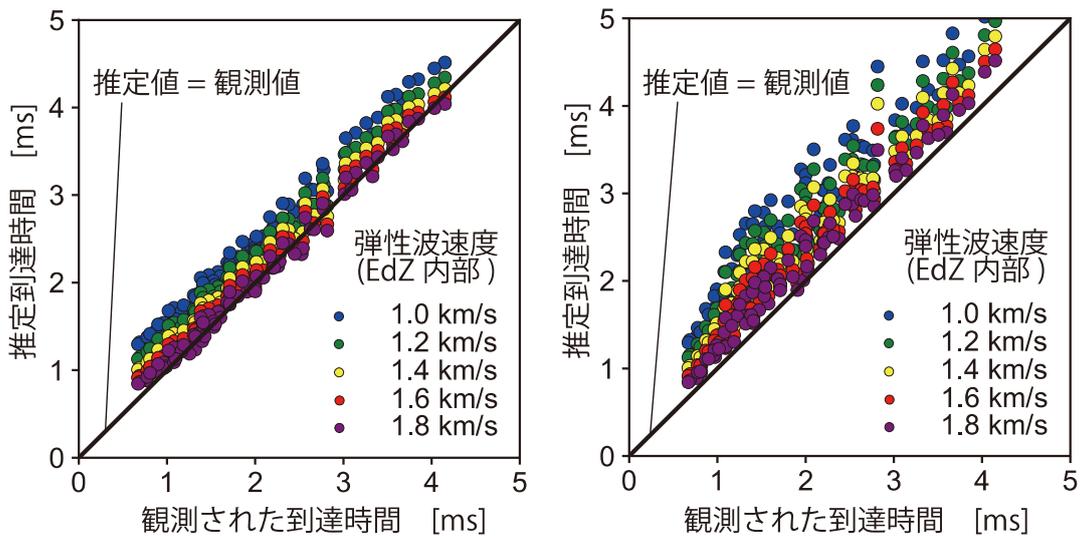


図 46 数値シミュレーションによる調査時の弾性波の通過経路の比較例



(a) 吹付けコンクリートの影響を考慮した場合 (b) 吹付けコンクリートの影響を考慮しない場合

図 47 調査により取得された弾性波の到達時間とEdZが1 mであると仮定した場合に数値計算により推定される到達時間の比較

⑤ 坑道内から掘削されたボーリング孔の閉塞技術の実証

地下施設の建設のために掘削される地上からの調査ボーリング孔は地上へと直結する卓越した水みちにならないよう適切な方法で閉塞することが求められています。また、地下施設の建設時には坑道内からボーリング孔が掘削される場合もあり、これらのボーリング孔が地上までの短絡経路となることや地層処分システムの長期安全性に影響を及ぼさないようにボーリング孔を適切な方法で閉塞することが求められています。

地上からのボーリング孔と坑道内からのボーリング孔では、ボーリング孔の状態や作業環境の違いにより、閉塞のために必要となる要素技術

や考慮すべき事項、技術的な課題点などが異なると考えられます。例えば、坑道内からのボーリング孔では、水平に近い向きに掘削されることも想定されます。水平ボーリング孔の場合には、重力方向へ材料を充填することのできる鉛直孔とは異なり、重力以外の駆動力によって目的の閉塞位置まで材料を輸送することが必要となります。また、日本のように豊富に地下水が存在する地質環境では、地下空間へ向かう方向にかかる動水勾配が大きい地下環境において、ボーリング孔への地下水流入量が比較的多い中での作業が想定されるため、高水圧、高湧水量条件下で閉塞が適用可能な技術が必要となります。

そこで、本検討では、坑道内から水平に近い向きに掘削されたボーリング孔を対象に、地下深部の地質環境条件を考慮した上で閉塞する材料の仕様を決定する考え方を整理するとともに、施工方法の適用性を検討します。令和2年度は、原位置試験の計画検討の一環として、国内外での研究事例を調査し、ボーリング孔を閉塞する際の材料の種類や配合を決定するための考え方や閉塞方法に関する技術的な課題を、以下に示すように抽出・整理しました。

閉塞材料に関しては、ボーリング孔の岩盤に損傷が少なく透水性が低い区間には低透水性を有するベントナイトを設置する考え方が示されています。ボーリング孔が水みちとならないためには、設置したベントナイトの透水係数が設置場所の周辺の岩盤の透水係数と同程度かそれより低い値である必要があると考えられており、閉塞するボーリング孔の寸法や流入する地下水の水質、ベントナイトを設置する場所の周辺岩盤の透水係数を計測した上で、ベントナイトの種類や配合、乾燥密度などの仕様を決定する必要があることが分かりました。

閉塞方法に関しては、あらかじめ高密度に圧縮したベントナイトブロックを孔の開いた銅管や密閉容器に充填して設置場所まで輸送する方法や、ベントナイトペレットをボーリング孔へ流し込む方法が示されています。いずれの場合にも、設置場所への輸送中にベントナイトと地下水が接触することによる膨潤により、輸送途中での閉塞やベントナイトの侵食などが発生することが課題であることが分かりました。日本のように豊富に地下水が存在する地質環境では、ベントナイトと地下水との接触

をできるだけ少なくする方法が必要となると考えられます。

上記の整理した結果を踏まえて、水平ボーリング孔を対象としたベントナイトによる閉塞方法の検討に着手しました。ベントナイトの材料形態は、①ベントナイトブロック、②ベントナイトペレット、③ブロックとペレットの組み合わせ、の3つの方法について表 6のように整理しました。例えば、ブロックの場合には、ブロックを収納した密閉容器を設置場所まで輸送し、容器の蓋を外してベントナイトをボーリング孔へ排出する方法が考えられますが、蓋がボーリング孔へ残ることが課題となります。ペレットの場合には、ボーリング孔内に挿入した充填管に注水し、水の流れによって親水遅延の処理を施したペレットを輸送することが考えられます。この場合には、親水遅延の処理によって輸送中の膨潤がどの程度抑えられるのか、充填後のペレットの膨潤特性を損なわないかなどを確認し、その適用性を評価する必要があります。

令和3年度は、検討した閉塞方法について、室内試験によりボーリング孔の閉塞に係るベントナイトブロックとペレットの基礎的物性データの取得やボーリング孔への設置方法の検討を実施します。

表 6 ベントナイトを用いたボーリング孔の閉塞方法の検討結果

	ベントナイトブロック	ベントナイトペレット	ブロック+ペレット
設置方法の概略図			
方法の概要	<ul style="list-style-type: none"> ・ 円柱状のベントナイトブロックを収納した密閉容器をボーリング孔内に挿入する。 ・ 設置場所で密閉容器の蓋を外し、ベントナイトブロックをボーリング孔へ排出する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ベントナイトペレットに親水遅延のコーティングを施す。 ・ ボーリング孔に挿入した充填管に注水し、水の流れによりベントナイトペレットを輸送する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ベントナイトの充填区間の上端と下端にはベントナイトブロックを設置し、中間区間をベントナイトペレットで充填する。
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・ ブロックの輸送中に地下水との接触を防ぐことができる。 ・ 設置したブロックの寸法から、ベントナイトの充填量や設置深度の管理が容易にできる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ベントナイトペレットは、個々の粒径が小さいため隙間の充填性やボーリング孔の形状への追従性が高い。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ブロックと孔壁の間に生じた比較的大きな隙間については、ペレットを充填することによりその隙間を埋めることが期待される。 ・ 充填区間が比較的に長い場合には、その充填区間の大部分をペレットにより充填することで、充填作業の時間を短縮することが考えられる。
課題	<ul style="list-style-type: none"> ・ ボーリング孔内に密閉容器の蓋が残置される。 ・ ベントナイトブロックとボーリング孔の孔壁の間に比較的大きな隙間が生じる。この隙間を膨潤により閉塞できる材料の配合や乾燥密度とする必要がある。 ・ 充填深度が深くなるほど、または充填区間が長くなるほど、充填作業に時間を要する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 注水によるベントナイトペレット輸送のみで所定の乾燥密度を達成できるか検証が必要である。 ・ ボーリング孔への充填状況を確認するための方法が必要となる。 ・ 親水遅延のコーティングについて、どの程度輸送中の膨潤を抑える性能を有するか、また、充填後の膨潤特性を損なうことがないか、長期的な閉塞性へ及ぼす影響の有無を検討する必要がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ベントナイトブロックとベントナイトペレットのそれぞれの課題について検討が必要となる。 ・ ブロックと孔壁の間の隙間にペレットを充填できる条件を確認する必要がある。 ・ ブロックとペレットの膨潤状況の違いにより、乾燥密度にばらつきが生じる可能性がある。

(3) 人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法の違いによる品質保証体系の構築

経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（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：ニアフィールドシステム評価確証技術開発）の一環として、原子力環境整備促進・資金管理センター^{*33}と協力して緩衝材流出試験を実施しました。

人工バリアの一部を構成する緩衝材の定置方法として、圧縮成形したブロックを廃棄体の周りに定置する施工方法が考えられています。この方法では、処分孔の孔壁と緩衝材の間に数cmの隙間ができます。日本で一般的に想定される豊富な地下水環境では、緩衝材の定置完了後に岩盤から処分孔に地下水が流れ込むこと（孔内湧水）が想定されます。地下の周囲の水位が処分孔の上端よりも高い状態であれば、流れ込んだ地下水は隙間を満たした後も、上向きの流れが継続する可能性があります。緩衝材の主な成分はベントナイトであり、地下水が浸み込むことにより膨潤し、岩盤やオーバーパックと緩衝材の間の隙間を埋めること（自己シール性）が期待されています。しかし、自己シール性が発揮されるまでの膨潤過程では、表面付近の密度の低下やゲル化する部分に湧水の流れによるせん断応力が作用して緩衝材が削り取られる可能性や、残された水みちを介して削り取られた緩衝材が処分孔外に排出される可能性が懸念されています。

室内の試験では、水みちの形成や、水みちの周囲の粘土鉱物が削り取られる現象を確認し、そのような現象が発生する条件や湧水量などとの関係を定量化するための要素試験を実施してきました。しかし、実際の地下環境は多様な条件（湧水量・流速、水圧、水質など）が複合しており、室内試験では地下環境を完全に模擬することは難しいため、実際の地下環境において流出挙動を把握することが必要となります。

350m調査坑道の試験坑道5で実施する原位置試験（約1/4スケールの縮尺モデル）では、孔壁と緩衝材ブロックの隙間は20 mmあります。令和元年度は、隙間に何も充填しない「隙間未充填ケース」とケイ砂を充填する

^{*33}：公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センターは、放射性廃棄物処理処分の専門研究機関として設立されました。現在は、原子力発電環境整備機構（NUMO）を通して積み立てられる最終処分積立金の管理などを行う資金管理業務も実施しています。

「ケイ砂充填ケース」に関する予備試験（短期の流出試験）を行い、緩衝材の流出濃度（単位体積あたりに含まれる緩衝材の流出量）、総流出量、試験孔からの排水量、膨潤圧の発生に伴い処分孔に作用する圧力（土圧）などを比較しました。その結果、ケイ砂充填ケースでは流出濃度が低く維持されること、隙間未充填ケースでは短期の試験期間における緩衝材の流出量は相対的に多くなったものの試験孔からの排水量は徐々に減少すること（0.4 L/minから0.02 L/min程度になった）などが分かりました。

令和2年度は、隙間未充填ケースを対象に地下の実環境における自然湧水環境下における長期的な試験を行い、自己シール機能が発揮されて緩衝材の流出現象（試験孔からの排水）が止まることを確認するとともに、その過程における詳細なデータを取得しました（緩衝材への浸潤、膨潤の進行に伴う試験孔からの排水量の変化、緩衝材の流出濃度と総流出量、孔内の水圧の変化、膨潤により発生する圧力など）。これらの緩衝材の流出挙動に関するデータ取得に加えて、処分孔縦置き方式で懸念される緩衝材の膨出に関連するデータ（緩衝材が上方向に動こうとする力）の取得も行いました。さらに、緩衝材などの人工バリアの定置および処分坑道の埋め戻し後に、処分孔と周囲の地下水位の差が大きくなる場合に緩衝材にどのような現象が発生しうるかを把握するために、上記の長期的な試験の後に強制注水試験を行いました。

自然湧水環境下で実施した原位置試験装置の概要を図 48に示します。試験開始時の試験孔（直径0.58 m×深さ約1.6 m）からの湧水量は約0.4 L/minでした。試験孔天端を上端として緩衝材を模擬した試験体を設置し、流出試験を行いました。試験体の大きさは、実際に処分される際の緩衝材のほぼ1/4の大きさです。

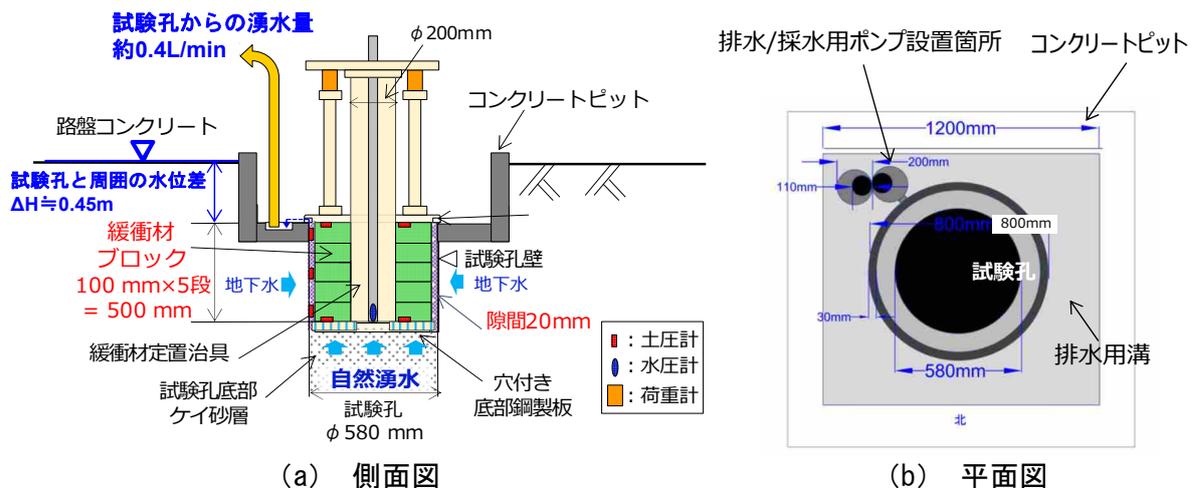


図 48 原位置での緩衝材流出試験設備の概要

試験の結果を図 49と図 50に示します。図 49には、緩衝材ブロック底面位置の圧力水頭と試験孔からの排水量を示しました。試験開始直後の緩衝材ブロックと試験孔壁面との隙間がある期間は、試験孔からの排水量は試験孔の当初の湧水量（約0.4 L/min）と同等であり、時間経過とともに（浸潤・膨潤が進むにつれ）徐々に湧水量が減少しました。また、試験開始直後の圧力水頭は約0.45 mであり、緩衝材ブロック上面の排水されている位置と、緩衝材ブロック底面に近い水圧計の設置位置との高低差と概ね一致しています。この図から、緩衝材ブロック底面位置の圧力水頭と試験孔からの排水量は相関があることが分かります。緩衝材ブロックと試験孔壁面との隙間が、緩衝材の膨潤により埋められることにより排水量が低下すると、圧力水頭は試験孔周囲の地下水位（緩衝材ブロック底面から上に約0.95 m）と釣り合うように上昇しています。その後、排水量は試験開始後48日でゼロとなり、隙間が閉塞したことが確認されました。この時の圧力水頭は約0.91 mであり、水圧計の設置位置に起因する計測誤差を考慮すると試験孔周囲の地下水位とほぼ等しい値となりました。

試験開始以降、緩衝材ブロック底面位置の圧力水頭は徐々に上昇しましたが、開始後6、9、13日目に急激な水位の上下動が見られました。これは緩衝材の膨潤によって隙間が埋められ、隙間の断面積が小さくなったことにより、緩衝材ブロック周囲の水圧が上昇し、それによって試験孔壁面と膨潤した緩衝材ブロックの界面で流路の拡張が起こったためと考え

られます。13日以降は水位の上下動は見られず、圧力水頭は0.9 mに収束しました。これは、緩衝材の膨潤により隙間が埋められた後、さらに内側が膨潤することにより孔壁付近の密度が高くなったため、水頭差による流路の再拡張が起こらなくなったためと考えられます。そのため、流路は徐々に狭まって、48日で排水量はゼロとなり、閉塞に至りました。

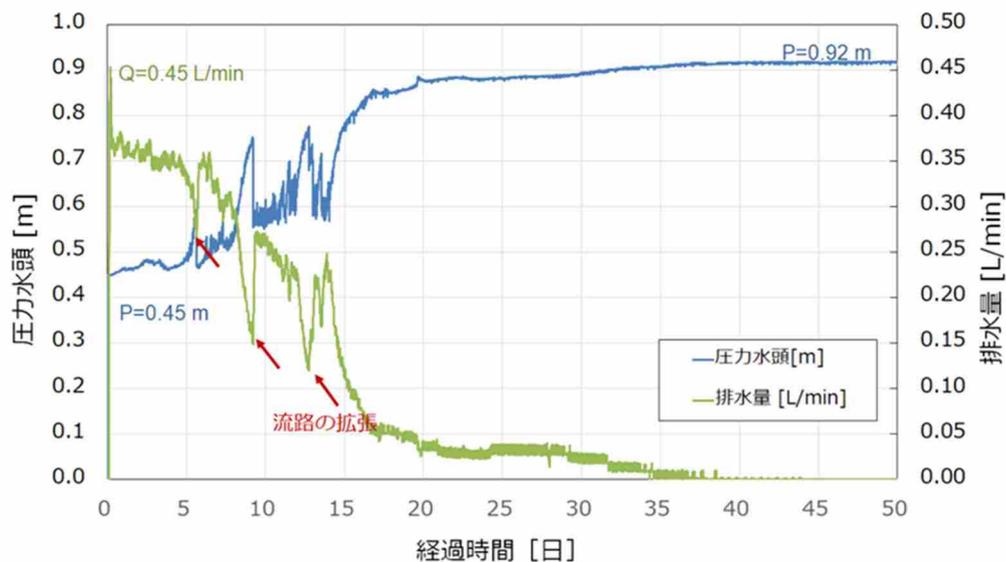


図 49 緩衝材流出試験における水位と排水量の変化

緩衝材の総流出量と排水中のベントナイト濃度の経時変化を図 50に示します。採水間隔は、試験開始から3時間は10分ごと、それから30日間は240分ごと、それ以降は480分ごととしました。総流出量は試験開始から15日以降はほとんど増えておらず、13.8日までの緩衝材の総流出量は、最終的な総流出量の97%を占めています。流路の縮小と拡張を繰り返す期間においては、流路が拡張する際に水位と流量が大きく変動するため、流出濃度（流出量）が一時的に増加することも影響していると考えられます。13.8日以降は、緩衝材ブロックと試験孔の隙間が埋まり、流路の拡張が起こらなくなることで、排水量、ベントナイト濃度が低下し、流出量が少量となっています。48日以降は排水量がゼロとなったため採水できず、流出量もゼロとしました。隙間がある場合にはこのような流出挙動が起こることから、緩衝材の流出量の評価については、流路の縮小と拡張を繰り返す期間（排水量が多い期間）が重要であると考えられます。また、完全

に閉塞したのは試験開始から48日後ですが、排水量が0.05 L/min以下となった期間（試験開始から20日以降）にはベントナイト濃度がほぼゼロとなっています。隙間未充填での施工の適用性の確認には、閉塞するか否かが判断指標の一つになると考えられますが、完全に閉塞しなくても緩衝材の流出が顕著な量でなければ、適用できる可能性があります。よって、隙間未充填で施工した場合の緩衝材の流出の評価には、地下水が上部に排出される流路が縮小と拡張を繰り返す期間の流出量の把握が必要となります。

ただし、ベントナイト濃度（流出量）が低い場合には地下水の濁りなどが計測精度に影響するため、低濃度の計測精度やバックグラウンド濃度の影響について検証が必要と考えており、今後の検討課題です。

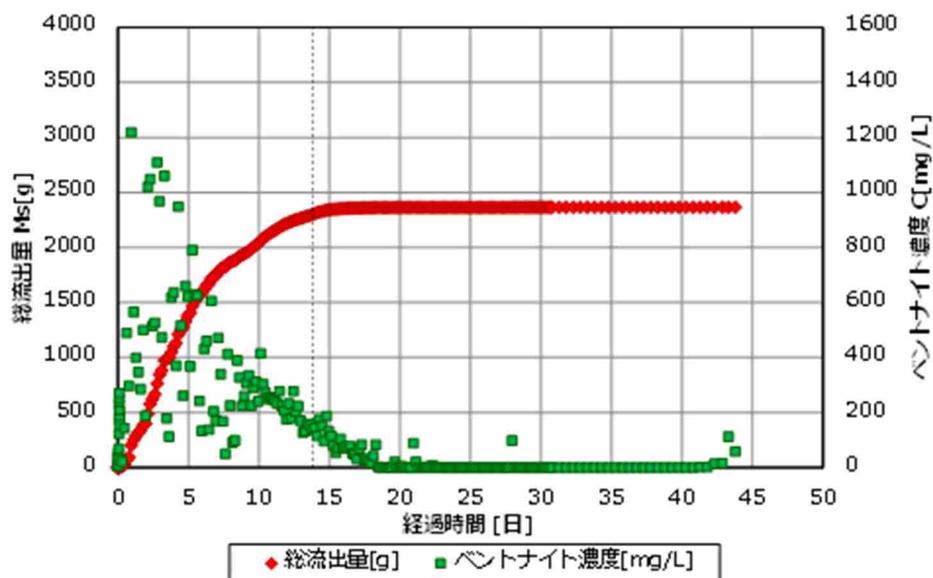


図 50 緩衝材流出試験における緩衝材の総流出量と排水中のベントナイト濃度の経時変化

試験体の定置後約120日間自然湧水条件で流出挙動を確認した後、隙間が閉塞した状態に対して注水し、水圧がかかることによって再度水みちができる事象（破過）が起こるかどうかを確認する試験を実施しました。注水試験は、埋め戻し後の水位の上昇による水圧の上昇の影響を見るために圧力制御の試験とし、およそ5～10 kPaの範囲で段階的に注水圧を昇圧させました。

注水試験は2日間実施しました。1日目の注水試験では、試験孔からのわずかな湧水（瞬時排水量1～2 mL/min）を確認したものの、最大90 kPa（注水流量約4.3 L/min）までの注水では明確な破過を示すデータが取得できませんでした。2日目の注水試験では、注水圧90 kPa（注水流量約4.3 L/min）で約2.5時間通水を継続したところ、10 kPaまで注水圧が低下し、ベントナイトおよびケイ砂の噴出に伴って試験体底面から上面まで水みちが貫通する破過が確認されました。図 51に試験後に回収した試験体の写真を示します。赤紫色の部分は、回収直前に染料を入れた水を流したことによるもので、水みちと考えられます。

はじめに述べたように、注水試験は埋め戻し後の流出の可能性について検討するために行いました。今回の試験では、水圧が上がることにより一旦閉塞した部分が破過することが示されました。破過に至った水圧は90 kPaでしたが、この圧力は隙間閉塞後の緩衝材の浸潤と膨潤の進行による岩盤との界面の緩衝材の密度などによって変化すると考えられます。また、今回の試験では緩衝材の上部に設置される埋め戻し材を考慮していませんが、実際には仮に破過した場合でも埋め戻し材によって緩衝材の流出を少なく抑えられることも考えられます。そのため、今回の試験結果が、実環境での現象を完全に再現できたものではありませんが、埋め戻し後の水圧の上昇によって流出挙動が再度起こる可能性があることを示していると考えられます。



図 51 緩衝材流出試験後に回収した試験体

今後は、これまでの試験と湧水量などが異なる環境での流出試験などを行い、堅置きブロック方式による緩衝材の複数の施工方法による流出挙動と適用性の把握を進めます。また、室内試験によって、水頭差(水圧)、湧水量、スケール効果などに関する試験を行い、緩衝材流出への影響を観点にしてその利点や欠点、緩衝材に求められる性能を保持するための流出についての評価指標などの整理を進め、実際の処分場設計における施工方法の選択のための情報として整備します。

5.2 高温(100℃以上)等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験

令和2年度以降は、人工バリアの構成要素である緩衝材の最高温度が100℃を超えた状態での人工バリアとその周辺岩盤の領域(ニアフィールド)において発生する現象の整理、人工バリア性能に係る試験データの整備、解析手法の開発を行うとともに、ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示します。これらの目標が達成されることにより、地層処分場において想定外の要因により緩衝材の温度が100℃を超えた状態となった場合の人工バリアの挙動を検討できるとともに、高温条件下での人工バリアの安全裕度を評価できます。本課題は、4.1人工バリア性能確認試験と関連する課題です。人工バリア性能確認試験では、100℃以下の温度条件下において熱-水理-力学-化学(THMC)連成現象に係るデータを取得していますが、本課題においては、100℃超になった際に、これらの連成現象の熱に関わる部分においてどのような現象が生じるかを把握することになります。

令和2年度は、緩衝材の最高温度が100℃を超えた状態で発生しうる現象の検討に着手しました。100℃を超えた温度条件において、埋め戻しに伴う間隙圧の回復が比較的緩やかである場合には、沸騰による水の蒸発と溶存成分の析出、水蒸気の移動、温度低下による水蒸気の凝縮、析出成分の再溶解などの現象が生じうると考えられました。水の蒸発や水蒸気の移動・凝縮を含めた水分移動特性については、100℃を超えた恒温槽を用いた室内試験(図 52①)や、空気や水蒸気を考慮した高温状態での解析手法の整備(図 52②)により評価可能と考えられ、解析手法の整備により、100℃を超えた状態における緩衝材中の熱や水分分布の履歴を解析

的に予測できるようになると考えられます。解析により得られた熱や水分分布の履歴のパターンに応じて、緩衝材が変質しやすい条件や緩衝材の特性が大きく変化する条件を抽出することにより、100℃を超えた状態でのシナリオの整理が可能となると考えられます。

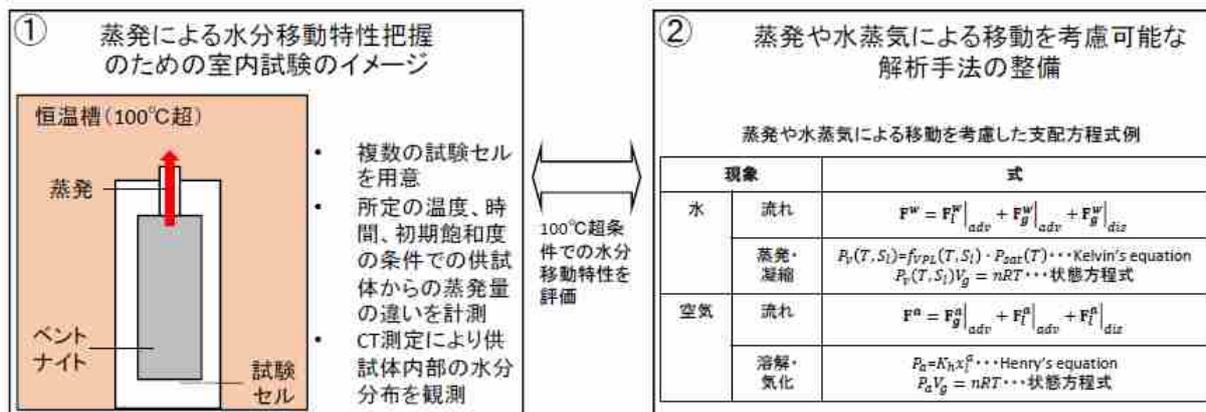


図 52 蒸発による水分移動特性を評価するための室内試験および解析手法のイメージ

上記のことを考慮に入れて、緩衝材の変質現象に関する原子力機構のこれまでの知見を、表 7のように整理しました (8)、(9)、(10)、(11)。緩衝材に生じると想定される変質現象のうち、スメクタイト (ベントナイトに含まれる膨潤性の粘土鉱物) のイオン型変化や変質、およびシリカセメンテーション*³⁴などは、100℃を超えた状態を想定した解析や実験が行われており、特にシリカセメンテーションは、緩衝材の可塑性の低下や透水性の上昇につながる可能性が示唆されます。一方で、一部の現象については、100℃を超えた状態での変質に関する知見が不十分であるといえます。令和3年度は、現状での知見が不十分な現象を中心に、100℃を超えた状態で発生しうる現象の調査を継続していくとともに、100℃を超えた状態での人工バリアの基本特性やニアフィールドでの熱－水理－力学－化学 (THMC) 連成現象に関する試験や解析の事例についても調査を進めていきます。

*34：緩衝材中に含まれるシリカ含有鉱物が高温環境などで溶解し、別のシリカ鉱物として再沈殿する現象のことです。シリカセメンテーションが生じた緩衝材では、可塑性や膨潤性の低下などが認められることがあります。

表 7 緩衝材の変質に関する既往知見の整理 (1/2)

変質が生じうる場所	想定される変質現象	発生の要因	緩衝材の特性に与える影響など	100℃を超えた状態での知見
岩盤/緩衝材境界部～ 緩衝材内部	スメクタイト(天然ケイ酸アルミニウム)のイオン型変化(Na型→Ca型)	<ul style="list-style-type: none"> 地下水や方解石に由来するCaとの相互作用 	<ul style="list-style-type: none"> 緩衝材の体積(密度)変化が生じた場合に、膨潤性能が低下する可能性がある。 Ca型スメクタイトに対する核種の収着データが充実化されている。 	<ul style="list-style-type: none"> 100℃超での実験・解析例などはなし。
緩衝材内部～緩衝材/オーバーパック境界部	塩・鉱物の沈殿	<ul style="list-style-type: none"> 高温環境での地下水の蒸発 	<ul style="list-style-type: none"> 緩衝材内部に沈殿した塩のセメンテーションにより、緩衝材の可塑性や膨潤性能が低下しうる。 ヒーター加熱温度 90℃の室内試験において、残存空気が緩衝材中に閉じ込められている場合にヒーター近傍で塩濃縮が生じる。生じた塩や鉱物は水の浸透にしたがい長期的には溶解する。 緩衝材性能に与える影響は小さいと考えられる。 	<ul style="list-style-type: none"> 100℃超での実験・解析例などはなし。
	スメクタイトのイオン型変化(Na型→Fe型)	<ul style="list-style-type: none"> オーバーパックの腐食に由来するFeとの相互作用 	<ul style="list-style-type: none"> Fe型スメクタイトはCa型と同程度の膨潤性能を有すると考えられる。 解析上は、緩衝材特性に与える影響は小さいと考えられる。 	<ul style="list-style-type: none"> ナチュラルアナログ研究では、変質期間が～10年・温度が～50℃程度の場合、および変質期間が100～1,000年・温度が100℃前後の場合に、Fe型スメクタイトが生成する可能性がある。 現状の知見では、100℃を大きく超えた場合には影響は小さいと考えられる。
	スメクタイトの変質(クロライト化など)	<ul style="list-style-type: none"> オーバーパックの腐食に由来するFeとの相互作用 マグネシウムの供給が必要 	<ul style="list-style-type: none"> 非膨潤性の鉱物に変質した場合、膨潤性能やイオン交換能が低下する。 変質に影響する主なパラメータは、温度、溶液条件、鉄/粘土比、スメクタイト組成である。 解析では、オーバーパックとの接触面近辺でFeに富む二次鉱物が生成してオーバーパック/緩衝材間の空隙が閉塞し、緩衝材の変質はそれ以上進まなくなると考えられる。 	<ul style="list-style-type: none"> 250℃以上の高温で変質を起こす報告例が多い。 バッチ試験では、温度 120～150℃、鉄/粘土比 0.5～1.0の場合に変質が認められた。 ナチュラルアナログ研究では、変質期間が短く100℃を超えた場合にはパーチェリン、コレンサイト、クロライトが生成する可能性がある。 現状の知見では、100℃を超えた場合には、オーバーパック/緩衝材境界で変質反応が速く進むと考えられる。ただし、変質鉱物が空隙を閉塞すると、変質はそれ以上進まなくなると考えられる。

表 7 緩衝材の変質に関する既往知見の整理 (2/2)

変質が生じうる場所	想定される変質現象	発生の要因	緩衝材の特性に与える影響など	100℃を超えた状態での知見
緩衝材内部 ～緩衝材/オーバーパッ ク境界部	腐食生成物によるセメ ンテーション	・ オーバーパックの 腐食生成物	・ 緩衝材間隙への腐食生成物の充填に伴い、 緩衝材の可塑性や膨潤性能が低下しうる。 ・ 炭素鋼とベントナイトを用いた室内試験 では、4年程度であればベントナイトの特 性に顕著な変化は認められない。 ・ 磁鉄鉱や水酸化鉄が腐食生成物としてオ ーバーパック/緩衝材境界付近に生成する 可能性があるが、緩衝材特性に与える影響 は小さいと考えられる。	・ 130℃程度で約1年間加熱されたベントナイトで は、ヒーター（鉄）/ベントナイト界面付近の約5 mmにおいて水酸化鉄などの沈殿が生じた。 ・ 100℃を超えた場合には腐食速度が速くなり、腐 食生成物の生成も促進されると考えられる。た だし、それが緩衝材全体の特性に与える影響は 小さいと考えられる。
	スメクタイトのイライ ト（雲母鉱物）化	・ 高温での変質（埋 没続成作用や熱水 変質作用を受けた スメクタイトに見 られる現象） ・ カリウムの供給が 必要	・ 緩衝材が100℃を超えた場合に特有の現 象	・ 陽イオン交換容量およびイオン交換性核種の 収着性能が低下し、Csの分配係数は高くなる。 ・ イライト化の反応時間やナチュラルアナログ 研究の結果を考慮すると、イライト化の発生確 率および緩衝材特性への影響は小さいと考え られる。
	シリカ含有鉱物の溶 解・再沈殿（シリカセメ ンテーション）	・ 緩衝材中のシリカ 含有鉱物の溶解お よび再沈殿	・ 緩衝材が100℃を超えた場合に特有の現 象	・ 室内試験および原位置試験より、緩衝材が 100℃を超えた場合にセメンテーションが観 察され、緩衝材の可塑性や膨潤性能の低下お よび透水性の増加が認められた。 ・ 150℃程度の温度履歴を受けたベントナイ トは、セメンテーションのために、室温の場 合と比べて透水係数は2桁程度増加し、膨潤 圧は50%程度低下する。

さらに、海外で実施されている緩衝材の最高温度が100°Cを超えた状態を模擬する原位置試験について、試験条件、試験手法、計測機器の選定・配置などに関する情報を入手しました。スイスのグリムゼル試験場では、地下施設を使用して、緩衝材の温度を最高200°C程度まで上昇させることを想定した人工バリア試験が実施されています（HotBENTプロジェクト）。ベントナイトの種類（米国産およびチェコ産）や形状（ブロックおよびペレット）、ヒーターの加熱温度（175°Cおよび200°C）などの条件を変えて試験を行うことにより、異なる条件下での人工バリアの挙動が検証される予定です。図 53に示すように、令和3年3月の時点では、坑道奥側のコンクリートプラグの施工までが終了しています。同図中に例示しているように、温度、間隙水圧、相対湿度、全圧力、水分量、変位、ガスの組成および濃度の計測が可能な機器が、各ヒーターの周囲やベントナイトの内部、および試験坑道の周囲に配置されています。100°Cを超えた状態で人工バリアに生じる現象を観測するにあたっては、温度、間隙水圧、相対湿度が特に重要なパラメータと考えられており、これらのパラメータを測定可能な計測機器が、ヒーター周囲やベントナイト内部には特に密に配置されています。令和3年度も、同試験に関する情報を引き続き入手していきます。

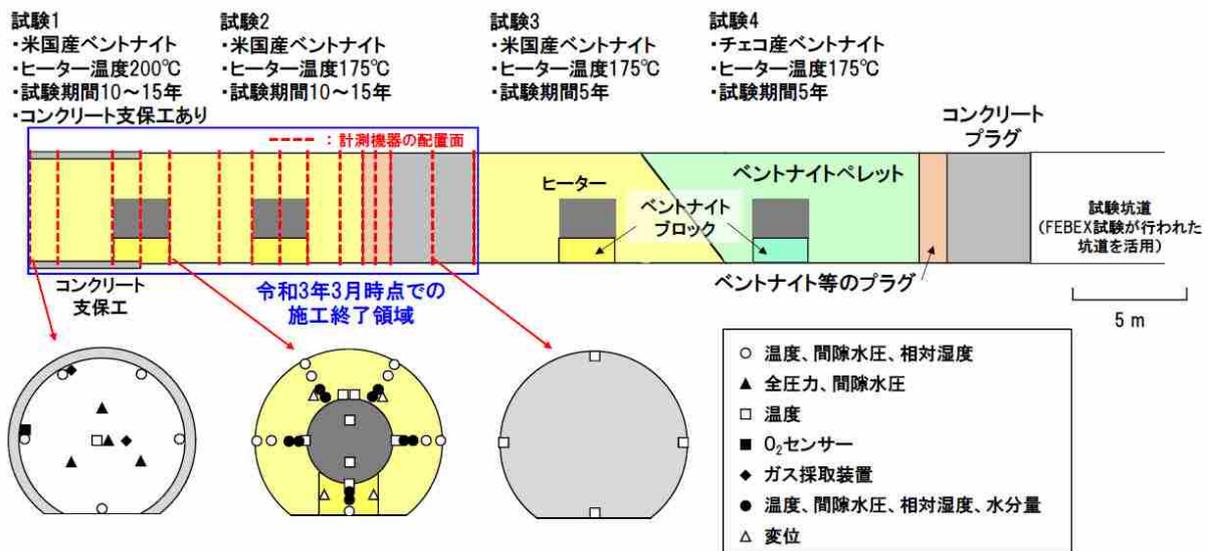


図 53 高温における人工バリア性能確認試験の施工状況ならびに計測機器の配置断面図（海外での研究事例）

6. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

6.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

6.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

令和2年度以降は、地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握が課題となります。そのため、断層沿いに亀裂の発達する幅が数十cm程度のより大型の断層における地震動や坑道掘削に伴う割れ目中の地下水の流れの変化に関して、堆積岩の緩衝能力（自己治癒能力）の評価手法の確認を行います。具体的には、地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握（ボーリング孔を用いた水圧擾乱試験）、ダクティリティインデックス（以下、DI）^{*35}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、水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備を行います。本課題は、割れ目や断層の中での地下水や物質の移動を把握するので、4.2物質移行試験と関連があります。

令和2年度は、地層の透水性を評価する上で重要となる割れ目の水理的連結性について、これまでに稚内層で得られてきている知見やデータの見直しを行いました。稚内層中の割れ目の水理的連結性については、平成30年度にDIの概念を用いて、割れ目内に隙間ができやすく、断層同士の連結も促されやすい $DI < 2$ の領域（稚内層浅部）と、割れ目内に隙間ができにくく、断層同士の連結が促されにくい $DI \geq 2$ の領域（稚内層深部）に区分し、浅部が水理的連結性の高い領域である一方で深部が水理的連結性の低い領域であることを透水試験・水圧観測・水質分析結果から示しました^{(12)、(13)}。さらに平成30年度から令和元年度に、この結果と立坑掘削時にHDB-6孔で観測された水圧応答との整合性を検討し、同孔の深度500 m以深で観測された継続的な水圧上昇が割れ目の水理的連結性の低さを表すことを明らかにしました^{(13)、(14)、(15)}。しかし、稚内層深部の深度500 m以浅では立坑掘削時に水圧低下が一部に認められており、十分な整合性がとれていませんでした⁽¹⁵⁾。令和2年度に既存データの見直しと解析を行った結果、長期水圧観測に関して以下のことが新たに分かりました。

図 54に示すように、立坑の掘削に伴い、HDB-6孔の深度500 m以深の観

*35：岩石の強度・応力状態を示すために新たに定義した指標であり、この値が高いほど、岩石は見かけ上、軟らかくなります。岩盤にかかる平均有効応力（岩石に実際にかかる平均的な負荷応力）をその健全部の引張強度（岩石の引っ張り破壊に対する強度）で除した値で定義されます。

測点 (No. 9~11) を除くHDB-6孔およびPB-V01孔の稚内層中の観測点で水圧低下が認められています。各観測点の水圧低下量を流量で、経過時間を距離の二乗で除して整理すると、図 55のように整理することができます (前者の値を水圧低下量/流量と表記)。すなわち、HDB-6孔の観測点No. 4、6、7とPB-V01孔の観測点No. 6は互いに類似した水圧低下量/流量の値を示すのに対し、HDB-6孔のNo. 8は早い時間帯においてこれらよりも明らかに小さな水圧低下量/流量の値を示します (図 55)。さらに、PB-V01孔のNo. 9、10はこの早い時間帯において負の値を示しており (水圧が増加している)、これは水圧低下が認められていないHDB-6孔の深度500 m以深のNo. 9~11と同様な特徴です (図 55)。これらのことは、HDB-6孔のNo. 4、6、7やPB-V01孔のNo. 6の観測点周辺の割れ目の水理的連結性が高く、水圧が一様に伝搬しやすい環境にあるのに対し、HDB-6孔のNo. 8やPB-V01孔のNo. 9、10の観測点周辺の割れ目は水理的連結性が低く、特にPB-V01孔のNo. 9、10周辺は非常に水圧が伝搬しにくい環境にあることを示唆します。

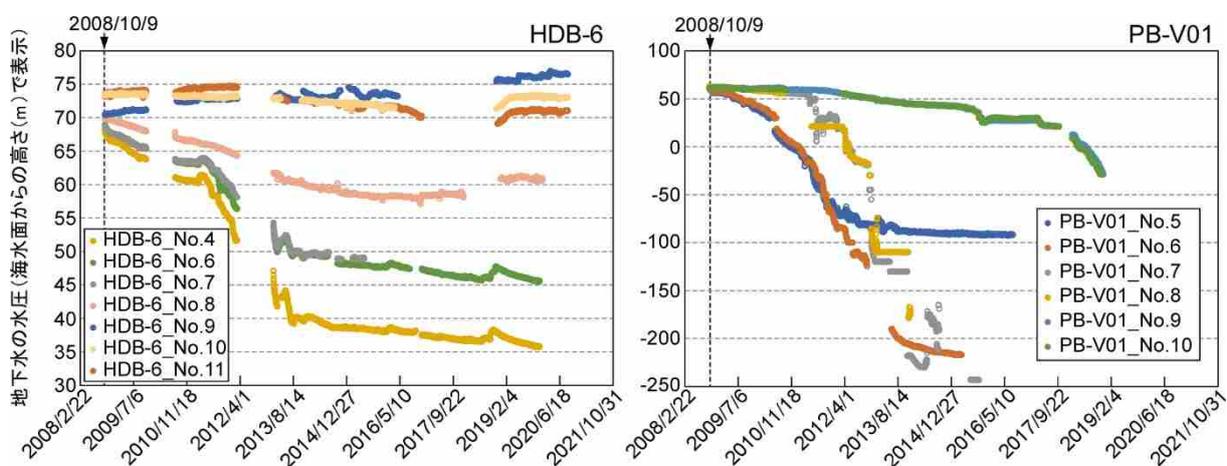


図 54 HDB-6孔およびPB-V01孔における長期水圧観測結果
立坑掘削に伴い湧水量が顕著に増加した2008年10月9日以降のデータを示します。センサーの不具合などによる異常値と考えられるデータは除外しています。

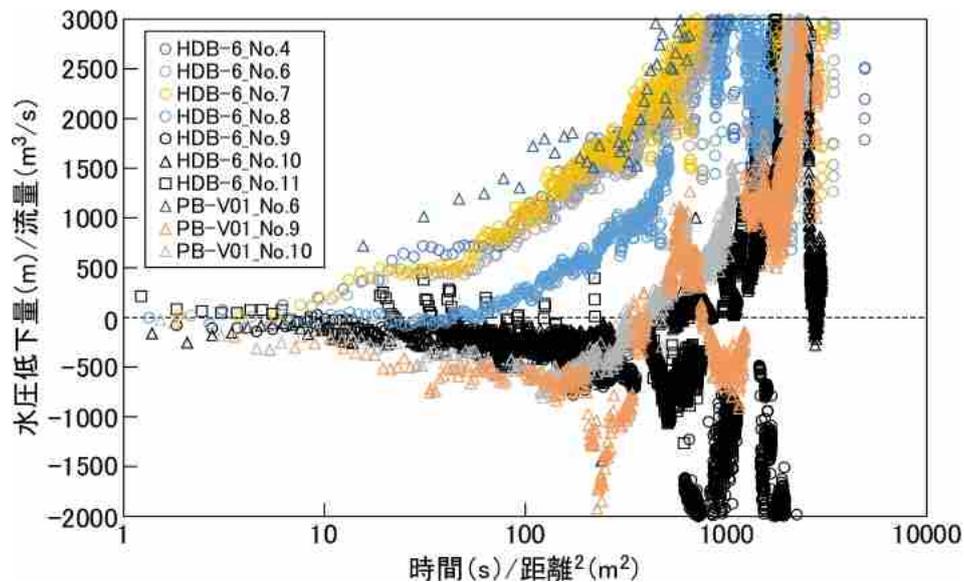


図 55 HDB-6孔およびPB-V01孔における水圧低下量を流量で除した値と
時間を距離の二乗で除した値の関係

流量は立坑での湧水量、時間は 2008 年 10 月 9 日以降の経過時間、距離は各観測区間と換気立坑深度 250 m との直線距離を表します。

上記の長期水圧観測に関する検討結果に加え、東立坑底盤から掘削したボーリング孔 (FZ-01孔およびFZ-02孔、図 14参照) での水圧擾乱試験・物質移行試験時の水圧応答の情報 (図 56) やPB-V01孔の孔内検層の結果⁽¹⁶⁾も合わせると、立坑周辺の稚内層中の割れ目の水理的連結性については図 57のように整理することができます。すなわち、稚内層浅部と稚内層深部の境界面 (DI=2の深度) から深度方向に100 m程度、割れ目の水理的連結性が高い領域から低い領域へと徐々に変化する遷移的な領域が存在することが考えられ (図 57)、この考えは地上からのボーリング調査における透水試験・水圧観測・水質分析結果とも整合します (図 58)。図 57に基づく、地下施設における深度500 m以深の領域は、この遷移領域を超えた、割れ目の水理的連結性が低い深度領域に相当することが考えられます。

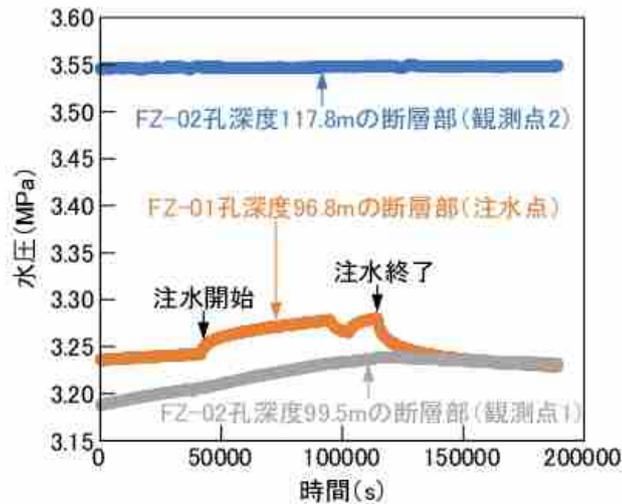


図 56 FZ-01孔の深度96.8 mの断層部へ注水を行った際のFZ-02孔の深度99.5 m (観測点1) および深度117.8 m (観測点2) の断層部での水圧応答

注水点から約 4.5 m 離れた観測点 1 では注水終了後に明瞭な水圧応答 (水圧低下) が確認できますが、注水点から約 21.3 m 離れた観測点 2 では水圧応答が確認されません。

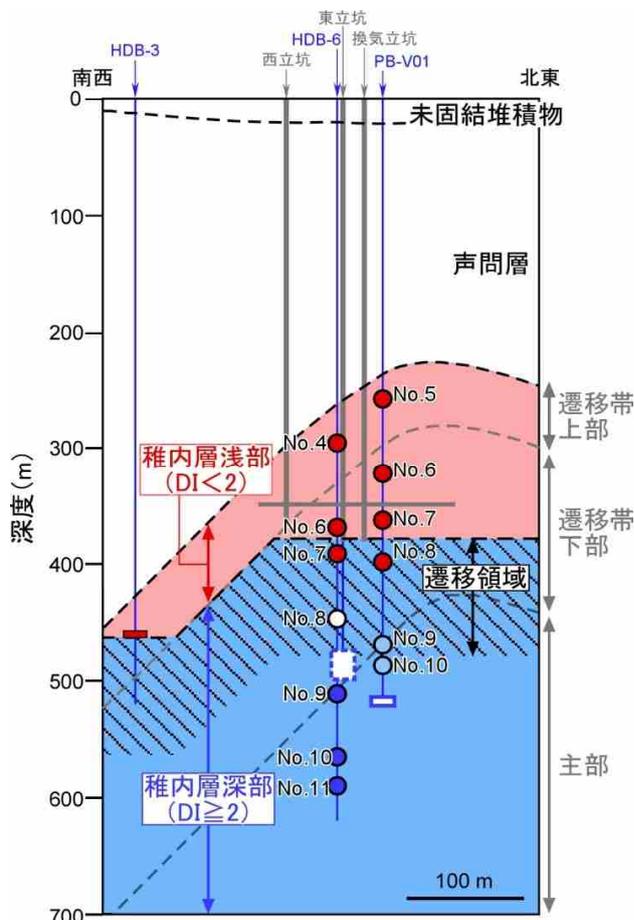


図 57 稚内層中の割れ目の水理的連結性に関するDIを指標とした領域区分とボーリング孔で得られた水理学的情報との比較

長期水圧観測

- 立坑掘削に伴い水圧低下が認められる観測点 (断層/割れ目の水理的連結性が高い)
- 立坑掘削に伴い水圧低下が認められるが、解析的には初期段階の低下量が小さい観測点 (断層/割れ目の水理的連結性が低い)
- 立坑掘削に伴い水圧低下が認められるが、初期段階では水圧上昇が認められる観測点 (断層/割れ目の水理的連結性が低い)
- 立坑掘削に伴い継続的な水圧上昇が認められる観測点 (断層/割れ目の水理的連結性が低い)

水圧擾乱・物質移行試験

- 数mを超えた距離で断層間の水圧応答が認められない領域 (断層の水理的連結性が低い)

孔内検層

- 地下水の流出入が検出されない断層区間 (断層の水理的連結性が低い)

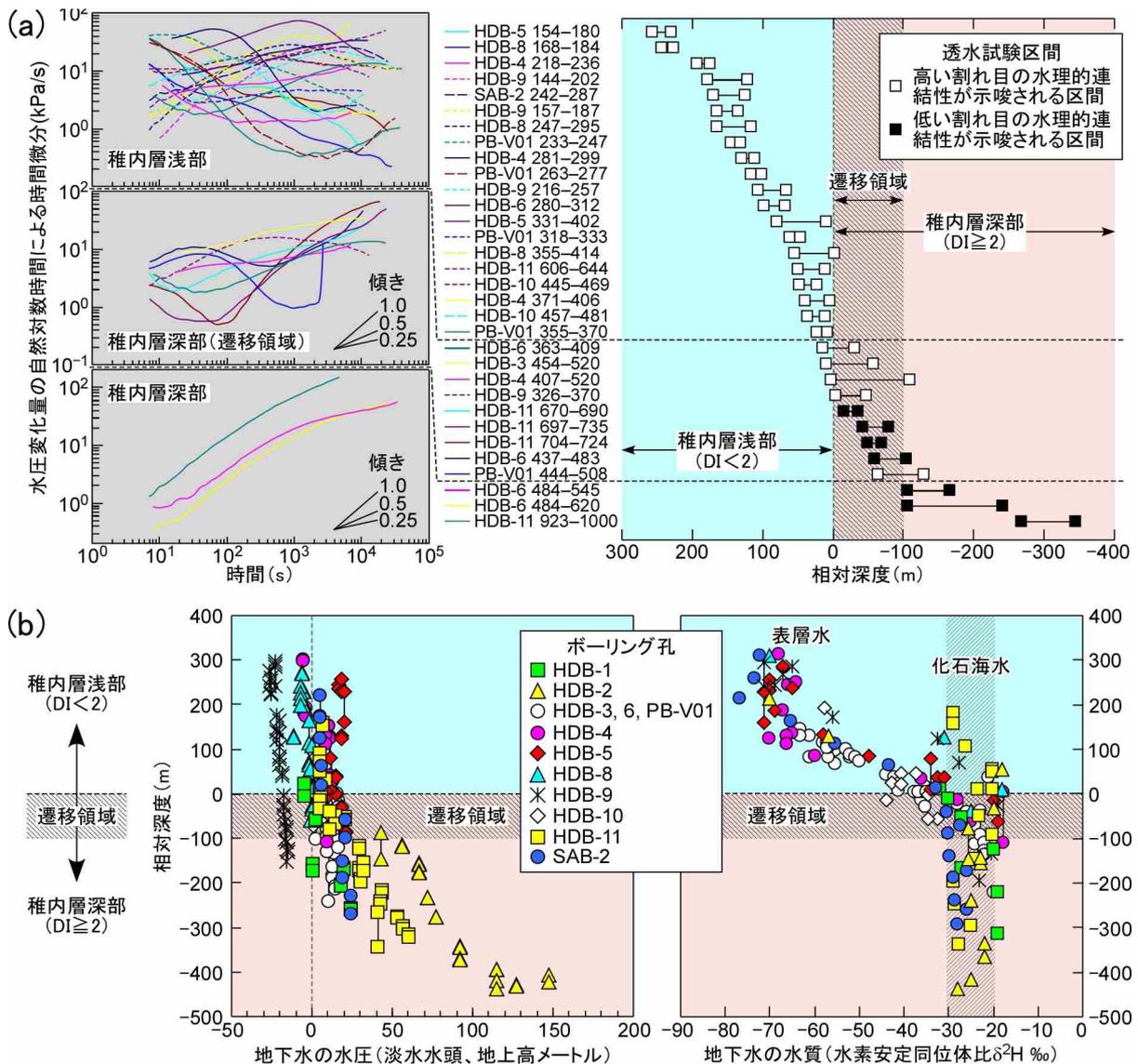


図 58 ボーリング孔における (a) 稚内層の割れ目を対象とした透水試験時の水圧変化と (b) 地下水の水圧と水質の深度分布⁽¹²⁾に加筆

(a) 透水試験の後半の時間帯で水圧の変化速度が一定もしくは小さくなる場合は割れ目の水理的連結性が高く、大きくなる場合は水理的連結性が低いことを示唆します。稚内層浅部では前者の水圧変化、稚内層深部（遷移領域）では両者の水圧変化、そして稚内層深部では後者の水圧変化が認められます。(b) 稚内層深部では、特に遷移領域より深い領域において、淡水水頭が深度とともに変化します。また、稚内層深部は、遷移領域で表層水の混入が一部に認められるものの、遷移領域より深い領域では表層水の混入は認められず、化石海水が残っていることが確認できます。これらの水圧・水質情報は割れ目の水理的連結性が低いことを示唆します。

稚内層の深部領域の断層を対象に実施した既往の水圧擾乱試験⁽¹⁷⁾前後の透水試験時に得られた水圧データを解析し、水圧擾乱試験中の高圧注水が断層の水理的連結性にどのような影響を与えたかを検討しました。その結果、高圧注水によって断層の水理的連結性が一時的に高くなる一

方で、水圧が元の状態に戻ると水理的連結性も数日の時間差を置いて元の低い状態に戻ることが確認できました⁽¹⁸⁾。この結果は、断層の水理的連結性が断層面に垂直に掛かる力に支配されていることを示唆しており⁽¹⁸⁾ (図 59)、このようなメカニズムは断層の水理的連結性の低さをもたらす普遍的な要因として重要と考えられます。令和2年度は水圧擾乱試験で確認された上記の現象とメカニズムを理解するために、まずは断層同士の離間距離が断層の水理的連結性に与える影響を解析的に検討しました。解析では、一様な開口幅を持つ2枚の断層を稚内層中に仮定し、一方の断層に注水を行った際に、両断層の離間距離に応じて、注水点における水圧変化がどのように異なるかを調べました。その結果、数cmでも断層が離れることにより、断層の水理的連結性が有意に低くなることが確認できました (図 60)。今後は、断層同士が連結し合うような場において、図 59に示すような断層内の開口幅の不均質性がどの程度、断層の水理的連結性に影響を与えるかを解析的に検討する予定です。

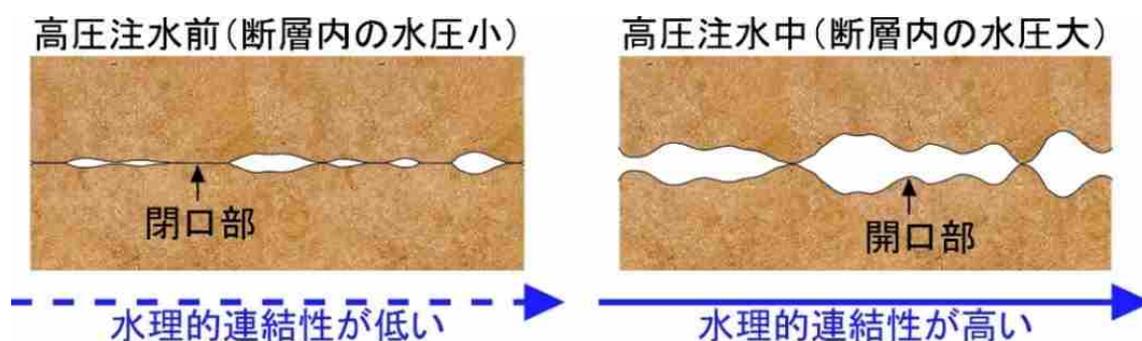


図 59 水圧上昇による断層内の開口部と水理的連結性の増加

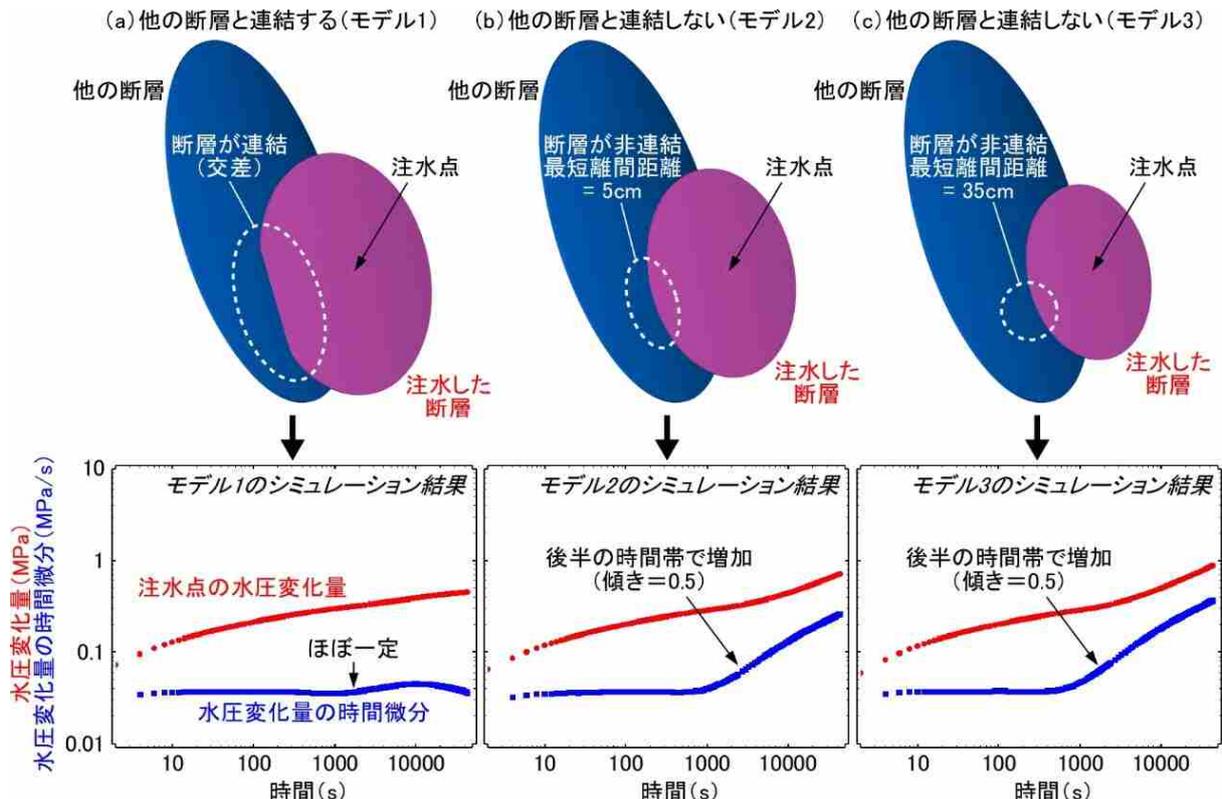


図 60 断層間の離間距離と断層の水理的連結性に関する解析結果

下図において、水圧変化量の時間微分の値がほぼ一定だと断層の水理的連結性が高く、後半の時間帯で増加する（傾き 0.5 以上）と断層の水理的連結性が低いことを示唆します⁽¹²⁾。

令和 2 年度は、地下施設内の既存のボーリング孔（FZ-01 孔、図 14 参照）において、幅数十 cm の断層（図 61）を対象に水圧擾乱試験を実施しました。これまでは幅数 cm 程度の小規模な断層を対象に同試験方法を確立してきましたが⁽¹⁷⁾、今回はより大型の断層に対して同試験方法を試みました。水圧擾乱試験では、注水により断層部の水圧を上昇させ、断層の摩擦力を一時的に低下させることにより断層を人工的にずらし、そのずれが透水性に与える影響を調べます⁽¹⁷⁾。今回の試験では、ステップ 0 からステップ 6 まで段階的に試験区間（断層部）の水圧を上昇させた後、一旦、水圧を急速に解放し、再びステップ 7 からステップ 13 まで段階的に水圧を上昇させました（図 62）。その結果、水圧上昇とともに鉛直方向のずれが断層面に発生し始め、ステップ 6 後の急速な水圧解放後に数 mm のずれが断層面に残された状態で再び水圧上昇とともにずれが増加していきました（ステップ 13 の最終段階で 13～49 mm のずれに到達、図 62 左

図)。この間、注入流量は水圧上昇とともに線形的に増加し、その増加率はステップ 1~6 とステップ 8~13 の間でほぼ同じことが分かりました (図 62 右上図の 2 本の近似直線の傾きがほぼ同じ)。これらの結果は、断層のずれが断層の透水性にほとんど影響を与えていないことを示唆しており、このことは試験中の注入流量と水圧の経時変化から別途計算される断層の水理学的な開口幅 (水の通しやすさを表す開口幅) が全ステップを通じて 0.09~0.10 mm とほぼ一定であることから示唆されます (図 62 右下図)。この水理学的な開口幅に対して、与えた断層のずれは数 mm 以上に達していることから、試験を行った断層の透水性は断層のずれに対して非常に鈍感であることが分かります。今回の試験により、小規模な断層を対象に確立した試験方法⁽¹⁷⁾がより大型の断層に対しても適用可能であることが確認できました。今後は今回得られた結果について、さらに検討を行っていく予定です。

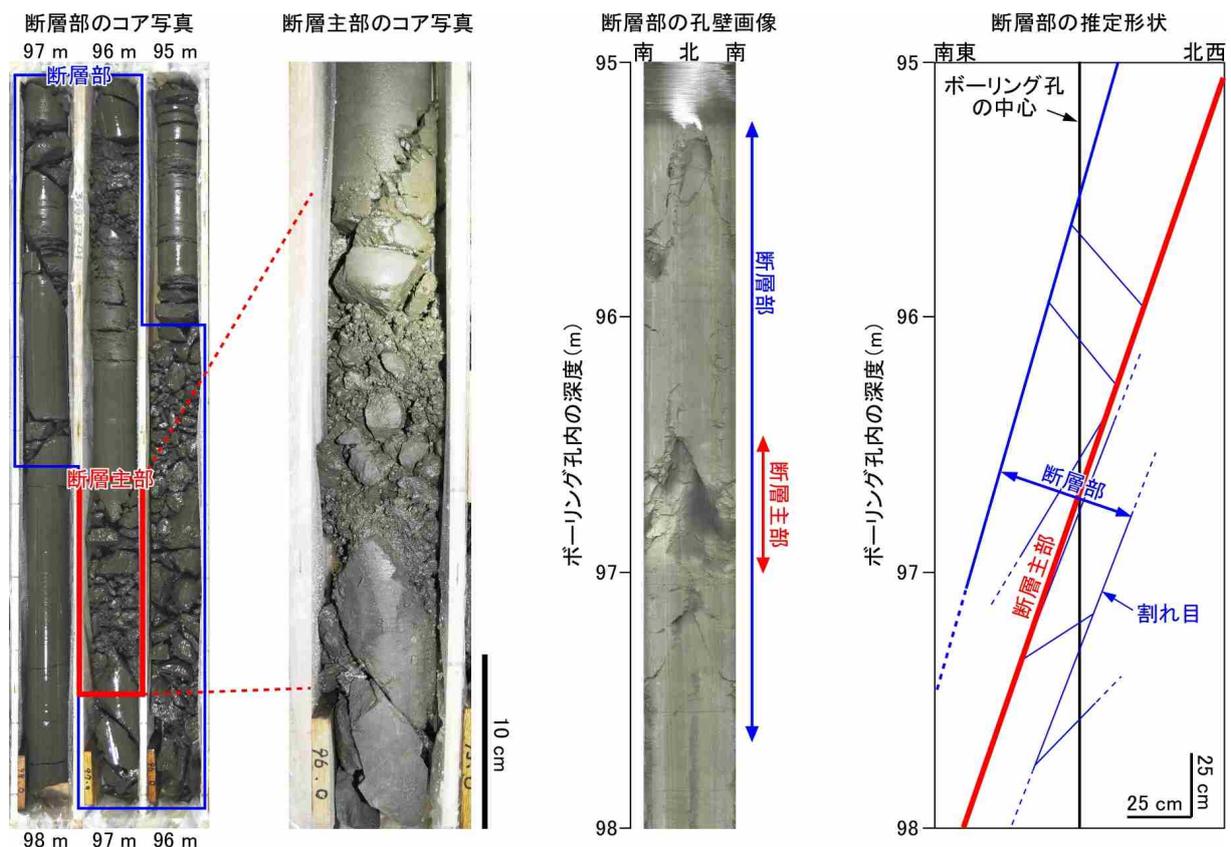


図 61 水圧擾乱試験を行った幅数十cmの断層部のコア写真、孔壁画像
および推定形状

断層主部の傾斜角は水平面に対して 71 度です。断層主部の周辺数十 cm の範囲に割れ目が発達しています。

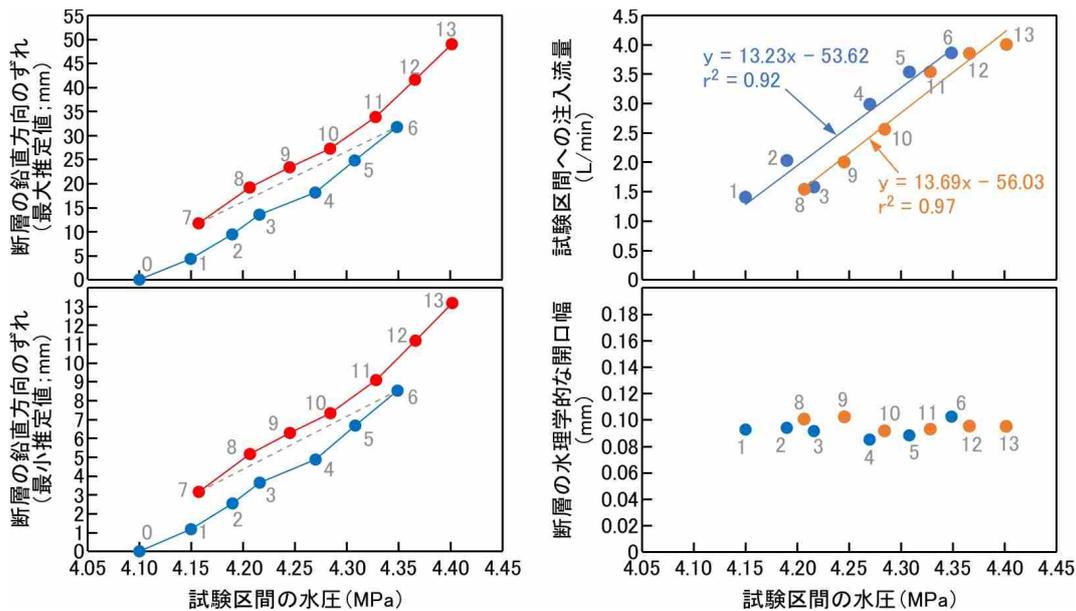


図 62 水圧擾乱試験結果

図中の番号は試験中のステップの番号（ステップ0→ステップ13）に対応しています。

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、このような領域を調査してモデル化する技術の実証を行います。処分事業のサイト選定において、地層処分における閉鎖後長期の地質環境に求められる要件は、水理場の観点では、「地下水流動に伴う放射性物質の移行時間を増大させ、その間の放射性崩壊により移行率を低減させるため、動水勾配が小さいまたは岩盤の透水性が低いことにより「地下水流動が緩慢である」こと」とされており⁽¹⁹⁾、この研究課題で整備される技術は、これ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（10数km×10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では、古水理地質学的変遷^{*36}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2年度は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（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：岩盤中地下水流動評価技術高度化開発）の一環として、上記の課題に取り組みました。

①地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域）の調査・評価技術の検証に関して、化石海水の分布を推定するための物理探査を実施しました。ここで言う化石海水とは、堆積時の海水が埋没続成過程で変化し、その後、長期にわたり地表からの天水の浸透の影響を受けていない地下水のことを指します。化石海水の存在は、地下水流動が非常に遅く、最も遅い物質輸送現象である拡散^{*37}が支配的であることを示す証拠となります。化石海水の存在を確認するための指標は、それが海水に由来していることから、地下水の塩濃度と酸素・水素同位体比^{*38}です。このうち、幌延地域の地質環境では、地下水の塩濃度が地下の電気の流れやすさ（比抵抗）と相関することが分かっており⁽²⁰⁾、塩濃度が高い場合は比抵抗値が低く、塩濃度が低い場合は比抵抗値が高くなります。このことから、広範囲にわたり地下深部の化石海水分布を把握する際には、地下の比抵抗分布を推定できる電磁探査を適用することが効果的であると考えられ、令和2年度は、幌延深地層研究センターを含む約3 km四方の範囲を対象とした電磁探査を実施しました。また、既往研究から天水の浸透が地質構造と関係することが分かっており^{例えば(21)}、化石海水分布の推定を効率的に行うには、

*36：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のことです。

*37：拡散とは、物質の濃度の違いによって物質が散らばり広がる現象を言います。

*38：酸素同位体比とは、質量数16の酸素に対する質量数18の酸素の割合を指します。幌延地域では、地表水で-10‰前後、深部地下水で0‰前後の値を示すことが分かっています。水素同位体比とは、質量数1の水素に対する質量数2の水素の割合を指します。水素同位体比は $\delta^2\text{H}$ または δD と表記されます。

地層や地質構造の分布との関係付けが肝要であることから、地層や地質構造の分布を推定するための反射法地震探査*39も併せて実施しました。

図 63に、令和2年度の探査範囲と、電磁探査および反射法地震探査の測点・測線の配置を示します。電磁探査は、探査深度の浅いAMT法*40と探査深度の深いMT法*41を併用した高密度電磁探査として実施しました。設定した探査範囲に対して満遍なく一様の精度で三次元比抵抗分布を推定するためには、測点を規則的かつ格子状に配置させることが理想的ですが、実際には、電磁探査のノイズとなる高压電線や作業者の安全性などを考慮して、図 63に示すとおり60箇所の測点配置としました。そして、三次元比抵抗分布を推定する解析には、3測点分の既往MT/AMT法データと36測点分の既往AMT法データを追加した合計99測点のデータを使用しました。一方、反射法地震探査は、地層・地質構造の三次元分布を得るために、アクセス可能な道路を最大限使用した準三次元反射法地震探査として実施しました。

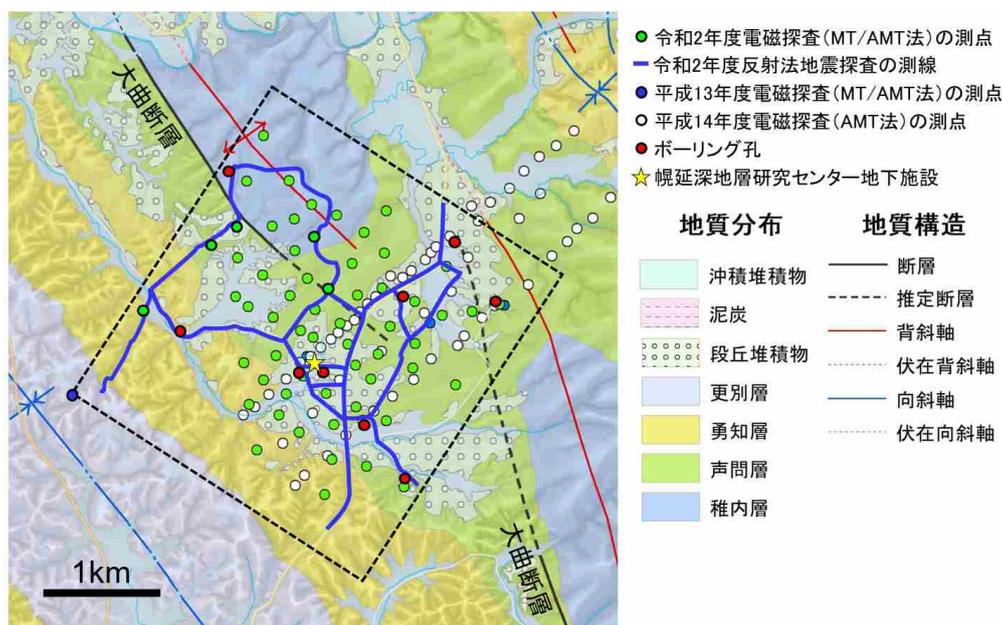


図 63 電磁探査および反射法地震探査の測点・測線の配置
 地質図は引用文献(22)に基づいています。

*39：地上で人工的に地震波(振動)を発生させ、その地震波が地下の地層境界や亀裂に達すると、その一部はそこで反射して再び地表に戻ってきます。この反射してきた地震波を地表に設置した多数の受振器(小型地震計)で測定することにより、地層の重なり方やその連続性を推定する手法です。

*40：AMT(Audio-frequency Magnetotellurics)法は、太陽の黒点活動や雷放電といった自然の電磁波に反応して地球内部から生じる自然電磁場のうち高い周波数帯を測定し、地下の比抵抗分布を推定する電磁探査法です。

*41：MT(Magnetotelluric)法は、AMT法と測定原理は同じですが、AMT法よりも低い周波数帯の自然電磁場を測定し、より深部の地下の比抵抗分布を推定する電磁探査法です。

図 64に、電磁探査の取得データを用いた解析により推定した三次元比抵抗分布から、6つの深度の水平断面を切り出した結果を示します。探査範囲における比抵抗値は1~50 $\Omega \cdot m$ の範囲にあり、深度が増加すると比抵抗値が低くなる傾向が認められました。また、側方方向にも異なる傾向が認められ、探査範囲の南西側の比抵抗は相対的に低く、一方、大曲断層が分布する北東側の比抵抗は相対的に高いです。

図 65(a)に、既存の地上からのボーリング調査において比抵抗検層により得られた比抵抗値と水質分析により得られた酸素同位体比の関係を示します。化石海水に相当する酸素同位体比の範囲を0‰以上とした場合、その範囲の比抵抗値は大半が2.4 $\Omega \cdot m$ 以下です。図 65(b)に、既存の地上からのボーリング調査の比抵抗検層により得られた比抵抗値の累積頻度分布を示します。図 65(b)のオレンジ色の三角のプロットは、すべてのデータ(127個)を示しており、この中から酸素同位体比が0‰以上であるデータ(63個)を抽出し、青色の丸で改めてプロットしました。この累積頻度分布からも、酸素同位体比が0‰以上となる比抵抗値は大半が2.4 $\Omega \cdot m$ 以下であることが分かります。すなわち、幌延深地層研究センター周辺では、比抵抗値が2.4 $\Omega \cdot m$ 以下の場合には高い確率で化石海水に相当する地下水であると判断できます。一方、2.4 $\Omega \cdot m$ を超えると徐々に化石海水ではない地下水が含まれるようになり、5.9 $\Omega \cdot m$ 以上は化石海水である可能性がほとんどないことを示しています。

これらを電磁探査により得られた比抵抗分布から化石海水の存在可能性を判断する際の目安としました。図 64に示す三次元比抵抗分布の水平断面図には、化石海水の存在可能性を判断するために、2.4 $\Omega \cdot m$ および5.9 $\Omega \cdot m$ の等値線を示しています。標高-12.5 mでは、化石海水が存在する領域はほとんどないと判断できますが、深度が増加するにつれて化石海水が存在する可能性がある領域が広がることが分かります。探査範囲の南西側では、化石海水の可能性が高い2.4 $\Omega \cdot m$ 以下の領域が標高-125 mから標高-550 mにかけて広がります。一方、北東側では、標高-550 mにおいて化石海水の可能性のある5.9 $\Omega \cdot m$ 以下の領域が広く分布します。しかし、令和2年度の三次元比抵抗分布の解析結果では、既存の地上からのボーリング調査の結果とは異なり、おおよそ標高-800 mより深くなる

と比抵抗値が高くなる可能性が認められました。今後は、解析条件の見直しを行い、より正確な三次元比抵抗分布を推定します。

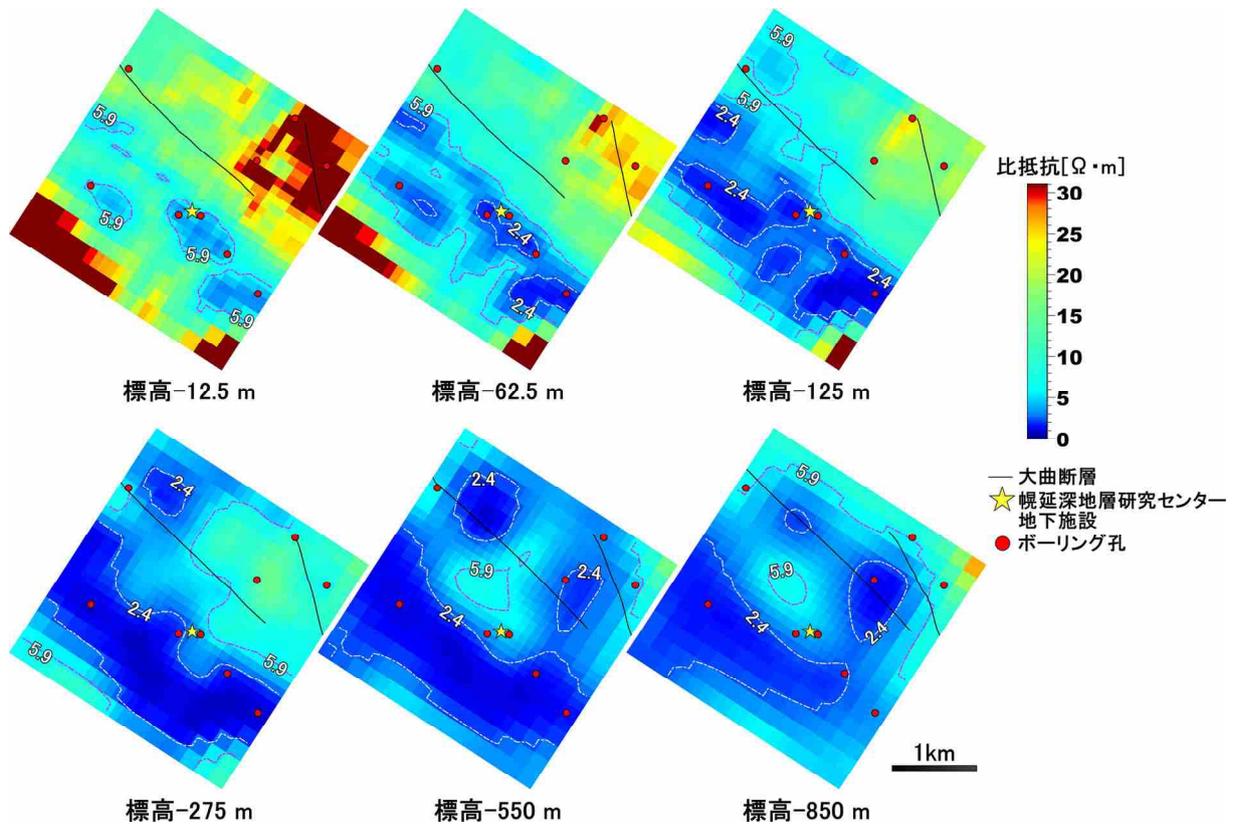


図 64 電磁探査により得られた三次元比抵抗分布の水平断面図

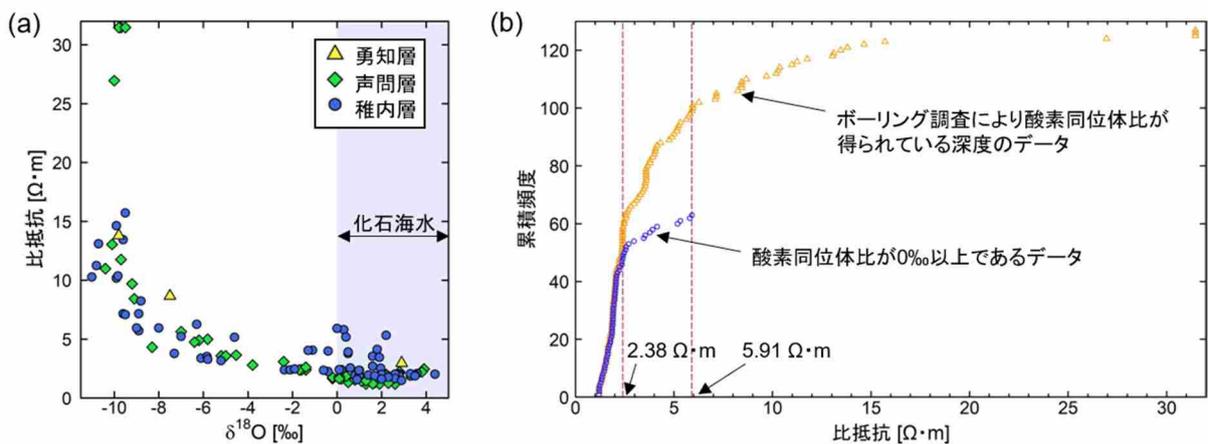


図 65 (a) 既存の地上からのボーリング調査において比抵抗検層により得られた比抵抗値と水質分析により得られた酸素同位体比の関係、(b) 既存の地上からのボーリング調査の比抵抗検層により得られた比抵抗値の累積頻度分布

図 66に、反射法地震探査の結果の一例として、探査範囲北西側の測線における重合前深度マイグレーション (PSDM) *42解析結果と電磁探査で得られた比抵抗分布を重ね合わせた図を示します。この断面図では、南西側から順に勇知層、声問層および稚内層が分布する範囲になります。PSDM解析結果で示されている黒い縞模様は、観測された地震波の時間が深度に変換され、地震波の振幅が強調されて表示されたものです。稚内層の方では縞模様がより明瞭であることから振幅が強く、一方、勇知層の方では縞模様が細かく振幅が弱いことが分かります。これはそれぞれの地層を構成する岩石の硬さの違いが反映された結果であると解釈することができます。比抵抗分布の傾向も岩石の硬さの違いが反映されていると解釈でき、勇知層の方では高い比抵抗の領域がより深くまで分布している様子が分かります。すなわち、これは、地層ごとに天水の浸透の程度が異なることを表していると考えられます。このように反射法地震探査により得られる情報を組み合わせることにより化石海水が分布する可能性が高い領域を効率的に判読できることが分かりました。

今後は、令和2年度に取得した物理探査データのさらなる解析や地質構造判読を進め、化石海水分布の推定精度を向上させるとともに、推定結果の解釈の正確性を確認するためにボーリング調査を実施することが課題となります。

*42：反射法地震探査により取得された反射波データの処理・解析手法の一つです。重合前深度マイグレーション (PSDM : Pre-Stack Depth Migration) では、反射波データとモデル化された地下の地震波速度構造の形状を組み合わせることにより、複雑な地震波伝搬の影響が補正され、正しい地下のイメージを得ることができます。

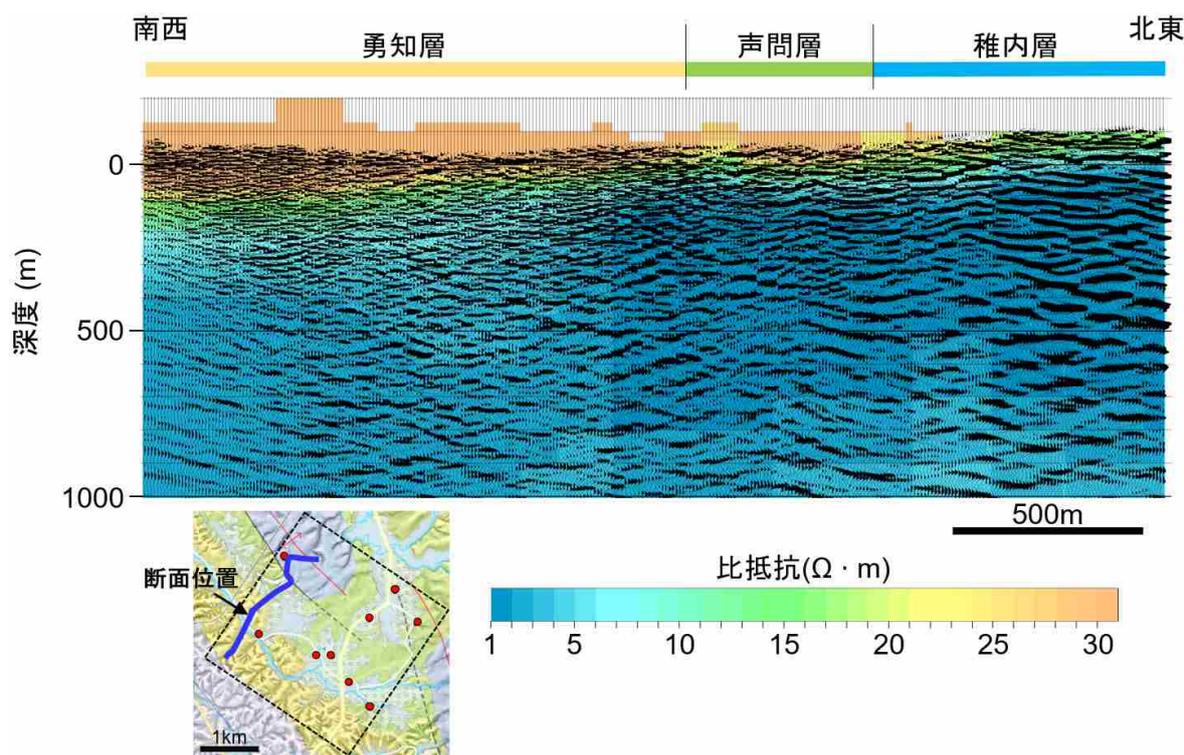


図 66 反射法地震探査の重合前深度マイグレーション (PSDM) 解析結果と電磁探査で得られた比抵抗分布の重ね合わせ
 地質図は引用文献(22)に基づいています。地質図の凡例は図 63に示すとおりです。

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年度は、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方法論に関して概略的な整理を行うとともに、物理探査とボーリング調査を組み合わせた手法により化石海水の三次元分布を把握する際に、それを効率的に実施できる調査数量や仕様などの検討に着手しました。今後は、令和2年度に取得した物理探査データを加えた検討を進めます。

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、既存の解析結果に基づき、隆起・侵食による古地形変化、密度流、異常高圧、海水準変動、涵養量変化^{*43}などの古水理地質学的変遷に関する考慮事項が水理・物質移動解析における地下水移行時間に及ぼす影響について整理しました。また、これらの影響を考慮した水理・物質移動解析を実施するために、既存の解析モデルを改良しました。今後は、改良した解析モデル

*43：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の変化のことです。

を用いて、古水理地質学的変遷が化石海水の分布におよぼす影響について、解析的検討を進めます。

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埋め戻し材の掘削損傷領域（EDZ）への自己治癒能力の実証が課題となります。そのため、EDZの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、緩衝材や埋め戻し材がEDZ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。本課題においては、6.1.1で述べたダクティリティインデックス（DI）などを活用して検討します。

令和2年度は、EDZの割れ目の開口状況を定量的に把握するために、原位置で樹脂注入（図 67）を行った後に採取した割れ目試料（図 68）の詳細な観察を行い、割れ目の開口幅とせん断変位量を計測しました（図 69）。その結果、最大で1 mm程度のせん断変位（ずれ）が割れ目沿いに発生していることが確認できる一方で、そのせん断変位量と開口幅（0.2～0.3 mm）の相関性は小さいことが分かりました（図 70）。一般に、せん断変位とともに割れ目の開口幅が増加することが既往の室内試験により分かっていますが、今回の結果では、そのような傾向は認められませんでした。この原因として、割れ目面に垂直に掛かる力が大きいため、せん断変位に伴う割れ目開口が抑制されている可能性が考えられます。今回の結果は、EDZの割れ目の開口メカニズムを理解する上で重要であることから、今後、さらに検討を行う予定です。

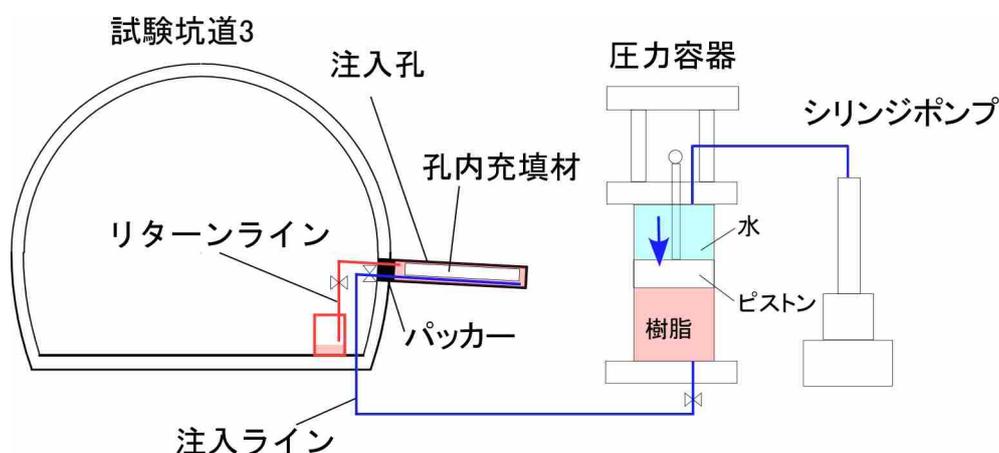


図 67 樹脂注入試験の概要⁽¹⁴⁾

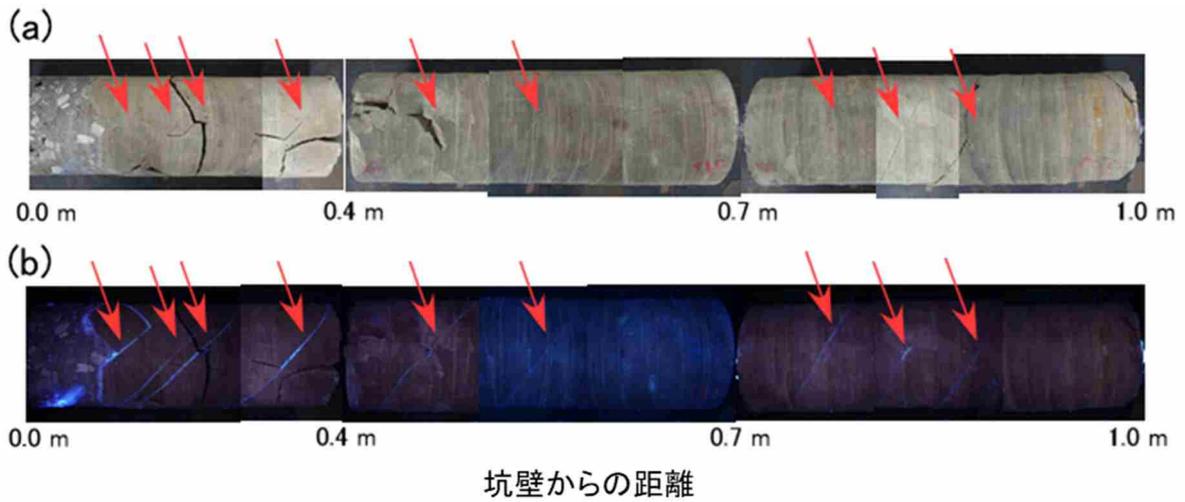


図 68 樹脂注入後に採取したコアの例

(a) 自然光で撮影、(b) 紫外線照射下で撮影（図中の赤矢印は樹脂注入された割れ目を示します。）

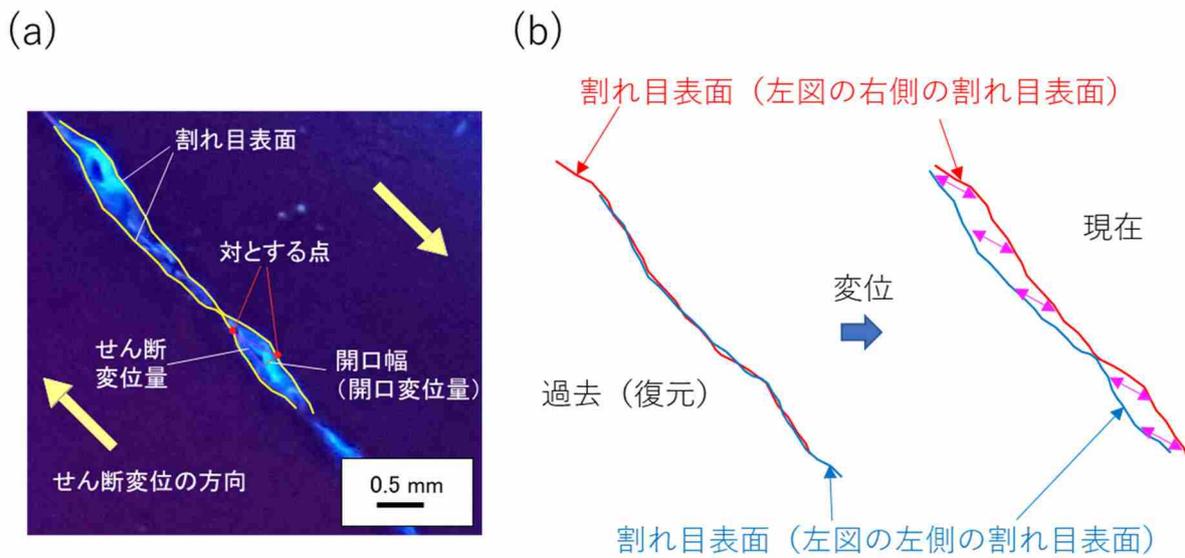


図 69 割れ目の開口幅とせん断変位量の計測方法

(a) 樹脂注入割れ目の拡大写真（紫外線照射下）と計測した開口幅とせん断変位量の例、(b) 対となる割れ目表面のフィッティングによる変位前の状態の復元