



亀裂を有する堆積岩の水理・物質移行評価のための 試験手法の検討と解析

(共同研究)

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

下茂 道人 熊本 創 伊東 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

November 2010

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

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

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

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

亀裂を有する堆積岩の水理・物質移行評価のための試験手法の検討と解析
(共同研究)

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}, 伊東 章^{*2}, 唐崎 健二^{*3}, 澤田 淳, 小田 好博, 佐藤 久^{*}

(2010年9月6日受領)

高レベル放射性廃棄物の地層処分システム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評価することが重要である。従来の研究では、堆積岩地域における物質移行現象においては、粒子間隙が主な移行経路として考えられてきたが、亀裂が発達している場合においては、亀裂が卓越した水みちを形成すると考えられる。特に、幌延地域では岩石基質（マトリクス）部の間隙率が高くかつ亀裂が発達しており、多孔質媒体と亀裂性媒体の双方の特徴を併せ持った性質を有することが明らかとなっている。

本件では、数十 cm スケール（最大 1m 程度）のブロック状の岩石試料を対象とし、①ブロック状岩石試料の採取方法の具体化、および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と予察解析、を行った。これは、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ために、原位置での試験と比較的大きな岩石試料を用いた室内試験を相互補完しながら評価する手法について検討する必要があるためである。①については、ワイヤーソーを用いたブロック採取方法（特開 2006-224346）を基本に、亀裂を含む稚内層を対象とした岩石ブロック試料の採取方法の具体的な手順を整理した。また、対象とする亀裂の抽出、観察、原位置での試験方法、ブロック試料の固定化方法などについて、具体的な方法を整理した。②については、ブロック状の岩石試料の採取前後で実施する原位置試験と、ブロック試料採取後に実施する透水・トレーサー試験の方法を検討した。トレーサー試験の検討においては、原子力機構がこれまで数 cm スケールの岩石試料を対象に実施してきた透水・トレーサー試験方法（特開 2006-064394）を参考にした。また、亀裂や岩石試料の水理物質移行特性の既存データを用いた予察的な解析により、試験で得られる結果や試験に要する時間などの検討を行った。原位置における試験対象亀裂の抽出から、試料採取、原位置および室内における透水トレーサー試験について、適用可能と考えられる手法を提案し、具体的な方法と手順についてまとめた。

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際しては、計測される水文・地質・水理のデータが非常にまばらであることに起因して様々な不確実性を伴う。本件では、幌延地域で得られた水頭分布データ、温度分布データ、塩分濃度データなど、異なる性質のデータを複合的に用い、順解析と逆解析を組み合わせた水理地質構造モデルの不確実性について検討し、これらのデータの有効性について取りまとめた。

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

*: 技術開発協力員

*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、デコミッションング部

*3: Lawrence Berkeley National Laborator

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

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 September 6, 2010)

In safety analysis of geological disposal of the high-level nuclear waste, it is important to evaluate appropriately the mass transport characteristics of the bedrock as the natural barrier. Historically it has been considered that the inter-granular pores of sedimentary rock are the main paths for nuclide transport, however, in the case of fractured one, fractures can be the dominant flow channels. Especially, it has been found that the porosity of the rock matrix is high and fractured zones are developing and therefore the mass transport characteristics will be the mixture of those for porous media and the fractured media.

In this work, we conducted, (1) a study on the method to mine out the rock block sample of tens of-centimeter to maximum 1m scale, (2) a study on a method of the tracer test using a rock block sample and a series of scoping analysis. As for (1), we investigated a procedure of the method to mine out the fractured rock block sample, based on the sampling method using a wire saw (patent laid-open number 2006-224346). As for (2), we listed the recommended in-situ tests procedures before a sampling and also summarized the recommended procedures of laboratory hydraulic and tracer tests. A series of scoping calculations was conducted to predict the test results and to estimate the duration time of the tests. For laboratory tracer test, we referred to the method of hydraulic and tracer tests those have been applied by JAEA for the rock sample of several-centimeter scale (patent laid-open number 2006-064394).

Various types of uncertainties are commonly included in the regional scale groundwater flow analysis for sedimentary rock formation, due to shortage of the information on hydrology, geology and hydraulic properties. We examined the uncertainty associated the hydrogeological model using a method combining a forward and inverse analysis, based on the various type of data sets obtained at Horonobe site, such as the temperature distribution and hydraulic head and salinity distribution.

Keywords: Mass Transport Property, Fractured Soft Sedimentary Rocks, Mine Out the Rock Block Sample, Geological Disposal, Uncertainty Reduction

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. ブロックスケールを対象とした試験手法の検討.....	3
3.1. はじめに.....	3
3.2. 試料採取および試験の実施に関わる制約条件.....	3
3.3. 試料採取から室内試験実施までの概略フロー.....	3
3.4. 試料採取方法の具体化.....	4
3.5. 作業数量と概略工程.....	17
3.6. 追加オプションの検討.....	19
3.6.1. 高角亀裂を対象とした原位置試験方法.....	19
3.6.2. 専用のニッチにて実施する場合.....	20
3.6.3. 原位置試験方法（ラインドリリング後）.....	22
3.7. 大型ブロック試料を対象とした室内透水トレーサー試験方法の検討と予察解析.....	23
3.7.1. トレーサー試験方法の検討.....	23
3.7.2. 大型ブロック試料を用いたトレーサー試験の予察解析.....	24
3.7.3. 大型ブロック試料を用いたトレーサー試験の手順.....	30
3.8. まとめ.....	32
4. 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.....	33
4.1. 目的.....	33
4.2. これまでの研究.....	33
4.2.1. 解析手法と条件.....	33
4.2.2. 涵養量に関する考察.....	36
4.2.3. 塩分濃度データを使った考察.....	37
4.2.4. HDB 孔沿いの温度分布データを使った考察.....	40
4.3. 不確実性の低減の為の水圧，塩分濃度，温度の総合解析.....	42
4.3.1. バックグラウンド.....	42
4.3.2. モデルの基本的な考え方.....	43
4.3.3. 物性.....	43
4.3.4. 初期条件，境界条件と解析手順.....	44
4.3.5. 順解析.....	44
4.4. 逆解析.....	46
4.4.1. 観測データ.....	46
4.4.2. 逆解析パラメータ.....	48
4.4.3. 逆解析結果.....	50
4.5. まとめと考察.....	54
4.6. 今後の課題と提案.....	54
5. おわりに.....	55
参考文献.....	56

Contents

1 Introduction	1
2 Brief overview of this study	2
2.1 Aim of this study	2
2.2 Contents of this study	2
3 Consideration for sampling method of block scale rock.....	3
3.1 Overviews	3
3.2 Restrictions of sampling and laboratory test.....	3
3.3 Outline flow from sampling to laboratory experiments.....	3
3.4 Crystallization of sampling method.....	4
3.5 Outline process and quantities of operations.....	17
3.6 Consideration of additional options.....	19
3.6.1 In-situ experiment for high angle crack.....	19
3.6.2 Operation on dedicated niche.....	20
3.6.3 In-situ experiment method (line drilling).....	22
3.7 Consideration for laboratory tracer test method on large block and reconnaissance analysis.....	23
3.7.1 Consideration for tracer test method.....	23
3.7.2 Reconnaissance analysis for tracer test using large block.....	24
3.7.3 Process of tracer test using large block.....	30
3.8 Summary.....	32
4 Uncertainty reduction of hydrologic models using data from surfaced-based investigation.....	33
4.1 Aim.....	33
4.2 Past studies.....	33
4.2.1 Simulation method and boundary conditions.....	33
4.2.2 Study on recharge amount.....	36
4.2.3 Study using the data of salinity concentration.....	37
4.2.4 Study using temperature data around HDBs.....	40
4.3 Generalized analysis to reduce uncertainty using water pressure, salinity, and temperature.....	42
4.3.1 Back ground.....	42
4.3.2 Basic concept of simulation model.....	43
4.3.3 Properties.....	43
4.3.4 Initial and boundary condition, and simulation process.....	44
4.3.5 Sequential analysis.....	44
4.4 Inverse analysis.....	46
4.4.1 Investigation data.....	46
4.4.2 Parameters for inverse analysis.....	48
4.4.3 Results of inverse analysis.....	50
4.5 Discussion and summary.....	54
4.6 Future works and proposals.....	54
5 Conclusion.....	55
Reference	56

目次

図 3.3-1 試料採取から室内試験実施までの概略フロー	3
図 3.4-1 対象とする亀裂の条件設定手順 (例)	4
図 3.4-2 対象とする亀裂の抽出フロー	5
図 3.4-3 探りボーリングのレイアウト例	6
図 3.4-4 採取範囲と亀裂の位置関係	7
図 3.4-5 採取範囲と亀裂の位置関係 (ブロック位置拡大)	7
図 3.4-6 亀裂の透水性, 連続性の確認フロー	8
図 3.4-7 ボーリングレイアウト (例)	9
図 3.4-8 クロスホール透水試験の概念	10
図 3.4-9 ダイポルトレーサー試験の概念	11
図 3.4-10 試料の採取, 保存フロー	11
図 3.4-11 ラインドリリングレイアウト例	12
図 3.4-12 固化材の打設状況	13
図 3.4-13 ワイヤソー切断用ボーリングレイアウト例	14
図 3.4-14 ワイヤソー切断手順	15
図 3.4-15 角度可変プーリー	15
図 3.4-16 ブロックの搬出手順例	16
図 3.4-17 ブロック吊り上げ用治具	17
図 3.6-1 高角亀裂を対象とした場合のボーリングレイアウト (例)	20
図 3.6-2 坑道底盤の亀裂露出部分の止水	20
図 3.6-3 ニッチのレイアウト (例)	21
図 3.6-4 試料採取方法 (追加オプション)	22
図 3.6-5 原位置試験のボーリング孔レイアウト (例)	23
図 3.7-1 トレーサー試験方法の概要 (スケールは実際と異なる)	24
図 3.7-2 解析モデルの概要	24
図 3.7-3 解析結果 (注入流量 Q の影響: $Q=5\text{cc/min}$, $Q=0.5\text{cc/min}$, $Q=0.05\text{cc/min}$)	26
図 3.7-4 解析結果 (分散長 α_{L} の感度: $Q=5\text{cc/min}$ の場合)	27
図 3.7-5 解析結果 (分散長 α_{L} の感度: $Q=0.05\text{cc/min}$ の場合)	28
図 3.7-6 解析結果 (実行拡散係数 D_e の感度: $Q=5\text{cc/min}$ の場合)	29
図 3.7-7 解析結果 (実行拡散係数 D_e の感度: $Q=0.05\text{cc/min}$ の場合)	30
図 3.7-8 室内透水トレーサー試験のフロー	31
図 4.2-1 3次元解析モデル	34
図 4.2-2 解析モデルの地質材料分布とボーリング孔位置	34
図 4.2-3 HDB 孔の平面的な位置関係	35
図 4.2-4 新間寒別橋と天塩大橋間の流量差データ	36
図 4.2-5 モデルの透水係数と温度分布の関係	37
図 4.2-6 洗い出し解析結果	38
図 4.2-7 HDB-1 データと解析結果の比較	39
図 4.2-8 HDB 各孔沿いの温度(T)と圧力分布(P)	40
図 4.2-9 温度分布シミュレーション結果と観測データの比較	41
図 4.2-10 温度分布解析から類推される透水係数の低い鉛直面の位置 (紫色の破線)	42

図 4.3-1 HDB-7,HDB-8 孔沿いの圧力分布データと順解析結果の比較.....	44
図 4.3-2 HDB-7 と HDB-8 における温度分布の順解析シミュレーション結果とデータの比較.....	45
図 4.3-3 HDB-7 と HDB-8 における塩分濃度分布の順解析シミュレーション結果とデータの比較	46
図 4.4-1 解析メッシュ中の HDB-5, HDB-7, HDB-8 と大曲断層の位置関係.....	47
図 4.4-2 圧力分布の逆解析結果.....	51
図 4.4-3 温度分布データと解析結果の比較.....	52
図 4.4-4 塩分濃度分布データと解析結果の比較.....	52
図 4.4-5 塩分濃度分布の逆解析結果.....	53

表目次

表 3.5-1 調査および採取作業の概略数量.....	18
表 3.5-2 主要資機材.....	18
表 3.5-3 調査および採取作業の概略工程.....	19
表 3.7-1 解析パラメーター一覧.....	25
表 3.7-2 試験条件設定のための試験一覧.....	31
表 4.2-1 解析に用いた透水係数初期値一覧.....	35
表 4.4-1 逆解析に使用した観測データ.....	47
表 4.4-2 逆解析ケースのリスト.....	49
表 4.4-3 Fi2 ケースの逆解析結果.....	50

List of Figures

Figure 3.3-1 Outline flow from sampling to laboratory experiments.....	3
Figure 3.4-1 Example process of a target crack condition setting.....	4
Figure 3.4-2 Flow chart of a target crack selection.....	5
Figure 3.4-3 Layout example of probe boring.....	6
Figure 3.4-4 Relation between sampling range and crack position.....	7
Figure 3.4-5 Relation between sampling range and crack position (close up to block position).....	7
Figure 3.4-6 Check flow of crack's permeability and continuity.....	8
Figure 3.4-7 Layout example for boring.....	9
Figure 3.4-8 Cross holes permeability test concept.....	10
Figure 3.4-9 Dipole tracer test concept.....	11
Figure 3.4-10 Flow chart of sampling and storage.....	11
Figure 3.4-11 Layout example for line drilling.....	12
Figure 3.4-12 cast of fixation agent.....	13
Figure 3.4-13 Layout example of boring for wire saw cutting.....	14
Figure 3.4-14 Operation process of wire saw cutting.....	15
Figure 3.4-15 Angle variable pulley.....	15
Figure 3.4-16 Example of discharge process of block sample.....	16
Figure 3.4-17 Loading jig of block sample.....	17
Figure 3.6-1 Layout example for boring of high angle crack.....	20
Figure 3.6-2 Waterproof at crack exposure on bottom surface.....	20
Figure 3.6-3 Layout example for niche.....	21
Figure 3.6-4 Sampling method (additional option).....	22
Figure 3.6-5 Layout example for in-situ borings.....	23
Figure 3.7-1 Outline of tracer test (not real scale).....	24
Figure 3.7-2 Outline of simulation model.....	24
Figure 3.7-3 Results of simulation (sensitivity of injection $Q=5, 0.5, 0.05\text{cc}/\text{min}$).....	26
Figure 3.7-4 Results of simulation (sensitivity of dispersivity $\alpha_{FL}, Q=5\text{cc}/\text{min}$).....	27
Figure 3.7-5 Results of simulation (sensitivity of dispersivity $\alpha_{FL}, Q=0.05\text{cc}/\text{min}$).....	28
Figure 3.7-6 Results of simulation (sensitivity of diffusion $D_e, Q=5\text{cc}/\text{min}$).....	29
Figure 3.7-7 Results of simulation (sensitivity of diffusion $D_e, Q=0.05\text{cc}/\text{min}$).....	30
Figure 3.7-8 Process flow of laboratory tracer test.....	31
Figure 4.2-1 3D simulation model.....	34
Figure 4.2-2 Boring positions and geological conditions on simulation model.....	34
Figure 4.2-3 Planer positional relation of HDBs.....	35
Figure 4.2-4 Difference of flow rate between Shin Toikanbetsu-hashii and Tejio ohashi.....	36
Figure 4.2-5 Relation between permeability and salinity distribution on model.....	37
Figure 4.2-6 Relation of washout simulation.....	38
Figure 4.2-7 Comparison of simulation results with HDB-1 data.....	39
Figure 4.2-8 Temperature and pressure distribution data around HDBs.....	40
Figure 4.2-9 Comparison of simulation data with HDB-7 and 8.....	41

Figure 4.2-10 Low permeability points by analogy from temperature analysis.....	42
Figure 4.3-1 Comparison of sequential analysis with pressure distribution data around HDB-7 and 8.....	44
Figure 4.3-2 Comparison of sequential analysis with temperature distribution data around HDB-7 and 8.....	45
Figure 4.3-3 Comparison of sequential analysis with salinity distribution data around HDB-7 and 8.....	46
Figure 4.4-1 Positional relation between HDB-5, 7 and 8 and Omagari fault.....	47
Figure 4.4-2 Inverse analysis result of pressure distribution.....	51
Figure 4.4-3 Comparison of inverse analysis result with temperature distribution data.....	52
Figure 4.4-4 Comparison of inverse analysis result with salinity distribution data.....	52
Figure 4.4-5 Inverse analysis result of salinity distribution.....	53

List of Tables

Table 3.5.1 Gross quantities of investigation and sampling.....	18
Table 3.5.2 Main equipments.....	18
Table 3.5.3 Outline process of investigation and sampling.....	19
Table 3.7.1 Simulation parameters.....	25
Table 3.7.2 List of experiments for the setting of experimental conditions.....	31
Table 4.2.1 Initial conditions for simulation.....	35
Table 4.4.1 Observed data used for inverse simulation.....	47
Table 4.4.2 Case list of inverse simulation.....	49
Table 4.4.3 Results of inverse simulation results on Fi2 case.....	50

1. はじめに

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

本研究では、これまで亀裂が発達した堆積岩中の水理・物質移行パラメータの取得を目的として、数 cm スケールの岩石コア試料を対象とした室内試験を実施してきた。今後は、原位置試験や原位置試験とコア試験を補間するような、より大きなスケールを対象とした室内試験の実施し、各スケールにおけるデータの相互補完の方法などについて検討することが考えられる。本件では、上記の準備段階として、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やトレーサー試験方法の検討を行った。なお、本報告書では、堆積岩のブロック試料採取について、主として技術的な方法論を検討している。地下研究所での実際の適用にあたっては、建設計画や他の研究計画との整合、採取位置や採取後の埋戻し、および安全性等について、別途検討する必要がある。

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については幌延サイトにて建設中の坑道内において、最大で 1m 程度のブロックスケールを対象とした試料採取と、採取した試料を対象としたトレーサー試験方法について具体的な方法と手順の検討を行った。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 2 つの目的に対して、以下の 2 項目について実施した。

(1) ブロックスケール試料採取および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、試験の対象となる亀裂の抽出から採取、さらには採取した試料を用いた室内試験方法の具体的な手順や留意点などについて取りまとめた。

(2) 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. ブロックスケールを対象とした試験手法の検討

3.1. はじめに

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る。本研究では、これまでに数 cm 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。平成 21 年度¹⁾は特にトレーサー試験方法およびブロックサンプリング方法（特願 2010-41541）の具体化を図った。本件では、数十 cm スケール（最大 1m 程度）のブロック状の岩石試料を対象とし、下記の二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の具体化
- 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の検討と予察解析

3.2. 試料採取および試験の実施に関わる制約条件

試料採取および試験方法の検討に先立ち、現状で想定可能な制約条件を以下に列挙する。

- | | |
|----------------|----------------|
| ① 試料形状・寸法 | 最大 1m 四方のブロック状 |
| ② 対象とする地層 | 稚内層 |
| ③ 対象とする亀裂 | 単一の開口亀裂 |
| ④ 採取および試験の実施場所 | 試験坑道内 |
| ⑤ 採取および試験の位置 | 底盤 |
| ⑥ 実施時期、期間 | 未定 |

3.3. 試料採取から室内試験実施までの概略フロー

試料採取から室内試験の実施には、図 3.3-1 に示すように、大きく 6 つの実施項目に分けられる。以下に現地での試料採取と室内試験に分けて具体的な実施方法について説明する。

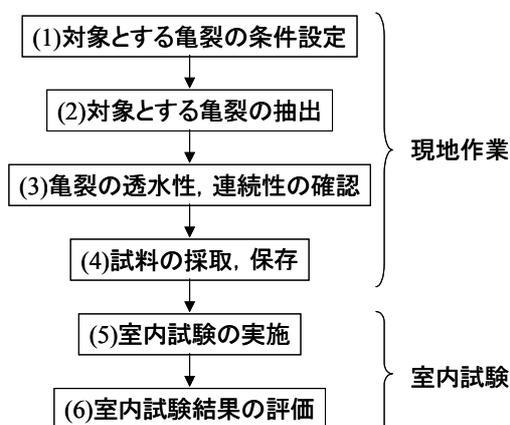


図 3.3-1 試料採取から室内試験実施までの概略フロー

3.4. 試料採取方法の具体化

以下に、図 3.4-1 中の(1)～(4)について、具体的な実施方法について説明する。

(1) 対象とする亀裂の条件設定

既存データの収集，整理により，試験対象となる亀裂の条件を設定する．図 3.4-1 に対象亀裂の条件設定手順の概略を示す．これまでに実施された試験調査や立坑壁面観察結果などを用いて，亀裂の分類ならびに水理特性との関連について整理する．その結果から，図に例示したような判断基準に従って，試験対象とする亀裂の条件を決定する．この際，幌延深地層研究センターで検討している水理地質構造概念モデルを参考にして亀裂選定の条件を検討する．また，条件設定においては，上記 3.2 節で挙げた制約条件を考慮した上で，試料採取ならびに試験が実現可能な条件を設定する．

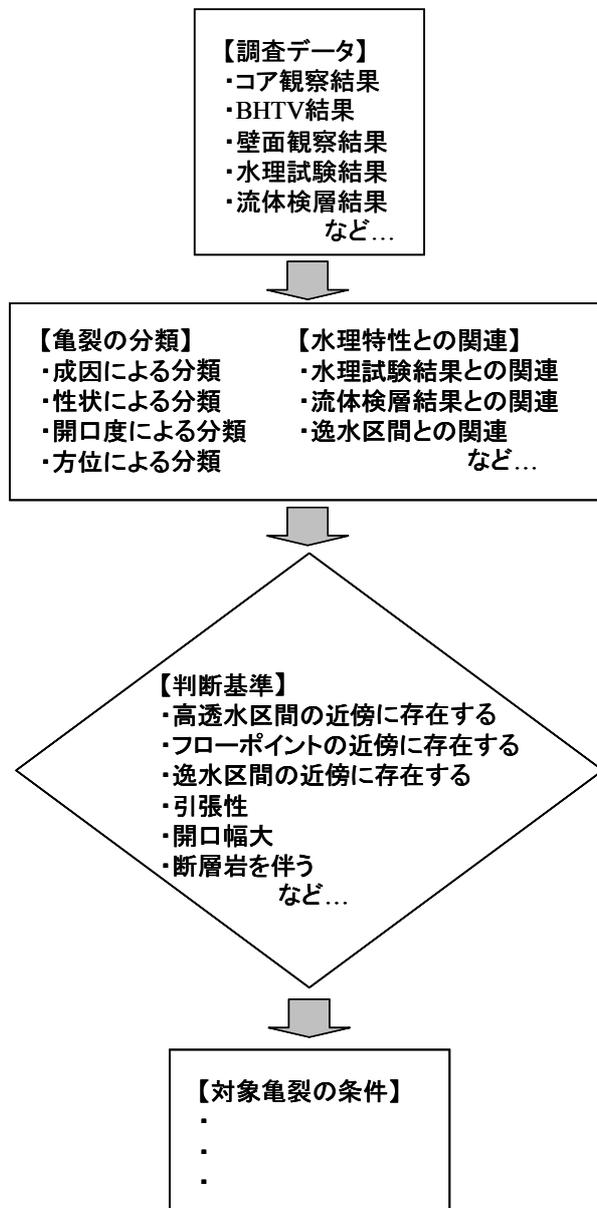


図 3.4-1 対象とする亀裂の条件設定手順 (例)

(2) 対象とする亀裂の抽出

採取候補箇所を対象に、(1)で設定した対象亀裂となる条件を満たす亀裂を抽出し、試料採取位置を決定する。図 3.4-2 に、亀裂の抽出から採取位置の決定までのフローを示し、以下に、それぞれの項目について説明する。

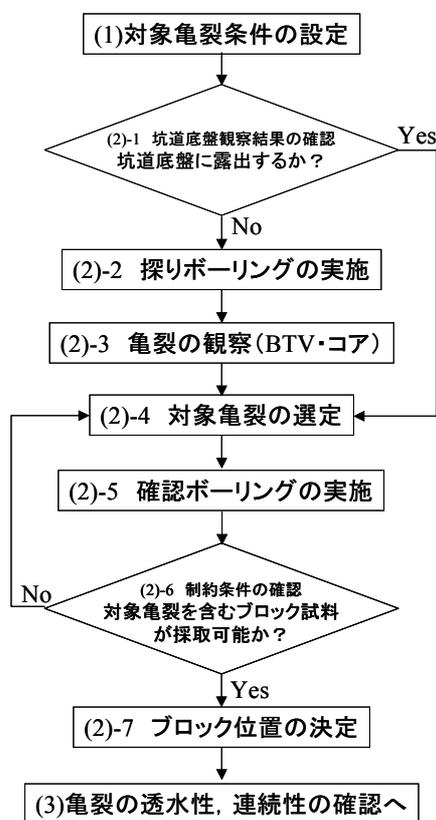


図 3.4-2 対象とする亀裂の抽出フロー

(2)-1 坑道底盤観察結果の確認

試験坑道の底盤観察結果に基づき、試験対象となり得る亀裂が坑道底盤に露出しているか否かについて確認を行う。坑道底盤に試験対象となり得る亀裂が露出している場合、確認されたものの中から最終的に試験対象とする亀裂を選定する。

(2)-2 探りボーリングの実施

坑道底盤に試験対象となり得る亀裂が露出していない場合、坑道底盤から探りボーリングを実施する。図 3.4-3 に探りボーリングのレイアウト例を示す。図 3.3-1 は東連絡坑道での調査を想定し、坑道延長を 70m とした場合のレイアウト例を示している。探りボーリングは、掘削深度 10m 程度のコアボーリングとし、坑道全長に対して、15m 程度の離隔で合計 5 本のボーリング掘削を行う。以下に探りボーリングの仕様についてまとめる。

【探りボーリング仕様】

- ・オールコアボーリング (φ76mm)
- ・削孔長 10m
- ・孔間隔 15m 程度 (東連絡坑道の場合、合計 5 本)

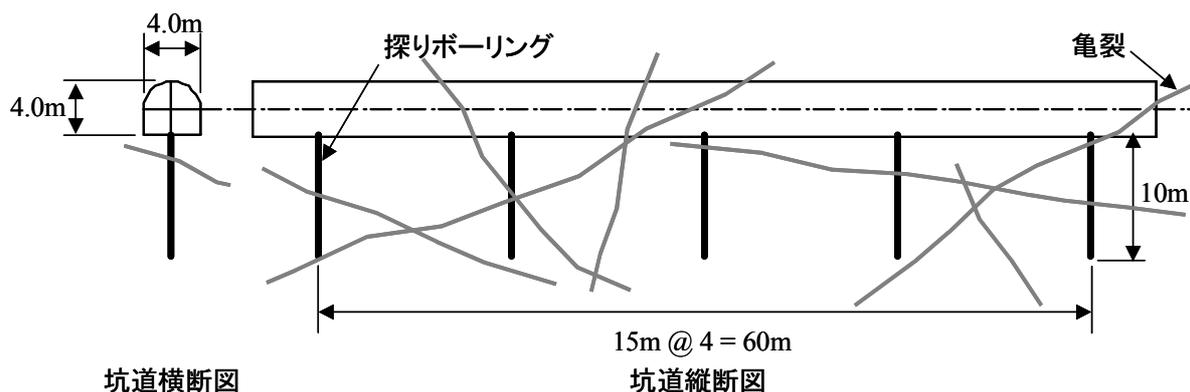


図 3.4-3 探りボーリングのレイアウト例

(2)-3 亀裂の観察

(2)-2 で実施した探りボーリングを利用し、コア観察および BTV (BHTV) 調査を実施する。観察結果に基づき、試料採取が可能な深度に、(1) で設定した条件を満たすような亀裂が存在するか否かについて調査を行う。以下に、調査項目についてまとめる。

【調査項目】

- ・コア観察（亀裂スケッチ、亀裂出現深度、亀裂の性状、成因、介在物）
- ・BHTV（亀裂出現深度、走向、傾斜、（開口度））
- ・水理試験（亀裂の透水量係数、水理開口幅）

(2)-4 対象亀裂の選定

(2)-3 の亀裂の観察結果に基づき、試験対象亀裂を選定する。対象亀裂の選定は、以下のことを考慮して実施する。

【対象亀裂の選定条件】

- ・亀裂が(1)で設定した条件を満たすこと
- ・亀裂がブロック採取範囲の全体に分布していることが推定できること
- ・亀裂が試料採取可能な深度に位置していること（深度 50cm～2m 程度まで）
- ・対象亀裂以外の亀裂が少なく、マトリクス部が自立すること

(2)-5 確認ボーリングの実施

(2)-4 で選定した亀裂が、採取候補位置の近傍で、実際に選定条件を満足しているか否かを確認するために、確認ボーリングを実施する。図 3.4-4 中に確認ボーリングのレイアウト例を示す。確認ボーリングは、掘削深度 5m 程度のコアボーリングとし、探りボーリングから想定されるブロック位置の近傍で実施する。以下に探りボーリングの仕様についてまとめる。

【探りボーリング仕様】

- ・ノンコアボーリング（φ 76mm）
- ・削孔長 5m

【調査項目】

- ・BHTV（亀裂出現深度、走向、傾斜、（開口度））

(2)-6 ブロック位置の決定

(2)-4, (2)-5 で選定した亀裂を含むブロック採取範囲を決定する。採取範囲と亀裂の位置関係を

図 3.4-4, 図 3.4-5 に示す. ブロック位置は, 最終的な 1m 四方の試料の中央に対象亀裂が配置されるように決定する. 採取するブロックのサイズは, 切断時の誤差や試料の崩壊等を考慮し, 1 辺 1.7m 程度の立方体とする. また, 後の原位置試験でのパッカー設置等を考慮して, 対象亀裂が坑道底盤から 1m 程度の深さに位置するように調整する. なお, 試料サイズについては, 採取場所の条件によっては, ブロックの切断ならびに切断後の搬出など作業が不可能となる場合も考えられるため, 場合によっては試料サイズを小さくする (最小で 50cm 程度) 必要がある.

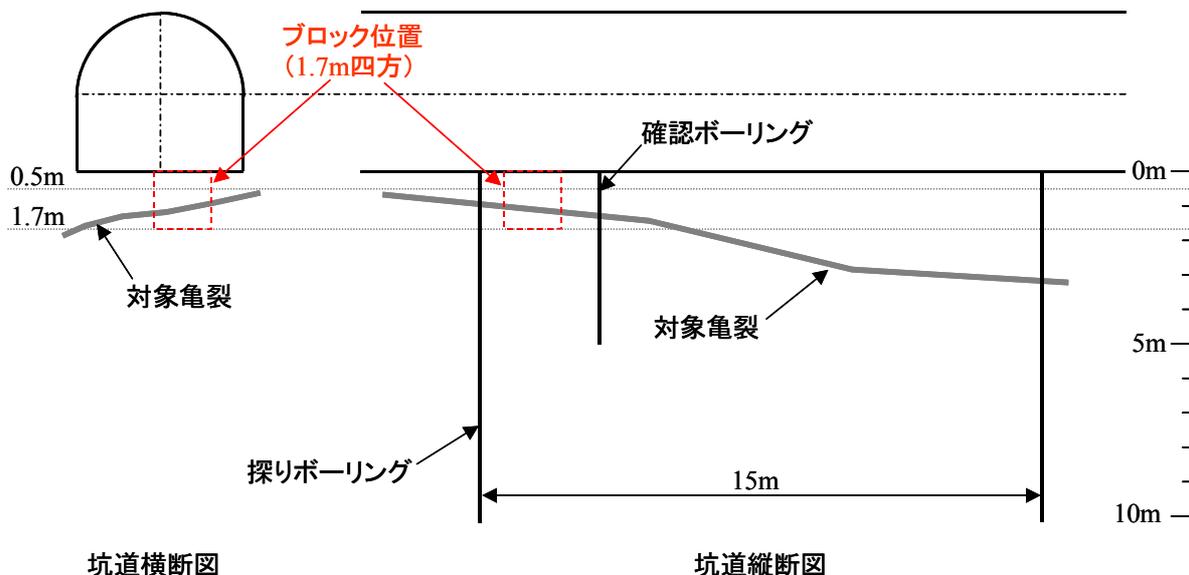


図 3.4-4 採取範囲と亀裂の位置関係

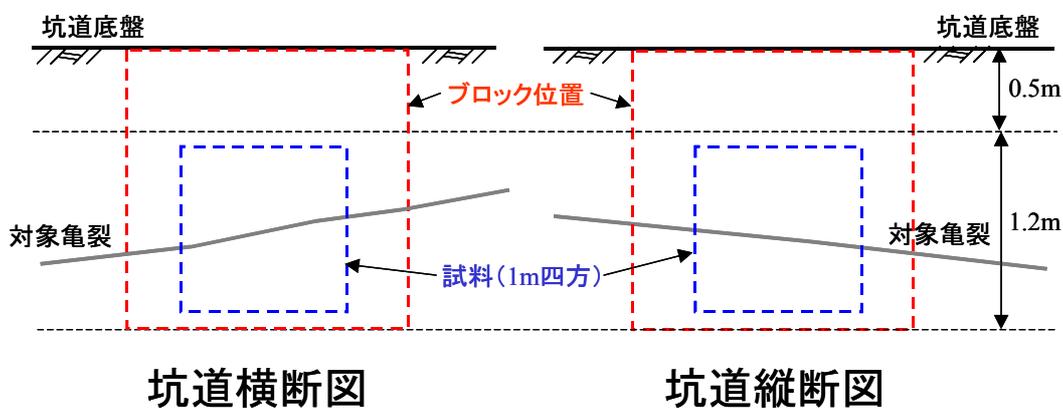


図 3.4-5 採取範囲と亀裂の位置関係 (ブロック位置拡大)

(3) 亀裂の透水性, 連続性の確認

ブロック採取前に, (2)で決定した対象亀裂の透水性, 連続性の調査を実施する. 図 3.4-6 に, 亀裂の透水性, 連続性確認のフローを示し, 以下に, それぞれの項目について説明する.

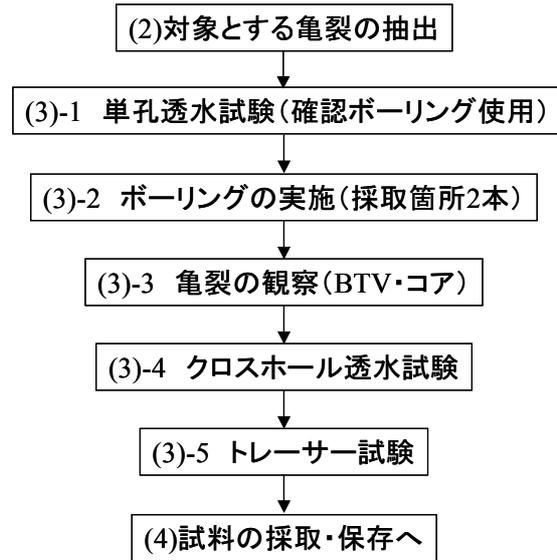


図 3.4-6 亀裂の透水性，連続性の確認フロー

(3)-1 単孔透水試験

採取対象亀裂の原位置での透水性を把握することを目的として，(2)で実施した確認ボーリングを用いた単孔透水試験を実施する．試験は，ダブルパッカーにより亀裂を含む短区間(1.0～2.5m)で実施し，試験結果から，亀裂の透水量係数や水理開口幅の算定を行う．

(3)-2 ボーリングの実施

最終的な 1m 四方の試料における亀裂分布の確認と，亀裂の連続性を把握することを目的として，1m 四方の試料端部におけるボーリング調査を実施する．図 3.4-7 に，ボーリングのレイアウト例を示す．ボーリングは，最終的な 1m 四方の試料の周囲に沿って 2 本削孔する．削孔深度は，後の水理試験，トレーサー試験の装置の設置分を考慮して，3.0m 程度とする．以下に探りボーリングの仕様についてまとめる．

【ボーリング仕様】

- ・オールコアボーリング (φ76mm)
- ・削孔長 3.0m
- ・試料周囲に沿って 2 本

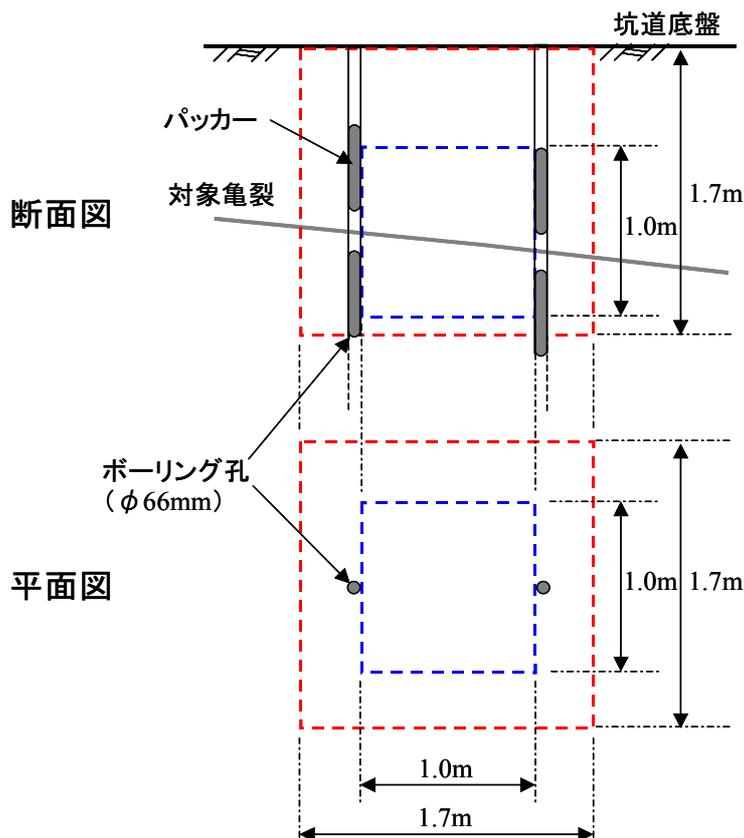


図 3.4-7 ボーリングレイアウト (例)

(3)-3 亀裂の観察

(3)-2 で削孔したボーリング孔を利用し、コア観察および BHTV 調査を実施する。観察結果に基づき、想定した深度に対象亀裂が位置しているか、また、想定した性状を有する亀裂が試料を貫通しているかについて確認を行う。以下に、調査項目についてまとめる。

【調査項目】

- ・コア観察（亀裂スケッチ、亀裂出現深度、亀裂の性状、成因、介在物）
- ・BHTV（亀裂出現深度、走向、傾斜、開口度）

(3)-4 クロスホール透水試験

対象亀裂の透水性、連続性を確認することを目的とし、(3)-2 で削孔したボーリング孔を利用したクロスホール透水試験¹⁾を実施する。

図 3.4-8 にクロスホール透水試験の概念を示す。クロスホール透水試験は、注水孔内の注水区間から正弦波状の圧力波形で注水した際の、観測区間への圧力応答とその応答圧力の波形解析結果から、ボーリング孔間の水みちの繋がりと透水係数を求める原位置水理試験手法である。図は、孔間の二次元的な水みち分布を把握するために、複数の注水区間、観測区間を設けた例であるが、今回の場合は、単一亀裂の連続性と透水性の確認を目的とするため、注水区間と観測区間はそれぞれ 1 区間となる。なお、注入圧力を正弦波で制御する目的は、自然の水圧変動ノイズの中から、注水による応答を容易に分離するためである。

本試験法は、岩手県釜石市の釜石鉱山原位置試験場において適用実績があり³⁾、本件で対象とする幌延サイトにも適用可能な手法であると考えられる。

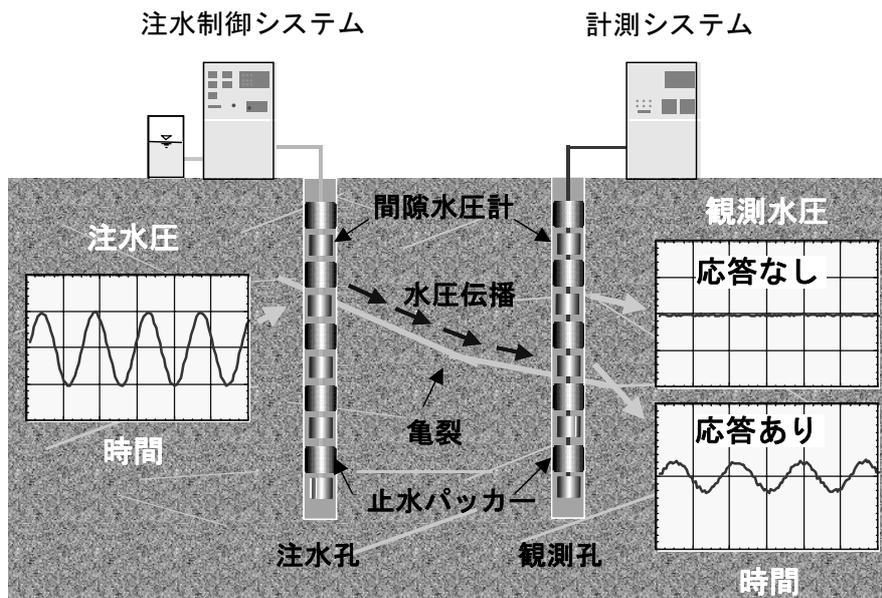


図 3.4-8 クロスホール透水試験の概念

(3)-5 原位置トレーサー試験

原位置における試料の物質移行特性を把握するために、(3)-2 で削孔したボーリング孔を利用したトレーサー試験を実施する。

図 3.4-9 にトレーサー試験の概念を示す⁴⁾。トレーサー試験には、主に、注水孔からトレーサー溶液を注入し、放射状に移行するトレーサーの濃度変化を観測孔にて測定する放射状流試験と、注水孔からトレーサーを注入する一方で観測孔から排水を行うダイポール試験(図 3.4-9)がある。本件では、後者のダイポール試験を適用する。ダイポール試験は、注水と排水を行うことで、強制的に孔間の流れを発生させるため、坑道内のようにバックグラウンドの流れが強い可能性のある場所での試験に適していると考えられる。また、ダイポール比(注水量/排水量)を変えることにより、試験対象領域を変えた試験が可能となるという特徴を有している。

なお、本試験方法は、クロスホール透水試験と同様に、岩手県釜石市の釜石鉱山原位置試験場において適用実績があり⁵⁾、本件で対象とする幌延サイトにも適用可能な手法であると考えられる。ただし、釜石鉱山ではマトリクス拡散の影響の少ない花崗岩を対象としていたため、幌延深地層研究センターへ適用する際は、釜石鉱山での適用例よりも流速条件を遅くした試験を実施する必要があると考えられる。

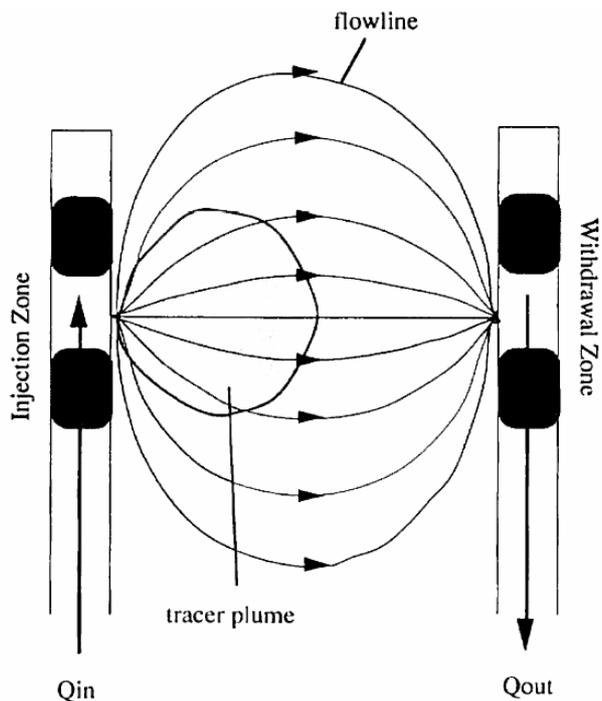


図 3.4-9 ダイポールトレーサー試験の概念

(4) 試料の採取, 保存

(2)で決定したブロック位置について, 試料の採取を実施する. 図 3.4-10 に, 試料採取のフローを示し, 以下に, それぞれの項目について説明する.

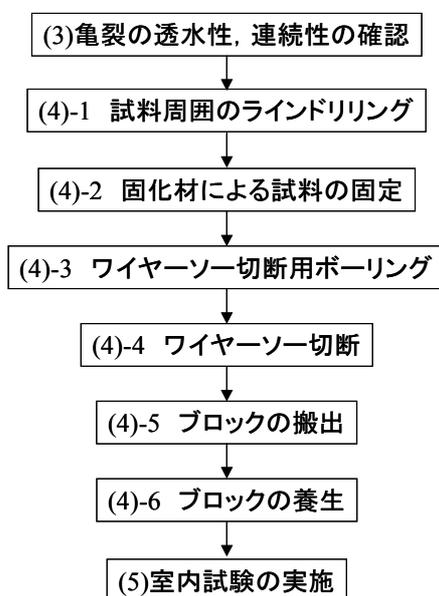


図 3.4-10 試料の採取, 保存フロー

(4)-1 試料周囲のラインドリリング

図 3.4-5 および図 3.4-7 に示した, 試料 (1m 四方) の周囲をラインドリリングにより切断する. その際, 図 3.4-7 中の 2 本のボーリング孔 ($\phi 76\text{mm}$) は, ラインドリリングの一部として利用する. 図 3.4-11 にラインドリリングのレイアウト例を示す. 削孔深度は, 1.7m とし, 各ボーリン

グ孔は、口径の半分を重ねて削孔する．この場合、1m に約 30 本のボーリングが必要となり、4 面で 120 本のボーリング孔を削孔することとなる．

ラインドリリング完了後、試料側面の状況を BTV 等により確認する．特に、試料の底部付近は、切断後の搬出の際に崩壊する恐れがあるため、割れ目の存在などについて状況を確認しておく必要がある．

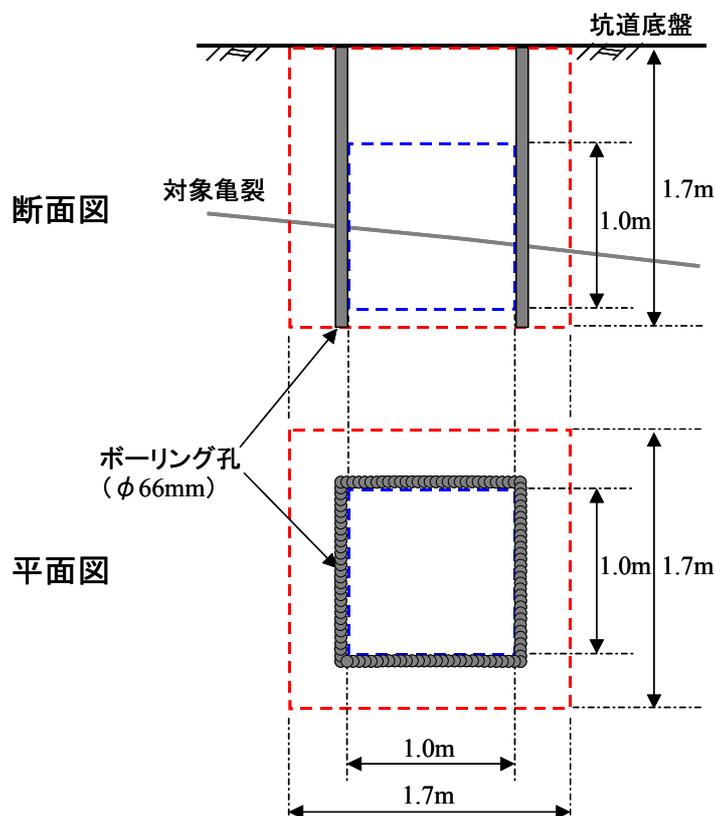


図 3.4-11 ラインドリリングレイアウト例

(4)-2 固化材による試料の固定

試料は、亀裂を含んでいることに加え、比較的軟質な堆積岩を対象とするため、試料の切断、搬出に際して、試料の崩壊が懸念される．そこで、後の切断、搬出における試料の保護を目的とし、(4)-1 でラインドリリングにより切断した箇所に固化材を流し込み、試料の固定を行う（図 3.4-12）．また、亀裂や試料の空隙に固化材が浸入することを防ぐため、固化材の打設前に、試料表面をビニールシート等により養生する．

【固化材の選定】

固化材は、種類によって、強度や耐久性が異なり、場合によっては固化過程において、発熱や膨張・収縮を伴うものもある．従って、固化材の種類によっては、その特性によって、試料の破壊を生じたり、固定の目的を果たさない場合があることが懸念される．

以下に、固化材の特性として必要な条件を示す．

【固化材としての必要条件】

- ・強度が十分であること
- ・水分の存在によって悪影響をもたらさないこと
- ・固化過程において、過度の発熱を生じないこと

- ・固化過程において、膨張、収縮を生じないこと
- ・ビニールシートと反応しないこと

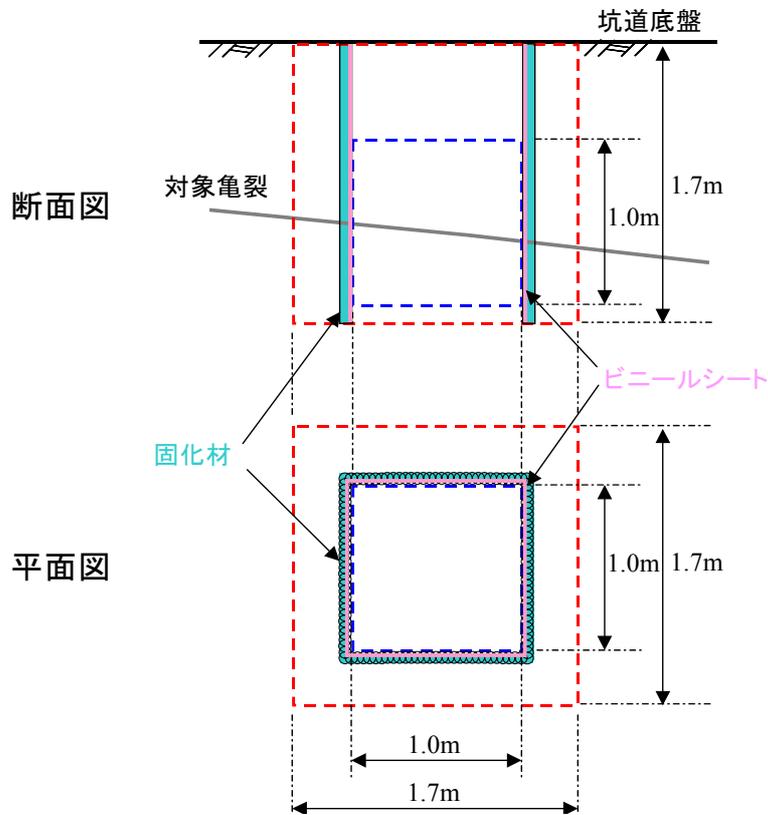


図 3.4-12 固化材の打設状況

(4)-3 ワイヤソー切断用ボーリング

ブロック位置 (1.7m 四方) の四隅に、ワイヤソー切断の切り口となるボーリング孔を削孔する。図 3.4-13 にワイヤソー切断用ボーリングのレイアウト例を示す。後のワイヤソー切断では、ブロックの側面と背面の全ての面をワイヤソーのみによって切断するために、後述の図 3.4-15 に示すような、角度可変プーリーを使用する。角度可変プーリーは約 200mm 程度の大きさであるため、ボーリング孔は $\phi 300\text{mm}$ の大口径とする必要がある。また、削孔長についても、角度可変プーリーの設置を考慮し、実質必要深度 1.7m に対して、300mm の余掘りを行い、全長 2.0mm とする。

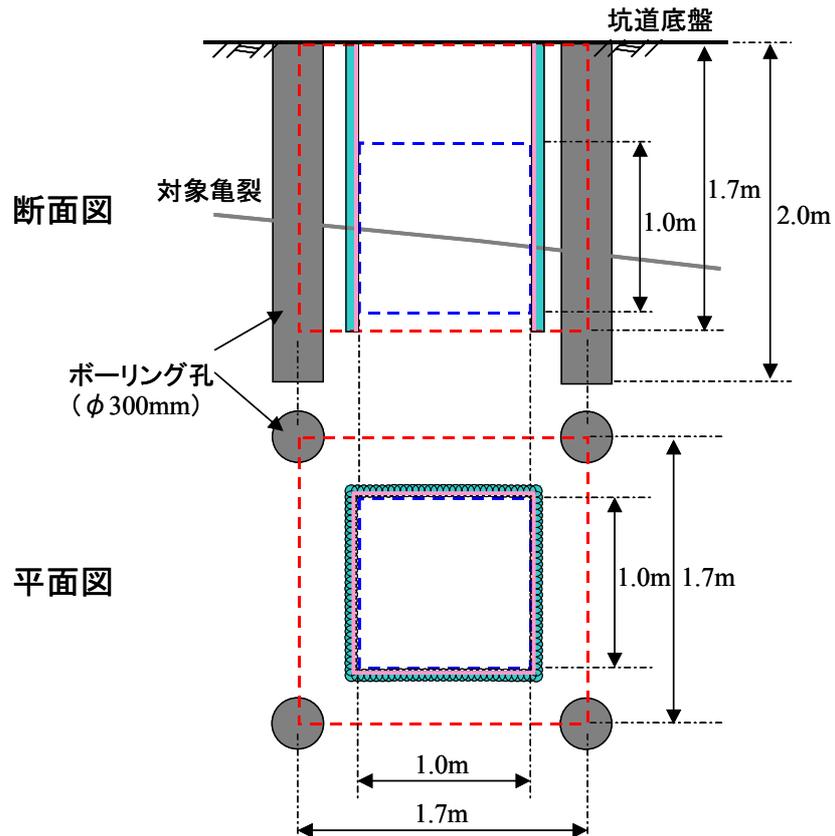


図 3.4-13 ワイヤソー切断用ボーリングレイアウト例

(4)-4 ワイヤソー切断

(4)-3 で削孔した 4 本のボーリング孔を切り口として、ブロックの側面と背面をワイヤソーにより切断する。図 3.4-14 にワイヤソー切断の手順を示す。同図は、壁面からの採取をイメージしたものであるが、底盤から採取する場合も同様の手順が適用可能である。ワイヤソー切断は、切断する面の位置によって、ワイヤーの取り回しを順次変える必要があるため、ワイヤーの取り回し方向に追従できるような角度可変プーリー（図 3.4-15）を使用する。

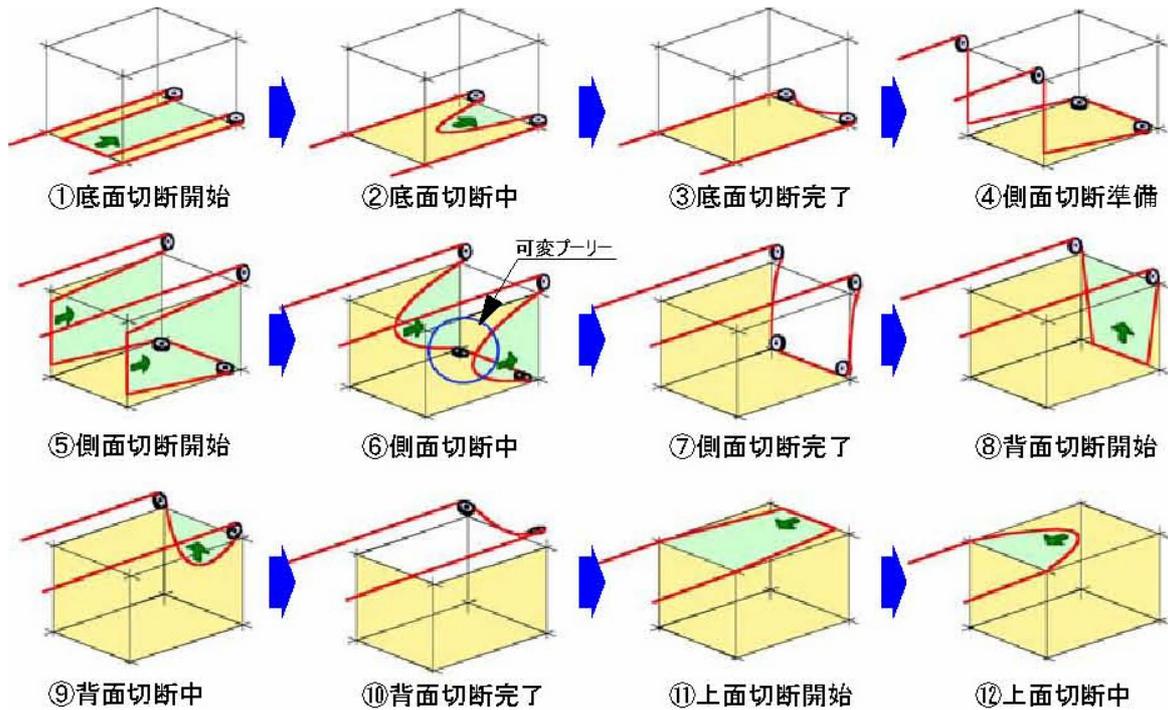


図 3.4-14 ワイヤソー切断手順

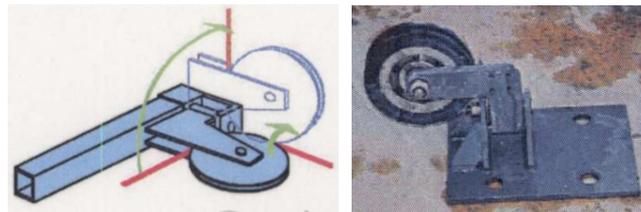


図 3.4-15 角度可変プーリー

(4)-5 ブロックの搬出

(4)-4 で切断したブロック（1.7m 四方）を搬出する．ブロックサイズを 1.7m 四方とした場合，ブロックの重量は約 10.0t となる．ただし，搬出用治具や余掘り分の重量などを考慮して 15.0t 以上の重量に対応したものである必要がある．

試験坑道内で採取する場合，大型クレーンなどの揚重機械を搬入できないことから，ブロックの搬出には，基本的にウインチを用いる．図 3.4-16 にブロック搬出手順の概要を示す．以下に，搬出方法について説明する．

【ブロックの搬出手順】

- ① 試料の上面にアンカーボルトにて，ブロック吊り上げ用の治具を取り付ける（図 3.4-17）．
- ② 坑道天端にアンカーボルトにて，滑車取り付け用の鉄板を取り付ける．
※ ①，②の実施に際して，事前にアンカーの引き抜き試験を実施する必要がある．
- ③ ウインチと滑車により，ブロックを吊り上げる（図 3.4-16 (a)）．
- ④ 開口部に山留材を敷き，その上にブロックを仮置きする（図 3.4-16 (b)）．
- ⑤ 坑道天端にアンカーボルトにて，盛り替え用の滑車を取り付ける．
- ⑥ 2 台のウインチを使用し，試料を吊り上げる（図 3.4-16 (c)）．
- ⑦ 2 台のウインチのワイヤー長さを同時に変えながら，ブロックを水平移動する（図 3.4-16 (d)）．

※ ウインチや滑車の盛り変えが簡単に行える場合は、この方法で立坑までブロックを移動する。

- ⑧ 敷鉄板の下に単管パイプ用を敷き、その上にブロックを降ろす (図 3.4-16 (e)).
- ⑨ 敷鉄板をウインチで引き寄せ、立坑までブロックを移動する (図 3.4-16 (e)).
- ⑩ スカフォードにて坑外に搬出する。

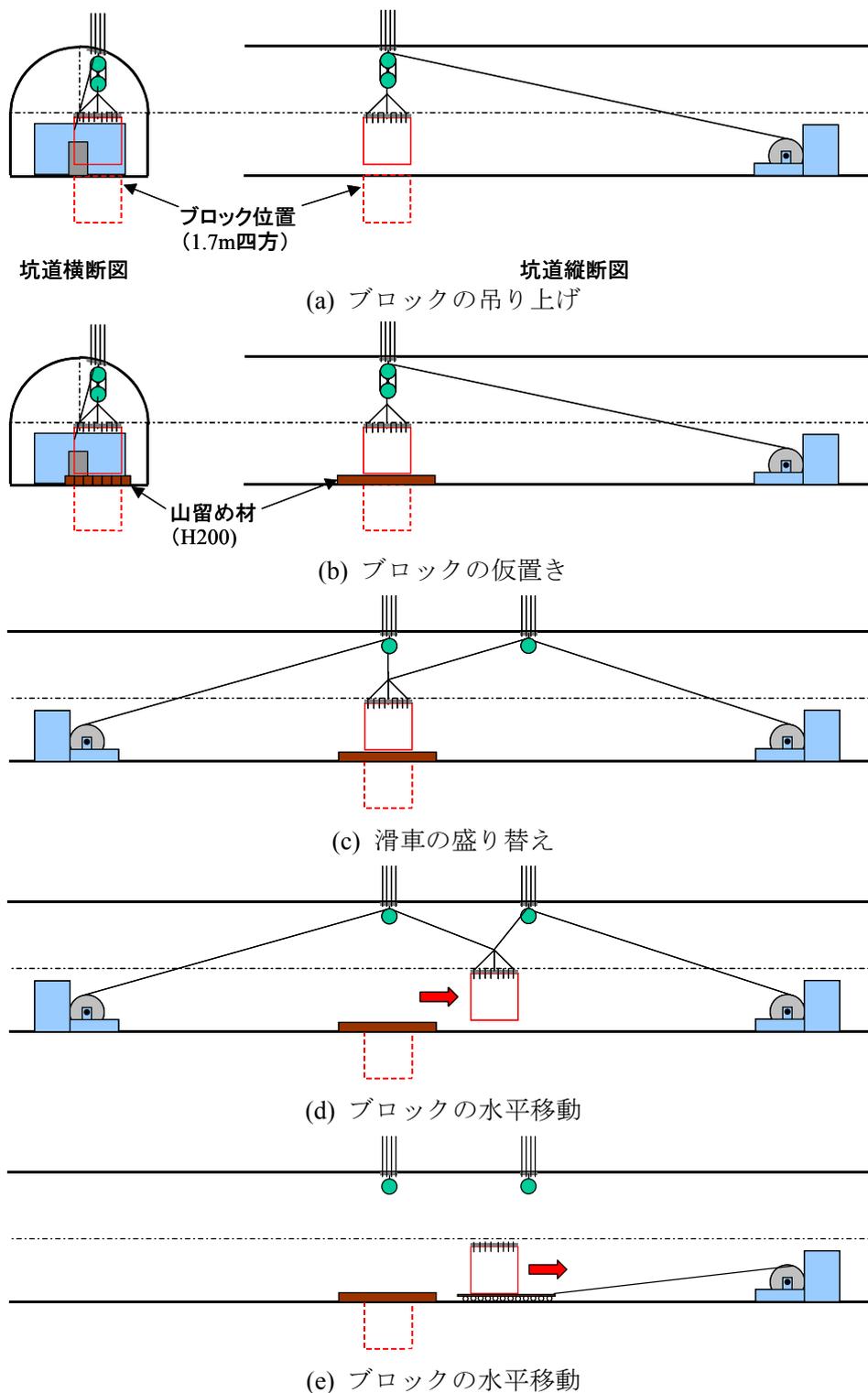


図 3.4-16 ブロックの搬出手順例

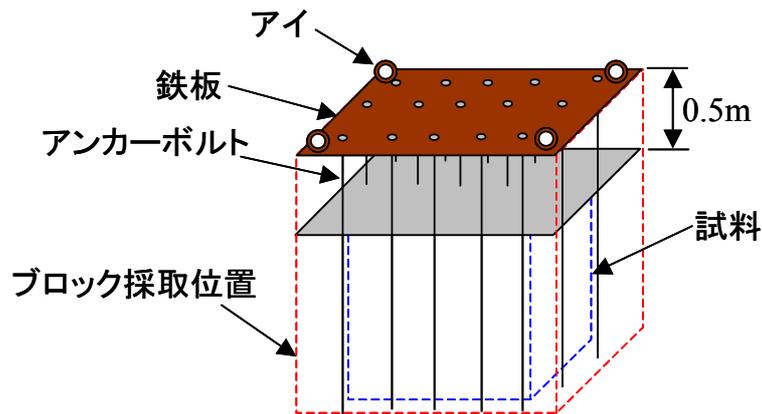


図 3.4-17 ブロック吊り上げ用治具

(4)-6 ブロックの養生

搬出したブロックは、その後、試験用の供試体として整形される。整形までの仮置き期間や、整形場所までの運搬期間などにおいては、ブロックの乾燥や酸化を防ぐための養生を行う必要がある。

養生の方法としては、試料の表面にパラフィンを塗布する方法や、試料の周囲に型枠を組み、その間にレジンなどの固化材を打設する方法などが考えられる。具体的な養生方法については、採取後のブロックの状況や仮置きの環境などによって検討する必要がある。また、養生の環境として、坑道内は湿度が高く試料が乾燥しにくい環境であるため、現地の状況が許す範囲で坑道内に仮置きするのが望ましい。

3.5. 作業数量と概略工程

表 3.5-1 および表 3.5-2 に、前節に示した試料採取に要する調査および作業の概略数量と、主要資機材の数量を示す。また、表 3.5-3 に前節の手順で試料採取を実施した場合の概略工程を示す。

表 3.5-1 調査および採取作業の概略数量

調査・作業項目	仕様	数量	単位
探りボーリング			
ボーリング削孔	φ 76mm オールコア, 削孔長 10m	5	本
コア観察	コア長 10m×5 本	50	m
BTV (BHTV)	孔長 10m	5	回
単孔透水試験	区間長 1~2.5m	5	区間
確認ボーリング			
ボーリング削孔	φ 76mm ノンコア, 削孔長 5m	1	本
BTV (BHTV)	孔長 5m	1	回
亀裂の透水性, 連続性確認			
単孔透水試験	区間長 1~2.5m	1	区間
ボーリング削孔	φ 76mm オールコア, 削孔長 3m	2	本
コア観察	コア長 3m×5 本	6	m
BTV (BHTV)	孔長 3m	2	回
孔間透水試験	区間長 1~2.5m	1	区間
トレーサー試験	区間長 1~2.5m	1	区間
試料採取, 搬出	孔長 3m		
ラインドリリング	φ 76mm, 削孔長 1.7m	120	本
BTV	試料全周 (CCD カメラの利用も検討)	1	式
大口径ボーリング削孔	φ 300mm, 削孔長 2.0m	4	式
ワイヤーソー切断	ブロック側面, 底面	1	式
アンカー引き抜き試験	試料上部用, 坑道天端用	1	式
試料搬出	ウインチ設置×2 および盛り替え	1	式

表 3.5-2 主要資機材

資機材名称	仕様	数量	単位
大口径ボーリングマシン	φ 300mm	1	台
ワイヤーソー切断機	小型タイプ	1	台
ウインチ	10t 対応	2	台
固化剤	レジン, モルタルなど	1	m ³
角度可変プーリー	ワイヤーソー切断用	4	個
アンカーボルト	高強度 (冶具固定用)	50	本
吊り上げ用冶具	試料上部, 坑道天端×2	3	セット
滑車	10t 対応	4	個
山留材	200H, L=3.0m	10	本
敷鉄板 (or パレット)	1.7m×1.7m 以上	1	枚
単管パイプ	2m	30	本

表 3.5-3 調査および採取作業の概略工程

項目	実施期間(月)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
(1)対象とする亀裂の条件設定	■								
(2)対象とする亀裂の抽出									
・底盤観察	■								
・探りボーリングおよび調査		■							
・確認ボーリングおよび調査			■						
(3)亀裂の透水性、連続性の確認									
・単孔透水試験(確認ボーリング)			■						
・試験用ボーリングおよび調査(2本)			■						
・クロスホール透水試験			■	試験条件による					
・原位置トレーサー試験			■	試験条件による					
(4)試料の採取、養生									
・ラインドリリング							■		
・固化材の打設、養生							■		
・ワイヤーソー切断用ボーリング								■	
・ワイヤーソー切断								■	
・ブロックの搬出								■	
・ブロックの養生								■	

3.6. 追加オプションの検討

ここまでは、試験対象とする亀裂の抽出から試料採取までの作業について、3.2 節で設定した制約条件に基づいた、最も基本的なケースについて具体的な手順と方法を検討してきた。ここでは、追加のオプションとして、前節までとは異なる制約条件を想定した幾つかのケースについて、作業手順と方法の検討を行う。以下に、各ケースについて説明する。

3.6.1. 高角亀裂を対象とした原位置試験方法

図 3.4-2 の(2)-1 坑道底盤観察結果の確認において、坑道底盤に高角度亀裂が確認され、それを対象亀裂とした場合、後の確認ボーリングや原位置透水試験、トレーサー試験などが、前述の方法では困難となることが考えられる。以下に、高角亀裂を対象とした場合の原位置試験方法を示す。

高角亀裂を対象とした場合は、前述の図 3.4-7 のように、亀裂を貫通する形で試験用のボーリング孔を削孔することが困難となる。そこで、高角亀裂の場合は、図 3.6-1 に示すように、試験用のボーリング孔(2本)を亀裂に沿った方向に削孔し、このボーリング孔間での試験を実施する。ボーリングの削孔方向は、底盤に露出した亀裂の走向傾斜から推定する。ただし、この方法で試験を実施した場合、試験中にトレーサー溶液などが、亀裂を伝わって坑道底盤に漏水する可能性が考えられる。そこで、図 3.6-2 のように、坑道底盤の亀裂の露出部分に止水材を充填し、試験中の注入水やトレーサー溶液の漏水を防止する。

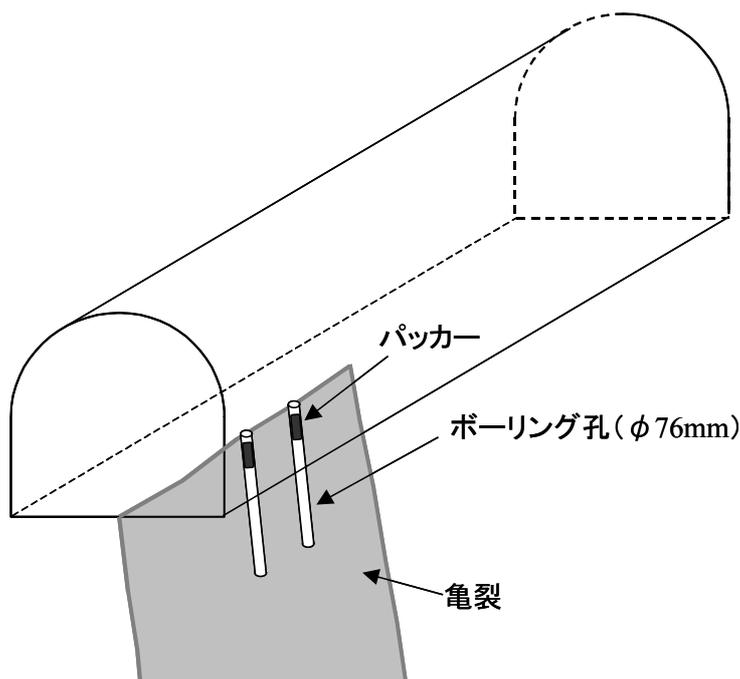


図 3.6-1 高角亀裂を対象とした場合のボーリングレイアウト (例)

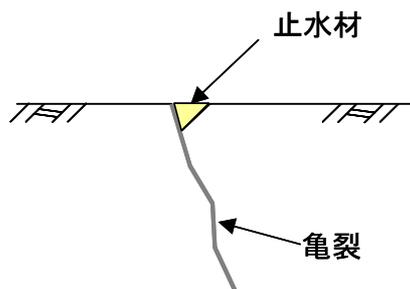


図 3.6-2 坑道底盤の亀裂露出部分の止水

3.6.2. 専用のニッチにて実施する場合

前述の試料採取および原位置試験を実施場所について、図 3.6-3 に示すような、専用の枝坑（ニッチ）で実施する場合も考えられる。この場合、立坑や坑道の建設やその他の調査の工程に与える影響が少ないため、坑道を占有する場合と比べて、採取、試験の工程についてある程度の余裕を確保することが可能であると考えられる。以下に、専用のニッチで実施する場合の必要スペースと、採取方法の追加オプションについて説明する。

(1) 必要スペース

専用のニッチにて採取および試験を実施する場合の必要スペースを図 3.6-3 に示す。ニッチの位置や広さは、基本的に、対象となる亀裂試験の位置によって大きく異なるものと考えられる。図 3.6-3 は、対象となる亀裂が、ニッチのスペースを最小とするような位置に存在した場合のスペースを示している。ニッチにて作業を行う際のスペースとしては、ブロック採取箇所の奥の作業スペース（2m 程度）と、ブロック搬出時のウインチの設置スペースを含めた合計 10m 程度を必要とする。掘削幅は、水平坑道と同様に 4m 程度を必要とする。

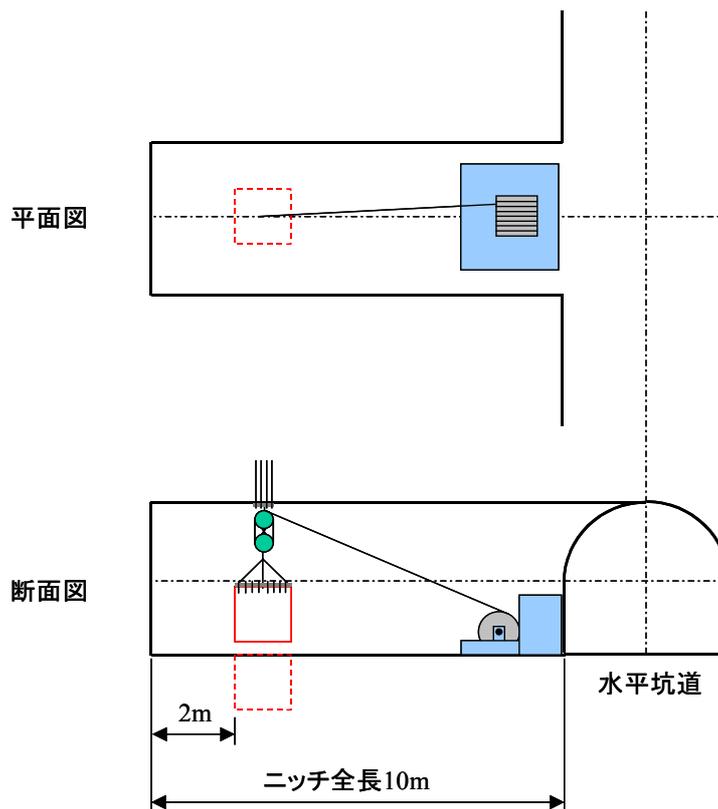


図 3.6-3 ニッチのレイアウト (例)

(2) 試料採取方法の追加オプション

専用のニッチにて、試料採取を行う場合、作業時間にある程度余裕を持つことが可能であると考えられる。このような場合を想定して以下のような方法を追加オプションとして示す。

図 3.6-4 に採取手順を示す。採取の基本的な考え方は、坑道壁面に出現する対象亀裂を含む試料を固化材で保護した状態で、試料の部分を残して切羽を掘削することにより試料を切り出す方法である。以下に、具体的な作業手順について説明する。

① 対象亀裂の決定

本採取方法は、坑道壁面もしくは切羽において、試験の対象となるような亀裂が確認された場合に適用可能となる。対象とする亀裂は、水平、高角のいずれの場合にも適用可能である。

② ラインドリリングおよび固化材の充填

前述と同様の方法により、試料採取箇所の側面と上面をラインドリリングにより切断する。切断した箇所に試料の保護のための固化材を充填する。固化材の充填に際しては、亀裂や岩石の空隙内への固化材の浸入を防止するため、ビニールシート等を敷設する。

③ 試料周囲の掘削

固化材が十分な強度発現するまで養生を行った後、試料と充填した固化材を残した状態で、周囲の切羽を掘削する。試料近傍の掘削に当たっては、掘削に伴う衝撃や振動により、試料を痛めないよう注意を払う必要がある。

④ 試料背面および底面の切断

試料周囲の切羽掘削を終えた後、試料の背面と底面の切断を行う。切断は、ワイヤーソーやチェーンソーなどを用いて、試料に過度な衝撃を与えないように実施する。

⑤ 試料の搬出

背面と底面の切断を終えた後、試料を搬出する。搬出の方法は、前述のウインチを用いた方法が応用できると考えられる。また、専用のニッチでの作業が可能な場合は、採取後の試料をニッチ内にて保管することも可能であると考えられる。

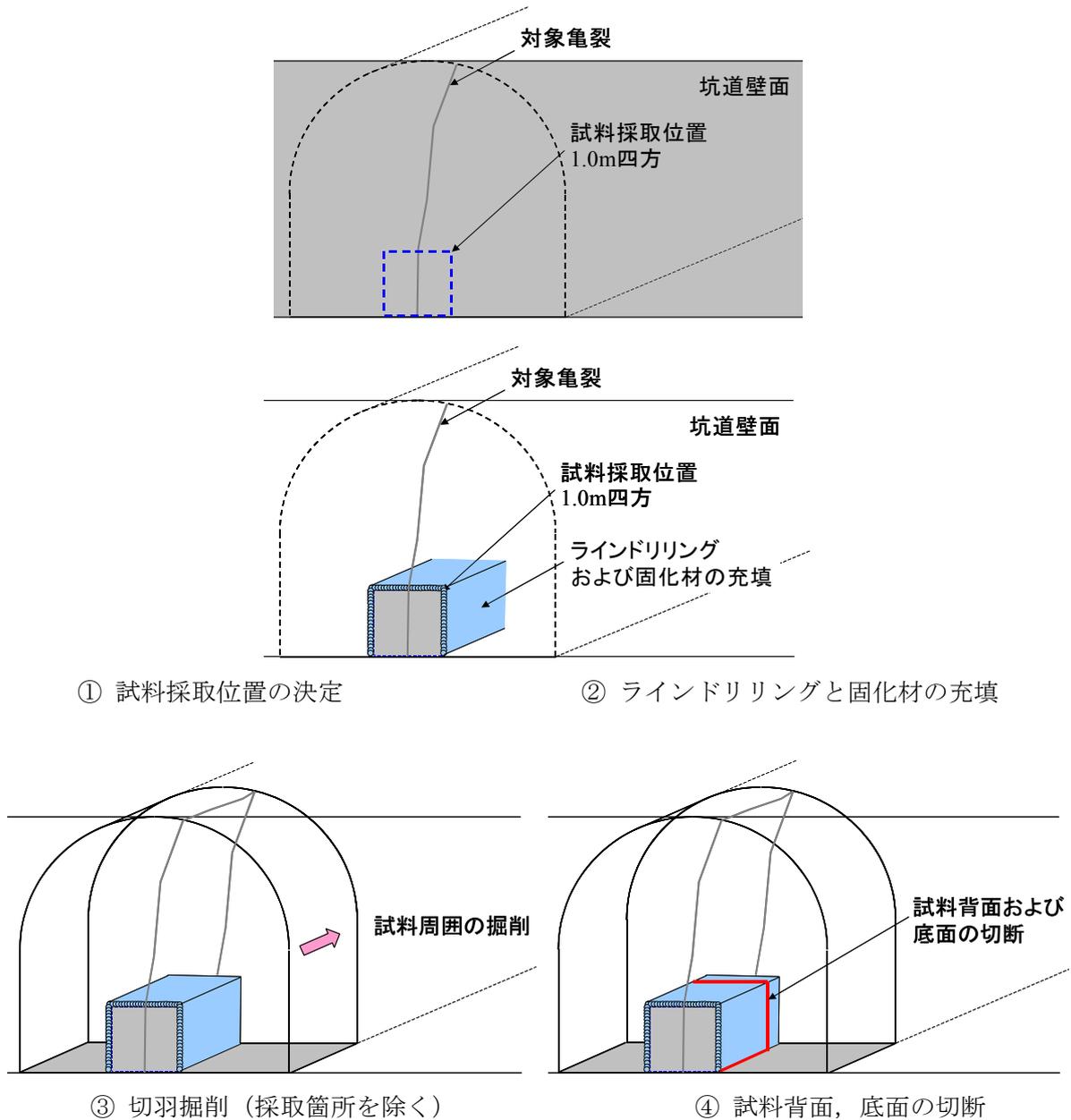


図 3.6-4 試料採取方法 (追加オプション)

3.6.3. 原位置試験方法 (ラインドリリング後)

前述の方法では、原位置透水試験およびトレーサー試験は、試料の採取作業の前に実施するこ

ととしている．ここでは，試料採取の途中で原位置試験を実施するケースを追加オプションとして示す．この方法は，原位置試験を試料採取の途中で実施する方法である．図 3.6-5 に試験の概要を示す．試験には，試料の中央に配置した注入孔（もしくは排出孔）と試料の四隅の観測孔を用いる．この方法は，ラインドリリングと固化材の充填を終えた後に実施する方法で，これにより，試料の周囲と周辺岩盤との繋がりが断たれるため，より境界条件を限定した試験が可能となる．

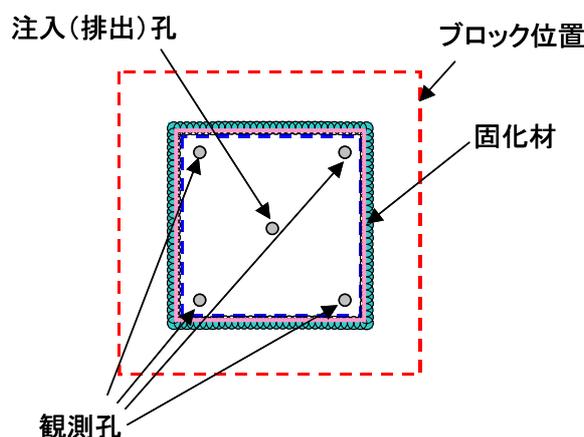


図 3.6-5 原位置試験のボーリング孔レイアウト（例）

3.7. 大型ブロック試料を対象とした室内透水トレーサー試験方法の検討と予察解析

前節で採取したブロック試料を対象とした室内透水試験ならびにトレーサー試験の方法について検討する．以下に，試験方法と手順について説明する．

3.7.1. トレーサー試験方法の検討

これまでの調査結果から，幌延サイトの亀裂を伴う堆積岩を対象としたトレーサー試験を行う場合，亀裂内の移流・分散の評価に加え，亀裂からマトリクスへの拡散現象による遅延の影響を考慮する必要があることが明らかとなっている．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適切に評価するためには，トレーサー試験中の亀裂内の移流速度を可能な限り遅くする必要がある．そこで，トレーサー試験方法としては，図 3.7-1 に示す方法⁶⁾を基本に検討を行う．本手法は，図に示すように，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あり，これまでのコア試料を対象としたトレーサー試験で採用した試験方法である．同手法は，配管内分散の影響を考慮する必要がなく，極微量流量条件下での試験に適した手法である．また，特徴として，排出されるトレーサーは，濃度測定用のセル内に貯留されるため，試験結果は通常の破過曲線とは異なり，測定セル内の累積濃度の時間変化として出力される．

以下に，本手法での試験を想定した予察解析を行うとともに，その結果を踏まえ，適切な試験を実施するための試験手順とその中で留意すべき点について説明する．

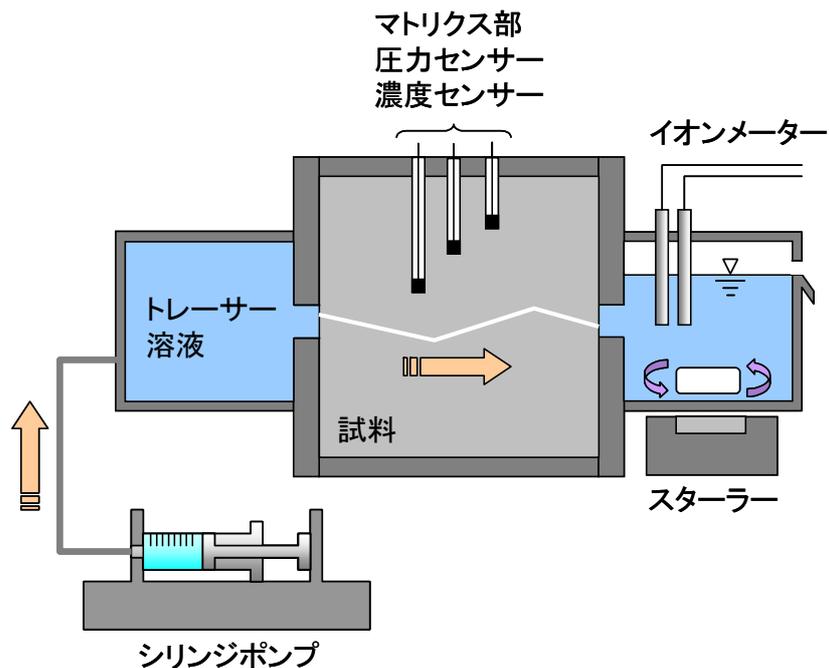


図 3.7-1 トレーサー試験方法の概要 (スケールは実際と異なる)

3.7.2. 大型ブロック試料を用いたトレーサー試験の予察解析

予察解析では、1m 四方の大型ブロック試料を用いた 1 次元の非収着性トレーサー試験を想定し、亀裂内の移流・分散およびマトリクス拡散を考慮したモデルによる数値解析を実施した。以下に、内容を説明する。

(1) 解析モデル

図 3.7-2 に解析モデルの概要を示す。モデルは、X-Z 平面上の 2.5m×1.0m 領域の中央(Z=0.5m)に亀裂を配したものとした。解析モデルの長さは、排出側境界の影響を考慮して、濃度観測点までの距離よりも長く設定した。境界条件は、亀裂へのトレーサーの注入流量 Q_f を一定とし、亀裂上の左端(X=0.0m, Z=0.5m)を $C_0=1.0$ の濃度固定境界とした。亀裂およびマトリクスのパラメータは、稚内層を対象に、これまでに実施した室内試験および原位置試験結果⁷⁾を参考に表 3.7-1 のように設定した。なお、数値解析には有限要素法による地下水流動・物質移行解析コード (FRAC3DVS ver.3.49⁸⁾)を用いた。

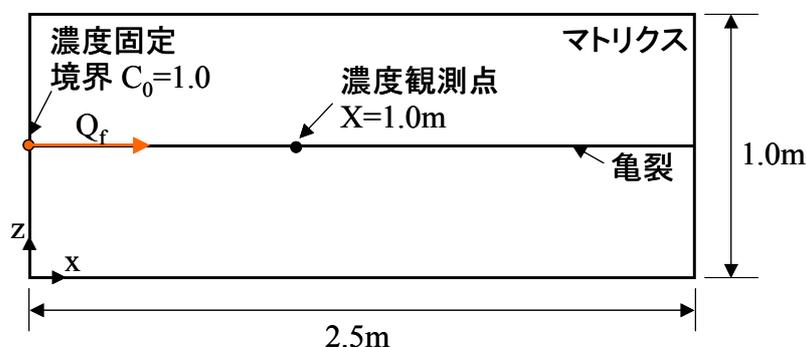


図 3.7-2 解析モデルの概要

表 3.7-1 解析パラメータ一覧

	パラメータ	単位	値
亀裂	開口幅 b	mm	0.1
	縦方向分散長 α_L	m	0.1
マトリクス	実効拡散係数 D_e	m ² /s	1.0×10^{-11}
	間隙率 n	%	35

(2) 解析結果

図 3.7-3 に、トレーサーの注入流量 Q の異なる 3 ケースについて解析結果を示す。解析結果は、濃度の経時変化を通常の破過曲線として示した場合と、図 3.7-1 に示す装置で試験を行った場合に得られる、測定セル内の累積濃度の変化として示した場合の 2 通りについて示した。測定セル内の累積濃度は、以下の式(3.1) により求めた。

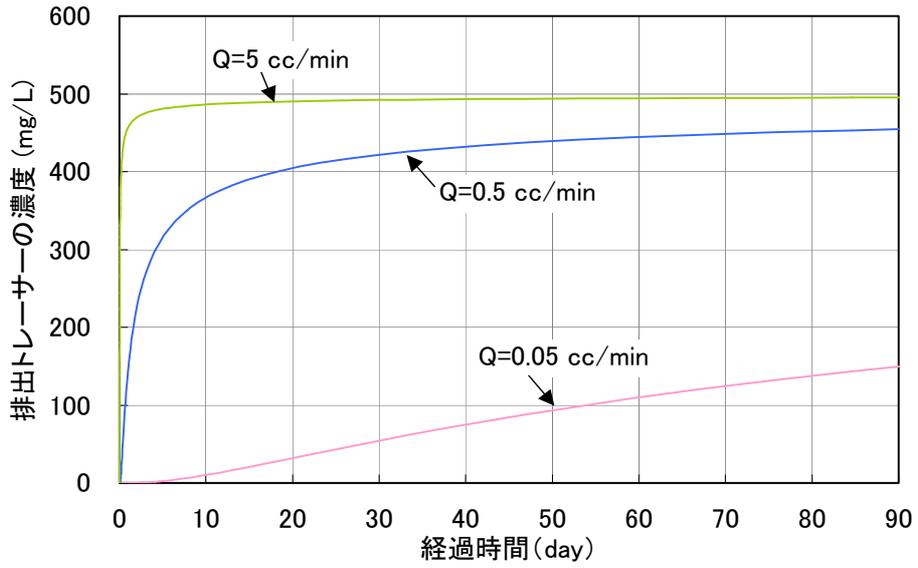
$$C^* = (C_{i-1}V + C_i Q(t_i - t_{i-1}) - C_{i-1} Q(t_i - t_{i-1})) / V \quad (3.1)$$

ここに、 C^* ：測定セル内の累積濃度(mg/L)、 C_i ：時間ステップ i における排出トレーサー濃度(mg/L)、 t_i ：時間ステップ i における時間(sec)、 Q ：トレーサー注入流量(L/sec)、 V ：測定セルの容積(L)である。なお、本解析における測定セルの容積 V は、イオンメータの設置に必要な最小容積として 2.5L を仮定した。また、注入するトレーサーの濃度は、これまでの室内試験の実績から密度の影響が生じない濃度として 500mg/L を仮定した。

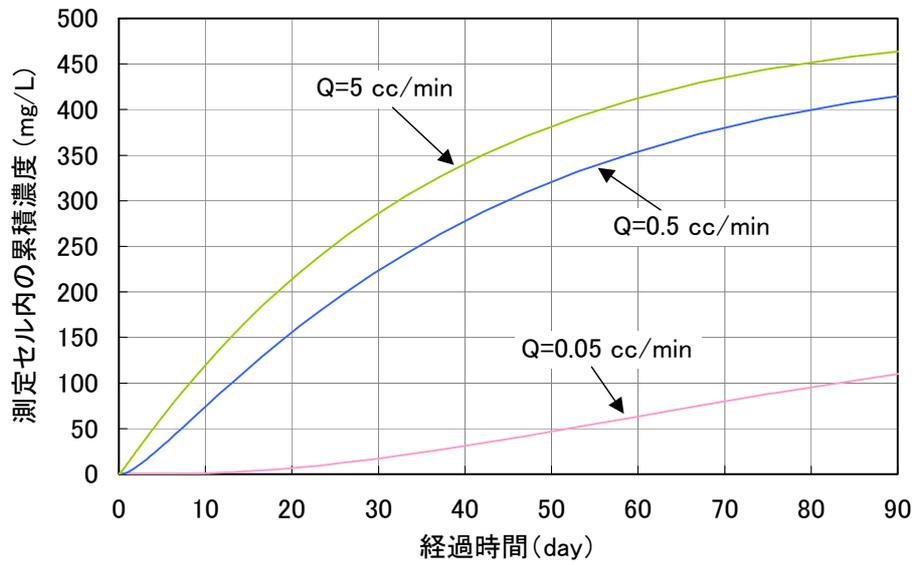
図 3.7-3 より、測定セル内の累積濃度の時間変化は、注入流量によって大きく異なることが分かる。測定セル内の濃度が 100 mg/L 程度に達するまでの時間は、流量 $Q=5\text{cc/min}$ では 1 週間程度、 $Q=0.5\text{cc/min}$ では 2 週間程度、最も流量の少ない $Q=0.05\text{cc/min}$ では 3 ヶ月程度を要する。この測定セル内の濃度 100mg/L は、パラメータの評価に必要な、測定セル内の濃度変化の立ち上がりと勾配をイオンメータによって十分に検知可能な濃度として、試験終了時期の一つの目安とした値である。なお動水勾配は、 $Q=0.05\text{cc/min}$ の場合で 0.001 程度、 5cc/min の場合で 0.1 程度である。

図 3.7-4～図 3.7-7 に、上記の流量が最も多いケース($Q=5\text{cc/min}$)と、少ないケース($Q=0.05\text{cc/min}$)について、亀裂の分散長 α_L ならびにマトリクスの拡散係数 D_e を感度解析的に変化させたケースについて解析結果を示す。これより、流量の多い $Q=5\text{cc/min}$ の場合は、流量の少ない場合($Q=0.05\text{cc/min}$)に比べて、分散長、拡散係数ともパラメータの感度が低く、パラメータの違いによる解析結果の違いが殆ど見られないことが分かる。これは、すなわち測定セル内の累積濃度の時間変化から、これらのパラメータの同定を行うことが困難であることを示している。したがって、トレーサー試験結果から、信頼性の高いパラメータの同定結果を得るためには、トレーサーの注入流量を可能な限り少なくする必要があると言える。

以上より、トレーサー試験の計画の際には、対象とする試料の大きさと、各パラメータの予想される範囲を予め把握した上で、上記と同様の予察解析を実施し、トレーサーの注入流量や濃度、測定セルの容積などの試験条件の最適化を行う必要があると言える。また、今回の解析結果は、同程度のスケールで実施する原位置試験の試験条件決定などにおいても参考とすることができる。

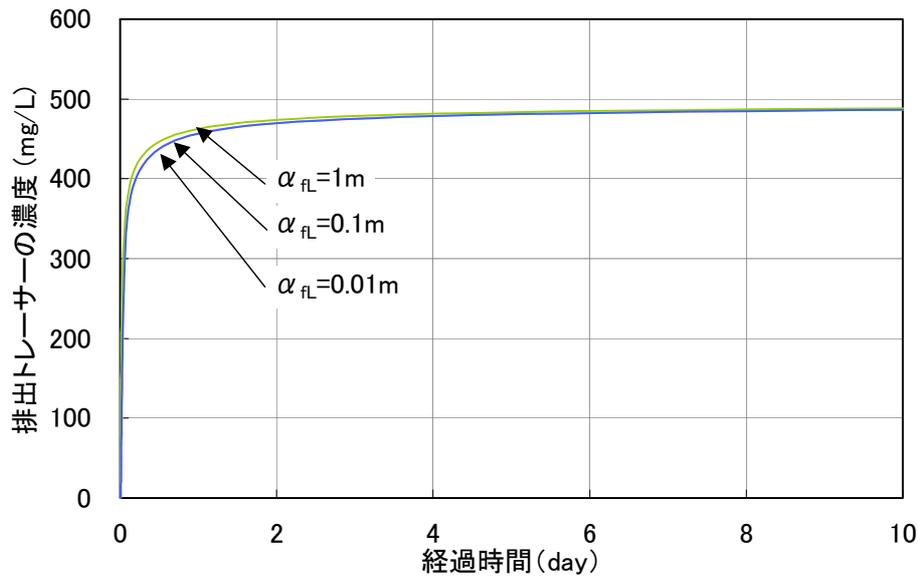


(a) 破過曲線

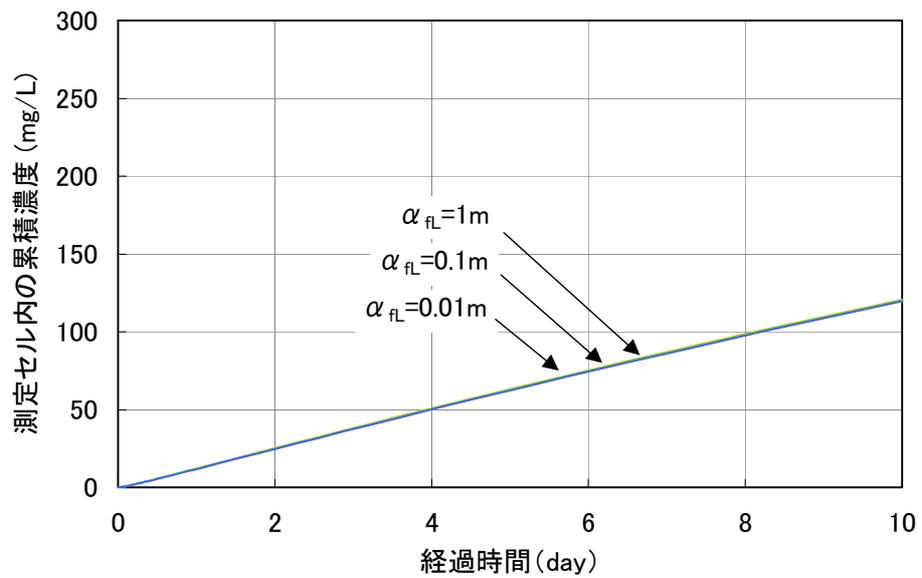


(b) 測定セル内の累積濃度

図 3.7-3 解析結果 (注入流量 Q の影響 : Q=5cc/min, Q=0.5cc/min, Q=0.05cc/min)

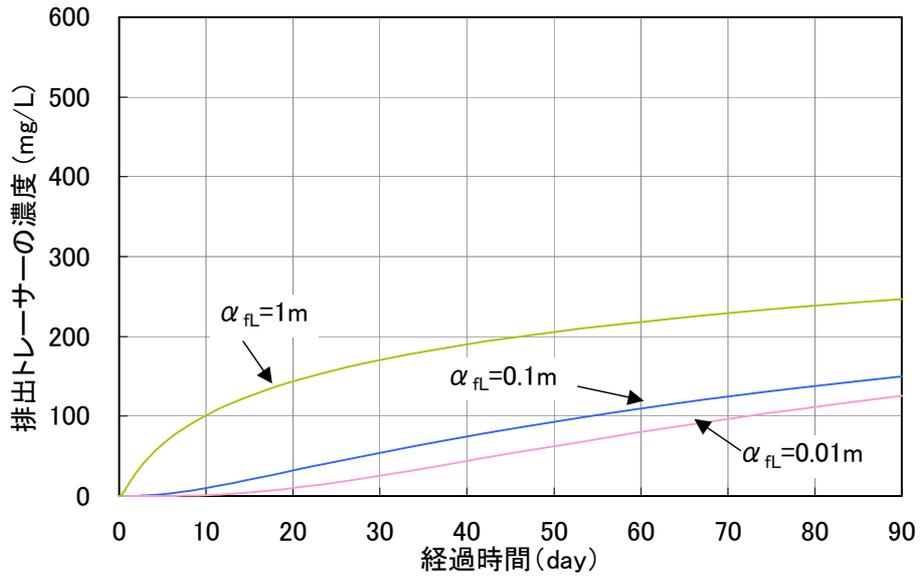


(a) 破過曲線

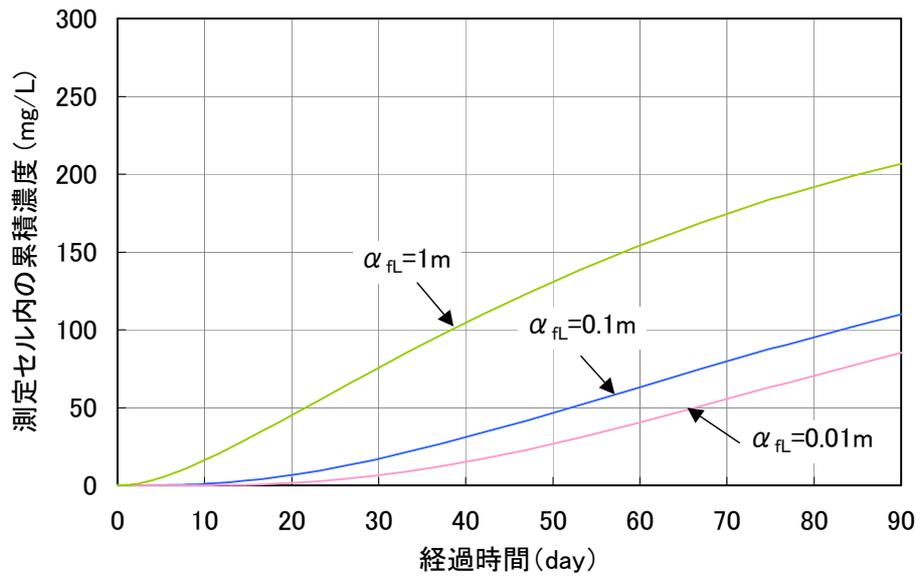


(b) 測定セル内の累積濃度

図 3.7-4 解析結果 (分散長 α_{fL} の感度 : $Q=5\text{cc/min}$ の場合)

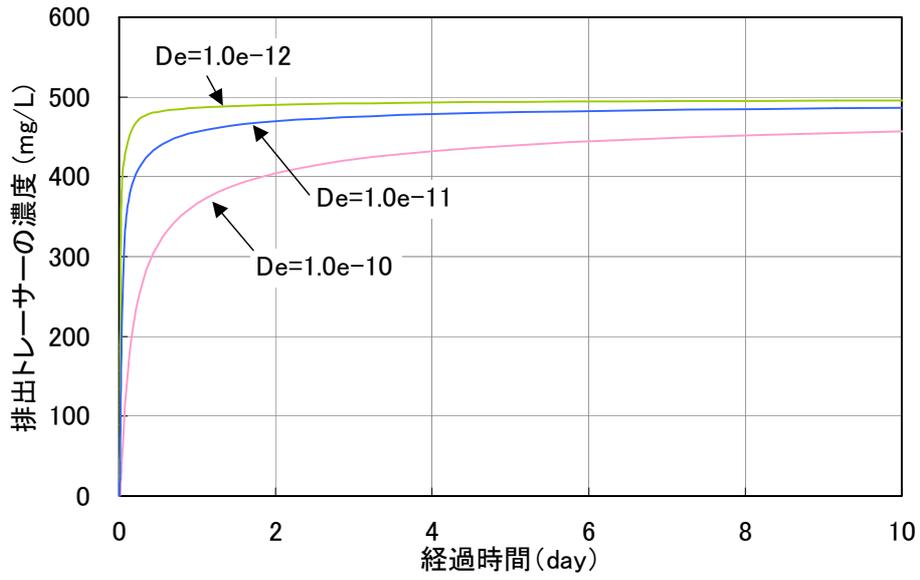


(a) 破過曲線

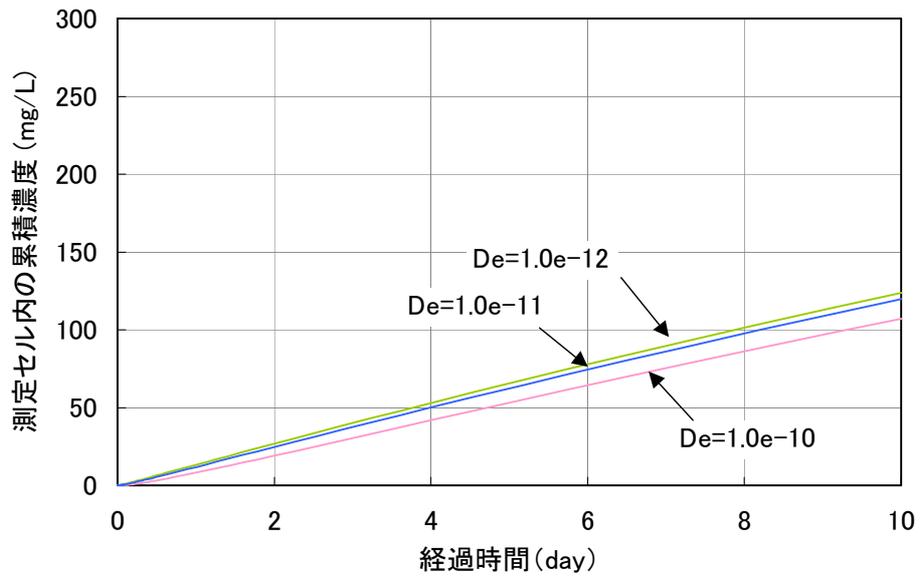


(b) 測定セル内の累積濃度

図 3.7-5 解析結果 (分散長 α_{fL} の感度 : $Q=0.05\text{cc/min}$ の場合)

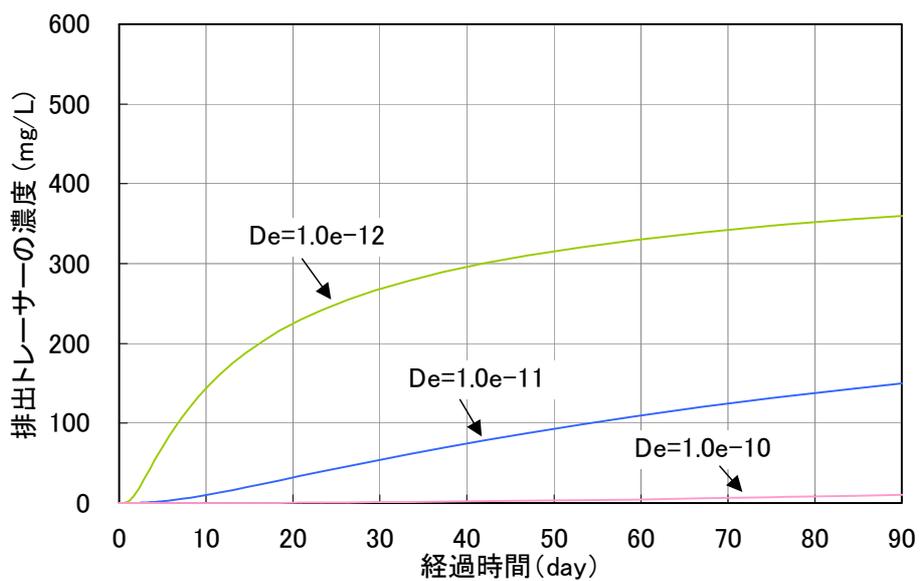


(a) 破過曲線

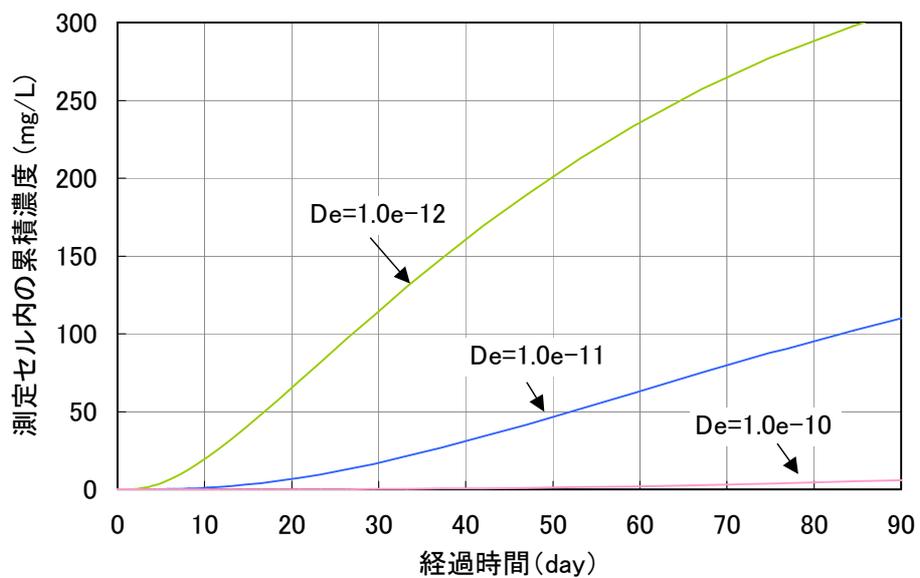


(b) 測定セル内の累積濃度

図 3.7-6 解析結果 (実行拡散係数 D_e の感度 : $Q=5\text{cc/min}$ の場合)



(a) 破過曲線



(b) 測定セル内の累積濃度

図 3.7-7 解析結果 (実行拡散係数 D_e の感度 : $Q=0.05\text{cc/min}$ の場合)

3.7.3. 大型ブロック試料を用いたトレーサー試験の手順

図 3.7-8 に、大型ブロック試料を用いた透水、トレーサー試験のフローを示す。図のように、試験には大きく 5 つの実施項目がある。以下に各項目について説明する。

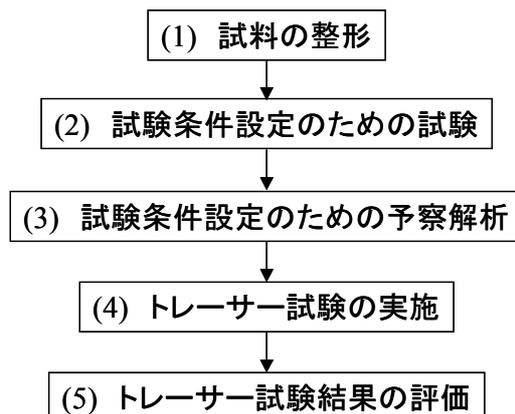


図 3.7-8 室内透水トレーサー試験のフロー

(1) 試料の整形

前節で採取したブロック試料を大型カッターにより室内試験用の寸法でブロック状に整形する。整形は、試料の崩壊や亀裂のずれなどが生じないように、治具等により固定した状態で実施する必要がある。

(2) 試験条件設定のための試験

前述の予察解析で示したように、トレーサー試験に実施に際しては、トレーサーの注入流量や濃度などの試験条件を決定するために、事前に試料のパラメータの概略値を把握しておく必要がある。表 3.7-2 に、試験条件の設定に必要なパラメータとパラメータ取得のための試験方法の例を示す。

なお、岩盤の不均質性の影響を考慮し、試験に用いる試料は、上記の試料整形で切断した除外部分の岩塊や、前節で述べた調査ボーリングならびに確認ボーリングで取得したコアなども対象とし、複数のデータを取得しておくことが望ましい。

表 3.7-2 試験条件設定のための試験一覧

取得パラメータ	試験方法 (例)
◆ マトリクスパラメータ	
・空隙率, 密度	浮力法 ⁹⁾
・透水係数	トランジェントパルス法 ¹⁰⁾
・拡散係数	透過拡散法 ¹¹⁾
◆ 亀裂パラメータ	
・透水量係数, 水理開口幅	定水頭透水試験法 ⁹⁾

(3) 試験条件設定のための予察解析

上記(2)で取得したパラメータに基づき、前述と同様の予察解析を実施する。予察解析では、評価するパラメータの感度、試験期間などを考慮し、トレーサーの注入流量や濃度、測定セルの容積、サンプリングの時間間隔等について検討する。また、検討結果に基づき、注入ポンプの選択、排出セルの濃度測定センサー、サンプリングしたトレーサーの濃度測定方法等を決定する。

(4) トレーサー試験の実施

上記(3)で決定した試験条件に基づき、トレーサー試験を実施する。試験中は、随時、予察解析結果との比較を行い、試験結果が事前に想定した結果と異なる場合は、サンプリング間隔などを再検討する必要がある。また、試験が長期に渡る場合は、試験途中で注入ポンプの不具合や、装置の漏水などにより、注入条件が変化する恐れがあるため、注入流量と排水流量の確認を行い、設定した注入条件が維持されていることを確認する。また、トレーサー物質の種類や、濃度測定センサーによっては、試験中の温度の影響を大きく受ける場合も考えられるため、試験実施場所の温度の測定と管理を行う必要がある。

(5) 試験結果の評価

トレーサー試験結果から、試料の物質移行パラメータの評価を行う。パラメータの評価には、前述の予察解析で用いたような数値解析コードや、亀裂内の移流・分散とマトリクス拡散を考慮した支配方程式を試験条件と合致した初期条件、境界条件で解いた理論解（例えば、Tang et al. 1981¹²⁾など）を適用することができる。パラメータの評価は、試験結果とモデル計算結果のフィッティングにより、試験結果を表現可能なパラメータの組合せを逆解析に求めることによって行う。

3.8. まとめ

本章では、大型ブロック試料を用いたトレーサー試験の実施に向け、原位置における試験対象亀裂の抽出から、試料採取、原位置および室内における透水トレーサー試験について、具体的な手順と方法についてまとめた。今後は、実際の試験対象箇所において、本件の成果の適用を目指す。

4. 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

4.1. 目的

地上からの調査段階における数 km から数十 km スケールの比較的広範な領域を対象とした地下水流動評価に際しては、計測される水文・地質・水理のデータが非常にまばらであることに起因して様々な不確実性を伴う。それらの不確実性には、対象とする領域の水理地質構造だけではなく、地表からの地下水の涵養量や側方境界などの境界条件の不確実性も含まれる。これらの境界条件そのものを正確に計測、又は推定することは概して非常に困難である。その一方で、原位置で観測されるデータはまばらであるものの、水頭分布や温度分布からその周辺が地下水の涵養域であるか流出域であるかの検討や、塩水濃度分布と地下水流動モデルとの比較など、異なる性質のデータを複合的に用いることにより、水理地質構造モデルの不確実性を確認することができると考えられる。また、水頭、温度、塩分濃度分布のデータは長い時間および大きな空間スケールで起きるプロセスの結果であり、対象とする地域全体の水理学的性状の平均値を現していると考えられる。

これまでの解析においては、幌延地域の水理地質モデルの不確実性の低減のために水頭データ以外に涵養量や温度、塩分濃度分布を考慮して幌延地域全体の涵養量の推定や、断層の構造やその水理場に対する影響の推定に一応の成果を収めている¹⁷⁾。しかしながら、地下水頭の逆解析や温度分布の順解析に比較使用したデータはそれぞれ異なった段階のデータであり、断層周辺での温度分布の考察では1次元での解析であった。本研究ではこのように断片的であった解析のまとめと各種のデータの整合的な総合解析を行い、幌延地域の水理地質構造の推定と断層の水理や物質移行に与える影響の推測とその不確実性の低減の為の提言を行う。

4.2. これまでの研究

4.2.1. 解析手法と条件

3次元解析手法は、Lawrence Berkeley 国立研究所開発による多成分、多相流シミュレーターである TOUGH2¹³⁾および、前者を使った逆解析手法である iTOUGH2¹⁴⁾を使用している。逆解析中の順解析としては Richards の式を仮定した飽和-不飽和浸透流解析モジュールである EOS9 を用いている。逆解析に用いる解析モデルは、既存表層地質図、地質断面図等から作成された3次元有限要素法格子分割(2002モデル、図 4.2-1 参照)¹⁵⁾を積分型有限差分法データに変換したモデルを基本モデルとしている。全要素数は 78,000 要素、要素の大きさは、平面的には外縁部で約 1,000m、中心部で約 200m、厚さは最上部で 50m から深部で 500m まで段階的に増加させている。

図 4.2-1 に、解析に用いられた要素分割図を示す。図 4.2-2 に、南北に約半分の部分における東西方向断面とボーリング孔配置及び3次元モデルの材料分割を示す。声間層上部に想定した難透水ゾーンは、伊藤らのモデル¹⁶⁾によるモデル化を継承している。断層に関しては、粘土化した低透水構造のみ、高透水構造のみ、もしくは高透水-低透水-高透水のサンドイッチ構造のいずれのケースの考察も可能なメッシュ分割である。

表 4.2-1 はこれまでの解析¹⁷⁾で使われた透水係数の初期値の一覧である。境界条件としては、地表面で定涵養量、底面および側面は不透水に設定している。

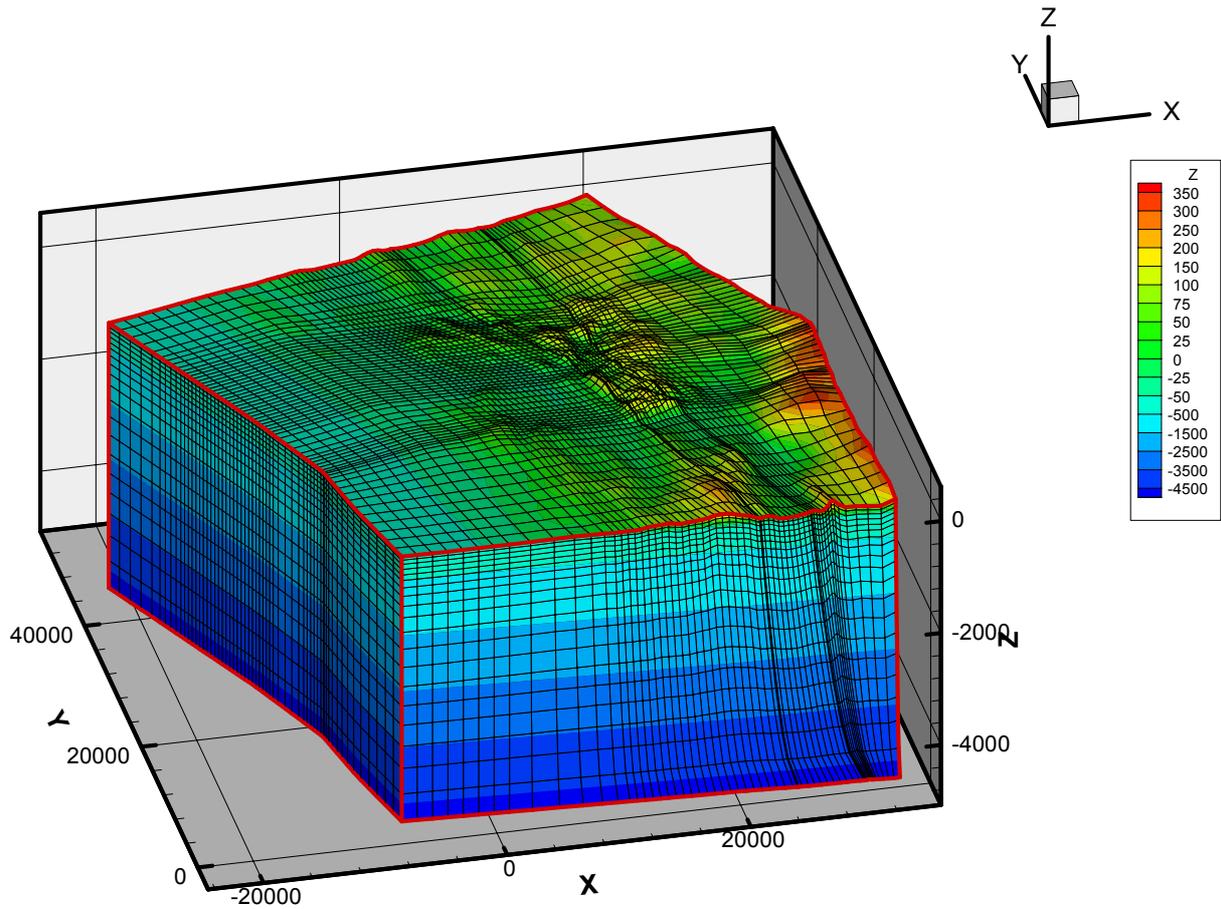


図 4.2-1 3次元解析モデル

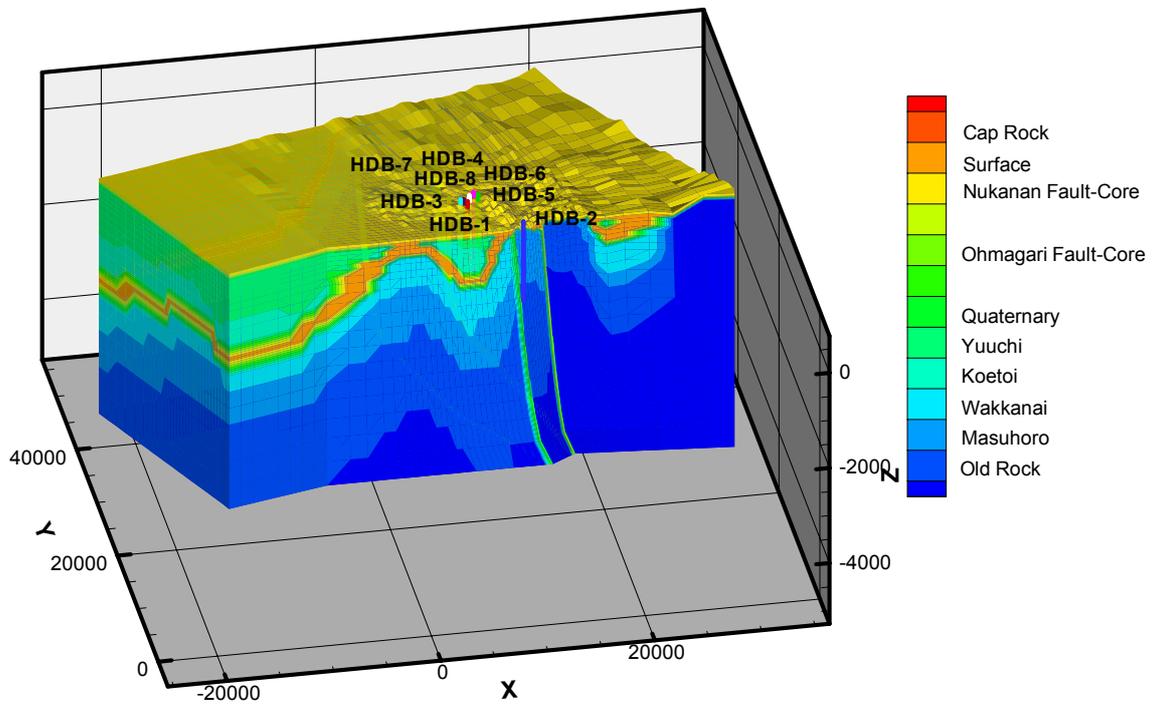


図 4.2-2 解析モデルの地質材料分布とボーリング孔位置

表 4.2-1 解析に用いた透水係数初期値一覧

Geological Period	Epoch	Formation	Initial Permeability (m/s)	Abbreviation	
		Surface	4.00×10^{-5}		
Quaternary		Quaternary Sediments	2.00×10^{-5}	QTR	
Neogene	Pliocene	Yuuchi Formation	2.00×10^{-6}	YCH	
	Miocene	Low permeability zone	1.67×10^{-10}	CAP	
		Koetoi Formation	horizontal	2.00×10^{-8}	KOE
			vertical	2.00×10^{-8}	
		Wakkanai Formation	horizontal	9.27×10^{-12}	WKN
	vertical		9.27×10^{-12}		
		Masuhoro Formation	1.00×10^{-8}	MHR	
Cretaceous		Cretaceous rock	2.00×10^{-10}	CRT	
		Omagari Fault	Core	2.00×10^{-9}	OCO
			Sandwich	2.00×10^{-9}	OSN
		Nukanan Fault	Core	2.00×10^{-9}	NCO
			Sandwich	2.00×10^{-9}	NKS

モデルの適合性を確認するために用いる目的関数として、HDB-1 から HDB-8 までの MP システムによる間隙水圧から換算された全水頭モニタリングデータ¹⁸⁾を用いる。その際に、MP の測定区間中心を代表点とし、代表点に最も近い解析格子中心の定常的な全水頭値を計算値として逆解析を実施している。図 4.2-3 に各孔の平面的位置関係を示す。この図から明らかなように、HDB-2 孔は他のボーリング孔から遠く、逆に残りのボーリング孔は互いに隣接している。HDB-2 孔で観測される異常高圧は突出しており、他の孔では見られない。HDB-2 孔で見られる異常高圧の原因は HDB-2 孔周辺に限られる要因とも考えられる。また、その他の HDB 孔は隣接している関係から、水頭分布が似通っている。これらのことから、広域の逆解析にはあまり適していないボーリング孔配置であると言える。

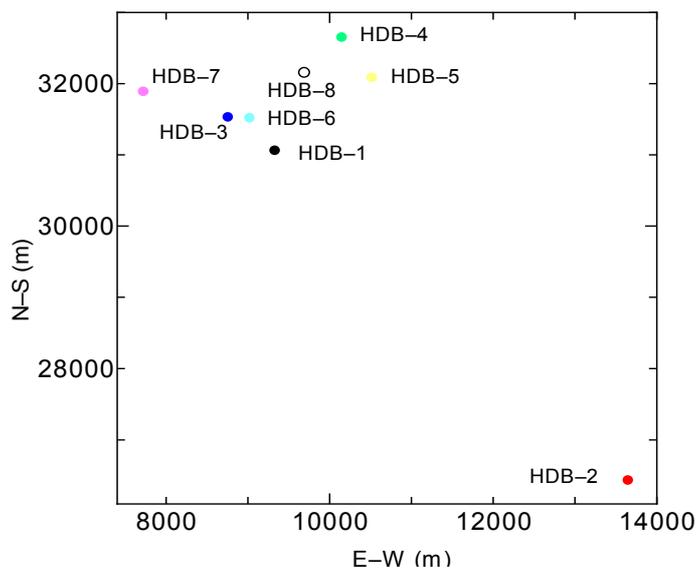


図 4.2-3 HDB 孔の平面的な位置関係

4.2.2. 涵養量に関する考察

そもそも涵養量を現場で直接計測するのは非常に困難であり、幌延地域のような広い範囲で信頼のおける涵養量のデータは往々にして得がたい。そこで、これまでに2つの方法で間接的に涵養量の推定を試みている^{16), 18)}。1つは河川の2点間の基底流量差から推定する方法である¹⁶⁾。もう1つは温度データから涵養量を推測する方法である¹⁸⁾。以前の解析¹⁶⁾で河川流量と温度データをもとに透水係数の推定を行い、モデル全体の透水係数をおよそ20倍に補正した⁷⁾。HDB孔の水頭分布を使って透水係数分布を逆解析で求めているが、もともと、水頭分布の逆解析からは透水係数の相対的な分布は推定可能でも、絶対値は同定できない。そこで、モデルの地表境界を固定水頭と仮定していることから、涵養量について直接キャリブレーションせずに、透水係数のキャリブレーションを行って河川流量と温度データの整合性を求めたのである。図4.2-4は国土地理院による新聞寒別橋と天塩大橋間の流量差データ¹⁸⁾である。データに大きなバラツキがあるものの、その差はおよそ $5\text{m}^3/\text{s}$ である。この流量差がモデル化された地域の実際の涵養量を反映していると仮定し、表4.2-1に示す基本ケースモデルの涵養量と比較した際、モデルの涵養量はおよそ1/10の $0.5\text{m}^3/\text{s}$ であった。また、温度データに関しては、幌延の北に位置する豊臣温泉では、 33°C の湯を深度500m~1000mから汲み上げているとの報告がある。図4.2-5に基本ケースモデルの透水係数を等倍に変化させた場合の深度温度分布と豊富温泉のデータを示す。この図から、豊富温泉のデータと整合性を持たせるためにはモデル全体の透水係数は5~50倍である必要があることがわかる。これら河川流量と温度データの2つの点を総合し、最終的なモデルを基本ケースの20倍の透水係数としたのである。つまり、涵養量はおよそ $80\text{mm}/\text{yr}$ と推定された。

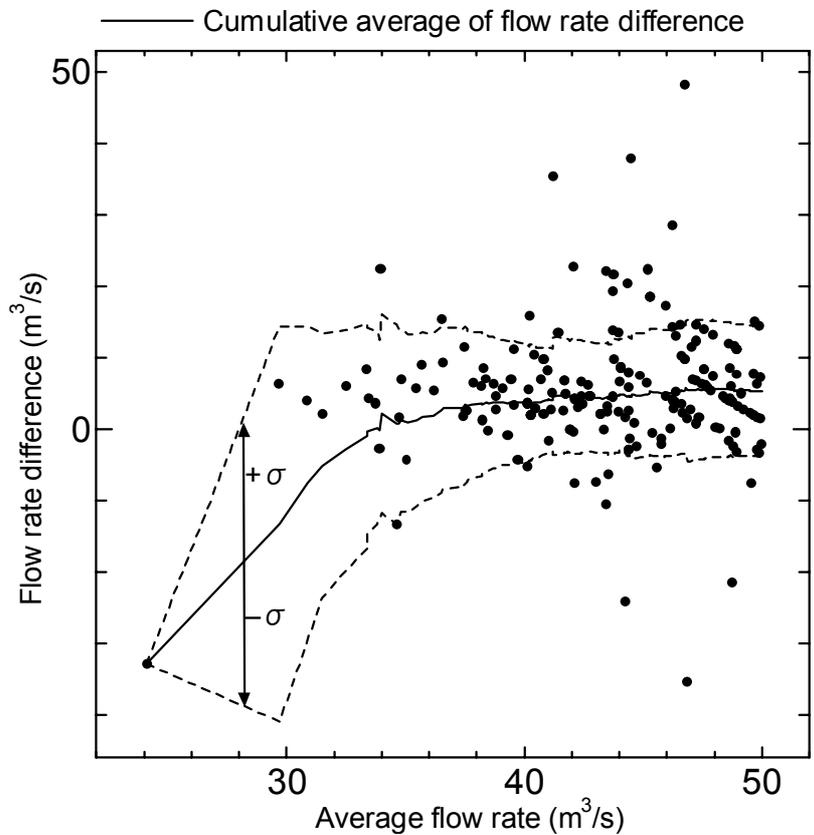


図 4.2-4 新聞寒別橋と天塩大橋間の流量差データ

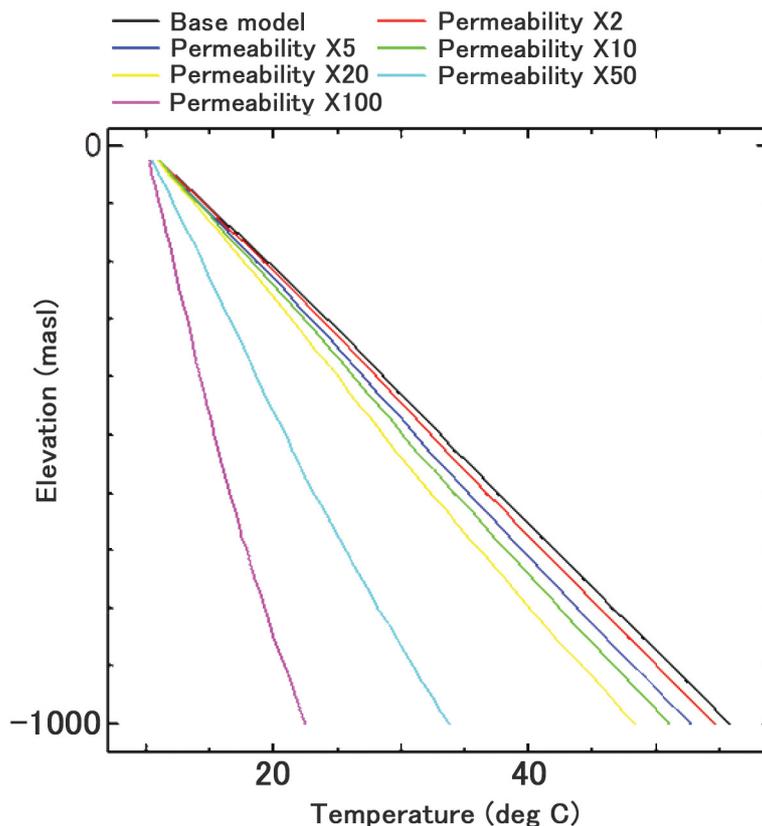


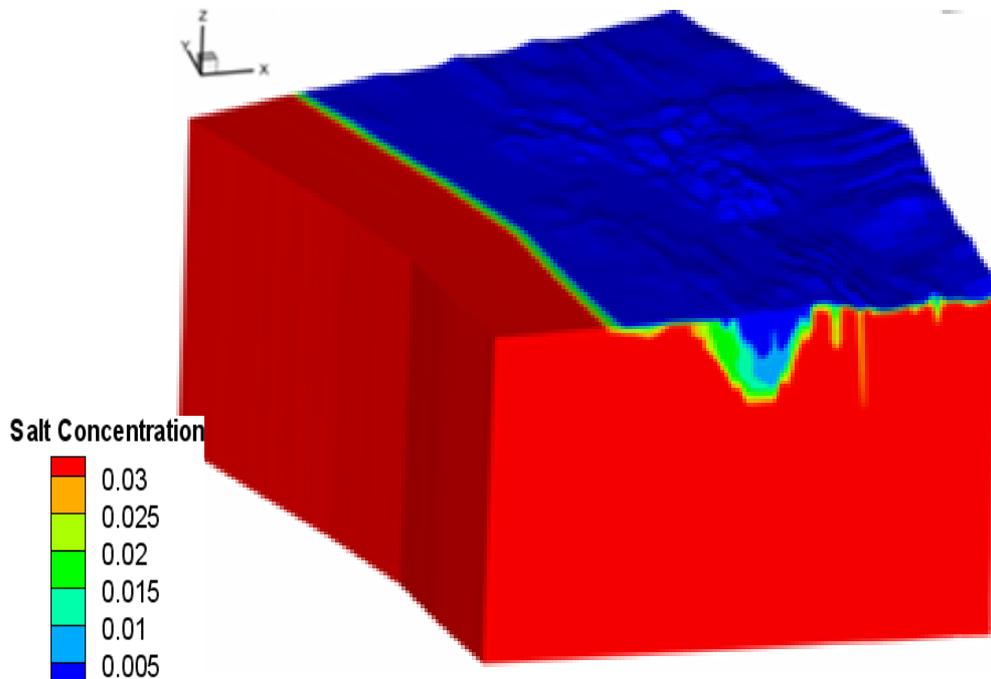
図 4.2-5 モデルの透水係数と温度分布の関係

4.2.3. 塩分濃度データを使った考察

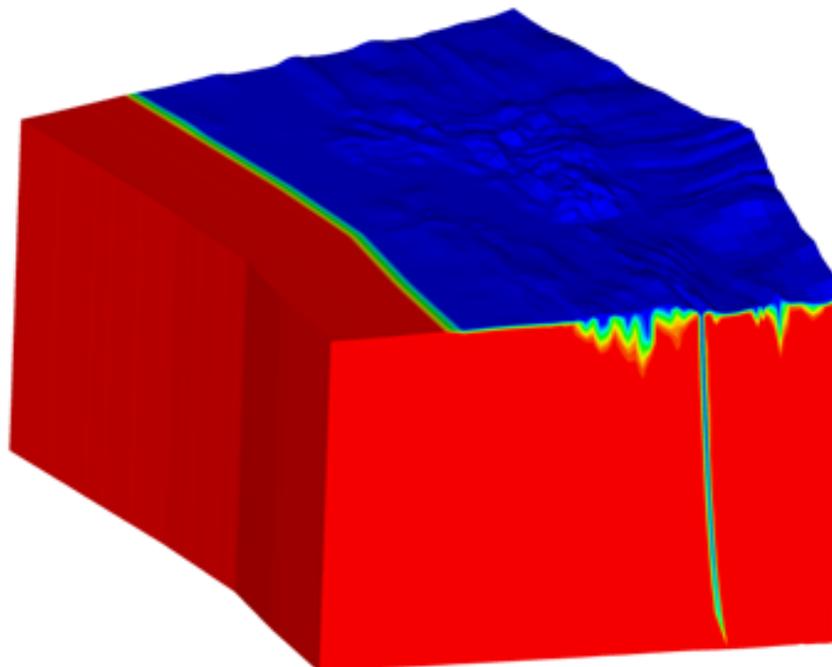
TOUGH2 の EWASG モジュールを用いて前述のモデルの透水係数を 10 倍に設定した場合と断層の透水係数のみを 100 倍に設定した場合の 2 つのケースについて幌延地域における天水の涵養による塩水の洗い出し解析を行い、HDB-1 及び HDB-2 を掘削した際に得られた電気伝導度データ^{20),21)}、及び温度分布データ^{20),21)}と比較検討を行った結果が図 4.2-6 および図 4.2-7 である。これらの結果から、天水が断層を伝わって深部まで浸透している可能性が指摘された。数値解的には、モデルの地表面境界を定流量と設定して解析を行うのは多少問題がある。これは実際の地表面は大気圧でほぼ一定の定圧力境界であるからである。無論、地下水面は地表と一致するとは限らず、地表から地下水面の間は不飽和、二相流となる。一般に TOUGH2 のようなシミュレーターでは圧力と流量の両方を 1 つの要素に同時に設定できない。したがって、地表面の要素の上にさらにダミーの要素を繋げて大気圧に設定し、地表面要素を固定流量にするが、その際設定された流量のすべてがモデル内部に流れ込む保障はない。透水係数や要素の位置によっては、ダミー要素に逆流する場合がある。要するに、流出域となる。これはダミー要素と地表面要素の間の透水係数を調節することによって、ある程度軽減されるが、透水係数を低く設定しすぎると、不透水境界と同様の設定をした事になる。理想的には信頼できる涵養量を使って観測された水頭データと整合する透水係数を逆解析によって同定するのが最良の方法と言える。あるいは、温度分布データのような何らかの観測データと合致するように各表面要素の涵養量について逆解析を行う方法も考えられる。しかしながら、これは現時点では非現実的であると考えられる。その理由の第 1 には、前にも述べたが、利用可能な逆解析を制約するデータ（各 HDB 孔の水頭データ）が極めて少なく局所的であり、モデル全体の感度が極端に低い事と、第 2 に地表面の要素数は 3,000 を超えるので、それらのすべてを未知数にして逆解析を行うには計算時間が掛かり過ぎる事、それら

を制約するデータが乏しい事である。

理想的には、地表流や蒸発散を考慮したシミュレーターを使うのが望ましいが、分配係数等の推定困難な新たなパラメータが必要となり、自由度がさらに増してしまう。そこで涵養量を地表面各要素で同一（単位面積当り）としキャリブレーションを行っている。

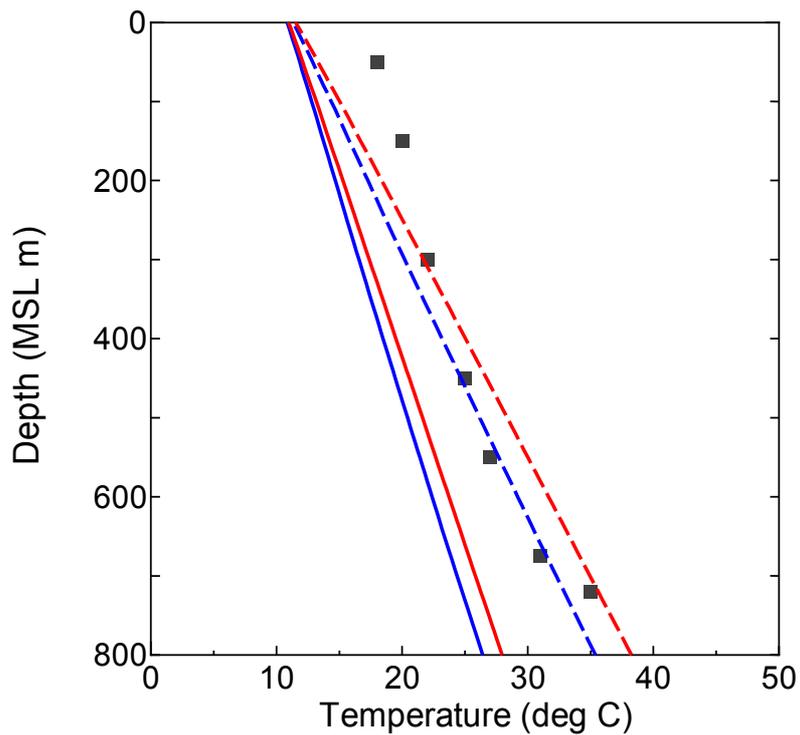


(a) 全体が 10 倍の透水係数

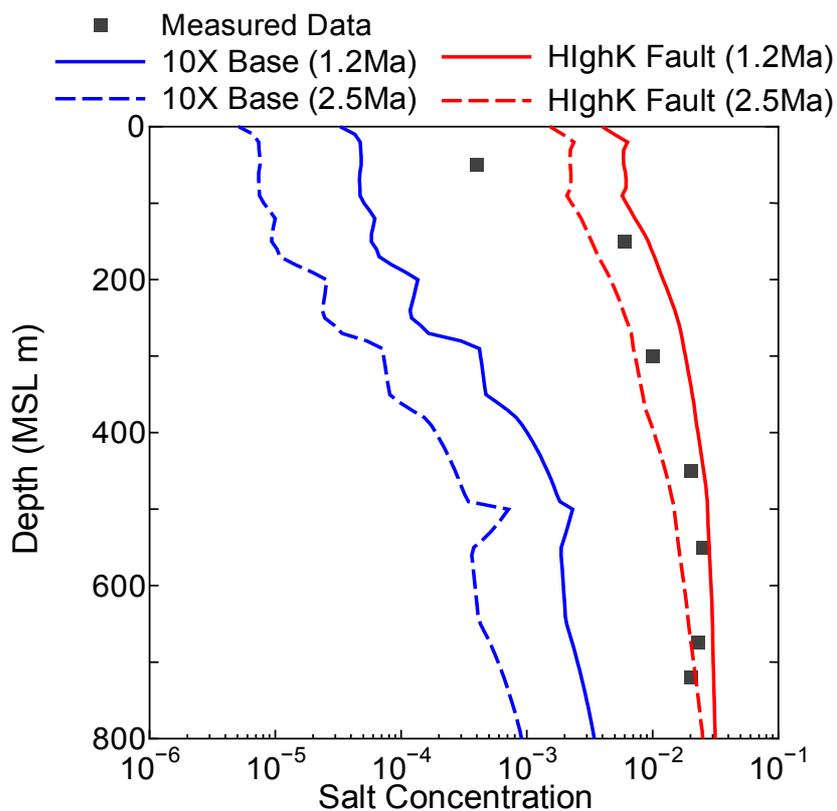


(b) 断層のみ 100 倍の透水係数

図 4.2-6 洗い出し解析結果



(a) 全体が 10 倍の透水係数



(b) 断層のみ 100 倍の透水係数

図 4.2-7 HDB-1 データと解析結果の比較

4.2.4. HDB 孔沿いの温度分布データを使った考察

幌延深地層研究センター付近に掘削された HDB-7 孔と HDB-8 孔は近接しているが、それぞれの孔の深度沿いの温度や地下水の比重分布には特徴的な違いが存在する。HDB-8 孔は HDB-7 孔に比較して内陸側、上流側に存在する。HDB-7 孔の深度-温度分布は上向きに凹であり HDB-8 孔は反対に上向きに凸である (図 4.2-8 参照)。それぞれの孔で観測された層序とコアデータに基づいた地層ごとの透水係数、比重、圧力分布^{22), 23), 24)}を使用して 1 次元地下水流動モデルを構築し流れの方向と流量をシミュレートした結果、HDB-7 沿いでは 3mm/yr の下降流、HDB-8 孔沿いでは 6mm/yr の上昇流を仮定すると最も観測データに近い温度分布が得られた (図 4.2-9)。HDB-1, 3, 6 および 9 孔も HDB-8 孔と同様な温度分布を示していることから、図 4.2-10 に示すように HDB-7 孔とそれ以外の HDB 孔の間に大曲断層に関連した透水係数の低い部分が存在すると類推された。HDB-11 のデータは考慮されていない為位置関係は不明である。

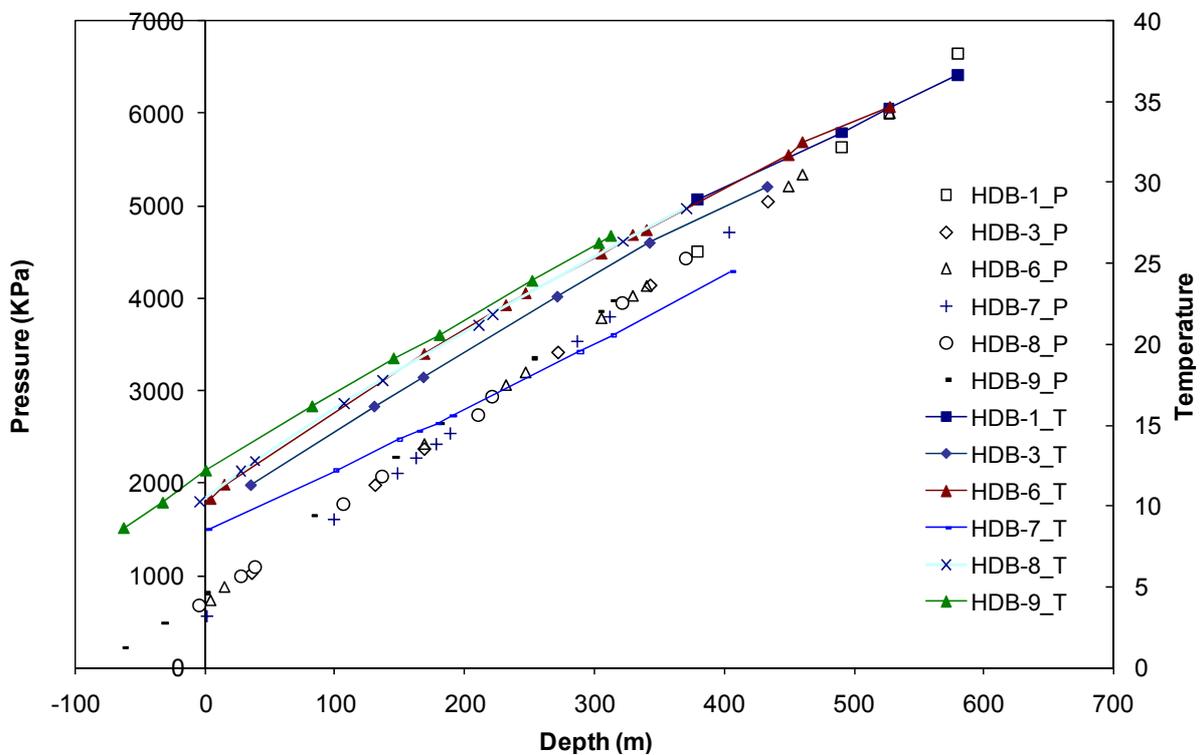
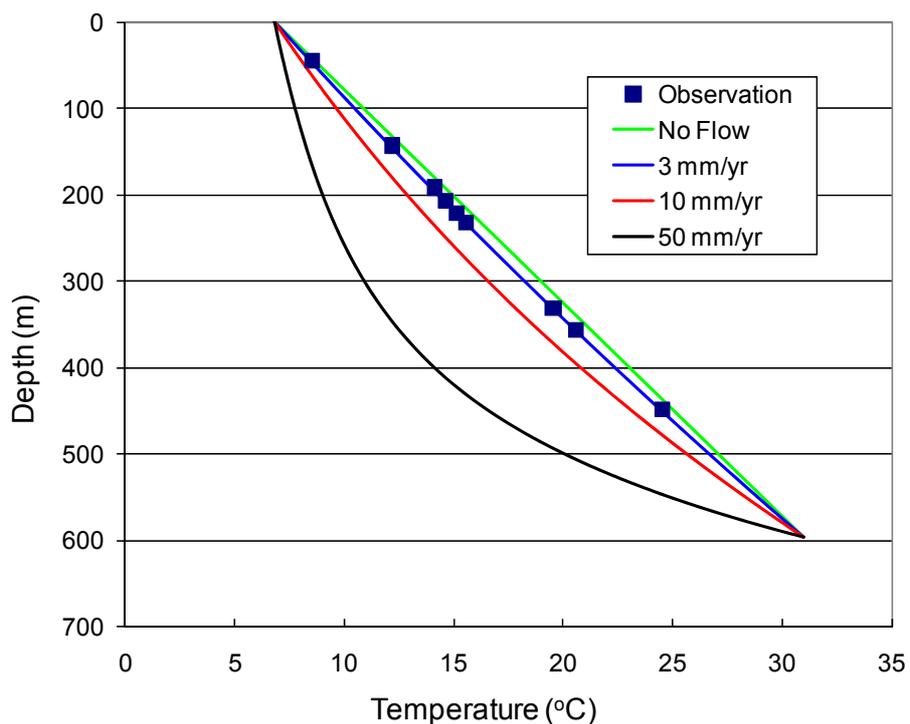
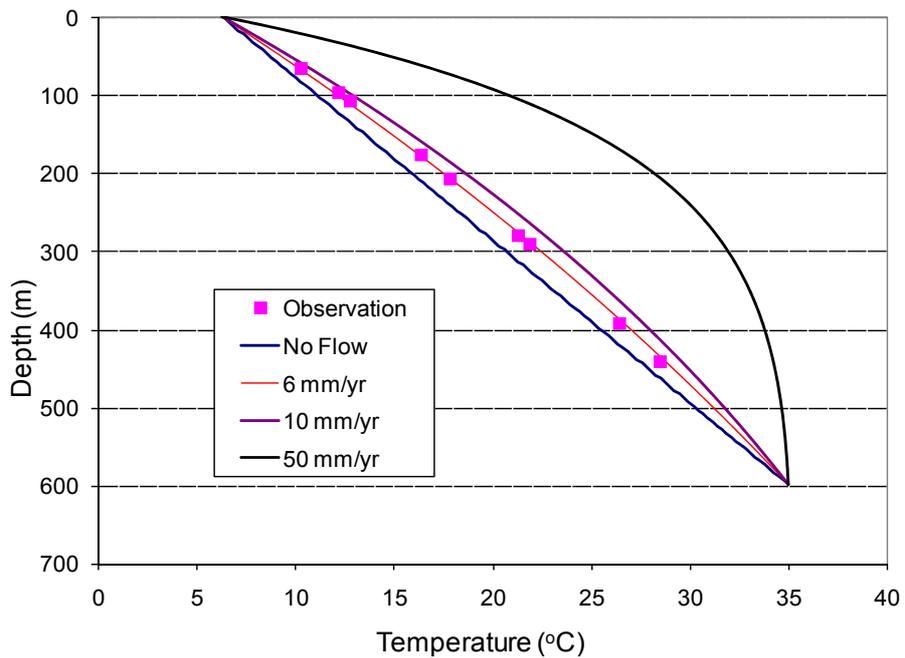


図 4.2-8 HDB 各孔沿いの温度(T)と圧力分布(P)
(凡例の T と P はそれぞれ温度と圧力を表す)



(a) HDB-7 孔沿いで上部境界からの各涵養量（下降流）(3, 10, 50mm/yr)を仮定



(b) HDB-8 孔沿いで下部境界からの各上昇流量(6, 10, 50mm/yr)を仮定

図 4.2-9 温度分布シミュレーション結果と観測データの比較

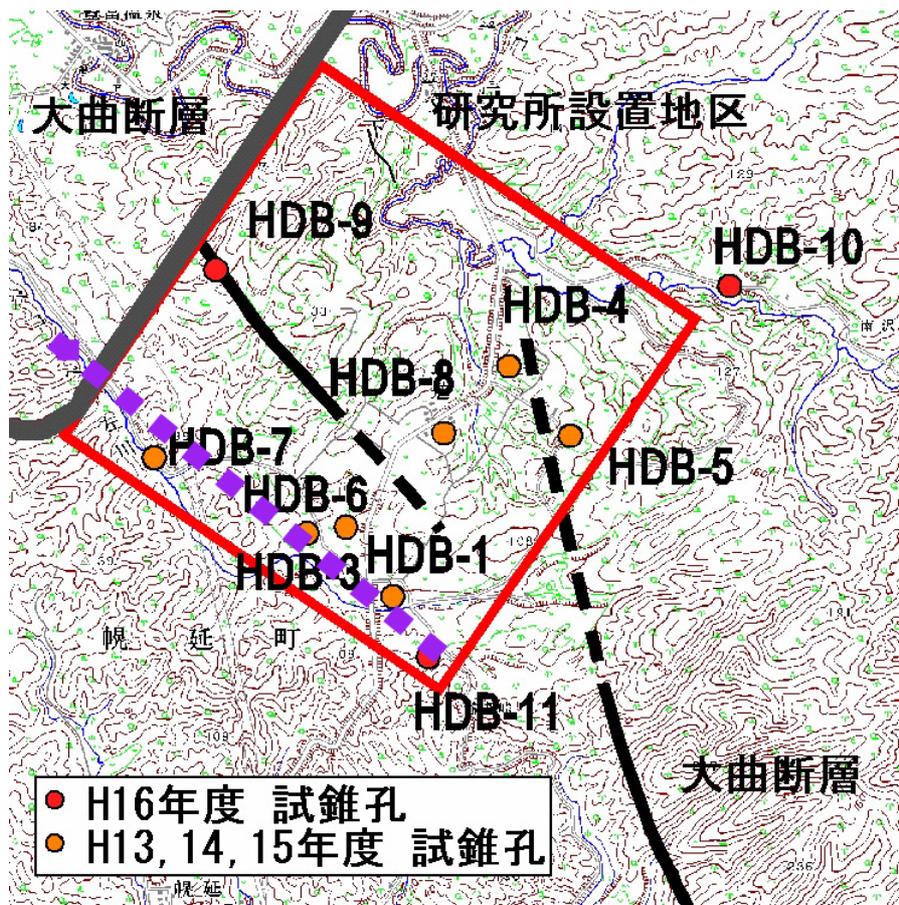


図 4.2-10 温度分布解析から類推される透水係数の低い鉛直面の位置（紫色の破線）

4.3. 不確実性の低減の為の水圧，塩分濃度，温度の総合解析

4.3.1. バックグラウンド

具体的な地質環境を対象に地下水流動解析を行う際、限られた原位置測定データを活用して水理地質モデルを構築しなければならない。データが限られる理由としては、第1にボーリング孔を掘削するには多大な費用が掛かる為、広い地域が対象であっても限られた数のボーリング孔しか掘削できないからである。第2に、原位置では直接計測する事が困難なデータが水理地質モデルの構築に必要であるからである。原位置で得られる水理データとしてはボーリング孔で観測される地下水水頭やボーリング孔を使った水理試験から推定される透水係数や貯留係数がある。その他にモデル構築に必要で重要なデータとして境界条件がある。モデルの側方境界と底面は往々にして便宜的に不透水境界が使われるが、果たして不透水境界が正確であるかの検証は難しい。側方境界が分水嶺と一致していれば、不確実性はある程度低いと推測できる。境界条件の中で最も不確実性が高いのは地表面の境界条件である。この理由は地下、特に深部への地下水の涵養量は直接計測することが困難だからである。1つの方法として降雨量の空間的、時間的分布を入力データとし、地表流と地下水流動を同時に解析する事も考えられるが、どれだけの降雨が蒸発散するのか、地表流となるのか、あるいは涵養されるかの分配係数の決定に大きな不確実性を伴う。加えて大きな不確実性を伴うのは断層などの不連続構造の水理性状である。我が国では断層は普遍的に存在し、どのようなサイトにも複数の断層が必ず存在する。本研究の様に比較的大きなスケールの水理地質モデルにおいては大きな断層の性状の正確な評価が極めて重要となる。

前節の 4.2 で述べたようにこれまでの解析においては、幌延地域の水理地質モデルの不確実性の低減の為に水頭圧データ以外に涵養量や温度、塩分濃度分布を考慮して幌延地域全体の涵養量の推定や、断層の構造やその水理場に対する影響の推定に一応の成果を収めた。しかしながら、地下水頭の逆解析や温度分布の順解析に比較使用したデータはそれぞれ異なった段階のデータであり、温度分布の考察では 1 次元での解析であった。本章ではこれまでの断片的な解析を統合化した総合的な解析を行い、幌延地域の水理地質構造の推定とその不確実性の低減の為に提言を行う。

4.3.2. モデルの基本的な考え方

対象地域の地下の水圧分布は主として地形とそれぞれの地層および断層の透水性の影響が大きいと考えられる。その他にメタンガスの存在の影響や古代の地層圧が残っている可能性もあるがここでは考慮しないものとする。また、地下の温度分布は地下深部からの熱の供給と冷たい天水の涵養のバランスによって平衡していると仮定し、現在の塩分濃度分布は天水による塩水の洗い出しの効果であると考えられる。これらは長い時間スケールでみればダイナミックなプロセスである。対象地域は過去数百万年前には海面下にあり、長期間の隆起、侵食作用を経て現在の地形、圧力、温度、塩分濃度分布になったと考えられる。これらのすべての物理プロセスを数値モデルで正確にシミュレーションするのは極めて困難である。その大きな理由は初期条件や時間経過と種々のプロセスの関連が不明だからである。

ここでは地質年代的な地形変化を考慮せずに現在の地形データをそのまま使用することとした。つまり、塩分濃度のシミュレーションにおいては、シミュレーションスタート時の初期条件として地形は既に現在の形であり、地下水圧も地形と地層の透水係数分布の影響のみを受けた平衡状態であり、時間ゼロにおいて解析地域全域において現海水の塩分濃度が分布し、地表において塩分濃度がゼロである天水が涵養を始めると仮定する。これらの仮定がモデルの解析結果の不確実性に寄与することは否めない。隆起プロセスに伴い水頭分布も変化し、温度分布も変化する。厳密には隆起プロセス、地質年代的降雨変化まで考慮に入れたシミュレーションが必要であるかもしれないが、今後の研究への提案としたい。

4.3.3. 物性

水理地質モデルを使った地下水、熱、塩水流動のシミュレーションに必要な主な物性パラメータとしては以下が挙げられる。

- (1) 透水係数
- (2) 貯留係数
- (3) 空隙率
- (4) 熱伝導率
- (5) 熱容量
- (6) NaCl の地層中の分子拡散係数

これらの内、透水係数と空隙率が地下水流動と物質移行に最も直接的に影響を及ぼす。熱伝導率その他のパラメータも原位置のスケールで測定することは難しいが透水係数や空隙率のように数オーダーに渡って分布しているとは考えにくく、実験室でのコアの計測データを参照しつつ設定することが可能と考えられる。一方透水係数の範囲は数オーダーに渡るが圧力試験を行う事により孔井試験のスケールにおいてはある程度の確からしさをもって推定が可能である。しかしながら、空隙率を孔井試験で有意に推定することは困難である。そこで iTOUGH2 を用いた逆解析では空隙率を未知パラメータとした解析ケースも考慮した。

4.3.4. 初期条件, 境界条件と解析手順

幌延地域の現在の水圧, 温度, 塩分濃度分布を TOUGH2 を用いて解析するには適切な初期条件が必要である。これは TOUGH2 が非定常のコードであり, シミュレートするプロセスが非線形であるためである。適切な初期条件が設定されてなければ, 解が収束するまでに莫大な CPU 時間が掛かるか, 解が収束しない場合すらある。そこで, 先ず単相流の EOS9 モジュールを使い現在の地形が水圧分布を支配していると仮定し, 等温度, 単相流を仮定し水圧分布を求めた。この際, 上部境界条件は地表面で固定水頭とした。次にこのようにして求めた水圧分布を初期条件とし, 下部を熱流量固定境界として温度分布を解析し, さらにその結果を初期条件として塩水の洗い出しプロセスを解析した。この手順で全てを連成させると, 比較的, 解が無事に求まる場合が多い。

4.3.5. 順解析

これまでの圧力や熱解析の順解析の知見から推定されたベストと推定されるパラメータを使って圧力, 熱, 塩分濃度を連成させた順解析を行い, 圧力, 温度, 塩分濃度分布の解析結果と観測データの比較を行った。

図 4.3-1 に圧力のシミュレーション結果とデータ²⁴⁾の比較を示す。HDB-8 の解析結果とデータは比較的整合しているが, HDB-7 の圧力の解析結果は浅部においてデータより約 500KPa 高い結果となった。この理由としてメッシュの解像度の問題が考えられる。HDB-7 の標高が実際は 44m 程度であるが, メッシュでは 95m になっている為, 実際より高い水頭を地表の境界条件として与えているからであると考えられる。一方, モデルでは地表の細かい標高が深部の水頭に直接影響を及ぼすが, 実際は深部の地下水と地表の第四期の堆積物の地下水面とは低い透水性の堆積物により水理的に比較的隔離されている可能性もある。この事象は瑞浪超深地層研究センターのモニタリング孔でも観測されている²⁵⁾。

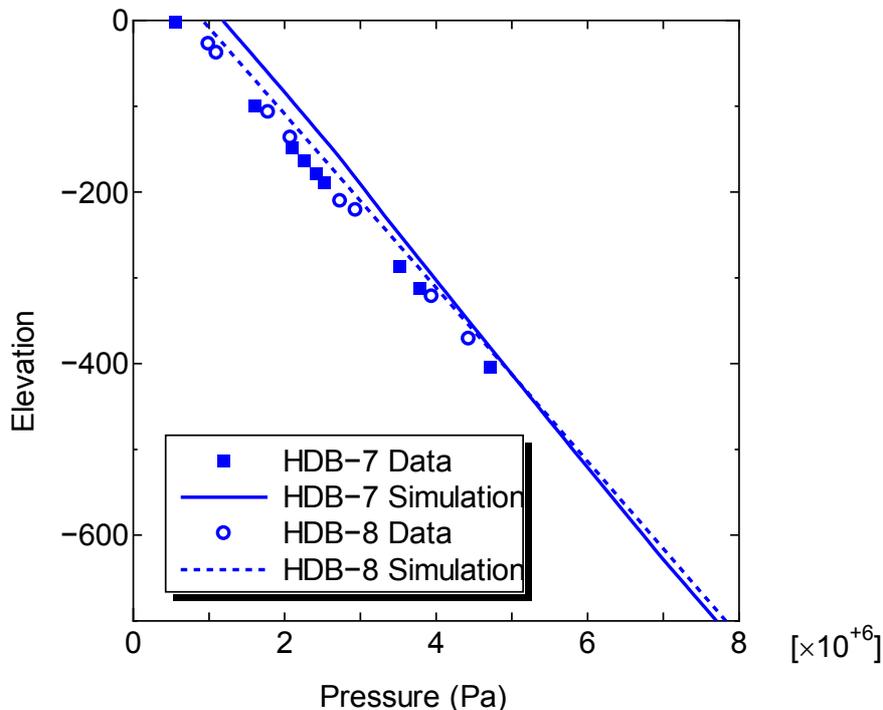


図 4.3-1 HDB-7,HDB-8 孔沿いの圧力分布データと順解析結果の比較

図 4.3-2 に温度分布のシミュレーション結果と観測データ²⁴⁾の比較を示す。図 4.2-8 にも示したが、HDB-7 の温度は他の HDB 孔に比べて低く、上に凹型の曲線であり、他の孔は凸型である。解析においても、同様の凹凸関係が見られる。また、HDB-8 孔に関しては解析結果とデータが比較的良く合っている。HDB-7 孔の解析結果はデータに比べて高すぎる傾向を示している。解析において地表温度を年間平均気温の 10°C に固定しているが、この設定が高すぎると思われる。

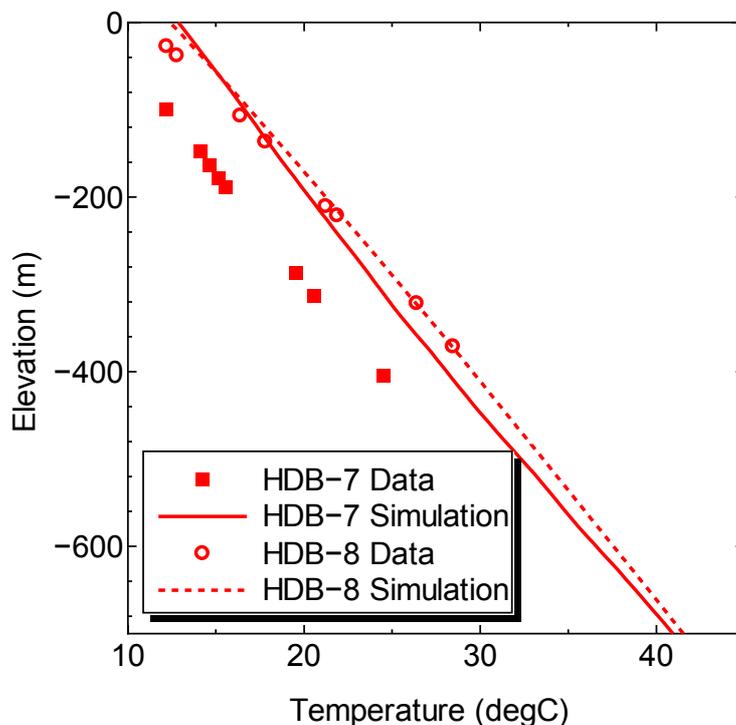


図 4.3-2 HDB-7 と HDB-8 における温度分布の順解析シミュレーション結果とデータの比較

図 4.3-3 に塩分濃度分布の解析結果とデータ²⁴⁾の比較を示す。塩分濃度はコア解析によって求められた Na, K, Ca, Mg, Cl および SO₄ の溶存イオンの濃度の総和と仮定した。塩分濃度に関しても HDB-7 は他の HDB 孔と比較して塩分濃度が高い。解析結果でも同様な結果が得られた。ただ、HDB-8 に関しては解析結果の方がデータより低い値となった。

以上のように順解析で比較的データに近い結果が得られているが、次の節では iTOUGH を使った逆解析により、パラメータを変化させ、データの再現性をより良くする試みを行う。

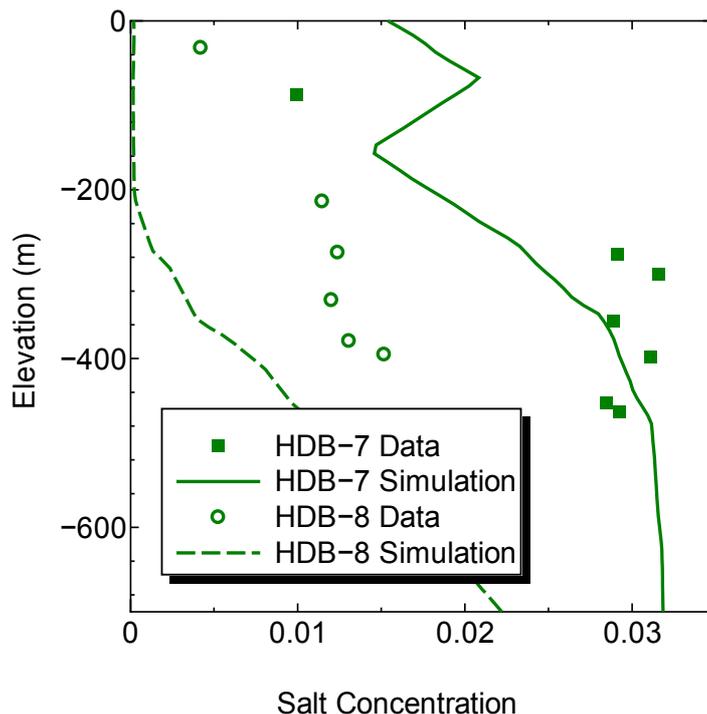


図 4.3-3 HDB-7 と HDB-8 における塩分濃度分布の順解析シミュレーション結果とデータの比較

4.4. 逆解析

4.4.1. 観測データ

逆解析に使用できる観測データとしては、各 HDB 孔の MP システムにより観測された水圧、温度、並びにコア解析によるイオン濃度である。しかしながら、図 4.2-3 に示すように観測孔は HDB-2 孔を除いては全て約 2 キロメートル四方の深地層研究センター用地の周辺に集中し、本研究で使用する約 40km 四方の水理地質モデルの構築に資するにはデータが限られた範囲に集中しすぎている。言い換えれば、モデルとデータのスケールの整合性が乏しい。深地層研究センター周辺のデータ密度に比較してモデルの解像度が乏しいとも言えるが、メッシュを細かく切って解像度を上げて HDB 孔以外の孔井データが存在しないことからモデルが対象とするスケールにおいてはモデル全体の不確実性を低減することに寄与しないと考えられる。一方、図 4.2-8 に見られるように、温度分布においては HDB-7 とそれ以外の孔ではっきりとした相違がある。また、溶存イオン濃度に関しても HDB-7 と他の孔との違いが顕著である。（ここで溶存イオン濃度とはコア解析から得られた Na, K, Ca, Mg, Cl および SO₄ の重量和であるが、この値を便宜的に塩分濃度として使用している。）従って、本解析においては逆解析に使う観測データ²³⁾として、HDB-7 のデータと HDB-7 孔以外の孔の代表として HDB-5 孔のデータを使用した。HDB-2 を除く HDB 孔すべてのデータを使用しても HDB-7 孔以外の孔のデータは比較的似ている事と、HDB 孔がモデルのスケールに比べて狭い範囲に集中している事から、モデルの改善には繋がらないと判断し、HDB-7 と HDB-5 のデータを使用した。解析ケースによっては HDB-8 の塩分濃度データも使用したが、メッシュの解像度が乏しい事から 2 孔間に十分な要素数を確保する目的で HDB-5 孔のデータを観測データとして使用した。図 4.4-1 に HDB-5, 7, 8 孔のメッシュ中の大曲断層に対するメッシュ中の位置関係を示す。表 4.4-1 に HDB-5, 7, 8 の観測データを示す。

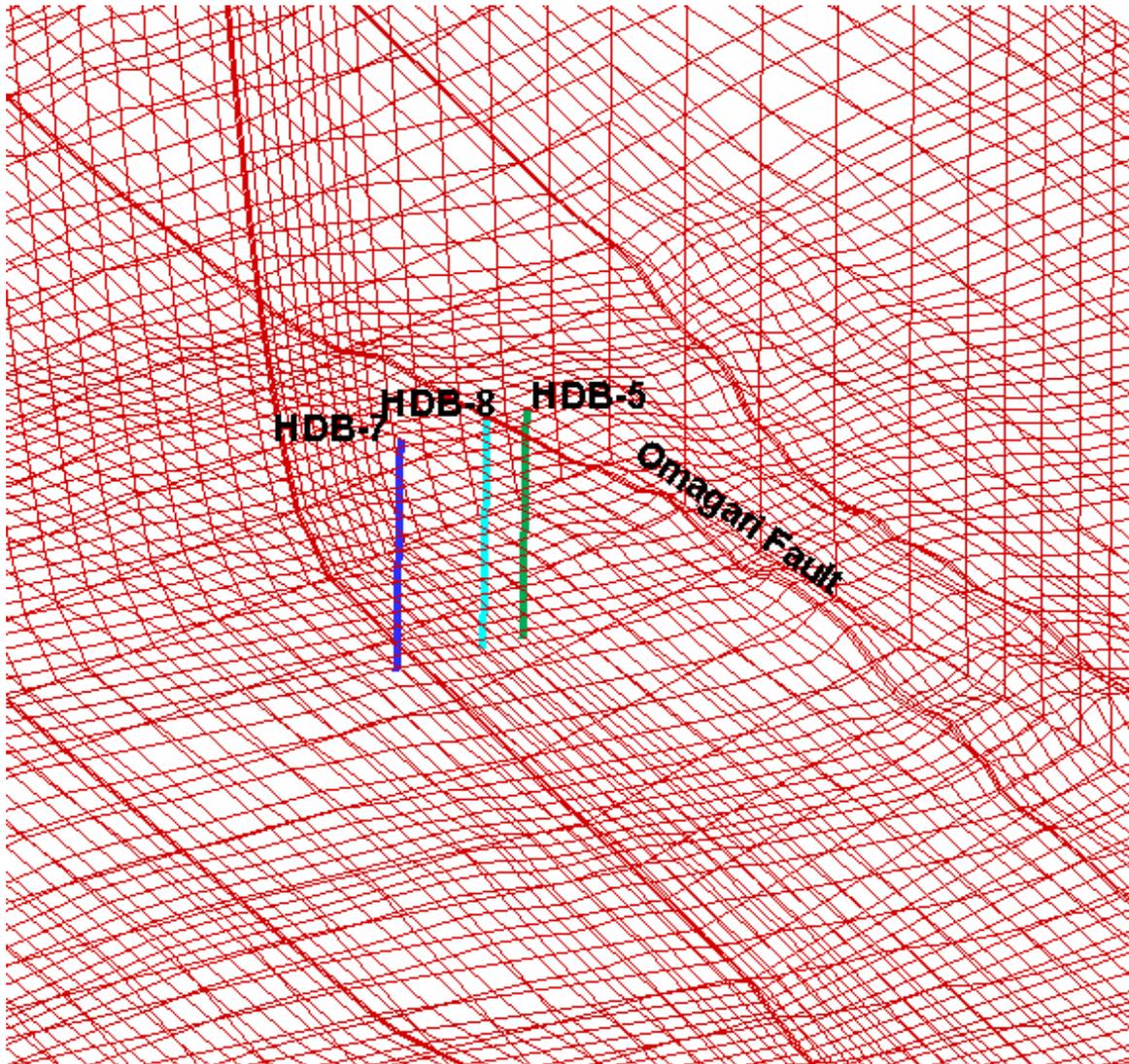


図 4.4-1 解析メッシュ中の HDB-5, HDB-7, HDB-8 と大曲断層の位置関係

表 4.4-1 逆解析に使用した観測データ

Borehole	Elev.(m)	Pressure (Pa)	Temperature (°C)	Salt mass fraction
HDB-5	-59	1.314×10^6	13.9	0.003
	-145	2.153×10^6	18.2	0.004
	-340	4.124×10^6	27.2	0.015
HDB-7	-71	1.298×10^6	11.2	0.009
	-159	2.209×10^6	14.5	0.018
	-257	3.215×10^6	18.3	0.033
	-353	4.194×10^6	22.3	0.04
HDB-8	-16			0.00125
	-91			0.0025
	-178			0.0025
	-277			0.0125

4.4.2. 逆解析パラメータ

逆解析のパラメータとしては 4.3.3 項に挙げた物性以外にも順解析のインプットデータであればパラメータ化が可能であるが、前出のように圧力、温度、塩分濃度等の観測データに限られた地域にしか存在せず、HDB 孔近傍の物性データ以外はモデルの逆解析の感度が低い。言い換えれば未知数が式よりはるかに多い状態であると言える。さらに本研究では表 4.4-1 に示すように地質区分と透水性を一意に対応させており、各地層中の不均質性を考慮していない。HDB 孔のデータは狭い範囲でそれなりに異なった値が見られ、逆解析で観測データとモデルの予測を一致させるにはモデルの解像度が低すぎる。しかしながら、解像度を上げるために細かいメッシュを切つて HDB 孔周辺の観測データとモデルの計算値を近づけても遥かにスケールの大きなモデル全体の信頼度を上げることはつながらない。当初は増幌層以浅の地層と大曲、ヌカナン両断層の透水係数、空隙率、あるいはその両方を同時に未知数として逆解析を試みたが、パラメータが多すぎると感度解析を含む解析に時間が多大に掛かり、非線形問題である事、二相流の発生と相まって有意な解を限られた検討時間内に得る事が残念ながら、事実上不可能であった。表 4.4-2 に本研究で試みた逆解析ケースのリストを示す。

表 4.4-2 逆解析ケースのリスト

Case Name	Process	Top BC	Parameters	Obs. Loc.	Obs. Time
PF	P	Fixed Q	k(WKN, KOE, YCH, OSN, OCO)	D-1, HDB-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8(P)	Inf.
PF1	P	Fixed Q (Higher initial head)	k(WKN, KOE, YCH, OSN, OCO)	D-1, HDB-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8(P)	Inf.
PF2	P	Fixed Q (1/2*PF1)	k(WKN, KOE, YCH, OSN, OCO)	D-1, HDB-1, 3, 4, 5, 6, 7, 8(P)	Inf.
PT	P, T	Fixed H	k(WKN, KOE, YCH, OSN, OCO)	HDB-5(P, T), HDB-7(P, T)	0.32My
PTF	P, T	Fixed H	k(WKN, KOE, YCH, OSN)	HDB-5(P, T), HDB-7(P, T)	2.38My
PTf	P, T	Fixed Q	k(WKN, KOE, YCH, OSN, OCO)	HDB-5(P, T), HDB-7(P, T)	0.32My
Salt0	P, T, Na	Fixed H	k(WKN, KOE, YCH, QTR, OSN, OCO, NKS, NCO)	HDB-5(P, T, Na), HDB-7(P, T, Na)	0.32My
Salt1	P, T, Na	Fixed H	k(WKN, KOE, YCH, QTR, OSN, OCO, NKS, NCO), High Fault k	HDB-5(P, T, Na), HDB-7(P, T, Na)	0.32My
Salt00	P, T, Na	Fixed H	k(WKN, KOE, YCH, QTR, OSN, OCO, NKS, NCO)	HDB-5 (P, T, Na), HDB-7(P, T, Na)	0.32My
Fi	P, (T), Na	Fixed H	k(WKN, KOE, YCH, OSN)	HDB-5(P, T, Na), HDB-7(P, T, Na), HDB-8(Na)	0.32My
Fi2	P, (T), Na	Fixed H	k(WKN, KOE, CAP, OSN)	HDB-5(P, T, Na), HDB-7(P, T, Na), HDB-8(Na)	0.32My
FinalGS	P, (T), Na	Fixed H	n(WKN, KOE, YCH, OSN)	HDB-5(Na), HDB-7(Na), HDB-8(Na)	0.32My
FinalGS2	P, (T), Na	Fixed H	n(WKN, KOE, CAP, OSN)	HDB-5(Na), HDB-7(Na), HDB-8(Na)	0.32My

P: 水圧, T: 温度, Na: 塩分濃度, Q: 流量, H: 水頭, k: 透水係数, n: 間隙率

4.4.3. 逆解析結果

本研究では表 4.4-2 に見られるように様々なパラメータや観測データのコンビネーションの逆解析を試みたが、節点数の多さとパラメータのコンビネーションによっては初期条件の設定が難しく、往々にして極度な非線形問題となり、使用した PC の演算能力に限界があり、殆どのケースにおいてリーズナブルな時間内に逆解析を完了する事が不可能であった。しかしながら、逆解析手法そのものは極めて有効な手段であり、適切な環境が整えば有意な結果が得られることが確認できた。

本節では、表 4.4-2 の Fi2 のケースの結果について述べる。必ずしもベストな結果とは言い難いが、設定したパラメータフィールドのサーチプロセスを時間内に完了した限られたケースの 1 つである。このケースでは塩水の洗い出しプロセスを逆解析した。稚内層、声問層、キャップロック、大曲断層の透水係数をパラメータとし、観測データとしては、HDB-5 と HDB-7 孔の圧力と塩分濃度、HDB-8 の塩分濃度を観測データとした。温度に関しては連成させず、逆解析の前に順解析で求めた温度分布を固定して使用し、水の粘性や比重は温度の関数であるが流れには寄与しないものとした。本来は水圧、温度、塩分濃度のすべてを連成させて逆解析を行うのが理想ではあるが、逆解析の試行パラメータのコンビネーションによっては二相流状態となり通常の PC の能力では妥当な時間内に逆解析解が求まらない。

温度分布が定常状態になるか否か、現在の分布が定常であるか否かは上部からの涵養量と下部境界からの熱供給量のバランスと透水係数で決まる。これらの条件が既知でない為、すべてに自由度を持たせると解が収束しないか、演算時間が途方もなく長くなってしまう。そこで、所謂サイエンティフィックジャッジメントに頼ることにした。塩水の洗い出しは解析対象地域が隆起し始めて後に起こるプロセスであるが、温度分布に関してはおそらく隆起以前から地表と深部との間で分布が存在しているはずであることから、先ず熱解析を行い、温度分布を固定して洗い出し解析を行うこととした。

表 4.4-3 に Fi2 のケースの逆解析結果を示す。逆解析では声問層の透水係数が下限まで下がり、その他の透水係数は増加した。特に大曲断層の透水係数が 60 倍程度に大きくなった。声問層は事実上不透水となったが隣接するキャップロックの透水性が増加したことにより水みちの連続性が保たれている。

表 4.4-3 Fi2 ケースの逆解析結果（透水係数）

Parameter	Initial (m/s)	Optimized (m/s)
log(WKN)	9.8E-11	2.5E-09
log(KOE)	9.8E-10	9.8E-24
log(CAP)	6.2E-11	1.2E-10
log(OSN)	9.8E-07	6.2E-05

図 4.4-2 は HDB-7 と HDB-8 孔における圧力分布の解析結果とデータ²⁴⁾の比較である。図 4.3-1 の順解析の結果と比較して HDB-8 に関してはフィットが改善ように見えるが、僅かな違いにとどまった。HDB-7 に関してはやはり、地表面標高のエラーの影響が大きいと思われる。また逆解析の感度は全く無いが、500m 以深で圧力が高くなっている。

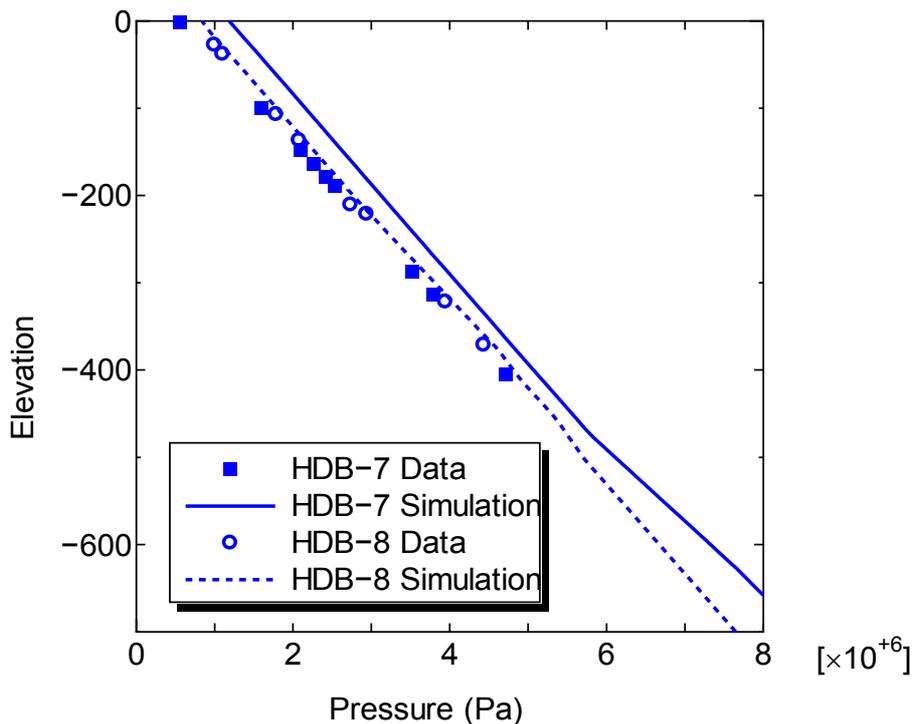


図 4.4-2 圧力分布の逆解析結果

図 4.4-3 には温度分布の比較を示す。前にも述べたがこの逆解析では熱流動を連成していない。上部境界が固定水頭であることから、透水係数を変化させると涵養量も変化し、実際には温度分布も変わり、温度が定常状態になる時間も変化する。従って厳密には透水係数の値を使って熱流動を再解析する必要がある。いずれにしても、初期設定としての温度分布は HDB-7 の凹状の温度分布を再現している。しかしながら、解析結果はデータと比較すると低い温度分布となっている。また、地上の固定温度は 10℃であるためデータより高い値になっている。

図 4.4-4 は塩分濃度分布の比較である。HDB-7 孔のデータ²³⁾と解析結果はうまく一致しているが、HDB-8 孔に関しては解析結果の方が洗い出しがより進んでいる。

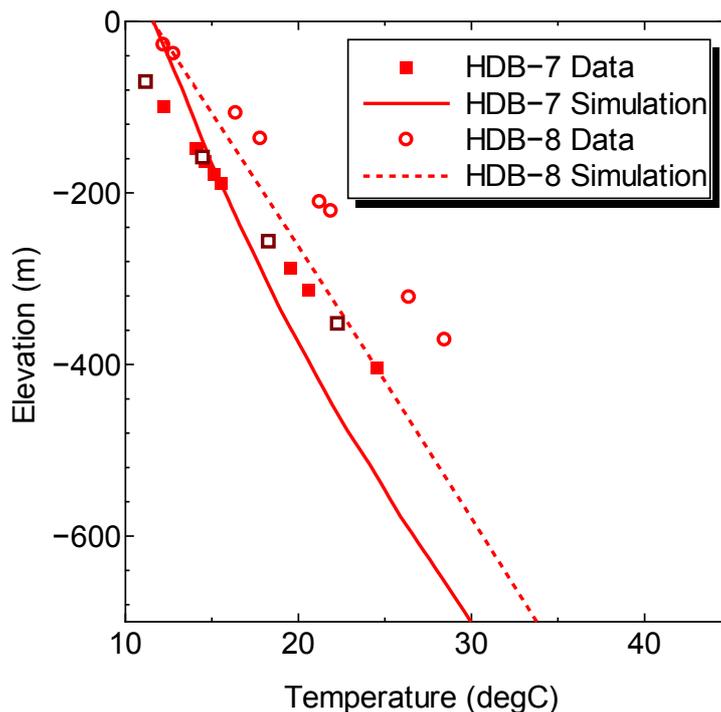


図 4.4-3 温度分布データと解析結果の比較

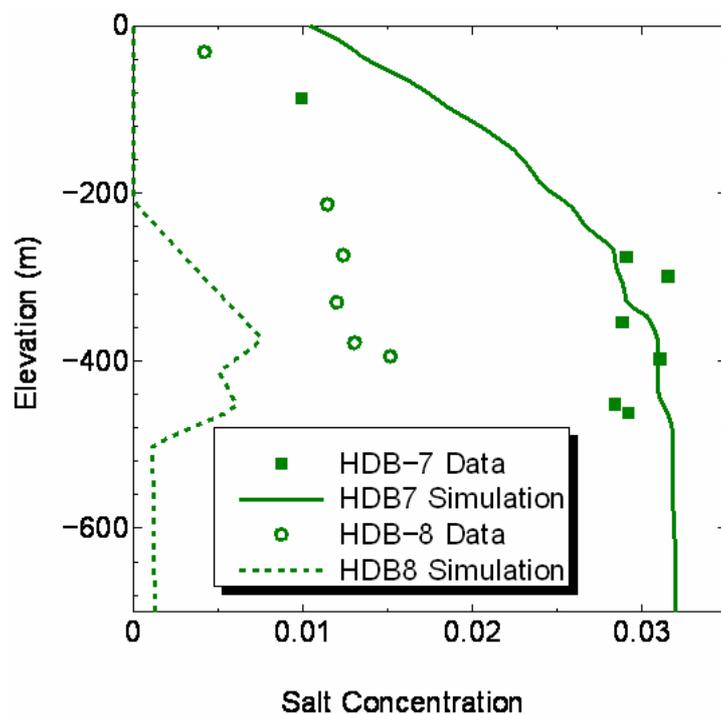
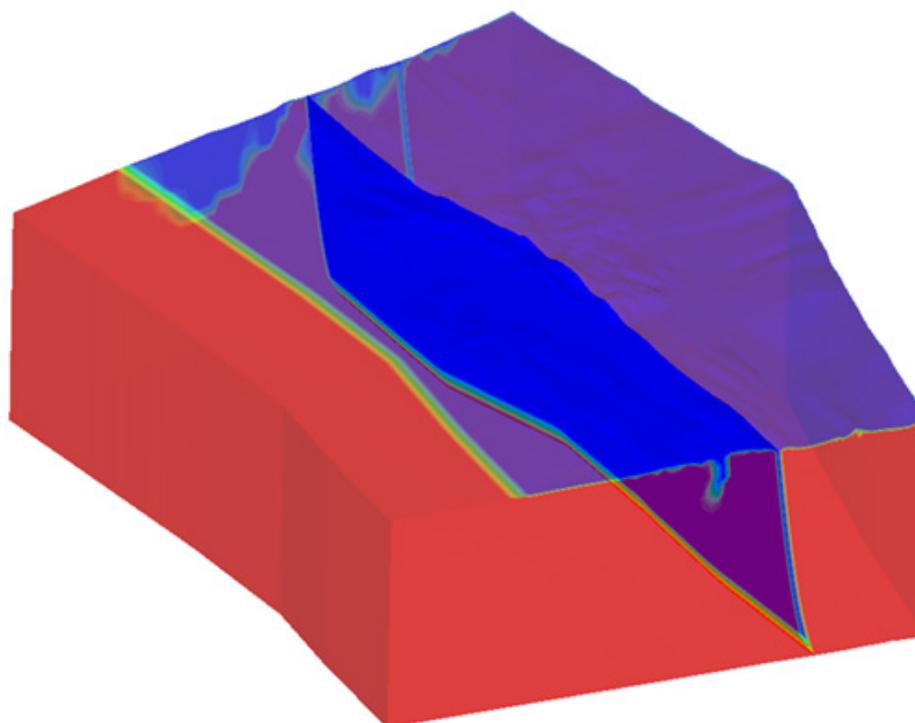
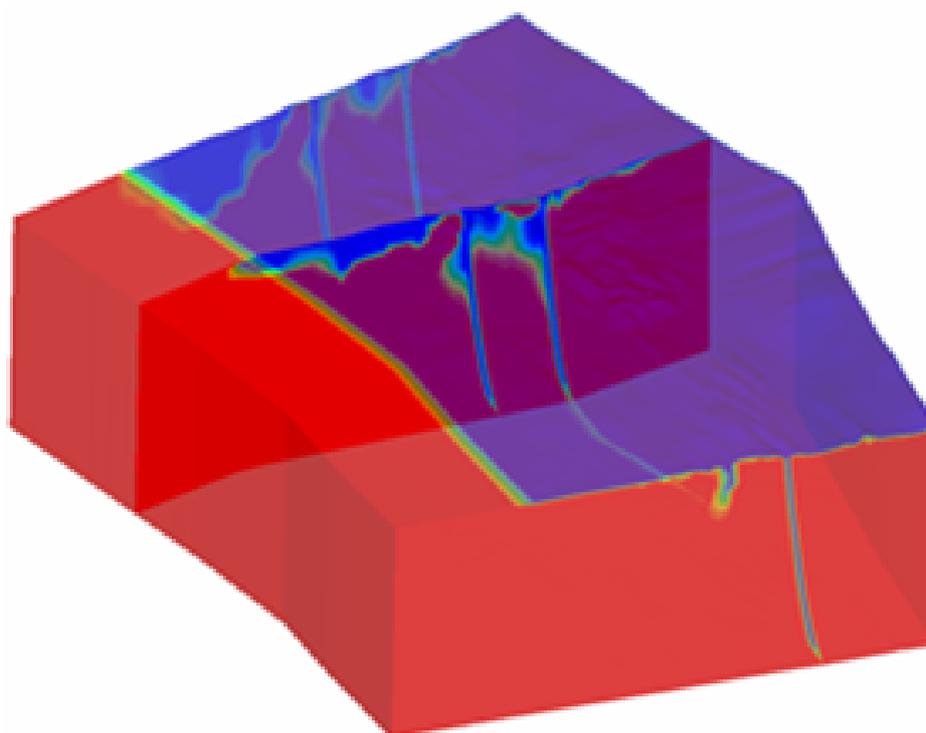


図 4.4-4 塩分濃度分布データと解析結果の比較

図 4.4-5 は塩分濃度分布の逆解析結果を三次元的に示したものである。図 4.4-5 (a)は大曲断層の断面上の塩分濃度を図示し、(b)は断層に直交する断面上の塩分濃度分布を表している。大曲、ヌカナン両断層が高透水性の為、断層に沿って洗い出しが進んでいるのがわかる。大曲断層全体の透水係数が表 4.4-3 に示すように $6.2 \times 10^{-5} \text{m/s}$ とは信じがたいが、少なくとも断層の性状によって物質移行の予測は大きく左右される事がわかる。



(a) 大曲断層の断面



(b) 断層に直交する断面での塩分濃度分布

図 4.4-5 塩分濃度分布の逆解析結果

4.5. まとめと考察

本研究の目的は地表からの調査から得られる情報をもとにして作られる水理地質モデルの不確実性を低減する手法の構築であった。その結果、圧力データに加えて温度と塩分濃度の観測データを使った逆解析手法が有効である可能性が示された。また、大曲断層のような大きな断層の性状が大きなスケールで水理場に影響をあたえる事が明らかになり、断層の水理性状の把握の重要性が指摘された。幌延地域に見られるような低い透水性の地層では、コア試験や孔井試験から得られた透水係数は有効なスケールが小さすぎる恐れがある。堆積、隆起、降雨、地熱等の地質年代を経たプロセスの結果を反映している圧力、温度や塩分濃度の分布に関して逆解析したモデルを使って現在の分布が説明ができるとするなら、そのモデルは少なくとも時間と空間スケールの両方で妥当なスケールと言える。

本研究では逆解析の際、数多くある HDB 孔から得られた全てのデータを観測データとして使わなかった。HDB 孔はほぼ 2km 四方の範囲に集中しており、本研究で使用した 40km 四方のモデルとはスケールが一致しない。モデルの不確実性を低減する一番有効な方法は有効なスケールにおいてデータを取得することである。そういった意味では幌延地域では広いスケールのデータが欠乏していると言える。

データの密度が重要なのは言うまでも無いが、データの品質の保証も不確実性の低減につながる。掘削終了後、観測装置を設置した後、圧力が自然の状態に戻って安定するまでに長い時間が掛かることを考慮に入れなければならない。また、計測装置やセンサーによってはドリフトやガスの発生により真の圧力データが計測されていない場合もあり、センサーの設置深度の誤差によって見かけの動水勾配が発生する可能性も考えておく必要がある。

4.6. 今後の課題と提案

本研究は温度や塩分濃度データがモデルの不確実性の低減に役立つ可能性を示唆したにとどまった。今後の課題として、本研究で開始した逆解析のいくつかのケースを完成させる事が望ましい。さらに、涵養量をパラメータとした逆解析が望まれる。ただし、二相流となる為、高速コンピューターが必要となる。また、データ密度にあわせて 78,000 の要素数を減らすのも有効であろう。スーパーコンピューターあるいはクラスターコンピューターを使って圧力、温度、密度流を一度に連成させた逆解析を試みるのも魅力的である。細かな点では、ボアホールの標高と地表温度を正確にモデルに反映することによって見た目のフィットは良くなるが、モデル全体の大きなスケールの不確実性の提言には繋がらないかもしれない。

5. おわりに

本研究では、大型ブロック試料を用いたトレーサー試験の実施に向け、原位置における試験対象亀裂の抽出から、試料採取、原位置および室内における透水トレーサー試験について、適用可能と考えられる手法を提案し、具体的な方法と手順についてまとめた。

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。その結果、モデルの不確実性を低減するために幌延地域ではより広いスケールでのデータの取得が必要であると言える。

今後は、実際の試験対象箇所において、本件の成果の適用を目指す。

参考文献

- 1) 下茂道人, 熊本創, 伊藤章, 唐崎健二, 澤田淳, 小田好博, 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(III)”, JAEA-Research 2009-060 (2010).
- 2) 下茂道人, 山本肇: “クロスホール透水試験機の開発とそのみずみち調査への応用”, 大成建設技術研究所報, 第30号, pp.187-191 (1997).
- 3) 竹内竜二, 下茂道人, 仙波毅, 天野健治, 青木智幸, 山本肇: “孔間水理試験装置の開発と現場適用例”, 第10回岩の力学シンポジウム (1998).
- 4) 下茂道人, 山本肇, 高原弘幸, Thomas Doe: “釜石鉱山における非収着性トレーサー試験”, PNC TJ 1205 98-001 (1998).
- 5) M. Shimo, H. Yamamoto, M. Uchida, A. Sawada, T.W. Doe, Y. Takahara: “In-situ test on fluid and mass transport properties of fractured rocks”, Proceedings of 9th International Congress on Rock Mechanics, Paris, pp.1401-1404 (1999).
- 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—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, 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”, JAEA-Research 2008-029 (2008).
- 8) 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).
- 9) 地盤工学会編: “岩の調査と試験”, 社団法人地盤工学会 (1989).
- 10) 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).
- 11) 喜多治之, 岩井孝幸, 中嶋悟: “花崗岩および凝灰岩間隙水中のイオンの拡散係数の測定”, 応用地質, 第30巻, 第2号, pp.26-32 (1989).
- 12) D. H. Tang, E. O. Frind, and E. A. Sudicky: “Contaminant Transport in Fractured Porous Media: Analytical Solution for a Single Fracture”, Water Resour. Res., Vol. 17, pp. 555-564 (1981).
- 13) K. Pruess, C. Oldenburg, and G. Moridis: “TOUGH2 User's Guide, Version 2.0”, Report LBNL-43134, Berkeley, California: Lawrence Berkeley National Laboratory (1999).
- 14) S. Finsterle: “iTOUGH2 User's Guide, Report LBNL-40040”, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, Calif. (1999).
- 15) H. Imai, N. Maeda, I. Shiozaki, K. Amamiya and M. Chijijimatsu: “Groundwater flow analysis for the Horonobe Underground Rock Laboratory Project”, JNC TJ1410 2002-004 (2002).
- 16) K. Ito, 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”, J. Japan Soc. Engineering Geology, Vol. 5, No. 3, pp.125-134 (2004).
- 17) K. Karasaki, K. Ito, YS. Wu, M. Shimo, A. Sawada, K. Maekawa and K. Hatanaka: “Uncertainty Reduction of Hydrologic Models using Data from Surface-based investigation”, proceedings, TOUGH Symposium 2009 (2009).
- 18) 下茂道人, 熊本創, 唐崎健二, 澤田淳, 前川恵輔, 佐藤久: “亀裂を有する堆積岩の水理・物質移行評価のためのデータ取得・解析(II)”, JAEA-Research 2008-101 (2008).

- 19) 太田久仁雄, 阿部寛信, 山口雄大, 國丸貴紀, 石井英一, 操上広志, 戸村豪治, 柴野一則, 濱克宏, 松井裕哉, 新里忠史, 高橋一晴, 丹生野純夫, 大原英史, 浅森浩一, 森岡宏之, 舟木泰智, 茂田直孝, 福島龍朗: “幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第1段階)研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」” JAEA-Research 2007-044 (2007).
- 20) 国土交通省ホームページ: “水文水質データベース”, <http://www1.river.go.jp/>, 07/30/2003 (2010).
- 21) 山本卓也, 下茂道人: “幌延深地層研究センターにおける試錐調査(HDB-2 孔)”, JNC-TJ1400 2002-011 (2002).
- 22) 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)”, JNC-TJ1400 2002-010 (2002).
- 23) 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)のうち HDB-6”, JNC-TJ5400 2005-004 (2005).
- 24) 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)のうち HDB-7”, JNC-TJ5400 2005-005 (2005).
- 25) 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)のうち HDB-8”, JNC-TJ5400 2005-006 (2005).
- 26) 毛屋博道, 竹内竜史: “超深地層研究所計画における地下水の間隙水圧 長期モニタリング (2005 年度~2008 年度)データ集”, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2009-030 (2010).
- 27) F. Bense 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).
- 28) C. Doughty, and K. Karasaki: “熱解析による水理モデルの境界条件の検討”, 土木学会第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.377-382 (2002).
- 29) 核燃料サイクル開発機構: “幌延深地層研究計画 平成 15 年度調査研究成果報告”, JNC-TN5400-2004-001 (2004).
- 30) H. Matsui: “Horonobe Underground Research Laboratory Project, The present status in investigation from the surface –Geology and Rock Mechanics”, in *Proceedings, International Workshop on Horonobe Underground Research Laboratory Project*, October (2004).
- 31) Y. S. Wu: “A unified numerical framework model for simulating flow, transport, and heat transfer in porous and fractured media”, *Developments In Water Science*, Edited By Cass T. Miller, Matthew W. Farthing, William G. Gray, And George F. Pinder, Elsevier (2004).
- 32) Yu-Shu Wu, 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).
- 33) Y. S. Wu, J. Rutqvist, K. Karasaki, Q. Lei, W. Xiong, J. Yuan, J., and M. Liu: “A mathematical model for rock deformation’s effects on flow in porous and fractured reservoirs”, prepared for presentation at San Francisco 2008, the 42nd US Rock Mechanics Symposium and 2nd U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium, held in San Francisco, June 29-July 2 (2008).
- 34) 藪内聡, 操上広志, 瀬尾昭治, 原稔, 国丸貴紀, 竹内竜史: “幌延深地層研究計画におけるボーリング孔を用いた地下水の水圧の長期モニタリング”, JAEA-Research 2006-056 (2006).

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

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

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

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

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

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

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についての、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

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

表5. SI接頭語

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

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

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

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

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

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

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
ファ	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガラ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ³ /4π)A m ⁻¹

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

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

