

図 28 割れ目のずれ、かみ合わせ、および透水性の関係 (DI が一定の場合)

上記の結果に基づくと、DI に対する透水性が既に図 26 の近似曲線の値の誤差範囲に達している割れ目は、割れ目がずれてもそれ以上、透水性が上昇しにくく (図 28)、DI が変化する場合のみ、それに応じた透水性の変化 (図 27) が生じることが予想されます。このことを確認するために、国内外の地下研究施設において実施された水圧擾乱試験の結果との比較検証を行いました。その結果、幌延の地下施設では、透水性が既に近似曲線の誤差範囲に達している割れ目がずれても DI の減少量に応じた分の透水性の上昇しか発生しないことが確認できました (図 29(a))。またスイスでは、透水性が既に近似曲線の誤差の範囲に達している割れ目がずれても透水性の変化が 1 オーダー以内に留まるのに対し (図 29(b))、透水性が近似曲線の誤差の範囲に達していない割れ目がずれた場合は透水性が数オーダー増加し、近似曲線の範囲に透水性が達することが確認できました (図 29(c))。これらの結果は、図 26 の近似曲線が隆起侵食により DI が低下した場合や、地震などにより断層が再活動した場合の割れ目の透水性の変化量の上限を見積もるのに有用であることを示しています<sup>(9)</sup>。今後は、今回得られた結果を基に、令和 2 年度に実施した水圧擾乱試験の結果<sup>(10)</sup>との比較検証も行う予定です。

割れ目がずれる際には、割れ目が容易にずれるかどうかという観点も、断層の活動性評価の観点からは重要です。図 29(c)に示すスイスの水圧擾乱試験では、透水性が上昇する際に、割れ目内に破壊が生じたことを示唆する水圧低下が観測される一方で、図 29(b)の透水性が有意に上昇しない試験ではそのような割れ目内の破壊を示唆するような水圧低下は観測されませんでした<sup>(11)</sup>。原位置の割れ目の充填状況も考慮すると、前者のケースでは石英などの鉱物によってシーリングされた割れ目がずれることにより割れ目内のシーリングが破壊されたことが考えられる一方で、後者のケースでは、シーリングされていない、あるいは過去の割れ目の再活動によって既に割れ目内のシーリングが破壊された状態の割れ目が試験中にずれたことが考えられます<sup>(9)</sup>。図 29(a)に示す幌延の水圧擾乱試験では、割れ目がずれる際に破壊を示唆するような水圧低下が観測される一方で<sup>(12)</sup>、令和 2 年度に幌延で実施した水圧擾乱試験ではそのような水圧低下は観測されていません<sup>(10)</sup>。割れ目がずれる際に生じる割れ目内の破壊現象の有無は、断層のずれにくさと密接に関連していると考えられます（ずれにくい場合は破壊が起きやすい）。今後はこのような観点を踏まえて、水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の検討を進めていきます。

令和 3 年度はさらに、図 29(a)に示す水圧擾乱試験で観測された割れ目の水理学的連結性に関する以下の現象について、令和 2 年度に引き続き検討を行いました。同水圧擾乱試験では、高圧注水によって割れ目の水理学的連結性が上昇した後、水圧低下後も数日間、水理学的連結性が高い状態が保持された後に元の水理学的連結性が低い状態に戻りました。この現象を再現するために、割れ目の透水性や幾何形状について複数のケースを仮定したシミュレーションを行った結果、注水を停止した後に試験区間を開放したために、ボーリング孔近傍から徐々に割れ目が閉じていった可能性があることが分かりました<sup>(13)</sup>。他の可能性として、割れ目表面の微小な凹凸の側面に働く摩擦力が水圧低下後も割れ目内の隙間を保持した可能性が考えられましたが<sup>(13)</sup>、いずれの場合においても、割れ目の水理学的連結性が DI に強く依存する可能性が高い（図 30）ことが水圧擾乱試験により分かりました。

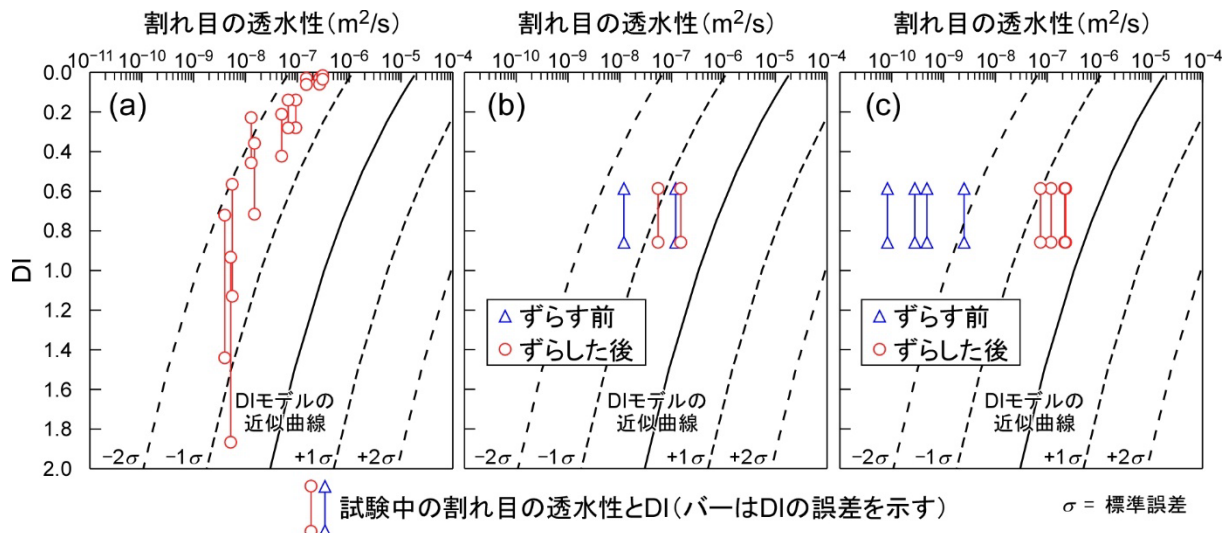


図 29 国内外の地下研究施設で実施された水圧擾乱試験の結果<sup>(9)</sup>

(a) 幌延の例。割れ目をずらす前から DI モデルの近似曲線（経験式）の誤差（ $\pm 2\sigma$ ）の範囲に割れ目の透水性が達しており、試験中、DI の低下とともに割れ目の透水性が近似曲線に沿って低下（試験中の割れ目のずれ幅は最大数 cm に到達）。(b) スイスの例。割れ目をずらす前から DI モデルの近似曲線の誤差（ $\pm 2\sigma$ ）の範囲に割れ目の透水性が達しており、割れ目をずらした後の透水性の変化は 1 オーダー以内（試験中の割れ目のずれ幅は最大 1 mm）。(c) スイスの例。割れ目をずらす前は DI モデルの近似曲線の誤差（ $\pm 2\sigma$ ）の範囲に割れ目の透水性が達していないが、割れ目をずらした後、透水性が数オーダー上昇し、近似曲線の範囲に割れ目の透水性が到達（試験中の割れ目のずれ幅は最大 1 mm）。

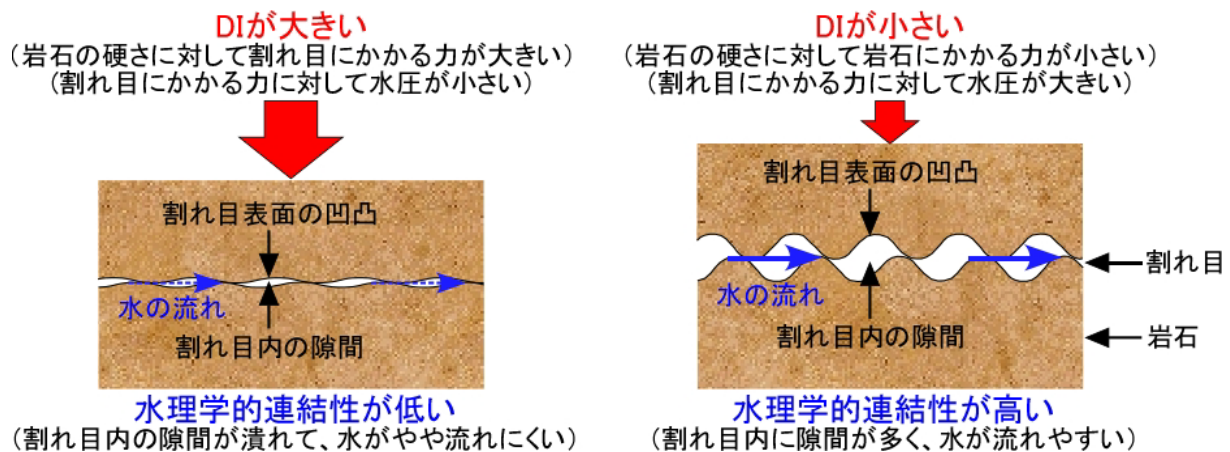


図 30 DI と割れ目の水理的連結性の関係

令和 4 年度は、令和 3 年度に再検証した DI モデルと、令和 2 年度に実施した水圧擾乱試験の結果との比較検証を行います。また、これまでに得られたデータを活用して、DI と断層/割れ目の水理的連結性の関係（図 30）に関する解析を行い、DI を用いた透水性評価の信頼性向上・隆起侵食の影響評価手法の整備を進めます。

## 6.1.2 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 2 年度以降は、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が課題であり、このような地下水の流れが非常に遅い領域を調査してモデル化する技術の実証を行います。具体的には、化石海水領域の三次元分布に係る調査・評価手法の検証、広域スケール(十数 km×十数 km)を対象とした水理・物質移行評価手法の検証(地下水滞留時間評価)のための水理解析、塩濃度分布評価のための水理・物質移行解析を行います。

この研究課題で整備される技術は、処分事業のサイト選定において、地質環境に求められる要件の 1 つとして挙げられている「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」を評価する際に役立ちます。本研究課題においては、化石海水が存在するような地下水の動きが非常に遅い環境を調査してモデル化する技術を実証するため、具体的には、以下を実施します。

- ① 地下水の流れが非常に遅い領域(化石海水領域)の調査・評価技術の検証
- ② 化石海水領域の三次元分布に係る調査・評価手法の検証
- ③ 広域スケール(十数 km×十数 km)を対象とした水理・物質移動評価手法の検証(地下水滞留時間評価)のための水理解析および塩濃度分布評価のための水理・物質移動解析

①地下水の流れが非常に遅い領域(化石海水領域)の調査・評価技術の検証では、地上からの主要な調査である物理探査とボーリング調査を対象に、化石海水領域を把握するための調査技術としての適用性やより効率的に把握するための調査仕様や手順などを検証します。②化石海水領域の三次元分布に係る調査・評価手法の検証では、幌延地域において取得されたデータを用いて化石海水の三次元分布を推定し、化石海水を指標として地下水の流れが非常に遅い領域を推定するための一連の手法を整理します。③広域スケール(十数 km×十数 km)を対象とした水理・物質移動評価手法の検証(地下水滞留時間評価)のための水理解析および塩濃度分布評価のための水理・物質移動解析では、地質環境中における過去から

現在までの地下水の流動や化学的状態などの移り変わり（古水理地質学的変遷）が、化石海水の三次元分布におよぼす影響について解析を通じた検討を行うとともに、化石海水領域の三次元分布の評価結果を踏まえた広域スケールの解析手法について検討します。

令和3年度は、①化石海水領域の調査・評価技術の検証については、令和2年度の電磁探査により推定した化石海水の三次元分布の妥当性を確認するために、ボーリング調査（HFB-1孔）を実施しました。調査地点として、声問層と稚内層がバランスよく調べられる地点、かつ、令和2年度の電磁探査により化石海水領域の広がり境界付近と推定された地点である、幌延深地層研究センターから南側に数十mの地点を選定しました（図31）。この地点では声問層と稚内層の地層境界は深度約310mに出現すると予想されます。また、令和2年度の電磁探査の解析結果、HFB-1孔の深度数十m以深では比抵抗値が $2.4\sim 5.9\ \Omega\cdot m$ であると推定され、化石海水が存在する可能性があります。図32にHDB-3孔、HDB-6孔およびHFB-1孔において取得された塩化物イオン（ $Cl^-$ ）、酸素同位体比<sup>\*</sup>（ $\delta^{18}O$ ）および比抵抗の深度方向の分布を示します。比抵抗値が $2.4\ \Omega\cdot m$ 以下の領域に位置するHDB-3孔では、化石海水に相当する地下水が深度約100m以深の声問層から確認されていますが、比抵抗値が $2.4\sim 5.9\ \Omega\cdot m$ の領域に位置するHDB-6孔では、化石海水に相当する地下水は深度約400m以深の稚内層から確認されています。この違いは、水理的連結性を有する断層が分布する稚内層浅部の層厚が関係していると考えており、HDB-3孔、HFB-1孔、HDB-6孔の順で層厚が厚く、その順で天水浸透の影響が大きいと考えています。電磁探査の解析結果に基づくと、HFB-1孔の比抵抗値はHDB-3孔とHDB-6孔の中間程度であると推定されていることから（図32(d)）、HFB-1孔はそれらの中間的な特徴を示すと予想されます。具体的には、深度約100m付近の声問層から化石海水相当の地下水が出現するか、また、稚内層浅部での天水浸透の影響はあるかといった観点から評価する必要があります。令和3年度は声問層を対象として深度200mまで岩石コアを採取するためのボーリング掘削を行いました。採取した岩石コアを対象に割れ目観察を行うとともに、化石海水の存在を確認するために岩石コアの間隙に含まれる地下水の水質・同位体データを



分析するための試料を採取し、分析作業を進めています。また、ボーリング孔の孔壁周辺の割れ目分布や地層の比抵抗などを計測する物理検層を実施しました。

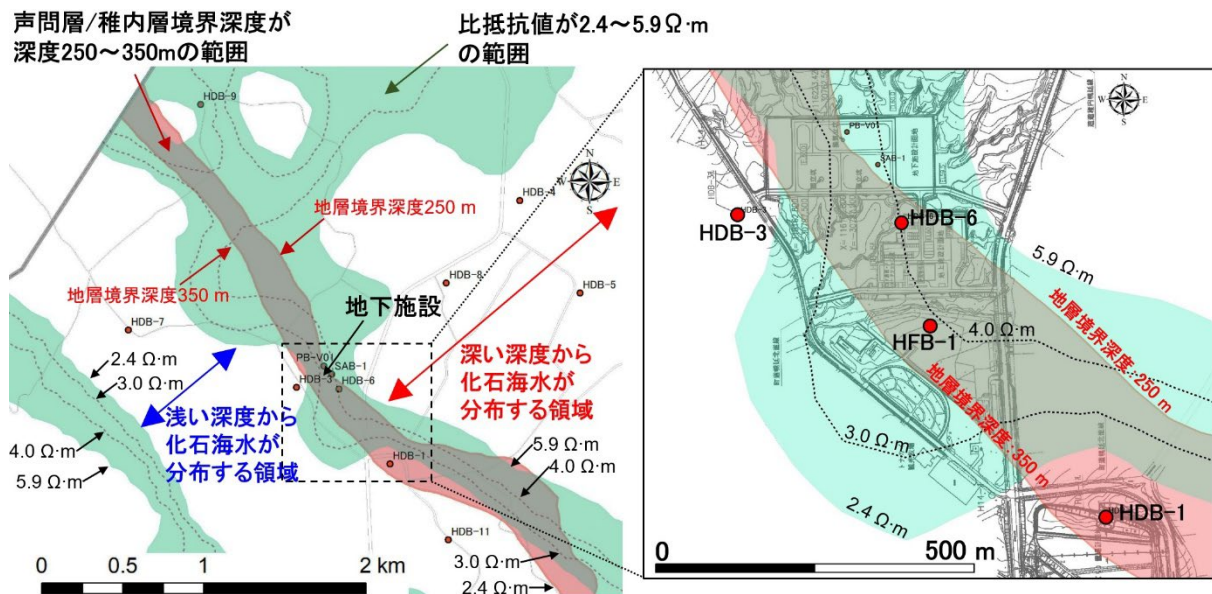


図 31 幌延深地層研究センター周辺における声問層/稚内層境界の深度と標高-275 mにおける比抵抗分布

左図の赤で示す範囲は、地表から声問層/稚内層境界までの深度が 250~350 m になる範囲を示します。一方、緑色の範囲は標高 - 275 m において比抵抗値が 2.4~5.9 Ω・m となる範囲を示します。この比抵抗値は令和 2 年度に実施した電磁探査の解析結果に基づきます。右図は左図の点線に囲まれた範囲の拡大であり、ボーリング調査 (HFB-1 孔) の実施地点を示します。なお、標高-275 m は、幌延深地層研究センターでは深度約 335 m となります。

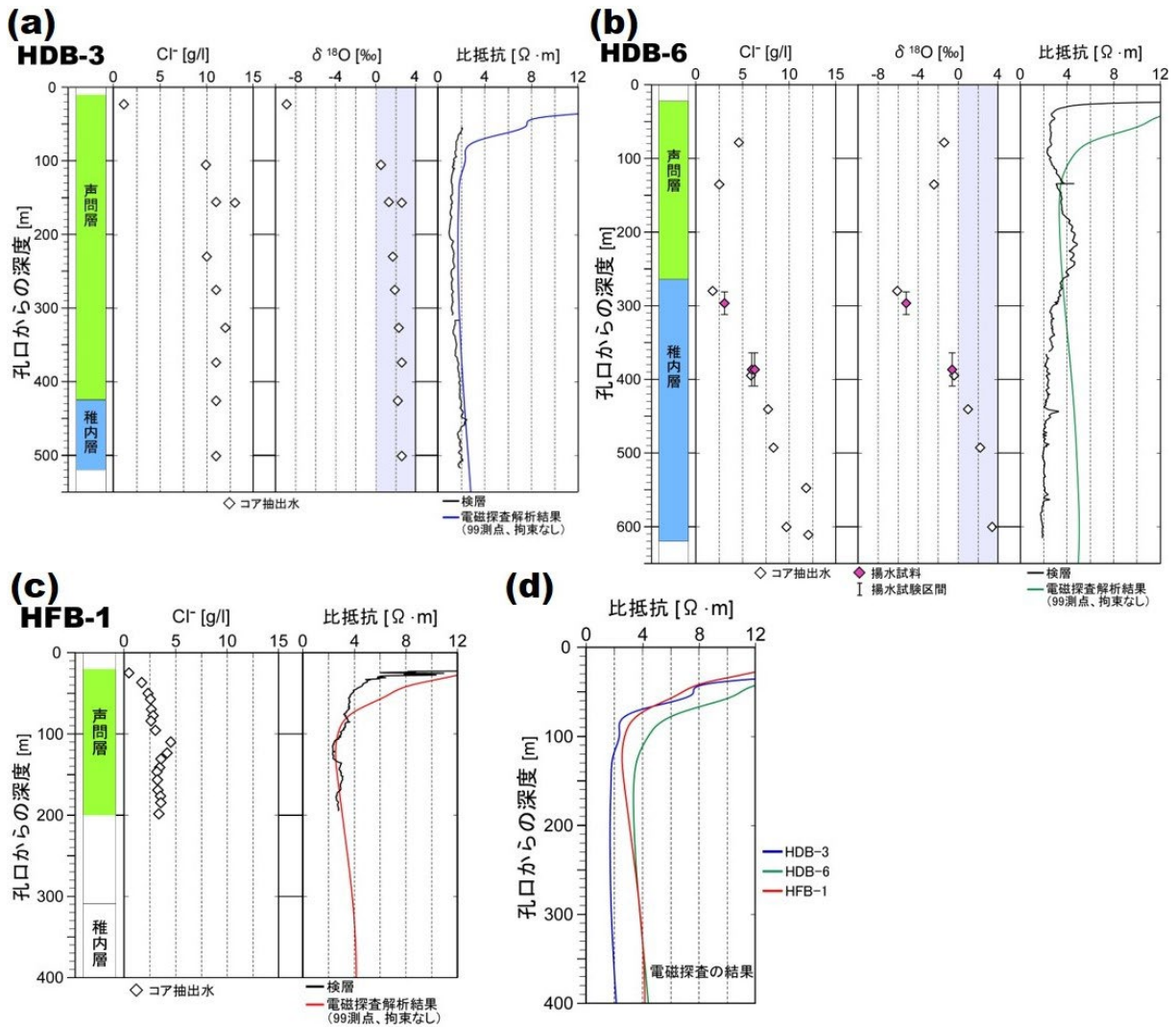


図 32 HDB-3 孔、HDB-6 孔および HFB-1 孔において取得された塩化物イオン濃度 ( $\text{Cl}^-$ )、酸素同位体比 ( $\delta^{18}\text{O}$ )、比抵抗と令和 2 年度の電磁探査の解析結果に基づく比抵抗

(a)、(b)、(c)はそれぞれ HDB-3 孔、HDB-6 孔および HFB-1 孔の結果を示します。令和 3 年度は HFB-1 孔を深度 200 m まで掘削しました。(c)には  $\text{Cl}^-$  濃度の結果のみを示します。また、HFB-1 孔における声間層/稚内層の境界は深度約 310 m と予想しています。(d)は令和 2 年度に実施した電磁探査の解析結果に基づく比抵抗の比較を示します。

②化石海水領域の三次元分布に係る調査・評価手法の検証については、令和 2 年度に取得した物理探査データを用いて、電磁探査と反射法地震探査のデータを組み合わせて三次元比抵抗分布を解析する方法について検討しました。令和 2 年度に実施した電磁探査の解析の結果から、幌延深地層研究センター付近を境にして、南西側では比抵抗が相対的に低く、大曲断層が分布する北東側の比抵抗値は相対的に高いことが分かりましたが、より深い深度での解析精度を見直すことが課題となっていました。

そこで、令和3年度は、さらに既存の電磁探査データ15測点のデータを加えて再解析を実施しました。その際、地表付近の高比抵抗構造や準三次元反射法地震探査により得られた地層境界面を拘束条件とする場合も解析しました。それらの結果を図33に示します。電磁探査データ15測点のデータを加えた再解析の結果、深度0~1,000 mの範囲において高比抵抗と低比抵抗のコントラストが明瞭となりました。また、拘束条件を設けることにより、地層の分布と調和する結果が得られました。

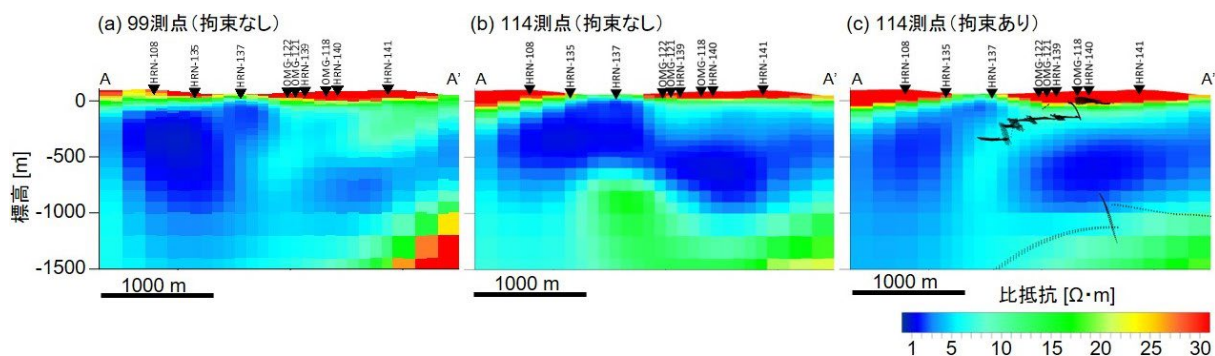


図 33 電磁探査データの解析結果の比較

(a)は物理探査範囲内にある令和2年度に実施した電磁探査の60測点と既存の39測点(平成13年度および平成15年度実施)の計99測点を用いた解析結果です。(b)は(a)の99測点に物理探査範囲外にある平成15年度の電磁探査の15測線を追加した計114測点を用いた解析結果です。(c)の測点データは(b)の解析と同様ですが、地表付近の高比抵抗構造および地層境界について拘束条件を設けた場合の解析結果です。

③広域スケールを対象とした水理・物質移動評価手法の検証については、広域スケールの地下水流動解析を実施する上で考慮すべき化石海水領域に影響する古水理地質学的変遷に関する因子を抽出するために、地形や海水準(陸地に対する海面の相対的な高さ)、涵養量(降水や地表水が地下に浸透して地下水として加わる水の量)などの長期的時間変化を考慮した感度解析を実施しました。その結果、長期的な地形変化や地下水の密度および異常水圧領域の変化が化石海水領域に影響を及ぼしうることが分かりました。

令和4年度は、令和3年度に深度200 mまで掘削したボーリング孔を延長し、稚内層を対象に化石海水の有無を確認するため地下水の水質・同位体データの取得を継続します。ボーリング調査地点では、深度300 m付



近に声問層と稚内層の地層境界があり、その境界付近より下の 150 m 程度の区間では、割れ目の水みちとしての連結性が良く、地下水が比較的流れやすい領域であると予想されます。そのため、化石海水分布と地層・地質構造分布の関係を評価する上で重要な区間となります。加えて、これまでの成果に基づき、物理探査およびボーリング調査によるデータ取得から地球統計学的手法による化石海水領域の三次元分布の推定に至る一連の手法を取りまとめます。また、これまでに実施した水理・物質移行解析に基づき、化石海水領域が存在する広域スケールを対象としたモデル化・解析手法を取りまとめます。その際、地質環境中における過去から現在までの地下水流動や化学的状态などの移り変わり（古水理地質学的変遷）が化石海水領域に与える影響を評価するという観点から整理します。

また、産業技術総合研究所\*8との共同研究として、令和 3 年度に幌延町沿岸部において、海陸連続三次元地質環境モデルの妥当性の検証を目的とした海上物理探査を行う計画でしたが、他の地域での実施となりました。そのため、令和 4 年度は、令和 3 年度の実績に基づき探査手法を見直した上で、幌延町沿岸部の浅海域において海上物理探査を実施するとともに、浜里地区などにおいて水文地質データの取得を行います。

## 6.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

令和 2 年度以降は、地殻変動による緩衝材や坑道埋め戻し材の掘削損傷領域への自己治癒能力の実証が課題となります。そのため、ひび割れに対する自己治癒能力の実証を行います。具体的には、緩衝材や坑道埋め戻し材が掘削損傷領域の力学的・水理学的な緩衝能力（自己治癒能力）に与える影響を把握する解析手法の開発を行います。

令和 3 年度は、令和 2 年度に実施した樹脂注入後の掘削損傷領域の割れ目試料の観察により得られた開口幅とせん断変位の関係性について、その妥当性を確認するためにシミュレーションを行いました。観察により、割れ目の開口幅とせん断変位量には相関性がほとんどないことが確

---

\*8 国立研究開発法人産業技術総合研究所は、産業技術の広い分野における様々な技術開発を総合的に行っている研究組織です。

認められました（図 34 の●）が、割れ目面にかかる力を原位置相当の 3.2 MPa として割れ目の開口幅とせん断変位量の関係を既存のモデル<sup>(14)</sup>を用いてシミュレーションすると、上記の観察結果と整合的なシミュレーション結果（開口幅とせん断変位量がほとんど相関しない結果）を得ることができました（図 34(a)）。一方、割れ目面にかかる力を原位置相当の圧力よりも極端に小さく見積もってシミュレーションを行うと、上記の観察結果をよく再現できない（開口幅とせん断変位量がよく相関する）ことが確認できました（図 34(b)）。これらの結果から、地下の原位置相当の圧力条件では、掘削損傷領域の割れ目が坑道閉鎖後にずれたとしても、圧力が大きく低下しない限り、掘削損傷領域の割れ目の開口幅（透水性）はほとんど増加しないことが確認できました<sup>(15)</sup>。

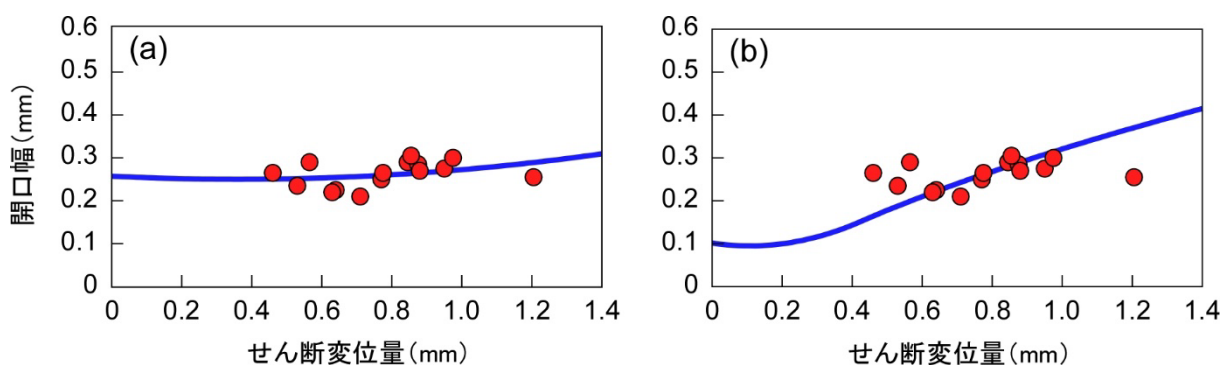


図 34 樹脂注入後の掘削損傷領域の割れ目試料で観察された開口幅とせん断変位量の関係（赤丸）とシミュレーション結果（青線）<sup>(15)</sup>

令和 3 年度はさらに、掘削損傷領域の割れ目を対象に実施した既往の注水試験のデータについて、以下のような検討を行いました。同試験では段階的に注水圧（試験区間の水圧）を増加させ、その時の注入流量の変化を計測しました（図 35(a)はその結果の例）。試験中の試験区間の水圧と注入流量の関係を調べると、試験区間の水圧の増加に伴う注入流量の増加量は、試験区間の水圧の増加とともに徐々に大きくなること分かりました（図 35(b)）。これは一般的な水理学の知見に基づくと、水圧の増加に伴って割れ目の開口幅が増加していることを示唆しており、このようなデータは割れ目面にかかる力に応じて割れ目の開口幅がどのように変化するかを調べるのに有用な情報となります。

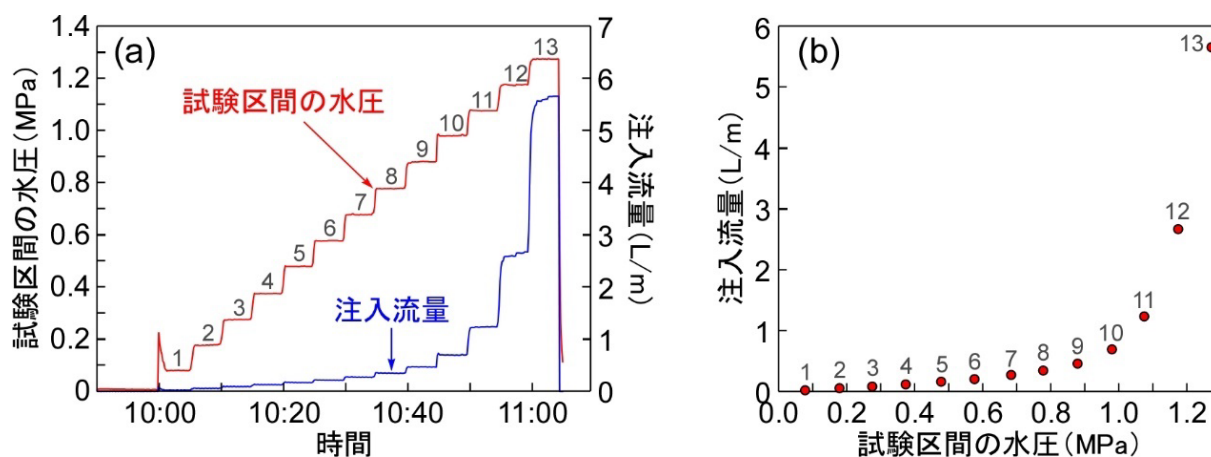


図 35 掘削損傷領域の割れ目を対象に実施した既往の注水試験のデータの例

注水試験中の試験区間の水圧と注入流量の(a)推移と(b)両者の関係。図中の1～13の番号は試験中のステップの番号を表します。

令和4年度は、掘削損傷領域の割れ目を対象に実施した既往の注水試験のデータ（図35はその一例）について、令和2年度に再検証したDIモデル（6.1.1を参照）を用いて詳細な解析を行い、坑道埋め戻し後の緩衝材や埋め戻し材の膨潤が坑道埋め戻し後の掘削損傷領域の透水性に与える影響を定量的に評価する手法を整備します。

## 7. 令和2年度以降の必須の課題への対応に必要なデータ取得

令和2年度以降、人工バリア性能確認試験や物質移行試験などの処分システム的设计・施工や安全評価に関わる基礎情報、例えば、岩盤の水の流れやすさや岩石の鉱物組成や化学組成、地下水のpHや酸化還元電位<sup>\*</sup>、化学組成などのデータの取得などについては、令和2年度以降の必須の課題への対応に必要なことから、引き続き必要最低限のデータを取得し、処分システム的设计・施工や安全評価に関する研究を行う試験場所の地質環境特性を明確にし、それらの手法の評価に用いることとなります。なお、処分システム的设计・施工手法や安全評価手法の信頼性を確認するために必要となるデータが取得できているかを含めて評価することが必要であるため、計測手法の妥当性を確認し、必要に応じて調査技術・機器の改良を行います。

令和3年度におけるデータ取得例として、ここでは地下水のpHや酸化還元電位、圧力などの物理化学パラメータのモニタリング結果を示します。地下施設の建設に伴う坑道周辺の地下水の水質変化を把握するため、既存のボーリング孔を対象に地下水の採水調査を行いました。地下水のpHや酸化還元電位などの物理化学パラメータについては、大気中の酸素との接触や圧力の低下などの影響を低減させた原位置の地下水の値を取得するために、350m調査坑道に設置している水圧・水質モニタリング装置を用いて、物理化学パラメータを取得しています。人工バリア性能確認試験の試験箇所周辺のボーリング孔に設置した水圧・水質モニタリング装置から得られた地下水のpHや酸化還元電位については、令和2年度までと同様の結果が得られました。また、令和2年度においては人工バリア性能確認試験の注水量の変化に伴う水圧の変化が確認されていましたが、令和3年度においては注水量の変化は無いことから、観測された水圧変化は、令和2年度までと同様の採水調査や装置のメンテナンスに伴うものと考えられます(図36)。