている。

3.2.4 本研究の課題

高レベル放射性廃棄物の地層処分において，坑道掘削によって坑道周辺岩盤がゆるむことで，高透水性ゾーンの発生が考えられる。周辺岩盤の透水性が増加することは，高レベル放射性廃棄物に地下水が接触し，放射性各種が地下水によって我々の生活圏に影響を及ぼす危険性を増加させる。よって，周辺岩盤に発生した高透水性ゾーンに対してグラウトすることで，増加した透水性を低下させる必要がある。地層処分における高透水性ゾーンへのグラウチング概念図を図 3.2.3 に示す。

従来の研究で，試験に用いられているセメントグラウトでは，超微粒子セメントに分散材を添加することで，50μm 程度の微細な亀裂へ注入可能であり，さらに動的注入工法を採用することによって，注入量の増加などの結果が得られている。しかしながら，高レベル放射性廃棄物の半減期を考えたとき，1 千年～1 万年という長期間の止水性がグラウト材には求められる。セメントでは，この条件を満たすことは困難であると考えられるため，地層処分で用いるグラウト材料として適当ではないと評価している。

本研究では，グラウト材としてそれ自身が天然材料であることから，長期間の安定性が期待されるベントナイトを，各種溶液によってグラウト可能なスラリー化したベントナイトスラリーを用いた。ベントナイトは，水によって膨潤し，難透水性を発揮するが，同時に高粘性であるため，止水性を発揮するベントナイトを，水を用いて，高密度でスラリー化することは難しい。ベントナイトの透水性は，間隙比に依存するため，低密度のグラウト材では難透水性が得られず，また，粘性が低い状態でのスラリー注入はセメント系グラウト材料と違い硬化しないため，流亡する可能性がある。よって，各種溶液を用いて高密度でスラリー化したベントナイトの浸透特性等の基礎物性，ベントナイトの注入可能亀裂開口幅およびセメントグラウトで有効であった動的注入工法の適用などを検討することで，ベントナイトを用いたグラウチングの有効性を示すことを本研究の課題とし，長期安定性を期待できるグラウト材とその工法について提案を行う。

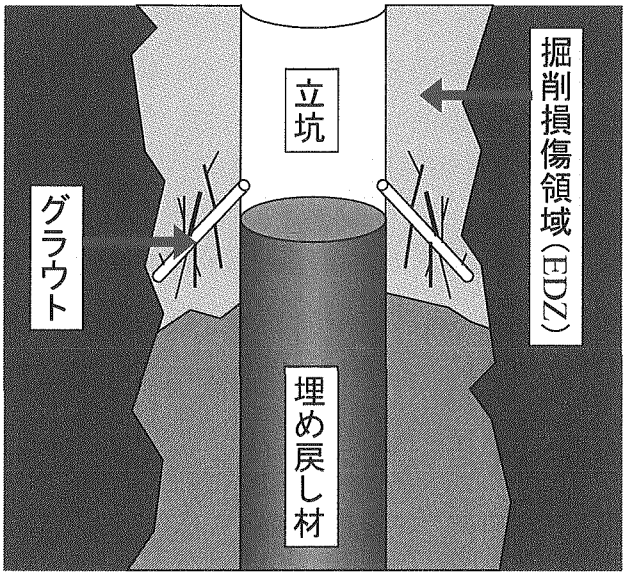


図 3.2.3　地層処分における掘削損傷領域(高透水性ゾーン)へのグラウチング概念図

3.3 グラウト材の基礎物性

3.3.1 概要

高レベル放射性廃棄物の地層処分における，ゆるみ領域へ行う注入のグラウト材は，高レベル放射性廃棄物の性質を考慮した長期の難透水性を有する物質を用いた方法となる。長期の難透水性を有する物質として，天然材料であり長期の安定性が期待され，難透水性を有する粘土であるベントナイトが考えられる。よって本章では，ベントナイトの基礎物性について試験を行い，そこから得られた所見をまとめる。

3.3.2 ベントナイト

ベントナイトとはスメクタイトを主成分とする粘土であり，その土粒子の密度は約 2.7g/cm^{3}である。スメクタイトとはモンモリロナイト，バイデライト，ノントロナイト，サポナイト等の粘土鉱物を総評した名称であり，この中でもモンモリロナイトが代表的粘土鉱物である。モンモリロナイトとは，単位結晶格子が 1 枚のアルミナ八面体シートを 2 枚の珪酸四面体シートで挟み込んだ構造を有しており，単位結晶格子が 2 つ重なると一つの層間ができる。また，層間の交換性陽イオンの種類により Na 型や Ca 型と呼ばれ，Na 型モンモリロナイトを多く有するベントナイトは以下に示す性質を有している。

① 水を吸収して膨潤する。
② 塩水，エタノールは膨潤抑制する。
③ 低透水性を有する。
④ 高い陽イオン交換能を有している。

これらの性質よりベントナイトを用いて高透水性ゾーンに対しグラウトを行う際，塩水およびエタノールでスラリー化し注入すると，施工性，透水性の向上が期待される。以上の観点から本研究では，特に注釈がない場合，山形産 Na 型ベントナイトを試験試料とし使用する。**図 3.3.1** に試験で用いたベントナイトの粒径加積曲線を示す。測定方法はレーザー回折法(測定範囲 0.02μm～2800μm)を用い，湿式での計測を行った。分散媒には，実験で使用した 60%エタノールを用いることで，スラリー化した時の粒径を測定している。分散媒の重量に対して 0.5%のベントナイトを混ぜ合わせ，撹拌し，超音波を当てることによって分散を促したものに対して，測定を行っている。エタノール濃度は 60%(質量)を超えると消防法上の「危険物」となるため，本研究では，すべて 60%以下のエタノールを使用した。

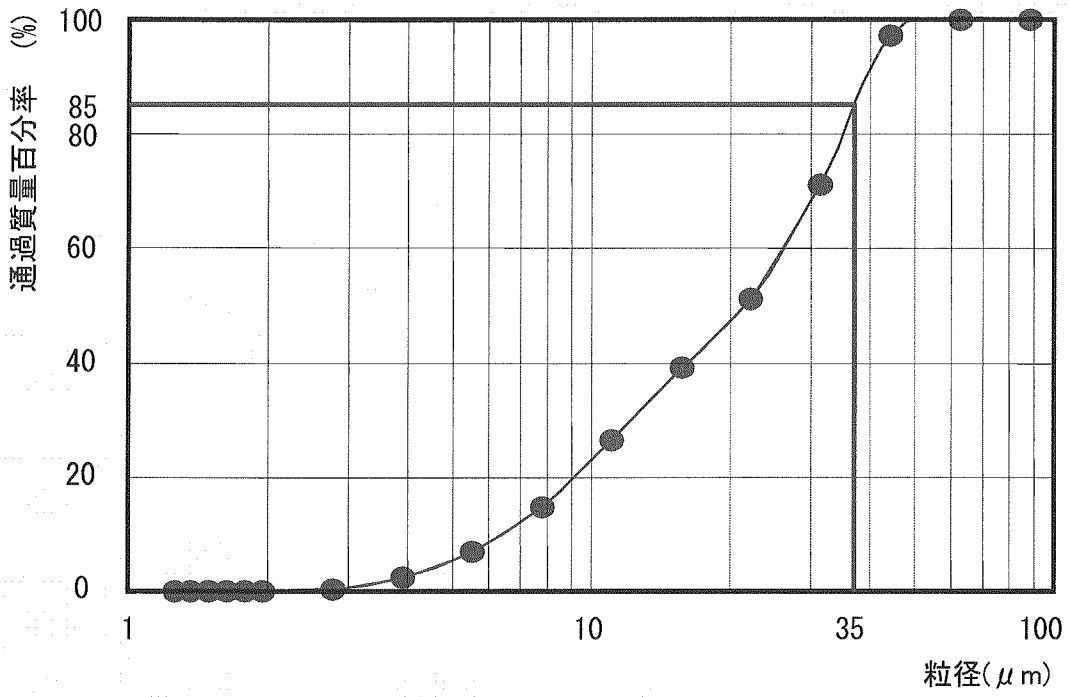


図 3.3.1　ベントナイト試料の粒経加積曲線

図 3.3.1 によるとベントナイトの 85%粒径 D_{85} は約 35 μm である。この値を目詰まりを生じない割れ目幅(D_p)の指標式とされている次式に代入すると，

$$D_p = D_{85} \times 5 \quad \cdots\cdots (3.3.1)$$

約 165 μm 以下の亀裂幅では目詰まりを生じてしまう可能性がある。このように注入口で目詰まりが生じてしまうと，十分な注入をおこなうことができず，止水効果が期待できない。よってベントナイトの注入可能領域を調査する必要がある。この問題については第 5 章で述べる。

3.3.3 ベントナイトスラリーの粘性

施工時の施工性を考慮すれば粘性が低いものが望ましい。よってベントナイトのスラリーの粘性を把握することは重要である。ここでは，水，塩水およびエタノールを用いたスラリーを作成し，塩分濃度，エタノール濃度によるベントナイトスラリーの粘性の変化，および塩水，エタノールとベントナイトの配合比による粘性の変化を把握することを目的とする。試験より得られた結果から高密度かつ低粘性である溶媒濃度および配合比のスラリーにて後の章の試験を行う。

写真-3.3.1 に粘度測定に用いた試験装置を示す。また試験方法を以下に示す。

所定の濃度の溶媒を作成する。

① 溶媒とベントナイトを設定配合比にて家庭用ミキサーを用い混合する。

② 作成したスラリーを恒温室(20℃)内に 24 時間静置した後，500ml ビーカーに移す。

③ B 型回転粘度計を用いて，各ずり速度 D(s^{-1})におけるずり応力 S(Pa)を求める。

④ ⊿S/⊿D から粘度 μ (Pa・s)を求める

$$\mu = \Delta S/\Delta D \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.3.2)$$

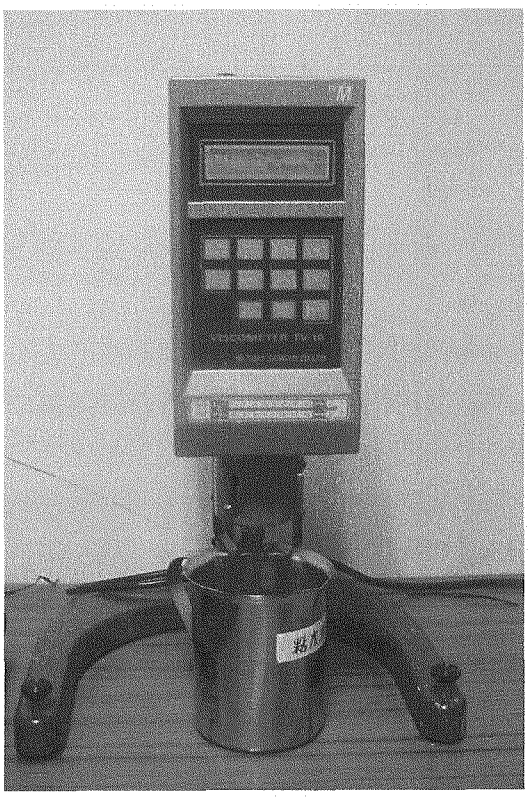


写真 3.3.1　B型回転粘度計

3.3.3.1 溶液濃度と粘性

塩分濃度によるスラリーの粘性変化を図 3.3.2 に，また同図に海水(以下 Ma)ベントナイトスラリーの粘性を示し，エタノール濃度による粘性の変化を図 3.3.3 に示す。また回転速度と粘性の関係を図 3.3.4 に示す。

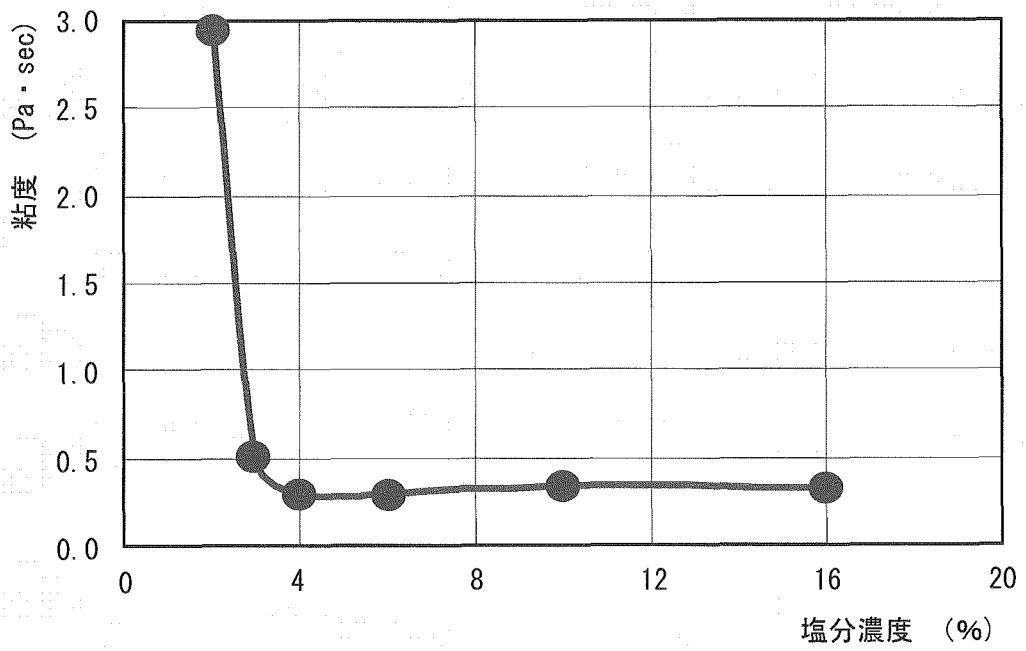


図 3.3.2 塩分濃度とスラリーの粘性の関係 (Sa/Be=2/1，22～23℃)

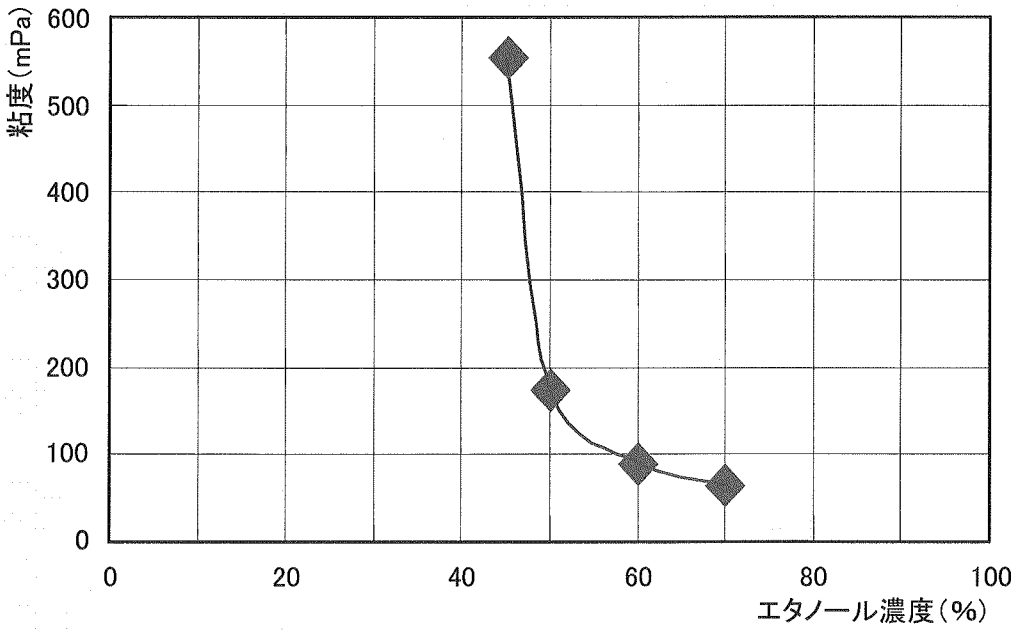


図 3.3.3　エタノール濃度とスラリーの粘性の関係（Et/Be=2/1，22～23℃）

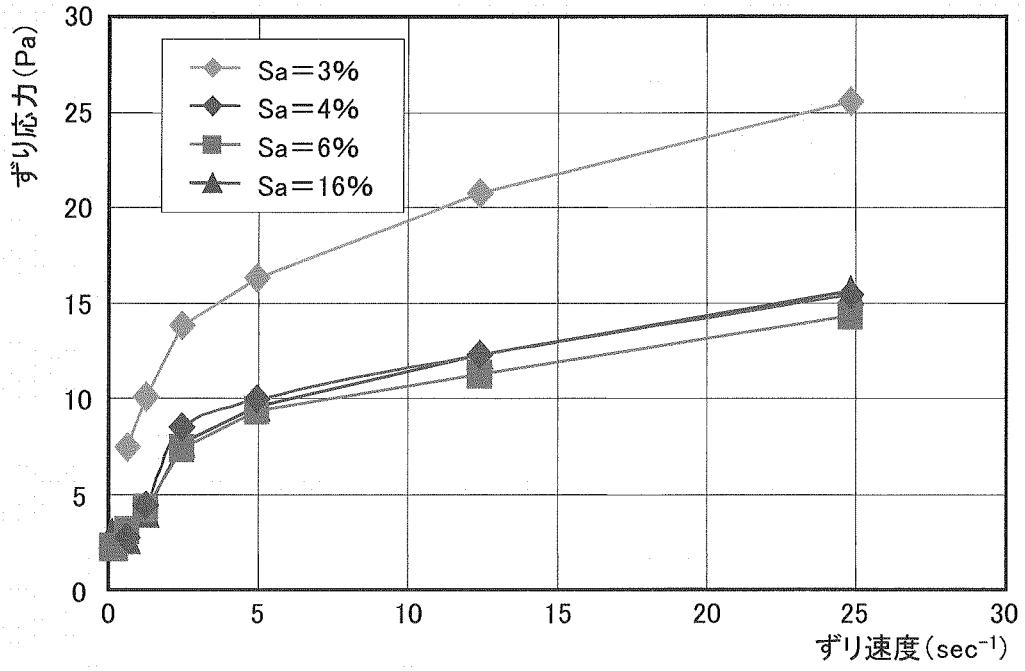


図 3.3.4　Sa/Be スラリーの流動曲線
（Sa/Be＝2/1，22～23℃）

図 3.3.4 より回転速度により粘度が変化していることから，ベントナイトスラリーは非ニュートン流体であり，かつチクドソロピー流体であると言える。チクソトロピー流体とは，その中に何らかの形の分子または分子集団の秩序ある配列すなわち内部構造が生じており，これがずり速度を受けることによって乱され，その結果内部構造の大きな変化をもたらすために複雑な性状を示すと考えられている流体のことで [24]，回転粘度計では粘度の測定は難しい。そのためここでは比較的線形領域であった高回転領域にて得た値から粘度を算出した。

塩水を用いてスラリー化を行う場合，図 3.3.2～3.3.3 の結果から 4%以下にて粘性が急上昇し，それ以上の濃度では粘性がほぼ変化しない。そのため 4%塩水を用いてベントナイトスラリーを作成することが望ましいことがわかった。一方エタノールを用いた場合では，濃度が 60%以上となると消防法上の取り決めで危険物となり資格が必要である。そのため本研究では 60%以下の値であるがエタノール濃度が 45%以下となると急激に粘性が上昇するため，それ以上の濃度にてスラリーを作成することが望ましいと判断される。またここでは塩水，およびエタノールベントナイトスラリーの配合比を 2/1 にてのみ行ったため，次項にて配合比と粘性の関係について述べる。

3.3.3.2 配合比と粘性

図 3.3.5 に各種溶液とベントナイトの配合比変化における粘性の関係を示す。溶液濃度はスラリー粘性が低い値となる塩水で４%，エタノールで 60%とした。

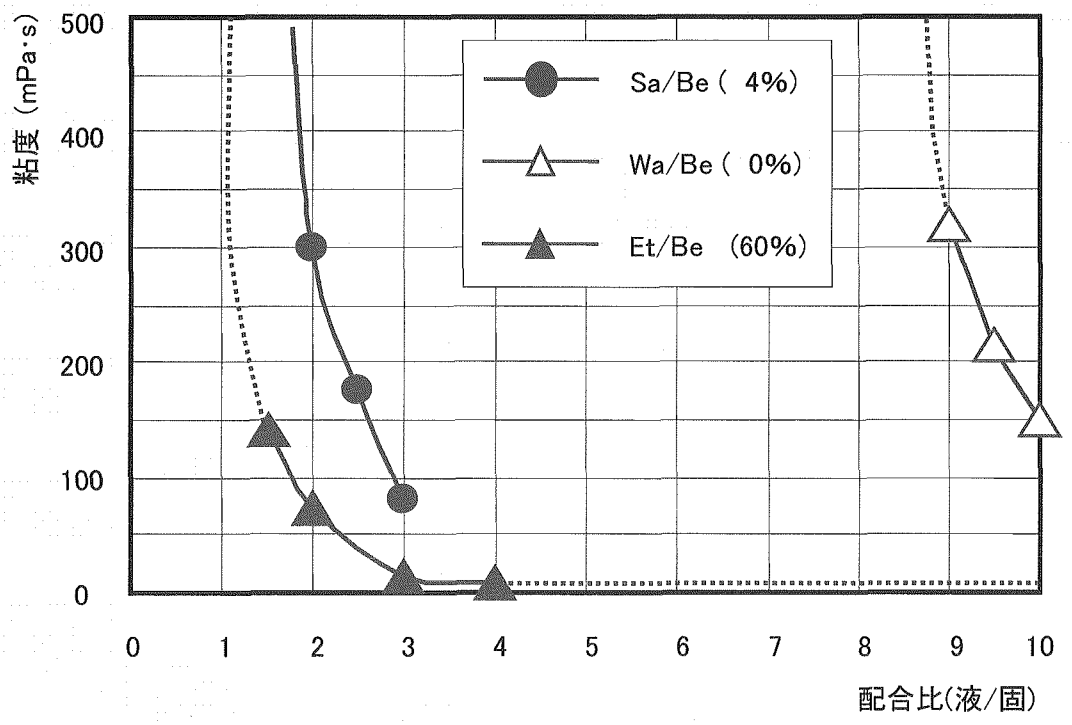


図 3.3.5　各種溶液ベントナイトスラリーの配合比と粘性の関係（22℃）

塩水においてはSa/Be＝2/1以下から，エタノールにおいてはEt/Be＝1.5/1以下から急激に粘性が上昇する。よってそれ以上の配合で設計することが望ましいと考えられる。よって本試験では注入試験に用いる塩水ベントナイトスラリーおよびエタノールベントナイトスラリーの配合の最低値をSa=4%でSa/Be＝2/1，Et＝60%でEt/Be=1.5/1とした。

各種溶液の配合比においてSa/Be＝1.5/1とEt/Be＝1.2では，粘性が大きくなり攪拌機（家庭用ミキサー）による混合ができずスラリー化が不可能である。また，Sa/Be＝1.7/1，Et/Be＝1.3/1においては粘度が大きすぎ装置測定範囲の上限である6Pa・secを超えてしまったため粘度の測定が不可能であった。

3.3.3.3 塩水エタノールベントナイトスラリーの粘性

前述までにベントナイトのスラリー化には塩水およびエタノールが粘性，および作成密度の観点から有効であることを示した。ここではより低粘性かつ高密度化の溶液として塩水エタノール水溶液の適用性について検討を行った。また試験はB型回転粘度計（**写真-3.3.1** 参照）にて行い，溶液としてエタノールを用いているためスラリーに対する脱気は行わないものとする。以下の**表3.3.1**にスラリーの配合条件を示す。

図3.3.6に溶液濃度と粘性の関係を示す。結果，塩水とエタノールを掛け合わせることにより粘性の低下させ，より高密度化が可能であることがわかった。試験ケースにおいて最も粘性が低いのは塩水4%，エタノール濃度60%の配合条件であった。Sa＝0%でのEt＝0～40%，SaEt/Be＝2/1では粘性が高く，装置の測定上限値を超えたため測定不能であった。

表3.3.1　塩水エタノールスラリー粘性試験における配合条件

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬
エタノール濃度（%）	60	60	60	60	40	40	40	20	20	20	0	0	0
塩水濃度（%）	0	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6
配合比（液/固）	2/1												

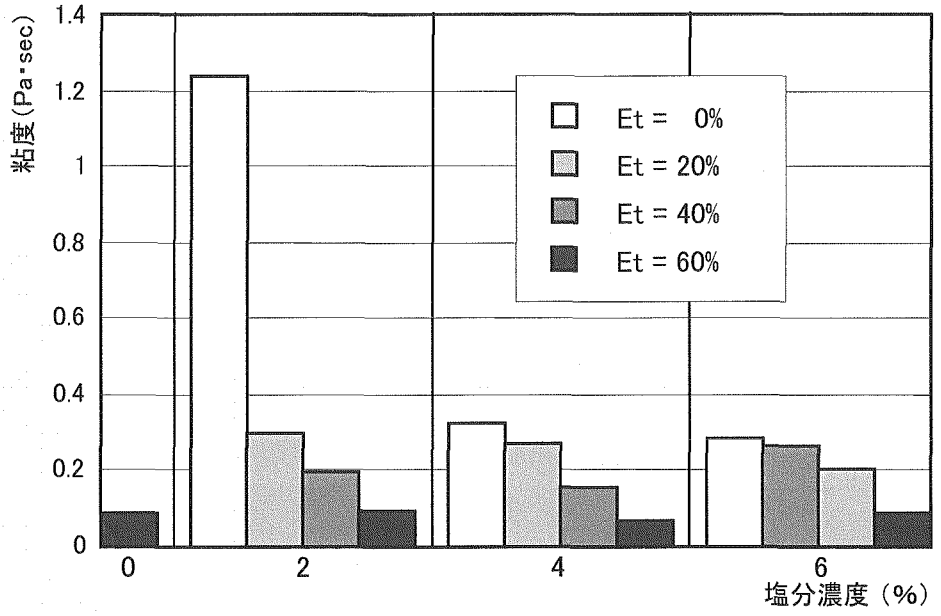


図3.3.6　ベントナイトスラリーの各種溶液濃度と粘性の関係（21～23℃）

3.3.3.4 粘性の経時的変化

さらに，ベントナイトスラリーのチクソトロピーを確認するため，Wa/Be スラリーに対する所定時間経過後，及び再撹拌したものをファンネル粘度で測定した。試験装置であるファンネル粘度計を**付写真-3.3.1** に示す。ファンネル粘度計とは土木現場において安定液の管理に用いられる簡易粘度計であり，装置から 500ml の試料がすべて流れ出るまでの時間(sec)を測定する粘度計で，単位はファンネル粘度(sec)で表される。配合比 Wa/Be=10/1 にて作成したスラリーを 20℃の恒温室において測定を行った。また再撹拌は手作業にて十分に行っている。結果を**図 3.3.7** に示す。

この結果より，経時的に粘性が増加していくが分かる。このことから，亀裂に注入後，スラリーの粘性が上昇すると考えられる。さらに，再撹拌することでほぼ初期の粘性に戻ることから，時間変化で粘性が増加しても注入時に力を加えることで見かけの粘性は大きく低下するという可能性を同時に示していると言える。この性質に対しては動的注入工法によるグラウチングが見かけ粘性の低下に対して有効である可能性を示す結果と言える。また配合比 Wa/Be=7/1 では作成直後には 200sec 程度であるが 24 時間後には，流出しない状態となり測定ができなかった。

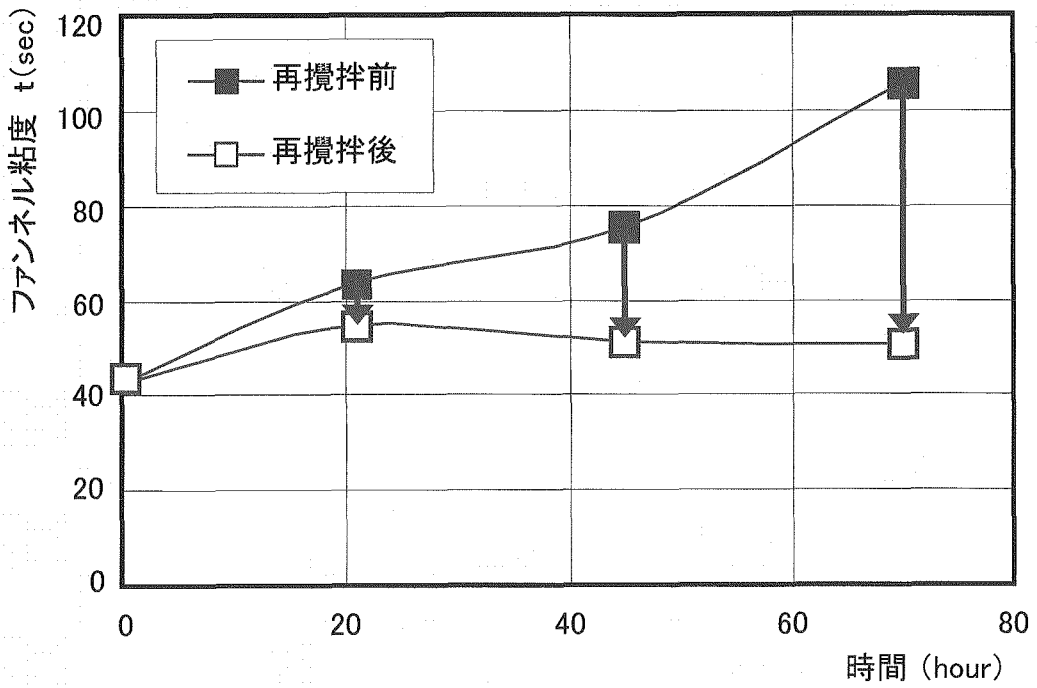


図 3.3.7　スラリーの粘性の経時的変化と再撹拌による効果

3.3.4 ベントナイトスラリーの圧密特性

ベントナイトスラリーの注入時に目詰まりが発生する場合，スラリー内の溶媒のみが絞り出されて流出することが考えられる。目詰り部より注入孔側では配合比の低下，反対側では配合比の上昇が考えられる。そのため，ベントナイトスラリーに対し圧密試験を行い，圧密物性及び透水性について調査を行った。

3.3.4.1 試験装置および試験方法

所定の配合で作製したスラリーを，**図 3.3.8** および**付写真-3.3.2** に示す圧密試験装置にて 24 時間載荷を 5 段階の荷重で行い，経時的な沈下量を調べる。試験溶液はスラリーを作製したものと同じもので試験を行った。ただしエタノールの蒸発および塩水による試験装置の酸化を考慮し，1 サイクルの圧密載荷時間を 2 次圧密状態となる 12 時間とした。

以下に試験の手順を示す。

① 液性限界付近の各種溶液スラリーを作製する。
② 圧密リングに作製したスラリーを入れ，供試体部の質量を測定する。
③ 圧密箱を組み立て圧密試験機セットし供試体を圧密する。
④ 各測定時間での沈下量をダイヤルゲージから読み取り，間隙比を算出する。
⑤ ２４時間後（Et/Be は３時間），次の段階の載荷を行う。
⑥ ④～⑤を繰り返し５段階行う。
⑦ 経時的沈下量から e-logP 曲線及び，log t 法[22]を用いて透水係数を算定する。

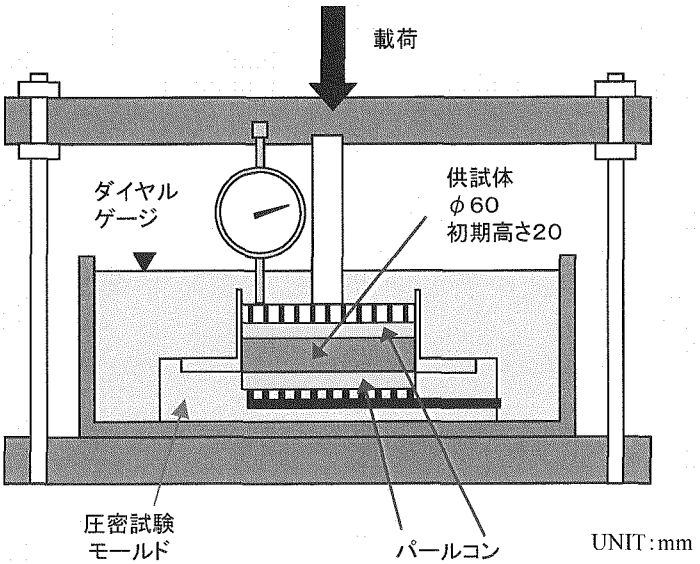


図 3.3.8　圧密試験装置

3.3.4.2 圧密試験結果

各種溶液による得られたe-logP曲線を図3.3.9に，圧密試験により得られた間隙比と透水係数の関係を図3.3.10に示す。

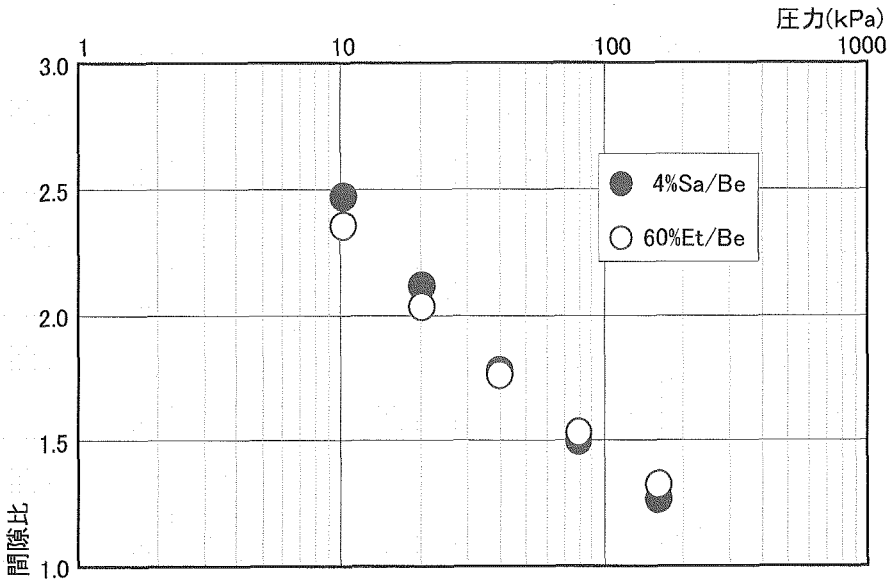


図3.3.9　e-log P曲線

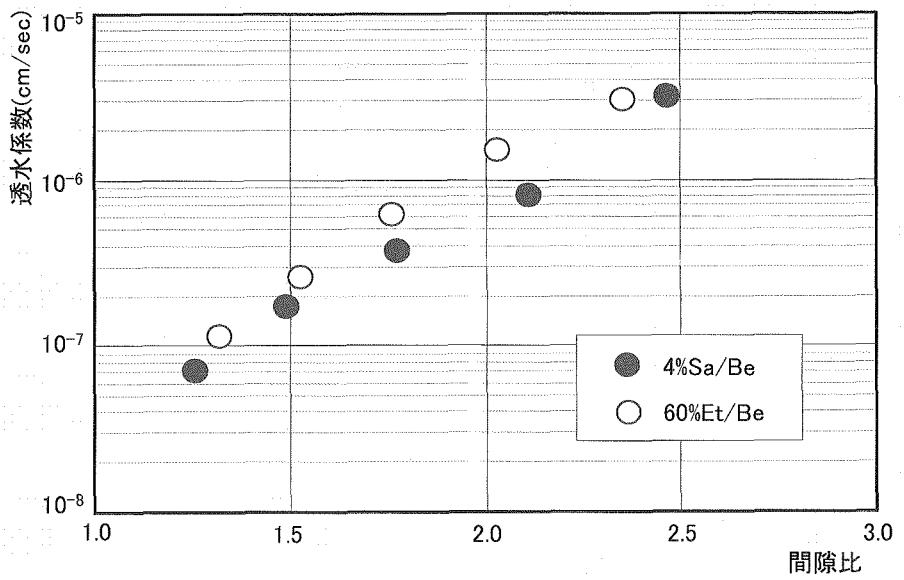


図3.3.10　間隙比と透水係数の関係(圧密試験)

結果，塩水・タノールともに同等の圧密強度，透水性が得られた。スラリーの状態であるため小さな応力で圧密が生じている。またここで得られた透水係数はあくまで参考程度の値であり，次章にて実際にスラリーに対し透水試験を行いその透水性の調査を行う。

3.3.5 考察

本章で得られた知見を以下にまとめる。

(1) ベントナイトスラリーは非ニュートン流体かつチクソトロピー流体のため，経時的に粘性が上昇するが，再攪拌を行うことによって粘性は初期値に戻る。また注入したスラリーがその粘性上昇効果により流亡しにくくなると考えられる。

(2) 塩水ベントナイトスラリーは塩分濃度４%以上ではあまり粘性が変化せず，それ以下となると，急激に粘性が上昇する。また配合比(Sa/Be)が 1.5/１以下から流動性が無くなりスラリー化がほぼ不可能である。

(3) エタノールベントナイトスラリーはエタノール濃度が 40%以下となると急激に粘性が上昇し，ベントナイトの膨潤を抑制する作用が弱まる。また配合比 Et/Be=1.2/1 以下となると流動性が無くなりスラリー化が不可能である。

(4) ベントナイトをスラリー化する場合，溶液として塩水およびエタノールを用いた方が高密度で低粘性のグラウト材を作成することが可能である。またエタノールと塩水を比較するとエタノールベントナイトスラリーのほうが粘性が低く高密度のスラリーが作製可能である。

(5) 塩水エタノールをスラリー化の溶液として用いることにより，ベントナイトスラリーは塩水およびエタノールベントナイトスラリーより粘性の低下可能であり，より高密度で作成可能である。最も粘度が低下する配合は塩分４%エタノール 60%である。

(6) 各種スラリーに対する圧密試験より，載荷圧力 p=10.4kPa においても，圧密して間隙比が低下する。よって実際のグラウトにおいて目詰まりが生じた場合，注入圧力によって，スラリーは圧密され，間隙比が低下することが考えられる。

以上の観点からエタノールを用いた場合が有効であると考えられるが，高濃度エタノールは蒸発しやすく，扱いにくい。また作業中に液体が漏水した場合，処分坑道内は閉鎖空間であるため，作業の危険性が伴う。よって使用にあたり十分な対策が必要である。一方，塩水はそれらの危険性はない。よって，両者を評価するため，次章より述べる試験をもとにグラウト材設計の指標とする。

3.4 ベントナイトスラリーに対する透水試験

3.4.1 概説

前章までで，高透水性ゾーンに対するベントナイトグラウトの必要性と基礎物性に関して示した。塩水，およびエタノールにてベントナイトをスラリー化し，注入したベントナイトがどの程度止水性を有するか把握することは最検討項目の一つである。注入したスラリーの最終的な透水係数が，掘削による損傷を受ける前の状態と同等以上の止水性（図3.4.1）を発揮しなければならない。よって本章では各溶媒濃度，配合比，間隙比による透水性の変化を計測することを目的とし，地層処分施工時から施工後長期間にわたる廃棄体の周辺の浸透特性を予測する。

試験溶媒には純水，塩水，エタノール，海水，海洋深層水を用い，圧密試験器と加圧型変水位透水試験にて各種スラリーの透水係数の計測を行った。

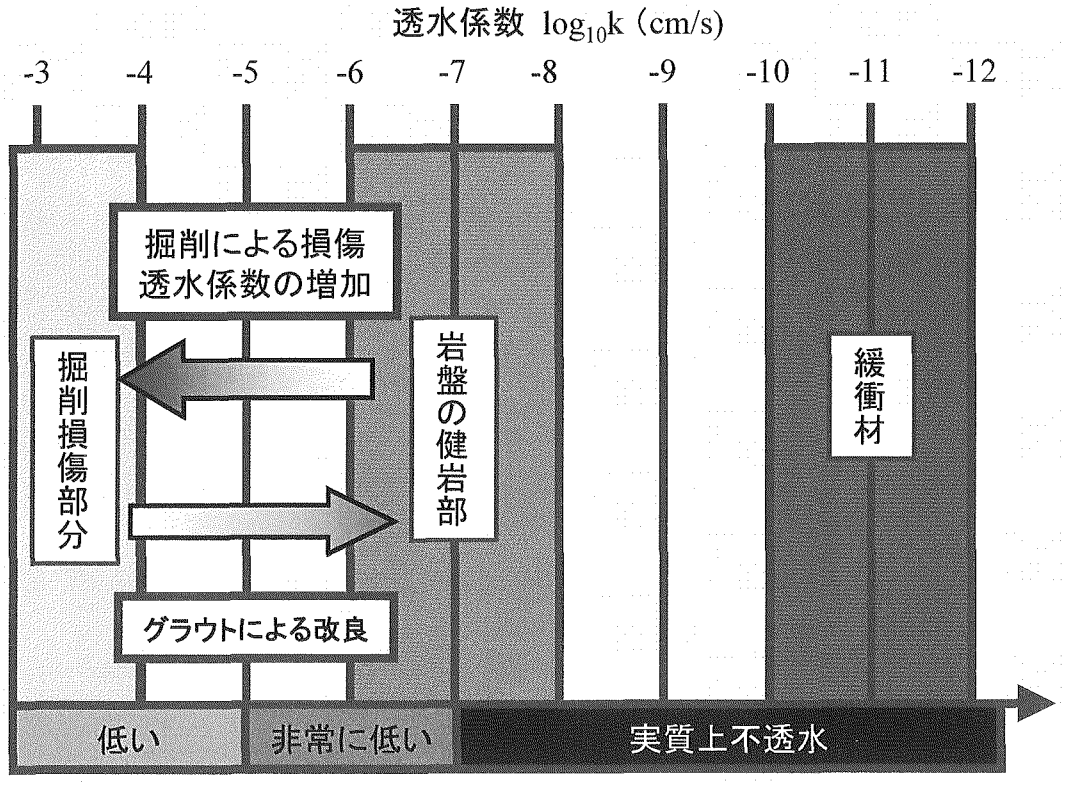


図 3.4.1　グラウトによる透水性の改良効果目標

3.4.2 試験装置と試験手順および評価手法

本試験に用いた透水試験装置は圧密試験用モールドを改良し，透水試験を併用可能にしたものである。試験装置図を**図 3.4.2，付写真-3.4.1** に示す。スラリーに対し透水試験を行う場合，供試体に体積変形を起こさず，流亡を生じないある程度の強度が必要である。そのため作成したスラリーをある程度まで載荷し，圧密させ強度を増加させた上で上下を固定し加圧型変水位透水試験を行った。

フィルター材として用いたパールコン（厚さ：5mm×2 枚）およびろ紙の透水係数は 1.0×10^{-3}（cm/sec）であるため，その透水性への影響は，透水係数が 3 オーダー以下となるような供試体においては除外して考えた。また試験用水にはスラリーを作成した溶液と同じものを用いた。

粘性土の透水試験を行う場合，導水勾配が低いとダルシー領域からはずれ，性格な透水性を測定することができない。そのため経時的な対数水頭の変化と時間が線形であることを確認を行いながら，測定を行った。

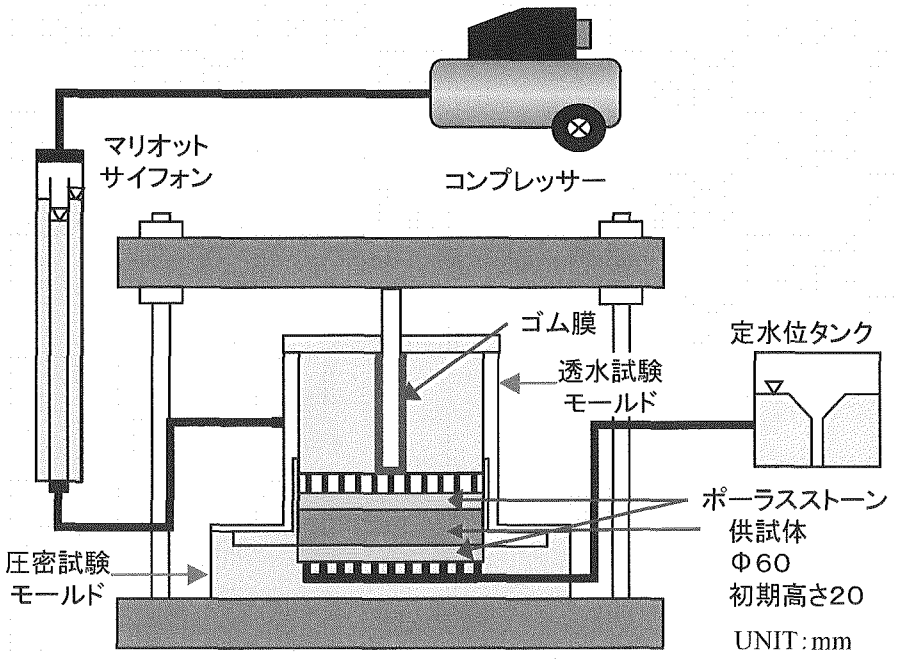


図 3.4.2　圧密併用加圧型透水試験装置

以下に試験の手順を示す。

(ア)所定の配合条件にてベントナイトスラリーを作成し，24 時間真空デジゲータ内にて脱気を行う。ただしエタノールベントナイトスラリーの場合はエタノールの蒸散が生じるため脱気を行わない。

(イ)圧密リングにスラリーを入れ，供試体の質量を測定し，試験装置を組立てる。

(ウ)供試体を 2 次圧密段階まで圧密させ，体積変化防止のため上下部を固定する。

(エ) ダイヤルゲージの指示値による沈下量から供試体の間隙比および配合比を算定する。
(オ) 上部モールドにマリオットサイフォンを取り付け，経時的な水頭の変化を計測し，ダルシー領域の確認を行う。水位の低下量が小さい場合は，マリオットサイフォン内を空気圧にて載荷し，加圧型変水位透水試験を行う。
(カ) 溶液の置換試験の場合は 24 時間ごとに内部の溶液を置換させる。
(キ) ③～⑤を繰り返し行う。
(ク) 装置を解体し供試体を炉乾させ，間隙比，配合比の確認を行う。

試験を行うにあたり，各種溶液を用いているため得られた透水性に対し同等の評価を行わなければならない。本試験では透水性の指標として固有透過度を用い試験を行った。固有透過度の算定式を**式**(3.4.1)に示す。またその固有透過度の式から透水係数を逆算し，透水係数による評価を行った。その式を**式**(3.4.2)に示す。

$$K = k_L \frac{\mu_L}{\rho_L g} \quad \cdots\cdots (3.4.1)$$

$$k_W = k_L \frac{\rho_W}{\rho_L} \frac{\mu_L}{\mu_W} \quad \cdots\cdots (3.4.2)$$

ここで，K：固有透過度 (L^2)，
k_L：透溶液係数 (LT^{-1})，
k_W：透水係数 (LT^{-1})，
ρ_L：溶液の密度 (M/L^{-3})，
ρ_W：水の密度 (ML^{-3})，
μ_L：溶液の粘度 (L^2TM^{-1})，
μ_W：水の粘度 (L^2TM^{-1})。

試験に際し溶液の粘性をキャノンフェンス計（**写真-3.4.1 参照**）により調査を行った。試験方法を以下に示す。

① 設定配合で溶液を作成し，温度を測定する。
② 基準点まで溶液を入れ，キャノンフェンス計を鉛直に設置する。
③ 片側から吸い上げ，測定高さ h1 から h2 まで水位が低下する時間 t (sec) を測定する。
④ 式(3.4.3)より粘度 μ (cp)を算出する。

$$\mu = t \times 0.0158 \quad \cdots\cdots (3.4.3)$$

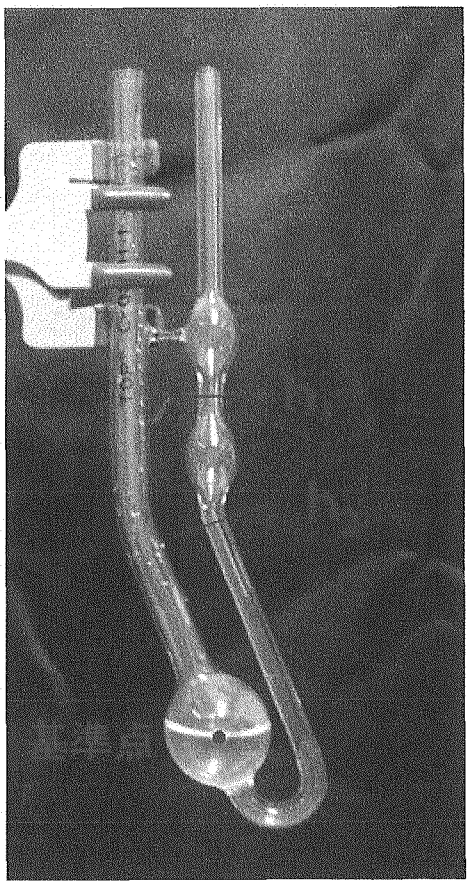


写真 3.4.1　キャノンフェンス計

図 3.4.3 に温度と溶液の関係を示す。

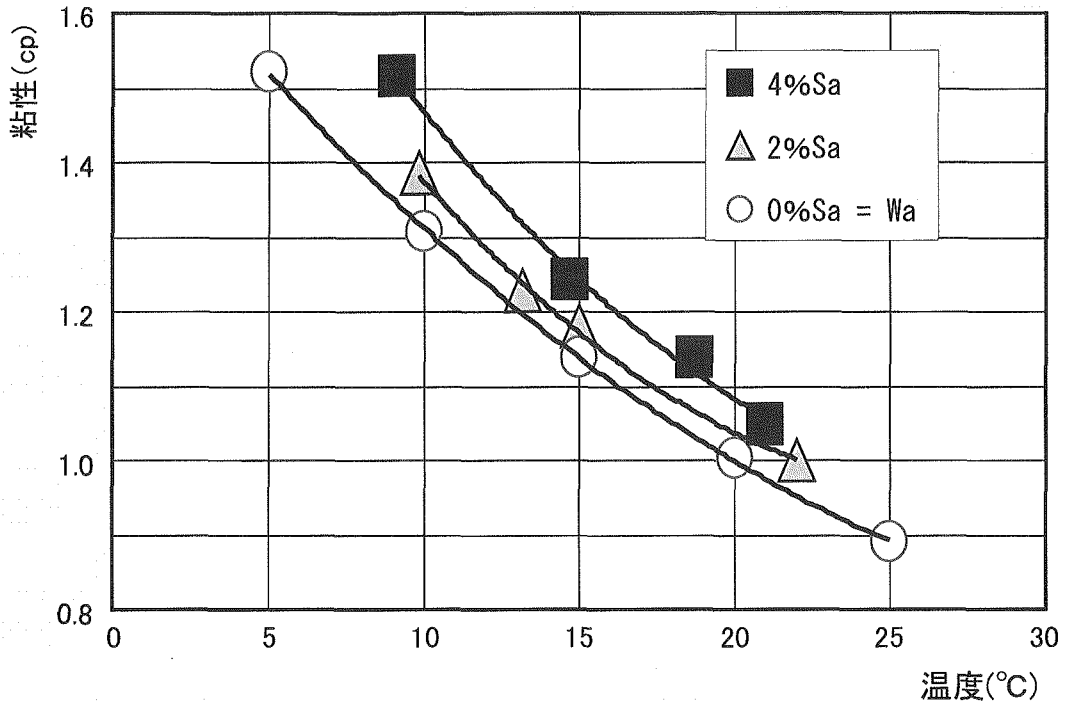


図 3.4.3　溶液の粘度と温度の関係

3.4.3 ベントナイトスラリーに対する透水試験

3.4.3.1 水ベントナイトススラリーに対する透水試験

初期スラリーの配合比は Wa/Be= 7 / 1 である。図 3.4.4 に試験により得られた配合比と透水係数の関係を，図 3.4.5 に間隙比と透水係数の関係を示す。結果，配合比（液/固）3/1 以下で約 10^{-9}cm/sec のオーダーと十分な難透水性を有するが，水にてスラリー化不可能である。また，スラリー作成可能域と考えられる配合比 8/1 以上では 10^{-5}cm/sec と予想される。

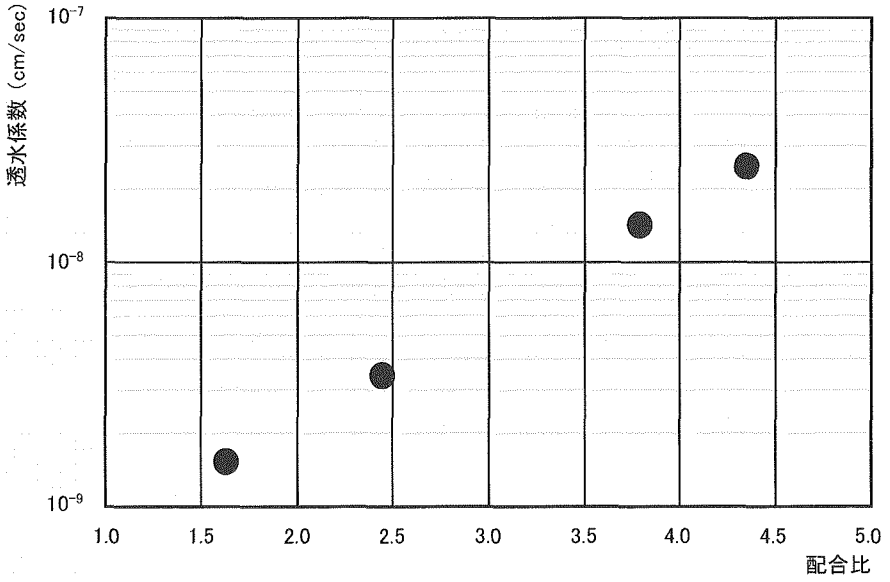


図 3. 4. 4　水ベントナイトスラリーの配合比と透水係数の関係（純水）

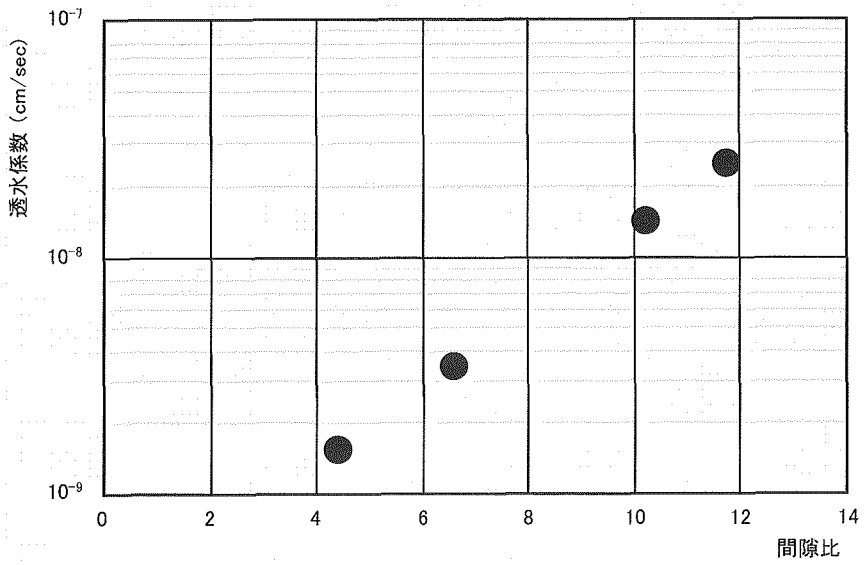


図 3.4.5　水ベントナイトスラリーの間隙比と透水係数の関係（純水）

3.4.3.2 塩水ベントナイトスラリーに対する透水試験

初期スラリーの塩分濃度は４％，配合比 Sa/Be=1.5/1 である。図 3.4.6 に試験により得られた配合比と透水係数の関係を，図 3.4.7 に間隙比と透水係数の関係を示す。結果，4%塩水スラリーにおいて十分な止水性(10^{-8}cm/sec 程度)を発揮させるためには，配合比が 0.75/1 以下である必要がある。しかしその範囲はスラリー化が困難な領域であるため，施工法などにより配合比を低下させることが必要となってくる。

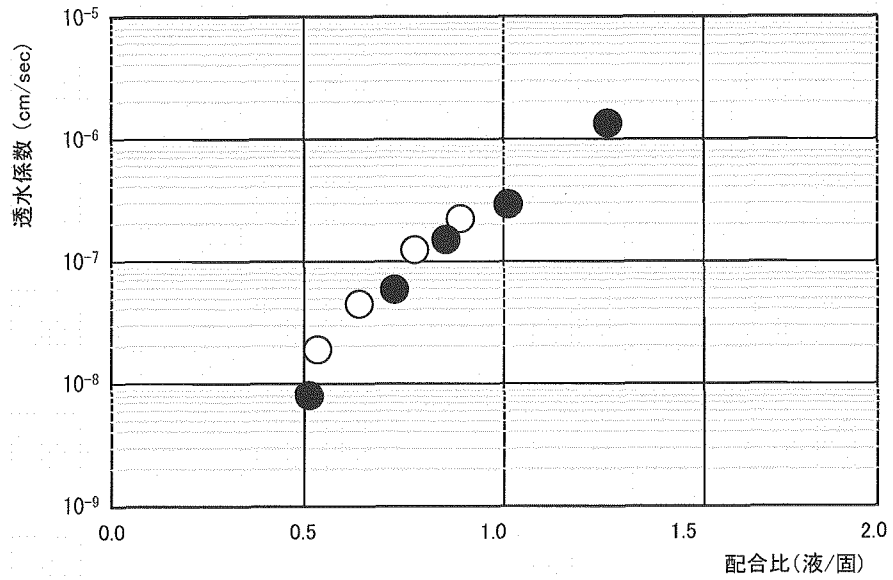


図 3.4.6　塩水ベントナイトスラリーの配合比と透水係数の関係(Sa=4%)

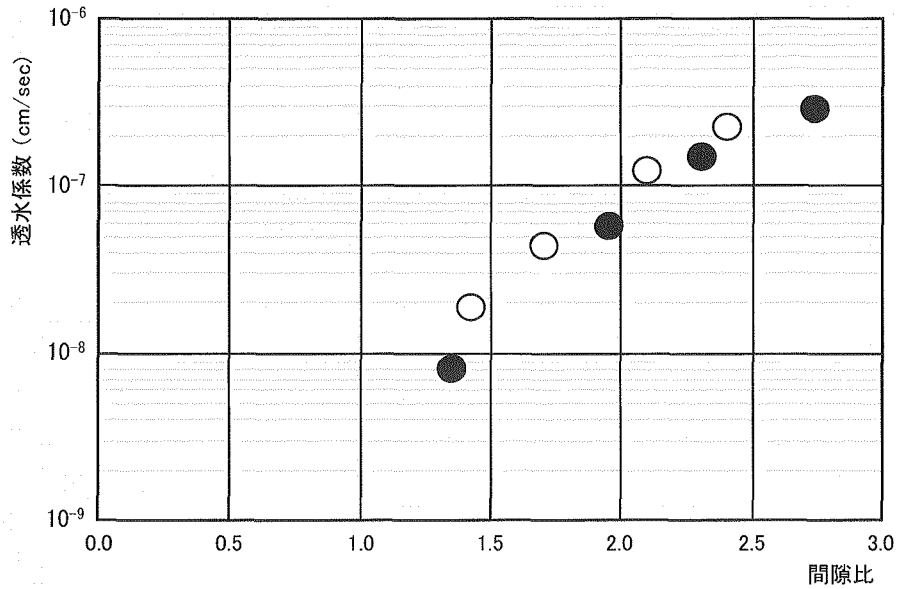


図 3.4.7　塩水ベントナイトスラリー間隙比と透水係数の関係(Sa=4%)

3.4.3.3 エタノールベントナイトスラリーに対する透水試験

初期スラリーのエタノールは 60%，配合比 Et/Be=1.2/1 である。図 3.4.8 に試験により得られた配合比と透水係数の関係を，図 3.4.9 に間隙比と透水係数の関係を示す。結果，60%エタノールスラリーにおいて十分な止水性(10^{-8}cm/sec 程度)を発揮させるためには，配合比が 0.5/1 以下である必要がある。しかしその範囲塩水同様，スラリー化が困難な領域であるため，施工法などにより配合比を低下させることが必要となってくる。

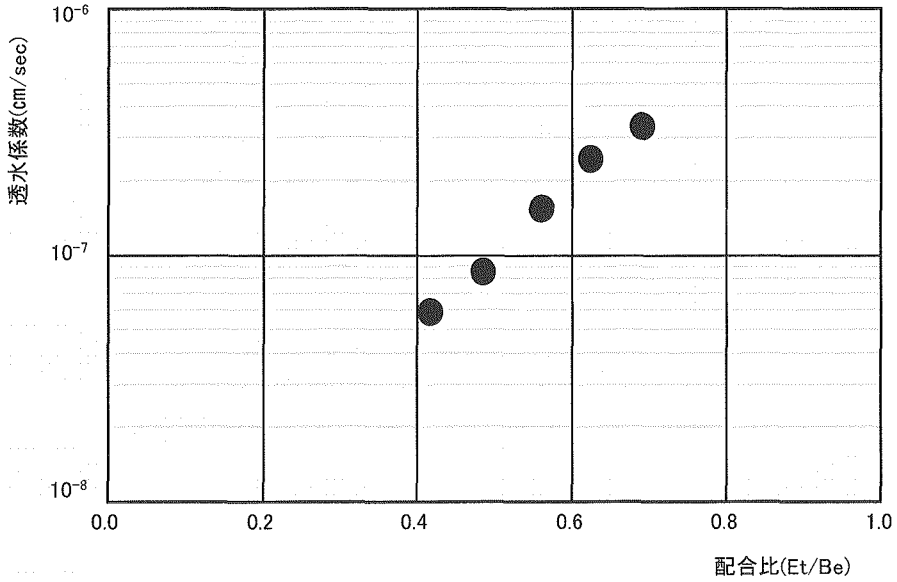


図 3.4.8　エタノールベントナイトスラリーの配合比と透水係数の関係(Et=60%)

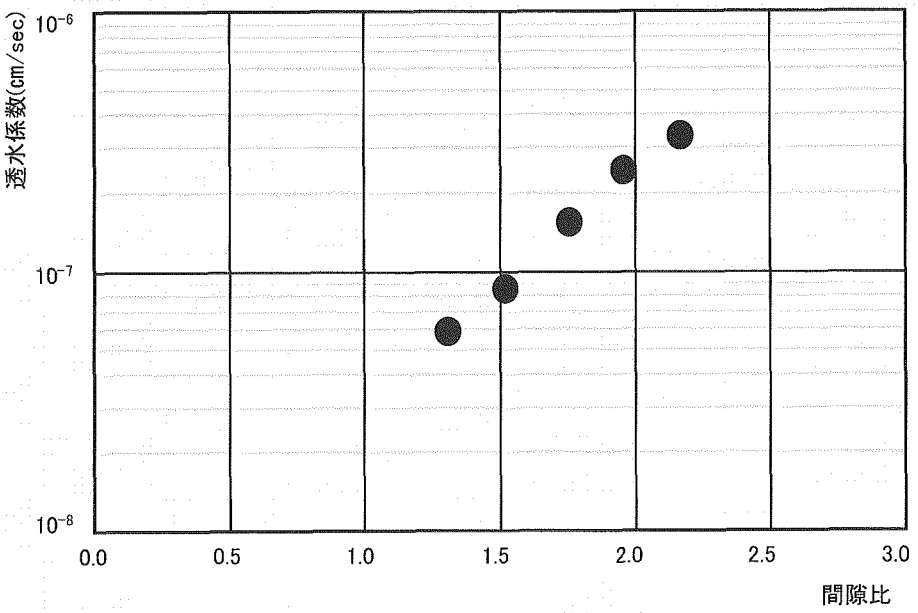


図 3.4.9　エタノールベントナイトスラリーの間隙比と透水係数の関係(Et=60%)

3.4.3.4 海水ベントナイトスラリーに対する透水試験

3.3 で海水ベントナイトスラリーはベントナイトの膨潤を抑制し，高密度でスラリー化が可能であることを述べた。よって海水により作成したベントナイトスラリーがどのような透水性を持つかにより，溶液としての海水利用の適用性を把握するため海水ベントナイトに対する透水試験を行った。海水の採取場所は岡山県渋川海岸である。

また処分サイトが沿岸付近の陸地から処分坑道を掘削して行く場合，大深度の地下水は1～2%程度の塩水であることが知られている。そのようなサイト（図 3.4.10）へグラウトを行えば，ベントナイトは完全には膨潤させることが不可能である。そのため，青函トンネル内の坑道からの湧水（以下海底深層水）を用いたスラリーにたいして透水試験を行った。

以下に海水および海底深層水の物性を表 3.4.1 に，試験溶液の粘性と温度の関係を図 3.4.11 に示す。

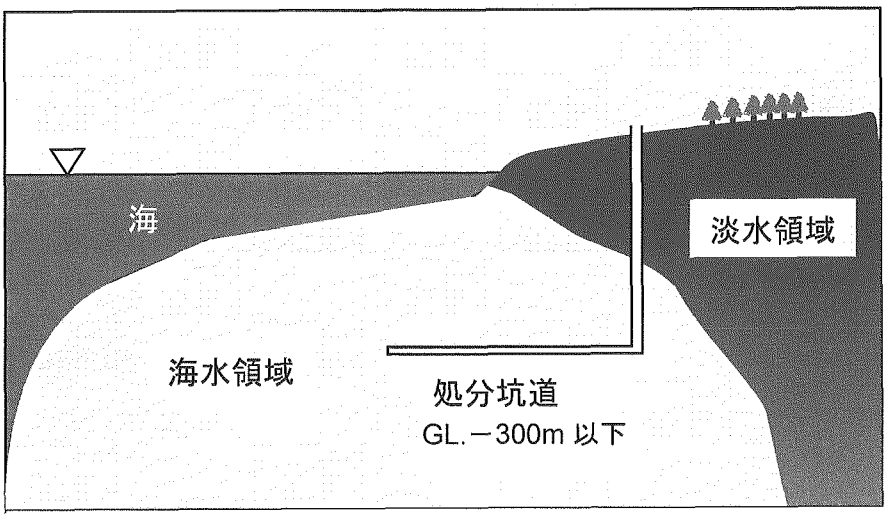


図 3.4.10　沿岸部地下の地下水の様相

表 3.4.1　溶液試料の物性

	密度 (g/cm3)	pH	塩分濃度 (%)	誘電率 (ms/cm)
海水	1.026	8.5	2.75	41.67
海底深層水	1.021	7.5	2.24	51.55

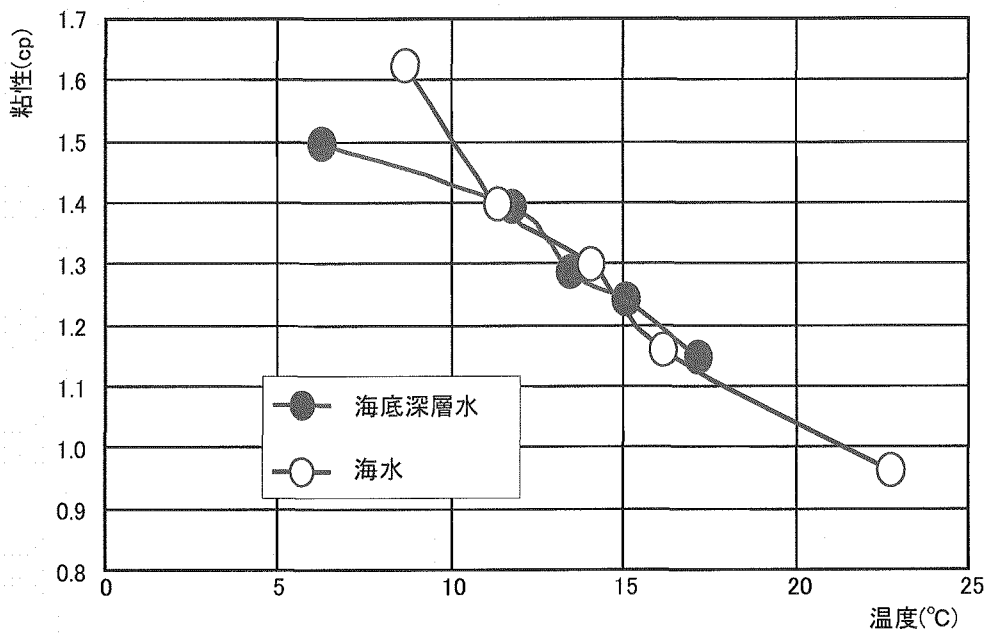


図 3.4.11　溶液試料の粘性と温度の関係

海水ベントナイトスラリーの配合比と透水係数の関係を図 3.4.12 に，間隙比と透水係数の関係を図 3.4.13 に示す。海水ベントナイトは，4%塩水スラリーとほぼ同程度の透水性を有している。

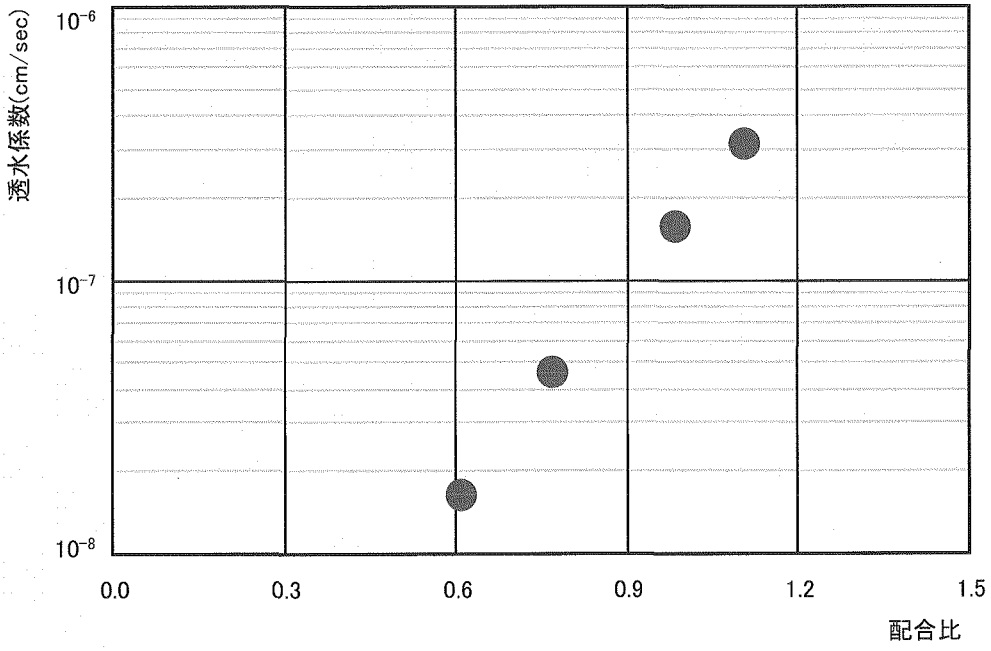


図 3.4.12　海水ベントナイトスラリーの配合比と透水係数の関係

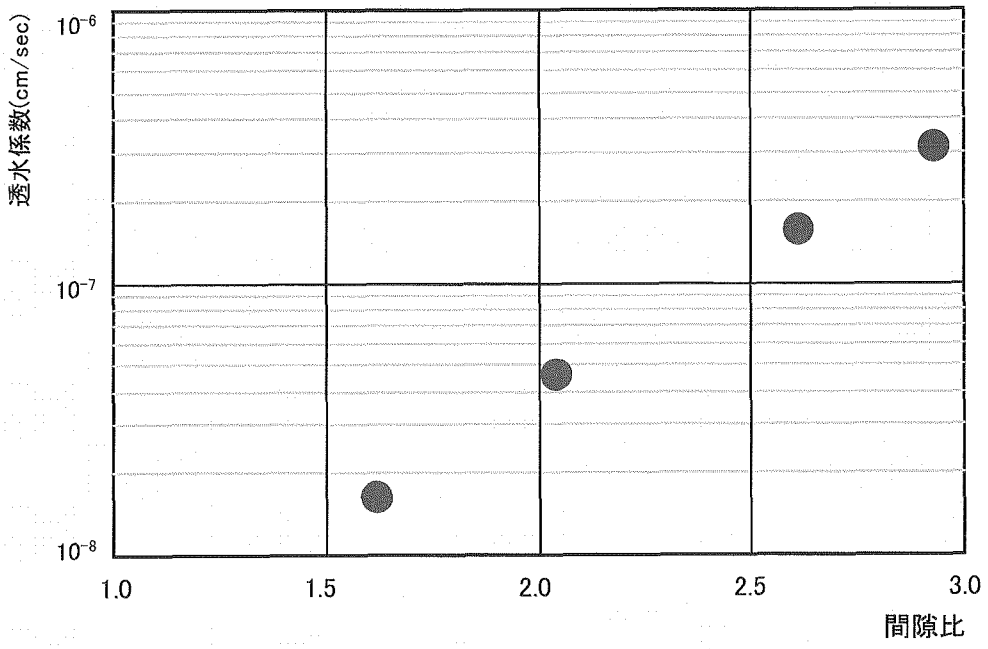


図 3.4.13　海水ベントナイトスラリーの間隙比と透水係数の関係

海洋深層水ベントナイトスラリーの配合比と透水係数の関係を図 3.4.14 に，間隙比と透水係数の関係を図 3.4.15 に示す。結果，4%塩水およびエタノールスラリーの透水性と比較して，同配合比でわずかに低い程度である。

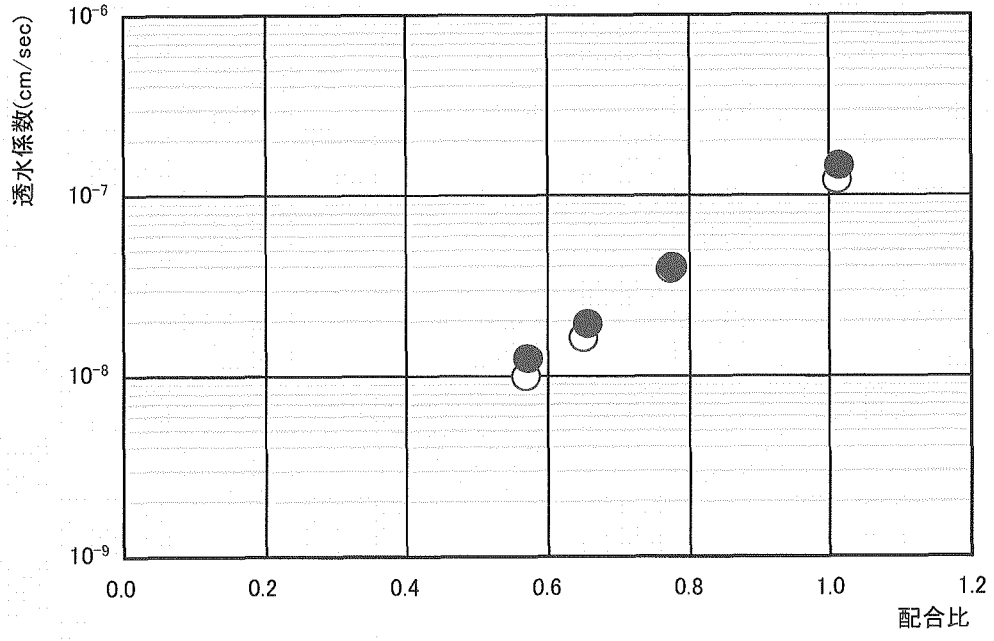


図 3.4.14　海底深層水ベントナイトスラリーの配合比と透水係数の関係

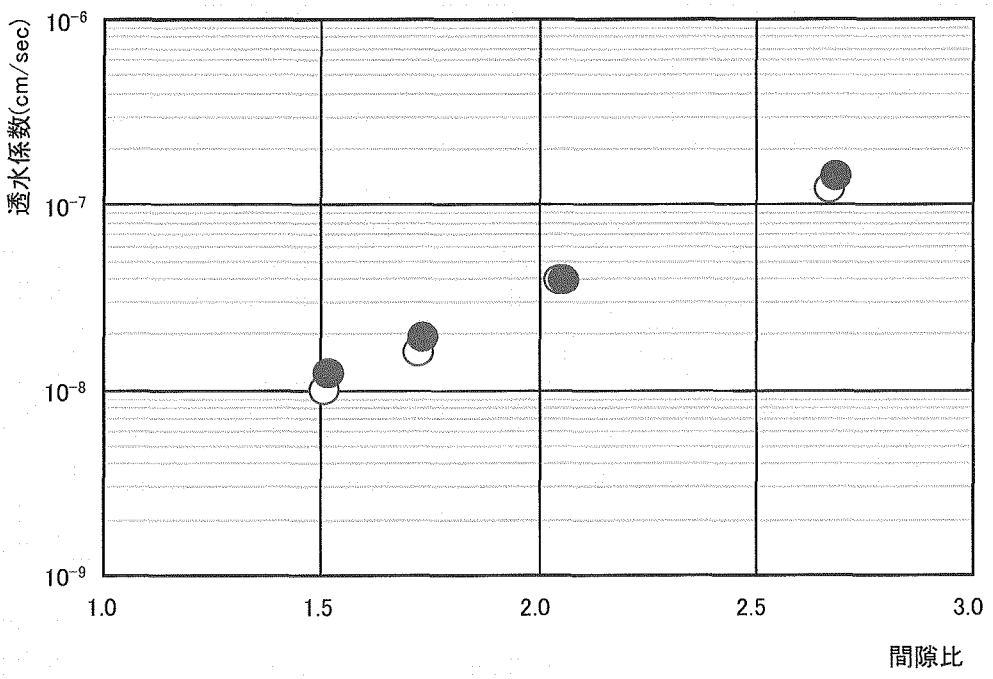


図 3.4.15　海底深層水ベントナイトスラリーの間隙比と透水係数の関係

以上の結果から，塩水，エタノールと水での透水性の比較，塩水，エタノールと海底深層水，海水での間隙比と透水係数の関係を図 3.4.16～3.4.17 に示す。

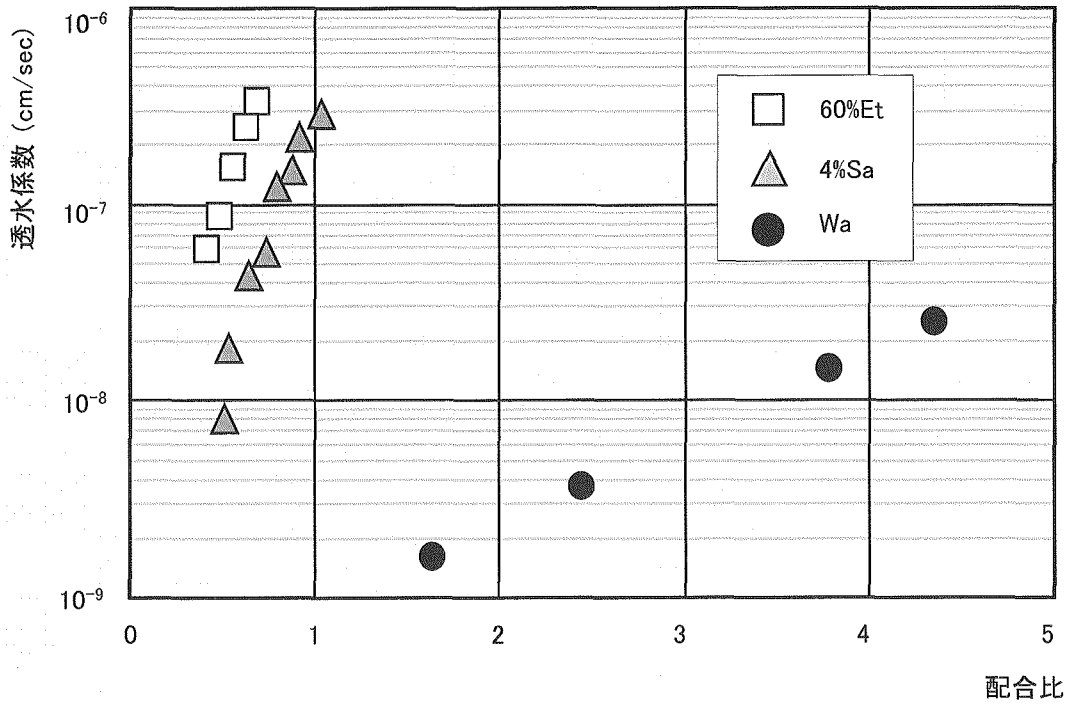


図 3.4.16　60%エタノール，４%塩水と水での透水性の比較

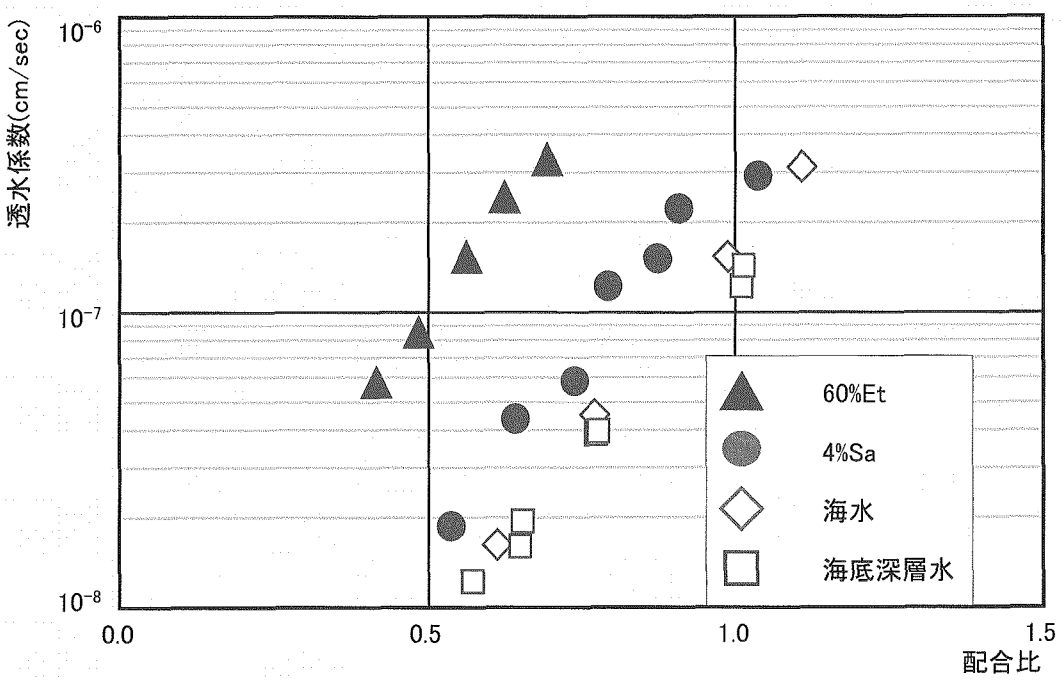


図 3.4.17　60%エタノール，4%塩水，海水と海底深層水での透水性の比較

結果としてスラリー内の塩水，エタノールが完全に水と置換した場合，モンモリロナイトの膨潤作用により，透水係数が３オーダー以上低下すると考えられる。またその透水性は周辺健岩部と同等以上の値であり止水材として十分な値である。

また実際に塩水およびエタノールが水と置換することにより，透水性が低下するかは次頁 3.4.4 において述べる。

一方,海底深層水へ置換した場合は透水係数が微小にしか低下しないことが予想される。よって処分サイトが海水系の地域では十分な止水効果が期待できず，汚染の早期拡散を招く可能性があるため，スラリーを注入する際には，施工方法の改良などにより充填密度を向上させる必要がある。目詰まり現象を利用した注入密度の向上については次章にて述べる。

3.4.4 各種スラリーに対する溶液置換透水試験

前述までに各種溶液に対する透水試験を行った。ここでは実際にベントナイトスラリー中の溶液が置換することにより，その透水性を低下させるかを，塩水およびエタノールから水への溶液置換透水試験を行った。表 3.4.2 に試験条件を示す。

エタノールから水への置換試験においては，排水された溶液を付写真－3.4.2 に示すFDR－V 装置を用いて比誘電率を測定することにより排水エタノール濃度を測定した。また上部にプルムリングを設置し経時的な膨潤圧の測定を行った。図 3.4.18 にエタノール濃度と比誘電率の関係を示す。経時的な膨潤圧の変化を図 3.4.19 に，排水濃度変化を図 3.4.20 に，透水試験の結果を図 3.4.21 に示す。

表 3.4.2　溶液置換透水試験条件

	スラリー作成溶液	溶液濃度	間隙比	置換溶液	備考
①	塩水	21.60%	1.31	純水	
②	エタノール水溶液	60%	1.31	純水	
③	エタノール水溶液	60%	2.25	純水	膨潤圧、排水量排水濃度測定

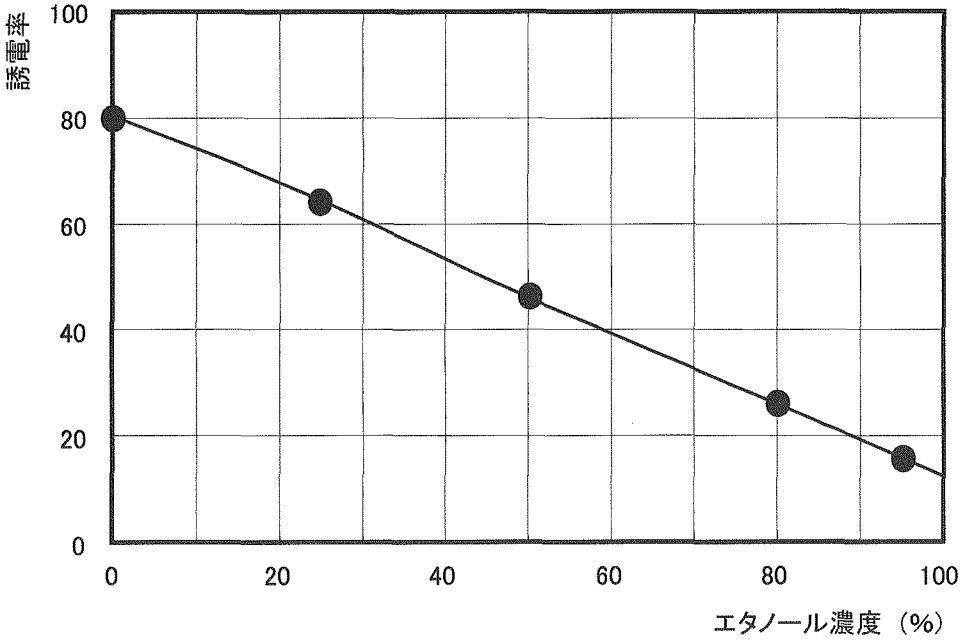


図 3.4.18　エタノール濃度と比誘電率の関係

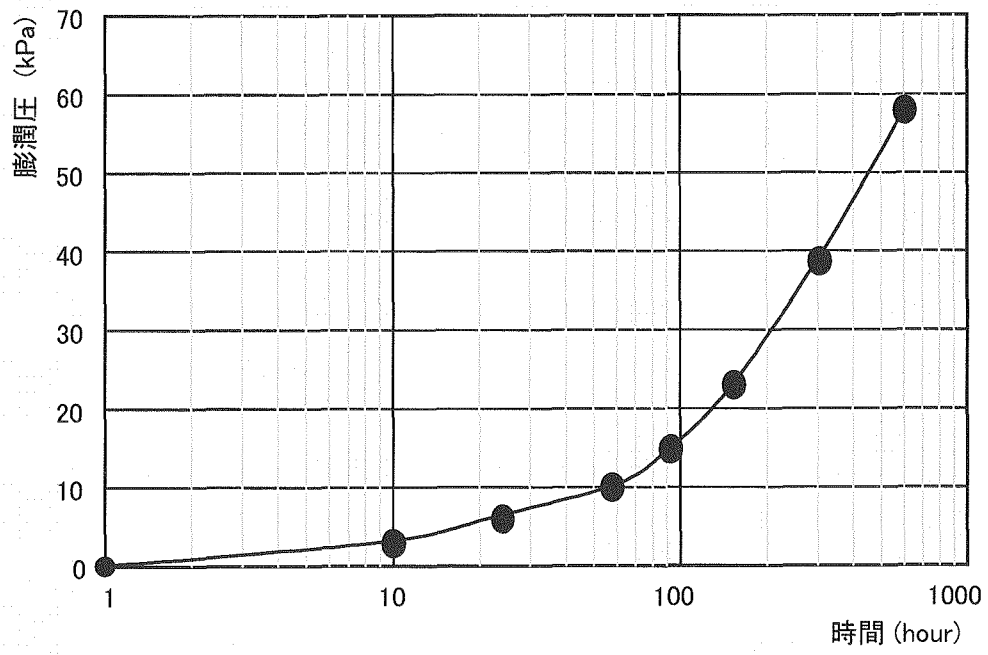


図 3.4.19　エタノールの水への置換における供試体の膨潤圧の経時的変化

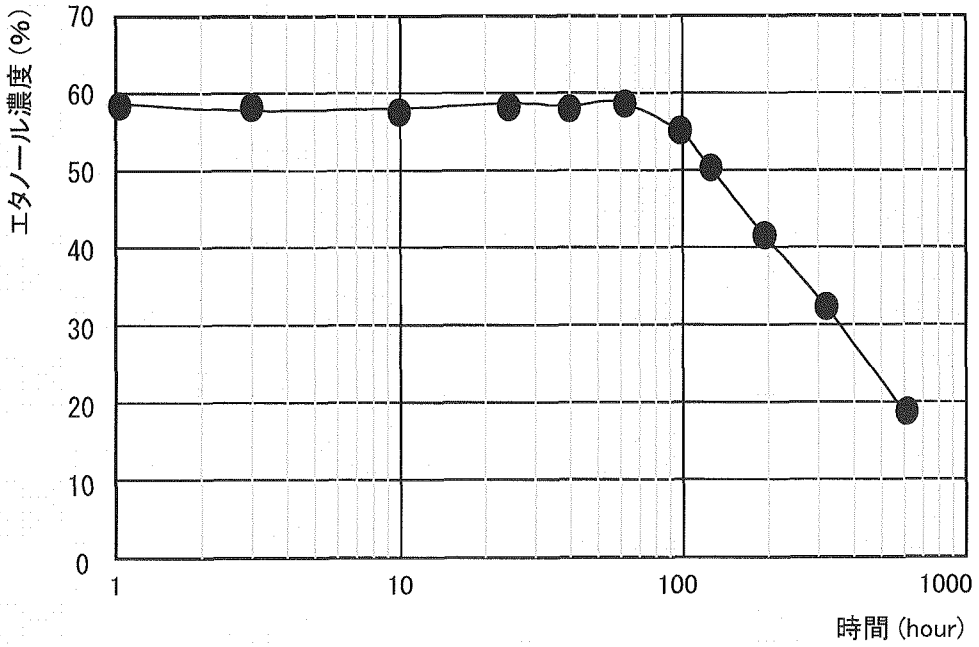


図 3.4.20　エタノールの水置換における排水濃度の経時的変化

エタノール濃度の低下に時間的遅れを伴った理由として，装置下流側（パールコン，水管）に圧密時の溶液が残っていたためである。

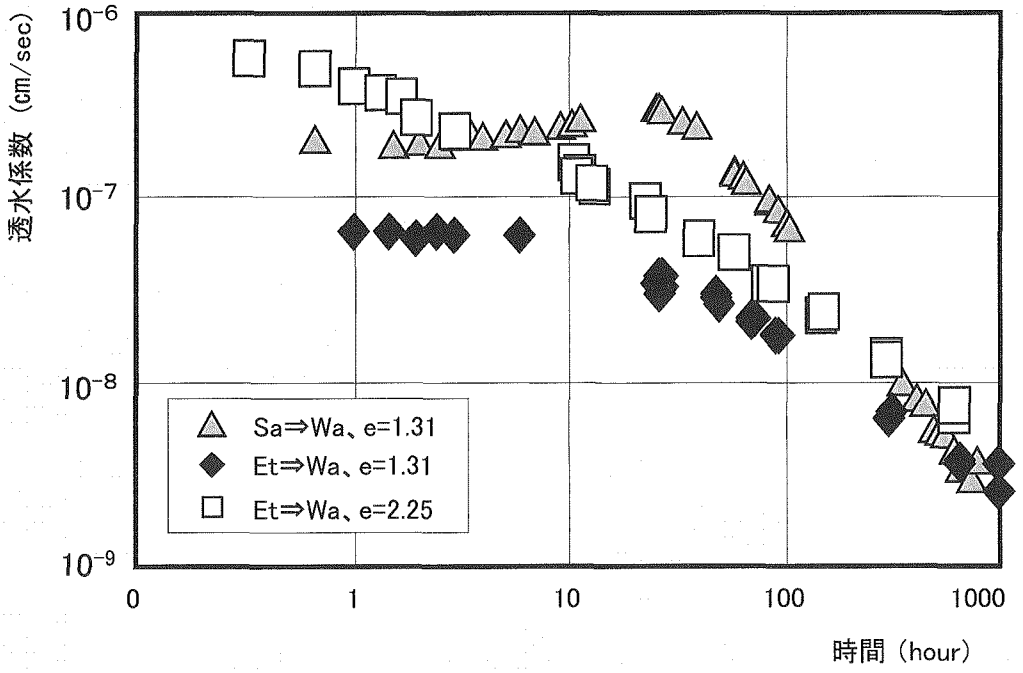


図 3.4.21　飽和塩水，エタノールから水への置換における
経時的な透水係数の変化

試験に際し，同じ間隙比にて行った結果，双方に透水性の低下が生じた，スラリー内溶液が膨潤抑制溶液から水へと変わり，膨潤抑制力が弱まったためモンモリロナイトの膨潤が生じ透水性が低下したと考えられる。また塩水ベントナイトスラリーにおいてはエタノールベントナイトスラリーと比較して，透水性の低下に時間的遅れを伴っている。これは 3.3.3 で示した塩分濃度と膨潤抑制力によるものだと思われ，供試体内溶液の塩分濃度が４％近くになった場合に，透水性の低下が生じたと考えられる。

また双方の内部溶液の置換が進むにつれ透水性が同等の値となり，図 3.4.4 から得られる水との置換が完全に完了した最終的な透水係数（10^{-10}cm/sec）の値までの到達時間は，本試験条件において約一年間と考えられる。しかし実際の施工においては，周辺岩盤の透水係数，注入量や拡散係数を考慮しなければならない。

3.4.5 考察

以下に本章で得られた知見をまとめる。

(1) 水ベントナイトスラリーは配合比 Wa/Be＝2/1 で約 1.0×10^{-9}cm/sec と難透水性を持つ。その値は掘削行動内周辺健岩部の透水性同等以下の値であるためグラウト材としてベントナイトは有効である。

(2) ４%Sa/Be＝2/1 の透水係数を得られた結果から予想すると約 1.0×10^{-4}cm/sec, 60%Et/Be＝1.5/1 では約 1.0×10^{-4}cm/sec となり，初期透水性はグラウト材として高いものといえる。

(3) 海水および海底深層水のベントナイトスラリーの透水係数は，4%Sa および 60%Et スラリーと比較して，わずかに低い値である。その値は止水材として十分に有効な値ではなく，汚染の早期拡散の危険性を孕んでいる。そのため施工時に注入密度を増加させることが必要である。

(4) 塩水，およびエタノールベントナイトスラリーは内部溶液の水への置換により，モンモリロナイトが膨潤し始め，透水性が低下する。その置換には長時間を有するが，処分期間や地層への隔離期間に対しては短時間にて，十分な止水性を発揮すると考えられる。

上記のことから，ベントナイトを高密度でスラリー化した Sa/Be スラリーや Et/Be スラリーには，スラリー作成時の膨潤を抑制し，溶液が水と置換し膨潤が生じることで，経時的な透水性の低下が得られることが分かった。スラリー化に用いる溶液で，塩水とエタノールを比較したとき，粘性及び透水性に関して，大きな差は見られなかった。しかし，実際に亀裂内へと注入不可能であれば，この止水性能は発揮されない。そのためこれら溶液を用いた場合に，どの程度の亀裂幅に対し，どの程度配合比で充填可能かを次章にて述べる。またその注入の挙動を知ることは，実際のグラウト設計に対し必要な要素の一つであり，同様に次章にて述べる。

3.5 ベントナイトスラリーを用いた平行平板定圧注入試験

3.5.1 概要

前章でベントナイトの透水性に関し述べた。しかし，実際に緩み領域に対しベントナイトスラリーが注入できなければ，その効果は期待できない。よって本章では，一次元平行平板亀裂モデルを用いてベントナイトスラリーの定圧注入試験を行い，注入可能亀裂幅の把握や注入距離，注入挙動，注入密度に関する調査を行った。

また実際に注入した直後スラリーは，粘性が低く周辺岩盤の復水作用により亀裂内から坑道部へと流亡してしまう可能性がある。よって同じく本章では，注入したスラリーに対する流亡試験を行った。

3.5.2 注入可能亀裂幅把握試験

3.5.2.1 試験方法と試験装置

図 3.5.1，付写真-3.5.1 に試験装置図を示す。亀裂長は 6cm，流路幅は 1cm であり，ステンレススペーサー厚は 50，100，150，200 μ m で試験を行った。

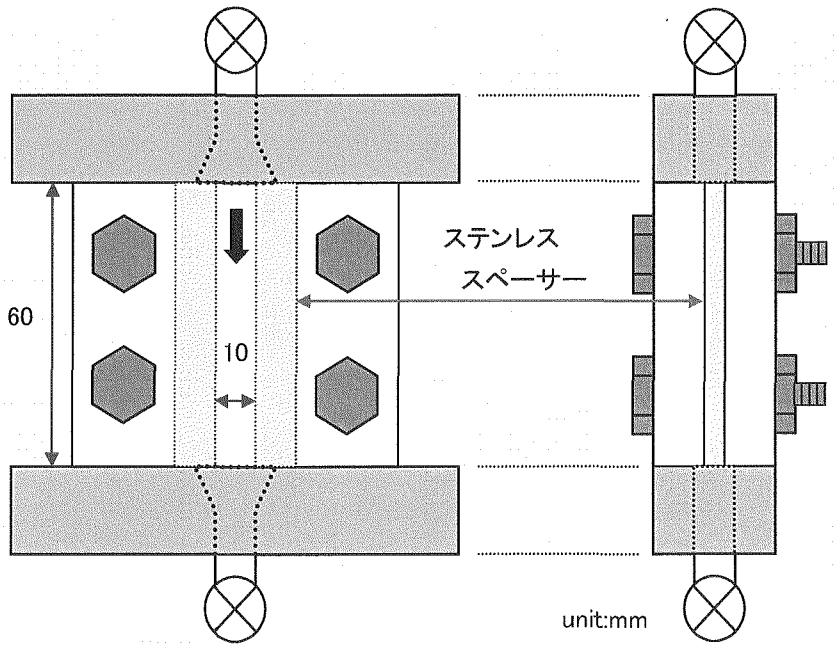


図 3.5.1　目詰まり確認試験装置

所定の配合比により作成したスラリーを定圧条件のもと注入を行う。目詰まりの判定方法として，以下の３種類に分けた。

① 亀裂内に注入が全く不可能なもの。
② 注入途中で目詰まりを生じてしまうもの。
③ 目詰まりすることがなく連続的に注入可能なもの（流出流量の経時的変化が線形であるもの）。

その注入の様相の模式図を図 3.5.2 に示す。また長時間注入を行った場合，ベントナイト粒子の沈降，溶液との分離および周面への吸着現象が生じ，必ず目詰まりが生じてしまうと考えられる。また分離，沈降現象は流速の関数と言われているため，ここでは亀裂内通過ベントナイト量に着目し，連続注入可能の評価の基準として次の値を設けた。

連続注入可能指標注入流量(g)＝配合比×100 ・・・

表 3.5.1　目詰まり試験ケース

60%エタノールベントナイトスラリー				4%塩水ベントナイトスラリー			
	亀裂幅(μm)	配合比	注入圧(kPa)		亀裂幅(μm)	配合比	注入圧(kPa)
1	50	1/1	98	13	50	2/1	98
2	50	1.5/1	98	14	50	3/1	98
3	50	2/1	98	15	50	4/1	98
4	50	2.5/1	98	16	50	8/1	98
5	100	1/1	98	17	100	2/1	98
6	100	1.5/1	98	18	100	3/1	98
7	100	2/1	98	19	100	4/1	98
8	100	2.5/1	98	20	100	8/1	98
9	150	1/1	98	21	150	2/1	98
10	150	1.5/1	98	22	150	3/1	98
11	150	2/1	98	23	150	4/1	98
12	150	2.5/1	98	24	200	2/1	98

3.5.2.2 試験結果

図 3.5.3 に塩水ベントナイトスラリーの結果を，図 3.5.4 にエタノールベントナイトスラリーの結果を示す。また経時的な流出流量の変化を図 3.5.5～3.5.6 に示す。

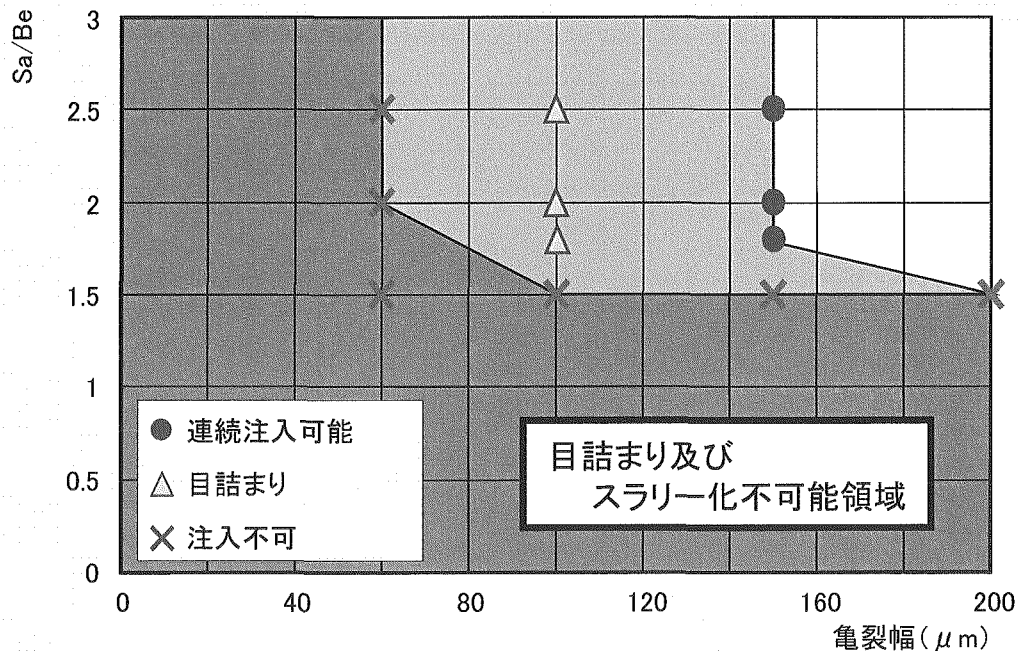


図 3.5.3　4%塩水ベントナイトスラリーの
配合比と注入可能亀裂幅の関係

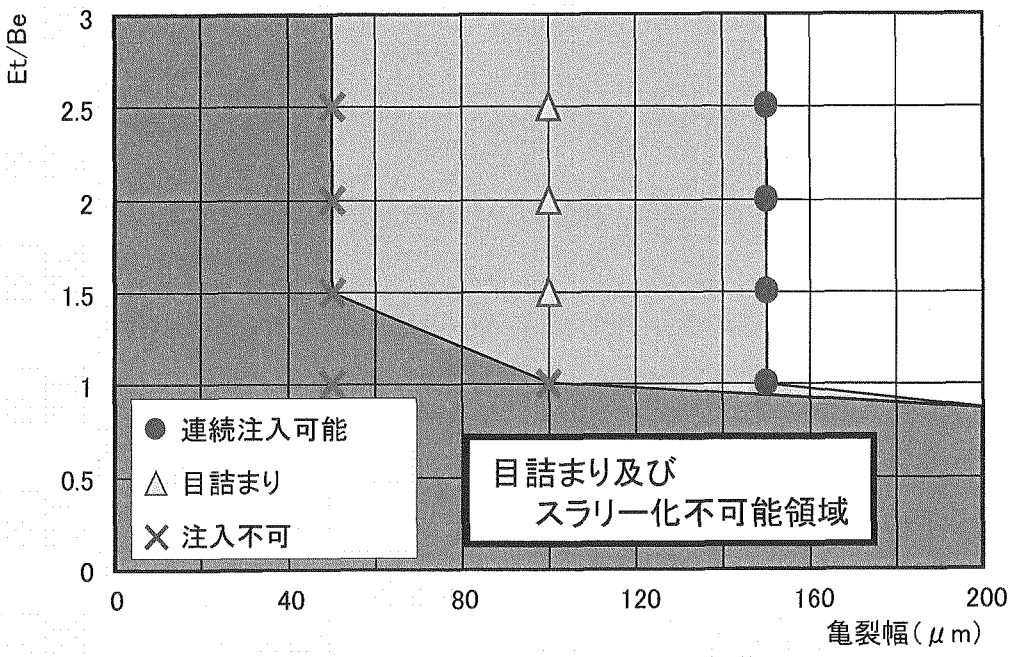


図 3.5.4　60%エタノールベントナイトスラリーの
配合比と注入可能亀裂幅の関係

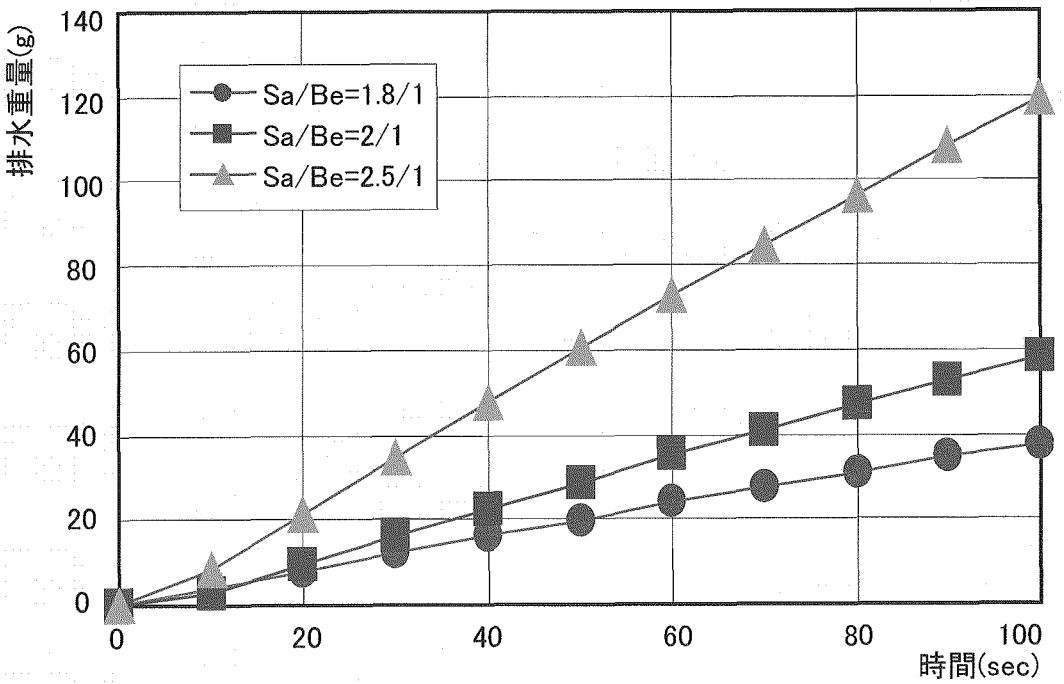


図 3.5.5　経時的な流出流量の変化（Sa＝4%，150μm）

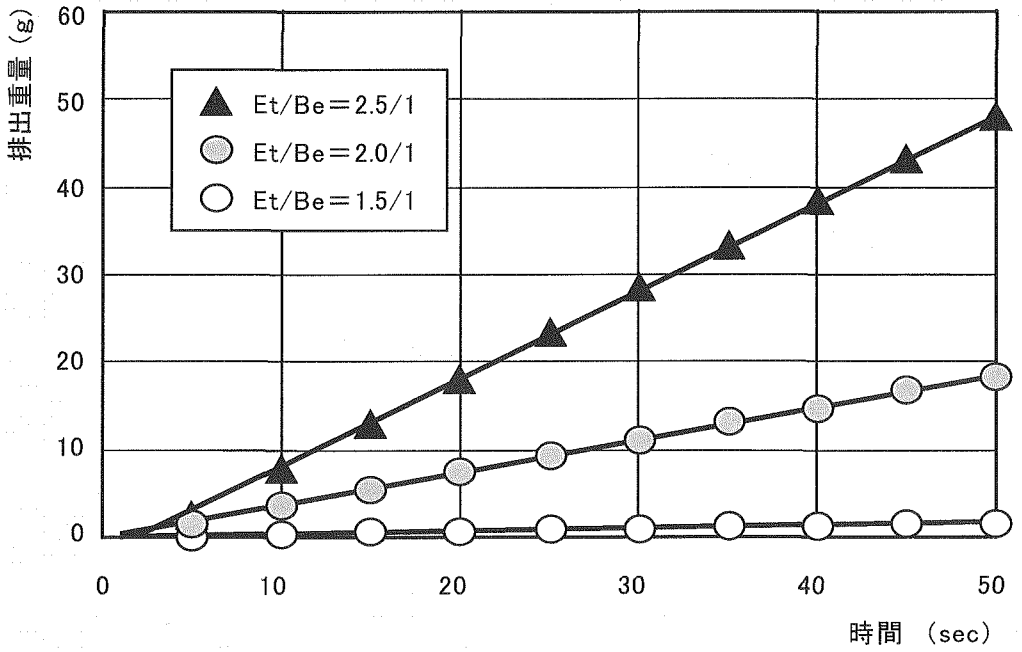


図 3.5.6　経時的な流出流量の変化（Et=60%）

結果を**図** 3.2.2 のセメント系注入材と比較した場合，塩水，エタノール両者とも普通セメントと同等の注入可能亀裂幅が得られている。また 3.3 で示した目詰まりの指標である**式**(3.3.1)から得られた値 175 μm 以下にも注入可能であることがわかった。一方，目詰まりが生じた場合でもある程度の距離までは注入可能だと言えるため，その限界距離および各種スラリーの注入挙動を次項にて述べる。

3.5.3 ベントナイトスラリーの平行平板亀裂定圧注入試験

前述までに目詰まりに対する配合比の関係をまとめた。しかし，目詰まり領域では，少なからず亀裂内へと注入が可能である。また，浸潤前線が進行するほど，粘性抵抗が大きくなり流速が減少する。沈降，分離現象の要因とされる流速が減少すれば，目詰まりを発生してしまう。そのためここでは 1.5m の長尺亀裂モデルを用いて，それらに対する種々の検討を行った。

3.5.3.1 試験方法と試験装置

図 3.5.7 に試験装置全体図を示す。また**図** 3.5.8，**付写真**-3.5.2 に平行平板亀裂モデルの解体図及び解体写真を示す。亀裂モデルは所定の厚みを持つ鋼製スペーサーの上部下部をアクリル板で挟み，さらにその上部下部を鉄板で挟んだものである。設定配合条件にて作成したベントナイトスラリーを定圧状態にて亀裂内に流入させ，経時的な浸潤距離の変化および圧力の変化，排水流量の変化の測定を行い，注入停止後，注入密度の測定をペーパータオルによる拭取りにて行った。なお流路幅は 2 cm である。

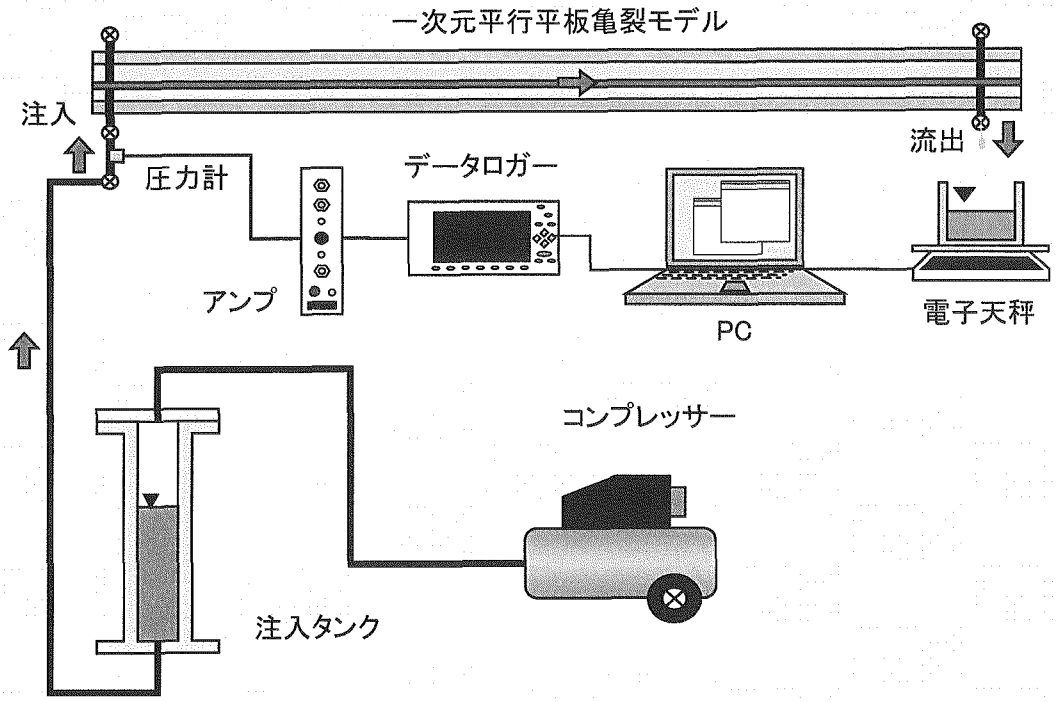


図 3.5.7　平行平板亀裂注入試験装置全体図

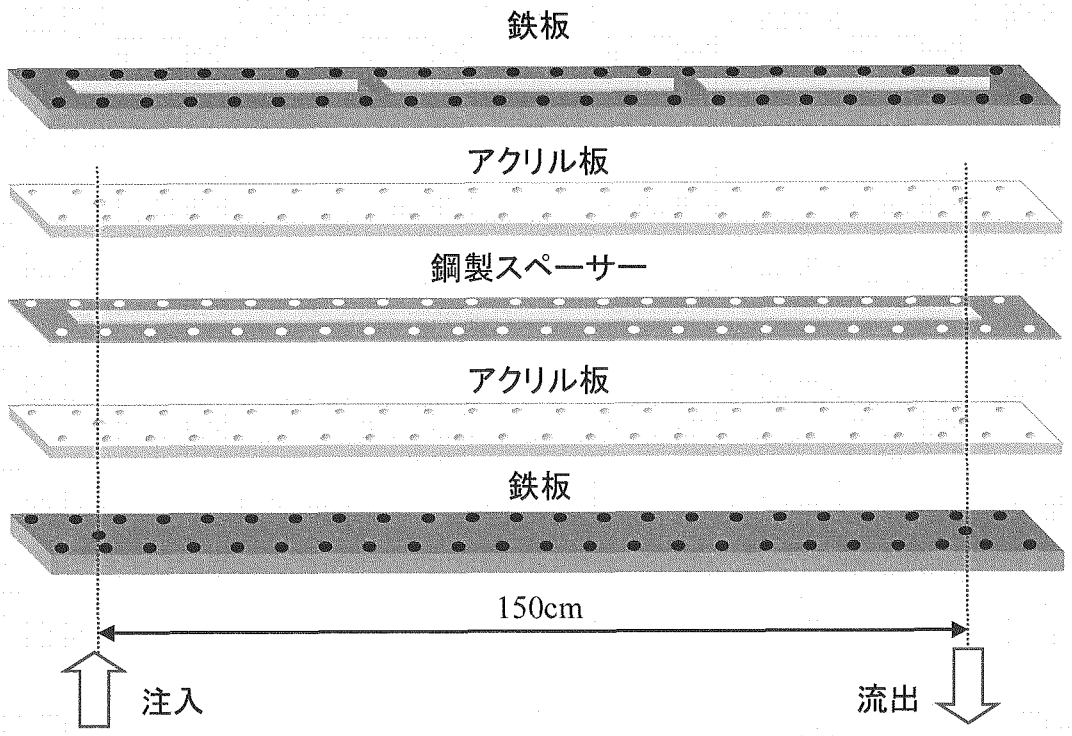


図 3.5.8　一次元平行平板亀裂モデル解体図

以下に試験の手順を示す。また図 3.5.9 に試験フロー図を示す。

① 設定配合にてスラリーを作成し，脱気を行う。
② 亀裂モデルを組み立て，圧力計のキャリブレーションを行う。なお鉄板の固定ボルトの締め付けは 5.5kgf/cm^2 とした。
③ 亀裂内へ脱気水を流し経時的な流出流量を測定し透水試験を行う。
④ 試験後，亀裂内へ空気圧かけ水を強制排水させ，亀裂内を不飽和状態とする。
⑤ 作成したスラリーをタンクに入れ，注入孔内をスラリーで満たす。
⑥ 設定圧力の確認を行い，コックを開け注入を開始する。
⑦ 注入中，経時的な注入距離，注入圧力，排出流量を測定する。
⑧ 亀裂内への注入時間の最大値は 30 分とし，目詰まりが生じた場合は注入を停止する。
⑨ 注入停止後，装置の解体を行い，亀裂内に残ったスラリーを事前に炉乾を行い十分に乾燥させたペーパータオルにてふき取り，再度炉乾させ，注入スラリーの乾燥密度を測定する。

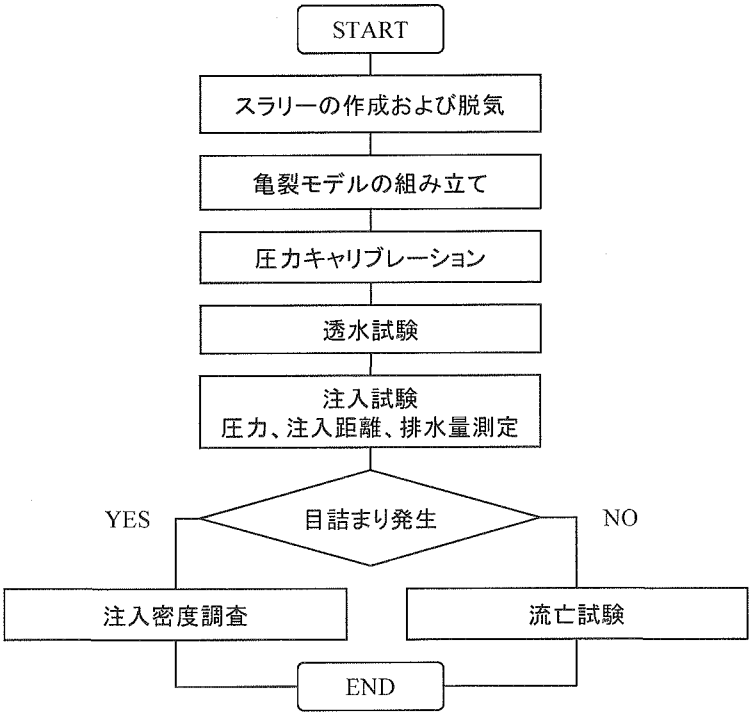


図 3.5.9 試験フロー

以下の表 3.5.2 に試験条件を示す。塩水ベントナイトスラリーに関し，試験番号①④⑤⑥において亀裂幅における違い，①②③において配合比における差異の調査を行った。同様にエタノールベントナイトスラリーでは⑦⑧⑨において配合比，⑦⑩⑪にて亀裂幅，⑤⑫において塩水との比較検討を行っている。

表 3.5.2　試験条件

	スラリー作成溶液	配合比	亀裂開口幅（μm）	注入圧力（kPa）	ケース数
①	4%Sa	2/1	150	196	1
②	4%Sa	4/1	150	196	1
③	4%Sa	8/1	150	196	1
④	4%Sa	2/1	100	196	2
⑤	4%Sa	2/1	200	196	2
⑥	4%Sa	2/1	500	196	2
⑦	60%Et	1.5/1	100	196	2
⑧	60%Et	2/1	100	196	2
⑨	60%Et	3/1	100	196	1
⑩	60%Et	1.5/1	150	196	2
⑪	60%Et	1.5/1	200	196	2
⑫	60%Et	2/1	200	196	2

3.5.3.2 試験結果

所定の亀裂幅にたいする透水係数は式(3.5.2)，実測による値は式(3.5.3)にて表される。

$$k = \frac{\rho g b^2}{12\mu} \quad \cdots\cdots (3.5.2)$$

$$k = Q/iA \quad \cdots\cdots (3.5.3)$$

ここで，　k：理論透水係数（cm/sec），　　Q：流出流量(cm^3/sec)，

ρ：流体の密度(gf/cm3)，　　i：導水勾配，

g：重力加速度(cm/sec2)，　　A：亀裂断面積(cm^2)，

b：亀裂開口幅（cm），

μ：粘性係数(Pa・sec)。

この結果と亀裂モデルにおける透水試験から得られた実測透水係数と，理論透水係数と亀裂開口幅の関係を**図 3.5.10** に示す。なお水温は 15℃である。

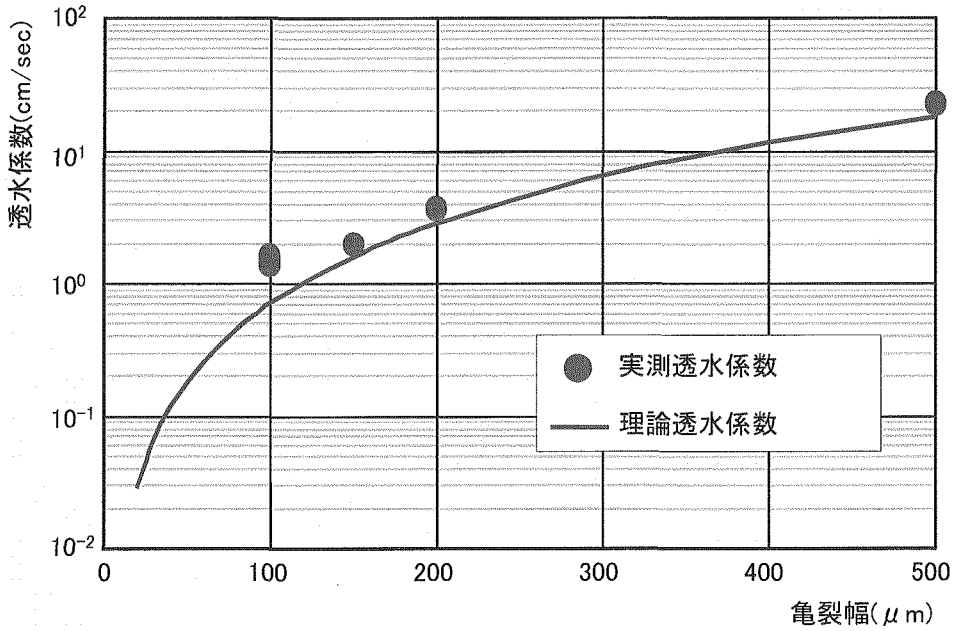


図 3.5.10　理論透水係数と実測透水係数の関係(15℃)

結果，亀裂幅が小さくなるほど理論透水係数と差が拡大する傾向にあり，全体的に理論値より透水係数が高い傾向にある。本試験装置において亀裂幅が 150μ以上では差はないと考えられる。

表 3.5.3 に試験の結果を示す。実際の注入スラリーと作成スラリー配合比の比較を行った。

表 3.5.3　注入試験結果

	亀裂開口幅 (μm)	配合比 (液/固)	測定配合比		目詰まり	
			case 1	case 2	case 1	case 2
①	150	2	測定不能			
②	150	4	5.41			
③	150	8	10.34			
④	100	2	3.53	2.95	発生	発生
⑤	200	2	2.73	2.71		
⑥	500	2	2.02	2.22		
⑦	100	1.5	2.65	2.45	発生	発生
⑧	100	2	1.88	2.85	発生	発生
⑨	100	3	3.11			
⑩	150	1.5	1.65	1.83		
⑪	200	1.5	1.85	1.07		
⑫	200	2	3.56	3.76		

ペーパータオルによる拭取り，および流出流体による注入配合比の測定は，作成したスラリーのものより高い値となっている。これらの原因としては完全な注入スラリーのふき取りができなかったことや，注入タンク内での粒子の沈降減少が原因ではないかと考えられる。また目詰まりが生じた場合，亀裂口付近から水みちが発生し，その水みちが徐々に

進展していき，浸潤前線にまで到達した場合溶液のみの流亡が生じていた。その様相を**図 3.5.11，付写真-3.5.3** に示す。この場合亀裂注入口部で配合比が低下し，圧密現象が生じていると考えられる。よって，亀裂内の幅が縮小したところでの目詰まり部では，結果的に注入効果を増大させていると考えられ，溶液の水置換による，透水性の低下が期待できないサイトでは，目詰まり発生を発生させ圧密排水による充填密度の向上させる方法が望ましいと考えられる。

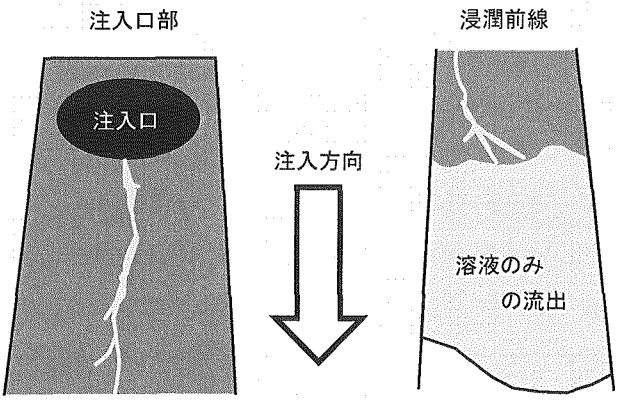


図 3.5.11　目詰まりの様相

図 3.5.12 に亀裂開口幅の違いによる注入距離の経時的変化を，**図 3.5.13** に配合比の違いよる流出流量の経時的変化を示す。また**図 3. 5. 14** に同配合条件，同亀裂開口幅での塩水，エタノールの比較を示す。

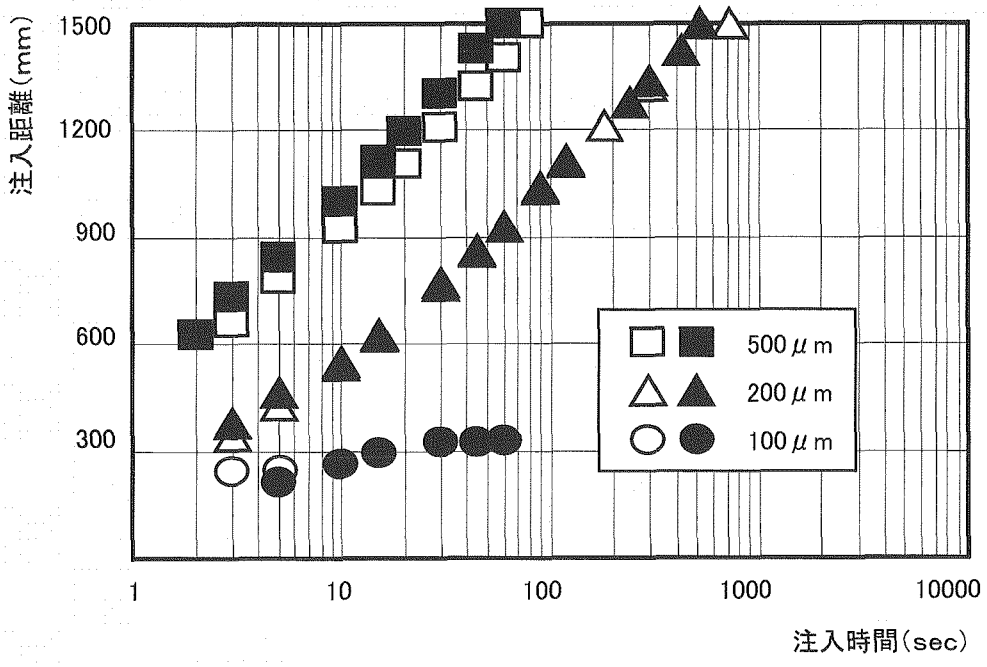


図 3.5.12　亀裂開口幅の違いによる注入距離の経時的変化(Sa＝4%)

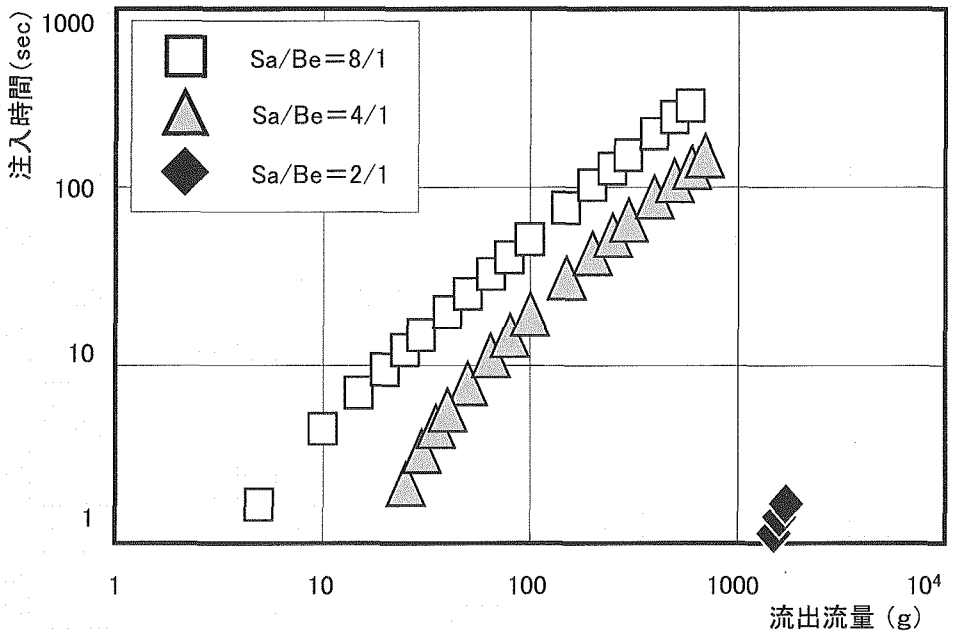


図 3.5.13　配合比の違いによる流出流量の経時的変化（150μm）

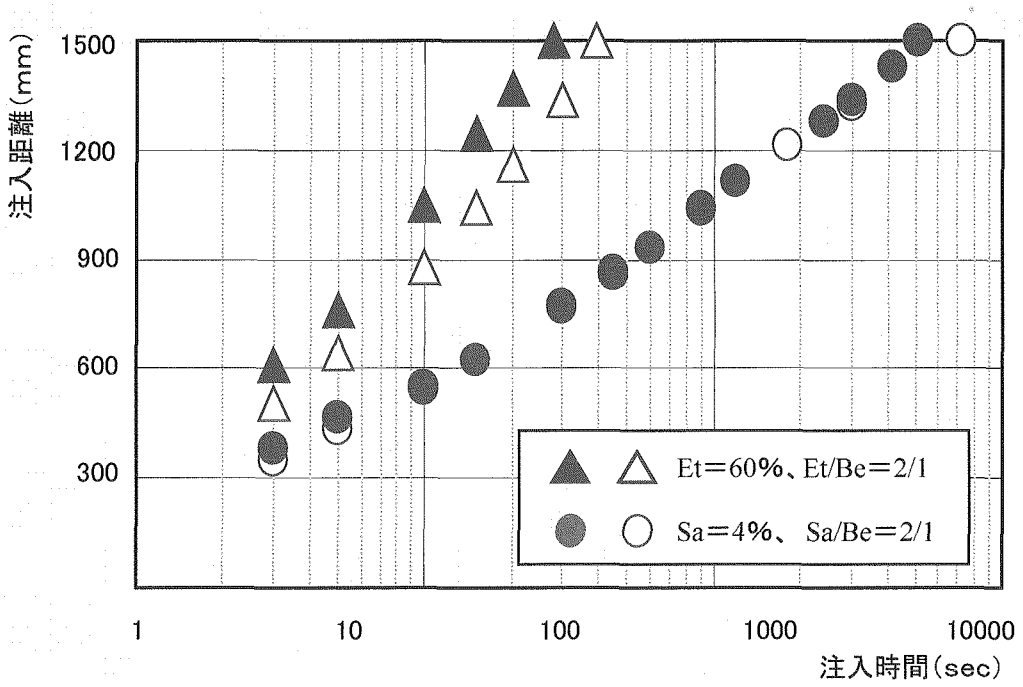


図 3.5.14　同配合比，亀裂条件での塩水とエタノールの比較
（d=200μm，液固比＝2/1）

亀裂開口幅が小さいほど，配合密度が高いほど注入に時間を要してしまう。そのため，土粒子の沈降や凝集による目詰まりも生じやすいと考えられる。亀裂開口部付近，及び注入開始直後の目詰まりを防止するためには，比較的配合密度の低いスラリーを用い，経時

的に注入スラリーの配合密度を高めていく方法が望ましいと考えられる。

また同じ配合比，亀裂開口幅の塩水ベントナイトスラリーとエタノールベントナイトスラリーを比較すると，粘性がエタノールで作成した方が低いため，流速が早く短時間で注入可能となる。よって60%エタノールは4%塩水を用いたスラリーより有効であるといえるが，処分サイトが閉鎖的空間であるため揮発性を有するエタノールの取り扱いには十分に注意が必要である。

3.5.4 流亡に対する検討

注入したスラリーは掘削損傷部の水位が戻るにつれ，水圧により坑道部へ流れ出す可能性がある。そのような場合以下の2つの大きな問題点が生じる。

① 掘削損傷部の透水性の改良効果が得られず，汚染物質の早期の拡散を生じる。
② 膨潤を抑制する液体をスラリー化に用いているため，坑道内への埋め戻し材として用いられることが予想される，ベントナイトブロックおよびベントナイト混合土へその液体種が触れ，透水性が上昇し，汚染の早期拡散を招く。

これら問題は，ベントナイトスラリーをグラウト材として用いる上で，重要な争点である。よってここでは，平行平板亀裂モデルへと注入したスラリーに対し，流亡に対する試験を行う。また，流亡を防ぐ手法の提案を行った。

3.5.4.1 試験方法と試験装置

試験装置は図3.5.15に示す。所定の配合比にてスラリーを注入後，注入下流側から，徐々に水位を上げ注入部から流出する状況を調査した。作用水圧は0kPaから98kPa刻みで10分間作用させながら，亀裂内状況を確認を行った。

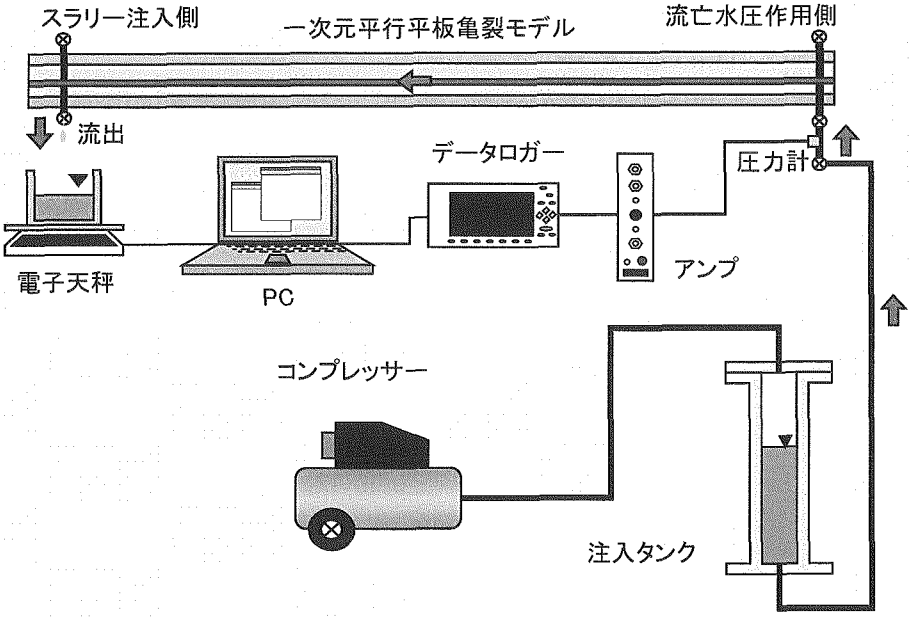


図3.5.15 流亡試験装置全体図

表 3.5.4 に試験条件を示す。

表 3.5.4　流亡試験条件

	作成溶液	配合比	亀裂幅（μm）	注入圧（kPa）	試験開始時間（注入停止からの時間）（hour）
①	4%Sa	2/1	200	196	1
②	4%Sa	2/1	200	196	2
③	4%Sa	2/1	200	196	4
④	4%Sa	2/1	200	196	8
⑤	4%Sa	3/1	200	196	1
⑥	4%Sa	4/1	200	196	1
⑦	60%Et	1.5/1	150	196	1
⑧	60%Et	1.5/1	150	196	2
⑨	60%Et	1.5/1	150	196	4
⑩	60%Et	1.5/1	150	196	10
⑪	60%Et	2/1	150	196	1
⑫	60%Et	3/1	100	196	1

3.5.4.2 試験結果

図 3.5.16 に流亡が生じた場合の流出流量の経時的変化の一例を示す。

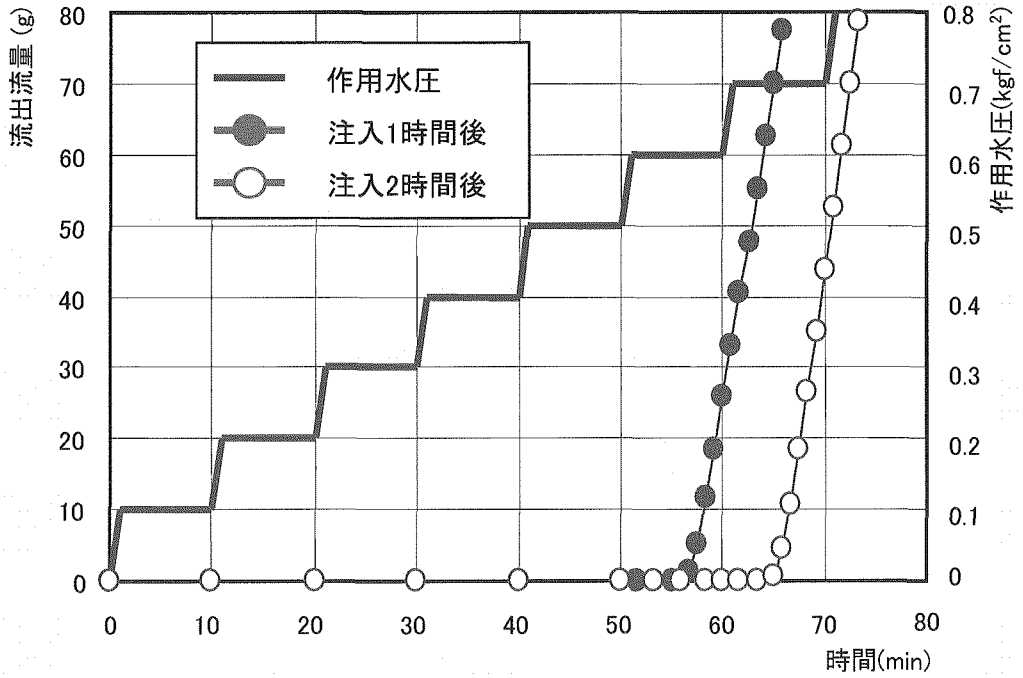


図 3.5.16　経時的流出流量の変化（Sa=4%，d=200μm）

また亀裂内に発生した水みちが亀裂開口部へ到達した場合，図 3.5.17 のような状況となる。水みちが拡大していきスラリーのほぼ大部分が流出してしまう。付写真-3.5.4 にその流亡状況を示す。

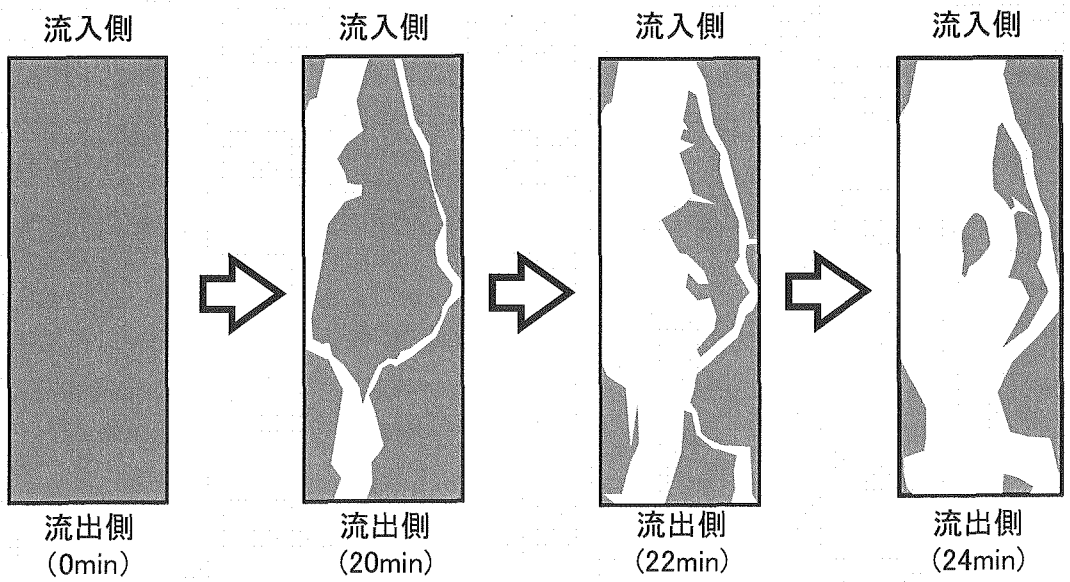


図 3.5.17　流亡状況の経時的変化の様相

また水みちの発生による流亡ではなく，混ざり合うような状態での流亡状況も確認された。その様相を**付写真-3.5.5** に示す。**図 3.5.18** に流亡導水勾配と配合比，**図 3.5.19** に注入後経過時間との関係を示す。

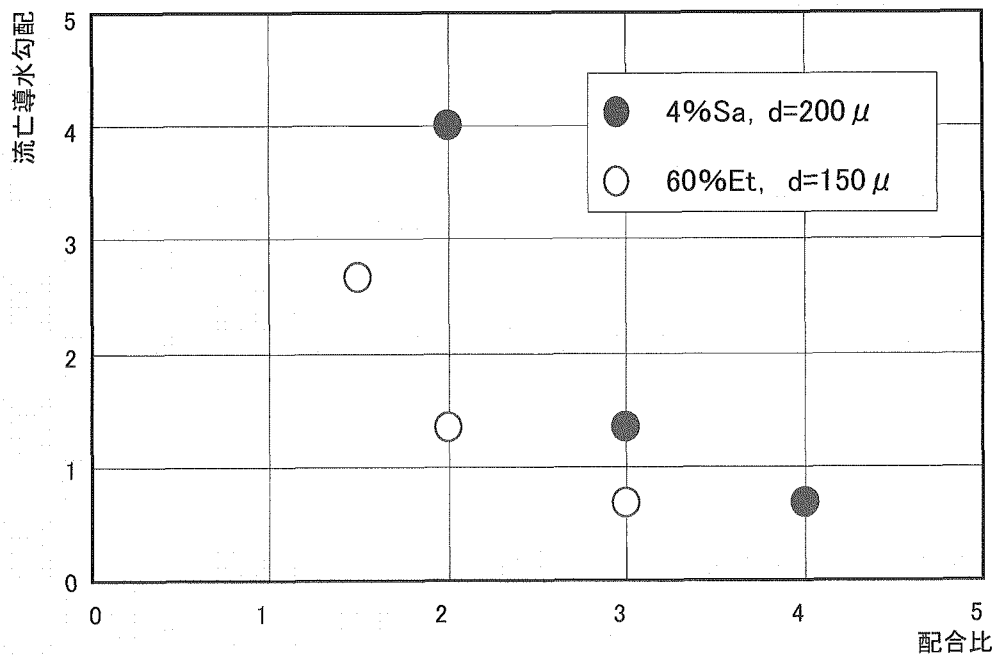


図 3.5.18　配合比と流亡導水勾配の関係(注入停止一時間後)

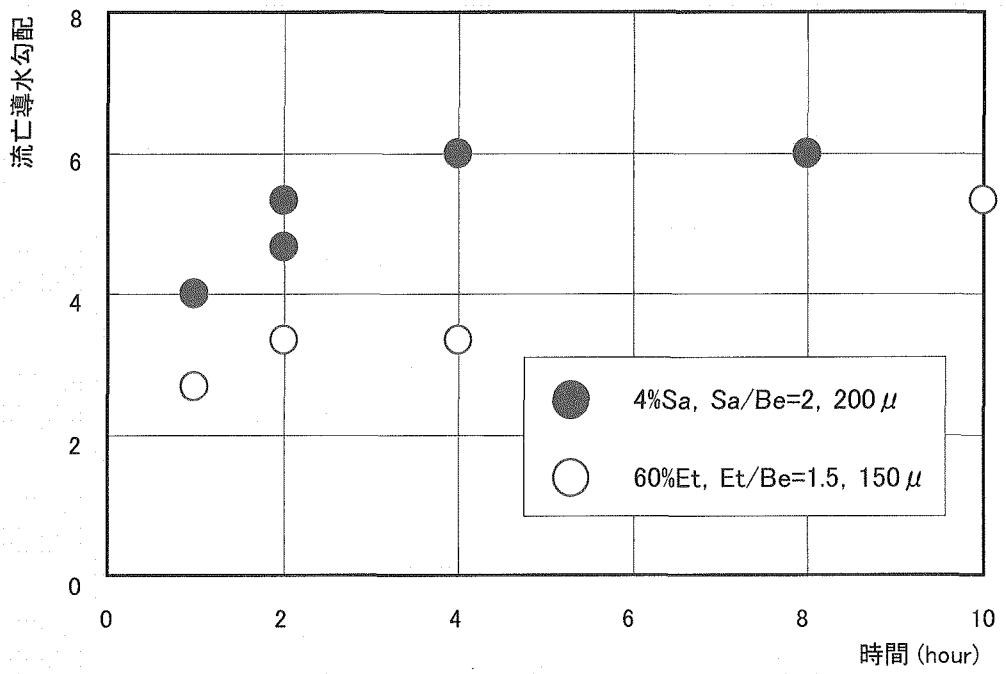


図 3.5.19　注入後経過時間と導水勾配の関係

流亡は密度が高いスラリーほど流亡抵抗力が増す。これは粘性抵抗によるものだと考えられる。またベントナイトスラリーはチクソトロピー流体であることが考えられるため経時的に粘度が上昇し，流亡に対する抵抗力も増大すること考えられる。また**付写真-3.5.6**に示すように，亀裂内に生じる水みちの進行速度が遅い場合には，ベントナイトの膨潤作用により水みちが再充填されていることが確認された。

結果，流亡防止には高密度で，注入時間を多くとり粘性の上昇効果を期待することが望ましいと考えられる。

3.5.4.3 流亡防止方法の提案

流亡試験の結果から，ベントナイトスラリーは高密度なほど流亡に対する抵抗力が増す。また短時間では流亡に対する抵抗が増加しないことがわかった。よって流亡を可能な限り防ぐためには，高密度なスラリーにて注入を行うことが望ましいと考えられる。

ここで実際注入を行うであろう岩盤の状態について考察を行うと以下の状態が考えられる。

① 注入段階では不飽和状態である。
② 岩盤は透水性が低い。
③ 亀裂長は無限ではなく，ほぼ坑道直径と同等の長さである。

この様な岩盤の状態を踏まえ，以下に流亡防止法の提案を行う。

a) 注入時に亀裂内に存在した空気の逃げ道が無いと考えられる。また空気は圧縮性

であるため注入圧により圧縮され，注入終了時に圧力の減少により膨張する。この膨張力により流亡が促進されると考えられる(図 3.5.20)。よって亀裂に対し注入を行う場合，亀裂に対し通水を行い空気の体積変化による流亡を防ぐ必要があると考えられる。もしくは亀裂内を真空状態に近い状態とすることで流亡を防ぐことが可能であると考えられ，作成スラリーも同様に攪拌時には減圧下で行うことが望ましい。

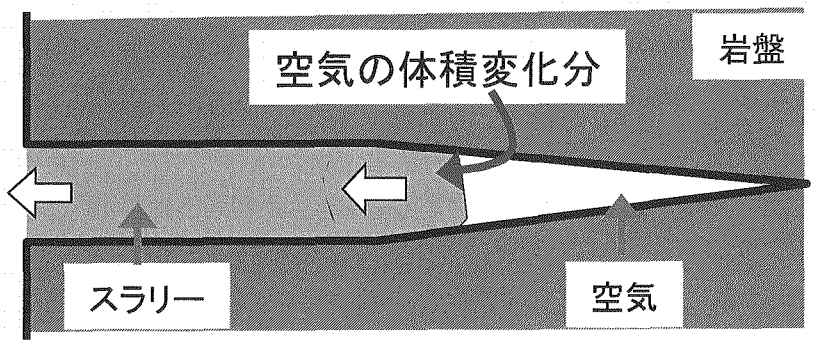


図 3.5.20　空気の体積変化による流亡

b) 次に復水による流亡を考えてみると，注入不可能であった亀裂からの浸透水が最も大きく作用すると考えられる(図 3.5.21)。しかし岩盤の透水性が低いため流亡するような水圧は作用せず，また流亡するにあたり岩盤からの浸出水も微量であるため，復水による流亡はほぼ生じないと考えられる.

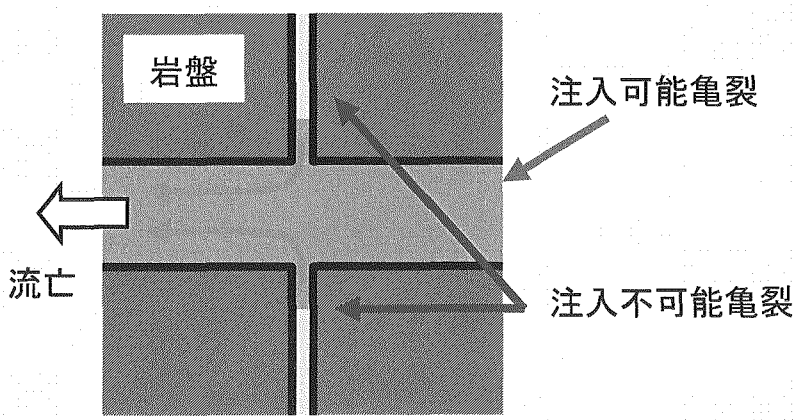


図 3.5.21　復水による流亡

c) またグラウトは 3 次元的ないかなる方向にも注入されると考えられる。そこで鉛直上向き方向の亀裂にグラウトを行った場合には，スラリーの自重から流下する可能性も考えられるため，グラウト孔の方向にも注意が必要である。

d) スラリーに着目点を置いた場合，粘性を増加させることが流亡に対する抵抗を増加させる方法の一つである。そのため注入したスラリーの含水比を熱風などによ

り低下させることも有効であると考えられる。エタノールスラリーの場合水と沸点に差があり，エタノールは約 78℃(1atm)，水は約 100℃(1atm)である。この温度差を利用することにより，エタノール濃度を低下させつつ，配合密度も上昇するため有効ではないかと考えられる。ただし，水分蒸発は亀裂開口部のみにとどまり，またエタノールの蒸発に伴う危険性があるため，換気システムの性能が要求される。また塩水の場合には，上記の方法は水のみ蒸発となってしまう。

3.5.5 考察

以下に本章で得られた知見をまとめる。

(1) 亀裂開口幅に対する注入口部での目詰まりの発生は，配合比に依存し配合密度が高い（濃い）スラリーでは早期に目詰まりが発生する。またエタノールスラリーは高密度にて塩水スラリーより小さい亀裂開口幅に対し注入可能である。セメント系材料と比較した場合，普通セメントと同等の注入効果が得られる。

(2) 配合密度が低い（薄い）ほど注入流速が早く，遠くまでの注入が可能である。また，同配合条件での塩水とエタノールスラリーを比較するとエタノールスラリーは粘性が低いため，注入速度が塩水スラリーより速い。

(3) 亀裂内で目詰まりが生じた場合，浸潤面より溶液のみの流出が生じ目詰まり部で密度の変化が生じる。よって目詰まり部では透水性が他の部位より低いと考えられる。

(4) 高密度ベントナイトスラリーの流亡は，目詰まりの発生と同じく水みちの発生から生じる。水みちの進行速度が遅い場合はベントナイトの膨潤作用により，水みちは充填される。しかし水みちが亀裂開口部に到達した場合，注入スラリー全体の流亡が発生する可能性がある。

(5) 注入したスラリーは経時的に流亡に対する抵抗力が増大する。その理由として，スラリーがチクソトロピー流体であるため，粘性の上昇や凝集作用が挙げられる。

以上得られた結果から，施工時には注入距離の向上，目詰まりの防止および流亡を防ぐ方法として，配合密度を徐々に高くしていく方法が最もよいと考えられる。よって次章にて，配合比に段階をつけた配合多段階式注入試験を行い，その妥当性について述べる。また新しい注入工法として着目されている動的注入工法の適用性について述べ，施工法についての設計の指針とした。

3.6 施工方法における検討

3.6.1 概説

前章で各亀裂幅に対するベントナイトの注入特性に関して述べた。すなわち，スラリー内のベントナイトの粒子の含有量が大きく目詰まり発生に起因している。廃棄体周辺環境をより不透水性のものとするには，適した施工方法において，できるだけ多くの量を高密度で注入することが望ましい。よって本章では，ベントナイトスラリーの施工方法に着目し配合段階的注入法および動的注入法による定圧注入との比較検討を行った。段階型注入とは段階的に配合密度を高くしていく方法であり，注入即時の目詰まり発生防止による注入距離の増加方法として用いられている方法である。また動的注入工法とは注入圧力に一定の振動数与え，グラウト材の粘性の低下および目詰まりの解消を目的とした工法である。

3.6.2 配合段階型注入試験

3.6.2.1 試験装置および試験手順

図 3.6.1 に試験装置を示す。注入スラリーは 3 種類の配合比にて行い，各スラリーの注入時間を 10 分とし最終段階のみ 30 分とした。

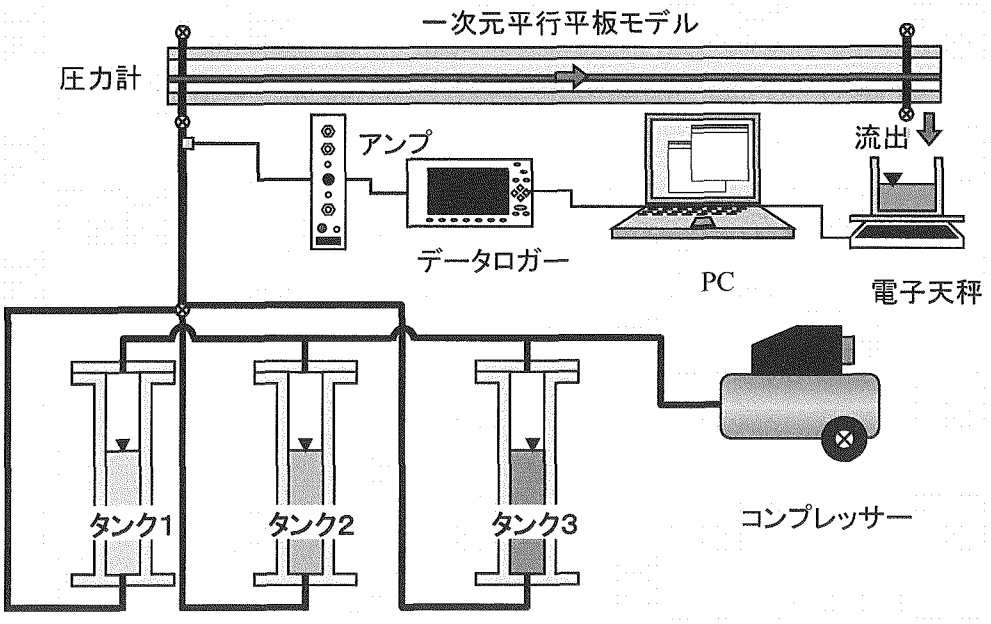


図 3.6.1　配合段階式注入試験装置

以下に試験手順を示す。

① 亀裂モデルを組み立て，間隙水圧計のキャリブレーションを行う。
② 3種類の設定配合比スラリーを作成し，注入タンクに注ぐ。
③ 注入ホース内を高密度のスラリーから順次満たしていく。
④ 圧力を確認し，注入を開始し経時的な流出流量の変化を調べる。
⑤ 注入10分後，及び20分後コックを回し次段階のスラリーを注入する。
⑥ 10毎に流出容器を取替え，質量および乾燥質量を測定する。

表3.6.1に注入条件を示す。また10分ごと流出流量から注入密度の算定を行った。

表3.6.1　配合段階試験条件

	作成溶液	亀裂幅 (μm)	注入圧力 (kPa)	配合比		
				第一段階	第二段階	第三段階
①	4%Sa	200	196	4/1	3/1	2/1
②	60%Et	200	196	3/1	2/1	1.5/1

3.6.2.2 試験結果

図3.6.2に経時的流出流量の変化を図3.6.3に流出流量から得られた配合比と時間の関係を示す。初期計測点は設定配合比であり，注入10分後の計測点は10分，それ以外は計測開始から計測終了までの中点の時間とする。

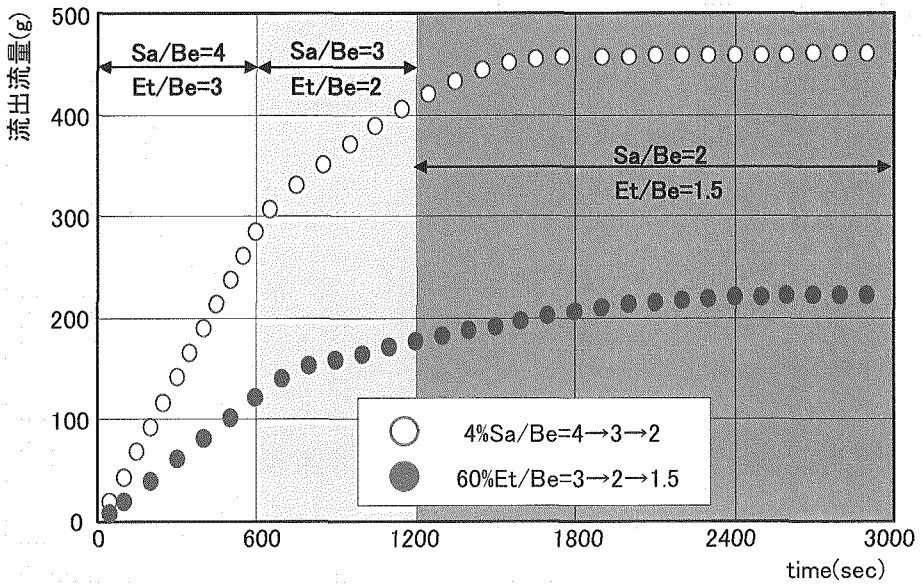


図3.6.2　経時的流出流量の変化

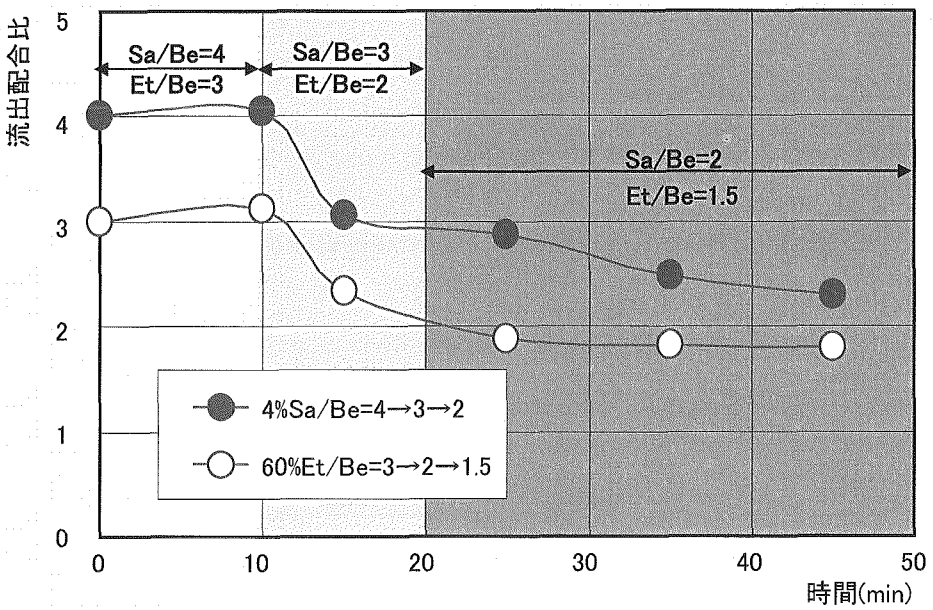


図 3.6.3　流出配合比と時間の関係

結果，流速は配合比が変化することに伴い減少している。流速の低下に時間的遅れを伴ったのはホース内に前の配合スラリーが残留していたためと考えられる。流出配合比は配合設計値と同じように低下していくが最終段階設定値までは到達しなかった。亀裂側面部に徐々にベントナイト粒子が吸着していったため，流出するベントナイト粒子が減少したと考えられる(図 3.6.4)。

解体時の拭取りによる測定配合比は Sa/Be=1.9，Et/Be=1.44 であり，作成スラリーより共に高密度となった。測定でスラリー作成値より高密度となったのも同様に，亀裂内にベントナイト粒子が多く存在したためと考えられる。

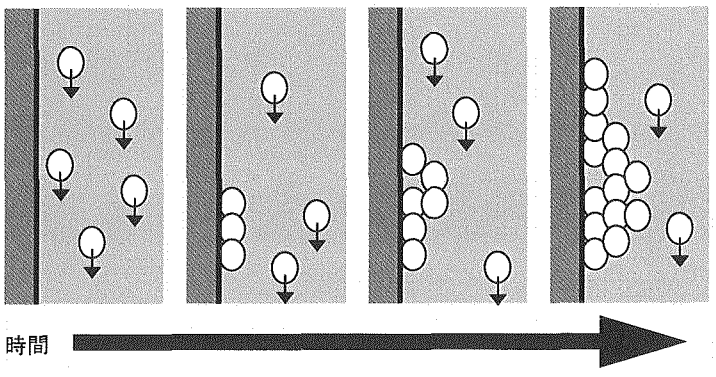


図 3.6.4　吸着・沈降現象による亀裂内密度の増加

3.6.3 加振下におけるスラリーの粘性

3.6.3.1 試験方法と試験装置

動的注入において最適な周波数を得るため，スラリーに対して加振下における粘度の測定を行い，周波数を変化させたときの見掛けの粘性の把握を行った。粘度の測定は，3.3にて使用した回転粘度計を用い，測定時間も同様に1分間行った。図 3.6.5 に示す装置を用い，所定周波数にて振動を与え，粘度の測定を行った。装置写真を付写真-3.6.1 に示す。測定は以下の手順にて行った。

周波数を 0，5，7，10，20Hz の順に増加させ，各ずり速度におけるずり応力の測定を行い粘性の調査を行った。

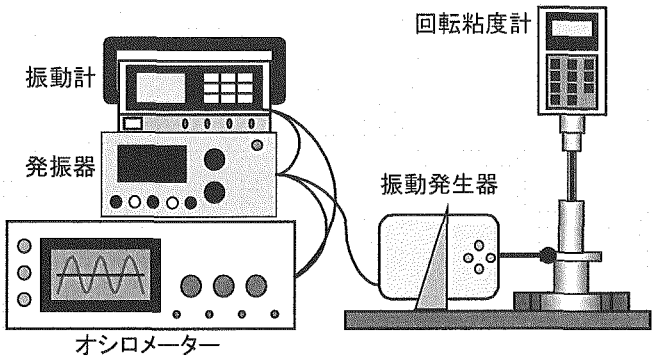


図 3.6.5　加震下粘度試験装置

3.6.3.2 試験結果

図 3.6.6 に振動数と粘度の関係を示す。結果から 7Hz 付近が最も粘性が低下すると考えられる。またこの値はセメントミルクに対する結果と同等の値である。次節にて行う動的注入にては 7 Hz の振動数を与え試験を行っていく。

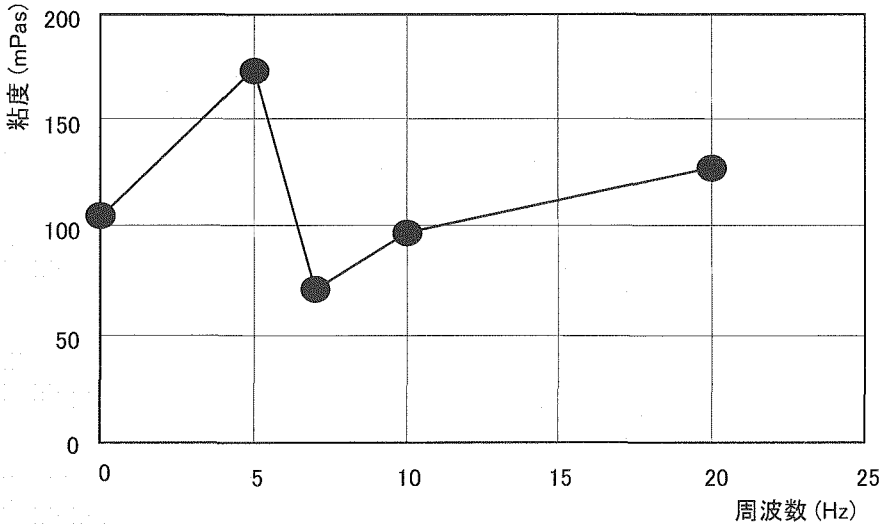


図 3.6.6　周波数と粘度の関係

3.6.4 動的注入試験

3.6.4.1 試験方法と試験装置

図 3.6.7 に試験装置を示す。脈動発生装置は電動のこぎりの上下運動を利用し，ある振動数にてゴムチューブに対し繰り返し打撃を行うものである。脈動発生装置を図 3.6.8，付写真-3.6.2 に示す。

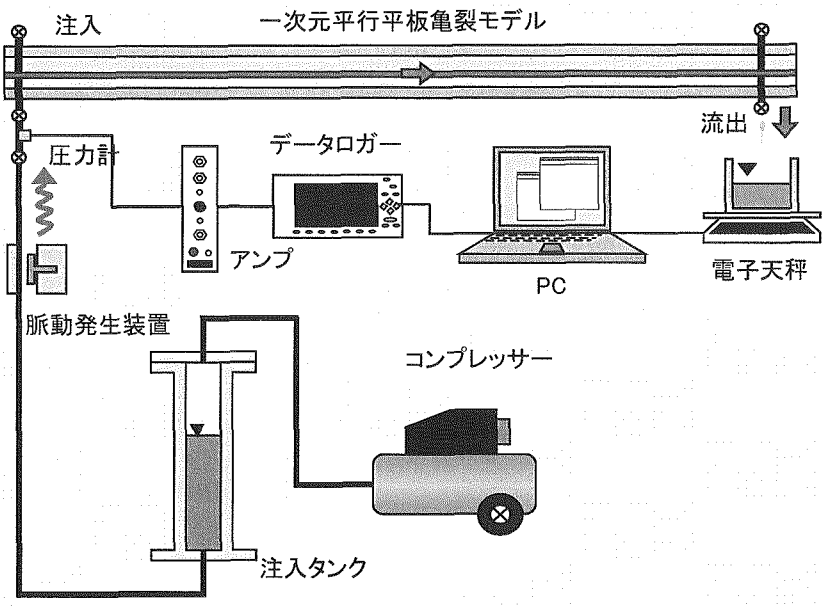


図 3.6.7　動的注入試験装置

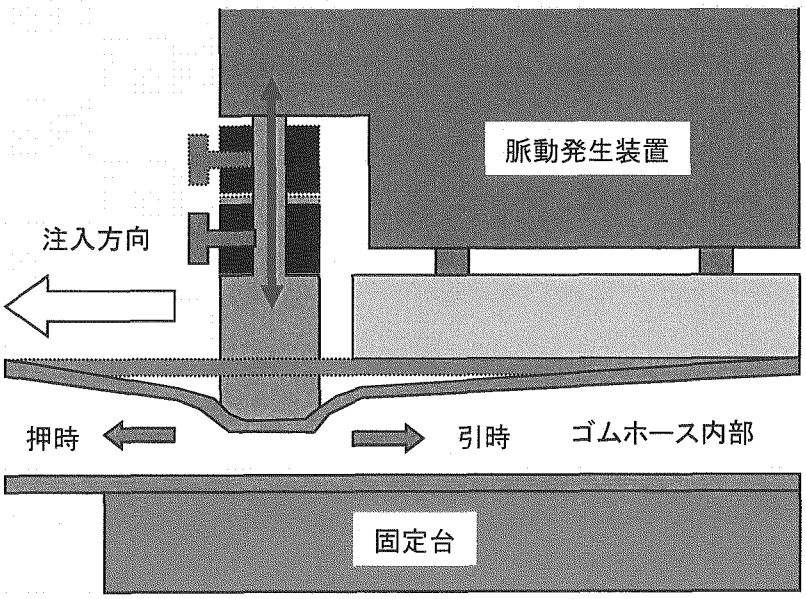


図 3.6.8　脈動発生装置

試験は目詰まり領域となる亀裂幅 100μm にて行い，各注入条件における経時的注入距離，注入密度の測定を行った。試験条件を表 3.6.2 に示す。圧力は上限を約 198kPa，下限を約 98kPa とし，振動数は前述 3.6.3 にて最も粘性が低下すると考えられる約 7Hz とした。試験手順は，配合段階試験の手順④に振動数の確認を加えたものである。

表 3.6.2　動的注入試験条件

	作成溶液	亀裂幅 (μm)	注入方式	注入圧力 (kPa)	配合比	ケース数
①	4%Sa	100	静的	196	2/1	2
②	4%Sa	100	静的	98	2/1	2
③	4%Sa	100	動的	98～196	2/1	2
④	60%Et	100	静的	196	1.5/1	2
⑤	60%Et	100	静的	98	1.5/1	1
⑥	60%Et	100	動的	98～196	1.5/1	2

3.6.4.2 試験結果

図 3.6.9, 10 に動的注入時の圧力波形を，図 3.6.11, 12 に経時的注入距離の変化を示す。圧力波形の最低値部で値が綺麗ではないのは，打撃棒とホースの間に隙間が生じるためである。

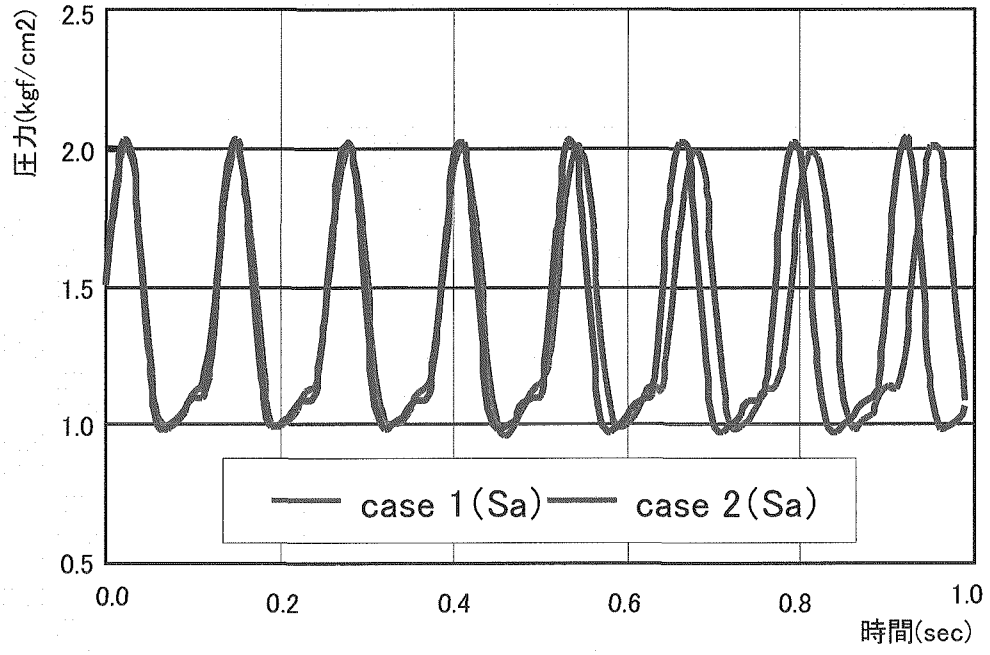


図 3.6.9　Sa/Be 注入時の圧力波形

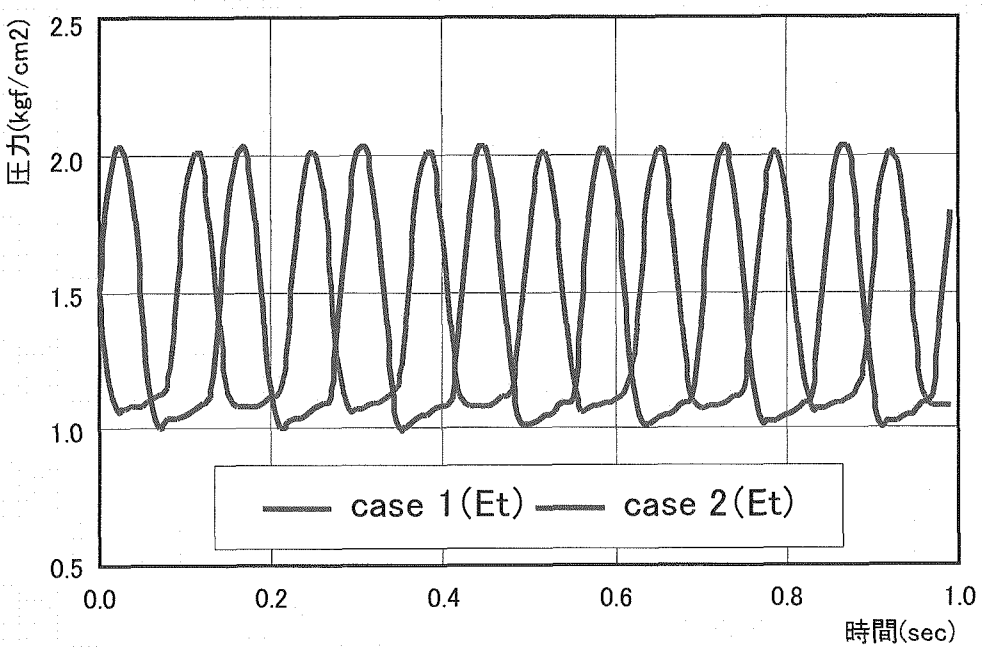


図 3.6.10　Et/Be 注入時の圧力波形

振動数は Sa/Be の case1 で 7.77Hz, case2 で 7.69Hz, Et/Be の case1 で 8.69Hz, case2 で 8.43Hz であった。

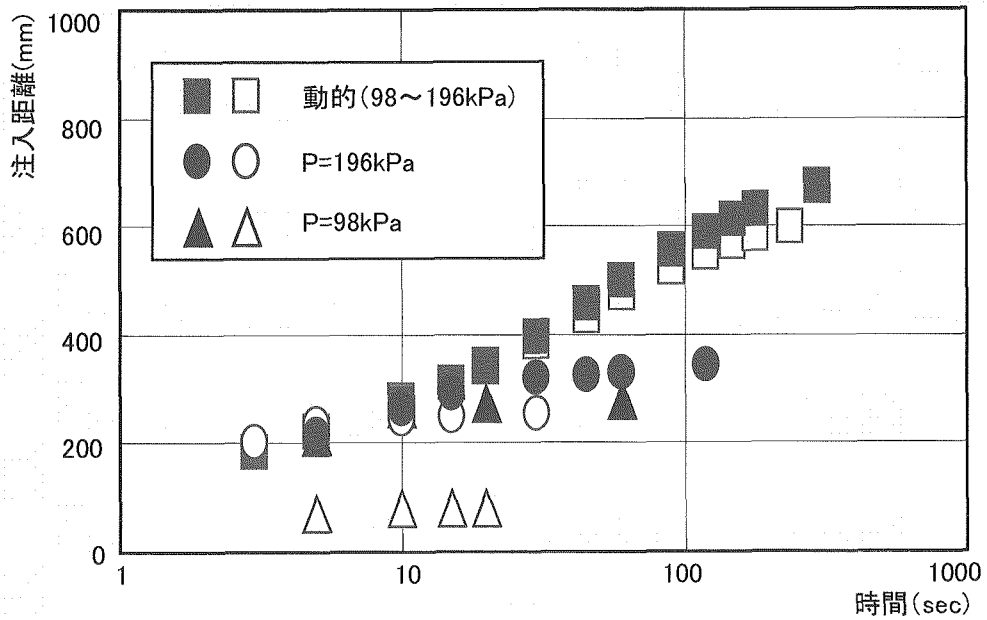


図 3.6.11　経時的注入距離の変化
(Sa/Be＝2/1)

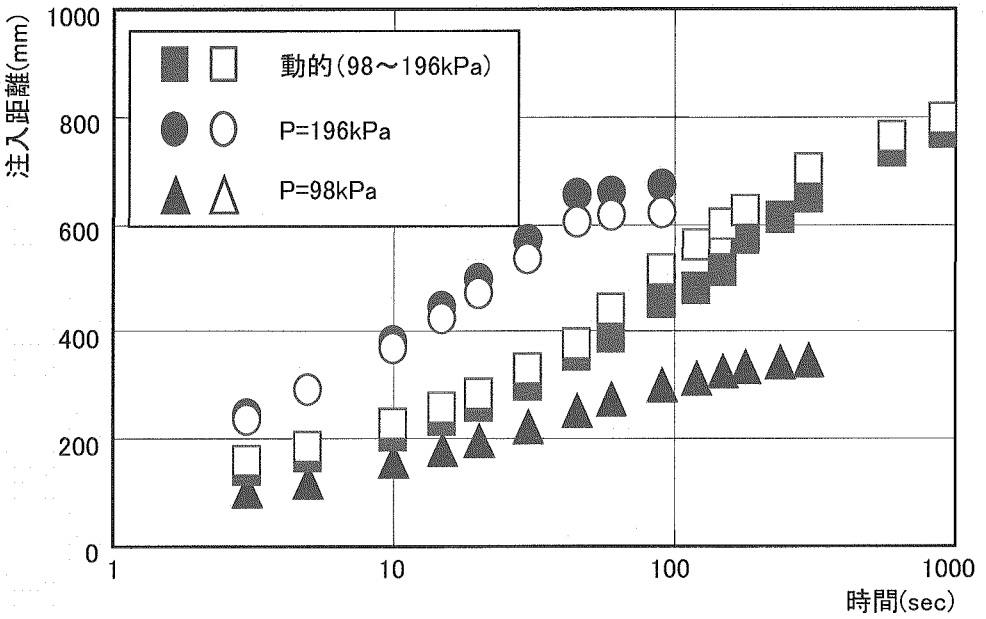


図 3.6.12　経時的注入距離の変化
(Et/Be＝1.5/１)

結果から，注入速度は動的圧力の最大値と静的圧力値での比較では静的が速く，下限値での比較では動的が早いエタノールスラリーにおいて顕著に表れた。動的注入は最大値と最小値の中間的な位置に注入前線がくることから，振動圧力の中心値が設計の指針となると考えられる。また注入距離の観点から動的注入は静的注入と比較して目詰まりが発生し難いといえる。および動的注入時に水みち発生による目詰まりが発生したが，その目詰まりが解消することも目視にてではあるが確認された。これは脈動による，ベントナイト粒子の運動が影響していると考えられる。その理念を図 3.6.13 に示す。

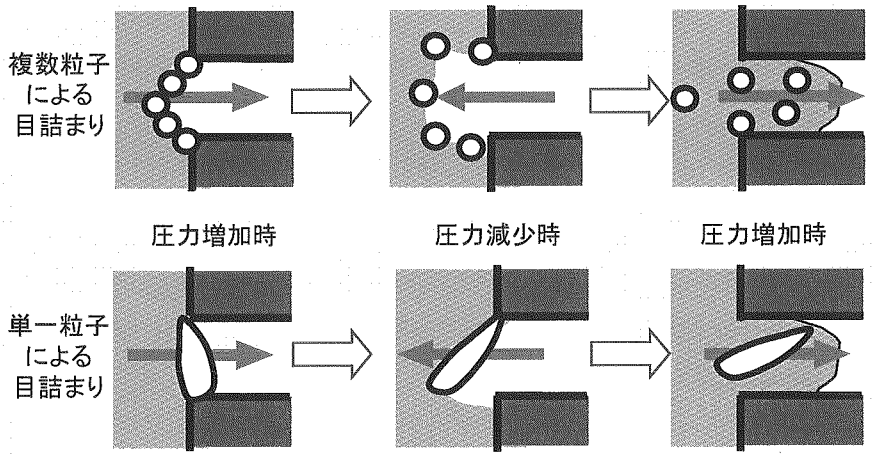


図 3.6.13　目詰まりの解消のメカニズム

3.6.5 考察

以下に本章で得られた知見をまとめる。

(1) スラリー密度を段階的に高めて注入することにより，注入後早期の目詰まり防止が可能であり，注入ベントナイト量の増加を期待できる。

(2) 長時間，低密度のスラリーを注入する場合でも亀裂壁面に対する吸着・沈降現象が生じ注入密度を高めるが，その現象は目詰まりの発生要因ともなる。

(3) スラリーに一定の振動数を与えることにより粘性を低下させることが可能であり，注入時に注入速度の上昇や目詰まりの抑制機能が作用する。ベントナイトスラリーでは約7Hz付近が最も粘性が低下する。

(4) 動的注入工法は静的注入工法と比較して目詰まりの発生を抑制可能であり，注入距離増加による注入効果の上昇が期待できる。また一度発生した目詰まりを解消する性質を持つ。

以上の観点から，亀裂性岩盤に対しグラウトを行う場合，目詰まりによる注入効果の減少を回避する方法として，注入配合密度を徐々に高めていくことで注入効果を高めることが出来る。また動的注入工法を併用することで目詰まりの防止による注入効果の向上が得られ，両者を併用することによってさらなる注入効果の向上が期待される。

3.7 砂層内への塩水ベントナイトの注入試験

3.7.1 概説

亀裂内に塩水ベントナイトを注入したことによる経時的な透水係数の低下を定量的に評価する方法として，砂材料内に静的と動的に塩水ベントナイトを注入することによって，その透水係数の経時的な低下を計測した。

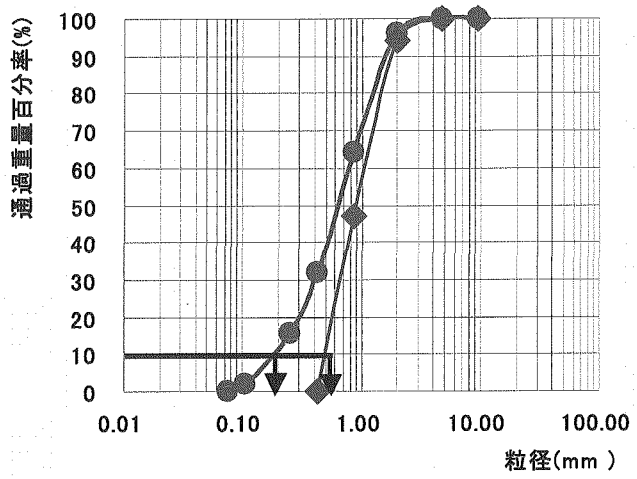


図 3.7.1　川砂の粒経加積曲線

3.7.2 試料

試料として，図 3.7.1 に粒径加積曲線を示す，2 種類の砂質材料を用いた。

3.7.3 試験方法

(1)試験モールド

試験は図 3.7.2 に示すように，内径 ϕ 10cm のモールドに下端より 20cm まで粗粒砂を間隙率を 0.41 で詰め，その上部の 10cm に細粒砂を間隙率 0.40 で詰めた。これは，グラウトとして注入するベントナイトの D_{85} が 35 μ m であることより，塩水ベントナイトスラリーが注入できる粗粒砂層(D_{50}=500 μ m)と，塩水ベントナイトが目詰まりする細粒砂層(D_{10}=200 μ m)として，粗粒砂層の中に静的と動的に注入した塩水ベントナイトの注入密度の差による注入後の透水係数の差を議論するためである。

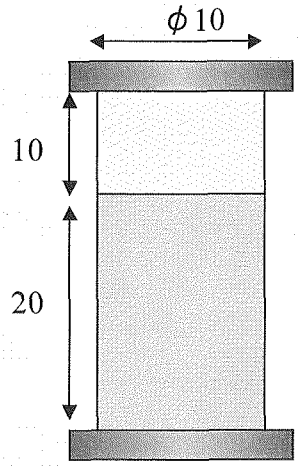


図 3.7.2　注入供試体(単位：cm)

(2)塩水ベントナイトスラリーの注入方法

注入材料として，塩水濃度 4%の溶液に，配合比 1:4（ベントナイト:塩水）でベントナイトを混合してベントナイトスラリーを作成した。

塩水ベントナイトの注入方法は，**図 3.7.3** に示す動的注入試験装置の一次元平行平板亀裂モデルを砂層モールドに変えた装置によって，動的と静的(注入パイプの途中で脈動を発生させない注入)で注入した。**写真-3.7.1，3.7.2** にその状況を示す。注入圧は**図 3.7.4** に示すように，動的では最大注入圧を 200kpa(2.0kgf/cm^2)，最小注入圧 100kpa(1.0kgf/cm^2)とし，約 9Hz で 30 分間注入した。静的では，200kpa(2.0kgf/cm^2)で同様に 30 分間注入した。注入流量および，塩水ベントナイトスラリーの注入によって供試体からの排水流量等を表 3.7.1 に示す。また，**表 3.7.1** には，粗粒層の初期の透水係数と注入後の透水係数の値を示す。

初期に 1.0×10^{-1}cm/s の砂層が注入によって，透水係数に静的注入でも動的注入でも 1.0×10^{-5}cm/s のオーダの透水係数になっている。これは，塩水ベントナイトスラリーが注入された後の透水係数の値であり，その後，塩水ベントナイトスラリー中の塩水が周囲の水によって希釈されてベントナイトが膨潤することによる透水係数の経時的変化を計測した。その途中結果を**図 3.7.5** に示す。この結果より，動的注入工法は静的注入工法に比較して，ベントナイトが密に注入されているため，透水係数が注入されているため，透水係数がきわめて大きく低下していることがわかった。

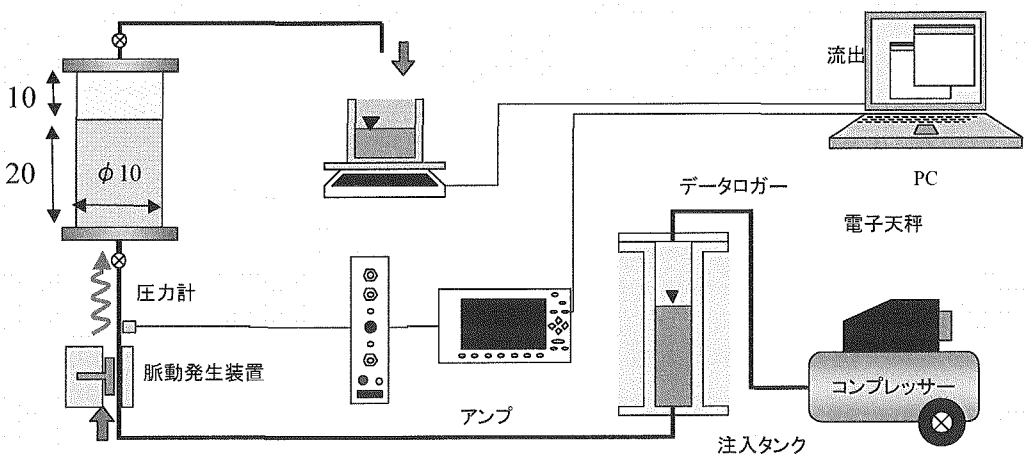


図 3.7.3　動的注入試験装置システム

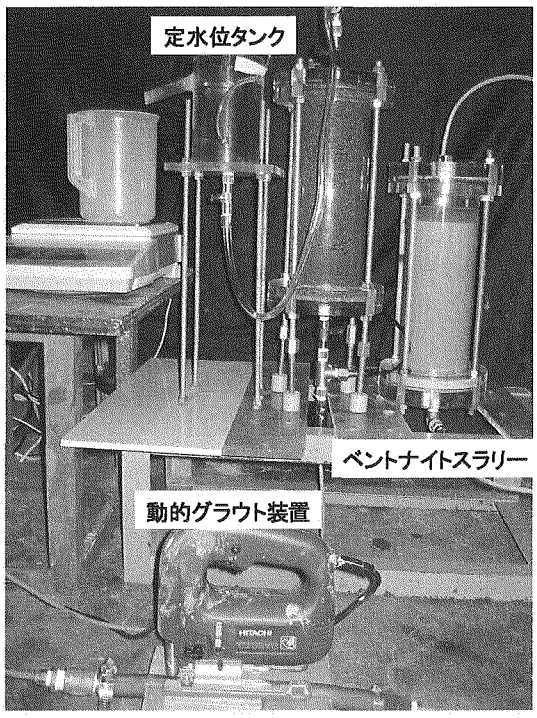


写真 3.7.1　ベントナイト動的注入試験装置

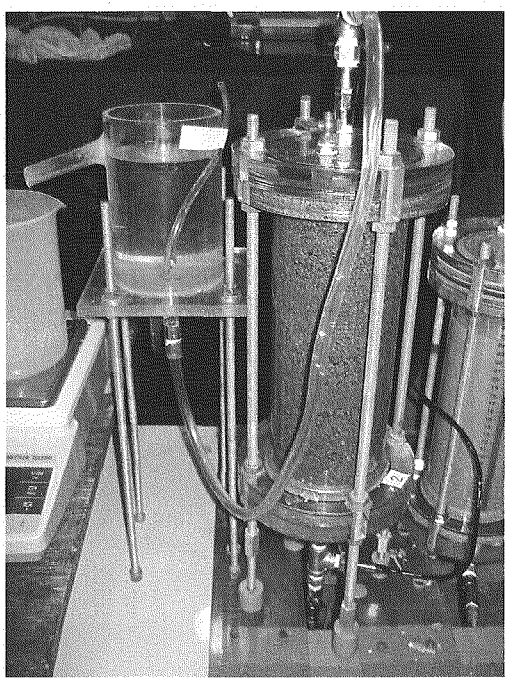


写真 3.7.2　供試体と定水位タンク

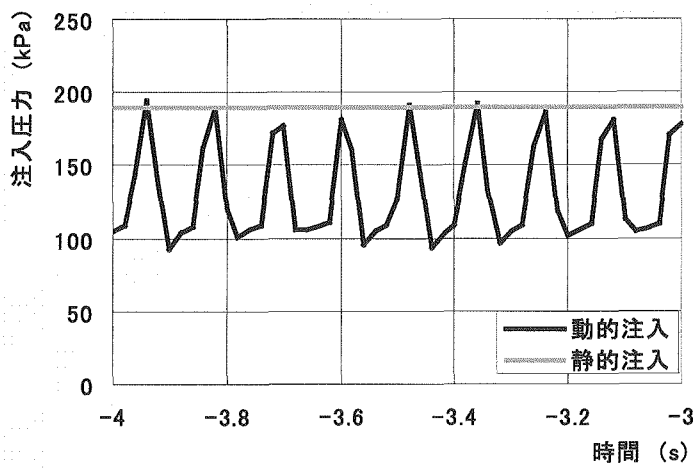


図 3.7.4　動的と静的の注入圧力

表 3.7.1　注入前後の透水係数の変化と注入量とそれによる排水流量

注入形式	初期の透水係数 k_i(cm/s)	注入後の透水係数 k_a(cm/s)	排水流量 (cm^3)	注入量 (cm^3)
静的注入	9.85E-02	2.86E-05	1076.3	1083.9
動的注入	1.00E-01	4.98E-05	982.4	997.5

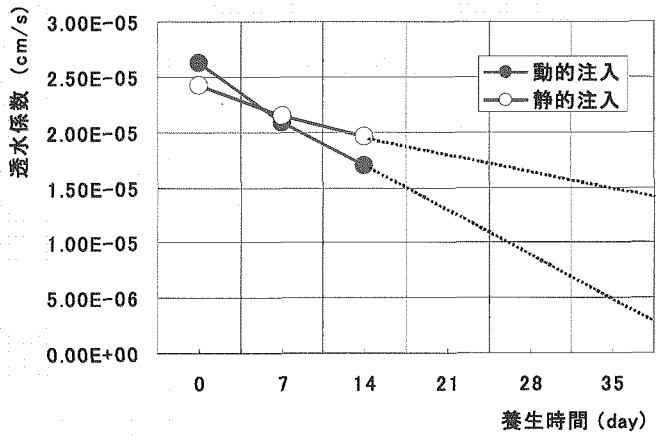


図 3.7.5　塩水ベントナイトスラリーの注入供試体の
透水係数の経時的低下

3.7.4 まとめ

掘削損傷領域への塩水ベントナイトスラリーの注入を模擬する方法として，砂層を対象として静的注入と動的注入とを比較した。その結果，動的注入は砂層の間隙に密にベントナイトスラリーを注入しているため，塩水が水によって置換する事によるベントナイトの膨潤のための透水係数の低下が大きくなる事がわかった。

3.8 結論

本研究でベントナイトを用いたグラウト手法の実験的研究を行った。ベントナイトを各種溶液を用いて注入可能なスラリー化を行い，浸透特性，注入特性，施工方法の検討を行い，その有効性を示した。またセメント系グラウト材に変わる，新たな恒久的グラウト材としての適用性を透水性，施工性の観点から示したともいえる。施工方法も新たなグラウト工法として着目されている，動的注入工法の実用性を示した。本研究によって，放射性廃棄物地層処分における岩盤掘削によって空洞周辺に生じた掘削損傷領域の修復法として，膨潤していないベントナイトスラリーを動的に岩盤内に注入する工法がきわめて有効であることがわかる。

以下に本研究で

(1) ベントナイトのスラリー化の際に，溶液として60%のエタノールおよび４%以上の塩水を用いることで水より高密度でスラリーの作成が可能である。塩水とエタノールを比較すると，エタノールを用いた場合が粘性や高密度化の点において有効である。また溶液として塩水エタノール水溶液を用いることでさらに高密度化が可能である。

(2) 塩水およびエタノールベントナイトスラリーの透水性は 1.0×10^{-4}～10^{-5} cm/sec と，健岩部と比較して高い値であるが，スラリー内部の溶液が周辺部の水と置換をすることにより，徐々に透水性が低下する。最終的に溶液が水と完全に置換した場合 1.0×10^{-8}～10^{-9} cm/sec となり，初期値から３～４オーダー程度低下するため，周辺健岩部同等以上の止水性を発揮する。

(3) 塩分濃度が１～２%と予想される，沿岸部大深度の地下水とのスラリー溶液の置換は，透水性がわずかな低下に留まる。よって，処分サイトは陸水系地盤であることが望ましい。

(4) 亀裂開口部での目詰まりの発生は，ベントナイトスラリーの配合比に依存し，高密度のベントナイトスラリーほど目詰まりが発生する。またエタノールベントナイトスラリーの方が，小さい亀裂開口幅にまで高密度にて注入可能である。

(5) 流亡は注入スラリーの配合条件に依存し，低密度のスラリーほど流亡しやすい。また時間的に粘性が上昇するため流亡に対する抵抗力が増す。

(6) 配合を段階的変化させることにより，亀裂開口部での早期の目詰まりの防止による注入距の向上，および止水性能の強化，流亡に対する強度が増加する。

(7) スラリーに７Hz程度の圧力振動を与えることにより，粘性の低下，目詰まりの早期防止による注入効果の向上が可能である。よって動的注入工法が静的注入工法に優る。

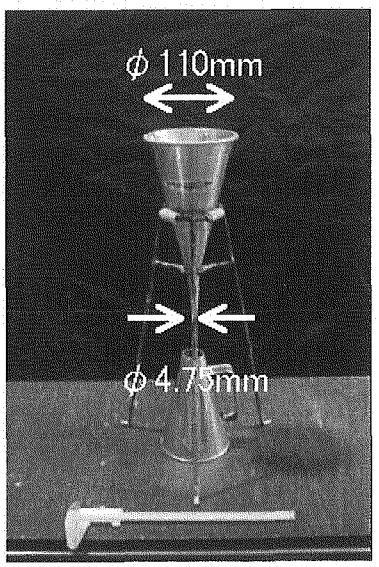
今後の課題として，本研究にて測定した値と理論での比較検討や，飽和亀裂に対する注入試験，水温による注入への影響などが考えられる。また実際の亀裂性岩盤に対する注入データの収集と，長期的な透水性の測定が一つ。予期せぬ亀裂幅の拡大に対するベントナイト膨潤による充填時間が挙げられる。

3.9 参考文献

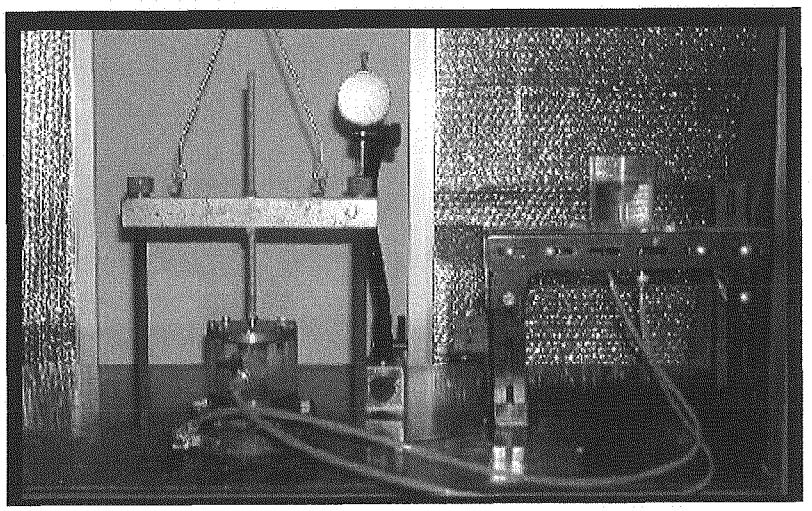
1) 核燃料サイクル開発機構（1999）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-分冊1わが国の地質環境，pp. I11-I12.
2) 核燃料サイクル開発機構（1999）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-分冊2地層処分の工学技術，pp. I1-I4.
3) 核燃料サイクル開発機構（1999）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-分冊3地層処分システムの安全評価，pp. IV72-IV76.
4) 核燃料サイクル開発機構（1999）：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-別冊地層処分の背景，pp7.
5) 緒方信英，小峯秀雄，尾上篤生，石井卓，堀江芳博（1993）：ベントナイト混合砕砂の膨潤率と膨潤圧について，土木学会第48回年次学術講演会，pp. 7-8.
6) 浅田素之，石川明，川口正人，堀内澄夫（2000）：エタノール/ベントナイトスラリー混合土の透水試験，第35回地盤工学研究発表会，pp. 1557-1558.
7) 堀内澄夫，浅田素之(2001)：エタノール/ベントナイトスラリーの性質と界面電気現象，第36回地盤工学会研究発表会，645.
8) 田中益弘，笹倉剛，藤沢理，岡本道孝（2000）：Na 型ベントナイトの塩水化による透水及び膨潤特性の変化，土木学会第55回年次学術講演会，CS-198.
9) 千々松正和，藤田朝雄，鈴木英明，松本一浩（1999）：緩衝材の水理特性，サイクル機構技法，No. 5.
10) 菊地広人，棚井憲治，佐藤治夫（2003）：海水条件下における圧縮ベントナイトの透水性，土木学会第58回年次学術講演会，pp. 343-344.
11) 浅田素之，石川明，堀内澄夫（2001）：エタノール/ベントナイトスラリー止水壁モデル実験(その1)，第36回地盤工学会研究発表会，643.
12) 石川明，浅田素之，堀内澄夫（2001）：エタノール/ベントナイトスラリー止水壁モデル実験(その2)，第36回地盤工学会研究発表会，644.
13) 早川幸恵，千々松正和，六川武，平賀健史，小峰秀雄（2003）：ベントナイトの膨潤特性に与えるNaCl濃度の影響，土木学会第58回年次学術講演会，pp. 349-350.
14) Lennart Borgesson, Roland Pusch, Anders Fredrikson, Harald Hokmark, Ola Karnland, Torbjorn Sanden（1991）：STRIPA Project Technical Report 91-34, SKB, Stockholm.
15) 西垣誠，山本浩志（1998）：セメントミルクの亀裂内流動則に関する基礎実験，土木学会第52回年次学術講演会，pp. 500-501.
16) 山本浩志（1999）：岩盤亀裂内へのグラウト材の注入・流動特性に関する実験的研究，岡山大学修士論文，pp. 111-128.
17) 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.
18) 内田善久，蓮本清二，平治，大橋昭，西垣誠，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. 117，pp. 108-115.

19) 大橋昭，平治，寺戸康隆，澤茂幸（1993）：微小亀裂への動的グラウチングに関する流動解析，土木学会第 48 回学術講演会第三部門，pp. 7-8.
20) 浅田素之，中島均，石井卓，堀内澄夫（2003）：エタノール/ベントナイトスラリーの岩盤亀裂注入現場実験，第 38 回地盤工学会研究発表会，pp. 1181-1182.
21) 中島均，浅田素之，堀内澄夫，石川卓，流岩男（2003）：エタノール/ベントナイトスラリーの岩盤注入特性，土木学会第 58 回年次学術講演会，pp. 375-376.
22) 土質工学会（1993）：土の圧密入門，pp. 117-130.

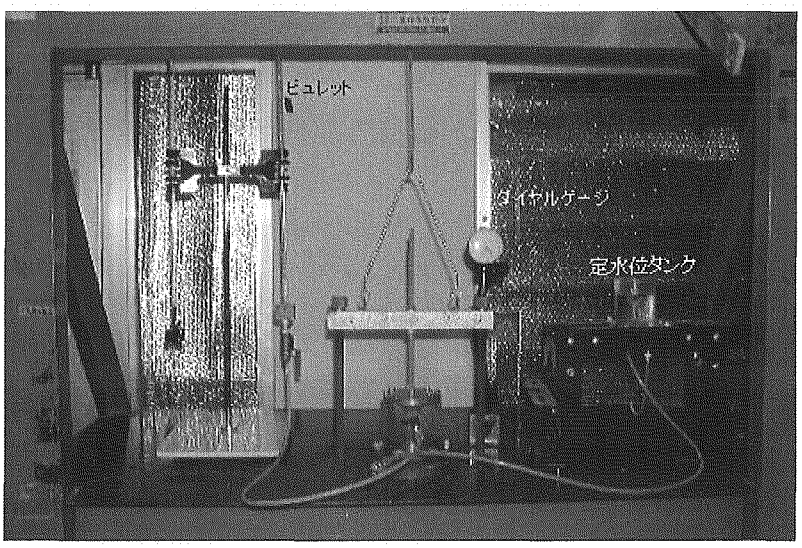
3.10 別添付写真



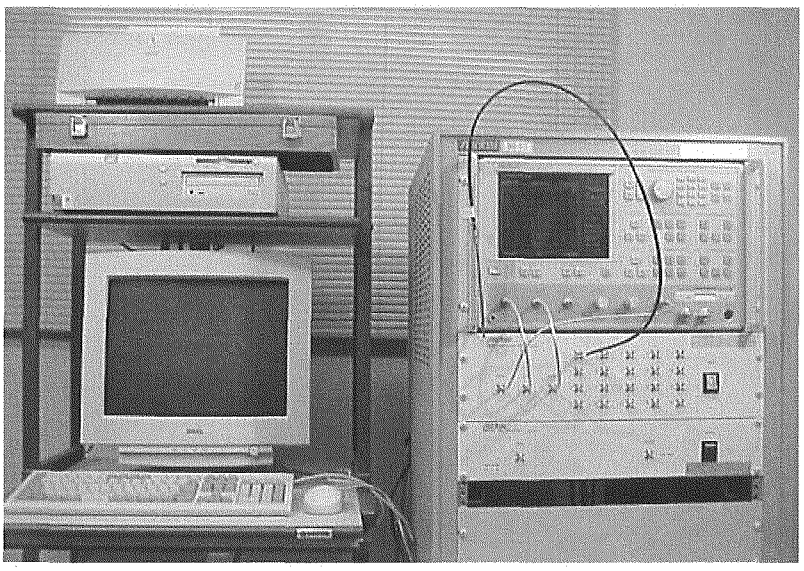
付写真 3.3.1　ファンネル粘度計



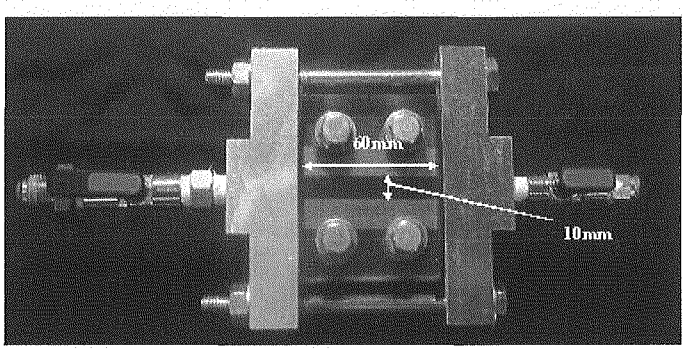
付写真 3.3.2　圧密試験装置



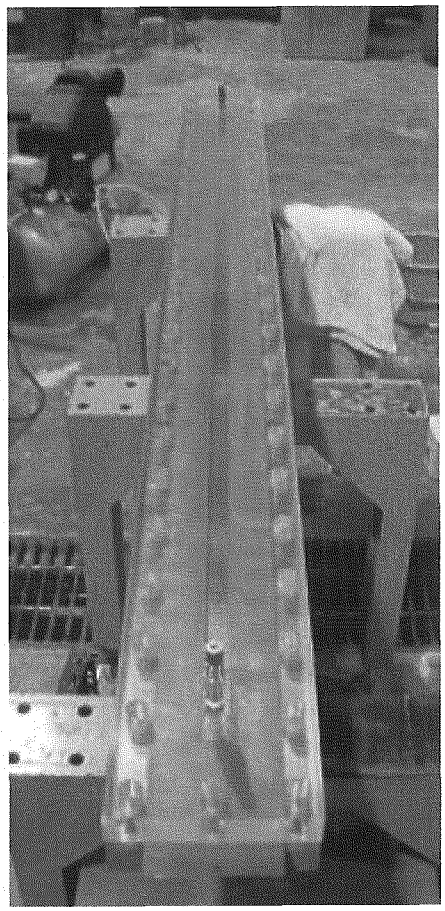
付写真 3.4.1　圧密透水試験装置



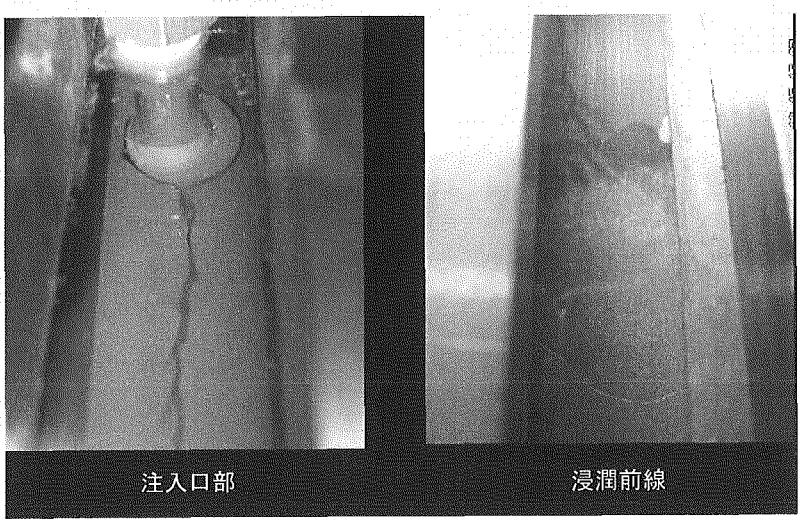
付写真 3.4.2 FDR-V 測定装置



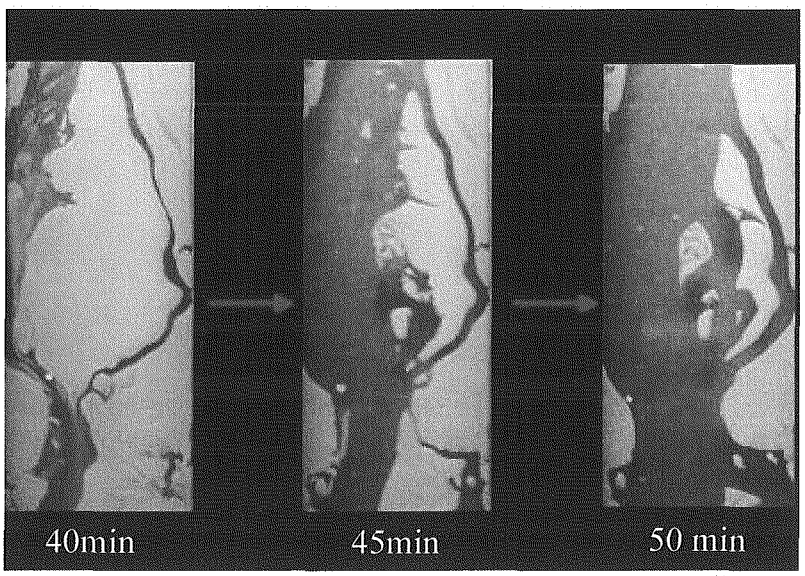
付写真 3.5.1　小型亀裂モデル



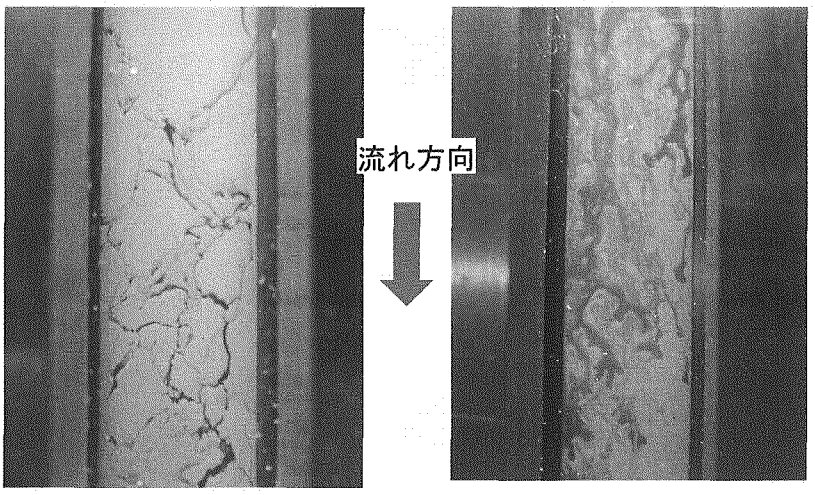
付写真 3.5.2　長尺亀裂モデル



付写真 3.5.3　目詰まり発生状況



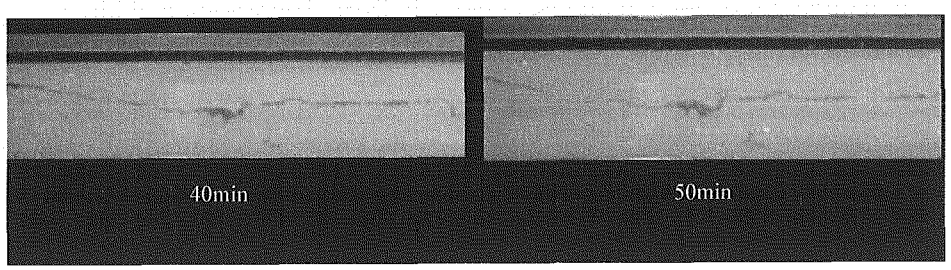
付写真 3.5.4　流亡状況



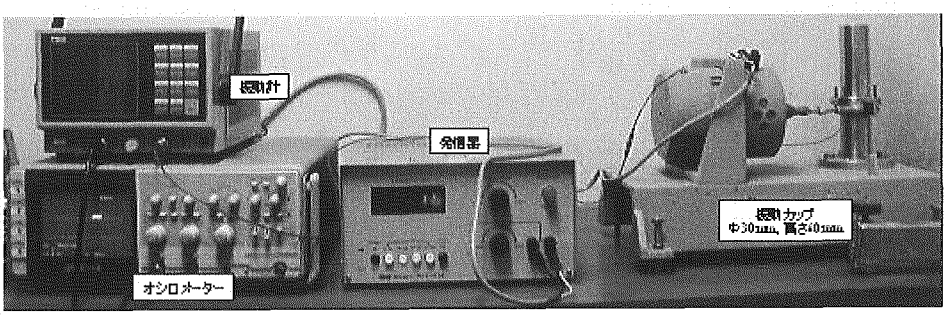
塩水ベントナイトスラリー
S=4%, SW/B＝2/1, d＝200

エタノールベントナイトスラリー
E=60%, EW/B=2/1, d＝200

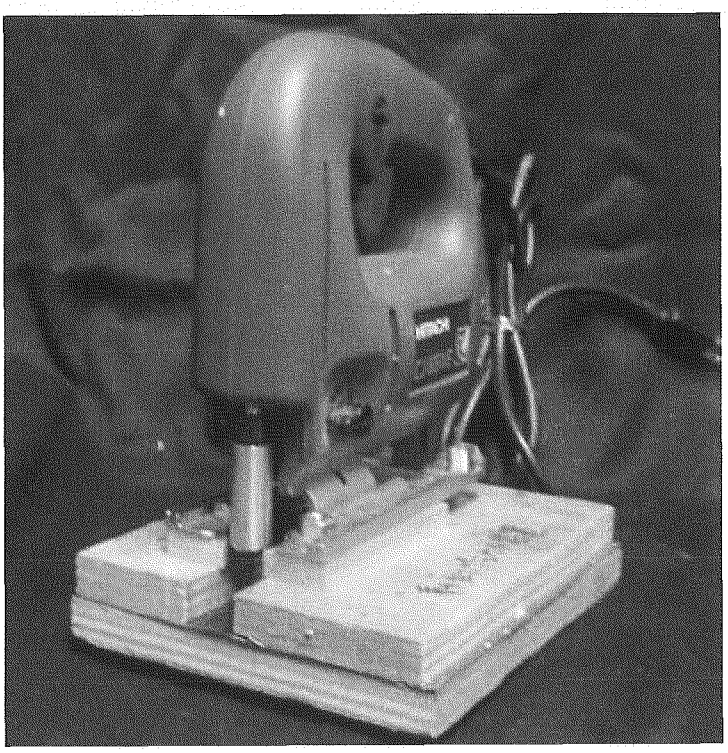
付写真 3.5.5　流亡状況 2
(水みち型流亡と混合型流亡)



付写真 3.5.6　流亡状況３
(Sa/Be=2/1,200μm,2hour)
（亀裂の膨潤による充填）



付写真 3.6.1 加振下粘度計



付写真 3.6.2 脈動発生装置

4. 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

4.1 はじめに

本研究では，JNC 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状況を把握することを目的とする。

作成するモデルは，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 次元構造が反映されたものであり，以下の諸量，諸現象の解明に資するものである。

- 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，地形との関係などの把握。
- 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。深地層施設の掘削影響評価などの把握。
- 今後の水文水理調査の指針の提示。

4.2 作業フロー

本研究は図 4.2.1 のような作業フローで実施した。

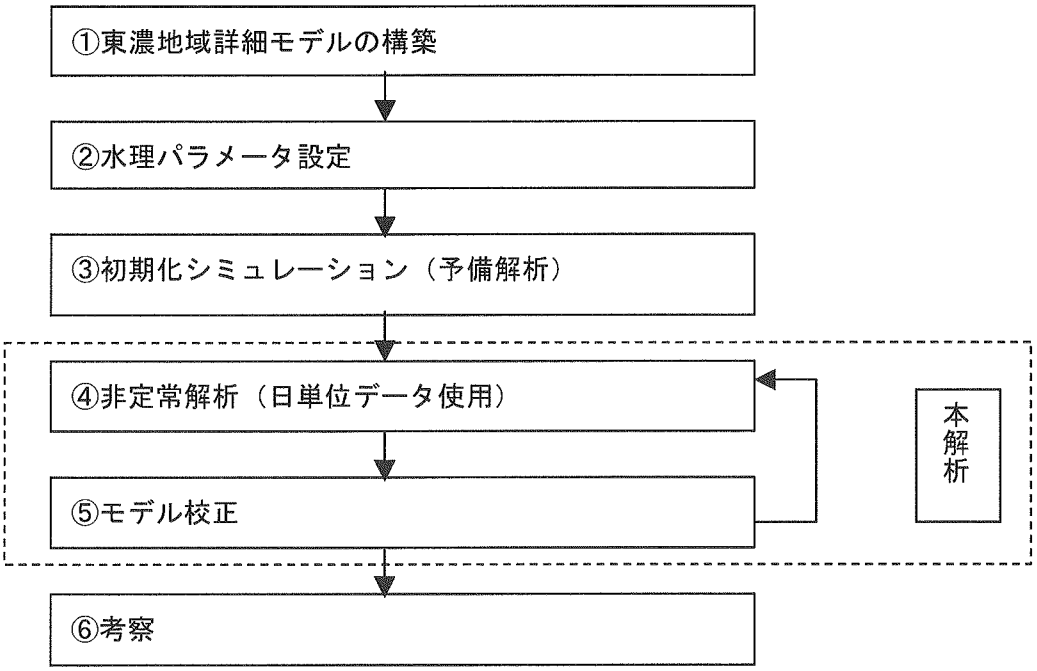


図 4.2.1　作業フロー

本年度は作業フローのうち④の非定常解析まで試行計算を行った。

4.3 表層水文・水理調査の概要

本流域では降水量，蒸発散量算出のための気象要素，河川流量，地下水位を複数の地点で観測している。観測流域位置図を図 4.3.1 に示した。

これらの観測結果を用い，水収支法により涵養量を求め，図 4.3.1 に示す約 7x9km のローカルスケール領域における地下水流動解析のための上部境界条件としての涵養量を推定している。

ここでは，観測から推定される涵養量の妥当性を検討するため，ローカルスケール領域において東濃地域の水文地質資料を用いて地表から深部にわたる水文地質モデルを構築し，河川（表層水）流動と地下水流動を統合的にシミュレートした。

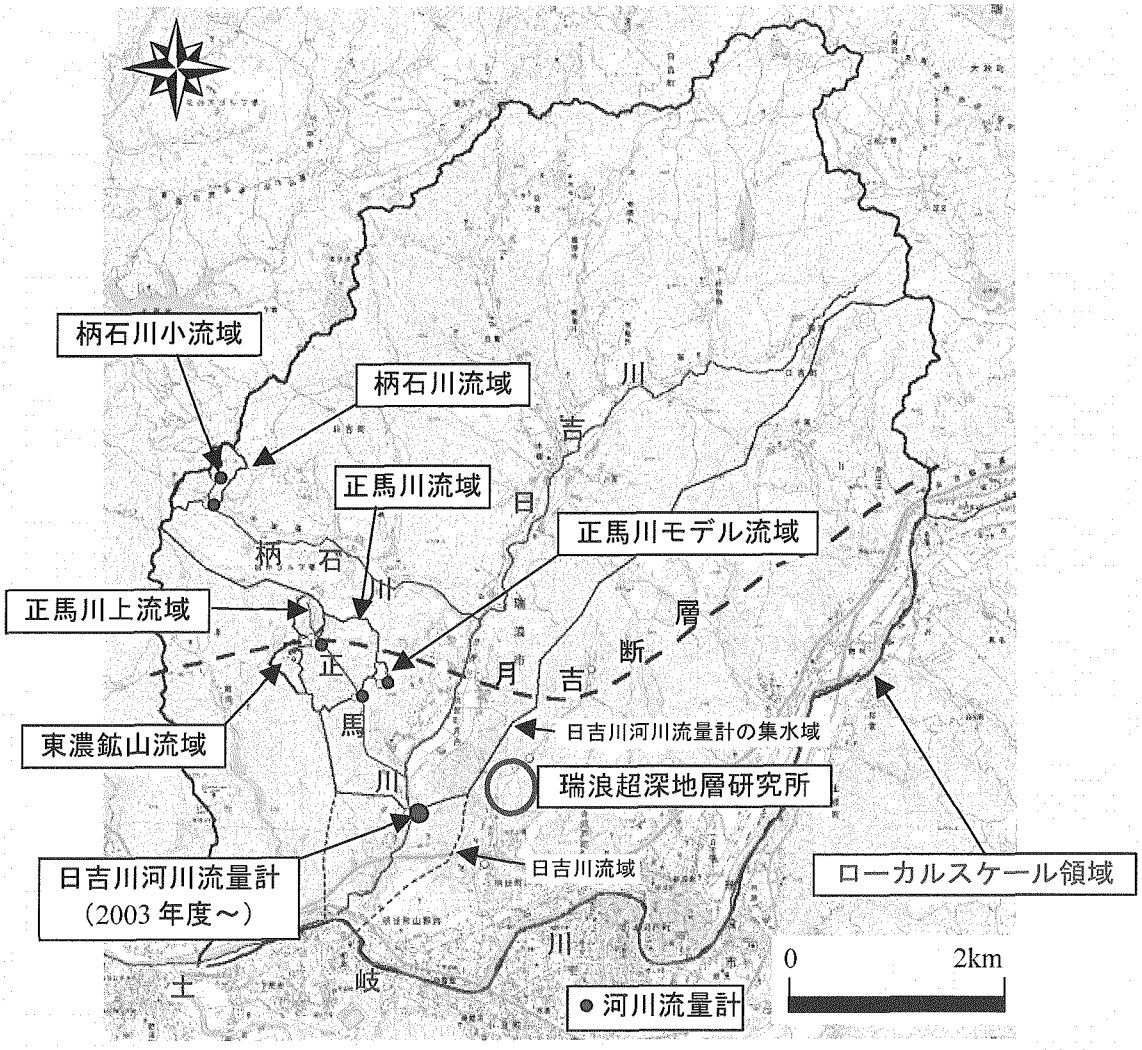


図 4.3.1　表層水理観測流域位置図

観測流域の規模は表 4.3.1 に示す通りである。

表 4.3.1　表層水理観測流域の規模

流域	集水面積
正馬川流域	0.535km^2
正馬川上流域	0.155km^2
板取洞流域	0.012km^2
東濃鉱山流域	0.062km^2
柄石川流域	0.233km^2
柄石川小流域	0.01km^2
日吉川流域	23.9km^2

4.4 地形情報を利用した東濃地域詳細モデルの構築

4.4.1 地形情報

東濃地科学センターにて作成された東濃地域の 5m メッシュ数値地図を用いて，河川系を充分に表現できるよう留意して平面格子分割を行った。図 4.4.1 に作成した格子（5m メッシュ数値地図上にプロット）を示す。

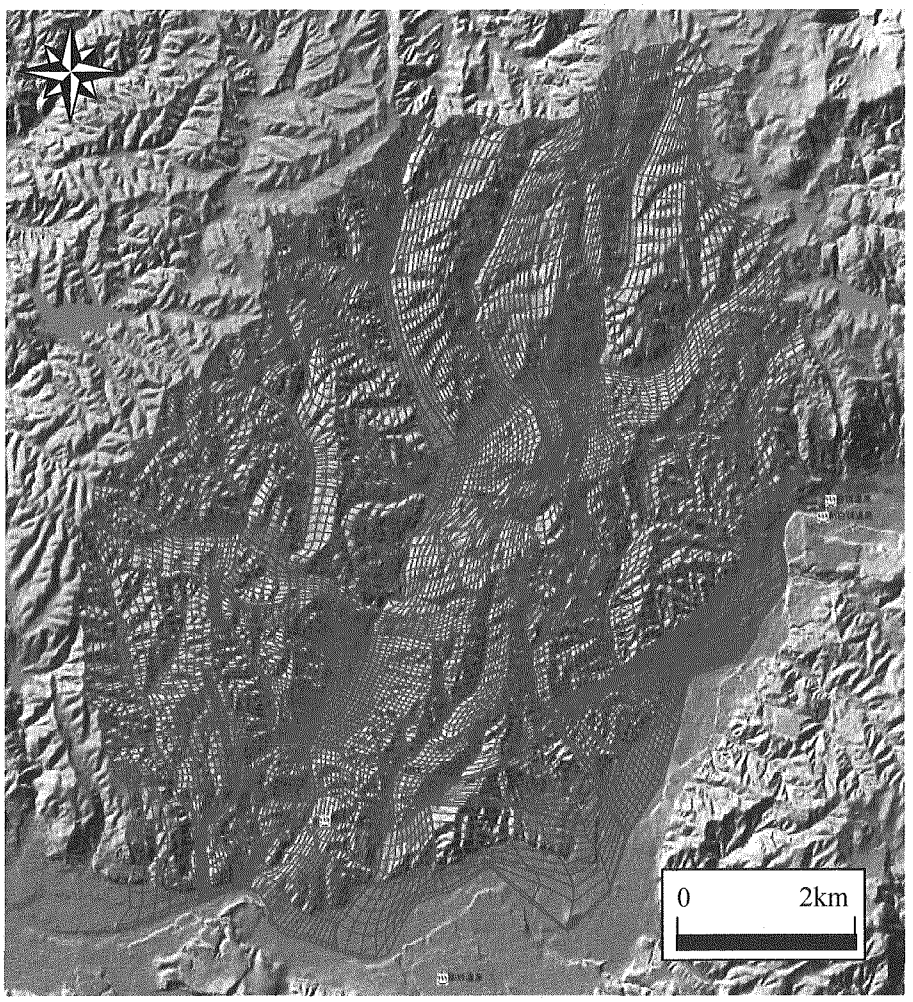


図 4.4.1　地表格子分割

4.4.2 地質情報

モデル化する地質構造は，これまで東濃地科学センターが実施しているローカルスケール領域の地質構造モデルを踏襲し，以下の地質構造を対象とした。

- 瀬戸層群
- 瑞浪層群（生俵累層，明世・本郷累層，土岐夾炭累層）
- 花崗岩上部割れ目帯
- 花崗岩割れ目低密度帯
- 月吉断層

上記に加え，表層水文現象に重要な役割を果たす地表付近の土壌層もモデル化した。土壌層の厚さは領域内一律に地表から２ｍまでとした。ただし，河川部には土壌層は設定していない。**図 4.4.2** に東濃地域の地質図を示す。**図 4.4.3** に地質モデルを示す。

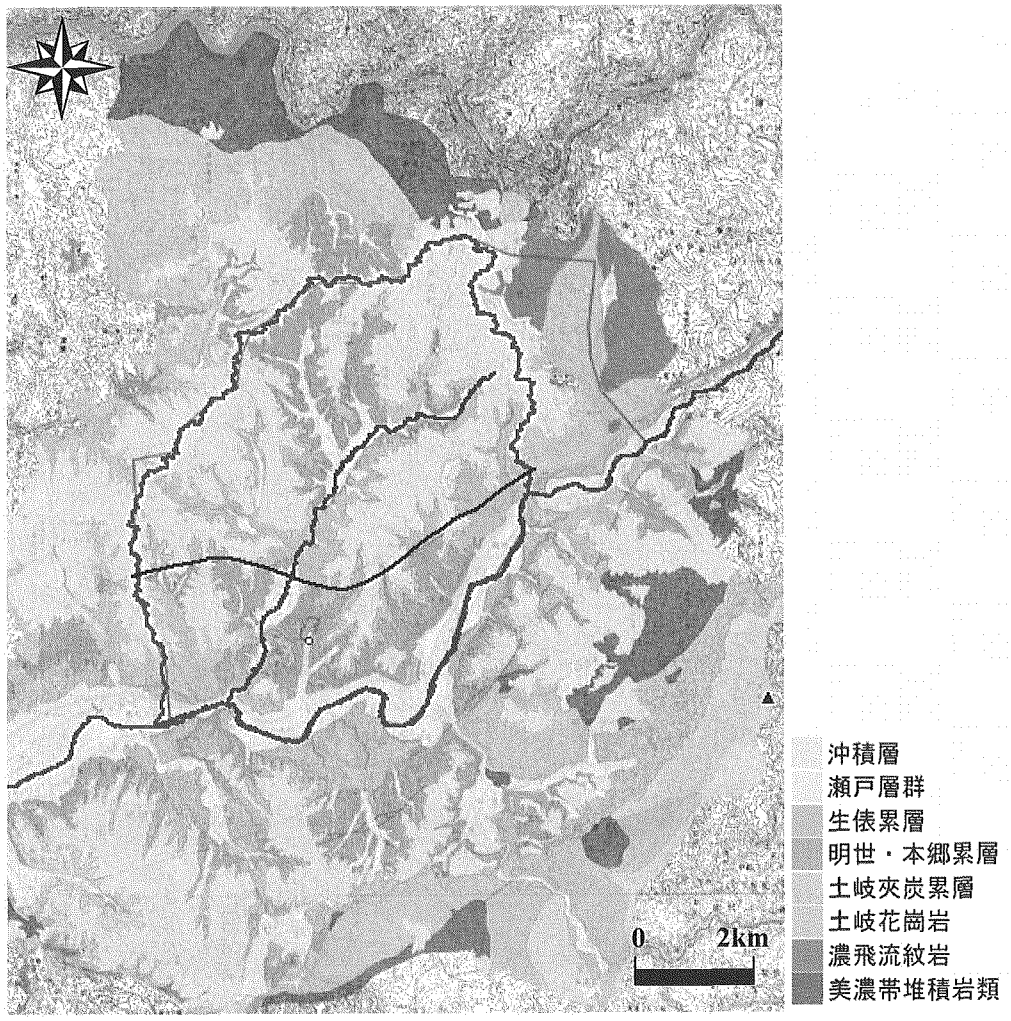


図 4.4.2　東濃地域の地質図

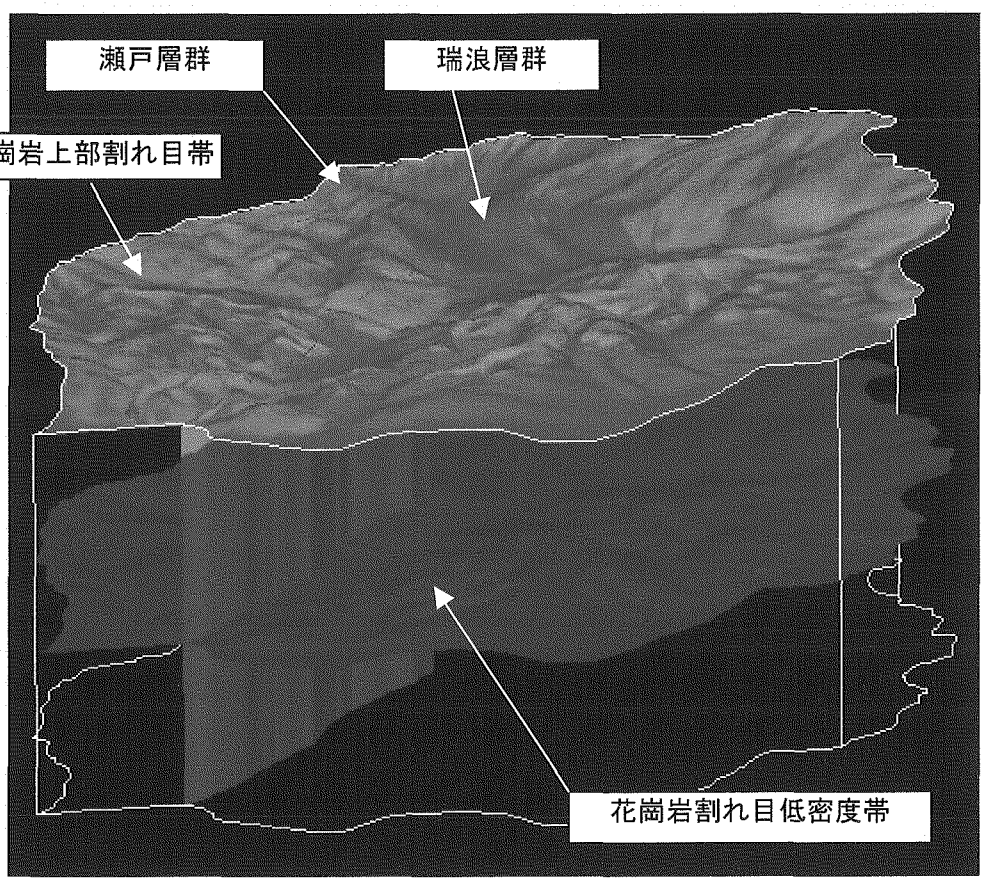


図 4.4.3　地質モデル（土壌層は表示していない）

4.4.3 水理情報

(1) 地表面等価粗度係数

地表面の粗度係数は東濃地域の土地利用分布図（図 4.4.4）を基に，農地，市街地，森林，ゴルフ場，河川の土地区分ごとに一般的な粗度係数を設定した。表 4.4.1 に設定した等価粗度係数を示す。図 4.4.5 にモデルの地表面における土地利用区分（等価粗度係数分布）を示す。

等価粗度係数は，初期化シミュレーションを行う際に，観測河川流量に整合するよう調整する。なお，ここでは，日吉川河川流量および正馬川河川流量を調整の対象とした。

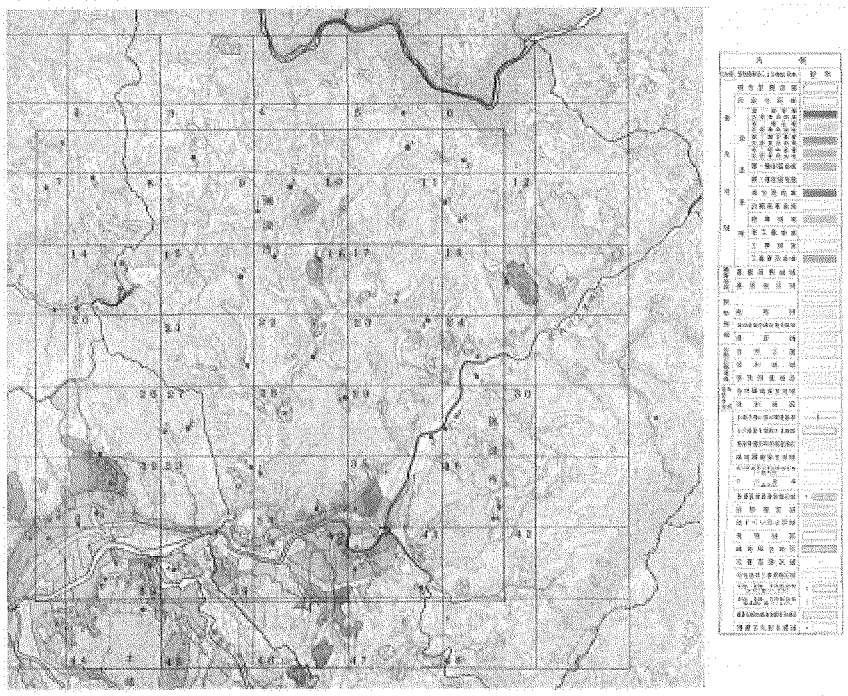


図 4.4.4　土地利用分布図

表 4.4.1　地表面粗度係数（初期値）

土地利用区分	地表面粗度係数
農地	0.2
市街地	0.1
森林	0.5
ゴルフ場	0.3
河川	0.04

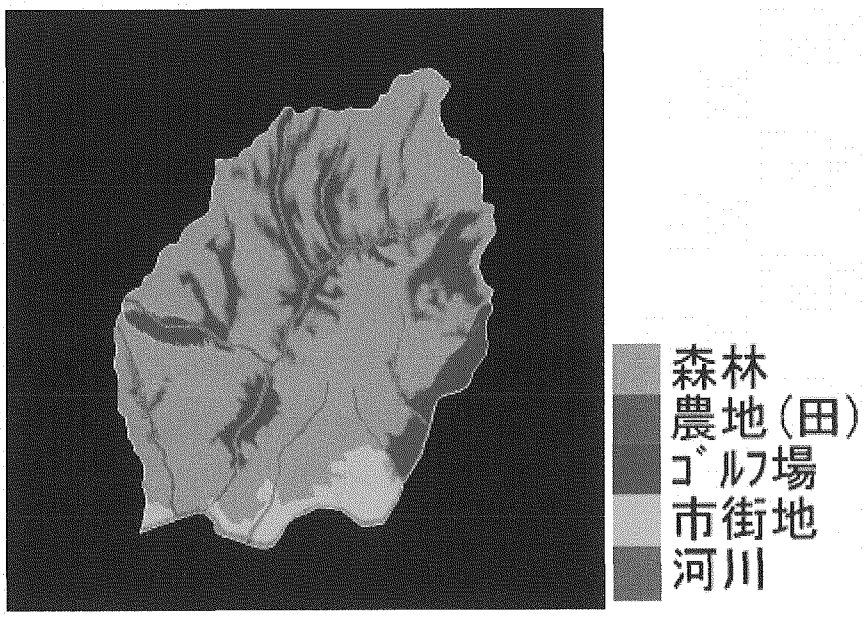


図 4.4.5　モデル地表面における土地利用区分

(2) 浸透率および間隙率

東濃地科学センターで取得された水理情報に基づき水理パラメータを設定した。**表 4.4.2** に各地質構造に与えた浸透率，間隙率を示す。土壌についてはデータがないため，３つのケースを設定し，土壌物性の影響を評価する。

表 4.4.2　浸透率および間隙率

		浸透率[md]		間隙率
土壌	ケース１	1000（深度 2m まで）		0.3
	ケース２	10000（深度 0.5m まで）		0.5
		1000（深度 2m まで）		0.3
	ケース３	森林	10000（深度 0.5m まで）	0.5
			5000（深度 2m まで）	0.4
		農地・ｺﾞﾙﾌ場	5000（深度 0.5m まで）	0.5
			2500（深度 2m まで）	0.4
		市街地	1000（深度 0.5m まで）	0.3
			200（深度 2m まで）	0.2
瀬戸層群		1033		0.3
瑞浪層群		39.5（水平方向） 0.395（鉛直方向）		0.2
花崗岩上部 割れ目帯		23.1		0.02
花崗岩割れ目 低密度帯		3.54		0.01
月吉断層		0.001（面に直交する方向） 116.1（面に平行な方向）		0.05

月吉断層の面に平行な方向の透水性は，水理試験から得られている断層沿いの透水量係数 $5.62\times10^{-5}m^2/s$ を，モデル上の断層厚さ約 50m で割った値である。
($5.62\times10^{-5}/50=1.124\times10^{-6}m/s=116.1md$)

(2) 不飽和物性

相対浸透率，毛管圧力曲線については，本研究では図 4.4.6 に示すような曲線を用いた。土壌や地質区分等により不飽和特性を相応のものにする必要があると考えられるが，今回は簡単のため，地質区分等に関わらず同一のデータを使用した。

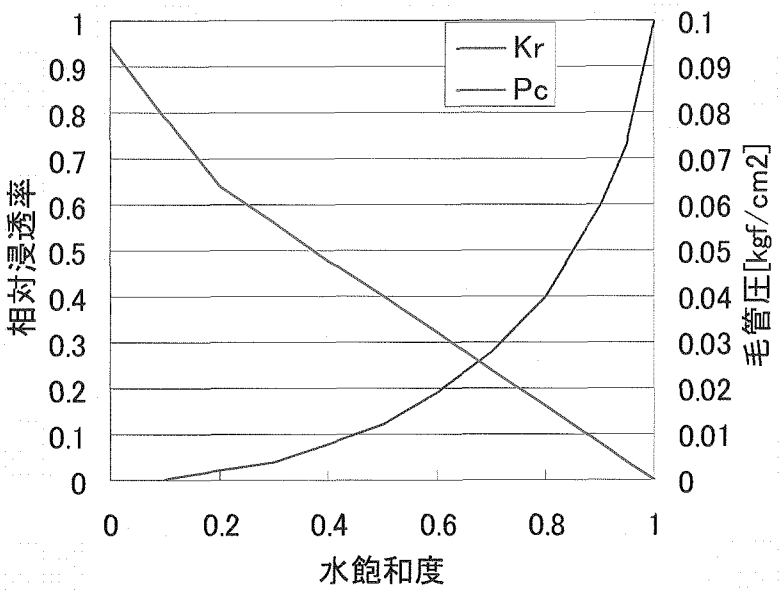


図 4.4.6　不飽和パラメータ

4.5 流域水文情報

4.5.1 観測地点位置図

図 4.5.1 に観測地点位置図を示す。

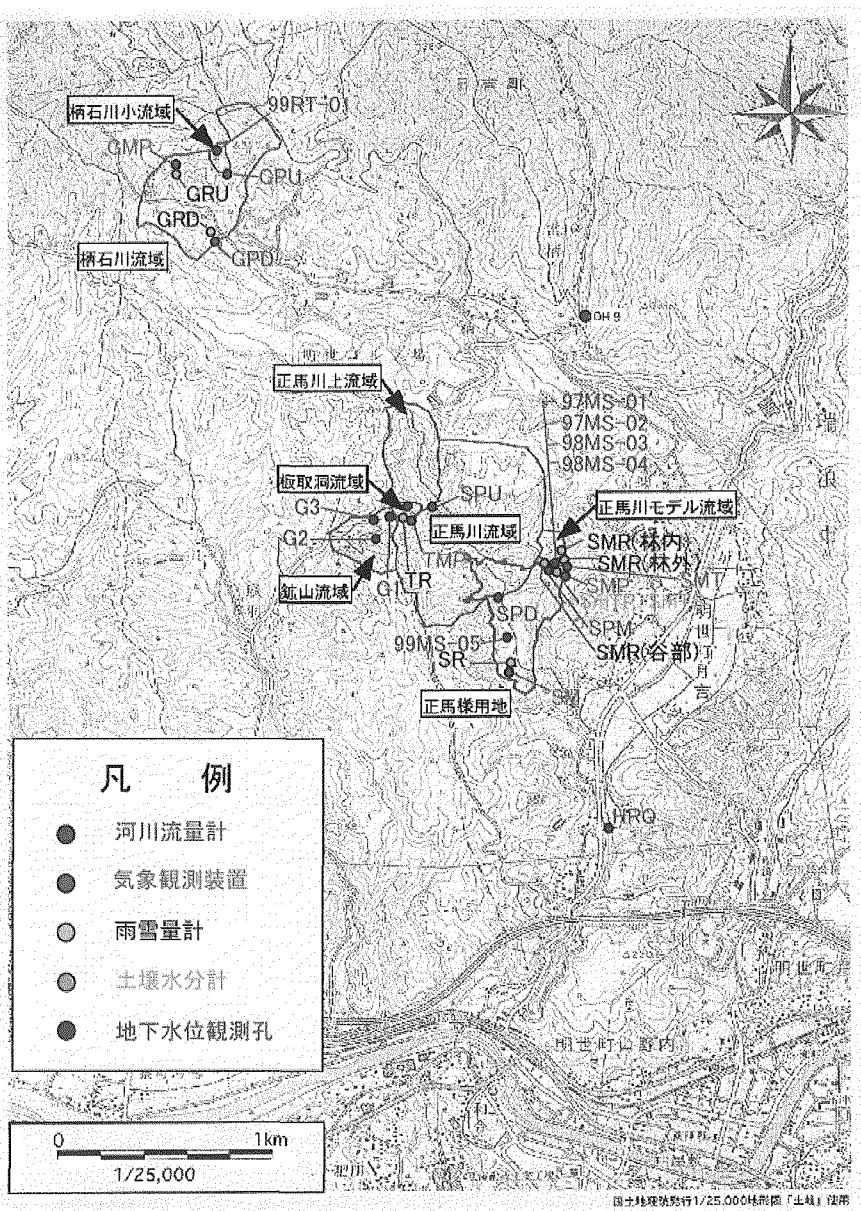


図 4.5.1　観測地点位置図

4.5.2 降水量記録および蒸発散量記録

図 4.5.2 に正馬様流域雨雪量計および東濃鉱山流域での蒸発散量推定値（ペンマン法）の 1999 年度～2003 年度の観測値を示す。

蒸発散量，雨雪量とも季節変動が認められる。しかし，雨雪量は年ごとに大きな違いがあるが，蒸発散量については年ごとの大きな違いは認められない。

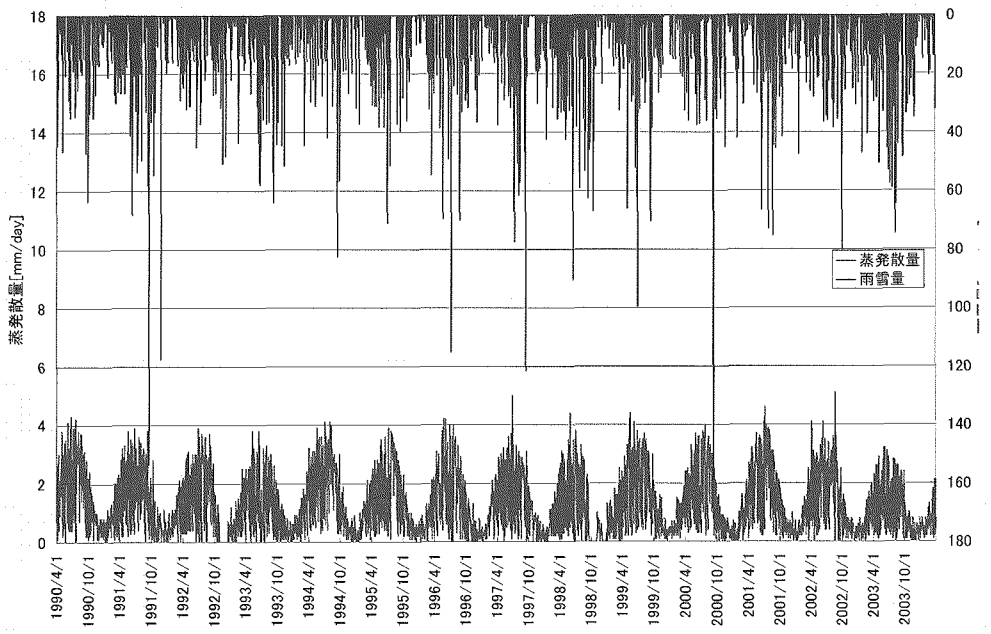


図 4.5.2　雨雪量および蒸発散量観測値

4.5.3 河川流量観測値

図 4.5.3 に正馬川流域の河川流量および正馬川流域の 1999 年度～2003 年度の雨雪量観測値を示す。河川流量も雨雪量・蒸発散量と同様に 1990 年度から継続してデータが取得されている。

図 4.5.3 では，雨雪量の増減に応じて河川流量も増減する様子が確認できる。ただし，雨雪量の増減幅が同程度であっても河川流量の増減が同程度になるとは限らない。これは，降雨に伴う地表を流下する流れに対して地下浸透した水分の流出が遅延すること（土壌中の水分の保水）などが影響しているためではないかと考えられる。このため，降雨/非降雨の継続時間が河川流量に影響を与えていると考えられる。

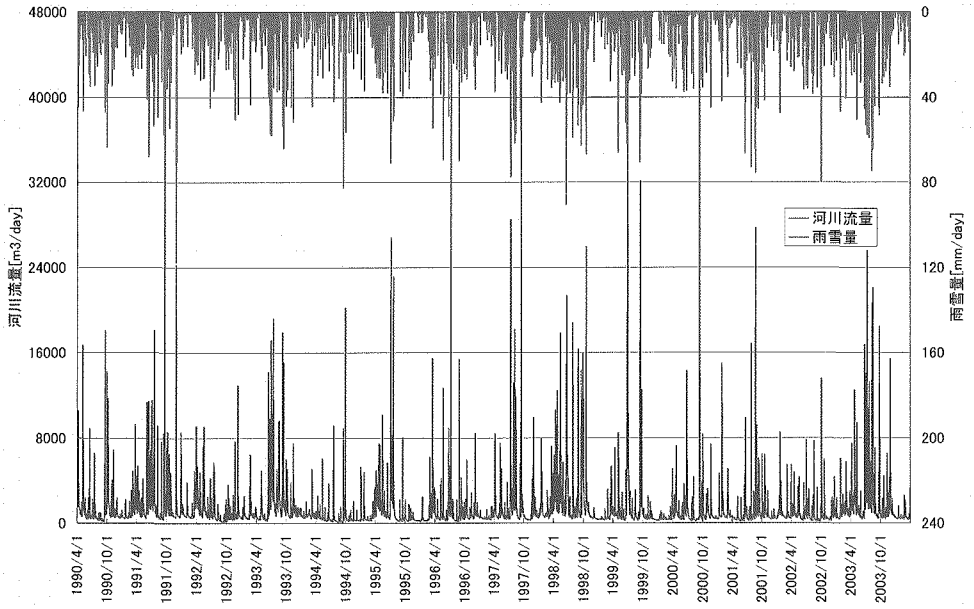


図 4.5.3　河川流量および雨雪量観測値

4.5.4 河川流量値の補完

日吉川河川流量は 2003 年度から計測開始されており，1990～2002 年度の河川流量データは存在しない。また，河川流量は全てのポイントで全年度計測されておらず，年度によてはデータが存在しないものがある。

ここでは，データが存在する年度の各河川流量と正馬川コミュニティー雨雪量計による降雨量観測値との相関を用い，データが存在しない年度の河川流量を補完した。

図 4.5.4 に正馬川流域（SPD），正馬川上流域（SPU），正馬川モデル流域（SPM），東濃鉱山流域，板取洞流域，柄石川流域（GPD），柄石川小流域（GPU）の観測河川流量と正馬様コミュニティー雨雪量計観測値の関係を示す。

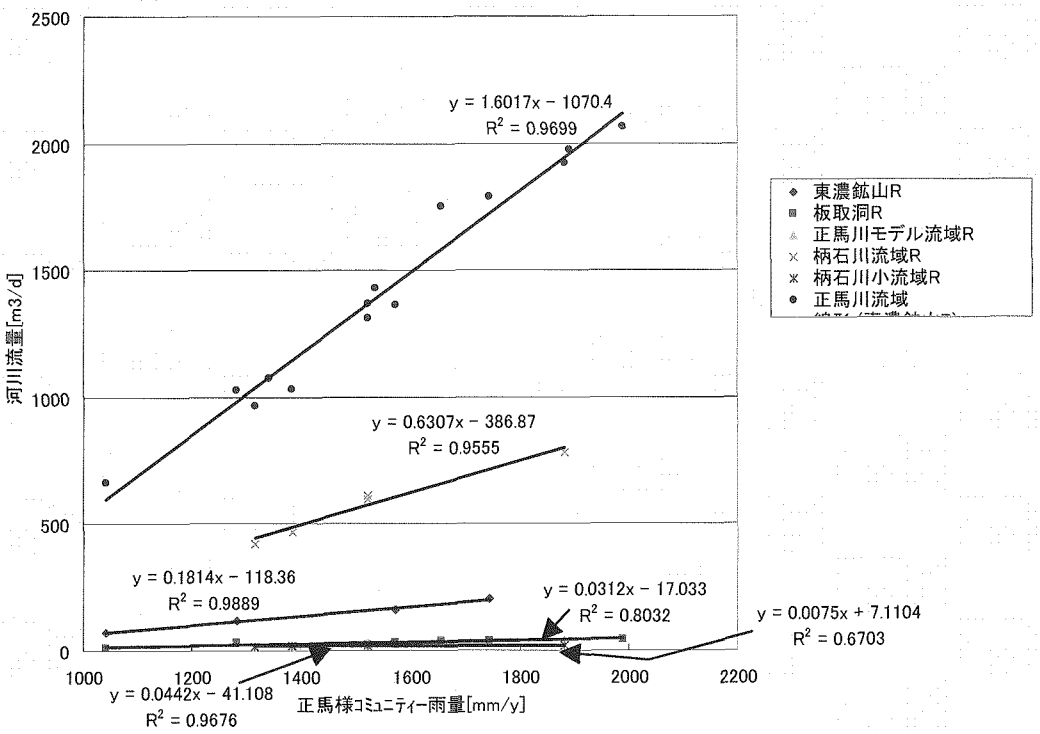


図 4.5.4　各河川流量と雨雪量の関係

各河川流量 y と雨雪量 x との相関式は以下の通りである。

正馬川流域	: y=1.6017x-1070.4（R^2=0.9699）
正馬川モデル流域	: y=0.0442x-41.108（R^2=0.9676）
板取洞流域	: y=0.0075x+7.1104（R^2=0.6703）
東濃鉱山流域	: y=0.1814x-118.36（R^2=0.9889）
柄石川流域	: y=0.6307x-386.87（R^2=0.9555）
柄石川小流域	: y=0.0075x+7.1104（R^2=0.6703）

この相関式を用い，データ欠測年度の河川流量を補完した（表 4.5.1）。表中の赤字が補完値である。

表 4.5.1　各河川流量（補完後）

	1990年度	1991年度	1992年度	1993年度	1994年度	1995年度	1996年度	1997年度	1998年度	1999年度	2000年度	2001年度	2002年度	2003年度	平均値
正馬川流域SPD	1428	1974	1075	1753	663	1366	1026	1788	2066	1366	1314	1031	965	1920	1410
正馬川上流域SPU	281	398	237	342	165	312	230	406	455	316	279	233	201	424	306
正馬川下流域	1148	1577	838	1411	498	1054	795	1382	1611	1050	1035	798	764	1495	1104
板取洞流域	*31*	*42*	*25*	37	11	32	32	37	44	25	*30*	*26*	*24*	*42*	31
東濃鉱山流域	*160*	212	*125*	*182*	70	159	118	203	*242*	*158*	*158*	*133*	*121*	*223*	162
正馬川モデル流域	*27*	*42*	*18*	*32*	*5*	*28*	*16*	*36*	*47*	29	25	19	17	41	27
柄石川流域	*581*	*805*	*459*	*657*	*270*	*605*	*423*	*712*	*868*	596	613	468	419	779	590
柄石川小流域GPU	*19*	*21*	*17*	*20*	*15*	*19*	*17*	*20*	*22*	19	20	17	16	21	19

表 4.5.2　日吉川河川流量（補完後）

		1990年度	1991年度	1992年度	1993年度	1994年度	1995年度	1996年度	1997年度	1998年度	1999年度	2000年度	2001年度	2002年度	2003年度
日吉川河川流量	流量/平均流量	*0.99*	*1.36*	*0.78*	*1.11*	*0.46*	*1.03*	*0.72*	*1.21*	*1.47*	*0.97*	*0.97*	*0.82*	*0.75*	1.22
	流量[m3/d]	*67778*	*93892*	*53606*	*76666*	*31589*	*70637*	*49374*	*83067*	*101185*	*66797*	*66823*	*56684*	*51799*	83623

各年度の上記各河川流量を 1990 年度～2003 年度の平均値で割ったものをｙ軸，各年度の雨雪量を 1990 年度～2003 年度の平均値で割ったものを x 軸にとり，プロットすると**図 4.5.5** のようになる。

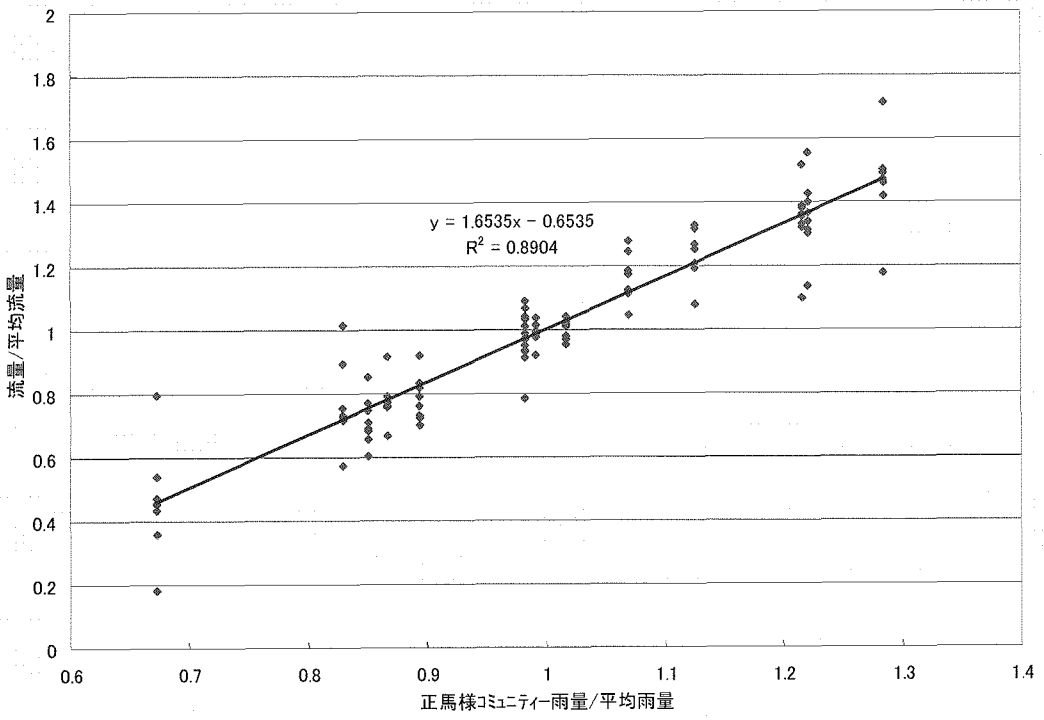


図 4.5.5　正規化河川流量と正規化雨量の関係

図中の相関式（y=1.6535x-0.6535）を用い，2003 年度の雨雪量から河川流量/平均流量を求めると 1.22 となる。これから，2003 年度の日吉川河川流量平均値（83623m^3/day）を用いて日吉川流量の平年値を推測すると 83623÷1.22=68543（m^3/day）となる。初期化シミュレーション（次節）において，等価粗度係数の調整に用いた日吉川河川流量の平均値はこの値を用いた。

なお，上記相関式から 1990 年度～2002 年度の日吉川河川流量を推測すると**表 4.5.2** のようになる。

4.5.5 地下水位観測値

地下水位も 1990 年度からデータが蓄積されている。**図 4.5.6** に 1999 年度～2003 年度の地下水位観測結果を示す。途切れている所はデータが欠損している所あるいは異常値である。

地下水位は GF-1, GU-3 観測孔を除いて季節変動は大きくなく，年間を通じてほぼ一定の地下水位を保っている。

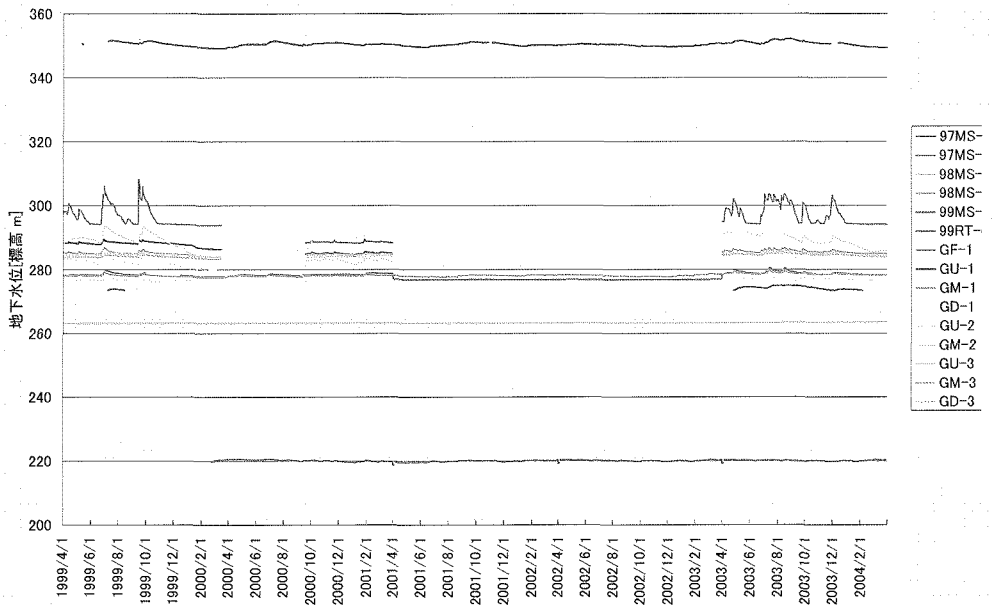


図 4.5.6　地下水位観測結果

4.6 初期化シミュレーション

本研究では地表流と地下水流動の統合解析を実施する。この統合解析では，日平均の降雨量，蒸発散量を与える非定常解析を実施する前に，初期状態として平常時の河川系が発達している様子を再現する必要がある。初期化シミュレーションは，平常時の河川系を再現することを目的とした予備解析である。

降水量，蒸発散量の過去の観測データの平均値（年平均値）を用い，解析における河川流量が観測から得られる河川流量平均値（年平均値）と整合するよう，モデルを校正する。ここでは，整合の対象として日吉川河川流量と正馬川河川流量を用いた。

4.6.1 入力パラメータの設定

表層水理観測による東濃地域の降雨量および蒸発散量の年平均値は 4.2mm/day，1.5mm/day である。ここでは平均降雨量をモデルの地上層に与え，平均蒸発散量をモデルの地下第１層に与えた（地下第１層から 1.5mm/day の生産量を与えた）。図 4.6.1 に概念図を示す。

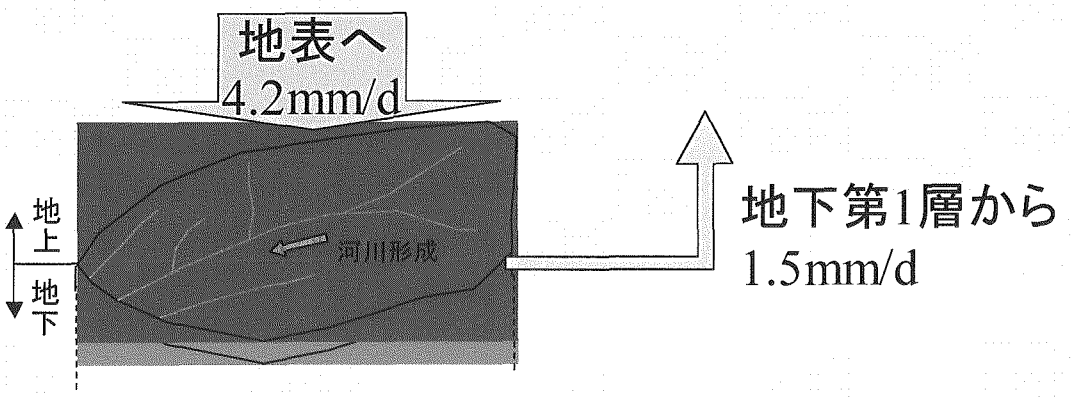


図 4.6.1 初期化シミュレーションにおける上部境界条件概念図

4.6.2 河川流量の変化

図 4.6.2，図 4.6.3，図 4.6.4 に初期化シミュレーション実行時の河川流量（日吉川）の変化を示す。

日吉川の河川流量がほぼ一定となった時点で定常に達したと判断し，解析を終了した。実際には観測河川流量と整合するよう試行錯誤的に等価粗度係数を調整し，調整する度にシミュレーションを実施しているので，各ケースとも複数回の解析を実施している。図 4.6.2，図 4.6.3，図 4.6.4 に示すグラフは，最終調整後の解析結果である。

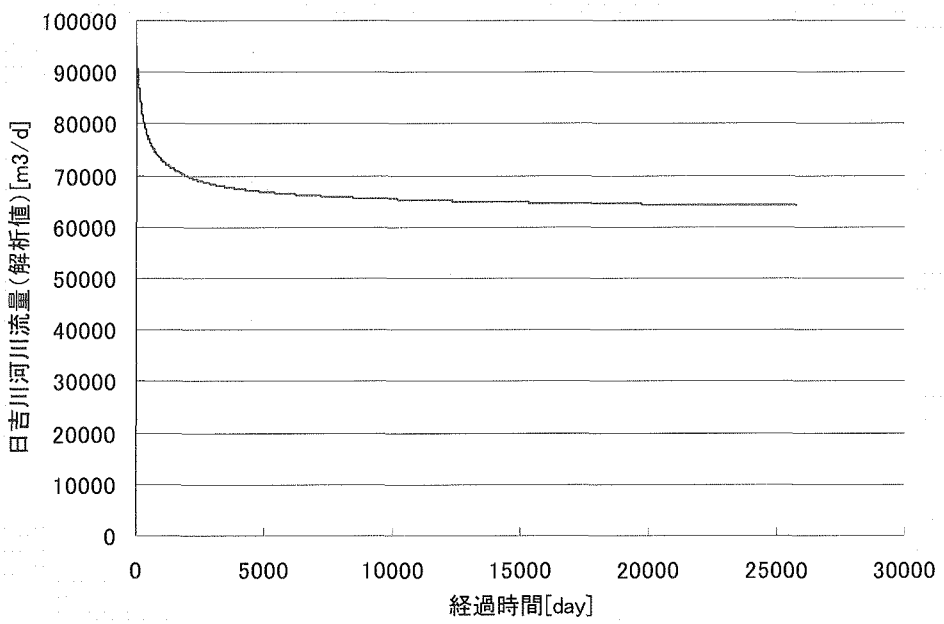


図 4.6.2　予備解析進行状況（ケース１）

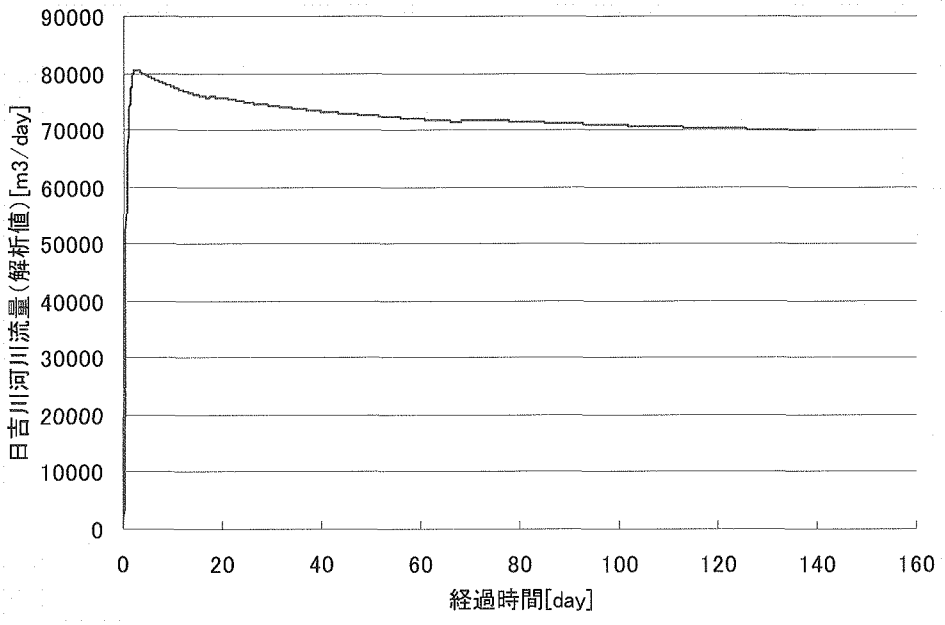


図 4.6.3 予備解析進行状況（ケース２）

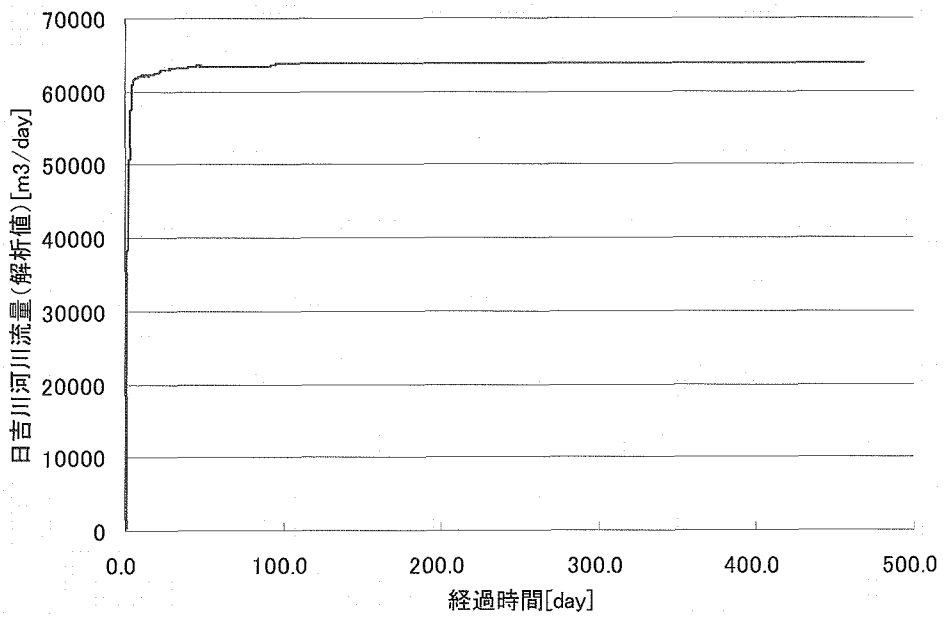


図 4.6.4　予備解析進行状況（ケース３）

4.6.3 調整後の粗度係数

表 4.6.1 地表面粗度係数調整後の解析結果（河川流量）と観測値との比較を，表 4.6.2 に調整後の地表面等価粗度係数を示す。また，河川流量の観測値と解析値の比較図を図 4.6.5 に示す。

表 4.6.1　観測値と予備解析結果の比較（河川流量）

	流域面積 [km2]	観測値 [m3/d]	case1	case2	case3
正馬川流域	0.535	1410	1524	1568	1410
正馬川上流域	0.155	306	234	218	174
正馬川モデル流域	0.015	27	18	8	2
柄石川流域	0.233	590	364	343	251
柄石川小流域	0.010	19	26	9	2
板取洞流域	0.012	31	22	6	1
日吉川流域	23.900	68543	64156	69908	63848

表 4.6.2　地表面粗度係数（調整後）

土地利用区分	地表面粗度係数	
	ケース１	ケース２，３
農地	0.195	3.90
市街地	0.098	1.95
森林	0.488	9.76
ゴルフ場	0.292	5.86
河川	0.039	0.78

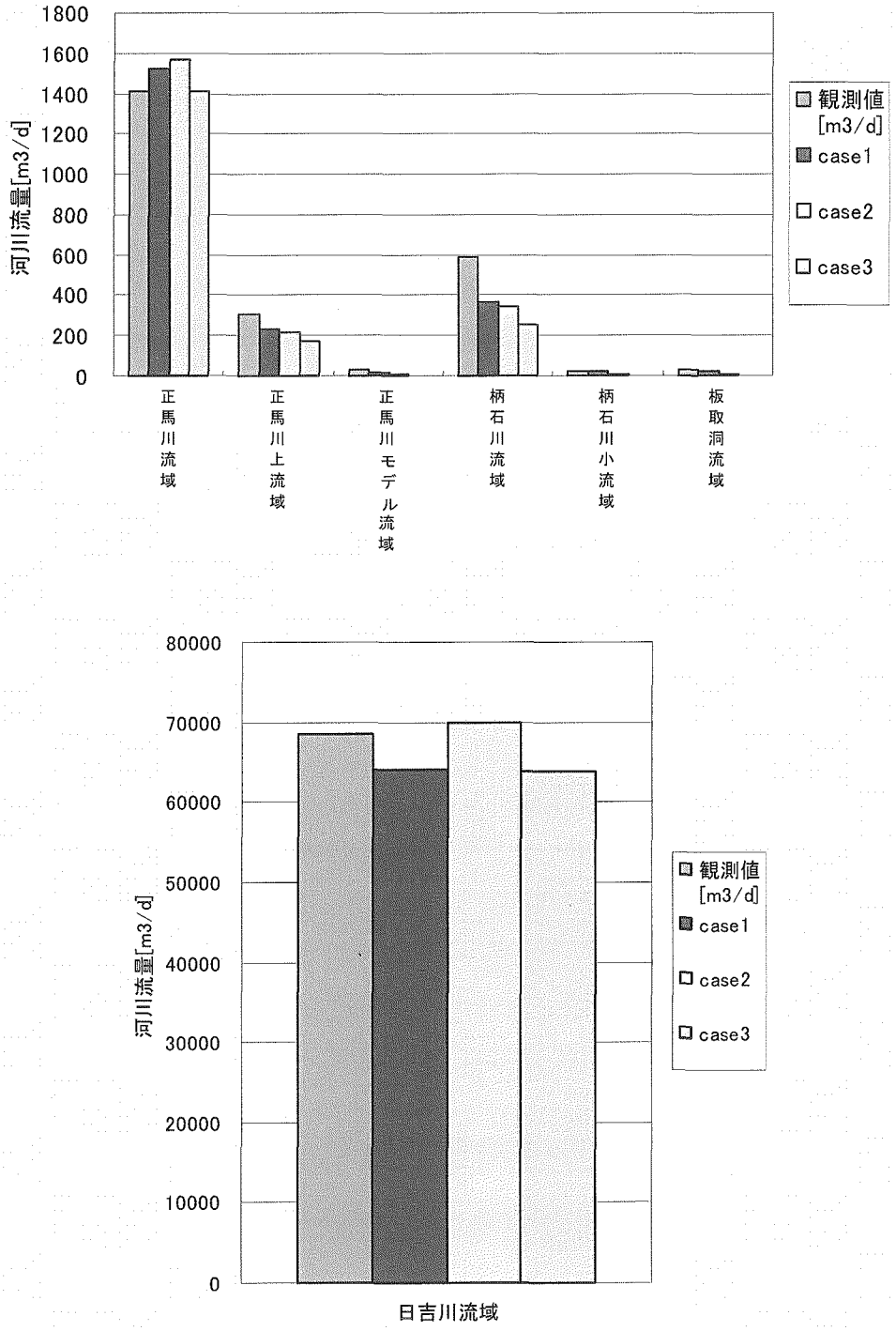


図 4.6.5　河川流量観測値と解析値の比較

正馬川流域河川流量および日吉川流域河川流量が観測値と整合するように地表面等価粗度係数を調整しており，この２つの流域の河川流量に関しては概ね観測値と解析値を整合させることができた。

4.6.4 河川系の発達

初期化シミュレーション結果における地表面水位分布を図 4.6.6 に示す。

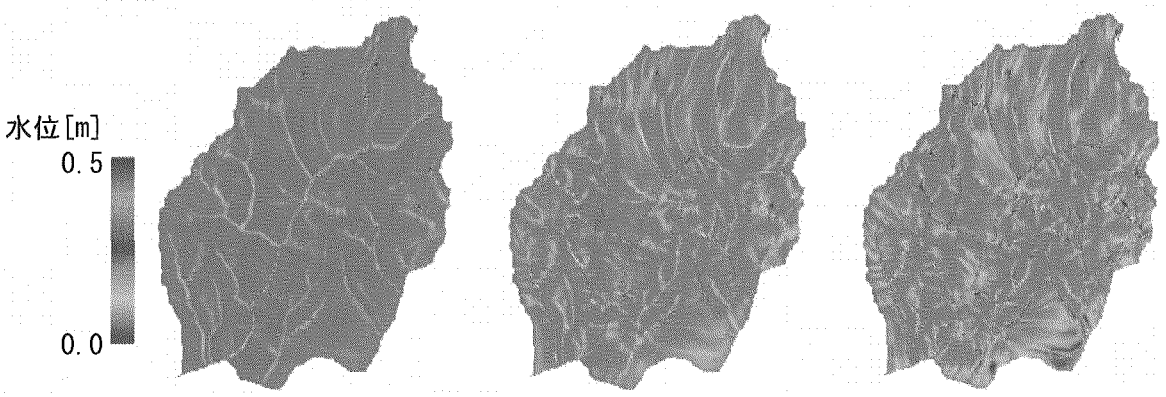


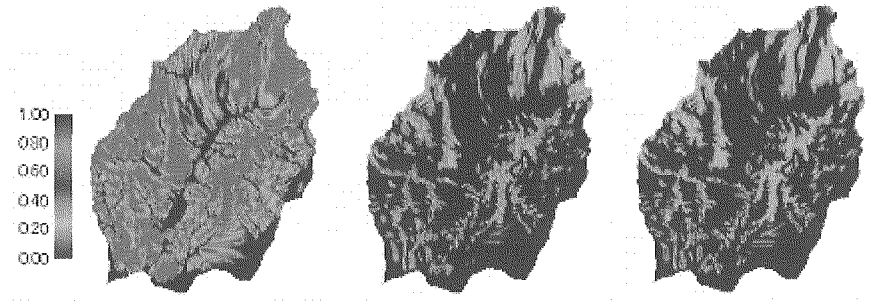
図 4.6.6　地表面水位分布（左：Case1，中：Case2，右：Case3）

各ケースとも日吉川河川流量および正馬川河川流量を観測値と整合させた後の結果である。

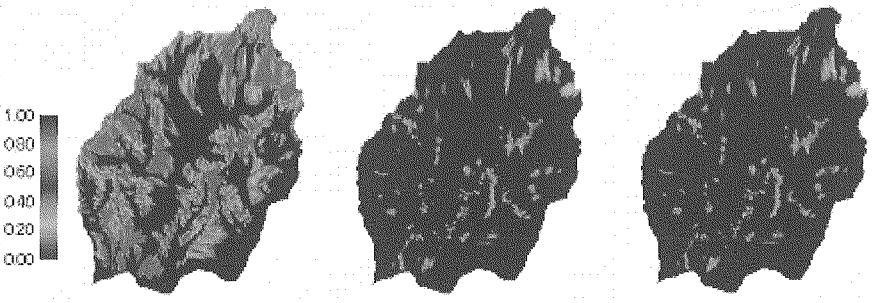
地表面水位分布は土壌の物性を変化させた各ケースにより異なる状態を呈す。このことから，河川系の発達をシミュレートする際は，土壌の物性が大きな影響を持つと言える。

4.6.5 水飽和度

図 4.6.7 に水飽和度を示す。



(a)深度 2m



(b)深度 15m



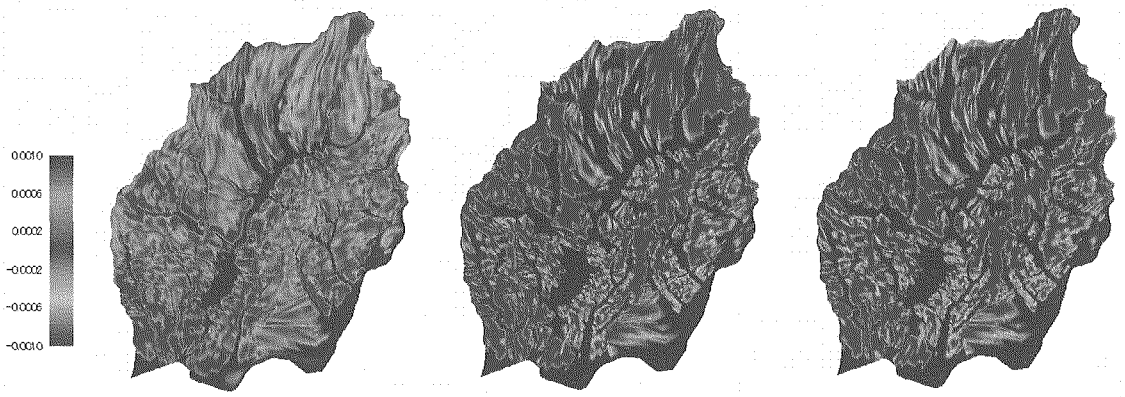
(c)深度 40m

図 4.6.7　水飽和度分布
（左：Case1，中：Case2，右：Case3）

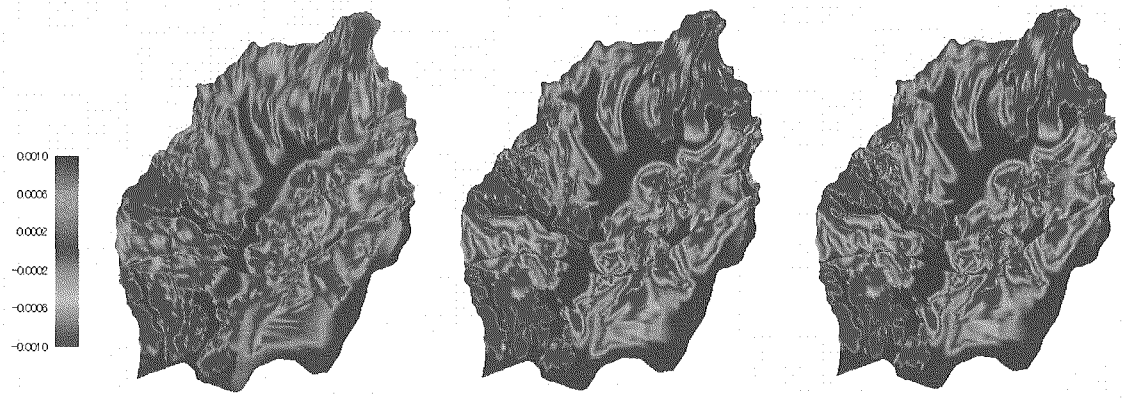
Case2 および Case3 では表層土壌に設定した高い透水性の影響により，地下への浸透量が増加し，浅部地下の飽和度が Case1 より高くなっている。また，その傾向は深度が浅い部分で顕著であり，深度 40m ほどではどのケースもほぼ水で飽和されている。

4.6.6 鉛直フラックス分布

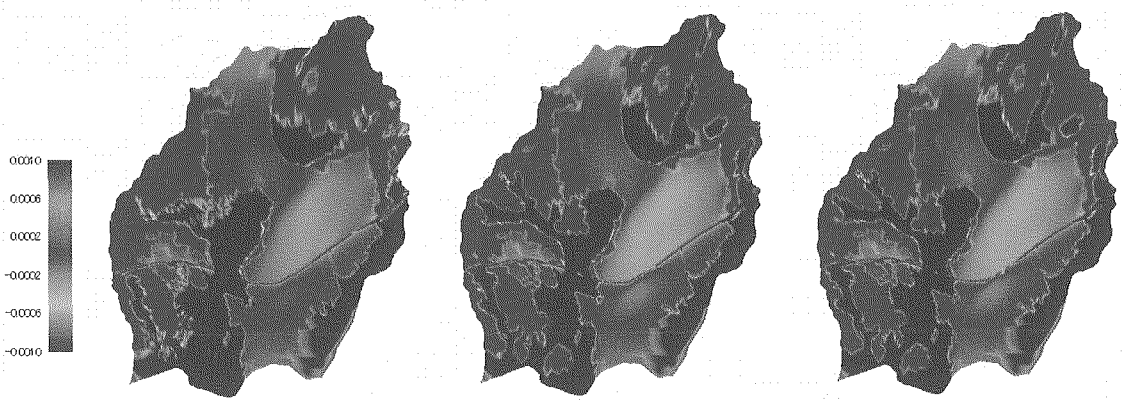
初期化シミュレーション結果から鉛直フラックスを求めた。図 4.6.8 に鉛直フラックス分布図を示す。



(a)深度 2m



(b)深度 15m



(c)深度 40m

図 4.6.8 鉛直フラックス分布

（左：Case1，中：Case2，右：Case3）

水飽和度と同様に，表層に設定した高透水土壌の影響で浅部地下において Case2, Case3 において下向き流量が増加している。深度 40m 程度ではどのケースもほぼ同一となり，表層土壌による鉛直フラックスへの影響範囲は深度 40m 程度までの浅部地下である。

4.6.7 地下水位

図 4.6.9 に地下水位観測孔の位置図を示す。**表 4.6.3**，**図 4.6.10** に各観測孔における地下水面標高の観測値と解析値の比較を示す。

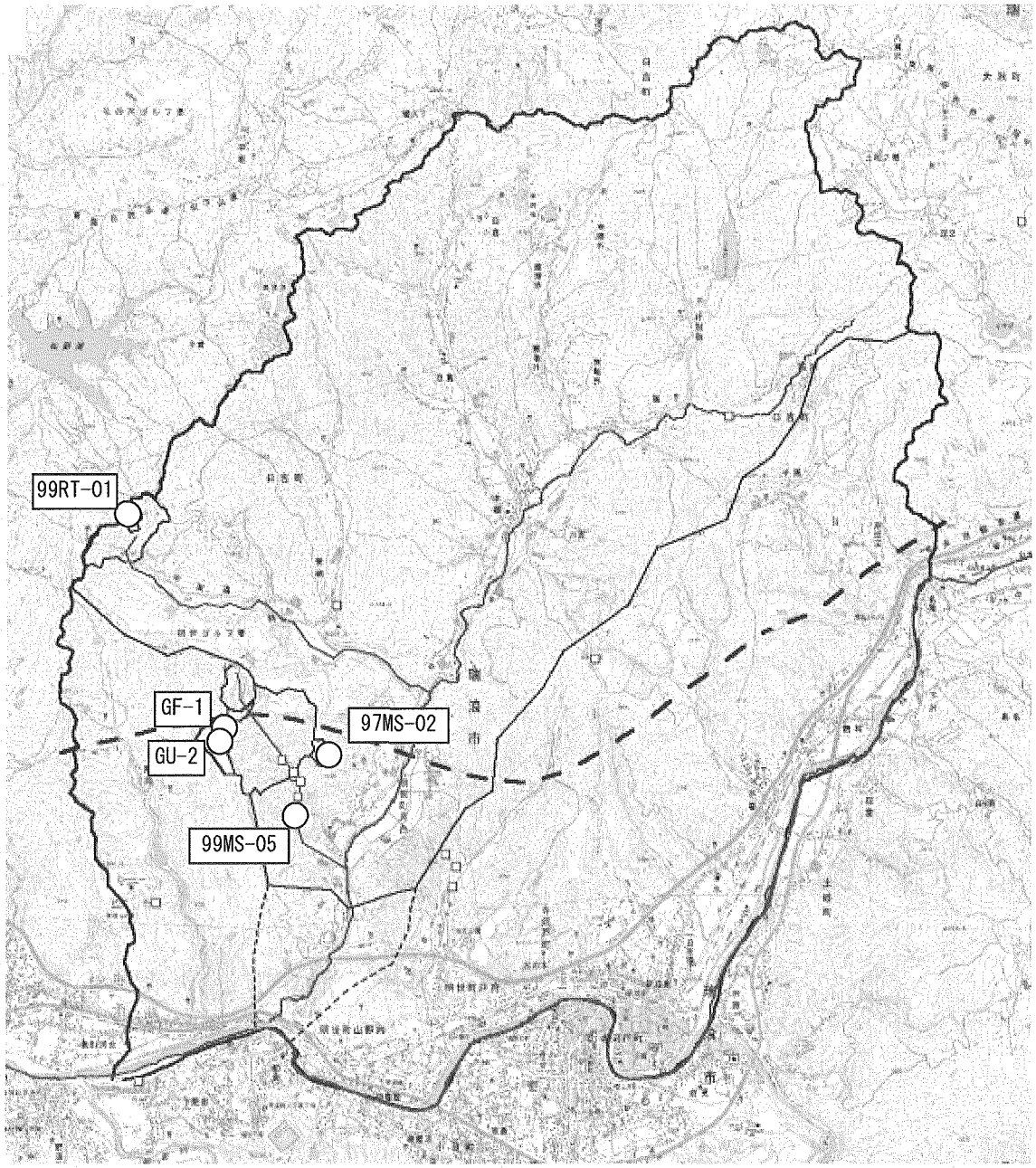


図 4.6.9　地下水位観測孔位置図

表 4.6.3　観測値と解析値の比較（地下水面標高）

観測孔名		観測値	case1	case2	case3
東濃鉱山流域	GF-1	297.06	284.32	293.82	293.82
	GU-2	277.21	280.89	295.19	295.44
正馬川モデル流域	97MS-02	278.01	275.9	280.7	281
	99MS-05	220.03	228.57	247.07	247.82
柄石川流域	99RT-01	350.40	337.97	356.37	357.32

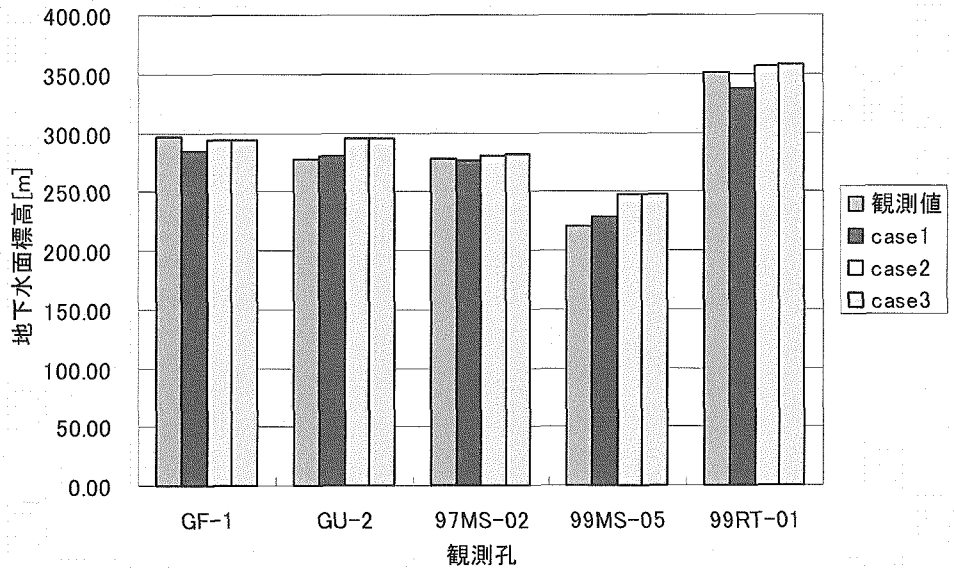


図 4.6.10　地下水面深度観測値と解析値の比較

解析における地下水面標高は，観測孔のストレーナ深度における水頭値を用いている。

地下水位観測孔における地下水位は，観測値と解析値で概ね整合している。

4.7 予備解析モデルの信頼性に関する考察

4.7.1 河川流量（年平均値）

河川流量の観測値と解析値は表 4.6.1 に示す通りである。

日吉川流域河川流量および正馬川流域河川流量はどのケースもほぼ観測値と整合した結果が得られた。その他の流域はオーダーは合っていると言えるが，絶対値は整合していない。流域ごとに等価粗度係数を調整するなどの方策により河川流量をマッチングさせることはできるが，正馬川モデル流域や板取洞流域などの極小流域における表層水循環現象が全体の水循環系に与える影響は相対的に小さいと思われ，どの程度厳密にマッチングすべきかについては検討の余地がある。

4.7.2 地下水位

地下水位は概ね観測値と解析値は整合している。従って，地下水位については現象をよく表しているものと考えられる。

4.7.3 地下水頭分布

図 4.7.1 に主要な地下水頭（間隙水圧）観測孔の位置図を示す。

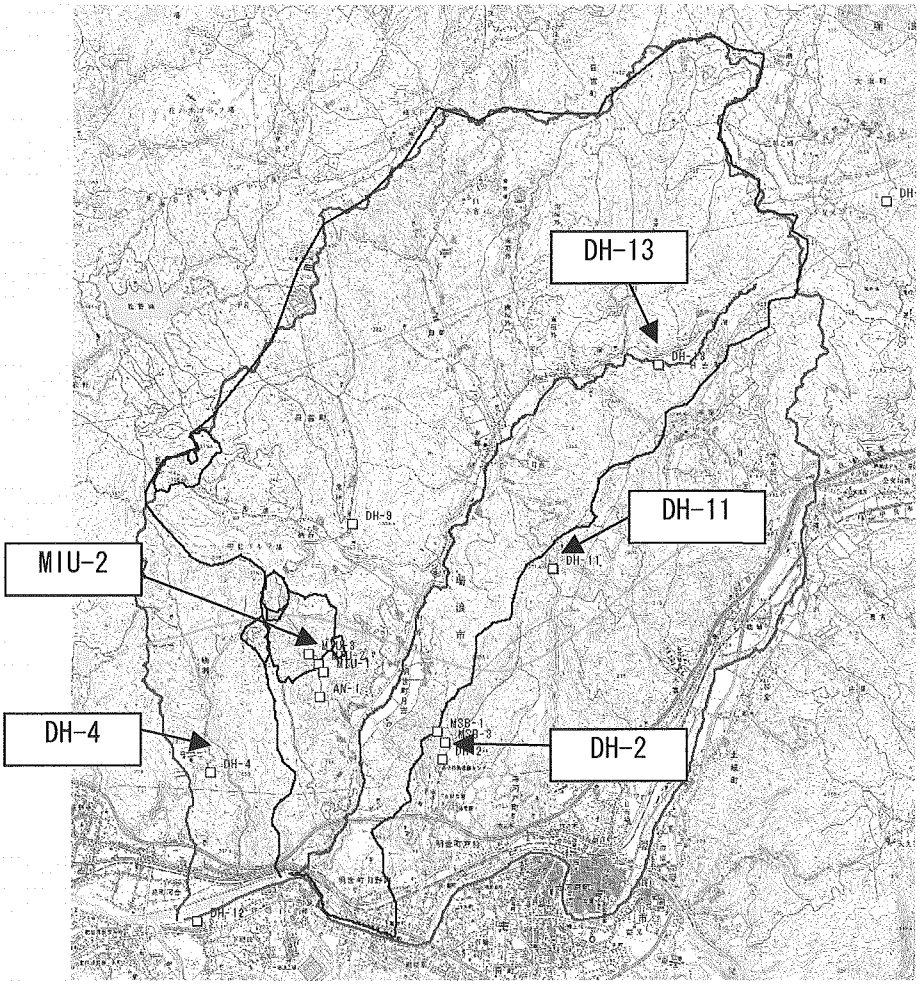


図 4.7.1　地下水頭観測孔位置図

図 4.7.2 に，上記の各観測孔における水頭分布の観測値と解析値の比較を示す。

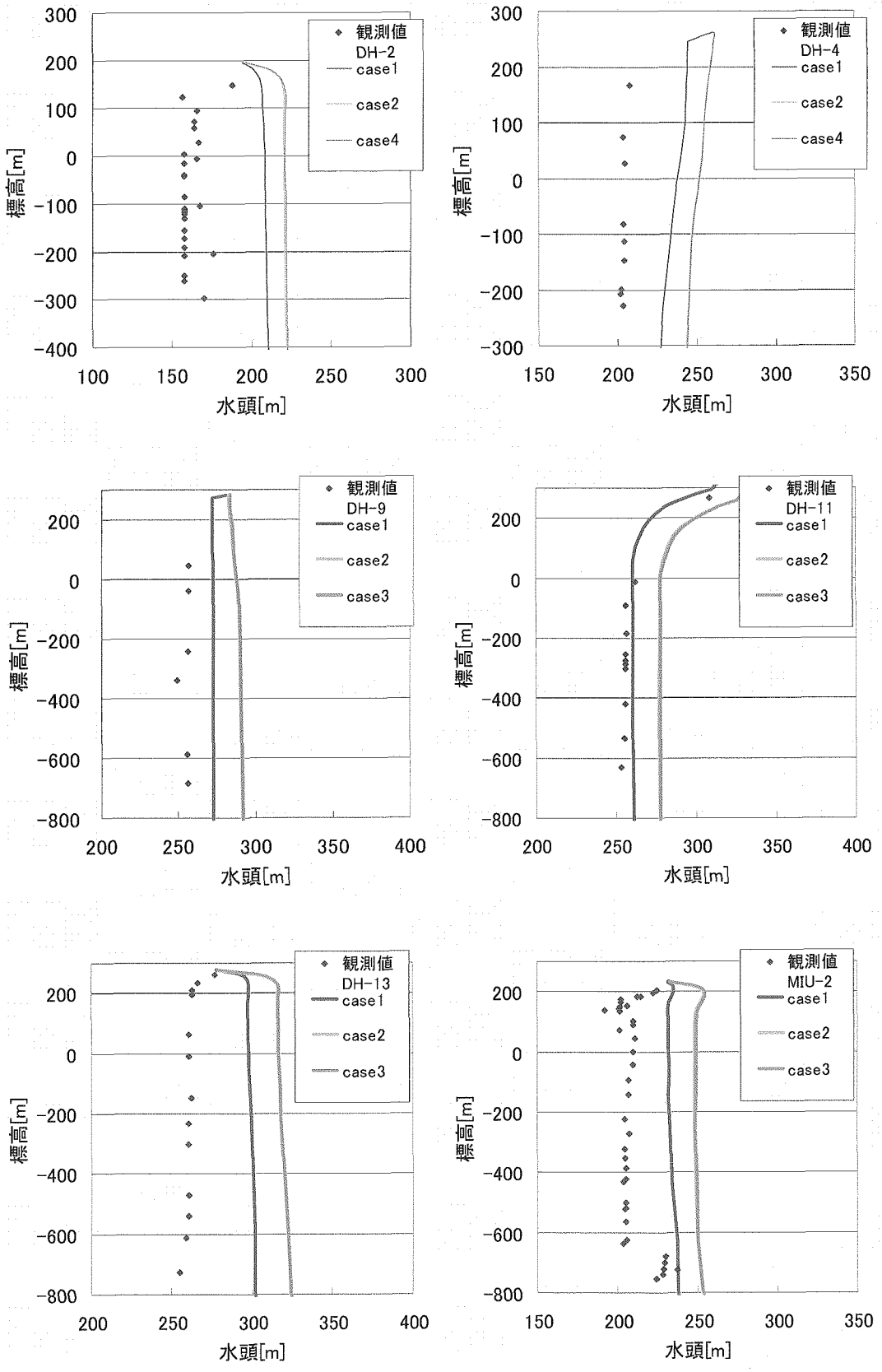


図 4.7.2　地下水頭観測値と解析値の比較

DH-11 は実測と解析は概ね整合している。

DH-2，DH-9 では深部において静水圧の傾向を示す点では整合しているが，解析値のほうが 30～80m ほど高い水頭を示す。

DH-4 では観測値からは若干の涵養傾向が見られるが，解析ではその傾向が強く出ている。また，水頭値も 30～50m ほど解析値が高い。

MIU-2 では月吉断層の遮水性に伴う水頭のジャンプが解析ではみられない。また，ここでも解析の水頭値が 30～50m ほど高い。

DH-13 では観測では涵養傾向だが，解析では流出傾向となり，整合していない。

全体的にみて解析値は実測値よりも高い水頭値を示す。この原因として，解析において深部岩盤へ浸透する水量が実際よりも大きな量となっている可能性が考えられる。

このことから，モデル化領域内の等価粗度係数や，土壌の物性をよりフレキシブルに調整し，実測値との整合を取る必要がある。また，DH-11 では地下水頭分布の傾向が良く合っていることから，DH-11 付近とそれ以外の領域で浅部の地下構造について差異があること（DH-11 以外の領域において，地表面からの鉛直方向の水の浸透を遮断するような地質構造，例えば低透水の粘土層など）も考慮する必要がある。

4.7.4 岩盤浸透量

解析結果から得られる鉛直フラックス分布から，各観測流域内の涵養量を求めた。**表 4.7.1** に解析結果から得られる地表層から深度４ｍの鉛直フラックス平均値と観測から推定される涵養量の比較を示す。なお，下向きが正（涵養），上向きが負（流出）である。なお，解析結果の鉛直フラックスは m3/day の単位であるので，各格子の xy 平面の面積で除した値(m/day)を算出し，各流域内に含まれる格子の総数で割った平均を mm/y に変換して表示している。

case2 の深度 2m における鉛直フラックスと涵養量観測値（推定値）が解析ケースの中では最も整合的であるが充分ではない。流域が小さいほど整合がとれていない傾向にあるが，これは，地表面分割格子が各流域の形状と乖離していることなどが原因として考えられる。また，小流域ではその領域内に該当する格子数が少ないため，モデル領域全体の粗度係数を一様にｎ倍して調整する手法では誤差が大きくでるものと思われる。各流域ごとに粗度係数を調整すれば，各流域ごとに解析値と観測値の整合を取ることは可能である。

表 4.7.2 に 1990 年度～2003 年度の表層水理観測データおよび涵養量の推定値を示す。涵養量観測値は年度によって大きく変動し，流域全体で涵養傾向になる場合もあれば，流出傾向になる場合もある。従って涵養量については，各年度の降雨量，蒸発散量に応じて個別に検討する方が良いと考えられる。

表 4.7.1　各流域の涵養量と鉛直フラックス平均値の比較（mm/y）

	正馬川流域			正馬川上流域			正馬川モデル流域		
	case1	case2	case3	case1	case2	case3	case1	case2	case3
地表層	0.6	5.6	−7.1	0.0	1.2	−1.9	0.0	−1.1	0.9
深度0.5m	5.8	6.3	−8.5	0.2	3.6	−3.9	−0.1	−0.9	1.9
深度2m	2.8	23.2	−1.1	0.0	8.1	0.5	0.0	−1.8	1.6
深度4m	2.5	8.0	−8.3	0.0	0.5	0.5	0.0	−1.0	1.9
観測値	61.00			303.00			358.00		

	板取洞流域			柄石川流域			柄石川小流域		
	case1	case2	case3	case1	case2	case3	case1	case2	case3
地表層	0.0	−0.5	−0.1	−0.1	5.4	−1.7	0.0	5.4	0.3
深度0.5m	−0.5	2.3	−1.5	−2.7	6.9	−63.9	0.0	6.9	0.6
深度2m	−1.4	8.4	−2.2	−3.4	142.8	−54.7	0.0	142.8	0.7
深度4m	−1.4	−6.8	−10.5	−3.5	51.7	−53.8	0.0	51.7	0.9
観測値	72.00			99.00			340.00		

表 4.7.2　各流域の表層水理観測データと涵養量推定値(mm/y)

観測年度		1990年度	1991年度	1992年度	1993年度	1994年度	1995年度	1996年度	1997年度	1998年度	1999年度	2000年度	2001年度	2002年度
Py	正馬様コミュニティー雨雪量計	1535	1890	1342	1655	1042	1573	1284	1743	1989	1521	1522	1384	1317
	東濃鉱山雨雪量計	1528	1814	1178	1616	1030	1446	1315	1870	2093	1640	1377	1391	1373
	正馬川モデル流域尾根部雨雪量計	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1498	1459	849	1415
	柄石川尾根部雨雪量計	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1404	1433	1488	1423
	柄石川谷部雨雪量計	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1407	1759	1322	1340
Ey	東濃鉱山気象観測装置	562	515	592	478	550	484	513	486	532	502	477	515	627
	柄石川気象観測装置	562	515	592	478	550	484	513	486	532	579	618	643	627
Ry	正馬川流域SPD	975	1347	734	1196	453	932	700	1220	1410	932	896	703	658
	正馬川上流域SPU	662	937	557	805	389	734	543	957	1072	745	658	548	473
	正馬川下流域	1102	1514	805	1356	478	1012	764	1328	1547	1009	994	766	734
	板取洞流域	938	1275	755	1128	339	964	965	1136	1348	746	926	795	732
	東濃鉱山流域	942	1249	736	1071	413	934	695	1193	1428	928	928	781	710
	正馬川モデル流域	650	1032	443	780	120	692	381	874	1139	710	606	466	402
	柄石川流域	910	1261	719	1030	423	948	663	1116	1359	933	960	733	657
	柄石川小流域GPU	680	777	627	713	545	690	611	737	804	676	745	629	582
	日吉川	1035	1434	819	1171	482	1079	754	1269	1545	1020	1021	866	791
G	正馬川流域SPD	−2	28	16	−18	40	158	71	36	47	86	148	165	31
	正馬川上流域SPU	311	438	192	372	103	355	228	300	385	273	387	320	216
	正馬川下流域	−129	−139	−56	−178	14	77	7	−71	−90	9	51	102	−44
	板取洞流域	35	100	−6	49	153	126	−194	121	109	272	118	73	−42
	東濃鉱山流域	31	126	13	107	79	155	76	63	30	90	116	88	−20
	正馬川モデル流域	323	343	307	398	372	398	390	382	318	308	438	402	288
	柄石川流域	63	114	30	148	69	141	108	141	98	85	84	136	33
	柄石川小流域GPU	293	598	123	465	−53	399	160	520	653	342	299	240	108
	日吉川	−62	−59	−69	7	10	11	17	−12	−88	−2	24	3	−101

赤字は補完値

4.8 非定常解析

4.8.1 入力パラメータの設定

非定常解析を行うにあたり，まず領域全体の河川系発達状況をおおまかに現実とあわせる観点から，日吉川流量を主として解析が自然と整合しているかどうかの判断に用いることとする。従って，日吉川流量の観測値が存在する2003年度の観測データを用いて非定常解析を実施した。モデルに与える入力データは，初期化シミュレーションのときと同様に，降雨量をモデルの地上層に与え，蒸発散量をモデルの地下第1層に与えた。

図 4.8.1 に2003年度の降雨量および蒸発散量観測値を示す。なお，いずれも入力データは日平均値を用いた。

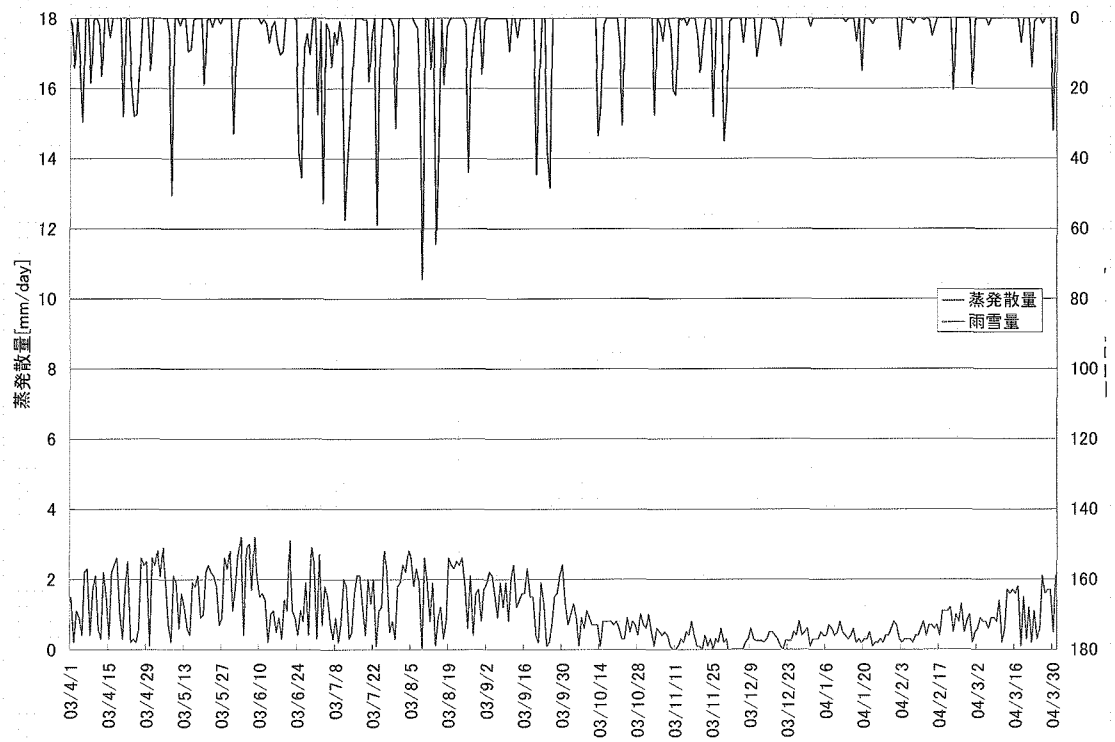


図 4.8.1　2003年度の降雨量，蒸発散量観測データ

4.8.2 解析結果

図 4.8.2～図 4.8.6 に4月～6月初旬までの日吉川流域，正馬川流域，正馬川上流域，柄石川流域，柄石川上流域の河川流量観測値および解析値を示す。

岩盤浸透量（涵養量）の観点からは，河川流量のうち基底流量が特に重要である。これは，降雨に伴う流量の増加は一時的なものであり，岩盤へ浸透する量は一時的にはそれほど大きく増加しないからである。

基底流量は，Case2 および Case3 が日吉川流域，正馬川流域において整合している。正馬川上流域，柄石川流域，柄石川上流域では基底流量はそれほど整合しておらず，今後さらにマッチングする必要がある。

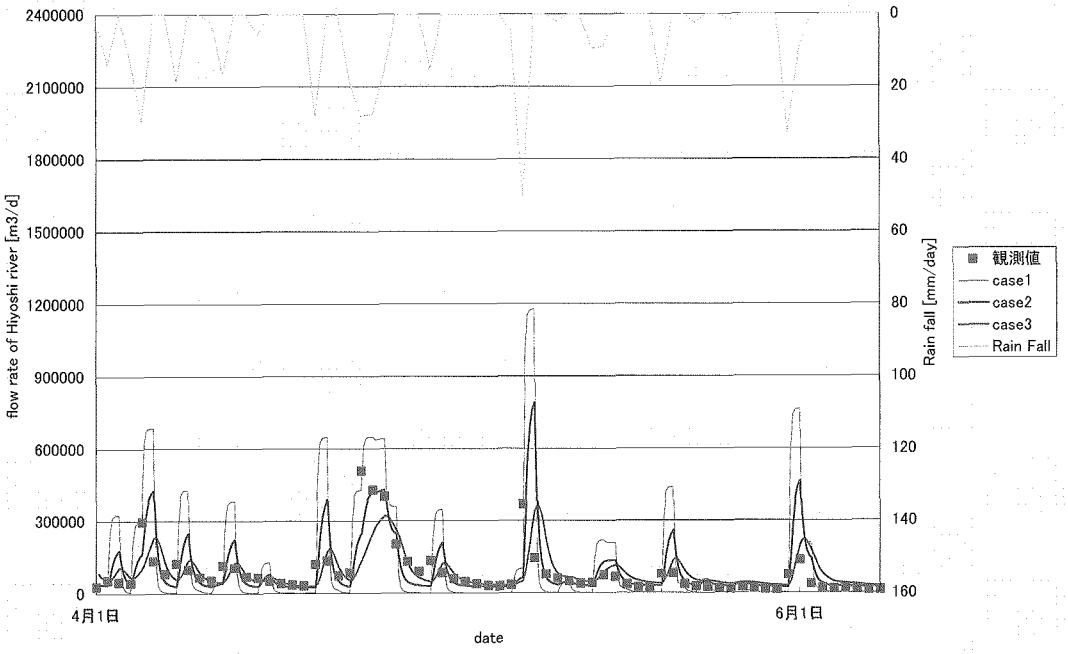


図 4.8.2　日吉川ハイドログラフ

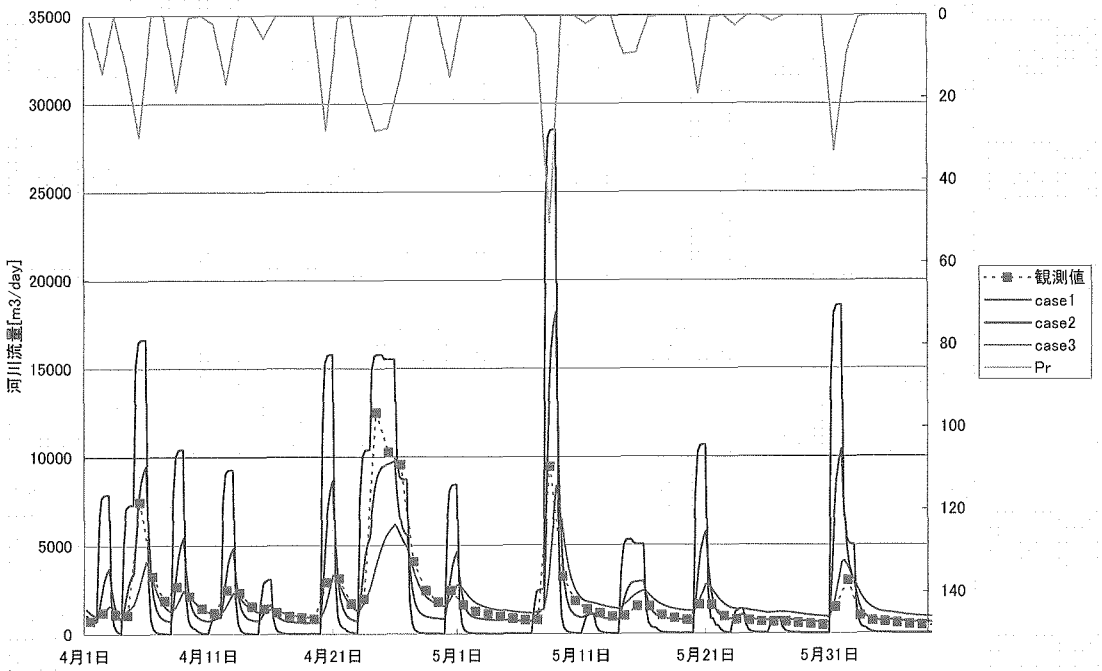


図 4.8.3　正馬川ハイドログラフ

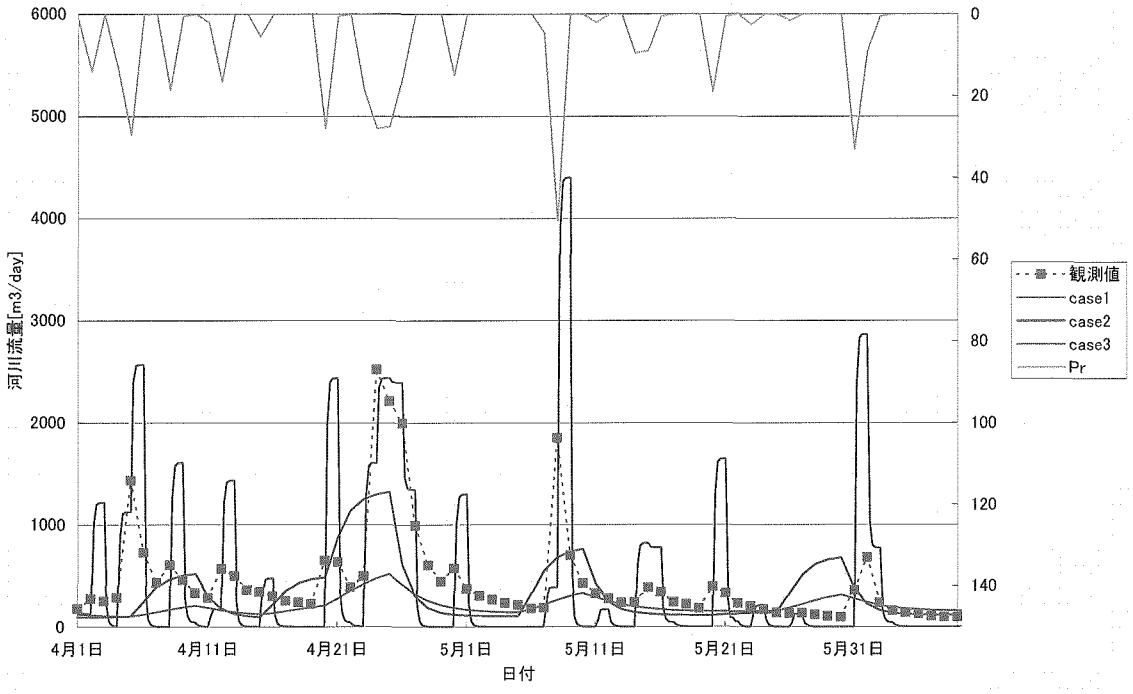


図 4.8.4　正馬川上流域ハイドログラフ

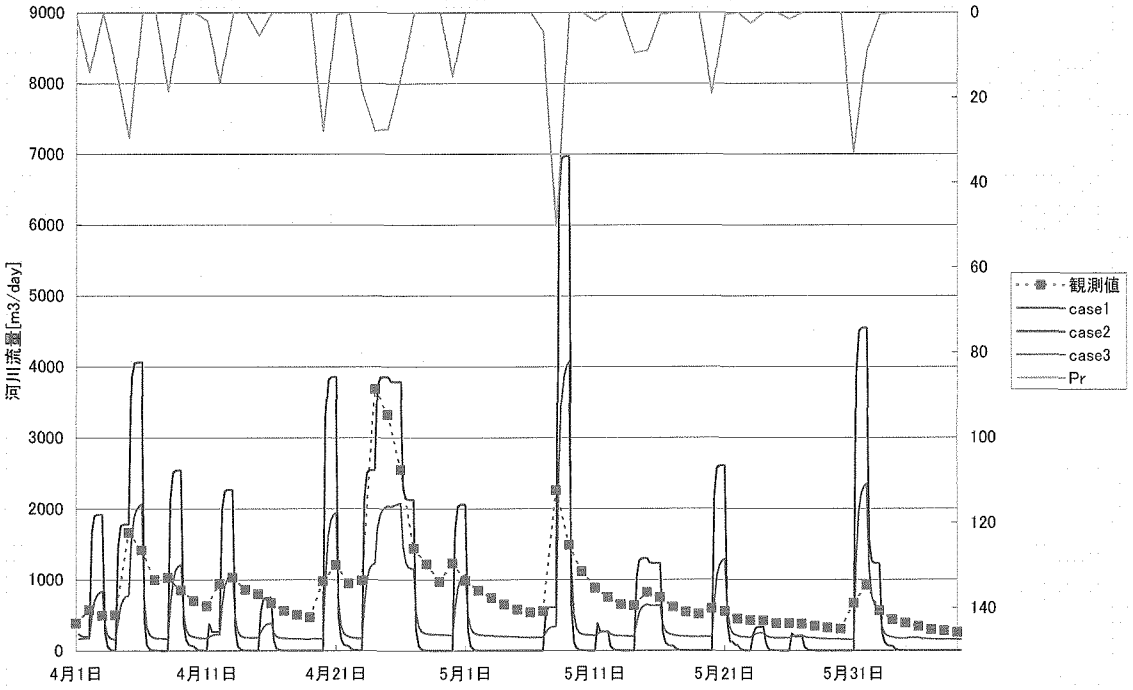


図 4.8.5　柄石川流域ハイドログラフ

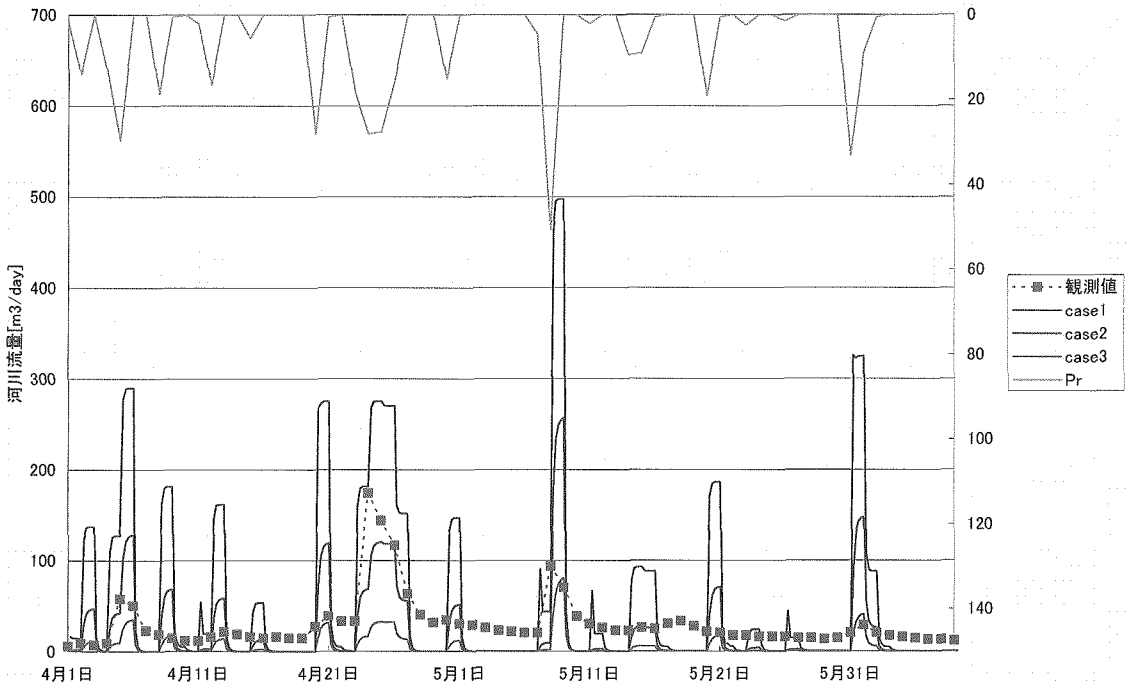


図 4.8.6　柄石川上流域ハイドログラフ

4.9 まとめと今後の課題

地表付近の水文・水理を反映した日吉川流域モデルを作成した。このモデルは，本流域の水の動態を明らかにし，掘削影響評価，埋め戻し後の再冠水評価などに利用できるものと考えられる。

現在までに，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，2003 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。

今後，さらに河川流量観測値や地下水位観測値とのパーフォーマンスマッチングを行うことにより，本流域の水文現象を充分よく説明するモデルの構築を行いたいと考えている。

5. 地下水の地球化学的特性調査に関する研究
（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）

5.1 はじめに

水循環における循環プロセスの研究が最も充実しているのが，山地の森林源流域における降雨一流出プロセスの研究である。この研究では降った降水が，どの様な経路を通り地下に浸透し，またどの様なメカニズムで河川へと流出するのかを現地で詳細に観測することによって解明することをその狙いとしている。対象流域の気象・植生・土壌・地質などの地域的に異なる要因が，降雨流出過程においてどのような役割を果たしているのかを正確に把握することは，山地の地形形成や地形変化要因の解明，斜面崩壊の発生プロセス，さらに山地における地下水涵養・流動の把握につながり，それらは山地防災および水資源的な観点からも重要な研究として位置づけられると共に，地層処分研究の関連としては，風化層での水収支としての降雨一流出プロセスの詳細な実態把握は，岩盤部への地下水涵養量の実態を把握するための基礎的データの提供が期待される。

水分子そのものと行動を共にするいわゆる水の環境同位体を用いて土壌水・地下水の滞留時間や地下水流動機構を評価するいわゆる同位体水文学的手法は，この降雨一流出プロセス研究においても広く利用されており，降水・土壌水・地下水の同位体比の違いを利用して降雨一流出プロセスの詳細な実態解明が試みられている。

九州のような年間降雨量が多く，長時間強い降雨が持続するような水文特性を持つ地域での研究例は少なく，また源流域森林内の立木密度が高いため樹幹流の効果が相当大きいことが想定されるが，それらを配慮した降雨一流出プロセス研究は行われていない。

本研究では，土壌層の発達が薄く滞留効果が相対的に小さい変成岩性の森林源流域において，林内雨，樹幹流を含めた降雨—流出プロセスについて，安定同位体比の時間変動特性を利用してその実態解明を試みる。

5.2 鹿北流域試験地の位置および水文環境

本研究は，2004 年 11 月から 2004 年 12 月までの期間において，熊本営林局および森林総合研究所九州支所が管理を行っている鹿北流域試験地で行なった（**図 5.2.1**）。本研究流域は菊池川の岩野川水系に属し，熊本県北部の鹿北町近郊に位置している。流域を構成する基盤岩は三郡変成岩（結晶片岩）で主として泥質岩から成っており，一部に砂質岩が見られる。

本研究地域には 3 つの試験流域が設定されいるが（**図 5.2.2**），現在研究対象流域として使用されているは 2 号流域と 3 号流域のみであり，年間平均気温は 15.5℃，流域面積はそれぞれ 2.63 ha と 3.69 ha である。Shimizu *et al* (2003)[4] は，3 号流域において 1992 年から 1999 年までの 8 年間に降水量（林外雨量），地表流出量，および蒸発散量の観測を行ない，3 号流域における年間平均降水量，年間平均流出量，年間平均損失量，および年間平

均蒸発散量（2地点）が，それぞれ2166 mm，1243 mm，923 mm，および902 mm・875 mmであることを示した。また図5.2.3の赤丸に示されているとおり3号流域において損失量と蒸発散量は，ほぼ等しいことから流域内で観察される損失は大半が蒸発散によるものであり，地下に浸透して流域外に流出する地下水はほとんど存在していない。研究流域の植生は主としてスギとヒノキに大別することができ，成熟したスギが流域中央を占め，ヒノキや広葉樹は斜面から尾根までを覆っている。

5.3 研究方法

2003年11月から2004年12月までの間に降水，地下水，および河川水等の定期採水を，2003年6月から12月までの間に降雨期間中に集中した連続採水を行った。3号流域の流域末端部において静電容量式水位計（Tru track社製）を用い水位—流量観測が行われている。試験流域における林外雨量，林内雨量，および樹幹流量の観測位置は図5.3.1に示されているとおりである。これら全ての雨量計は森林総合研究所によって管理されている。林外雨量に関しては0.5 mmの転倒マス型雨量計を用いて測定し，林内雨量に関しては，3号流域中流部のスギの樹冠直下に設置した2本の雨樋（0.9 m^2）を使って集めたものを200 mlの転倒マス型雨量計を用いて測定した。樹幹流量に関しては，3号流域中流部の4本の代表木（スギ）の樹幹にウレタンマットを巻きつけて集水したものを500 mlの転倒マス型雨量計で測定した。樹幹流量を測定した4本の代表木の合計樹冠投影面積は21.4 m^2であり，胸高直径は，それぞれ56.8 cm，68 cm，70.94 cm，および85 cmである。但し集水用塩化ビニールパイプの目詰まりにより2004年8月18日以前のデータは3本の代表木から集水した値となっており，合計樹冠投影面積は14.4 m^2である。

流域における降雨期間中の河川水の酸素同位体比およびSiO_2濃度の挙動を確認する目的で，降雨前から採水を開始し，降雨期間中，および降雨終了後の数日間に亘って，河川水を3号流域中流部（パーシャルフリュームのすぐ下流）において自動採水機（アメリカンシグマ社製SIGMA900）を用いて1時間毎に採取した。また林内雨および樹幹流も図5.3.2に示されるような装置を製作し，河川水と同様に自動採水機を用いて1時間毎に採取した。図に示される装置は，それぞれの雨量計を通過し各ポリバケツの中（林内雨：40 ℓ，樹幹流：60 ℓ）に溜まった水が，1時間毎に完全に排水される仕組みになっているため，時間単位での降雨の採水が可能となっている。採取試料は，熊本大学において林内雨および樹幹流に関しては水素・酸素同位体分析を，河川水については酸素同位体分析を行った後，九州・沖縄農業試験センターにてSiO_2濃度の測定を行った。

5.4 研究結果

5.4.1 安定同位体比から見た試験流域の流出特性

図5.4.1は鹿北試験流域における2004年1月から11月までの林外雨および林内雨の水素安定同位体比と酸素安定同位体比との関係を示したものである。この図から鹿北試験流域における林外雨と林内雨の同位体比は，夏期（5月～10月）よりも冬期（11月～4月）

に大きく異なる値を示すことが示されている。これは本流域における気象特性に関係していおり,気象庁のアメダス観測点である鹿北町における20年平均の月平均降雨量によれば,本研究流域における年間降雨量の大半が夏期に集中している。降雨量の多い夏期は樹冠貯留時における蒸発による同位体分別が起こりにくいが，降雨量の少ない冬期においては林内が常に乾燥した状態にあるため，樹冠貯留時における同位体分別を発生しやすい状態になっていると考えられる。このため林内雨の同位体比は林外雨と比較して冬期に重い値を示したものと考えられる。

図 5.4.2 は林外雨，林内雨，および河川水（2 号および 3 号流域）における d 値（$d=\delta D-8\delta^{18}O$）の各月の変動を示したものである。降水の同位体比データが 2004 年の 1 年分しかないことから確定することはできないが，鹿北試験流域における降雨は，相対的に冬期に高い d 値を示し夏期に低い d 値を示す。それに対し，両流域における河川水の d 値は年間を通して大きな変動していない。2004 年 9 月に 8 月や 10 月と比較して極端に大きな d 値をもつ雨が降ったため，2 号流域における河川水の d 値が若干高い傾向を示しているが，3 号流域の河川水についてはその傾向は見られない。このことから両流域における河川水は降雨における d 値の季節変化を打ち消す程度の滞留時間を持っており，貯水能力は 2 号流域よりも 3 号流域の方が高いと考えられる。

図 5.4.3 は，2004 年 1 月から 2004 年 11 月までの 3 号流域における林内雨および河川水の水素・酸素同位体比の δ ダイヤグラムを示したものであり。図中の直線はそれぞれ夏期と冬期の天水線を示している。この図からも試験流域における河川水の同位体比はほとんど変動せず，さらに夏期の天水線（$\delta D = 7.5015\ \delta^{18}O + 6.9268$）付近に集中していることから，流域から流出する河川水は主に夏期の降水によって涵養されたものであることがわかる。

5.4.2 試験流域の降雨流出特性

図 5.4.4 は 2004 年 4 月 26 日から 11 月 27 日までの 2 号流域と 3 号流域の日流出高（mm/day）を示したものである。図より基底流出量に関しては，年間を通して 2 号流域の方が 3 号流域と比較して少ない傾向が読み取れる。隣接する小規模な 2 流域においてこの様な差が生じる理由としては，流域を構成する結晶質岩の主要傾斜の方向と関連していることが考えられる。すなわち 3 号流域は，地層傾斜方向と沢の進入方向が同じであり，かつ土壌層の発達が薄いため，急傾斜をもつ層理面から浸透した水は基盤岩上をほとんど失われることなく下流方向へ向かって流れるのに対し，傾斜方向と沢の進入方向が垂直となる 2 号流域では,傾斜面あるいは岩石の割れ目から流域外へ流出して行く地下水が存在し，それが 2 流域における流出高の差となって表れているものと考えられる。さらに図からは，両流域ともに，降雨に対して敏感に反応しているものの，5 月中旬や 9 月中旬から 10 月初旬にかけての大きな降雨イベントに関しては 2 号流域の流出高が 3 号流域の流出高を上回っている。これは一定量以上の雨が 2 号流域に降った場合，2 号流域において非浸透地域あ

るいは飽和面が発生するため河川への直接流入量が増加するためと考えられる。このことから 2 号流域における浸透能は 3 号流域におけるそれと比較して相対的に小さいと判断できる。

5.4.3 タンクモデルによる流出解析

タンクモデルとは菅原 (1972)[5] によって提唱されたモデルで，雨量から河川流量を予測するモデルである。このモデルではタンクの底面積を 1 と置くこと以外は形状およびパラメータの決定に関して一切制約がない。すなわちタンクを何段とするのか，側面の流出孔の数を幾つにするのか，浸透および流出係数を幾つに設定するのかなどについては一切決まりが存在しない。よって任意の河川のモデリングを行なう際には，過去の雨量および流出量のデータから大・中・小，様々な洪水に対して最も適当な構造とパラメータを与えることで流域特性を反映したモデルになり，それを基に洪水時の出水予測モデルとして利用されてきた。全ての洪水に対して 1 つのモデルを用いるため，全てのハイドログラフの形状に完璧にはフィットするわけではないが，大規模な流域では雨量には各観測地点におけるバラつきがあり，また各小流域における条件も異なっているため，ある程度の出水に適合できるパラメータが設定できれば予測モデルとしては十分利用価値があるため，広く利用されてきた。

このようにタンクモデルは大規模な流域面積（数千 km^2～数百 km^2）を想定したものであるため，小流域におけるシミュレーションに関しては不向きとされてきたが，Ishihara and Kobatake (1979)[2] や Saito (2000)[3] において小流域あるいは源流域においてもタンクモデルが使用可能であることを立証した。

本研究においては**図 5.4.5** に示すとおり 1 段目のタンクからの流出を直接流出成分，2 段目および 3 段目タンクからの流出を地下水流出成分と設定し解析をすすめた。事前に行った 2 つのトレーサー（$\delta^{18}O$ および SiO_2）による洪水ハイドログラフの成分分離結果が類似しており，地下水流動機構の相対的に単純な流域である 3 号流域を対象にタンクモデルによる解析を試みた。

5.4.4 樹冠貯留による遮断蒸発量の評価

タンクモデルにおける各種のパラメータを決定する際に，最初に決定しなければならないのが，input 量すなわちタンクに流入する雨量である。森林流域における林外雨，林内雨，樹幹流および遮断蒸発における関係は以下のように表現される。

林外雨＝林内雨＋樹幹流＋遮断蒸発　　（1）

本試験流域においては，林外雨量，林内雨量および樹幹流量は前述したとおり転倒マス型雨量計によって記録されている。タンクモデルの入力値としての降水量は，全ての単位を林外雨量と同じ水柱高単位“mm”に換算する必要がある。しかしながら，現在までに樹幹流量を“ml”から“mm”に変換するための有効な手段は見つかっていない。そのため上式から直接的に遮断蒸発量を算出することができない。そこで，本研究では林内雨と樹幹流

の酸素同位体比の差に着目し，レイリー蒸留の式から損失率を算出することにより遮断蒸発量の定量化を行なった。

降雨期間中の林内雨において林内雨と樹冠貯留により蒸発の影響を受けた樹幹流との間に定常的に同位体平衡が成り立っていると仮定すると，Rayleigh の蒸発過程の適応が可能となる。Rayleigh 式は，

$$\ln\frac{R}{R_0}=(\alpha-1)\ln f \qquad (2)$$

で示され，R は酸素 18 濃度，もしくはデューテリウム濃度（$^{18}O/^{16}O$，D/H），α は同位体分別係数，f は残留層の割合を示す，下付きの 0 は初期値である。δ 値の定義（式（1））より以下のように変換される。

$$\ln\frac{(1+10^{-3}\delta)}{(1+10^{-3}\delta_0)}=(\alpha-1)\ln f \qquad (3)$$

ここで δ は樹幹流の同位体比，δ_0 は林内雨の同位体比を示す。f は残存率を表すことから，林内雨からの蒸発による損失率は（1−f）となる。ここで酸素安定同位体分別係数 α と気温（温度）の関係は以下の式のように表される（Clark and Fritz, 1997）[1]。

$$10^3\ln\alpha^{18O}=-\frac{1137}{T^2}\times10^3+\frac{415.6}{T}+2.07 \qquad (4)$$

T（K）＝273.15＋C（℃）である。

表 5.4.1 に考察の対象とした 2 つのイベント（8 月 30 日～31 日および 12 月 3 日～6 日）に関する林内雨と樹幹流の $\delta^{18}O$ 値，温度，酸素同位体分別係数，および得られた遮断蒸発量を示す。

5.4.5 タンクモデルによる結果と成分分離結果との比較

前述したように，タンクモデルは雨量から流出量の予測を立てるモデルである。したがって，雨量が流出高を下回らない限り側面の流出孔やタンク底部の浸透孔のパラメータを変化させることにより，実測ハイドログラフの形状に推定の形状を合わせることは容易である。しかしながら本研究においては，ハイドログラフの形状だけでなく，実測された河川水の同位体比変動も再現できるようなシミュレーションを行う必要がある。したがって，様々な樹幹流雨量を与えることによって得られたモデルの妥当性を検討する目的で，8 月 30 日～31 日のイベントにおいて様々な形状のタンクを用意し，そのモデルから推測される河川水の酸素同位体比変動の推定値と実測値を照合することによりモデルの評価を行った。

対象とした降雨イベントにおいてタンクに流入する樹幹流雨量（input）には 2 種類の値を想定した。まず初めに，実測された樹幹流量（ml）をその測定に用いられた代表木 3 本の胸高面積（0.10262 m^2）の 30 倍の値で除して樹幹流量（mm）として用いた場合（Case1）。同じく胸高面積の 10 倍の値で除して樹幹流量（mm）として用いた場合（Case2）。また林内雨量は，雨量計によって測定された値（ml）を雨樋の集水面積（0.9 m^2）で除し mm 換

算した値を用いた。尚，これらの設定は前述した（1）式，林外雨量≧林内雨量＋樹幹流量＋遮断蒸発量を満たす範囲で樹幹流量を変化させている。

● 8月30日～31日のイベント

林外雨量　56.5 mm

林内雨量　23.98 mm

樹幹流量　27.60 mm（胸高面積×10）・・・Case 2・3

　　9.20 mm（胸高面積×30）・・・Case 1

遮断蒸発量　2.35 mm　（同位体比から推定）

Case 1。樹幹流量9.20mm（胸高面積×30）を用いた場合

8月30日～31日のイベントにおいては，前述された式（1）より遮断蒸発量を2.35 mmと推定すると，樹幹流量（x）は $0 \leqq x \leqq 30.35$（mm）の範囲で任意の値を持つことが考えられる。ここでは樹幹流量を9.20 mm（実測水量/胸高面積×10）と仮定し試算を行った。試算によって得られたタンクの構造および各パラメータは**図5.4.6**に示されており，そのモデルから得られた推定流出量と実測流出量の関係が**図5.4.7**に示されている。一回目のピークの位置が実測値と推定値で異なっている理由は，林外雨と林内雨のピークの差が原因であると考える。すなわちタンクモデルは林内雨および樹幹流の合計値が最高値の時にピークが出るような構造であるが，8月30日～31日のイベントにおいては林外雨のピークよりも林内雨のピークの方が2時間遅れて生じていたため，実測値と推定値との間にピークのズレが生じたと考えられる。

図5.4.8は得られたモデルから算出された全流出，直接流出（1段目タンクからの流出），基底流出＋地下水流出（基底流出＋2・3段目タンクからの流出）の経時変化を示している。このタンクパラメータを用いて，**図5.4.9**において全流出に占める地下水流出の割合について，このモデルから得られたイベント期間中の全流出に対する地下水流出の割合と前述したSiO_2を用いて算出した全流出に対する地下水流出の割合を比較した。この図から，タンクモデルによる推定値はイベント全般にわたって，明らかに地下水流出成分を過小評価していることがわかる。言い換えれば，直接流出成分を過大評価してしまっている。**図5.4.10**はこのモデルから推定される河川水の$\delta^{18}O$値と実測された$\delta^{18}O$値を比較したものである。この図から両者が降雨流出時において全く異なった挙動を示すことがわかる。結果的に，このモデルでは流出水の同位体変化を説明できていない。

Case 2。樹幹流量27.60 mm（胸高面積×10）を用いた場合（I）

Case 2は，Case 1よりも，樹幹流に対する寄与面積を縮小することにより相対的に大きな樹幹流量(mm)を想定したCaseである。**図5.4.11**は試算の結果得られたタンクの構造および各パラメータを示している。さらにこのモデルから得られた推定流出量と実測流出量

を図 5.4.12 に示している。このモデルもまたハイドログラフの形状は極めて良い再現性を持っている。Case 1 と同様に，モデルから算出された全流出，直接流出（1 段目タンクからの流出），基底流出＋地下水流出（基底流出＋2・3 段目タンクからの流出）の経時変化を図 5.4.13 に示した。さらにモデル，SiO_2 それぞれから得られた全流出に対する地下水流出の割合を図 5.4.14 に示した。Case 1 と同様にこのモデルにおいても地下水流出成分を過小評価してしまっている。図 5.4.15 は河川水の $\delta^{18}O$ 値の推定値と実測値を比較したものである。Case 1 と比較して降雨開始時の挙動や減衰時の挙動がやや良くなっているが，やはりこのモデルも適当ではないと考えられる。

Case 3。樹幹流量 27.60mm（胸高面積×10）を用いた場合（II）

上述の Fig.20 において，河川水における $\delta^{18}O$ 値の挙動としては case 1 に比べて case 2 はやや良い結果を得ることができたため，樹幹流量は変えず Case 1 および 2 で問題となっている地下水流出成分の過小評価に着目した。すなわち，1 段目タンクからの流出を減少させ，2・3 段目タンクからの流出を増加させるようなモデルパラメータを設定した。図 5.4.16 は試算の結果得られたモデルにおけるタンクの構造と各パラメータを示している。また図 5.4.17 には，このモデルから得られた推定流出量と実測流出量を示す。モデルによる流出における再現性が確認されたことを踏まえて，これまでと同様に，モデルから算出された全流出，直接流出（1 段目タンクからの流出），基底流出＋地下水流出（基底流出＋2・3 段目タンクからの流出）の経時変化を図 5.4.18 に示した。さらにモデル，SiO_2 それぞれから得られた全流出に対する地下水流出の割合も図 5.4.19 に示した。図 5.4.18 は Case 2 の図 5.4.13 とは明らかに異なり，2・3 段目タンクからの流出が大きくなっている。図 5.4.19 においても両者における割合の差はほとんど無い。そこでこれまでと同様に河川水の $\delta^{18}O$ 値の推定値と実測値を比較したもの作成した（図 5.4.20）。1 回目の流出のピークが異なることから完全ではないが，ほぼ河川水における $\delta^{18}O$ の挙動を再現できた。Case 1～3 の中では結果的に，このモデルが一番妥当であるといえる。

以上のことを踏まえ，樹幹流の定量評価を行う際の手順としては以下の方法が提示される。

1）林内雨と樹幹流の同位体比の加重平均値とレイリー式から同位体の濃縮率を求め，遮断蒸発散量を求める。
2）input としての降水量（C：林内雨と樹幹流の合計値）を林外雨から遮断蒸発量を差引いた値（A）と林内雨（B）の範囲内で適宜設定し，あらかじめ化学トレーサー（SiO_2）を用いて求めておいた降雨流出時の地下水流出の割合と比流量変化の両方を満たすタンク形状を試行錯誤的に求める。
3）実際の河川水における同位体比変動と，上記 2）のモデルから得られた同位体変動を比較しモデルの妥当性を検証する。
4）両者を比較し整合しない場合には上記 2）の C 値を適宜変更して，再度 2），3）の操

作を繰返す。整合性に問題がなければ，設定したinput量（C値）から林内雨量を差し引き，これを樹幹流（mm）とし，実測された樹幹流量（ml）を1000倍した値をこの樹幹流(mm)で除すことにより樹幹流の浸透寄与面積（m^2）を算出する。

5.4.6 タンクモデルを用いた樹幹流の定量評価

前述した手順を用いることによりその他のイベントにおいても同様の結果が得られるかどうかを調べる目的で，12月3日～5日のイベントにおいて樹幹流の定量評価を行なった。このイベントを選んだ理由は，長時間の降雨イベントであり，ある程度の降雨量があり，林内雨および樹幹流における長時間の試料がそろっており，ハイドログラフのピークがはっきり現れているためである。

● 12月3日～5日のイベント

林外雨量　86 mm
林内雨量　75.92 mm
樹幹流量　6.86 mm
遮断蒸発量　3.22 mm　（同位体比により推定）

このイベントでは，林内雨量が全雨量の約 88%を占めているため，樹幹流量として得られる範囲が非常に小さくなってしまったが，イベントして大きかったため樹幹流量は（1）式から算定される範囲内の最大値を使用した。

図 5.4.21 はinputのパラメータに上記の林内雨および樹幹流を当てはめた時のタンクの構造および各パラメータの値を示している。**図 5.4.22** はその結果得られた推定流出量と実測流出量である。**図 5.4.23** はモデルから算出された全流出，直接流出（1段目タンクからの流出），基底流出＋地下水流出（基底流出＋2・3段目タンクからの流出）の経時変化を示しており，**図 5.4.24** はモデルおよびSiO_2それぞれから得られた全流出に対する地下水流出の割合を示している，タンクモデルは 1 時間ステップのハイドログラフ分析のために作られた構造を持つため，しばしば減衰部において直接流出成分は急激な減少を見せる（Saito, 2000）[3]。しかしながら，今回得られた結果はシミュレーションによる値と SiO_2 による値が非常に良い相関を持っているため，このモデルによる河川水の$\delta^{18}O$値の挙動を作成した（**図 5.4.25**）。その結果，降雨開始直後と降雨終了直後に異なった挙動を見せるものの，降雨のピーク時においてシミュレーション値は実測値と類似した挙動を示した。結果的にこのイベントにおける流出に寄与した樹幹流量は，想定した 6.86 mm 程度であったと評価された。このイベントにおいて，測定された全樹幹流量が 232714 ml であることから，このイベントにおける樹幹流の寄与面積は 33.92 m^2 と考えられ，これは 4 本の代表木の合計樹冠投影面積（21.4m^2）の約 1.59 倍の大きさに相当している。

5.5 まとめ

本研究では，温帯湿潤森林源流域における地下水涵養および降雨流出過程に対する樹幹流の果たす役割の定量評価を行なう目的で，森林総合研究所九州支所が管理している熊本県鹿北試験流域の3号流域において2003年11月から2004年12月の期間について降雨－流出に関して，安定同位体比特性を基本とした関連水文観測調査を行なった。以下にその結果を示す。

（1）隣接する2流域における水文特性の比較

1. 両流域とも降雨における同位体比の季節変動を打ち消す程度の滞留時間をもっており，主に夏期の降水によって涵養されている。
2. 3号流域の方が2号流域と比較して高い保水機能を持っている。
3. 3号流域の方が2号流域と比較して降雨に対する応答が早いが，一定量の降雨があったとき，2号流域における浸透能は徐々に減少し，その結果2号流域の流出が3号流域を上回ることがある。
4. イベントの大小にかかわらず，3号流域の方がピーク流量時からの早い減衰を示すが，イベントが大きくなるほど，減衰速度の差が小さくなる。
5. 2号流域よりも3号流域においてSiO_2はハイドログラフの成分分離を行なう上で有益なトレーサーとなる。

（2）タンクモデルによる樹幹流の定量評価

1．定量評価を行う際の手順

流出に寄与する樹幹流の定量評価を行う際の手順を以下に示す。

1）林内雨と樹幹流の同位体比の加重平均値とレイリー式から同位体の濃縮率を求め，遮断蒸発散量を求める。

2）inputとしての降水量（C：林内雨と樹幹流の合計値）を林外雨から遮断蒸発量を差引いた値（A）と林内雨（B）の範囲内で適宜設定し，あらかじめ化学トレーサー（SiO_2）を用いて求めておいた降雨流出時の地下水流出の割合と比流量変化の両方を満たすタンク形状を試行錯誤的に求める。

3）実際の河川水における同位体比変動と，上記2）のモデルから得られた同位体変動を比較しモデルの妥当性を検証する。

4）両者を比較し整合しない場合には上記2）のC値を適宜変更して，再度2），3）の操作を繰返す。整合性に問題がなければ，設定したinput量（C値）から林内雨量を差引き，これを樹幹流（mm）とし，実測された樹幹流量（ml）を1000倍した値をこの樹幹流(mm)で除すことにより樹幹流の浸透寄与面積（m^2）を算出する。

2．12月3日～6日のイベントにおける樹幹流の定量評価

上記の手順を用いて12月3日～6日のイベントにおける樹幹流の定量評価を行った。その結果，このイベントに寄与した樹幹流量は 6.86mm 程度であり，この樹幹流に対する寄与面積（33.92m²）は，樹冠投影面積（21.4m²）の 1.59 倍に相当することがわかった。

これまで一つの降雨イベントに関しては，降水中の安定同位対比は土地利用（地表植生）による違いは存在しないと考えられていたが，本研究のような森林植生域では樹幹流の影響により，降水中の安定同位対比が他の土地利用地域と異なる可能性が出てきた。今後，地下水流動の入力トレーサーとして安定同位体を用いる場合に，涵養域の植生条件を加味する必要が出てくる可能性がある。樹幹流の発生は，降雨の形態と樹種によって大きく異なる。今後，色々なタイプの降雨形態時の樹幹流について，流出に対する寄与率をここで提案された方法で検証することにより，源流域における樹幹流の涵養効果の定量化を図ってゆきたい。

5.6 参考文献

1) Clark, I. D., and P. E. Fritz. (1997) : Environmental Isotopes in Hydrogeology, CRC Press, Boca Raton, Fla,.p28.

2) Ishihara, Y. and Kobatake, S. (1979) : Runoff Model for Flood Forecasting. *Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.* Vol.**29**, No.260, 27-43.

3) Saito, T. (2000) : Runoff characteristics in a small mountain basin analyzed by the use of hydrogen and oxygen stable isotopes. *Limnology*, **1**, 217-224.

4) Shimizu, A. Shimizu, T. Miyabuchi Y. and Ogawa, Y. (2003) : Evapotranspiration and runoff in forest watershed, western Japan. *Hydrological Process.* **17**, 3125-3139.

5) 菅原正巳（1972）：流出解析法　水文学講座 7　共立出版。

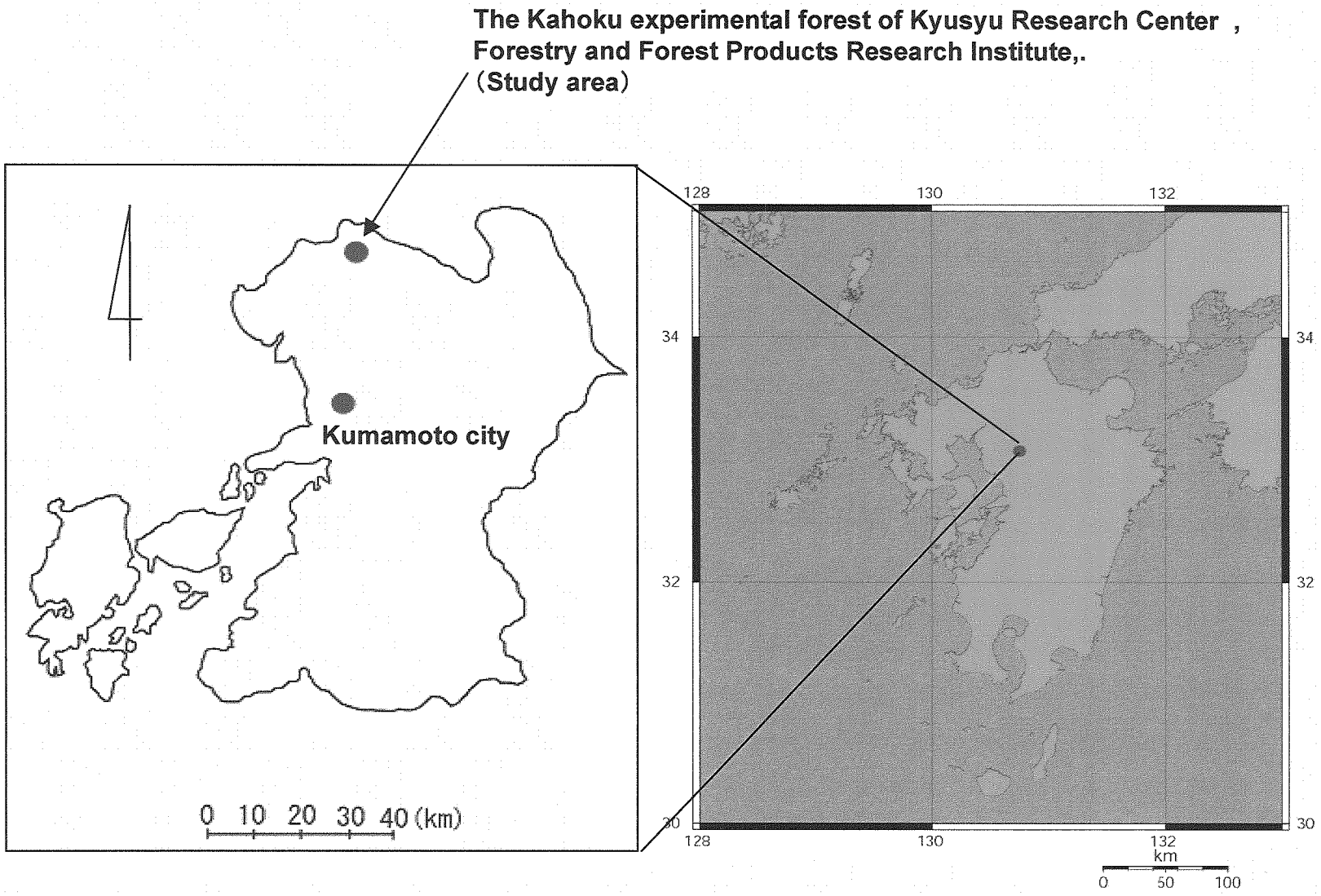


図5.2.1　研究地域位置図

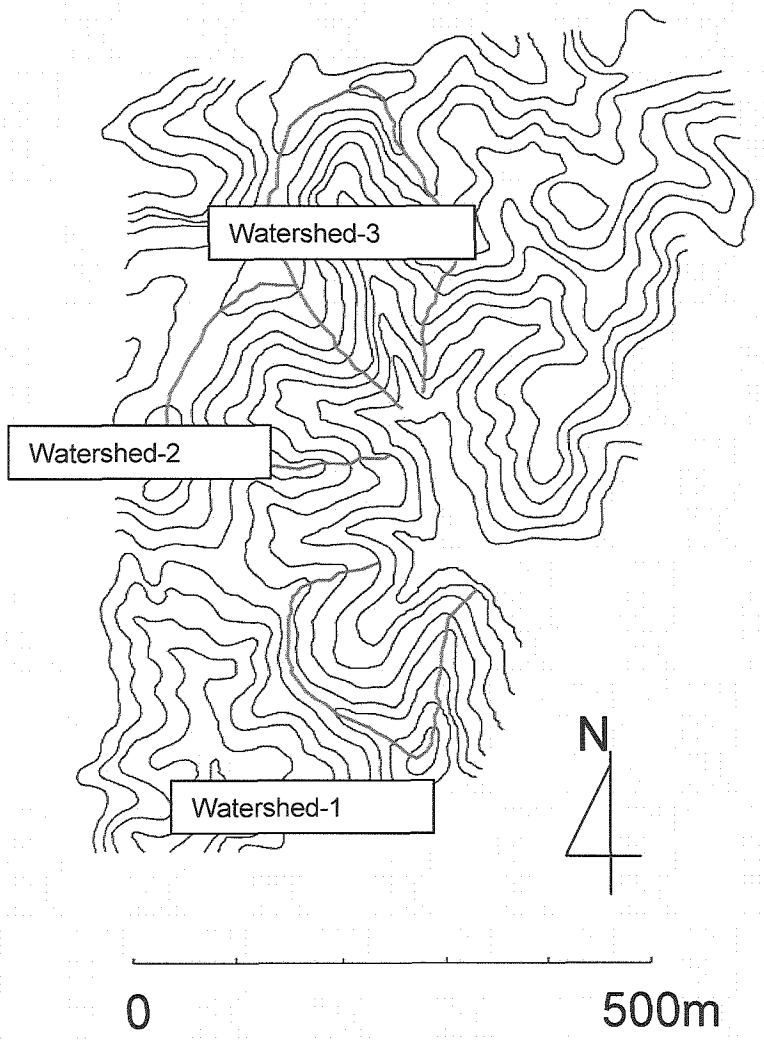


図5.2.2　3つの試験流域地形図

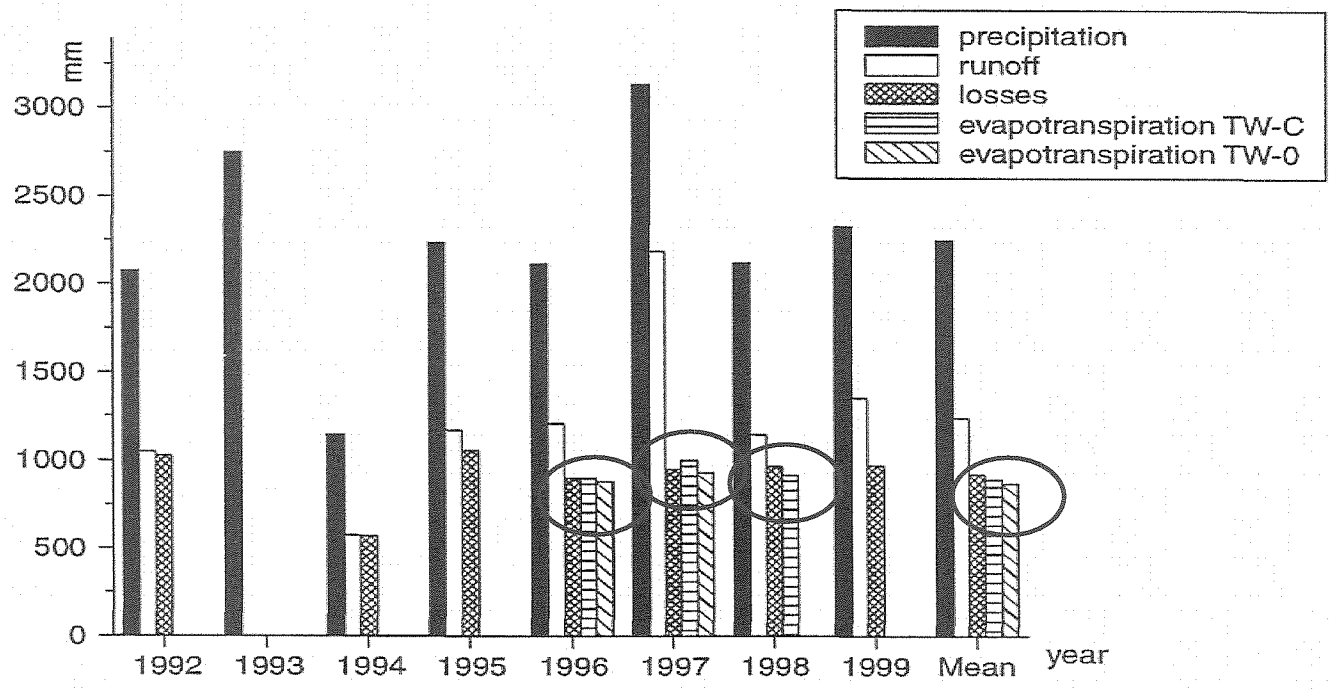


図5.2.3　研究流域における年降水量・流出量・蒸発散量（1992－1999）

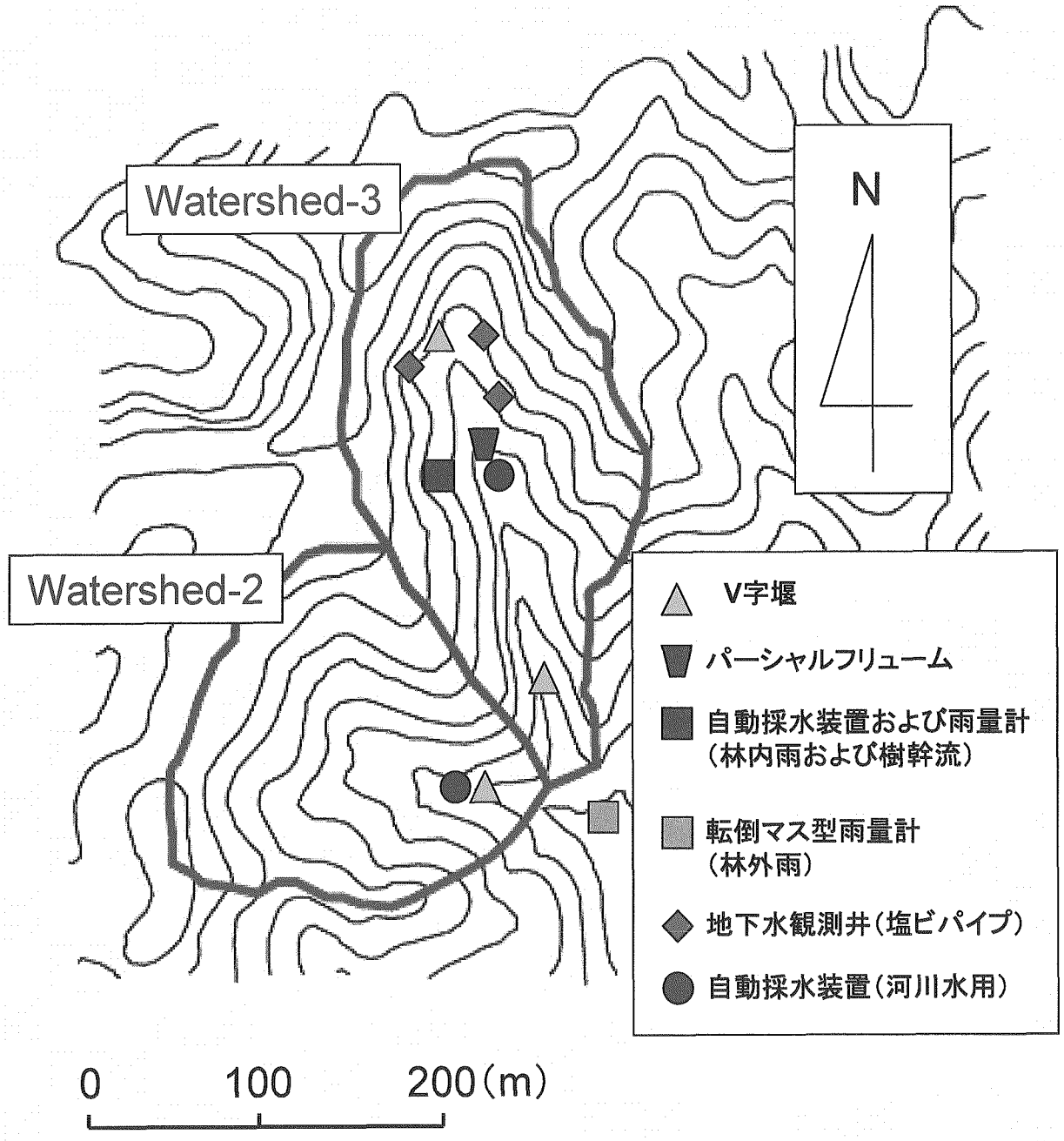

Watershed-3
Watershed-2
N
V字堰
パーシャルフリューム
自動採水装置および雨量計
(林内雨および樹幹流)
転倒マス型雨量計
(林外雨)
地下水観測井(塩ビパイプ)
自動採水装置(河川水用)
0
100
200(m)

図5.3.1　観測器配置図

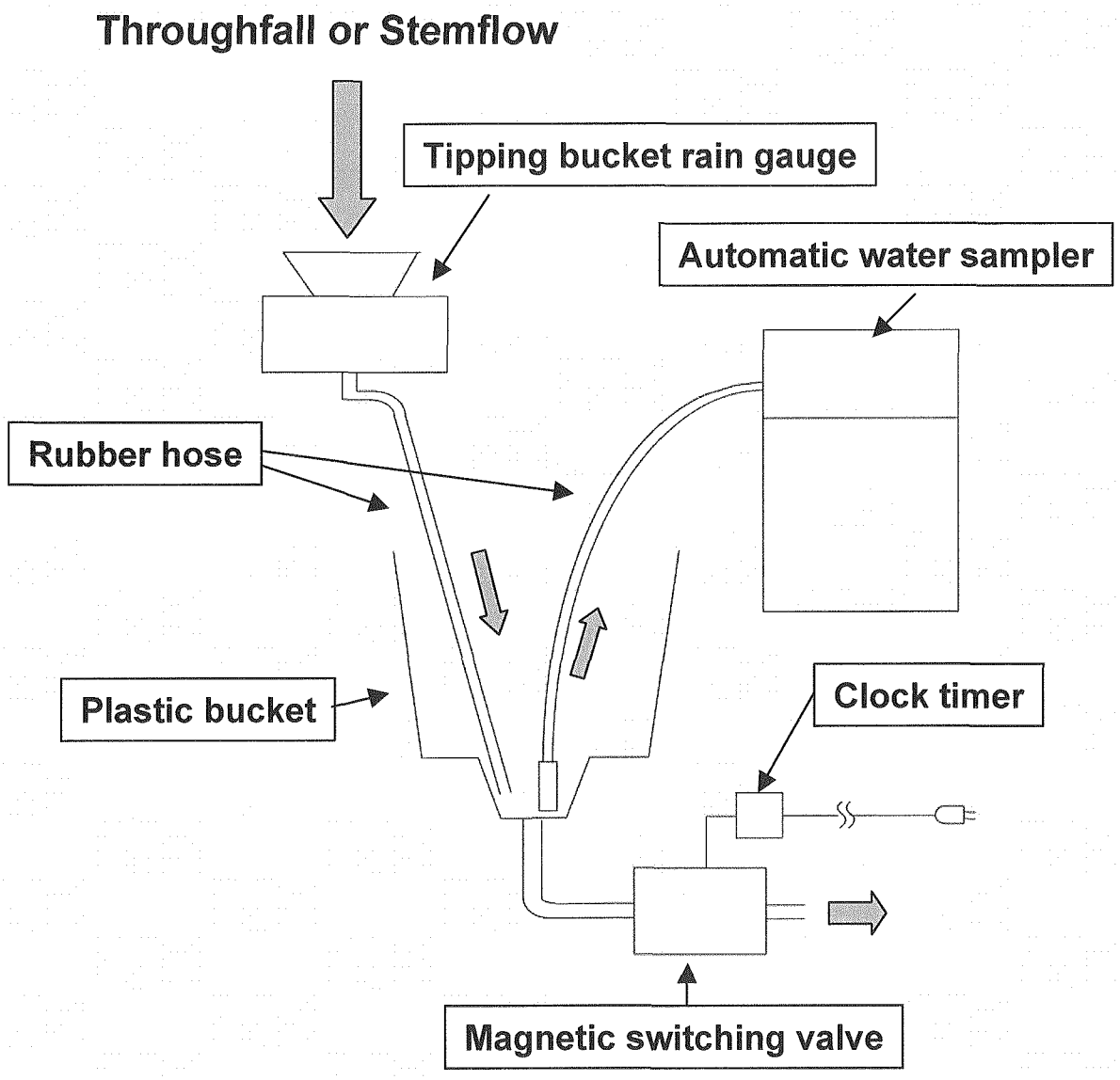


図5.3.2　樹幹流・林内雨時間別採水装置構造概念図

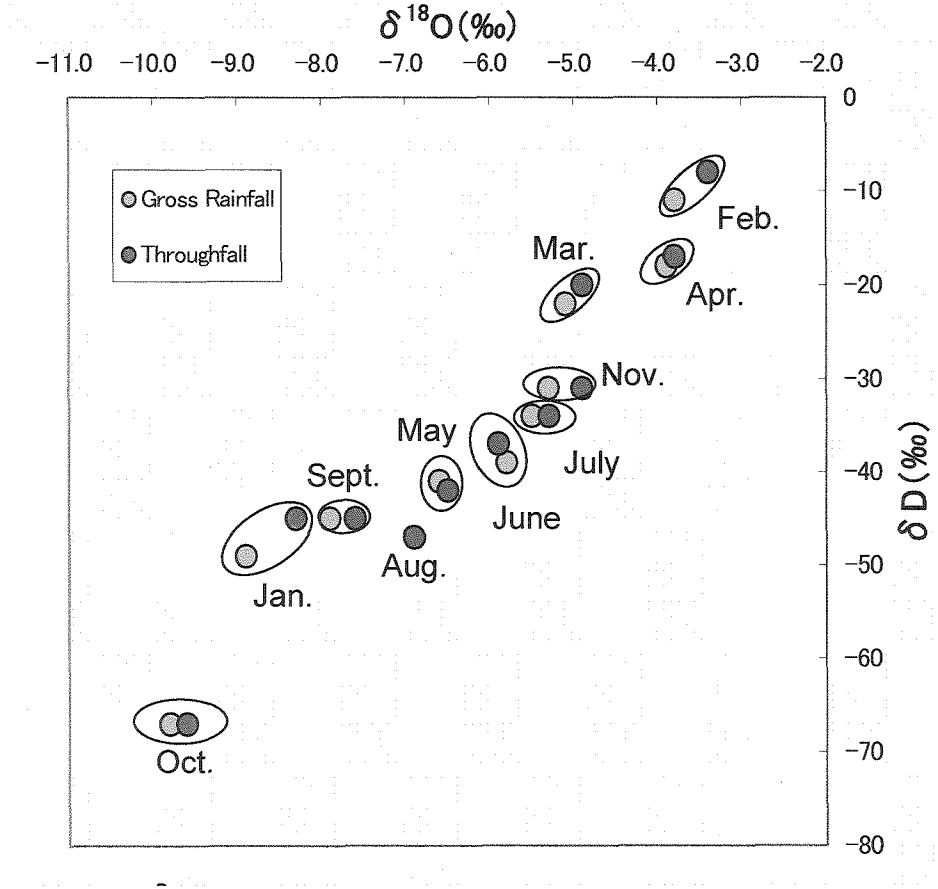


図5.4.1　2004年度における林外雨・林内雨のデルタダイヤグラム

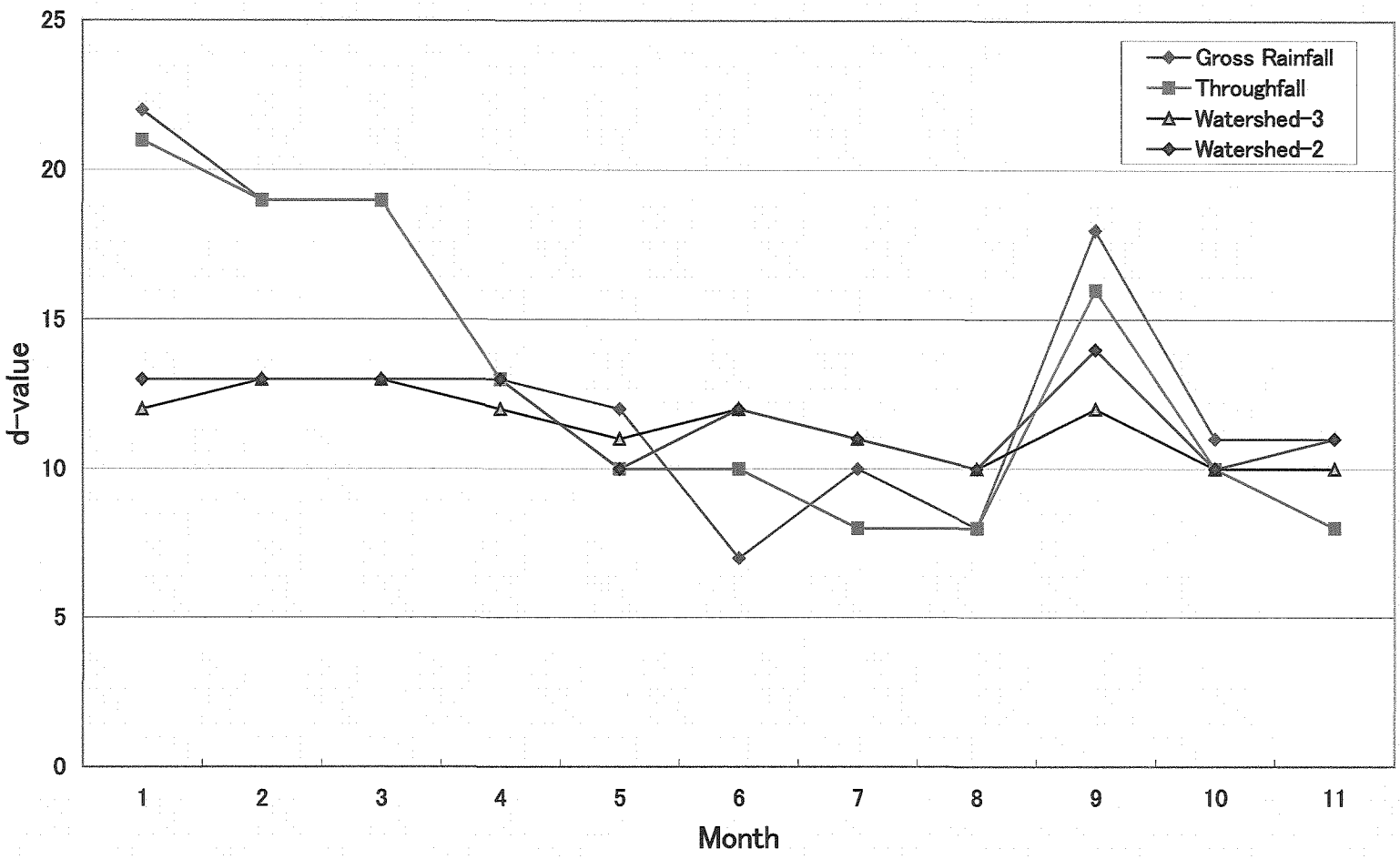


図5.4.2　林外雨・林内雨・樹幹流のd値月変動図

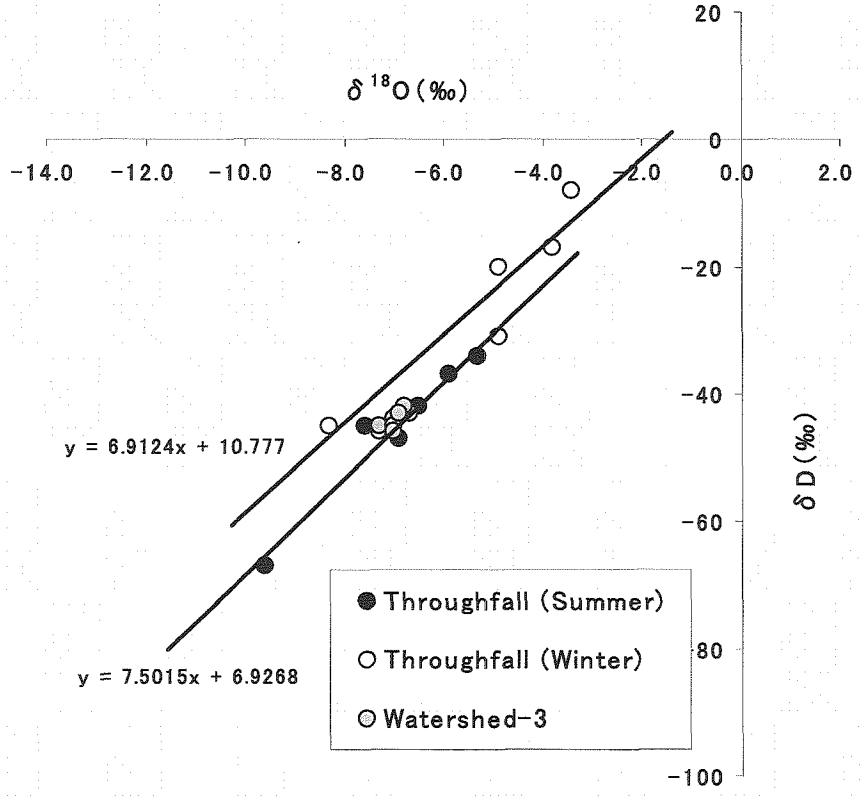


図5.4.3　試験流域３における河川水と林内雨のデルタダイヤグラム

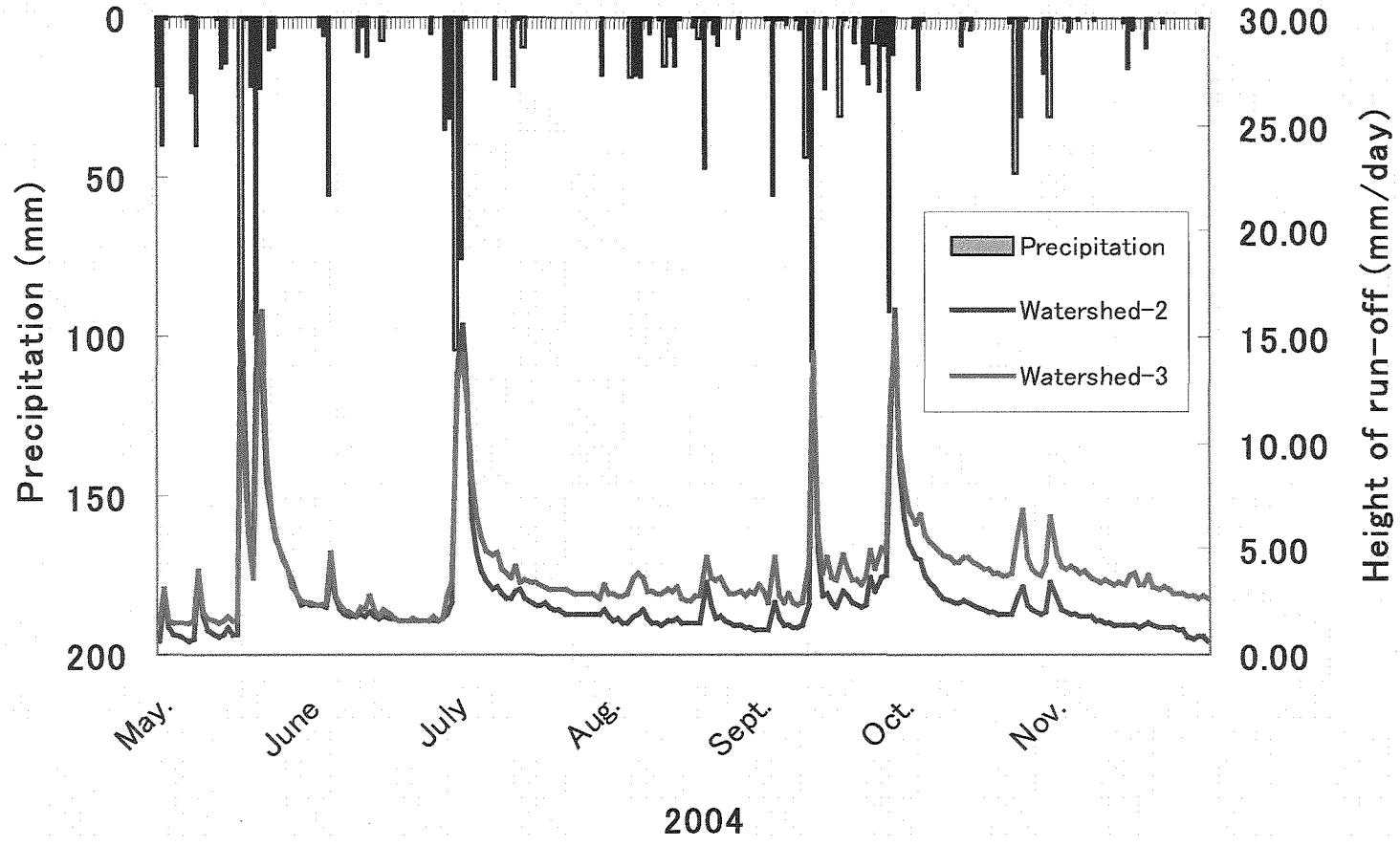


図5.4.4　２つの試験流域における流出高の季節変化（2004年4月～11月）

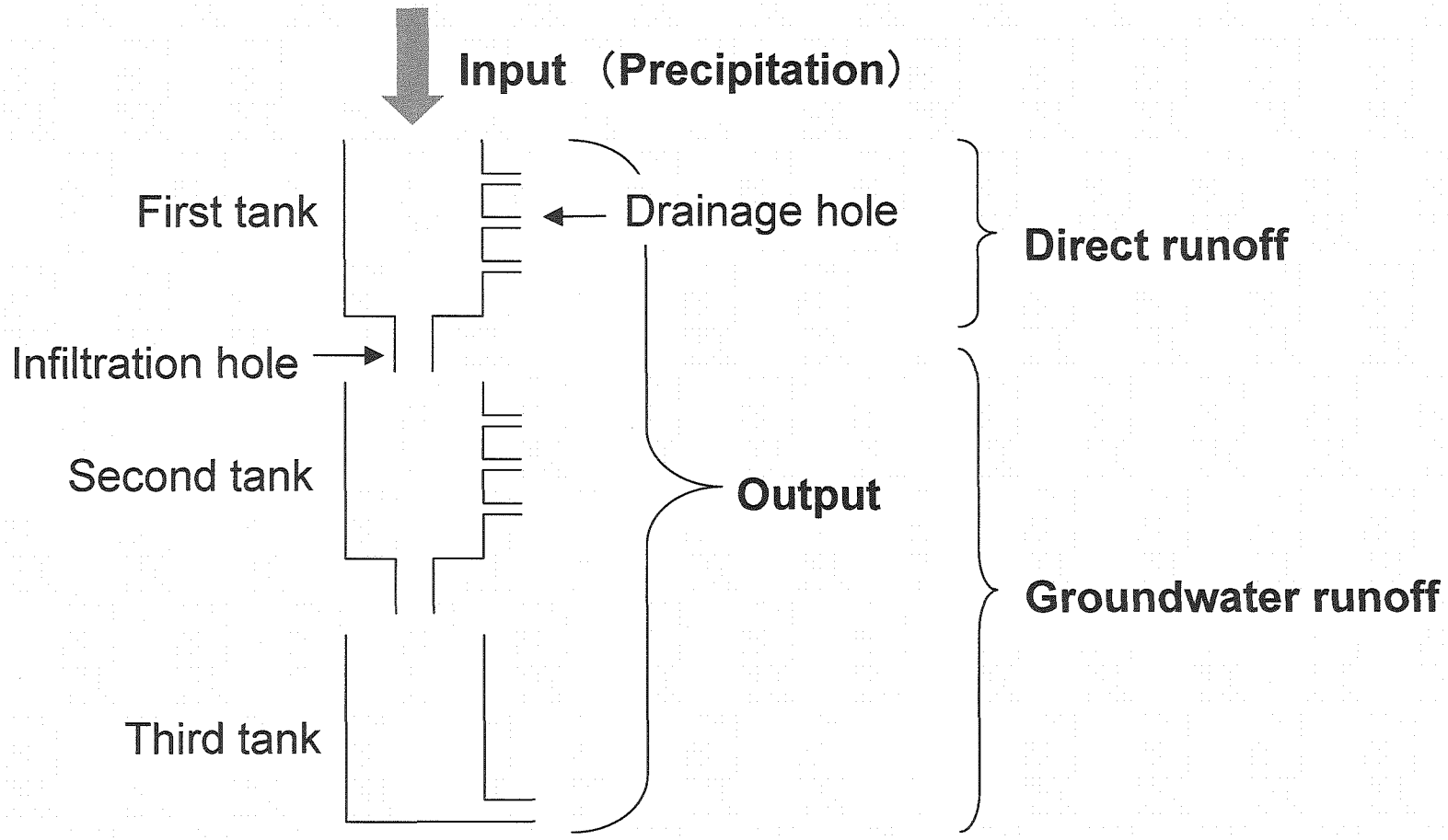


図5.4.5　タンクモデルの基本構造概念図

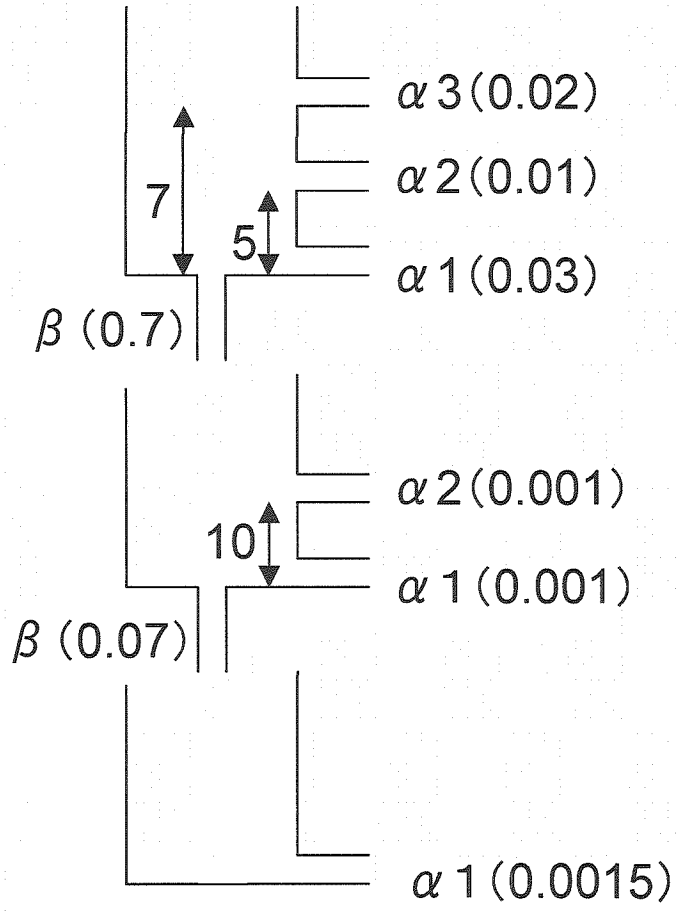


図5.4.6　タンクモデルの構造

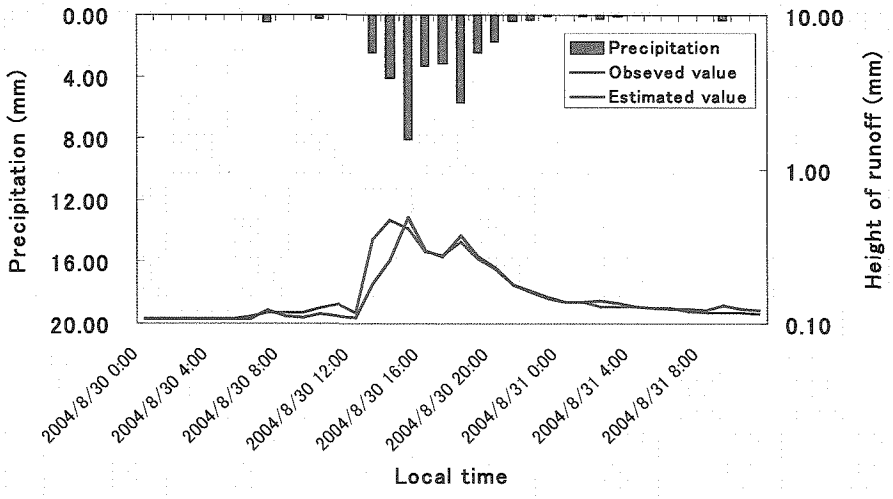


図5.4.7　タンクモデルによる推定流出量変化

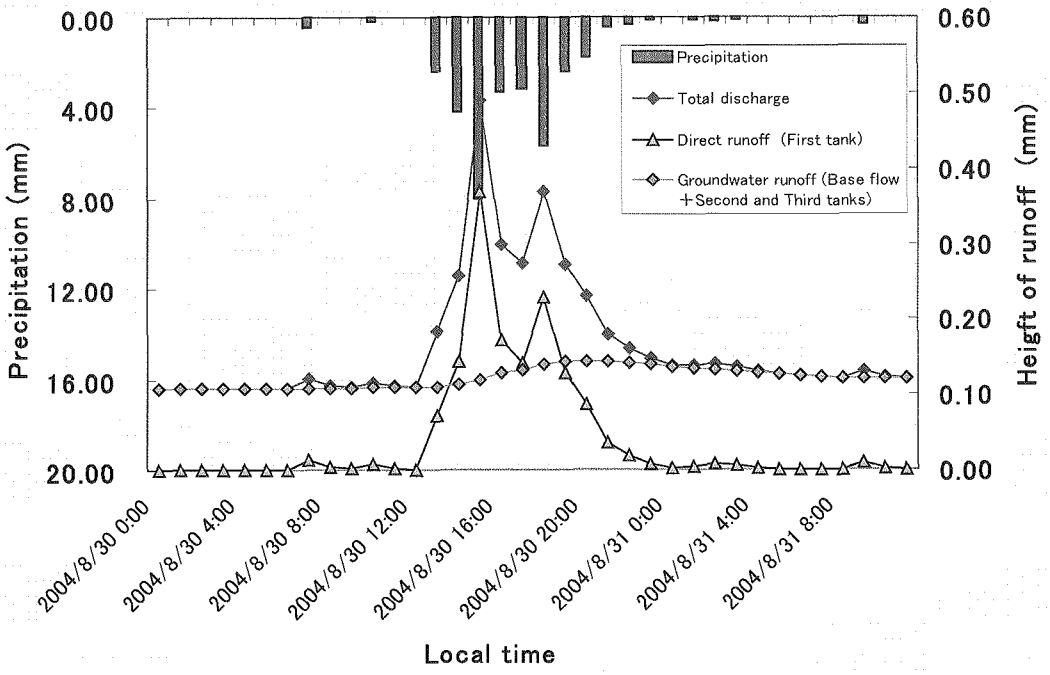


図5.4.8　タンクモデル推定値による直接流出成分と
地下水流出成分の分離

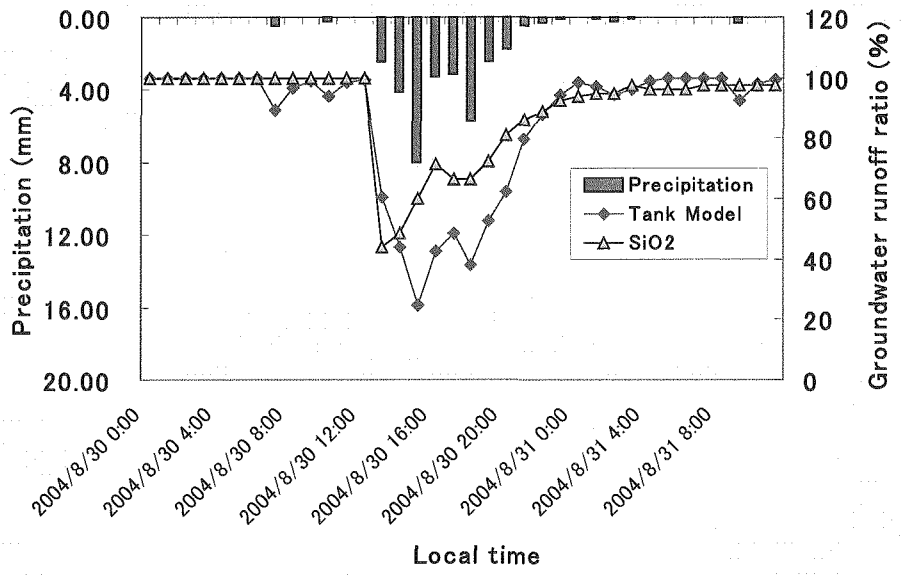


図5.4.9　SiO2濃度およびタンクモデル推定値による
地下水流出率の比較

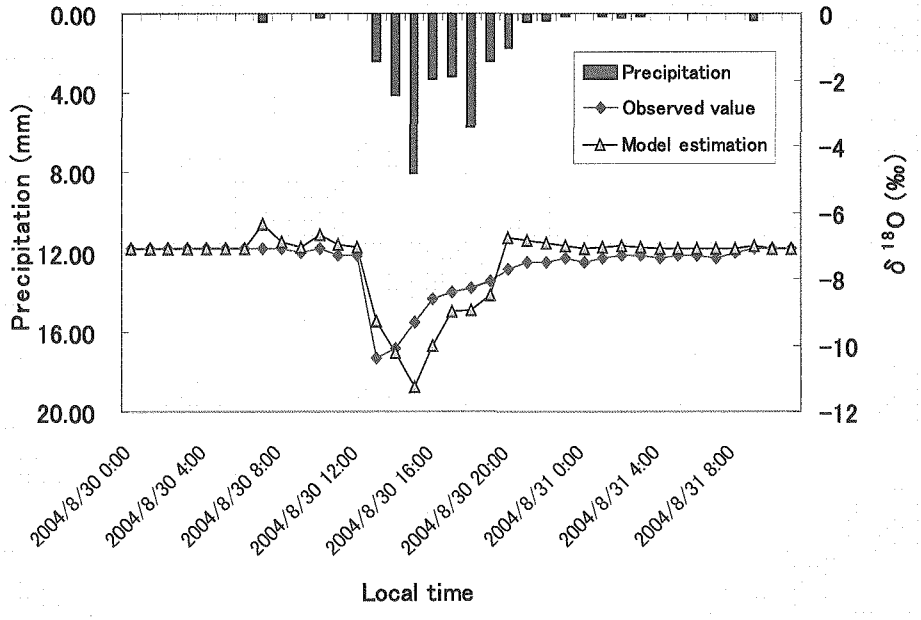


図5.4.10　河川水中のδ^{18}O濃度変化に関する実測値と
タンクモデル推定値の比較

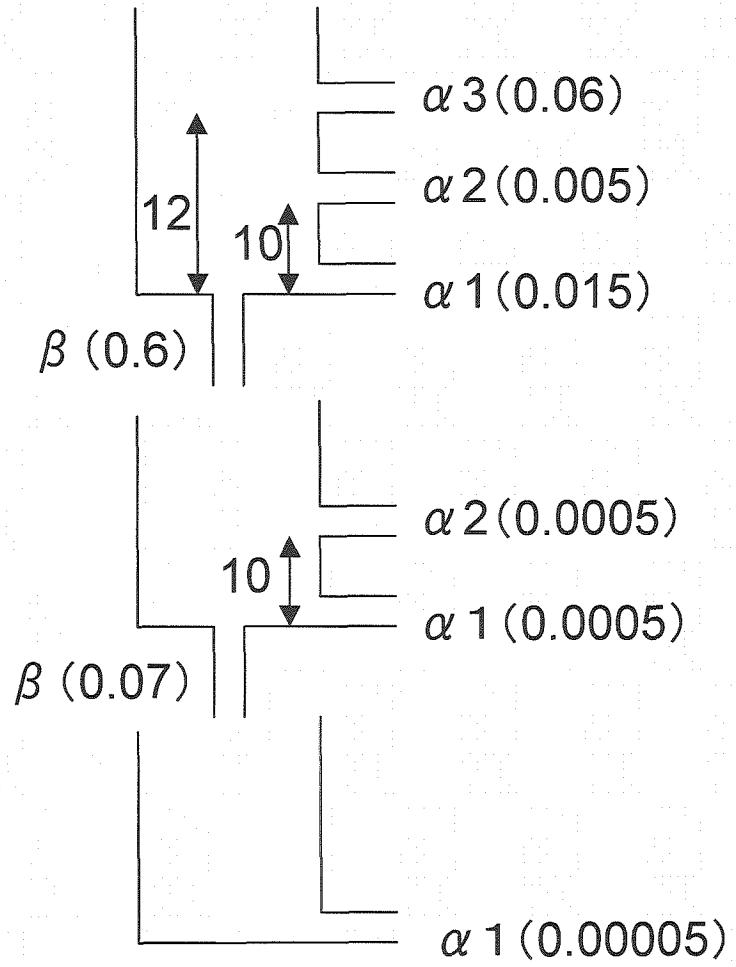


図5.4.11　タンクモデルの構造

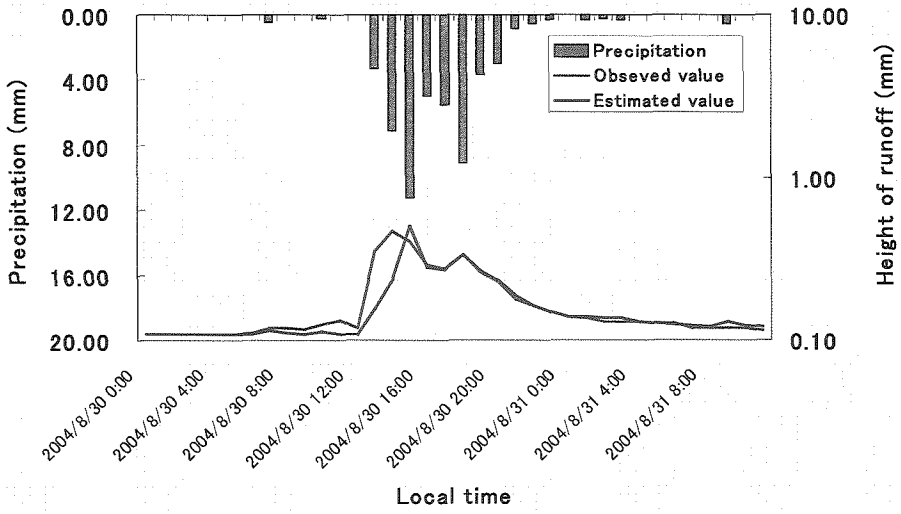


図5.4.12　タンクモデルによる推定流出量変化

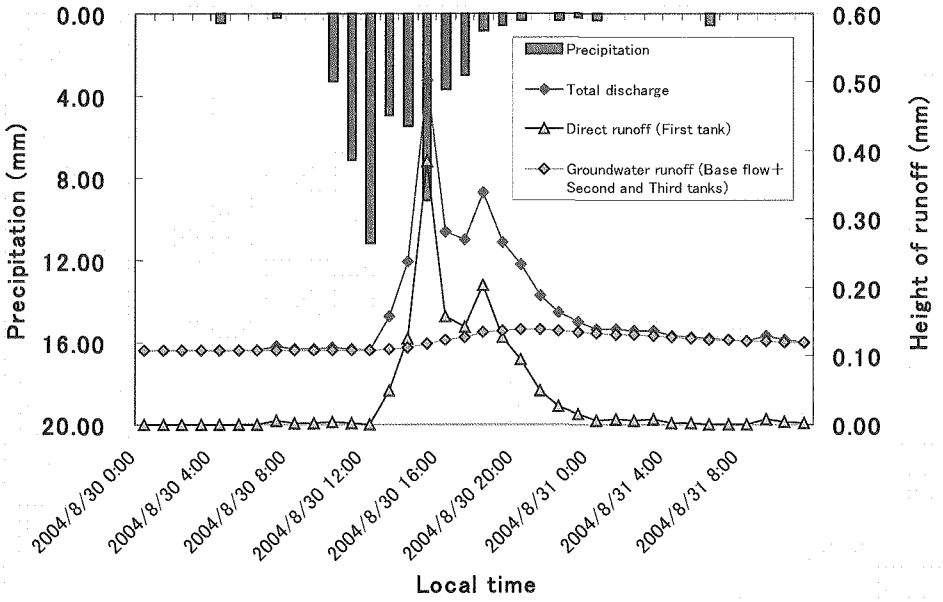


図5.4.13　タンクモデル推定値による直接流出成分と
地下水流出成分の分離

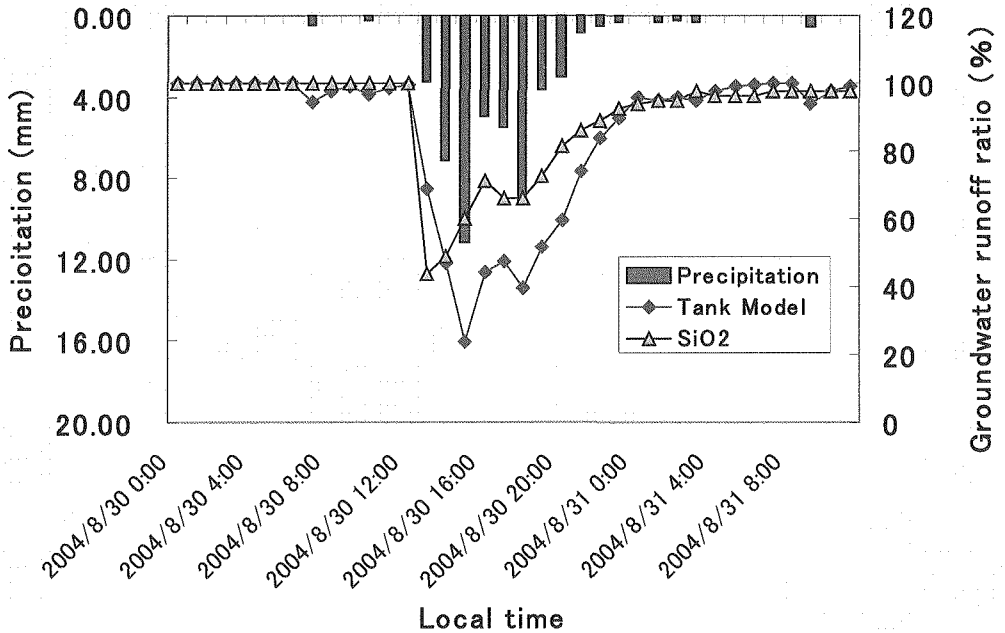


図5.4.14　SiO2濃度およびタンクモデル推定値による
地下水流出率の比較

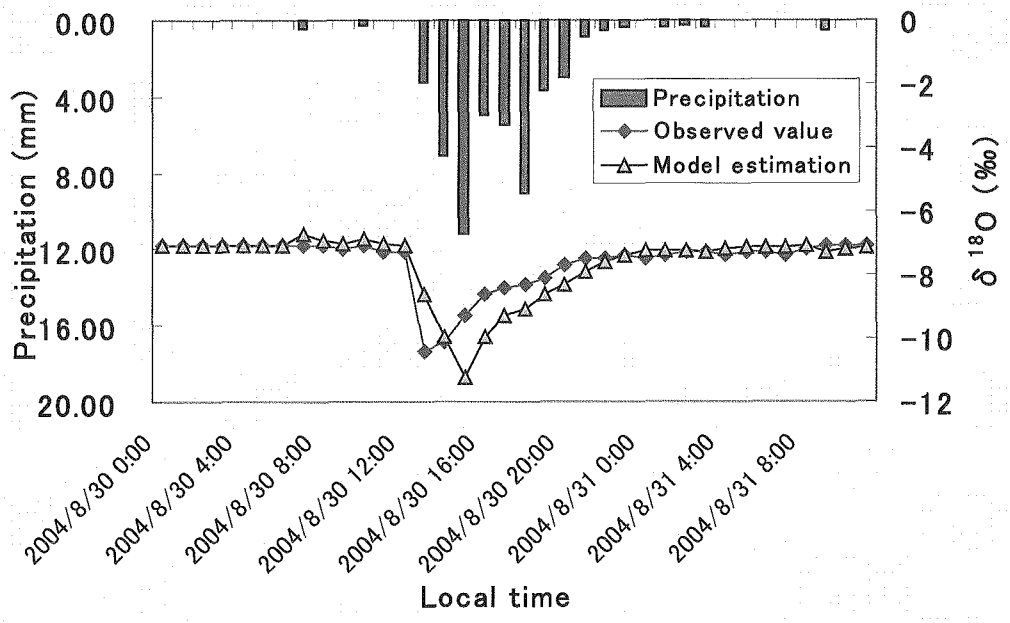


図5.4.15　河川水中の$\delta^{18}O$濃度変化に関する実測値と
タンクモデル推定値の比較

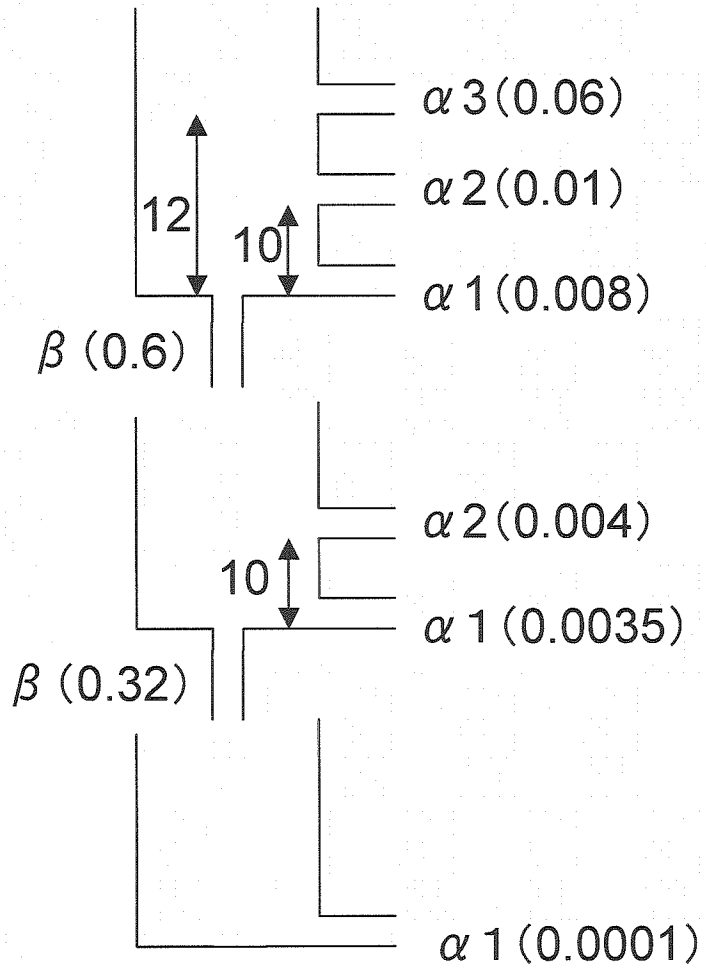


図5.4.16　タンクモデルの構造

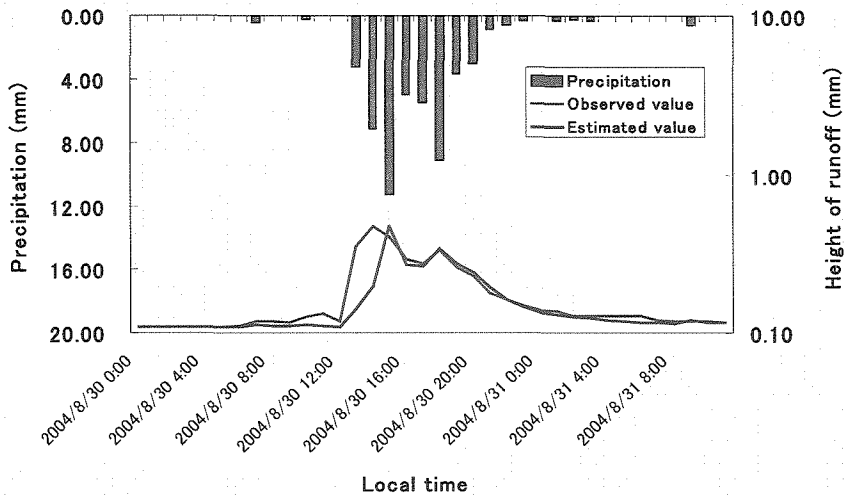


図5.4.17　タンクモデルによる推定流出量変化

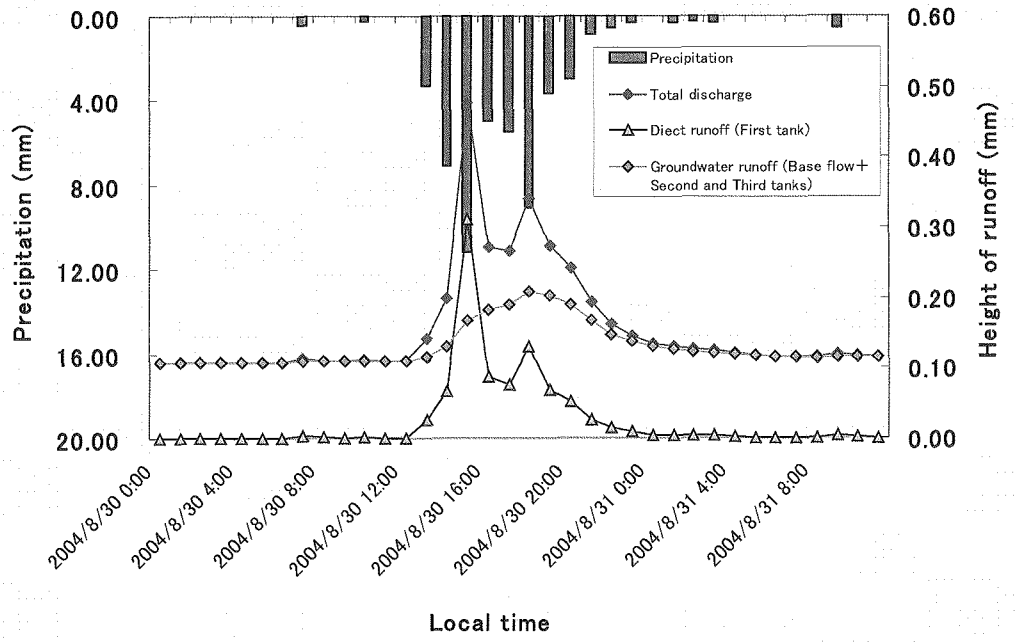


図5.4.18　タンクモデル推定値による直接流出成分と
地下水流出成分の分離

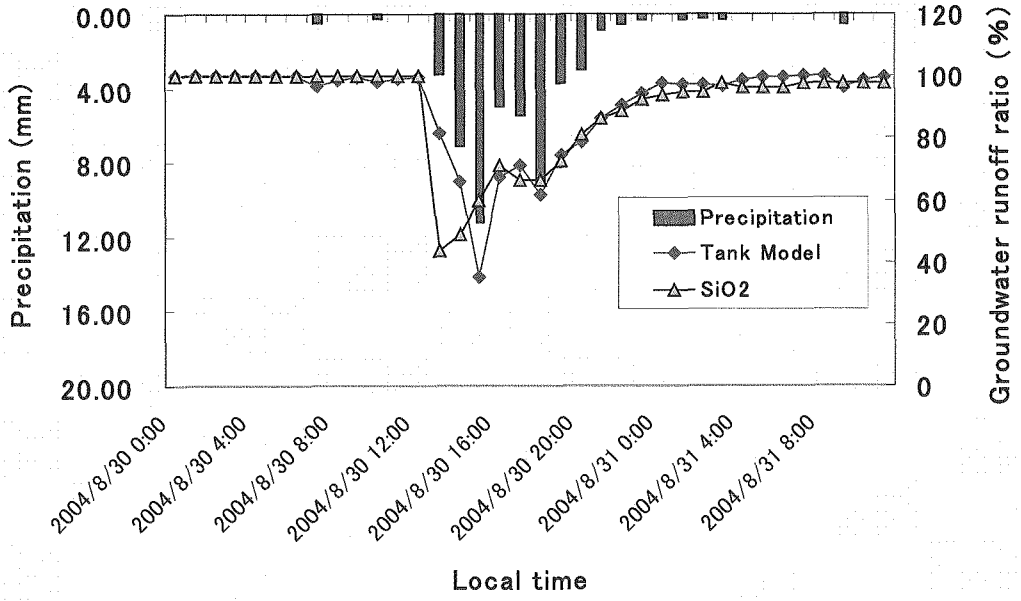


図5.4.19　SiO2濃度およびタンクモデル推定値による
地下水流出率の比較

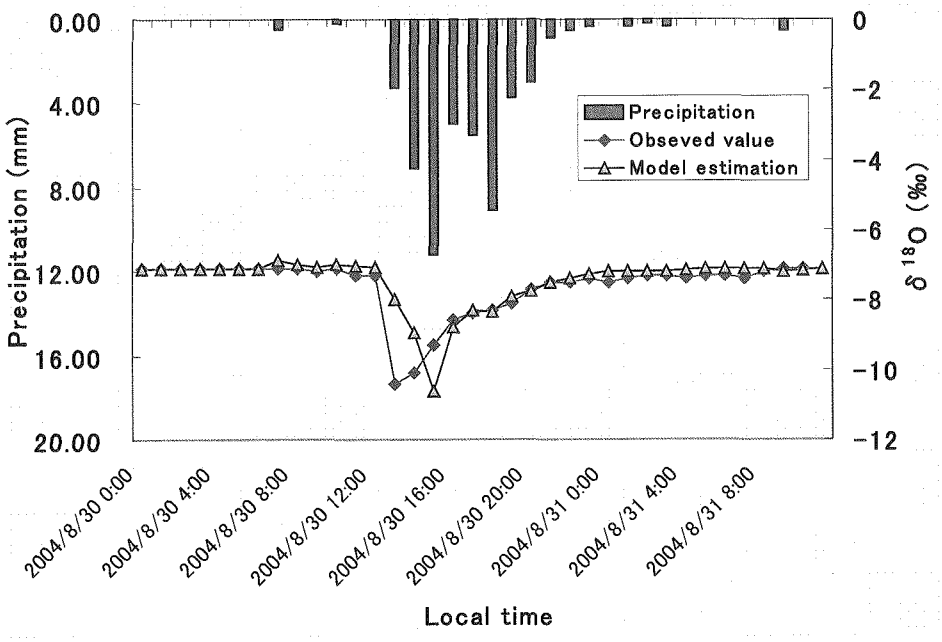


図5.4.20　河川水中の$\delta^{18}O$濃度変化に関する実測値と
タンクモデル推定値の比較

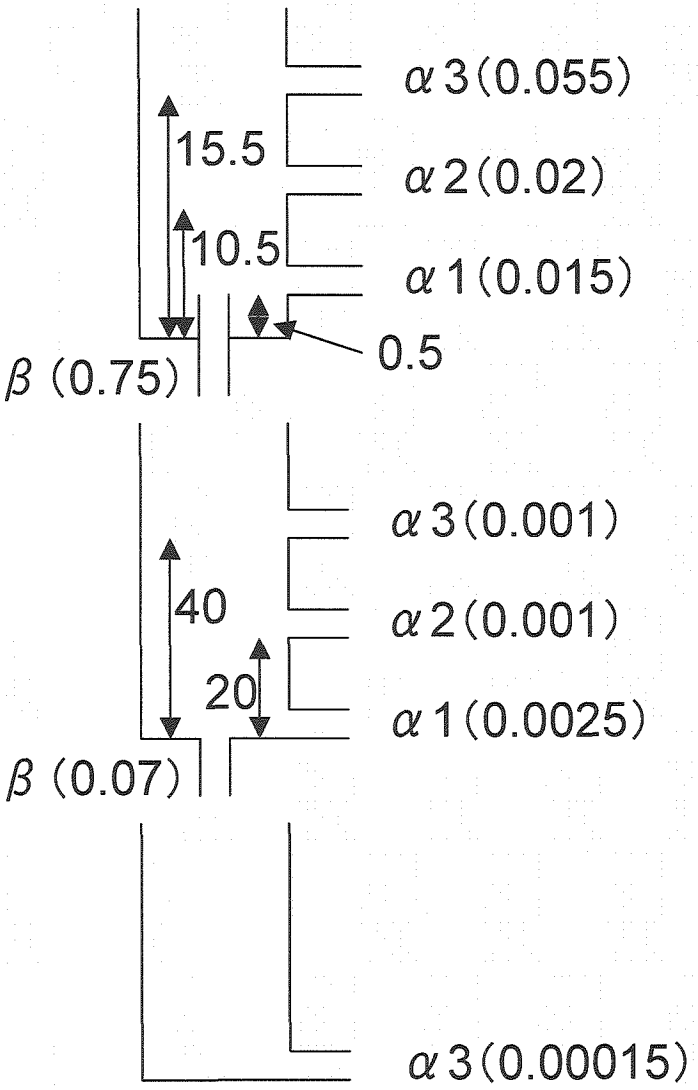


図5.4.21　タンクモデルの構造

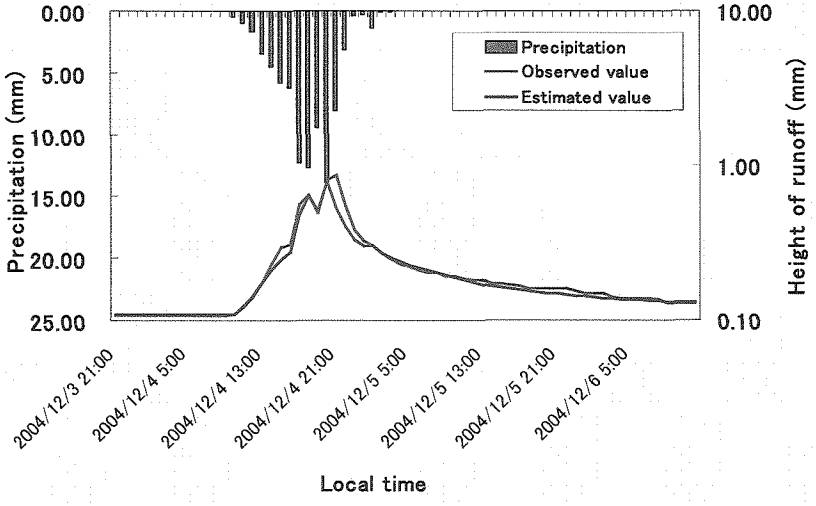


図5.4.22　タンクモデルによる推定流出量変化

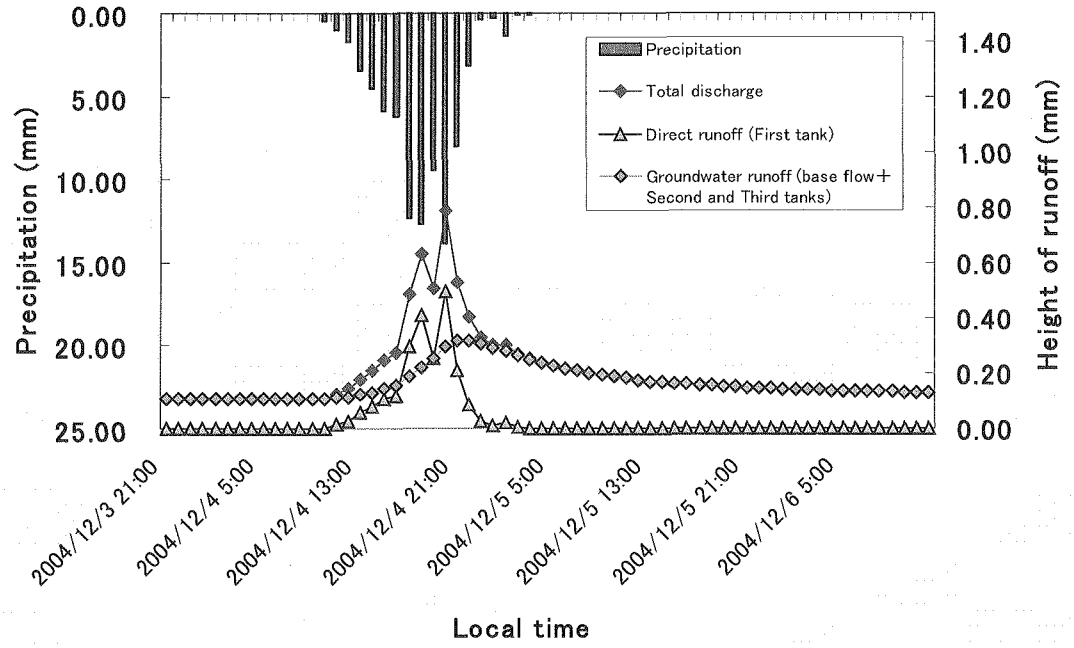


図5.4.23　タンクモデル推定値による直接流出成分と
地下水流出成分の分離

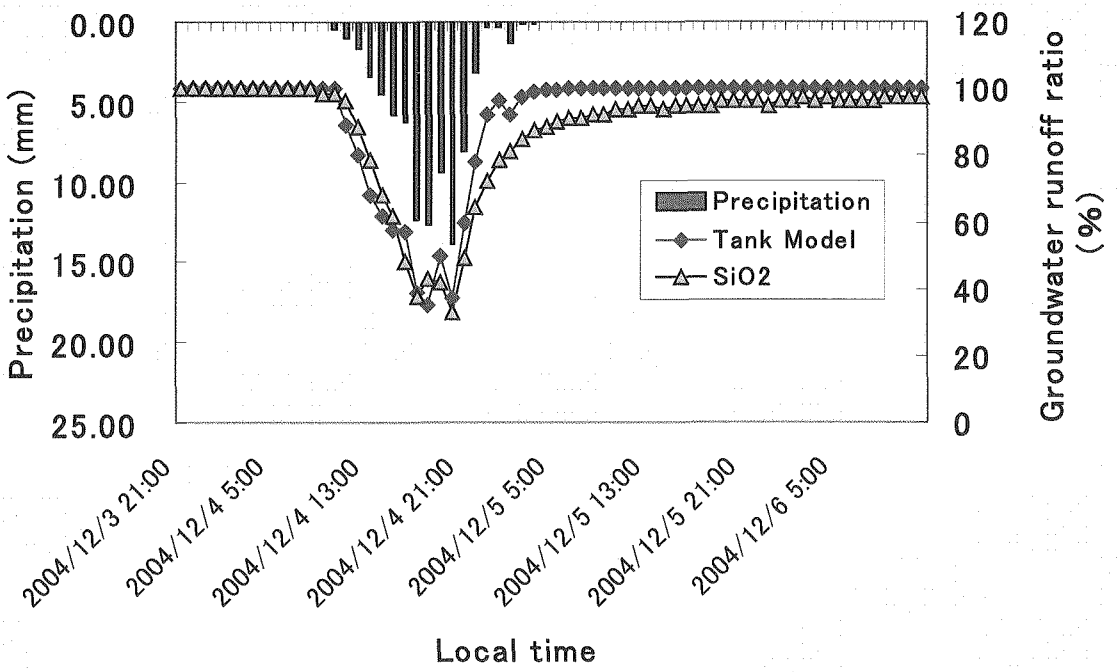


図5.4.24　SiO2濃度およびタンクモデル推定値による
地下水流出率の比較

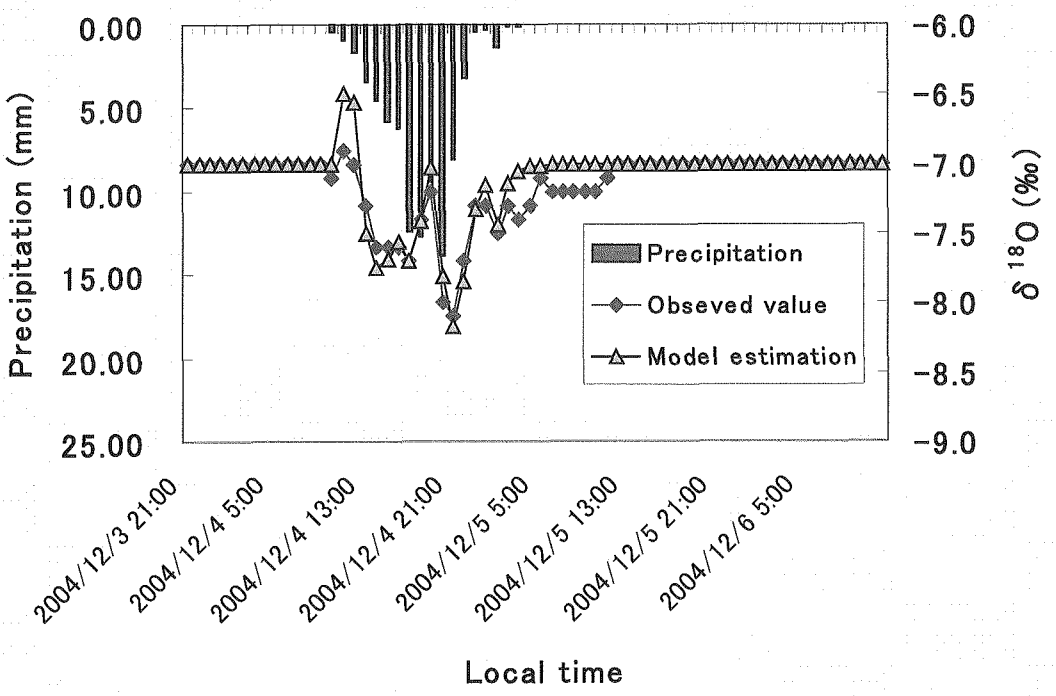


図5.4.25　河川水中の$\delta^{18}O$濃度変化に関する実測値と
タンクモデル推定値の比較

表5.4.1　遮断損失を推定するためのパラメータ

Precipitation event	Throughfall $\delta^{18}O$(‰)	Stemflow $\delta^{18}O$(‰)	Temperature (℃)	Fractionation factor for ^{18}O	Interception loss (mm)
8/30～31	−11.5	−11.1	23.5	1.0095	2.35
12/3～6	−8.5	−8.1	12.7	1.0106	3.22

第Ⅲ章

実用化に向けた研究開発課題の提示及び調査・解析技術の高度化・体系化の総括

1. 研究結果の検討

1.1 基盤技術の実用化・高度化の方向

地層処分の研究開発は，「処分場を造るための実用的技術の開発」，「処分場を造る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，じみち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，研究開発の性格が異なってくる。また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明確にすることが当面の急務である。

「実用化に向けた研究開発課題の提示」（課題グループ）に関しては，今年度は上記の地層処分施設構築の流れの中で，2000 年レポートの体系の大項目である，「地質環境」「処分技術」「安全評価技術」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に対して継続的に調査研究を実施した。また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検討を加えた。

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・水文に関する要因の基礎的技術の研究・開発を実施している。今年度は，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た。

また東濃地科学センターの研究開発も実験立坑の掘削がはじまり，立坑の掘削を伴う研究段階（第二段階）に入っている。本調査・研究の成果を反映させて，第二段階の調査研究計画の評価もおこないながら，より具体的・実用的な調査・解析技術の高度化をおこない，地下水に関する調査・解析技術の体系を構築していきたい。

1.2 課題の提示／調査研究と基盤技術実用化への研究開発

1.2.1 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

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。今年度は，

研究１：掘削影響領域（EDZ）の解析・評価手法と微小破壊音による調査・計測，設計，モニタリングシステムの研究を進展させた。

研究２：低透水岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の高度化に関する実験，解析を引続き実施した。

1.2.2 性能評価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

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。

放射性各種を含む元素が，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。今年度の研究は，

研究１：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。

研究２：処分場構築に関連した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。

1.2.3 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

研究１：断層周辺の割れ目特性に関する研究；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，断層のモデリングを進展させた。

研究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の長期的影響を明らかにする。このための野外調査による実態の調査研究をおこなった。

1.2.4 各分野中間領域の調査研究の連携検討

以上のべてきた課題は，２０００年レポートの研究分野，「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，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。よく指摘される，各分野の中間領域の課題にもあちこちで遭遇している。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，「活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，「掘削にともなう割れ目発生の破壊音による計測・解析とモニタリング手法および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・研究からニアフィールドコンセプトの再構築の重要性が抽出され（Ⅰ－４参照），今後の具体的な連携のありかたが検討された。

1.3 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

1.3.1 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

２０００年レポートの総論報告には，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横目で見ながら，当研究会の「調査・解析グループ」が現在実施している，どちらかというと，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探る。

1.3.2 地下水の基盤技術／要素技術の高度化

「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いる。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した評価をおこない，最新の知見を実用技術へ取り込む方向での議論を進めている。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。個々の R&D の項目については，研究成果の総括で述べる。

1.3.3 環境安全の地下水技術と建設・操業安全の地下水技術

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」の中枢，核種の移行に密接に係った技術であり，後者は，どちらかというと「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。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。

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，「地下実験施設（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，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になろう。「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地下水環境の安定性の統合論理」などがその事例である。

2. 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

2.1 「実用化に向けた研究開発課題の提示」の総括

「処分場を造るための実用的技術の開発」に関し，“第２次取りまとめ”の評価に深くかかわった委員の参加をえて，「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”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，実験施設の建設は，東濃，幌延で始まっている。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”では，可能性は示したにとどまったが，これらの技術を実用的に使うための，より詳細な検討ができる機会が整いつつある。

本年度は，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・調査と成果の検討を試みた。

2.1.1 処分技術

（１） 微小破壊音（AE：Acoustic　Emission）計測による掘削影響領域（EDZ：Excava－tio n　Disturbed Zone）の評価技術に関する研究

本年度は，岩石試料の破壊試験と微小破壊音の計測／波形解析を実施し，その破壊過程の数値シミュレーションを加えて，破壊／ゆるみの発生のメカニズムとAEを用いたより高度のモニタリングの可能性を検討した。さらに，割れ目系硬岩から堆積軟岩へも，調査研究の領域を広げた。

（２） 低透水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

一定の注入圧に振動圧を加えた，動的グラウチングの室内試験とその数値シミュレーションにより，グラウト材の充填メカニズムと注入条件に関する基礎データを進展させた。また現場試験により，数値解析手法の適用可能性を示した。

2.1.2 安全評価

（1）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関する研究。

種々の元素が沈殿する場合，まず非晶質の含水酸化物を形成し，これが徐々に結晶性の酸化物に変わっていく。その過程で固相の溶解度も異なる。また元素が地下水中を溶解して移行する際には，地下水に接している岩石の表面状態によって，収着・移行の遅延が異なる。そしてこれらが長い時間をかけて徐々に変わっていく。

放射線元素が形成する固体の溶解度，収着分配係数を左右する固体の表面状態，そしてその時間変化。本年度は，これを系統的に理解するための上記の実験に着手した。性能評価の安全尤度を低減させることにつなげることを目標にしている。

（2）酸化性地下水・物質に関する研究。

中間領域の研究につなげるため，処分場構築に関連した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。

2.1.3 地質環境

（1）地下処分施設の建設に当たって，遭遇すると考えられる断層／活断層周辺の割目特性と長期的な挙動予測手法に関する研究

阿寺断層／活断層のずれに伴う周辺岩盤の破壊領域の実態を次の二つの指標で表て見た。一つは割れ目密度の計測値であり，他は割れ目に侵入した雨水起源の地下水と岩石の反応によって，（岩石形成時にできた一次鉱物とは異なり）割れ目中に２次的に形成された鉱物に関係する，XRF 全岩分析値（新しく形成された割れ目の指標となることが期待される）である。いずれも断層からの距離と相関があることが認められ，サイト選定における断層回避に関する実用的，工学的判断の考え方とデータの蓄積が進展しつつある。

（2）地下処分施設周辺（とくにニアフィールド）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。

上記の XRF 分析を一歩進めて，処分施設坑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進展させた。

2.1.4 分野間の連携のまとめ

以上要約したように，それぞれの分野で課題を抽出し，試験・調査を実施して，より具体的な問題点に踏み込んでみた。課題グループの目標の一つは，それぞれの中間分野で，研究・開発が手薄な穴，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。その一例は，各分野にわたる具体的な課題として，１．２．４で，また地下

水技術に限定した課題に関しては１．３．３で述べた。今後これらをたたきだいにして，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たい。また中間分野の課題に関する研究開発の進展により，個々の要素の安全を積み重ねた従来の評価では捕らえにくかった，相互の要素が連携した，より現実的な安全の評価が可能になることが期待される。ここで試みているいくつかの事例でこれを検証し，地層処分／安全評価の考え方をさらに進展させたい。

2.2 「調査・解析技術の高度化・体系化」の総括

どちらかというと「処分場を造るための技術の高度化へむけた基礎的研究開発」に相当する研究テーマについての，今年度の成果報告である。

2.2.1 調査技術の高度化に関する研究開発

（１）割れ目系岩盤の水理解析に関する研究／地下水情報化施工用簡易システム SWING（System forWater Information for Ground）法の研究；　最近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，上記の手法の研究に取り組んでいる。

（２）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；地下工事に伴う地圏環境変化の総合モニタリングの一環として河川流出計測を，立坑掘削に伴う環境変化のモニタリングや環境管理に用いる研究を行っている。ニューラルネットワークによる流出解析のツールを作成し，夏季の流出解析のランニングテストでよい結果を得た。引続き深層地下水流動の影響が比較的大きい，冬季の流出解析を実施中である。この基礎研究の成果を踏まえて，地表面の流出解析に基づく「地圏環境モニタリングシステム」の構築をめざしている。

（３）水理試験法および地下水制御法に関する研究／亀裂性岩盤に対するベントナイトスラリー注入試験：地下水に関するモニタリング，特に地中での間隙水圧・水温関連の計測では，従来の機器は長期の耐久性と維持管理に難点が多く，地層処分で重要な長期の経時変化の観測に適合しない。FBG（Fiber Bragg Grating）光ファイバーを用いた地盤内の水温・水圧計測システムの開発に解決の可能性を見出し，良好な成果が得られつつある。実

用化に向けては，センサーの連装化やファイバー配線の損失等の問題が見出され，現地試験を積み重ねている。今年度は，これに加えて，水みちの地下水制御に重要な割れ目シールの方法の実用化を目指した試験を実施した。グラウト材には天然の材料で，長期安定をはか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，岩盤亀裂模型で最適注入条件の実験をおこない，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。

（4）深層水理の調査方法およ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水循環のモデル化に関する研究；前年度は水収支解析のキーポイントである，「物質の移流・分散に関する基礎的研究」と「蒸発散のメカニズムに関する実験と理論的考察，数値解析手法の研究」とについて報告した。今年度は，地表水の地下浸透の実態を考慮した地表水・地下水の練成を試み，野外計測データによるモデルの校正をおこなった。今後は，時系列の計測データの蓄積をおこない，ツールの検証をおこない，　陸域水循環系評価の実用的手法を確立していきたい。

（5）安定同位体分析による地下水流動機構の研究／降水中の安定同位体比変動に基づく変成岩源流域における降雨—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おこないデータの蓄積をはかっている。地下水流動が極めて遅い低透水性媒体／地層には，地下水流動変遷の履歴情報が保存されていることがわかってきた。この手法を用いて，幌延深地層研究施設の堆積岩（ボーリングコア）の安定同位体分析から，この地域の深部の地下水は，海水が化学反応やろ過作用を経て変化した化石水であること，天水浸入／涵養の深度がそこまでおよんでいないこと，山側から海側への極めて低速な地下水流れが存在することなどが考えられた。今年度は地下水形成のもとである降雨の地下浸透に関し安定同位体の組成の鍵をにぎる，降雨流出過程に焦点をあてた調査を実施した。とくに昨今，木の幹を伝わって地表へ到達する雨水（樹幹流）が安定同位体組成に与える影響が大きいことが指摘されており，その実態を把握するために，貯留効果の少ない山地源流域の降雨流出機構と降水中の安定同位対比の時間変動特性を利用する研究をおこない，その影響が大きいことを見出した。またこれらの一連の研究を通して，地下水流動特性と水理試験結果の整合性がみいだされ，従来から，判断するに足るデータがすくなく，「水理／物理的データに基づく地下水理解析と地化学分析結果との不一致」という命題に解決の糸口が得られてきた。

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。しかし地層処分のどの段階で使うか／使えるかの目標，達成度は，それぞれ異なっており，まだ全体を統合した実用的な体系ができあがるには時間を要するが，それぞれの研究成果内容の検討と，実用化の見通し，および東濃地科学センターが，計画・実施中のプロジェクト

への取り込み方などについて，これからも議論を展開していきたい。

2.3 瑞浪超深地層研究所の第二段階の調査研究計画に関するコメント

当研究開発に関する研究会の場で，超深地層研究計画第二段階の計画案についての意見交換をおこなった。研究会としての意見をまとめるまでの十分な意見交換はおこなっていないので，ここでは研究会の議事録に基づいて，メンバーの意見を要約した結果を記述するにとどめ，第二段階の調査・研究計画の参考に供したい。

2.3.1 第二段階の調査研究計画に関する一般的なコメント

第二段階の調査研究計画（立坑掘削500mまでの計画書（案））に基づいて検討した。次のような意見があった。

（1）第二段階前半（500mまで）と後半（1000mまで）の研究開発の位置付け

○　前半は技術的な調査研究，後半は実地検証という考え方もある。

○「前半の成果で改良を加え，後半でもう一度繰り返す」か「前・後半を最初の計画に沿って一連のものとして実施」。解析に関する項目はどちらかというと前者，掘削に影響する計測項目は後者か。いずれにしても前半である程度の成果をだしておきたい。

○　前半の調査研究の成果で後半に省けるものを抽出，研究開発の重点を絞るのも一つの方法（研究開発項目の詳細では，地球化学分野では後半まで継続することが明示されているが，岩盤力学，地下水理分野では前半でとめられているのは，これに近い発想か）

(2) 長期にわたる立坑掘削・計測に伴う，地質環境の擾乱について

○　立坑掘削に伴って，地質環境がどのように変化するかの把握も重要だが，施工・調査研究期間が長期に及ぶことから，立坑周辺のみならず，研究開発に必要な乱されてない場まで乱してしまい，結局なにも分からないということはよくあることである。施工・調査工程の事前の検討が重要。

○　一方地下水理の立場からいえば，場を大いに乱して，その影響が増幅されることも意味がある。その際に掘削作業等の人為的な記録を，時系列で克明に記述し，データの分析・解析の時点でその影響を排除できるようにしておくことが重要。

（3）わが国固有の地質環境について

○「わが国固有の地質環境特性を把握する」という表現がよくでてくるが，「わが国固有の・・・」とは何を指すのか，海外と何が違うのか，それらのデータをどう取り扱っていこうとするのか，事前の議論が必要。

（4）工事段階のデータの取得・検証とデータベースに関して

○　工事段階でのデータ取得は，データ取得に追われ，データの整理・質の良否の判断が後回しになりがちである。データに基づく事象の検証も先延ばしになりがちである。「データを取得する」ではなく「データを活用できる」仕組みを，具体的につくっておくことが重要である。どの工程で，具体的になにを検証・評価するかを，あらかじめ決めておくの

も一つの方策であろう。

○　この段階でのデータベースは，工事と試験・調査が錯綜する工程の中で，データに影響するどのような事象が，どこでおこったかを，総合的かつ時系列で克明に記載しておかないと役にたたない。各担当分野の連携を密にして，様々なデータを統括する施工管理が必要である。

（5）調査研究とデータ計測とのシステムを，もう少し簡潔に整理する必要がある。

○　例えば地下水に関する計画では，地下水圧，地下水流動，地化学に関する調査研究項目に関する計測が混在していて，総合的な目標または評価をどこへ着地させるのかの視点が見えない。

○　各分野や調査研究毎に必要な計測項目の検討だけでなく，それらに共通した計測項目についても検討しておくことが肝要である。また事業所間の調査研究項目も，連携を密にして，役割分担とデータ交換も含め，共同で研究を進めることが，システムの簡潔化を図るのに役立つであろう。

（6）調査研究と建設工事の実証

○　この調査研究の目標が，基本的な技術の集大成と建設・操業のマネジメントシステムの構築とすれば，この段階では前者は，建設に伴う地層処分特有の技術に絞った，原位置での調査研究が重要項目であり，後者は，現在の技術で処分場立坑の建設と施工管理ができることを実証することが重要項目である。第二段階の計画では，調査研究内容が網羅的であり，地層処分特有の技術が十分に絞り込まれていないし，両者の項目が混在しているように見受けられる。研究重視と施工工程重視のどちらかに重点をおくべきであろう。

○　研究重視の立場からは，第二段階の計画にみる立坑の施工技術は，一般的な土木技術であり，土木工事に際しては必ず実施する，坑道の安定・出水に関する（労災上の）安全，周辺地域の環境保全等に関する項目は，研究項目とは別のルーチンの作業として扱い，項目も必要最小限にしぼった方がよい。一方，施工工程重視の立場では，実施設建設の施工管理に資する実用的なデータを取得するには，調査研究項目が多すぎると障害になる。継続的な時系列データを取得し，予測を実際の施工に役立てるシステムの構築を急ぐべきとも考える。

（7）　最終目標は，閉鎖後／隔離型処分の評価に資する，的をしぼったデータの取得

○　第二段階の調査研究は，立坑掘削の建設段階であるから，長期の最終処分／隔離型処分の安全・安定にいたる，いわば不安定な過渡過程の調査・研究である。この段階では，建設・操業時の安全の項目に目がうばわれがちである。計画では，一般的な技術が錯綜している。閉鎖後を念頭においた，地層処分特有の技術に重点をおかれたい。

2.3.2 第二段階の調査研究計画に関する分野毎，分野間の視点で見たコメント

第二段階の調査研究計画（立坑掘削500mまでの計画書（案））の５章「第２段階の調査研究項目の設定」６章「第２段階の調査研究計画」に基づいて検討した。いくつかのコメントを，要約して記述する。

（１）研究坑道のレイアウトと調査研究項目の制約

○　立坑は密閉遮水方式でなく，水圧を逃がす方式のようである。この場合，とくに地下水に関しては，地層処分の調査研究の本命である計測坑道が深さに比して短すぎ（用地取得の問題もあろうが），立坑による擾乱が大きいと思われる。これに関する実測は計画されているようであるが，研究項目によっては（地球化学特性の把握など），目標が達成できないものも生じよう。事前の十分な検討が望まれる。Mol では，とくに凍結工法の影響が計測坑道におよび，別の坑道が必要であった。AECL や Aspo でもこれに関する検討がなされて，URL の目標に対するなんらかの割り切り方をしている。東濃の URL 計画でも検討されていることと思うが，場合によってはこれら海外の URL の考え方をもう一度レビューすることも必要であろう。一方立坑の建設で水圧を逃がす工法が必要であると同様，処分坑道に対応する計測坑道でも，水圧をどのように逃がすかは重要な問題である。同様な建設・操業の工程をとる鉱山の技術では，水抜き坑道により水圧を逃がすのが一般である。上記の地下水の問題，計測坑道のレイアウトとあわせて，検討の余地がある。

（２）第２段階の調査計画

○　地質・地質構造に関する調査：第２段階の前半に限定して考えると，ａ．「立坑の壁面調査」は，施工工程と最も錯綜する作業である。実用的な技術の確認の立場からは，調査項目は調査データの分析時に最小限必要なカルテをつくることに重点をおき（贅肉をとる），何のために，どの精度のデータを蓄積するかを十分検討することが肝要である。一方研究開発／技術の高度化の観点からは，壁面調査にもっと GIS 等を駆使した３次元の可視化技術を取り入れ，また多分野の情報を同一の座標に表現し，検討できるシステムをこの時点で開発しておくべきとの意見もある。ｂ．逆 VSP 探査：立坑掘削に限れば，切羽前方探査は，実用上は事前のボーリング（先行観測孔も含む）＆湧水調査で十分であろう。とくに物理探査のデータは多数のデータを組み合わせないと解釈がしにくい。この時点で検証しておくべきという意見と，贅肉をとる立場からは別の工程で実施することも考えられるという意見もある。

○　岩盤の水理に関する調査：ａ．地下水に関する調査は，地化学調査も含めて，多くの項目がある。施工管理の目的と研究開発目的の項目をわけて，計測の流れを整理しておく必要がある。計測坑道で実施すれば目的を達成できるものも分別・整理する（坑孔内計測など）。初期からの時系列データが必要な計測分野は，地道に，着実に継続させることはいうまでもない（地下水長期モニタリングなど）。ｂ．蛇足であるが，「第一段階の予測の妥当性確認とモデルの更新」という言葉が頻繁にでてくるが，地質・地盤の妥当性の確認は，何をもって妥当とするかで評価が常に分かれるところである（予測が期待したほどあわな

いことが多い)。むしろ「情報が増えたらよりよいモデルになった（マッチングの精度がよくなった）ことを強調するほうがよい。Aspoの段階調査のパンフレットもこれを強調する立場をとっている。ｃ．研究開発の立場からは，間隙水圧測定は，独立に計るのではなく応力場と変位との一連のシステムで計測することが重要。これによって掘削や地震の影響に関する地下水理と力学の連成問題のデータも提供できる。また物理探査による地下水理物性と地下水挙動の計測技術も急速に進展しており，新しい技術の導入も積極的におこなう必要がある。ｄ．水理学的な掘削影響領域EDZに関しては，力学的EDZと連携した計測が必要である。どのような方法で確認できるのか，方法論の詳細も含めて検討の余地がある。また建設・操業から閉鎖後／隔離型処分に至る地層処分の工程の，それぞれの段階でのEDZの重要性を再検討する必要がある。幸いこの計画は，１８年度以降となっているので，それまでに得られたデータと，諸外国のデータと考え方のレビューを加えて，今後の展開を図りたい。

○　地下水の地球化学に関する調査研究：ａ．ボーリング孔や集水リングからの採水では，ライニングやグラウチング，地表付近の酸化性地下水などが処分施設の地下水質に与える影響についての，原位置での調査項目を，後半の調査研究も含めたどこかで入れたい。ｂ．予備ステージからの水平ボーリングについては，岩盤に孔をあけ過ぎで，地下水環境を大きく乱さないか。また後述するモデルの検証の妨げとならないかなど，システム全体の目的を達成できる最小限の擾乱で留めるよう，事前の十分な検討が欲しい。

○　岩盤力学に関する調査研究：ａ．室内試験および初期応力測定については地層処分特有の研究開発項目は少ないが，施工時調査としての基本的なデータを取得しておくことは必要であろう。ただ第２段階以降で意義がある試験は（前半で行うかは別として），岩盤の原位置での試験・計測であり，第１段階での予測との比較検討は，基本的にはこのような原位置試験値を使った解析との比較であろう。ｂ．掘削影響領域（EDZ）の調査については，地下水調査の項で述べた。ｃ．学術的な基礎データに関しては，岩盤物性の異方性や不均質性を議論できるデータの取得，さらに深度や空間スケールの影響に関して，ミクロな異方性がマクロな岩盤に与える影響，深さや応力履歴による断層の浸透率構造の変化に関するデータなど，研究坑道で基礎的な研究のデータを取得してはいかがかという意見もある。同様な趣旨で，長期の影響としては，岩盤と地下水の化学的な反応と長期的な力学物性の変化に関する原位置でのなんらかの試験ができるとよい。いずれにしても既存のデータのレビューをした上で，的を絞ったデータの取得が望まれる。

（３）第２段階のモデル化・解析計画

○　水理地質構造モデルの構築：立坑の影響だけで，サイトスケールのモデルの詳細なマッチングは難しい。むしろ簡便で実用的な手法で掘削に伴うデータを取得し，施工に容易にフィードバックできる解析や一歩すすめて地下水に関する情報化施工を目指すほうが第２段階としては賢明かもしれない。

○　地球化学モデルの構築：ａ．地層処分特有の優先すべき課題を多く含む項目であるが，

建設段階は外部条件が刻々変わり，取得したデータの解釈が難しくなる。施工時のイベントを時系列で克明に記載する施工管理が重要である。予察や初期値の計測はともかくとして，詳細な解析と検証は第三段階に実施する内容か。ｂ．水圧低下による溶存ガスの脱ガスや酸化的空気の岩盤内への浸入に関しては，現象の確認という原位置試験目的はわかるが，地層処分の各段階での影響の程度など，地下水シナリオの中での位置付けに関する十分な検討を先行させたい。

○　岩盤力学モデルの構築：岩盤の長期力学挙動に関する試験・解析については，軟岩では，建設・操業段階では坑道の安定，作業の安全などに関して検討の余地があるが，閉鎖後／隔離処分の段階や硬岩ではむしろ重要度が低いことを実証したい。第三段階の課題か。

（４）工学技術の研究計画：ａ．計測工および対策工，施工情報のデータベース化に関しては，大きな工事の施工過程では必ず実施する事項であり，妥当であろう。前方予測技術に関しては，前述の地質・地質構造に関する調査でコメントした。ｂ．立坑のスムースブラスティング工法については，処分場の実用的な深度，発破による EDZ の影響なに関する検討が進展するにつれ，TBM やレイズボーラーなどによる立坑掘削も研究開発の対象となろう。他の工法のレビューと比較をしながら，適用性を検討することが重要である。ｃ．施工情報のデータベース化に関して追記すると，多くの情報が詰まっている工事に伴うデータベースから，有用な情報を抽出して意志決定に結びつける「データーマイニング」の技術を取り入れることも，第２段階の調査研究として有意義なことと思われる。また地下水情報化施工とそのデータの取得に関しては，（３）の水理地質構造のモデル化でコメントした。

(5) 全体を通しての感想：ａ．立坑の調査研究で手間をとらないで，早く計測坑道での地層処分特有の調査研究へ進むべき。そのためには，一般的技術で「確認すればすむ」項目を思い切って削除し，地層処分特有の問題に原位置試験の重点をおくほうがよい。ｂ．最も重要な目標の一つである閉鎖後／隔離処分の安全について，「いつ確認して，見せてくれるのか」という社会のニーズに答えていないきらいがある。第２段階／立坑建設段階の調査研究でもあり，やむをえない面はあるが，この調査研究の工程図のたぐいだけでなく，どの調査研究段階でも，「閉鎖後／隔離型処分を最終目標とすると，この段階での調査研究項目の位置付けと成果の見込みはこうである」という説明が随所に欲しい。ｃ．地質環境，処分技術，性能評価の３分野の連携については，いくつかの項目について，コメントの中でも述べてきたが，系統的な計画案は示されていないようである。今後の検討に期待したい。