



JAEA-Data/Code

2023-009

DOI:10.11484/jaea-data-code-2023-009

HFB-1 孔調査データ集

HFB-1 Borehole Survey Data Collection

宮川 和也 早野 明 佐藤 菜央美 中田 弘太郎
長谷川 琢磨

Kazuya MIYAKAWA, Akira HAYANO, Naomi SATOH, Kotaro NAKATA
and Takuma HASEGAWA

核燃料・バックエンド研究開発部門

幌延深地層研究センター

深地層研究部

Horonobe Underground Research Department

Horonobe Underground Research Center

Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

September 2023

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Data/Code

本レポートは国立研究開発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。
本レポートの転載等の著作権利用は許可が必要です。本レポートの入手並びに成果の利用(データを含む)
は、下記まで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ウェブサイト (<https://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方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.
Reuse and reproduction of this report (including data) is required permission.
Availability and use of the results of this report, please contact
Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, 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, 2023

HFB-1 孔調査データ集

日本原子力研究開発機構

核燃料・バックエンド研究開発部門 幌延深地層研究センター 深地層研究部

宮川 和也，早野 明，佐藤 菜央美，中田 弘太郎*，長谷川 琢磨*

(2023 年 5 月 16 日受理)

本ボーリング調査は，経済産業省資源エネルギー庁委託事業「令和 3 年度および令和 4 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発事業（JPJ007597）（岩盤中地下水流動評価技術高度化開発）」の一環として，令和 2 年度に実施した物理探査などのデータに基づき推定した地下深部の低流動域分布の妥当性を確認することを目的としたものである．ボーリング孔名は Horonobe Fossil seawater Boring-1 であり，HFB-1 孔と称す．HFB-1 孔は幌延深地層研究センターの隣接地に掘削された垂直孔であり，令和 3 年度に地表から深度 200 m まで掘削され，令和 4 年度に深度 200 m から深度 500 m まで掘削されたものである．本稿は，令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画に示された研究課題の 1 つである地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化に必要な基礎データとして，HFB-1 孔の掘削に関わる情報およびボーリング調査から得られた各種データ（岩芯記載，物理検層，化学分析など）を取りまとめたものである．

HFB-1 Borehole Survey Data Collection

Kazuya MIYAKAWA, Akira HAYANO, Naomi SATOH, Kotaro NAKATA* and Takuma HASEGAWA*

Horonobe Underground Research Department
Horonobe Underground Research Center
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development
Japan Atomic Energy Agency
Horonobe-cho, Teshio-gun, Hokkaido

(Received May 16, 2023)

This borehole investigation was carried out to confirm the validity of the distribution of low flow areas deep underground estimated based on the geophysical survey in FY 2020, as a part of an R&D supporting program titled “Research and development on Groundwater Flow Evaluation Technology in Bedrock” under contract to the Ministry of Economy, Trade and Industry (2021, 2022 FY, Grant Number: JPJ007597). The borehole name is Horonobe Fossil seawater Boring-1 and is referred to as HFB-1 borehole. HFB-1 is a vertical borehole drilled adjacent to the Horonobe Underground Research Laboratory (URL), which was drilled from the surface to a depth of 200 m in FY2021 and from a depth of 200 m to 500 m in FY2022. This report summarizes information related to the drilling of HFB-1 and various data (rock core description, geophysical logging, chemical analysis, etc.) obtained from the borehole investigation.

Keywords: HFB-1, Boring Survey, PQ-WL, Fossil Seawater

* Central Research Institute of Electric Power Industry

目次

1. 背景と目的	1
2. ボーリング孔掘削	1
2.1 掘削地点	1
2.2 調査プログラムの概要	2
2.3 ボーリング孔掘削	3
2.4 掘削水管理	14
2.5 調査・試験の方法	18
2.5.1 岩芯記載	18
2.5.2 物理検層	27
2.5.3 試料の採取と化学分析	40
3. 調査・試験の結果	54
3.1 岩芯記載	54
3.2 物理検層	61
3.2.1 温度検層	64
3.2.2 孔径検層	64
3.2.3 比抵抗（インダクション）・自然電位検層	64
3.2.4 孔壁画像検層（BHTV 検層）	65
3.2.5 電磁式フローメータ検層およびビルドアップ試験	73
3.2.6 物理検層結果のまとめ	79
3.3 試料の採取と化学分析	80
3.3.1 鉱物組成分析結果	80
3.3.2 間隙水を含まない岩石部の酸素水素同位体比の分析結果	82
3.3.3 間隙水中の He の濃度および同位体比の分析結果	84
3.3.4 間隙水中の溶存成分および酸素水素同位体比の分析結果	85
3.3.5 岩石の化学組成分析および密度測定結果	89
3.3.6 原位置採水試料の水質分析結果	92
4. まとめ	99
謝辞	100
参考文献	101
付録 DVD	103

Contents

1. Introduction -----	1
2. Borehole core drilling -----	1
2.1 Drilling location-----	1
2.2 Outline of survey program -----	2
2.3 Borehole core drilling -----	3
2.4 Drilling fluid management -----	14
2.5 Methods -----	18
2.5.1 Core description -----	18
2.5.2 Physical logging -----	27
2.5.3 Sampling and chemical analysis -----	40
3. Results -----	54
3.1 Core description-----	54
3.2 Physical logging -----	61
3.2.1 Temperature logging -----	64
3.2.2 Caliper logging -----	64
3.2.3 Resistivity (induction) · streaming potential logging-----	64
3.2.4 Borehole TV (BHTV)-----	65
3.2.5 Electromagnetic flow meter-----	73
3.2.6 Summary of physical logging -----	79
3.3 Sampling and chemical analysis-----	80
3.3.1 Mineral composition -----	80
3.3.2 O-H isotopic ratio of rock -----	82
3.3.3 He concentration and isotopic ratio of porewater-----	84
3.3.4 Dissolved components and O-H isotopic ratio of porewater -----	85
3.3.5 Chemical composition and density of rock -----	89
3.3.6 Chemical analysis of in-situ water sample-----	92
4. Summary -----	99
Acknowledgement -----	100
References-----	101
Appendix DVD -----	103

1. 背景と目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、処分場の閉鎖後長期の地質環境に期待される安全機能および求められる要件の一つに、動水勾配が小さいまたは岩盤の透水性が低いことによる放射性物質の移行を抑制する緩慢な地下水流動の水理場であることが挙げられる¹⁾。厚い海成堆積層の地下深部には、地層の堆積時に間隙に取り込まれた海水が埋没続成過程で変質したと考えられる地下水（化石海水）が存在することがある。化石海水の存在は地層の埋没に続く隆起により動水勾配が増加した後も、その場の地下水が天水浸透により洗い出されていないことを示唆していることから、このような場合は長期的に低流動域であることが推察される。

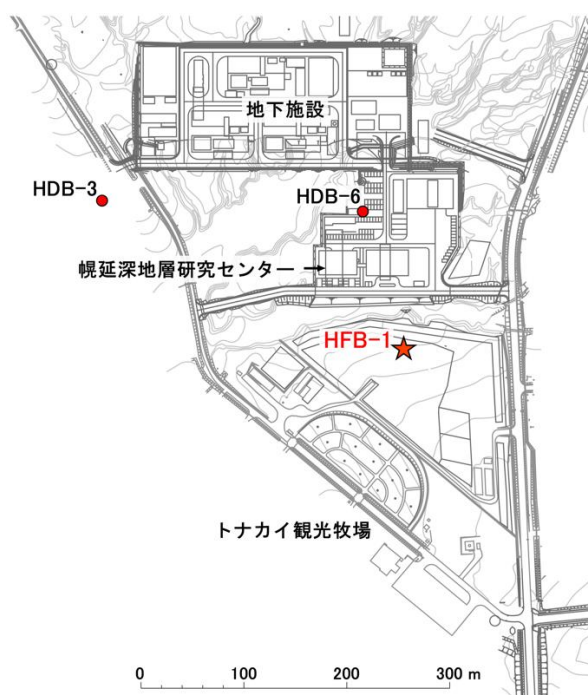
北海道幌延町に分布する新第三紀海成堆積層である稚内層の深部は割れ目の連結性が低く、ここでは天水の浸透した痕跡の無い化石海水が見られることが多い²⁾。そのような稚内層深部の地下水は少なくとも本地域が隆起に転じた以降はほとんど動いていないことが、放射性塩素同位体比や溶存ヘリウム量を用いた地下水年代測定結果から示唆されている³⁾。このことから、物理探査とボーリング調査を組み合わせた低流動域の評価技術の高度化を狙いとして、地下水中の塩化物イオン濃度と酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) を指標とした化石海水の三次元分布の推定や、その分布領域における物質移行が拡散律速であることの確認、地史を踏まえた化石海水の水質形成過程の理解が進められてきた⁴⁾。

本ボーリング調査は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業^{4),5)}の一環として、令和2年度に実施した物理探査などのデータに基づき推定した地下深部の低流動域分布の妥当性を確認することを目的としたものである。ボーリング孔名は Horonobe Fossil seawater Boring-1 であり、HFB-1 孔と称す。HFB-1 孔は幌延深地層研究センターの隣接地に掘削された垂直孔であり、令和3年度に地表から深度 200 m まで掘削され、令和4年度に深度 200 m から深度 500 m まで掘削されたものである。本稿は、令和2年度以降の幌延深地層研究計画に示された研究課題の1つである地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化に必要な基礎データとして、HFB-1 孔の掘削に関わる情報およびボーリング調査から得られた各種データ（岩芯記載、物理検層、化学分析など）を取りまとめたものである。

2. ボーリング孔掘削

2.1 掘削地点

HFB-1 孔の掘削地点は、幌延深地層研究センターの隣接地である (Fig. 1)。幌延町の地質は、白亜系が露出する東部の天塩山地を除き、大半が新第三系～第四系からなる。新第三系～第四系は南北走向の軸を持つ背斜・向斜を繰り返しているが、これらの褶曲構造は、鮮新世以降に顕著となった東西圧縮の構造運動により、東から順次、褶曲構造が形成されたと考えられている^{6),7)}。本地域の新第三系～第四系は下位より、稚内層、声問層、勇知層、更別層からなる⁸⁾。稚内層および声問層は、ともに珪質泥岩を主体とする。福沢(1985)⁹⁾は、詳細な岩相層序学的検討に基づき、層理の明瞭な珪質タービタイトを主体とする地層を稚内層、細～巨礫サイズの円礫が点在する無層理塊状の珪藻質泥岩を主体とする地層を声問層としている。HFB-1 孔の掘削地点は HDB-3 孔や HDB-6 孔および地下施設に近接しており、深度約 310 m まで声問層が分布し、それ以深では稚内層が分布することが予測されていた⁴⁾。

Fig. 1 Location of HFB-1⁴⁾

2.2 調査プログラムの概要

HFB-1 孔の調査プログラムの概要を Fig. 2 に示す。令和 3 年度は深度 200 m まで、令和 4 年度は深度 500 m まで掘削した。本ボーリング調査では岩石中の間隙水などの化学分析を実施するため、全深度においてコア掘削を実施した。掘削水による岩石コアへの汚染を最小限に抑える必要があることや、汚染に耐え得る孔径で岩石コアを取得する必要があることから、本ボーリング調査では、PQ 三重管ワイヤーライン工法によるコア掘削を行った。ワイヤーライン工法は調査掘削において用いられる手法の一つであり、ビット、アウターチューブ、ボーリングロッドを孔内にとどめたまま、ワイヤーに接続した治具を孔内に降下させ、コアの収納されたインナーチューブを回収することで掘削を進める手法である。ワイヤーライン工法 (WL) は掘削時に掘削孔へ与える影響が少なく掘進能率が高いことから、深度 200 m を超える大深度ボーリングにおいて多く採用される手法であり、これまでの幌延深地層研究計画における地上からのボーリング調査においても用いられてきた手法である。ワイヤーライン工法は Boart Longyear 社 (アメリカ) が開発した「Q wireline system」を基とし、口径の規格と合わせて PQ-WL などと呼ばれ、P は外径約 123 mm であることを意味する。

本ボーリング調査では化石海水の分布の指標となる比抵抗や Cl⁻濃度、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD の深度プロファイルを得ることが重要である。物理検層では比抵抗・自然電位検層のほか、水みち箇所を把握できる調査項目である電磁式フローメータ検層、孔壁画像検層 (BHTV 検層) などの 5 項目を実施した。Cl⁻濃度、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD の連続的な深度プロファイルを得るために、間隙水や溶存ガスの分析のためのコア試料のサンプリング間隔を 10 m に 1 箇所程度の頻度とした。本ボーリング調査では単孔式透水試験を実施していないが、電磁式フローメータ検層終了後に孔内に設置した圧力計を利用してビルドアップ試験を行い、ボーリング孔全体の透水量係数を取得した。 ^{81}Kr を用いた天水の流入時期を推定する地下水年代測定手法のボーリング調査における適用性の確認のために、物理検層とコア記載などの結果に基づき推定した 2 箇所の水みちに対し、揚水による地下水試料および遊離した溶存ガス試料の採取を実施した。

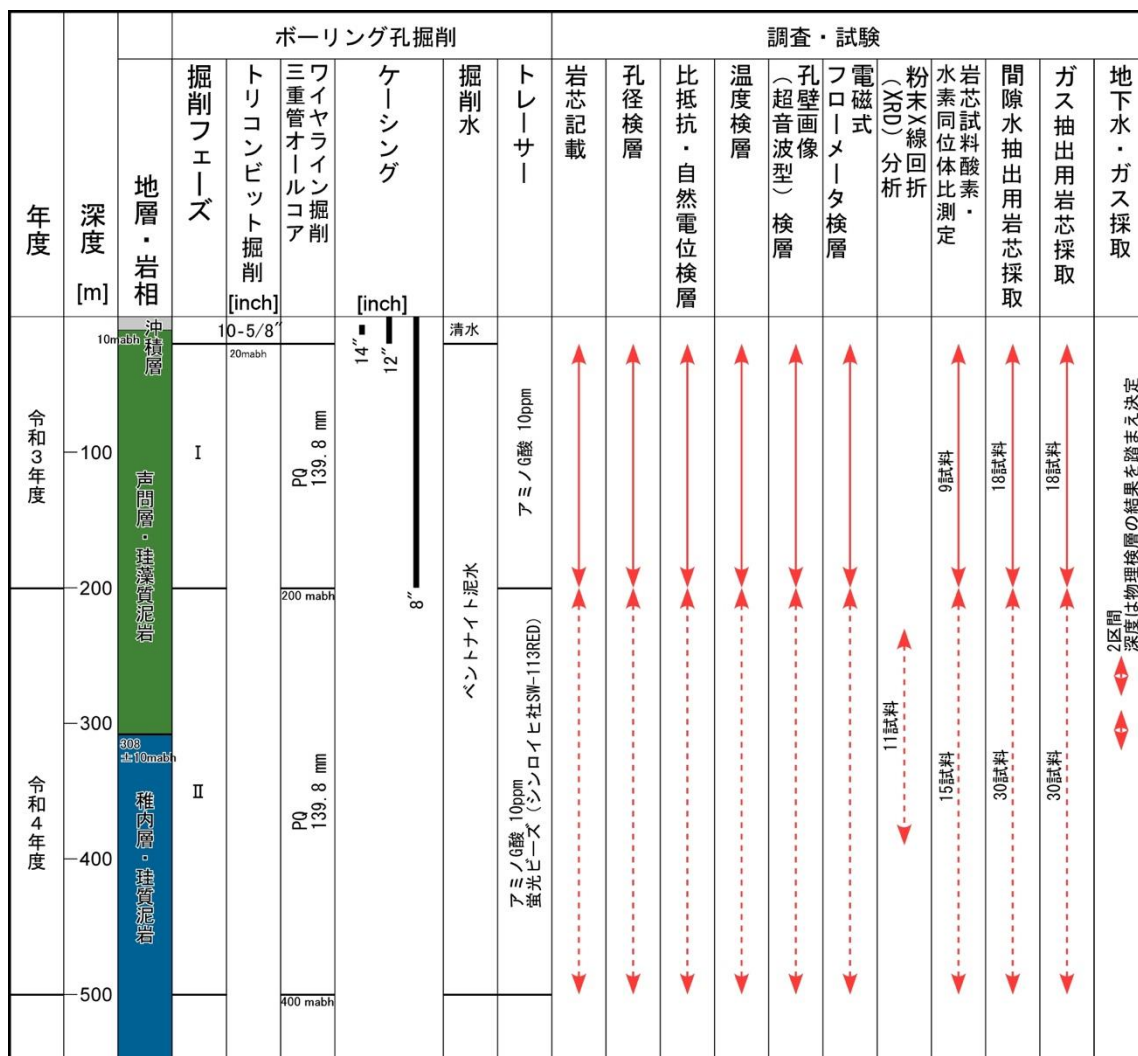


Fig. 2 HFB-1 孔の調査プログラム 4)

地層境界深度は既存情報を基にした HFB-1 孔掘削前の予想深度である。

2.3 ボーリング孔掘削

(1) 基本方針

本地域では天然ガス等の地層流体の噴出が考えられるため、ボーリング作業は鉱山保安法施工規則および鉱業上使用する工作物等の技術基準を定める省令に準じて行った。その他に以下の点に留意して掘削を行った。

- 掘削用鉄製櫓の脚の安全率は、最大静荷重に対して 2.7 倍（「鉱業上使用する工作物等の技術基準を定める省令」に基づく）以上とした。最大静荷重は最大フック荷重、櫓の自重およびボーリング機のファーストラインおよびデットラインの張力を含む。巻き上げ荷重の計算はドラムの肌巻きではなく、最も使用頻度の高いワイヤー巻き段数にて行った。
- ボーリング掘削装置（ボーリング機、ポンプ、櫓など）は PQ（139.8 mm）孔径で深度 500 m のボーリング孔掘削および抑留対策などに十分な能力と耐久性を有するものとした。掘削では岩芯採取率 100% を目標とするため、ボーリング機は油圧スピンドルタイプ（TSL-HD クラス）を基本とし、ボーリング孔の掘削深度に対応したロッドなどの引き上げに十分な能力を有する昇降装置を使用した。掘削ツールズ（コアバーレル、ロッドなど）についてもボーリング孔の掘削深度を掘削するために十分な能力と耐久性を有するものとした。

- ・ボーリング機およびボーリングポンプの動力は基本的にモーターとし、発電機は防音型を採用した。
- ・発電機用ケーブル、各ケーブル配線は規格品とし、屋外の配線はキャブタイヤケーブルを使用した。
- ・ボーリング掘削中に可燃性ガスが噴出する可能性が想定されたことから、鉱山保安法施行規則第 15 条第 1 号に規定する「火災を防止するための措置」に準拠し、孔口より半径 8 m 以内で使用するボーリング機器および設備の電気機器は全て防爆構造とした。
- ・ボーリングポンプについては、掘削期間中予備を 1 台準備した。
- ・スライムによるボーリング孔近傍の透水性への影響を低減するため、掘削中はシェルシェーカ、デカンターを使用した。
- ・ガスの噴出を防止するため、噴出防止装置（BOP）を取り付けた。
- ・掘削パイプは油井用鋼管を使用し、接続ネジは API 規格または同等の性能を持つものを使用した。
- ・ガス探知警報装置をボーリング孔口周辺に設置し、ガス対策を講じた。
- ・孔内に降下する孔内機器（掘削パイプ、コアバーレル等）の採揚器をあらかじめ孔井元に準備した。
- ・地層流体の噴出に備え、孔井元にバライトおよび調泥剤を準備した。

ボーリング調査の作業の概要は次のとおりである：作業敷地の整備や掘削準備などの付帯工事、深度 0～500 m について PQ ロッド（孔径 139.8 mm）によるワイヤーラインオールコア掘削、岩芯記載、物理検層、揚水試験、廃孔措置、現場撤去と原形復旧。岩芯記載については 2.5.1 項で述べる。物理検層については 2.5.2 項で述べる。揚水試験については 2.5.3(6)項で述べる。

(2) 付帯工事

令和 3 年度のボーリング調査の工程を Fig. 3 に示す。2021 年 11 月 15 日に敷地工事に着工し、調査用地の草刈りを実施した後、鉄板敷設およびボーリング用地周辺にガードフェンスを設置した。その後、12B（300A）ガイド管をバイプロハンマ工法で深度 20.0 m まで挿入し、セーラーを掘削し、鉄製セーラー枠を設置した。ボーリング孔の孔口測定の結果は次の通りであった。

世界測地系：X 座標 115932.673, Y 座標 -30624.754, 標高 59.192

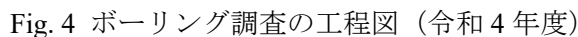
日本測地系：X 座標 115669.272, Y 座標 -30319.020, 標高 59.192

2021 年 11 月 23 日から櫓・サブストラクチャの機材搬入および組立を行い、櫓周辺の電気配線および泥水ラインの配管を行った。タンク類を配置し、雨水や雪の混入を防止するために積雪に耐える構造の仮設材で囲った。これと並行して PQ ロッドやドリルパイプなどの掘削機材を搬入し、メタンガスの噴出に伴い機器が押し戻されることを防止するために、噴出防止装置（BOP）を設置した。令和 3 年度は深度 200 m までの調査終了後に翌年度の延伸掘削に備えるための措置を実施した。物理検層の終了後、2022 年 1 月 9 日から作業を再開し、6B ガイドケーシングのフランジから BOP を取り外した後、フランジとガイドケーシングの落下防止対策を取り外した。2022 年 1 月 16 日から深度 200 m まで 9-5/8" 拡孔を行い、8B ケーシングパイプを挿入した。その後、8B ケーシングをセメンチングし、8B ケーシングパイプ内の泥水を清水に入れ替えた。櫓の解体やタンク類の撤去などの撤去作業を行い、2022 年 2 月 16 日に令和 3 年度の調査を終え、翌年度の延伸掘削に備えた。

令和 4 年度は 2022 年 8 月 1 日に付帯工事に着工した（Fig. 4）。作業の安全性の確保のために調査用地の草刈りを実施し、車両の運行のために鉄板を施設し、第三者や動物の侵入を防ぐために調査用地の周囲にガードフェンスを施設した。その後、調査作業に必要な事務所や分析室、コ

[illegible][illegible]

- 5 -



ボーリング孔掘削に用いた機材の一覧を Table 1 に示す。PQ-WL コア掘削は、2021 年 12 月 21 日より開始した。掘削作業は日進 24 m 程度で進捗し、2021 年 12 月 28 日に 200.00 m に達した。深度 200 m 以深の掘削は 2022 年 9 月 3 日に開始し、9 月 19 日までの 17 日間（このうち 1 日は休工）で深度 200.00～500.00 m の計 300.00 m および物理検層に必要な余堀り約 10 m を掘削した。Fig. 5 と Fig. 6 に掘削深度と日時の関係図を示す。掘削深度や使用した掘削水種別、掘削時間、ビットタイプ、ビット荷重、ビット回転数、送水量、排水量、圧力、コア採取率などの掘削パラメータの詳細データを付録 A5 に示す。ボーリング掘削中は深度 103.90 m および 300 m、400 m において孔径検層（簡易キャリパー検層）を実施し、孔径拡大の進展状況を確認しながら掘削を進めた。深度 200 m および 400 m、500 m に到達時に孔芯傾斜測定を実施した。深度 200 m および 500 m までの掘削後に PQ ロッドを揚管し、物理検層を実施した。本ボーリング掘削中、掘削に支障となる孔内の崩壊および逸水はなかった。

Table 1 ボーリング孔掘削に用いた機材一覧表

機 器 名	名 称	能 力	備 考
ボーリングマシン	利根製 TSL-1	巻上能力シングル9 t 出力 90 kW	4段ミッション+インバータ スピンドル+テーブル
ボーリング檣	DR-25型	スタンダード型 7.0 m × 7.0 m H = 25 m	耐荷重 80 t 風圧40 m時
サブストラクチャー	自社製	ブロック形 2基 6.18 m × 2.19 m × 1.50 m	
泥水ポンプ	鉦研製 MG-40型	MAX.V 720 L/min MAX.P 6.0 MPa	ミッション 掘削・拡孔時
泥水ポンプ	セキサク D-30型	MAX.V 510 L/min MAX.P 6.9 MPa	6段ミッション+インバータ セメンチング時
シェーカータンク	鉄製角形	容量 10 kL 5.0 m × 2.0 m × 1.2 m	
サクショントank	鉄製角形	容量 10 kL 5.0 m × 2.0 m × 1.2 m	
ミキシングタンク	鉄製角形	容量 8 kL 4.6 m × 1.6 m × 1.3 m	
リザーブタンク	鉄製角形	容量 10 kL 5.0 m × 2.0 m × 1.2 m	
ザクタンク	鉄製角形	容量 10 kL 5.0 m × 2.0 m × 1.2 m	
マッドスクリーン	SASC JAPAN M3e	処理能力 1,893 L/min 8〜210メッシュ	振動モーター 5.5 kWインバータ
デカンタ	セキサク SD-14M	処理能力 300 L/min	15 kWインバータ
ドリルパイプ	利根製	2-7/8"E-75 重量 16.22 kg/m 外径70.0 mm・内径54.6 mm レンジ1	L≒6.0 m 掘削・拡孔用
スーパーアームロボ	セキサク製	メークアップトルク MAX:7,870 kg-m ブレイクアウトトルクMAX:9,240 kg-m	スピニングレンチ径:4〜8" 100 rpm/トルク80 kg-m
WLロッド	クリステンセンマイカイ製	PQロッド 外径114.3 mm・内径103.2 mm	L=3.0 m 重量 14.9 kg/m
WLウインチ	NLC製2000型WLホイスト	ドラム巻き上げ能力 9 mmワイヤー × 2,000 m	動力 15kWモーター
ブレイクアウトツール	NLC製	ブレイクアウトトルクMAX:5,880 kg-m メークアップトルク MAX:3,920 kg-m	油圧ホルダー耐荷重20 t
ドリルカラー	YBM製	6-1/2"レンジ2 外径165.1 mm・内径57.15 mm	L≒6.0 m 9.0 m 掘削・拡孔用
スタビライザー	TSK製	9-5/8" ニア1本・ストリングス2本	掘削・拡孔用
フックブロック	セキサク製	HB-50型 耐荷重50 t	シーブ径 458 mm 車数 3車
ウォータスイベル	キング製	32-GA 耐荷重36ton 53-GA 耐荷重54ton	WL用 掘削・拡孔用
BOP	NLC製 BP-8	耐圧：2MPa φ73、φ89、φ120.6mm	
ドリルパイプエレベーター	TSK製	2-7/8"	耐荷重50 t
ケーシングパイプエレベーター	Wilson・セキサク製	8"	耐荷重100 t
ロータリースリッパ	TSK製	2-7/8" DU型ショート	耐荷重100 t
ドリルカラースリッパ	TSK製	4"〜8"	耐荷重80 t
ロータリースパイダー	セキサク製	耐荷重100 t	
デリベリホース	住友理工ホーステック	型式 1B140×210-65	耐圧14 MPa
配電盤	自社製		
ツールハウス	自社製	鉄製箱形	

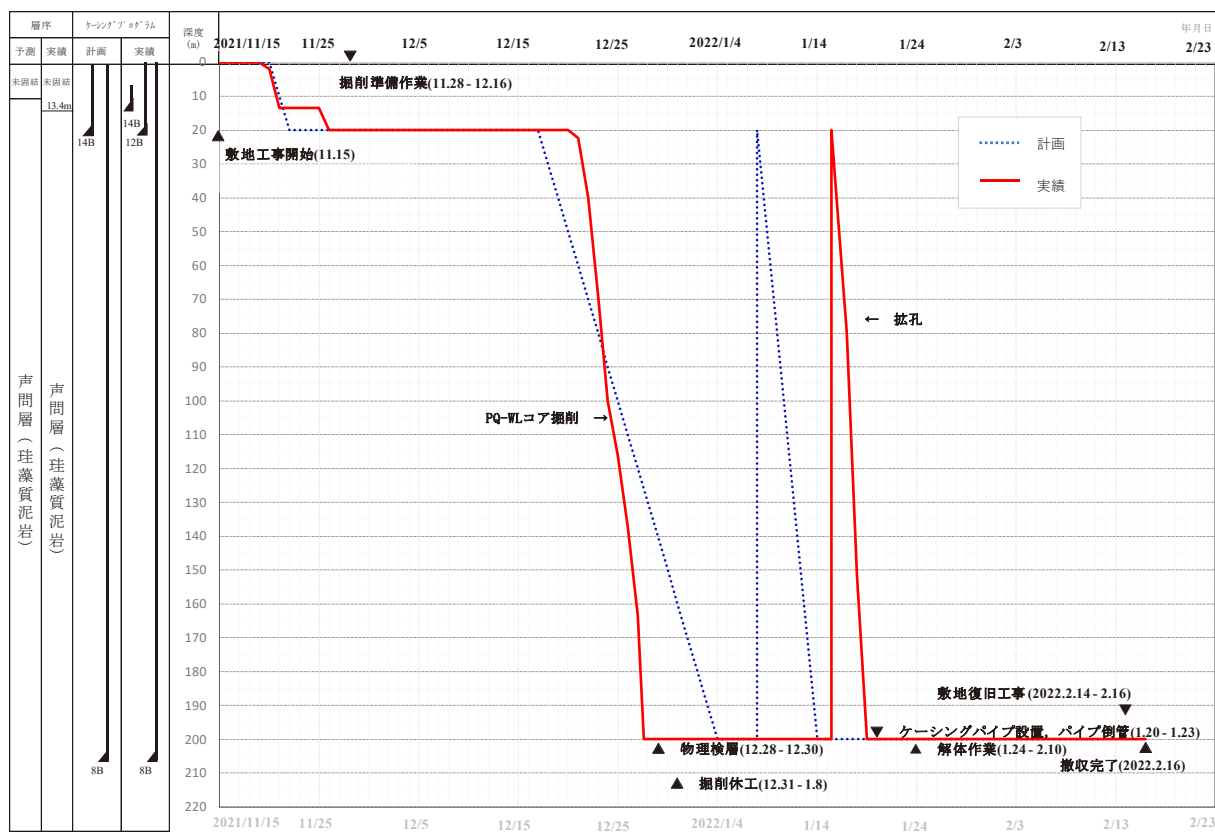


Fig. 5 掘削深度と日時の関係図 (R3 年度：深度 0～200 m)

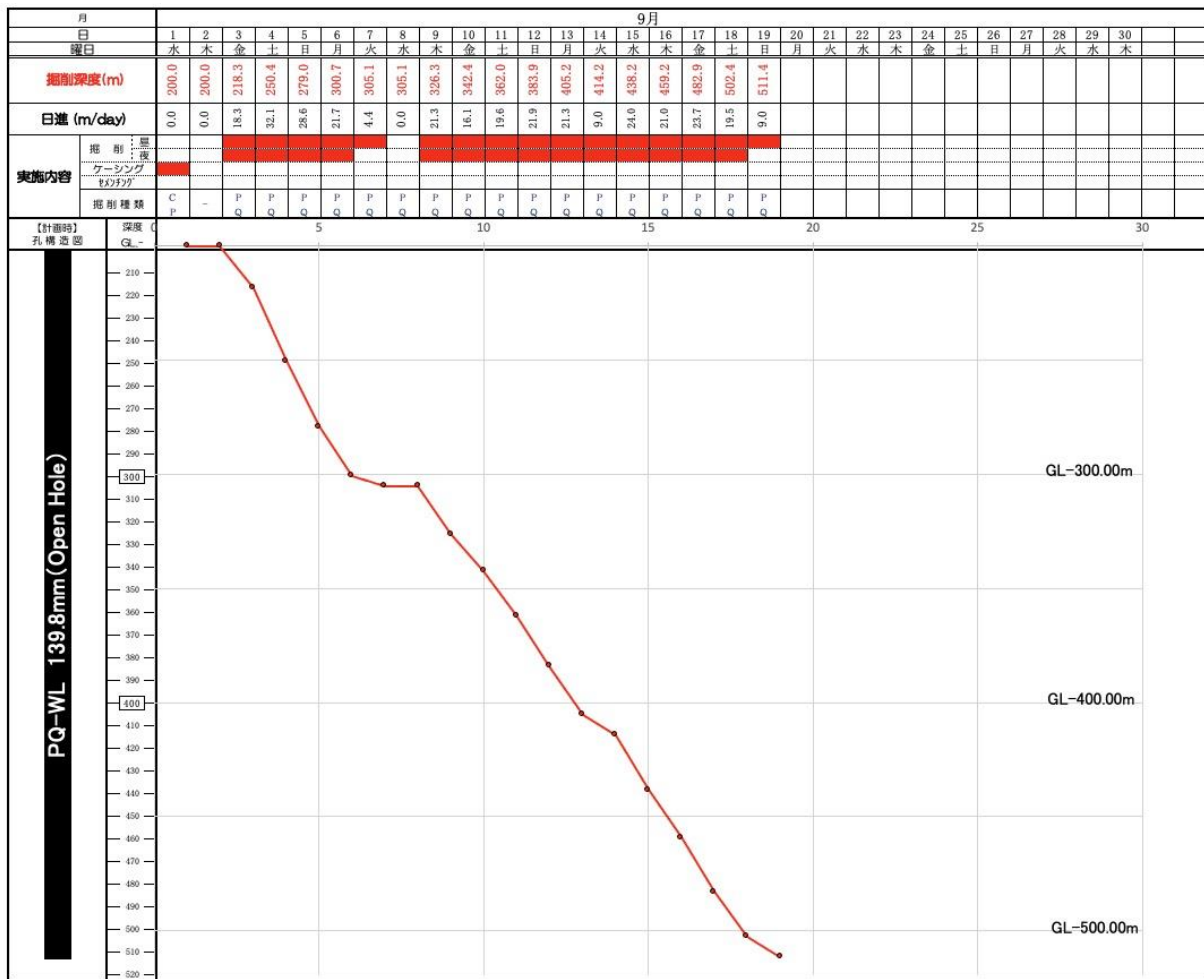


Fig. 6 掘削深度と日時の関係図 (R4 年度：深度 200～500 m)

(4) 簡易キャリパー検層

簡易キャリパー検層は深度 103.90 m および深度 300 m, 深度 400 m において, 掘削時点の孔壁の崩壊や圧縮状況を把握することを目的に実施した. Figure 7 に深度 103.90 m における検層結果を, Fig. 8 と Fig. 9 に深度 300 m および深度 400 m における検層結果をそれぞれ示す. 本検層では検層器を中心とし, X および Y 軸として 2 軸, 4 方向の孔径 (半径) が取得される. 検層器はウインチケーブルで孔内に降下させており, このときケーブルおよび孔内状況により検層器が回転して降下している可能性があるため, X および Y 軸には定方向性はないと考えられる.

深度 300 m の結果: 深度 200～270 m は, 概ね安定的な孔壁状況を保っていた. 深度 270～300 m では局所的に孔が拡大している状況が認められ, 特に深度 280～300 m 区間では掘削直後にもかかわらず, 孔壁拡大が著しい結果が得られた. 深度 250 m 付近を境に浅部では X 変位の, 深部では Y 変位の拡大傾向が認められ, 地質構造の姿勢 (走向傾斜) の差異あるいは応力に関わる孔壁のブレイクアウト軸が異なることが示唆された.

深度 400 m の結果: 深度 305 m 及び 320 m 付近に Y 変位の拡大ピークが認められた. 深度 305 m のピークは深度 300 m で実施した簡易キャリパー検層結果と調和的であることから, 掘削中の崩壊が進んだこと示唆された. 深度 320 m の孔壁拡大は, X 変位側ではほとんど検出されていないことから, 孔壁を構成する地質あるいは応力に関係した変位である可能性が高い. 深度 390 m 付近に X 変位のピークが認められるが, Y 変位ではほとんど検出されていないことから, 地質あ

るいは応力に関係した変位であることが示唆された。

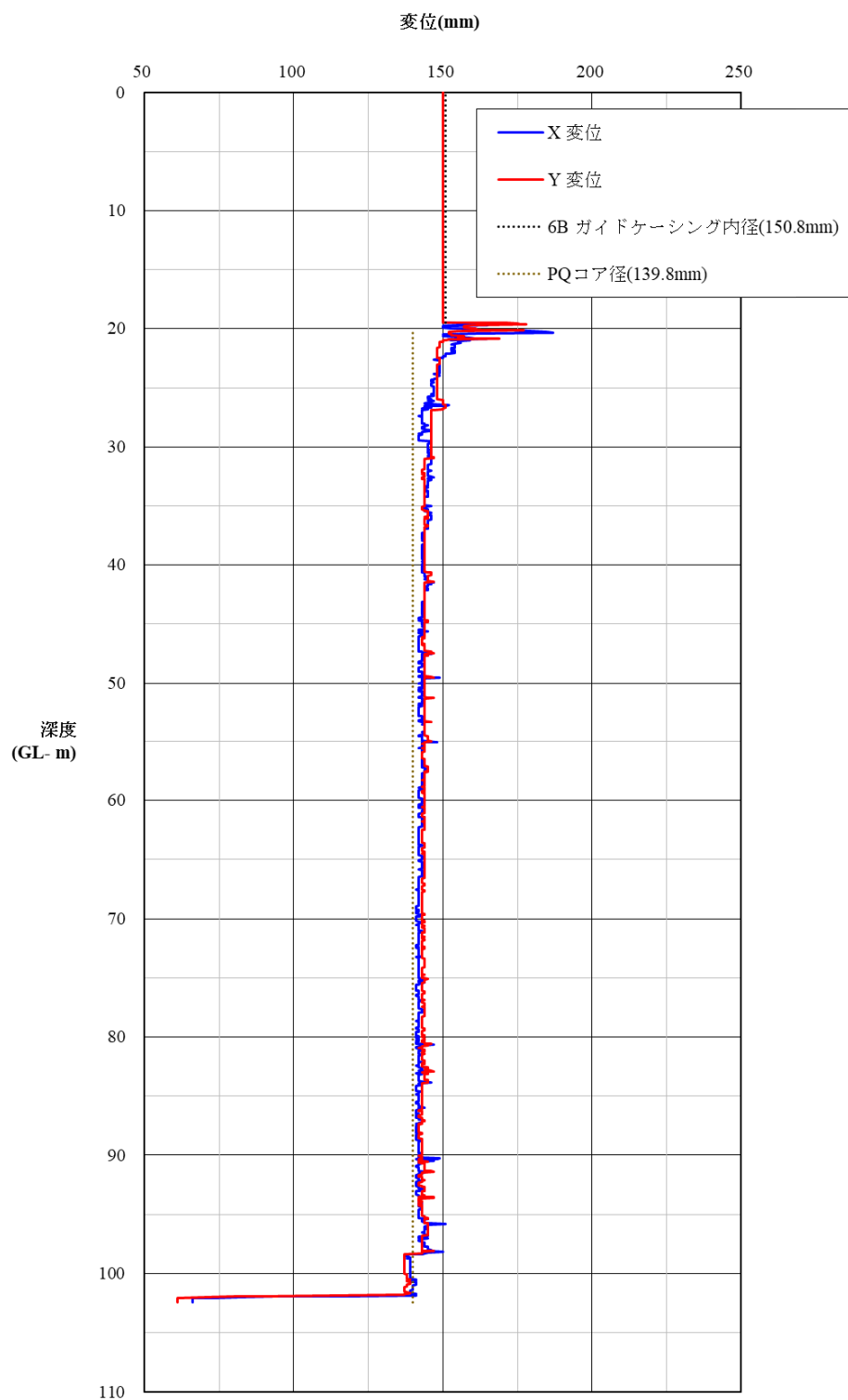


Fig. 7 深度 103.90 m における簡易キャリパー検層結果

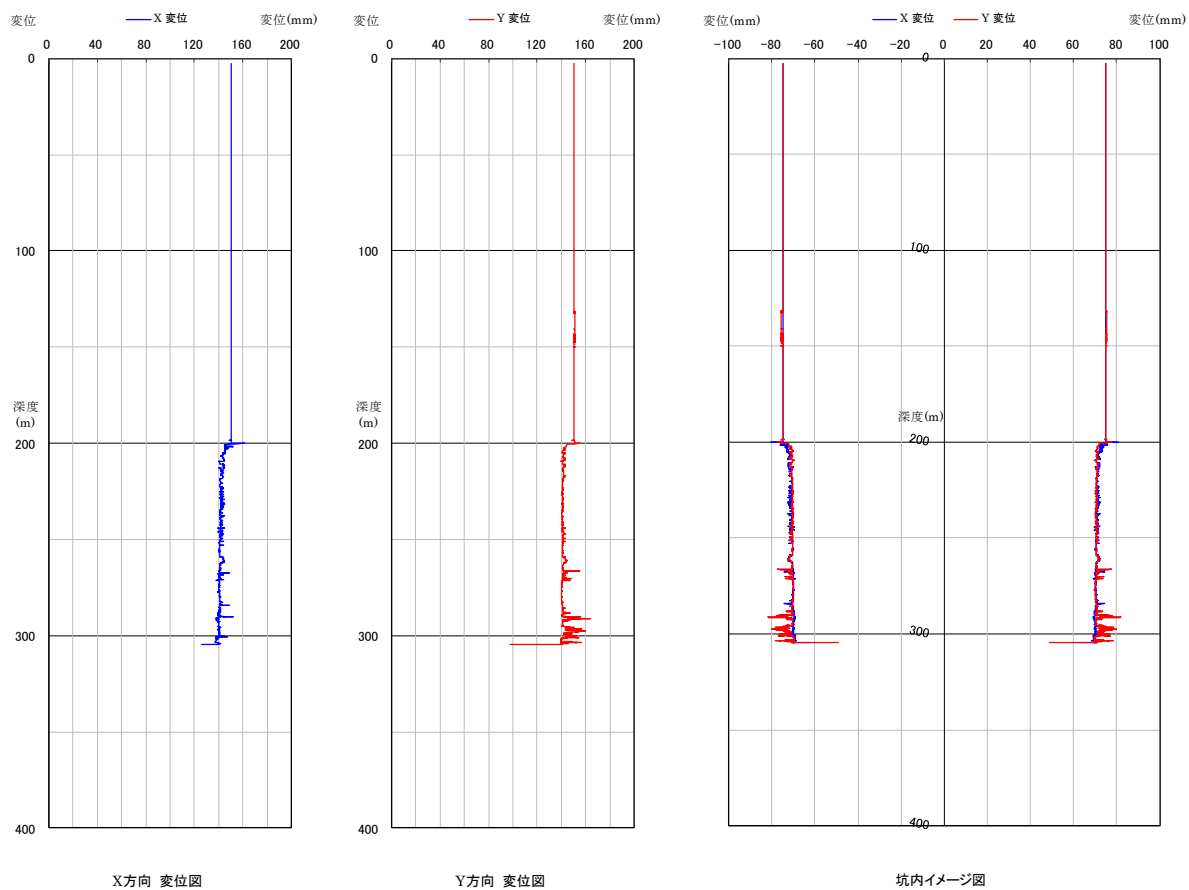


Fig. 8 深度 300 m における簡易キャリパー検層結果

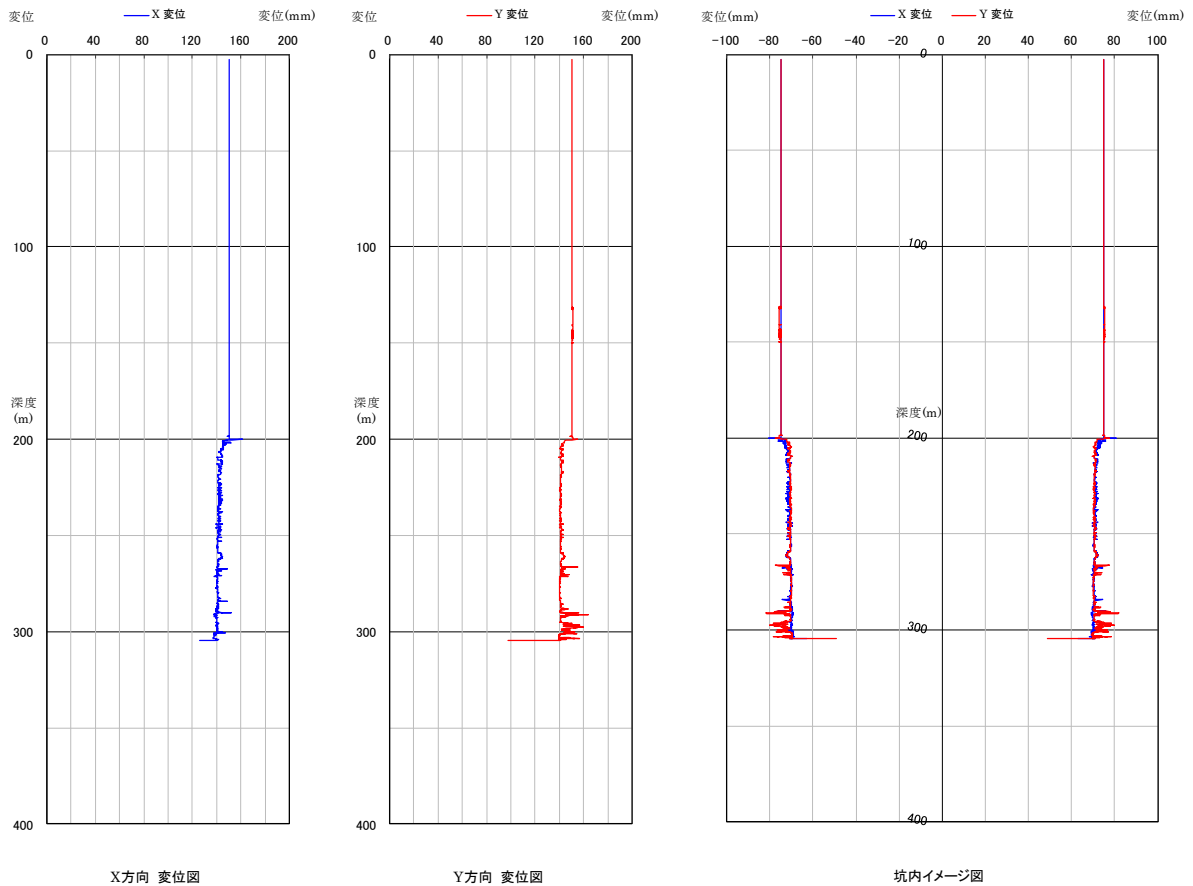


Fig. 9 深度 400 m における簡易キャリパー検層結果

(5) 孔芯傾斜測定

孔芯傾斜測定は深度 200 m, 300 m, 400 m, 500 m の 4 箇所にて実施した。孔芯傾斜測定結果および掘削軌跡図を Fig. 10 に示す。深度 200 m における方位は 0° 、傾斜は 0.05° であった。深度 300 m における方位は $S70^{\circ}E$ 、傾斜は 0.5° であった。深度 400 m における方位は $S45^{\circ}E$ 、傾斜は 2.5° であった。深度 500 m における方位は $S45^{\circ}E$ 、傾斜 2.9° であった。最終掘削孔底は孔口から東に 8.59 m, 南に 5.42 m の位置であった。孔曲を考慮した掘削深度 500 m 地点における鉛直深度は 499.77 m であった。

孔番 HFB-1

孔口標高 EL+59.192m 孔口座標 X=115932.673, Y=-30624.754, Z=59.192 偏角: 西偏10° 20′

測定深度 (m)	孔曲がり測定結果（読み値）		掘削傾斜角にのみ規制			測量座標系（孔口座標：0, 0）			備考
	磁針方位 (MN) (°)	傾斜 (鉛直下方0°) (°)	鉛直深度方向 (傾斜角は水平方向0°)		標高 EL m	真方位 (TN) 角度 (°)	W (-) - E (+) 方向 距離 (m)	N (-) - S (+) 方向 距離 (m)	
			傾斜角 (°)	鉛直距離 (m)					
0				0.000	59.19		0.000	0.000	令和3年度測量
100	0.0	0.00	90.0	100.000	-40.81	10.3	0.000	0.000	未実施
200	0.0	0.05	90.0	200.000	-140.81	10.3	-0.016	-0.086	令和3年度実施
300	250.0	0.50	89.5	299.996	-240.80	260.3	0.845	0.061	本調査
400	225.0	2.50	87.5	399.901	-340.71	235.3	4.432	2.542	本調査
500	225.0	2.90	87.1	499.773	-440.58	235.3	8.593	5.420	本調査

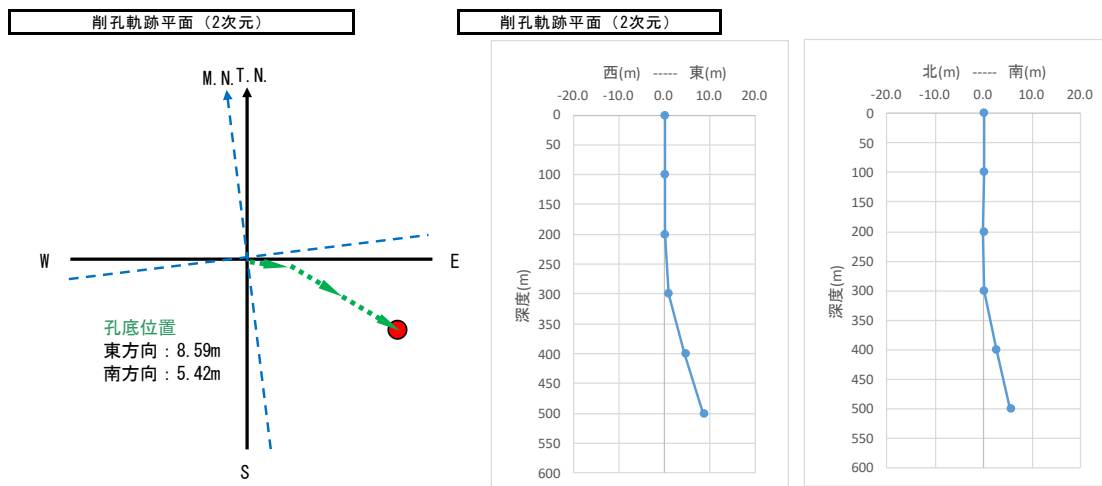


Fig. 10 孔芯傾斜測定結果および掘削軌跡

(6) 廃孔措置

廃孔は鉱山保安法施行規則第25条第2号に規定する「坑外における鉱物の掘採による崩壊又は土砂流出、石油の湧出、汚濁水流出等の鉱害を防止するための措置」に基づき実施した。廃孔の概念図をFig. 11に示す。本孔は令和3年度に深度200mまで8Bケーシングが挿入され、外周がフルセメンチングにより固化されている。また、深度20mまでは8Bケーシングの外周に12Bケーシングが打設されており、さらにその外周に14Bケーシングが深度6.1~13.4mの区間内に残置されていた。

深度200mまで挿入していた6Bガイドケーシングを抜管後、掘削孔底(余掘も含めて511.4m)から深度170mまでの区間を比重1.8のセメントスラリーを用いて充填した。この深度170mのセメントプラグは上記施行規則により強度の確認が必要であり、セメントプラグ上部に3t以上の負荷をかけた場合においてプラグに異常がないことを確認する、との条件がある。これに基づきセメントスラリー打設後のセメント固化後に荷重を計測し、3t以上の値が出ており、また沈下等の異常がないことを確認した。深度170m以浅から32mまでの区間はケーシング内であり、外周をフルセメンチングで処理されていることから、掘削に使用したものと同等の比重の泥水を使用し(比重1.06)充填した。深度32~2mまでの区間は最上部セメントプラグとして比重1.8のセメントスラリーを充填した。深度2mまではバックホウにより掘削を行い、立上りのケーシング(8B及び12B)を深度2.0mにて切断の後、鉄蓋を8Bにて溶接した。溶接完了後は地表部を令和3年度に掘り起こした地表部の耕作土にて埋め戻した。

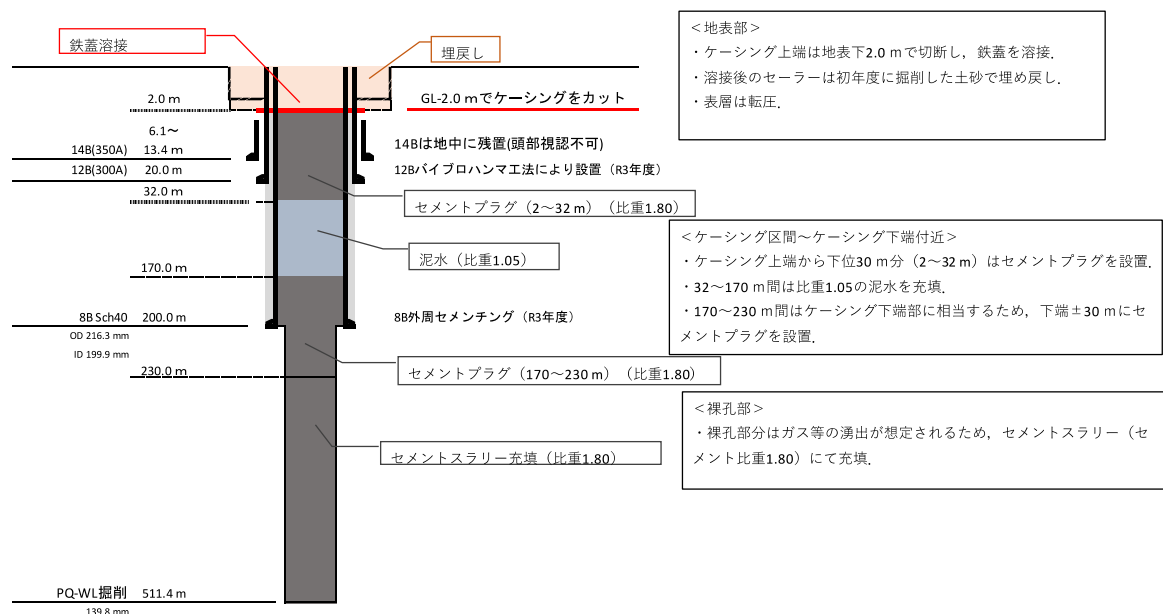


Fig. 11 廃孔の概念図

(7) 現場撤去と原形復旧

廃孔措置の後、現場の全資材を撤去し、用地を原形復旧した。掘削に際し使用した資機材の撤去（櫓解体を含む）、ハウス類の撤去、敷鉄板、フェンスの撤去の後ゴミ等の微小残置物の片付けを実施した。2023年11月16日に本ボーリング調査用地の所有者の立ち会い確認のもとに原形復旧を終了した。

2.4 掘削水管理

掘削水は掘削水中の孔壁崩壊を防ぐ目的からベントナイト泥水とした。用いたベントナイトはクニゲル-V1（クミニネ工業）である。ベントナイト濃度は2~3 wt.%とした。清水は幌延深地層研究計画における地上からのボーリング孔であるHDBの掘削や幌延深地層研究センター地下施設の維持管理に用いられている水井戸の地下水を用いた。水井戸の水は幌延町内の深度約50mから採水された浅層地下水であり、水質分析結果は毎年報告されており、時期による水質変化は見られない¹⁰⁾。掘削に用いた泥材はベントナイトのみであり、掘削水のpHを8~10程度で維持する必要があるため、掘削中にpHの低下が認められた際にpH調整剤として無水炭酸ナトリウムを加えた。

(1) トレーサーの選定

1) 溶存トレーサー

掘削水の溶存トレーサーとして蛍光染料が広く用いられている¹¹⁾。蛍光染料は岩石への非吸着性や分解されにくさなどの保存性、バックグラウンドや定量下限の低さや他の分析への影響の小ささなどの分析の簡易性、環境への負荷の低さなどの安全性の観点から選定される。しかしながら、蛍光染料が地下水と接触した際に著しい濃度の低下が報告されている^{11), 12)}。杉山ほか（私信）¹³⁾では、本邦のボーリング調査や物質移行試験で用いられることの多いウラニン、エオシン、ナフチオン酸ナトリウム、アミノG酸の4種類について、地下水と接触した際の蛍光染料の濃度変化について報告している。ウラニンとナフチオン酸ナトリウムについては地下水との接触による濃度低下が顕著であり、一方でエオシンとアミノG酸については顕著な濃度低下が見られなかった。

ことが報告されている¹³⁾。これらの濃度変化の主要因として微生物活動による蛍光染料の分解や疑似蛍光の生成などの可能性が指摘されている¹³⁾。エオシンとアミノ G 酸とを比較すると、エオシンの方が岩石微粒子への収着性が高いため、本ボーリング調査では溶存トレーサーとしてアミノ G 酸を用いることとした。アミノ G 酸試薬として、東京化成工業の 7-アミノ-1,3-ナフタレンジスルホン酸モノカリウム水和物（純度>98.0%）を用いた。

2) コロイドトレーサー

コア試料中の間隙水に対する掘削水の汚染評価については溶存トレーサーを用いて評価が可能であるが、割れ目の連結性や割れ目充填鉱物などを顕微鏡で観察する場合、溶存トレーサーを用いた汚染評価はできない。このことから粒径 $0.2\sim0.5\ \mu\text{m}$ のコロイドトレーサーを用いたボーリング調査が行われてきている^{14), 15) 16), 17)}。しかしながら、これらの調査で用いられたコロイドトレーサーは 1 mL あたり数千円であり、非常に高額であるため、数十 m^3 以上の掘削水を用いる調査で使用することは現実的ではない。また、顕微鏡での観察の際に非常に手間がかかる問題がある。Frieese et al. (2017)¹⁸⁾は、安価な蛍光染料を用いることで費用と汚染評価の容易性の問題の解決を報告している。彼らは SPL-N fine grind fluorescent pigment dispersion (DayGlo, USA) を掘削水中濃度約 $1 \times 10^9\ \text{particles mL}^{-1}$ で使用している。

令和 4 年度における深度 200～500 m における掘削では Frieese et al. (2017)¹⁸⁾を参考に、コロイドトレーサーには蛍光染料として安価に市販されている蛍光ビーズ (SW-147 Violet、シンロイヒ) を用いた。SW-147 Violet は粒径約 $1\ \mu\text{m}$ 以下であり、価格は 1 mL あたり数円程度である。蛍光ビーズには様々な蛍光発色の種類が存在するが、アミノ G 酸の励起、蛍光波長と大きく重ならないように選定した。SW-147 Violet の励起波長と蛍光波長は 382.5 nm と 437.5 nm および 635 nm である。溶存トレーサーを用いた掘削水の汚染評価では、最小で約 0.1% の汚染まで評価が可能であることから、コロイドトレーサーについても、0.1～10% の汚染を評価できることを考慮して掘削水中の濃度を決定した。Figure 12 にコロイドトレーサーの濃度を変えた場合の顕微鏡での観察結果を示す。溶液中の濃度が $10^6\ \text{particles mL}^{-1}$ 以上あれば検出可能であることから (Fig. 12)、掘削水中の濃度を $1 \times 10^9\ \text{particles mL}^{-1}$ となるように管理することとした。

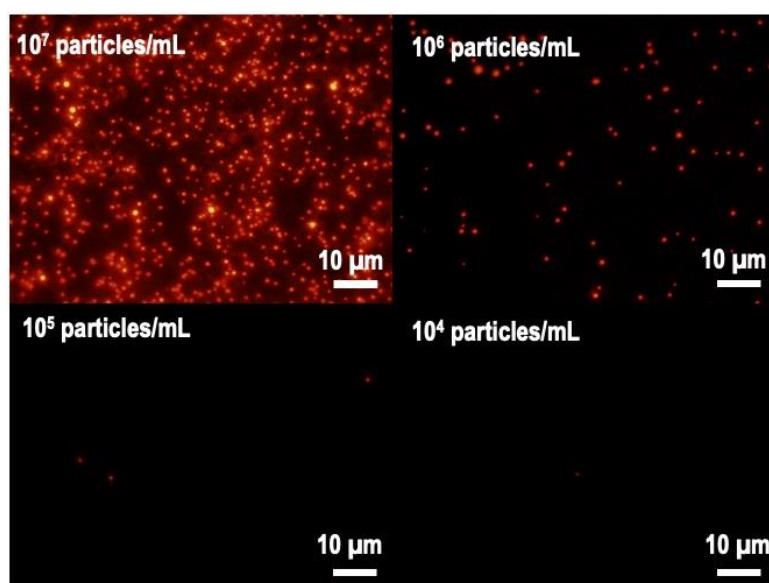


Fig. 12 溶液中の蛍光ビーズ濃度を変化させた場合の顕微鏡での検出結果

蛍光ビーズの濃度管理については、溶存蛍光染料であるアミノ G 酸のように濃度測定を迅速に実施できないため、現場では掘削水中の蛍光ビーズ濃度の測定は実施せず、掘削中の循環掘削水における蛍光ビーズの挙動がアミノ G 酸の挙動と同じであると仮定し、アミノ G 酸の濃度管理に従うこととした。掘削水中の実際の濃度変化を確認するために、深度約 10 m 毎に掘削水を採取し、後日に室内で濃度測定を実施した。測定方法については 2.4(3)項で述べる。

(2) トレーサー水の管理方法と実績

アミノ G 酸トレーサーは掘削水のみではなく、孔内洗浄水や試験用水にも添加し、溶液中の濃度が 10 ± 1 ppm となるように管理した。掘削水、孔内洗浄および試験用水等の管理は主に 3 種類のタンクで行った。タンク配置の概念図を Fig. 13 に示す。掘削水および孔内洗浄水は、ベントナイト泥材、アミノ G 酸、蛍光ビーズを添加し、サクシオンタンクおよびミキシングタンクにて貯水・管理した。ただし、蛍光ビーズの添加は深度 200～500 m の掘削時のみである。試験用水等の水はアミノ G 酸のみを添加しトレーサータンクにて管理した。トレーサータンク内の水は主に孔内水の置替え、掘削資材の洗浄、採取コアの取り出し、ミキシングタンクへの給水に用いた。トレーサータンクにはベントナイトや調泥材などが含まれず、水井戸から取水した清水にアミノ G 酸のみが添加されている水を貯水している。この水はロッド、掘削編成およびワイヤーなどの掘削ツールの洗浄や、コアチューブから岩芯を押し出す際に使用された。また、物理検層において泥水が影響する検層項目前に清水として孔内洗浄や孔内水置換に用いた。そのため、蛍光ビーズの微細粒子が孔内水置換え後の物理検層結果に影響を及ぼす可能性があることや、染料としての着色力が強く、資材洗浄中にボーリング足場および周囲への色の付着が懸念されることなどが懸念されたことから、アミノ G 酸のみを添加することとした。なお、本調査に使用した貯水タンクは全て雨囲いを行い、雨水などの混入を防止した。

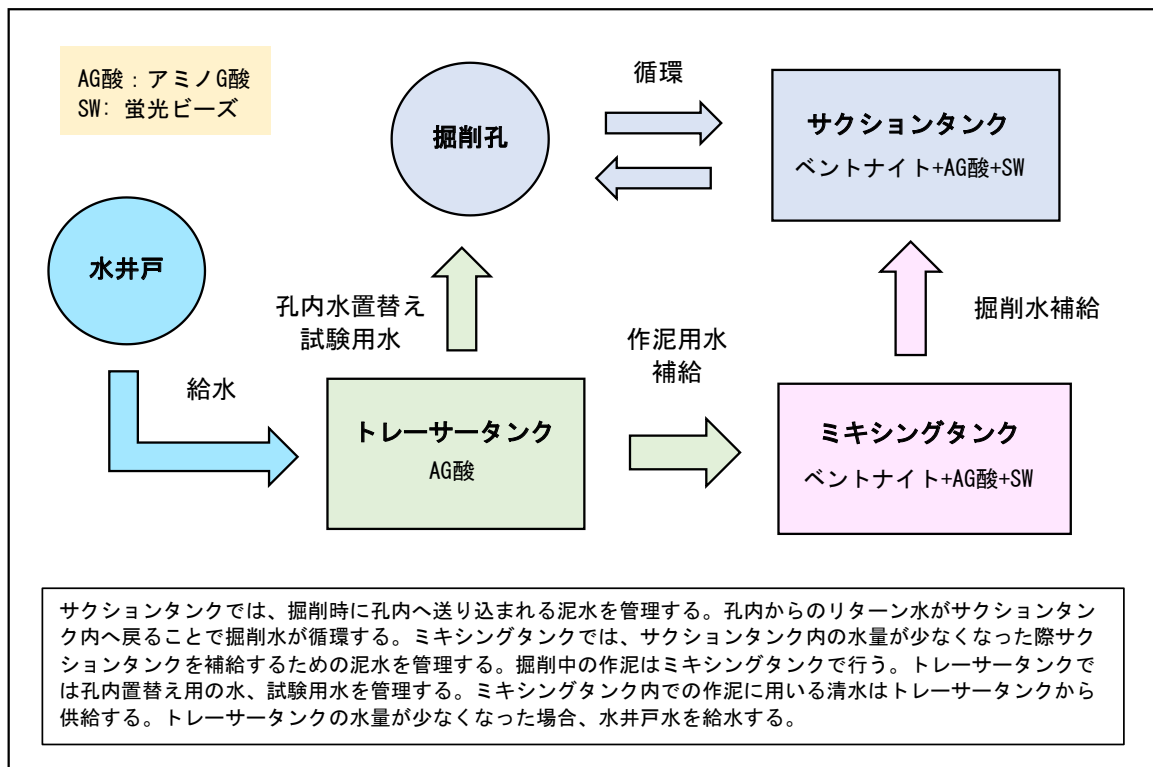


Fig. 13 使用タンクの配置概念図

アミノ G 酸濃度は蛍光光度分析計 (FP8200, 日本分光) を用いて波長 300 nm で励起させ、波長 450 nm の蛍光強度から濃度を測定した。光源にはキセノンショートアークランプ (UXL-159, ウシオ電機) を用いた。この時、溶液中に蛍光ビーズが存在することで蛍光の影響を受けるため、測定試料に対して 0.22 μm フィルタを用いたろ過を徹底した。このことにより波長 450 nm におけるブランクの蛍光強度を十分に低減することができた。検量線はマトリクスの大きく異なる水井戸と掘削泥水、揚水地下水それぞれに対して作成し、相関係数 (R^2) が 0.99 以上となることを確認した。Figure 14 に深度 200~500 m の掘削時の掘削水 (リターン水) のアミノ G 酸濃度, pH, EC, タンク内水量の測定結果を示す。深度 200 以浅の掘削時の情報や詳細データについては、付録 A6 に示す。

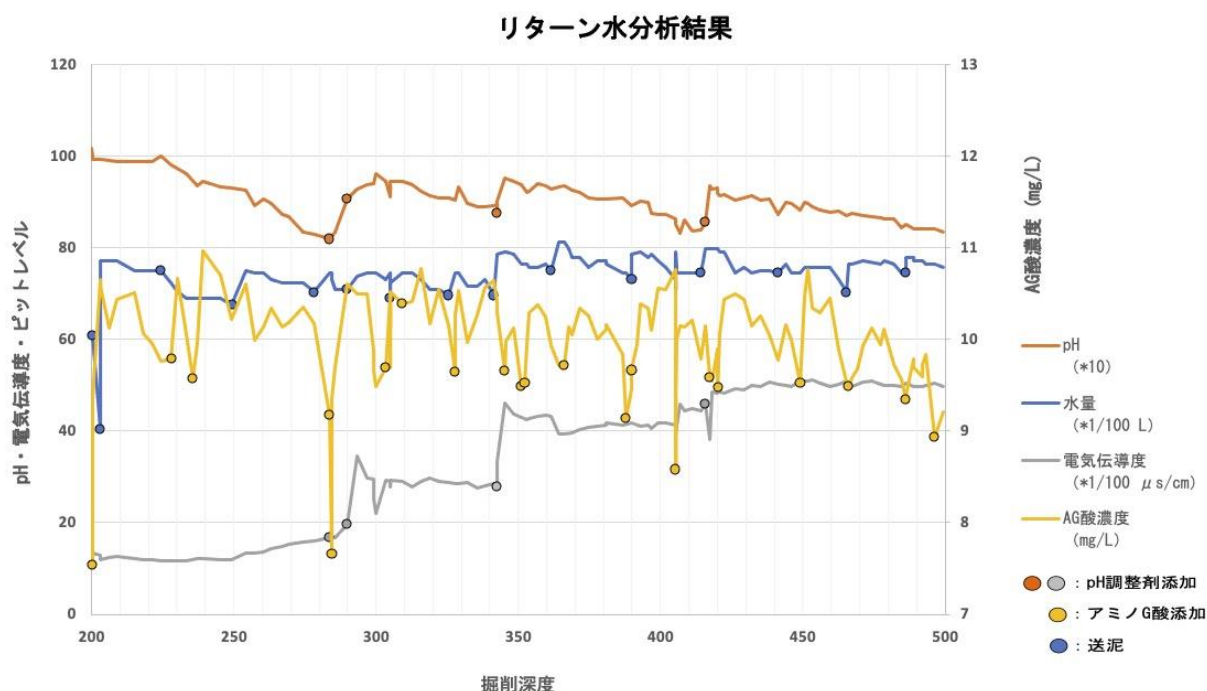


Fig. 14 掘削深度に対する掘削水中のアミノ G 酸濃度, pH, EC, タンク内水量

(3) コロイドトレーサーを用いた汚染評価の試み

掘削水試料については、試料を振盪機で攪拌し、懸濁粒子を分散させた後に超純水で希釈し、黒色ポリカーボネートフィルタにろ過した。フィルタ上の懸濁粒子について蛍光顕微鏡を用いて蛍光ビーズ数を計測した。用いた蛍光顕微鏡は Olympus BX51 であり、WIG (cy3), 25ND25 フィルタを用いた。計測では 50 視野の観察を基に蛍光ビーズ濃度を評価した。

コア試料については、掘削水と触れた最外周を最汚染部とし、コア試料内部との汚染程度の違いについて比較した。ピーラーを用いて最外周数 mm を削り、これを超純水中に懸濁させ、掘削水試料と同様に蛍光顕微鏡を用いて蛍光ビーズ濃度を評価した。コア試料内部については、外周約 1 cm を除去した試料を粉末状にし、超純水中に懸濁させ、掘削水試料と同様に蛍光顕微鏡を用いて蛍光ビーズ濃度を評価した。掘削水試料中の蛍光ビーズ濃度は particles mL^{-1} であるが、コア試料中の蛍光ビーズ濃度は particles g^{-1} で評価される。汚染評価については、コア試料内部の計測結果を最外周部の計測結果で除することにより汚染率を求めた。

深度 200~500 m の掘削水試料とコア試料中の蛍光ビーズ濃度の測定結果を Fig. 15 に示す。掘削水試料中の蛍光ビーズ濃度は掘削期間中概ね $10^9 \text{ particles mL}^{-1}$ の濃度を維持できていたことが

分かる．深部ほど濃度が高くなる傾向が認められるが，アミノ G 酸の濃度管理を基に蛍光ビーズの濃度管理を実施したことから，アミノ G 酸と比較して蛍光ビーズの方が動きにくいことが分かる．コア試料の最外周部については，約 $10^6 \sim 10^8 \text{ particles g}^{-1}$ の濃度であった．一方で，コア試料内部は $10^4 \sim 10^5 \text{ particles g}^{-1}$ であり，このことから汚染率は最大で数％であり，多くは 1％未満となった．このことは，アミノ G 酸を用いた汚染評価結果（3.3.4 項）と同様の結果であった．

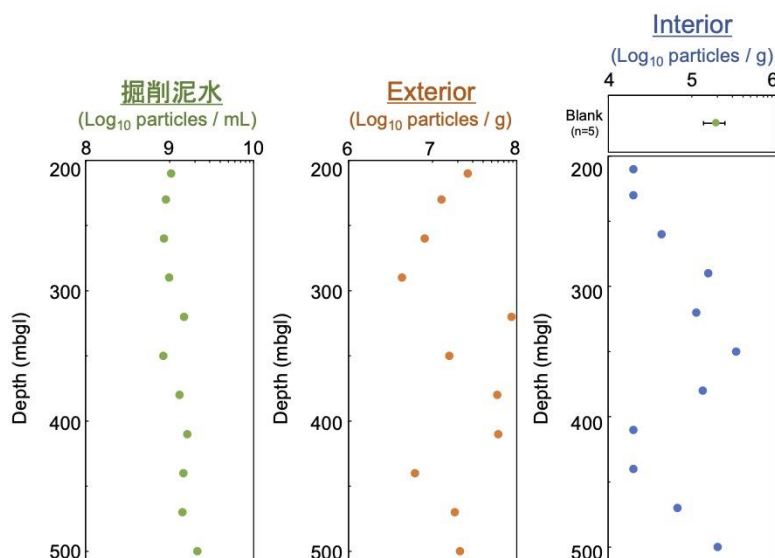


Fig. 15 掘削水試料とコア試料中の蛍光ビーズ濃度の測定結果

2.5 調査・試験の方法

2.5.1 岩芯記載

岩芯記載は深度 20.00 m～500.00 m の計 480 m のコアを対象に Fig. 16 に示されるフローに従って実施した．岩芯記載は，地質技術者が 24 時間体制で行うとともに，基本的にコア採取後から 24 時間以内に記載を完了させ，岩芯試料を真空パックにて保管した．岩芯記載前に岩芯表面の汚れを取り除くため，掘削水と同濃度の蛍光染料を添加した洗浄水で岩芯の表面を洗浄した．岩芯の洗浄後，現場事務所内に設置した写真撮影用の暗室内で写真を撮影し，岩芯連続写真として整理した．岩芯記載は，ボーリング孔全区間にわたり 1/5 スケールで記載を行い，記載項目は割れ目の判別を重視した内容とした．岩芯写真については付録 A1 に示し，岩芯記載の結果については付録 A2 に示す．

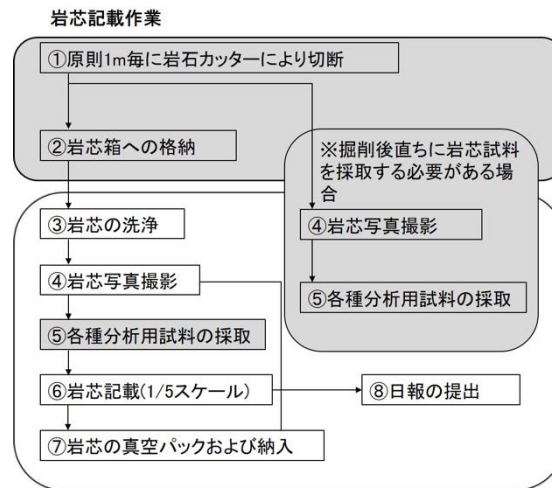


Fig. 16 岩芯記載作業のフロー図

(1) 岩芯洗浄

岩芯の洗浄には、掘削水と同じ蛍光塗料（アミノ G 酸）が添加された水溶液を使用した。水溶液は微生物によるアミノ G 酸の濃度低下が進行する可能性を考慮し、作業日毎に新たな水溶液を作成した。水溶液を噴霧器に入れ、弱い圧を掛けて岩芯に噴霧し、表面に付着した掘削泥を洗い流した。

(2) 岩芯写真撮影

以下の手順で岩芯写真撮影を行った。

- ① 岩芯の写真撮影については2箱（4m）毎に岩芯箱全体が入るように、掘削後速やかに実施した（Fig. 17）。
- ② 各掘削インターバル（おおよそ3 m毎の掘削で、掘削を完了し岩芯試料を引き上げるタイミング）に当たる深度では、岩芯箱の仕切り板に▼・▲を記載し、インターバルによる掘削割れ目である箇所を示した。
- ③ 掘削後直ちに採取する必要がある岩芯試料のある岩芯箱については、試料を採取した欠損部にタグを挿入した状態で、2箱（4m）分の岩芯が揃い次第、写真撮影を行った。写真撮影結果の一例をFig. 18に示す。
- ④ 写真撮影ではフルサイズ一眼レフのデジタルカメラを使用した。ISO感度は100とし、500万画素相当の解像度で撮影を行った。撮影した画像についてはJPEG形式のフォーマットで保存した。
- ⑤ 岩芯の写真データを取得した後、20m間隔で接合写真を作成した（付録A1）。その一例をFig. 19に示す。
- ⑥ 写真撮影に際して、外部の光がなるべく入らない暗室を仮設し、太陽光に近い6,000 K以上の色温度の平板型LEDライトを2灯設置し、光の状態を一定に保った。ライティングの位置・角度およびカメラ位置・角度が変わらないよう留意し、常に岩芯全体の照度が一定となるように照度計で明るさを確認した上で撮影した。
- ⑦ 岩芯の撮影時に岩芯が乾燥している場合は、岩芯洗浄で用いた噴霧器で岩芯を湿潤状態にして撮影した。粘土質で水分を弾き乱反射してしまう場合には、余剰な水滴を拭き取った上で撮影した。

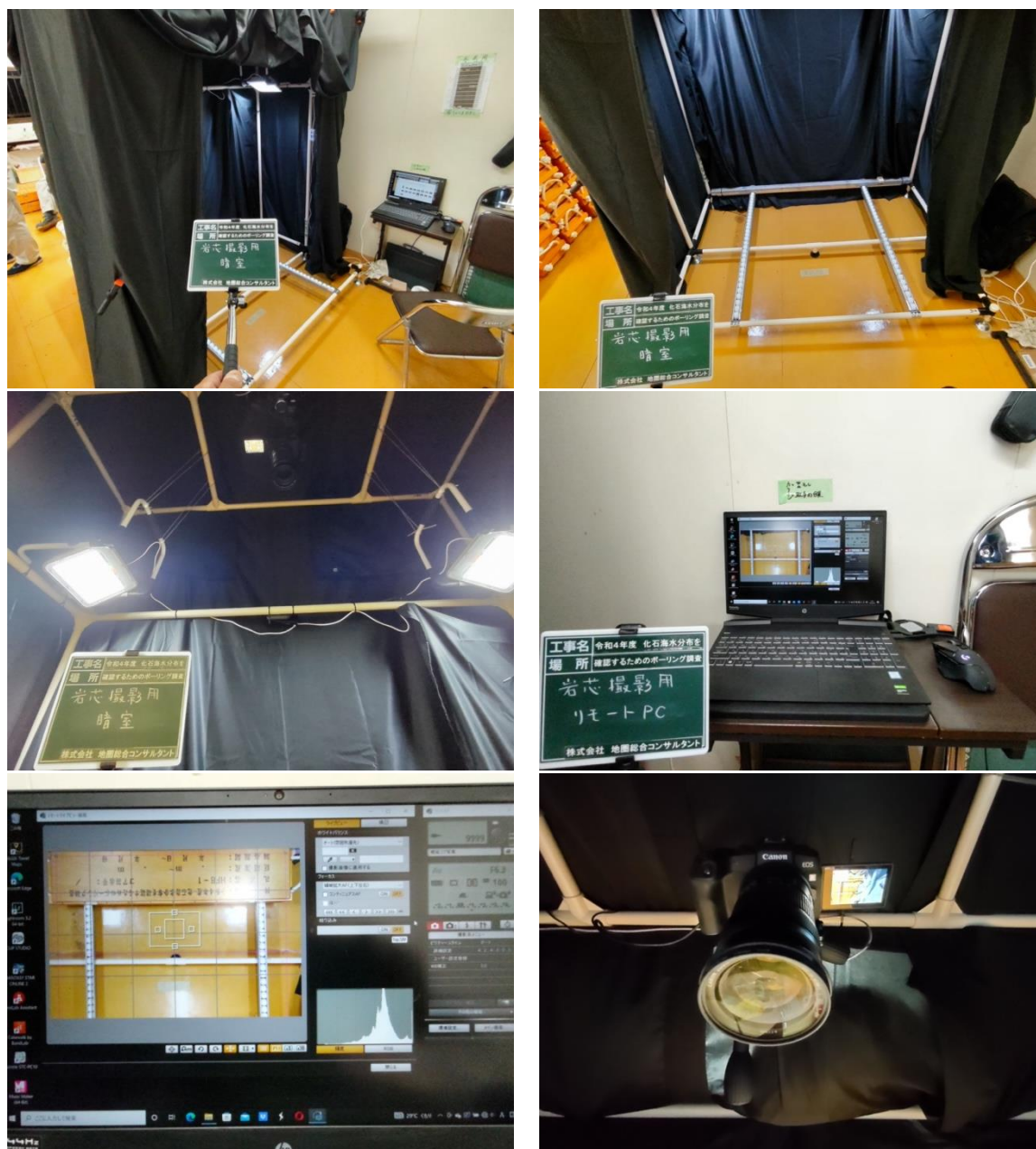


Fig. 17 岩芯写真撮影の一例（撮影用機材の配置）



Fig. 18 岩芯写真撮影の一例（深度 204.00 m～208.00 m）



Fig. 19 接合した岩芯写真の一例（深度 200.00 m～220.00 m）

(3) 岩芯記載

岩芯記載は以下に示す記載要領に従った。記載結果は 1/5 スケールの記載シートに記録した (Fig. 20)。作業にあたっては、記載の迅速性と品質維持に努めるため、岩芯記載を担当する地質技術者を 24 時間体制で配置した。全区間の岩芯観察が終了した後、1/5 スケールの観察記載シート (Fig. 20) を Excel 形式で電子化し清書した (付録 A2)。

- 深度

深度の記載は孔口からの距離 (GL-) とした。

- 地層名

声間層および稚内層の肉眼での識別が困難であることが懸念されたため、観察時は地層境界を考慮せず、肉眼観察による色調や硬さで評価を行った。地層境界については、粉末 X 線回折 (XRD 分析, 2.5.3(1)項) の結果を踏まえて深度を決定した。

- 岩石名

声間層は珪藻質泥岩に、稚内層は珪質泥岩に分類した。

- 岩相

層理・葉理の発達または塊状などの堆積構造について記載した。堆積構造については、発達の間隔、傾斜角、明瞭・不明瞭、層理・葉理の構造などについて記述した。

- 色調

表現に用いる色は、「黒、褐、赤、橙、黄、緑、青、紫、灰、白」を基本色とし、基本色以外は基本色の組合せ (原則として 2 色) とした。基本色の組合せは主色の前に従色を冠した (例: 緑が主色で青が従色の場合は、青緑とした)。

- 硬さ

Table 2 に示される 5 段階で記載した。

Table 2 硬さの評価基準

記号	状態
A	極硬. ハンマーで容易に割れない.
B	硬. ハンマーで金属音.
C	中硬. ハンマーで容易に割れる.
D	軟. ハンマーでボロボロに砕ける.
E	極軟. マサ状, 粘土状.

- 岩盤等級

Table 3 に示される基準で記載した。

Table 3 岩盤等級の評価基準

記号	状態
C _H	ハンマーによって打診すれば少し濁った音を出す．ハンマーの強打によって破碎する．
C _M	硬さの基準で C とみなされ，割れ目間隔が 30 cm 以上ある場合．ハンマーによって打診すれば多少濁った音を出す．ハンマーの普通程度の打撃によって破碎する．
C _L	ハンマーによって打診すれば濁った音を出す．ハンマーの軽打によって破碎する．
D	粘土状を呈する，またはハンマーによって打診すれば著しく濁った音を出し，ハンマーによってわずかな打撃を与えるだけで崩れ落ちる．

- 風化

大気中の酸素や表層水によって引き起こされる風化の程度を，Table 4 に示される基準に従い分類した．

Table 4 風化の評価基準

記号	状態
α	新鮮．岩石の変質は認められない．
β	弱風化．割れ目沿いまたは一部の割れ目表面に変色が認められる．
γ	中風化．全ての割れ目表面に変色が認められる．
δ	強風化．岩芯全体に変色が認められる．すべての割れ目表面は変色し，もろい．
ε	土壌化している．

- 化石・生痕化石

生痕化石や貝化石などが認められた場合，その産状や生物擾乱の程度，ノジュールや植物片・炭質物の色と大きさなどについて記載した．

- RQD (Rock Quality Designation)

1 m の区間における長さ 10 cm 以上の岩芯の長さの総和の百分率で表した．岩芯が縦に割れ，半割状態の場合は RQD には加算しないものとした．通常，ディスクキングを不連続面とはしないが，岩盤の評価という観点からはその部分を良好な岩盤とは判断しえないため，ディスクキング区間については RQD に加算しないものとした．

- 割れ目模式断面図

記載シートには岩芯写真撮影で取得した展開画像を貼付した．個々の割れ目については，割れ目上端および下端深度（掘削深度の小数点以下のみ）を記入した．割れ目のタイプを「非癒着割れ目：f」または「開口割れ目：o-f」と判断した割れ目については実線で示し，「癒着割れ目：h-f」と判断した割れ目については波線で示した．交差している割れ目がある場合には，その状態が

わかるように記載した。「非癒着割れ目：f」および「開口割れ目：o-f」の各割れ目の本数について、記入欄に記載した。

- 割れ目番号

癒着割れ目と非癒着割れ目について別々に割れ目番号を付した。

GL-24.00～25.00 m の非癒着割れ目の例：24-1, 24-2, 24-3, . . .

GL-32.00～33.00 m の癒着割れ目の例：32'-1, 32'-2, 32'-3, . . .

- 割れ目傾斜角度

割れ目の傾斜角度は、岩芯に垂直な方向からの角度とし、5°刻みで記入した。

- 割れ目タイプ

Table 5 に示される基準に従い、割れ目を分類した。

Table 5 割れ目タイプの評価基準

記号	状態
h-f	癒着割れ目，面なし断層，または脈などの不連続面。
f	非癒着割れ目。
o-f	開口割れ目，割れ目を合わせたときに明らかに間隙が認められるもの。

- 割れ目と層理面の関係

Table 6 に示される基準に従い、割れ目と層理面の関係を分類した。

Table 6 割れ目と層理面の関係の評価基準

記号	状態
Pr	層理面とほぼ平行（交差角が概ね 10°以下）。
Pp	層理面と高角に交わる（交差角が概ね 10°以上）。
U	関係が不明。

- 割れ目の条線

割れ目の条線については、Table 7 に示される基準に従い記述した。

Table 7 割れ目の条線の評価基準

記号	状態
SS	鏡肌が認められる。
SL	条線，鏡肌が認められる。条線のレイク角を記入する。
ST	ステップ，鏡肌が認められる。割れ目の上盤側の相対的な移動方向を記入する。
-	なし

HFB-1 孔は水平方向から 90°下向きに掘削しているため、岩芯に認められる断層面等では、岩芯の中心を通る水平軸が断層面の走向となる。レイク角は下盤側の岩芯の断層面等を用いて、断層面等の走向から時計回り（right hand rule）に計測した断層面上での角度をレイク角とした。

- 断層岩の分類

Table 8 に示される基準に従い、断層岩を分類した。

Table 8 断層岩の分類の評価基準

記号	状態
fb	断層角礫を伴う割れ目。断層角礫は基質と岩片が未固結で、ランダムな構造を示し、破碎岩片を 30%以上含む。
fg	断層ガウジを伴う割れ目。断層ガウジは基質と岩片が未固結で、ランダムな構造を示し、破碎岩片を 30%以下含む。
tsz	層理面に平行な断層に認められる粘土質せん断帯。堆積構造と調和的で色調が明るく、凝灰質であることなどにより、fg と判別する。
fc	せん断による割れ目の集中帯。断層岩・破碎物質を伴わないが、せん断作用により数 mm 程度以下の間隔で割れ目が集中した区間。
db	幅数 mm 以下の黒色細粒な破碎物質からなる脈状の変形バンド。
-	断層岩・破碎物質なし。

- 割れ目の成因

Table 9 に示される基準に従い、割れ目の成因を分類した。

Table 9 割れ目の成因の評価基準

記号	状態
S	せん断割れ目。鏡肌、条線、ステップ、断層岩などが認められる。
T	引っ張り割れ目。羽毛状構造が認められる。
U	不明。
D	人為的（機械的）。

- 割れ目の変質幅・色

割れ目に沿った変質幅と色を記述した。変質幅は割れ目の両側を含めた変質部の厚さとした。

- 割れ目の充填鉱物

次に示される略記号を用いて充填鉱物を記述した。石英：Qz，鉄鉱物（水酸化鉄，酸化鉄，褐鉄鉱，赤鉄鉱など）：Fe，緑泥石：Chl，黄鉄鉱（自形）：Py，黄鉄鉱（他形）：Py-t，炭酸塩鉱物（自形）：Cb，炭酸塩鉱物（他形）：Cb-t，粘土鉱物：Cly，その他：oth。割れ目充填鉱物の量比については、Table 10 に示される基準に従い記述した。

Table 10 割れ目充填鉱物の量比の評価基準

記号	状態
(1)	割れ目の充填率が 10%以下。
(2)	割れ目の充填率が 10~50%程度。
(3)	割れ目の充填率が 50~90%程度。
(4)	割れ目の充填率が 90%以上。

- その他記載

分析用試料の迅速な採取のために簡易観察とした区間は、「★試料採取 ○-○m」の文字と、分析の目的を記入した。断層岩が認められる場合は、断層岩の幅および組織の特徴を記述した。水平な割れ目が 10 cm 間隔以下で密集する「ディスク状割れ目」の発達が認められる場合は、

その発達区間と割れ目間隔を記述した。その他、重要な地質学的特徴などが認められる場合には本欄に記述した。

調査名 令和4年度 化石海水分布を確認するためのボーリング調査														No. 1							
地質記載柱状図				孔名 : HF8-1		コア箱No. : 1		深度 : 200 ~ 201 m		縮尺 1 / 5		記載日 : 2020/9/3									
				生痕 : 5		頁化石 : その他 : (個数)		R0D : 36 %		岩芯採取率 : 100 %		記載者 : 徳留									
深度	地層名	岩石名	岩相	色調	硬さ	岩壁等級	風化	生痕 / 化石	岩芯画像	割れ目 (おおよそ f-o) 本数 : 8 本/m				その他記載							
(cm)										模式断面図	コア長 (m)	番号	傾斜角度	癒着 / 開口	層面との関係	条線等	せん断層帯 / 下層流線、歪みから推察される一時的変形を示唆	成因	変質幅 / 色	充填鉱物	
			層理構造 ∠50°							明度補正 : 70 %											
10			全体にラミナ構造が認められる					200.15m L20×W10 生痕化石		10	4	200-1	0	o-f	PP	-	-	U	-	-	凹凸状の面
20								200.23m L30×W12 生痕化石		16	15	200-2	45	f	PP	-	-	U	-	-	凹凸状の面
30										23											
40	声問層	珪藻質泥岩		淡灰	C	C _L	α	200.49m L20×W12 生痕化石	34	34	200-3	0	f	Pp	-	-	U	-	-	凹凸状の面	
50									18												
60										52	8	200-4	20	o-f	Pr	SL r=145	-	S	-	-	黒色フィルム付着
60									56	55	200-5	65	f	Pp	-	-	T	-	-	羽毛状の面	
70									59	3	200-6	40	o-f	Pr	-	-	U	-	-	凹凸状の面	
80								200.71m L15×W5 生痕化石	68	67											
80									78	77	200-7	25	f	Pr	-	-	T	-	-	羽毛状の面	
90									82	79	200'-1	80	f	Pr	SL r=140	-	S	-	-	黒色フィルム付着	
100											10										

Fig. 20 1/5 スケールの記載シート例 (深度 200.00 m~201.00 m)

2.5.2 物理検層

深度 200.00 m まで掘進した直後の 2021 年 12 月 28 日~30 日の 3 日間にわたり、物理検層を実施した。また、深度 200 m から 500 m までの区間を対象に 2022 年 9 月 21 日~23 日の 3 日間で物理検層を実施した。物理検層では、温度検層、孔径検層、比抵抗・自然電位検層、BHTV 検層、電磁式フローメータ検層・ビルドアップ試験の 5 種目を実施した。物理検層において使用した機器を Table 11 と Table 12 に示し、各種目の原理や方法を次々に述べる。

Table 11 物理検層における使用機器一覧（その1）

機 種	種 別	製 造 元	仕 様
基本装置			
検層車	三菱ファイター EC-135号車	(株) 物理計測 コンサルタント	エンジン形式：ディーゼル 総重量：13.1 t 測定深度：4,500 m
ケーブル	7芯硬鋼線検層用 アーマードケーブル	ROCHESTER	外 径： 3/8" (9.5mm) 耐 熱： 260 ℃ 破断強度：3.7 t 絶 縁 体： TEFEXテフロン
捲上装置	6,000m級油圧ウィンチ	北海道車体工業（株）	油圧PTO切替え式 チェーンドライブ 引張強度：3.0 t 捲上速度：0～100 m/min
データ収録 データ処理 ツール制御	LOGIQ	Halliburton	ツール制御インターフェイス 使用OS：Windows 7 以降 電源：AC100-240V 50/60 Hz DSP
	System VII	Century	ツール制御インターフェイス 使用OS：Windows 7 以降 電源：AC115-120V 50/60 Hz ツール供給電源：250mA、180V(Max)
	SCOUT	ALT	ツール制御インターフェイス 使用OS：Windows 7 以降 電源：AC100-240V 50/60 Hz Dual DSP
深度計	深度パネル (DCP-HG1)	(株) 物理計測 コンサルタント	深度表示範囲：0～9999.9 m ケーブル速度表示範囲：0～240.0 m/min 適用エンコーダ：5V電源2相出力タイプ 外部深度パルス出力：1000パルス/1m 許容速度：0～240m/min(1000Pulse/mモード時)
エンコーダ ー	インクリメンタル ロータリーエンコーダ ー (OIS-68 500C/T-C3-5V)	多摩川精機（株）	出力形態：オープンコレクタ（DC5V電源） 分解能：500カウント/回転 許容速度：2,500cm/min 最大応答周波数：125kHz
温度検層			
地上機器	SCOUT	ALT	（〔基本装置〕参照）
孔内機器	自然ガンマ線測定部 QL40-GR		外径：40mm 全長：90cm 耐圧：20MPa 耐温：70℃ 自然ガンマ線センサー：NaIシンチレーション
	温度・電気伝導度測定 部 QL40-FTC		外径：43 mm 全長：78 cm 耐圧：20MPa 耐温：80℃ 温度センサー：白金センサー（クラスA） 測定範囲：-20～70℃ 精度：<1% 分解能：0.004℃ 電気伝導度センサー： 測定方式：交流7電極方式 測定範囲：5 ～ 2.5 x 10 ⁵ μS/cm 精度：1%(500 ～ 2.5 x 10 ⁵ μS/cm)

Table 12 物理検層における使用機器一覧（その2）

機 種	種 別	製 造 元	仕 様
比抵抗検層			
地上機器	LOGIQ	Halliburton	（〔基本装置〕参照）
孔内機器	自然ガンマ線測定部 D4TG		テレメトリーサブ 外径：992 mm 全長：1,067 cm 耐圧：137.9 MPa 耐温：177℃ サンプリング周期：10 Sample/m, 48 Sample/m 自然ガンマ線センサー：NaIシンチレーション 測定範囲：0～1,000API 測定誤差：±5%
	比抵抗測定部 HRI		外径：43 mm 全長：78 cm 耐圧：137.9MPa 耐温 150℃ 測定範囲：DEEP, Medium (0.2～2,000 Ω・m) Focus Shallow (1～1,000 Ω・m) SP (0～200 mV)
孔径検層			
地上機器	LOGIQ	Halliburton	（〔基本装置〕参照）
孔内機器	自然ガンマ線測定部 GTET		テレメトリーサブ 外径：92 mm 全長：219 cm 耐圧：137.9 MPa 耐温：177℃ サンプリング周期：10 Sample/m, 48 Sample/m 自然ガンマ線センサー：NaIシンチレーション 測定範囲：0～1,000API 測定誤差：±5%
	方位傾斜測定部 IDT		外径：92 mm 全長：12 cm 耐圧：137.9MPa 耐温 177℃ 3軸加速度センサー，3軸地磁気センサー 精度：傾斜±0.5°，方位±5.0°
	孔径測定部 ICT		外径：92 mm 全長：393 cm 耐圧：137.9 MPa 耐温 177℃ 測定範囲：101 ～ 609 cm （6方向独立型）
BHTV検層（超音波型孔壁画像検層）			
地上機器	SCOUT	ALT	（〔基本装置〕参照）
孔内機器	自然ガンマ線測定部 QL43-GR		外径：43mm 全長：93cm 耐圧：80MPa 耐温：125℃ 自然ガンマ線センサー：NaIシンチレーション
	孔壁画像測定部 QL43-ABI	外径：43 mm 全長：200 cm 耐圧：80 MPa 耐温：125℃ 音響センサー：トランスデューサー 基本周波数：1,200 kHz 方位分解能：1.25°，2.5°，5.0°（任意） 最小深度サンプリング深度：3 mm （方位分解能2.5°，測定速度2 m/min時） 方位センサー： 3軸加速度センサー，3軸地磁気センサー 精度：傾斜±0.5°，方位±1.5°	
電磁式フローメータ検層			
地上機器	System VII	Century	（〔基本装置〕参照）
孔内機器	EMFM-9721		外径：50.8 mm 全長：1.4 m 電磁センサ型フローメータ 流量測定流量範囲：0.05 ～ 40.0 l/min 分解能：0.02 l/min 温度測定範囲：0～60℃ 精度：±5% 泥水比抵抗測定範囲：0～100 Ω・m，精度：±5%

(1) 温度検層

温度検層には FTC 検層ツールを用いた (Fig. 21). FTC 検層ツールは温度センサーと流体電導

度センサーにより構成される。温度は測定精度が高いクラス A の白金センサー，電気伝導度は測定精度が高く測定レンジが広い 7 電極方式のセンサーを用いて測定される。FTC 検層ツールから取得した温度データは，一般に地層の対比や逸水層，出水層および帯水層などの位置判定に利用されている。孔内水の電気伝導度を測定することにより，性質の異なる水の境界深度を把握することができ，湧水・逸水箇所付近では，電気伝導度が変化することが多く，逸水層や出水層および帯水層などの位置判定に利用されている。電気伝導度の変化は，湧出量が小さい出水層の位置判定に優れている。また，ケーシングの破損やストレーナ管の事由により湧水や漏水が生じた場合，電気伝導度の急激な変化が認められる。

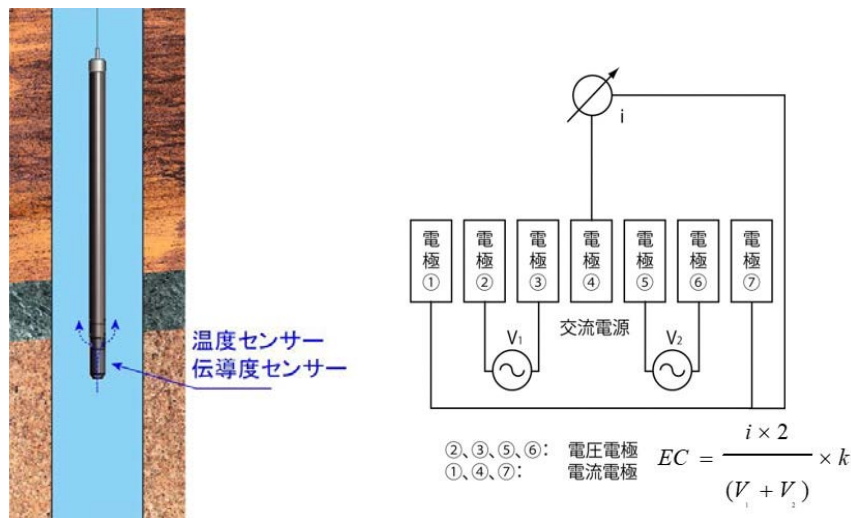


Fig. 21 FTC 検層ツール（左）と 7 電極方式電気伝導度センサー（右）の概念図

(2) 孔径検層

Figure 22 に孔径検層の概念を示す。孔径検層により，孔径の変化を深度に対して連続的に測定し，孔内における空洞・崩壊の位置やその形状・程度を把握できる。孔径検層は孔径補正を必要とする検層の補助的役割を果たす。孔内ツールに小型モーターを内蔵し，地上からのコントロールで測定用アームを開閉する。アームを閉じた状態で孔内にツールを降下させ，測定箇所（最深部）でアームを開き，測定ツールを巻き上げながら孔径の変化を測定する。一般的に破碎帯や断層，軟弱地質においては孔壁が崩壊し易く孔径拡大が顕著である。孔径検層の結果から孔内容量等を算出し，セメンチング作業の情報として利用することもできる。

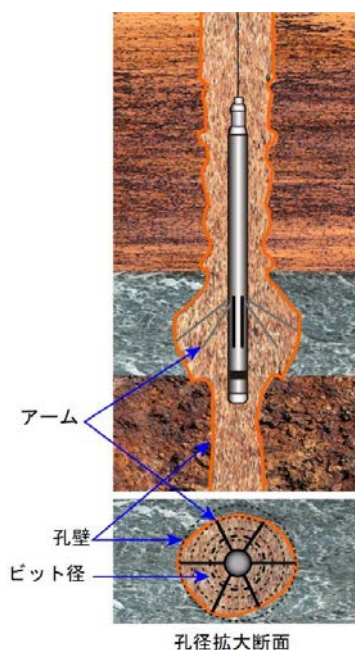


Fig. 22 孔径検層の概念図

(3) 比抵抗（インダクション検層）・自然電位検層

インダクション検層は比抵抗検層の一種で、電気検層（ノルマル法）やガード比抵抗検層とは原理が異なる。インダクション検層は、孔内液体が非導電性の場合でも地層の比抵抗を測定でき、特に比抵抗の低い地層に有効である。検層ツール内部には送信コイルと受信コイルが配置されており、送信コイル（トランスコイル）が周波数 20kHz 程度の交流電流の変化によって磁場を変化させ、この磁場が地層中を通過するとループ状の 2 次電流（うず電流）が地層内に発生する。さらにうず電流は 2 次的な磁場を誘起し、これをツールの受信コイルで受信する（Fig. 23）。地層中に発生したうず電流の強さは地層が有する導電率に比例する関係にある。導電性の大きい地層では、測定電極によって地層に誘起された渦流におよぼす表皮効果が増加し、測定される導電率が多少減少する傾向を示すが、これはツール内に組み込まれた補正機構で自動的に補正される。

HFB-1 孔で利用したインダクション検層ツールでは、受信コイルを複数使い、2 種類の探査深度で測定が可能である。探査深度の深い方をディープ比抵抗、比較的浅い方をミディアム比抵抗と呼ぶ（それぞれの探査深度は、231 cm と 99 cm である）。さらに補助電極の短いラテロ型比抵抗を同時に組み込み、探査深度を最も浅くした比抵抗値をシャロー比抵抗と呼ぶ（探査深度は 43 cm）。インダクション検層は電磁誘導を利用するため、ディープ比抵抗は孔内泥水の影響を受けにくく、探査深度が深くなるように設計されているため、泥水に侵されない領域の比抵抗（≒真の比抵抗）を得ることができる。

インダクション検層では、比抵抗と同時に地層の自然電位（SP）も連続的に測定する。自然電位は孔井内電極 M と地上の電極 N との間の電位差である。自然電位の発生機構には、イオンを含む地層水が流動するときに生ずる流動電位と、掘削泥水と塩分濃度の異なる地層水との間のイオンの移動によって生じる電気化学的電位があり、大部分が後者の効果であると考えられている。電気化学的電位には拡散電位と膜電位がある。砂岩などの浸透層と頁岩からなる堆積層では、浸透層の泥水濾過水と地層水が接触し、拡散電位が生じる。また、頁岩には膜電位が生じる。通常、頁岩と砂岩の自然電位差を SP 偏差と呼び、頁岩を零位として表す。

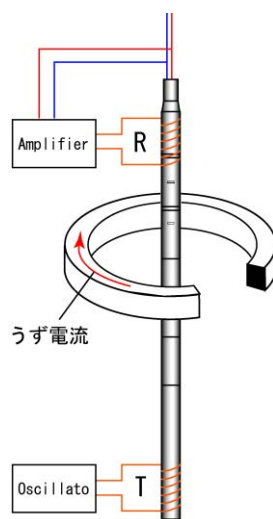


Fig. 23 インダクション検層の概念図

(4) 孔壁画像検層（BHTV 検層）

1) 測定原理

BHTV 検層は、流体で満たされた孔井の孔壁を超音波で走査することにより、孔壁の状態を画像として表す測定器である。BHTV 検層ツールは、音波の送受信を行うことによって孔壁の状態を調べる圧電形トランスデューサーと、地磁気および重力加速度を検出することによってツールの方位・傾斜を調べる 3 軸加速度・地磁気センサーにより構成される。受信した孔壁からの反射波は、ツール内の計算機（DSP：デジタル・シグナル・プロセッサ）により波形処理、デジタル化された後、地上収録システムに伝送され画像化される（Fig. 24）。ツール内のミラーは毎秒 3～10 回転の速度で高速回転しながら、トランスデューサー（基本周波数 1,200 kHz）から発振された音波エネルギーを、非常に細いビーム状に収束させて孔壁に向けて発射する。音波エネルギーの一部が孔壁で反射され、ミラーを経由してトランスデューサーで受信される。

孔壁から反射される音波エネルギーの大きさは孔壁の表面の物理的性質によって左右され、滑らかな表面は粗い表面よりもよく反射し、硬い表面は柔らかい表面よりもよく反射する。トランスデューサーに対して反射面が斜めの場合は、反射エネルギーは著しく減少する。表面の凹凸は反射信号の振幅を減少させる（Fig. 25）。波形処理された反射波はアンプリチュード（反射波強度）とトラベルタイム（反射波到達時間）に分けられ、トラベルタイムはゾンデから孔壁までの距離に変換され孔径が算出される。

アンプリチュードとトラベルタイム（孔径）は孔壁画像展開図として出力される（Fig. 26）。アンプリチュードは反射波のアンプリチュード（0～10 V）を 4,096 分割して表したもので反射の強弱を示す。暖色系の色調ほどアンプリチュードは大きい。アンプリチュードの孔壁画像の色調を全深度にわたり一義的にスケールリングすると、アンプリチュードの変化が小さい区間では微細な変化をとらえることが困難になるため、アンプリチュードの孔壁画像は用途に応じて次の 2 通りの出力処理を実施する。固定スケール出力（Static Histogram Normalization to Image Data）：測定区間全域において同一のカラースケールを用いて画像出力する固定スケールでは、色調からアンプリチュード値を比較することが可能であり、総合柱状図や他の検層種目との比較に向いている。移動スケール出力（Dynamic Histogram Normalization to Image Data）：コントラストが最も明瞭になるようにアンプリチュードに対して局所領域（深度 0.1m）において、イメージデータの動的ヒストグラムの正規化処理を行う。移動スケールでは局所的な変化を高コントラストで表現するこ

とができ、微細な変化を確認することが可能である。

一方、トラベルタイムの孔壁画像は暖色系の色調ほどトラベルタイム（孔径）が大きいことを意味する。反射波到達時間に対する孔井半径については、測定温度からの日本機械学会蒸気表¹⁹⁾に基づき算出した泥水速度を用いて算出した。不連続面投影ログは、孔壁展開図より読み取った不連続面とブレイクアウト、縦亀裂を示す。アロープロット・ログは深度（縦軸）に対する不連続面の傾斜方位と傾斜角度（横軸）を示す（Fig. 27）。

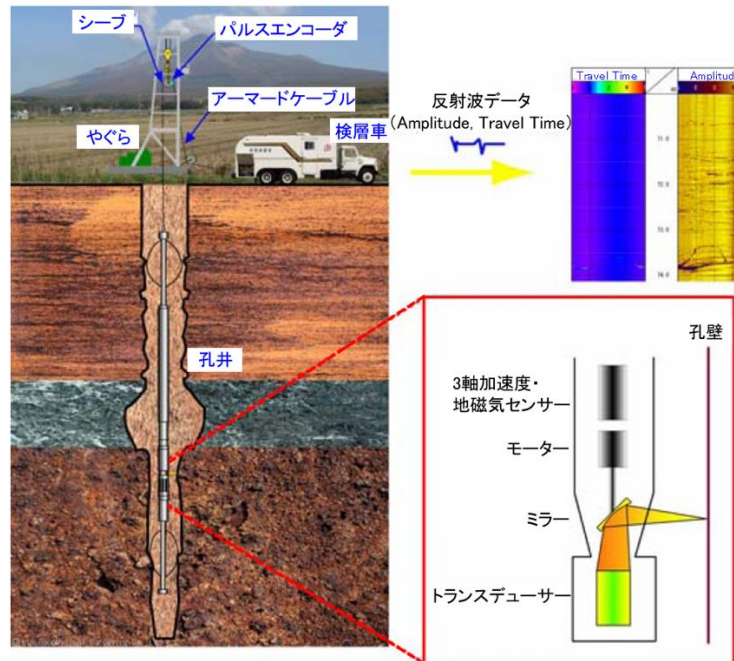


Fig. 24 BHTV 検層の概念図

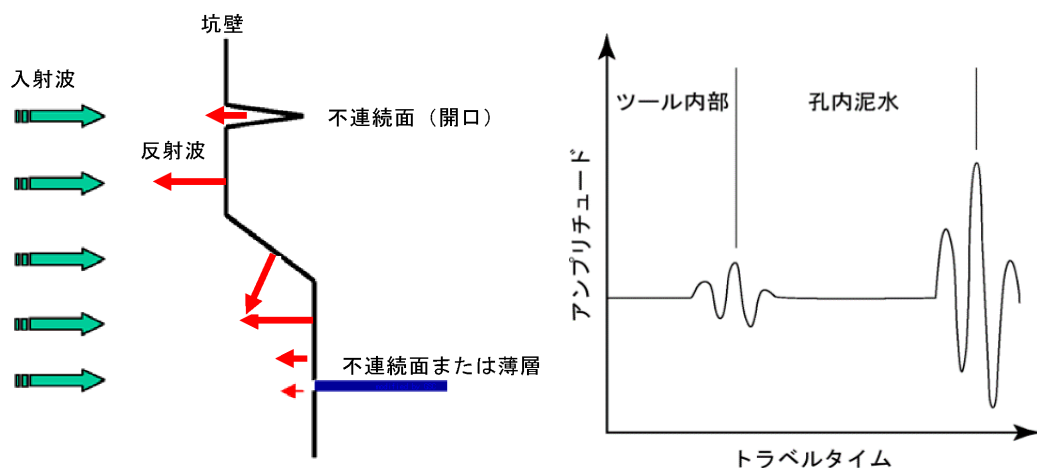


Fig. 25 孔壁における反射波（左）と反射の振幅と走時（右）の概念図

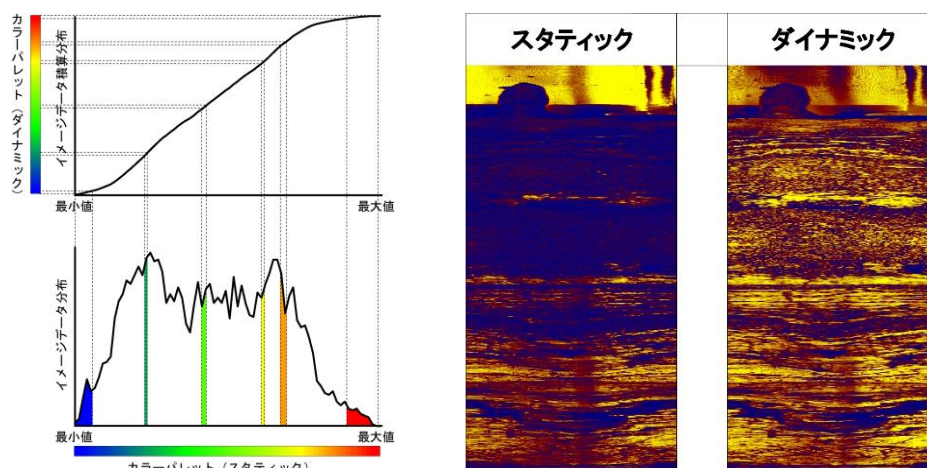


Fig. 26 固定スケール出力（スタティック）と移動スケール出力（ダイナミック）

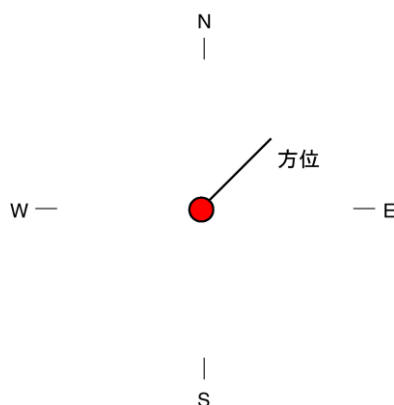


Fig. 27 アロープロットとその方位

2) 不連続面解析方法

孔壁展開図より肉眼で検知できる不連続面（サインカーブで表せるもの）のみについて読み取り，不連続面方位（不連続面の傾斜方位）および不連続面の傾斜角を解析した（Fig. 28）．孔壁画像から読み取った不連続面について，次に示すフラクチャー（ランク 1～ランク 3）と地層傾斜系の評価基準に従い分類した．

- フラクチャー（ランク1）：アンプリチュードログのみならず孔井半径ログにも360°方向に明瞭で有意に幅の広い低振幅かつ孔径拡大を示す帯状のサインカーブが見られる．これは開口性フラクチャーである可能性が高い不連続面である．断層粘土を伴う変位量の大きな断層は非開口性である可能性も高いが，地質学的意味が大きいためランク1に含めた．
- フラクチャー（ランク2）：ランク1に準じる開口性フラクチャーである可能性が高い不連続面である．これは，ランク1と比較してやや開口幅が狭い不連続面である場合や開口幅はランク1と同等でも全体的にイメージの質がやや劣る不連続面である場合，開口幅はランク1と同等でもイメージの欠損がランク1よりやや大きい不連続面である場合，開口幅は狭くても開口性を期待させる特徴や根拠を有する不連続面である場合のいずれかであると解釈される．
- フラクチャー（ランク3）：ランク1およびランク2を除くフラクチャーとして認識できる不連続面である．これは，開口幅の狭い線状の不連続面である場合，全体的にイメージの質が不明瞭な不連続面である場合，孔壁イメージは明瞭でもイメージの欠損が大きい不連続

面である場合、鉱物脈で充填されている可能性の高振幅を示す不連続面である場合、孔井半径・ログに全く現れておらず非開口性と考えられる不連続面である場合のいずれかであると解釈される。

- 地層傾斜系：岩相境界や単層、あるいは葉理などの堆積構造として認識できる不連続面である。ただし、地層とほぼ調和的に発達する次の4つの場合も含める。溶岩に発達する流理構造や縞状構造の場合、シート状岩脈の境界面や流理構造・縞状構造の場合、溶岩や熔結凝灰岩の冷却過程で生じた板状節理の場合、層理面や葉理面および前述の3つの場合に沿った滑り面の場合。

不連続面解析の結果から、不連続面結果一覧表、ローズダイアグラム、シュミットネット投影図を作成した。不連続面結果一覧表には、不連続面の傾斜方位、傾斜角、明瞭度を示す。ローズダイアグラムには、不連続面傾斜方位の 10° ごとの方位分布を示す（円の中心を 0 個、円周上を最大値とする）。シュミットネット投影図には、不連続面の傾斜方位（投影方法によりローズダイアグラムとは逆）および傾斜分布（ポーラープロット）または傾斜頻度（コンターマップ）を示す（円の中心を 0° 、円周上を 90° ）。

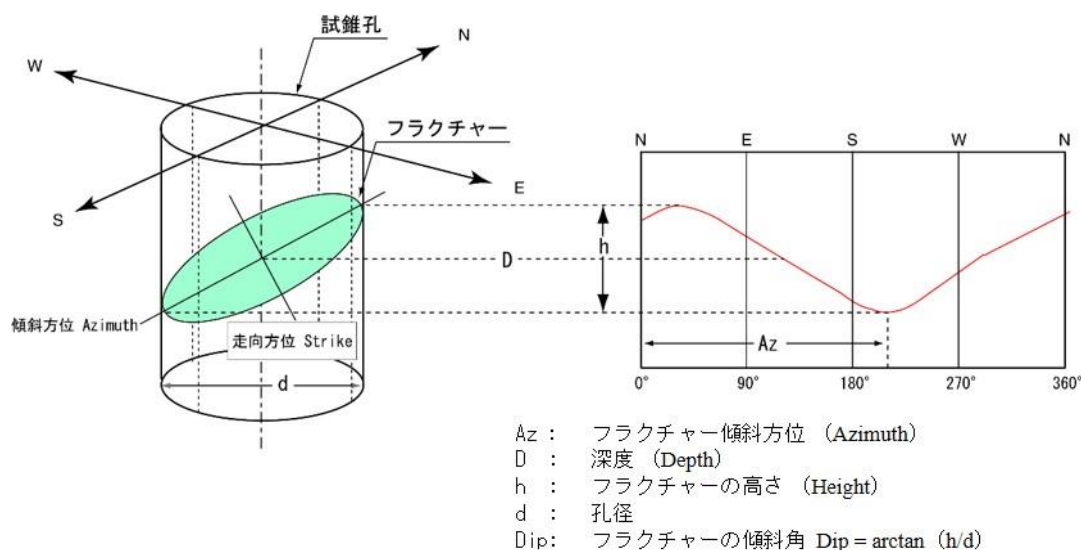


Fig. 28 孔壁展開図における不連続面の形状

3) インデュースド・フラクチャーとブレイクアウトの解析手法

インデュースド・フラクチャーとブレイクアウト発生機構の概念図を Fig. 29 に示す。孔井のような深い鉛直の円孔において最大・最小水平圧縮応力が働いている場合、孔井周辺に応力が集中する。岩盤の強度に対して相対的に掘削時の泥水圧が高い場合は引張による孔壁崩壊が生じ、その箇所に鉛直の縦亀裂（インデュースド・フラクチャー）が最大主力方位に発生する。また、掘削時の泥水圧以外に、掘削時の孔内冷却による孔内温度と地層温度の差を要因とした応力開放により縦亀裂（インデュースド・フラクチャー）が最大主力方位に発生する場合がある。一方、岩盤の強度に対して相対的に掘削時の泥水圧が低い場合は、圧縮による孔壁崩壊（ブレイクアウト）が最小主応力方位に発生する。

肉眼で検知できたブレイクアウトについては、方位と開口度を読み取り (Fig. 30)、ローズダイアグラムを作成した。ローズダイアグラムには、主応力方位に換算した分布方位の 10° ごとの方位分布を示す（円の中心を 0 個、円周上を最大値とした）。

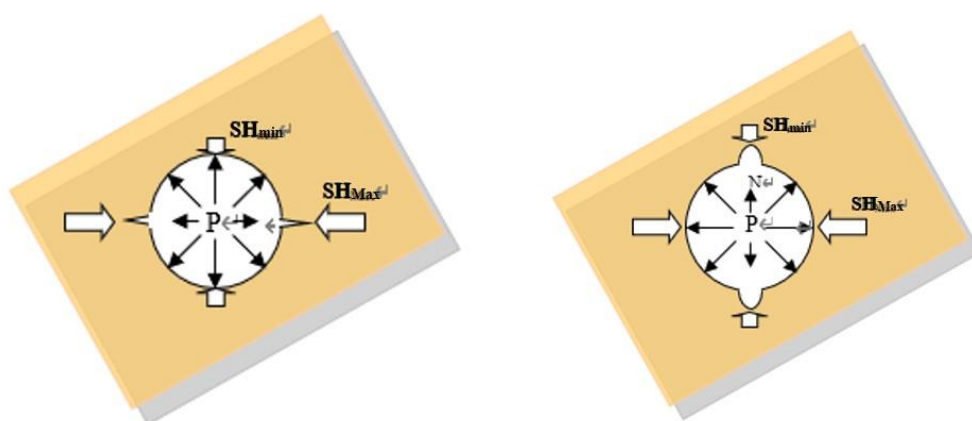


Fig. 29 インデュースト・フラクチャー（左）とブレイクアウト（右）の発生機構

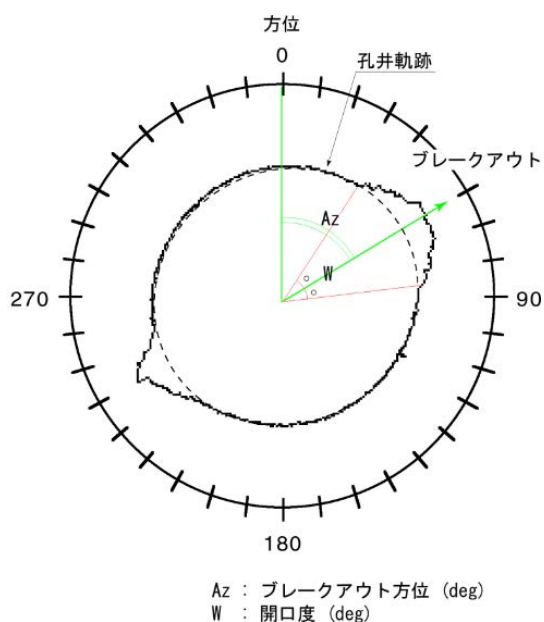


Fig. 30 ブレイクアウト方位と開口度

(5) 電磁式フローメータ検層およびビルドアップ試験

1) 測定方法

電磁式フローメータ検層の概念図を Fig. 31 に示す。電磁式フローメータ検層は、電磁流量計と同じファラデーの法則（電磁誘導の法則）を利用している。このため、従来のインペラー型フローメータやヒートパルス型フローメータと比較すると測定範囲が非常に広いのが特長である。また電磁式フローメータはインペラー型フローメータ検層ツールのようにインペラーなどの回転する動的部分がないため、機械的ノイズがほとんど発生しない。検層ツールのフローチューブ内に電磁センサーが組み込まれ、孔内水が電磁センサー内を通ることにより、孔内水の流れが測定される。同時に孔内水温度と孔内水比抵抗も測定される。電磁式フローメータ検層ツールにゴムのダイバーターを取り付けることで流量計になる。この場合、孔井内の任意の測定ポイントごとに停止して測定を行う。ゴムのダイバーターを取り外した場合、流速計になる。一定の速度で孔内を移動した際に測定ツールによる流体の相対速度やケーブル速度を記録し、それらに孔径変化

のデータを加えて孔内流体の流量を求めることができる。

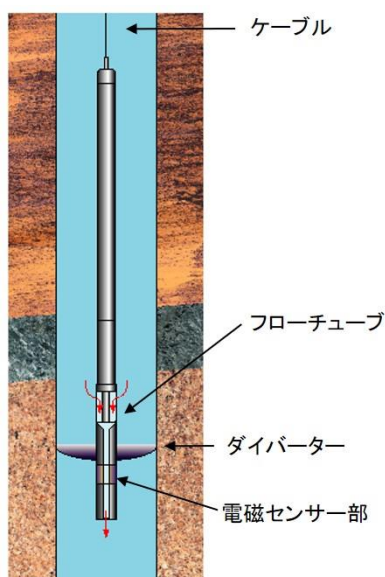


Fig. 31 電磁式フローメータ検層の概念図

2) 解析方法

測定対象区間を異なる測定速度で複数回測定することにより見かけの流速を求めた。縦軸にケーブル速度を取り、横軸に流速の測定カウント数を取ることで、深度ごとの分布を結ぶ直線の縦軸の切片から見かけの流速を得ることができる (Fig. 32, クロスプロット法)。

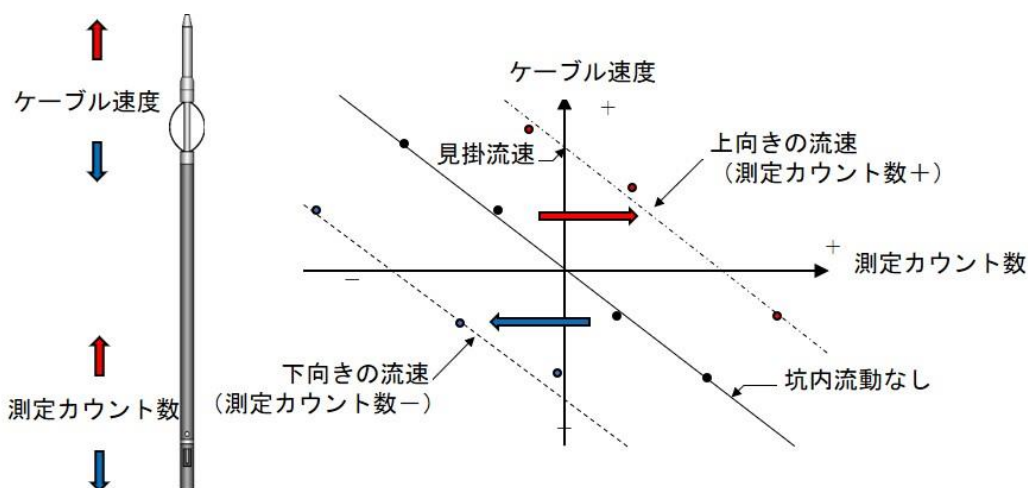


Fig. 32 孔内流速解析の模式図

電気伝導度 (FEC, $\mu\text{S cm}^{-1}$) は電磁式フローメータ検層ツールにより計測される孔内水の比抵抗 (R_w , $\Omega \cdot \text{m}$) を用いて次式により算出した: $\text{FEC} = 10000/R_w$. 電磁式フローメータの変化点の透水係数については、フローメータ検層によって得られた各区間の流入割合の変化率とビルドアップ試験から得られた孔全体の透水量係数を用いて算出した。孔全体の透水量係数 (T , $\text{m}^3 \text{Pa}^{-1} \text{s}^{-1}$) および透水係数 (K , m s^{-1}) は、重ね合わせ法を用いて測定圧力 (p , Pa) と換算時間 (X , 式 2) のプロットの直線部分 ($p = p_i - mX$) から傾き (m) を求め、式 1～式 3 により求めた²⁰⁾。

$$T = \frac{kh}{\mu} = \frac{2.303Q_n}{4\pi m} \quad \text{式 1}$$

$$X = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{Q_n} \log \left(\frac{t_n - t_{i-1} + \Delta t}{t_n - t_i + \Delta t} \right) \quad \text{式 2}$$

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad \text{式 3}$$

ここで、 p_i は初期圧力 (Pa)、 k は浸透率 (m^2)、 h は貯留層の厚さ (m)、 μ は流体の粘性係数 (Pa s)、 Q_n は最終段の揚水量 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)、 Q_i は第 i 段の揚水量 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)、 Δt は揚水停止後からの経過時間 (s)、 t_i は第 i 段の注水時間 (s)、 t_n は最終段の注水時間 (s)、 ρ は流体の密度 (kg m^{-3})、 g は重力加速度 (m s^{-2}) である。

(6) 物理検層データの品質

各検層に使用する地上機器および孔内ツールについては、Table 13 に示される動作確認を行った。

Table 13 各検層の測定ツールの動作確認方法

検 層 種 目		定 期 的	作 業 準 備 (基 地)	現 場
温 度	温 度	・メーカー出荷時の試験成績・製品保証を基準とする。 ・ツールをNaCl溶液または純水等の流体中に入れ、測定値がツールの精度の範囲内にあることを確認する。温度標準はサーミスタ式温度コレクタTM10(横河メータ&インスツルメンツ)を使用する。		・ツールを孔内に入れ、動作確認を行う。
	電気伝導度	・メーカー出荷時の試験成績・製品保証を基準とする。 ・ツールをNaCl溶液または純水等の流体中に入れ、測定値がツールの精度の範囲内にあることを確認する。流体の導電率はNaCl標準液で校正された導電率計(横河電機パーソナルSCメータSC82)を使用して測定する。		・ツールを孔内に入れ、動作確認を行う。
比 抵 抗		・ツール電極とアーマードケーブルに絶縁異常が無いことを確認する。 ・専用キャリブレーションで校正を行う。		・ツールを孔内に入れ、動作確認を行う。
孔 径		・専用キャリブレーションによる既知径での複数点測定で、校正を行う。		・本測定前にケーシング内で測定を行い、測定値がツールの精度の範囲内にあることを確認する。
自 然 放 射 線		・専用キャリブレーションによる既知の自然放射線強度を使って、ツールの回路部と検出器の経年変化を調査する。	・専用キャリブレーションによる既知の自然放射線強度を使って、校正する。	・専用キャリブレーションによる既知の自然放射線強度を使って、校正する。
孔 壁 画 像 (BHTV)		・方位・傾斜センサとトランスデューサの位置ズレを計測(マーカ位置確認)し、方位データ修正の基本パラメータを取得する(年数回)。	・ツールを北(または南)に傾斜させ、方位・傾斜計が正常に作動していることを確認する。	・ツールを北(または南)に傾斜させ、方位・傾斜計が正常に作動していることを確認する。 ・本測定前にケーシング内で測定を行い、トラベルタイムの測定値がケーシング径に対応していることを確認する。
電磁式フローメータ	流 量	・上昇流、下降流を再現できる流量測定ツール専用のフローチューブ内にツールをセットし、流量に対するカウント数(cps)の換算式を作成する。 ・流量は面積式流量計(0.045~0.45L/min、0.4~4.0L/min 大阪フローメータ工業)により測定する。	・人為的に流れを作った塩ビパイプ内に挿入し、動作確認を行う。	・ツールを孔内に入れ、動作確認を行う。 ・流速ゼロ時のカウント数(cps)を取得する。
	電気伝導度	・電気伝導度ツールをNaCl溶液または純水等の流体中に入れ、ツール出力値と導電率計との関係を調査する。経年変化やセンサの絶縁不良が無いかどうかを調べる。 ・流体の導電率はNaCl標準液で校正された導電率計(横河電機パーソナルSCメータSC82)を使用して測定する。		・ツールを孔内に入れ、動作確認を行う。

検層種目によって地層に対するレスポンスが異なることや、ツールの形状・重量が異なることにより種目間で深度がずれることがある。各種検層深度と岩芯観察結果との整合性を図るため、岩芯観察結果による深度を基準深度とし、次の方法により深度補正を行った。BHTV 検層と岩芯観察結果から明瞭に見られる低傾斜亀裂または掘削痕の代表的な深度を取得し、両者間の補正量を求め、BHTV 検層による深度に対して補正を行った。補正された BHTV 検層ツールの自然ガンマ線とそれ以外の検層ツールの自然ガンマ線から明瞭なアノマリーの代表深度を取得し、両者間の深度補正量を求め各検層種目に生じた深度について補正を行った。ただし、自然ガンマ線センサーを同時測定しない電磁式フローメータ検層については、深度補正を行っていない。

1) BHTV 検層の深度補正

BHTV 検層と岩芯観察結果から求めた BHTV 検層深度の補正相関図を Fig. 33 に示す。

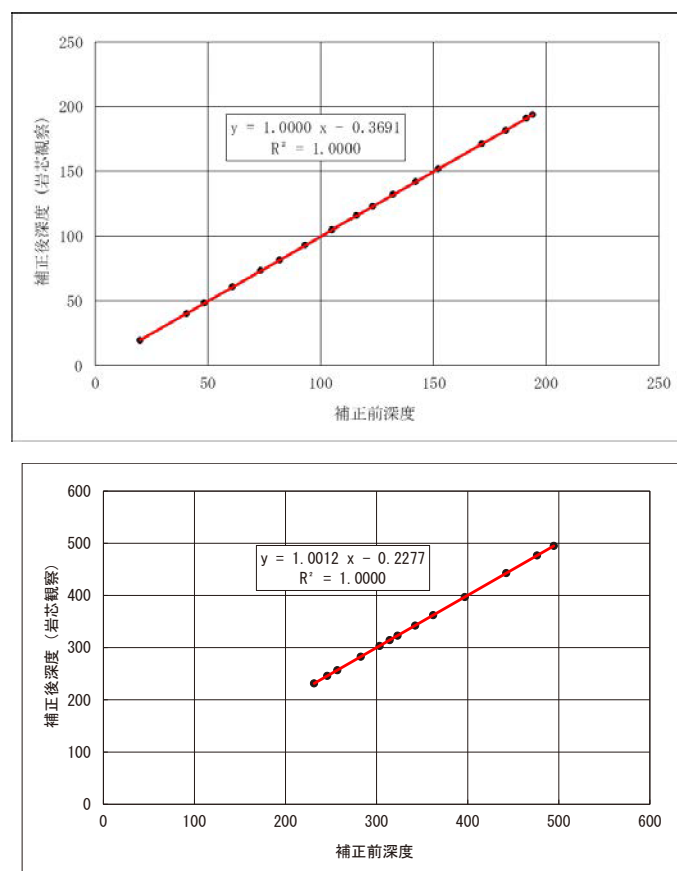


Fig. 33 深度補正相関図 (x 軸: BHTV, y 軸: 岩芯観察)

2) 孔径検層, 比抵抗 (インダクション検層)・自然電位検層, 温度検層の深度補正

各検層種目の測定深度については, BHTV 検層ツールのガンマ線を基準に補正した。これらの検層種目の補正量を Table 14 と Table 15 に示す。

Table 14 BHTV 検層以外の深度補正量 (0-200 m)

検 層 種 目	補 正 量
孔 径 検 層	- 0.2m
比抵抗・自然電位検層	- 0.2m
温 度 検 層	±0.0m
電磁式フローメータ	未実施

Table 15 BHTV 検層以外の深度補正量 (200-500 m)

検 層 種 目	補 正 量
孔 径 検 層	- 0.5m
比抵抗・自然電位検層	- 0.6m
温 度 検 層	±0.0m
電磁式フローメータ	未実施

2.5.3 試料の採取と化学分析

ボーリング孔掘削により得られたコア試料から(1) 鉱物組成分析, (2) 間隙水を含まない岩石部の酸素水素同位体比, (3) 間隙水中の He の濃度および同位体比, (4) 間隙水中の溶存成分および酸素水素同位体比, (5) 岩石の化学組成および密度の各種分析に必要な岩石試料を乾式コアカッターにより切り取り, 各種分析に供した. また, 割れ目中の原位置地下水の採水および概要調査における地下水年代測定技術の高度化を目的として揚水試験を実施し, (6)原位置採水試料の化学分析を実施した.

(1) 鉱物組成分析

本項で採取された岩石試料は, 珪藻質泥岩である声間層と珪質泥岩である稚内層との地層境界を明らかにすることを主目的として, 2.5.1 項に示される岩芯記載の実施後に事前に予測した地層境界の出現深度 (Fig. 2) を跨ぐように深度 230~390 m の範囲から, 約 20 m に 1 箇所 の頻度で約 5 cm の岩石試料をチャック付ポリ袋に採取し, 粉末 X 線回折 (XRD) 分析に供した. 310 m 箇所と 330 m 箇所の分析結果から地層境界の深度をより詳細に絞り込むため, この間の深度から 2 箇所試料を採取した. 岩石試料の採取深度を岩相区分の検討結果と合わせて Table 16 に示す. 各試料の中心付近から 100 g 程度の板状試料を切り出し, 生痕化石などを削り取った後, メノウ乳鉢で粉砕した. 粉砕した試料のうち, 10 g 程度を取り分けて全岩不定方位分析 (バルク分析) 用とし, 残りの試料を水ひ用試料とした. 水ひ試料についてはエチレングリコール (EG) 処理, 塩酸 (HCl) 処理, ポリタイプの判定, 結晶度の測定を行った. 分析条件の一覧を Table 17 に示す.

1) バルク分析

バルク分析試料を風乾させた後, メノウ乳鉢でさらに粉砕した. 粒度は乳鉢中で十分に細粒化が認められ, 指で触れたときに粒状感を感じなくなり, 粉末に粘りが生じることを目安にした. 全試料に対しバルク分析を実施し, ピークの位置と強度により鉱物の同定を行った. 鉱物の量比は石英指数による表示とした. 石英指数は, 標準石英の第 1 ピーク ($3.34\text{\AA}$; $2\theta=26.6^\circ$) の強度を 100 としたときの各鉱物の第 1 ピークの比率である. 粘土鉱物 (スクメタイト, イライト-スメクタイト混合層, イライト, 緑泥石など) とシリカ鉱物 (石英, オパール A, オパール CT, トリディマイト, クリストバライト) の相対量比は, それぞれの鉱物群で全体を 100 としたときの比率として石英指数 (ピークの強度比) をもとに算出した.

2) 水ひ (定方位) 分析

全試料に対し水ひ定方位試験を実施し, 化学処理の結果とともに粘土鉱物の同定を行った. 水ひ試料の調整は遠心分離器を用いて行った. 手順は次のとおりである.

- 試料をイオン交換水 300 cc と混ぜ合わせ, 懸濁液を超音波洗浄器にて 30 分間分散させた.
- 懸濁液から直径 $2\text{ }\mu\text{m}$ 以下の粒子を次に示す手順にて濃集させた. a) で得られた懸濁液を遠

心分離器を用いて 1,000 rpm の条件で 80 秒間分離させた。上澄みには直径 $2\mu\text{m}$ より小さい粒子が主に含まれる。次に 3,000 rpm の条件で 30 分間遠心分離し、沈殿物を回収した。

- c) 上記 b) の操作で得られた沈殿物の一部をスポイトで採り、2 枚のスライドガラス上にそれぞれ展開して室温で乾燥させたものを X 線回折分析用試料（定方位分析用試料：無処理・エチレングリコール処理）とした。エチレングリコール処理は、 50°C に保った恒温槽内にエチレングリコールが入ったデシケーターを用意し、エチレングリコール蒸気で充満したデシケーター内に定方位分析用試料を X 線回折分析の直前の 1 時間静置することにより行い、処理後に直ちに X 線回折分析を実施した。
- d) 上記 b) の操作で得られた沈殿物を等量ずつ 2 つの遠沈管に分け、一方については塩酸処理を行った。試料に塩酸 20 mL を加え、約 100°C のホットプレートにて湯煎された 200 mL ビーカーに遠沈管を入れ、攪拌しながら 1 時間反応させた。反応後の試料について遠心分離器を用いて沈殿させ、上澄みの塩酸を捨てた。その後、遠沈管に沸騰したイオン交換水を入れ、超音波洗浄器を用いて攪拌し、粒子を洗浄した。洗浄後の試料について、遠心分離器を用いて粒子を沈殿させ、上澄み液を捨てた。洗浄を 2 度繰り返した後、沈殿物（直径 $2\mu\text{m}$ 未満の粒子）の一部をスポイトで採り、スライドガラス上に展開して室温で乾燥させたものを XRD 分析用試料（定方位試料：塩酸処理）とした。定方位試料を作成した残りは、乾燥させた後にメノウ乳鉢で粉碎し、これを不定方位分析用試料（塩酸処理済み）とした。
- e) 上記 d) で塩酸処理を行わなかったものはそのまま乾燥させ、メノウ乳鉢で粉碎して「不定方位分析用試料（細粒成分）」とした。

3) 水ひ残渣分析

水ひ残渣試料は、上記 2) の水ひにより粘土鉱物が除去されたことを確認するために代表的な試料で実施した。2) b) の操作において得られた沈殿物について、水ひ試料と同じ条件で分析を実施した。この結果から得られたチャート図で粘土鉱物が除去されたことを確認した。

4) 結晶度の判定

イライト、緑泥石、オパールについて結晶度の判別を実施した。結晶度は各鉱物の特定反射面の半価幅（FWHM : Full Width at Half Maximum）で示す。半価幅はバルクにおいて該当するピークの高さの半分の点における回折ピーク幅（ 2θ の角度）である。測定する各鉱物のピーク位置は次のとおりである：イライト；(001) 面 = $10\text{\AA}$ ($2\theta = 8.9^{\circ}$ 付近)、緑泥石；(002) 面 = $7\text{\AA}$ ($2\theta = 12.5^{\circ}$ 付近)、オパール；(101) 面 = $4.1\text{\AA}$ ($2\theta = 21.7^{\circ}$ 付近)。

5) ポリタイプ（イライトおよび緑泥石）の判定

層状珪酸塩鉱物である粘土鉱物（イライト、緑泥石）には様々なポリタイプが存在する。これらを判別するために代表的な試料で以下の試験を実施した。

- a) 試料から粘土鉱物のみを可能な限り集めた。
- b) 集めた試料中のイライト、緑泥石の有無を確認した。
- c) 上記で $2\theta = 8.8^{\circ}$ 付近および $2\theta = 29 \sim 30^{\circ}$ にピークがある場合、イライトと方解石が重なる可能性があるため、HCl 処理を経て判別した。緑泥石については、主に底面反射の強度変化からおおよそのポリタイプの見当をつけた上で他のピークの一致状況の確認を行った。
- d) 上記の結果からポリタイプを判定した。

6) 地層境界深度の推定

XRD 分析結果および 2.5.1 項の岩芯記載との比較から、声間層及び稚内層の地質境界深度を推定した。

Table 16 鉱物組成分析に供した試料リストおよび岩相区分の結果

No.	試料区間 (m)	地層	岩相
230m箇所	230.10 ~ 230.20	声間層	珪藻質泥岩
250m箇所	249.90 ~ 250.00		珪藻質泥岩
270m箇所	269.90 ~ 270.00		珪藻質泥岩
290m箇所	290.00 ~ 290.10		珪藻質泥岩
310m箇所	309.60 ~ 309.70		珪藻質泥岩
316m箇所	316.00 ~ 316.05		珪藻質泥岩
322m箇所	321.95 ~ 322.00		珪藻質泥岩
330m箇所	329.90 ~ 330.00	稚内層	珪質泥岩
350m箇所	349.90 ~ 350.00		珪質泥岩
370m箇所	370.00 ~ 370.10		珪質泥岩
390m箇所	390.90 ~ 391.00		珪質泥岩

Table 17 XRD 分析条件一覧

	全岩不定方位分析	定方位分析 水簸無処理, EG処理, HCl処理	ポリタイプ	
			φ2μm以下の細粒成分 (不定方位・無処理)	φ2μm以下の細粒成分 (不定方位・HCl処理)
X線回折装置	株式会社リガク製RINT-TTR III-MTA			
対陰極	Cu			
フィルター	モノクロメーター			
管電圧	50kV			
管電流	250mA			
走査速度	4° /分	4° /分	6° /分	3° /分
スリット条件	0.5° - 0.5° - 0.15mm	0.5° - 0.5° - 0.15mm	1° - 1° - 0.3mm	1° - 1° - 0.3mm
走査範囲	2θ=3~70°	2θ=2~40°	2θ=5~50°	2θ=27~40°

(2) 間隙水を含まない岩石部の酸素水素同位体比の分析

本項で採取された岩石試料は、2.5.1 項に示される岩芯記載の実施後に、掘削長約 20 m につき 1 箇所から約 5 cm の岩石試料をチャック付ポリ袋に採取した。採取した岩石試料の採取深度、岩芯長、採取日時を Table 18 に示す。酸素同位体比の分析は Clayton and Mayeda (1963)²¹⁾を参考に、CO₂ レーザー・フッ素化-質量分析法により実施した。手順は次の通りであった。岩石試料を粉碎し、乾燥させ、そのうち約 1-5 mg をニッケルサンプルホルダーに入れ、分析装置の試料室に入れた。試料室内を排気した後、試料および試料室内の吸着水を取り除くため、約 150°C で約 12 時間加熱した。その後、BrF₅ を試料室に 300 mbar になるまで導入し、室温で一晩静置した。次に、BrF₅ を試料室に 100 mbar になるまで導入し、CO₂ レーザーを照射し、試料を蒸発させた。液体窒素を用いた冷却トラップにより、フッ化物 (BrF₅, SiF₄, BrF₃ など) を取り除いた後、加熱した水銀拡散

ポンプを通して、F₂やハロゲンフッ化酸素化合物を取り除き、O₂を精製した。白金触媒とグラファイトを用いて550°CにおいてO₂をCO₂に変化させ、O₂の収率をマノメータで測定した後、CO₂を安定同位体比質量分析計（IsoPrime, GV Instruments）へ導入し、CO₂の¹⁸O/¹⁶O比を測定した。

水素同位体比の分析は Vennemann and O'Neil (1993)²²⁾を参考に、熱分解-安定同位体比質量分析法により実施した。手順は次の通りであった。岩石試料を粉碎し、乾燥させ、そのうち約1–5 mgを銀カップに入れ、150°Cで約12時間加熱した。試料を入れた銀カップを熱分解型元素分析装置（TC/EA, Thermo Fisher Scientific）にセットし、He 雰囲気の有酸素還元炉において1,450°Cに加熱し、試料を熱分解した。分離カラムにより発生したガスから分離されたH₂を安定同位体比質量分析計（DELTA V Advantage, Thermo Fisher Scientific）に導入し、D/H比を測定した。

Table 18 岩石部の酸素水素同位体比の分析に供した試料リスト

採取深度 (GL -m)		岩芯長 (m)	採取日時
上端	下端		
24.35	24.40	0.05	2021/12/24 20:10
49.45	49.50	0.05	2021/12/24 19:50
68.00	68.05	0.05	2021/12/24 19:30
83.65	83.70	0.05	2021/12/24 19:00
109.55	109.60	0.05	2021/12/25 13:30
123.90	123.95	0.05	2021/12/26 14:30
146.25	146.30	0.05	2021/12/27 15:15
169.94	170.00	0.06	2021/12/28 15:15
184.65	184.70	0.05	2021/12/29 11:40
200.19	200.24	0.05	2022/9/21 14:50
219.89	219.94	0.05	2022/9/21 15:25
239.89	239.94	0.05	2022/9/21 16:40
259.49	259.54	0.05	2022/9/21 17:45
279.89	279.94	0.05	2022/9/22 16:10
299.89	299.94	0.05	2022/9/23 9:20
319.89	319.94	0.05	2022/9/23 10:25
339.82	339.87	0.05	2022/9/23 11:05
359.19	359.24	0.05	2022/9/23 11:50
379.89	379.94	0.05	2022/9/23 14:00
400.00	400.05	0.05	2022/9/23 14:30
419.74	419.79	0.05	2022/9/23 15:20
439.89	439.94	0.05	2022/9/23 16:15
459.89	459.94	0.05	2022/9/23 16:30
480.00	480.05	0.05	2022/9/23 17:00
499.00	499.05	0.05	2022/9/23 17:15

(3) 間隙水中のHeの濃度および同位体比の分析

本項で採取された岩石試料は、ボーリング孔の掘削において試料採取予定深度のコア試料が掘り上がり次第、2.5.1項に示される写真撮影や観察などを簡易的に実施し、可能な限り速やかに分析に供することとした。掘削長約10 mにつき1箇所から約10 cmの目立った割れ目の見られない岩石試料を採取した。また、掘削水との接触時間を極力少なくするため、各掘削インターバルにおける最も深い深度付近から試料を採取した。採取した岩石試料の採取深度、岩芯長、採取日時をTable 19に示す。ボーリングコアからカットされた岩石試料から、中田ほか(2006)²³⁾に示されるコア間隙水中希ガス抽出技術に従い、採取した岩石試料の表面についた掘削水をウェスで拭き取り、試料をステンレス製の容器に入れ、真空排気により容器内の空気や掘削水などに溶存し

た空気を排気したことを圧力計により確認した後，ステンレス容器に接続される銅管部をクランプで押し潰すことで，容器に封をした．この時の採取記録一式を付録 A3 に付す．数ヶ月間，試料容器を静置し，岩石試料内の He を試料容器内の空間に十分に拡散させた後，試料容器の銅管部を分析装置に接続し，クランプを解放することで容器内に抽出されたガスを電力中央研究所の有する地下水年代測定設備に導入し，Mahara et al. (2001)²⁴⁾や Hasegawa et al. (2016)²⁵⁾に示される方法に従って He を分離・精製し，希ガス質量分析装置（VG-5400, マイクロマス製）にて測定した．

Table 19 間隙水中の希ガスの濃度および同位体比の分析に供した試料リスト

採取深度 (GL -m)		岩芯長 (m)	採取日時
上端	下端		
23.40	23.50	0.10	2021/12/21 18:30
37.33	37.42	0.09	2021/12/22 6:45
49.23	49.30	0.07	2021/12/22 15:15
57.80	57.89	0.09	2021/12/22 21:30
68.75	68.85	0.10	2021/12/23 6:23
77.66	77.75	0.09	2021/12/23 14:45
82.25	82.33	0.08	2021/12/23 18:30
95.75	95.86	0.11	2021/12/24 4:55
108.42	108.52	0.10	2021/12/24 23:45
123.70	123.80	0.10	2021/12/25 17:45
130.90	131.00	0.10	2021/12/26 0:28
139.35	139.45	0.10	2021/12/26 9:50
147.85	147.93	0.08	2021/12/26 18:05
156.77	156.87	0.10	2021/12/27 1:15
169.07	169.17	0.10	2021/12/27 14:20
177.51	177.60	0.09	2021/12/27 21:00
184.00	184.10	0.10	2021/12/28 1:10
199.05	199.15	0.10	2021/12/28 13:30
208.80	208.90	0.10	2022/9/4 0:03
221.00	221.10	0.10	2022/9/4 10:39
230.00	230.10	0.10	2022/9/4 18:14
238.65	238.75	0.10	2022/9/5 0:16
250.80	250.90	0.10	2022/9/5 8:40
259.08	259.18	0.10	2022/9/5 17:11
269.00	269.10	0.10	2022/9/6 0:01
281.00	281.10	0.10	2022/9/6 9:16
289.90	290.00	0.10	2022/9/6 17:27
299.23	299.33	0.10	2022/9/7 0:07
309.80	309.90	0.10	2022/9/9 17:36
318.35	318.45	0.10	2022/9/10 1:15
330.80	330.90	0.10	2022/9/10 15:29
338.55	338.65	0.10	2022/9/10 23:22
350.90	351.00	0.10	2022/9/11 19:02
359.90	360.00	0.10	2022/9/12 5:20
368.71	368.81	0.10	2022/9/12 16:07
380.75	380.85	0.10	2022/9/13 4:23
387.80	387.90	0.10	2022/9/13 13:20
399.40	399.50	0.10	2022/9/14 1:44
411.48	411.58	0.10	2022/9/15 4:05
420.51	420.61	0.10	2022/9/15 13:44
429.00	429.10	0.10	2022/9/15 22:16
440.90	441.00	0.10	2022/9/16 10:58
450.10	450.20	0.10	2022/9/16 20:42
459.59	459.69	0.10	2022/9/17 6:52
471.66	471.76	0.10	2022/9/17 20:17
480.30	480.40	0.10	2022/9/18 5:42
489.10	489.20	0.10	2022/9/18 16:51
499.90	500.00	0.10	2022/9/19 4:47

(4) 間隙水中の溶存成分および酸素水素同位体比の分析

本項で採取された岩石試料は、ボーリング孔の掘削において試料採取予定深度のコア試料が掘り上がり次第、他のコア試料より優先的に 2.5.1 項に示される岩芯記載を実施し、岩石試料を二重で真空パックし、分析用に保管した。掘削長約 10 m につき 1 箇所から約 40 cm の目立った割れ目の見られない岩石試料を採取した。また、(3)で示される間隙水中の He の濃度および同位体比の分析に供する試料の採取深度と近い深度から試料を採取するように留意した。採取した岩石試料の採取深度、岩芯長、採取日時を Table 20 に示す。

Table 20 間隙水中の溶存成分および酸素水素同位体比の分析に供した試料リスト

採取深度 (GL -m)		岩芯長 (m)	採取日時
上端	下端		
24.45	24.85	0.40	2021/12/22 17:30
36.35	36.75	0.40	2021/12/22 18:40
49.60	50.00	0.40	2021/12/23 21:00
56.60	57.00	0.40	2021/12/23 1:00
69.18	69.58	0.40	2021/12/24 11:00
77.00	77.40	0.40	2021/12/24 15:15
83.70	84.00	0.30	2021/12/24 13:30
95.28	95.68	0.40	2021/12/24 14:45
109.60	110.00	0.40	2021/12/25 13:30
123.05	123.35	0.30	2021/12/26 13:50
130.40	130.80	0.40	2021/12/26 13:30
141.00	141.37	0.37	2021/12/27 10:30
146.30	146.70	0.40	2021/12/27 11:15
156.28	156.68	0.40	2021/12/27 13:15
168.60	168.97	0.37	2021/12/28 15:00
176.05	176.43	0.38	2021/12/28 16:30
184.25	184.65	0.40	2021/12/28 17:00
198.10	198.50	0.40	2021/12/29 11:00
208.11	208.51	0.40	2022/9/4 13:10
219.00	219.40	0.40	2022/9/5 14:40
230.50	230.84	0.34	2022/9/6 9:10
238.16	238.46	0.30	2022/9/8 20:30
250.25	250.75	0.45	2022/9/7 6:20
259.60	260.00	0.40	2022/9/9 9:00
271.25	271.65	0.40	2022/9/9 10:50
280.60	281.00	0.40	2022/9/9 14:10
288.25	288.91	0.66	2022/9/10 1:45
298.34	298.74	0.40	2022/9/9 19:28
310.10	310.50	0.40	2022/9/10 6:43
317.45	317.85	0.40	2022/9/10 20:45
330.00	330.35	0.35	2022/9/11 19:10
339.42	339.82	0.40	2022/9/11 22:30
350.20	350.60	0.40	2022/9/12 4:50
359.30	359.70	0.40	2022/9/12 17:25
369.55	370.00	0.45	2022/9/13 10:20
381.17	381.57	0.40	2022/9/13 18:05
387.17	387.54	0.37	2022/9/14 2:10
399.60	400.00	0.40	2022/9/14 18:40
411.00	411.33	0.33	2022/9/15 13:45
421.06	421.45	0.39	2022/9/15 22:50
429.30	429.74	0.44	2022/9/16 15:50
440.20	440.60	0.40	2022/9/16 22:50
450.30	450.79	0.49	2022/9/17 18:20
459.00	459.49	0.49	2022/9/18 7:10
472.00	472.40	0.40	2022/9/18 10:30
479.60	480.00	0.40	2022/9/18 16:10
488.60	489.00	0.40	2022/9/19 0:15
499.20	499.60	0.40	2022/9/19 9:10

1) リーチング（浸漬）分析

溶存イオン濃度として、 Na^+ 濃度、 K^+ 濃度、 Mg^{2+} 濃度、 Ca^{2+} 濃度、 F^- 濃度、 Cl^- 濃度、 Br^- 濃度、 NO_3^- 濃度、 SO_4^{2-} 濃度を分析した。分析方法は次の通りであった²⁶⁾。コア試料の外周約 5 mm をトリミングした岩石試料の一部を粒径 1 cm 程度以下に粉碎し、そのうち約 100 g をプラスチック容器に採取し、約 200 mL の蒸留水を加えて約 1 週間振盪し、岩石と水を接触させ、間隙水中のイオンを抽出した。事前の確認により 1 週間の接触時間が間隙水中のイオンを抽出するのに適切であることを確認している。遠心分離により固液分離された上澄み溶液をさらに 0.45 μm フィルタでろ過し、ろ液中の各種溶存イオン濃度をイオンクロマトグラフィ（Compact Professional IC881, メトローム）により測定した。岩石試料の間隙水中の各種溶存イオン濃度（ppm）の計算方法として、次式に Cl^- 濃度の例を示す。

$$[\text{Cl}]_p = \frac{[\text{Cl}]_L \times (A_w + A_r \times R_w)}{A_r \times R_w} \quad \text{式 4}$$

$[\text{Cl}]_p$ は岩石試料の間隙水中の Cl^- 濃度であり、 $[\text{Cl}]_L$ はイオンクロマトグラフィにより測定されたプラスチック容器内で岩石粉末と振盪させた溶液中の Cl^- 濃度である。 A_w はプラスチック容器に加えた蒸留水の重量であり、 A_r はプラスチック容器に入れた岩石粉末の重量、 R_w は岩石試料の含水率である。含水率は、上述の岩石粉末約 10 g をビーカーに入れ、110°C で 48 時間以上乾燥させ、乾燥前後における重量変化から求めた。

2) 圧縮抽出水の分析

コア試料の外周約 1 cm を乾式カッターでトリミングし、試料を圧縮抽出装置²⁷⁾に入れ、300 MPa の圧力でコア試料の収縮が収まるまで圧縮し、間隙水を抽出した。各種溶存イオン濃度（ Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} ）についてはイオンクロマトグラフィ（Compact Professional IC881, メトローム）により測定した。 Br^- 濃度および微量元素濃度（I, Li, B, Sr, Rb, Ba, Cs）については ICP 質量分析法により測定した。酸素同位体比については、isoFLOW for solution（エレメンター）を用いて試料を 30°C で 12 時間、 CO_2 ガスと同位体交換させ平衡状態にし、同位体比質量分析装置（isoprime precisION, エレメンター）にて CO_2 ガスの安定同位体比を測定し、試料の $\delta^{18}\text{O}$ 値を求めた。分析精度は $\pm 0.1\text{‰}$ である。アミノ G 酸濃度については、蛍光分光分析計（FP-8300, 日本分光）を用いて波長 300 nm で励起させ、波長 450 nm の蛍光強度から濃度を測定した。

3) 直接水蒸気平衡レーザー分光分析

水素同位体比は Nakata et al. (2018)²⁸⁾ に従い、直接水蒸気平衡レーザー分光分析法^{29), 30)}により求めた。コア試料の外周約 5 mm をトリミングした岩石試料約 12 g を容積 2 L のアルミバッグに入れ、そこに 1 L の乾燥窒素を入れて封をし、室温で 2 日間静置した。その後、アルミバッグを同位体比質量分析計（IWA-45EP, Los Gatos Research）に接続し、アルミバッグ内の水蒸気の酸素水素同位体比を測定した。岩石試料の間隙水と水蒸気の間における同位体分別の温度依存性の校正のため、同位体比が既知の水約 2 g をアルミバッグに入れた標準試料を用意し、岩石試料と同様にアルミバッグ内の水蒸気の水素同位体比を測定した。校正結果を用いて岩石試料の間隙水の水素同位体比を求めた。

(5) 岩石の化学組成分析および密度測定

本項では Table 20 に示される試料を用いた。岩石の主要 13 元素組成（ SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、

MnO, CaO, MgO, Na₂O, K₂O, Cr₂O₃, P₂O₅, SrO, BaO) については、蛍光 X 線 (XRF) 分析により定量した。岩石試料にホウ酸リチウムを添加して 1,100°C で溶解させることでガラスビードを作成し XRF の分析に供した。微量元素については岩石を酸溶液に溶解させ、誘導結合プラズマ質量分析 (ICP-MS) および誘導結合プラズマ発光分光 (ICP-AES) によって溶液中のイオン濃度を定量することで、岩石中に含まれる量を評価した。

真密度については以下の手順で乾燥・粉碎した試料を用い、Quantachrome 社製ペンタピクノメータにて分析した。岩石試料約 10~15 g を 110°C の通風乾燥器で 72 時間程度乾燥させ、乾燥させた岩石試料をタングステン製の乳鉢に入れて粗粉碎した。その後 Philips 社製遊星型ボールミル「Mini Mill」に試料を入れ、微粉碎した。粉碎容器およびボールは窒化ケイ素製のものを使用し、1 つの容器に 5 g 程度の岩石試料を入れ、約 10 分間粉碎した。真密度はペンタピクノメータのリークチェックをした後、膨張用空間体積・セルの空容器体積を測定し、微粉碎試料を入れて同様に体積を定量し、微小な空隙を除いた体積と重量を評価した。その結果から、真密度を算出した。

(6) 原位置採水試料の水質分析

2.5.1 項の岩芯記載および 2.5.2 項の物理検層の結果を基に、化石海水の分布域の境界部を挟み込むように稚内層深部と浅部から採水箇所を 2 箇所選定した。稚内層浅部の採水深度は深度 362.02~372.34 m (以降、深度 367 m と呼ぶ) であり、稚内層深部の採水深度は深度 485.02~495.34 m (以降、深度 491 m と呼ぶ) である。原位置に耐圧採水容器を下ろした状態での原位置採水および孔口まで揚水させた状態での揚水試料の採水を実施した。前者を封圧採水試料と呼び、後者を孔口採水試料と呼ぶことにする。

1) 一連の作業概要

深度 491 m での採水を実施するため、2022 年 9 月 26 日から採水作業に係る資材の搬入および試験装置の挿入を行い、9 月 30 日に揚水用のポンプの設置と透水試験を実施し、採水の可否を判断した。10 月 1 日から 5 日まで揚水を実施し、その後に封圧採水試料を採取し、10 月 8 日に深度 491 m での採水作業を終えた。10 月 9 日に試験装置を深度 367 m に移設し、10 日に透水試験を実施し、採水の可否を判断した。10 月 12 日から 16 日まで揚水を実施し、その後に封圧採水試料を採取し、10 月 19 日に試験装置をボーリング孔から回収した。使用した機材を Table 21 に示す。

はじめに、孔内をアミノ G 酸の濃度を 10 ppm に調製した清水で満たした。目的とする深度まで採水装置を降下させパッカーを拡張した後、間隙水压を測定し、平衡水位を測定した。揚水ポンプを設置し、採水の可否を判断するためにスラグ試験を実施した。採水の可否の判断基準はパッカーで区切られた採水区間の透水係数が $1 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$ 以上であることとした。この場合、揚水量として 1 L min^{-1} 以上が得られる見込みであり、作業期間中にロッド内部を十分に置換できるためである。揚水中はアミノ G 酸濃度、pH、ORP、EC、水温をモニタリングした。アミノ G 酸濃度が 1 mg L^{-1} 以下になることやロッド内部の容積が揚水地下水により十分に置換されたこと (採水装置内部の容積の 5 倍以上の揚水量の確認)、水質が安定したことなどを確認し、孔口採水試料を採取した。この時、遊離ガスをアルミバッグに採取し、⁸¹Kr を用いた地下水年代測定の有効性の検討に供した。揚水の終了後に揚水ポンプを回収し、封圧採水容器を降下させ、封圧採水試料を採取した。地下水の揚水時の試験装置概念図を Fig. 34 に示す。

Table 21 採水作業での使用機材一覧

機材名		仕 様
パッカー（スライド）		・収縮外径 $\phi 102$ mm ラバー長：約 1,000 mm ・最大適用孔径 $\phi 190$ mm
トリップバルブ		・孔内バルブ（圧力駆動方式）
ストレーナ		・JFT ロッドを穿孔加工したもの
JFT ロッド		・内径 $\phi 35.8$ mm, ネジ部外径 $\phi 49$ mm, 定尺 3 m
3.5 インチ管		・内径 $\phi 90.2$ mm, ソケット外径： $\phi 114.3$ mm, 定尺 3 m
封圧採水用 地球科学ロッド		・内径 $\phi 65.9$ mm, ネジ部外径： $\phi 89.1$ mm, 定尺 5 m
組チューブ		・ナイロンチューブ AS2：$\phi 6$ mm $\times$ 4 mm の 4 本組 ・最高使用圧力 3.7 MPa, 長さ約 600 m
耐圧タンク		・耐圧:5 MPa（パッカー用など）
パッカー圧センサー		・DRUCK/PCDR レンジ 0～5 MPa, 精度 0.06%FS
気液分離タンク		・部材は耐圧タンクと同じ
3.5 インチ管用 マニホールド		・3.5 インチ管口元の閉塞部材（ガス抽出用）
揚水ポンプ SQE-1		・GRUNDFOS 揚程約 180 m, 最大吐出量約 30 L/min
ベビーコンプレッサー		・使用最高圧力：2.5 MPa
投入式水位計		・DRUCK/PTX レンジ 0～3 MPa, 精度 0.06%/FS
流量計		・TOSHIBA 電磁流量計／口径 15 mm, 流速スパン 0～10 m/sec, 精度 $\pm 0.25 \sim 0.5\%$
自動調整弁		・KITZ 口径 1/2" 電動ボールバルブ, 制御：1～30 L/min
ガス流量計		・FCON 流量スパン（N ₂ 換算）0～10 L/min, 精度 $\pm 1\%$ _FS
水質モニタリング装置		・PRODSS マルチ水質センサー（pH・温度・EC, メモリー内蔵）
計測システム		・計測データ収録, 描画, 保存用 ・KEYENCE/NR500 データロガー（アナログ電圧入力）, ノートパソコン
封 圧 採 水 装 置	採水容器	・ピストン式：内容量 500 mL
	ケーブルドラム	・コントロールケーブル用電動ウインチ（巻き速度可変） ・ケーブル長：1,200 m（ワイヤー・チューブ）
	耐圧タンク	・エタノール供給用（容量 10 L）

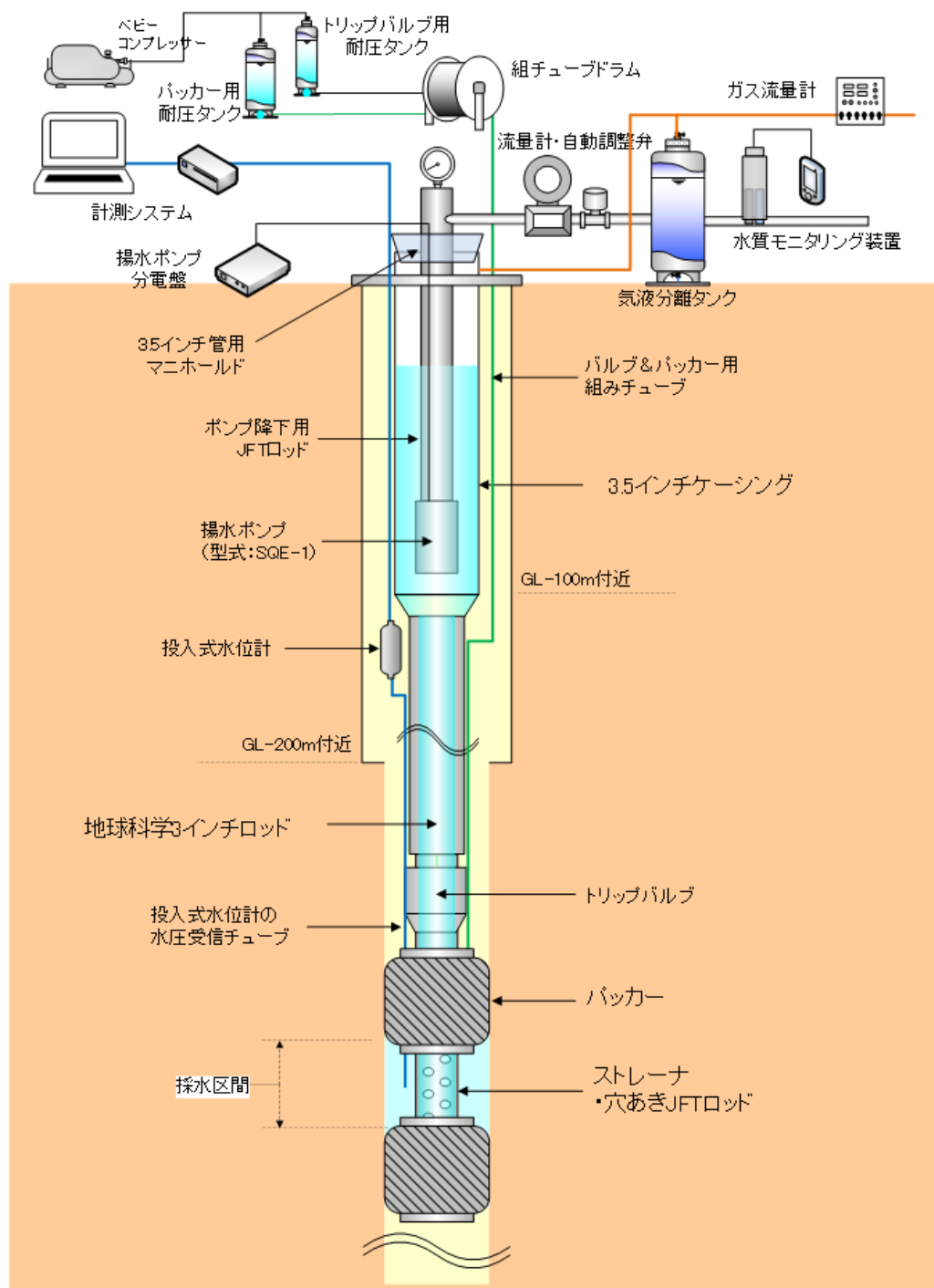


Fig. 34 地下水の揚水時の試験装置概念図

2) 採水箇所の選定

2.5.1 項の岩芯記載および 2.5.2 項の物理検層の結果を基に、深度 200～320 m (区間 1)、深度 320～410 m (区間 2)、深度 410～500 m (区間 3) の 3 つの水理地質区間に区分した (Fig. 35)。電磁式フローメータから得られた計 7 箇所の地下水流入箇所のうち、流速変化の大きさや深度分布を考慮して 5 箇所の候補を絞り込み、化石海水の分布域の境界部を挟み込むように区間 2 と区間 3 から 1 箇所ずつ採水できるように採水の優先順位を付けた。

採水装置の移設に時間を要することから、装置の往復を避けるため、深部から浅部に順に採水

地点を移動させることとした。またパッカー区間長は区間内容積を小さくすることや割れ目を絞り込むことを目的として 10 m とした。採水地点は、優先順位の高い地点から順に、深度 491 m 地点（区間 3）、深度 442 m 地点（区間 3）、深度 367 m 地点（区間 2）、深度 344 m 地点（区間 2）、深度 389 m 地点（区間 2）である。上記の優先順位に従った採水作業の結果、前述のように深度 491 m 地点と深度 367 m 地点の 2 箇所において採水作業が実施された。

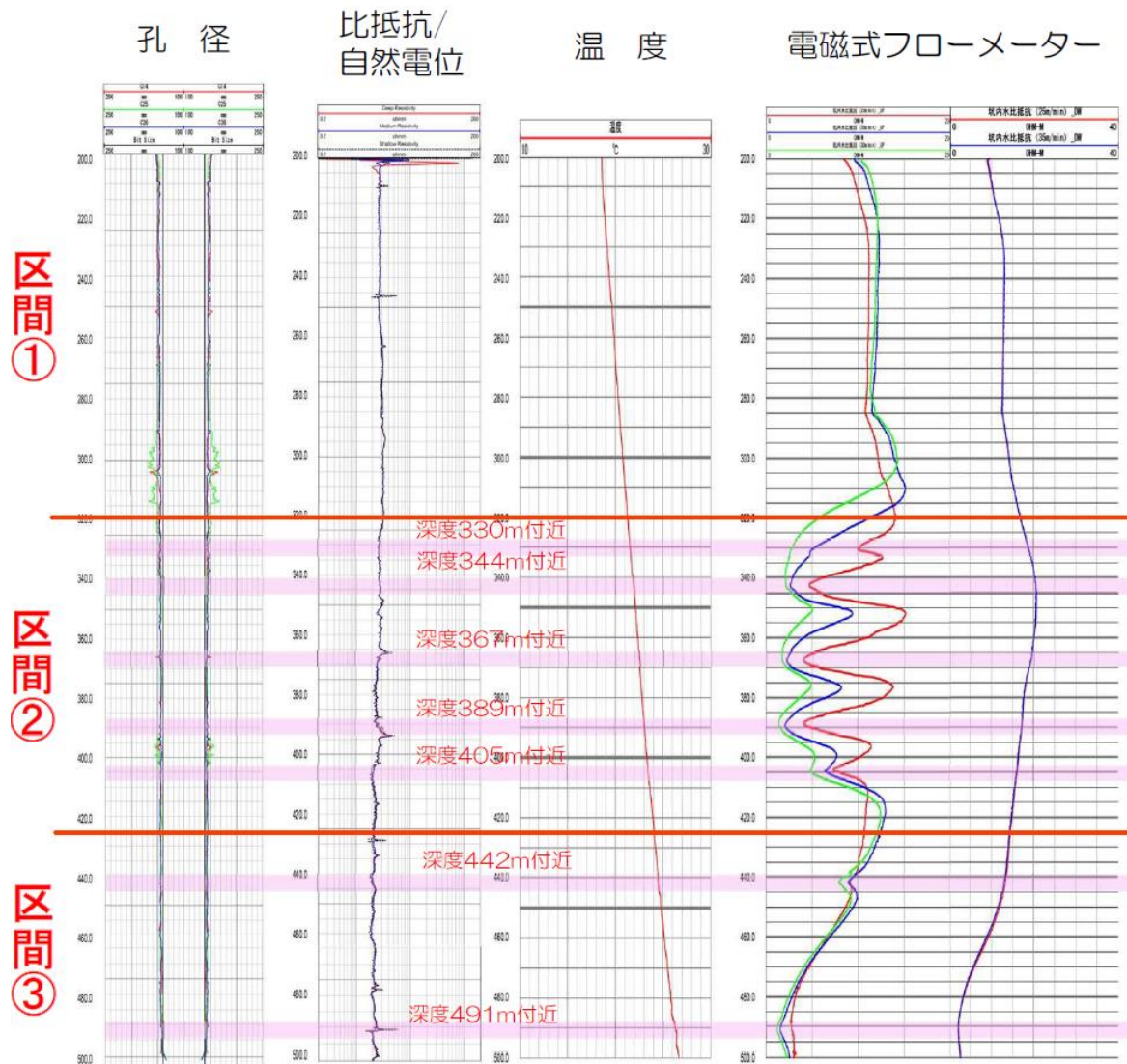


Fig. 35 物理検層結果と採水候補地点

3) 封圧採水試料

①採取方法

原位置における地下水の封圧採水時の試験装置概念図を Fig. 36 に示す。採水容器にはピストン式封圧採水容器を用いた (Fig. 37)。採水手順は次のとおりであった。

- ・ コントロールケーブルのチューブ内をエタノール（アルコール）で充填した。
- ・ 封圧採水容器のB室を蒸留水で満たした状態でピストンブロックを押し込み、A室にエタノールを充填した。
- ・ 封圧採水容器をコントロールケーブルに接続し、A室へ目的深度の水圧以上の圧力をかけた。

- ・ 封圧採水容器を目的深度まで降下させ、コントロールケーブル内の圧力を解放することでA室を減圧し、B室に地下水を採取した。この時の採取状況は地表部にてコントロールケーブルから排出されるエタノール量から判断した。
- ・ ピストンブロックがA室側の端まで移動したところで封圧採水容器を巻き上げ回収した。必要量を採取するまで上記の作業を繰り返した。

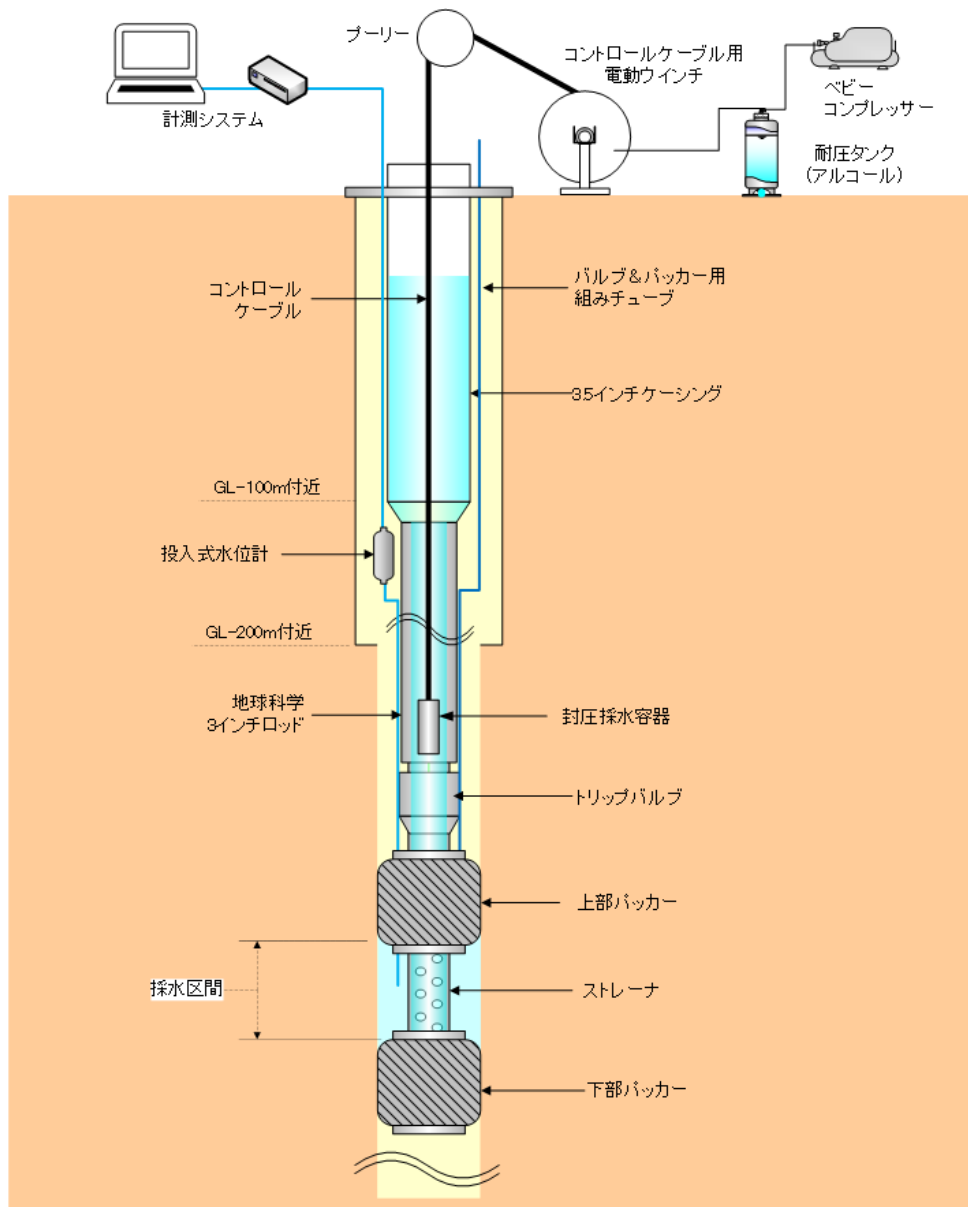


Fig. 36 封圧採水時の試験装置概念図

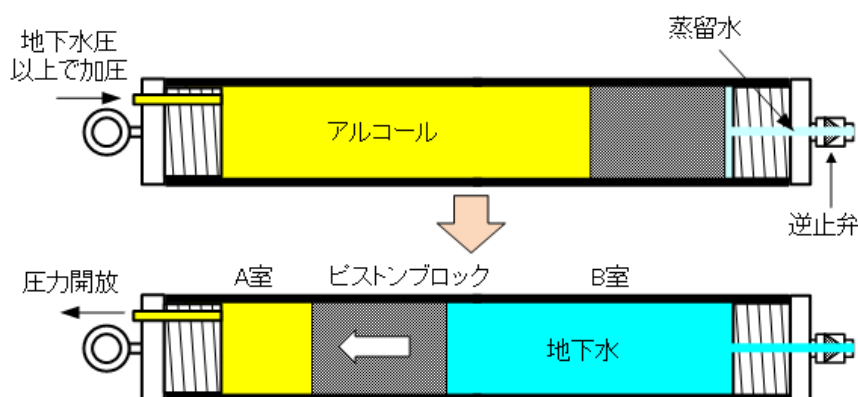


Fig. 37 ピストン式採水容器による地下水の採取手順

②分析方法

封圧容器内が原位置地下水で満たされた状態で分析室まで輸送し、分析の直前に圧力を解放し、各種分析に供する試料を分取した。水質の分析項目および分析方法は2.5.3(4)項と同じである。

4) 孔口採水試料

①採取方法

深度 491 m 地点における採水は揚水開始から約 78 時間後（10 月 4 日）に実施した。スラグ試験や揚水中の水質モニタリングの結果については、3.3.6 項で述べる。孔口から揚水された原位置地下水を大気解放条件でプラスチックボトルに採取し、速やかに分析機関に輸送した。

深度 367 m 地点における採水は揚水開始から約 102 時間後（10 月 16 日）に実施した。スラグ試験や揚水中の水質モニタリングの結果については、3.3.6 項で述べる。孔口から揚水された原位置地下水を大気解放条件でプラスチックボトルに採取し、速やかに分析機関に輸送した。

②分析方法

水質の分析項目および分析方法は2.5.3(4)項と同じである。

3. 調査・試験の結果

3.1 岩芯記載

岩芯写真と岩芯記載の結果を付録 A1 と付録 A2 にそれぞれ示す。深度 0.00~20.00 m 区間はノンコアであったため、カッティングスを観察し記録した。深度 200.00~323.05 m には珪藻質泥岩からなる声間層が分布し、均質一様な（塊状な）珪藻質泥岩からなる。深度 245.90~246.24 m には角礫状の礫を含む玉石状の凝灰岩が認められた。岩芯は比較的硬質であり、掘削直後はわずかに岩芯からのガス漏れを示す発泡および音が認められた。深度 284.00~296.00 m の岩芯の洗浄や写真撮影時に岩芯表面の洗浄水の乾燥が著しい特徴が認められた。

深度 323.05~500.00m には珪質泥岩からなる稚内層が分布する。全体的に上位の声間層である珪藻質泥岩よりも緻密であり、岩芯重量が増加する。深度 323.05~404.40 m まで断層あるいは開口亀裂帯が局所的に存在した。上位層と比較して、砂あるいは礫などの粗粒な碎屑物と考えられる物質がやや多く含まれる。声間層と稚内層は整合の関係にあり、その境界は不明瞭であるため、肉眼観察で地層境界を判別することは難しい。2.5.3(1)項に示される XRD 分析の結果も踏まえ、地層境界を深度 323.05 m と判断した。

RQD と割れ目頻度および断層頻度の深度分布図を Fig. 38 に示す。割れ目の頻度は深度 20 m から 50 m にかけて高くなる傾向が認められ、深度 50 m から 200 m にかけて徐々に低くなる傾向が認められた。深度 200.00 m から 280.00 m では、割れ目頻度は比較的lowかつ概ね均等であり、著しく亀裂が集中する深度がほとんど認められなかった。深度 280.00 m から 410.00 m では、他の区間と比較して、開口性の割れ目の局所的な集中が散見された。癒着割れ目はほとんど認められず、ほとんどの亀裂が開口性を示した。この区間は水みちの水理的連結性の高い稚内層浅部の分布する範囲にあたる。深度 410.00 m から 500.00 m では、他区間と比較して、明らかな開口性の割れ目本数が少なく、割れ目頻度が低いあるいは割れ目がない区間も認められた。

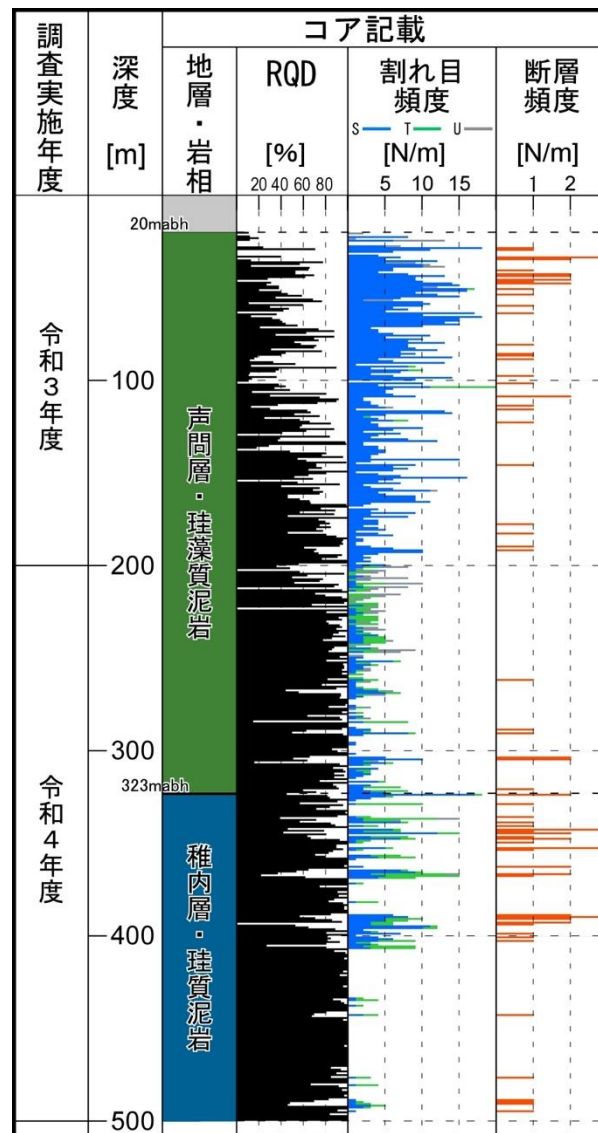


Fig. 38 RQD と割れ目頻度，断層頻度の深度分布 ⁴⁾

断層と考えられる構造は主に深度 291 m 付近，深度 304 m 付近，深度 323 m 付近，深度 348.05 m，深度 366.3 m 付近，深度 388.16～392.00 m，深度 393.58 m，深度 442.85 m，深度 476.55 m，深度 490.55～491.10 m の 10 箇所において認められた。この近傍で割れ目頻度が高くなる傾向が認められた。これらの断層と考えられる構造の観察結果を以下に示す。

・深度 291 m 付近 (Fig. 39, 40)

岩芯形状を保たない破碎された性状が認められた。岩芯には微細なヘアクラックが多く発達する。シャープな割れ目は少なく、波状の割れ目が主体である。本区間に明瞭な細粒粘土は確認されていない。



Fig. 39 深度 290.00～292.00 m の岩芯写真



Fig. 40 深度 290.50～291.00 m の岩芯写真

・深度 304 m 付近 (Fig. 41, 42)

深度 303.5～304.2 m には多くのヘアクラックが認められた。ヘアクラックは割れ目に沿った方向 (R1 面と判定) およびそれより 45°程度の角度を持った一定方向 (P 面と判定) に葉片状として発達している。このことから、本破碎は逆断層運動を示唆する構造と考えられた。一方、深度 304.2 m 以深では、ヘアクラックの発達は少なく、明らかな開口性の割れ目が多く確認された。本区間に明瞭な細粒粘土は確認されていない。



Fig. 41 深度 303.00～306.00 m の岩芯写真

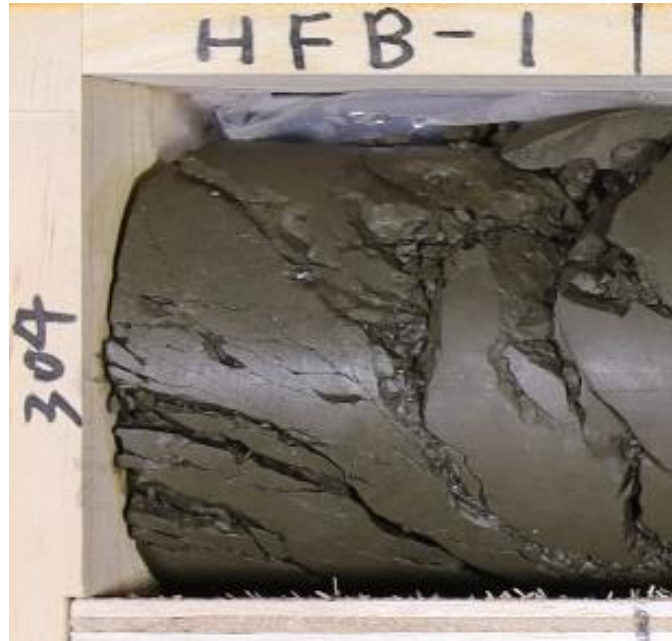


Fig. 42 深度 304.00～304.10 m の岩芯写真

・ 深度 323 m 付近 (Fig. 43)

深度 323.05～324.13 m では，ヘアクラックおよび開口性の割れ目からなる破碎が認められた．見かけ $\angle 20^\circ$ の概ね同方向の割れ目が発達しており，それに斜交するようにヘアクラックが発達する．

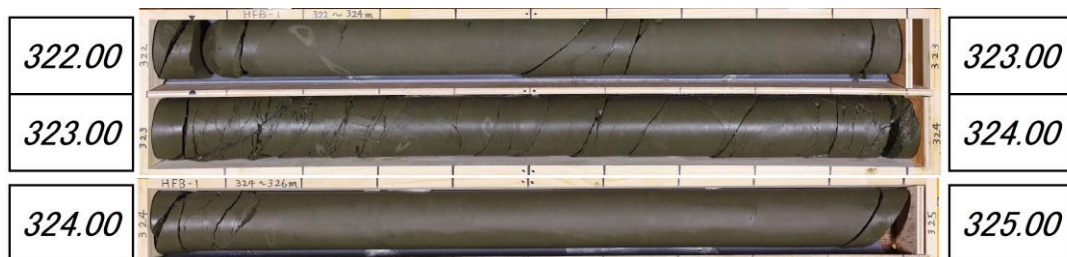


Fig. 43 深度 322.00～325.00 m の岩芯写真

・ 深度 348.05 m (Fig. 44)

本破碎は，粘土を含んだ断層と考えられる．せん断面の方向は周囲の割れ目の姿勢と概ね平行であり，せん断面に沿って厚さ 10 mm 程の軟質な粘土が認められた．



Fig. 44 深度 348.05 m の岩芯写真

・深度 366.3 m 付近 (Fig. 45)

深度 365.10～369.10 m にかけて明瞭な割れ目の集中が認められた。そのうち深度 366.28～366.32 m に厚さ 5 cm の軟質な粘土が認められた。この粘土帯は緑灰色を示す凝灰質な物質で構成されており，“tsz”に分類される地層が褶曲する際の火山灰層がすべり面になって形成された層面断層と考えられた。



Fig. 45 深度 365.00～369.00 m の岩芯写真

・深度 388.16～392.00 m (Fig. 46)

深度 388.16～392.00 m では、見かけ $\angle 45^\circ$ 以上の中～高角の明瞭な開口性割れ目の集中が認められた。深度 388.00～391.00 m にかけて、掘削方向に平行の高角割れ目の痕跡が確認された。ただし、その割れ目の連続性はやや不明瞭であり、各割れ目の一定の方向のみ（岩芯写真での上側）の岩芯が削り取られているような形状にも見えることから、ボーリング掘削に伴う破砕である可能性もあることに留意が必要である。本区間では開口性の割れ目に沿ってわずかに粘土が認められた。

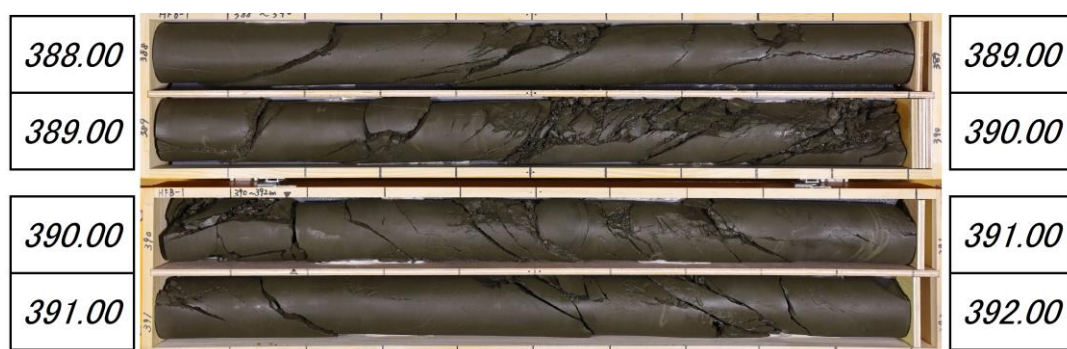


Fig. 46 深度 388.00～392.00 m の岩芯写真

・深度 393.58 m (Fig. 47, 48)

深度 393.42～393.67 m には、挟在される白色鉱物脈が発達した珪質な細粒砂岩～泥岩の近傍に割れ目が認められた。主せん断面はやや不明瞭であるがシャープな割れ目およびせん断面が存在する深度 393.68 m と考えられる。本深度は珪質泥岩がシート状あるいはレンズ状に破砕された構造を持つ。運動方向は不明瞭であるが、せん断面直下（下盤側）のレンズ状構造が岩芯写真から見て左上に発達した葉片状であることから、本構造を P 面とし、逆断層の運動センスと判定した。



Fig. 47 深度 393.00～395.00 m の岩芯写真



Fig. 48 深度 393.60～393.70 m の岩芯写真

・ 深度 442.85 m (Fig. 49)

深度 442.85 m ではシャープなせん断面が認められ、せん断面に沿って角礫状の細片および粘土が確認された。せん断面は見かけ $\angle 60^\circ$ の高角割れ目であり、珪質泥岩内で確認される $\angle 30^\circ$ のラミナ状構造から判定した層理面を切断する構造であった。粘土はシャープなせん断面に沿って連続的に確認され、その下位（深部側）に角礫状の細片が付着した性状であり、粘土を含んだ断層と考えられる。せん断面の方向は周囲の割れ目の姿勢とほとんど平行であり、せん断面に沿って厚さ 10 mm 程の軟質な粘土が認められた。



Fig. 49 深度 442.85 m の岩芯写真

・ 深度 476.55 m (Fig. 50, 51)

本破碎は粘土を含んだ断層と考えられるが、主せん断面の判定が困難であった。深度 476.55 m にやや開口性が認められる割れ目が存在し、その 2 cm 下部に褐色の粘土主体で構成される厚さ数 mm の薄層が認められた。複合面構造は後者により発達しており、粘土層直下にはレンズ～葉片状に細礫化した珪質泥岩礫が存在した。岩芯写真から見て、深度 476.57 m の上側には右下側に伸びる葉片状構造が集中しており、これを P 面と判定し、逆断層の運動センスと判断した。



Fig. 50 深度 476.00～477.00 m の岩芯写真



Fig. 51 深度 476.50～476.60 m の岩芯写真

・ 深度 490.55～491.10 m (Fig. 52, 53)

本破碎は多量の粘土を含んだ断層と考えられる。破碎帯中央部には白色鉱物脈を含んだ珪質細粒砂岩～泥岩が包有され、その上下位に粘土で構成される軟質な脆弱部が認められた。せん断面の方向は周囲の割れ目の姿勢とほとんど平行であり、せん断面に沿って厚さ 10 mm 程の軟質な粘土が認められた。本珪質細粒砂岩～泥岩には明瞭な回転痕跡は認められないが、下面側には比較的シャープなせん断面が存在した。一方、上面側は上部の珪質泥岩とやや漸移的な関係を示しており、深度 490.68 m に 45° のややシャープな面構造（せん断面と考えられる）が存在していることから、深度 490.55～491.10 m の区間では複数のせん断面によって断層運動が生じていることが示唆された。珪質細粒砂岩～泥岩の下面側により多くの粘土が含まれ、粘土は軟質な性状を示した。深度 491.10 m には、深度 490.88 m のせん断面に平行な粘土と硬質部の物質境界が認められた。

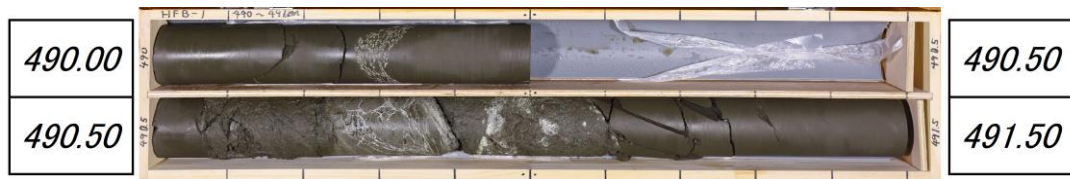


Fig. 52 深度 490.00～491.50 m の岩芯写真



Fig. 53 深度 490.60～491.10 m の岩芯写真

3.2 物理検層

物理検層の作業実績一覧を Table 22 と Table 23 に示す。物理検層の結果として Fig. 54 と Fig. 55 に物理検層総合柱状図を示す。測定・解析データ一式を付録 A4 に付す。以下に、各検層の結果について述べる。

Table 22 物理検層の作業実績一覧（深度 0～200 m）

測定種目	測定深度 (m)	測定年月日	測定時間	測定速度 (m/min)	測定方向	備考
温度 (S. T. = 1:13)	0.0 ～ 200.0 ^{※1}	2021.12.28	18:04 ～ 18:25	9.5	降下	温度 0.0～199.9 m 流体電気伝導度 7.7～199.8 m
比抵抗 (インダクション)	4.4 ～ 200.1 ^{※1}		19:20 ～ 19:51	6.3	巻揚	比抵抗(DEEP) 20.0～194.0 m 自然電位 20.0～196.7 m
孔径	15.0 ～ 200.0 ^{※1}		21:48 ～ 22:05	10.9	巻揚	孔径 14.8～198.7 m
BHTV	11.5 ～ 200.0 ^{※1} ^{※2}	2021.12.29	3:40 ～ 5:06	2.2	巻揚	孔壁画像 13.0～199.3 m ※ BHTV検層実施前に、孔壁画像品質の確保のため、清水置換を実施。
電磁式 フローメータ (静止時)	11.5 ～ 197.0 ^{※2}		7:09 ～ 7:21	15.5	降下	
	11.5 ～ 197.0 ^{※2}		7:36 ～ 7:43	26.5	降下	
電磁式 フローメータ (揚水量: 9.5L/min)	26.5 ～ 197.0 ^{※2}		12:59 ～ 13:10	15.5	降下	測定中、孔内水内の固形粒子等によるポンプ目詰まりが生じたため、揚水停止。測定データの品質に問題があるため、不採用。
	26.5 ～ 197.0 ^{※2}		13:27 ～ 13:34	24.4	降下	
	26.5 ～ 139.1 ^{※2}		13:49 ～ 13:56	15.0	降下	測定中、孔内水内の固形粒子等によるポンプ目詰まりが生じたため、揚水停止。測定データの品質に問題があるため、不採用。
	26.5 ～ 197.0 ^{※2}		14:01 ～ 14:13	14.2	降下	
ビルドアップ試験	16.0		15:30 ～ 翌日 9:33	0.0	停留	
孔内状況 : ビット径 PQ @ 200.00 m 孔内水 : ベントナイト ケーシング 12B @ 20.00 m 泥水比抵抗 8.04 Ω・m@10.9℃ 6B @ 19.50 m 比重 1.06 粘速 46 sec						

※1 ツールボトム深度基準

※2 センサー深度基準

Table 23 物理検層の作業実績一覧（深度 200～500 m）

測 定 種 目	測定深度 (m)	測定年月日	測 定 時 間	測定速度 (m/min)	測定方向	備 考
温 度 (S.T.= 19:52)	0.0 ～ 511.6 ^{※1}	2022.09.21	8:52 ～ 9:45	9.7	降下	温度 0.0 ～511.5 m
孔径	200.0 ～ 511.8 ^{※1}		11:45 ～ 12:25	7.8	巻揚	孔径 200.0 ～501.0 m
比抵抗 (インダクション)	200.0 ～ 511.8 ^{※1}		14:49 ～ 15:19	10.4	巻揚	比抵抗(DEEP) 200.0 ～505.9 m 自然電位 200.0 ～508.6 m
BHTV	200.0 ～ 508.7 ^{※1}	2022.09.22	9:14 ～ 11:40	2.1	巻揚	孔壁画像 200.0 ～508.7 m
電磁式フローメータ (静止時)	190.0 ～ 508.0 ^{※2}		15:18 ～ 15:31	24.5	降下	
	190.0 ～ 508.0 ^{※2}		16:09 ～ 16:18	35.3	降下	測定データの品質に問題があるため不採用。
電磁式フローメータ (揚水量：9.5L/min)	190.0 ～ 508.0 ^{※2}		17:31 ～ 17:45	22.7	降下	揚水量：30.4 L/min
	190.0 ～ 508.0 ^{※2}		18:05 ～ 18:15	31.8	降下	揚水量：4.6 L/min
	400.0 ～ 508.0 ^{※2}		18:20 ～ 18:24	27.0	降下	揚水量：4.6 L/min 測定データの品質に問題があるため不採用。
	190.0 ～ 508.0 ^{※2}		18:55 ～ 19:05	31.8	降下	揚水量：1.9 L/min
	190.0 ～ 508.0 ^{※2}		19:50 ～ 20:00	31.8	降下	揚水量：1.9～3.0 L/min（揚水量安定せず）
ビルドアップ試験	37.0 ^{※2}	2022.09.22	21:45 ^{翌日} ～ 13:45	0.0	停留	
孔内状況：ビット径 PQ @ 511.40 m 孔内水：ベントナイト ケーシング 12B @ 20.00 m 泥水比抵抗 2.76Ω・m@18.4℃ 6" @ 200.00 m 比重 1.05 粘速 30～35 sec						

※1 ツールボトム深度基準

※2 センサー深度基準

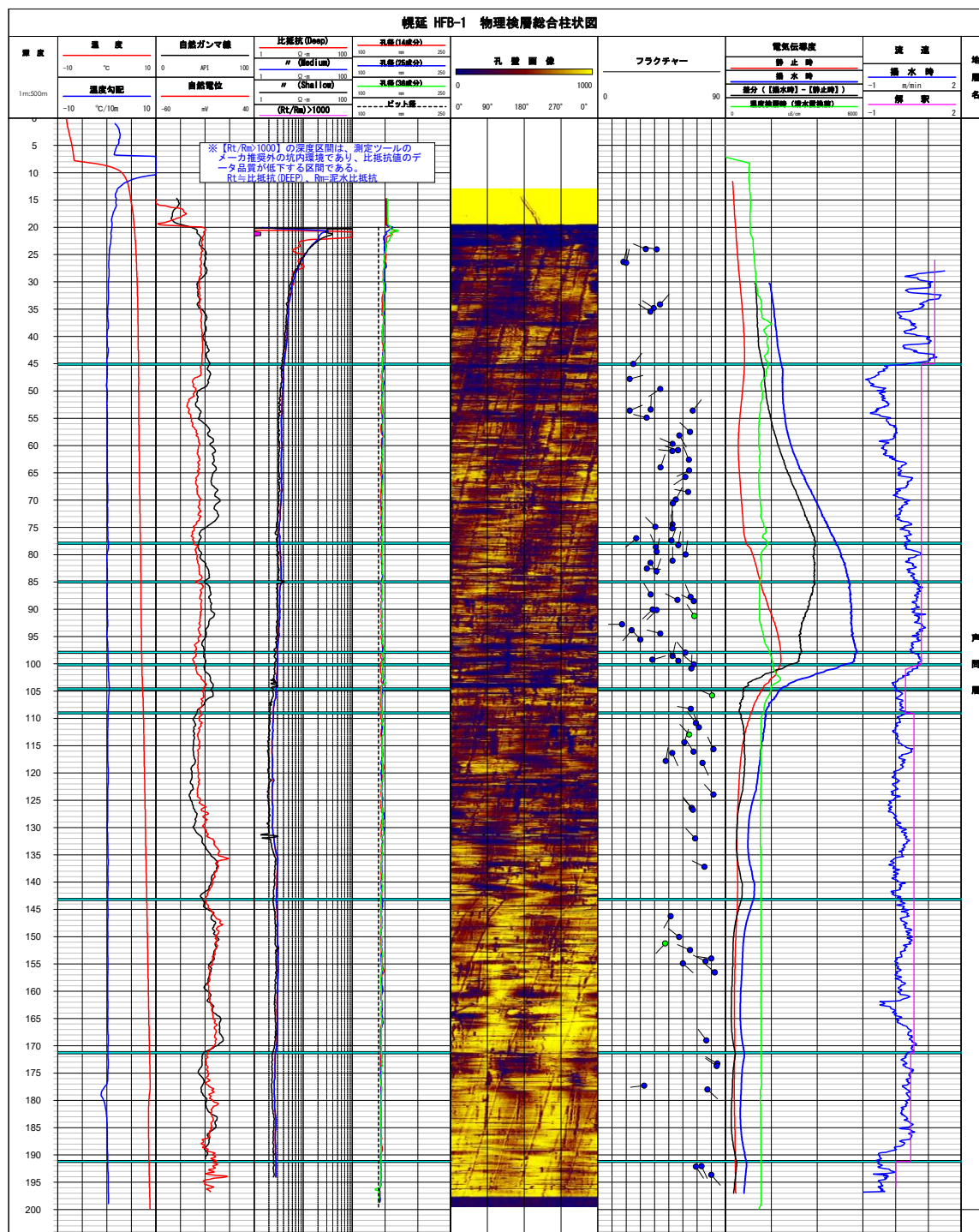


Fig. 54 物理検層柱状図 (深度 0～200 m)

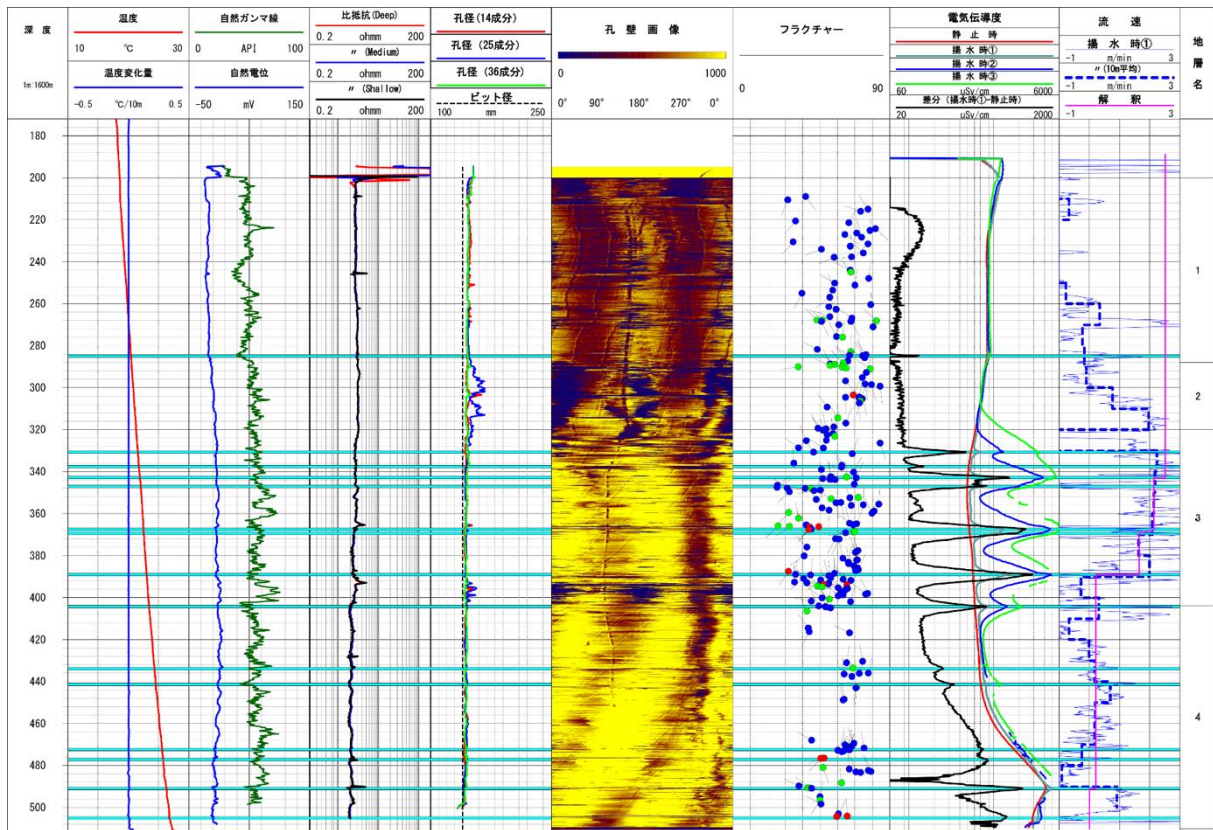


Fig. 55 物理検層柱状図（深度 200～500 m）

3.2.1 温度検層

深度 200 m までの掘削終了後のポンプ循環停止後から 2 時間 49 分経過した後に、温度検層を開始した。深度 0～200 m の区間における最高温度は、深度 177.5 m と孔底付近の深度 199.3 m における 8.8℃であった。温度勾配からみたアノマリー点は深度 100 m 付近と深度 178 m 付近に見られ、前者では同時に測定した孔内水電気伝導度にもアノマリーが、後者では関連性は不明ながら BHTV 検層により抽出したフラクチャーが確認された。

深度 200～500 m における温度検層は、深度 500 m までの掘削終了後のポンプ循環停止後から 19 時間 52 分経過した後に実施した。この時の最高温度は孔底付近の深度 511.5 m における 28.0℃であった。全体的に一様な深度増加に伴う温度の増加傾向が見られた。

3.2.2 孔径検層

温度検層完了後に孔径検層を実施した。深度 0～200 m における孔径検層では、深度 20 m のガイド管直下で約 170 mm に孔径が拡大しているが、これ以外ではおおそ一定の孔径を示した。深度 200～500 m における孔径検層では、深度 290～310 m 付近で最大 165 mm 程度にまで 1 方向に拡大する傾向が見られた。また、深度 395～401 m 付近において最大 160 mm 程度にまで孔径が拡大していることが確認された。これら以外の領域では概ね孔径は安定していた。

3.2.3 比抵抗（インダクション）・自然電位検層

孔径検層完了後に比抵抗（インダクション）・自然電位検層を実施した。深度 0～200 m における検層では、深度 20 m のガイド管直下において高い比抵抗（DEEP）が認められたが、深度の増加とともに $10 \Omega \cdot \text{m}$ 以下になった。深度 20 m のガイド管直下のプラス方向の変化は、孔径拡大

あるいはガイド管の影響であると考えられる。深度 200～500 m における検層では、比抵抗曲線（DEEP）は全測定範囲を通して $10 \Omega \cdot \text{m}$ 以下を示した。深度 209.3 m, 深度 246.3 m, 深度 365.9 m 付近, 深度 393.6 m 付近, 深度 428.6 m, 深度 478.1 m, 深度 490.5 m などスパイク状の変化が見られた。

3.2.4 孔壁画像検層（BHTV 検層）

(1) 深度 0～200 m における結果

BHTV 検層の結果、88 本の不連続面（ランク 1：0 本、ランク 2：4 本、ランク 3：84 本、地層傾斜系：0 本）が抽出された。抽出結果の読取表を付録 A4 に付す。今回の測定では明瞭な堆積構造や単層などの地層傾斜系と判別される箇所は抽出されなかったが、既存の調査から HFB-1 孔における地層の走向・傾斜が北西-南東走向で 40° 程度の南西傾斜であることが分かっている。今回の測定で抽出したフラクチャーの中で地層の傾斜方位・傾斜角と調和的なものは、地層傾斜系の構造である可能性もある。

フラクチャー解析の結果として Fig. 56 に読み取った不連続面から作成したローズダイアグラムおよびシュミットネット投影図を、Fig. 57 にアロープロットおよび不連続面の傾斜方位分布を示す。測定区間全体の不連続面（フラクチャー）の傾斜方位については、北北東方向と北北西～西北西方向に傾斜しているフラクチャーが優勢であった。傾斜角度については、北北東傾斜のフラクチャーは傾斜角度 $45^\circ \sim 60^\circ$ で多く分布しているのに対し、北北西～西北西傾斜の不連続面は傾斜角度 $55^\circ \sim 80^\circ$ で広く分布している。

抽出したフラクチャーは、フラクチャーの傾斜方位および傾斜角度の傾向から、深度 20.0 m～104.0 m のゾーン 1 と、深度 104.0 m～200.0 m のゾーン 2 に分類することができる（Table 24）。傾斜方位については、ゾーン 1 は北北東と北北西～西北西傾斜が優勢であるのに対し、ゾーン 2 は北西と南東方向に傾斜している不連続面が優勢である。コンターマップの集中点について比較すると、ゾーン 1 では北北東と北西方向で高傾斜（傾斜角度 45° 程度）に集中しているのに対し、ゾーン 2 では北西方向で高傾斜（傾斜角度 70° 以上）に集中している。

インデュースド・フラクチャーとブレイクアウトの解析結果を Fig. 58 に示す。本測定では、ブレイクアウトのみ検出された。解析結果の読取表を付録 A4 に付す。ブレイクアウトは北西—南東方向を中心に分布しており、今回の測定データのみからは HFB-1 孔周辺の応力場は北東—南西方向であると解釈された。

定方位孔径の結果として、BHTV 検層による N-S 成分、NE-SW 成分、E-W 成分および NW-SE 成分の孔径値を Fig. 59 に孔径検層結果と合わせて示す。BHTV 検層ツールの測定結果から算出された孔径を比較すると、ガイド管直下の孔径拡大箇所を除いた深度区間では同じ傾向が得られた。BHTV 検層ツールによる測定結果は、孔径崩壊部（開口部）で誤差が大きくなる傾向がある。これは孔壁が滑らかではないため、音波エネルギーが孔壁で散乱・減衰する箇所が多いためである。また、深度が深くなるにつれ、孔径が減少傾向となるドリフトが見られた。孔内は深度が深くなるにつれ温度が上昇することにより超音波速度が変わるが、BHTV 測定時の孔内水温度が不明なため、BHTV 検層結果の解析では超音波速度を一定の値（ $1,452 \text{ m s}^{-1}$ ：温度検層時の深度 20 m の温度測定値）として孔径値を算出した影響が考えられる。

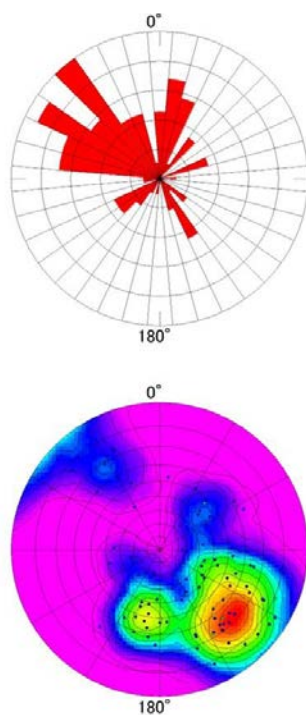


Fig. 56 ローズダイアグラムおよびシュミットネット投影図（深度 0～200 m）

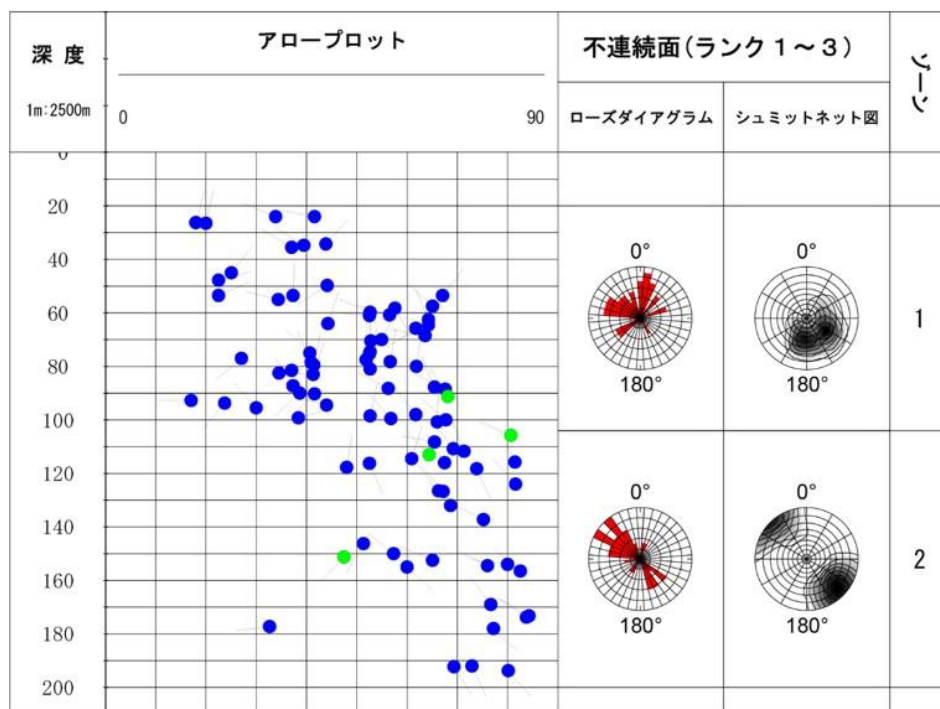


Fig. 57 アロープロットおよび不連続面の傾斜方位分布（深度 0～200 m）

Table 24 各ゾーンのフラクチャーの傾斜方位と傾斜の分布の特徴（深度 0～200 m）

ゾーン	深度（m）	検出数		集中点	傾斜方位の特徴
		実数	10m平均		
全体	20.0 ～ 200.0	88	29	335 / 85	北北東方向と南南東方向に傾斜している不連続面が卓越
1	20.0 ～ 104.0	56	6.7	7 / 45 302 / 48	北北東方向と南南東方向に傾斜している不連続面が卓越
2	104.0 ～ 200.0	32	3.3	313 / 80	北西方向と南東方向に傾斜している不連続面が卓越

注) フラクチャー集中点の数字は、それぞれ方位角と傾斜角を表わす。複数の集中点がある場合は、集中数が区間内の2番目までを記載。

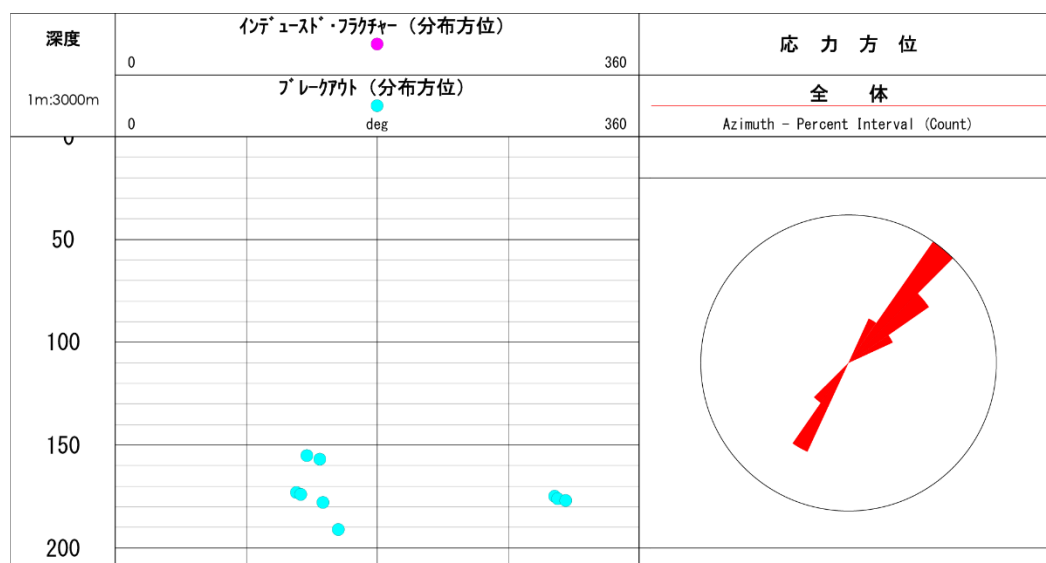


Fig. 58 インデュースド・フラクチャーとブレイクアウトの解析結果（深度 0～200 m）

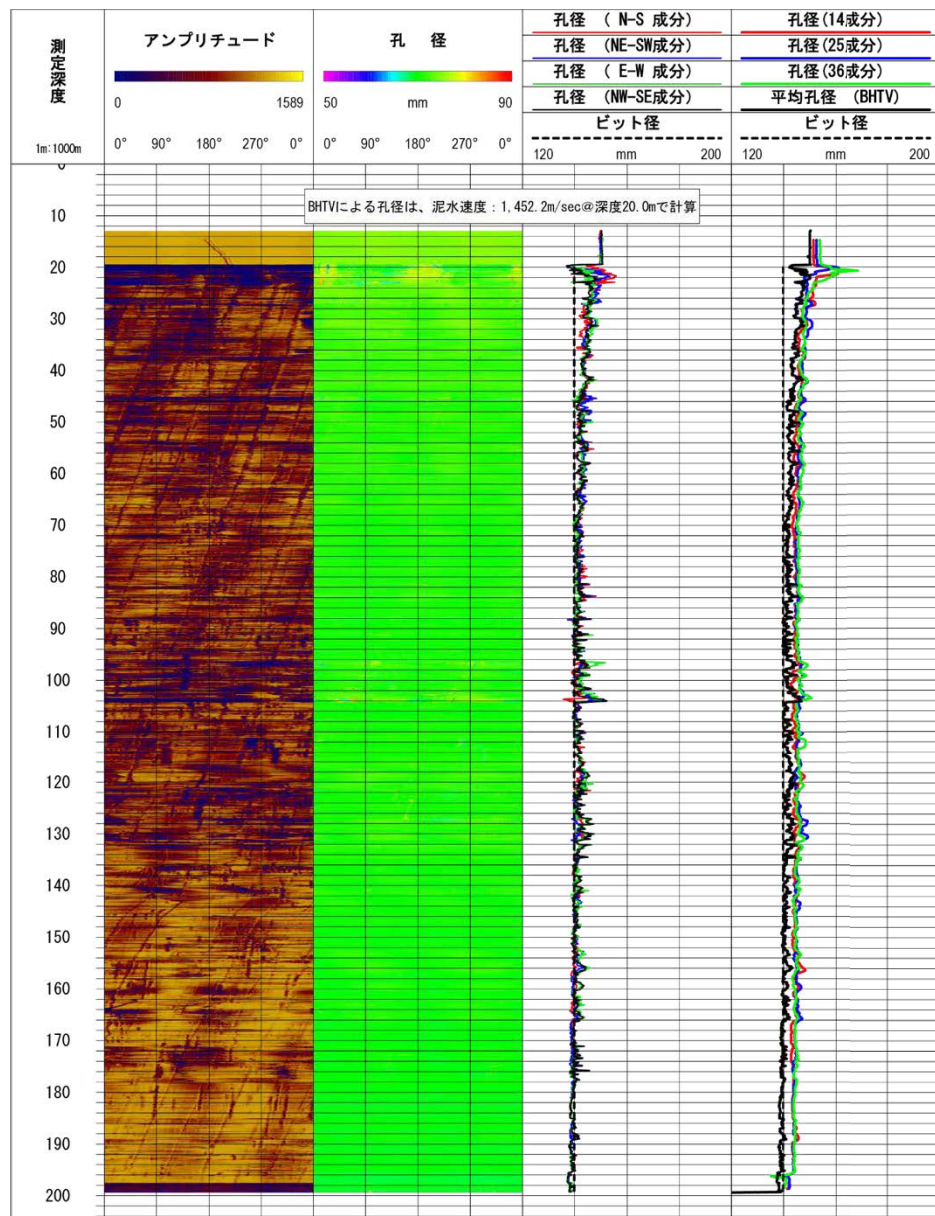


Fig. 59 定方位孔径比較図 (深度 0~200 m)

(2) 深度 200~500 m における結果

BHTV 検層の結果、231 本の不連続面（ランク 1：11 本，ランク 2：36 本，ランク 3：183 本，地層傾斜系：0 本）が認められた。抽出結果の読取表を付録 A4 に付す。明らかに堆積構造や単層などの地層傾斜系の不連続面は抽出されなかったが，地層の傾斜方位・傾斜角と調和的なものは，地層傾斜系の構造である可能性もある。

フラクチャー解析の結果として，Fig. 60 に読み取った不連続面から作成したローズダイアグラムおよびシュミットネット投影図を，Fig. 61 にアロープロットおよび不連続面の傾斜方位分布を示す。フラクチャー系の傾斜方位については，北西～北北東方向に傾斜しているフラクチャーが優勢であった。傾斜角度については 60°～80°に多くが分布している傾向となった。岩芯観察の結果に基づく割れ目頻度や割れ目の開口状態から，ゾーン 1（深度 200～288 m），ゾーン 2（深度 288～320 m），ゾーン 3（深度 320～404 m），ゾーン 4（深度 404～511 m）の四つに分けることができる（Table 25）。傾斜方位については，ゾーン 1 では北方向および北西傾斜が優勢であるのに

対し、ゾーン2では北北東と北西および南南東方向に傾斜している不連続面が優勢であった。ゾーン3およびゾーン4では北西および北方向に傾斜している不連続面が優勢であった。コンターマップの集中点は、いずれのゾーンにおいても傾斜角度 70°前後となる傾向が見られた。電磁式フローメータ検層により検出された水みちと BHTV 検層により抽出された不連続面の傾斜方位と傾斜角度の対応関係について Table 26 にまとめた。

インデュースド・フラクチャーとボアホール・ブレイクアウトの解析結果を Fig. 62 に示す。本測定では、ボアホール・ブレイクアウトのみ検出された。解析結果の読取表を付録 A4 に付す。本測定に基づくと、ボアホール・ブレイクアウトは東北東-西南西方向を中心に分布しているため、HFB-1 孔周辺の応力場は北北西-南南東方向と解釈された。

Figure 63 に BHTV 検層による N-S 成分、NE-SW 成分、E-W 成分、NW-SE 成分の孔径値を孔径検層の結果と合わせて示す。BHTV 検層による孔径と通常の孔径検層の結果を比較すると、ケーシング直下の孔径拡大箇所を除いた深度区間では、概ね同様の傾向が見られた。

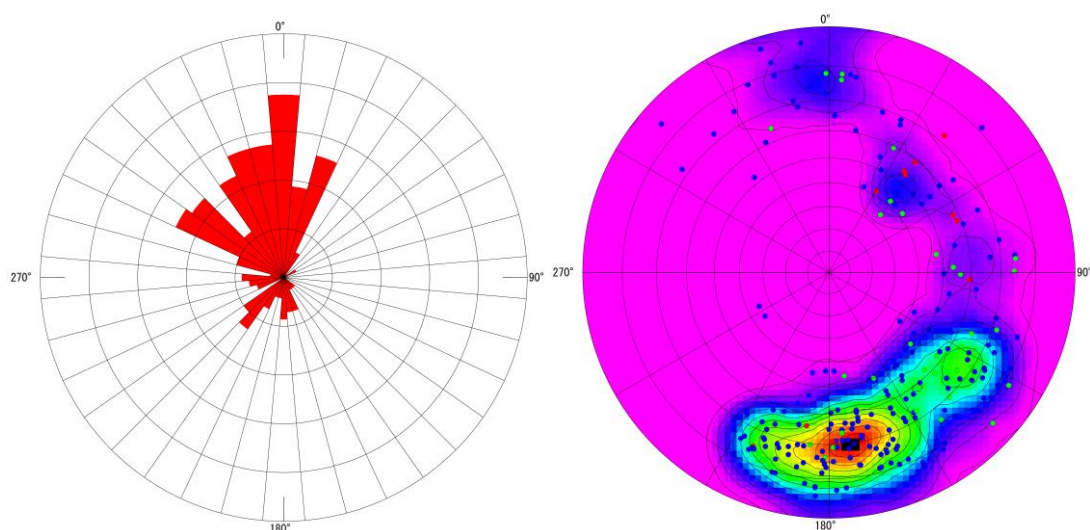


Fig. 60 ローズダイアグラムおよびシュミットネット投影図（深度 200～500 m）

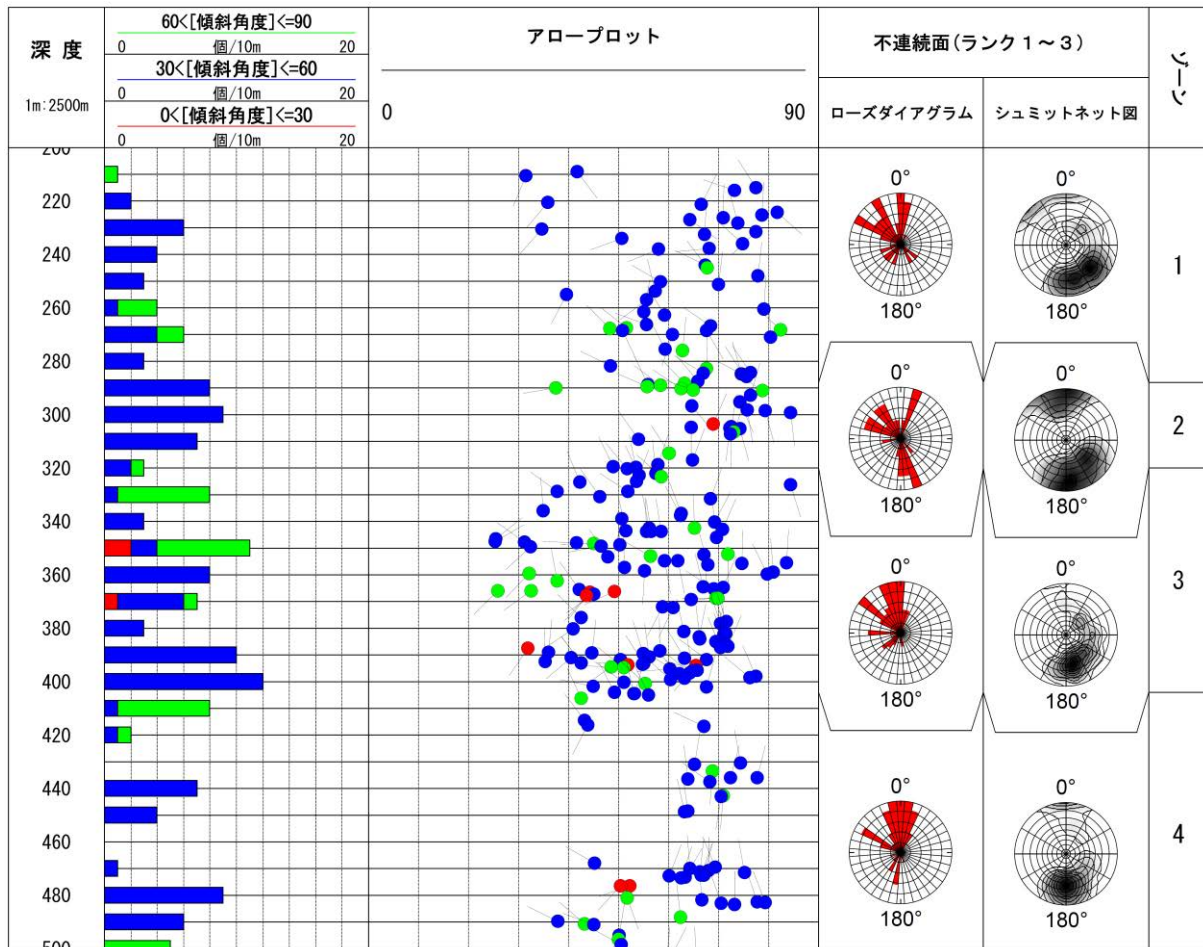


Fig. 61 アロープロットおよび不連続面の傾斜方位分布（深度 200～500 m）

Table 25 各ゾーンのフラクチャーの傾斜方位と傾斜の分布の特徴（深度 200～500 m）

ゾーン	深度（m）	検出数		集中点	傾斜方位の特徴
		実数	10m平均		
全体	200.0 ～ 510.0	231	14	352 / 70	北西～北北東方向に傾斜している不連続面が卓越
1	200.0 ～ 288.0	48	5.5	314 / 73 345 / 75	北方向および北西方向に傾斜している不連続面が卓越
2	288.0 ～ 320.0	27	8.4	353 / 81	北北東と北西方向および南南東方向に傾斜している不連続面が卓越
3	320.0 ～ 404.0	109	13.0	348 / 68	北西および北方向に傾斜する不連続面が卓越
4	404.0 ～ 510.0	47	4.4	2 / 71	北西および北方向に傾斜する不連続面が卓越

注) フラクチャー集中点の数字は、それぞれ方位角と傾斜角を表わす。複数の集中点がある場合は、集中数が区間内の2番目までを記載。

Table 26 電磁式フローメータ検層において抽出した傾斜方位と傾斜角度（深度 200～500 m）

水みち	代表深度 (m)	不連続面 (BHTV) との対比	他検層種目のアノマリー			
			SP	温度 (揚水時)	流速	電気伝導度
FP①	285.0	深度284～286m間、北西傾斜、70～80° 程度のランク3が数本	○	○	△	△
FP②	330.7	深度330.7m、北西傾斜、45° 程度、ランク3が1本	○	○	△	◎
FP③	337.6	深度337.8m、北西傾斜、60° 程度、ランク3が1本	△	△	△	○
FP④	343.0	深度342～344m間、北傾斜、50～70° 程度のランク2～3が数本	△	◎	○	◎
FP⑤	347.0	深度346～348m間、西と北東傾斜、20～45° 程度のランク2～3が数本	○	◎	△	◎
FP⑥	367.5	深度367.5m、南西傾斜、45° 程度、ランク1が1本	△	◎	◎	◎
FP⑦	369.5	深度368～369.5m間、西傾斜、70～80° 程度のランク2～3が3本	△	◎	◎	◎
FP⑧	389.1	深度389～390m間、北傾斜、35～60° 程度のランク3が3本	△	◎	◎	◎
FP⑨	404.3	深度404.4m、北傾斜、50° 程度、ランク3が2本	△	○	△	◎
FP⑩	433.9	深度433.6m、南傾斜、70° 程度、ランク2が1本	△	△	△	○
FP⑪	441.2	確認されず	△	○	△	◎
FP⑫	472.5	深度472.5m、北東傾斜、60～70° 程度、ランク3が3本	△	△	△	○
FP⑬	477.3	深度476.5m、南西傾斜、50° 程度、ランク1が2本	△	△	△	○
FP⑭	491.0	深度490.5～491.0m、北西傾斜、45° 程度、ランク2とランク3	○	◎	◎	◎
FP⑮	505.1	深度504.2m、北傾斜、60～70° 程度、ランク1が2本	△	○	△	◎

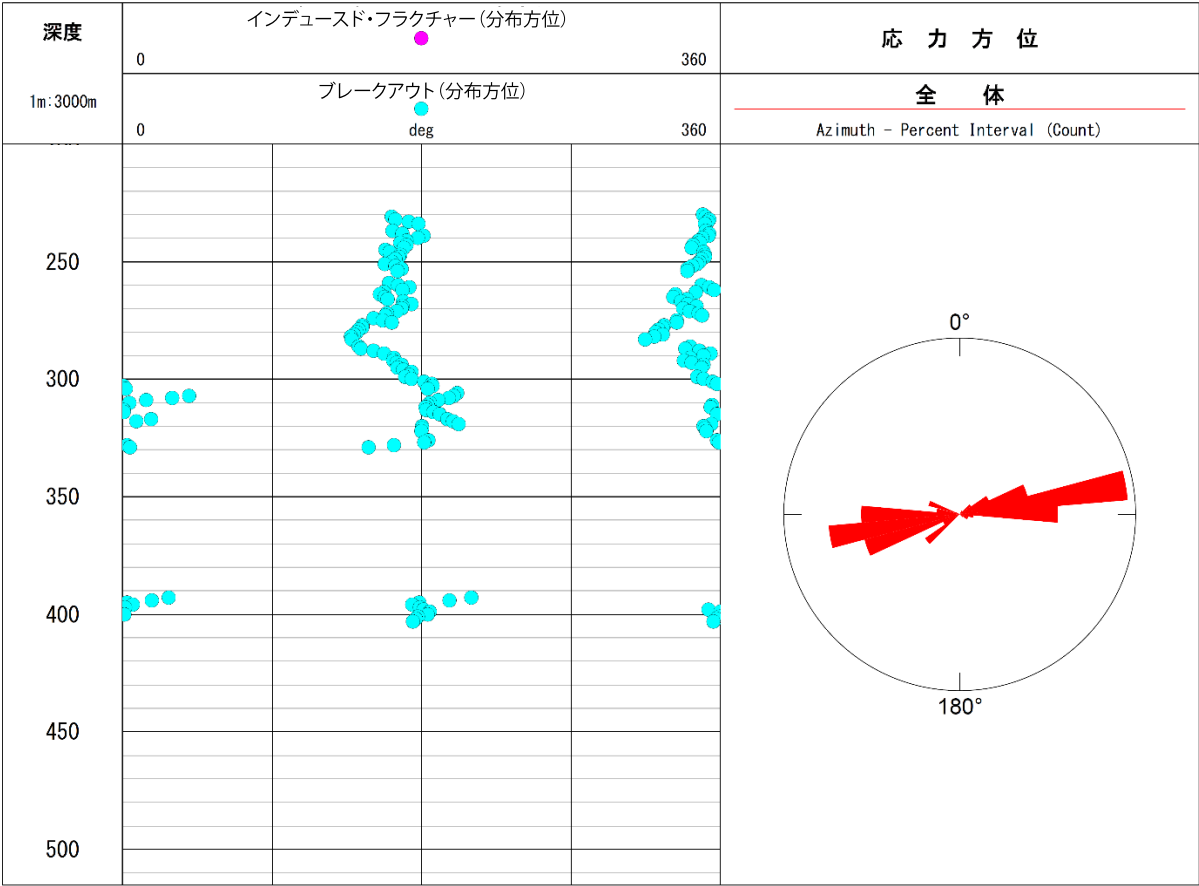


Fig. 62 インデューズド・フラクチャーとブレークアウトの解析結果 (深度 200～500 m)

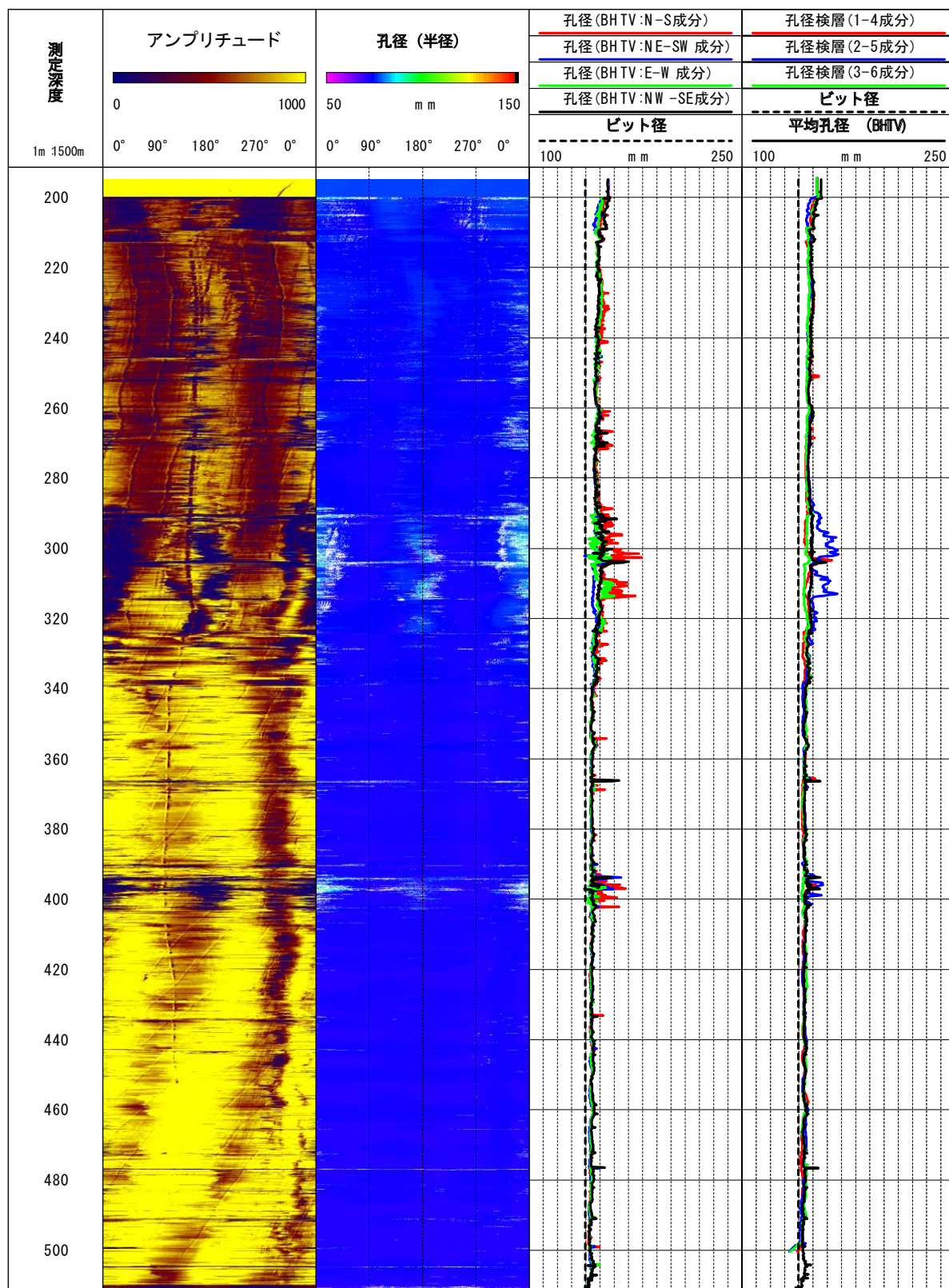


Fig. 63 定方位孔径比較図 (深度 200~500 m)

3.2.5 電磁式フローメータ検層およびビルドアップ試験

(1) 深度 0~200 m における結果

電磁式フローメータ検層の解析結果を Fig. 64 に示す。揚水量 9.5 L m^{-1} 時の電気伝導度曲線から、①深度 45.1 m (流入)、②深度 77.90 m (流入)、③深度 85.00 m (流入)、④深度 97.90 m (流入)、⑤深度 100.2 m (流入)、⑥深度 104.6 m (流出)、⑦深度 109.0 m (流出)、⑧深度 143.2 m (流入)、⑨深度 171.3 m (流入) および⑩深度 191.2 m (流入) の変化点が抽出された。流速の推定結果からは、①深度 45.1 m (流入)、⑤深度 100.2 m (流入)、⑦深度 109.0 m (流出)、⑨深度 171.3 m (流入) および⑩深度 191.2 m (流入) の流出入が確認でき、BHTV 検層結果からも⑨深度 171.3 m を除き相当深度におけるフラクチャーが確認された。図中の流入割合については、深度 25 m 付近の揚水量 9.5 L m^{-1} を 100%とした時の各水みちの流入割合である。

電磁式フローメータ検層後に、孔内に設置した圧力計を利用してビルドアップ試験を実施した。測定結果を Fig. 65 および Fig. 66 に、重ね合わせ法による解析図を Fig. 67 に示す。ビルドアップ試験の解析の結果、勾配値 m は $-17.364 \text{ kPa cycle}^{-1}$ 、初期圧力 p_i は 149.06 MPa 、透水量係数は $2.343 \times 10^{-9} \text{ m}^3 \text{ Pa}^{-1} \text{ s}^{-1}$ または $2.609 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (15°C 水の粘性係数と密度を用いて換算) と算出された。

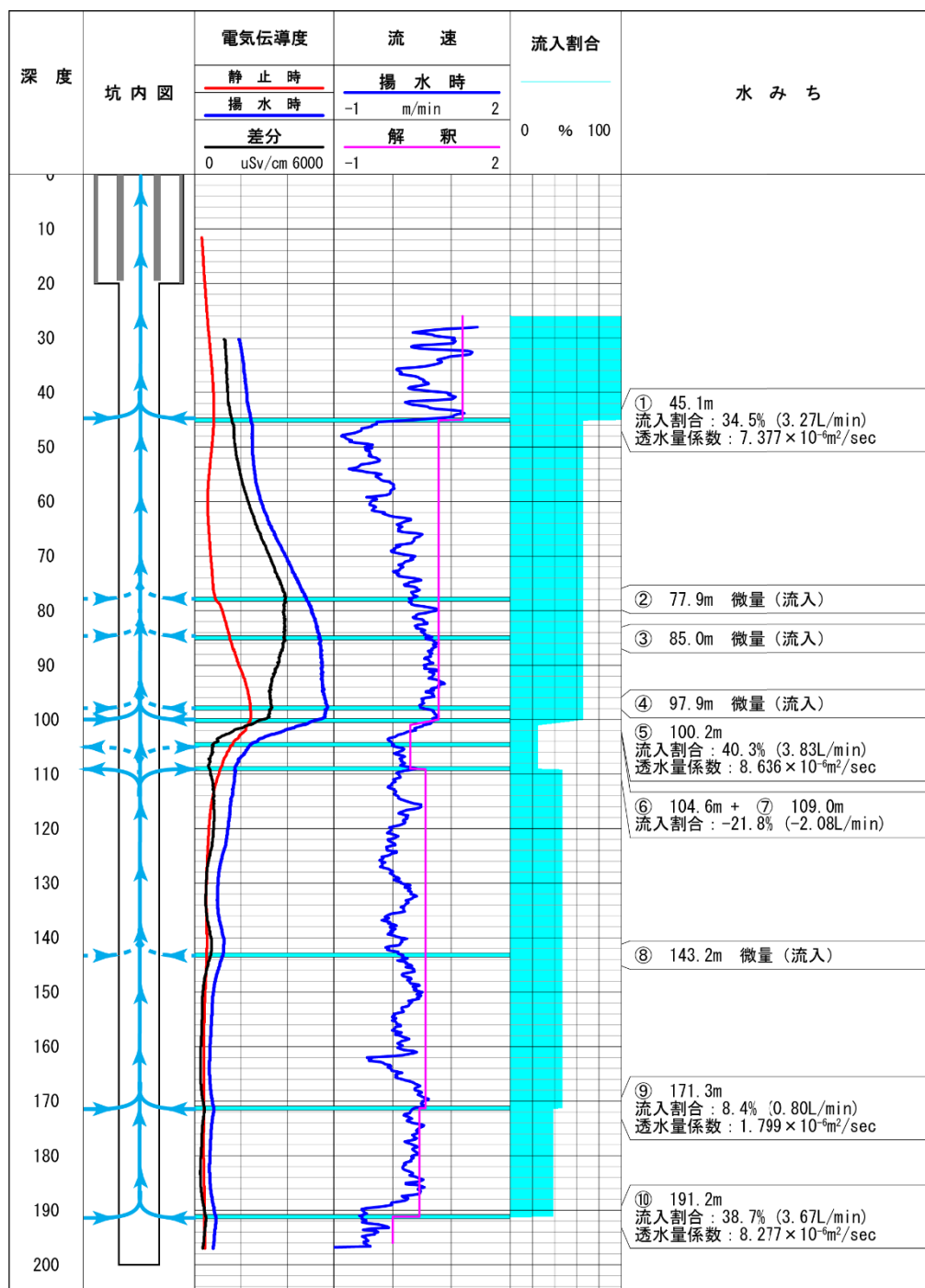


Fig. 64 電磁式フローメータ検層解析結果 (深度 0~200 m)

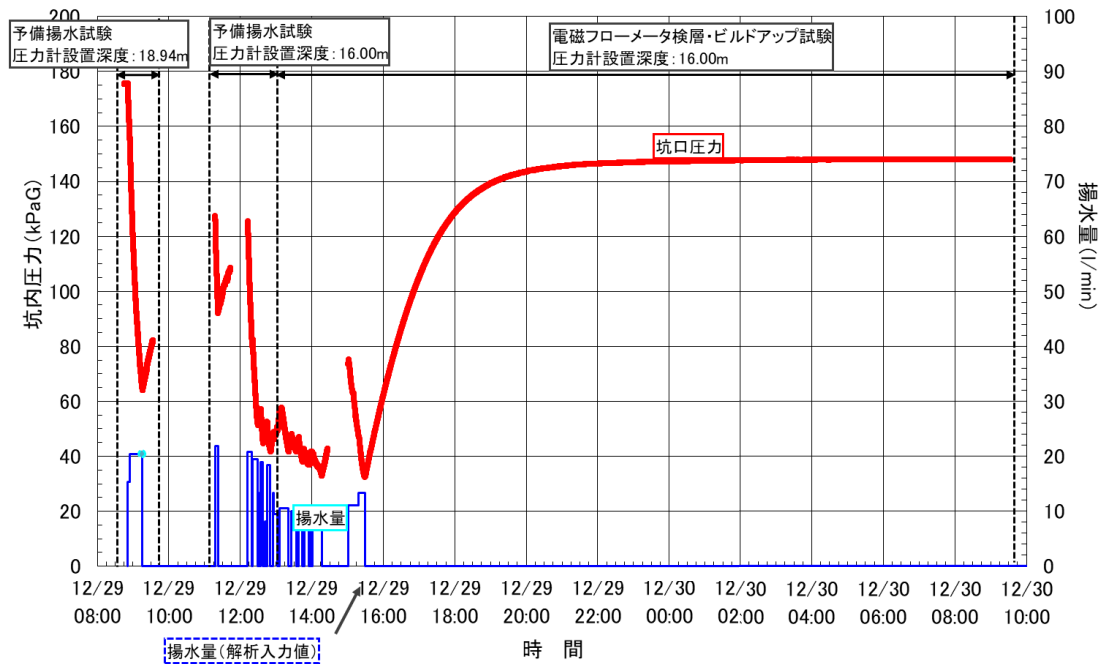


Fig. 65 ビルドアップ試験結果 (2021 年 12 月 29 日～30 日)

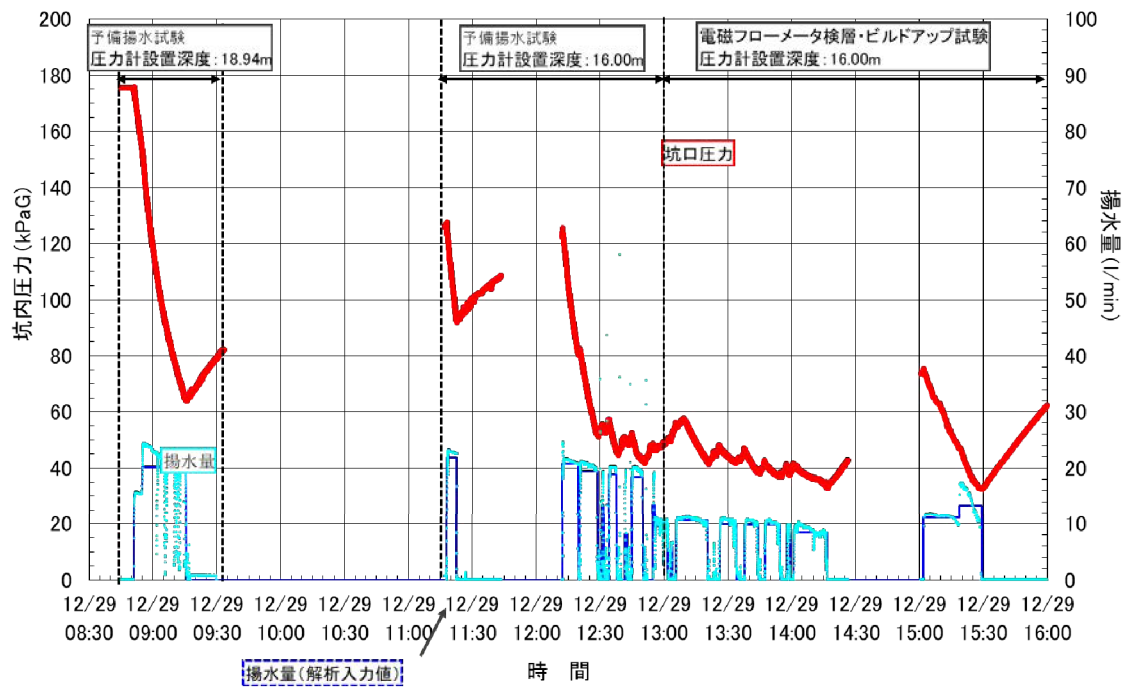


Fig. 66 ビルドアップ試験結果 (2021 年 12 月 29 日)

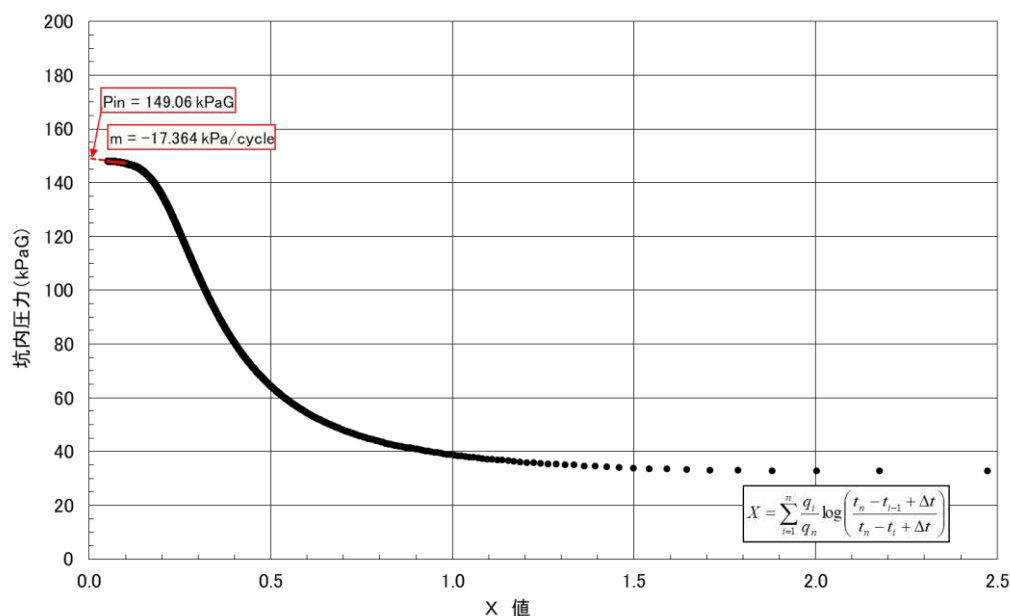


Fig. 67 ビルドアップ解析図（重ね合わせ法）（深度 0～200 m）

(2) 深度 200～500 m における結果

BHTV 検層完了後、2022 年 9 月 22 日に電磁式フローメータ検層を実施した。前述のように、通常は測定対象区間を異なる測定速度で複数回測定することにより孔内流体と測定ツールの相対速度を変化させて揚水時の見かけの流速を求める。しかしながら、揚水時の孔内水位を一定に維持するために揚水量を $30.4 \text{ L m}^{-1} \rightarrow 4.6 \text{ L m}^{-1} \rightarrow 1.9 \text{ L m}^{-1}$ と段階的に変化させて測定を行ったところ、いずれの揚水量の場合も測定途中に揚水量が減少し、各揚水量に対して一つの測定速度でしか測定ができなかった。そこで、見かけの流速が測定ツールのフローチューブ内を通過する孔内水の相対流速値に等しいと仮定し、最も揚水量が安定であった揚水量 30.4 L m^{-1} 時の流速を採用した。

測定結果および解析結果を Fig. 68 に示す。電気伝導度曲線と温度変化率曲線の変化点と併せて解釈することにより、図に示される 15 箇所地層水が孔内に流入していると推定された。また、揚水時の電気伝導度曲線には、時間の経過にしたがい（揚水時①→揚水時②→揚水時③）、欠損区間が多く発生しており、これは気泡の存在に因るものであると考えられる。このため、流入割合の解析に際しては、各水みちの流入割合を反映した明瞭な階段状の流速変化を示す箇所は限定的であった。有意な流入割合として計算できた箇所は、④深度 343.0 m、⑥深度 367.5 m、⑦深度 369.5 m、⑧深度 389.1 m、⑭深度 491.0 m の 5 箇所のみであった。BHTV 検層結果からは、⑪深度 441.2 m を除いて、水みちの近傍にフラクチャーが確認されているが、その関連性は必ずしも明確ではない。深度 195 m で測定された流量 30.4 L m^{-1} を 100% とした時の各水みちが存在する深度からの流入割合を Fig. 68 に合わせて示す。

電磁式フローメータ検層の終了後に、孔内に設置した圧力計を利用してビルドアップ試験を実施した。ビルドアップ試験結果を Fig. 69 に、重ね合わせ法による解析図を Fig. 70 に示す。ビルドアップ試験の解析の結果、勾配値 m は $-67.091 \text{ kPa cycle}^{-1}$ 、初期圧力 p_i は 149.06 MPaG （G：ゲージ圧）、透水量係数は $1.577 \times 10^{-10} \text{ m}^3 \text{ Pa}^{-1} \text{ s}^{-1}$ または $1.756 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ （15℃水の粘性係数と密度を用いて換算）と算出された。

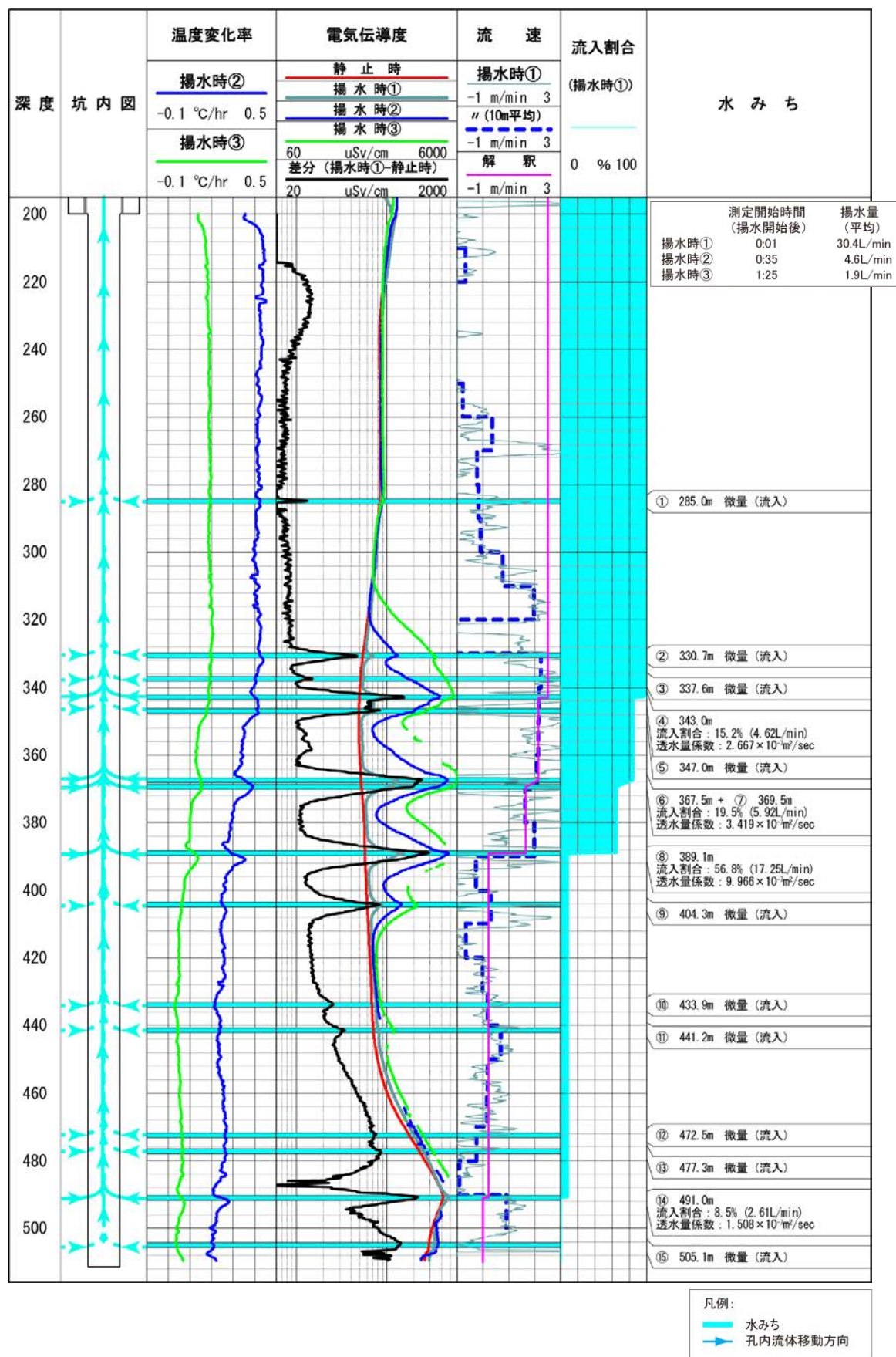


Fig. 68 電磁式フローメータ検層解析結果 (深度 200~500 m)

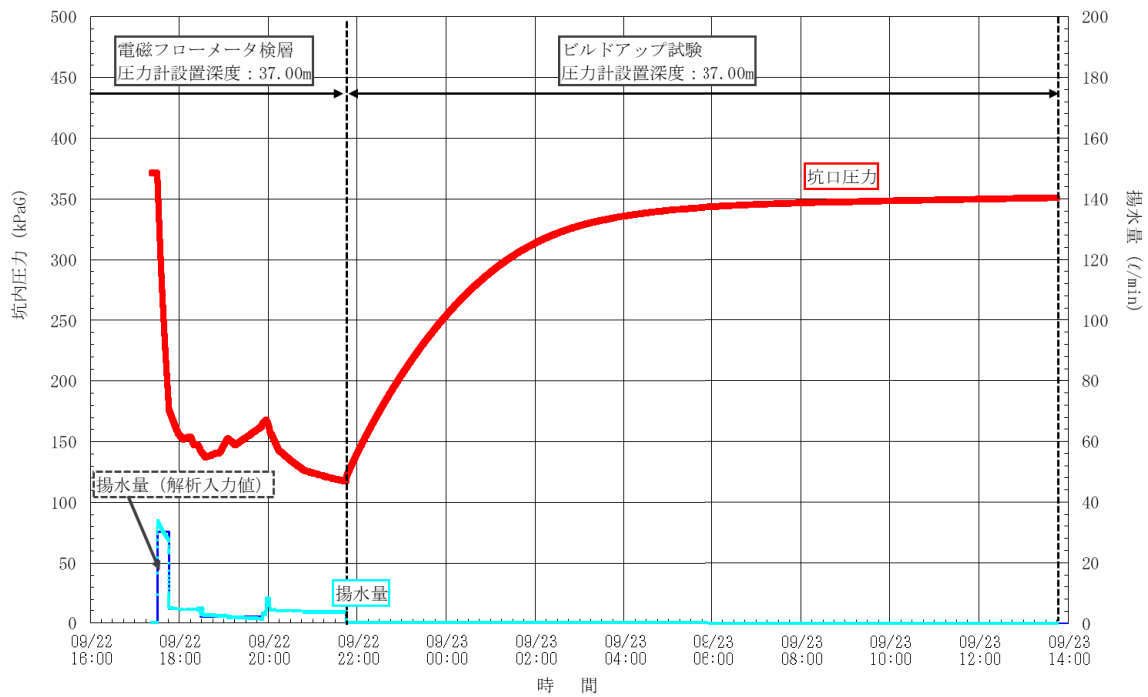


Fig. 69 ビルドアップ試験結果 (2022 年 9 月 22 日～23 日)

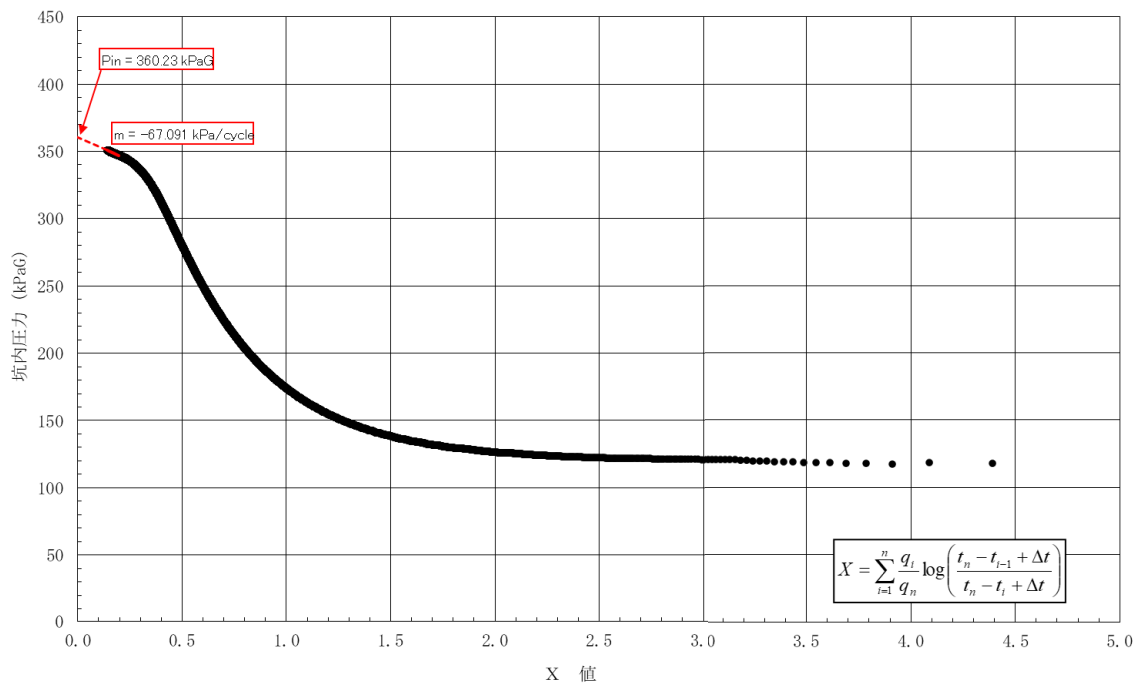


Fig. 70 ビルドアップ解析結果 (重ね合わせ法) (深度 200～500 m)

3.2.6 物理検層結果のまとめ

Figure 71 に深度 20 m から深度 500 m までの物理検層の結果のうち、温度検層、電磁式フローメータ検層、比抵抗検層の結果を示す。令和 3 年度は冬期、令和 4 年度は秋期の実施であったため、温度に関しては深度 200 m において大きな差が生じているが、それ以外の項目は概ね年度間

の差は小さい。

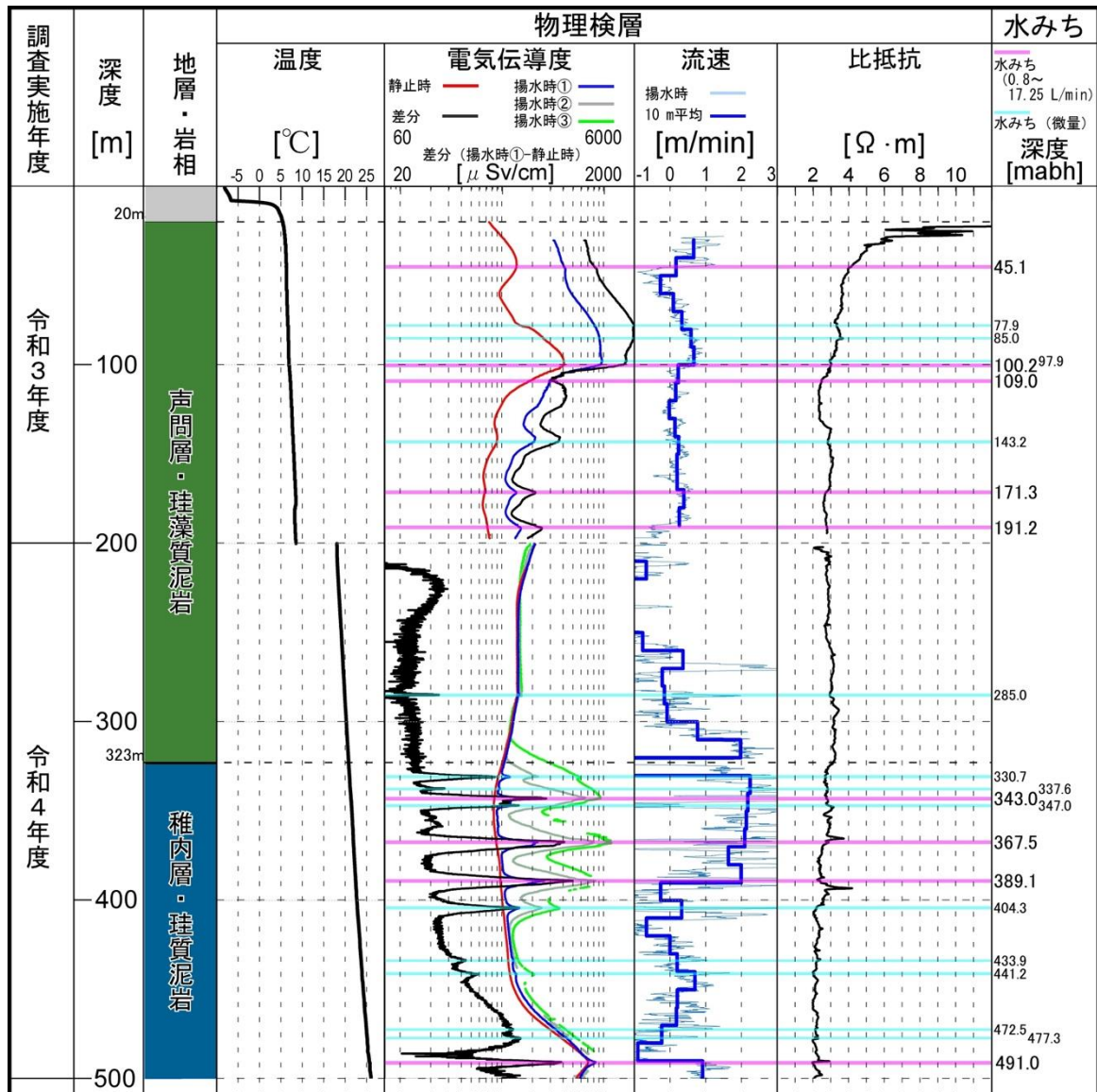


Fig. 71 物理検層結果のまとめ⁴⁾

3.3 試料の採取と化学分析

3.3.1 鉱物組成分析結果

XRD 分析の結果を Table 27～Table 30 に示す。非晶質シリカについては深度 322 m までオパール A と判定され、深度 330 m 以深ではオパール CT と判定された。各試料の分析結果のチャート一式を付録 A3 に付す。

Table 27 XRD 分析による鉱物組成一覧

					Silicate Minerals										Carbonate Minerals	Sulphate Minerals
					Clay Minerals			Silica			Other		Siderite	Pyrite		
					Smectite	Illite	Chlorite	Quartz	Opal A	Opal CT	Plagioclase	K-Feldspar				
図中略号					Sm	I	Chl	Q	Op	Op	Pl	Kf	Sd	Py		
読み取りピーク位置 (° (2θ, CuKα))					6.0-7.0	8.8	12.5	26.6	21.8	21.8	28.0	27.5	32.1	33.0		
No.	地層	試料区間 (m)	岩相	各処理	石英指数 (石英標準試料の2θ=26.6° における強度を100とする)											
230m箇所	声間層	230.10 ~ 230.20	珪藻質泥岩	不定	EG HCl	0.15	0.17	0.15	8.00	0.16	—	1.75	0.17	0.40	0.52	
250m箇所		249.90 ~ 250.00	珪藻質泥岩	不定	EG HCl	0.11	0.10	0.08	7.61	0.23	—	0.90	0.10	0.19	0.47	
270m箇所		269.90 ~ 270.00	珪藻質泥岩	不定	EG HCl	0.11	0.19	0.12	8.61	0.10	—	1.21	0.25	0.32	0.51	
290m箇所		290.00 ~ 290.10	珪藻質泥岩	不定	EG HCl	0.17	0.22	0.11	9.31	0.17	—	1.11	0.29	0.20	0.57	
310m箇所		309.60 ~ 309.70	珪藻質泥岩	不定	EG HCl	0.14	0.18	0.14	9.96	0.12	—	1.40	0.29	0.31	0.41	
316m箇所		316.00 ~ 316.05	珪藻質泥岩	不定	EG HCl	0.14	0.38	0.23	9.33	0.17	—	1.17	0.24	0.41	0.49	
322m箇所		321.95 ~ 322.00	珪藻質泥岩	不定	EG HCl	—	0.39	0.19	11.11	0.10	—	2.69	0.40	0.51	0.59	
330m箇所	稚内層	329.90 ~ 330.00	珪質泥岩	不定	EG HCl	0.11	0.28	0.07	9.81	—	1.14	1.57	0.27	0.36	0.52	
350m箇所		349.90 ~ 350.00	珪質泥岩	不定	EG HCl	0.12	0.28	0.13	9.05	—	1.24	1.29	0.25	0.46	0.54	
370m箇所		370.00 ~ 370.10	珪質泥岩	不定	EG HCl	0.14	0.22	0.12	9.96	—	1.14	1.42	0.24	0.37	0.42	
390m箇所		390.90 ~ 391.00	珪質泥岩	不定	EG HCl	0.11	0.25	0.10	8.56	—	1.92	1.54	0.46	0.35	0.66	

Table 28 XRD 分析による鉱物組成の相対量比一覧

				Silicate Minerals								Carbonate Minerals	Sulphate Minerals
				Clay Minerals			Silica			Other		Siderite	Pyrite
				Smectite	Illite	Chlorite	Quartz	Opal A	Opal CT	Plagioclase	K-Feldspar		
図中略号				Sm	I	Chl	Q	Op	Op	Pl	Kf	Sd	Py
読み取りピーク位置 (° (2θ, CuKα))				6.0-7.0	8.8	12.5	26.6	21.8	21.8	28.0	27.5	32.1	33.0
No.	地層	試料区間 (m)	岩相	相対量比 (試料毎に石英指数の合計を100とする)									
230m箇所	声間層	230.10 ~ 230.20	珪藻質泥岩	1.4	1.5	1.3	69.8	1.4	—	15.2	1.5	3.5	4.5
250m箇所		249.90 ~ 250.00	珪藻質泥岩	1.1	1.0	0.9	77.6	2.4	—	9.2	1.0	1.9	4.8
270m箇所		269.90 ~ 270.00	珪藻質泥岩	1.0	1.6	1.0	75.5	0.9	—	10.6	2.2	2.8	4.5
290m箇所		290.00 ~ 290.10	珪藻質泥岩	1.4	1.8	0.9	76.7	1.4	—	9.1	2.4	1.7	4.7
310m箇所		309.60 ~ 309.70	珪藻質泥岩	1.0	1.4	1.1	76.9	0.9	—	10.8	2.3	2.4	3.2
316m箇所		316.00 ~ 316.05	珪藻質泥岩	1.1	3.1	1.8	74.3	1.4	—	9.3	1.9	3.2	3.9
322m箇所		321.95 ~ 322.00	珪藻質泥岩	—	2.4	1.2	69.5	0.7	—	16.8	2.5	3.2	3.7
330m箇所	稚内層	329.90 ~ 330.00	珪質泥岩	0.8	1.9	0.5	69.4	—	8.0	11.1	1.9	2.6	3.7
350m箇所		349.90 ~ 350.00	珪質泥岩	0.9	2.1	1.0	67.8	—	9.2	9.6	1.9	3.5	4.1
370m箇所		370.00 ~ 370.10	珪質泥岩	1.0	1.5	0.8	71.0	—	8.2	10.1	1.7	2.6	3.0
390m箇所		390.90 ~ 391.00	珪質泥岩	0.8	1.8	0.7	61.3	—	13.8	11.1	3.3	2.5	4.7

Table 29 イライトの結晶度およびポリタイプと緑泥石の結晶度

No.	地層	試料区間 (m)	岩相	イライト					緑泥石				
				石英 指数	結晶度			ポリタイプ	石英 指数	結晶度			ポリタイプ
					ピーク位置		FWHM			ピーク位置		FWHM	
					CuK α $^{\circ} 2\theta$	d 001 Å	CuK α $^{\circ} 2\theta$			CuK α $^{\circ} 2\theta$	d 002 Å	CuK α $^{\circ} 2\theta$	
230m箇所	声問層	230.10 ~ 230.20	珪藻質泥岩	0.17	8.84	10.003	0.37	2M ₁ >1M	0.15	12.49	7.087	0.337	主に1MI1b
250m箇所		249.90 ~ 250.00	珪藻質泥岩	0.10	8.83	10.015	0.36	2M ₁ >1M	0.08	12.48	7.093	0.323	主に1MI1b
270m箇所		269.90 ~ 270.00	珪藻質泥岩	0.19	8.83	10.015	0.41	2M ₁ >1M	0.12	12.50	7.082	0.36	主に1MI1b
290m箇所		290.00 ~ 290.10	珪藻質泥岩	0.22	8.84	10.003	0.36	2M ₁	0.11	12.47	7.098	0.35	主に1MI1b
310m箇所		309.60 ~ 309.70	珪藻質泥岩	0.18	8.83	10.015	0.37	2M ₁	0.14	12.50	7.082	0.31	主に1MI1b
316m箇所		316.00 ~ 316.05	珪藻質泥岩	0.38	8.81	10.037	0.30	2M ₁	0.23	12.47	7.098	0.37	主に1MI1b
322m箇所		321.95 ~ 322.00	珪藻質泥岩	0.39	8.83	10.015	0.23	2M ₁	0.19	12.47	7.098	0.29	1MI1b, 1MIb
330m箇所	稚内層	329.90 ~ 330.00	珪質泥岩	0.28	8.83	10.015	0.37	2M ₁	0.07	12.49	7.087	0.29	1MI1b, 1MIb
350m箇所		349.90 ~ 350.00	珪質泥岩	0.28	8.84	10.003	0.28	2M ₁	0.13	12.51	7.076	0.29	主に1MI1b
370m箇所		370.00 ~ 370.10	珪質泥岩	0.22	8.83	10.015	0.29	2M ₁	0.12	12.5	7.082	0.29	1MI1b, 1MIb
390m箇所		390.90 ~ 391.00	珪質泥岩	0.25	8.83	10.015	0.28	2M ₁	0.10	12.48	7.093	0.31	1MI1b, 1MIb

Table 30 オパール結晶度

No.	地層	試料区間 (m)	岩相	X線による 続成区分	石英 指数	結晶度				
						ピーク位置				FWHM
						CuK α $^{\circ} 2\theta$	d 値 Å	強度 cps	CuK α $^{\circ} 2\theta$	
230m箇所	声問層	230.10 ~ 230.20	珪藻質泥岩	Opal A帯	—	—	—	—	—	—
250m箇所		249.90 ~ 250.00	珪藻質泥岩	Opal A帯	—	—	—	—	—	—
270m箇所		269.90 ~ 270.00	珪藻質泥岩	Opal A帯	—	—	—	—	—	—
290m箇所		290.00 ~ 290.10	珪藻質泥岩	Opal A帯	—	—	—	—	—	—
310m箇所		309.60 ~ 309.70	珪藻質泥岩	(Opal A帯)	0.12	21.57	4.12	3004.00	0.92	—
316m箇所		316.00 ~ 316.05	珪藻質泥岩	Opal A帯	—	—	—	—	—	—
322m箇所		321.95 ~ 322.00	珪藻質泥岩	Opal A帯	—	—	—	—	—	—
330m箇所	稚内層	329.90 ~ 330.00	珪質泥岩	Opal CT帯	1.14	21.6	4.12	1953	0.89	—
350m箇所		349.90 ~ 350.00	珪質泥岩	Opal CT帯	1.24	21.6	4.11	4406	0.81	—
370m箇所		370.00 ~ 370.10	珪質泥岩	Opal CT帯	1.14	21.6	4.11	4080	0.73	—
390m箇所		390.90 ~ 391.00	珪質泥岩	Opal CT帯	1.92	21.6	4.12	5643	0.75	—

3.3.2 間隙水を含まない岩石部の酸素水素同位体比の分析結果

分析結果を Table 31 に、深度分布を Fig. 72 に示す。酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) は+19.4~+26.4‰を示した。深度 300 m までは約+25‰であり、深度 300~340 m にかけて徐々に値が低下する傾向を示した。深度 340 m 以深ではややばらつきが認められるが約+22‰を示した。水素同位体比については、浅部から深度約 350 m まで増加し続け、それ以深では約-75~-70‰の一定の値を示した。

Table 31 岩石部の酸素水素同位体比の分析結果

採取深度 (GL -m)		$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
上端	下端		
24.35	24.40	+25.4	-105.4
49.45	49.50	+26.2	-103.3
68.00	68.05	+19.6	-99.7
83.65	83.70	+19.8	-96.9
109.55	109.60	+24.0	-100.3
123.90	123.95	+22.0	-108.3
146.25	146.30	+17.8	-99.5
169.94	170.00	+17.9	-95.0
184.65	184.70	+21.7	-96.3
200.19	200.24	+25.0	-84.8
219.89	219.94	+25.6	-86.7
239.89	239.94	+26.4	-86.8
259.49	259.54	+25.1	-85.8
279.89	279.94	+25.8	-88.7
299.89	299.94	+25.1	-85.4
319.89	319.94	+24.2	-80.8
339.82	339.87	+23.4	-69.5
359.19	359.24	+22.2	-67.4
379.89	379.94	+22.6	-74.1
400.00	400.05	+22.9	-74.4
419.74	419.79	+20.3	-72.1
439.89	439.94	+21.1	-74.5
459.89	459.94	+25.8	-72.7
480.00	480.05	+19.4	-76.9
499.00	499.05	+23.2	-69.0

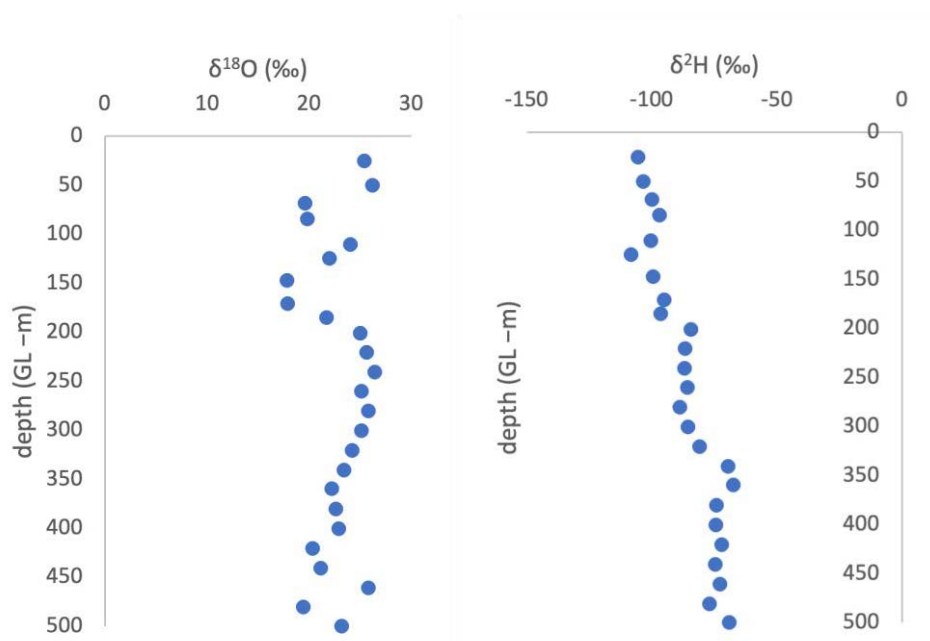


Fig. 72 岩石部の酸素水素同位体比の深度分布

3.3.3 間隙水中の He の濃度および同位体比の分析結果

間隙水中の He 濃度, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 同位体比, Ne 濃度の分析結果を Table 32 に示す. 表中に赤色で示されるデータは Ne 濃度から大気汚染が大きいと判断されたデータである. 化石海水が地層の堆積時に間隙水として間隙に取り込まれる際の溶存 Ne 濃度を 2.2 ccSTP g^{-1} であると仮定し, 得られた Ne 濃度の測定結果からボーリング掘削や試料採取の際に圧力の低下により生じた脱ガスの程度を見積り, He と Ne が脱ガスの際に同じ挙動をすることから ^3He , 脱ガス前の He 濃度を求めた. この際, 脱ガスの挙動がヘンリーの法則に従う場合と拡散に従う場合の 2 通りについて計算した結果を Fig. 73 に示す. 溶存 He 濃度は深度と共に増加するものの, 地層境界部から約 100 m の区間では濃度が一定もしくはやや減少する傾向が見られた. この深度はオパール A からオパール CT への遷移帯に相当すると考えられる. 深度約 350 m から He 濃度は深度と共に大きく増加した.

Table 32 溶存 He 濃度の分析結果

採取深度 (GL-m)			He	$^3\text{He}/^4\text{He}$	Ne
上端	下端	平均	(ccSTP g^{-1})	(-)	(ccSTP g^{-1})
23.4	23.5	23.45	1.623E-7	2.872E-7	3.801E-8
37.33	37.42	37.375	4.026E-6	1.490E-6	1.137E-5
49.23	29.3	39.265	1.929E-5	1.508E-6	3.719E-5
57.8	57.89	57.845	3.065E-7	1.419E-7	2.292E-8
68.75	68.85	68.8	3.601E-7	1.347E-7	1.450E-8
77.66	77.75	77.705	4.493E-7	1.389E-7	2.104E-8
82.25	82.33	82.29	3.719E-7	1.486E-7	2.587E-8
95.75	95.76	95.755	4.770E-7	1.304E-7	1.386E-8
108.42	108.52	108.47	6.029E-7	2.595E-7	1.481E-7
123.7	123.8	123.75	4.187E-7	1.387E-7	1.747E-8
130.9	131	130.95	5.000E-7	1.477E-7	3.157E-8
139.35	139.45	139.4	6.754E-7	1.269E-7	1.604E-8
147.85	147.93	147.89	6.198E-7	1.330E-7	2.294E-8
156.77	156.87	156.82	7.240E-7	1.153E-7	1.210E-8
169.07	169.17	169.12	1.424E-5	1.395E-6	3.073E-5
177.51	177.6	177.555	5.266E-7	1.301E-7	7.274E-9
184	184.1	184.05	8.828E-7	1.235E-7	1.804E-8
199.05	199.15	199.1	8.006E-7	1.132E-7	1.546E-8
208.8	208.9	208.85	1.211E-7	1.216E-7	6.823E-9
221	221.1	221.05	1.554E-6	6.237E-7	1.700E-6
230	230.1	230.05	7.231E-6	1.405E-6	1.780E-5
238.65	238.75	238.7	4.881E-7	1.446E-7	2.474E-8
250.8	250.9	250.85	9.650E-7	1.180E-7	1.621E-8
259.08	259.18	259.13	1.073E-6	1.104E-7	1.253E-8
269	269.1	269.05	5.391E-7	1.492E-7	3.315E-8
289.9	290	289.95	9.279E-7	1.883E-7	1.299E-7
290	290.1	290.05	6.411E-7	1.120E-7	1.650E-8
299.23	299.33	299.28	1.169E-6	1.111E-7	1.566E-8
309.8	309.9	309.85	6.517E-7	1.297E-7	1.925E-8
318.35	318.45	318.4	4.681E-6	1.114E-6	9.726E-6
330.8	330.9	330.85	1.841E-6	1.163E-7	1.442E-8
338.55	338.65	338.6	2.432E-6	2.361E-7	6.053E-7
350.9	351	350.95	2.096E-6	1.173E-7	1.194E-8
368.71	368.81	368.76	1.536E-6	1.056E-7	1.145E-8
380.75	380.85	380.8	7.536E-6	1.394E-6	1.903E-5
387.8	387.9	387.85	2.798E-6	1.388E-7	1.467E-7
399.4	399.5	399.45	1.896E-6	1.189E-7	1.361E-8
411.48	411.58	411.53	4.889E-7	1.409E-7	1.626E-8
420.9	420.91	420.905	2.955E-6	1.173E-7	1.985E-8
440.9	441	440.95	2.603E-6	1.165E-7	1.160E-8
450.1	450.2	450.15	9.967E-5	1.177E-6	2.343E-4
459.59	459.69	459.64	3.068E-6	3.732E-7	9.713E-7
471.66	471.76	471.71	3.353E-5	1.517E-6	1.077E-4
480.3	480.4	480.35	2.690E-6	1.145E-7	1.364E-8
489.1	489.2	489.15	3.411E-6	1.182E-7	1.195E-8
499.9	500	499.95	2.195E-6	1.106E-7	6.179E-9

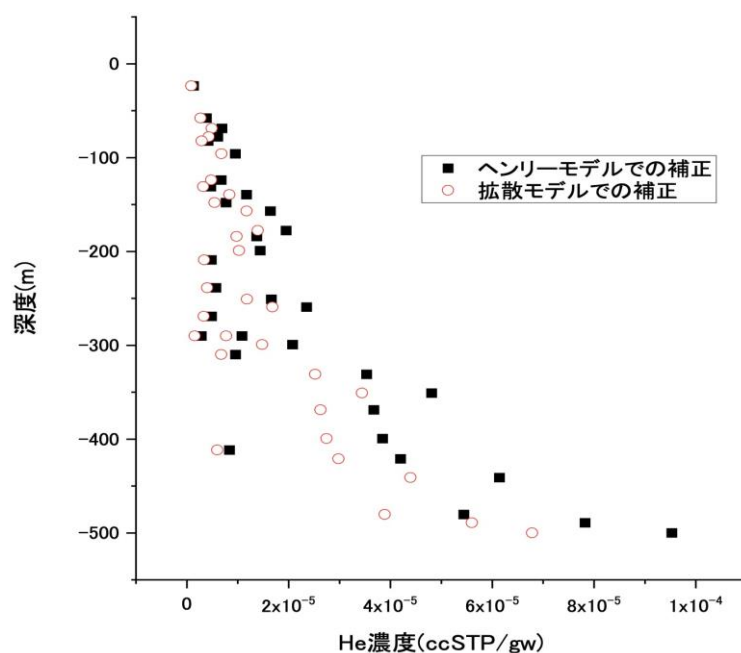


Fig. 73 間隙水中の補正 He 濃度の深度分布

3.3.4 間隙水中の溶存成分および酸素水素同位体比の分析結果

リーチング（浸漬）分析の結果を Table 33 に、圧縮抽出水の分析結果を Table 34 と Table 35 にそれぞれ示す。アミノ G 酸濃度について、2.4 節で述べた掘削水中の濃度と合わせて深度分布を Fig. 74 に示す。間隙水中のアミノ G 酸濃度は $0.1 \sim 0.7 \text{ mg L}^{-1}$ であることから、掘削水の汚染率は最大で 7% であり、多くの試料は 5% 以下であった。地下水中には溶存天然有機物などアミノ G 酸の蛍光分光分析に対する妨害成分が存在することから¹¹⁾、実際の汚染率はこれよりも低いと考えられる。

圧縮抽出水の分析結果のうち、Cl⁻濃度および酸素水素同位体比の深度分布を 2.5.3(6)項の原位置採水試料の分析結果と合わせて Fig. 75 に示す。深度約 100 m 付近で不連続が見られるが、それ以外は深度変化に対する連続的な Cl⁻濃度および酸素水素同位体比が見られた。Cl⁻濃度および酸素水素同位体比の深度に対する変化は良く相関しており、地表部から深度約 100 m まで増加し、深度約 180 m から深度約 310 m まで僅かに減少し、それ以深では深度 500 m まで再び増加した。これらの濃度が減少から増加に変わる深度は、声間層と稚内層の地層境界深度（約 320 m）の近傍であった。また、原位置採水試料（封圧採水試料）の分析結果は圧縮抽出水試料と近い値を示すことから、これら 2 箇所の原位置採水箇所に見られた水みち中の地下水は流動性の高いものではないことが推察される。 $\delta^{18}\text{O}$ が 0‰ 以上であることを基準とすると、深度約 400 m 以深から化石海水の分布深度であることが分かる。これに対応する $\delta^2\text{H}$ の値は -30‰ ～ -20‰ であり、本地域の声間層と稚内層で見られる化石海水の $\delta^2\text{H}$ の値²⁾と一致する。

Table 33 間隙水中の溶存成分の分析結果（リーチング）

採取深度 (GL -m)		間隙水中の溶存イオン濃度 (mg L ⁻¹)								
上端	下端	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
24.45	24.85	440	50	29	31	1	440	2.9	12.2	166
36.35	36.75	1720	124	14.3	18.3	0.7	1690	11.2	10.6	117
49.60	50.00	2200	128	11.5	17.5	0.6	2300	15.3	14.5	155
56.60	57.00	2400	143	11.6	20	0.6	2500	16.7	11.1	188
69.18	69.58	2500	138	9.4	17.9	0.7	2500	16.9	12.8	91
77.00	77.40	2700	157	11.0	24	0.9	2800	18.6	10.7	135
83.70	84.00	2500	141	10.5	22	0.8	2500	17.0	7.7	118
95.28	95.68	2700	147	9.6	19.2	0.6	3000	20	9.6	60
109.60	110.00	3600	184	12.9	27	0.3	4500	31	15.4	28
123.05	123.35	3300	171	11.6	21	0.3	4000	28	4.2	148
130.40	130.80	3200	169	12.0	20	0.4	4000	27	12.5	115
141.00	141.37	3000	155	11.1	21	0.7	3400	23	16.1	78
146.30	146.70	2900	150	10.7	19.9	0.8	3100	21	12.9	75
156.28	156.68	3000	152	10.9	19.8	0.8	3200	21	7.5	107
168.60	168.97	2900	142	10.7	22	1.0	3200	22	10.4	83
176.05	176.43	3000	147	9.2	16.3	0.4	3500	23	7.3	132
184.25	184.65	3000	149	10.1	15.8	0.8	3500	24	11.4	89
198.10	198.50	3000	139	10.0	17.1	1.0	3300	23	10.9	116
208.11	208.51	3500	170	7.2	10.6	1.7	3900	28	28	290
219.00	219.40	3600	173	9.3	14.2	0.8	3900	27	18.2	940
230.50	230.84	3700	180	8.6	11.6	0.7	3800	27	26	1280
238.16	238.46	3400	163	5.5	8.8	1.1	3700	26	17.8	710
250.25	250.75	3400	151	7.7	12.2	0.7	3600	25	34	820
259.60	260.00	3300	149	5.5	6.5	1.1	3400	24	11.0	780
271.25	271.65	3400	156	6.5	8.5	1.1	3300	23	14.1	1140
280.60	281.00	3400	152	7.5	10.6	1.1	3400	24	32	1210
288.25	288.91	3800	196	12.8	25	0.9	3200	23	7.2	2500
298.34	298.74	3400	153	7.6	10.6	1.1	3200	23	55	1450
310.10	310.50	3400	148	5.8	7.9	1.6	3200	23	16.8	940
317.45	317.85	3400	142	6.1	9.6	2.2	3400	24	18.7	730
330.00	330.35	3600	138	6.6	10.0	3.3	3100	22	9.7	2200
339.42	339.82	4300	172	10.3	13.8	4.3	3200	23	23	2500
350.20	350.60	4300	159	7.9	9.1	4.0	3500	25	32	2300
359.30	359.70	4700	167	7.6	9.7	4.2	3800	27	8.2	2600
369.55	370.00	5000	169	11.9	16.7	3.0	4400	32	28	3000
381.17	381.57	5100	151	16.1	20	2.5	5200	37	24	2600
387.17	387.54	5500	171	16.4	25	3.4	4900	36	20	2500
399.60	400.00	6000	182	21	29	2.2	5800	42	15.1	3700
411.00	411.33	6000	171	17.1	21	2.4	6400	47	30	2500
421.06	421.45	6300	176	14.3	22	3.9	6200	46	12.0	1960
429.30	429.74	6700	172	24	41	3.0	7500	55	26	2600
440.20	440.60	7200	179	27	46	3.0	7600	56	10.1	2300
450.30	450.79	7000	170	25	44	2.9	8000	59	52	2700
459.00	459.49	7700	189	43	57	0.9	8200	61	11.6	4300
472.00	472.40	7400	165	27	40	2.5	8000	60	33	3300
479.60	480.00	7700	173	32	41	2.6	8900	67	26	2800
488.60	489.00	7700	186	17.8	36	6.1	8000	60	13.7	1990
499.20	499.60	8500	184	38	62	2.9	9300	70	46	3300

Table 34 間隙水中の溶存成分および酸素水素同位体比の分析結果（圧縮抽出水）

採取深度 (GL -m)		間隙水中の溶存イオン濃度 (mg L ⁻¹)									酸素水素同位体比 (‰)	
上端	下端	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	δ ¹⁸ O	δ ² H
24.45	24.85	330	30	37	47	1.0	510	4.4	1.7	12.1	-9.0	-64.3
36.35	36.75	1590	85	58	86	<10	1800	13.2	1.6	41	-6.4	-57.9
49.60	50.00	2300	112	36	67	<10	2600	19.2	1.8	51	-4.3	-51.1
56.60	57.00	2500	125	37	60	<10	2900	21	4.6	180	-3.7	-48.6
69.18	69.58	2600	121	35	55	1.9	3000	22	4.4	101	-3.0	-45.7
77.00	77.40	2700	132	41	62	<10	3300	24	3.3	106	-2.7	-43.5
83.70	84.00	2600	121	35	53	<10	3000	22	0.6	68	-3.1	-46.6
95.28	95.68	2800	128	43	67	<10	3400	26	1.2	77	-2.7	-44.5
109.60	110.00	3600	160	70	93	<5	5000	40	0.7	33	-1.1	-37.3
123.05	123.35	3400	153	62	85	<10	4600	36	1.9	155	-1.2	-38.9
130.40	130.80	3300	137	63	84	<5	4400	34	1.7	104	-1.3	-40.2
141.00	141.37	3000	125	47	72	<10	3900	30	0.4	92	-1.5	-40.4
146.30	146.70	3000	131	46	71	<10	3600	28	0.8	490	-2.1	-42.1
156.28	156.68	3000	109	46	67	<10	3700	28	0.7	119	-1.8	-41.5
168.60	168.97	3000	121	49	66	<10	3700	29	0.5	135	-1.8	-42.0
176.05	176.43	3200	127	51	72	<10	4100	31	0.9	148	-1.4	-40.5
184.25	184.65	3000	87	51	66	<10	3700	29	0.7	184	-1.5	-40.5
198.10	198.50	3500	168	85	128	<10	3900	30	1.9	2600	-1.8	-42.0
208.11	208.51	2900	96	32	41	2.1	3700	28	<0.5	110	-1.9	-42.0
219.00	219.40	3100	118	40	55	2.1	3900	29	0.6	71	-2.2	-42.3
230.50	230.84	2900	102	34	47	2.1	3600	28	0.8	130	-2.4	-41.6
238.16	238.46	2900	94	34	46	1.6	3700	28	0.6	117	-2.3	-42.8
250.25	250.75	2900	99	34	47	1.8	3700	28	<0.5	98	-2.4	-43.0
259.60	260.00	2800	92	31	44	1.6	3500	26	<0.5	80	-2.8	-44.2
271.25	271.65	2600	79	28	35	1.6	3200	24	<0.5	196	-3.0	-44.5
280.60	281.00	2800	93	31	39	2.0	3500	27	0.7	250	-2.8	-44.5
288.25	288.91	2800	96	39	51	2.2	3300	26	0.7	610	-2.9	-44.5
298.34	298.74	2800	80	36	52	2.3	3400	26	<0.5	320	-3.1	-43.9
310.10	310.50	2600	68	33	46	2.3	3200	29	0.4	84	-3.2	-45.9
317.45	317.85	2700	68	36	53	2.2	3500	30	0.6	43	-2.9	-44.4
330.00	330.35	2800	70	43	61	3.0	3800	34	0.3	71	-2.5	-42.3
339.42	339.82	2900	66	47	66	2.6	3800	34	0.5	162	-2.7	-42.8
350.20	350.60	3100	67	52	67	2.0	4400	39	2.2	62	-1.9	-39.2
359.30	359.70	2900	57	45	59	1.8	4200	38	0.5	50	-1.6	-38.2
369.55	370.00	3500	68	62	78	1.6	5100	45	0.7	79	-1.2	-37.4
381.17	381.57	3900	74	76	89	1.6	5700	51	0.7	23	-0.8	-35.1
387.17	387.54	3500	48	68	74	1.7	5200	47	0.5	55	-0.6	-33.4
399.60	400.00	6300	148	350	480	1.7	6000	58	1.7	7400	-0.1	-32.9
411.00	411.33	4900	81	110	122	1.9	7400	61	0.7	55	+1.2	-28.5
421.06	421.45	4800	71	108	117	1.9	7400	62	0.8	84	+0.9	-28.0
429.30	429.74	5300	86	127	141	1.8	8100	68	<0.5	220	+1.5	-25.6
440.20	440.60	5600	82	134	141	1.8	8700	72	0.7	76	+2.0	-24.3
450.30	450.79	5700	83	139	150	1.5	8800	74	0.8	118	+1.8	-24.5
459.00	459.49	5700	85	141	162	1.6	8900	75	0.6	256	+1.7	-24.2
472.00	472.40	5700	83	137	141	1.9	9000	75	0.8	46	+1.9	-24.3
479.60	480.00	6100	83	155	170	1.6	9600	82	0.7	44	+2.4	-21.9
488.60	489.00	5800	67	155	171	1.9	9400	80	1.2	36	+2.1	-22.2
499.20	499.60	6300	83	160	187	1.6	10100	86	1.2	54	+2.5	-21.9

Table 35 間隙水中の溶存成分の分析結果（圧縮抽出水）

採取深度 (GL -m)		(mg L ⁻¹)					(μg L ⁻¹)		(mg L ⁻¹)	
上端	下端	I	Li	B	Sr	Rb	Ba	Cs	Amino	G酸
24.45	24.85	4.0	1.2	20	0.4	13	1760	<1	0.6	
36.35	36.75	6.8	5.5	67	1.0	37	4000	<2	0.7	
49.60	50.00	8.8	7.6	88	1.1	43	7200	<5	0.7	
56.60	57.00	8.7	8.4	95	1.1	50	2500	<5	0.6	
69.18	69.58	9.1	8.3	97	1.1	48	6500	<5	0.7	
77.00	77.40	9.9	8.3	97	1.2	51	6400	<5	0.7	
83.70	84.00	9.1	7.7	95	1.0	52	8300	<5	0.7	
95.28	95.68	10.7	8.6	98	1.3	55	7300	<5	0.6	
109.60	110.00	15.4	12	110	1.9	70	12100	<5	0.6	
123.05	123.35	13.8	11	105	1.7	67	3300	<5	0.6	
130.40	130.80	14.0	11	104	1.8	63	4900	<5	0.6	
141.00	141.37	12.1	9.3	99	1.4	56	5900	<5	0.6	
146.30	146.70	10.8	9.1	97	1.1	58	530	<5	0.5	
156.28	156.68	11.4	8.9	96	1.3	53	4500	<5	0.6	
168.60	168.97	11.2	9.2	98	1.3	51	4500	<5	0.6	
176.05	176.43	12.2	9.6	102	1.5	58	4000	<5	0.6	
184.25	184.65	11.9	9.5	107	1.2	42	1340	<5	0.6	
198.10	198.50	11.5	11	97	1.2	76	156	<5	0.3	
208.11	208.51	11.0	8.5	94	0.9	46	4300	<5	0.6	
219.00	219.40	11.0	8.9	94	1.2	56	9500	<5	0.5	
230.50	230.84	10.7	8.0	84	1.0	49	3600	<5	0.6	
238.16	238.46	10.7	8.0	84	1.0	47	3800	<5	0.6	
250.25	250.75	10.6	8.0	82	1.0	50	5300	<5	0.6	
259.60	260.00	10.3	7.4	75	0.9	47	5700	<5	0.6	
271.25	271.65	8.9	7.1	75	0.7	45	1060	<5	0.5	
280.60	281.00	9.6	7.2	73	0.8	50	1130	<5	0.6	
288.25	288.91	8.8	7.4	71	0.8	54	300	<5	0.4	
298.34	298.74	9.3	7.1	67	1.0	44	950	<5	0.5	
310.10	310.50	9.4	7.1	63	1.0	43	5500	<5	0.5	
317.45	317.85	9.9	7.1	62	1.1	42	9300	<5	0.5	
330.00	330.35	10.9	7.4	61	1.3	44	4400	<5	0.4	
339.42	339.82	10.7	7.6	66	1.3	41	1470	<5	0.4	
350.20	350.60	12.5	8.5	63	1.5	42	4300	<5	0.4	
359.30	359.70	11.7	8.4	62	1.3	36	4500	<5	0.4	
369.55	370.00	14.5	9.7	71	1.8	43	4100	<5	0.4	
381.17	381.57	16.5	11	80	2.1	48	6800	<5	0.5	
387.17	387.54	14.7	11	70	1.7	30	5000	<5	0.4	
399.60	400.00	5.7	17	129	4.1	100	96	<5	0.1	
411.00	411.33	21	14	90	2.9	49	9000	<5	0.4	
421.06	421.45	20	13	83	2.7	47	5700	<5	0.4	
429.30	429.74	18.9	14	94	3.0	55	1880	<5	0.4	
440.20	440.60	23	15	91	3.2	53	5800	<5	0.4	
450.30	450.79	17.6	15	92	3.5	51	3000	<5	0.5	
459.00	459.49	18.4	15	93	3.4	58	1310	<5	0.4	
472.00	472.40	23	14	93	3.6	51	10600	<5	0.4	
479.60	480.00	27	15	94	4.3	55	11100	<5	0.4	
488.60	489.00	24	15	75	3.4	44	10600	<5	0.3	
499.20	499.60	23	15	86	4.4	55	10800	<5	0.3	

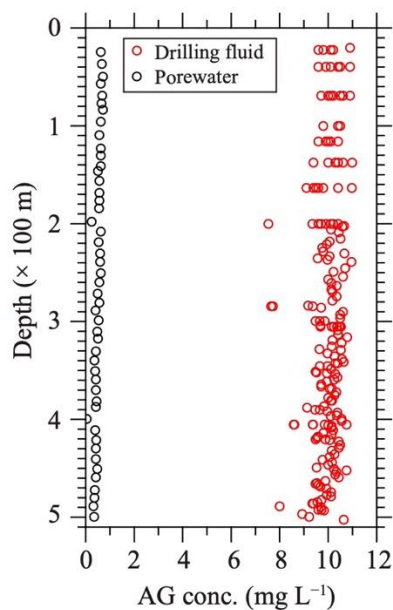


Fig. 74 アミノ G 酸濃度の深度分布

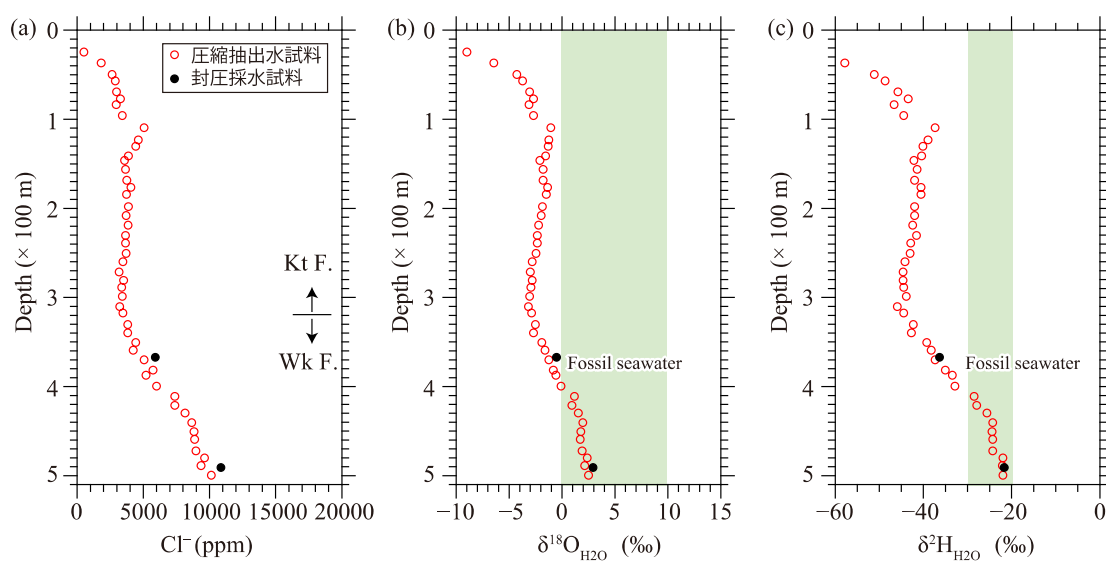


Fig. 75 間隙水中の Cl⁻ 濃度および酸素水素同位体比の深度分布

3.3.5 岩石の化学組成分析および密度測定結果

XRF 分析により求めた岩石の主要 13 元素組成を Table 36 に、深度分布図を Fig. 76 に示す。微量元素の分析結果を Table 37 と Table 38 に示す。LOI の深度分布を見ると、深度約 200 m までは約 7% の値を示すが、それ以深では徐々に低下し、深度 500 m では 5.8% となった。岩石の真密度の測定結果を Fig. 77 に示す。真密度は約 $2.35 \sim 2.45 \text{ g mL}^{-1}$ の一定の値を示した。

Table 36 岩石の主要元素組成

採取深度 (GL-m)	Al ₂ O ₃ %	BaO %	CaO %	Cr ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	K ₂ O %	MgO %	MnO %	Na ₂ O %	P ₂ O ₅ %	SiO ₂ %	SrO %	TiO ₂ %	LOI %	Total %
36.50~36.75	8.8	0.03	0.41	0.01	3.6	1.5	0.99	0.02	1.24	0.1	75	0.01	0.40	7.1	103
56.60~57.00	8.8	0.03	0.40	0.01	4.0	1.5	1.04	0.02	1.38	0.1	75	0.01	0.40	7.3	103
77.00~77.40	9.2	0.03	0.57	0.01	3.6	1.6	1.10	0.02	1.55	0.1	73	0.01	0.41	7.0	102
95.28~95.68	9.5	0.04	0.40	0.01	3.6	1.6	1.06	0.02	1.44	0.1	74	0.01	0.44	7.0	102
123.05~123.35	7.5	0.03	0.35	0.01	3.1	1.3	0.90	0.02	1.36	0.1	78	0.01	0.35	6.7	102
141.00~141.37	10.0	0.04	0.40	0.01	3.9	1.7	1.26	0.02	1.49	0.1	73	0.01	0.45	7.0	102
156.28~156.68	10.5	0.04	0.47	0.01	3.9	1.8	1.32	0.02	1.55	0.1	72	0.01	0.48	6.8	101
176.05~176.43	8.6	0.03	0.43	0.01	3.5	1.5	1.06	0.02	1.42	0.1	76	0.01	0.39	6.9	103
198.10~198.50	11.3	0.04	0.43	0.01	4.3	1.9	1.49	0.02	1.53	0.1	70	0.01	0.51	7.5	103
208.11~208.51	10.6	0.04	0.45	0.01	3.9	1.8	1.28	0.02	1.52	0.1	72	0.01	0.47	7.2	102
230.50~230.84	9.6	0.04	0.45	0.01	3.8	1.7	1.18	0.02	1.55	0.1	73	0.01	0.44	7.1	102
250.25~250.70	8.2	0.03	0.40	0.01	3.3	1.40	0.95	0.02	1.40	0.1	76	0.01	0.38	6.9	102
271.25~271.65	9.6	0.04	0.59	0.01	3.6	1.60	1.12	0.02	1.51	0.1	73	0.01	0.44	6.8	101
298.34~298.74	9.2	0.03	0.44	0.01	3.7	1.5	1.18	0.02	1.41	0.1	74	0.01	0.42	6.9	102
317.45~317.85	9.8	0.04	0.56	0.01	3.4	1.60	1.32	0.03	1.65	0.1	73	0.01	0.45	6.7	101
339.42~339.82	10.2	0.04	0.53	0.01	3.8	1.7	1.54	0.02	1.53	0.1	73	0.01	0.47	6.7	102
359.30~359.70	10.5	0.04	0.53	0.01	3.9	1.8	1.56	0.03	1.59	0.1	73	0.01	0.49	6.5	103
381.17~381.57	7.6	0.03	0.37	0.01	2.8	1.3	1.04	0.02	1.35	0.1	78	0.01	0.35	5.7	101
399.60~400.00	9.3	0.04	0.49	0.01	3.3	1.60	1.18	0.02	1.56	0.1	75	0.01	0.43	6.0	101
421.06~421.45	7.8	0.03	0.39	0.01	2.9	1.4	0.93	0.02	1.40	0.1	77	0.01	0.36	6.1	101
440.20~440.60	8.5	0.03	0.42	0.01	3.0	1.5	1.02	0.02	1.51	0.1	78	0.01	0.39	5.7	102
459.00~459.49	8.4	0.03	0.42	0.01	3.2	1.4	0.94	0.02	1.52	0.1	77	0.01	0.39	5.7	102
479.60~480.00	8.5	0.03	0.44	0.01	3.1	1.5	0.97	0.02	1.61	0.1	78	0.01	0.39	5.4	103
499.20~499.60	8.9	0.03	0.47	0.01	3.3	1.5	1.14	0.02	1.57	0.1	76	0.01	0.41	5.8	102

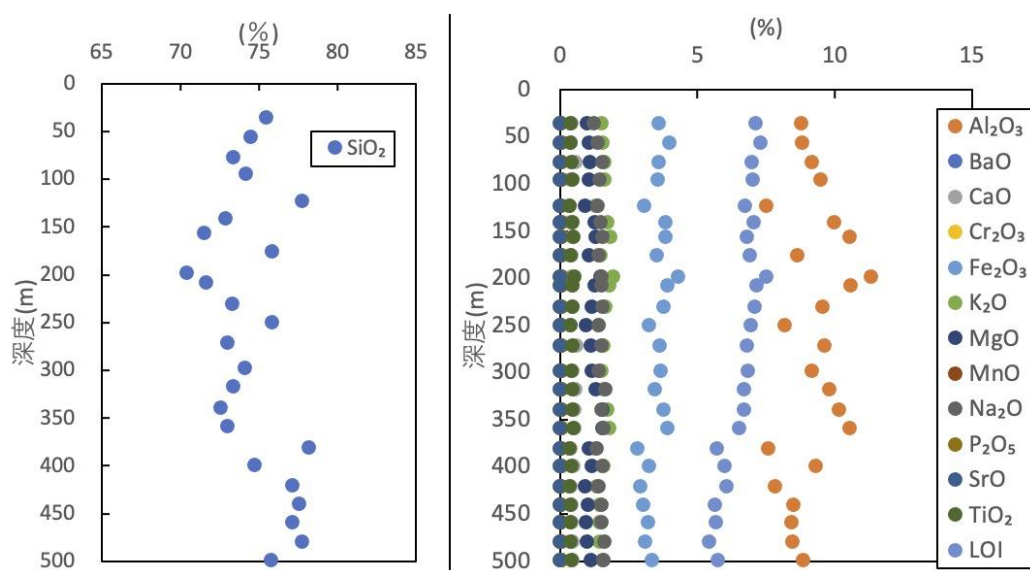


Fig. 76 岩石の主要元素組成の深度分布

Table 37 岩石の微量元素濃度の分析結果

採取深度 (GL-m)	Ba ppm	Ce ppm	Cr ppm	Cs ppm	Dy ppm	Er ppm	Eu ppm	Ga ppm	Gd ppm	Ge ppm	Hf ppm	Ho ppm	La ppm	Lu ppm	Nb ppm
36.50~36.75	270	32	68	4.8	2.3	1.38	0.68	10.6	2.3	1.1	2.4	0.47	15.4	0.20	6.6
56.60~57.00	270	33	67	5.0	2.3	1.28	0.60	10.8	2.5	1.1	2.4	0.44	15.8	0.20	6.7
77.00~77.40	290	31	67	4.6	2.3	1.51	0.59	11.0	2.5	1.3	2.5	0.51	15.0	0.24	6.4
95.28~95.68	290	36	68	5.7	2.3	1.52	0.59	12.0	2.7	1.3	2.6	0.48	18.1	0.19	7.3
123.05~123.35	230	27	54	4.2	2.0	1.24	0.47	9.5	2.1	1.0	2.0	0.43	13.2	0.19	5.7
141.00~141.37	300	40	65	6.2	2.6	1.42	0.64	12.2	3.1	1.4	2.7	0.54	19.2	0.24	8.3
156.28~156.68	330	41	69	6.2	2.6	1.74	0.72	13.0	3.3	1.3	2.9	0.6	20.4	0.27	8.5
176.05~176.43	260	32	59	4.7	2.4	1.24	0.57	10.4	2.3	1.2	2.2	0.48	15.6	0.20	6.6
198.10~198.50	330	42	76	6.9	2.8	1.66	0.74	14.4	2.9	1.4	2.7	0.62	20.9	0.25	8.7
208.11~208.51	330	40	67	6.1	2.5	1.42	0.69	13.2	2.9	1.1	2.6	0.51	19.4	0.23	8.3
230.50~230.84	310	34	68	5.2	2.3	1.44	0.58	11.7	2.5	1.3	2.6	0.53	16.6	0.22	7.3
250.25~250.70	250	28	61	4.5	2.0	1.26	0.47	9.9	2.2	1.2	2.1	0.45	13.2	0.18	5.6
271.25~271.65	300	34	68	5.2	2.2	1.36	0.54	11.8	2.4	1.3	2.7	0.50	16.7	0.23	7.5
298.34~298.74	280	33	75	5.6	2.6	1.65	0.70	12.2	2.7	1.2	2.7	0.52	17.0	0.20	7.6
317.45~317.85	300	32	77	4.9	2.6	1.72	0.66	12.4	2.9	1.3	3.1	0.51	16.2	0.25	7.4
339.42~339.82	290	36	76	6.0	2.7	1.47	0.64	13.0	2.8	1.4	2.7	0.50	18.0	0.25	7.6
359.30~359.70	300	35	78	6.0	2.6	1.65	0.71	13.2	3.0	1.3	2.9	0.51	17.5	0.29	8.3
381.17~381.57	230	26	60	4.3	2.0	1.26	0.55	9.5	2.2	1.1	2.0	0.40	13.3	0.18	5.8
399.60~400.00	310	34	78	5.4	2.6	1.62	0.69	12.1	2.7	1.0	2.8	0.52	17.0	0.24	7.6
421.06~421.45	240	27	66	4.4	2.3	1.38	0.50	10.1	2.2	0.8	2.4	0.41	14.3	0.17	6.0
440.20~440.60	270	30	73	4.9	2.2	1.34	0.62	10.8	2.3	1.2	2.4	0.45	14.8	0.23	6.7
459.00~459.49	270	27	73	4.5	2.2	1.44	0.52	10.3	2.3	1.0	2.6	0.43	14.4	0.20	6.6
479.60~480.00	280	39	76	4.5	2.4	1.52	0.62	10.8	2.4	1.1	2.8	0.49	14.9	0.22	6.7
499.20~499.60	280	32	72	5.0	2.5	1.46	0.62	11.2	2.6	1.0	2.8	0.49	16.2	0.22	7.2

Table 38 岩石の微量元素濃度の分析結果

採取深度 (GL-m)	Nd ppm	Pr ppm	Rb ppm	Sm ppm	Sn ppm	Sr ppm	Ta ppm	Tb ppm	Th ppm	Tm ppm	U ppm	V ppm	W ppm	Y ppm	Yb ppm	Zr ppm
36.50~36.75	15	3.7	69	2.9	1.2	76	0.4	0.4	5.8	0.2	4.4	83	1.0	13	1.3	89
56.60~57.00	15	3.7	70	3.0	1.5	72	0.4	0.4	5.9	0.2	5.3	81	1.2	14	1.4	89
77.00~77.40	15	3.6	64	3.0	1.3	84	0.4	0.4	5.6	0.2	4.1	86	1.0	14	1.50	99
95.28~95.68	16	4.5	77	3.0	1.4	79	0.5	0.4	6.8	0.2	4.3	88	1.2	14	1.4	98
123.05~123.35	12	3.1	59	2.4	1.1	65	0.4	0.3	5.0	0.2	3.3	72	1.1	12	1.2	76
141.00~141.37	18	4.7	80	3.8	1.7	82	0.5	0.4	7.4	0.2	4.0	86	1.4	15	1.40	102
156.28~156.68	19	4.8	89	3.7	2.1	89	0.6	0.5	7.8	0.3	3.5	94	1.3	17	1.60	113
176.05~176.43	15	3.7	67	3.1	1.4	74	0.5	0.4	5.8	0.2	3.5	77	1.1	13	1.3	88
198.10~198.50	20	4.7	95	3.7	2.1	84	0.6	0.5	7.9	0.3	3.9	99	1.7	17	1.6	109
208.11~208.51	18	4.6	85	3.5	1.4	84	0.6	0.5	7.6	0.3	3.2	84	1.4	15	1.6	105
230.50~230.84	15	4.0	74	3.1	1.5	85	0.5	0.40	6.1	0.20	3.9	87	1.2	14	1.3	103
250.25~250.70	13	3.3	62	2.6	1.1	71	0.4	0.4	5.1	0.20	3.5	74	1.1	12	1.1	83
271.25~271.65	15	4.0	73	3.1	1.2	87	0.5	0.40	6.3	0.20	3.6	82	1.3	13	1.3	101
298.34~298.74	15	4.2	73	3.4	1.3	82	0.5	0.4	6.2	0.2	4.2	85	1.4	14	1.5	104
317.45~317.85	14	3.8	69	3.0	1.5	95	0.5	0.4	6.0	0.2	3.1	84	1.1	14.0	1.6	115
339.42~339.82	15.0	4.5	81	3.1	1.4	88	0.5	0.4	6.7	0.2	3.8	87	1.2	14	1.6	104
359.30~359.70	15	4.2	80	3.4	1.6	90	0.6	0.4	6.5	0.3	3.9	93	4.2	15	1.7	112
381.17~381.57	12	3.1	58	2.3	1.2	69	0.4	0.3	4.9	0.2	3.5	70	1.0	11	1.10	79
399.60~400.00	16	4.2	73	3.2	1.5	91	0.5	0.4	6.2	0.2	4.5	85	1.3	15	1.6	107
421.06~421.45	12	3.4	59	2.8	0.9	73	0.4	0.3	5.1	0.2	2.8	68	1.0	12.0	1.2	85
440.20~440.60	13	3.5	66	2.9	1.1	81	0.4	0.3	5.5	0.2	3.0	77	1.1	13	1.4	98
459.00~459.49	13	3.5	64	2.8	1.0	82	0.4	0.3	5.2	0.2	3.3	72	1.2	12	1.30	96
479.60~480.00	13	3.7	63	2.9	1.4	89	0.5	0.4	5.3	0.2	3.2	72	1.0	13	1.4	104
499.20~499.60	14.0	3.9	68	3.3	1.4	88	0.5	0.4	6.0	0.2	2.9	74	1.5	13	1.6	111

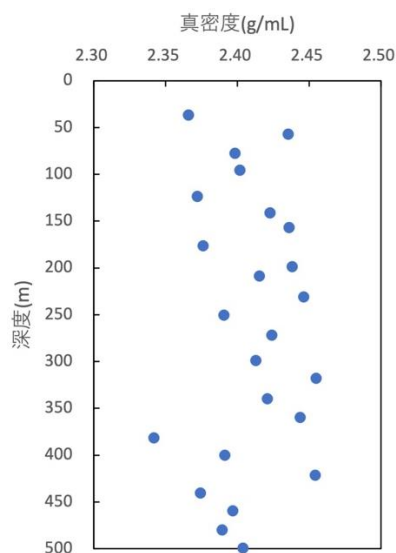


Fig. 77 岩石の真密度の深度分布

3.3.6 原位置採水試料の水質分析結果

(1) スラグ試験および揚水中の水質モニタリングの結果

揚水の可否はスラグ試験の結果から得られたパッカー区間の岩盤の透水係数から判断した。深度 491 m 地点におけるスラグ試験中の水位の時間変化と解析結果を Fig. 78 に示す。透水係数は $6.5 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$ (区間長 10.32 m, 孔半径 0.07 m) であり, 揚水時の水位低下量が 50 m の場合に約 2.5 L min^{-1} の揚水が可能と算定された。揚水中の水位, 揚水流量, 遊離ガス流量, 水温, pH, EC

(25°Cにおける補正值), アミノ G 酸濃度, パッカー圧の観測結果を Fig. 79 と Fig. 80 に示す. 平均揚水量は 1.55 L min^{-1} であり, 総揚水時間 103.5 時間で約 9.6 m^3 の地下水を揚水した. これは採水装置の内部容積の約 5.3 倍に相当する. 揚水流量を 2.0 L min^{-1} として揚水を開始したが, 水位が下がる傾向を示したため, 計 6 回流量を変更しながら調整した. ^{81}Kr を用いた地下水年代測定の有効性の検討のための遊離ガスの採取については, 積算揚水量が採水装置の内部容積の 2 倍以上を超えた時点 (揚水開始から 22 時間後) から開始した. EC の値は揚水開始から約 18 時間後に約 30 mS cm^{-1} の値で定常状態に達した. 水温は外気温の影響を受け, $13\sim 16^\circ\text{C}$ の間で推移した. pH は採水装置の内部容積の 1 倍程度の揚水後から約 6.4 の値を示し, 安定した. アミノ G 酸濃度は揚水開始の 11 時間後に 1 mg L^{-1} を下回った.

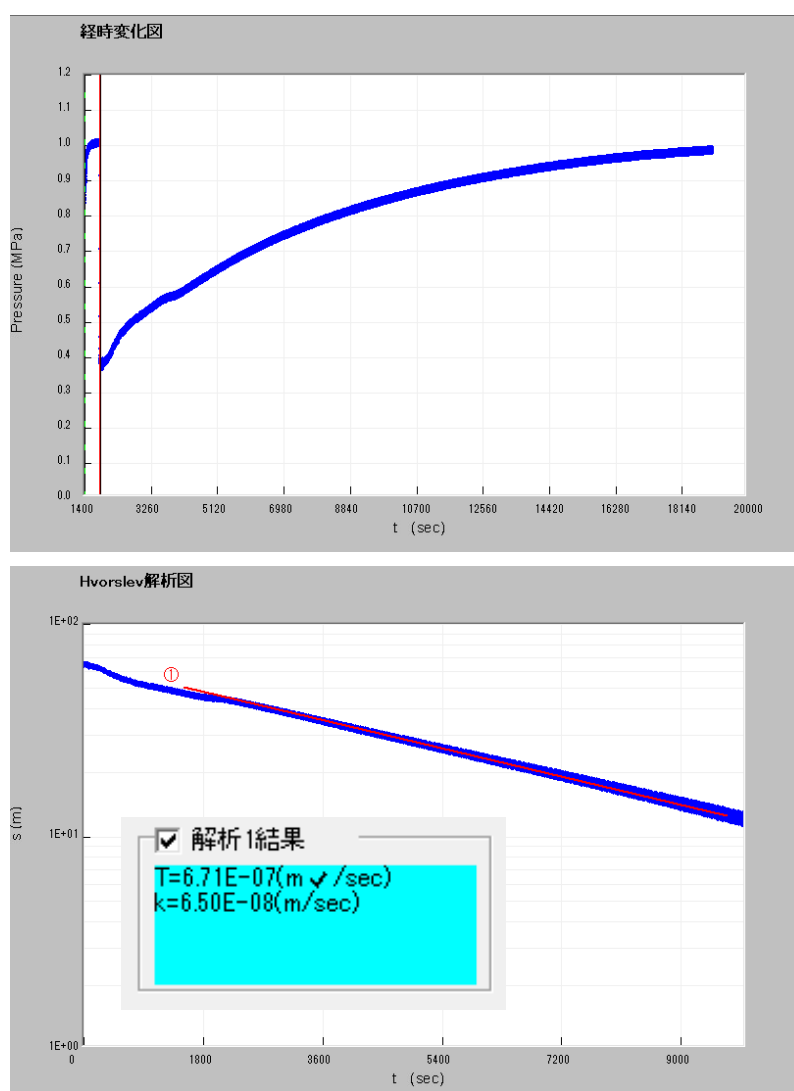


Fig. 78 深度 491 m 地点におけるスラグ試験結果

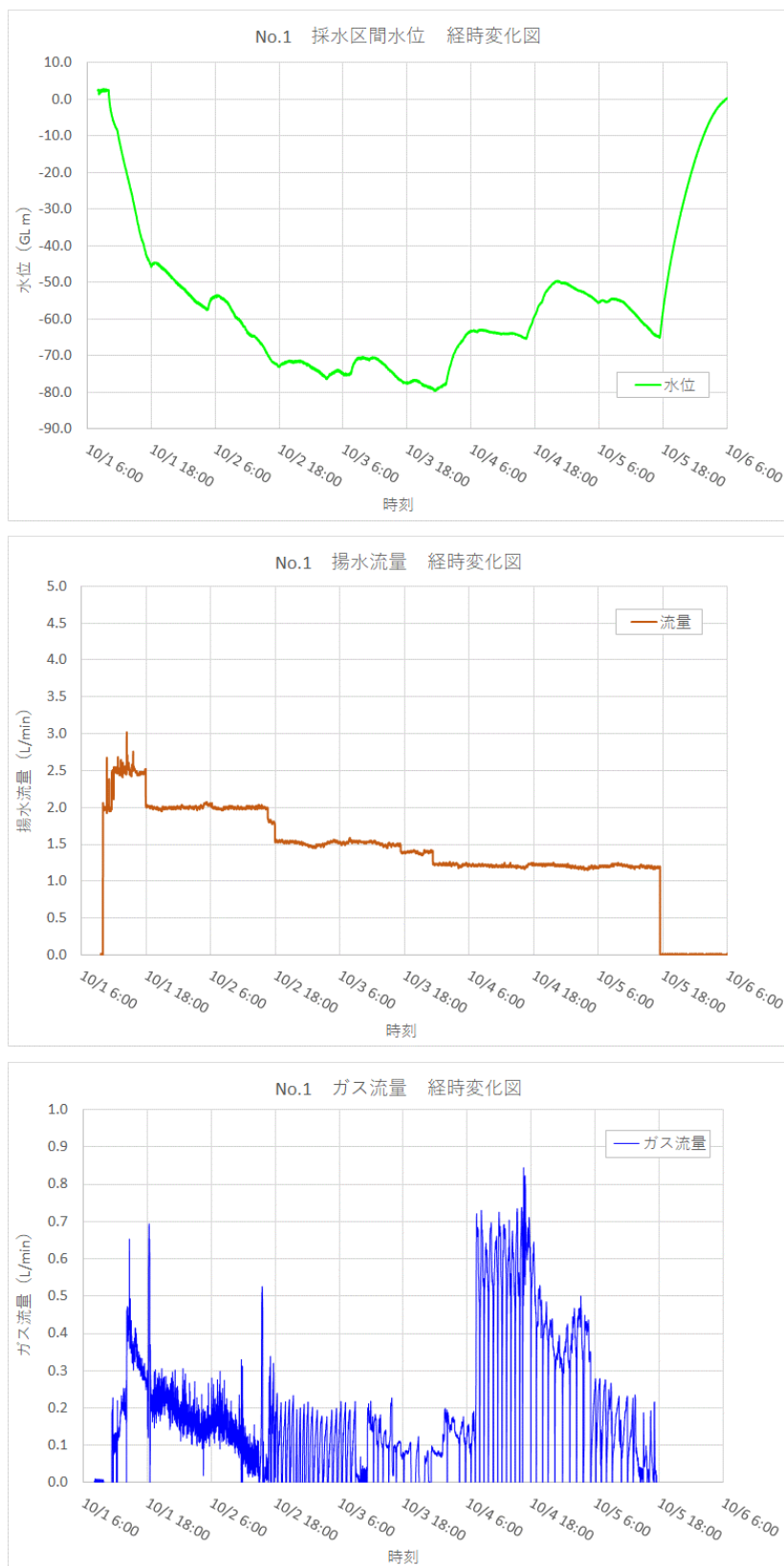


Fig. 79 深度 491 m 地点からの揚水時の水位と流量，ガス流量

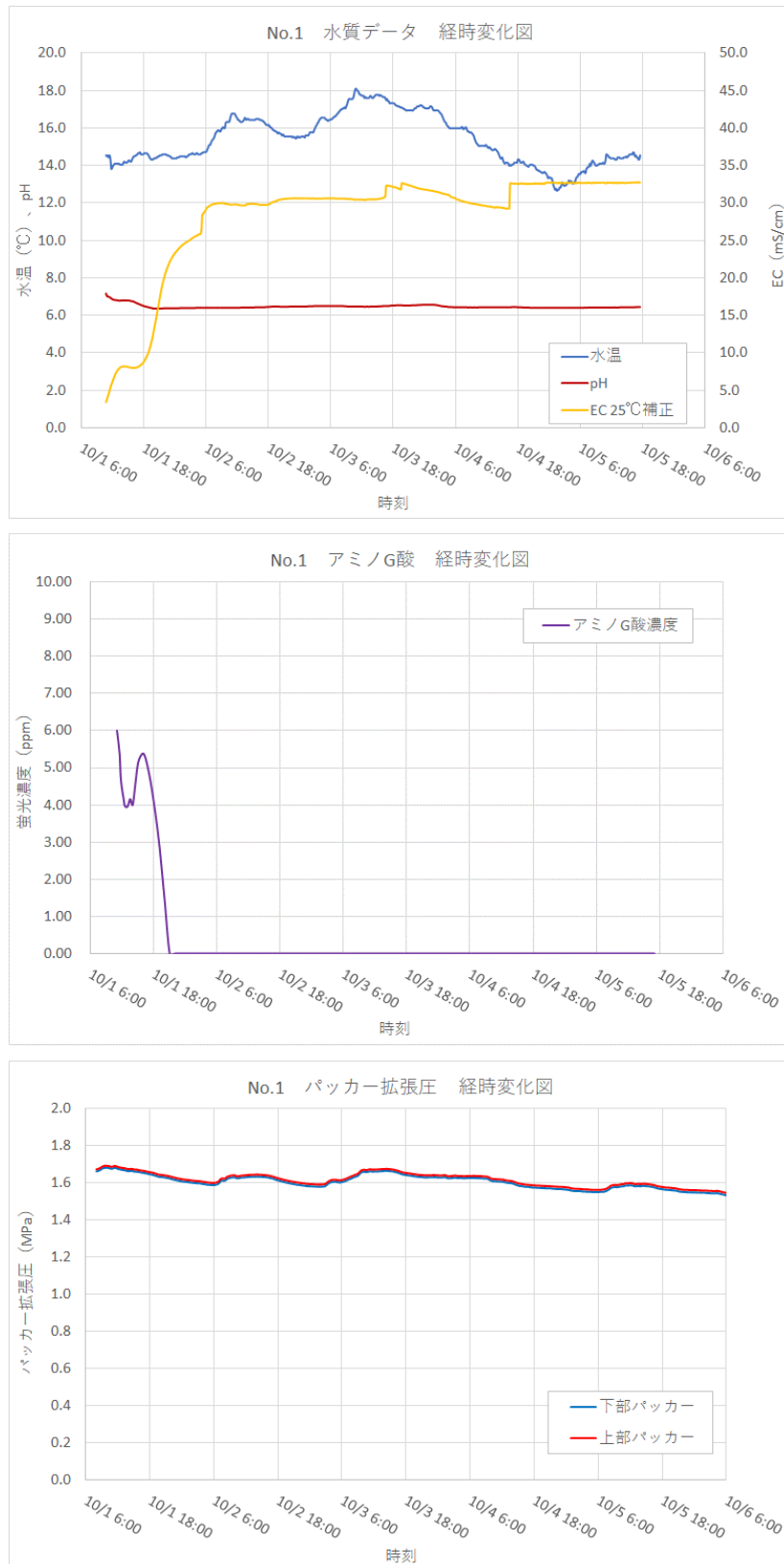


Fig. 80 深度 491 m 地点からの揚水時の水温, pH, EC, アミノ G 酸濃度, パッカー圧

深度 367 m 地点におけるスラグ試験中の水位の時間変化と解析結果を Fig. 81 に示す。透水係数は $4.0 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$ (区間長 10.32 m, 孔半径 0.07 m) であり, 揚水時の水位低下量が 50 m の場

合に約 1.6 L min^{-1} の揚水が可能と算定された。揚水中の水位、揚水流量、遊離ガス流量、水温、pH、EC (25°Cにおける補正值)、アミノ G 酸濃度、パッカー圧の観測結果を Fig. 82 と Fig. 83 に示す。平均揚水量は 1.35 L min^{-1} であり、総揚水時間 102 時間で約 8.3 m^3 の地下水を揚水した。これは採水装置の内部容積の約 5.9 倍に相当する。揚水流量は 1.5 L min^{-1} として揚水を開始したが、水位が下がる傾向を示したため、揚水開始から 24 時間後に 1.3 L min^{-1} とした。 ^{81}Kr を用いた地下水年代測定の有効性の検討のための遊離ガスの採取については、積算揚水量が採水装置の内部容積の 2 倍以上を超えた時点（揚水開始から 24 時間後）から開始した。EC の値は揚水開始から約 20 時間後に約 21 mS cm^{-1} の値で定常状態に達した。揚水開始時に見られる約 30 mS cm^{-1} の値は採水装置内部に残留した深度 491 m 地点の地下水の影響である。水温は外気温の影響を受け、 $12\sim 16^\circ\text{C}$ の間で推移した。pH は採水装置の内部容積の 1 倍程度の揚水後から約 6.6 の値を示し、安定した。アミノ G 酸濃度は揚水開始の 13 時間後に 1 mg L^{-1} を下回った。

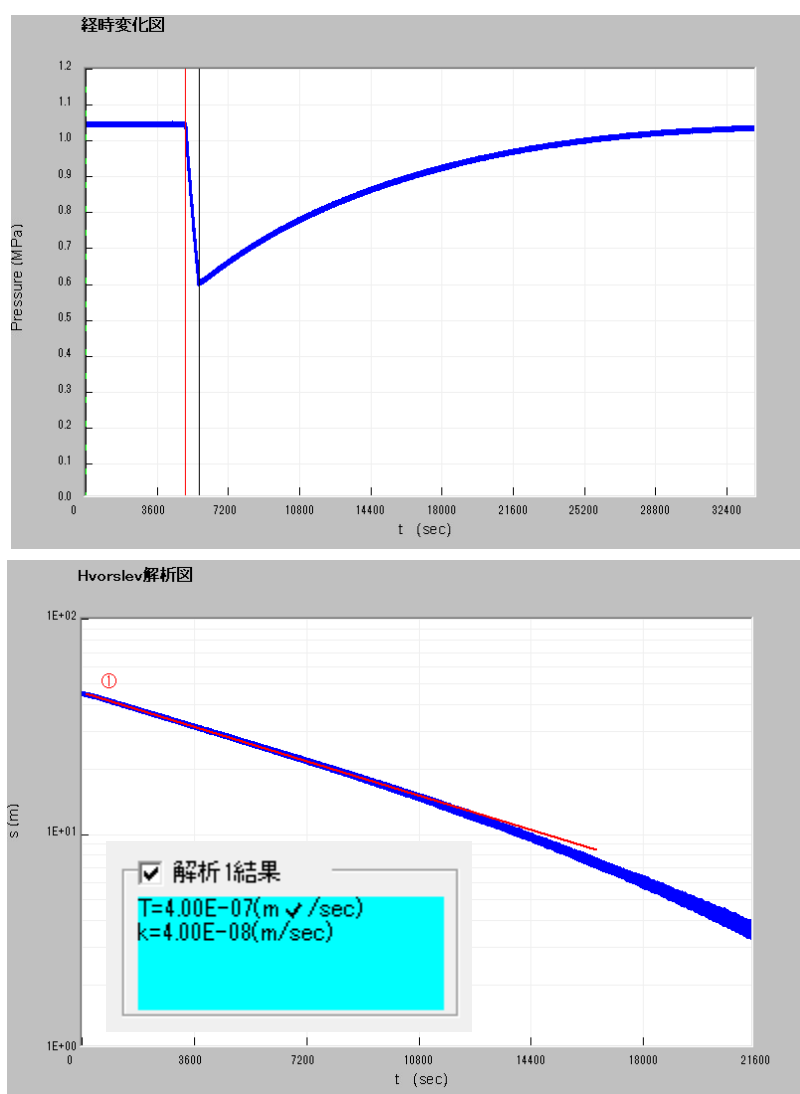


Fig. 81 深度 367 m 地点におけるスラグ試験結果

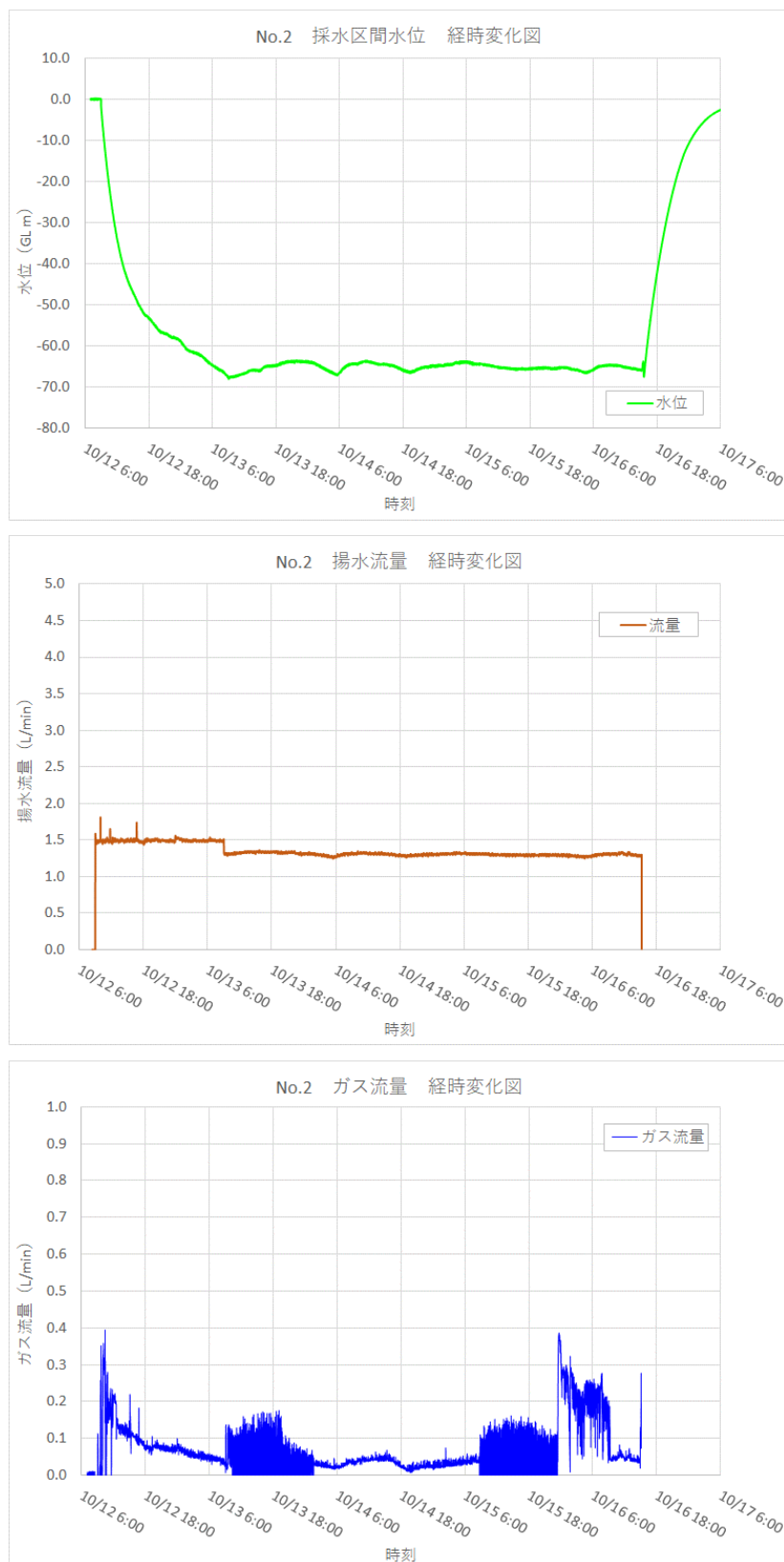


Fig. 82 深度 367 m 地点からの揚水時の水位と流量，ガス流量

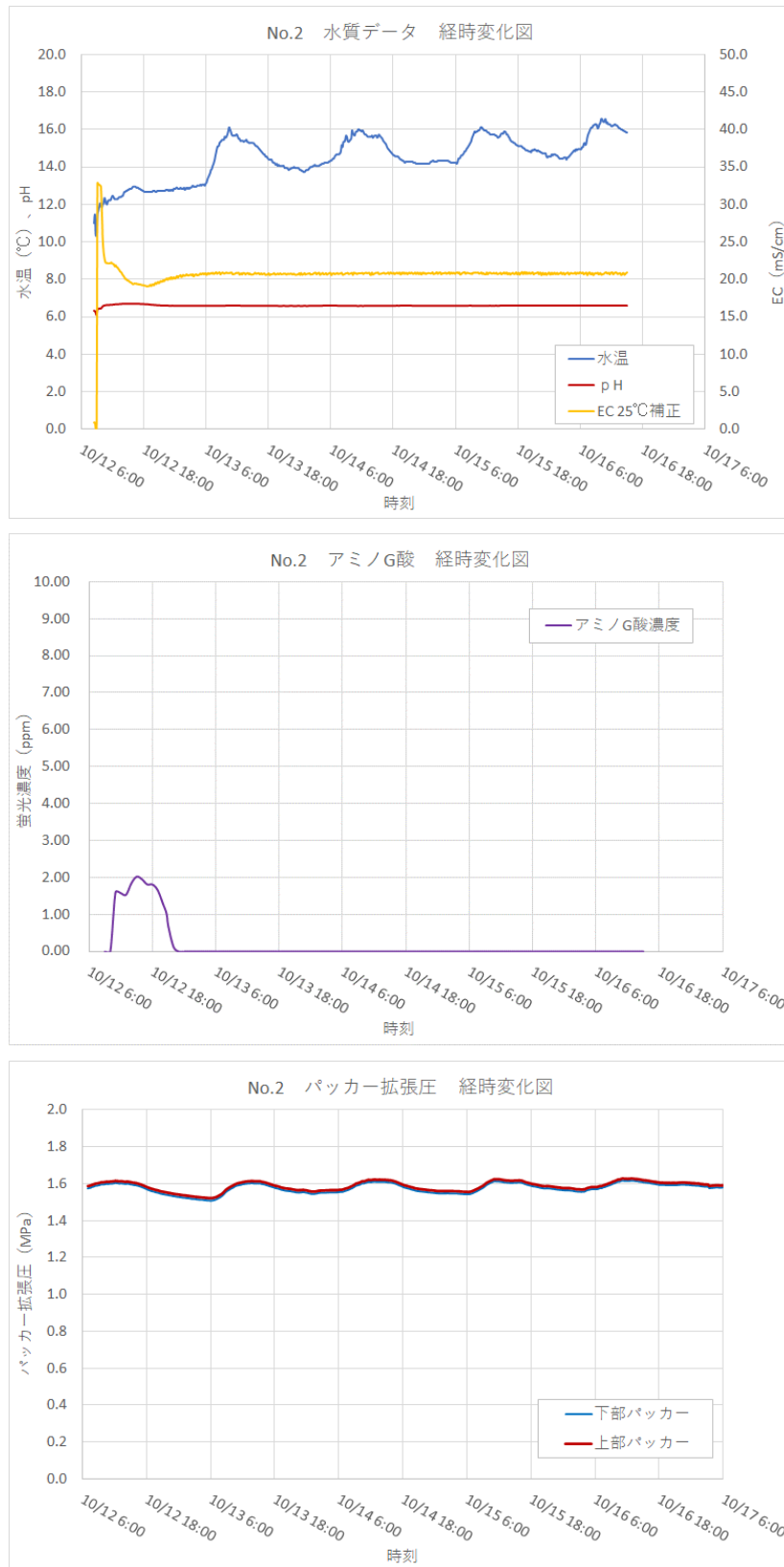


Fig. 83 深度 367 m 地点からの揚水時の水温, pH, EC, アミノ G 酸濃度, パッカー圧

(2) 封圧採水試料と孔口採水試料の分析結果

封圧採水試料と孔口採水試料の分析結果を Table 39 と Table 40 に示す。アミノ G 酸の濃度は十分に低く、掘削水の汚染は見られない。各深度から得られた割れ目中の地下水は、圧縮抽出水と同じ値を示すことから (Fig. 75)、これら 2 箇所の原位置採水箇所に見られた水みち中の地下水は流動性の高いものではないことが推察される。封圧採水試料と孔口採水試料はどちらも同じ値を示すことから、採取方法による違いは見られない。

Table 39 封圧採水試料と孔口採水試料の分析結果

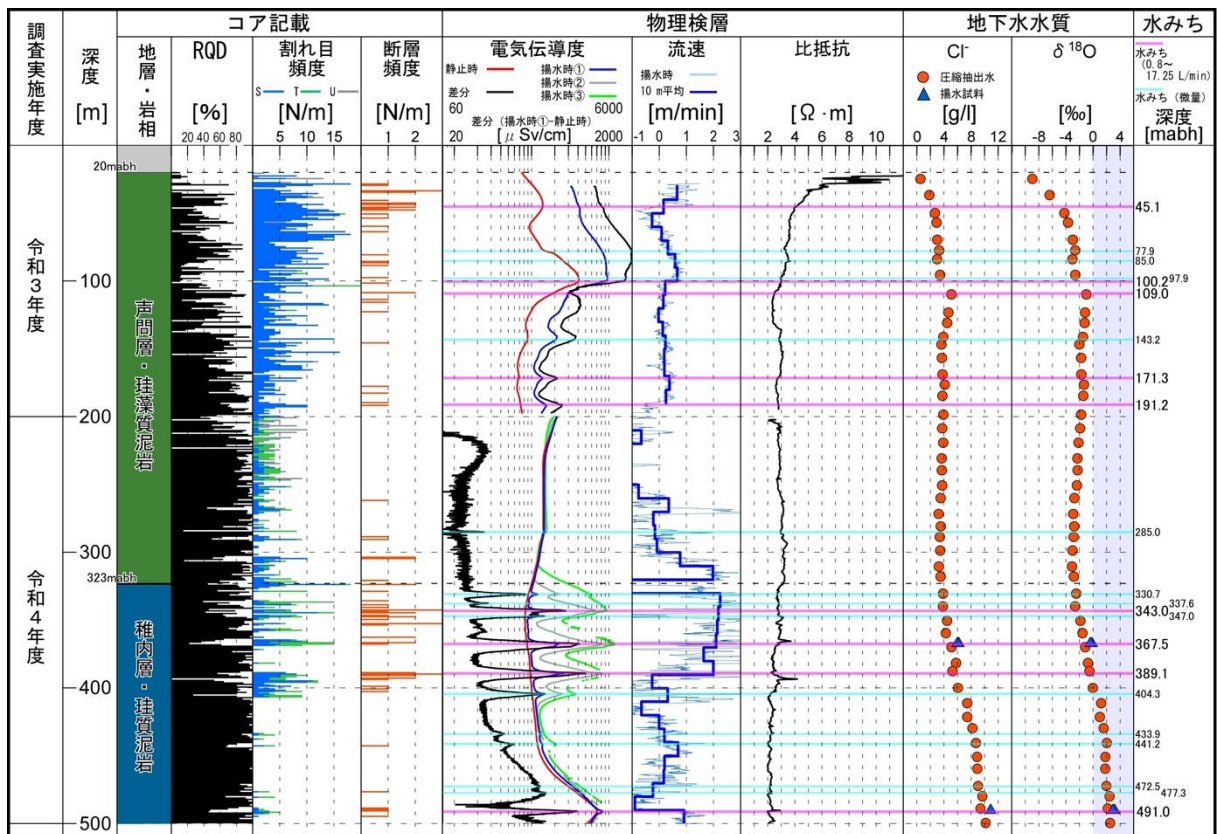
	採取深度 (GL -m)		間隙水中の溶存イオン濃度 (mg L ⁻¹)								酸素水素同位体比 (‰)		
	上端	下端	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	δ ¹⁸ O	δ ² H
封圧	362.02	372.34	4200	104	95	129	<0.1	5900	44	0.1	1.8	-0.5	-36.3
封圧	485.02	495.34	6900	115	194	240	<0.1	10900	85	0.4	1.7	+2.9	-21.6
孔口	362.02	372.34	4400	108	98	133	<0.1	6100	47	0.1	1.6	-0.2	-35.8
孔口	485.02	495.34	6900	116	193	240	<0.1	10900	86	0.4	2.7	+3.2	-21.4

Table 40 封圧採水試料と孔口採水試料の分析結果

	採取深度 (GL -m)		(mg L ⁻¹)					(μg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(-)	(mS cm ⁻¹)	
	上端	下端	I	Li	B	Sr	Rb	Ba	Cs	Amino G酸	pH	EC
封圧	362.02	372.34	16	12	105	2.4	57	2000	<5	0.2	7.27	22
封圧	485.02	495.34	30	17	129	4.9	74	4400	<5	0.2	7.05	35
孔口	362.02	372.34	17	12	108	2.5	59	2100	<5	0.2	6.98	23
孔口	485.02	495.34	30	17	130	4.9	72	4500	<5	0.2	6.77	35

4. まとめ

本ボーリング調査は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業^{4),5)}の一環として、令和2年度に実施した物理探査などのデータに基づき推定した地下深部の低流動域分布の妥当性を確認することを目的としたものである。ボーリング孔名は Horonobe Fossil seawater Boring-1 であり、HFB-1 孔と称す。HFB-1 孔は幌延深地層研究センターの隣接地に掘削された垂直孔であり、令和3年度に地表から深度 200 m まで掘削され、令和4年度に深度 200 m から深度 500 m まで掘削されたものである。本稿は、令和2年度以降の幌延深地層研究計画に示された研究課題の1つである地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化に必要な基礎データとして、HFB-1 孔の掘削に関わる情報およびボーリング調査から得られた各種データ（岩芯記載、物理検層、化学分析など）を取りまとめたものである。Fig. 84 に HFB-1 孔における地表から深度 500 m までの岩芯記載、物理検層、地下水水質の深度分布を示す。岩芯写真や記載データ、本文中に示しきれない物理検層デジタルデータなどは付録に納めた。

Fig. 84 HFB-1 孔のボーリング調査結果一覧⁴⁾

謝辞

本調査には、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「令和3年度および令和4年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発事業（JPJ007597）（岩盤中地下水流動評価技術高度化開発）」の成果の一部を利用した。ボーリング調査に当たっては、株式会社地球科学総合研究所および株式会社地圏総合コンサルタントの諸氏にご協力いただいた。この場を借りて、深く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 原子力発電環境整備機構, 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—, NUMO-TR-20-01, 2021.
- 2) Ishii, E., Assessment of hydraulic connectivity of fractures in mudstones by single-borehole investigations, *Water Resources Research*, vol. 54, pp. 3335–3356, 2018.
- 3) Nakata, K., Hasegawa, T., Oyama, T., Ishii, E., Miyakawa, K. and Sasamoto, H., An evaluation of the long-term stagnancy of porewater in the Neogene sedimentary rocks in northern Japan, *Geofluids*, vol. 2018, article ID 7823195, 2018.
- 4) 日本原子力研究開発機構, 電力中央研究所, 令和 4 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業—岩盤中地下水流動評価技術高度化開発—報告書, 経済産業省資源エネルギー庁, 2023.
- 5) 日本原子力研究開発機構, 電力中央研究所, 令和 3 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業—岩盤中地下水流動評価技術高度化開発—報告書, 経済産業省資源エネルギー庁, 2022.
- 6) 小椋伸幸, 掃部 満, 天北・羽幌地域の石油地質—深部構造特性と炭化水素ポテンシャル, 石油技術協会誌, vol. 57, pp. 32–44, 1992.
- 7) 岡 孝雄, 北海道付近のネオテクトニクス像—特にネオテクトニクスの地域区分と特徴—, 月刊地球, vol. 21, pp. 549–556, 1999.
- 8) 福沢仁之, 保柳康一, 秋山雅彦, 北海道中央北部の新第三系の層序と古環境, 地質学論集, vol. 37, pp. 1–10, 1992.
- 9) 福沢仁之, 北海道天北—羽幌地域の上部新第三系層序の再検討—とくに“稚内”・“声間”層について—, 地質学雑誌, vol. 91, pp. 833–849, 1985.
- 10) Miyakawa, K. and Nakata, K., Data of Groundwater Chemistry Obtained in the Horonobe Underground Research Laboratory Project (FY2022), JAEA-Data/Code, 2022-013, 23p., 2023.
- 11) 中田弘太郎, 長谷川琢磨, 柏谷公希, 地下水トレーサーとしての蛍光染料の分析と試料溶液の保管法の検討, 地下水学会誌, vol. 59, pp.205–227, 2017.
- 12) Käss, W. and Behrens, H., Tracing Technique in Geohydrology, AA Balkema, Rotterdam, Netherland, 581pp., 1998.
- 13) 杉山 歩, 中田弘太郎, 長谷川琢磨, 私信.
- 14) Colwell, F.S. et al. Innovative techniques for collection of saturated and unsaturated subsurface basalts and sediments for microbiological characterization, *J. Microbiol. Method.*, vol. 15, pp. 279–292, 1992.
- 15) Kallmeyer, J., Mangelsdorf, K., Cragg, B. and Horsfield, B., Techniques for contamination assessment during drilling for terrestrial subsurface sediments, *Geomicrobiol. J.*, vol. 23, pp. 227–239, 2006.
- 16) Smith, D.C., Spivack, A.J., Fisk, M.R., Haveman, S.A. and Staudigel, H., Tracer-based estimates of drilling-induced microbial contamination of deep sea crust, *Geomicrobiol. J.*, vol. 17, pp. 207–219, 2000.
- 17) Yanagawa, K. et al., The first microbiological contamination assessment by deep-sea drilling and coring by the D/V Chikyu at the Iheya North hydrothermal field in the Mid-Okinawa Trough (IODP Expedition 331), *Front. Microbiol.*, vol. 4, pp. 1–10, 2013.
- 18) Friese, A., Kallmeyer, J., Kitte, J.A., Montano, I., Bijaksana, S., Wagner, D., the ICDP Lake Chalco Drilling Science Team and the ICDP Towuti Drilling Science Team, A simple and inexpensive technique for assessing contamination during drilling operations, *Limnology and Oceanography: Methods*, vol. 15, pp. 200–211, 2017.

- 19) 日本機械学会, 1999 日本機械学会蒸気表, 日本機械学会, 201p., 1999.
- 20) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 坑井試験マニュアル, pp.II-180–II-1282, 1993.
- 21) Clayton, R.N. and Mayeda, T.K., The use of bromine pentafluoride in the extraction of oxygen from oxides and silicates for isotopic analysis, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol.27, pp.43–52, 1963.
- 22) Vennemann, T.W. and O'Neil, J.R., A simple inexpensive method of hydrogen isotope and water analyses of minerals and rocks based on zinc reagent, *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, vol.103, pp.227–234, 1993.
- 23) 中田弘太郎, 長谷川琢磨, 東原知広, 地下水年代測定評価技術の開発(その1) –地下水年代測定のためのコア間隙水中希ガス抽出技術の確立と適用–, 電力中央研究所報告, N05065, 20p., 2006.
- 24) Mahara, Y., Igarashi, T., Hasegawa, T., Miyakawa, K., Tanaka, Y. and Kiho, K., Dynamic changes in hydrogeochemical conditions caused by tunnel excavation at the Aspo Hard Rock Laboratory (HRL), Sweden, *Applied Geochemistry*, vol.16, pp.291–315, 2001.
- 25) Hasegawa, T., Nakata, K., Tomioka, Y., Goto, K., Kashiwaya, K., Hama, K., Iwatsuki, T., Kunimaru, T. and Takeda, M., Cross-checking groundwater age by ^4He and ^{14}C dating in a granite, Tono area, central Japan, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol.192, pp.166–185, 2016.
- 26) Nakata, K., Hasegawa, T., Higashihara, T. and Oyama, T., Chloride ion concentrations during the compression of rocks to extract pore water, *Geofluids*, vol.16, pp.78–88, 2016.
- 27) 木方建造, 大山隆弘, 馬原保典, 圧密型岩石抽水装置の製作と深部堆積岩への適用, *応用地質*, vol. 40, pp. 260–269, 1999.
- 28) Nakata, K., Hasegawa, T., Oyama, T. and Miyakawa, K., Evaluation of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of water in pores extracted by compression method-effects of closed pores and comparison to direct vapor equilibration and laser spectrometry method, *Journal of Hydrology*, vol.561, pp.547–556, 2018.
- 29) Wassenaar, L.I., Hendry, M.J., Chostner, V.L. and Lis, G.P., High resolution pore water $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ measurements by $\text{H}_2\text{O}_{(\text{liquid})}$ – $\text{H}_2\text{O}_{(\text{vapor})}$ equilibration laser spectroscopy, *Environ. Sci. Technol.*, vol.42, pp.9262–9267, 2008.
- 30) Hendry, M.J., Schmeling, E., Wassenaar, L.I., Barbour, S.L. and Pratt, D., Determining the stable isotope composition of pore water from saturated and unsaturated zone core: Improvements to the direct vapor equilibration laser spectrometry method, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol.19, pp.4427–4440, 2015.
- 31) Nakata, K., Hasegawa, T., Solomon, D.K., Miyakawa, K., Tomioka, Y., Ohta, T., Matsumoto, T., Hama, K., Iwatsuki, T., Ono, M. and Marui, A., Degassing behavior of noble gases from groundwater during groundwater sampling, *Applied Geochemistry*, vol. 104, pp. 60–70, 2019.

付録 DVD

付録 DVD に格納したデータの内容を下記に示す。[]はフォルダを表す。

- [A1 岩芯写真] ┐ [分析用事前抽出試料(200-500m)] – *depthm.jpg*
 - └ 岩芯写真(20-200m).pdf
 - └ 岩芯写真(200-500m).pdf

- [A2 岩芯記載] ┐ 地質柱状図(20-200m).xlsx
 - └ 地質柱状図(200-500m).xlsx
 - └ [岩芯記載シート] – 記載表_*depth-depthm.xlsx*

- [A3 試料の採取と化学分析] ┐ XRD 分析結果チャート一覧.pdf
 - └ 希ガス分析用コアガス採取記録(20-200m).xls
 - └ 希ガス分析用コアガス採取記録(200-500m).xls

- [A4 物理検層] ┐ ブレークアウト読取表(20-200m).xlsx
 - └ ブレークアウト読取表(200-500m).xlsx
 - └ 不連続面読取表(20-200m).xlsx
 - └ 不連続面読取表(200-500m).xlsx
 - └ 測定・解析データ(0-200m).xlsx
 - └ 測定・解析データ(200-500m).xlsx
 - └ 物理検層総合柱状図(0-200m).pdf
 - └ 物理検層総合柱状図(200-500m).pdf

- [A5 掘削パラメータ] ┐ マッドロギングデータ(20-200m).xlsx
 - └ 掘削状況データ(200-500m).xlsx

- [A6 トレーサー管理実績] ┐ トレーサー管理実績データ(20-200m).xlsx
 - └ トレーサー管理実績データ(200-500m).xlsx

This is a blank page.

