



亀裂を有する堆積岩の水理・物質移行評価のための データ取得・解析（II）

Study on Flow and Mass Transport through Fractured Sedimentary Rocks (II)

下茂 道人* 熊本 創* 唐崎 健二* 佐藤 久
澤田 淳

Michito SHIMO*, Sou KUMAMOTO*, Kenzi KARASAKI*, Hisashi SATO
and Atsushi SAWADA

地層処分研究開発部門
システム性能研究グループ

Performance Assessment Research Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

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

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

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

亀裂を有する堆積岩の水理・物質移行評価のためのデータ取得・解析（II）

日本原子力研究開発機構

地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究ユニット

下茂 道人*, 熊本 創*, 唐崎 健二**, 佐藤 久*, 澤田 淳

(2008年12月12日受理)

高レベル放射性廃棄物の地層処分における安全評価では、最終処分施設建設地の選定までの各調査段階において、調査地区の特性を把握し、地下水流动および物質移行モデルの構築や、モデル解析のためのパラメータ設定に適宜反映させることが重要である。従来の研究では、堆積岩のうち新第三紀堆積岩などの軟岩では粒子間隙が主な移行経路として考えられてきた。しかし、軟岩においても、亀裂が発達している場合においては、亀裂が粒子間隙よりも卓越した水みちを形成すると考えられる。本研究では、このような堆積岩が分布する地域を対象とした地下水流动および物質移行特性を評価する手法検討の一環として、①コア岩石試料スケール、②数キロメータースケールの2つの異なるスケールでの検討を実施した。

コア岩石試料スケールを対象とした検討では、幌延深地層研究計画にしたがって換気立坑道近傍から掘削されたパイロットボーリングで得られた岩石コアから平行平板亀裂を有する試料を作成して、透水試験ならびに非吸着性トレーサー試験など試験を実施した。それらの試験結果から、岩石試料の透水係数、拡散係数、物質移行開口幅、分散長等などの水理物質特性を評価するとともに、それらのデータに基づいて、亀裂開口幅および間隙率などのパラメータの違いが岩盤内の物質移行現象に与える影響を整理した。数キロメータースケールを対象とした検討では、幌延深地層研究所のボーリングで観測されている温度データを用いた地下水流动評価を検討した。その結果、検討対象としたボーリング孔間に透水係数の低い断層のコア部の存在を推定した。

本報告書は、大成建設株式会社が日本原子力研究開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

核燃料サイクル工学研究所(駐在) : 〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

*: 大成建設株式会社 技術センター土木技術研究所

**: Lawrence Berkeley National Laboratory

*: 技術開発協力員

Study on Flow and Mass Transport through Fractured Sedimentary Rocks (II)

Michito SHIMO^{*}, Sou KUMAMOTO^{*}, Kenzi KARASAKI^{**}, Hisashi SATO^{***} and Atsushi SAWADA

Geological Isolation Research Unit, Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 12, 2008)

It is important for safety assessment of HLW geological disposal to understand hydro-geological conditions at the investigation area, and to evaluate groundwater flow and mass transport model and parameters, at each investigation phase. Traditionally, for Neogene sedimentary rock, the grain spacing of sediments has been considered as the dominant migration path. However, fractures of sedimentary rock could act as dominant paths, although they were soft sedimentary rocks. In this study, as part of developing groundwater flow and mass transport evaluation methodologies of such a “fractured sedimentary rock” distributed area, we conducted two different scale of studies; 1) core rock sample scale and 2) several kilometer scale.

For the core rock sample scale, some of laboratory hydraulic and tracer experiments have conducted using the rock cores with tailored parallel fracture, obtained at pilot borehole drilled in the vicinity of ventilation shaft. From the test results, hydraulic conductivity, diffusion coefficient, transport aperture, dispersion length and etc. was evaluated. Based on these test results, the influence of these parameters onto mass transport behavior of fractures sedimentary rocks was examined. For larger scale, such as several kilometer scale, the regional scale groundwater flow was examined using temperature data observed along the boreholes at Horonobe site. The results show that the low permeable zone between the boreholes might be estimated..

Keywords: Geological Disposal, Flow, Mass Transport, Fractured Soft Sedimentary Rocks

This work was performed by Taisei Corporation under contract with Japan Atomic Energy Agency.

JAEA Liaison: Performance Assessment Research Group, Japan Atomic Energy Agency

^{*}: Technology Center, Taisei Corporation

^{**}: Lawrence Berkeley National Laboratory

^{***}: Collaborating Engineer

目次

1.はじめに.....	1
2.研究概要.....	2
2.1 研究の目的.....	2
2.2 研究の内容.....	2
3.岩石試料を対象とした水理・物質移行特性データの取得.....	3
3.1 試料の採取、整形.....	3
3.2 試料の分析.....	6
3.2.1 分析項目	6
3.2.2 基本物性試験.....	6
3.2.3 一軸圧縮試験.....	8
3.2.4 X線分析	9
3.2.5 空隙径分布測定	13
3.3 透水試験	16
3.3.1 インタクト試料を対象とした透水試験（トランジエントパルス透水試験）	16
3.3.2 亀裂試料を対象とした透水試験（定水頭透水試験）	26
3.4 物質移行試験.....	29
3.4.1 拡散試験	29
3.4.2 トレーサー試験	34
4.亀裂を考慮した堆積岩の水理・物質移行評価パラメータの推定.....	42
4.1 解析モデルおよび解析条件.....	42
4.2 パラメータの設定および解析ケース	42
4.3 解析結果	47
5.温度分布データを使った地下水流量モデルの推定.....	53
5.1 背景と目的.....	53
5.2 HDB孔データ	53
5.3 解析コードと解析条件	55
5.4 解析メッシュ	55
5.5 入力データ	55

5.6 シミュレーションの手順.....	59
5.7 シミュレーション結果.....	59
5.8 5章のまとめ.....	63
6.まとめ	65
6.1 岩石試料を対象とした水理物質移行特性データの取得	65
6.2 亀裂を考慮した堆積岩の水理・物質移行挙動の検討.....	66
6.3 温度分布データを用いた地下水流量モデルの推定	66
7.おわりに.....	67
参考文献.....	68

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of research	2
2.1 Research objectives	2
2.2 Research contents	2
3. Measurements of flow and mass transport data in rock specimens	3
3.1 Collecting and forming of rock specimens	3
3.2 Analysis of specimens	6
3.2.1 Analysis items	6
3.2.2 Physical property experiments	6
3.2.3 Uniaxial compression tests	8
3.2.4 X-ray diffraction analysis	9
3.2.5 Void distribution analysis	13
3.3 Hydraulic test	16
3.3.1 Hydraulic test for intact rock specimens (Transient pulse test)	16
3.3.2 Hydraulic test for fractured rock specimens (constant head test)	26
3.4 Transport test	29
3.4.1 Diffusion experiments	29
3.4.2 Tracer migration tests	34
4. Flow and mass transport property evaluation with considering an effect of fracture	42
4.1 Numerical model and conditions	42
4.2 Parameter specification and analysis cases	42
4.3 Analysis results	47
5. Groundwater flow model estimation by using temperature data	53
5.1 Background and objectives	53
5.2 Data obtained at HDB series of boreholes	53
5.3 Numerical code and analysis conditions	55
5.4 Numerical mesh	55
5.5 Input parameters	55
5.6 Procedure of numerical simulations	59
5.7 Simulation results	59
5.8 Summary of chapter 5	63
6. Summary	65
6.1 Measurements of flow and mass transport data in rock specimens	65
6.2 Flow and mass transport property evaluation with considering an effect of fracture	66
6.3 Groundwater flow model estimation by using temperature data	66

7. Conclusion	67
References.....	68

図目次

図 3.2-1 採取深度と物性値の関係（密度、有効間隙率）	7
図 3.2-2 X線分析結果	12
図 3.2-3 水銀圧入法による細孔径分布測定結果	14
図 3.2-4 細孔径分布測定結果（既存データとの比較；下茂ほか, 2003, 2004, 2007, 2008） .	15
図 3.3-1 トランジエントパルス透水試験装置概要	17
図 3.3-2 トランジエントパルス法測定原理	18
図 3.3-3 トランジエントパルス透水試験手順	18
図 3.3-4 岩盤内応力と深度の関係（HDB-1孔, HDB-6孔）	19
図 3.3-5 Hsieh 法による解析手順の概念図	22
図 3.3-6 トランジエントパルス透水試験結果	24
図 3.3-7 深度と透水係数の関係（既往データとの比較；下茂ほか, 2003, 2004, 2007, 2008）	25
図 3.3-8 定水頭透水試験装置概要	27
図 3.3-9 供試体作成の模式図	27
図 3.4-1 拡散実験装置概要	30
図 3.4-2 拡散実験装置および供試体の概観	30
図 3.4-3 拡散試験結果	33
図 3.4-4 実効拡散係数と有効間隙率の関係（既存データとの比較；下茂ほか, 2003, 2004, 2007, 2008；核燃料サイクル開発機構, 1999）	33
図 3.4-5 セル型トレーサー試験装置概要	35
図 3.4-6 トレーサー試験結果	38
図 3.4-7 トレーサー試験の解析条件（試料 5）	38
図 3.4-8 物質移行開口幅の感度	39
図 3.4-9 亀裂内縦方向分散長の感度	40
図 3.4-10 マトリクス部の拡散係数の感度	41
図 3.4-11 透水量係数と物質移行開口幅の関係	41
図 4.2-1 解析モデルの概要	45
図 4.2-2 フローポイントと水理試験区間の関係	46
図 4.2-3 水理試験結果（稚内層）	46
図 4.3-1 観測点における濃度変化（物質移行開口幅を変えたケース、マトリクス拡散なし）	49
図 4.3-2 観測点における濃度変化（物質移行開口幅を変えたケース、 $t_H=5.00e-5$ m）	50
図 4.3-3 観測点における濃度変化（物質移行開口幅を変えたケース、 $t_H=1.00e-4$ m）	50
図 4.3-4 観測点における濃度変化（物質移行開口幅を変えたケース、 $t_H=5.00e-4$ m）	51

図 4.3-5 各ケースの開口幅 (t_H , t_T) と流量 Q_f , 実流速 v_f の関係	51
図 4.3-6 観測点における濃度変化 (物質移行開口幅を変えたケースの比較)	52
図 4.3-7 観測点における濃度変化 (間隙率を変えたケース)	52
図 5.2-1 HDB 各孔の位置図 (核燃料サイクル開発機構, 2005b の図 16 を一部変更して引用)	54
図 5.2-2 HDB 各孔沿いの温度 (T) と圧力分布 (P) (凡例の T と P はそれぞれ温度と圧力を表す)	54
図 5.2-3 HDB 各孔沿いの水頭分布 (地下水密度を 998kg/m^3 と仮定)	55
図 5.5-1 HDB-7 孔および 8 孔沿いの地下水密度分布	58
図 5.7-1 下部境界からの各上昇流量 (1mm/yr , 10mm/yr , 50mm/yr) を仮定した HDB-7 孔沿いの温度分布シミュレーション結果と観測データの比較	60
図 5.7-2 上部境界からの各涵養量(下降流) (3mm/yr , 10mm/yr , 50mm/yr) を仮定した HDB-7 孔沿いの温度分布シミュレーション結果と観測データの比較	60
図 5.7-3 上部境界からの各涵養量(下降流) (0mm/yr , 3mm/yr , 10mm/yr) を仮定した HDB-7 孔沿いの圧力分布シミュレーション結果(実線)と観測データ(シンボル)の比較	61
図 5.7-4 下部境界からの各上昇流量 (6mm/yr , 10mm/yr , 50mm/yr) を仮定した HDB-8 孔沿いの温度分布シミュレーション結果と観測データの比較	62
図 5.7-5 上部境界からの各涵養量(下降流) (0mm/yr , 10mm/yr , 50mm/yr) を仮定した HDB-8 孔沿いの温度分布シミュレーション結果と観測データの比較	62
図 5.7-6 上部境界からの各涵養量(下降流) (0mm/yr , 6mm/yr , 10mm/yr , 50mm/yr) を仮定した HDB-8 孔沿いの圧力分布シミュレーション結果(実線)と観測データ(シンボル)の比較	63
図 5.8-1 温度分布解析から類推される透水係数の低い鉛直面の位置(紫色の破線)	64

表目次

表 3.1-1 試料の形状、寸法一覧	4
表 3.2-1 基本物性試験結果一覧（既存データとの比較；下茂ほか, 2003, 2004, 2007, 2008）	6
表 3.2-2 一軸圧縮試験結果一覧（既存データとの比較；下茂ほか, 2003, 2004, 2007, 2008）	8
表 3.2-3 X線分析結果一覧.....	11
表 3.2-4 水銀圧入試験結果一覧	14
表 3.3-1 試験条件	19
表 3.3-2 トランジエントパルス透水試験法で用いた既知パラメータ一覧.....	23
表 3.3-3 トランジエントパルス透水試験結果一覧	23
表 3.3-4 定水頭透水試験結果一覧（亀裂試料：試料 6）	28
表 3.4-1 試験条件一覧.....	31
表 3.4-2 拡散試験結果（既往データとの比較；下茂ほか, 2003, 2004, 2007, 2008）	32
表 3.4-3 トレーサー試験条件	36
表 3.4-4 ブロック試料トレーサー試験解析入力条件一覧	38
表 4.2-1 各パラメータの実測範囲（下茂ほか, 2003, 2004, 2007, 2008）	45
表 4.2-2 解析ケースとパラメータ一覧	45
表 4.2-3 フローポイントの有無と透水量係数の関係（水理試験結果）	46
表 5.5-1 解析に使用した HDB-7 孔沿いのデータ	56
表 5.5-2 解析に使用した HDB-8 孔沿いのデータ	57
表 5.5-3 HDB-7 孔と HDB-8 孔沿いの地下水溶存イオン濃度と密度	57
表 5.5-4 各地層の透水係数と空隙率	58

写真目次

写真 3.1-1 コア試料の外観.....	4
写真 3.1-2 試料整形結果（トランジエントパルス試験用）.....	5
写真 3.1-3 試料整形結果（トレーサー試験用）.....	5
写真 3.3-1 トランジエントパルス透水試験装置概観.....	17

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分における安全評価では、最終処分施設建設地の選定までの各調査段階において、調査地区の特性を把握し、地下水流动および物質移行モデルの構築や、モデル解析のためのパラメータ設定に適宜反映させることが重要である。日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）では、処分事業の推進および安全基準の策定に資することを目的とした地層処分研究開発の一環として、処分場を設置する母岩として大別された結晶質岩および堆積岩を対象とした二つの深地層の研究施設計画を進めており、安全評価上重要な地下水の移行経路に着目し、それぞれの岩種を亀裂性媒体および多孔質媒体として扱ったモデル化を主に行っている。堆積岩のうち新第三紀堆積岩などの軟岩では粒子間隙が主な移行経路として考えられてきた。しかしながら、軟岩においても、亀裂が発達している場合においては、亀裂が粒子間隙よりも卓越した水みちを形成すると考えられる。特に、幌延地域の堆積岩は岩石基質（マトリクス）部の間隙率が高くかつ亀裂が発達しており、多孔質媒体と亀裂性媒体の双方の特徴を併せ持った性質を有することが明らかとなっている。

本研究では、このような幌延地域の堆積岩を対象として、物質移行現象の把握を目的に、亀裂を有する堆積岩の水理・物質移行データを室内試験により拡充するとともに、それらのデータに基づいた亀裂を有する堆積岩中の物質移行評価手法の検討の一環として、亀裂開口幅や基質部の間隙率が堆積岩の物質移行現象に与える影響について数値解析的な検討を行い、各パラメータとマトリクス拡散による遅延効果の関係について整理した。

また、堆積岩が分布する広域的なスケールでの地下水流动場を評価する手法開発の一環として、幌延地域の孔内温度分布に着目して、これを用いて、地下水の流动方向や地表面からの涵養量を推定する試みを行った。

2. 研究概要

2.1 研究の目的

本研究は、①亀裂の発達した堆積岩中の物質移行現象の把握、②堆積岩地域における広域的なスケールでの地下水流动場を評価する手法の開発を目的としている。①については幌延地域で採取された岩石試料を用いた室内での透水試験やトレーサー試験によるデータの取得と数値解析コードを用いた数値実験的な検討を行った。②については、幌延地域で観測されたデータに基づいて数値解析コードを用いたシミュレーションによる評価を行った。

2.2 研究の内容

本研究では、上記の二つの目的に対して、以下の3項目を実施した。

- (1) 岩石試料を対象とした水理・物質移行特性データの取得
- (2) 亀裂を考慮した堆積岩の水理・物質移行評価パラメータの推定
- (3) 温度分布データを使った断層性状と地下水流量の推定

なお、(1)および(2)は、上記の目的①に対応し、(3)は、目的②に対応している。

(1) 岩石試料を対象とした水理・物質移行特性データの取得

試験に用いる試料は、幌延深地層研究計画に基づき掘削されたパイロットボーリングで取得された岩石コア試料（声問層試料）から、亀裂試料、インタクト試料を採取した。

試験は、透水試験および非吸着性のトレーサーを用いた物質移行試験を実施した。試験方法は、インタクト試料については、透水試験をトランジエントパルス法にて行い、物質移行試験は、移流を考慮しない拡散試験を行った。試験から得られるデータを解析し、透水係数ならびに拡散係数を求めた。また、亀裂試料については、セル型のトレーサー試験装置を用いて、定水頭透水試験および移流を考慮した非吸着性トレーサー試験を行い、それぞれ、透水係数と物質移行開口幅、分散長を求めた。

(2) 亀裂を考慮した堆積岩の水理・物質移行評価パラメータの推定

単一亀裂モデルを用いて、これまでに取得した試験データから想定される範囲において、亀裂開口幅や基質部の間隙率の異なる数ケースについて物質移行解析を実施し、各パラメータの違いが堆積岩中の物質移行現象に与える影響について確認した。

(3) 温度分布データを使った断層性状と地下水流量の推定

幌延地域で実施されたこれまでの調査で取得された孔内温度分布データに着目し、一次元流動モデルによる、地下水の流动方向、流动量の推定を行った。

3. 岩石試料を対象とした水理・物質移行特性データの取得

3.1 試料の採取、整形

北海道幌延町にある原子力機構 幌延深地層研究センターが実施したパイロットボーリングにおいて、平成19年度中に掘削した深度から、岩石コアを採取した（写真3.1-1）。地質ならびに採取地点等を以下に記す。

- ・ 地質 : 声問層健岩部
- ・ 採取位置 : 換気立坑パイロットボーリング (GL.-232.45～-233.70m)
- ・ 採取日 : 平成19年1月25日(金)

各試験に必要となる試料の形状および寸法を表3.1-1に示す。インタクト試料を用いた透水試験は、三軸セルにより試料に封圧を載荷した状態で試験を実施する必要があるため、使用する試験装置の構造上、試料の形状、寸法が直径50mm×高さ50mmの円柱状に限定される。亀裂試料を用いた透水試験、トレーサー試験については、コアリングよりも試料への負荷が少ない方法で整形可能なブロック状試料を用いた試験を実施した。なお、今回採取した試料からは、自然亀裂を有する試料が得られなかつたため、亀裂試料については、半割状の試料の間にスペーサーを挟んで作成した人工の平行平板試料を用いた。また、インタクト試料を用いた物質移行試験（拡散試験）では、直径30mmに再コアリングし、これを直径30mm×厚さ5mmの円盤状にスライスしたものを用いた。基本物性試験および試料分析については、一軸圧縮試験では、直径30mm×高さ60mmの円柱状に整形したものを用いた。その他の物性試験、分析については、試料の形状が限定されないため、透水試験、物質移行試験用の試料を採取した近傍から、必要な量の塊状試料をサンプリングして使用した。写真3.1-2、写真3.1-3に透水試験、物質移行試験用に整形した試料の寸法、重量ならびに外観を示す。



(a) 採取深度 GL.-232.45m～GL.-233.00m



(b) 採取深度 GL.-233.00m～GL.-233.70m

写真 3.1-1 コア試料の外観

表 3.1-1 試料の形状、寸法一覧

試験項目	試験方法	試料形状	試料寸法
(1)基本物性試験、試料分析			
・密度、空隙率など	浮力法(地盤工学会, 1989)	岩塊	握りこぶし大
・弾性波速度	超音波速度試験(地盤工学会, 1989)	円柱状	Φ 50mm × L50mm程度
・一軸圧縮試験	一軸圧縮試験(JIS M 0302, JGS 2521)	円柱状	Φ 30mm × L60mm程度
・X線回折	定方位、不定方位法(地盤工学会, 1989)	岩塊	握りこぶし大
・空隙径測定	水銀圧入法(例えば、林他, 2000)	岩塊	握りこぶし大
(2)インタクト試料			
・透水試験	トランジエントパルス透水試験法(青木他, 1994)	円柱状	Φ 50mm × L50mm程度
・拡散試験	透過拡散法(例えば、喜多他, 1989)	円盤状	Φ 30mm × L5mm程度
(3)亀裂試料			
・透水試験	定水頭透水試験(地盤工学会, 1989)	平行平板ブロック	H30mm × W30mm × L50mm程度
・トレーサー試験	トレーサー試験(熊本他, 2004)	平行平板ブロック	H30mm × W30mm × L50mm程度

試料 1

試料寸法	$\phi=50.07\text{mm}$ $L=48.50\text{mm}$
試料重量	161.56g
亀裂の状況	亀裂なし

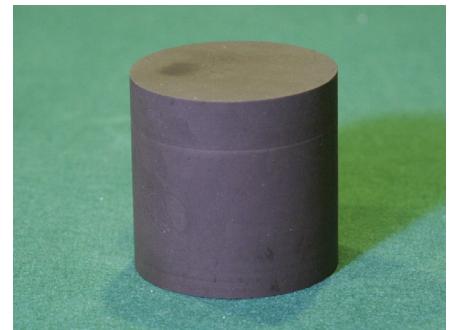
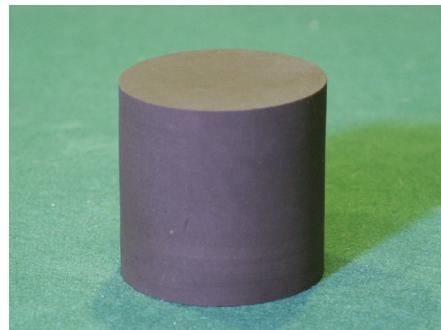
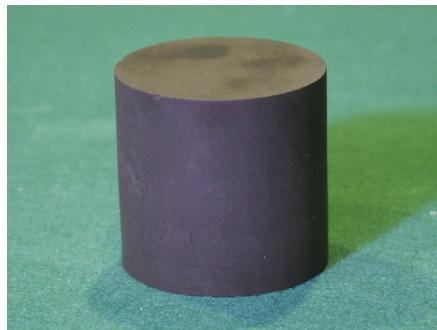
試料 2

試料寸法	$\phi=50.13\text{mm}$ $L=49.11\text{mm}$
試料重量	164.01g
亀裂の状況	亀裂なし

試料 3

試料寸法	$\phi=50.17\text{mm}$ $L=49.24\text{mm}$
試料重量	163.47g
亀裂の状況	亀裂なし

(a) 試料諸元



(b) 写 真

写真 3.1-2 試料整形結果（トランジエントパルス試験用）

試料 4

試料寸法	$H32.3\text{mm} \times W30.4\text{mm} \times L49.9\text{mm}$
試料重量	82.52g
亀裂の状況	人工平行平板

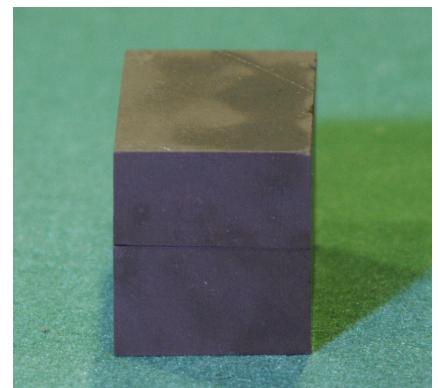
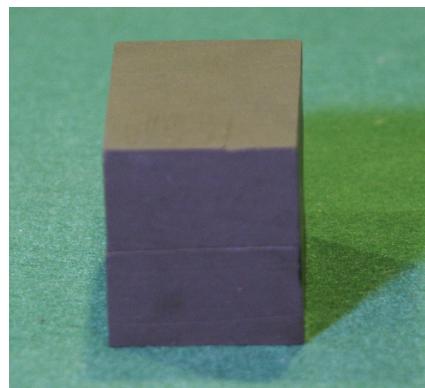
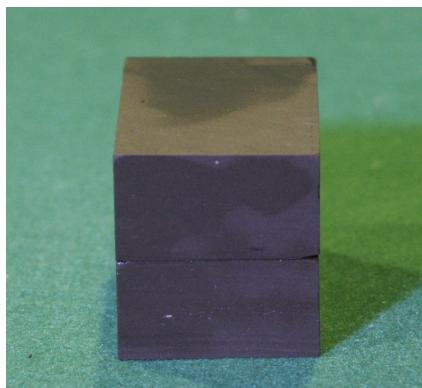
試料 5

試料寸法	$H31.7\text{mm} \times W29.6\text{mm} \times L49.8\text{mm}$
試料重量	79.49g
亀裂の状況	人工平行平板

試料 6

試料寸法	$H32.9\text{mm} \times W30.3\text{mm} \times L49.8\text{mm}$
試料重量	82.25g
亀裂の状況	人工平行平板

(a) 試料諸元



(b) 写 真

写真 3.1-3 試料整形結果（トレーサー試験用）

3.2 試料の分析

3.2.1 分析項目

ここでは、試験に使用する試料の基本的な物性を把握するため、試験に使用した岩塊試料を対象とし、基本物性試験、一軸圧縮試験、ならびに以下の2点を目的とした試料分析を行った。

①珪藻質泥岩の続成作用の変化を調べること

②岩石の空隙分布を把握すること

①に関しては、幌延地域の珪藻質泥岩に見られる埋没続成作用の特徴を踏まえ、続成作用に伴うシリカ鉱物の変化（珪藻→オパールA→オパールCT→石英）に着目し、粉末式X線分析を行った。②に関しては、水銀圧入法による空隙の細孔径分布測定を行った。

3.2.2 基本物性試験

基本物性測定は、試験に使用した試料の物性を把握する目的で実施した。なお、基本物性試験用の試料は、採取した岩塊のうちの透水試験および物質移行試験に使用したインタクト試料、亀裂試料のごく近傍の岩片から採取した。

試験結果の一覧を表3.2-1に、自然状態、強制乾燥状態ならびに強制湿潤状態における密度、有効間隙率（地盤工学会、1989）や弾性波速度（地盤工学会、1989）について採取深度との関係を図3.2-1に示す。また、同図表中には、比較のため、既往の研究で取得したデータを併せて示す。これより、今回の試料は、同深度において採取された声問層試料とほぼ同程度の値を示すことが分かった。

表 3.2-1 基本物性試験結果一覧（既存データとの比較；下茂ほか、2003, 2004, 2007, 2008）

データ 参照元	地層名	採取深度 (GL-m)	密度(g/cm ³)			含水比 (-)	飽和度 (%)	有効間隙率 (%)	吸水率 (%)	弾性波速度(km/s)	
			自然状態	強制乾燥状態	強制湿潤状態					P波速度	S波速度
本研究	声問層	232.45～233.70	1.682	1.158	1.682	0.452	100.0	52.3	45.2	1.85	0.68
			1.682	1.159	1.683	0.451	99.8	52.4	45.2	1.86	0.68
既往の 研究	稚内層	195.00～195.70	1.879	1.465	1.879	0.283	100.0	41.4	28.3	2.70	0.98
		314.00～314.40	1.910	1.526	1.910	0.252	100.0	38.5	25.2	2.80	1.12
		441.50～442.00	1.911	1.527	1.911	0.252	100.0	38.4	25.2	2.70	1.10
		30.6	2.005	1.673	2.005	0.199	100.0	33.2	19.9	2.60	1.15
	声問層	1.580	0.975	1.586	0.621	99.0	61.1	62.7	1.66	0.42	
		1.580	0.979	1.589	0.614	98.5	61.0	62.3	1.66	0.43	
		202.00～202.60	1.574	0.978	1.574	0.609	100.0	59.5	60.9	1.68	0.43
		245.10～245.60	1.568	0.970	1.568	0.617	100.0	59.8	61.7	1.70	0.46
	勇知層	1.570	0.974	1.570	0.613	100.0	59.6	61.3	1.68	0.48	
		1.699	1.177	1.699	0.443	100.0	52.2	44.3	1.85	0.46	
		1.679	1.145	1.679	0.466	100.0	53.4	46.6	1.87	0.59	
		1.675	1.138	1.675	0.472	100.0	53.7	47.2	1.93	0.40	
	189.65～190.00	1.917	1.470	1.917	0.304	100.0	44.7	30.4	1.78	0.44	
		1.882	1.413	1.882	0.332	100.0	46.9	33.2	1.80	0.41	
		226.85～228.27	1.921	1.475	1.921	0.302	100.0	44.5	30.2	1.77	0.36
		240.00～240.60	1.935	1.495	1.935	0.294	100.0	44.0	29.4	1.78	0.38
			1.893	1.429	1.893	0.322	100.0	46.3	32.4	1.72	0.34
			1.907	1.451	1.907	0.315	100.0	45.7	31.7	1.71	0.32

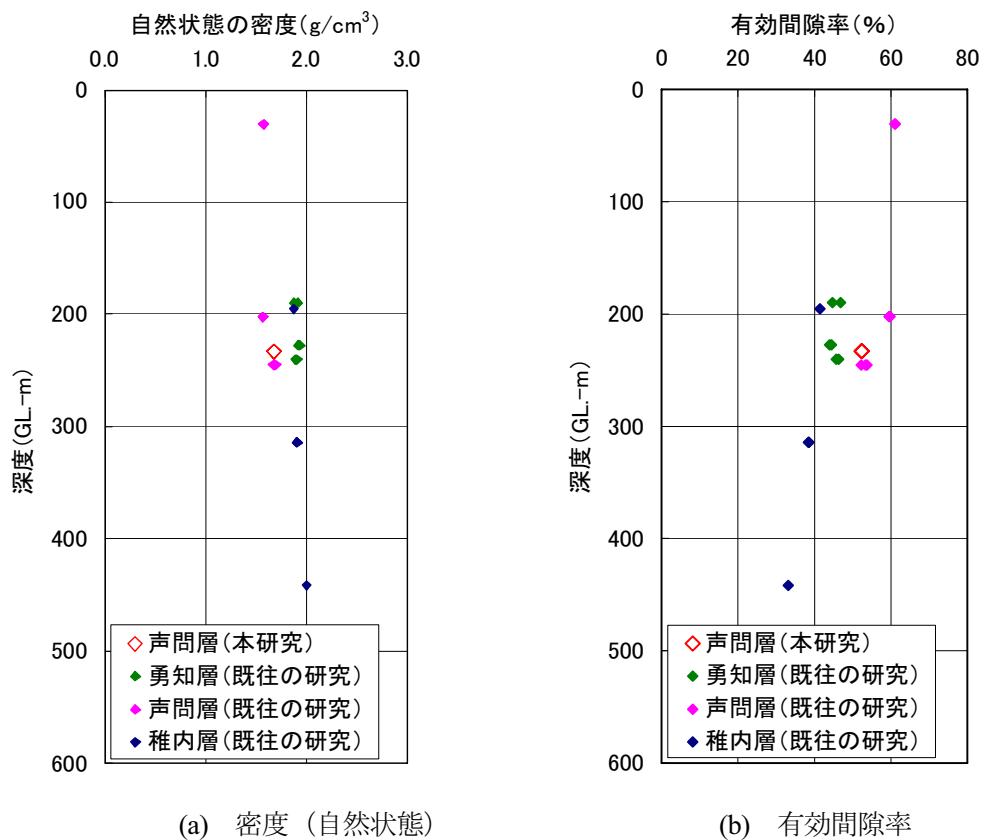


図 3.2-1 採取深度と物性値の関係（密度、有効間隙率）

既存データとの比較（下茂ほか, 2003, 2004, 2007, 2008）

3.2.3 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験 (JIS M 0302, JGS 2521) の結果一覧を表 3.2-2 に示す。同表中には、比較のため、既往の研究で取得したデータ (下茂ほか, 2003, 2004, 2007, 2008) を併せて示す。一軸圧縮強度は、7.8MPa であり、既往の声問層のデータと比べて、やや高い値となった。

表 3.2-2 一軸圧縮試験結果一覧 (既存データとの比較; 下茂ほか, 2003, 2004, 2007, 2008)

データ参照元	地層名	試料名	深度 (m)	再コアリング 方向	単位体積 重量 (kN/m ³)	一軸圧縮試験						
						一軸圧縮 強度 (MPa)		静弾性 係数 (外部) (MPa)		静弾性 係数 (内部) (MPa)		静ポアソン比
本研究	声問層	換気立坑 パイロット孔	232.45 - 233.00	コア軸方向	16.5	8.63	898	1126	1.72	0.286	0.279	
					16.5	8.12	7.78	940	1.62	1.54	0.315	
					16.4	6.58	834	944	1.28	0.237		
既往の研究	声問層	換気立坑 掘削スリ	GL.-30.8m	-	15.8	2.92	221	505	1.46	0.423	0.386	
					15.3	2.10	2.51	547	1.06	1.32	0.384	
					15.8	3.03	239	524	1.44	0.350		
	6-1	96.33 - 96.40	水平	15.1	2.57	263	487	1.16	0.225	0.207		
					14.7	3.31	288	447	1.25	1.07	0.156	
					15.5	2.76	351	657	0.80	0.239		
		96.33 - 96.40	水平+90°	15.1	2.67	360	604	0.83	0.153	0.148		
					14.8	5.14	297	302	1.80	1.29	0.109	
					14.6	3.07	250	463	1.24	0.183		
	6-2	201.05 - 201.40	水平	15.4	4.25	328	494	1.35	0.200	0.185		
					15.2	2.33	320	354	0.68	0.35	0.164	
					15.4	3.02	381	635	0.83	0.220		
		205.75 - 206.00	鉛直	15.3	4.27	341	528	1.28	0.198	0.145		
					15.4	4.68	278	308	1.75	1.67	0.132	
					15.0	5.67	309	439	1.99	0.106		
	6-3	245.75 - 246.00	水平	16.4	3.52	469	802	0.89	0.260	0.211		
					16.5	3.64	441	735	0.87	0.176	0.211	
					16.8	3.68	479	711	0.87	0.211		
		246.00 - 246.45	鉛直	16.6	6.06	339	379	1.97	0.134	0.166		
					16.5	6.12	374	367	1.85	1.90	0.164	
					16.6	6.71	408	456	1.87	0.201		
	7-1	183.00 - 183.30	水平	18.9	1.05	77	78	1.46	0.232	0.253		
					19.1	1.63	1.18	119	1.46	1.45	0.370	
					18.8	0.98	64	63	1.42	0.158		
		183.30 - 183.56	鉛直	18.9	1.35	88	84	1.59	0.439	0.381		
					19.0	1.86	104	134	1.87	0.486		
					18.9	1.27	88	101	1.56	0.217		
	7-2	226.00 - 226.43	水平	18.9	1.05	127	162	0.86	0.311	0.334		
					18.8	1.77	153	207	1.29	1.14	0.352	
					19.0	1.30	115	133	1.26	0.340		
		226.43 - 226.70	鉛直	19.2	1.68	159	188	1.18	0.489	0.474		
					19.0	1.84	207	181	1.03	1.07	0.442	
					19.0	1.62	177	187	1.01	0.491		
	7-3	237.00 - 237.32	水平	19.2	1.44	114	121	1.41	0.237	0.422		
					19.1	0.82	74	100	1.16	1.30	0.476	
					19.1	1.37	113	125	1.32	0.422		
		239.25 - 239.59	鉛直	19.2	1.80	175	213	1.06	0.369	0.280		
					19.4	1.01	101	116	1.06	1.23	0.234	
					19.1	1.03	72	73	1.58	0.238		
	稚内層	HDB-9 (150)	166.00 - 166.8	水平	18.1	10.77	1125	1560	0.97	0.107	0.147	
					18.2	10.85	841	1108	1.05	1.04	0.185	
					18.1	15.15	1357	1378	1.11	0.169		
		HDB-9 (250)	253.5 - 254	垂直	18.2	7.21	1312	2421	0.69	0.238	0.227	
					18.5	5.29	932	1224	0.61	0.80	0.255	
					18.2	4.84	1038	2269	0.50	0.187		
		稚内層	HDB-9 (250)	コア軸方向	18.8	18.18	1084	1520	1.90	0.237	0.232	
					18.7	17.50	1088	1093	1.79	1.77	0.216	
					18.6	16.67	1106	1890	1.62	0.243		

3.2.4 X 線分析

対象試料である珪藻質泥岩の続成作用の程度を調べることを目的として、不定方位法、定方位法によるX線分析を行った。分析用の試料は採取した岩塊のうち、透水試験、物質移行試験用の試料のごく近傍の岩片から採取した。

(1) 原理

X線回折(X-ray diffraction, XRD)は、鉱物の結晶構造に関する情報を得るための分析方法であり、試料に含まれている元素の種類や量を知るための方法ではない。この分析法は、試料中の原子の配列が規則性を有すること、すなわち結晶相であることを前提にしている。

結晶体に単色のX線を当てるとき、X線が結晶格子面で反射し、互いに干渉しあうので、次の条件を満たす方向の回折線のみ強度が増大し、他は打ち消しあって観察されない。

$$2d \sin\theta = n\lambda$$

d は面間隔、 λ は波長、 n は干渉しあう波の位相の差である。 $n=0,1,2,\dots$ の場合をそれぞれ0次、1次、2次…の回折線と呼ぶ。波長 λ が一定の単色X線を照射した際の反射角 θ (2θ) を観測し、上の式から面間隔が求められる。この面間隔は一般に物質の固有の値で、一つの物質の数個の d とそれに対応する回折X線の相対強度が観察できれば、その物質を同定することができる。

X線回折には多くの方法があり、通常は、粉末回折法(powder diffraction method)が適用される。鉱物はそれに特有の回折線を示し、回折線の位置と強度から各鉱物の同定がなされる。つまり、X線回折により鉱物の同定が可能である。具体的には、粉末試料の回折実験によって得られたX線回折結果を既知物質のそれと比較し、未知物質を同定する。

通常の粉末回折法では不定方位法を用い、あらゆる方向に配列した結晶粉末からのX線回折を測定する。不定方位法により試料に含まれる鉱物種の同定が可能であり、そのおよその量も知ることができる。

(2) 不定位法

不定方位法は、あらゆる方向を示す配向性のない粉末試料からのX線回折を行う。試料をめのう乳鉢を用い、指でさわったときに粒子の感じがなくなるまで($4\mu\text{m}$ 以下)粉碎する。粉末にした試料は、穴のあいた(20×14×1.5mm)アルミニウム板製試料ホルダーにつめこみ、測定に供する。得られたデータを既知のX線回折データと比較し、含有される鉱物の種類を決定する。ただし、複雑な混合物や粘土鉱物の場合には同定が困難であるため、さらに定方位法で検討する必要がある。

(3) 定方位法

定方位法は、水ひ法により特定範囲の粒径の粘土を採取して定方位のマウントを行った試料に対して、エチレングリコール処理、塩酸処理、高温処理(地盤工学会、1989)、ジアミン処理を行った試料と無処理の試料についてX線回折を行い、それぞれの結果を比較することで、含有される鉱物の種類とおよその含有量を決定する方法である。

(4) 鉱物含有量の推定

結晶相の混合物からのX線の強度は結晶相の含有量と相関関係があるので、結晶相同定後、適当な回折線を選んで結晶相の定量を行うことができる。しかし、回折X線の強度は、結晶相物質の含有量だけではなく鉱物の種類（化学組成・結晶構造）、結晶度、粉末粒子の形状、大きさ、方位、測定条件、および混合物全体のX線吸収係数などの要素により決定される。その主要なもののみについてみても鉱物の種類によって異なり、同族の鉱物であっても変異があり、同じ結晶面の回折線強度が一定の強度を示すとは限らない。例えば、緑泥石のように大幅に化学組成が変わるために強度も大きく変わるものもある。このような試料では、定量しようとする鉱物の純粋状態での強度が必要であるのに、これを知る（あるいは基準試料を選ぶ）ことが困難である。また、完全な不定方位あるいは定方位試料をつくることが難しいので、試料間の方向性の相違による誤差も避けられない。これらの限界によりX線回折による鉱物の定量は一般にかなり大きな誤差を含むことになり、厳密に定量的な評価を行うことは困難である。

今回の測定では、不定方位測定により得られたX線回折デジタルデータを既知含有量の標準鉱物のそれと比較することによって経験的に各鉱物のおおよその含有量を推定した。

(5) 分析結果

X線解析チャートを図3.2-2に示す。以下に各鉱物の同定結果を示す。

① スメクタイトの同定

スメクタイトの同定は無処理とエチレングリコール処理（地盤工学会、1989）の結果を比較することにより行った。

無処理定方位試料の回折実験により得られた $\text{CuK}\alpha : 2\theta = 5.0\sim7.5^\circ$ に分布する幅が広い回折線が、エチレングリコール処理後低角度 $\text{CuK}\alpha : 2\theta = 5.2^\circ$ に明らかに移動したことは、膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトの存在を示唆する。したがって、スメクタイトが、微量～小量程度存在すると推定される。

② 緑泥石とカオリナイトの同定

緑泥石とカオリン鉱物が共存する場合、緑泥石の002, 004の回折線とカオリン鉱物の001, 002の回折線が重なるため、カオリン鉱物と緑泥石の識別に困難が生じる。このような場合には、何らかの処理によってこれらの回折線の変化を観察し、同定を行う必要がある。近年、カオリン鉱物を判別する有効な手段として、ジアミン処理方法が開発された。ジアミン処理では、カオリン鉱物の層間にジアミンをインターラートさせ、ジアミンとの複合体を作ることにより、カオリナイトの底面間隔を膨脹し、 $\text{CuK}\alpha : 2\theta = 12.3^\circ$ の回折線が $\text{CuK}\alpha : 2\theta = 8.4^\circ$ に変化する。一方、緑泥石は、同処理により回折線は変化しないことから、緑泥石とカオリナイトの識別を容易に行うことができる。なお、カオリナイトへの有機化合物のインターラートによる回折線の変化については、（恒松他、1997）を参照されたい。同文献では、ジアミンの代わりに、尿素をインターラートした際のカオリナイトの回折線の変化の例が示されている。

ジアミン処理の具体的な処理方法としては、まず、水ひ法により採取した特定範囲粒径の粘土50～100mgと10mlのジアミンを試験管にとり、十分に攪拌分散させた後、室温で1日静置する。次に遠心分離により沈殿したものを、定方位法の測定に用いる。

分析試料に対してジアミン処理を行った結果, $\text{CuK}\alpha : 2\theta = 12.3^\circ$ 付近の回折線の移動が観察できなかったため, カオリンが存在していないことが確認された.

③ シリカ鉱物の同定

シリカ鉱物であるオパール CT とオパール A は以下の定義に基づいて同定を行った. オパール CT は, クリストバライトとトリジマイトの不規則の混じりであり, 回折線には $\text{CuK}\alpha : 2\theta = 21.66$ で明確なピークが現れる. 一方, オパール A は非晶質であるため, 回折線には明確なピークが現れず, $\text{CuK}\alpha : 2\theta = 21.66$ を中心に非常に幅広い弱い散乱(ブロードピーク)が現れる.

今回の分析では, オパール A のブロードピークに加え, オパール CT の弱いピークも見られることから, 幌延地域の珪藻質泥岩に特徴的なシリカ鉱物の変化: 硅藻 \rightarrow オパール A \rightarrow オパール CT \rightarrow 石英の中で, 基本的にはオパール A のゾーンに区分されるが, オパール CT への若干の続成変化が見られることが分かる.

表 3.2-3 X 線分析結果一覧

順番	試料名	シリカ鉱物				長石		菱 鉄 鉱	黃 鐵 鉱	石膏	沸石		粘土鉱物			備考
		非晶質? 石英	オパール CT	トリジマイト	クリストバライト	カリ長石	斜長石				斜 沸 石	渦 沸 石	斜 普 チ ロ ル 沸 石	ス メ ク タ イ ト	緑 泥 石	雲 母 類
1	声問層コア試料 (GL. -232.5m)	△	△	△			△	△	△				△	△	△	

凡例: ● 多量, ○ 中量, ▲ 少量, △ 少量? 微量, + 微量, - 極微量

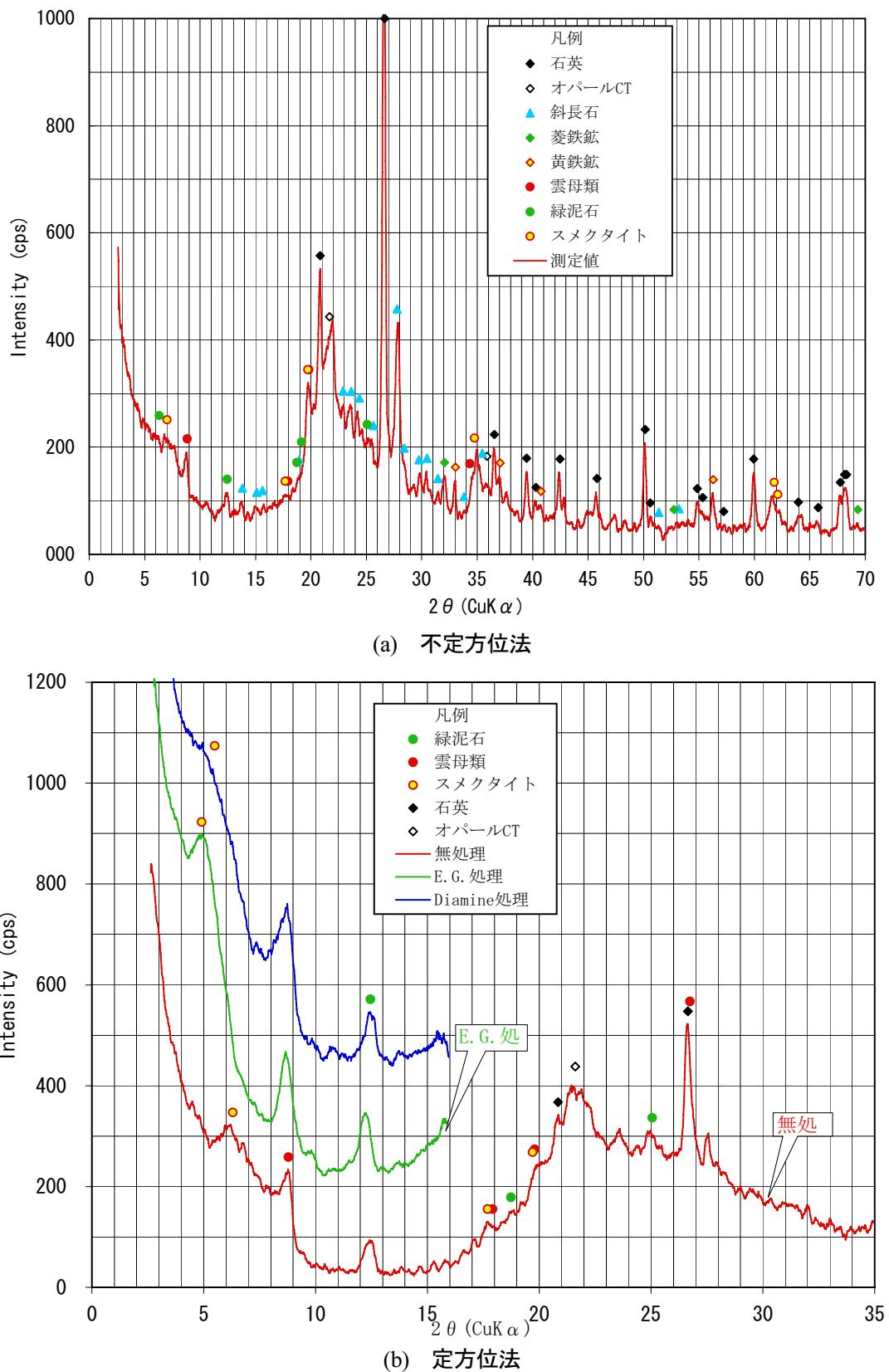


図 3.2-2 X 線分析結果

3.2.5 空隙径分布測定

試料の空隙分布を測定することを目的として、水銀圧入法による空隙の細孔径分布測定を行った。測定には、採取した岩塊のうち、透水試験・物質移行試験用試料のごく近傍から採取した岩片を用いた。

(1) 測定方法

水銀圧入法は、水銀が土壤や岩石表面に対して接触角が大きく、濡れ性が小さいという性質を利用したもので、間隙率や乾燥嵩密度、真密度をはじめ、細孔径分布、細孔内比表面積などを求めることができる。

水銀圧入法による測定は、島津製作所製のポロシメーター（オートポア IV9520：測定細孔径 0.003～ $500\mu\text{m}$ ）を用いて行った。試料は、大きさ 2.5～5.0mm 粒に破碎した試料を 105°C の温度で 1 時間乾燥させたものを用いた。

細孔径分布および細孔内比表面積の計算においては、水銀の土壤に対する一般的な物性値として、表面張力 $\gamma = 0.480 \text{ (N/m)}$ 、および接触角 $\theta = 140^\circ$ を用いた。細孔径と水銀にかかる圧力、表面張力、接触角との関係は、Washburn の法則として関連付けられている。細孔径、細孔内比表面積、乾燥嵩密度、有効間隙率は、以下の関係から決定した。

$$D = -\left(\frac{4}{P_m}\right)\gamma \cdot \cos\theta \quad (3.2-1)$$

$$S_p = -\frac{1}{\gamma \cdot \cos\theta} \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} P_m dV \quad (3.2-2)$$

$$\rho_d = \frac{M_d}{V_c - \left(\frac{M_{me}}{\rho_{me}}\right)} \quad (3.2-3)$$

$$n_p = 100V_{sp} \cdot \rho_d \quad (3.2-4)$$

ここに、 D : 細孔直径 (m), P_m : 水銀にかけた圧力 (kg/m^2), γ : 水銀の試料表面での表面張力 (N/m), θ : 水銀の試料表面での接触角 ($^\circ$), S_p : 細孔内比表面積 (m^2/kg), V_{\max} : 水銀が最大孔径の空隙に注入された時のセル中の水銀体積 (m^3), V_{\min} : 水銀が最小孔径の空隙に注入された時のセル中の水銀体積 (m^3), ρ_d : 乾燥嵩密度 (kg/m^3), M_d : 乾燥状態での試料重量 (kg), V_c : 密閉セルの体積 (m^3), M_{me} : 水銀の重量 (kg), ρ_{me} : 水銀の密度 (kg/m^3), n_p : 有効間隙率 (%), V_{sp} : 比空隙体積 (単位重量当たりの空隙体積) (m^3/kg) である。

(2) 測定結果

図 3.2-3 に各試料の細孔半径と累積有効間隙率の関係を、表 3.2-4 に水銀圧入試験結果の一覧を示す。図より、今回の試料では、細孔半径 $0.2\mu\text{m}$ 付近以下の空隙の割合が多く、既往の声門層を対象とした試験結果の特徴と類似した結果となった。ただし、図 3.2-4 より、細孔半径 $0.005\mu\text{m}$ 以下の分布形状は、既往の稚内層試料の試験結果と類似した特長を示す結果となっており、前節の X 線回折結果に見られるシリカ鉱物の同定結果と整合的な結果が示された。

表 3.2-4 水銀圧入試験結果一覧

試料	採取深度 (GL.- m)	累積細孔 体積 (mL/g)	累積細孔 比表面積 (m ² /g)	嵩密度 (g/cm ³)	真密度 (g/cm ³)
1	232.45~233.70	0.52	29.10	1.05	2.29

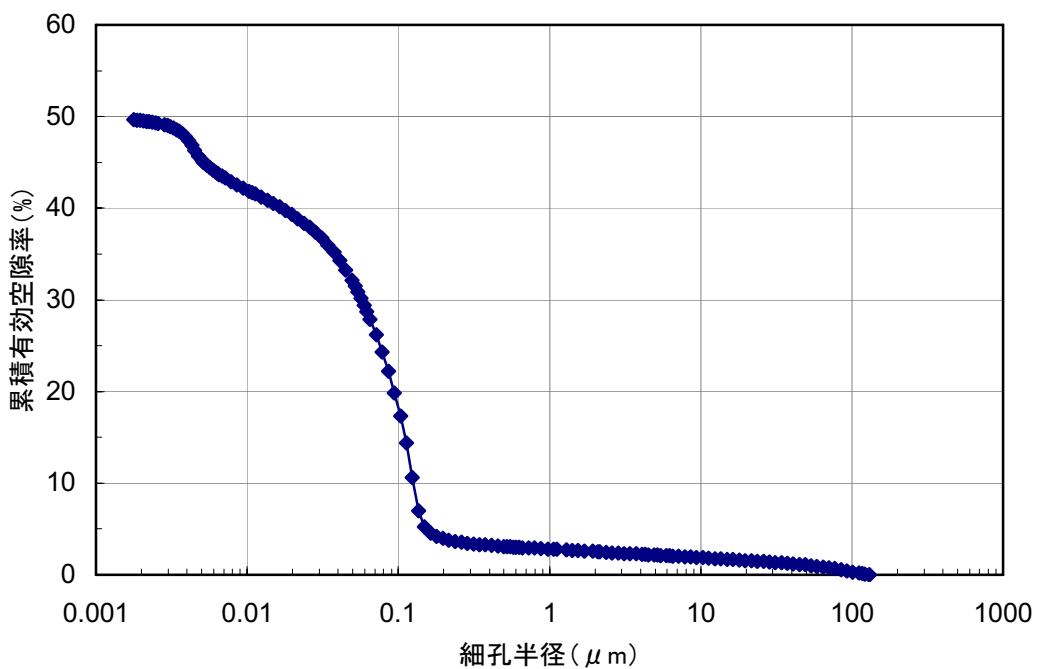


図 3.2-3 水銀圧入法による細孔径分布測定結果

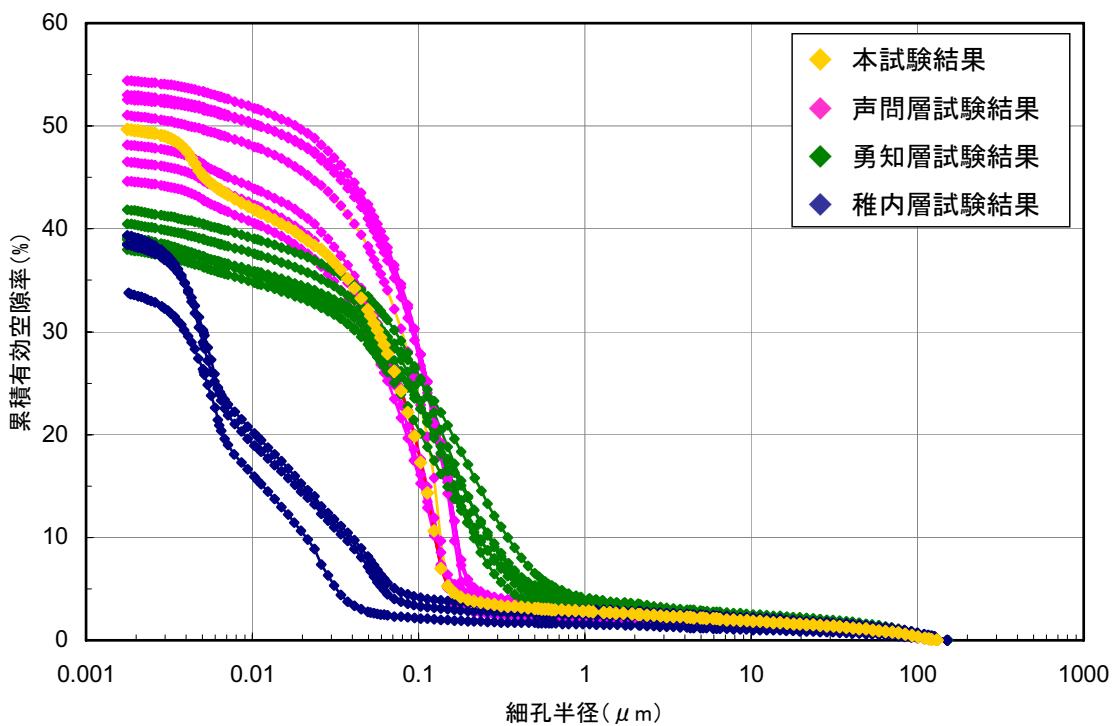


図 3.2-4 細孔径分布測定結果（既存データとの比較；下茂ほか, 2003, 2004, 2007, 2008）

3.3 透水試験

透水試験は、インタクト試料についてはトランジエントパルス透水試験、亀裂試料については定水頭透水試験を実施した。以下に試験方法と結果について説明する。

3.3.1 インタクト試料を対象とした透水試験（トランジエントパルス透水試験）

(1) 試験方法

試験に用いたトランジエントパルス透水試験装置の概要、概観及び、測定原理をそれぞれ、図 3.3-1、図 3.3-2、写真 3.3-1 に示す。本装置の特徴は、温度変化による水圧への影響を低減するため、装置全体を水槽内に沈める機構を有することである。試験手順を図 3.3-3 に示し、試験手順の詳細を以下に述べる。

① 試料セット

三軸セルに試料をセットし、装置内、配管内のエア抜きを行う。

② 封圧の載荷

試料に側圧、軸圧を載荷する。試料採取深度に相応の側圧、軸圧を載荷し、圧力が安定するまで監視する。

③ 間隙水圧の載荷

試料及び上下貯留槽内に一様な水圧を加え、水圧が一定になるまで監視する。

④ 水圧パルスを作成

上流側貯留槽内の水圧をパルス幅 H だけ上昇させ、水圧の安定を確認した後、バルブの開閉により試料に水圧パルスを作成させる。

⑤ 水圧変化の測定、記録

上下流の水圧の経時変化を測定、記録する。

⑥ 水圧平衡

水圧が平衡に達した時点で、計測を終了する。

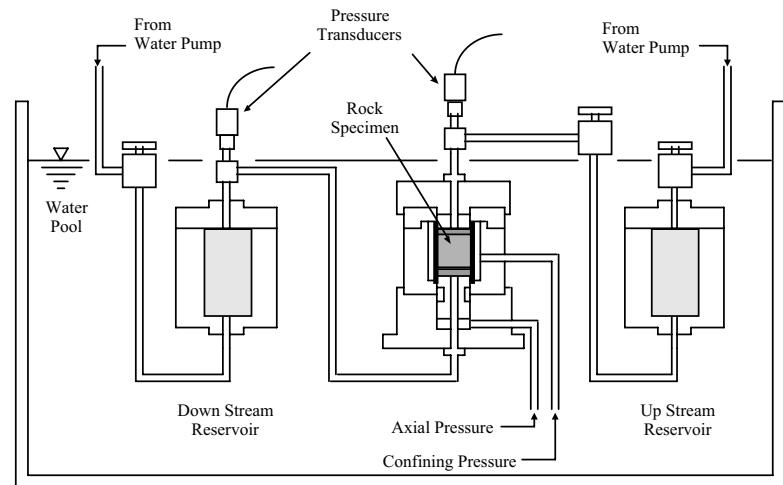


図 3.3-1 トランジエントパルス透水試験装置概要



写真 3.3-1 トランジエントパルス透水試験装置概観

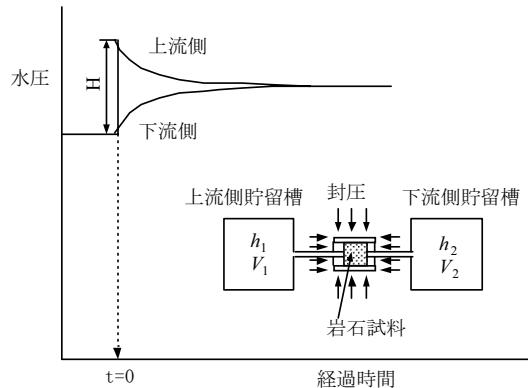


図 3.3-2 トランジエントパルス法測定原理

[試験の流れ]

[計測の流れ]

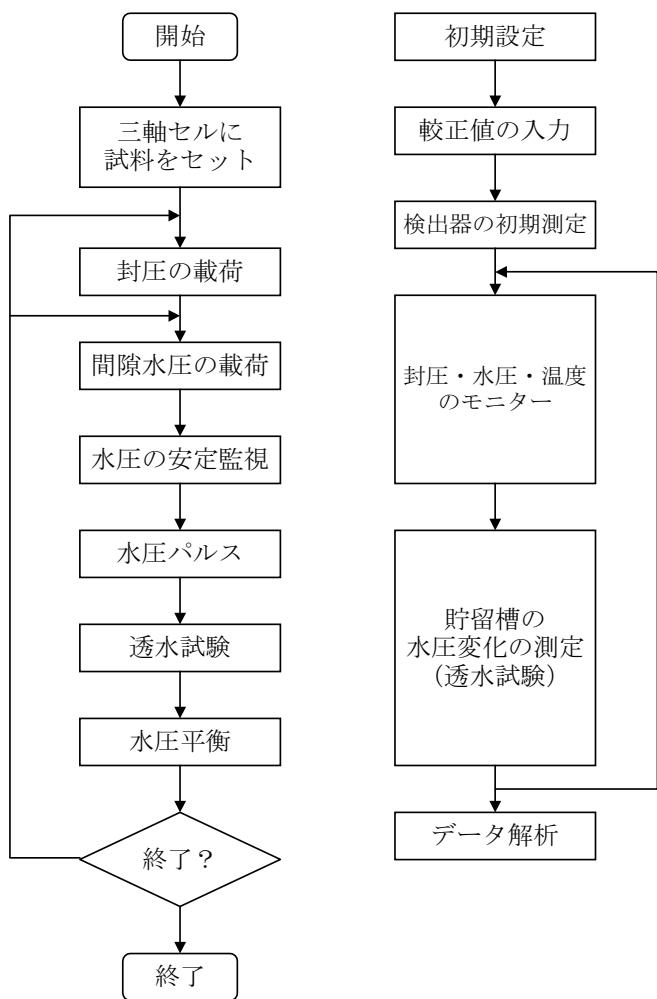


図 3.3-3 トランジエントパルス透水試験手順

(2) 試験条件

試験条件を以下に示す。封圧については、図 3.3-4 に示す HDB-1 孔（山本ほか, 2002）および HDB-6 孔（山本ほか, 2004）の密度検層の結果から推定した鉛直応力を参考に、試料採取深度相当の圧力条件下に設定した。なお、その鉛直応力の値は、水圧破碎試験により求められた最小主応力値とも整合的である。また、間隙水圧については、岩盤内の間隙水圧が深度方向に静水圧分布していると仮定して決定した。

温度 : 室温

封圧 : 深度 (m) $\times 0.018$ (MPa/m)

間隙水圧 : 深度 (m) $\times 0.010$ (MPa/m)

表 3.3-1 試験条件

採取深度 [GL. -m]	封圧 [MPa]		間隙水圧 [MPa]	パルス圧 [MPa]
	軸圧	側圧		
232.45～233.70	4.20	4.20	2.30	0.10

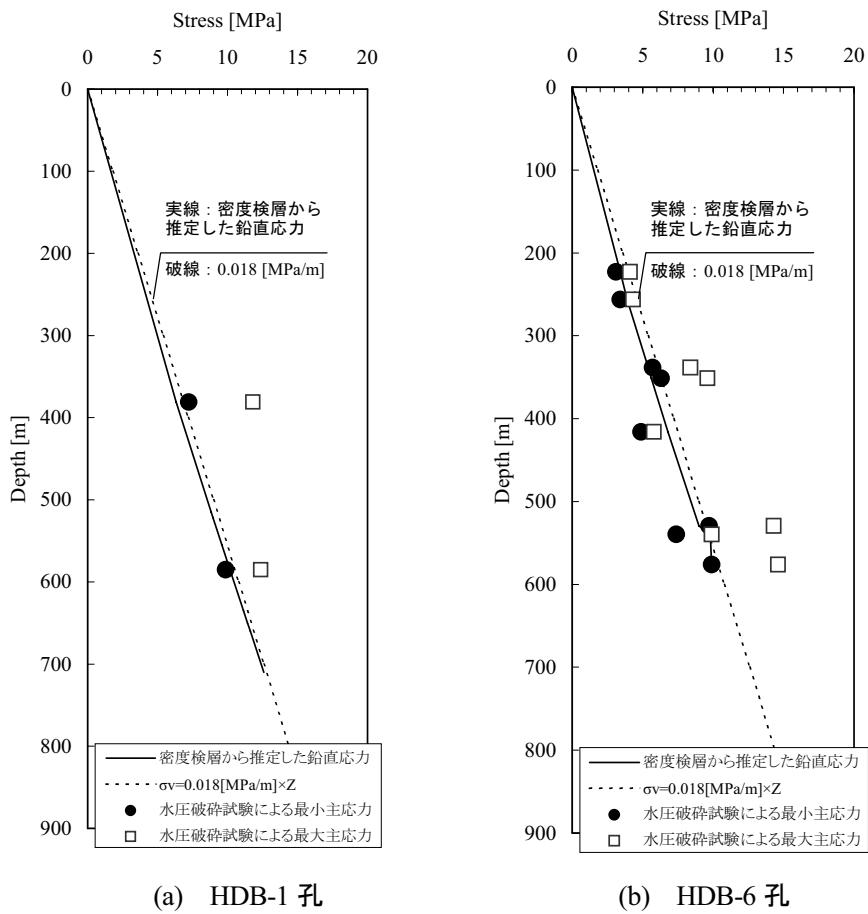


図 3.3-4 岩盤内応力と深度の関係 (HDB-1 孔, HDB-6 孔)

(3) 試験結果

トランジエントパルス透水試験の結果を、図 3.3-6 ならびに表 3.3-3 に示した。トランジエントパルス透水試験の解析には、Brace 法と、差圧を用いた Hsieh 法を用いた。それらの方法を以下に述べる。

(a) Brace 法 (Brace, W.F.他, 1968)

Brace 法は、上下流水槽内の水圧差の測定結果を次式にフィッティングさせることにより、透水係数を求める方法である (Brace, W.F.他, 1968)。

$$\frac{h_u - h_d}{H} = \exp \left[- \frac{V_u + V_d}{V_u V_d} \frac{KAt}{\ell C_w \gamma_w g} \right] \quad (3.3-1)$$

ここに、 H : パルス圧幅 (MPa), h_u : 上流側水圧 (MPa), h_d : 下流側水圧 (MPa), V_u : 上流側貯留槽の容積 (m^3), V_d : 上流側貯留槽の容積 (m^3), K : 岩石試料の透水係数 (m/s), A : 岩石試料の断面積(m^2), t : 経過時間 (s), ℓ : 岩石試料の長さ (m), C_w : 水の圧縮率 (m^2/kN), γ_w : 水の密度 (kg/m^3), g : 重力加速度 (m/s^2)

Brace 法は、上下流水槽内の水圧差を用いるため、温度影響による水圧変化分がキャンセルアウトされる利点を有する。しかし、岩石内貯留が上下流水槽の貯留量に比べて無視しうるという仮定に基づいており、比貯留係数を算出することはできない。

(b) 差圧を用いた Hsieh 法 (Hsieh, P.A.他, 1981)

岩石内貯留を考慮した水圧変化の厳密解として、次式で示される Hsieh の解がある (Hsieh, P.A.他, 1981)。

$$\frac{h_u}{H} = \frac{1}{1 + \beta + \gamma} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha \phi_m^2)(\beta + \gamma^2 \phi_m^2 / \beta)}{\left[\gamma^2 \phi_m^4 / \beta^2 + (\gamma^2 \beta + \gamma^2 + \gamma + \beta) \phi_m^2 / \beta + (\beta^2 + \gamma \beta + \beta) \right]} \\ \cdots \quad (3.3-2)$$

$$\frac{h_d}{H} = \frac{1}{1 + \beta + \gamma} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha \phi_m^2)(\beta - \gamma^2 \phi_m^2 / \beta)}{\left[\gamma^2 \phi_m^4 / \beta^2 + (\gamma^2 \beta + \gamma^2 + \gamma + \beta) \phi_m^2 / \beta + (\beta^2 + \gamma \beta + \beta) \right] \cos \phi_m} \\ \cdots \quad (3.3-3)$$

ここで、 ϕ_m は次式の根である。

$$\tan \phi = \frac{(1 + \gamma)\phi}{\gamma \phi^2 / \beta - \beta} \quad \cdots \quad (3.3-4)$$

上式中の α , β , γ は無次元数で、以下のように表される。

$$\alpha = \frac{Kt}{\ell^2 S_s}, \quad \beta = \frac{S_s A \ell}{S_u}, \quad \gamma = \frac{S_d}{S_u} \quad \cdots \quad (3.3-5)$$

$$S_u = C_w \gamma_w V_u g \quad \cdots \quad (3.3-6)$$

$$S_d = C_w \gamma_w V_d g \quad \cdots \quad (3.3-7)$$

ここに、 H : パルス圧幅 (MPa), h_u : 上流側水圧 (MPa), h_d : 下流側水圧 (MPa), S_u : 上流側貯留槽の貯留量 (m^2), S_d : 下流側貯留槽の貯留量(m^2), K : 岩石試料の透水係数 (m/s), A : 岩石試料の断面積 (m^2), t : 経過時間 (s), ℓ : 岩石試料の長さ (m), C_w : 水の圧縮率 (m^2/kN), γ_w : 水の密度 (kg/m^3), g : 重力加速度 (m/s^2), V_u : 上流側貯留槽の容積(m^3), S_v : 比貯留係数(m^{-1})である。

Hsieh の解では、上・下流側の水圧を個々にフィッティングさせるため、温度による水圧変化の影響によって解析誤差が生じやすい。そこで、(3.3-2)式と(3.3-3)式の差を取ることにより、温度による水圧変化分をキャンセルアウトする方法が考えられる。この方法を、ここでは「差圧を用いた Hsieh 法」と呼ぶこととする。

Brace 法と差圧を用いた Hsieh 法による解析結果を図 3.3-6 のグラフ中に示した。いずれも理論解(図中の赤線)との良好な一致が見られる。

図 3.3-5 に Hsieh 法による解析手順の概念図を示す。具体的な解析手順は以下のとおりである。

- ① 測定された上下流側貯留槽の水圧変化を理論曲線とマッチングし、そのときの β ($=\beta^*$) と, $\alpha \beta^2=1$ のときの t ($=t^*$) を求める。
- ② ①で求めた β および t を用いて (3.3-5) 式より、比貯留係数 S_s を求める。
- ③ ②で求めた S_s と①で求めた t を用いて (3.3-5) 式より、 K を求める。

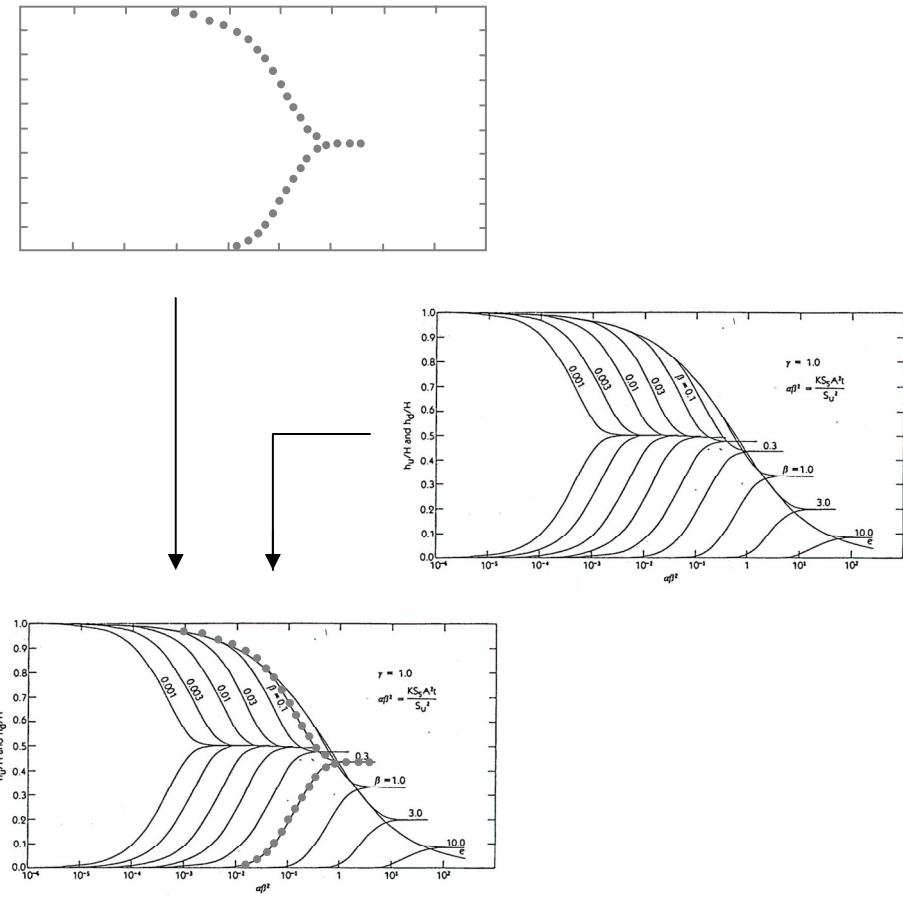


図 3.3-5 Hsieh 法による解析手順の概念図

図 3.3-7 に、透水係数と深度の関係について、今回の試験結果と、これまでに実施した既往の透水試験結果とを比較したものを示す。これより、今回の試験結果は、既往の結果も含めて、採取深度と透水係数の間に明瞭な相関は見られないことが分かる。また、既往の声問層を対象とした試験結果と比較すると同深度の声問層試料とほぼ同等の透水性を示すことが分かる。

表 3.3-2 トランジエントパルス透水試験法で用いた既知パラメータ一覧

	単位	既知パラメータ値
V_u	(m ³)	4.15E-04
V_d	(m ³)	4.15E-04
A	(m ²)	1.96E-03
l	(m)	5.00E-02
C_w	(m ² /kN)	4.65E-07
γ_w	(kN/m ³)	9.7890

表 3.3-3 トランジエントパルス透水試験結果一覧
(既往データとの比較 ; 下茂ほか, 2003, 2004, 2007, 2008)

データ参照元	採取孔名	地層名	試料名	採取深度(GL. -m)			封圧 (MPa)		間隙水圧 (MPa)	パルス圧 (MPa)	透水係数 (m/s)		比貯留係数 (1/m)
				軸圧	側圧	brace法	差圧を用いたhsieh法						
本研究	換気立坑 パイロット孔	声問層	1	232.45	~	233.70	4.20	4.20	2.30	0.10	1.44E-10	1.77E-10	6.92E-06
既往の研究	HDB-9孔	稚内層	9-1i-h	230.75	~	231.00	4.50	4.50	2.50	0.10	2.41E-11	2.80E-11	1.32E-05
			9-1i-v								1.25E-11	1.50E-11	1.34E-05
			2-1i	195.00	~	195.70	3.6	3.6	2	0.1	4.83E-12	5.49E-12	1.12E-05
	HDB-4孔	稚内層	3-2i	314.00	~	314.40	5.4	5.4	3	0.1	4.83E-12	4.88E-12	6.08E-06
			4-1i	441.50	~	442.00	8.1	8.1	4.5	0.1	1.69E-12	1.63E-12	8.11E-06
	換気立坑 掘削ズリ	声問層	1	30.60			0.50	0.50	0.30	0.10	8.49E-11	1.35E-10	5.59E-05
			10-1i-h	91.50	~	92.00	1.80	1.80	1.00	0.10	6.90E-11	8.28E-11	1.43E-05
	HDB-10孔	声問層	10-1i-v1								6.98E-11	8.38E-11	1.42E-05
			6-2i-h	202.00	~	202.60	3.60	3.60	2.00	0.10	5.40E-10	7.53E-10	8.74E-06
			6-2i-v								4.21E-10	4.53E-10	1.11E-05
	HDB-6孔	勇知層	6-4i-h	245.10	~	245.60	4.50	4.50	2.50	0.10	1.71E-10	1.93E-10	4.08E-06
			6-4i-v								1.13E-10	1.27E-10	1.18E-05
			7-1i-001	189.65	~	190.00	3.60	3.60	2.00	0.10	2.11E-10	2.54E-10	1.29E-05
	HDB-7孔	勇知層	7-1i-90								2.78E-10	2.86E-10	1.10E-05
			7-2i	226.85	~	228.27	4.10	4.10	2.30	0.10	3.31E-10	4.09E-10	1.01E-05
			7-3i	240.00	~	240.60	4.30	4.30	2.40	0.10	1.98E-10	2.22E-10	1.08E-05

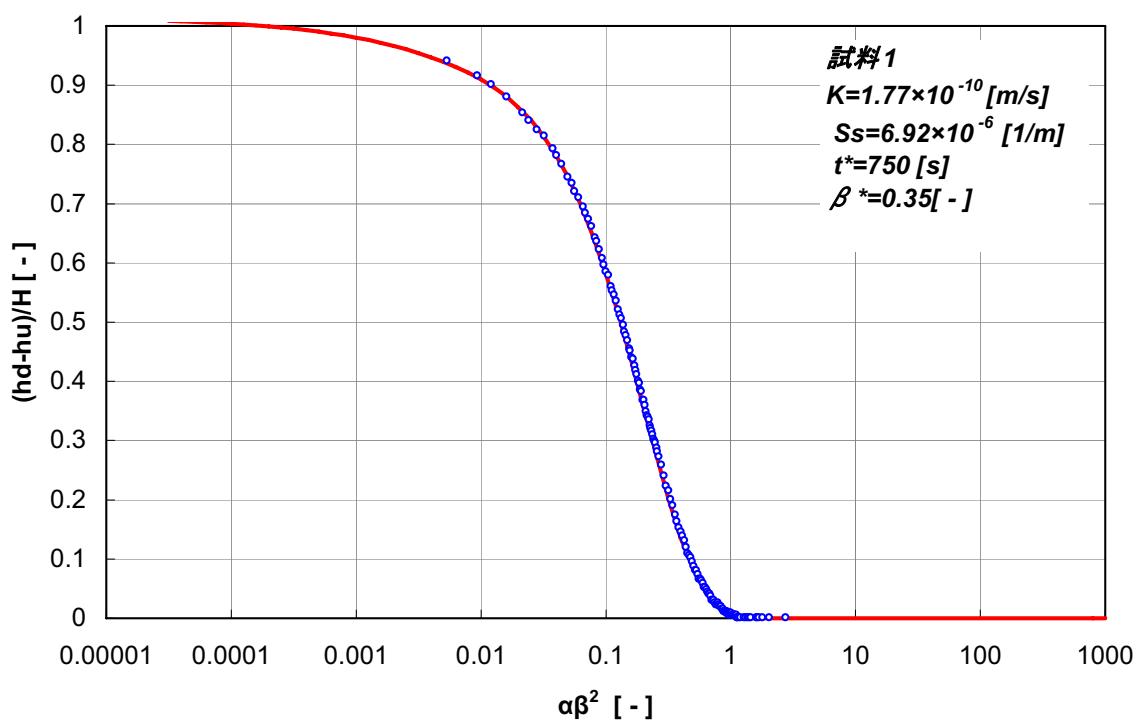
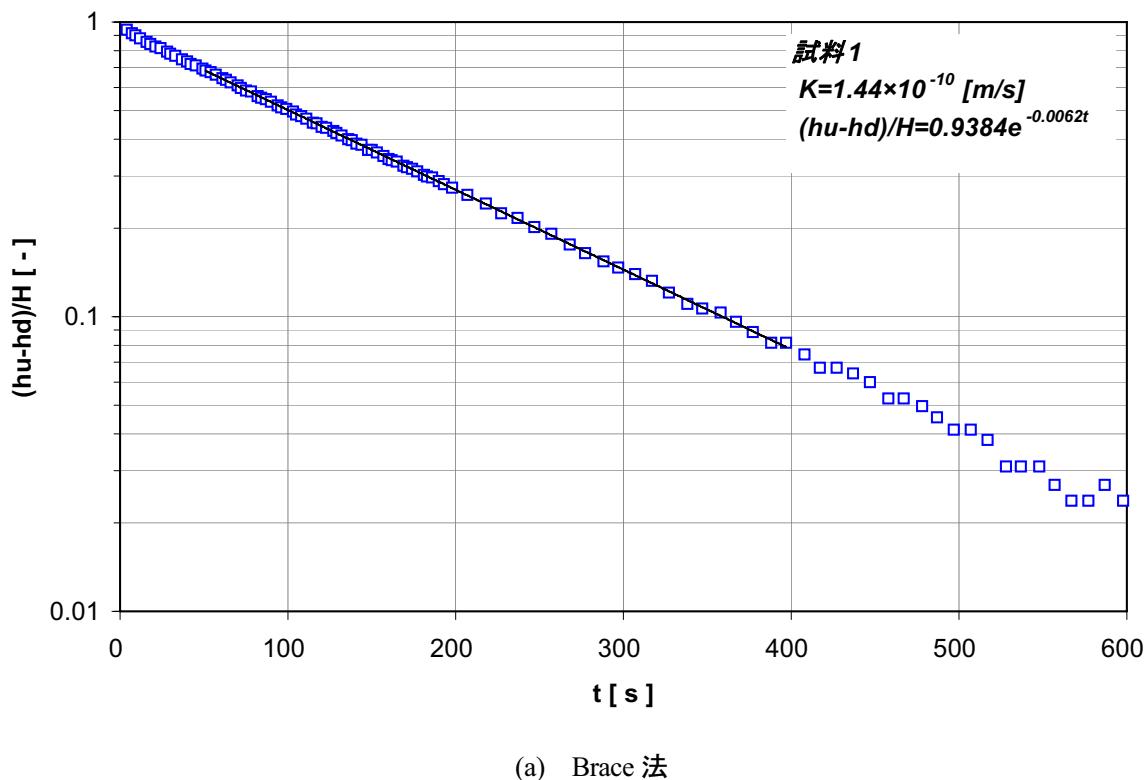


図 3.3-6 トランジエントパルス透水試験結果

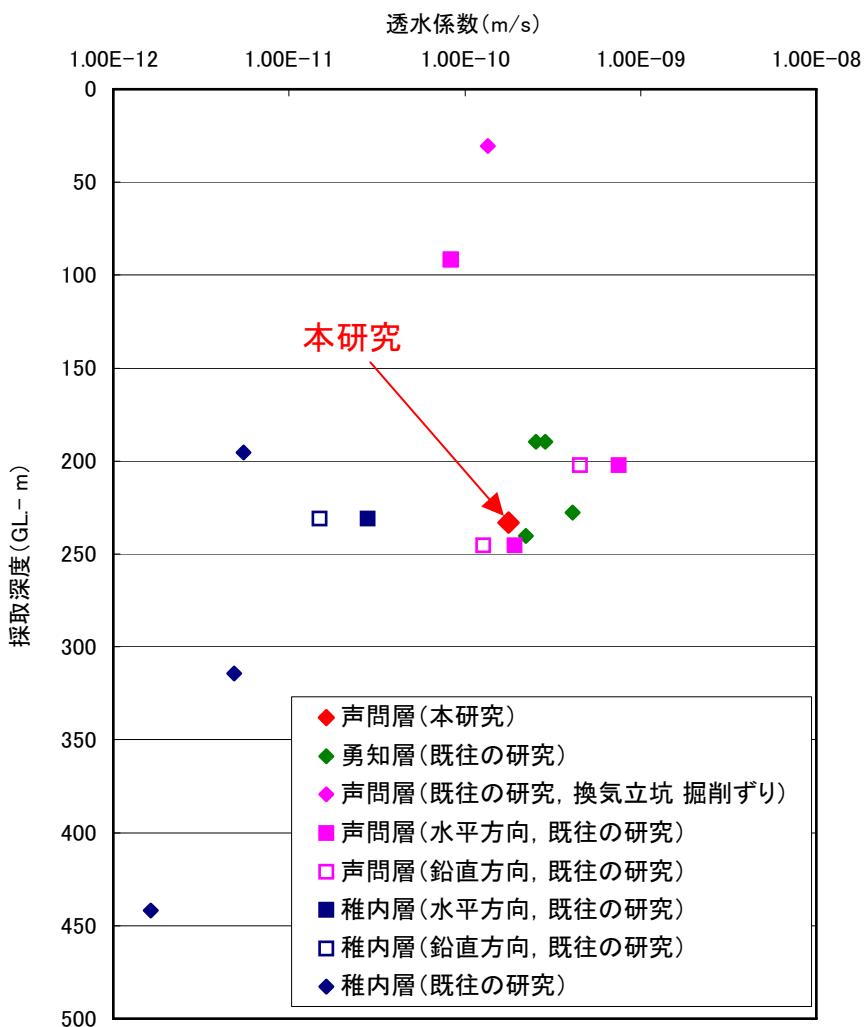


図 3.3-7 深度と透水係数の関係（既往データとの比較；下茂ほか, 2003, 2004, 2007, 2008）

3.3.2 亀裂試料を対象とした透水試験（定水頭透水試験）

（1） 試験方法

定水頭透水試験は、後述のトレーサー試験で使用する装置を用いて実施した。試験装置の概略を図3.3-8に示す。試験装置は、トレーサー試験装置のトレーサー注入側のシリンジポンプを定水頭の堰に取り替えたもので、排出側の堰との水頭差を一定に保った状態で、試料を通水する流量を測定した。試験手順を以下に示す。

① 供試体の作成

作製した供試体の模式図を図3.3-9に示す。写真3.1-3で整形したブロック状試料（試料6）の両端面を除く周囲にシリコンシーラントを塗布し、図3.3-9(a)に示すように、止水のためのアクリル板を貼り付ける。両端部には、亀裂部のみにトレーサーを注入できるように、亀裂寸法に合わせたスリットを設けたアクリル板を周囲と同じようにシリコンシーラントを用いて貼り付ける（図3.3-9(b)）。さらに、これらを固定するために周囲をアングルと全ネジロッドにより締め付けた（図3.3-9(c)）。この状態で、水中脱気による試料の飽和を行った。

② 注入側、排水側セルの組立て

水中脱気後の供試体を図3.3-8に示すように注入側、排水側の2つのセルで挟み込むようにセットする。なお、装置の組立ては、装置内や試料の亀裂内にエアが混入しないよう水中にて行った。組立て完了後、注入側、排水側の両バルブを閉じる。

③ 注入側、排水側の定水頭タンクの取り付け

セルの組立てを完了した供試体を水中より取り出し、図3.3-8に示すように、注入側、排水側のそれぞれのタンクを取り付ける。なお、タンクの取り付けに際しては、セルとタンクを繋ぐ配管等にエアが混入しないよう注意を払う。

④ 定水頭透水試験の開始

注入側および排水側の両バルブを開放し、通水を開始する。

⑤ 定常状態の確認

排出側での流量を測定し、流量が定常状態に達したことを確認する。このときの水頭差と、流量の関係から亀裂の透水量係数を算定する。

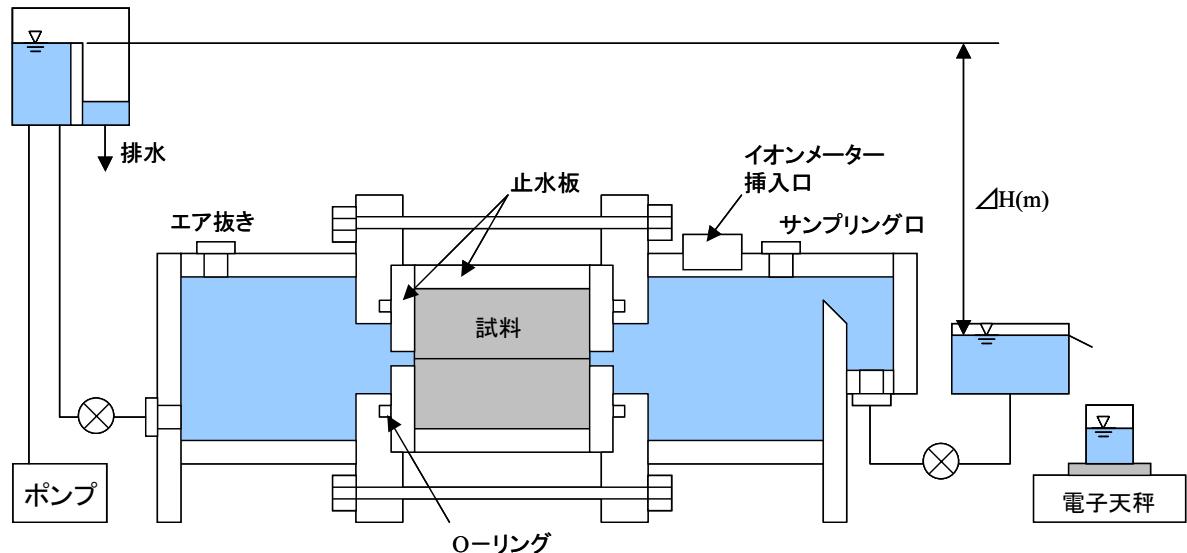


図 3.3-8 定水頭透水試験装置概要

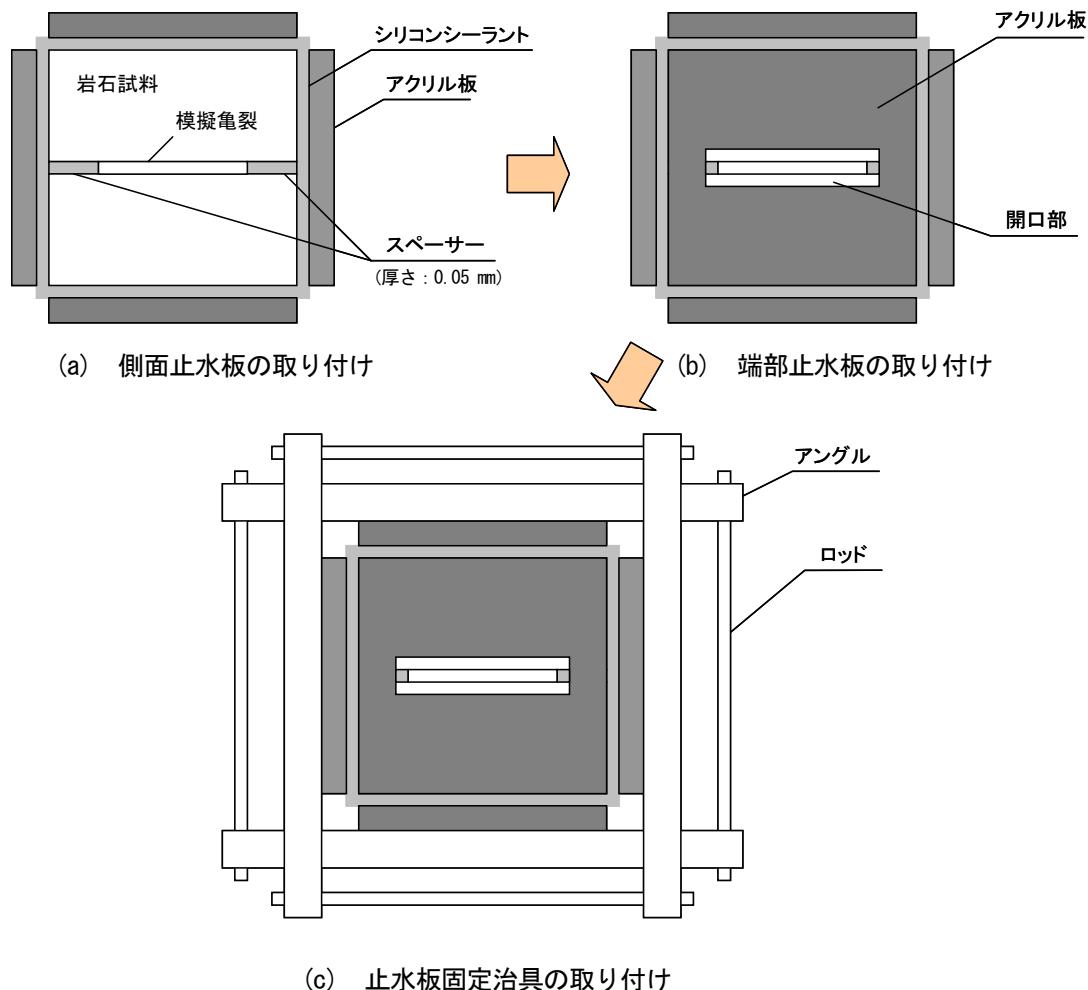


図 3.3-9 供試体作成の模式図

(2) 試験結果

定水頭透水試験では、亀裂が試料の中央に位置していると仮定した場合の亀裂の透水量係数 $T_f(m^2/s)$ を以下の(3.3-8)～(3.3-9)式から求めた。

$$T_f = \frac{Q}{x \cdot I} \quad \dots \quad (3.3-8)$$

$$I = \frac{\Delta H}{L} \quad \dots \quad (3.3-9)$$

ここに、 T_f : 亀裂の透水量係数(m^2/s)、 Q : 流量(m^3/s)、 L : 試料の長さ(m)、 x : 亀裂長さ(m)、 I : 動水勾配(-)、 ΔH : 水頭差(m)である。

表 3.3-4 に定水頭透水試験結果の一覧を示す。亀裂の透水量係数は、 $7.30 \times 10^{-8}(m^2/s)$ であり、これから三乗則により求められる水理開口幅は、 0.047(mm)であった。

表 3.3-4 定水頭透水試験結果一覧 (亀裂試料 : 試料 6)

試料名	地層名	採取深度	水頭差 (m)	流量 (m^3/s)	亀裂の 透水量係数 $T_f(m^2/s)$
試料6	声問層	GL.-232.45 ～233.70m	0.26	7.72E-09	7.30E-08

3.4 物質移行試験

物質移行試験は、インタクト試料については透過拡散法による拡散試験、亀裂試料についてはトレーサー試験を実施した。以下にそれぞれについて説明する。

3.4.1 拡散試験

(1) 試験方法

試験装置の概要を図 3.4-1、図 3.4-2 に示す。本試験は、透過拡散法による拡散試験である。透過拡散法とは、岩石試料で仕切られた 2 つのセルにそれぞれトレーサー溶液と水を入れ、2 つのセル内のトレーザー濃度の経時変化から岩石の拡散係数を求める方法である。

以下に、試験手順に沿って、試験方法を述べる。

① 供試体作成

供試体は、図 3.4-2 に示すように、採取試料を直径 30mm、厚さ 5mm の円盤状に整形し、周囲をエポキシ系樹脂により固めたものである。なお、供試体の作成中は試料をなるべく乾燥させないよう注意を払い、供試体作成後は速やかに試料脱気を行った。

② 供試体のセット

作成した供試体は、図 3.4-1、図 3.4-2 に示すアクリル製の拡散セルに、2 つのセルで挟み込むようにセットした。

③ 供試体の脱気

供試体セット後、両セルに脱イオン水を入れ真空槽にて脱気を行った。

④ 拡散試験の開始

供試体の脱気を完了後、トレーサーセル側の脱イオン水をトレーサー溶液（ヨウ化カリウム水溶液）と交換し、拡散試験を開始した。この時、動水勾配による溶液の移流が発生しないよう、トレーサー溶液および脱イオン水の容量はともに 50ml とし、両セルの水位を同じにした。

⑤ 測定セル側溶液のサンプリングおよび脱イオン水の補充

試験開始の 1 時間後から 11 時間後までは、1 時間おきに測定セルから 20ml ずつサンプリングし、サンプリング後は同量の脱イオン水を測定セルに補充した。また、11 時間後以後は、同様の方法で 1 日に 2 回のサンプリングを実施した。なお、測定セルの脱イオン水の補充により生じる希釈の影響は、サンプリング毎の量とその濃度から補正を行った。

⑥ サンプルの分析

サンプリングした溶液中に含まれるヨウ化物イオン濃度を ICP 発光分光分析（定量下限値：0.01 mg/L）により求めた。

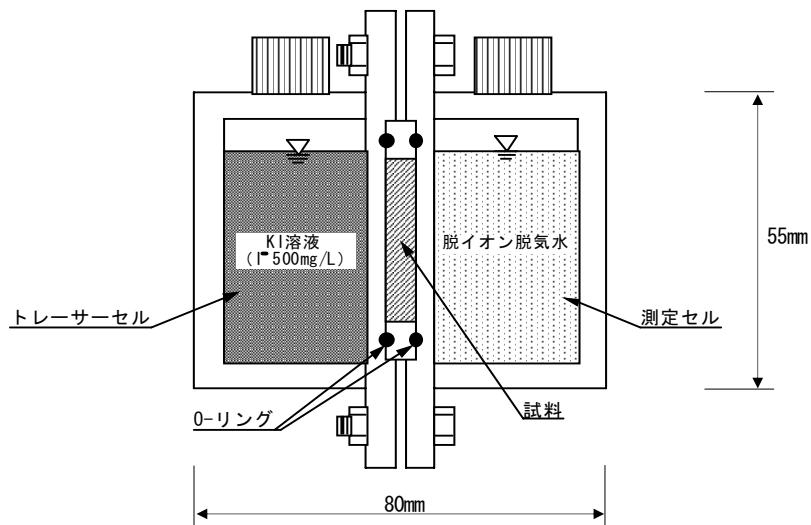


図 3.4-1 拡散実験装置概要

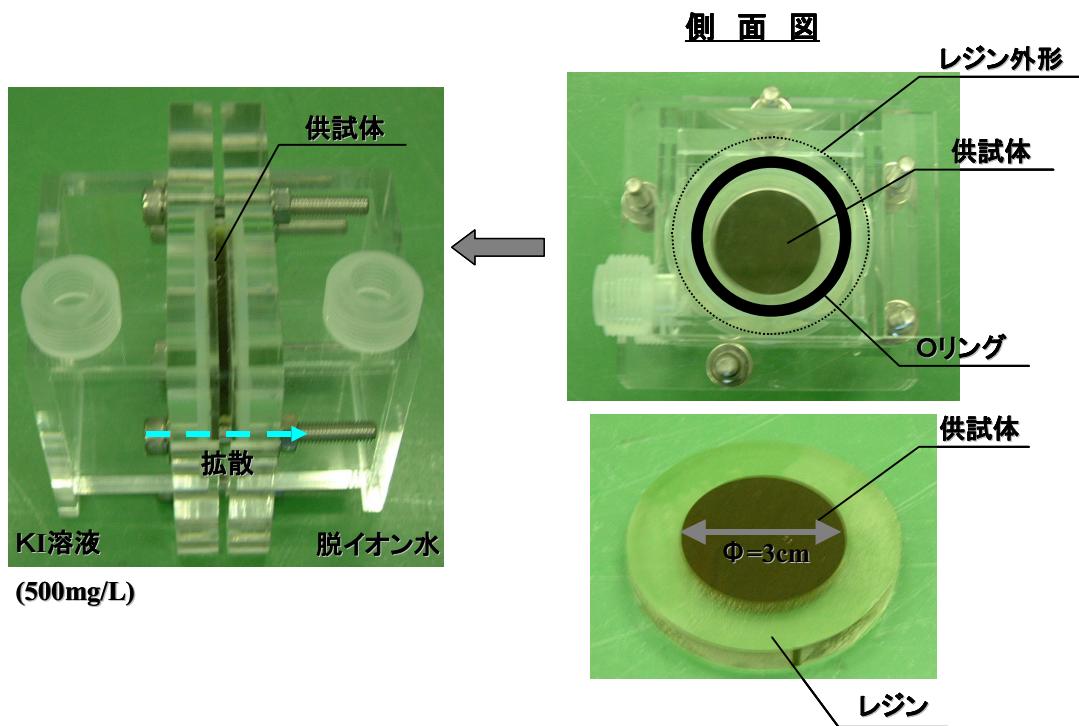


図 3.4-2 拡散実験装置および供試体の概観

(1) 試験条件

表 3.4-1 に試験条件の一覧を示す。トレーサー溶液にはヨウ化カリウム (KI) 水溶液を用い、トレーサー濃度は、ヨウ化物イオン (I^-) 濃度を対象に測定した。また、溶液濃度は、ヨウ化物イオンの酸化による測定結果への影響を考慮して、低濃度の $I^- 500$ (mg/L) とした。

表 3.4-1 試験条件一覧

項目	実験条件
トレーサーセル側	ヨウ化カリウム水溶液
	・濃度 : $I^- 500$ (mg/L)
	・容量 : 50 (ml)
測定セル側	脱イオン水
	・容量 : 50 (ml)
温度	室温 (22°C ~ 25°C)

(2) 試験結果

試験結果を

図 3.4-3 に示す。得られた試験結果を用い、以下に述べる方法で拡散係数を求める。

① 解析方法

一次元の拡散方程式を、初期条件 $C_p(t,x)=0$, $t=0$, $0 \leq x \leq H$, 境界条件 $C_p(t,x)=C_0$, $t>0$, $x=0$, $C_p(t,x)=0$, $t>0$, $x=H$ のもとで解くことにより、次式を得る。

$$Cd = \frac{Sr \cdot H \cdot C_0}{Vm} \left[\frac{De \cdot t}{H^2} - \frac{\alpha}{6} - \frac{2\alpha}{\pi^2} \times \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{(-1)^n}{n^2} \cdot \exp \left(-\frac{De \cdot n^2 \cdot \pi^2 \cdot t}{H^2 \cdot \alpha} \right) \right\} \right] \quad (3.4-1)$$

ここに、 C_p : 間隙水中のトレーサー濃度、 t : 時間、 x : 拡散源からの距離、 H : 試料の厚さ (m), C_0 : トレーサーセル中のトレーサー濃度 (mg/L), Cd : 測定セル中のトレーサー濃度 (mg/L), Sr : 試料の断面積 (m^2), De : 実効拡散係数 (m^2/s), Vm : 測定セル中の溶液体積 (m^3) である。また、 α は吸着容量 (-) であり、 $\alpha = n + \rho \cdot Kd$ (n : 試料の有効間隙率, ρ : 試料の乾燥密度 (kg/m^3), Kd : 分配係数 (m^3/kg)) で与えられる。

式(3.4-1)の指数項部は、試験時間のあまり経過していない初期の非定常状態における Cd の経時変化を表しており、ある程度の時間が経過した後は、これを無視できる。従って、上式 (3.4-1) は、近似的に次式 (3.4-2) のように表せる。

$$Cd = \frac{Sr \cdot H \cdot C_0}{Vm} \left(\frac{De \cdot t}{H^2} - \frac{\alpha}{6} \right) \quad (3.4-2)$$

つまり、実効拡散係数は、時間に対する濃度増加の傾きから、(3.4-2) 式により求められる。さらに、見かけの拡散係数を次式で与えられるタイムラグ法によって求めた。

$$Da = \frac{H^2}{6T_{\text{int}}} = \frac{De}{\alpha} \quad (3.4-3)$$

ここに、 Da : 見かけの拡散係数 (m^2/s)、 T_{int} : 測定セル中のトレーサー量が 0 となる時間 (s) である。

②解析結果

解析により求めた実効拡散係数、見かけの拡散係数および収着容量を表 3.4-2 に示す。実効拡散係数は、 1.15×10^{-10} (m^2/s) であり、既往の声問層試料を対象とした試験結果と比べると、やや低い値となった（図 3.4-4）。また、収着容量から求めた分配係数を求めると、0 に近い値となることから、当試料へのヨウ化物イオンの収着量は非常に小さいものと考えられる。

表 3.4-2 拡散試験結果（既往データとの比較；下茂ほか, 2003, 2004, 2007, 2008）

データ参照元	地層名	試料名	実効拡散係数 De (m^2/sec)	見かけの拡散係数 Da (m^2/sec)	収着容量 α (-)	分配係数 Kd (m^3/kg)	有効間隙率 n_e (-)
本研究	声問層	換気立坑 パイロット孔	1.15E-10	2.60E-10	4.43E-01	0.00E+00	0.524
既往の研究	稚内層	9-2i1	4.19E-11	2.50E-08	1.67E-03	0.00E+00	0.426
		9-1i-h	2.94E-11	3.38E-10	8.70E-02	0.00E+00	0.426
		9-1i-v	3.52E-11	4.26E-10	8.26E-02	0.00E+00	0.440
		2-2i	2.34E-11	6.86E-11	3.42E-01	0.00E+00	0.414
		3-4i	2.55E-11	3.36E-11	7.58E-01	2.40E-04	0.384
		4-2i	8.16E-12	3.84E-11	2.12E-01	0.00E+00	0.332
	声問層	10-1i-h	9.22E-11	1.76E-09	5.23E-02	0.00E+00	0.486
		10-1i-v1	9.60E-11	2.97E-10	3.23E-01	0.00E+00	0.486
		11-2i-h3	3.22E-10	4.63E-10	6.94E-01	6.43E-05	0.639
		11-4i-h1	1.46E-10	2.93E-10	4.97E-01	0.00E+00	0.546
		換気立坑 掘削すり	2.13E-10	3.21E-10	6.63E-01	4.91E-05	0.615
		6-2i-h	6.78E-10	6.01E-10	1.13E+00	5.42E-04	0.598
勇知層	声問層	6-2i-v	3.30E-10	1.58E-09	2.09E-01	0.00E+00	0.596
		6-4i-h	2.59E-10	1.56E-09	1.66E-01	0.00E+00	0.534
		6-4i-v	2.08E-10	1.29E-09	1.61E-01	0.00E+00	0.537
		7-1i-003	1.44E-10	5.52E-10	2.61E-01	0.00E+00	0.447
	7-1i-902	9.50E-11	9.41E-09	1.01E-02	0.00E+00	0.469	
	7-2i-2	1.17E-10	1.02E-09	1.15E-01	0.00E+00	0.440	
	7-3i	2.32E-10	1.70E-08	1.36E-02	0.00E+00	0.457	

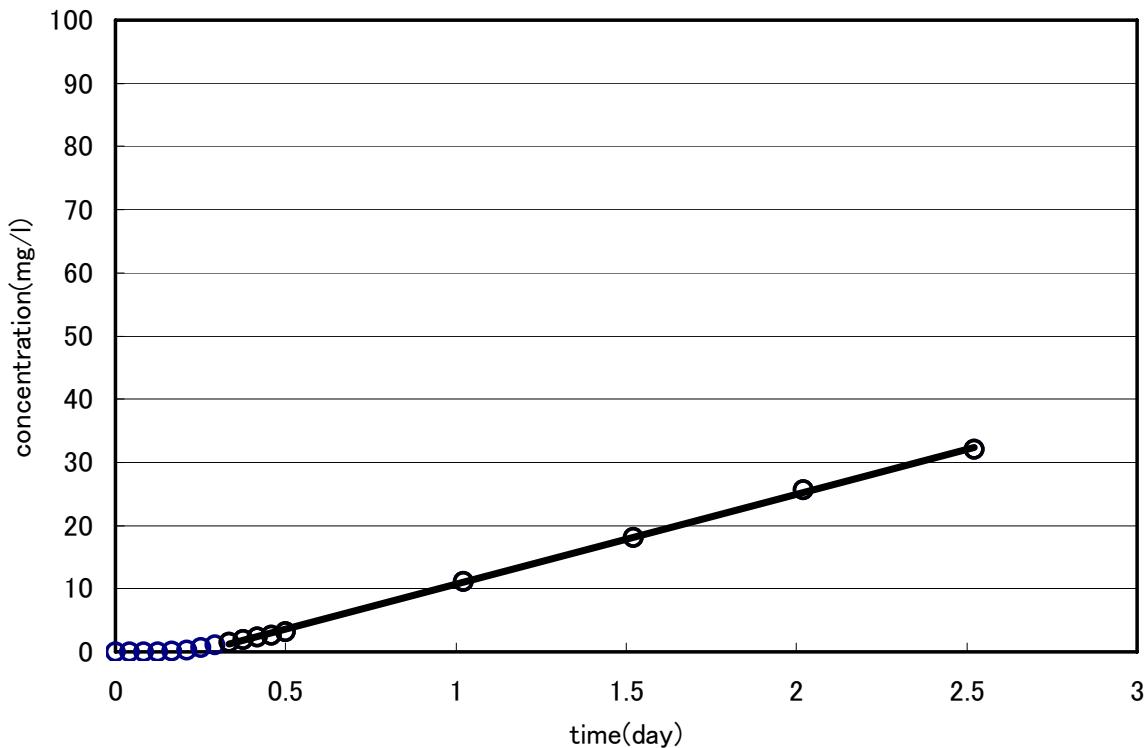


図 3.4-3 拡散試験結果

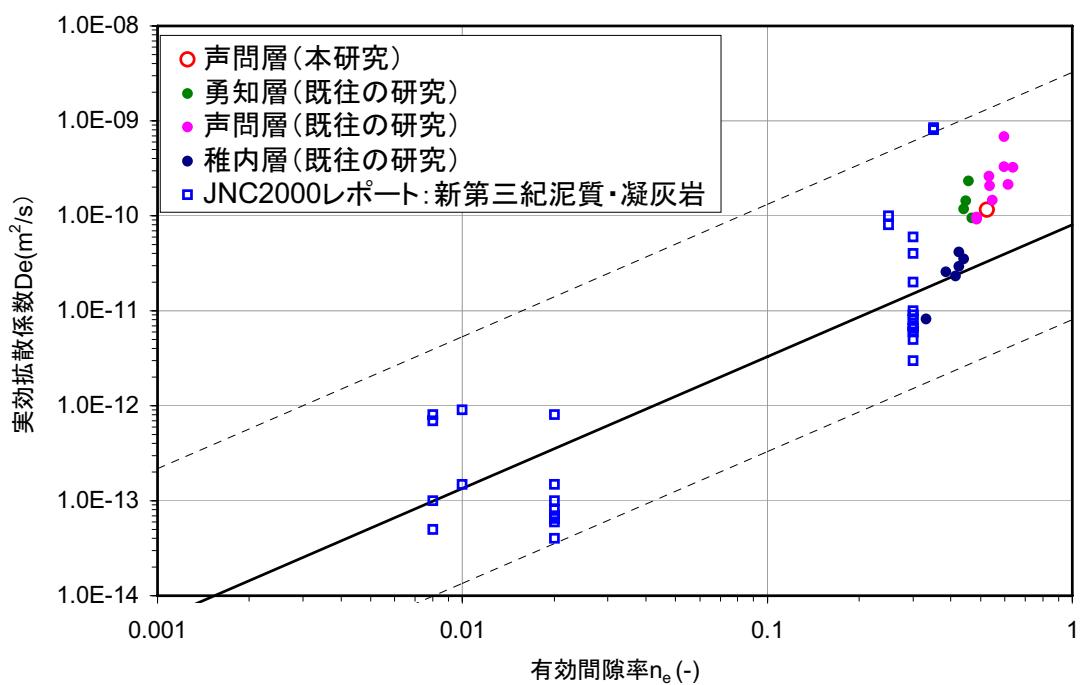


図 3.4-4 実効拡散係数と有効間隙率の関係(既存データとの比較; 下茂ほか, 2003, 2004, 2007, 2008; 核燃料サイクル開発機構, 1999)

3.4.2 トレーサー試験

(1) 試験装置および方法

トレーサー試験は、コア試料の拡散試験で用いた拡散セル装置を応用したセル型のトレーサー試験装置を用いて行った。試験装置の概要を図 3.4-5 に示す。本装置は試料をトレーサーセル（注入側）と測定セル（排水側）の 2 つのセルで挟み込み、トレーサーセルより一定流量でトレーサー溶液を注入し、測定セル側の溶液濃度の経時変化を測定するものである。本装置の特徴を以下に示す。

- ・ 注入流量が少なくともフラッシングの必要がない
- ・ 配管内分散が生じない
- ・ 蒸発の影響を受けない

これらの特徴から、本試験法は、今回のように極微量条件下での試験を行う必要がある場合に有効な試験方法であるといえる。

なお、本試験では、トレーサー溶液の注入に極微量を高精度で送液することが可能なシリンジポンプを用い、測定セル側の濃度測定には、イオンメーターを用いた。また、濃度測定は、イオンメーターによる連続測定に加えて、図中に示すサンプリングロより 1 日 2 回の頻度でサンプリングを行い、ICP によるトレーサー濃度分析も行った。また、測定セル内に排出されたトレーサー溶液の濃度分布を一様にするために、測定セル内は、常時、スターラーによる攪拌を行った。以下に試験の手順について説明する。

① シリンジポンプの設置

3.3.2 節の定水頭透水試験を完了した後、図 3.4-5 に示すように、注入側の堰をトレーサー注入用のシリンジポンプに付け替える。この際、測定セル内は水で満たした状態で、排出側バルブを閉じておく。また、シリンジ内ならびにシリンジから注入側セルまでの配管内は、あらかじめトレーサー溶液で満たしておく。その際、配管や三方バルブ内のエア抜きを確実に実施する。

② トレーサー溶液への入替え

引き続き測定セル側のバルブを閉じたまま、注入側セル内の脱イオン水をトレーサー溶液（ヨウ化カリウム水溶液）に入れ替える。作業時には、試料内ならびに配管継手などにエアが混入しないよう注意する。

③ シリンジポンプの始動

注入側配管の三方バルブをドレイン側経路にセットし、シリンジポンプを始動する。シリンジポンプは、始動後、シリンジの押子とスライダーの接触がなじむまで注入流量が一定にならないため、ポンプ始動直後は試料への注入は行わず、ドレイン方向に排水し、送液流量の測定を行う。送液流量が一定になったことを確認した時点で試験を開始する。

④ トレーサー試験の開始

シリンジポンプの送液流量が一定になったことを確認した後、注入側の三方バルブを試料方向に切り替え、それと同時に排出側のバルブを開放し、トレーサー試験を開始する。

排出側バルブを開放すると、測定セル内に満たされた水は排出側の堰より排水され、測定セル内に図 3.4-5 のような位置で水位が形成される。注入されたトレーサー溶液は、試料内部を通り、測定セル内へ排出され、測定セル内の堰で越流し、セル外部へ排出される。なお、測定セル内は、排出されたトレーサーの濃度が常に一様になるよう、常時、スターラーによる攪拌を行った。

⑤ 測定セル側溶液の濃度測定およびサンプリング

イオンメーターによる連続測定により、試験開始直後からの測定セル側の溶液濃度の経時変化を測定する。また、確認のため、試験開始当日から 1 日 2 回の頻度で 5ml のサンプリングを行い、ICP によるヨウ化物イオン濃度測定を行った。なお、サンプリング後は同量の脱イオン水を測定セルに補充した。測定セルの脱イオン水の補充により生じる希釈の影響は、サンプリングした溶液の量とその濃度から補正を行った。

⑥ サンプルの分析

サンプリングした溶液中に含まれるヨウ化物イオン濃度を ICP 発光分光分析（定量下限値：0.01 mg/L）により求めた。

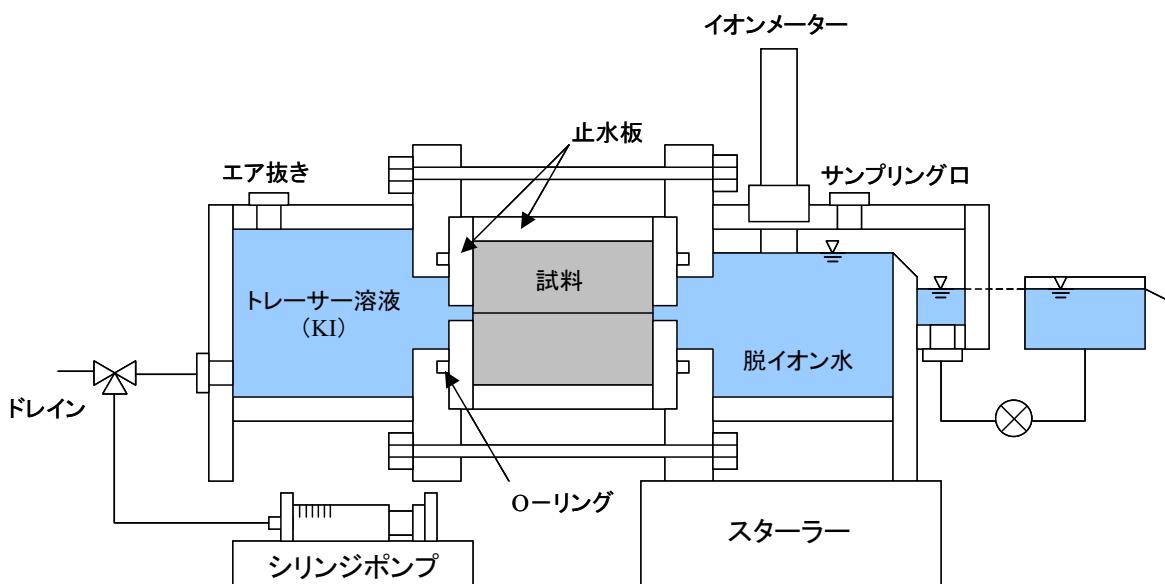


図 3.4-5 セル型トレーサー試験装置概要

(2) 試験条件

試験条件を

表 3.4-3 に示す。トレーサー溶液は拡散試験と同様に、ヨウ化カリウム水溶液を用いた。また、注入するトレーサー溶液の濃度および注入流量は、測定セルの容量、シリジンポンプの容量、イオンメーターの測定精度等から、 $I^- 500 \text{ mg/L}$ 、および $q=0.003 \text{ cm}^3/\text{min}$ とした。

表 3.4-3 トレーサー試験条件

試験条件	
トレーサーセル側	ヨウ化カリウム水溶液
	・濃度 : $I^- 500 \text{ mg/L}$
	・注入流量 : $q=0.003 \text{ cm}^3/\text{min}$
測定セル側	脱イオン水 ・イオンメーターにより濃度測定

(3) 試験結果および解析結果

① 試験結果

トレーサー試験結果を図 3.4-6 中に示す。これより、試験結果は、マトリクス拡散による遅延の影響を受け、測定濃度の経時変化のプロットが、下に湾曲しながら上昇していることが分かる。また、サンプリングした溶液の ICP による測定結果とイオンメーターによる連続測定の結果は、良く一致しており、濃度測定の信頼性が高いことが分かる。

② 解析方法

上記の試験結果を用いて、試験と同様の条件を与えた数値解析により得られた濃度上昇曲線と試験結果とのフィッティングにより、亀裂部の物質移行開口幅ならびに分散係数（分散長）を逆解析的に求めた。数値解析には、3 次元物質移行解析コード FRAC3DVS ver.3.49 (Therrien et al., 1999; Therrien and Sudicky, 1996) を用いた。

解析条件を表 3.4-4 に示す。既知パラメータとして与えた水理開口幅、マトリクス部の透水係数、マトリクス部の実効拡散係数、間隙率は、前述の透水試験、拡散試験、基本物性測定結果を参考に設定した。解析モデル（図 3.4-7）は、試験で使用した試料と同寸法の断面の中心に平板亀裂を配置し、亀裂面を挟んで対称としたものである。亀裂の幅は、試料の幅からスペーサーの幅を差し引いた値（20mm）とした。また、流れ方向の長さについては、実際の試料長さをそのままモデル化した場合、出口側におけるモデル境界の影響を受け、亀裂内の分散現象による移行を正しく評価できない可能性があるため、モデル上の試料長さを実際の試料長さよりも長い 250mm とし、濃度評価点を実際の試料長である 50mm 地点とした。亀裂面は面要素でモデル化した。境界条件は、左右面を水頭固定境界、上下側面を不透水境界とした。ここで、試験条件が定流量条件にもかかわらず、左右面を水頭固定としたのは、マトリクス部と亀裂部に流れる流量比が未知であるため、解析上、流量を固定できないためである。

なお、フィッティング解析において、物質移行開口幅は測定セル内の濃度変化を表す破過曲線の傾きに、分散長は破過曲線の初期の立ち上がりの部分に大きく影響するので（図 3.4-8、図 3.4-9）、両

者は独立して決定することができる。フィッティングの手順としては、まず、曲線の傾きに着目し、物質移行開口幅を決定し、その後、初期の立ち上がりに着目し、分散長の決定を行う。

(3) 解析結果

図 3.4-6 中に解析結果を示す。フィッティングにより得られた物質移行開口幅、分散長は、それぞれ 0.033 (mm), 0.004 (m) であった。このうち、物質移行開口幅は、事前に実施した定水頭透水試験結果から三乗則により求めた水理開口幅よりも小さい値となった。一般に、透水性に寄与する水理開口幅は、亀裂幅の狭いところの効果が卓越するのに対し、物質移行開口幅は、平均的な開口幅の影響を大きく受けるため、物質移行開口幅の方が水理開口幅よりも大きくなることが報告されているが、今回はこれに反する結果となった。これには、試験条件や解析の設定条件など様々な原因が考えられるが、その一つとして、解析条件の一つであるマトリクス部の拡散係数の設定が考えられる。解析におけるマトリクス部の拡散係数は、前節の拡散試験で求めた値を用いているが、拡散試験では、トレーサー試験用の試料の近傍からサンプリングした試料を用いており、トレーサー試験用試料そのものについて実施している訳ではない。特に、今回の対象試料は、声問層と稚内層の地層境界付近で採取されたものであり、隣接する深度でも実効拡散係数などのマトリクス拡散に関する特性が大きく異なる可能性があると考えられる。すなわち、今回の試験結果から得られた物質移行開口幅は、水理開口幅よりも小さい結果となったが、実際には、物質移行開口幅と水理開口幅はほぼ等しい値であり、拡散係数の設定の違いにより、物質移行開口幅を実際より小さく評価している可能性があると考えられる。試みに、物質移行開口幅を 0.046mm (= 水理開口幅)、分散長を既往の研究（新藤他, 1995）で示されている値 ($0.005\text{m} \approx L/10$, L : 移行距離 m) で固定条件とし、マトリクス部の拡散係数を変えた 4 ケースの解析結果を図 3.4-10 に示す。同図から、解析結果は、拡散係数の違いにより大きく異なることが分かる。また、物質移行開口幅=水理開口幅とした場合、今回の解析の設定条件である実効拡散係数 $D_e = 1.15 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ の場合では、試験結果を充分に再現できないが、 $D_e = 6.00 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{s}$ の場合で、試験結果をほぼ再現することが分かる。この値は、既往の拡散試験結果のうち、稚内層試料を対象とした試験結果のほぼ最小値に相当する値である（図 3.4-4, 表 3.4-2）。今回の試料が、声問層と稚内層の遷移帯に位置しており、X 線回折や水銀圧入試験でも見られるように、声問層と稚内層の双方の特徴を併せ持つ可能性があることを考慮すると、この値は、妥当な範囲にあると考えられる。

図 3.4-11 に、物質移行開口幅と透水量係数の関係を示す。同図には、比較のため、既往の研究におけるトレーサー試験結果と、花崗岩サイト（釜石鉱山原位置試験場）において、原位置スケールの亀裂に対して実施されたトレーサー試験結果を示す。原位置試験結果では、物質移行開口幅 e と透水量係数 T の間に $e = 2\sqrt{T}$ の関係が示されている（Shimo 他, 1999）が、今回の試験結果は、これより小さい開口幅が得られた。また、同図より、既往の試験結果を含めた室内トレーサー試験結果は、概ね、 $e = 2\sqrt{T} \sim$ 三乗則の範囲に入ることが分かる。

分散長については、一般的に移行経路の 1/10～1/100 の値を示すと言われており、今回の結果はこの傾向とほぼ一致している。

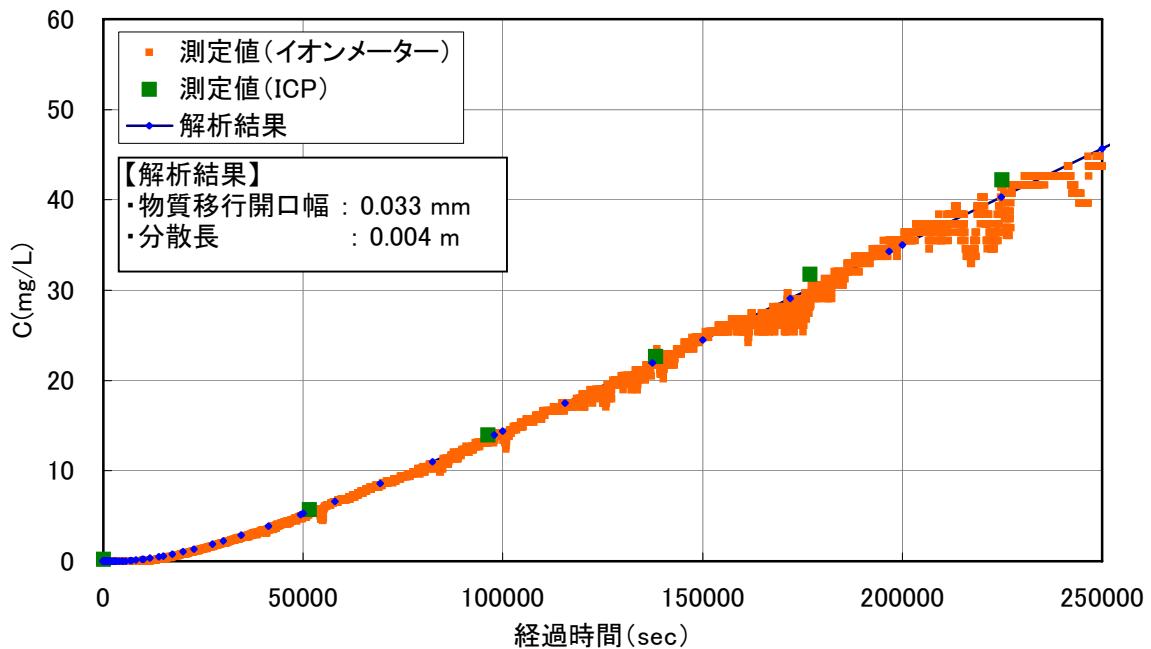


図 3.4-6 トレーサー試験結果

表 3.4-4 ブロック試料トレーサー試験解析入力条件一覧

試料名	注入流量 (cm ³ /min)	水理開口幅 (mm)	マトリクス部 透水係数 (m/s)	マトリクス部 実効拡散係数 (m ² /s)	マトリクス部 有効間隙率 (%)
試料6	0.003	0.046	1.77E-10	1.15E-10	50.0
設定根拠	試験条件より 設定	透水試験結果 より設定	透水試験結果 より設定	拡散試験結果 より設定	基本物性試験 結果より設定

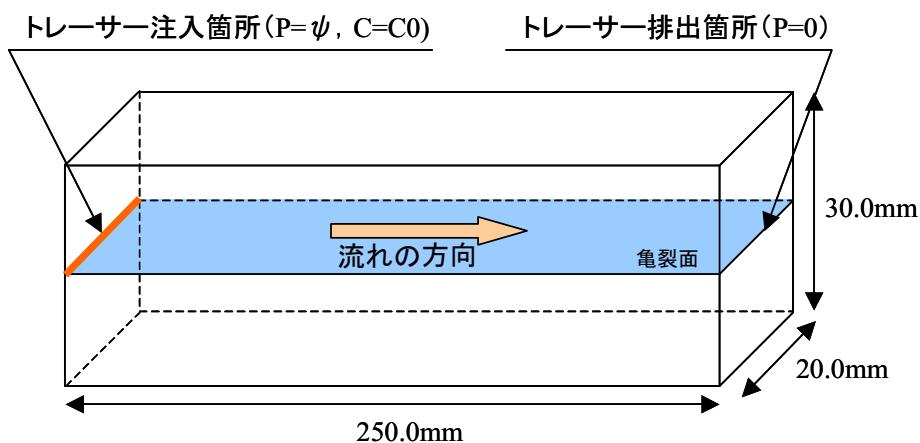
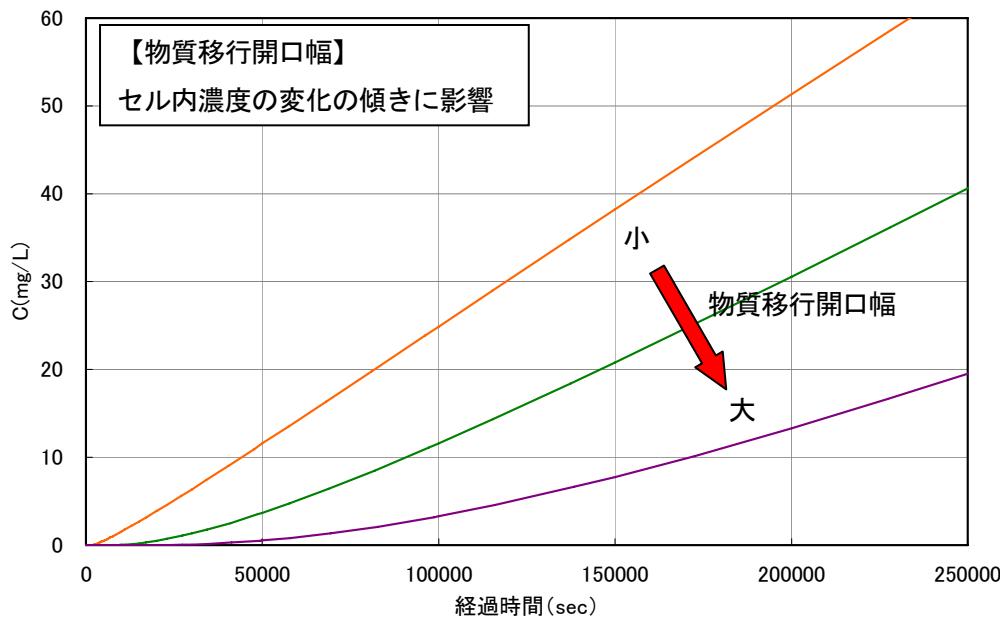
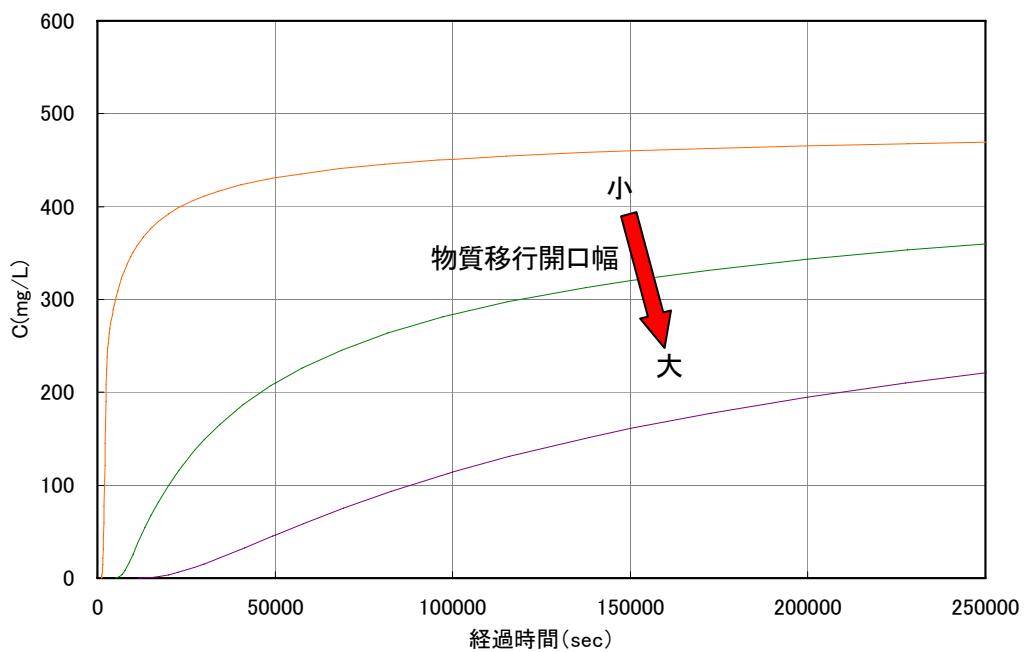


図 3.4-7 トレーサー試験の解析条件（試料 5）

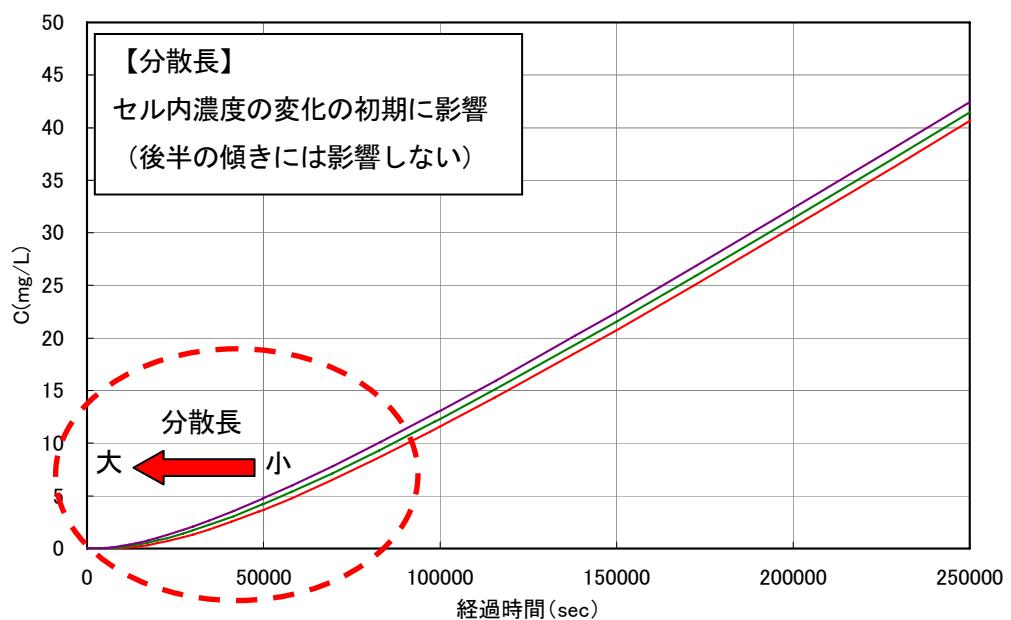


(a) 測定セル内濃度

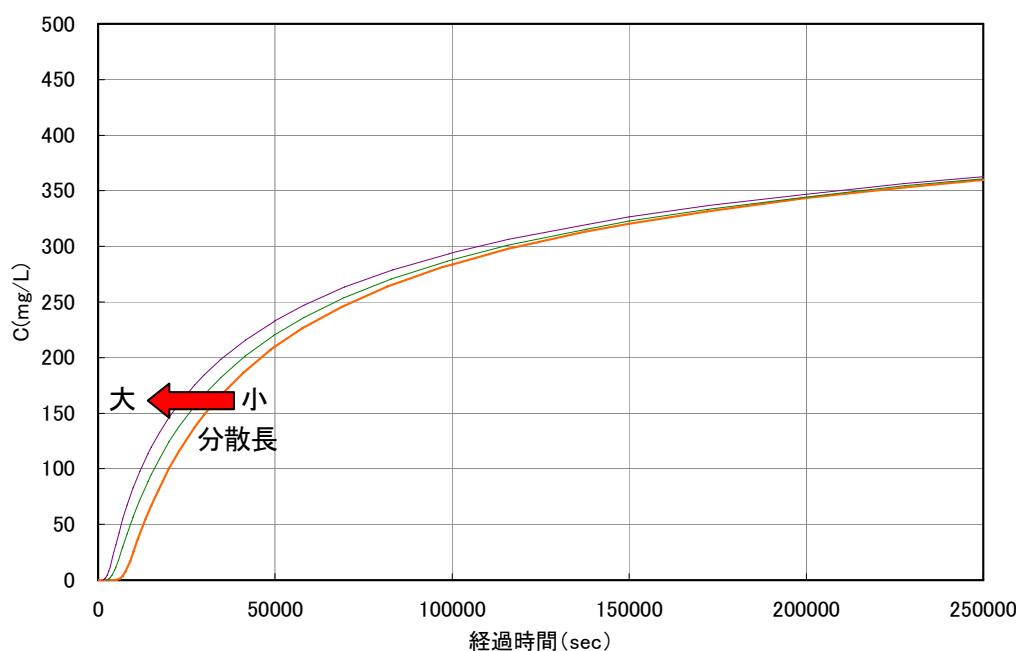


(b) 破過曲線

図 3.4-8 物質移行開口幅の感度



(a) 測定セル内濃度



(b) 破過曲線

図 3.4-9 亀裂内縦方向分散長の感度

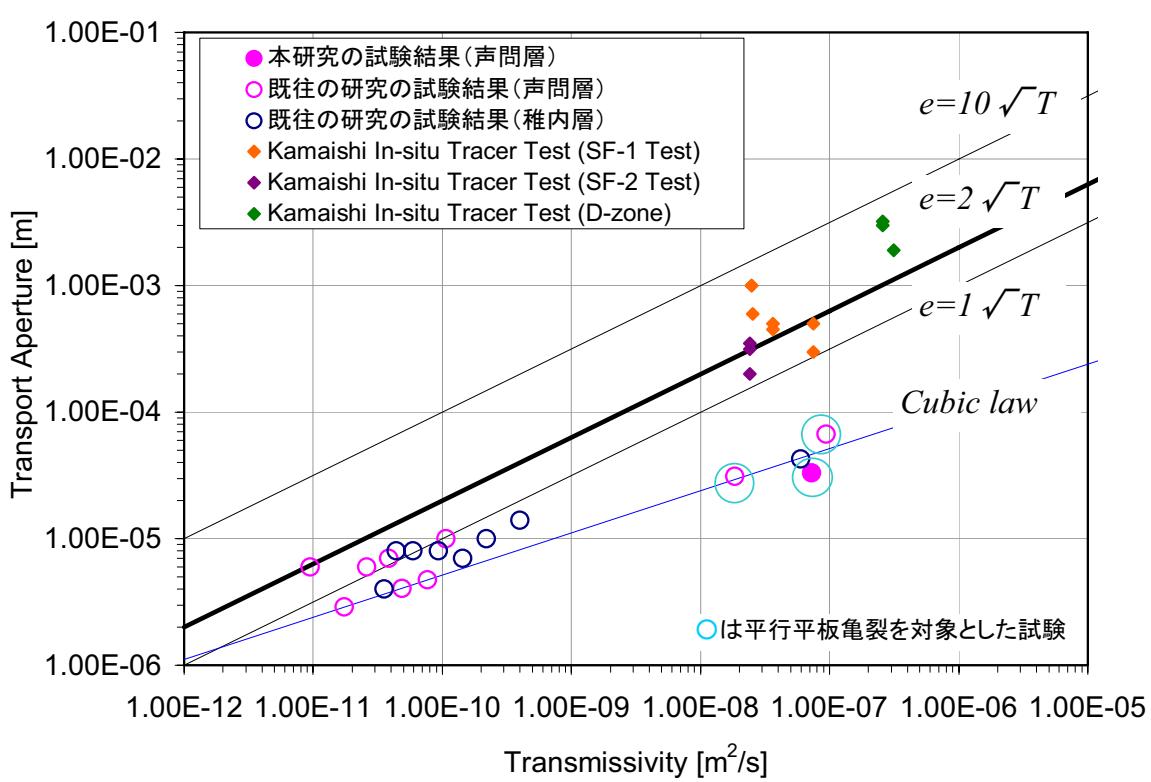
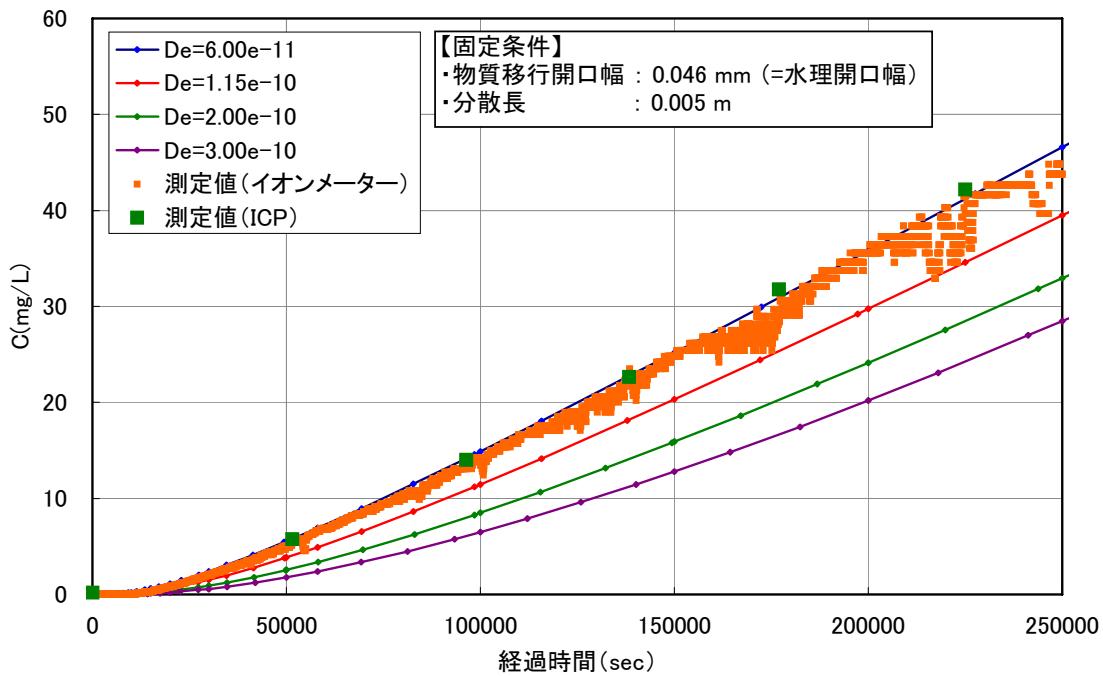


図 3.4-11 透水量係数と物質移行開口幅の関係
(既存データとの比較; 下茂ほか, 2003, 2004, 2007, 2008; Shimo et al., 1999)

4. 亀裂を考慮した堆積岩の水理・物質移行評価パラメータの推定

岩盤中の物質移行現象の評価においては、物質の移行経路となる岩盤間隙内の地下水の流速（実流速）を適切に評価することが重要である。また、一般に、実流速はダルシ一流速を地下水の流れに寄与する間隙率で除すことにより求められ、この間隙率を設定する際には、物質の移行に寄与する間隙を適切に評価する必要がある。

花崗岩などの結晶質岩では、一般的に、岩石マトリクス部の間隙率は小さく、かつ亀裂を有するため、岩盤内の地下水流动に寄与する間隙は主に亀裂であり、亀裂内の実流速を規定するパラメータである亀裂開口幅の評価が重要となる。一方、本件で対象とする幌延地域の堆積岩は、結晶質岩と同様に、マトリクス部の透水性は小さく主要な水みちとなり得るような亀裂が存在するものの、マトリクス部の間隙率が大きいため、岩盤内の物質移行現象の評価においては、亀裂に支配される地下水流动による移流に加えて、亀裂からマトリクス部への拡散現象の効果を考慮する必要があることが示唆されている。このような場合、岩盤内の物質の移行に寄与する間隙は亀裂およびマトリクス部の粒子間間隙であり、これらの間隙内の移行に影響を与えるパラメータとして、亀裂開口幅やマトリクス部の間隙率の評価が重要となる。ただし、これらのパラメータは、岩盤内の物質移行現象のうち、それぞれ異なる現象を規定するものであり、各々のパラメータが岩盤内で生じる物質移行現象に与える影響を別々に把握しておく必要がある。

そこで、本章では、亀裂を有する堆積岩を対象として、上記の亀裂開口幅とマトリクス部の間隙率に着目し、その違いが堆積岩中の物質移行現象に与える影響について整理した。

具体的には、単一の平行平板亀裂を有するモデルを用いて、亀裂開口幅、マトリクス部の間隙率の異なるケースについて、物質移行解析を実施し、各パラメータの違いが、堆積岩中の物質移行現象に与える影響について整理するとともに、現状で想定し得るパラメータの範囲における物質移行現象の範囲を示した。

なお、解析は、室内トレーサー試験結果の評価と同様に、三次元物質移行解析コードFRAC3DVS ver.3.49 (Therrien et al., 1999; Therrien and Sudicky, 1996) を用いて行った。

4.1 解析モデルおよび解析条件

解析モデルは、亀裂内の移流とマトリクスへの拡散現象を考慮するために、図 4.2-1 に示すような X-Z 平面上に单一平行平板亀裂を配置したものを用いた。モデルスケールは、原位置試験スケールを想定した $25\text{m} \times 10\text{m}$ とし、亀裂上の $X=0\text{m}$ のトレーサー注入点から、 $X=10\text{m}$ の観測点までの移行距離 10m 間の物質移行現象を評価した。

解析は、まず、モデル左右両端 ($X=0, 25\text{m}$) を定水頭境界、側面 ($Z=0, 10\text{m}$) を不透水境界とした定常地下水流动解析を実施し、その後、得られた定常流速分布を用いて、亀裂内の移流、分散およびマトリクス内の拡散を考慮した物質移行解析を実施した。境界条件は、上流側（亀裂上の $X=0$ 点）のトレーサー濃度を 1.0 で固定し、解析終了時間まで一定濃度を連続注入した。

4.2 パラメータの設定および解析ケース

本解析では、幌延地域において、特に亀裂内の流れが卓越すると考えられる「稚内層」について、

これまでの調査結果に基づいたパラメータの設定を行った。設定には、本件でこれまでに取得された室内試験結果、ならびに幌延地域における原位置水理試験結果等を用いた。表 4.2-1 に室内試験および原位置水理試験結果から求めた水理、物質移行パラメータの範囲を示す。また、表 4.2-2 に実測データに基づいて設定した解析ケースとパラメータの一覧を示す。本解析では、亀裂開口幅（水理開口幅、物質移行開口幅）およびマトリクス部の間隙率を各 3 ケースの変動パラメータとし、その他のパラメータは、実測データの平均的な値で固定パラメータとした。以下に、各パラメータの設定根拠について説明する。

(1) 亀裂パラメータの設定

(a) 水理開口幅 : t_H

水理開口幅は、幌延地域で実施された原位置水理試験結果に基づいて設定した。

原子力機構では、これまでに実施された地表からの調査結果に基づいた水理地質構造モデルの構築を行っている。その中で、特に稚内層については、割れ目が集中している割れ目帯と透水係数の相関性が指摘されている（核燃料サイクル開発機構、2005a）。各ボーリング孔で流体検層などにより検出されるフロー・ポイント（以下では、FP と呼ぶ）と呼ばれる地下水の流入・流出箇所では、その近傍に位置する亀裂が地下水の主要な水みちとして機能している可能性が高いと考えられる（図 4.2-2 参照）。図 4.2-3 に示すように水理試験結果においても、FP を含む区間の方が含まない区間よりも高い透水性を示している（

表 4.2-3 参照）。そこで、本解析では、稚内層を対象とした水理試験結果のうち、特に FP を含む区間に着目し、想定される水理開口幅の範囲を求め、解析パラメータとして設定した。なお、水理開口幅の算定は、各試験区間に 1 本の亀裂が交差し、それが区間の透水性を代表すると仮定し、以下の三乗則（式 (4.1)）に基づいて行った。その結果、得られた水理開口幅の最小値、最大値、平均値を表 4.2-1 中に示す。解析パラメータは、これに基づいて表 4.2-2 中に示す 3 ケースとした。

$$t_H = \sqrt[3]{\frac{12\mu T}{\rho g}} \quad \dots \quad (4.1)$$

(b) 物質移行開口幅 : t_T

物質移行開口幅は、本件を含めたこれまでの室内トレーサー試験結果に基づいて設定した。物質移行開口幅は、既往の花崗岩サイト（釜石鉱山原位置試験場）で実施されたトレーサー試験結果から、亀裂の透水量係数との間に関係式 (4.4) のような関係があることが示されている。また、本件で実施した室内トレーサー試験結果でも物質移行開口幅と亀裂の透水量係数の間に同じような相関がみられ、概ね三乗則～ $2\sqrt{T}$ の間にあることが明らかとなってきた。そこで、本解析では、物質移行開口幅を透水量係数との関数として、以下の (4.2) ～ (4.4) の 3 ケースとした。

$$t_T = t_H = \sqrt[3]{\frac{12\mu T}{\rho g}} \quad \dots \quad (4.2)$$

$$t_T = \sqrt{T} \quad \dots \quad (4.3)$$

$$t_T = 2 \times \sqrt{T} \quad \dots \quad (4.4)$$

(c) 分散長 : α_f

分散長は、本件で実施した室内トレーサー試験結果に基づいて設定した。分散長は、対象とするスケールによって異なり、一般に移行距離の1/10~1/100の値であると言われている。また、本件で実施した室内トレーサー試験結果においてもこの傾向と整合的であった。そこで、今回の解析では、亀裂の縦方向分散長 (α_f) を移行距離（トレーサー供給源から濃度観測断面までの距離：10m）の1/10である $\alpha_f=1.0\text{m}$ に設定した。

(2) マトリクスパラメータの設定

(a) 間隙率 : n

マトリクス部の間隙率 (n) については、本件で、これまでに実施した基本物性試験結果（表 3.2-1）に基づいて設定した。基本物性試験結果のうち、稚内層についてマトリクス部の間隙率の最小値、最大値、平均値を表 4.2-1 中に示す。これより、稚内層のマトリクス部の間隙率は、概ね 30%~40% であった。そこで、本解析では、表 4.2-2 中に示す 3 ケースとした。

(b) 拡散係数 : D_e

マトリクス部の実効拡散係数 (D_e) は、本件で、これまでに実施した室内拡散試験結果（表 3.4-2）に基づいて設定した。室内拡散試験結果のうち、稚内層について実効拡散係数の最小値、最大値、平均値を表 4.2-1 中に示す。また、表 3.4-2 中の実効拡散係数と間隙率の関係から、以下の(4.5)式の関係式により求めた屈曲率 (τ) の最小値、最大値、平均値を表 4.2-1 中に示す。本件では、(4.4)式のうち、屈曲率 τ と水中における分子拡散係数 D*を固定し、マトリクス部の間隙率 n を上述(a)のように変化させて、表 4.2-2 中に示すような 3 ケースの D_e を設定した。なお、屈曲率 τ の値は、表 4.2-1 本件で実施した室内拡散試験結果のうち、稚内層の平均的な値を設定した。

$$D_e = n \tau D^* \quad \dots \quad (4.5)$$

ここに、D* : 水中における分子拡散係数 ($2.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$: ヨウ化物イオンを想定) である。

(c) 透水係数 : k_m

マトリクス部の透水係数 (k_m) は、本件で、これまでに実施した室内透水試験結果（表 3.3-3）に基づいて設定した。室内試験結果のうち、稚内層について透水係数の最小値、最大値、平均値を表 4.2-1 中に示す。これより、稚内層の透水係数は、概ね $1 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ 程度であることから、この値を解析パラメータとした。

(3) 境界条件（動水勾配）の設定

動水勾配は、幌延深地層研究センターにおいて、これまでに実施された三次元広域地下水流动解析結果（操上他, 2005）を参考に、地下施設近傍における稚内層が分布する深度付近の動水勾配として、0.005と設定した。

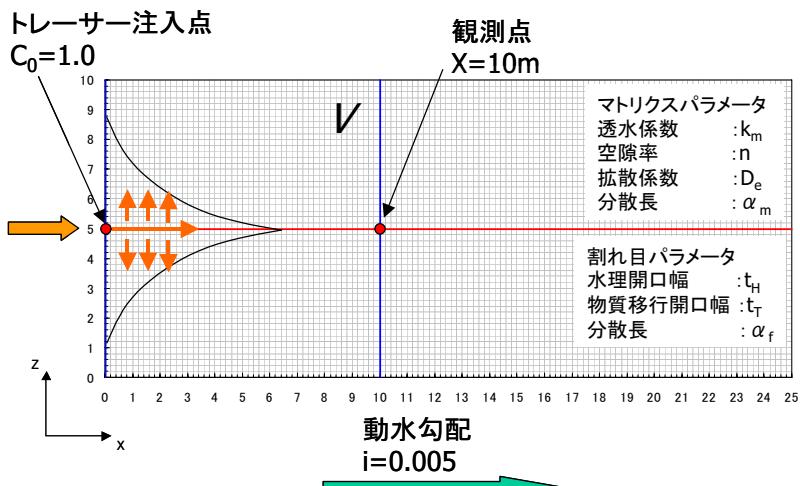


図 4.2-1 解析モデルの概要

表 4.2-1 各パラメータの実測範囲（下茂ほか, 2003, 2004, 2007, 2008）

	亀裂パラメータ			マトリクスパラメータ			
	水理開口幅	物質移行開口幅	縦方向分散長	有効空隙率	実効拡散係数	屈曲率	透水係数
	(m)	(m)	(m)	(-)	(m ² /s)	(-)	(m/s)
最大値	6.78E-04	6.70E-05	0.075	41.4	4.19E-11	4.92E-02	2.80E-11
最小値	2.91E-05	2.88E-06	0.001	33.2	8.16E-12	1.23E-02	1.63E-12
平均値	1.64E-04	1.52E-05	0.017	37.9	2.73E-11	3.29E-02	7.12E-12

表 4.2-2 解析ケースとパラメータ一覧

解析ケース	境界条件	亀裂パラメータ				マトリクスパラメータ			
		動水勾配	水理開口幅	物質移行開口幅	縦方向分散長	実効拡散係数	有効空隙率	屈曲率	透水係数
case01	0.005	5.00E-05	三乗則	5.00E-05	1.0	1.00E-11	35	1.43E-02	1.00E-11
case02			\sqrt{T}	3.02E-04		8.58E-12	30		
case03			$2\sqrt{T}$	6.03E-04		1.00E-11	35		
case04			$1.00E-04$	1.00E-04		1.14E-11	40		
case05		1.00E-04	\sqrt{T}	8.53E-04		1.00E-11	35		
case06			$2\sqrt{T}$	1.71E-03		8.58E-12	30		
case07			$5.00E-04$	5.00E-04		1.00E-11	35		
case08		2.00E-03	\sqrt{T}	9.53E-03		1.14E-11	40		
case09			$2\sqrt{T}$	1.91E-02		1.00E-11	35		
case10			$1.00E-03$	1.00E-03		8.58E-12	30		
case11			$2.00E-03$	2.00E-03		1.00E-11	35		
case12		$1.00E-02$	\sqrt{T}	1.00E-02		1.14E-11	40		
case13			$2\sqrt{T}$	2.00E-02		1.00E-11	35		

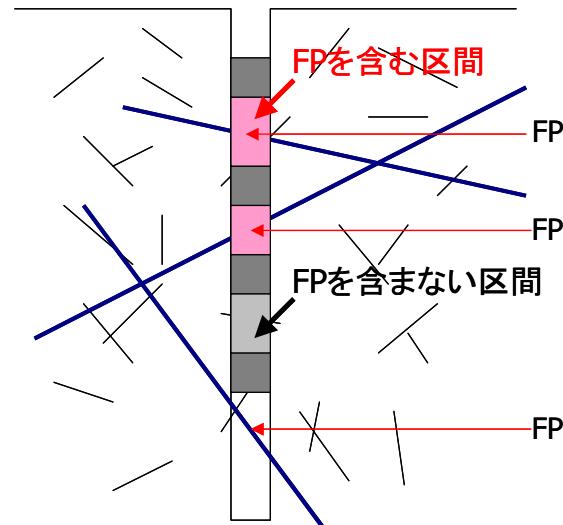


図 4.2-2 フロー・ポイントと水理試験区間の関係

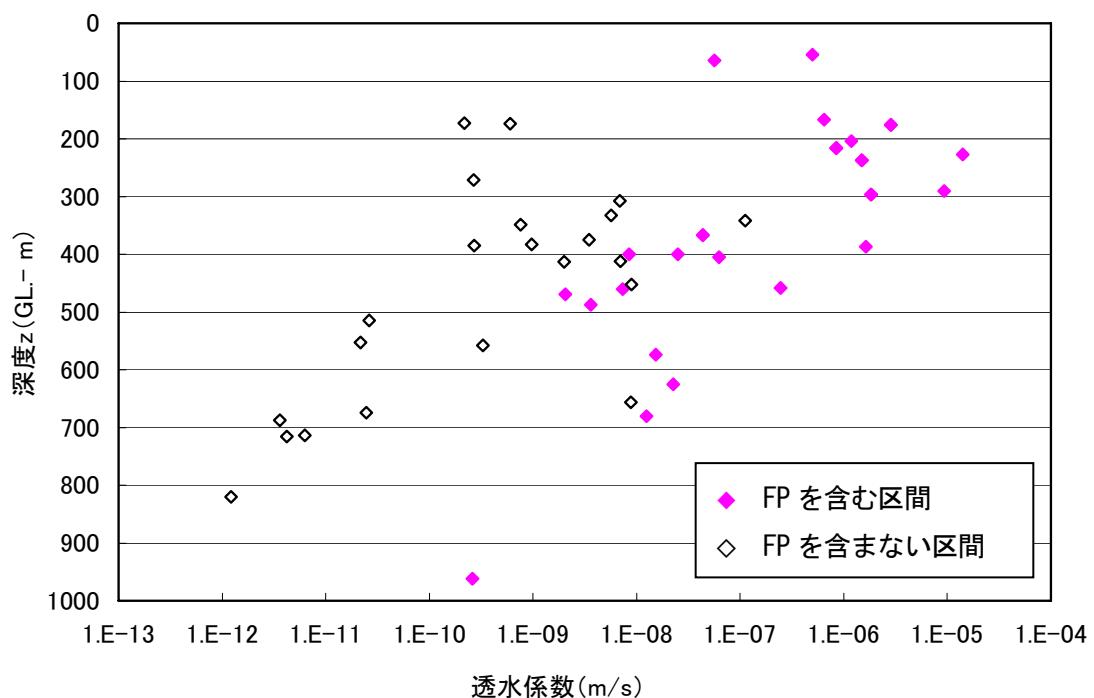


図 4.2-3 水理試験結果（稚内層）

表 4.2-3 フロー・ポイントの有無と透水量係数の関係（水理試験結果）

	全区間 T(m²/s)	FP区間 T(m²/s)	FP区間以外 T(m²/s)
最大値	2.55E-04	2.55E-04	2.69E-06
最小値	1.96E-11	2.01E-08	1.96E-11
対数平均値	2.22E-07	3.62E-06	1.20E-08

4.3 解析結果

(1) 開口幅に着目したケース

図 4.3-2～図 4.3-4 に、それぞれ開口幅を変化させたケースについて、観測点におけるトレーサー濃度の経時変化を示す。各グラフは、水理開口幅が一定で物質移行開口幅を変化させた場合の結果である。すなわち、各グラフ中の破過曲線は、それぞれ流量が一定で、亀裂内実流速が異なる 3 ケースを示している（図 4.3-5）。また、それについて、時間軸を実時間とした場合と、次式で求めた滞留時間 t^* で正規化した場合のプロットを示す。

$$t^* = \frac{l}{v_f} \quad \dots \quad (4.6)$$

ここに、 l : 移行距離 (m) (注入点から観測点までの距離 : 10m), v_f : 亀裂内の実流速 (m/s) ($v_f = Q/t_T$, Q : 流量 (m^3/s), t_T : 物質移行開口幅 (m)) である。時間軸を実時間で整理した場合、破過曲線の形状には、実流速の違いによる亀裂内の移流、分散現象の違いと、それに伴うマトリクス拡散現象の違いが複合的に現れることとなり、それぞれの現象を別々に評価することが困難である。一方、時間軸を滞留時間で正規化した場合、実流速の違いがキャンセルされ、濃度上昇の遅れをマトリクス拡散による遅延効果の程度として評価することができる。図 4.3-1 に正規化の例として、マトリクス拡散が生じない場合（亀裂内の移流、分散のみを考慮した場合）の解析結果を示す。マトリクス拡散が生じない場合、分散長が同じであれば、実流速の異なる各ケースの破過曲線は、時間軸の正規化により同一の形状を示す。したがって、マトリクス拡散を考慮した場合、この曲線からの時間遅れが、マトリクス拡散による遅延効果の程度を示すと言える。

各ケースの内、例として図 4.3-2 を見ると、観測点におけるトレーサー濃度変化は、物質移行開口幅によって異なり、物質移行開口幅が大きくなるほど（すなわち実流速 v_f が小さくなるほど（図 4.3-5））上昇に遅れが生じることが分かる。これは、物質移行開口幅が大きくなると、実流速が小さくなるとともに亀裂内の滞留時間が長くなり、亀裂からマトリクスへの拡散量が相対的に増加することによるものと考えられる。また、図 4.3-2～図 4.3-4 より、水理開口幅と物質移行開口幅の関係が同じ場合でも（例えは図 4.3-2～図 4.3-4 のうち、 $t_T = \text{Cubic Law}$ の場合を比較すると）濃度上昇の遅れは、水理開口幅によって異なり、水理開口幅が小さいと、遅延効果が大きくなる傾向が見られる。これも上記と同様に、水理開口幅が小さくなると、実流速も小さくなり、亀裂内の滞留時間が長くなるため、亀裂からマトリクスへの拡散量が相対的に増加することによるものと考えられる。図 4.3-6 に開口幅に着目した全ケースを比較した結果を示す。これより、今回のモデル条件では、現状で想定される開口幅の範囲において、数倍から数万倍程度の遅延効果が見込めることが明らかとなった。

以上より、幌延地域の亀裂を有する堆積岩では、一定動水勾配下において、同じ水理開口幅でも、物質移行開口幅の設定の仕方によって、亀裂内の移流、分散だけでなく、マトリクス拡散による遅延効果が大きく異なるため、水理開口幅と物質移行開口幅は、それぞれ別々に評価する必要があると言える。

(2) マトリクス部の間隙率に着目したケース

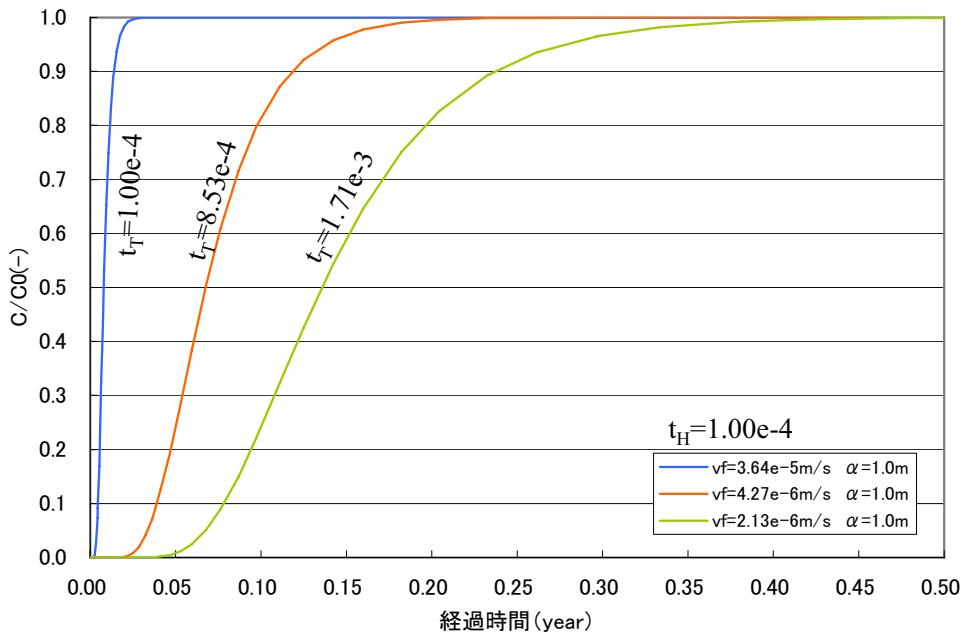
図 4.3-7 に、開口幅に着目したケースのうち、最も遅延効果の大きいケースと ($t_H=5.00\times 10^{-5}$ m, $t_f=2\sqrt{T}$)、小さいケース ($t_H=5.00\times 10^{-4}$ m, $t_f=\text{Cubic Law}$) について、マトリクス部の間隙率を変化させたケースの観測点におけるトレーサー濃度の経時変化を示す。各グラフは、水理開口幅、物質開口幅が一定でマトリクス部の間隙率を変化させた場合の結果である。

図 4.3-7 より、マトリクス部の間隙率が異なると、破過曲線の形状に違いが見られ、間隙率が大きくなると濃度上昇に遅れが見られることが分かる。これは、間隙率を大きくすると、(4.5)式により、マトリクス部の拡散係数が大きくなり、遅延効果が大きくなったものと考えられる。

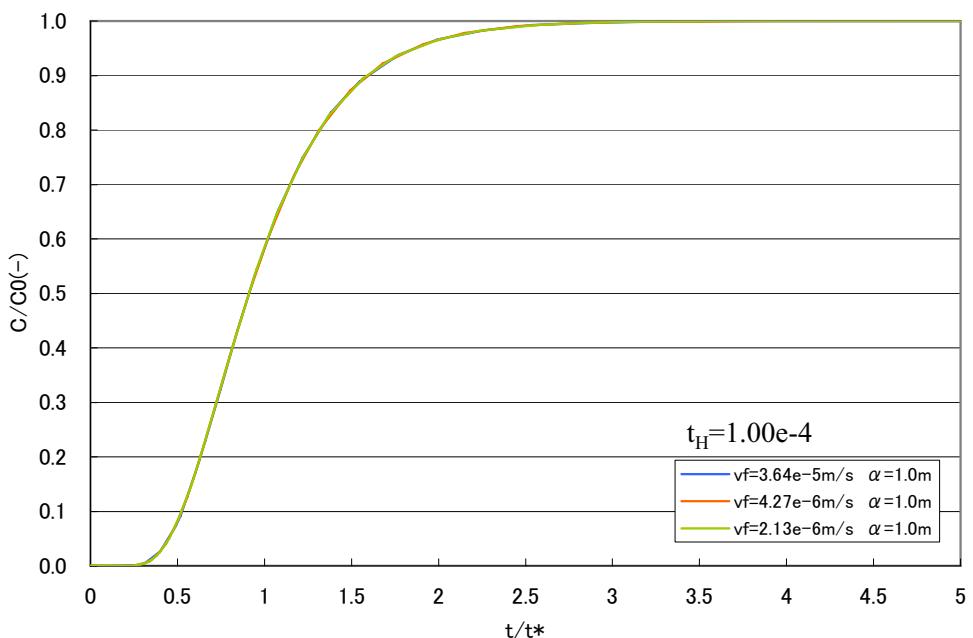
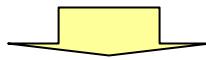
以上より、亀裂開口幅ならびにマトリクス部の間隙率の違いは、いずれもマトリクス拡散による遅延効果に影響を与え、前者は亀裂内の滞留時間、後者はマトリクス内への拡散量が変化することにより、遅延効果の相対的な大きさを変化させることができた。また、これらのパラメータのうち、特に水理開口幅の影響が相対的に大きいことから、今後の幌延サイトの物質移行評価においては、この水理開口幅を適切に評価することが重要であると考えられる。

今回は、亀裂を有する堆積岩において、主な移行経路となり得る「亀裂」と岩石内の「粒子間間隙」に着目し、亀裂開口幅やマトリクス部の有効空隙率が岩盤内の物質移行現象に与える影響について整理するとともに、原位置試験スケールにおいて、現状の調査結果から想定される物質移行現象を「マトリクス拡散による遅延効果」に着目して整理した。ここで得られた知見は、今後の原位置での物質移行試験計画や、性能評価手法の確立に寄与するものと考えられる。

今後は、今回対象としなかった亀裂部の分散長やマトリクス部の拡散係数など、他の物質移行パラメータについても、同様の検討を行い、現状で想定される現象の範囲について整理する必要があると考えられる。

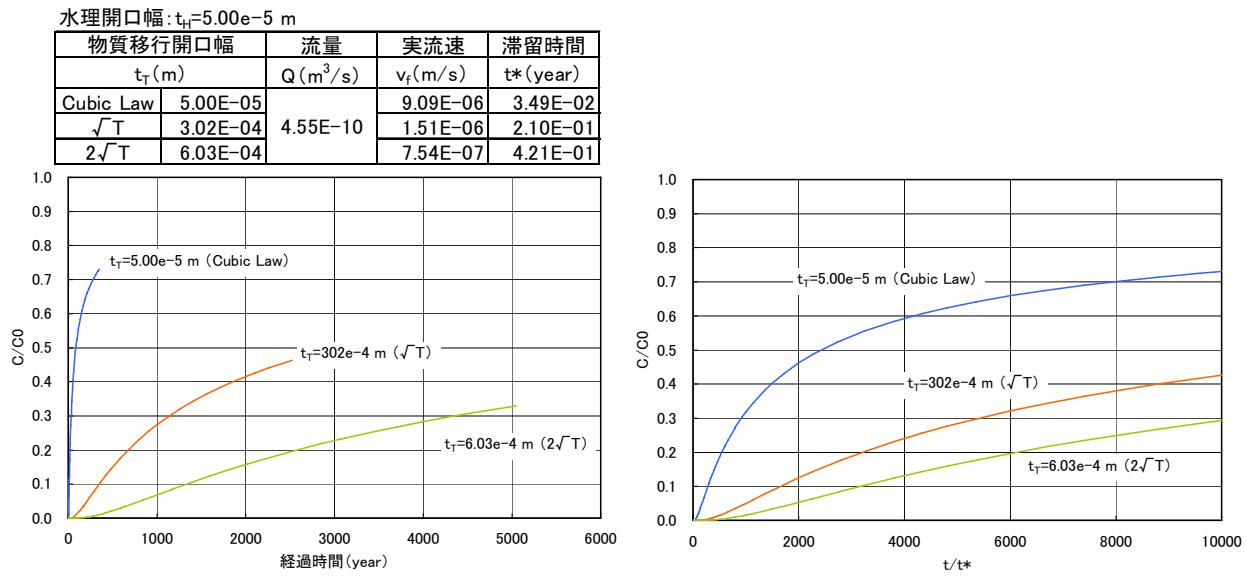


(a) 時間軸（実時間）



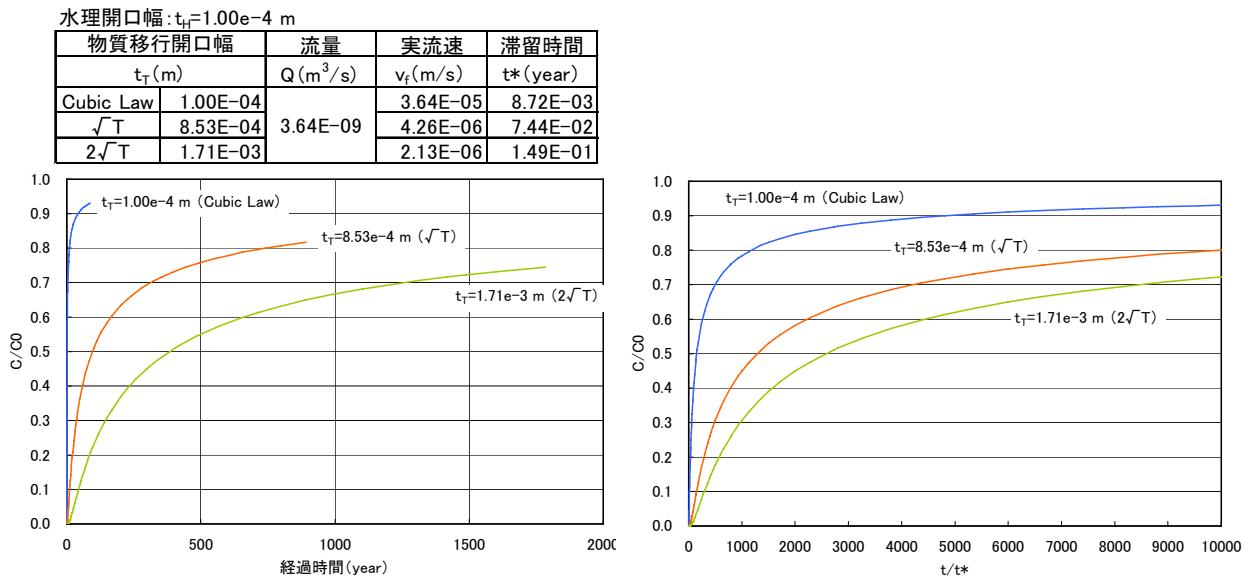
(b) 時間軸（正規化）

図 4.3-1 観測点における濃度変化（物質移行開口幅を変えたケース、マトリクス拡散なし）



(a) 時間軸（実時間）

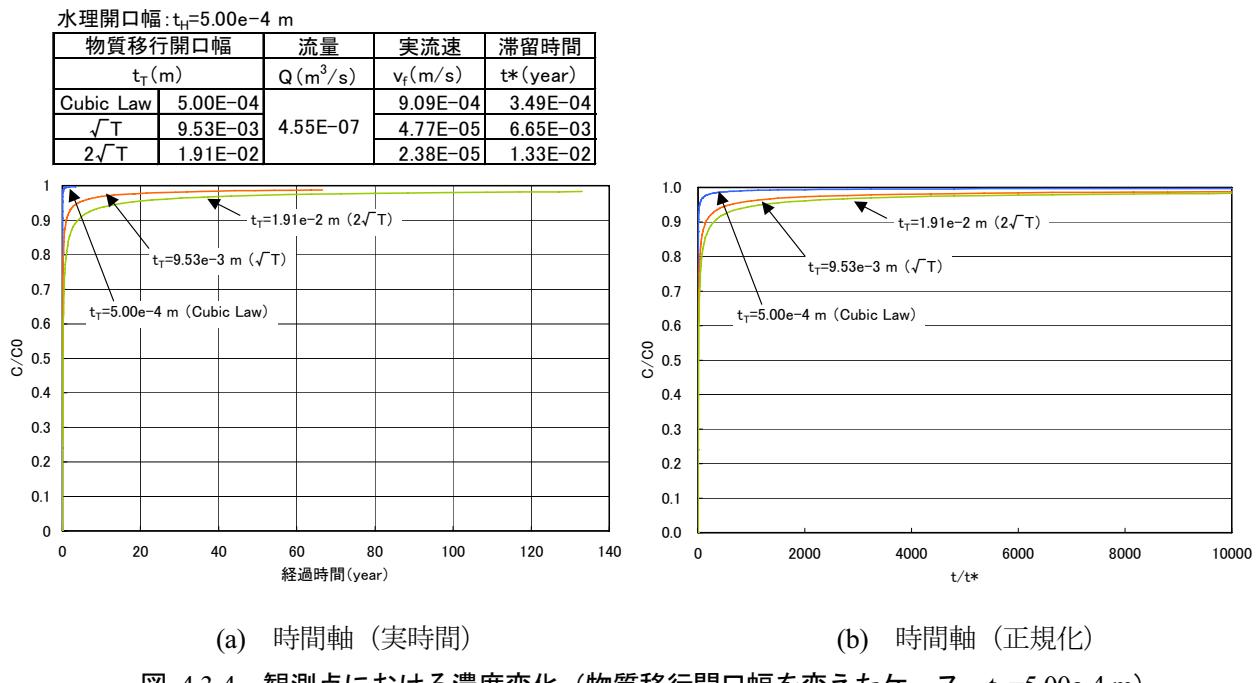
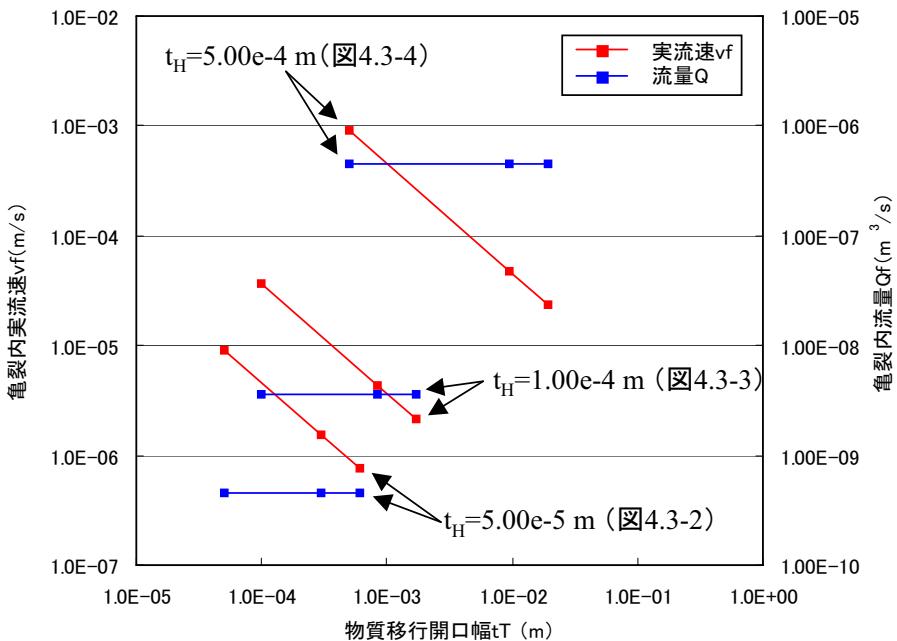
(b) 時間軸（正規化）

図 4.3-2 観測点における濃度変化（物質移行開口幅を変えたケース, $t_H=5.00 \times 10^{-5} \text{ m}$ ）

(a) 時間軸（実時間）

(b) 時間軸（正規化）

図 4.3-3 観測点における濃度変化（物質移行開口幅を変えたケース, $t_H=1.00 \times 10^{-4} \text{ m}$ ）

図 4.3-4 観測点における濃度変化（物質移行開口幅を変えたケース, $t_H=5.00 \times 10^{-4} \text{ m}$ ）図 4.3-5 各ケースの開口幅 (t_H , t_T) と流量 Q_f , 実流速 v_f の関係

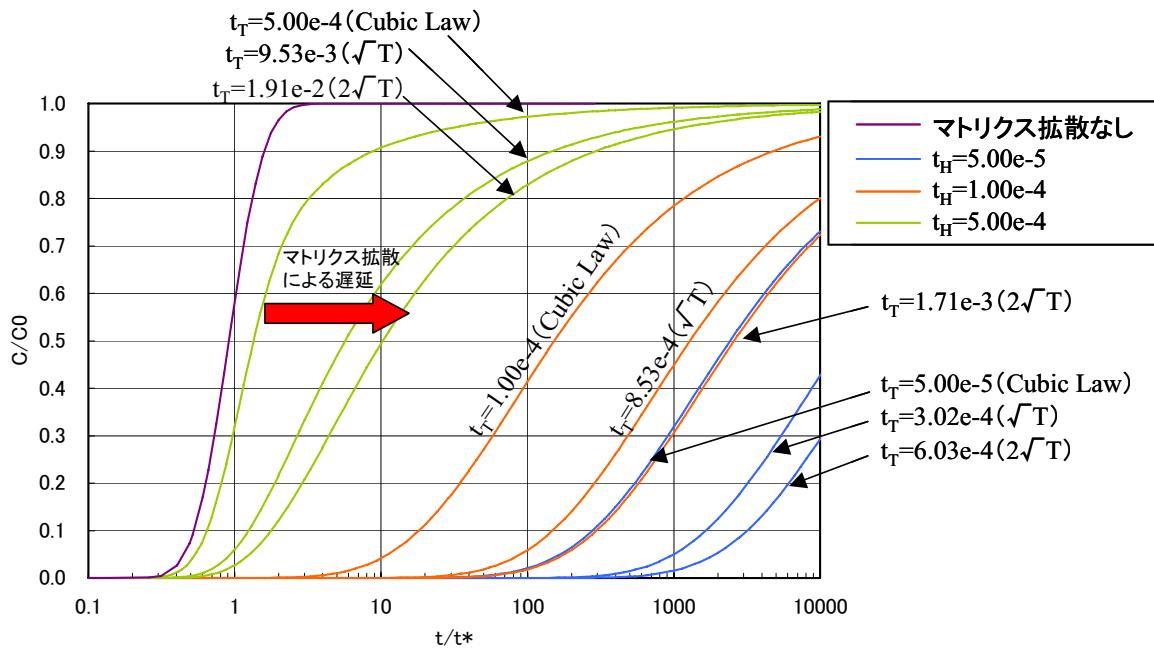


図 4.3-6 観測点における濃度変化（物質移行開口幅を変えたケースの比較）

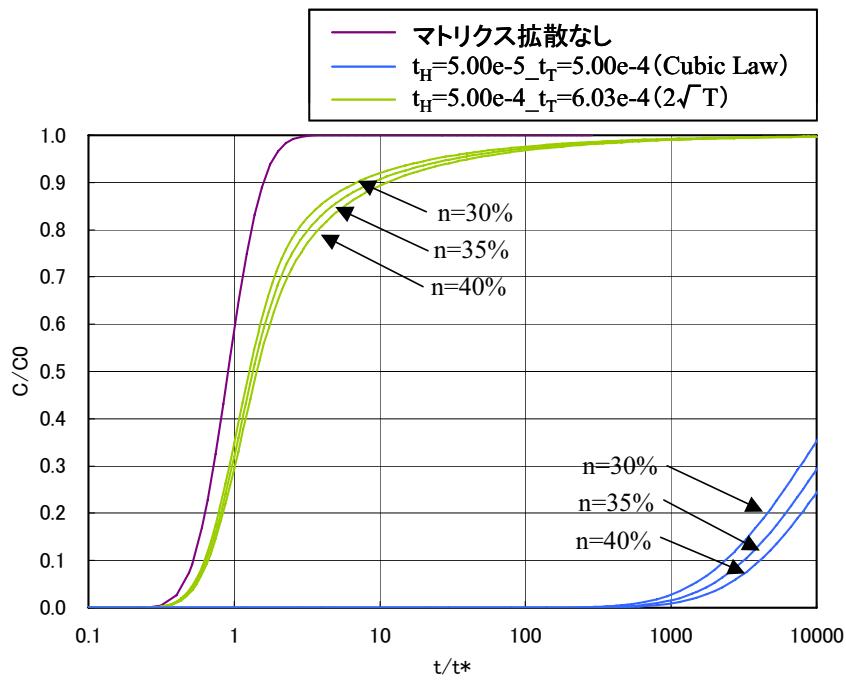


図 4.3-7 観測点における濃度変化（間隙率を変えたケース）

5. 温度分布データを使った地下水流量モデルの推定

5.1 背景と目的

具体的な地質環境を対象に地下水流动解析を行う際、限られた原位置測定データを活用して水理地質モデルを構築しなければならない。データが限られる理由としては第一にボーリング孔を掘削するには多大な費用が掛かり、広い地域が対象であっても、限られた数のボーリング孔しか掘削できないからである。第二に、原位置では直接計測する事が困難なデータが水理地質モデルの構築に必要であるからである。原位置で得られる水理データとしてはボーリング孔で観測される地下水水頭やボーリング孔を使った水理試験から推定される透水係数や貯留係数がある。その他にモデル構築に必要で重要なデータとしては、境界条件がある。往々にしてモデルの側方境界と底面は不透水境界が便宜的に使われる。果たして不透水境界が正確であるかの検証は難しいが、側方境界が分水嶺と一致していれば、不確実性は低いと推測できる。境界条件の内最も不確実性が高いのは地表面の境界条件である。地下、特に深部への地下水の涵養量は直接計測することは困難である。理想的には、降雨量の空間的、時間的分布を入力データとし、地表流と地下水流动を同時に解析するのが望ましいが、どれだけの降雨が蒸発散するのか、地表流となるのか、あるいは涵養されるかの決定に不確実性を伴う。加えて、大きな不確実性を伴うのは断層などの不連続構造の水理性状である。我が国では断層は普遍的に存在し、どのようなサイトにも複数の断層が必ず存在する。

Doughty and Karasaki(2002), Wu et al.(2004; 2007) は地温勾配や温度分布が地下の地下水流动に大きく影響を受けることにより、地下水流量の推定に役立つ事を示した。また、Bense and Kooi(2004)は鉛直性の断層の上流側での上昇流と断層下流側での鉛直流れを温度分布データから類推している。

本研究では地下水圧データに加えて、一般的な水理データ以外のデータ、具体的にはボーリング孔の深度沿いの温度分布データを使って地下水の流动方向、地中への涵養量もしくは上昇流の流量を推定する試みを行った。

5.2 HDB 孔データ

図 5.2-1 に幌延深地層研究センター近傍に掘削された HDB 各孔の位置図を示す。付近には正確な位置は未だに特定されていないが、大曲断層が横切っていると推定されている。図 5.2-2 に HDB 各孔の深度沿いの圧力と温度分布を示す(藪内ら, 2006)。図 5.2-2 から明らかなように HDB-7 孔の深度沿いの温度分布（青色の実線）のみ他の HDB 孔と異なった分布をしていることがわかる。HDB-7 孔の温度分布は弓形に下向きに凸であり、その他の HDB 孔沿いの温度分布は上向きに凸である。温度の値そのものも HDB-7 孔沿いに 5°C 前後低い。一般にボーリング孔掘削直後の温度データは掘削水の影響などにより地下の性状を類推する手がかりにするには注意を要するが、これらの HDB 孔のデータは掘削後 2, 3 年経て安定しており、地下の温度分布をほぼ正確に反映していると考えることができる。HDB-7 孔のように上向きに凹の温度分布は一般に温度の低い天水の下降流を示し、HDB-8 孔や他の孔のように上向きに凸の温度分布は深部からの温かい地下水の上昇流を意味する。

図 5.2-2 中の HDB 各孔沿いの圧力データ（記号）は殆どすべての孔の圧力データが直線に乗っているように見えるが、水の密度を 998 kg/m^3 と仮定し圧力データを標高補正して水頭圧に変換した値をプロットした図 5.2-3 から判るように、HDB-7 孔は他の HDB 孔の水頭値と異なるトレンドを示していると言える。



図 5.2-1 HDB 各孔の位置図 （核燃料サイクル開発機構, 2005b の図 16 を一部変更して引用）

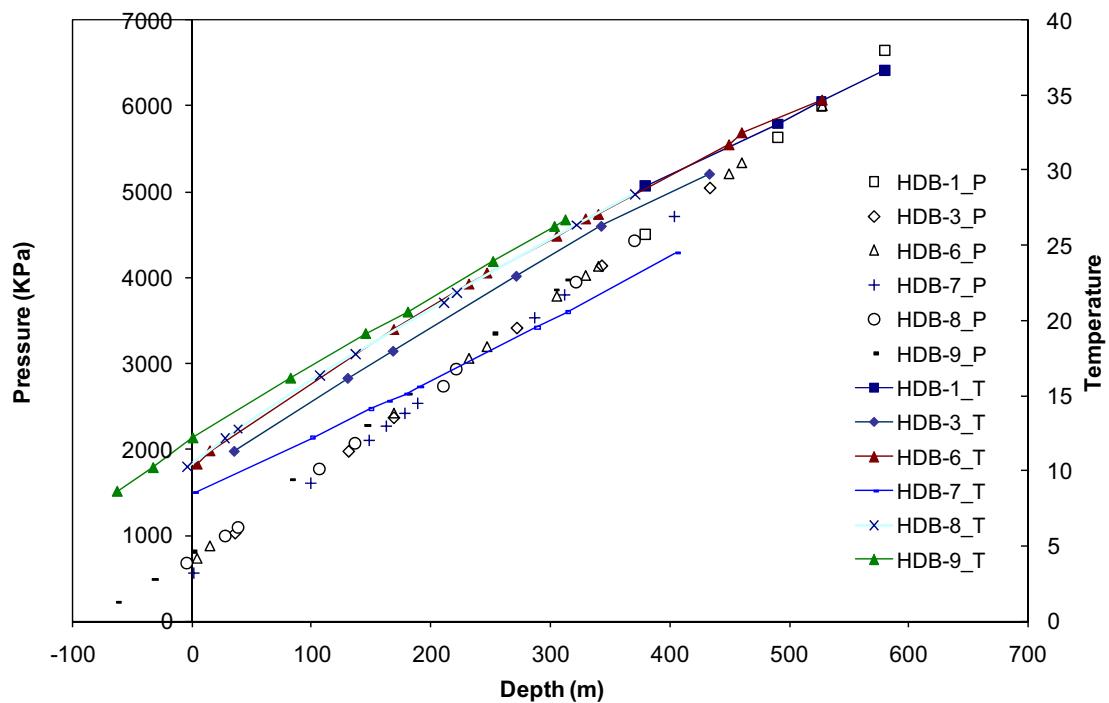
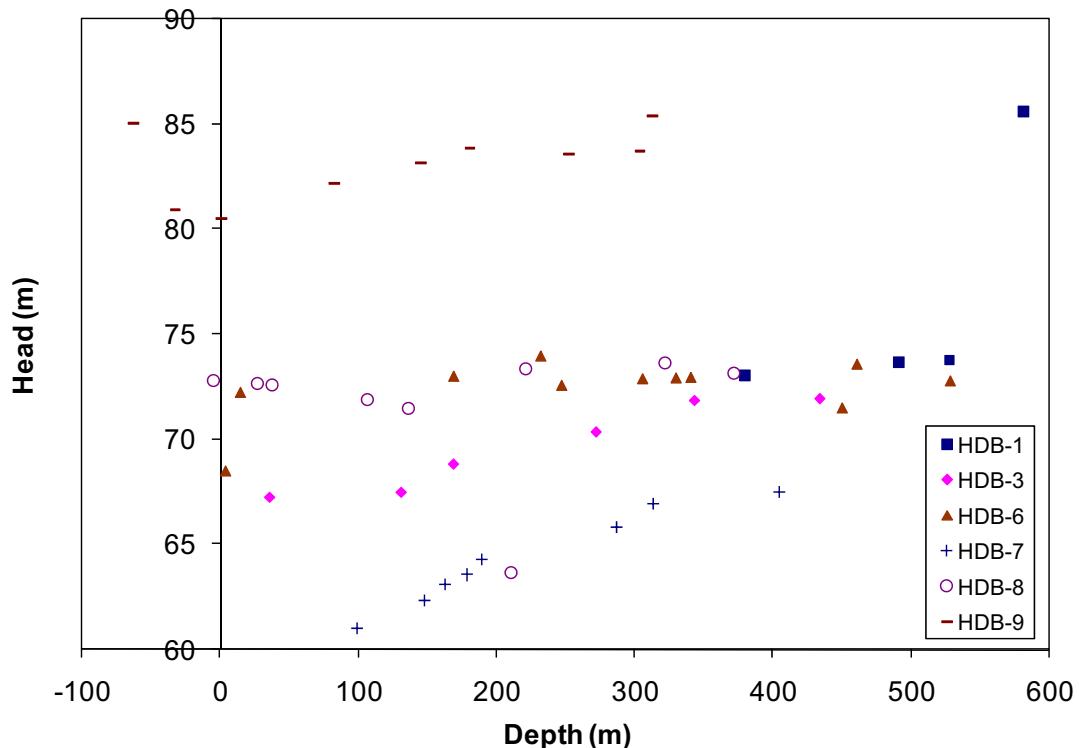


図 5.2-2 HDB 各孔沿いの温度 (T) と圧力分布 (P) （凡例の T と P はそれぞれ温度と圧力を表す）

図 5.2-3 HDB 各孔沿いの水頭分布（地下水密度を 998kg/m^3 と仮定）

5.3 解析コードと解析条件

本解析には LBNL で開発された TOUGH2 シミュレーター (Pruess, et. al., 1999) に温度に依存した水と空気の二相流を扱える EOS-3 モジュールの改良版 (Wu, et al., 2008) を組み合わせて使用した。当該モジュールは深度に依存した地下水の密度変化を扱うことができる。本解析では空気を無視して水のみの単相流とした。

解析は、定常の鉛直 1 次元流を対象とし、地表面から地表面下 600mまでの鉛直一次元方向の単位断面積を有する解析メッシュを用いた。また、地下水の密度は計測された溶存イオン濃度の値の総和で求めた総濃度 (Total concentration) で推定されると単純化した。また地下水の密度は温度とも相関をもち、イオン濃度は深度にのみ依存すると仮定した。

5.4 解析メッシュ

鉛直方向に地表から深度 600m の 1 次元のコラムを 5m 間隔で離散化、单一連続体近似とし、地層毎に物性の違う多重の層序構造とした。

5.5 入力データ

表 5.5-1 に解析に使用した HDB-7 孔の層序、並びに温度と圧力分布を示す。HDB 各孔はパッカーデ区切られた区間ごとの温度と圧力が観測、記録されている。HDB-7 孔は地表 (標高 43.75m) から深

度 400m までは勇知層, 以深 600m までの声問層を一次元モデル化した. 同様に表 5.5-2 に HDB-8 孔のデータを示す. HDB-8 孔は孔口の標高が 70.05m で深度 140m までは声問層, 以深 600m まで稚内層とした.

表 5.5-1 解析に使用した HDB-7 孔沿いのデータ

Geologic Units/Layers	Depth (m)	Thickness (m)	Temperature (°C)	Pressure (kPa)
Yuuchi F.	45.35	97.71	8.55	549.27
Yuuchi F.	143.06	48.74	12.2	1600.14
Yuuchi F.	191.80	15.26	14.11	2099.64
Yuuchi F.	207.06	15.04	14.62	2259.53
Yuuchi F.	222.09	10.76	15.13	2414.1
Yuuchi F.	232.86	98.02	15.55	2529.13
Yuuchi F.	330.88	25.77	19.53	3522.07
Yuuchi F. /Koetoi F.	356.64	91.53	20.56	3790.36
Koetoi F.	448.17	75.33	24.51	4709.45

表 5.5-2 解析に使用した HDB-8 孔沿いのデータ

Geologic Units/Layers	Depth (m)	Thickness (m)	Temperature (°C)	Pressure (kPa)
Koetoi F.	65.48	31.74	31.74	680.89
Koetoi F.	97.22	10.75	10.75	996.56
Koetoi F.				
/ Wakkai F.	107.97	69.01	69.01	1103.02
Wakkai F.	176.98	29.75	29.75	1784.73
Wakkai F.	206.73	73.74	73.74	2077.55
Wakkai F.	280.43	10.72	10.72	2734.68
Wakkai F.	291.15	100.48	100.48	2938.81
Wakkai F.	391.64	49.5	49.5	3944.4
Wakkai F.	441.13	32.33	32.33	4433.35

表 5.5-3 HDB-7 孔と HDB-8 孔沿いの地下水溶存イオン濃度と密度

Well	Depth (m)	Total concentration (ppm)	Density factor
HDB-7	41.61	4,698	1.003
HDB-7	131.13	9,928	1.008
HDB-7	320.52	29,107	1.027
HDB-7	343.42	31,572	1.030
HDB-7	398.90	28,850	1.027
HDB-7	442.20	31,094	1.029
HDB-7	496.25	28,440	1.026
HDB-7	506.64	29,230	1.027
HDB-8	63.15	3,255	1.001
HDB-8	101.87	4,204	1.002
HDB-8	283.82	11,469	1.009
HDB-8	344.45	12,395	1.010
HDB-8	400.79	12,014	1.010
HDB-8	449.14	13,066	1.011
HDB-8	465.34	15,175	1.013

表 5.5-3 には HDB-7 孔と HDB-8 孔沿いの区間の地下水サンプルから分析された主要イオンの溶存濃度とそれに基づいて単純計算された密度を示す。図 5.5-1 は 2 孔の深度沿いに密度をプロットした図である。

uuu ——————

図 5.5-1 HDB-7 孔および 8 孔沿いの地下水密度分布

また

表 5.5-4 にシミュレーションに使用した各地層の透水係数(hydraulic conductivity)と空隙率を示す。浸透率(permeability)は水の密度を $1000.1(\text{kg}/\text{m}^3)$ 、粘性係数を $0.0011 (\text{Pa}\cdot\text{s})$ と仮定して算出した。

表 5.5-4 各地層の透水係数と空隙率

Geologic Unit	Hydraulic conductivity (m/sec)	Permeability (m^2)	Porosity
Yuuchi F.	5.70E-10	6.27E-17	0.55
Koetoi F.	3.59E-09	3.95E-16	0.55
Wakkanai F.	1.36E-08	1.50E-15	0.45

5.6 シミュレーションの手順

上記の 2 つの一次元モデル (HDB-7 孔および HDB-8 孔) のシミュレーションを以下の手順で行った。

1. それぞれのモデルの圧力と温度の上部及び下部境界条件を決定するために静水圧状態での圧力と温度の平衡状態をそれぞれ表 3.2-1 と表 5.5-2 の温度と圧力データに合致するようシミュレーションした。平衡状態のモデル計算結果は次の地下水流动のシミュレーションの初期条件となる。
2. 1. で得られた結果を初期条件として、それぞれのモデルの上部、あるいは下部境界から数ケースの異なる流量の水を流量固定条件として注入した。ここで上部と下部の温度は一定として上昇流、あるいは下降流の流量を決定した。

5.7 シミュレーション結果

図 5.7-1 に HDB-7 孔において下部境界からの各上昇流量 (1mm/yr , 10mm/yr , 50mm/yr) を仮定した深度沿いの温度分布シミュレーション結果と観測データの比較を示す。図から明らかなように、上昇流を仮定した場合は温度分布が上向きに凸となり、観測データと一致しない。図 5.7-2 には上部境界からの各涵養量(下降流) (3mm/yr , 10mm/yr , 50mm/yr) を仮定した HDB-7 孔沿いの温度分布シミュレーション結果と観測データの比較を示す。これらの図から 3mm/yr の下降流が観測データと最も良く合致することがわかる。図 5.7-3 には上部境界からの各涵養量(下降流) (0mm/yr , 3mm/yr , 10mm/yr) を仮定した HDB-7 孔沿いの圧力分布シミュレーション結果と観測データの比較を示す。温度分布では 3mm/yr の下降流が一番良くデータと合致したが、圧力分布においては、静水圧分布が一番データに近い。これは一次元流を仮定していることから、上部境界を固定流量の流入境界にした際、与えられた各地層の透水係数が高すぎることを示している。実際には三次元流であることから、三次元モデルでシミュレーションを行い、各地層の透水係数を調節することで観測値により合致した結果が得られると考えられる。

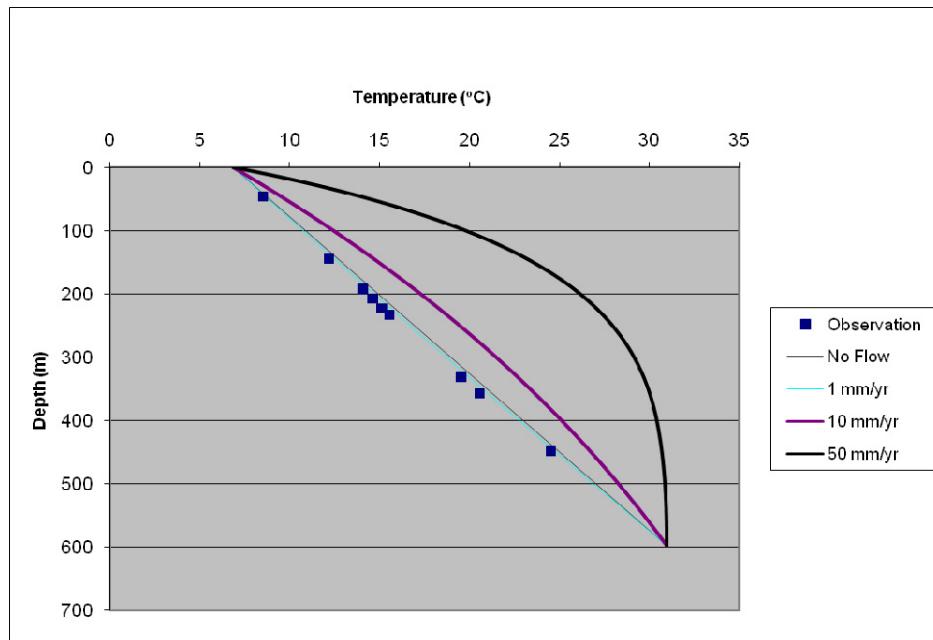


図 5.7-1 下部境界からの各上昇流量 (1mm/yr, 10mm/yr, 50mm/yr) を仮定した HDB-7 孔沿いの温度分布シミュレーション結果と観測データの比較

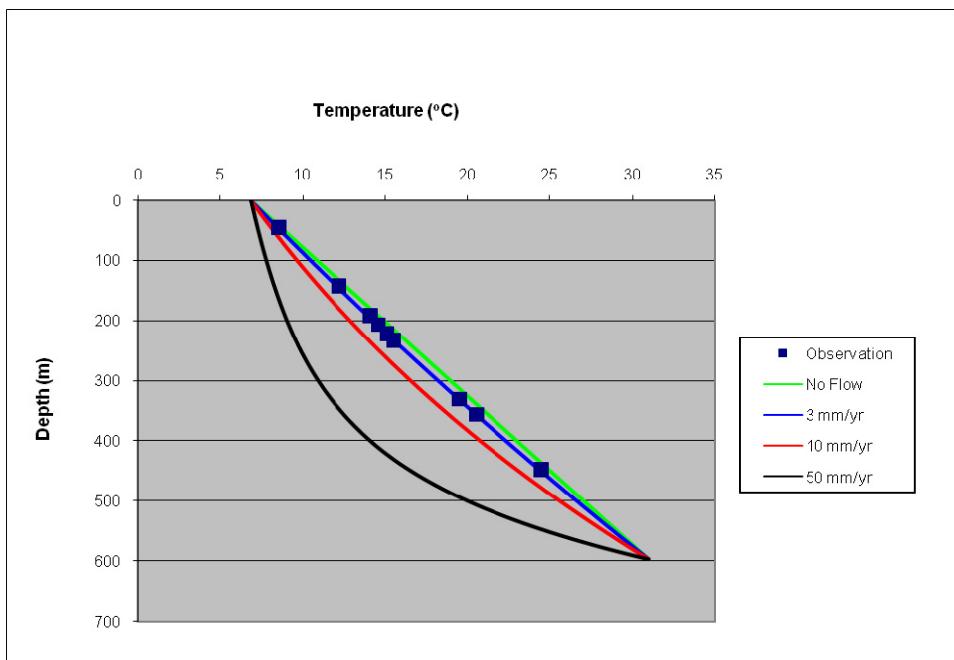


図 5.7-2 上部境界からの各涵養量(下降流) (3mm/yr, 10mm/yr, 50mm/yr) を仮定した HDB-7 孔沿いの温度分布シミュレーション結果と観測データの比較

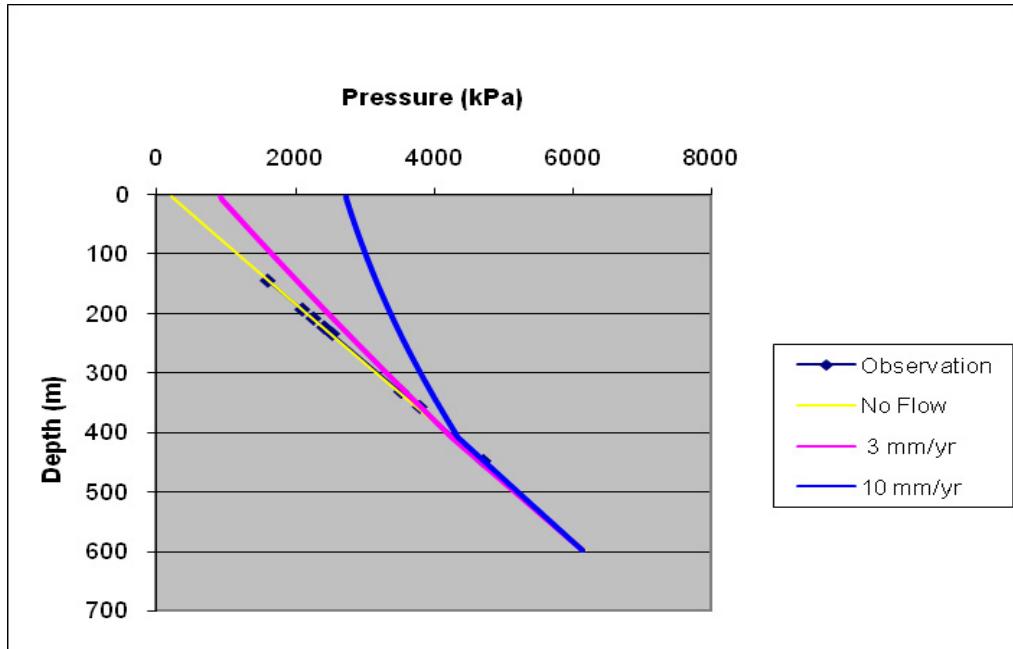


図 5.7-3 上部境界からの各涵養量(下降流) (0mm/yr, 3mm/yr, 10mm/yr) を仮定した HDB-7 孔沿いの圧力分布シミュレーション結果(実線)と観測データ(シンボル)の比較

図 5.7-4 には下部境界からの各上昇流量 (6mm/yr, 10mm/yr, 50mm/yr) を仮定した HDB-8 孔沿いの温度分布シミュレーション結果と観測データの比較を示す. 図 5.7-5 には上部境界からの各涵養量(下降流) (0mm/yr, 10mm/yr, 50mm/yr) を仮定した HDB-8 孔沿いの温度分布シミュレーション結果と観測データの比較, 図 5.7-6 では, 上部境界からの各涵養量(下降流) (0mm/yr, 6mm/yr, 10mm/yr, 50mm/yr) を仮定した HDB-8 孔沿いの圧力分布シミュレーション結果と観測データの比較を示す. これらの図から明らかにように 6mm/yr の上昇流を仮定したケースが観測された温度分布に最もよく合致する. 圧力分布に関してもよく合致していると言える.

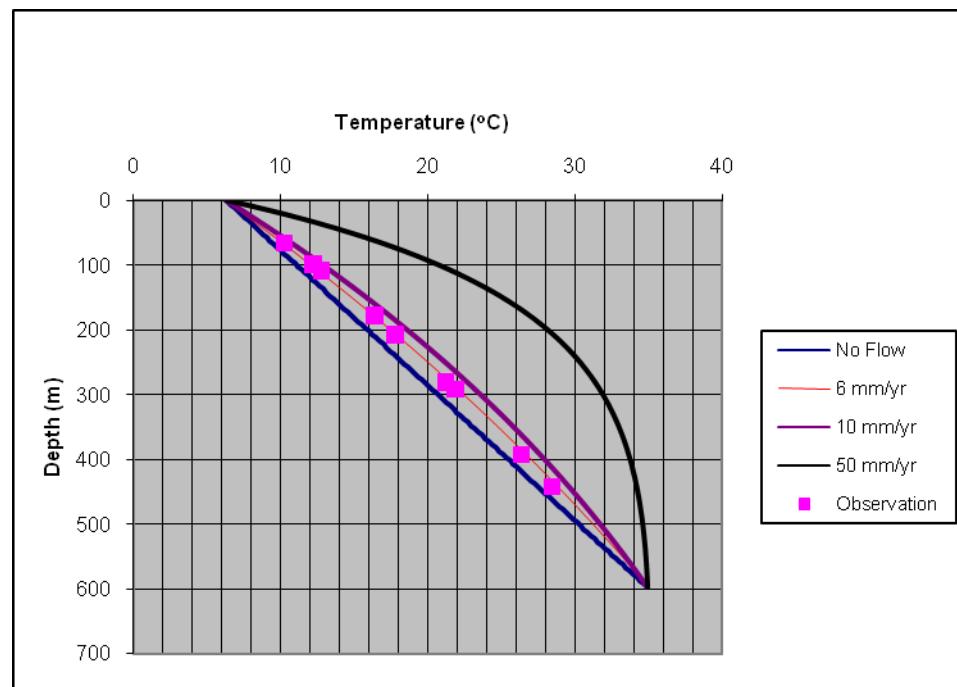


図 5.7-4 下部境界からの各上昇流量 (6mm/yr, 10mm/yr, 50mm/yr) を仮定した HDB-8 孔沿いの温度分布シミュレーション結果と観測データの比較

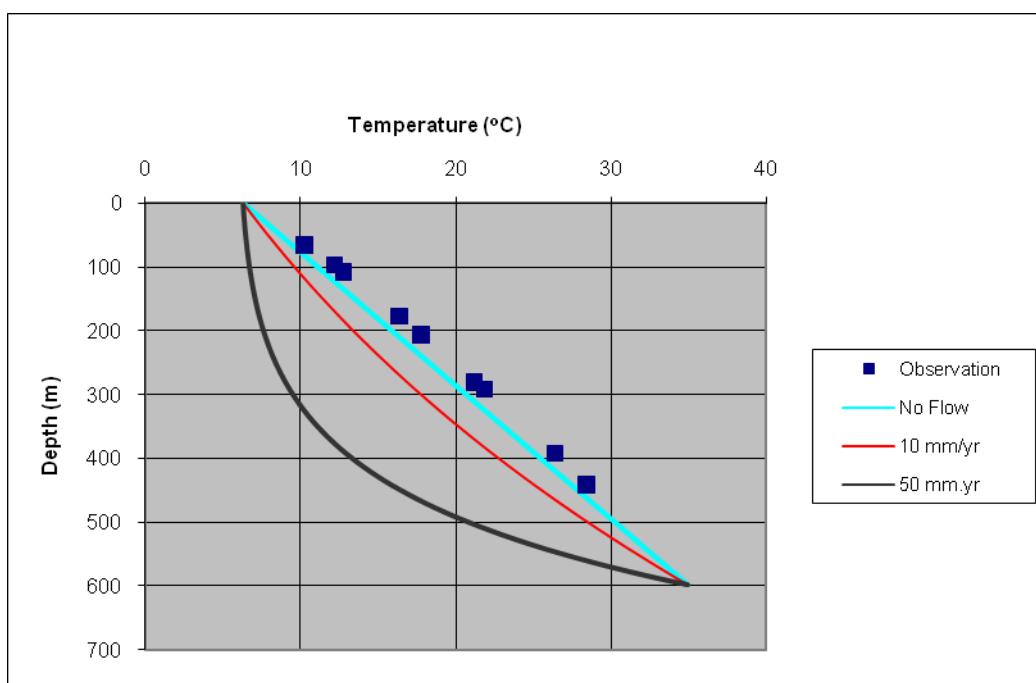


図 5.7-5 上部境界からの各涵養量(下降流) (0mm/yr, 10mm/yr, 50mm/yr) を仮定した HDB-8 孔沿いの温度分布シミュレーション結果と観測データの比較

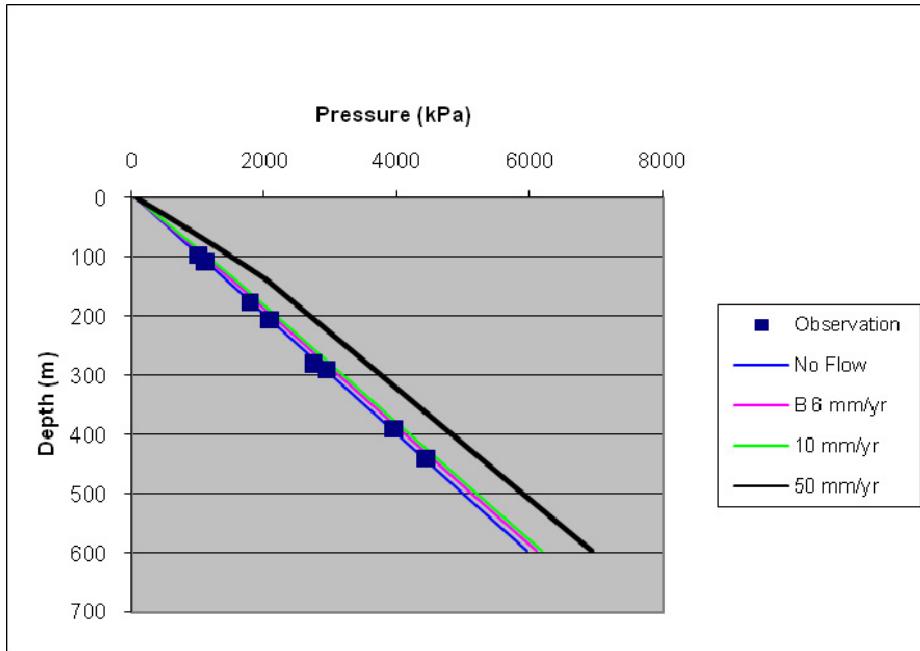


図 5.7-6 上部境界からの各涵養量(下降流) (0mm/yr, 6mm/yr, 10mm/yr, 50mm/yr) を仮定した HDB-8 孔沿いの圧力分布シミュレーション結果(実線)と観測データ(シンボル)の比較

5.8 5章のまとめ

幌延深地層研究センター付近に掘削された HDB-7 孔と HDB-8 孔は近接しているが、それぞれの孔の深度沿いの温度や地下水の密度分布には特徴的な違いが存在する。HDB-8 孔は HDB-7 孔に比較して内陸側、上流側に存在する。HDB-7 孔の深度 v.s. 温度分布は上向きに凹であり HDB-8 孔は反対に上向きに凸である。それぞれの孔で観測された層序とコアデータに基づいた地層ごとの透水係数、密度、圧力分布を使用して一次元地下水流動モデルを構築し流れの方向と流量をシミュレートした結果、HDB-7 沿いでは 3mm/yr の下降流、HDB-8 孔沿いでは 6mm/yr の上昇流を仮定すると最も観測データに近い温度分布が得られた。HDB-1, 3, 6, 9 孔も HDB-8 孔と同様な温度分布を示していることから、図 5.8-1 に示すように HDB-7 孔とそれ以外の HDB 孔の間に大曲断層に関連した透水係数の低い部分が存在すると類推できる。

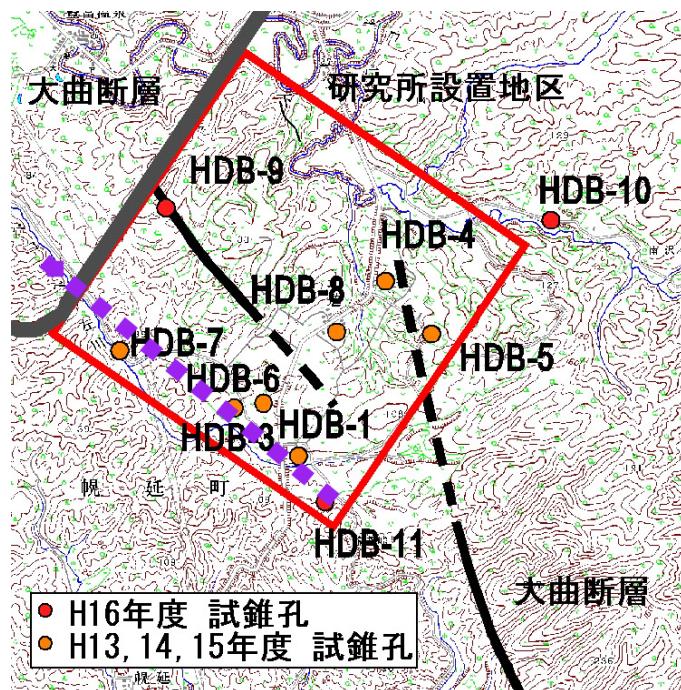


図 5.8-1 温度分布解析から類推される透水係数の低い鉛直面の位置(紫色の破線)
(核燃料サイクル開発機構, 2005b の図 16 を一部変更して引用)

6. まとめ

6.1 岩石試料を対象とした水理物質移行特性データの取得

亀裂の発達した堆積岩中の物質移行現象を把握することを目的に、幌延深地層研究センターにて建設中の地下研究施設のうち、パイロットボーリングの GL.-232.45m～233.70m 地点において採取した声問層試料を用いて、透水試験ならびに物質移行試験を実施した。その結果以下のことが明らかとなつた。

(1) 透水性

- ①マトリクス部の透水係数は、 1.77×10^{-10} (m/s) であった。
- ②これまでの同深度付近の声問層試料と同程度の透水係数であった。

(2) 物質移行特性

- ①マトリクス拡散係数

マトリクス部の実効拡散係数、 1.15×10^{-10} (m^2/s) であり、既往の声問層試料を対象とした試験結果と比べると、やや低い値となった。

- ②分散長

亀裂を有する試料のトレーサー試験結果を用いた FRAC3DVS によるフィッティングから、分散長として、0.004 (m) が得られた。この結果を既往の試験結果と比較すると、ほぼ同一のトレンド上にある。従って、従来から指摘されている分散長とスケールの関係が、ほぼ同様の回帰直線により表せる可能性が示された。

- ③物質移行開口幅

亀裂を有する試料のトレーサー試験結果から、物質移行開口幅として 0.033mm が得られた。この値は、透水係数から三乗則により逆算した水理開口幅とほぼ同等である。また、透水量係数と物質移行開口幅の関係を見ると、非常に緩やかではあるが、正の相関が見られ、 $2\sqrt{T}$ ～三乗則の間で直線的な関係にある。

6.2 亀裂を考慮した堆積岩の水理・物質移行挙動の検討

亀裂が発達した堆積岩中の物質移行現象を把握することを目的に、単一の平行平板亀裂を有するモデルを用いて、亀裂開口幅とマトリクス部の有効間隙率の異なるケースについて、物質移行解析を実施し、各パラメータの違いが、岩盤内の物質移行現象に与える影響について確認を行った。その結果、以下のような知見が得られた。

- ① 幌延サイトのように、亀裂内の移流、分散に加えてマトリクス部への拡散が顕著となるような岩盤では、開口幅の違いは、直接的には、亀裂内の移流、分散現象に影響を与えるが、それにともなう亀裂内での滞留時間の違いによって、マトリクス部への拡散現象による移行量にも影響を与える。
- ② 幌延地域の亀裂を有する堆積岩では、一定動水勾配下において、同じ水理開口幅でも、物質移行開口幅の設定の仕方によって、亀裂内の移流、分散だけでなく、マトリクス拡散による遅延効果が大きく異なるため、水理開口幅と物質移行開口幅は、それぞれ別々に評価する必要がある。
- ③ マトリクス部の有効間隙率は、マトリクス部の拡散特性に影響するパラメータであり、有効間隙率が大きくなるほど、マトリクス拡散による遅延効果が大きくなる。

6.3 温度分布データを用いた地下水流量モデルの推定

堆積岩が分布する広域的なスケールでの地下水流动場を評価する手法開発の一環として、ボーリング孔の深度沿いの温度分布データを使って地下水の流动方向、地中への涵養量もしくは上昇流の流量を推定する試みを行った。その結果、以下の知見が得られた。

- ① 延深地層研究センター付近に掘削されたHDB-7孔とHDB-8孔は近接しているが、それぞれの孔の深度沿いの温度や地下水の密度分布には特徴的な違いが存在する。
- ② HDB-7孔とHDB-8孔の位置関係は、HDB-8孔の方が、HDB-7孔よりも内陸側（上流側）に位置しており、各孔の深度と温度分布の関係は、逆の傾向を示す。
- ③ 上記②の関係に着目し、各孔で観測された層序とコアデータに基づいた地層ごとの透水係数、密度、圧力分布を使用して一次元地下水流动モデルを構築し流れの方向と流量をシミュレートした。その結果、HDB-7孔沿いでは3mm/yrの下降流、HDB-8孔沿いでは6mm/yrの上昇流を仮定すると最も観測データに近い温度分布が得られることが分かった。
- ④ 上記②より、HDB-7孔とHDB-8孔の間に大曲断層に関連した透水係数の低い部分が存在すると類推できる。

7. おわりに

本研究では、亀裂が発達した堆積岩中の物質移行現象を把握することを目的に、亀裂を有する堆積岩の水理・物質移行データについて室内試験（透水試験、トレーサー試験など）を実施して取得するとともに、それらのデータに基づいた亀裂を有する堆積岩中の物質移行の評価手法の検討として、亀裂開口幅やマトリクス部の間隙率が堆積岩の物質移行に与える影響について数値解析的な検討を行った。また、堆積岩が分布する広域的なスケールでの地下水流动場を評価する手法開発の一環として、ボーリング孔の深度沿いの温度分布データを使って地下水の流动方向、地中への涵養量もしくは上昇流の流量を推定する試みを行った。

室内試験では、データの極めて少ない泥岩における水理、物質移行パラメータを取得し、これまでに取得してきたデータを拡充した。また、数値解析的検討においては、幌延サイトのように、亀裂内の移流、分散に加えてマトリクス部への拡散が顕著となるような岩盤では、亀裂開口幅の違いは、直接的には、亀裂内の移流、分散現象に影響を与えるが、それにともなう亀裂内での滞留時間の違いによって、マトリクス部への拡散現象による移行量にも影響を与えることが分かった。またさらに、水理開口幅が同じでも、物質移行開口幅の設定の仕方によって、亀裂内の移流、分散だけでなく、マトリクス拡散による遅延効果が異なることから、水理開口幅と物質移行開口幅を区別して評価することの重要性を示した。

堆積岩が分布する広域的なスケールでの地下水流动場の評価検討については、延深地層研究センター付近に掘削されたHDB-7孔とHDB-8孔の温度や圧力、地下水の密度などの分布に着目し、一次元地下水流动モデルにより、地下水の流动方向や流动量の推定を行った。その結果、HDB-7孔沿いでは3mm/yrの下降流、HDB-8孔沿いでは6mm/yrの上昇流を仮定すると最も観測データに近い温度分布が得られることが分かった。また、このことから、HDB-7孔とHDB-8孔の間に大曲断層に関連した透水係数の低い部分の存在を類推した。

今後も、亀裂を有する堆積岩内の水理・物質移行現象の評価手法の構築の一環として、室内試験による水理・物質移行データの拡充を進める。そのような室内試験で得られるデータは、亀裂を有する堆積岩中の亀裂と高い間隙率を有する岩石マトリクス間を考慮した物質移行を評価するための基礎的なデータになる。また、地下の研究坑道などを活用して実施される原位置トレーサー試験で得られるデータと採取したサンプルを用いた室内試験について、それぞれの利点と欠点を整理した上で、数10cm～数mのブロックスケールを地下の研究坑道から採取して室内で実施するトレーサー試験方法について検討する。さらに、堆積岩が分布する広域的なスケールを対象とした地下水流动場の評価に際しては、構築した水理地質構造モデルと原位置で取得される水頭値などの限られたデータとの対比によるモデルの信頼性確認やモデルの更新などの検討と、そのために必要な原位置データについて整理していく予定である。

参考文献

- 1) 青木智幸, 井尻裕二, 下茂道人：“高精度トランジエントパルス透水試験機の開発”, 土木学会第49回年次講演会, pp.80-81, 1994.
- 2) Bense, V. F. and H. Kooi : “Temporal and spatial variations of shallow subsurface temperature as a record of lateral variations in groundwater flow”, Journal of Geophysical Research, Vol. 109, B04103, doi:10.1029/2003JB002782, 2004.
- 3) Brace, W.F., et al. : “Permeability of Granite under High Pressure”, J. of Geophysical Research, Vol.73, No.6, pp.2225-2236, 1968.
- 4) Doughty, C. and K. Karasaki : “熱解析による水理モデルの境界条件の検討”, 土木学会第32回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp377-382, 2002.
- 5) 林為人, 高橋学：“水銀圧入ポロシメーターおよび岩石の内部空隙寸法分布の測定への適用”, 地質ニュース 549号, pp.61-68, 2000.
- 6) Hsieh, P.A., et al. : “Transient Laboratory Method for Determining the Hydraulic Properties of ‘Tight’ Rocks – I Theory”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. , Vol. 18, pp.245-252, 1981.
- 7) 地盤工学会編：“岩の調査と試験”, 社団法人地盤工学会, 1989.
- 8) 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 一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, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 99-023, 2000.
- 9) 核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤 一平成17年取りまとめ”, 一分冊1 深地層の科学的研究, JNC TN1400 2005-014, 2005a.
- 10) 核燃料サイクル開発機構：“幌延深地層研究計画 平成16年度調査研究成果報告”, JNC TN5400 2005-001, 2005b.
- 11) 喜多治之, 岩井孝幸, 中嶋悟：“花崗岩および凝灰岩間隙水中のイオンの拡散係数の測定”, 応用地質,

第30卷,第2号,pp.26-32, 1989.

- 12) 熊本創, 下茂道人：“亀裂を有する岩石を対象とした室内トレーサー試験手法の開発－マトリクス拡散現象を考慮したトレーサー試験手法－”, 大成建設技術センター報 第37号, 2004.
- 13) 操上広志, 竹内竜史, 濑尾昭治：“幌延深地層研究計画における地下水流動解析”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN5400 2005-003, 2005.
- 14) Gelhar, L. W., Welty, C., Rehfeldt, K. R. : “A Critical Review of Data on Field-Scale Dispersion in Aquifers”, Water Resources Reserch, Vol.28, No.7, pp.1955-1974, 1992.
- 15) Pruess K., Oldenburg, C., and Moridis, G. : “TOUGH2 User’s Guide, Version 2.0”, Report LBNL-43134, Berkeley, California: Lawrence Berkeley National Laboratory, 1999.
- 16) 下茂道人, 熊本創：“亀裂を有する軟岩中の流れと移行現象に関する研究(II)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ8400 2004-011, 2004.
- 17) 下茂道人, 熊本創, 前川恵輔：“亀裂を有する軟岩の水理・物質移行特性データの取得・解析”, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2007-016, 2007.
- 18) 下茂道人, 熊本創, 唐崎健二, 澤田淳, 前川恵輔, 佐藤久：“亀裂を有する堆積岩の水理・物質移行評価のためのデータ取得・解析”, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2008-029, 2008.
- 19) Shimo M., Yamamoto H., Uchida M., Sawada A., Doe T. W., Takahara, Y. : “In-situ test on fluid flow and mass transport properties of fractured rocks”, Proc.9th ISRM Congress, Vol. 2, pp.1401-1404, 1999.
- 20) 下茂道人, 山本肇, 熊本創：“亀裂を有する軟岩中の流れと移行現象に関する研究”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ8400 2003-028, 2003.
- 21) 新藤静夫, 井伊博行：“表層における地下水流動, 放射性廃棄物と地質科学(島崎英彦, 新藤静夫, 吉田鎮男編), 東京大学出版会, 1995.
- 22) Therrien, R. and E.A.Sudicky : “Three-dimensional analysis of variably-saturated flow and solute transport in discretely-fractured porous media”, J. Contaminant Hydrology, vol.23, pp.1-44, 1996.
- 23) Therrien, R., E. A. Sudicky, and R. G. McLaren : “User’s Guide for NP 3.49, A preprocessor for FRAC3DVS 3.49 : An Efficient Simulator for Three-dimensional, Saturated - Unsaturated Groundwater Flow and Chain -

Decay Solute Transport in Porous or Discretely - Fractured Porous Formations” , University of Waterloo, Ontario, Canada, 1999.

- 24) 恒松絹江, 立山博, 木村邦夫, 石橋修：“尿素のインターラーションに及ぼすカオリン鉱物の構造・形態の影響”, 資源と素材, vol. 113, pp.211-215, 1997.
- 25) 蔡内聰, 操上広志, 瀬尾昭治, 原稔, 国丸貴紀, 竹内竜史：“幌延深地層研究計画におけるボーリング孔を用いた地下水の水圧の長期モニタリング”, JAEA-Research 2006-056, 2006.
- 26) 山本卓也, 下茂道人, 藤原靖, 服部弘通, 田所照夫, 岩間彦衛, 名合牧人, 熊本創：“幌延深地層研究センターにおける試錐調査 (HDB-1 孔) ”, 核燃料サイクル開発機構 (委託研究成果報告書, 大成建設株式会社) , JNC TJ1400 2002-010, 2002.
- 27) 山本卓也, 下茂道人, 藤原靖, 服部弘通, 名合牧人, 田所照夫, 中垣真一：“幌延深地層研究計画における試錐調査 (HDB-6, 7, 8 孔) のうち HDB-6 孔”, 核燃料サイクル開発機構 (委託研究成果報告書, 大成建設株式会社) , JNC TJ5400 2005-004, 2004.
- 28) Wu, Y. S. : “A unified numerical framework model for simulating flow, transport, and heat transfer in porous and fractured media”, *Developments In Water Science*, Edited By Cass T. Miller, Matthew W. Farthing, William G. Gray, And George F. Pinder, Elsevier, 2004.
- 29) Wu, Yu-Shu, Guoping Lu, Keni Zhang, L. Pan, and G. S. Bodvarsson : “Analyzing Unsaturated Flow Patterns in Fractured Rock Using an Integrated Modeling Approach”, *Hydrogeology Journal*, Vol. 15, pp.553-572, 2007.
- 30) Wu, Y. S., J. Rutqvist, K. Karasaki, Q. Lei, W. Xiong, J. Yuan, J., and M. Liu : “A mathematical model for rock deformation’s effects on flow in porous and fractured reservoirs”, prepared for presentation at San Francisco 2008, the 42nd US Rock Mechanics Symposium and 2nd U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium, held in San Francisco, June 29-July 2, 2008.

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位		
基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例		
組立量	SI基本単位	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立方メートル	m^3
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度、質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比體積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
質量濃度 ^(a)	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度(amount concentration)は臨床医学の分野では物質濃度(substance concentration)ともよばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	$1^{(b)}$
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	$1^{(b)}$
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz	m^{2}/m^2
力	ニュートン	N	s^{-1}
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N\cdot m$
仕事を、工率、放射束	ワット	W	J/s
電荷、電気量	クーロン	C	$m^2 kg s^{-3}$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$
静電容量	ファラード	F	$m^2 kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	$m^2 kg^{-1} s^3 A^2$
磁束密度	ウェーバ	Wb	$m^2 kg s^{-2} A^{-1}$
磁束度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリー	H	$kg s^{-2} A^{-1}$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C	K
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(e)
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq	lm/m^2
吸収線量、比エネルギー分与、カーマ	グレイ	Gy	$m^2 s^{-2}$
線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg
酸素活性	カタール	kat	$m^2 s^{-2}$

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもやはコヒーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。

(c) 調光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば誤った用語で“radioactivity”と記される。

(g) 単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはCIPM勧告2(CI-2002)を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1} kg s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2 kg s^2$
表面張力	ニュートン每メートル	N/m	$kg s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m^{-1} s^{-1} = s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	$m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット每平方米メートル	W/m ²	W/m^2
熱容量、エンントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{-2} K^{-1}$
比熱容量、比エンントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^3 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^{-2}$
熱伝導率	ワット每メートル每ケルビン	W/(m K)	$m kg s^{-3} K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m ³	$m^{-1} kg s^2$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m kg s^{-3} A^{-1}$
電荷密度	クーロン每立方メートル	C/m ³	$m^3 sA$
表面電荷密度	クーロン每平方メートル	C/m ²	$m^2 sA$
電束密度、電気変位	クーロン每平方メートル	C/m ²	$m^2 sA$
誘電率	ファラード每メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m kg s^{-2} A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール每モル	J/mol	$m^3 kg s^{-2} mol^{-1}$
モルエンントロピー、モル熱容量	ジュール每モル每ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン每キログラム	C/kg	$kg^{-1} sA$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^3 s^{-3}$
放射強度	ワット每ステラジアン	W/sr	$m^4 m^2 kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m ² sr)	$m^2 m^2 kg s^{-3} = kg s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール每立方メートル	kat/m ³	$m^{-3} s^{-1} mol$

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^9	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^6	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^3	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	$1^\circ=(\pi/180) \text{ rad}$
分	'	$1'=(1/60)^\circ=(\pi/10800) \text{ rad}$
秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000) \text{ rad}$
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^2=10^4 m^2$
リットル	L	$1L=1dm^3=10^3 cm^3=10^{-3} m^3$
トン	t	$1t=10^3 kg$

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.602 176 53(14) \times 10^{-19} J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660 538 86(28) \times 10^{-27} kg$
統一原子質量単位	u	$1u=1 Da$
天文単位	ua	$1ua=1.495 978 706 91(6) \times 10^{11} m$

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	$1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10^5 Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	$1 mmHg=133.322 Pa$
オングストローム	Å	$1 \text{ \AA}=0.1 nm=100 pm=10^{-10} m$
海里	M	$1 M=1852 m$
バーン	b	$1 b=100 fm^2=(10^{-12} cm)^2=10^{-28} m^2$
ノット	kn	$1 kn=(1852/3600) m/s$
ネーベル	Np	$SI \text{ 単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。}$
ベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	$1 erg=10^{-7} J$
ダイニン	dyn	$1 dyn=10^{-5} N$
ボアズ	P	$1 P=1 dyn s cm^{-2}=0.1 Pa s$
ストークス	St	$1 St=1 cm^2 s^{-1}=10^{-4} m^2 s^{-1}$
スチルブル	sb	$1 sb=1 cd cm^{-2}=10^4 cd m^{-2}$
フォント	ph	$1 ph=1 cd sr cm^{-2} 10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal=1 cm s^{-2}=10^{-2} ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1 Mx=1 G cm^2=10^8 Wh$
ガウス	G	$1 G=1 Mx cm^{-2}=10^4 T$
エルステッド	Oe	$1 Oe \triangleq (10^3/4\pi)nA m^{-1}$

(e) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリ	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^4 C/kg$
ラド	rad	$1 rad=1 cGy=10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem=1 cSv=10^{-2} Sv$
ガンマ	γ	$1 \gamma=1 nT=10^{-9} T$
フェルミ	fm	$1 \text{ フェルミ}=1 fm=10^{-15} m$
メートル系カラット		$1 \text{ メートル系カラット}=200 mg=2 \times 10^{-4} kg$
トル	Torr	$1 Torr=(101 325/760) Pa$
標準大気圧	atm	$1 atm=101 325 Pa$
カロリ	cal	$1 cal=4.1868 J ([15^\circ C] \text{ カロリー}), 4.1868 J ([IT] \text{ カロリー})$
ミクロ	μ	$1 \mu=1 \mu m=10^{-6} m$

