JAEA-Research 2009-060



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(III)

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

下茂 道人 熊本 創 伊藤 章 唐崎 健二 澤田 淳 小田 好博 佐藤 久

Michito SHIMO, Sou KUMAMOTO, Akira ITO, Kenzi KARASAKI Atsushi SAWADA, Yoshihiro ODA and Hisashi SATO

> 地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット

Geological Isolation Research Unit Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2010

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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

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

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

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(Ⅲ)

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット 下茂 道人*1,熊本 創*1,伊藤 章*2, 唐崎 健二*3,澤田 淳,小田 好博,佐藤 久*

(2009年12月15日受理)

高レベル放射性廃棄物の地層処分システムの評価にあたっては、天然バリアを構成する岩盤中にお ける水理・物質移行特性を適切に評価することが重要である.

従来の研究では、堆積岩における物質移行現象に関しては、粒子間間隙を主な移行経路として考えてきた.しかし、亀裂が発達した堆積岩においては、亀裂が粒子間間隙よりも卓越した水みちを形成する可能性がある.

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, (1) 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, (2) 今後, より大きなスケールを対象と した試験を実施する際の試料採取方法およびトレーサー試験方法の検討を行った.また, (3) 堆積岩が 分布する広域的なスケールでの地下水流動場を評価する手法開発の一環として, 水理地質構造モデル の構築に有効なパラメータをリストアップするとともに, モデルの不確実性を把握, 低減するための方法論 を体系的に整理して取りまとめた.

室内試験では、原子力機構が北海道幌延町において実施している幌延深地層研究計画に伴うパイロットボーリングで得られた稚内層の岩石コア試料を整形し、人工の平行平板亀裂を有する試料を作成して、これを対象とした透水試験ならびに非収着性トレーサー試験を実施した.試験により得られた実効拡散係数は、既往の稚内層を対象とした試験結果の平均的な値であり、分散長も移行距離の1/10倍という従来から指摘されている関係と同様の傾向が示された.

試料採取方法,トレーサー試験方法の検討では、ブロック状試料の採取に適用可能な既往の技術として、ワイヤーソー切断技術に着目し、これを応用した採取方法の提案や、採取に当たって留意すべき点について取りまとめた.また、試料採取前に実施する原位置試験方法や試料採取後の室内トレーサー試験方法について、既往の試験方法を適用した場合に解決すべき課題について取りまとめた.

堆積岩が分布する広域的なスケールでの地下水流動場の評価検討については、ボーリング孔沿いの 温度分布や塩分濃度分布データなど、水圧データ以外のデータを用いて、水理地質構造モデルや境界 条件などを推定する方法について、これまでの既存の研究で実施された検討内容を整理するとともに、こ れらのデータの有効性について取りまとめた.

*: 技術開発協力員

本報告書は大成建設(株)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

^{*1:} 大成建設(株)技術センター 土木技術研究所

^{*2:} 大成建設(株)原子力本部 デコミッショニング部

^{*3:} Lawrence Berkeley National Laboratory

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

Michito SHIMO^{*1}, Sou KUMAMOTO^{*1}, Akira ITO^{*2}, Kenzi KARASAKI^{*3}, Atsushi SAWADA, Yoshihiro ODA and Hisashi SATO ^{**}

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

(Received December 15, 2009)

It is important for safety assessment of HLW geological disposal to evaluate groundwater flow and mass transport in deep underground appropriately.

Though it is considered that the mass transport in sedimentary rock occurs in pores between grains mainly, fractures of sedimentary rock can be main paths.

The objective of this study is to obtain the data of flow and mass transport properties in fractured sedimentary rocks by laboratory tests, and to estimate these properties in larger scale rocks, such as in situ test scale with considering both data obtained by this study and one from in situ experiments such as packer tests.

In this study the following three tasks were carried out: (1) laboratory hydraulic and tracer experiments using the rock cores of Wakkanai formation obtained at pilot borehole, (2) a study on the tracer test and sampling technique for the larger scale (block scale: about $0.5m\sim1.0m$) than core scale, (3) a study on the reduction technique of uncertainty of the hydrogeological models using data from surface-based investigation.

Non-sorbing tracer experiments using artificial fractured rock specimens were carried out. Potassium iodide was used as a tracer. The obtained breakthrough curve was interpreted and fitted by using a numerical simulator called FRAC3DVS¹), and mass transport parameters, such as longitudinal dispersivity, matrix diffusion coefficient, transport aperture, were obtained. In the study on the block scale tracer test technique, the sampling technique using wire saw and tracer test technique using block samples were suggested. In the study on the reduction technique of uncertainty of the hydrogeological model, availability of the information other than pressure data, such as the temperature and salinity and all, were presented.

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

^{*:} Collaborating Engineer

^{*1:} Technology Center, Taisei Corporation

^{*2:} Nuclear Facilities Division, Taisei Corporation

^{*3:} Lawrence Berkeley National Laboratory

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 |
| 3.1. 試料の採取,整形 |
| 3.2. 試料の分析 |
| 3.2.1. 分析項目 |
| 3.2.2. 基本物性試験 |
| 3.2.3. 一軸圧縮試験 |
| 3.2.4. X 線分析11 |
| 3.2.5. 空隙径分布測定15 |
| 3.3. 透水試験17 |
| 3.3.1. インタクト試料を対象とした透水試験(トランジェントパルス透水試験)17 |
| 3.3.2. 亀裂試料を対象とした透水試験(定水頭透水試験) |
| 3.4. 物質移行試験 |
| 3.4.1. 拡散試験 |
| 3.4.2. トレーサー試験 |
| 4. ブロックスケールトレーサー試験方法の検討42 |
| 4.1. ブロック状の岩石試料の採取方法42 |
| 4.1.1. 採取条件 |
| 4.1.2. サンプリング技術の抽出43 |
| 4.1.3. 幌延サイトへの適用性と技術的課題45 |
| 4.1.4. 課題を考慮した採取方法の提案45 |
| 4.2. ブロック状の岩石試料を用いた透水トレーサー試験方法48 |
| 4.2.1. 原位置透水トレーサー試験方法48 |
| 4.2.2. 室内透水トレーサー試験方法50 |
| 4.3. 今後の予定 |
| 5. 地上からの調査データに基づく水理地質構造モデルの不確実性低減方法の検討55 |
| 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 |
| 6.2. ブロックスケールトレーサー試験方法の検討56 |
| 6.3. 地上からの調査データに基づく水理地質構造モデルの不確実性低減方法の検討57 |
| 7. おわりに |
| 参考文献 |
| 付録 "UNCERTAINTY REDUCTION OF HYDROLOGIC MODELS USING DATA FROM |
| SURFACE-BASED INVESTIGATION" |

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 | 5 |
| 3.2.1 Analysis items | 5 |
| 3.2.2 Physical property experiments | 5 |
| 3.2.3 Uniaxial compression tests | 7 |
| 3.2.4 X-ray diffraction analysis | 11 |
| 3.2.5 Void distribution analysis | _15 |
| 3.3 Hydraulic test | _17 |
| 3.3.1 Hydraulic test for intact rock specimens (Transient pulse test) | _17 |
| 3.3.2 Hydraulic test for fractured rock specimens (constant head test) | _27 |
| 3.4 Transport test | _29 |
| 3.4.1 Diffusion experiments | _29 |
| 3.4.2 Tracer migration tests | _34 |
| 4. Development for tracer tests methodologies for block scale rock sample | 42 |
| 4.1 Sampling methods | 42 |
| 4.1.1 Requirements for sampling | _42 |
| 4.1.2 Extraction of sampling techniques | _43 |
| 4.1.3 Technical applicability and problems to Horonobe site | _45 |
| 4.1.4 Proposal of sampling technique concerning problems | _45 |
| 4.2 Hydroulic and tracer tests methodlogies | _48 |
| 4.2.1 Test techniques for in situ experiments | _48 |
| 4.2.2 Test techniques for laboratory experiments | _50 |
| 4.3 Issues to be examined | 54 |
| 5. Study of reducing the uncertainty of geohydrogic model using surface investigation data | 55 |
| 6. Summary | 56 |
| 6.1 Measurements of flow and mass transport data in rock specimens | 56 |
| 6.2 Flow and mass transport property evaluation with considering an effect of fracture. | _56 |
| 6.3 Groundwater flow model estimation by using temperature data | _57 |
| 7. Conclusion | 58 |
| References | _59 |
| Appendix: "UNCERTAINTY REDUCTION OF HYDROLOGIC MODELS | |
| USING DATA FROM SURFACE-BASED INVESTIGATION" | .61 |

図目次

| 义 | 3.2 - 1 | 採取深度と物性値の関係(密度,有効間隙率)7 |
|---|---------|---------------------------------------|
| 义 | 3.2-2 | X 線分析結果14 |
| 义 | 3.2-3 | 水銀圧入法による細孔径分布測定結果16 |
| 义 | 3.2-4 | 細孔径分布測定結果16 |
| 义 | 3.3-1 | トランジェントパルス透水試験装置概要18 |
| 义 | 3.3-2 | トランジェントパルス法測定原理19 |
| 义 | 3.3-3 | トランジェントパルス透水試験手順19 |
| 义 | 3.3-4 | 岩盤内応力と深度の関係 |
| 义 | 3.3-5 | Hsieh 法による解析手順の概念図 |
| 义 | 3.3-6 | トランジェントパルス透水試験結果25 |
| 义 | 3.3-7 | 深度と透水係数の関係 |
| 义 | 3.3-8 | 定水頭透水試験装置概要 |
| 义 | 3.3-9 | 供試体作成の模式図 |
| 义 | 3.4-1 | 拡散実験装置概要 |
| 义 | 3.4-2 | 拡散実験装置および供試体の概観 |
| 义 | 3.4-3 | 拡散試験結果 |
| 义 | 3.4-4 | 実効拡散係数と有効間隙率の関係 |
| 义 | 3.4-5 | セル型トレーサー試験装置概要35 |
| 义 | 3.4-6 | トレーサー試験結果 |
| 义 | 3.4-7 | トレーサー試験の解析条件(試料 3)38 |
| 义 | 3.4-8 | 物質移行開口幅の感度 |
| 义 | 3.4-9 | 亀裂内縦方向分散長の感度40 |
| 义 | 3.4-10 | 0 透水量係数と物質移行開口幅の関係41 |
| 义 | 4.1-1 | ワイヤーソー切断技術(ラインドリリング併用)の概要43 |
| 义 | 4.1-2 | ワイヤーソー切断技術(ボーリング4孔併用)の概要44 |
| 义 | 4.1-3 | 可変プーリー |
| 义 | 4.1-4 | ブロック試料採取方法案の概要(底盤から採取する場合)46 |
| 义 | 4.1-5 | ブロック試料採取方法案の概要(壁面から採取する場合)47 |
| 义 | 4.2-1 | 原位置孔間透水、トレーサー試験方法の概要(底盤から実施する場合)49 |
| 义 | 4.2-2 | 原位置孔間透水、トレーサー試験方法の概要(壁面から実施する場合)49 |
| 义 | 4.2-3 | 孔間試験用ボーリングとサンプリング試料の位置関係50 |
| 义 | 4.2-4 | ブロック試料を対象としたトレーサー試験方法の概要(配管を用いた試験方法) |
| | | |
| 义 | 4.2-5 | ブロック試料を対象としたトレーサー試験方法の概要(配管を用いない試験方法) |
| | | |
| 义 | 4.2-6 | 配管内分散の影響を考慮した試験方法(フラッシング機構の追加)54 |
| | | |

表目次

| 表 | $3.1 \cdot 1$ | 試料の形状, 寸法一覧 | 3 |
|---|---------------|------------------------------|----|
| 表 | 3.2 - 1 | 基本物性試験結果一覧 | 6 |
| 表 | 3.2-2 | 一軸圧縮試験結果一覧 | 8 |
| 表 | 3.2-3 | X線分析結果一覧 | 13 |
| 表 | 3.2-4 | 水銀圧入試験結果一覧 | 16 |
| 表 | 3.3-1 | 試験条件 | 20 |
| 表 | 3.3-2 | トランジェ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 | トランジェントパルス透水試験結果一覧 | 24 |
| 表 | 3.3-4 | 定水頭透水試験結果一覧(亀裂試料:試料3) | 29 |
| 表 | 3.4-1 | 試験条件一覧 | 31 |
| 表 | 3.4-2 | 拡散試験結果 | 32 |
| 表 | 3.4-3 | トレーサー試験条件 | 35 |
| 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 |

写真目次

| 写真 | $3.1 \cdot 1$ | 試料整形結果 | (トランジェントパル | ~ス試験用) | 4 |
|----|---------------|--------|------------|--------|-------|
| 写真 | 3.1-2 | 試料整形結果 | (トレーサー試験用) | ••••• | 4 |
| 写真 | 3.3-1 | トランジェン | トパルス透水試験装置 | 置概観 | |

List of figures

| Figure 3.2 1 | Relation between sampling depth and physical properties | |
|---------------|--|---------|
| | (density and effective porosity) | 7 |
| Figure 3.2 2 | Result of X-ray analysis | 14 |
| Figure 3.2 3 | Measured pore-size distribution | 16 |
| Figure 3.2 4 | Measured pore-size distribution (comparison with past studies) | 16 |
| Figure 3.3 1 | Transient pulse permeability test equipment | |
| Figure 3.3 2 | Measurement principle of transient pulse permeability test | 19 |
| Figure 3.3 3 | Test procedure of transient pulse permeability test | |
| Figure 3.3 4 | Relation between stress in the bedrock and sampling depth | |
| | (HDB-1 and HDB-6) | |
| Figure 3.3 5 | Evaluation procedure using Hsieh's analytical solution | 22 |
| Figure 3.3 6 | Results of transient pulse permeability test | 25 |
| Figure 3.3 7 | Relation between permeability and sampling depth | |
| | (comparison with past studies) | |
| Figure 3.3 8 | Constant head permeability test equipment | 28 |
| Figure 3.3 9 | Fabrication sequences of hydraulic and tracer tests specimen | |
| | for fractured rock | |
| Figure 3.4 1 | Through diffusion test equipment | 30 |
| Figure 3.4 2 | Through diffusion test equipment and test specimen | |
| Figure 3.4 3 | Result of through diffusion test | 33 |
| Figure 3.4 4 | Relation between effective diffusion coefficient and effective porosity | 33 |
| Figure 3.4 5 | Tracer test equipment | 35 |
| Figure 3.4 6 | Result of tracer test | 37 |
| Figure 3.4 7 | Model and conditions for fitting analysis (sample 3) | 38 |
| Figure 3.4 8 | Sensitivity of transport aperture | |
| Figure 3.4 9 | Sensitivity of longitudinal dispersion length | 40 |
| Figure 3.4 10 | Relation of transmissivity and transport aperture | 41 |
| Figure 4.1 1 | Wire saw cutting technique (combined line drilling) | 43 |
| Figure 4.1 2 | Wire-saw cutting technique (combined four drill holes) | 44 |
| Figure 4.1 3 | Variable angle pulley | 44 |
| Figure 4.1 4 | Block sampling method (at floor face) | 46 |
| Figure 4.1 5 | Block sampling method (at wall face) | 47 |
| Figure 4.2 1 | In situ hydraulic and tracer test method (at floor face) | |
| Figure 4.2 2 | In situ hydraulic and tracer test method (at wall face) | 49 |
| Figure 4.2 3 | Layout of bore holes for cross-hole tests and sampling area | 50 |
| Figure 4.2 4 | Tracer test method for block sample (using transport pipe) | 53 |
| Figure 4.2 5 | Tracer test method for block sample (using reservoir tank) | 53 |
| Figure 4.2 6 | Tracer test method considering dispersion in pipes (add a flushing proce | ess)_54 |

List of tables

| Table 3.1 1 | Shape and size of samples | 3 |
|-------------|---|----|
| Table 3.2 1 | Measured physical properties (comparison with past studies) | 6 |
| Table 3.2 2 | Results of unconfined compression test (comparison with past studies) | 8 |
| Table 3.2 3 | Results of X-ray analysis | 13 |
| Table 3.2 4 | Results of Mercury intrusion test | 16 |
| Table 3.3 1 | Test conditions | 20 |
| Table 3.3 2 | Given parameters for transient pulse permeability test | 23 |
| Table 3.3 3 | Results of transient pulse permeability test | 24 |
| Table 3.3 4 | Results of constant head permeability test (fractured rock sample 3) | |
| Table 3.4 1 | Test conditions | 31 |
| Table 3.4 2 | Results of through diffusion test (comparison with past studies) | |
| Table 3.4 3 | Tracer test conditions | 35 |
| Table 3.4 4 | Input data for tracer test analysis | 38 |

List of photos

| Photo 3.1 1 | Formed samples (for transient pulse permeability test) | 4 |
|-------------|--|----|
| Photo 3.1 2 | Formed samples (for tracer test) | 4 |
| Photo 3.3 1 | Transient pulse permeability test equipment | 18 |

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分サイトの性能評価にあたっては、天然バリアを構成する岩盤中に おける水理・物質移行特性を適切に把握したモデルを用いて評価することが、核種の物質移行等、安全 性評価をする上で重要である.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.

これまで、堆積岩のうち新第三紀堆積岩などの軟岩では粒子間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、このような軟岩で間隙率が大きな岩石においても、岩石基質部の透水性が低い場合 には、亀裂が粒子間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、幌延地域に分布する新 第三紀の堆積岩は岩石基質(マトリクス)部の間隙率が大きくかつ岩石基質部の透水性が低いため、亀 裂が発達している場合には、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.このような亀裂を有する堆積岩では、亀裂の密度と連続性とそれらの透水特性の大 小によって、亀裂とマトリクスの両方の寄与を地下水流動および物質移行のモデル化において考慮する 必要があると考えられる.

そこで本研究では、物質移行現象の把握を目的に、幌延地域の亀裂を有する堆積岩を対象として、 亀裂と媒体中のそれぞれについてコア試料を用いた室内試験により水理特性と物質移行特性にかかわ るデータを取得した.また、今後、より大きなスケール(数十 cm~1m 程度)での室内試験を実施するた めの、試料採取方法やトレーサー試験方法の検討を行った.

また, 堆積岩が分布する広域的なスケールでの地下水流動場を評価する手法開発の一環として, 水 理地質構造モデルの構築に有効なパラメータをリストアップするとともに, モデルの不確実性を把握, 低 減するための方法論を, 幌延地域を対象とした検討事例とともに整理した.

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動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を取得するとともに、ブロックスケ ールを対象としたトレーサー試験方法について概念的な検討を行った。②については、幌延地域を対象 とした数値解析的な検討事例に基づきモデルの不確実性を把握、低減するための方法論を整理した。

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項目について実施した.

- (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) ブロックスケールトレーサー試験方法の検討
- (3) 地上からの調査データに基づく水理地質構造モデルの不確実性低減方法の検討
- 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で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(稚内層試料)から, 亀裂試料, インタクト試料を採取した.

試験は、透水試験および非収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ェ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 収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) ブロックスケールトレーサー試験方法の検討

ブロックスケールの試料採取,ならびにトレーサー試験方法について,文献調査などにより既存技術を 調査・整理するとともに,幌延深地層研究センター周辺のように亀裂を含む堆積岩(軟岩)の特徴を考慮 してそれらの適用性について検討した.

(3) 地上からの調査データに基づく水理地質構造モデルの不確実性低減方法の検討

幌延地域を対象として、これまでに取得された調査データから、水理地質構造モデルの構築に有効な データをリストアップするとともに、それを用いてモデルの不確実性を把握、低減するための方法論を体 系的に整理して取りまとめた.

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換気立坑パイロットボーリング において,平成 19 年度に掘削した深度から,岩石コアを採取した.地質ならびに採取地点等を以下に 記す.

·地質: 稚内層

・採取位置: 換気立坑パイロットボーリング(G.L.-340.00~-342.00 m)

·採取日: 平成 20 年 10 月 31 日

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ったため, 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.基本物性試験のうち,一軸圧縮試験及び弾性波速度試験では,直径 30mm×高さ50mmの円柱状に整形したものを用い,その他の物性試験や試料分析については,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 3.1-1,写真 3.1-2 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.

| 試験項目 | 試験方法 | 試料形状 | 試料寸法(mm) |
|---------------|-----------------------------|------|----------------|
| (1) 基本物性試験, 壽 | 式料分析 | | |
| ・密度, 空隙率など | 浮力法 2) | 岩塊 | 握りこぶし大 |
| • 弹性波速度 | 超音波速度試験 2) | 円柱状 | Φ30×L50 程度 |
| ・一軸圧縮試験 | 一軸圧縮試験(JIS M0302, JGS 2532) | 円柱状 | Φ30×L50 程度 |
| ・X線回折 | 定方位,不定方位法 2) | 岩塊 | 握りこぶし大 |
| ・空隙率測定 | 水銀圧入法(例えば文献 3)) | 岩塊 | 握りこぶし大 |
| (2) インタクト試料 | | | |
| ・透水試験 | トランジェントパルス透水試験法 4) | 円柱状 | Φ30×L50 程度 |
| ・拡散試験 | 透過拡散法(例えば文献 5)) | 円盤状 | Φ30×L5 程度 |
| (3) 亀裂試料 | | | |
| ·透水試験 | 定水頭透水試験 2) | 平行平板 | H30×W30×L50 程度 |
| | | ブロック | |
| ・トレーサー試験 | トレーサー試験 6) | 平行平板 | H30×W30×L50 程度 |
| | | ブロック | |

表 3.1-1 試料の形状, 寸法一覧

| | | 試料1 | 試料 2 |
|------|-------|--------|--------|
| 試料寸法 | 直径Φ | 49.8 | 49.78 |
| (mm) | 長さ L | 50.94 | 50.41 |
| 試料重量 | 量 (g) | 181.96 | 182.00 |
| 亀裂の | 状況 | 亀裂なし | 亀裂なし |

(a) 試料諸元



(b) 写真(左:試料 1, 右:試料 2) 写真 3.1-1 試料整形結果(トランジェントパルス試験用)

| | | 試料 3 |
|-------|-------------|--------|
| 李利 十许 | 高さ H | 38.4 |
| (mm) | 幅 W | 30.4 |
| | 長さ L | 49.65 |
| 試料重量 | (g) | 110.05 |
| 亀裂の | 状況 | 人工平行平板 |

(a) 試料諸元



(b) 写真 写真 3.1-2 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, 基本物性試験の一つである一軸圧縮試験,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 2)や弾性波速度 2)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 た稚内層試料とほぼ同程度の値を示すことが分かった.

| | | - | | | | | | - | | | |
|-------------------------------|------------------|----------------------|-------|------------------------|--------|-------|-------|-------|------|-------|---------|
| Ti - Ji | 地図る | 採取深度 | | 密度(g/cm ³) | | 含水比 | 飽和度 | 有劾間隙率 | 吸水率 | 弹性波速 | 菮(km/s) |
| 参照元 | を見て | (GLm) | 自然状態 | 強制乾燥状態 | 強制湿潤状態 | (-) | (%) | (%) | (%) | P 波速度 | S波速度 |
| ب - <u>1</u> 11 77 | 张 内 园 | 0 CL 20 - 211 0 | 1.915 | 1.509 | 1.915 | 0.270 | 100.0 | 40.7 | 27.0 | 2.14 | 0.88 |
| | 作用 | 0.242.0 | 1.841 | 1.430 | 1.841 | 0.287 | 100.0 | 41.1 | 28.7 | 2.18 | 0.91 |
| | | $195.00 \sim 195.70$ | 1.879 | 1.465 | 1.879 | 0.283 | 100.0 | 41.4 | 28.3 | 2.70 | 0.98 |
| - | <u> </u> | 01 1 000 511 100 | 1.910 | 1.526 | 1.910 | 0.252 | 100.0 | 38.5 | 25.2 | 2.80 | 1.12 |
| - | 作用 | 04.410 ~ 014.40 | 1.911 | 1.527 | 1.911 | 0.252 | 100.0 | 38.4 | 25.2 | 2.70 | 1.10 |
| - | | $441.50 \sim 442.00$ | 2.005 | 1.673 | 2.005 | 0.199 | 100.0 | 33.2 | 19.9 | 2.60 | 1.15 |
| - | | | 1.580 | 0.975 | 1.586 | 0.621 | 0.66 | 61.1 | 62.7 | 1.66 | 0.42 |
| | | 0.Uc | 1.580 | 0.979 | 1.589 | 0.641 | 98.5 | 61.0 | 62.3 | 1.66 | 0.43 |
| - | | | 1.574 | 0.978 | 1.574 | 0.609 | 100.0 | 59.5 | 60.9 | 1.68 | 0.43 |
| - | | $202.00\sim 202.60$ | 1.568 | 0.970 | 1.568 | 0.617 | 100.0 | 59.8 | 61.7 | 1.70 | 0.46 |
| - | 四間平 | | 1.570 | 0.974 | 1.570 | 0.613 | 100.0 | 59.6 | 61.3 | 1.68 | 0.48 |
| 既往の | | 010 15 - 000 70 | 1.682 | 1.158 | 1.682 | 0.452 | 100.0 | 52.3 | 45.2 | 1.85 | 0.68 |
| 研究 | | 232.40~233.10 | 1.682 | 1.159 | 1.683 | 0.451 | 9.66 | 52.4 | 45.2 | 1.86 | 0.68 |
| - | | | 1.699 | 1.177 | 1.699 | 0.443 | 100.0 | 52.2 | 44.3 | 1.85 | 0.46 |
| | | $245.10 \sim 245.60$ | 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 |
| | | 180 65010000 | 1.917 | 1.470 | 1.917 | 0.304 | 100.0 | 44.7 | 30.4 | 1.78 | 0.44 |
| | | 109.09 ~ 130.00 | 1.882 | 1.413 | 1.882 | 0.332 | 100.0 | 46.9 | 33.2 | 1.80 | 0.41 |
| | 王 王 王 王 | 006 05~000 07 | 1.921 | 1.475 | 1.921 | 0.302 | 100.0 | 44.5 | 30.2 | 1.77 | 0.36 |
| | 为叫眉 | 17.077~.00.077 | 1.935 | 1.495 | 1.935 | 0.294 | 100.0 | 44.0 | 29.4 | 1.78 | 0.38 |
| | | 340.00~340.60 | 1.893 | 1.429 | 1.893 | 0.322 | 100.0 | 46.3 | 32.4 | 1.72 | 0.34 |
| | | 740.00 ~ 240.00 | 1.907 | 1.451 | 1.907 | 0.315 | 100.0 | 45.7 | 31.7 | 1.71 | 0.32 |

表 3.2-1 基本物性試験結果一覧 (既存データ かいとの比較)



3.2.3. 一軸圧縮試験

ー軸圧縮試験(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³⁾⁻⁷⁾を併せて示す. 一軸圧縮強度は, 18.6MPa であり, 同深度における既 往の稚内層のデータとほぼ同等の値となった.

| 軸圧縮試験結果一覧 (1/3) | ギータ 7)-11)との比較) |
|-----------------|-----------------|
| -2 一軸 | 既存デー |
| 表 3.2 | \smile |

| | ンン | 1 | | 0.292 | | | 0.386 | | | 0.207 | | | 0.148 | | | 0.195 | | | 0.145 | |
|---------------|------------|-------|-------|------------------|-----------|---------------------------------|-----------------|-------|-------------|------------|------------|-------------|-------------|--------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 静ポア | H | 0.293 | 0.318 | 0.285 | 0.423 | 0.384 | 0.350 | 0.225 | 0.156 | 0.239 | 0.153 | 0.109 | 0.183 | 0.200 | 0.164 | 0.220 | 0.198 | 0.132 | 0 106 |
| | 蔑 | ل (%) | | 1.49 | | | 1.32 | | | 1.07 | | | 1.29 | | | 0.95 | | | 1.67 | |
| | 破填 | いずみ | 1.59 | 1.40 | 1.47 | 1.46 | 1.06 | 1.44 | 1.16 | 1.25 | 0.80 | 0.83 | 1.80 | 1.24 | 1.35 | 068 | 0.83 | 1.28 | 1.75 | 1.99 |
| 宿試験 | | (MPa) | | 2272 | | | 524 | I | | 530 | | | 463 | | | 589 | | | 439 | |
| 一軸圧約 | 三係数 | ゲージ(| 3214 | 2076 | 1525 | 505 | 547 | 520 | 487 | 447 | 657 | 604 | 362 | 424 | 494 | 635 | 638 | 528 | 377 | 411 |
| | 静弹性 | (IPa) | | 1466 | | | 227 | I | | 293 | | | 302 | L | | 354 | | | 308 | |
| | | 外部(1) | 1389 | 1526 | 1484 | 221 | 222 | 239 | 263 | 266 | 351 | 360 | 297 | 250 | 328 | 353 | 381 | 341 | 273 | 309 |
| | 王緒 | (IPa) | | 18.63 | I | | 2.51 | 1 | | 2.88 | | | 3.91 | | | 3.20 | | | 4.97 | |
| | □軸 | 強度(N | 19.96 | 19.03 | 16.91 | 2.92 | 2.10 | 3.03 | 2.57 | 3.31 | 2.76 | 2.67 | 5.14 | 3.07 | 4.25 | 2.33 | 3.02 | 4.27 | 4.68 | 5.67 |
| 自生実 | 頃里里 …3) | П°) | | 17.6 | | | 15.5 | I | | 15.1 | | | 15.0 | | | 15.3 | | | 15.2 | |
| 步半空 | | | 17.6 | 17.5 | 17.6 | 15.6 | 15.3 | 15.6 | 15.1 | 14.7 | 15.5 | 15.1 | 14.8 | 14.6 | 15.4 | 15.2 | 15.4 | 15.3 | 15.4 | 15.0 |
| ŧ | コアリング | 方向 | | コア軸方向 | L | | | 1 | | 水平 | L | | 水平+90° | | | 水平 | | | 鉛直 | |
| | 深度(m) | | | 340.6 - 341.0 | | | GL30.6 | | 96.33-96.40 | 00 0-00 01 | 33.0-33.41 | 96.33-96.40 | 00 00-00 91 | 33.00 ⁻ 33.21 | 201.05-201.40 | 201.60-202.00 | 205.75-206.00 | 201.05-201.40 | 201.60-202.00 | 205.75-206.00 |
| | 試料名 | | あらさお | 決入し上が Dilc+ J | T TION JE | 4 4 二 二 二 二 二 | 「狭え上生」 「話当」」 | 対明へつ | | | 1-0 | 1_0 | | | | | 0-J | 7_0 | | L |
| 幸 | 層 | Ƴ | 辨 | ₽ E | 围 | ᆌᠣ | E | 劆 | | | 瓶 | 凹層 | | | | | 瓶〓 | <u>i</u> t | | |
| ц [] [] | シェン | | ¥ | (臣) | Ķ | | | | | | | 既往 | 101 | | | | | | | |

| | ■ ■ 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 | | (%) H | x t(%) Ht bt 0.286 | $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$ | $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$ | к нт 47 0.286 1.54 0.286 0.237 0.279 0.260 | $\begin{array}{c ccccc} & & & & & & \\ 1.54 & & 0.286 & & \\ 1.54 & 0.315 & 0.279 & \\ 0.237 & & 0.237 & \\ 0.260 & & 0.176 & 0.211 \end{array}$ | $\begin{array}{c ccccc} & & & & & & \\ \mu_{1}(96) & & & \mu_{2} \\ \hline 1.54 & 0.286 \\ \hline 0.237 & 0.279 \\ \hline 0.237 & 0.260 \\ \hline 0.88 & 0.176 & 0.211 \\ \hline 0.211 & 0.211 \end{array}$ | $\begin{array}{c cccc} & & & & & & \\ \mathfrak{l}(\%) & & & & & \\ 1.54 & 0.286 & & \\ 1.54 & 0.315 & 0.279 & \\ 0.237 & & 0.260 & \\ 0.260 & & 0.176 & 0.211 & \\ 0.211 & & 0.134 & \\ \end{array}$ | $\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$ | $\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$ | $\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$ | $\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$ | $\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$ | $\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$ | $\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$ | $\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$ | $\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$ | $\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$ | $ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$ | $ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$ | $\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$ |
|--------|---|----------------------|-------|-----------------------------|---|---|---|--|---|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|---|---|--|
| 験 | 破壞 | 71 21 21 21 | | 1.72 | 4 1.62 1 | 1.72 1.72 1.62 1.28 | 4 1.62 1 1.28 1 0.89 | $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$ | 0 0'9 970 1 1.62 1 1.28 1.28 0 0 0.89 0 0.87 0 0 | $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$ | $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$ | $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$ | $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$ | $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$ | $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$ | $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$ | $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$ | $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$ | $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$ | $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$ | $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$ | $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$ | $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$ |
| | | (MPa) | | 944 | | | 749 | (| | 456 | | | 90 | [| | 106 | | | 167 | | | 191 | |
| □軸□ | 性係数 | ゲージ | 1126 | 940 | 766 | 802 | 735 | 711 | 379 | 367 | 621 | 78 | 129 | 63 | 84 | 134 | 101 | 162 | 207 | 133 | 188 | 199 | |
| | 静硝 | (IPa) | | 834 | | | 463 | | | 374 | | | 87 | | | 93 | | | 132 | | | 181 | |
| | | 外部(1 | 898 | 756 | 848 | 469 | 441 | 479 | 339 | 374 | 408 | 77 | 119 | 64 | 88 | 104 | 86 | 127 | 153 | 115 | 159 | 207 | |
| | 王縮 | APa) | | 7.78 | | | 3.61 | I | | 6.30 | | | 1.18 | | | 1.61 | | | 1.37 | I | | 1.65 | |
| | ■ | 強度(N | 8.63 | 8.12 | 6.58 | 3.52 | 3.64 | 3.68 | 6.06 | 6.12 | 6.71 | 1.05 | 1.63 | 0.86 | 1.35 | 1.86 | 1.27 | 1.05 | 1.77 | 1.30 | 1.68 | 1.84 | |
| 世 世 | 月里里 | m") | | 16.5 | | | 16.5 | | | 16.6 | L | | 18.9 | | | 19.0 | | | 18.9 | | | 19.1 | , |
| 玉玉玉 | 与111-111 11-111 | (KIN) | 16.5 | 16.5 | 16.4 | 16.4 | 16.5 | 16.6 | 16.6 | 16.5 | 16.6 | 18.9 | 19.1 | 18.8 | 18.9 | 19.0 | 18.9 | 18.9 | 18.8 | 19.0 | 19.2 | 19.0 | |
| ŧ | コアリング | 方向 | | コア軸方向 | L | | 水平 | 1 | | 部直 | L | | 水平 | L | | 鉛直 | L | | 水平 | L | | 鉛直 | L |
| | 深度(m) | | | 232.45 - 233.00 | | 915 75-916 00 | 240.107240.00 | 246.00-246.45 | 94E 7E-946 00 | 240.107240.00 | 246.00-246.45 | 189.00-189.90 | 00.001-00.001 | 183.30 - 183.56 | 183.00-183.30 | 183.30 - 183.56 | 183.93-194.00 | 006 00-006 10 | 64.022-00.022 | 226.43-226.70 | 996 00-996 19 | 220.00 220.40 | |
| | 試料名 | | あらさお | 狭刈土刈 Dilot 习 | T TION JE | | | د ر | 0_0 | | | | | | 1./ | | | | | с- Г | 7 | | |
| 早 | 迎層 | ${\leftarrow}$ | 間 | | 圓 | | | 声 | Ē | | | | | 更加 | ね層 | | | | | 勇如 | 和層 | | |
| | | ◎ ¹ 11 JL | | | | | | | | | | 既往 | 101 | ∲究 | | | | | | | | | |

表 3.2-2 一軸圧縮試験結果一覧 (2/3)

| | | シン | 1 | | 0.422 | | | 0.280 | | | 0.147 | | | 0.227 | | | 0.232 | |
|---------|-------------|------------|-----------------------|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------|-------|--------------|--------------|-------|-------|-------|-------------|---------|
| | | 静ポラ | Ŧ | 0.237 | 0.476 | 0.422 | 0.369 | 0.234 | 0.238 | 0.107 | 0.165 | 0.169 | 0.238 | 0.255 | 0.187 | 0.237 | 0.216 | 0.243 |
| | | 嶡 | (%)خ | | 1.30 | | | 1.23 | | | 1.04 | | | 0.60 | | | 1.77 | |
| | | 破J | いずみ | 1.41 | 1.16 | 1.32 | 1.06 | 1.06 | 1.58 | 0.97 | 1.05 | 1.11 | 0.69 | 0.61 | 0.50 | 1.90 | 1.79 | 1.62 |
| | 宿試験 | | (MPa) | | 104 | | | 125 | | | 1516 | | | 1971 | | | 1568 | |
| | | E係数 | ゲージ | 121 | 67 | 125 | 213 | 88 | 73 | 1560 | 1378 | 1611 | 2421 | 1224 | 2269 | 1520 | 1493 | 1690 |
| | | 静弹性 | (IPa) | | 100 | <u> </u> | | 116 | | | 1108 | | | 1094 | | 1 | 1093 | <u></u> |
| 3/3) | | | 外部(1) | 114 | 74 | 113 | 175 | 101 | 72 | 1125 | 841 | 1357 | 1312 | 932 | 1038 | 1084 | 1088 | 1108 |
| !─覧 () | | 王緒 | (IPa) | | 1.21 | | | 1.28 | | | 10.81 | | | 6.25 | | | 17.84 | I |
| 試験結果 | | / 暉 - | 強度(D | 1.44 | 0.82 | 1.37 | 1.80 | 1.01 | 1.03 | 10.77 | 10.85 | 15.15 | 7.21 | 5.29 | 4.84 | 18.18 | 17.50 | 16.67 |
| - 軸圧縮 | 世 王 王 | 見里里 | n°) | | 19.1 | <u> </u> | | 19.2 | | | 18.1 | | | 18.3 | | | 18.7 | |
| 3.2-2 - | サキャンティング | | (KIN) | 19.2 | 19.1 | 19.1 | 19.2 | 19.4 | 19.1 | 18.1 | 18.2 | 18.1 | 18.2 | 18.5 | 18.2 | 18.8 | 18.7 | 18.6 |
| 表 | Ħ | コアリング | 方向 | | 水平 | L | | 鉛直 | | | 水平 | | | 垂直 | L | 1 6 軸 | 中 1 1 | |
| | | 深度(m) | | 00-037 33 | 76.167.00.167 | 239.25-239.59 | 237.00-237.32 | 030 95-990 E0 | 203.20-203.09 | | | 166 00-166 0 | 0.001-UU.001 | | | | 253.5 - 254 | |
| | | 試料名 | | | | - 0 - L | 0 | <u></u> | | | | HDB-9 | (150) | | | 0-מתח | | (007) |
| | 犐 | 」 译 | $\overset{-}{\nabla}$ | | | 更如 | 和層 | | | | | 稚肉 | C IE | | | 兼 | ±€∎ | Ē |
| | | | ◎ III JL | | | | | | | 既往 | 101 | 牧 究 | | | | | | |

| (3/3) |
|--------|
| 找験結果一覧 |
| 一軸圧縮詞 |
| .2-2 |

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、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, …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 (2 θ)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. 鉱物はそれぞ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,そのおおよその量も知ることができ る.

(2) 不定方位法

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、4µm 以下に粉砕する. 粉末にした試料は、穴のあいたアルミニウム板製試料ホルダー (20×14×1.5mm)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²⁾、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線分析の結果の一覧を表 3.2-3 に, 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 2)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 CuKa:20=5.0~7.5°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 CuKa:20=5.2°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カレートさせ,カオリナイトの底面間隔を膨脹し,CuKa:20=12.3°の回折線が CuKa:20=8.4°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カレー トによる回折線の変化については,文献 12 を参照されたい.同文献では,有機化合物として,尿素 をインターカレ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、十分に撹拌分散させた後、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, CuKα:2θ=12.3°付近の回折線の移動が観察で きなかったため, カオリナイト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 CuKa:20=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、CuKa:20=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、CuKa:20=21.66 に明瞭なピークが見られることから、幌延地域の珪藻質泥 岩に特徴的なシリカ鉱物の変化:珪藻→オパールA→オパールCT→石英の中で、オパールCTの ゾーンに区分されることが分かる.

| | 式料番号 | 1 |
|-------|-----------|---------------------|
| | 試料名 | 稚内層コア試料(GL341.40 m) |
| | 石英 | |
| | 非晶質オパール A | |
| シリカ鉱物 | オパール CT | 0 |
| | トリジマイト | |
| | クリストバライト | |
| 巨工 | カリ長石 | |
| 民力 | 斜長石 | Δ |
| | 菱鉄鋼 | Δ |
| | 黄鉄鋼 | \bigtriangleup |
| | 石膏 | |
| 油石 | 濁沸石 | |
| ሪሞባገ | 斜プチロル沸石 | |
| | スメクタイト | Δ |
| 业上在协 | 緑泥岩 | \bigtriangleup |
| 们上现初 | 雲母類 | \triangle |
| | カオリン | |
| | 備考 | |

表 3.2-3 X 線分析結果一覧

凡例: ○ 中量, ▲ 少量, △ 少量?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、水銀が土壌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 0.003~500µm)を用いて行った. 試料は, 大きさ2.5~5.0mm 粒に破砕した試料を105℃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,水銀の土壌に対する一般的な物性値として, 表面張力 y=0.480 (N/m),および接触角 θ=140°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.

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

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

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

$$n_P = 100V_{SP} \cdot \rho_d \tag{3.2-4}$$

ここに、D: 細孔直径(m), Pm: 水銀にかけた圧力(kg/m²), y: 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(°), Sp: 細孔内比表面積(m²/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(m³), 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(m³), pa: 乾燥嵩密度(kg/m³), Ma:乾燥状態での試料重量(kg), V_c: 密閉セルの体積(m³), M_{me}: 水銀の重量(kg), p_{me}: 水銀の密度(kg/m³), n_P: 有効間隙率(%), V_{SP}:比空隙体積(単位重量当りの空 隙体積)(m³/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 3.2-4 より,今回の試料では,細孔半径 0.1µm 付近以下の空隙の割合が多く,既往の稚内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.





| 試料 | 採取深度 | 累積細孔体積 | 累積細孔比表面積 | 嵩密度 | 真密度 |
|----|---------------|--------|-----------|------------|------------|
| | (G.L m) | (mL/g) | (m^2/g) | (g/cm^3) | (g/cm^3) |
| 1 | 34.060~341.00 | 0.32 | 81.83 | 1.33 | 2.30 |

表 3.2-4 水銀圧入試験結果一覧



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ェ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(トランジェントパルス透水試験)

(1) 試験方法

試験に用いたトランジェ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, 写真 3.3-1, 図 3.3-2 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¹³⁾. 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.

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.

 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 水圧パルスを作用

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用させる.

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 トランジェントパルス透水試験装置概要



写真 3.3-1 トランジェントパルス透水試験装置概観



図 3.3-3 トランジェントパルス透水試験手順

(2) 試験条件

試験条件を表 3.3-1 に示す. 封圧については, 図 3.3-4 に示す HDB-1 孔および HDB-6 孔の密 度検層の結果 ^{14),15)}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, 水圧破砕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)×0.018 (MPa/m) |
| 間隙水圧: | 深度(m)×0.010 (MPa/m) |



表 3.3-1 試験条件



(3) 試験結果

トランジェントパルス透水試験の解析には, Brace法 16)と, 差圧を用いた Hsieh法 17)を用いた. それらの方法を以下に述べる.

(a) Brace 法 ¹⁶⁾

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.

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

ここに, H: パルス圧幅(MPa), hu: 上流側水圧(MPa), hd:下流側水圧(MPa), Vu:上流側貯留槽の 容積 (m³), Vd: 上流側貯留槽の容積(m³), K:岩石試料の透水係数(m/s), A: 岩石試料の断面積 (m²), t: 経過時間(s), ^ℓ: 岩石試料の長さ(m), Cw: 水の圧縮率(m²/kN), Yw: 水の密度(kg/m³), g: 重力加速度(m/s²)

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 ¹⁷⁾

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.

$$\frac{h_{u}}{H} = \frac{1}{1+\beta+\gamma} + 2\sum_{m=1}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha\phi_{m}^{2})(\beta+\gamma^{2}\phi_{m}^{2}/\beta)}{\left[\gamma^{2}\phi_{m}^{4}/\beta^{2} + (\gamma^{2}\beta+\gamma^{2}+\gamma+\beta)\phi_{m}^{2}/\beta + (\beta^{2}+\gamma\beta+\beta)\right]},$$
(3.3-2)

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

ここで, φm は次式の根である.

$$\tan\phi = \frac{(1+\gamma)\phi}{\gamma\phi^2/\beta - \beta},$$
(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.

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

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

$$S_d = C_w \gamma_w V_d g_{\perp}$$
(3.3-7)

ここに, H: パルス圧幅(MPa), hu: 上流側水圧(MPa), hd: 下流側水圧(MPa), Su: 上流側貯留槽の貯留量(m²), Sd: 下流側貯留槽の貯留量(m²), K: 岩石試料の透水係数(m/s), A: 岩石試料の断面

積(m²), t: 経過時間(s), ℓ: 岩石試料の長さ(m), C_w: 水の圧縮率(m²/kN), Y_w: 水の密度(kg/m³), g: 重力加速度(m/s²), V_u: 上流側貯留槽の容積(m³), 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.

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.

- 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 6(=6*)と、 a²=1 のときのt(=t*)を求める.
- ② ①で求めた B および t を用いて(3.3-5)式より,比貯留係数 Ss を求める.

③ ②で求めた Ss 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

トランジェントパルス透水試験法で用いた既知パラメータを表 3.3-2 に示す. Brace 法と差圧 を用いた Hsieh 法による解析結果を表 3.3-3 及び図 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 3.3-7 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、既往の稚内層を対象とした試験結果と比較す ると同深度の稚内層試料よりやや高いものの、ほぼ同等の透水性を示すことが分かる.

| | 単位 | 既知パラメータ値 |
|---------|-------------------|-----------------------|
| V_u | (m ³) | 4.15×10 ⁻⁴ |
| V_d | (m ³) | 4.15×10 ⁻⁴ |
| А | (m ²) | 1.96×10 ⁻³ |
| Ι | (m) | 5.00×10 ⁻² |
| C_{w} | (m^2/kN) | 4.65×10 ⁻⁴ |
| γw | (kN/m^3) | 9.7890 |

表 3.3-2 トランジェントパルス透水試験法で用いた既知パラメーター覧

表 3.3-3 トランジェントパルス透水試験結果一覧 (既往データ ワ・11)との比較)

| データ | 々 に 虫 処 | th 国 ク | <i>थ</i> ।फ्रस्≡ | 採取深度 | 封压(1 | MPa) | 間隙水圧 | パルス圧 | 透水係 | 数(m/s) | 比貯留係数(1/m) |
|-----|-----------------------|----------|------------------|----------------------|------|----------|-------|-------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| 参照元 | 状状に有 | 地價石 | | (GLm) | 軸圧 | 側圧 | (MPa) | (MPa) | Brace $\not\equiv$ | 差圧を用 | いた Hsieh 法 |
| 本研究 | 換気立抗 Pilot 孔 | 稚内層 | 1 | 341.00~342.00 | 6.15 | 6.15 | 3.40 | 0.10 | 9.83×10-12 | 1.11×10-11 | 7.70×10 ⁻⁶ |
| | 2 ס-מתח | | 9-1i-h | 000 TE- 001 00 | A EO | С Ц V | 010 | | 2.41×10^{-11} | 2.80×10^{-11} | 1.32×10^{-5} |
| | ллр-а л∟ | | 9-1i-v | 230.10~231.00 | 4.00 | 4.00 | 2.00 | 0.10 | 1.25×10^{-11} | 1.50×10^{-11} | 1.34×10^{-5} |
| | | 稚内層 | 2-1i | $195.00 \sim 195.70$ | 3.6 | 3.6 | 2 | 0.1 | 4.83×10^{-12} | 5.49×10^{-12} | 1.12×10^{-5} |
| | HDB-4 \mathcal{F} L | | 2-2i | $314.00 \sim 314.40$ | 5.4 | 5.4 | က | 0.1 | 4.83×10^{-12} | 4.88×10^{-12} | 6.08×10^{-6} |
| | | | 4-1i | $441.50 \sim 442.00$ | 8.1 | 8.1 | 4.5 | 0.1 | 1.69×10^{-12} | 1.63×10^{-12} | 8.11×10^{-6} |
| | 換気立坑 掘削ズリ | | 1 | 30.60 | 0.50 | 0.50 | 0.30 | 0.10 | 8.49×10-11 | 1.35×10^{-10} | 5.59×10 ⁻⁵ |
| | UDD.10 7 | | 10-1i-h | 01 50-09 00 | 1 00 | 1 00 | 1 00 | | 6.90×10^{-11} | 8.28×10-11 | 1.43×10^{-5} |
| 既往 | | | 10-1i-v1 | 00.22~00.1E | 1.0U | 1.00 | 1.00 | 01.0 | 6.98×10-11 | 8.38×10-11 | 1.42×10^{-5} |
| 101 | חחם-מ | 図出手 | 6-2i-h | 09 606 00 606 | 026 | 026 | 00.6 | | 5.40×10^{-10} | 7.53×10^{-10} | 8.74×10^{-6} |
| 虾 究 | | | 6-2i-v | 00.202-00.202 | 0.00 | 0.00 | 7.00 | 01.0 | 4.21×10^{-10} | 4.53×10^{-10} | 1.11×10^{-5} |
| | 換気立坑 Pilot 孔 | | 1 | $232.45 \sim 233.70$ | 4.20 | 4.20 | 2.30 | 0.10 | 1.44×10^{-10} | 1.77×10^{-10} | 6.92×10^{-6} |
| | חס-מתח | | 6-4i-h | 945 10-945 60 | V EO | N NO | 0 20 | | 1.71×10^{-10} | 1.93×10^{-10} | 4.08×10^{-6} |
| | | | 6-4i-v | 740.107240.00 | 4.00 | 4.00 | 00.7 | 01.0 | 1.13×10^{-10} | 1.27×10^{-10} | 1.18×10^{-5} |
| | | | 7-1i-001 | 1 80 65~1 00 00 | 3 60 | 3 60 | 00.6 | 01.0 | 2.11×10^{-10} | 2.54×10^{-10} | 1.29×10^{-5} |
| | HDR-7 | 圏 uf 更 | 7-1i-90 | 00.061-00.601 | 0.00 | 0.00 | 7.00 | 01.0 | 2.78×10^{-10} | 2.86×10^{-10} | 1.10×10^{-5} |
| | | 11/11/11 | 7-2i | $226.85 \sim 228.27$ | 4.10 | 4.10 | 2.30 | 0.10 | 3.31×10^{-10} | 4.09×10^{-10} | 1.01×10^{-5} |
| | | | 7-3i | $240.00 \sim 240.60$ | 4.30 | 4.30 | 2.40 | 0.10 | 1.98×10^{-10} | 2.22×10^{-10} | 1.08×10^{-5} |







(既往データ 7)-11)との比較)
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 3.1-2 で整形したブロック状試料(試料 3)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.





(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 (m²/s)を以下の(3.3-8)及び(3.3-9)式から求めた.

$$T_{f} = \frac{Q}{x \cdot I},$$

$$I = \frac{\Delta H}{L}.$$
(3.3-8)
(3.3-9)

ここに, T_f: 亀裂の透水量係数(m²/s), Q: 流量(m³/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, 1.02×10⁻⁷ (m²/s)であり, これから三乗則(平行平板亀裂では流量が開口幅の三乗に比例する)により求められる水理開口幅は, 0.052 (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 3) | | | | | | |
|--------------------------------|-----|----------------------|------|-----------------------|--------------------------------|--|
| 試料名 | 地層名 | 採取深度 | 水頭差 | 流量 | 亀裂の透水量係数 | |
| | | (GL m) | (m) | (m^3/s) | $T_{ m f}$ (m ² /s) | |
| 試料 3 | 稚内層 | $341.70 \sim 342.00$ | 0.32 | 1.32×10^{-8} | 1.02×10^{-7} | |

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 トレーサ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 30 mm,厚さ5 mm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.

④ 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(KI)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 50 mL 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

試験開始から4日後までは、2回/日の頻度で測定セルから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、5日後以後は、同様の方法で1回/日の頻度で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 3.4-2 拡散実験装置および供試体の概観

(2) 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.

| 項目 | 実験条件 | | | | |
|----------|--------------------|--|--|--|--|
| | ヨウ化カリウム(KI)水溶液 | | | | |
| トレーサーセル側 | ・濃度: I- 500 (mg/L) | | | | |
| | ・容量: 50 (mL) | | | | |
| 測会セル側 | 脱イオン水 | | | | |
| 例た ビル 例 | ・容量: 50 (mL) | | | | |
| 温度 | 室温(22~25℃) | | | | |

表 3.4-1 試験条件一覧

(3) 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 Cp(t, x)=0, t=0, 0≤x≤H, 境界条件 Cp(t, x)=C₀, t>0, x=0,
 Cp(t, x)=0, t>0, x=H のもとで解くことにより、次式を得る.

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

ここに、Cp: 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), Co: 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(m²), De: 実効拡散係数(m²/s), Vm: 測定セル中の溶液体積(m³)である. また, a は収着容量であり, $a = n + \rho \cdot Kd(n: 試料の有効間隙率, \rho: 試料の乾燥密度(kg/m³), Kd:分配係数(m³/kg))で与えられ$ る.

上式(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.

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

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

ここに、Da: 見かけの拡散係数(m²/s)、Tint: 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,1.79×10⁻¹¹ (m²/s)であり,既往の稚内層試料を対象とした試験結果とほぼ同等の値となった(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.

| (現在ノークガニンの比較) | | | | | | | |
|---------------|-----|----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------|
| データ 参照元 | 地層名 | 試料名 | 実効 拡散係数 | 見かけの 拡散係数 | 収着容量 α(-) | 分配係数 K _d (m³/kg) | 有効間隙率 |
| > | | | D_e (m ² /sec) | D_a (m ² /sec) | | | n _e (-) |
| 本研究 | 稚内層 | 換気立坑 パイロット孔 | 1.79×10^{-11} | 4.03×10 ⁻¹¹ | 4.44×10 ⁻¹ | 2.38×10^{-5} | 0.409 |
| | 稚内層 | 9-2i1 | 4.19×10^{-11} | 2.50×10^{-8} | 1.67×10^{-3} | 0.00×10^{0} | 0.426 |
| | | 9-1i-h | 2.94×10^{-11} | 3.38×10^{-10} | 8.70×10^{-2} | 0.00×10^{0} | 0.426 |
| | | 9-1i-v | 3.52×10^{-11} | 4.26×10^{-10} | 8.26×10 ⁻² | 0.00×10^{0} | 0.440 |
| | | 2-2i | 2.34×10^{-11} | 6.86×10^{-11} | 3.42×10^{-1} | 0.00×10^{0} | 0.414 |
| | | 3-4i | 2.55×10^{-11} | 3.36×10^{-11} | 7.58×10^{-1} | 2.40×10^{-4} | 0.384 |
| | | 4-2i | 8.16×10^{-12} | 3.84×10^{-11} | 2.12×10^{-1} | 0.00×10^{0} | 0.332 |
| | 声問層 | 10-1i-h | 9.22×10^{-11} | 1.76×10^{-9} | 5.23×10^{-2} | 0.00×10^{0} | 0.486 |
| | | 10-1i-v1 | 9.60×10^{-11} | 2.97×10^{-10} | 3.23×10^{-1} | 0.00×10^{0} | 0.486 |
| | | 11-2i-h3 | 3.22×10^{-10} | 4.63×10^{-10} | 6.94×10 ⁻¹ | 6.43×10^{-5} | 0.639 |
| | | 11-4i-h1 | 1.46×10^{-10} | 2.93×10^{-10} | 4.97×10^{-1} | 0.00×10^{0} | 0.546 |
| 既往の 研究 | | 換気立坑 掘削ずり | 2.13×10 ⁻¹⁰ | 3.21×10 ⁻¹⁰ | 6.63×10 ⁻¹ | 4.91×10 ⁻⁵ | 0.615 |
| | | 6-2i-h | 6.78×10^{-10} | 6.01×10^{-10} | 1.13×10^{-1} | 5.42×10^{-4} | 0.598 |
| | | 6-2i-v | 3.30×10^{-10} | 1.58×10^{-9} | 2.09×10^{-1} | 0.00×10^{0} | 0.596 |
| | | 6-4i-h | 2.59×10^{-10} | $1.56 	imes 10^{-9}$ | 1.66×10^{-1} | 0.00×10^{0} | 0.534 |
| | | 6-4i-v | 2.08×10^{-10} | 1.29×10^{-9} | 1.61×10^{-1} | 0.00×10^{0} | 0.537 |
| | | 換気立坑 | 1 15×10-10 | 2.60×10 ⁻¹⁰ | 4.43×10 ⁻¹ | 0.00×10^{0} | 0.594 |
| | | パイロット孔 | 1.15×10 10 | | | | 0.324 |
| | 勇知層 | 7-1i-003 | 1.44×10^{-10} | 5.52×10^{-10} | 2.61×10 ⁻¹ | 0.00×10^{0} | 0.447 |
| | | 7-1i-902 | 9.50×10^{-11} | 9.41×10 ⁻⁹ | 1.01×10 ⁻² | 0.00×10^{0} | 0.469 |
| | | 7-2i-2 | 1.17×10^{-10} | 1.02×10^{-9} | 1.15×10^{-1} | 0.00×10^{0} | 0.440 |
| | | 7-3i | 2.32×10^{-10} | 1.70×10^{-9} | 1.36×10^{-2} | 0.00×10^{0} | 0.457 |

表 3.4-2 拡散試験結果 (既往データ 7)-11)との比較)



(既存データ 7)-11),18)との比較)

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.

・注入流量が少なくて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、今回のように極微少流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少流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(KI)水溶液)と入れ替える. 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 に注意する.

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(I)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(I)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.



(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, シリンジポンプの容量, イオンメーターの測定精度等から, I⁻ 500 (mg/L), および q=0.0017 (mL/min)とした.

| | 試験条件 | | |
|----------|--------------------------------|--|--|
| | ヨウ化カリウム(KI)水溶液 | | |
| トレーサーセル側 | ・濃度: I ⁻ 500 (mg/L) | | |
| | ・注入流量: q=0.0017 (cm³/min) | | |
| 測学セル側 | 脱イオン水 | | |
| 側足ビル側 | ・イオンメーターにより濃度測定 | | |

表 3.4-3 トレーサー試験条件

- (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.

排出濃度の経時変化は,試験途中で濃度上昇の勾配が多少変化している.試験前後の注入流量 は,変化しておらず,装置の漏水等も確認されていないことから,試験途中で亀裂の状況が変化した 可能性が考えられる.

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^{1),19)}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(20 mm)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 250 mm とし,濃度評価点を実際の試料長で ある 50 mm 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 中に実線で解析結果を示す. 今回は, 試験途中で濃度上昇の勾配が変化しているため, 図中に示す 3 ケースについてフィッティング解析を行った. 図中の解析結果①は試験の前半に着目し たケース, 解析結果②は後半, 解析結果③は試験の前半と後半の平均的なトレンドに着目したケース である. 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, それぞれ解析結果①で 0.052 (mm), 0.02 (m), 解析結果②で 0.056 (mm), 0.001 (m), 解析結果③で 0.052 (mm), 0.005 (m)で あった. ただし, 本トレーサー試験は, 排出トレーサーの累積濃度を測定しており, 試験後半の濃度変 化は, 前半の濃度変化の影響を含むため, 試験後半に着目した解析結果②は参考値として考えるこ ととする.

解析結果①および解析結果③は、物質移行開口幅は双方とも同じ値であるが、分散長は解析結果 ①が解析結果③の4倍大きくなる結果となった.このことから、試験途中において、亀裂の平均的な開 口幅は変化せず、亀裂面内の流速分布が何らかの要因によって変化した可能性が考えられる.解析 結果①と解析結果③のどちらを正とするかは議論の余地があるが,今回は試験の前半と後半の平均的なトレンドに着目した解析結果③を代表値とする.

解析結果③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と同じ値であった.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,今回は人工の平行平板試料であるため,双方が同じ値になったものと考えられる.

図 3.4-10 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 20)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 19)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, $e = 2\sqrt{T} \sim =$ 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、解析結果②は この傾向とほぼ一致している.



| 試料名 | 注入流量 (cm³/min) | 水理開口幅 (mm) | マトリクス部 | マトリクス部 | マトリクス部 | |
|------|-------------------|---------------|------------------------|-----------------------|--------|--|
| | | | 透水係数 | 実行拡散係数 | 有効間隙率 | |
| | | | (m/s) | (m/s) | (%) | |
| 試料 3 | 0.0017 | 0.052 | 1.11×10^{-11} | $1.79 	imes 10^{-11}$ | 40.0 | |
| 設定根拠 | 設定根拠 試験条件 | | 透水試験 | 拡散試験 | 基本物性試験 | |
| | より設定 | 結果より推定 | 結果より推定 | 結果より推定 | 結果より推定 | |

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



図 3.4-7 トレーサー試験の解析条件(試料3)



図 3.4-8 物質移行開口幅の感度





図 3.4-10 透水量係数と物質移行開口幅の関係 (既存データ 7)-11),20)との比較)

4. ブロックスケールトレーサー試験方法の検討

坑道掘削段階や地下施設での調査研究段階においては、水理学的に特徴的な地質構造を対象に水 理試験やトレーサー試験などを実施し、その水理物質移行特性を評価する.しかしながら、原位置での 試験では境界条件が不明確など様々な不確実性を伴う.その一方で、岩石試料の数や大きさが限定さ れるものの、岩石試料を用いた室内試験は種々の実験条件を精密に制御することで精度の高いデータ が取得でき、3章のように数センチメートルスケールの岩石試料を対象とした室内試験を実施してきた. 今後は、比較的大きな岩石試料を用いた試験により、これまで取得してきたデータのより大きなスケール への適用性について検討するとともに、原位置試験データと相互補完する方法を検討していく必要があ る.そのためには、原位置における調査試験を踏まえた大型の岩石試料の採取方法や、大型岩石試料 を対象とした水理物質移行試験手法とこれらの試験研究を通じたコアスケールの試験データから原位置 スケールへのアップスケーリング手法などの整備が必要となる.

そのうち、本章では、数十 cm スケール(最大 1 m 程度)のブロック状の岩石試料を対象とし、下記の 2 つの項目について検討を行う.

①ブロック状の岩石試料の採取方法

② ブロック状の岩石試料を用いた透水トレーサー試験方法

4.1. ブロック状の岩石試料の採取方法

4.1.1. 採取条件

本章で検討の対象とするブロック状岩石試料の採取条件を以下に記す.

- ・採取場所:幌延深地層研究センター地下施設坑道内
- ・試料形状:ブロック状
- •試料寸法:1m×1m×1m 程度
- ・試料性状:自然亀裂を含む

4.1.2. サンプリング技術の抽出

(1) ワイヤーソー切断技術(ラインドリリング併用)

本技術は、ワイヤーソー切断とラインドリリングにより、表面からしかアクセスできない壁面および床面等から大型ブロックを採取する技術である. 図 4.1-1 に示すように、試料の周囲をラインドリリングにより切断し、底面をワイヤーソーにより切断することにより、ブロック状の試料を採取することが可能である.

このラインドリリングを併用したワイヤーソー切断技術は原子力機構の既存施設の解体工事への適用 実績を有する.同工事では,床盤の鉄筋コンクリートを対象とし,ラインドリリング,ワイヤーソー切断ともに 無水削孔,無水切断を実施している.無水条件に対する補助対策として,エア冷却,粉塵吸引が行われ ている.適用サイズは,1.0 m~1.5 m 程度である.



図 4.1-1 ワイヤーソー切断技術 (ラインドリリング併用)の概要

(2) ワイヤーソー切断技術(ボーリング4孔併用)(特許第3178560号,特許第3730690号)

(1)と同様に、ワイヤーソー切断とボーリング削孔により、壁面および床面等から大型ブロックを採取す る技術である.(1)との大きな違いは、試料の周囲の切断にラインドリリングを使用せず、ブロック 4 隅のボ ーリング孔を切り口として、全ての面をワイヤーソーにより連続的に切断する点である。施工時間の掛かる ラインドリリングを行わないため、(1)よりも工期の面で有利であると考えられる。図 4.1-2 に技術の概要を 示す.図のような連続切断を行うためには、ワイヤーの角度を切断面に応じて変更する必要があることか ら、ワイヤーの角度変化に追随できるような角度可変プーリー(図 4.1-3)を使用する.また、可変プーリ ーの大きさは、200 mm 程度であるため、これを設置するボーリング孔は、Φ300 mm 程度の通常のライ ンドリリングよりも大口径の削孔が必要となる.







図 4.1-3 可変プーリー

4.1.3. 幌延サイトへの適用性と技術的課題

以下に, 4.1.2 節に示したサンプリング技術について, 幌延サイトへの適用性と適用に向けた技術的な 課題を挙げる.

① 軟質試料への適用性

ワイヤーソー切断技術は、構造物の解体を対象として開発された技術であり、切断の対象は、主に 鉄筋コンクリートである.そのため、比較的軟質な幌延地域の堆積岩への適用性については充分に検 討する必要がある.特に、亀裂が集中し、試料の自立性が確保できないような箇所では、ボーリング削 孔や切断の衝撃により、試料が崩壊する恐れがある他、切断後の試料の搬出にも困難を生じる可能 性がある.したがって、ワイヤーソー切断技術の適用に際しては、試料が崩壊せずに自立できる状態 を維持することが前提条件として考えられる.

2 亀裂面の固定

試料は,採取の前後に自然亀裂を対象とした水理,物質移行試験に使用されることから,対象とした た亀裂の性状を保持した状態で採取することが望ましい. 亀裂を含む岩石試料のサンプリングにワイ ヤーソー切断技術を適用する場合は,削孔,切断,搬出に際して,補助的な対策を検討しておく必要 がある.

③ 防爆対策

幌延深地層研究所は、メタンガスを主成分とする可燃性ガスが賦存する環境であるため、坑道内で の作業の際は、防爆対策を実施する必要がある.

④ 保存方法

幌延サイトの堆積岩は、粘土分は少ないものの、乾燥収縮等による試料の崩壊が懸念される.また、 試料採取から試験実施まで、試料の長期保存が必要となる場合は、酸化防止等の対策を検討してお く必要がある.

4.1.4. 課題を考慮した採取方法の提案

上記の課題を考慮したワイヤーソー切断によるブロック採取方法を以下に提案する.

図 4.1-4, 図 4.1-5 に採取方法の概要を示す.本採取方法は, 主に 4.1.3 節で挙げた課題②に対す る対応策を含んだ方法であり, 基本的に自立性を確保可能な箇所を対象とし, 換気, 送風等により防爆 対策を施した状態で実施することを想定している.本採取方法の基本的な考え方は, 対象とするブロック をラインドリリングで切断し, 試料の崩壊防止のために, 周囲をモルタル等により固定する. その固定した 範囲よりよりもやや大きな範囲をワイヤーソーで切断の上, モルタル等による固定部に搬出用アンカー等 を設置する方法である. この方法により, 対象とするブロックを痛めることなく, 採取することが可能となる. 図 4.1-4 は坑道底盤から鉛直方向に, 図 4.1-5 は坑道壁面から水平方向にブロック試料を採取する方 法を示している. 以下に, 底盤からの採取方法と壁面からの採取方法に分けて, それぞれ具体的な採取 手順を示す. 【底盤から採取する場合】

- ① 亀裂の位置, 試料の自立性などを考慮し, ブロックの採取範囲を決定する.
- ② 対象とするブロックの周囲をラインドリリングにより切断する.
- ③ ラインドリリングを実施した箇所のブロックと周辺岩盤の間にモルタルを打設する(必要に応じて鉄 筋金網等を設置する).
- ⑥ 対象ブロック外側にワイヤーソー切断の切り口となるボーリング孔(4本)を削孔する.なお、ボーリング孔は、孔底にプーリーを設置する関係上、ラインドリリングよりも口径が大きい(Φ300 mm 程度).
- ⑦ 外側領域をワイヤーソーにより切断する.
- ⑧ 外側領域の四隅に搬出用アンカーを設置し搬出する.
- ※ ただし,外側領域のワイヤーソー切断方法(ボーリング孔 4 本併用)は,適用実績がないため,事 前に検証実験等を行う必要がある.



図 4.1-4 ブロック試料採取方法案の概要(底盤から採取する場合)

【壁面から採取する場合】

- ① 亀裂の位置, 試料の自立性などを考慮し, ブロックの採取範囲を決定する.
- ② 対象とするブロックの底面をラインドリリングにより切断する.この時,底面の幅よりも広い範囲を切断する.
- ③ ラインドリリングを実施した箇所のブロックと周辺岩盤の間にモルタルを打設する.この時,後の解体を考慮して,テフロンシート等を設置する.
- ④ 対象ブロックの側面,上面をラインドリリングにより切断する.
- ⑤ 底面と同様に、ラインドリリングを実施した箇所にモルタルを打設する.
- ⑥ 対象ブロック外側の両肩部にワイヤーソー切断の切り口となるボーリング孔(Φ300 mm 程度, 4本) を削孔する.
- ⑦ 外側領域をワイヤーソーにより切断する.
- ⑧ 外側領域の四隅に搬出用アンカーを設置し搬出する.

※ ただし,外側領域のワイヤーソー切断方法(ボーリング孔 4 本併用)は,適用実績がないため,事前に検証実験等を行う必要がある.



図 4.1-5 ブロック試料採取方法案の概要(壁面から採取する場合)

4.2. ブロック状の岩石試料を用いた透水トレーサー試験方法

ブロックスケールを対象とした透水,トレーサー試験(原位置試験,室内試験)は,基本的に以下の手順で実施されるものと考えられる.

- ① 対象亀裂の選定
- ② 亀裂の確認(ボーリング削孔)
- ③ パッカー設置
- ④ 孔間透水,トレーサー試験(原位置試験)
- ⑤ ブロック採取(上記 4.1 で提案した手法を適用)
- ⑥ 室内透水,トレーサー試験(室内試験)

4.2.1. 原位置透水トレーサー試験方法

上記①~④の亀裂の選定から原位置での孔間透水,トレーサー試験までの方法について提案する. 図 4.2-1 および図 4.2-2 に試験の概要を示す.本試験法は,坑道壁面に露頭する亀裂から比較的傾 斜角度が低角で(壁面から実施する場合は高角),かつ底盤(もしくは壁面)に対して低角に交差する亀 裂を試験対象として抽出し,対象亀裂を含む 2 本のボーリング孔間において,透水試験,トレーサー試 験を実施するものである.ボーリングの位置は,亀裂方位からボーリング坑内の亀裂の出現深度を推定し, 亀裂が,採取するブロックの中央付近に位置するように決定する.なお,ここで使用するボーリング孔は, 後のブロック採取時のラインドリリングの一部を兼ねる(図 4.2-3).

透水試験およびトレーサー試験時の通水は,注入した水(もしくはトレーサー溶液)が,坑道壁面側へ 流出することを防ぐため,亀裂位置が壁面より遠方で交差しているボーリング孔から注入し,壁面に近い 方のボーリング孔へ排出するような通水方向が望ましい.また,孔間距離は,ブロック試料のスケールに 従い1m程度とする.



断面図(拡大図)

図 4.2-1 原位置孔間透水,トレーサー試験方法の概要(底盤から実施する場合)



ブロック採取範囲





図 4.2-2 原位置孔間透水,トレーサー試験方法の概要(壁面から実施する場合)



4.2.2. 室内透水トレーサー試験方法

(1) 試験の目的

室内透水トレーサー試験の目的を以下に示す.

- ① 自然亀裂を対象とした亀裂の透水量係数,物質移行開口幅,分散長の取得
- ② マトリクス拡散による遅延効果の評価
- ③トレーサー試験時のマトリクス部の水圧分布、トレーサー濃度分布の確認
- ④ スケール効果の確認(これまでの室内試験では、数 cm~数+ cm)

ブロック試料を対象とした室内透水トレーサー試験では、コア試料を対象とした試験と同様に、亀裂内の水理、物質移行パラメータの取得や、マトリクス拡散による遅延効果の評価を行うとともに、コア試料を対象とした試験結果との比較により、亀裂面内やマトリクス部の不均質性に起因する各パラメータのスケール依存性について確認を行う.スケール依存性の確認は、今後の原位置トレーサー試験の計画やサイト周辺の物質移行評価において重要な知見となる.また、試験スケールを大きくすることにより、コア試験では不可能であった、試験中のマトリクス内の水圧分布やトレーサー濃度分布のモニタリングも可能となると考えられる.マトリクス内のモニタリングデータは、試験結果の評価に用いる解析モデルの検証などに活用できるものと考えられる.

以下に,ブロック試料を対象とした試験方法の概念について整理するとともに,上記の目的を達成する ために必要な検討項目についてまとめる.

(2) 室内トレーサー試験方法の概念

亀裂を有する岩石試料を対象とした室内トレーサー試験は、対象とする亀裂にトレーサー溶液を注入 し、亀裂内を通過して排出されるトレーサー溶液の濃度の時間変化から亀裂の物質移行パラメータを取 得する試験である. 試験方法は、試料の形状や試験条件などの違いはあるが、大きく図 4.2-4 および図 4.2-5 に示すような2種類の方法に分けられる. 図 4.2-4 は、トレーサー溶液の注入および排出された溶 液の濃度測定点までの輸送に配管を伴う試験方法で、室内トレーサー試験では、最も一般的な試験方 法である. 図 4.2-5 は、トレーサーの注入や濃度測定点までの輸送に配管を伴わない試験方法で、前 章のコア試料を対象としたトレーサー試験で採用している試験方法である. 同試験方法は、配管内分散 が生じないため,極微少流量条件下での試験に適した試験方法である.また,前者は,排出された溶液 濃度を直接測定するが,後者は,排出された溶液をタンクに貯留し,タンク内の累積トレーサー濃度を測 定する方法である.以下に,各試験方法について,必要な検討項目を挙げる.

(3) ブロック試料を対象としたトレーサー試験における留意点

亀裂からマトリクスへの拡散現象は, 亀裂内の移流に比べて非常に遅い現象であると考えられる. その ため, マトリクス拡散による遅延効果を精度良く評価するためには, 亀裂内の移流速度を可能な限り遅く する必要がある. このことに留意して, 上記の 2 種類の各試験方法について, 検討すべき項目を以下に まとめる.

配管を用いた試験方法

・トレーサー注入ポンプの選択

極低流量条件での試験を実施する場合,水頭差の制御が困難であることから,定水頭条件での 試験は望めない可能性が高い.したがって,極低流量かつ一定流量での連続送液が可能な高性 能ポンプが必要となる.

配管内分散の影響

極低流量条件での試験を実施する場合, 試料から排出された溶液が濃度測定センサーに達する までの時間遅れと, その間に生じる配管内分散が試験精度に大きな影響を与える可能性がある. こ れには, 図 4.2-6 に示すように, 排出口にフラッシング機構を設けることや, 濃度測定点を可能な限 り排出点に近づけるなどの対策が考えられる. ただし, フラッシングを行う場合は, フラッシングによる 希釈の影響を受けるため, 予備解析等により, 適切なフラッシング流量を設定することや, 試験中の 流量制御などについても検討が必要となる.

初期条件の制御

極低流量条件での試験を実施する場合,トレーサー注入開始前の細かい初期条件の違いが,測 定精度に与える影響が,高流量条件の場合に比べて大きくなる可能性がある.特に,試験開始前 の注入側スリット内のトレーサー溶液への入替え方法については,検討が必要である.

・ 濃度センサーの精度

極低流量条件での試験を実施する場合,排出されるトレーサー溶液の濃度上昇は,非常に緩や かとなる可能性が高い.また,破過曲線の立ち上り付近は,亀裂内の分散特性の評価において,非 常に重要となるため,濃度センサーは,低濃度領域の測定精度が高いものを採用することが望ましい.

・トレーサー濃度の影響と注入方向

極低流量条件での試験を実施する場合,水とトレーサー溶液の密度差により,トレーサー溶液が 亀裂内を均質に流れない可能性がある(重力の影響を受け, 亀裂低部のみを流れる可能性がある). トレーサー溶液は, 試験条件や濃度センサーの精度を考慮しつつ,可能な限り低濃度(低密度)と する必要がある.また, 注入方向についても, 試験条件の許す範囲で, 可能な限り鉛直上向きとす ることが望ましい.

・試料の飽和および装置内の残留エアの影響

極低流量条件での試験を実施する場合,試料内や試験装置内に残留した微細な気泡が,試料 内のトレーサー溶液の流れに与える影響が,高流量条件の場合に比べて相対的に大きくなる可能 性がある.試験計画の立案に際しては,試料の飽和や装置内のエア抜きの方法を含めた検討が必 要である.

- ② 配管を用いない試験方法
 - ・トレーサー注入ポンプの選択

上記の配管を用いる試験方法と同様.

初期条件の制御

極低流量条件での試験を実施する場合,トレーサー注入開始前の初期条件の違いによる測定精度への影響が,高流量条件の場合に比べて大きくなる可能性がある.トレーサー注入開始前は, 亀裂内のトレーサー濃度を零とする必要がある. 極低流量条件での試験を実施する場合,トレーサー注入開始前に, 亀裂内にトレーサーが浸入し, 亀裂内のトレーサー濃度が上昇すると, 測定結果に大きな影響を与える可能性が高い. したがって, 特に, 試験開始前の注入側タンク内のトレーサー 溶液への入替え方法については, 検討が必要である.

• 濃度センサーの精度

上記の配管を用いる試験方法と同様.

・トレーサー濃度の影響と亀裂の配置

トレーサー濃度については、配管を用いる試験方法と同様に、トレーサー溶液の密度を考慮し、 可能な限り低濃度(低密度)とする必要がある.また、注入方向は、試験装置の構造上、水平方向と なる.したがって、亀裂の配置は、試験条件の許す範囲で、可能な限り水平とすることが望ましい.

・試料の飽和および装置内の残留エアの影響

上記の配管を用いる試験方法と同様.

・ 排出側タンク(濃度測定タンク)の容積と攪拌方法

本試験方法は、試料から排出されたトレーサー溶液を排出側タンクに貯留し、タンク内の累積濃度の変化を測定するため、排出側タンクの容量が大き過ぎると、タンク内でのトレーサー濃度の希釈の影響により、測定精度が大きく低下する可能性がある。そのため、排出側タンクの容積は、試料の大きさや試験条件等の許す範囲で、可能な限り小さくする必要がある。また、試料から排出されたトレーサー溶液は、排出側タンク内で瞬時に混合し、タンク内の溶液濃度を常に均質にする必要がある。そのため、スターラーによる攪拌などの対策を検討する必要がある。

- ③ 共通の検討項目
- ・トレーサー物質の選択

幌延サイトは、地下水中に塩分を多く含むため、非収着性トレーサーとして、よく用いられる塩化物イオンは使用できない.トレーサー物質の選択には、同サイトの間隙水の分析結果などを確認の上、地下水中に多く含まれない物質を選択する必要がある.

・ 繰り返し試験の実施について

一度、トレーサー試験を実施すると、トレーサー溶液がマトリクス内に拡散する.特に、長期に渡る 試験を実施した場合は、マトリクス内に拡散したトレーサー溶液を洗い出すには、その何倍もの期間 に渡って試料の洗浄を実施する必要がある.したがって、一つの試料で繰り返し試験を実施するこ とは、基本的に困難である.



図 4.2-4 ブロック試料を対象としたトレーサー試験方法の概要(配管を用いた試験方法)



図 4.2-5 ブロック試料を対象としたトレーサー試験方法の概要(配管を用いない試験方法)



図 4.2-6 配管内分散の影響を考慮した試験方法(フラッシング機構の追加)

4.3. 今後の予定

本章では、ブロックスケールのトレーサー試験の実施に向け、特に、試料の採取方法と原位置および 室内における透水トレーサー試験方法について、既存の手法の整理と検討すべき課題について整理し た.課題を考慮した試料採取方法や試験方法の概念を示した.今後は、幌延サイトで取得された既存デ ータを参考に、同サイトの特徴を考慮した、より具体的な方法の検討を行う.また、トレーサー試験方法に ついては、既存データを用いた予察的な解析を実施し、必要な試験手法や試験条件などの最適化につ いて検討を行う. 5. 地上からの調査データに基づく水理地質構造モデルの不確実性低減方法の検討

水理地質構造モデルについて,北海道幌延町で地上からの調査データを利用して不確実性の低減 方法を検討した.

不確実性低減のために, 圧力データ以外の情報の使用について, 幾つかの例を通して検討した. 最初のモデルは, 表層の地質と限られた数のボアホールからの情報を用いて作成した. 圧力の逆解析は, 低透水性キャップ・ロックの存在を考慮して行った. 続いて涵養率の見積りでは, 温泉の温度データと河川の流量データを使用した. ここで推定された涵養率は, 基本モデルの透水性を全体を通して1桁大きく設定した原型モデルよりも, 10倍ほど大きくなった. 次に, 塩水の洗い出し過程を解析し, ボアホールからの塩濃度データと比較した. 塩濃度については, モデル全体に高い透水性を仮定するよりも, 断層帯が高い透水性をもつと仮定した場合に, 整合性が高いことが示された. 小さいスケールについては, 1次元の解析を行い, 2 つのボアホールからの温度, 圧力, および密度特性について一致が得られた. この結果から, 2 つのボアホール間に, 低透水性の断層が存在する可能性が考えられたので, 断層を横断する概念的な水理モデルを提案した.

水理地質構造モデルにおける熱や塩の移行など付加的な現象の導入は、パラメータの追加を必要と し、また事実上、不確実性を増加させると考えられる。例えば、普通の水理学的パラメータに加えて、熱 伝導率と熱流東データが必要とされる。初期の塩濃度分布が不明なため、解析モデルでは、現代の北 海道の隆起と地層形成が瞬時に起きたと仮定している。しかしながら、解析モデルが圧力データに加え て温度と塩濃度分布データに上手く合っていれば、解析モデルは、小規模の観測を単に展開したり推定 してモデルを作るよりも信頼できるであろうと考えられる。これは圧力、温度、および塩濃度分布データが、 自然界においては大きなスケールで長い時間をかけて平均化される過程を反映しているためである。し たがって、幌延において大きなスケールで水理地質構造的な過程の理解を高める必要があると考えられ ます。

以上を取りまとめて TOUGH Symposium 2009 で報告した[付録参照].

6. まとめ

以下,本件で明らかになったことをまとめる.

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-340.00 m~342.00 m 地点において採取した 稚内層試料を用いて, 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った.

(1) 透水性

① マトリクス部の透水係数は、1.11×10⁻¹² (m/s)であった.

② これまでの同深度付近の稚内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は, 1.79×10⁻¹¹ (m²/s)であり, 既往の稚内層試料を対象とした試験 結果とほぼ同等の値となった.

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 による解析結果との比較から,分散長として,0.005 (m)が得られた.この結果は,従来から指摘されている分散長とスケールの関係と一致している.

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 0.052 mm 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√T~三乗則の間で直線的な関係にある.

6.2. ブロックスケールトレーサー試験方法の検討

数十 cm~1m 程度のブロックスケールを対象とした室内試験方法について,下記の 2 つの項目について検討を行った.

①ブロック状の岩石試料の採取方法

ブロック状の岩石試料の採取に適用可能な既存技術として,ワイヤーソー切断技術を挙げ,これを 幌延サイトの堆積岩に適用する際の課題を抽出した.また,同技術を用いた具体的な採取方法を提案 した.

② ブロック状の岩石試料を用いたトレーサー試験方法

対象亀裂の選定から選定した亀裂を対象とした原位置および室内トレーサー試験までの一連の手順を提案し,原位置および室内におけるトレーサー試験方法の概略について提案を行った.また,幌延サイトの堆積岩を対象とした場合の課題の抽出を行った.

6.3. 地上からの調査データに基づく水理地質構造モデルの不確実性低減方法の検討

堆積岩が分布する広域的なスケールでの地下水流動場を評価する手法開発の一環として、ボーリン グ孔沿いの温度分布や塩分濃度分布データなどの水圧データ以外のデータを用いた水理地質構造モ デルの推定手法について、これまでの既存の研究で実施された検討内容を整理するとともに、これらの データの有効性について取りまとめた.

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・物質移行データを室内試験により拡充するとともに, 今後, より大きなスケール(数+ cm~1m 程度)での室内試験を実施するための, 試料採取方法やトレーサー試験方法の検討を行った. また, 堆 積岩が分布する広域的なスケールでの地下水流動場を評価する手法開発の一環として, 水理地質構造 モデルの構築に有効なパラメータをリストアップするとともに, モデルの不確実性を把握, 低減するための 方法論を体系的に整理して取りまとめた.

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、ブロックスケールトレーサー試験方法の検討においては、ブロック 試料の採取方法として、既存のコンクリート構造物の解体技術であるワイヤーソー切断技術を抽出し、同 技術を幌延サイトの堆積岩に適応する際の課題について整理した.また、挙げられた課題を考慮した具 体的な試料採取の手順を提案した.また、さらに、ブロックスケールを対象とした原位置および室内トレー サー試験手法を提案するとともに、対象亀裂の選定から試験の実施までの一連の手順を提案した.

堆積岩が分布する広域的なスケールでの地下水流動場の評価検討については、ボーリング孔沿いの 温度分布や塩分濃度分布データなど、水圧データ以外のデータを用いて、水理地質構造モデルや境界 条件などを推定する方法について、これまでの既存の研究で実施された検討内容を整理するとともに、こ れらのデータの有効性について取りまとめた.

今後は、より大きなスケールでの室内試験に向けた試験方法の検討を継続して進め、これまで実施してきた数 cm スケールの岩石試料を対象とした室内試験結果のより大きなスケールへの適用性について検討するとともに、原位置試験データと相互補完する方法を検討していく.

参考文献

- R. Therrien, 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).
- 2) 地盤工学会編: "岩の調査と試験", 社団法人地盤工学会(1989).
- 3) 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.
- 4) 青木智幸,井尻裕二,下茂道人:"高精度トランジェ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.
- 5) 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 巻,第 2 号,pp.26-32, 1989.
- 6) 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 ーマトリクス 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.
- 7) 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).
- 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).
- 9) 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).
- 10) 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).
- 11) 下茂道人, 熊本創, 唐崎健二, 佐藤久, 澤田淳: "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, JAEA-Research 2008-101 (2009).
- 12) 恒松絹江, 立山博, 木村邦夫, 石橋修: "尿素のインターカレ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).
- 13) 青木智幸,井尻裕二,下茂道人: "高精度トランジェ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).
- 14) 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).
- 15) 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 (2003).
- 16) W. F. Brace, et al.: "Permeability of Granite under High Pressure", J. of Geophysical Research, Vol.73, No.6, pp.2225-2236 (1968)
- 17) P. A. Hsieh, 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).

- 18) 核燃料サイクル開発機構: "わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 -地層処分研究開発第2次取りまとめ-",分冊3 地層処分システムの安全評価,核燃料サイ クル開発機構, JNC TN1400 99-023 (1999).
- 19) R. Therrien, 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).
- 20) M. Shimo, H. Yamamoto, M. Uchida, A. Sawada, T. W. Doe, and Y. Takahara: "In-situ test on fluid flow and mass transport properties of fractured rocks", Proc.9th ISRM Congress, Vol.2, pp.1401-1404 (1999).

付録

"Uncertainty reduction of hydrologic models using data from surface-based investigation"

This manuscript has been authored by an author at Lawrence Berkeley National Laboratory under Contract No. DE-AC02-05CH11231 with the U.S. Department of Energy. The U.S. Government retains, and the publisher, by accepting the article for publication, acknowledges, that the U.S. Government retains a non-exclusive, paid-up, irrevocable, worldwide license to publish or reproduce the published form of this manuscript, or allow others to do so, for U.S. Government purposes.

PROCEEDINGS, TOUGH Symposium 2009 Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, September 14-16, 2009

UNCERTAINTY REDUCTION OF HYDROLOGIC MODELS USING DATA FROM SURFACE-BASED INVESTIGATION

Kenzi Karasaki¹, Kazumasa Ito², Yu-Shu Wu³, Michito Shimo⁴, Atsushi Sawada⁵, Keisuke Maekawa⁵ and Koichiro Hatanaka⁵

> ¹Lawrence Berkeley National Laboratory Berkeley, CA, 94720, USA kkarasaki@lbl.gov ²National Institute of Advanced Industrial Science and Technology ³Colorado School of Mines ⁴Taisei Corporation ⁵Japan Atomic Energy Agency

ABSTRACT

Geohydrologic model uncertainties include permeability, boundary, and initial conditions. We present some examples of using information other than pressure data to constrain a geohydrologic model. The initial model was constructed using information from surface geology and a few boreholes. Inversion analysis of pressure data implied the existence of a low-permeability cap rock. We then used river flow data and temperature data from a hot spring as a basis for estimating the recharge flux, which suggested that the overall permeability of the modeled area could be one order of magnitude larger than that of the base model. Next, we simulated a saltwater washout process and compared the simulated salinity distribution with the salinity data from a borehole. We found that a better match to the salinity data is obtained if the increase in permeability is taken up by the fault zone rather than uniformly by the entire model. A smaller-scale match to the temperature, pressure, and density profiles from two boreholes indicated that there was a lowpermeability fault in between the two boreholes.

1. INTRODUCTION

It is very difficult to characterize a large body of heterogeneous rock sufficiently, and to build a reliable groundwater flow model, particularly when the rock is fractured, which is most often the case. Available hydrological data are often limited and insufficient, both spatially and temporally. It is extremely challenging to scale-up detailed smallscale measurements and to predict and verify largescale behavior. Unless there is an underlying known property that extends over scales, measurements conducted at a certain scale can only be used to describe the processes at the same scale. Some geostatistical tools may be used to predict the range of the model outcome. However, the more heterogeneous the rock is, the larger the uncertainty becomes.

Building a geohydrologic model of a large area involves many uncertainties from various sources, from the conceptual model to the input parameters. Model uncertainties include material parameters such as permeability and porosity. Often overlooked are boundary conditions and initial conditions. The most important element of a reliable model is the correct conceptual understanding of the geohydrologic processes within the area, which comes only after a long progression of model building, with much trial and error. Although model uncertainties originating from different modeling approaches have been addressed (e.g., Ijiri et al., 2009), uncertainty studies applied to actual field sites are limited. Most numerical models have implicit limitations that may lead to uncertainties that are inconspicuous and are seldom discussed. Many numerical models do not consider all the physical processes involved, which may or may not be necessary. A complete THMC (thermal, hydrological, mechanical, and chemical) simulation is very challenging and a subject of intense research at present. There are multiple reasons for this, including the difficulty in estimating the initial conditions and specifying the constitutive equations (such as the porosity-permeability relationship) that are applicable at a practical scale, in addition to the scarcity of relevant data.

The conditions at the outer boundaries of numerical models need to be specified all around, although they are usually immeasurable in practice. Therefore, they are often chosen for the convenience of modeling. The surface boundary conditions are often set to be a constant flux condition. Observations that can be made in the field are often severely limited in type, space, and time. One type that can be relatively easily observed is pressure, which can involve uncertainties of its own, such as gauge drift and borehole shortcircuiting due to packer leak. To measure pressure at depth, we need to drill deep boreholes, which is very expensive. As a consequence, only a limited number of boreholes are drilled. Furthermore, the locations
where boreholes can be drilled are often limited for reasons such as physical accessibility.

Ideally, tests should be designed to directly stress the system at the scale of interest, so that the observed response is the result of the averaging of the inherent properties up to that scale. However, this is difficult if the scale is over a kilometer or more. Moreover, in a very active tectonic environment like that of Japan, faults exist ubiquitously, which greatly affect the hydrology around their vicinity. Correct characterization of large faults is crucial in building a reliable geohydrologic model.

Large-scale groundwater flow models are typically calibrated to the steady-state pressure head data. An inversion scheme can be used to search for optimum parameters. However, we rarely have enough head data, and furthermore, head data alone are not sufficient for building a reliable model. Therefore, it is very important to utilize all available relevant data to constrain model uncertainties. In this paper, we



Figure 1. Location of Horonobe Town (after Yamasaki et al., 2004)



Figure 2. Horonobe Town (top, the yellow area in Figure 1) and the Horonobe URL area (below, broken square). Also shown are the borehole locations and the geology (after Ota et al., 2007).

show a progressive model improvement, in which information other than pressure data, such as temperature and salinity data, are used to constrain a hydrologic model to help reduce uncertainties in the conceptualization of a large heterogeneous rock formation, using the data from the Horonobe Underground Research Laboratory in Japan during the ground-surface-based initial investigation phase.

2. HORONOBE SITE

The Japan Atomic Energy Agency (JAEA) is constructing an underground research laboratory (URL) in Horonobe Cho, Hokkaido (Figure 1), to study physical and chemical processes deep underground and to develop technologies that may be applied to future geologic disposal of high-level radioactive waste elsewhere in Japan (Ota et al., 2007). At the Horonobe URL, eleven deep boreholes (HDB-1to HDB-11) have been drilled, with depths ranging from 470 m to 1020 m (Figure 2). After various investigations, loggings, and pressure tests were conducted, each borehole was isolated by packers into several intervals, and the pressure was monitored.

<u>3. GEOHYDROLOGIC MODEL</u>

Groundwater in the Horobobe area in general is expected to flow from the higher hills in the east to the Japan Sea in the west. Based on the information obtained from early boreholes, geologic, and geophysical surveys, Imai et al. (2002) constructed a hydrogeologic model of the Horonobe area. The original mesh of Imai et al.'s model was in a finite element model (FEM) format, which was converted to that of integrated finite difference (IFDM) for simulations using TOUGH2 (Pruess et al., 1999). Figure 3 shows the geohydrological model used for the simulations. Heads observed in the boreholes show an increase with depth, which can be caused by several sources, including the topography, geostatic load or gas generation. The initial version of the Imai et al. model shown in Figure 3 failed to reproduce the observed head data.

3.1 Static head inversion

Ito et al. (2004) attempted to assess whether the topography and permeability structure alone can explain the high heads at depth, by changing the input permeabilities. To match model predictions to observed data, modelers often employ a trial and error approach, in which forward model runs are repeated numerous times by adjusting input



Figure 3. Numerical grid (top), EW (left) and NS (right) cross section of the geohydrological model of the Horonobe area showing the borehole locations, surface elevation (top plot), and geological formations (bottom plots). The model is 40km×40km×5km centered on the Horonobe URL area shown in Figure 2.

parameters. This approach is often useful, because it gives the modeler insights into which parameters are more important relative to one another. However, it is often very tedious and difficult to conduct in a systematic manner. Ito et al. (2004) used iTOUGH2 (Finsterle, 1998; 2008), which solves the inverse problem by automatically calibrating a TOUGH2 model against observed data.

By assuming the existence of a low-permeability cap rock, Ito et al. (2004) showed that the high heads at depth can be explained. They also examined the influence of fault properties on the observed data. In one model, the fault is assumed to have a sandwich structure, with a low-permeability core and highpermeability damaged zones on both sides. In another model, the fault was assumed to be a simple lowpermeability structure (base case). The head at greater depth diverged between the two fault models



Figure 4. Head inversion results for two different structures of fault

(Figure 4). Because there were no data available from the depth, the results were inconclusive regarding the structure of the fault. Table 1 shows the calibrated values of permeabilities, which we call the base case.

3.2 Use of River Flow Data

One of the important but very difficult parameters to estimate for a geohydrologic model is the surface boundary condition. This is especially true when the model area is very large, i.e., several tens of square kilometers. One approach is to use river flow data, if there is a river that runs across the area of interest, preferably forming a basin. Ito et al. (2004) used the data from the Teshio River, which flows from east to west within the modeled area, to estimate the recharge rate, by taking the difference of the average monthly flow rate between two measurement locations that are approximately at the east and west end of the area.

| Geological Period | Epoch | Model Units | Hydraulic Conductivity (m/s) |
|----------------------|----------|-----------------------|------------------------------------|
| | | Surface | 2.0E-06 |
| Quatenery | | Quaternery Sediments | 1.0E-06 |
| | Pliocene | Yuuchi F. | 1.0E-07 |
| | Miocene | Low permeability zone | 6.3E-11 |
| Neogene | | Koetoi F. | 1.0E-09 |
| | | Wakkanai F. | 1.0E-10 |
| | | Masuhoro F. | 5.0E-10 |
| Cretaceous | | Cretaceous rock | 1.0E-11 |
| F . 10 | | Oomagari Fault core | 1.0E-10 |
| raults | | Nukanan Fault core | 1.0E-10 |

Table 1. Permeability values of the base case

Figure 5 shows the calculated difference between the two locations for flow rates less than 50 m³/s, which is assumed to be the maximum base flow rate. Based on the figure, the flow-rate difference is approximately 5 m³/s, considered to be closely related to the recharge rate in the area. However, note that the variance is very large; thus, it should only be considered as approximate. The 5 m³/s recharge rate for the area translates to roughly 80 mm/year of recharge for the entire area. Using data from much smaller sub-basins in the area, Kurikami et al. (2008) estimated the recharge rate to be from 64 mm/year to 283 mm/year, or approximately from 5% to 20% of the annual average rainfall of 1,400 mm/year.



Figure 5. Flow-rate difference between two points of the Teshio River. Broken lines indicate one standard deviation.

The model calibrated to the measured heads described in the previous section calculates only 8 mm/year of recharge. Calibration to head values alone is only sensitive to the relative contrast (ratio) of the permeability of each layer and not to the absolute values of permeability. Therefore, permeability values can be multiplied by a constant value for all layers and still maintain the same goodness of fit for the steady-state head analysis.

3.3 Hot Spring Data

Adjacent to the north of Horonobe Town is Toyotomi Onsen, a hot spring (see Figure 2). Hot spring water has been produced since the 1920s from a depth of ~800–900 m. The water temperature is reportedly around 42°C (Toyotomi Onsen, 2009). We use TOUGH2 with the EOS3 module to simulate coupled heat and fluid flow. The bottom boundary condition is set at a constant heat flux of 20 mW/m² with no fluid flow. The top boundary condition is set at atmospheric pressure with 10°C, the annual average temperature of the area.

Figure 6 shows a comparison of the steady-state temperature profiles when the permeability of each layer in the model is multiplied by a constant value. Also shown in the figure is the approximate depth and temperature of the hot-water production zone for the hot spring (double-headed arrow). As can be seen from the figure, the case with ten to twenty times the permeability of the base-case model matches the temperature of the production zone best.



Figure 6. Modeled temperature profile at Toyotomi Hot Spring for various permeability multipliers. The arrow indicates approximate temperature and depth of the source of Tovotomi Hot Spring.

3.4 Use of Salinity Data

Salinity distribution in groundwater may yield some clues as to how the groundwater has evolved. Highsalinity water is encountered at depths in HDB boreholes. It is believed that the study area was once under the sea before it rose to its present state. The land mass was initially saturated with saltwater, but as a result of rainfall, which recharges fresh water into the ground, the saltwater has been gradually washed out, particularly near the surface. We model the saltwater washout process by using TOUGH2 with the EOS7 module to simulate nonisothermal, density-driven, single-phase flow. As the initial condition for the salt concentration, we assume that the entire model is saturated with seawater (3.2% salt concentration). By setting the top boundary condition at atmospheric, recharge of fresh water takes place from the surface. The boundary conditions are much the same as in the previous case, with the strength and pattern of freshwater recharge a function of permeability and topography.

Figure 7 shows the simulation results after 2.5 Ma: (a) the case with 10 times larger permeability than the base case, and (b) the case in which the permeability of the fault zone is 100 times larger than the base case, while the rest of the permeabilities are kept the same as the base case. The latter still allows a similar amount of total recharge (~50 mm/year), but the flow is localized to the fault zone. The high-permeability fault model is consistent with the finding by Ishii et al. (2006), who suggested deep intrusions of fresh water along the Omagari Fault based on the AMT (audio-frequency magnetotelluric) surveys.

| - | 0.03 |
|---|-------|
| | 0.025 |
| | 0.02 |
| | 0.015 |
| | 0.01 |
| | 0.005 |

(b)

Figure 7. Salt concentration distribution after 2.5 Ma for the cases: (a) ten times the base case permeability, and (b) high permeability fault. Fresh water intrudes deeply along the faults.

(a)

Figure 8 shows a comparison of the salt concentration and the temperature data from HDB-1 with the simulation results. It should be noted that the data were collected shortly after the drilling and may not reflect true *in situ* conditions. The model with 10 times larger permeability than the base case matches reasonably well with the temperature data after 2.5 Ma, but does poorly against the salt concentration data. The permeability appears to be too large, and the freshwater washes out the salt too quickly. The high-permeability-fault case matches reasonably well with the temperature and salt concentration data. Note that 2.5 Ma is approximately the age of the study area.



Figure 8. Saltwater washout simulation results. Markers denote measured data along HDB-1. Blue colored lines are for the case with 10 times the base permeability. Red lines are for the high permeability fault case.

4. FAULT ZONE CHARACTERIZATION

Geothermal gradients or temperature profiles are very sensitive to, and thus useful in, estimating water percolation fluxes in the subsurface (e.g., Wu et al. 2004; 2007). In particular, temperature profiles near a fault are often used to assess fault properties (Fairley and Hinds, 2004a, 2004b; Heffner and Fairley, 2006; Doan, 2007). Wu and Karasaki (2009) used the measured temperature data to estimate both flow rate and flow directions in two HDB boreholes at Horonobe (Figure 1). It is suspected that a fault or a set of faults exist at the Horonobe site, one of which is the Omagari Fault as shown in Figure 3. The HDB boreholes at the site are packed off into several monitoring intervals using packers. Pressure and temperature are monitored in each interval. Figure 9 shows the temperature profiles along the HDB boreholes. As the figure shows, the temperature profile along HDB-7 is different from that of other boreholes-slightly concave upward, generally indicating colder groundwater flowing downward. The other profiles are all concave downward, indicating that warm groundwater may be flowing upward.



Figure 9. Temperature profile along HDB boreholes. The blue line is the temperature profile along HDB-7.

Wu and Karasaki (2009) used the TOUGH2 code with the modified EOS3 module to simulate nonisothermal flow of single-phase water with density dependence on mineral compositions, in addition to pressure and temperature in the two wells, HDB-7 and HDB-8. For each layer, the most recent permeability value based on borehole tests was used. The basic assumption was that the system is at steady-state conditions for water flow, solute transport, and heat flow. Aqueous mineral concentration distribution was assumed at steady state as a function of depth only for each well. The water density is correlated to mineral compositions by extrapolating and interpolating the measured mineral compositional data from the two wells, and its dependence on pressure and temperature.

Figure 10 shows the simulated temperature profile. A downward flow of 3 mm/year matches the HDB-7 data, and an upward flow of 6 mm/year matches HDB-8 data. Note that the two wells, HDB-7 and HDB-8, are close to each other, with HDB-8 further inland. Head values in HDB-8 are ~10 m higher than those in HDB-7. Comparing the simulation results with the data indicates different flow directions, i.e., flow at HDB-8 is upwards (discharge) and flow at HDB-7 is downwards (recharge). This finding indicates a likely fault separating the two boreholes, with the fault behaving as a closed boundary or lowpermeability barrier to flow across it. Figure 11 shows a conceptual model of groundwater flow crossing a fault zone. A similar model was proposed by Bense and Kooi (2004) for Peel Boundary Fault in The Netherlands. The Figure 11 model most likely applies to the Omagari Fault zone: upward flow along the damage zone east of the fault (HDB-8) and downward flow along the damage zone to the west



Figure 10. Simulated temperature profile along HDB-7(top) and HDB-8(bottom) for various downward (top) and upward (bottom) flow rates



Figure 11. Conceptual model of fault zone flow

(HDB-7)—and overall higher head in HDB-8 than in HDB-7.

5. SUMMARY AND DISCUSSION

In this paper, we presented (through some examples) the use of information other than pressure data to constrain a geohydrologic model. The initial model was constructed using information on surface geology and from a limited number of boreholes. The inversion analysis of pressure implied the existence of a low-permeability cap rock. We then used river flow data and temperature data from a hot spring for estimating the recharge rate. The estimated recharge rate was ten times larger than the original model had calculated, which suggested that the overall permeability of the model may be one order of magnitude larger than that of the base model. Next, we simulated the saltwater washout process and compared it with salinity data from a borehole. We found that a better match to the salinity data is obtained if the increase in permeability were taken up by the fault zone rather than assigning larger permeability uniformly to the entire model. At a smaller scale, we conducted a 1D simulation and matched the temperature, pressure, and density profiles from two boreholes. We found that there may be a low-permeability fault in between the two boreholes. A conceptual flow model across a fault is proposed. Table 2 summarizes the model evolution.

Inclusion of additional processes in a geohydrologic model, such as heat and salt transport, requires additional parameters and may actually increase uncertainty. For example, heat-conductivity and heatflux data are needed, in addition to the usual hydrologic parameters. Although the initial saltwater distribution is unknown, the model assumes that the rise and formation of the present-day Hokkaido Island happened instantaneously. However, when a model successfully matches temperature and salinity data in addition to pressure data, the model may be deemed more reliable than a model constructed by simply extrapolating or upscaling small-scale observations. This is because pressure, temperature, and salinity data reflect the results of the natural averaging process that takes place at a large scale and over a long time duration. Thus, we believe that we now have more enhanced understanding of the largescale geohydrologic processes at the Horonobe Site.

| Section | Data Used | Processes | Findings |
|---------|---|--|---|
| No. | (Additional) | Modeled | |
| 3.1 | Hydraulic head | Groundwater flow | Low permeability layer |
| 3.2 | River flow | Groundwater | Larger |
| | rate | flow | recharge rate |
| 3.3 | Hot spring data | Groundwater and heat flow | 10× larger overall permeability |
| 3.4 | Fluid salinity, | Groundwater, | Localized fault |
| | temperature | brine, and | zone |
| | profiles | heat flow | permeability |
| 4 | Pressure, temperature, salinity profiles | Groundwater flow, heat, mineral composition | Flow direction and flux in fault zone |

Table 2. Summary of geohydrologic model evolution

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Japan Atomic Energy Agency (JAEA) and performed under the US Department of Energy Contract #DE-AC02-05CH11231. The authors would like to thank Dr. Christine Doughty of LBNL and Dr. Kaname Miyahara of JAEA for their kind and constructive review.

REFERENCES

- 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.
- Doan, M. L., and F. H. Cornet, Thermal anomaly near the Aigio fault, Gulf of Corinth, Greece, maybe due to convection below the fault, Geophys. Res. Lett., 34, L06314, doi:10.1029/2006GL028931, 2007.
- Fairley, Jerry P. and Jennifer J. Hinds, Field observation of fluid circulation patterns in a normal fault system, Geophysical Research

Letters, Vol. 31, L19502, doi:10.1029/2004GL020812, 2004a.

- Fairley, Jerry P. and Jennifer J. Hinds, Rapid transport pathways for geothermal fluids in an active Great Basin fault zone, Geology, Vol. 32, No. 9, 825-828, 2004b.
- Finsterle, S., http://www-esd.lbl.gov/iTOUGH2, 2008.
- Finsterle, S., and J. Najita, (1998): Robust Estimation of Hydrogeologic Model Parameters, Water Resources Research, Vol.34(11), pp.2939-2947.
- Heffner, James and Jerry Fairley, Using surface characteristics to infer the permeability structure of an active fault zone, Sedimentary Geology 184, 255–265, 2006.
- Imai, H., N. Maeda, I. Shiozaki, K. Amamiya, and M. Chijimatsu, Groundwater flow analysis for the Horonobe Underground Rock Laboratory Project, JNC Report, JNC TJ1410 2002-004, 2002
- Ishii, E., K. Yasue, T. Tanaka, R. Tsukuwi, K. Matsuo, K. Sugiyama, and S. Matsuo, Threedimensional distribution and hydrogeological properties of the Omagari Fault in the Horonobe area, northern Hokkaido, Japan, Journal of the Geological Society of Japan, 112(5), 2006.
- Ito, K., K. Karasaki, K. Hatanaka and M. Uchida, Hydrogeological Characterization of Sedimentary Rocks with Numerical Inversion using Vertical Hydraulic Head Distribution : An Application to Horonobe Site, Journal of the Japan Society of Engineering Geology, 45(3), 125-134, 2004.
- Kurikami, H., R. Takeuchi and S. Yabuuchi, Scale effect and heterogeneity of hydraulic conductivity of sedimentary rocks at Horonobe URL site, Physics and Chemistry of the Earth, 33, 2008.
- Kurikami, H., R. Takeuchi, S. Yabuuchi, S. Seno, G. Tomura, K. Shibano, M. Hara and T. Kunimaru, Hydrological investigations of surface-based investigation phase of Horonobe URL Project, Journal of the Japan Society of Civil Engineers C, 64(3), 2008.
- Ota, K., H. Abe, T. Yamaguchi, T. Kunimaru, E. Ishii, H. Kurikami, G. Tomura, K. Shibano, K. Hama, H. Matsui, T. Niizato, K. Takahashi, S. Niunoya, H. Ohara, K. Asamori, H. Morioka, H. Fukai, N. Shigeta and T. Fukushima, Horonobe Underground Research Laboratory Project Synthesis of Phase I Investigations 2001 – 2005,

Volume "Geoscientific Research", JAEA-Research 2007-044, 2007.

- Pruess, K., C. Oldenburg, G. and Moridis, TOUGH2 User's Guide, Version 2.0, LBL Report, LBNL-43134, 1999.
- Toyotomi Onsen, http://www.toyotomionsen.com/index.php?itemid=2, 2009
- Vasco, D. W., Karasaki, K. and Kishida, K., A coupled inversion of pressure and surface displacement, Water Resour. Res., 37(12), 3071-3089, 2001.
- Vasco, D. W., Wicks, C., Karasaki, K. and Osni Marques, Geodetic imaging: High resolution reservoir monitoring using satellite interferometry, Geophys. J. Int., 149, 555-571, 2002(a).
- Vasco, D. W., Karasaki, K. and Nakagome, O., Monitoring reservoir production using surface deformation at the Hijiori test site and the Okuaizu geothermal field, Japan, Geothermics, 31 (3), 303-342, 2002(b).

- Wu, Y. S., G. Lu, K. Zhang, and G. S. Bodvarsson, A Mountain-Scale Model for Characterizing Unsaturated flow and Transport in Fractured Tuffs of Yucca Mountain, LBNL-52524, Vadose Zone Journal, Vol. 3, pp.796-805, 2004.
- Wu, Y.-S., Guoping Lu, Keni Zhang, L. Pan, and G. S. Bodvarsson, Analyzing Unsaturated Flow Patterns in Fractured Rock Using an Integrated Modeling Approach, LBNL-54006, Hydrogeology Journal, Vol. 15, pp.553-572, 2007.
- Wu, Y.S. and K. Karasaki, Conceptualization and Modeling of Flow and Transport Through Fault Zones, SPE 122456, in proceedings, 2009 SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Cartagena, Colombia, 31 May–3 June 2009.
- Yamasaki, S., H. Matsui, K. Hama, H. Morioka, K. Hatanaka, and T. Fukushima, International Workshop on Horonobe Underground Research Laboratory Project, JNC TN5400 2004-004, 2004.

| 表 1. SI 基本単位 | | | | | | |
|---------------|-------------------|-----|--|--|--|--|
| 甘木县 | SI 基本ì | 单位 | | | | |
| 龙平里 | 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 | А | | | | |
| 熱力学温度 | ケルビン | K | | | | |
| 物質量 | モル | mol | | | | |
| 光 度 | カンデラ | cd | | | | |
| C.C. NY STATE | State State State | | | | | |

| 表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例 | | | | | | |
|--------------------------|----|-------|-----|-----|--------------|--------------------|
| | | 1.4 | - | | SI 基本単位 | R allo Se |
| | R1 | 1 11. | Æ | | 名称 | 記号 |
| 面 | | | | 積 | 平方メートル | m ² |
| 体 | | | | 積 | 立法メートル | m ³ |
| 速 | さ | , | 速 | 度 | メートル毎秒 | m/s |
| 加 | | 速 | | 度 | メートル毎秒毎秒 | m/s ² |
| 波 | | | | 数 | 毎メートル | m ⁻¹ |
| 密 | 度, | 質 | 量密 | 度 | キログラム毎立方メートル | kg/m ³ |
| 面 | 積 | | 密 | 度 | キログラム毎平方メートル | kg/m ² |
| 比 | | 体 | | 積 | 立方メートル毎キログラム | m ³ /kg |
| 電 | 流 | | 密 | 度 | アンペア毎平方メートル | A/m ² |
| 磁 | 界 | 0 | 強 | さ | アンペア毎メートル | A/m |
| 量 | 濃度 | (a) | , 濃 | 度 | モル毎立方メートル | mol/m ³ |
| 質 | 量 | | 濃 | 度 | キログラム毎立法メートル | kg/m ³ |
| 輝 | | | | 度 | カンデラ毎平方メートル | cd/m ² |
| 屈 | 护 | ŕ | 率 | (b) | (数字の) 1 | 1 |
| Ht. | 诱 | 秘 | 率 | (b) | (数字の) 1 | 1 |

(a) 最濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのこと を表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

| | | | | | | SI 組立単位 | | | | |
|------------|---------------|-------|---|--|--|--|--|---|---|--|
| | 維 | 立量 | k | | | 名称 | 記号 | 他のSI単位による | SI基本単位による | |
| | | - | | | - | (1) | | 表し方 | 表し方 | |
| - | | 血 | | | 角 | ラジアン(1) | rad | 1 (6) | m/m | |
| | | 体 | | | 角 | ステラジアン(0) | sr ^(c) | 1 (6) | m^2/m^2 | |
| | | 波 | | | 数 | ヘルツ (d) | Hz | | s^{-1} | |
| 1 | | | | | | ニュートン | N | | m kg s ⁻² | |
| 1 | 5 | , | J, | た | 力 | パスカル | Pa | N/m ² | m^{-1} kg s ⁻² | |
| ネル | ギー | - , 1 | 士事 | F, 熱 | 量 | ジュール | J | N m | $m^2 kg s^2$ | |
| :事率 | , [| [率 | , | 放射 | 東 | ワット | W | J/s | m ² kg s ⁻³ | |
| 荷 | , | 冒 | t | 気 | 量 | クーロン | C | | s A | |
| 位差 | (電 | 圧 |), | 起貢 | 力 | ボルト | V | W/A | $m^2 kg s^{-3} A^{-1}$ | |
| - | 電 | | 容 | 1 | 量 | ファラド | F | C/V | $m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$ | |
| i | 気 | | 抵 | | 抗 | オーム | Ω | V/A | $m^2 kg s^{-3} A^{-2}$ | |
| ン | ダ | ク | 9 | ン | ス | ジーメンス | S | A/V | $m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$ | |
| 5 | | | | | 束 | ウエーバ | Wb | Vs | $m^2 kg s^2 A^1$ | |
| ŧ. | 柬 | | 密 | | 度 | テスラ | Т | Wb/m ² | kg s ⁻² A ⁻¹ | |
| ン | ダ | ク | 9 | ン | ス | ヘンリー | H | Wb/A | $m^2 kg s^2 A^2$ | |
| ル | 2 | ウ | ス | 温 | 度 | セルシウス度 ^(e) | °C | | K | |
| | | | | | 束 | ルーメン | lm | cd sr ^(c) | cd | |
| | | | | | 度 | ルクス | lx | lm/m^2 | m ⁻² cd | |
| (射性) | 核種 | の友 | 女射 | 能(| f) | ベクレル ^(d) | Bq | | s ⁻¹ | |
| 収線量 | k, 比= | 二个. | ルギ | 一分 | 与, | ガレイ | Gy | J/kg | m ² c ⁻² | |
| -7 | | | | | | | ay | OING | | |
| 量当量 線量当 | t,周i | 四線 | 量当線是 | 量, 力 | 「向 | シーベルト (g) | Sv | J/kg | $m^2 s^2$ | |
| - 1015 ABA | 素 | | 活 | | 性 | カタール | kat | | s ⁻¹ mol | |
| | 「北平荷差」 シル 性量線 | | 組立量 面体 が カ・、 キャンン・ キャンン・ に す が た ま 本 ルギー・、 キ で 、 た で 、 の 、 、 、 キャンン・ 、 で で 、 の 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 | 組立量 面 体 波 力 , 「 事率, 工率, 位差(電圧), 容 (電圧)、容 (電圧)、容 、 ダ ク タ 本 、 ダ ク タ 本 、 ダ ク タ 本 、 ジ の 久 本 、 (電圧)、 、 (電圧)、 、 (電圧)、 、 (電圧)、 、 (電圧)、 、 (電)、 、 (四)、 、 (四)、 、)、 、 (四)、 、 (個人線量 、 素)、 素、 、 (四)、 、 (四)、 、)、 、 (四)、 、 (個人線量) 素、 、 (四)、 、 (四)、 (四)、 (四) | 組立量 面 体 波 力,応 本ルギー,仕事,熱 事率,工率,放射 「電 気(電圧),定 電 気(電圧),定 電 、気 大 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 | 組立量 面 角 体 カ 、応 カ 、応 カ 、た カ 、た カ 、た カ 、た カ 、た カ 、た カ 、た カ 、た カ 、た カ 、た 力 、た カ 、た 力 、定 気 気 気 し た 、2 気 し 、電 気 量 て ぞ 、電 気 量 て ぞ 、電 気 量 て を 、電 気 し で た 、 の し 、 で 、 で 、 で 、 の し 、 の た 、 た 、た か 和 東 電 、 の た 、 た 、た た 、 、 た 、 た 、 、 た 、 た 、 た 、 た 、 た 、 た 、 た 、 た 、 た 、 た 、 た 、 た 、 た た 、 た 、 た 、 た た 、 た た 、 た た 、 た た 、 た た 、 た た 、 た た 、 た た た 、 た た た た た た た た 、 た し た た た た た た た た た た た た た | 組立量 名称 面 角 ジデン ^(b) 体 角 ステジデン ^(b) 波 数 カ 広 カ 広 カ 広 カ 広 ホルギー、仕事、熱量 ジュール 事率、工率、放射東 ワット 「位差(電圧)、起電力ボルト ケーロン 電 容 「次 五 シダクタンス ジーメンス レ アラド 「気<抵抗 | 組立量 名称 記号 面 角 $\overline{\gamma} \overline{\gamma} \overline{\gamma} \overline{\nu}^{(b)}$ rad 体 角 $\overline{\gamma} \overline{\gamma} \overline{\gamma} \overline{\nu}^{(b)}$ rad 波 体 角 $\overline{\gamma} \overline{\gamma} \overline{\gamma} \overline{\nu}^{(b)}$ rad 波 数 次 $\overline{\gamma} \overline{\nu}^{(b)}$ rad 波 数 数 $\overline{\gamma} \overline{\nu}^{(b)}$ rad カ 、応 カ パスカル Pa ニュートン N $\overline{\gamma}$ $\overline{\gamma}$: 事率, 工率, 放射 東 $\overline{\gamma} - \nu$ \overline{V} : 位 : 電 (a) $\overline{\gamma} - \nu$ \overline{V} : 位 : 電 (a) : $\overline{\gamma} - \overline{\gamma} \overline{\rho}$ \overline{V} : 位 : (a) : $\overline{X} - \overline{\gamma} \overline{\rho} \overline{\rho}$ \overline{Y} : $\overline{\gamma} \overline{\rho} \overline{\rho} \overline{\rho}$: (a) : $\overline{X} - \overline{\rho} \overline{\rho} \overline{\rho}$: $\overline{X} - \overline{\rho} \overline{\rho} \overline{\rho} \overline{\rho}$: $\overline{Y} \overline{\rho} \overline{\rho} \overline{\rho} \overline{\rho} \overline{\rho} \overline{\rho} \overline{\rho} \rho$ | 組立量 SI 組立単位 名称 記号 他のSI単位による 本 角ラジアン ^(b) rad 1 (^{b)} 本 角フラジアン ^(b) rad 1 (^{b)} 波 $& \sim n \nu \gamma^{(d)}$ Hz 波 カ ニュートン N ニュートン N - ホルギー, 仕事, 熱量 ジュール J N m : 事率, 工率, 放射 東ワット W J/s - : 体 ① コール J N m : 事率, 工率, 放射 東ワット W J/s - : 位差(電圧), 起電 気 ① - - : 位差(電圧), 起電 気 ① - - : 位差(電圧), 起電 気 ② - - : 公 ダ ク タ ン ス ジーズンス S A/V : 東 密 度 テスラ T Wb/m ² - : 少 ダ ク タ ン ス - - - - : 少 ダ ク タ ン ス シースシウス N Wb/M ² - : 少 ダ ク タ ン ス ン ジース L Lm/m ² | |

 酸 素 店 作1/2 グール kat [s' mo]

 (a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (a)額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) 細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) 細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) 小型は周期現象についてのみ、ペクレルは放射性接種の統計的道路についてのみ使用される。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、温度差や温度問隔を表す数値はとちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射症 (activity referred to a radionuclide)は、しぼしば誤った用語で"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(Cl-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 |
|-----|------|------|------|------|----------|
|-----|------|------|------|------|----------|

| | SI 組立単位 | | | |
|-----------------|-------------------|--------------------|---|--|
| 組立量 | 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 | ニュートン毎メートル | N/m | kg s ⁻² | |
| 角 速 度 | ラジアン毎秒 | rad/s | m m' s' = s' | |
| 角 加 速 度 | ラジアン毎秒毎秒 | rad/s ² | $m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$ | |
| 熱流密度,放射照度 | ワット毎平方メートル | W/m ² | kg s ⁻³ | |
| 熱容量、エントロピー | ジュール毎ケルビン | J/K | $m^2 kg s^2 K^1$ | |
| 比熱容量, 比エントロピー | ジュール毎キログラム毎ケルビン | J/(kg K) | $m^{2} s^{2} K^{1}$ | |
| 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 | ワット毎メートル毎ケルビン | W/(m K) | m kg s ⁻³ K ⁻¹ | |
| 体積エネルギー | ジュール毎立方メートル | J/m ³ | m ⁻¹ kg s ⁻² | |
| 電界の強さ | ボルト毎メートル | V/m | m kg s ⁻³ A ⁻¹ | |
| 電 荷 密 度 | クーロン毎立方メートル | C/m ³ | m ⁻³ sA | |
| 表 面 電 荷 | クーロン毎平方メートル | C/m ² | m ⁻² sA | |
| 電東密度, 電気変位 | クーロン毎平方メートル | C/m ² | m ⁻² sA | |
| 誘 電 率 | ファラド毎メートル | F/m | $m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$ | |
| 透磁 率 | ヘンリー毎メートル | H/m | m kg s ⁻² A ⁻² | |
| モルエネルギー | ジュール毎モル | J/mol | m ² kg s ⁻² mol ⁻¹ | |
| モルエントロピー, モル熱容量 | ジュール毎モル毎ケルビン | J/(mol K) | $m^2 kg s^2 K^1 mol^1$ | |
| 照射線量(X線及びy線) | クーロン毎キログラム | C/kg | kg ⁻¹ sA | |
| 吸収線量率 | グレイ毎秒 | Gy/s | $m^2 s^{\cdot 3}$ | |
| 放 射 強 度 | ワット毎ステラジアン | W/sr | $m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$ | |
| 放 射 輝 度 | ワット毎平方メートル毎ステラジアン | $W/(m^2 sr)$ | m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³ | |
| 酵素活性濃度 | カタール毎立方メートル | kat/m ³ | m ⁻³ s ⁻¹ mol | |

| 表 5. SI 接頭語 | | | | | | | |
|-----------------|------------|----|------------------|------|----|--|--|
| 乗数 | 接頭語 | 記号 | 乗数 | 接頭語 | 記号 | | |
| 10^{24} | Э <i>9</i> | Y | $10^{.1}$ | デシ | d | | |
| 10^{21} | ゼタ | Z | 10^{-2} | センチ | с | | |
| 10^{18} | エクサ | E | 10 ⁻³ | z | m | | |
| 10^{15} | ~ 4 | Р | 10^{-6} | マイクロ | μ | | |
| 10^{12} | テラ | Т | 10 ⁻⁹ | ナノ | n | | |
| 10 ⁹ | ギガ | G | 10^{-12} | ピ コ | р | | |
| 10^{6} | メガ | M | 10^{-15} | フェムト | f | | |
| 10^{3} | + 1 | k | 10^{-18} | アト | a | | |
| 10^{2} | ヘクト | h | 10^{-21} | ゼプト | Z | | |
| 10^{1} | デカ | da | 10^{-24} | ヨクト | у | | |

| 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 | | | | |
| H | d | 1 d=24 h=86 400 s | | | | |
| 度 | • | 1°=(п/180) rad | | | | |
| 分 | , | 1'=(1/60)°=(π/10800) rad | | | | |
| 秒 | " | 1"=(1/60)'=(п/648000) rad | | | | |
| ヘクタール | ha | $1ha=1hm^{2}=10^{4}m^{2}$ | | | | |
| リットル | L, 1 | 1L=11=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 |
|-----|-----------|--------------|-----------|
| | | | |

| 名称 | 記号 | SI 単位で表される数値 | | | | | |
|----------|----|--|--|--|--|--|--|
| 電子ボルト | eV | 1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J | | | | | |
| ダルトン | Da | 1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg | | | | | |
| 統一原子質量単位 | u | 1u=1 Da | | | | | |
| 天 文 単 位 | ua | 1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m | | | | | |

| 表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位 | | | | | | | | |
|-----------------------------|------|---|--|--|--|--|--|--|
| 名称 | 記号 | SI 単位で表される数値 | | | | | | |
| バー) | bar | 1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa | | | | | | |
| 水銀柱ミリメートパ | mmHg | 1mmHg=133.322Pa | | | | | | |
| オングストローム | Å | 1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m | | | | | | |
| 海 | M | 1 M=1852m | | | | | | |
| バーン | b | $1 b=100 fm^2 = (10^{-12} cm)^2 = 10^{-28} m^2$ | | | | | | |
| 1 " | kn | 1 kn=(1852/3600)m/s | | | | | | |
| ネ ー , | Np | | | | | | | |
| ベ) | В | 51単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存 | | | | | | |
| デジベリ | dB - | | | | | | | |

| 表9. 固有の名称をもつCGS組立単位 | | | | | | | | |
|-----------------------|-----|---|--|--|--|--|--|--|
| 名称 | 記号 | SI 単位で表される数値 | | | | | | |
| エルグ | erg | 1 erg=10 ⁻⁷ J | | | | | | |
| ダイン | dyn | 1 dyn=10 ⁻⁵ N | | | | | | |
| ポアズ | Р | 1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s | | | | | | |
| ストークス | St | $1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$ | | | | | | |
| スチルブ | sb | $1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$ | | | | | | |
| フォト | ph | 1 ph=1cd sr cm ^{-2} 10 ⁴ lx | | | | | | |
| ガル | Gal | 1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻² | | | | | | |
| マクスウェル | Mx | $1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$ | | | | | | |
| ガウス | G | $1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$ | | | | | | |
| エルステッド ^(c) | Oe | $1 \text{ Oe} \triangleq (10^3/4\pi) \text{A m}^{-1}$ | | | | | | |

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

| 表10. SIに属さないその他の単位の例 | | | | | | | |
|----------------------|-----|---|----|-----|------|--|--|
| 名称 | | | | | 記号 | SI 単位で表される数値 | |
| + | л | | IJ | - | Ci | 1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq | |
| V | ン | F | ゲ | ン | R | $1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$ | |
| ラ | | | | ド | rad | 1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy | |
| V | | | | 4 | rem | $1 \text{ rem}=1 \text{ cSv}=10^{-2} \text{Sv}$ | |
| ガ | | ン | | 7 | γ | 1 γ =1 nT=10-9T | |
| 7 | I | | N | 111 | | 1フェルミ=1 fm=10-15m | |
| メー | ートル | 采 | カラ | ット | | 1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg | |
| F | | | | N | Torr | 1 Torr = (101 325/760) Pa | |
| 標 | 準 | 大 | 気 | 圧 | atm | 1 atm = 101 325 Pa | |
| 力 | D | | IJ | 1 | cal | 1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J(「熱化学」カロリー) | |
| 111 | ク | | D | ン | μ | $1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$ | |