

ち、坑道周辺の稚内層浅部は断層同士が水理学的に連結しているために水圧応答が良い一方で、稚内層深部は断層同士の水理学的連結性が限定的であるために水圧応答が悪いと解釈することができます。このことを解析的に検証するために、令和元年度は平成30年度に引き続き、地下水の浸透流解析（地下水の流れのシミュレーション）を行いました。その結果、稚内層深部の透水係数が 1×10^{-10} m/s以上だと深部でも水圧低下が起こり、透水係数が 1×10^{-11} m/s以下だと水圧低下が起こらない結果が得られました。この結果は、稚内層深部の巨視的な透水性が非常に低いことを示唆しており（健岩部と同程度）、これまでの検討により構築した、地上からのボーリング調査により水理学的に閉鎖的な環境領域を特定する方法⁽¹³⁾の妥当性を支持すると言えます。

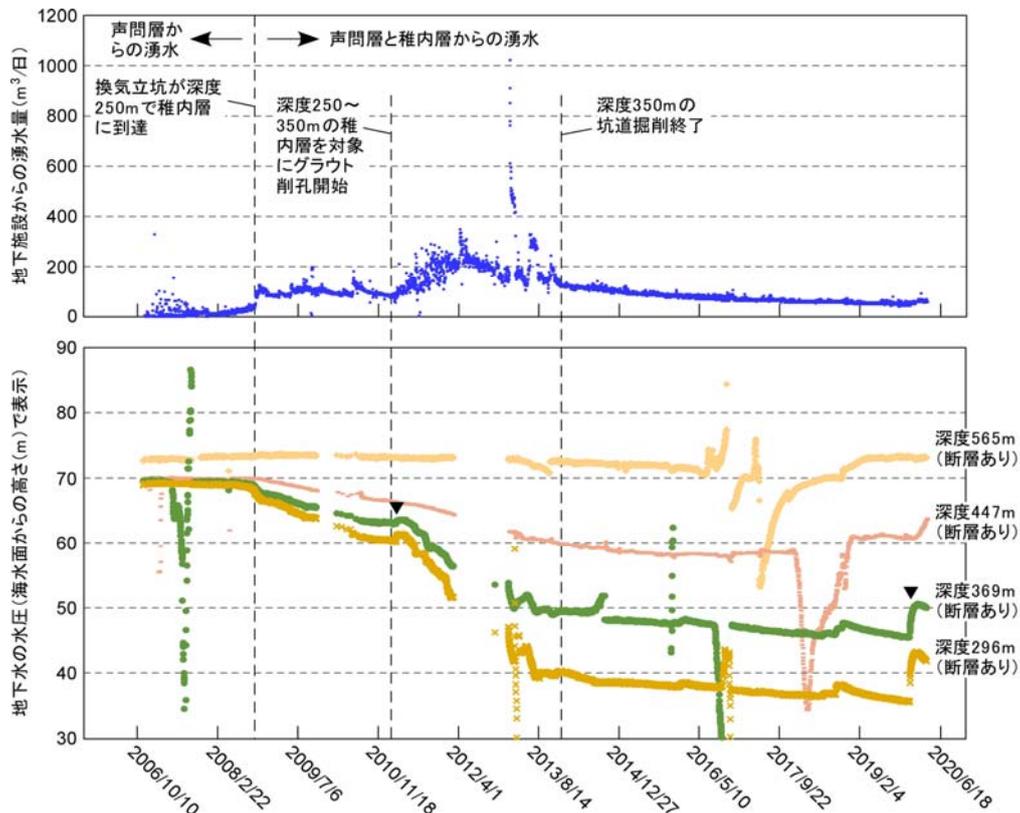


図 13 地下施設からの湧水量（上図）と HDB-6 孔の稚内層における断層区間の水圧観測結果（下図）（2006/11/19～2020/3/24 のデータ）

下図で水圧が急激に変化している箇所は装置の不具合による変動と考えられます。2019年12月12日に深度296mおよび深度369mにて急激な水圧上昇が観測されていますが、これらは同日の宗谷地方北部で起こった地震の影響によるものと考えられ、類似する水圧上昇が2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震でも確認されています（図中の▼）。このような水圧上昇は、観測区間周辺で地下水の流れが何らかの原因で一時的に滞ると発生し得ます。

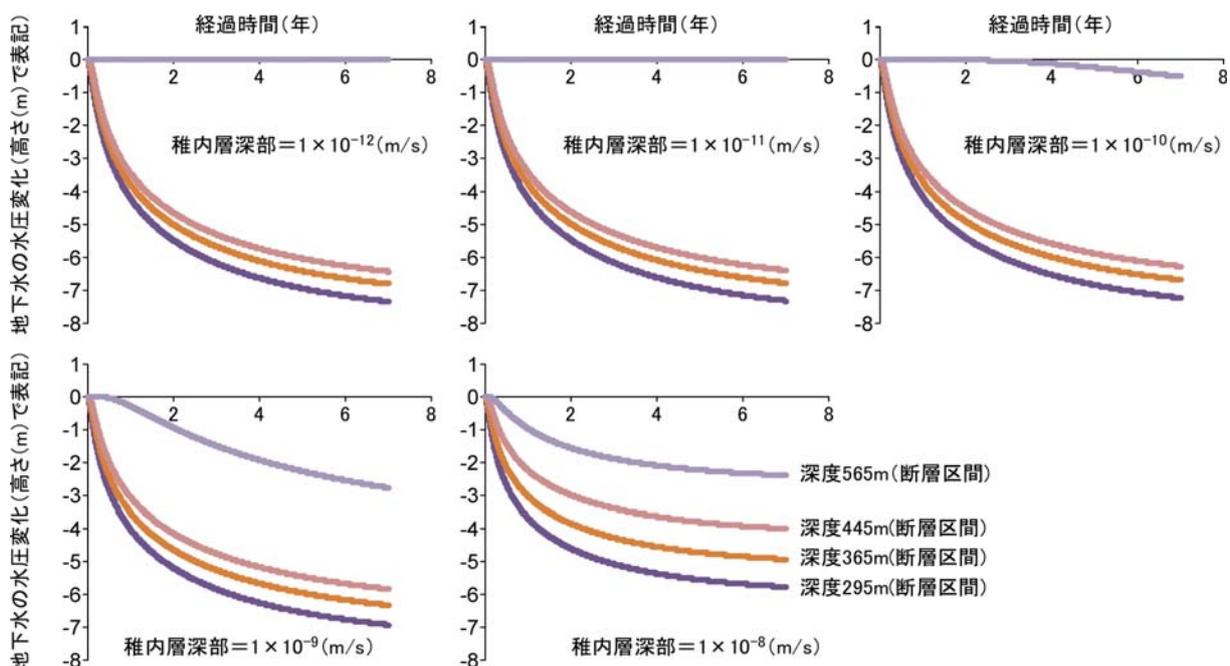


図 14 地下施設からの湧水に伴う HDB-6 孔の水圧変化の解析結果

湧水（揚水）箇所は換気立坑の深度250m（稚内層の初出深度）とし、湧水（揚水）量は70 m³/日で一定と仮定。声間層および稚内層浅部の透水係数はそれぞれ 5×10^{-9} (m/s) および 2×10^{-8} (m/s) と設定し、稚内層深部の透水係数の設定は図中に示す通り。貯留性は健岩部と同程度に設定。

地下施設の深度350m調査坑道において、坑道掘削によって周辺岩盤に形成される掘削損傷領域の割れ目の透水性を予測するためのモデル開発を行っています。令和元年度は、掘削損傷領域の割れ目の開口幅を把握するために、低圧・低粘性で樹脂を注入した掘削損傷領域から採取したボーリングコアの詳細な観察を行いました⁽¹⁴⁾。予め樹脂（蛍光剤添加）を割れ目内に浸透させ、割れ目を固化させた状態でコア採取することにより、原位置での開口幅を保った割れ目を観察することが可能となります。樹脂が浸透した割れ目の開口幅を紫外線照射下で計測した結果、孔口から0.3 mの範囲では割れ目の開口幅が1 mmに及ぶ一方、孔口から0.3 m以深では最大でも0.2 mm程度であることが分かりました（3.1.2(4)参照）。

(3) 地下水の地球化学

第1段階の調査結果から推定した坑道周辺の地下水の水質分布とその形成プロセスを確認するとともに、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の調査・解析技術の開発を行っています。

このため、坑道内で採取した地下水のpHや電気伝導度*18、酸化還元電位*19などの物理化学パラメータを測定するとともに、採取した地下水の水質分析を実施し、その変化をモニタリングしています。

令和元年度は、平成30年度に引き続き、換気立坑および東立坑の壁面に設置した集水リング*20や、坑道内で掘削したボーリング孔から採取した地下水の水質分析を行いました。図 15に、これらの地点から採取した地下水の塩分*21の経時変化を示します。集水リングで採取された地下水（図中で○印のデータに相当）では、坑道内から掘削されたボーリング孔から採取された地下水（図中で□印のデータに相当）に比べて塩分の変動が大きいことが分かります。これは、主に集水リングとボーリング孔とでの地下水の採取方法の違いによるものと考えられます。また、集水リングで採取された地下水の中では、深度100 m～200 m程度の位置で採取された地下水の多く（例えば、WR-V-98.0、WR-V-133.8、WR-V-168.0、WR-E-169.0、WR-E-202.0）で、相対的に塩分の変動が大きい傾向が認められます。このうちWR-V-98.0、WR-V-133.8、WR-V-168.0では、平成26年度以降、塩分が低下する傾向が認められます。これは、平成30年度にも検討したように、立坑を通じて塩分が低い浅部地下水の引き込みが生じ、相対的に深部に位置する塩分の高い地下水と混合していることによると考えられます。

また、深度350m調査坑道で行われている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から採取した地下水の水質分析結果を、図 16に整理しました。試験坑道4は平成25年度に掘削され、平成26年度に人工バリアを埋め戻したのちに人工バリア性能確認試験が開始されています。平成28年度より試験箇所に対する注水量が増加され、また令和元年度は、試験坑道4周辺にグラウトが実施されました。しかし、試験坑道4周辺のボーリング孔（13-350-C05、13-350-C09）では、これらに関連するような塩分の変化は認められませんでした。また、深度350m調査坑道の他のボーリ

*18：電気の通しやすさを表す値で、電気伝導度が大きい(電気を通しやすい)ほど地下水に溶けているイオンの量が多いことを表します。

*19：地下水の酸化還元状態を表します。酸化還元電位が低い地下水ほど、含まれる酸素が少なく還元状態であることを表します。

*20：立坑内で、坑壁から染み出した地下水を回収・採取するために、立坑壁面に30～40 mごとに設置されている設備です。

*21：ここでは、地下水1Lに溶けているナトリウムイオン、カリウムイオン、マグネシウムイオン、カルシウムイオン、塩化物イオン、硫酸イオンの総重量を差します。

ング孔 (13-350-C06、14-350-C04) に関しても、令和元年度まで塩分の大きな変化は認められていません。

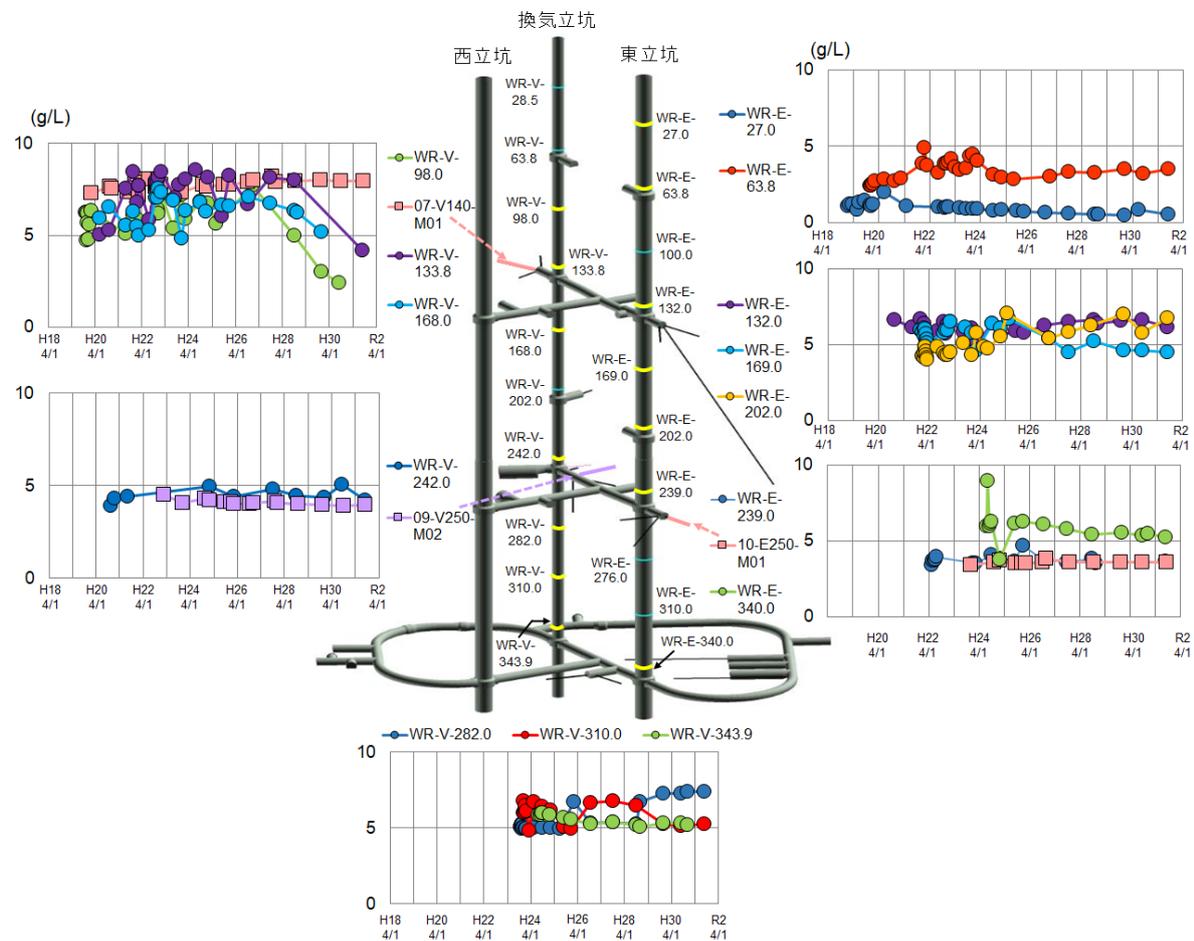


図 15 坑道内で採取した地下水の塩分の経時変化

図中の“V”および“E”はそれぞれ“換気立坑”と“東立坑”を表しています。VまたはEのうしろの数字は深度(m)を表しています。また、○は集水リング、□は坑道内で掘削したボーリング孔から採取した地下水のデータを表しています。

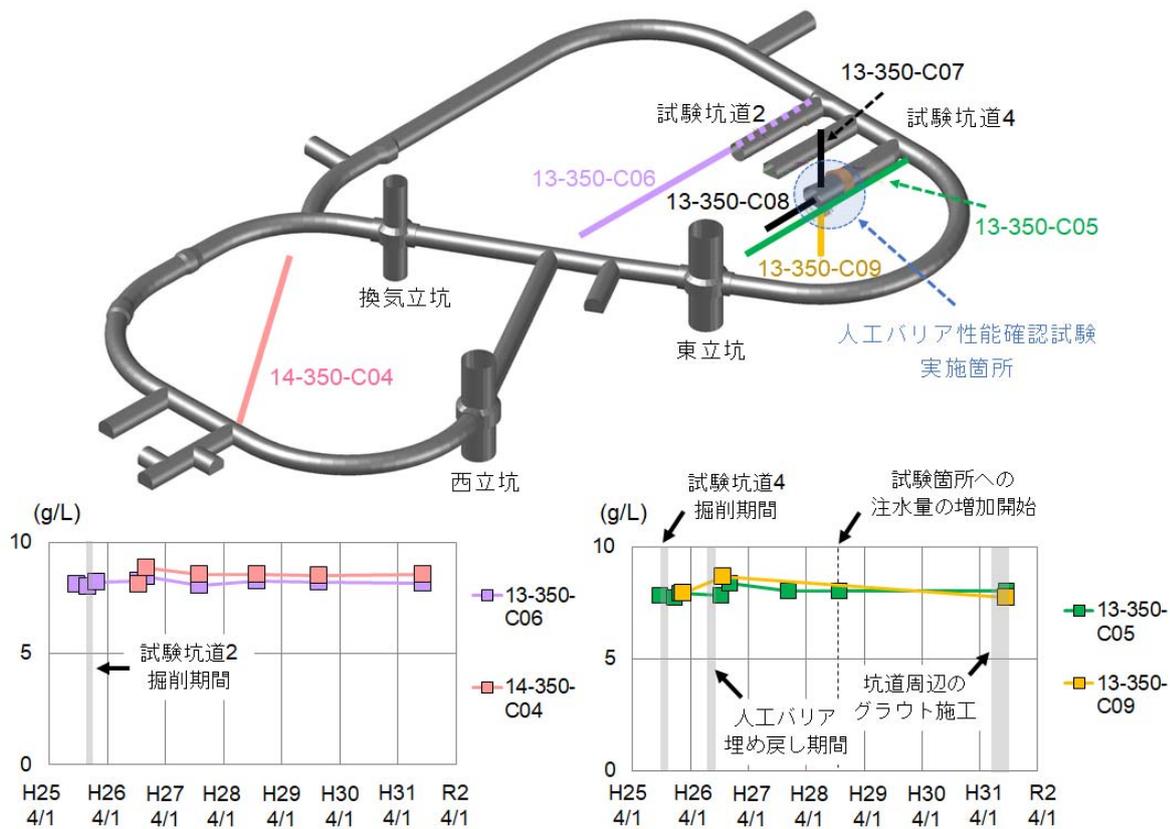


図 16 深度 350m 調査坑道のボーリング孔における地下水の塩分の経時変化

幌延の地下水には比較的多くの有機物が溶存しており、元素の移動性に影響を与える可能性があるため、その特性を評価するための研究を行っています。令和元年度は、樹脂に対する吸着しやすさの違いを利用して有機物を分画する手法を、幌延の地下水に適用しました。その結果、図 17 に示すように、深度140m調査坑道 (08-E140-C01) および深度250m調査坑道 (09-V250-M02) から採取した地下水では、有機物の約60%が腐植物質*²²、約10%が疎水性中性物質*²³、約30%が親水性物質*²⁴から構成されることが分かりました。また、深度350m調査坑道 (13-350-C06) から採取した地下水では約50%が腐植物質、約10%が疎水性中性物質、約40%が親水性物質からなり、腐植物質の割合がやや低いことも明らかになりました。各

*22：ある条件下で樹脂に吸着した物質のうち、アルカリ性溶液で溶出される物質群です。特定の化学構造をもちません。

*23：ある条件下で樹脂に吸着した物質のうち、アルカリ性溶液で溶出されなかった物質群です。炭化水素や脂質などを含みます。

*24：ある条件下で樹脂に吸着しなかった物質群です。多糖類、タンパク質などを含みます。

深度の地下水中の腐植物質の割合については、既往の研究結果⁽¹⁵⁾ともおむね整合することが確認されました。なお、以上の成果は、国立環境研究所との共同研究により得られたものです。

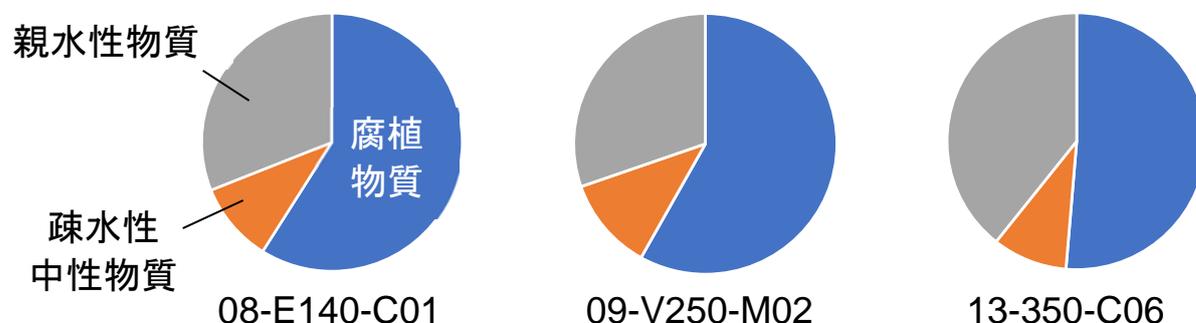


図 17 地下水中の有機物の構成割合

これまでの幌延深地層研究計画における有機物の研究は、大部分が地下水中に溶存している有機物に着目したものでした。しかし、国外の堆積岩地域では、岩石中の空隙に捕捉されていたり、岩石の表面に吸着していたりする有機物に着目した研究も行われています。このような有機物は、たとえば地下水の水質が変化したり、岩石中の地下水の流れが変化したりすることで地下水に溶存し、元素の移動性に影響を与える可能性が考えられます。また、地層処分研究において必要となる有機物—放射性核種—岩石の相互作用に関するモデル構築にあたっても、このような岩石から溶出し得る有機物の特性評価は重要です。

令和元年度は、岩石から溶出し得る有機物の特性評価に関する予察的な検討を行いました。深度350m調査坑道から採取した岩石を超純水に入れて振り混ぜ、ろ過した溶液の蛍光特性*²⁵を、平成30年度までに分析した地下水の蛍光特性⁽¹⁶⁾と比較しました。その結果、両者は形状が類似するもののピーク位置にわずかな違いが見られることから、含まれる有機物の分子構造がやや異なることが示唆されました(図 18)。一方、岩石から溶出する有機物の分子量分布を測定したところ、分子量のピークは深度350 mの地下水の測定値⁽¹⁶⁾と同程度であることが分かりました。

*25：蛍光とは、ある物質がある波長の光を吸収し、それとは異なる波長の光（蛍光）を発する現象のことです。地下水中の有機物、特に腐植物質の分子は蛍光を発する特徴をもち、その蛍光特性は分子構造の違いにより異なります。

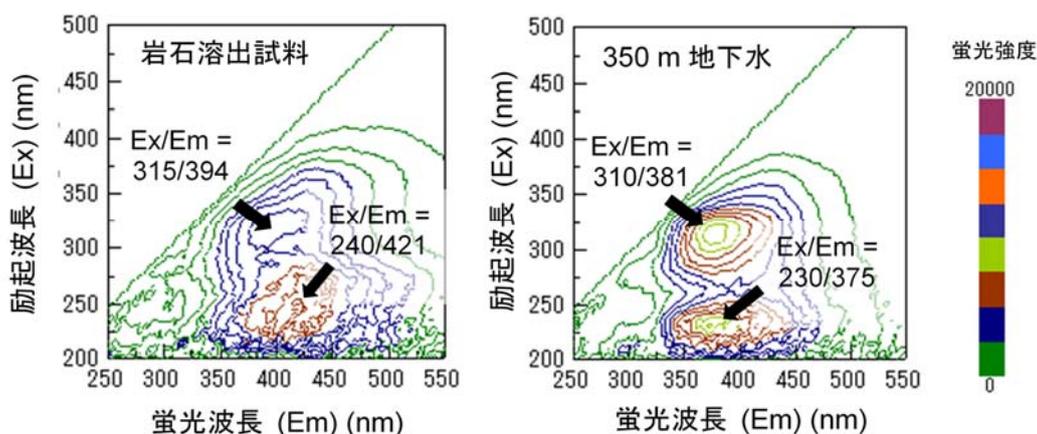


図 18 岩石溶出試料および深度 350m 地下水の蛍光特性

地下環境には多くの微生物が存在しており、幌延の地下環境にも他の環境と同様に様々な種類の微生物が豊富に存在しています。これまでに地下施設の建設に伴う坑道周辺の地球化学環境の変化と微生物代謝活性^{*26}の関連性を調査するため、微生物の現存量や群集組成の変化をモニタリングしています。令和元年度は、平成30年度に引き続き、深度140m、250m、350m調査坑道から掘削されたボーリング孔(08-E140-C01、07-V140-M03、09-V250-M02、13-350-C01、14-350-C04)から採取した地下水中の微生物数と群集組成の調査を行いました。令和元年度の調査結果から、遺伝子解析手法^{*27}を用いた解析により、優占種^{*28}として存在する微生物の種類は、調査坑道壁面近傍において群集組成が大きく変化していることが示されました。坑道壁面近傍の領域では、バイオフィルムを形成する種として知られるAltiarchaeales目に属する古細菌に近縁な未知微生物、Atribacteria、*Deltaproteobacteria*などの絶対嫌気性微生物が優占種として存在することを確認していましたが、ここ1、2年の調査結果では、*Betaproteobacteria*や*Gammaproteobacteria*などのやや酸化還元電位の高い環境でも生息可能な微生物に近縁な種の割合が増加していることが明らかになってきました。このような微生物の群集組成の変化は、坑道壁面近傍の領域において、坑道掘削後に岩盤中に拡散した大気中の酸素な

*26：微生物が生きるために周辺環境から有機物や無機物を取り込んで化学反応を行ったり、物質を生成したりする活動の程度のことです。

*27：環境中に存在する遺伝子を解析することにより、環境中の微生物の種類や特定の性質を調べることです。

*28：生物群集である種の量が特に多く、その群集を特徴付けていることです。

どの酸化物が微生物の働きにより消費され、還元環境が維持されている可能性を示唆しています。

(4) 岩盤力学

第1段階で構築した岩盤力学モデル*²⁹の妥当性を評価することを目的とした広範囲な応力状態を把握するための手法として、深度350m調査坑道で取得した内空変位*³⁰計測結果に基づいて地下施設規模の広域的な初期応力状態を推定する解析の開発を進めています。これまで、断層の分布を考慮した解析や、実際に逆解析により得られた応力値を入力することで適切に坑道で取得した内空変位値を説明できるかどうか、検討を進めてきました。しかしながら、より信頼性の高い初期応力状態を推定するためには、深度350 mの周回坑道の掘削の順序を正確に再現した解析を実施することが課題として残っていました。そこで、図 19に示すモデルを構築し、実際の坑道掘削の順序で掘削を再現し、実際に内空変位を計測した断面に相当する箇所における掘削時の変位量を解析的に求め、地下施設で取得した内空変位値を説明できる応力状態を推定しました。

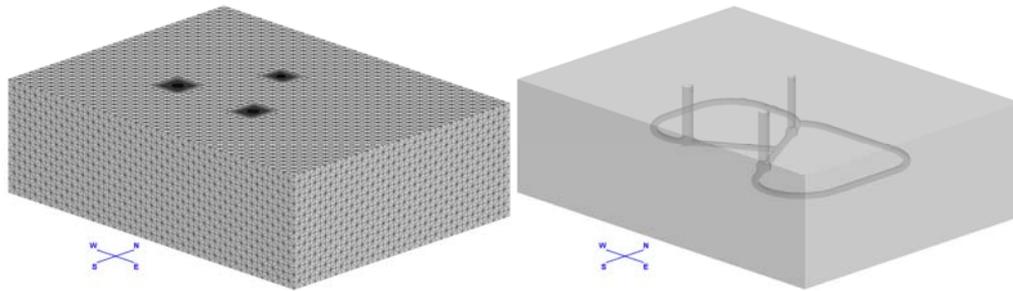
図 20に地上からのボーリング調査、および坑道内での測定で得られた応力測定結果および最大主応力の方位と、解析により推定された結果を示します。この図から、解析により推定された応力値は、既存の計測により得られた応力値よりも高い値となることが分かります。また、最大主応力の方位に関しては、地上からの調査で得られた結果にほぼ整合する結果となりました。

次に、解析により得られた内空変位の値と、実際の内空変位の計測値との比較結果を図 21に示します。比較対象とした計測結果は、深度350m調査坑道のうち様々な方位で掘削が行われた東・西周回坑道および東・西連絡坑道での計測結果を、坑道掘削方位と内空変位の関係で示しています。本解析では、岩盤は均質と仮定して解析しているため、割れ目卓越部や断層部では、解析結果よりも実測値の方が大きな値を示す傾向がみられましたが、割れ目の発達がそれほど顕著ではなかった一般部の計測結果に関しては、解析結果と計測結果が良い一致を示しました。このことから、

*29：割れ目などの性質を含めた岩盤の強度・変形などに関する特性を図や数式などを用いて表現したものです。

*30：坑道内で吹付コンクリート内側の断面の相対変位量を計測することです。

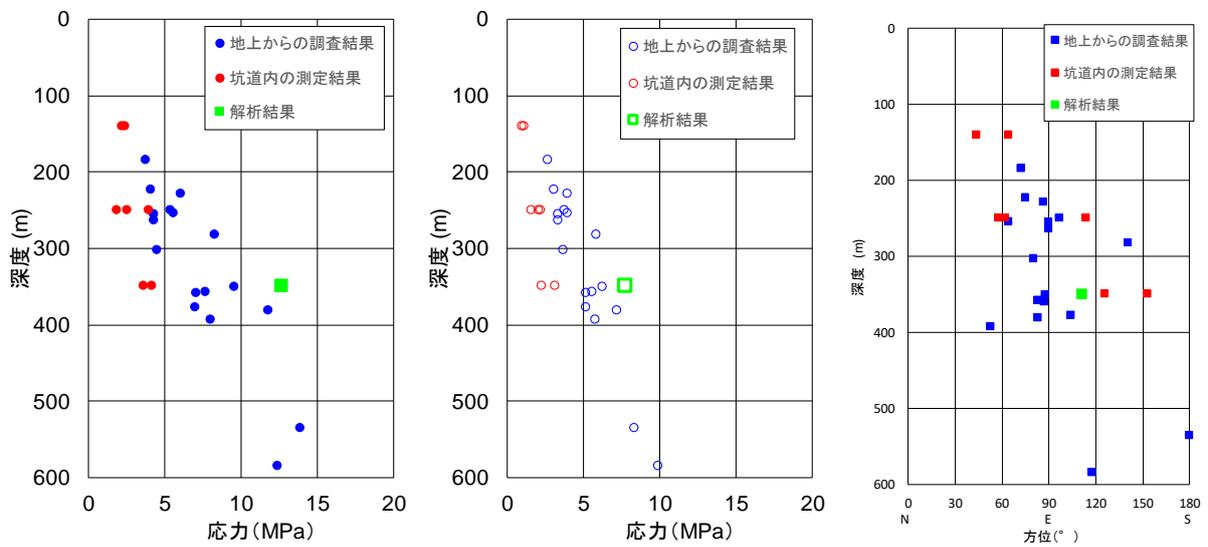
より信頼性の高い初期応力状態を推定することができました。



(a) モデル全体図

(b) モデル透過図

図 19 解析モデル



(a) 最大主応力

(b) 最小主応力

(c) 最大主応力の方位

図 20 水平面内の主応力に関する解析結果と既存調査結果との比較

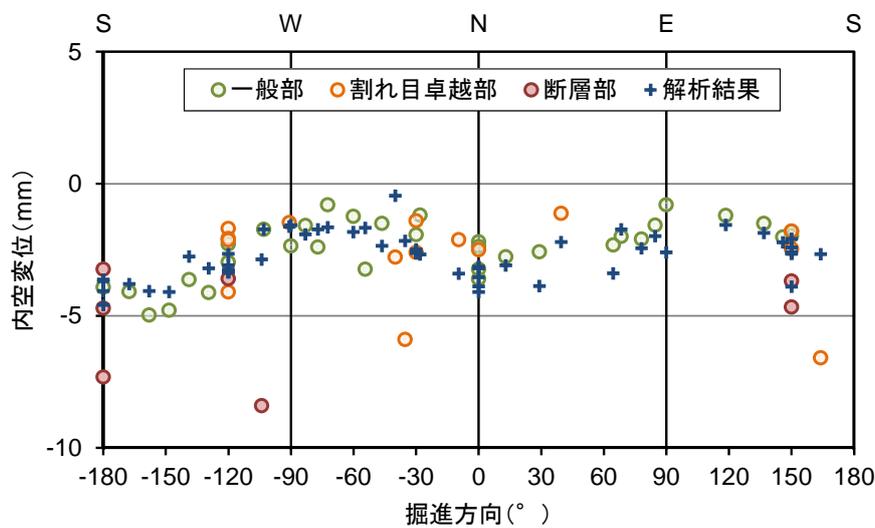


図 21 内空変位の計測結果と解析結果の比較

3.1.2 調査技術・調査機器開発

調査技術・調査機器開発として、岩盤の水理特性に関する調査技術、坑道周辺岩盤の地下水の地球化学特性、坑道掘削の影響、岩盤の力学に関する調査技術のほか、地下水の流れが非常に遅い領域の分布を評価する技術の高度化開発を実施しました。

(1) 岩盤の水理特性に関する調査技術の開発

必須の課題の1つである「地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証」の一環として、水圧擾乱試験方法(3.1.1(2)参照)の開発を行っています。水圧擾乱試験では、ボーリング孔の試験区間の両端にスライド式パッカーを設置して試験を行います。このパッカーは、パッカーチューブ内への注水により膨らむ構造となっており、パッカーチューブが膨らむ際に、チューブの下部加締め部のみがスライドしてパッカーが膨らみます(上部加締め部は不動;図22(a))。このようなパッカーを試験区間の両端に設置すると、試験区間が短縮した場合、上端パッカーの上部加締め部が上位に引っ張られ、その結果、パッカーチューブ内の容積が増えることによりパッカー圧が低下します(図22(b))。反対に、下端パッカーの上部加締め部は下位に引っ張られ、その結果、パッカー内の容積が減少し、パッカー圧が上昇します。しかし、孔壁が柔らかい場合は、パッカーチューブが孔壁を押し広げ、パッカー内の容積が増加し、パッカー圧が低下します(図22(c))。

平成30年度は、上記の現象を確認するために、水圧擾乱試験を行ったボーリング孔と同じ孔径の鋼管と、同じパッカー圧を用いて室内実験を行いました。しかし、鋼管の固さは実際に試験を行った孔壁の固さよりも固いため、令和元年度は、両者の固さも同じになるように、鋼管の代わりにアクリルパイプとアルミパイプを用いた実験を行いました(図22(b)(c))。実際に試験を行った孔壁の固さは、アクリルパイプとアルミパイプのちょうど中間くらいの固さに相当します。また、令和元年度は実験中の上部加締め部を引っ張る力(ロッドの軸力)も併せて計測しました(図22(b)(c))。室内実験の結果、パッカー圧、軸力および変位量の関係が図22(d)~(g)の灰色で塗られた範囲内に収まることが分かりました。これらの関係性を用いることにより、水圧擾乱試験中に観測されたパッ

カープの変化から、試験中の区間長の伸縮量をある一定の幅をもって見積もることが可能となりました (3.1.1(2)参照)。

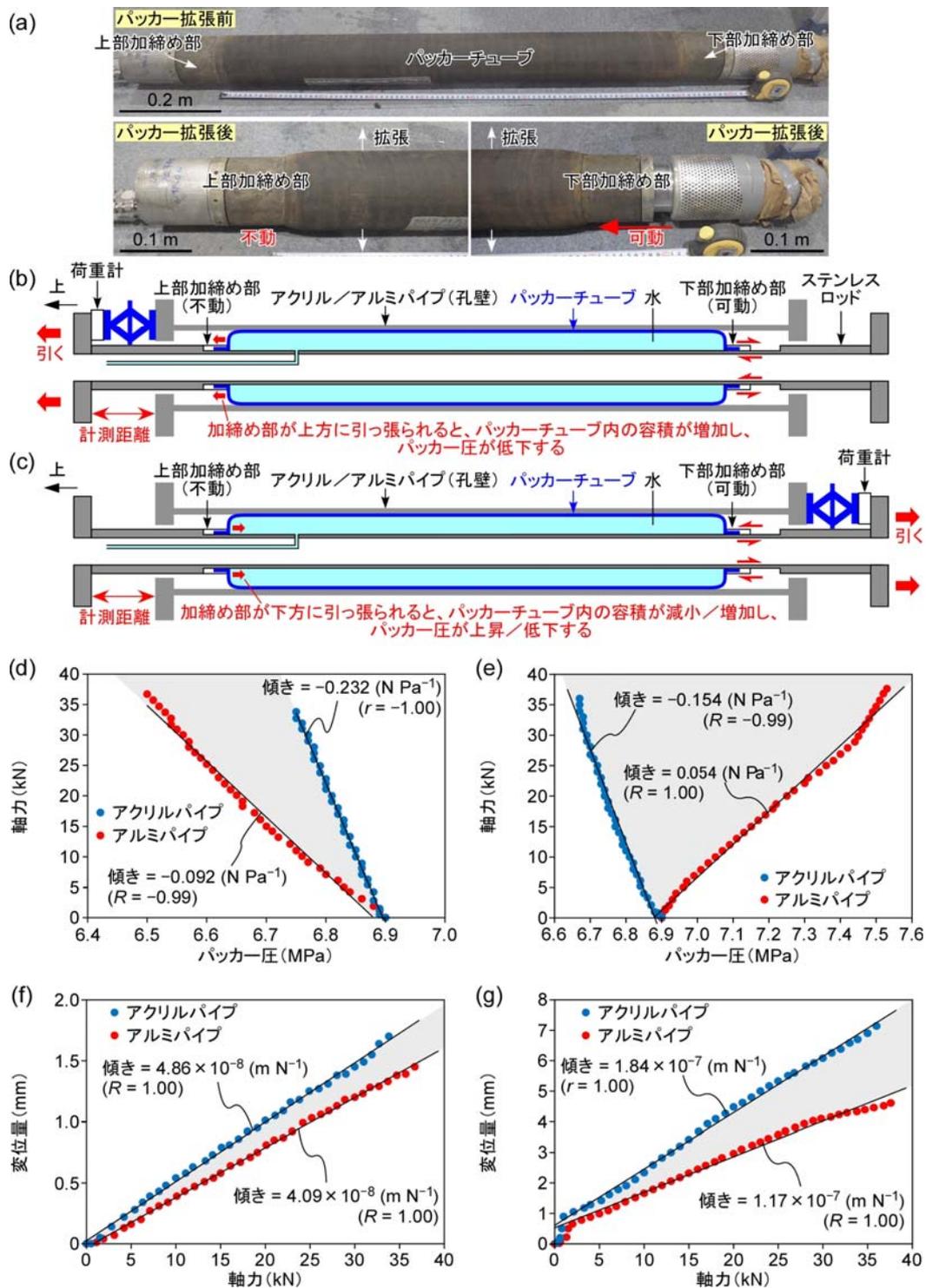


図 22 水圧擾乱試験における試験区間の伸縮量とパッカー圧の変化の関係性を把握するために行った実験 (a~c) とその結果 (d~g) この実験結果は、試験区間の両端に設置する両パッカーに等しく適用されます。

(2) 地下水の地球化学特性に関する調査技術の開発

地下施設の建設が施設周辺の地下水の水圧や水質に与える影響を観測する技術の整備を目的とした調査技術の開発を行っています。調査技術の開発の中で得られたデータは、岩盤の水理地質構造モデル^{*31}や地下水の地球化学モデルの構築、構築したモデルや解析結果の妥当性を確認するために利用します。また、得られたデータは、人工バリア性能確認試験における熱－水理－力学－化学連成挙動に関わる解析において、人工バリアの外側境界条件となる周辺岩盤中の水圧や水質条件の設定にも反映します。

地下水の地球化学特性に関する調査技術の開発では、平成 26 年度までに深度 350m 調査坑道に設置した水圧・水質モニタリング装置を用い、令和元年度もモニタリングを継続しました。装置の設置箇所を図 23 に示します。平成 30 年度に引き続き、令和元年度も試験坑道掘削後の経時変化の把握や観測装置の長期的な性能確認の一環として 13-350-C05、13-350-C06、13-350-C07、13-350-C08 および 13-350-C09 孔（以下、C05、C06、C07、C08 および C09）の 5 孔を用い、水圧・水質モニタリングを継続しました。C05、C06、C07、C08 および C09 における水圧モニタリングの結果を図 24、図 25、図 26、図 27 および図 28 に各々示します。図中での急激な水圧の低下は、採水やメンテナンスの際に孔内のガスや地下水が放出されたことによるものです。

試験坑道の掘削以降、多くの区間で徐々に水圧が低下する傾向が認められます。一方、C07 の区間 2 では平成 28 年度、C05 および C08 の区間 2 では平成 30 年度より、数か月規模での継続的な水圧の上昇が複数回認められます。この現象について詳細に理解するために、C08 の区間 2 において、孔内を大気開放せずに水圧モニタリングを継続しました。その結果、水圧は令和元年 10 月から約 5 ヶ月の間継続的に上昇し、令和 2 年 3 月現在も上昇し続けています（図 27）。この圧力上昇は、地下水から遊離するガスの影響によるものと推測されます。

*31：地質構造の分布や形状にあわせて透水係数などの水理学的なデータを与えて、岩盤の水理特性を二次元的または三次元的な図や数式などを用いて表現したものです。

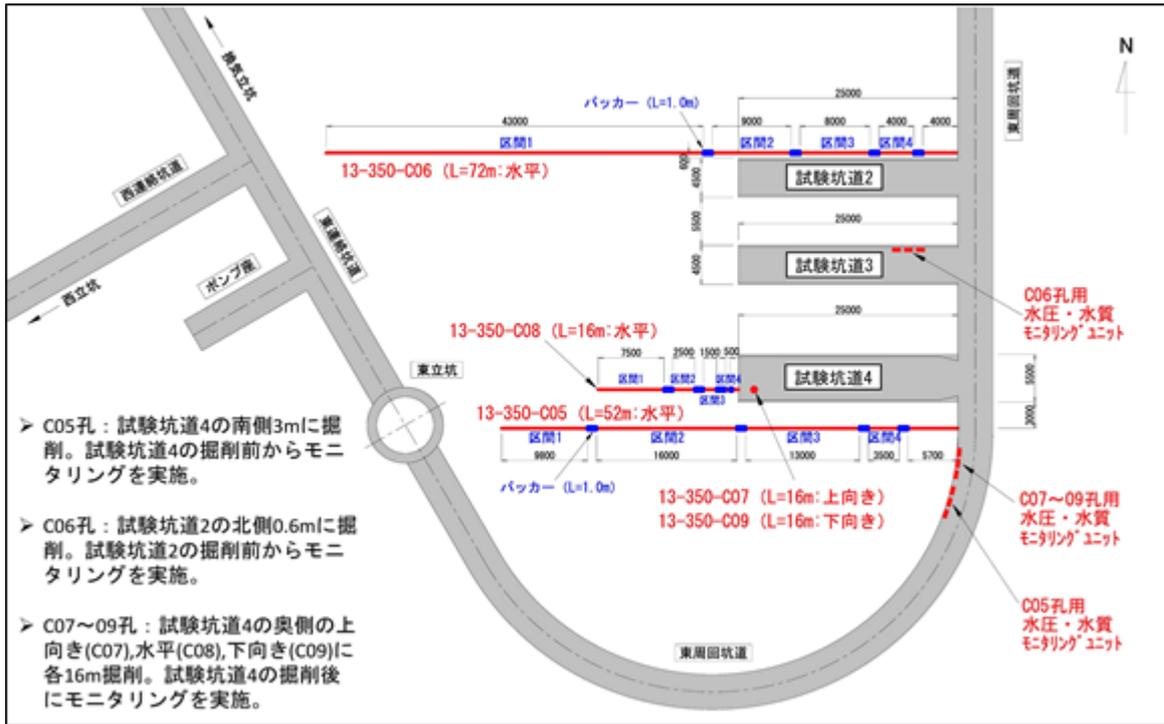


図 23 試験坑道 2 および試験坑道 4 周辺における水圧・水質モニタリング実施箇所

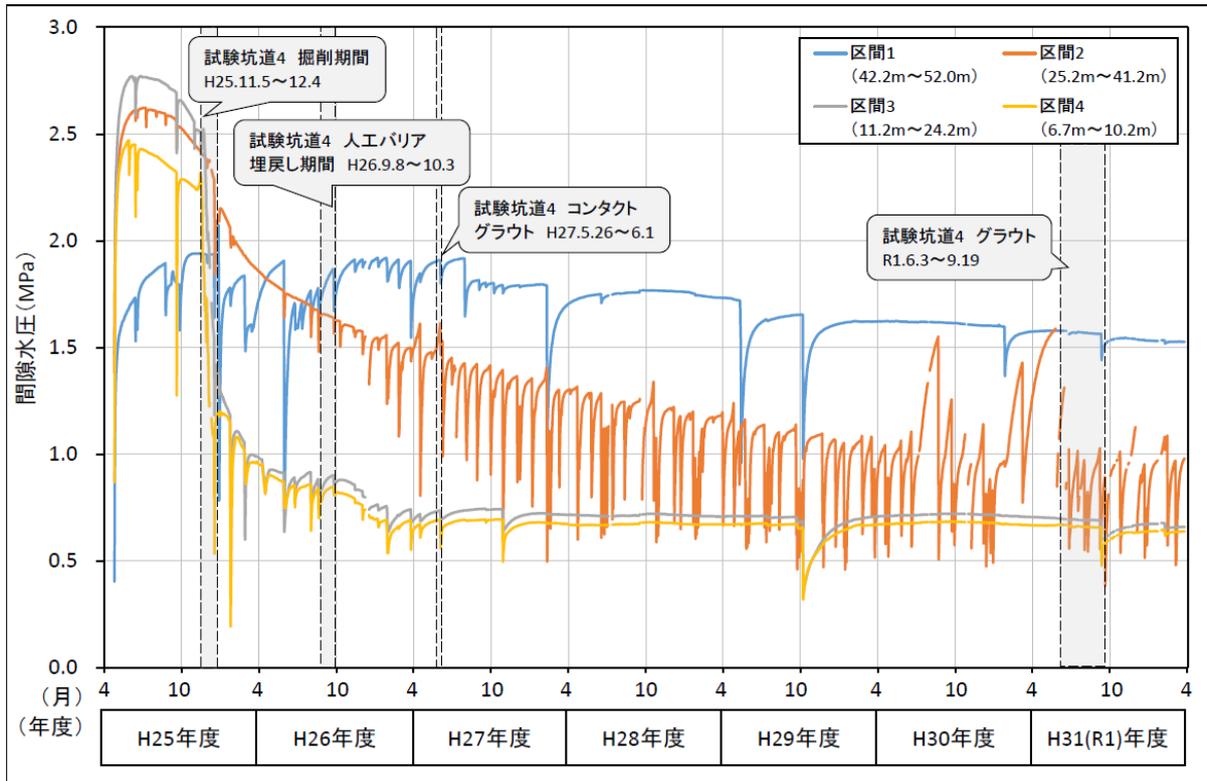


図 24 C05 における水圧モニタリング結果
水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

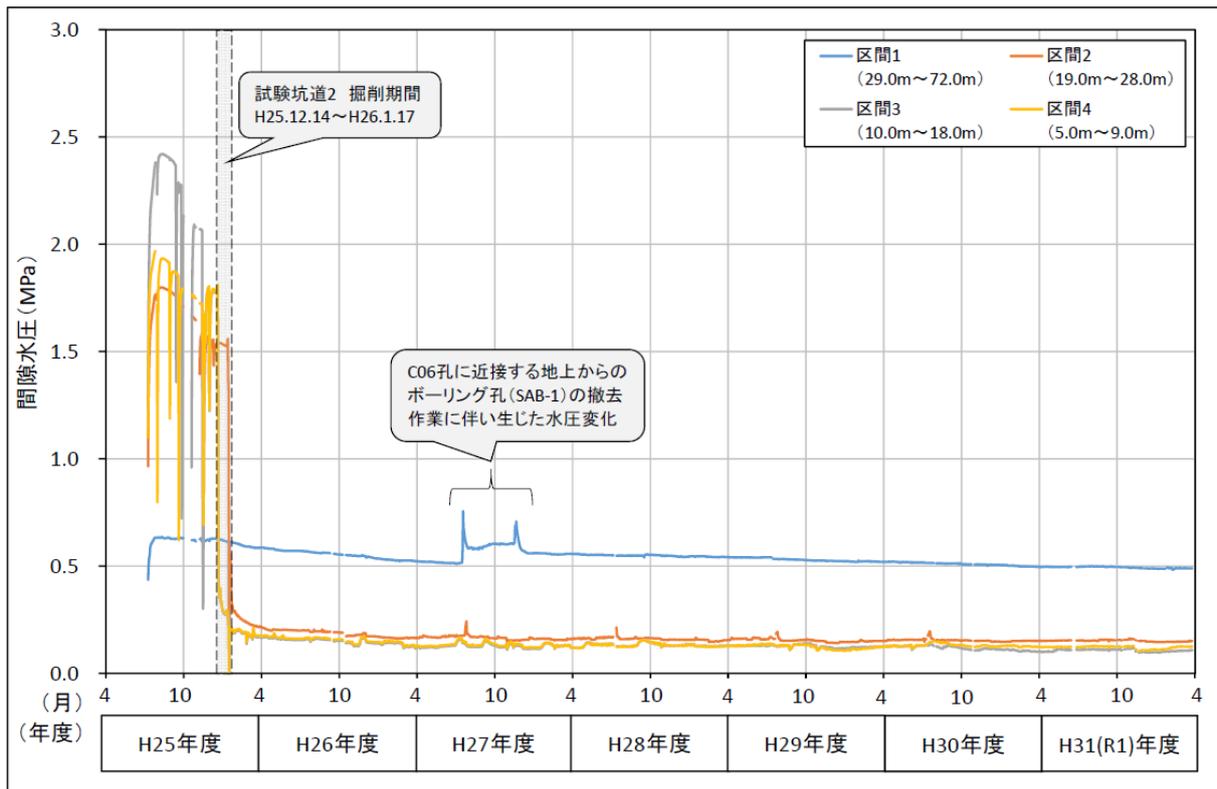


図 25 C06 における水圧モニタリング結果
水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

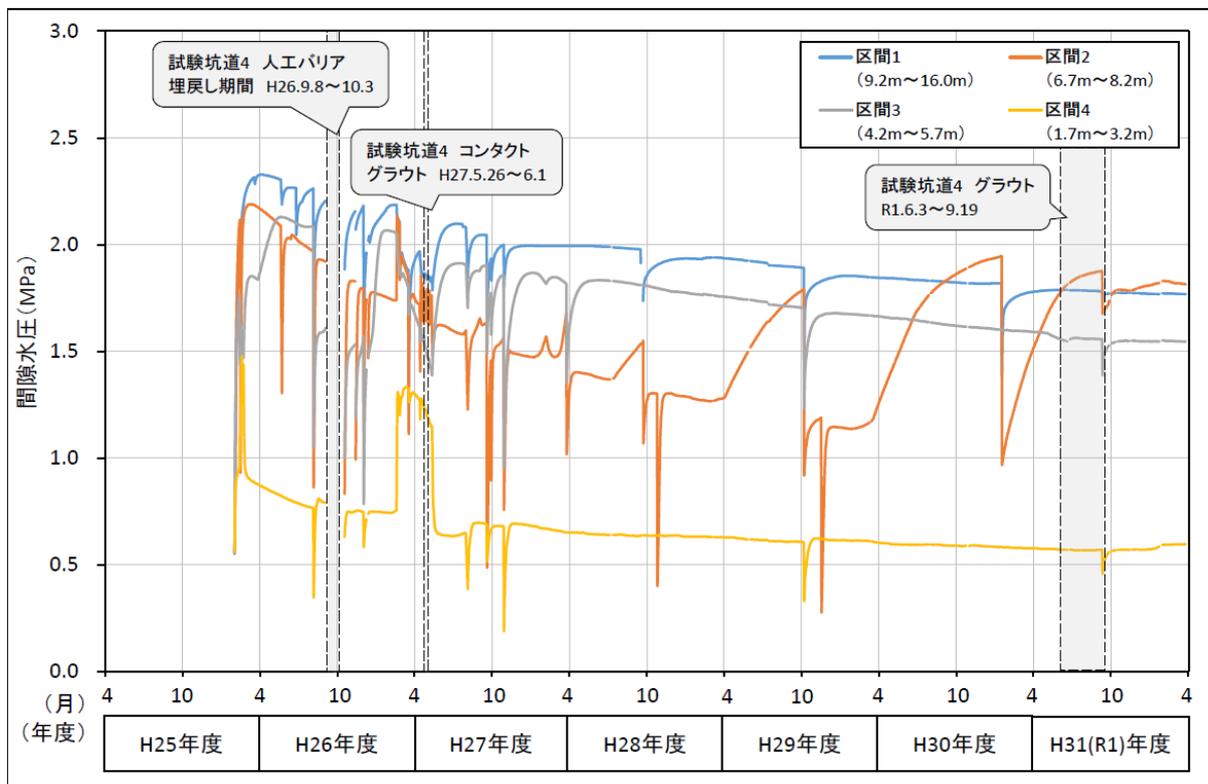


図 26 C07 における水圧モニタリング結果
水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

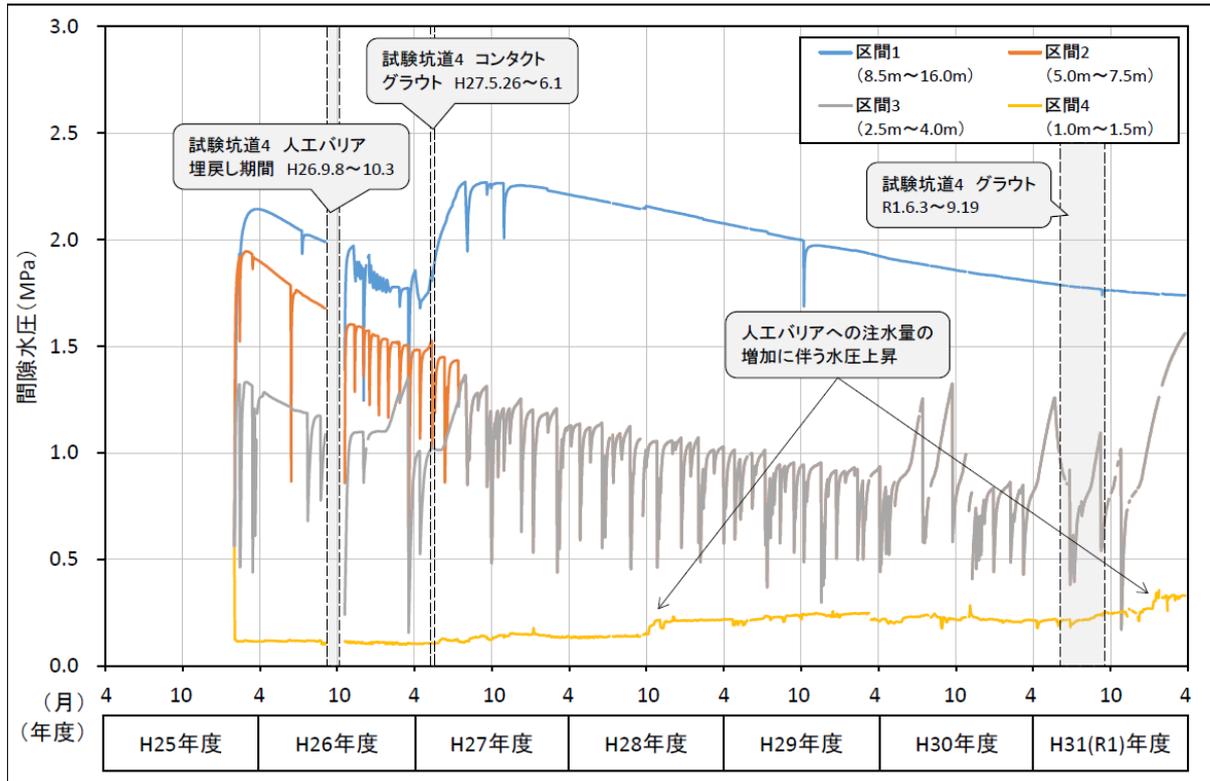


図 27 C08 における水圧モニタリング結果
水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

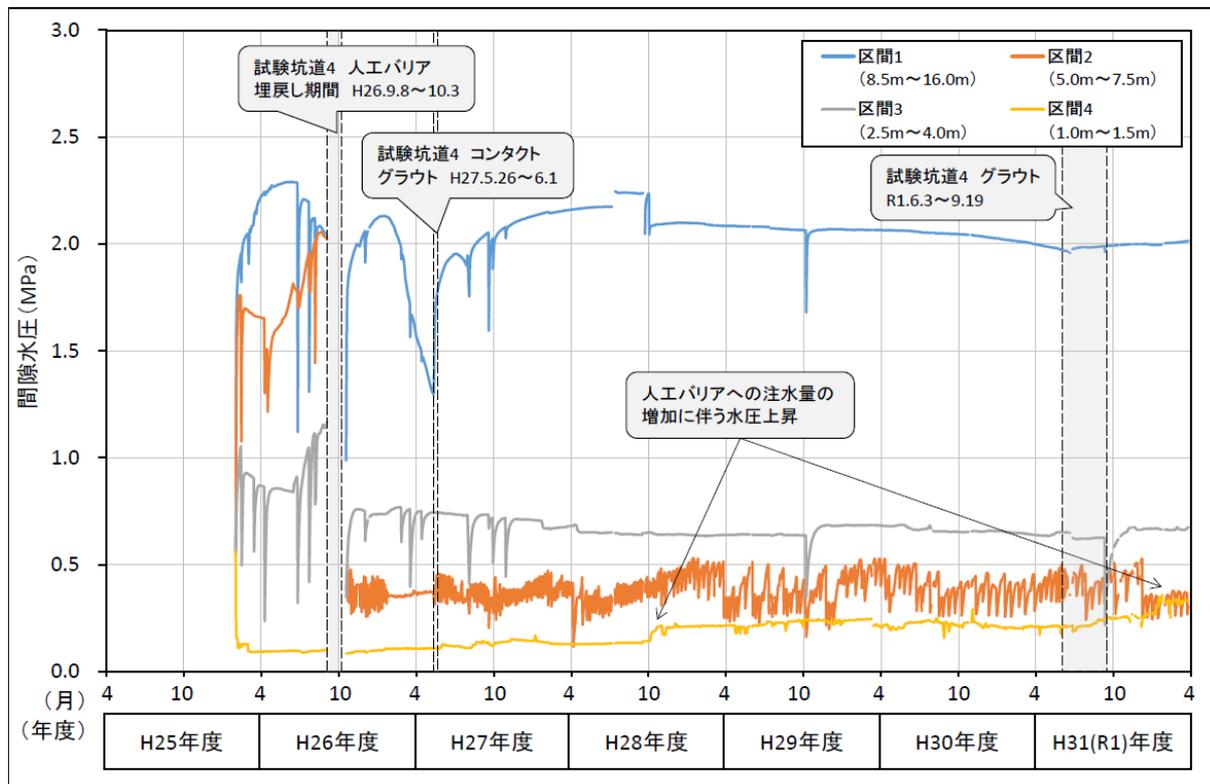
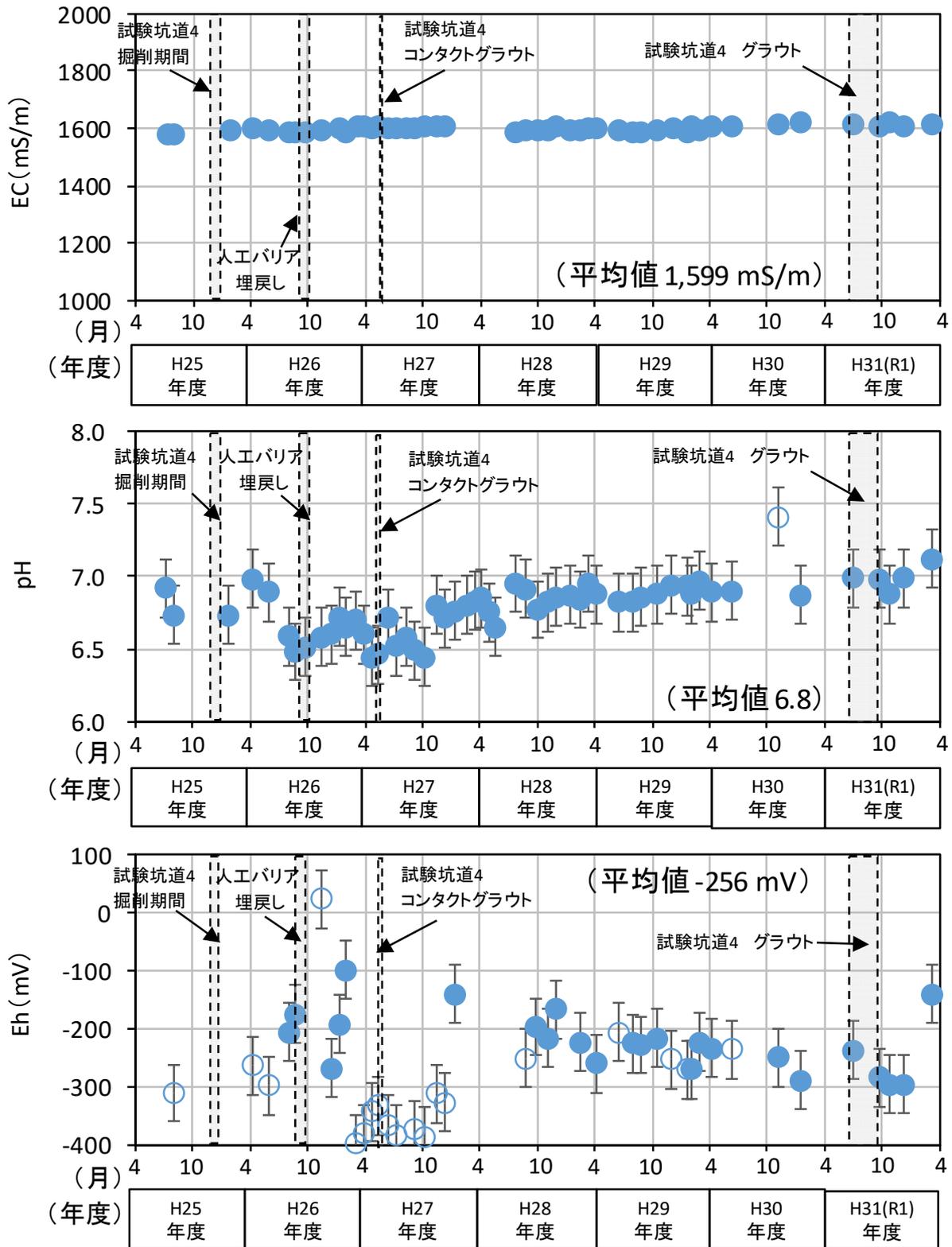


図 28 C09 における水圧モニタリング結果
水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

試験坑道 4 では、平成 26 年度に人工バリア性能確認試験における坑道の一部埋め戻しが行われ、平成 27 年度に同坑道においてコンクリートプラグ外周の地山に放射状にグラウト注入を行うコンタクトグラウト注入作業が実施されました。坑道の埋め戻し部分を冠水させるため、平成 27 年 1 月から人工バリア内への注水が行われており、急激な注水による緩衝材の流出現象などを避けるために、段階的に注水量を増加させています。これに伴い、埋め戻し範囲に位置する C07、C08 および C09 のうち、C08（水平孔）および C09（鉛直下方孔）の最浅部である区間 4 において水圧が上昇しており、令和元年 12 月に、注水量の増加に伴う比較的大きな水圧の上昇が認められました（図 27 および図 28）。一方、試験坑道 4 の南側約 3 m に位置する C05 では、注水量の増加に伴う水圧への影響は確認されていません。また、令和元年 6～9 月には、試験坑道 4 の人工バリア性能確認試験の実施箇所周辺において、緩衝材に十分に水を浸潤させることを目的としたグラウトを行いました。これに関連すると考えられる水圧変化も確認されていません（図 24、図 26、図 27、図 28）。

試験坑道掘削後、水圧低下に伴い地下水中の溶存ガスが遊離した影響により、水質モニタリングの継続可能な箇所は限定されつつあります（図 29）。図 30 には一例として、C05 の区間 2 における電気伝導度（EC）、pH、酸化還元電位（Eh）の観測結果を示します。C05 では、地下水の EC は 1600 mS/m 程度、pH は 7 程度、Eh は -140～-300 mV 程度でした。これらの結果は平成 30 年度の測定値とおおむね同様であり⁽¹⁷⁾、試験坑道周辺に分布する地下水の EC や pH には顕著な変化は生じていません。Eh は、令和 2 年 3 月の測定値がやや高いなどバラつきがあるものの、還元状態が維持されていることが示唆されます。なお、Eh のモニタリング結果においては、一部のデータで電極の劣化や表面への汚れ・気泡の付着、遊離ガスによる地下水循環の停止等の影響が示唆されました。これらのデータは、「信頼性が劣る可能性のあるデータ」として示しています。信頼性の高いデータを取得するために必要な、観測装置の定期的なメンテナンス（年 2 回のセンサーの検定・校正および 1 回／月程度のセンサーの異常有無の確認）も継続して行いました。



白抜きデータ(○)は、信頼性が劣る可能性のあるデータ

図 30 C05 の区間 2 における水質モニタリング結果

また、令和元年度は、平成28年度から平成30年度までの水圧モニタリングの結果をとりまとめるとともに、C05およびC07～C09におけるモニタリング結果をもとに、人工バリア性能確認試験の実施箇所周辺における水圧分布を可視化しました⁽¹⁸⁾ (図 31)。このような情報は、人工バリア性能確認試験における熱－水理－力学－化学連成挙動の解析において、人工バリアの外側境界条件である周辺岩盤中の水圧条件の設定にも役立ちます。なお、この図では水圧・水質モニタリング以外のボーリング孔による観測結果は含まれていません。

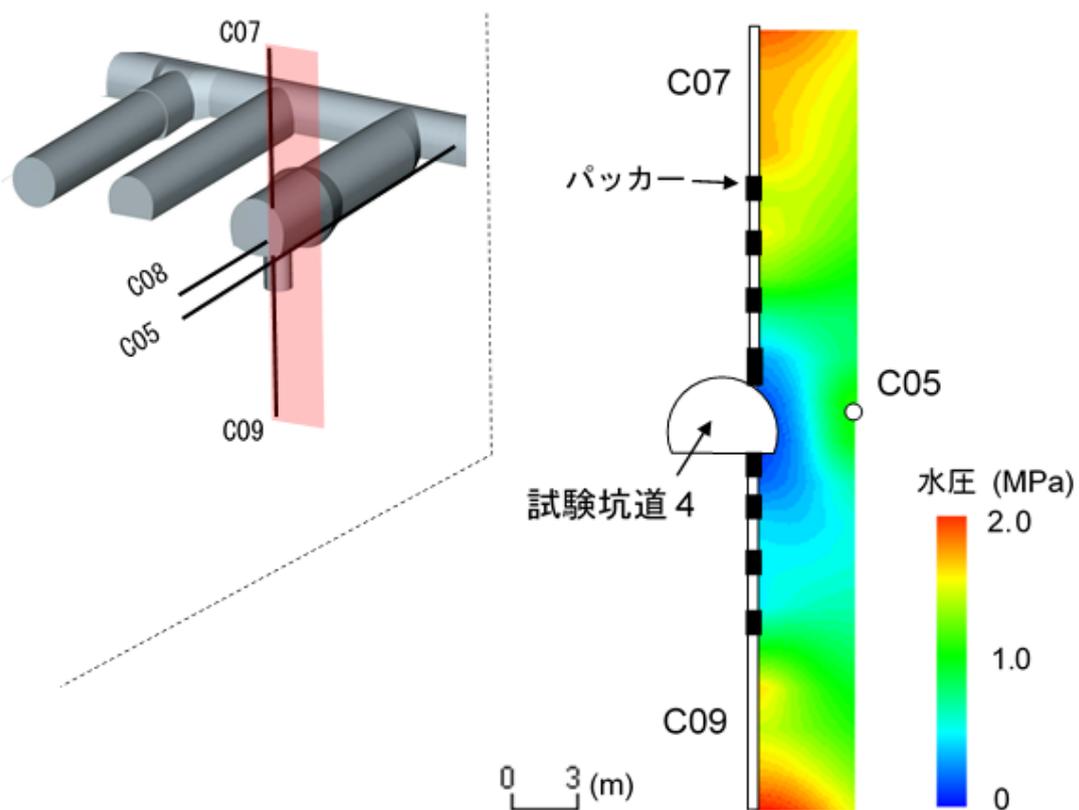


図 31 人工バリア性能確認試験の実施箇所周辺の水圧分布

(3) 坑道掘削の影響に関する調査技術の開発

地下施設建設時には、坑道周辺の岩盤の損傷などによる掘削損傷領域や溶存ガスの発生などによる不飽和領域の形成といった掘削擾乱領域が生じます。そこでは、岩盤の透水性の増大や、地下水の水質変化といった地層が有する放射性核種の移行を遅延させる機能に影響を与えることが考えられます。そのため、地下施設の建設・操業・閉鎖に伴う地質環境の変化過程をモデル化するための技術開発を進めています。幌延地域の地下深部の地下水には、多量のメタンや二酸化炭素などの溶存ガスが含まれているため、令和元年度は、地下水中の溶存ガスが岩盤中の不飽和領域の形成に与える影響を調べるために、地下施設の調査坑道の条件を模擬した数値・感度解析を実施しました。図 32 に示すように、坑道壁面、掘削損傷領域および健岩部を準一次元的に模擬し、数値解析コード TMVOC⁽¹⁹⁾ を用いて、坑道掘削から 50 年間の地下水と溶存ガスの流れについて計算しました。その結果、地下水に溶存ガスが含まれる場合、岩盤中の飽和度が低下し、不飽和領域の広がりが大きくなることが分かりました(図 33)。一方で、岩盤の透水性を変化させた場合は、主に不飽和領域の広がりの方に影響することが分かりました。なお、本研究は、電力中央研究所との共同研究の一環として実施しています。

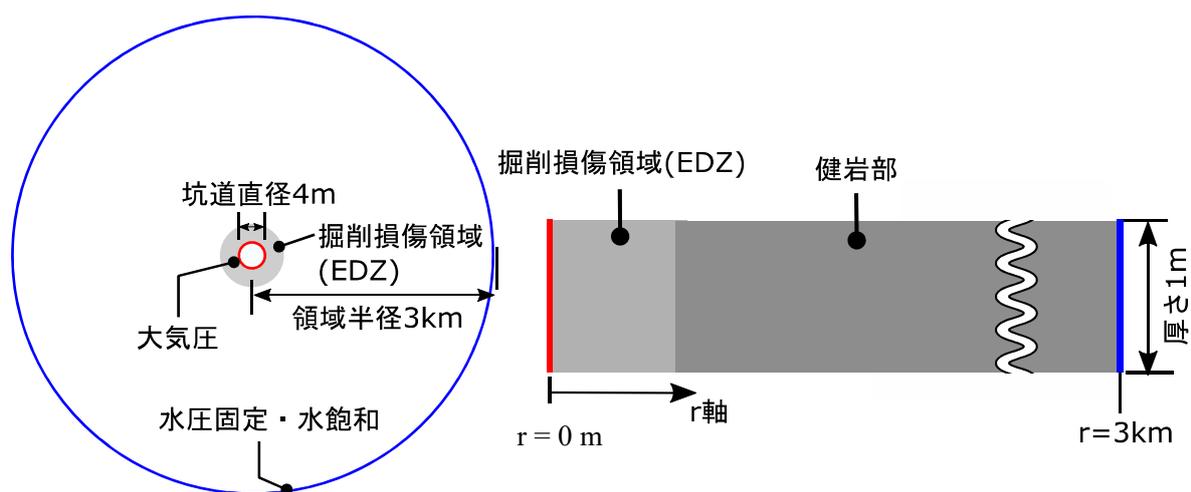


図 32 解析領域と解析条件

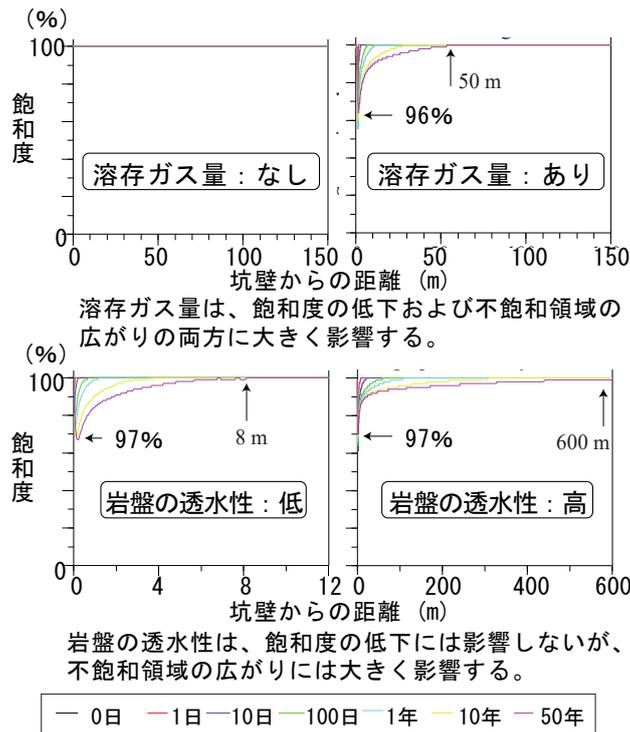


図 33 140m 調査坑道を模擬した感度解析による岩盤中の飽和度の変化例⁽²⁰⁾

坑道周辺の掘削影響領域では、坑道内の大気が坑道掘削に伴い生じた割れ目などを通じて岩盤内に侵入し、坑道周辺の岩盤や地下水が還元状態から酸化状態に変化する可能性が考えられています。平成 30 年度は、簡易モデルによる岩盤内への酸素の拡散を計算し、坑道壁面から約 1 m の酸素の侵入が予測されましたが、ボーリング孔を利用したガス組成の分析やコア試料の観察などからは、坑道周辺の掘削影響領域における酸化の兆候は確認されなかったことを報告しました⁽²¹⁾。その理由として、地下水中に多量に溶存しているメタンや二酸化炭素などのガスが遊離することで、岩盤内への酸素の拡散を抑制している可能性が指摘されました。

令和元年度は、図 32 の解析モデルを用いて、メタンや二酸化炭素などのガスや地下水の流れを考慮した気液二相流解析を実施し、岩盤中への酸素の侵入について再考しました。坑道の掘削を模擬し、坑道の掘削から 50 年間の地下水とガスの流れを計算しました。ただし、この解析では坑道壁面を覆うコンクリートの影響を考慮していません。解析結果のうち酸素の流れについて、拡散成分の結果と、移流成分と拡散成分を合わせた

結果とを図 34 に示します。坑道壁面から約 0.1 m 程度の岩盤内部まで拡散による定常的な酸素の移動が生じていますが (図 34(a))、移流により岩盤内部から坑道へ押し戻されていることが分かります (図 34(b))。図 35 に、岩盤中のガスおよび地下水の酸素濃度の解析結果を示します。坑道壁面から岩盤内に約 10 cm 程度の深さまで、定常的に酸素が存在していることが分かります。地下施設におけるこれまでの観測結果から、調査坑道内のコンクリートで覆われていない岩盤では、坑道壁面から岩盤内部へ約 10 cm 程度の深さまで酸化や風化の影響が及んでいることが報告されています⁽²²⁾、令和元年度の解析では、これまでの観測結果と整合的な結果が得られていることを確認できました。一方で、既存の観測結果⁽²¹⁾のように、坑道壁面の岩盤がコンクリートで覆われている場合は、岩盤内部への酸素の侵入が抑えられていると理解されます。

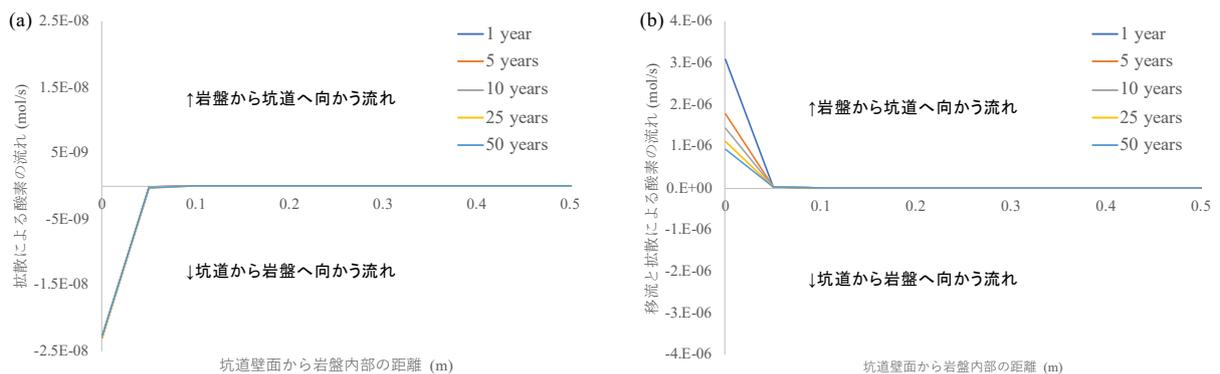


図 34 岩盤内部における酸素の流れ (a) 拡散による酸素の流れ、(b) 移流と拡散を合わせた酸素の流れ

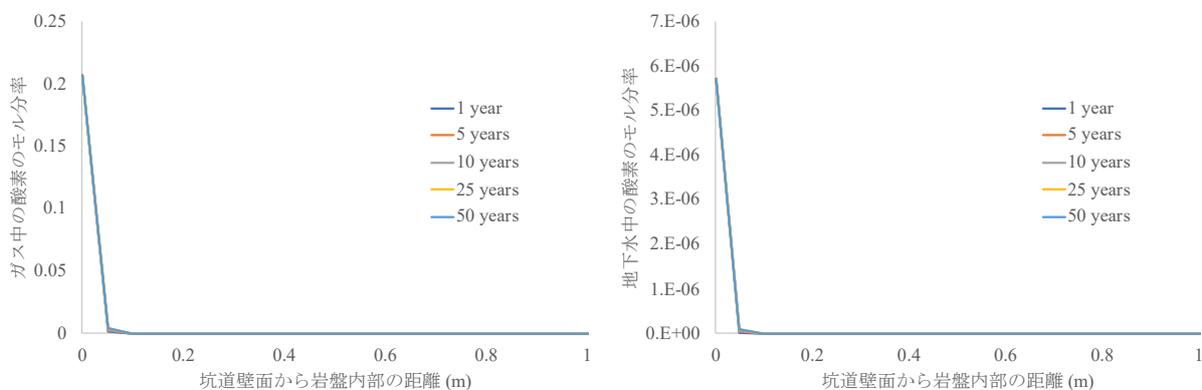


図 35 岩盤内部におけるガスおよび地下水中の酸素濃度

地表面から坑道掘削時の地下深部の岩盤や地下水の挙動をモニタリングする技術を確立することを目的として、立坑の周辺（換気立坑から半径100 m以内）に9台、東立坑の深度140 mの接続部付近に1台、立坑周辺から1 km程度離れたHDB-8孔近傍に1台の高精度傾斜計*³²を配置し、坑道掘削に伴う地表付近における岩盤の傾斜の変化を計測しています。令和元年度も、過年度までと同様の方法⁽²³⁾で計測データ（直交する2方向での傾斜角度の時系列データ）に含まれるノイズ成分を除去した後、計測した傾斜データと坑道掘削時の工程との対比を行いました。令和元年度は坑道掘削工事はなく、得られた傾斜データの全体的な傾向として、傾斜量の変化は少ないことが確認されました。坑道掘削の影響を示すため、東立坑近傍にあるPIN8の傾斜量と傾斜方向および西立坑から北東方向へ約1 km離れたHDB-8孔近傍のPIN10の傾斜量を図 36に示します。PIN8では坑道掘削時に顕著な傾斜が計測されました。傾斜方向は、掘削を実施した東および西立坑の方向でした。また、掘削が終了した後は、傾斜変化はほぼありませんでした（図 36(a)、(b)）。一方、PIN10（図 36(c)）では、坑道掘削中および掘削終了後も、地表の傾斜はほとんど観測されませんでした。

これまでの計測データにより、高精度傾斜計によって地下深部の坑道の掘削に伴う地表付近での傾斜量やその傾斜方向が検知できることを確認しました。

*32：通常の傾斜計が計測できる角度は約3,600分の1度であるのに対し、約1億分の6度の傾斜量を計測することができる非常に計測精度の高い傾斜計です。