

幌延深地層研究計画に関する 令和6年度の成果及び令和7年度の計画

(2) 必須の課題のうち令和6年度に取りまとめる課題

3. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

3.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

3.1.2 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

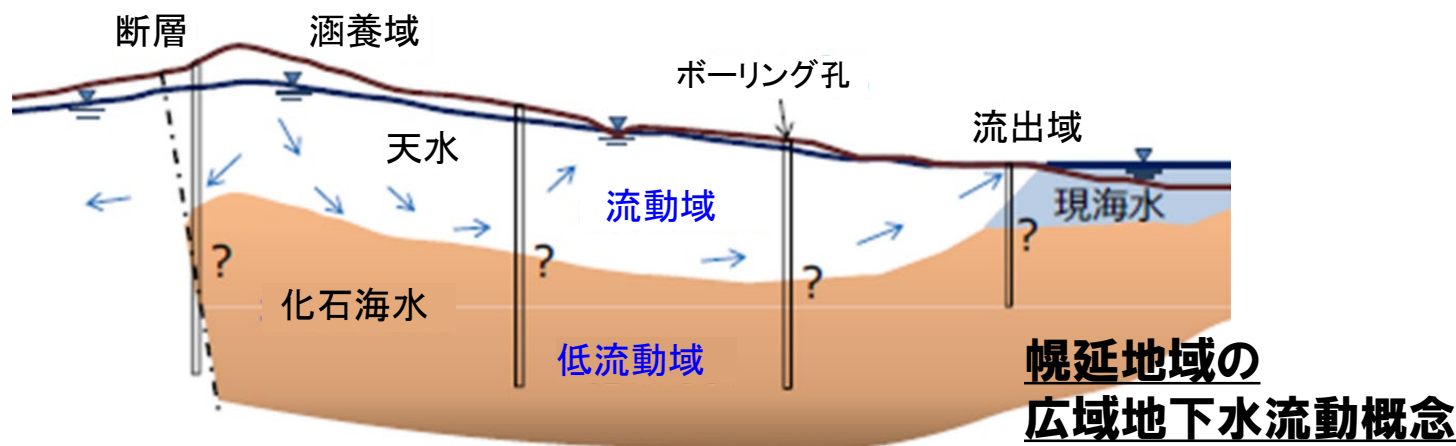
令和7年3月11日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
幌延深地層研究センター

3.1.2 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

【第4期中長期計画 目的】

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を目的として、化石海水が存在するような地下水の流れが非常に遅い領域(低流動域)の三次元分布を調査・評価する手法の検証および広域スケールを対象とした水理・物質移行評価手法の検証



- 地下浅部は、隆起・侵食により天水が涵養し、地下を經由して、流出域まで流動する**流動域**
- 地下深部は、隆起・侵食を経ても天水の涵養の影響を受けておらず、埋没続成過程により変質した堆積時の海水※が残されており、拡散が支配的な**低流動域**

※本研究では、このような古い海水を「化石海水」と呼ぶ

【令和6年度の計画】

引き続きこれまでに得られた成果に基づき、地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する方法を取りまとめる。

3.1.2 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

【成果取りまとめ】

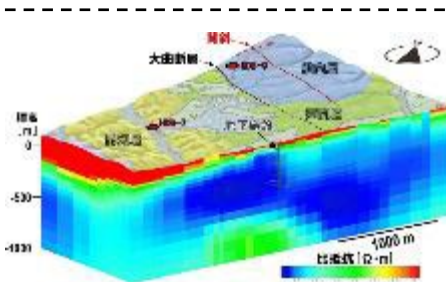
地下水の流れが非常に遅い領域の調査・モデル化技術を実証

流動域/低流動域の
三次元分布を調査・評価

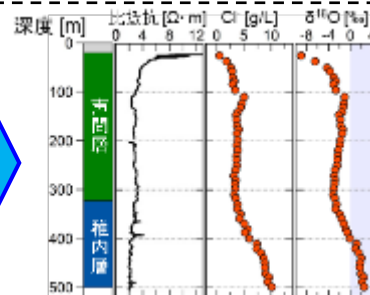
流動域/低流動域の
三次元分布を推定

長期的に安定な水理場・
化学環境の確認

水理モデル構築と
数値解析による
地下水移行時間の評価

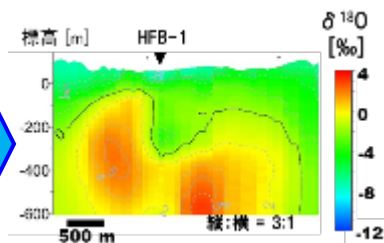


高密度電磁探査



ボーリング調査

(比抵抗、Cl濃度、 $\delta^{18}\text{O}$ の深度分布取得)



地球統計学的解析

(各パラメータの三次元分布推定)

- ・ 既存調査も含む幌延地域の調査データを基に、数十km四方の範囲の調査結果に基づき、数km四方に絞り込み、その範囲の三次元分布を推定する手順を提示

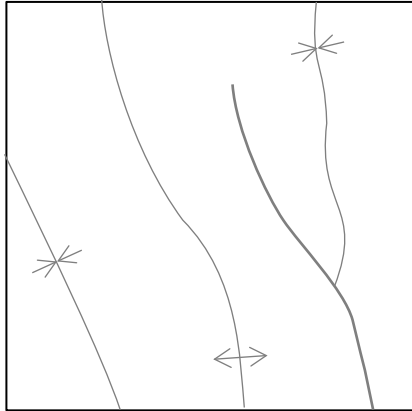
- ・ 地下水の年代や安定同位体比といった地球化学的な評価方法として、割れ目水と間隙水の水質コントラストと、地下水の放射性炭素(^{14}C)年代を利用した地下水流動の評価手法を構築
- ・ 幌延地域の埋没続成作用のモデル化と数値解析により、化石海水の水質形成機構を定量的に理解

- ・ 広域スケールを対象とした水理・物質移行解析(地下水移行時間解析)において、結果に対して感度の高い岩盤の水理学的有効間隙率の与え方を提示

3.1.2 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

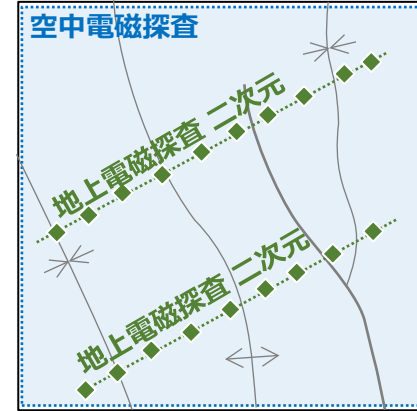
【主要成果】化石海水の三次元分布を推定する手順の提示

【手順①】 数十km四方



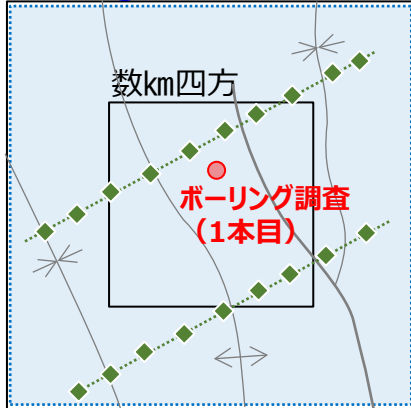
- 既存情報に基づき数十km四方の調査範囲を設定
- 化石海水に関する既存情報の有無の確認

【手順②】 数十km四方



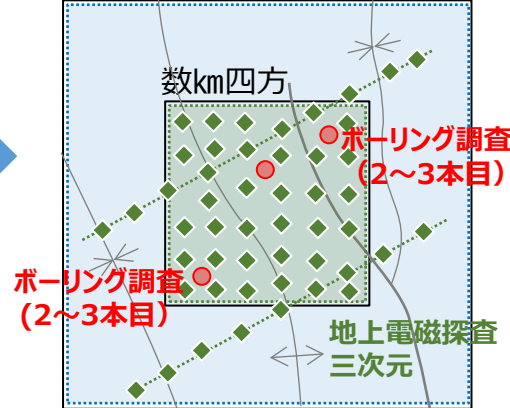
- 空中電磁探査により浅い領域の三次元比抵抗分布を推定し、二次元地上電磁探査により深い領域の比抵抗分布を推定

【手順③】 数十km四方

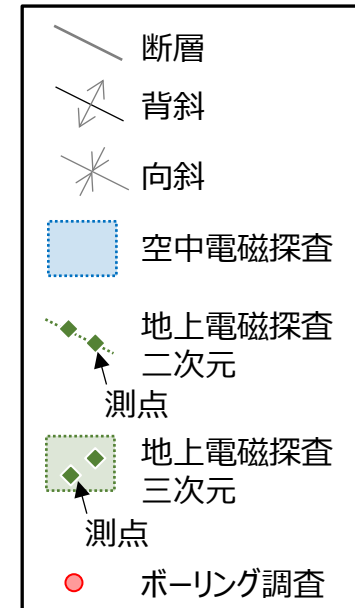


- 手順②の結果に基づき、化石海水が分布している可能性の高い低比抵抗領域が浅い深度に存在する数km四方の調査範囲を設定
- その調査範囲における1本目のボーリング調査により、化石海水の有無を確認

【手順④】 数十km四方



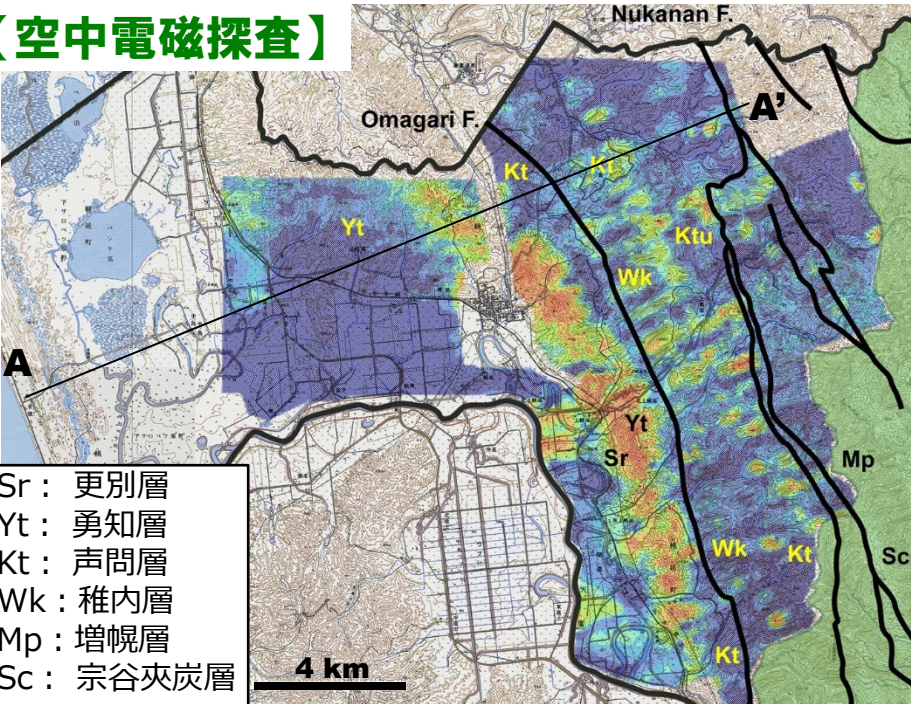
- 数km四方の調査範囲に高密度に測点を配置させた地上電磁探査により、深い領域を含めて三次元比抵抗分布を推定
- その結果に基づき2〜3本目のボーリング調査地点を設定
⇒ **化石海水の広がりを確認できる地点を選定**
- 地球統計学的解析により低流動域の三次元分布を推定



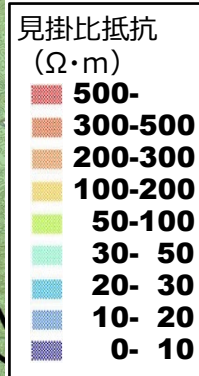
3.1.2 地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化

【主要成果】化石海水の三次元分布を推定する手順の提示（数十km四方を対象とした電磁探査の適用例）

【空中電磁探査】



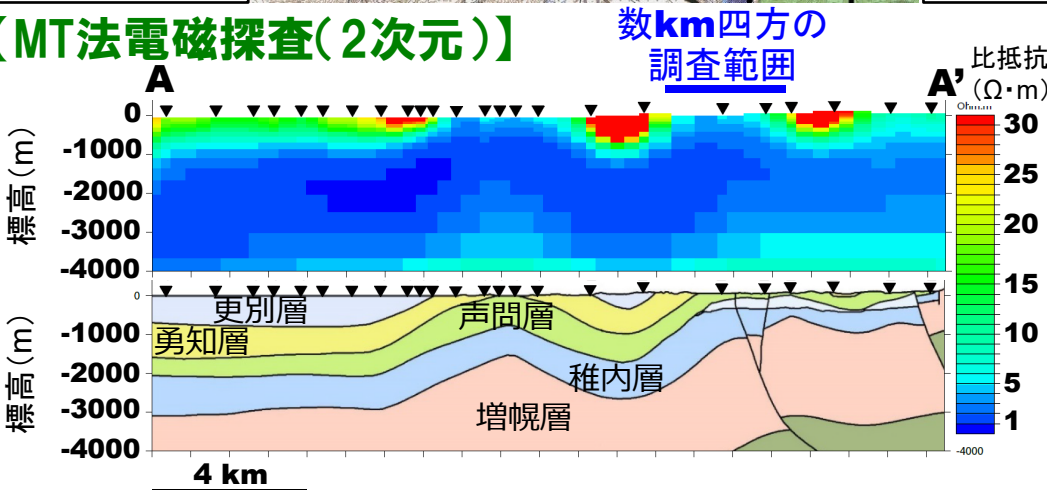
探査深度は150m程度と浅いが、調査範囲全域の三次元比抵抗分布を取得可能
⇒ 地層や褶曲、断層と比較しながら、化石海水が分布する可能性が高い領域である低比抵抗領域を抽出可能



見掛け比抵抗分布図(100m深度)

五十嵐ほか, 2001, JNC-TJ1420 2001-035に基づく

【MT法電磁探査(2次元)】



二次元情報ではあるものの、空中電磁探査の結果に加えてさらに深部の比抵抗分布を補足可能
⇒ 調査範囲を地下施設設置深度に化石海水が分布する数km四方に絞り込むことが可能

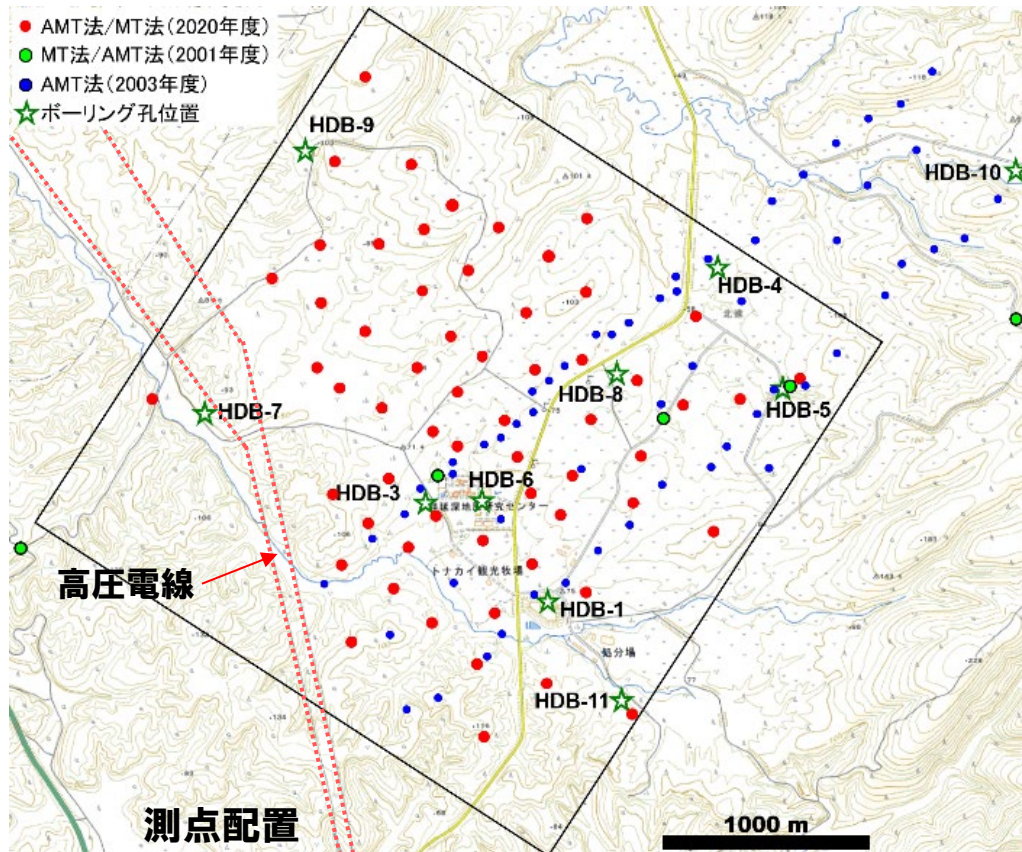
2次元比抵抗断面(上)、地質断面(下)
(TE+TMモード、初期比抵抗値: $10 \Omega \cdot m$)

産総研, 2008, 沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発平成19年度成果報告書、および岸本ほか, 2001, JNC TJ1420-036のデータ使用

3.1.2 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

【主要成果】化石海水の三次元分布を推定する手順の提示（数km四方を対象とした電磁探査の適用例）

- 幌延URLを中心とする約3 km四方が調査範囲
- 探査深度は、地下施設が建設される深度より十分に深い探査深度 ⇒ AMT/MT 法：幅広い周波数帯
- 解析上の解像度は調査範囲の中心部で100 m程度、周辺部で200 m程度
⇒地形や土地利用、高圧電線などのノイズ源を考慮した上で、測点を200～500 m程度の間隔で配置
⇒新規60測点と既存39測点の合計99測点を用いて逆解析により三次元比抵抗分布を推定



磁気センサーを埋設している様子

【測定仕様】

測定方法： リモートリファレンス方式による AMT/MT 法

測点数： 60点（令和2年度実施分）

測定成分： 全測点で電場 2成分、
磁場 3成分の計 5成分を測定

ダイポール長： 原則 30 m

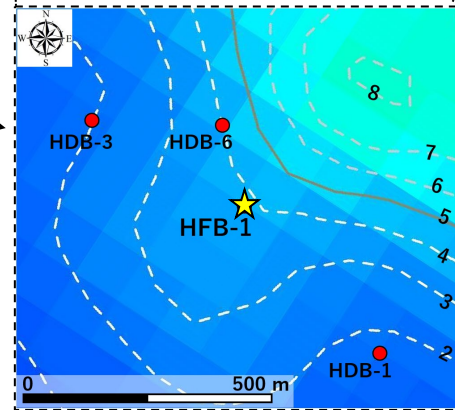
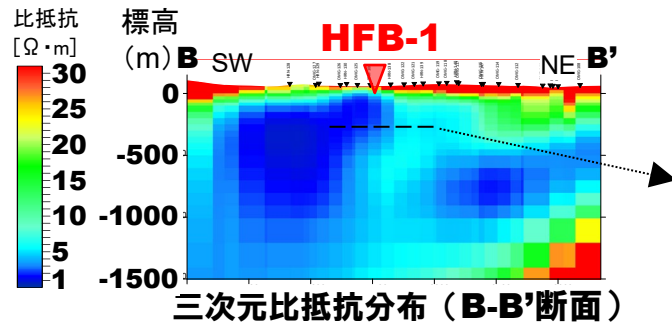
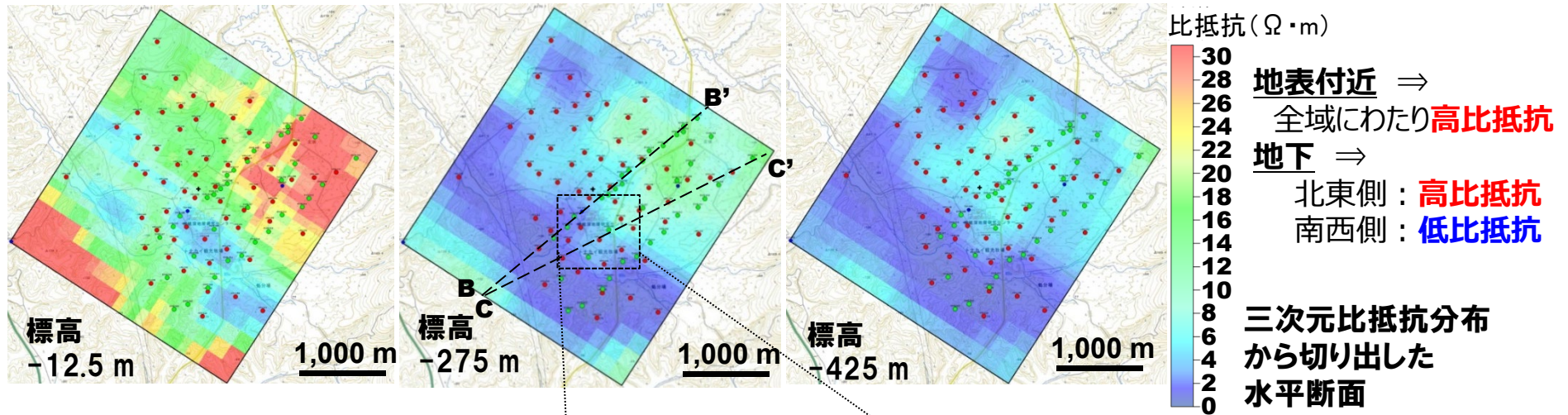
測定周波数： 8,000～0.001Hz の 30 周波数 以上

測定時間： AMT 周波数帯 1 晩 以上、
MT 周波数帯 2 晩以上

測定機器： カナダ Phoenix 社 AMT/MT 法測定システム

3.1.2 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

【主要成果】化石海水の三次元分布を推定する手順の提示 (三次元比抵抗分布の推定結果とボーリング調査地点の選定)



★ HFB-1 (新規) ● 既存ボーリング孔
標高 -275 m の比抵抗分布 (拡大図)

数km四方におけるのボーリング調査地点の選定

1本目：

低流動域と推定できる領域（低比抵抗領域）
がより浅部から分布する地点

⇒ **手順③における1本目のボーリング調査**

⇒ 例えば、既存孔HDB-1とHDB-3が相当

2本目：

化石海水の広がり端を把握するために、
低比抵抗領域の端と読み取れる地点

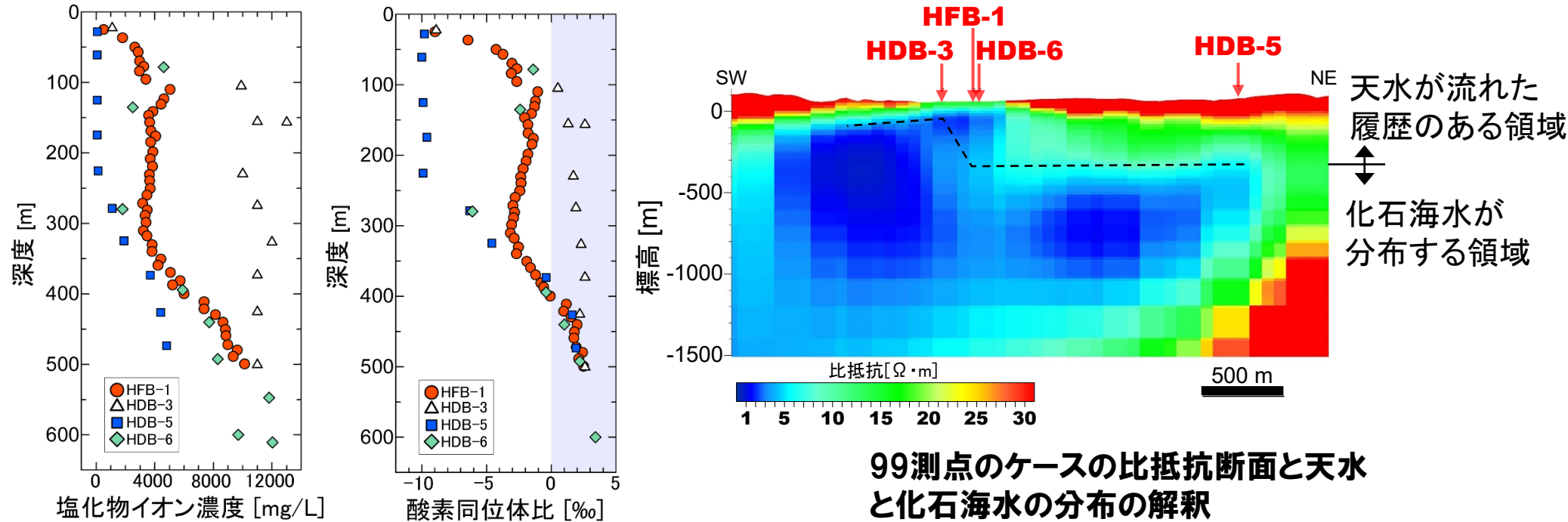
⇒ **HFB-1の地点を選定**

⇒ 本研究において実際に掘削し確認



3.1.2 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

【主要成果】 化石海水の三次元分布を推定する手順の提示
(電磁探査結果に基づくボーリング調査地点の選定結果の妥当性確認)



99測点のケースの比抵抗断面と天水
と化石海水の分布の解釈

地上からのボーリング調査による Cl⁻濃度、 $\delta^{18}\text{O}$ の深度分布

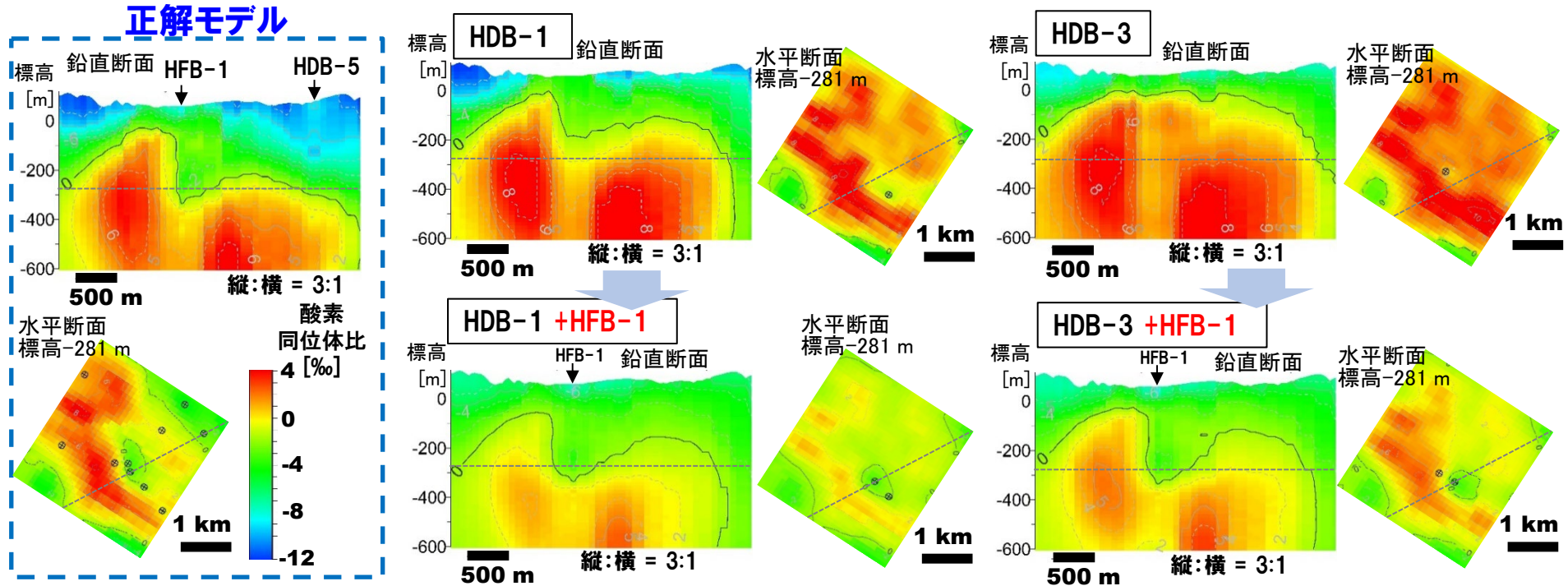
- 深度約20 mからCl⁻濃度、 $\delta^{18}\text{O}$ ともに上昇するが、深度400 mまでは化石海水と判断できない地下水
- 既存孔HDB-3、6、5の $\delta^{18}\text{O}$ の深度プロファイルに基づき、天水と化石海水の分布を解釈
 - ⇒ 比抵抗の分布（高低）は、天水と化石海水の分布の状況と整合的
- HFB-1孔は「天水と化石海水が混合している領域」が鉛直に長く分布する地点
 - ⇒ 検討した調査手順に従い、高密度電磁探査の結果に基づきHFB-1孔の調査地点を選定した結果、当初の狙い通り、南西側の深度100 m以深に広がる化石海水が分布する領域の縁を選定できたことを確認

3.1.2 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

【主要成果】化石海水の三次元分布を推定する手順の提示

(地球統計学的手法による $\delta^{18}\text{O}$ の三次元分布の推定)

- 最適なボーリング調査地点の場所と数を検討するために、全11孔を使用した場合 (**正解モデル**) と任意の2孔を使用した場合を比較 ⇒ここでは、検討した手順に従い、1孔目をHDB-1またはHDB-3、2孔目をHFB-1



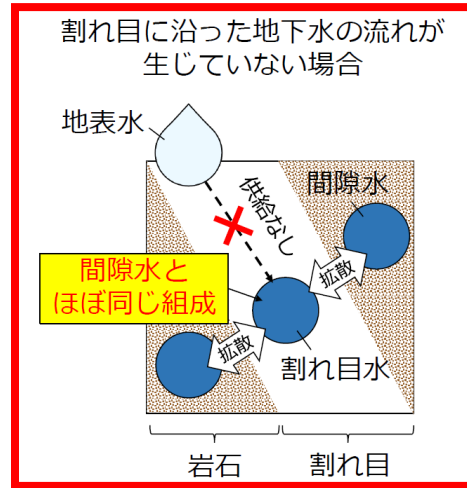
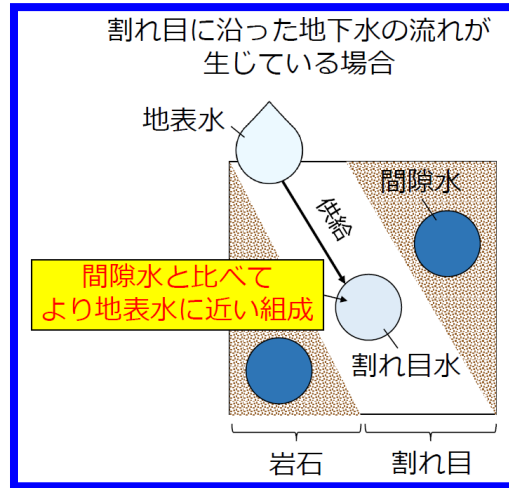
コロケートッド・コクリギングに基づく $\delta^{18}\text{O}$ の分布の推定結果

- HFB-1孔を加えると、その付近だけでなくそこから離れた領域の推定値も正解モデルに近づく
⇒ **最低2孔のボーリング調査**により、低流動域の三次元分布が推定可能
- 地球統計学的解析の観点では、比抵抗と $\delta^{18}\text{O}$ の関係を幅広く把握することで推定精度向上
⇒ HFB-1孔周辺は比抵抗と $\delta^{18}\text{O}$ の変化が大きい領域
⇒ 検討した調査手順の通り、化石海水の広がり端を調査地点とすることは効果的

3.1.2 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

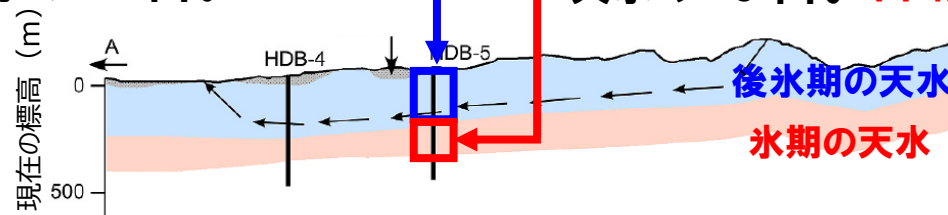
【主要成果】

割れ目水と間隙水の水質コントラストおよび ^{14}C 年代を利用した地下水流動の評価手法を構築



- 割れ目水と間隙水の水質に**コントラスト有**
- 現在と同じ同位体比の天水が浸透
- 天水の ^{14}C 年代: **4~7 ka**

- 割れ目水と間隙水の水質に**コントラスト無**
- より寒冷な時期を示す同位体比の天水が浸透
- 天水の ^{14}C 年代: **11 ka以前**

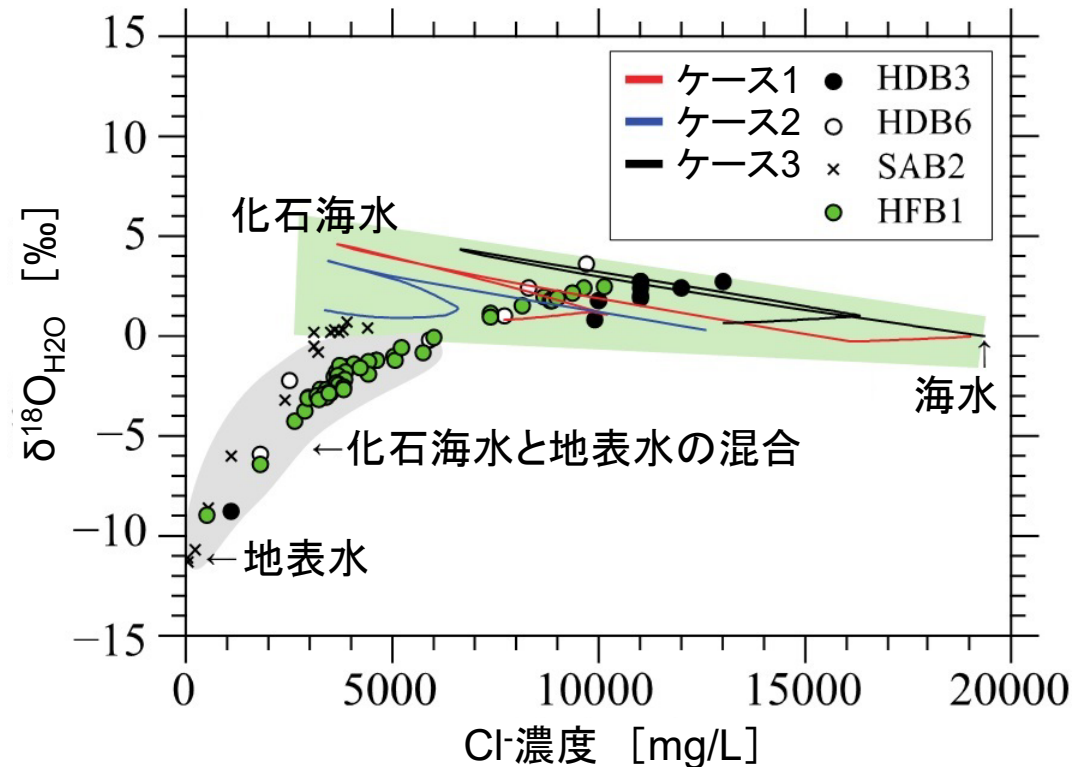


⇒ 天水領域の浅部: **後氷期の天水が流動**
天水領域の深部: **最終氷期の天水が滞留**
鉛直方向の動水勾配の違いに起因

- ボーリング調査において地下水の水質や年代に基づく地球化学的な評価手法として、割れ目と岩石間隙中の地下水の水質の違いから地下水の流れの有無を評価し、地下水の放射性炭素(^{14}C)年代から得られた情報を組み合わせることで、地下水の流動状態の長期的な変遷を推定する手法を構築
 - 天水が浸透した領域のうち、浅部では最終氷期以降(後氷期: 約1万年前以降)に浸透した地表水が流動し、深部では最終氷期に浸透した天水が現在は滞留
- ⇒ 両者の流動状態の違いは最終氷期と後氷期での鉛直方向の動水勾配(地下水を動かす駆動力)の違いに起因すると解釈

3.1.2 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

【主要成果】 幌延地域の埋没続成作用のモデル化と数値解析により化石海水の水質形成機構を定量的に理解



ボーリング孔における岩石コアの間隙水のCl⁻濃度とδ¹⁸Oの関係と解析結果

水質形成機構の数値解析における3ケース

ケース1: 0℃からスメクタイトの相変化が開始し、スメクタイトの含水率が10wt%

ケース2: 40℃からスメクタイトの相変化が開始し、スメクタイトの含水率が15wt%

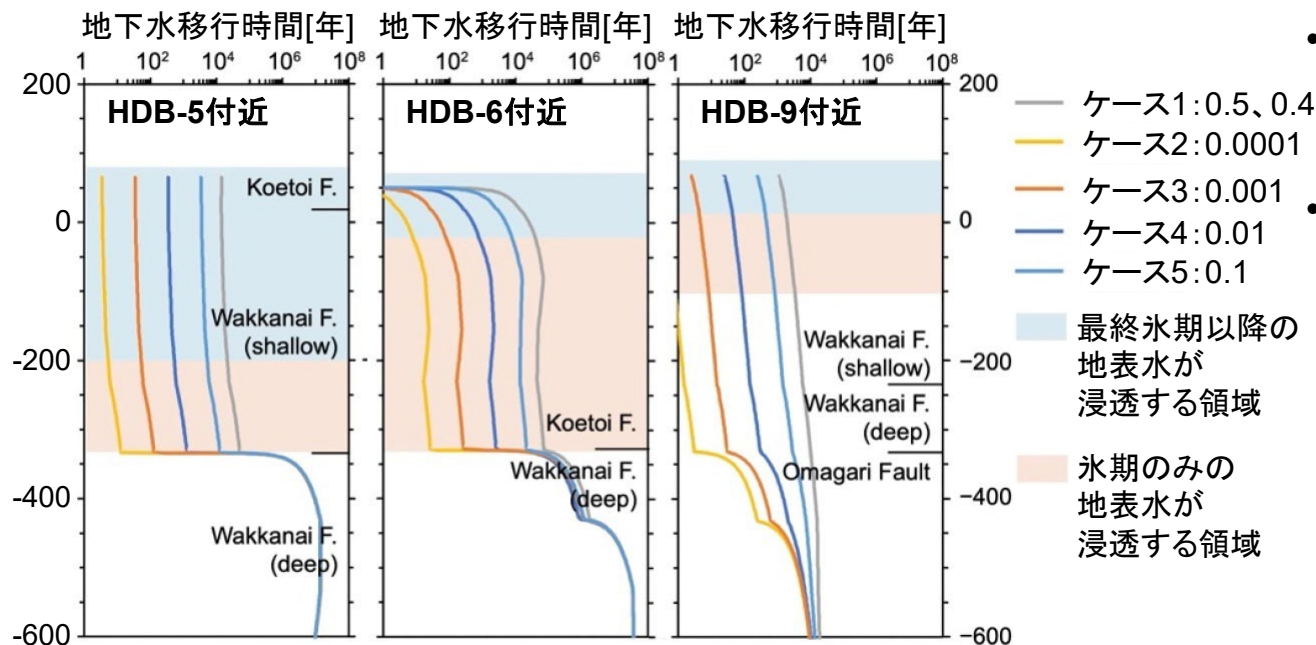
ケース3: 104℃からスメクタイトの相変化が開始し、スメクタイトの含水率が10wt%

- 幌延地域の化石海水は、海水のCl⁻濃度と比べて最大で約80%低い
 - 地層の埋没続成過程に伴う間隙率の減少による上昇流と、生物起源シリカおよび粘土鉱物の相変化に伴う脱水を考慮したモデルを構築し、数値解析を実施
 - **数値解析の結果**
 - ✓ 天水との混合がなくても海水と比較して最大で約80%低いCl⁻濃度の地下水を形成可能
 - ✓ 地下水の安定同位体比(δ¹⁸O、δ²H)も整合的
 - 化石海水に見られるCl⁻濃度の希釈は、現在の地質環境下での天水との混合ではなく、100万年オーダーの長い時間をかけて起こった埋没続成作用による変質に起因することを定量的に理解
- ⇒幌延地域の化石海水が分布する領域が地下水の流れが非常に遅い地域であるという解釈を支持

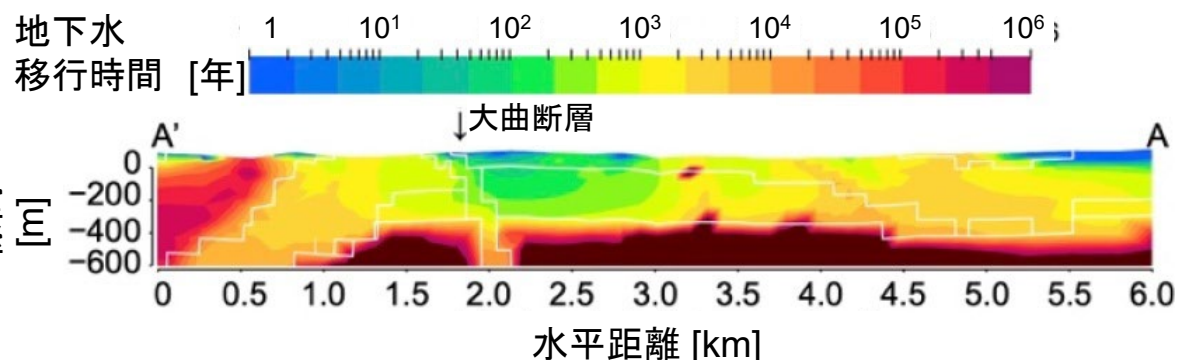
3.1.2 地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化

【主要成果】広域スケールを対象とした地下水移行時間解析手法の整備

地下水移行時間に対して感度の高い水理学的有効間隙率の与え方を検討



HDB-5、HDB-6、HDB-9付近の地下水移行時間の深度分布



地下水移行時間の解析結果の例（有効間隙率0.01の場合）

- センター周辺の陸域から日本海の海域にかけての広域(60×30 km)を対象に定常浸透流解析を実施
- 天水が主に割れ目を介して流動している地下浅部の領域の水理学的有効間隙率について場合分けし、得られた地下水移行時間と環境トレーサー(地下水の¹⁴Cやトリチウム)に基づく推定とを比較
 - ✓ 岩石基質部相当(0.5、0.4)
 - ✓ 割れ目の開口幅から算出(0.0001~0.1)
⇒ 0.0001~0.01が整合的
- 稚内層深部で得られた10⁶年以上の移行時間は、³⁶Clや⁴Heを用いた地下水年代評価と矛盾していない
- 割れ目内の地下水と基質部の間隙水の水質に差がある領域では、亀裂の開口幅に基づいて算出した岩盤の有効間隙率を与えることが適切

3.1.2 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係る成果

- 宮川和也, 石井英一, 今井久, 平井哲, 大野宏和, 中田弘太郎, 長谷川琢磨 (2024): 亀裂性堆積岩を対象とした地下水流動解析における有効間隙率の与え方: 北海道幌延に分布する声問層と稚内層浅部の事例、原子力バックエンド研究, vol.31, no.2, pp.82-95.
- Miyakawa, K., Kashiwaya, K., Komura, Y., and Nakata, K. (2023): Evolution of porewater in a Neogene sedimentary formation in the Horonobe area, Hokkaido, Japan: Modeling of burial diagenesis, GEOCHEMICAL JOURNAL, vol. 57, no.5, pp. 155-175.
- Mochizuki, A. and Ishii, E. (2022): Assessment of the level of activity of advective transport through fractures and faults in marine deposits by comparison between stable isotope compositions of fracture and pore waters, Hydrogeology Journal, vol.30, 2022, pp.813-827.
- Mochizuki, A. and Ishii, E. (2023): Paleohydrogeology of the Horonobe area, Northern Hokkaido, Japan: groundwater flow conditions during glacial and postglacial periods estimated from chemical and isotopic data for fracture and pore water, Applied Geochemistry, vol.155, 2023, 105737.
- 日本原子力研究開発機構, 電力中央研究所 (2021): 令和2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 [JPJ007597] 岩盤中地下水流動評価技術高度化開発報告書.
- 日本原子力研究開発機構, 電力中央研究所 (2022): 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 [JPJ007597] 岩盤中地下水流動評価技術高度化開発報告書.
- 日本原子力研究開発機構, 電力中央研究所 (2023): 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 [JPJ007597] 岩盤中地下水流動評価技術高度化開発報告書.
- 宮川和也, 早野明, 佐藤菜央美, 中田弘太郎, 長谷川琢磨: HFB-1孔調査データ集, JAEA-Data/Code 2023-009, 2023, 103p.