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
（沿岸部処分システム評価確証技術開発）

成果報告書

国立研究開発法人　産業技術総合研究所
公益財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター
一般財団法人　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
（沿岸部処分システム評価確証技術開発）成果報告書　目次

本編
第１章　はじめに 2
1-1　研究の背景と目的 3
1-2　研究の概要と年度計画 3
第２章　海陸連続３次元地質環境モデルの構築手法の高度化 7
2-1　地質環境モデルの構築と地下水流動解析の高度化 8
2-2　塩淡境界近傍における地下水流動解析の高度化 64
第３章　海陸連続３次元地質環境モデルの妥当性の検証に向けたデータ取得方法の高度化. 112
3-1　陸域から海域にかけての地質環境特性の把握技術の高度化 113
3-2　地下水の流出場及び海底地形把握技術の高度化 156
3-3　物理探査技術の高度化 172
第４章　沿岸海底下特有の地質環境に着目した工学技術の高度化 225
4-1　はじめに 226
4-2　セメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充 232
4-3　緩衝材の機能変化に係るデータの拡充 461
4-4　緩衝材-オーバーパックの相互作用と緩衝材仕様に関わるデータの拡充 535
第５章　おわりに 802
5-1　令和４年度にける研究の成果（まとめ） 803
5-2　図目次 809
5-3　表目次 827
5-4　写真目次 834

二次利用未承諾リスト 835

Appendix Ⅰ～Ⅸ 848

第１章　はじめに

1－1　研究の背景と目的

地層処分に対する国民理解を深めるために、国は 2017 年 7 月に科学的特性マップを公表し（資源エネルギー庁，2017)、原子力発電環境整備機構（NUMO）は 2021 年に包括的技術報告書を公開している。これにより、地層処分事業は飛躍的に前進した。我が国において、これまでの原子力発電の利用に伴って既に放射性廃棄物が発生しており、その処理処分対策を着実に進める必要がある。放射性廃棄物の対策については、2000 年に成立した「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（最終処分法）に基づき、地下 300m以深の安定した地層に高レベル放射性廃棄物等を処分（地層処分） する方針である。高レベル放射性廃棄物等の地層処分においては、天然の岩盤（天然バリア）と人工的な構築物（人工バリア）から構成される多重バリアシステムによって長期的な安全確保がなされ、この処分システムの成立性や安全性に係る信頼性を一層高めていくためには、天然バリアと人工バリアの特性把握と将来変化に係る調査評価技術の信頼性向上が重要である。高レベル放射性廃棄物の最終処分に向けて公表した科学的特性マップでは、沿岸の陸域 20km の範囲を廃棄物の輸送面でも好ましい範囲としている。しかし、沿岸陸域から海底下においては、塩水の影響や海陸接合部などの沿岸部固有の環境を考慮した、地質環境の調査技術・工学技術のさらなる高度化が不可欠である。

これらの状況を踏まえ、本事業では、我が国における沿岸部固有の環境を踏まえ、概要調査段階から精密調査段階で必要となる地質環境の調査・工学に関する技術開発に取り組むことにより、地層処分技術の信頼性及び安全性の更なる向上を図る。

1－2　研究の概要と実施計画

（1）海陸連続 3 次元地質環境モデルの構築手法の高度化

① 地質環境モデルの構築と地下水流動解析の高度化

（2）の①におけるボーリング調査地点を対象に、地質環境モデル、地下水モデルの構築方法について事例研究を行い、それらの知見を踏まえて、沿岸部での文献調査から概要調査時におけるモデル構築の手順を高度化する。

これまでに、研究地域の設定、文献調査、地質モデルの作成、地下水モデルの作成、地下水解析、地下水モデルの校正、不確実性低減対策の検討を実施した。昨年度は、地下水モデルの校正として、実測値による逆解析だけでなく、数値実験を行い、パラメータの推定値と信頼性、データの有用性について定量的に評価する方法を示した。

令和4年度は、ボーリング調査地点を対象に、その調査結果を考慮して地質モデルの見直しを行い、地下水モデルの校正を通じて、実測値の再現性向上を図るとともに、パラメータの推定誤差の低減など不確実性の変化を明らかにする。また、実測値の有効性や、パラメータの同定レベルについても検討し、より不確実性の低減を図るための方法について調査する。

また、新たなデータ取得の有効性を確認するために、複数のトレーサー(^{36}Cl、^{14}C、^{4}Heなど)による調査結果を指標とした数値実験を行い、有効な調査地点および指標を明

らかにする。

（２）海陸連続３次元地質環境モデルの妥当性の検証に向けたデータ取得手法の高度化

地層処分事業では、構築したモデルやそのモデルを用いた解析結果の妥当性を示す必要がある。そこで、以下の①～③を実施し、沿岸部に特化した調査技術の高度化並びに構築したモデルとモデルを用いた地下水流動解析結果の妥当性の検証を行う。

①　陸域から海域にかけての地質環境特性の把握技術の高度化

概要調査段階では、ボーリング孔の本数は限定されると想定されることから、効率的にモデルの妥当性を検証し、必要な地質環境データを取得する必要がある。そこで、陸域から海域にかけて、精度良く効率的に地質環境特性を把握する技術の高度化を行う。

令和４年度においては、昨年度までに掘削した試験孔の増掘ならびに各種試験を実施し、新第三紀層を対象とした沿岸域深部における地質環境のデータ取得を目的とする。得られたデータから塩淡境界の形状や深度に関する決定要因を推定し、数値モデルなども使いながら、塩淡境界および塩淡境界以深の塩水の挙動の把握にと努める。また、②において取得されたデータを用いて、陸域地下水と海底湧出地下水の連続性の確認を含めた塩淡境界付近の地下水の挙動を把握する。また得られたデータを（1）で作成した地質環境モデルに反映させるとともに、分野間連携を通じて性能評価試験に必要なデータや試料を共有する。

②　地下水の流出場及び海底地形把握技術の高度化

地質環境モデルの妥当性を検証する上では、海底下における陸域からの地下水の流出場を特定し、その水質の分析結果から陸域の化学的特徴を把握することが有効であり、地下水の流出場を特定するためには海底地形を詳細に把握することが必要である。そこで、海底地形の詳細把握に係る技術、陸域地下水の流出場の特定手法や流出している海底湧出地下水から陸域地下水の化学的特徴の推定手法の高度化を行う。

令和4年度においては、概要調査に資する体系化を念頭に置き、様々な海底地形や地質環境も想定して、国内外の沿岸部における地下水の流出場や海底地形把握に係る調査事例や知見を整理してとりまとめる。また、これまでの実海域での試験や探査で得られた結果に、文献収集で得られた知見も含めて、陸海の地下水との連続性を検証する。

③　物理探査技術の高度化

海底下に処分場が建設される場合、海底面下の地層や断層などの地質構造を把握する必要がある。主な手法としては物理探査が挙げられるので、海底面下の地層や地質構造を高精度に把握可能な物理探査手法の確立・高度化を行う。

具体的には、海底面下の地層や断層などの地質構造を探査する有力な手法である反射法探査における従来手法では、複数の受信器を曳航できる大掛かりな設備と大型作業船が必要であったため、浅海域へのアクセスが制限され、結果として海陸をつないだ場合、浅海域が調査の空白域となっていた。本事業では、小型船舶を用いたマルチ振源３Ｄ海上反射法を空白域である浅海域に適用することで、高レベル放射性廃棄物の地層処分の対象深度を探査可能な手法へと高度化するとともに、海陸をつなぐ探査手法の体系化を図る。

令和４年度においては、令和3年度の予備試験の結果を踏まえて、マルチ振源３Ｄ海上反射法を用いた浅海域における確認試験を実施し、概要調査を念頭においた調査手法

の高度化を図る。

（３）沿岸海底下特有の地質環境に着目した工学技術の高度化

沿岸海底下に処分場が建設される場合、処分場建設に伴う地下水の流入や我が国の多様な海底地下水の水質の幅を対象とした、坑道建設に必要な支保工等のセメント系材料の変質機構や緩衝材への影響を評価する必要がある。そこで、既存情報等から我が国の海底下の地下水水質の幅を整理し、その幅の中での坑道建設から再冠水に至るまでの、処分場の構成材料の変質機構や緩衝材への影響の定量化とその対策技術に関する検討を行う。

具体的には、沿岸部に特有な地下水化学環境を念頭に置き、処分場の建設・操業～閉鎖後の再冠水に至る期間における、セメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充（①）、及び緩衝材の機能変化に係るデータの拡充（②）を行う。また緩衝材については、沿岸部特有の地下水環境下であることを考慮した人工バリア性能評価に資する、緩衝材－オーバーパックの力学的相互作用と緩衝材仕様に関するデータの拡充を行う。取得したデータ等を通じて、沿岸部の多様な地下水環境条件に柔軟に対応できる緩衝材の材料仕様に関する定量的な評価方法を整備する（③）。さらに、工学設計技術が必要とするデータの品質や範囲などについては、年度ごとに地質環境分野への情報提供（フィードバック）を行う機会を設ける（共同研究会議を想定）。

令和４年度においては、セメント系材料の短期的な変質挙動に関して、沿岸部の地下水の組成等の地下環境や材料配合を考慮した浸漬試験等の継続と試料の分析による化学的変質と力学的特性の関係に関する試験データの拡充（①）、緩衝材の機能変化に係る沿岸部の地下水のイオン強度や陽イオン濃度を考慮した膨潤挙動試験、圧縮状態下や高イオン強度下での陽イオン交換等の化学的な挙動に関する試験によるデータの拡充（②）をそれぞれ地質環境分野と連携し現実的な地下水組成を考慮して実施し、多様な地下水組成に対する機能変遷等の現象理解や、処分場の構成材料の評価に資する情報として、体系的な知見整備に向けてデータ拡充を進める。加えて、沿岸部の地下水環境におけるせん断を受けた緩衝材に生じる力学・化学特性の影響を要素試験、および緩衝材が飽和するまでのより長期間におけるオーバーパックとの力学相互作用の影響を模型試験と数値解析により把握する。これにより塩水に起因する性能変化と緩衝材仕様に資する基礎的データを拡充する（③）。また、工学設計技術が必要とするデータの品質や範囲などについて、構成材料のデータ取得及び評価手法などの検討を通して整理し情報提供を行う。

（４）情報収集及び委員会の設置・運営

本事業の実施に当たり、国内外の関係機関や大学等との間で情報交換等を実施し、関連技術等についての最新情報を入手するとともに、成果の普及に努める。また、外部の専門家・有識者等で構成される委員会を設置し、研究計画、実施方法、結果の評価等に関する審議・検討を年２回以上行い、成果報告書を取りまとめる。

具体的には、ＪＡＥＡやＮＵＭＯ等の関連機関との連携を図りつつ、海外の関連機関の研究成果を収集し、最先端の研究を実施している大学等の有識者のアドバイスを受けて研究の成果を効率的に発信する。さらに、研究を実施する３者では共同研究会議を組織し、分野間ならびに組織間の連絡を密にして、研究プロジェクトの効率化、適

正化を図る。また、次世代技術者の育成についての手法や要件についても議論・検討を行う。

参考文献

経済産業省資源エネルギー庁、科学的特性マップ、2017.
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kagakutekitokuseimap/（**最終確認**　2021.03.25）

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－、2021.

特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律、平成十二年法律第百十七号、2000.
https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=412AC0000000117（最終確認2021.03.25）

第２章　海陸連続三次元地質環境モデルの構築手法の高度化

２－１　地質環境モデルの構築と地下水流動解析の高度化

（1）　背景と目的

沿岸部は、科学的特性マップで示されたように、高レベル放射性廃棄物処分の候補地として、輸送の観点から適性が高いとされている。しかし、沿岸部は、内陸に比べて調査データが少なく、地質環境モデル（Site Descriptive Model, SDM）の構築に関する不確実性が多く存在すると考えられる。このため、不確実性の取り扱いを考慮した地質環境モデルの構築方法を検討する必要がある。

そこで、本項目では、地質情報の不確実性を考慮した 3 次元地質環境モデルの構築方法・モデル化の手順について検討する。現在、富士川河口付近でボーリング調査が進められている。このことから、ここでは、富士川河口付近の駿河湾沿岸部を事例研究の対象として、地質モデル・地下水流動モデルを構築し、地下水流動解析を試行する。すなわち、文献調査から地質・地下水モデルを構築し、その不確実性とそれを低減する方法を検討する。さらに、ボーリング調査を受けて、モデルを更新し、不確実性の低減度合いを評価する。

富士川河口付近の駿河湾沿岸部を研究対象とした理由は、3 つある。1 つ目は、本地点が、わが国でも有数の地殻変動が激しい地域であり、地質分布・地質構造の作業仮説を複数議論しやすいことである。2 つ目は、地質や地下水に関して既存データが多いことである。3 つ目は、地下水の流れが非常に速い地域の一つであり、地下水流動に関わる現象を把握しやすいことが期待されるためである。

この地点を対象として、図 2-1-1 に示すような、文献調査、地質モデル作成、地下水モデル作成、地下水流動解析、原位置調査、調査結果の地質モデルへの反映という、繰り返しアプローチによる一連の作業を行うことは、調査の各段階における調査内容の確認や将来的な課題を抽出するうえで有益である。また、地質モデルや地下水モデルが内包する不確実性や、それによってもたらされる影響の検討や評価は重要である。

このため、本研究では、①地質のモデル化と地下水流動の解析を繰り返すことにより、沿岸部の地質評価から地下水流動評価までの一連の地質環境モデル（ここでは地質モデル＋地下水モデル）構築フローの高度化を図る、②地質の不確実性を想定しうる地質分布・地質構造などの複数の作業仮説で表現し、各地質の地質モデル／作業仮説に基づいて構築される地下水流動解析モデルを比較することにより、地質の不確実性が地下水流動の評価に与える影響を検討する、③地質モデル・地下水モデルの不確実性を低減するために必要な調査・評価方法を明らかにする、ことを実施する。高レベル放射性廃棄物の処分事業において、様々な技術の適用が必要となる。これら技術は、地質環境、工学技術、安全評価の大きく 3 つの分野に区分できる。地質環境モデルは、これらの分野間をつなぐ、インターフェースになることが期待される。

（２）　実施方法

本研究は、図 2-1-2 のフローチャートにしたがってモデル構築・修正作業とそれに関連する検討を進めていく。③～⑧のステップを繰り返しながら（ステップの⑨から⑫…）モデルの確度・精度を高めていくことが、前述の繰り返しアプローチに対応している。

これまでに、研究地域の設定、文献調査、地質モデルの作成、地下水モデルの作成、地下水解析、地下水モデルの校正、不確実性低減対策の検討を実施した。昨年度は、地下水モデルの校正として、実測値による逆解析だけでなく、数値実験を行い、パラメータの推定値と信頼性、データの有用性について定量的に評価する方法を示した。

今年度は、昨年度に引き続き、地下水モデルの校正を実施した。ボーリング地点の調査結果を考慮して逆解析を実施することにより、実測値の再現性向上や推定誤差などの変化を明らかにした。

新たなデータ取得の有効性を確認するために、複数のトレーサーを対象とした数値実験を行い、有効な調査地点や指標および組み合わせを検討した。さらに、パラメータの同定レベルの空間的な分布について検討するために、pilot point 法による逆解析を試行した。

パラメータの感度やパラメータ間の関係性を明らかにするために、グローバル感度解析を実施した。さらに、逆解析結果と比較することで、逆解析とグローバル感度解析の有用性を相互的に確認した。

最後に、海水準変動を考慮した地下水・物質移行解析を実施し、沿岸海底下の地下水の滞留時間や塩淡境界の挙動を評価した。

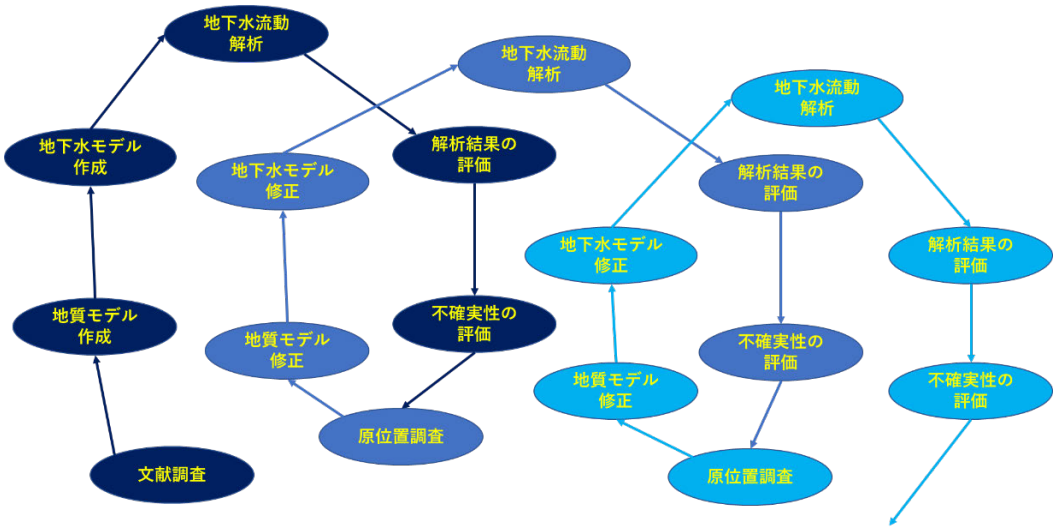


図 2-1- 1　繰り返しアプローチの概念図

（核燃料サイクル開発機構(2005)を一部改変）

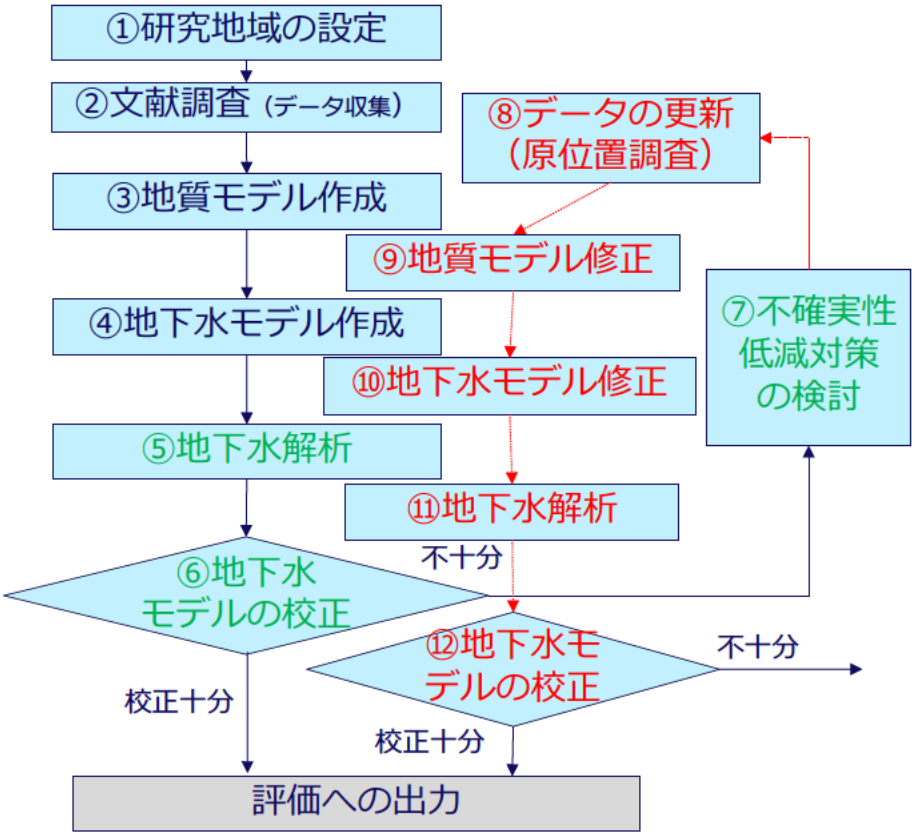


図 2-1- 2　本研究のフローチャート

（３）　地下水流動・物質移行解析

①　地下水の概念モデルおよび文献調査データ

これまでに、ボーリング調査が実施されている駿河湾周辺を対象とし、地質モデルを作成した（産業技術総合研究所ほか、2020）。地形、地質、地球物理、地下水理、水文、気象、地下水水質、地化学などの情報は、対象地域の地下水流動を理解する上で重要である。これらを取り扱っている文献・資料を参考に、地下水流動の概念モデルを構築した。ここでは、これまでに整理した地下水の概念モデルおよび文献調査から取得した水圧および$\delta^{18}O$の観測値について纏めた。

構築した概念モデルを図 2-1-3 に示す。なお、図 2-1-3 中の左側（四角で囲む領域）は、解析モデルの領域外である。富士山は中新統の基盤上に形成された火山で、透水性が良い新富士火山噴出物の下に、難透水性の古富士火山噴出物が大規模な面的広がりをもって分布する。地下水は古富士火山の上を斜面下方へと流れ、山麓下部で一部が湧水として湧出する（安原ほか、2007）。白糸の滝はこのような新富士火山噴出物と古富士火山噴出物の境界部に形成された湧水の代表である。また、新富士火山噴出物では溶岩流（厚さ数 m～60 m 程度）や火山灰層などが何重にも重なった中を地下水が流れており、南西麓の湧玉池や南東麓の柿田川湧水はその例とされる。

山麓の標高 800 m 以下は湧水に飛んだ豊水域（山本、1971）であるのに対し、高標高部は無水域（標高 2,000 m 以上）や乏水域（標高 800～2,000 m）と呼ばれる涵養域の役目を果たす。無水域や乏水域でも、粘土化した火山灰や溶岩緻密部が局所的な難透水層となって小規模な湧水が形成される。

この地域では、主に水圧、^{3}H、水同位体（δD と $\delta^{18}O$）の調査結果が多い。水文環境図 No.9「富士山」（小野ほか、2016）では、富士山西麓から沿岸部にかけての地下水位分布が示されており、大局的には地形に調和的な分布であることから、地形勾配に従った地下水流動であると想定されている。^{3}H などの調査結果から、新富士火山噴出物では滞留時間は 30 年以内、古富士火山噴出物では 60 年以上と考えられている（戸崎・浅井、2017）。また、広域的な地下水流動は水同位体によって特徴づけられており、高標高で涵養した同位体比の軽い地下水が低標高で流出していることが報告されている。

これまでの降水量の文献調査によると、富士山体は降水量が多く、3,000 mm/y を超えるところもあり、平均的には 2,500 mm/y であると推定された（産業技術総合研究所ほか、2020）。これらの情報から、解析モデルで設定する降雨涵養量は、2,000 mm/y と仮定した。

図 2-1-4 に示すように、産業技術総合研究所では、富士川の右岸と左岸でボーリング調査を実施している（産業技術総合研究所、2015；産業技術総合研究所、2016）。2020 年度から掘削されている新規ボーリング孔も合わせて示す。右岸地区のボーリング（以下、SKB）の調査深度は 352.1 m、左岸地区のボーリング（以下、FGB）の調査深度は 160 m である。SKB 孔では、深度 352.1 m まで富士川扇状地砂礫層の分布が確認されている。深度 0～57 m が塩淡境界（浅層）、57～125 m が淡水ゾーン、120 m 以深が塩淡境界（深部）と考えら

れている（図 2-1-5）。143 m 付近、154 m 付近では、$\delta^{18}O$ が-11‰前後であり（産業技術総合研究所、2016）、白糸の滝（-8.5‰）や湧玉池（-8.5‰）より軽い値となるため、これらよりも高標高で涵養した地下水と考えられている。これら調査結果より、ボーリング調査領域の沿岸部地下水流動として図 2-1-6 に示す概念モデルが想定されている。より深い海底において塩水が陸域に向かって流動し、塩淡境界向かって上昇し、その後、塩淡境界に沿って海側に向かって流出していると推察されている。

ボーリング調査地点の浅部の地下水は非常に流れが速く、^{3}H が検出される数十年オーダーの滞留時間である。一方、深部では、^{14}C 濃度の減衰が確認できる数千オーダーの滞留時間である。さらに、海水域での ^{14}C 濃度は、深度とともに増加する傾向にあり、深部で流入した地下水が塩淡境界付近で混合し、海に流出していると考えられている。

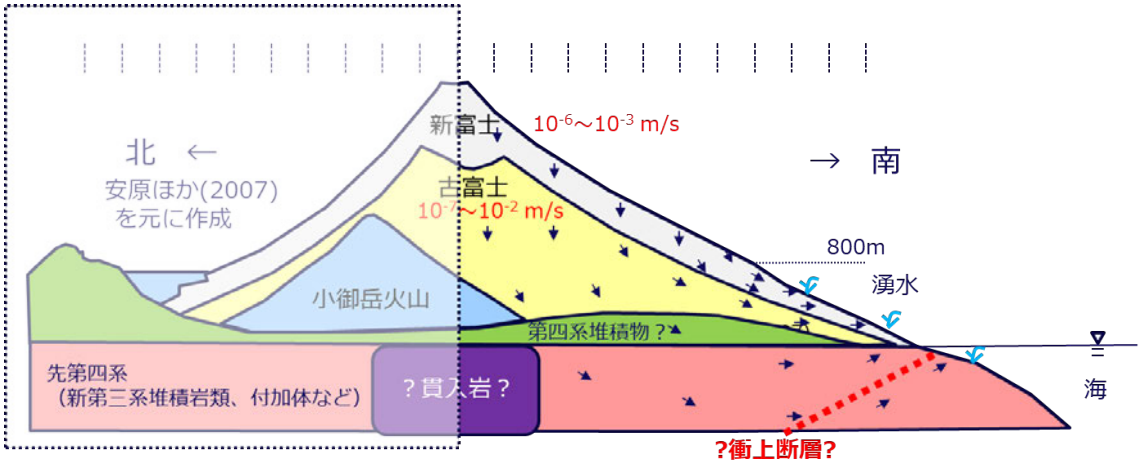


図 2-1- 3　研究対象地域の地下水流動の概念図

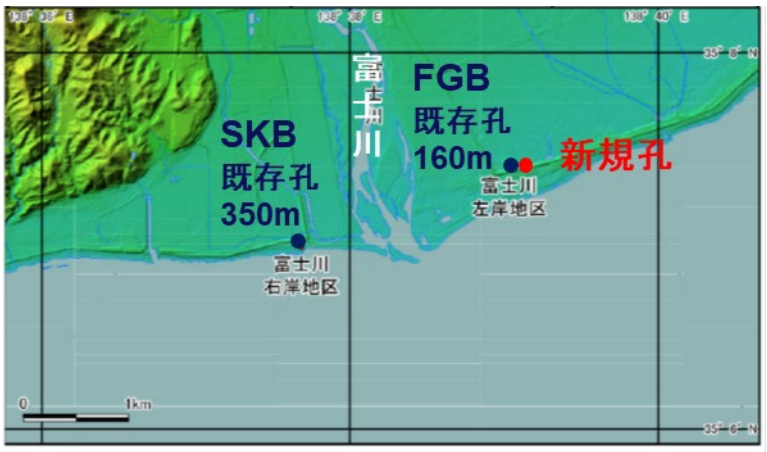


図 2-1- 4　ボーリング調査位置図（産業技術総合研究所、2016）

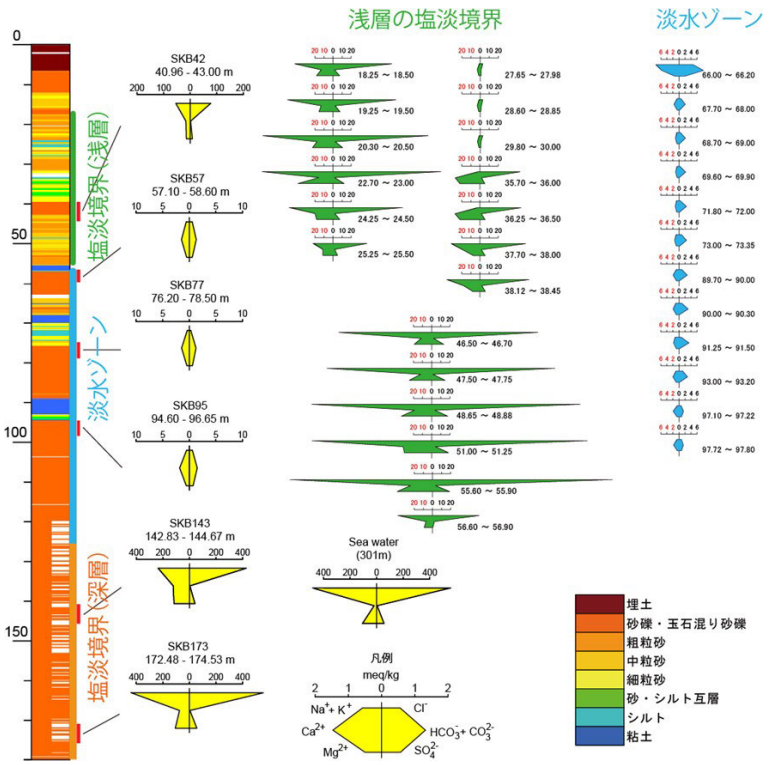


図 2-1- 5　SKB 孔の柱状図および揚水地下水（黄色）と間隙水（緑色・水色）の水質（産業技術総合研究所、2016）

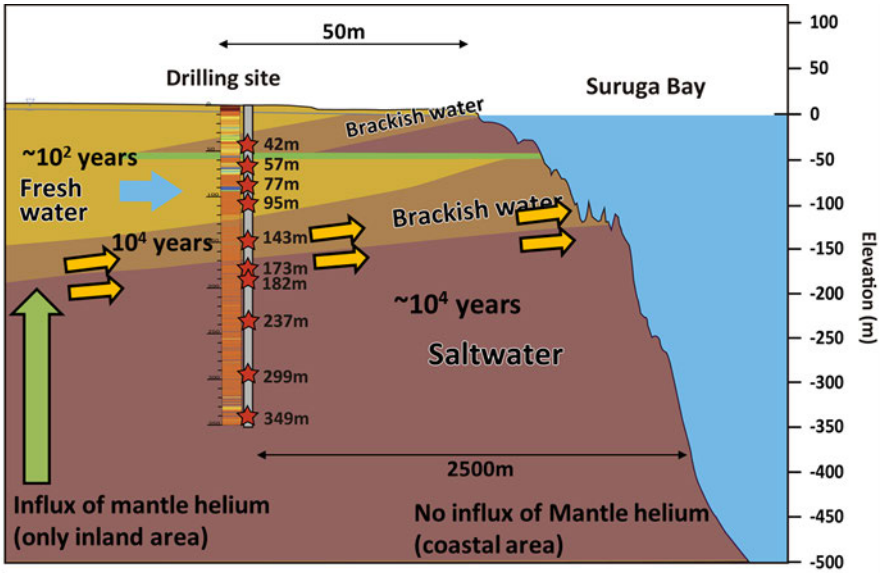


図 2-1- 6 沿岸部における地下水流動の概念図（Machida et al., 2016）

地層の水理特性については、2019 年度の調査結果に基づくと表 2-1- 1 のように整理される。この表は、動力炉・核燃料開発事業団（1996）、富士川河口近傍における産業技術総合研究所のボーリング調査結果（産業技術総合研究所、2015；産業技術総合研究所、2016）

と、山本(1971)、村本・岸（1967）を合わせて整理したものである。第四紀の更新世火山噴出物（古富士火山噴出物）と新第三紀の富士川層群について、透水係数のバラつきが大きく、透水係数の平均値がどの程度であるか不明である。

$\delta^{18}O$ の調査結果は、水文環境図 No.9「富士山」（小野ほか、2016）に整理されている（図 2-1- 7）。本件における研究対象領域である富士山の南麓～西麓において、低標高で取得された $\delta^{18}O$ の値は、高標高の $\delta^{18}O$ の値よりも低い。このことを踏まえると、高標高で涵養した地下水が地下深部を流動し、沿岸域で流出するような流動系であると想定される。

表 2-1- 1 地質の水理特性

地質区分			透水係数 [m/s]	間隙率	備考
第四紀	沖積層	砂礫	10^{-5}～10^{-4}	30%	
		シルト	10^{-6}	30%	
	完新世火山噴出物	新富士火山噴出物	10^{-6}～10^{-3}	溶岩緻密部：5% 溶岩多孔質部：20% その他：10～20%	溶岩部は特に大きい透水係数 間隙率は，関根ほか（1996）の溶結凝灰岩を参考
	更新世火山噴出物	古富士火山噴出物	10^{-7}～10^{-2}	溶岩緻密部：5% 溶岩多孔質部：20% その他：10～20%	溶岩部は特に大きい透水係数 間隙率は，関根ほか（1996）の溶結凝灰岩を参考
新第三紀	鮮新統～上部中新統	富士川層群 （砂岩・シルト岩・礫岩互層）	10^{-10}～10^{-5}	30%	
	下～中部中新統	大井川層群 （風化泥岩）	10^{-9}	30%	
古第三紀	古第三系	瀬戸層群 （頁岩，一部砂岩）	10^{-9}～10^{-8}	1%	間隙率は，関根ほか（1996）の頁岩を参考
閃緑岩			10^{-8}～10^{-5}	1%	間隙率は，関根ほか（1996）の閃緑岩を参考
断層		断層平行方向	周辺岩盤の透水係数より 1～2 オーダー大と仮定	50%	仮定
		断層直交方向	周辺岩盤の透水係数より 1～2 オーダー小と仮定		

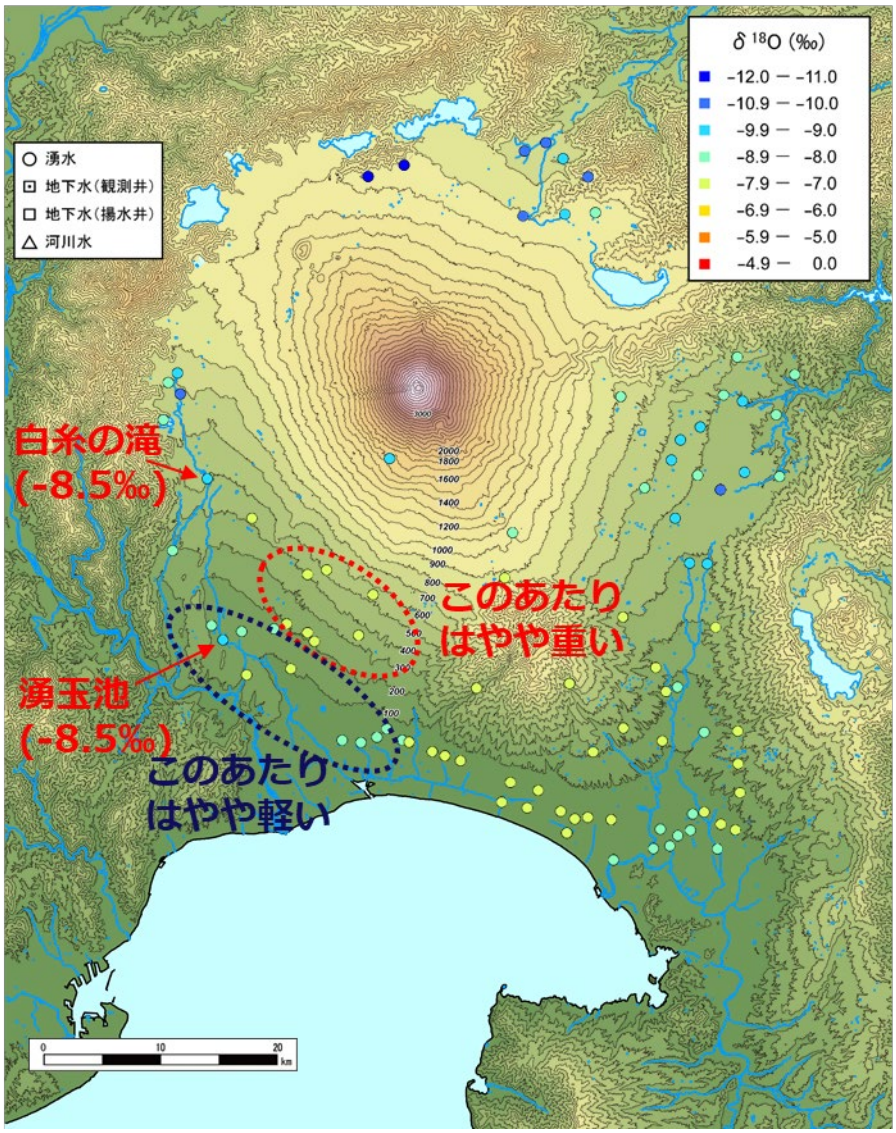


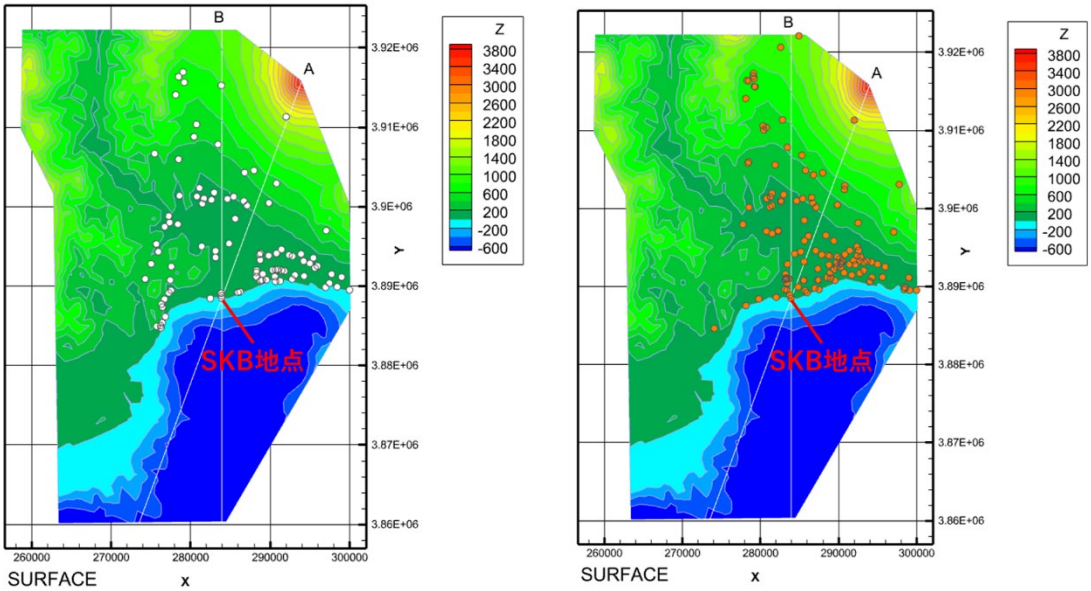
図 2-1- 7　富士山周辺での酸素同位体比の分布

水文環境図 No.9 「富士山」（小野ほか、2016）に加筆

水位・水圧の観測値は「全国地下水資料台帳」（国土交通省）、「水文地質図 No.9 富士山」（小野ほか、2016）から収集した（産業技術総合研究所ほか、2020）。さらに、昨年度は、地下水モデルの校正に使用する全水頭の観測値を再収集した。再収集にあたって、国土地盤情報検索サイト Kunijiban（国土交通省）および静岡県地質情報システム（静岡県）の 2 つの公開情報を用いた。それぞれのサイトから富士山周辺の対象領域におけるボーリング柱状図を抽出し、これに記載の緯度、経度、孔口標高、孔内水位などの情報を整理した。そのうえで、孔口標高と孔内水位を用いて水位標高（全水頭）を算出した。モデル化した領域に対して、再収集した全水頭の地点は狭い範囲に集中したことから、再収集した全水頭の観測値を間引いた。これらの作業を経て、解析に使用した全水頭の観測値数は 94 点となった（産

業技術総合研究所ほか、2022)。また、地下水モデルの校正に使用した $\delta^{18}O$ の観測値は、2020 年度に使用したものと同様で、「水文地質図 No.9 富士山」（小野ほか、2016）から取得した 129 点を使用した。

今年度、地下水モデルの校正に使用する観測値は、上記の全水頭、$\delta^{18}O$ の観測値に加えて、SKB、FGB 地点のボーリング調査で取得された観測値も合わせたものである。全水頭の観測値数は合計 102 点となり、$\delta^{18}O$ の観測値数は合計 138 点となった。地下水モデルの校正に使用する観測値の位置を図 2-1- 8 に示す。図 2-1- 8 (a)は全水頭の観測値位置であり、図 2-1- 8 (b)は $\delta^{18}O$ の観測値位置を示す。参考として SKB 地点も合わせて示す。



(a)　全水頭　　(b)　$\delta^{18}O$

図 2-1- 8　観測値の位置

② 逆解析による地下水モデルの校正

今年度は、透水係数の逆解析として、以下の 3 つの項目を実施した。1 つ目の項目は、ボーリング調査で得られた観測値が透水係数の推定結果に与える影響を評価することである。2 つ目の項目は、^{4}He の観測値が得られたと仮定した数値実験を行い、新たなデータ取得の有効性を検討することである。3 つ目の項目は、Pilot Point 法と呼ばれる逆解析手法を導入し、透水係数分布の推定を試みることである。なお、1 つ目の項目と 2 つ目の項目は、昨年度実施した透水係数の推定に関する検討内容の続きである。

(a) ボーリング調査結果が透水係数の推定結果に与える影響

ボーリング調査（SKB 孔）で取得した観測値が透水係数の推定結果に与える影響を評価することを目的に、逆解析で計算される感度情報から相関係数マトリクスを算出し、逆解析結果と合わせて考察を行った。

ここで使用する地下水モデルを図 2-1- 9 に示す。透水係数を推定する地質区分は、7 つである。上層から順に、第四紀堆積物（hs）、新富士火山噴出物（qvn）、古富士火山噴出物（qvo）、第四紀堆積岩（qs）、新第三紀堆積岩（ns）、付加コンプレックス（ncom）、断層（fault）である。逆解析は、PEST と呼ばれる逆解析ソフトウェアを使用した。PEST では、解析値と観測値の重み付き残差二乗和を目的関数とし、Gauss-Marquardt-Levenberg 法によって、この目的関数を最小化する。この手法は、推定値近傍の感度情報（ヤコビアン）を用いて、パラメータの修正を行う。逆解析手法の詳細は、昨年度の報告書を参照されたい（産業技術総合研究所ほか、2022）。

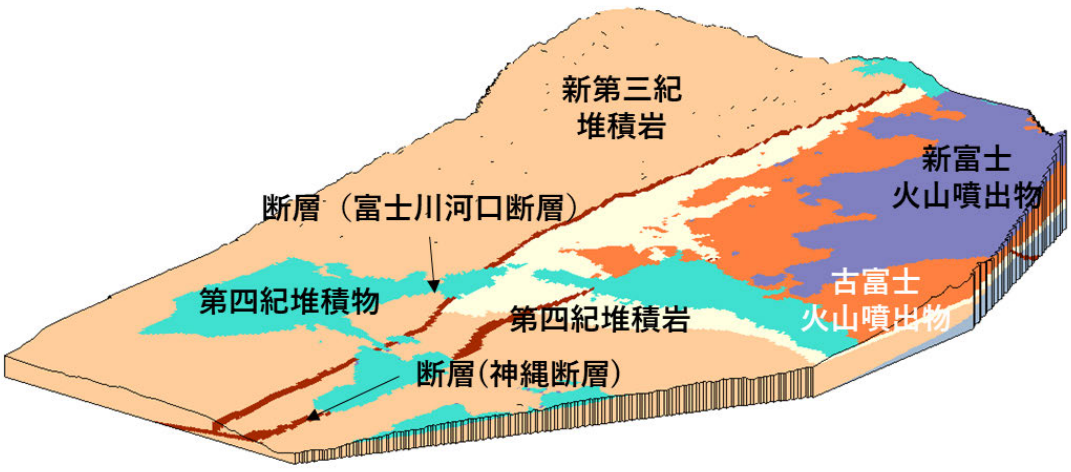


図 2-1- 9 透水係数の逆解析で使用した解析モデル（2021 年度）
（産業技術総合研究所ほか、2022）

境界条件を表 2-1- 2 に整理する。地下水流動解析において、陸域地表面は降雨境界条件とした。降雨量は文献調査の結果から 2,000 mm/y を仮定した。海底面の境界条件は、海底面から海水面までの塩水水頭を淡水換算した値とした。塩分の境界条件は、流入出を考慮した流量（Q）依存型の境界条件とした。陸域地表面でモデル内へ流入する場合、塩分は 0 に固定した。一方、海底面でモデル内へ流入する場合、塩分は 1 に固定した。なお、塩分は、海水の塩分を 1 とした比濃度で解析を行った。$\delta^{18}O$ の物質移行解析について、陸域では、高度効果による影響で標高に応じた $\delta^{18}O$ を持つ降水が涵養することを仮定した。$\delta^{18}O$ の高度効果の関数は、富士山で取得された観測値から計算されたものを使用した（安原ほか、2007）。陸域地表面の境界条件は、上記の高度効果を踏まえた流量（Q）依存型の境界条件とした。海底面の境界条件は、流入濃度が 0 の流量依存型の境界条件とした。なお、流量依存型の境界条件では、地表から解析モデル内へ流入する場合は濃度固定境界とし、地表からモデル外へ流出する場合は内部濃度に依存する。

それぞれの地質区分の基本透水係数を表 2-1-3 に示す。これらの地質区分の透水係数は、表 2-1- 1 や ^{3}H の滞留時間を基に設定した。間隙率は 20%とし、縦分散長は 500 m、横分散長は 50 m に設定した。解析項目は全水頭と $\delta^{18}O$ を対象として、地下水流動・物質移行解析を実施した。解析は定常解析で実施した。

表 2-1- 2 逆解析で使用する解析モデルの境界条件

項目	陸域地表面	海底面	側面・底面	特記事項
地下水	降雨境界条件	海水面までの水頭 （塩水密度考慮）	不透水境界	塩水密度 $\rho = 1 + 0.025C$ C は海水密度
塩分	$Q \geq 0 : C = 0$ $Q < 0 : \partial C / \partial x = 0$	$Q \geq 0 : C = 1$ $Q < 0 : \partial C / \partial x = 0$	濃度勾配 0	
$\delta^{18}O$	$Q \geq 0$: $C = 2.22 \times 10^{-3} \times \mathrm{Ele} + 5.18$ $Q < 0 : \partial C / \partial x = 0$ Ele：標高(m)	$Q \geq 0 : C = 0$ $Q < 0 : \partial C / \partial x = 0$	濃度勾配 0	$\delta^{18}O$ の高度効果は安原ほか（2007）を参照

文献調査で取得された地表の観測値だけを使用した場合と、地表の観測値に加えて、ボーリング調査で得られた観測値を使用した場合の透水係数の推定結果を表 2-1-4 に示す。表 2-1-4 は、推定した透水係数を常用対数で示している。全水頭（水圧）と $\delta^{18}O$ の観測値を使用した透水係数の推定結果について、両者の結果で、浅部の第四紀堆積物から新第三紀堆積岩にかけて小さくなった（深度依存性があった）。また、第四紀堆積物から新第三紀堆積岩の透水係数の推定誤差は比較的小さかった。一方、深部の付加コンプレックスや局所的な構造である断層の透水係数は推定誤差が大きかった。

表 2-1- 3 解析モデルの基本透水係数

地質区分	記号	基本透水係数［m/s］
第四紀堆積物	hs	4.0×10^{-6}
新富士火山噴出物	qvn	4.0×10^{-5}
古富士火山噴出物	qvo	1.0×10^{-5}
第四紀堆積岩	qs	1.0×10^{-6}
新第三紀堆積岩	ns	1.0×10^{-7}
付加コンプレックス	ncom	1.0×10^{-9}
断層	fault	1.0×10^{-9}

ボーリング調査で取得した観測値を加えた場合、透水係数の推定値は大幅に改善されなかったものの、水圧と $\delta^{18}O$ の観測値を使用したときの推定誤差は僅かに改善された。推定誤差が僅かに改善されたことは、透水係数を推定するための感度が多少改善された可能性を示す。ここでは、ボーリング孔 1 本の観測値を追加しただけであり、深部の地質区分の透水係数を推定するためには、観測値の数量および深部の観測値は拡充する必要があると考えらえる。

ボーリング調査結果を加えることによる感度情報の変化を確認するために、感度情報から計算される共分散行列を用いて、相関係数マトリクスを算出した。共分散行列は以下の式で示すことができる。

$$\mathbf{C}(\mathbf{b}) = \sigma_r \left(\mathbf{X}^t\mathbf{Q}\mathbf{X}\right)^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_{11}^2 & \sigma_{12} & \cdots & \sigma_{1m} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22}^2 & \cdots & \sigma_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{m1} & \sigma_{m2} & \cdots & \sigma_{mm}^2 \end{bmatrix} \tag{2-1-1}$$

ここに、**b** は入力パラメータベクトル、**X** は感度マトリックス、**Q** は重み行列、σ_r^2 は参照重み（reference variance）、σ は標準偏差、m は入力パラメータの数を示す。ここで、参照重み σ_r^2 は、以下の式で計算することができる。

$$\sigma_r^2 = \frac{\Phi(\mathbf{b})}{n_{obs} - m} \tag{2-2-2}$$

ここに、**Φ(b)**はパラメータの推定値ベクトル **b** を使用して、計算される目的関数（重み付き残差二乗和）であり、n_{obs} は観測値の数を示す。相関係数マトリクスは、式(2-1-1)を使用して、以下の式から算出できる。

$$\rho_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sigma_i \sigma_j} \tag{2-2-3}$$

ここに、ρ_{ij} は相関係数マトリクスの各成分を示す。相関係数は-1～1 の値をとる。-1 に近いほど負の強相関があり、1 に近いほど正の相関がある。一方、0 に近いほど無相関である。

相関係数マトリクスから、入力パラメータ間の相関性を議論できる。

図 2-1- 10 に表 2-1- 4 の逆解析で得られた感度情報から算出した相関係数マトリクスを示す。色が濃いほど強相関関係である、色が薄いほど無相関関係である。ボーリング調査で得られた観測値を透水係数の推定に加えることで、相関係数マトリクスが変化した。入力パラメータ間は無相関関係が増えている。これは、パラメータを一意に推定できる可能性が僅かに向上したことを示すと考えられる。また、新富士火山噴出物（qvn）と古富士火山噴出物（qvo)、新第三紀堆積岩（ns）と断層（fault）は負相関であることも分かった。これは、一方の透水係数が大きくなる場合、もう片方の透水係数が小さくなることを意味している。これらは、両者のバランスで観測値の再現に寄与していると考えられる。

このように、相関係数マトリクスを調べることは、入力パラメータ間の相関関係を評価することに有効である。さらに、逆解析に使用する観測値（ここでは、ボーリング調査結果）を変えたことによる感度情報の変化を可視化することに利用できると考えられる。

表 2-1- 4 ボーリング調査（SKB 孔）を追加した透水係数の逆解析結果

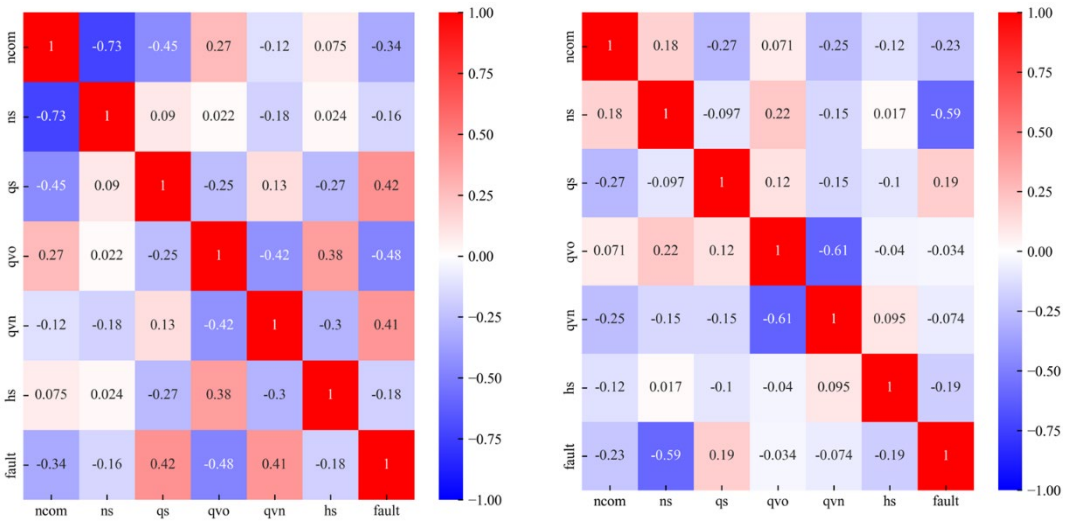
（単位は m/s，推定結果は常用対数で示している）

(a) 地表の観測値のみ

地層名	記号	水圧			$\delta^{18}O$			水圧＋$\delta^{18}O$		
第四紀堆積物	hs	-5.7	±	0.2	-4.0	±	1.1	-4.8	±	2.6
新富士火山噴出物	qvn	-7.3	±	6.7	-3.4	±	0.9	-3.1	±	0.8
古富士火山噴出物	qvo	-5.9	±	1.0	-4.2	±	0.4	-4.3	±	0.4
第四紀堆積岩	qs	-6.0	±	0.3	-5.4	±	1.0	-5.4	±	0.6
新第三紀堆積岩	ns	-6.6	±	0.1	-6.3	±	0.8	-6.3	±	0.6
付加コンプレックス	ncom	-7.6	±	38.6	-3.8	±	2.4	-3.9	±	1.9
断層	fault	-8.7	±	13.2	-6.5	±	2.8	-6.2	±	2.2

(b) 地表の観測値＋SKB 孔

地層名	記号	水圧			$\delta^{18}O$			水圧＋$\delta^{18}O$		
第四紀堆積物	hs	-5.6	±	0.2	-4.9	±	4.3	-5.3	±	2.2
新富士火山噴出物	qvn	-7.3	±	4.9	-3.4	±	1.8	-5.1	±	0.4
古富士火山噴出物	qvo	-5.5	±	0.7	-4.4	±	1.1	-7.1	±	0.3
第四紀堆積岩	qs	-6.4	±	1.3	-5.4	±	1.7	-5.6	±	0.5
新第三紀堆積岩	ns	-6.6	±	0.1	-6.3	±	1.7	-6.4	±	0.5
付加コンプレックス	ncom	-7.4	±	113.9	-3.6	±	2.8	-4.9	±	0.3
断層	fault	-8.6	±	6.4	-8.2	±	22.0	-5.9	±	4.4



(a) 地表の観測値のみ　　(b) 地表の観測値＋SKB 孔

図 2-1- 10　相関係数マトリクス

(b) 数値実験による新たなデータ取得の有効性

^{4}He の観測値が得られたと仮定した数値実験を行い、新たなデータ取得の有効性を検討した。ここでは、文献で取得した観測値を使用するのではなく、地下水モデルで順解析を行って得られた解析値を観測値として使用する。この観測値を使用して透水係数の推定を行い、透水係数の推定結果と順解析で設定した透水係数を比較することで、観測値の有効性を検討する。

ここで使用する地下水モデルは、前節の図 2-1- 9 を基に構築した。数値実験に使用する観測値は全 207 点である。地表面の観測値が 199 点であり、それに加えて、SKB 地点の鉛直方向に 8 点の観測地点を追加した。地下水流動解析・物質移行解析は FEFLOW（Diersch、2014）を使用した。なお、ここでの数値実験では、計算負荷を低減することを目的に、塩水による密度流は考慮していない。境界条件を表 2-1- 5 に整理する。地下水流動解析において、陸域地表面は降雨境界条件とした。降雨量は文献調査の結果から 2,000 mm/y を仮定した。降雨境界条件において、圧力水頭が 0 以上であれば、地表へ流出する（浸出面境界）。塩分による密度流は考慮していないが、海底面の境界条件は、海底面から海水面までの塩水水頭を淡水換算した値に設定した。δ^{18}O の境界条件は、逆解析による地下水モデルの校正（②(a)）に使用したものと同じである。

表 2-1- 5 数値実験で使用する解析モデルの境界条件

項目	陸域地表面	海底面	側面・底面	特記事項
地下水	降雨境界条件	海水面までの水頭* （塩水密度考慮）	不透水境界	海底面から海水面までの塩水水頭を淡水換算した値
δ^{18}O	$Q \geq 0$: $C = 2.22\times10^{-3}\times\mathrm{Ele} + 5.18$ $Q < 0 : \partial C/\partial x = 0$ Ele：標高(m)	$Q \geq 0 : C = 0$ $Q < 0 : \partial C/\partial x = 0$	濃度勾配 0	δ^{18}O の高度効果は安原ほか(2007)を参照

昨年度は、水圧、δ^{18}O、水圧＋δ^{18}O の観測値の有効性を検討した。今年度は、これらに加えて、^{4}He の観測値を加えた場合に、透水係数の推定値が向上できるか検討した。表 2-1- 6 に数値実験の結果を示す。透水係数の単位は m/s であり、推定値は常用対数で示している。逆解析に使用する観測値の指標を増やすに従って、推定結果は真値に近づいた。これは、水圧および δ^{18}O の観測値に対する透水係数の感度が異なるためだと考えられる。しかしながら、水圧＋δ^{18}O と ^{4}He＋水圧＋δ^{18}O の推定結果を比較すると、^{4}He を追加することによって、第四紀堆積物の推定値は真値に近づいた。一方、他の地層の推定結果は大きく改善されていない。これは、^{4}He の観測値が地表付近で取得されたと仮定したことに起因すると考えられる。地下水の滞留時間が長いほど、^{4}He 年代は古くなる。つまり、長い時間をかけて地表付近に移行してきた地下水であれば、^{4}He 年代は古くなるが、涵養した地下水が短い時

間で湧水した場合には、^{4}He 年代は若い。文献調査で得られた ^{3}H の観測値から、研究対象地域の浅部の地下水流速は比較的速いことが想定されている。このことから、浅部で ^{4}He の観測値が取得されたとしても、^{4}He の観測値は若い地下水であることを示し、深部の地質区分の透水係数を推定するための感度も小さい可能性がある。一方、地下水流速が速い浅部地下水の ^{4}He ではなく、ボーリング調査によって深部地下水の ^{4}He の観測値（^{4}He 年代が古い観測値）が取得できれば、これによって深部地質区分の透水係数を推定できる可能性もある。

表 2-1- 6 ^{4}He の観測値を仮定した数値実験の逆解析結果

（単位は m/s, 推定値は常用対数で示している）

地層名	記号	真値	推定値			
			水圧	$\delta^{18}O$	水圧+$\delta^{18}O$	水圧+$\delta^{18}O$+^{4}He
第四紀堆積物	hs	-5.4	-6.4	-7.2	-5.9	-5.2
新富士火山噴出物	qvn	-4.4	-7.0	-5.7	-4.7	-4.8
古富士火山噴出物	qvo	-5.0	-6.9	-5.3	-5.0	-5.0
第四紀堆積岩	qs	-6.0	-6.6	-5.3	-5.9	-5.6
新第三紀堆積岩	ns	-7.0	-7.3	-6.7	-7.8	-6.4
付加コンプレックス	ncom	-9.0	-6.0	-6.1	-6.1	-6.4
断層	fault	-9.0	-8.4	-7.3	-7.2	-4.9

(c) Pilot Point 法による透水係数分布の推定

本研究では、これまで、地質区分ごとの透水係数を対象に逆解析を行ってきた。しかしながら、地質区分ごとに透水係数を推定することは、地質区分内での透水係数の不均質性を考慮しておらず、透水係数の空間分布は地質区分に依存する。実際のフィールドでは、同じ地質区分であっても、透水係数の空間分布に不均質性がある。これらのことから、ここでは、Pilot Point 法を適用し、透水係数の空間分布を推定することを試みた。

Pilot Point は、逆解析によって入力パラメータを推定する地点のことである。Pilot Point で推定された入力パラメータの値は、地球統計学的な手法によって空間的に補間され、数値モデルの要素（もしくは、節点）に割り当てられる。このため、数値モデルの要素（もしくは、節点）ごとにパラメータを推定するより、遥かに低い計算負荷で入力パラメータの空間分布を推定することが可能である（Doherty et al., 2010）。

Pilot Point 法では、配置する Pilot Point の数にもよるが、推定する入力パラメータの数が、観測値の数よりも多くなる場合が多い。このとき、入力パラメータを一意に推定できなくなる。このような問題に対して、逆解析の目的関数に数学的な正則化を施すことで、解を

一意に推定することができるようになる。正則化は、推定する入力パラメータに、地質構造的な制約や事前に調査された情報を加えることである。正則化によって、逆解析の推定結果は安定性と一意性が向上する（Doherty et al., 2010; Hunt et al., 2007）。

上述のように、正則化によって推定結果の安定性と一意性を向上することができる。しかしながら、Pilot Point 法では、推定する入力パラメータの数が多く、この数に対応して、感度情報（ヤコビアン）を構築するための順解析の数は増加する。このため、特異値分解を利用して、感度が有意な入力パラメータ（解空間にベクトルが張れる入力パラメータ）だけを使用して、逆解析をする方法が提案されている。この方法では、正則化に Tikhonov 正則化を用いること、逆解析に有意な特異値だけを逆解析にしようすることから、Tikhonov–TSVD (Truncated Singular Value Decomposition)と呼ばれる（Tonkin and Doherty, 2005; Tonkin and Doherty, 2009）。

上述の内容は、逆解析ソフトウェア PEST に実装されている。数学的な手続きや PEST の使用方法は、関係論文や PEST マニュアルを参考にされたい（Doherty, 2003; Doherty, 2015; Doherty et al., 2010; Doherty and Hunt, 2010; Tonkin and Doherty, 2005; Watermark Numerical Computing, 2018a; Watermark Numerical Computing, 2018b）。

(i) 解析モデルおよび Pilot Point の配置

Pilot Point 法による逆解析で使用した地質モデルは、地質区分ごとの透水係数の逆解析で使用したものと同様である。解析モデルの概要図は、図 2-1- 9 に示したものと同じである。また、基本透水係数は表 2-1-3 に示した値と同じである。

Pilot Point 法による逆解析は多くの順解析を実施する。このため、1 回の順解析の計算負荷を低減する工夫が必要である。ここでは、総節点数を減らすために、空間解像度を粗くした解析モデルを再構築した。Pilot Point 法で使用するモデルを再構築する際は、観測値の地点がモデル内になるように留意した。ここで、再構築した解析モデルの総節点数は、43,307 であり、総要素数は 79,260 である。解析モデル内の要素は全て三角柱で構築した。ここでは、HydroGeoSphere（Aquanty, 2015）を用いて順解析を行った。

ここでの物質移行解析では、塩分と $\delta^{18}O$ を解析した。塩分による密度流も考慮して解析を行った。間隙率は 20%、縦分散長は 500 m、横分散長は 50 m として設定した。解析は定常解析で行った。地下水流動・物質移行に関わる境界条件は表 2-1- 2 と同じである。

Pilot Point は、陸域の地表面（第 1 層目）に配置した。Pilot Point の数は 100 点である。Pilot Point は、陸域に格子上に配置した。Pilot Point および逆解析に使用した観測値を図 2-1- 11 に示す。図 2-1- 11 (a)は、Pilot Point と水圧の観測値を併せて示しており、図 2-1- 11 (b)は、Pilot Point と $\delta^{18}O$ の観測値を併せて示している。Pilot Point 間の空間補間は 2 次元 Kriging を用いた。

逆解析では、水圧の観測値と $\delta^{18}O$ の観測値について、それぞれ重みを設定し、目的関数を計算した。PEST では、計算値と観測値の重み付き残差二乗和を目的関数とし、以下の式

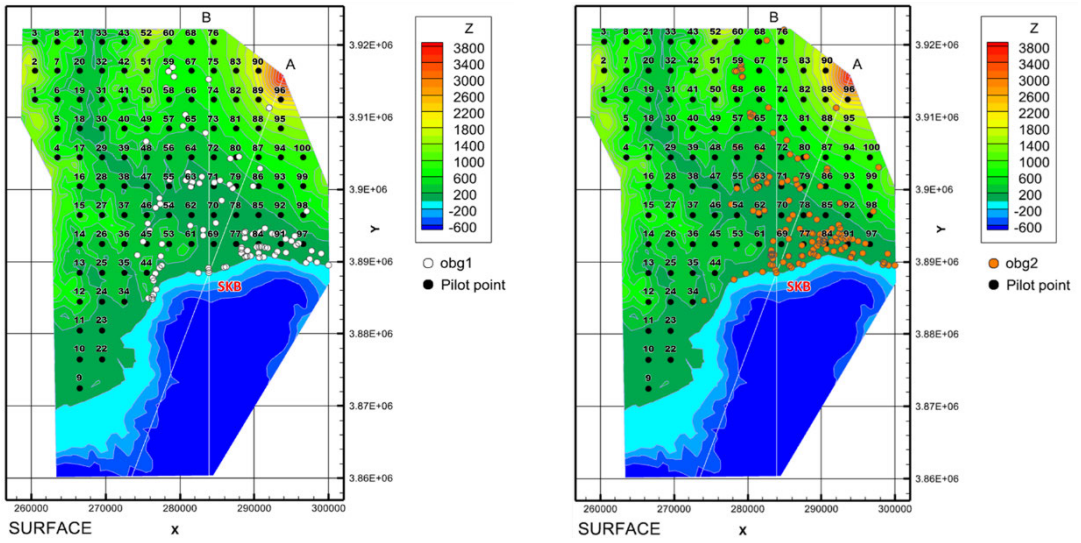
で示される。

$$\Phi = \sum_{i=1}^{n} \left\{ w_i \left(y_i - y(X)_i \right) \right\}^2 \qquad (2\text{-}1\text{-}4)$$

ここに、w_i は i 番目の観測値の重み、y_i は i 番目の観測値、$y(X)_i$ は i 番目の計算値を示す。

$$w = \frac{1}{\sigma\sqrt{n}} \qquad (2\text{-}1\text{-}5)$$

ここに、σ は観測値の標準偏差であり、n は観測値の数である。水圧の観測値、$\delta^{18}O$ の観測値、それぞれに対して重みを計算し、重み付き残差二乗和を計算した。



(a) 水圧の観測値　　(b) $\delta^{18}O$ の観測値

図 2-1- 11　Pilot Point および観測値の配置図

(ii) 数値実験による Pilot Point 法の適用性確認

Pilot Point 地点の透水係数を校正できるか確認するために、数値実験を行った。この数値実験では、手法の適用性を確認することを目的としており、順解析で得た計算値を観測値に置き換えている。数値実験の手順を以下に示す。

(ア) 基本透水係数の値で順解析を行い、観測値地点の水圧、$\delta^{18}O$ の計算値を得る

(イ) Pilot Point 地点の透水係数を常用対数で取得する

(ウ) 平均 1、標準偏差 0.1 の正規分布を作成する

(エ) 透水係数の常用対数値(イ)と正規分布(ウ)に従う乱数の積から、Pilot Point 地点の透水係数を再設定する（推定開始時の透水係数に乱数を付与する）

(オ) (ア)の計算値を観測値として使用し、逆解析を行う

ここでの数値実験は、Pilot Point の透水係数の推定値が、乱数付与前の透水係数に近づ

くか検証する。ただし、上述の通り、Pilot Point による逆解析では正則化を用いている。乱数を付与した推定開始時の透水係数（prior information）を基に正則化されるため、推定値は乱数付与前の透水係数と全く同じ値にはならない。

数値実験の逆解析結果を図 2-1- 12 に示す。横軸は Pilot Point の番号である。また、観測値と計算値の比較を図 2-1- 13 に示す。なお、図 2-1- 13 に示す観測値は、文献から取得した値ではなく、上記の数値実験の手順(ア)で作成されたものである。Pilot Point ごとの透水係数の推定結果は、乱数が付与された透水係数の初期値に比べて、ばらつきが小さくなり、乱数付与前の透水係数の分布に近づいていることが分かる。また、最適値での計算値と数値実験の手順(ア)で作成された観測値はよく整合している。

図 2-1- 14 に逆解析中の目的関数の推移を示す。図 2-1- 14 中の「測定－目的関数」は、観測値と計算値の重み付き残差二乗和（目的関数）である。目的関数の推移によると、ここでの逆解析においては、観測値と計算値が低下するように透水係数が調整されることよりも、正則化による Pilot Point 間の連続性を修正することの方が、透水係数の修正に寄与したと考えられる。

ここで設定した Pilot Point は、解析モデルの地表面（第 1 層目）に配置されており、加えて、2 次元 Kriging を使用して補間している。このため、地表面付近の透水係数分布の変化が観測値に与える影響は小さい可能性がある。しかし、この数値実験を通して、Pilot Point ごとに推定した透水係数を Kriging で補間することによって、透水係数の分布を推定できる可能性があることは確認できた。

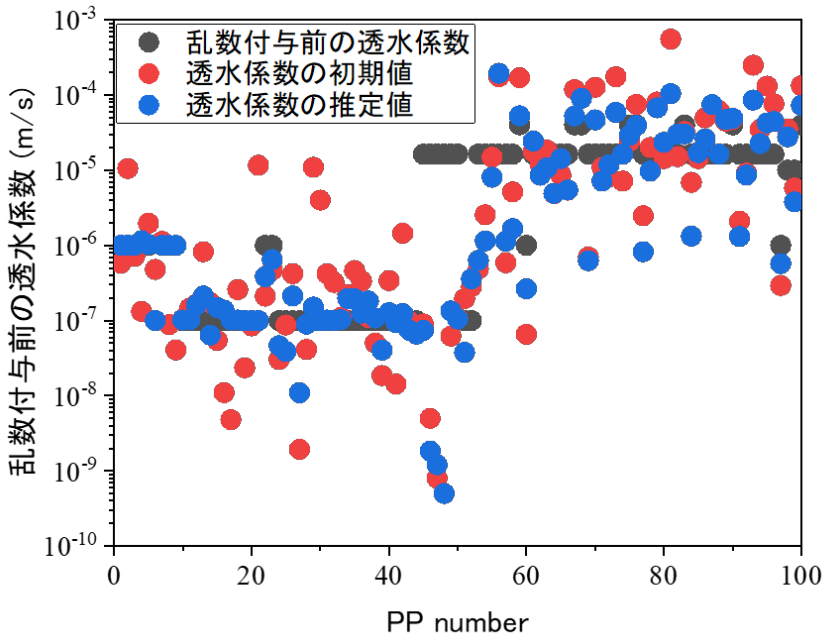
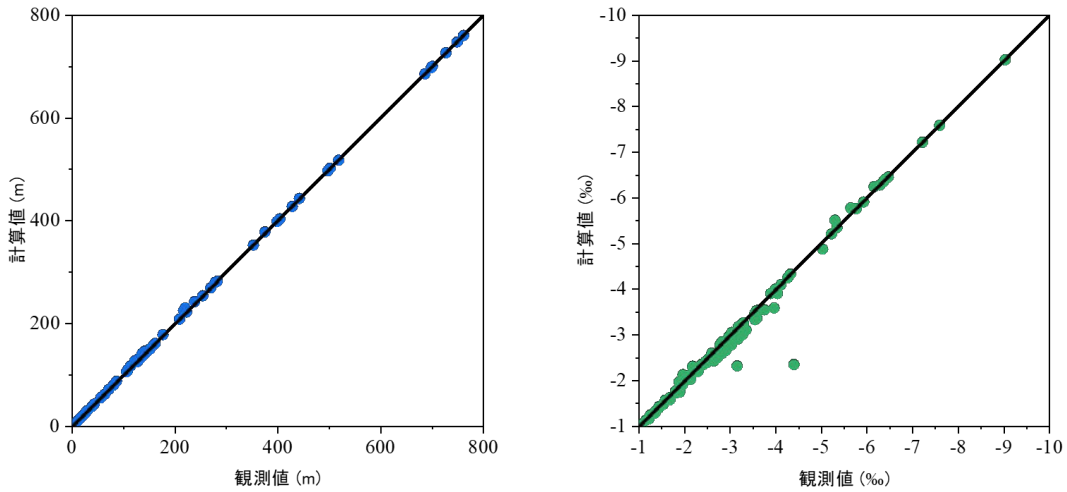


図 2-1- 12　数値実験の逆解析結果



(a) 水圧　　(b) $\delta^{18}O$

図 2-1- 13　観測値と計算値の比較（数値実験）

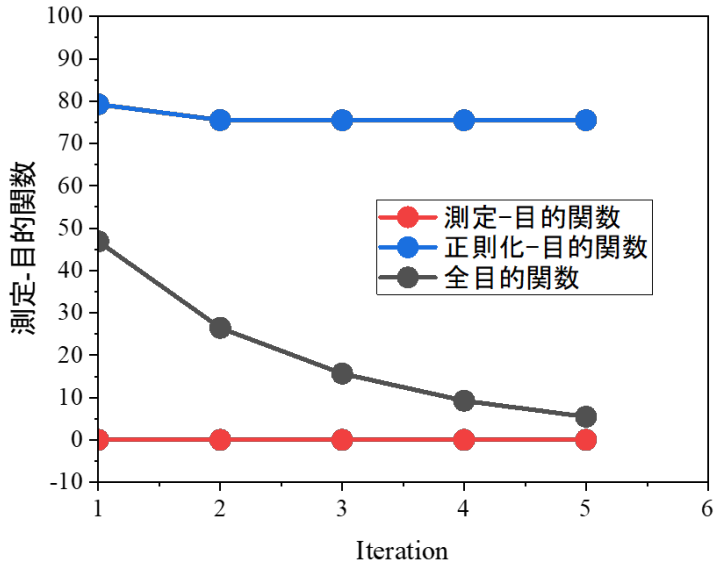


図 2-1- 14　逆解析中の目的関数の推移（数値実験）

(iii) 観測値を使用した Pilot Point 法による透水係数分布の推定

ここでは、文献から取得した観測値を使用して、Pilot Point 法による透水係数の空間分布を推定した。図 2-1- 15 に逆解析中の目的関数の推移を示す。逆解析中に目的関数の変化がなく、透水係数の修正は行われていない。ここでは、Pilot Point は解析モデルの地表面

（第 1 層目）に配置している。このため、地表面付近の透水係数の変化が観測値に与える影響は小さく、逆解析による透水係数の修正は行われなかったと考えられる。図 2-1- 16 に初期の透水係数分布と Pilot Point 法による逆解析後の透水係数分布を示す。透水係数の修正は行われていないものの、地表面の透水係数分布が変化した。これは、推定開始時の Pilot Point の透水係数を 2 次元 Kriging によって補間して、得られた透水係数分布である。

逆解析によって、Pilot Point の透水係数が推定された度合いを評価する指標として、同定率（Identifiability）を計算した。同定率は、パラメータの推定結果が解空間に反映されている度合いを示したものである。逆解析で計算される感度情報（ヤコビアン）を特異値分解することで、計算することができる。図 2-1- 17 に同定率の概念図を示す。同定率は推定したパラメータが解空間に射影できる大きさを示しており、値は 0~1 の間である。同定率が 1 に近いほど、解空間に射影できており、推定度合いが高いことを示す（Doherty and Hunt, 2009）。Pilot Point ごとに同定率を計算し、モデル領域内へマッピングした結果を図 2-1- 18 に示す。なお、Pilot Point は陸域にしか配置していないため、同定率のマッピングも陸域のみである。同定率は観測値が多く存在する沿岸域で高かった。一方、観測値が少ないモデルの西側、富士山付近では、同定率は小さかった。透水係数の修正が行われていないにも関わらず同定率が高かったことから、少なくとも Pilot Point 間で感度の差異はあると考えられる。しかし、逆解析で透水係数は修正されなかったため、観測値に対する Pilot Point の透水係数の感度は、透水係数を修正するほどの大きさではなかったと考えらえる。

ここでは、文献から収集した観測値を用いて、Pilot Point 法によって透水係数の分布を推定することを試みた。しかしながら、逆解析で透水係数の修正は行われず、得らえた透水係数分布は、推定開始時の Pilot Point の透水係数を Kriging で補間したものとなった。これは、Pilot Point を配置した箇所が地表付近であったことが原因と考えらえる。地質区分ごとに透水係数を逆解析した結果によると、地表付近の観測値でも第四紀堆積岩までの感度は得られている。これらのことから、Pilot Point を 3 次元的に配置し、透水係数の分布を推定できるか検討することが今後の課題と考えられる。また、同定率は、モデルの西側では小さく、駿河湾の沿岸域付近で高かったことから、Pilot Point の配置も格子状に配置するのではなく、モデル内に粗密を付けて配置することが効果的だと考えらえる。具体的には、モデルの西側で Pilot Point を少なくし、駿河湾の沿岸域付近では Pilot Point を増やすことで透水係数分布の推定が改善される可能性がある。

Pilot Point 法による透水係数分布の推定が確からしく実施できた場合、各々の Pilot Point で透水係数の推定誤差や同定率が算出できる。これらの情報は、不確実性が高い地点や領域を判断することに有用であり、調査地点や調査項目の意思決定に資するものであると考えられる。

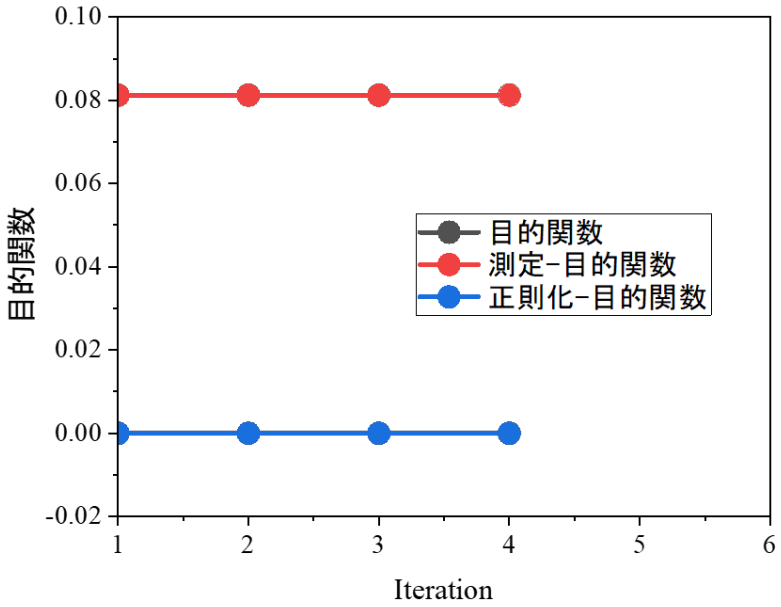
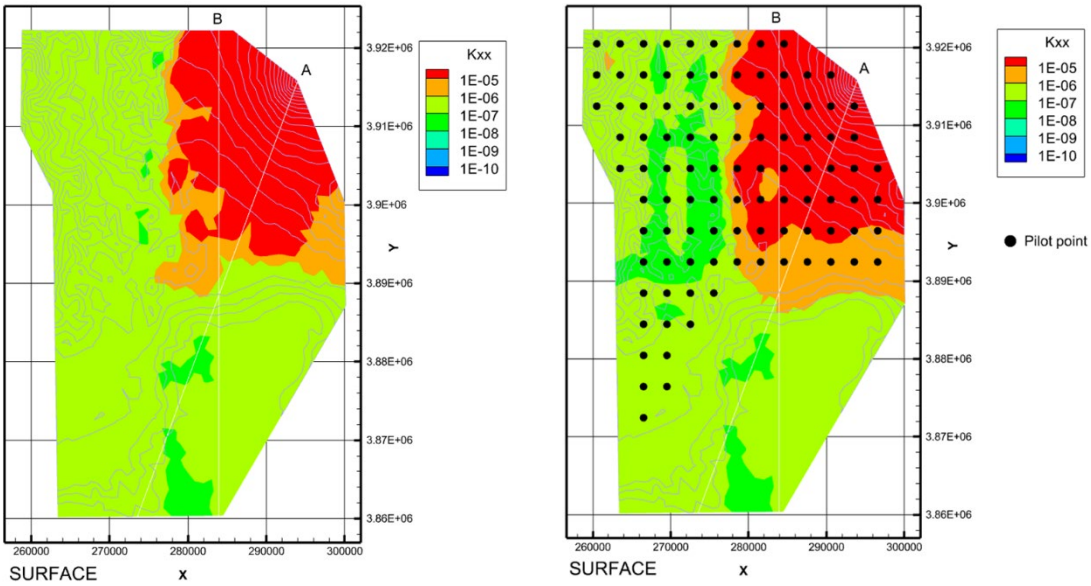


図 2-1- 15　逆解析中の目的関数の推移



(a) 初期の透水係数分布

(b) Pilot Point 法による逆解析後の透水係数分布

図 2-1- 16　透水係数分布の変化

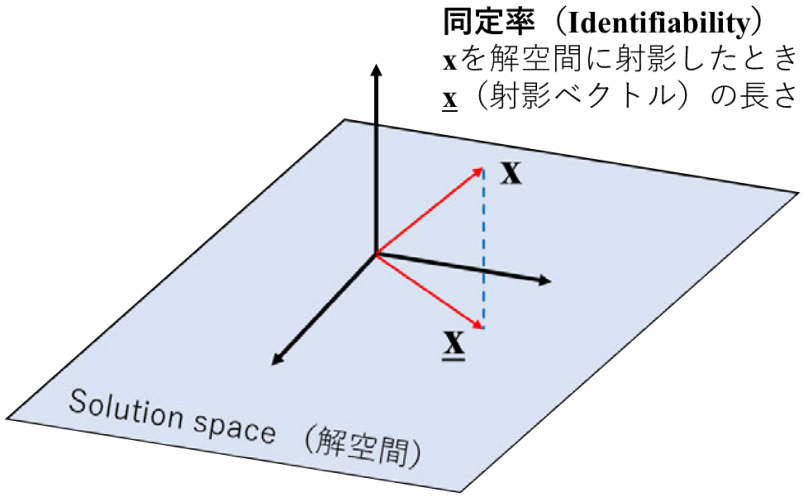


図 2-1- 17　同定率の概念図

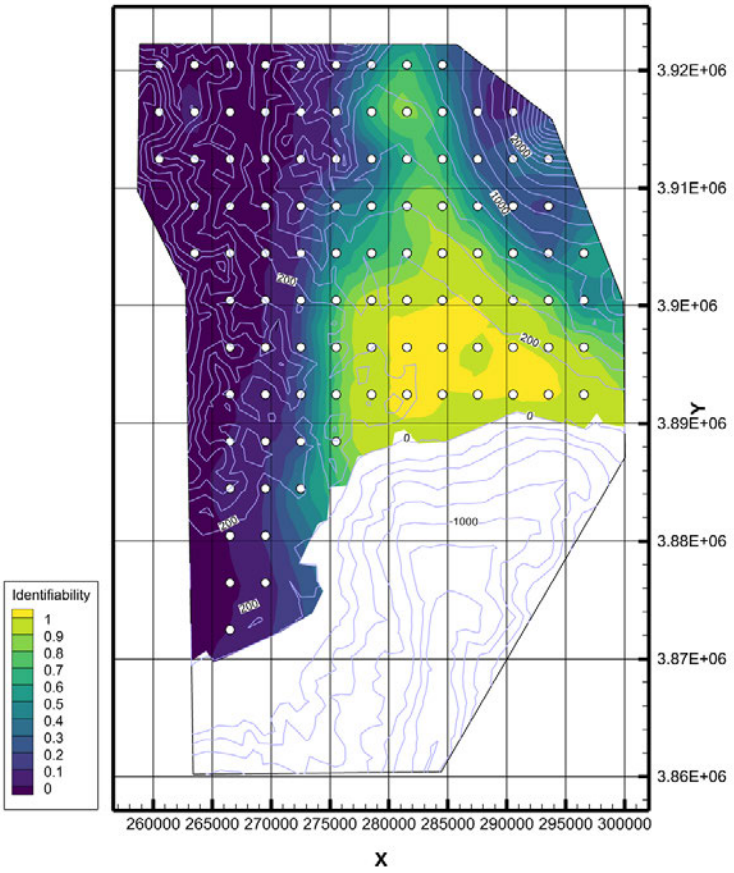


図 2-1- 18　Pilot Point ごとに評価された同定率のマッピング

(d) 逆解析で推定された透水係数を考察する上での課題

これまで、文献調査で得られた観測値を用い、逆解析によって透水係数を推定してきた。しかしながら、逆解析で推定された透水係数を考察する上で 2 つの課題があると考えられる。まず、1 つ目は、感度情報（ヤコビアン）を計算している入力パラメータの値域が狭いことである。上述のように、逆解析は推定値近傍の感度情報を用いてパラメータの修正を行う。逆解析では感度を調べる範囲が狭いことから、入力パラメータ（ここでは、透水係数）が非線形的に解析値へ影響するとき、一意に推定できたか（局所解でないか）の判断が難しい場合がある。2 つ目は、研究対象地域で実測された透水係数の値が少ないため、逆解析で推定された透水係数の確からしさの判断が難しいことである。対象地域において、深部の地質区分の透水係数は取得されておらず、水理試験などから得られた透水係数も僅かであり、空間的には疎に分布する。

これらのことから、入力パラメータの感度を広い値域で探索することができるグローバル感度解析手法を調査し、地下水モデルに適用した。なお、2 つ目の課題は、水理試験を実施して透水係数を取得するしか解決できないものの、逆解析の結果とグローバル感度解析の結果を相補的に考察することによって、逆解析による推定結果の確からしさを定性的に評価することを目指した。

③　グローバル感度解析による地下水モデルの感度評価

(a) グローバル感度解析の概要

水理、環境系の数値モデルに感度解析を適用した事例をレビューした論文はいくつかある（Pianosi et al., 2016; Song et al., 2015）。感度解析の目的は、大きく 3 つに区分できるとされている。1 つ目は、解析結果に対する相対的な貢献度に応じて、入力パラメータを順位付けすることである（Ranking）。2 つ目は、解析結果に影響を持たない入力パラメータを特定することである（Screening）。3 つ目は、極端な解析結果となる入力パラメータの値域の範囲を決定することである（Mapping）。また、これらの目的や計算負荷、感度の計算方法、サンプリング方法などに基づいて、感度解析の手法は図 2-1- 19 のように体系的に整理されている（Pianosi et al., 2016）。本研究では、図 2-1- 19 中の赤枠に記載の 2 つの方法を採用した。Muliple-starts perturbation では、Morris 法を採用した。また、Variance-based では、Sobol'法を採用した。

Morris 法と Sobol'法を選定した理由は、2 つある。1 つ目の理由は、本研究において、グローバル感度解析は逆解析の結果を補助するために実施することを目的としており、入力パラメータの重要度を調べること（Ranking）、解析結果に影響がない入力パラメータを特定すること（Screening）ができる手法を適用するためである。2 つ目の理由は、サンプリング手法（OAT; One-At-a-Time と AAT; All-At-a-Time）の違いが、感度解析の評価結果に与える違いを比較するためである。

OAT は、感度解析中にある入力パラメータだけを変化させ、他のパラメータは固定したまま、解析結果の変動を得る手法である。この操作を全入力パラメータに対して行う。一方、AAT は、入力パラメータを同時に変化させて解析結果の変動を得る手法である。OAT は計算負荷が小さい一方、入力パラメータ間の交互作用は得られないか、もしくは定性的な評価となる。一方、AAT は計算負荷が大きいが、入力パラメータ間の交互作用をより定量的に特徴付けることができる。

なお、Morris 法および Sobol'法によるグローバル感度解析は、SALib（Herman and Usher, 2017）と呼ばれる python モジュールを使用した。

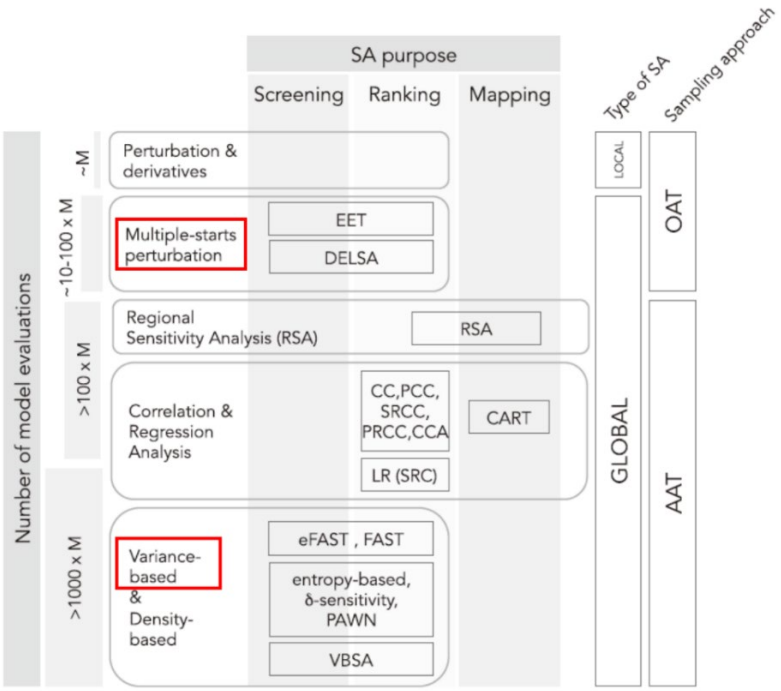


図 2-1- 19　感度解析手法の体系的な整理図　（Pianosi et al., 2016）に加筆

(i)　Morris 法の概要

Morris 法は Elementary Effects（以下、EE）に基づいて、感度を調べる方法である。Morris 法の詳細は、様々な文献で説明されている（たとえば、Morris, 1991; Saltelli et al., 2004; Campolongo et al., 2007）。EE はモデル出力（解析値）や評価量（たとえば、解析値と観測値の残差二乗和）の有限差分のことであり、下の式で表される。

$$EE(X)=\frac{y(x_1,x_2,\cdots,x_i+\Delta,x_{i+1},\cdots,x_m)-y(X)}{\Delta} \qquad (2\text{-}1\text{-}6)$$

ここに、y は、モデル出力や評価量であり、x は入力パラメータである。また、X は入力パラメータ群であり、$X=(x_1,x_2,\cdots,x_m)$ で示される。なお、m は入力パラメータの数である。Δ は入力パラメータ空間の格子サイズであり、以下の式から計算することができる。

$$\Delta=\frac{p}{[2(p-1)]} \qquad (2\text{-}1\text{-}7)$$

ここに、p はレベルであり、入力パラメータ空間の格子の分割数となる。この p は Morris 法の設定時に入力する値である。p を決定すると、入力パラメータ空間の格子サイズは決定する。

EE の平均値と標準偏差を計算することで、感度の情報を得る。EE の平均値は、入力パラメータ x_i がモデル出力や評価量に与える総合的な影響の大きさを示しており、EE の標準偏差は、入力パラメータ x_i がモデル出力や評価量に非線形的な影響の大きさを示す。EE の平均値および標準偏差は以下の式で示される。

$$\mu_i = \frac{1}{r}\sum_{j=1}^{r} EE(j) \tag{2-1-8}$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{r-1}\sum_{j=1}^{r}\left[EE(j) - \frac{1}{r}\sum_{j=1}^{r} EE(j)\right]^2} \tag{2-1-9}$$

ここに、r は軌道（trajectories）の数であり、入力パラメータのサンプリング数を規定する値である。軌道は、m + 1 点から構成される入力パラメータのサンプリング順序に相当し、これを r 個生成する。各軌道の始点は入力パラメータ空間の格子上にランダムで配置される。この始点に続く m 個の軌道を構成する点らは、各軌道が 1 入力パラメータあたりの EE を評価できるように、Δ ずつ入力パラメータを移動させることで決定される。なお、順解析の数は、上述の軌道の設定方法より、$r \times (m+1)$ となる。

モデル出力や評価量が単調増加でない場合、正負の異なる EE 同士によって平均値が小さくなり、感度情報が消失してしまう。そこで、以下のように、EE の絶対値の平均値で評価することが提案されている（Campolongo et al., 2007）。

$$\mu^*_i = \frac{1}{r}\sum_{j=1}^{r} |EE(j)| \tag{2-1-10}$$

本研究においても、EE の絶対値の平均値を用いて、感度を評価した。

Morris 法の評価方法として、図 2-1- 20 のように図化することで、定性的ではあるものの、入力パラメータの ranking や screening の評価が可能とされている（Wicaksono, 2016）。

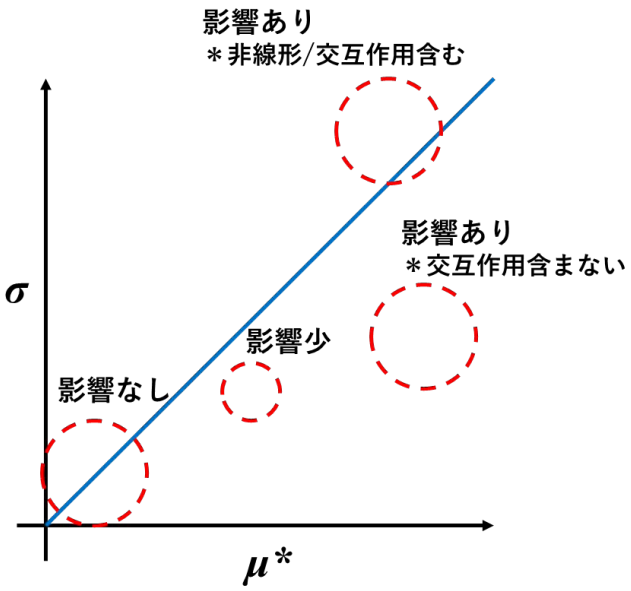


図 2-1- 20　Morris 法の評価方法（Wicaksono, 2016）

(ii) Sobol'法の概要

Sobol'法は、分散に基づく手法である。Sobol'法の詳細は、様々な文献で説明されている（たとえば、Sobol' et al., 2001; 本間、2010; 香田・本間、2010）。モデル出力や評価量の総分散は、入力パラメータの次元の増加に従って分解することができる。

$$V(y)=\sum_{i=1}^{m}V_i+\sum_{i=1}^{m-1}\sum_{j=i+1}^{m}V_{ij}+\cdots+V_{1,\cdots,m} \tag{2-1-11}$$

ここに、y はモデル出力や評価量であり、m は入力パラメータの数である。$V(y)$は総分散を示しており、V_i は個々の入力パラメータの分散（1 次分散）であり、V_{ij} は入力パラメータ x_i と x_j による分散（2 次分散）であることを示す。上式は、総分散が個々の入力パラメータの主効果および入力パラメータ間の交互作用に結び付けられることを意味する。

総分散に対する入力パラメータの寄与度を以下のように特徴付けることができる。

$$S_i=\frac{V_i}{V} \tag{2-1-12}$$

$$S_{ij}=\frac{V_{ij}}{V}\quad(i\neq j) \tag{2-1-13}$$

$$S_{Ti}=S_i+\sum_{j\neq 1}S_{ij}+\cdots \tag{2-1-14}$$

ここに、S_i は 1 次の感度指標、S_{ij} は 2 次の感度指標、S_{Ti} は総感度指標である。1 次の感度指標 S_i は、モデル出力や評価量に対して、入力パラメータ x_i 単独での寄与度を示す。これは、主効果(main effect)とも呼ばれる。2 次の感度指標 S_{ij} は、入力パラメータ x_i と x_j の交互作用(interaction effect)を示す。総感度指標 S_{Ti} は、入力パラメータ x_i の主効果と他の入力パラメータとの高次の全ての交互作用を含む影響度合いを評価することができる。なお、全入力パラメータの総感度指標の総和は 1 となる。

Sobol'法では、入力パラメータ空間のサンプリングに準乱数がよく用いられる。順解析の数は、2 次の感度指標 S_{ij} を計算する場合、$n\times(2m+2)$ となる。ここで、n は入力パラメータのサンプルを生成するための数であり、理想的には 2 の乗数が望ましい。また、n の異なる値で感度指標を計算し、n に対する感度指標の収束性を評価することも行われている（Nossent et al., 2011; Kumar et al., 2020）。

(iii) 解析モデル

グローバル感度解析に使用した地質モデルは、図 2-1- 9 に示す 2020 年度に構築されたものである（産業技術総合研究所ほか、2021）。この地質モデルの地質区分は 7 つである。上位から、第四紀堆積物、新富士火山噴出物、古富士火山噴出物、第四紀堆積岩、新第三紀堆積岩、付加コンプレックス、断層である。なお、富士川河口断層と神縄断層の透水係数は同じと仮定した。

グローバル感度解析では、多くの順解析を実施する。このため、1 回の順解析にかかる計

算時間が短くないと、現実的な期間でグローバル感度解析を終えることができない。そこで、1 回の順解析の計算負荷を低減するために、①総節点数を削減する、②塩分による密度流を考慮しない、こととした。空間解像度を粗くした解析モデルを図 2-1- 21 に示す。解析には FEFLOW（Diersch, 2014）を使用した。解析モデルの総節点数は 481,399 であり、総要素数は 919,140 である。解析モデル内の要素は全て三角錐（Triangular prism）で構築した。それぞれの基本透水係数の設定値は、表 2-1-3 と同じである。解析は定常解析で実施した。地下水流動・物質移行解析に関わる境界条件は表 2-1-5 と同じである。

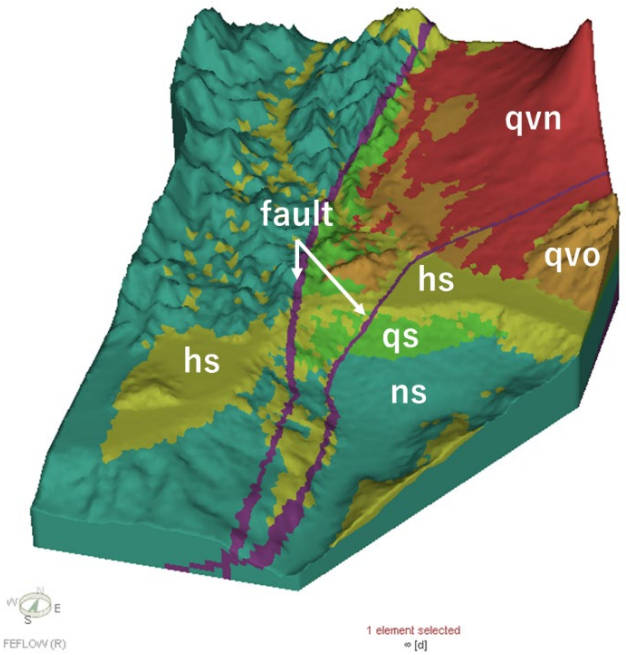
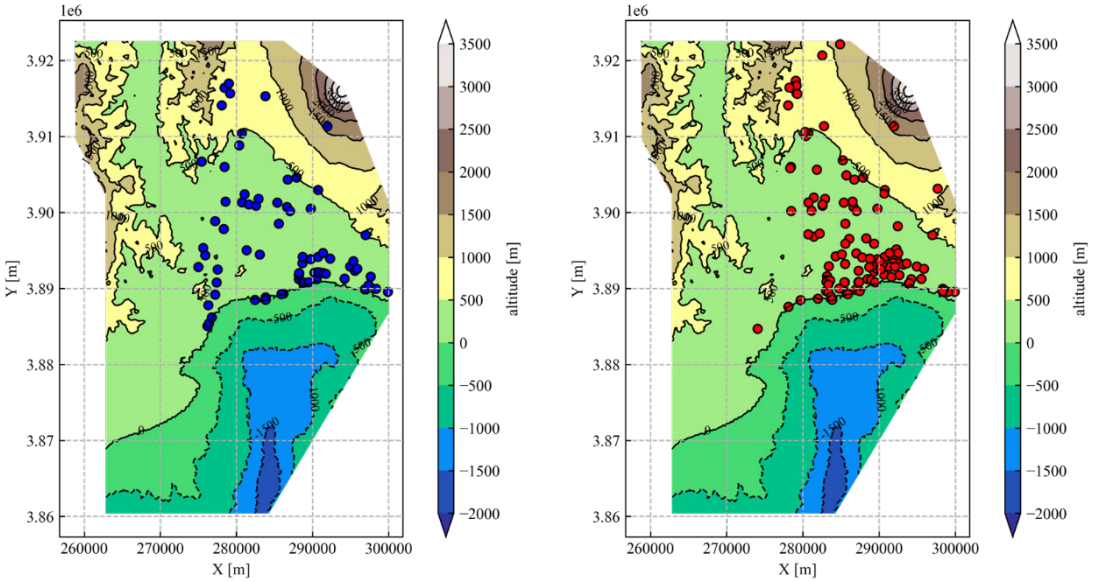


図 2-1- 21　グローバル感度解析で使用する解析モデル

これまでの解析モデルに比べて、粗い空間分割で解析モデルを再構築したため、地形の形状も粗く表現された。これに伴って、図 2-1- 8 の観測値について、解析モデル外の判定となった観測値がいくつか発生した。モデル外となった観測値点数は、水圧の観測値は 102 地点中 24 地点、$\delta^{18}O$ の観測値は 138 地点中 12 地点であった。よって、グローバル感度解析で使用した観測値の数は、水圧で 78 点、$\delta^{18}O$ で 126 点となる。グローバル感度解析で使用した観測値を図 2-1- 22 に示す。水圧および $\delta^{18}O$ の観測値の重みの計算式は式（2-1-5）と同じである。



(a) 水圧　　(b) $\delta^{18}O$

図 2-1- 22　グローバル感度解析で使用した観測値

(b)　グローバル感度解析の結果

(i)　Morris 法の結果

Morris 法では、表 2-1-3 に示す基本透水係数から±2 桁の範囲で透水係数をサンプリングした。入力パラメータ空間の格子分割数（レベル）は、10 に設定した。Morris 法における透水係数のサンプリング箇所を図 2-1- 23 に示す。このサンプリング箇所から、軌道（trajectory）に基づいて、順次透水係数がサンプリングされる。サンプリングされた透水係数を用いて順解析を行い、解析値と観測値の重み付き残差二乗和を計算する。

軌道の数による感度指標の違いを評価するために、軌道数（r）を 24、50、100、150 と変えて Morris 法を行った。このとき、入力パラメータの数（m）は 7 つであることから、順解析数（$r\times(m+1)$）は、それぞれ 192、400、800、1200 回となる。

図 2-1- 24 に軌道の数と EE の絶対値の平均（μ^*）を示す。基本的に、軌道数を変えてもμ^*の大きさの順番は概ね安定した。ただし、第四紀堆積物（hs）の μ^*は、軌道数が増えるにつれて低下していき、第四紀堆積岩（qs）、古富士火山噴出物（qvo）の μ^*を下回った。このように、軌道数が多ければ多いほど、EE の標本数は増えるため、確からしい感度指標（μ^*や σ）を算出することができる。一方、軌道数が増えると、計算負荷は大きくなる。このことから、軌道数をいくつか変えて感度指標の安定性を確認した後、感度指標から入力パラメータの感度を考察することが望ましいと考えられる。以下では、軌道数が 150 のときに計算した感度指標の結果を示す。

図 2-1- 25 に Morris 法によるグローバル感度解析の結果を示す。EE の絶対値の平均値

（μ^*）は、入力パラメータ x_i が評価量に与える総合的な影響の大きさを示しており、EE の標準偏差（σ）は、入力パラメータ x_i が評価量に及ぼす非線形的な影響の大きさを示す。

Morris 法の結果によると、古富士火山噴出物（qvo）と第四紀堆積岩（qs）は、重み付き残差二乗和への影響が大きく、他のパラメータとの交互作用や非線形性を有することが分かった。これは、ここで使用している観測値が、古富士火山噴出物（qvo）と第四紀堆積岩（qs）の透水係数に感度を持つことを示す。古富士火山噴出物（qvo）と第四紀堆積岩（qs）は、新富士火山噴出物（qvn）や第四紀堆積物（hs）の下部に位置する。地表付近で取得された観測値を使用しているのにも関わらず、これらの地質区分で感度が得られたことは、水圧に加えて $\delta^{18}O$ の観測値も使用したことに起因すると考えられる。対象地域で取得された $\delta^{18}O$ から、高標高で涵養した地下水は地下深部を流動していると考察されており、このことが、古富士火山噴出物（qvo）や第四紀堆積岩（qs）の透水係数の感度へ寄与したと考えられる。

一方、深部に位置する付加コンプレックス（ncom）や新第三紀堆積岩（ns）、局所的な構造である断層（fault）は、重み付き残差二乗和への影響は小さかった。これは、地表付近の観測値と SKB 孔の観測値だけでは、深部や局所的な構造である断層の透水係数を推定できないことを示唆する。言い換えれば、これらの透水係数を推定するには、深部の情報を取得するためのボーリング調査が必要となることを示唆している。

Morris 法では、比較的少ない解析数で、入力パラメータの感度や影響度合いを評価することができた。しかしながら、第四紀堆積岩（qs）のように、入力パラメータ間の交互作用や非線形性があることは評価できても、どの入力パラメータ間で交互作用や非線形的な結びつきがあるかまでは定量化できない。

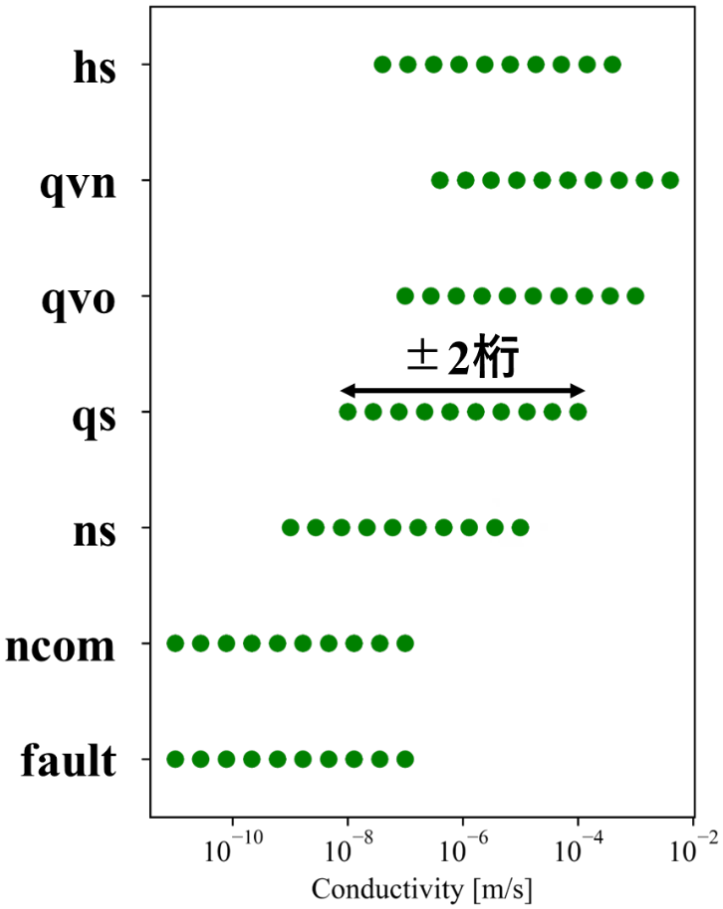


図 2-1- 23　Morris 法における透水係数のサンプリング箇所

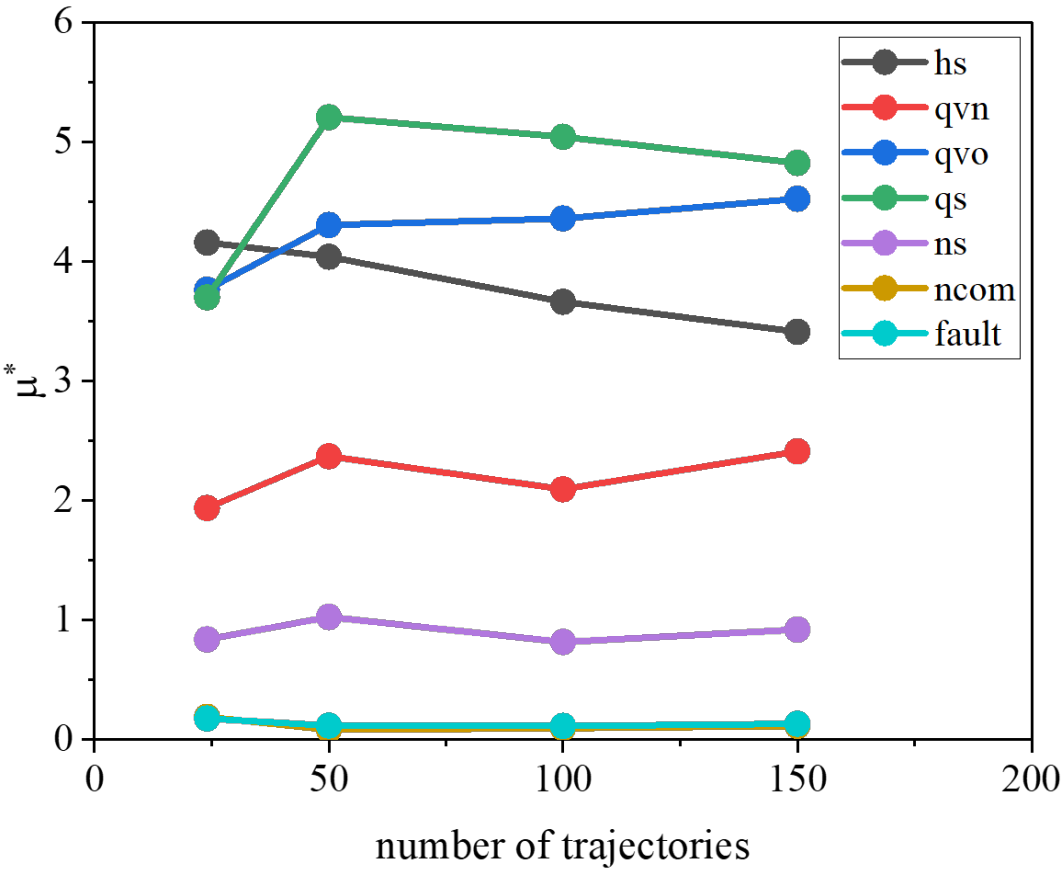
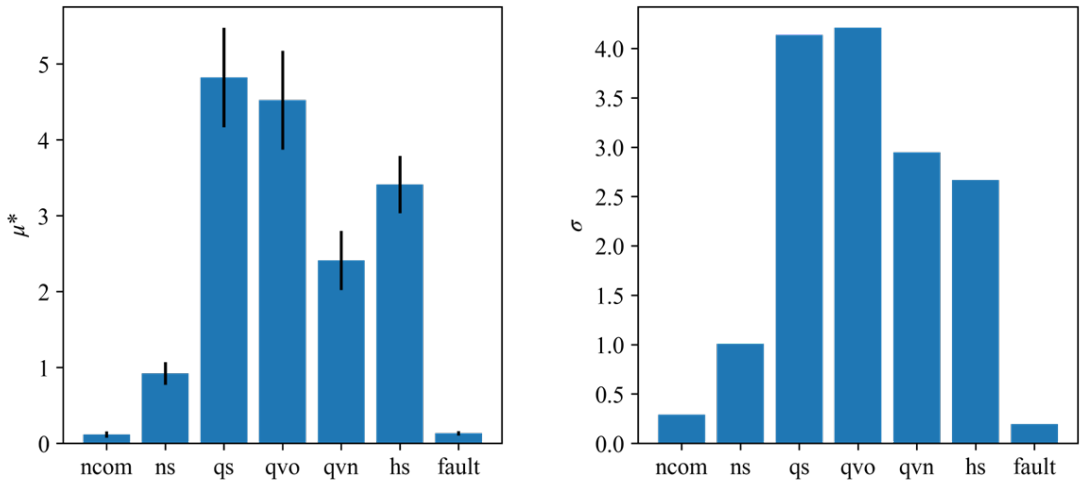
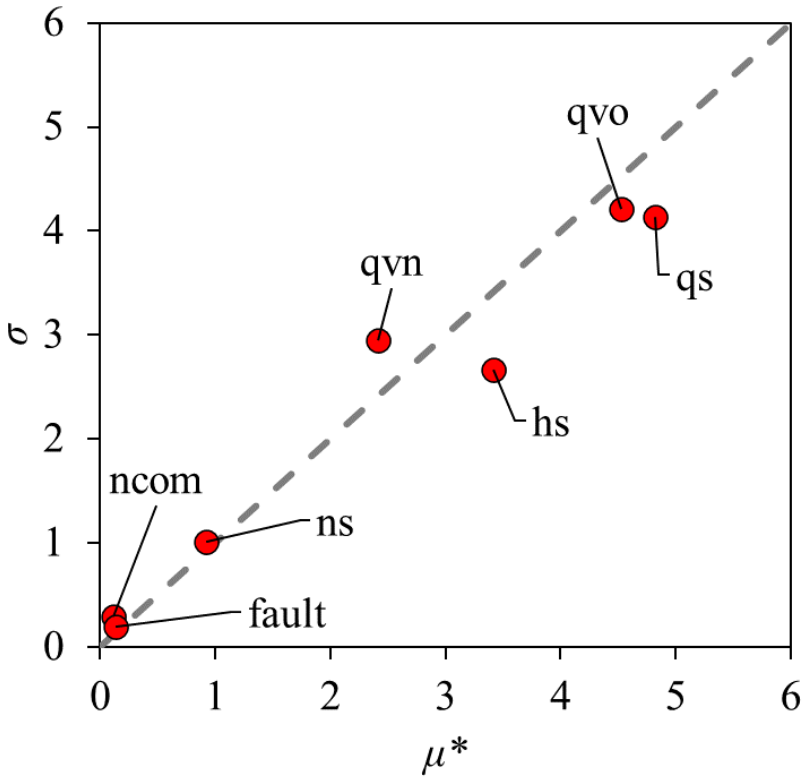


図 2-1- 24　軌道の数と EE の絶対値の平均（μ*）



(a) μ^*　　(b) σ



(c)　μ^*と σ の関係

図 2-1- 25　Morris 法の評価結果

(ii) Sobol'法の結果

Sobol'法でも Morris 法と同様に、表 2-1-3 に示す基本透水係数から±2 桁の範囲で透水係数をサンプリングした。Sobol'法のサンプリングは、この基本透水係数から±2 桁の範囲

の中で、準乱数に基づいて行われる。入力パラメータのサンプルを生成する n は、512 に設定した。Morris 法では評価できなかった入力パラメータ間の交互作用を評価するため、2 次の感度指標の計算を行う。このことから、順解析の数は $n\times(2m+2)$ で計算される。2020 年に構築された地質モデルの入力パラメータ数（地質区分の数）は、7 であることから、Sobol'法での順解析数は、8,192 回となる。95%信頼区間や 2 次の感度指標を計算する上では、標本数が多い方が良いとされており、定性的に n は 1,000 以上が望ましいとされている。しかし、ここでは、計算負荷の都合上、順解析数を 10,000 回以下にしたかったため、n は 512 とした。

Morris 法と同様に、サンプリング数が感度指標に与える影響を評価するために、n が 2 の乗数のごとに感度指標を計算した。図 2-1- 26 にサンプリング数と Sobol'の感度指標を示す。総感度指標（S_T）と 1 次の感度指標（S_1）ともに、順解析数が 4,000 回を超えると、入力パラメータの感度の大きさの順位は安定したことが分かる。このように、Sobol'法でも Morris 法と同様に、サンプリング数を変えて感度指標を計算することで、十分なサンプリング数で感度指標を計算できているか確認することができる。以下では、順解析数が 8,192 回のときに計算した感度指標の結果を示す。

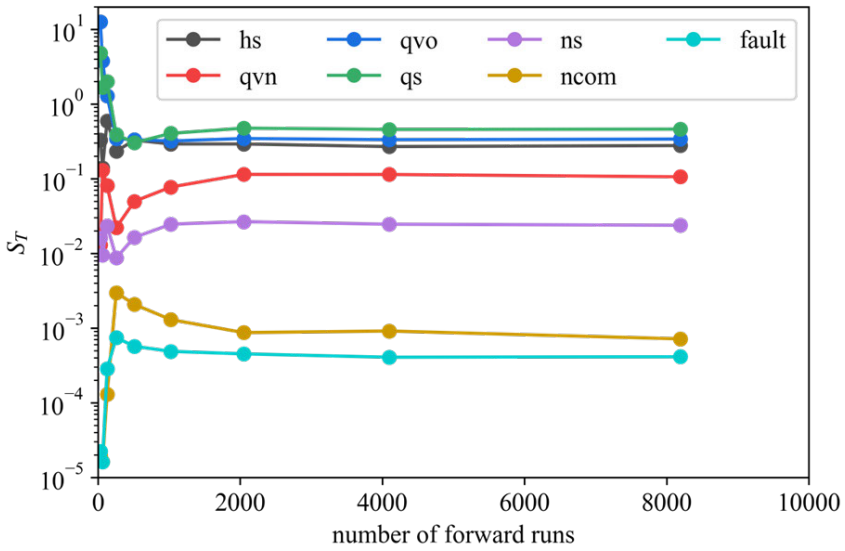
図 2-1- 27 に Sobol'法の評価結果を示す。1 次の感度指標 S_i は、モデル出力や評価量に対して、入力パラメータ x_i 単独での寄与度を示しており、主効果(main effect)とも呼ばれる。総感度指標 S_{Ti} は、入力パラメータ x_i の主効果と他の入力パラメータとの高次の全ての交互作用を含む影響度合いを評価できる。2 次の感度指標 S_{ij} は、入力パラメータ x_i と x_j の交互作用(interaction effect)を示す。

Sobol'法の結果によると、総感度指標（S_T）の結果は、Morris 法と同様の結果を示した。つまり、古富士火山噴出物（qvo）と第四紀堆積岩（qs）での感度が大きく、地表付近および SKB 孔の観測値から、これらの透水係数を推定できることを示唆した。一方、付加コンプレックス（ncom）や新第三紀堆積岩（ns）や断層（fault）の感度は小さく、地表付近および SKB 孔の観測値からでは、これらの透水係数を推定できないことを示唆した。1 次の感度指標（S_1）の結果では、第四紀堆積物（hs）の感度が大きい。これは、第四紀堆積物（hs）が単独で、重み付き残差二乗和に対する影響度が大きいことを示している。これは、観測値の多くが沿岸の地表付近にあり、第四紀堆積物（hs）に存在することに起因していると考えられる。

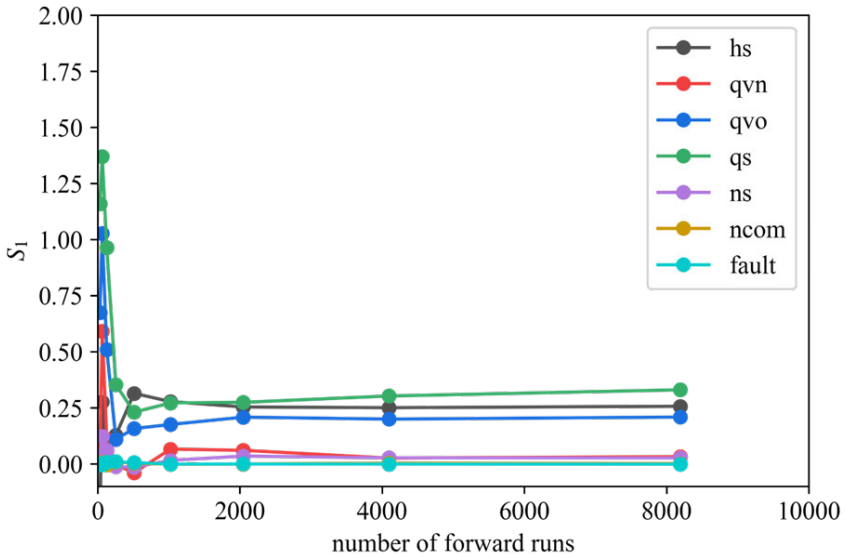
2 次の感度指標（S_2）の結果から、第四紀堆積岩（qs）と古富士火山噴出物（qvo）、古富士火山噴出物（qvo）と新富士火山噴出物（qvn）に交互作用があると考えられる。古富士火山噴出物（qvo）の大部分は、上部を新富士火山噴出物（qvn）に覆われ、下部には第四紀堆積岩（qs）が分布する。このような地質構造に起因して、これらの地質区分間で地下水流動・物質移行に関係性があることから、交互作用が認められたと考えられる。

Sobol'法は Morris 法に比べて、計算負荷が大きいものの、入力パラメータが単独で評価量に与える影響度合い（主効果）や入力パラメータ間の交互作用を定量化できる点で優れて

いる。地質区分ごとに分かれていても、これらは水理的な連結性が認められることが多い。この場合、地質区分ごとの透水係数は交互作用や相関性を伴って、モデル出力（解析値）や評価量へ影響を及ぼすと考えらえる。これらのことを踏まえると、入力パラメータの主効果や、入力パラメータ間の交互作用を定量化できる Sobol'法は、地下水モデルを校正する上で重要な情報を提供する手法であると考えられる。

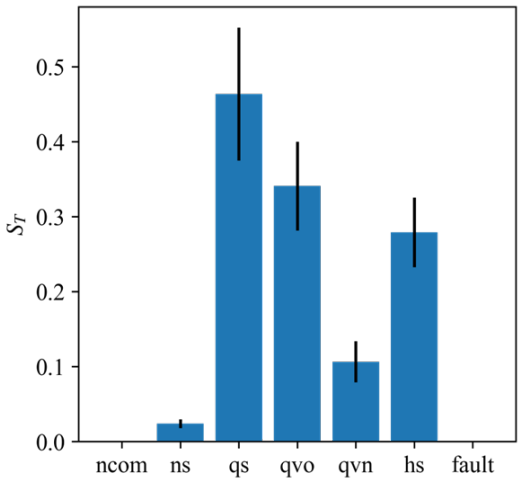


(a) 総感度指標（S_T）

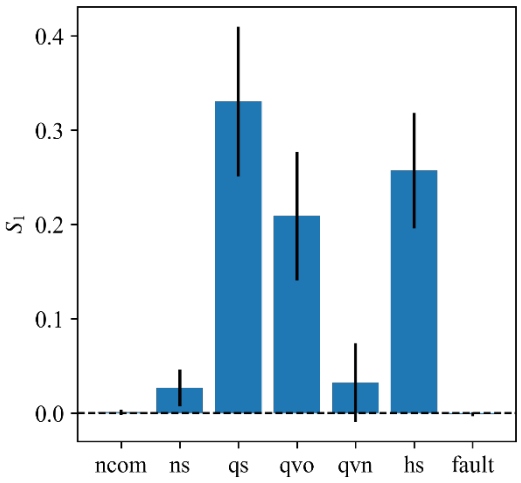


(b) 1 次の感度指標（S_1）

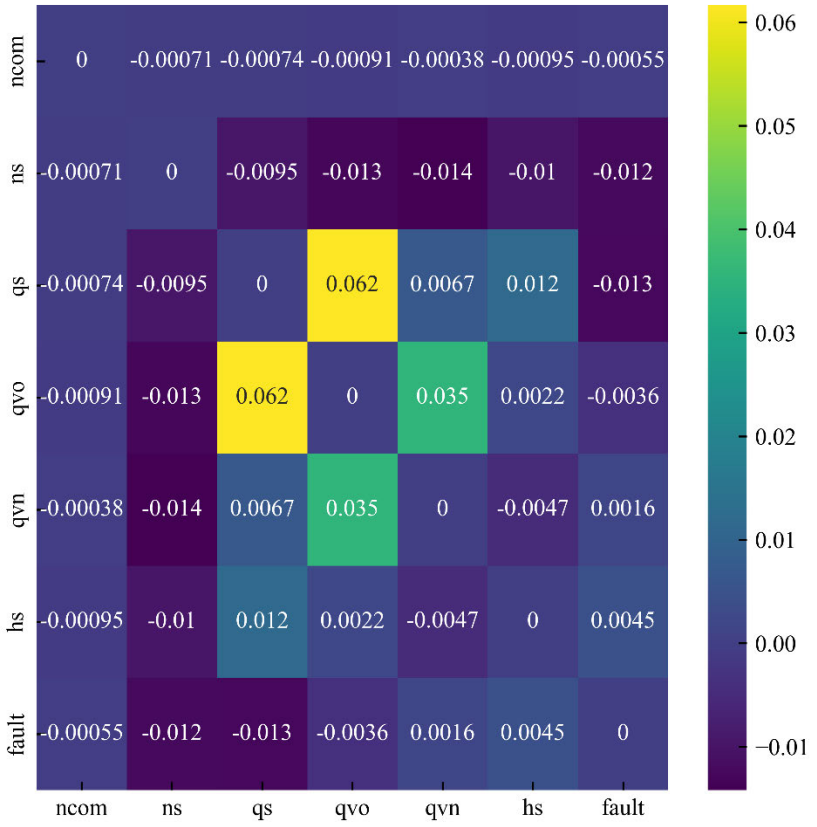
図 2-1- 26　サンプリング数と Sobol'の感度指標



(a) 総感度指標（S_T）



(b) 1 次の感度指標（S_1）



(c) 2 次の感度指標（S_2）

図 2-1- 27　Sobol'法の評価結果

(c) グローバル感度解析および逆解析結果の考察

グローバル感度解析で得られた結果と逆解析の結果（産業技術総合研究所ほか、2021）を併せて考察する。図 2-1- 28 にグローバル感度解析と逆解析結果の概要を示す。なお、以下の逆解析の結果では、水圧（全水頭）と $\delta^{18}O$ を使用した結果に着目して議論する。グローバル感度解析の結果によると、地表付近の観測値に対して、第四紀堆積物（hs）、新富士火山噴出物（qvn）、古富士火山噴出物（qvo）、第四紀堆積岩（qs）の透水係数は感度が認められた。このことは、逆解析の結果において、これらの推定誤差が小さいこととも整合的である。これらのことから、地表付近で取得された観測値を使用して、透水係数の逆解析をした場合、浅部に分布する地質区分の透水係数は推定できることが示唆された。ただし、Sobol' 法による 2 次の感度指標（S_2）から、新富士火山噴出物（qvn）と古富士火山噴出物（qvo）、古富士火山噴出物（qvo）と第四紀堆積岩（qs）で交互作用があると推測された。逆解析を実施した場合、これらの透水係数を一意に決定できない可能性がある。このため、推定開始時の透水係数を変えて逆解析を実施することや、これらの透水係数値について文献を再調査することが必要になると考えらえる。一方、地表付近の観測値に対して、深部の新第三紀堆積岩（ns）や付加コンプレックス（ncom）、断層（fault）の透水係数は感度が認められなかった。このことは、逆解析の結果において、これらの推定誤差が大きいこととも整合的である。以上より、地表付近で取得された観測値では、深部に分布する地質区分の透水係数は推定が困難であることが示唆された。

本節の冒頭でも述べたように、逆解析（GML 法）では、推定値近傍の感度しか計算しない。このため、逆解析のみでは、推定誤差が大きい場合に、推定結果近傍の感度だけ小さいのか、広い値域にわたって感度が小さいのか判断できない。このため、グローバル感度解析を併用し、広い値域にわたって透水係数の感度を調べることで、逆解析で得られた結果の解釈を補うことができる。

文献で得られる観測値は、数量も少なく、空間的には疎に分布する。これらは、地下水モデルの校正を行う上で、十分でないことが多いと予測される。このことから、逆解析前に、グローバル感度解析によって、推定対象とする透水係数の感度を順位付けすること（ranking）、感度がない透水係数を特定すること（screening）が有効であると考えられる。

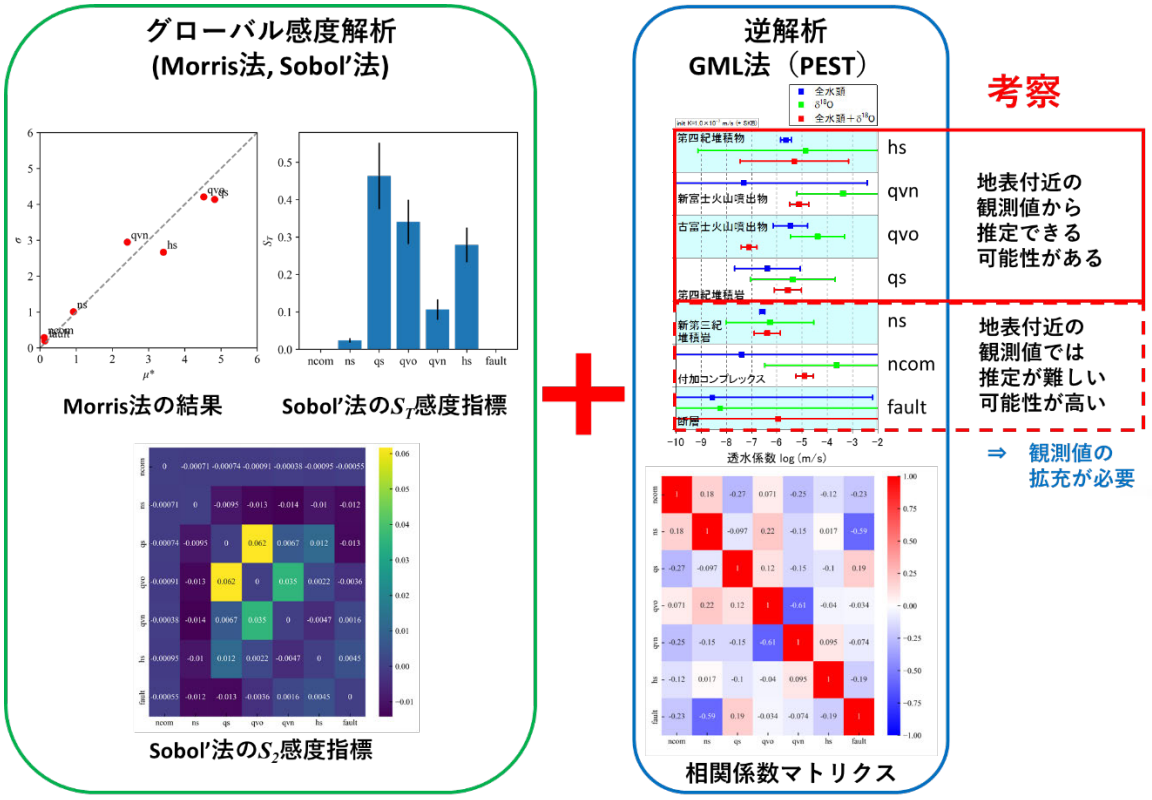


図 2-1- 28　グローバル感度解析と逆解析結果の概要

④　海水準変動に伴う塩淡境界の挙動の評価

ここまでは、駿河湾沿岸部を対象にした地下水モデルの校正について、議論してきた。しかしながら、沿岸部は、海水準変動に伴って地下水流況が変化する可能性が示されている。このため、沿岸域における地下水流動場の長期的な安定性を担保するためには、氷河性海水準変動による地下水流況の変化を解析的に評価する必要がある。ここでは、単一地形勾配モデルを使用した数値解析によって、海水準変動変動に伴う地下水流況の変化を検討する。

海水準変動中の地下水流況に大きく影響を与える因子として、地層の透水係数と地形勾配の 2 つが考えられる。この理由は、地層の透水係数は海水準変動中の淡水および塩水地下水の流動速度に深く関与し、地形勾配は海水準が変動する範囲と動水勾配の大きさに関与するためである。これまでに、海水準変動を考慮した地下水流動解析（長谷川・宮川、2001 ; 登坂、2002）、さらに滞留時間も考慮した解析は行われている（長谷川・宮川、2009）。しかしながら、透水係数と地形勾配が、海水準変動中の塩分および地下水の滞留時間分布に及ぼす影響は十分に検討されていない。これらのことから、ここでは、透水係数と地形勾配が海水準変動中の地下水流動、塩分分布、滞留時間分布に与える影響を明らかにすることを目的とする。このような検討から、海水準変動を考慮しても地下水が長く地下に留まる水理地質的・地理的特徴が抽出できれば、処分場候補地点や調査地点の合理的な選定に有用であると考えられる。

数十万年前以降の氷河性海水準変動は、約 10 万年周期で発生していると考えられており、特に約 14 万年以降の海退時には 10 万年で海水準は約 125 m ほど低下し、海進時には 2 万年で元の水位まで上昇すると考えられている（たとえば、Chappell et al., 1996）。ここでの解析において、海水準は現海水準を 0 m とし、標高+5 ～ -120 m を 12 万年周期で変動するものとして仮定した。地下水流動・物質移行解析で考慮した海水準変動を図 2-1- 29 に示す。横軸に経過時間、縦軸に海水準を示す。

本検討では、単一地形勾配の 2 次元鉛直モデルを構築した。地形勾配の差異を検討するため、2%の地形勾配、5%の地形勾配の 2 つのモデルを構築した（図 2-1- 30）。地形勾配 2%モデルのモデル長は 40 km であり、地形勾配 5%モデルのモデル長は 30 km となる。モデルは単一地形勾配であり、海水準の変動量を図 2-1- 29 で仮定していることから、海水準の水平方向の移動距離（最大海進から最大海退までの距離）は計算できる。海水準の水平方向の移動距離は、地形勾配 2%では 6,250 m、地形勾配 5%では 2,500 m となる。このように、地形勾配が小さいほど、海水準変動による汀線の移動距離は長くなり、海水準変動が地下水流況に与える影響範囲も広くなる。一方、地形勾配が小さければ、動水勾配も小さくなる。このため、地形勾配が小さいと、海退中に塩水地下水を洗い出す動水勾配は小さくなり、塩水地下水が沿岸海底下に残存する可能性は高くなると推測される。

地下水流動・物質移行解析では、海水準変動を考慮して、非定常解析で実施した。解析には FEFLOW（Diersch, 2014）を使用した。地下水流動解析において、不飽和状態は考慮していない。滞留時間は、モデル内に一定速度で仮想的な物質を発生させ、解析結果の物質濃

度を発生量で除すことで求めた（Goode, 1996）。解析モデルの物性値および境界条件を表 2-1- 7 に示す。表 2-1- 7 に記載の解析条件は、地形勾配 2%モデル、地形勾配 5%モデルともに同じである。透水係数は、10^{-7}、$10^{-7.5}$、10^{-8}、$10^{-8.5}$、10^{-9} m/s と変化させて解析を行い、結果の比較を行った。また、解析モデルは地質区分や不均質性は考慮せず、モデル全体に均質な物性分布を仮定した。

海水準変動は、時間の経過とともに地表面の境界条件を変化させることで表現した。表 2-1- 7 に記載のとおり、解析時間は 36 万年とした。海進と海退を合わせた海水準変動の 1 周期は 12 万年と仮定したことから、36 万年の解析時間は海水準変動を 3 周期分計算することとなる。また、塩分の初期条件は、現海水準での定常解析を実施し、その解析結果を適用した。また、滞留時間の初期条件は 0 年とした。ここでの解析は、非定常解析を行うことから、ここで計算される滞留時間は、解析開始時を 0 年とした相対的な値となる。以上に示す解析は、FEFLOW の python API を使用して機能拡張を行ったコードを用いた。

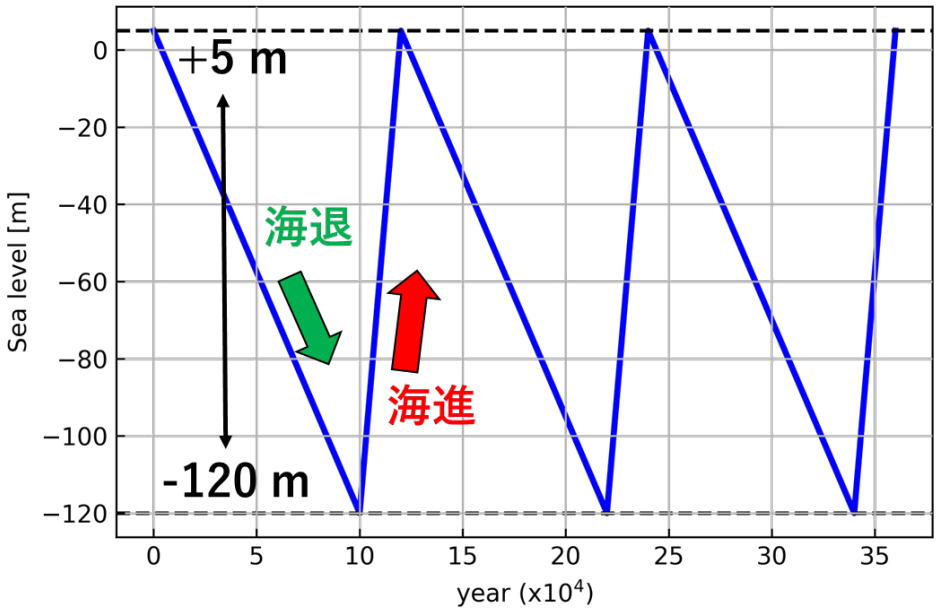
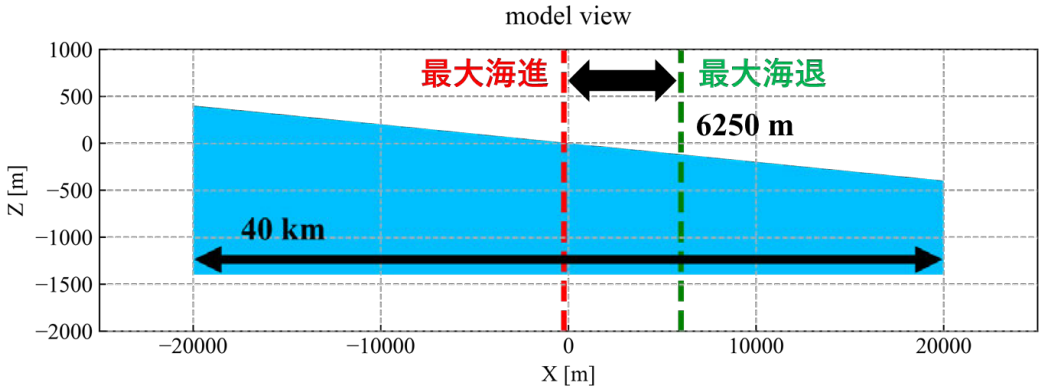
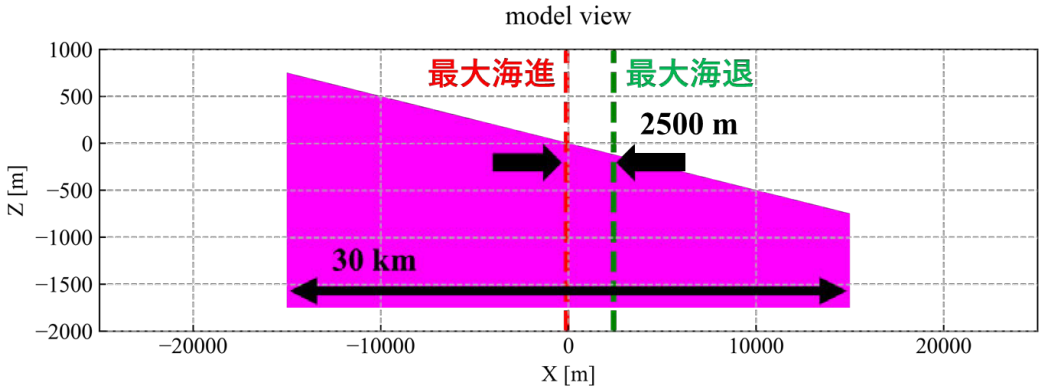


図 2-1- 29　解析で考慮した海水準変動



(a)　地形勾配 2%モデル



(b)　地形勾配 5%モデル

図 2-1- 30　単一地形勾配の 2 次元鉛直モデル

表 2-1- 7 海水準変動解析の解析条件

パラメータ・境界条件など	設定値
透水係数	10^{-7}, $10^{-7.5}$, 10^{-8}, $10^{-8.5}$, 10^{-9} m/s
間隙率	20%
分散長	縦分散長：50 m 横分散長：5 m
飽和・不飽和	飽和のみ
降雨浸透量	1000 mm/y
海水準の変動量	海進：+5 m, 2 万年 海退：-120 m, 10 万年
解析時間	36 万年 （1 周期 12 万年×3）
滞留時間の計算	水理的滞留時間 （Goode, 1996）
初期条件	現海水準における定常解析結果
陸側地表面の境界条件	全水頭：降雨境界条件 塩分：流量依存型 $Q \geq 0 : C = 0$ $Q < 0 : \partial C / \partial x = 0$ 滞留時間：流量依存型 $Q \geq 0 : C = 0$ $Q < 0 : \partial C / \partial x = 0$
海底面の境界条件	全水頭：海水換算の水頭値 塩分：海水濃度固定 滞留時間：流量依存型 $Q \geq 0 : C = 0$ $Q < 0 : \partial C / \partial x = 0$

塩水域の拡がりや滞留時間分布の拡がりを要約する指標を定義することで、地形勾配と透水係数を変えたことが地下水流況に与える影響を比較する。塩水浸入に関する数値解析では、解析条件間の塩水浸入の度合いを比較するために、海水体積（Seawater volume）と呼ばれる指標が用いられている（Ketabchi and Jahangir, 2021）。ここでは、この指標を参考に、相対塩水体積を新たに定義し、地形勾配と透水係数が塩水域の拡がりに与える影響を比較する。海水体積は、解析モデル中の海水由来の塩水地下水の体積として定義されている。

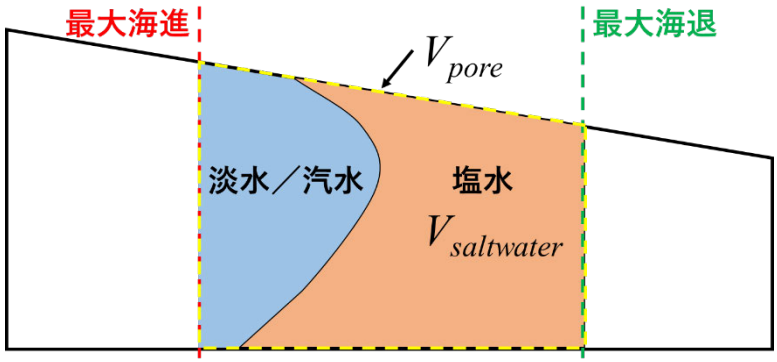
しかしながら、地形勾配が異なる 2 つのモデル（図 2-1- 30）は、モデル長が異なることから、海水体積を指標として比較することは適切でない。そこで、ここでは、相対塩水体積は、ある領域の間隙体積に対して塩水が占める割合、として定義した。相対塩水体積が大きいほど、ある領域内で塩水が広く分布することを示す。相対塩水体積は、以下の式で計算した。

$$RSV = \frac{V_{saltwater}}{V_{pore}} \times 100 \quad [\%] \qquad (2\text{-}1\text{-}15)$$

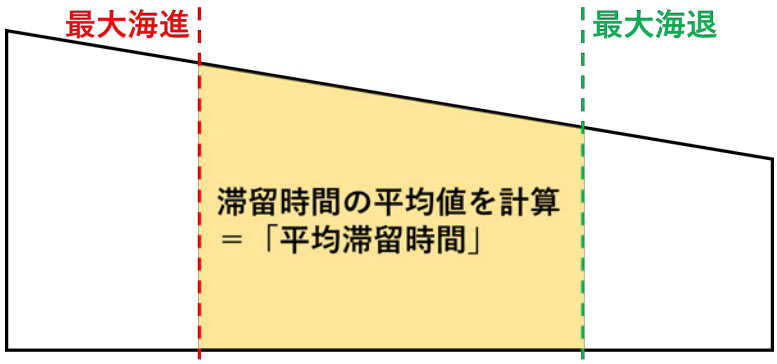
ここに、$V_{saltwater}$ はある領域内の塩水体積で、V_{pore} はある領域内の間隙体積である。なお、塩水は、海水を 1 とした塩分の比濃度で 0.9 以上とした。

滞留時間分布の拡がりを要約する指標として、ある領域内の滞留時間を平均した平均滞留時間を新たに定義した。この指標を用いて、地形勾配と透水係数が滞留時間分布の広がりに与える影響を比較する。

ここでの海水準変動解析において、最大海進から最大海退までの範囲の地下水流況に着目した。このことから、相対塩水体積および平均滞留時間を計算する領域は、最大海進から最大海退までの範囲とした。相対塩水体積および平均滞留時間を計算する領域の概要を図 2-1- 31 に示す。



(a)　相対塩水体積



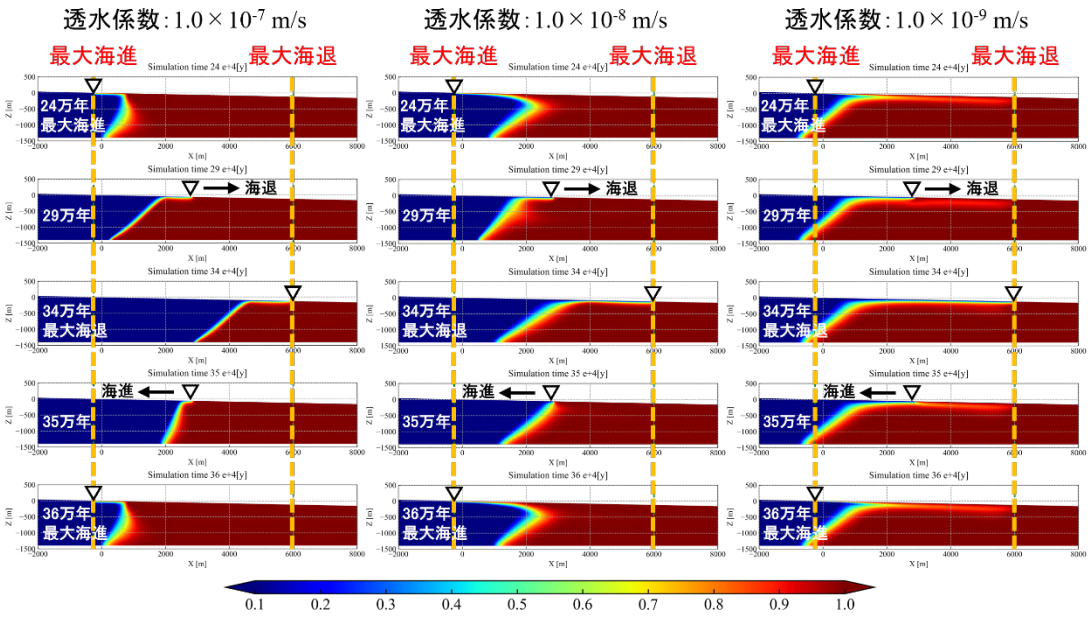
(b)　平均滞留時間

図 2-1- 31　相対塩水体積および平均滞留時間を計算する領域の概要図

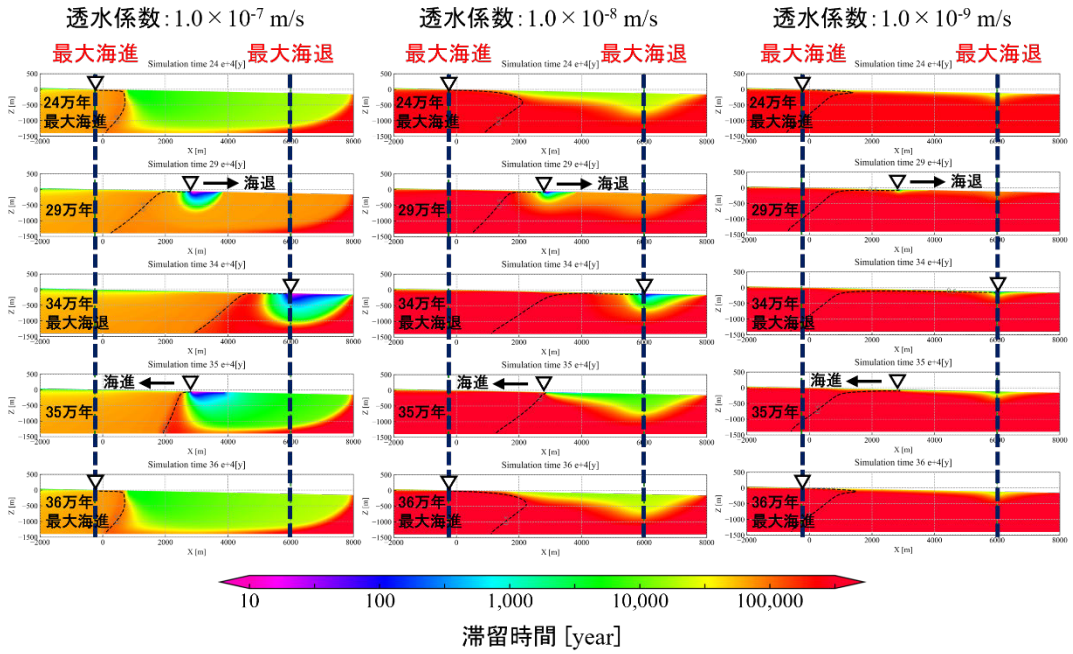
図 2-1- 32 に地形勾配 2%モデルの 24 万年～36 万年の解析結果を示す。透水係数が 10^{-7}、10^{-8}、10^{-9} m/s のときの解析結果を示している。また、上から下に向かって 24 万年～36 万年の解析結果である。図 2-1- 32 (a)は塩分の解析結果であり、図 2-1- 32 (b)は滞留時間の解析結果である。また、図 2-1- 32 (b)の黒点線は、海水を 1 とした塩分の比濃度が 0.5 の位置である。透水係数が 10^{-7} m/s のとき、塩淡境界は海水準変動に追従して移動した。さらに、海水準変動に伴って、海水由来の塩水が浸透し、地下水の滞留時間は短くなった。特に、海退時に比べ、海進時の方が滞留時間は顕著に短くなった。海進時は、海退時に比べて短い期間で海水準が遷移し、これに伴い、淡水の流出と塩水の浸透が促進されたことに起因すると考えられる。一方、透水係数が小さくなるにつれ、海水準変動が移動する距離に対して、塩淡境界が遷移する距離は小さくなった。透水係数が 10^{-9} m/s のとき、海水準変動が地下水流況に与える影響は小さく、海退時に淡水化する領域は浅部のみであった。また、滞留時間は、淡水域と塩水域のどちらでも長くなった。

図 2-1- 33 に地形勾配 5%モデルの 24 万年～36 万年の解析結果を示す。地形勾配 2%モデルの結果と同様に、透水係数が 10^{-7}、10^{-8}、10^{-9} m/s のときの解析結果を示している。また、上から下に向かって、24 万年～36 万年の解析結果である。図 2-1- 33 (a)は塩分の解析結果であり、図 2-1- 33 (b)は滞留時間の解析結果である。また、図 2-1- 33 (b)の黒点線は、海水を 1 とした塩分の比濃度が 0.5 の位置である。塩分分布の結果について、地形勾配 2%モデルの結果と比較すると、いずれの透水係数においても、淡水地下水が海底下に張り出した。これは、地形勾配が大きいことから、動水勾配も大きくなり、淡水地下水で塩水が洗われるためである。海水準変動に伴う塩分分布の遷移の傾向は、各々の透水係数で地形勾配 2%モデルと同等である。ただし、上述のように、淡水地下水が海底下に広く分布することから、塩淡境界の移動距離は短くなった。滞留時間の結果について、透水係数が小さくなるにつれ、淡水域および塩水域で滞留時間が長くなる傾向は、地形勾配 2%と同じであった。一方、海進時における海水由来の若い塩水地下水は深部まで侵入できていない。これは、地形勾配が大きいことと、海水準変動中の塩淡境界の移動距離が短いこと、から若い塩水地下水の侵入深度が制限されたためと推測される。

これらの結果は、地形勾配と透水係数によって、海水準変動が地下水に与える影響は異なることを意味する。さらに、地形勾配が大きくても、透水係数が小さければ、海水準変動の影響は地下深部に及ばないと考えられる。これは、沿岸部でのボーリング調査の事例において、地下深部の透水係数が小さい地層で化石海水が観測された報告とも整合的である（長谷川ほか、2013）。



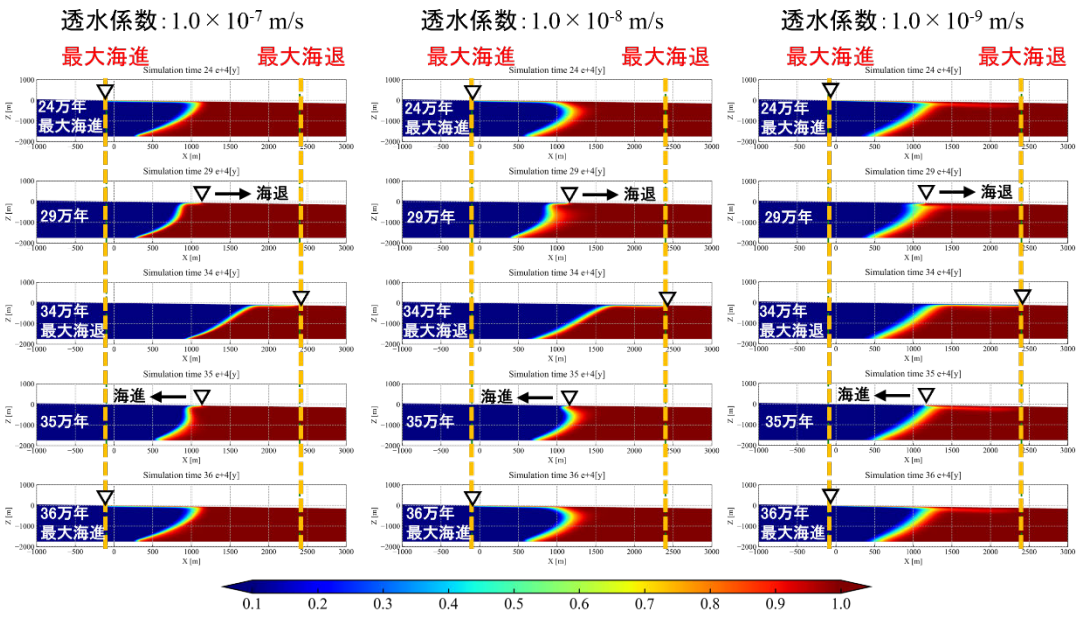
(a)　塩分分布



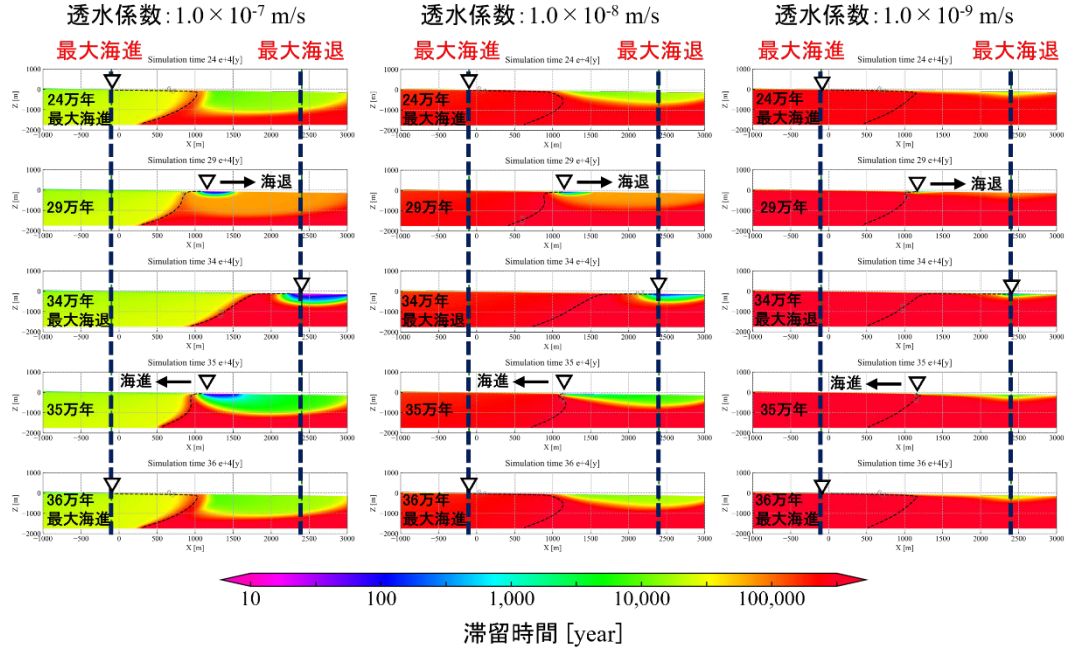
(b)　滞留時間分布

（黒点線は、海水を 1 とした塩分の比濃度が 0.5 の位置である）

図 2-1- 32　地形勾配 2%モデルの解析結果（24 万年～36 万年）



(a)　塩分分布

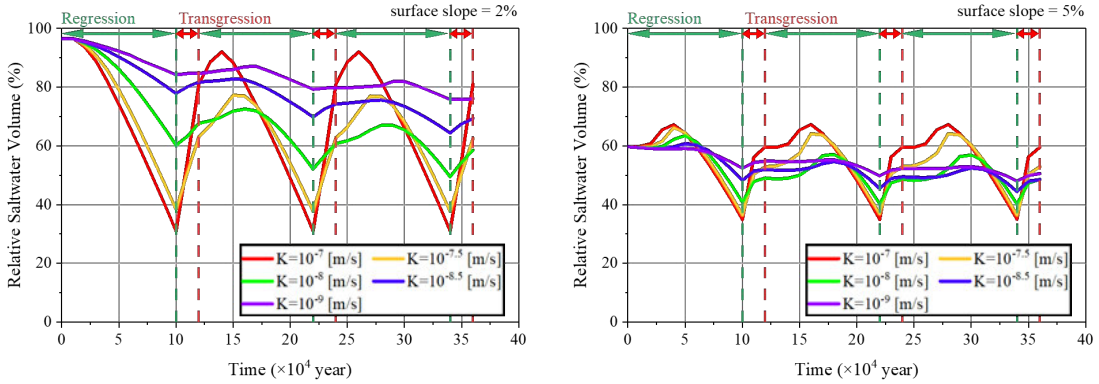


(b)　滞留時間分布

（黒点線は、海水を 1 とした塩分の比濃度が 0.5 の位置である）

図 2-1- 33　地形勾配 5%モデルの解析結果（24 万年～36 万年）

相対塩水体積（以下、RSV）の経時変化を図 2-1- 34 に示す。図 2-1- 34 (a)は地形勾配 2%モデル、図 2-1- 34 (b)は地形勾配 5%モデルの結果を示す。地形勾配 2%モデルに比べて、地形勾配 5%モデルの RSV は小さい。これは、地形勾配が大きいと動水勾配も大きくなり、海水準変動開始時（定常状態）から淡水地下水が海側に張り出しているためである。このことから、地形勾配が大きい場合、淡水地下水が存在する領域は広くなる。RSV の変動量は、地形勾配 2%モデルよりも地形勾配 5%モデルの方が小さいが、RSV の最小値（最大海退時）を比較すると、大きな差異はない。以上のことから、図 2-1- 34 中の地形勾配による RSV の差異は、淡水地下水が海底下に張り出す度合いが大きく起因していると考えられる。このことは、地形勾配が大きい場合、海水準変動中に淡水地下水と塩水地下水が入れ替わる領域は狭くなるものの、海底下に淡水地下水が広く分布する可能性を示す。



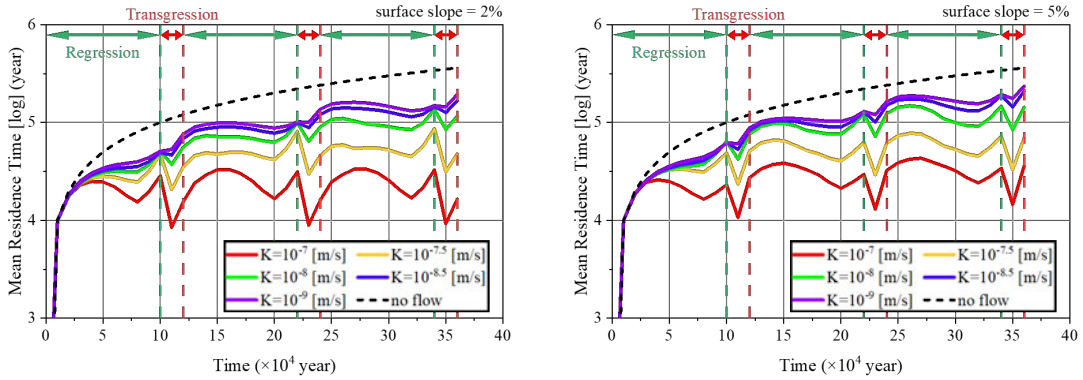
(a)　地形勾配 2%モデル　　(b)　地形勾配 5%モデル

図 2-1- 34　相対塩水体積（RSV）の経時変化

平均滞留時間（以下、MRT）の経時変化を図 2-1- 35 に示す。図 2-1- 35 (a)は地形勾配 2%モデル、図 2-1- 35 (b)は地形勾配 5%モデルの結果を示す。ここで、MRT は常用対数上で計算しているため、MRT が 5 であれば、10 万年であることを示す。図 2-1- 35 の黒点線は解析の経過時間を示す。地下水流動が全くない場合、滞留時間は解析の経過時間と同じになる。地形勾配 2%モデル、5%モデルの両者で、MRT の経時変化は海水準の変動に対応した周期性が認められる。透水係数が 10^{-7} m/s のとき、MRT は同じ変動幅（振幅）で推移しており、このときの MRT の最大値は概ね 4.5（約 3 万年）であった。これは、図 2-1- 32 や図 2-1- 33 で示すように、透水係数が大きい場合、海水由来の塩水地下水が地下に侵入することによって、地下水の滞留時間が短くなるためと考えられる。一方、透水係数が小さくなるにつれ、MRT の周期的な変動量は小さくなり、MRT は増加する傾向になった。また、透水係数が小さいとき（透水係数が $10^{-8.5}$、10^{-9} m/s）の MRT は、地形勾配によらず、概ね同じ傾向を示した。

透水係数および地形勾配の解析条件と RSV や MRT の結果を整理すると、地形勾配 5%

以下でかつ透水係数が 10^{-9} m/s ほどの透水係数を有する地層であれば、滞留時間の長い塩水地下水が存在できると考察できる。



(a)　地形勾配 2%モデル　　(b)　地形勾配 5%モデル

図 2-1- 35　平均滞留時間（MRT）の経時変化

地形勾配と透水係数が海水準変動中の地下水流動、塩分分布、滞留時間に与える影響を明らかにすることを目的に、海水準変動を考慮した地下水流動・物質移行解析を実施した。さらに、相対塩水体積や平均滞留時間を定義して、解析条件間の結果を比較した。

透水係数が大きい場合、塩淡境界は海水準変動による汀線の移動に追従した。さらに、海水準変動に伴って海水由来の塩水地下水が浸透することで、地下水の滞留時間は短くなった。一方、透水係数が小さくなるにつれ、淡水と塩水地下水の入れ替わる領域は浅部に制約されていき、滞留時間が長い塩水地下水が広く分布する。

地形勾配が大きい場合、動水勾配が大きくなり、海側での淡水地下水の分布は広くなる。一方、沿岸海底下で淡水地下水が広く分布することから、海退・海進時に、淡水地下水と塩水地下水が入れ替わる領域は狭くなる。

ここでは、単一地形勾配を仮定した数値実験ではあるが、解析結果から、地形勾配 2%以下で、かつ 10^{-9} m/s 程度の透水係数を有する地層であれば、滞留時間の長い塩水地下水が広く分布する可能性を示した。また、海水準変動解析において滞留時間も計算することで、地下水の長期的な安定性を議論することができた。このことは、実際のフィールドにて、氷期降水や化石海水の存在を地下水年代測定から調べることの重要性を支持していると考えられる。

（4） まとめ

地質モデルの不確実性が地下水流動に与える影響を明らかにし、不確実性を低減するための方策を示すことを目的として、駿河湾沿岸部を対象とした地質モデル作成ならびに地下水流動解析の事例研究を実施した。

2021 年度は、$\delta^{18}O$ の観測値と再収集した水圧・水位の観測値を用いて、逆解析（GML 法）による透水係数の推定を行った。この結果によると、浅部地質区分の透水係数の推定誤差は小さく、これらの透水係数の推定値には深度依存性が認められた。一方、深部の地質区分や断層の透水係数では、推定誤差が大きく、これらの透水係数を推定できないことが示唆された。

地表で取得した観測値に加えて、ボーリング調査で取得した観測値も用いて、透水係数の推定を行った。この結果、透水係数の推定値は大幅に改善されなかった。一方、このとき、相関係数マトリクスに僅かな改善が確認されたことから、透水係数の感度は改善された可能性を示した。このことは、ボーリング調査で取得した観測値が透水係数の推定に有効であることを示唆した。しかしながら、ここでは、ボーリング孔 1 本の観測値を追加しただけである。透水係数の推定値を大幅に改善し、確からしい推定結果を得るには、複数本のボーリング孔の調査結果が必要になると考えられる。

これまで、地質区分ごとの透水係数を対象に逆解析を行ってきた。しかしながら、地質区分ごとに透水係数を推定することは、地質区分内での透水係数の不均質性を考慮しておらず、推定された透水係数の空間分布は地質区分の分布に依存する。そこで、Pilot Point 法による透水係数分布の推定を試みた。数値実験を実施した結果、透水係数分布を推定できる可能性があることを確認できた。しかしながら、文献から収集した観測値を使用して、透水係数分布の推定した結果、透水係数は修正されず、推定開始時の Pilot Point 地点の透水係数を Kriging しただけの透水係数分布が得られた。これは、Pilot Point を地表付近に配置したことが原因と推測される。また、Pilot Point 地点の同定率を計算し、マッピングした。同定率は駿河湾沿岸域で値が大きくなったことから、駿河湾沿岸域に Pilot Point を多く配置することで、推定結果が改善することが期待された。今後、Pilot Point を 3 次元的かつモデル領域に粗密をつけて配置し、透水係数分布の推定結果を改善できるか試みる。Pilot Point 法による透水係数分布が確からしく推定できた場合、各々の Pilot Point で透水係数の推定誤差や同定率が計算できる。これらの情報は、不確実性が高い地点や領域を判断することに有用であり、ボーリング調査地点の選定に資すると考えられる。

逆解析は推定値近傍の感度のみを使用して、入力パラメータを推定する手法であり、入力パラメータの感度は広い値域で評価できない。このため、今年度は、広い値域で感度を調べることができるグローバル感度解析（Morris 法と Sobol'法）を実施した。グローバル感度解析と逆解析で得られた結果を相補的に考察することで、地表付近で取得された観測値から推定できる地質区分の透水係数を調べた。

グローバル感度解析の結果では、浅部の地質区分の透水係数に感度が認められた。これは、

地表付近の観測値から、これらの透水係数が推定できる可能性があることを示唆する。さらに、富士山体を構成する古富士火山噴出物は、上層の新富士火山噴出物、下層の第四紀堆積岩と交互作用を伴って、解析結果に影響を及ぼすことが分かった。一方、深部の地質区分や断層の透水係数の感度は、小さかった。この結果は、逆解析において、これらの推定誤差が大きかったこととも整合的であった。このことは、地表付近の観測値からでは、これらの透水係数を推定できないことを示唆する。以上より、深部の地質区分や局所的な構造である断層の透水係数を推定するには、ボーリング調査による観測値の拡充が必要であると考えられる。

このように、広い値域で感度を調べられるグローバル感度解析は、逆解析で得られた推定値や推定誤差の解釈を補助できる。さらに、感度が小さい地質区分を特定できることは、不確実性が大きい地質区分を特定できることを意味する。これは、ボーリング調査地点の選定などに利用できる情報である。グローバル感度解析や逆解析などの方法で地下水モデルの不確実性を定量化し、これを調査に反映していくことで、地質環境モデルの不確実性を低減できると考えられる。

地形勾配と透水係数は、沿岸域の地下水流況に与える影響が大きいと考えらえる。このため、地形勾配と透水係数が海水準変動中の地下水流動、塩分分布、滞留時間に与える影響を明らかにすることを目的に、海水準変動を考慮した地下水流動・物質移行解析を実施した。地形勾配が小さいとき、動水勾配も小さく、沿岸海底下に塩水地下水は広く分布した。さらに、透水係数が小さいとき、淡水と塩水地下水の入れ替わる領域は浅部に制約され、滞留時間が長い塩水地下水は沿岸海底下に広く分布した。ここでの結果は単一地形勾配のモデルを仮定した数値実験ではあるが、地形勾配が 2%以下で、かつ透水係数が 10^{-9} m/s 以下の地層であれば、滞留時間の長い塩水地下水は広く分布する可能性を示した。また、滞留時間を考慮することによって、海水準変動による淡水と塩水の入れ替わりや長期的な安定性を議論できた。これは、実際のフィールドにおいて、古い地下水年代を評価できる指標（^{4}He や ^{14}C 年代測定）の調査が重要であることを示す。

参考文献

Aquanty Inc., HydroGeoSphere (HGS) Theory Manual, 2015.

Campolongo, F., Cariboni, J. and Saltelli, A., An effective screening design for sensitivity analysis of large models, Environmental Modelling & Software, Vol. 22, 2007, pp.1509-1518.

Chappell, J., Omura, A., Esat, T., McCulloch, M., Pandolfi, J., Ota, Y. and Pillans, B., Reconciliation of late Quaternary sea levels derived from coral terraces at Huon Peninsula with deep sea oxygen isotope records, Earth and Planetary Science Letters, vol.141, Issues1-4, 1996, pp.227-236.

Diersch, H.J.G., FEFLOW Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media, Springer, 2014.

Doherty, J., Ground Water Model Calibration Using Pilot Points and Regularization, Groundwater, Vol. 41, No. 2, 2003, pp.107-177.

Doherty, J., Calibration and Uncertainty Analysis for Complex Environmental Models PEST: complete theory and what it means for modelling the real world, Watermark Numerical Computing, 2015.

Doherty, J.E., Fienen, M.N. and Hunt, R.J., Approaches to Highly Parameterized Inversion: Pilot Point Theory, Guidelines, and Research Directions, Scientific Investigations Report 2010-5168, USGS, 2010.

Doherty, J. and Hunt R.J., Two statistics for evaluating parameter identifiability and error reduction, Journal of Hydrology, Vol. 366, 2009, pp.11-127.

Doherty, J.E. and Hunt, R.J., Approaches to Highly Parameterized Inversion: A Guide to Using PEST for Groundwater-Model Calibration, Scientific Investigation Report 2010-5169, USGS, 2010.

動力炉, 核燃料開発事業団,日本の地盤を対象とした透水係数データベースの作成, 動力炉・核燃料開発事業団, 1996, PNC TN7450 96-002.

Goode, D.J., Direct simulation of groundwater age, Water Resources Research, vol.32, No.2, 1996, pp.289-296.

長谷川琢磨, 五十嵐敏文, 田中靖治, 土 宏之, 小野文彦, 沿岸海底下の地下水流動状況に関する数値解析的検討, 地下水学会誌, 第 43 巻, 第 4 号, 2001, pp.289-300.

長谷川琢磨, 宮川公雄, 海水準変動を考慮した地下水流動解析モデルの検証―花崗岩が分布する沿岸域を対象として―, 電力中央研究所報告, 研究報告:N08013, 2001.

長谷川琢磨, 中田弘太郎, 近藤浩文, 五嶋慶一郎, 村本茂則, 富岡祐一, 後藤和幸, 柏谷公希, 沿岸域における地下水の流動性の年代測定による評価―三浦半島西部沿岸域でのボーリング調査―, 地学雑誌, 122 巻, 1 号, 2013, pp.116-138.

Herman, J. and Usher, W., SALib: An open-source Python library for Sensitivity Analysis,

The Journal of Open Source Software, 2(9), 97, 2017

本間俊充, Global 感度解析－Sobol'法, オペレーションズ・リサーチ学会, 機関誌 55 巻, 10 号, 2010, pp.627-631.

Hunt, R.J., Doherty, J. and Tonkin, M.J., Are Models Too Simple? Arguments for Increased Parameterization, Groundwater, Vol. 45, No. 3, 2007, pp.254-262.

核燃料サイクル開発機構, 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築―平成 17 年取りまとめ― ―分冊 1 深地層の科学的研究―, 核燃料サイクル開発機構, 2005, JNC TN1400 2005-014.

Ketabchi, H. and Jahangir, M.S., Influence of aquifer heterogeneity on sea level rise-induced seawater intrusion: A probabilistic approach, Journal of Contaminant Hydrology, Vol. 236, 103753, 2021.

香田正人, 本間俊充, 感度解析について, オペレーションズ・リサーチ学会, 機関誌 55 巻, 10 号, 2010, pp.613-621.

Kumar, D., Singh, A., Kumar, P., Jha, R.K, Sahoo, S.K. and Jha, V., Sobol sensitivity analysis for risk assessment of uranium in groundwater, Environmental Geochemistry and Health, Vol. 42, 2020, pp.1789-1801.

国土交通省国土政策局：全国地下水資料台帳, https://nlftp.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/water/f9_exp.html（最終確認 2022.03.22）.

国土交通省, 国土地盤情報検索サイト Kunijiban, KuniJiban (pwri.go.jp)（最終確認 2021.05.25）.

Morris, M.D., Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments, Technometrics, Vol. 33, No. 2, 1991.

村本敏夫, 岸 和男, 地下水の塩水化についての研究―第 1 報 溶岩帯水層の水理地質学的性質―, 地質調査所月報, 第 18 巻, 第 6 号, 1967, pp.379-392.

Nossent, J., Elsen, P. and Bauwens, W., Sobol' sensitivity analysis of a complex environmental model, Environmental Modelling & Software. Vol. 26, 2011, pp.1515-1525.

小野昌彦, 井川怜欧, 町田 功, 丸井敦尚, 村中康秀, 神谷貴文, 大山康一, 伊藤 彰, 水文環境図 No.9「富士山」. 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2016, https://gbank.gsj.jp/WaterEnvironmentMap/contents/fujisan/fujisan/fujisan.htm（最終確認 2023.03.06）.

Pianosi, F., Beven, K., Freer, J., Hall, J.W., Rougier, J., Stephenson, D.B. and Wagener, T., Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow, Environmental Modelling & Software, Vol. 79, 2016, pp.214-232.

Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F. and Ratto M., Sensitivity Analysis in Practice:

A Guide to Assessing Scientific Models, Wiley, ISBN: 978-0-470-87093-8, 2004.
産業技術総合研究所, 平成 26 年度 海域地質環境調査確証技術開発成果報告書, 2015.
産業技術総合研究所, 海域地質環境調査確証技術開発成果報告書 3 箇年とりまとめ（総括報告書）, 2016.
産業技術総合研究所, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 平成 31 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（沿岸部処分システム評価確証技術開発）成果報告書, 2020.
産業技術総合研究所, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 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（沿岸部処分システム評価確証技術開発）成果報告書, 2021.
産業技術総合研究所, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 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（沿岸部処分システム評価確証技術開発）成果報告書, 2022.
関根一郎, 西牧 均, 石垣和明, 原 敏明, 斎藤 章, 岩石の比抵抗値とその力学的性質とその関係, 土木学会論文集, No.541, III-3, 1996, pp.75-86.
静岡県, 静岡県地質情報システム, 静岡県地理情報システム（pref.shizuoka.jp）（最終確認 2021.05.25）.
Sobol', I. M., Global Sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates, Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 55, Issue 1-3, 2001, pp.271-280.
Song, X., Zhang, J., Zhan, C., Xuan, Y., Ye, M. and Xu, C., Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications, Journal of Hydrology, Vol. 523, 2015, pp.739-757.
Tonkin, M.J. and Doherty, J., A hybrid regularized inversion methodology for highly parameterized environmental models, Water Resources Research, Vol. 41, 2005, W10412.
Tonkin, M. and Doherty, J., Calibration-constrained Monte Carlo analysis of highly parameterized models using subspace techniques, Water Resources Research, Vol. 45, 2009, W00B10.
登坂博行, 地質時間にわたる塩淡遷移帯の形成過程と形態変化に関する数値解析的検討（その 2）―動的境界条件下における検討―, 応用地質, 第 43 巻, 第 5 号, 2002, pp.306-315.
戸崎裕貴, 浅井和由, 富士山の地下水年代, 地学雑誌, 第 126 巻 1 号, 2017, pp.89-104.
Watermark Numerical Computing, PEST Model-Independent Parameter Estimation User Manual Part I: PEST, SENSAN and Global Optimisers, 7th Edition, 2018a.
Watermark Numerical Computing, PEST Model-Independent Parameter Estimation User Manual Part II: PEST Utility Support Software, 7th Edition, 2018b.

Wicaksono, D., gsa-module, 2016, https://gsa-module.readthedocs.io/en/develop/index.html（最終確認 2023.03.03）
安原正也, 風早康平, 丸井敦尚, 富士山の地下水とその涵養プロセスについて, 富士火山, 山梨県環境科学研究所, 2007, pp.389-405.
山本荘毅, 富士山とその周辺の陸水, 「富士山」富士山総合学術調査報告書, 富士急, 1971, pp.151-209.

２－２　塩淡境界近傍における地下水流動解析の高度化

（１）　背景と目的

沿岸部における高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、塩淡境界の下位に分布する化石海水を含んだ領域が処分場となる可能性がある（図 2-2-1、図 2-2-2）。そのため、流動性の塩水系地下水が胚胎される領域は、処分場に至る地下坑道（アクセス斜坑）が通るエリアとなりうるが、地下坑道を構成するコンクリート構造物（支保工及び履工）の空洞安定性には、地下水中の塩分が大きく関係する。そのため、地下坑道および処分場周辺の淡水系地下水と塩水系地下水の移り変わりを予報することは、施設建造時の安全につながる。また、海底下の塩水系地下水は、緩慢ながらも流動している可能性があり、それは海域から陸域へ向かい、塩淡境界を通って再び海に流出すると推定される（Reilly and Goodman, 1985）。そのため、人工バリアを通過した核種はこの塩水系地下水の流動の影響を受け、処分システムの安全評価に影響を及ぼす可能性がある。このような淡水系地下水と塩水系地下水の挙動を知るための手法として、移流・分散と密度の違いを考慮した地下水モデル（本節では、密度流解析と呼ぶ）が有効とされている。

密度流解析に限らず、一般にソフトウェア（解析コード）の利用の前には物理モデル（例：室内実験）との比較・検証が必要とされる。例えば、小田ほか（2010）は、室内試験で得られた塩淡境界の位置（塩分濃度の分布）と密度流解析結果との比較をおこない、おおむね一致する結果を得ている。一方、その解析コードがフィールドにて適用可能かどうかはまた別の検証が必要と思われる。なぜなら、フィールドにおいては、解析コードで考慮されていない自然現象が存在しうるためであり（Anderson et al., 2016）、そのうち良く知られた現象としては非ダルシー流が挙げられる（King, 1898）。これは動水勾配が小さいときには、ダルシーの法則から予想されるフラックス／動水勾配が小さくなるという現象である（図 2-2-3）。非ダルシー流を扱った邦文レビューには、安原・開発（1981）があるが、地層処分研究においてもその重要性は認識されており、高橋ほか（2004）は非ダルシー現象を組み込んだ 2 次元非定常地下水流動解析をおこなっている。非ダルシー流はモデルの不確実性の一例であるが、特に塩水系地下水流動に関しては、同様の（一般的な解析コードで実装されていない）自然現象が存在する可能性が低いとは言い切れない。なぜなら、塩水系地下水流動に関しては、淡水系地下水流動と比較して調査事例が極端に少なく、その実態が多くの研究者によって検証されていないためである。

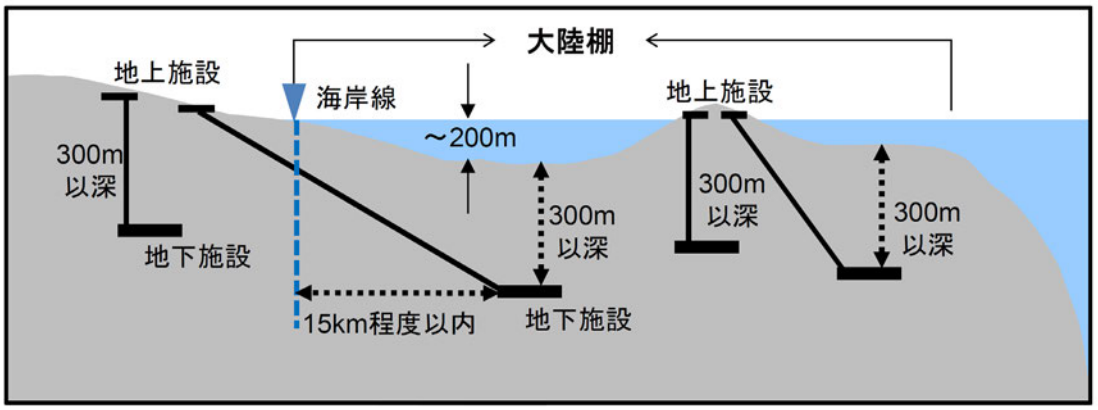


図 2-2- 1 沿岸部における地下施設設置のイメージ

「沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会とりまとめ」より
https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/engan_kaiteika/pdf/report01_01.pdf

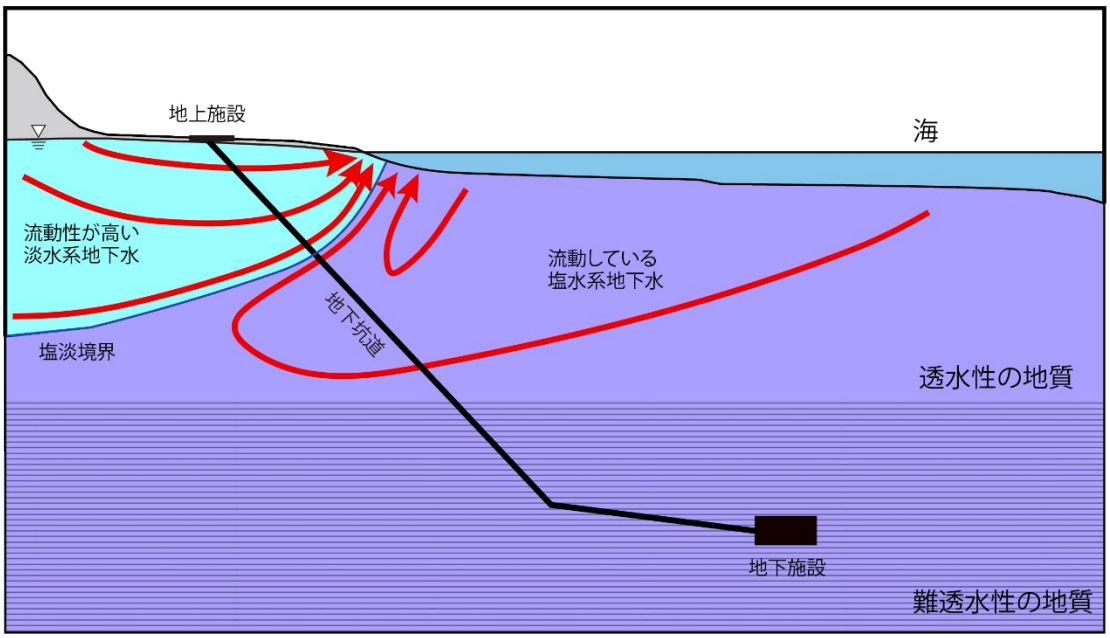


図 2-2- 2 沿岸部周辺の淡水系地下水と塩水系地下水の流動イメージ

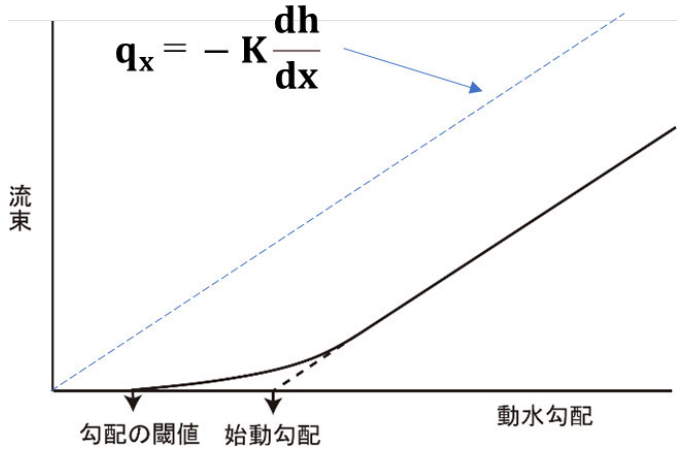


図 2-2- 3　動水勾配が小さいときに起こりそうなダルシ―の法則からのずれ

(Hillel, 1998)

非ダルシー流という用語は、地下水の流速が大きく、乱流発生場における流れを表現するために用いられる。一方で、極めて流速が小さいときに、ダルシーの法則に従わない流れが発生する場合もこの用語が用いられる。

（2） モデルの目的

本研究では沿岸部での現場データと密度流解析結果の整合性を確認し、解析コードの妥当性を検証する。この目的のために本研究では、静岡県富士市富士川河口部でのボーリング調査結果を用いる。比較対象とするのは、昨年度までの調査で得られている、SKB 孔および FGB-2 孔（3-1 節）の淡境界の幅、地下水年代、地下水の速さである。本研究地域を選択した理由は、地質の透水性が高く、地層は火山砂礫や扇状地堆積物がほぼ一様に分布し、粘土鉱物も少ないために、非ダルシー流が発生しにくい条件を備えていると考えられるためである。

地下水モデルは水理パラメータを任意に変更することにより解析結果を大きく操作することができるため、解析結果と現場データが合致したからと言って、それは必ずしも解析コードの有効性を示したことにはならない。しかし、現実に即したデータを使う限り、パラメータの振れ幅には限界がある。本年度の解析結果は次年度の研究計画を考えるベースとなるものであり、仮に、本年度の解析結果が現場データをある程度反映するのであれば、次年度により詳細なモデル構築を進めることし、両者が全く合致しないのであれば、解析コードを含めたモデルの修正および開発を行うこととした。

（3） 地下水モデル

① 水文地質単元（モデルレイヤー）

淡水系地下水－塩淡境界－塩水系地下水が存在する領域を対象とし、2 次元および 3 次元密度流解析を実施する。手順として 3 次元地質モデルを作成し、そこから 2 次元地質断面を切り出すこととした。水文地質単元としては、完新統、上部更新統、中・下部更新統の 3 つを設定した。これは本地域で採取したボーリングコアの岩相や地質調査結果が基になっている。それぞれの地層のイメージは図 2-2-4 の通りである。

(a) 完新統

基底面標高分布は図 2-2-5 の通りである。この分布は、村下・岸（1967）、村下（1982）、産総研地質調査総合センターによる駿河湾北部沿岸部海陸シームレス地質図に収録された、石原・水野（2016）、尾崎ほか（2016）、佐藤・荒井（2016）による解釈等が基になっている。この解釈では、過年度に実施した海域地質環境調査確証技術開発平成 26 年度報告書（産総研，2015）による FGB 孔と SKB 孔（3-1 節参照）の ^{14}C 年代測定結果も考慮されている。

(b) 上部更新統

図 2-2-6 に基底面標高分布を示す。上部更新統と命名したが、その実態は扇状地堆積物あるいは火山砂礫層であり、完新統の下位に分布している。FGB および FGB-2 孔で認められた溶岩層（産総研ほか，2021）は計算領域の地下水流動に多大な影響を与えるとは考

えにくいことから、本層に含めた。沿岸部の３本のボーリング結果（FGB、SKB、FGB-2 孔）から、上部更新統は入山瀬断層の沈降に引きずられ、断層付近ではかなりの深度まで落ち込んでいると推定される。この沈降している領域に、扇状地堆積物や火山砂礫が堆積していることは容易に想像できることである。この断層の動きに加え、田子の浦よりも東には扇状地堆積物が分布していないことを考慮すると（佐藤・荒井，2016)、上部更新統の基底面深度は富士川河口部から田子の浦に向かって浅くなっていると推定される。しかし、その底面標高分布は不明で、昨年度までの FGB-2 孔の調査（深度 400 m）でも固結岩に到達していなかった。そこで、本年度のモデルでは FGB-2 孔の位置において深度 800 m にて本層の底面に到達すると仮定したモデルを作成した。なお、伊藤・山口（2016）の反射法地震探査結果によると本地域の地層はほぼ水平となっているため、地層は傾斜していないこととした。

(c)　中・下部更新統

中・下部更新統は蒲原層を想定しており、難透水層に対応する。深度－2000 m まで続く層として与えたものであるが、富士川河口部の地下からは見出されていない。図 2-2-4 の写真の通り、上部更新統と比べ、透水性は低いと想定される。地形図および地質図の鳥瞰図を図 2-2-7 に示す。

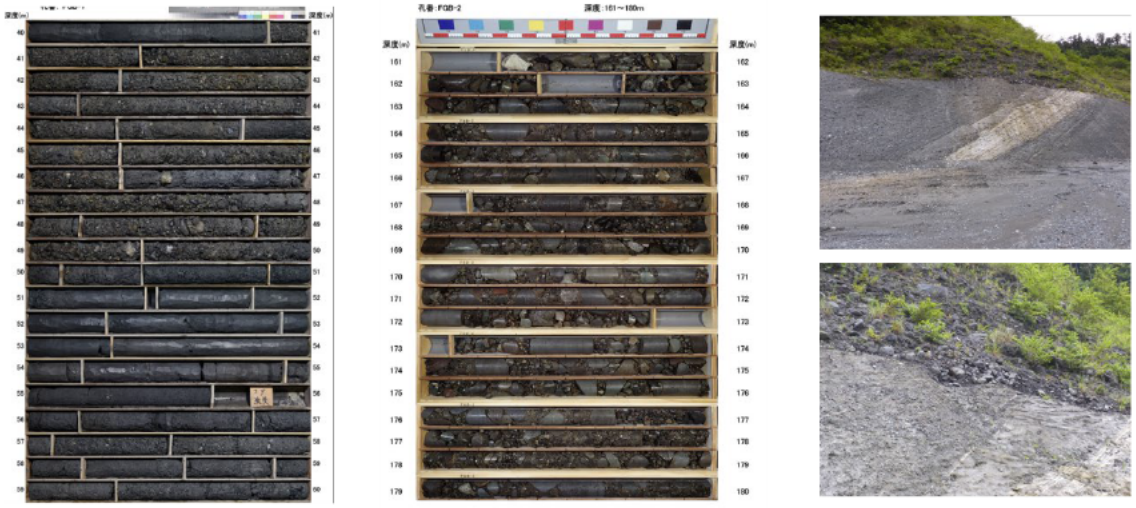


図 2-2- 4 3 つの水文地質単元（モデルレイヤー）

完新統は主に、砂・シルト・礫の互層、上部更新統は扇状地堆積物と火山砂礫からなる。FGB-2 孔の大部分はこの領域を掘削している。中・下部更新統は透水性の悪い堆積岩を想定しているが（写真は蒲原層）、解析領域内での実態および上面深度分布は不明である。

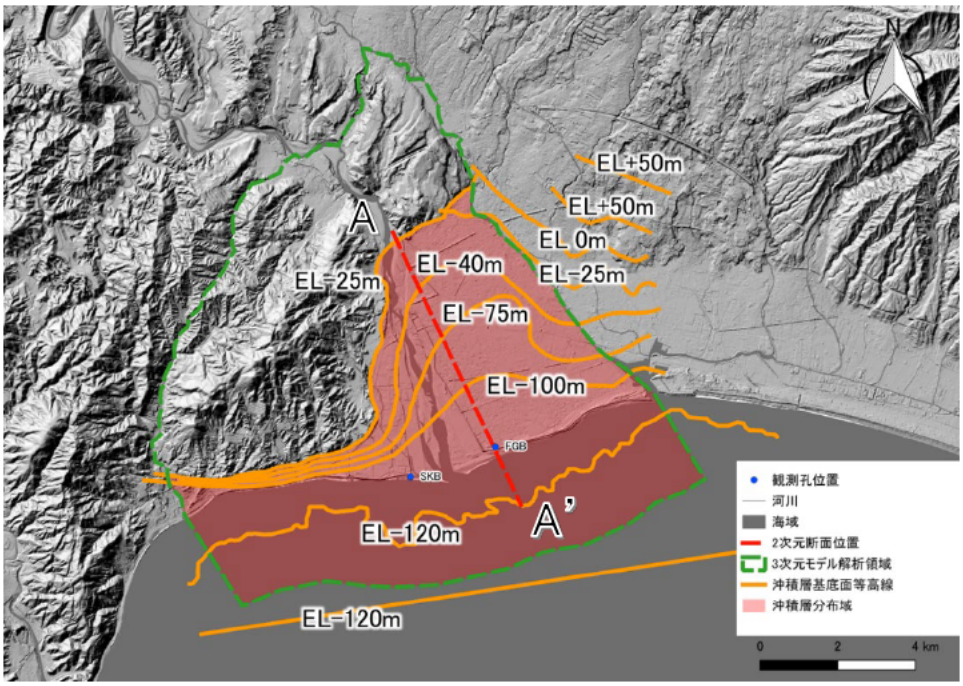


図 2-2- 5 完新統基底面標高分布図

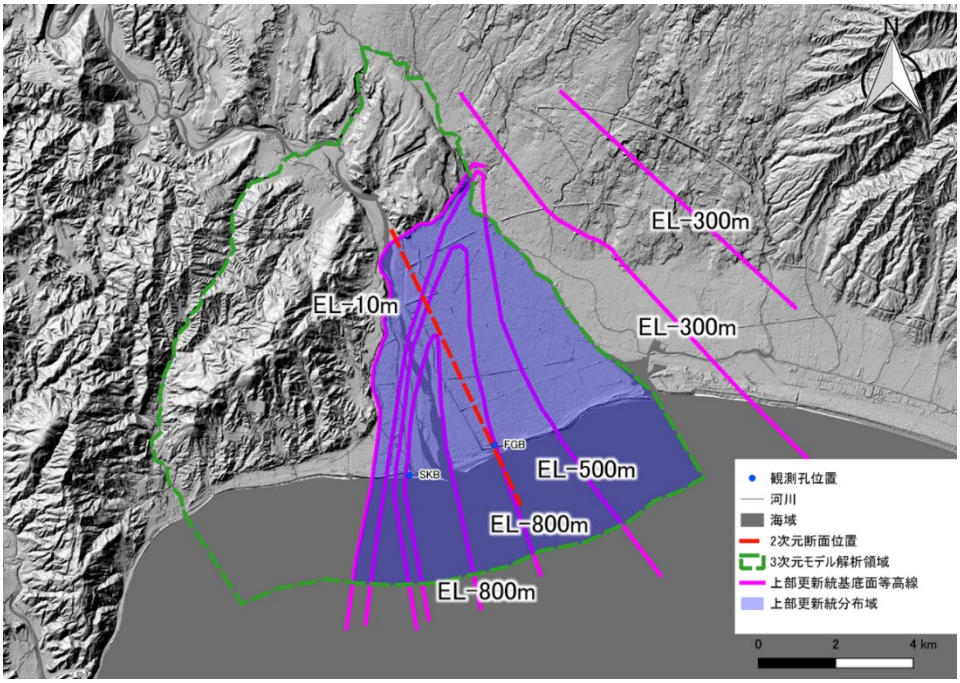


図 2-2- 6 上部更新統基底面標高分布図

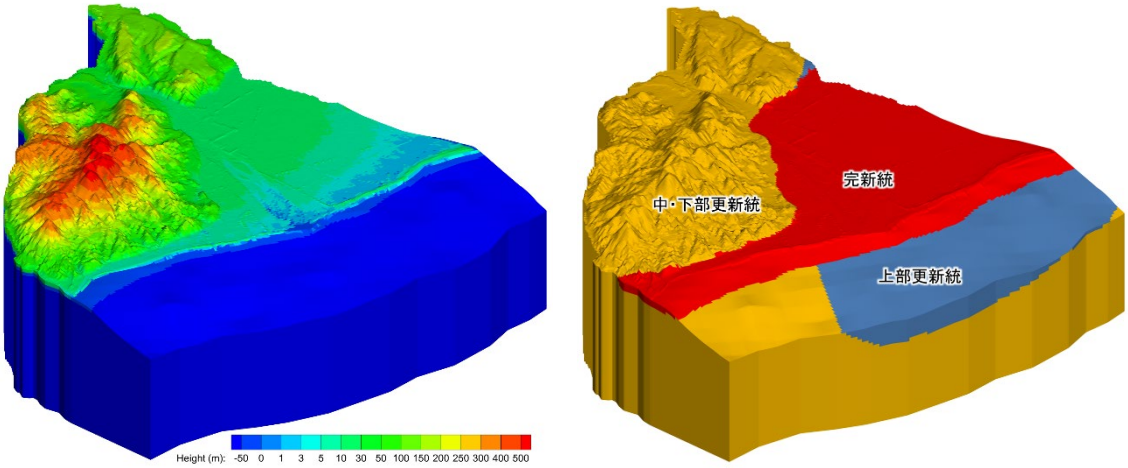


図 2-2- 7 3 次元モデルの鳥瞰図（縦：横＝2：1）

標高分布図（左）、地質分布図（右）。上部更新統は入山瀬断層を意識し、富士川付近で落ち込んでいると想定した。

② 2 次元密度流解析

(a) 目的

本研究では、3 次元密度流解析にて、過年度のボーリング調査にて得られた野外データ（SKB 孔と FGB-2 孔の塩分濃度、地下水年代、地下水の速さの分布）が大まかに再現できるかどうかを確認することを目的としている。この目的のために、2 次元密度流解析を実施し、各水理パラメータの変化が解析結果に及ぼす影響を確認する。

(b) 解析領域と境界条件

2 次元密度流解析を行う断面位置は図 2-2-5 に示す通りであり、地質断面図は図 2-2-8 のようになる。境界条件を表 2-2-1 に示す。上端境界は塩分濃度 0 の涵養フラックス 1000 mm/y を与えた。これは富士市の年間降水量（2140 mm/y：気象庁，2022）の約半分が涵養されることを意味する。下面は標高-2000 m に非流動境界、海域には 2012 年 1 月 1 日～2021 年 12 月 31 日までの清水港での平均的な海水面（EL=0.243 m）を与え、海底面には海水密度を考慮した静水圧を与えた。これは表層付近よりも海底付近の方が海水の比重が大きくなることを意味する。なお、この解析領域は、前年度の報告書（産総研ほか，2022）の不確実性の低減に係る検討で用いたモデル（2-2 節の（4）①～④）の解析領域内に含まれている（図 2-2-9）。そのため、陸域の側面境界は、前年度の報告書で得られた解を用いた。

(c) 解析コード・空間離散化・初期条件

解析コードには地圏流体シミュレータ GETFLOWS を用いた。数値解法は有限差分法である。本コードにかかる支配方程式等は Appendix に示す。初期条件としては陸域が全て塩水でみたされている状態とした（塩水洗い出し法）。この条件で計算をすると、時間ステップの経過とともに、涵養フラックスによって地表部から淡水が入りこみ、徐々に陸域が淡水系地下水に置き換わっていく。最終的には塩水系地下水が塩水楔を形成した状態でほぼ準安定となる。なお、初期条件として解析領域を全て淡水で満たしたケースでも、同じ解析結果が得られる（登坂，2002）。すなわち、実際には非定常計算を実施しているが、実質的に定常解を求めていることになる。

(d) 水理パラメータ

3 つの水文地質単元に与えた水理パラメータを表 2-2-2 に示す。完新統は村下・岸（1967）の第 1 層に相当し、透水係数は 2.0×10^{-4}～3.0×10^{-4}（m/s）とされている。一方、過年度に実施した SKB 孔での揚水試験結果は 4 深度で平均 2.8×10^{-4}（m/s）であった。どちらの調査でも 10^{-4} m/s のオーダーであり、ここでは、1.0×10^{-4}（m/s）を与えた。上部更新統は村下・岸（1967）の第 3 層に相当し、透水係数は 3.0×10^{-4}～7.0×10^{-4}（m/s）である。一方、過年度に実施した SKB 孔での該当 5 深度の揚水試験結果の平均値

は 3.3×10^{-5}（m/s）であった。ここでは揚水試験結果のオーダーに合わせ 1.0×10^{-5}（m/s）を与えた。中・下部更新統の透水係数は不明のため 2 オーダー低い値に設定した。決定が難しいパラメータとして、有効間隙率と分散長がある。有効間隙率は産総研ほか（2022）に従い、0.2 で固定とした。また、Gelhar et al.(1992)によると 10～1000m スケールのフィールドでは、縦分散長α_Lは 0.1 から数 10 m の分散長を持つ。FGB-2 孔と海岸線までの距離が 300 m であることから、縦分散長は Neuman(1990)より算出して 30 m とした。また同じく Gelhar et al.(1992)によると野外スケールでは、$5 \leq \alpha_L/\alpha_v \leq 500$であり、野外では一般に 1m 未満の場合もあれば数 mm のときもある。ここでは鉛直横分散長はその 1/10 の 3 m を与えた。以上のパラメータを用いて解析するモデルを基本モデルとする。

（e）　キャリブレーションターゲット

2 次元モデルのキャリブレーションターゲット（現場データ）は、昨年度までの調査で得られた FGB-2 孔の塩淡境界位置、地下水年代、地下水の速さである。これらの現場データを密度流解析で再現できるかどうかを検討することが第一の目的である。

なお、Drever（1988）定義を用いると、淡水系地下水は塩水混合率が 3%以下の地下水となるが、我が国の Cl^-濃度に対する水道水質基準（日本環境管理学会，2009）は 200mg/L 以下、すなわち海水の約 1/100 である。そのため、ここでは塩水濃度比（塩水の混合率）が 1%以下のものを淡水系地下水とした。また、塩水の定義は明確でないため、塩水濃度比が 99%以上のものとした。両者の間は塩淡境界である。昨年度までの結果では、FGB-2 孔における塩淡境界は GL-75～-200 m、地下水年代は本年度の結果を用い、GL-168 m で 2,000～8,000 年で、GL-282 m で 9,000 年とした。地下水の流向流速（定量限界は 1.0×10^{-7} m/s）について、昨年度の調査では GL-170 m で流向は観測されたことから 1.0×10^{-7} m/s オーダー以下とし、GL-220 m では流向すら観測されなかったため、5.0×10^{-8} m/s オーダー以下と仮定した。

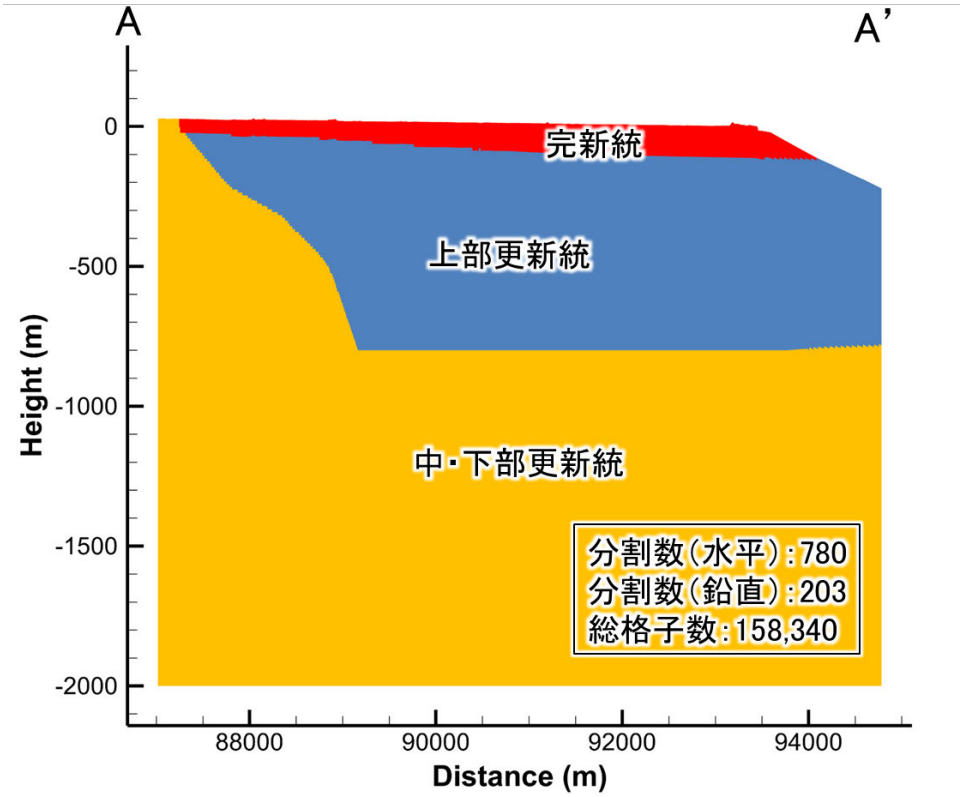


図 2-2- 8 2 次元モデルの地質分布（縦：横＝3：1）

セルの大きさは水平方向、垂直方向ともに 10 ｍ。分割数は水平方向に 780、鉛直方向に 203 であり、総格子数 158, 340 である。

表 2-2- 1 解析条件（境界条件）

本節では複数の解析をおこなっているが、潮汐変動を与えた一部の解析を除き、境界条件は変化させていない。

境界条件	設定条件
上端境界	涵養フラックスとして 1000 mm/y、濃度 C＝0。地表は流出境界。
下端境界	EL-2000 m で非流動境界。
陸域の 側面境界	産総研ほか（2021）の定常解析結果の水頭を与えた（規定水位境界）。 2D モデルの場合は陸域側の端の位置における値となる。
海底面	清水港での平均海水準（0.243 m）を与え、海水密度を考慮した静水圧固定境界、および海水濃度を与えた濃度固定境界。

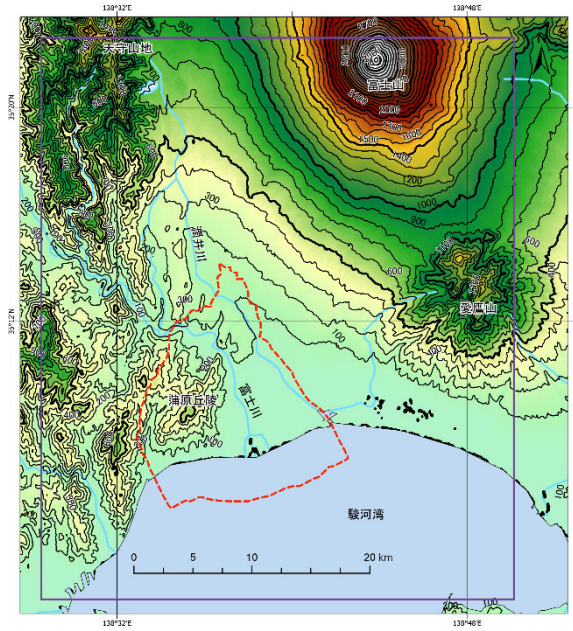


図 2-2- 9 昨年度の 2-2 節でおこなわれた解析領域（紫色の枠）と、本研究の解析領域（赤色の点線）。

表 2-2- 2 基本モデルでの水理パラメータ

地層区分	透水係数（m/s）	有効間隙率	縦分散長α_L（m）	垂直横分散長α_T
完新統	1.0×10^{-4}	0.2	30	縦分散長の 1/10
上部更新統	1.0×10^{-5}	0.2	30	縦分散長の 1/10
中・下部更新統	1.0×10^{-7}	0.2	30	縦分散長の 1/10

(f)　基本モデルの解析結果

基本モデルの条件を与えたときの解析結果を図 2-2-10 に示す。向かって左側が陸域で、右側が海域である（以下、同様）。右端の傾斜が急になっている領域は海である。図の右上にある黒枠の四角が、FGB-2 孔が含まれる領域であり、この領域内で解析結果と現場データを比較する。なお、産総研ほか（2022）の解析結果を用いている関係上、陸域側面境界は地表から EL-2,000 m まで淡水系地下水となっているが、陸域側面境界を非流動境界としたケースでも、FGB-2 付近の解析結果にはほとんど影響しないことは確認済みである。FGB-2 孔付近を拡大したものが図 2-2-11 である。FGB-2 孔では完新統で水平流、上部更新統で上昇流が確認される。解析結果では塩淡境界の上端は地表にまで及び（現場データから判読される塩淡境界の上端は GL=-75 m：現場の地盤標高は EL≒4 m のため、本節では GL=EL と考えて良い）、下端は EL-250 m まで広がっている（現場データでは GL-200 m）。インターフェース、すなわち淡水系地下水と塩水系地下水が半々で混合する面は、解析結果では EL-120～-130 m 程度である（現場データでは GL-190 m）。塩水領域から淡水領域に向かい、濃度はゆるやかに S 字を描いている。

地下水年代の領域全体の解析結果を図 2-2-12 に示す。完新統の陸域上流部では年代が 100 年未満の領域が認められるが、海岸に近づくにつれて徐々に完新統の底面付近の地下水年代が古くなる。これは塩淡境界に沿った上昇流によって、古い地下水が完新統内に運ばれたためである。地下水年代の FGB-2 孔周辺の解析結果（図 2-2-13）からは、上部更新統からの古い地下水が完新統内に流動している様子がみてとれる。また、EL-110 m 周辺の塩淡境界の上部にて、地下水年代の古い深度が現れる。ここは淡水系地下水の混合率が高い領域であり、広域地下水流動によってもたらされた年代の古い淡水系地下水の影響が現れている。現場データ（^{14}C 年代）では塩淡境界の GL-168 m にて 2,000～8,000 年、塩水系地下水の GL-282 m で 9,000 年程度の値が得られていることから、基本モデルの解析結果とは隔たりがあるが、塩水系地下水の年代は塩淡境界の地下水よりも若いことがありうることが示された。

地下水の流さについて領域全体の解析結果を図 2-2-14 に示す。完新統と上部更新統で速さが 1 桁異なる主な理由は、透水係数が異なるためである。上部更新統では 0.01 m/s のライン（黄色と黄緑色の境界）が海岸に向かって斜めに延びており、塩淡境界の周辺で地下水流動が不活発になることが示されている。また、そのラインの下位に、これと並行して速さが最も小さくなる領域が認められる（図 2-2-12 では緑色の筋のようにみえる）。これが陸から海へ向かう淡水系地下水と、海から陸側へ向かう塩水系地下水が接する“流動境界”とよばれる領域（登坂，2002）であり、塩淡境界と塩水系地下水の境界付近に位置する。FGB-2 孔周辺の地下水の速さに関する解析結果では（図 2-2-15）、流動境界は EL-175mであり、塩淡境界の下部にあたり、ほぼ真上に向かう上昇流がしている。流向流速計（現場データ）では流れの水平成分を測定しているため、単純に両者を比較できるか疑問が残るが、解析によって得られた EL-168 m および EL-282 m の地下水の流速は 1.0×

10^{-7} m/s 以下であり、現場データと矛盾しない。また、地下水年代が最も古い深度（EL-110 m）と速さが最も小さい深度（EL-175m）は必ずしも一致しない。EL-110m の塩水混合率は約 0.38、EL-175m では約 0.88 である。

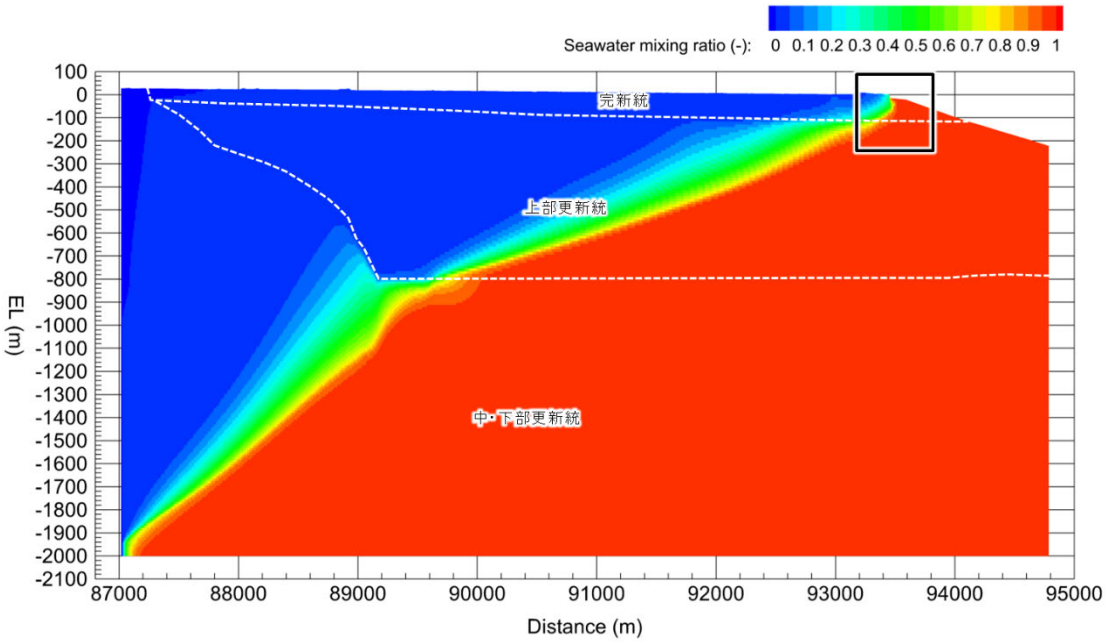
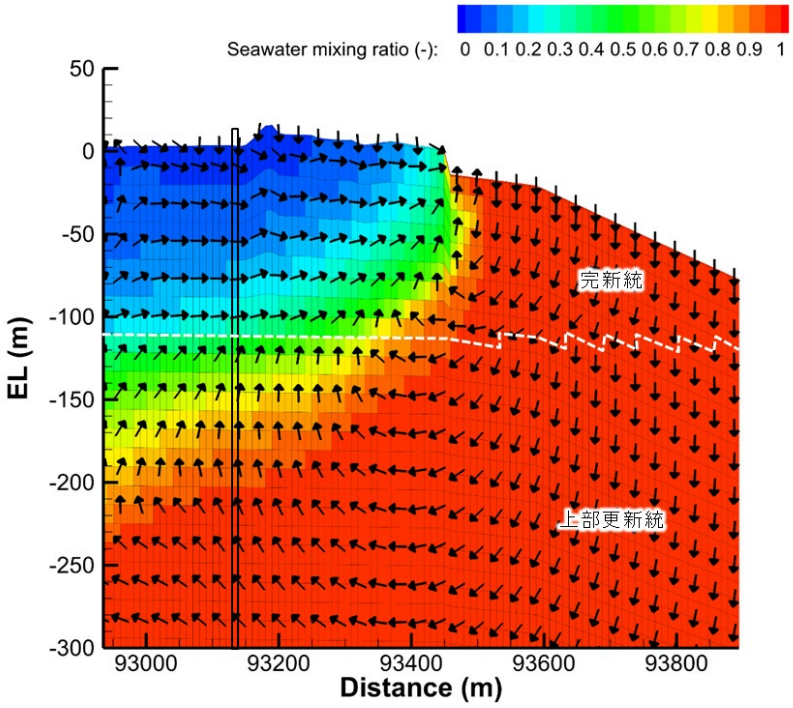


図 2-2- 10 基本モデルでの解析結果（塩分濃度）

向って左側が陸域、右側が海域である。本研究では、特に右上の黒枠内の解析結果に注目している。



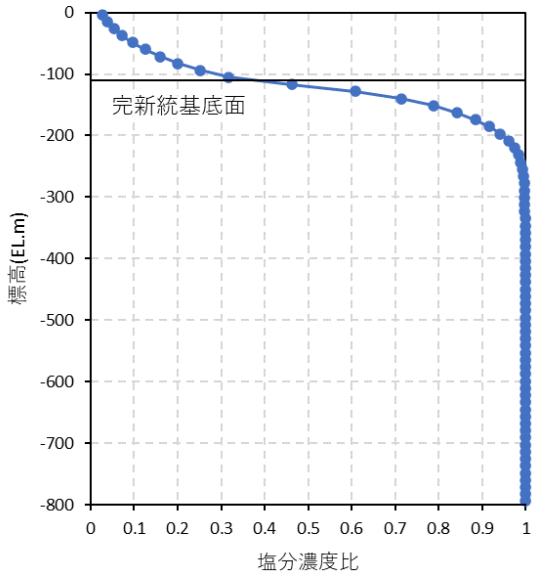


図 2-2- 11 基本モデルでの FGB-2 孔周辺の解析結果（塩分濃度）

FGB-2 孔周辺の塩分濃度分布（上）。図中の縦棒が FGB-2 孔の位置である（以下同様）。下図に FGB-2 孔の位置における解析結果を示した。

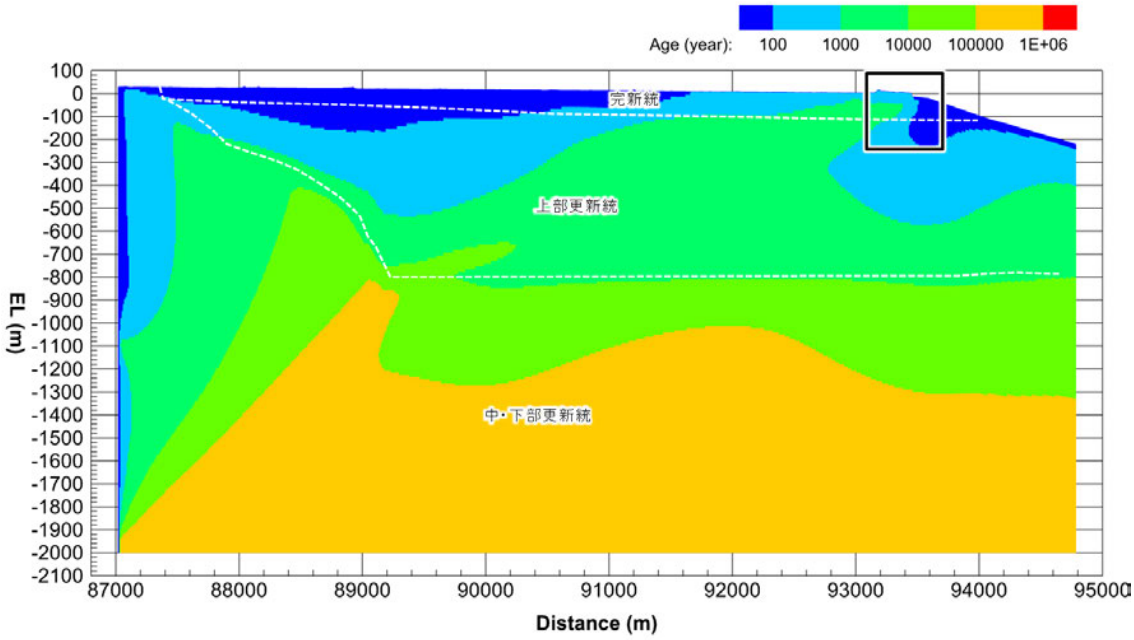
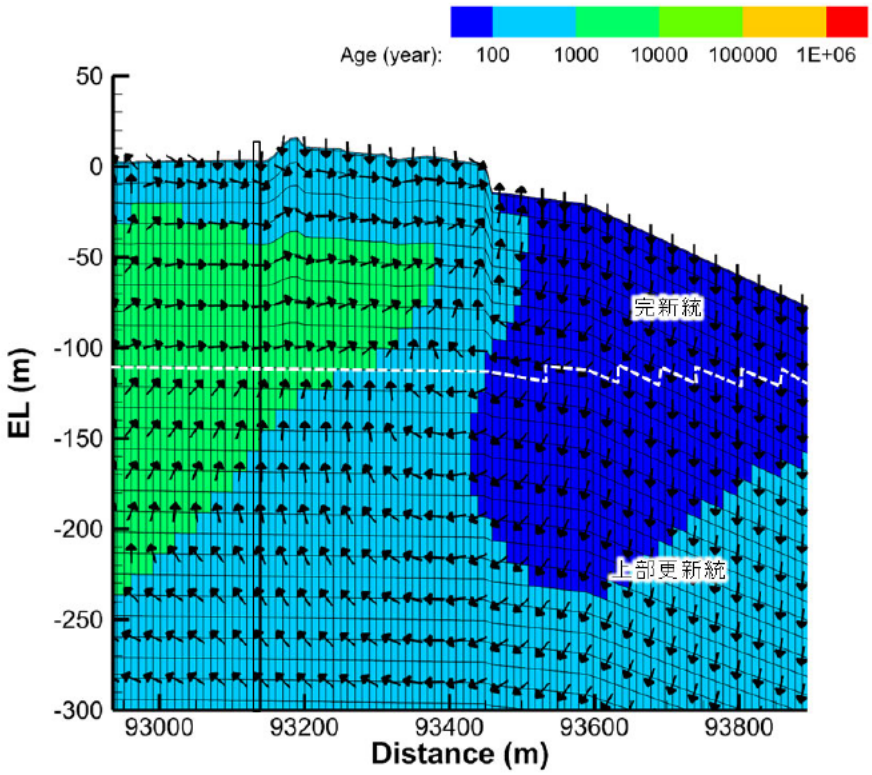


図 2-2- 12 基本モデルでの解析結果（地下水年代）



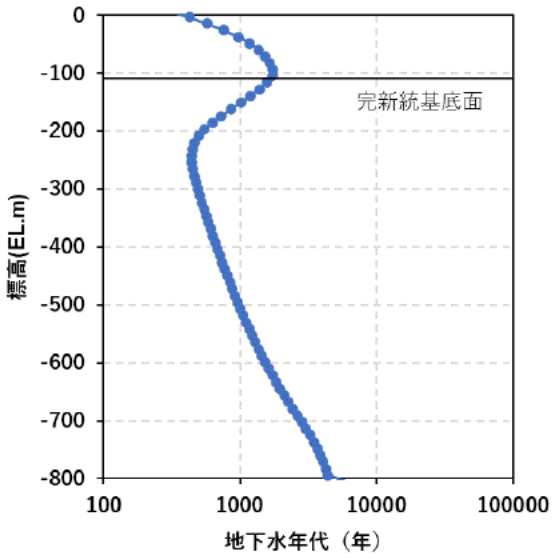


図 2-2- 13　基本モデルでの FGB-2 孔周辺の解析結果（地下水年代）

FGB-2 孔周辺の地下水年代分（上）。下図に FGB-2 孔の位置における解析結果を示した。

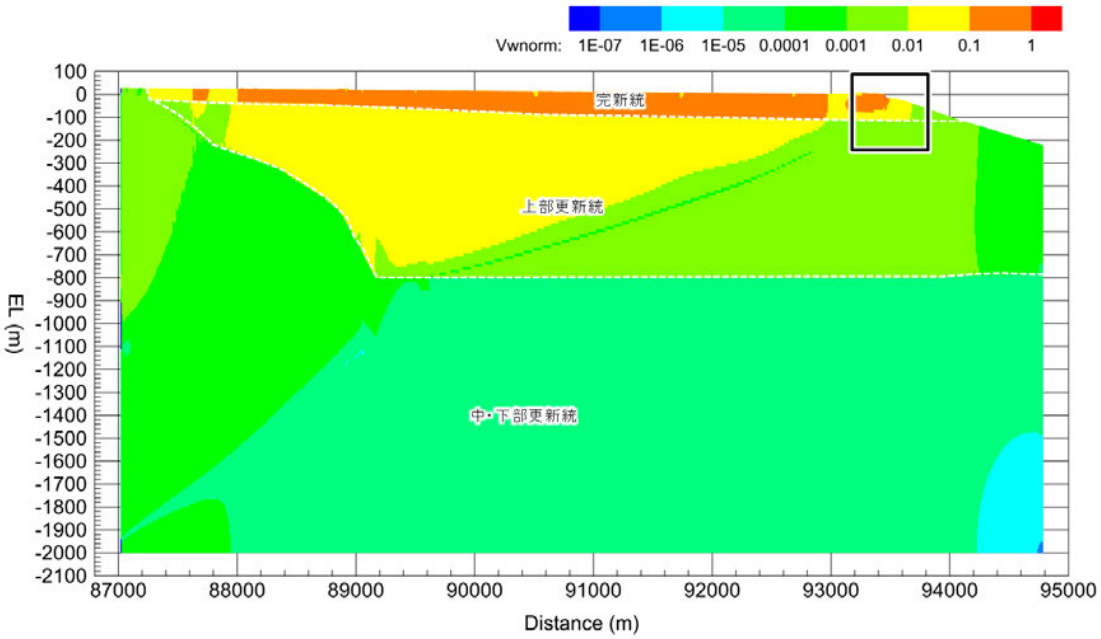
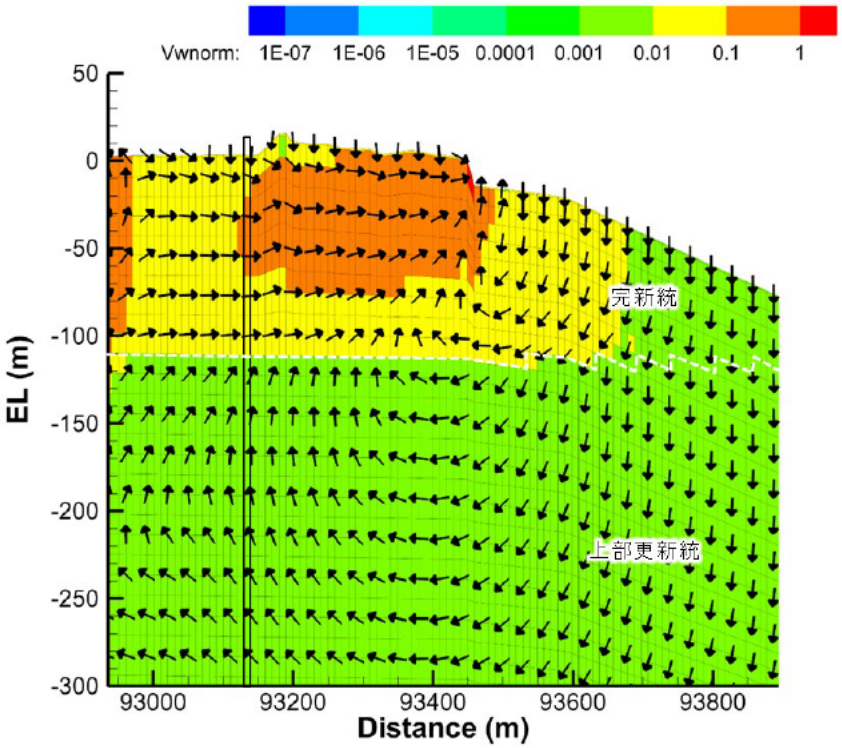


図 2-2- 14 基本モデルでの解析結果（地下水の速さ）



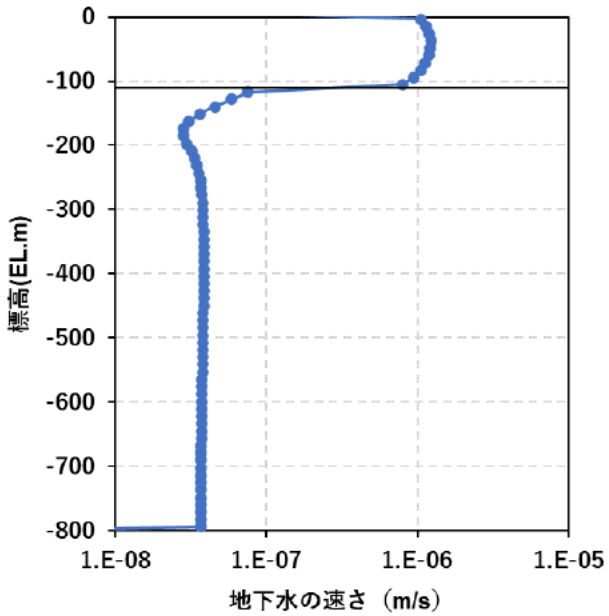


図 2-2- 15 基本モデルでの FGB-2 孔周辺の解析結果（地下水の速さ）

（g）　透水係数の影響

水理パラメータの影響について検討する。まず、完新統の透水係数を 8 倍（8.0×10^{-4}（m/s））にしたケースである。結果を図 2-2-16 に示す。基本モデルと比較して、上部更新統の上流部で塩淡境界の位置が浅くなる。この理由は、完新統の透水性を高めることは、完新統の排水能力を上昇させることにつながるためである。したがって、領域全体の地下水面は低下するであろう。そのため、上流部で完新統から上部更新統に流動する地下水が減少し、塩淡境界が陸側に押し込まれる。このプロセスにより、上流部の上部更新統内で淡水系地下水の地下水年代が古くなり、速さが低下する（図 2-2-17 および図 2-2-18)。このように地表を覆う完新統の透水係数を 1 オーダー程度変化させた場合でも、上部更新統中の塩淡境界の位置に大きな変化が認められる。なお、この結果から類推すると、涵養フラックスの大小によっても塩淡境界の分布は異なると考えられる。

FGB-2 孔周辺について、基本モデルと比較して、完新統で塩分濃度の低下がみられる（図 2-2-19 上段)。これは上流部にて地下水面が低下したものの（動水勾配は低下したものの)、透水係数は 8 倍に大きくなっているためである。その結果、完新統内の地下水流動の水平成分が増加し、塩淡境界が海側に押し出されている（図 2-2-19 中段)。一方、図 2-2-19 上段に示した、FGB-2 孔での地下水年代と速さの分布では、基本モデルと比較して上部更新統中の塩淡境界でも地下水年代が若く、地下水の速さは大きい。これは前パラグラフで述べた、上部更新統中の地下水流動が不活発になったという記載と矛盾するように思える。この理由として、塩水系地下水の流動系の変化が生じたことが考えられる。図 2-2-19 下段において、基本モデルと比較すると FGB-2 孔の EL-100～200 m 近辺の塩淡境界は海岸線付近に形成される小規模な流動系によってもたられていることが確認される。完新統の透水係数が高くなったことにより、塩水系地下水の陸域への浸入も促進され、その結果、極めて若い塩水系地下水が FGB-2 孔の GL-100～-200 m 近辺に収束し、強い上昇流を発生させている。一方、GL-250 m 以下に分布する塩水系地下水に関しては、地下水流動の速さは基本モデルに近づき、塩分濃度や地下水年代には差がみとめられない。この結果は、より深層の塩水系地下水の地下水年代は完新統の透水係数の影響を受けにくくなることを意味する。すなわち、浅層地下水流動の活発さと無関係に地下水年代が決まる領域がある。

次に上部更新統の透水係数を 5 倍（5.0×10^{-5}（m/s））にしたケースを検討する。解析領域全体の結果を図 2-2-20 および図 2-2-21 に示す。上部更新統内では基本モデルと比較して、塩淡境界の位置および幅に大きな差は認められない（図 2-2-20)。地下水年代の分布（図 2-2-21）では、淡水系地下水と塩水系地下水が接する塩淡境界にて、10,000～100,000 年を持つ領域が帯状に延びている。なお、中・下部更新統で 100,000 年以上の領域が若干広がっていることは、上位に高透水性の地層が存在する場合、下位層の地下水流動が不活発になることを示している。

FGB-2 孔周辺に関しては、塩分濃度は EL-130 m 以浅では完新統で基本モデルよりも高くなり、それ以深で低くなった（図 2-2-22 上段・中段）。地下水年代は総じて若くなり（図 2-2-22 上段）、上部更新統内の地下水の速さが大きくなった（図 2-2-22 上段・下段）。年代と速さについては透水係数が高くなったことと整合的である。一方、EL-130 m 以深で塩分濃度が低くなり、EL-130 m 以浅で高くなった理由は、上部更新統の透水係数が大きくなったことにより、地下水の流速が上がり、分散係数が大きくなったことが主要因と考えられる。

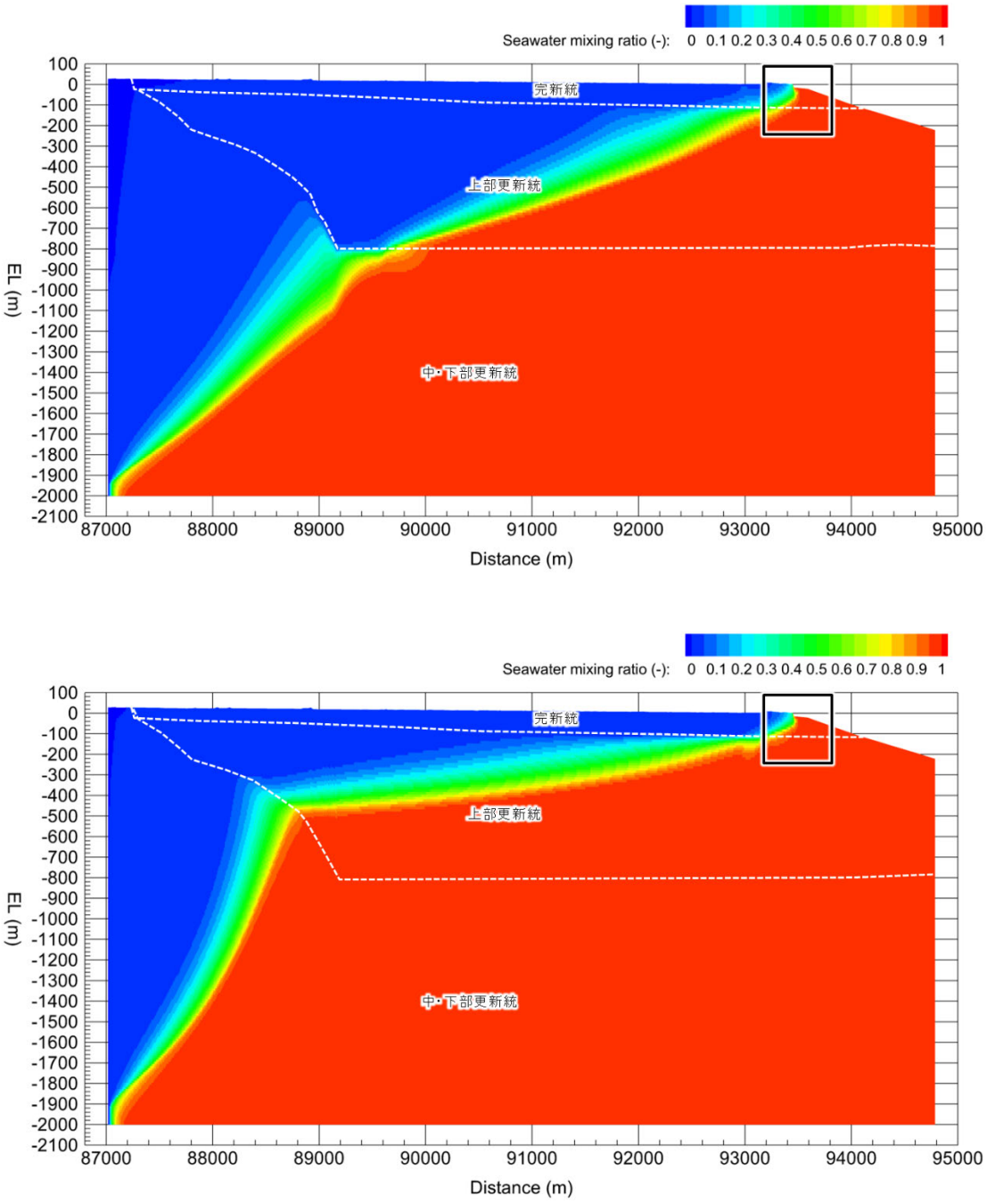


図 2-2- 16 基本モデルおよび完新統の透水係数を 8 倍にしたケースでの解析結果の比較（塩分濃度）

上は基本モデル、下は完新統の透水係数を 8 倍にしたケース。

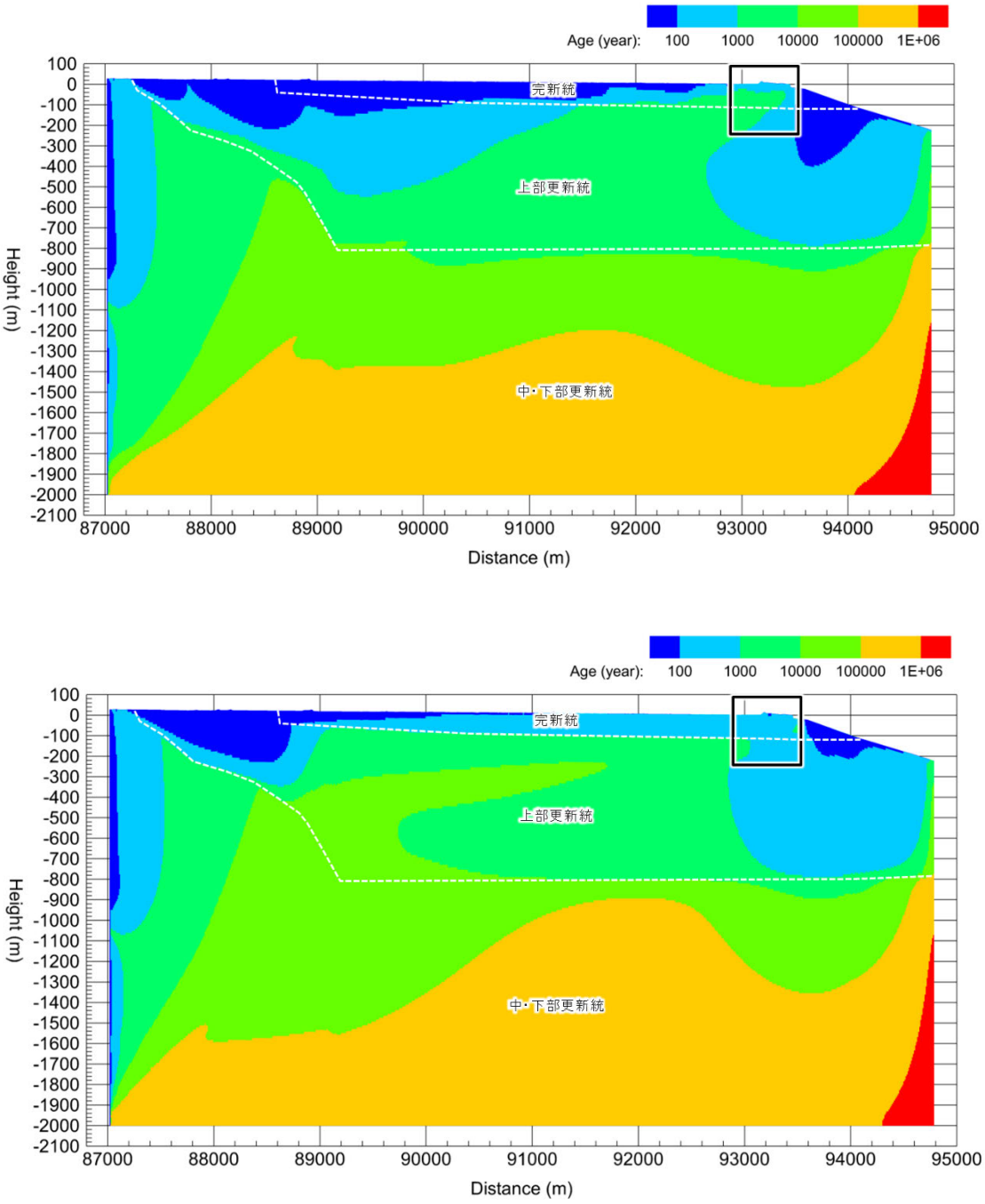


図 2-2- 17 基本モデルおよび完新統の透水係数を 8 倍にしたケースでの解析結果の比較（地下水年代）

上は基本モデル、下は完新統の透水係数を 8 倍にしたケース。

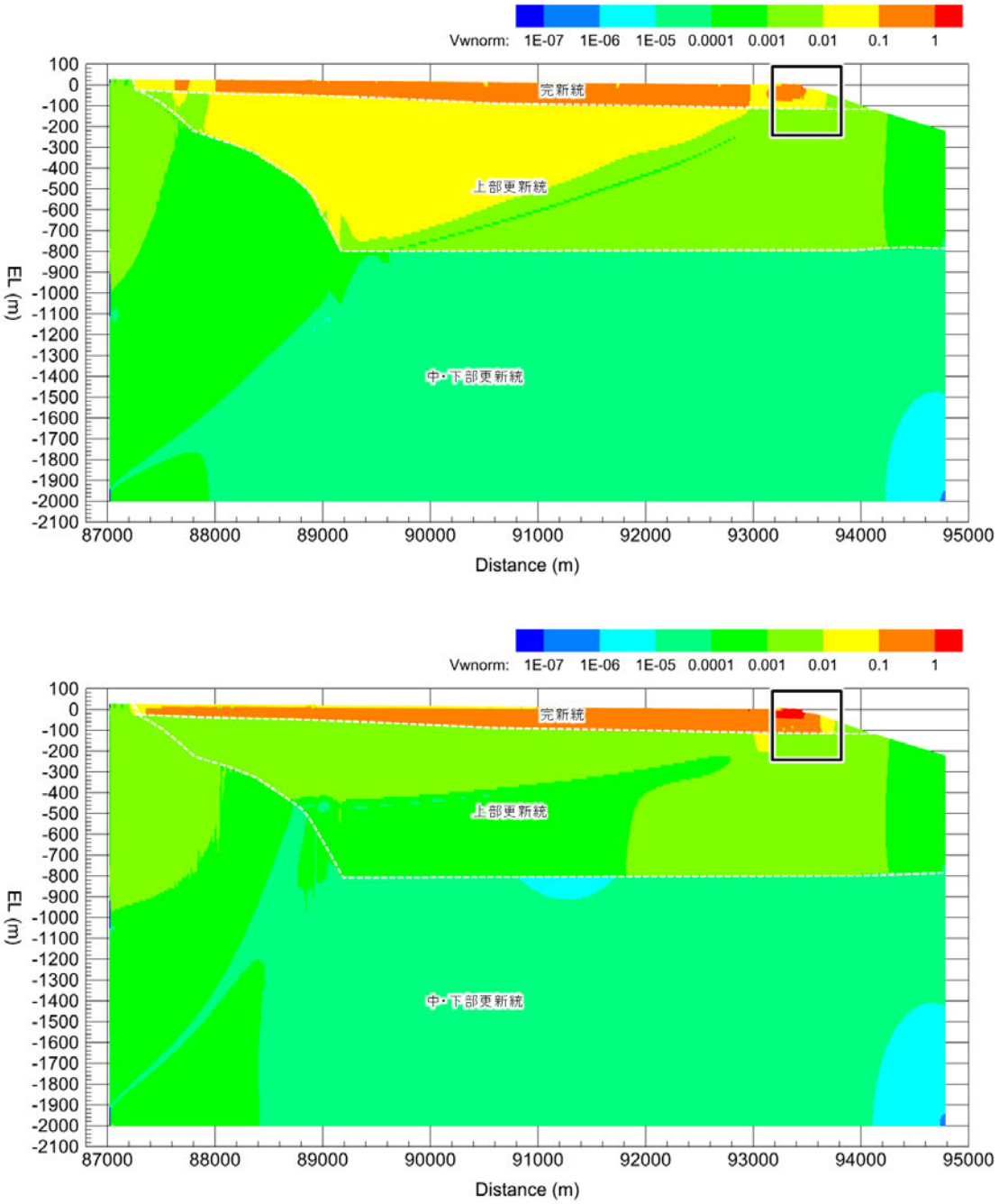


図 2-2- 18 基本モデルおよび完新統の透水係数を 8 倍にしたケースでの解析結果の比較（地下水の速さ）

上は基本モデル、下は完新統の透水係数を 8 倍にしたケース。

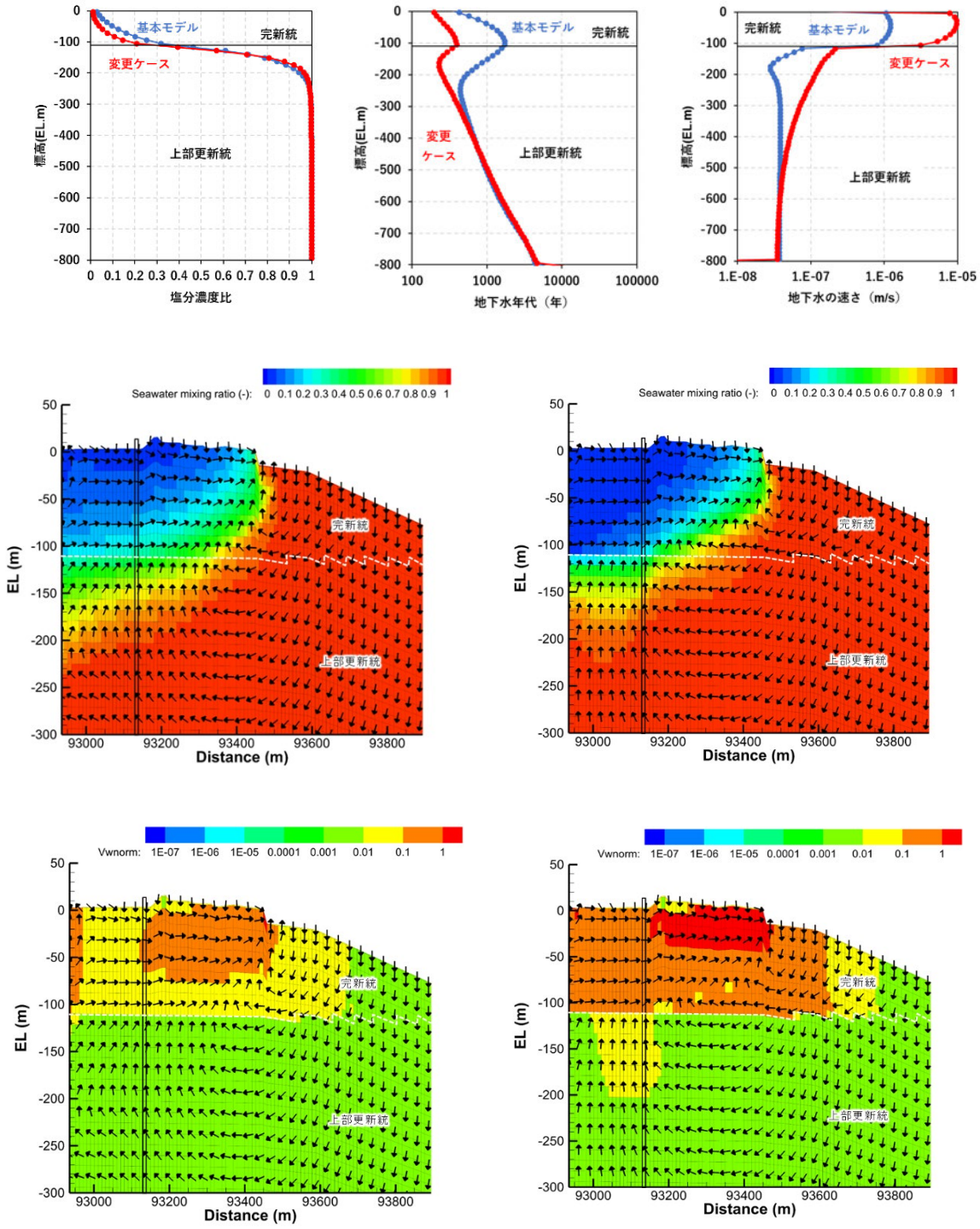


図 2-2- 19 基本モデルおよび完新統の透水係数を 8 倍にしたケースでの解析結果の比較

FGB-2 孔周辺の変化。上段の左から塩分濃度、地下水年代、地下水流動の速さの分布である。中段左は基本モデルでの塩分濃度分布、右は完新統の透水係数を 8 倍にした変更ケース。下段は同様に地下水の流さの分布の変化を示している。

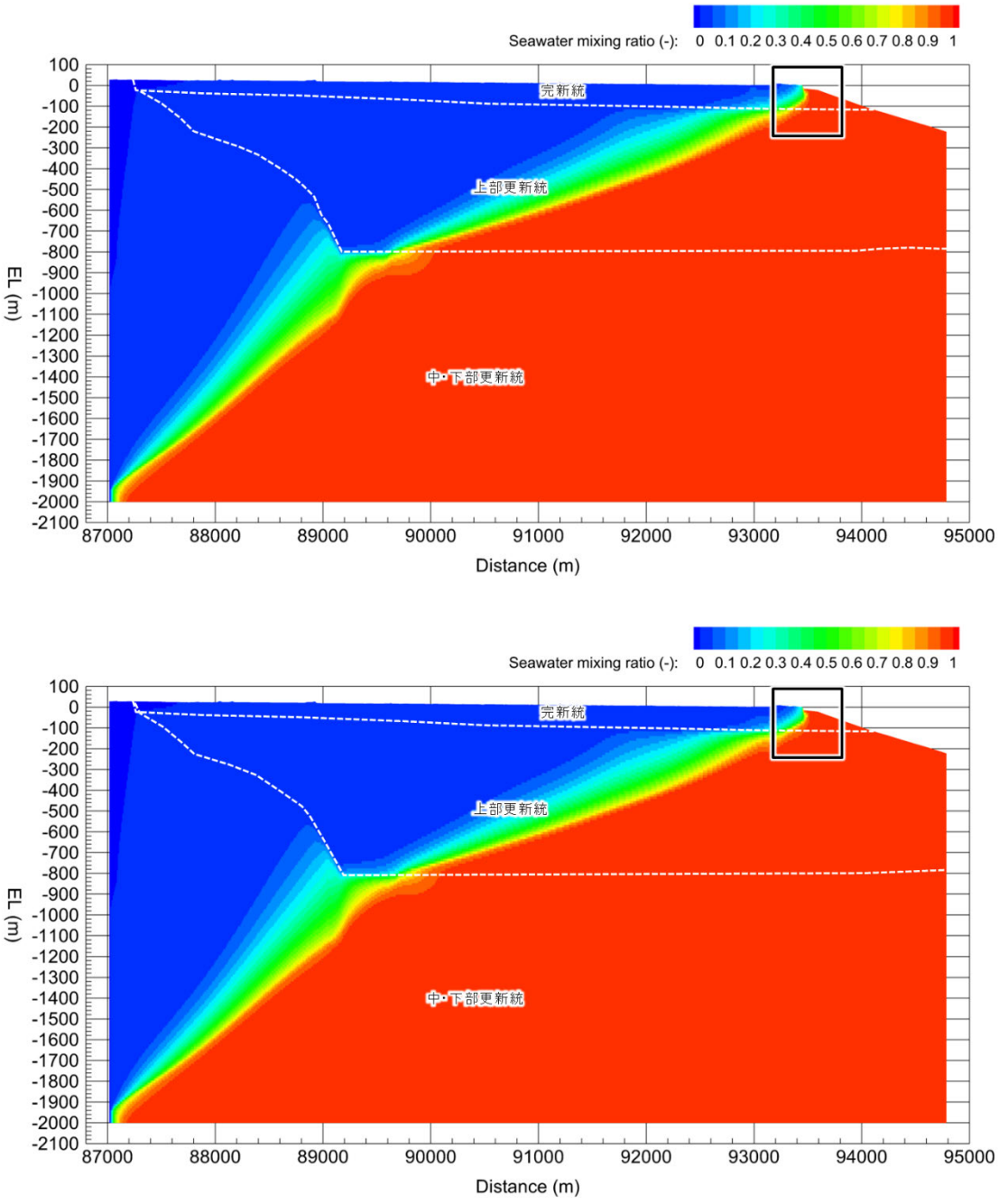


図 2-2- 20 基本モデルおよび上部更新統の透水係数を 5 倍にしたケースでの解析結果の比較（塩分濃度）

上は基本モデル、下は上部更新統の透水係数を 5 倍にしたケース。

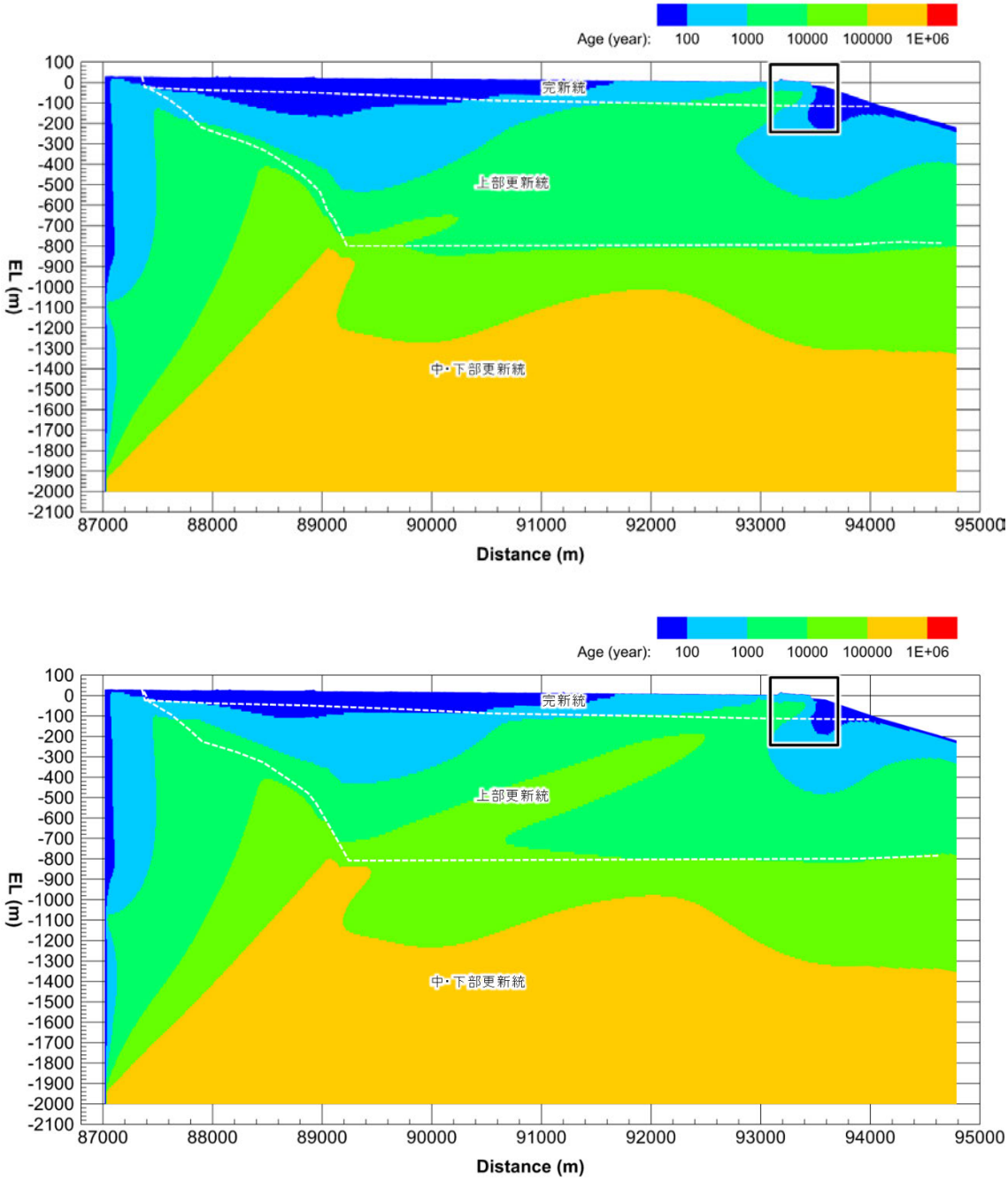


図 2-2- 21 基本モデルおよび上部更新統の透水係数を 5 倍にしたケースでの解析結果の比較（地下水年代）

上は基本モデル、下は上部更新統の透水係数を 5 倍にしたケース。

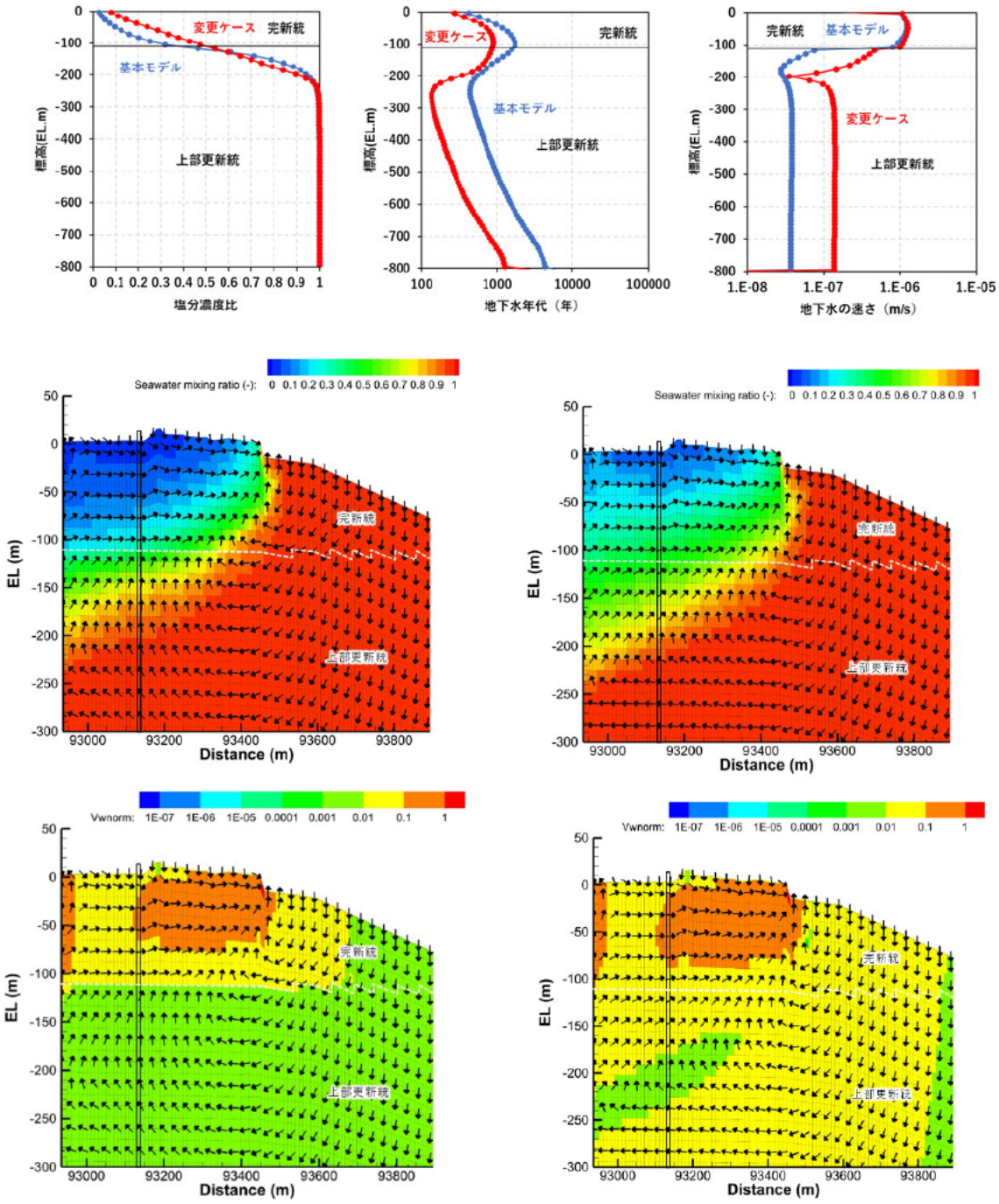


図 2-2- 22 基本モデルおよび上部更新統の透水係数を 5 倍にしたケースでの解析結果の比較

FGB-2 孔周辺の変化。上段の左から塩分濃度分布、地下水年代分布、速さの分布である。中段左は塩分濃度分布の比較であり、左は基本モデル、右は上部更新統の透水係数を 5 倍にしたケース。下段は同様に地下水の流向流速分布。

（h）　異方性の影響について

透水係数の異方性の影響を調べるために、完新統および上部更新統それぞれについて、水平方向の透水係数/垂直方向の透水係数（K_h/K_v）を 10 としたケースを検討した。完新統の異方性を与えたものが図 2-2-23 である。基本モデルと比べ塩分濃度は低下するが、塩淡境界と塩水領域の境界は変わらず GL-250 m近辺である（図 2-2-23 上段)。異方性は陸域と海域の両方に作用するため、塩淡境界の位置は変化しないように思えるが、解析結果では塩淡境界は海側に移動している（図 2-2-23 中段)。この理由は陸域で地下水面が上昇しているためである。異方性を与えて全体的に透水性を下げたことにより、表層付近の淡水系地下水も海底付近の塩水系地下水も、総じて流動が不活発になる。しかし、陸域においては地下水面が上昇するために、(定水頭境界が与えられている塩水系地下水と比べて）相対的に上部更新統への流動量が大きくなる。この理由で FGB-2 孔周辺の上部更新統では、基本モデルと比べて地下水年代は古くなるが、塩淡境界が海側に押し出される。

次に上部更新統に対し、水平方向の透水係数/垂直方向の透水係数 K_h/K_v を 10 とした場合が、図 2-2-24 である。上部更新統の異方性により、基本モデルと比べて全体的に地下水は流動しにくくなっているが、やはり陸域の地下水面が高くなることから、上部更新統中の塩淡境界は海側に押し込まれている。完新統に異方性を与えた場合と同じ理由で FGB-2 孔周辺では塩分濃度が低下し、塩水系地下水の年代が古くなる（図 2-2-25)。このように異方性の存在は塩淡境界の位置を大きく変える。

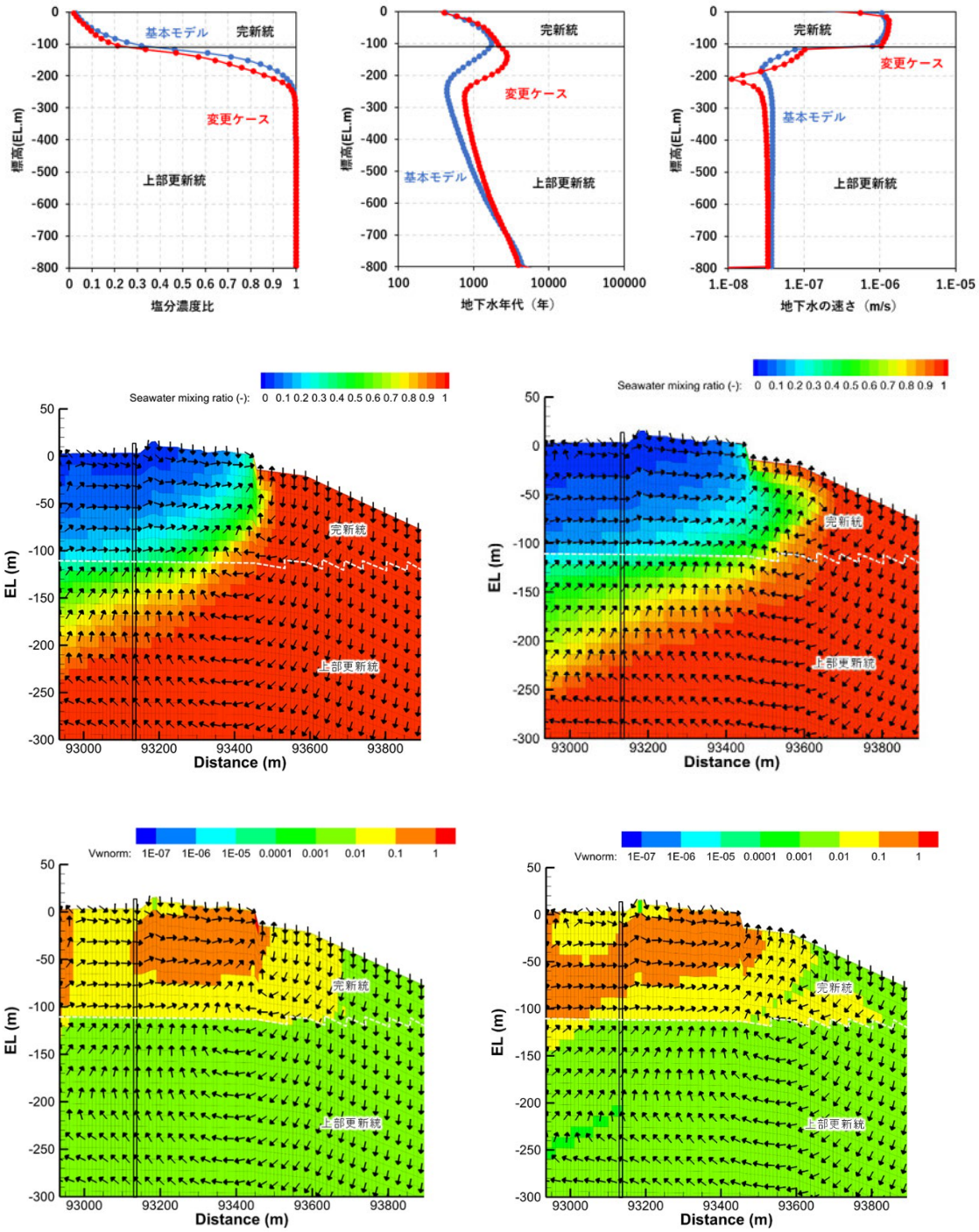


図 2-2- 23 完新統の透水係数に異方性を与えた場合（K_h ＝ 1.0×10^{-4} m/s、K_v = 1.0×10^{-5}m/s）FGB-2 孔周辺の変化。上段の左から塩分濃度分布、地下水年代分布、速さの分布である。中段左は塩分濃度分布の比較であり、左は基本モデル、右は異方性を与えたケース。下段は同様に地下水の流向流速分布。

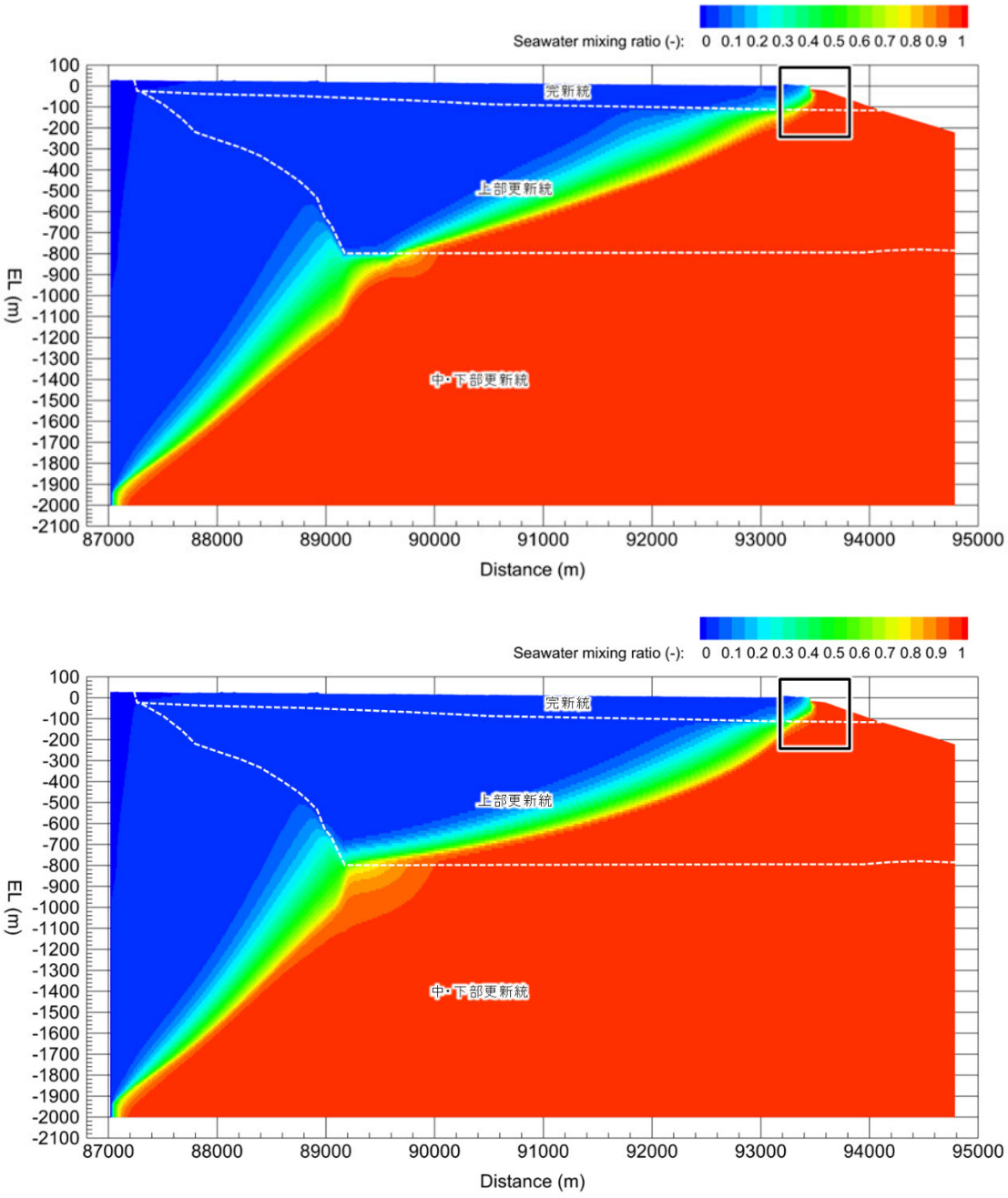


図 2-2- 24 基本モデルおよび上部更新統の透水係数に異方性を与えた場合

（K_h＝1.0×10^{-5} m/s、K_v=1.0×10^{-6} m/s）（塩分濃度）

上は基本モデル、下は上部更新統の透水係数に異方性を与え異方性を与えたケース。

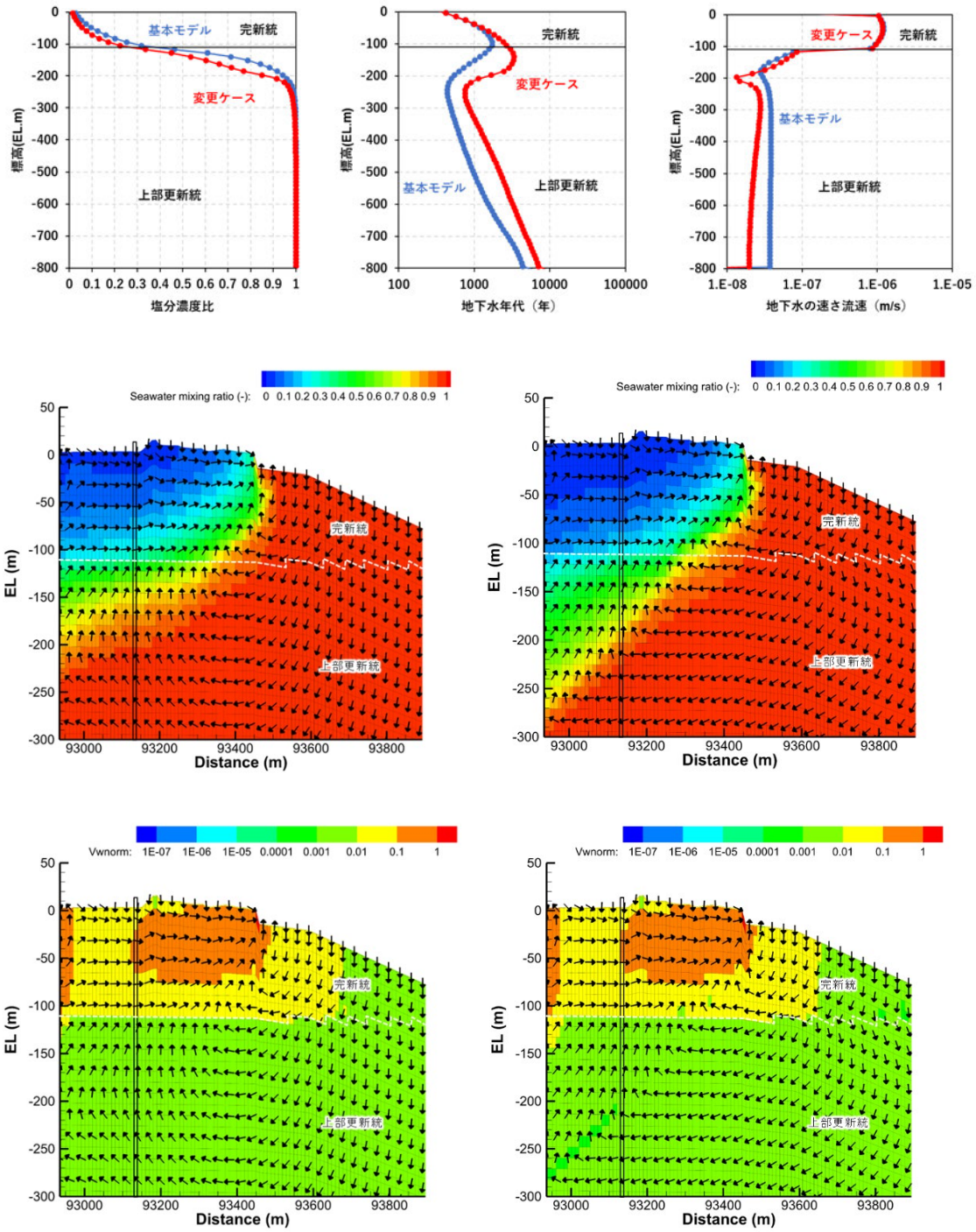


図 2-2- 25 上部更新統の透水係数に異方性を与えた場合（K_h＝1.0×10^{-5} m/s、K_v=1.0×10^{-6} m/s）

FGB-2 孔周辺の変化。上段の左から塩分濃度分布、地下水年代分布、速さの分布である。中段左は塩分濃度分布の比較であり、左は基本モデル、右は異方性を与えたケース。下段は同様に地下水の流向流速分布。

(i)　分散長の影響

α_{Tv}/α_L =0.1 を維持したまま、分散長を 1/10 倍にしたケースについて解析結果を示す。図 2-2-26 は解析領域全体の塩分濃度分布であり、明らかに塩淡境界の幅に違いがみられる。FGB-2 孔付近を拡大したものが図 2-2-27 である。基本モデルと比較して、深度方向の濃度変化がシャープになる。地下水年代は塩淡境界中央付近の EL-110 m あたりで最も古くなるが、これは広域地下水流動によってもたらされた古い淡水系地下水が塩淡境界を形成しているためである。また、速さに関しては、上部更新統で総じて小さくなる。これは分散長を小さくしたことにより、地下水流動が不活発になったためと考えられ、これにより、FGB-2 孔周辺では流速が極小となる流動境界が明瞭になっている（図 2-2-28）。このように分散長の変化は、塩淡境界の幅だけでなく、地下水流動の活発さにも影響を及ぼしている。

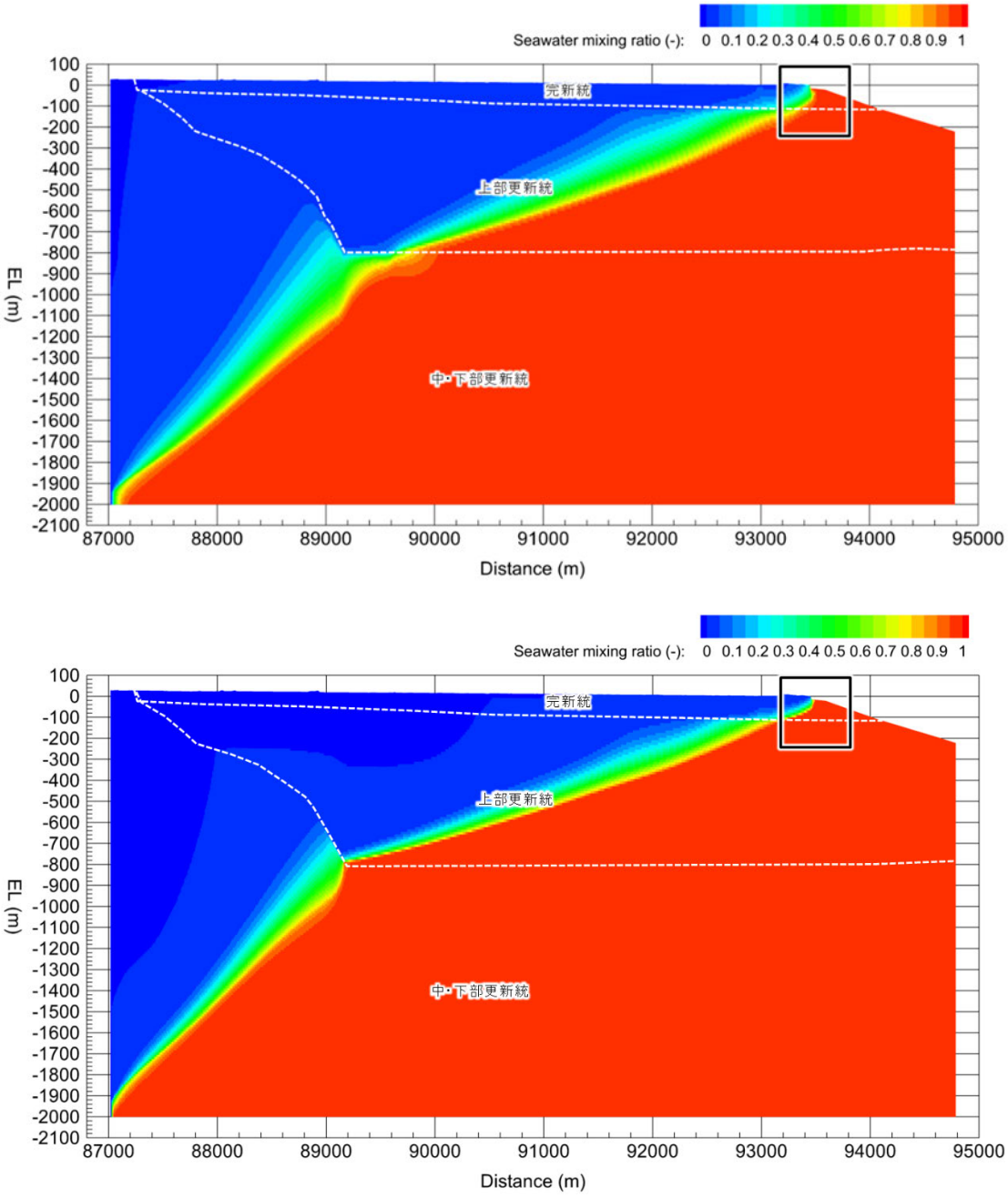


図 2-2- 26 基本モデルおよび分散長を 1/10 にしたケース（塩分濃度）

上は基本モデル、下は分散長を 1/10 にしたケース。

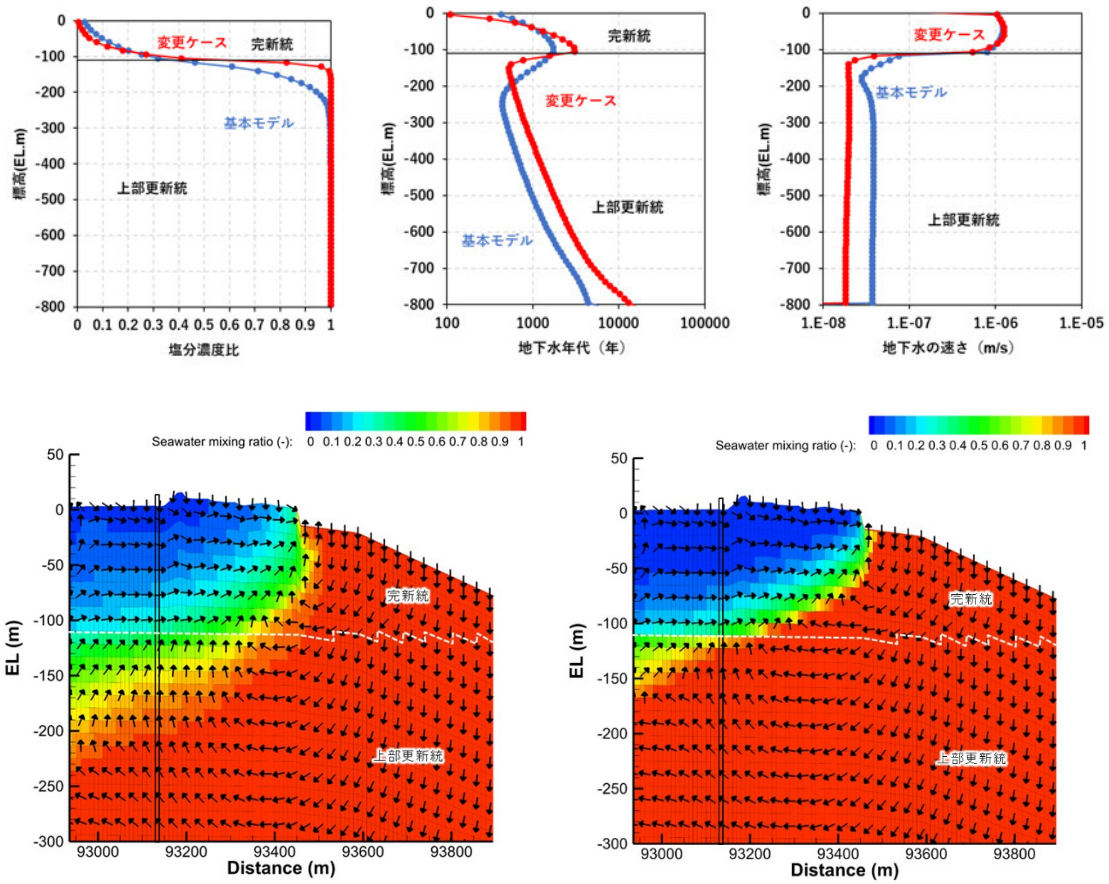


図 2-2- 27 基本モデルおよび分散長を 1/10 にしたケースでの解析結果の比較

上段は FGB-2 孔での変化。下段左は基本モデルでの塩分濃度分布、右は分散長を 1/10 にした変更ケース。

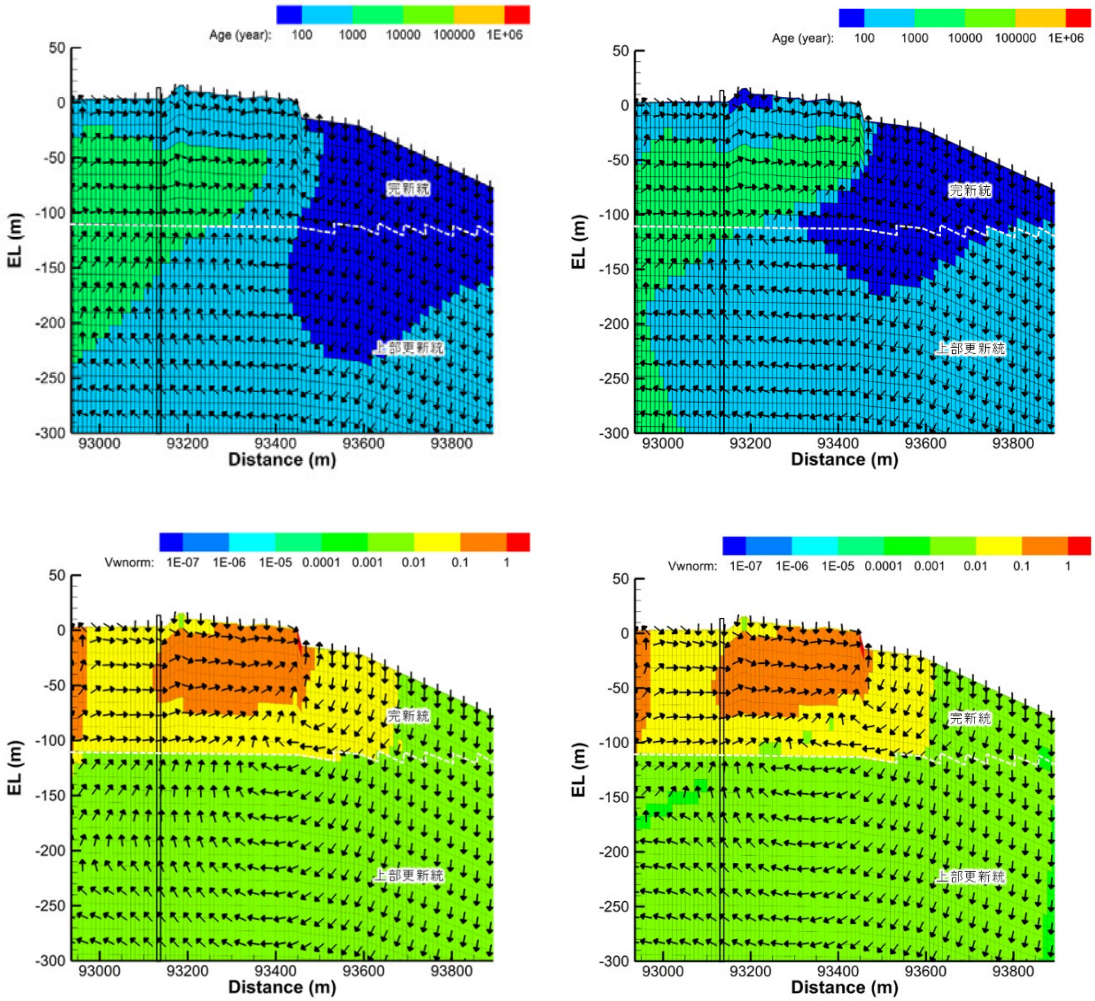


図 2-2- 28 基本モデルおよび分散長を 1/10 にしたケースでの解析結果の比較

FGB-2 孔周辺の変化。上段は地下水年代の分布で左は基本モデルで右が分散長を 1/10 にした変更ケース。下段は同様に地下水の速さである。

③　3 次元密度流解析

（a）　概要

3 次元密度流解析では、過年度と 2021 年度のボーリング調査にて得られた野外データ（キャリブレーションターゲット：SKB 孔と FGB-2 孔の塩分濃度分布）との整合性を確認する。この目的は 2 次元密度流解析が 3 次元密度流解析の結果を、ある程度反映するかどうかを把握する意味もある。境界条件、初期条件、解析コード、水理定数については上述の通りであり、基本的には 2 次元密度流解析と変わらない。解析領域や地質モデルは図 2-2-5、図 2-2-6、図 2-2-7 に示す通りである。セル長は 50 m、領域のセル数は東西方向に 210、南北方向に 272、鉛直方向に 43、総格子数は 749,275 である。

（b）　鉛直断面

3 次元地質モデルと解析結果で得られた塩分濃度分布を図 2-2-29 に示す。図 2-2-29 では A-A'から D-D'断面について示しているが、場所によって塩淡境界の位置が大きく異なっている。海岸線からの位置関係に注目すると、東側（E 断面）では塩淡境界は陸域まで入り込んでいるが、西側（A 断面）では、淡水が海底下に張り出している。

FGB-2 孔を切る断面での結果は、塩淡境界の幅は FGB-2 孔の位置においては 2 次元の解析結果と似た結果となった（図 2-2-30 および図 2-2-31）。これは地下水流動の方向と測線の方向が概ね一致したためと考えられる。一方、SKB 孔周辺では、塩淡境界が海岸線付近まで押し出されている（図 2-2-32 および図 2-2-33）。これは透水係数の低い山体（中・下部更新統：10^{-7} m/s）が海岸線付近に位置しているためである。上端境界条件として涵養フラックスを 1000 mm/y に一様に与えていることから、この透水性の低い山体に水を上から“押し込む”状態になっている。そのために、中・下部更新統に胚胎されている淡水系地下水の水理水頭は高くなり、この影響で塩淡境界は海側に押し出されている。C 断面、D 断面でも背後の山体の影響が認められるが、透水性の高い上部更新統内では選択的に塩水が侵入している。このように、塩淡境界の位置は背後の山体への涵養量と透水性によって大きく影響を受ける。

また、完新統と上部更新統に透水係数を表 2-2-3 のように変化させたケースが図 2-2-34 および図 2-2-35 である。地下水が垂直方向に流れにくくなったことにより、上部更新統の塩淡境界の位置が km スケールで変化しており、これは 2 次元密度流解析結果の②（h）で述べた結果と同じである。

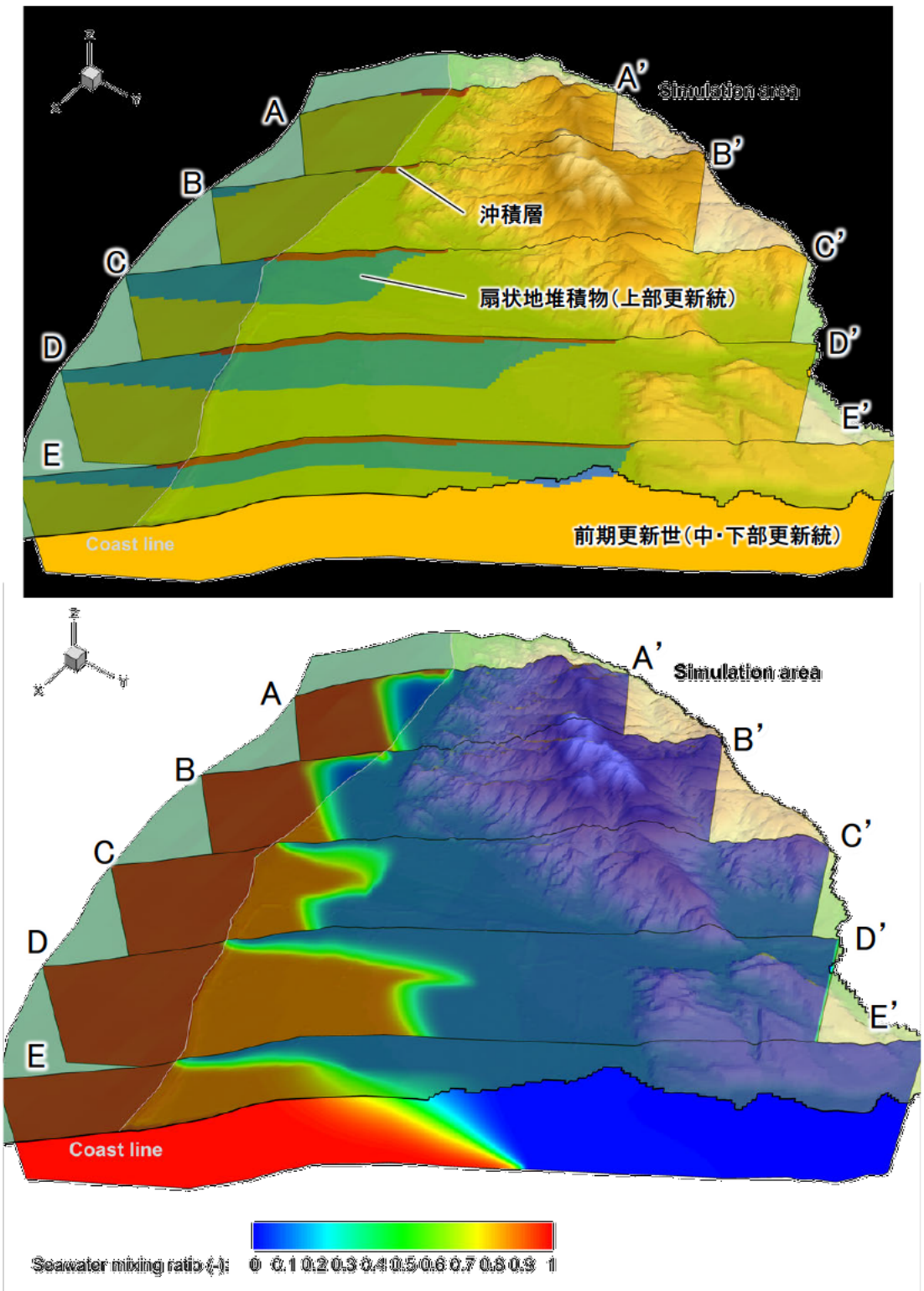
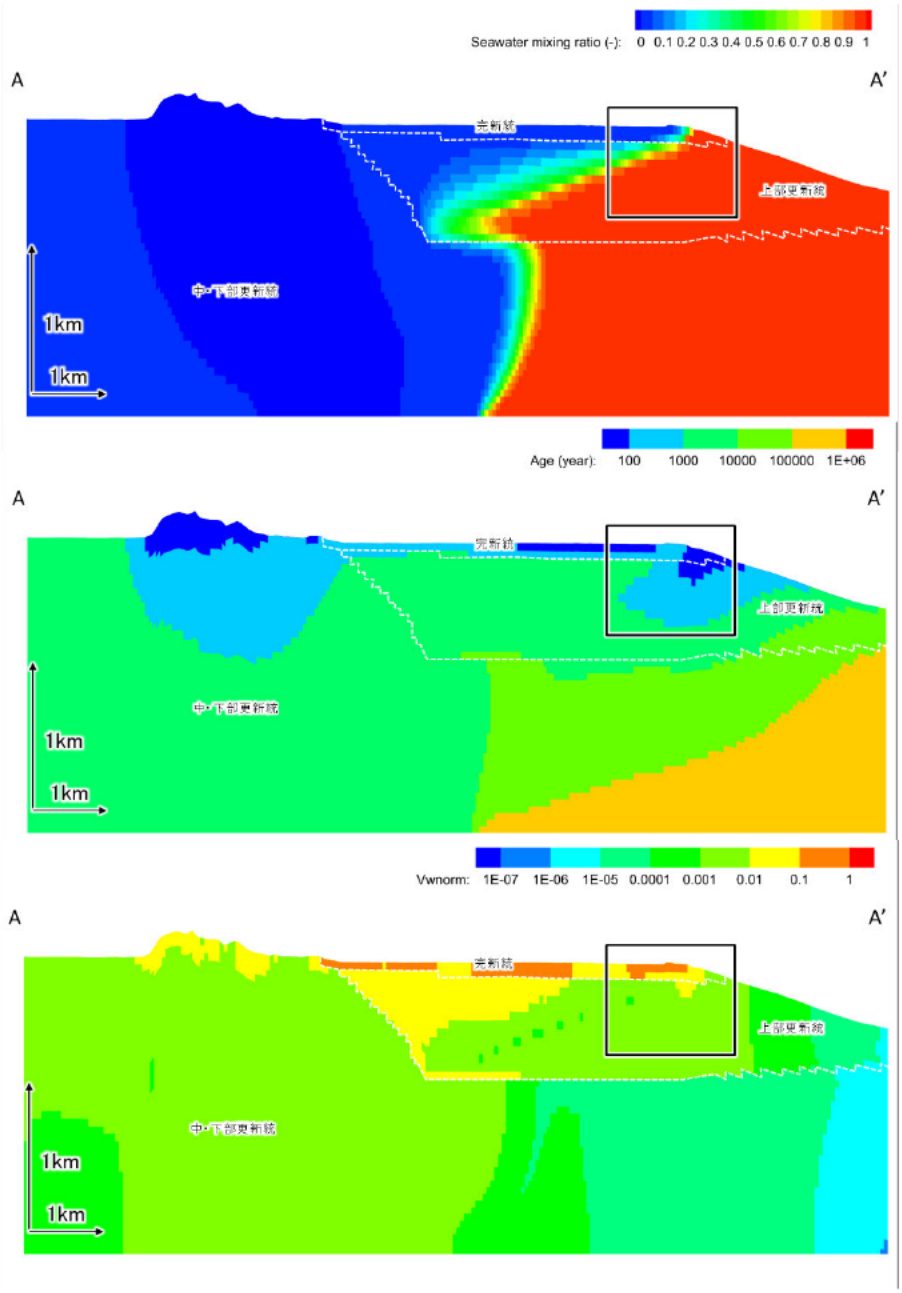


図 2-2- 29 3 次元モデルにおける塩淡境界位置（上：地質、下：塩分濃度）



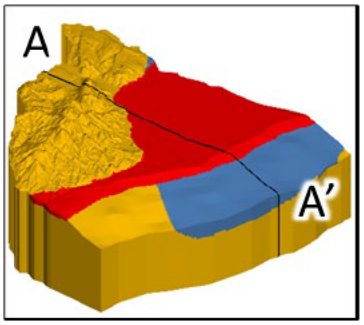
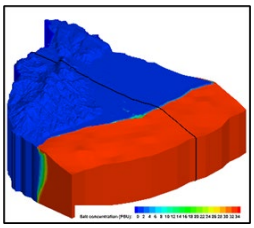
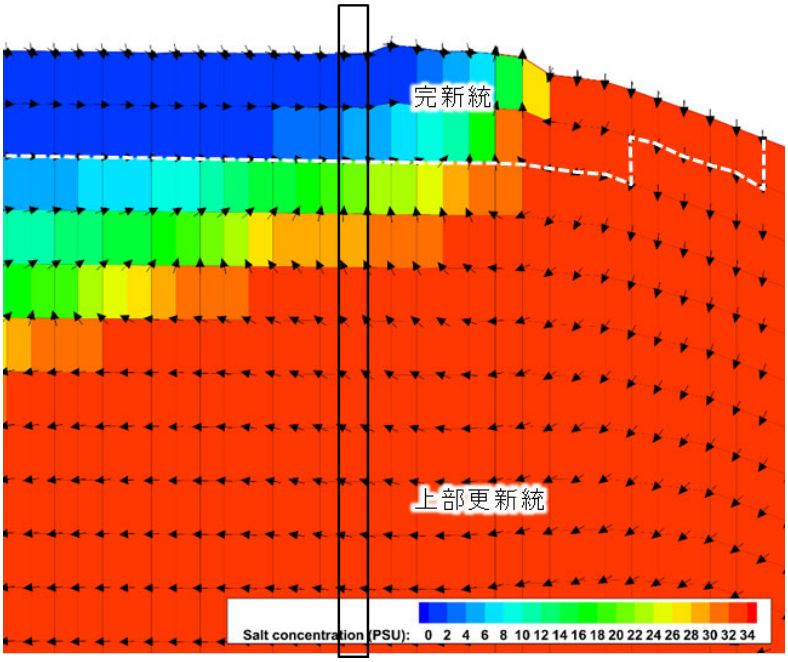


図 2-2- 30 FGB-2 孔を通る断面における 3 次元密度流解析初期モデルによる塩分濃度分布（上）と地下水年代分布（上から 2 番目）、流さの分布（上から三番目）。下段の図は断面位置。





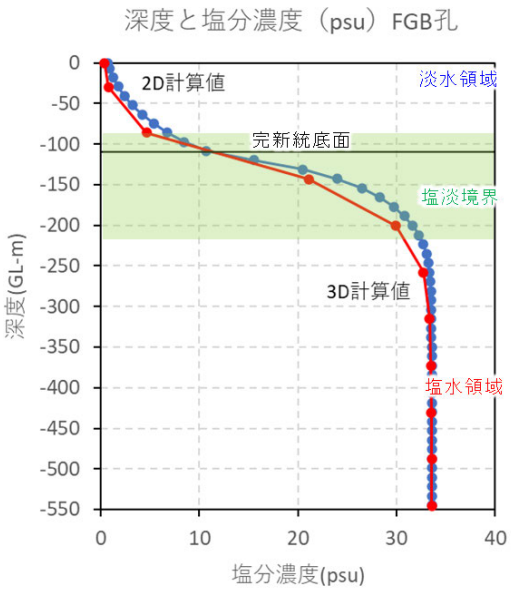


図 2-2- 31 3 次元密度流解析（基本モデル，FGB-2 を通る断面の解析結果）

上の図は塩分濃度分布であり、図中の縦棒は FGB-2 孔の位置である。下は 2 次元密度流解析結果との比較である。両者はほとんど変わらない。

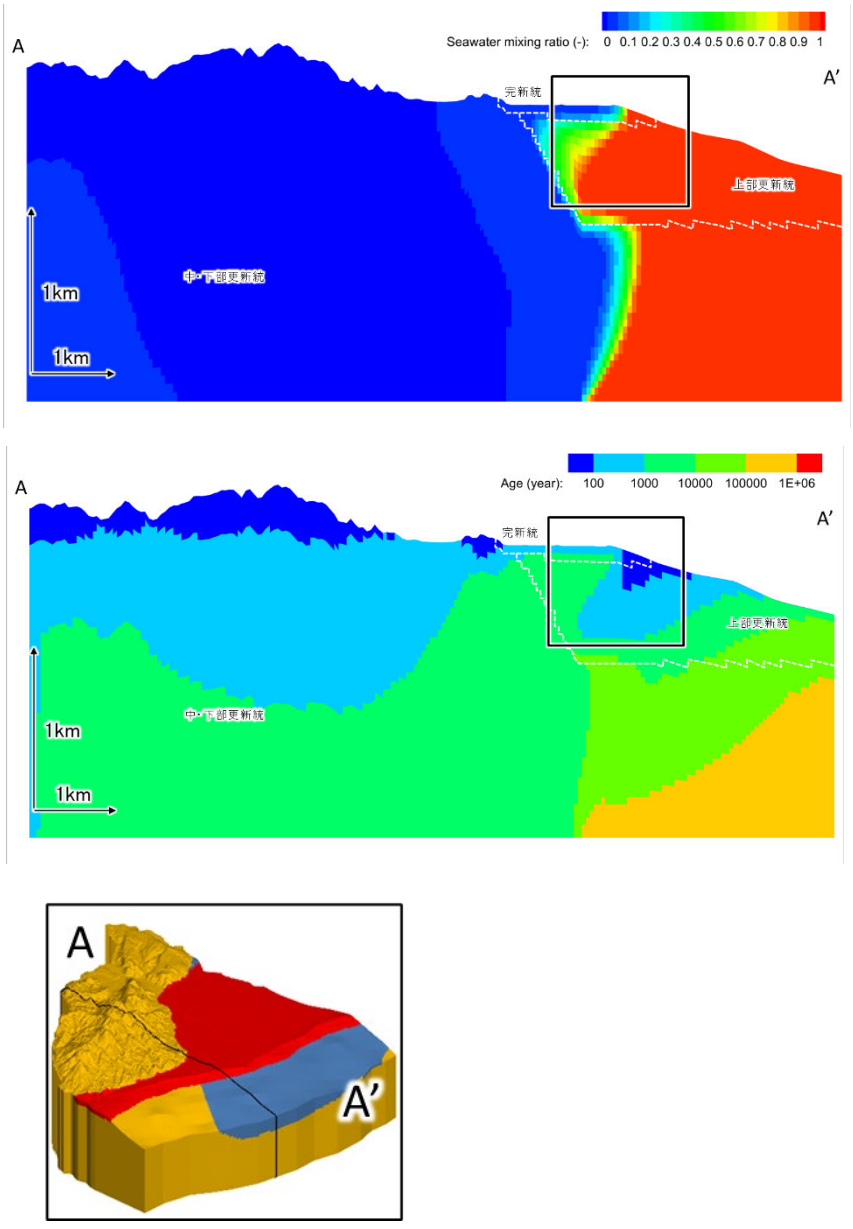


図 2-2- 32 SKB 孔を通る断面における 3 次元密度流解析初期モデルによる塩分濃度分布（上段）と地下水年代分布（中段）。下段の図は断面位置。

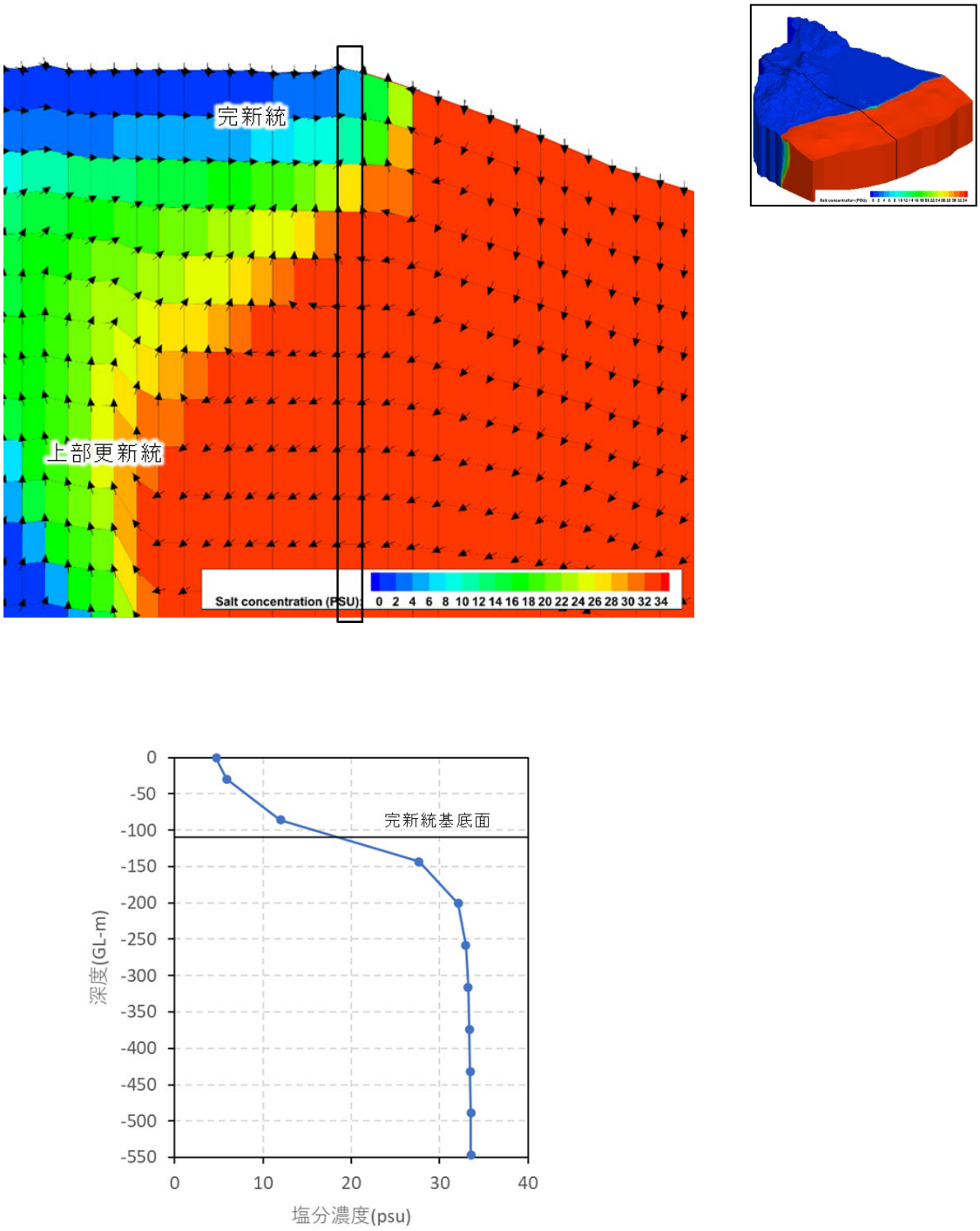


図 2-2- 33 3 次元密度流解析（基本モデル，SKB 孔を通る断面の解析結果）

上の図は塩分濃度分布であり、図中の縦棒は SKB 孔の位置である。下図は解析によって得られた SKB 孔の位置における塩分濃度分布。

表 2-2- 3 基本ケースと変更ケースに与えた透水係数

透水係数（m/s）	完新統	上部更新統
基本ケース	$K_h = K_v = 1.0 \times 10^{-4}$	$K_h = K_v = 1.0 \times 10^{-5}$
変更ケース	$K_h = 1.0 \times 10^{-4}$ $K_v = 1.0 \times 10^{-5}$	$K_h = 5.0 \times 10^{-6}$ $K_v = 5.0 \times 10^{-7}$

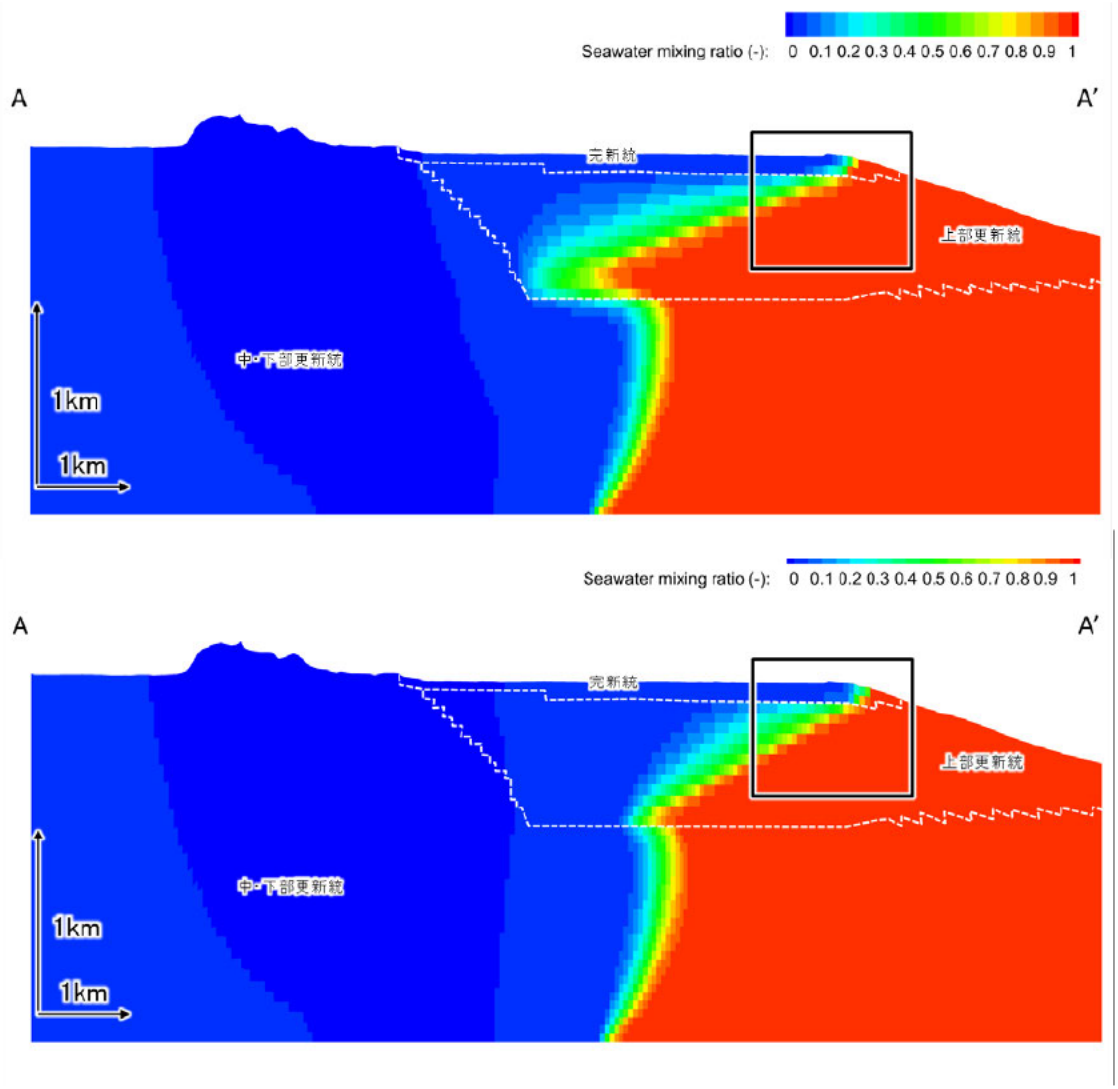


図 2-2- 34 3 次元密度流解析による塩分濃度分布（FGB-2 を通る断面の解析結果； 上：基本モデル，下：変更ケース）

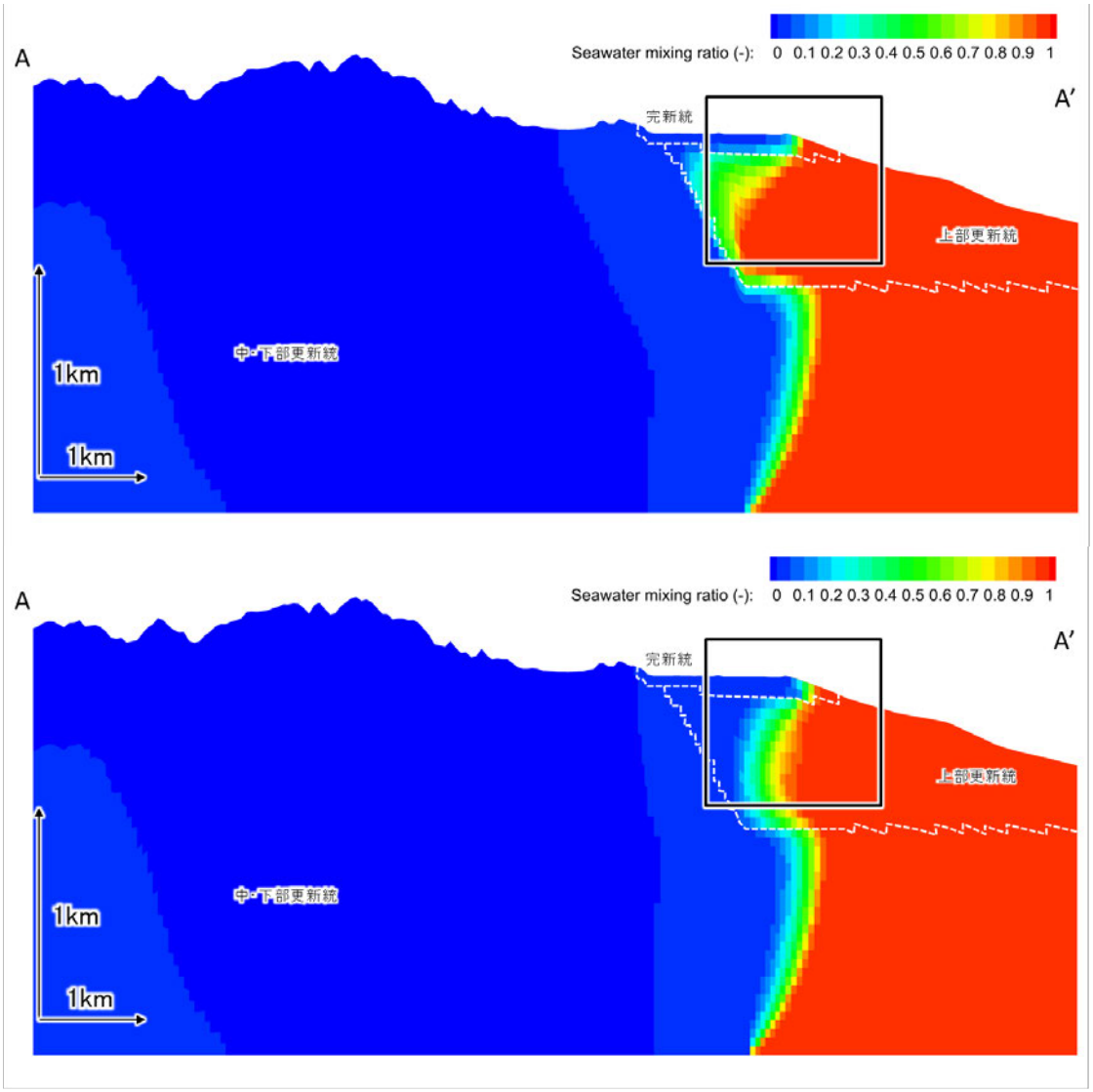


図 2-2- 35 3 次元密度流解析による塩分濃度分布（SKB を通る断面の解析結果； 上：基本モデル，下：変更ケース）

(c)　水平断面

基本ケースの計算結果を、GL-300 m、-800 m にて水平方向にスライスしたものが図 2-2-36 および図 2-2-37 である。

GL-300 m の水平断面（図 2-2-36）では、海岸線の西側に沿って海域に淡水系地下水が張り出しているが、中央～東側では塩淡境界は陸域となり、塩水くさびが形成されている。この東西の違いは、前節で述べた計算領域の西に位置する山体から地下水流動と、中・下部更新統と比べて透水性の高い上部更新統の分布が影響している。特に上部更新統の領域では塩淡境界は幅広になっている。一方、GL-800 m の水平断面（図 2-2-37）でも傾向は似ており、上部更新統の分布に影響を受けていることが示されている。また、塩淡境界内の地下水流動方向に関しては総じて東側は淡水系地下水と塩水系地下水が互いに反対方向になっており、上向きに流動方向が転じていると考えられる。一方、西側の塩淡境界内では西に向かう地下水流動が確認される。このように、高透水層の存在は、深層の塩水系地下水流動および塩淡境界内の地下水の水平方向の流動にも影響を与える。

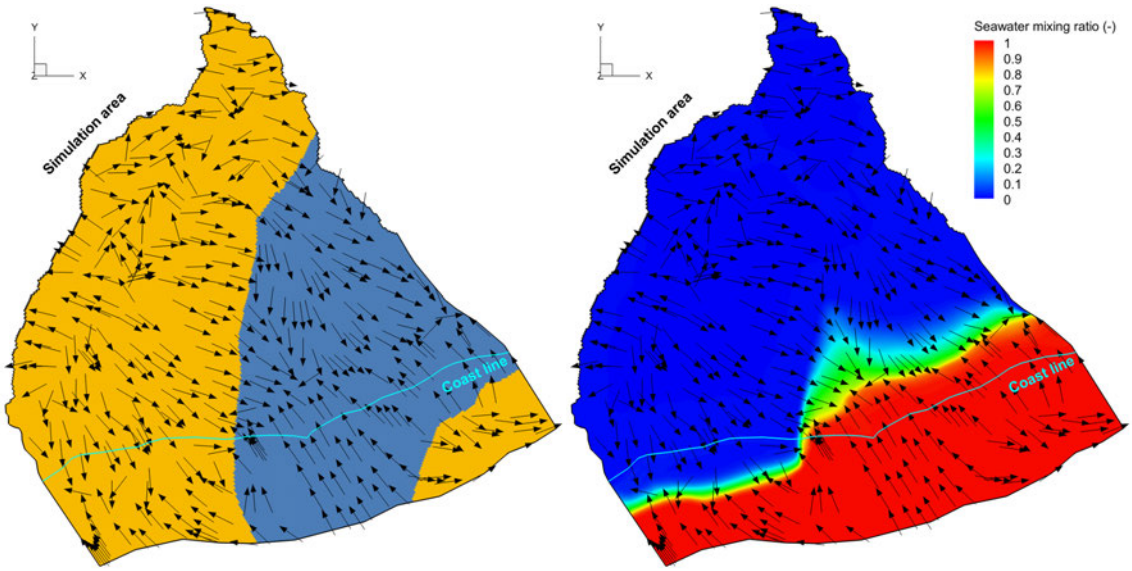
（4）　おわりに

本年度の解析の目的は、昨年度の現場データと既存調査により得られた水理パラメータを用いた密度流解析の整合性を確認することにあった。感度解析結果を考慮すると、既存調査により得られた水理パラメータ用いた密度流解析結果は現場データを十分説明し得ることが確認された。本研究は密度流解析コードが透水性の高い地域（透水係数が 10^{-4}～10^{-6}m/s）の塩水系地下水流動の評価に対し利用可能であることを示した事例である。

本研究の密度流解析は予察的なものであるが、いくつかの基礎的な知見が得られた。深層の塩水系地下水の流動は不活発というイメージがあるが、駿河湾のような透水性の高い地域では、塩淡境界の地下水よりも塩水系地下水が若いことがありうる。また、地下水年代が最も古い領域と地下水の速さが最も小さい領域は必ずしも一致しないことがわかった。

海岸線から数 km オーダーの塩淡境界の形状は、表層地質の透水性、涵養フラックスの大小、そして異方性によっても変化する。また、浅層地下水流動の活発さと無関係に塩水系地下水の年代が決まる深度領域が存在しうる。このような結果は、塩水系地下水の調査によって測定しにくいパラメータを推定するための手段としての可能性を示唆する。

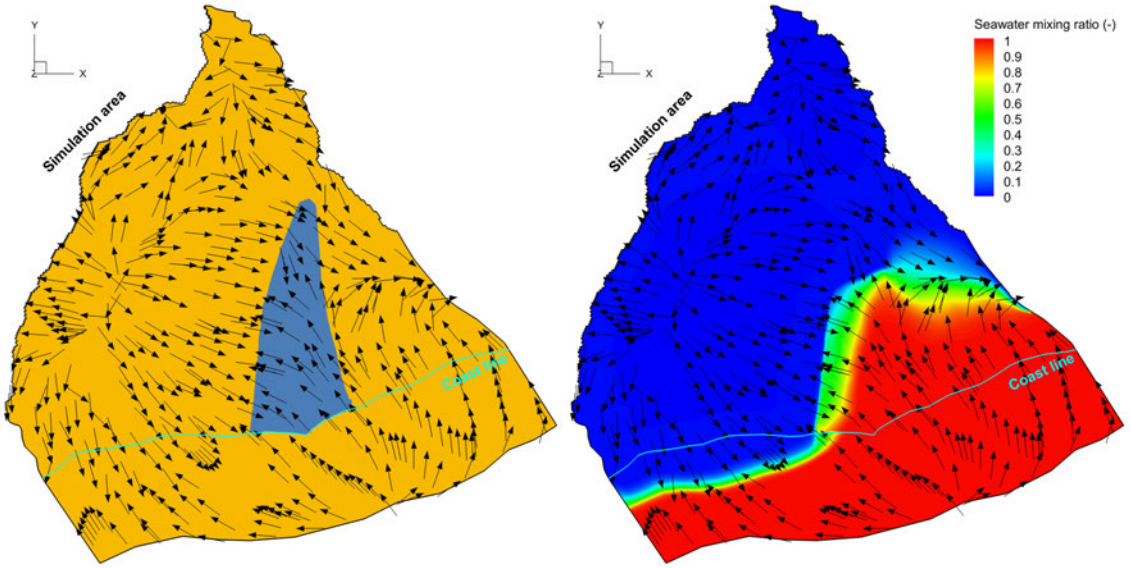
本年度、FGB-2 孔の調査が大きく進んだが、次年度はボーリング調査と密度流解析のデータの受け渡しにおける課題抽出も視野にいれ、調査結果をモデルに反映させる予定である。



地層区分で色分け

海水濃度を1.0とした
塩分濃度で色分け

図 2-2- 36 塩淡境界と地下水流動方向（GL-300m）
地層区分（左）の青色は上部更新統、オレンジ色は中・下部更新統



地層区分で色分け

海水濃度を1.0とした
塩分濃度で色分け

図 2-2- 37 塩淡境界と地下水流動方向（GL-800 m）
地層区分（左）の青色は上部更新統、オレンジ色は中・下部更新統

参考文献

Anderson M.P, Woessner W. and Hunt R. (2016) : Applied Groundwater Modeling. （訳）地下水モデル　実践的シミュレーションの基礎. 堀野治彦・ 諸泉利嗣・中村公人・大西建夫・吉岡有美，共立出版，497p

Gelhar L.W., Welty C. and Rehfeldt K.T. (1992): A critical review of data on field scale dispersion in aquifers , Water resources research, 28, 1955-1974.

Drever J.N（1988）: The geochemistry of natural waters. Printice Hall, 437p.

Hillel D.(2001) : 環境土壌物理学　I 土と水の物理学.（監訳）岩田進午・内嶋善兵衛，農林統計協会.

石原武志・水野清秀（2016）: 駿河湾北部沿岸域における平野地下の浅部地質構造. 海陸シームレス地質図 S-5（3），1-21.

伊藤忍・山口和雄（2016）: 富士川河口地域における反射法地震探査. 海陸シームレス地質図 S-5（4），1-25.

King F.H.（1898）: Principles and conditions of the movements of ground water, Washington, 59-294.

気象庁(2022) : 気象庁ホームページ : 過去の気象データ.
https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php（閲覧日 : 2023/1/15）

村下敏夫（1982）: 本邦における地下水の塩水化. 地質調査所月報，33（10），479-530.

産総研地質調査総合センター(2022)

村下敏夫・岸和男（1967）: 地下水の塩水化についての研究－第 1 報　熔岩帯水層の水理地質学的性質－. 地調月報，18（6），1-14.

Neuman S.P.(1990): Universal scaling of hydraulic conductivities and dispersivities in geological media, Water resources research, 26, 1749-1758.

日本環境管理学会（2009）: 改訂 4 版　水道水質基準ガイドブック. 丸善，209p.

小田ほか（2010）: 塩淡境界部における塩濃度分布の移流・分散および密度流解析. JAEA-Research, 2010-020, 23p

尾崎正紀・水野清秀・佐藤智之（2016）: 5 万分の 1 富士川河口断層帯および周辺地域地質編纂図および説明書，海陸シームレス地質情報集，駿河湾北部沿岸域，海陸シームレス地質図集 S-5 (9), 1-57.
URL: https://www.gsj.jp/data/coastal-geology/GSJ_SGMCZ_S5_2016_09_c.pdf（確認日 2021 年 3 月 3 日）

Reilly T.E. and Goodman A.S.(1985): Quantitative analysis of saltwater-freshwater relationships in groundwater systems - A historical perspective. Journal of Hydrology, 80, 125-160.

産業技術総合研究所（2015）: 平成 25 年度　海域地質環境調査確証技術開発　成果報告書（その 1）

L:https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2015/27fy_kaiiki-1.pdf（確認日　2021 年 2 月 16 日）
（その 2）
URL:https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2015/27fy_kaiiki-2.pdf（確認日　2021 年 2 月 16 日）
産業技術総合研究所・原子力環境整備促進・資金管理センター・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　沿岸部処分システム評価確証技術開発　報告書
URL:https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2020/2fy_coast.pdf　（確認日　2022 年 3 月 18 日）
佐藤智之・荒井晃作（2016）：20 万分の 1 駿河湾北部沿岸域海底地質図及び説明書．海陸シームレス地質図 S-5（1），1-25.
髙橋康裕・鈴木和則・萩沼真之・松尾雄司・土山滋郎・大岡政雄・菱谷智幸（2004）：沿岸域における地下水流動への非ダルシー性の影響（1） ―解析的検討―．土木学会第 59 回年次学術講演会（平成 16 年 9 月），43-44.
登坂博行（2002）：地質時間にわたる淡塩漸移帯の形成過程と形態変化に関する数値解析的検討（その 2）－動的境界条件下における検討－．応用地質，43（5），306-315.
安原正也・開発一郎（1981）：多孔質媒体中の非ダルシー流動に関する研究の流れ．日本地下水学会誌，23（2），1-9.

図 2-1- 1　繰り返しアプローチの概念図 9
図 2-1- 2　本研究のフローチャート 10
図 2-1- 3　研究対象地域の地下水流動の概念図 12
図 2-1- 4　ボーリング調査位置図（産業技術総合研究所、2016） 12
図 2-1- 5　SKB 孔の柱状図および揚水地下水（黄色）と間隙水（緑色・水色）の水質 13
図 2-1- 6 沿岸部における地下水流動の概念図（Machida et al., 2016） 13
図 2-1- 7　富士山周辺での酸素同位体比の分布 16
図 2-1- 8　観測値の位置 17
図 2-1- 9　透水係数の逆解析で使用した解析モデル（2021 年度） 18
図 2-1- 10　相関係数マトリクス 22
図 2-1- 11　Pilot Point および観測値の配置図 26
図 2-1- 12　数値実験の逆解析結果 27
図 2-1- 13　観測値と計算値の比較（数値実験） 28
図 2-1- 14　逆解析中の目的関数の推移（数値実験） 28
図 2-1- 15　逆解析中の目的関数の推移 30
図 2-1- 16　透水係数分布の変化 30
図 2-1- 17　同定率の概念図 31
図 2-1- 18　Pilot Point ごとに評価された同定率のマッピング 31
図 2-1- 19　感度解析手法の体系的な整理図　（Pianosi et al., 2016）に加筆 34
図 2-1- 20　Morris 法の評価方法（Wicaksono, 2016） 35
図 2-1- 21　グローバル感度解析で使用する解析モデル 37
図 2-1- 22　グローバル感度解析で使用した観測値 38
図 2-1- 23　Morris 法における透水係数のサンプリング箇所 40
図 2-1- 24　軌道の数と EE の絶対値の平均（μ^*） 41
図 2-1- 25　Morris 法の評価結果 42
図 2-1- 26　サンプリング数と Sobol'の感度指標 44
図 2-1- 27　Sobol'法の評価結果 45
図 2-1- 28　グローバル感度解析と逆解析結果の概要 47
図 2-1- 29　解析で考慮した海水準変動 49
図 2-1- 30　単一地形勾配の 2 次元鉛直モデル 50
図 2-1- 31　相対塩水体積および平均滞留時間を計算する領域の概要図 52
図 2-1- 32　地形勾配 2%モデルの解析結果（24 万年～36 万年） 54
図 2-1- 33　地形勾配 5%モデルの解析結果（24 万年～36 万年） 55
図 2-1- 34　相対塩水体積（RSV）の経時変化 56
図 2-1- 35　平均滞留時間（MRT）の経時変化 57

図 2-2- 1 沿岸部における地下施設設置のイメージ.....65
図 2-2- 2 沿岸部周辺の淡水系地下水と塩水系地下水の流動イメージ.....65
図 2-2- 3 動水勾配が小さいときに起こりそうなダルシ―の法則からのずれ.....66
図 2-2- 4 3 つの水文地質単元（モデルレイヤー） 69
図 2-2- 5 完新統基底面標高分布図 69
図 2-2- 6 上部更新統基底面標高分布図 70
図 2-2- 7 3 次元モデルの鳥瞰図（縦：横＝2：1） 70
図 2-2- 8 2 次元モデルの地質分布（縦：横＝3：1） 73
図 2-2- 9 昨年度の 2-2 節でおこなわれた解析領域（紫色の枠）と、本研究の解析領域（赤色の点線)。 74
図 2-2- 10 基本モデルでの解析結果（塩分濃度） 76
図 2-2- 11 基本モデルでの FGB-2 孔周辺の解析結果（塩分濃度） 77
図 2-2- 12 基本モデルでの解析結果（地下水年代） 78
図 2-2- 13 基本モデルでの FGB-2 孔周辺の解析結果（地下水年代） 79
図 2-2- 14 基本モデルでの解析結果（地下水の速さ） 80
図 2-2- 15 基本モデルでの FGB-2 孔周辺の解析結果（地下水の速さ） 81
図 2-2- 16 基本モデルおよび完新統の透水係数を 8 倍にしたケースでの解析結果の比較（塩分濃度） 84
図 2-2- 17 基本モデルおよび完新統の透水係数を 8 倍にしたケースでの解析結果の比較（地下水年代） 85
図 2-2- 18 基本モデルおよび完新統の透水係数を 8 倍にしたケースでの解析結果の比較（地下水の速さ） 86
図 2-2- 19 基本モデルおよび完新統の透水係数を 8 倍にしたケースでの解析結果の比較.87
図 2-2- 20 基本モデルおよび上部更新統の透水係数を 5 倍にしたケースでの解析結果の比較（塩分濃度） 88
図 2-2- 21 基本モデルおよび上部更新統の透水係数を 5 倍にしたケースでの解析結果の比較（地下水年代） 89
図 2-2- 22 基本モデルおよび上部更新統の透水係数を 5 倍にしたケースでの解析結果の比較.....90
図 2-2- 23 完新統の透水係数に異方性を与えた場合（K_h ＝ 1.0×10^{-4} m/s、K_v = 1.0×10^{-5}m/s）FGB-2 孔周辺の変化。上段の左から塩分濃度分布、地下水年代分布、速さの分布である。中段左は塩分濃度分布の比較であり、左は基本モデル、右は異方性を与えたケース。下段は同様に地下水の流向流速分布。 92
図 2-2- 24 基本モデルおよび上部更新統の透水係数に異方性を与えた場合.....93
図 2-2- 25 上部更新統の透水係数に異方性を与えた場合 94

図 2-2- 26 基本モデルおよび分散長を 1/10 にしたケース（塩分濃度）.....96
図 2-2- 27 基本モデルおよび分散長を 1/10 にしたケースでの解析結果の比較.....97
図 2-2- 28 基本モデルおよび分散長を 1/10 にしたケースでの解析結果の比較.....98
図 2-2- 29 3 次元モデルにおける塩淡境界位置（上：地質、下：塩分濃度）.....100
図 2-2- 30 FGB-2 孔を通る断面における 3 次元密度流解析初期モデルによる塩分濃度分布（上）と地下水年代分布（上から 2 番目）、流さの分布（上から三番目）。下段の図は断面位置。.....101
図 2-2- 31 3 次元密度流解析（基本モデル，FGB-2 を通る断面の解析結果）.....102
図 2-2- 32 SKB 孔を通る断面における 3 次元密度流解析初期モデルによる塩分濃度分布（上段）と地下水年代分布（中段）。下段の図は断面位置。.....103
図 2-2- 33 3 次元密度流解析（基本モデル，SKB 孔を通る断面の解析結果）.....104
図 2-2- 34 3 次元密度流解析による塩分濃度分布（FGB-2 を通る断面の解析結果； 上：基本モデル，下：変更ケース）.....106
図 2-2- 35 3 次元密度流解析による塩分濃度分布（SKB を通る断面の解析結果； 上：基本モデル，下：変更ケース）.....107
図 2-2- 36 塩淡境界と地下水流動方向（GL-300m）.....109
図 2-2- 37 塩淡境界と地下水流動方向（GL-800 m）.....109

表 2-1- 1 地質の水理特性.....15
表 2-1- 2 逆解析で使用する解析モデルの境界条件.....19
表 2-1- 3 解析モデルの基本透水係数.....20
表 2-1- 4 ボーリング調査（SKB 孔）を追加した透水係数の逆解析結果.....22
表 2-1- 5 数値実験で使用する解析モデルの境界条件.....23
表 2-1- 6 ^{4}He の観測値を仮定した数値実験の逆解析結果.....24
表 2-1- 7 海水準変動解析の解析条件.....51

表 2-2- 1 解析条件（境界条件）.....73
表 2-2- 2 基本モデルでの水理パラメータ.....74
表 2-2- 3 基本ケースと変更ケースに与えた透水係数.....105

第３章　海陸連続３次元地質環境モデルの妥当性の検証に向けたデータ取得方法の高度化

３－１　陸域から海域にかけての地質環境特性の把握技術の高度化

（1） 背景と目的

平成 29 年 5 月に経済産業省が公開した科学的特性マップにおいて日本国内の沿岸域の大部分は「好ましい特性が確認できる可能性が相対的に高い地域」のうち、「輸送面でも好ましい」地域とされている（経済産業省，2017）。一方で、平成 28 年 8 月に経済産業省が公表した“沿岸海底下における地層処分の技術的課題に関する研究会とりまとめ“ では平成 27 年に総合資源エネルギー調査会放射性廃棄物ワーキンググループにおいて、沿岸部における一般性と課題についての指摘があったことが記載されており、これを受ける形で、研究会において沿岸部（海岸線から陸側に 20 km、海側に 15km の範囲）の地質環境において検討すべき項目として、海水準変動、塩淡境界、水理場、化学場が抽出され、これらの特徴について説明がなされている（経済産業省，2016）。これらの項目は全て地下水に関連づけられており、沿岸部における地下水特性の把握が、沿岸海底下等における安全な地層処分事業の実施に必要不可欠であることがわかる。本とりまとめでは、海域を含めた沿岸部における地層処分を実現するために必要な基本的な技術は概ね整備されているものの、信頼性の更なる向上にむけて技術の高度化に引き続き取り組む必要性が示されており、また地質環境調査・評価と工学的対策や安全評価を組み合わせた包括的な調査・評価技術の体系的な整備の実施の必要性も示されている。また平成 30 年 3 月に公開された ”地層処分における全体計画（平成 30 年度～令和 4 年度）“ においても、沿岸海底下の地質環境特性の調査・評価技術の整備が項目として挙げられており、沿岸部陸域から沿岸海底下までを対象とした広域地下水流動の連続性や長期にわたり安定な水理場や化学環境の存在、断層の地下水流動への影響などが把握できるように調査・評価技術を体系的に整備することが求められている（地層処分研究開発調整会議，2019）。

本研究では、経済産業省（2016）において検討項目とされている海水準変動、塩淡境界、水理場、化学場と地下水流動との関係について、一般性の抽出も視野に入れつつ検討を行い、さらに地層処分研究開発調整会議（2019）において述べられている沿岸部陸域から海域にかけての広域地下水流動系を含む地質環境特性の把握技術の高度化の一環として、海陸連続 3 次元地質環境モデルの妥当性の検証に向けたデータ取得手法の高度化を目指した。また、研究を進めるにあたり概要調査段階を想定した調査孔を用いた地質環境と工学的対策（施設設計や性能評価）との分野間連携についても意識し、調査孔における物理検層や採水などの調査項目の検討をおこなった。

上記の理由から、本ボーリング調査における目的は、沿岸部地下水の特性把握の観点から①陸域と海域の地下水の連続性の把握、②塩淡境界付近における地下水の流向・流速の確認、③塩水領域の地下水質と年代の把握、分野間連携の観点から④物理検層による地質情報や物理パラメータの取得とデータが持つ代表性の検証、⑤初期地圧測定のための新たな水平

応力測定手法の検証とした。令和 4 年度は、2-2 節の密度流解析と合わせて、①～③について研究を進めた。

（2） 調査地域の概要

本研究地域は駿河湾沿岸部である。上述したように沿岸部における地下水特性の一般性の把握は本研究における重要なテーマの一つである。これまでに地層処分において数多くの地下水研究が実施されているが、日本全国の沿岸部地下水の一般性に着目した研究は、産業技術総合研究所ほか（2018）において実施されたシステマティック区分のみである。この研究では、日本全国の沿岸域における 90 地点で深部地下水を採水し、地下水年代測定結果と水質から地下水を現降水、現海水、氷期降水、化石海水の 4 つに分類するとともに、井戸直下の地下地質ごとにその割合を示した（図 3-1-1）。その結果、地下深部に賦存されている地下水の種類と地質との間には、明瞭な関係性があることが示された。また地下水年代と地形・地質学的要素を対象とした多変量解析を実施し、海底地形勾配が地下水年代の決定に大きく関与していることを明らかにした。

駿河湾は、産業技術総合研究所が平成 19 年度～24 年度にかけて調査した北海道幌延町沿岸部とは異なり、急峻な地形を有し、上述したシステマティック区分による結果では 10 万年を超える古い地下水年代を持つ地下水が海底下に存在しづらい環境である。一方で、後背地に標高 3000 m を超える富士山を持つことから地下水の動水勾配が大きく、既存の調査において、陸域の地下水流動が調査され、明確な海底湧出地下水の存在が確認されているなど、国内で最も陸域から海域の地下水流動特性を確認しやすい地域である。

（3） 既存調査に基づく調査地域の水理地質特性

図 3-1-2 に示すように、本研究の調査地点 FGB-2 孔（後述）は、入山瀬断層の東側の富士川扇状地の上に位置し、海岸線からは約 300 m内陸にある。富士川扇状地の地形・地質学的な特徴については、過去に同じ地域で調査を実施した受託事業である海域地質環境調査確証技術開発の成果報告書（産業技術総合研究所，2013; 2014; 2015）や、本事業における報告書（産業技術総合研究所ほか，2019）に詳細が記載されており、また水質や同位体を含む水文データについては、井川ほか（2016）や小野ほか（2016）などに報告されているため本稿では概略のみを記載する。図 3-1-3 は産業技術総合研究所（2013）による 2014 年 1 月に実施された海岸線から約 1.2 km の海域を対象に実施した広域曳航調査における海水中（水深 1 m）の ^{222}Rn 濃度の測定結果を示したものである。^{222}Rn はウラン崩壊系列に属する放射性同位体であり、親核種は ^{226}Ra である。^{226}Ra は岩石の鉱物中に含まれており、α 崩壊により ^{222}Rn を大気や水などの接触している媒体中へ放出する。^{222}Rn は水への溶解性は高い一方で、大気と接触すると大気中へと散逸する性格をもつため、地下水中の濃度は高いものの、河川水や海水中の濃度は低くなる。したがって、沿岸部における海底湧出地下水を検出するためのよいトレーサーとなる（Burnett et al., 2001; 2010）。

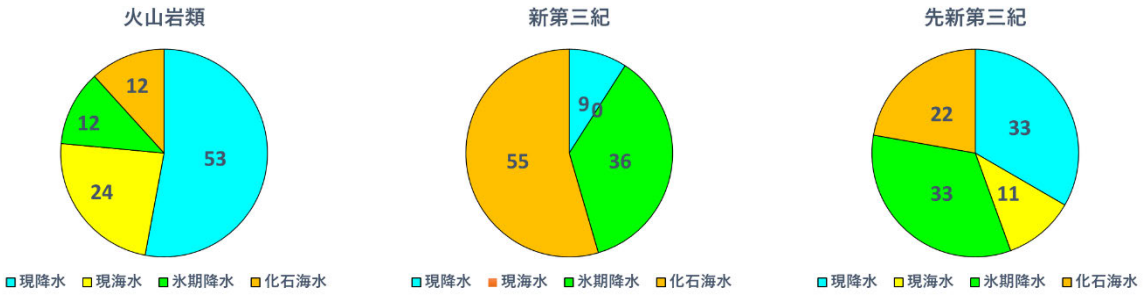


図 3-1- 1　地下地質ごとの地下水の区分

（火山岩類 17 地点、新第三紀堆積岩類 11 地点、先新第三紀堆積岩類 18 地点、円グラフの単位は%）（産業技術総合研究所ほか，2019）

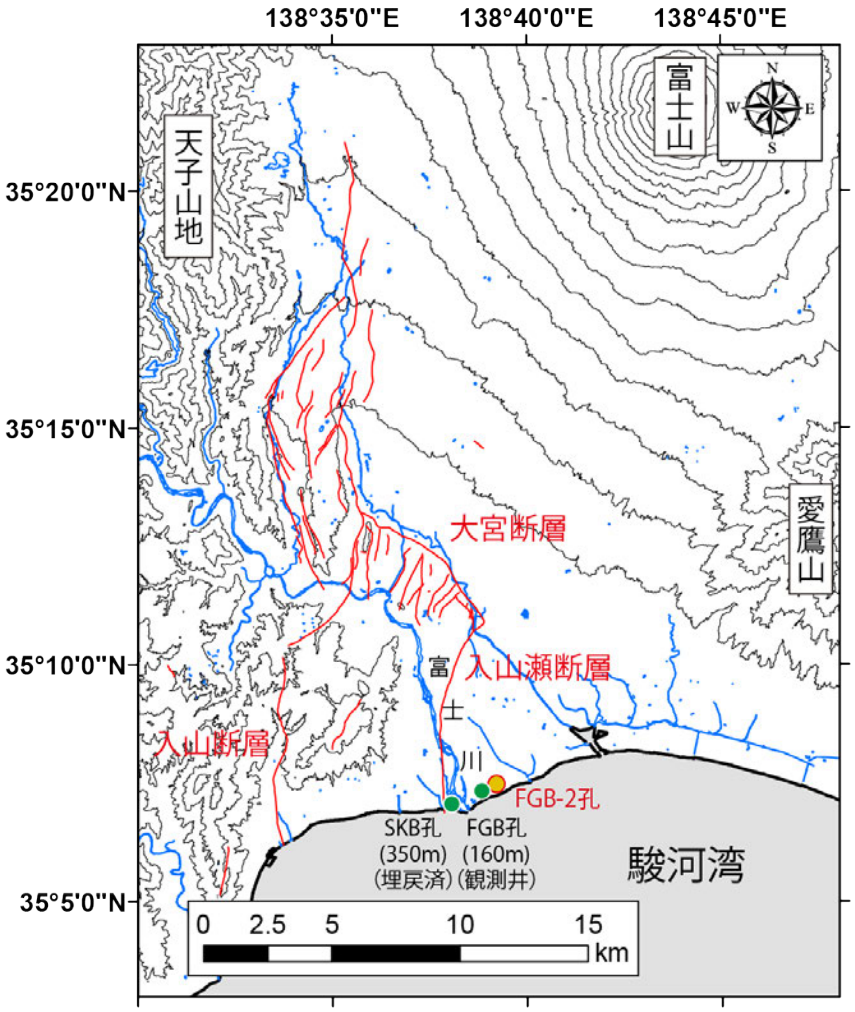


図 3-1- 2　調査地点 FGB-2 孔の位置図

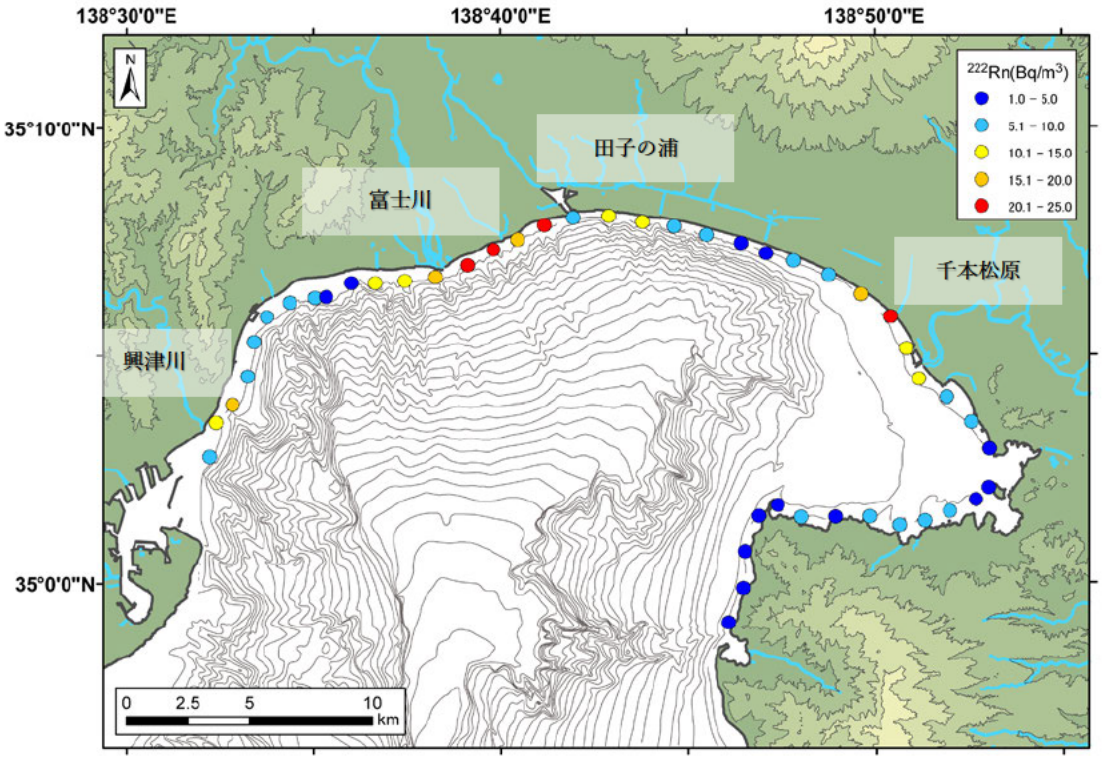


図 3-1- 3　駿河湾における海水中の ^{222}Rn 濃度分布
（産業技術総合研究所，2013）

本地域では、富士川から田子の浦にかけて相対的に高い ^{222}Rn 濃度が検出されており、^{222}Rn と電気伝導率の関係から、これらの Rn 濃度が地下水に起因していることが明らかとなっている。またサイドスキャンソナーを用いた海底地形探査により、音波の散乱域が水深 150～170 m の範囲に存在していることがわかっている（図 3-1-4）。音波の散乱については複数の要因が考えられるため、必ずしも海底湧出地下水の存在を表しているわけではないが、広域曳航調査と同時期に実施された底層水の採水結果からは、部分的に高い ^{222}Rn 濃度が検出されており、音波の散乱域が海底湧出地下水との関連性が示唆されている。

陸域に関しては同事業において 2014 年と 2015 年にかけて富士川の西側と東側にそれぞれ SKB 孔と FGB 孔という 2 つの調査孔を掘削した（図 3-1-2）。それぞれの調査孔の深度は 350 m と 160 m である。２つの調査孔ではオールコアリングによる地質試料の採取、孔内物理検層、ならびに採水を伴う連続揚水試験などの水理試験を実施した。SKB 孔については 10 深度で地下水の採水を実施し、水温、pH、電気伝導率、無機溶存イオン濃度、水素・酸素安定同位体比（δD や δ^{18}O）、放射性炭素同位体（δ^{13}C や ^{14}C）、溶存ヘリウム（^{3}He/^{4}He）の分析を実施し、FGB 孔ではスクリーンが設置された深度 150.83～157.33 m にかけて水理試験を実施した。図 3-1-5 は SKB 孔における Cl^-濃度、δD および ^{14}C 濃度の鉛直プロファイルを示したものである。SKB 孔（汀線より 50 m 内陸）では、深度 170 m 以深で Cl^-濃度と δD は、海水と値とほぼ一致する。一方で ^{14}C 濃度は深度 170 m 付近でもっとも小さい値、すなわち最も古い地下水年代を示した。図 3-1-6 はこれらの調査結果から推定される沿岸部における地下水の流動系を示した概念図である。本図から駿河湾では、より深い海底において塩水が陸域に向かって流動し、塩淡境界にて上昇し、その後、塩淡境界に沿って海側に向かって流出していることが推察される。

このように、本地域の塩淡境界および塩水系地下水の実態は徐々に明らかになってきているが、より深層の領域については調査が行われていない。そこで本事業では FGB-2 孔の掘削を行い、昨年度まで深度 400 m まで掘進したところである。本年度は 2-2 節の密度流解析への展開も考慮し、FGB-2 孔を深度 800 m まで増掘するとともに、淡水領域から塩淡境界上部までをより詳細に調査する目的で、深度 120 m の FGB-3 孔の掘削をおこなった。

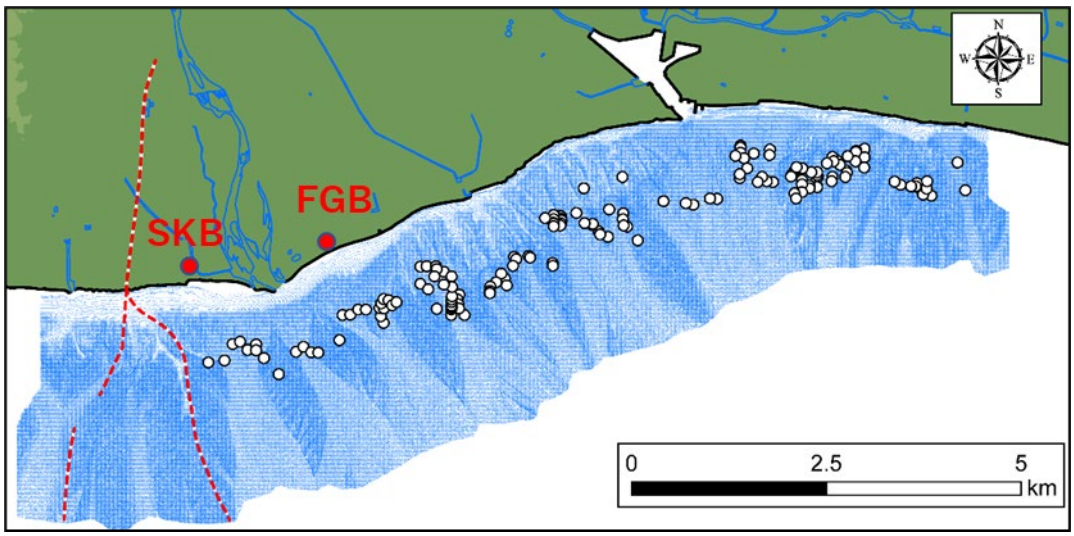


図 3-1- 4　駿河湾における音波の散乱域（産業技術総合研究所，2013 に加筆）

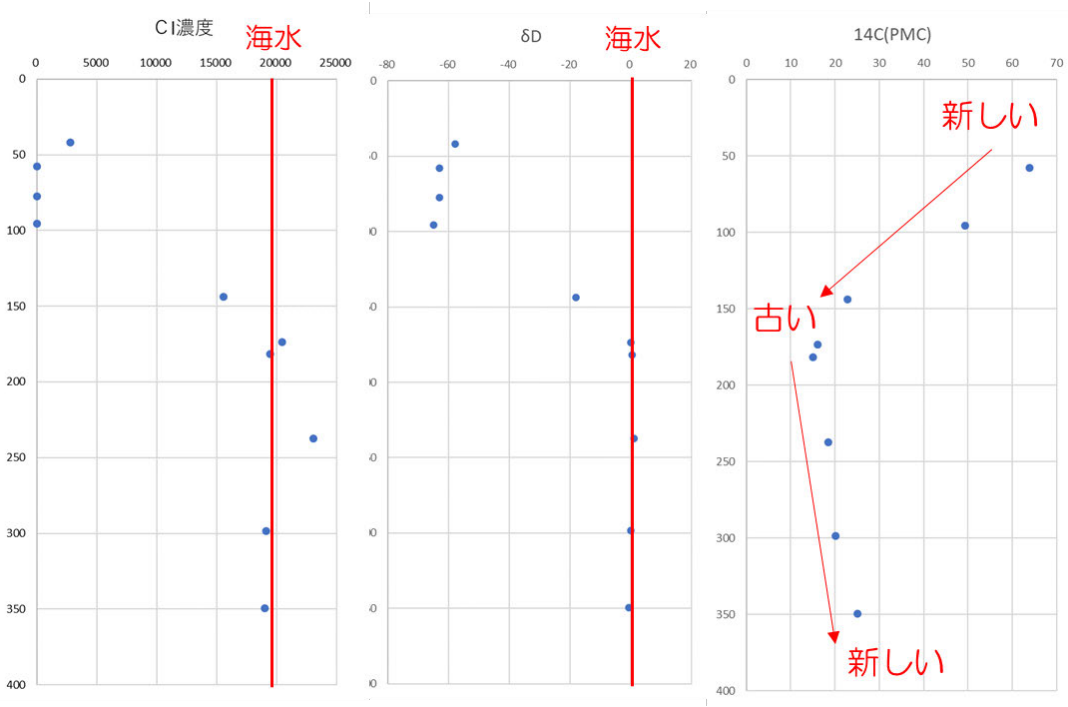


図 3-1- 5　SKB 孔における水質の深度プロファイル

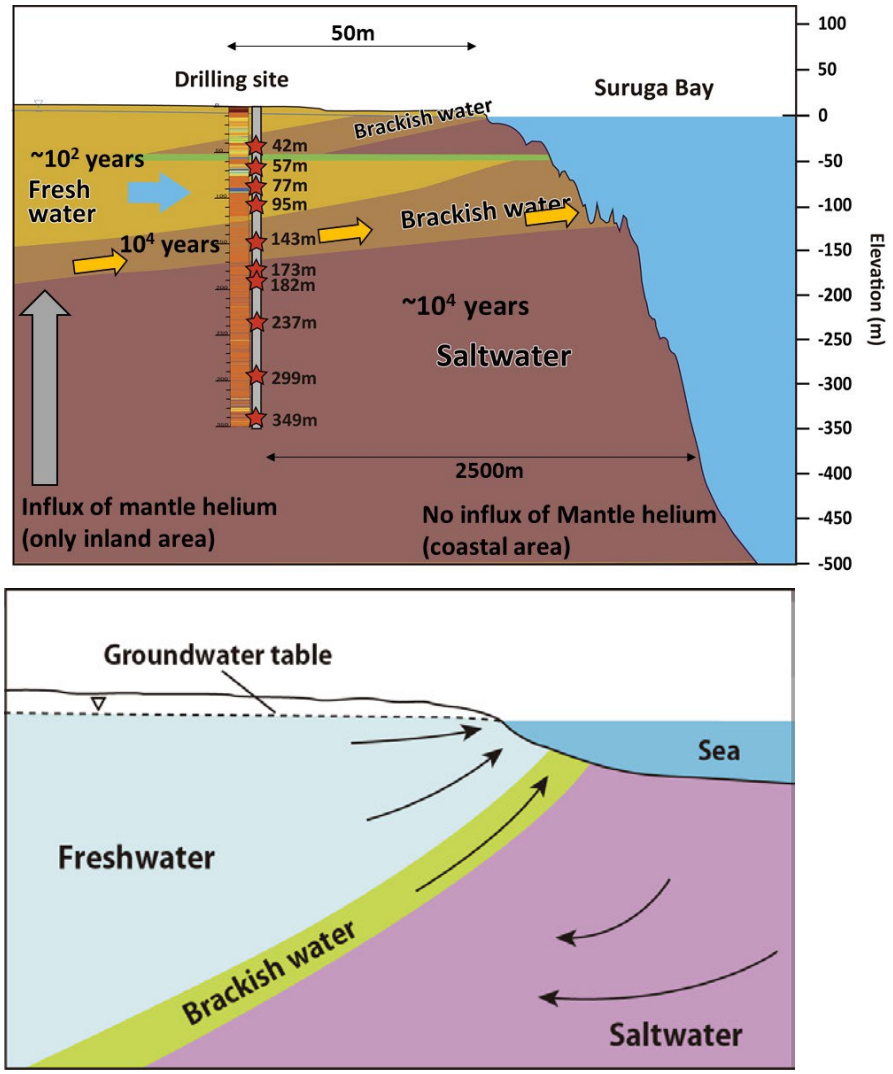


図 3-1- 6　水質や地下水年代から想定される駿河湾沿岸部における
地下水流動システム（Machida et al., 2016 を一部変更）

（4） 今年度の調査孔掘削の概要

本事業で掘削をおこなった FGB-2 孔は、北緯 35.12348 度、東経 138.65254 度、地盤標高は 3.87 mに位置する（写真 1)。(1) 背景と目的の節で述べたように、本調査孔は 5 つの目的を有しており、この中には、富士川東側の塩淡境界深度、地下水水質、岩層の確認のほか、2.2 節の密度流解析の基礎データの取得や、分野間連携を意識した研究が含まれる。これに加えて、本年度の FGB-2 孔掘削は不透水基盤岩への到達を目的としていた。基盤に到達することができれば、基盤内での揚水試験や地下水採取を行うことにより、その水理学的特性、水質、地下水年代などを精査でき、流動性の塩水系地下水と非流動性の塩水系地下水の違いを明確にすることができると考えられた。さらに、基盤深度の確認は 2-1 節のモデルの更新や、実験溶液としての化石海水の提供など（第 4 章)、分野間連携を含む、いくつかの課題にも貢献することも考えられていた。

令和 3 年度までに FGB-2 孔は深度 400 m まで掘削したが、400 m とした理由は不透水基盤となりうる可能性がある更新世中期の愛鷹山火山噴出物（溶岩）や鷺ノ田層（シルトを含む堆積岩）が、深度 350～400 m 程度にて出現すると想定されたためである（8)（基盤未到達について参照)。しかし、結果として令和 3 年度の調査では基盤岩に到達することはできなかったことから、本年度は、できるだけ深くまで掘削することとし、深度 800 m までの増掘をおこなった。また、FGB 孔や FGB-2 孔では調査をおこなっていない、塩淡境界上部から淡水系地下水の領域にかけて調査するために、深度 120 mの FGB-3 孔を掘削した。この 2 本の調査孔により、淡水系地下水－塩淡境界－塩水系地下水の水質、年代、流速などのコントラストを明瞭にし、塩水系地下水の特徴を明らかにすることが可能である。

（5） FGB-2 孔の増掘

① ボーリング掘削

令和 4 年度の FGB-2 孔（および FGB-3 孔）の掘削に要した期間は準備や後片付けも含め、2022 年 6 月 22 日から 2023 年 3 月 9 日であった。ケーシングプログラムは図 3-1-7 の通りであり、深度 400 m から 800 m までの増掘をおこなった。FGB-2 孔は昨年度終了時点で深度 400 m 孔として仕上げていることから、増掘時に新たな段落としを行うと、ほとんどの物理検層が実施できなくなってしまう。そのため、深度 400 m 以深は裸孔とした。送水掘削に使用した泥水やトレーサー（蛍光染料）については令和 2 年度報告書に記したため割愛する。

本研究では不透水基盤への到達が目的の 1 つであったため、できるだけ深くまで掘削を行う必要があった。そこで基本的にノンコア掘削としたが、常時カッティングスと掘削パラメータ（ビット荷重、回転数、送水圧、送水量、排水量）をモニタリングし、不透水基盤に到達した場合（地質に変化が認められた場合）はただちにオールコア掘削に切り替えることができる状態とした。しかし、地質の状況は、未固結の山体崩壊堆積物と砂礫層が続いて変化せず（図 3-1-8－図 3-1-11)、不透水性基盤は確認されなかった。

写真 3-1- 1 防潮堤からの風景（上）と FGB-2 孔の櫓

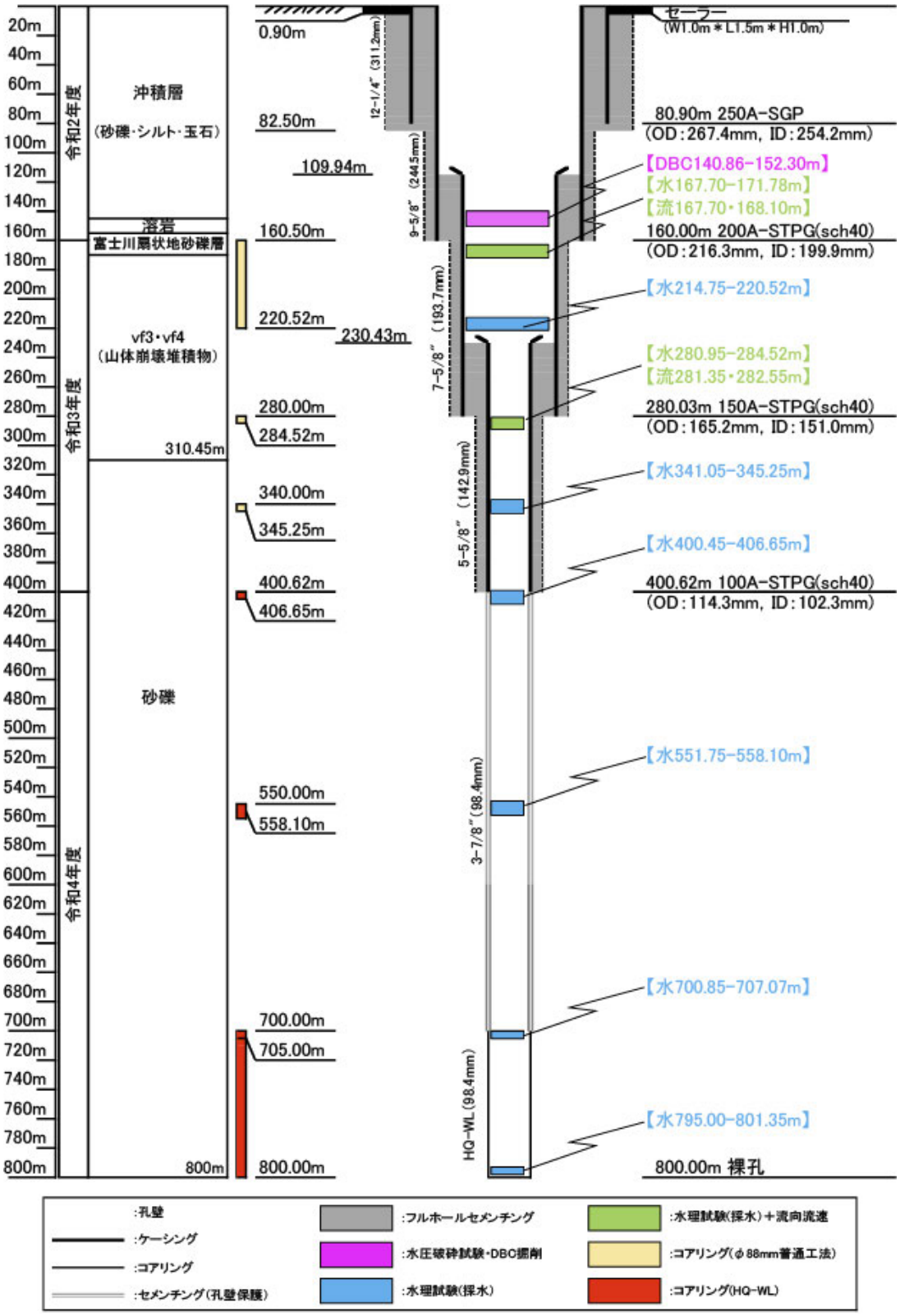
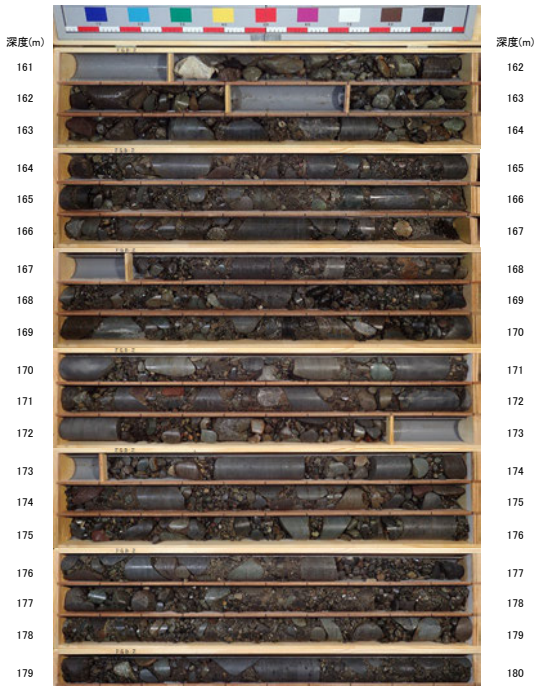
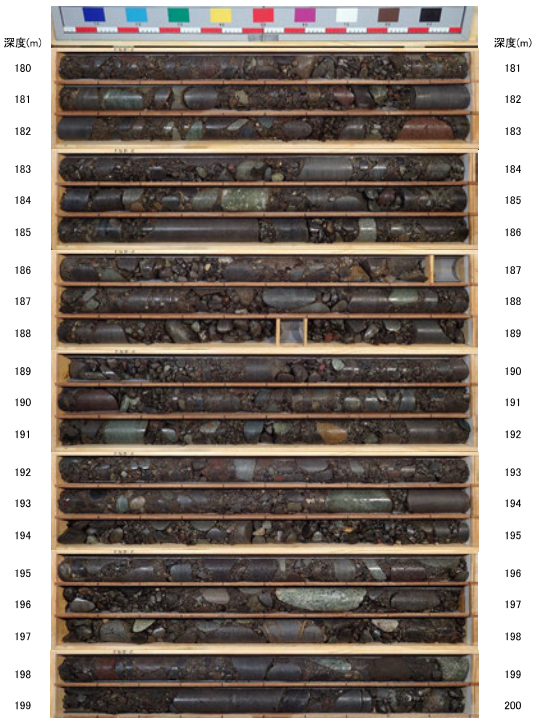


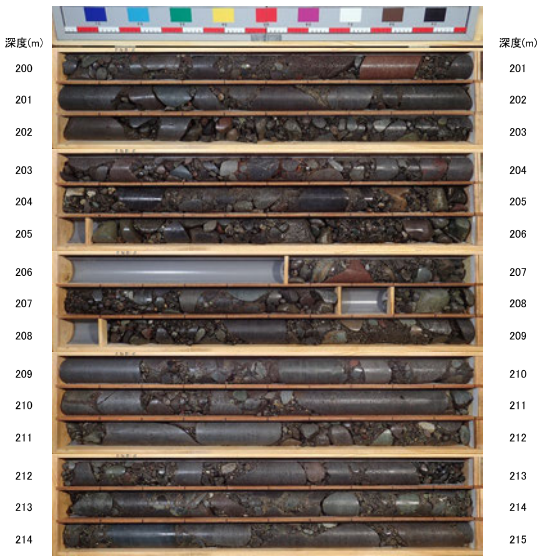
図 3-1- 7　FGB-2 孔におけるケーシングプログラム

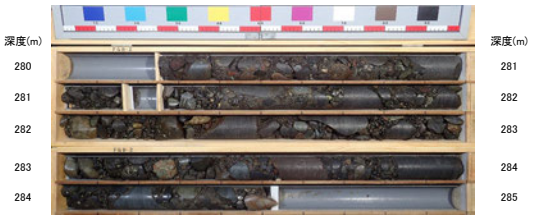
図 3-1- 8　ボーリングコア
海域地質環境調査確証技術開発（産業技術総合研究所，2013; 2014; 2015）より

図 3-1- 9　ボーリングコア
海域地質環境調査確証技術開発（産業技術総合研究所，2013; 2014; 2015）より









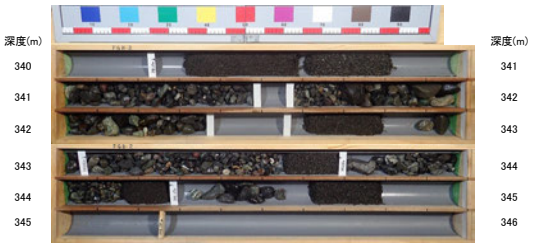


図 3-1- 10　ボーリングコア（本事業実施分：その 1）

図 3-1- 11　ボーリングコア（本事業実施分：その 2）

② 孔内物理検層実施概要

本調査では地盤の物理特性の連続的な把握ならびに孔井仕上げの把握を目的に，掘削段階に応じて孔内物理検層を実施した。今回実施した物理検層の実施項目を表 3-1-1 に示す。検層結果は図 3-1-12 および図 3-1-13 の通りである。令和 2 年度に実施した S 波検層、BMR 検層、XRMI 検層などが実施されていない理由は、(昨年度と同様) ボーリング孔が小さく、センサーが入らないためである。深度 400～800 m の間は砂礫層が連続しているが、深度 500 m にて間隙率が下がり、密度が高くなる。

表 3-1- 1　FGB-2 孔における孔内物理検層の実施工程

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.=21:55)	0.0 ～ 802.2※	2023.02.07	9:20 ～ 10:31	11.3	降下	温度 0.0 ～801.9m 流体電気伝導度 0.0 ～801.4m
中性子孔隙率	400.6 ～ 802.1		13:53 ～ 14:26	12.2	巻揚	
密度	400.6 ～ 802.2※		16:00 ～ 16:33	12.2	巻揚	密度 400.6 ～801.8m
電気	400.6 ～ 802.0		18:33 ～ 18:56	17.5	巻揚	
	525.0 ～ 725.0		19:19 ～ 19:29	20.0	巻揚	自然電位にノイズ混入のため、自然電位のみを再測定
音波	400.6 ～ 800.7	2023.02.08	8:33 ～ 9:13	10.0	巻揚	
ＢＨＴＶ	400.6 ～ 800.9※		11:49 ～ 14:46	2.3	巻揚	孔壁画像 400.6 ～800.9m
孔径	400.6 ～ 802.1		17:33 ～ 18:12	10.3	巻揚	
孔内状況 ： ビット径 98.4mm @ 802.00 m ケーシング 100A @ 400.62 m			孔内水 ： ベントナイト、ポリマー、ＣＭＣ 泥水比抵抗 1.09Ω･m@14.3℃ 比重 1.03 粘速 52sec			

※ ツールボトム深度基準

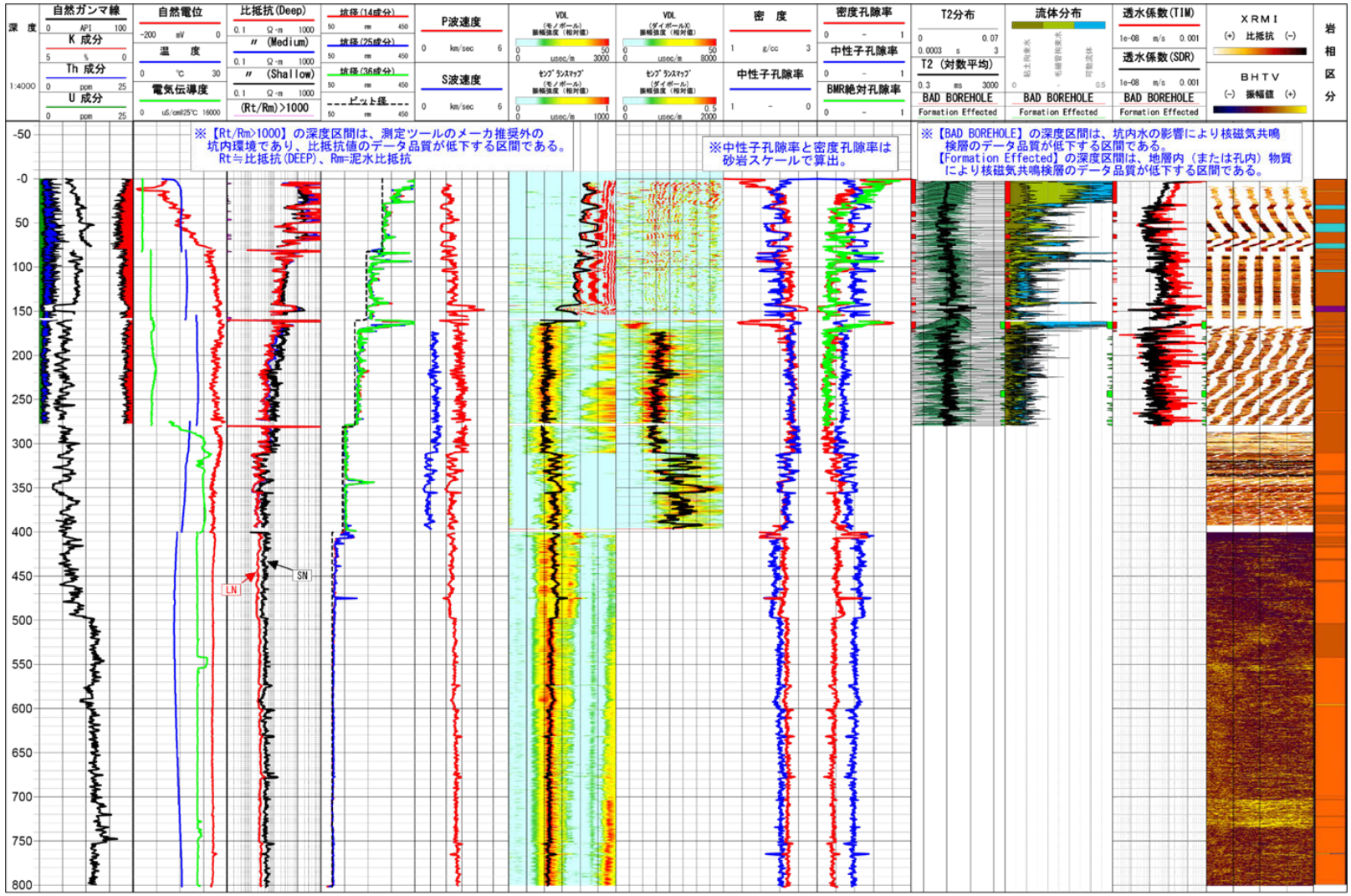


図 3-1- 12　FGB-2 孔における孔内物理検層結果

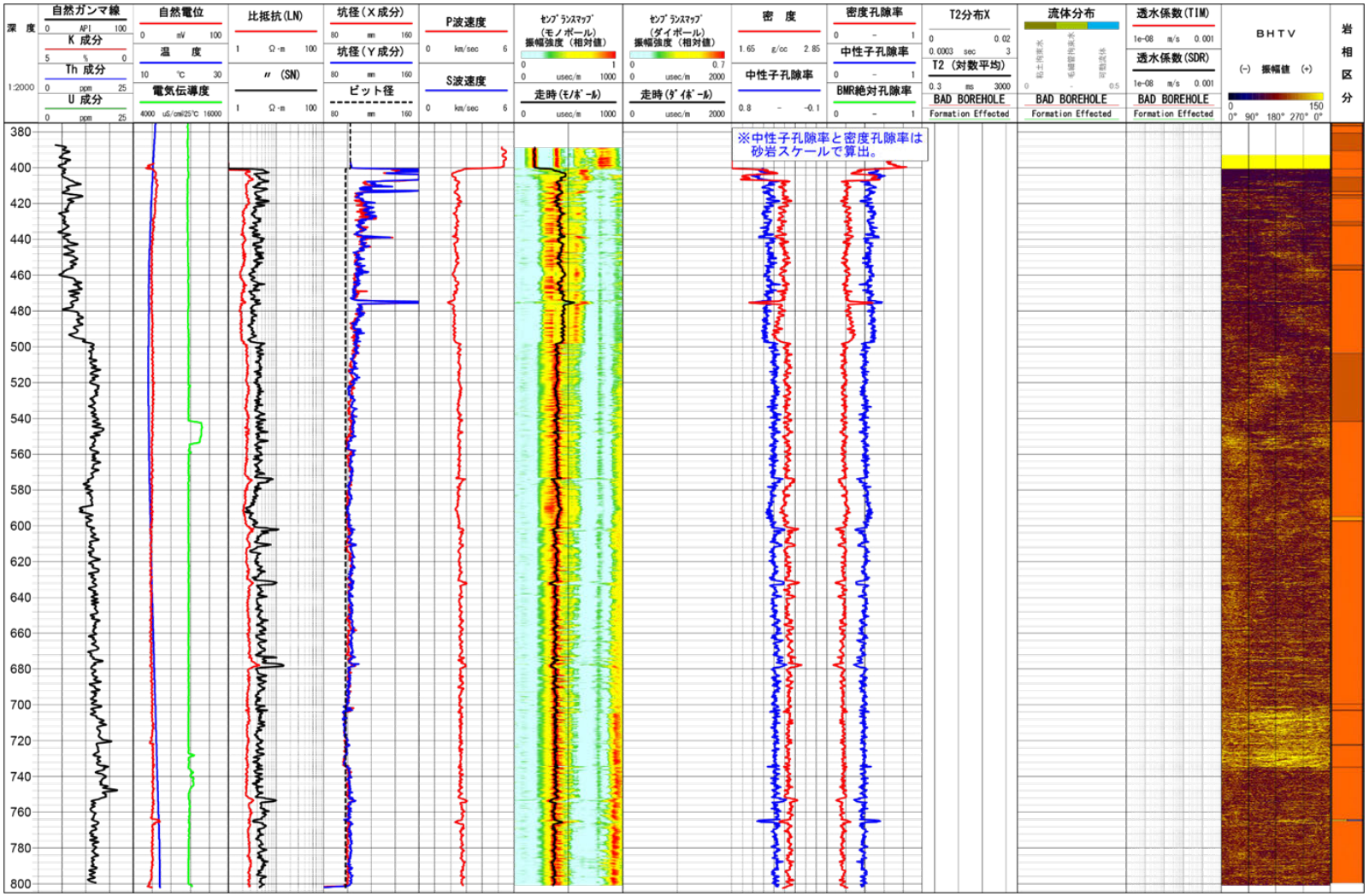


図 3-1- 13　FGB-2 孔における孔内物理検層結果（400～800m）

③ 水理試験

本年度の水理試験の実施概要を表 3-1-2 に、水理試験装置の概要を図 3-1-14 に示す。水理試験は、掘削と併行して、地盤工学会基準(単孔を利用した透水試験方法:JGS 1314-2003)に準じた段階揚水試験、定流量揚水試験、回復試験を連続的に実施した。試験区間は孔底から上部 3～6m程度の区間をシングルパッカーで遮蔽し、試験区間のみ地下水に置換する形にした。水圧センサーは試験区間内と試験区間外に設置した。

揚水地下水は、温度、pH、電気伝導度、酸化還元電位、溶存酸素濃度を多項目水質計（地上部： IDRONAUT 製 Ocean Seven 303 Plus、孔内：IDRONAUT 製 Ocean Seven 303 Plus、Ocean Seven 308）によって連続モニタリングするとともに、原則 1 時間ごとに採取して掘削水にトレーサーとして添加した蛍光染料の濃度を測定した。また、550m 以深については、揚水管に分岐を設け，希ガス測定（Appendix 参照）が実施できるよう配管した。

採水は、揚水する地下水の地化学パラメータが安定するとともに、蛍光染料の濃度が十分に低下したことを確認して実施した。採水時の多項目水質計による水質および蛍光染料濃度を表 3-1-3 に示す。また、採水時にはポータブル水質計でも水質を測定した。水位や水質データの詳細については（7）地下水の水位および水質にて述べる。

表 3-1- 2　水理試験の実施概要

孔番	掘削深度（GL-m)	試験区間（GL-m)	区間の設定	試験実施日時	実施項目
FGB-2孔	406.65	400.45 ～ 406.65	シングルパッカー	22/8/1 13:39 ～ 22/8/5 7:59	段階揚水試験，定流量揚水試験，回復試験，採水，平衡水位測定
	558.10	551.75 ～ 558.10		22/10/15 15:18 ～ 22/10/19 8:50	
	707.07	700.85 ～ 707.07		22/11/30 8:57 ～ 22/12/3 8:47	
	801.35	795.00 ～ 801.35		23/2/16 10:06 ～ 23/2/20 8:56	

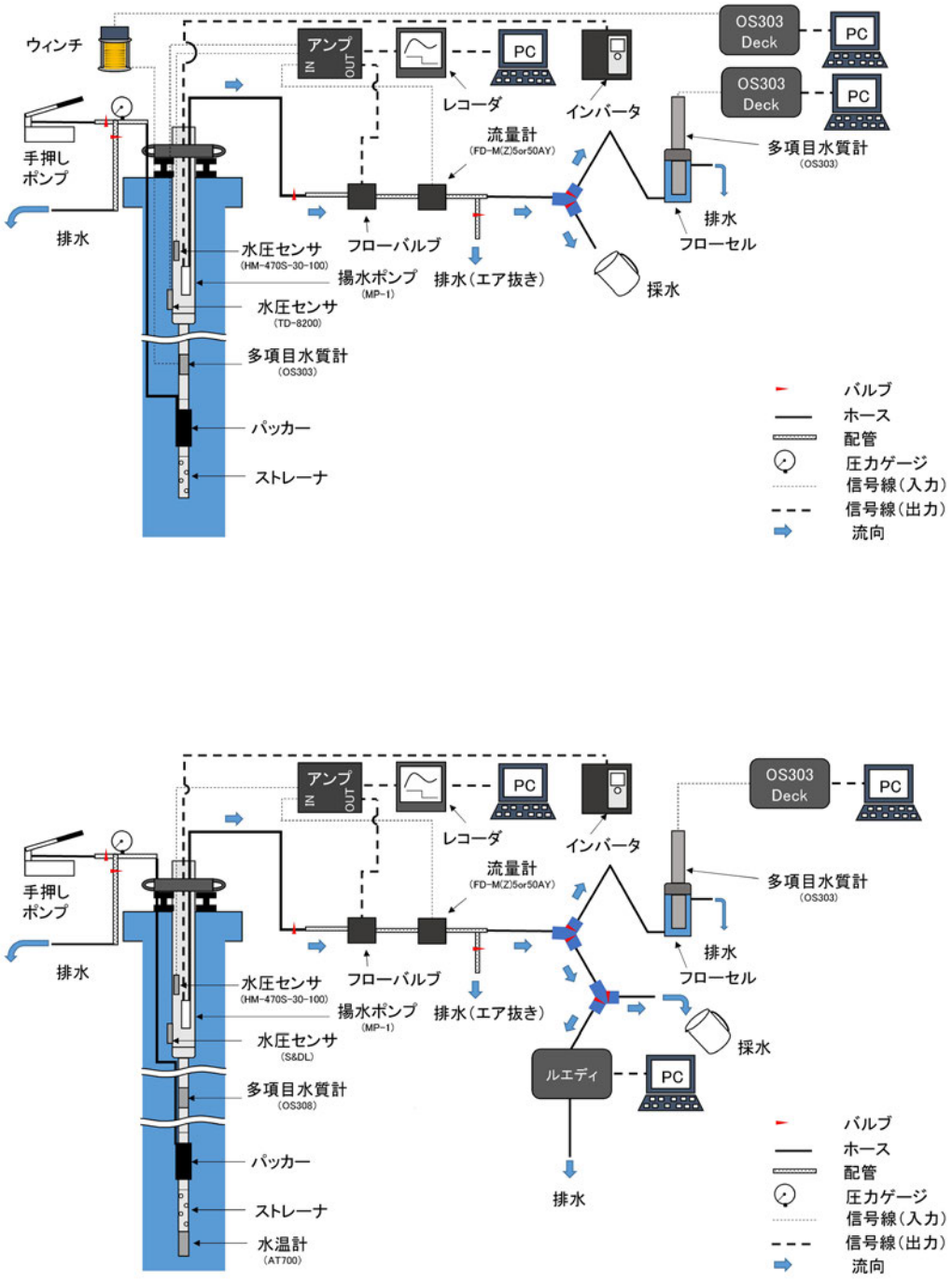


図 3-1- 14　FGB-2 孔水理試験の装置の概要
400.45m~406.65m（上）と 550m 以深（下）

表 3-1- 3　採水時の多項目水質計による水質および蛍光染料濃度

孔番	実施深度（GL-m）	測定場所	pH	電気伝導度 (μS/cm)	酸化還元電位 (mV)	溶存酸素濃度 (mg/L)	水温 (℃)	蛍光染料濃度 (mg/L)	積算揚水量 (m^3)	システムボリューム (m^3)
FGB-2	400.45 ～ 406.65	地上	－	46564	-68	0.00	20.34	0.01	10.30	0.34
		孔内	7.77	20495	-562	0.03	14.74			
	551.75 ～ 558.10	地上	8.04	46933	-297	0.05	20.36	0.00	7.82	0.43
		孔内	－	41636	—	—	14.07			
	700.85 ～ 707.07	地上	7.98	41120	-301	0.15	19.75	0.00	14.70	0.52
		孔内	－	－	－	－	－			
	795.00 ～ 801.35	地上	8.00	42801	-304	0.26	19.37	0.00	17.21	0.57
		孔内	－	42431	－	－	15.21			

（6）FGB-3 孔の掘削

① ボーリング掘削

図 3-1-15 に FGB-3 孔のケーシングプログラムを示す。仕上げ管は、流向流速測定（次節参照）のプローブ径（60 mm）を考慮して、塩ビ管 VP75 を採用するとともに、流向流速測定区間には巻線スクリーン（ステンレス製、開口率 39.5%）を設置した。掘削径は、孔仕上げにおいて砂利や遮水剤を確実に充填することを目的に、十分なアニュラスを確保可能な 7-5/8”（φ193.7 mm）とした。掘削時の保孔には FGB-2 孔の実績より、深度 10 m までの埋土を対象に 200A ケーシングを計画・設置した。

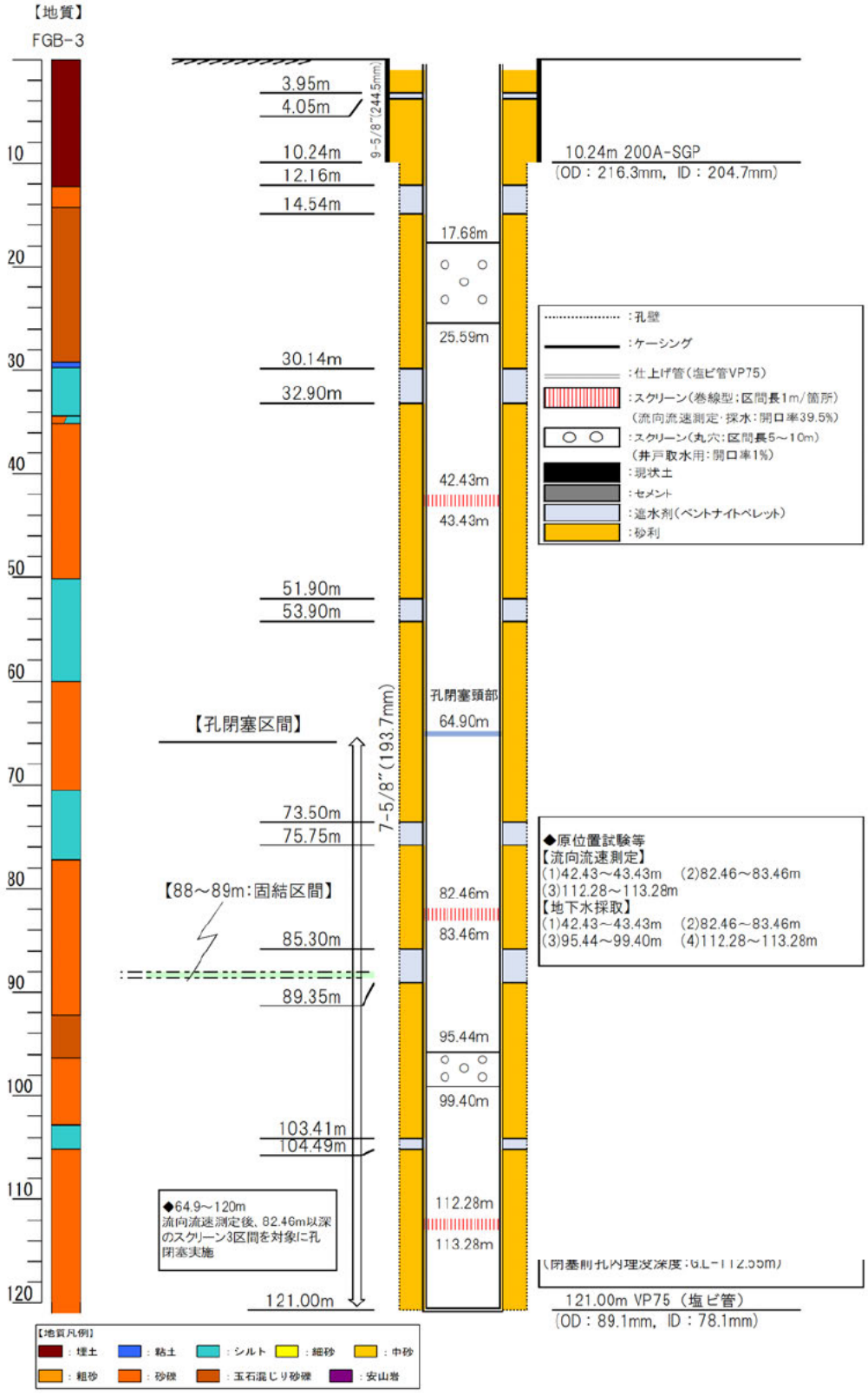


図 3-1- 15　FGB-3 孔におけるケーシングプログラム

② 流向流速測定

FGB-3 孔において、電極間の比抵抗の変化によって地下水の流れを検出する「地下水流向流速計（Type-LD60）」を用い、流向流速測定を実施した。本装置および方法については昨年度の報告書にて述べた通りである。その特徴をまとめると、下記のようになる。

・測定方式：電位測定法（電極間の抵抗変化を検出）
・トレーサー：蒸留水、ブドウ糖溶液
・流速測定範囲：ダルシー流速で 1.0×10^{-4}～1.0×10^{-7}（m/s）
・流向分解能：12 方位
・測定誤差：流速±5％以内、流向±7.5°以内
・方位の設定：定方位ロッド、方位計
・孔内上下流の低減：ダブルパッカーシステムによる
・流向流速計と地盤との間の処理：珪砂の充填

調査の概要を表 3-1-4、結果を表 3-1-5 に示す。深度 43.3 m における測定は、潮汐の影響を把握するために、2 回、異なる潮汐の条件でそれぞれ実施した。測定された流向は 2 測定ともに S30°W、ダルシー流速は測定 No.1、No.2 ともに 1.9×10^{-6} m/sec（≒0.2 m/日） である。流向・流速ともに同じ結果を示しており、データの信頼性がある。潮汐の影響は受けていないと考えられる。深度約 83 m での測定は、異なる 3 回のセンサー深度で実施した。流向は測定 No.1 で N75°E、深度を変更した測定 No.2 と No.3 で S15°W を示し、約 120°の変化が認められた。この原因としては、観測井戸近傍の玉石やスクリーン部の目詰りに伴う地下水流動の迂回などの可能性がある。流速は測定 No.1 で 1.2×10^{-7} m/sec、深度を変更した測定 No.2 で 1.6×10^{-7} m/sec、測定 No.3 で 1.8×10^{-7} m/sec を示した。以上より、深度約 83 m では地下水の流向流速は、南向きで 1.2×10^{-7}m/s（≒0.01m/日）であると推定されるが、これらはセンサーの定量限界に近いこともあり、参考値として考えるべきである。深度 113 m 付近での測定は、No.1 は未検出であった。これは井戸構造とセンサー深度の位置関係によるものと考えられる（図 3-1-16）。そこでセンサー深度と試験溶液の比重を変更したが、地下水の流速は測定下限値以下であった。12 方向の電極の反応から考えると流向は北から北東向きになるが、はっきりしない。令和 3 年度調査の深度 168 m での測定では、測定下限値を下回る流速であり、1 回目は S30°E 方向、2 回目は S60 °E 方向の流向が得られていた。しかし、本年度の調査ではより流速が速いと推定される深度 113 m にて検出限界以下だったことにより、これ以深の流向データは検出下限以下として扱うべきだと思われる。

以上のように、昨年度と本年度に実施した一連の流向流速測定では、塩淡境界上部の深度 83 m で約 0.01 m/日程度という極めて遅い流速が得られており、これ以深は明瞭ではない。地下水のダルシー流速は浅層と比較して塩淡境界や塩水領域では 1/20 以下、と結論づける

ことができるだろう。なお、本調査により、井戸孔近傍の目詰まり現象や地質情報の不均質性に十分な注意が必要であることが明らかになった。

表 3-1- 4　流向流速測定の概要

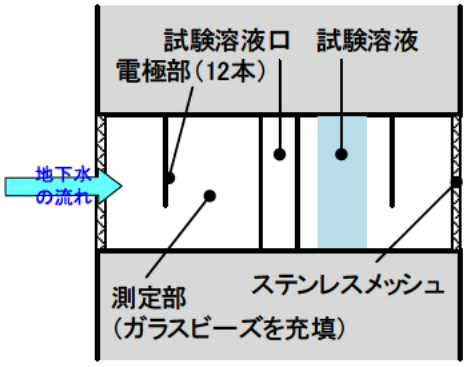
	測定深度 (GL- m)	測定 No.	測定開始日時（測定時間）	潮汐の状況	地下水・試験溶液の比重（g/cm^3） 地下水	試験溶液	備考
上部	43.30	1	2023/11/8 8:15（20分）	満潮⇒干潮	1.001	1.001	
	43.30	2	2023/11/8 13:00（20分）	干潮⇒満潮	1.001	1.001	潮汐影響の確認
中部	83.35	1	2023/11/11 8:30（3.5時間）	満潮⇒干潮	1.0015	1.0015	
	83.10	2	2023/11/12 9:00（3時間）	満潮⇒干潮	1.0015	1.0015	深度の変更
	83.10	3	2023/11/14 10:00（3時間）	満潮⇒干潮	1.0015	1.0015	再現性の確認
下部	112.40	1	2023/11/15 8:00（6時間）	干潮⇒満潮⇒干潮	1.004	1.004	
	112.84	2	2023/11/16 8:40（5時間）	干潮⇒満潮⇒干潮	1.004	1.004	深度の変更
	112.70	3	2023/11/17 7:30（24時間）	－	1.004	1.003	深度と試験溶液比重の変更
	112.70	4	2023/11/18 11:15（20時間）	－	1.004	1.005	試験溶液比重の変更

表 3-1- 5　流向流速測定で得られた流向流速

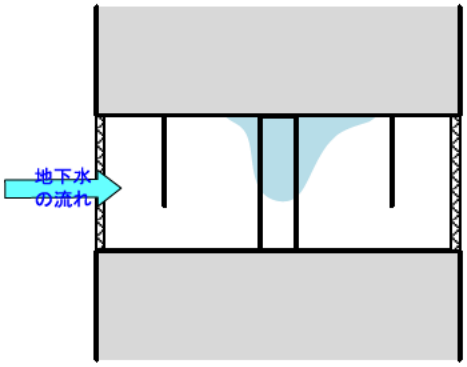
測定 No.	測定深度 (GL- m)	測定結果		備考
		流向 (磁北：N)	流速 [ダルシー流速]	
1	43.3	S30°W	1.85E-04 cm/sec	
2	43.3	S30°W	1.88E-04 cm/sec	潮汐影響の確認

測定 No.	測定深度 (GL- m)	測定結果		備考
		流向 (磁北：N)	流速 [ダルシー流速]	
1	83.35	N75°E	1.22E-05 cm/sec	
2	83.10	S15°W	1.57E-05 cm/sec	センサー深度の変更
3	83.10	S15°W	1.84E-05 cm/sec	再現性の確認

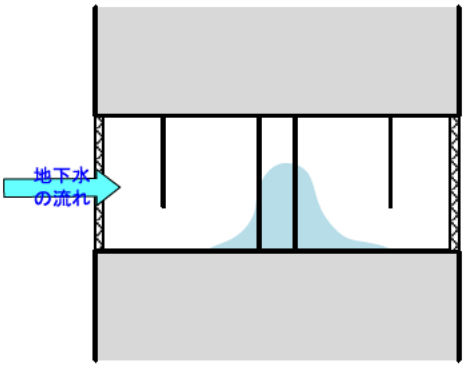
測定 No.	測定深度 (GL- m)	測定結果		備考
		流向 (磁北：N)	流速 [ダルシー流速]	
1	112.40	測定不能	測定不能	井戸構造とセンサー深度によって未検出
2	112.84	N （参考値）	測定不能	センサー深度の変更
3	112.70	N60°E （参考値）	測定不能	センサー深度の変更 試験溶液の比重変更
4	112.70	N45°E （参考値）	測定不能	試験溶液の比重変更



（a）地下水と試験溶液の比重が同じ場合



（b）地下水の比重が試験溶液より大きい場合



（c）地下水の比重が試験溶液より小さい場合

図 3-1- 16　比重の違いによる試験溶液の移動イメージ

③ 水理試験

水理試験は、掘削後設置したスクリーン区間に対して、地盤工学会基準（単孔を利用した透水試験方法：JGS 1314-2003）に準じた段階揚水試験、定流量揚水試験、回復試験を連続的に実施し、揚水終了前に揚水する地下水を採水した。スクリーン、ケーシング管設置後、蛍光染料を添加した清水を注水し、孔内を清水に置換してした。試験区間は、シングルまたはダブルパッカーを用いて遮蔽した。水圧センサーは試験区間内と試験区間外に設置した。

揚水する地下水は、温度、pH、電気伝導度、酸化還元電位、溶存酸素濃度を多項目水質計（地上部： IDRONAUT 製 Ocean Seven 303 Plus、孔内：IDRONAUT 製 Ocean Seven 308）によって連続モニタリングするとともに、4 時間ごとに採取して掘削水にトレーサーとして添加した蛍光染料の濃度を測定した。また、揚水管に分岐を設け、ガスの測定（Appendix 参照）が実施できるよう配管した。採水は、揚水する地下水の地化学パラメータが安定するとともに、蛍光染料の濃度が十分に低下したことを確認して実施した。

水理試験の実施概要を表 3-1-6 に、水理試験装置の概要を図 3-1-17、図 3-1-18、図 3-1-19 に、採水時の水質データを表 3-1-7 に示す。深度約 95 m を除く深度では 2 度の水質測定をおこなっている。この理由は 1 回目の採取の際、蛍光染料濃度は下がっていたものの pH がやや高く、掘削泥水の影響が残っていた可能性があったためである。

表 3-1- 6　水理試験の実施概要

孔番	掘削深度（GL-m)	試験区間（GL-m)		区間の設定	試験実施日時		実施項目
FGB-3孔 1回目	120.00	17.68 ～	25.59	シングルパッカー	22/10/7 11:41 ～	22/10/10 9:18	段階揚水試験，定流量揚水試験，回復試験，採水，平衡水位測定
		42.43 ～	43.43	ダブルパッカー	22/10/15 15:18 ～	22/10/19 8:50	
		82.46 ～	83.46		22/10/21 8:04 ～	22/10/27 10:50	
		95.44 ～	90.40		22/10/27 12:16 ～	22/11/1 12:03	
		112.28 ～	113 28		22/11/1 13:27 ～	22/11/3 16:40	
FGB-3孔 2回目	120.00	17.68 ～	25.59	シングルパッカー	23/1/30 8:12 ～	23/1/13 16:12	孔洗浄，採水
		42.43 ～	43.43	ダブルパッカー	22/12/15 13:02 ～	23/1/13 16:12	
		82.46 ～	83.46		23/1/18 8:09 ～	23/1/27 16:40	
		112.28 ～	113 28	シングルパッカー	22/11/1 13:27 ～	22/12/12 14:44	

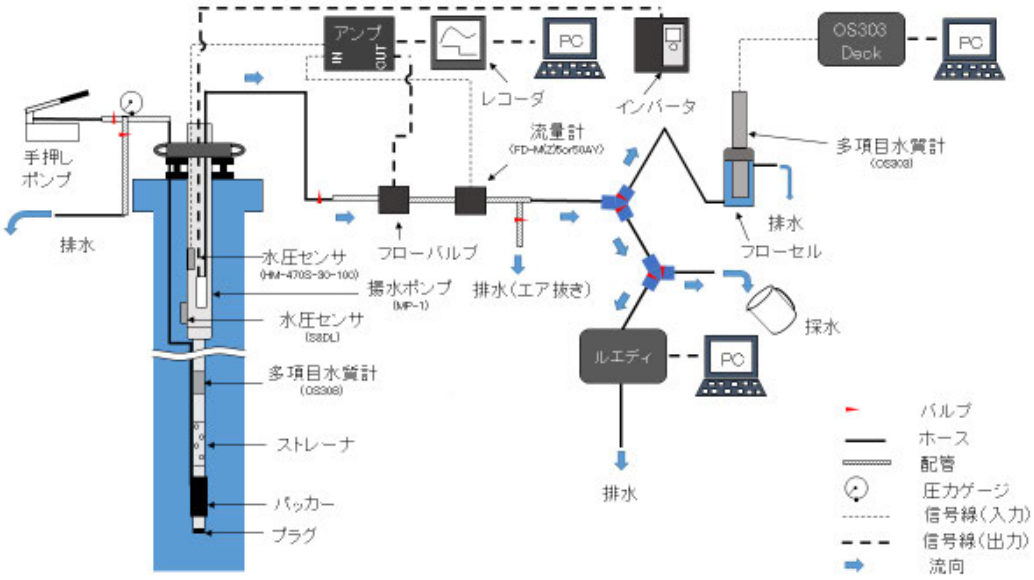


図 3-1- 17　FGB-3 孔　17.68 m~25.59 m 水理試験の装置の概要

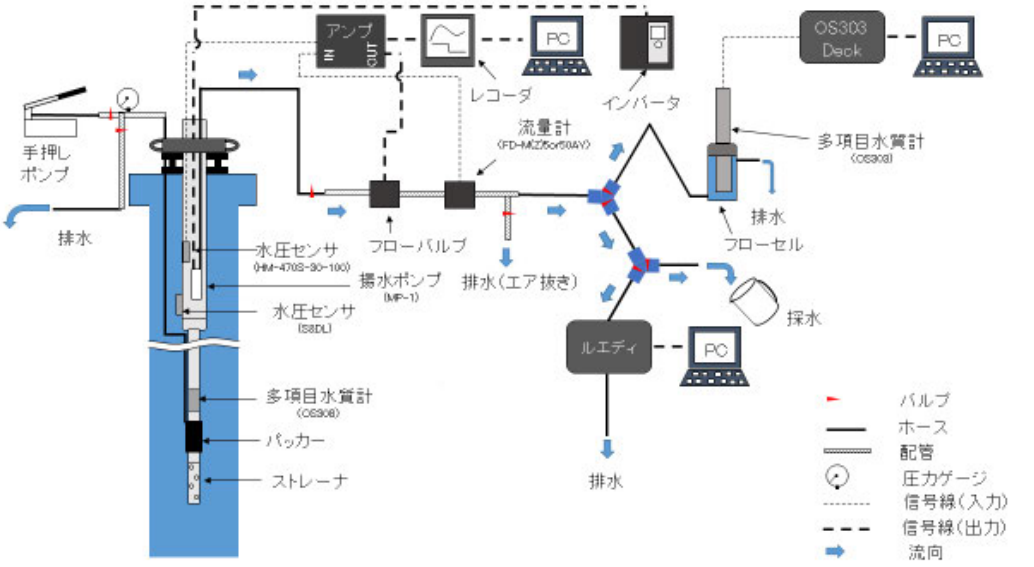


図 3-1- 18　FGB-3 孔　112.28 m~113.28 m水理試験（2 回目）の装置の概要

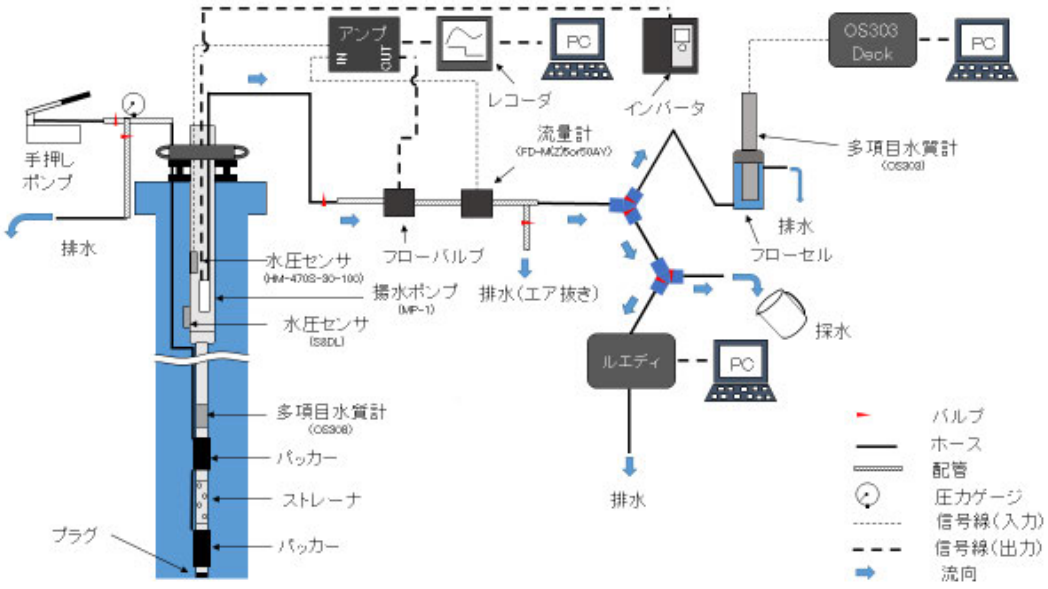


図 3-1- 19　FGB-3 孔　ダブルパッカーを用いた水理試験の装置の概要

表 3-1- 7　FGB-3 採水時の多項目水質計による水質および蛍光染料濃度

孔番	実施深度（GL-m）			測定場所	pH	電気伝導度 (μS/cm)	酸化還元電位 (mV)	溶存酸素濃度 (mg/L)	水温 (℃)	蛍光染料濃度 (mg/L)	積算揚水量 (m^3)	システムボリューム (m^3)
FGB-3 (1回目)	17 68	～	25 59	地上	8 38	220	-28	2 92	19 00	0 02	17 42	0 13
				孔内	-	216	-	-	17 57			
	42 43	～	43 43	地上	8 84	237	-80	0 00	18 81	0 00	32 33	0 07
				孔内	-	234	—	—	17 06			
	82 46	～	83 46	地上	7 81	1476	-101	0 24	18 63	0 00	90 80	0 09
				孔内	-	1485	-	-	18 04			
	90 40	～	95 44	地上	7 65	4259	-93	0 15	17 71	0 00	14 70	0 12
				孔内	-	4315	-	-	19 15			
	112 28	～	113 28	地上	7 36	5803	-25	0 00	19 80	0 00	17 21	0 13
				孔内	-	-	-	-	-			
FGB-3 （2回目）	17 68	～	25 59	地上	8 03	284	42	3 12	18 02	0 00	31 10	0 13
				孔内	-	247	—	—	17 59			
	42 43	～	43 43	地上	7 94	442	-144	0 23	17 23	0 00	144 13	0 07
				孔内	-	-	-	-	-			
	82 46	～	83 46	地上	7 67	1555	-92	0 46	18 07	0 00	144 10	0 09
				孔内	-	1441	-	-	18 03			
	112 28	～	113 28	地上	7 30	4862	-71	0 28	18 88	0 00	22 22	0 13
				孔内	-	6021	-	-	19 39			

（７）地下水の水位および水質

FGB-2 孔および FGB-3 孔の水理試験で得られた水理定数を表 3-1-8 に示す。FGB-2 孔および FGB-3 孔にて測定した水位には、潮汐変動に伴う水位の変動（規則的な概ね 12 時間周期の変動）が認められたため、水位の潮汐変動の補正を行った。水位の潮汐変動の補正は、まず、水理試験実施期間における調査地に最も近接する清水港の 1 時間あたりの実測潮位（気象庁，2022a）と測定した水位を比較して変動の傾向が類似することを確認した。そして、水理試験実施時のモデル潮位を清水港の 1 時間あたりの実測潮位に基づき、次式（例えば、三和ほか，2008）から算出した。

$$T_n = a_0 + a_1 t_n + a_2 \sin(\frac{2\pi t_n}{M_2}) + a_3 \cos(\frac{2\pi t_n}{M_2}) + a_4 \sin(\frac{2\pi t_n}{S_2}) + a_5 \cos(\frac{2\pi t_n}{S_2}) + a_6 \sin(\frac{2\pi t_n}{K_1})$$

$$+ a_7 \cos(\frac{2\pi t_n}{K_1}) + a_8 \sin(\frac{2\pi t_n}{O_1}) + a_9 \cos(\frac{2\pi t_n}{O_1}) + a_{10} P$$

ここで、T_n：n 時におけるモデル潮位（m）、t_n：観測時間（h）、P：気圧（hPa）、M_2・S_2・K_1・O_1：主要 4 分潮の周期でそれぞれ 12.42（h）・12（h）・23.93（h）・25.82（h）、a_0～a_{10}：係数である。なお、気圧は静岡気象台の 10 分あたりの海面気圧（気象庁，2022b）とした。

次に、モデル潮位と観測した水位を比較して、これらの位相差と振幅比を求め、次式の潮位補正量（高田ほか，1999）を観測した水位から差引いた。

$$WL_T = (T_{n+\alpha} - B)\beta$$

ここで、WL_T：潮位補正量（m）、$T_{n+\alpha}$：位相差 α を足し合わせた時刻におけるモデル潮位（m）、B：対象期間のモデル潮位の平均値（m）、β：振幅比でモデル潮位の振幅と観測した水位に認められる周期的な水位変動の振幅の比である。なお、位相差と振幅比は、定流量揚水試験時における水位の変動から求めた。

表 3-1- 8　水理試験で得られた水理定数

孔番	実施深度（GL-m）	平衡水位		透水係数 (m/s)				比貯留係数 (1/m)	
		（GL+m）	（TP+m）	段階揚水試験	定流量揚水試験		回復試験	定流量揚水試験	回復試験
					Jacob	Hvorslev	Agarwal	Jacob	Agarwal
FGB-3	17.68 ～ 25.59	-2.58	1.37	4.15E-05*	5.07E-05*	2.73E-05*	1.80E-04*	6.31E-02*	5.63E-40*
	42.43 ～ 43.43	-2.41	1.54	1.02E-04*	2.99E-04*	7.26E-05*	1.95E-03*	4.11E-01*	3.61E-87*
	82.46 ～ 83.46	0.46	4.41	4.05E-05*	1.21E-03*	4.88E-05*	2.57E-03*	1.77E+00*	1.05E-122*
	90.40 ～ 95.44	0.42	4.37	1.23E-05*	1.09E-04*	1.04E-05*	-	1.56E-01*	-
	112.28 ～ 113.28	0.42	4.37	1.23E-05*	3.15E-04*	2.75E-05*	1.22E-03*	4.59E-01*	4.77E-126*

※FGB-3孔口標高：TP+3.95m
*参考値

孔番	実施深度（GL-m）	平衡水位		透水係数 (m/s)				比貯留係数 (1/m)	
		（GL+m）	（TP+m）	段階揚水試験	定流量揚水試験		回復試験	定流量揚水試験	回復試験
					Jacob	Hvorslev	Agarwal	Jacob	Agarwal
FGB-2	400.45 ～ 406.65	-2.14	1.73	7.74E-06	6.11E-05	3.83E-05	4.02E-05	4.87E-02	1.16E-24
	551.75 ～ 558.10	-2.55	1.32	3.46E-06	5.95E-06	5.51E-06	1.67E-05	3.16E-03	7.54E-12
	700.85 ～ 707.07	-2.68	1.19	2.90E-06	5.15E-06	3.79E-06	5.58E-05	4.09E-03	2.19E-88
	795.00 ～ 801.35	-2.98	0.89	5.81E-06	3.15E-05*	4.66E-06*	6.30E-05	2.87E-02*	2.54E-44

※FGB-2孔口標高：TP+3.87m
*参考値：試験時流量、水位が大きく乱れたデータを除して算出

透水係数と水位のデータをまとめたものが図 3-1-20 である。透水係数は深度 80 m までは 5.0×10^{-5} m/s に近い値であるが、深度 180 m に向かって低くなる。深度 180 m 以深は、10^{-5}〜10^{-6} m/s オーダーとなっている。この値は、図 3-1-10 および図 3-1-11 にて示したボーリングコアの写真から想像される透水係数よりもかなり小さい印象を受けるが、これはボーリングコアが地上に運ばれ応力が開放されたことが理由の 1 つになっていると考えられる。なお、②の孔内物理検層では深度 500m 付近で間隙率と密度の変化が認められたが、透水係数には顕著な変化は認められない。

また、地下水位については、実測された水位（ポイント水頭）と、これを淡水水頭に換算したものを示した。淡水水頭への換算式は以下の通りである（例えば Post et al., 2007）。

$$h_f = \frac{\rho}{\rho_f} h - \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} z_i$$

ここでh_fは淡水水頭、h はポイント水頭、ρは井戸孔内を満たしている原位置の地下水の密度、ρ_fは淡水の密度、z_iは参照位置に対する井戸内の水柱高である。FGB-2 および FGB-3 孔では深度毎に水位が大きく変動した。特に深度 83 m から 169 m までの 4 深度ではその上位と比較して平衡水位が 2 m 以上変化し、自噴する水位になった。これは地下水が上向き成分を有することを示すものである。この水位ギャップから、深度 43 m と深度 83 m の間に難透水層の存在が示唆されるが、ボーリングコア（図 3-1-8 および図 3-1-9）の観察より、深度 50−80 m の細砂ーシルト層が難透水層の役割を果たしていると推定される。一方、深度 169 m から深度 218 m では実水頭は 3 m 以上低下するが、淡水水頭に換算すると大きな違いは認められない。すなわち、この 2 深度の間に難透水層が存在するのではなく、孔内水の密度差によって見掛け上水位が変化したと考えられる。

地下水の採水は、連続揚水試験の終了時に実施した。これは採水前にできるだけ長く揚水をおこなうことにより、掘削泥水のコンタミネーションを最小限に抑えるためである。その結果、採水時にはすべての水質測定項目値が安定していた。現場測定値および分析結果を図 3-1-21 および図 3-1-22 に示す。電気伝導率や Cl-濃度の分布から、調査地点の淡水域の下限は深度 70 m 付近であり、塩淡境界の下限は深度 200 m と考えられる。塩水領域上面からわずかな距離で塩分濃度が低下し、電気伝導率分布は、塩淡境界で下に凸の形状を成している。このような分布は極めて稀であり（例えば Abarca, 2006 の図 2.2）、今後の検討が必要である。

水温は塩淡境界の内部では上昇するが、塩水領域に達すると低下し、深度 500 m 付近から再び上昇する。このような水温プロファイルは特異であり、次年度はこれを利用した解析を行う予定である。溶存酸素では塩淡境界の中でもゼロになってはおらず、深度 170 m の塩分の混合率が 30%の領域以深でほぼゼロになっている。すなわち、塩淡境界の下部では地下水が極めて動きにくくなっていることが反映されている。$\delta^{13}C$ は-10 ‰程度であり、

海水の $\delta^{13}C$ がほぼ 0 ‰であることを考えると、有機物等が溶解したことが示唆されており、^{14}C 濃度は塩淡境界およびその下位の塩水で低くなるが、10 pMC 以上の値を持つ。以上の結果は塩水が流動していることを示唆している。これらの結果は、次年度に密度流解析に反映させる予定である。

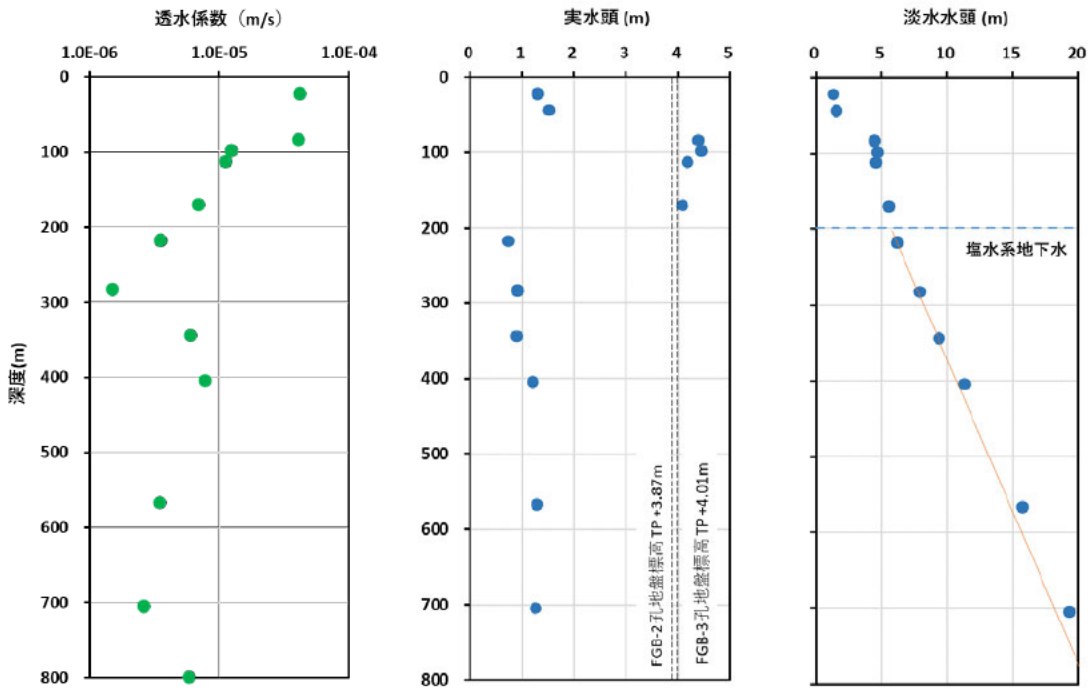


図 3-1- 20　地下水の実水頭、淡水水頭、透水係数

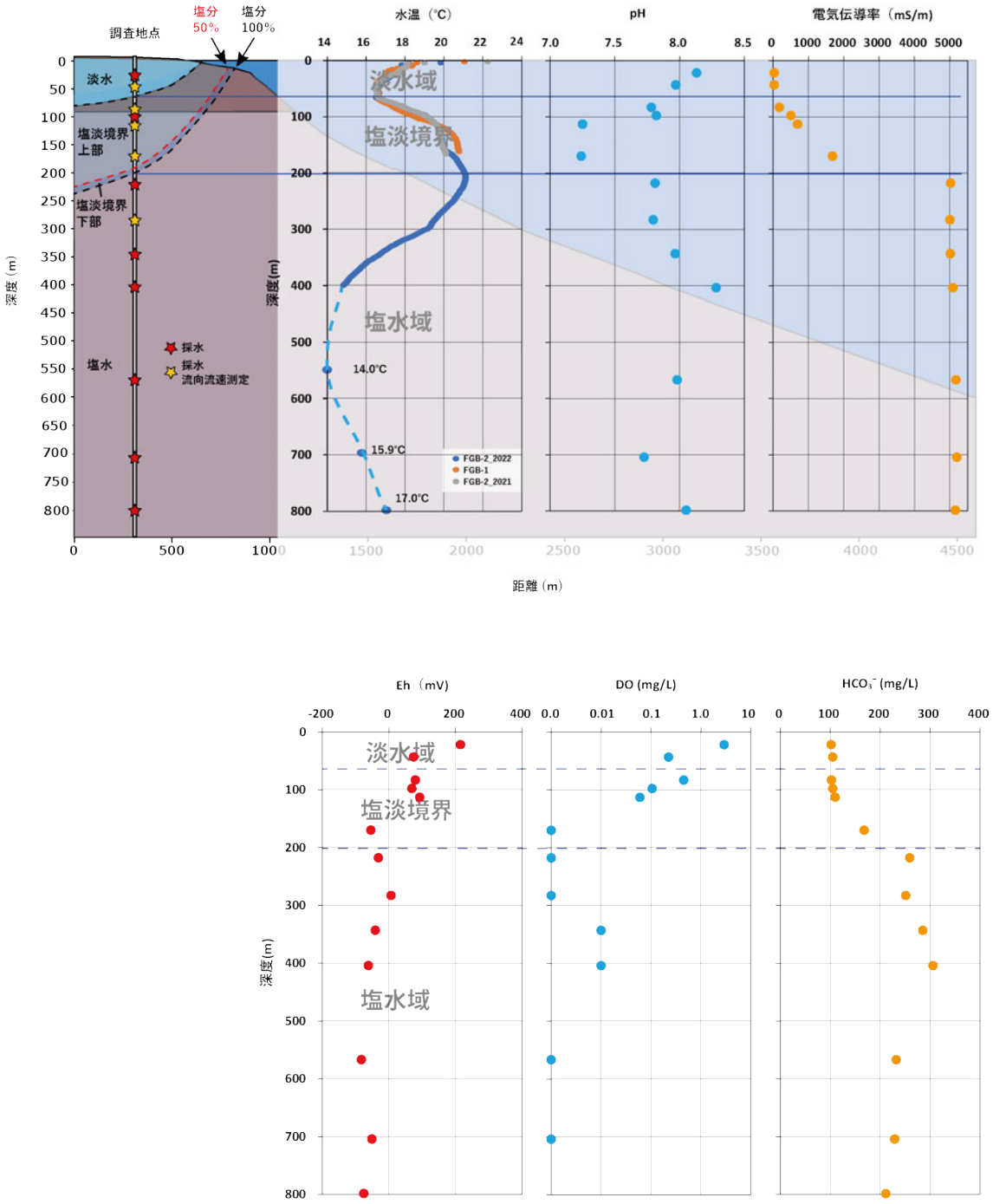


図 3-1- 21　FGB-2 および FGB-3 から得られた地下水の水質（その 1）

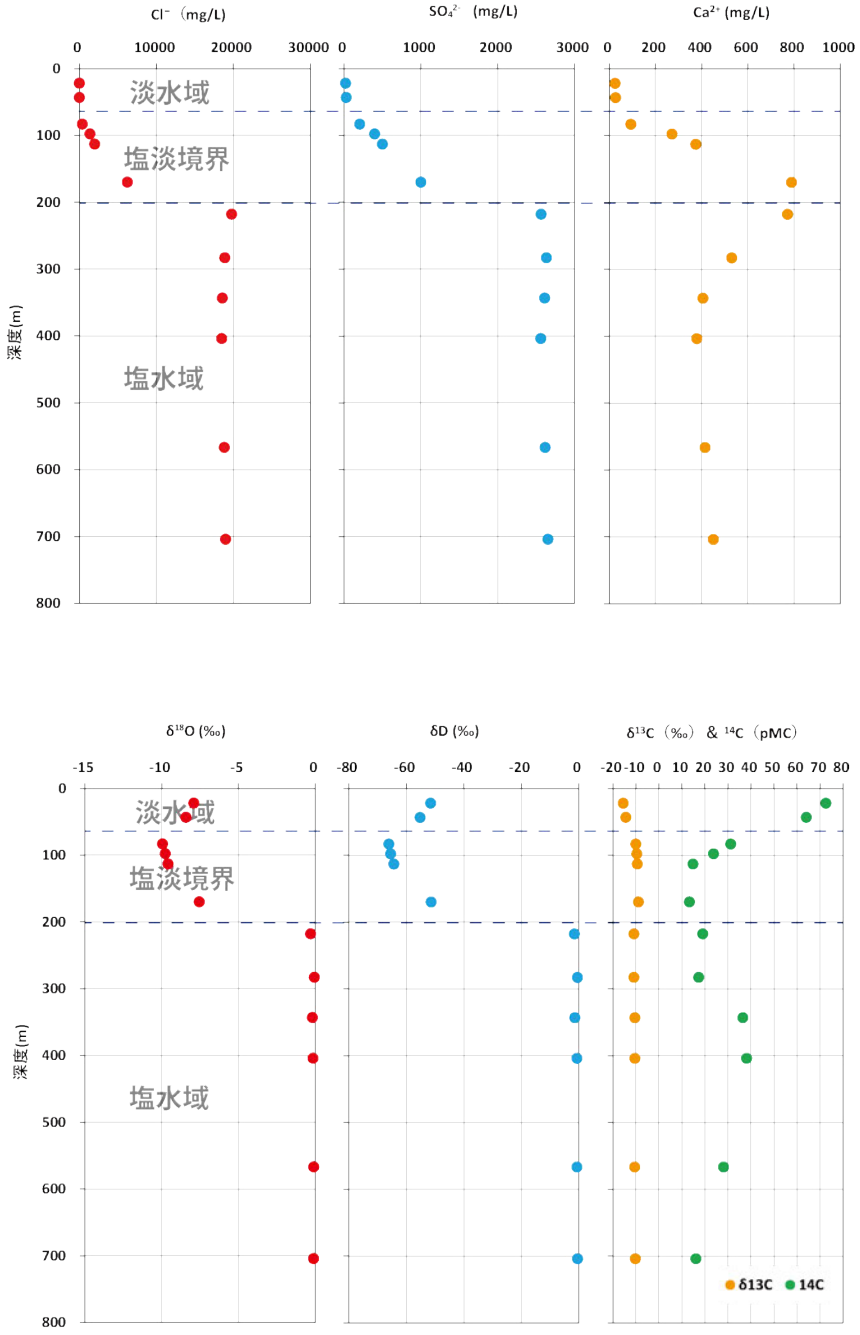


図 3-1- 22　GB-2 および FGB-3 から得られた地下水の水質（その 2）

（８）基盤岩未到達について

FGB-2 孔の増掘の大きな目的の 1 つに、不透水基盤岩への到達があった。基盤に到達し、基盤内での揚水試験や地下水採取を行うことにより、その水理学的特性、水質、地下水年代などを精査でき、流動性の塩水系地下水と非流動性の塩水系地下水の違いを明確にすることができると考えられた。さらに、基盤深度の確認は 2-1 節のモデルの更新や、実験溶液としての化石海水の提供など（第 4 章）、分野間連携を含む、いくつかの課題にも貢献する。しかしながら、上述したように深度 800 mでの透水係数は 10^{-6}（m/s）オーダーであり、その上位層と大きな違いは認められない（図 3-1-20）。令和 2 年度の時点では FGB-2 孔は深度 400 m で不透水基盤に到達すると考えられていたが、結果として深度 800 m でも基盤岩に到達しなかったことになる。この予測と結果を振り返ることは、文献調査の限界を示すことにつながると考えられることから、本節で記載することとした。

以下、尾崎ほか（2016）を参考に記載する。本地域の潤井川低地や富士川扇状地の地下には、蒲原層、岩淵火山岩類、鷺ノ田層のほか、それ以降の火山岩や堆積岩が分布していると推定されているが，これらの地層・岩体の分布を示すデータは得られていない。このような全く未知の状態において、重視したのは地質断面図であった（図 3-1-23）。FGB-2 孔の掘削地点では深度 100 m で約 1 万年の地層となることがわかっており、深度 150 m 付近で溶岩が認められ、これ以深は、砂礫、山体崩壊堆積物（古富士泥流：Vf3 や Vf4）となると考えられている。古富士泥流は 2～6 万年程度の地質年代を持つため、仮に FGB-2 孔の溶岩層付近の砂礫層が Vf3 もしくは Vf4 ならば（図 3-1-23 の下図にもその可能性が示されているが、ボーリングコアからは判断ができなかった）、深度 100 m から 150 m にかけて急激に地質が古くなりはじめるということである。Vf3 もしくは Vf4 の下位には、中期更新世の愛鷹火山（10～40 万年前：図 3-1-21 では At と書かれている）が位置しており、地質断面図では深度 400 m 付近で到達する可能性があった。以上のことから、令和 3 年度初期では、図 3-1-24 のような地質モデルが想定されていた。当初より、入山瀬断層の活動による基盤の落ち込みは予想されていたが、その程度は FGB-2 孔の位置で限定的という判断であった。

また、図 3-1-25 に示した屈折走時トモグラフィによる速度モデルでは（産総研，2014）、FGB-2 孔の掘削地点では深度約 600 m まで速度が明らかに変化しており、反射法の解析結果では 200～400 m で反射面の様相が異なっている。以上のような地質学的、地球物理学的なモデルでは深度 400 m で基盤岩に到達することを予想したが、令和 3 年度調査では到達しなかった。しかし、モデルには不確実性が存在することも考慮し、令和 4 年度にはできるだけ深い深度まで増掘する判断をおこなった。

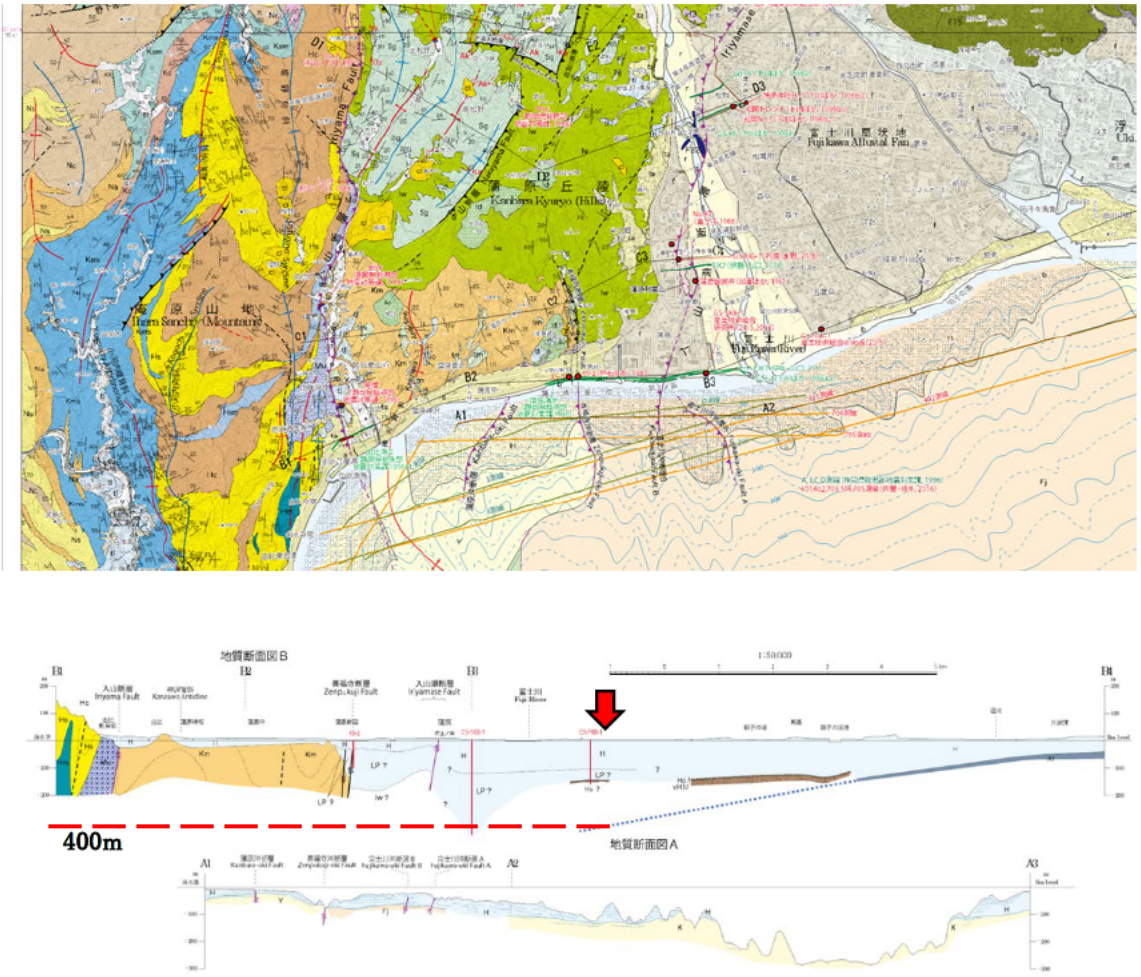


図 3-1- 23　地質断面図から推定された不透水基盤深度
青および赤色の点線を付記した。赤い矢印が FGB-2 孔の掘削地点

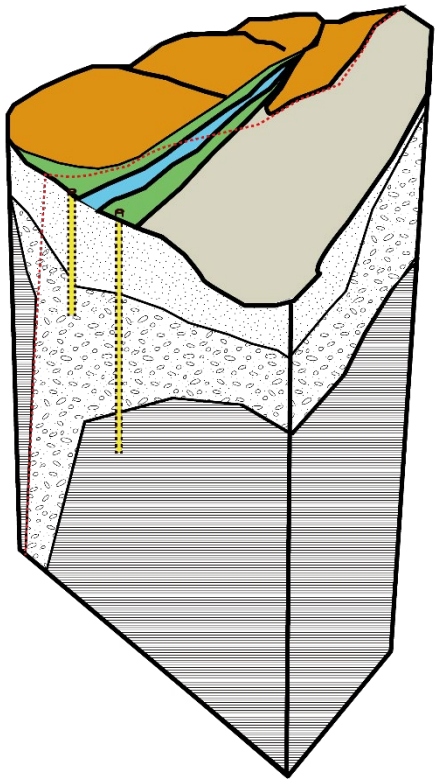


図 3-1- 24　当初推定していた地質図
左側のボーリング孔が SKB 孔、右側が FGB-2 孔である。入山瀬断層による基盤の落ち込みは予想されていた。

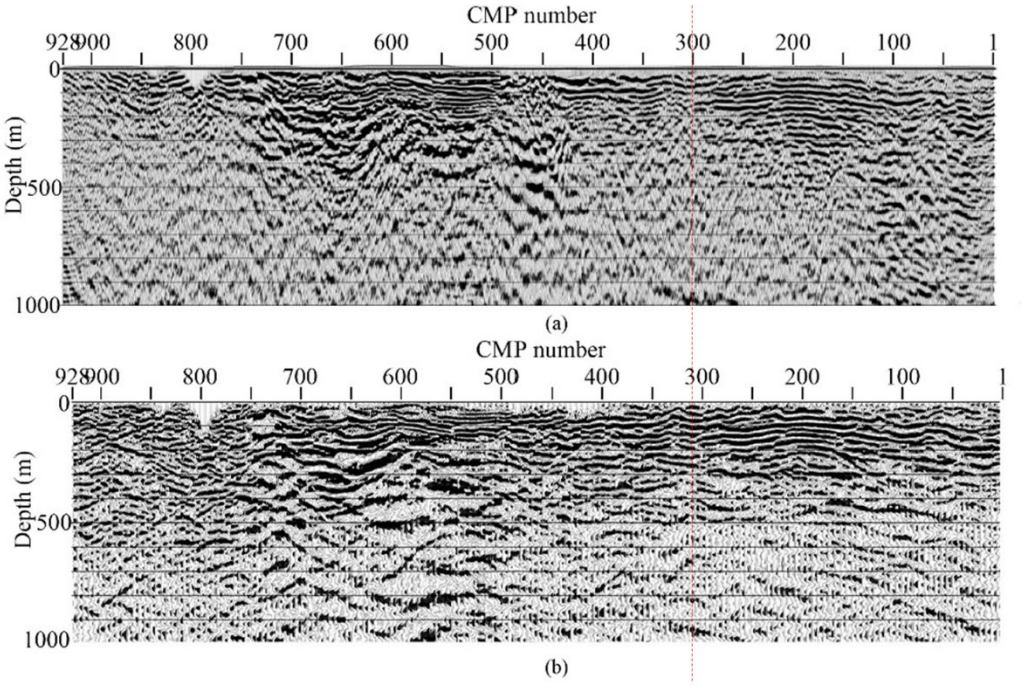


図 3-1- 25　平成 25 年度深部反射法結果と深部・浅部統合解析結果の比較（a）　H25 年度深部反射法深度断面、(b) 深部統合解析 CMP 重合解析結果。CMP450 が富士川付近（産総研, 2016）

参考文献

Abarca E.C.(2006): Seawater intrusion in complex geological environments. PhD Thesis, Department of Geotechnical Engineering and Geo-Sciences (ETCG), Technical University of Catalonia, UPC.

Burnett W.C., Kim G. and Lane-Smith D. (2001): A continuous monitor for assessment of ^{222}Rn in the coastal ocean. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 249(1), 167-172.

Burnett W. C., Peterson R. N., Santos I. R. and Hicks R. W. (2010): Use of automated radon measurements for rapid assessment of groundwater flow into Florida streams. Journal of Hydrology, 380, 298-304.

Post V., Kooi H. and Simmons C.(2007): Using Hydraulic Head Measurements in Variable-Density Ground Water Flow Analyses. Ground water, 45(6), 664-671.

井川怜欧・小野昌彦・神谷貴文・渡邊雅之・村中康秀・平野智章・丸井敦尚（2016）：富士山周辺の水文地質，海陸シームレス地質情報集，駿河湾北部沿岸域，海陸シームレス地質図集 S-5 (8), 1-25.
URL: https://www.gsj.jp/data/coastal-geology/GSJ_SGMCZ_S5_2016_08.pdf（確認日 2021 年 3 月 3 日）

経済産業省（2016）：沿岸海底下における地層処分の技術的課題に関する研究会とりまとめ
URL:https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/engan_kaiteika/pdf/report01_01.pdf （確認日 2022 年 3 月 18 日）

経済産業省（2017）：科学的特性マップ公表サイト
URL:https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kagakutekitokuseimap/ （確認日 2022 年 3 月 18 日）

Machida I, M. Ono, M. Koshigai, and A. Marui (2016): Comparison of the ages of groundwater around a saltwater – freshwater mixing zone, IAH 2016.

小野昌彦・井川怜欧・町田 功・丸井敦尚・村中康秀・神谷貴文・大山康一・伊藤 彰 (2016)：水文環境図「富士山」，産業技術総合研究所地質調査総合センター
URL:
https://gbank.gsj.jp/WaterEnvironmentMap/contents/fujisan/fujisan/fujisan.htm (確認日 2022 年 3 月 18 日)

尾崎正紀・水野清秀・佐藤智之（2016）：5 万分の 1 富士川河口断層帯および周辺地域地質編纂図および説明書，海陸シームレス地質情報集，駿河湾北部沿岸域，海陸シームレス地質図集 S-5 (9), 1-57.
URL: https://www.gsj.jp/data/coastal-geology/GSJ_SGMCZ_S5_2016_09_c.pdf (確認日 2022 年 3 月 18 日)

気象庁（2023a）：潮汐・海面水位に関する診断表，データ．
http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/shindan/index_tide.html（確認日 2023 年 02 月 28 日）．
気象庁（2023b）：過去の気象データ検索．
http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php（確認日 2023 年 02 月 28 日）
産業技術総合研究所（2013）：平成 25 年度　海域地質環境調査確証技術開発　成果報告書
URL:https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2013/25-5-1.pdf（確認日　2022 年 3 月 18 日）
産業技術総合研究所（2014）：平成 25 年度　海域地質環境調査確証技術開発　成果報告書
URL:https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2014/26fy_kaiiki.pdf（確認日　2022 年 3 月 18 日）
産業技術総合研究所（2015）：平成 25 年度　海域地質環境調査確証技術開発　成果報告書
（その 1）
URL:https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2015/27fy_kaiiki-1.pdf（確認日　2022 年 3 月 18 日）
（その 2）
URL:https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2015/27fy_kaiiki-2.pdf（確認日　2022 年 3 月 18 日）
産業技術総合研究所・日本原子力研究開発機構・原子力環境整備促進・資金管理センター・電力中央研究所（2018）：平成 30 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　沿岸部処分システム高度化開発　報告書
URL:https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2018/30fy_coast.pdf（確認日　2022 年 3 月 18 日）
産業技術総合研究所・原子力環境整備促進・資金管理センター・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　沿岸部処分システム評価確証技術開発　報告書
URL:https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2020/2fy_coast.pdf　（確認日　2022 年 3 月 18 日）
産業技術総合研究所・日本原子力研究開発機構・原子力環境整備促進・資金管理センター・電力中央研究所（2019）：平成 31 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　沿岸部処分システム評価確証技術開発　報告書
URL:https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2019/31fy_coast.pdf　（確認日　2022 年 3 月 18 日）
高田渉太郎・佐藤靖彦・平岡博明・明石　健・原田弘幸・松野忠彦（1999）：現場透水試験における観測地下水位の潮位補正．土木学会年次学術講演会講演概要集第 3 部（A），54，690-691．

地層処分研究開発調整会議（2019）：地層処分における全体計画（平成 30 年度～令和 4 年度）
URL:https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/chiso_shobun/pdf/20200331_001.pdf（確認日　2022 年 3 月 18 日）
三和功喜・川元智司・石本正芳（2008）：験潮自動化集中管理システムの高度化に関する研究．国土地理院平成 20 年度調査研究年報．
http://www.gsi.go.jp/common/000057254.pdf（2015 年 1 月 15 日）

３－２　地下水の流出場及び海底地形把握技術の高度化

（１）背景

沿岸部では陸域から海域へ地下水が流動しており、その末端現象として海底から湧出する地下水の存在が知られている。そのため、沿岸部における地層処分を想定した場合、地下水流動が放射性核種の移行経路となる可能性があり、安全評価の観点からも沿岸部の地下水流動から流出に至る実態を明らかにしておく必要がある。また沿岸部地質環境モデルの妥当性を検証する観点からも、地下水の流出場を特定し、流出する地下水の化学的特徴から陸域地下水の特徴を把握することが必要である。このような背景を受けて、本事業では海底地形の詳細把握に係る技術と、陸域地下水の流出場の特定手法や海底湧出地下水から陸域地下水の化学的特徴の推定手法の高度化を目的として、特に遠隔無人探査機（Remotely Operated Vehicle、以下 ROV とする）とサイドスキャンソナーなどで得られる音響画像の解析を組み合わせた湧出水の探査手法について検討を進めてきた（産業技術総合研究所ほか、2020；2021；2022）。

令和 4 年度は実際の沿岸部海域での試験を通して、海底地形や湧出地点との関係性や湧出量の評価、及び陸ー海の地下水の連続性の評価に関わるデータ収集と検討を進めた。また、地下水の流出場の特定や海底下の構造などを探査する技術について、これまでに収集した文献情報に基づいて地形や地質等の解析とデータ整理を行った。

（２）海底湧出地下水の探査技術に関する試験

①　概要および方法

本試験では、駿河湾奥部の田子の浦～富士川河口周辺の海域を対象に、ROV と高精度音響カメラ（ARIS Explorer 3000、Sound Metrics 社製）を組み合わせた探査手法を適用した。音響画像から湧出水を検出する方法としては、音響画像中に現れる反射領域の音圧と、背景の音圧との間での閾値を設定し、それを上回る音圧が認められた領域を湧出水と判断するものである。閾値は、模擬水源を用いた実験による検討を行って、カメラの前方 3.0～4.9 mの範囲における音圧の平均値+3σ と決定した。探査手法の概要や模擬実験の検討内容は令和 3 年度事業でとりまとめており、海底面から 4～5 m 離れた距離から湧出水を高精度に検出できる（産業技術総合研究所ほか、2022）。

探査測線の配置図を図 3-2-1 に、測線長と探査範囲を表 3-2-1 に示す。実海域での探査では、音響探査に基づく湧出水の検出技術と音響画像を用いた湧出量の推定手法について検討した。また、発見した湧出水については採水と化学分析を行い、過年度の掘削調査で得られた地下水を含む陸域地下水と湧出水との性状比較を行って、沿岸部における陸ー海の地下水の連続性について検討した。

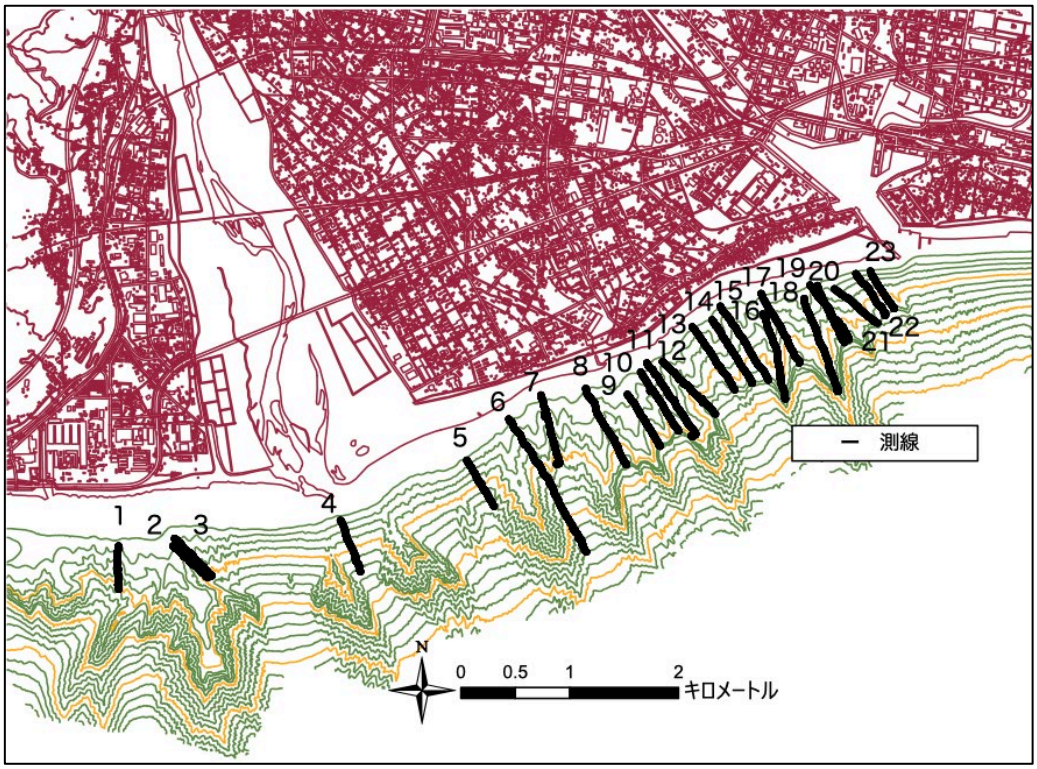


図 3-2- 1　ROV と高精度音響カメラを用いた探査の測線配置図
（黒線は ROV の航跡を示す。令和 4 年度に測線番号 3、7、10 を探査し、その他の測線は過年度に探査したものである。探査の実施内容は表 3-2-1 に示す通りである。陸域の地図情報は国土地理院（2022）を使用した。）

表 3-2- 1　ROV と高精度音響カメラを用いた探査の測線長と探査面積の一覧

測線番号	測線長（m）	探査面積（㎡）	湧出水の検出	調査年度
1	472	1,181	×	令和 3 年度
2	455	1,138	×	令和 3 年度
3	455	1,137	×	令和 4 年度
4	534	1,334	×	令和 3 年度
5	528	1,319	×	令和 2 年度
6	760、832	1,900、2,081	×	令和 2 年度、3 年度
7	866	2,166	×	令和 4 年度
8	842	2,160	×	令和 2 年度
9	619	1,547	×	令和 3 年度
10	627	1,569	×	令和 4 年度
11	753	1,883	×	令和 2 年度
12	882	2,204	×	令和 3 年度
13	717	1,791	○	令和 2 年度
14	720	1,801	×	令和 3 年度
15	829	2,072	×	令和 2 年度
16	830	2,075	×	令和 3 年度
17	752	1,880	○	令和 2 年度
18	1,240	2,560	×	令和 3 年度
19	641	1,604	○	令和 2 年度
20	621	1,552	○	令和 3 年度
21	593	1,483	×	令和 3 年度
22	530	1,324	○	令和 3 年度
23	418	1,046	○	令和 2 年度

② 湧出水の探査と定量化

令和 4 年度は 11 月から 12 月にかけて、3 測線の水深 20～140 m を対象に音響探査を実施した。今回の探査では、調査船と海中の ROV が風や潮流に流されることなく、直線上に探査を実施できた。得られた探査結果と過年度に実施した 20 測線の探査結果を統合して湧出分布を解析した。解析の結果、測線 13、17、19、20、22 及び 23 において音響画像中に湧出水が検出された（図 3-2-1、表 3-2-1）。この結果は、これまでの事業で海底面の観察や水質データによって確認されている湧出地点の分布と整合していた。湧出水周辺の海底地形や底質の特徴は、令和 3 年度の事業（産業技術総合研究所ほか、2022）で報告したとおり、泥状の堆積物に覆われた箇所から噴流上に湧出している状況（測線 13、17；図 3-2-1）や、崖の上で広範囲に湧出している状況（測線 17、19、20、22、23）が確認されている。一方で、掘削孔の近傍を含めた富士川河口周辺（測線 1～7）においては、これまでの探査で顕著な湧出地点を確認できなかった。

湧出量の評価は、湧出水の直上を通過する際に連続的に得られた音響画像を用いて、それらの画像中に現れる湧出水の反射面積を合算することで、3 次元の立体として捉えて湧出量を計算するものである。実際の海域では、潮流等の影響を受けて ROV の航行速度にばらつきが生まれるため、ROV の移動距離当たりに高精度音響カメラが撮影する枚数（フレーム数）に違いが生まれる。探査測線ごとにフレーム数が異なると、抽出する音響画像の枚数がそれぞれの測線で異なるため、計算結果を同一に比較できない。そこで、模擬実験で得られたフレーム数と、実海域における ROV の移動距離からフレーム数を補正することで、単位距離ごとに抽出する音響画像の枚数が同一となるように計算した。湧出量は、模擬実験における模擬水源の湧出量（1～21 L/min）と音響画像の反射面積との関係から近似式を導き、実海域でのフレーム数を補正して推定した。以上の計算方法は令和 2 年度事業（産業技術総合研究所ほか、2021）にまとめている。

図 3-2-2 は Natural Neighbor 法（ESRI、2022）を用いて内挿を行い、推定した湧出量を平面分布図として示したものである。解析範囲における湧出量は 3.3 万 m^3/日と推定された。推定湧出量の規模について陸域の地下水や河川流量と比較すると、山﨑・村下（1966）がダルシーの法則に基づいて推定した駿河湾沿岸域（岳南地区）の地下水流動量は、合計 127 万 m^3/日であるとされ、今回推定された湧出量はその値の 2.6%に相当する。また富士川の渇水流量（2019 年の計算値）は 180 万 m^3/日（国土交通省、2023）とされ、推定した湧出量は 1.8%程度である。現状の推定値は、富士川河口周辺のように探査測線の密度が低い領域を含んだ暫定的な結果であるため、測線の間を補完する探査が必要と考えられる。また、シーページメータなど実測できる他の手法に基づく湧出量の検証も必要と考えられる。

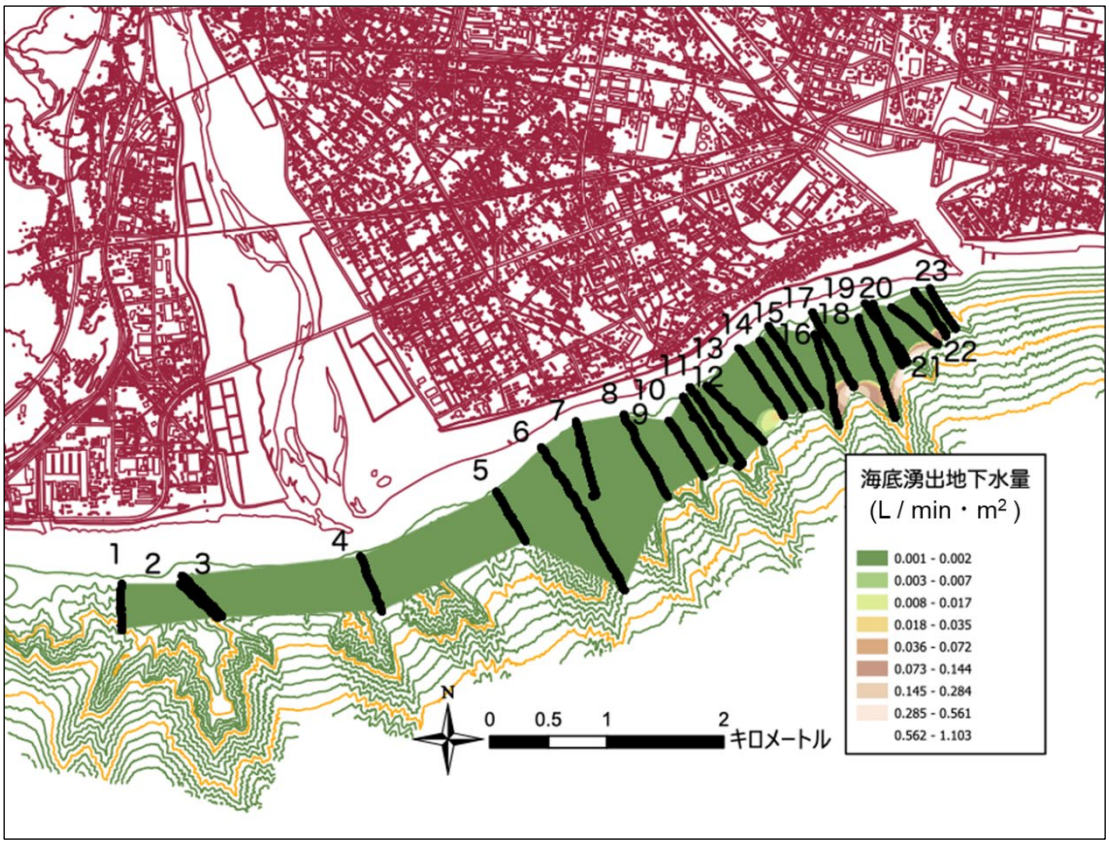


図 3-2- 2　ROV と高精度音響カメラで推定した湧出量の分布図
（音響探査データを基に GIS を用いて Natural Neighbor 法による内挿を行った。）

③ 陸ー海の地下水の連続性に関する検討

音響探査で検出された湧出水（表 3-2-1）を対象に、ピストン式採水器（産業技術総合研究所ほか、2021）を用いて採水した試料の炭素同位体組成および微量元素の分析結果を図 3-2-3 に示す。これらの湧出水は、酸素・水素安定同位体比とⅤ濃度の結果から、採水した湧出水には富士山で涵養されて溶岩層を流動してきた地下水が含まれると推定されている（産業技術総合研究所ほか、2021）。図 3-2-3 の結果でも同様に、海底湧出地下水の組成は富士山系地下水と海水との混合で形成されたことを示唆する。一方で、湧出水と掘削孔の地下水（SKB 孔と FGB 孔、図 3-1-2 参照）を比較すると、互いの組成の間に直接的な関係性は認められない。湧出水の ^{14}C 濃度は、海水から富士山系地下水に近づくほど濃度が低下傾向にあるものの、見かけ年代はほぼ現代の地下水であると推定され、^{14}C 濃度が顕著に低い掘削孔地下水とは差が認められる。以上の結果から、これまでに発見した海底湧出地下水と掘削孔周辺の地下水との間での連続性は認められないと考えられる。音響探査結果からは、掘削孔周辺の測線 6（水深 20～260 m）では湧出が検出されていない。掘削孔周辺の探査測線の数が限られることや、水深 20 m 以浅の情報が得られていな

いことを踏まえて、補足の音響探査の実施や浅海域における滲出型の湧水の可能性も含めた検討が必要である。

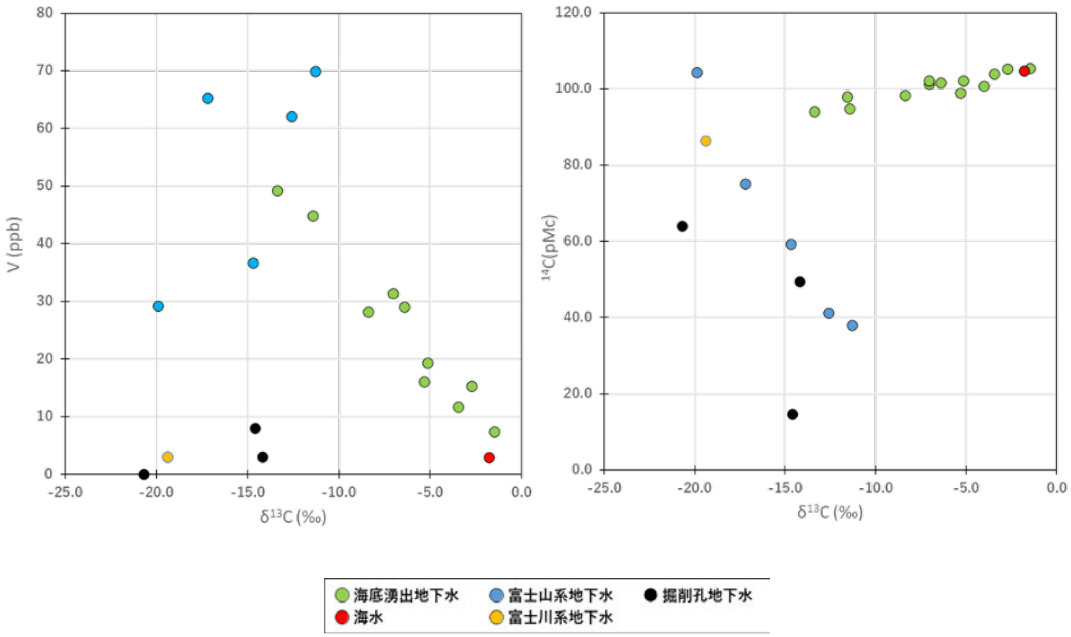


図 3-2- 3　水試料の炭素同位体および V 濃度
（掘削孔地下水は過年度に SKB 孔と FGB 孔（図 3-1-2 参照）で採水したものである。）

（３）海底湧出地下水周辺の地形・地質情報に関する文献収集

① 概要

令和 3 年度は海底湧出地下水や海底下地下水に関する現状の探査手法を整理し、様々な沿岸部における探査手法の体系化を念頭に、文献の収集および整理を行った（産業技術総合研究所ほか、2022；Appendix Ⅴ参照）。令和 4 年度は、地下水の湧出や沿岸部の地下水流動に関わる地形と地質情報を整理してその特徴について検討するとともに、現場で適用されている探査手法をとりまとめるために、文献の整理と GIS データの整備を進めた。具体的には、過年度に収集した文献のうち、海底湧出地下水や沿岸部地下水に関する文献（136 件）を整理して 34 地域を抽出し、文献に記載された位置情報を基に集水域を設定して、周辺の地形や地質情報を GIS で解析した（表 3-2-2）。集水域の設定、地形及び地質情報の解析に当たっては、公開されている既存データを利用した（表 3-2-3）。1 つの地域に複数の海底湧出地下水や地下水の観測地点がある場合は、それらの地点ごとに集水域を設定した。設定した集水域を対象に、地形勾配や地質、地下の地質、周辺の海底地形などを GIS で解析して 69 の集水域におけるデータをとりまとめた（図 3-2-4、表 3-2-4）。

表 3-2- 2　対象とした地域と集水域の一覧

地域番号	地域名	集水域番号
1	幌延	1
2	富山湾	2
		3
3	瀬戸内海	4
		5
		6
		7
4	九十九里浜	8
5	駿河湾	9
		10
6	八代海	11
7	利尻	12
		13
		14
		15
		16
		17
8	有明海	18
		19
		20
		21
		22
		23
		24
		25
9	多良間島	26
		27
		28
		29
		30
		31
		32
10	鳥海山	33
		34
		35
		36

地域番号	地域名	集水域番号
11	池島	37
12	下北半島	38
13	相模湾	39
		40
14	大阪湾	41
		42
15	釧路	43
16	土佐湾	44
17	大槌湾	45
18	沖縄南部	46
		47
19	津軽海峡	48
		49
		50
		51
20	東海村	52
21	博多湾	53
22	伊豆大島	54
23	伊勢湾	55
		56
24	小浜湾	57
25	霞ヶ浦	58
26	上ノ国	59
27	白石平野	60
28	東京湾	61
		62
29	常磐炭田	63
30	七尾湾	64
31	与論島	65
32	徳島	66
33	磐田・浜松	67
		68
34	石狩平野	69

表 3-2- 3　解析に使用したデータの一覧

データ	出典
標高	基盤地図数値標高モデル 10m メッシュデータ（国土地理院、2022）
表層地質	20 万分の 1 日本シームレス地質図 V2（産総研地質調査総合センター、2022）
地下地質	Subsurface geological mapping of the Japanese Islands (Yasue et al., 2014)
海域地形	500m メッシュ水深データ（日本海洋データセンター、2022）

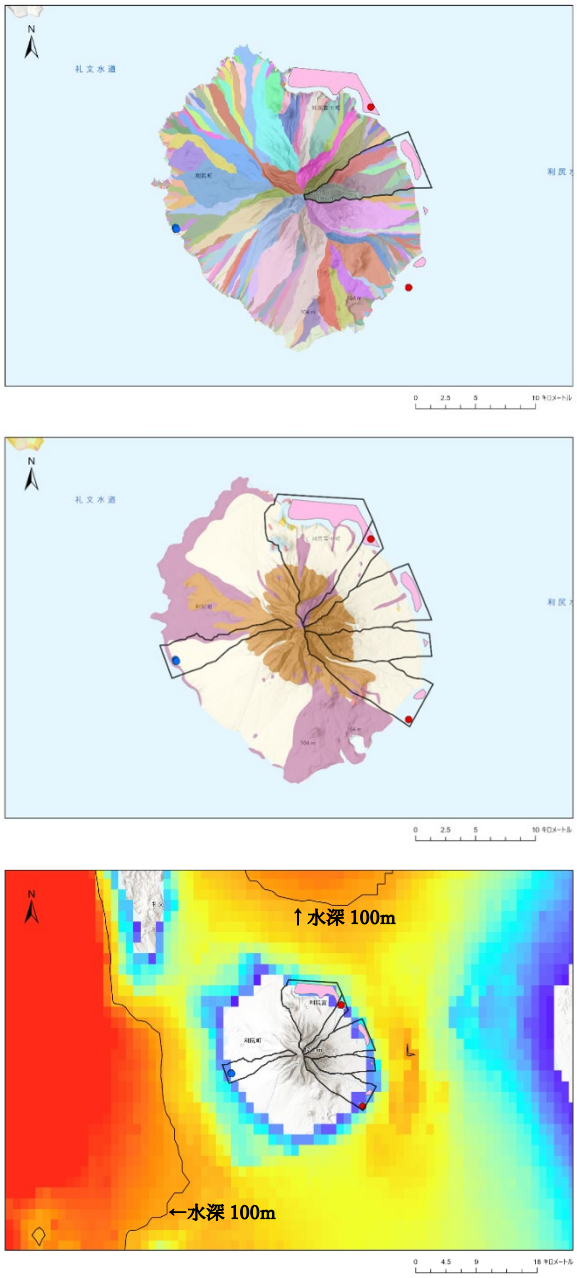


図 3-2- 4　文献情報に基づき GIS で解析した集水域、表層地質及び海底地形図
（本図は地域番号 7：利尻島の解析例を示したものである。文献に記載された海底湧出地下水や地下水の観測地点の位置情報に基づいて、集水域や表層地質の分布を解析した。地点が明記されている場合は「点」として示し、位置情報が明確でない湧出水の場合は湾などを目安に「湧出域」として示した。）

表 3-2- 4　GIS で解析した集水域、表層地質及び海底地形勾配の一覧

地域名	集水域番号	集水域面積（km^2）	傾斜角（度、中央値）	表層地質の分類別面積割合(%)					海底地形勾配（‰）
				堆積岩	火成岩	変成岩	付加体	その他	
幌延	1	1,453	3.4	96.1	0.1		3.8		1.7
富山湾	2	173	10.3	76.8	23.1	0.1			33.1
	3	204	24.3	41.3	36.2	22.5			93.8
瀬戸内海	4	1.3	16.7		84.6		15.4		1.4
	5	1.8	24.1		100.0				3.4
	6	2.8	26.7	5.2	94.8				7.4
	7	1.6	11.5	16.4	80.5			3.2	9.1
九十九里浜	8	203	0.2	100.0					2.6
駿河湾	9	647	29.6	21.9			78.0	0.0	21.4
	10	371	5.2	11.4	88.7				45.1
八代海	11	5.1	17.5	3.5	96.5				3.3
利尻	12	18.4	12.0	7.0	93.0				7.2
	13	5.3	7.8		100.0				6.4
	14	12.3	6.2	0.2	99.8				14.5
	15	9.1	6.5		100.0				16.8
	16	11.9	7.3		100.0				10.7
	17	7.6	5.3		100.0				9.8
有明海	18	25.6	0.9	81.6	18.4				2.3
	19	33.1	0.9	75.8	18.2			6.1	2.6
	20	18.6	15.3	8.3	91.7				2.6
	21	41.0	5.3	10.6	88.8			0.6	6.8
	22	25.1	7.1	4.1	95.9				4.7
	23	18.1	9.4	8.9	91.2				2.1
	24	14.0	10.2	7.6	92.3			0.1	2.4
	25	28.8	15.4	10.3	85.4			4.3	2.5
多良間島	26	0.7	1.4	100.0					13.9
	27	2.4	0.3	100.0					15.1
	28	1.5	0.2	100.0					23.5
	29	1.2	0.3	100.0					28.6
	30	1.7	0.2	100.0					37.7
	31	4.1	0.3	100.0					78.9
	32	2.3	0.6	100.0					50.0
鳥海山	33	8.1	5.5		100.0				8.2
	34	2.9	6.1		100.0				7.3
	35	9.8	7.0		100.0				18.7
	36	1.9	7.6		100.0				5.9
池島	37	0.1	2.7	87.7	12.3				14.1
下北半島	38	63.7	1.2	85.7	14.3				18.8
相模湾	39	9.0	5.6	69.9			26.6	3.6	16.7
	40	1,004	13.9	35.7	43.7	2.3	18.4		99.0
大阪湾	41	1,785	0.8	68.7	18.9	0.0	7.7	4.7	2.3
	42	169	4.7	43.2	44.0		2.3	10.4	3.3

表 3-2-4　GIS で解析した集水域、表層地質及び海底地形勾配の一覧（続き）

地域名	集水域番号	集水域面積（km^2）	傾斜角（度、中央値）	表層地質の分類別面積割合(%)					海底地形勾配（‰）
				堆積岩	火成岩	変成岩	付加体	その他	
釧路	43	2,437	3.5	57.0	43.0			0.1	9.4
土佐湾	44	25.7	5.0	39.5			60.5		4.9
大槌湾	45	344	26.0	10.7	31.8		57.4		10.7
沖縄南部	46	6.7	2.1	100.0					21.4
	47	4.2	2.4	100.0					32.3
津軽海峡	48	69	14.7	42.3	17.4		39.0	1.3	13.8
	49	185	22.1	16.7	72.5		10.8		20.4
	50	241	19.8	36.1	63.8		0.1		10.4
	51	639	18.7	73.0	20.9		6.1		9.4
東海村	52	45	0.1	95.4				4.6	4.6
博多湾	53	80	3.7	36.9	34.5	22.1		6.5	1.3
伊豆大島	54	3.5	4.9		100.0				41.9
伊勢湾	55	2,942	0.5	67.4	3.9		22.8	5.8	1.9
	56	1,960	3.1	64.6	25.2	3.6	5.4	1.2	1.2
小浜湾	57	441	27.7	20.0	0.0		79.9	0.1	3.6
霞ヶ浦	58	7,016	0.3	79.4	15.8	0.9	3.2	0.7	4.6
上ノ国	59	6.4	7.3	32.6	67.4				46.5
白石平野	60	206	0.9	71.9	16.6			11.6	1.4
東京湾	61	13,002	7.7	46.6	30.9	3.6	18.4	0.6	2.2
	62	1,558	3.9	52.9	3.4		41.0	2.7	3.1
常磐炭田	63	891	8.1	38.3	54.6	6.3		0.7	9.5
七尾湾	64	118	4.7	46.6	53.4				3.7
与論島	65	4.9	2.3	99.2			0.8		32.3
徳島	66	3,686	26.3	23.9	0.4	71.8	3.5	0.5	2.1
磐田・浜松	67	521	3.8	71.6			28.4	0.0	31.4
	68	642	0.7	63.4		15.5	19.4	1.7	10.1
石狩平野	69	8,684	8.1	76.2	18.5	2.6	2.7	0.0	1.9

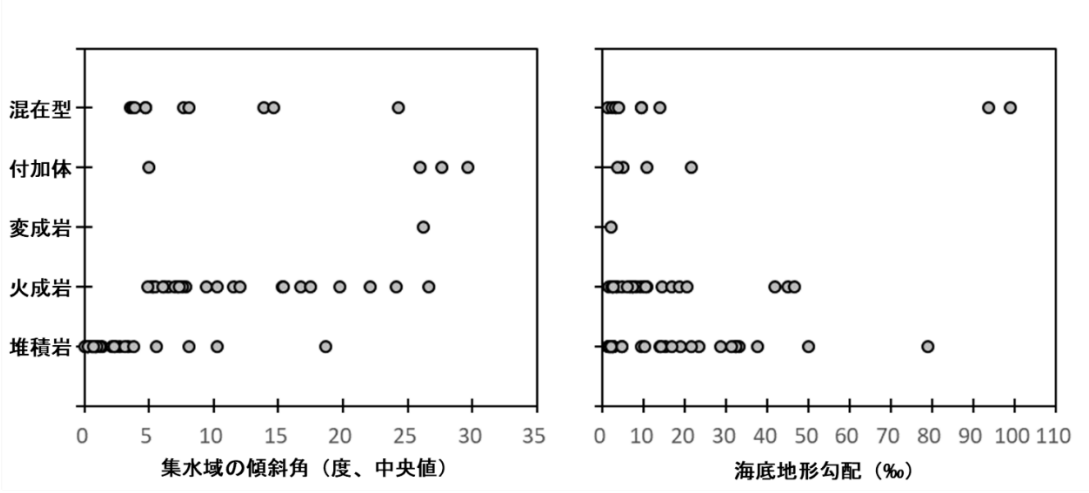


図 3-2- 5　集水域内の主要な表層地質、傾斜角及び海底地形勾配の関係
（集水域の面積に占める割合が 1 位の地質を集水域内の主要な表層地質とみなし、割合の 1 位と 2 位の差が 20%以内の場合は混在型として分類した。海底地形勾配は海岸線から水深 100 m までの水平距離から算出した。）

② 結果

海底湧出地下水周辺の地形・地質情報の関係性や、各地域で適用された探査手法を抽出する観点から整理を進めて、GIS 解析による 69 の集水域におけるデータ整備が完了した。地質種ごとの傾斜角や海底地形勾配の傾向については、整備したデータに基づく統計解析や検討が必要である。表 3-2-2 でとりまとめた文献に基づき、20 地域の海底湧出地下水の事例について整理した結果を図 3-2-6 と表 3-2-5 に示す。海底湧出地下水周辺の地質状況は、火成岩や堆積岩など様々で、地質時代も第四紀、新第三紀、白亜紀などが確認できる。湧出タイプとしては、海底湧出地下水で一般的な亀裂流出型と滲出型の両者が確認された。湧出している場所に着目すると、大半が海岸から 300 m 以内の距離に位置し、水深も数十 m とごく浅い範囲での事例が多い。今後、これらの結果と前段の GIS 解析結果を統合して、海底湧出地下水の特徴と周辺の地形・地質情報、推定される地下の地質（Yasue et al., 2014）との関係について検討を進める。

表 3-2-6 は、20 地域で用いられた海底湧出地下水の調査手法について整理したものである。湧出水の検出に関する探査手法としては、塩分濃度や水温をはじめとして、地表水よりも地下水中で高い濃度を示すラドン（^{222}Rn）をトレーサーとした手法が多くの事例で適用されている。湧出水の起源や陸域地下水との対比といった観点からは、酸素・水素安定同位体比が広く適用されており、一部の地域では沿岸部地下水の年代幅に応じて CFCs や ^{14}C などの年代トレーサーも適用されている。また、沿岸部における湧出水の探査手法の特徴を示すものとして、栄養塩類や窒素同位体を調査した事例が認められる。これは、海

底湧出地下水が陸域から海域への物質輸送経路であり、沿岸域の水環境に対する重要な要素の一つとして理解されているためと考えられる。

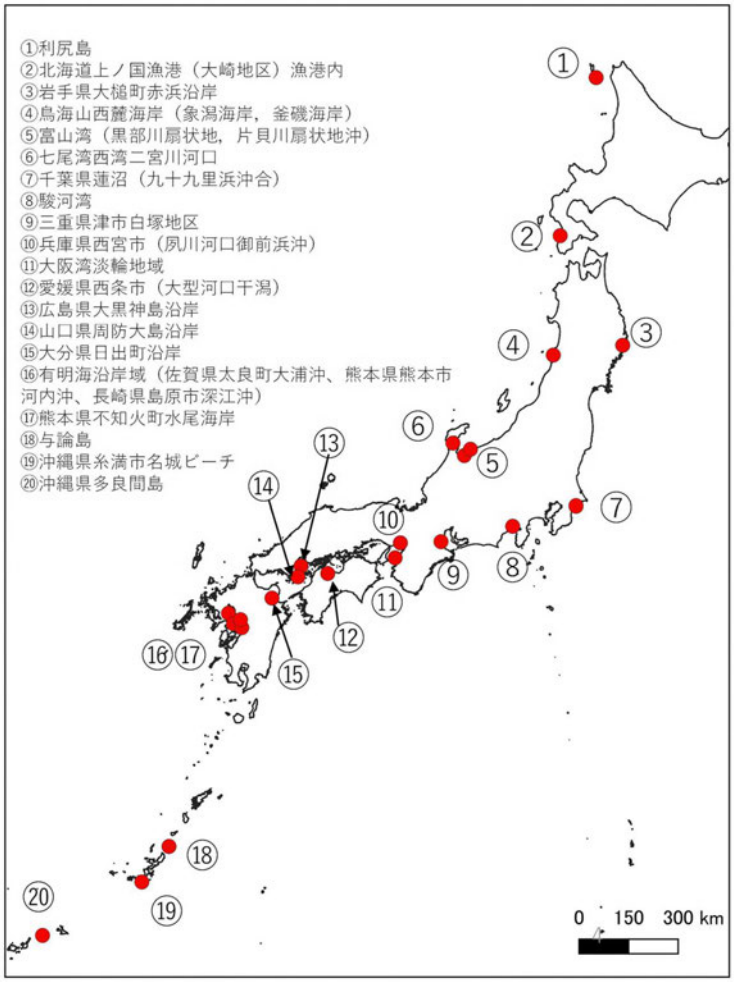


図 3-2-6　海底湧出地下水に関する文献の調査地域
（令和 3 年度に収集した文献に基づき、海底湧出地下水の報告事例がある 20 地域を対象に記載されている情報を整理した。収集した文献リストは、産業技術総合研究所ほか（2022）Appendix V を参照のこと。）

表 3-2-5　海底湧出地下水周辺の地質と湧出機構
（本表は産業技術総合研究所ほか（2022）Appendix Ⅴで収集した文献から作成した。）

地域名	湧出 水深（m）	海岸線から湧出地点までの距離（m）	地質	湧出機構に関する記載
①利尻島	9.3～15	100～500	第四紀の溶岩流と二次的な堆積物	・砂質の海底面から砂を巻き上げるように湧出 ・陸域起源（水質が海岸線沿い自噴井戸と同じ）
②北海道上ノ国漁港（大崎地区）漁港内	不明	不明	第三紀中新世安山岩～玄武岩	・漁港内の海底から地下水が湧出
③岩手県大槌町赤浜沿岸	不明	不明	粘板岩・砂岩・チャートからなる中・古生層および白亜紀の花崗閃緑岩、トーナライト	・海底から地下水（淡水～汽水）が流出 ・塩淡境界付近における海側からの海水侵入あり
④鳥海山西麓海岸（象潟海岸,釜磯海岸）	0.2～10	40～200	象潟海岸（鳥海山の北西麓）：主に鳥海山起源の第四紀更新世中期～後期の火山噴出物 釜磯海岸（鳥海山西麓：安山岩溶岩（かんらん石輝石安山岩）	・海底下に淡水系地下水が存在 ・安山岩の岩盤割れ目上に堆積した砂質堆積物から線状に海底地下水湧出域が分布 ・地層の亀裂から湧出
⑤富山湾（部黒部川扇状地、片貝川扇状地沖）	8～33	20～200	基盤に新第三紀の堆積岩（泥岩、砂岩、火山岩起源の砕屑岩、凝灰岩等）と第四紀堆積物	・湧水は炭質物からなる層とその下位の砂層との境界付近から湧出、ほぼ陸域の地下水組成と同じ ・海底湧水の供給源は扇状地上の旧河川と考えられる
⑥七尾湾西湾二宮川河口	不明	不明	新第三紀の堆積岩および火山岩、第四紀堆積物	・西湾奥部、特に二宮川河口付近で湧出が顕著
⑦千葉県蓮沼（九十九里浜沖合）	2.4～4.2	200	上総層群国本層、砂質堆積物	・塩淡境界に沿った地下水の流れが存在（沖合 200m） ・沖合 320m 付近まで低 Cl 地下水が張り出しており、上位の砂層中の淡水域と区別される ・海底砂層中から湧出している
⑧駿河湾	1～30	10～2500	第四紀後期の新富士火山溶岩と第四紀の堆積物	・水深 120m～140m 付近には比高 30m 程度の急崖、溶岩の末端部から湧水（駿河湾田子の浦港沖） ・流域の全流出量の 39%が陸域起源の地下水（駿河湾安倍川流域）
⑨三重県津市白塚地区	0.3	30～200	第三紀鮮新統～前期更新統の東海層群（砂、泥）	・湧出量は冬季および満潮時の前後に最大となる ・海岸線から沖合 200m に地形が急勾配になる地域があり、その周辺での湧水量の観測
⑩兵庫県西宮市（夙川河口御前浜沖）	～8	165	第四紀大阪層群上部層（砂・シルト層）、夙川の河床堆積物	・潮間帯において海底から湧出 ・海域全体の容積変化量に対する海底湧水の寄与率は 5～8%、低潮時に地下水が湧出
⑪大阪湾淡輪地域	不明	不明		
⑫愛媛県西条市（大型河川の河口干潟）	干潟	不明	後期白亜紀和泉層群の砂岩泥岩互層、加茂川の河川堆積物	・河口から数 100m 離れた地点で ^{222}Rn 濃度と水圧が高く、海底湧水の存在を示唆 ・間隙水は海水と地下水との混合、深部ほど再循環水の影響が大きい
⑬広島県大黒黒神島沿岸	1～3	0～200	白亜紀後期の広島花崗岩	・砂礫層を流下し、汀線辺りで滲出する
⑭山口県周防大島沿岸	9	0～200	中期中新世の瀬戸内火山岩類（安山岩、デイサイト）	・陸域起源（周囲に鉱山廃坑あり） ・滲出型と湧水型
⑮大分県日出町沿岸	1.5～5	20	小規模な第四紀火山、沿岸部の間の扇状地堆積物、海岸段丘上	・岩盤割れ目から湧出
⑯有明海沿岸域（佐賀県太良町大浦沖、熊本県熊本市河内沖、長崎県島原市深江沖）	0～8	0～30	鮮新世～第四紀前期に噴出した火山岩類（玄武岩から安山岩）あるいは凝灰角礫岩、山麓まで緩傾斜をなす火山麓扇状地が広がっている地域も見られる。	・湧出水は火山岩類の延長上に位置する。 ・玄武岩や火山灰により形成された被圧帯水層を流下してきた地下水が、局所的な亀裂等の高透水性の部分から湧出 ・（大浦・河内）玄武岩、凝灰角礫岩のクラックを流路として、集中的に地下水が湧出する。 ・（深江）砂礫層を流下した地下水が滲出
⑰熊本県不知火町水尾海岸	干潟	海岸線付近	新第三期漸新世～第四紀更新世の安山岩質溶岩、凝灰角礫岩	・湧出水は潮間帯に分布し、満潮時には水没する ・陸域の地下水流動系は局所流動系、中間流動系、広域深層流動系の 3 つに大別され、海底湧出地下水は最も滞留時間の長い広域深層流動系の末端に位置する
⑱与論島	不明	20～300	一部基盤の古生層が露出、大部分は琉球層群の砂岩・石灰岩	・海底湧出地下水は陸域起源の地下水が、短時間で海域へ押し出されたもの
⑲沖縄県糸満市名城ビーチ	不明	不明	琉球石灰岩	・陸域の人為起源の影響を受けた地下水が海域へ湧出 ・亀裂からの流出
⑳沖縄県多良間島	不明	不明	更新世の琉球層群（琉球石灰岩）と石英質砂岩から成る多良間砂層（下部島尻層群）	・記載なし

表 3-2- 6　海底湧出地下水の検出や性状等の把握に用いられるトレーサー
（本表は産業技術総合研究所ほか（2022）Appendix Ⅴで収集した文献から作成した。）

地域名	水温、水質等（検出や性状の把握）	同位体（検出、起源及び年代の評価）
①利尻島	EC、主要溶存イオン、溶存ケイ酸	CFCs、SF_6
②北海道上ノ国漁港(大崎地区)漁港内	栄養塩	ラドン濃度
③岩手県大槌町赤浜沿岸	pH、電気伝導度、溶存酸素濃度、酸化還元電位	ラドン濃度
④鳥海山西麓海岸(象潟海岸,釜磯海岸)	硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、リン酸態リン、塩素濃度、EC、pH、DO、塩分濃度、全溶固形物量、比重、水温、濁度	ラドン濃度,溶存無機炭素、トリチウム、水の安定同位体比、希ガス、^{13}C-DIC、CFCs、SF_6
⑤富山湾(黒部川扇状地、片貝川扇状地沖)	高密度電気探査、電磁探査、EC、水温	
⑥七尾湾西湾二宮川河口	Ca^{2+}、Mg^{2} 、Na 、K 、HCO_3^-、SO_4^{2-}、Cl^-、NO_3^-、主成分分析、栄養塩、DOC、3 次元励起蛍光スペクトル、温度・塩分・希土類分析、溶存メタン、溶存酸素	酸素・水素安定同位体比、トリチウム、炭素窒素安定同位体比
⑦千葉県蓮沼(九十九里浜沖合)	塩分、DO、クロロフィル蛍光、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、リン酸態リン、アンモニア態窒素	ラドン濃度
⑧駿河湾	pH、ORP、DO、主要溶存イオン	酸素・水素安定同位体比、ラドン、トリチウム、δ^{13}C、^{14}C
⑨三重県津市白塚地区	水温、水位、EC、溶存イオン	酸素・水素安定同位体比
⑩兵庫県西宮市(夙川河口御前浜沖)	窒素、リン、ケイ素、塩分、水温、溶存酸素、濁度、蛍光強度	ラドン濃度
⑪大阪湾淡輪地域	栄養塩濃度、植物プランクトン濃度	
⑫愛媛県西条市(大型河川の河口干潟)	塩分、栄養塩濃度（N、P、Si）、Fe、Mn、Zn	
⑬広島県大黒黒神島沿岸	塩分、栄養塩濃度（N、P、Si）、Fe、Mn、Zn	
⑭山口県周防大島沿岸	EC、栄養塩類、塩分	ラドン濃度
⑮大分県日出町沿岸	DOC、TOC、主要陽イオン、主要陰イオン、栄養塩、pH、EC、DO、ORP、硝酸性窒素、亜硝酸性窒素、全窒素、リン酸態リン、全リン、珪酸、臭化物イオン	酸素・水素安定同位体比、ラドン、トリチウム、CFCs、He、^{36}Cl/Cl分析
⑯有明海沿岸域(佐賀県太良町大浦沖、熊本県熊本市河内沖、長崎県島原市深江沖)	無機溶存成分、EC	酸素・水素安定同位体比、トリチウム、^{14}C
⑰熊本県不知火町水尾海岸	EC、温度	酸素・水素安定同位体比、^{14}C
⑱与論島	陽イオン、陰イオン、ATP 測定	SF_6、酸素・水素安定同位体比
⑲沖縄県糸満市名城ビーチ	EC、pH、主要溶存イオン、アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素	
⑳沖縄県多良間島	主要イオン、溶存有機炭素、EC	CFCs、SF_6、窒素酸素安定同位体比

（4）まとめと今後の課題

ROV と音響画像解析を組み合わせた探査を用いて、実際の海域における湧出水の検出と湧出量の推定手法について検討した。これまでの検討結果から、潮流が変化する実際の海域条件下においても高精度に湧出水の位置を検出できることが分かり、面的なデータ収集も可能である。そのため、広域の探査（サイドスキャンソナー等の探査）と狭域の探査（原位置測定や採水）の間を補完できる探査手法として適用が期待できる。また、連続的に取得された音響画像に基づいて暫定的な湧出量を推定した。湧出量の推定については、探査測線の密度が低い領域での補足探査や、シーページメータなどの他の手法による湧出量の検証も必要と考えられる。さらに、検出した湧出水や陸域地下水の化学分析結果に基づいて、陸ー海の地下水の連続性について検討した。その結果、湧出水は富士山周辺の地下水を起源としており、掘削孔周辺の地下水とは異なると判断された。そのため、地質環境モデルの構築においては、掘削孔周辺の地下水、富士山系地下水及び湧出水の起源や分布を踏まえて地下水流動を検討していく必要がある。

過年度に収集した文献に基づいて、34 地域の沿岸部地下水や海底湧出地下水に関わる地形や地質等の情報を GIS で解析し、整理した。また、海底湧出地下水の探査に適用された手法についてとりまとめた。今後、地下水の湧出や沿岸部の地下水流動に関わる地形・地質の特徴の解析や、実際の海域で適用された有効な探査手法の整理という観点でとりまとめを行う必要がある。

参考文献

ESRI（2022）：Natural Neighbor 内挿法 https://desktop.arcgis.com/ja/arcmap/10.3/manage-data/terrains/hidden-natural-neighbor-interpolation.htm、2022 年 2 月 15 日閲覧

国土地理院（2022）：基盤地図情報数値標高モデル 10m メッシュデータおよび基本項目、国土交通省国土地理院基盤地図情報サイト　http://www.gsi.go.jp/kiban/、2022 年 11 月 21 日閲覧

国土交通省（2023）：水文水質データベース、富士川「松岡」水位流量データ http://www1.river.go.jp/、2023 年 1 月 18 日閲覧

日本海洋データセンター（2022）：500 m メッシュ水深、海上保安庁海洋情報部ホームページ　http://www.jodc.go.jp/jodcweb/index_j.html、2022 年 11 月 28 日閲覧

産業技術総合研究所、原子力環境整備促進・資金管理センター、電力中央研究所（2020）：平成 31 年度　沿岸部処分システム確証技術開発成果報告書、297p、2020

産業技術総合研究所、原子力環境整備促進・資金管理センター、電力中央研究所（2021）：令和 2 年度　沿岸部処分システム確証技術開発成果報告書、297p、2021

産業技術総合研究所、原子力環境整備促進・資金管理センター、電力中央研究所（2022）： 令和 3 年度　沿岸部処分システム確証技術開発成果報告書、672p、2022

山﨑誠治・村下敏夫（1966）：静岡県岳南地区地下水利用適正化調査成果、工業用水、96、60-70.

Yasue, K., Ishimaru, T., Kobori, K., Umeda., K, and Nakatsuka, N. (2014) Subsurface geological mapping of the Japanese Islands. Journal of the Geological Society of Japan, 120, 12, ⅩⅢ-ⅩⅣ.

３－３　物理探査の高度化

（１）はじめに

本事業における本課題に実施に対する背景、ならびに技術的課題、目的については、産業技術総合研究所ほか（2021）に記載されているため、本稿では省略する。令和 4 年度に実施した本事業では昨年度に残された課題の克服と浅海域における 3 次元音波探査手法の適応を中心に技術の高度化を実施した。

①　昨年度の成果と課題

詳細については、産業技術総合研究所ほか（2021）に記載されているため、ここでは概要を記載する。令和 3 年度については、鶴ほか（2017）において報告されている複数の水中スピーカーによるマルチ振源と単一のストリーマーケーブルを用いたマルチ振源 3 次元探査手法の高度化を図るため、発振器である水中スピーカーの出力強化（大型化）と、速度分解能の向上に向けた受振器（ストリーマーケーブル）の強化（センサー数の増加）を実施し、それらの測定性能試験を大型水槽施設や実際の海域（神奈川県金田湾）で実施した。その結果、本手法は、既存のブーマーを使った測定手法の代替手法としての有効性が確認できたものの、高精度の測定結果を得るためには、受振機の浮力調整や発振器の出力機構の安定性の向上、具体的には、高波高時の出力低下の解消と、スピーカーの振動面における共振の影響の低減が必要であることがわかった。

②　今年度の取組み

上述した課題を考慮し、令和 4 年度では、発振器の改良を実施した後、その性能を評価するため､2 つの海域で現地調査を実施した｡1 つ目の海域である北海道幌延町沿岸海域では、2 次元と 3 次元の探査を実施し、本調査手法の適応性、ならびに既存の陸域における反射法データとの連続性の検証を行った。また 2 つ目の海域である神奈川県横須賀市沿岸海域（金田湾）では、昨年度と同じ測線上で 2 次元と疑似 3 次元の探査を実施することで、発振器の改良を含む、調査システムの向上性評価に関する検討を実施した。

（２）現地調査に向けた事前準備（発振システムの改良）

①　大型水槽を用いた問題点の確認

昨年度用いた水中スピーカーの出力が想定よりも小さい原因として、スピーカーの振動面の共振以外にスピーカー振動面にかかる水圧の変化の影響が考えられた。これを確認するために国立研究開発法人海洋研究開発機構が保有する大型水槽において揺動試験を行った。揺動試験の方法、試験仕様、ならびに試験に用いた大型水槽を図 3-3-1、表 3-3-1、ならびに図 3-3-2 にそれぞれ示す。本試験では、水中スピーカーをクレーンでつり下げて静止させた状態と、揺動することで振動面に水圧の変動を付加した状態の 2 つについて試験を実施した。試験においては入力信号として疑似ランダム波を用いた。

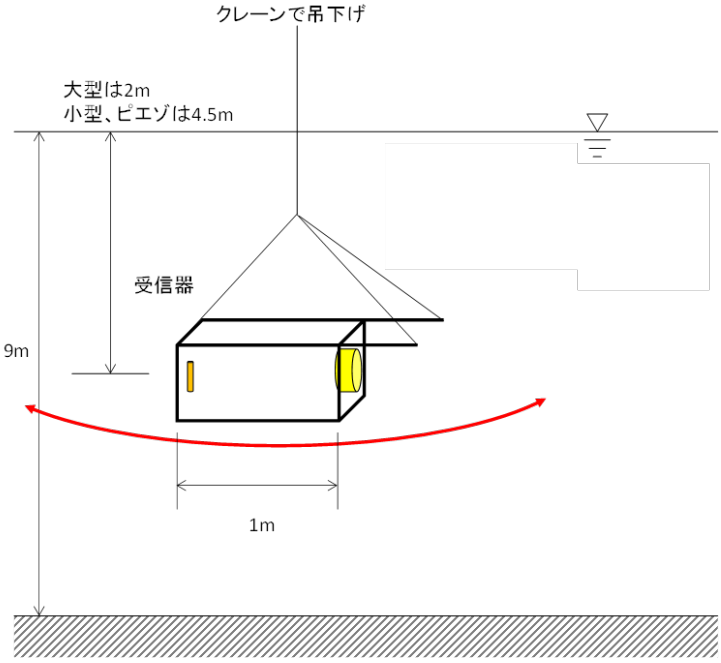


図 3-3- 1 振動試験の方法（イメージ図）

表 3-3- 1　振動試験の仕様

項目	仕様	備考
試験機器	小型スピーカー(UA-50) 大型スピーカー(昨年度製作)	
受振機器	Bentho 社製 AQ-4(プリアンプ増幅率 100 倍)	校正済の Tokin 社製ピエゾ発振器を用いて現場で校正を実施
計測機器	JFE シビル製データロガー 音響アンプ(CP-400)	
試験方法	最大深度 1.0m になるようにして水平方向に 10m 程度揺動させ測定を実施	
発振周波数	200Hz～1000Hz	
発振信号	バーストサイン波(正弦波数 20 波)	

横須賀本部　施設・設備

超音波水槽装置

概要

1. 水槽本体および無響装置

水槽材質： 鉄筋コンクリート
水槽寸法： 長さ：約9m×幅：約9m×深さ：約9m
無響装置： 壁面（5面）全体に吸音材（マイヤーゴム）を装備（浅い部分は除く）

2. 計測機器位置検出制御装置

計測機器（供試体）の計測を行う際に、計測機器の位置の制御および検出を行うことができ、位置情報はデジタル表示されます。

項目	内容
走行ユニット	スパン　約13m　（深い部分：約4.5m）
	速度制御　0～10cm/s（可変速）
横行ユニット	横行距離　約6m　（深い部分：約4.5m）
	横行速度　約1cm/s
昇降ユニット	取付荷重　500Kg　（最大）
	昇降範囲　水面上約1.7m・最大潜降約4.5m
	昇降速度　約1cm/s
	位置精度　±3cm以内
旋回ユニット	旋回角度　時計方向370° 時計反方向370°
	旋回速度　0.5°/s～3°/s（可変速）
	角度精度　±0.5°以内

図 3-3- 2　試験に用いた大型水槽の概要

（国立研究開発法人海洋研究開発機構ホームページ抜粋）

小型スピーカーと大型スピーカーの両方の試験結果の比較を図 3-3-3 に示した。同図から古定時における大型スピーカーの音圧は小型スピーカーよりも大きいものの、揺動させることで、出力が大きく低下することがわかった。一方で、小型スピーカーでは揺動の影響大きくなかった。以上のことから、大型スピーカーの振動面にかかる水圧の影響を取除くことで出力を改善できる可能性があることがわかった。

② 発振器の設計見直し

大型スピーカーの振動面にかかる水圧を取除くため、まず、水中スピーカーの設計の見直しを行った。図 3-3-4 と表 3-3-2 に水中スピーカーの構造とスピーカーの周波数特性に影響を与える項目をそれぞれ示す。スピーカーはボイスコイルに電気信号を印加してボイスコイルを振動させ、その振動を振動板に伝達して音波を発生させる。この時、振動板外径、振動板の材質、ボイスコイルのばねがスピーカーの周波数特性に影響を与えることがわかっている。昨年度に使用した水中スピーカーは、周波数特性を低くするために振動板外径を大きくし、振動板の硬さとボイスコイルのばねを軟らかいものを使用していたが、結果として、これにより外圧の影響が大きくなり、自由振動による共振の影響が大きくなったと考えられた。これらの問題を解決するために水中スピーカーの設計の見直しと改良を行った。

表 3-3-3 に水中スピーカーの設計の見直しについてまとめた。振動板の外径を小さくすることで外圧を低減し、材質、ボイスコイルのばねの固さを変えることで外圧の影響を低減し共振し難くなることが期待された。写真 3-3-1 に昨年度と今年度に使用した大型スピーカーを比較して示す。令和 4 年度の作業はこの新しい大型スピーカーを用いて行った。

③ 発振器の性能評価確認

改良した水中スピーカーの性能を確認するために令和 4 年 7 月 7 日に先述した大型水槽を用いた性能確認試験を行った。試験レイアウト、試験仕様、試験状況を図 3-3-5、表 3-3-4、および写真 3-3-2～4 にそれぞれ示す。本試験では、水中スピーカーの設置方向、設置深度をパラメータとして 4 つのケースを検証した。試験に用いた発振信号は正弦波数 20 波のバーストサイン波であった。

検証結果を図 3-3-6 に示す。同図から以下のことがわかる。

今年度製作した大型スピーカー（青色）は周波数帯域 100Hz～300Hz で小型スピーカーより出力が 20dB 大きい。

スピーカーの設置方向や水深については明瞭な違いはない。

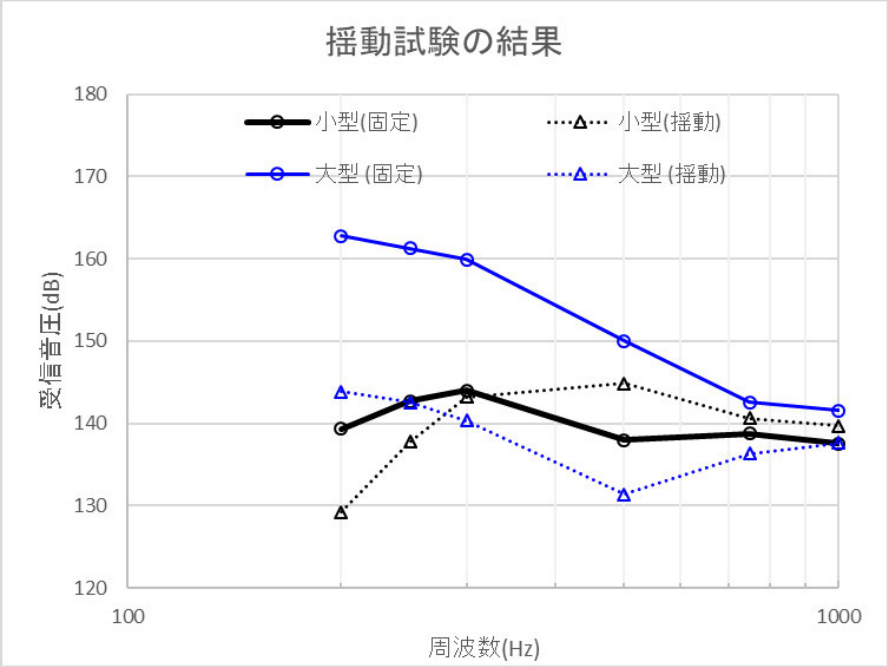


図 3-3- 3　振動試験結果の比較

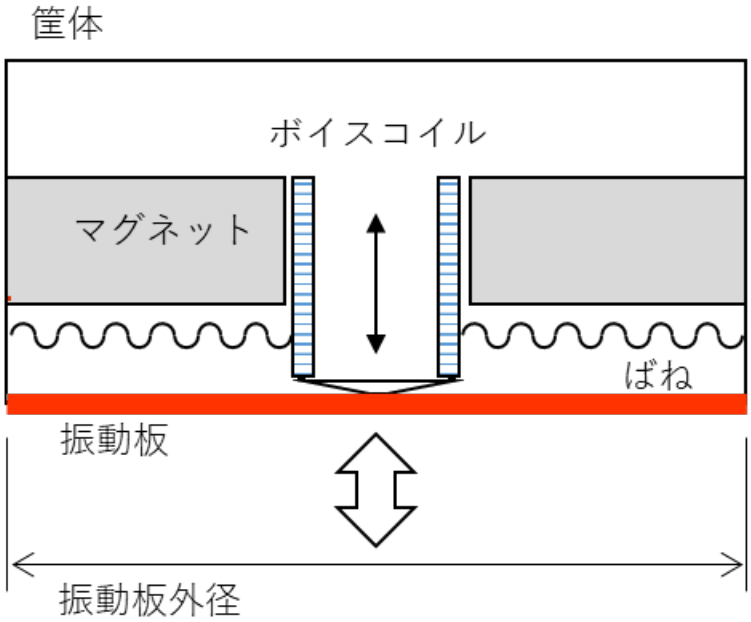


図 3-3- 4　水中スピーカーの構造

表 3-3- 2　水中スピーカーの周波数特性に影響を与える項目

項目	低周波数で出力増	高周波数で出力増	外圧や共振の影響
振動板外径	大	小	外径が大きいと外圧の影響は大きくなる。
振動板の質量、硬さ	大、軟	小、硬	振動板の材質が柔らかいと外圧の影響は大きくなり、共振の影響を受けやすくなる。
ボイスコイルのばね	軟	硬	ボイスコイルのばねが軟らかいと外圧の影響は大きく、共振の影響を受けやすくなる。

表 3-3- 3　水中スピーカーの改良点と期待される成果

項目	改良前	改良後	期待される効果
振動板外径	400mm	260mm	振動板の面積を小さくすることで外圧を低減する。
振動板の材質、厚み	薄いステンレス	厚い硬質プラスチック	外圧の影響が小さくなり、自由振動が抑えられて共振し難くなる。
ボイスコイルのばね	軟らかい	やや硬め	外圧の影響が小さくなり、自由振動が抑えられて共振し難くなる。

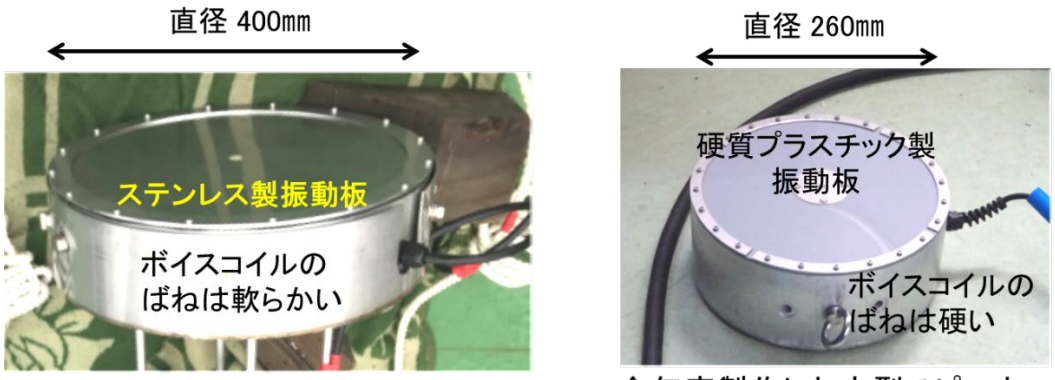


写真 3-3- 1　令和 3 年度と 4 年度の水中スピーカー（大型）の外観の比較

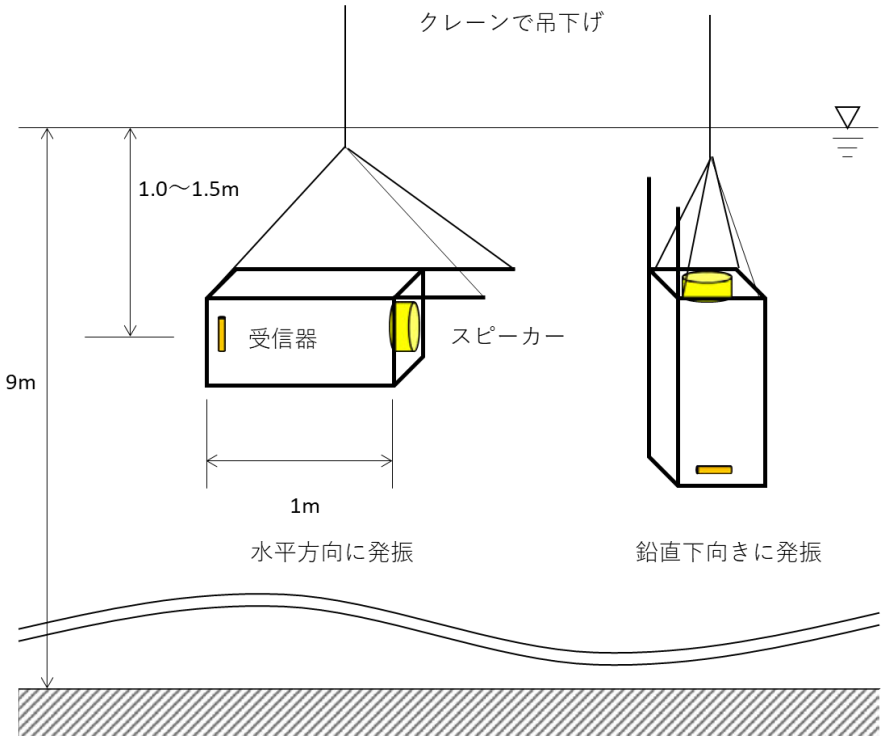


図 3-3- 5　試験レイアウト

表 3-3- 4　性能評価試験の仕様

項目	仕様	備考
試験機器	小型スピーカー(UA-50) 大型スピーカー(今年度製作) 大型スピーカー(昨年度製作)	 外径 260mm、振動板はプラスチック 外径 400mm、振動板はステンレス
受振機器	Bentho 社製 AQ-4(プリアンプ増幅率 100 倍)	校正済の Tokin 社製ピエゾ発振器を用いて現場で校正を実施
計測機器	JFE シビル製データロガー 音響アンプ(CP-400)	
試験方法	水平方向　深度　1.0m、1.5m 鉛直方向　深度　1.0m、1.5m	
発振周波数	100Hz～1000Hz	
発振信号	バーストサイン波(正弦波数 20 波)	

写真 3-3- 2　発振器固定フレーム

写真 3-3- 3　固定フレームに取り付けられた水中スピーカー

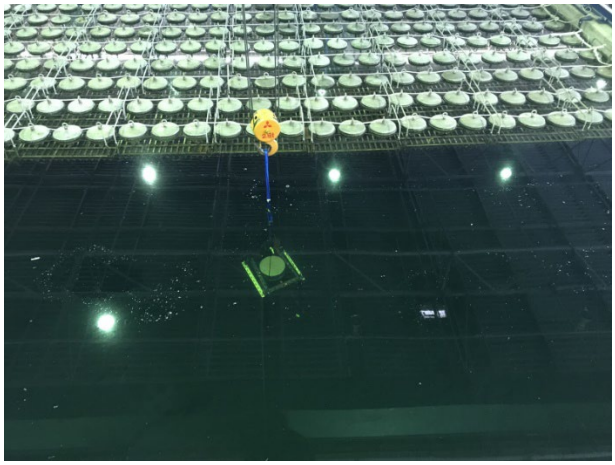


写真 3-3- 4　大型水槽に沈めた水中スピーカー（測定中）

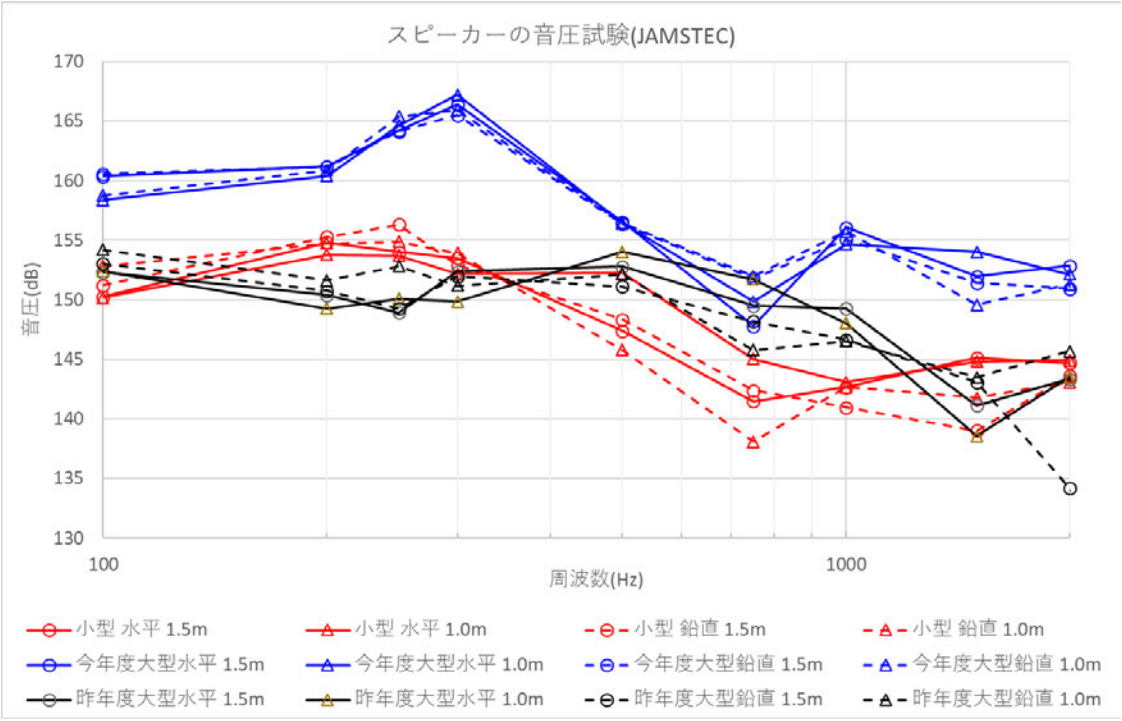


図 3-3- 6　性能評価試験の検証結果

④ 発振器の曳航手法の検討

令和 3 年度の調査結果から、波高により水中スピーカーの振動面に対する水圧の変化が測定結果の精度に大きな影響を与えることが明らかとなった。そのため、発振器の曳航法についても検討を実施した。振動面にかかる水圧を模式的に図 3-3-7 に示す。令和 3 年度はブイの内圧を大きくしてブイが水面上に浮上するようにしていた。結果として水面の上下動に伴ってブイとブイに接続されたスピーカーを上下させ、これに応じて振動面には正と負の圧力がかかる状態になっていた。これを改善するためにスピーカーが一定の水深を保つ曳航方法を検討した（図 3-3-8）。本手法ではブイは水面下に沈んでいるため水面の上下動を受けにくくなり、さらに水中翼に固定されたスピーカーは海水の動きと一緒に上下するため、スピーカーの振動面には水圧変化がかかりにくい構造となっている。制作した水中翼を写真 3-3-5 に示す。

⑤ 海上における曳航試験

制作した水中翼の性能を確認するために、2022 年 7 月 8 日に神奈川県横須賀市沿岸海域において海上試験を行った。

曳航試験のレイアウト、試験仕様および試験状況を図 3-3-9、表 3-3-5、および写真 3-3-6～8 にそれぞれ示す。試験のパラメータとして水中翼あり（小、中、大サイズ）となしの 4 ケースを実施した（写真 3-3-7）。曳航速度は約 3 ノットであった。写真 3-3-8 に曳航中のブイの状況を示す。右側の空気を抜いたブイは常に沈んだ状態であり波の影響をあまり受けず、左側の空気を入れた状態のブイは常に浮いた状態となり波の影響で上下していた。この状態で 1 ケースにつき 4 回の測定を実施し、直達波の波形を比較した。この例として大型スピーカー（水中翼は中サイズ）および小型スピーカー（水中翼は小サイズ）の結果を図 3-3-10 と 11 に示す。これらの図から以下のことがわかった。

大型スピーカー、小型スピーカーの何れも水中翼をつけている状態では入力信号とほぼ一致した波形が得られた。

水中翼なしの場合は位相がずれたり高周波数ノイズがのったり、入力信号とは異なる波形となった。

疑似ランダム波の波形は、今年度製作した大型スピーカーと小型スピーカーについては波が到達後は振動が収束している一方で、昨年度製作した大型スピーカーは到達後も振動が続いており、これは共振による影響を受けているものと考えられる。

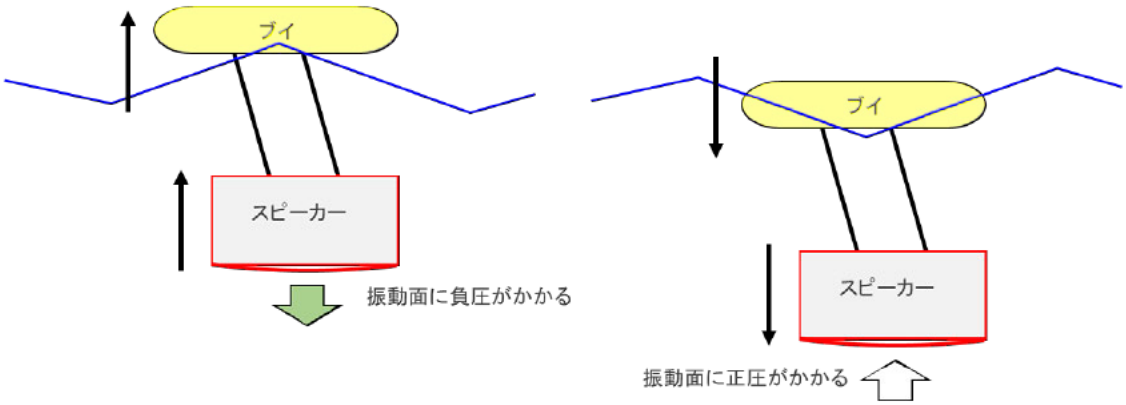


図 3-3- 7　水中スピーカーの振動面にかかる水圧の影響

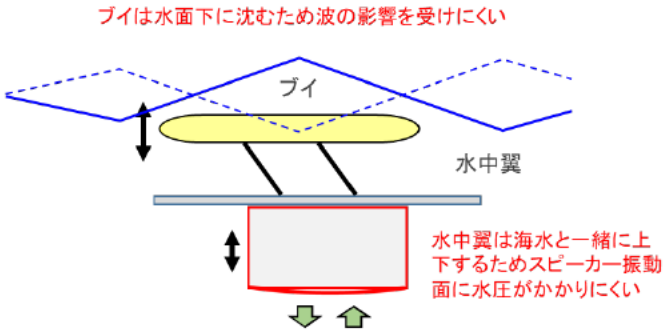


図 3-3- 8　振動面にかかる水圧低減の方法

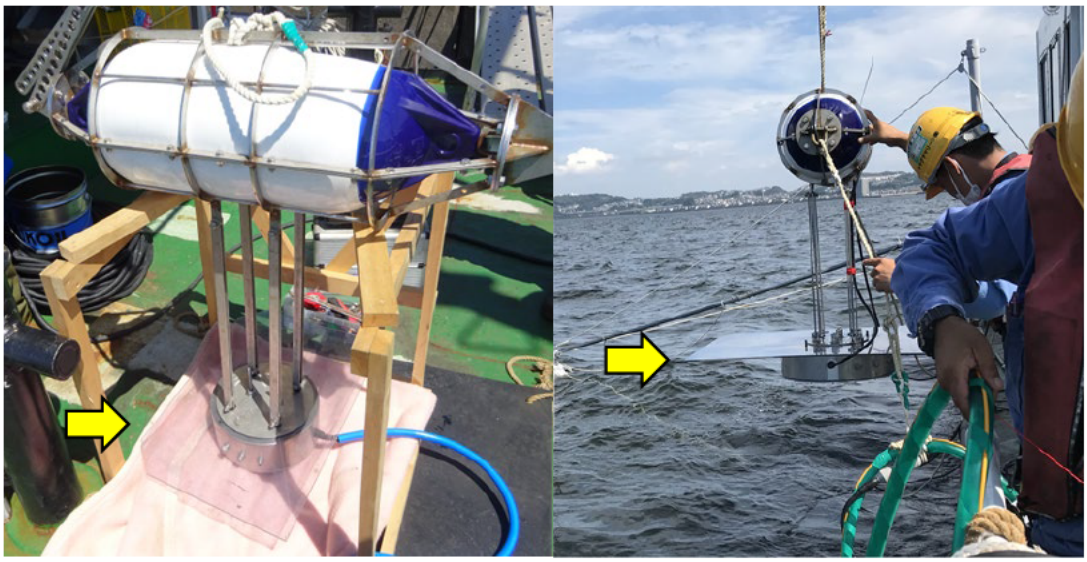


写真 3-3- 5　制作した水中翼

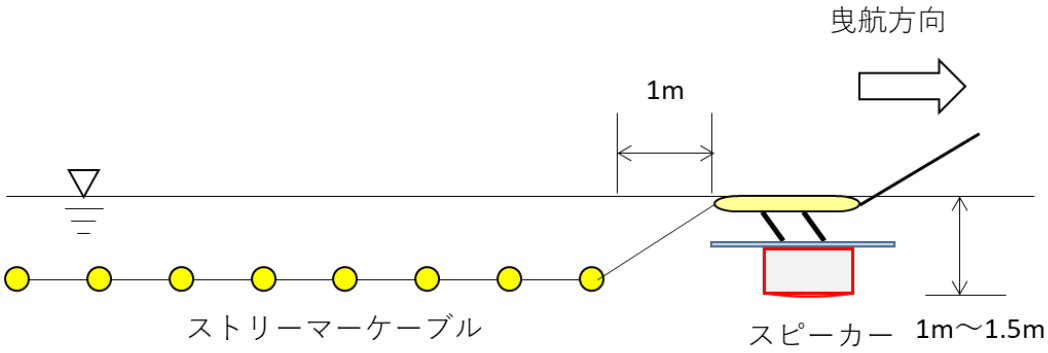


図 3-3- 9　曳航試験における発振器と受振器のレイアウト

表 3-3- 5　曳航試験の仕様

項目	仕様	備考
試験機器	小型スピーカー(UA-50) 大型スピーカー(今年度製作)	
受振機器	Bentho 社製 AQ-4(増幅率 100 倍のプリアンプ付き)、7ch	校正済の Tokin 社製ピエゾ発振器を用いて校正を実施
計測機器	JFE シビル製データロガー 音響アンプ(CP-400)	
水中翼サイズ	小　400mm×600mm　厚み 5mm 中　510mm×800mm　厚み 5mm 大　650mm×1000mm　厚み 5mm	材質は透明塩ビ
試験方法	オフセット距離 1m 設置深度　約 1m～1.5m 各ケースにつき各 4 回測定	曳航速度は約 3 ノット
発振周波数	200Hz～1000Hz	
発振信号	バーストサイン波(正弦波数 20 波)	

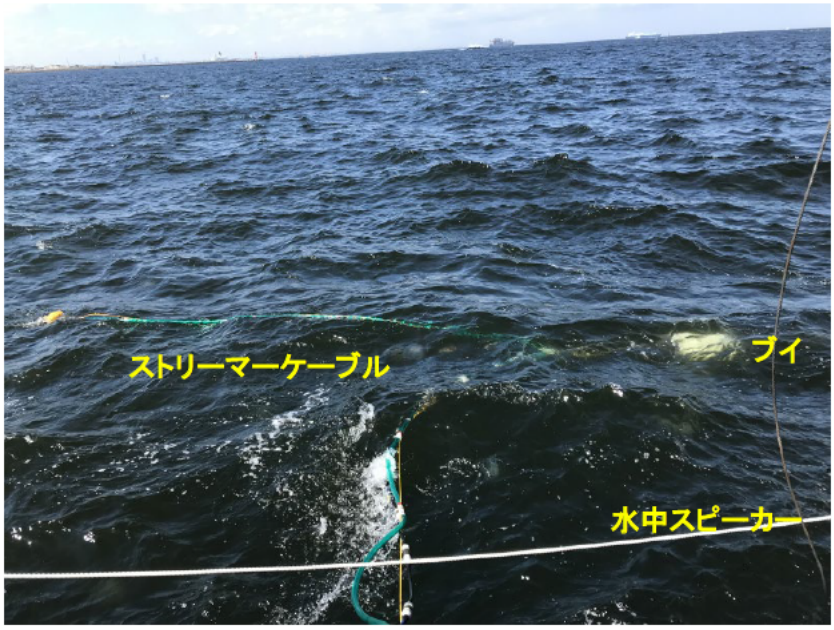


写真 3-3- 6　曳航試験の様子（曳航時）

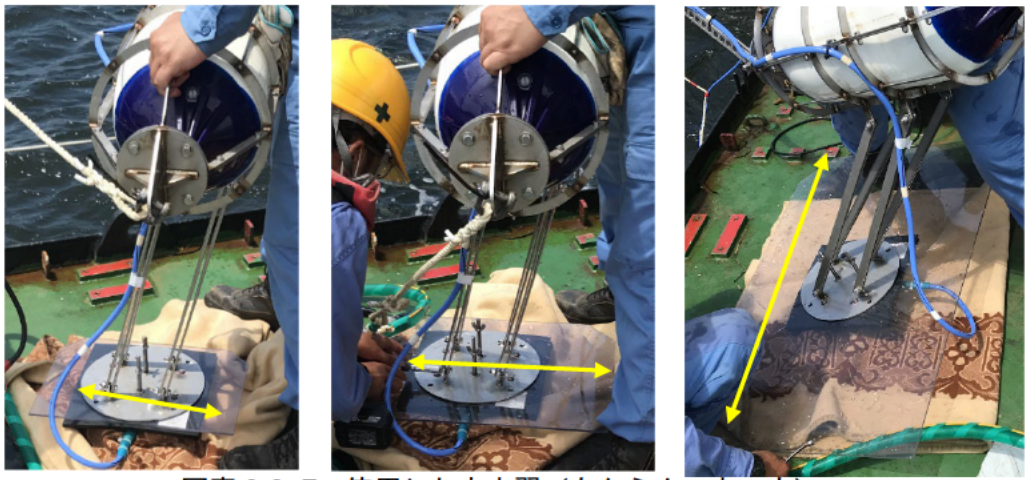


写真 3-3- 7　使用した水中翼（左から小、中、大）

写真 3-3- 8　ブイの状態（左　空気抜き前、右　空気抜き後）

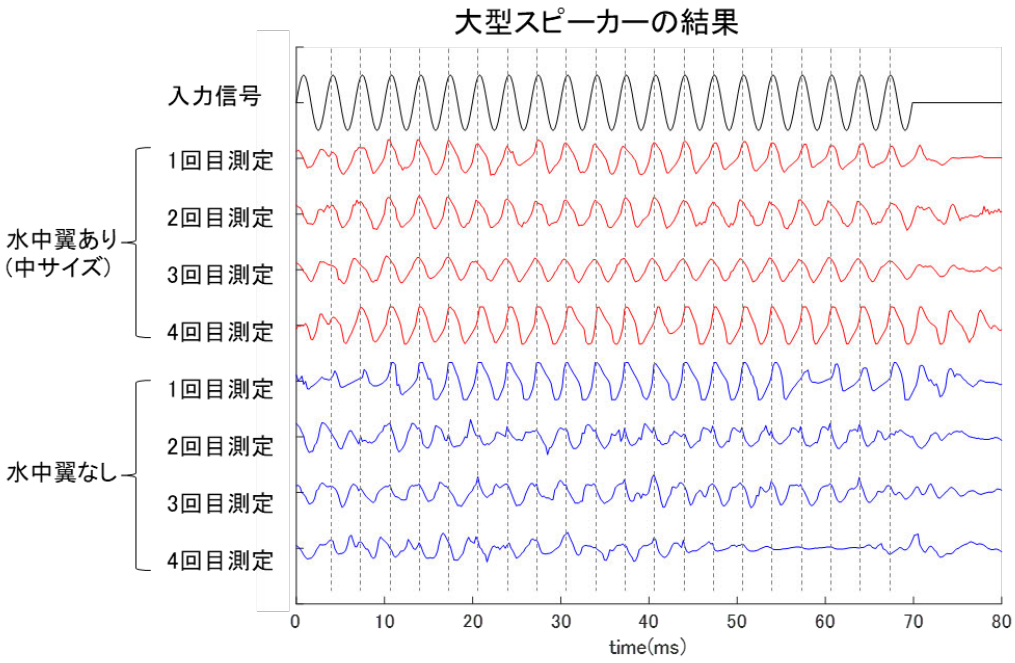


図 3-3- 10　大型スピーカーの性能評価試験結果

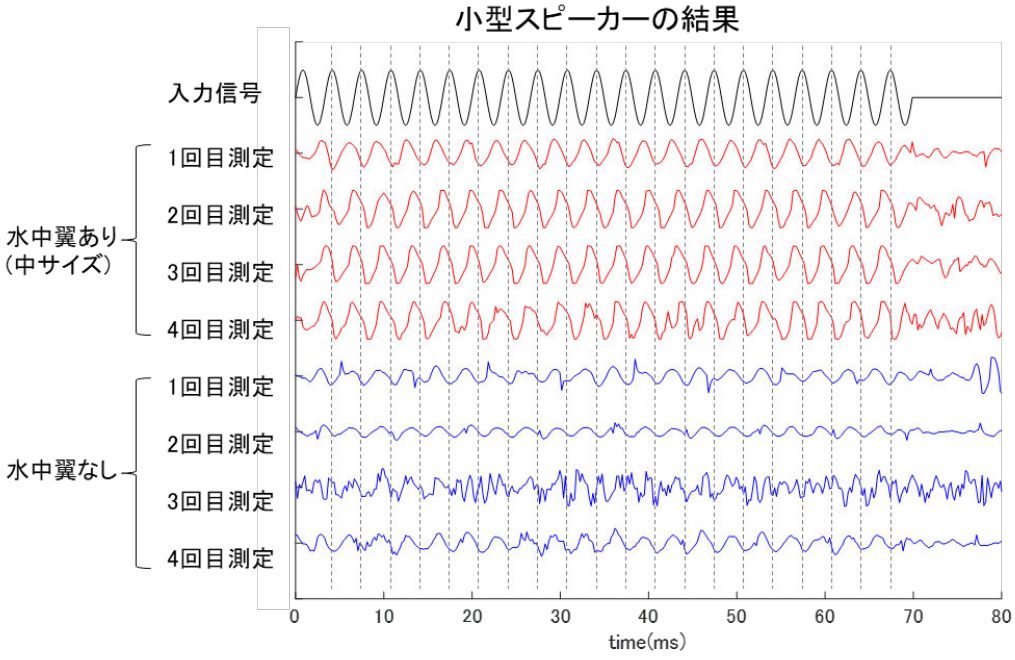


図 3-3- 11　小型スピーカーの性能評価試験結果

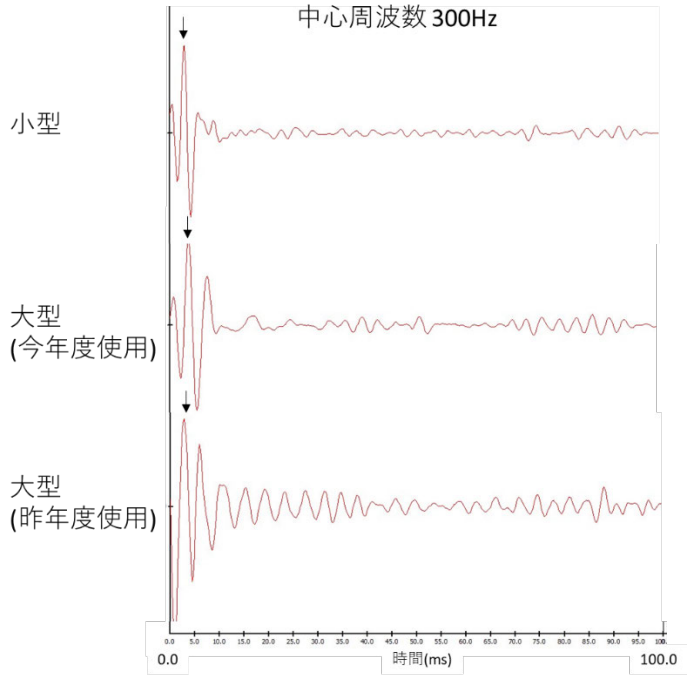


図 3-3- 12　疑似ランダム波の受振波形（相関計算後）

⑥ まとめ

本章では発振装置の改良について記した。スピーカーの出力低下の原因として共振とスピーカー振動板における水圧変化が考えられたため、スピーカーの構造の改良と水中翼の設置を検討した。

検討の結果、スピーカーについては、振動板の径を小さくし、材質をステンレスから硬質プラスチックに変更した、またボイスコイルのばねの固さを硬いものに変更した。さらに、水中翼を設置することで振動板にかかる水圧の低減を図った。大型水槽でのスピーカーの出力試験と海上での曳航試験の結果、スピーカーの構造の改良と水中翼の効果が認められたため、次章以降で述べる北海道幌延町沿岸海域と神奈川県横須賀市沿岸海域における現地調査においては、改良した大型スピーカーおよび既存の小型スピーカーを用いた。またすべてのスピーカーには水中翼を設置し、ブイの空気を抜いてスピーカーを水没させた状態で測定を実施した。

（3）現地調査の実施

① 測定システム

現地調査で使用した主な使用機材とデータ取得の仕様、ならびに使用機材等の写真を表 3-3-6 と 7，ならびに写真 3-3-9～11 にそれぞれ示す。神奈川県横須賀市沿岸での調査の一部においては受振器の形状による曳航ノイズの影響を調べるため、国立研究開発法人産業技術総合研究所（以下、産総研）所有の凹凸のないストレートタイプのストリーマーケーブルと専用のデータロガーを使用した。また、調査船は令和 3 年度と同様に（株）ヤマグチマリーン保有の「うみかぜ」と横須賀での作業の一部に Minato 保有の「たかしょう」を使用した。

表 3-3- 6　使用機材一覧（*1 は産総研からの貸与）

名称	主な仕様	数量
小型水中スピーカー (送信)	出力 150dB(周波数 300Hz 時)、 周波数 200Hz～1000Hz、重量 5kg	4 セット
大型水中スピーカー (送信)	出力 165dB(周波数 300Hz 時)、周波数 100Hz～500Hz、重量 15 ㎏	1 セット
ストリーマーケーブル(受振、幌延で使用)	センサ数 48ch、センサ間隔 2m、オフセットケーブル長 150m、重量 50 ㎏	1 セット
ストリーマーケーブル(*1) (受振)	センサ数 24ch、センサ間隔 3.125m、オフセットケーブル長 30m、重量 150 ㎏	1 セット
信号発生器(送信)	出力 5ch、発震周波数 100Hz～2000Hz、無線同期機能	1 セット
データロガー(受振)	入力 48ch、分解能 16bit	1 セット
データロガー(*1)(受振)	入力 24ch(仕様上は ch 数の上限はない)、分解能 16bit	1 セット
パワーアンプ(送信)	出力 280W、2.8A	4 セット
大型音響アンプ(送信)	出力 900W、15A	1 セット
測位(DGPS)	船位測定用、データ更新レート 10Hz、水平精度 0.3m、ストリーマーケーブル端部測定用、データ更新レート 20Hz、水平精度 0.6m	各 1 セット
音響測深機	測定レンジ 2.5-2000m	1 セット
水中音速計	測定レンジ 1400-1550m/s、 分解能 0.015m/s	1 セット
調査船	うみかぜ、19 トン たかしょう、19 トン	各 1 隻

表 3-3- 7　データ取得の仕様

項目		仕様
送信部	音源	水中スピーカー（大型と小型）
	音源数	4 セット（小型）および 1 セット（大型）
	送信音圧	130dB～165dB の範囲で設定(*)
	送信周波数	100Hz～1000Hz の範囲で設定(*)
	音源の深度	1m
	音源の水平方向の間隔	4～5m(*)
	発震点間隔	6 m(*)
受振部	受振器	ストリーマーケーブル
	受振器数	1 セット
	センサ数	48ch(JFE)、24ch(産総研)
	センサ間隔	2m(JFE)、3.125m(産総研)
	受振器深度	1m
	オフセット距離	30～40m の範囲で設定(*)
収録部	データロガー	サンプリング精度 16bit
	記録方式	SEG-Y
	重合数	～16(*)
	サンプリング間隔	サンプリング間隔 0.2ms(送信周波数 300Hz の場合)
	記録長	記録長 3.05s(送信周波数 300Hz、リスニングタイム 1s の場合)
その他	CMP ビンサイズ	2.5m×2m(*)
	測位	DGPS(Differential GPS)
	船速	2～3 ノット(*)

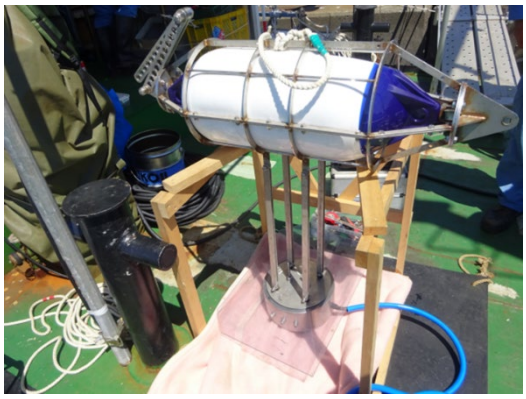
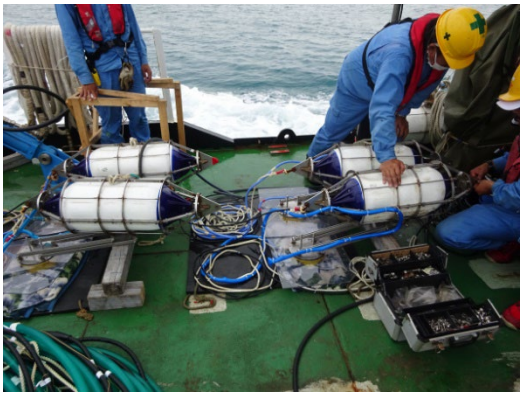



写真 3-3- 9　使用した水中スピーカー（左：大型、右：小型）

写真 3-3- 10　使用したストリーマーケーブル（左：48ch、右：24ch）

写真 3-3- 11　使用した GPS（左：船位測定用、右：受信器位置の測定用）

② 現地調査と結果

（a）北海道幌延町沿岸海域

令和 4 年度は、北海道幌延町沿岸海域にて、現地調査を実施した。北海道幌延町沿岸部では、海岸線から陸域に 300m に位置する旧浜里小学校の跡地において、産総研や幌延地圏環境研究所による複数の調査孔が掘削され、コア判読や各種検層、ならびに地下水試料の採水等による詳細な地質環境特性の把握が進められている。それらの詳細については、過年度事業である「沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発（平成 19～24 年度）の成果報告書（産業技術総合研究所, 2007 など）や幌延地圏環境研究所の年度成果報告書（幌延地圏環境研究所 2007，2008）に記載されている。また、これらの事業で得られた成果の一部は論文として公開されている（酒井ほか，2011；酒井ほか，2012；Ikawa et al., 2014；Ueda et al., 2014 など）。

また、過年度事業では、産総研が主体となり、平成 21 年度に陸域の深部と浅部の 2 次元反射法探査を実施している（産業技術総合研究所，2009）。本事業では、過年度事業で実施した 2 次元探査による既存の陸域データと新たに取得した海域データとの連続性の検証、ならびに 3 次元探査による海域の推定断層の検証を目的とした。

（i）調査概要と測定内容

当該海域における海上音波探査は令和 4 年 7 月 27 日から 8 月 3 日にかけて実施した。図 3-3-13 と表 3-3-8 に調査測線と詳細な作業工程を示す。また表 3-3-9 と 10 には測線名と測定目的、ならびに全測定内容を記す。表 3-3-8 に示したとおり、悪天候のため海況がおもわしくなかった 7 月 30 日と 31 日は作業中止と判断した。また当初予定していた。過去の MT 探査が実施された南側の測線については、側線用に蛸壺用のブイが点在したことから、南側の測線（2D-02）では、測線上を曳航することができなかったため、データ取得は限定的となった。

（ii）データ処理

2 次元および 3 次元測定のデータ処理フローを図 3-3-14 に示す。各フローにおける作業の詳細に関しては令和 3 年度における当該事業の成果報告書である産業技術総合研究所ほか（2021）に記載されていることから、そちらを参照いただきたい。

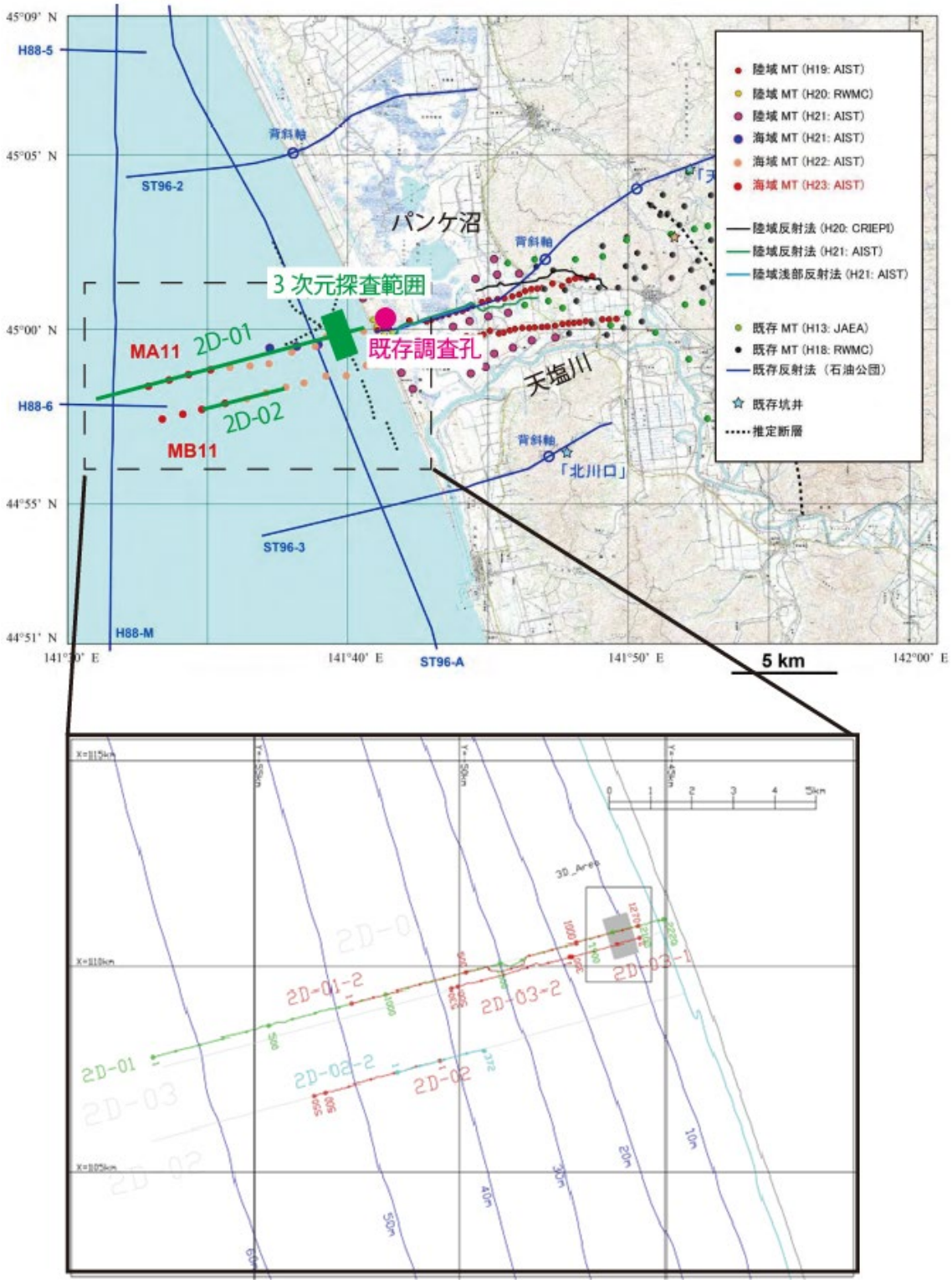


図 3-3- 13　幌延町沿岸海域における測線位置

表 3-3- 8　作業工程表

項目	7月27日 水	7月28日 木	7月29日 金	7月30日 土	7月31日 日	8月1日 月	8月2日 火	8月3日 水	8月4日 木
艤装	実績								
テストラン									
2D測定									
3D測定				強風により作業中止					
艤装解除									
予備日									
最大風速(最大瞬間風速)	4.7m(6.0m)	4.2m(6.5m)	5.7m(7.8m)	10.4m(15.4m)	11.6m(16.3m)	5.8m(9.0m)	5.0m(8.2m)	3.9m(6.2m)	4.6m(6.4m)
最大波高(6-15時)	0.5m	0.3m	0.3m	1.0m	2.5m	0.8m	2.6m	0.7m	0.9m
天気	曇のち晴	曇のち晴	曇	曇のち晴	曇	曇	雨	曇時々晴	曇時々晴

表 3-3- 9　測線名および測定目的

測線	測線名	測定方法	スピーカー	中心周波数	目的
2D-01	2D-01	2D	大型	300Hz	既存データとの比較
2D-02	2D-02	2D	大型	300Hz	既存データとの比較
2D-01	2D-01S	2D	小型	500Hz	発振器の比較
2D-03	2D-03S	2D	小型	500Hz	発振器の比較
3D	3D-000～040	3D	小型	500Hz	3D データ取得
3D	3DF004～041	3D	小型	500Hz	3D データ取得 （隙間補完）

表 3-3- 10　全測定内容

日付	開始時刻	測線名	測線長	ショット数	測定方法	スピーカー	オフセット	中心周波数	コード長	コード名
7月27日	10:15	2D-01-01	9.0	1493	2D	大型	10m	300	1023	PRBS
7月27日	12:49	2D-01-02	4.4	726	2D	大型	10m	300	1023	PRBS
7月28日	10:52	3D-000	1.2	205	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
7月28日	11:35	3D-001	1.2	202	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
7月28日	12:20	3D-002	1.2	205	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
7月28日	13:11	3D-003	1.2	197	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
7月28日	13:59	3D-004	1.2	197	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
7月28日	14:49	3D-005	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
7月28日	11:14	3D-020	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
7月28日	11:56	3D-021	1.2	203	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
7月28日	12:44	3D-022	1.3	210	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
7月28日	13:34	3D-023	1.2	201	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
7月28日	14:25	3D-024	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
7月29日	8:18	3D-006	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
7月29日	9:41	3D-007	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
7月29日	10:41	3D-008	1.2	203	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
7月29日	11:41	3D-009	1.2	203	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
7月29日	7:49	3D-025	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
7月29日	9:09	3D-026	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
7月29日	10:10	3D-027	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
7月29日	11:11	3D-028	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
7月29日	12:10	3D-029	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月1日	8:01	3D-010	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月1日	8:56	3D-011	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月1日	9:51	3D-012	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月1日	10:48	3D-013	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月1日	11:45	3D-014	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月1日	12:36	3D-015	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月1日	13:27	3D-016	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月1日	14:17	3D-017	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月1日	7:36	3D-030	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月1日	8:30	3D-031	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月1日	9:26	3D-032	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月1日	10:20	3D-033	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月1日	11:17	3D-034	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月1日	12:10	3D-035	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月1日	13:02	3D-036	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月1日	13:47	3D-037	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月1日	14:40	3D-038	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月2日	7:45	3D-018	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月2日	8:34	3D-019	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月2日	7:16	3D-039	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月2日	8:10	3D-040	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月2日	9:28	3D-F004	1.2	202	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月2日	10:20	3D-F007	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月2日	13:07	3D-F010	1.2	202	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月2日	11:11	3D-F013	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月2日	13:56	3D-F017	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月2日	11:37	3D-F020	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月2日	9:53	3D-F022	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月2日	10:45	3D-F025	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月2日	9:00	3D-F028	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月2日	12:43	3D-F031	0.8	137	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月2日	13:31	3D-F034	1.2	205	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月2日	14:20	3D-F037	1.2	200	3D	小型	38m	500	1023	PRBS
8月3日	11:36	2D-02-01	3.3	550	2D	大型	10m	300	1023	PRBS
8月3日	7:21	2D-03-00	7.6	1270	2D	小型	10m	500	2047	PRBS
8月3日	9:44	2D-03-01	1.8	300	2D	小型	10m	500	1023	PRBS
8月3日	10:13	2D-03-02	3.2	530	2D	小型	10m	300	1023	PRBS
8月4日	7:02	2D-02-02	2.2	372	2D	大型	10m	300	1023	PRBS
8月4日	8:11	2D-02-03	4.1	685	2D	大型	10m	300	1023	PRBS

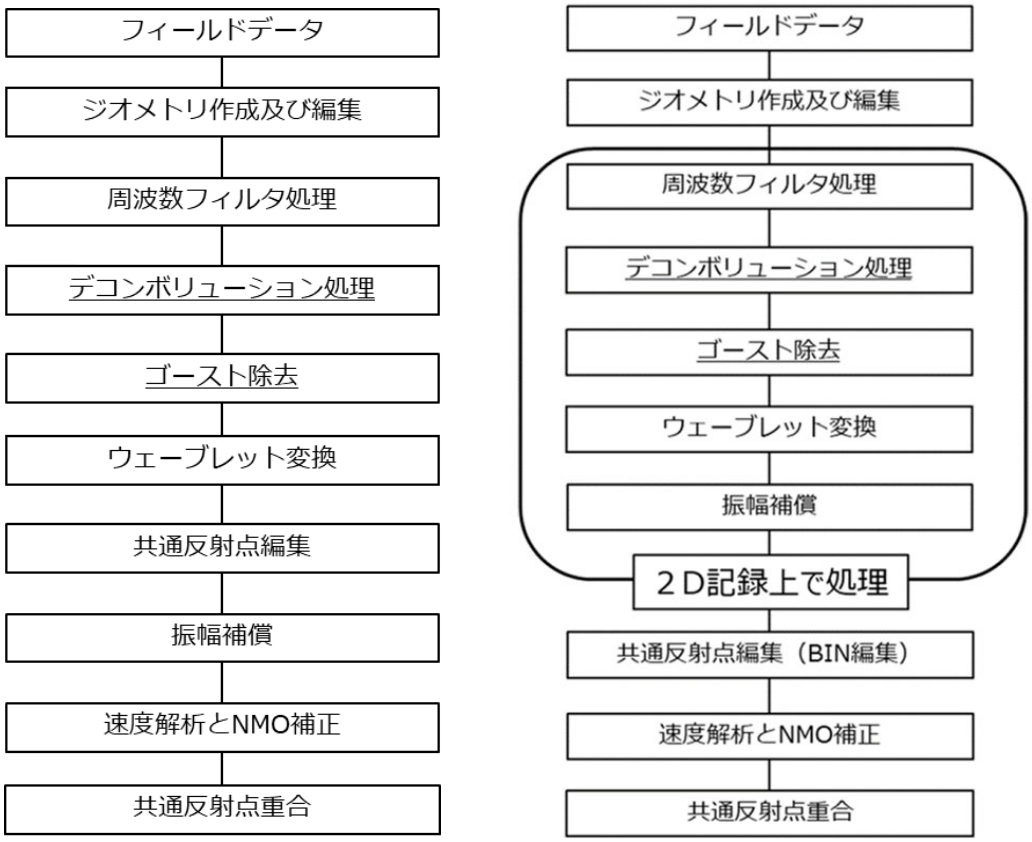


図 3-3- 14　データフロー処理図（左：2 次元記録、右：3 次元記録）

（iii）取得データの解釈

・陸域データとの連続性の検証

本調査で取得した記録で反射面を確認できるのは、調査海域の沖合部で海底から往復走時で 0.1s 程度、水深の浅い海岸部では 0.07s 程度である。P 波速度を 1600m/s とするとそれぞれ、海底下 80m、60m の範囲となる。

2 次元測線の 2D-01 測線の時間断面記録から 3 つの境界面を認定した（図 3-3-15）。最上位の境界面）（H1）は沿岸部で下位層にダウンラップする構造が認められ、沖合では整合的な構造に漸移する面である。上位から 2 枚目の境界面（H2）は下位層を侵食し上位層がオンラップする構造を有する境界面として認識できる。最下層の境界面（H3）は下位層を削剥し、上位層がオンラップする構造を有する境界面である。

これらの確認された 3 つの境界面は、海岸部の測線の末端から 500～600m ほど離れた陸域の旧浜里小学校跡地に幌延地圏環境研究所によって掘削された調査孔におけるボーリング柱状図と比較すると、深度 30m 以浅の砂礫層をそれぞれ反映しているものと推察される（図 3-3-16）。

陸域では先述したように、産総研により海岸部から測線長 4km の S 波を用いた浅部反射法探査が実施されている。この探査では、深度 10～50m と深度 100～150m あたりの 2 枚の明瞭な反射面が認められた（図 3-3-17）。深度 100m以深で見られる反射面については、残念ながら本調査では海域において、その存在を確認することはできなかったため、深部 10～50m 付近の反射面に関して取得データとの連続性を検証した。図 3-3-17 における陸域反射法結果とボーリング柱状図を見る限り、陸域における青線で描かれた反射面は、深度 30m 以浅では砂層中の砂礫層を表しており、30m以深ではシルトや泥層中の砂層を反映しているように見える。先述したように、30m以深の砂礫層に関しては、本調査において海域でも明瞭に確認されていることから、両者のデータには、連続性があると言える。深度 30m 以深の砂層については、沖合では多重反射の影響による多重反射面により、存在が確認できないものの、海岸部から 2 ～ 3 km 程度に渡っては明瞭に存在が確認できることから、こちらについても陸域データとの連続性があると判断できる。

さらに電磁探査結果（MT 探査）との比較についても検証した。当該地域では過年度事業によりすでに海陸連続の電磁探査が実施されており、沿岸海底下に陸域から張り出した淡水が存在する可能性が示唆されている（Ueda *et al.*, 2014）。陸域における詳細な地下水研究により、海底下に存在する淡水は、最終氷期に涵養されたものであることが明らかになっており（Ikawa *et al.*, 2014）、また、酒井ほか（2012）などにより沿岸陸域では、深度 30m 以深にあるシルトや粘土は縄文海進最盛期のバリアーラグーン堆積物で堆積したものであり、これらが砂丘な湿原における表層水の浸透を防ぐ難透水層の役割を果たしているとされている。実際に、幌延地圏環境研究所によって抽出されたコア間隙水の水質分析結果から深度 30～40mのシルト層では高い Cl 濃度が観察されており、これは、この地層における塩水の洗い出しが進んでいない、言い換えれば高い難透水性を有していることを示している

（図 3-3-18）。この上位や下位の地層に含まれる間隙水あるいは地下水との Cl 濃度の違いは、電磁探査によって得られた比抵抗結果にもあらわれており、陸域における深度 30～40 mの比抵抗値は上下の地層よりも低い値となっている。これは、そのまま海域にも連続しており、反射法探査によって得られた深度 30～50m程度の陸域から海域に連続した砂礫層や砂層の分布とも一致している。このことから、この連続したシルトあるいは泥層が海域では、海底面からの海水の浸透を阻害している結果、海底下において淡水が残留している可能性を示唆している。

最後になるが、幌延町沿岸の調査結果は後述する横須賀市沿岸の結果と様相が異なり、下から上に伸びる白い筋のようなものが複数認められる。これは過年度事業で取得した陸域データも同様である（図 3-3-18）。このような現象は一般的に地中に天然ガスが賦存する地域においてみられる。本地域では、産総研が掘削した 100m 調査孔（DD-2 孔）において深度 90.7～99.7m で採取した地下水にもメタンによる発泡が確認されていることから、陸域や海域で見られたデータ欠損部（白く抜けている部分）についてはガスの影響である可能性が強く示唆される。

・推定断層の評価

先述したように、今回の現場調査では過年度事業において描かれている沿岸海域の推定断層の存在を検証するために 3 次元の音波探査を実施した。はじめに、断層の存在を確認するために推定断層を横切る測線である 2 次元探査の測線について精査した。その結果、2D-01 と 2D-03 において推定断層が描かれている地点において明瞭な反射面の不連続性が確認された（図 3-3-19）。2 本の測線は、300m 程度離れて並行に走っていることから、この構造は南北方向の走向を持っていると考えられる。同様の反射面の不連続構造は 2D-01 と 2D-02 の測線についても確認された（図 3-3-20）。両測線の距離はおよそ 2km であり、この結果から、当該地域の沿岸海域では数キロ程度にわたって南北方向の不連続面が存在していることが推察される。この不連続面が本地域の陸域や稚内付近の沿岸海域で確認されているサロベツ断層帯の一部であるかどうかについては、今後、慎重に判断していく必要がある。

図 3-3-21 と図 3-3-22 は、2D-01 測線と 2D-03 測線で認められた地層構造と 3D キューブの結果と照合したものである。黒矢印部が、不連続面が確認された位置に該当するが本図からは明瞭な地層構造の変化は認められない。これは、地層の走向とサロベツ断層帯の走向が一致しているためと推察され、このようなケースでは 3D キューブの比較だけでは断層か否かの判断は難しいと考えられる。

（iv）まとめ

当該海域における現地調査の結果から以下のことが明らかになった。

1）未固結堆積物を対象とした本調査システムであっても砂礫層が複数枚挟在するような地域では音の減衰が大きいため、深部まで音が貫通しなかった。当該地域では深度 60～80m

程度であった。

2) 陸域の柱状図と比較することで、陸域の沖積層中で確認されている複数の砂礫層を海域においても連続的に確認することができた。

3) 電磁探査による海底下の汽水の分布範囲と本調査で確認された海底下の地質構造の間には一定の整合性が確認された。

4) 海底下における複数の不連続面の存在が確認されたが、不連続面の方向が地層の走向と同じであったため、3 次元探査の結果からは、確認された不連続面が断層か否かは特定できなかった。

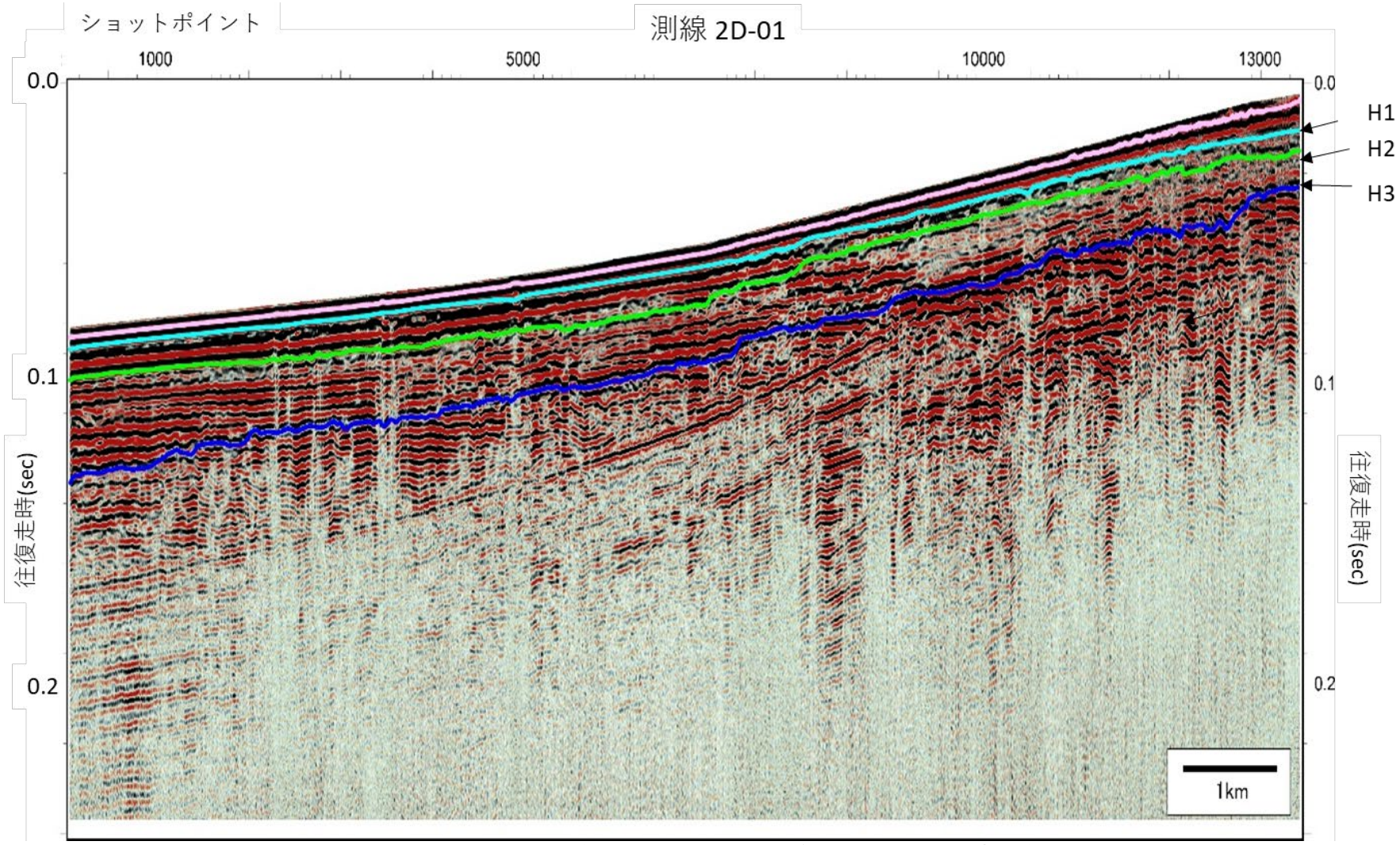


図 3-3- 15　2D-01 測線の時間断面記録から推定された 3 つの境界線

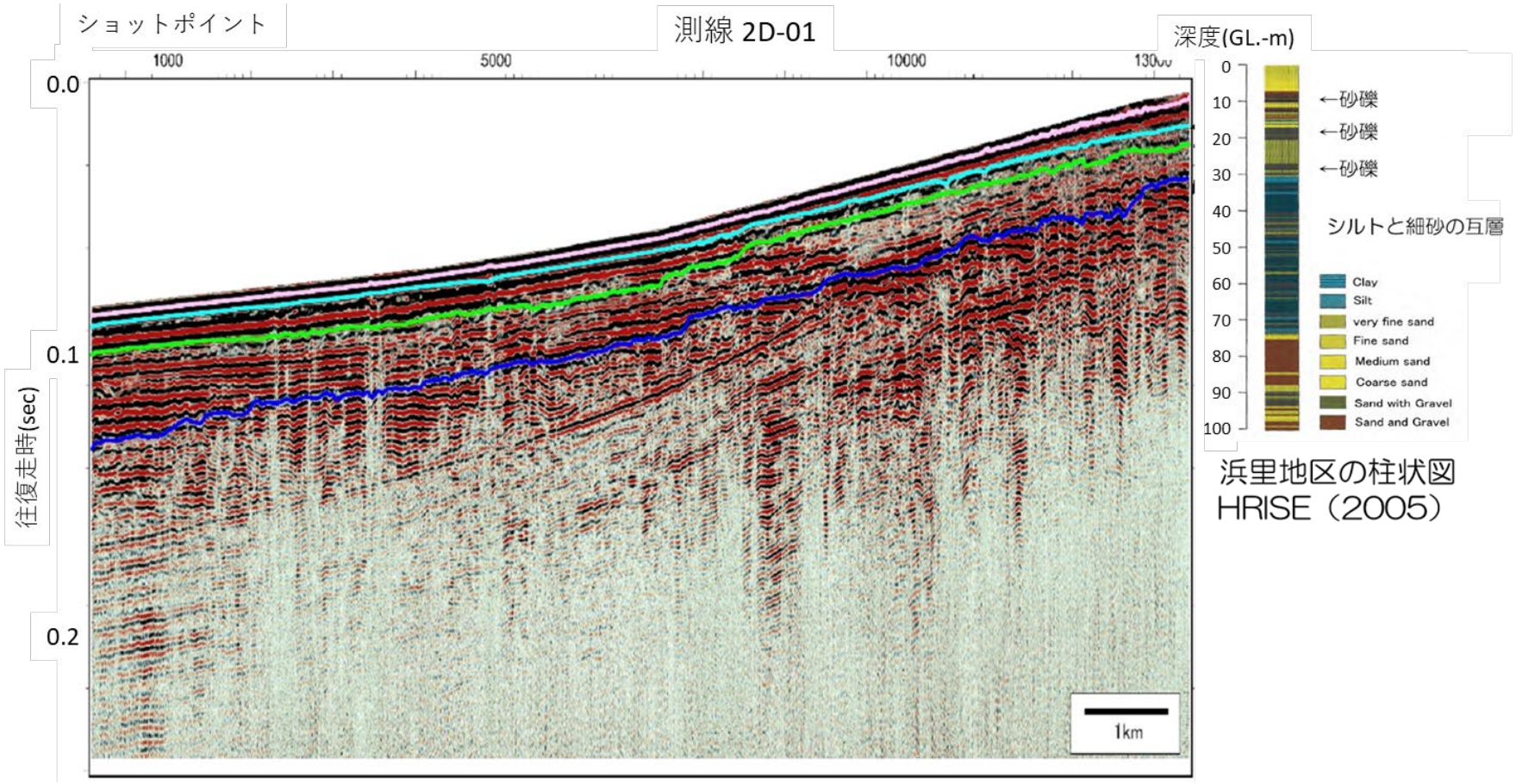


図 3-3- 16　2D-01 測線の時間断面図と陸域のボーリング柱状図との比較

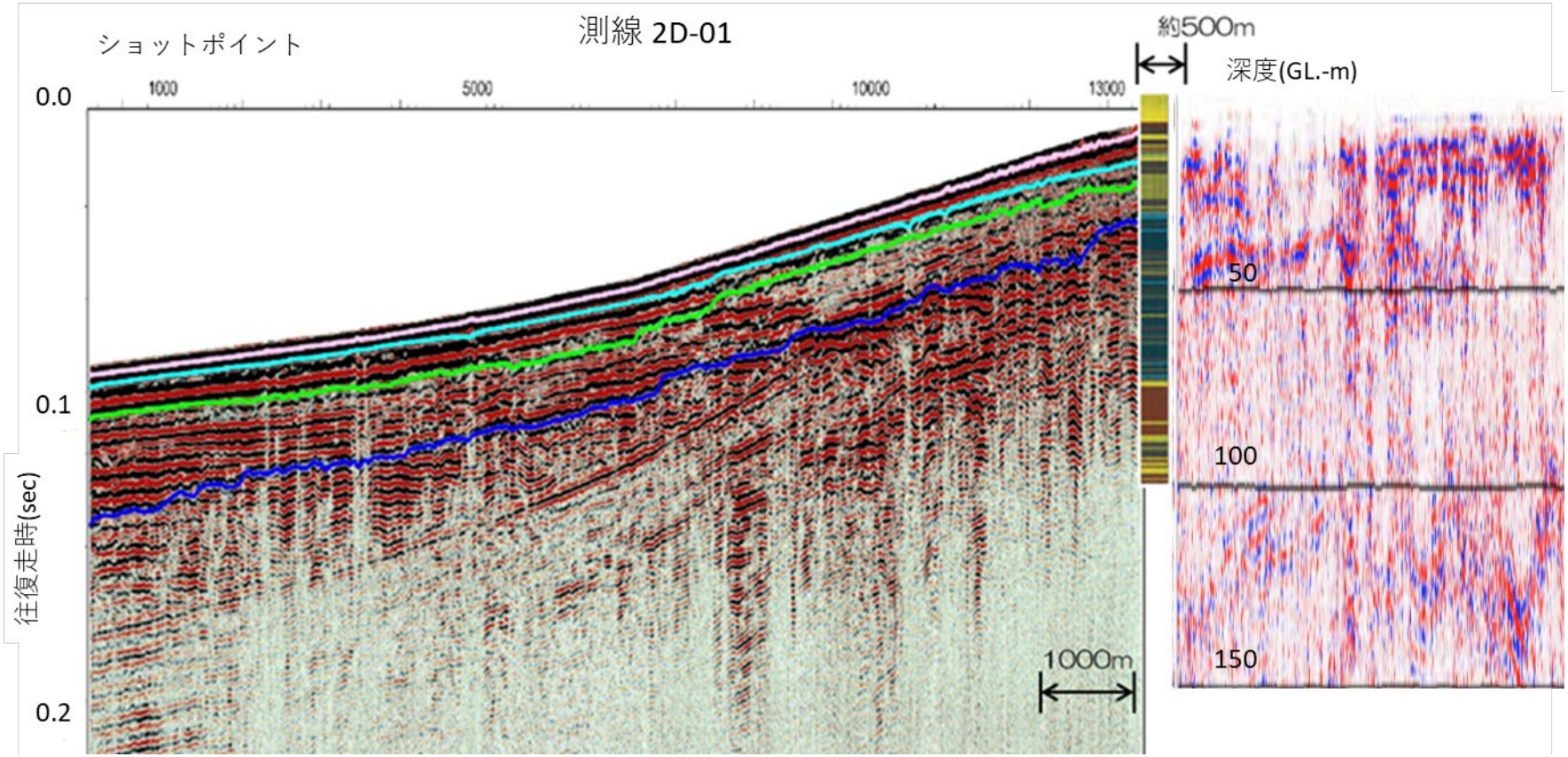


図 3-3- 17　陸域の浅部反射法データとの連続性の検討

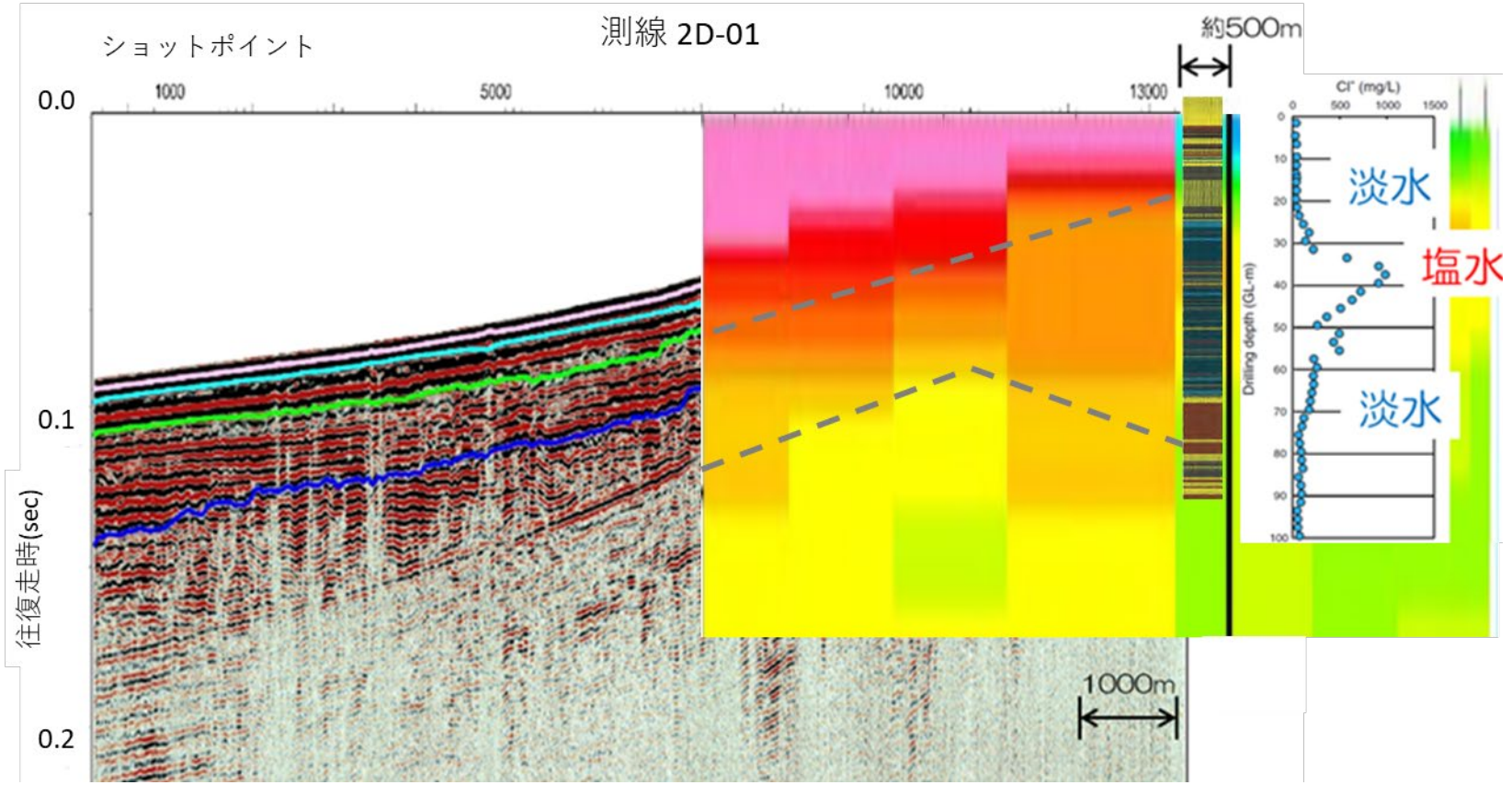


図 3-3- 18　海域における電磁淡データと陸域ボーリングにおける間隙水の Cl-濃度変化との比較

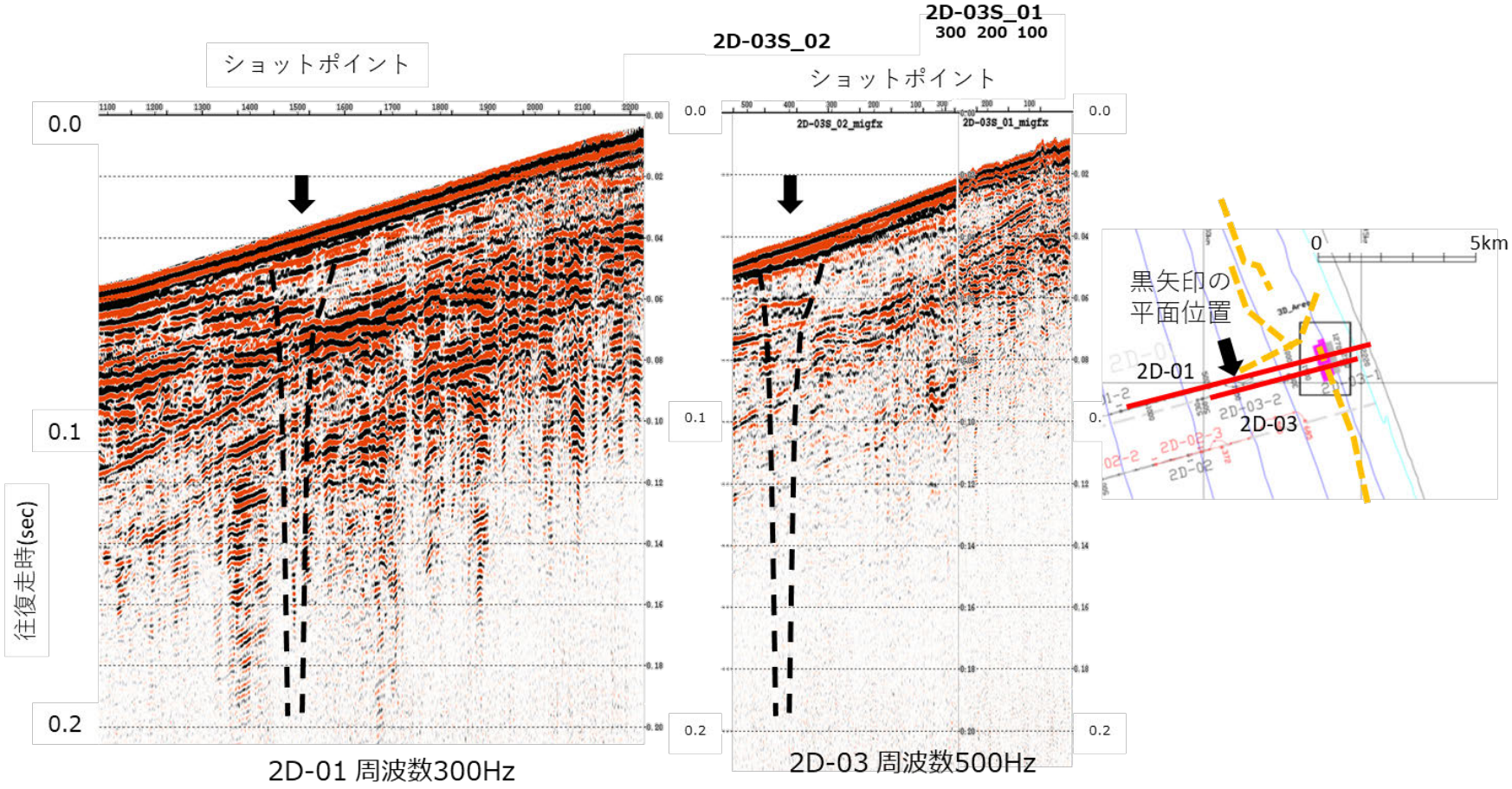


図 3-3- 19　2D-01 測線と 2D-03 測線の比較（黒の点線は不連続構造の位置を示す）

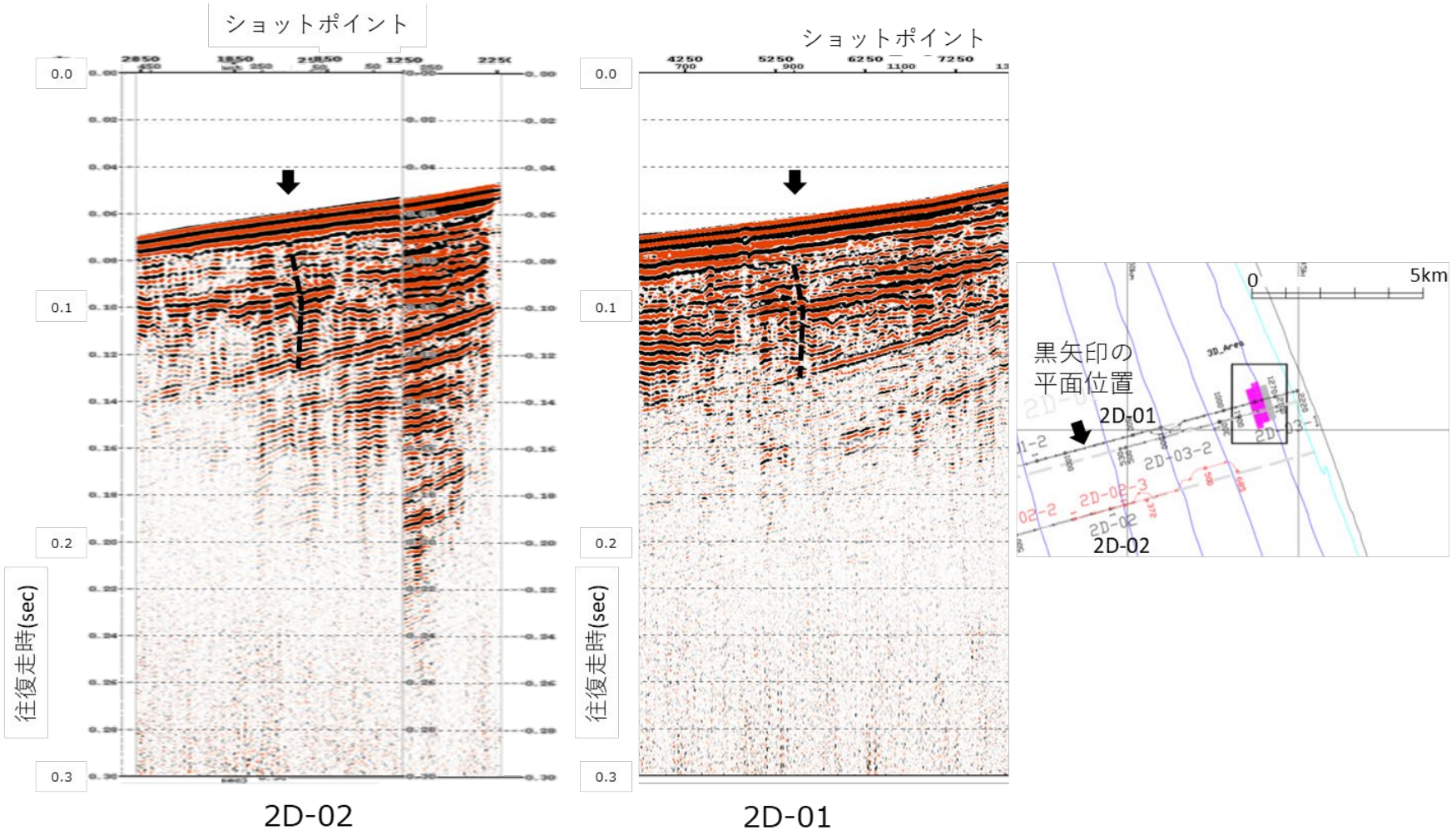


図 3-3- 20　2D-01 測線と 2D-02 測線の比較（黒の点線は不連続構造の位置を示す）

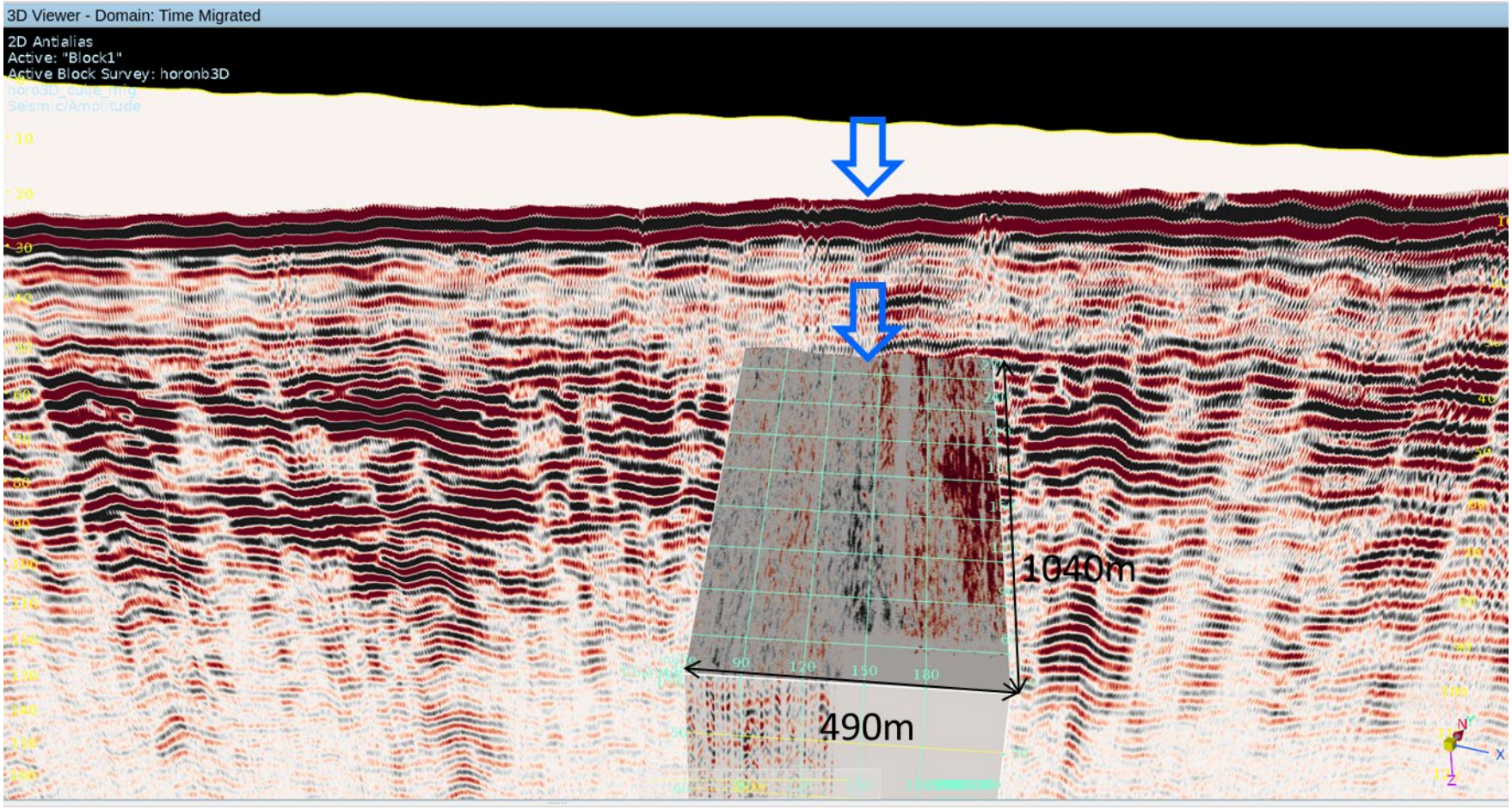


図 3-3- 21　2D-01 測線と 3D キューブの比較（青矢印は不整合の位置）

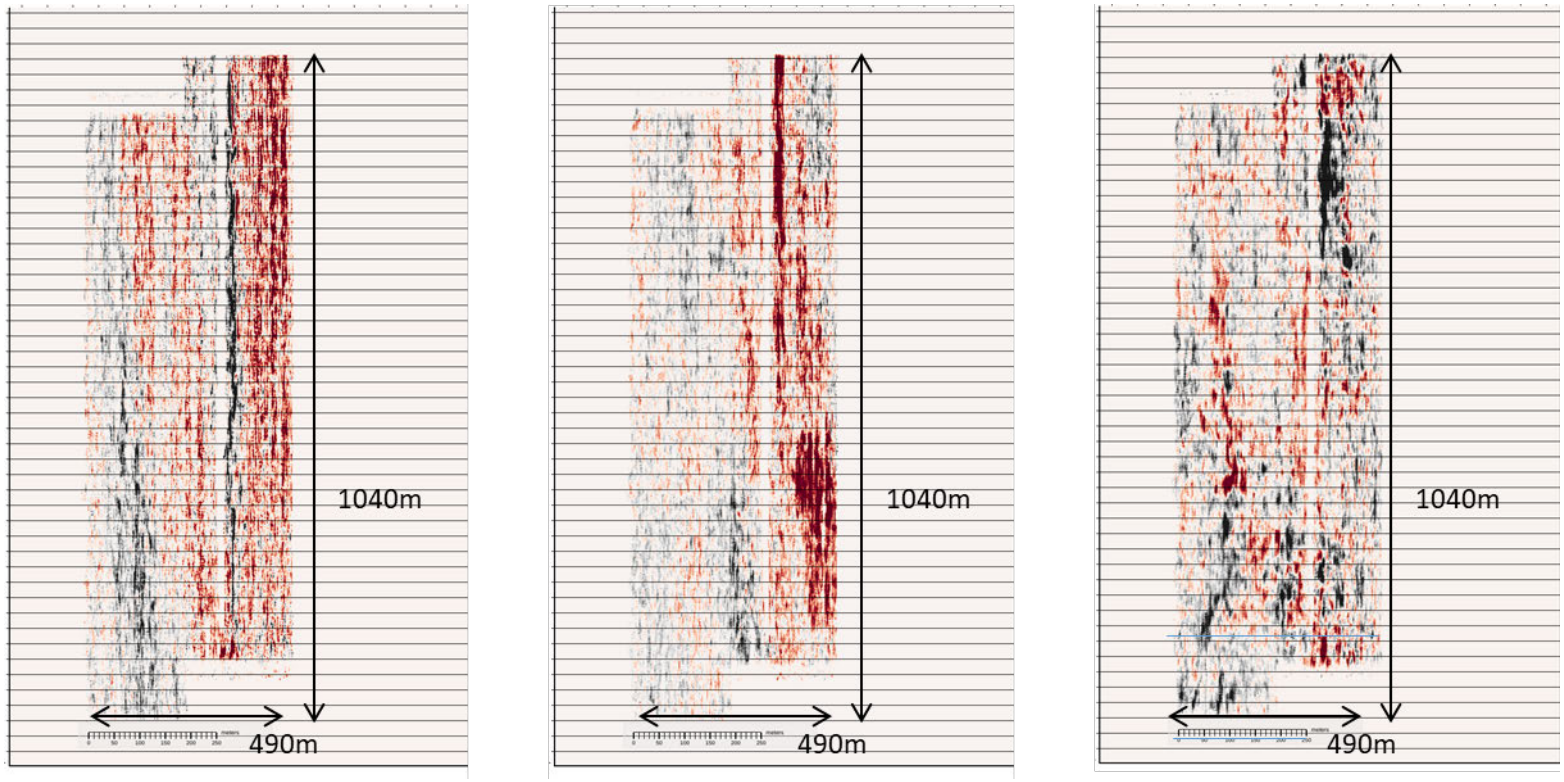


図 3-3- 22　3D キューブのタイムスライスの比較（左 30ms，中央 40ms、右 50ms）

（b）神奈川県横須賀市沿岸海域

令和 4 年度は、神奈川県横須賀市沿岸域（金田湾）においても、現地調査を実施した。本調査の目的は、先述したとおり、発振器の改造（出力向上）や受振器の形状変化によるデータ精度の検証と既存の手法をもちいた調査結果との比較である。なお、該海域では令和 3 年度も同様の調査を実施しているため、詳細については、産業技術総合研究所ほか（2021）を参照されたい。

（i）調査概要と測定内容

当該海域における海上音波探査は令和 4 年 9 月 7 日から 9 月 11 日（1 回目）と 11 月 30 日～12 月 3 日（2 回目）にかけて実施した。図 3-3-23 と表 3-3-11 に調査測線と詳細な作業工程を示す。また表 3-3-12 と 13 には測線名と測定目的、ならびに全測定内容を記す。表 3-3-11 に示したとおり、悪天候のため海況がおもわしくなかった 9 月 9 日は作業中止と判断した。

（ii）データ処理

幌延沿岸海域と同様に、データ処理フローを図 3-3-14 に示す。各フローにおける作業の詳細に関しては令和 3 年度における当該事業の成果報告書である産業技術総合研究所ほか（2021）に記載されていることから、そちらを参照いただきたい。なお、本地域では 3 次元探査は実施していないため、2 次探査におけるデータ処理のみ実施した。

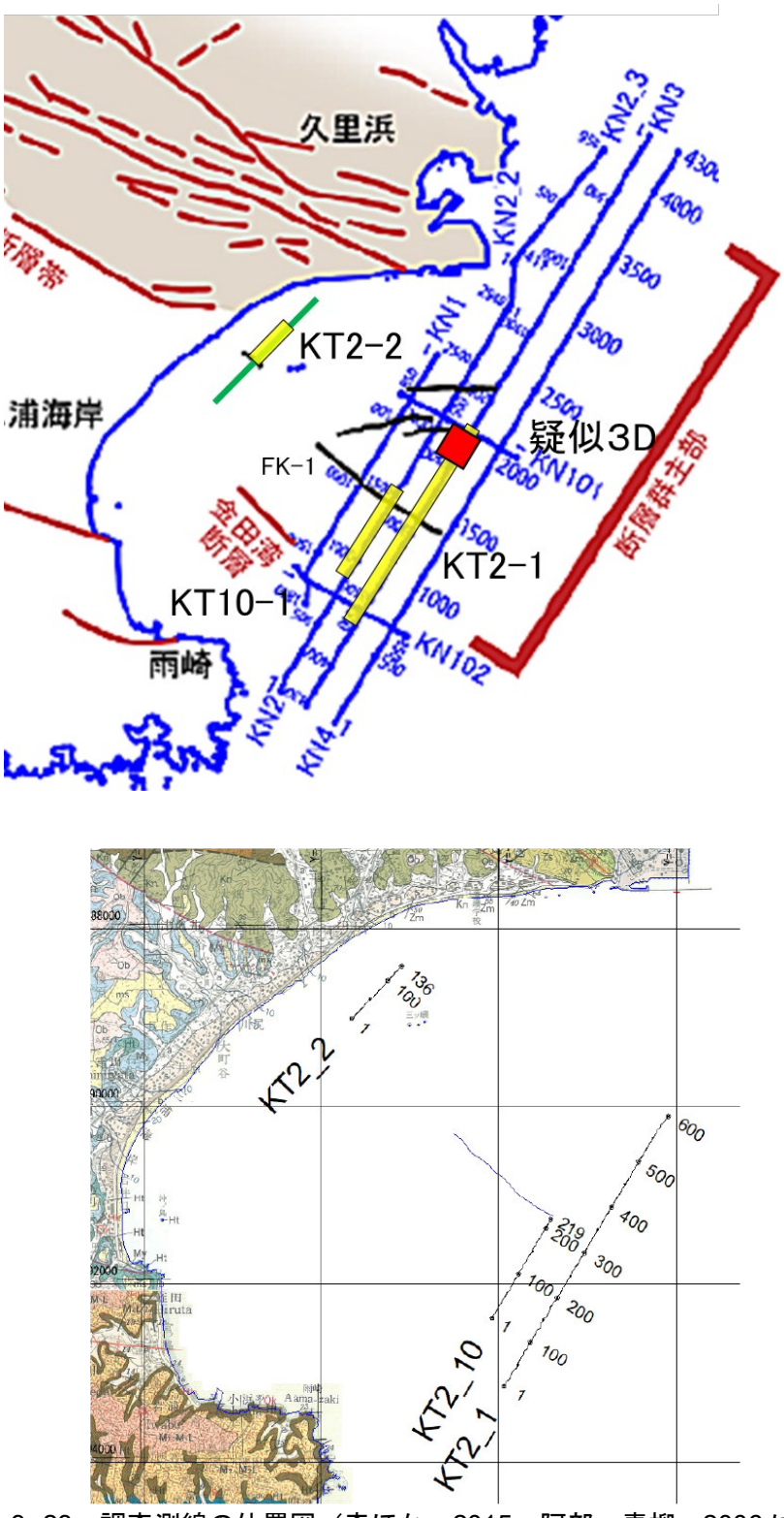


図 3-3- 23　調査測線の位置図（森ほか，2015；阿部・青柳，2006 に加筆）

上図の黄色のハッキングが 2 次元探査測線。赤色は模擬 3 次元の範囲。

表 3-3- 11　作業工程表（上段：9/7～9/11，下段：11/30～12/3）

風速は気象庁データベース（三浦市）、

波高は全国港湾海洋波浪情報網（第二海堡）より抜粋。

項目	9月7日 水	9月8日 木	9月9日 金	9月10日 土	9月11日 日
艤装	―				
テストラン		―			
2D測定		―	強風により作業中止		
疑似3D測定				―	
艤装解除					―
最大風速(最大瞬間風速)	6.3m(9.3m)	6.7m(10.3m)	6.2m(9.2m)	7.3m(11.9m)	6.9m(11.3m)
最大波高(6-15時)	0.7m	1.3m	0.9m	1.2m	1.3m
天気	曇時々雨	曇のち晴	曇のち晴	晴	曇のち晴

項目	11月30日 水	12月1日 木	12月2日 金	12月3日 土
艤装	―			
テストラン		―		
2D測定(産総研ストリーマケーブル)		―		
2D測定(JFEストリーマケーブル)			―	
艤装解除				―
最大風速(最大瞬間風速)	9.3m(15.3m)	6.4m(9.1m)	7.3m(12.5m)	5.5m(8.3m)
最大波高(6-15時)	0.6m	0.6m	0.7m	0.5m
天気	曇時々晴	曇	曇時々晴	曇時々晴

表 3-3- 12　測線名および測定目的

番号	測線	測線名	測定方法	スピーカー	ストリーマーケーブル	中心周波数	目的
①	KT2-1 (1 回目)	KT2-1	2D	大型	JFE	300Hz	既存データ(ブーマー)との比較
②	KT2-1 (2 回目)	KN3_KT1-2 KN3_KT1-3 KN3_KT1-1R、KN3_KT1-1R2	2D	大型	産総研	400Hz	ストリーマーケーブルの比較、往復測定による効果の把握
③	KT2-2 (1 回目)	KT2-2	2D	大型	JFE	300Hz	浅海域既存データ(ベイケーブルとの比較)
④	KT10-1 (1 回目)	KT2_10	2D	大型	JFE	300Hz	既存データ(ブーマー)との比較
⑤	KT10-1 (2 回目)	KN4_KT-10R1 KN4_KT-10R2	2D	大型	JFE	400Hz	ストリーマーケーブルの比較
⑥	KT10-1 (2 回目)	KN3_KT10-1、KN3_KT10-2	2D	大型	産総研	400Hz	ストリーマーケーブルの比較
	3D (1 回目)	KN2-12～KN2-42	疑似 3D	小型	JFE	300Hz	疑似 3D データ取得

表 3-3- 13　全測定内容

日付	開始時間	測線名	測線長	ショット数	測定方法	スピーカー	ストリーマーケーブル	オフセット	中心周波数	コード長	コード名
9月8日	8:19	KT2-1	3.6	600	2D	大型	JFE	30m	300	1023	PRBS
9月8日	14:11	KT2-2	0.8	136	2D	大型	JFE	30m	300	1023	PRBS
9月10日	8:30	KN2-42	0.9	145	疑似3D	小型	JFE	30m	300	1023	PRBS
9月10日	9:26	KN2-37	0.9	143	疑似3D	小型	JFE	30m	300	1023	PRBS
9月10日	10:11	KN2-32	0.9	143	疑似3D	小型	JFE	30m	300	1023	PRBS
9月10日	10:52	KN2-27	0.9	143	疑似3D	小型	JFE	30m	300	1023	PRBS
9月10日	11:25	KN2-22	0.9	143	疑似3D	小型	JFE	30m	300	1023	PRBS
9月10日	12:07	KN2-17	0.9	143	疑似3D	小型	JFE	30m	300	1023	PRBS
9月10日	12:45	KN2-12	0.9	144	疑似3D	小型	JFE	30m	300	1023	PRBS
9月10日	13:39	KN2_10	1.3	219	2D	大型	JFE	30m	300	1023	PRBS
12月1日	10:29	KN3_KT1-1R	1.6	260	2D	大型	産総研	30m	400	1023	PRBS
12月1日	10:50	KN3_KT1-1	1.7	290	2D	大型	産総研	30m	400	1023	PRBS
12月1日	11:08	KN3_KT1-1R2	2.1	350	2D	大型	産総研	30m	400	1023	PRBS
12月1日	11:48	KN3_KT1-2	2.3	380	2D	大型	産総研	30m	400	1023	PRBS
12月1日	13:10	KN3_KT10-1	1.7	280	2D	大型	産総研	30m	400	1023	PRBS
12月1日	13:46	KN3_KT10-2	1.6	270	2D	大型	産総研	30m	400	1023	PRBS
12月2日	14:29	KN4_KT10	2.0	325	2D	大型	JFE	30m	400	1023	PRBS
12月2日	15:05	KN4_KT10R	2.1	350	2D	大型	JFE	30m	400	1023	PRBS

（iii）取得データの解釈

・昨年度データとの比較

本事業では令和 3 年度において、小型スピーカーを発振器として用いた測定を KT2-1（沖合）と KT2-2（浅海部）における音波探査を実施している。昨年度に取得したデータと今年度に新たに準備した大型スピーカーによる測定結果を比較することにより、発振器の性能向上による測定精度の向上についての検討を行った。2D 測線の KT2-1、浅海の測線 KT2-2 の結果を図 3-3-24 と図 3-3-25 にそれぞれ示す。KT2-1 の結果を見ると、昨年度は確認できなかった 0.2s から 0.3s の反射面（図中の下向き黒矢印）を確認することができ、また、海底面直下の地層も明瞭である。さらに全体的にノイズが少ないことがわかる。これは図 3-3-12 で示した受振波形がシャープになったことが理由と考えられる。

昨年度の 3D 測定（小型スピーカー）と今年度の疑似 3D 測定（大型スピーカー）の比較として同一測線の結果を図 3-3-26 に示す。昨年度は明瞭に確認できなかった黒矢印で示す反射面を今年度は明瞭に確認できていることがわかる。図 3-3-27 に 3D キューブの結果を比較して示す。今年度の記録（黄色）の方が昨年度の記録(白色）よりもノイズが少なく反射面も明瞭になっていることがわかる。表 3-3-11 に示す今年度の最大風速 7.9m に比べ昨年度の最大風速の方が小さかったことから、この記録の違いは海況よりも発振器の改良効果が理由であると考えられる。

・受振器の形状の違いによる比較

曳航と受振器の形状によって生じる波のノイズが測定精度に与える影響を調べるため、11 月の 2 回目の測定では形状の異なる 2 種類のストリーマーケーブル（JFE シビル：凹凸あり、産総研：凹凸なし）の比較を行った。この結果として測線 KT10-1 の結果を図 3-3-28 に示す。図中黒矢印が示すのは既往の研究で確認されている断層（FK-1）の位置を示す。9 月に測定された 1 回目の調査データと 12 月に測定された 2 回目のデータを比較すると、同じ受振器（JFE ストリーマーケーブル）を用いたにも関わらず、2 回目はノイズを十分に除去できておらず、測定精度が著しく低いことが分かる。同様の結果は、KT2-1 測線でも確認されており、2 回目に実施した産総研のデータロガーとストリーマーケーブルを用いた探査結果も十分な測定精度が得られていないことから、1 回目よりも 2 回目の測定時の方が、海域における測定条件が悪かったと推察されるが、原因の詳細については不明である。

測定精度が大きく異なるため、断定することはできないが、図中における産総研の測定機材を用いた調査結果では、明瞭ではないものの、1 回目に JFE シビルの測定結果で見えている地層構造と同じものが確認されていることから、海況が悪い状況にあったとしても、凹凸なしのストリーマーケーブルの方が、凹凸ありのケーブルよりも良い精度で測定することができたと考えられる。したがって、曳航と受振器の形状によって生じる波のノイズの影響は、測定精度に一定の影響を与えることが確認できた。

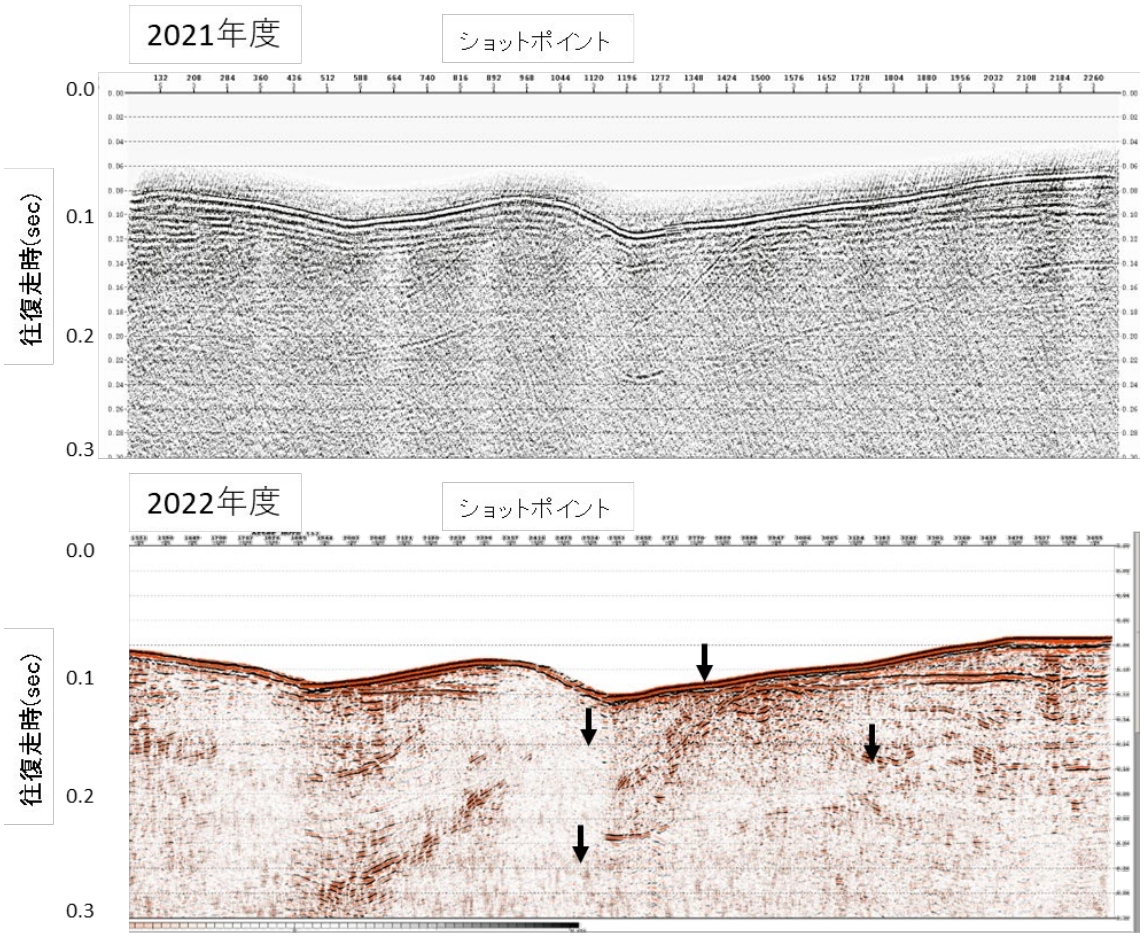


図 3-3- 24　測定結果の比較（KT2-1 測線）

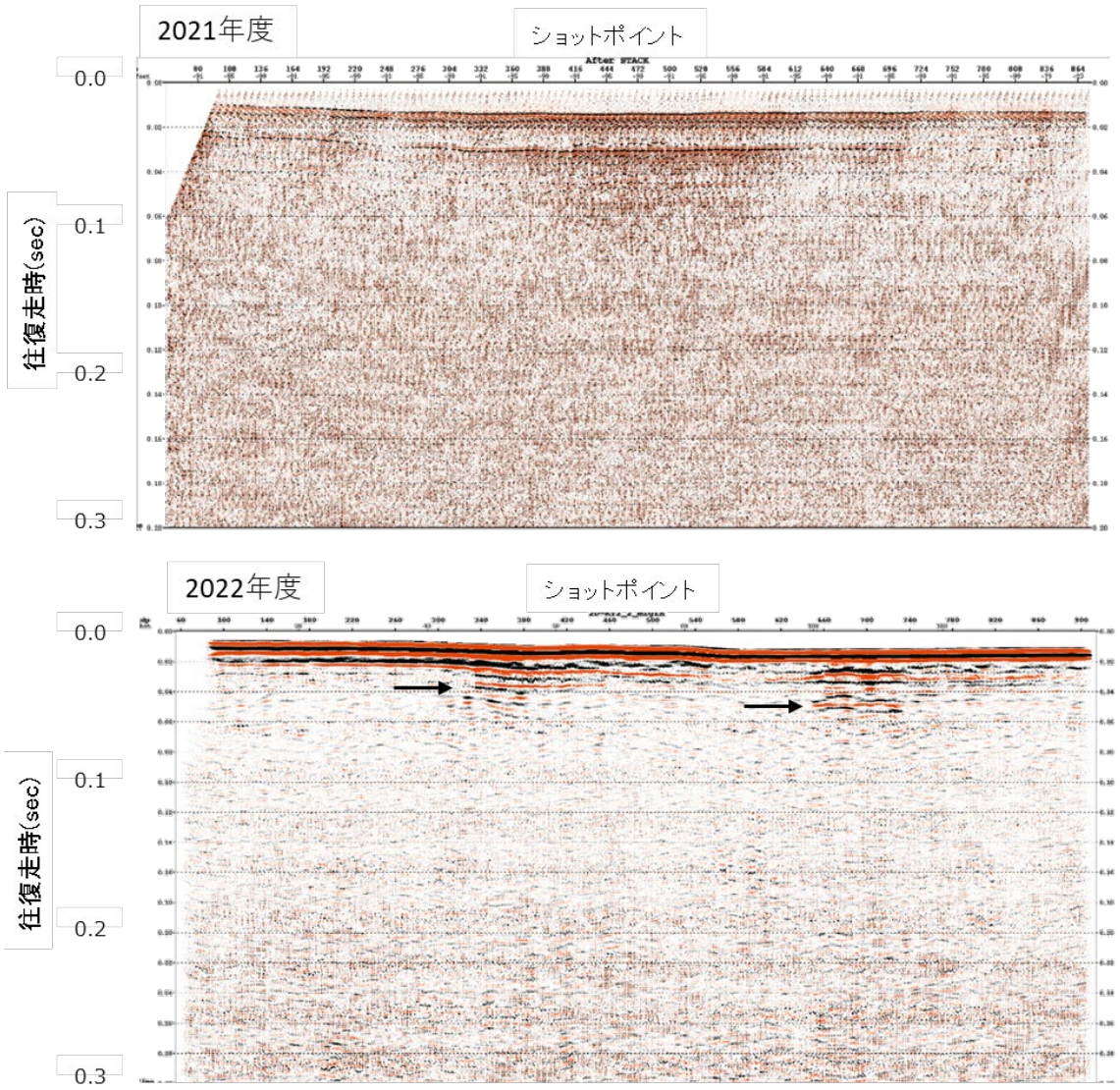


図 3-3- 25　測定結果の比較（KT2-2 測線）

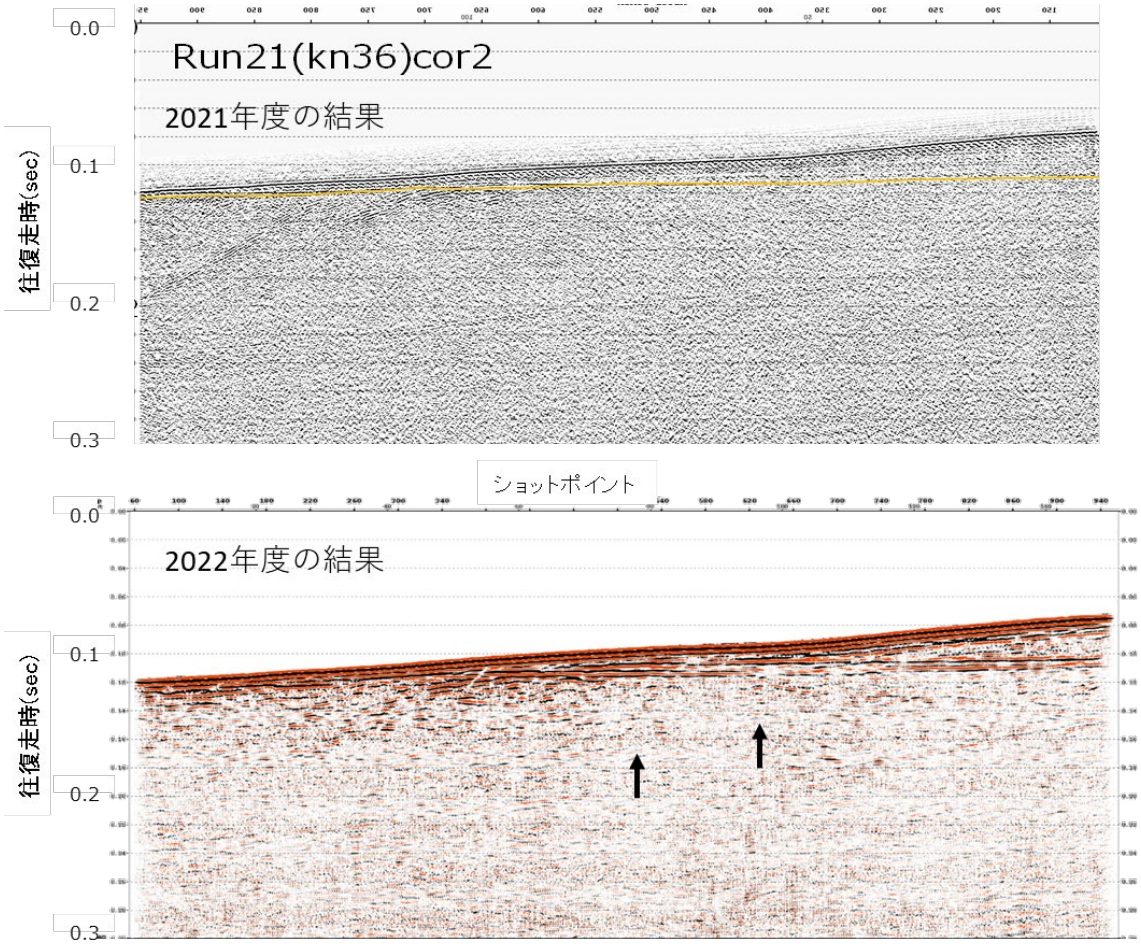


図 3-3- 26　3D 測線における昨年度の結果との比較

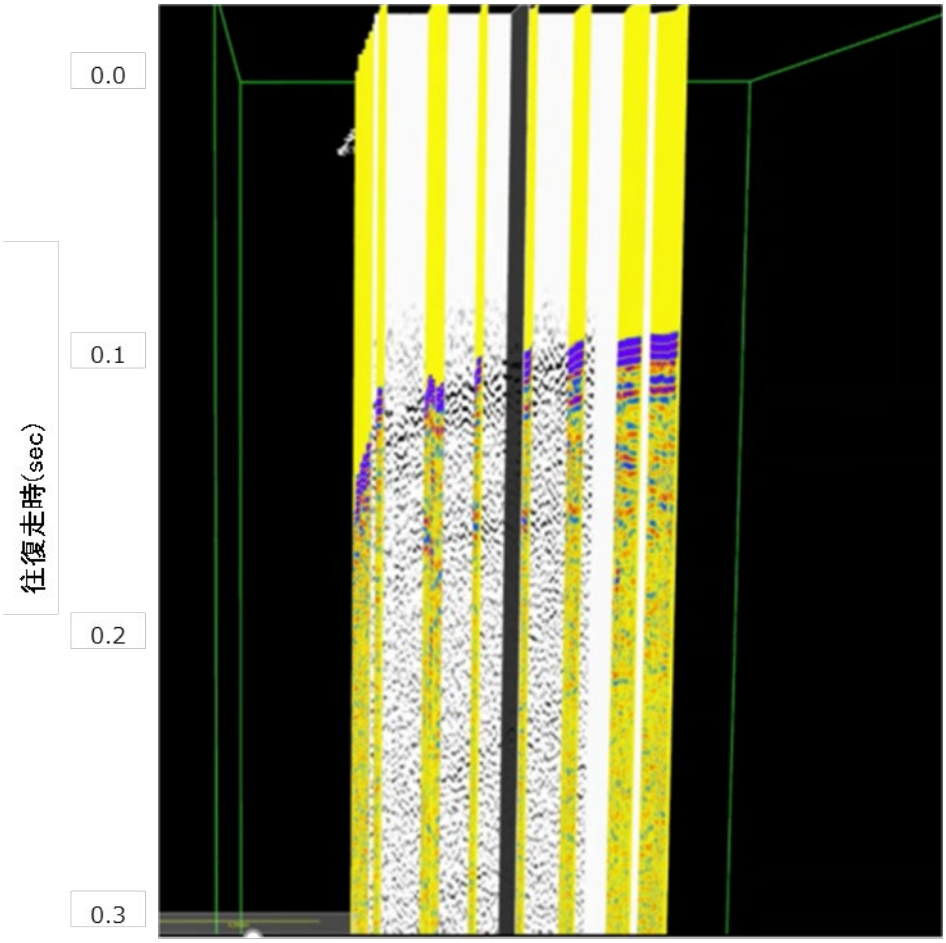


図 3-3- 27　模擬 3D 処理の結果（3D キューブ）
白色：昨年度、黄色：今年度

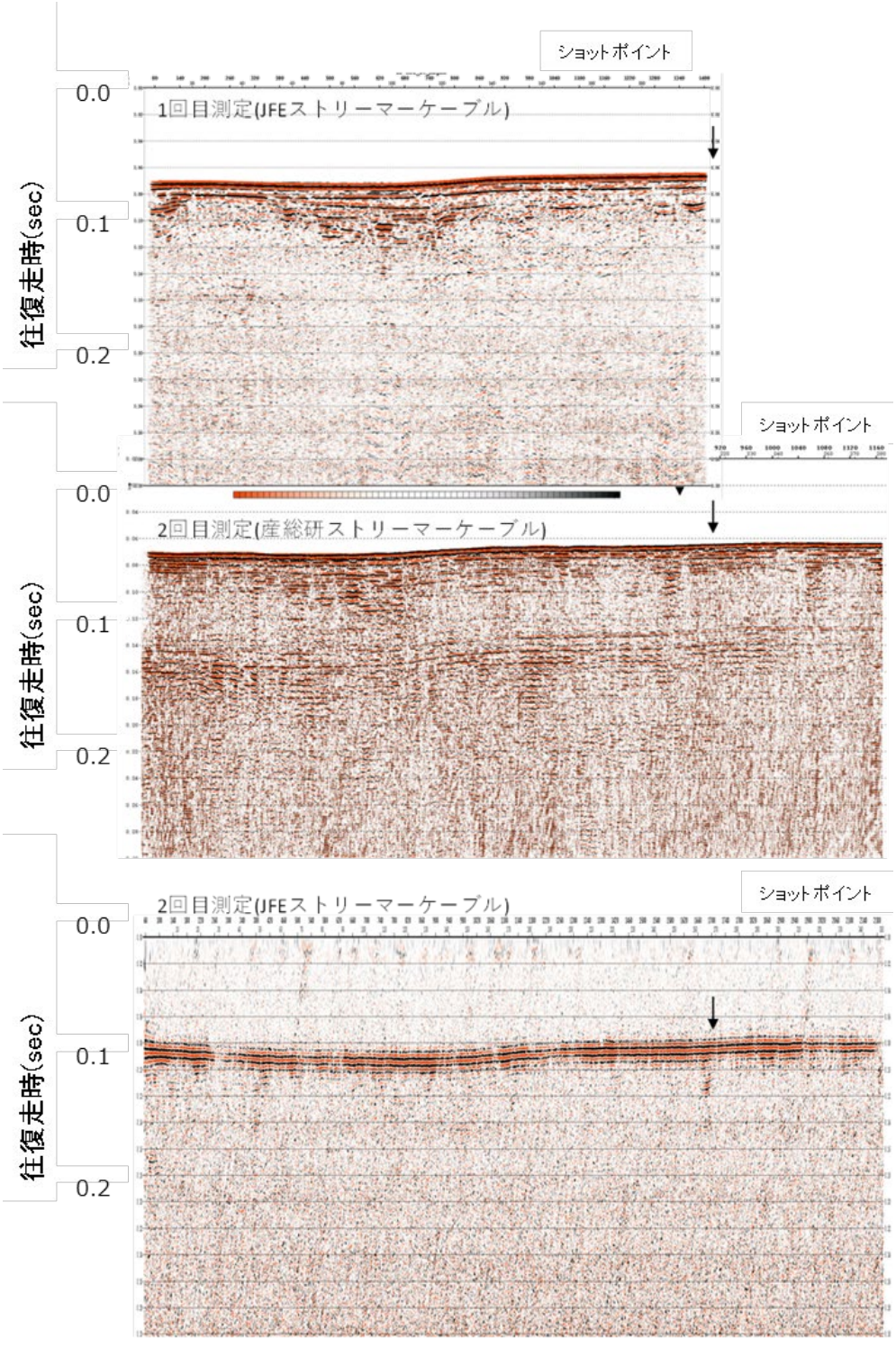


図 3-3- 28　受振器の形状の違いによる測定結果の比較

（上：凹凸あり（1 回目）、中：凹凸なし（2 回目）、下：凹凸あり（2 回目）

・既存の調査手法との比較

令和 3 年度も実施したが、本調査手法の特徴であるパルス型音源を用いた調査システムの特性を評価するために、従来の非パルス型音源を用いた調査システムとの比較を実施した。図 3-3-29 は測線 KT2-1 において取得された記録を既存の記録（森ほか, 2015）と比較したものである。測線 KT2-1 は全体として深度 0.3 秒程度まで反射面が確認できており。これは海底下 170m（地盤の音速を 1700m/s と仮定）に相当する。部分的には既存のブーマー記録（測線 KN3）よりも深部（多重反射面の下）まで確認できていることがわかる。(図中矢印部)。一方、測線 KT2-1 の SP1500-1800、P2300-2600 に反射面が見えなくなる部分（図中 片カッコで示す）があり、どちらも調査船の進行方向に対して下に傾斜する構造である。既存の記録で確認された当該部分の 0.11 秒よりも上位にほぼ水平な反射面については (図中 黒矢印)、本手法でも同様に確認することができた。

測線 KT10-1 測線の比較を図 3-3-30 に示す。図中、KT-10-1 の白点線で示す部分に地層の不連続がある。同じ構造は既存の記録（KN2）にも確認できる。この構造は谷状の堆積面のように見える。同様の構造は黄色点線で示す部分にも確認できる。これ以外の海底直下の地層面からの反射波は認められない。既存の記録でも同様の構造が確認できる。両記録ともに海底面直下の水平な反射面を確認できるが、既存の記録の方がより細かい地層を確認できているようにも見えるが、これが海況などの測定条件によるものか、あるいは測定システムによる違いなのかについては、現時点では断定することはできない。

測線 KT2-2 測線の結果については既存のベイケーブル測線（阿部・青柳、2006）の結果と比較を行った（図 3-3-31）。ベイケーブルは震源（音源）にエアガンを使用した深部を対象とした探査手法のため、水中スピーカーを音源とした本探査と探査深度や分解能を単純に比較することは難しいが、ベイケーブルの記録で確認される地層構造（白点線）に対応する構造が本手法で取得したデータにおいても確認されており、幌延同様に浅海域において、本手法が適応できることが確認された。

（iv）まとめ

当該海域における現地調査の結果から以下のことが明らかになった。

1）昨年度比較して発振器の改良による測定精度の向上が確認された。

2）受振器の形状が測定精度の向上（ノイズの低減）に影響を与える可能性が示唆された。

3）最大探査深度は海底下-170m 程度と推定された。

4）条件によっては、非パルス型震源であるブーマーよりも深い反射面のデータを得ることも可能であるが、海況によっては、プーマ―よりも精度が落ちることもある。

5）船の進行方向に沿って下向き傾斜の海底地形を有する海域では、地下構造が見えなくなるケースが確認された。

6）浅海域でも本調査手法が適応可能であることが示された。

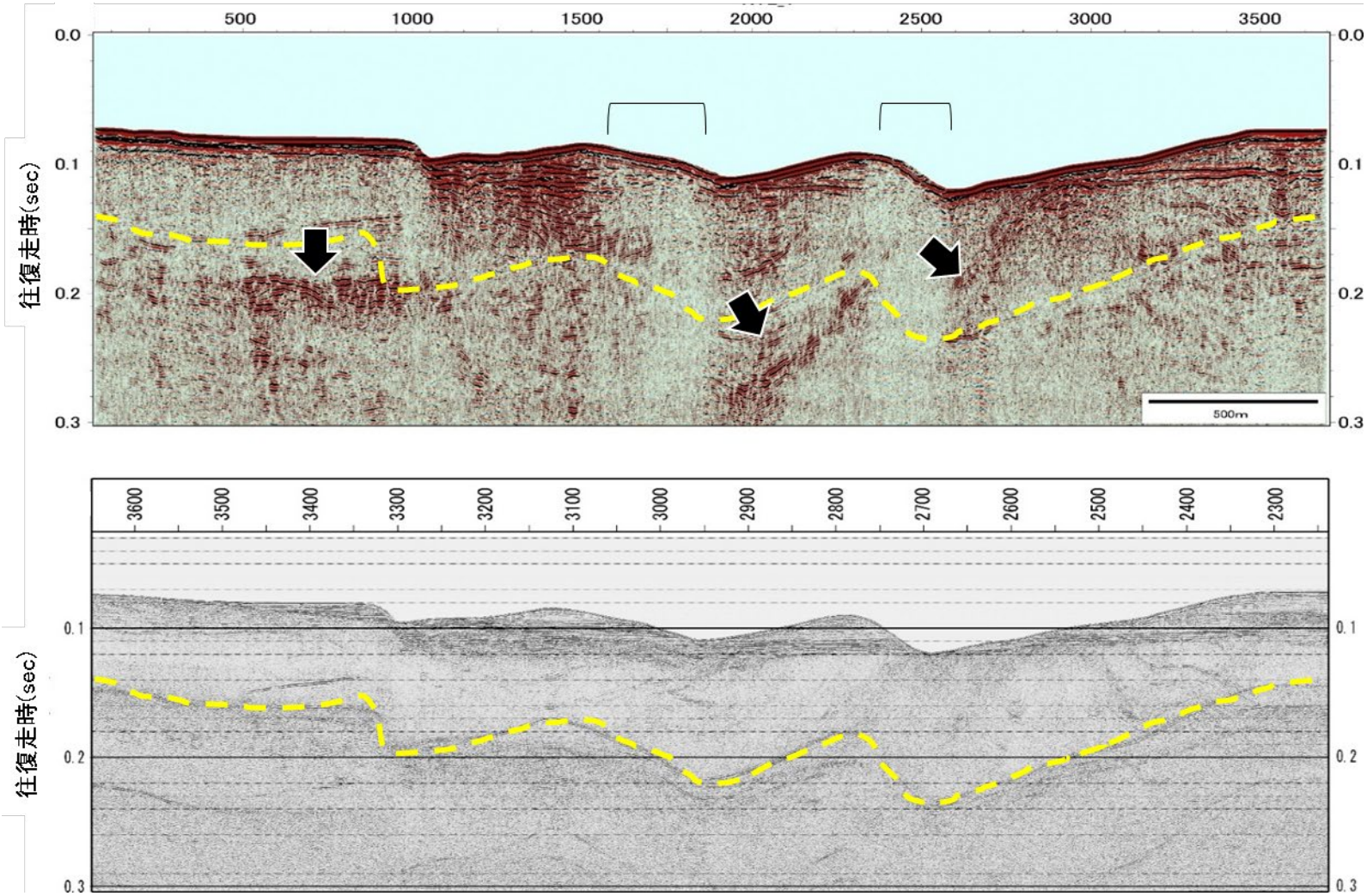


図 3-3- 29　既存測定結果との比較（黄線は多重反射面）　上：測線 KT2-1、下：測線 KN3（森ほか，2015）

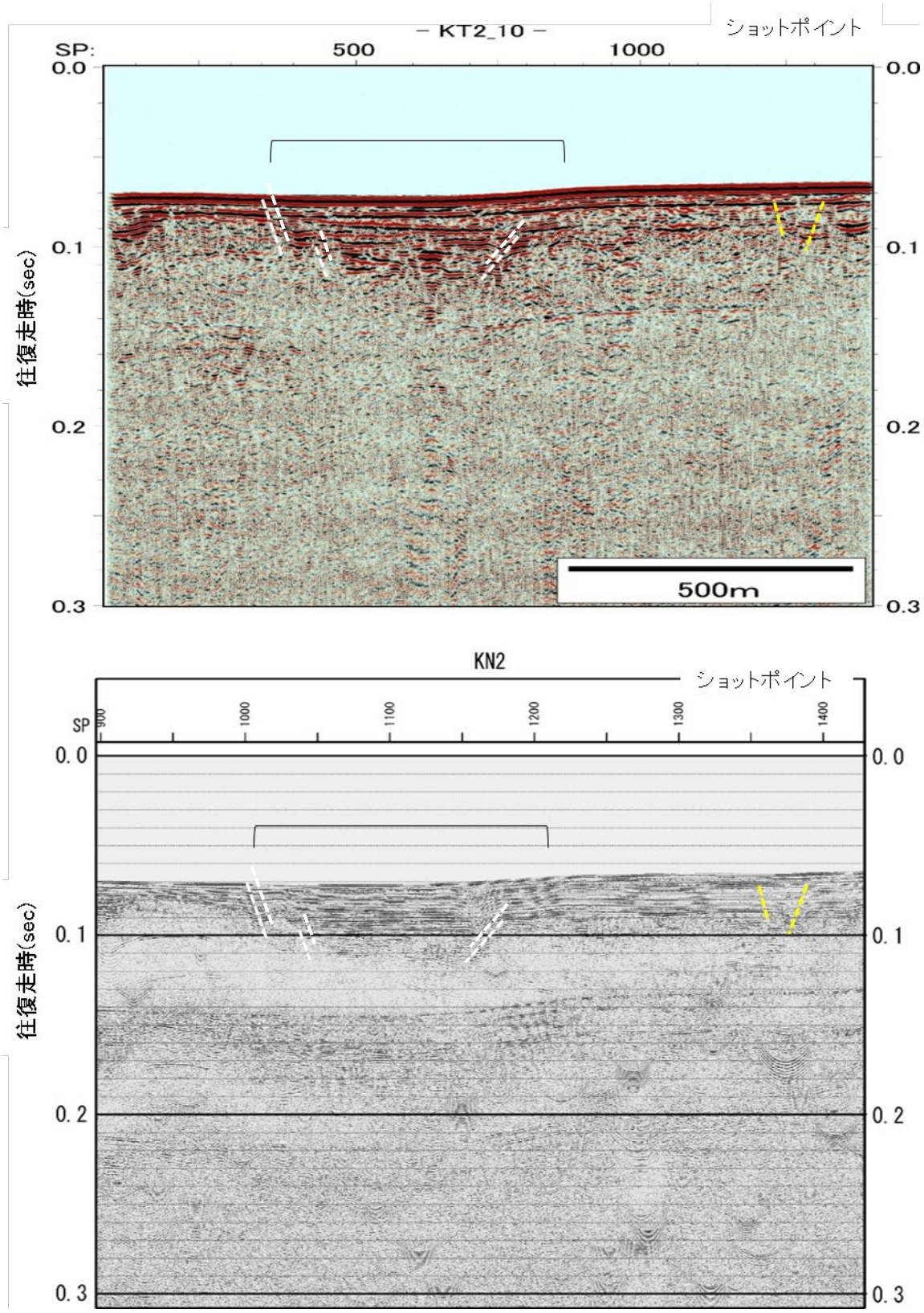


図 3-3- 30　既存測定結果との比較　上：測線 KT2-10、下：測線 KN2（森ほか，2015）

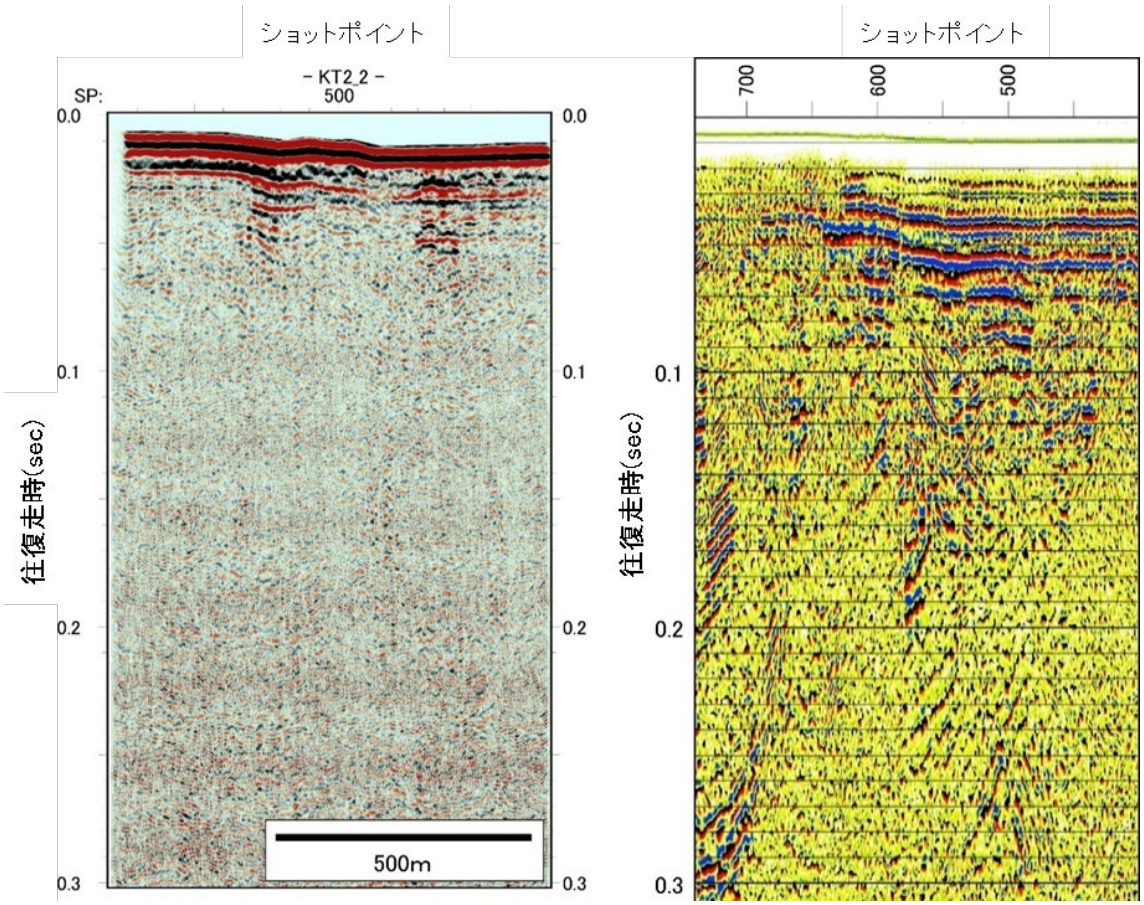


図 3-3- 31　既存測定結果との比較

左：測線 KT2-2、下：ベイケーブル記録（阿部・青柳，2006）

（4）今年度の成果と課題

本事業では、令和 3 年度と同様に、水深 5～20m の浅海域を対象に小型船舶と海洋生態系への影響が小さいとされる低い音圧を使うパルス型震源（水中スピーカー）を用いた音波手法の高度化を行った。今年度、振動板の素材変更や水中翼の取り付けなど改良した発振器（水中スピーカー）を用いることより得られた測定データについては、小型スピーカーを用いた昨年度のものよりも明らかに精度が向上しており、また測定条件によっては、ブーマーなどの既存のパルス型震源を用いた測定手法より得られたデータよりも良いデータが得られることがわかった。一方で、パルス型音源を用いた際の課題も明らかとなり、今後は、この課題を克服し、測定システムとしての安定性を確保することが本手法を地層処分事業で用いていくために必要となる。

（今年度の成果）

・幌延町沿岸海域では最大深度 80m、横須賀市沿岸海域では最大深度 170m まで測定データを取得できた。

・3 次探査を含めて水深 5m 程度の浅海域での曳航調査が可能であることがわかった。

・両海域において、海底面下の地層の不連続構造を把握することができた。

・測定条件次第では、従来のパルス型音源（ブーマー）よりも深部の反射面を捉えることができた。

・ブイの浮力調整や水中翼の取り付けにより、海中における発振器（水中スピーカー）の振動面における水圧変化を低減し、またストリーマーケーブルの凹凸形状をなくし、曳航による波によるノイズの影響を低減されることで、測定精度を上げられることを確認した。

（課題）

＜発振器＞

・低周波数（100Hz）程度で、安定的な音圧をだせるようにする必要がある。

・発振間隔を大きくするなど、より深くまで音を届かせる方法を検討する必要がある。

・形状も含めて、より大きな音圧をだせるように改良する必要がある。

＜受振器＞

・できるだけ凹凸をなくし、曳航による波の影響を除去する必要がある。

・浮力調整等により、水中での位置や直線性が維持されるような工夫が必要。

＜測定システム全体＞

・海底地形面の凹凸に起因する 1 発振時の見掛け伝搬距離の拡張による受振エネルギーの低下について対策を講じる必要がある。

・船速をもう少し上げた状態（3～4 ノット）で安定したデータが取れるように検討する必要がある。

（今後の展望）

探査深度の向上を行うためにはスピーカー出力特性の向上、発振時間を長くすることの 2 つが考えられる。

・スピーカーの出力特性の向上

スピーカーの出力特性の向上は低周波数域の出力増、中心周波数付近の周波数特性をフラットにすることが重要と考えられる。低周波数域の出力増にはスピーカー自体の改良が必要である。周波数特性をフラットにすることもスピーカー自体の改良が必要であるが、これ以外には周波数特性の異なる複数のスピーカーを同時に使用することで疑似的に周波数特性を改善することが可能と考えられる。

・発振時間の延長

本研究における発振時間は船速、進行方向の分解能の関係で 4 秒以下の測定を行ったが、深部の調査においては進行方向の分解能を下げることができるかもしれない。今回の測定では進行方向の分解能を 6m にするために 6m 間隔で起震を行ったが、これを例えば 12m にすることができれば発振時間を 8 秒程度にすることができ、信号長を 2 倍にすることが可能になる。これにより探査深度を向上させることが可能になると考えられる。

・その他（信号長の検討）

本業務では発振信号として用いた疑似ランダム波はフルサイクルとハーフサイクルの 2 種類がある（Nakamura et al., 2015）。ハーフサイクルは信号長が半分になること、低周波数でエネルギーが大きくなること、理論上は相関計算後の波形にサイドローブがでないこと、というメリットがある（図 3-3-32）。一方、ハーフサイクルは震源への負荷が大きいので本業務ではフルサイクルを用いたが、水中スピーカーへの負荷の軽減を図ることができれば、信号長を短くできる、低周波数でエネルギーが大きくなるというメリットを生かせる可能性がある。

・測定システムの高度化（漁船の利用）

本事業では計測機器の設置場所、低速での航行、機器の海中投入時の作業場所の確保などを重視したため調査船を用いた。しかしながら、調査船は国内において保有している会社も少なく、実際の海域では漁期や海況などの問題から、調査期間が限定されることを考えると、調査対象地域にある漁船を利用することがもっとも効率的であり、またコスト面からも有効である。したがって、計測機材の小型化と耐久性強化、信号長（発振時間）の短縮による船速増を図ることができれば、将来的に漁船の使用が可能となる可能性がある。また、漁船を利用することのもう一つのメリットはクロスラインを拡大することで 1 測線当たりの測定幅を増やし作業の効率化できることである（図 3-3-33）。先述したように、海域での調査は、漁期や海況に大きく依存するため、一般的には長期にわたって実施することは難しい。

小型船舶を使った 3 次元音波手法では、小型の測器を利用しなければならないため、どうしても 1 測線あたりの測定幅が小さくなる。そのため、地層処分で想定されているような 2km×2km の範囲を 3 次元で探査するためには、相当数の日数を要することとなる。そのため、なるべく測定幅を大きくする必要があるが、そのためには複数台の船をつかう必要がある。調査船を複数台準備することは現実的に難しいため、調査対象地域の漁船で利用できるシステムにすることで、この問題を解決することができる。

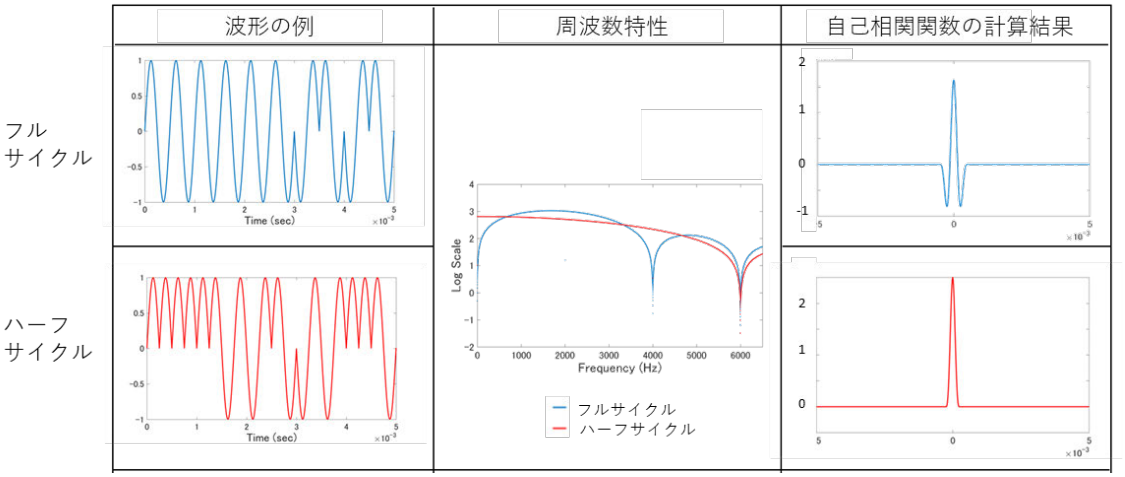


図 3-3- 32　フルサイクルとハーフサイクルの疑似ランダム波（Nakamura et al., 2015）

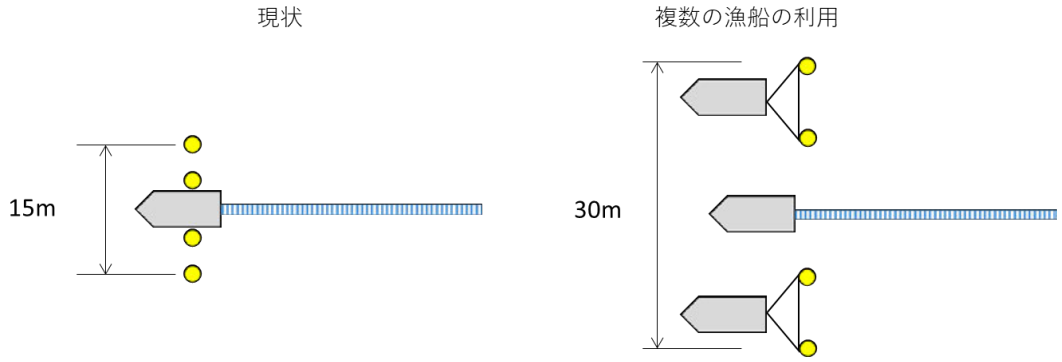


図 3-3- 33　複数の漁船を利用した測定システム

（５）参考文献

阿部信太郎，青柳恭平，日本列島沿岸海域における海底活断層調査の現状と課題－海底活断層評価の信頼度向上にむけて－，電力中央研究所報告（N05047），2006

幌延地圏環境研究所，平成 16 年度 地圏環境研究事業　研究成果報告書，2005

幌延地圏環境研究所，平成 18 年度 地圏環境研究事業　研究成果報告書．2007

幌延地圏環境研究所，平成 19 年度 地圏環境研究事業　研究成果報告書．2008

IKawa R., I. Machida, M. Koshigai, S. Nishizaki, A. Marui, Coastal aquifer system in late Pleistocene to Holocene deposits at Horonobe in Hokkaido, Japan, Hydrogeology Journal, Vol.22, 2014, pp.987-1002.

森　宏，阿部信太朗，荒井良祐，田之口英史，津村紀子，青柳恭平，三浦半島断層群海域延長部における断層分布と活動性について．活断層・古地震研究報告，No.15，2015，p143-177.

Nakamura Y., M. Takanashi and Y. Kunishi, and J. Sakakibara, Simultaneous Low-frequency Data Acquisition Using Amplitude Modulated Half-cycle Pseudorandom Sweep, Society of Petroleum Engineers, SPE-188825-MS, 2015

酒井 利彰，井岡聖一郎，石島洋二，五十嵐敏文，サロベツ原野における沖積層の地質解析，応用地質，vol.52，2011，pp.2-13.

酒井 利彰，井岡聖一郎，五十嵐敏文，サロベツ原野南部における沖積層の水文地質構造と地下水流動，応用地質，vol.53，2012，pp.172-182.

産業技術総合研究所，平成 19 年度 沿岸域塩淡境界・断層評価高度化開発 成果報告書，2007，pp.181

産業技術総合研究所，平成 21 年度 沿岸域塩淡境界・断層評価高度化開発 成果報告書，2009，pp.204-261

産業技術総合研究所，原子力環境整備促進・資金管理センター，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（沿岸部処分システム評価確証技術開発）成果報告書，2021，pp.232-278.

鶴　哲郎、朴　進午，榊原淳一，高梨　将，辻　健，浅海域 3D 反射法地震探査のための多重発震振源の開発、応用地質学会要旨集、2017

Ueda T., Y. Mitsuhata, T. Uchida, A. Marui, A new marine magnetotelluric measurement system in a shallow-water environment for hydrogeological study, Journal of Applied Geophysics, vol. 100, 2014, pp.23-31.

図 3-1- 1　地下地質ごとの地下水の区分.....115
図 3-1- 2　調査地点 FGB-2 孔の位置図.....115
図 3-1- 3　駿河湾における海水中の ^{222}Rn 濃度分布.....116
図 3-1- 4　駿河湾における音波の散乱域（産業技術総合研究所，2013 に加筆）.....118
図 3-1- 5　SKB 孔における水質の深度プロファイル.....118
図 3-1- 6　水質や地下水年代から想定される駿河湾沿岸部における.....119
図 3-1- 7　FGB-2 孔におけるケーシングプログラム.....122
図 3-1- 8　ボーリングコア.....123
図 3-1- 9　ボーリングコア.....124
図 3-1- 10　ボーリングコア（本事業実施分：その 1）.....125
図 3-1- 11　ボーリングコア（本事業実施分：その 2）.....126
図 3-1- 12　FGB-2 孔における孔内物理検層結果.....128
図 3-1- 13　FGB-2 孔における孔内物理検層結果（400～800m）.....129
図 3-1- 14　FGB-2 孔水理試験の装置の概要.....131
図 3-1- 15　FGB-3 孔におけるケーシングプログラム.....133
図 3-1- 16　比重の違いによる試験溶液の移動イメージ.....137
図 3-1- 17　FGB-3 孔　17.68 m~25.59 m 水理試験の装置の概要.....140
図 3-1- 18　FGB-3 孔　112.28 m~113.28 m水理試験（2 回目）の装置の概要.....140
図 3-1- 19　FGB-3 孔　ダブルパッカーを用いた水理試験の装置の概要.....141
図 3-1- 20　地下水の実水頭、淡水水頭、透水係数.....146
図 3-1- 21　FGB-2 および FGB-3 から得られた地下水の水質（その 1）.....147
図 3-1- 22　GB-2 および FGB-3 から得られた地下水の水質（その 2）.....148
図 3-1- 23　地質断面図から推定された不透水基盤深度.....150
図 3-1- 24　当初推定していた地質図.....151
図 3-1- 25　平成 25 年度深部反射法結果と深部・浅部統合解析結果の比較（a） H25 年度深部反射法深度断面、(b） 深部統合解析 CMP 重合解析結果。.....152

図 3-2- 1　ROV と高精度音響カメラを用いた探査の測線配置図.....157
図 3-2- 2　ROV と高精度音響カメラで推定した湧出量の分布図.....160
図 3-2- 3　水試料の炭素同位体および V 濃度.....161
図 3-2- 4　文献情報に基づき GIS で解析した集水域、表層地質及び海底地形図.....163
図 3-2- 5　集水域内の主要な表層地質、傾斜角及び海底地形勾配の関係.....166
図 3-2- 6　海底湧出地下水に関する文献の調査地域.....167

図 3-3- 1 振動試験の方法（イメージ図）.....173
図 3-3- 2　試験に用いた大型水槽の概要.....174

図 3-3- 3　振動試験結果の比較.....176
図 3-3- 4　水中スピーカーの構造.....176
図 3-3- 5　試験レイアウト.....178
図 3-3- 6　性能評価試験の検証結果.....180
図 3-3- 7　水中スピーカーの振動面にかかる水圧の影響.....182
図 3-3- 8　振動面にかかる水圧低減の方法.....182
図 3-3- 9　曳航試験における発振器と受振器のレイアウト.....183
図 3-3- 10　大型スピーカーの性能評価試験結果.....185
図 3-3- 11　小型スピーカーの性能評価試験結果.....185
図 3-3- 12　疑似ランダム波の受振波形（相関計算後）.....186
図 3-3- 13　幌延町沿岸海域における測線位置.....191
図 3-3- 14　データフロー処理図（左：2 次元記録、右：3 次元記録）.....194
図 3-3- 15　2D-01 測線の時間断面記録から推定された 3 つの境界線.....198
図 3-3- 16　2D-01 測線の時間断面図と陸域のボーリング柱状図との比較.....199
図 3-3- 17　陸域の浅部反射法データとの連続性の検討.....200
図 3-3- 18　海域における電磁淡データと陸域ボーリングにおける間隙水の Cl^-濃度変化との比較.....201
図 3-3- 19　2D-01 測線と 2D-03 測線の比較（黒の点線は不連続構造の位置を示す）...202
図 3-3- 20　2D-01 測線と 2D-02 測線の比較（黒の点線は不連続構造の位置を示す）...203
図 3-3- 21　2D-01 測線と 3D キューブの比較（青矢印は不整合の位置）.....204
図 3-3- 22　3D キューブのタイムスライスの比較（左 30ms，中央 40ms、右 50ms）..205
図 3-3- 23　調査測線の位置図（森ほか，2015；阿部・青柳，2006 に加筆）.....207
図 3-3- 24　測定結果の比較（KT2-1 測線）.....211
図 3-3- 25　測定結果の比較（KT2-2 測線）.....212
図 3-3- 26　3D 測線における昨年度の結果との比較.....213
図 3-3- 27　模擬 3D 処理の結果（3D キューブ）.....214
図 3-3- 28　受振器の形状の違いによる測定結果の比較.....215
図 3-3- 29　既存測定結果との比較（黄線は多重反射面）　上：測線 KT2-1、下：測線 KN3（森ほか，2015）.....217
図 3-3- 30　既存測定結果との比較　上：測線 KT2-10、下：測線 KN2（森ほか，2015）.....218
図 3-3- 31　既存測定結果との比較.....219
図 3-3- 32　フルサイクルとハーフサイクルの疑似ランダム波（Nakamura et al., 2015）.....223
図 3-3- 33　複数の漁船を利用した測定システム.....223

表 3-1- 1　FGB-2 孔における孔内物理検層の実施工程.....127
表 3-1- 2　水理試験の実施概要.....130
表 3-1- 3　採水時の多項目水質計による水質および蛍光染料濃度.....132
表 3-1- 4　流向流速測定の概要.....135
表 3-1- 5　流向流速測定で得られた流向流速.....136
表 3-1- 6　水理試験の実施概要.....139
表 3-1- 7　FGB-3 採水時の多項目水質計による水質および蛍光染料濃度.....142
表 3-1- 8　水理試験で得られた水理定数.....144

表 3-2- 1　ROV と高精度音響カメラを用いた探査の測線長と探査面積の一覧.....158
表 3-2- 2　対象とした地域と集水域の一覧.....162
表 3-2- 3　解析に使用したデータの一覧.....162
表 3-2- 4　GIS で解析した集水域、表層地質及び海底地形勾配の一覧.....164
表 3-2- 5　海底湧出地下水周辺の地質と湧出機構.....168
表 3-2- 6　海底湧出地下水の検出や性状等の把握に用いられるトレーサー.....169

表 3-3- 1　振動試験の仕様.....173
表 3-3- 2　水中スピーカーの周波数特性に影響を与える項目.....177
表 3-3- 3　水中スピーカーの改良点と期待される成果.....177
表 3-3- 4　性能評価試験の仕様.....178
表 3-3- 5　曳航試験の仕様.....183
表 3-3- 6　使用機材一覧（*1 は産総研からの貸与）.....187
表 3-3- 7　データ取得の仕様.....188
表 3-3- 8　作業工程表.....192
表 3-3- 9　測線名および測定目的.....192
表 3-3- 10　全測定内容.....193
表 3-3- 11　作業工程表（上段：9/7～9/11，下段：11/30～12/3）.....208
表 3-3- 12　測線名および測定目的.....209
表 3-3- 13　全測定内容.....209

写真 3-1- 1 防潮堤からの風景（上）と FGB-2 孔の櫓.....121

写真 3-3- 1　令和 3 年度と 4 年度の水中スピーカー（大型）の外観の比較.....177
写真 3-3- 2　発振器固定フレーム.....179
写真 3-3- 3　固定フレームに取り付けられた水中スピーカー.....179
写真 3-3- 4　大型水槽に沈めた水中スピーカー（測定中）.....179

写真 3-3- 5　制作した水中翼 182
写真 3-3- 6　曳航試験の様子（曳航時） 184
写真 3-3- 7　使用した水中翼（左から小、中、大） 184
写真 3-3- 8　ブイの状態（左　空気抜き前、右　空気抜き後） 184
写真 3-3- 9　使用した水中スピーカー（左：大型、右：小型） 189
写真 3-3- 10　使用したストリーマーケーブル（左：48ch、右：24ch） 189
写真 3-3- 11　使用した GPS（左：船位測定用、右：受信器位置の測定用.....189

第４章　沿岸海底下特有の地質環境に着目した工学技術の高度化

４－１　はじめに

（１）実施概要

概要調査段階以降に必要となる工学技術の高度化の観点では、平成 27 年度の沿岸部処分システム高度化開発において、沿岸部における処分システムの構築を念頭に、沿岸部の特性などに関連したこれまでの地層処分研究開発の成果の再整理を行い、再検討が必要な課題などが抽出・整理された（産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 2016）。これらの整理結果は、並行して進められた「沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会」（以下、沿岸部研究会とする）に適宜提供され、平成 28 年 8 月の同研究会のとりまとめでは、“海域を含めた沿岸部において地層処分を実現するために必要な基本的な技術は概ね整備されている”としつつも、“今後、技術の高度化に引き続き取り組むことで、さらに信頼性を高めることが重要である”と結論付け、併せて技術の高度化に向けて取り組むべき課題とその方向性が示された（沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会, 2016）。工学的対策技術は、沿岸部における技術的な対応の可能性に関して塩水環境下における性能の確認が必要とされ、これは化学場の影響を考慮した人工バリアの設計に資するものと位置づけられている。

このような沿岸部研究会における議論を踏まえ、平成 28 年度からの 3 ヵ年に、工学技術の高度化に向け、設計や施工等のエンジニアリングや操業中の安全確保への反映、及び閉鎖後の長期挙動評価への反映の２つの観点から、海水や海水を希釈した塩水等を考慮した環境下での構成要素もしくは構成材料(オーバーパック、緩衝材、セメント系材料)の各種特性に関する「①人工バリア材料等に関する劣化や変質に関する現象の把握(各種特性等のデータ拡充)」、及び溶液型グラウト材の海水下での適用性や総合的な評価方法に関する「②塩水環境下ニアフィールド(NF)領域での処分システムの成立性に係る手法の提示」について検討を進めた（産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 2019）。

地質環境調査技術によって得られる沿岸部の初期ベースラインは、地下施設の建設・操業に伴う坑内湧水の排水等によって擾乱を受ける。特に沿岸部では、浅部の塩水系地下水の影響など、操業期間中の水理及び化学場の擾乱を注意深く評価する必要がある。沿岸海底下に処分場が建設される場合、処分場建設に伴う地下水の流入や我が国の多様な海底地下水の水質の幅を対象とした、坑道建設に必要な支保工等のセメント系材料の変質機構や緩衝材への影響を評価する必要がある。また、NUMO によりとりまとめられた、包括的技術報告書（原子力発電環境整備機構, 2021： 4 章では以降 NUMO-SC とする）では、ジェネリックな環境での地層処分の実現性が示され、第 4 章の処分場の設計と工学技術では、処分場の設計について、所要の安全機能を確保するための設計の考え方や方法論、想定される建設・操業・閉鎖の手順、およびそれらに適用する技術の工学的な実現性が示された。沿岸部

環境に関しては、海水相当の地下水での実現性が示されており、多様な地下水に対応すべく、データの拡充が望まれるものと考えられる。

そこで、平成 30 年度までの成果を踏まえ、平成 31 年度から令和 3 年度の本事業では、処分場建設に伴う浅部地下水と深部地下水の混合や湧水等への影響に係る水理場の解析技術及び処分場の成立性に関する手法の整理、また、既存情報等から我が国の海底下の地下水水質の幅を整理し、その幅の中での坑道建設から再冠水に至るまでの坑道建設に必要な材料の変質機構や緩衝材への影響の定量化とその対策技術に関する検討を実施してきた（産業技術総合研究所, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 2020; 2021; 2022）。

令和 4 年度は、セメント系材料および緩衝材の沿岸部における地下水に関わる機能等の変遷についてのデータの取得や解析手法の検討を実施し、現象理解とそれに基づくデータ拡充や評価手法の整備を進めた。実施した項目は以下の通りである。

・セメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充（４－２節）
・緩衝材の機能変化に係るデータの拡充（４－３節）
・緩衝材-オーバーパックの相互作用と緩衝材仕様に関わるデータの拡充（４－４節）

（２）廃棄体周辺の状態変遷と研究の位置づけ

本事業では、沿岸海底下特有の地質環境に着目し、緩衝材や支保工の変質や機能変化に係る知見拡充を通じて、設計に加え性能評価等への反映を意識した工学的な検討を行う。本事業以外にも地層処分研究は幅広く進められている中、ここでは沿岸海底下特有の事象として建設初期から海水系地下水が処分施設の構成要素に浸透することに着目すると共に、建設から再冠水完了までの期間を主な対象とする。

沿岸部処分において構成要素に作用する外的要因を整理したものを図 4-1- 1 に例示する。坑道については支保工（セメント系材料）による空洞安定性、緩衝材（ベントナイト系材料）については核種移行抑制機能としての低透水性や自己シール性などが設計要件として求められる（NUMO、2021）。高レベル放射性廃棄物処分の竪置きもしくは横置きの設計を想定するならば、廃棄体発熱は緩衝材に、岩盤中地下水の水質は支保工と緩衝材に作用し、要求性能に影響を及ぼす外的要因になると考えられる。支保工と緩衝材が隣接しない場合には、海水系地下水が支保工や埋戻し材を通過し、水質を変えて緩衝材に到達することも考えられる。すなわち、緩衝材に侵入する地下水については、その時期と水質に多様性が見込まれる。

構成要素と外的要因の相互作用を踏まえ、海水系地下水の浸潤を起点とした時に、支保工または緩衝材において想定される状態変遷の概念図を図 4-1- 2 と図 4-1- 3 に例示する。状態変遷の概念図の作成経緯については Appendix を参照されたい。支保工については、地下水が支保外表面を流動する場合と、支保内部に浸透する場合があり、それぞれ支保工の岩盤側から徐々に化学的変質部が拡大し、健全部は減少すると予想される。こうした不均一な変

質の進展に対し、支保全体の力学特性を踏まえて空洞安定性を評価するには、化学的変質部の拡大を段階的に捉える必要がある。すなわち、著しい強度低下を伴わない変質部の拡大から、著しい強度低下を伴う変質部の拡大へと段階が変わるものと考えられる。緩衝材は、海水系地下水と接触することにより、飽和度の上昇とイオン交換反応が同時に進行する。岩盤側から徐々に飽和度が上昇するとベントナイト系材料の膨潤が生じ、オーバーパックー緩衝材や緩衝材ー岩盤の間等に存在する隙間は緩衝材の自己シール性能によって閉塞されると予想される。ベントナイト系材料のイオン交換反応も岩盤側から廃棄体側に向かって徐々に進行し、一定の水質で海水系地下水が供給され続ければいずれ平衡に至る。水質に関して、例えば竪置きの設計であれば岩盤中の海水系地下水がほぼ直接的に緩衝材に流入する可能性は高く、一方で、支保工を通過した地下水が緩衝材に到達する可能性も考えられる。流入経路や時期に依って海水系地下水の水質が変動すれば、それとの平衡に向かってイオン交換反応は進行する。そのため、イオン交換反応が生じうる時間スケールは大きい。緩衝材中でこうした変化が生じている段階を含め、オーバーパックと緩衝材の相互作用は生じるものと考えられる。例えば、緩衝材の膨潤や圧密によりオーバーパックが移動すれば、緩衝材にはひずみ分布が生じる。先述したイオン交換反応と重畳することで、緩衝材中に交換性陽イオン組成や乾燥密度の分布が残留する可能性や、物質移行の卓越部（せん断帯）が形成される可能性が考えられる。こうした緩衝材内部で不均一に進行する状態の変化を透水係数と関連づけることが、放射性核種の移行を評価するうえで重要であると考えられる。

状態変遷の概念図を念頭に、本事業で行う研究は以下のように位置づけられる。支保工については、多様な地下水水質の想定に対して、建設から閉鎖までの空洞安定性を満足する支保工の選定や耐久年数を説明するために、変質後の力学特性の評価が重要となる。そこで本事業では、前述した地下水流動のパターンを考慮し、海水系地下水と接触したセメント系材料の化学変質と力学特性の変化を実験的に検討する。支保工内で生じる状態変遷を時空間的に評価することを目指し、数値解析手法の開発も並行して行う。緩衝材については、多様な地下水水質の想定に対して、移行抑制機能を維持できる緩衝材仕様あるいは水質の条件を明確にするために、緩衝材中でのイオン交換反応の予測とそれが低透水性や自己シール性などに及ぼす影響の評価が重要になる。そこで本事業では、高イオン強度かつ多様なイオン組成の水質条件のもとイオン交換選択係数に関する基盤的な検討を進め、ベントナイト系材料におけるイオン交換反応の予測精度を向上させる。そして、ベントナイト系材料の透水特性や膨潤変形挙動に及ぼすイオン交換やイオン強度の影響を分析する。水質は、流入経路や時期に依存した不確実性があることから、本事業では現海水のイオン組成を基本条件とし、その端成分や希釈・濃縮倍率、セメント系材料との反応を考慮する。緩衝材とオーバーパックの相互作用については、外的因子として廃棄体発熱も考慮し、模型試験により調べる。模型試験では計測しきれない局所的な変形や透水現象があることから、別途、要素試験を行い、せん断帯が緩衝材の透水性に与える影響の有無について検討する。以上に加え、緩

衝材中の状態変遷を時空間的に評価することを目指し、再現解析を通じた数値解析手法の妥当性についても並行して検討する。

状態変遷の概念図には、廃棄体側の緩衝材を想定した高温下での吸水膨潤過程など本事業では実施しない課題的項目も示している。今後の課題を含め、状態変遷の概念図を意識しながら上述した検討を進めることにより、多数ある課題の相互関係が明確となり、抜けのない検討が可能となる。それにより、熱的・水理学的・力学的・化学的挙動に対する予測精度が高まり、性能評価や設計等へ反映されることや、安全評価におけるより確からしい状態設定につながることが期待される。

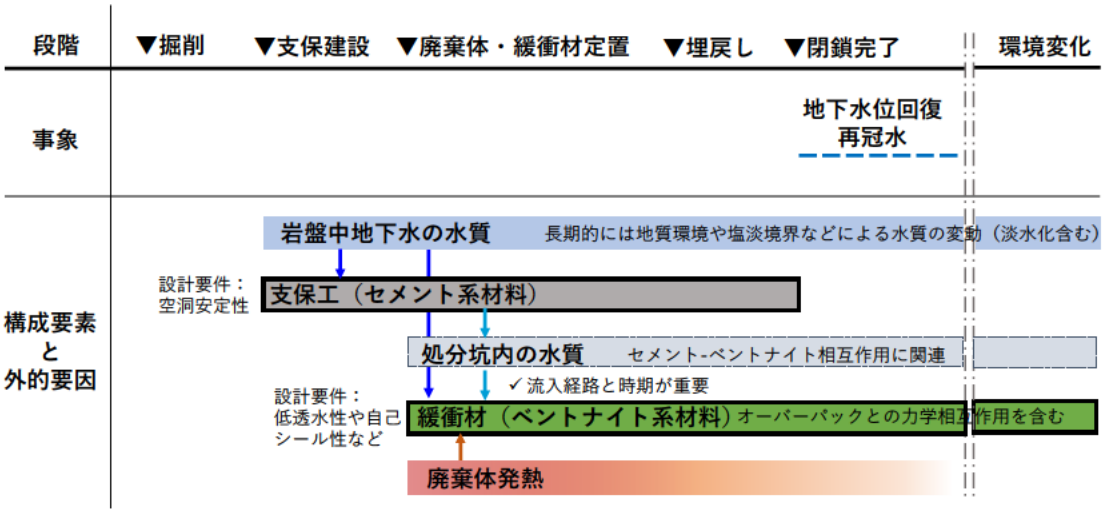


図 4-1- 1　沿岸部処分において構成要素に作用する外的要因の整理
（研究の位置づけ等を整理するために作成したイメージ）

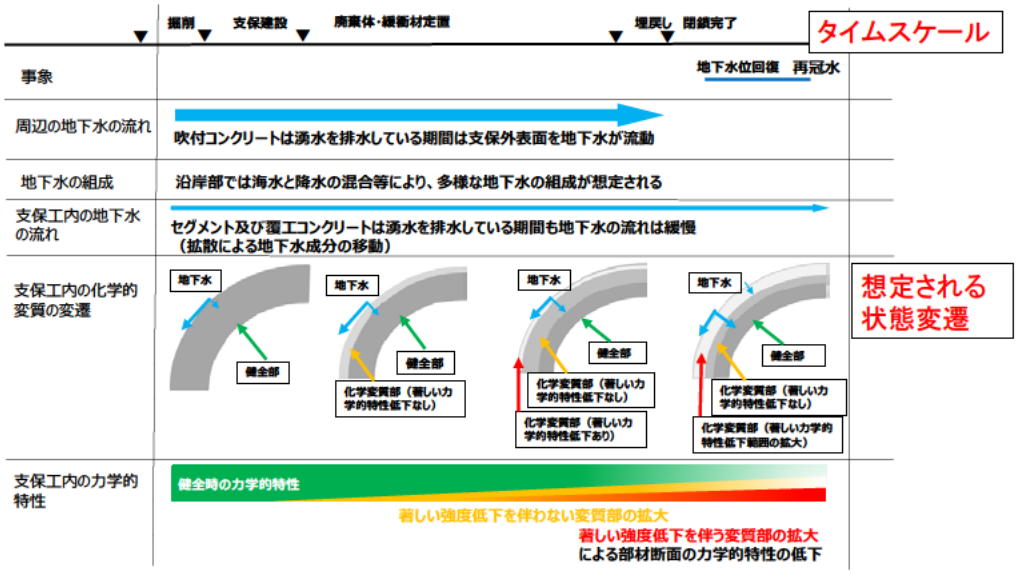


図 4-1- 2　支保工において想定される状態変遷の一例
（研究の位置づけ等を整理するために作成したイメージ）

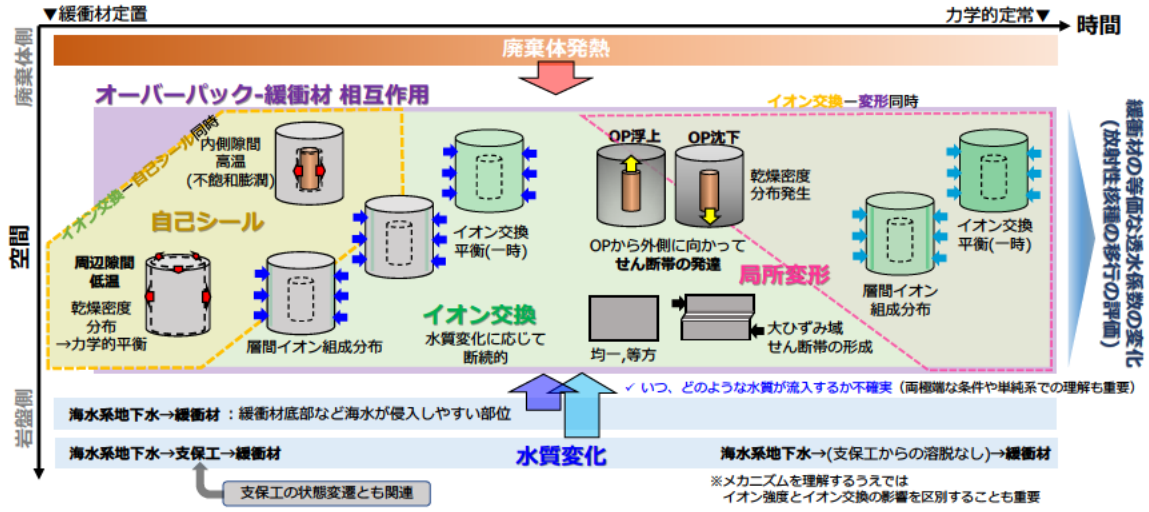


図 4-1- 3　緩衝材において想定される状態変遷の一例図
（研究の位置づけ等を整理するために作成したイメージ）

参考文献

沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会，とりまとめ，2016, https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/engan_kaiteika/report_01.html（最終確認　2023.03.01）

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－，(2021), NUMO-TR-20-03.

産業技術総合研究所，日本原子力研究開発機構，原子力環境整備促進・資金管理センター，電力中央研究所，平成 27 年度地層処分技術調査等事業（沿岸部処分システム高度化開発）報告書，2016.

産業技術総合研究所，日本原子力研究開発機構，原子力環境整備促進・資金管理センター，電力中央研究所，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（沿岸部処分システム高度化開発）平成 27 年度～平成 30 年度取りまとめ報告書，2019.

産業技術総合研究所，原子力環境整備促進・資金管理センター，電力中央研究所，平成 31 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（沿岸部処分システム評価確証技術開発）成果報告書，2020.

産業技術総合研究所，原子力環境整備促進・資金管理センター，電力中央研究所，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（沿岸部処分システム評価確証技術開発）成果報告書，2021.

産業技術総合研究所，原子力環境整備促進・資金管理センター，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（沿岸部処分システム評価確証技術開発）成果報告書，2022.

４－２　セメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充

（１）はじめに

①　背景及び目的

沿岸部における地層処分では、塩水の影響や海陸接合部などの沿岸部固有の環境が想定される。沿岸海底下に処分場が建設される場合、建設段階から処分場の閉鎖までの期間に渡って空洞安定性を維持する必要があるため、支保工・覆工を構成するセメント系材料は、吹付けコンクリート（以下、「吹付けコン」）、覆工コンクリート、セグメント（シールド工法が採用された場合）が候補材料とされ、特に主要坑道、連絡坑道、アクセス坑道（立坑・斜坑）については、覆工コンクリートを設置することを基本（NUMO-SC）としている。しかし、それらのセメント系材料で構成される支保及び覆工に関しては、**図 4-2- 1** に示すように、岩盤側からの地下水との接触による化学変質とそれに伴う力学的特性の変化が懸念されているが、現状ではその現象に関する知見について、

- セメント系材料の地下水による化学変質に関するデータはあるが、それに伴う強度変化に関するデータは少ない。
- 人工海水やそれを希釈した溶液でのデータはあるが、沿岸部の多様な地下水組成に対応するデータは少ない。

といった課題がある。

そこで本業務では、沿岸部に特有な地下水化学環境を念頭に置き、処分場の設計に資する情報として、セメント系材料の化学変質と力学的特性の関係を体系的に整理し、解析的な予測手法を整備することを目的に、以下の検討を進めた。

- セメント系材料の化学変質に伴う力学的特性に関する検討
- 現実的な材料及び条件における変質挙動と力学的特性に関する検討
- 地下水や材料の種類に応じた強度推定手法の検討

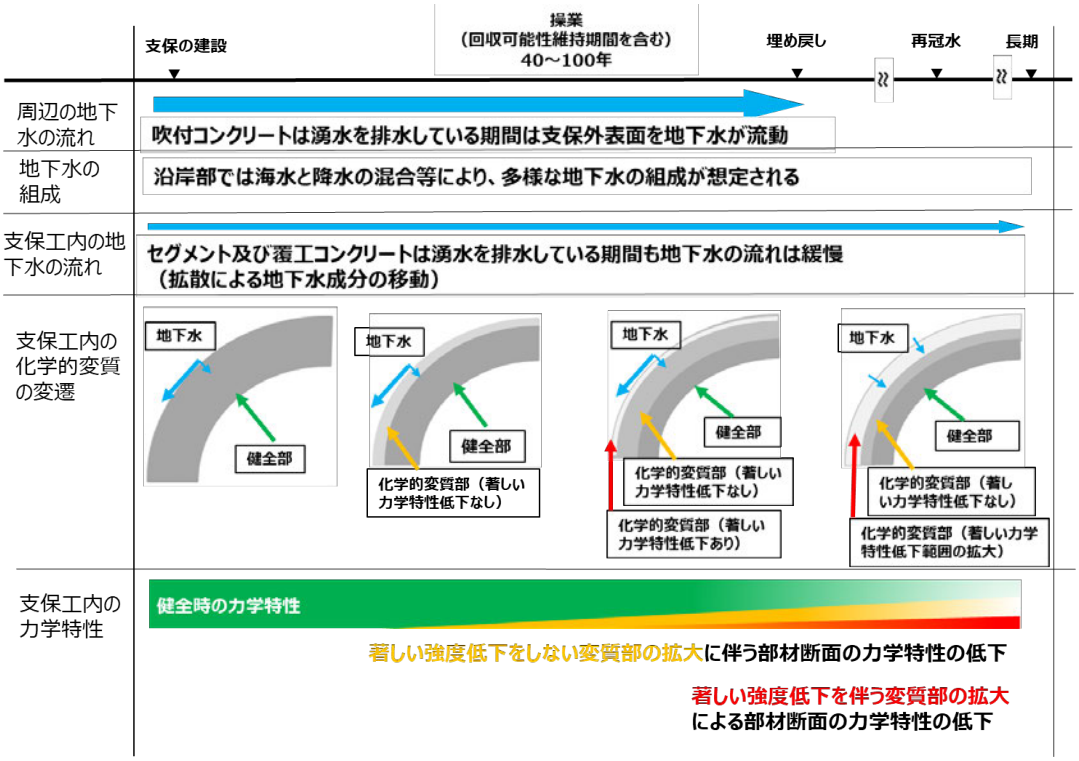


図 4-2- 1　坑道の支保工及び覆工の状態変遷と維持期間のイメージ

② 課題とアプローチ及び成果の目標

本フェーズの検討課題と研究のアプローチ及び成果の目標を**図 4-2- 2** に、年度展開を表 4-2- 1 に示す。

平成 30 年度までに、陸域からの地下水の海水への混合を想定し、希釈した人工海水にセメントペースト試料を浸漬し、化学変質と力学的特性に関するデータを取得して知見を整理してきた。その結果、セメントペースト試料の接液面の固相外側に $Mg(OH)_2$ 及び $CaCO_3$ といった二次鉱物が生成し、内部の化学変質を抑制する現象が認められた。塩水化学組成により、試料表面や空隙内に生成する二次鉱物の種類や量などの化学変質が異なり、それにより力学的特性の変化が異なる可能性が示唆された。これまでに、同じ溶液に浸漬した試料においても、接液面の二次鉱物が成長しひび割れが発生した例と、目視上、成長が見られずひび割れが発生しない例とが混在しているケースがあった（産業技術総合研究所、日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、電力中央研究所, 2017; 2018; 2019）。また、海洋環境下に浸漬されたコンクリートについて、接液面に二次鉱物が生成している試料と生成していない試料の両方が存在している報告例(Jakobsen, et al., 2016)があり、セメント系材料の外側に生成する二次鉱物の生成条件や生成後の挙動は明確ではない。

沿岸部の地下水は様々な化学組成が存在する（産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 2018）。しかし、淡水と塩水の混合や水－岩石反応により、海水及び希釈された海水の組成比から外れた地下水におけるセメント系材料の化学変質のデータは少ない。そのため、沿岸部の地下水の化学組成を整理し、生成する二次鉱物を把握し、その影響を整理する必要がある。

試験に使用するセメントの種類は、普通ポルトランドセメント（以下、「OPC」という）、高炉スラグセメント（以下、「BFSC」という）及びフライアッシュセメント（以下、「FAC」という）とした。塩水環境におけるトンネル工事で OPC と BFSC の使用実績が多いこと、既往の検討結果（産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 2017; 2018; 2019）より、BFSC と FAC では、化学変質は比較的同様な傾向を示すと考えられることを踏まえて、試験水準の計画に当たっては BFSC を優先して選択した。

また、これまで主に変質現象が生じるセメントペーストでの試験データが多く取得され、実際に使用が想定されるモルタル及びコンクリートでのデータが少ないため、それらの変質に伴う力学的特性の挙動の把握が必要である。また、セメントに急結剤を添加した吹付けコンクリートや、蒸気養生などで硬化を促進した工場製品であるセグメントは、それぞれ化学変質などに関するデータが少ない。

加えて、処分場の成立性評価の試行（産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 2019）において、水理解析結果を用いて試験結果と合わせて評価を行ったが、セメント系材料への水の接触について、解析と

試験条件の整合にも課題があり、現実的条件（セメント系材料と地下水の接触条件など）をふまえてデータを取得していくことも必要である。

本図の（Ⅰ）（４－２（２）セメント系材料の化学変質と力学的特性に関する検討）では、沿岸部の処分場を想定した地下水条件で、セメントペーストの試料の接液面への二次鉱物生成状況を確認し、化学変質と力学的特性の変化に関するデータを体系的に整理する。本図の（Ⅱ）（４－２（３）現実的な材料及び条件における化学変質と力学的特性に関する検討）では、実環境における地下水流動を考慮した条件において、処分場での使用が想定されるコンクリート試料の化学変質及び変質の進展について評価するとともに、変質に伴う力学的特性の変化を把握する。本図の（Ⅲ）では、（Ⅰ）及び（Ⅱ）で得られた結果を基に解析による変質予測及び強度予測手法を整備する。強度推定手法の検討では、地下水や材料の種類に応じた強度推定手法の構築を目的とし、相平衡計算と物質移行計算を連成させた相平衡多元素移動計算コード（Hosokawa et al., 2011）を使用して、地下水とセメント系材料の相互作用による鉱物相変化の計算を行う。計算されたセメント系材料の変質域に対して、試験により確認された鉱物相の変質に伴う力学的特性変化を反映させることで、力学的特性が変化した領域の進展を予測する手法を検討する。

令和 4 年度は、（Ⅰ）セメントペースト試料を用いて多様な組成の地下水への浸漬試験を継続するとともに、駿河湾で採取した実地下水に 10 箇月間浸漬したセメンペースト試料より化学変質と力学的特性の関係に関する試験データを取得した。力学的特性は微小領域の変化を評価するためナノインデンテーション法による硬度を測定した。また、令和 3 年度に実施した多様な模擬地下水に 3 箇月間浸漬した試料についてもナノインデンテーション法による力学的特性データを取得し、地下水の化学成分とセメント系材料の種類による化学変質と力学的特性の関連について体系的にデータを取得した。

（Ⅱ）吹付けコンクリート試料はフロースルー法による試験を、セグメントコンクリート試料は浸漬法による試験を継続する。化学変質の確認のための分析及び変質部の力学的特性の確認のためナノインデンテーション法による硬度測定を実施し、処分場における部材周辺の現実的条件（セメント系材料と岩盤との接触部付近での地下水流動など）におけるコンクリートの化学変質と力学的特性の関係を把握した。

（Ⅲ）試験で得たセメント系材料の化学変質挙動と力学的特性の関係について、マップ図などによる体系的な整理の支援となり得る解析的な予測手法を構築し整備することを目的に、令和 3 年度に検討した相平衡多元素移動解析コードを使用して試験結果の再現解析により検討した。（Ⅰ）及び（Ⅱ）の試験において試料の外部に析出物が生成（以下「外部析出層」という）ケースとしないケースが確認されているが、外部析出層の生成がセメント系材の化学変質や力学的特性に影響を与える可能性がある。そこで、外部析出層の無い試験結果と外部析出層の有る試験結果について外部析出層を考慮しない解析を実施することでコードの検証を実施するとともに、外部析出層の影響を確認した。また、アメリカ国立標準技術研究所(NIST)が開発した Virtual Cement and Concrete Testing Laboratory (VCCTL)モ

デルを用いて、セメントペーストの水和物の分布を三次元的に模擬して計算し、弾性係数及びポアソン比の推定を行い、細骨材及び粗骨材の情報を組み合わせることで、モルタル及びコンクリートの強度予測モデルを構築した。ペースト、モルタル及びコンクリートの各試験体を作製し、材料の組成や強度などの分析を実施し解析結果と比較することで解析結果の確からしさや見通しについて検討するとともに課題を抽出した。

セメント系材料の化学変質と力学的特性に関する検討では、沿岸部の地下で想定される地下水と支保工や覆工に使用されるセメント硬化体の変質や力学的特性に与える影響についてマップ図などによる体系的な整理を行うことを目標とする。具体的には、吹付コンクリートやセグメントを想定したセメントペーストの化学変質と力学的特性の変化ついて影響の大きい地下水成分に着目し、支保工に使用されるセメントの種類及び工法（使用方法）について整理し、地下水成分に対して適性の有る材料選定に資する情報整備を目指す。

現実的な材料及び条件における化学変質と力学的特性に関する検討では、セメントペーストの化学変質及び力学的特性に影響の大きい模擬地下水に、地下水の流動の状況を模擬した浸漬試験を実施し、現実的なコンクリートの変質の進展の評価に資する情報の整備を目指す。また、化学変質の予測と強度の予測解析の検証データを整備する。

地下水や材料の種類に応じた化学変質予測と強度推定手法の検討では、様々な地下水の化学成分に対する支保工維持期間を目途とした化学変質解析の検証を実施し、解析結果の信頼性を向上する。外部析出層が化学変質に与える影響を明らかにするとともに、化学変質への影響が確認されてた場合には、外部析出層を有するコンクリートの化学変質解析方法について調査し、対策を提案する。また、化学変質後のコンクリートの強度の予測手法として可能性がある解析コードを調査、選定し、第一段階として健全なコンクリートの強度予測を実施してコードの適用性を明らかにする。

処分施設の地下水環境が明らかになった時点で化学変質解析を実施し、地下水成分との反応による支保工の化学変質領域の時間変化の評価を可能とする化学変質解析モデルの構築しする。化学変質を伴う地下水環境で処分施設を建設する場合、供用期間中に生じる化学変質に伴う力学的特性の低下する厚さを考慮して支保の設計を実施する必要があると考えるが、化学変質に伴う力学特性の低下について過度な保守性（安全率）を排除した合理的な施設の設計を可能とする情報提供を目指す。地下水の化学成分の特徴から、化学変質に対してより耐久性の高いセメントの種類や配合などについて具体的な提案が可能となるように、コンクリートの化学変質と力学的特性の関係について情報の整備を行う。また、将来は化学変質解析の結果を基に化学変質後のセメント水和物の組成からコンクリートの圧縮強度を推定する手法の確立を目指す。

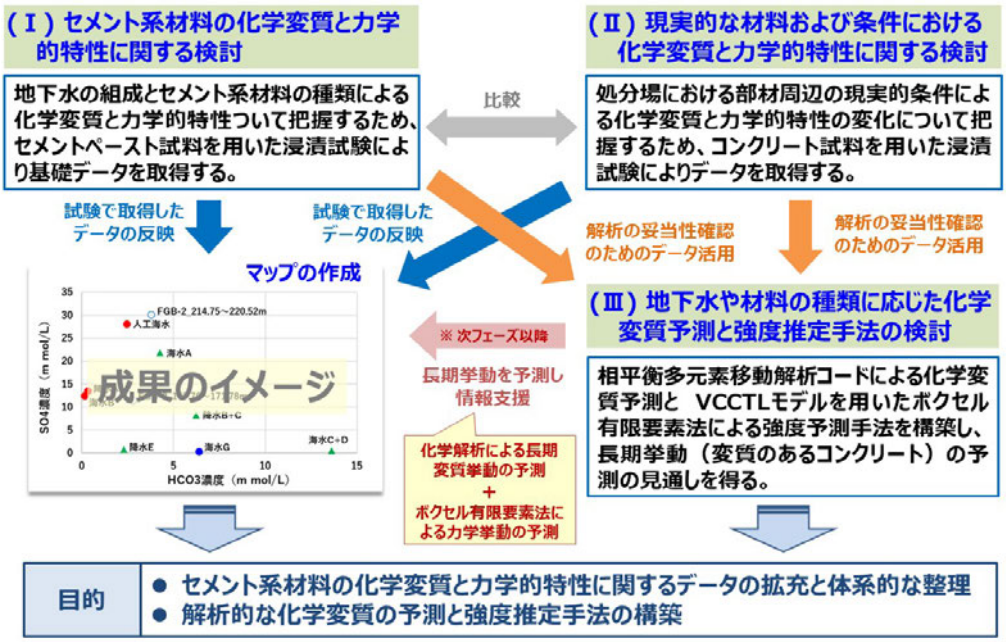


図 4-2- 2　今フェーズの検討課題と研究のアプローチ及び成果の目標

表 4-2- 1　本フェーズの年度展開

	平成31年	令和2年	令和3年	令和4年	令和5年
（Ⅰ）セメント系材料の化学変質と力学的特性に関する検討	地下水組成・試験方法の調査、試験計画の立案、試験体作製	・初期状態の分析 ・簡易試験	浸漬試験開始 データ取得	データ取得	まとめ
（Ⅱ）現実的な材料および条件における化学変質と力学的特性に関する検討	地下水組成・試験方法の調査、試験計画の立案、試験体作製	・初期状態の分析 ・浸漬試験開始	浸漬試験開始 データ取得	データ取得	まとめ
（Ⅲ）地下水や材料の種類に応じた化学変質予測と強度推定手法の検討	強度推定手法の情報収集	強度推定手法の検討		解析による化学変質予測の検討 強度推定手法の検討	まとめ まとめ
成　果 （アウトプット事項）	(令和2年へ反映)	・地下水の組成と化学変質の関係について既往の知見を整理	・試験で得られた化学変質と力学的特性に関するデータの拡充	・試験で得られた化学変質と力学的特性に関するデータの拡充	・設計に資する情報として体系的にデータを整理

③　分野間連携

令和３年度より、分野間連携の一環として、３ - １節「陸域から海域にかけての地質環境特性の把握」において令和３年度採水した FGB-2 ボーリング孔の実地下水を使用し、室内試験で取得したデータの検証や実際の地下水でのデータの拡充のため、４－２（２）浸漬試験、４－２（３）フロースルー試験及び浸漬試験を開始した。また、実際の地下水は、人工海水及び人工海水を希釈した模擬地下水と比べ、微量の化学成分なども含むため、それらのセメント系材料の化学変質や力学的特性への影響について把握した。

（2）セメント系材料の化学変質と力学的特性に関する検討

① 目的

令和 4 年度は、地下水の組成とセメント系材料の種類による化学変質と力学的特性の関係について把握することを目的として、セメントペースト試料を用いて多様な組成の地下水への浸漬試験を実施し、化学変質を確認するための分析と変質部の力学的特性の確認のためナノインデンテーション法による硬度測定を実施した。

② 試験方法

セメント系材料の化学変質と力学特性に関する検討は、沿岸海底下で想定される地下水にセメントペースト試料を浸漬し、接液面近傍のセメントペースト試料の化学変質の状況を分析するとともに、接液面近傍の力学的特性としてナノインデンテーション法による硬度とヤング率を測定し、化学変質と力学的特性に関する知見を得た。沿岸海底下で想定される地下水の化学組成は、沿岸海底下の実地下水の分析結果を基に設定し、コンクリートの力学的特性への影響を考慮して浸漬液の組成を選定した。

(a) セメントペースト試料の浸漬試験の条件

セメントペーストの浸漬試験の条件を表 4-2- 2 に、試験の模式図を**図 4-2- 3** に示す。試験体は 20 mm × 20 mm × 長さ 40 mm とし、切断面の一面を接液面にしてその他の面を被覆した。浸漬液量は試料 1 個あたり 500 ml とし密閉容器に封入した。

表 4-2- 2　浸漬試験の試験条件

項目		詳細
試験体条件	試料形状	開放面 20 mm 角、長さ 40 mm
	開放面	切断面
	前養生	常温水中、3 か月以上
浸漬試験条件	浸漬液量	500 ml / 試料
	接液面状態	開放面を下向き静置

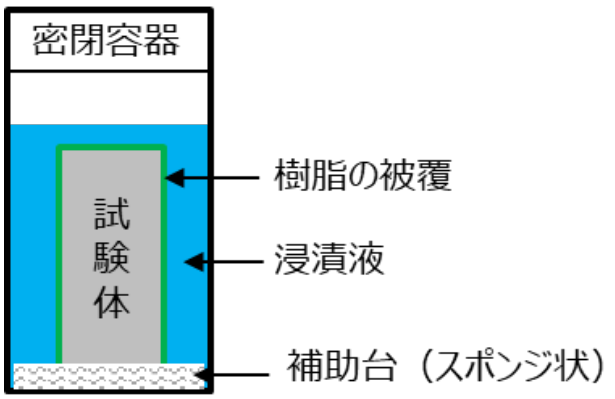


図 4-2- 3　浸漬試験の模式図

(b) 試験水準

令和 3 年度より浸漬を開始したセメントペースト試料による浸漬試験の水準を表 4-2- 3 に示す。

試験に用いるバルクのセメントペーストは、吹付コンクリートのセメントペースト部分を想定した試料（以下、「吹付け想定」とういう）とセグメントのペースト部分を想定した試料（以下、「セグメント想定」という）とした。これは、令和 2 年度までの検討結果（産業技術総合研究所, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所,2020;2021）より、処分場で使用が想定されるコンクリートのうち、吹付けコンの変質に関する知見が少ないこと及びセグメントと現場打設コンクリートのペースト部分に相当する試料の空隙径分布や鉱物相は同様であり、セグメントは工場製品のため化学変質に対する知見が少ないことを踏まえて選択した。セメントの種類は、OPC 及び BFSC とした。これは、塩水環境におけるトンネル工事で OPC と BFSC の使用実績が多いこと、また既往の検討結果（産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所,2017;2018;2019）より、BFSC と FAC の変質は同様の傾向を示すと考えられることから選択した。

- 令和3年度にマイクロビッカース硬度測定を実施した浸漬期間3箇月の試料(表中の○)について、より精緻な力学的特性のデータを取得するためナノインデンテーション法による硬度測定を実施した。
- 実際の地下水を使用することで模擬地下水による試験の妥当性の確認や実海水のデータを拡充する目的で、分野間連携を活用し駿河湾で採取した 2 種類の実地下水 FGB-2_167.70～171.78 m 及び FGB-2_214.75～220.52 m による浸漬試験を令和 3 年度に開始した。令和 4 年度は、浸漬期間 10 箇月の試料（表中の●）の分析及び硬度測定を実施した。

表 4-2- 3　セメントペースト試料による浸漬試験の水準

項目	試験名	セメントペースト試料の浸漬試験											
	コンクリートの種類	吹付け想定						セグメント想定					
	セメントの種類	OPC			BFSC			OPC			BFSC		
	浸漬期間（箇月）	3	10	20	3	10	20	3	10	20	3	10	20
海水系	人工海水	○*1		△	○		△	○		△	○		△
	B	○*1		△	○		△	○		△	○		△
	G	○*1		△	○		△	○		△	○		△
降水系	A	○*1		△	○		△	○		△	○		△
	D＋F	○*1		△	○		△	○		△	○		△
実地下水	FGB-2_167.70～171.78 m		●*1			●*1			●			●	
	FGB-2_214.75～220.52 m		●*1			●*1			●			●	

○：令和 3 年度に実施済み、令和 4 年度にナノインデンテーションによる力学的特性データを取得

●：令和 4 年度に分析及び硬度測定を実施

△：令和 4 年度は継続し令和 5 年度に分析予定

*1：接液面近傍の微細領域の元素分布（SEM-EDS）の測定を実施

(c)　試験に用いたセメントペースト試料

試験に使用したセメントペースト試料の材料を表 4-2- 4 に、セメントペースト試料の構成割合を表 4-2- 5 に示す。

試験に用いるバルクのセメントペーストは、吹付け想定及びセグメント想定の試料とした。試料の水セメント比（以下、「W/C」という）は、実際に施工されているコンクリートを参考に、吹付け想定のセメントペーストは W/C=45wt%、セグメント想定のセメントペーストは W/C=40wt%とした。

また、BFSC に占めるスラグの割合は 45wt%とし、吹付け想定のセメントペーストには、急結剤を 6.5wt%混合した。

表 4-2- 4　セメントペースト試料の材料

材料			詳細	密度 (g / cm^3)
練水	W	上水	-	1.00
セメント	C	普通ポルトランドセメント	太平洋セメント製	3.16
混和材	BS	高炉スラグ	関東エスメント社製：エスメント 4000	2.89
急結剤	A	急結剤	太平洋マテリアル社製：太平洋ショットマスターA（高強度用、セメント鉱物系）	−

表 4-2- 5　セメントペースト試料の構成割合

想定コンクリート	試験体の種類	混和材/粉体(%)	W/C (%)	ペースト材料の構成割合（wt%）			
				W	C	BFS	A
吹付け	OPC	−	45	29.0	64.5	−	6.5
	BFSC	45	45	29.0	35.5	29.0	6.5
セグメント	OPC	−	40	28.6	71.4	−	−
	BFSC	45	40	28.6	39.3	32.1	−

W:上水、C：OPC、BFS：高炉スラグ、A：急結剤

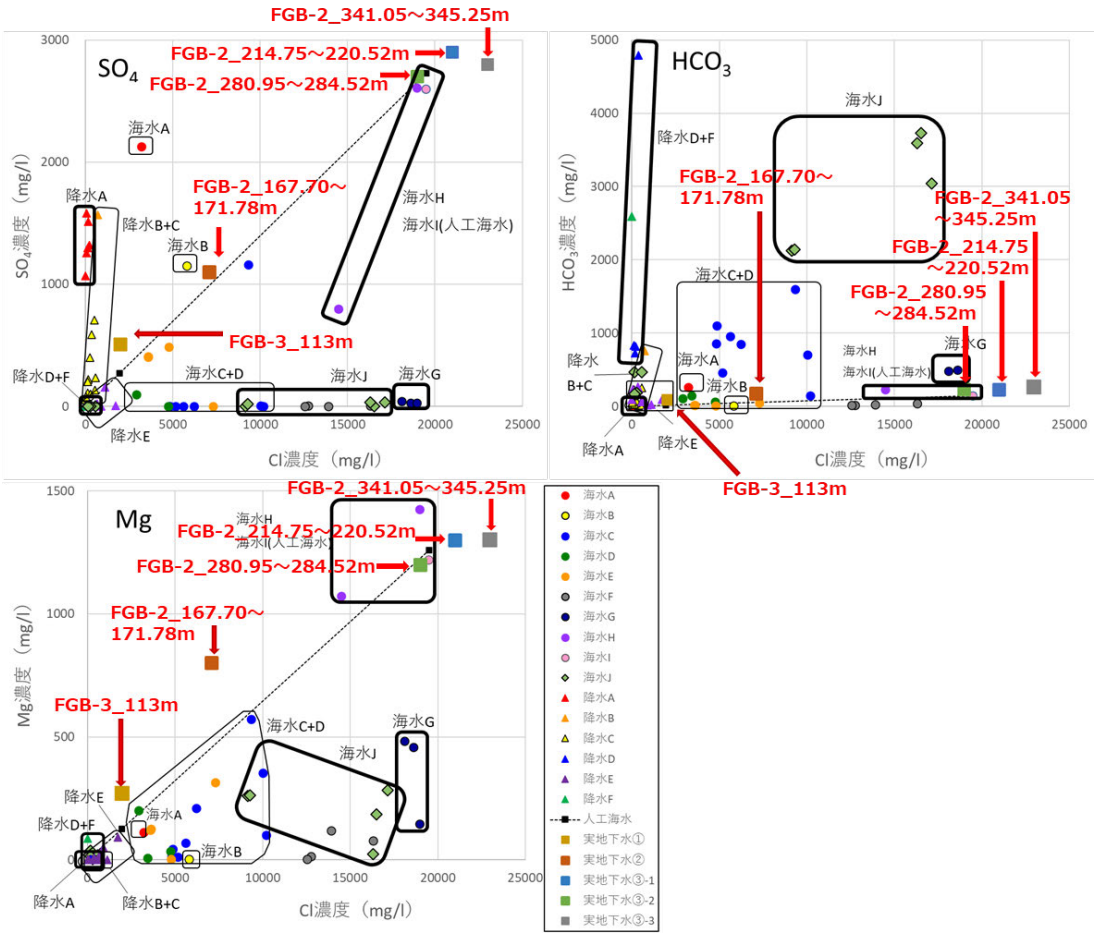
(d) 試験に用いた浸漬液

(i) 模擬地下水の化学組成

分類した地下水の化学組成を**図 4-2- 4** に、模擬地下水の化学組成を表 4-2- 6 に示す。

これまでに、陸域からの地下水と海水系地下水の混合を想定し、希釈した人工海水にセメントペースト試料を浸漬し、化学変質及び力学的特性に関するデータを取得して知見を整理してきた（産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 2019）。その結果、地下水の化学組成により、試料表面や空隙内に生成する二次鉱物の種類や量などの化学変質が異なり、それにより力学的特性の変化が異なる可能性が示唆され、令和 3 年度に、平成 31 年度に整理した 62 地点の地下水の化学組成データ（産業技術総合研究所, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 2021）に加え、11 点のデータを加えて地下水の特徴を再整理した。

人工海水と希釈した人工海水の試験結果から、塩濃度の高い溶液に浸漬した試料の化学変質が著しい結果となるわけではないこと、グループ化した地下水の濃度は、沿岸海底下の実環境で実際に採取した地下水の分析結果であることを踏まえて、持ち地下水の化学成分濃度はグループ化した地下水の化学成分濃度の中央値（最大値と最小値の中央）とした。



図では便宜的に定量下限値未満のデータを 0 mg/L として表示している。

図 4-2- 4　分類した地下水の化学組成

表 4-2- 6　模擬地下水の化学組成

成分濃度(mg / L)							
地下水名	Na	Cl	SO_4	HCO_3	K	Ca	Mg
人工海水（海水 I）	11,000	20,000	2,700	150	420	390	1,300
海水 A	3,178	3,200	2,100	260			
海水 B	4,339	5,800	1,200	9			
海水 C+D	4,616	6,600	49	830			
海水 G	12,487	19,000	37	390			
海水 J	9,608	13,100	18	2,930			
降水 A	714	130	1,300	20			
降水 B+C	755	360	790	380			
降水 D+F	1,183	190	10	2,800			
降水 E	655	870	79	140			

※人工海水は、八洲薬品社、金属腐食試験用アクアマリンを使用。

(ii)　実地下水の前処理方法と分析結果

実地下水の分析結果を表 4-2- 7 に、希釈した人工海水と比較した FGB-3_113 m のヘキサダイヤグラムを図 4-2- 5 に示す。

３－１節「陸域から海域にかけての地質環境特性の把握技術の高度化」において令和 4 年度に FGB-3 ボーリング孔から採水した沿岸部実地下水を分析した。地下水の調整方法は令和 3 年度に FGB-2 ボーリング孔から採水した沿岸部実地下水と同じ方法で実施し、調整後は 4℃以下の冷暗所で保管した。

地下水の処理の流れを以下に示す。

・ 複数の容器に封入された地下水を大型のポリ容器に試験に必要な液量を入れて混合する。
・ 地下水を大気中で静置して Eh を 1 日 1 回測定し、前日の測定結果との差が小さく、プラス電位であることを確認したのち密封バックに分け入れ、1 日静置する（沈殿物が生成する可能性があるため、静置時間を設ける）。
・ 静置した地下水を 5C ろ紙を用いて、ゴミや沈殿物粒子を取り除き、その後、0.2 μm の親水性 PES メンブレンフィルターの滅菌済みろ過ユニットを用いてろ過を行う。
・ ろ過後の溶液は 1 L の滅菌済みろ過ユニットの受け容器または滅菌済み PP ボトルなどの容器に封入し 4 ℃以下の冷暗所で保管する。
・ 輸送する場合は保冷状態を維持する。
・ 試験に用いる際は、試験環境温度に戻し使用する。

FGB-3_113 m は、FGB-2 の近傍のボーリング孔で、人工海水の Cl 濃度に対して 0.10 倍の Cl 濃度であった。0.10 倍に希釈した人工海水の組成に対して Ca と Mg 濃度が高く Na+K の濃度が低くなっており、SO_4 の濃度はやや高くなっている。FGB-2_167.70～171.78m の濃度比と同様の傾向であった。

表 4-2- 7　FGB-2 及び FGB-3 ボーリング孔の実地下水の分析結果

地下水名	成分濃度(mg / L)						
	Na	Cl	SO_4	HCO_3	K	Ca	Mg
人工海水（参考）	11,000	20,000	2,700	150	420	390	1,300
FGB-2 (EL-100 m)	採取中止						
FGB-2_167.70～171.78 m	2,300	7,100	1,100	178	43	880	800
FGB-2_214.75～220.52 m	10,000	21,000	2,900	230	93	900	1,300
FGB-2_280.95～284.52 m	11,000	19,000	2,700	230	180	570	1,200
FGB-2_341.05～345.25m	11,000	23,000	2,800	260	280	470	1,300
FGB-2_800 m	令和 4 年度採水済、令和 5 年度分析予定						
FGB-3_113 m	610	2,000	510	93	44	380	270

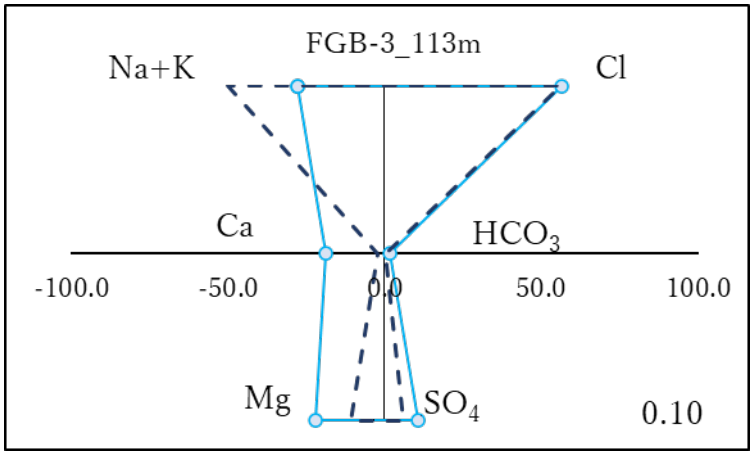


図 4-2- 5　希釈した人工海水と比較した FGB-3_113 m のヘキサダイヤグラム

(iii) コンクリートの力学的特性に影響を与える地下水成分

令和 2 年度に実施したコンクリートの力学的特性に影響を与える地下水の成分を整理した結果を**図 4-2- 6** に示す。

化学変質に影響する塩水化学成分として挙げた成分のうち、地下水に含まれる Ca については、基本的に強度低下につながる化学変質を抑制するものと考えた。したがって、試験に用いる塩水化学組成を判断する過程においては、コンクリートの強度低下の可能性がある化学変質に影響する成分である、HCO_3、SO_4、Mg に主に留意する事とした。また、本検討では、強度の低下への影響を鑑み、以下の化学変質現象を中心に確認する事とした。

- Ca 溶脱：空隙の増加
- 炭酸化：C-S-H の分解による強度低下の可能性、または、pH 低下による鉄筋腐食の促進の可能性（鉄筋コンクリートのみ）
- 硫酸塩化合物の生成：エトリンガイト生成による膨張に伴う強度低下
- Mg 系二次鉱物の生成：M-S-H による強度低下の可能性

なお、セメント系材料の化学変質ではないが、鉄筋コンクリートにおける塩化物イオン浸透による鉄筋腐食については、支保工の強度に影響するため留意する必要がある。

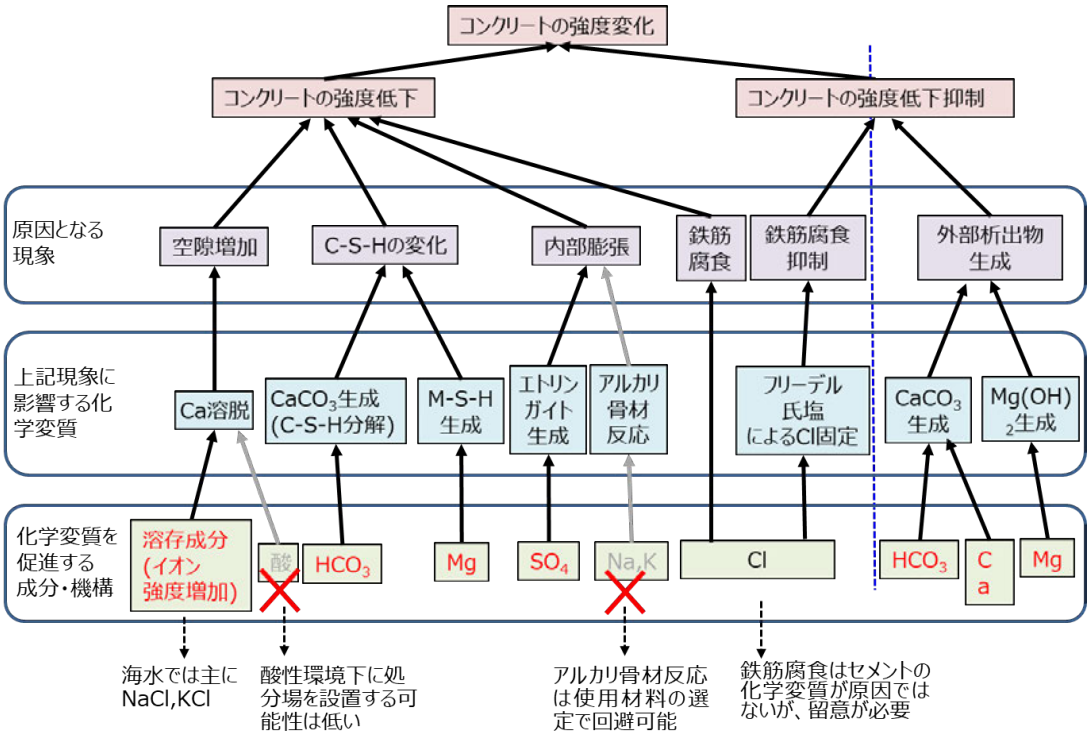


図 4-2- 6　コンクリートの力学的特性に影響を与える地下水の成分の整理

(iv)　試験に用いた浸漬溶液

本試験において試験に使用した地下水の化学組成を表 4-2- 8 に示す。

試験に使用している溶液は、多様な化学組成の地下水からコンクリートの力学的特性に影響を与える可能性のある成分を考慮し、人工海水及び希釈人工海水の組成と比較して各成分の濃度傾向の異なるパターンに類型化した地下水（産業技術総合研究所,原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所,2021）のうち、海水 B、海水 G、降水 A、降水 D+F、人工海水の 5 種類とした。

また、沿岸部地下より採取した実地下水のうち、FGB-2_167.70～171.78 m 及び FGB-2_214.75～220.52 m を使用した試験も実施した。

表 4-2- 8　試験に使用した浸漬溶液の化学組成

成分濃度（mg/L）							
地下水名	Na	Cl	SO_4	HCO_3	K	Ca	Mg
人工海水（海水 I）	11,000	20,000	2,700	150	420	390	1,300
海水 B	4,339	5,800	1,200	9			
海水 G	12,478	19,000	37	390			
降水 A	714	130	1,300	20			
降水 D＋F	1,183	190	10	2,800			
FGB-2_167.70～171.78 m	2,300	7,100	1100	170	43	880	800
FGB-2_214.75～220.52 m	10,000	21,000	2,900	230	93	900	1,300

※人工海水は、八洲薬品社、金属腐食試験用アクアマリンを使用して調製。

(e)　分析項目及び分析方法

(i)　低アルカリ性化領域の測定方法

試料を接液面から鉛直方向に切断し、接液面からの Ca 溶脱や地下水成分との反応による二次鉱物生成に伴う低アルカリ化を、フェノールフタレイン呈色試験により確認した。低アルカリ性化領域の評価は、JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」に従い試験体の変質領域を確認した。主にセメント系材料の炭酸化領域の測定に用いる方法であるが、高 pH の領域で濃い赤紫色を呈し、低 pH（10 以下）の領域で無色 – 薄紫色を呈する性質から、本検討では、Ca の溶脱部や地下水成分との反応で二次鉱物が生成して低アルカリ化した領域の判定に用いた。

(ii)　鉱物相の同定方法

微小部エックス線回折（以下、「μXRD」という）の分析条件を表 4-2- 9 に示す。地下水の化学成分との反応で元素組成分布が変化した部分を変質領域（化学組成が変化した領域）と判断し、変質領域の鉱物組成の変化を確認することを目的として μXRD 測定を実施した。試料は EPMA による元素組成分布の分析を実施した鏡面研磨試料を使用し、化学変質したセメントペースト部分の結晶性鉱物を同定するため μXRD 分析領域は試験体内部の接液面から 300 μm とし、外部析出物の影響を受けないように測定位置を調整した。μXRD は X'Pert PRO MPDP（パナリティカル社製）を使用し、X 線モノキャピラリーを使用して 100 μm に X 線をコリメートし、ターゲット Cu、電圧・電流 45 kV - 40 mA、走査範囲 2θ = 5 - 40°で測定を実施した。

(iii)　力学的特性の測定方法

EPMA 測定に供した試料と同一の試料を使用し、試料断面の変質部と健全部それぞれにおいて、超微小押し込み硬さ試験機（株式会社 Elionix 社製、ENT-1100a）を用いて力学的特性値として硬度及びヤング率を取得した。変質部は、EPMA の結果を参考に接液面から 0.3 mm 程度以内の範囲、健全部は接液面から十分に離れた（30 mm 程度以上）試料端部に近い箇所とした。具体的な測定箇所の選定は、装置付属のカメラ映像に基づき、セメントペースト（C-S-H）と判断される箇所とした。測定点は、選定した測定箇所で 100 点（100 μm 四角）とした。取得した全データを対象として硬度の測定結果は平均値を、ヤング率は箱ひげ図を作成し、四分位範囲（箱の長さ）の値を比較することで健全部と変質部の力学的特性値の変化を整理した。なお、健全部は、海水 G に浸漬した各試料（吹付け想定 OPC 及び BFSC、セグメント想定 OPC 及び BFSC）で測定し、得られたデータを健全部の力学的特性値として各試料の変質部との比較に用いた。

(iv)　元素組成分布の測定方法

元素組成分布の測定は、地下水の化学成分との反応でセメントの元素分布が変化した領域とその化学組成の変化を検討することを目的として、土木学会規準「EPMA 法によるコンクリート中の元素の面分析方法（案）（JSCE-G 574-2005）」に従って日本電子データム株式会社製、JXA-8100 を使用して測定した。分析対象の試料は、コンクリートカッターを使用して切断加工する際に試料端部が破損するリスクを避けるため、端部を樹脂で固めて保護した。樹脂が硬化した後、試料の接液面から鉛直方向に切断し、切断面を鏡面研磨して元素濃度の面分析を実施した。元素分布の測定条件は、加速電圧 15 KV、照射電流 5×10^{-8} A、ビーム径 10 μm、ピクセルサイズ 20 μm とし、試料断面の元素組成分析をした。測定元素は、Ca、Si、Al、Fe、Mg、S、Na、K 及び Cl の 9 元素とした。

(v) 空隙径分布の測定方法

空隙径分布は、地下水の化学成分との反応でセメントの力学的特性や物質移行特性に影響する空隙構造の変化を検討することを目的として測定した。水銀圧入式ポロシメータ（micromeritics 社製、AutoPoreⅣ 9520）を使用し、試験体の変質部の空隙量（測定範囲 0.003 – 300 μm）を測定した。試料は厚さ 5 mm 以下の塊状に調製し、真空乾燥後に測定に用いた。なお、変質領域が狭く水銀圧入ポロシメータによる空隙径分布の測定ができない場合には、SEM 測定の反射電子像を用い健全域と比較して輝度が低下した変質域の面積率を求めた。SEM 測定を実施して反射電子像を取得し、画像データの任意の輝度に閾値を置き二値化することで輝度が低い領域を空隙率の高い領域と判定した。

(vi) 接液面近傍の元素組成分布の測定方法

接液面近傍の元素組成分の測定は、地下水の化学成分との反応でセメントの内部に生成した二次鉱物の生成状況を確認するため、微小領域を対象に SEM-EDS により実施した。元素組成分布の分析結果から、接液面近傍の二次鉱物生成の状況を検討した。試料は EPMA による元素組成分布の分析を実施した鏡面研磨試料を使用し、化学変質したセメントペースト部分の二次鉱物の生成状況を確認した。分析対象の試料は、吹付け想定 OPC の浸漬期間 3 箇月の人工海水、海水 B、海水 G、降水 A、吹付け想定 OPC の浸漬期間 10 箇月の FGB-2_167.70～171.78 m、FGB-2_214.75～220.52 m、吹付け想定 BFSC の浸漬期間 10 箇月の FGB-2_167.70～171.78 m、FGB-2_214.75～220.52 m の計 8 水準とした。

表 4-2- 9　微小部エックス線回折（μXRD）分析条件

測定装置	スペクトリス株式会社（Malvern Panalytical) X’ Pert PRO MPD	
測定条件	X 線源	Cu-Kα(λ=1.54 Å)
	管電圧 / 管電流 （出力）	45 kV / 40 mA
	コリメータサイズ	X 線モノキャピラリー，サイズ：100 μm
	ステップ	0.017°
	スキャン速度	0.25° / min
	スキャン範囲（2θ）	2 θ = 5° - 40°
	検出器	高速半導体検出器 X’ Celerator
使用解析ソフト	スペクトリス株式会社（Malvern Panalytical） HighScore(Plus)	

③　セメントペーストの試験結果

(a)　低アルカリ性化領域の測定結果

ペースト試料の 10 箇月間浸漬後の低アルカリ性化領域の測定結果を図 4-2- 7 に示す。

10 箇月間 FGB-2_167.70～171.78 m 及び FGB-2_214.75～220.52 m に浸漬した試料について、フェノールフタレイン溶液を噴霧した結果、いずれの試料においても pH 低下領域は認められなかった。このことから、いずれの試料も接液面近傍での著しい Ca 溶脱、炭酸化や表面から試料内部にわたる Ca 溶脱及び炭酸化による pH 低下は生じていないことを確認した。

本項(d)において実施した EPMA による元素組成分布の測定結果では、FGB-2_167.70～171.78 m に 10 箇月間浸漬した吹付け想定 OPC とセグメント想定 OPC 及び FGB-2_214.75～220.52 m に 10 箇月間浸漬した吹付け想定 OPC は、接液面近傍のわずかな Ca 濃度の低下が確認されているが、フェノールフタレイン溶液の噴霧で中性化（発色しない）に相当する pH10 程度まで低下していないためと考えられる。

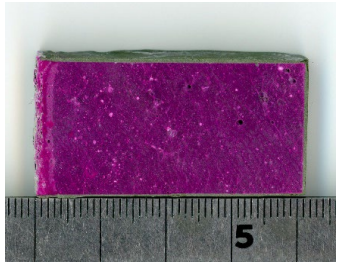
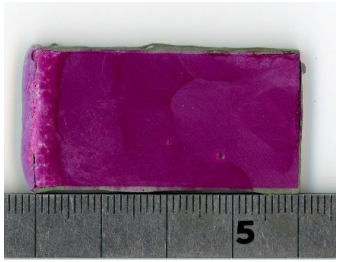
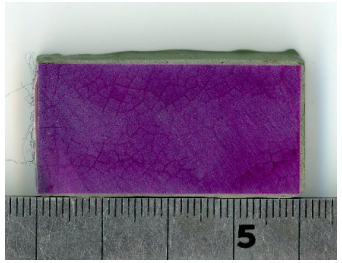
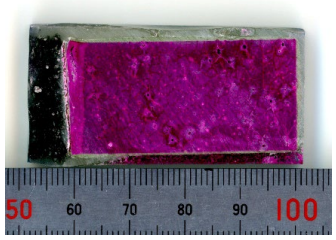
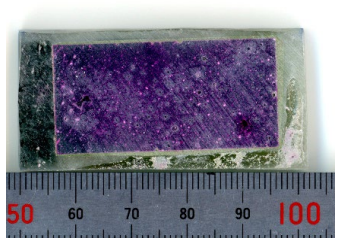
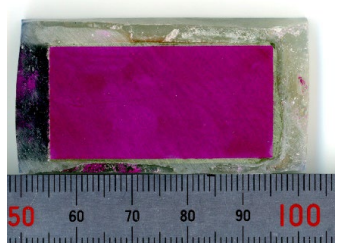
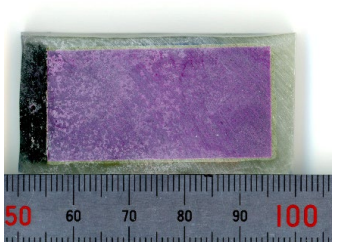
試料名 液種	吹付け想定OPC	吹付け想定BFSC	セグメント想定OPC	セグメント想定BFSC
FGB-2_167.70 ～171.78 m ※左が接液面側				
FGB-2_214.75 ～220.52 m ※左が接液面側 (左側の黒い層 はスポンジ)				

図 4-2- 7　ペースト試料の 10 箇月間浸漬後の低アルカリ性化領域の測定結果

(b) 鉱物相の同定結果

FGB-2_167.70～171.78 m に 10 箇月浸漬したペースト試料の μXRD 測定結果を表 4-2-10 及び図 4-2- 8 に、FGB-2_214.75～220.52 m に 10 箇月浸漬したペースト試料の μXRD 測定結果を表 4-2- 11 及び図 4-2- 9 に示す。

FGB-2_167.70～171.78 m に 10 箇月浸漬したペースト試料の全ての水準で C-S-H の存在を確認した。吹付け想定 OPC の表面近傍では Ettringite の生成が確認され、吹付け想定の BFSC 及びセグメント想定の BFSC で Friedel's salt の生成を確認した。

FGB-2_214.75～220.52 m に 10 箇月浸漬したペースト試料においても全ての水準で C-S-H の存在を確認した。吹付け想定 BFSC、セグメント想定の OPC 及びセグメント想定の BFSC で Friedel's salt の生成を確認した。セグメント想定の OPC では Portlandite の存在も確認している。

地下水に含まれる Cl とセメントのアルミネート水和物の層関イオンの交換で生成する Friedel's salt は、全ての BFSC のペースト試料と Cl 濃度の高い FGB-2_214.75～220.52 m に浸漬したセグメント想定の OPC で生成していることを確認した。(d) 元素組成分布の測定結果から SO_3 濃度が低く Cl 濃度が高い水準で Friedel's salt の生成を確認した。

地下水に含まれる SO_3 との反応で生成する Ettringite は、FGB-2_167.70～171.78 m に浸漬した吹付け想定 OPC のみで生成を確認した。FGB-2_167.70～171.78 m に浸漬したセグメント想定 OPC 及び FGB-2_214.75～220.52 m に浸漬した吹付け想定 OPC の界面近傍では(d) 元素組成分布の測定結果から SO_3 濃度が高く Ettringite が生成しているものと考えられる。しかしながら、本検討において μXRD の測定対象とした試料は、EPMA による元素組成分布の分析を実施した真空乾燥後に樹脂包埋処理をして鏡面研磨した試料のため、試料の乾燥過程で Ettringite の結合水が脱水して XRD のピークが観察できなくなったものと考える。

表 4-2- 10　FGB-2_167.70～171.78 m　ペースト試料 10 箇月浸漬　μXRD 測定結果

試験体種類	C-S-H	Friedel's salt	Portlandite	Ettringite
吹付け想定 OPC	○			○
吹付け想定 BFSC	○	○		
セグメント想定 OPC	○			
セグメント想定 BFSC	○	○		

CSH：C-S-H、F：Friedel's salt、E：Ettringite

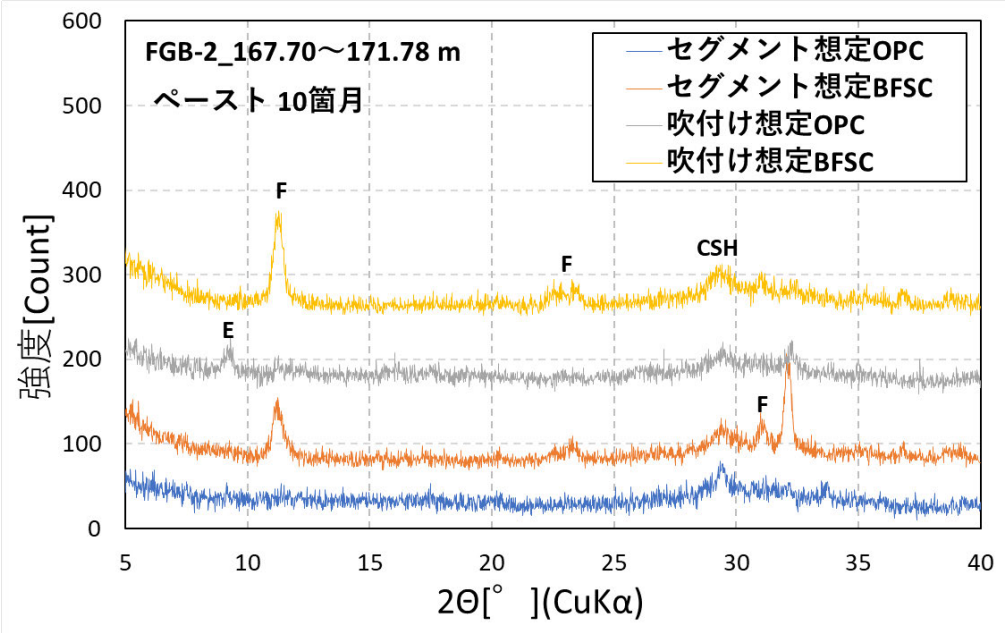


図 4-2- 8　FGB-2_167.70～171.78 m　ペースト試料 10 箇月浸漬　μXRD 測定結果

表 4-2- 11　FGB-2_214.75～220.52 m
ペースト試料 10 箇月浸漬　μXRD 測定結果

試験体種類	C-S-H	Friedel's salt	Portlandite	Ettringite
吹付け想定 OPC	○			
吹付け想定 BFSC	○	○		
セグメント想定 OPC	○	○	○	
セグメント想定 BFSC	○	○		

CSH：C-S-H、F：Friedel's salt、P：Portlandite

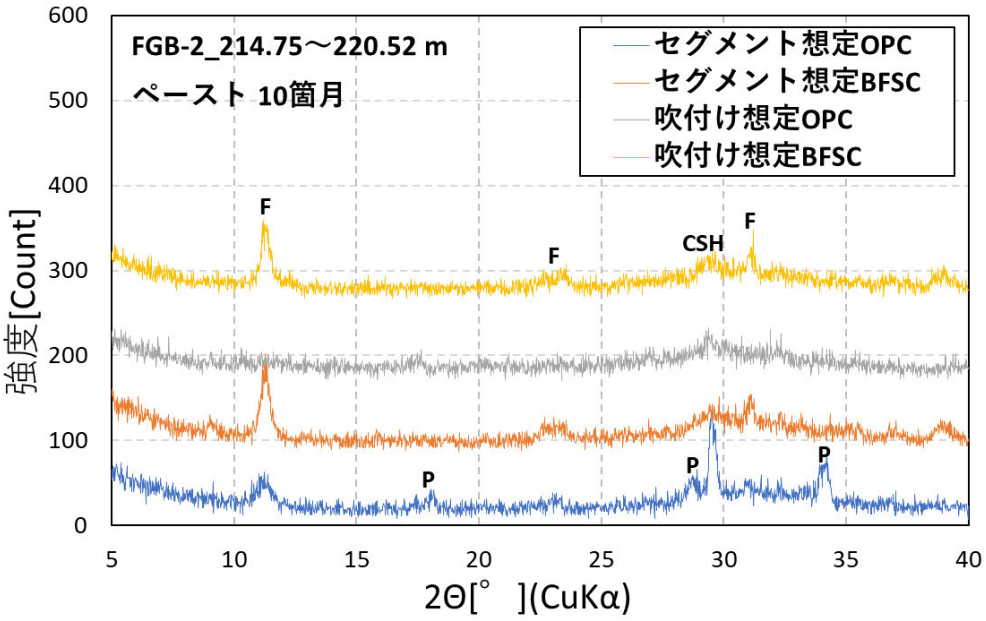


図 4-2- 9　FGB-2_214.75～220.52 m　ペースト試料 10 箇月浸漬　μXRD 測定結果

(c) 力学的特性の測定結果

各試料の接液面から 0.3mm 以内のベースと部分で測定した 100 点の硬度の平均値及び海水 G に浸漬した試料の接液面から約 30mm 離れた位置で測定した 100 点の硬度の平均値を健全部の硬度として、模擬地下水に 3 箇月間浸漬したペースト試料の硬度測定結果を表 4-2- 12 に、実地下水に 10 箇月間浸漬したセメントペースト試料の硬度測定結果を表 4-2- 13 に示す。

模擬地下水に 3 箇月浸漬したペースト試料のヤング率測定結果を表 4-2- 14 から表 4-2-18 に、模擬地下水に 3 箇月浸漬したペースト試料のヤング率測定結果を図 4-2- 10 から図 4-2- 14 に、実地下水に 10 箇月浸漬したペースト試料のヤング率測定結果を表 4-2- 19 及び表 4-2- 20 に、実地下水に 10 箇月浸漬したペースト試料のヤング率測定結果を図 4-2- 15 及び図 4-2- 16 に示す。

力学的特性については、健全部の力学的特性からどの程度低下した部分を劣化と判断するかといった基準は特になく、設計で設定している力学的特性を確保できなくなった部位を劣化と判断することなど考えられるが、ここでは 30%以上の硬度の低下を力学的特性の低下の指標としてまとめた。

模擬地下水に 3 箇月間浸漬した試料では、人工海水に浸漬したセグメント想定 OPC、海水 B に浸漬した吹付け想定 OPC、セグメント想定 OPC と BFSC、降水 A に浸漬した吹付け想定 OPC とセグメント想定 OPC の試料で硬度が 30%以上低下していることを確認した。実地下水 FGB-2_167.70～171.78 m に 10 箇月間浸漬した試料では、セグメント想定 OPC のみが 30%以上硬度が低下する結果となった。模擬地下水に 3 箇月間浸漬した他の試料及び実地下水に 10 箇月間浸漬した他の試料では、30%を超える硬度の低下は確認されていない。硬度が 30%以上低下した水準が存在する人工海水、海水 B、降水 A 及び FGB-2_167.70～171.78 m は、何れも S 濃度が高く、HCO_3 濃度が比較的低い地下水組成であることを特徴としている。硬度が 30%以上低下した水準の有る地下水の中では、人工海水の S 濃度が最も高く、海水 B、降水 A 及び FGB-2_167.70～171.78 m の S 濃度は人工海水の S 濃度の 1/2 程度の濃度になっている。

最も硬度の低下した水準は、海水 B のセグメント想定 OPC で、健全部の 25%に低下しており、海水 B のセグメント想定 BFSC のみが BFSC の材料で唯一硬度が 30%以上低下した。OPC と BFSC を比較すると OPC の方が硬度が大きく低下する傾向にあり、吹付け想定とセグメント想定を比較するとセグメント想定の方が 30%以上硬度が低下している水準が多くなっているが硬度の低下率の差異は小さいことを確認した。

接液面から 0.3mm 以内のペースト部分で測定した 100 点のヤング率の測定結果を箱ひげ図にまとめ、試料内部の化学変質を受けていない部分（健全部）で測定した結果と比較した。セメントペーストの硬度及びヤング率の測定値には、C-S-H を主要鉱物とするセメント水和物の硬度の他、未水和鉱物などセメントペーストと異なる硬度の値が含まれる。この様なセメント以外の硬度の検出割合は試料ごとに異なっている。これらのセメントペース

ト以外のヤング率が含まれるデータからセメントペーストの硬度の変化を評価するため箱ひげ図を用いてデータ整理した。箱ひげ図は、最小値から 25%に相当する値（第一四分位値）を箱の下端、最小値から 50%に相当する値（第ニ四分位値）を箱の中の線、最小値から 75%に相当する値（第三四分位値）を箱の上端として示している。箱の上下に示される「ひげ」は最大値と最小値を示しており、四分位の 1.5 倍の値を示し、ここから外れる値については、外れ値として図に表示していない。測定結果の平均値は「×」で示している。

本検討では、試料の健全部の箱の下端（第一四分位）から箱の上端（第三四分位）の範囲から外れる試験水準について力学的特性が変化していると判断した。

人工海水及び海水 G に 3 箇月間浸漬した試料では、吹付け想定 OPC 及びセグメント想定 OPC のヤング率が健全試料に比べ低下しているが、吹付け想定 BFSC 及びセグメント想定 BFSC のヤング率についてはヤング率の低下は確認していない。

海水 B 及び降水 A に 3 箇月間浸漬した試料では、吹付け想定の OPC 及び BFSC、セグメント想定の OPC 及び BFSC の全ての水準でヤング率の低下を確認した。特に、海水 B に浸漬した吹付け想定 OPC では健全部に比べてヤング率の平均値が 21%まで低下し、セグメント想定 OPC についてもヤング率の平均値が 33%に低下し、本検討の水準の中で最もヤング率の低下率が大きいことを確認した。また、降水 A に浸漬した吹付け想定 OPC では健全部に比べてヤング率の平均値が 47%まで低下し、セグメント想定 OPC についてもヤング率の平均値が 48%に低下し、海水Bに次いで大きな低下率であった。

また、降水 D+F に 3 箇月間浸漬した試料では、吹付け想定の OPC 及び BFSC、セグメント想定の OPC 及び BFSC の全ての水準でヤング率の低下は確認していない。

人工海水及び海水 G に 3 箇月間浸漬した試料は､吹付け想定とセグメント想定の OPC でヤング率が低下し、BFSC ではヤング率の低下は確認していない。人工海水に比べ S 濃度が低く、HCO_3 の濃度が非常に低い海水 B 及び降水 A では全ての水準でヤング率の低下を確認し、低下の程度も人工海水に比べて大きいことを確認した。一方、HCO_3 の濃度が高い降水 D+F では、全ての水準でヤング率の低下は確認されなかった。

FGB-2_167.70～171.78 m に 10 箇月間浸漬した試料では、吹付け想定 OPC 及びセグメント想定 OPC のヤング率の低下を確認し、吹付け想定 BFSC 及びセグメント想定 BFSC についてはヤング率の低下は確認していない。FGB-2_214.75～220.52 m に 10 箇月間浸漬した試料では､吹付け想定 OPC のみがヤング率の低下が確認され､セグメント想定 OPC、吹付け想定 BFSC 及びセグメント想定 BFSC についてはヤング率の低下は確認されなかった。

セメント種類のヤング率への影響については、ヤング率の低下が確認された水準では、BFSC に比べて OPC の方がヤング率の低下割合が大きくなっていることを確認した。吹付け想定とセグメント想定という配合の違いについては、模擬地下水の水準では大きな差がないことを確認し、FGB-2_167.70～171.78 m 及び FGB-2_214.75～220.52 m の実地下水では、吹付け想定 OPC のみでヤング率の低下を確認した。

表 4-2- 12　模擬地下水に 3 箇月間浸漬した試料の硬度測定結果（kN/mm^2）

液相	吹付け想定						セグメント想定					
	OPC			BFSC			OPC			BFSC		
	表層部	健全部	変化率(%)	表層部	健全部	変化率(%)	表層部	健全部	変化率(%)	表層部	健全部	変化率(%)
人工海水	1.28	1.65	78	1.23	1.26	98	1.07	1.81	59	1.40	1.89	74
海水B	0.66	1.65	40	0.89	1.26	71	0.45	1.81	25	0.99	1.89	52
海水G	1.37	1.65	83	1.33	1.26	106	1.44	1.81	80	1.38	1.89	73
降水A	0.89	1.65	54	1.21	1.26	96	1.00	1.81	55	1.49	1.89	79
降水D+F	1.42	1.65	86	1.55	1.26	123	1.98	1.81	109	1.57	1.89	83

表 4-2- 13　実地下水に 10 箇月間浸漬した試料の硬度測定結果（kN/mm^2）

液相	吹付け想定						セグメント想定					
	OPC			BFSC			OPC			BFSC		
	表層部	健全部	変化率(%)	表層部	健全部	変化率(%)	表層部	健全部	変化率(%)	表層部	健全部	変化率(%)
FGB-2_167.70～171.78 m	1.30	1.65	79	1.98	1.26	157	1.21	1.81	67	1.85	1.89	98
FGB-2_214.75～220.52	1.28	1.65	78	1.58	1.26	126	1.85	1.81	102	2.20	1.89	116

表 4-2- 14　人工海水　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm²）

ヤング率（人工海水　3か月浸漬）

	吹付け想定						セグメント想定					
	OPC			BFSC			OPC			BFSC		
	表層部	健全部	変化率（%）	表層部	健全部	変化率（%）	表層部	健全部	変化率（%）	表層部	健全部	変化率（%）
第3四分位値	27045	40035	68%	31040	32010	97%	25215	40355	62%	29735	37725	79%
中央値	24810	34880	71%	26850	28740	93%	21720	35880	61%	26260	30490	86%
第1四分位値	20875	31780	66%	24550	26230	94%	17120	32275	53%	23930	26980	89%
平均値	24458	38299	64%	28327	30032	94%	22196	37340	59%	27881	35296	79%

表 4-2- 15　海水 B　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm²）

ヤング率（海水B　3か月浸漬）

	吹付け想定						セグメント想定					
	OPC			BFSC			OPC			BFSC		
	表層部	健全部	変化率（%）	表層部	健全部	変化率（%）	表層部	健全部	変化率（%）	表層部	健全部	変化率（%）
第3四分位値	9526.5	40035	24%	20495	32010	64%	17090	40355	42%	21465	37725	57%
中央値	7251	34880	21%	16450	28740	57%	11500	35880	32%	18690	30490	61%
第1四分位値	5599.5	31780	18%	13470	26230	51%	5884.5	32275	18%	12895	26980	48%
平均値	7922	38299	21%	17204	30032	57%	12395	37340	33%	18492	35296	52%

表 4-2- 16　海水 G　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm²）

ヤング率（海水G　3か月浸漬）

	吹付け想定						セグメント想定					
	OPC			BFSC			OPC			BFSC		
	表層部	健全部	変化率（%）	表層部	健全部	変化率（%）	表層部	健全部	変化率（%）	表層部	健全部	変化率（%）
第3四分位値	27870	40035	70%	30955	32010	97%	29810	40355	74%	28825	37725	76%
中央値	24120	34880	69%	26920	28740	94%	26060	35880	73%	26850	30490	88%
第1四分位値	21040	31780	66%	24270	26230	93%	19055	32275	59%	24465	26980	91%
平均値	25175	38299	66%	28517	30032	95%	25778	37340	69%	27318	35296	77%

表 4-2- 17　降水 A　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm²）

ヤング率（降水A　3か月浸漬）

	吹付け想定						セグメント想定					
	OPC			BFSC			OPC			BFSC		
	表層部	健全部	変化率（%）	表層部	健全部	変化率（%）	表層部	健全部	変化率（%）	表層部	健全部	変化率（%）
第3四分位値	20765	40035	52%	23795	32010	74%	21725	40355	54%	24590	37725	65%
中央値	17350	34880	50%	19940	28740	69%	16310	35880	45%	22500	30490	74%
第1四分位値	14390	31780	45%	13850	26230	53%	12575	32275	39%	19885	26980	74%
平均値	17932	38299	47%	20808	30032	69%	17828	37340	48%	24837	35296	70%

表 4-2- 18　降水 D+F　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm^2）

ヤング率（降水D+F　3か月浸漬）

	吹付け想定						セグメント想定					
	OPC			BFSC			OPC			BFSC		
	表層部	健全部	変化率（%）	表層部	健全部	変化率（%）	表層部	健全部	変化率（%）	表層部	健全部	変化率（%）
第3四分位値	36340	40035	91%	35715	32010	112%	42410	40355	105%	36130	37725	96%
中央値	32770	34880	94%	30250	28740	105%	37630	35880	105%	31470	30490	103%
第1四分位値	28950	31780	91%	26590	26230	101%	33480	32275	104%	27270	26980	101%
平均値	34729	38299	91%	32444	30032	108%	40771	37340	109%	33239	35296	94%

表 4-2- 19　FGB-2_167.70～171.78 m　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm^2）

ヤング率（FGB-2_167.70～171.78 m　3か月浸漬）

	吹付け想定						セグメント想定					
	OPC			BFSC			OPC			BFSC		
	表層部	健全部	変化率（%）	表層部	健全部	変化率（%）	表層部	健全部	変化率（%）	表層部	健全部	変化率（%）
第3四分位値	26695	40035	67%	37765	32010	118%	27520	40355	68%	31415	37725	83%
中央値	23810	34880	68%	33130	28740	115%	20690	35880	58%	26690	30490	88%
第1四分位値	21875	31780	69%	29040	26230	111%	17020	32275	53%	24260	26980	90%
平均値	26796	38299	70%	36911	30032	123%	22951	37340	61%	31453	35296	89%

表 4-2- 20　FGB-2_214.75～220.52 m　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm^2）

ヤング率（FGB-2_214.75～220.52 m　3か月浸漬）

	吹付け想定						セグメント想定					
	OPC			BFSC			OPC			BFSC		
	表層部	健全部	変化率（%）	表層部	健全部	変化率（%）	表層部	健全部	変化率（%）	表層部	健全部	変化率（%）
第3四分位値	25520	40035	64%	27435	32010	86%	40250	40355	100%	42075	37725	112%
中央値	21220	34880	61%	24800	28740	86%	34960	35880	97%	34720	30490	114%
第1四分位値	17585	31780	55%	22805	26230	87%	32455	32275	101%	31395	26980	116%
平均値	23161	38299	60%	28170	30032	94%	37203	37340	100%	40247	35296	114%

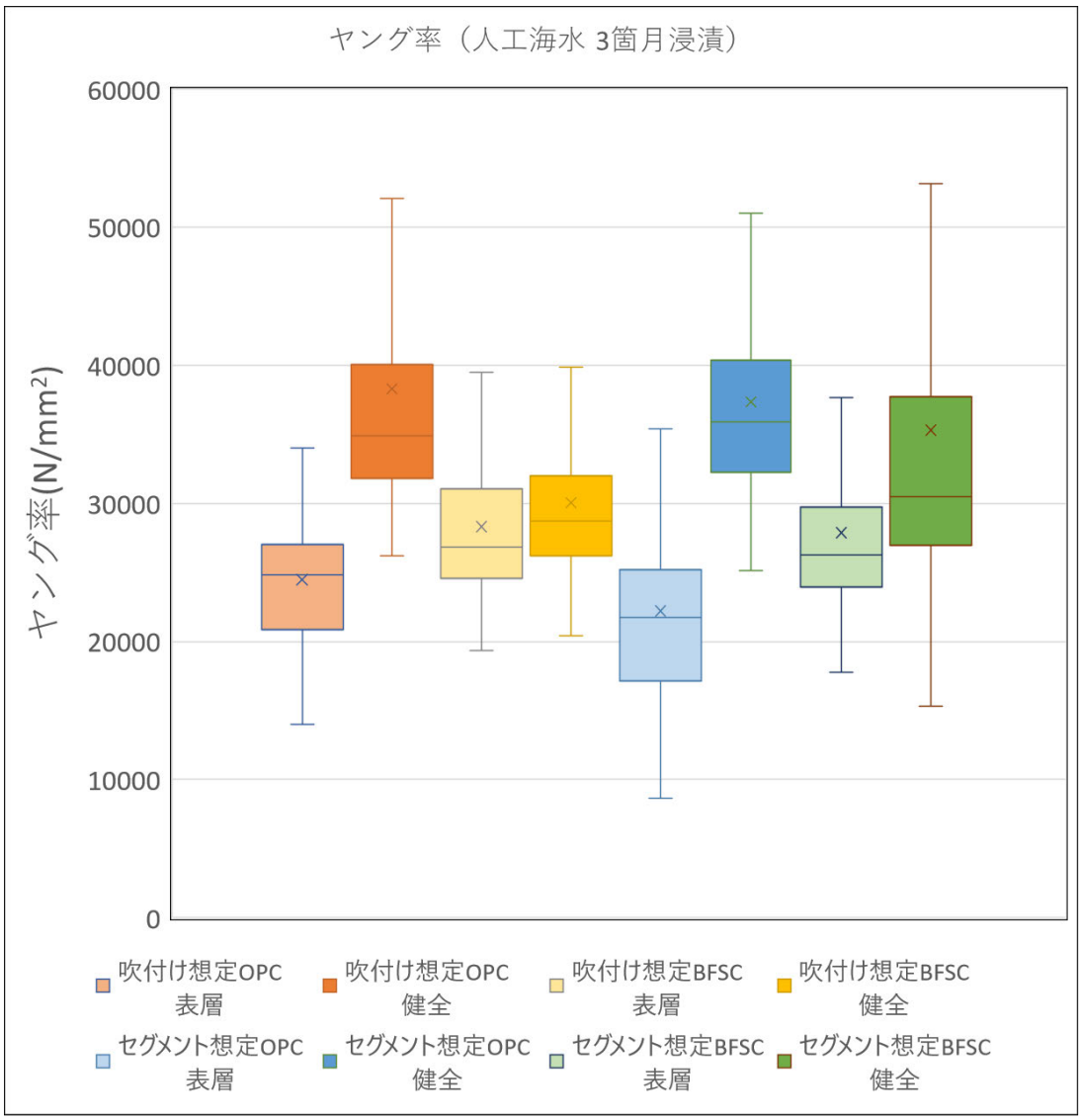


図 4-2- 10　人工海水　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果

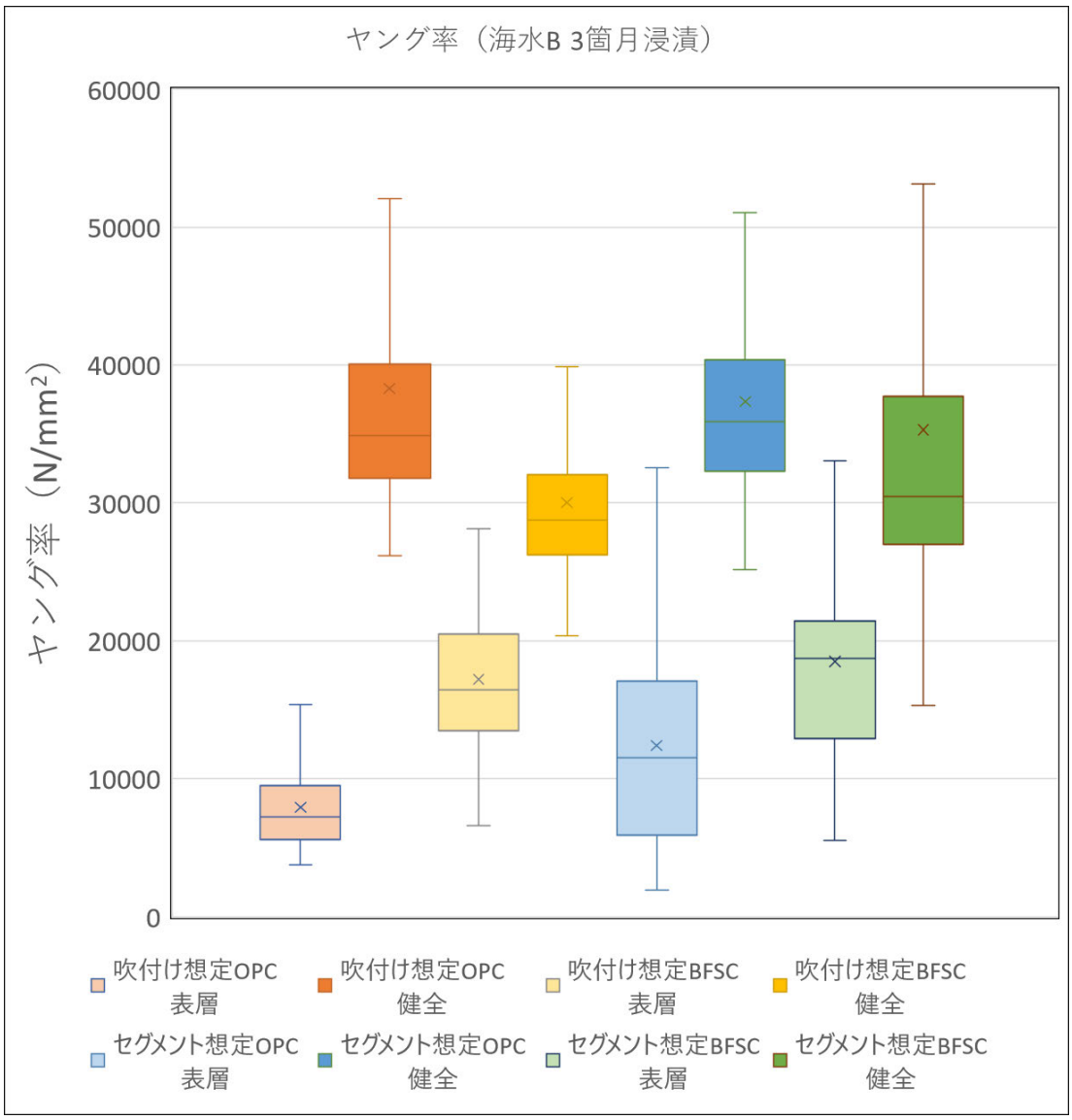


図 4-2- 11　海水 B　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果

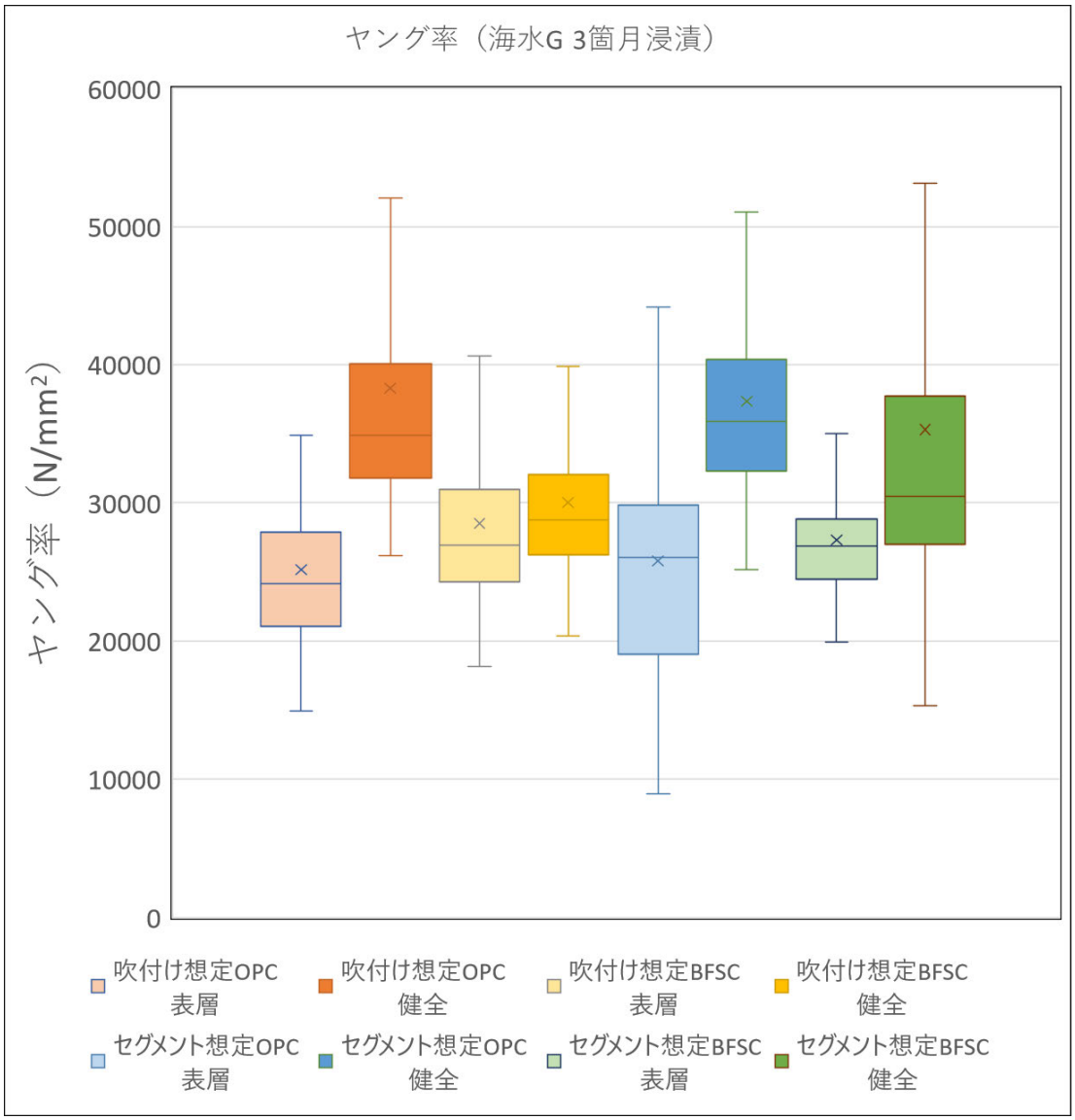


図 4-2- 12　海水 G　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果

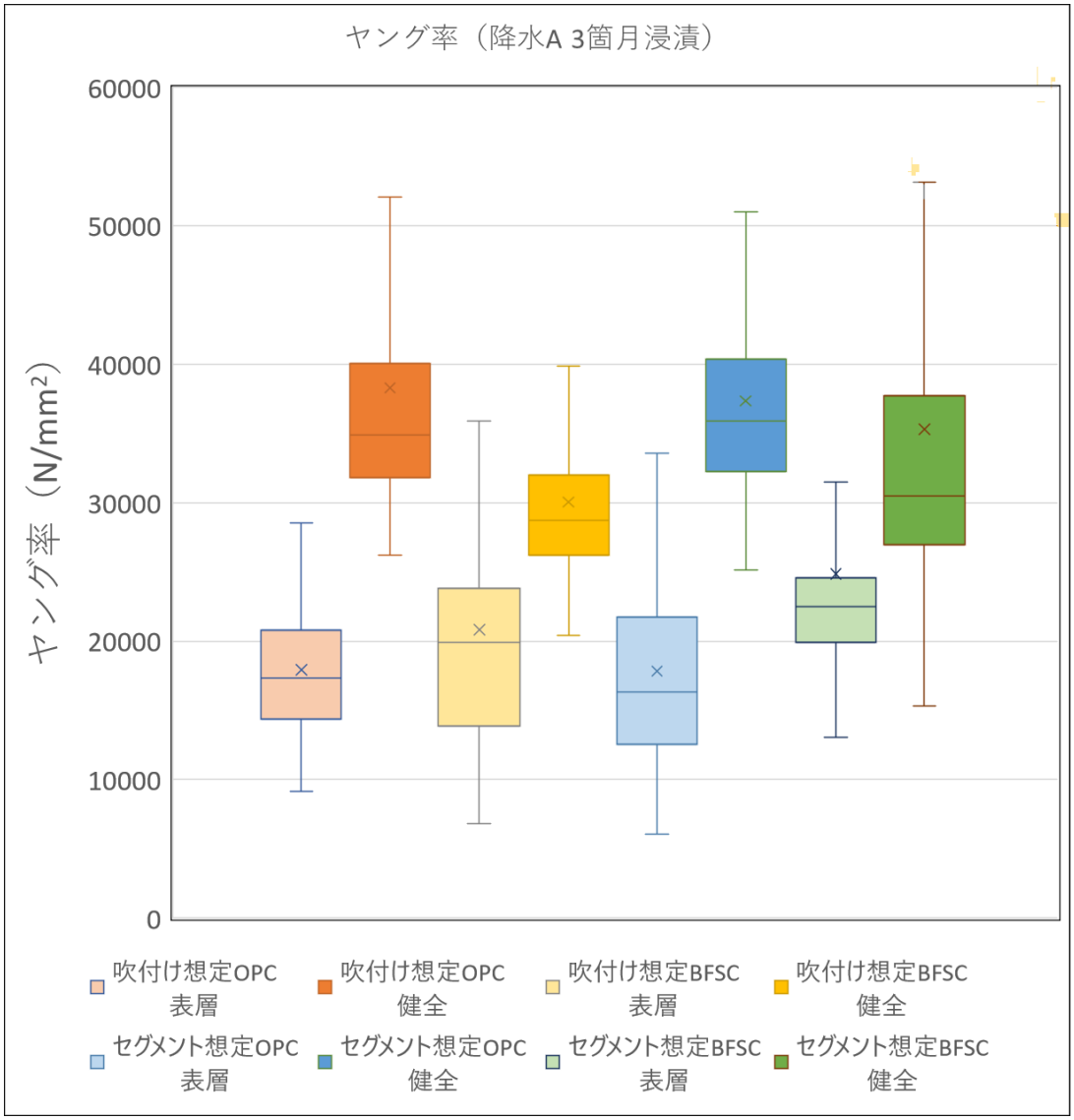


図 4-2- 13　降水 A　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果

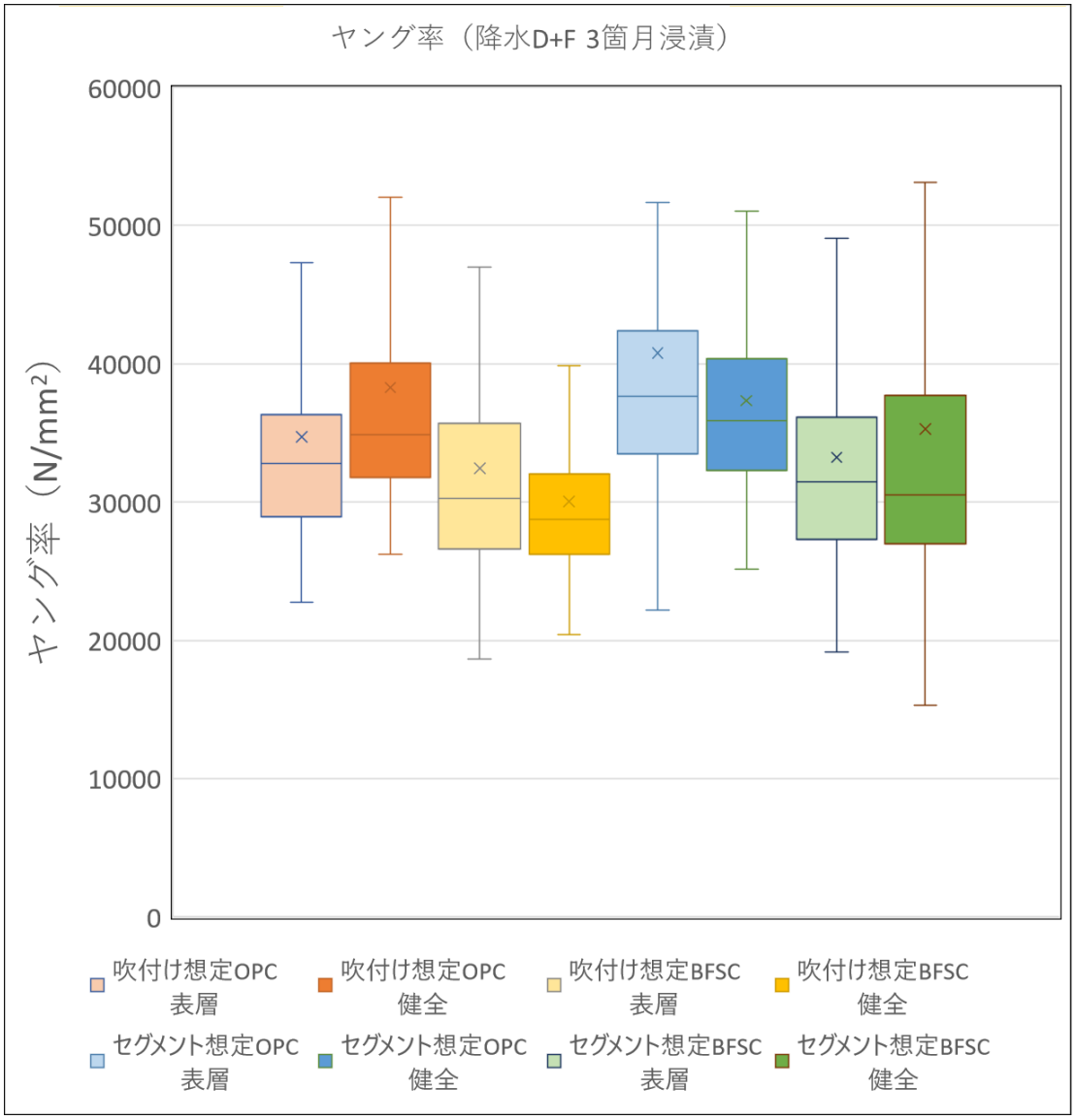


図 4-2- 14　降水 D+F　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果

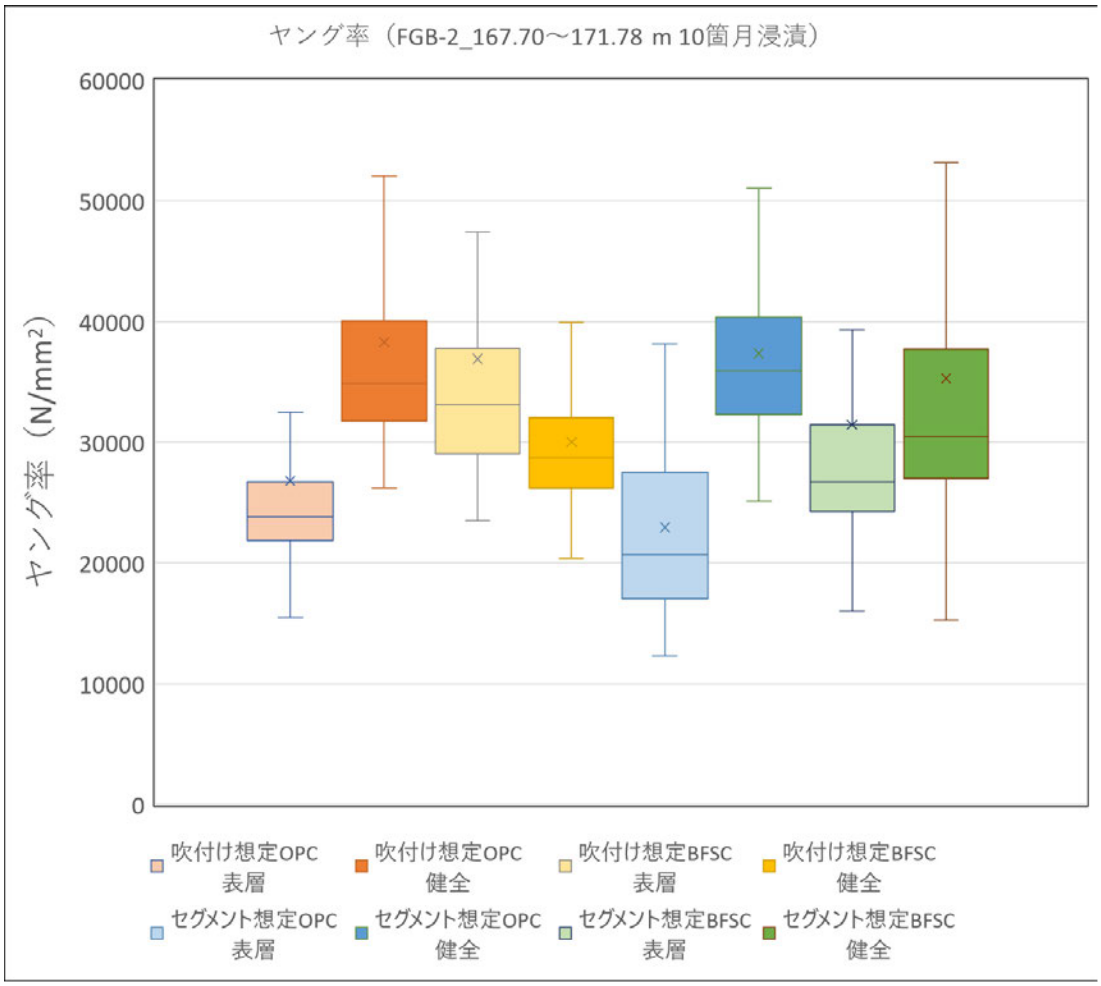


図 4-2- 15　FGB-2_167.70～171.78 m　ペースト試料 10 箇月浸漬　ヤング率測定結果

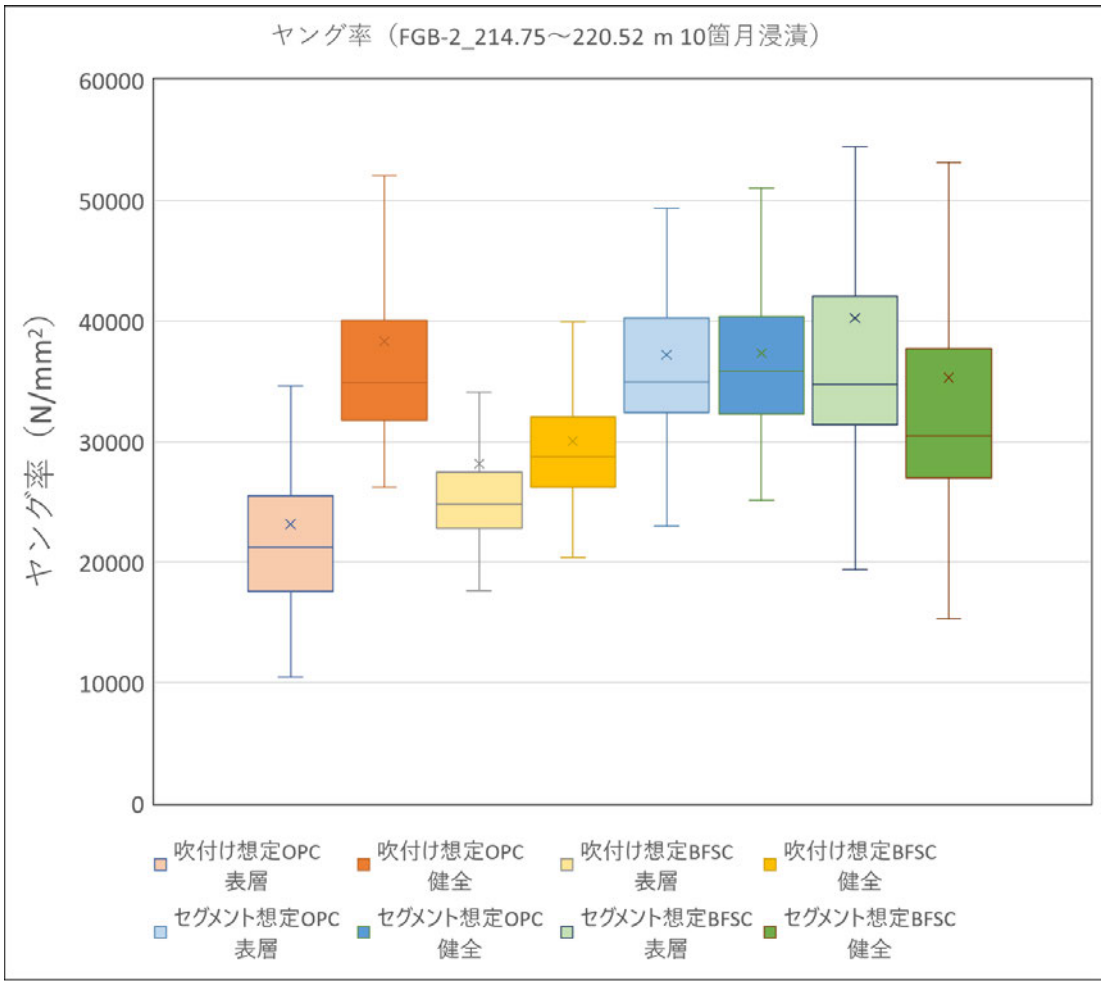


図 4-2- 16　FGB-2_214.75～220.52 m　ペースト試料 10 箇月浸漬　ヤング率測定結果

(d)　元素組成分布の測定結果

FGB-2_167.70～171.78 m に 10 箇月浸漬したペースト試料の EPMA 測定結果を図 4-2-17 から図 4-2- 20 に、FGB-2_214.75～220.52 m に 10 箇月浸漬したペースト試料の EPMA 測定結果を図 4-2- 21 から図 4-2- 24 に示す。

FGB-2_167.70～171.78 m に 10 箇月間浸漬した吹付け想定 OPC、セグメント想定 OPC 及び FGB-2_214.75～220.52 m に 10 箇月浸漬した吹付け想定 OPC は、接液面近傍の Ca 濃度の低下が確認され、セメント硬化体の表層部に微細な亀裂が多数発生している。接液面近傍の Ca 濃度の低下している領域で S 濃度の上昇を確認した。Cl 濃度は、接液面近傍の S 濃度の高い領域で濃度が低く、その内側から濃度が高くなり、内部に行くにしたがって濃度が低くなることを確認した。Mg は、外部析出層に濃集しており、FGB-2_214.75～220.52 m に浸漬した吹付け想定 OPC では、固相表面の近傍にも濃集していることを確認した。Na 及び K は測定範囲の領域で濃度の低下が確認され、Al 及び Fe は大きな濃度の変化は生じていないことを確認した。

FGB-2_167.70～171.78 m に 10 箇月間浸漬した吹付け想定 BFSC、セグメント想定 BFSC 及び FGB-2_214.75～220.52 m に 10 箇月浸漬した吹付け想定 BFSC、セグメント想定 OPC 及びセグメント想定 BFSC は、接液面近傍の著しい Ca の濃度低下は確認されていないが、外部析出層や接液面近傍に Ca の濃集を確認した。接液面近傍の S の濃集は観察されず、外部析出層に存在することを確認した。Mg は、外部析出層に存在が確認されているが、接液面近傍の変質が著しい水準で観察された高い濃度にはなっていない。Cl は、接液面近傍のわずかな領域の濃度が低くなっているが、概ね接液面から内部に地下水成分が拡散したと思われる濃度分布になっている。Na 及び K は接液面から溶出したと思われる濃度の低下が確認され、Al 及び Fe は大きな濃度の変化は生じていないことを確認した。外部析出層は、Ca、Si、Mg 及び S で構成されていることを確認した。

接液面近傍の化学組成の変化は、人工海水と同程度の化学成分濃度の FGB-2_214.75～220.52 m に比べ人工海水の 1/3 程度（Cl 濃度で 0.36 倍）の化学成分濃度の FGB-2_167.70～171.78 m の方が大きく変化していることを確認した。同じ実地下水に対しては BFSC に比べ OPC の方が接液面近傍の化学変化が大きく、同じセメント種類に対しては、セグメント想定に比べ吹付け想定の方が化学組成の変化が大きいことを確認した。

FGB-2_167.70～171.78 m 10箇月浸漬　吹付け想定OPC

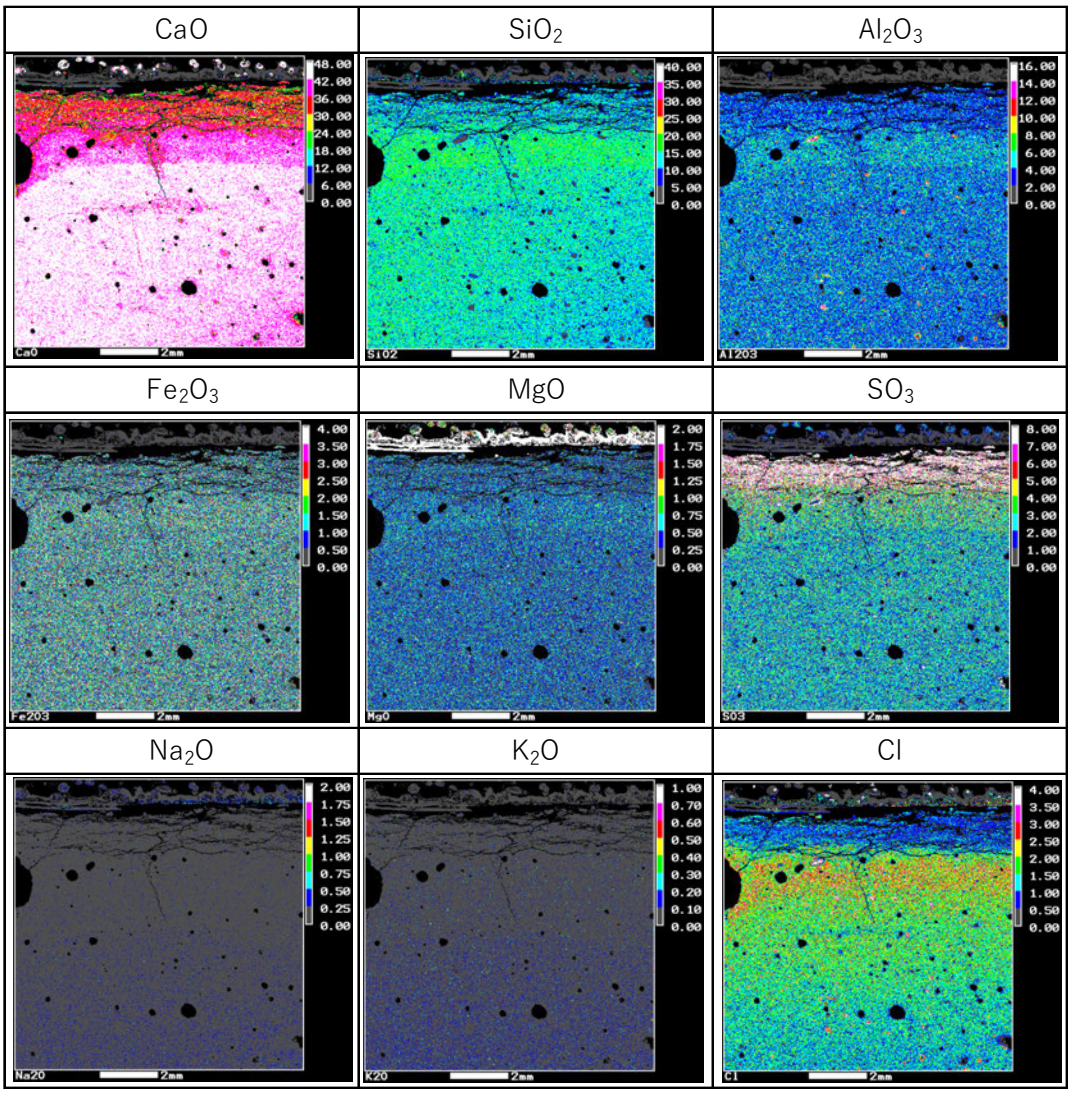


図 4-2- 17　FGB-2_167.70～171.78 m　吹付け想定 OPC
10 箇月浸漬　EPMA 測定結果

FGB-2_167.70～171.78 m 10箇月浸漬　吹付け想定BFSC

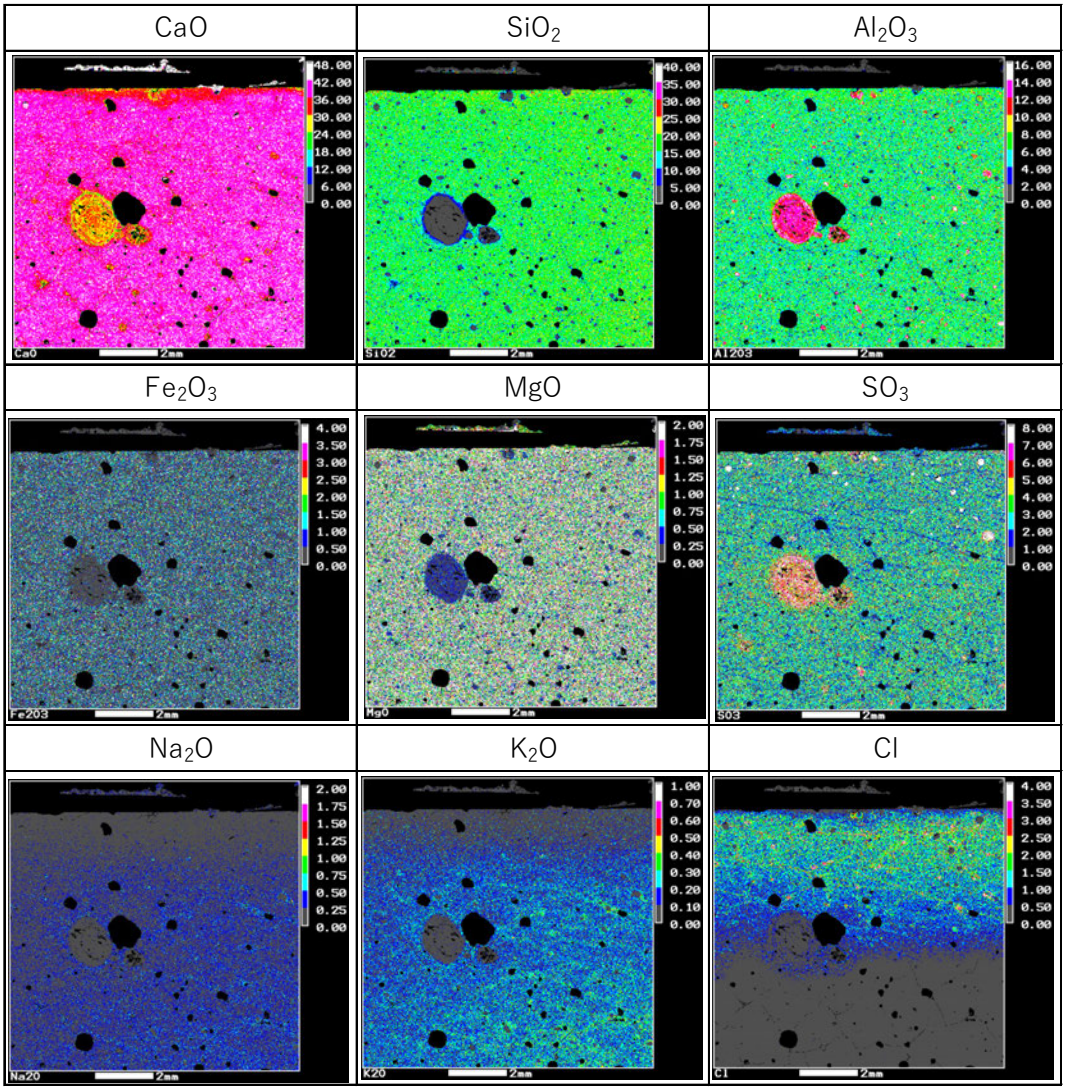


図 4-2- 18　FGB-2_167.70～171.78 m　吹付け想定 BFSC
10 箇月浸漬　EPMA 測定結果

FGB-2_167.70～171.78 m 10箇月浸漬　セグメント想定OPC

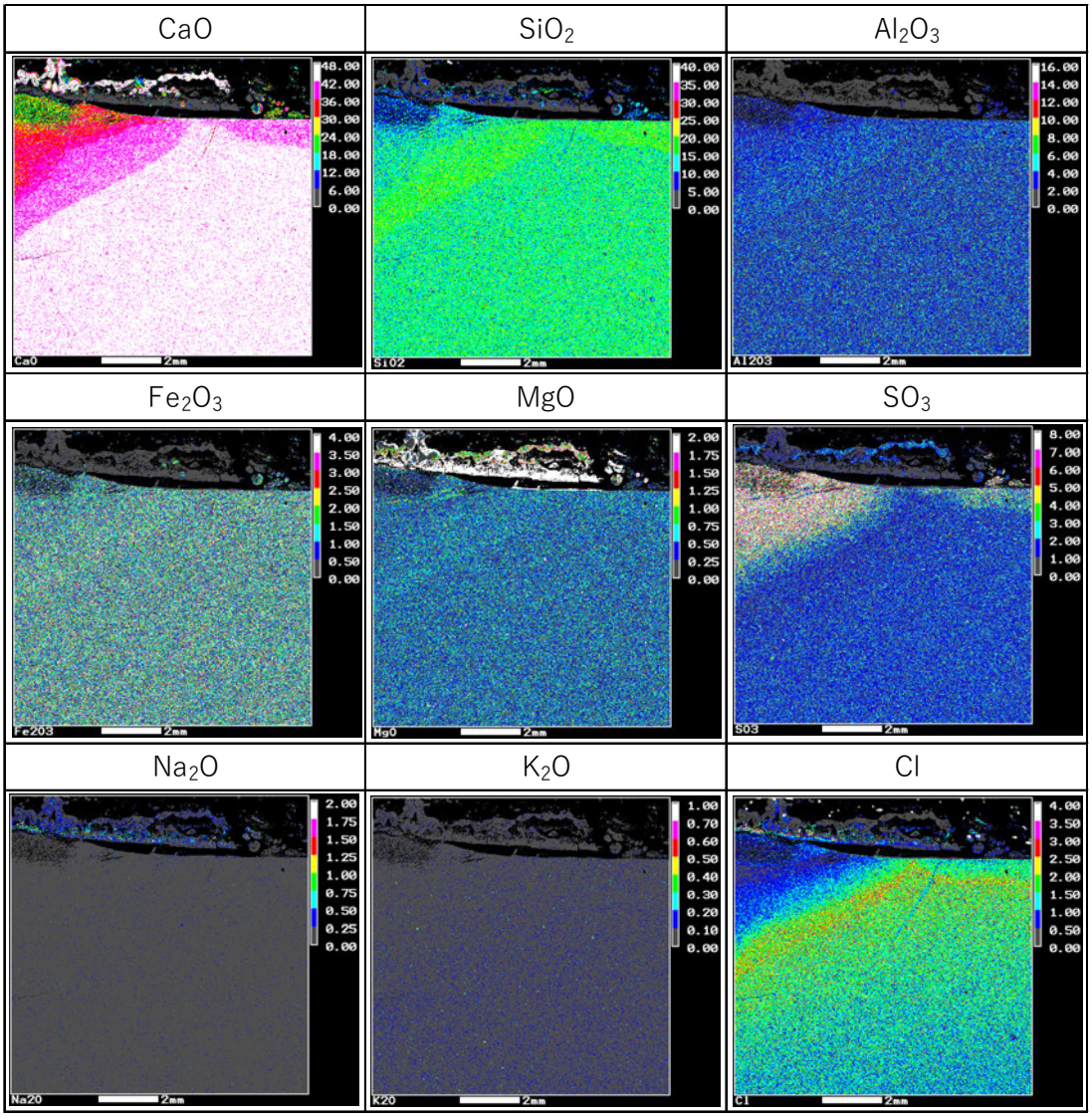


図 4-2- 19　FGB-2_167.70～171.78 m　セグメント想定 OPC
10 箇月浸漬　EPMA 測定結果

FGB-2_167.70～171.78 m 10箇月浸漬　セグメント想定BFSC

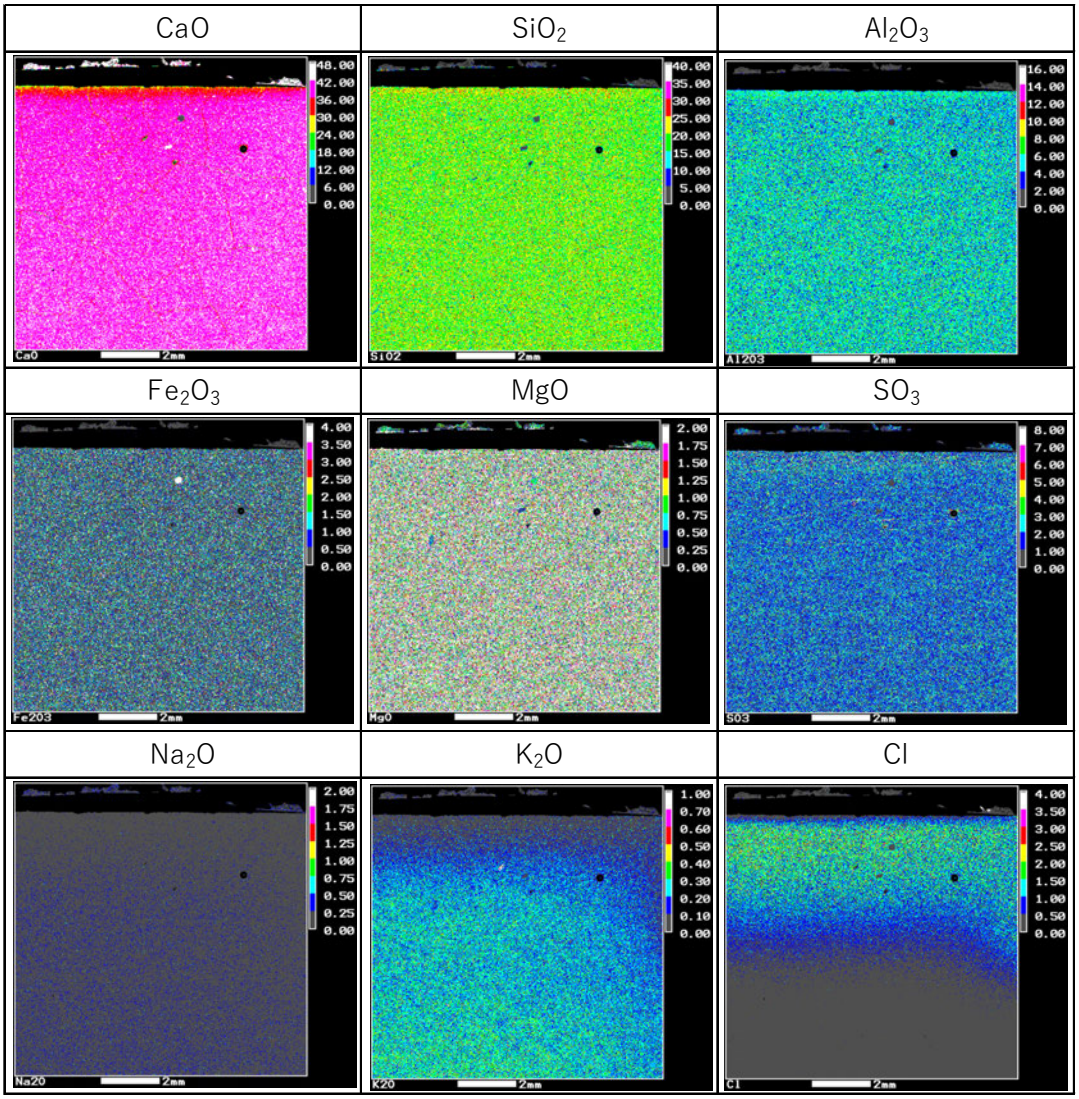


図 4-2- 20　FGB-2_167.70～171.78 m　セグメント想定 BFSC
10 箇月浸漬　EPMA 測定結果

FGB-2_214.75～220.52 m　10箇月浸漬　吹付け想定OPC

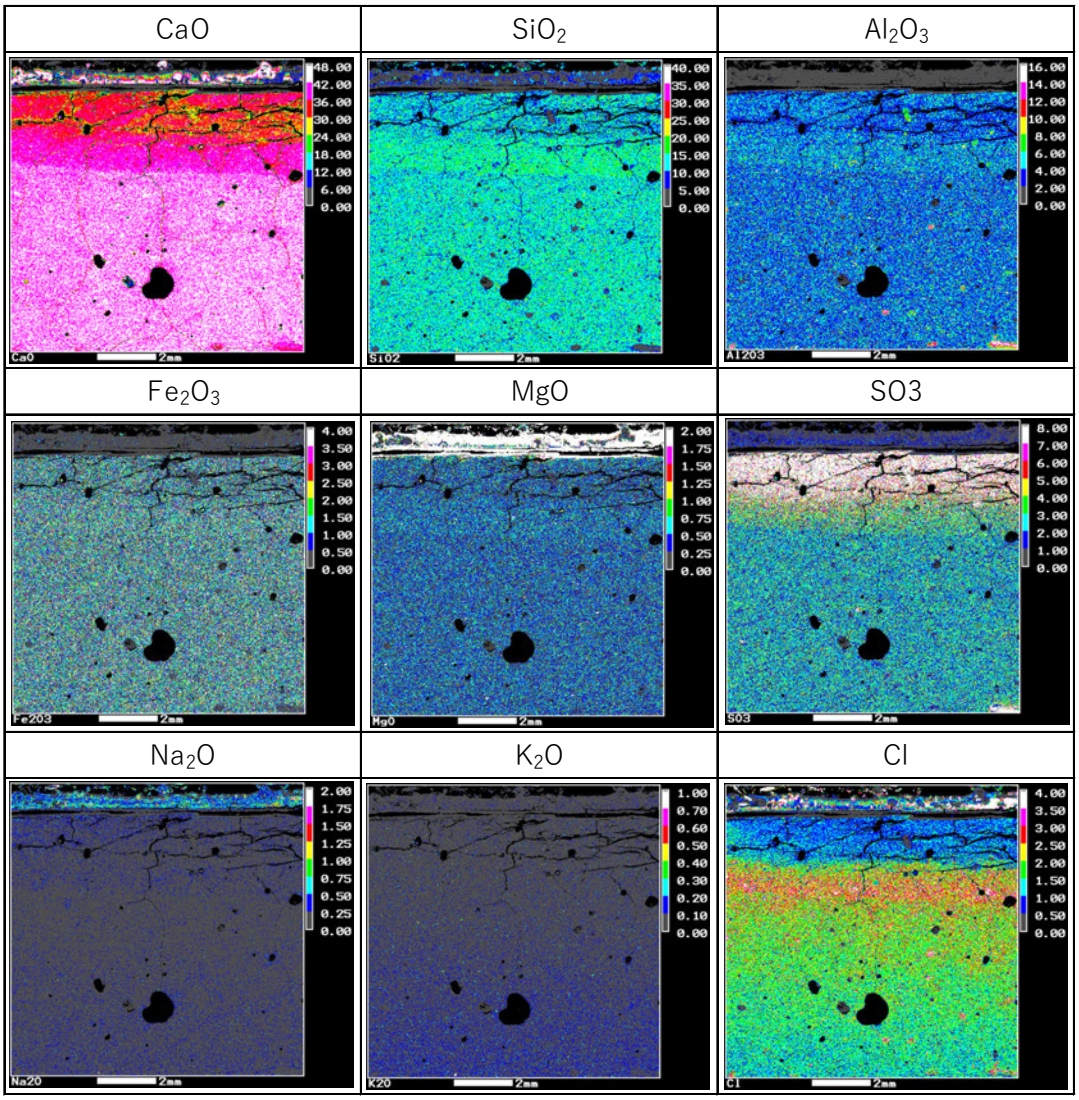


図 4-2- 21　FGB-2_214.75～220.52 m　吹付け想定 OPC
10 箇月浸漬　EPMA 測定結果

FGB-2_214.75～220.52 m　10箇月浸漬　吹付け想定BFSC

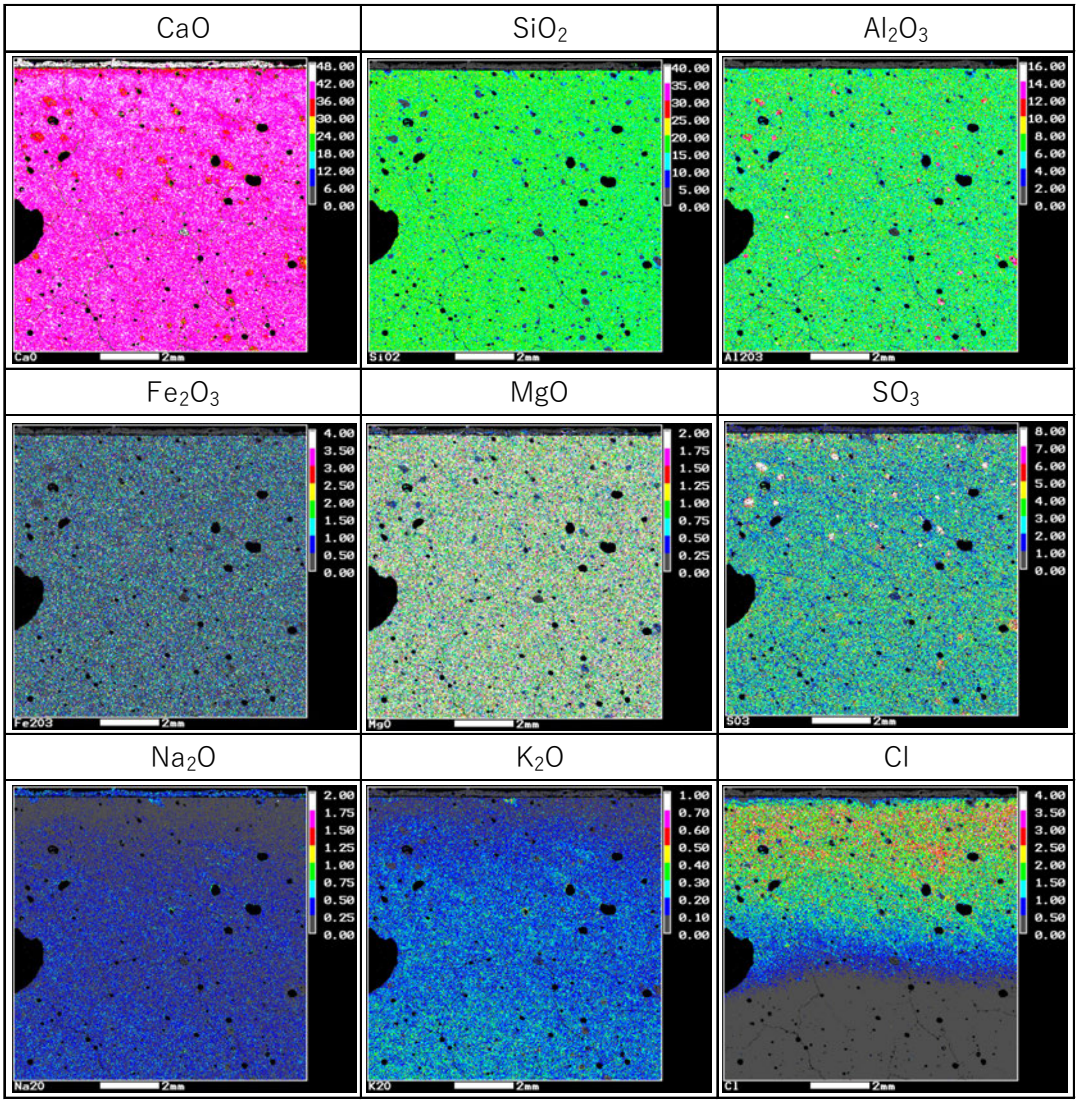


図 4-2- 22　FGB-2_214.75～220.52 m　吹付け想定 BFSC
10 箇月浸漬　EPMA 測定結果

FGB-2_214.75～220.52 m　10箇月浸漬　セグメント想定OPC

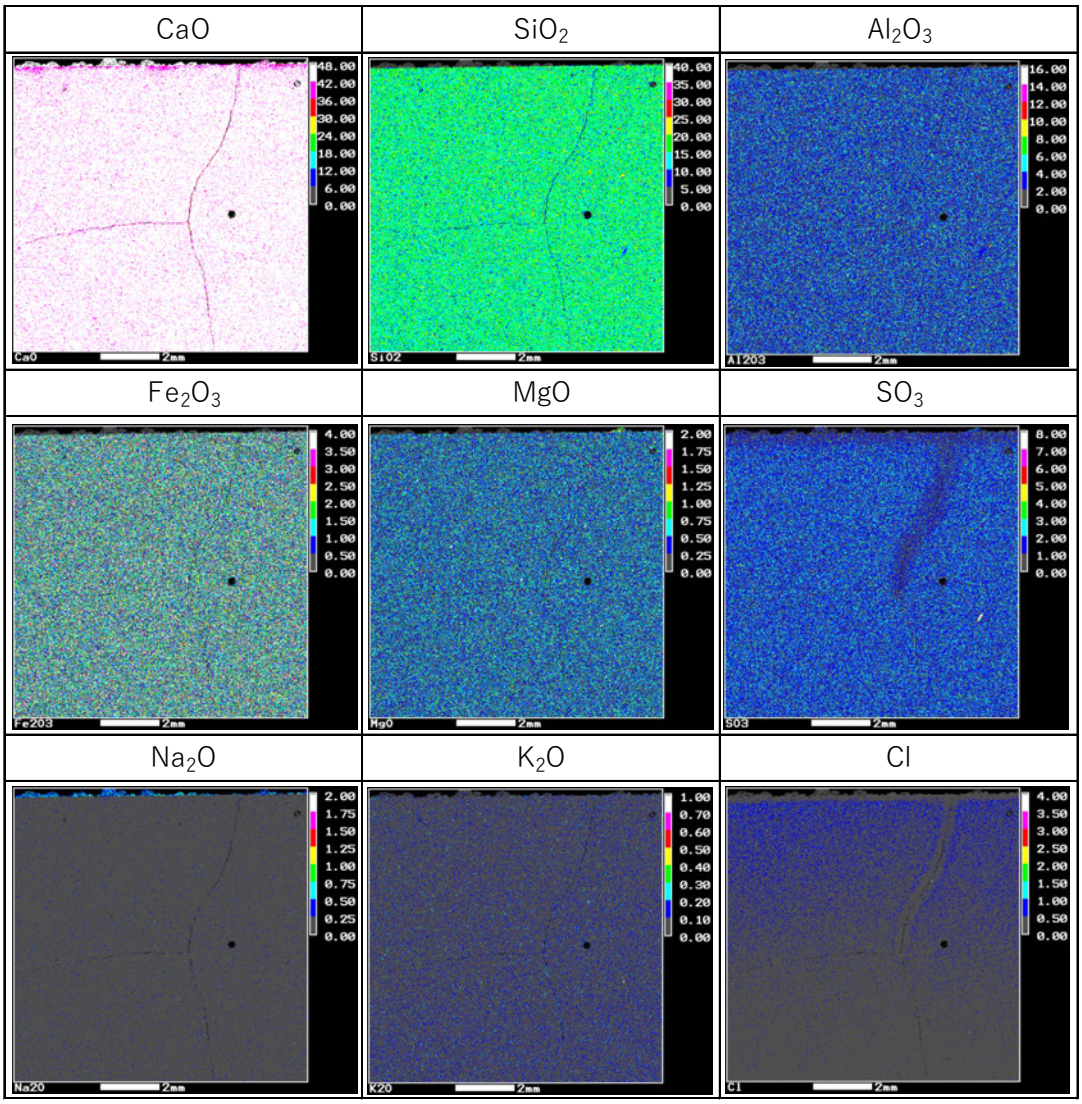


図 4-2- 23　FGB-2_214.75～220.52 m　セグメント想定 OPC
10 箇月浸漬　EPMA 測定結果

FGB-2_214.75～220.52 m　10箇月浸漬　セグメント想定BFSC

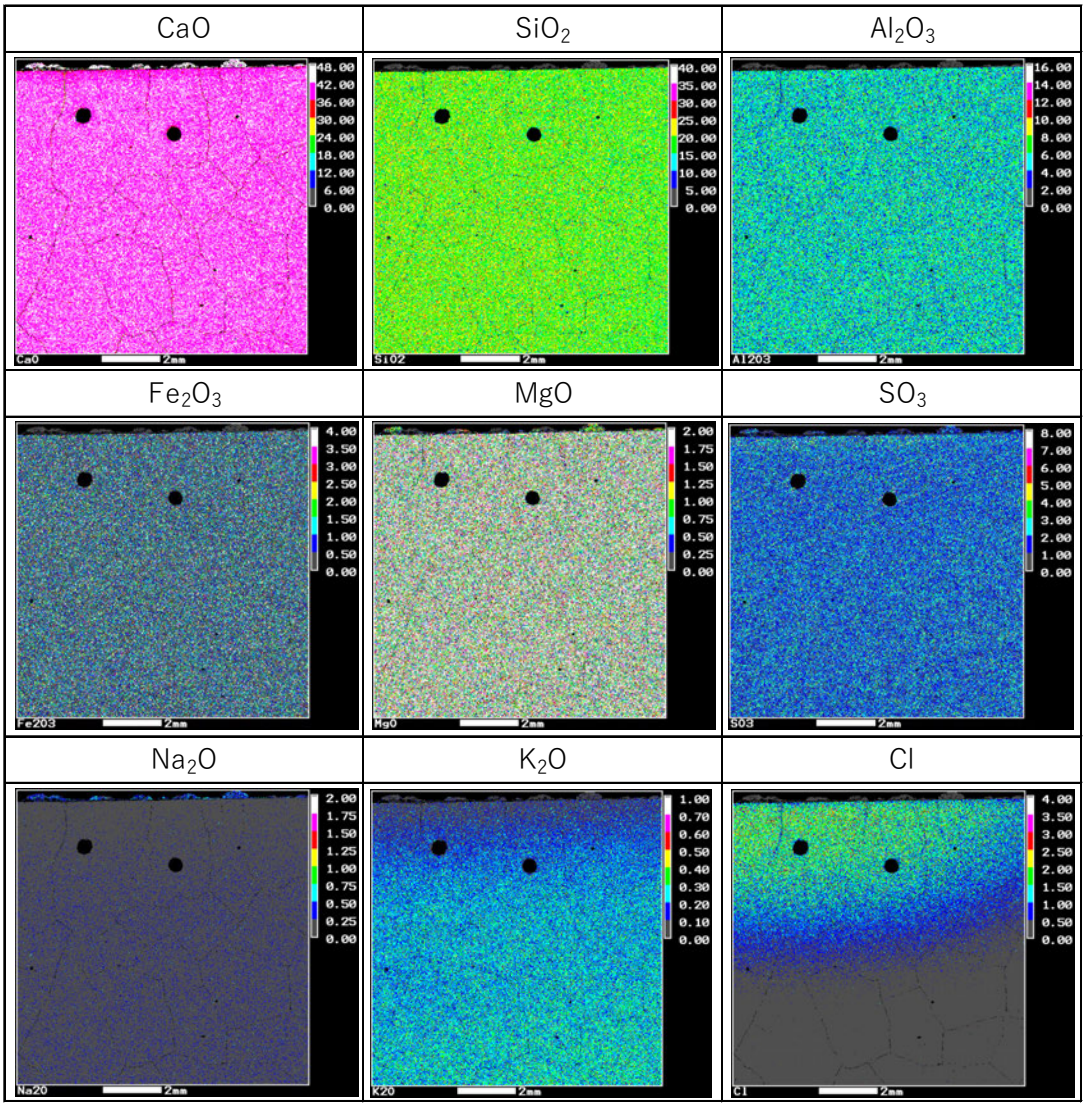


図 4-2- 24　FGB-2_214.75～220.52 m　セグメント想定 BFSC
10 箇月浸漬　EPMA 測定結果

(e)　空隙径分布の測定結果

SEM 反射電子像によるセメントペースト試料の空隙率の測定結果を力学的特性の硬度の測定結果と合わせて表 4-2- 21 に、ペースト試料の反射電子像の低輝度面積の変化率と硬度の変化率の関係を図 4-2- 25 に示す。

空隙径分布は、接液面近傍の変質部の領域がいずれの試験水準も狭く水銀圧入ポロシメータによる測定ができないため、SEM を使用した反射電子像の測定結果から画像解析により空隙率の変化を測定した。接液面近傍及び試料内部の反射電子像を SEM を使用して測定し、画像データに閾値を設けて二値化することで、原子密度の低い（輝度の低い）領域を空隙と定義し、試料内部の健全部と比較した。変質部と健全部の空隙の面積比は、1 より大きくなると空隙率が高くなり、硬度の変化は、1 より小さくなると力学的特性が低下していることを示している。

接液面近傍の化学変質及び硬度の低下が確認された FGB-2_167.70～171.78 m の吹付け想定 OPC、セグメント想定 OPC、FGB-2_214.75～220.52 m の OPC において空隙率の増加を確認した。反射電子像の低輝度面積の変化率と硬度の変化率の関係から、本検討で対象とした実地下水に 10 箇月間浸漬したペースト試料では、地下水の化学成分やセメントの種類及び配合によらず、空隙率と硬度は概ね直線関係にあり、空隙率の増加に伴い力学的特性が低下することを確認した。

硬度が低下している部分ではセメント成分の溶脱や Ettringite の生成にともなう組織の緩みのために空隙率が増加したものと考えられる。

表 4-2- 21　SEM 反射電子像によるセメントペースト試料の空隙率の測定結果

液相	試料種類	変質部（0-0.3mm）		健全部		変質部/健全部比	
		硬度（平均値）（kN/mm^2）	空隙率（面積率）	硬度（平均値）（kN/mm^2）	空隙率（面積率）	硬度の変化率	面積率比
FGB-2_167.70～171.78 m	吹付け想定OPC	1303	55.3	1646	41.4	0.79	1.34
	吹付け想定BFSC	1981	46.8	1258	58.1	1.57	0.80
	セグメント想定OPC	1212	57.4	1810	43.0	0.67	1.34
	セグメント想定BFSC	1853	56.8	1888	52.6	0.98	1.08
FGB-2_214.75～220.52 m	吹付け想定OPC	1281	62.0	1646	45.5	0.78	1.36
	吹付け想定BFSC	1581	62.2	1258	58.0	1.26	1.07
	セグメント想定OPC	1855	46.0	1810	43.3	1.02	1.06
	セグメント想定BFSC	2198	45.5	1888	56.8	1.16	0.80

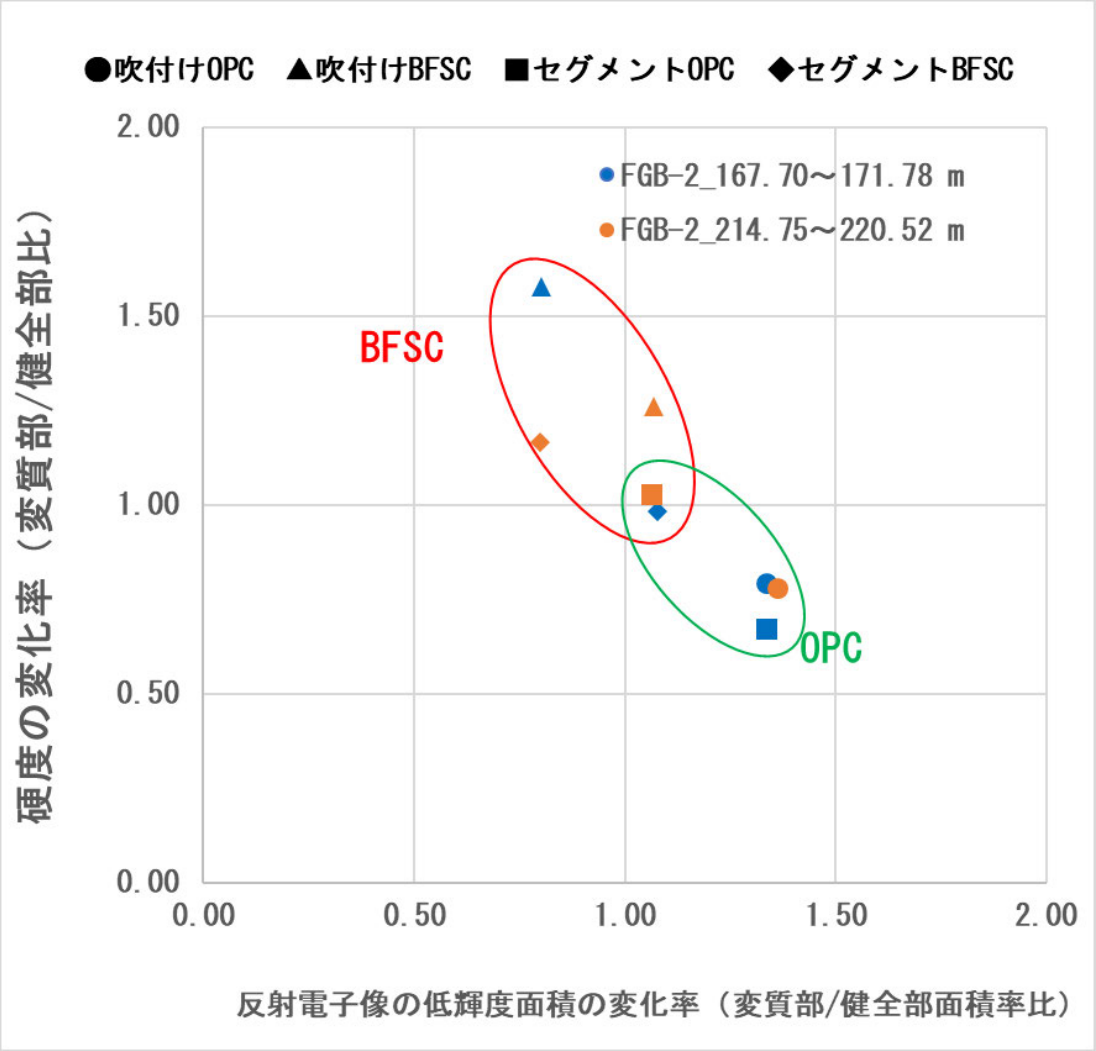


図 4-2- 25　ペースト試料の反射電子像の低輝度面積の変化率と硬度の変化率の関係

(f)　接液面近傍の元素組成分布の測定結果

接液面近傍の元素組成分布測定結果と硬度低下率を表 4-2- 22 に、人工海水に 3 箇月浸漬した吹付け想定 OPC の微細領域元素分布を図 4-2- 26 に、海水 B に 3 箇月浸漬吹付け想定 OPC の微細領域元素分布を図 4-2- 27 に、海水 G に 3 箇月浸漬した吹付け想定 OPC の微細領域元素分布を図 4-2- 28 に、降水 A に 3 箇月浸漬した吹付け想定 OPC の微細領域元素分布を図 4-2- 29 に、FGB-2_167.70～171.78 m に 10 箇月浸漬した吹付け想定 OPC の微細領域元素分布を図 4-2- 30 に、吹付け想定 BFSC の微細領域元素分布図 4-2- 31 に、FGB-2_214.75～220.52 m に 10 箇月浸漬した吹付け想定 OPC の微細領域元素分布を図 4-2- 32 に、吹付け想定 BFSC の微細領域元素分布を図 4-2- 33 に示す。

本検討では、セメント材料の化学変質が力学的特性に与える影響を確認する目的で、SEM-EDS による接液面近傍の反射電子像及び元素組成分布の観察を実施しするとともに、硬度の低下率（変質部/健全部）との比較を行った。

硬度が最も低下した海水 B 及び降水 A に浸漬した吹付け想定 OPC では、外部析出層は確認されなかった。海水 B 及び降水 A は S 濃度が高い模擬地下水であるが、他の水準と比較して観察領域の S 濃度は特別に高くはなく濃集も確認されていない。接液面に外部析出層が生成しないことからセメント成分の溶脱や地下水成分の浸透が阻害されないため、浸漬液とセメントの反応が抑制されなかったと考える。海水 B 及び降水 A では、微細なひび割れが確認された。

S の濃集が明確な水準は、海水 B、降水 A 及び FGB-2_214.75～220.52 m に浸漬した吹付け想定 OPC であった。これらの水準では、ひび割れも多く発生しており力学的特性も低下している。S の分布からエトリンガイトの生成がひび割れの発生に影響したと考えた。同様に、S の濃集が確認された人工海水に浸漬した吹付け想定 OPC も力学的特性は低下しているが、反射電子像で観察した範囲では、明らかなひび割れは見られない。また、FGB-2_214.75～220.52 m に浸漬した吹付け想定 BFSC では、S の濃集が確認されたが硬度の低下は確認されない。

視野の中で比較的粗大なひび割れが確認された人工海水、FGB-2_167.70～171.78 m 及び FGB-2_214.75～220.52 m の吹付け想定 OPC では、何れの試料についても、ひび割れ内に二次鉱物などの充填は確認されていない。また、海水 B 及び降水 A の吹付け想定 OPC は、接液面が平滑ではなく目視では確認できない表層の溶脱又は微細領域の剥離が生じていると考えられる。

硬度の低下が確認されてた FGB-2_167.70～171.78 m 及び FGB-2_214.75～220.52 m に浸漬した吹付け想定 OPC 粗大なひび割れや S の濃集が確認されるが、硬度の低下が確認されていない BFSC は、粗大なひび割れや S の濃集は無く、化学変質と力学的特性の関係を示していると考える。

表 4-2- 22　接液面近傍の元素組成分布測定結果と硬度低下率

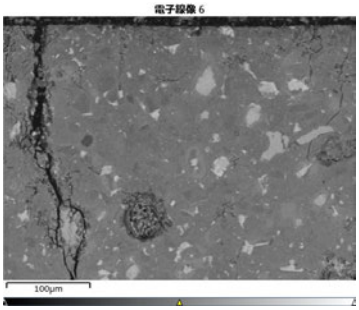
浸漬期間	液相	試料	反射電子像観察、分布評価			硬度低下率※2
			外部析出層	S の濃集	ひび割れ	
3 箇月	人工海水	吹付け想定 OPC	○※1	○		○
	海水 B	吹付け想定 OPC			○	◎
	海水 G	吹付け想定 OPC	○			
	降水 A	吹付け想定 OPC				◎
10 箇月	FGB-2_167.70 ～171.78 m	吹付け想定 OPC	○※1	○	○	○
		吹付け想定 BFSC	○			
	FGB-2_214.75 ～220.52 m	吹付け想定 OPC	○	○	○	○
		吹付け想定 BFSC	○	○		

※1：外部析出層は生成したが SEM 観察の範囲より離れている。（SEM 測定以外で確認）

※2：硬度低下率（変質部/健全部）○は 20%以上、◎は 30%以上低下した水準

人工海水 3箇月浸漬 吹付け想定OPC

分析視野(縦300μm×横400μm程度)



※外部析出層は生成したが界面より離れている

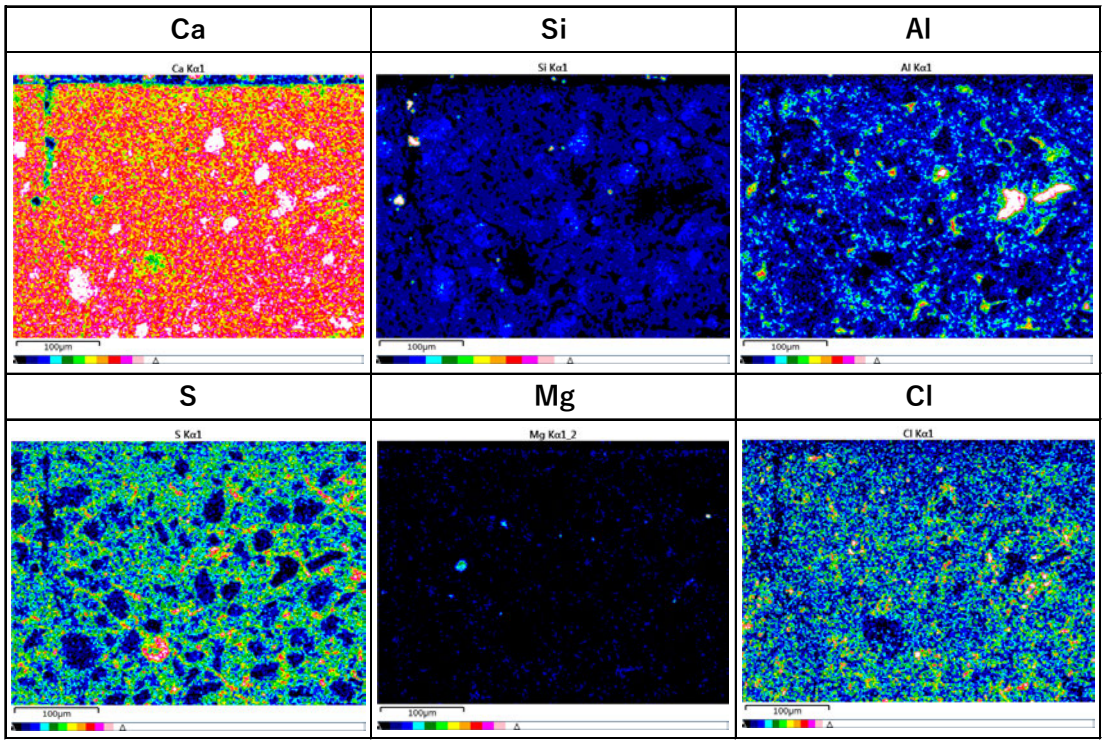


図 4-2- 26　人工海水　3 箇月浸漬　吹付け想定 OPC の微細領域元素分布測定結果

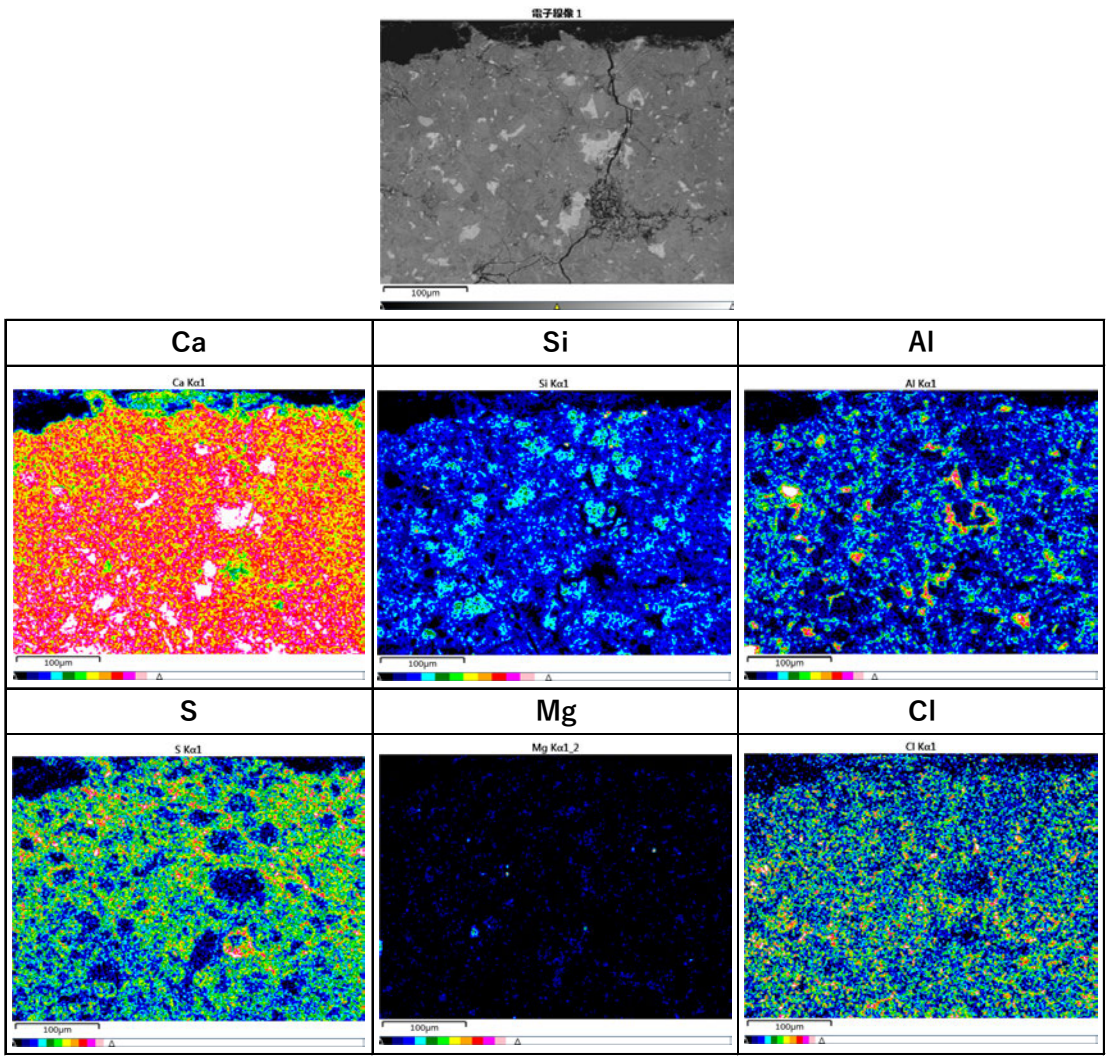


図 4-2- 27　海水 B　3 箇月浸漬　吹付け想定 OPC の微細領域元素分布布測定結果

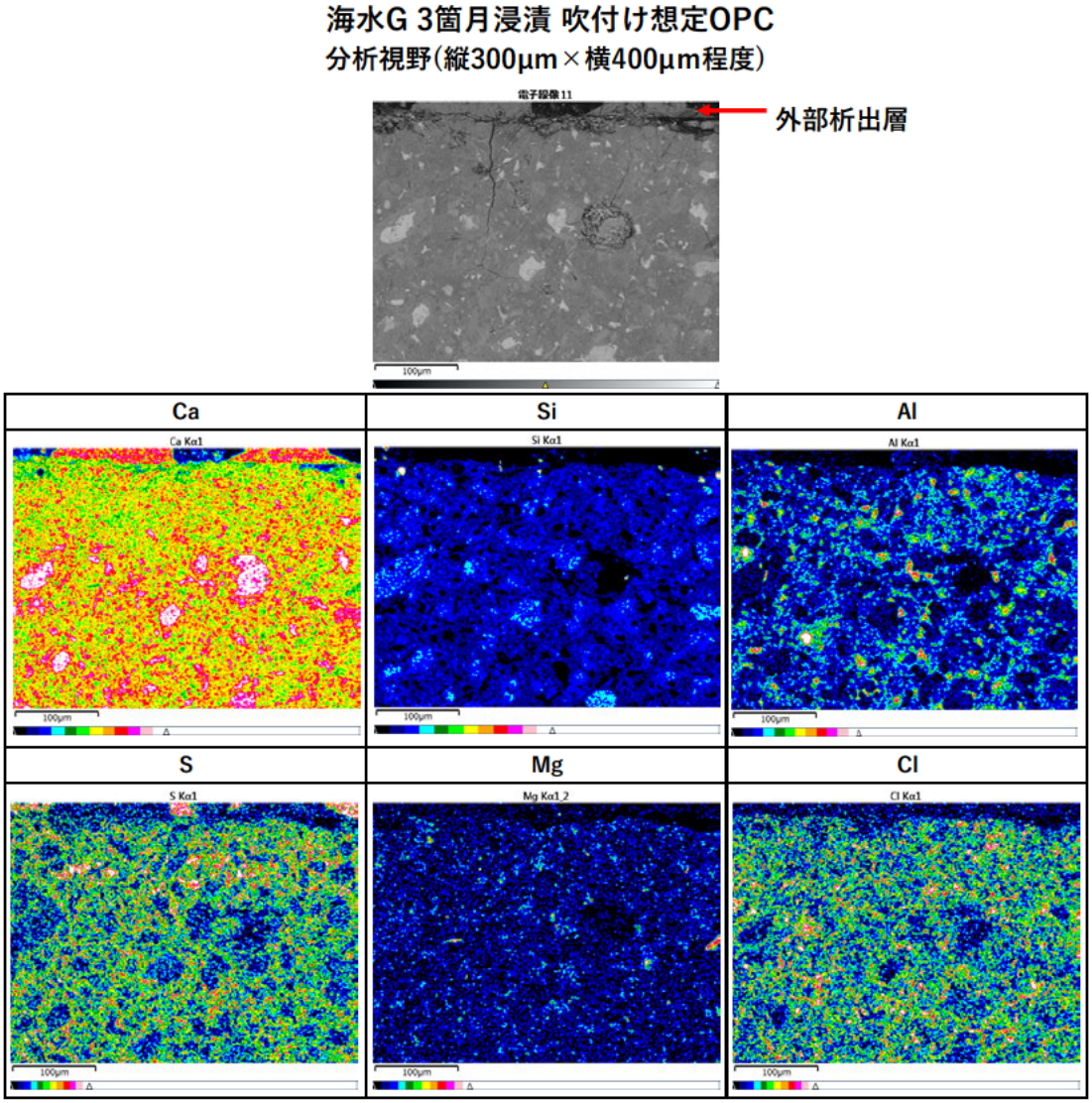


図 4-2- 28　海水 G　3 箇月浸漬　吹付け想定 OPC の微細領域元素分布布測定結果

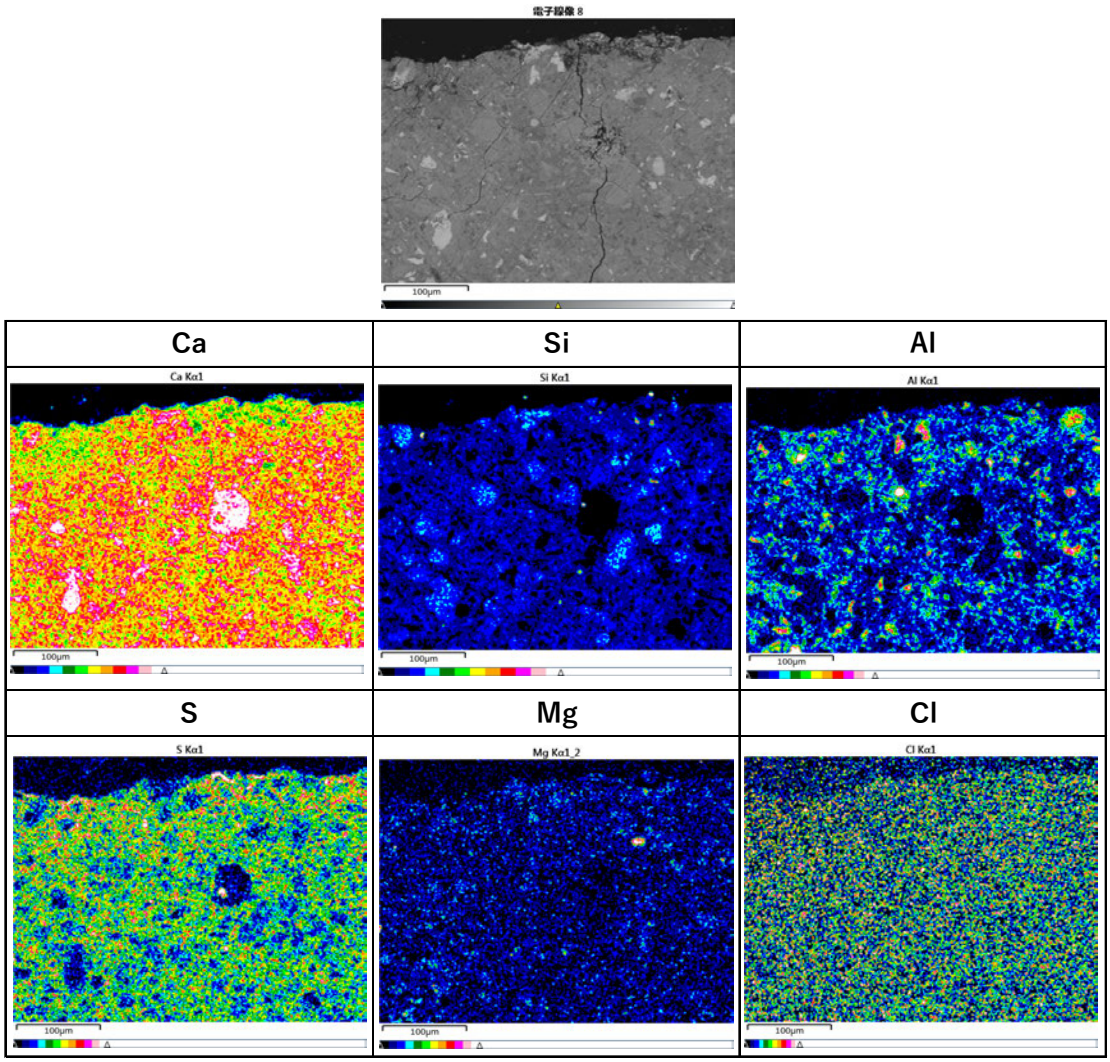


図 4-2- 29　降水 A　3 箇月浸漬　吹付け想定 OPC の微細領域元素分布測定結果

FGB-2_167.70～171.78 m 10箇月浸漬 吹付け想定OPC

分析視野(縦300μm×横400μm程度)

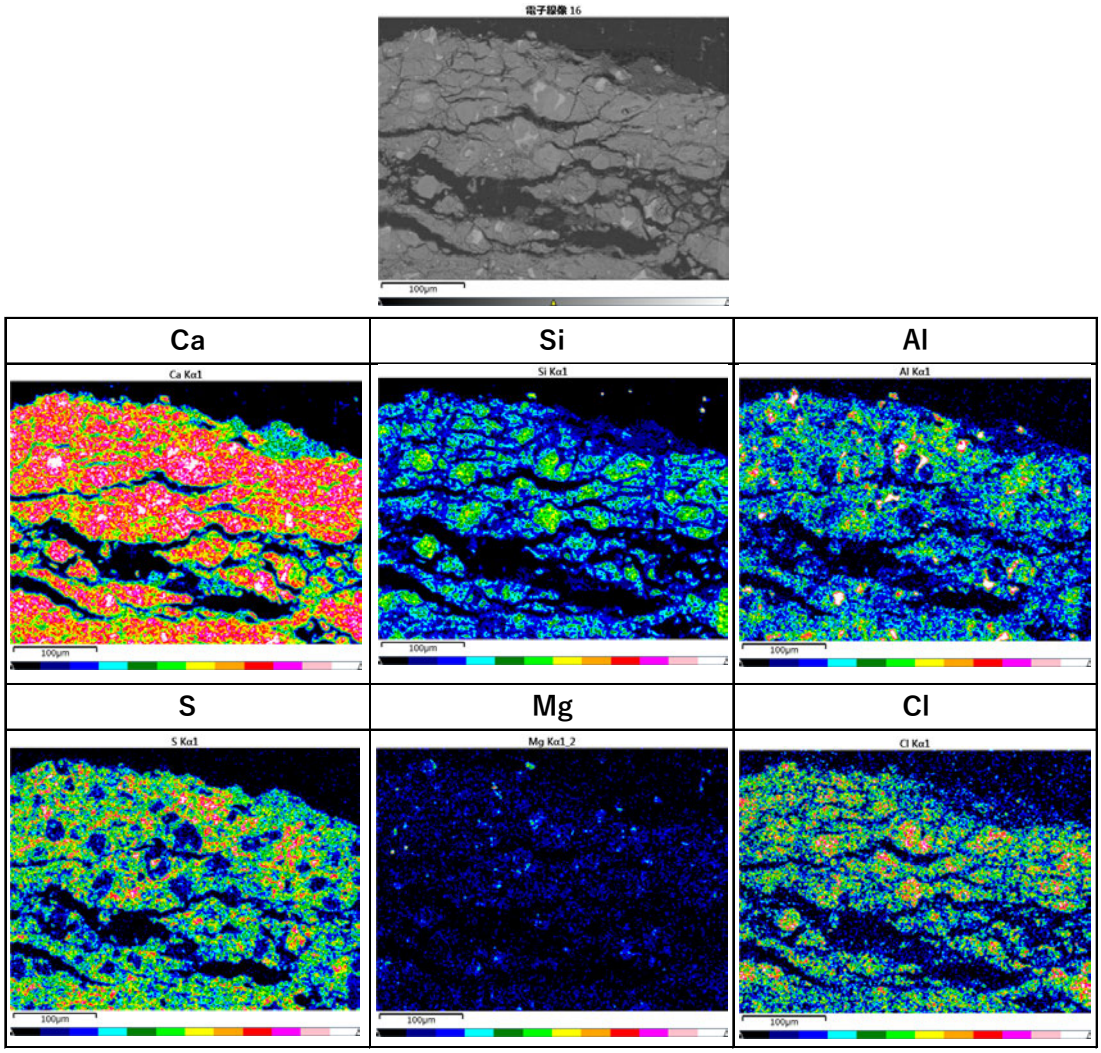


図 4-2- 30　FGB-2_167.70～171.78 m　10 箇月浸漬
吹付け想定 OPC の微細領域元素分布測定結果

FGB-2_167.70～171.78 m 10箇月浸漬 吹付け想定BFSC

分析視野(縦300μm×横400μm程度)

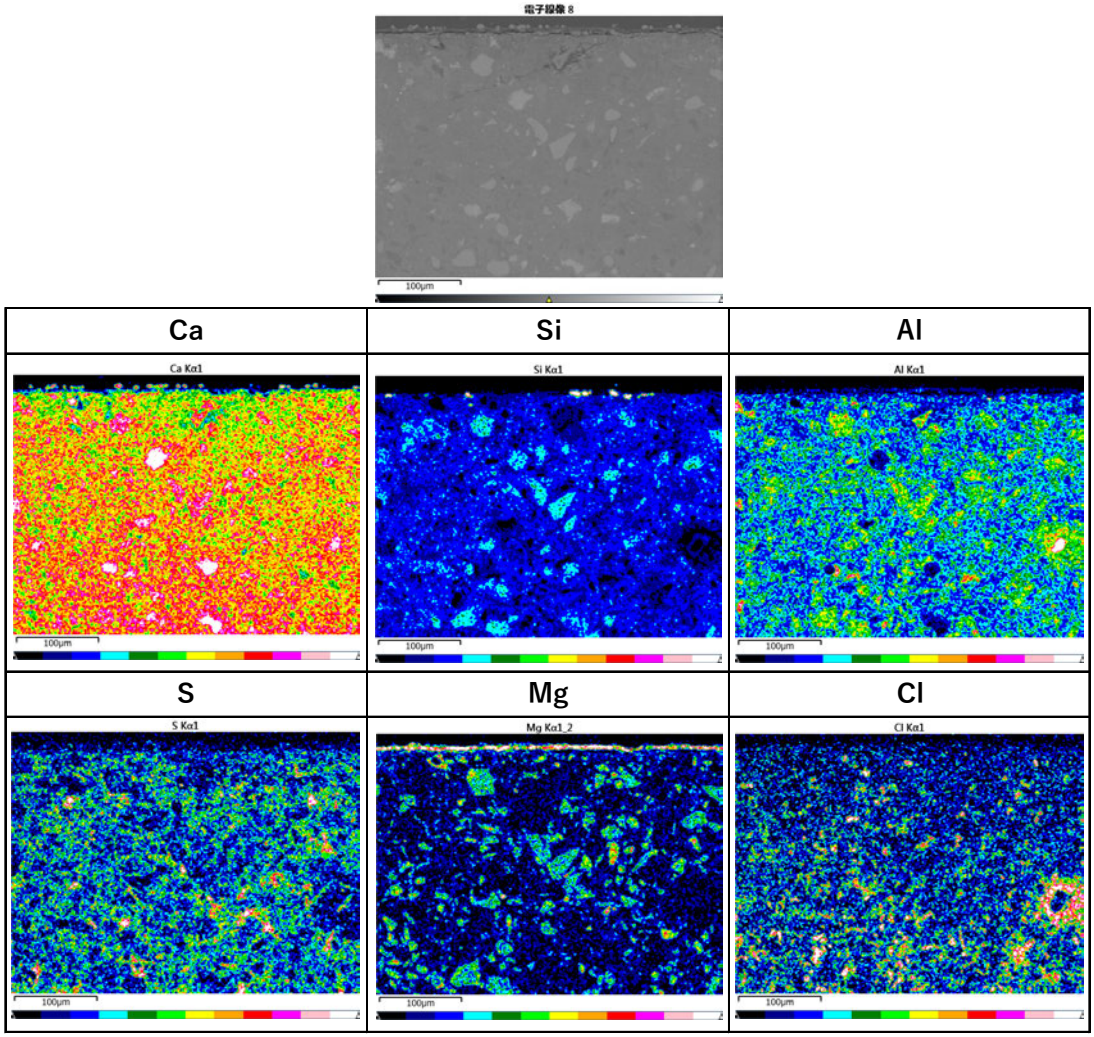


図 4-2- 31　FGB-2_167.70～171.78 m　10 箇月浸漬
吹付け想定 BFSC の微細領域元素分布測定結果

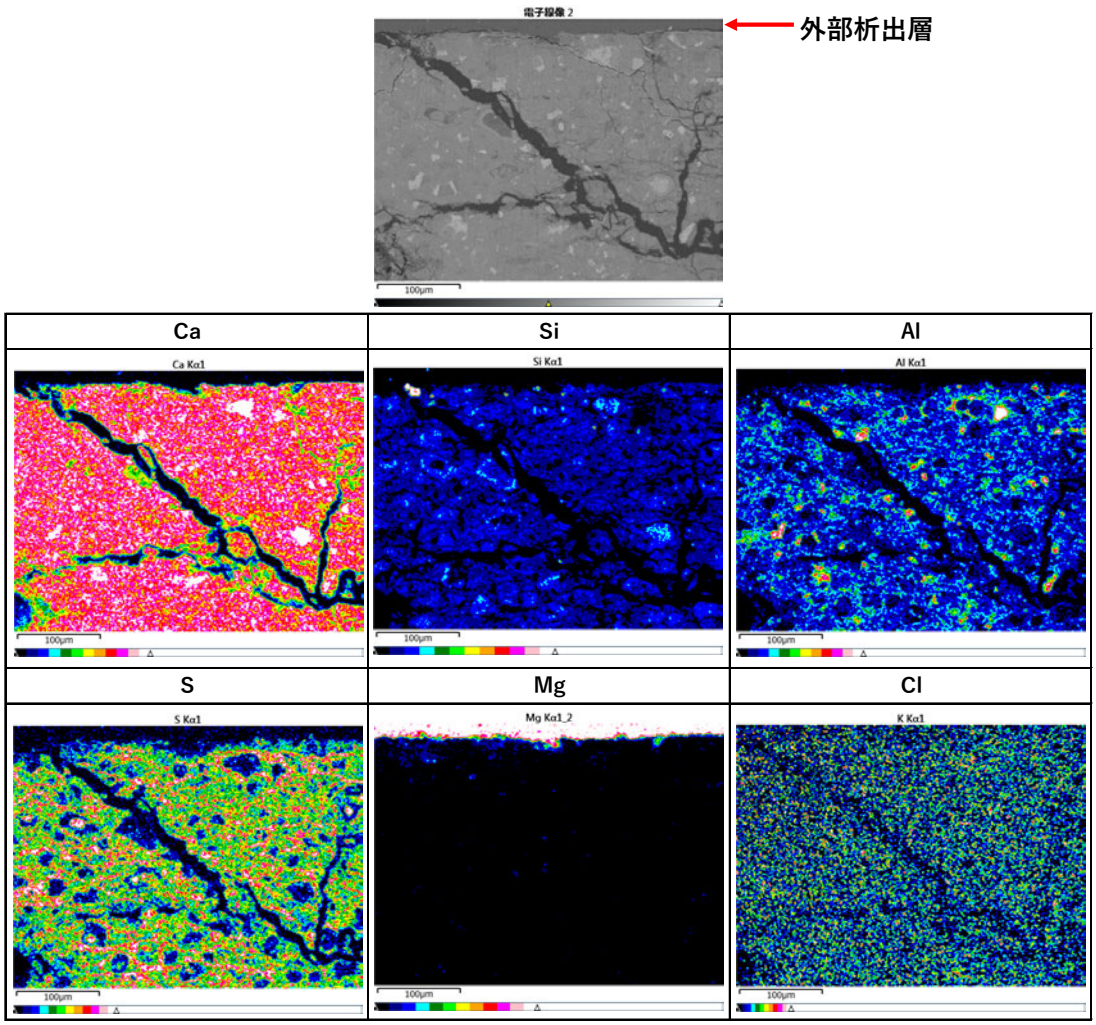


図 4-2- 32　FGB-2_214.75～220.52 m　10 箇月浸漬
吹付け想定 OPC の微細領域元素分布測定結果

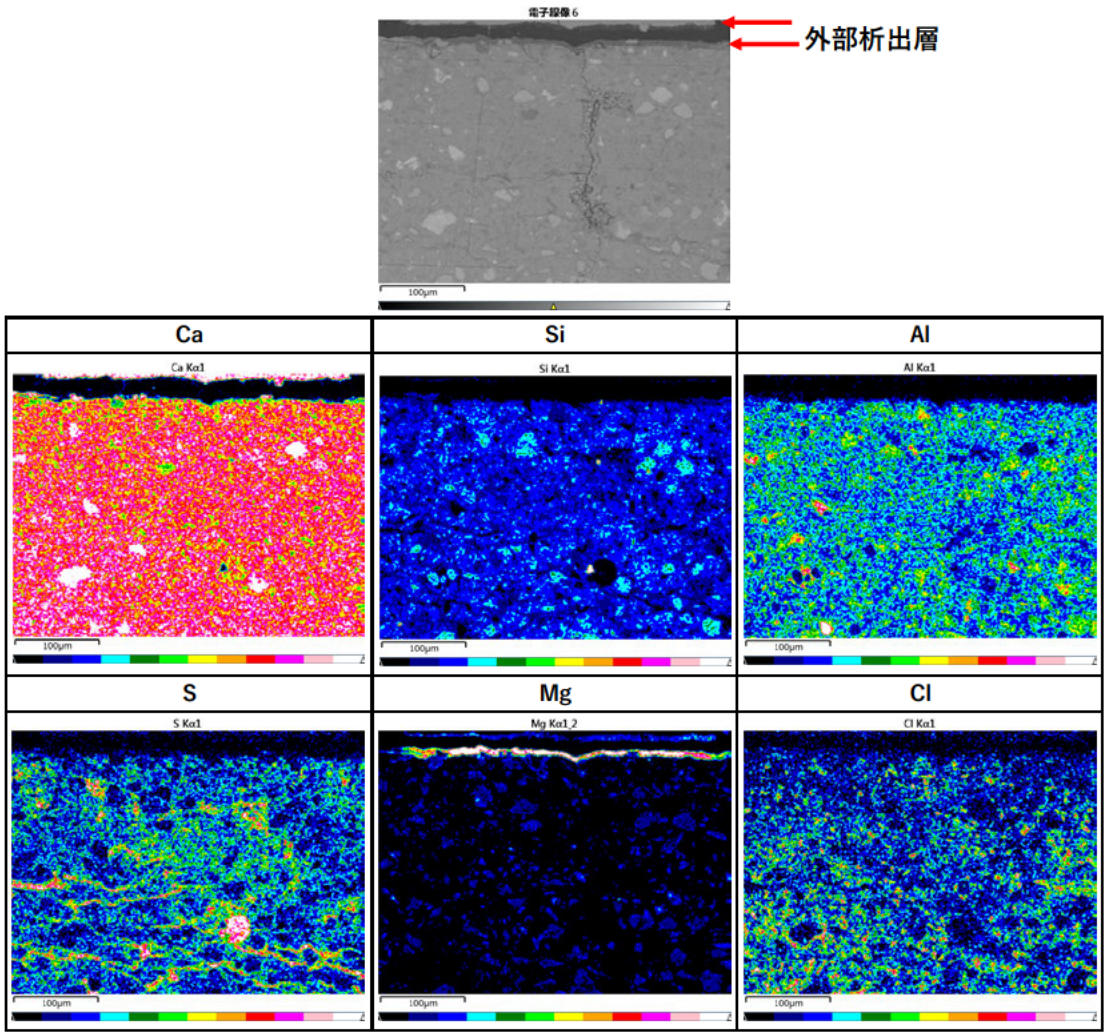


図 4-2- 33　FGB-2_214.75～220.52 m　10 箇月浸漬
吹付け想定 BFSC の微細領域元素分布測定結果

⑥　まとめ

地下水化学成分が硬度に与える影響（吹付け想定 OPC）を図 4-2- 35 に、地下水化学成分が硬度に与える影響（吹付け想定 BFSC）を図 4-2- 36 に、地下水化学成分が硬度に与える影響（セグメント想定 OPC）を図 4-2- 37 に、地下水化学成分が硬度に与える影響（セグメント想定 BFSC）を図 4-2- 38 に示す。

セメント系材料の化学変質に伴う力学的特性に関する検討を実施するため、沿岸部の地下で想定される地下水と支保工や覆工に使用が想定される OPC 及び BFSC のセメントペースト硬化体の化学変質と力学的特性の関係について試験を実施した。沿岸部の地下で想定される地下水として、令和 3 年度に浸漬試験を開始した実地下水 FGB-2_167.70～171.78 m 及び FGB-2_214.75～220.52 m の吹付け想定とセグメント想定のセメントペースト硬化体の分析及び硬度測定を実施するとともに、令和 3 年度に試験を実施した人工海水、海水 B、海水 G、降水 A 及び降水 D+F について、吹付け想定及びセグメント想定のセメントペースト硬化体の力学的特性を評価した。

沿岸部の地下水に含まれる化学成分の中で、コンクリートの化学変質や力学的特性に影響を与える可能性のある SO_4 と HCO_3 に着目し、浸漬試験を実施した試料の接液面近傍の硬度への影響を検討した。Ettringite を生成して海水影響を受けるコンクリートの劣化要因となる SO_4 濃度を縦軸に、$CaCO_3$ がコンクリートの表層に析出して劣化を遅延する可能性のある HCO_3 濃度を横軸に取り、実地下水に 10 箇月浸漬した後の硬度への影響と模擬地下水に 3 箇月浸漬した後の硬度への影響を合わせてプロットした。力学的特性の評価で実施した健全部の硬度に比べて表層部の硬度が 30%以上低下した水準を化学変質による力学的特性の低下が大きい水準として赤い丸で、健全部の硬度に比べて表層部の硬度の低下が 30%に満たない水準を化学変質による力学的特性の低下が大きくない水準として青い丸で示した。

吹付け想定 OPC を実地下水に 10 箇月間及び模擬地下水に 3 箇月間浸漬した後の力学的特性は、SO_4 濃度が高く HCO_3 濃度が非常に低い海水 B で 40%、降水 A で 54%と硬度が大きく低下していることを確認した。海水 B 及び降水 A に比べて SO_4 濃度が高い FGB-2_214.75～220.52 m 及び人工海水に浸漬した試料については、大きな硬度の低下は確認していない。また、SO_4 濃度が海水 B 及び降水 A と同程度の FGB-2_167.70～171.78 m についても大きな硬度の低下は確認していない。

吹付け想定 BFSC を実地下水に 10 箇月間及び模擬地下水に 3 箇月間浸漬した後の力学的特性は、全ての水準で 30%を超える大きな硬度の低下をしていないことを確認した。最も硬度の低下が大きい水準は、海水 B の 71%であった。

セグメント想定 OPC を実地下水に 10 箇月間及び模擬地下水に 3 箇月間浸漬した後の力学的特性は、人工海水、海水 B、降水 A 及び FGB-2_167.70～171.78 m で硬度の大きな低下を確認した。海水 B 及び降水 A と比べ SO_4 濃度が高い FGB-2_214.75～220.52 m や SO_4 濃度が低く HCO_3 濃度が非常に高い降水 D+F では大きな硬度の低下を確認していない。特

に HCO_3 濃度が低く SO_4 濃度が高い海水 B の硬度が健全部の 25%と大きく低下していることを確認した。

セグメント想定 BFSC を模擬地下水に 3 箇月間浸漬した後の力学的特性は、SO_4 濃度が高く HCO_3 濃度が非常に低い海水 B で大きな硬度の低下を確認した。

人工海水、海水 G 及び降水 A で 20%を超える硬度の低下を確認した。

地下水の化学成分の力学的特性への影響は、SO_4 濃度が高く HCO_3 濃度が低い海水 B が全ての試験水準で硬度の低下が観察され、硬度の低下の割合も最も大きくなっている。FGB-2_214.75～220.52 m 及び人工海水は、海水 B 及び降水 A に比べて SO_4 濃度は高いが、海水 B 及び降水 A に比べて硬度の低下割合が小さい。BFSC を使用している水準は、OPC に比べて硬度の低下は小さい水準が多く、セグメント想定 BFSC を除くすべての水準で大きな硬度の低下を確認していない。海水環境下での力学的特性低下の原因となるエトリンガイト生成に必要な SO_4 濃度の高い水準の方が硬度の低下率が大きくなるのではなく、化学変質を抑制すると考えられる HCO_3 濃度によって化学変質や力学的特性の変化に影響すると考えられる。

海水 G、降水 D+F 及び FGB-2_214.75～220.52 m については、全ての水準で大きな硬度の低下を確認していない。

令和 4 年度までに得られた知見から、沿岸部の地下環境下想定される地下水と接触するセメントの化学変質は、地下水に含まれる S との反応で生成するエトリンガイトの影響に加えて、セメント成分の化学変質を抑制すると考えられる HCO_3 の影響も大きいと考えられる。本検討の範囲では、地下水の S 濃度が海水の 1/2 程度で HCO_3 濃度低い地下水と接触していた試料の化学変質と力学的特性の硬度の低下が最も大きい結果となった。支保工に使用するセメントは、OPC に比べ BFSC の方が化学変質適の進展や力学的特性の低下が緩やかに進行すると考えられる。支保工建設の施工方法として吹付け工法とシールド工法を想定したセグメントを想定したセメントペーストの化学変質と力学的特性の試験の結果から、何れの工法を選択しても化学変質の観点からは大きな差異は無いことを確認した。

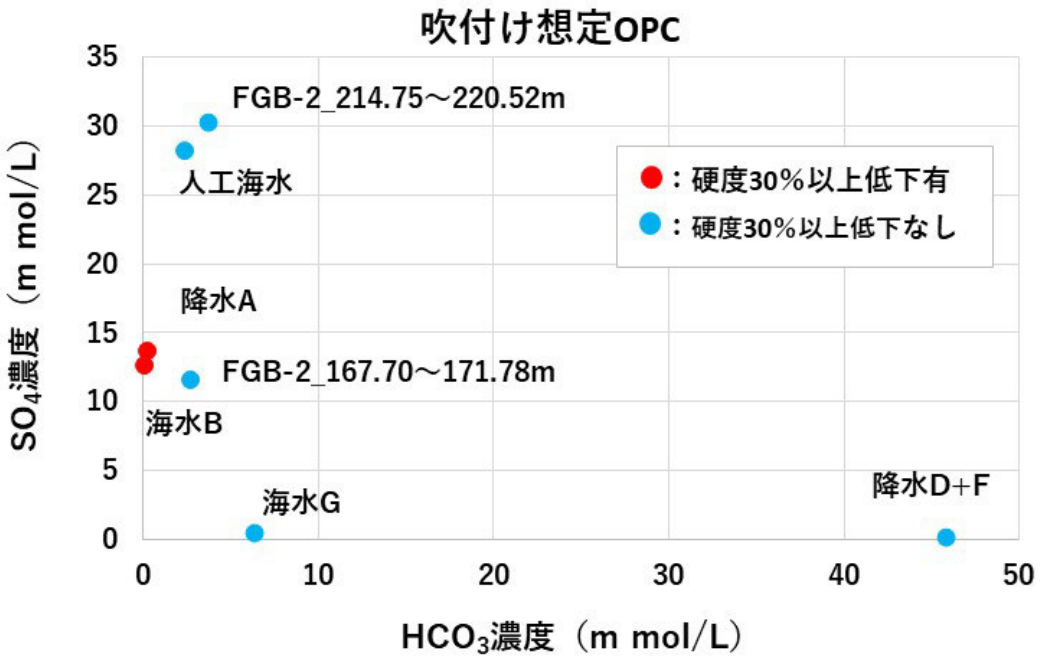


図 4-2- 34　地下水化学組成が硬度に与える影響（吹付け OPC）

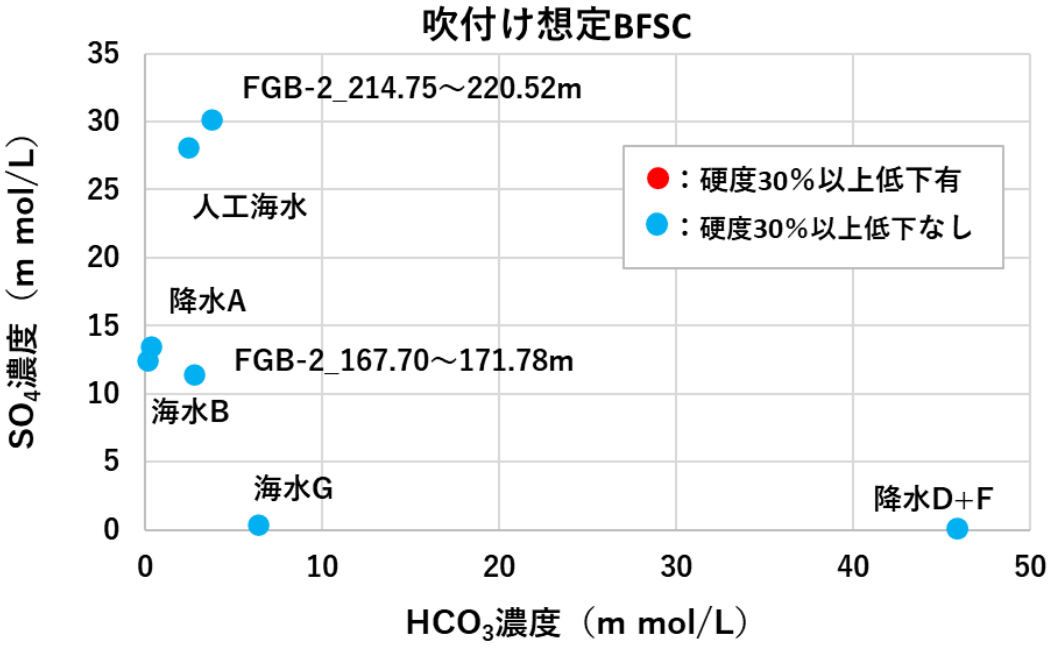


図 4-2- 35　地下水化学成分が硬度に与える影響（吹付け想定 BFSC）
（模擬地下水 3 箇月浸漬、実地下水 10 箇月浸漬後の硬度）

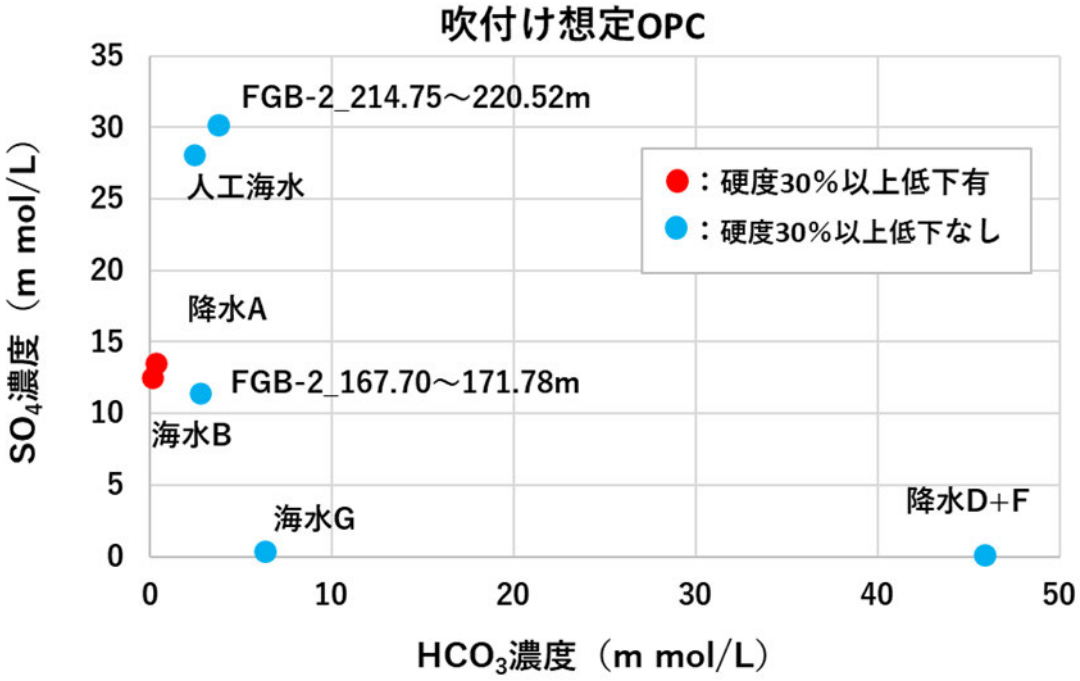


図 4-2- 36　地下水化学成分が硬度に与える影響（セグメント想定 OPC）
（模擬地下水 3 箇月浸漬、実地下水 10 箇月浸漬後の硬度）

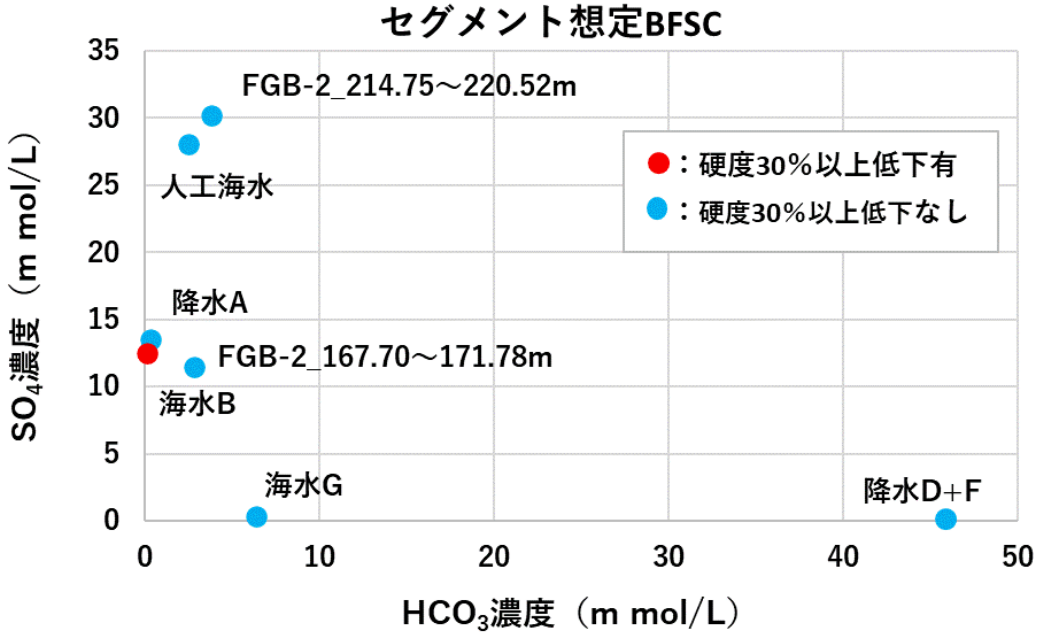


図 4-2- 37　地下水化学成分が硬度に与える影響（セグメント想定 BFSC
（模擬地下水 3 箇月浸漬、実地下水 10 箇月浸漬後の硬度）

（3）現実的な材料及び条件における化学変質と力学的特性に関する検討

① 目的

令和 4 年度は、令和 2 年度に開始した吹付けコン及びセグメントで処分場における部材周辺の現実的条件（セメント系材料と岩盤との接触部付近での地下水流動など）を模擬した試料の変質状況を確認するとともに、力学的特性としてナノインデンテーション法による硬度及びヤング率の変化を評価することを目的に試験を実施した。流速や浸漬液を変えた水準の試験を開始し、地下水流速が支保コンクリートの変質に与える影響を確認した。また、現実的な環境を模擬したコンクリートの化学変質について、化学変質解析の検証データとした。

② 試験方法

(a) 各部材で想定した環境条件

本検討では、実環境における地下水流動を考慮した条件において、処分場での使用が想定されるコンクリートの化学変質及び変質の進展について評価するとともに、化学変質に伴う力学的特性の変化について検討した。

支保工の部材として想定した吹付けコン、セグメント（以上は、支保工）、覆工（現場打設）コンクリートの環境条件を**図 4-2- 38** に示す。各コンクリートは、それぞれ設置環境が異なるため、それぞれの環境条件に合わせた試験方法を設定した。吹付けコンは岩盤壁面と支保コンクリートの隙間を地下水が移動すると考えられるため、動的条件を模擬できるフロースルー試験を実施した。セグメント及び現場打設コンクリートは低透水の裏込め材や遮水シートの処置が施される事が想定されるため、静的または微動条件を模擬できる浸漬試験を実施した（産業技術総合研究所, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 2021）。

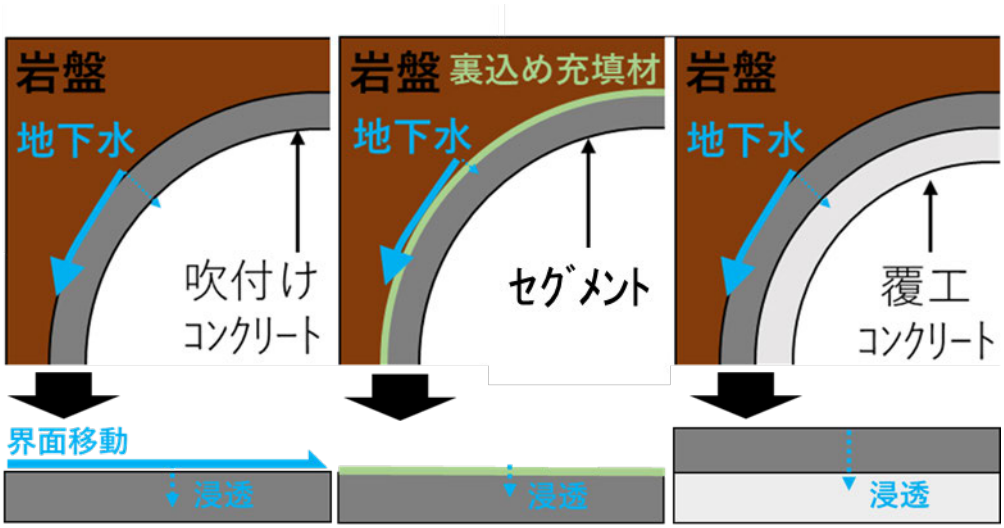


図 4-2- 38　各部材で想定した環境条件

(b) 試験水準

吹付けコン試料による浸漬試験の試験水準を表 4-2- 23 に、セグメント試料による浸漬試験の試験水準を表 4-2- 24 に、界面確認試験の試験水準を表 4-2- 25 に示す。

令和 2 年度に開始した変質試験では、浸漬液として人工海水を使用している。令和 3 年度には、FGB-2_167.70～171.78 m に対する変質試験を開始した。また、令和 2 年度のセメントペーストを用いた試験では Ca 溶脱などの変質の程度が最も大きかった降水系地下水のうち、SO_4 濃度が高い地下水（降水 A）について変質試験を開始した。加えて、フロースルー法では、人工海水の流速を令和 2 年度の 10 倍とした試験を開始した。これらの試験は令和 4 年度も継続中である。

変質試験で用いている試料は、吹付けコンとセグメントである。混合セメントのセメント種については、塩水環境におけるトンネル工事では OPC と BFSC の使用実績が多いこと、既往の検討結果（産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所,2017;2018;2019）より BFSC と FAC の変質は同様の傾向を示すと考えられることから BFSC を選択している。

令和 4 年度は、表 4-2- 23 及び表 4-2- 24 に示した吹付けコン及びセグメントの浸漬期間 10 箇月の試料（表中の●）について分析及び硬度測定を実施した。この試験で得たデータから、実環境を模擬した変質試験による化学変質と力学的特性の関係について体系的に整理した。

また、界面確認試験については、浸漬試験を継続するとともに、浸漬試験期間 20 箇月後の接液面の二次鉱物の生成状況について確認した。

表 4-2- 23　吹付けコン試料による浸漬試験の水準

項目	試験名		コンクリート試料の浸漬試験							
	コンクリートの種類		吹付けコン（フロースルー法）							
	セメントの種類		OPC				BFSC			
	浸漬期間（箇月）		3	10	20	30	3	10	20	30
海水系	人工海水	流速小		○		△		○		△
		流速大	○	●	△		○	●	△	
	B									
	G									
降水系	A		○	●	△		○	●	△	
	D＋F									
実地下水	FGB-2_167.70～171.78 m		○	●	△		○	●	△	

○：令和 3 年度に実施済み

●：令和 4 年度に分析及び硬度測定を実施

△：令和 4 年度は継続し令和 5 年度に分析予定

表 4-2- 24　セグメント試料による浸漬試験の水準

項目	試験名	コンクリート試料の浸漬試験										
	コンクリートの種類	セグメント（浸漬法）										
	セメントの種類	OPC				BFSC				FAC		
	浸漬期間（箇月）	3	10	20	30	3	10	20	30	10	20	30
海水系	人工海水		○		△		○		△	○		△
	B											
	G											
降水系	A	○	●	△		○	●	△				
	D＋F											
実地下水	FGB-2_167.70～171.78 m	○	●	△		○	●	△				

○：令和 3 年度に実施済み

●：令和 4 年度に分析及び硬度測定を実施

△：令和 4 年度は継続し、令和 5 年度に分析予定

表 4-2- 25　コンクリート表面への二次鉱物生成の確認試験の試験水準

項目	試験名	界面観察試験（浸漬法）			
	コンクリートの種類	吹付けコン		セグメント	
	セメントの種類	OPC	BFSC	OPC	BFSC
	浸漬期間（箇月）	20	20	20	20
海水系	人工海水	△	△	△	△
	B				
	G	△	△	△	△
降水系	A	△	△	△	△
	D＋F	△	△	△	△

△：令和 4 年度は浸漬試験を継続し、20 箇月経過時点の二次鉱物生成状況を確認した

（c） コンクリート試料の配合

試験に使用した吹付けコンのベースコンクリートの配合を表 4-2- 26 に、セグメントの配合を表 4-2- 27 に示す。

吹付コンクリートのベースコンクリートは、吹付け想定のセメントペースト試料と同じ水セメント比 45wt%とした。急結剤は、コンクリートの吹付け工程でベースコンクリートに対して 10wt%添加した。

セグメントは、セグメント想定のセメントペースト試料と同じ水セメント比 40wt%とした。BFSC は、OPC と BFS を混合して調整し、BFSC に占める BFS の割合は、セメントペースト試料と同じ 45wt%とした。

表 4-2- 26　吹付けコンのベースコンクリートの配合

試験体の種類	W/C (%)	s/a (%)	混和材/粉体 (%)	単位量　(kg / m³)						
				W	C	BFS	S1	S2	G1	SP1※ (B×%)
OPC	45	60	－	203	450	－	606	404	673	0.2
BFSC	45	60	45	203	248	203	600	400	667	0.2

注）※1：SP1 は、B（結合材：　B（結合材：OPC は C、BFSC は C+BFS からなる）に対する質量割合で添加した。また、急結剤は、吹付け工程で B に対して質量割合で 10%添加しているが、配合表には含まない。

表 4-2- 27　セグメントの配合

試験体の種類	W/C (%)	s/a (%)	混和材/粉体 (%)	単位量　(kg / m³)								
				W	C	BFS	FA	S1	S2	G2	G3	SP2※ (B×%)
OPC	40	40	－	140	350	－	－	467	311	467	701	0.5
BFSC	40	40	45	140	192	158	－	464	309	464	697	0.4
FAC	40	40	30	140	245	－	105	458	305	458	687	0.3

注）※2：SP2 は、B（結合材：OPC は C、BFSC は C+BS、FAC は C+FA からなる）に対する質量割合で添加した。

(d)　浸漬試験の条件

(i)　吹付けコン

吹付けコンのフロースルー試験の試験条件を表 4-2- 28 に、概略図を図 4-2- 39 に示す。

試験体は 50 mm×50 mm×長さ 200 mm とし、吹付け型枠面を接液面にして、その他の面を被覆した。令和 3 年度から開始した降水 A 及び FGB-2_167.70～171.78 m の流速は、令和 2 年度に開始した人工海水と同じ 0.12 ml / cm^2 / 日程度とした。また、人工海水で流速を令和 2 年度と異なる水準の流速は、試験溶液とコンクリートとの反応がコンクリートの表面から内側か外側のどちらに進むのか、令和 2 年度開始した水準との比較が可能な条件として現実的な速度で十分に速い令和 2 年度の 10 倍で開始した。

(ii)　セグメント

セグメントの浸漬試験の試験条件を表 4-2- 29 に、浸漬試験の模式図を図 4-2- 40 に示す。

試験体は Φ100 mm×長さ 200 mm の円柱供試体を長手方向に 1/4 にカットした扇形とし、型枠面（底面）の一面を接液面にして、その他の面を被覆した。浸漬液量は 1 試料あたり 500 ml とし、密閉容器に封入した。

(iii)　コンクリート表面への二次鉱物生成

コンクリート表面への二次鉱物生成の確認試験の試験条件を表 4-2- 30 に、コンクリートの接液面への二次鉱物生成の確認試験の模式図を図 4-2- 41 に示す。

試験体は Φ100 mm×長さ 200 mm の円柱供試体を長手方向に 1/4 にカットした扇形とし、型枠面（底面）の一面を接液面にして、その他の面を被覆した。浸漬液量は 1 試料あたり 500 ml とし、密閉容器に封入した。

表 4-2- 28　吹付けコンのフロースルー試験の試験条件

項目		詳細
試験体条件	試料形状	開放面 50 mm×50 mm、長さ 200 mm 角柱
	開放面	吹付け型枠面
	前養生	打設後、常温で封緘養生
模擬地下水条件	流速 1	0.12 ml /cm² / 日程度（2.9 ml / 1 試料面 / 日）
	流速 1 の水準の試験の液性	模擬地下水：人工海水（令和 2 年度開始） 模擬地下水：降水 A（令和 3 年度開始） FGB-2_167.70～171.78 m（令和 3 年度開始）
	流速 2	1.2 ml / cm² / 日程度（29 ml / 1 試料面 / 日）
	流速 2 の水準の試験の液性	人工海水（令和 3 年度開始）
その他	接液面状態	開放面の上部に 1 mm 幅の模擬流路

表 4-2- 29　セグメントの浸漬試験条件

項目		試験条件
試験体条件	試料形状	開放面Φ100 mm の 1/4 の扇形、長さ 200 mm
	開放面	型枠面（底面）
	前養生	常温で封緘養生、セグメントは 60℃で 2 時間の蒸気養生後常温で封緘養生
模擬地下水条件	液性	模擬地下水：人工海水（令和 2 年度開始） 模擬地下水：降水 A（令和 3 年度開始） FGB-2_167.70～171.78 m（令和 3 年度開始）
	液固比	500 ml / 試料
その他	接液面状態	開放面を下向き静置（補助台を設ける）

表 4-2- 30　コンクリート表面への二次鉱物生成の確認試験の試験条件

項目		詳細
試験体条件	試料形状	開放面Φ100 mm の 1/4 の扇形、長さ 50 mm
	開放面	型枠底面
	前養生	打設後（セグメントは 60 ℃で 2 時間の蒸気養生後）、常温で封緘養生
模擬地下水条件	液性	模擬地下水：人工海水、海水 G、降水 A、降水 D+F
	液固比	500 ml / 試料
その他	接液面状態	開放面を下向き静置（補助台を設ける）

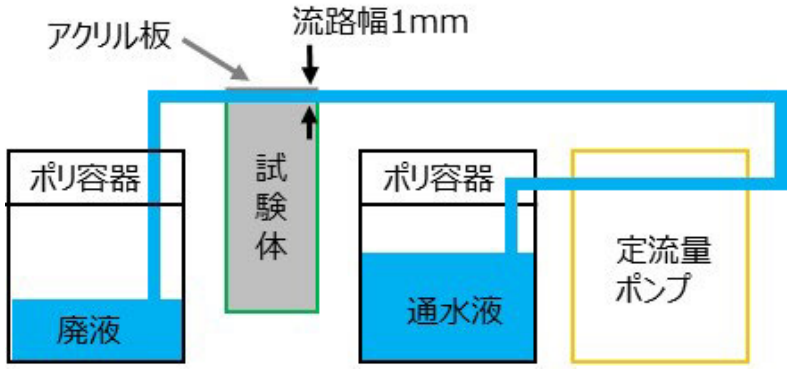


図 4-2- 39　フロースルー試験の模式図

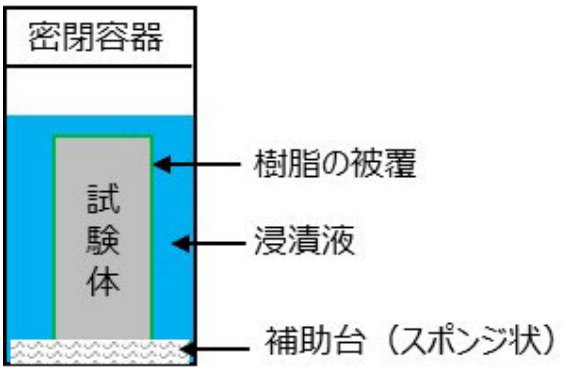


図 4-2- 40　浸漬試験の模式図

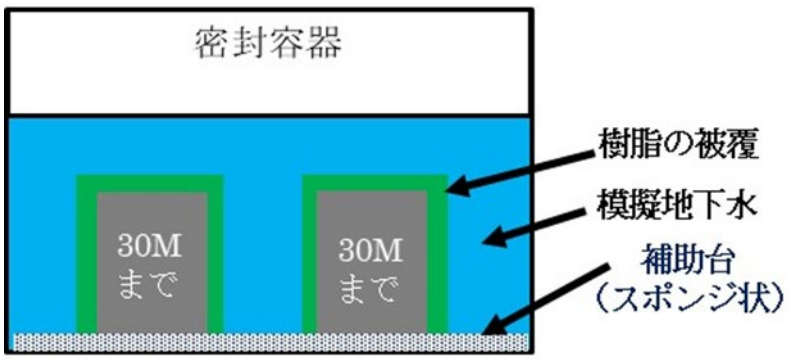


図 4-2- 41　コンクリート表面への二次鉱物生成の確認試験の模式図

(e)　析項目及び分析方法

浸漬期間 10 箇月を経過した吹付コンクリートの試験水準表 4-2- 23 及びセグメントの試験水準表 4-2- 24 の●について、以下の項目の分析を実施した。

(i)　低アルカリ性化領域の評価

試験方法は、４－２（２）(a)　低アルカリ性化領域の評価と同じ方法で実施した。

(ii)　鉱物相の同定

試験方法は、４－２（２）(b)　鉱物相の同定と同じ方法で実施した。

(iii)　力学的特性の評価

試験方法は、４－２（２）(c)　力学特性と同じ方法で実施した。なお、健全部のデータは、降水 A に浸漬した各試料（吹付けコン OPC、吹付けコン BFSC、セグメント OPC 及びセグメント BFSC）の接液面から十分離れた位置（40mm 程度）を対象に測定を実施した。

(iv)　元素組成分布

試験方法は、４－２（２）(d)　元素組成分布と同じ方法で実施した。なお、降水 A に浸漬したセグメント OPC については、接液面近傍に粗骨材が存在していたため、600×500 ピクセルで試料断面の元素組成分析を実施した。

(v)　空隙径分布

試験方法は、４－２（２）(e)　空隙径分布と同じ方法で実施した。

(vi)　コンクリート表面への二次鉱物生成の確認

海洋環境下でのコンクリートの表面に二次鉱物が生成した事例、生成しない事例があることから、沿岸部の処分場を想定した地下水条件で、コンクリートの接液面への二次鉱物生成状況を確認する。令和 4 年度は、令和 2 年度に浸漬を開始した試料について、浸漬期間 20 か月経過後に目視にてコンクリート表面の二次鉱物生成状況を確認した。

③　試験結果

(a)　低アルカリ性化領域の測定結果

コンクリート試料の 10 箇月間浸漬後の低アルカリ性化領域の評価結果を図 4-2- 42 に示す。

FGB-2_167.70～171.78 m 及び降水 A に 10 箇月浸漬した試料、人工海水で流速を早くした条件、FGB-2_167.70～171.78 m 及び降水 A でフロースルー試験に供した試料について、フェノールフタレインの溶液を噴霧した結果、いずれの試料においても pH 低下領域は認められなかった。このことから、いずれの試料も接液面近傍での著しい Ca 溶脱や炭酸化や表面から試料内部への Ca 溶脱や炭酸化による pH 低下は生じていないことを確認した。

(d)の EPMA 測定の結果からも、接液面近傍の Ca 濃度の変化は小さく、コンクリートの pH を 10 以下に低下させるような変質を生じていないことと整合する結果となっている。

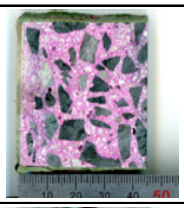
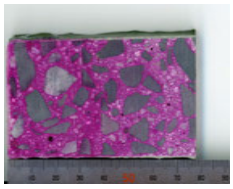
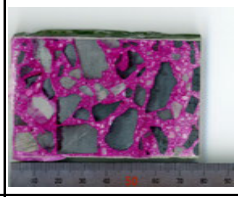
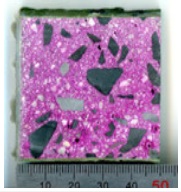
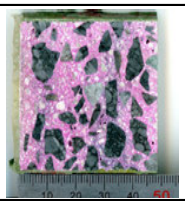
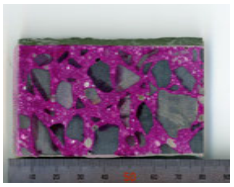
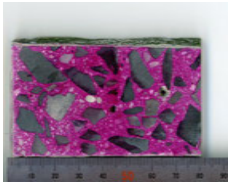
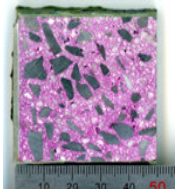
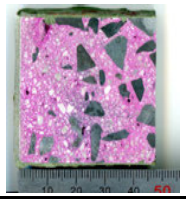
試料名 液種	吹付けコンOPC	吹付けコンBFSC	セグメントOPC	セグメントBFSC
降水A ※左が接液面側				
FGB-2_ 167.70～ 171.78 m ※左が接液面側				
人工海水 流速変更 ※左が接液面側			全ての試料で中性化領域は確認されなかった。	

図 4-2- 42　コンクリート試料の 10 箇月間浸漬後の低アルカリ性化領域の評価結果

(b) 鉱物相の同定の結果

降水 A に 10 箇月浸漬したコンクリート試料の μXRD 測定結果を表 4-2- 31 及び図 4-2-43 に、FGB-2_167.70～171.78 m に 10 箇月浸漬したコンクリート試料の μXRD 測定結果を表 4-2- 32 及び図 4-2- 44 に、流速を変更した人工海水に 10 箇月浸漬したコンクリート試料の μXRD 測定結果を表 4-2- 33 及び図 4-2- 45 に示す。

接液面近傍の結晶相を μXRD で測定した結果、降水 A、FGB-2_167.70～171.78 m 及び地下水流速を変えた人工海水のフロースルー試験の全ての水準で Calcite の存在を確認した。また、Cl を含む地下水の FGB-2_167.70～171.78 m 及び人工海水の全ての水準で Friedel's salt の生成を確認している。また、降水 A の吹付けコン BFSC では Monocarbonate の存在を確認した。

地下水に含まれる SO_3 との反応で生成する Ettringite は、何れの試料においても確認されていない。(d) 元素組成分布の測定結果から降水 A に浸漬した全ての試料の接液面近傍は SO_3 濃度が高く、Cl 型のアルミネート水和物である Friedel's salt が確認されていないことから S を含むアルミネート水和である Ettringite が生成している可能性があると思われる。しかしながら、本検討において μXRD の測定対象とした試料は、EPMA による元素組成分布の分析を実施した真空乾燥後に樹脂包埋処理をして鏡面研磨した試料のため、試料の乾燥過程で Ettringite の結合水が脱水して XRD のピークが観察できなくなったものと考える。

表 4-2- 31　降水 A　コンクリート試料 10 箇月浸漬　μXRD 測定結果

試験体種類	Calcite	Friedel's salt	Monocarbonate
吹付けコン OPC	○		
吹付けコン BFSC	○		○
セグメント OPC	○		
セグメント BFSC	○		

CC：Calcite、AFc：Monocarbonate

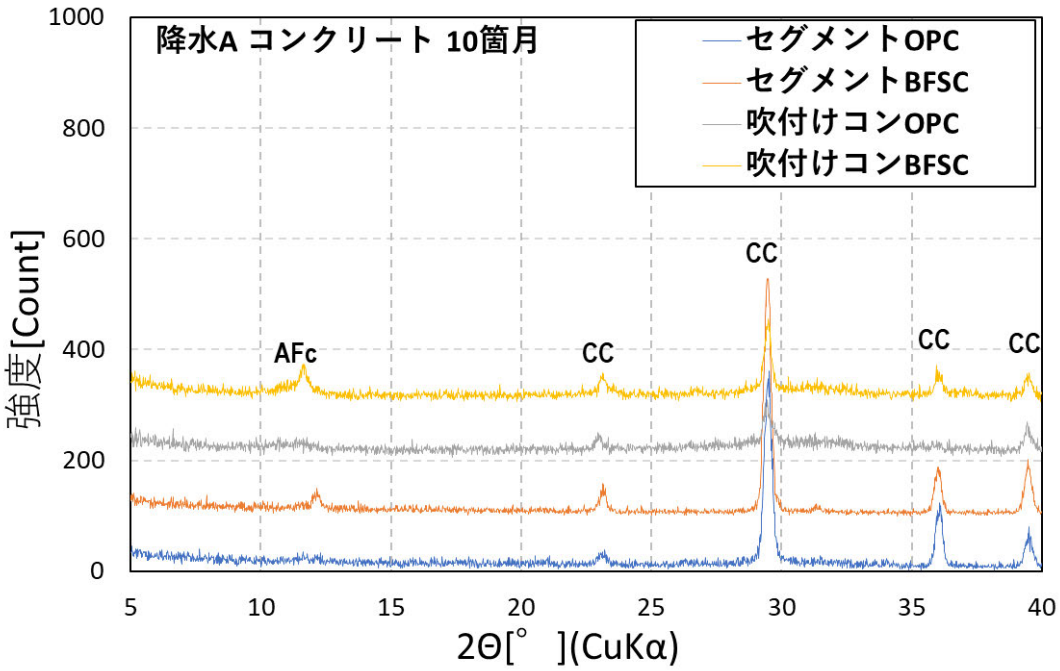


図 4-2- 43　降水 A　コンクリート試料 10 箇月浸漬　μXRD 測定結果

表 4-2- 32　FGB-2_167.70～171.78 m　コンクリート試料 10 箇月浸漬　μXRD 測定結果

試験体種類	Calcite	Friedel's salt	Monocarbonate
吹付けコン OPC	○	○	
吹付けコン BFSC	○	○	
セグメント OPC	○		
セグメント BFSC	○	○	

CC：Calcite、F：Friedel's salt

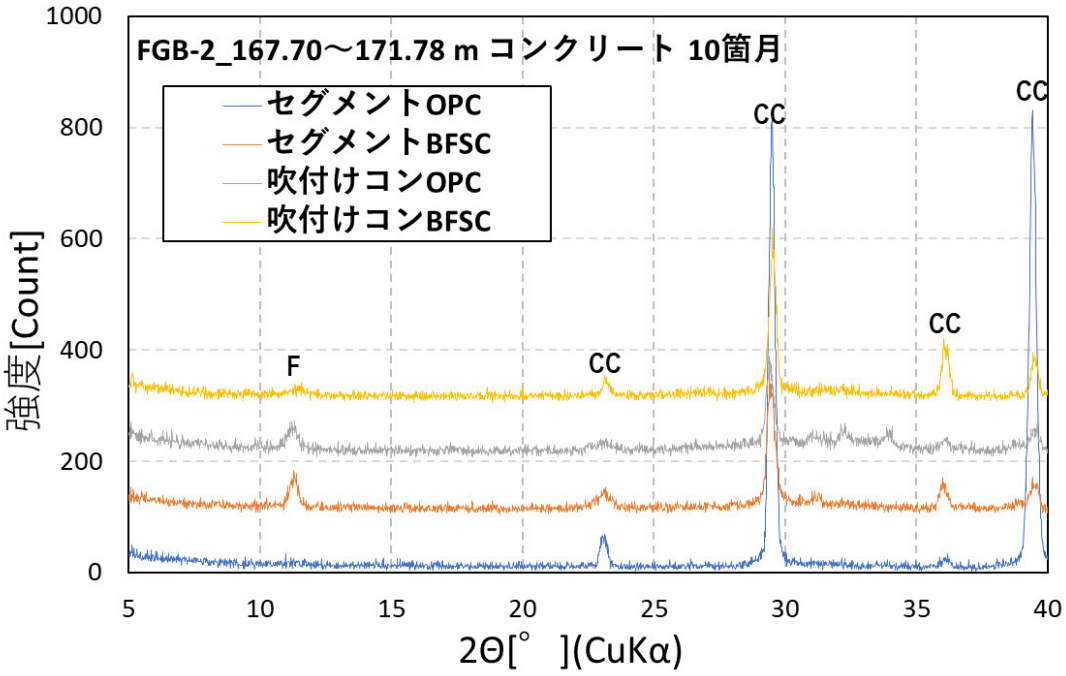


図 4-2- 44　FGB-2_167.70～171.78 m
コンクリート試料 10 箇月浸漬　μXRD 測定結果

表 4-2- 33　人工海水流速変更　コンクリート試料 10 箇月浸漬　μXRD 測定結果

試験体種類	Calcite	Friedel's salt	Monocarbonate
吹付けコン OPC	○	○	
吹付けコン BFSC	○	○	

CC：Calcite、F：Friedel's salt

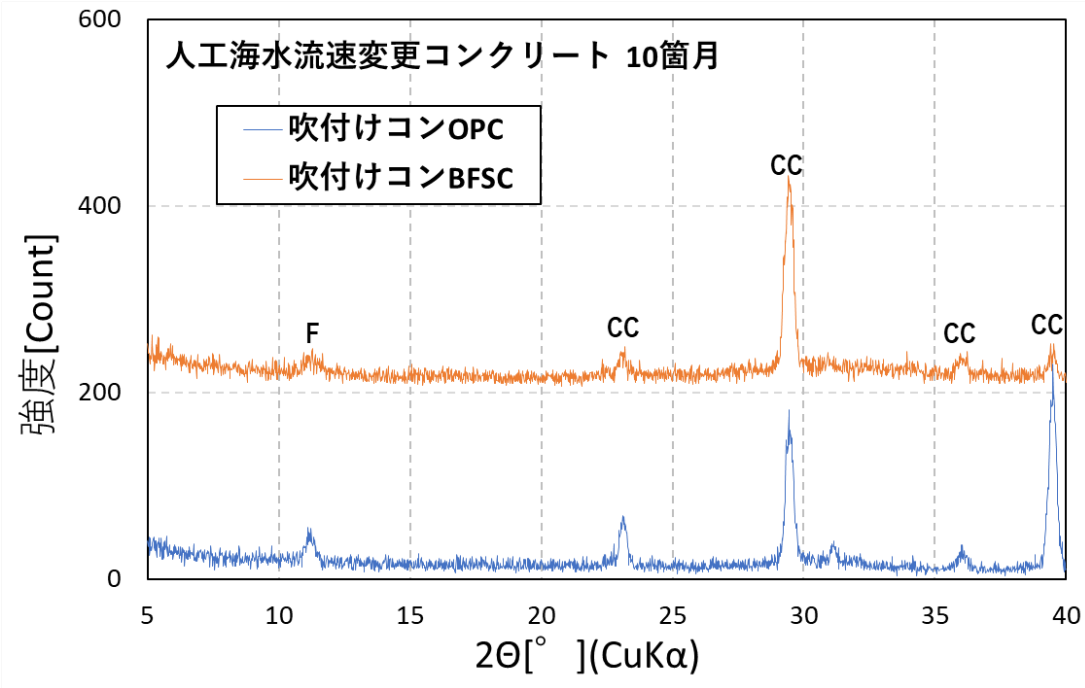


図 4-2- 45　人工海水流速変更　コンクリート試料 10 箇月浸漬　μXRD 測定結果

(c)　力学的特性の測定結果

浸漬試験 10 カ月後の硬度測定結果を表 4-2- 34 に、降水 A に 10 箇月浸漬したコンクリート試料のヤング率測定結果を表 4-2- 35 に、FGB-2_167.70～171.78 m に 10 箇月浸漬したコンクリート試料のヤング率測定結果を表 4-2- 36 に、流速を変更した人工海水に 10 箇月浸漬したコンクリート試料のヤング率測定結果を表 4-2- 37 に示す。降水 A に 10 箇月浸漬したコンクリート試料のヤング率測定結果を図 4-2- 46 に、FGB-2_167.70～171.78 m に 10 箇月浸漬したコンクリート試料のヤング率測定結果を図 4-2- 47 に、流速を変更した人工海水に 10 箇月浸漬したコンクリート試料のヤング率測定結果を図 4-2- 48 に示す。

模擬地下水及び実地下水 FGB-2_167.70～171.78 m に 10 箇月間浸漬した試料では、降水 A に浸漬したセグメント BFSC のみの大きく硬度が低下し、健全部と比較して 55%の硬度となっていた。他の水準では大きな硬度の低下は確認されていない。硬度と同時に測定したヤング率の測定結果では、全ての水準で大きなヤング率の低下は確認されていない。(d)で実施した EPMA 測定の結果からも降水 A に浸漬したセグメント BFSC の接液面近傍は Ca の著しい濃度の低下や S 濃度の上昇は確認されていない。また、SEM の反射電子像の輝度を解析した空隙率の評価でも大きな空隙率の増加は観測されていないことから、降水 A に浸漬したセグメント BFSC のみの大きく硬度が低下した理由を合理的に説明できる現象は確認できていない。一方、他の試料については、大きな硬度の低下は確認されておらず、浸漬期間 3 箇月の多くの水準で硬度の低下が確認されたセメンペーストに比べて化学変質や力学的特性の変化は、緩やかに進行すると考えられる。

接液面から 0.3mm 以内のセメントペースト部分で測定した 100 点のヤング率の測定結果を箱ひげ図にまとめ、試料内部の化学変質を受けていない部分（健全部）の測定結果と比較した。

本検討では、試料の健全部の箱の下端（第一四分位）から箱の上端（第三四分位）の範囲から外れる試験水準について力学的特性が変化していると判断した。

降水 A に 10 箇月間浸漬した試料では、吹付コン OPC、吹付けコン BFSC、セグメント OPC 及びセグメント BFSC の全ての水準で健全部に比べ表層部のヤング率の低下は確認していない。降水 A に 10 箇月間浸漬しても大きな力学的特性の変化は生じていないことを確認した。

FGB-2_167.70～171.78 m に 10 箇月間浸漬した試料では、セグメント BFSC の表層部でわずかなヤング率の上昇が確認されており、セグメント OPC でも箱の上端から外れてはいないが箱の位置は健全部より高いヤング率となっていた。吹付けコン OPC では大きなヤング率の変化はなく、吹付けコン BFSC では健全部に比べわずかに表層部のヤング率が低下する傾向を確認した。

人工海水の流速を 10 倍にして 10 箇月間浸漬した吹付けコン BFSC は、わずかにヤング率が上昇する傾向が確認され、吹付けコン OPC ではヤング率の変化は確認していない。

降水 A に浸漬したセメントペースト試料では、浸漬期間 3 箇月後に全ての水準でヤング率の低下を確認し、人工海水に浸漬したセメントペースト試料では、吹付け想定 OPC 及セグメント想定 OPC のヤング率の低下が確認されている。コンクリート試料の地下水の化学成分との反応による力学的特性の低下は、セメントペースト試料に比べて遅いことを確認した。

表 4-2- 34　浸漬試験 10 カ月後の硬度測定結果（kN/mm^2）

液相	吹付けコン						セグメント					
	OPC			BFSC			OPC			BFSC		
	表層部	健全部	変化率(%)	表層部	健全部	変化率(%)	表層部	健全部	変化率(%)	表層部	健全部	変化率(%)
降水A	2.07	1.96	105	2.14	2.25	95	1.93	1.96	99	1.07	1.94	55
FGB-2_167.70 ～171.78 m	2.19	1.96	111	1.83	2.25	82	2.26	1.96	116	1.94	1.94	100
人工海水 流速変更	2.04	1.96	104	2.65	2.25	118						

表 4-2- 35　降水 A　コンクリート試料 10 箇月浸漬　ヤング率測定結果（kN/mm^2）

ヤング率（降水A　10箇月浸漬）

	吹付けコン						セグメント					
	OPC			BFSC			OPC			BFSC		
	表層部	健全部	変化率（%）	表層部	健全部	変化率（%）	表層部	健全部	変化率（%）	表層部	健全部	変化率（%）
第3四分位値	39330	39115	101%	42360	43085	98%	52505	46945	112%	52350	43670	120%
中央値	34580	35040	99%	33040	38130	87%	47230	36800	128%	41350	37750	110%
第1四分位値	31325	31900	98%	26945	31840	85%	38015	31335	121%	33385	32995	101%
平均値	38053	36782	103%	35358	38768	91%	43123	40856	106%	43582	40168	108%

表 4-2- 36　FGB-2_167.70～171.78 m　コンクリート試料 10 箇月浸漬　ヤング率測定結果（kN/mm^2）

ヤング率（実地下水②　10箇月浸漬）

	吹付けコン						セグメント					
	OPC			BFSC			OPC			BFSC		
	表層部	健全部	変化率（%）	表層部	健全部	変化率（%）	表層部	健全部	変化率（%）	表層部	健全部	変化率（%）
第3四分位値	47150	39115	121%	32840	43085	76%	59705	46945	127%	59085	43670	135%
中央値	39350	35040	112%	26560	38130	70%	52600	36800	143%	52270	37750	138%
第1四分位値	34440	31900	108%	23335	31840	73%	41340	31335	132%	45450	32995	138%
平均値	40984	36782	111%	30052	38768	78%	51198	40856	125%	52834	40168	132%

表 4-2- 37　人工海水流速変更　コンクリート試料 10 箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm^2）

ヤング率（人工海水　流速変更　10箇月浸漬）

	吹付けコン					
	OPC			BFSC		
	表層部	健全部	変化率（%）	表層部	健全部	変化率（%）
第3四分位値	42075	39115	108%	59705	43085	139%
中央値	35730	35040	102%	51770	38130	136%
第1四分位値	31760	31900	100%	41360	31840	130%
平均値	37149	36782	101%	50565	38768	130%

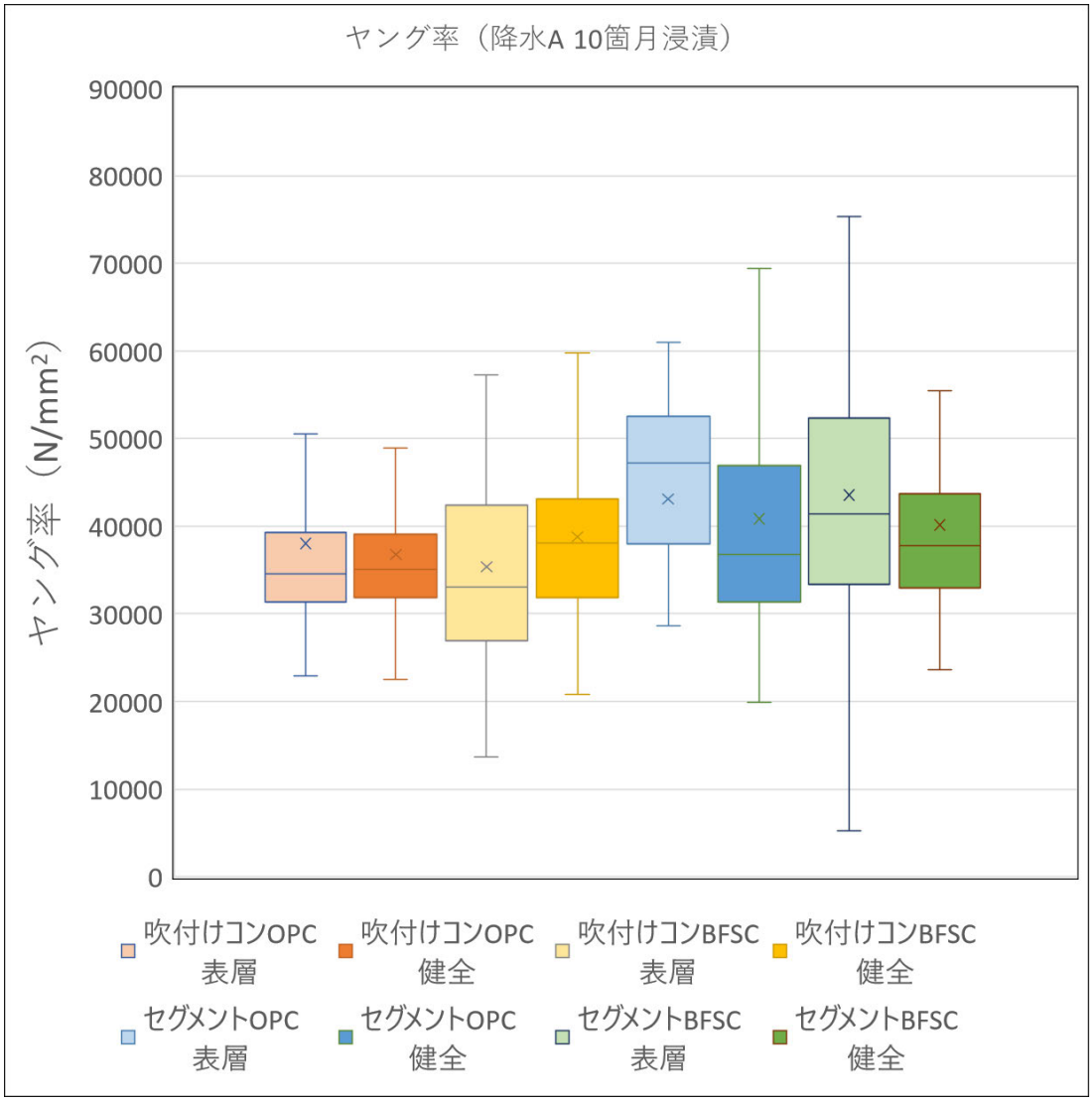


図 4-2- 46　降水 A　コンクリート試料 10 箇月浸漬　ヤング率測定結果

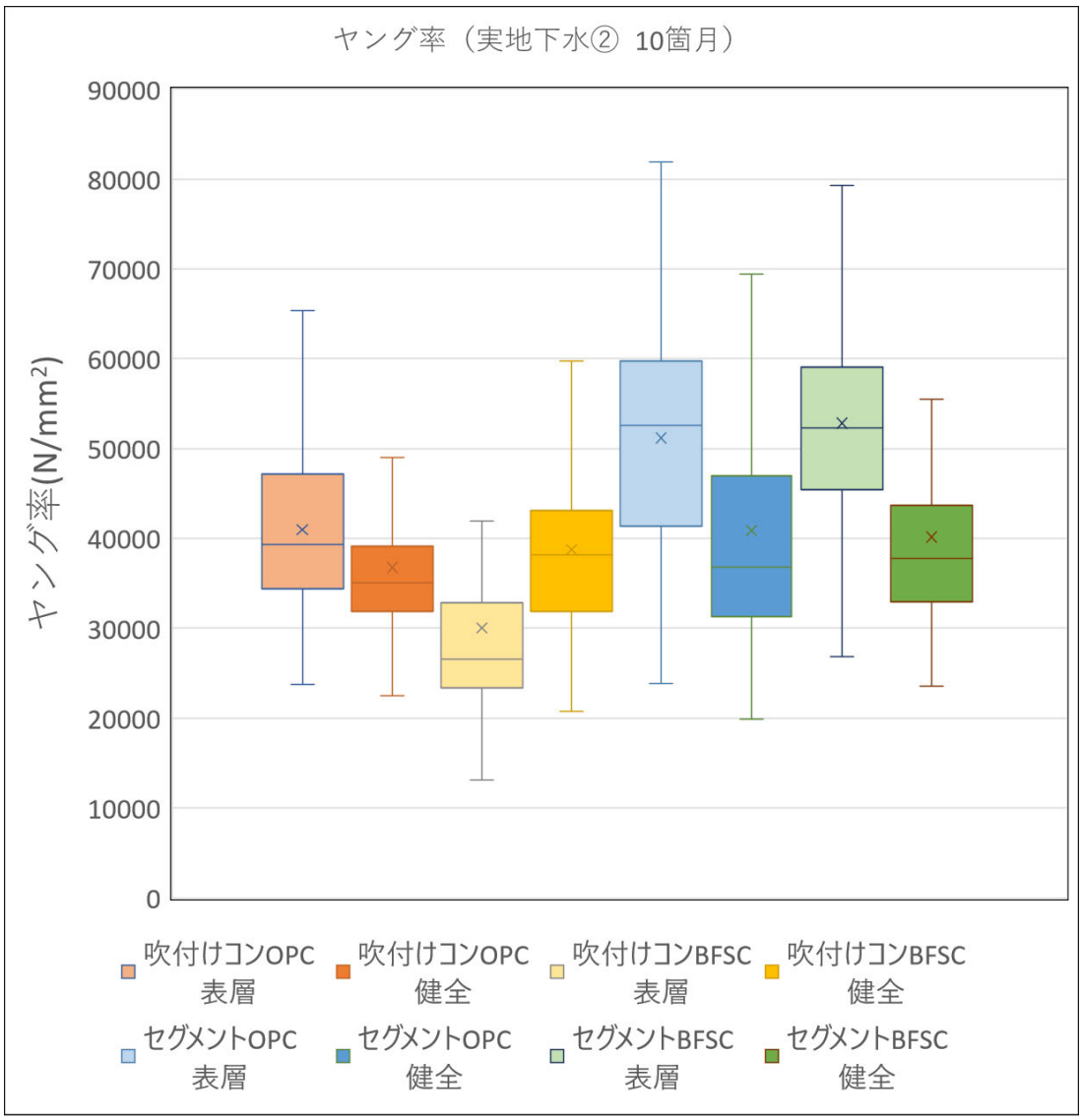


図 4-2- 47　FGB-2_167.70～171.78 m　コンクリート試料 10 箇月浸漬
ヤング率測定結果

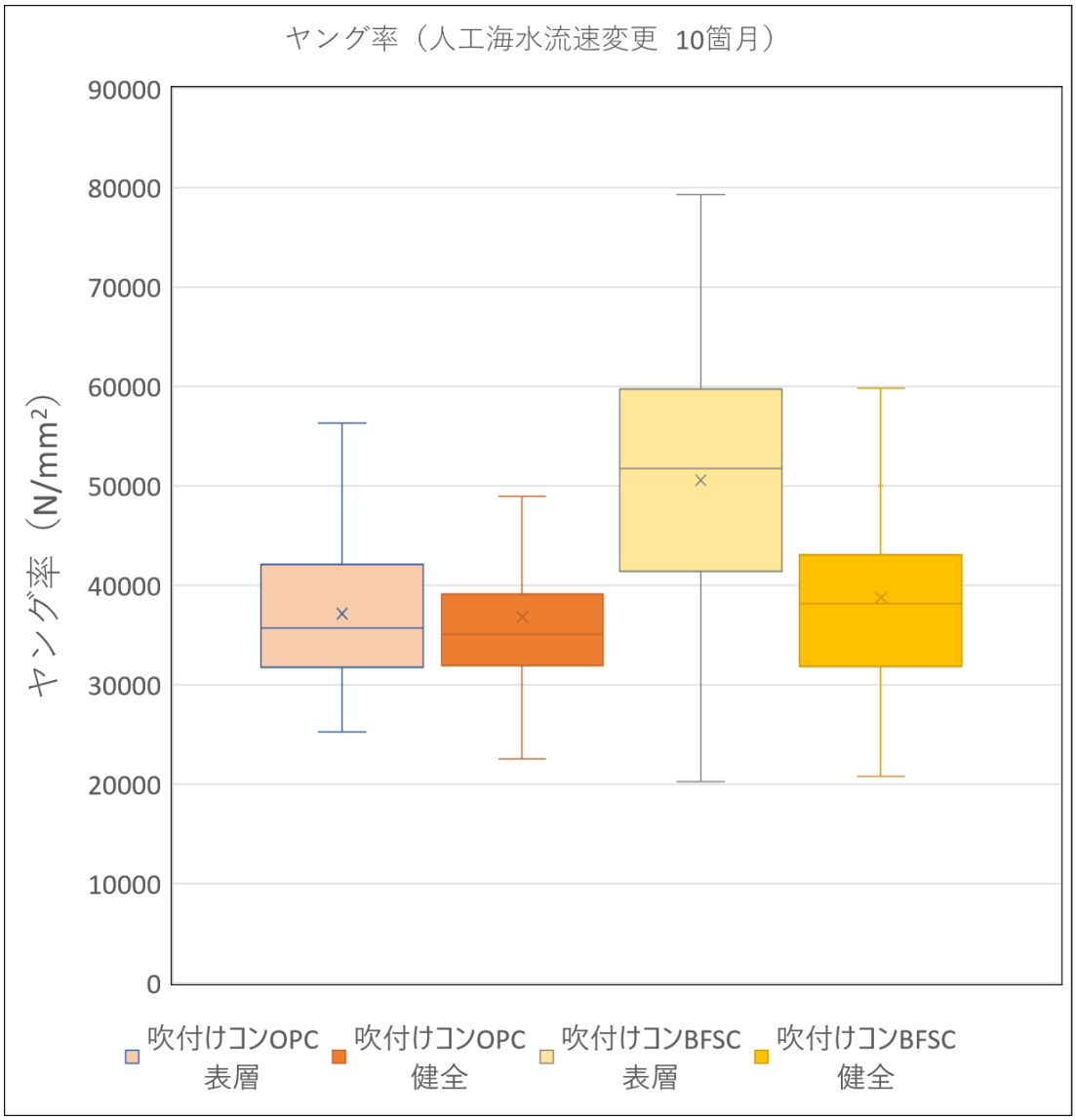


図 4-2- 48　人工海水流速変更　コンクリート試料 10 箇月浸漬　ヤング率測定結果

(d) 元素組成分布の測定結果

降水 A に 10 箇月浸漬したコンクリート試料の EPMA 測定結果を図 4-2- 49 から図 4-2- 52 に、FGB-2_167.70～171.78 m に 10 箇月浸漬したコンクリート試料の EPMA 測定結果を図 4-2- 53 から図 4-2- 56 に、流速を変更した人工海水に 10 箇月浸漬したコンクリート試料の EPMA 測定結果を図 4-2- 57 及び図 4-2- 58 に示す。降水 A に 10 箇月浸漬したコンクリート試料の EPMA 測定結果の平均濃度プロファイルを図 4-2- 59 から図 4-2- 61 に、FGB-2_167.70～171.78 m に 10 箇月浸漬したコンクリート試料の EPMA 測定結果の平均濃度プロファイルを図 4-2- 62 から図 4-2- 64 に、流速を変更した人工海水に 10 箇月浸漬したコンクリート試料の EPMA 測定結果の平均濃度プロファイルを図 4-2- 65 から図 4-2- 67 に示す。

降水 A に 10 箇月間浸漬した吹付けコン OPC、吹付けコン BFSC、セグメント OPC 及びセグメント BFSC の全ての水準で、接液面から 1mm 程度の範囲で Ca 濃度の僅かな低下が確認された。S 濃度は、吹付けコン OPC、吹付けコン BFSC 及びセグメント BFSC で接液面から 2mm 程度の位置まで上昇し、セグメント OPC は接液面から 4mm 程度まで上昇してることを確認した。他の元素については、全ての水準で大きな濃度の変化は観察されていない。

FGB-2_167.70～171.78 m に 10 箇月間浸漬した吹付けコン OPC、セグメント OPC は接液面から 2mm 程度、吹付けコン BFSC、セグメント BFSC では接液面から 1mm 程度の範囲で Ca 濃度のわずかな低下が確認された。S 濃度は、全ての水準で接液面から 2mm 程度の範囲で上昇が確認された。Cl 濃度は、吹付けコン OPC、セグメント OPC 及び吹付けコン BFSC で測定範囲の 10mm まで上昇が確認され、吹付けコン BFSC は接液面から 10mm の範囲で上昇が確認された。他の元素については、全ての水準で大きな濃度の変化は観察されていない。

人工海水の流速を 10 倍にして 10 箇月間浸漬した吹付けコン OPC は、接液面から 1mm 程度の範囲で Ca 濃度のわずかな低下が確認されたが、吹付けコン BFSC は Ca 濃度の変化は確認されていない。S 濃度は、吹付けコン OPC 及び吹付けコン BFSC ともに接液面から 1mm 程度の範囲で上昇が観察された。Cl 濃度は、吹付けコン OPC は測定範囲の 10mm まで上昇が確認され、吹付けコン BFSC は接液面から 8mm の範囲で上昇が確認された。他の元素については、吹付けコン OPC 及び吹付けコン BFSC ともに大きな濃度の変化は観察されていない。

降水A　10箇月　吹付けコンOPC

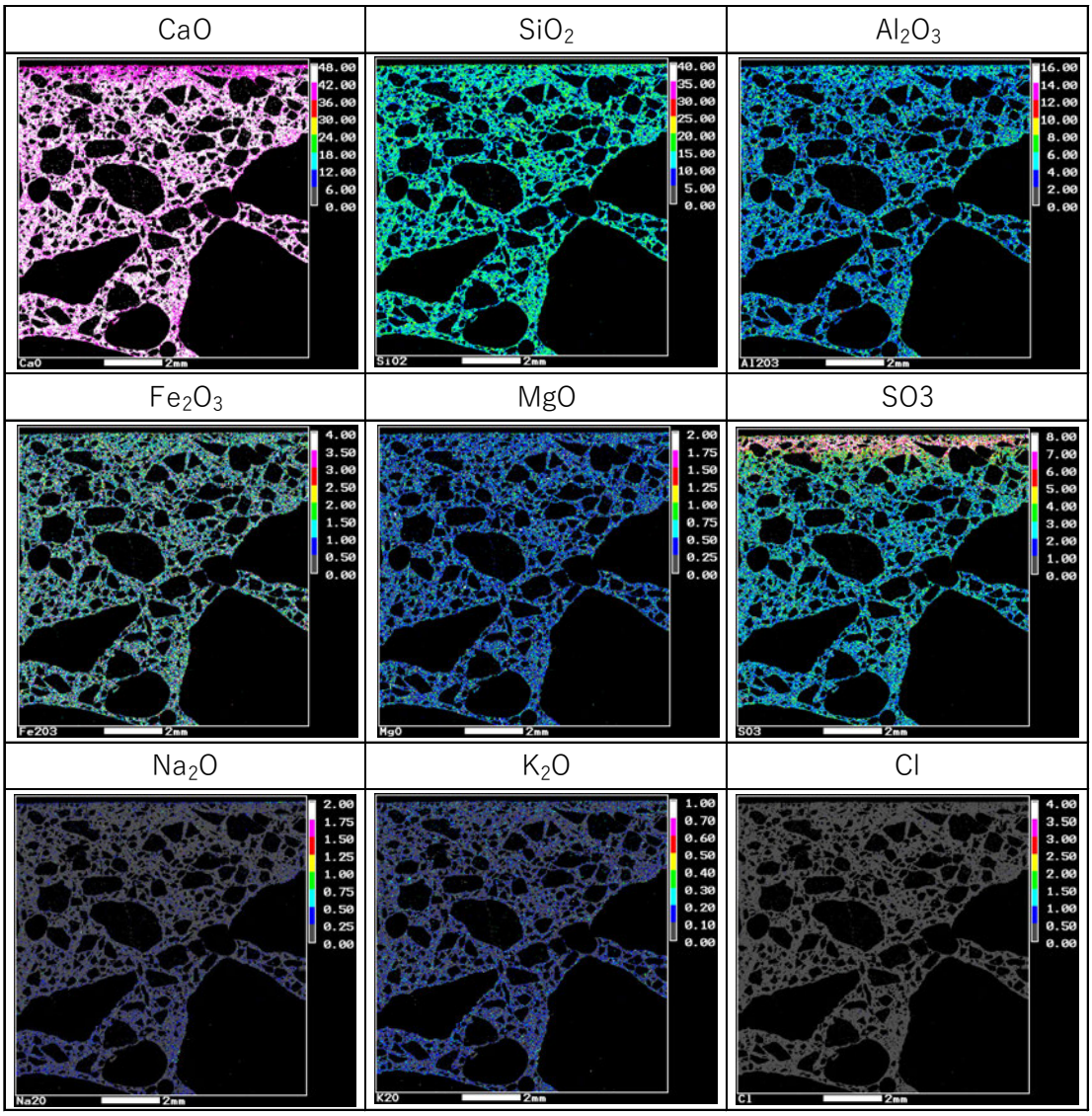


図 4-2- 49　降水 A　吹付けコン OPC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果

降水A　10箇月　吹付けコンBFSC

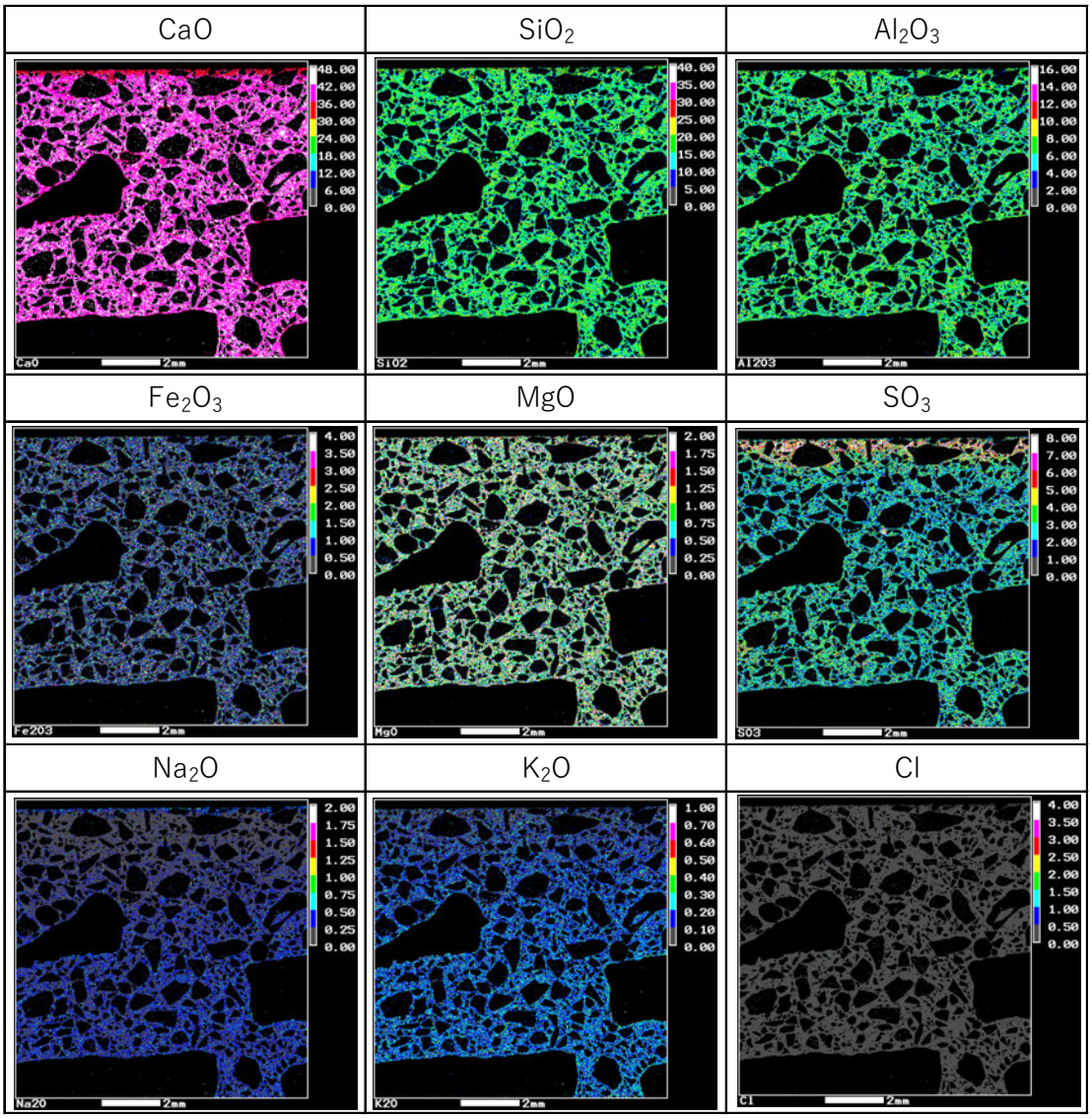


図 4-2- 50　降水 A　吹付けコン BFSC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果

降水A　10箇月　セグメントOPC

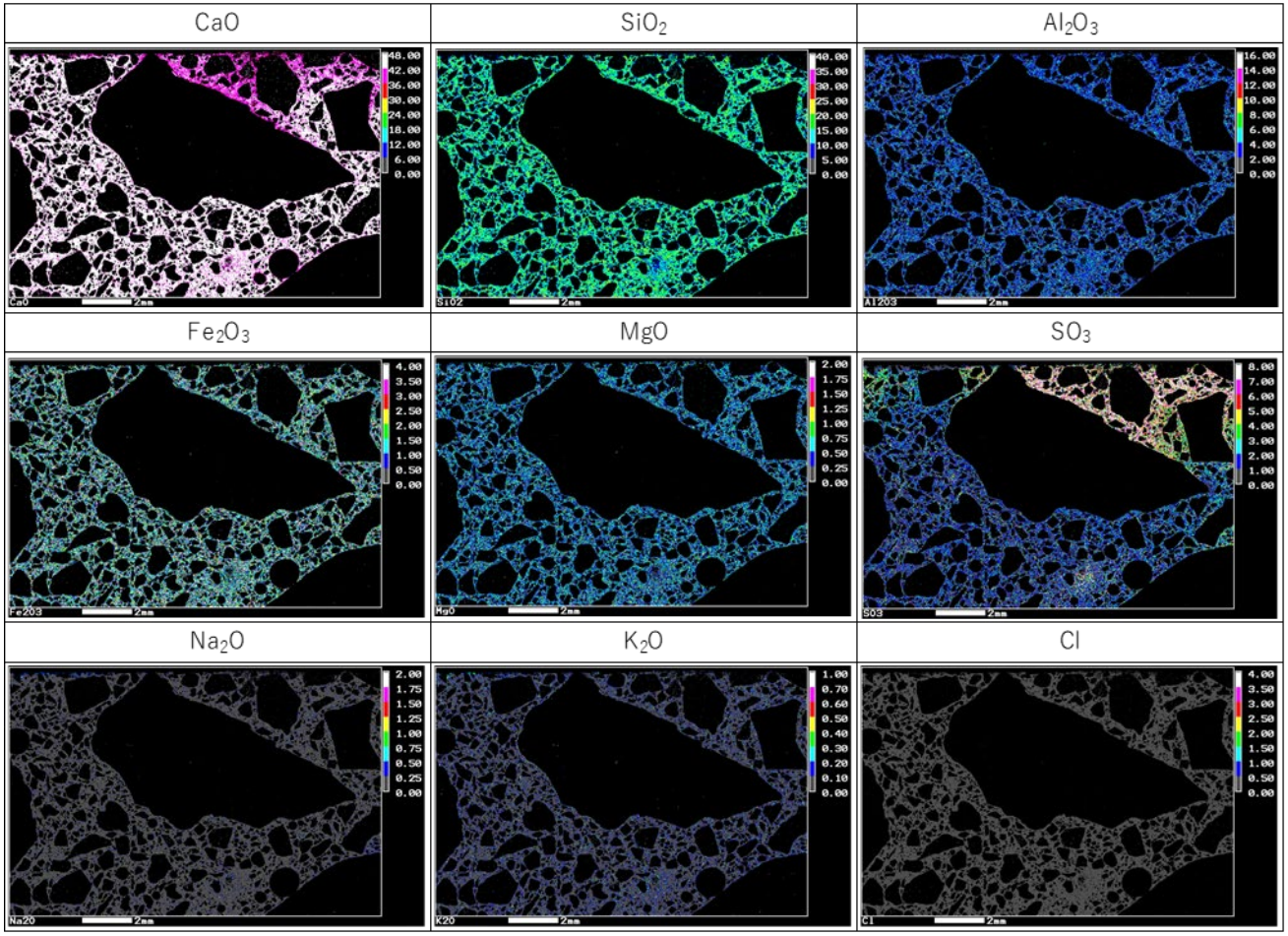


図 4-2- 51　降水 A　セグメント OPC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果

降水A 10箇月　セグメントBFSC

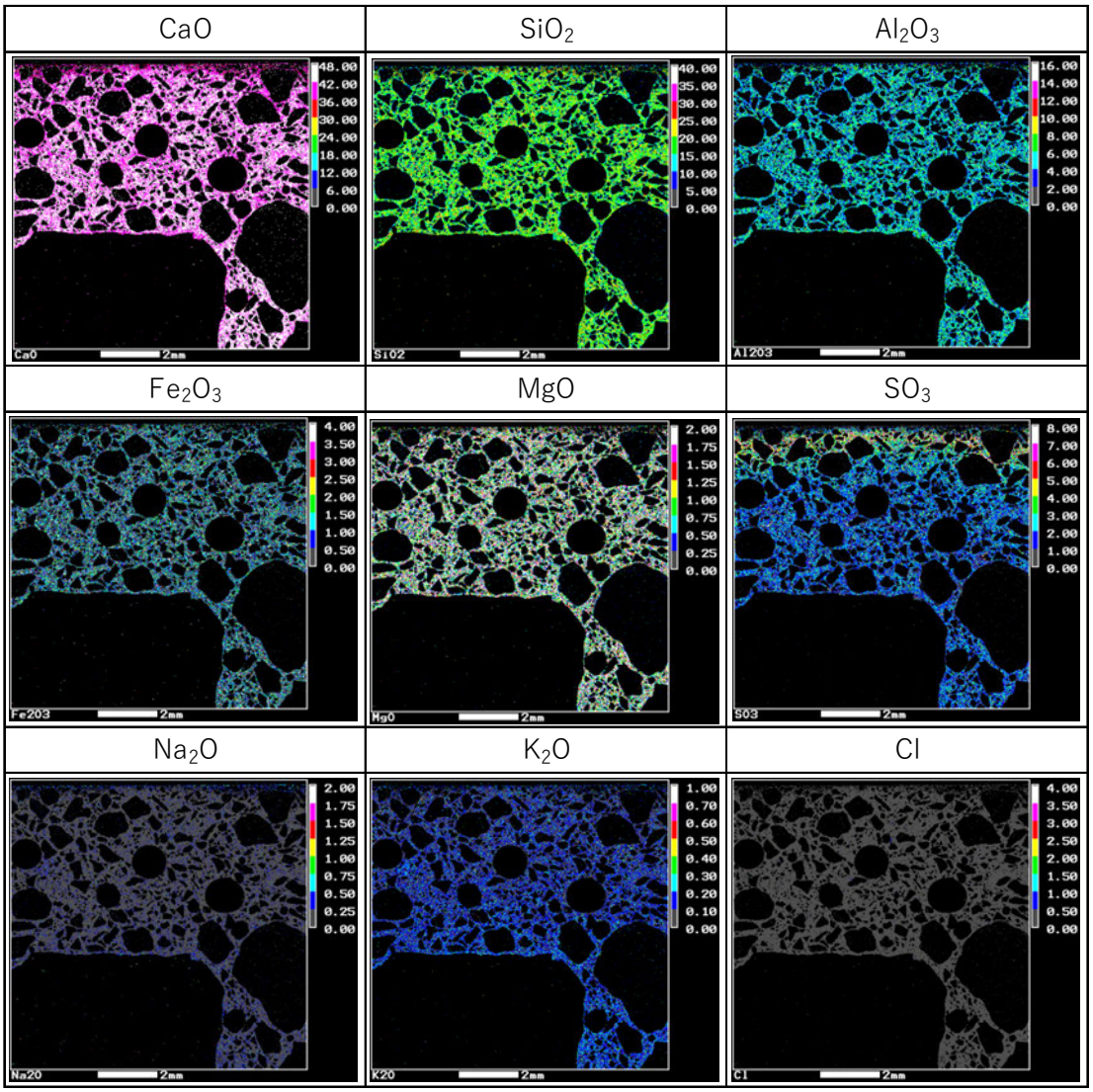


図 4-2- 52　降水 A　セグメント BFSC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果

FGB-2_167.70～171.78m　10箇月　吹付けコンOPC

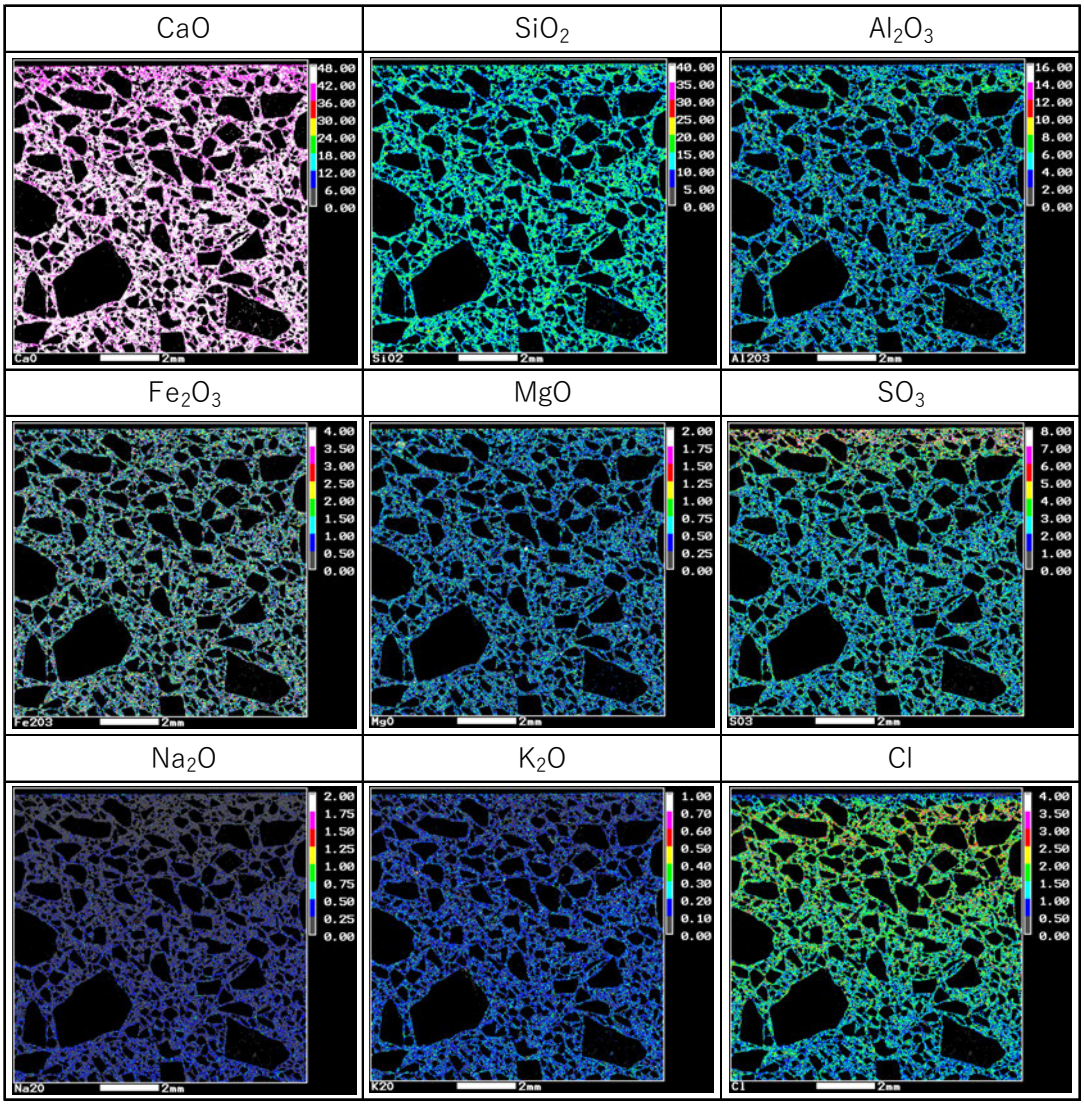


図 4-2- 53　FGB-2_167.70～171.78 m　吹付けコン OPC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果

FGB-2_167.70～171.78m　10箇月　吹付けコンBFSC

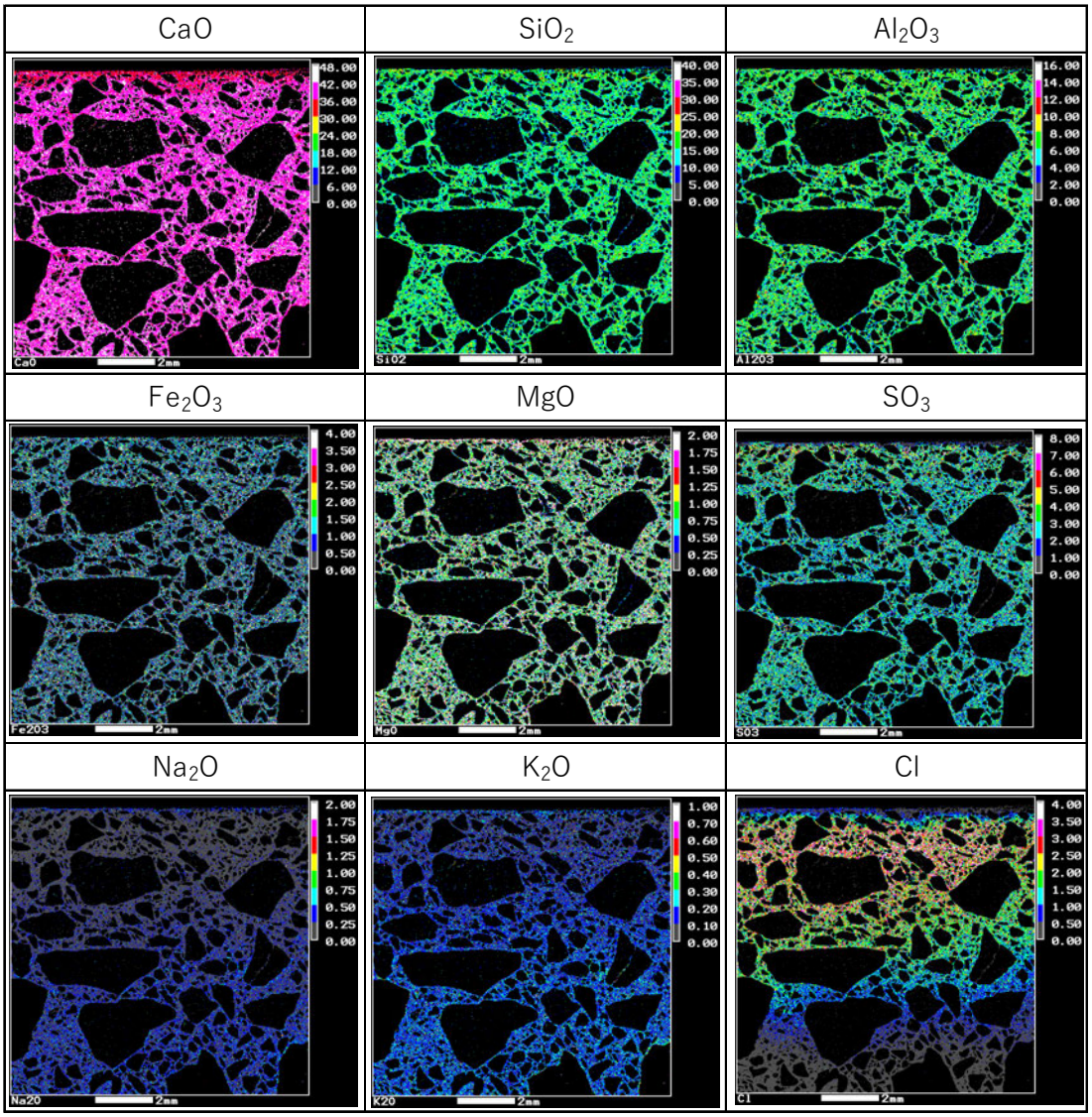


図 4-2- 54　FGB-2_167.70～171.78 m　吹付けコン BFSC
10 箇月浸漬　EPMA 測定結果

FGB-2_167.70～171.78m　10箇月　セグメントOPC

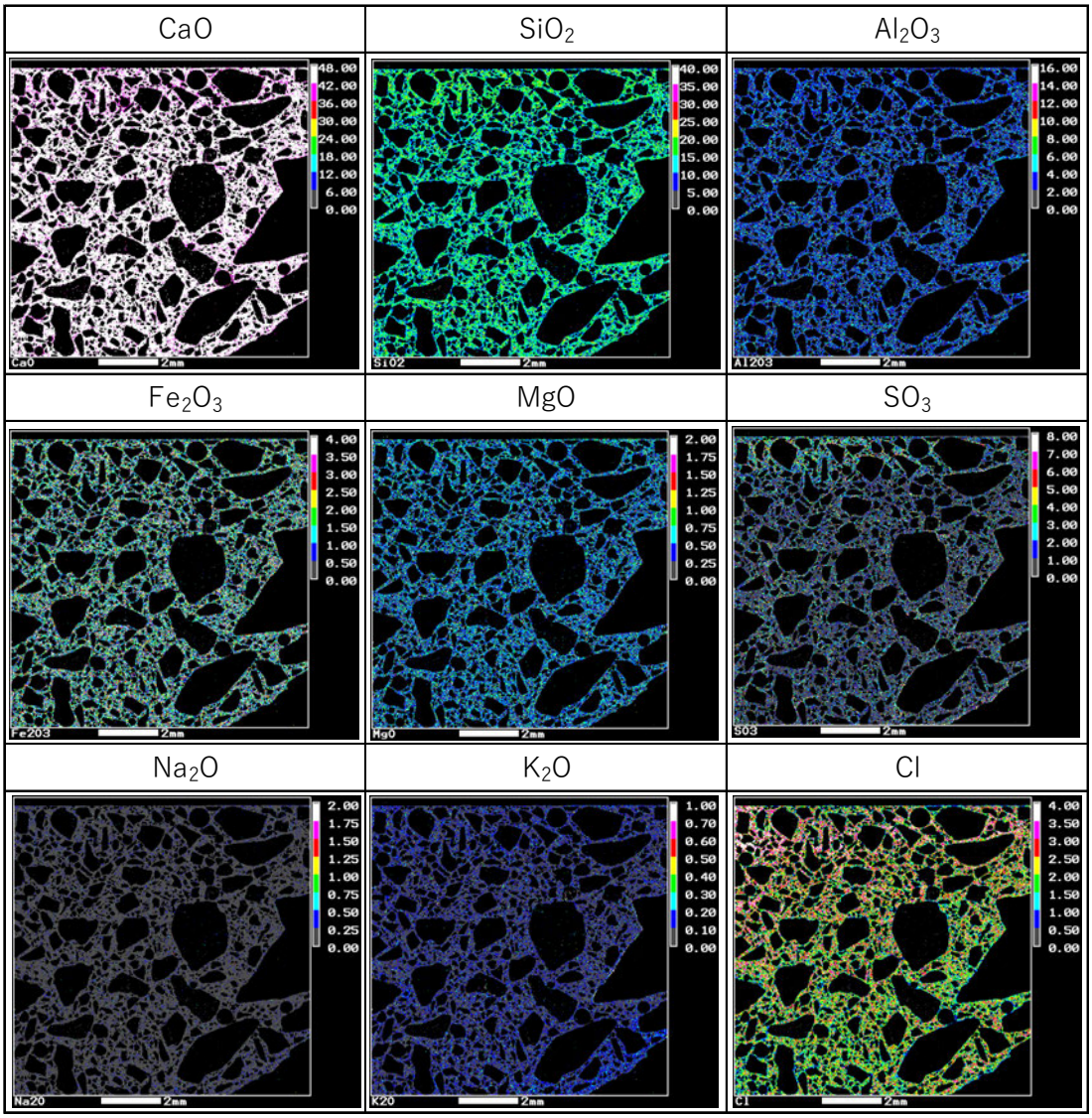


図 4-2- 55　FGB-2_167.70～171.78 m　セグメント OPC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果

FGB-2_167.70～171.78m　10箇月　セグメントBFSC

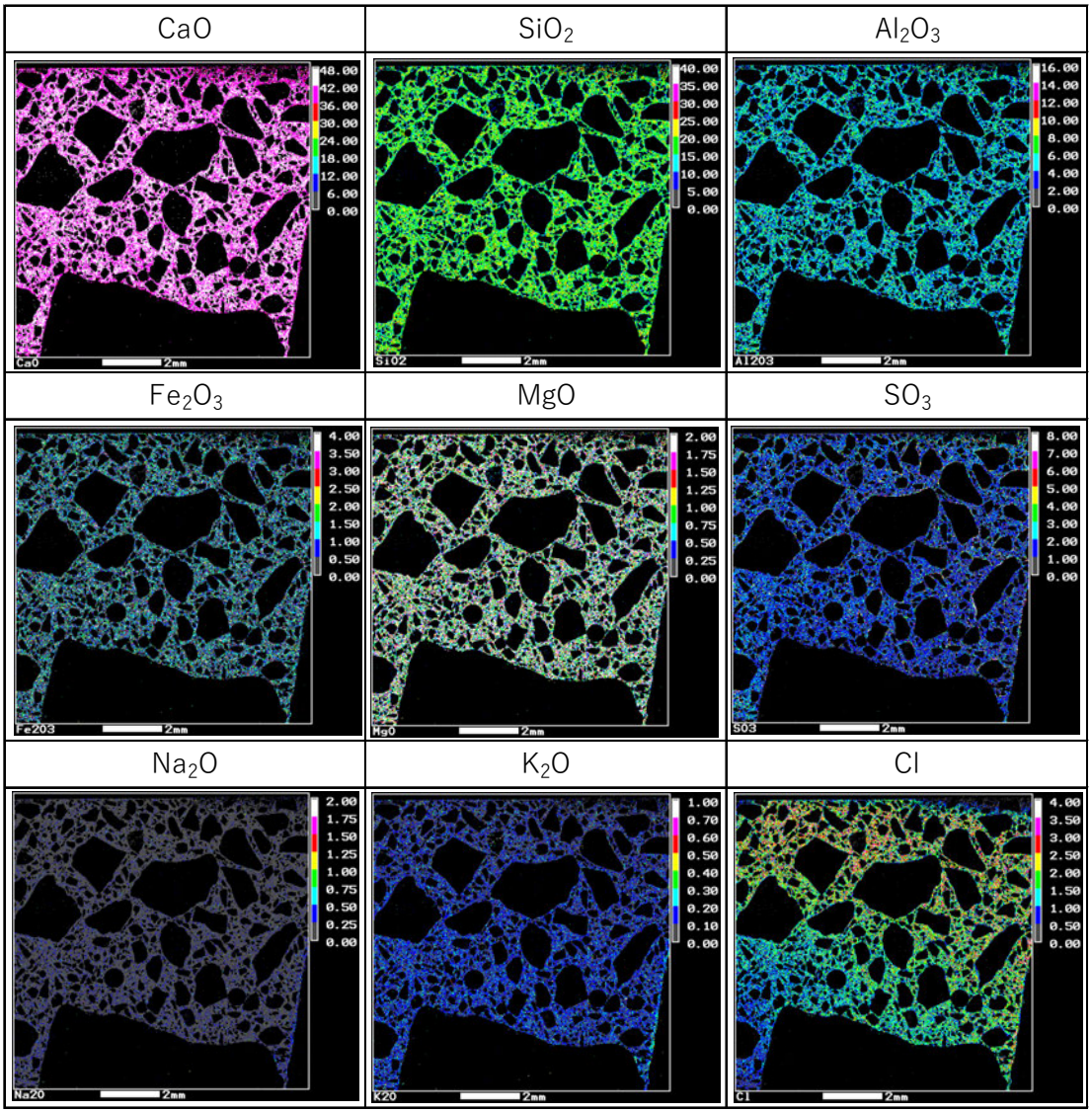


図 4-2- 56　FGB-2_167.70～171.78 m　セグメント BFSC
10 箇月浸漬　EPMA 測定結果

人工海水流速変更　10箇月　吹付けコンOPC

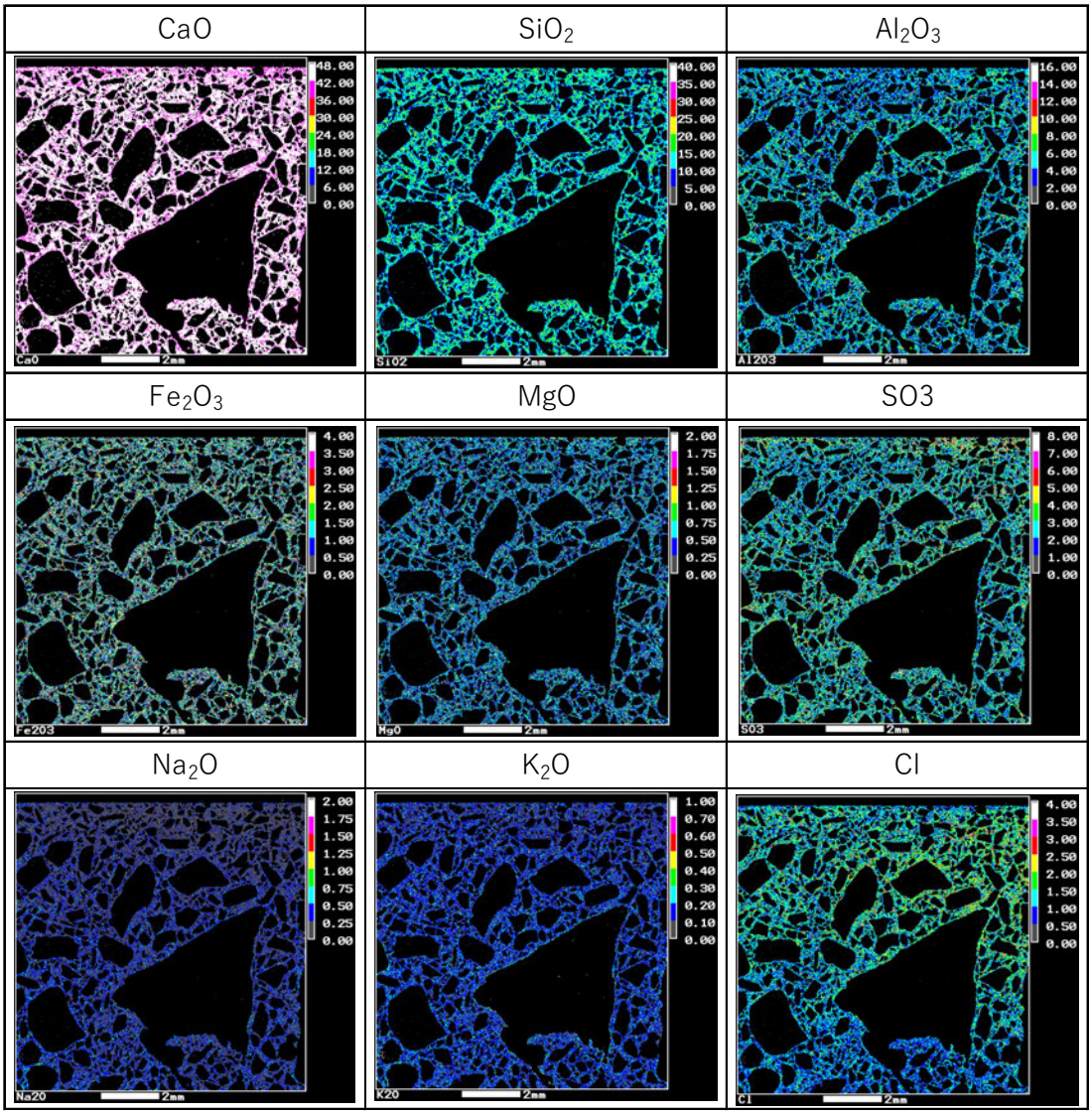


図 4-2- 57　人工海水流速変更　吹付けコン OPC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果

人工海水流速変更　10箇月　吹付けコンBFSC

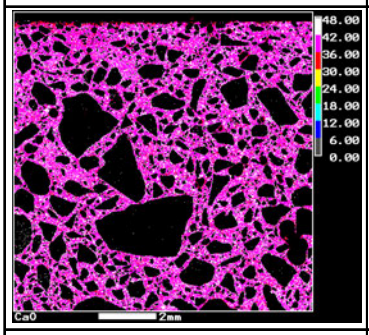
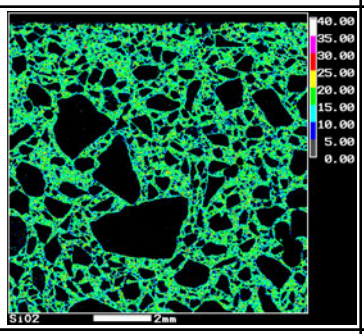
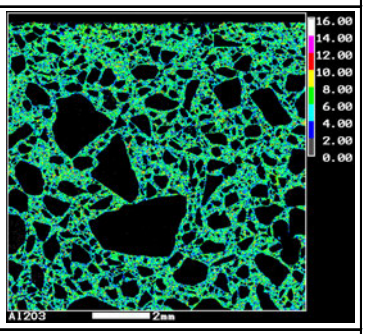
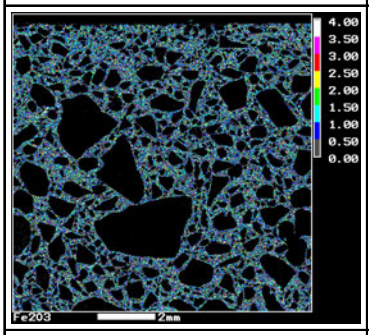
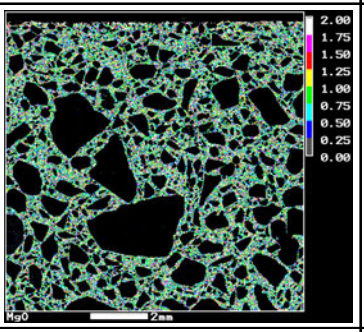
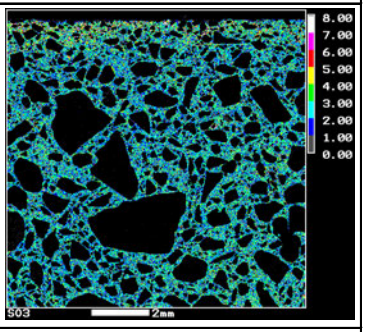
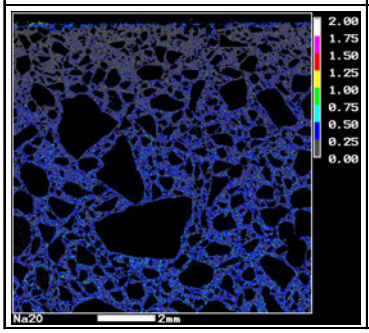
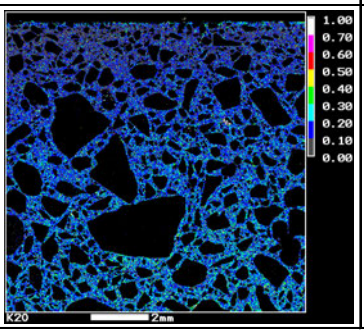
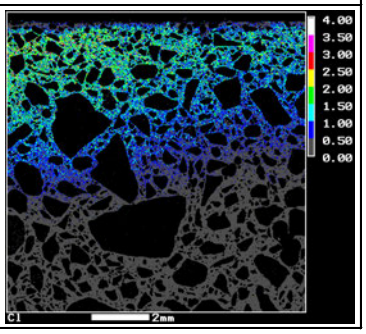
CaO	SiO_2	Al_2O_3
		
Fe_2O_3	MgO	SO_3
		
Na_2O	K_2O	Cl
		

図 4-2- 58　人工海水流速変更　吹付けコン BFSC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果

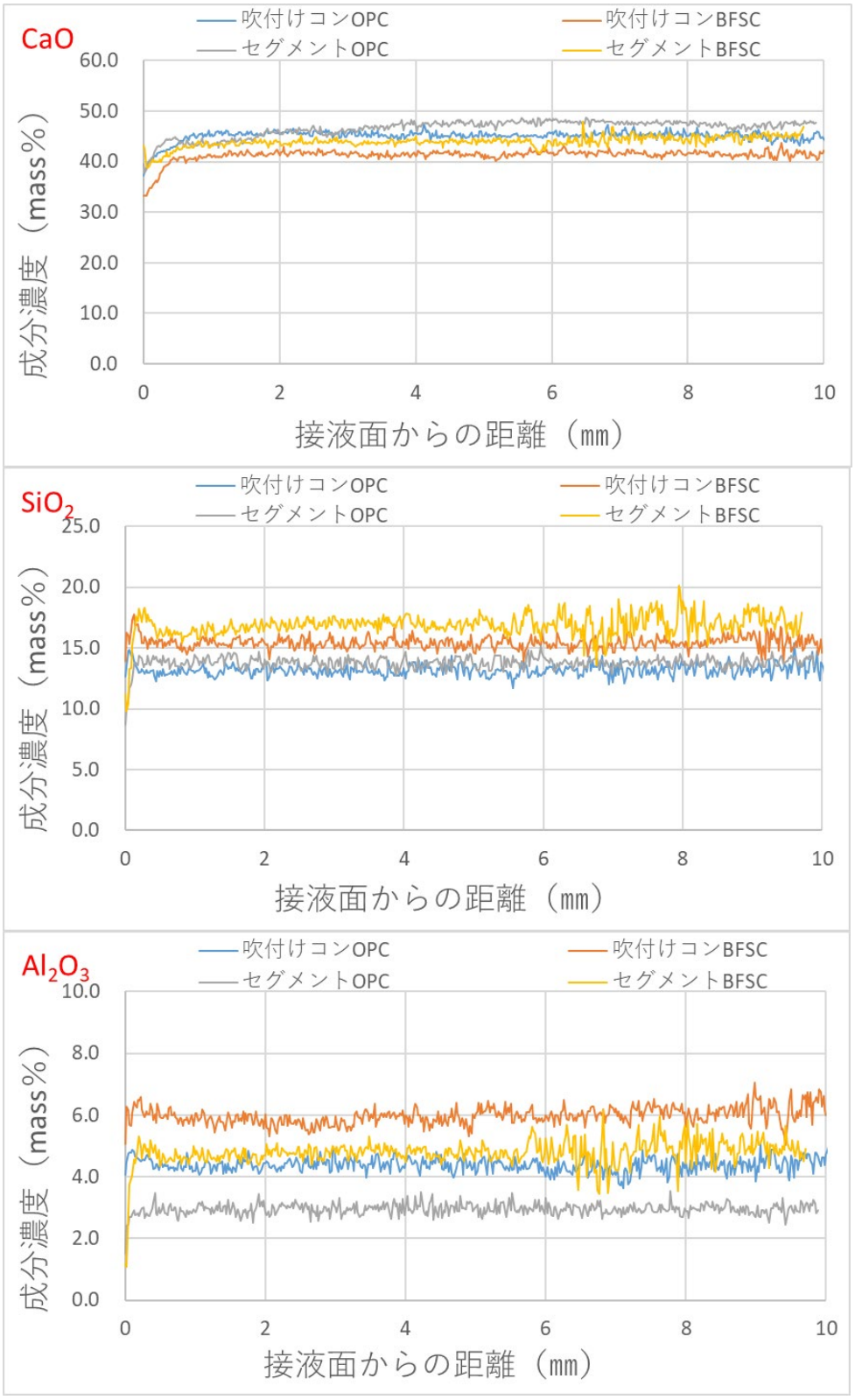


図 4-2- 59　降水 A　コンクリート試料 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果
平均濃度プロファイル（1/3）

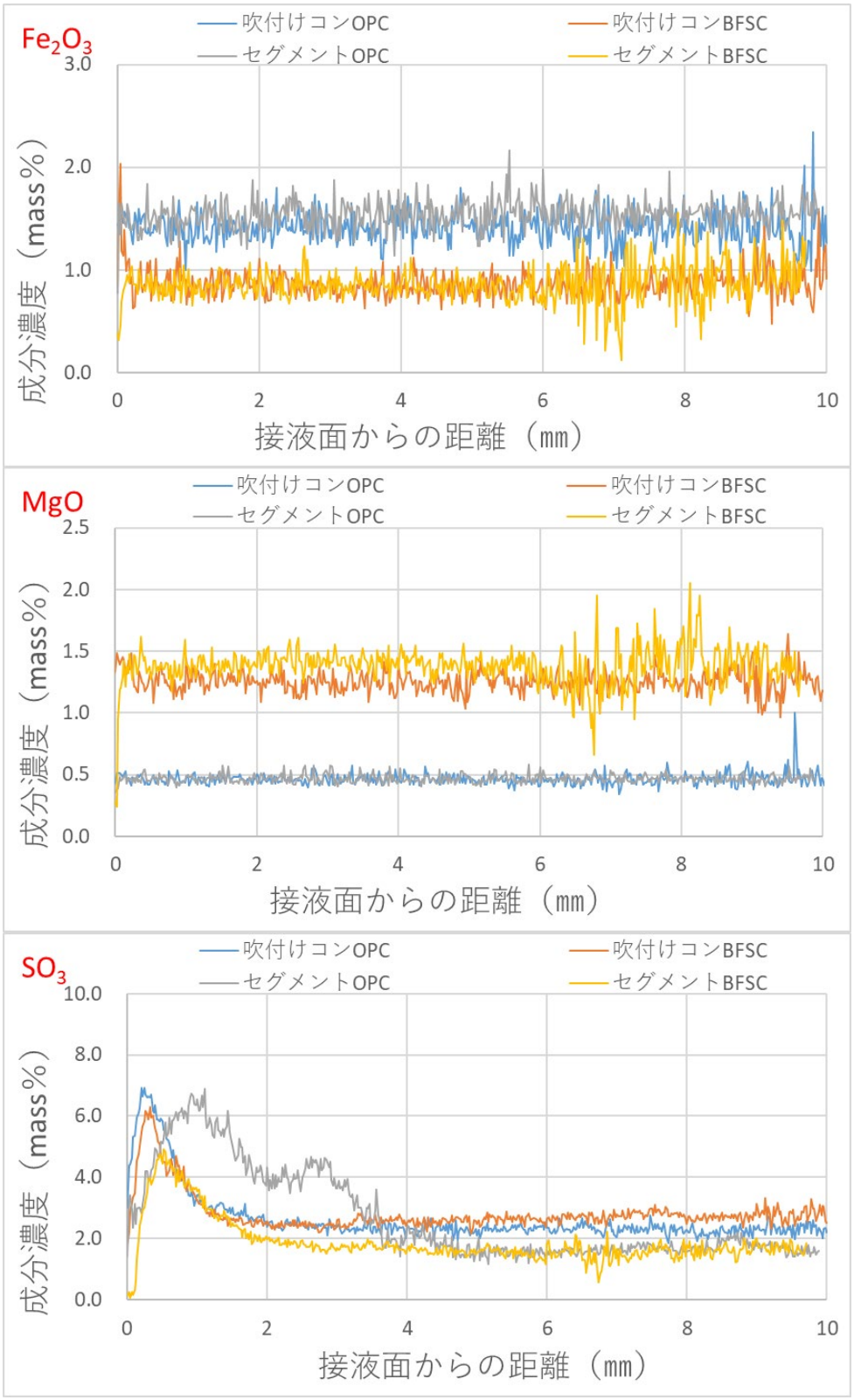


図 4-2- 60　降水 A　コンクリート試料 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果
平均濃度プロファイル（2/3）

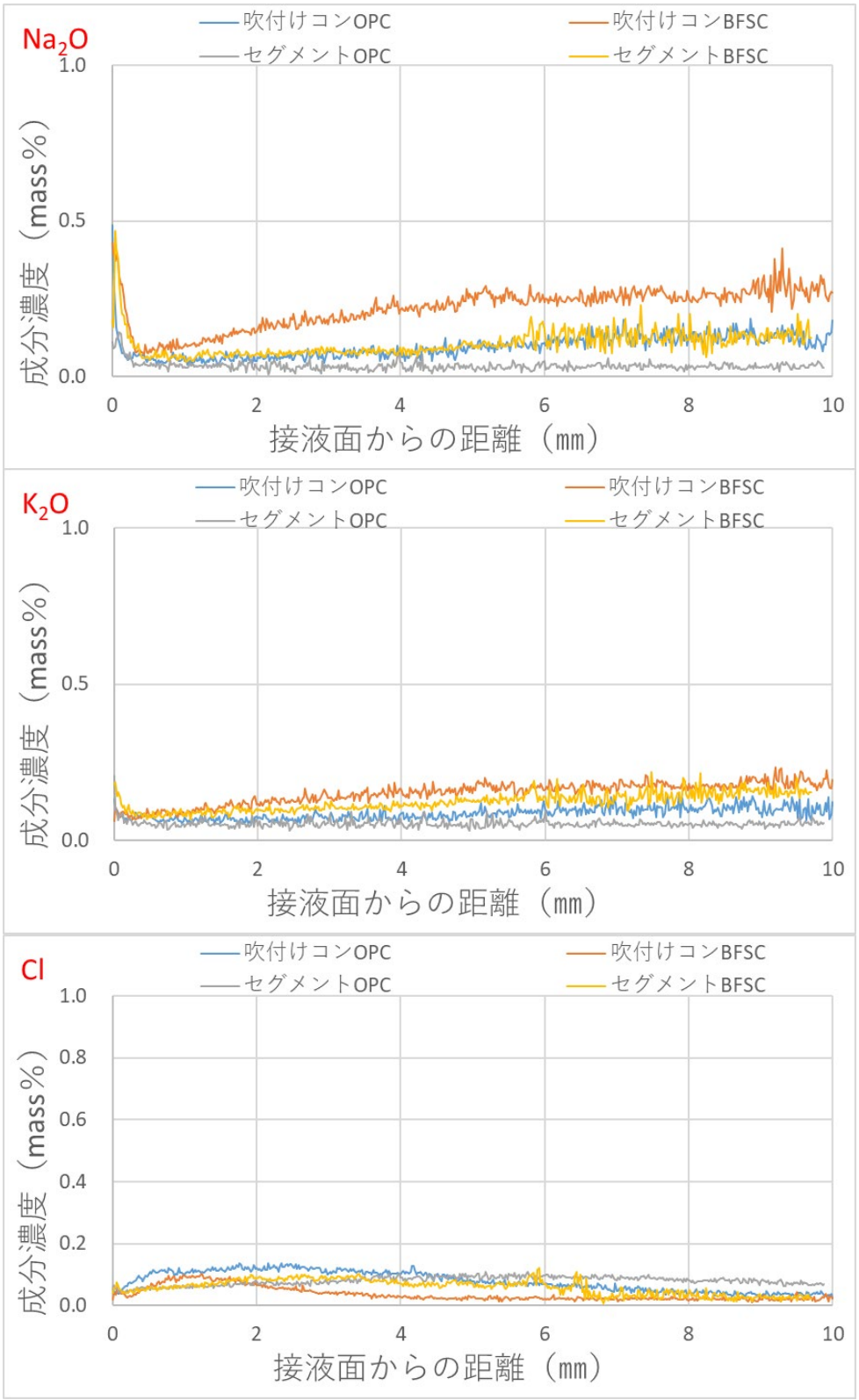


図 4-2- 61　降水 A　コンクリート試料 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果
平均濃度プロファイル（3/3）

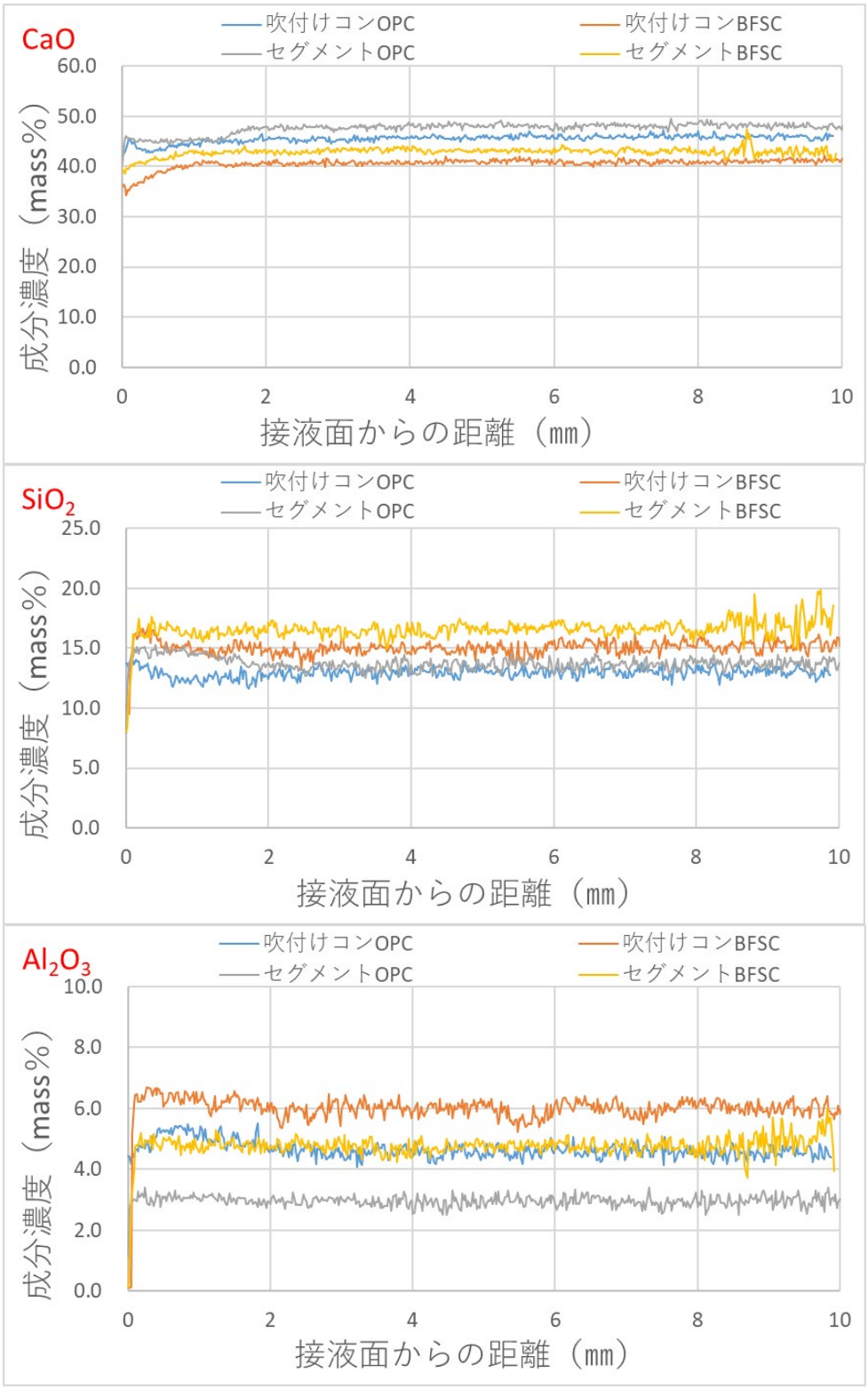


図 4-2- 62　FGB-2_167.70～171.78 m　コンクリート試料 10 箇月浸漬
EPMA 測定結果　平均濃度プロファイル（1/3）

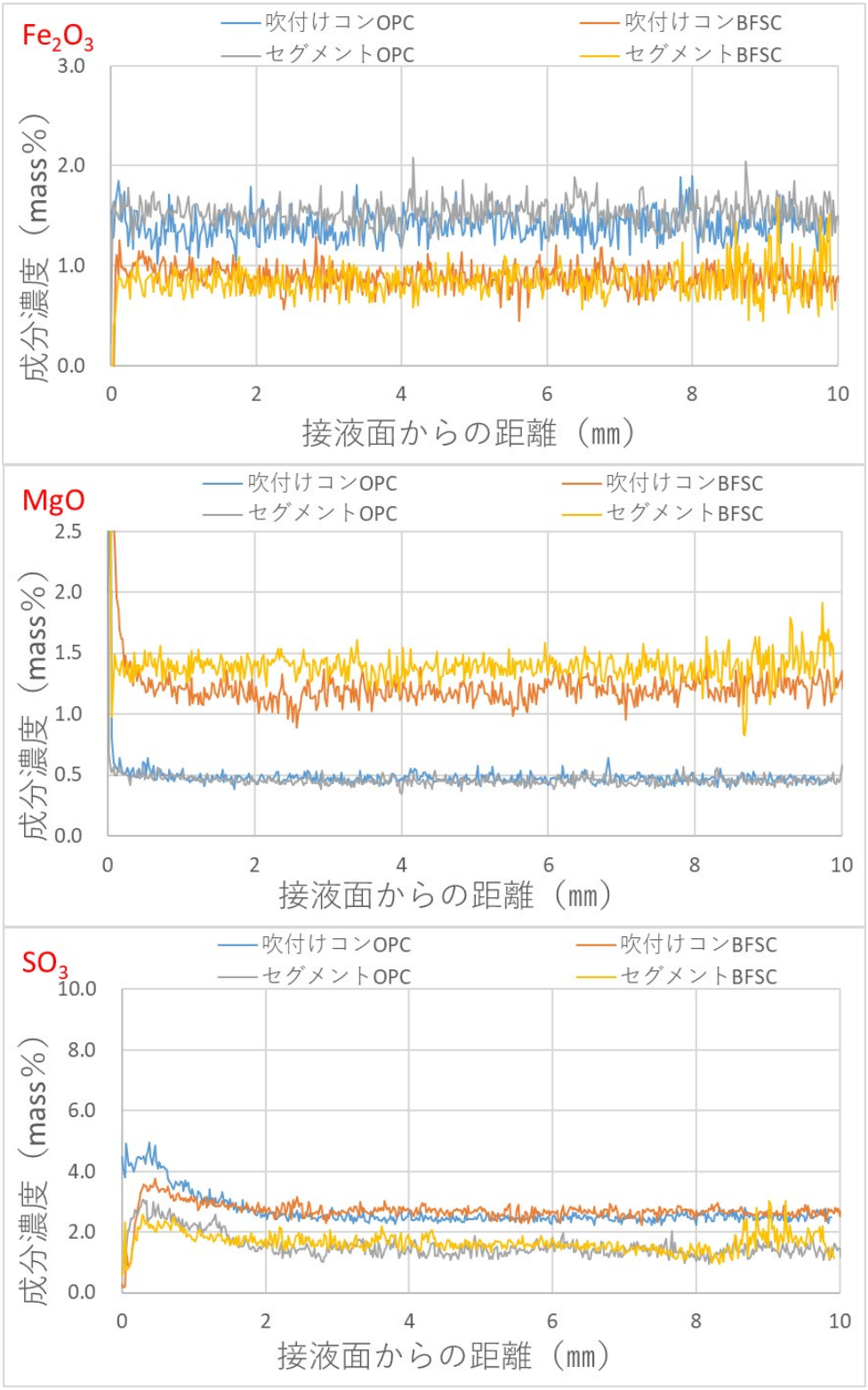


図 4-2- 63　FGB-2_167.70～171.78 m　コンクリート試料 10 箇月浸漬
EPMA 測定結果　平均濃度プロファイル（2/3）

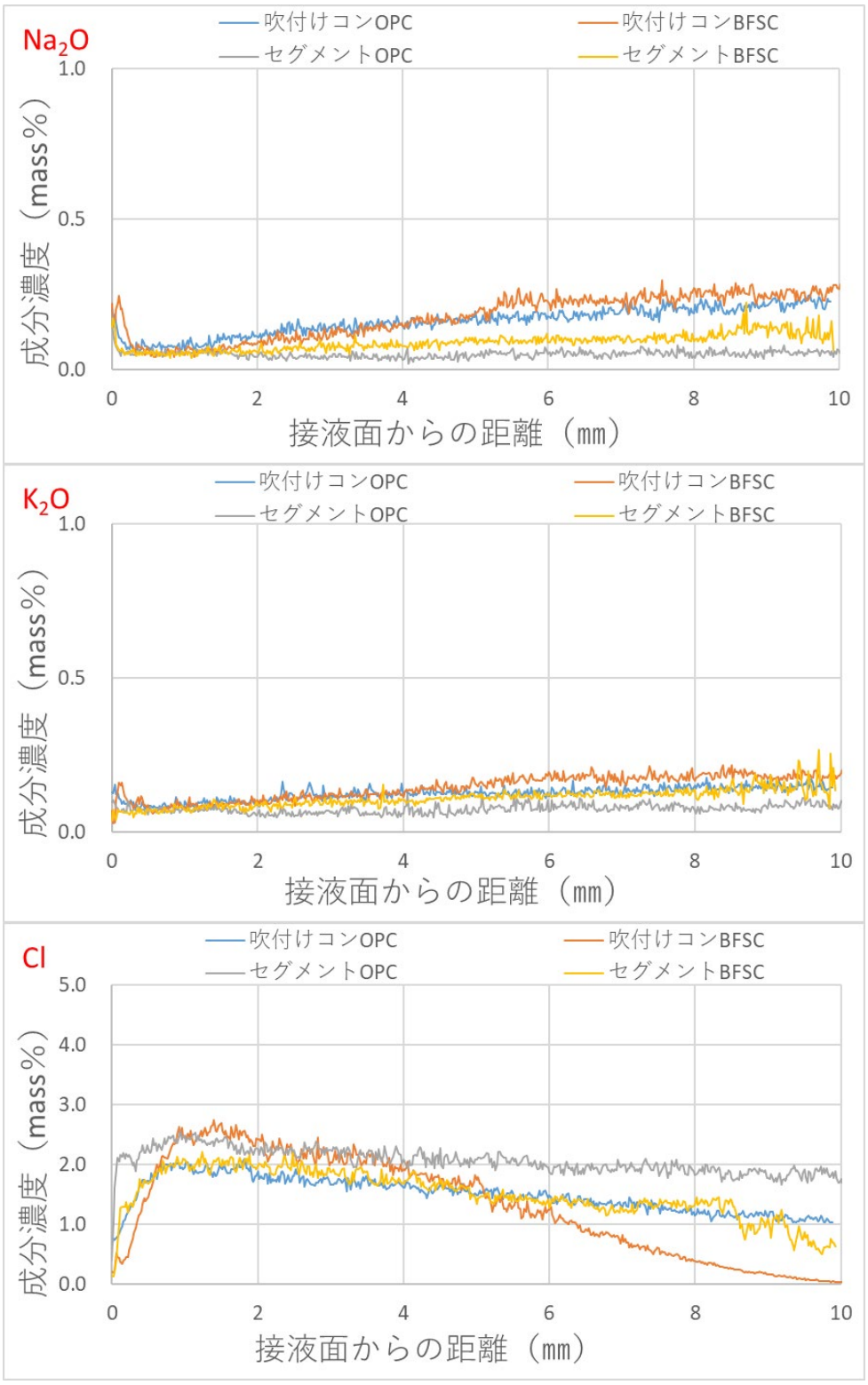


図 4-2- 64　FGB-2_167.70～171.78 m　コンクリート試料 10 箇月浸漬
EPMA 測定結果　平均濃度プロファイル（3/3）

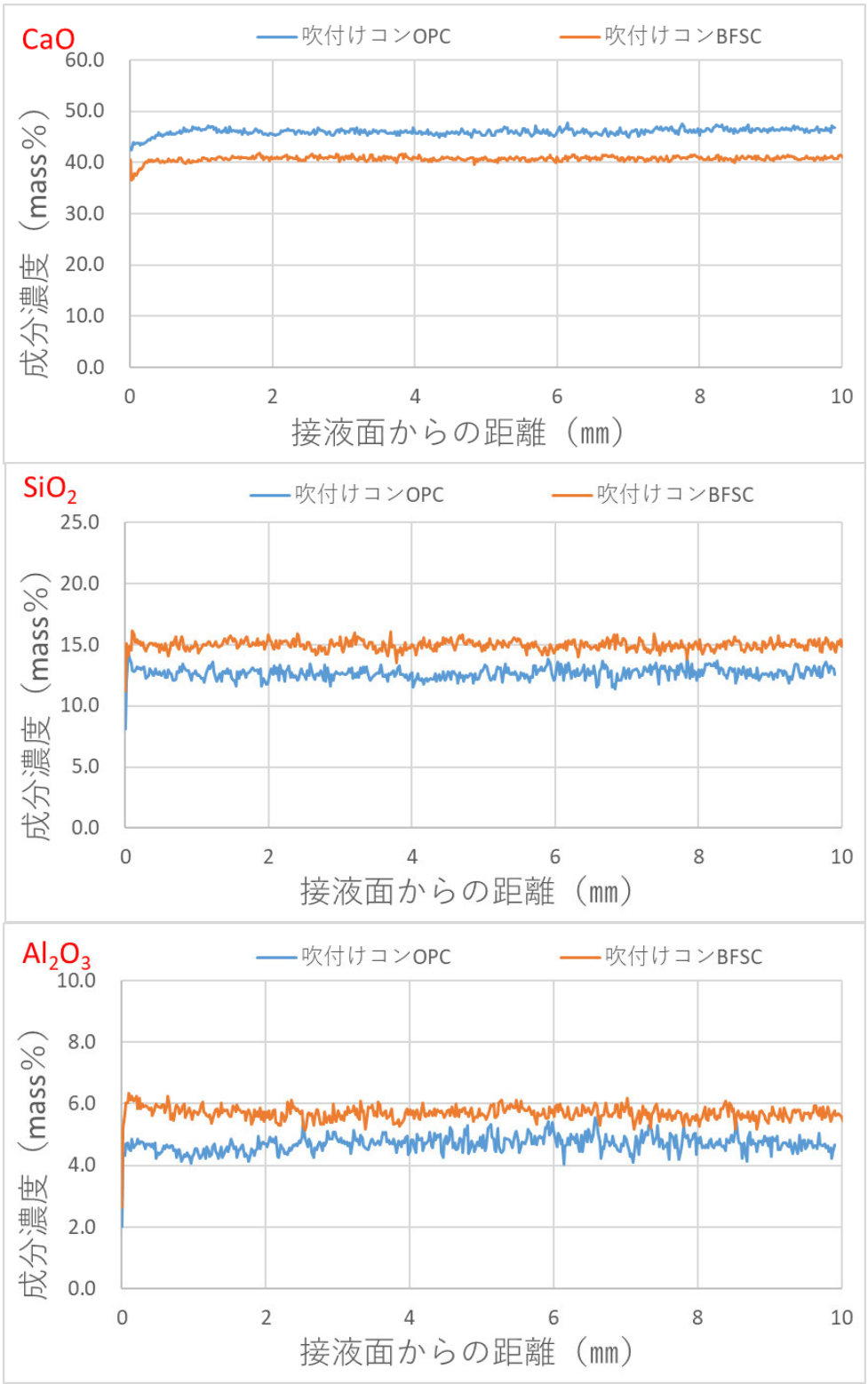


図 4-2- 65　人工海水（流速早い）コンクリート試料 10 箇月浸漬
EPMA 測定結果　平均濃度プロファイル（1/3）

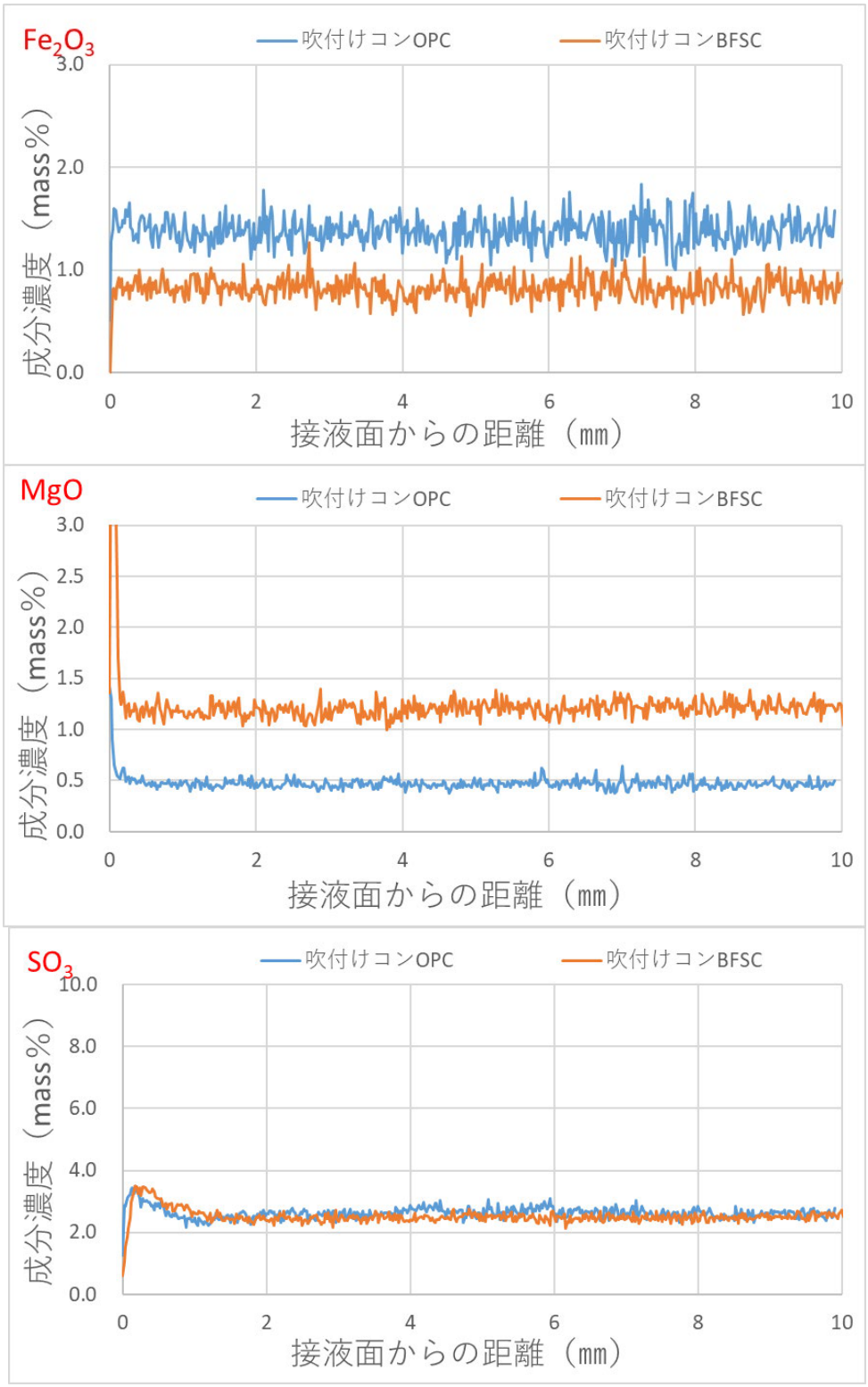


図 4-2- 66　人工海水（流速早い）コンクリート試料 10 箇月浸漬
EPMA 測定結果　平均濃度プロファイル（2/3）

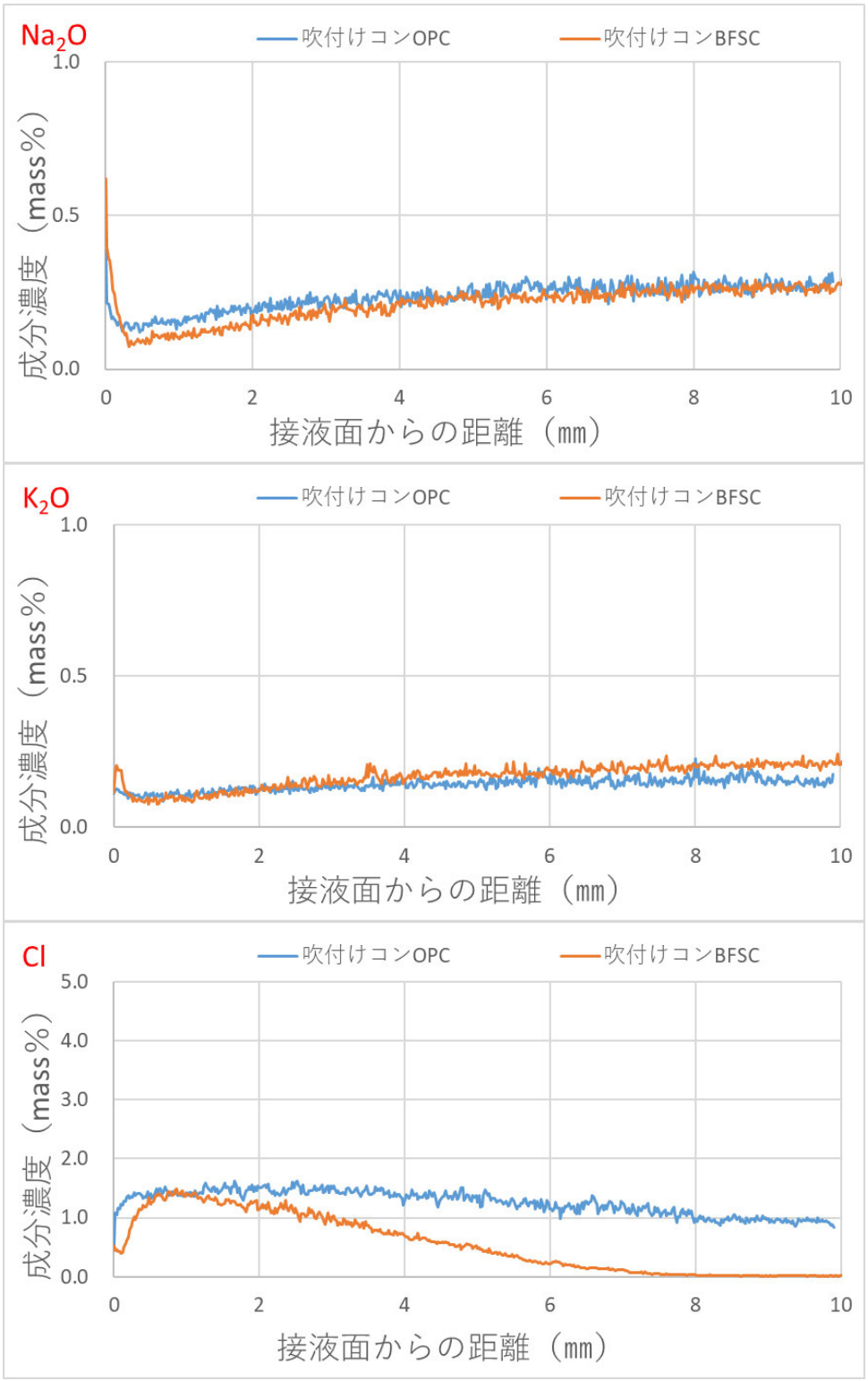


図 4-2- 67　人工海水（流速早い）コンクリート試料 10 箇月浸漬
EPMA 測定結果　平均濃度プロファイル（3/3）

(e)　空隙径分布の測定結果

SEM 反射電子像によるコンクリート試料の空隙率の測定結果を力学的特性の硬度の測定結果と合わせて表 4-2- 38 に、コンクリートの反射電子像の強度低下領域の面積比と硬度の変化率の関係を図 4-2- 68 示す。空隙径分布は、接液面近傍の変質部の領域がいずれの試験水準も極めて狭く水銀圧入ポロシメータによる測定ができなかったため、SEM を使用した反射電子像の測定結果から画像解析により空隙率の変化を測定した。接液面近傍及び試料内部の反射電子像を SEM を使用して測定し、画像データを輝度に閾値を設けて二値化することで、原子密度の低い領域を空隙と判断し、試料内部の健全部と比較した。

コンクリート試料では何れの水準も接液面近傍に Ca 濃度の低下した領域が確認されるものの明確な変質部は確認されず、著しい空隙率の増加は確認できなかった。また、接液面近傍に明確な変質領域が生じたセメントペースト試料のような硬度と空隙率の関係は明確ではなく、健全部との空隙率の比はおおむね 1 の近傍であることを確認した。降水 A に 10 箇月浸漬したセグメント BFSC のみが大きく硬度が低下しているが、(c)力学特性の評価結果で検討しているように硬度が低下する明確な要因は確認されていない。

表 4-2- 38　SEM 反射電子像によるコンクリート試料の空隙率の測定結果

液相	試料種類	表層部（0.3mm）		健全部		変質部/健全部比	
		硬度（平均値）(kN/mm^2)	空隙率（面積率）	硬度（平均値）(kN/mm^2)	空隙率（面積率）	硬度の変化率	面積率比
降水A	吹付けコンOPC	2.07	50.0	1.96	47.4	1.05	1.05
	吹付けコンBFSC	2.14	44.2	2.25	52.5	0.95	0.84
	セグメントOPC	1.93	48.3	1.96	44.3	0.99	1.09
	セグメントBFSC	1.07	50.5	1.94	57.4	0.55	0.88
FGB-2_167.70～171.78 m	吹付けコンOPC	2.19	39.7	1.96	50.9	1.11	0.78
	吹付けコンBFSC	1.83	47.0	2.25	54.9	0.82	0.86
	セグメントOPC	2.26	50.6	1.96	43.9	1.16	1.15
	セグメントBFSC	1.94	47.6	1.94	56.0	1.00	0.85
人工海水流速変更	吹付けコンOPC	2.04	45.2	1.96	48.1	1.04	0.94
	セグメントBFSC	2.65	44.9	2.25	55.4	1.18	0.81

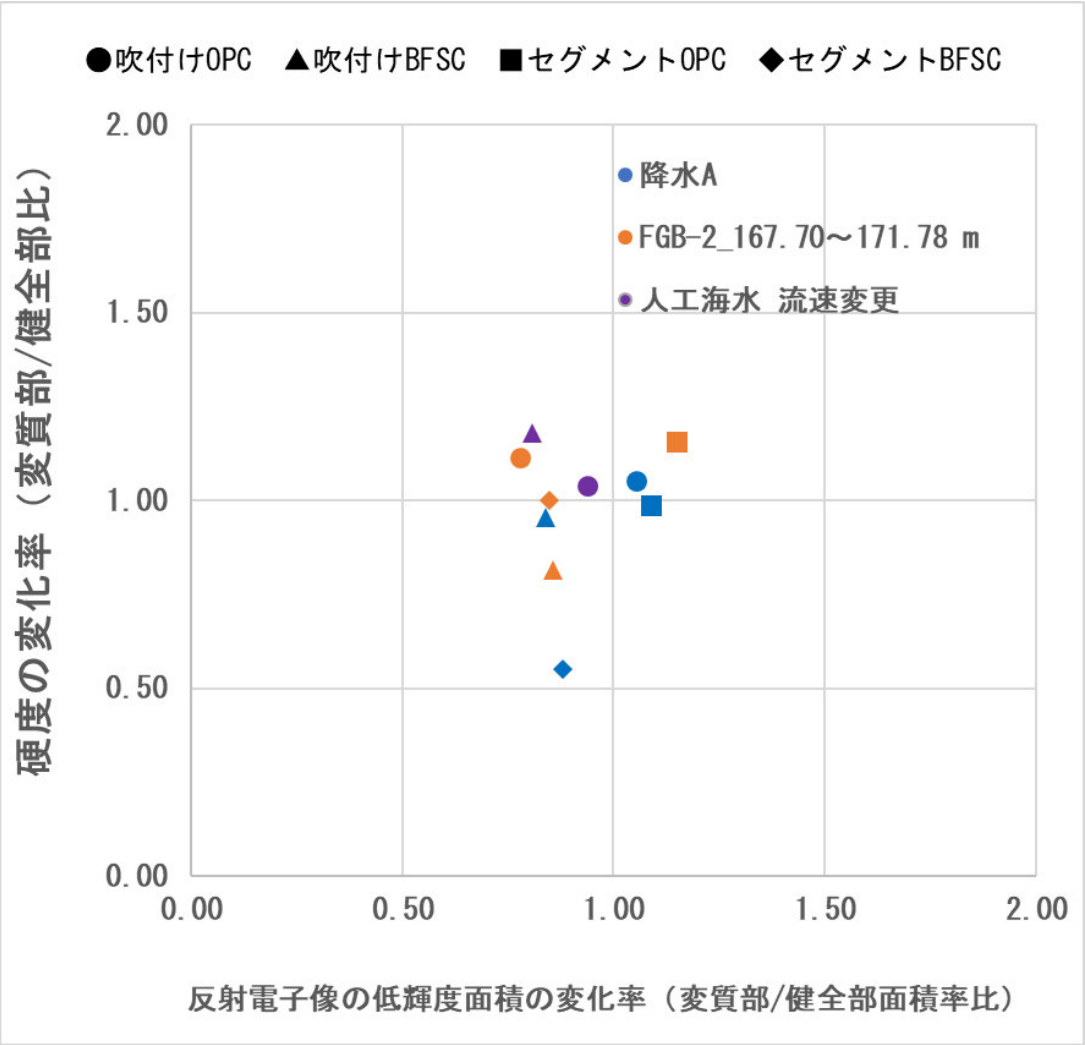


図 4-2- 68　コンクリートの反射電子像の強度低下領域の面積比と硬度の変化率の関係

(f)　コンクリート表面への二次鉱物生成の確認の結果

コンクリート表面への二次鉱物生成確認の結果（目視観察）を図 4-2- 69 及び表 4-2- 39 に示す。

界面確認試験では、浸漬期間 10 箇月で二次鉱物の生成を確認していた水準では 20 箇月においても二次鉱物の生成を確認したが、明確に生成量が増えている水準は存在しなかった。一方、浸漬期間 10 箇月で二次鉱物の生成が確認できなった降水 A に浸漬した吹付けコン OPC 及びセグメント OPC の試料では、20 箇月で二次鉱物の生成を確認した。ただし、その生成量は少なく、目視での生成の有無の判断は難しく、光の反射の仕方や試料と接していたスポンジの繊維が接液面に巻き込まれるようについていたことなどをふまえ、二次鉱物が生成していると判断した。

人工海水に浸漬したコンクリート表面への二次鉱物生成の確認試験でコンクリート試料を 20 箇月浸漬後の浸漬液の pH は、pH9 から pH10 程度ですべての水準で二次鉱物の生成が確認されているが、降水 D+F の浸漬液は同様の pH でもすべての水準で二次鉱物の生成を確認していない。海水 G のコンクリート表面への二次鉱物生成の確認試験では、何れの浸漬液も pH12 程度の高いアルカリ性を示しているが、OPC では二次鉱物の生成が確認され、BFSC では確認されていない。一方、降水 A では、全ての水準で二次鉱物の生成を確認しているが、浸漬液の pH は pH9 程度と pH12 程度の水準が混在する結果となっている。二次鉱物の生成には、地下水の化学成分の影響とともに沈殿が生成する pH の条件も重要と考えられるが、これまでの試験の結果から明確な傾向はつかめおらず今後の検討課題とする。

液種＼試料名	吹付けコンOPC	吹付けコンBFSC	セグメントOPC	セグメントBFSC
人工海水				
	二次鉱物あり	二次鉱物あり	二次鉱物あり	二次鉱物あり
	pH=9.8	pH=9.6	pH=10	pH=9.1
海水G				
	二次鉱物あり	二次鉱物なし	二次鉱物あり	二次鉱物なし
	pH=12.3	pH=11.7	pH=12	pH=11.8
降水A				
	二次鉱物あり	二次鉱物あり	二次鉱物あり	二次鉱物あり
	pH=11.7	pH=8.6	pH=12.2	pH=11.6
降水D+F				
	二次鉱物なし	二次鉱物なし	二次鉱物なし	二次鉱物なし
	pH=9.4	pH=8.8	pH=9.6	pH=9.5

図 4-2- 69　コンクリート表面への二次鉱物生成確認の結果（目視観察）

表 4-2- 39　コンクリート表面への二次鉱物生成確認の結果（目視観察）

模擬 地下水	接液面の二次鉱物の有無 上段：浸漬期間 20 箇月 （中段：浸漬期間 10 箇月） （下段：浸漬期間 1 箇月）			
	吹付けコン		セグメント	
	OPC	BFSC	OPC	BFSC
人工海水	有 (有) (有)	有 (有) (有)	有 (有) (有)	有 (有) (有)
海水 G	有 (有) (有)	無 (無) (無)	有 (有) (有)	無 (無) (無)
降水 A	有 (無) (無)	有 (有) (無)	有 (無) (無)	有 (有) (無)
降水 D+F	無 (無) (無)	無 (無) (無)	無 (無) (無)	無 (無) (無)

④　まとめ

地下水化学成分が硬度に与える影響（10 箇月浸漬　吹付けコン OPC）を図 4-2- 70 に、地下水化学成分が硬度に与える影響（10 箇月浸漬　吹付けコン BFSC）を図 4-2- 71 に、地下水化学成分が硬度に与える影響（10 箇月浸漬　セグメント OPC）を図 4-2- 72 に、地下水化学成分が硬度に与える影響（10 箇月浸漬　セグメント BFSC）を図 4-2- 73 に示す。

セメントペーストを対象としたセメント系材料の化学変質と力学的特性に関する検討では、SO_4 濃度が高く HCO_3 濃度の低い海水 B 及び降水 A に浸漬した試料の化学変質と力学的特性への影響が大きく、ヤング率の低下が確認されている。吹付け想定 OPC 及びセグメント想定 OPC では、人工海水及び FGB-2_167.70～171.78 m への浸漬試験においても、化学変質と力学的特性の変化が確認されている。一方、コンクリートを対象とした現実的な材料及び条件における化学変質と力学的特性の検討では、全ての水準において浸漬試験期間 10 箇月を経過した後も接液面近傍の著しい化学変質や力学的特性の変化を生じていない。

接液面近傍では、Ca の溶脱に伴う CaO 濃度の低下や SO_3 濃度の上昇が確認されているが、力学的特性が変化するような変質状態に至っていないと考えられる。Cl の浸透深さは、FGB-2_167.70～171.78 m に浸漬したセグメント BFSC は 10mm 程度、人工海水（流速大）のセグメント BFSC は 8mm 程度で、それ以外の水準については何れも 10mm を超えているが、力学的特性に変化は生じていない。

二次鉱物生成確認試験では、海水系の模擬地下水及び降水 A に浸漬した OPC の全ての水準で二次鉱物の生成が確認されており、降水 D+F に浸漬した水準では全て二次鉱物の生成は確認されなかった。一方、BFSC では、人工海水及び降水 A に浸漬したすべての水準で二次鉱物の生成が確認されているのに対して、海水 G 及び降水 D+F では全ての水準で二次鉱物の生成は確認されていない。

セメントペーストの試験では、浸漬期間 3 箇月において既に明確な化学変質領域と硬度の低下する領域が確認された水準と、化学変質及び硬度の変化が確認されない水準を確認し、地下水の化学成分の影響が明らかになっているが、コンクリートの試験では浸漬期間 10 箇月においても明確な化学変質や硬度の低下は確認されていない。

今後は、浸漬試験を継続して化学変質の進展状況を評価し、力学的特性の変化について知見を充足するとともに、現実的な材料及び条件における化学変質と力学的特性の関係について体系的にまとめ、化学解析及び力学解析の検証データを得る。また、セメントペーストとコンクリートの化学変質及び硬度低下の違いについては、次年度の課題とする。

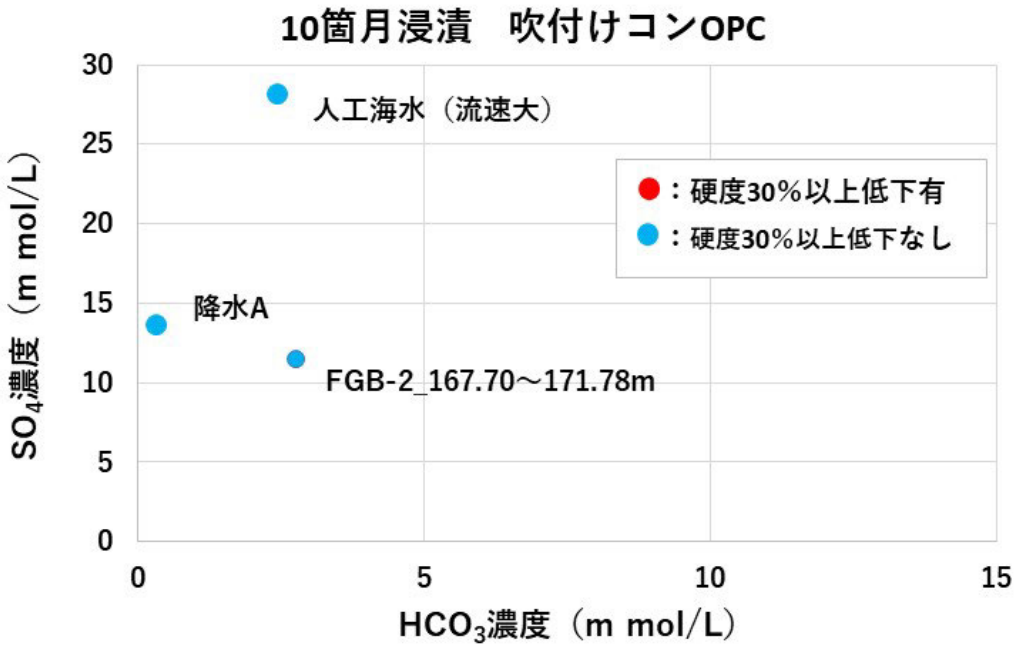


図 4-2- 70　地下水化学成分が硬度に与える影響（10 箇月浸漬　吹付けコン OPC）

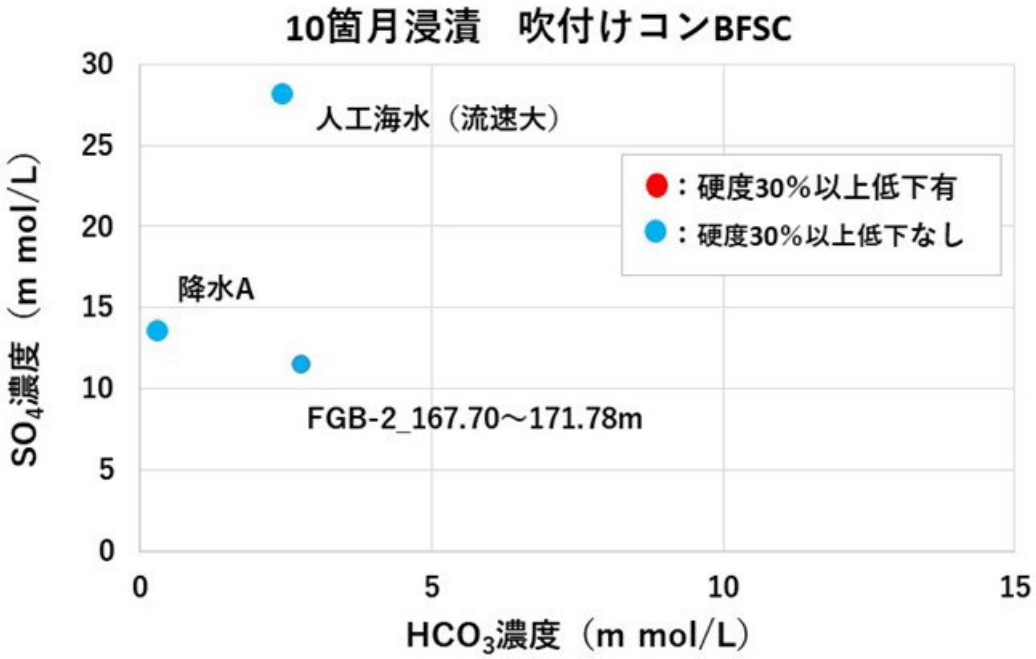


図 4-2- 71　地下水化学成分が硬度に与える影響（10 箇月浸漬　吹付けコン BFSC）

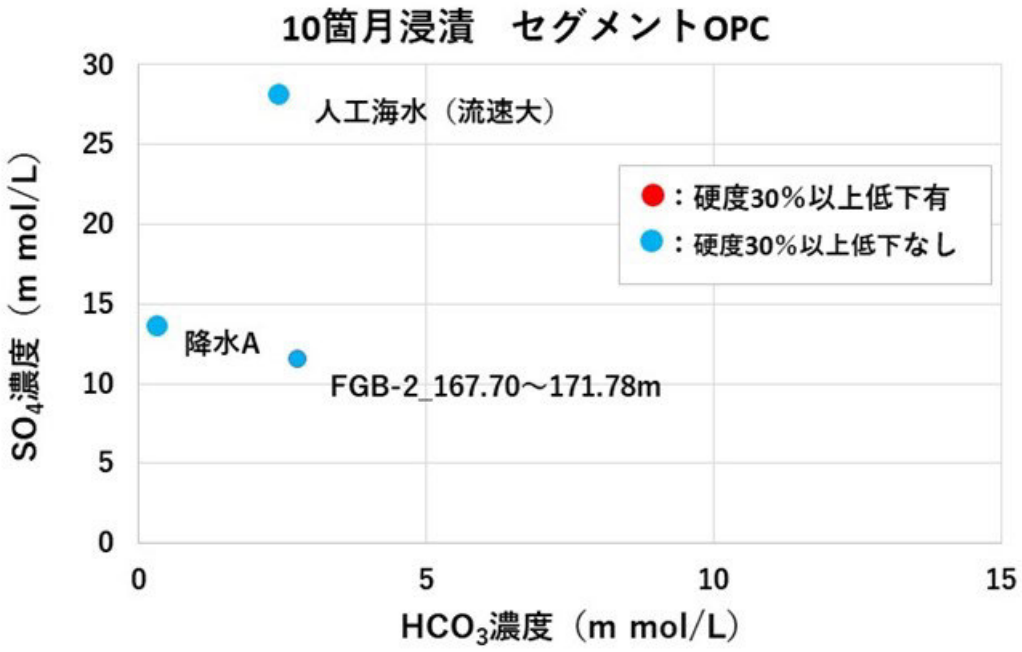


図 4-2- 72　地下水化学成分が硬度に与える影響（10 箇月浸漬　セグメント OPC）

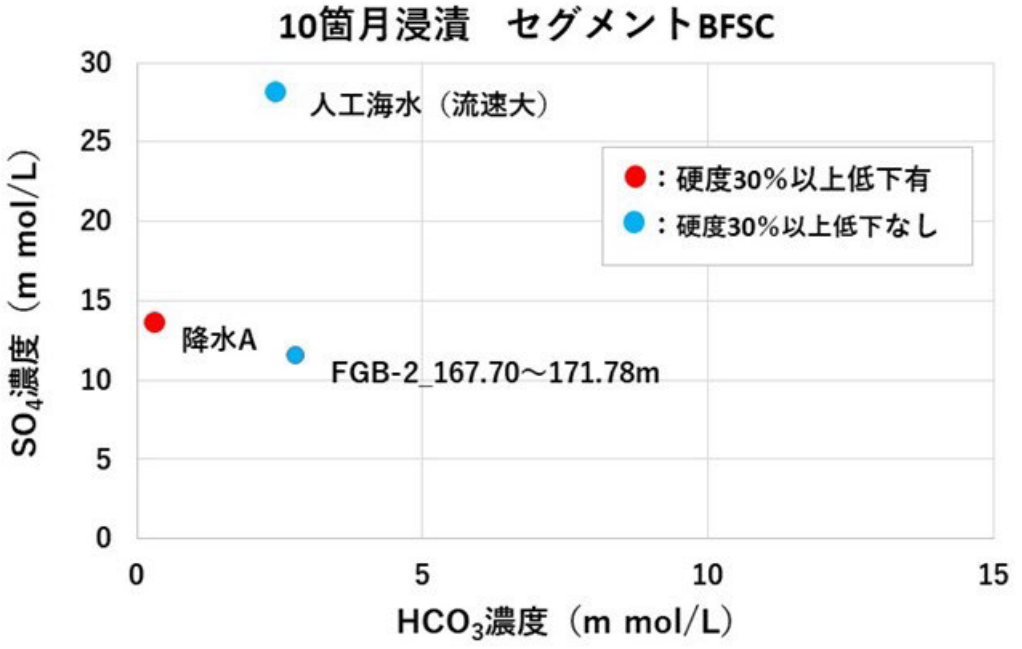


図 4-2- 73　地下水化学成分が硬度に与える影響（10 箇月浸漬　セグメント BFSC）

（4）地下水や材料の種類に応じた強度推定手法の検討

① 目的

本検討は、試験で得たセメント系材料の化学変質と力学的特性の関係について、マップ図などによる体系的な整理の支援となり得る解析的な手法を構築し、整備することを目的とする。令和 4 年度は、鉱物相の変化やイオンの浸透のような化学的な変化に着目した外部析出層の化学変質への影響及び外部析出層を有するコンクリートの化学解析手法の検討を実施した。また、セメントの水和反応の進展に着目したコンクリートの強度予測手法の検討を実施した。

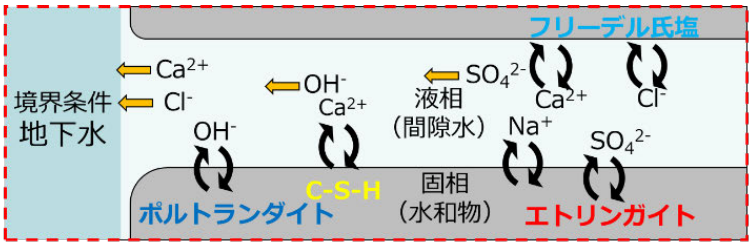
② 化学解析手法の検討

令和 3 年度に実施した相平衡多元素移動解析コードによる外部析出層を考慮した化学解析では、試験結果に比べ外部析出物の生成量が少なく塩素の浸透量も少ない、といった相違が課題として挙げられた。令和 4 年度は、解析コードの検証を目的として外部析出層を考慮しない解析を実施した。外部析出層のない試験の結果について外部析出層を考慮しない解析結果と比較することで、解析結果による試験で得られた濃度プロファイル及び鉱物組成の再現性に関して検討した。また、外部析出層の有る試験結果について外部析出層を考慮しない解析を実施することで、外部析出層の化学変質挙動への影響に関して検討した。また、外部析出層を考慮した解析手法について調査し、化学解析方法に関する外部析出層の影響を考慮する方策を検討した。加えて、長期予測の解析の妥当性を検証するためのデータを文献などにより調査し抽出した。

(a) 使用する計算コード

本検討では、相平衡計算と物質移行計算を連成させた相平衡多元素移動計算コード（Hosokawa et al., 2011）を使用して、地下水とセメント系材料の相互作用による鉱物相変化の計算を行った。相平衡多元素移動計算コードの模式図を図 4-2- 74 に示す。

細川らのモデルでは相平衡を考慮している事から、地下水に含まれる塩化物イオン以外のイオンの影響や重炭酸イオンによる固定塩分の分解を考慮出来る。本検討で想定している地下環境における多数のイオンの浸透予測には、相平衡と物質移動モデルを連成させることにより相平衡単体よりも複雑な物質移動に対応することが可能となる細川らのモデルが適している。



イオンの拡散 ⇐ 濃度勾配に従いイオンが拡散

連成 (coupling)

相平衡 ⇄ 平衡定数に従い固液間が常に平衡

鉱物相の溶解及び二次鉱物生成を計算

空隙構造因子の変化を反映させた移行計算

図 4-2- 74　相平衡多元素移動計算コードの模式図

(b) 地下水などに接触したコンクリートの試験データによる解析コードの検証

外部析出層のイオン浸透抑制効果は、外部析出層を構成する鉱物組成、化学組成及び微細構造によって変化すると想定されるが、そのイオン浸透抑制効果を直接評価する一般的手法は構築されていない。令和 3 年度の研究（産業技術総合研究所, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 2022）において、人工海水に 10 箇月浸漬したセグメント試料では、試料表層に外部析出物の生成が認められたものの、Cl イオンのセグメント試料内部への浸透も確認されたことから、当該外部析出層のイオン浸透抑制効果は小さい可能性がある。そのため、外部析出層を考慮しないプログラムを用いて、令和 3 年度の浸漬試験の諸条件におけるイオンの浸透を計算し、計算結果と試験結果を比較することで、間接的に外部析出層の影響を検討した。本検討では、令和 3 年度に使用したセメント系材料内部の二次鉱物生成とそれに伴う空隙変化を表現できる相平衡多元素移動計算コードを使用した。本コードは、令和 3 年度に M-S-H や C-A-S-H のデータベースを追加したものである。

(i) 方法

外部析出層の生成を考慮しないプログラムを用いて、表 4-2- 40 に示す試験水準について、計算で浸透プロファイルを取得した。「外部析出層の有無」は、目視及び EPMA にて、浸漬後の試料の表層付近を観察した際に、コンクリートの表層全体を覆うように析出物の層ができていた場合を「有」、一部に析出物が確認できても、表層全体を覆っていない場合を「無」とした。

計算に考慮した固相の組成や配合などを表 4-2- 41 から表 4-2- 44 に示す。セメントの化学組成及び強熱減量（以下、「ig.loss」という）は、JIS R 5202:2010 セメントの化学分析方法に従って測定し、鉱物組成は、化学組成分析結果を基に算出した。計算に考慮した液相イオン種とその拡散係数、境界条件を表 4-2- 45 に示す。

本解析で用いる主な鉱物の反応式とその熱力学的平衡定数（log K）を表 4-2- 46、表 4-2- 47 に示す。また、令和 3 年度に Haas ら（Haas et al., 2015）の報告値を基に実装した C-A-S-H 溶解平衡モデル（表 4-2- 48）も使用した。これ以外に用いる液相化学種や固相の反応式と平衡定数については、PHREEQC に付属の熱力学データベース WATEQ4F に記載のものを用いた。

物質移行解析条件を表 4-2- 49 及び表 4-2- 50 に示す。解析対象領域は、EPMA の分析範囲に合わせて表面から 10 mm と全範囲（88 mm）とし、表面からの深さが 10 mm 以内で変化が落ち着く元素は、表面から 10 mm の範囲で細かく区切って計算した結果と比較し、それ以外の元素は全範囲の計算結果と比較した。人工海水浸漬は表面から 10 mm までの EPMA 測定結果が無いため、全範囲のみ計算した。また、空間分割は、硬化体表面付近の間隙水の組成変化が著しいと推定されるため、硬化体表層を細かく区切り、硬化体内部は一定に区切るよう設定した。

表 4-2- 40　解析コードの検証と外部析出層の影響を検討するための計算条件

固相	液相	浸漬期間	分析年度	外部析出層の有無
セグメント OPC	降水 A	10 箇月	令和 4	無
	人工海水		令和 3	有
	FGB-2_167.70 ～171.78 m		令和 4	
セグメント BFSC	降水 A		令和 4	無
	人工海水		令和 3	有
	FGB-2_167.70 ～171.78 m		令和 4	

表 4-2- 41　OPC 及び BFSC の化学組成及び密度

試料名	ig.loss (%)	化学組成(wt%)								密度 (g/cm^3)
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	
OPC	2.77	20.24	5.42	3.04	64.42	0.9	1.96	0.24	0.31	3.16
BFSC	0.97	33.12	13.21	0.31	43.95	4.97	-	0.2	0.32	2.89

表 4-2- 42　セグメント OPC 及びセグメント BFSC の配合及び空気量

配合	W/C (%)	s/a (%)	混和材/粉体比 (%)	単位量（kg / m^3）					空気量 (%)
				W	C	BFS	S	G	
セグメント OPC	40	40	－	140	350	－	778	1168	2.5
セグメント BFSC			45	140	192	158	773	1161	1.9

W：水、C：セメント、s/a：細骨材率、BFS：エスメント（高炉スラグ）、S：細骨材、G：粗骨材

表 4-2- 43　OPC の鉱物組成及び反応率

鉱物名	鉱物組成（wt%）	反応率（%）
C3S	52.22	87.9
C2S	18.63	84.2
C3A	9.22	81.7
C4AF	9.25	63.2
MgO	0.90	100.0
Gypsum	2.59	100.0
Bassanite	0.38	100.0
Calcite	5.01	38.8
Na_2SO_4	0.55	100.0
K_2SO_4	0.52	100.0
KCl	0.05	100.0

表 4-2- 44　BFSC の鉱物組成及び反応率

鉱物名	鉱物組成（wt%）	反応率（%）
C3S	28.72	87.9
C2S	10.25	84.2
C3A	5.07	81.7
C4AF	5.09	63.2
MgO	0.50	100.0
Gypsum	1.42	100.0
Bassanite	0.21	100.0
Calcite	2.76	38.8
Na_2SO_4	0.30	100.0
K_2SO_4	0.28	100.0
KCl	0.03	100.0
BFS	45.00	43.2

表 4-2- 45　計算に考慮した液相イオン種、拡散係数及び境界条件

考慮したイオン種	拡散係数（m^2 / cm）	境界条件(m mol / L)		
		人工海水	降水 A	FGB-2_167.70～171.78 m
Cl	2.03E-09	564.175	3.675	200.282
Na	1.33E-09	478.469	31.120	100.043
OH-	5.27E-09	0.000	0.000	0.000
Ca	7.91E-10	9.731	0.000	21.956
K	1.96E-09	10.742	0.000	1.100
S	1.07E-09	28.107	13.560	11.451
Al	1.04E-09	0.000	0.000	0.000
Mg	7.05E-10	53.476	0.000	32.908
C	1.18E-09	2.458	0.329	2.916
Si	1.10E-09	0.029	0.000	0.712
Fe	7.19E-10	0.000	0.000	0.000

表 4-2- 46　各鉱物の反応式とその熱力学的平衡定数 - 1

鉱物名	反応式	log K	参考文献
Portlandite	$Ca(OH)_2 + 2H^+ = Ca^{2+} + 2H_2O$	22.8	a
Calcite	$CaCO_3 + H^+ = Ca^{2+} + HCO_3^-$	1.849	b
Aragonite	$CaCO_3 = Ca^{2+} + CO_3^{-2}$	-8.34	a
Brucite	$Mg(OH)_2 + 2H^+ = Mg^{2+} + 2H_2O$	16.84	b
Silica	$SiO_2 + 2H_2O = H_4SiO_4$	-2.85	c
Gypsum	$CaSO_4{:}2H_2O = Ca^{2+} + SO_4^{2-} + 2H_2O$	-4.58	a
Al(OH)3(a)	$Al(OH)_3 + OH^- = Al(OH)_4^-$	0.24	b
Ettringite	$Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12}{:}26H_2O = 2Al(OH)_4^- + 6Ca^{2+} + 26H_2O + 4OH^- + 3SO_4^{2-}$	-45.09	b
Monosulfate	$(CaO)_3Al_2O_3CaSO_4{:}12H_2O = 4Ca^{2+} + 2Al(OH)_4^- + SO_4^{2-} + 4O\ H^- + 6H_2O$	-27.7	b
Friedel's salt	$Ca_4Al_2Cl_2(OH)_{12}{:}4H_2O = 4Ca^{2+} + 2Al(OH)_4^- + 2Cl^- + 4OH^- + 4H_2O$	-27.3	d
Monocarbonate	$(CaO)_3(Al_2O_3)CaCO_3{:}11H_2O = 4Ca^{2+} + 2Al(OH)_4^- + CO_3^{2-} + 4OH^- + 5H_2O$	-31.47	b
Hemicarbonate	$Ca_4Al_2(CO_3)_{0.5}(OH)_{13}{:}7H_2O = 4Ca^{2+} + 2Al(OH)_4^- + 0.5CO_3^{2-} + 5OH^- + 7H_2O$	-29.13	e
Katoite	$Ca_3Al_2(SiO_4)(OH)_8 + 12H^+ = 2Al^{3+} + 3Ca^{2+} + H_4SiO_4 + 8H_2O$	71.17	f
Straetlingite	$Ca_2Al_2SiO_2(OH)_{10}{:}2.5H_2O + 10H^+ = 2Al^{3+} + 2Ca^{2+} + H_4SiO_4 + 10.5H_2O$	49.67	f

a : WATEQ4F、b : Lothenbach et al., 2006、c : Bénard et al, 2009、d : Loser et al., 2010、e : Lothenbach et al., 2019、f : THERMODDEM

表 4-2- 47　各鉱物の反応式とその熱力学的平衡定数- 2

鉱物名	反応式	log K	参考文献
Hydrogarnet(C_3AH_6)	$Ca_3(Al(OH)_6)_2 = 3Ca^{2+} + 2Al(OH)_4^- + 4OH^-$	-22.46	b
C4AH13	$(CaO)_4Al_2O_3{:}13H_2O = 4Ca^{2+} + 2Al(OH)_4^- + 6OH^- + 6H2O$	-25.56	b
C4FH13	$(CaO)4Fe2O3{:}13H2O = 4Ca2+ + 2Fe(OH)4- + 6OH^- + 6H_2O$	-29.88	b
Hydrotalcite (OH)	$Mg_4Al_2(OH)_{14}{:}3H_2O = 4Mg^{2+} + 2Al(OH)_4^- + 6OH^- + 3H_2O$	-56.02	b
Hydrotalcite (CO_3)	$Mg_4Al_2(OH)_{12}CO_3{:}2H_2O = 4Mg^{+2} + 2Al(OH)_4^- + CO_3^{-2} + 4OH^- + 2H_2O$	-51.14	b
MSH06	$Mg_{0.82}SiO_{2.385}(OH)_{0.87} + 1.64H^+ + 0.745H_2O = 0.82Mg^{2+} + H_4SiO_4$	9.12	f
MSH12	$Mg_{1.07}SiO_{2.075}(OH)_{1.99} + 2.14H^+ = 1.07Mg^{2+} + H_4SiO_4 + 0.065H_2O$	12.73	f

b : Lothenbach et al., 2006、f : THERMODDEM

表 4-2- 48　使用した C-A-S-H 溶解平衡モデルの反応式とその熱力学的平衡定数

	反応式	log K
C-A-S-H particle	$Ca_2Si_2O_7(Al(OH)_2)_{0.02}H_{1.98} + 3.98H^+ + 1.04H_2O = 2Ca^{2+} + 2H_4SiO_4 + 0.02Al(OH)_4^-$	28.4
C-A-S-H external surface site	$\equiv SiOH = \equiv SiO^- + H^+$	-9.8
	$\equiv SiOH + Ca^{2+} = \equiv SiOCa^+ + H^+$	-7.0
	$\equiv SiOH + 0.5H_4SiO_4 = \equiv SiOSi_{0.5}OH + H_2O$	2.9
	$\equiv SiOSi_{0.5}OH = \equiv SiOSi_{0.5}O^- + H^+$	-9.8
	$\equiv SiOSi_{0.5}OH + Ca^{2+} = \equiv SiOSi_{0.5}OCa^+ + H^+$	-7
	$\equiv SiOH + 0.5Al(OH)_4^- = \equiv SiOAl_{0.5}OH^{0.5-} + H_2O$	3.8
	$\equiv SiOH + 0.5Al(OH)_4^- + 0.5Ca^{2+} = \equiv SiOAl_{0.5}OHCa_{0.5}^{0.5+} + H_2O$	5.04
C-A-S-H internal surface site	$\equiv SiOH + 0.5Ca^{2+} = \equiv SiOCa_{0.5} + H^+$	-10.2
	$\equiv SiOH + 0.5H_4SiO_4 = \equiv SiOSi0.5OH + H2O$	2.9
	$\equiv SiOSi0.5OH + 0.5Ca2+ = \equiv SiOSi_{0.5}OCa_{0.5} + H^+$	-10.2
	$\equiv SiOH + 0.5Al(OH)_4^- + 0.25Ca^{2+} = \equiv SiOAl_{0.5}OHCa_{0.25} + H_2O$	2.1
	$3(\equiv SiOSi_{0.5}OH) + Al(OH)_3 = (\equiv SiOSi_{0.5}O)_3Al + 3H_2O$	10

表 4-2- 49　解析コードの検証と外部析出層の影響を検討するための物質移行解析条件（表面から約 10 mm）

液相		降水 A		FGB-2_167.70～171.78 m	
セグメント種類		OPC	BFSC	OPC	BFSC
解析対象期間（days）		300			
解析のタイムステップ（hour）		24			
ステップ数		300			
空間分割	硬化体表層	0, 0.02, 0.06, 0.12, 0.20, 0.30, 0.40, 0.52, 0.66, 0.82, 1.00 mm			
	硬化体内部	0.2 mm ごと			
解析対象領域（mm）		10.8			

表 4-2- 50　解析コードの検証と外部析出層の影響を検討するための物質移行解析条件（全範囲）

液相		人工海水		降水 A		FGB-2_167.70 ～ 171.78 m	
セグメント種類		OPC	BFSC	OPC	BFSC	OPC	BFSC
解析対象期間（days）		300					
解析のタイムステップ（hour）		24					
ステップ数		300					
空間分割	硬化体表層	0, 0.2, 0.6, 1.2, 2, 3, 4, 5.2, 6.6, 8.2, 10 mm					
	硬化体内部	2 mm ごと					
解析対象領域（mm）		88					

(ii) 試験データによる解析コードの検証

試験結果の再現性検討のため、外部析出層のないセグメント OPC を降水 A に 10 箇月間浸漬した水準について EPMA 測定結果と解析結果との比較を図 4-2- 75 に示す。Ca は EPMA 測定結果の方が全体的に濃度は高く、Si、Al、Fe 及び Mg は EPMA 測定結果の方が全体的に濃度は低い傾向にあった。図 4-2- 75 の表面から 70 から 80mm 部分の Ca/Si 比に着目すると、EPMA 測定結果は Ca/Si 比が 4.0、解析結果は 3.4 であった。本試験体作製時に使用した OPC の化学組成から求めた Ca/Si 比は 3.4 である。EPMA 測定結果の Ca/Si 比が高い点については、試験体に石灰石砕砂が含まれているため、EPMA では、石灰石砕砂の Ca の影響を受けて Ca が高く他の元素を相対的に低く見積もったと考えられる。そこで、図 4-2- 76 に示すようにプロファイルが一定になっている部分で原料の組成比と一致するよう EPMA 測定結果を補正した。その結果、イオンの溶出や浸透が生じている表面付近においても EPMA 測定結果と解析結果は概ね一致した。Na 及び K が解析結果より若干高い要因として、今回は EPMA 測定結果を濃度一定部分が原料の組成比になるよう補正しており、試料内部でのセメント中の Na と K の溶出を考慮していないことが挙げられる。
解析で得られたコンクリートの組成を図 4-2- 77 に、試験結果と解析結果のペースト部分の鉱物相の比較を表 4-2- 51 に示す。μXRD 測定結果では、Calcite の強度の大きいピークと Ettringite の強度の小さいピークが確認されたのに対し、解析結果では、同様に Calcite 及び Ettringite が生成したものの、Ettringite の生成量が Calcite より多い結果となった。μXRD では試料中の石灰石砕砂の影響を受けて、Calcite のピークが大きくなった可能性がある。解析では、表面付近に試験では確認できなかった未水和セメント鉱物、C-A-S-H、C4FH13、Portlandite、Monocarbonate、Monosulfate、Hydrotalcite (OH)及び Friedel's salt が生成する結果となったが、試験では生成量が少なく非晶質及び低結晶質であることなどから、μXRD によって鉱物相を定性できなかったと考える。解析と試験が一致しない点については今後も原因や影響の程度などの検討が必要と考えられるが、

図 4-2- 76 に示した通り、浸透プロファイルは試験結果と解析結果がおおむね一致していることから、解析結果が試験結果を再現できることを検証したと考えた。OPC を使用したセグメントに対して外部析出層がないコンクリートの短期の化学変質の解析ツールとしての適用できることを確認した。

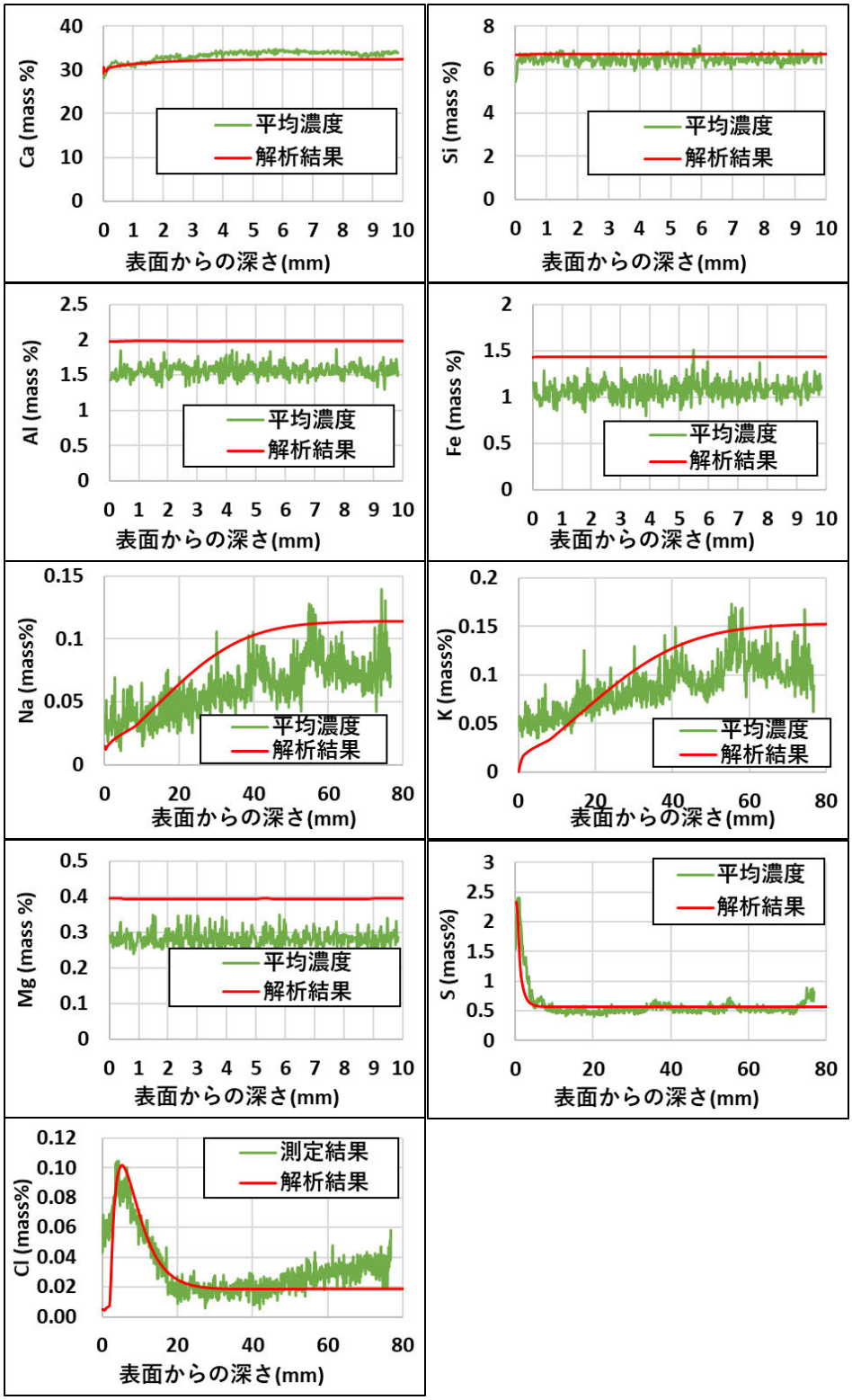


図 4-2- 75　降水 A10 箇月浸漬　セグメント OPC　EPMA 測定結果と解析結果の比較

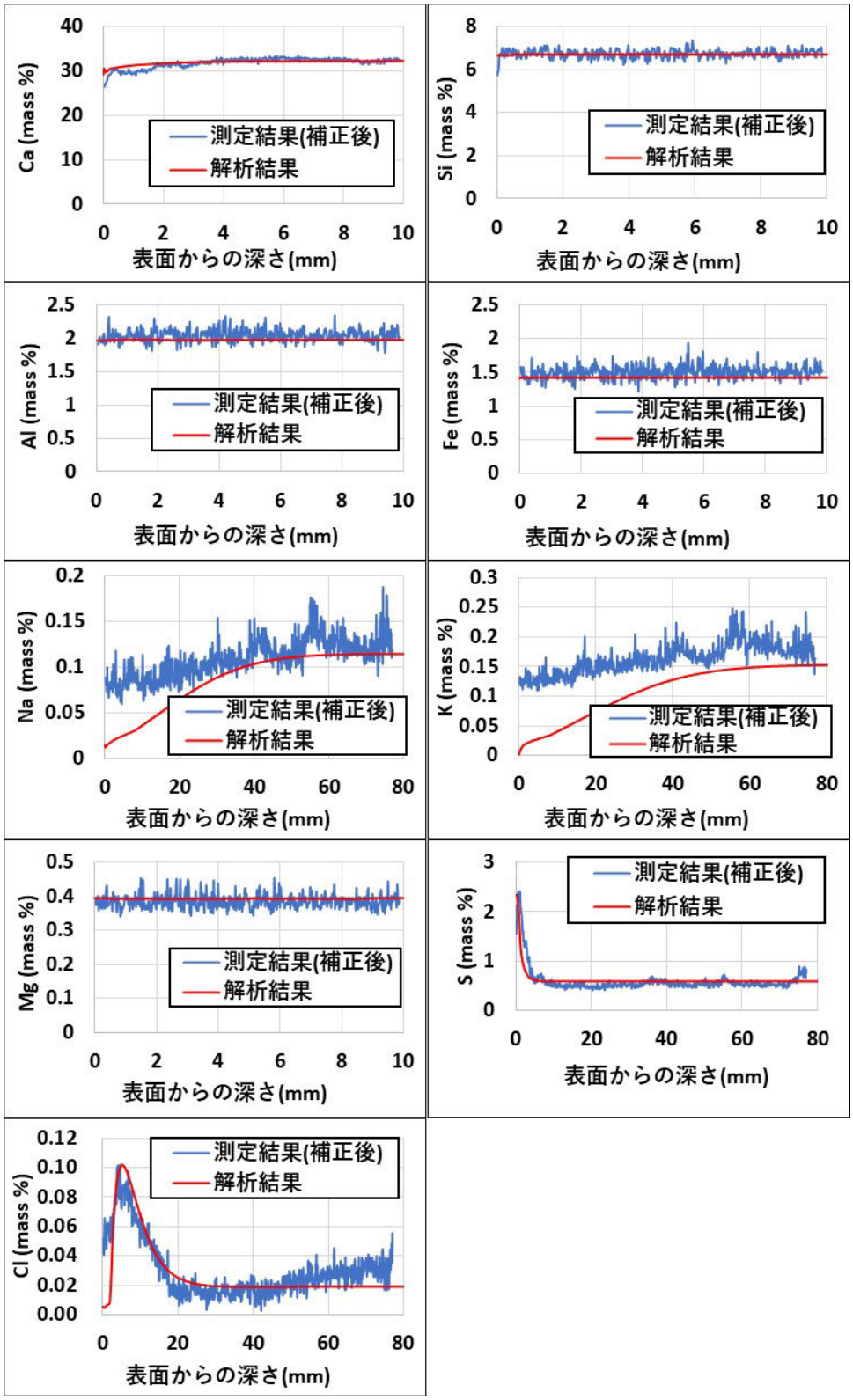


図 4-2- 76　降水 A10 箇月浸漬　セグメント OPC　EPMA 測定結果と解析結果の比較
（石灰石骨材の Ca の影響を補正）

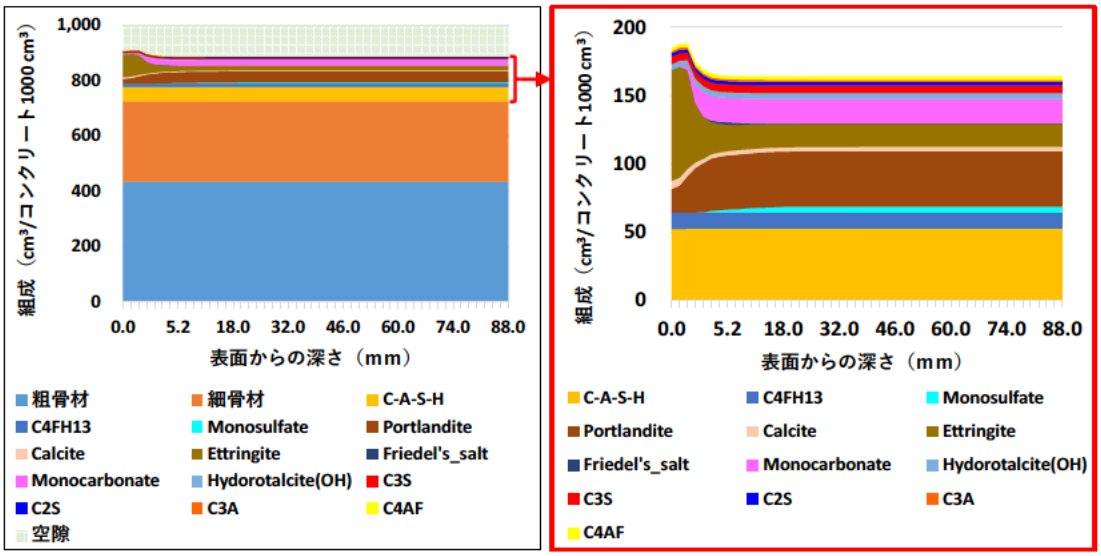


図 4-2- 77　セグメント OPC の 10 箇月降水 A 浸漬　コンクリートの組成解析結果
（左：コンクリート全体、右：セメントペースト部）

表 4-2- 51　セグメント OPC の 10 箇月降水 A 浸漬の鉱物相
試験結果と解析結果の比較

由来	外部から のイオン	鉱物相		μXRD	解析
				表面	表面－0.2 mm
セメント 水和	－	未水和 セメント 鉱物	C3S		△
			C2S		△
			C3A		△
			C4AF		△
		C(-A)-S-H			△
		C4FH13			△
		Portlandite			○
セメント 水和 模擬地下水	C	Calcite		○	○
		Monocarbonate			○
	S	Ettringite		○	○
		Monosulfate			△
	Mg	Hydrotalcite (OH)			△
	Cl	Friedel's salt			△

○：試験及び解析で確認できた鉱物

△：解析で確認できたが、量の少なさや、非晶質であることなどから、試験では確認できなかった可能性がある鉱物

次に、セグメント BFSC を降水 A に 10 箇月浸漬した外部析出層のない水準について、EPMA 測定結果と解析結果との比較を図 4-2- 78 に示す。EPMA の結果は前述のようにセメントの化学組成で補正した。EPMA 測定結果では極表層の Si、Al、Fe、S 及び Cl の濃度が解析結果より低い傾向にあった。これは、石灰石砕砂が使用されていること、空気中で試験していること及びセグメント BFSC は OPC に比べて炭酸塩鉱物に変化しやすいカルシウムアルミノシリケート水和物の量が多いことから、極表層で Calcite、Monocarbonate 及び Hemicarbonate が生成し、Si、Al 及び Fe が溶出したために Ettringite、Monosulfate 及び Friedel's salt が生成しなかったためと考えた。また、極表層は溶脱が激しくポーラスになっていることから、EPMA で正確に測定できていない可能性も考えられる。また、Na 及び K の濃度が補正後の EPMA 測定結果の方が若干高い要因は、セグメント OPC の降水 A 浸漬と同様の理由であると考える。

解析で得られたコンクリートの組成を図 4-2- 79 に、試験結果と解析結果のペースト部分の鉱物相の比較を表 4-2- 52 に示す。μXRD 測定結果では、Calcite 及び Ettringite の強度の小さいピークが確認されたのに対し、解析結果では、同様に Calcite 及び Ettringite の生成が確認されたものの、Ettringite の生成量が Calcite より多い結果となった。この要因として、μXRD では試料中の石灰石砕砂の影響を受けている可能性がある。解析では、表面付近に試験では確認できなかった未水和セメント鉱物や C-A-S-H、C4FH13、Monocarbonate、Hemicarbonate、Monosulfate、Hydrotalcite (OH)及び Friedel's salt が生成する結果となったが、試験では生成量が少なく非晶質及び低結晶質である可能性があることなどから、μXRD によって鉱物相を定性できなかったと考える。解析と試験が一致しない点については今後も原因や影響の程度などの検討が必要と考えられるが、図 4-2- 78 で示した通り、浸透プロファイルは試験結果と解析結果がおおむね一致していることから、解析結果が試験結果を再現できることを検証したと考えた。BFSC を使用したセグメントに対して外部析出層がないコンクリートの短期の化学変質の解析ツールとしての適用できることを確認した。

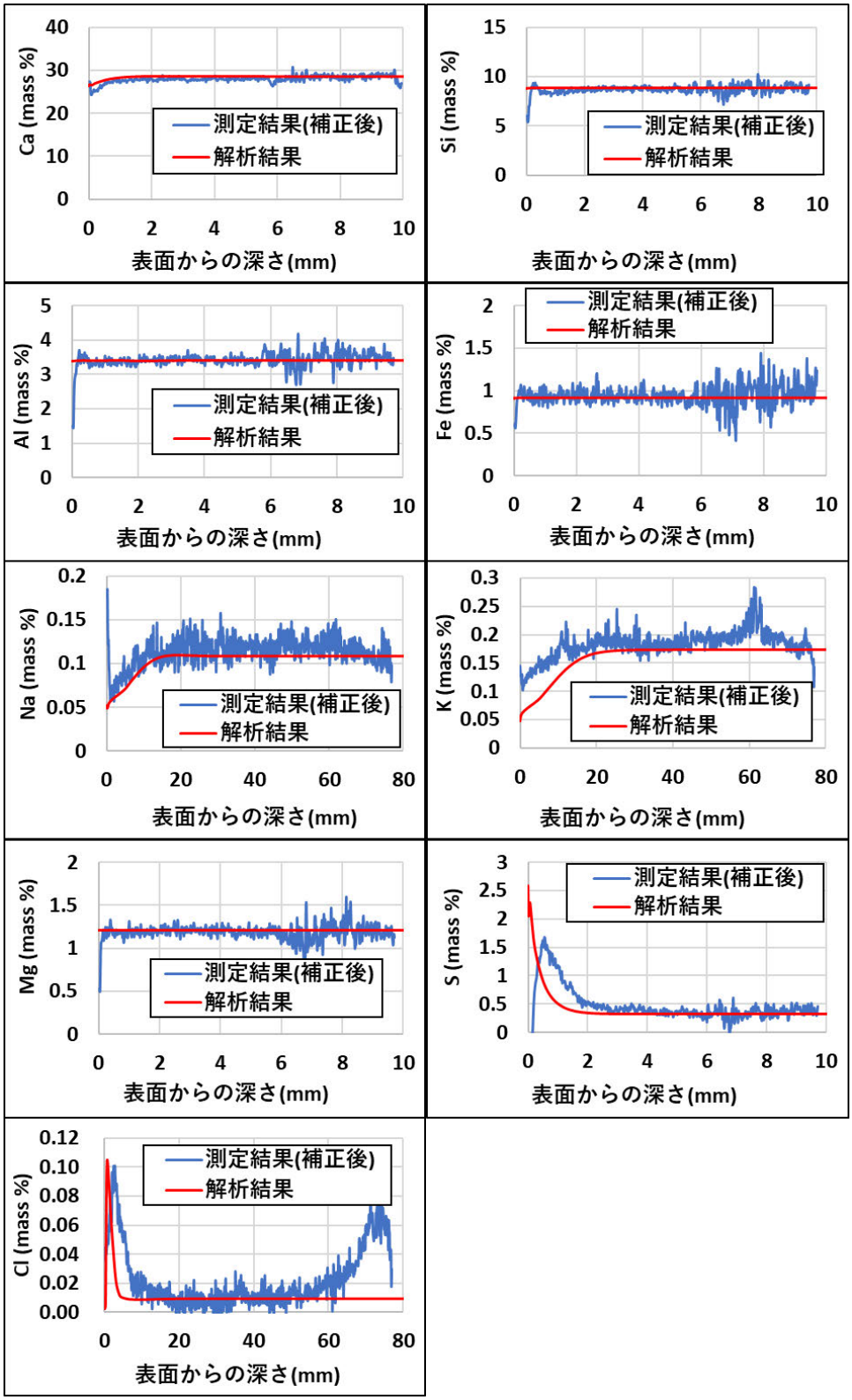


図 4-2- 78　降水 A10 箇月浸漬　セグメント BFSC
EPMA 測定結果と解析結果の比較
（石灰石骨材の Ca の影響を補正）

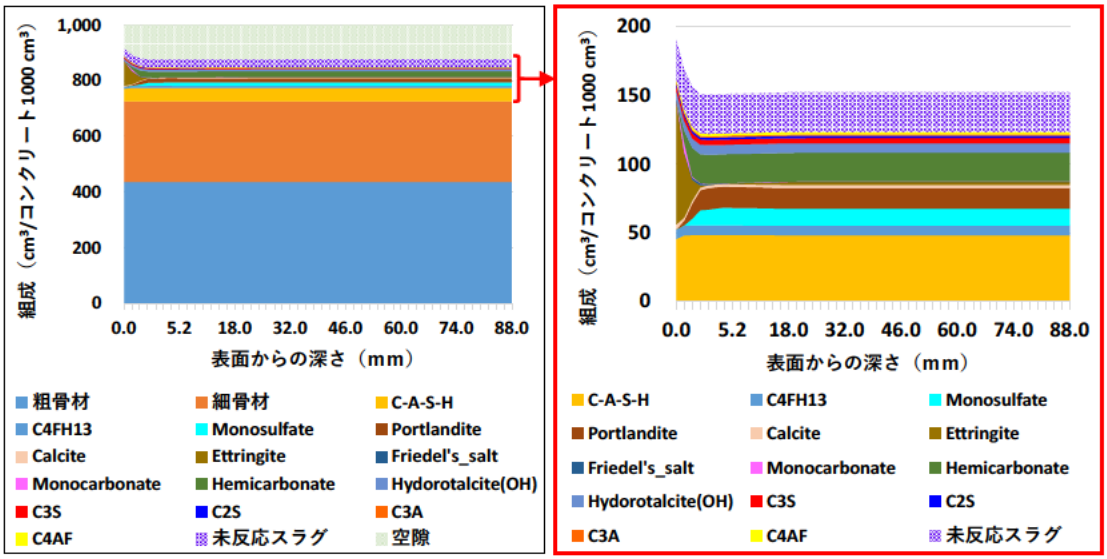


図 4-2- 79　セグメント BFSC の 10 箇月降水 A 浸漬　コンクリートの組成解析結果
（左：コンクリート全体、右：セメントペースト部）

表 4-2- 52　セグメント BFSC の 10 箇月降水 A 浸漬の鉱物相
試験結果と解析結果の比較

由来	外部から のイオン	鉱物相		μXRD	解析
				表面	表面－0.2 mm
セメント 水和	－	未水和 セメント 鉱物	C3S		△
			C2S		△
			C3A		△
			C4AF		△
		C(-A)-S-H			△
		C4FH13			△
セメント 水和 模擬地下水	C	Calcite		○	○
		Monocarbonate			○
		Hemicarbonate			△
	S	Ettringite		○	○
		Monosulfate			△
	Mg	Hydrotalcite (OH)			△
	Cl	Friedel's salt			△

○：試験及び解析で確認できた鉱物

△：解析で確認できたが、量の少なさや、非晶質であることなどから、試験では確認できなかった可能性がある鉱物

(iii)　外部析出層の化学変質挙動への影響に関する検討

外部析出層の化学変質挙動への影響を検討するため、外部析出層が生成したセグメント OPC 及びセグメント BFSC を人工海水、FGB-2_167.70～171.78 m に 10 箇月浸漬した水準について試験結果と計算結果を比較した結果を図 4-2- 80 から図 4-2- 88 に、試験結果と解析結果のペースト部分の鉱物相の比較を表 4-2- 53 から表 4-2- 56 に示す。すべての EPMA 測定結果は、10 箇月降水 A 浸漬と同様に石灰石砕砂の影響と考えられる Ca 濃度の増加及び他の元素の相対的な低下を補正した。

図 4-2- 80 に示すセグメント OPC の 10 箇月人工海水浸漬後のイオンの浸透の試験結果と解析結果の比較では、表面付近で解析結果の方が Ca の溶脱が多く、Mg、Na 及び S の濃度が高く、Cl 濃度は低かった。Ca、Mg 及び S が試験結果と異なった要因としては、表層に析出物が生成したことにより Ca の溶脱や Mg 及び S の浸透を抑制したためと考えられる。解析結果で表面の Na 濃度が高い理由は、表面で試験と比べて過剰に Ca の溶脱及び炭酸化が生じ、C-A-S-H の Ca / Si 比が低下し、C-A-S-H への Na の収着が増加しているためと考えられる。解析結果の表面付近の Cl の濃度が試験結果より低い理由としては、解析では表層付近で S 濃度が高くなっているため Ettringite が多量に生成したことによって Friedel's salt が生成しなかったと考えられる。Friedel's salt は、Ettringite の生成した領域の内側で生成しており、試験に比べ表層近傍では S 濃度が高く、Cl は内部に多く浸透している。Monocarbonate 及び Hemicarbonate は、Ettringite 及び Friedel's salt が生成している領域で減少しており、試験結果に比べて S 及び Cl の浸透が多いことに起因すると考えられる。補正後の EPMA 測定結果の濃度が一定になった部分で、Na と K の濃度が解析結果より若干高い点については、OPC の降水 A 浸漬で記述した通り、補正方法の問題である。

解析で得られたコンクリートの組成を図 4-2- 81 に、試験結果と解析結果のペースト部分の鉱物相の比較を表 4-2- 51 に示す。本試料は昨年度材齢に到達した試料であり、μXRD の測定結果はないが、昨年度測定した接液面から内部 2 mm までの試料の XRD 測定結果では、C-S-H、Portlandite、Calcite、Aragonite、Ettringite 及び Friedel's salt のピークが確認された。それに対し解析では、表面から 2 mm までの範囲で未水和セメント鉱物、C-A-S-H、C4FH13、Portlandite、Calcite、Monocarbonate、Hemicarbonate、Ettringite、Monosulfate、Brucite、Hydrotalcite (OH)及び Friedel's salt が生成する結果となった。解析では、試験では確認できなかった未水和セメント鉱物、C4FH13、Monocarbonate、Hemicarbonate、Monosulfate 及び Hydrotalcite (OH)が生成する結果となったが、試験では生成量が少なく非晶質及び低結晶質である可能性があることなどから、μXRD によって鉱物相を定性できなかったと考える。

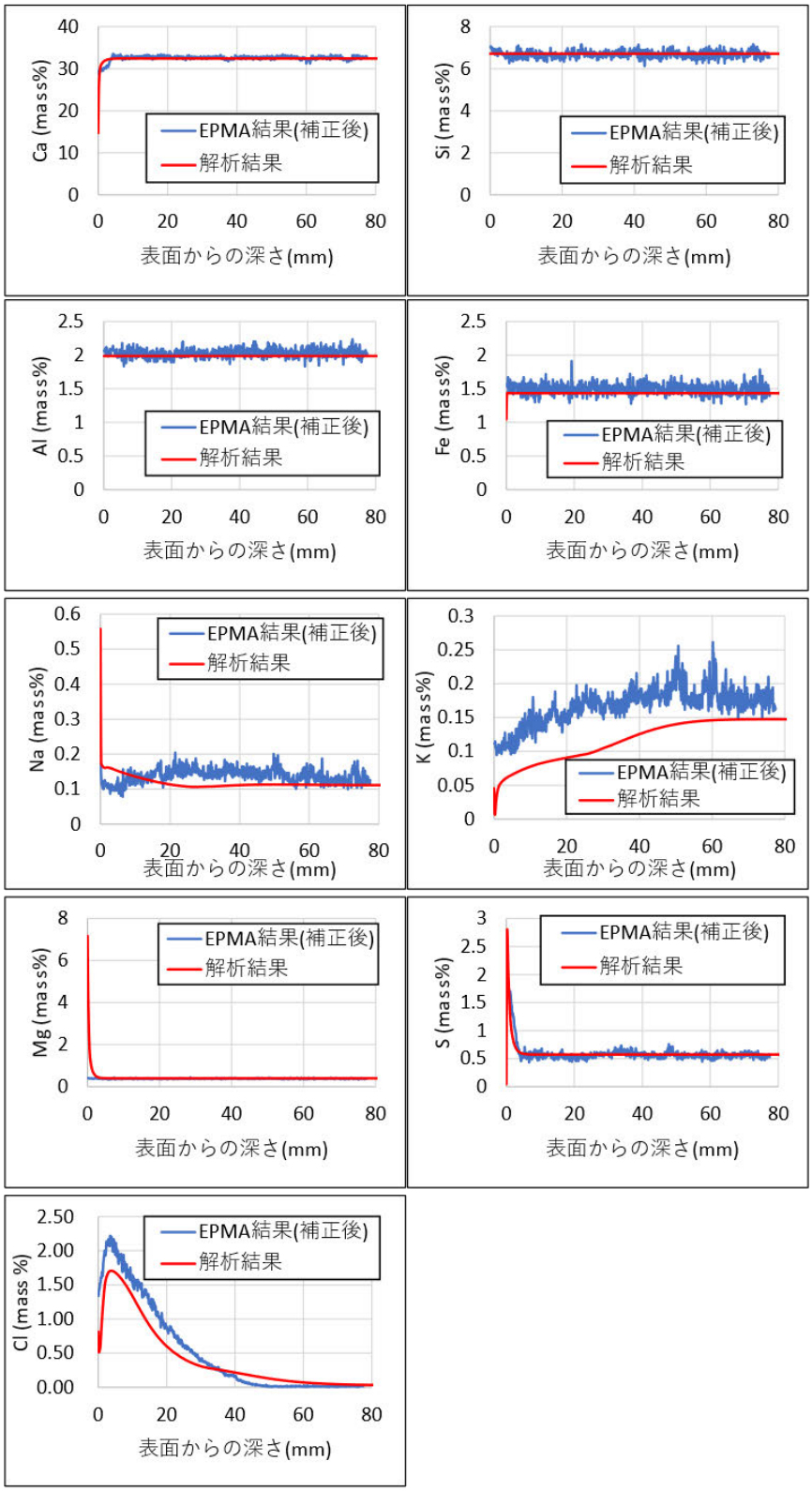


図 4-2- 80　人工海水 10 箇月浸漬セグメント OPC
EPMA 測定結果と解析結果の比較
（石灰石骨材の Ca の影響を補正）

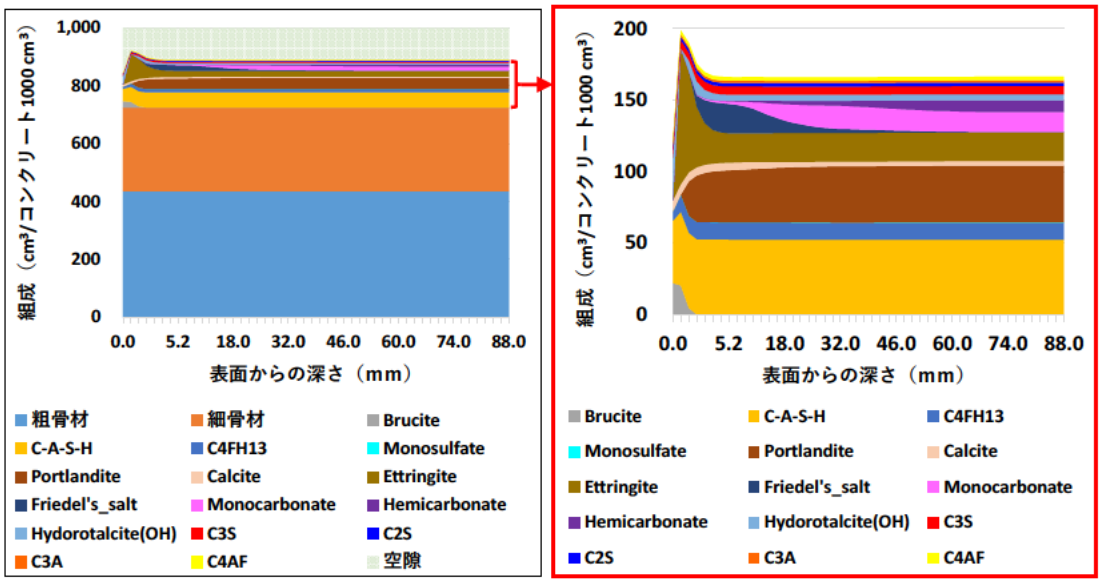


図 4-2- 81　セグメント OPC の 10 箇月人工海水浸漬　コンクリートの組成解析結果
（左：コンクリート全体、右：セメントペースト部）

表 4-2- 53　セグメント OPC の 10 箇月人工海水浸漬の鉱物相
試験結果と解析結果の比較

由来	外部からのイオン	鉱物相		XRD	解析
				表面 －2 mm	表面 －2 mm
セメント水和	－	未水和セメント鉱物	C3S		△
			C2S		△
			C3A		△
			C4AF		△
		C(-A)-S-H		○	○
		C4FH13			△
		Portlandite		○	○
セメント水和模擬地下水	C	Calcite		○	○
		Aragonite		×	
		Monocarbonate			△
		Hemicarbonate			△
	S	Ettringite		○	○
		Monosulfate			△
	Mg	Brucite			××
		Hydrotalcite (OH)			△
	Cl	Friedel's salt		○	○

○：試験及び解析で確認できた鉱物

△：解析で確認できたが、量の少なさや、非晶質であることなどから、試験では確認できなかった可能性がある鉱物

×：試験で確認できたが解析で確認できなかった鉱物

××：解析で確認できたが試験で確認できなかった鉱物

図 4-2- 82 に示すセグメント BFSC の 10 箇月人工海水浸漬のイオンの浸透の試験結果と解析結果の比較では、セグメント OPC の人工海水浸漬と同様に、表面付近で解析結果の方が Ca の溶脱が多く、極表層近傍の Mg、Na 及び S の濃度が高く、Cl 濃度は低くなった。これは OPC の人工海水浸漬と同様に、実際の試料では表層に析出物が生成した影響によりコンクリートから Ca の溶脱が抑制され、人工海水から Mg、Na 及び S の浸透が抑制されたためと考えられる。

解析で得られた 10 箇月人工海水に浸漬したセグメント BFSC の組成を図 4-2- 83 に、ペースト部分の試験結果と解析結果の鉱物相 10 箇月浸漬コンクリートの組成を表 4-2- 54 に示す。

接液面から内部 2 mm までの試料の XRD 測定結果では、C-S-H、Calcite、Ettringite 及び Friedel's salt のピークが確認された。それに対し解析では、表面から 2 mm までの範囲で未水和セメント鉱物、C-A-S-H、C4FH13、Portlandite、Calcite、Monocarbonate、Hemicarbonate、Ettringite、Monosulfate、Brucite、Hydrotalcite (OH)、MSH06、MSH12 及び Friedel's salt が生成する結果となった。解析では、試験では確認できなかった未水和セメント鉱物、C4FH13、Portlandite、Monocarbonate、Hemicarbonate、Monosulfate、Hydrotalcite (OH)、MSH06 及び MSH12 が生成する結果となったが、試験では生成量が少なく非晶質及び低結晶質である可能性があることなどから、μXRD によって鉱物相を定性できなかったと考える。

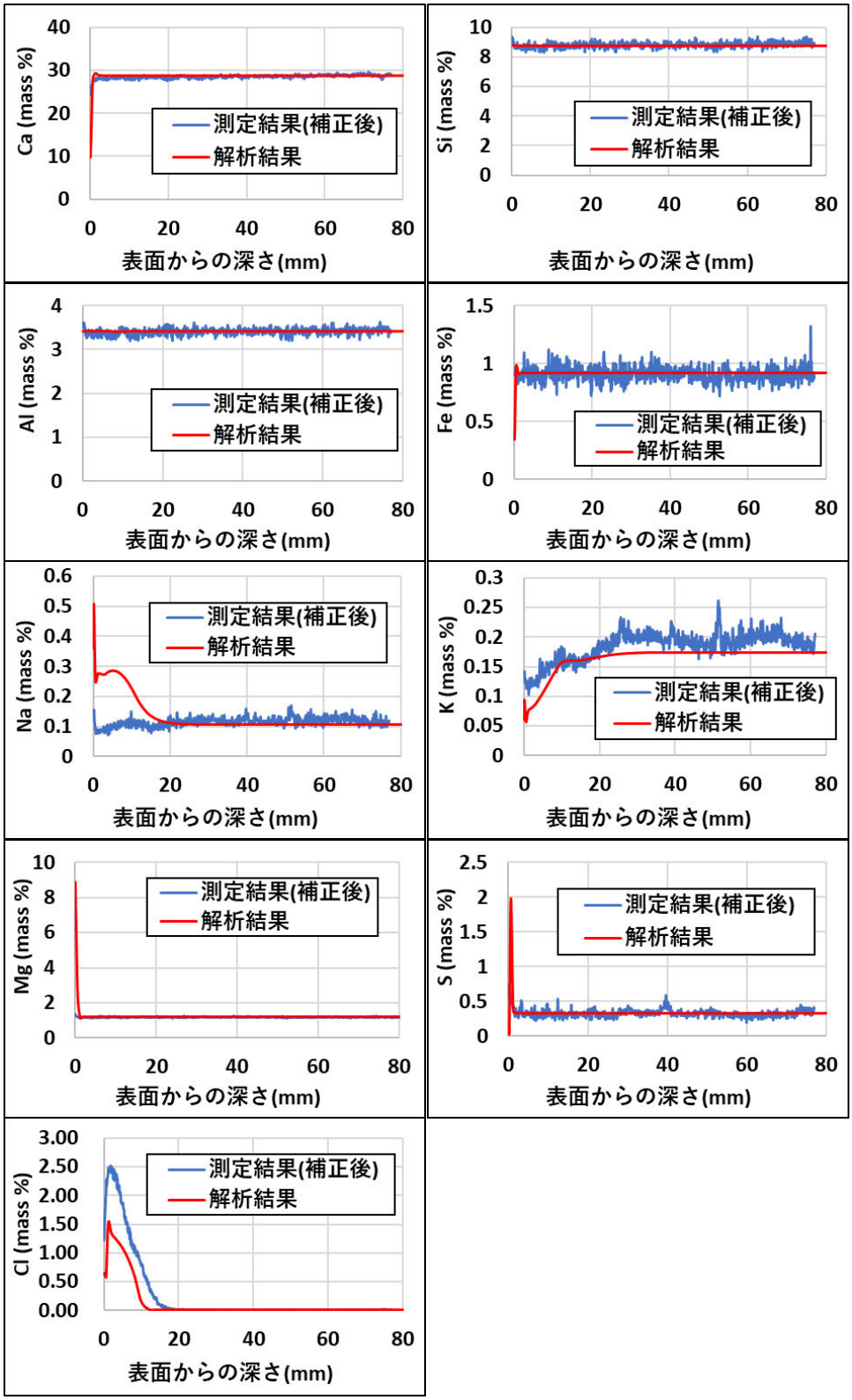


図 4-2- 82　人工海水 10 箇月浸漬セグメント BFSC
EPMA 測定結果と解析結果の比較（石灰石骨材の Ca の影響を補正）

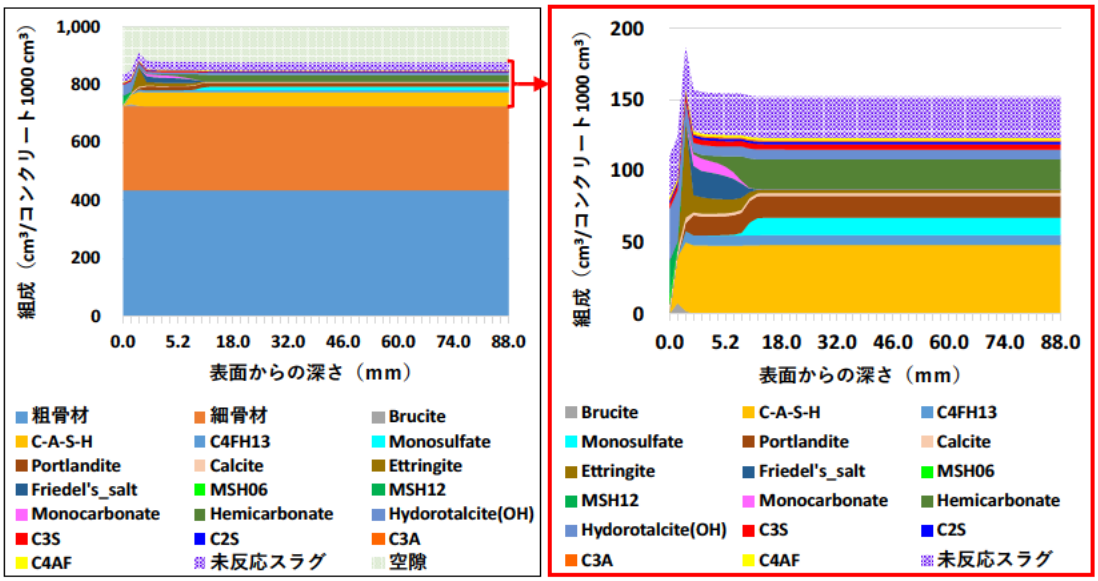


図 4-2- 83　セグメント BFSC の 10 箇月人工海水浸漬　コンクリートの組成解析結果
（左：コンクリート全体、右：セメントペースト部）

表 4-2- 54　セグメント BFSC の 10 箇月人工海水浸漬の鉱物相
試験結果と解析結果の比較

由来	外部から のイオン	鉱物相		XRD	解析
				表面 – 2 mm	表面 – 2 mm
セメント 水和	－	未水和 セメント 鉱物	C3S		△
			C2S		△
			C3A		△
			C4AF		△
		C(-A)-S-H		○	○
		C4FH13			△
		Portlandite			△
セメント 水和 模擬地下水	C	Calcite		○	○
		Monocarbonate			△
		Hemicarbonate			△
	S	Ettringite		○	○
		Monosulfate			△
	Mg	Brucite			××
		Hydrotalcite (OH)			△
		MSH06			△
		MSH12			△
	Cl	Friedel’s salt		○	○

○：試験及び解析で確認できた鉱物

△：解析で確認できたが、量の少なさや、非晶質であることなどから、試験では確認できなかった可能性がある鉱物

××：解析で確認できたが試験で確認できなかった鉱物

図 4-2- 84 に示すセグメント OPC の 10 箇月 FGB-2_167.70～171.78 m 浸漬のイオンの浸透の試験結果と解析結果の比較では、セグメント OPC の人工海水浸漬と同様に表面付近で解析結果の方が Ca の溶脱が多く、Mg 及び S の濃度が高く、Cl 濃度が低い傾向にあった。これは人工海水浸漬と同様、試験では試料の外部に析出層が生成したため（図 4-2- 55）、イオンの浸透や溶脱が抑制されたと考える。補正後の EPMA 測定結果の濃度が一定になった部分で、Na 及び K の濃度が解析結果より若干高い点については、OPC の降水 A 浸漬で記述した通り、補正方法の問題である。

解析で得られたコンクリートの組成を図 4-2- 85 に、試験結果と解析結果のペースト部分の鉱物相の比較を表 4-2- 55 に示す。FGB-2_167.70～171.78 m に 10 箇月浸漬したセグメント OPC の表面の μXRD 測定結果では、Calcite、Aragonite 及び Brucite のピークが確認されたのに対し、解析結果では、表面付近で未水和セメント鉱物、C-A-S-H、C4FH13、Calcite、Monocarbonate、Hemicarbonate、Ettringite、Monosulfate、Brucite、Hydrotalcite (OH)及び Friedel's salt が生成する結果となった。μXRD にて、人工海水浸漬試料では確認できなかった Brucite が確認できた。μXRD では、図 4-2- 86 に示す通り試料の接液面付近を分析しているため、外部析出層を分析している可能性がある。EPMA 測定結果では接液面から 0.02 mm までの部分で高濃度の Mg が検出されているが、図 4-2- 55 で示された通り、本試料には外部に高濃度の Mg の層が生成しているため、その組成の影響を受けている可能性がある。また、セグメント BFSC の降水 A 浸漬と同様に、極表層の Si、Al、Fe 及び S の濃度が EPMA 測定結果では解析結果より低い傾向にあった。本試料には石灰石砕砂が使用されていること及び空気中で試験していることから、極表層で Calcite、Monocarbonate 及び Hemicarbonate が生成し、極表層の Si、Al 及び Fe が溶出したために Ettringite、Monosulfate 及び Friedel's salt が生成しなかったためだと考えた。また、極表層は、溶脱が激しくポーラスになっていることから、EPMA で正しく測定できていない可能性も考えられる。解析では、表面付近に試験では確認できなかった未水和セメント鉱物、C-A-S-H、C4FH13、Monocarbonate、Hemicarbonate、Ettringite、Monosulfate、Hydrotalcite (OH) 及び Friedel's salt が生成する結果となったが、試験では生成量が少なく非晶質及び低結晶質である可能性があることなどから、μXRD によって鉱物相を定性できなかったと考える。試験で確認できた Aragonite が解析で確認できない要因については、人工海水浸漬と同様と考える。

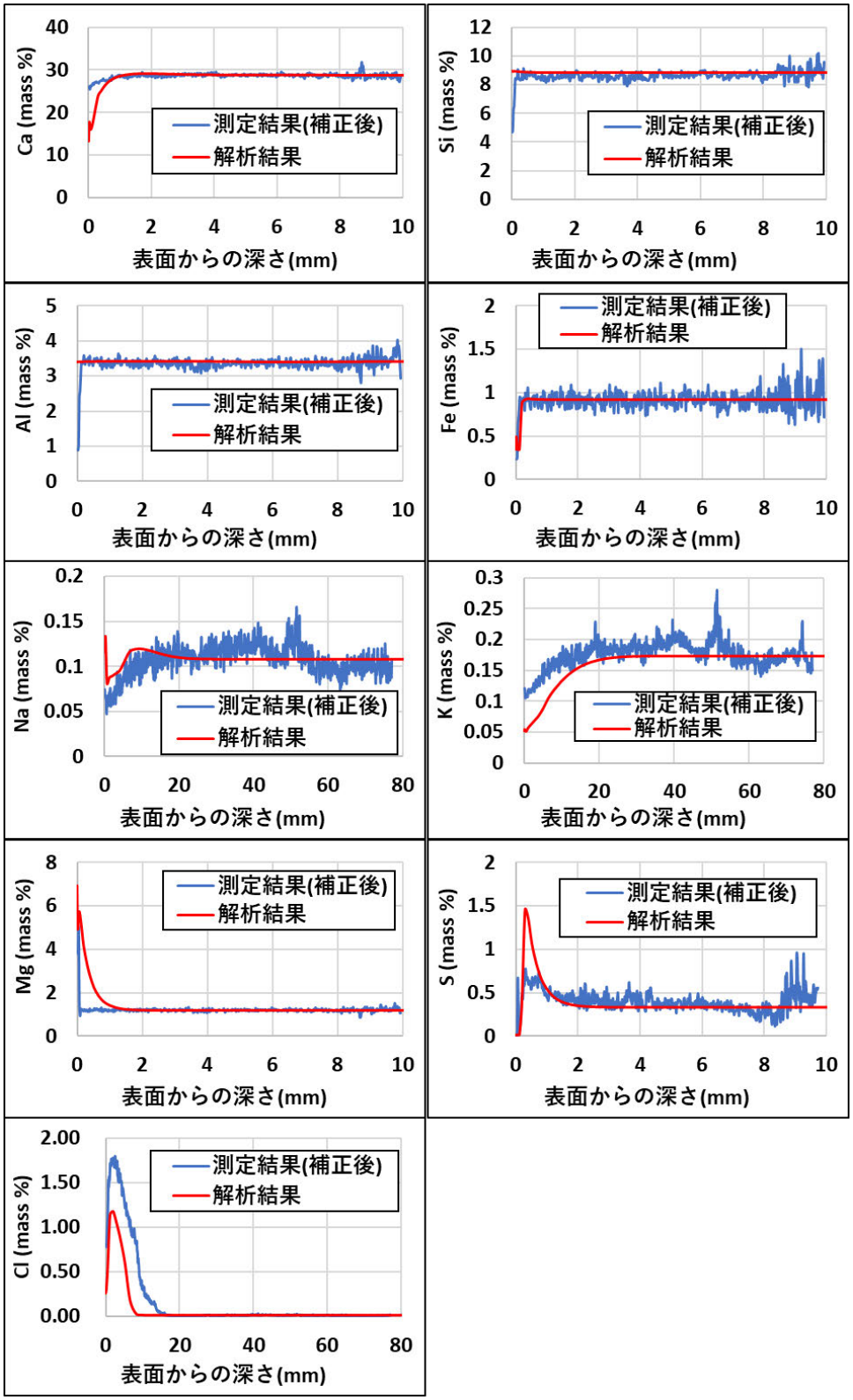


図 4-2- 84　FGB-2_167.70～171.78 m10 箇月浸漬セグメント OPC
EPMA 測定結果と解析結果の比較（石灰石骨材の Ca の影響を補正）

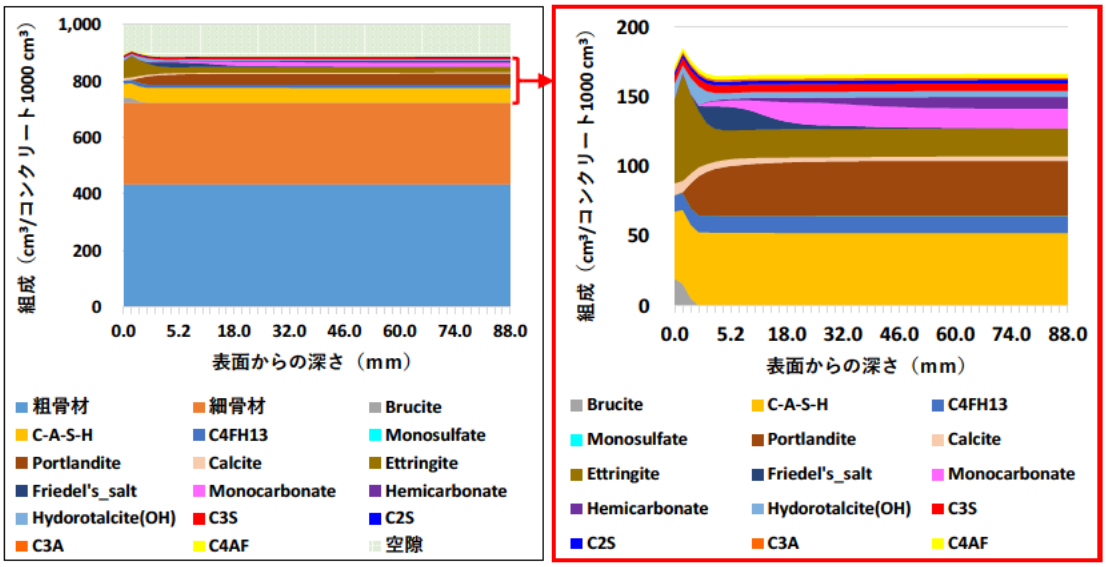


図 4-2- 85　セグメント OPC の 10 箇月 FGB-2_167.70～171.78 m 浸漬コンクリートの組成解析結果

（左：コンクリート全体、右：セメントペースト部）

表 4-2- 55　セグメント OPC の 10 箇月 FGB-2_167.70～171.78 m 浸漬の鉱物相
試験結果と解析結果の比較

由来	外部からのイオン	鉱物相		μXRD	解析
				表面	表面 – 0.2 mm
セメント水和	–	未水和セメント鉱物	C3S		△
			C2S		△
			C3A		△
			C4AF		△
		C(-A)-S-H			△
		C4FH13			△
セメント水和模擬地下水	C	Calcite		○	○
		Aragonite		×	
		Monocarbonate			△
		Hemicarbonate			△
	S	Ettringite			△
		Monosulfate			△
	Mg	Brucite		○	○
		Hydrotalcite (OH)			△
	Cl	Friedel's salt			△

○：試験及び解析で確認できた鉱物

△：解析で確認できたが、量の少なさや、非晶質であることなどから、試験では確認できなかった可能性がある鉱物

×：試験で確認できたが、解析で確認できなかった鉱物

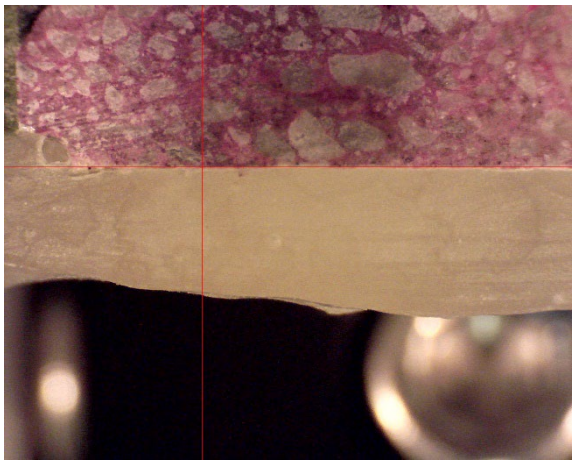


図 4-2- 86　μXRD の分析箇所（例）

図 4-2- 87 に示すセグメント BFSC の 10 箇月 FGB-2_167.70～171.78 m 浸漬のイオンの浸透の試験結果と解析結果の比較では、セグメント BFSC の人工海水浸漬と同様に表面付近で解析結果の方が Ca の溶脱が多く、Mg 及び S の濃度が高く、Cl 濃度が低い傾向にあった。これは人工海水浸漬と同様、試験では試料の外部析出物が生成したため（図 4-2- 56）、イオンの浸透や溶脱が抑制されたと考える。

解析で得られたコンクリートの組成を図 4-2- 88 に、試験結果と解析結果のペースト部分の鉱物相の比較を表 4-2- 56 に示す。FGB-2_167.70～171.78 m に 10 箇月浸漬したセグメント OPC の表面の μXRD 測定結果と解析で得た表面付近の鉱物相の比較を表 4-2- 56 に示す。μXRD では、Aragonite のピークが確認されたのに対し、解析結果では、表面付近で未水和セメント鉱物、C-A-S-H、Calcite、Brucite、MSH06、MSH12 及び Hydrotalcite (OH) が生成する結果となった。μXRD で Aragonite のみのピークが確認できた要因として、セグメント OPC の FGB-2_167.70～171.78 m の浸漬と同様に外部析出層を分析している可能性がある。EPMA 測定結果では接液面から 0.06 mm の範囲までの極表層の Mg 濃度が上がっているが、図 4-2- 56 で示された通り、本試料には外部に高濃度の Mg の層が生成しているため、その組成の影響を受けている可能性がある。極表層は変質が大きいため、EPMA でうまく測定できていない可能性もある。したがって、解析で確認された Brucite が試料内部で生成しているかどうかは判断できない。解析では、表面付近に試験では確認できなかった未水和セメント鉱物、C-A-S-H、Calcite、MSH06、MSH12 及び Hydrotalcite (OH)が生成する結果となったが、試験では生成量が少なく非晶質及び低結晶質である可能性があることなどから、μXRD によって鉱物相を定性できなかったと考える。試験で確認できた Aragonite が解析で確認できない要因は、セグメント OPC の人工海水浸漬と同様と考える。

以上の検討により、外部析出層が生成する条件では、外部析出層を考慮した解析が必要であることがわかった。化学変質を伴う地下水環境で処分施設を建設する場合、供用期間中に生じる化学変質に伴う力学的特性の低下する厚さを考慮して支保の設計を実施する必要があると考える。外部析出層が生成する環境や条件でコンクリートの化学変質やコンクリートへのイオンの浸透を評価する場合は、コンクリート外部での反応を考慮しないと過度に保守的な設計になる可能性がある。

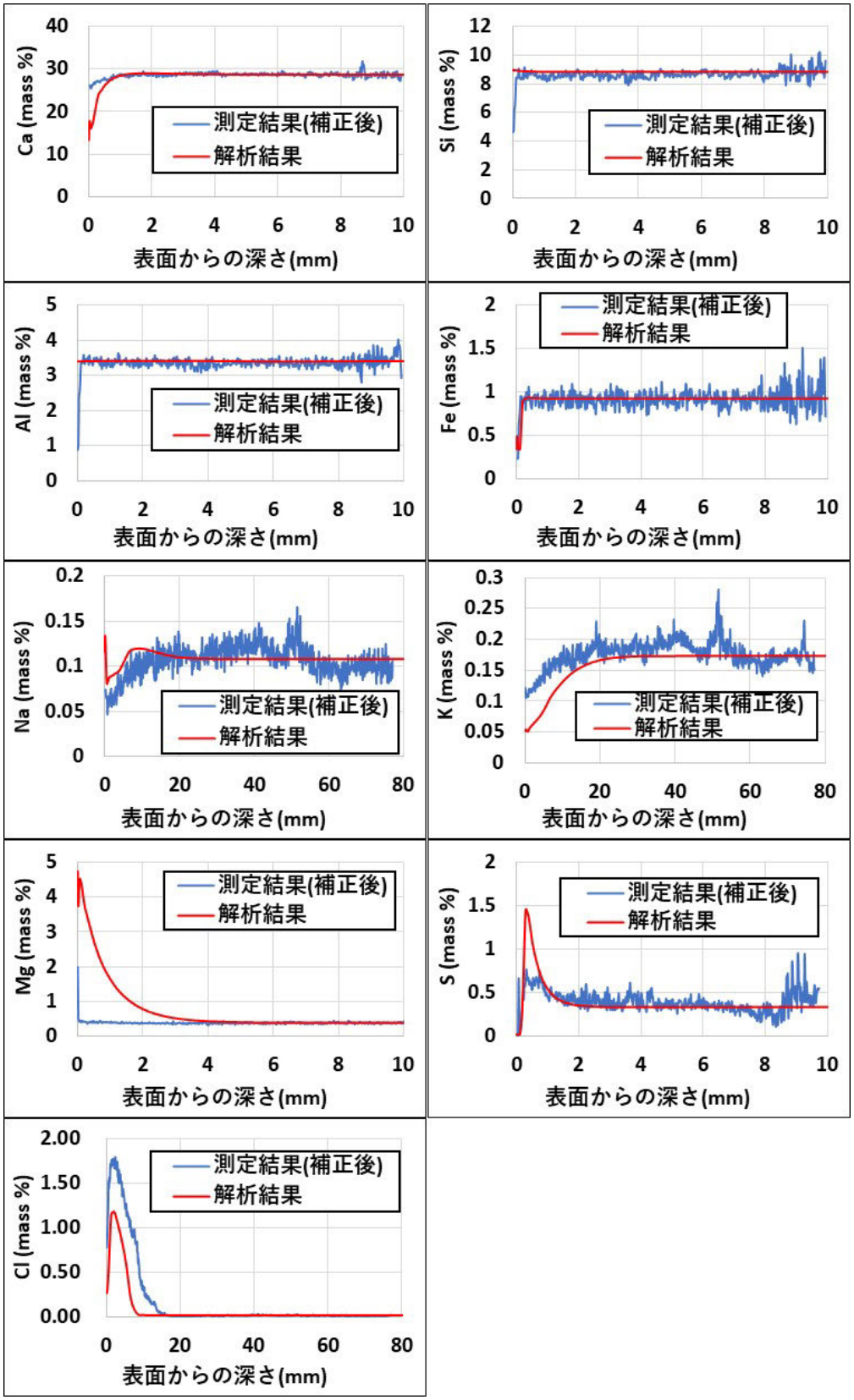


図 4-2- 87　FGB-2_167.70～171.78 m10 箇月浸漬セグメント BFSC
EPMA 測定結果と解析結果の比較（石灰石骨材の Ca の影響を補正）

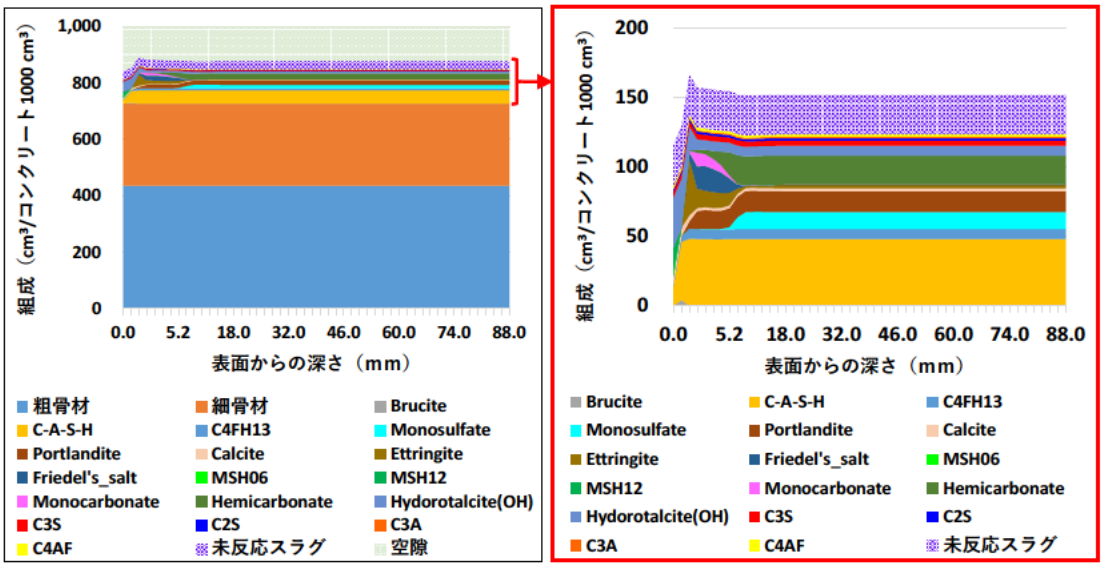


図 4-2- 88　セグメント BFSC の 10 箇月 FGB-2_167.70～171.78 m 浸漬コンクリートの組成解析結果

（左：コンクリート全体、右：セメントペースト部）

表 4-2- 56　セグメント BFSC の 10 箇月 FGB-2_167.70～171.78 m 浸漬の鉱物相
試験結果と解析結果の比較

由来	外部から のイオン	鉱物相		μXRD	解析
				表面	表面 – 0.2 mm
セメント 水和	―	未水和 セメント 鉱物	C3S		△
			C2S		△
			C3A		△
			C4AF		△
		C(-A)-S-H			△
セメント 水和 模擬地下水	C	Calcite			△
		Aragonite		×	
	Mg	Brucite			××
		MSH06			△
		MSH12			△
		Hydrotalcite (OH)			△

△：解析で確認できたが、量の少なさや、非晶質であることなどから、試験では確認できなかった可能性がある鉱物

×：試験で確認できたが、解析で確認できなかった鉱物

××：解析で確認できたが試験で確認できなかった鉱物

(c) 外部析出層を考慮した解析手法の調査

既往の文献にて、セメント系材料が地下水などに接触することで、セメント系材料の表面より外側に析出層が生成し、セメント系材料の劣化を抑える保護層の役割をする可能性があることが報告されている。たとえば、羽原らはモルタル小片に対し 11 種類の凍結防止剤（水、NaCl、$MgCl_2$、酢酸ナトリウムなど）を用いて凍結融解試験を行った際に、Mg を含む凍結防止剤ではモルタル表面に $Mg(OH)_2$ 相が生成し、生成した $Mg(OH)_2$ 相が保護層となり、スケーリング劣化が小さくなることを報告している（羽原ほか, 2014）。また、丸屋ら（丸屋ほか, 2003）や Jakobsen ら（Jakobsen et al., 2016）は、海水と接触したコンクリート表層では、フジツボなどの海生生物の殻などにより、コンクリート表面に 50～100 μm 程度の緻密な $CaCO_3$ の相が生成し、コンクリート構造物の耐久性向上につながる可能性があることを報告している。また、平成 28 年度の本研究（産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 2017）において、人工海水と接触したセメントペーストの表面に Brucite、Calcite 及び Aragonite を含む析出物が生成し、Cl の浸透が抑制されたことを報告している。本項では、上記のような外部析出層を考慮した解析手法について文献調査を行った。また、調査結果に基づき、外部析出層を考慮した解析手法を検討した。

検索には Google Scholar を使用した。検索した条件を表 4-2- 57 に示す。それぞれの検索条件について、「期間指定なし」、「関連性で並び替え」、「英語と日本語のページを検索」、「すべての種類」、「引用部分を含める」の条件で、上から順に 30 件分調査して整理した。

表 4-2- 57　Google Scholar を用いた外部析出層を考慮した文献調査の検索条件

No.	検索日時（最終確認時点）	キーワード	検索ヒット数
1	2022/12/13__9:20	コンクリート,外部,析出,解析	約 619 件
2	2022/12/14__15:20	コンクリート,表面,析出,解析	約 710 件
3	2022/12/15__15:20	コンクリート,表面,析出,推定	約 755 件
4	2023/1/16__19:15	Concrete, Surface, Precipitation, Model	約 48,700 件
5	2023/2/16__17:30	Cement, Seawater, Model, Brucite	約 2,610 件
6	2023/2/17__17:35	Concrete, Seawater, Model, M-S-H	約 709 件

No.1 の検索条件によって抽出された文献を大まかに分類すると以下のようになった。本条件では外部析出層について解析した文献は該当しなかった。

Ⅰ　セメント粒子の水和や硬化体の炭酸化により間隙部に析出物ができる現象

・未水和のセメント粒子が水和によって粒子表面より外部に水和物が生じることに着目し、細孔構造の変化や水和に伴う水分の保持および移動等を連成解析することで、自己収縮および乾燥収縮挙動を追跡した文献（石田ほか, 1997）

・セメント粒子の水和反応による空隙構造の変化に着目し、セメント粒子の水和反応と強度発現モデルを提案した小田部らの文献（小田部ほか, 2005）

Ⅱ　外部からの地下水などの侵入によるコンクリート内部からの Ca イオンの溶出などの現象

・水道等の実構造物のコンクリートを評価、解析した文献（横関ほか, 2002）

Ⅲ　高温蒸気養生したコンクリート中でエトリンガイトが遅延生成し（DEF）膨張する劣化現象

・解析や室内試験によって、DEF 膨張に影響を及ぼす要因を考察した文献（川端ほか, 2011）

Ⅳ　コンクリート硬化体外部の環境（温度、湿度、水掛かり、摩耗及び火災など）によるコンクリート中の鉄筋腐食やコンクリート表層の浮き、脱水、ひび割れなどの現象

・コンクリート中の鉄筋のみを加熱し、鉄筋の腐食形状を評価した文献（木下ほか, 2009）

Ⅴ　外部からの水や塩分などの侵入を抑制する施工、養生方法及び機構

・フライアッシュコンクリートによる高い遮塩性能を報告した文献（岸, 2013）

No.2、No.3 及び No.4 の検索条件においても No.1 と同様に、外部析出層について解析した文献は該当しなかった。そこで、本研究や既往の研究（たとえば、Buenfeld et al., 1986、高屋ほか, 2009 など）の条件を基に、外部析出層に関する情報が出てくるキーワードは「海水」、「Brucite」もしくは「M-S-H」と考え、No.5 及び No.6 の検索条件で検索した。また、該当した文献の参考文献などから関連した文献や情報を調査した。Ⅰ De Weerdt ら（De Weerdt et al., 2023）の文献、ⅡJenni ら（Jenni et al., 2017）の文献及びⅢコンクリート構造物の長期性能シミュレーションプログラム LECCA2（日本コンクリート工学協会ほか, 2010）が外部析出層の解析の参考になったため、以下に整理した。

Ⅰ　海水に暴露されたセメント系材料の相変化（De Weerdt et al., 2023）

・野外あるいは試験室で、淡水、NaCl 溶液及び海水などに暴露したセメント系材料の相変化について試験及び数値解析した文献のレビューと数値解析。

・地球化学モデリングコード Gibbs Energy Minimization Selektor（GEMS）を使用して、セメント系材料と海水などとの反応について液固比を変えてバッチ計算。横軸に液固比を設定した鉱物組成の計算結果をグラフにすることで、セメント系材料表面の反応を簡易的に模倣。

・設定するパラメータが少ない簡易的なモデルだが、解析結果は野外あるいは試験で得られた結果と概ね整合する。
・解析によって、炭酸塩やマグネシウムを含む海水との接触することで、セメントペーストの表面より外側に M-S-H、Brucite、Hydrotalcite、Calcite が生成することを予測している。
・解析によって、河川水及び NaCl 溶液とセメントペーストが接触しても表面より外側に析出物は生成しないが、花崗岩や粘土の間隙水、海水、硫酸塩溶液、重炭酸水と接触した場合は外部析出物が生成することを予測している。
・セメントペースト中でのイオンの移動、骨材の遷移帯などの物質移行への影響、表面の溶出及び表面の析出物による物質移行への影響は考慮できない。

Ⅱ　コンクリートと粘土の相互作用（Jenni et al., 2017）

・処分場の環境を模擬するため、反応移行コード FLOTRAN、CrunchFlowMC 及び PhreeqC を用いて、コンクリートと粘土の空隙中のイオンの移動の性質も考慮して一次元で多成分の反応・物質移行をモデル化
・コンクリートと粘土が接触した相を想定し、各間隙液中のイオンの移動に伴う pH、イオン濃度の分布及び鉱物相の変化を予測。
・FRONTRAN では、多くの固溶体を考慮すると計算に負荷がかかるため、C-S-H や M-S-H は代表的なものを考慮し、C-S-H や M-S-H へのアルカリ、Al の取り込みは考慮されていない。
・処分場の環境を模擬するためには、セメントが水和開始から 1 年未満では界面で激しい反応が生じることを考慮し、モデルでは配合を基にセメントの水和も含めて考慮。
・骨材は不活性とし、物質移行への影響のみを考慮。
・コンクリートと粘土の相互作用を再現するためには、信頼できる試験データと試験データを基にしたパラメータが必要。

Ⅲ　コンクリート表面の被膜影響（日本コンクリート工学協会ほか, 2010）

・コンクリート構造物の長期性能シミュレーションプログラム（LECCA2）を用いることで、被覆によって抑制された塩素イオンの浸透や中性化深さを算出することが可能
・コンクリート表面より外側に表面被覆や断面修復の有無や材質などを設定することができ、物質移行性や寿命などを考慮して塩素イオンの浸透や中性化深さの抑制程度が算出可能

(c)　解析により外部析出層を考慮するための方策

前述の調査では、外部析出層に関して化学反応および物質移行を考慮した解析が可能なモデルは確認できなかった。現状では、解析では試験で確認されるような充分な密度を持った析出物を試験体外部に生成させることは難しいことがわかった。したがって、本検討では、

Jenni ら（Jenni et al., 2017）や LECCA2（日本コンクリート工学協会ほか, 2010）のモデルを参考に、図 4-2- 89 に示すように、最初から試料外部に外部析出層を設定して解析を行うことで簡易的に外部析出層の影響を検討できると考えた。外部析出層とコンクリート硬化体層の厚さ、化学組成、鉱物相、空隙率及び物質移行に関する係数などをパラメータとして解析することで、外部析出層の影響を明らかにできると考えている。本手法では、外部析出層や硬化体の組成を設定する必要があるため、地下水組成に対してどのような外部析出層を設定するかを試験や文献調査の結果を基に整理し、モデルに反映する必要がある。また、外部析出層の生成による硬化体の元素組成の変化を反映することが必要である。

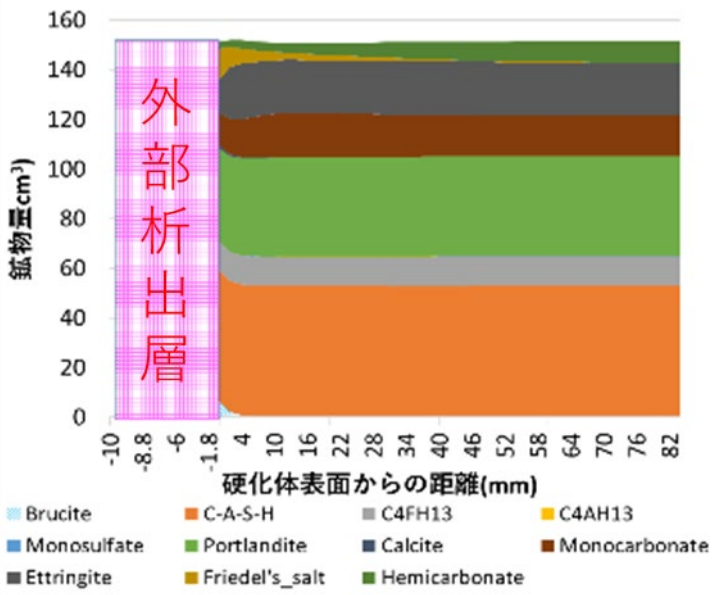


図 4-2- 89　外部析出層の設定イメージ図

(d) 解析による長期予測の検証データの調査

調査結果を表 4-2- 58 から表 4-2- 65 に示す。解析による長期予測を検証するためのデータについて調査した。調査には、日本原子力研究開発機構の研究開発成果検索・閲覧システム（JOPSS）や Google Scholar などを使用し、海水系の液相と長期間接触したコンクリートを対象とした。

以下の条件を満たしているものを、解析が可能と判断した。

・常時海水と接触する条件（干満帯や潮間帯は、環境条件を再現するのが難しいため）。
・材料の組成もしくは施工時期と使用した材料の種類が明記されている
・液相の組成もしくは試験場所が明記されている

固相組成の変化が定量的に明記されている海水との接触による外部析出物の生成について言及した文献もあったが、言及していない文献もあった。外部析出層の生成は、使用した材料の種類や環境が影響するほか、劣化が激しいと試料回収時に表層が破損している可能性がある。

調査の結果、小樽港の 100 年耐久試験（防波堤コンクリート）（長瀧, 1995）、海岸近くの上水道施設のコンクリート（2 報）（横関, 2004）、海中に暴露された橋や防波堤のコンクリート（山路ほか, 2010）、海水に暴露した試験体及び実構造物（Jakobsen et al., 2016）、海水に暴露したコンクリートとモルタル（レビュー）（De Weerdt, 2023）の 6 報のデータが解析による長期予測の検証の対象になると判断した。

表 4-2- 58　海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（1/8）

文献情報		Mehta et al., 1975	福手, 1992
試料		海水中に浸漬されたコンクリート	干満帯のコンクリート
材令		27 年、67 年	5、10 及び 20 年
境界条件（入力データ）	材料組成	－	○（普通、早強、中庸熱、高炉、アルミナセメント）
	配合	－	○
	液相組成	－	○
長期変質後の分析結果（検証データ）	鉱物組成	○	○
	元素分布、量	－	○（塩化物量のみ）
	強度	○	○
	解析	－	－
	その他	－	中性化深さ、自然電位、発錆面積、酸素の拡散係数
要旨		・高 C3A 含有の低透水性コンクリートは劣化が確認できなかった Mg と Ca の交換が確認できた ・硫酸塩と炭酸ガスによる、表面の劣化が確認できた	・高炉セメント、アルミナセメントでは、普通、早強、中庸熱セメントで確認されたひび割れや剥離は確認できなかった。 ・5 年までは強度増加、20 年後は低下
解析の可/不可		不可（情報不足）	不可（干満の再現）

（○：明確な記述あり、△：推定に資する記述あり、－：記述無し）

表 4-2- 59　海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（2/8）

文献情報		長瀧, 1995	
試料		小樽港の 100 年耐久試験（モルタルブリケット）	小樽港の 100 年耐久試験（防波堤コンクリート）
材令		1、4 週、2、6 箇月、2、4、5、7、10 年、それ以降 5 年ごと	約 100 年
境界条件（入力データ）	材料組成	○	△（組成無し）
	配合	○	○
	液相組成	－（海水、淡水、気中）	△(小樽港)
長期変質後の分析結果（検証データ）	鉱物組成	○	○
	元素分布、量	－	○
	強度	○（抗張試験）	○
	解析	－	－
	その他		中性化深さ、気泡、細孔構造、骨材モルタル界面
要旨		・モルタルブリケットは寸法が小さいため、防波堤コンクリートと比べて抗張力の低下などが大きい ・気中保管は中心まで、淡水保管は 1～3 mm、海水保管はほぼ 0 mm 炭酸化	・一部 ASR が生じた骨材があったが、コンクリートの劣化にはつながらなかった ・表面で MgO、SO3、K2O が多く、1 cm 内部では急激に減少する
解析の可/不可		不可（寸法が特殊）	可

（○：明確な記述あり、△：推定に資する記述あり、－：記述無し）

表 4-2- 60　海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（3/8）

文献情報		丸屋, 2003	山路ほか, 2010
試料		海洋暴露試験を行ったコンクリート	海中や干満に暴露された橋や防波堤のコンクリート
材令		1 年 8 か月	19 － 40 年
境界条件（入力データ）	材料組成	○	△（N1、BB などの種類あり）
	配合	○	○(W/C=0.45～0.60)
	液相組成	△（清水港、本渡港）	○
長期変質後の分析結果（検証データ）	鉱物組成	○（水酸化カルシウム）	－
	元素分布、量	○（Cl）	○
	強度	－	○
	解析	－	△（Mg の侵入深さの式化）
	その他	空隙、生物付着率	中性化深さ、ビッカース硬度
要旨		・干満帯のコンクリートには、フジツボ類などが付着し、底殻を形成することで緻密な保護層を生成した ・アルカリ度の低い高炉スラグセメントやフライアッシュセメントの方が、海生生物が付着しやすい	ビッカース硬さ低下領域と Mg 濃度分布に相関がある
解析の可/不可		不可（生物影響の反映）	可

（○：明確な記述あり、△：推定に資する記述あり、－：記述無し）

表 4-2- 61　海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（4/8）

文献情報		横関, 2004	
試料		海岸近くの上水道施設のコンクリート	海岸近くの上水道施設のコンクリート
材令		供用後 35 年	施工後 70 年
境界条件（入力データ）	材料組成	－	－
	配合	－	－
	液相組成	海水の 0.7 倍程度	海水の 1/100 － 1/200 倍程度
長期変質後の分析結果（検証データ）	鉱物組成	－	－
	元素分布、量	○（Ca,S,Cl）	○（Ca,Si）
	強度	○	○
	解析	○	○
	その他	空隙率、中性化深さ	空隙率
要旨		表面で Ca 溶脱と強度低下	
解析の可/不可		可	可

（○：明確な記述あり、△：推定に資する記述あり、－：記述無し）

表 4-2- 62　海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（5/8）

文献情報		De Weerdt et al., 2014	Jakobsen et al., 2016
試料		潮間帯の普通コンクリート	海水に暴露した試験体及び実構造物
材令		10 年	2～75 年
境界条件（入力データ）	材料組成	○(CEM I 42.5 R)	○（CEM I、FA、SF、Slag）
	配合	○(W/C=0.47)	○（W / C = 0.34 － 0.45）
	液相組成	○	○
長期変質後の分析結果（検証データ）	鉱物組成	○	○
	元素分布、量	○	○
	強度	－	－
	解析	○（液固比を変えたバッチ計算）	－
	その他	TG	偏光顕微鏡観察、BSE 画像
要旨		・コンクリート表層(0～2 mm)で Ca の溶脱やエトリンガイトやソーマサイトが生成 ・表面ではなく、ひび割れ中での Mg の濃縮を確認	・表面より外部に生物もしくは化学反応由来の CaCO3 層、Brucite 及び M-S-H の層が生成 ・ひび割れ部や空隙に Brucite 、 Calcite 及び Ettringite が生成
解析の可/不可		不可（潮間帯の条件設定）	可（CEM I の反応率などの情報が必要）

（○：明確な記述あり、△：推定に資する記述あり、－：記述無し）

表 4-2- 63　海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（6/8）

文献情報		風間ほか, 2017	産総研, 2017
試料		海岸線に暴露したコンクリート	人工海水と接触したセメントペースト
材令		11 年	3 箇月、11 年
境界条件（入力データ）	材料組成	△（FAC）	△（OPC、FA、BFS）
	配合	○（W / C = 0.45 － 0.65）	○（W / C = 0.6）
	液相組成	－	○
長期変質後の分析結果（検証データ）	鉱物組成	－	○
	元素分布、量	○（Na、Cl）	○
	強度	○	－
	解析	－	－
	その他	中性化、鉄筋腐食、自然電位、透気係数、ASR	ビッカース硬度、空隙率
要旨		・普通コンクリートは鉄筋腐食由来のひび割れ雅楽人できた ・FAC はひび割れが確認できなかった	・OPC では、接液面上部に Calcite、Aragonite、Gypsum 、 Brucite 、 Thaumasite が生成し、接液面下部では、Portlandite が消失、Ettrinite が増加し、硬度は低下
解析の可/不可		不可（波しぶきの条件設定）	不可（寸法が小さい、閉鎖系の液相変化の再現）

（○：明確な記述あり、△：推定に資する記述あり、－：記述無し）

表 4-2- 64　海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（7/8）

文献情報		与那嶺ほか, 2018	Kobayashi, 2021
試料		海中に暴露したコンクリート	水深 1680 m の海底に保管したモルタル
材令		8～17 年程度	608 日
境界条件（入力データ）	材料組成	○（N、H 及び BB）	○（Portland cement）
	配合	○（W/C=0.355 － 0.65）	○
	液相組成	○	○
長期変質後の分析結果（検証データ）	鉱物組成	－	○
	元素分布、量	－	－
	強度	－	○
	解析	○（GEMS, De Weerdt et al. (2014)の手法）	－
	その他	SEM	NMR
要旨		・ひび割れ部にエトリンガイトやブルサイトが充填 ・飛沫帯のみ、エトリンガイトによる体積変化	・Portlandite 及び C-S-H の Ca 溶脱、Brucite、M-S-H、Hydrotalcite 、 Friedel's salt、Calcite、Ettringite 及び Thaumasite の生成 ・
解析の可/不可		不可（検証データ不足）	不可（水圧の影響が大きい）

（○：明確な記述あり、△：推定に資する記述あり、－：記述無し）

表 4-2- 65　海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（8/8）

文献情報		Takahashi, 2022	De Weerdt, 2023
試料		水深 3515 m の深海で原位置試験したモルタル	海水に暴露したコンクリートとモルタル（レビュー）
材令		1 日、309 日	90 日、637 日など
境界条件（入力データ）	材料組成	○	○（Portland Cement）
	配合	○	－（引用文献を要確認）
	液相組成	－	○
長期変質後の分析結果（検証データ）	鉱物組成	－	○
	元素分布、量	－	○
	強度	○	－
	解析	－	○(GEMS, De Weerdt et al. (2014)の手法)
	その他	空隙、ビッカース硬度	Raman
要旨		・圧力とひずみの増加をモニタリングできた ・ひずみと空隙率測定から得た損傷深さは一致 ・暴露後は圧縮強度とヤング率が低下した ・試料サイズが変質領域に影響	・表面より外部に Calcite crust や M-S-H が生成 ・表層で Ca、K の溶脱、Calcite 、 Aragonite 、 Hydrotalcite 、 Gypsum 、 Ettringite、NASH の生成
解析の可/不可		不可（水圧の影響が大きい）	可（配合要確認）

（○：明確な記述あり、△：推定に資する記述あり、－：記述無し）

(e) まとめ

本章では、試験で得たセメント系材料の化学変質挙動について、マップ図などによる体系的な整理の支援となり得る解析的な予測手法を構築し整備することを目的に、解析コードの検証、外部析出層の影響の評価、外部析出層を考慮した解析手法の検討及び解析による長期予測の検証データの抽出を行った。

解析コードの検証では、外部析出層を考慮しないプログラムを用いて、外部析出層がない試験ケースについて解析を実施し、試験結果の再現性を確認した。試験では確認されていないが解析では確認された鉱物相が多かったが、試験では生成量が少なく非晶質及び低結晶質である可能性があることなどから、μXRD や XRD によって鉱物相を定性できなかったと考える。解析と試験が一致しない点については今後も原因や影響の程度などの検討が必要と考えられるが、浸透プロファイルは試験結果と解析結果がおおむね一致していた。浸透プロファイルには試験では確認できない鉱物相の分布が反映されており、それが試験結果とよく一致していたことから、解析結果が試験結果を再現できたと考えた。

外部析出層の影響の評価では、外部析出層のない試験で検証したプログラムを用いて、外部析出層がある試験条件で解析を実施し、試験結果と解析結果を比較することで、外部析出層の影響を検討した。鉱物相は、試験では外部析出層に海水中の Mg 由来の Brucite や M-S-H、セメントペーストからの Ca と海水中の炭酸塩由来の Aragonite が生成し、コンクリート内部では Brucite や Aragonite は生成していなかった。一方、解析ではコンクリート内部に Brucite や M-S-H が生成し、Aragonite は生成しなかった。また、浸透プロファイルについては、解析では、試験で確認できない Mg の浸透が確認され、Ca、Na 及び K の溶脱を過剰に見積もり、Cl の浸透を低く見積もる傾向にあった。これらは、本プログラムの解析対象領域はコンクリート部分であり、コンクリートからの元素の溶脱は考慮されているものの、溶脱した元素はすべて解析範囲外に排出されることから、外部析出層の影響が考慮されていないためである。また、解析では、コンクリート硬化体より外部の液相は境界条件として常に一定となっており、外部析出層による物質移行の抑制効果が考慮されていないため、試験よりもコンクリートからの溶出や海水からのイオンの浸透が生じやすい結果となった。化学変質を伴う地下水環境で処分施設を建設する場合、供用期間中に生じる化学変質に伴う力学的特性の低下する厚さを考慮して支保の設計を実施する必要があると考える。外部析出層が生成する環境や条件でコンクリートの化学変質やコンクリートへのイオンの浸透を評価する場合は、コンクリート外部での反応を考慮しないと過度に保守的な設計になる可能性がある。

外部析出層を考慮した解析手法について調査した結果、外部析出層に関して化学反応及び物質移行を考慮して解析が可能なモデルは確認できなかった。既往のモデルを参考に、最初から試料外部に外部析出層を設定して解析を行うことで簡易的に外部析出層の影響を検討できると考えた。外部析出層とコンクリート硬化体層の厚さ及び化学組成などをパラメータとして解析することで、外部析出層の影響を明らかにできると考えている。本手法では、

外部析出層や硬化体の組成を設定する必要があるため、地下水組成に対してどのような外部析出層を設定するかを試験や文献調査の結果を基に整理し、モデルに反映する必要がある。また、外部析出層の生成による硬化体の元素組成の変化を反映することが必要である。

解析による長期予測の妥当性を評価するための検証データに関する文献調査を実施した。調査対象は、「海水系の液相と長期間接触したコンクリート」とした。各文献の条件で解析可能かどうかについて、材料や境界条件の情報の記載内容を基に評価した。海水系においても外部析出層が生成するものとしないものが報告されていた。小樽港の 100 年耐久試験（防波堤コンクリート）（長瀧, 1995）、海岸近くの上水道施設のコンクリート（2 報）（横関, 2004）、海中に暴露された橋や防波堤のコンクリート（山路ほか, 2010）、海水に暴露した試験体及び実構造物（Jakobsen et al., 2016）、海水に暴露したコンクリートとモルタル（レビュー）（De Weerdt, 2023）の 6 報のデータが解析による長期予測の検証対象になると判断した。

② 強度予測手法の検討

(a) 目的

将来、沿岸海底下の地下水の影響を受けて変質したコンクリートの強度を予測するモデルを構築することを目的とし、強度予測する解析コードの調査を実施するとともに、選定したモデルの健全なコンクリートの強度予測の適用性を検討した。具体的には、コンクリートの強度予測モデルに関する文献調査を行うとともに、コンクリート試料を作製し、強度予測に必要なインプットデータと強度データを取得し、健全なコンクリート（化学変質が起きていないコンクリート）の強度を予測して試験結果と予測結果との比較を行うことでモデルの適用性を確認した。

(b) 方法

強度予測手法の検討では、コンクリートの強度予測モデルを調査し、長期的な化学変質に伴う力学的特性の変化を評価できる可能性のある強度予測モデルを選定する。選定した強度予測モデルの適用性について、強度予測に必要なインプットデータ及び検証データを取得し、モデルによる解析結果と比較することで確認した。

(i) コンクリートの強度予測に関する文献調査

本検討でコンクリートの強度予測モデルを調査した結果を表 4-2- 66 に示す。コンクリートはセメントペースト、砂、粗骨材、空気を主とした複合材料であり、その強度を予測することは難しい。これまでの多くの試験的検討から配合条件によって圧縮強度を決定しコンクリートの材料設計を行っているのが現状である。強度発現に大きく影響を及ぼすものは水セメント比であるが、その他にも要因が多数あり、地下水の化学成分との反応による長期間経過後の強度変化を推定する方法は現時点ではない。

近年では、コンクリートの強度に関して多くの試験データが蓄積され公開されていることから、コンピュータを用いて機械学習を行い、強度予測を行うという取り組みもなされている（Kim, J. I., et al., 2004, Naderpour, H., et al., 2018）。しかしながら、環境要因により劣化が生じたり、変質したりした際にどのくらいコンクリートの強度低下が生じるかについて予測を行うには十分なデータが蓄積されておらずこのような手法を適用することは難しい。コンクリートの強度に及ぼす影響として最も大きい要因はコンクリート中に存在する空隙構造である。空隙は水セメント比が高いほど水がセメントとの反応に消費されず残存することによって生じ、強度が低下する。吉野らは、空隙構造と圧縮強度との相関を検討し予測を行っている。その結果総空隙量だけでなく、空隙径も重要な要因であることを明らかにしている（吉野 他, 1996）。したがってコンクリート中の空隙量と空隙径を測定することが可能であれば強度を予測することは可能である。一方、結合材であるセメントペーストの強度も空隙量が大きく影響を及ぼしていることが古くから指摘されている。Powers は毛細管空隙量と圧縮強度との相関が非常に高いことを示している（Powers, T. C., 1958）。

このことからセメントの反応率と水セメント比が既知であればセメントペーストの毛細管空隙量を Powers モデルによって計算できることからその強度を予測することが可能である。しかし、Powers モデルは普通ポルトランドセメントには適用可能であるがフライアッシュや高炉スラグといった混和材が入った場合には適用できないためすべてのセメントペーストへの適用は難しいである。また、コンクリート強度に及ぼす影響として挙げられるのが骨材とペーストとの界面に存在する遷移帯である。遷移帯は水セメント比が高い場合に存在し、その組成は水酸化カルシウムやエトリンガイトに富んでいるといわれておりセメントペースト部分よりも粗な構造であるといわれている（羽原 他, 1992, 内川, 1993, 1995）。

コンクリートには砂や粗骨材が含まれておりそれらが強度に影響を及ぼすことも報告されている。一般に粗骨材が砕石であれば川砂利よりも強度が高いことが知られている（友沢, 1978）。また、骨材が十分な強度を有していれば粗骨材で破壊することはなく、コンクリートはモルタル部分や遷移帯部において破壊が進行し強度を決定する。したがって超高強度コンクリートでない場合にはモルタル部や遷移帯が強度を決定する上で重要となる。

近年のコンピュータの計算能力の向上によりコンクリート強度を数値解析によって求める手法が適用されている。数値解析としては、有限要素法（FEM）、粒子法（DEM）、剛体ばねモデル（RBSM）などが挙げられる。いずれの手法でも各要素の弾性係数、ポアソン比、破壊強度、破壊エネルギーなどの値を定める必要がある。これらの値は過去に行われた試験に基づき決定されており、それを用いることによって試験で得られる応力・ひずみ曲線と解析によって得られる結果がよく一致することが示されている。

Wang らは粒子法を用いてコンクリートをモルタルと骨材、空気の 3 相と仮定し、コンクリートの強度を推定している（Wang, P., et al., 2020）。この時、骨材とモルタルの界面に遷移帯が存在することを考慮することによって適切な強度予測ができることを示している。また、Nitka らは CT を用いコンクリート中の骨材と空気の分布を測定しそれに基づいて DEM モデルを構築し破壊強度を求めている（Nitka, M., et al., 2018）。

Trawiński らは、CT を用いてコンクリートを 3 相に分離しそれを用いて FEM 解析を行っている（Trawiński, W., et al., 2018）。その結果、モルタル部と遷移帯部の破壊特性が強度に大きく影響を及ぼすことを明らかにしている。Wang らは骨材を球、楕円体、多角形と仮定し、破壊シミュレーションを行い、その影響は大きくはないことを明らかにしている（Wang, X. F., et al., 2015）。永井らはコンクリートの断面画像から骨材の分布を測定し、得られたイメージに有限要素法を適用しコンクリート強度に及ぼす影響を検討している（永井 他, 2000）。また、浅井らは得られた画像の界面の影響を考慮するために非局所型の有限要素法を適用しコンクリートの解析を行っている（浅井 他, 2004）。

さらに Nagai らは RBSM モデルをモルタル及びコンクリートに適用し、破壊形状が試験とよく一致していることを明らかにしている（Nagai, K., 2005）。しかしながら粗骨材を球体として取り扱っており骨材の形状に関して検討はなされていない。また、山本らは RBSM

を用いてコンクリートの圧縮破壊を再現している（山本 他, 2008)。なお、表 4-2- 66 に示すように RBSM の解析には多くのパラメータの設定が必要である。

以上より、モルタル及びコンクリートにおける骨材の分布及び空気の分布、そして遷移帯の分布が強度を決定する上で必要である。さらにそれぞれの相に対する弾性係数、ポアソン比、引張強度、破壊エネルギーといった値が入力として必須である。これらを考慮できるモデルとして、アメリカ国立標準技術研究所（National Institute of Standards and technology 以下 NIST）が開発した Virtual Cement and Concrete Testing Laboratory（以下 VCCTL）モデルがある。VCCTL モデルを用いてセメントの水和反応を三次元的にシミュレートし、セメントペースト中のクリンカーや水和物の三次元空間分布情報をもとに、非線形有限要素法を適用しセメントペーストの強度予測を行った例はほとんどない。また、セメントペーストの計算結果をモルタルのペースト部分の物性値として用い細骨材とペーストの三次元空間分布を考慮したモルタルの強度予測、さらにモルタルの強度予測結果から得られた物性値を用いモルタルと粗骨材の三次元空間分布を考慮したコンクリートの強度予測を行うといった研究例もほとんどない。個々にモルタルやコンクリートの強度予測を行うといった研究例は見られるが、本研究では、セメントペーストからコンクリートまで拡張して強度予測を行うがこのような研究例はほとんどない。

本事業では、将来コンクリートの地下水の化学成分との反応に伴う化学変質と力学的特性の関係を予測できる可能性のあるモデルとして、セメントペーストの水和物を三次元配置して強度の予測する VCCTL モデルを採用する。本フェーズでは、VCCTL モデルを用いて硬化セメントペーストの三次元イメージモデルを作成し（Bullard, J. W.., 2014, Watts, B. E., et al., 2018)、それに基づいて劣化が生じていないモルタルやコンクリートの骨材の形状や分布を考慮し、強度予測を有限要素法による永井らのモデルに基づいて行うこととした（永井 他, 2010)。有限要素法は TRU 廃棄物処分における岩盤などの力学挙動を解析する際にも用いられている（Sahara, F., et al., 2006, 三原 他, 2017)。一方、劣化が生じたコンクリートの強度推定に関しては、劣化した際に弾性係数などの値がどの程度変化するかを明らかにすることが必要である。

表 4-2- 66　コンクリートの強度予測モデル

計算手法	パラメータ設定 （破壊規準など）	形状 （骨材など）	ひび割れ進展
粒子法 （DEM）	複雑 （E,G,μ,ρ_{mat},σ_t,G_f, K_{ni}/k_{sl},τ/σ_t）	設定に依存	優れている
有限要素法 （FEM）	容易（E,v,G_f,σ_t）	可能	可能
剛体ばねモデル （RBSM）	複雑（E,σ_t、η、G_f、σ_c、ε_{c2}、α_{c1}、α_{c2}、c、φ、σ_b、β_0、β_{max}、χ、κ）	可能（ボロノイ分割）	優れている
解析的手法	容易（試験データと解析手法に基づき設定）	設定に依存	不可能

なお、E：弾性係数、v：ポアソン比、G：せん断弾性係数、μ：摩擦係数、ρmat：材料密度、σt：引張強度、Gf：破壊エネルギー、 kni/ksl：剛性係数、τ/σt：強度比、η：せん断ばねと垂直ばねの弾性係数比、σc、εc2、αc1、αc2：垂直ばねの圧縮挙動の非線形性を制御するパラメータ、c：粘着力、φ：内部摩擦角、σb、β0、βmax、χ：せん断ばねの圧縮挙動の非線形性を制御するパラメータ、κ：ひび割れ面のせん断伝達特性の劣化を制御するパラメータ

(ii) 本事業で使用する強度予測モデルの概要

本事業では、セメントペーストの強度予測を行った実績があるモデル（永井ら,2010）を高度化して、コンクリートの強度予測を行った。本モデルは、NIST が開発した VCCTL モデルを用いて、セメントペーストの三次元モデルを構築し、非線形ボクセル有限要素法による強度予測を実施した。VCCTL モデルは、セメントの粒度分布やその鉱物組成を考慮して水和反応を模擬するモデルである（Bullard et al., 2009）。VCCTL モデルでは有限要素法によるセメントペースト硬化体の弾性係数及びポアソン比の推定を行うことが可能である（Haecker et al., 2005）。解析条件及び解析結果の検証については、ペースト、モルタル、コンクリートの各種試験体を作製し、材料の分析や強度の測定などを実施し、解析結果と比較することで解析結果の確からしさや見通しについて検討した。VCCTL モデルを用いてセメントペーストの水和後の三次元の相分布を求めた例を図 4-2- 90 に示す（Bullard et al., 2009）。VCCTL モデルで求めた三次元イメージデータに、非線形ボクセル有限要素法を適用することで、硬化体の引張強度及び圧縮強度の予測を行うことができる。

本事業では、図 4-2- 91 のコンクリートの強度予測モデルの構築方法に示す通り、a）上述の手法でセメントペーストの強度を予測し、b）セメントペーストの強度予測結果、細骨材の強度と空隙の空間分布を組み合わせてモルタルの強度を予測し、c）モルタルの強度予測結果と粗骨材の強度及び粗大空隙の分布を組み合わせてコンクリートの強度を予測した。

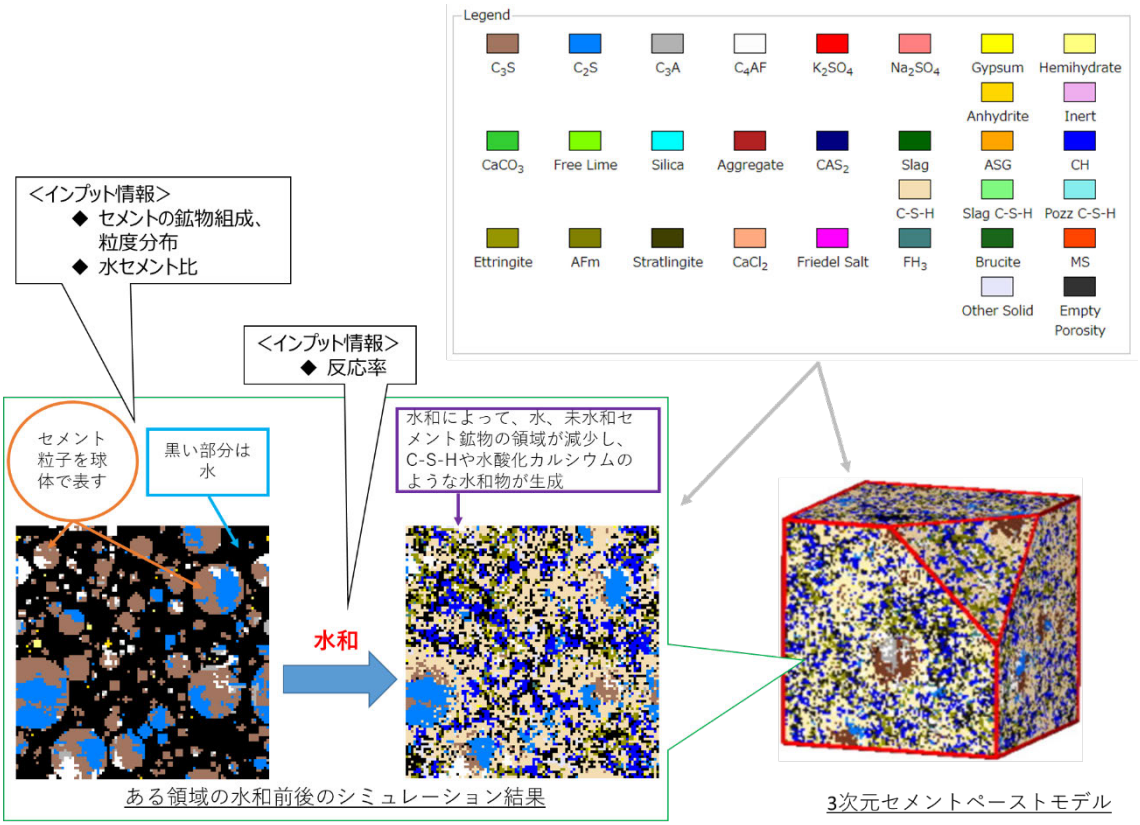
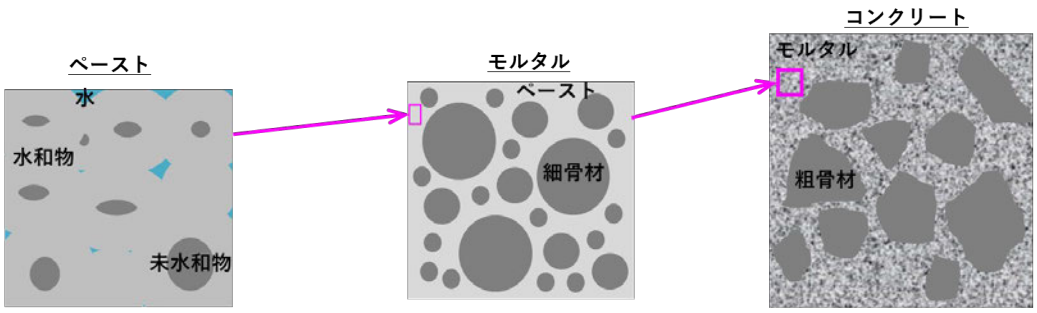


図 4-2- 90　VCCTL モデルによる水和後のセメントペーストの三次元的イメージデータの例



(a) ペーストの強度予測モデル化

- 三次元構造モデル化
  セメントの鉱物組成と粒度分布、水セメント比から水和後の鉱物組成や分布を算出し、モデルに反映
- ペーストの強度予測
  各相の弾性係数、ポアソン比、破壊基準をインプットし、非線形ボクセル有限要素法を用いて強度を推定

(b) モルタルの強度予測モデル化

- 三次元構造モデル化
  配合と細骨材の粒度分布を測定し、モデルに反映
- モルタルの強度予測
  細骨材の弾性係数、ポアソン比、強度データ、(a)で算出されたペーストの弾性係数、ポアソン比、破壊基準を入力し、非線形ボクセル有限要素法を用いて強度を推定

(c) コンクリートの強度予測モデル化

- 三次元構造データの取得
  X線CTにより**粗骨材と気泡の空間分布**を測定し、モデルに反映
- コンクリートの強度予測
  粗骨材の弾性係数、ポアソン比、強度データ、(b)で算出されたモルタルの弾性係数、ポアソン比、破壊基準を入力し、非線形ボクセル有限要素法を用いて強度を推定

図 4-2- 91　コンクリートの強度予測モデルの構築方法

(c) 強度予測モデルの適用性の検討

本事業で実施した強度予測モデの検討フローを図 4-2- 92 に、モデルのインプットデータ及び検証データの取得のための分析項目を表 4-2- 67 示す。

VCCTL モデルの水和予測とボクセル有限要素法による強度予測を実施するため、セメント原料の粒度分布、化学組成及び鉱物組成を測定し、骨材の粒度分布及び引張強度の測定を実施した。VCCTL モデルのインプットデータとして未水和セメントの粒度分布、化学組成及び鉱物組成、セメントペーストの鉱物組成と水和率を、非線形ボクセル有限要素法による強度予測のためのインプットデータとして、骨材の粒度分布、引張強度のデータを取得した。

VCCTL モデルと非線形ボクセル有限要素法による強度予測の結果は、セメントペーストの強度（圧縮、引張）、モルタルの ig. Los、強度（圧縮、引張）、コンクリートの ig. Los、強度（圧縮）の測定を実施し、解析結果と比較することで強度予測モデルの適用性を検討した。

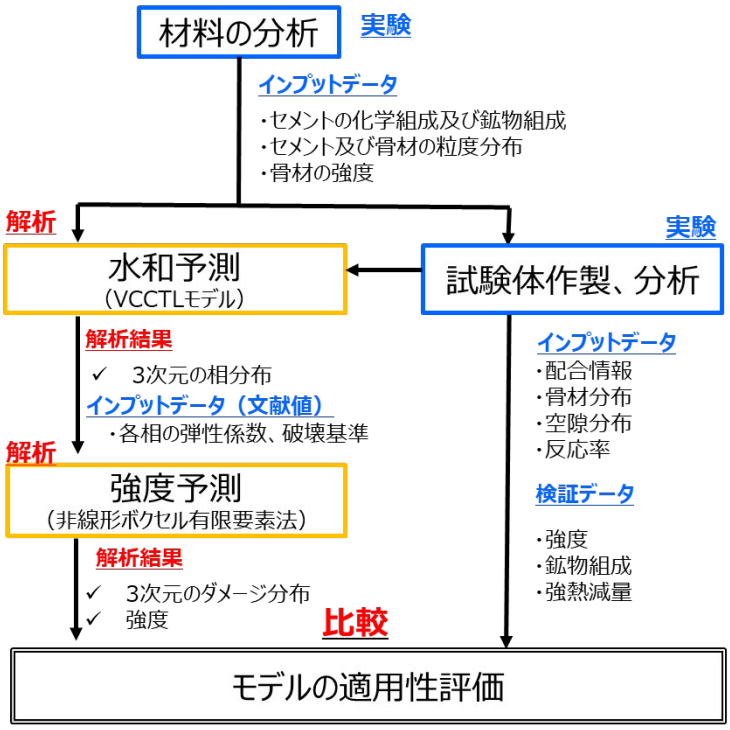


図 4-2- 92　VCCTL モデルによる強度予測モデルの検討フロー

表 4-2- 67　　モデルのインプットデータ及び検証データの取得のための分析項目

試料		分析項目	目的
原料	セメント	粒度分布	インプットデータ
		化学組成	
		鉱物組成	
	骨材	粒度分布	
		強度	
硬化体	ペースト	鉱物組成	インプットデータ
		反応率	
		強度（圧縮、引張）	検証データ
	モルタル	骨材及び空隙分布	インプットデータ
		強熱減量	検証データ
		強度（圧縮、引張）	
	コンクリート	骨材及び空隙分布	インプットデータ
		強熱減量	検証データ
		強度（圧縮）	

(d)　強度予測モデル検証用試験体の作製

本事業で強度予測モデルの検証データの取得用に作製した試験体の作製条件を表 4-2- 68、材料情報を表 4-2- 69、配合を表 4-2- 70 に示す。

強度予測モデルの検証のための試験体は、ペースト及びモルタルは直径 5cm、高さ 10cm の円柱供試体とし、コンクリートは径 5cm、高さ 10cm の円柱供試体とした。養生条件は 20℃の水中で 28 日間とした。

セメントは OPC を使用し、骨材には砕石、砕砂を使用し上水道水を練り混ぜ水として混錬した。コンクリートの作製には高性能減水剤を添加した。

表 4-2- 68　強度予測モデル検証用の試験体の作製条件

試験体名	試験体形状	養生条件
ペースト	φ5×10 cm	28 日間 20 ℃ 水中養生
モルタル		
コンクリート	φ10×20 cm	

表 4-2- 69　強度予測モデル検証用の試験体の作製に使用した材料

材料	略号	製造会社、産地	密度(g/cm^3)
普通ポルトランドセメント	C	太平洋セメント株式会社	3.16
上水道水	W	千葉県佐倉市	－
細骨材	S	静岡県掛川市産山砂	表乾：2.58 絶乾：2.53
粗骨材	G	茨城県桜川市富谷産砕石	表乾：2.63 絶乾：2.61
高性能減水剤 （マスターグレニウム 8000S）	SP	ポゾリス ソリューションズ株式会社	－

表 4-2- 70　作製した強度予測モデル検証用の試験体の配合

試験体	W/C	細骨材率	計量値(kg/m3)				SP 添加率
			C	W	S	G	(C×%)
ペースト	0.45		587	1305			
モルタル			233	518	1555		
コンクリート		0.4	140	311	765	1170	1.2

(i)　セメントの粒度分布

マイクロトラック・ベル株式会社製のマイクロトラック粒度分布計　MT3300EX　Ⅱを用いて、強度予測モデル検証用の試験体の材料として使用したセメントの粒度分布を測定した。測定条件を表 4-2- 71 に、セメントの粒度分布の測定結果を図 4-2- 93 に示す。

表 4-2- 71　セメントの粒度分布測定条件

項目	内容
測定粒度範囲	0.1～700 μm
分散媒	エチルアルコール
測定時間	30 秒
測定回数	2 回

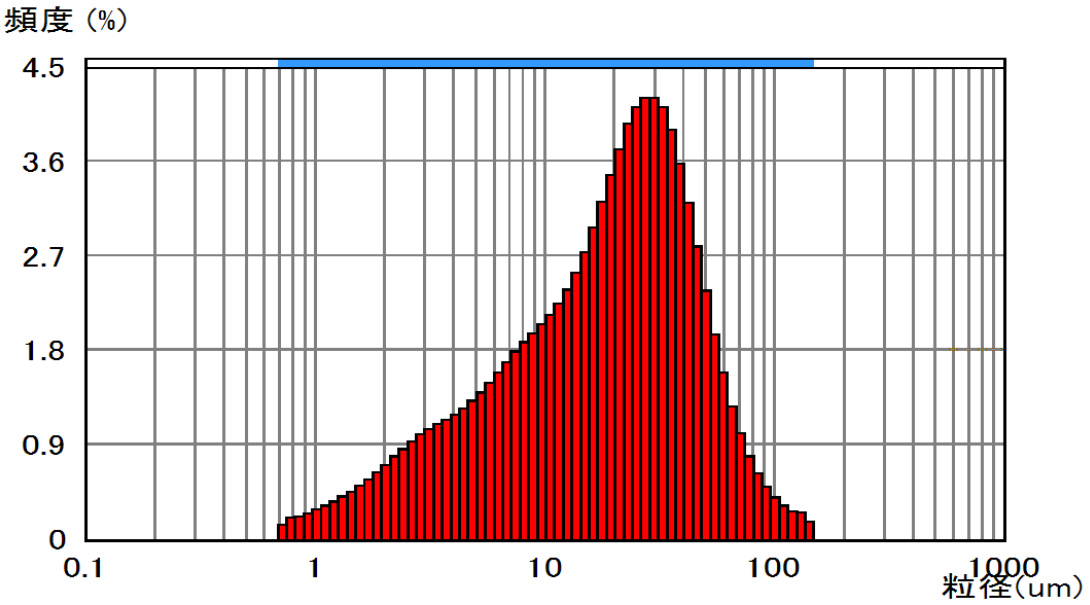


図 4-2- 93　セメントの粒度分布の測定結果

(ii) セメントの化学組成

株式会社リガク社製の蛍光X線分析装置　ZSX Primus Ⅳを用いて、JIS R 5204:2019 セメントの蛍光X線分析方法の検量線法にて、強度予測モデル検証用の試験体の材料として使用したセメントの化学組成を測定した。また、950 ℃で 1 時間強熱した際の減量値より、ig. loss を求めた。結果を表 4-2- 72 に示す。

表 4-2- 72　セメントの化学組成、ig.loss

試料名	ig.loss	化学組成(mass %)										
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO
セメント	2.34	20.55	5.22	3.01	64.1	0.98	1.96	0.35	0.34	0.32	0.48	0.08

(iii)　セメントの鉱物組成

Bruker AXS 社製の 全自動多目的 X 線回折装置（D8 ADVANCE A25）を使用して、リートベルト法により、強度予測モデル検証用の試験体作製に使用したセメントの鉱物組成の定量分析を行った。リートベルト解析は、星野らの手法（星野 他., 2006）に準拠した。解析ソフトは、Bruker AXS 社製の TOPAS を用いた。定量対象とした鉱物は、エーライト（C3S）、ビーライト（C2S）、アルミネート（C3A）、フェライト（C4AF）、ペリクレース（f.MgO）、半水石膏（Bassanite）、カルサイト（Calcite）とした。測定条件を表 4-2- 73 に、測定結果を表 4-2- 74 示す。

表 4-2- 73　セメントの鉱物組成測定条件

項目	内容
電流-電圧	40 kV-40 mA
ターゲット	CuKα
測定範囲	10-65°
ステップ幅	0.023°/step
測定時間	0.13 秒 /step

表 4-2- 74　セメントの鉱物組成測定結果

試料名	鉱物組成(mass %)							
	C3S	C2S	C3A	C4AF	f.MgO	Bassanite	Calcite	合計
セメント	54.6	19.7	7.8	10.2	0.4	1.9	5.4	100.0

(iv)　骨材の粒度分布

JIS A 1102:2014 骨材のふるい分け試験方法に準拠し、強度予測モデル検証用の試験体の材料として使用した細骨材及び粗骨材のふるい分け試験を行い、粒度分布を求めた。試験結果を表 4-2- 75 に示す。

表 4-2- 75　骨材の粒度分布

ふるいの呼び寸法(mm)	区間別質量割合(%)	
	細骨材	粗骨材
25	－	0
20	0	2
15	0	0
10	0	61
5	1	35
2.5	13	2
1.2	15	0
0.6	16	－
0.3	22	－
0.15	23	－
受皿	10	－
合計	100	100

(v)　骨材の強度

応用地質株式会社製の点載荷試験機 Model-4326 を用いて、強度予測モデル検証用の試験体の材料として使用した粗骨材の点載荷試験を行い、引張強度を求めた。試験に供する粗骨材は、点載荷試験機の載荷部のストローク幅を鑑み、最長径が約 20 mm 以上である粗骨材を使用した。N 数は 40 で行った。また、平松らの式（平松 他, 1965）を用いて、点載荷時の載荷点距離 d と荷重 F0 より、骨材の引張強度 St を求めた。点載荷試験の結果を表 4-2- 76 及び図 4-2- 94 に示す。

表 4-2- 76　粗骨材の点載荷試験結果

No.	重量 (g)	載荷点距離 d (mm)	荷重 F0 (kN)	引張強度 St (N/mm²)	No.	重量 (g)	載荷点距離 d (mm)	荷重 F0 (kN)	引張強度 St (N/mm²)
1	8.0	20.6	5.9	12.51	21	11.1	24.7	4.0	5.90
2	9.3	29.7	3.7	3.78	22	7.4	23.9	3.7	5.83
3	7.7	24.3	3.7	5.64	23	7.2	21.4	4.8	9.43
4	8.5	30.0	3.0	3.00	24	7.4	27.3	4.2	5.07
5	10.3	25.3	4.1	5.76	25	7.7	19.5	4.1	9.70
6	12.0	23.7	3.0	4.81	26	7.6	23.0	3.8	6.47
7	9.4	25.3	6.2	8.72	27	8.7	24.8	3.9	5.71
8	9.1	25.4	4.5	6.28	28	7.7	27.2	3.0	3.65
9	11.1	26.2	1.9	2.49	29	7.8	19.9	6.3	14.32
10	8.6	28.9	3.3	3.56	30	7.3	26.1	5.2	6.87
11	8.8	22.8	2.0	3.46	31	6.8	25.8	3.0	4.06
12	6.3	25.4	3.9	5.44	32	9.4	29.7	1.7	1.73
13	11.9	32.3	4.2	3.62	33	8.7	21.4	3.2	6.29
14	10.9	27.0	4.2	5.19	34	6.6	24.2	3.8	5.84
15	8.4	26.1	4.2	5.55	35	7.2	24.3	6.8	10.36
16	11.2	22.9	3.7	6.35	36	7.5	25.3	5.9	8.30
17	6.7	21.7	2.2	4.20	37	9.2	23.0	4.1	6.98
18	11.2	34.6	4.2	3.16	38	9.1	23.1	4.2	7.08
19	5.9	19.3	4.2	10.15	39	7.4	22.2	3.0	5.48
20	6.9	23.7	3.7	5.93	40	7.7	21.7	3.8	7.26

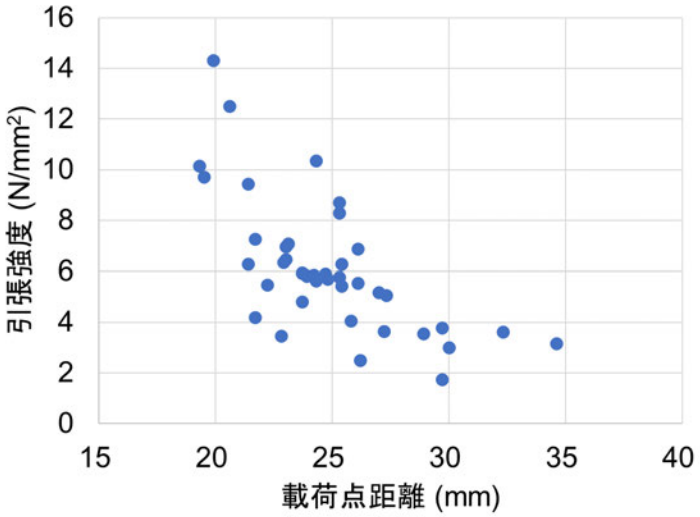


図 4-2- 94　粗骨材の点載荷試験結果

(vi)　ペースト、モルタル、コンクリート強熱減量の測定とその結果

水中で 28 日間養生したペースト、モルタル及びコンクリートについて、XRD や強熱減量を求めるために粉砕、乾燥処理を行った。試料は、粉砕、乾燥しやすいように切断した。φ5×10 cm のペースト及びモルタルは、試料の表面は養生中に炭酸化や溶脱が起きている可能性があるため、上下と側面を切り落とし、約 3.5×3.5×2 cm の直方体を各 4 個切り出した（図 4-2- 95）。φ10×20 cm のコンクリートも同様に上下と側面を切り落とし、約 3.5×3.5×4 cm の直方体を 16 個切り出した。切り出した試料は、粉砕しやすいよう 1 日真空乾燥を行った。真空乾燥後のペーストはハンマーで粗粉砕した後、メノウ乳鉢で 100 μm のふるいを通るまで微粉砕した。真空乾燥後のモルタルとコンクリートは、可能な限り骨材を取り除くため、ハンマーで粗粉砕し、メノウ乳鉢で骨材をつぶさないようにすり合わせ、100 μm のふるいを通ったものを分析用の試料として回収した。粉砕後の試料は、半量ずつ 2 つの容器に分けて、1 つは RH11 %に調整したデシケータで乾燥、もう 1 つは真空乾燥をそれぞれ 1 週間以上行った。試料の原料の OPC 及び乾燥後の試料に対して、室温から 950℃までの強熱減量(ig.loss)と鈴木らの手法（鈴木 他, 1990）を参考にサリチル酸メタノール、塩酸、水酸化カリウム溶液で試料を段階的に溶解し、不溶残分(insol.)を測定した。測定結果を表 4-2- 77 に示す。

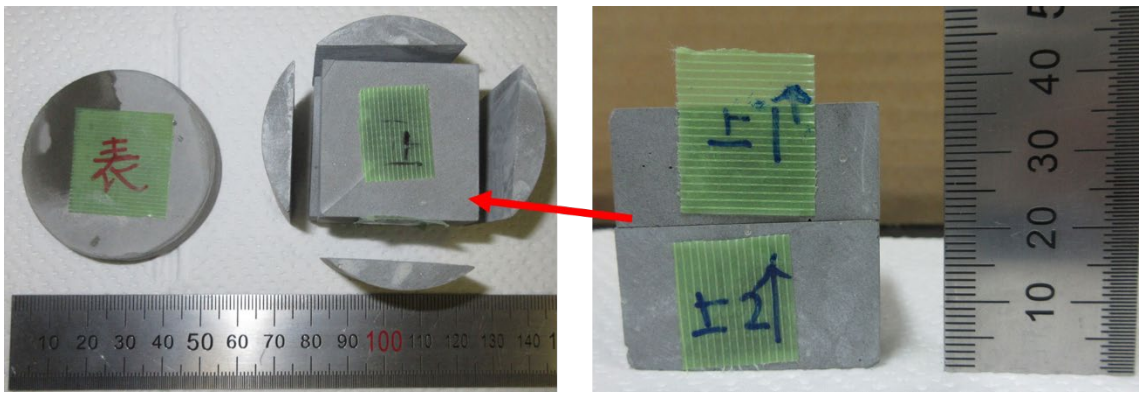


図 4-2- 95　切断後のペースト（上半分）

表 4-2- 77　ig.loss 及び insol.測定結果

試料名※	N	ig.loss (%)			insol. (%)		
		生データ	平均	標準偏差	生データ	平均	標準偏差
OPC	1	2.3	2.4	0.03	0.4	0.4	0.06
	2	2.4			0.5		
セメントペースト (RH11 %)	1	21	21	0.00			
	2	21					
セメントペースト (真空)	1	19	19	0.00	0.3	0.3	0.06
	2	19			0.4		
モルタル (RH11 %)	1	17	17	0.07			
	2	17					
モルタル (真空)	1	16	15	0.12	36	35	0.41
	2	15			35		
コンクリート (RH11 %)	1	9.7	9.7	0.01			
	2	9.7					
コンクリート (真空)	1	8.7	8.8	0.11	60	60	0.22
	2	8.9			61		

※（　）内は乾燥方法を示す。

(vii) ペーストの鉱物組成及び反応率

Bruker AXS 社製の 全自動多目的 X 線回折装置（D8 ADVANCE A25）を使用して、リートベルト法により、強度予測モデル検証用に作製したペースト試験体の鉱物組成の定量分析を行った。測定試料は、(6)にて RH11 %環境下で乾燥したペースト粉末に、内部標準として α-Al_2O_3 を内割りで 10 mass %添加し、十分に均一になるよう混合したものを使用した。リートベルト解析は、星野らの手法（Hoshino et al., 2006）に準拠した。解析ソフトは、Bruker AXS 社製の TOPAS を用いた。定量対象とした鉱物は、エーライト（C3S）、ビーライト（C2S）、アルミネート（C3A）、フェライト（C4AF）、ペリクレース（f.MgO）、二水石膏（Gypsum）、半水石膏（Bassanite）、カルサイト（Calcite）、ポルトランダイト(CH)、エトリンガイト(AFt)、モノサルフェート(AFm)、モノカーボネート(Mc)、ヘミカーボネート(Hc)、非晶質相とした。また、測定条件を表 4-2- 78 に示す。求めたセメント及びペーストの ig. loss、鉱物組成から、C3S、C2S、C3A、C4AF、f.MgO、Bassanite 及び Calcite の反応率を算出した。鉱物組成の測定結果を表 4-2- 79 に、反応率を表 4-2- 80 に示す。

表 4-2- 78　ペーストの鉱物組成測定条件

項目	内容
電流-電圧	40 kV-40 mA
ターゲット	CuKα
測定範囲	5-65°
ステップ幅	0.023° / step
測定時間	0.13 秒 / step

表 4-2- 79　ペーストの鉱物組成測定結果

試料名	C3S	C2S	C3A	C4AF	Calcite	CH	AFt	Mc	非晶質相	total
ペースト	3.5	11.6	1.5	3.3	2.2	11.3	5.6	5.9	55.1	100

表 4-2- 80　ペーストのセメント鉱物相の反応率

試料名	反応率(%)						
	C3S	C2S	C3A	C4AF	f.MgO	Bassanite	Calcite
ペースト	92	29	78	55	0.4	1.9	46

(viii)　モルタルの空隙及び細骨材分布の測定

ニコン製の検査用 X 線 CT 装置（XT H225 ST）を用いて、強度予測モデル検証用に作製したモルタル試験体の空隙及び細骨材の空間分布をそれぞれ測定した。測定条件は、電圧は 220 kV、電流は 200 μA、ボクセルサイズは 30 μm に設定した。測定した直径が 50 mm の試験体の 1 断面と三次元構築画像を図 4-2- 96 に示す。空気を示す黒い部分は明確に区別することが可能であり、モルタルの体積に対して 2vol.%程度であった。この部分は、ボクセルサイズの 30 μm より粗大なため、試料の混練時に取り込まれたエントラップドエアーが主であると考えられる。一方、細骨材の分布はセメントペースト部分と区別することはできなかった。

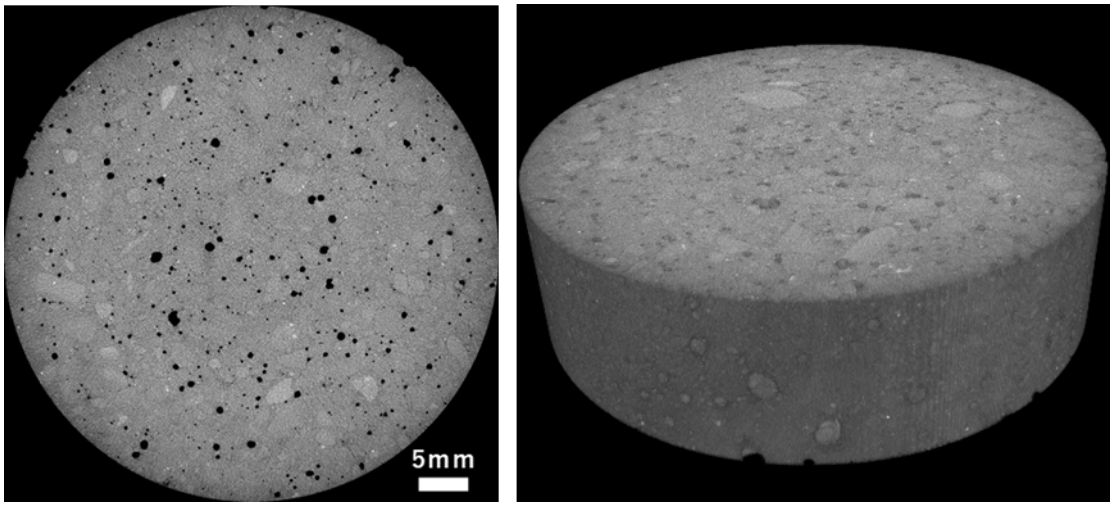


図 4-2- 96　モルタルの X 線 CT 測定結果（左：断面、三次元画像）

(viii)　コンクリートの空隙及び粗骨材分布の測定結果

株式会社島津製作所製の X 線 CT 装置（inspeXio SMX-225CTS）を用いて、強度予測モデル検証用に作製したコンクリート試験体の空隙及び粗骨材の空間分布をそれぞれ測定した。まず、試料を切断、乾燥させずに電圧 225 kV、電流 190 μA、ボクセルサイズ 138 μm で測定した結果を図 4-2- 97 に示す。モルタル同様、空気を示す黒い部分を区別したところ全体の体積に対して空気の体積はコンクリートの体積に対して約 1vol. %であった。これはボクセルサイズの 138 μm より大きな粗大空隙の量を示す。一方、粗骨材とモルタル部は密度が近く、分離が難しかった。

X 線 CT で、高さ 20 cm の試料全体を高解像度で測定することが難しかったため、高さが 10 cm になるよう試料を切断した。その後、粗骨材の境界を明瞭にするため、試料を 105 ℃で約 2 か月乾燥した。乾燥した試料を電圧 225 kV、電流 190 μA、ボクセルサイズ 74 μm で測定した。測定結果を図 4-2- 98 及び図 4-2- 99 に示す。乾燥させることで、ペースト部の密度が減少し、粗骨材の境界が明瞭になった。

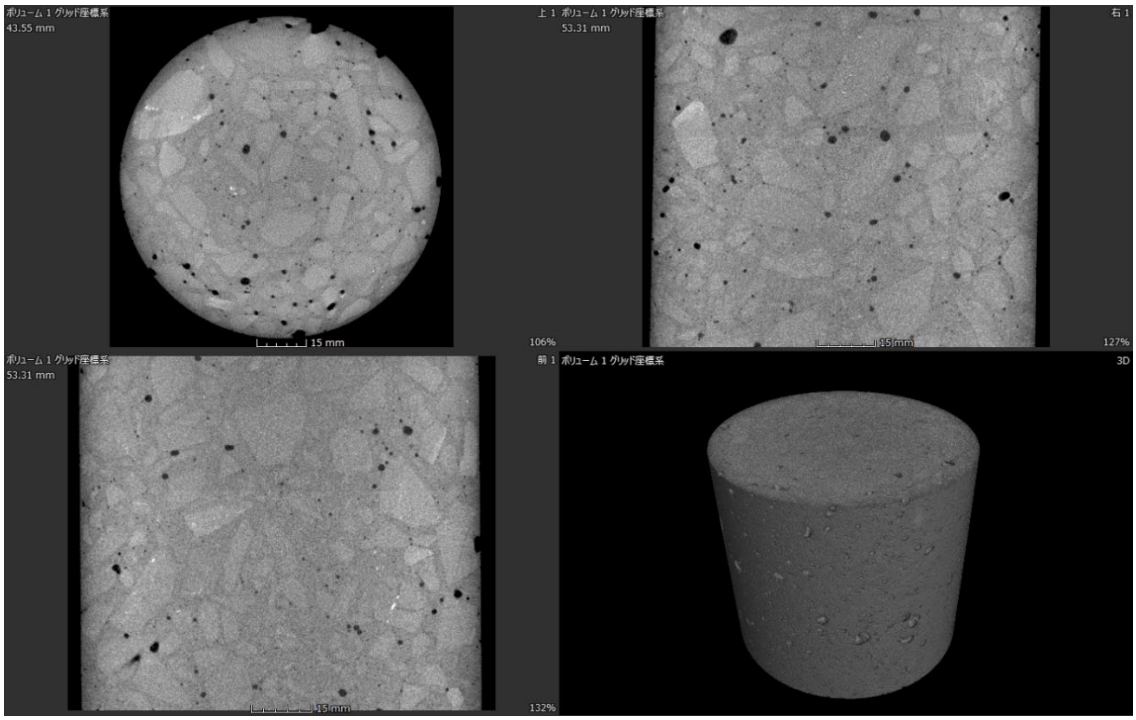


図 4-2- 97　乾燥前のコンクリートの X 線 CT 測定結果
（左上：横断面、右上：縦断面 1、左下：縦断面 2、右下：三次元画像）

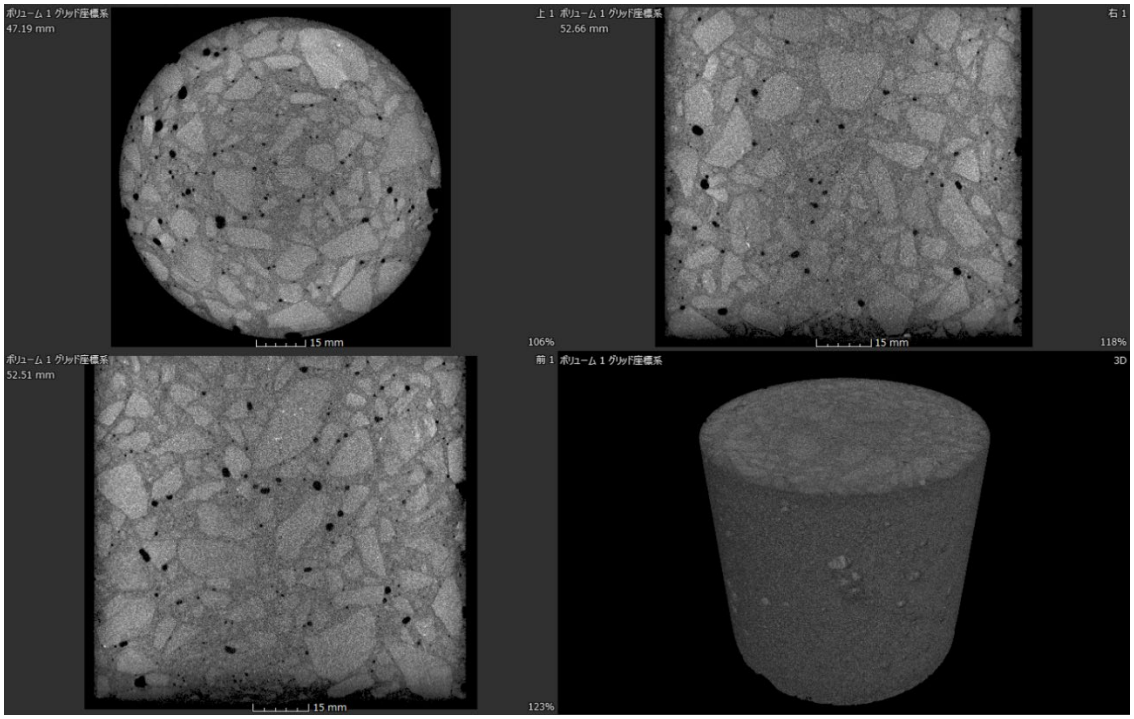


図 4-2- 98　乾燥後のコンクリート（打設面側）の X 線 CT 測定結果
（左上：横断面、右上：縦断面 1、左下：縦断面 2、右下：三次元画像）

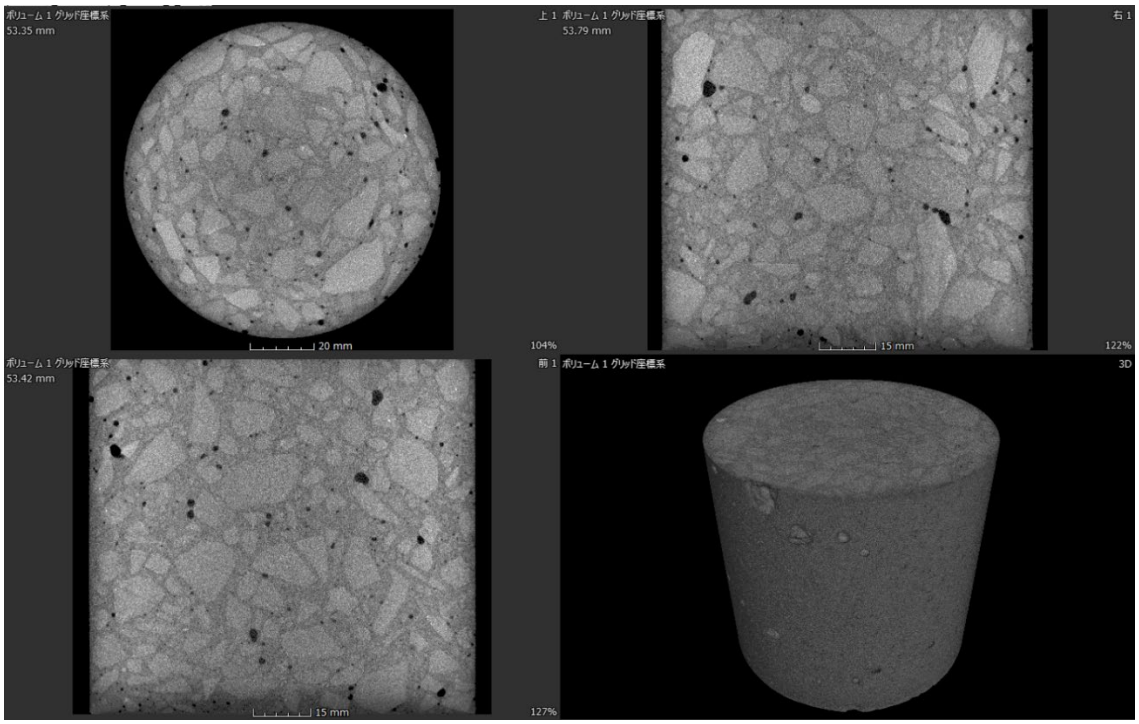


図 4-2- 99　乾燥後のコンクリート（底面側）の X 線 CT 測定結果
（左上：横断面、右上：縦断面 1、左下：縦断面 2、右下：三次元画像）

(x) ペースト、モルタル及びコンクリートの強度試験結果

強度予測モデル検証用に作製したペースト、モルタル、コンクリートの圧縮強度試験を行った。ペースト及びモルタル試験体については、引張試験も行った。圧縮強度試験及び引張試験は、それぞれ N 数は 3 で行った。セメントペースト及びモルタルの圧縮強度は、JSCE-G 505「3.円柱供試体を用いたモルタルまたはセメントペーストの圧縮強度試験方法(案)」を参考に実施し、静弾性及びポアソン比はコンクリートの基準を参考にひずみゲージの長さの設定や計算等を行った。コンクリートの圧縮強度試験は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」、コンクリートの静弾性係数試験は、JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」、コンクリートのポアソン比測定は、JHS 307「コンクリートの静弾性係数試験方法」及びコンクリートの割裂引張強度試験は JIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」に従って実施した。

圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比の測定結果を表 4-2- 81 に示す。

表 4-2- 81　ペースト、モルタル、コンクリートの圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比

試験体名	N	圧縮強度 (N / mm²)		静弾性係数 (kN / mm²)		ポアソン比	
		測定値	平均値	測定値	平均値	測定値	平均値
ペースト	1	45.9	44.8	16.2	15.5	0.268	0.264
	2	43.5		15.7		0.251	
	3	44.9		14.5		0.273	
モルタル	1	56.5	57.9	28.0	28.2	0.183	0.184
	2	55.3		27.7		0.178	
	3	61.9		29.0		0.191	
コンクリート	1	61.7	61.9	32.7	33.5	0.161	0.177
	2	63.0		34.9		0.196	
	3	61.0		33.0		0.173	

(e) 強度予測

(i) セメントの水和反応シミュレーション

Bullard らの方法を用いて水セメント比 0.45 のセメントペーストの水和反応を VCCTL モデルを用いた三次元水和予測を実施した（Bullard, J. W., (2014)）。なお、粒度分布と鉱物量は図 4-2- 93 及び表 4-2- 74 に示す測定結果に基づいて設定し、1 ボクセルは一辺 1 μm の立方体として 100×100×100 μm の大きさ（一辺 100 μm の直方体）で解析を行った。水和反応前と反応後の断面を図 4-2- 100 に示す。セメント粒子の反応が概ね再現できている。

サイクル数と反応率及び空隙率の計算結果を図 4-2- 101 に示す。1 サイクルは、水に接触したセメント粒子が溶解、拡散、水和物の析出まですべて終了するまでを示し、α はセメント反応率を示す。サイクル数とともにセメント反応率、水酸化カルシウム（CH）、C-S-H の体積が増加している様子が確認できる。一方、空隙率は減少していった。サイクル数と経過時間の関係は、$t=\beta n^2$ 、t：時間(h)、β：0.00035（h / cycles^2）、n：サイクル数です。β はセメントの種類で変わり、デフォルトは 0.00035（h / cycles^2）となっている。セメントペースト、モルタル及びコンクリートの強度予測モデルの検証用試験体の養生期間 28 日は、1,373 サイクルに相当する。

表 4-2- 82 に XRD と VCCTL によって計算された各鉱物と水和物の組成の比較を示す。VCCTL では各鉱物の割合が体積で計算されるため、各鉱物の密度（Balonis et al., 2009、Kurihara et al., 2022）を乗じて質量比に変換した。C2S、水酸化カルシウムとモノカーボアルミネートの量において若干の差が見られた。VCCTL では C3AH6 と計算されているが、試験ではモノカーボアルミネートとして測定されていると考えられる。

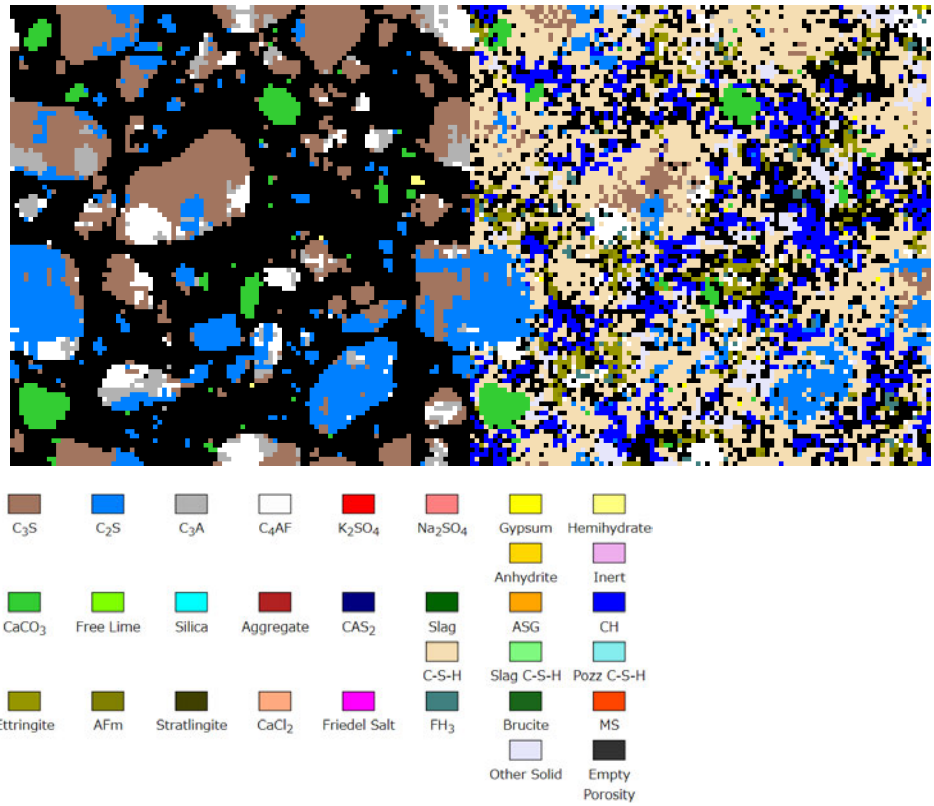


図 4-2- 100　VCCTL による水和反応の解析結果（左：反応前、右：反応後）

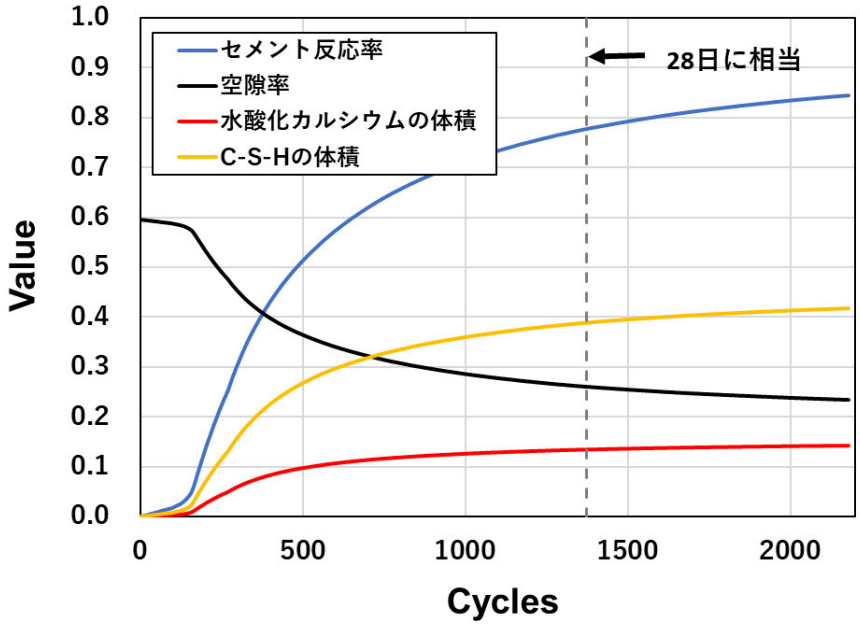


図 4-2- 101　VCCTL によるセメントの水和解析結果

表 4-2- 82 鉱物組成の比較

	C3S	C2S	C3A	C4AF	Calcite	CH	AFt	Mc	非晶質相	C_3AH_6	その他	total
XRD	3.5	11.6	1.5	3.3	2.2	11.3	5.6	5.9	55.1	-		100
VCCTL	3.53	6.91	0.42	4.11	3.46	16.85	3.39	0.62	52.27	7.08	1.37	100

(ii) セメントペーストの強度予測

VCCTL モデルによる三次元水和予測の結果を非局所化を用いたボクセル有限要素法による強度推定は、下記の表 4-2- 83 に示す条件にて行った（浅井他, 2004、 永井他, 2010）。なお、本解析では破壊エネルギーを考慮した等方損傷モデルに非局所化を組み合わせ行い、偏差が 1/2 要素辺長である正規分布型のフィルタ関数を用い、3 画素分をマスクし非局所化計算を行った。図 4-2- 102 に示す VCCTL モデルによる三次元水和予測したセメントペーストを用いて周期境界条件にて解析を行った。各相の弾性係数とポアソン比はインデンテーション法によってペーストの断面を測定し得られた既往の研究を参考に設定した（Haecker, C. J., et al., (2005)、 Šmilauer, V., et al., (2006)）。したがって本研究で設定している弾性係数などは鉱物単体の値ではない。C-S-H の弾性係数は既往の研究において 22.4 GPa であるが（Haecker, C. J., (2005)）、空隙を考慮して 20 GPa とした。ポアソン比は既往の研究の 0.26 とした（Haecker, C. J., (2005)）。空隙の値は 0 を採用すると計算が発散する恐れがあるため他の要素に影響を及ぼさないように C-S-H の 100 分の 1 の値を用いた。

応力ひずみ曲線の計算結果を図 4-2- 103 に示す。左図は圧縮、右図は引張の結果を示している。それぞれ 3 つの解析結果を示している。いずれも同様の応力ひずみ曲線を示している。圧縮強度は、46.5 MPa、引張強度は 8.1 MPa、弾性係数は、16.8 GPa、ポアソン比は 0.24 であった。

図 4-2- 104 に示すようにモルタルの解析のために応力ひずみ曲線の直線性が失われる点を引張破壊開始時のひずみとして算出し、そのひずみ値を次の段階での破壊規準とした。

表 4-2- 83　セメントペーストの解析に用いた値

	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	破壊規準ひずみ	破壊エネルギー (N / mm)
未水和セメント	117.6※1	0.314※1	500μ	1.0×10-3
水酸化カルシウム	38.0※2	0.324※1	500μ	1.0×10-3
C-S-H	20.0	0.26※1	750μ	1.0×10-4
その他の水和物	20.0	0.26※1	750μ	1.0×10-4
$CaCO_3$	79.6※1	0.31※1	500μ	1.0×10-3
空隙	0.2	0.0025	-	-

※1：Haecker, C. J., et al., (2005)

※2：Šmilauer, V., et al., (2006)

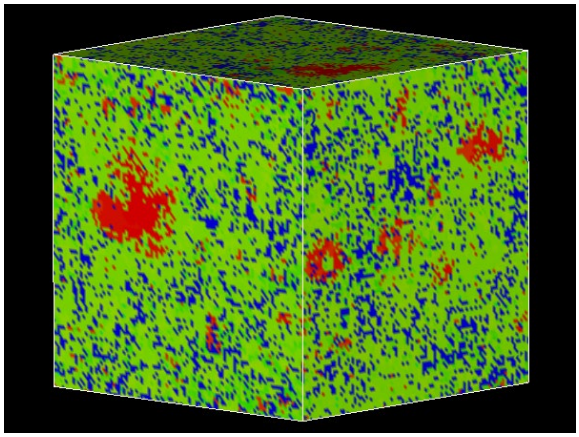


図 4-2- 102　セメントペーストの解析モデル
（赤：セメント、黄緑：C-S-H 他水和物、青：空隙）

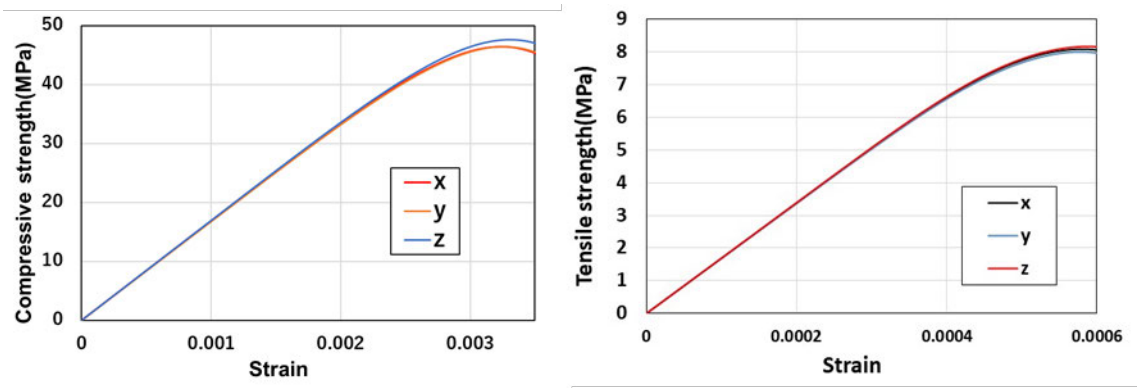


図 4-2- 103　硬化セメントペーストの応力ひずみ曲線（左：圧縮、右：引張）

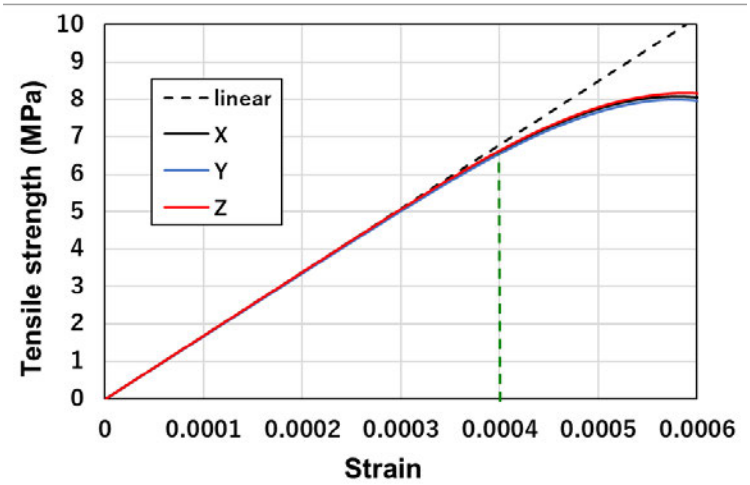


図 4-2- 104　引張時の応力ひずみ曲線

(iii) モルタルの強度予測

モルタルの強度予測は、ペーストと砂の 2 相が存在するとした。砂の粒度分布は表 4-2-75 に示した測定値を使用して粒度分布に従ってランダムに配置し、周期境界条件にて解析を行った。解析に使用した細骨材の形状は、NIST モデルに基づき EN1691 standard を採用した。解析に使用したモルタルの三次元モデルを図 4-2- 105 に示す。本項(ii)で実施したセメントペーストの三次元モデルによる VCCTL モデルと非線形ボクセル有限要素法による解析によって得られたペーストの弾性係数、ポアソン比を入力した。ペーストの引張破壊時のひずみを破壊規準（400 μ）とし、破壊エネルギーは 0.002 N / mm とした。なお、既往の研究によると硬化セメントペーストの破壊エネルギーは、0.01 から 0.02 N / mm 程度であり（Wittmann, F. H., 2002）、本解析の値は少し低い値である。砂の弾性係数は、40.0 GPa、ポアソン比は 0.17、破壊規準ひずみは 500 μ、破壊エネルギーは 0.1 N / mm とした。なお、既往の研究において骨材は、弾性係数を 57 から 75 GPa、ポアソン比を 0.17 から 0.22、破壊規準ひずみを 180 から 340 μ、破壊エネルギーを 0.1 から 0.33 としている（井出 他, 2012）。モルタルの強度予測は、1 ボクセルを一辺 30 μm の立方体として 135×135×135 の大きさ（一辺 4050 μm の直方体）で解析を行った。

図 4-2- 106 に応力ひずみ曲線の計算結果を示す。左図は圧縮、右図は引張の結果を示している。それぞれ 3 つの解析結果を示している。いずれも同様の応力ひずみ曲線を示している。圧縮強度は 52.3 M Pa、引張強度は 7.5 M Pa、弾性係数は 26.4 GPa、ポアソン比は 0.2 であった。

図 4-2- 107 に示すようにコンクリートの解析のために応力ひずみ曲線の直線性が失われる点を引張破壊開始時のひずみとして算出し、そのひずみ値を次の段階での破壊規準とした。

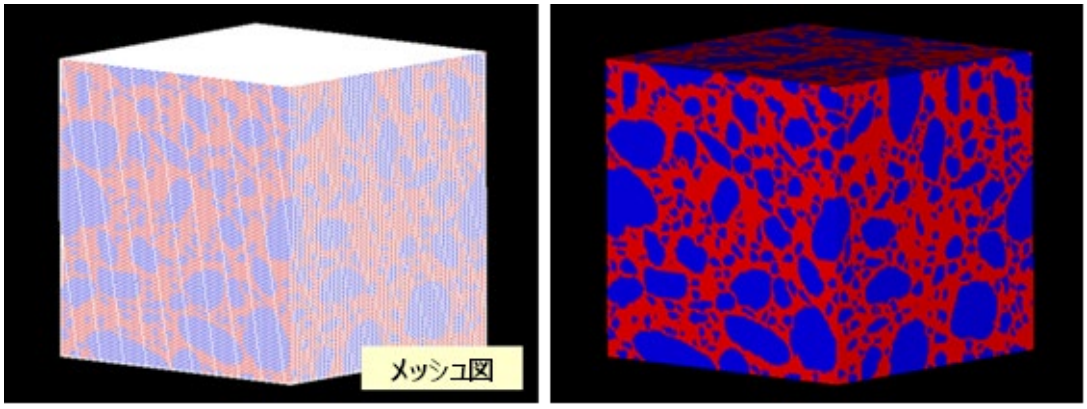


図 4-2- 105　モルタルの解析モデル（青：砂、赤：セメントペースト相）

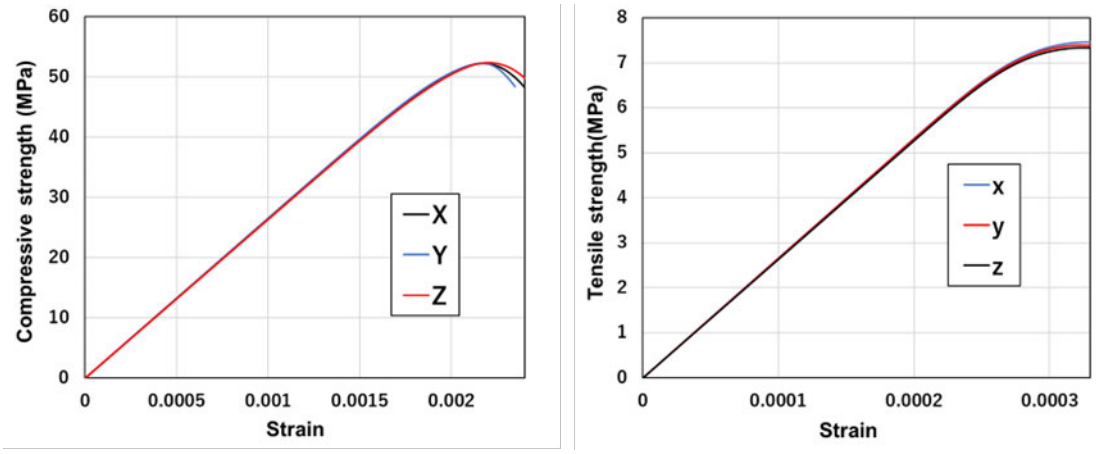


図 4-2- 106　モルタルの応力ひずみ曲線（左：圧縮、右：引張）

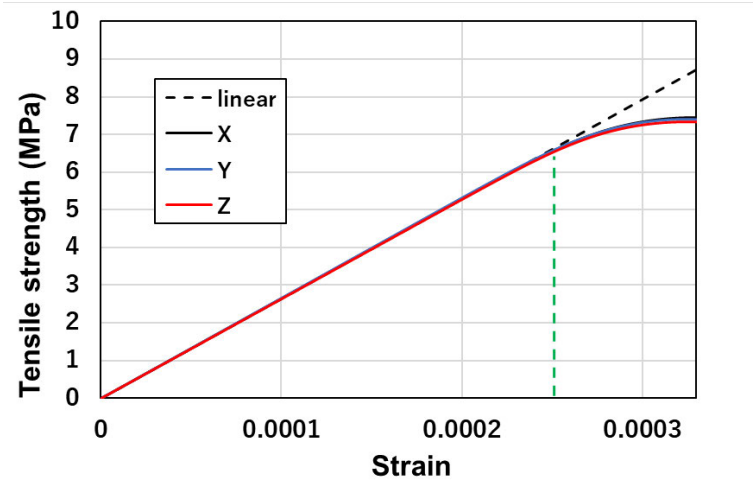


図 4-2- 107　引張時の応力ひずみ曲線

(iv)　コンクリートの圧縮強度予測

コンクリートの圧縮強度予測は、モルタル、粗骨材の 2 相が存在するとした。粗骨材の粒度分布は測定値を使用して粒度分布に従ってランダムに配置し、周期境界条件にて解析を行った。解析に使用した粗骨材の形状は、NIST モデルに基づき ASTM 57 stone を採用した。図 4-2- 108 に解析に使用したコンクリートを示す。本項 (iii)のモルタルの強度予測解析で得られた弾性係数、ポアソン比を入力した。また、モルタルの引張破壊時のひずみを破壊規準（250 μ）とし、破壊エネルギーGf (N / mm)は、0.05 N / mm とした。なお、既往の研究におけるモルタルの破壊エネルギーは、0.01 から 0.1 N / mm 程度である（Wittmann, F. H., 2002）。粗骨材の弾性係数 : 40.0 GPa、ポアソン比 : 0.17、破壊規準ひずみ : 500 μ、破壊エネルギー : 0.1 N / mm とした。コンクリートの強度予測は、1 ボクセルを一辺 0.5 mm の立方体として 101×101×101 の大きさ（一辺 50.5 mm の直方体）で解析を行った。

図 4-2- 109 に圧縮時の応力ひずみ曲線の計算結果を、図 4-2- 110 にコンクリートの 1 軸圧縮時のひずみと損傷の関係をそれぞれ示す。それぞれ 3 つの解析結果を示している。いずれも同様の応力ひずみ曲線を示している。圧縮強度は 70.0 MPa、弾性係数は 34.1 GPa、ポアソン比は 0.18 であった。なお、今回の解析モデルではセメントペースト中の空隙率は考慮されているが、X 線 CT 測定で確認されたモルタル（約 2vol.%）及びコンクリート（約 1vol.%）の粗大空隙を考慮していないため、これらの空隙量を考慮した解析の実施と粗大空隙の力学的特性への影響については今後の課題とする。

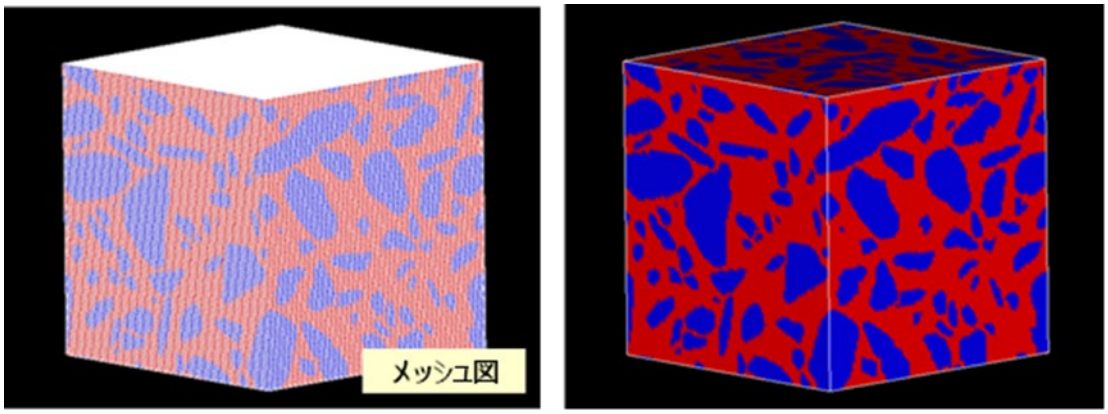


図 4-2- 108　コンクリートの解析モデル（青：骨材、赤：モルタル相）

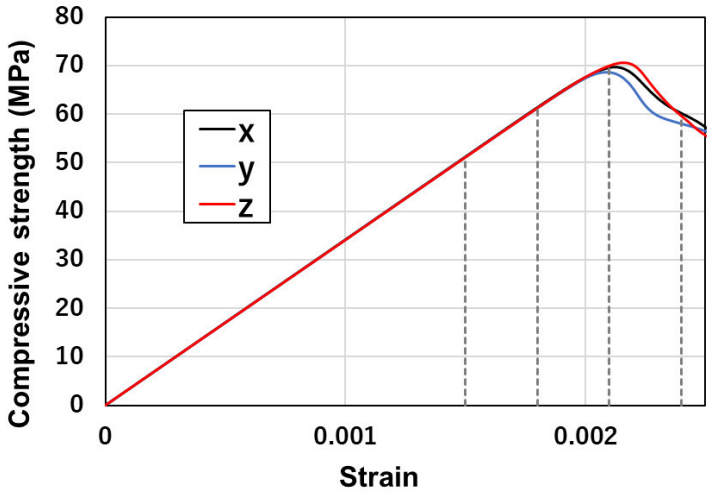
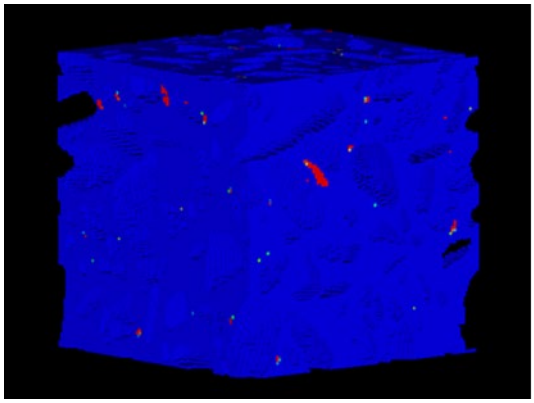
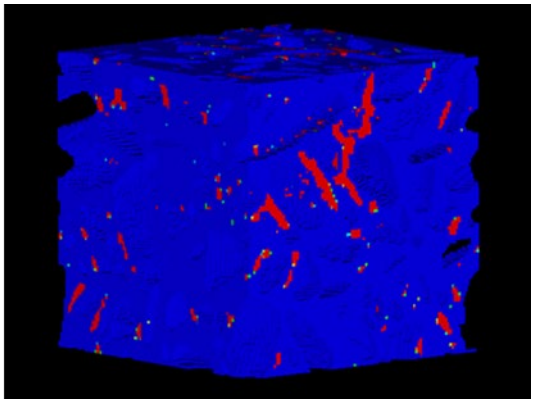


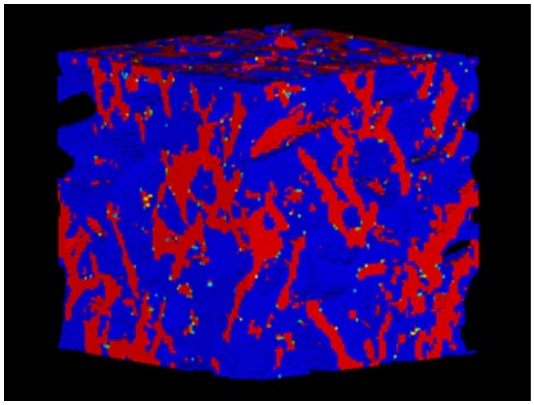
図 4-2- 109　コンクリートの一軸圧縮時の応力ひずみ計算結果



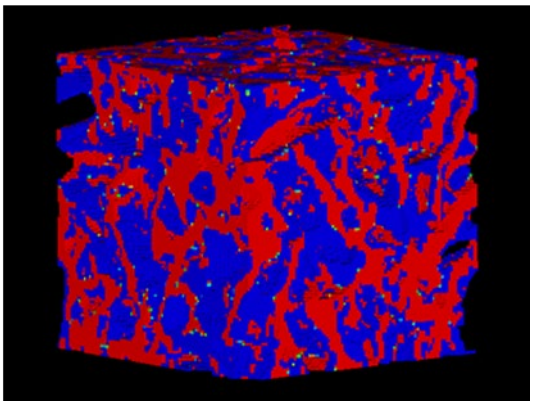
一軸圧縮ひずみ 1500μ



一軸圧縮ひずみ 1800μ



一軸圧縮ひずみ 2100μ



一軸圧縮ひずみ 2400μ

図 4-2- 110　コンクリートの一軸圧縮時のひずみと損傷の関係（赤：損傷）

(v) 適用性評価

TCCTL モデルによる水和反応の予測と非線形ボクセル有限要素法による解析結果と本項で作成した何れも健全なセメントペースト、モルタル及びコンクリートの検証用データの試験結果を比較し、モデルの確からしさ及び適用性を評価した。その結果を表 4-2-84 に示す。試験値と推定値はおおよそ一致した。

以上より、硬化セメントペーストの解析結果からモルタルの解析、コンクリートの圧縮強度予測を行うことが可能であると考える。令和 4 年度の検討では、セメントペースト中の空隙率は考慮されているが、X 線 CT 測定で確認されたモルタル（約 2 %）及びコンクリート（約 1 %）の粗大空隙や粗骨材下面に生成する遷移帯を考慮していない。より精緻な強度予測を行うには、これらの空隙を考慮する必要がある。セメントの種類、水セメント比やコンクリートの配合など、多様なコンクリートの力学的特性に対する適応性についても検証が必要と考える。また、将来的に人工バリアの特性と将来変化を評価するために、本解析モデルの課題を抽出する必要がある。

表 4-2- 84　試験値と推定値の比較

	圧縮強度 (N / mm²)		静弾性係数 (kN / mm²)		ポアソン比	
	試験値	推定値	試験値	推定値	試験値	推定値
硬化セメントペースト	44.8	45.4	15.5	16.9	0.264	0.240
モルタル（空気量考慮無し）	57.9	52.3	28.2	26.5	0.184	0.200
コンクリート（空気量考慮無し）	61.9	69.7	33.5	34.1	0.177	0.181

(f) まとめ

本章では、試験で得たセメント系材料の化学変質挙動と力学的特性の関係について、マップ図などによる体系的な整理の支援となり得る解析的な予測手法を構築し整備することを目的に、コンクリートの強度予測に関する文献調査、予測手法の検討、健全なコンクリートに対する強度予測及び試験結果との比較による確からしさと見通しの検討を行った。

コンクリートの強度予測に関する文献調査によって、モルタル及びコンクリートにおける骨材の分布、空気の分布及び遷移帯の分布が強度を決定する上で必要なことがわかった。さらにそれぞれの相の弾性係数、ポアソン比、引張強度、破壊エネルギーといった値が入力として必須であることがわかった。本事業では、これらを考慮できる NIST が開発した VCCTL モデルを用いて硬化セメントペーストの三次元イメージモデルを作成し（Bullard, 2014, Watts et al., 2018）、劣化が生じていないモルタルやコンクリートの骨材の形状や分布を考慮し、強度予測を有限要素法による永井らのモデルに基づいて行った（永井ほか, 2010）。

健全なセメントペースト、モルタル及びコンクリート硬化体を作製し、それらの配合情報や材料のデータなどをインプットデータとしてセメントペーストの水和予測、セメントペースト、モルタル及びコンクリートの強度予測を行った。

水和後のセメントペーストの組成について、試験結果と計算結果を比較した結果おおむね一致したが、C2S、Portlandite 及び Monocarbonate の量において若干の差が見られた。VCCTL では C3AH6 と計算されているが、試験では Monocarbonate として測定されていると考えられる。

セメントペーストの圧縮強度、静弾性係数及びポアソン比の試験結果と解析結果は概ね一致していた。また、セメントペーストの強度予測から得た値をモルタルの強度予測のインプットデータに、モルタルの強度予測から得た値をコンクリートの強度予測のインプットデータにそれぞれ使用した解析結果についても、試験結果と概ね一致していた。以上より、硬化セメントペーストの解析結果からモルタルの解析、OPC を使用した健全なコンクリートの圧縮強度予測を行うことが可能になったと考える。

（5）セメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充のまとめ

セメント系材料の化学変質と力学的特性に関する検討では、セメントペースト試料を用いた多様な地下水への浸漬試験を継続し、地下水の SO_4 濃度と HCO_3 濃度に着目して力学的特性への影響について検討した。処分施設の建設で使用が想定される OPC 及び BFSC を使用した吹付けコンクリートとセグメントコンクリートを想定したセメントペースト試料の浸漬試験を実施し、地下水の化学成分が力学的特性に与える影響としてナノインデンテーション法による硬度及びヤング率の測定を実施した。浸漬試験の結果については、Ettringite を生成して海水影響を受けるコンクリートの劣化要因となる SO_4 濃度と、$CaCO_3$ がコンクリートの表層に析出して劣化を遅延する可能性のある HCO_3 濃度をパラメータに

整理した。人工海水や FGB-2_214.75～220.52m の実地下水に比べ SO_4 濃度が 1/2 程度で HCO_3 濃度が非常に低い海水 B 及び降水 A の模擬地下水の方が化学変質の進展と力学的特性の低下が著しいことを確認した。セメント系材料の地下水との接触による化学変質と力学的特性への影響は、劣化要因となる SO_4 濃度のみならず遅延要因となる HCO_3 濃度の影響も大きいことを示唆する結果となった。令和 4 年度までに得られた知見からコンクリートの支保材料としては、OPC に比べ BFSC の方が化学変質の進展や力学的特性の低下が緩やかに進行すると考えられる。支保工建設の施工方法として吹付け工法とシールド工法を想定したセグメントを想定したセメントペーストの化学変質と力学的特性の試験の結果から、何れの工法を選択しても化学変質の観点からは大きな差異は確認されていない。

現実的な材料及び条件におけるコンクリートの化学変質と力学的特性の試験では、令和 2 年度に開始したコンクリート試料の浸漬試験及びフロースルー試験を継続し、それぞれ試料を分析して地下水成分とセメント硬化体の変質挙動の関係について確認した。セメントペーストを使用した試験において化学変質と力学的特性の低下が著しい降水 A、人工海水と FGB-2_167.70～171.78m の実地地下水を使用して浸漬試験を実施した。浸漬期間 10 箇月の時点においては、何れの水準においても著しい化学変質や力学的特性の変化は確認されず、バルク状のセメントペーストの硬化体に比べ化学変質の進展が遅いことを示唆する結果となった。

地下水や材料の種類に応じた強度推定手法の検討では、試験で得たセメント系材料の化学変質について、マップ図などによる体系的な整理の支援となり得る解析的な予測手法を構築し整備することを目的に実施した。

化学解析手法の検討では、鉱物相の変化やイオンの浸透のような化学的な変化に着目した外部析出層の影響及び解析手法の検討を実施し、解析コードの検証、外部析出層の影響の評価、外部析出層を考慮した解析手法の検討及び解析による長期予測の検証データの抽出を行った。また、強度予測手法の検討では、強度予測モデルに関する文献調査を実施するとともに、コンクリート試料を作製して強度予測に必要なインプットデータと検証データを取得し、健全なコンクリートの検証を実施した。健全なコンクリートの強度予測を実施して適用性を検討した。

化学解析手法の検討におけるコードの検証では、外部析出層を考慮しないプログラムを用いて、外部析出層がない試験ケースについて解析を実施し、試験結果の再現性を確認した。試験では確認されていないが解析では確認された鉱物相が多かったが、試験では生成量が少なく非晶質及び低結晶質である可能性があることなどから、μXRD や XRD によって鉱物相を定性できなかったと考える。解析と試験が一致しない点については今後も原因や影響の程度などの検討が必要と考えられるが、浸透プロファイルは試験結果と解析結果がおおむね一致していた。浸透プロファイルには試験では確認できない鉱物相の分布が反映されており、それが試験結果とよく一致していたことから、解析結果が試験結果を再現できたと考えた。

外部析出層の影響の評価では、外部析出層のない試験で検証したプログラムを用いて、外部析出層がある試験条件で解析を実施し、試験結果と解析結果を比較することで、外部析出層の影響を検討し、外部析出層が生成する環境や条件でコンクリートの変質やコンクリートへのイオンの浸透を評価する場合は、コンクリート外部での反応を考慮する必要があることがわかった。

外部析出層を考慮した解析手法について調査した結果、外部析出層に関して化学反応及び物質移行を考慮して解析が可能なモデルはなく、既往のモデルを参考に、最初から試料外部に外部析出層を設定して解析を行うことで簡易的に外部析出層の影響を検討できると考えた。解析による長期予測の妥当性を評価するための検証データに関する文献調査を実施し、小樽港の 100 年耐久試験（防波堤コンクリート）など 6 報のデータが解析による長期予測の検証対象になると判断した。

強度予測手法の検討では、コンクリートの強度予測に関する文献調査によって、NIST が開発した VCCTL モデルを用いて硬化セメントペーストの三次元イメージモデルを作成し、健全なセメントペースト、モルタル及びコンクリート硬化体を作製し、それらの配合情報や材料のデータなどをインプットデータとしてセメントペーストの水和予測、セメントペースト、モルタル及びコンクリートの強度予測を行った。セメントペーストの圧縮強度、静弾性係数及びポアソン比の試験結果と解析結果は概ね一致していた。また、セメントペースト、モルタル及びコンクリートの強度予測の解析結果は、試験結果と概ね一致しており OPC を使用した健全なコンクリートの圧縮強度予測を行うことが可能になったと考える。

参考文献

浅井光輝, 山岸道弘, 寺田賢二郎, 永井学志 : 非局所型ボクセル有限要素法の開発とその破壊挙動解析への適用, 土木学会論文集 No.759, pp.233-245, 2004.

Balonis, M. and Glasser, F. P.: The density of cement phases, Cement and Concrete Research, vol. 39 (9), pp.733-739, 2009.

Bénard, A., Rose, J., Hazemann, J.-L., Proux, O., Trotignon, L., Borschneck, D., Nonat, A., Chateau, L. and Bottero, J.-Y,: Modelling of Pb release during Portland cement alteration, Advances in Cement Research, vol.21, pp.1-10, 2009.

Bentz, D. P.: Three-dimensional computer simulation of Portland cement hydration and microstructure development, Journal of American Ceramic Society, vol.80 (1), pp.3-21, 1997.

Buenfeld, N. R. and Newman, J. B.:The development and stability of surface layers on concrete exposed to sea-water, Cement and Concrete Research, vol. 16 (5), pp.721-732, 1986.

Bullard, J. W., Bentz, D., Garboczi, E., Ferraris, C., Martys, N., & Stutzman, P.: Virtual Cement and Concrete Testing Laboratory: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2009.

Bullard, J. W.: Virtual cement and concrete testing laboratory: Version 9.5 user guide, 2014.

De Weerdt, K., Justnes, H. and Geiker, M. R.: Changes in the phase assemblage of concrete exposed to sea water, Cement and Concrete Composites, vol. 47, pp. 53-63, 2014.

De Weerdt, K., Bénard, E., Kunther, W., Pesersen, M. T. and Lothenbach, B.: Phase changes in cementitious materials exposed to saline solutions, Cement and Concrete research, vol. 165, 107071, 2023.

福手 勤, 濵田秀則, 山本邦夫 : 海洋環境に 20 年間暴露されたコンクリートの耐久性に関する研究, 土木学会論文集, vol.16, no.442, 1992.

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-20-03, 2021

Haas, J. and Nonat, A.: From C–S–H to C–A–S–H: Experimental study and thermodynamic modeling, Cement and Concrete Research, vol.68, pp.124-138, 2015.

Haecker, C. J., Garboczi, E. J., Bullard, J. W., Bohn, R. B., Sun, Z., Shah, S. P., & Voigt, T.: Modeling the linear elastic properties of Portland cement paste, Cement and Concrete Research, vol. 35 (10), pp.1948-1960, 2005.

Hoshino, S., Yamada, K., Hirao, H.: XRD/Rietveld Analysis of the hydration and strength development of slag and limestone blended cement, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 4, No. 3, pp.357-367, 2006.

Hosokawa, Y., Yamada, K., Johannesson, B., Nilsson, L.-O.: Development of a multi-species mass transport model for concrete with account to thermodynamic phase equilibriums, Materials and Structures, vol.44, pp.1577–1592, 2011.

井出貴之, 青山琢人, 胡桃澤清文, 名和豊春 : 超高強度コンクリートの力学的性状に及ぼす粗骨材の影響, セメント・コンクリート論文集, 65(1), pp.464-469, 2012.

石田哲也, Chaube, R.P., 岸利治, 前川宏一 : 微視的機構に基づくコンクリートの自己収縮, 乾燥収縮及びその複合に関する解析的検討, 土木学会論文集, vol.37, no.578, pp.111-121, 1997.

羽原俊祐, 沢木大介 : 硬化コンクリートの空隙構造とその物性, 石膏と石灰, no. 240, pp. 314-323, 1992.

羽原俊祐, 小山田哲也, 菅野華果, 中村大樹 : コンクリートのスケーリング劣化に及ぼす凍結防止剤の影響, セメント・コンクリート論文集, vol.67, 2014.

平松良雄, 岡行俊, 木山英郎 : 非整形試験片による岩石の引張り強さの迅速試験, 日本鉱業会誌, vol.81, no.932, 1965.

星野清一, 平尾宙, 山田一夫 : X 線回折/リートベルト法によるセメントペーストの水和反応解析, コンクリート工学年次論文集, vol. 28, no. 1, pp. 41-46, 2006.

Jakobsen, U. H., De Weerdt, K. and Geiker, M. R.: Elemental zonation in marine concrete, Cement and Concrete Research, vol. 85, pp. 12-27, 2016.

Jenni, A., Gimmi, T., Alt-Epping, P., Mäder, U. and Cloet, V.: Interaction of ordinary Portland cement and Opalinus Clay: Dual porosity modelling compared to experimental data, Physics and Chemistry of the Earth, vol. 99, pp. 22-37, 2017.

川端雄一郎, 松下博通 : 高温蒸気養生を行ったコンクリートにおける DEF 膨張に関する検討, 土木学会論文集 E2, vol.67, no.4, pp.549-563, 2011.

風間洋, 富山潤, 砂川勇二, 比嘉正也, 小簗俊介 : 沖縄県の海岸線に 11 年間暴露したフライアッシュコンクリートの耐久性に関する研究, 土木学会論文集 E2, vol.73, no.3, pp.251-270, 2017.

Kim, J. I., Kim, D. K., Feng, M.Q. and Yazdani, F.: Application of neural networks for estimation of concrete strength, Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 16 (3), pp. 257-264, 2004.

木下英吉, 長坂慎吾, 倉橋貴彦, 谷口修 : コンクリート表面温度に基づく鉄筋腐食厚および腐食率の推定手法に関する研究, 土木学会論文集 E, vol.65, no.4, pp.442-458, 2009.

岸利治 : コンクリートの耐久性を定める『水』の制御　③コンクリート中への水の侵入の理解と制御, そして活用, コンクリート工学, vol.51, no.12, 2013.

Kobayashi, M., Takahashi, K. and Kawabata, Y.: Physicochemical properties of the Portland cement-based mortar exposed to deep seafloor conditions at a depth of 1680 m, Cement and Concrete Research, vol. 142, 106335, 2021.

Kurihara, R. and Maruyama, I.: Revisiting Tennis-Jennings method to quantify low-density/high-density calcium silicate hydrates in Portland cement pastes, Cement and Concrete Research, vol. 156, 106786, 2022.

Loser, R., Lothenbach, B., Leemann, A. and Tuchschmid, M.: Chloride resistance of concrete and its binding capacity – Comparison between experimental results and thermodynamic modeling, Cement and Concrete Research, vol.32, pp.34-42, 2010.

Lothenbach, B. and Winnefeld, F.: Thermodynamic modelling of the hydration of Portland cement, Cement and Concrete Research, vol.36 (2), pp.209-226, 2006.

Lothenbach, B., Kulik, A. D., Matscheic, T., Balonisd, M., Baquerizoe, L., Dilnesaf, B., Mironb, D. G. and Myersg, R.J.: Cemdata18: A chemical thermodynamic database for hydrated Portland cements and alkali-activated materials, Cement and Concrete Research, vol.115, pp.472-506, 2019.

丸屋 剛, 岩波光保, 坂井悦郎, 真下昌章, 濱田秀則 : 海生生物が形成する緻密な保護層による鉄筋コンクリート構造物の耐久性向上, 土木学会論文集, vol.60, no.739, pp.61-74, 2003.

Mehta, P. K. and Haynes, H. H.: Durability of concrete in sea water, Journal of the structural division, vol. 101, pp. 1679-1686, 1975.

三原守弘, 平野史生, 高山裕介, 京川裕之, 大野進太郎 : ＴＲＵ廃棄物地層処分施設の化学的変遷を考慮した長期力学挙動解析コードの開発, 原子力バックエンド研究, vol. 24, no. 1, pp. 15-26, 2017.

Naderpour, H., Rafiean, A. H. and Fakharian, P.: Compressive strength prediction of environmentally friendly concrete using artificial neural networks, Journal of Building Engineering, vol. 16, pp. 213-219, 2018.

Nagai, K., Sato, Y., & Ueda, T..: Mesoscopic simulation of failure of mortar and concrete by 3D RBSM, Journal of Advanced Concrete Technology, vol. 3 (3), pp. 385-402, 2005.

永井 学志, 山田貴博, 和田章 : 階層型デジタル画像に基づく粗骨材-モルタル界面を考慮したコンクリート材料の非線形有限要素解析手法, 日本建築学会構造系論文集, vol. 65, no.528, pp.91-98, 2000.

永井 学志, 池田 翔太, 胡桃澤 清文 : 硬化セメントペーストの圧縮強度評価に対する非線形ボクセル有限要素解法とその適用可能性, 日本計算工学会論文集, No.20100012, 2010.

長瀧重義 : コンクリートの長期耐久性 [小樽百年耐久試験に学ぶ], 技報堂出版株式会社, 1995.

日本コンクリート工学協会, ケイ酸力学研究センター : コンクリート構造物の長期性能シミュレーションプログラム LECCA2 理論解説書, 2010.

Nitka, M. and Tejchman, J.: A three-dimensional meso-scale approach to concrete fracture based on combined DEM with X-ray μCT images, Cement and Concrete Research, vol. 107, pp. 11-29, 2018.

小田部裕一, 岸利治 : コンクリートの品質予測・施工管理支援に向けた水和反応・強度発現モデルの開発, 生産研究, vol.57, no.2, 2005.

Powers, T. C.: Structure and physical properties of hardened Portland cement paste, Journal of the American Ceramic Society, vol. 41 (1), pp. 1-6, 1958.

Sahara, F., Murakami, T., Ito, H, Kobayashi, I. and Yokozeki, K.: Development of a mechanical analysis system considering chemical transitions of barrier Materials, WM'06 Conference, 2006.

産業技術総合研究所, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 平成 31 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沿岸部処分システム評価確証技術開発報告書, 2020.

産業技術総合研究所, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 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沿岸部処分システム評価確証技術開発報告書, 2021.

産業技術総合研究所, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 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沿岸部処分システム評価確証技術開発報告書, 2022.

産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 平成 28 年度地層処分技術調査等事業沿岸部処分システム高度化開発, 2017.

産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 平成 29 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沿岸部処分システム高度化開発報告書, 2018.

産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 平成 30 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沿岸部処分システム高度化開発報告書, 2019.

Šmilauer, V., and Zdeněk K. B.: Microstructure-based micromechanical prediction of elastic properties in hydrating cement paste, Cement and Concrete Research, vol.36 (9) pp.1708-1718, 2006.

鈴木一孝, 西川直宏, 山出義章, 谷口幾哉 : コンクリートの耐久性評価を目的とした水和組織の分析手法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, vol.1, no.2, pp.39-49, 1990.

Takahashi, K., Kawabata, Y., Iwanami, M., Kobayashi, M., Kasaya, T., Yamanaka, T,m Nomura, S. and Makita, H.: In-situ Deep-Sea Monitoring of Cement Mortar Specimen at a Depth of

3515 m and Changes in Mechanical Properties after Exposure to Deep Sea Condition,Journal of Advenced Conrete Technology, vol. 20, pp. 254-266, 2022.

高屋康彦, 中山丈士, 小口千明, 八田珠郎 ： 海水によるモルタルの変質に関する実験的研究―表面の二次生成物について―, Journal of MMIJ , vol.125, no.9, pp.489-495, 2009.

THERMODDEM [online], Available from: < https://thermoddem.brgm.fr/> (2021.12.17)

友沢史紀: 骨材について（2），コンクリート工学, vol.16，no.9，pp.115-123，1978.9.

Trawiński, W., Tejchman, J., Bobiński, J.: A three-dimensional meso-scale modelling of concrete fracture, based on cohesive elements and X-ray μCT images, Engineering Fracture Mechanics, vol. 189, pp. 27-50, 2018.

内川浩, 羽原俊祐, 沢木大介 ： 硬化モルタル及びコンクリート中の遷移帯厚さの評価並びに遷移帯厚さと強度との関係の検討, コンクリート工学論文集, vol. 4, no. 2, pp.1-8, 1993.

内川浩 ： セメントペーストと骨材の界面の構造・組織がコンクリートの品質に及ぼす影響, コンクリート工学, vol. 33, no. 9, pp.5-17, 1995.

Wang, P., Gao, N., Ji, K., Stewart, L. and Arson, C.: DEM analysis on the role of aggregates on concrete strength, Computers and Geotechnics, vol. 119, 103290, 2020.

Wang, X. F., Yang, Z. J., Yates, J. R., Jivkov, A. P. and Zhang, C.: Monte Carlo simulations of mesoscale fracture modelling of concrete with random aggregates and pores, Construction and Building Materials, vol. 75, pp.35-45, 2015.

WATEQ4F [online], (2 February 2005), Available from:
https://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GWC_chemtherm/software.htm (2021.12.17)

Watts, B. E., Tao, C., Ferraro, C. C., Masters, F. J.: Proficiency analysis of VCCTL results for heat of hydration and mortar cube strength, Construction and Building Materials, vol. 161 (10), pp.606-617, 2018.

Wittmann, F. H.: Crack formation and fracture energy of normal and high strength concrete, Sadhana, 27,4, pp.413-423, 2002.

山路 徹, 審良善和, 濱田秀則, 山田一夫 ： 海洋環境におけるコンクリートの劣化性状および劣化指標に関する検討, 土木学会論文集Ｅ, vol. 66, no. 1, pp. 21-37, 2010.

山本 佳士, 中村 光, 黒田 一郎, 古屋 信明 ：3 次元剛体バネモデルによるコンクリート供試体の圧縮破壊解析, 土木学会論文集Ｅ, vol. 64, no. 4, pp. 612-630, 2008.

横関康祐, 渡邉賢三, 古澤靖彦, 大門正機, 大即信明, 久田真 ： カルシウムイオンの溶出に伴うコンクリートの変質に関する実態調査と解析的評価, 土木学会論文集, vol.54, no.697, pp.51-64, 2002.

横関康祐: コンクリートからの成分溶出を対象とした千年レベルの長期耐久性設計に関する研究, 東京工業大学, 博士論文, 2004.

与那嶺一秀, 山路 徹, 川端雄一郎 : 海水作用を受けるコンクリートの局所的劣化に対する一考察, セメント・コンクリート論文集, vol. 71, pp. 425-431, 2018.
吉野利幸, 鎌田英治, 桂 修 : 空隙指標で表したコンクリート強度式の提案とその検証, コンクリート工学論文集, vol. 7 (2), pp. 65-77, 1996.

４－３　緩衝材の機能変化に係るデータの拡充

（1）背景と目的

高レベル放射性廃棄物における緩衝材には「放射性物質の移流による移行の抑制」、「コロイド移行の抑制」、「放射性物質の収着」の安全機能が設定されている。このうち、「放射性物質の収着」については、安全評価において考慮することとし、緩衝材の安全機能の確保に必要な設計要件としては、表 4.3-1 に示すように「低透水性」、「自己シール性」、「コロイドろ過性」、「自己修復性」が設定されている（NUMO-SC）。これらの各設計要件では指標及び基準が設定されており、これを充足する緩衝材の密度と厚さの範囲（仕様成立範囲）が示されている。

緩衝材の設計要件を評価するためには、再冠水の過程において生起する緩衝材の諸特性を予測する必要がある。主な緩衝材の特性としては、透水特性や膨潤特性などがあり、これらの状態変化は、浸潤する地下水組成の影響を受けることが知られている。これまでは、緩衝材の状態変化に影響を及ぼす地下水として、主に海水系地下水を想定した人工海水や Ca^{2+}濃度の高いセメント系材料からの浸出水を取り上げた研究が実施されている。それらの結果は、主に地下水のイオン強度と緩衝材の特性との関係で整理されてきた（日本原子力研究開発機構, 2018）。例えば、田中・中村(2005)では、人工海水等を用いた膨潤量試験により、イオン強度及び乾燥密度に対する膨潤率の依存性を確認している。しかし、沿岸部地下水の分析結果（産業技術総合研究所ほか, 2019）をイオン強度や陽イオン濃度組成で整理した結果（図 4-3-1 及び後掲図 4-2-2）に着目すると、Mg^{2+}、K^{+}などのこれまでに緩衝材の状態変化に対する影響について十分に検討されていない成分が多く含まれており、イオン強度の高い地下水が存在することが分かった。これを踏まえるとより多様な組成やイオン強度の地下水における緩衝材の状態変化に関するデータを拡充する必要がある。

上記のような沿岸部地下水の塩水条件を考えた場合、上述の緩衝材の設計要件のうち、自己シール性の仕様成立範囲（NUMO-SC 第 4 章　図 4.4-10）が最も狭くなる。そこで、平成 31 年度からは、沿岸部地下水で緩衝材の機能に最も影響する設計要件として自己シール性に着目した。

自己シール性を評価するためには、指標となる膨潤率についてのデータを整備する必要がある。膨潤率は、ベントナイトの主成分であるモンモリロナイトの層間陽イオンや浸潤する液相のイオン強度の影響を受けて変化することが知られている。モンモリロナイトの層間陽イオンは、その組成によって水和状態が変化するため、層間距離、すなわち膨潤率に影響する。なお、層間陽イオン組成は、浸潤する水に含まれる陽イオンと層間陽イオンが交換されることによって変化する。また、液相のイオン強度（塩分）が高くなることにより、モンモリロナイト粒子の凝集が生じ、膨潤率の低下につながる。以上を踏まえると、浸潤する液相に応じた膨潤率を予測するためには、液相に含まれる陽イオンと緩衝材とのイオン交換反応の把握及び、陽イオン種とイオン強度の膨潤率への影響の把握が有用と考えられる。これら

に加えて、これまで、圧縮ベントナイトの陽イオン溶液への浸漬によるイオン交換試験が実施されている（原子力環境整備促進・資金管理センター, 2018）。しかし、カラム試験による反応が平衡に至るまでのイオン交換挙動や、圧縮系のイオン交換選択係数の取得は充分になされていない。そのため、ベントナイト緩衝材の設置後から再冠水に至るまでに自己シール性を担保することを示すには、圧縮ベントナイトの挙動についてのデータを整備しておく必要がある。

以上のことから、本検討では、沿岸部を想定した現実的な環境での緩衝材のイオン交換反応の予測手法を整備（後述（３）イオン交換選択性に関する検討）し、陽イオン種やイオン強度の緩衝材の膨潤率（自己シール性）への影響に関するデータを拡充（後述（４）緩衝材の膨潤率に対する溶存陽イオンの影響把握試験）することにより、飽和後における緩衝材の性能を予測するためのデータを整備することを目的とする。

表 4-3- 1　緩衝材の安全機能の確保に必要な緩衝材の設計要件の確認方法

設計要件	確認方法	指標	基準
低透水性	緩衝材中の放射性物質の移行が拡散によって支配されるように，緩衝材の密度を設定する。	ペクレ数	0.1 以下
自己シール性	施工時の隙間を充填可能な膨潤性を有していることを確認する。	膨潤率/隙間体積比	2 以上
コロイドろ過能	コロイドが緩衝材中を透過しないように，緩衝材の 密度を設定する。	コロイド透過率	0
自己修復性	ガス発生による亀裂が緩衝材に生じたとしても，閉塞することのできる密度を確認する。	破過前後の透水係数の増加割合	1 以下

※NUMO-TR-20-03（原子力発電環境整備機構（2021））を参照し作成

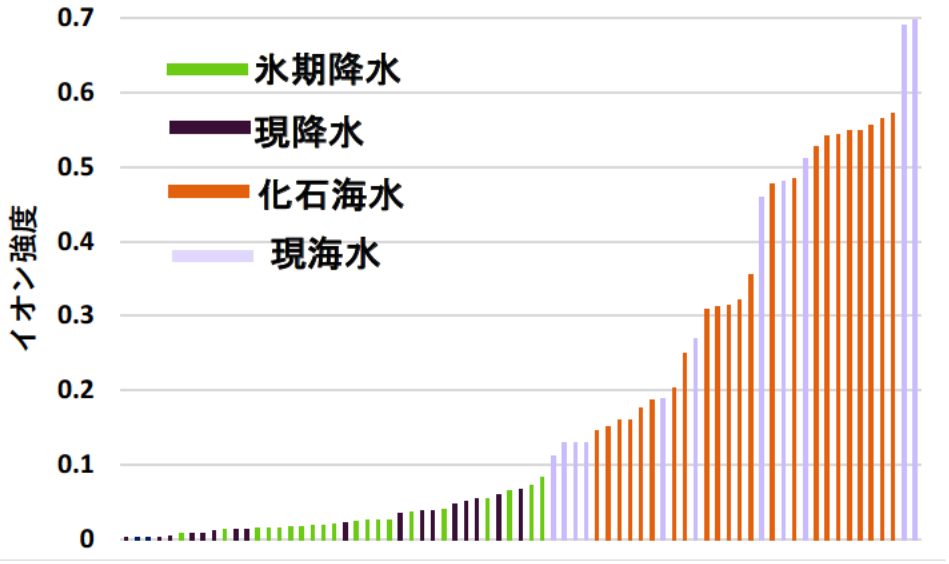


図 4-3- 1　沿岸部地下水（産業技術総合研究所ほか, 2019）のイオン強度

（2）目標とアプローチ

現実的な環境での緩衝材のイオン交換反応を予測する手法として、主に地球化学解析がこれまで検討されてきた。圧縮したベントナイトを高イオン強度の陽イオン溶液に浸漬させるイオン交換反応試験を実施し、試験でのイオン交換反応を再現する地球化学解析を試みた（原子力環境整備促進・資金管理センター, 2018）。その結果、固相の層間陽イオンの分析結果と解析結果に乖離が見られた。この乖離の要因として、解析に設定したイオン交換選択係数が、既往の希薄溶液の分散系で取得された値（小田・柴田, 1999）であり、浸漬試験と異なる条件で取得された値であること、また、圧縮したベントナイト中での移流・分散などによる物質移行が解析で十分に再現できていないこと、以上の 2 点が考えられた。

1 点目の要因であるイオン交換選択係数に関して、これまで、地球化学解析で入力するイオン交換選択係数には、希薄溶液中のバッチ試験で取得された値（例えば、小田・柴田, 1999）を設定することが一般的であった。しかし、実際の処分環境では、ブロック状に締め固めたベントナイト緩衝材に地下水が浸潤する。そのため、締め固めたベントナイトへ通水する圧縮系でのイオン交換選択係数と分散系でのイオン交換選択係数を比較し、違いがあるか否かを確認する必要がある。Karnland et al.(2011)では、圧縮ベントナイトを用いた通水試験によって、Na に対する Ca のイオン交換選択係数（以後、「Ca-Na のイオン交換選択係数」とする。）を取得し、分散系で得られたイオン交換選択係数（Bradbury and Baeyens, 2002；Missana and Garcia-Guitierrez, 2007）との比較がなされている。そこでは、圧縮系の通水試験より得られたイオン交換選択係数は、分散系で取得された値と大きく変わらないとされている。しかし、分散系のイオン交換選択係数にばらつきが見られることや、分散系と圧縮系でイオン強度の条件が異なるなど、さらなる精査が必要と考えられる。そこで、圧縮ベントナイトへの塩水系地下水の浸潤を想定した条件で通水試験を実施し、イオン交換選択係数を取得する。また、圧縮系の通水試験とイオン強度等の条件を揃えたバッチ試験を実施し、分散系と圧縮系のイオン交換選択係数を比較することで、圧縮系と分散系におけるイオン交換選択係数の違いの有無について把握する。さらに、圧縮系のイオン交換選択係数のイオン強度や緩衝材乾燥密度との関係を把握し、地球化学解析の入力データとして資するように整理する。（→検討項目 1 ：イオン交換選択係数の取得）

2 点目の要因である解析での物質移行の再現について、上述の圧縮ベントナイトの浸漬試験におけるイオン交換反応を予測する解析（原子力環境整備促進・資金管理センター, 2018）では圧縮したベントナイト中への溶液の浸潤や、固相中での移流・分散などは表現されておらず、ベントナイトと溶液を考慮した平衡計算であった。しかし、実際の処分環境では、不飽和のベントナイト緩衝材への水の浸潤や、固相中での移流・分散が想定される。そこで、沿岸部を想定した条件（高イオン強度かつ多様な地下水組成）で飽和・不飽和浸透流、移流・分散、イオン交換反応を連成した地球化学解析を実施し、圧縮したベントナイトにおけるイオン交換反応を予測する解析手法を整備を進めている。（→検討項目 2 ：イオン交換反応評価のための解析手法の整備）

陽イオン種やイオン強度の影響による緩衝材の膨潤率（自己シール性）に関するデータの拡充（後述（４）緩衝材の膨潤率に対する溶存陽イオンの影響把握試験）については、沿岸部地下水を想定した溶液で膨潤量試験を実施し、地下水組成に応じた膨潤率を予測する方法を検討する。NUMO-SC では、主に人工海水を用いた膨潤量試験を参照しているが、陽イオン種ごとの膨潤量の違いは考慮されていない。本業務では、沿岸部地下水データに基づき、溶液の陽イオン種を決定する。また、陽イオン種ごとに、イオン強度、乾燥密度を変更した試験を実施し、陽イオン種ごとのイオン強度や乾燥密度への依存性を確認する。上記のように拡充したデータを基に膨潤率を予測する方法を検討し、沿岸部を想定した多様な溶液組成、イオン強度におけるベントナイト緩衝材の膨潤率の予測を目指す。

（３）イオン交換選択性に関する検討

①　実施概要

イオン交換選択係数の取得に関しては、圧縮系におけるイオン交換選択係数のイオン強度および緩衝材乾燥密度との関係を把握し、イオン交換選択係数を整理するために、圧縮した Na 型ベントナイトへの通水試験をイオン強度と緩衝材乾燥密度を変更した条件で実施した。通水溶液は、沿岸部で想定される主な陽イオン（K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}）を考慮し設定した。また、圧縮系と分散系のイオン交換選択係数の差異を確認するために、圧縮系試験と同じイオン強度の条件で分散系のバッチ試験を実施した。なお、イオン強度の条件は、沿岸部の実地下水を想定して（0.125、0.25、0.5）と設定した。緩衝材乾燥密度については、有効モンモリロナイト乾燥密度換算で（0.88、1.00、1.27 Mg/m^3）とした。

以上を踏まえて設定した、通水試験の計画を表 4-3-2 に示す。令和２年度は、イオン強度 0.5 の KCl 溶液を、有効モンモリロナイト乾燥密度 0.88 Mg/m^3 及び 1.27 Mg/m^3 の圧縮した供試体に通水し、K の Na に対するイオン交換選択係数を取得した。なお、イオン交換選択係数は Gaines＆Thomas のイオン交換選択係数 K_{GT}（Gaines and Thomas, 1953）として算出した。その結果、$\log K_{GT}$ は、密度 0.88 Mg/m^3 においては 0.08、1.27 Mg/m^3 においては 0.33 であった。この通水試験では、通水溶液を KCl のみの単成分としたが、Na に対するイオン交換選択係数を算出する際には、主要交換体である Na を含む塩である NaCl を含めた 2 成分とするほうが、分析誤差の影響が相対的に小さくなり、イオン交換選択係数の精度がより確保される。そこで、令和 3 年度以降は、NaCl を含めた 2 成分の混合溶液で通水試験を実施し、イオン交換選択係数を取得することとした。

令和 3 年度は、イオン強度 0.5、0.25 の KCl と NaCl の混合溶液を、有効モンモリロナイト乾燥密度 1.00 Mg/m^3 の供試体に通水し、イオン強度を変化させた場合の K-Na のイオン交換選択係数を取得した。また、イオン強度 0.125 の KCl と NaCl の混合溶液、イオン強度 0.5 の $CaCl_2$ と NaCl の混合溶液、及び 3-1 節「陸域から海域にかけての地質環境特性の把握」において令和 3 年度採水した沿岸部実地下水（ここでは、採水孔名と採水深度より FGB-2 孔 167.70～171.78 m と呼ぶ）を、通水する試験を実施した。

令和 4 年度は、イオン強度 0.5 の $MgCl_2$ と NaCl の混合溶液を、有効モンモリロナイト乾燥密度 1.00 Mg/m^3 の供試体に通水する試験を実施した。また、イオン交換選択係数と乾燥密度の関係を確認するために、イオン強度 0.5 の KCl と NaCl の混合溶液を有効モンモリロナイト乾燥密度、0.88Mg/m^3 の供試体に通水する試験を実施した（乾燥密度 1.27Mg/m^3 については試験を開始)。さらに、分散系と圧縮系におけるイオン交換選択係数の差異を確認するために、イオン強度が（0.05、0.125、0.25、0.5）の水準で、KCl、$CaCl_2$、$MgCl_2$ のそれぞれと NaCl の混合溶液でバッチ試験を実施した。

イオン交換反応評価のための解析手法の整備に関して、令和 2 年度は、塩水環境下における圧縮ベントナイトのイオン交換の進行や間隙水の変化などを適切に評価することを目的として、粒子間隙とモンモリロナイト層間でのイオンの挙動の違いを考慮した解析手法を検討した。具体的には、粒子間隙とモンモリロナイト層間の表面積比を考慮した 2 サイトモデル及び粒子間隙を可動領域としてモンモリロナイト層間を不動領域とした可動水-不動水モデルである。

令和 3 年度は、令和 2 年度に実施した KCl 溶液（イオン強度 0.5）を圧縮ベントナイト（有効モンモリロナイト乾燥密度 0.88、1.27 Mg/m^3）に通水した試験の再現解析を実施した。イオン交換選択係数には既往の分散系で取得された値（小田・柴田，1999）を設定した。その結果、排水液の Ca^{2+}イオンの濃度は試験結果と乖離するが、その他のイオンの濃度変化は、試験結果を良好に再現した。

令和 4 年度は、令和 3 年度と同様のイオン強度 0.5 の KCl 溶液を圧縮ベントナイト(有効モンモリロナイト乾燥密度 0.88、1.27 Mg/m^3)に通水した試験の再現解析を圧縮系のイオン交換選択係数を設定して実施した。Ca-Na 及び K-Na のイオン交換選択係数は、圧縮系の通水試験から取得したイオン強度 0.5 における値を用いた。ただし、Mg-Na については未取得のため既往の分散系で取得された値（小田・柴田，1999）を用いた。また、沿岸環境下を想定し、より複雑な条件である、イオン強度 0.5 の NaCl と KCl の混合溶液、NaCl と $CaCl_2$ の混合溶液、及び駿河湾沿岸で採取された実地下水（FGB2 孔_167.70~171.78m）などを用いた通水試験の再現解析を実施した。

表 4-3- 2　通水試験の計画

ケース	通水溶液	有効モンモリロナイト乾燥密度 (Mg/m^3)	イオン強度	令和2年度	令和3年度	令和4年度	令和5年度
①	KCl溶液	0.88	0.50	○			
②		1.27	0.50	○			
③	KCl-NaCl混合溶液	0.88	0.50			○	
④		1.00	0.50		○		
⑤			0.25		○		
⑥			0.125		○	○	
⑦		1.27	0.50			○	○
⑧	$CaCl_2$-NaCl混合溶液	1.00	0.50		○	○	
⑨			0.25				○
⑩	$MgCl_2$-NaCl混合溶液	1.00	0.50			○	
⑪			0.25				○
⑫	沿岸部実地下水 (FGB-2孔_ 167.70~171.78m)	1.00	0.28		○	○	

② イオン交換性選択係数の取得

(a) 令和４年度の実施内容

令和３年度までの検討において、沿岸部で想定される地下水のイオン強度を基に、K-Na のイオン交換選択係数を異なるイオン強度の２水準（イオン強度 0.25 と 0.5）で取得した。これらの結果から、イオン交換選択係数はイオン強度に依存して、K-Na のイオン交換選択係数が大きくなる傾向が示唆された。令和４年度は、さらにイオン強度が低い水準（イオン強度 0.125）の通水試験を実施し、イオン強度に対するイオン交換選択係数の依存性を把握する。このようなイオン強度や緩衝材乾燥密度に対するイオン交換選択係数の依存性について、理論的な検討から定性的な説明を与えるようにする。まずは、ポアソン-ボルツマン方程式などの古典的な電気二重層理論から検討を始め、前提条件や仮定などを整理し、考慮しきれていない因子を把握しながらイオン強度や乾燥密度へのイオン交換選択係数への依存性について考察する。

また、圧縮系の通水試験とイオン強度の条件を揃えたバッチ試験による分散系でのイオン交換選択係数を取得し、圧縮系と分散系におけるイオン交換選択係数の差異を把握する。

(b) 試験計画

(i) 通水試験（圧縮系）

イオン交換選択係数の取得に関する試験計画を表 4-3- 2 に示す。ベントナイトの圧縮の影響を得るため、有効モンモリロナイト乾燥密度をパラメータの一つとした。また、多様な地下水溶液に適用できる結果を得るために、通水溶液のイオン強度を変えた通水試験を計画した。なお、Na 型モンモリロナイトのイオン交換反応を対象としたため、供試体には、クニピア F（モンモリロナイト含有率：98%）を用いた。

ケース①、③は、供試体の乾燥密度を 0.88 Mg/m^3、②、⑦は 1.27 Mg/m^3 としているが、この乾燥密度は、緩衝材の厚さ 700 mm での有効粘土密度の仕様成立範囲の最小（1.2 Mg/m^3）と最大（1.6 Mg/m^3）時の緩衝材の有効モンモリロナイト乾燥密度に相当する（クニゲル V1 のモンモリロナイト含有率を 60 wt%、粒子密度をすべて 2.6 Mg/m^3 として算出した）。その他のケースでは、供試体の乾燥密度を 1.00 Mg/m^3 としており、これは、クニゲル V1 にケイ砂を 30 wt%混合した緩衝材の乾燥密度が 1.6 Mg/m^3 の時の有効モンモリロナイト乾燥密度である。

ケース③～⑩は、通水溶液を 2 成分の混合溶液とした。Na 型のモンモリロナイトを対象としてイオン交換反応をさせるため、イオン強度比を交換する陽イオンを 4、Na^+イオンを 1 になるように混合した。通水溶液の総イオン強度は、海水を想定した 0.5 を最大濃度とし、0.5、0.25、0.125 の 3 水準とした。

ケース⑫は、沿岸部実地下水（FGB-2 孔 167.70～171.78 m）を通水溶液とした。実地下水は多成分であり、主要な４種（Na^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}、K^+）以外の陽イオンを含み、陰イオンも複数種含まれている。この沿岸部実地下水の組成を表 4-3-3 に示す。また、**図 4-3-2** に示

すように、沿岸部実地下水の主要陽イオン量の組成比を標準海水や他の沿岸部地下水の組成比（産業技術総合研究所ほか，2019）とともにプロットし、これらを比較した。沿岸部実地下水の陽イオン濃度と海水の希釈ラインとの位置関係により、標準海水の組成比よりも Mg^{2+}、Ca^{2+}が多く、Na^{+}、K^{+}が少ないことが示され、沿岸部実地下水は、単純に淡水による希釈により形成されているものではないことが分かる。また、他の沿岸部地下水の組成の傾向と比べると Mg^{2+}が多いことが特徴といえる。

令和 3 年度は、上記のうちケース④（イオン強度 0.5、KCl-NaCl の混合溶液）、ケース⑤（イオン強度 0.25、KCl-NaCl の混合溶液）、ケース⑥（イオン強度 0.125、 KCl-NaCl の混合溶液）、ケース⑧（イオン強度 0.5、 $CaCl_2$-NaCl の混合溶液）、ケース⑫（沿岸部実地下水 FGB2 孔_167.70~171.78m）の通水試験を実施した。

令和 4 年度は、上記のうちケース③（イオン強度 0.5 の KCl と NaCl の混合溶液、有効モンモリロナイト乾燥密度密度 0.88 Mg/m^3）およびケース⑩（イオン強度 0.5 の $MgCl_2$ と NaCl の混合溶液、有効モンモリロナイト乾燥密度 1.00 Mg/m^3）の通水試験を実施した（ケース⑦、乾燥密度 1.27Mg/m^3 については試験を開始）。また、ケース⑥、⑧、⑫の供試体を解体し固相の分析を実施した。

(ii) バッチ試験（分散系）

圧縮系と分散系におけるイオン交換選択係数の差異を把握するために、分散系でのイオン交換試験を実施する。試料土は、圧縮系試験と同様に Na 型モンモリロナイト（クニピア F，クニミネ工業社製）とした。浸漬溶液の液種についても、圧縮ベントナイトの通水液と同様とした。イオン強度は、通水試験で得られたイオン交換選択係数と比較することを念頭に置き、0.050～0.500 の範囲とした。液固比については、全てのケースで 25 とした。この液固比は、最適な液固比を決定するための事前の予備検討等の結果を踏まえて、分析精度を確保しつつ試験操作が可能である条件として設定した。表 4-3- 4 に試験ケースを示す。合計 12 ケースで、各ケースとも n＝3 で実施した。

表 4-3- 3　沿岸部実地下水（FGB-2 孔_167.70~171.78 m）の組成

成分	濃度(mol/L)
Na	0.10
K	1.1×10^{-3}
Ca	0.022
Mg	0.033
Al	$<2 \times 10^{-5}$
Si	7.1×10^{-4}
SO_4	0.011
Cl	0.20

その他	
イオン強度	0.28
IC	35mg/L
TOC	<5mg/L
pH	7.9

表 4-3- 4　分散系でのベントナイトのイオン交換反応試験ケース

水準名	イオン強度			液固比
	混合溶液	混合溶液中に各成分のイオン強度		
		NaCl	MCl_n	
K/Na系0.500	0.500	0.100	0.400	25
K/Na系0.250	0.250	0.050	0.200	25
K/Na系0.125	0.125	0.025	0.100	25
K/Na系0.050	0.050	0.010	0.040	25
Ca/Na系0.500	0.500	0.100	0.400	25
Ca/Na系0.250	0.250	0.050	0.200	25
Ca/Na系0.125	0.125	0.025	0.100	25
Ca/Na系0.050	0.050	0.010	0.040	25
Mg/Na系0.500	0.500	0.100	0.400	25
Mg/Na系0.250	0.250	0.050	0.200	25
Mg/Na系0.125	0.125	0.025	0.100	25
Mg/Na系0.050	0.050	0.010	0.040	25

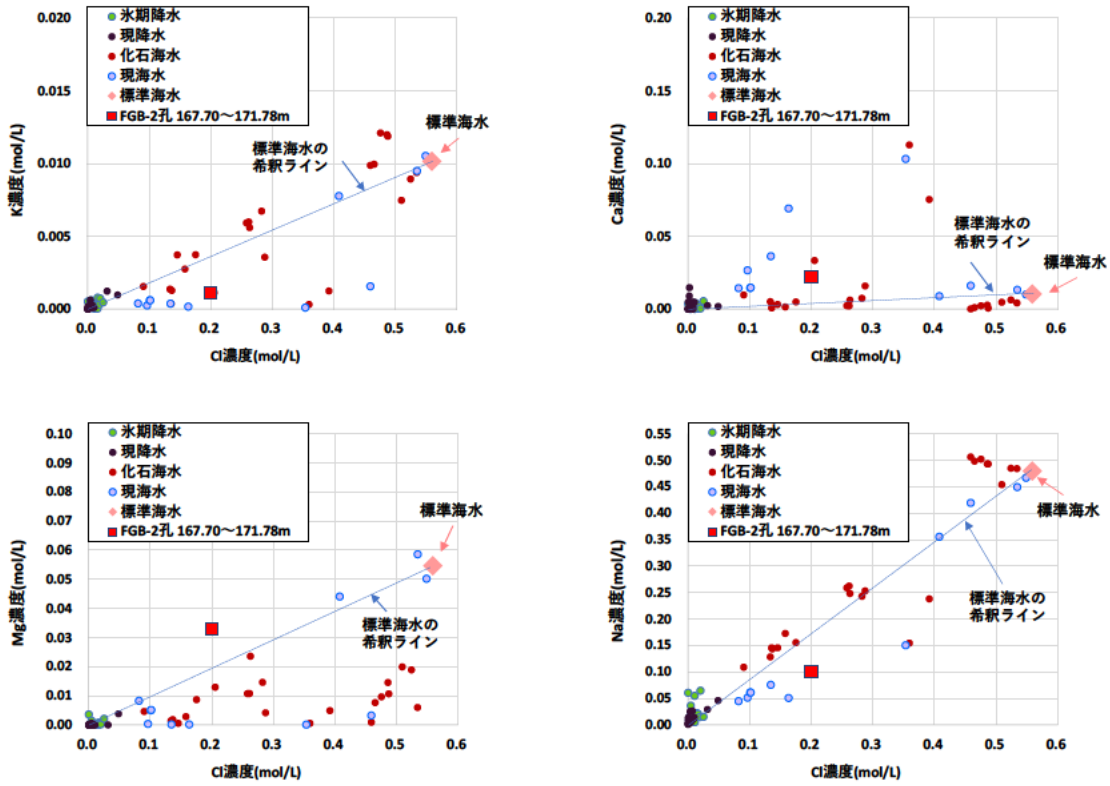


図 4-3- 2　沿岸部実地下水（FGB-2 孔_167.70~171.78 m）及び沿岸部地下水（産業技術総合研究所ほか, 2019）の成分中の陽イオン量

(c) 試験方法

(i) 通水試験（圧縮系）

通水試験には、図 4-3- 3 に示す装置を使用した。カラムは SUS316 製の上下キャップの間に SUS316 製のリングをはさみ、上下キャップをボルト・ナットで固定した。供試体は平均含水率 12.73 wt%に調整して静的締固めにより充填した。セルに各密度（各供試体数 n=2）で充填した試料量を表 4-3- 5 に示す。通水は不飽和な状態から供試体下端から圧力をかけて通水した。排水された液を経時的に採水し、液中のイオン濃度について Na^{+}イオンと K^{+}イオンを原子吸光、Ca^{2+}イオンと Mg^{2+}イオンは ICP-MS 分析によって測定した。試験後の供試体は、エタノールを用いて、間隙中の塩溶液を洗浄して取り除いた後、SFSA 改良法により層間陽イオン量を分析した。試験条件を表 4-3- 6 に示す。なお、通水試験は、それぞれのケースで 2 回実施した。

(ii) バッチ試験（分散系）

試験方法は以下の通りとした。

- ベントナイトを 116℃で一晩以上乾燥させる。
- デシケータにて徐冷し、各浸漬液に対して、設定液固比となるよう乾燥ベントナイトを浸漬させる。（液固比 25：乾燥試料 1.4 g /浸漬液 35 g　※固相分析に必要な量を確保するための条件）
- 振とう機とハンドシェイクを併用して撹拌しながら 2 週間浸漬する。
- 浸漬完了後、懸濁液を高速遠心分離機にて、9,000rpm で 1 時間遠心分離を行い、上澄みと沈降物をそれぞれ回収する。
- 上澄みを 2mL 程度分取し、分画分子数 10,000 の限外ろ過を行う。
- 限外ろ過後のろ液の濃度分析を行う。（ICP-AES または ICP-MS）
- 沈降物を 80%エタノール水にて洗浄し、洗浄水の電気伝導度が一定となるまで洗浄を行い過剰な塩を可能な限り除去する。洗浄後は、105℃で乾燥し、分析まで保管する。（分析対象試料のみ洗浄、その他は湿潤状態で保管）
- 固相の層間陽イオン量を SFSA 改良法にて測定する。

浸漬液分析については、限外ろ過後の検液を希釈し、ICP-AES により分析する。固相分析については、通水試験によりイオン交換選択係数を取得しているケースと比較することを念頭に置き、試料の内 K/Na 混合溶液(イオン強度 0.5)、K/Na 混合溶液(イオン強度 0.125)、Ca-Na 混合溶液(イオン強度 0.5)のケースの分析を実施した。固相分析は、圧縮ベントナイトへの通水試験と同様に SFSA 改良法にて行う。また、分析対象とする陽イオン種も通水試験と同様とした。

表 4-3- 5　クニピア F のセルへの充填量（作製数 各ケース n=2）

有効ﾓﾝﾓﾘﾛﾅｲﾄ乾燥密度 (Mg/m³)	剛性セル容積 (cm³)	占有体積（cm³）			重量（g）		湿潤ｸﾆﾋﾟｱ F 充填量 (g)
		乾燥ｸﾆﾋﾟｱ F	含水	セル空隙	乾燥ｸﾆﾋﾟｱ F	含水	
0.88	14.13	4.78	1.81	7.53	12.43	1.81	14.25
1.00	14.13	5.43	2.06	6.63	14.13	2.06	16.19
1.27	14.13	6.90	2.62	4.61	17.95	2.62	20.56

※クニピア F は随伴鉱物を含まない 100%モンモリロナイトと仮定する。

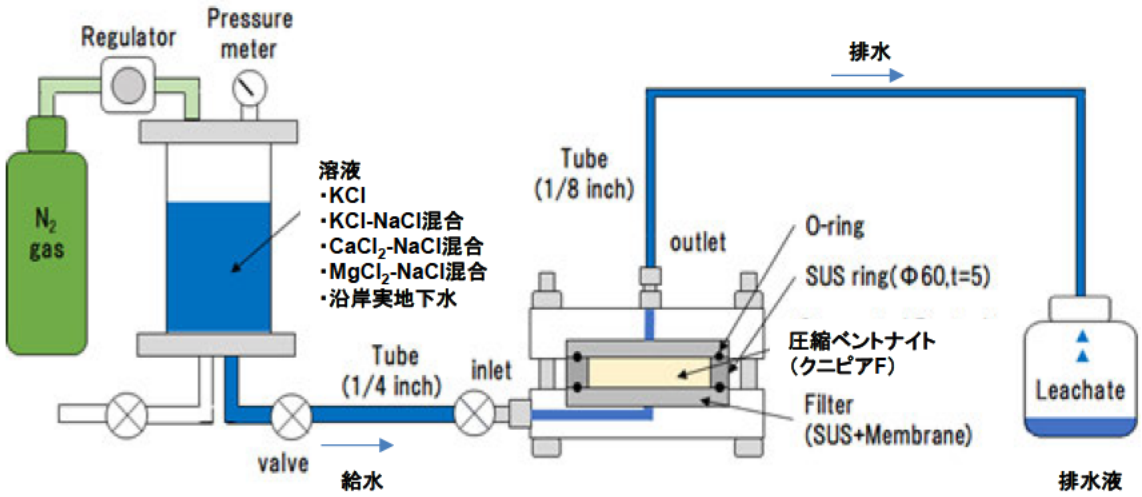


図 4-3- 3　試験装置概念図

表 4-3- 6　通水試験条件

圧縮ベントナイト供試体	乾燥密度 (Mg/m³)	供試体寸法 (mm)	通水溶液	
			イオン強度	イオン種
クニピア F (Na 型モンモリロナイト)	0.88	直径 60×高さ 5	0.5	KCl-NaCl 混合溶液（KCl と NaCl のイオン強度比率 4:1）
	1.27			
	1.00			$MgCl_2$-NaCl 混合溶液（MgCl2 と NaCl のイオン強度比 4:1）

(d) 試験結果

(i) 通水試験（圧縮系）

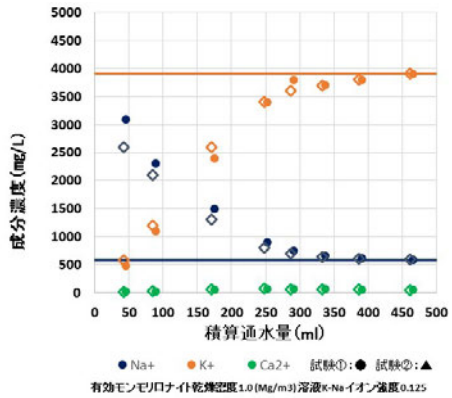
試験が終了した KCl-NaCl 混合溶液のイオン強度 0.125 のケース⑥、$CaCl_2$-NaCl 混合溶液のイオン強度 0.5 のケース⑧、岸部実地下水のケース⑫の排水及び固相分析の結果をそれぞれ**図 4-3-4**～**図 4-3-6** に示す。また、KCl-NaCl 混合溶液の乾燥密度 0.88Mg/m^3 のケース③、$MgCl_2$-NaCl 混合溶液のイオン強度 0.5 のケース⑩については、排水液の分析結果を Appendix に示す。

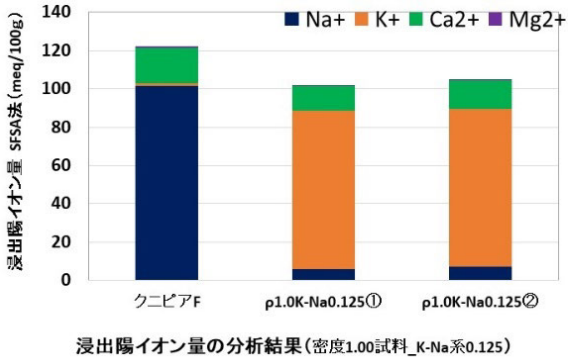
ケース⑥については、KCl-NaCl 混合溶液の通水に応じて、排水中に Na^+イオンが浸出し、排水中の Na^+イオン濃度が高まったが、積算通水量ともに徐々に減少し、積算通水量が 300 mL 程度で定常に至った。一方で Na^+イオン濃度の減少に伴い、K^+の濃度が増加しており、層間陽イオンの交換が進んでいることが認められた。K^+は、Na^+と同様に積算通水量が 300 mL 程度で通水溶液と同程度の濃度で定常に至った。

通水試験後の圧縮ベントナイト供試体について SFSA 改良法により、層間陽イオン量を取得した。Ca^{2+}が残存しているが、Na^+のほとんどが K^+に交換される結果（**図 4-3-4**）となった。

ケース⑧については、排水中の Na^+は、ケース⑥と同様の挙動を示し、積算通水量が 180～200 mL 程度で、通水濃度と同程度となり定常に至った。一方で、Na^+イオン濃度の減少に伴い Ca^{2+}の濃度が増加しており、層間陽イオンの交換が進んでいることが認められた。Ca^{2+}は、Na^+と同様に積算通水量が 180～200mL 程度で通水溶液と同程度の濃度で定常に至った。試験後の圧縮ベントナイト供試体について、SFSA 改良法により、層間陽イオン量を取得した（**図 4-3-5**）。Na^+のほとんどが Ca^{2+}に交換される結果となった。

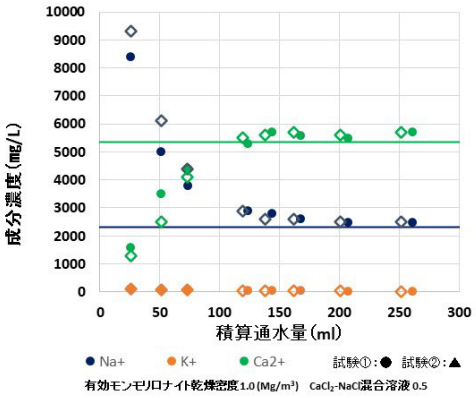
ケース⑫については、排水中の Na^+は、ケース⑥及び⑧と同様の挙動を示し、積算通水量 230～240mL 程度で定常に至った。一方で Na^+イオン濃度の減少に伴い、Ca^{2+}及び Mg^{2+}の濃度が増加しており、層間陽イオンの交換が進んでいることが認められた。Ca^{2+}と Mg^{2+}はいずれも、同程度の濃度で定常に至った。試験後の圧縮ベントナイト供試体について、SFSA 改良法により、層間陽イオン量を取得した（**図 4-3-6**）。Na^+のほとんどが Ca^{2+}および Mg^{2+}に交換された。ただし、ケース⑥、⑧に比べると残存する Na^+は比較的多い結果となった。

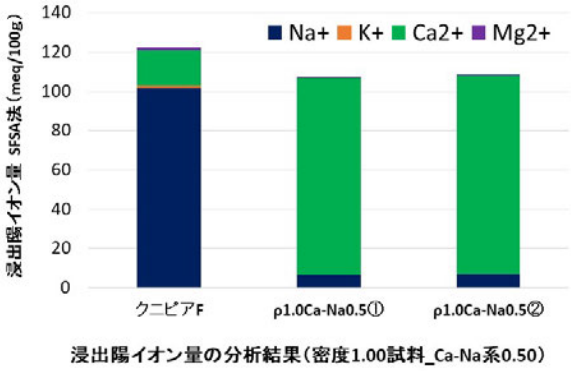




排水のイオン濃度　　層間陽イオン量

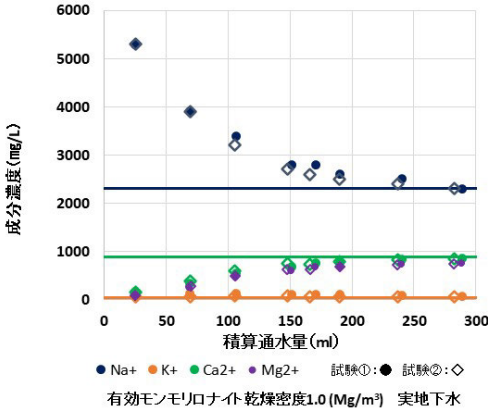
図 4-3- 4 K Cl-NaCl 混合溶液、イオン強度 0.125（ケース⑥）の分析結果

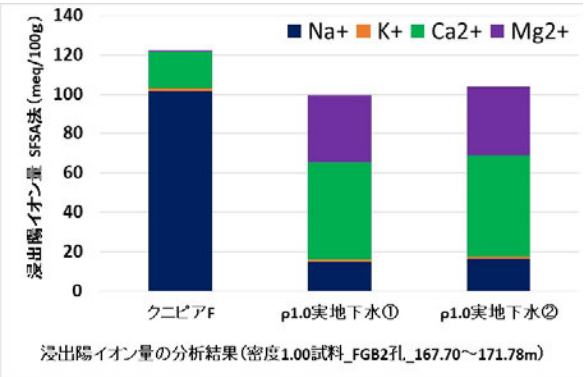




排水分析結果　　層間陽イオン量

図 4-3- 5 $CaCl_2$-NaCl 混合溶液、イオン強度 0.5（ケース⑧）の分析結果





排水分析結果　　層間陽イオン量

図 4-3- 6　沿岸部実地下水 FGB2 孔_167.70～171.78m（ケース⑫）の分析結果

(ii) **バッチ試験（分散系）**

バッチ試験の液相及び固相の分析結果については Appendix に示す。

(e) 試験結果から算出したイオン交換選択係数

得られた溶液の分析結果または供試体の層間陽イオン量のデータから、Gaines&Thomas の見かけのイオン交換選択係数 K_{GT}（Gaines and Thomas, 1953）を算出した。ベントナイトにおけるイオン交換選択係数の算出方法は、以下のとおりである。

$$\mathrm{nZNa} + M^{n+} = Z_n M + nNa^{+} \tag{4-3.1}$$

$$K_{GT} = \frac{[X-M]\{Na^{+}\}^n}{\{M^{n+}\}[X-Na]^n} \tag{4-3.2}$$

ここで、

Z^{-}：負電荷，M^{n+}：陽イオン，Z_nM：表面化学種、K_{GT}：Gaines & Thomas選択係数

[X-M]：固相収着M^{n+}の当量分率

=（固相単位重量当たりの固相中M^{n+}の濃度[meq/100 g]*1）/[CEC*2]

[X-Na]：固相収着Na^{+}の当量分率

$\{M^{n+}\}$：平衡溶液中M^{n+}の活量 = 平衡溶液中M^{n+}モル濃度$[M^{n+}]$×活量係数（Daiviesの式※3)

$\{Na^{+}\}$：平衡溶液中Na^{+}の活量 = 平衡溶液中Na^{+}モル濃度$[Na^{+}]$×活量係数（Daiviesの式※3)

※1 固相分析より算出、※2 陽イオン交換容量

※3 Daiviesの式

$$-\log\gamma_i = AZ_i^2\left(\frac{I^{1/2}}{1+I^{1/2}} - 0.3I\right) \tag{4-3.3}$$

ここで、A：0.5085 (25℃) , Z_i：価数，I：イオン強度

(i) 通水試験（圧縮系）

有効モンモリロナイト乾燥密度 1.00Mg/m^3 の $CaCl_2$ と NaCl の混合溶液（イオン強度 0.5）の原子吸光、ICP-MS による溶液分析結果および改良 SFSA 法による固相の層間陽イオン分析結果を基に、上述の計算方法に従って Ca-Na のイオン交換選択係数（log K_{GT}）を算出した。その結果を**図 4-3-7** に示す。Ca-Na のイオン交換選択係数は、K_{GT}=37.91（log K_{GT}=1.58）である。Karnland et al.,(2011)は、圧縮ベントナイトに溶液を通水させるイオン交換試験を実施し、溶液の濃度変化からイオン交換選択係数 K_{GT} を算出している。その結果、有効モンモリロナイト乾燥密度 0.87 Mg/m^3 で K_{GT}=4.0（log K_{GT}=0.60）、有効モンモリロナイト乾燥密度 1.26 Mg/m^3 で K_{GT}=5.5（log K_{GT}=0.74）と本試験よりも 1/10 倍程度の値を報告している。本試験系では、通水は一方向（in-put から out-put）であり、溶液は循環させておらず、

常にフレッシュな溶液が浸潤する。一方で Karnland et al.,(2011)では、反応溶液を循環させているため、一度ベントナイトを通過し、イオン交換を経た溶液を継続して通水している。すなわち、本試験系では常に一定組成の初期溶液が通水されているが、Karnland et al.,(2011)ではイオン交換により通水溶液の組成が変化している可能性がある。本試験と Karnland et al.,(2011)が報告するイオン交換選択係数の差異については、イオン強度などの条件の違いもあるが、上記の溶液組成の変化が要因の一つと考えられる。この Karnland et al.,(2011)の試験条件で考えられる溶液組成の変化は、閉鎖系の反応であるバッチ試験でも同様に生じると考えられる。既往の分散系での Ca-Na のイオン交換選択係数（小田・柴田, 1999）は、K_{GT}=4.90（log K_{GT}=0.69）と、Karnland et al.,(2011)と同様に本検討の 1/10 程度の値である。以上を踏まえると溶液組成の変化によるイオン交換選択係数への影響を検討する必要がある。

有効モンモリロナイト乾燥密度 1.00Mg/m^3 の KCl と NaCl の混合溶液の通水試験における排水溶液及び固相の分析結果（分析法は上記の $CaCl_2$ と NaCl と同じ）を基に、上述の計算方法によりイオン交換選択係数を算出した。陽イオン交換容量[CEC]には、圧縮ベントナイト供試体の作製に使用したクニピア F の固相分析の結果（**図 4-3-4** 参照）を用いた。得られた K-Na のイオン交換選択係数（log KGT）を表 4-3- 7 に示す。また、イオン強度とイオン交換選択係数の関係を**図 4-3-7** に示す。溶液のイオン強度 0.5 においては、log K_{GT} が平均 0.69（それぞれの試験で得られた値は、0.68、0.69）、イオン強度 0.25 においては、log K_{GT} が平均 0.59（0.57、0.60）、イオン強度 0.125 においては、log K_{GT} が平均 0.50（0.53、0.46）、となりイオン強度が大きいほどイオン交換選択係数が大きくなる傾向が見られた。この傾向については、後述の理論的な検討で考察する。

表 4-3- 7　通水試験結果から算出したイオン交換選択係数（$logK_{GT}$）

モンモリロナイト乾燥密度 Mg/m³	イオン種	イオン強度 I	陽イオン交換選択係数 K	log K	平均 K	平均 log K
1.000	K/Na	0.500	4.79	0.68	4.85	0.69
1.000	K/Na	0.500	4.91	0.69		
1.000	K/Na	0.250	3.74	0.57	3.85	0.59
1.000	K/Na	0.250	3.96	0.60		
1.000	K/Na	0.125	3.42	0.53	3.16	0.50
1.000	K/Na	0.125	2.89	0.46		
1.000	Ca/Na	0.500	40.38	1.61	37.91	1.58
1.000	Ca/Na	0.500	35.44	1.55		

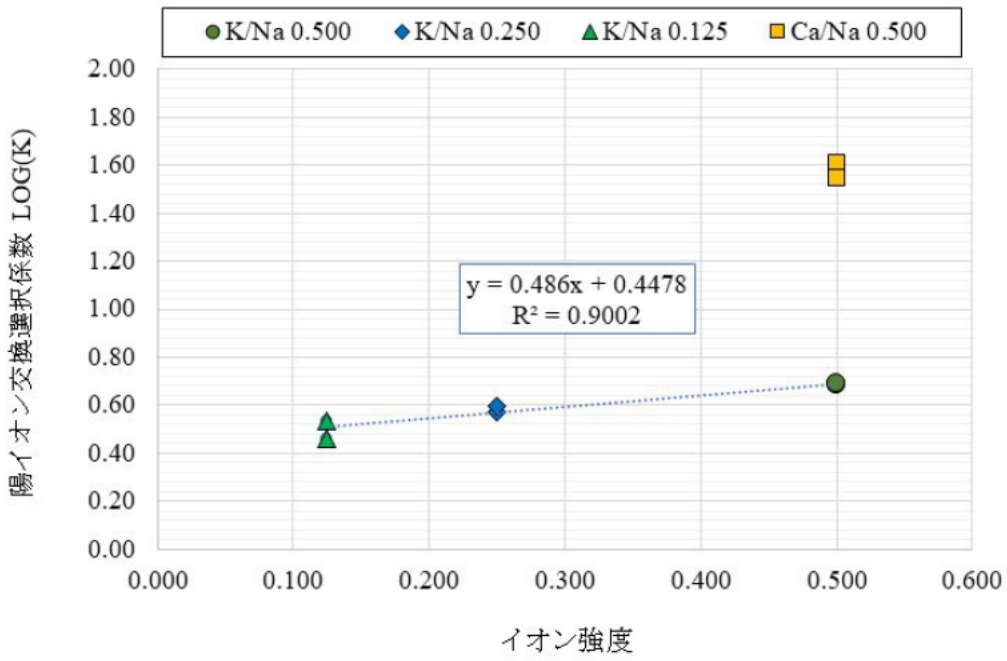


図 4-3- 7 イオン強度とイオン交換選択係数の関係（通水試験）

(ii) バッチ試験（分散系）

平衡溶液のイオン濃度から平衡溶液中のイオン活量、初期溶液と平衡溶液の増減から固相への収着量を求め、固相中への各イオンの当量分率を算出した。表 4-3- 8 に算出されたイオン交換選択係数の一覧を示す。**図 4-3-8** にイオン強度とイオン交換選択係数（以下、K_{GT}）の関係を示す。いずれのイオン種においても、イオン交換選択係数とイオン強度の間に明瞭な相関は見られない。また、表 4-3- 8 に示す通り、イオン強度が高い 0.500 のケースにおいて、イオン交換選択係数のバラつきが大きくなり、特に Ca-Na 系においてその傾向が顕著である。このバラつきの主な要因としては、平衡溶液の濃度分析値の誤差が考えられる。

K_{GT} のバラつきを抑える方法としては、以下 3 つが考えられる。

1.液固比を小さくし、固相量を多くすることで初期と平衡溶液濃度の差を大きくする

2.溶液分析精度を上げる

3.固相の収着量を、SFSA 改良法など直接分析した値を用いる

1.については、今回の液固比より小さくすると、懸濁液の粘性が高くなりすぎ、浸透撹拌が不可能となり、反応の不均質性が生じる。2.については、現在の分析精度も一般的な分析精度を確保していることから、これ以上の精度の向上は見込めない。3.については、固相の収着量を直接分析するため、溶液分析誤差の影響を受けない（ただし、層間陽イオン分析時の濃度分析誤差は生じる）そのため、現時点で考えられる対策としては 3.が最もイオン交換選択係数の精度を確保できる可能性のある方法と考えられる。そこで、3.の通り K/Na 混合溶液（イオン強度 0.5）、K/Na 混合溶液（イオン強度 0.125）、Ca-Na 混合溶液（イオン強度 0.5）のケースを対象に固相分析を実施し、イオン交換選択係数を算出した。

固相分析の結果を**図 4-3-9** に示す。この固相分析結果から得られた固相の層間陽イオン当量分率を用いてイオン交換選択係数を算出した。表 4-3- 9 に算出結果を示す。また、先に算出した溶液分析ベースの陽イオン交換選択係数も合わせた結果を**図 4-3-10** に示す。平衡溶液の分析結果から算出したイオン交換選択係数と固相分析から算出したイオン交換選択係数では、3 ケースとも固相の分析結果から求めた値の方が高くなっており、特に Ca^{2+}ではその差が非常に大きくなっている。K/Na のケースでは、固相分析の結果から、初期に層間に存在している Ca^{2+}の K^{+}とのイオン交換はほとんど進行していないことが分かる。Ca/Na では層間がほぼ Ca^{2+}に置換されているため、Na^{+}と Ca^{2+}の固相当量分率の差が大きくなる。一方、平衡溶液の分析結果から固相当量分率を算出した場合、Na^{+}と Ca^{2+}の固相当量分率の差は固相分析を基にするよりも小さくなる。その結果、固相分析を基に算出したイオン交換選択係数が大きくなったと考えられる。

表 4-3- 8　各平衡溶液から算出されたイオン交換選択係数一覧（バッチ試験）

初期イオン強度設定	K / Na 系		Ca / Na 系		Mg / Na 系	
	K_{GT}	log K_{GT}	K_{GT}	log K_{GT}	K_{GT}	log K_{GT}
0.500	3.0 (1.9~4.2)	0.48	17.9 (11.7~40.3)	1.25	8.7 (6.8~12.3)	0.94
0.250	2.2 (2.1~2.2)	0.34	10.9 (9.4~12.2)	1.04	12.7 (11.1~13.7)	1.10
0.125	2.8 (2.5~3.1)	0.45	14.6 (12.7~16.5)	1.17	7.7 (7.4~8.0)	0.88
0.050	2.6 (2.5~2.7)	0.42	8.6 (8.3~8.7)	0.93	6.9 (6.5~7.4)	0.84

※1　一部異常値と思われる分析値を除外し、K_{GT} を算出

※2　K_{GT} は平均値、（　）内は、個別に算出した K_{GT} の値の範囲（バラつき）を示している。

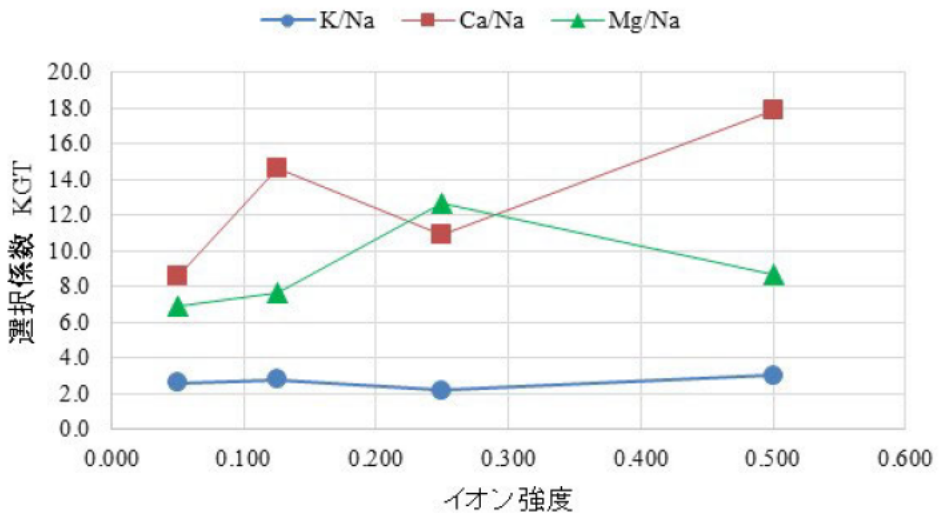


図 4-3- 8 イオン強度とイオン交換選択係数の関係（バッチ試験）

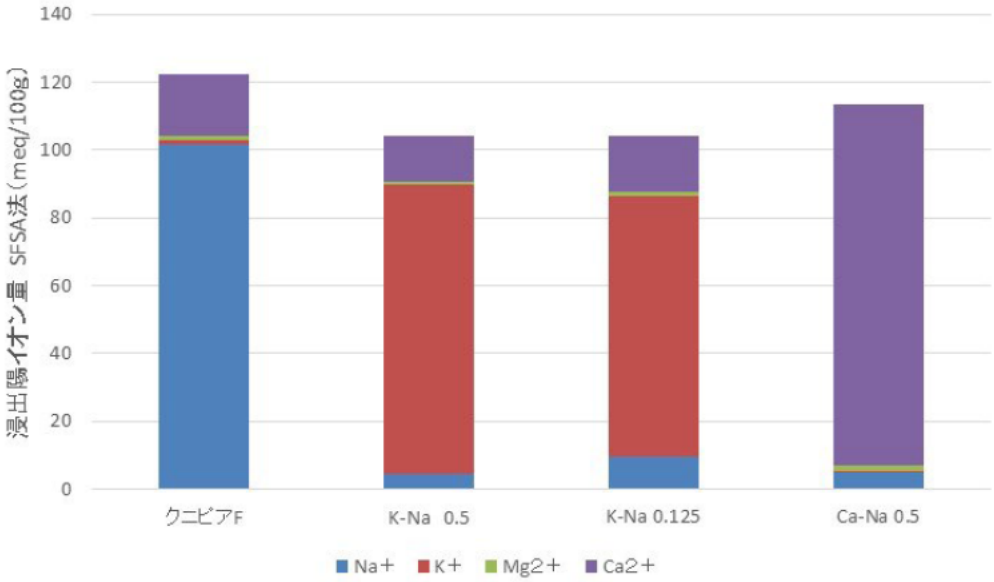


図 4-3- 9 層間陽イオン量の分析結果（バッチ試験試料）

表 4-3- 9　固相分析を基に算出した陽イオン交換選択係数

イオン種	K/Na		Ca/Na	
イオン強度	K_{GT}	$\log K_{GT}$	K_{GT}	$\log K_{GT}$
0.500	7.7	0.89	151.8	2.18
0.125	6.7	0.83	—	—

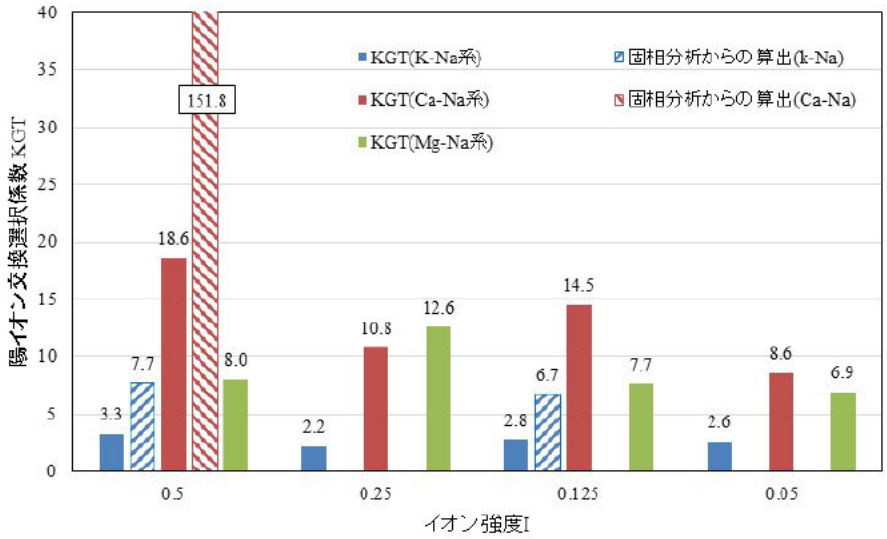


図 4-3- 10 各算出方法による陽イオン交換選択係数結果の比較

(iii) 圧縮系と分散系のイオン交換選択係数の比較

通水試験（圧縮系）とバッチ試験（粉末系）の両方のデータが揃っている K/Na のケースにおいて圧縮系と分散系のイオン交換選択係数を比較する。圧縮系及び分散系におけるイオン交換選択係数とイオン強度の関係を**図 4-3-11** に示す。1 価の陽イオン同士の Na^+、K^+の交換反応において、圧縮系でのイオン交換選択係数の方が分散系に対してやや高い傾向にある。ただし、イオン強度が 0.5 のケースでは、分散系のイオン交換選択係数のバラつきが、1.9～4.2 の範囲にあるため、圧縮系との比較は難しい。

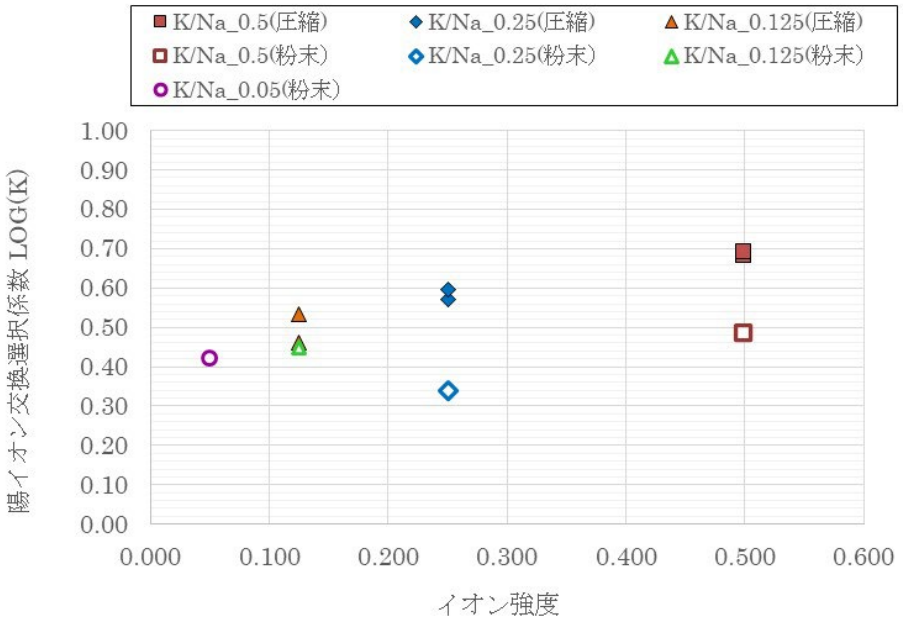


図 4-3- 11 圧縮系及び分散系におけるイオン交換選択係数とイオン強度の関係

(f) イオン交換選択係数の理論的な検討

(i) イオン交換選択係数と乾燥密度との関係

1) ポアソン-ボルツマン (Poisson-Boltzman; P-B) 方程式

ここでは、ポアソン-ボルツマン方程式により Ca-Na のイオン交換選択係数を導出し、乾燥密度と Ca/Na イオン交換選択係数の関係として整理した。イオン交換選択係数は、Hedström and Karnland(2011)に基づく方法で導出した。イオン交換選択係数の導出は、層間の全電荷を対象とした場合とモンモリロナイト表面から 6Åまでの電荷を対象とした場合のそれぞれで行った。得られた乾燥密度とイオン交換選択係数の関係を**図 4-3-12** に示す。この結果から、ポアソン-ボルツマン方程式により求めた Ca-Na 選択係数 $\log K_{GT}$ は、乾燥密度と正の相関があることがわかる。

また、層間の電位分布を**図 4-3-13** に、イオン濃度分布を**図 4-3-14** に示す。乾燥密度が大きい、すなわち、層間距離が小さいほど、**図 4-3-13** に示すとおり層間の電位の絶対量が低くなることが分かる。ボルツマン分布に従うと、層間における電位の絶対量が大きいほど 2 価の陽イオンの方が 1 価の陽イオンよりも層間に安定して存在しやすくなるため、Ca-Na のイオン交換選択係数が、乾燥密度と正の相関になると考えられる。ただし、モンモリロナイト粒子表面近傍では、乾燥密度（層間距離）による電位の差が小さく、濃度分布の差異も小さいため、表面から 6Å までの陽イオンより算出した Ca-Na イオン交換選択係数 $\log K_{GT}$ は、ほぼ横ばいとなっている。

2) 分子動力学法 (Molecular Dynamics; MD)

Akinwunmi et al. (2020)は、分子動力学シミュレーション（以下、「MD」とする。）を用いて導出した $CaCl_2$-NaCl 混合溶液中のモンモリロナイト層間の Ca^{2+}、Na^{+}イオンの電荷量の割合を導出している。ここでは、Akinwunmi et al. (2020)による上記のデータを基にイオン交換選択係数を導出し、乾燥密度とイオン交換選択係数の関係として整理した。イオン強度 0.1、0.3 及び 1.0 それぞれの乾燥密度とイオン交換選択係数の関係を**図 4-3-15** に示す。この MD に基づき算出したイオン交換選択係数には、いずれのイオン強度やモンモリロナイト層間外の組成においても、乾燥密度とイオン交換選択係数の関係に明瞭な傾向は見られない。

3) ポアソン-ボルツマン方程式と分子動力学法の比較

Akinwunmi et al. (2020)による MD の計算条件と同じ条件でポアソン-ボルツマン方程式によって導出した Ca-Na のイオン交換選択係数 $\log K_{GT}$ を、Akinwunmi et al. (2020)の MD より導出した Ca-Na のイオン交換選択係数 $\log K_{GT}$ と比較し、乾燥密度と Ca/Na のイオン交換選択係数の関係に整理した（**図 4-3-15**）。

先述の通り、ポアソン-ボルツマン方程式では乾燥密度と Ca/Na イオン交換選択係数 $\log K_{GT}$ に正の相関があることがわかる。一方、Akinwunmi et al. (2020)では乾燥密度とイオン交換選択係数の間に明瞭な相関はみられなかった。また、Akinwunmi et al. (2020)の Ca-Na

のイオン交換選択係数の値は、ポアソン-ボルツマン方程式の値より小さい結果となっている。これは、Akinwunmi et al. (2020)が実施した MD では、初期のモンモリロナイト層間内に存在する陽イオンを Na^+イオンのみと設定しており、イオン交換後は層間外の Na^+の割合が初期よりも大きくなる。しかし、Ca/Na のイオン交換選択係数を算出する際には、イオン交換による層間外の Na^+イオンの増分を考慮せず、層間外の活量を初期状態としている。そのため、ここで算出したイオン交換選択係数は、小さく見積もっている可能性がある。したがって、外液組成の変化を考慮した平衡溶液で計算する必要がある。また、この分子動力学法は、約 50ns の解析であり、イオン交換反応が平衡状態に至っていない可能性も考えられる。

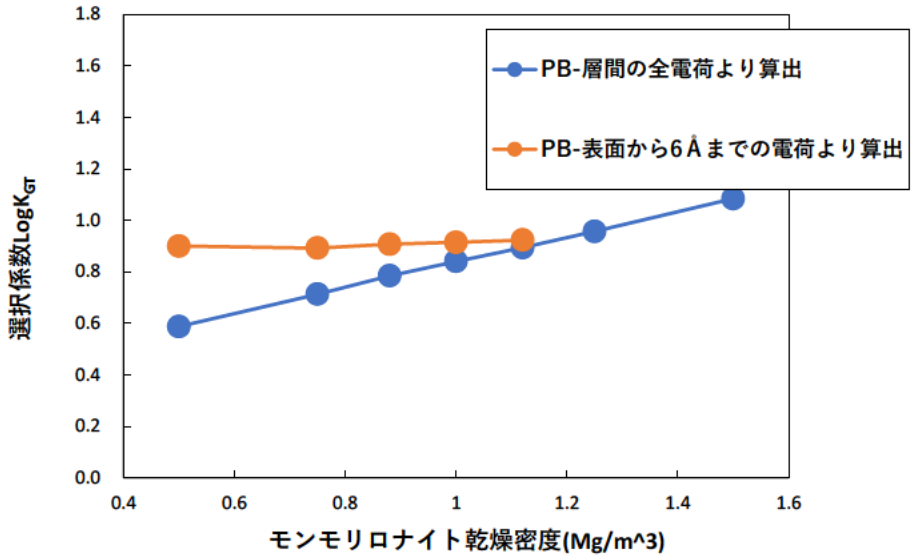


図 4-3- 12 乾燥密度と Ca/Na の選択係数 $logK_{GT}$ の関係（イオン強度 0.5 mol/L）

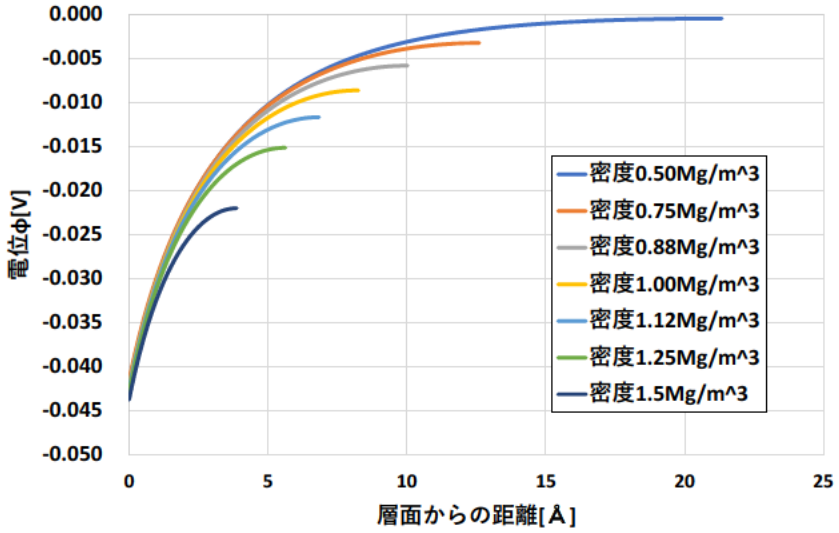
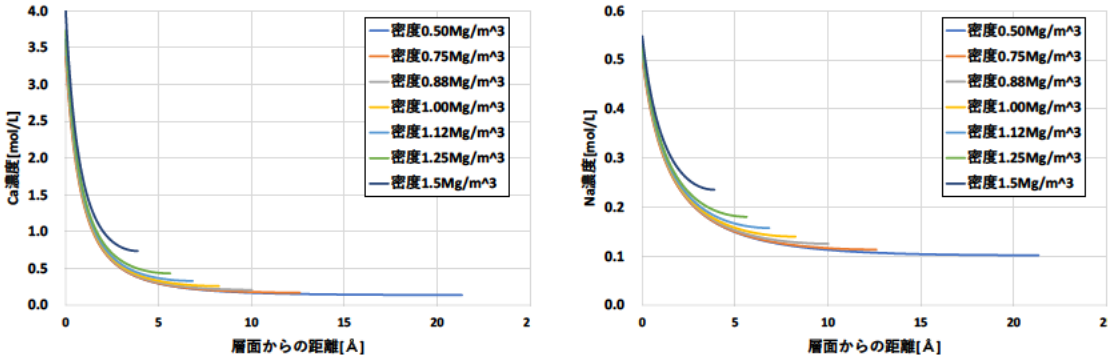
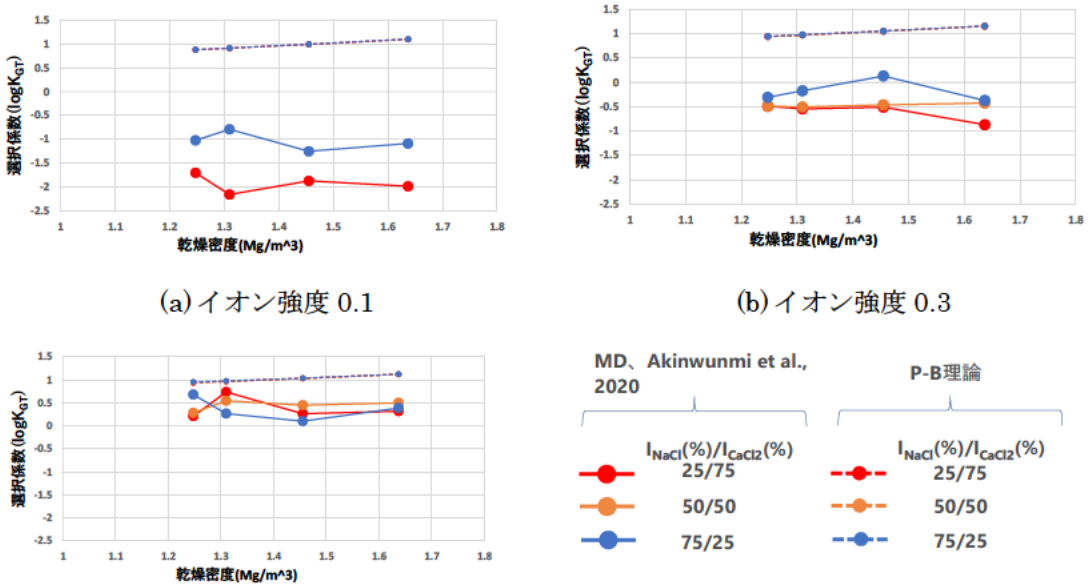


図 4-3- 13 乾燥密度による層間の電位分布の違い



(a)Ca イオン濃度　　(b)Na イオン濃度

図 4-3- 14　乾燥密度による層間陽イオンの濃度分布



(a) イオン強度 0.1　　(b) イオン強度 0.3

(c) イオン強度 1.0

図 4-3- 15　乾燥密度と Ca-Na イオン交換選択係数の関係（ポアソン-ボルツマン方程式と分子動力学法の比較）

(ii) イオン交換選択係数とイオン強度との関係

1) ポアソン-ボルツマン (Poisson-Boltzman; P-B) 方程式

ここでは、ポアソン-ボルツマン方程式により Ca-Na のイオン交換選択係数を導出し、イオン強度と Ca/Na イオン交換選択係数の関係として整理した。イオン交換選択係数は、Hedström and Karnland(2011)に基づく方法で導出した。イオン交換選択係数の導出は、層間の全電荷を対象とした場合とモンモリロナイト表面から 6Åまでの電荷を対象とした場合のそれぞれで実施した。乾燥密度が 1.00 Mg/m^3 のときのイオン強度とイオン交換選択係数の関係を**図 4-3-16** に示す。ポアソン-ボルツマン方程式により求めた Ca-Na のイオン交換選択係数 $\log K_{GT}$ は、イオン強度とわずかに正の相関があるが、ほぼ横ばいの結果となった。この傾向に関して、層間の電位分布や層間における陽イオン濃度分布を参照し、検討した。詳細は Appendix を参照されたい。

2) 分子動力学法 (Molecular Dynamics; MD)

ここでは、Akinwunmi et al. (2020)が、分子動力学シミュレーションを用いて導出した $CaCl_2$-NaCl 混合溶液中のモンモリロナイト層間の Ca^{2+}、Na^{+}イオンの電荷量の割合を用いてイオン交換選択係数を算出し、イオン強度とイオン交換選択係数の関係として整理した。イオン強度と Ca-Na イオン交換選択係数の関係を**図 4-3-17** に示す。

いずれの乾燥密度や溶液組成に対しても、イオン強度とのイオン交換選択係数に正の相関が見られた。また、ポアソン-ボルツマン方程式を基に算出したイオン交換選択係数よりも MD により算出した値の方が、各イオン強度において低く、その差はイオン強度が低いほど大きい。ただし、先述の通り、Akinwunmi et al. (2020)が実施した分子動力学法では、初期のモンモリロナイト層間内に存在する陽イオンを Na^{+}イオンのみと設定しており、イオン交換に伴い層間外の Na^{+}イオンの割合は大きくなるが、この影響は、イオン交換選択係数の算出の際には考慮されていない。そのため、分子動力学法に基づいて得られた、イオン交換選択係数とイオン強度の間に見られる正の相関には、上記のような影響が含まれている可能性がある。イオン交換に伴う層間外の陽イオン組成の変化を考慮したうえでイオン交換選択係数のイオン強度依存性について評価する必要がある。

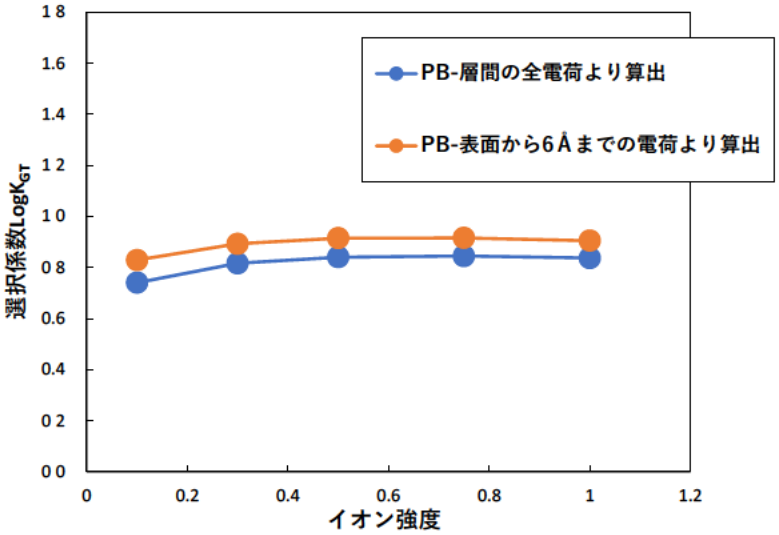
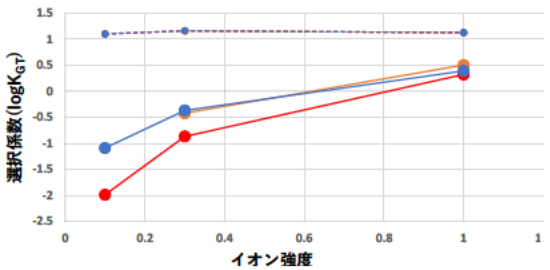
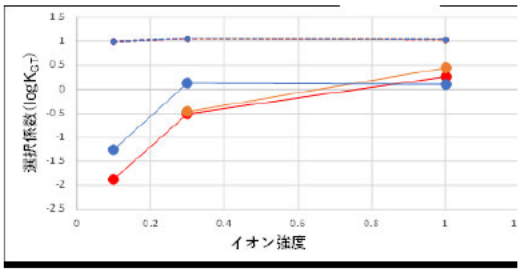


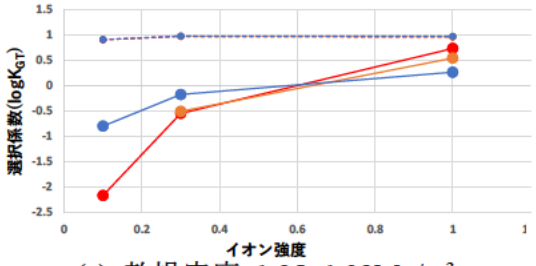
図 4-3- 16 イオン強度と Ca/Na の選択係数 $logK_{GT}$ の関係
（乾燥密度 1.00Mg/m^3,モル濃度比 Ca:Na:Cl = 4:3:11）



(a) 乾燥密度 1.54~1.75Mg/m^3



(b) 乾燥密度 1.38~1.54Mg/m^3



(c) 乾燥密度 1.25~1.38Mg/m^3

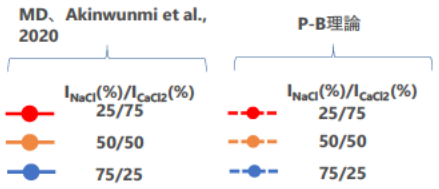


図 4-3- 17 イオン強度と Ca-Na 選択係数 log K_{GT} の関係（ポアソン-ボルツマン方程式と分子動力学法の比較）

(iii) 通水試験結果から得られたイオン交換選択係数との比較

Hedström and Karnland(2011)におけるポアソン-ボルツマン方程式を用いたイオン交換選択係数の導出方法に基づき、通水試験と同一の条件で Ca/Na のイオン交換選択係数を算出し、通水試験の結果から得られた Ca/Na イオン交換選択係数と比較した。通水試験における Ca/Na 選択係数を比較した結果を表 4-3- 10 に示す。通水試験結果から求めた Ca/Na イオン交換選択係数 $\log K_{GT}$ は、ポアソン-ボルツマン方程式から求めた値より約 0.7 大きい。この差の理由として、ポアソン-ボルツマン方程式では、イオンを点電荷と仮定したことが考えられる。四辻ほか(2012)は、陽イオンと陰イオンの電解質濃度の比率が 1:1 の溶液（例えば、NaCl 溶液）について、イオンサイズ効果（排除体積効果）を考慮した拡張ポアソン-ボルツマン方程式を用いてモンモリロナイト層間の電位分布を求めた。その結果、イオンサイズ効果を考慮することで層間内の電位分布が低下することが分かった。もし、$CaCl_2$-NaCl 混合溶液でも、イオンサイズ効果によって上記の結果と同様に電位分布が低下する場合、1 価の陽イオン Na^+よりも 2 価の陽イオン Ca^{2+}の方が層間に存在しやすくなり、Ca/Na の選択係数が大きくなり、通水試験の結果とより整合する結果が得られると予想される。

乾燥密度及、イオン強度とイオン交換選択係数の関係について、ポアソン-ボルツマン方程式および分子動力学法（Akinwunmi et al., 2020）の計算結果から整理した。

乾燥密度とイオン交換選択係数との関係については、現時点では、乾燥密度をパラメータとした通水試験結果が十分に得られていないため、理論より導出した結果と通水試験より得られた結果を比較することは難しい。今後、取得予定の通水試験結果から得られるイオン交換選択係数と乾燥密度の関係について、ここでの検討結果を踏まえて解釈する必要がある。

イオン強度とイオン交換選択係数の関係については、ポアソン-ボルツマン方程式と MD のいずれも Ca/Na イオン交換選択係数でイオン強度との間に正の相関が見られた。特に MD においてその傾向が顕著であった。ポアソン-ボルツマン方程式では、わずかに正の相関が見られたが、その傾向は明瞭ではなかった。ところで、圧縮系の通水試験から得られた K/Na のイオン交換選択係数においても、イオン強度とイオン交換選択係数の間に正の相関が見られた。本検討のポアソン-ボルツマン方程式では、イオンは点電荷として表現されているため、イオンの価数の違いが結果に大きく影響する。一方で MD では、イオンの価数に加えてイオン半径もモデル化されている。そのため、通水試験結果より得られた K/Na のイオン交換選択係数とイオン強度との正の相関は、ポアソン-ボルツマン理論で主として考慮されている価数の違いよりも、MD で考慮されているイオン半径の影響が大きいものと推察される。今後は、水和半径等を考慮した拡張版のポアソン-ボルツマン方程式での検討や、通水試験より Ca/Na イオン交換選択係数を拡充し検討する必要がある。

表 4-3- 10　ポアソン-ボルツマン方程式から求めた Ca/Na 選択係数と通水試験結果における Ca/Na 選択係数の比較

算出方法		選択係数 $\log K_{GT}$	備考
Hedström and Karnland(2011)	層間の全陽イオンより算出	0.84	モンモリロナイト乾燥密度 ρ_d=1.00Mg/m³、通水溶液はイオン強度 0.5 の $CaCl_2$-NaCl 混合溶液（Ca:Na:Cl のモル濃度比は、4:3:11）
	表面から 6Å までの陽イオンより算出	0.92	
通水試験結果（ケース④）		1.58	

(g) 令和５年度のとりまとめに向けた課題

令和４年度は、イオン強度を揃えた条件で、圧縮系および分散系におけるイオン交換選択係数を取得し、これらを比較した。バッチ試験では、溶液の分析誤差がイオン交換選択係数の算出過程で強調されるため、イオン交換選択係数の誤差が大きくなる。この傾向は特に高イオン強度の条件で顕著であった。そのため、高イオン強度の条件での分散系と圧縮系のイオン交換選択係数の比較は難しかった。誤差が比較的に小さい低イオン強度の条件では、K-Naのイオン交換選択係数は分散系のほうが圧縮系よりも小さい傾向が見られた。分散系の試験における低イオン強度の条件では、イオン交換反応の過程で外溶液の組成が変化するが、圧縮系の通水試験では、常に新鮮な溶液が給水されているため、溶液の組成は変化しないと考えられる。これを踏まえると、分散系と圧縮系でイオン交換選択係数を比較する際には、溶液の組成の変化がイオン交換選択係数に及ぼす影響を考慮することで、より正確な比較が可能になると考えられる。

異なるイオン強度の３水準（イオン強度 0.125、0.25、0.5）について K-Na のイオン交換選択係数を取得し、K-Na のイオン交換選択係数のイオン強度依存性について把握した。その結果、イオン強度が増加すると K-Na のイオン交換選択係数も増加する傾向が見られた。乾燥密度による依存性については継続して試験を実施し、傾向を把握する必要がある。これらのイオン交換選択係数のイオン強度や乾燥密度による依存性は理論的な検討を進めて、定性的に把握する必要がある。令和４年度は、試行的に、古典的な電気二重層理論であるポアソン・ボルツマン方程式を中心に、検討を進めた。現状のポアソン-ボルツマン方程式による検討では、イオン交換選択係数がイオン強度に対して大きくなるような明瞭な傾向は見られなかった。ただし、本検討でのポアソン・ボルツマン方程式では水和半径などが考慮されていないため、今後、このような条件を加味した拡張版のポアソン・ボルツマン方程式による検討などを進める必要がある。

③　イオン交換反応評価のための解析方法の整備

(a) 令和 4 年度の実施内容

令和 3 年度までは、イオン交換選択係数に既往の分散系の値（小田・柴田, 1999）を設定して通水試験の再現解析を実施した。令和 4 年度は、は、K-Na のイオン交換選択係数と Ca-Na のイオン交換選択係数を圧縮系の通水試験で取得されたイオン交換選択係数に変更して、改めて、令和 3 年度と同様の試験ケース（KCl 溶液、イオン強度 0.5、有効モンモリロナイト密度 1.00 Mg/m^3）の再現解析を実施する。その結果から、圧縮系と分散系のイオン交換選択係数の違いにより、再現性がどのように変化するかを把握する。

再現解析の対象となる試験系を単成分系から複数の陽イオン種が混在する試験系へと変更し、陽イオンの成分が増えてもこれまでに検討してきた解析手法が適用可能か否かを確認する。また、複数の陽イオンおよび陰イオンを含む沿岸部実地下水の通水試験の再現解析を実施し、複雑な多成分系において解析手法の適用性を確認する。また、これらの再現解析の結果から、解析手法の課題を抽出し、課題の解決に向けた解析手法の高度化を図る。

(b) 検討の流れ

塩水系の地下水が圧縮ベントナイトに浸潤する際のイオン交換反応を予測する解析の方法を整備するために、令和 4 年度は、以下の（ア）－（ウ）の内容を実施した。検討の流れを**図 4-3-18** に示す。

（ア）圧縮ベントナイト中の飽和に至るまでの浸潤やイオン交換反応の進行のプロセスを表現するための飽和・不飽和浸透流、溶質の移流・分散、地球化学反応の連成解析ツールを用いて、「②イオン交換選択係数の取得」の通水試験及び、クニゲル V1+珪砂混合土（質量比で 7 : 3）に人工海水を通水した透水-膨潤圧試験（産業技術総合研究所ほか, 2021）を対象に再現解析を実施する。なお、再現解析は、圧縮系の通水試験から得られたイオン交換選択係数を用いる。ただし、Mg-Na のイオン交換選択係数については未取得のため、既往の分散系の試験で取得された値（小田・柴田, 1999）を設定する。また、透水-膨潤圧試験の再現解析については、いずれの陽イオン種に対するイオン交換選択係数についても、小田・柴田(1999)の値を設定する。前掲の表 4-3- 2 の「②イオン交換選択係数の取得」の通水試験のうち、再現解析の対象とするケースを表 4-3-11 に示す。

ケース①、②は令和 3 年度に再現解析を実施したケースである（原子力環境整備促進・資金管理センター, 2022）。令和 3 年度は、各陽イオンの Na に対するイオン交換選択係数に既往の分散系で取得された値（小田・柴田, 1999）を設定したが、令和 4 年度は、圧縮系の通水試験で取得されたイオン交換選択係数を設定して再度解析を実施する。その結果を令和 3 年度に実施した解析結果と比較し、イオン交換選択係数を変えたことによる再現性の差異について確認する。

ケース④、⑧については、沿岸部地下水データに基づき設定した複数の陽イオン種が含まれるケースである。このケースの再現解析により、沿岸部を想定したより複雑な溶液系への解析手法の適用性を確認する。

ケース⑫および透水膨潤圧試験については、実地下水及び人工海水を通水したケースであり、透水膨潤圧試験はクニゲルV1+珪砂混合土を対象としている。このような、溶液および供試体を沿岸部の地層処分で想定されるより現実的な環境条件に対して解析手法の適用性を確認する。

（イ）試験で得られた結果と（ア）の解析結果を比較・検討し、圧縮ベントナイトの高イオン強度の溶液中でのイオン交換反応を対象とした予測解析方法としての課題の有無を検討する。

（ウ）（イ）で抽出された課題について、感度解析などによって解析結果への影響の大小を整理する。その影響度を踏まえ、その課題の考慮の必要性、解析方法の改善方法を検討する。

表 4-3- 11 再現解析の対象とするケース

ケース	通水溶液	有効モンモリロナイト乾燥密度 (Mg/m^3)	イオン強度	解析を実施するケース
①	KCl溶液	0.88	0.50	○
②		1.27	0.50	○
③	KCl-NaCl混合溶液	0.88	0.50	
④		1.00	0.50	○
⑤			0.25	
⑥			0.125	
⑦		1.27	0.50	
⑧	$CaCl_2$-NaCl混合溶液	1.00	0.50	○
⑨			0.25	
⑩	$MgCl_2$-NaCl混合溶液	1.00	0.50	
⑪			0.25	
⑫	沿岸部実地下水 (FGB-2孔_ 167.70~171.78m)	1.00	0.28	○

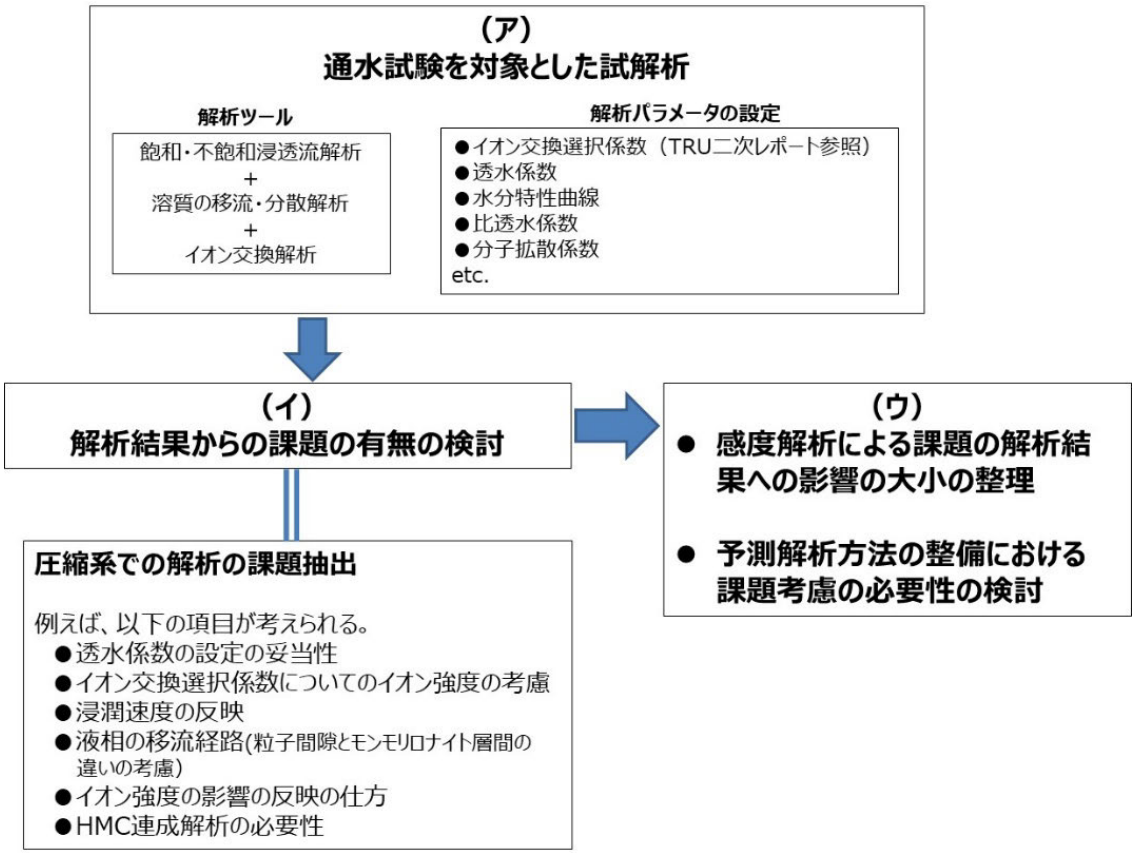


図 4-3- 18　検討の流れ

(c) 通水試験の再現解析

(i) 解析ツール

解析ツールは、令和 2 年度に検討した HP1 を用いた（産業技術総合研究所ほか, 2021）。HP1 は、一次元の飽和・不飽和浸透流、移流分散解析連成コードである HYDRUS-1D（Šimůnek et al., 2013）に地球化学解析コードである PHREEQC（Parkhurst and Appelo, 1999）の機能を追加し、これらの連成解析を可能とした解析ツールである。

(ii) 解析条件

解析モデルは、通水試験の供試体が円柱形であり、浸潤及び通水方向が中心軸方向上向き、かつ円周側面が非排水構造であることから、モデルは鉛直一次元とした。また、解析領域は、供試体高さである 5 mm とし、これを 50 等分した 0.1mm 間隔のメッシュを設定した。

境界条件は、通水試験と同様に供試体下端から通水し、上端から排水するように下端を一定圧力・濃度境界条件とし、上端を浸出面境界（濃度勾配は 0）とした。また、下向きの重力 9.8m/s2 を設定した。通水時の給水口と排水口の圧力差は、試験条件を踏まえて設定した。

飽和・不飽和浸透流の解析用パラメータは、（飽和）透水係数、水分特性曲線、比透水係数などである。通水試験の再現解析に関するこれらのパラメータの設定値を表 4-3-12 及び表 4-3-13 に示し、解析に使用した水分特性曲線と比透水係数のグラフを**図 4-3-19** に示す。水分特性曲線については、クニピア F 100%試料のデータ（鈴木・藤田, 1999）を通水試験で設定した 3 通りの乾燥密度（0.88 Mg/m^3、1.00 Mg/m^3、1.27 Mg/m^3）について、体積含水率とサクションのデータに換算し、van Genuchten モデルでフィッティングした。

溶質の移流・分散解析用のパラメータは、分子拡散係数、分散長及び屈曲度である。これらのパラメータの設定値を表 4-3-14 に示す。分子拡散係数は HTO の自由水中の拡散係数を用いた。圧縮ベントナイト系材料についての HTO（トリチウム）の実効拡散係数D_e^{HTO}の経験式として、電気事業連合・核燃料サイクル開発機構(2005)には次式が挙げられている。

$$D_e^{HTO} = \varepsilon\left(\varepsilon^{2.22} f_s^{0.13}\right) D^*$$

ここで、εは空隙率、f_sはスメクタイト含有率、D^*は HTO の自由水中の拡散係数である。上式で、括弧内の$\varepsilon^{2.22} f_s^{0.13}$が屈曲度係数に相当する。また、屈曲度係数は飽和度によっても変化しうる。HYDRUS-1D では、飽和度により変化する屈曲度係数として、Moldrup et al.（1997）の式（$\tau = 0.66(\theta/\theta_s)^{\frac{8}{3}}$）が利用できる（$\theta_s$は、飽和時の体積含水率）。同式は、ベントナイトを志向したものではないが、幅広い土性に適合するとされている。そこで、本解析ではこの両者を組み合わせた式を設定することとした。

$$\tau_w = 0.66(\theta/\theta_s)^{\frac{8}{3}}$$

イオン交換反応を平衡論でモデル化する場合に必要な情報は、イオン交換選択係数、交換サイトの初期イオン組成、及び間隙水のイオン濃度である。これらのパラメータの設定値を表 4-3-15 及び表 4-3-16 に示す。イオン交換選択係数は、前述（３）の通水試験で取得したイオン交換選択係数（表 4-3-9）を用いた。ただし、Mg の Na に対するイオン交換選択係数は、既往の分散系試験で取得された値（小田・柴田, 1999）を用いた。交換サイトの初期イオン組成(表 4-3-16)は、試験に用いたクニピア F の分析結果を用いた。なお、モンモリロナイトの CEC は、表 4-3-16 に示すイオン交換サイトの当量の合計値とした。間隙水の初期化学組成は、イオン交換サイトと間隙水との間の平衡計算を、表 4-3-15 に示すイオン交換選択係数を与えて実施し、イオン交換サイトの組成の計算結果が表 4-3-16 に示した初期組成と同じになるように調整した。上記の平衡計算の詳細については、Appendix に示す。

表 4-3- 12　飽和・不飽和浸透流解析用パラメータ（1/2）

パラメータ	設定値					根拠・出典
ケース番号	①	②	④	⑧	⑫	―
通水溶液	KCl aq		KCl-NaCl 混合 aq	$CaCl_2$-NaCl 混合 aq	沿岸部実地下水 (FGB-2 孔_ 161.70m～ 171.78m)	通水試験での設定
乾燥密度 ρ_d	0.88 Mg/m^3	1.27 Mg/m^3	1.00 Mg/m^3			通水試験での設定
イオン強度 I	0.50	0.50	0.50	0.50	0.28	通水試験での設定
透水係数 K_s (m/s)	1×10^{-10}	6×10^{-13}	3×10^{-11}	3×10^{-12}	9×10^{-13}	通水試験における透水係数の概略値(詳細は及び)
間隙率 ε	0.674	0.530	0.630			土粒子密度ρ_s（2.7 Mg /m^3）と乾燥密度ρ_dより算出 $\varepsilon = 1-\rho_d/\rho_s$
水分特性曲線 $\psi(S_e)$	$\psi = \frac{1}{\alpha}\left(S_e^{\frac{n}{1-n}}-1\right)^{\frac{1}{n}}$ ここに、$S_e = \frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}$：有効飽和度, θ：体積含水率, θ_s ：飽和体積含水率, θ_r：残余体積含水率, α, n：モデルパラメータ					鈴木・藤田(1999)に掲載のグラフからの読み取り値に基づく換算データを van Genuchten モデル（van Genuchten, 1980）の関数で近似したもの
	α =8.524×10^{-3} mH$_2$O^{-1}, n =1.454, $\theta_s = \varepsilon$ =0.674, θ_r= 0	α = 1.227×10^{-3} mH$_2$O^{-1}, n =1.592, $\theta_s = \varepsilon$ =0.530, θ_r= 0	α = 5.035×10^{-3} mH$_2$O^{-1}, n =1.468, $\theta_s = \varepsilon$ =0.630, θ_r= 0			

表 4-3- 13　飽和・不飽和浸透流解析用パラメータ（2/2）

パラメータ	設定値					根拠・出典
ケース番号	①	②	④	⑧	⑫	－
通水溶液	KCl aq		KCl-NaCl 混合 aq	$CaCl_2$-NaCl 混合 aq	沿岸部実地下水（FGB-2 孔_ 161.70～171.78m）	通水試験での設定
乾燥密度 ρ_d	0.88 Mg/m³	1.27 Mg/m³	1.00 Mg/m³			通水試験での設定
イオン強度 I	0.50	0.50	0.50	0.50	0.28	通水試験での設定
比透水係数 $k_r(S_e)$	$k_r = S_e^{0.5}\left\{1-\left(1-S_e^{\frac{n}{n-1}}\right)^{1-\frac{1}{n}}\right\}^2$					仮想的な値であり、水分特性曲線と同じパラメータ（n, θ_s, θ_r）を用いた Mualem-van Genuchen モデル(Mualem, 1976)により表したもの
	n =1.454, $\theta_s = \varepsilon$ =0.674, θ_r= 0	n =1.592, $\theta_s = \varepsilon$ =0.530, θ_r= 0	n =1.468, $\theta_s = \varepsilon$ =0.630, θ_r= 0			

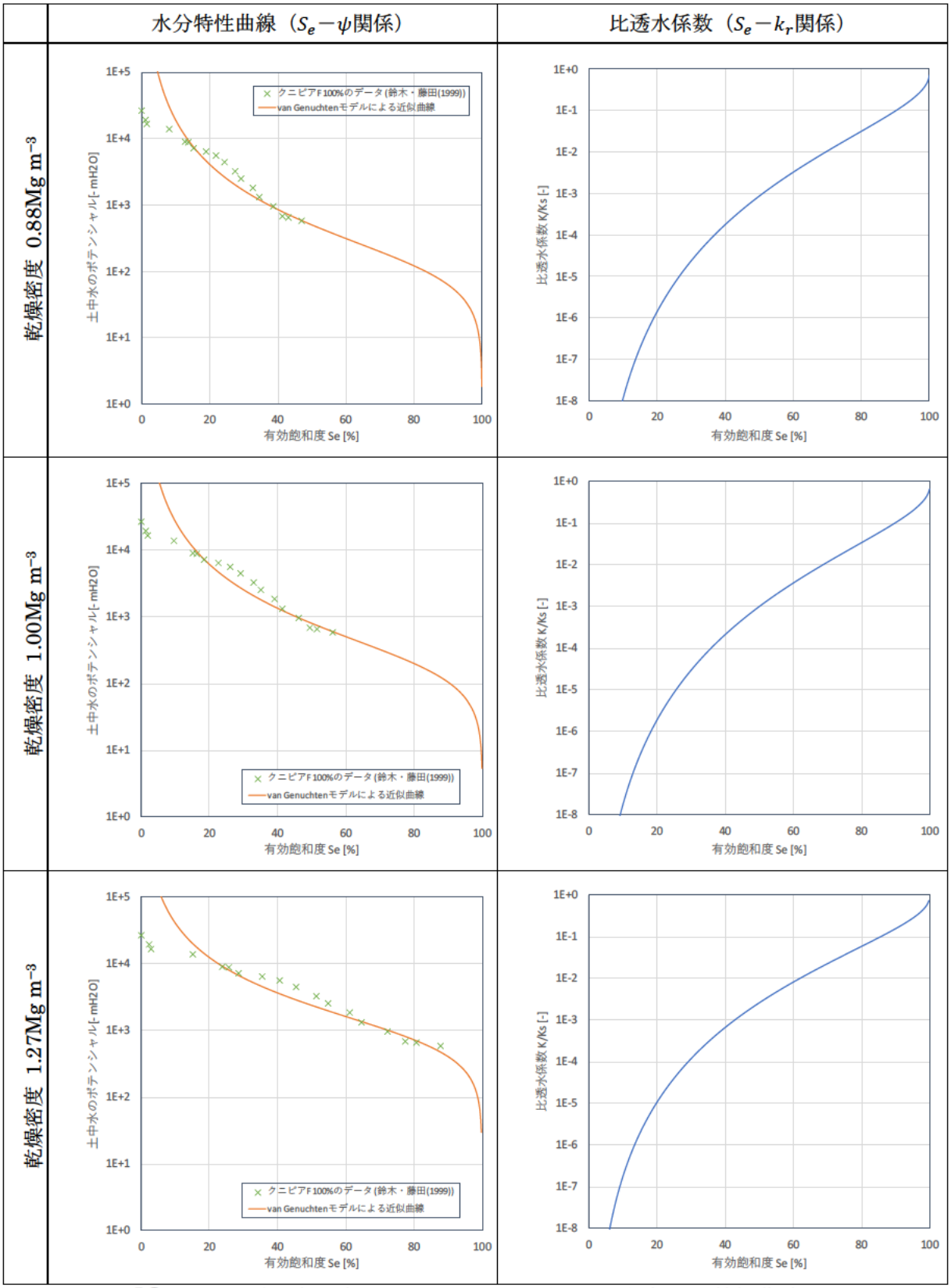


図 4-3- 19　「②イオン交換選択係数の取得」の通水試験の再現解析水分特性曲線と比透水係数

表 4-3- 14　「②イオン交換選択係数の取得」の通水試験の再現解析移流分散用解析パラメータ

パラメータ	設定値	根拠・出典
ケース番号	①,②,④,⑧,⑫	―
分散長 α (m)	1.0×10^{-4}	一般に、移行距離の 1/10～1/100 程度とされていることから、カラム長 (5 mm)の 1/50 とした。
分子拡散係数 D_{w0} ($m^2\ s^{-1}$)	2.23×10^{-9}	HTO（トリチウム水）の自由水中の拡散係数
屈曲度係数 τ_w	$\tau_w=\left(\varepsilon^{2.22}f_s^{0.13}\right)(\theta/\theta_s)^{8/3}$ ここに、ε ：間隙率、f_s：スメクタイト含有率、θ ：体積含水率、θ_s：飽和体積含水率	Mihara and Sasaki (2005) の式 Moldrup et al. (1997) の式

表 4-3- 15　「②イオン交換選択係数の取得」の通水試験の再現解析に用いたイオン交換選択係数

イオン交換反応式 （半反応式）	選択係数 ($\log K_{GT}$)	根拠
$Z^- + Na^+ = ZNa$	0	基準値
$Z^- + K^+ = ZK$	0.69	前掲の通水試験③より取得された値
$2Z^- + Ca^{2+} = Z_2Ca$	1.58	前掲の通水試験④より取得された値
$2Z^- + Mg^{2+} = Z_2Mg$	0.67	小田・柴田(1999)

表 4-3- 16　再現解析に用いた初期状態におけるイオン交換サイトの組成表

イオン交換体の 初期組成	当量 (meq/100g-soil)	根拠
ZNa	101.8	・通水試験前のクニピア F について、SFSA 改良法により測定した値。 ・CEC は左記の合計 122.2meq/100g-soil としている。（産業技術総合研究所ほか, 2021）
ZK	1.3	
Z_2Ca	18.2	
Z_2Mg	0.9	

(iii) 解析結果

解析によって得られたケース①、②の排水液中のイオン濃度変化を試験結果と比較する形で**図 4-3-20** に示す。層間陽イオンの当量分率についても試験結果と比較する形で**図 4-3-20** に示す。ケース①、②のいずれも令和３年度に取得した解析結果と合わせて示す。

排水液中のイオン濃度の経時変化については、ケース①及び②のいずれにおいても解析により得られた排水液の Na^+、K^+及び Mg^{2+}イオンの濃度変化は、試験結果を良好に再現していたが、Ca^{2+}イオンの濃度は、試験結果より溶出のピークが遅れる傾向が見られた。また、分散系のイオン交換選択係数を用いた令和 3 年度の解析結果と比較して、いずれのイオン濃度についても再現性が向上していた。

層間陽イオン量の当量分率について、**図 4-3-21** に示す初期のグラフはクニピア F の分析値であり、解析での初期条件に等しい。試験(1), (2)は本ケースに当たる 2 つの通水試験後の固相の分析値である。また、解析結果は解析領域（カラム全体）の平均値である。ケース①、②のいずれについても、試験では、Ca イオン及び Na、Mg イオンが吸着されて固相に残る結果となっていたが、解析では Ca イオンは少量だが残り、Na、Mg イオンは K イオンに交換される結果となった。ケース①と②では、ケース②のほうが、残存する Ca イオンが多い結果となっている。分散系のイオン交換選択係数を設定した令和 3 年度の解析結果と比較すると、令和４年度の解析結果は Ca イオンの吸着割合が増加している。依然として Ca イオンの吸着割合は試験結果より小さいものの、全体的に試験結果により近づく結果が得られた。つまり、圧縮系のイオン交換選択係数を設定することで層間陽イオン量の再現性が向上した。先述の通り Ca-Na イオン交換選択係数は、イオン強度の条件に違いはあるものの、本解析で設定した圧縮系の値のほうが、既往の分散系の値（小田・柴田, 1999）のおよそ 8 倍程度と大きい。また、（３）②(e)で述べた通り、イオン強度を揃えた条件で実施した、圧縮系の通水試験と分散系のバッチ試験から得られた K-Na のイオン交換選択係数の比較では、分散系の値が圧縮系よりも低い傾向を示した。以上のことを踏まえると、圧縮系のイオン交換選択係数は分散系よりも大きい値である可能性が示唆された。

ケース④の再現解析の排水液中のイオン濃度変化（**図 4-3-22**）については、Na, K 及び Mg イオンの濃度変化は、試験結果を良好に再現した。Ca イオン濃度変化は試験結果より溶出のピークが遅れてはいるものの、最終的にはほぼ同じ値に落ち着いている。層間陽イオン量の当量分率（**図 4-3-22**）については、通水試験では Ca イオン及び K, Na イオンが吸着されて残る結果であったのに対し、解析では Na イオンは残るが、Ca イオンはほとんど K イオンにより交換される結果となった。Na イオンの吸着量は試験結果をよく再現しているが、Ca イオンの吸着量は試験結果より顕著に少ない。

ケース⑧の再現解析の排水液中のイオン濃度変化（**図 4-3-23**）については、Na, Ca 及び Mg イオンの濃度変化は、試験結果を良好に再現した。K イオンの濃度変化は、試験結果よりもやや低い値ではあるが、変化の傾向は試験結果と整合的である。層間陽イオン量の当量分率（**図 4-3-23**）については、Na および Ca イオンが吸着し、その吸着割合は試験結果をよく

再現している。ただし、K および Mg イオンは、試験結果ではわずかに吸着しているが、解析では吸着量はほぼ 0 である。

ケース⑫の再現解析の排水液中のイオン濃度変化（**図 4-3-24**）については、Na イオンの濃度変化は、試験結果を良好に再現した。Mg, Ca イオン濃度変化は、Mg イオンの流出量は試験より多く、Ca イオンの流出量は試験より少ない値ではあるが、変化の傾向は試験結果と整合的である層間陽イオンの当量分率（**図 4-3-24**）については、解析では通水試験同様 Ca, Mg, Na イオンが吸着される結果となった。各陽イオンの当量分率の大小関係は、試験結果と整合しており、Na イオンの吸着割合は試験結果を良く再現している。Ca, Mg イオンの吸着割合は、試験と解析で差があり、解析の方が Ca イオンをより吸着している。

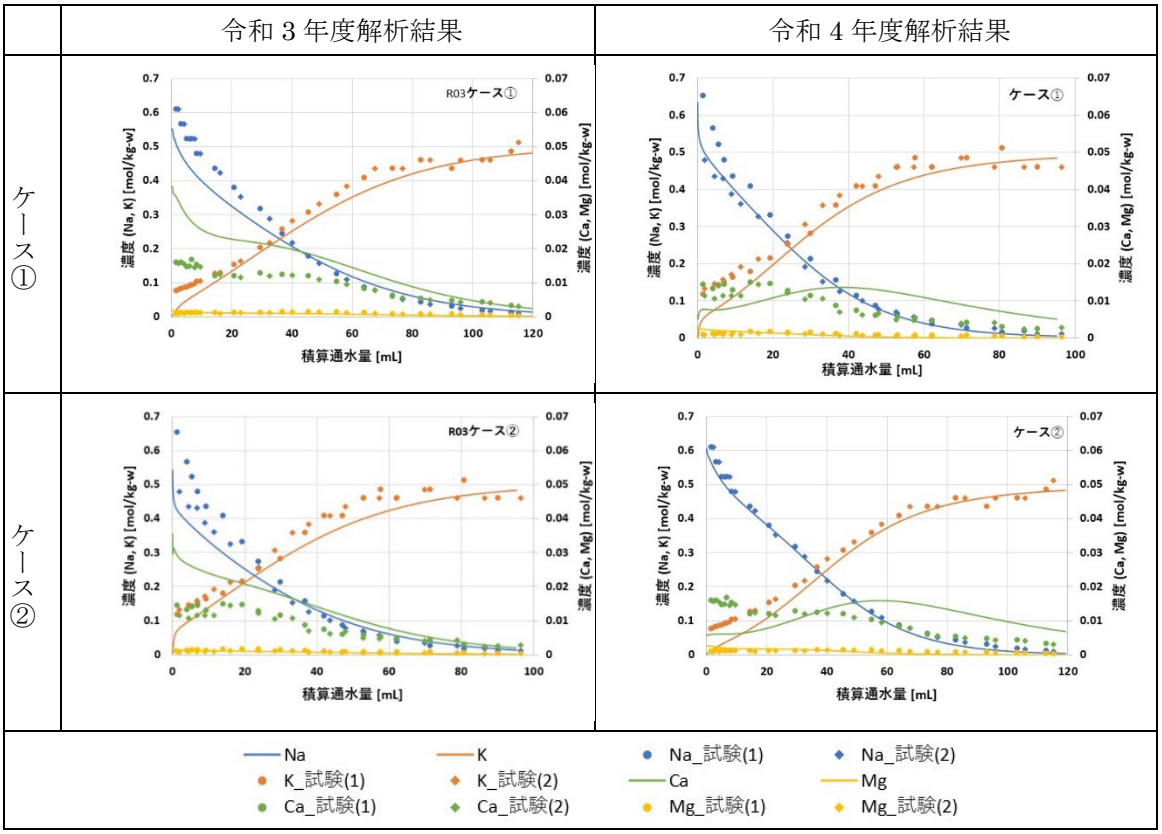


図 4-3- 20 排水中のイオン濃度の経時変化

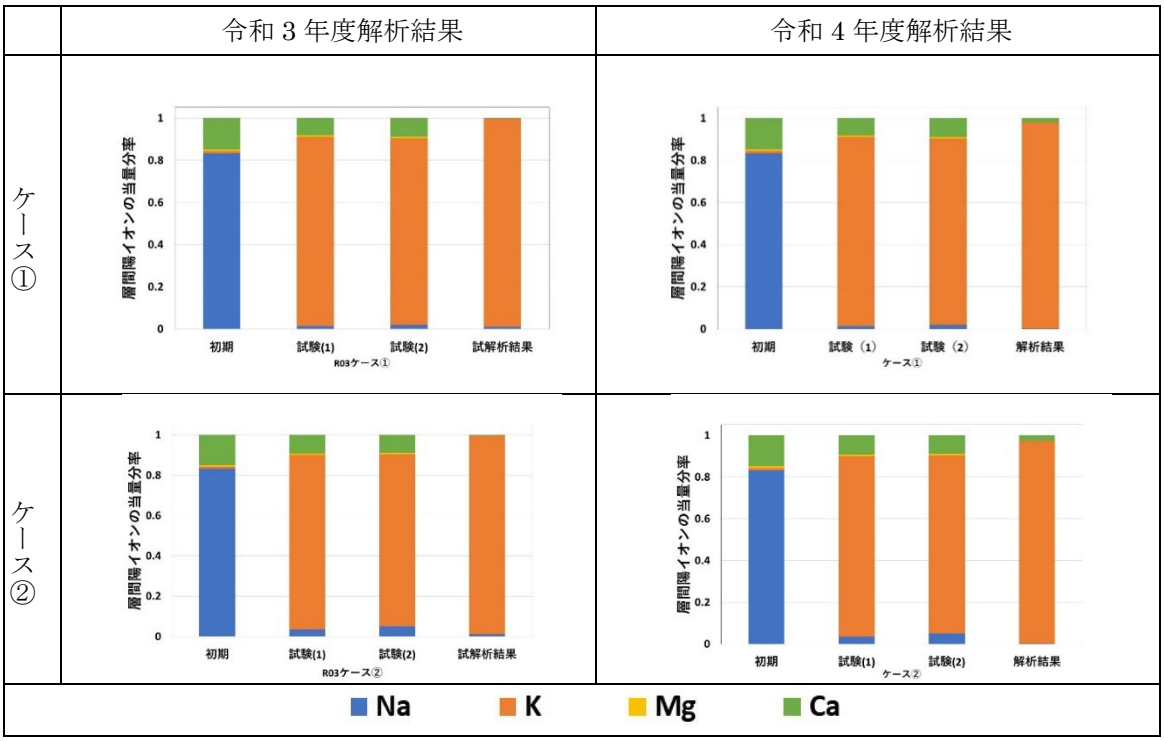


図 4-3- 21 層間陽イオンの当量分率

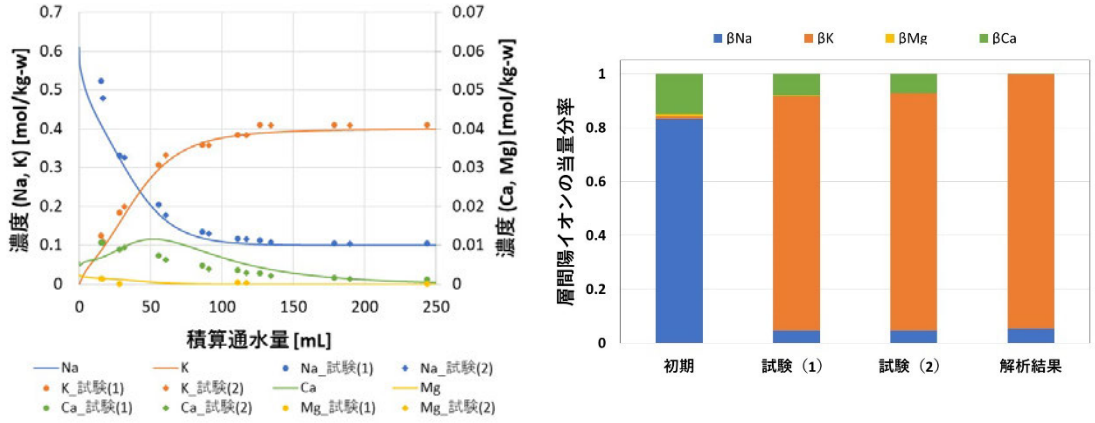


図 4-3- 22　排水中イオン濃度の経時変化及び層間陽イオンの当量分率（ケース④）

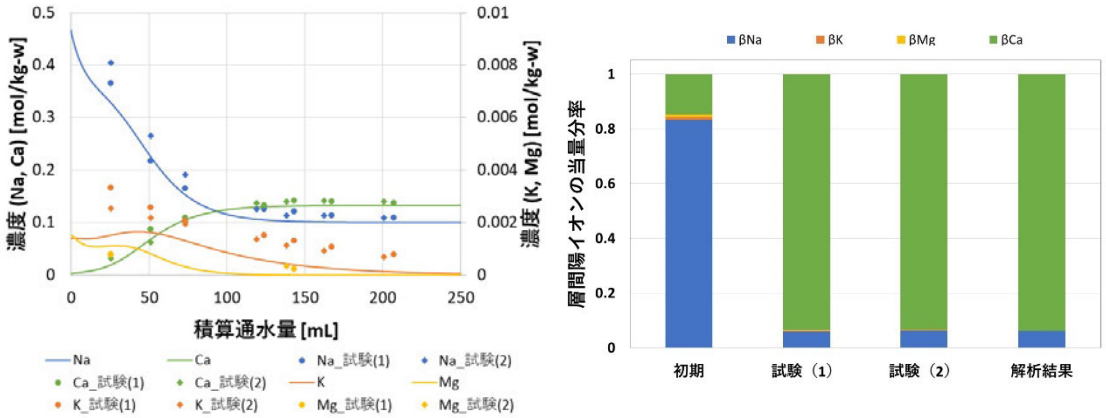


図 4-3- 23 排水中イオン濃度の経時変化及び層間陽イオンの当量分率（ケース⑧）

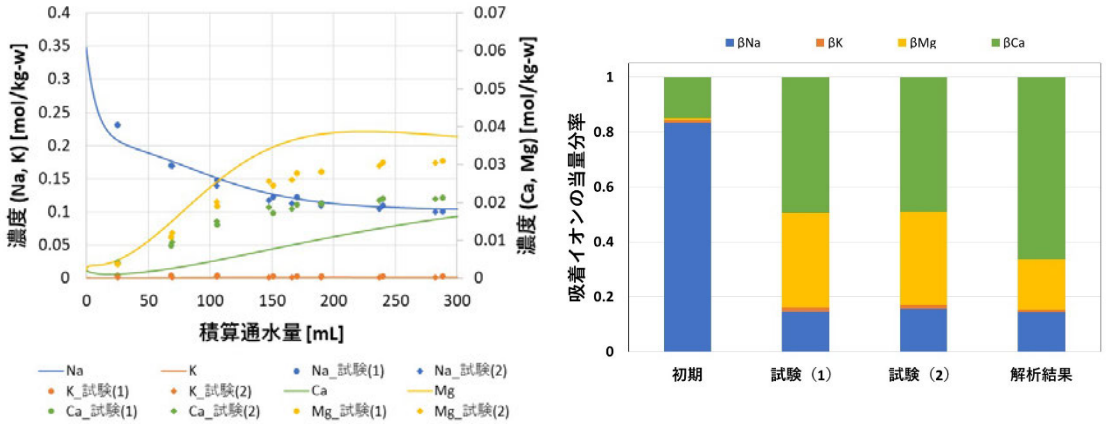


図 4-3- 24　排水中イオン濃度の経時変化及び層間陽イオンの当量分率（ケース⑫）

(iv) 解析結果を踏まえた課題の整理

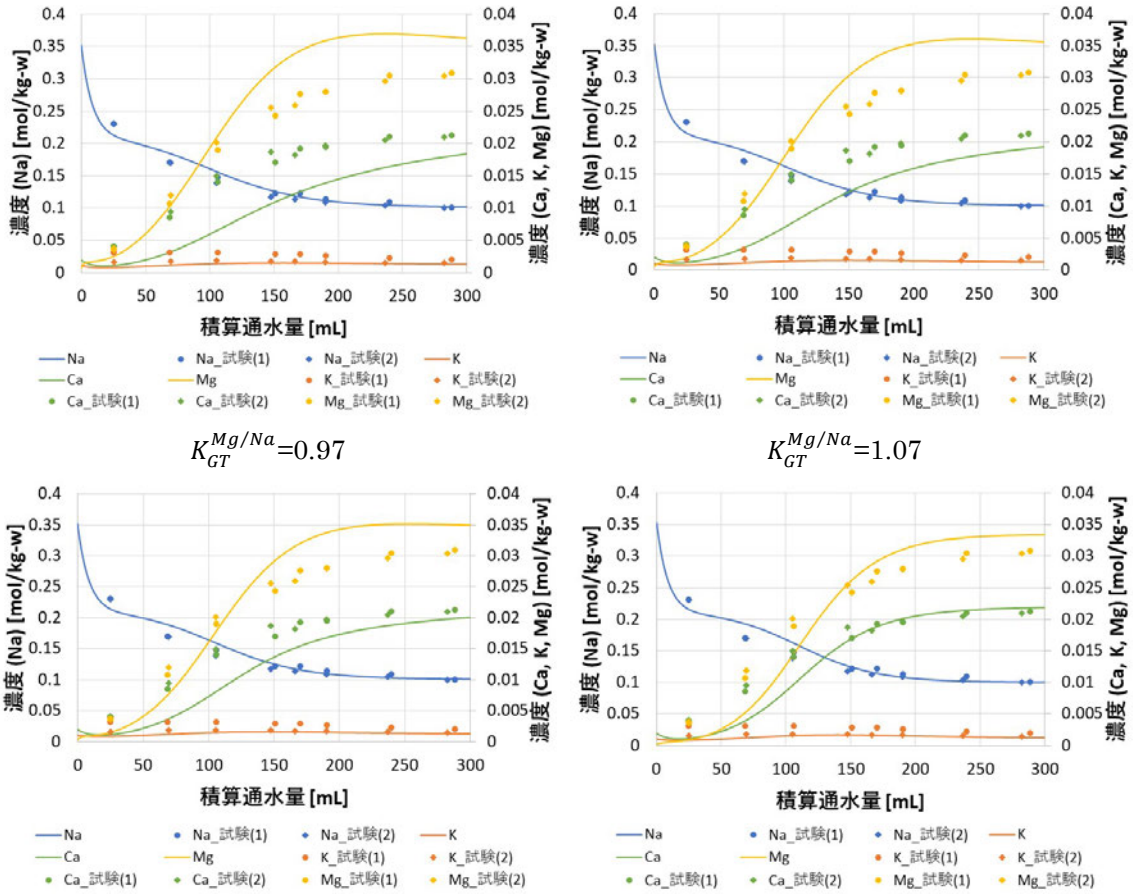
1) Mg^{2+}のイオン交換選択係数の影響に関する検討

通水試験の再現解析では、K-Na と Ca-Na のイオン交換選択係数については圧縮系の値を設定したが、Mg-Na のイオン交換選択係数（以後、$K_{GT}^{Mg/Na}$とする。）のみ分散系で取得された値（小田・柴田, 1999）を設定した。ここで、Mg-Na のイオン交換選択係数が変化したときにイオン交換反応にどの程度影響するかを把握し、圧縮系の$K_{GT}^{Mg/Na}$の妥当性の判断に資することを目的として$K_{GT}^{Mg/Na}$についてのパラメータ・スタディを実施した。設定するイオン交換選択係数は、（$K_{GT}^{Mg/Na}$＝0.97，1.07，1.17，1.37）の 4 水準とし、解析を実施した。解析対象は、$K_{GT}^{Mg/Na}$の影響が顕著になることが予想される Mg-Na 混合溶液（イオン強度 0.5）を通水したケース⑩とする。解析結果を**図 4-3-25** に示す。

排水液の Mg イオン濃度については、$K_{GT}^{Mg/Na}$を大きくしていくと、流出量 100mL 以下では低下して試験結果と乖離していき、流出量 150mL 以上では逆に試験結果に近づく変化を示した。流出初期に Mg イオン濃度変化が低下するのは$K_{GT}^{Mg/Na}$を大きくしたことにより固相により強く吸着し、流出が妨げられているためであると考えられる。Ca イオン濃度は$K_{GT}^{Mg/Na}$が大きいほど試験結果を再現していた。Mg, Ca イオンは選択係数を解析設定値の 5 倍程度にした場合($K_{GT}^{Mg/Na}$=1.37)に最も試験結果に近い結果となった。一方で Na, K イオン濃度には大きな変化は見られなかった。

陽イオン吸着量（**図 4-3-26**）については、$K_{GT}^{Mg/Na}$が大きくなるほど、試験終了時点の Mg 吸着量が多くなり、それに伴い Na, Mg イオンの吸着量が少なくなる。具体的には$K_{GT}^{Mg/Na}$=1.17 のケースで最も試験結果と近い結果となった。しかし、Na の吸着量は試験結果と差異がある結果となった。なお、 初期は解析の初期条件を示す。試験結果は供試体を測定したものであり、解析結果は領域（カラム長）全体での平均値である。

以上より、ケース⑩において、流出液の濃度変化と陽イオン吸着量ともに選択係数を大きくすることで解析結果が試験結果に近づいた。したがって、圧縮系の$K_{GT}^{Mg/Na}$は分散系の値よりも大きいことが示唆される。なお、この傾向は$K_{GT}^{K/Na}$、$K_{GT}^{Ca/Na}$においても同様に確認されている。



$K_{GT}^{Mg/Na}$=0.97　　$K_{GT}^{Mg/Na}$=1.07

$K_{GT}^{Mg/Na}$=1.17　　$K_{GT}^{Mg/Na}$=1.37

図 4-3- 25　Mg の Na に対するイオン交換選択係数を変更して実施したケース⑩の解析結果（排水中の陽イオン濃度変化）と試験結果の比較

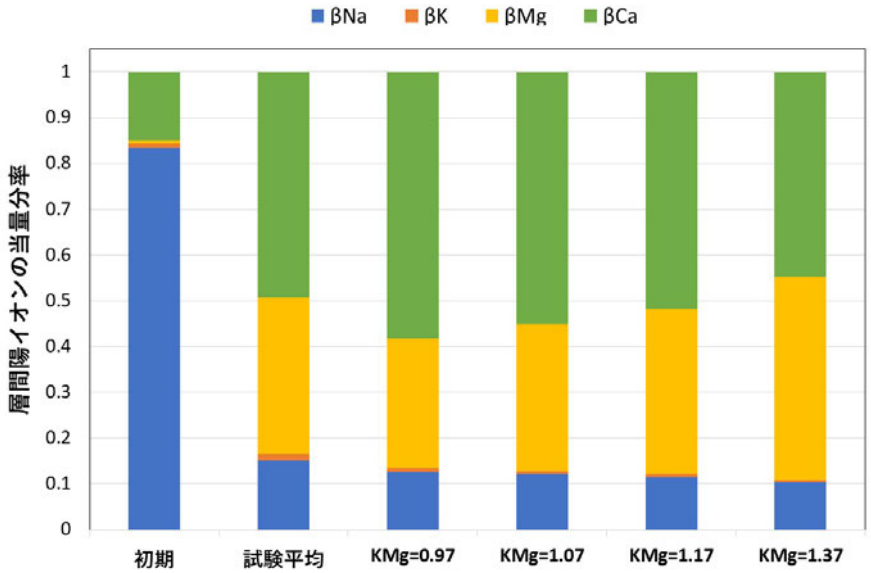


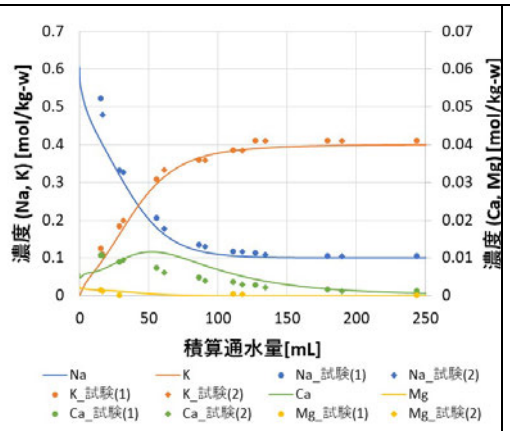
図 4-3- 26　試験終了時点の解析結果と試験結果（層間陽イオンの当量分率）の比較

2) Calcite 溶解の影響に関する検討

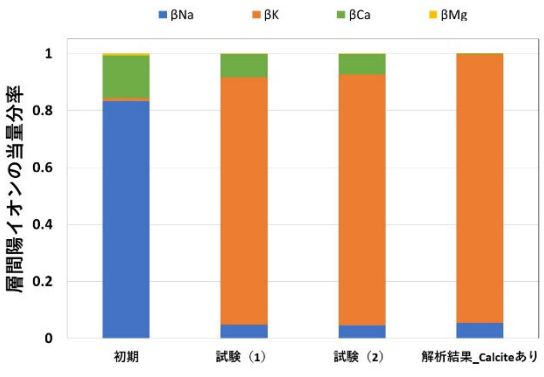
通水試験で対象としているクニピア F のモンモリロナイト含有率は 99%以上である。もし、仮に不純物としてカルサイトが含まれていたとした場合には、溶液の通水過程で Ca^{2+}が溶出し、イオン交換により層間に吸着する可能性が考えられる。そこで、このようなカルサイト溶解による吸着陽イオン量への影響の有無を確認するために、供試体に 1%の不純物としてカルサイトが含まれる場合と含まれない場合のそれぞれの条件で解析を実施し、それらを比較した。なお、通水溶液は、標準大気組成の二酸化炭素（314 ppm）と平衡したものを想定し、KCl-NaCl 混合溶液（乾燥密度 1.00Mg/m^3、イオン強度 0.500）ケース④の条件で解析を実施した。

カルサイトを考慮した条件としない条件で解析し、排水中のイオン濃度及び吸着陽イオン量のそれぞれで比較した結果を**図 4-3-27** に示す。いずれにおいても差異は見られなかった。これは、カルサイトが平衡状態で存在することにより pH が高く維持され、かつ流入溶液に含まれる炭酸が極めて微量であるため、ここでの通水溶液の条件では溶解が起きなかったと考えられる。したがって、仮に不純物としてカルサイトが 1%程度含まれていたとしても、通水過程において吸着陽イオン量に影響を及ぼさないことが分かった。

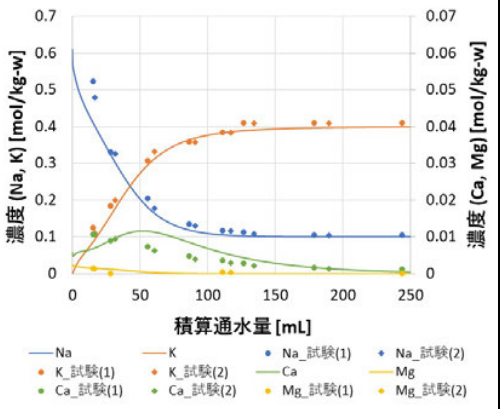
なお、本検討の解析条件の詳細については Appendix を参照されたい。



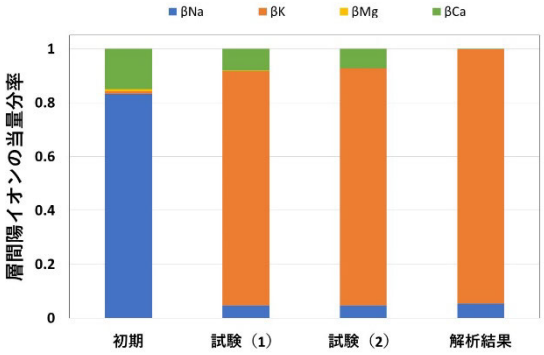
排水中のイオンの濃度変化（Calcite あり）



層間陽イオン量（Calcite あり）



排水中のイオンの濃度変化（Calcite なし）



層間陽イオンの当量分率（Calcite なし）

図 4-3- 27 カルサイト溶解を考慮した解析結果と非考慮の解析結果の比較

(d) 透水 - 膨潤圧試験の再現解析

(i) 透水 - 膨潤圧試験の概要

本事業の「緩衝材－オーバーパックの相互作用と緩衝材仕様に関わるデータの拡充」で実施されている透水－膨潤圧試験の再現解析を実施する。クニゲル V1－砂混合土を対象に人工海水を通水し、膨潤圧と透水係数に加えて、通水が終了した時点での層間陽イオン量が測定されている。また、クニゲル V1 を海水平衡させた試料を作成し、この海水平衡ベントナイト試料についても上記の試験が実施されている。本解析では、このクニゲル V1－砂混合土及び海水平衡ベントナイト試料の通水試験で取得された層間陽イオン量を対象とする。

(ii) 解析ツール

解析ツールについては、通水試験の再現解析と同様に HP1 を含む HYDRUS のバージョン 5 を用いた。

(iii) 解析条件

透水-膨潤圧試験（産業技術総合研究所ほか, 2021）の供試体は円柱形で、透水方向が中心軸方向上向きであり、円周側面が非排水構造であることから、モデルは鉛直一次元とした。また、解析領域は供試体長と等しい 20mm とし、これを 60 等分割したメッシュを用いた。

上端及び下端の境界条件は、令和 3 年度実施の透水-膨潤圧試験の試験手順（**図 4-3-28**）及び載荷空気圧（**図 4-3-29**）をもとに、表 4-3-17 に示すように設定した。上端は浸出面境界とし、下端の境界圧力を変更することにより、試験と同様の通水となるようにした。下端は圧力が時間により変化する境界とし、初期の供試体への吸水過程（**図 4-3-29** のⒶ）では、試験での圧力を下端の境界圧力として設定した。通水期間においては、（**図 4-3-29** のⒷ及びⒺ）は供試体の上端と下端との差圧（20 kPa）を下端の境界圧力として設定した。通水が生じない期間（**図 4-3-29** のⒸ及びⒹ）については、上端の全水頭に等しい 20mmH_2O を下端の境界圧として与えた。なお、上端は濃度勾配が 0 とし、下端は一定組成境界とした。

飽和・不飽和浸透流の解析用パラメータは、（飽和）透水係数、水分特性曲線、（不飽和）比透水係数である。これらのパラメータを表 4-3-18 示す。透水係数は透水―膨潤圧試験で取得した値を設定した（産業技術総合研究所ほか, 2022）。間隙率 εは、クニゲル V1-ケイ砂混合土の土粒子密度ρ_s（2.736 Mg /m^3）および乾燥密度ρ_dより算出し、0.414 とした。水分特性曲線は、van Genuchten モデルで表すこととし、そのパラメータは、産業技術総合研究所ほか(2022)が報告しているクニゲル V1-砂混合土についての値（P_0 =2.6 MPa, λ =0.31, S_{l_0} = 0.1, S_{l_0max} =1.0）とした。比透水係数については仮想的な値とし、水分特性と同じパラメータ（n）を用いた Mualem-van Genuchten モデル(Mualem, 1976)により表すこととした。このようにして求めた水分特性曲線と比透水係数のグラフを**図 4-3-30** に示す。

移流分散解析用のパラメータは、分散長、分子拡散係数及び屈曲度係数である。これらについては、②の通水試験の再現解析と同じ条件（表 4-3-14）とした。

イオン交換反応を平衡論でモデル化する場合に必要な情報は、イオン交換選択係数、イオン交換体の初期吸着イオン組成（以下、単に交換体の初期組成と記す）及び間隙水のイオン濃度である。K-Na、Ca-Na 及び Mg-Na のイオン交換選択係数には小田・柴田(1999)がクニゲル V1 についての測定データとして取りまとめた値を使用した。イオン交換選択係数の設定値を表 4-3-19 に示す。交換体の初期組成には、試験前のクニゲル V1 について、産業技術総合研究所ほか(2022)が示す浸出陽イオン量の値に、クニゲル V1-ケイ砂混合土のクニゲル V1 の重量割合 0.7 を乗じた値を用いた。これらの設定値を表 4-3-20 に示す。なお、混合土の CEC は、同表に示す交換体の当量の合計値である 44.9 meq/100g-soil とした。間隙水の初期組成は、初期含水比においてイオン交換体と溶液との平衡計算を行ったときに、表 4-3-20 に示した交換体の初期組成を与えるようなものとした。上記の平衡計算の詳細については、Appendix に示す。

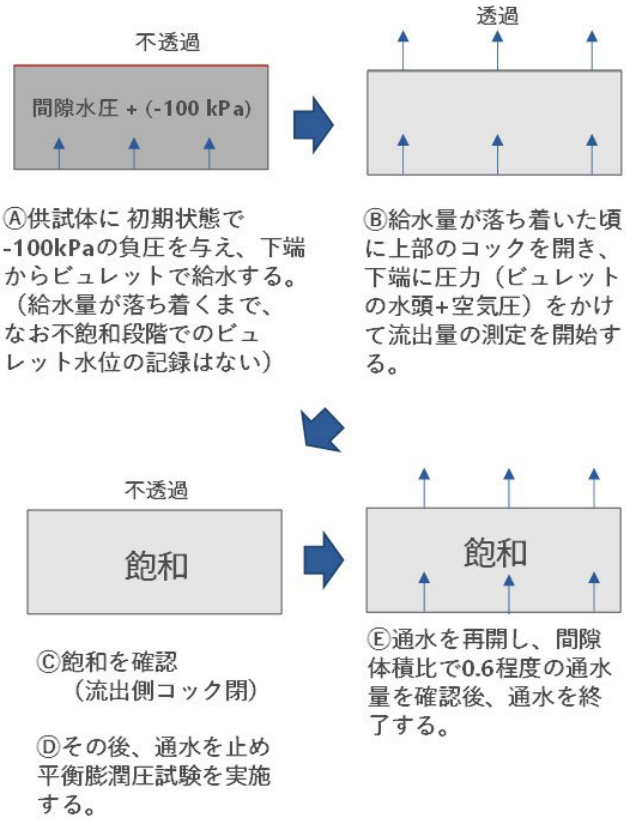


図 4-3- 28　透水-膨潤圧試験の試験手順

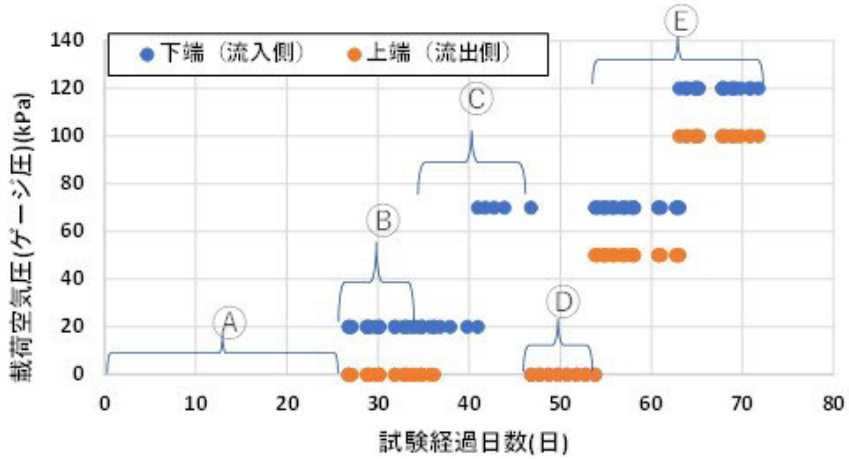


図 4-3- 29　載荷空気圧（試験における想定値）

表 4-3- 17　圧力境界条件

試験期間		試験条件		解析条件			備考
状態	期間(日)	下端の設定	上端の設定	初期条件	境界条件		
					下端の設定	上端の設定	
Ⓐ	0-26.8	不明	閉	飽和度や初期間隙水組成は後述	20mmH_2O	浸出面境界	下端圧は、上端からの流出が生じない範囲での最大の圧力（上端の位置水頭と同一）とする。
Ⓑ	26.8-36.2	20kPa	0kPa	Ⓐの最終状態	20kPa	浸出面境界	—
Ⓒ	36.2-40.9	20kPa	閉	Ⓑの最終状態	20mmH_2O	浸出面境界	解析モデル上、供試体は飽和状態となっているため、境界条件を試験と同一としても供試体への浸潤は起こらない。この状態を模擬するため、下端の全水頭を上端と同一にする。
	40.9-46.8	70kPa	閉	Ⓒの 40.9 日後の状態	20mmH_2O	浸出面境界	
Ⓓ	46.8-53.8	0kPa	0kPa	Ⓒの最終状態	20mmH_2O	浸出面境界	試験では、供試体の上下端からの流出がない。これを模擬するため、下端の全水頭を上端と同一にする。
Ⓔ	53.8-63.1	70kPa	50kPa	Ⓓの最終状態	20kPa	浸出面境界	試験において、下端と上端の圧力差が 20kPa のため、解析上も 20kPa の差となるように設定。
	63.1-71.8	120kPa	100kPa	Ⓔの 63.1 日後の状態	20kPa	浸出面境界	
—				Ⓔの 71.8 日後の状態	20kPa	浸出面境界	ほぼ平衡状態になるまで解析

Ⓐ～Ⓔは、前掲図 4-3-27 のⒶ～Ⓔと同じである。

表 4-3- 18　透水 - 膨潤圧試験の再現解析における飽和・不飽和浸透流解析用パラメータ

パラメータ	設定値	根拠・出典
ケース番号	⑥	－
通水溶液	人工海水	－
乾燥密度 ρ_d	1.603 Mg/m^3	産業技術総合研究所ほか(2022)
イオン強度	0.64	通水試験での設定
透水係数 K_s	1.63×10^{-11} m/s	産業技術総合研究所ほか(2022)
間隙率 ε	0.414	クニゲル V1-ケイ砂混合土の土粒子密度ρ_s（2.736 Mg /m^3）と乾燥密度ρ_dより算出 $\varepsilon = 1 - \rho_d/\rho_s$
水分特性曲線 $\psi(S_e)$	$\psi = \frac{1}{\alpha}\left(S_e^{\frac{n}{1-n}} - 1\right)^{\frac{1}{n}}$ $S_e = \frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}$：有効飽和度，$\theta$：体積含水率，$\theta_s$：飽和体積含水率，$\theta_r$：残余体積含水率，$\alpha$，$n$：モデルパラメータ $\alpha = 3.760\times10^{-3}$ mH$_2$O^{-1}，n =1.449， $\theta_s = \varepsilon$ =0.414，θ_r= 0.1θ_s	van Genuchten モデル (van Genuchten, 1980) モデルパラメータは、産業技術総合研究所ほか(2022)に示されているクニゲルV1砂-混合土についての値を用いた。
比透水係数 $k_r(S_e)$	$k_r = S_e^{0.5}\left\{1 - \left(1 - S_e^{\frac{n}{n-1}}\right)^{1-\frac{1}{n}}\right\}^2$ n =1.449， $\theta_s = \varepsilon$ =0.414，θ_r= 0.1θ_s	Mualem-van Genuchen モデル (Mualem, 1976) 上記の水分特性曲線と同じパラメータ（n，θ_s，θ_r）を用いた仮想的な値

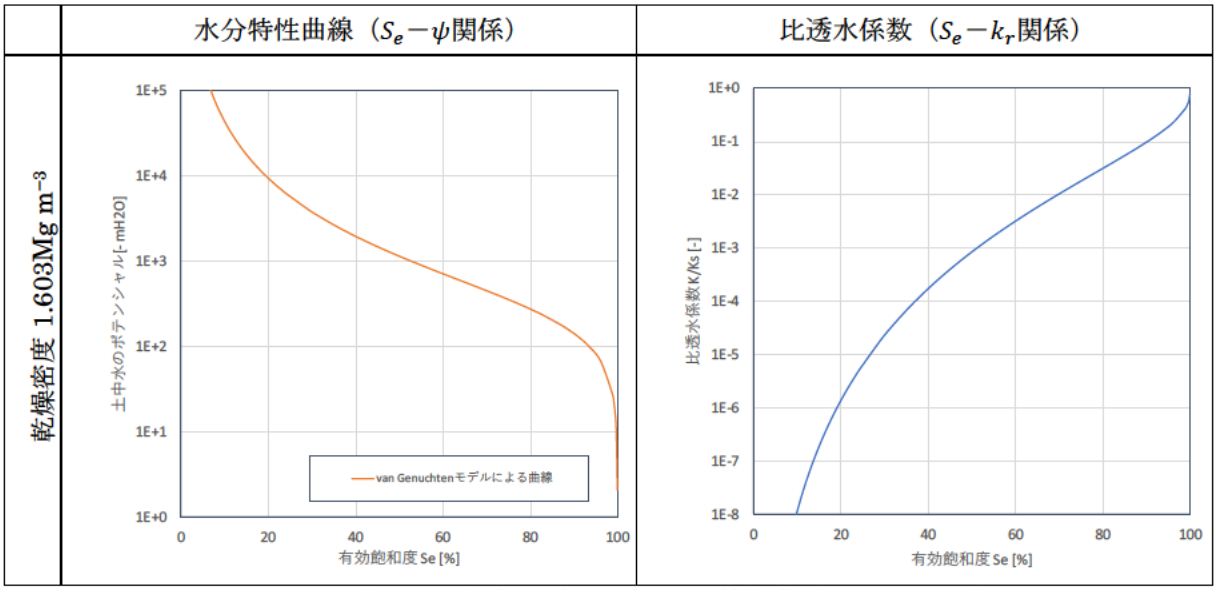


図 4-3- 30　透水 - 膨潤圧試験の再現解析に使用した水分特性曲線と比透水係数

表 4-3- 19　透水 - 膨潤圧試験の再現解析に用いたイオン交換選択係数

イオン交換反応式 （半反応式）	選択係数 ($\log K_{GT}$)	根拠
$Z^- + Na^+ = ZNa$	0	基準値
$Z^- + K^+ = ZK$	0.42	小田・柴田（1999）
$2Z^- + Ca^{2+} = Z_2Ca$	0.69	
$2Z^- + Mg^{2+} = Z_2Mg$	0.67	

表 4-3- 20　透水 - 膨潤圧試験の再現解析に用いた初期状態におけるイオン交換サイトの組成

イオン交換体 の初期組成	当量 (meq/100g-soil)	根拠
ZNa	39.8	試験前のクニゲル V1 の浸出陽イオン量の値(産業技術総合研究所ほか, 2022)に、クニゲル V1-ケイ砂混合土のクニゲル V1 の重量割合 0.7 を乗じた値
ZK	0.5	
Z_2Ca	4.6	
Z_2Mg	0	

(iv) 解析結果

供試体の吸着陽イオンの組成（当量分率）を、通水試験前及び試験終了後の分析値と解析結果とを比較する形で**図 4-3-31** に示す。同図の、初期はクニゲル V1 の分析値であり、解析の初期条件に等しい。試験結果は、試験終了後の供試体の流出側、中央部及び流入側の 3 箇所の分析値である。また、解析結果は、通水終了時点（71.8 日後）について、領域（カラム全体）を流入側、中央部及び流出側の 3 つに等分割し、各領域について算出した平均値である。

各吸着陽イオン量の大小関係は、カラムのどの部位でも試験結果を良く再現している。K イオンの吸着量は試験結果を良く再現した。また、Ca イオンの吸着量は、試験結果よりも少ない結果となった。Mg イオンの吸着量は試験結果よりも少ないが、流入側から流出側にかけて吸着量が減少する傾向は試験結果と整合的である。

供試体の吸着陽イオンの組成（当量分率）を、海水平衡ベントナイトの分析値及び平衡後の解析結果を比較する形で**図 4-3-32** に示す。同図の初期は、クニゲル V1 の初期状態の分析値であり、解析の初期条件に等しい。試験結果は、海水平衡ベントナイトを対象に実施した通水試験終了後の分析値であり、供試体を流出側、中央部及び流入側の 3 つに分割した各領域での分析値である。解析結果はイオン交換反応が平衡に到達した 5,000 日後の状態について、解析領域（カラム全体）を流入側、中央部及び流出側の 3 つに分割し、各領域について算出した平均値である。

流出側、中央部及び流入側の各領域での吸着陽イオンの当量分率の大小関係については、解析結果は試験結果より Na イオンが大きくその他のイオンが小さい結果となった。本解析では、既往の分散系でのイオン交換選択係数を設定しているため、圧縮系と分散系での条件の違いも乖離の要因の一つとして考えられる。また、イオン交換選択係数のイオン強度による違いも乖離の要因として考えられる。ここでの検討の対象とした、クニゲル V1（クニミネ工業社製）は、随伴鉱物として沸石類（クリノプチロライト等）を含有しており、これは陽イオンを吸着する能力を有している。このような随伴鉱物に起因する陽イオンが固相の分析結果に含まれている可能性も考えられる。また、試験終了時点でみられた流出側～流入側の差異は、平衡後の結果にはみられなかった。

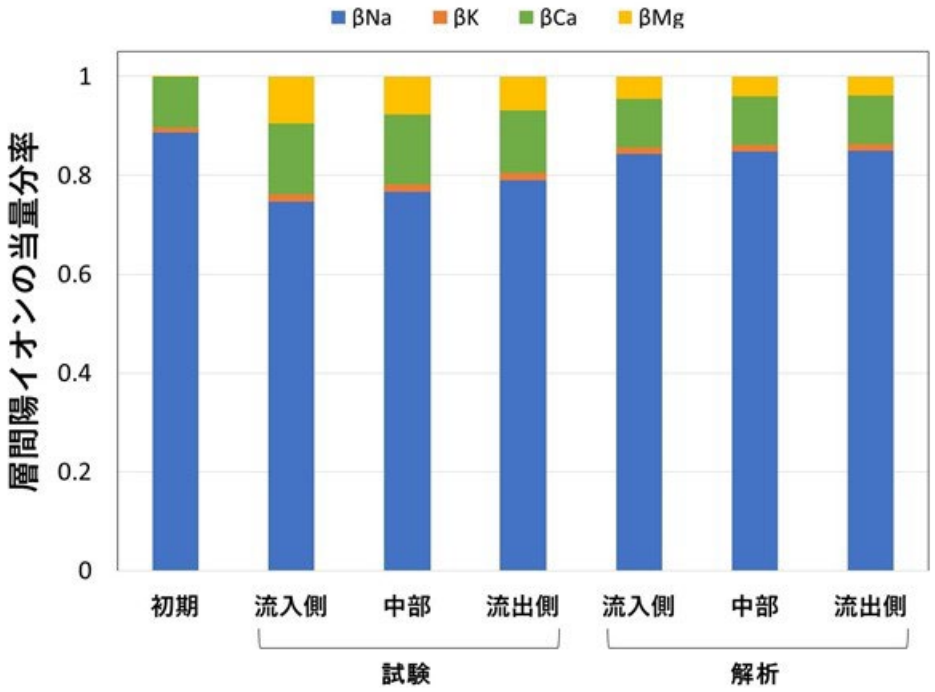


図 4-3- 31　試験終了後の吸着陽イオン組成と
通水終了時点（71.8 日後）での解析結果との比較

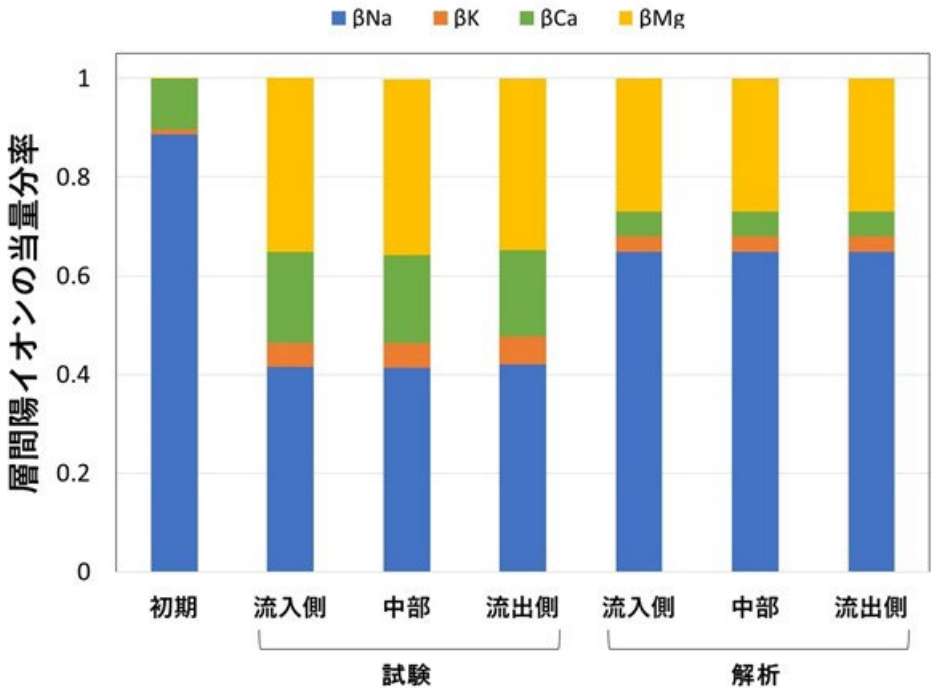


図 4-3- 32　海水平衡ベントナイトについての試験終了後の吸着陽イオン組成と
平衡時（5,000 日後）の解析結果との比較

(e) 令和 5 年度のとりまとめに向けた課題

令和 4 年度は、圧縮系におけるイオン交換選択係数を設定し、令和 3 年度実施分と同じケースの再現解析を実施した。ただし、Mg-Na のイオン交換選択係数については、圧縮系での値が得られていないため、令和 3 年度と同様、分散系のイオン交換選択係数を設定した。令和 4 年度と令和 3 年度の通水試験の再現性の差異を比較すると、圧縮系のイオン交換選択係数を設定した令和 4 年度の解析結果の方が、層間陽イオンの Ca 当量分率の再現性は向上していた。また、沿岸部地下水のデータに基づき設定した、2 成分系の溶液や沿岸部実地下水の通水試験の再現解析においても、層間陽イオンの当量分率の大小関係や排水液の濃度の経時変化を概ね再現できた。以上を踏まえると、圧縮系のイオン交換選択係数の方がより妥当な設定といえる。令和 5 年度は、圧縮系の Mg-Na のイオン交換選択係数を設定して解析を実施し、より再現性が向上することを確認する必要がある。また、通水試験により得られたイオン交換選択係数のイオン強度依存性を踏まえてイオン交換選択係数の設定の見直しをする必要がある。

（4）緩衝材の膨潤率に対する溶存陽イオンの影響把握試験

① 令和 4 年度の実施内容

緩衝材の設計要件である自己シール性を確認する指標としては、NUMO-SC において緩衝材の膨潤量が施工時にできる緩衝材と孔壁およびオーバーパックとの間にできる隙間体積（膨潤率／隙間体積比）の 2 倍以上となることが基準として設定されている（原子力発電環境整備機構, 2021）。緩衝材の膨潤率 ε_s は、任意の円柱形に締め固めたベントナイト系材料を一定の鉛直圧下において膨潤により一次元的に変形した量を測定する試験（以下、膨潤量試験という。）により膨潤量ΔSを測定し、このΔSを初期の供試体の高さH_0で除し、100 倍したものと定義される（小峯・緒方, 1997）。既往の研究においては、これまでに Na 型ベントナイトに蒸留水、人工海水、10 倍希釈人工海水などのイオン強度の異なる溶液を浸潤させた試験（小峯・緒方, 1997, 田中・中村, 2005）、Ca 型化したベントナイトに蒸留水を浸潤させた試験（戸井田ほか, 2005）、Na 型ベントナイトに幌延地下水を浸潤させた試験（日本原子力開発機構・原環センター, 2019）などによって各条件における最大膨潤率が報告されている。しかし、浸潤液中の陽イオンの違いによる影響を詳細に検討したベントナイト系材料を用いた膨潤率に係るデータは多くないのが現状である。沿岸部の多様な地下水の組成に対応した膨潤率を把握するにあたり、地下水に溶存する主要陽イオンである Na^+、K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+} の影響、及びイオン強度依存性のデータを取得し、体系的に整理する必要がある。

本研究では、主要陽イオンを対象とした膨潤量試験を実施し、陽イオン種、及びイオン強度による膨潤率への影響に係るデータを拡充することを目的とした。加えて、得られたデータを元に、多様な組成の溶液が浸潤した際の自己シール性に関する性能の予測する方法の提示を目標とした検討を行う。

表 4-3-21 に、平成 31 年度から実施している膨潤量試験の試験ケースを示す。また、本研究では、Na 型ベントナイトとして、これまでに多くの緩衝材に関わる研究で使用された実績があり、得られた結果と既往の研究結果を比較することで結果の妥当性の確認ができると考えられるクニゲル V1®（クニミネ工業製）に混合用の砂として SiO_2 割合が高いケイ砂 3 号とケイ砂 5 号を 7 : 1.5 : 1.5 の割合で混合したケイ砂 30wt%混合ベントナイトを使用した。供試体の密度は、基本ケースとして NUMO-SC に示されている緩衝材仕様の乾燥密度 1.6 Mg/m^3 を設定し、リファレンスケースおよび後述する試験Ⓐ、Ⓑ、Ⓒ、Ⓗに関して、初期乾燥密度 1.2 Mg/m^3 および 2.0 Mg/m^3 を条件に加えた。試験溶液としては、図 4-3-33 に示す検討フローに従い、Ⓐでは高イオン強度での陽イオン種の膨潤率への影響を検討のために、試験溶液として海水程度のイオン強度 0.5 の塩化物溶液（NaCl 水溶液、KCl 水溶液、$CaCl_2$ 水溶液、$MgCl_2$ 水溶液）を用いた膨潤量試験を実施した。Ⓑでは高イオン強度での異なる陽イオン種の混合に伴う影響を検討するため、試験溶液として NaCl 水溶液と KCl 水溶液をモル濃度比 1 : 1 で混合し、イオン強度 0.5 に調整した溶液を用いて膨潤量試験を実施した。Ⓒでは地下水が地形や気候の変動などに伴い塩水場から淡水場に置き換わった場合の影響を検討するため、試験溶液としてイオン強度 0.5 の塩化物溶液（NaCl 水溶液、KCl 水溶液）を用いて膨潤率が平衡状態になった後、試験溶液をイオン交換水に変えて通水する膨潤量試験を実施した。Ⓓでは陽イオン種として Na^+を主としたイオン強度の濃度の影響を検討するため、NaCl 水溶液によるイオン強度 0.025 から 0.20 の範囲での膨潤量試験を実施した。Ⓔでは Na^+以外の陽イオン種（K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}）のイオン強度の濃度の影響を検討するため、イオン強度 0.025、0.10、0.20 の塩化物溶液（KCl 水溶液、$CaCl_2$ 水溶液、$MgCl_2$ 水溶液）による膨潤量試験を実施した。Ⓕでは低イオン強度で二種の陽イオンが共存する場合の影響を検討するために、陽イオン種として Ca^{2+}と Na^+の混合溶液（Ca^{2+}と Na^+のモル濃度比 1.5 : 1）と Mg^{2+}と Na^+の混合溶液（Mg^{2+}と Na^+のモル濃度比 0.4 : 1）をイオン強度 0.025、0.10 に調整した溶液を用いて膨潤量試験を実施した。Ⓖでは沿岸近傍の実際の地下水を用いて主要陽イオン以外の微量の陽イオン、及び多種の陰イオンが含まれる場合の影響やⒶからⒻまでに把握した試験の結果から得られた最大膨潤率の予測の妥当性を確認するためのデータを得るために、駿河湾沿岸部に掘削地点とした FGB-2 孔の 167.70～171.78 m および FGB-2 孔の 214.75～220.52 m から採水した実地下水を用いて膨潤量試験を実施した。試験に用いた沿岸部実地下水の組成を表 4-3-22 及び図 4-3-2 に示した。Ⓗでは、イオン種ごとのイオン強度の濃度による初期乾燥密度への影響を把握するため、初期乾燥密度 1.2 Mg/m^3、1.6 Mg/m^3 および 2.0 Mg/m^3 を対象に、試験溶液として、イオン強度 0.2 の塩化物溶液（KCl 水溶液）を用いて膨潤量試験を実施した。表 4-3-21 に示すように試験は一部終了し、今後も計画に従いデータの拡充を進める。

令和 4 年度は、試験Ⓔ、Ⓕ、Ⓖ、Ⓗおよびこれまでに得られた本研究結果を合わせ、イオン種ごとのイオン強度の影響を検討した。

表 4-3- 21 膨潤量試験の試験ケース

	溶液の種類	イオン強度	初期乾燥密度 (Mg/m³)	平成 31 (2019) 年度	令和 2 (2020) 年度	令和 3 (2021) 年度	令和 4 (2022) 年度	令和 5 (2023) 年度
リファレンス	イオン交換水	0	1.2、1.6、2.0					
Ⓐ 高イオン強度で陽イオン種の影響の検討	NaCl 水溶液	0 5	1.2、1.6、2.0					
	KCl 水溶液		1.2、1.6、2.0					
	$CaCl_2$ 水溶液		1.2、1.6、2.0					
	$MgCl_2$ 水溶液		1.2、1.6、2.0					
	NaCl 水溶液	0.7～1.0	1.6					
	$CaCl_2$ 水溶液	0.7～1.0	1.6					
Ⓑ 高イオン強度での異なる陽イオン種の混合に伴う影響の検討	NaCl-KCl 混合溶液 (モル濃度比 1：1)	0 5	1.2、1.6、2.0					
Ⓒ 塩水場から淡水場にを想定し、高イオン強度からイオン交換水に交換した影響の検討	NaCl 水溶液→イオン交換水	0.5→0	1.2、1.6、2.0					
	KCl 水溶液→イオン交換水	0.5→0	1.2、1.6、2.0					
Ⓓ Na を主としたイオン強度の影響の検討	NaCl 水溶液	0.025	1.6					
		0.050	1.6					
		0.075	1.6					
		0.10	1.6					
		0.15	1.6					
		0 20	1.6					
Ⓔ Na 以外の陽イオン種ごとのイオン強度の影響の検討	KCl 水溶液	0.025	1.6					
		0.10	1.6					
		0 20	1.6					
	$CaCl_2$ 水溶液	0.025	1.6					
		0.10	1.6					
		0 20	1.6					
	$MgCl_2$ 水溶液	0.025	1.6					
		0.10	1.6					
		0 20	1.6					
Ⓕ 複数イオン種を含む溶液のイオン強度の影響の検討	$CaCl_2$ と NaCl の混合溶液 (モル濃度比 1.5：1)	0.025	1.6					
		0.10	1.6					
	$MgCl_2$ と NaCl の混合溶液 (モル濃度比 0.4：1)	0.025	1.6					
		0.10	1.6					
Ⓖ 沿岸部実地下水の影響の検討	FGB-2_167.70-171.78m	0.283	1.6					
	FGB-2_**214. 75-220. 52**m	0.727	1.6					
	FGB-2_**800**m	海水程度	1.6					
	FGB-3_113m	海水濃度 10%程度	1.6					
Ⓗ イオン種ごとの初期乾燥密度の影響の検討	NaCl 水溶液	0 2	1.2、 2.0					
	KCl 水溶液		1.2、 2.0					
	$CaCl_2$ 水溶液		1.2、 2.0					
	$MgCl_2$ 水溶液		1.2、 2.0					

実施済　2022 年度実施　実施予定

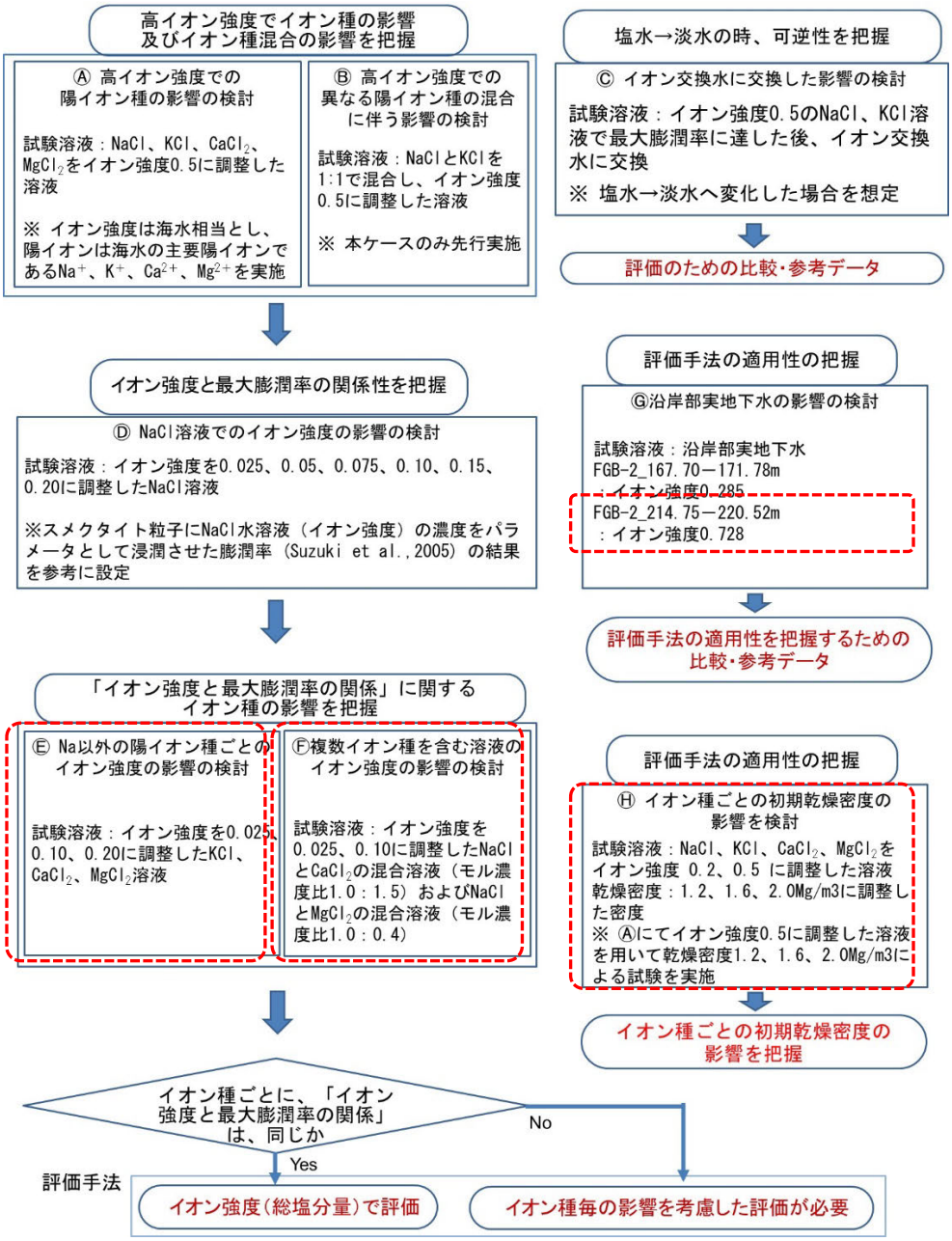


図 4-3- 33　緩衝材の膨潤率に対する溶存陽イオンの影響把握に係る検討フロー

：令和 4 年度実施個所

表 4-3- 22　沿岸部実地下水の組成

地下水名	成分											
	pH	Na	K	Ca	Mg	Al	Si	SO_4	Cl	IC	TOC	イオン強度
	－	mol/L								mg/L		－
FGB-2_ 167.70- 71.78 m	7.9	0.10	1.1×10^{-3}	0.022	0.033	$<2\times10^{-5}$	7.1×10^{-4}	0.011	0.20	35	< 5	0.285
FGB-2_ 214.75- 220.52 m	7.8	0.435	2.4×10^{-3}	0.022	0.053	$<2\times10^{-5}$	5.7×10^{-4}	0.03	0.592	36	N.D.	0.728

② 試験方法

本試験では、全ての膨潤量試験において、図 4-3-34 に示す試験装置を使用した。試験セルのピストンの質量から求めたピストンと試験セルとの摩擦込みの供試体断面にかかる上載圧は概ね 8.8 kPa 程度である。ただし、試験中にベントナイトやケイ砂が試験セルとピストンとの隙間に入り、試験セルの内側を傷つけることにより摩擦力が増加するなど、供試体にかかる上載圧は、8.8 kPa と異なる可能性があるため、測定結果に留意する必要がある。

本試験は、境界条件として一次元・鉛直方向への膨潤量を取得する試験であるため、供試体寸法のうち、供試体の直径は任意であるが、直径が小さくなるほど、膨潤量試験に対して供試体と試験セルとの間に発生する摩擦の影響が顕在化してくることが想定される。また、既往の研究（田中・中村，2005；戸井田ほか，2005）や過去の実績（日本原子力開発機構・原環センター，2019）と比較することも必要であることから、供試体の直径は 60 mm に設定した。また、供試体の高さは、高くなるほど、送水側の密度が低下し供試体内に密度分布が発生すること、試験セルと供試体の間に発生する摩擦が大きくなること、膨潤量が定常にまでに時間が掛かることなどが懸念されるため、供試体の直径と同様に既往の研究や過去の実績から 5 mm に設定した。

表 4-3-23 に供試体の諸元を示す。初期含水比一定で静的締固めにより供試体を作製した。試験溶液の給水は、試験セルの底部からビュレットの水位差で給水し、給水に伴う間隙空気が速やかに排気されるようにした。また、供試体の膨潤量はピストンの上部に設置した変位計を用いて測定した。

本試験における膨潤率は、試験溶液の給水直前から供試体の一次元方向の膨潤量ΔSを掲示的に測定し、この一次元方向のΔSを供試体の初期高さH_0で除し、100 倍したものを膨潤率ε_s（%）と以下の式に定義する（小峯・緒方，1997）。

$$\varepsilon_s(\%) = \frac{\Delta S}{H_0} \times 100$$

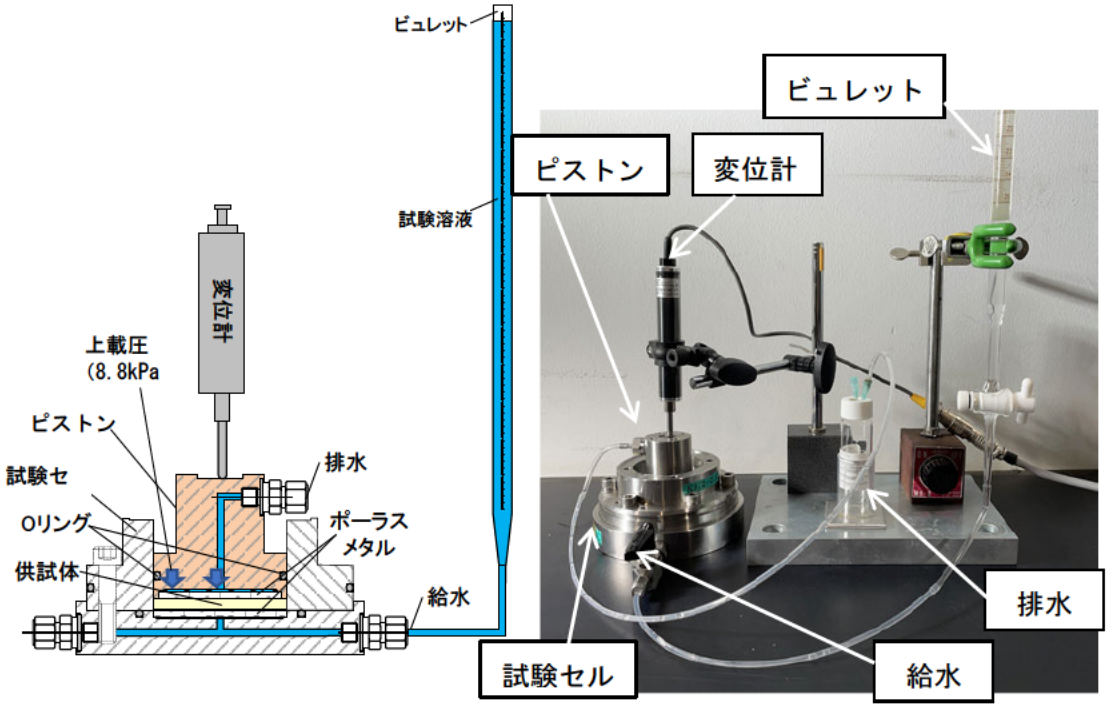


図 4-3- 34　本研究で使用する膨潤量に係る試験装置の概略図

表 4-3- 23　供試体の諸元

		供試体
ベントナイト系材料		クニゲル V1
混合材料		3 号、5 号ケイ砂（1：1）
混合材料の混合割合（wt%）		30
寸法	直径 D （mm）	60
	初期高さ H_0（mm）	5
初期含水比（%）		7.1 ― 8.3

③　試験結果

これまでの成果と合わせ、令和 4 年度に実施した膨潤量試験により得られた最大膨潤率を表 4-3-24 に示す。また、図 4-3-33 の検討フローに示す試験Ⓔ、Ⓕ、Ⓖ及びⒽの影響を検討するため、膨潤率の経時変化を図 4-3- 35～図 4-3-38 に示す。

各試験ともに試験溶液を給水した直後から膨潤し、約 50 日から 100 日程度で膨潤率が平衡状態に達する傾向を示した。また、イオン強度が低い場合は、膨潤率の経時変化は緩慢であるが、イオン強度が高くなるに従い、膨潤率が早く平衡状態に達する傾向を示した。試験終了後､試験セルを解体した後､給水側から供試体を押し出し､超音波カッターを用いて 1mm 間隔で切断した。切断した供試体の含水比分布及び乾燥密度を測定し、各供試体ともに概ね均一に膨潤していることを確認した。層間陽イオンの組成分析の詳細、含水比分布、乾燥密度分布については、付属書（Appendix）を参照されたい。

(a) Na＋以外の陽イオン種ごとのイオン強度の影響の検討

図 4-3-39 の（a）～（c）に Na^+以外の陽イオン種（K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}）ごとのイオン強度と最大膨潤率の関係を示す。図から Na^+以外の陽イオン種（K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}）ごとのイオン強度の影響に関しては､Na^+イオンの傾向性と同様に､各陽イオン種ともにイオン強度が高くなるに従い、最大膨潤率が低下する傾向を示した。また、イオン強度 0.025～0.2 に関しては、試験を 2 回実施しており、膨潤率に 2 倍程度のバラつきが確認できる。バラつきの原因として考えられるのは、供試体中のモンモリロナイトの含有量にバラつき、供試体中に試験溶液が均等に浸潤しておらず、Na 型から Na 以外の陽イオン種にイオン交換ができていないこと、供試体圧縮成型時にケイ砂が試験セルの壁面を傷つけ、供試体が膨潤する際にピストンが偏心したことによって、試験セルとピストンの間に生じた摩擦による影響などにより、バラつきが生じた可能性などが挙げられるため、データの取り扱いに留意する必要がある。

図 4-3-40 に本研究において取得された乾燥密度 1.6Mg/m^3 における NaCl 水溶液、KCl 水溶液､$CaCl_2$ 水溶液､$MgCl_2$ 水溶液を用いたイオン強度と最大膨潤率の関係を示すとともに、令和 3 年度に NaCl 水溶液のイオン強度と最大膨潤率の関係から導入した近似式を合わせて示す。図から令和 3 年度に試験結果より作成した NaCl 水溶液の近似式に比して、Na^+イオン以外の陽イオン種ともにイオン強度 0.2 までは液種ごとのバラつきが大きいもののイオン強度 0.2 以上はバラつきが小さくなり、イオン強度の増加とともに最大膨潤率が低下する傾向が示され、粘土鉱物の膨張や膨潤特性に係る既往の研究成果（佐藤，2001）に示されるイオン強度の平方根に反比例するような関係と概ね整合する結果が得られた。また、原子価数ごとに分けて整理した結果と令和 3 年度に実施した NaCl 水溶液の近似式を整理した方法を用いてイオン種ごとの近似式を図 4-2-9 と図 4-2-10 に導入した。図から 1 価の Na^+イオンと K^+イオンを比較した結果、Na^+イオンに比してイオン強度 0.5 の高イオン強度に関しては同様の最大膨潤率を示すものの、イオン強度 0.025～0.2 の低イオン強度に関しては、K^+イオンの最大膨潤率が低くなる傾向を示した。この原因として、同じ価数（1 価）でも N^+イオンに

比べ、K^+イオンは、イオン半径が大きく、モンモリロナイト層間に 2 分子層以上水和せず、結晶層面に固定化されて安定な構造を形成することによって結晶性膨潤したことが原因と考えられる（河村，2008；鬼形, 2007）。一方、2 価の陽イオンの Ca^{2+}イオンと Mg^{2+}イオンを比較した結果、全体的な傾向としては、Ca^{2+}イオン、Mg^{2+}イオンともに最大膨潤率は概ね等しい結果となった。

図 4-3-43 に図 4-3-41 と図 4-3-42 の結果を合わせて示す。図から陽イオン種ごとのイオン強度の影響に関しては、NaCl 水溶液の最大膨潤率が最も高く、続いて $CaCl_2$ 水溶液と $MgCl_2$ 水溶液の最大膨潤率が概ね同等で示され、KCl 水溶液の最大膨潤率が最も低い傾向にあることが示された。また、各イオン種の近似式においては、1 価の K^+イオン（KCl 水溶液）の近似式が低い値を示すものの、1 価の Na^+イオン（NaCl 水溶液）、2 価の Ca^{2+}イオン（$CaCl_2$ 水溶液）、Mg^{2+}イオン（$MgCl_2$ 水溶液）ともに同等の近似式で表現できる。なお、K^+イオンのみが低い値を示す原因については、次年度、試験に用いた供試体の固相分析や液相分析等を実施し、供試体のイオン交換の状態を確認するなどして検討することとする。

(b) 沿岸部実地下水の影響の検討

図 4-3-44 に FGB-2 孔から採水した FGB2_214.75～220.52m（イオン強度 0.728）の最大膨潤率と令和 3 年度に取得した FGB-2 孔から採水した FGB2_167.70～171.78 m（イオン強度 0.285）の沿岸部実地下水の最大膨潤率の結果を合わせて示す。図からイオン強度 0.285 の FGB2_167.70～171.78 m に比して、イオン強度 0.728 の FGB2_214.75～220.52m の最大膨潤率は 1/2 程度に低下し、沿岸部実地下水を用いた検討においても、膨潤率のイオン強度依存性を把握することができた。今後、FGB-2 孔の 800m 以深から採水した海水濃度程度の実地下水（FGB-2_800m）および FGB-3 孔の 113m から採水した塩水濃度 10%程度の実地下水（FGB-3_113m）を用いた膨潤率を取得し、これまでに得られた陽イオン種や後述する複数の陽イオン種を含むイオン強度との影響を検討するために取得した膨潤率との比較を通じたイオン強度や乾燥密度などを用いた評価手法の適用性を確認する。

(c) 複数の陽イオン種を含むイオン強度の影響の検討

図 4-3-45 に NaCl 水溶液と $MgCl_2$ 水溶液をモル濃度比 1：0.4 で混合し、イオン強度を調整した溶液（以下、Na-Mg 混合溶液という。）と NaCl 水溶液と $CaCl_2$ 水溶液をモル濃度比 1：1.5 で混合し、イオン強度を調整した溶液（以下、Na-Ca 混合溶液という。）を用いた複数の陽イオン種を含むイオン強度と最大膨潤率の関係を示す。図からイオン強度 0.025 と 0.1 のみではあるが、Na^+イオンと同様に、Na-Ca 混合溶液や Na-Mg 混合溶液ともに、イオン強度が高くなるに従い、最大膨潤率が低下する傾向を示した。また、イオン強度 0.025 に関しては、Na-Mg 混合溶液に比して、Na-Ca 混合溶液の方が 1.5 倍程度の最大膨潤率を示すものの、イオン強度 0.2 に関しては、同等の最大膨潤率を示した。

図 4-3-46 に Na-Mg 混合溶液と Na-Ca 混合溶液のイオン強度と最大膨潤率の結果に加え、沿岸部地下水（FGB2_167.70～171.78 m、FGB2_214.75～220.52m）の結果を示す。図から液種ごとの最大膨潤率の傾向は異なるように見えるが、今後、複数の陽イオン種を含むイオン強度の影響を詳細に検討するため、沿岸部実地下水や他の陽イオン種と重複するイオン強度の膨潤量試験を実施する。

(d) イオン種ごとの初期乾燥密度の影響の検討

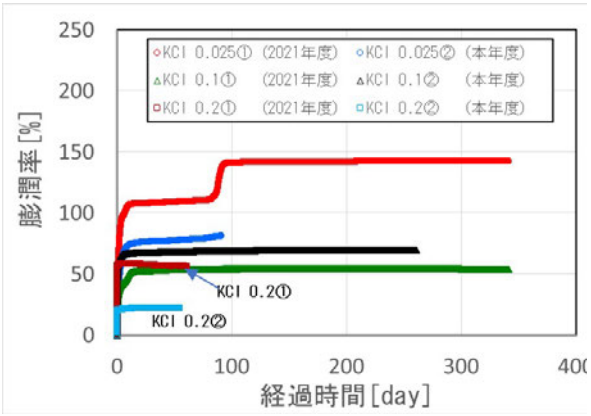
図 4-3-47 にイオン種ごとの初期乾燥密度の影響を検討するため、本年度取得したイオン強度 0.2 の KCl 水溶液と令和 2 年度に取得したイオン強度 0.5 の NaCl、KCl、$CaCl_2$、$MgCl_2$ 水溶液の最大膨潤率の結果を示す。図から多少のバラつきがあるものの、イオン強度 0.2 の KCl 水溶液に関しても、これまでに得られたイオン強度 0.5 の各イオン種と同様に、概ね初期乾燥密度の増加に伴い、最大膨潤率が大きくなる傾向を示した。ただし、初期乾燥密度 1.6Mg/m^3 におけるイオン強度 0.2 の KCl 水溶液の最大膨潤率（KCl 020①）が他の初期乾燥密度 1.6Mg/m^3 に比べて 2 倍程の値を示したことから、同様の条件で再試験（KCl 020②）を実施した。その結果、他のイオン種と同等の最大膨潤率を示した。本原因としては、例えば、KCl 020①の材料のみモンモリロナイト含有率が他の試料に比べて高かったことや層間中のイオン交換が進まなかったため、膨潤量が高くなったと推察されるが、本試験データ（KCl 020①）に関しては、固相分析や液相分析を実施していないため、取り扱いに留意する必要がある。

今後、取得されていないイオン強度 0.2 の NaCl、$CaCl_2$、$MgCl_2$ 水溶液の膨潤量試験を実施し、予測評価に資するデータを整備する。

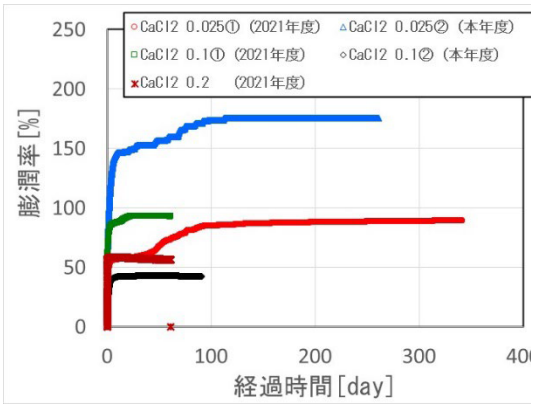
表 4-3- 24 試験ケースにおける最大膨潤率表

	試験溶液	イオン強度	乾燥密度 (Mg/m^3)	初期有効粘土密度 (Mg/m^3)	上載圧 (kPa)	最大膨潤率 (%)
リファレンス	イオン交換水	0	1 2(1.208)	0.980	8.8	140 8
			1.6(1.600)	1.368		216.0
			2.0(1.991)	1.800		277 8
Ⓐ 高イオン強度での陽イオン種の影響の検討	KCl	0 2	1 2(1.220)	0.991		14.15
		0.2 ①	2.0(1.984)	1.793		47.82
		0.2 ②	2.0(2.010)	1.824		41.29
	NaCl	0 5	1 2(1.208)	0.980		5.8
			1.6(1.590)	1.358		25.6
			2.0(2.026)	1.842		34.3
	KCl		1 2(1.221)	0.992		1.4
			1.6(1.593)	1.361		20.8
			2.0(1.986)	1.795		27.8
	$CaCl_2$		1 2(1.201)	0.973		9.6
			1.6(1.601)	1.369		15.7
			2.0(2.025)	1.840		38.5
	$MgCl_2$		1 2(1.217)	0.989		5.9
			1.6(1.591)	1.359		29.8
			2.0(1.985)	1.794		40.0
Ⓑ 高イオン強度での異なる陽イオン種の混合に伴う影響の検討	NaCl-KCl 混合（モル濃度比 1：1）	0 5	1 2(1.203)	0.975		3.4
			1.6(1.597)	1.365		27.6
			2.0(2.005)	1.817		37.3
Ⓒ イオン交換水に交換した影響の検討	NaCl⇒イオン交換水	0 5 ⇒ 0	1 2(1.208)	0.980		6.8
			1.6(1.590)	1.358		156.4
			2.0(2.026)	1.842		242.9
	KCl⇒イオン交換水	0 5 ⇒ 0	1 2(1.208)	0.992		30.0
			1.6(1.593)	1.361		47.8
			2.0(1.986)	1.795		195 2
Ⓓ NaCl 溶液でのイオン強度の影響の検討	NaCl	0.025	1.6(1.622)	1.391		187.7
		0.05	1.6(1.615)	1.384		147.9
		0.075	1.6(1.608)	1.377		97.5
		0.10	1.6(1.605)	1.374		95.2
		0.15	1.6(1.608)	1.377		62.4
		0 20	1.6(1.607)	1.376		45.2
Ⓔ Na イオン以外の陽イオン種ごとのイオン強度の影響の検討	KCl	0.025①	1.6(1.600)	1.369		141.9
		0.025②	1.6(1.577)	1.345		80.9
		0.10①	1.6(1.600)	1.369		55.0
		0.10②	1.6(1.572)	1.340		69.2
		0.20①	1.6(1.600)	1.369		56.4
		0.20②	1.6(1.617)	1.387		41.3
	$CaCl_2$	0.025①	1.6(1.590)	1.358		175
		0.025②	1.6(1.574)	1.358		85
		0.10①	1.6(1.590)	1.358		92.8
		0.10②	1.6(1.600)	1.369		42.2
		0 20	1.6(1.591)	1.359		59.1
	$MgCl_2$	0.025①	1.6(1.598)	1.367		75
		0.025②	1.6(1.595)	1.367		160
		0.10①	1.6(1.598)	1.367		50
		0.10②	1.6(1.598)	1.367		75
		0 20	1.6(1.598)	1.369		65
Ⓕ 複数イオン種を含む溶液のイオン強度の影響の検討	NaCl- $CaCl_2$ 混合（モル濃度比 1：1.5）	0.025	1.6(1.601)	1.370		103.1
		0.10	1.6(1.601)	1.370		34.6
	NaCl-$MgCl_2$ 混合（モル濃度比 1：0.4）	0.025	1.6(1.612)	1.381		173.4
		0.10	1.6(1.588)	1.586		39.2
Ⓖ 沿岸部実地下水の影響の検討	FGB-2_167.70-171.78m	0 283	1.6(1.604)	1.373		62.0
	FGB-2_214.75-220.52m	0.727	1.6(1.591)	1.359		22.3

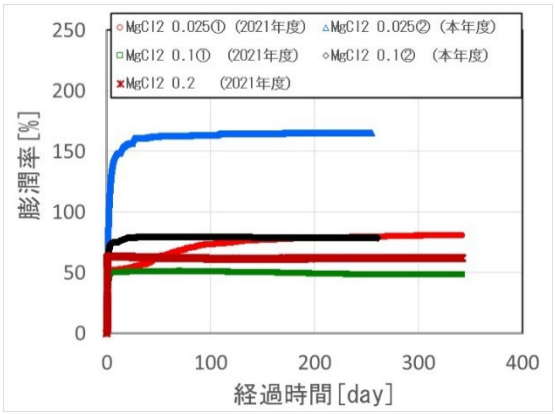
※乾燥密度の（ ）内は、試験開始前の供試体の実寸法から求めた乾燥密度を示す。



（a）KCl 水溶液



(b) $CaCl_2$水溶液



（c）$MgCl_2$水溶液

図 4-3- 35　膨潤率の経時変化
（試験Ⓔ：Na^+イオン以外の陽イオン種ごとのイオン強度の影響）

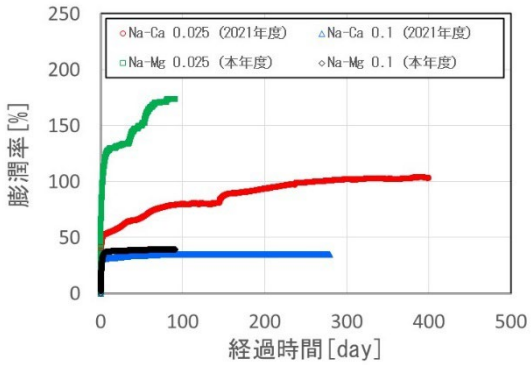


図 4-3- 36　膨潤率と経過変化
（試験Ⓕ：複数の陽イオン種を含むイオン強度の影響）

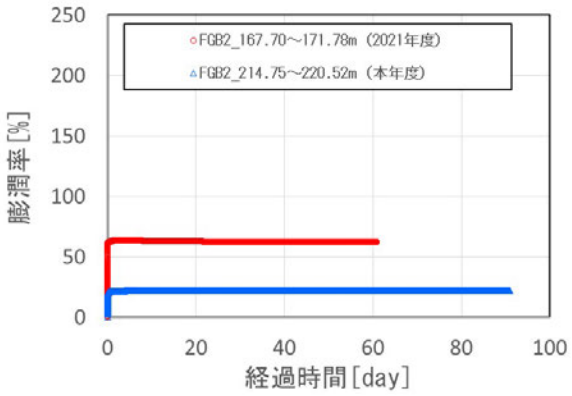


図 4-3- 37　膨潤率の経時変化
（Ⓖ 沿岸部実地下水の影響）

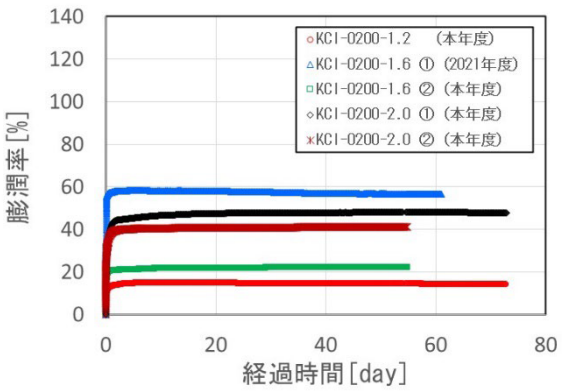
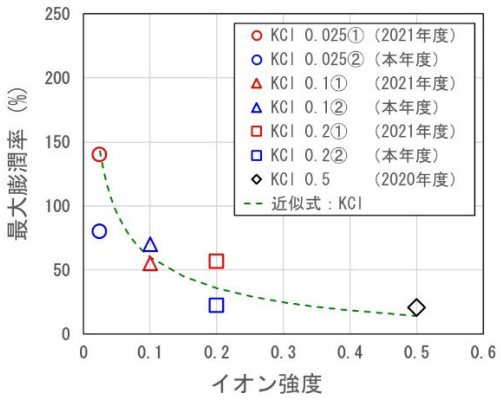
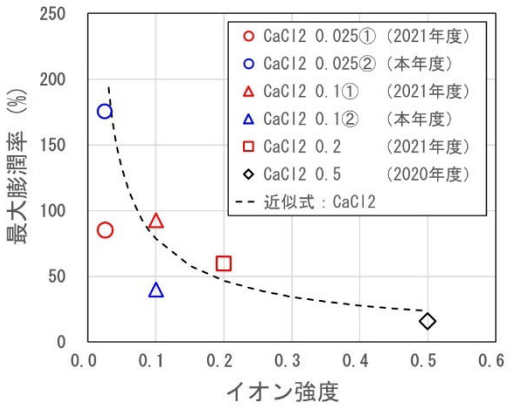


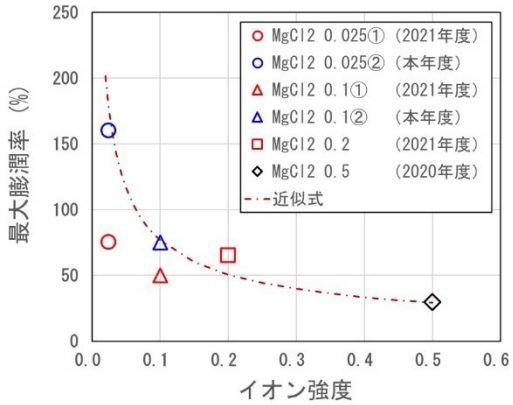
図 4-3- 38　膨潤率の経時変化
（Ⓗ KCl 水溶液 イオン強度 0.2 初期乾燥密度の影響）



（a）KCl 水溶液



(b) $CaCl_2$水溶液



（c）$MgCl_2$水溶液

図 4-3- 39　イオン強度と最大膨潤率の関係
（試験Ⓔ：Na^+イオン以外の陽イオン種ごとのイオン強度の影響）

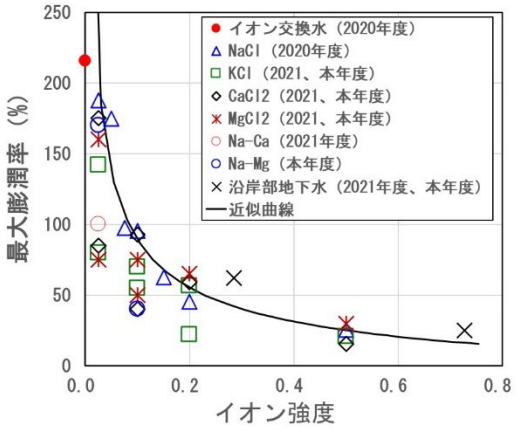


図 4-3- 40　イオン強度と最大膨潤率の関係（全試験結果）

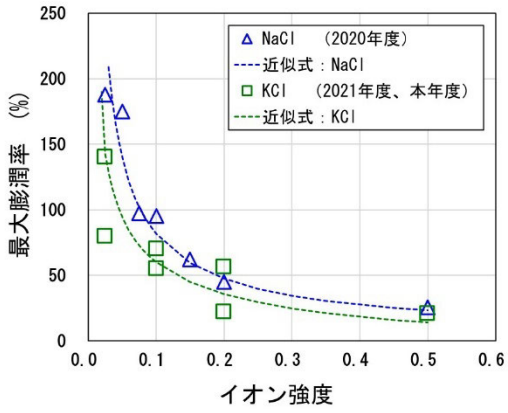


図 4-3- 41　イオン強度と最大膨潤率の関係（1 価の陽イオン（Na^+, K^+）の影響）

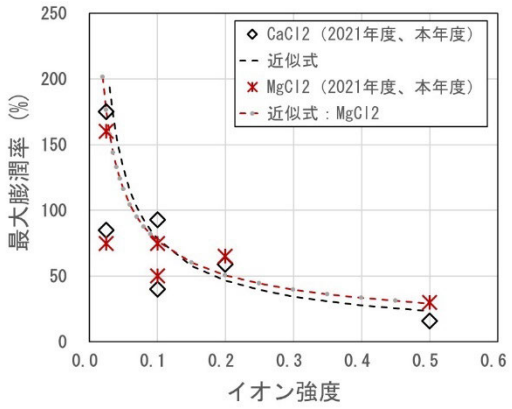


図 4-3- 42　イオン強度と最大膨潤率の関係（２価の陽イオン（Ca^{2+}, Mg^{2+}）の影響）

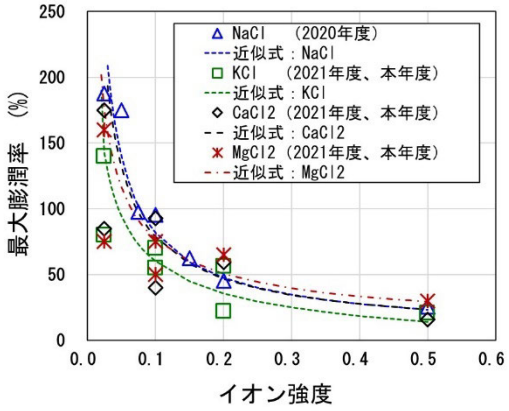


図 4-3- 43　イオン強度と最大膨潤率の関係（1 価と２価の陽イオンの影響）

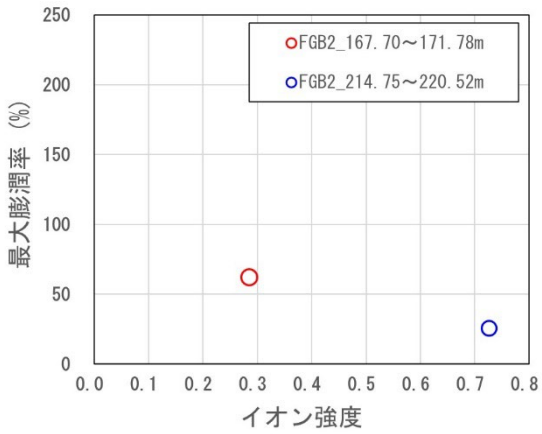


図 4-3- 44　イオン強度と最大膨潤率の関係（試験Ⓖ：沿岸部実地下水の影響）

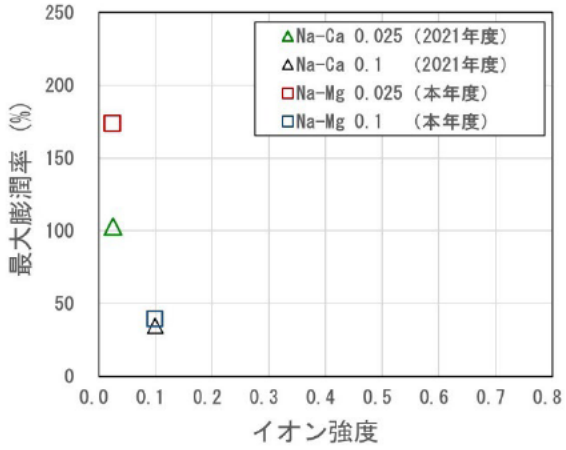


図 4-3- 45　イオン強度と最大膨潤率の関係（試験Ⓕ：複数の陽イオン種を含むイオン強度の影響）

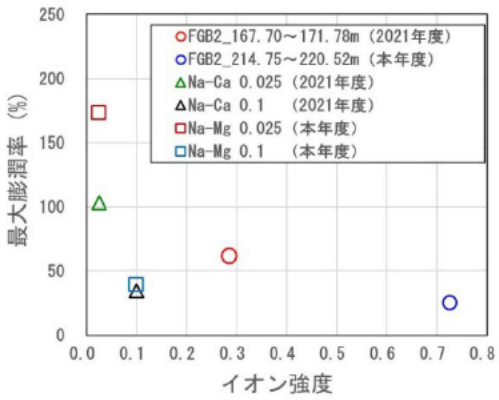


図 4-3- 46　イオン強度と最大膨潤率の関係
（複数の陽イオン（$NaCl+CaCl_2$ 混合溶液 $NaCl+MgCl_2$ 混合溶液、沿岸実地下水）の影響）

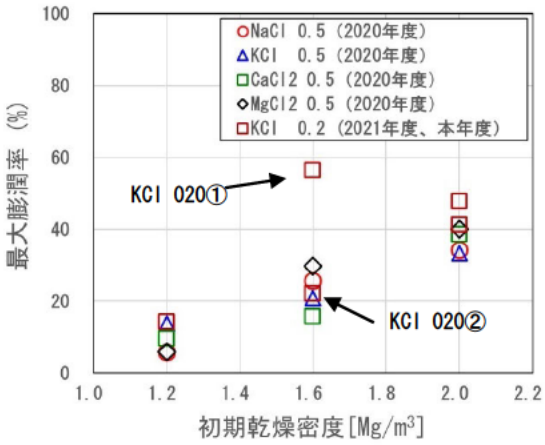


図 4-3- 47　イオン強度と最大膨潤率の関係（初期乾燥密度の影響）

（5）緩衝材の機能変化に係るデータ拡充のまとめ

緩衝材の膨潤率に対する浸潤する液相の溶存陽イオンの影響を確認する膨潤量試験において、令和 4 年度は、Na^+イオン以外の陽イオン種ごとのイオン強度の影響、複数イオン種を含む溶液のイオン強度の影響、沿岸部実地下水の影響および、イオン種ごとの初期乾燥密度の影響の検討を実施した。その結果、Na^+イオン以外の陽イオン種（K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}）ごとのイオン強度の影響に関しては、Na^+イオンと同様に、各陽イオン種ともにイオン強度が高くなるに従い、最大膨潤率が低下する令和 3 年度の近似式の傾向を示すものの、イオン強度で整理できない可能性が高いことがわかった。また、原子価数ごとに分けて整理した結果、最大膨潤圧は、1 価の Na^+イオンが最も高く、次に、2 価の Ca^{2+}イオンと Mg^{2+}イオンが概ね同等の値で示され、1 価の K^+イオンが最も低い傾向を示した。なお、本原因については、不明であるが、試験に用いた供試体の固相分析や液相分析等を実施し、今後、イオン交換の状態も含め検討することとする。

令和 5 年度は、沿岸部実地下水の影響および複合イオン種を含む溶液のイオン強度の影響を検討するため、乾燥密度 1.6Mg/m^3 においてイオン強度が重複する海水濃度及び海水濃度 10%程度のイオン強度と NaCl 水溶液および $CaCl_2$ 水溶液を用いたイオン強度 0.5 以上に高イオン強度の膨潤量試験を実施するとともに、イオン種ごとの初期乾燥密度の影響の検討するため、乾燥密度 1.2Mg/m^3 および 2.0Mg/m^3 におけるイオン強度 0.2 に調製した NaCl、$CaCl_2$、$MgCl_2$ 水溶液を用いた膨潤量試験を実施し、陽イオンの種類やイオン強度などが、ベントナイトの膨潤率に与える影響を系統的に把握し、多様な塩水系地下水における緩衝材の膨潤性能の評価手法の適用性を確認するためデータを整備する。

参考文献

Akinwunmi, B., Kporha, F. E. A., Hirvi, J., T., Kasa, S., Pakkanen, T., Atomistic simulations of the swelling behaviour of Na-montmorillonite in mixed NaCl and CaCl2 solutions., Chemical Physics 533, 110712, 2020.

Bradbury, M. H., Baeyens, B., Porewater Chemistry in Compacted Re-Saturated MX-80 Bentonite: Physico-Chemical Characterisation and Geochemical Modelling., P.S.I., 02-10, 2002

電気事業連合, 核燃料サイクル開発機構, TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物 処分研究開発取りまとめ－, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, 2005.

Gaines, G.L., Thomas, H.C., Adsorption studies on clay minerals. II. A formulation of the thermodynamics of exchange adsorption., J. Chem. Phys., 21, 714–718., 1953.

原子力発電環境整備機構, 包括的技術報告書　わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築－, NUMO-TR-20-03, 2021.

原子力環境整備促進･資金管理センター, 平成 29 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発報告書（第 2 分冊）－人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材, 2018.

Hedström, M., and Karnland, O., Ca/Na selectivity coefficients from the Poisson–Boltzmann theory., Phys. Chem. Earth., Parts A/B/C 36.17-18, 1559-1563, 2011.

Karnland O., Birgersson M., and Hedstrom M., Selectivity coefficient for sodium/calcium exchange in highly compacted bentonite, Phys. Chem. Earth., doi:10.1016/j.pce.2011.07.023., 2011.

小峯秀雄, 緒方信英, 放射性廃棄物処分のための砂・ベントナイト混合材料の膨潤特性とその評価法, 電力中央研究所　U96029, 1997.

Mihara, M., Sasaki, R., RAdio-nuclides Migration DAtasets (RAMDA) on Cement, Bentonite and Rock for TRU Waste Repository in Japan, JNC TN8400 2005-027, 49p., 2005.

Missana, T., Garcia-Gutierrez, M., Adsorption of bivalent ions (Ca(II), Sr(II) and Co(II) onto FEBEX bentonite, Phys. Chem. Earth, 32, 559–567, 2007.

Moldrup P., T. Olesen, D. E. Rolston, T. Yamaguchi., Modeling diffusion and reaction in soils: VII. Predicting gas and ion diffusivity in undisturbed and sieved soils, Soil Sci., 162(9), 632-640, 1997.

Mualem, Y., A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media., Water Resour. Res., 12, pp. 513-522, 1976.

日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 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), 平成30年度 報告書, 2019.

小田治恵, 柴田雅博士, ベントナイト-水相互作用の実験とモデル化, JNC TN8400-99-032, 1999.

鬼形正伸, ベントナイトの特性とその応用, 粘土科学, 第46巻 第2号 p.131-138, 2007.

Parkhurst, D. L., Appelo, C. A. J.,User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Water-resources investigations report, 99(4259), 312, 1999.

佐藤努, 粘土基礎講座Ⅰ －粘土の特性と利用－, 粘土科学, No.41, Vol.1, pp.26-33, 2001.産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 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（沿岸部処分システム 高度化開発）平成 27 年度～平成 30 年度取りまとめ報告書, 2019.

産業技術総合研究所, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 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（沿岸部評価確証技術開発）令和2年度 報告書, 2021.

産業技術総合研究所, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 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（沿岸部評価確証技術開発）令和3年度 報告書, 2022.

Šimůnek, J., M. Šejna, H. Saito, M. Sakai, and M. Th. Van Genuchten, The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.17, HYDRUS Software Series 3, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA, 343p., 2013.

鈴木英明, 藤田朝雄, 緩衝材の不飽和水理特性, サイクル機構技術資料, JNC TN8430 99-010, 76 p., 1999.

田中幸久, 中村邦彦, 海水の濃度と高温履歴がベントナイトの膨潤特性に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.806/Ⅲ-73, pp.93-111, 2005.

戸井田克, 笹倉 剛, 横関康祐, 小林一三, 渡邉賢三, 芦澤良一, 人工バリア材料の力学的物性取得試験, JNC TJ8400 2004-036, 2005.

van Genuchten, M. Th., A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils., Soil Sci. Soc. Am. J., 44, pp. 892-898 , 1980.

四辻健治, 舘幸男, 西巻祐一郎, 拡張 Poisson-Boltzmann 方程式による圧縮ベントナイト中の拡散モデルの高度化検討, JAEA-research 2011.47,1-105, 2012.

図目次

図 4-1- 1　沿岸部処分において構成要素に作用する外的要因の整理.....229
図 4-1- 2　支保工において想定される状態変遷の一例.....230
図 4-1- 3　緩衝材において想定される状態変遷の一例図 230

図 4-2- 1　坑道の支保工及び覆工の状態変遷と維持期間のイメージ.....233
図 4-2- 2　今フェーズの検討課題と研究のアプローチ及び成果の目標 237
図 4-2- 3　浸漬試験の模式図 241
図 4-2- 4　分類した地下水の化学組成 247
図 4-2- 5　希釈した人工海水と比較した FGB-3_113 m のヘキサダイヤグラム 250
図 4-2- 6　コンクリートの力学的特性に影響を与える地下水の成分の整理 252
図 4-2- 7　ペースト試料の 10 箇月間浸漬後の低アルカリ性化領域の測定結果.....259
図 4-2- 8　FGB-2_167.70～171.78 m　ペースト試料 10 箇月浸漬　μXRD 測定結果 261
図 4-2- 9　FGB-2_214.75～220.52 m　ペースト試料 10 箇月浸漬　μXRD 測定結果 262
図 4-2- 10　人工海水　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果.....270
図 4-2- 11　海水 B　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果 271
図 4-2- 12　海水 G　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果.....272
図 4-2- 13　降水 A　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果 273
図 4-2- 14　降水 D+F　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果 274
図 4-2- 15　FGB-2_167.70～171.78 m　ペースト試料 10 箇月浸漬　ヤング率測定結果.....275
図 4-2- 16　FGB-2_214.75～220.52 m　ペースト試料 10 箇月浸漬　ヤング率測定結果.....276
図 4-2- 17　FGB-2_167.70～171.78 m　吹付け想定 OPC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果.....278
図 4-2- 18　FGB-2_167.70～171.78 m　吹付け想定 BFSC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果.....279
図 4-2- 19　FGB-2_167.70～171.78 m　セグメント想定 OPC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果 280
図 4-2- 20　FGB-2_167.70～171.78 m　セグメント想定 BFSC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果.....281
図 4-2- 21　FGB-2_214.75～220.52 m　吹付け想定 OPC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果.....282

図 4-2- 22　FGB-2_214.75～220.52 m　吹付け想定 BFSC　 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果.....283
図 4-2- 23　FGB-2_214.75～220.52 m　セグメント想定 OPC　 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果 284
図 4-2- 24　FGB-2_214.75～220.52 m　セグメント想定 BFSC　 10 箇月浸漬 EPMA 測定結果.....285
図 4-2- 25　ペースト試料の反射電子像の低輝度面積の変化率と硬度の変化率の関係 288
図 4-2- 26　人工海水　3 箇月浸漬　吹付け想定 OPC の微細領域元素分布測定結果 291
図 4-2- 27　海水 B　3 箇月浸漬　吹付け想定 OPC の微細領域元素分布布測定結果 292
図 4-2- 28　海水 G　3 箇月浸漬　吹付け想定 OPC の微細領域元素分布布測定結果 293
図 4-2- 29　降水 A　3 箇月浸漬　吹付け想定 OPC の微細領域元素分布測定結果...294
図 4-2- 30　FGB-2_167.70～171.78 m　10 箇月浸漬　 吹付け想定 OPC の微細領域元素分布測定結果 295
図 4-2- 31　 FGB-2_167.70～171.78 m　10 箇月浸漬　 吹付け想定 BFSC の微細領域元素分布測定結果.....296
図 4-2- 32　 FGB-2_214.75～220.52 m　10 箇月浸漬　 吹付け想定 OPC の微細領域元素分布測定結果 297
図 4-2- 33　 FGB-2_214.75～220.52 m　10 箇月浸漬　 吹付け想定 BFSC の微細領域元素分布測定結果.....298
図 4-2- 34　地下水化学組成が硬度に与える影響（吹付け OPC） 301
図 4-2- 35　地下水化学成分が硬度に与える影響（吹付け想定 BFSC） 301
図 4-2- 36　地下水化学成分が硬度に与える影響（セグメント想定 OPC） 302
図 4-2- 37　地下水化学成分が硬度に与える影響（セグメント想定 BFSC.....302
図 4-2- 38　各部材で想定した環境条件 304
図 4-2- 39　フロースルー試験の模式図 313
図 4-2- 40　浸漬試験の模式図 313
図 4-2- 41　コンクリート表面への二次鉱物生成の確認試験の模式図.....313
図 4-2- 42　コンクリート試料の 10 箇月間浸漬後の低アルカリ性化領域の評価結果 315
図 4-2- 43　降水 A　コンクリート試料 10 箇月浸漬　μXRD 測定結果.....317
図 4-2- 44　FGB-2_167.70～171.78 m.....318
図 4-2- 45　人工海水流速変更　コンクリート試料 10 箇月浸漬　μXRD 測定結果..319

図 4-2- 46　降水 A　コンクリート試料 10 箇月浸漬　ヤング率測定結果.....324
図 4-2- 47　FGB-2_167.70～171.78 m　コンクリート試料 10 箇月浸漬　ヤング率測定結果.....325
図 4-2- 48　人工海水流速変更　コンクリート試料 10 箇月浸漬　ヤング率測定結果.....326
図 4-2- 49　降水 A　吹付けコン OPC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果.....328
図 4-2- 50　降水 A　吹付けコン BFSC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果.....329
図 4-2- 51　降水 A　セグメント OPC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果.....330
図 4-2- 52　降水 A　セグメント BFSC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果.....331
図 4-2- 53　FGB-2_167.70～171.78 m　吹付けコン OPC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果.....332
図 4-2- 54　FGB-2_167.70～171.78 m　吹付けコン BFSC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果.....333
図 4-2- 55　FGB-2_167.70～171.78 m　セグメント OPC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果.....334
図 4-2- 56　FGB-2_167.70～171.78 m　セグメント BFSC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果.....335
図 4-2- 57　人工海水流速変更　吹付けコン OPC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果 336
図 4-2- 58　人工海水流速変更　吹付けコン BFSC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果.....337
図 4-2- 59　降水 A　コンクリート試料 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果 平均濃度プロファイル（1/3）.....338
図 4-2- 60　降水 A　コンクリート試料 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果 平均濃度プロファイル（2/3）.....339
図 4-2- 61　降水 A　コンクリート試料 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果 平均濃度プロファイル（3/3）.....340
図 4-2- 62　FGB-2_167.70～171.78 m　コンクリート試料 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果　平均濃度プロファイル（1/3）.....341
図 4-2- 63　FGB-2_167.70～171.78 m　コンクリート試料 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果　平均濃度プロファイル（2/3）.....342
図 4-2- 64　FGB-2_167.70～171.78 m　コンクリート試料 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果　平均濃度プロファイル（3/3）.....343
図 4-2- 65　人工海水（流速早い）コンクリート試料 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果 平均濃度プロファイル（1/3）.....344
図 4-2- 66　人工海水（流速早い）コンクリート試料 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果 平均濃度プロファイル（2/3）.....345

図 4-2- 67　人工海水（流速早い）コンクリート試料 10 箇月浸漬　 EPMA 測定結果平均濃度プロファイル（3/3） 346
図 4-2- 68　コンクリートの反射電子像の強度低下領域の面積比と硬度の変化率の関係 349
図 4-2- 69　コンクリート表面への二次鉱物生成確認の結果（目視観察）.....351
図 4-2- 70　地下水化学成分が硬度に与える影響（10 箇月浸漬　吹付けコン OPC） 354
図 4-2- 71　地下水化学成分が硬度に与える影響（10 箇月浸漬　吹付けコン BFSC） 354
図 4-2- 72　地下水化学成分が硬度に与える影響（10 箇月浸漬　セグメント OPC） 355
図 4-2- 73　地下水化学成分が硬度に与える影響（10 箇月浸漬　セグメント BFSC） 355
図 4-2- 74　相平衡多元素移動計算コードの模式図.....357
図 4-2- 75　降水 A10 箇月浸漬　セグメント OPC　EPMA 測定結果と解析結果の比較 367
図 4-2- 76　降水 A10 箇月浸漬　セグメント OPC　EPMA 測定結果と解析結果の比較（石灰石骨材の Ca の影響を補正） 368
図 4-2- 77　セグメント OPC の 10 箇月降水 A 浸漬　コンクリートの組成解析結果 369
図 4-2- 78　降水 A10 箇月浸漬　セグメント BFSC　 EPMA 測定結果と解析結果の比較 （石灰石骨材の Ca の影響を補正） 372
図 4-2- 79　 セグメント BFSC の 10 箇月降水 A 浸漬　コンクリートの組成解析結果 373
図 4-2- 80　人工海水 10 箇月浸漬セグメント OPC　 EPMA 測定結果と解析結果の比較 （石灰石骨材の Ca の影響を補正） 376
図 4-2- 81　セグメント OPC の 10 箇月人工海水浸漬　コンクリートの組成解析結果 377
図 4-2- 82　人工海水 10 箇月浸漬セグメント BFSC　 EPMA 測定結果と解析結果の比較（石灰石骨材の Ca の影響を補正） 380
図 4-2- 83　セグメント BFSC の 10 箇月人工海水浸漬　コンクリートの組成解析結果 381
図 4-2- 84　FGB-2_167.70～171.78 m10 箇月浸漬セグメント OPC　 EPMA 測定結果と解析結果の比較（石灰石骨材の Ca の影響を補正） 384
図 4-2- 85　セグメント OPC の 10 箇月 FGB-2_167.70～171.78 m 浸漬　 コンクリートの組成解析結果 385

図 4-2- 86　μXRD の分析箇所（例）.....386
図 4-2- 87　FGB-2_167.70～171.78 m10 箇月浸漬セグメント BFSC　EPMA 測定結果と解析結果の比較（石灰石骨材の Ca の影響を補正）.....388
図 4-2- 88　セグメント BFSC の 10 箇月 FGB-2_167.70～171.78 m 浸漬　コンクリートの組成解析結果.....389
図 4-2- 89　外部析出層の設定イメージ図.....396
図 4-2- 90　VCCTL モデルによる水和後のセメントペーストの 三次元的イメージデータの例.....413
図 4-2- 91　コンクリートの強度予測モデルの構築方法.....413
図 4-2- 92　VCCTL モデルによる強度予測モデルの検討フロー.....415
図 4-2- 93　セメントの粒度分布の測定結果.....419
図 4-2- 94　粗骨材の点載荷試験結果.....427
図 4-2- 95　切断後のペースト（上半分）.....429
図 4-2- 96　モルタルの X 線 CT 測定結果（左：断面、三次元画像）.....433
図 4-2- 97　乾燥前のコンクリートの X 線 CT 測定結果.....435
図 4-2- 98　乾燥後のコンクリート（打設面側）の X 線 CT 測定結果.....435
図 4-2- 99　乾燥後のコンクリート（底面側）の X 線 CT 測定結果.....436
図 4-2- 100　VCCTL による水和反応の解析結果（左：反応前、右：反応後）.....440
図 4-2- 101　VCCTL によるセメントの水和解析結果.....440
図 4-2- 102　セメントペーストの解析モデル.....444
図 4-2- 103　硬化セメントペーストの応力ひずみ曲線（左：圧縮、右：引張）.....444
図 4-2- 104　引張時の応力ひずみ曲線.....444
図 4-2- 105　モルタルの解析モデル（青：砂、赤：セメントペースト相）.....446
図 4-2- 106　モルタルの応力ひずみ曲線（左：圧縮、右：引張）.....446
図 4-2- 107　引張時の応力ひずみ曲線.....446
図 4-2- 108　コンクリートの解析モデル（青：骨材、赤：モルタル相）.....448
図 4-2- 109　コンクリートの一軸圧縮時の応力ひずみ計算結果.....448
図 4-2- 110　コンクリートの一軸圧縮時のひずみと損傷の関係（赤：損傷）.....449

図 4-3- 1　沿岸部地下水（産業技術総合研究所ほか, 2019）のイオン強度.....463
図 4-3- 2　沿岸部実地下水（FGB-2 孔_167.70~171.78 m）及び沿岸部地下水（産業技術総合研究所ほか, 2019）の成分中の陽イオン量.....471
図 4-3- 3　試験装置概念図.....473
図 4-3- 4 K Cl-NaCl 混合溶液、イオン強度 0.125（ケース⑥）の分析結果.....475
図 4-3- 5 $CaCl_2$-NaCl 混合溶液、イオン強度 0.5（ケース⑧）の分析結果.....475
図 4-3- 6　沿岸部実地下水 FGB2 孔_167.70～171.78m（ケース⑫）の分析結果....475

図 4-3- 7 イオン強度とイオン交換選択係数の関係（通水試験）.....478
図 4-3- 8 イオン強度とイオン交換選択係数の関係（バッチ試験）.....480
図 4-3- 9 層間陽イオン量の分析結果（バッチ試験試料）.....481
図 4-3- 10 各算出方法による陽イオン交換選択係数結果の比較.....481
図 4-3- 11 圧縮系及び分散系におけるイオン交換選択係数とイオン強度の関係.....483
図 4-3- 12 乾燥密度と Ca/Na の選択係数 $\log K_{GT}$ の関係（イオン強度 0.5 mol/L）.486
図 4-3- 13 乾燥密度による層間の電位分布の違い.....486
図 4-3- 14 乾燥密度による層間陽イオンの濃度分布.....487
図 4-3- 15 乾燥密度と Ca-Na イオン交換選択係数の関係（ポアソン-ボルツマン方程式と分子動力学法の比較）.....487
図 4-3- 16 イオン強度と Ca/Na の選択係数 $\log K_{GT}$ の関係 （乾燥密度 1.00Mg/m^3,モル濃度比 Ca:Na:Cl = 4:3:11）.....489
図 4-3- 17 イオン強度と Ca-Na 選択係数 $\log K_{GT}$ の関係（ポアソン-ボルツマン方程式と分子動力学法の比較）.....489
図 4-3- 18 検討の流れ.....495
図 4-3- 19 「②イオン交換選択係数の取得」の通水試験の再現解析水分特性曲線と比透水係数.....500
図 4-3- 20 排水中のイオン濃度の経時変化.....504
図 4-3- 21 層間陽イオンの当量分率.....504
図 4-3- 22 排水中イオン濃度の経時変化及び層間陽イオンの当量分率（ケース④）.....505
図 4-3- 23 排水中イオン濃度の経時変化及び層間陽イオンの当量分率（ケース⑧）.....505
図 4-3- 24 排水中イオン濃度の経時変化及び層間陽イオンの当量分率（ケース⑫）.....505
図 4-3- 25 Mg の Na に対するイオン交換選択係数を変更して実施したケース⑩の解析結果（排水中の陽イオン濃度変化）と試験結果の比較.....507
図 4-3- 26 試験終了時点の解析結果と試験結果（層間陽イオンの当量分率）の比較.....507
図 4-3- 27 カルサイト溶解を考慮した解析結果と非考慮の解析結果の比較.....509
図 4-3- 28 透水-膨潤圧試験の試験手順.....512
図 4-3- 29 載荷空気圧（試験における想定値）.....512
図 4-3- 30 透水 - 膨潤圧試験の再現解析に使用した水分特性曲線と比透水係数.....515
図 4-3- 31 試験終了後の吸着陽イオン組成と 通水終了時点（71.8 日後）での解析結果との比較.....517

図 4-3- 32　海水平衡ベントナイトについての試験終了後の吸着陽イオン組成と 平衡時（5,000 日後）の解析結果との比較.....517
図 4-3- 33　緩衝材の膨潤率に対する溶存陽イオンの影響把握に係る検討フロー 521
図 4-3- 34　本研究で使用する膨潤量に係る試験装置の概略図 523
図 4-3- 35　膨潤率の経時変化 （試験Ⓔ：Na^+イオン以外の陽イオン種ごとのイオン強度の影響） 528
図 4-3- 36　膨潤率と経過変化 （試験Ⓕ：複数の陽イオン種を含むイオン強度の影響） 528
図 4-3- 37　**膨潤率の経時変化 （Ⓖ 沿岸部実地下水の影響）** 529
図 4-3- 38　**膨潤率の経時変化 （Ⓗ KCl 水溶液 イオン強度 0.2 初期乾燥密度の影響）** 529
図 4-3- 39　**イオン強度と最大膨潤率の関係 （試験Ⓔ：Na^+イオン以外の陽イオン種ごとのイオン強度の影響）** 529
図 4-3- 40　**イオン強度と最大膨潤率の関係（全試験結果）** 530
図 4-3- 41　**イオン強度と最大膨潤率の関係（1 価の陽イオン（Na^+, K^+）の影響）** ...530
図 4-3- 42　**イオン強度と最大膨潤率の関係（２価の陽イオン（Ca^{2+}, Mg^{2+}）の影響）** 530
図 4-3- 43　**イオン強度と最大膨潤率の関係（1 価と２価の陽イオンの影響）** 530
図 4-3- 44　**イオン強度と最大膨潤率の関係（試験Ⓖ：沿岸部実地下水の影響）** 530
図 4-3- 45　**イオン強度と最大膨潤率の関係（試験Ⓕ：複数の陽イオン種を含むイオン強度の影響）** 531
図 4-3- 46　**イオン強度と最大膨潤率の関係 （複数の陽イオン（NaCl+$CaCl_2$ 混合溶液 NaCl+$MgCl_2$混合溶液 、沿岸実地下水）の影響）** 531
図 4-3- 47　イオン強度と最大膨潤率の関係 （初期乾燥密度の影響） 531

表目次

表 4-2- 1　本フェーズの年度展開 238
表 4-2- 2　浸漬試験の試験条件....241
表 4-2- 3　セメントペースト試料による浸漬試験の水準 243
表 4-2- 4　セメントペースト試料の材料....245
表 4-2- 5　セメントペースト試料の構成割合....245
表 4-2- 6　模擬地下水の化学組成 248
表 4-2- 7　FGB-2 及び FGB-3 ボーリング孔の実地下水の分析結果 250
表 4-2- 8　試験に使用した浸漬溶液の化学組成 254
表 4-2- 9　微小部エックス線回折（μXRD）分析条件 257
表 4-2- 10　FGB-2_167.70～171.78 m　ペースト試料 10 箇月浸漬　μXRD 測定結果 261
表 4-2- 11　FGB-2_214.75～220.52 m　ペースト試料 10 箇月浸漬　μXRD 測定結果 261
表 4-2- 12　模擬地下水に 3 箇月間浸漬した試料の硬度測定結果（kN/mm²） 265
表 4-2- 13　実地下水に 10 箇月間浸漬した試料の硬度測定結果（kN/mm²） 265
表 4-2- 14　人工海水　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm²） ...266
表 4-2- 15　海水 B　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm²） 266
表 4-2- 16　海水 G　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm²） 267
表 4-2- 17　降水 A　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm²） 267
表 4-2- 18　降水 D+F　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm²） ..268
表 4-2- 19　FGB-2_167.70～171.78 m　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm²） 268
表 4-2- 20　FGB-2_214.75～220.52 m　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm²） 269
表 4-2- 21　SEM 反射電子像によるセメントペースト試料の空隙率の測定結果....287
表 4-2- 22　接液面近傍の元素組成分布測定結果と硬度低下率 290
表 4-2- 23　吹付けコン試料による浸漬試験の水準....306
表 4-2- 24　セグメント試料による浸漬試験の水準....306
表 4-2- 25　コンクリート表面への二次鉱物生成の確認試験の試験水準 307
表 4-2- 26　吹付けコンのベースコンクリートの配合 309
表 4-2- 27　セグメントの配合 309
表 4-2- 28　吹付けコンのフロースルー試験の試験条件....311
表 4-2- 29　セグメントの浸漬試験条件 311
表 4-2- 30　コンクリート表面への二次鉱物生成の確認試験の試験条件 312

表 4-2- 31　降水 A　コンクリート試料 10 箇月浸漬　μXRD 測定結果.....317
表 4-2- 32　FGB-2_167.70～171.78 m　コンクリート試料 10 箇月浸漬　μXRD 測定結果.....317
表 4-2- 33　人工海水流速変更　コンクリート試料 10 箇月浸漬　μXRD 測定結果..318
表 4-2- 34　浸漬試験 10 カ月後の硬度測定結果（kN/mm²）.....322
表 4-2- 35　降水 A　コンクリート試料 10 箇月浸漬　ヤング率測定結果（kN/mm²）.....322
表 4-2- 36　FGB-2_167.70～171.78 m　コンクリート試料 10 箇月浸漬　ヤング率測定結果（kN/mm²）.....323
表 4-2- 37　人工海水流速変更　コンクリート試料 10 箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm²）.....323
表 4-2- 38　SEM 反射電子像によるコンクリート試料の空隙率の測定結果.....348
表 4-2- 39　コンクリート表面への二次鉱物生成確認の結果（目視観察）.....352
表 4-2- 40　解析コードの検証と外部析出層の影響を検討するための計算条件.....359
表 4-2- 41　OPC 及び BFSC の化学組成及び密度.....359
表 4-2- 42　セグメント OPC 及びセグメント BFSC の配合及び空気量.....359
表 4-2- 43　OPC の鉱物組成及び反応率.....360
表 4-2- 44　BFSC の鉱物組成及び反応率.....360
表 4-2- 45　計算に考慮した液相イオン種、拡散係数及び境界条件.....361
表 4-2- 46　各鉱物の反応式とその熱力学的平衡定数 - 1.....362
表 4-2- 47　各鉱物の反応式とその熱力学的平衡定数- 2.....363
表 4-2- 48　使用した C-A-S-H 溶解平衡モデルの反応式とその熱力学的平衡定数...364
表 4-2- 49　解析コードの検証と外部析出層の影響を検討するための物質移行解析条件（表面から約 10 mm）.....364
表 4-2- 50　解析コードの検証と外部析出層の影響を検討するための物質移行解析条件.....365
表 4-2- 51　セグメント OPC の 10 箇月降水 A 浸漬の鉱物相　試験結果と解析結果の比較.....370
表 4-2- 52　セグメント BFSC の 10 箇月降水 A 浸漬の鉱物相　試験結果と解析結果の比較.....374
表 4-2- 53　セグメント OPC の 10 箇月人工海水浸漬の鉱物相　試験結果と解析結果の比較.....378
表 4-2- 54　セグメント BFSC の 10 箇月人工海水浸漬の鉱物相　試験結果と解析結果の比較.....382
表 4-2- 55　セグメント OPC の 10 箇月 FGB-2_167.70～171.78 m 浸漬の鉱物相　試験結果と解析結果の比較.....386

表 4-2- 56　セグメント BFSC の 10 箇月 FGB-2_167.70～171.78 m 浸漬の鉱物相　試験結果と解析結果の比較.....390
表 4-2- 57　Google Scholar を用いた外部析出層を考慮した文献調査の検索条件....392
表 4-2- 58　海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（1/8）398
表 4-2- 59　海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（2/8）399
表 4-2- 60　海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（3/8）400
表 4-2- 61　海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（4/8）401
表 4-2- 62　海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（5/8）402
表 4-2- 63　海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（6/8）403
表 4-2- 64　海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（7/8）404
表 4-2- 65　海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（8/8）405
表 4-2- 66　コンクリートの強度予測モデル 411
表 4-2- 67　モデルのインプットデータ及び検証データの取得のための分析項目 ..415
表 4-2- 68　強度予測モデル検証用の試験体の作製条件.....417
表 4-2- 69　強度予測モデル検証用の試験体の作製に使用した材料 417
表 4-2- 70　作製した強度予測モデル検証用の試験体の配合.....417
表 4-2- 71　セメントの粒度分布測定条件.....419
表 4-2- 72　セメントの化学組成、ig.loss 421
表 4-2- 73　セメントの鉱物組成測定条件.....423
表 4-2- 74　セメントの鉱物組成測定結果.....423
表 4-2- 75　骨材の粒度分布.....425
表 4-2- 76　粗骨材の点載荷試験結果.....427
表 4-2- 77　ig.loss 及び insol.測定結果.....429
表 4-2- 78　ペーストの鉱物組成測定条件.....431
表 4-2- 79　ペーストの鉱物組成測定結果.....431
表 4-2- 80　ペーストのセメント鉱物相の反応率 431
表 4-2- 81　ペースト、モルタル、コンクリートの圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比 438
表 4-2- 82 鉱物組成の比較 441
表 4-2- 83　セメントペーストの解析に用いた値 443
表 4-2- 84　試験値と推定値の比較 451

表 4-3- 1　緩衝材の安全機能の確保に必要な緩衝材の設計要件の確認方法 463
表 4-3- 2　通水試験の計画.....467
表 4-3- 3　沿岸部実地下水（FGB-2 孔_167.70~171.78 m）の組成.....470
表 4-3- 4　分散系でのベントナイトのイオン交換反応試験ケース 470

表 4-3- 5　クニピア F のセルへの充填量（作製数 各ケース n=2）.....473
表 4-3- 6　通水試験条件.....473
表 4-3- 7　通水試験結果から算出したイオン交換選択係数（$\log K_{GT}$）.....478
表 4-3- 8　各平衡溶液から算出されたイオン交換選択係数一覧（バッチ試験）.....480
表 4-3- 9　固相分析を基に算出した陽イオン交換選択係数.....481
表 4-3- 10　ポアソン-ボルツマン方程式から求めた Ca/Na 選択係数と通水試験結果における Ca/Na 選択係数の比較.....491
表 4-3- 11 再現解析の対象とするケース.....495
表 4-3- 12　飽和・不飽和浸透流解析用パラメータ（1/2）.....498
表 4-3- 13　飽和・不飽和浸透流解析用パラメータ（2/2）.....499
表 4-3- 14　「②イオン交換選択係数の取得」の通水試験の再現解析移流分散用解析パラメータ.....501
表 4-3- 15　「②イオン交換選択係数の取得」の通水試験の再現解析に用いたイオン交換選択係数.....501
表 4-3- 16　再現解析に用いた初期状態におけるイオン交換サイトの組成表.....501
表 4-3- 17　圧力境界条件.....513
表 4-3- 18　透水 - 膨潤圧試験の再現解析における飽和・不飽和浸透流解析用パラメータ.....514
表 4-3- 19　透水 - 膨潤圧試験の再現解析に用いたイオン交換選択係数.....515
表 4-3- 20　透水 - 膨潤圧試験の再現解析に用いた初期状態におけるイオン交換サイトの組成.....515
表 4-3- 21 膨潤量試験の試験ケース.....520
表 4-3- 22　沿岸部実地下水の組成.....522
表 4-3- 23　供試体の諸元.....523
表 4-3- 24 試験ケースにおける最大膨潤率表.....527

４－４　緩衝材-オーバーパックの相互作用と緩衝材仕様に関わるデータの拡充

（1）　はじめに

①　背景及び目的

沿岸部及び沿岸海底部（以下、沿岸部）は特有の地質・地下水環境であり、地層処分場として想定した場合、少なからず地下水の海水成分を考慮する必要がある。地層処分場で使用が想定される人工バリアのうち、緩衝材について、地下水の動きを抑制する止水性、各バリア材との隙間を閉塞させる自己シール性の観点から、透水係数が低く膨潤率の大きいNa型ベントナイト（あるいは砂・Na型ベントナイト混合土）に関する多くの研究がなされている（例えば、小峯・緒方、1999)。一方で、ベントナイトの膨潤変形試験中に試料に供給する溶液を純水と人工海水の場合で比較した研究では、Na型ベントナイトは人工海水濃度が大きくなるほど最大膨潤率が小さくなること（田中・中村、2004）や、またイオン濃度の影響をうけやすいことなどが知られている（直井ほか、2005)。このため、Na型ベントナイトに加え、代替えオプションとなり得る海水との平衡を考慮したイオン型の異なるベントナイト（例えば、層間陽イオン組成が主に2価のCa型/Ca型化ベントナイトなど）に着目することも、処分場の頑健性を高める上で重要と考えられる。
沿岸部の地下水環境が塩分を含むことを考慮し、また、イオン型の異なるベントナイトを用いた場合、人工バリア性能評価上の不確実性としては、①膨潤性が異なると予想される緩衝材中のオーバーパックの変位（移動）挙動（緩衝材とオーバーパックの力学的相互作用)、②オーバーパックの変位や腐食膨張などに伴い緩衝材中に生じるせん断帯の自己修復性、③物質移行－化学反応における二次生成物種の想定と沈殿による効果、などが考えられるが、特にイオン型の異なるベントナイトではあまり検討が進んでいない。

オーバーパックの変位挙動は、周辺材料（緩衝材や岩盤）との複合挙動であり、周辺材料の力学特性に強く依存する。また、不飽和から飽和に至る再冠水期は数十年以上にわたる。このため、オーバーパックの変位とそれにともなう緩衝材の変形に関する力学的相互作用は模型試験によって現象を把握する必要があるが、イオン型の異なるベントナイトを使用したり沿岸部の地下水環境を考慮した模型試験の事例は見当たらず、知見がない。また、オーバーパックの変位や腐食膨張などにともない緩衝材に生じるせん断帯の物質移行特性、また化学的雰囲気次第では、二次生成物のクロッギングが物質移行を変化させる可能性については、模型試験では捉えきれず、要素試験で実施する場合でもその難易度は高い。

このため本研究では、沿岸部特有の地下水環境下であることを考慮した人工バリア（緩衝材）性能評価に資する緩衝材仕様に関するデータの拡充を行うことを目的とする。取得したデータなどを通じて、沿岸部の多様な地下水環境条件に柔軟に対応できる緩衝材の材料仕様に関する定量的な評価手法の整備を目指す。

② 試験計画及び実施内容

(a) 本研究の中長期的な目的（試験計画）

本研究の中長期的な目的は、以下の 2 点である。

- 沿岸部特有の地下水環境下であることを考慮した人工バリア（緩衝材）性能評価に資するデータの拡充を行う。
- 取得したデータなどを通じて、沿岸部の多様な地下水環境に柔軟に対応できる緩衝材の材料仕様に関する定量的な評価手法の整備を目指す。

１つ目について、具体的には、オーバーパックの変位挙動とその周辺材料（緩衝材及び岩盤）の変形との力学的相互作用を評価するための物理模型試験と、緩衝材に生じるせん断などの局所現象を評価するための要素試験を実施することである。

２つ目については、海水（塩水）環境下における人工バリア（緩衝材）の機能変化を把握し、水質変化に起因する不確実性の低減、設計へフィードバックできる材料仕様選定に資する知見を得ることである。

これらの目的達成に資するための試験計画を表 4-4-1 に示す。

(b) 本年度の実施内容

試験計画に基づき、本年度の実施内容は以下の通りである。

要素試験に関しては昨年度に引き続きベントナイトの自己修復性に着目した、透水膨潤試験およびせん断透水試験を実施する。イオン濃度及びイオン種が透水係数に及ぼす影響を区別しながら検討を進めるため、ベントナイトと海水とのイオン交換反応が平衡状態に至るまでイオン交換処理を施した試料（海水平衡ベントナイト）を用いる。試験用水は、人工海水のイオン濃度を 1～3 倍まで変化させた人工海水を用い、その影響を把握する。また、海水がセメント等で構成される支保と反応した溶液が緩衝材に侵入することを想定し、その反応水により緩衝材が化学的変質することも考えられる。このため、本年度より新たに、セメント系材料と海水を反応させた試験溶液とベントナイトの相互作用を調べるバッチ試験を実施する。

模型試験に関しては、昨年度と同様の材料・模型、すなわち金属容器に緩衝材とオーバーパックを封入した模型を用いた緩衝材の変形を拘束した条件下で単純模型試験を実施する。一方、再冠水が完了する期間を見据え、より長期間の評価を行うために過年度より縮尺を小さくした 1/50 寸法の模型を用い 50G の遠心力場において、加速の効果を高めた試験を実施する。

数値解析に関しては、本年度実施する遠心力模型試験と同等な条件の再現解析を行う。また、影響が大きいパラメータを推定するための感度解析も合わせて実施する。

表 4-4-1　本研究に関わる全体の試験計画

		FY H31 (2019)	FY R02 (2020)	FY R03 (2021)	FY R04 (2022)	FY R05 (2023)
要素試験	試験環境整備・試験手順の検討	■■■■	■■			
	透水性に対する海水影響の検討		■■■	■■■■	■■	
	力学的観点からの自己修復性の検討		■■■	■■■■	■■■■	
	化学的観点からの性能変化の検討				■■■■	■■■■
模型試験	試験環境整備	■■■	■■	■■	■■	■■
	変形拘束条件の単純模型試験(1/30 寸法)	■■■■	■■■■	■■■■		
	変形拘束条件の単純模型試験(1/50 寸法)				■■■■	■■■■
数値解析	模型試験の数値解析			■■■■	■■■■	■■■■

（２）　要素試験(力学)

①　要素試験(力学)の背景および目的

沿岸部における地層処分場を想定した場合、再冠水の初期段階から、化石海水を含む様々な組成の海水系地下水が緩衝材に浸透することが想定される。人工バリア(緩衝材)の性能に関する沿岸部特有の課題として、海水系地下水の高イオン濃度の影響により、緩衝材の候補として考えられているベントナイト(膨潤性粘土) に凝集やイオン交換反応が生じることで、その工学的性質が変化することが考えられる。既往の研究において、圧縮ベントナイトに対して人工海水や幌延の地下水を用いた室内試験は数多く実施されている(高治ほか、2003；菊池・棚井、2005；高山・菊池、2020)。しかし、室内試験に供した圧縮ベントナイト内部においてイオン交換の程度(反応領域やその拡大速度)が不明であること、液体のイオン濃度による凝集等とイオン交換による影響を区別することが困難であること、化石海水に相当する高イオン濃度の影響に関するデータが少ないことなどの点において、設計や性能評価に用いる知見が不足している。

緩衝材の設計要件である自己シール性や低透水性は、ベントナイトの膨潤性に起因する特性である。ベントナイトの膨潤機構として、モンモリロナイト結晶層間の内外におけるイオン濃度差により生じる浸透性膨潤がある。なお、産地等が異なる各種ベントナイトの膨潤性は、モンモリロナイトの層間陽イオンの組成によって異なるとされている。具体的には、モンモリロナイトの層間陽イオンが層間陽イオンに Na イオンや Li イオンを多く含むモンモリロナイトは、単位層同士の Na イオン、Li イオンによる電気的引力が弱いため、水に分散させると層間陽イオンと水分子が水和し、やがて単位層にまで分離する。一方、層間陽イオンに Mg、Ca イオン等の 2 価の陽イオンを多く含む場合、これらのイオンによる単位層同士の電気的引力が強いため、水和による結晶層間の拡大には限りがあることが知られている(Fukushima、1984；佐藤、1996)。こうしたことから、沿岸部の地下水環境下では、間隙水のイオン濃度の増加により浸透性膨潤による各性能が発現しにくくなることに加え、地下水とのイオン交換が生じることで、2 価の層間陽イオンの比率が高まり、拡散二重層が発達しにくくなることが予想される。したがって、沿岸部の地下水組成に対して設計や性能評価を行う上で、海水系地下水による緩衝材の性能変化について膨潤機構と関連付けて理解することは重要であると考えられる。

その他の課題としては、オーバーパックの変位や腐食膨張により、緩衝材が比較的大きなせん断変形を受けた場合、局所的に透水性が変化する可能性が考えられる。緩衝材の設計要件である自己修復性に着目すると、このようなせん断を受けた場合であっても、ベントナイトの膨潤により局所的な水みち(短絡経路)が生じないことが重要と考えられる。しかし、せん断変形を受けたベントナイトの透水性の変化に関する実験的な調査事例は少なく、特に、せん断方向に沿った透水性や自己修復性の評価はほとんど行われていない。

このため要素試験では、沿岸部の地下水環境に対する柔軟な設計や、設計で対応できる範囲を明らかにすることを目指し、緩衝材の低透水性や自己修復性に関する評価方法を整

備しデータを取得する。また、海水系地下水のイオン濃度に応じた性能変化の幅、あるいは不確実性の少ない材料仕様の設定に結びつけることも視野に入れ、各特性の検討を行う。要素試験で得られる成果から、例えば、締め固めたベントナイトの低透水性の観点から設計上許容できる海水系地下水のイオン濃度の範囲を把握することで、材料条件やサイト選定に資することが期待される。

平成 31 年度は、予備的な透水試験やせん断試験の結果を参考に、せん断透水試験を実施するための試験環境整備を進めた。令和 2 年度は、せん断透水試験の試験手順を決定し、透水性に対する海水影響ならびに力学的観点からの自己修復性を検討した。令和 3 年度は、海水系地下水とのイオン交換反応が平衡に至った状態のベントナイトを模して、人工海水でイオン交換処理を施したベントナイト(以後、海水平衡ベントナイトと称する)を作製した。これを要素試験に用いることで、試験中、人工海水の通水に伴う圧縮ベントナイトのイオン交換反応を抑制し、人工海水によるイオン交換と、イオン濃度およびイオン種が透水係数に及ぼす影響を区別しながら検討を進めた。令和 4 年度は、引き続き海水平衡ベントナイトを用いた試験データの拡充に努めるとともに、得られた結果に関する考察を深めるための検討を実施した。

② 試料および試料の準備

(a) 使用するベントナイトと人工海水

本研究では、Na 型ベントナイトとしてクニゲル V1(クニミネ工業)、Ca 型ベントナイトとしてクニボンド(クニミネ工業)、Na 型ベントナイトへの混合用の砂として 50%粒径が約 0.2 mm の三河ケイ砂を使用した。本研究で使用するベントナイトとして、原子力発電環境整備機構(2021)において緩衝材の仕様として検討されているクニゲル V1－砂混合土の他、上述のとおり膨潤特性の異なる Ca 型ベントナイトに着目した。ここでは、入手のしやすさから、主要な層間陽イオンが Ca イオンとなるクニボンドを選択した。

試験用水としては、イオン交換水、および海水系地下水を想定した人工海水を用いた。要素試験には数か月以上の試験期間を要することも想定されたことから、水質の安定性を優先し、海水系地下水を想定した試験用水として人工海水を使用する。具体的には、試薬としてマリンアート SF-1(大阪薬研)を、試薬調整にはイオン交換水を使用した。マリンアートの成分を表 4-4-2 に示す。陽イオンについては Na が最も高く、次いで Mg である。陰イオンは Cl が最も高く、次いで SO_4 である。なお、我が国においては、海水の約 1.5～2 倍の塩化物濃度を示す化石海水が確認されている(高村ら、2006；村松ら、2012)。このことを考慮し、マリンアートの溶解量を変えることで、人工海水のイオン比は変えずにイオン濃度を 1 倍、2 倍、3 倍と変化させ、イオン濃度の影響の検討に用いた。なお、人工海水(1 倍)とは、マリンアート SF-1 を標準的な方法により作製した状態(希釈なし)である。

作製した人工海水について、主要元素（Na、K、Mg、Ca、Al、S、Si、Fe、Cl）の濃度は、誘導結合プラズマ発光分光分析装置（ICP-OES；サーモフィッシャーサイエンティフィック製、ICAP7400）を用いて測定した。測定値が表 4-4-2 を基準とした各倍率の濃度に対し、±5%未満であることを確認し、各試験に用いた。

表 4-4-２　人工海水（マリンアート SF-1）の成分表

イオン種	濃度(mg/L)	濃度(mmol/L)
Na	9860	429
Ca	402	10
K	346	9
Mg	1165	48
Al	9×10^{-4}	3×10^{-5}
Fe	1×10^{-3}	2×10^{-5}
SO_4	2596	27
Cl	17594	496
CO_3	134	2
Br	63	1
F	1.3	0.07
NH_4	2×10^{-3}	9×10^{-5}
I	6×10^{-3}	5×10^{-5}
B	8.7	0.81
Sr	7.1	0.08
Li	0.2	0.02
Mn	2×10^{-4}	3×10^{-6}
Co	5×10^{-4}	8×10^{-6}
W	1×10^{-3}	6×10^{-6}
Mo	1×10^{-2}	1×10^{-4}

(b) 海水平衡ベントナイトの作製

圧縮ベントナイトに海水系地下水が浸潤すると、間隙水のイオン濃度に応じた凝集と、イオン組成に応じたモンモリロナイトのイオン交換反応が重畳的に進行すると考えられる。イオン交換反応に関して、その過渡期には、間隙水のイオン組成がイオン交換反応の進行に伴い変化しながら、反応が進む現象となる。すなわち、圧縮ベントナイトの内部では、変化した間隙水のイオン組成に応じて各部位のイオン交換が生じる。その結果、圧縮ベントナイト内のモンモリロナイトの層間陽イオン組成の分布に不均一性が生じることが予想される。圧縮ベントナイトの膨潤圧や透水係数が、モンモリロナイトの層間陽イオン組成に応じて異なること（田中・中村、2004）を考慮すると、海水系地下水の浸潤に起因して不均一なイオン交換反応が生じた場合、圧縮ベントナイト内でこれらの特性に分布が生じると考えられる。

一方、圧縮ベントナイトのイオン交換を長期的な現象として捉えた場合、緩衝材として使用されるベントナイトの量に対して、沿岸部には膨大な海水系地下水が存在し、この地下水は長期にわたって圧縮ベントナイトに浸透すると考えられる。水質が一定の海水系地下水が常に供給され続ければ、将来的に、モンモリロナイトの層間陽イオン組成は、一定の比率に収束すると予想される。こうした想定に基づき、要素試験で主に対象とする状態として、十分量の海水系地下水とベントナイトが接触し続けてモンモリロナイトのイオン交換反応が平衡状態に至った時点を設定した。この状態を模して、以下に詳述する海水平衡ベントナイトを作製した。

海水平衡ベントナイトを作製するため、クニゲル V1 およびクニボンドについて、以下の手順に従いイオン交換処理を施した。まず、15 L の人工海水に 1.55 kg のベントナイトを加えて攪拌し、一昼夜ほど静置した。吸引濾過により固液分離し、回収した固相試料を 15 L の人工海水に分散させ、攪拌した。同様の手順を計 5 回繰り返した。その後、吸引濾過により回収した固相を 70～80%のエタノール 4～5 L に投入し、分散と濾過を繰り返すことで人工海水の成分の洗浄を実施した。洗浄後のエタノールに硝酸銀溶液を滴下した時に白色沈殿がほとんどないこと、および電気伝導率に変化がないことを確認することで、塩化物イオンが十分に除去されたと判断し、洗浄を終了した。洗浄後の湿潤試料は、60℃の恒温槽を用いて一晩乾燥した後、ハンマーミル(メッシュスクリーン 1 mm)で 2 回の粉砕処理を行うことで、各試験に用いる粉体試料とした。

海水平衡ベントナイトを試料とすることで、各試験中にイオン交換反応の進行がほぼ生じない状態において、イオン濃度の影響を調べることができる。

③ 供試体条件および試料の基礎物性評価

供試体の密度条件については、原子力発電環境整備機構(2021)により示されている緩衝材の仕様として、飽和膨潤により隙間充填した状態でクニゲル V1－砂混合土(乾燥質量比

7:3)の乾燥密度 1.6 Mg/m^3 であることから、これを本要素試験における基本ケースとした。

ベントナイトの透水係数や膨潤圧は、有効モンモリロナイト乾燥密度と相関があることが示されている(渡邊・横山、2020)。有効粘土乾燥密度および有効モンモリロナイト乾燥密度は、式(4-4-1)および式(4-4-2)より算出される。

$$\rho_b = \frac{\rho_d\left(1-\frac{R_s}{100}\right)}{1-\rho_d\cdot\frac{R_s}{100\cdot\rho_s}} \tag{4-4-1}$$

$$\rho_{em} = \frac{m_m}{V_a+V_w+V_m} = \frac{\frac{C_m}{100}\cdot\rho_b}{1-\left(1-\frac{C_m}{100}\right)\cdot\frac{\rho_b}{\rho_{nm}}} \tag{4-4-2}$$

ρ_b：有効粘土乾燥密度(Mg/m^3)、ρ_d：乾燥密度(Mg/m^3)、R_s：骨材（ケイ砂）の混合率(%)、ρ_s：混合材（砂）の土粒子の密度(Mg/m^3)、ρ_{em}：有効モンモリロナイト乾燥密度(Mg/m^3)、m_m：モンモリロナイトの質量 (Mg)、V_a、V_w、V_m：空気、水およびモンモリロナイトの体積(m^3)、C_m：モンモリロナイト含有率(%)、ρ_{nm}：随伴鉱物の土粒子の密度(Mg/m^3)

上述した乾燥密度 1.6 Mg/m^3 のクニゲル V1－砂混合土の有効モンモリロナイト乾燥密度は、式(4-4-1)および式(4-4-2)より 1.0 Mg/m^3 となる。ベントナイトの種類やベントナイト混合率が異なる場合にも出来る限り平等な条件で比較検討を行えるよう、各供試体の作製密度は、上記基本ケースの有効モンモリロナイト乾燥密度に統一することとした。表 4-4-3 は、本要素試験における各供試体条件である。

試料の基礎物性として、土粒子の密度とメチレンブルー吸着量を測定し、密度の計算等に用いた。土粒子の密度は、JIS A 1202:2009「土粒子の密度試験方法」(日本工業規格、2009a)を参考に測定した。その際、脱気の方法を JIS の内容から変更し、ベントナイトをイオン交換水に分散させた後、真空ポンプを用いて減圧する方法を用いた。

メチレンブルー吸着量は、JIS Z 2451:2019「ベントナイトなどのメチレンブルー吸着量の測定方法」(日本工業規格、2009b)のスポット法により測定した。モンモリロナイト含有率を計算するためには、純モンモリロナイトのメチレンブルー吸着量で未知試料のメチレンブルー吸着量を除する必要がある。渡邊・横山(2020)はクニピア F およびクニボンドから水簸した粒径 0.2×10^{-6} m 以下画分のメチレンブルー吸着量を測定している。これを参考に、クニゲル V1 とクニボンドのそれぞれに含まれるモンモリロナイトのメチレンブルー吸着量を 140 mmol/100g および 150 mmol/100g と仮定して、モンモリロナイト含有率を計算した。

モンモリロナイトの浸出陽イオン組成は、塩化ベンジルトリメチルアンモニウムクロリド(以下、「BTM」という)溶液を用いた抽出方法(SFSA 改良法：佐治ほか、2005)を一部変更して測定した。具体的な手順は、次の通りである。100 mL ポリ瓶にベントナイト乾燥試料 0.5 g を秤量した。秤量した試料に、6%BTM 溶液を 50 mL 加え、超音波分散器を用いて 20 分間の分散を行った。分散後の試料を 1 時間静置した後、上澄み液を 0.2 μm 孔径のメンブレンフィルターで濾過した後に体積分立で約 0.1%の硝酸を添加した。この溶液を必要に応じて希釈し、ICP- OES(サーモフィッシャーサイエンティフィック製、ICAP7400)を用いて Na、K、Ca、Mg イオンの濃度を測定した。なお、溶液分析の際に用いる標準液は、抽出作業に用いた BTM 溶液を必要に応じて希釈したものを用いて作製した。

表 4-4- 3　要素試験における各供試体条件

試料	乾燥密度 (Mg/m^3)	有効モンモリロナイト乾燥密度(Mg/m^3)
クニゲル V1－砂混合土（7:3)	1.60	1.0
海水平衡クニゲル V1－砂混合土（7:3)	1.60	
クニゲル V1（単体）	1.37	
海水平衡クニゲル V1（単体）	1.37	
クニボンド（単体）	1.12	
海水平衡クニボンド（単体）	1.12	

④　要素試験(力学)で使用する装置および試験方法

要素試験(力学)では、各試料を圧縮成型した供試体を用いて、透水膨潤圧試験およびせん断透水試験を実施した。イオン交換が海水系地下水と平衡状態である材料を模擬した海水平衡ベントナイトに加えて、初期状態の圧縮ベントナイトの透水性やイオン交換を調べるため、イオン交換処理を施していないベントナイト(未処理試料)についても試験を実施した。さらに、透水特性のメカニズム検討に必要な試験ケースも設定した。表 4-4-4 に、令和 4 年度までに実施した試験内容の一覧を示す。試験後には供試体を分割し、③と同様に各部の浸出陽イオン(Na、K、Ca、Mg)を測定することで、モンモリロナイト含有率の空間分布やイオン交換の程度を調べた。

表 4-4-4　令和 4 年度までの要素試験（力学）における実施状況の一覧
透水膨潤圧試験およびせん断透水試験

試験の種類	通水液	クニゲル V1－砂混合土	クニボンド単体	海水平衡クニゲル V1－砂混合土	海水平衡クニボンド単体
透水膨潤圧試験	イオン交換水	R3	R3	R3	R3
	人工海水(濃度 1 倍)	H31	H30	R3	R3
	人工海水(濃度 2 倍)	R2	R2	**R4**	**R4**
	人工海水(濃度 3 倍)	R2	R2	**R4**	**R4**
せん断透水試験	イオン交換水	R2	R3	実施なし	実施なし
	人工海水(濃度 1 倍)	R2	**R4**	R2	R3
	人工海水(濃度 2 倍)	実施なし	実施なし	R3	**R4**
	人工海水(濃度 3 倍)	実施なし	実施なし	R3	**R4**

透水試験（剛壁型）

試験の種類	通水液	クニゲル V1 単体	海水平衡クニゲル V1 単体
透水試験（剛壁型）	イオン交換水	実施なし	**R4**
	人工海水(濃度 1 倍)	**R4**	**R4**
	人工海水(濃度 2 倍)	実施なし	実施なし
	人工海水(濃度 3 倍)	実施なし	**R4**

透水試験（柔壁型）

試験の種類	通水液	クニゲル V1－砂混合土		クニボンド単体	
		圧縮方向に鉛直の向き	圧縮方向に水平の向き	圧縮方向に鉛直の向き	圧縮方向に水平の向き
透水試験（柔壁型）	イオン交換水	**R4**	**R4**	**R4**	**R4**
	人工海水(濃度 1 倍)	**R4**	**R4**	**R4**	**R4**

(a) 透水膨潤圧試験

透水試験あるいは透水膨潤圧試験は、供試体の体積を一定に維持し、変形を受けない状態で供試体の透水性と膨潤性を調べる試験である。

透水係数および膨潤圧の測定で使用した装置の基本構造を図 4-4-1 に示す。(i)および(iii)の透水試験においては、荷重計を設置していない装置を用いた。人工海水を使用するため装置の素材はステンレス製(SUS316L)とした。直径 60 mm、高さ 20 mm の円柱形供試体を直接リング内にて締固め、高分子フィルター(材質：ポリプロピレン、親水性、最大孔径：0.25 μm×0.075 μm、空孔率：45%、厚み：25 μm)とポーラスメタルを供試体の両端面に接触させた状態で試験セルを組み立てた。

透水係数の定常の判断は、JGS0312-2018 を参考に、値がほぼ一定になったことを確認した後 3 回以上の測定を実施し、測定値の平均値からの変動が±50%以内に収まることで定常と見なした。

(i) 未処理供試体の海水平衡化に関する透水試験

本試験で使用する海水平衡ベントナイトは、②(b)に記載の通り、各試料を分散系で人工海水(1 倍)と平衡に至るまでイオン交換させた試料である。一方、処分施設で生じる現象としては、締め固めたベントナイトに対して海水系地下水が通水することが想定される。そこで、未処理試料を圧縮成型した供試体(未処理供試体)に対して多量の人工海水を通水し、試験後の浸出陽イオン組成の分布を調べた。なお、ここでは、透水係数は取得したが、膨潤圧の測定は実施していない。使用した試料は、クニゲル V1 単体である。供試体の有効モンモリロナイト乾燥密度が 1.0 Mg/m^3 となるよう、乾燥密度は 1.37 Mg/m^3 とした。通水液は人工海水(1 倍)である。試験中、イオン交換反応の進行と平衡状態への到達を判断するため、随時流出液の回収を行い、Na、K、Mg、Ca、Al、SO_4、Si、Fe イオン濃度を ICP-OES(サーモフィッシャーサイエンティフィック製、ICAP7400）を用いて測定した。流出液の水質が安定した後、試験セルの解体を行い、供試体を高さ方向に流出側・中部・流入側として分割した。各試料について含水比を測定するとともに、アルコール洗浄した後、SFSA 改良法をベースにした方法(③に詳述)により浸出陽イオン量(Na、K、Ca、Mg)の測定を実施した。

(ii) 透水膨潤圧試験

通水液のイオン濃度が透水係数と平衡膨潤圧に及ぼす影響を調べるため、クニゲル V1－砂混合土、海水平衡クニゲル V1－砂混合土、クニボンド単体、および海水平衡クニボンド単体について、各通水液で透水試験を実施した。供試体の密度条件は、表 4-4-3 の通りである。

通水にあたり、配管等に空気が残留することを避けるため、あらかじめ真空ポンプで試験セル内を減圧し、供試体下部から予め脱気した溶液を供給した。その後、供試体上部側

から流出水を確認してから、片面給水状態として背圧を高め、ビュレットにより吸水量を測定した。この時の圧力増分と吸水量を用いて、河野・西垣(1982)の方法により、空気の溶解は無視した仮定のもと、供試体の飽和度を推定した。推定された飽和度が 99%以上であることを確認した後に、通水を再開し、透水係数を測定した。飽和度の推定と透水係数の計算については、渡邊ほか(2013)に記載されているので参照されたい。

本試験では、透水係数を取得した後、通水を止め、間隙水圧を大気圧とほぼ同等とした状態において、平衡膨潤圧を測定した。供試体中のイオン交換反応は、人工海水の累積通水量が多いほど進行すると考えられることから、ポアボリューム比(PV 比)を 1 以下とすることで、通水量と通水操作をできるかぎり揃えて透水性と膨潤性を調べた。一般的な透水試験と比較して、通水量は少ないが、複数回計測により求めた透水係数がほぼ一定であることを確認した。

透水係数および平衡膨潤圧を測定した後、速やかに供試体を解体し、供試体を高さ方向に流入側、中部、流出側として三分割し、含水比と浸出陽イオン量の測定を行った。ここで、人工海水を用いたケースでは、人工海水を 110℃で 24 時間炉乾燥した際の蒸発残留分を考慮し、式(4-4-3)により含水比の補正を実施した。浸出陽イオンの分析においては、それぞれアルコール洗浄の後に SFSA 改良法(佐治ほか、2005)をベースにした方法(③に詳述)により Na、K、Ca、Mg イオン量を測定した。

$$w' = \frac{m_w + m_{salt}}{m_d - m_{salt}} \times 100 \qquad (4\text{-}4\text{-}3)$$

w'：補正後の含水比(%)、m_w：試料中の水の質量(g)、m_d：試料を 110℃で 24 時間炉乾燥した際の乾燥質量(g)、m_{salt}：人工海水中の水m_w(g)あたりの析出塩(110℃で 24 時間)の乾燥質量(g)

(iii) 砂混合の有無の影響に関する透水試験

供試体の砂混合の有無による透水係数への影響を調べるため、本試験の基本ケースとして砂を混合したクニゲル V1 について、単体の供試体を作製して透水試験に用いた。特に(ii)で得た海水平衡クニボンド単体の結果と比較するため、試料は海水平衡クニゲル V1 単体とした。供試体の有効モンモリロナイト乾燥密度が 1.0 Mg/m^3 となるよう、乾燥密度は 1.37 Mg/m^3 とした。通水液は、イオン交換水、人工海水(1 倍)および人工海水(3 倍)の 3 種類である。なお、ここでは、膨潤圧の測定は実施していない。試験後、速やかに試験セルの解体を行い、供試体を高さ方向に流出側・中部・流入側として分割し、各試料について含水比を測定した。人工海水を用いたケースでは、人工海水を 110℃で 24 時間炉乾燥した際の蒸発残留分を考慮し、式(4-4-3)により含水比の補正を実施した。

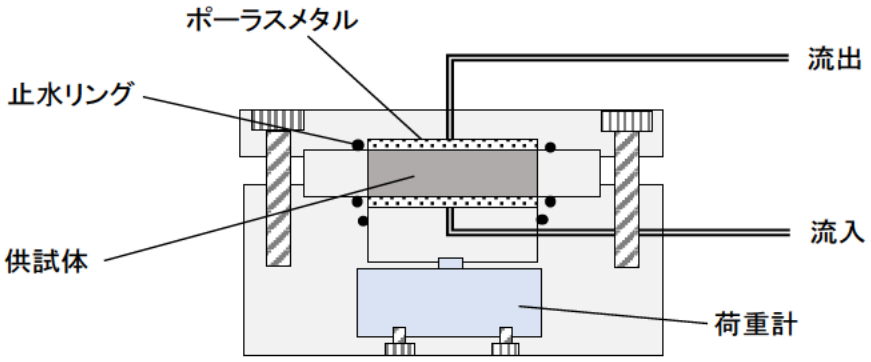


図 4-4- 1　透水膨潤圧試験装置の概略

(b) せん断透水試験

せん断を受けたベントナイトの透水性を調べるため、リングせん断試験の機構を応用し、せん断の進行に応じた透水性の変化を調べた。はじめに、装置の動作確認や一連の試験手順の検討を目的とした予備試験として、非膨潤性粘土であるカオリン粘土を用いて試験を行った。次いで予備試験で構築した手順をもとに、ベントナイト供試体を用いてせん断透水試験を行った。

(i) せん断透水試験装置の機構

せん断透水試験装置の概略図および写真を図 4-4-2 および図 4-4-3 に示す。試験セルの材質は、膨潤圧に対する十分な剛性の確保、および試験に人工海水を使用することを考慮し、ステンレス(SUS316L)とした(多孔板の材質を除く)。供試体は中空リング状（外径：70 mm、内径：30 mm、供試体高さ：20 mm)であり、供試体リング中に設置される。供試体リングは上下二分割されており、上側リングは固定され、下側リングは回転する機構となっている。これにより、供試体中央の高さ 10 mm の位置でせん断される仕組みである。供試体の上下面にはポーラスメタルがあり、これは試験セルにボルト留めされている。供試体と多孔板の間には、供試体と同じ寸法に中空状に加工した高分子フィルター(材質：ポリプロピレン、親水性、最大孔径：0.25 μm×0.075 μm、空孔率：45%、厚み：25 μm)を設置した。供試体の上部ピストンにはトルクロードセル(容量は鉛直荷重とトルクの順に 20 kN、20 kN・cm または 2 kN、2 kN・cm)が取り付けられており、これにより圧密圧力や膨潤圧といった鉛直圧、および下側リングを回転させた時のトルクを測定することが可能である。

リングせん断試験では、一般的に、上下のリング同士が接触していると摩擦力が生じるため、わずかに上下のリングを離した状態で回転させる。ここでは、上下リングの隙間をスリットと呼ぶ。先行研究では、0.1 mm のスリット幅を設けてせん断試験が行われている(宜保、1994)。本装置では、せん断帯に沿う方向(水平方向)の透水量を測定するため、スリット部分に連結した通水経路を設けている。供試体側面のスリット(上部リングと下部リングの隙間)を通じて、内側のスリット(供試体中空部分に位置する装置上部と下部の隙間)から中央の流出部に向かって通水を行うことで、水平方向の透水性を評価することが可能である。スリット幅の調整は、図 4-4-4 の通り、供試体は変位拘束したまま、スリット幅 0 mm の状態から上部リングを引き上げることでスリットを開く。このとき、スリット幅は、ダイヤルゲージから読みとる。供試体の鉛直方向の透水に関しては、給排水経路が上部および下部の多孔板を通じて設けられているため、これを用いて供試体下面から供試体上面へ通水を行った。供試体の飽和や圧密にも、この給排水経路を用いる。このようなせん断透水試験装置を用いることにより、任意のせん断変位において一時的に回転を止め、鉛直方向および水平方向の透水試験を実施することが可能となった。

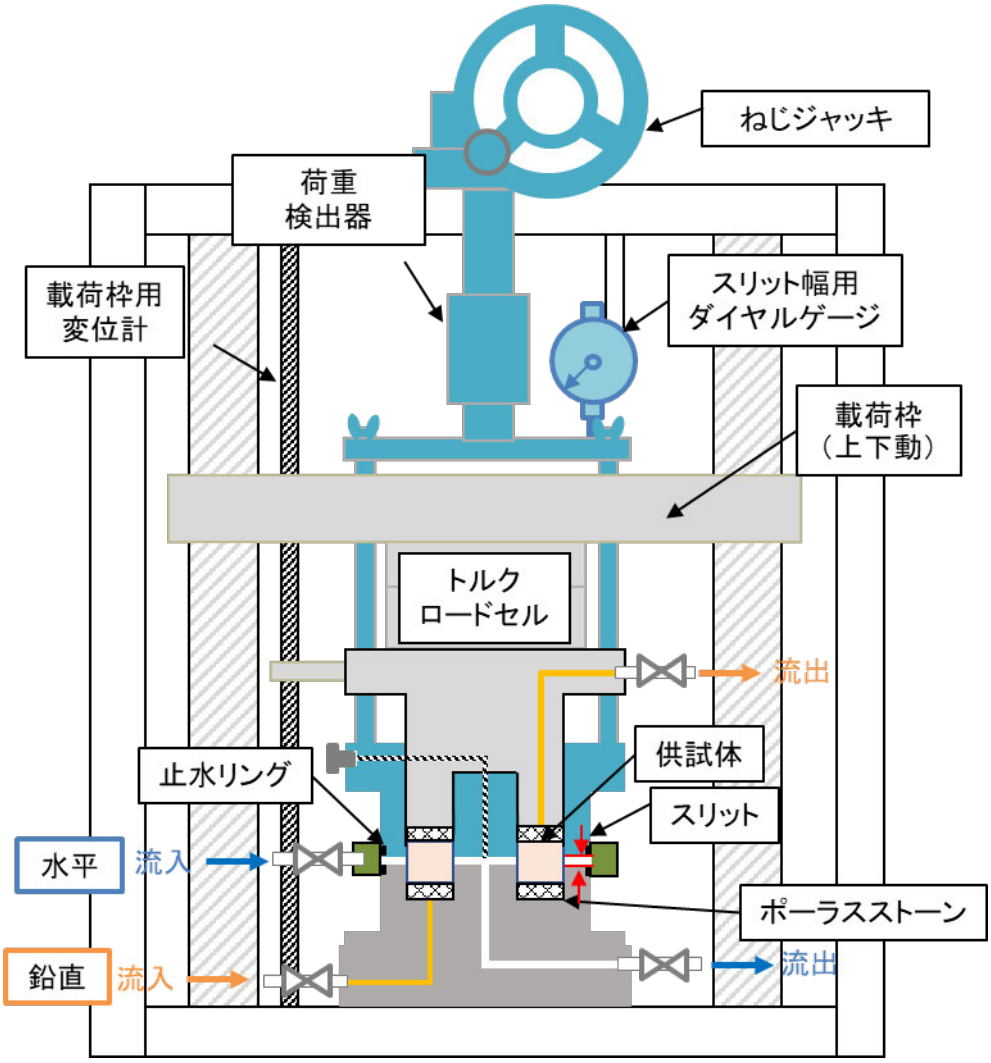


図 4-4- 2　せん断透水試験装置の概略

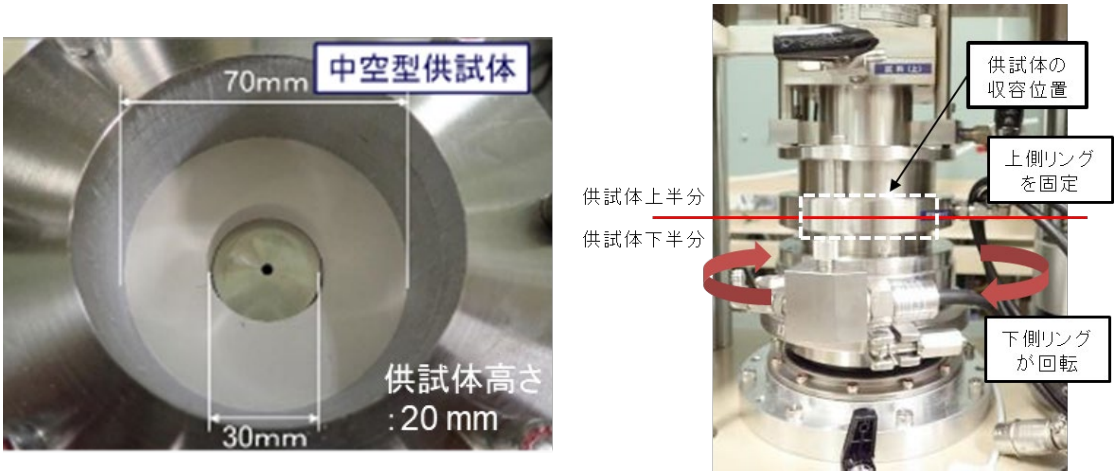
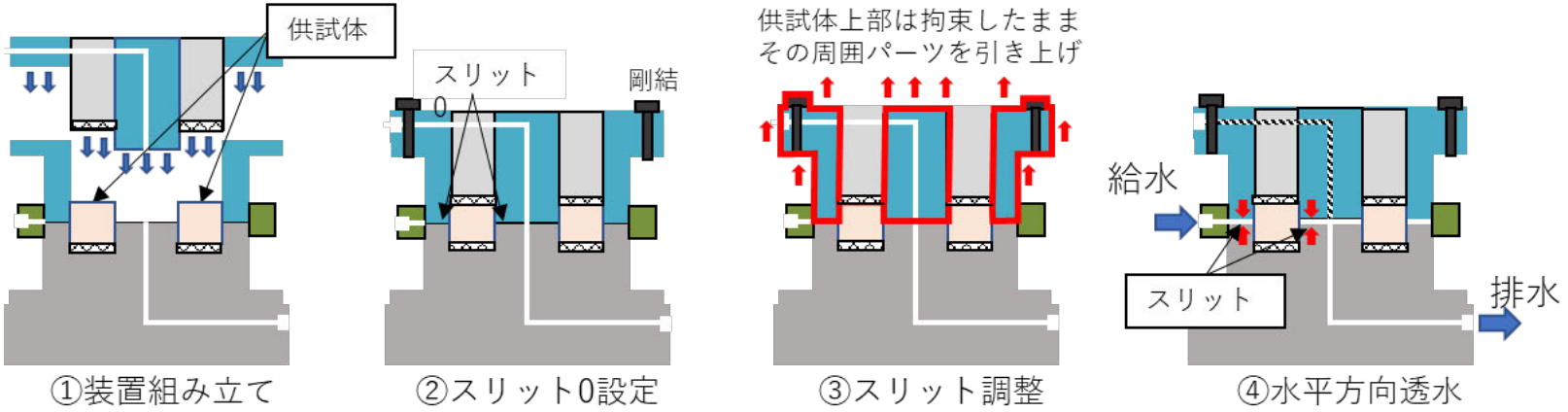


図 4-4- 3　せん断透水試験装置の写真

図 4-4-4 スリットの調整手順



(ii) せん断透水試験の試験条件

非膨潤性粘土としてカオリン粘土を用いて、試験手順および試験条件を確認するための予備試験を行った。乾燥密度は 1.3 Mg/m^3 とした(静的締固めの圧力：約 15 MPa)。予備試験では定体積と定荷重の両方の条件で検討した。圧密圧力は 100 kPa、250 kPa、500 kPa と段階的に増加させた。なお、圧密の完了は 3t 法により判断した。定荷重で試験を実施する場合、せん断時の垂直荷重を 500 kPa で制御した。せん断速度は、後述するベントナイトの供試体より透水性が高いことを考慮して、0.15°/分とした。

ベントナイト供試体としては、クニゲル V1－砂混合土、海水平衡クニゲル V1－砂混合土、クニボンド単体、および海水平衡クニボンド単体を用いて試験を実施した。ベントナイトに関しては、処分施設における緩衝材が岩盤等により拘束された状態であると考え、圧密は実施せず、定体積条件とした。なお、拘束圧として作用する鉛直圧は、各供試体の平衡膨潤圧として考えた。せん断速度は、ASTM D6467-13(ASTM International、2013)に従い 0.03°/分とした。海水平衡クニゲル V1－砂混合土を用いた試験では、他のケースと同様に任意のせん断変位においてせん断停止と透水試験を実施したほか、せん断開始後 0°から 360°までせん断を停止せずに、せん断特性や透水性を調べた。これにより、試験から得られるせん断や透水特性について、任意のせん断変位でせん断を停止する操作や、それに伴う透水試験の影響を確認した。

リングせん断試験装置を応用したせん断透水試験では、供試体に大きなせん断ひずみを与えることが可能であるため、例えば粘土粒子の配向が完了したと思われる状態までせん断を実施した。粘土粒子の配向は、限界状態に至る前の応力低下を引き起こすと考えられていることから(石原、2018)、残留状態までせん断することで粘土粒子の配向が進行した状態に至ると見なした。ここで、土の残留状態におけるせん断強度を残留強度と呼んでおり、これはせん断応力がピーク値を超え、漸次低下して究極的な定常せん断状態に達したときの強度を指す(地盤工学会、2006)。残留状態に至るまでのせん断変位は、試料の種類や試験条件によって異なり、カオリンを用いた既往の研究ではせん断変位 40 mm で残留状態と判断されている(酒井、2003)。スメクタイトを用いた試験では、例えばせん断変位 5 mm に対し、せん断応力の変動幅が 1kPa 以内であることを残留状態の判定基準として、せん断変位 300 mm において残留状態と判断されている(村尾、2015)。本試験装置では、測定精度を考慮し、ピーク後にせん断変位 5 mm 以上にわたり、せん断応力の変動幅が 5 kPa 以内に収まっていることを確認することで残留状態と判断した。

透水試験においては、水平方向の測定に関しては、通水経路としてスリット幅を開く必要がある。試料の流出可能性を考慮し、0.1 mm 以下に設定した。なお、スリット幅とトルクおよび透水性の関係は供試体無しの状態で予め調べており、図 4-4-5 の通り上記設定であれば計測に問題ないことを確かめた。

表 4-4-5 は、各せん断透水試験における試験条件である。ここで検討された予備試験や試験条件をもとに、以下の試験手順を整理した。

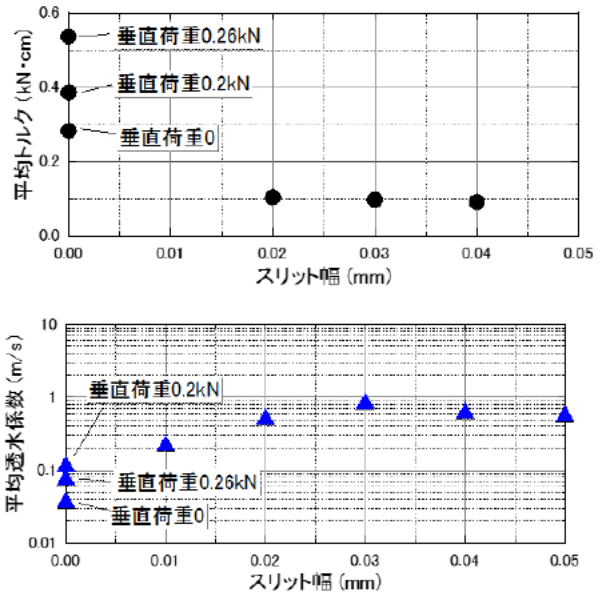


図 4-4-5　供試体未設置時のスリット幅とトルクおよび透水係数の関係

表 4-4-5　せん断透水試験の試験条件

供試体		カオリン粘土	未処理ベントナイト		海水平衡ベントナイト	
			クニゲル V1－砂混合土	クニボンド（単体）	クニゲル V1－砂混合土	クニボンド（単体）
飽和・通水液		イオン交換水	・イオン交換水 ・人工海水（濃度 1 倍）		・イオン交換水 ・人工海水（濃度 1 倍、2 倍、3 倍）	
透水条件	背圧	0	100 kPa ※クニゲル V1－砂混合土のイオン交換水条件では 400 kPa			
	スリット幅	0.1 mm 以下				
せん断条件	圧密条件	圧密	非圧密			
	制御条件	定体積、定荷重(500 kPa)	定体積			
	せん断速度	0.15°/分	0.03°/分 ※ASTM D6467-13 に準拠			
	排水条件	排水				
	最大回転角度	360°				

(iii) せん断透水試験の手順

本試験では、図 4-4-6 に示すように、せん断の進行に伴う透水性の変化を評価するため、①せん断実施前、②せん断によるピーク強度の発現前、③ピーク強度の発現後、および④残留状態において、それぞれ透水試験を行った。これらの状態に相当するせん断変位となるまでせん断を実施し、一度せん断を停止した後、鉛直方向および水平方向の透水試験を行い、その後せん断を再開することを繰り返した。試験手順を図 4-4-7 にフローチャートとして示す。まず、静的締固めによりモールド中に供試体を作製した。これを試料リングに移し替え、供試体の上下面に高分子フィルターが敷かれた状態で、上部ピストンを供試体に接触させた(スリット 0 mm)。その後、供試体の鉛直変位を固定した状態で、供試体下方から試験用水を給水した。供試体上部側からの流出水を確認した後、透水試験に移行した。カオリン粘土の場合、供試体を段階的に圧密した後、透水試験に移行した。ベントナイトの場合、平衡膨潤圧を拘束圧に相当した値として考え、透水試験を実施した。

透水試験の段階では、供試体の飽和促進のため、はじめに大気圧条件下で鉛直方向の透水試験を実施した。このとき、時間当たりの流入量と流出量がほぼ同等であること、背圧を作用させた後の透水係数と変化がないことを確認することで、飽和を判断した。次に、水平透水用のスリット幅を調整した。水平方向の透水では、供試体の外側のスリットを通じて、内側のスリットに向かって通水を行った。いずれの方向の測定についても、透水係数の定常の判断は、JGS0312-2018 を参考に、値がほぼ一定になったことを確認した後 3 回以上の測定を実施し、測定値の平均値からの変動が±50%以内に収まることで定常と見なした。

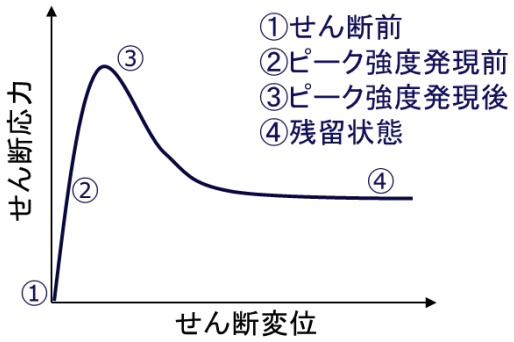


図 4-4- 6　せん断透水試験において透水試験を実施するせん断変位の考え方

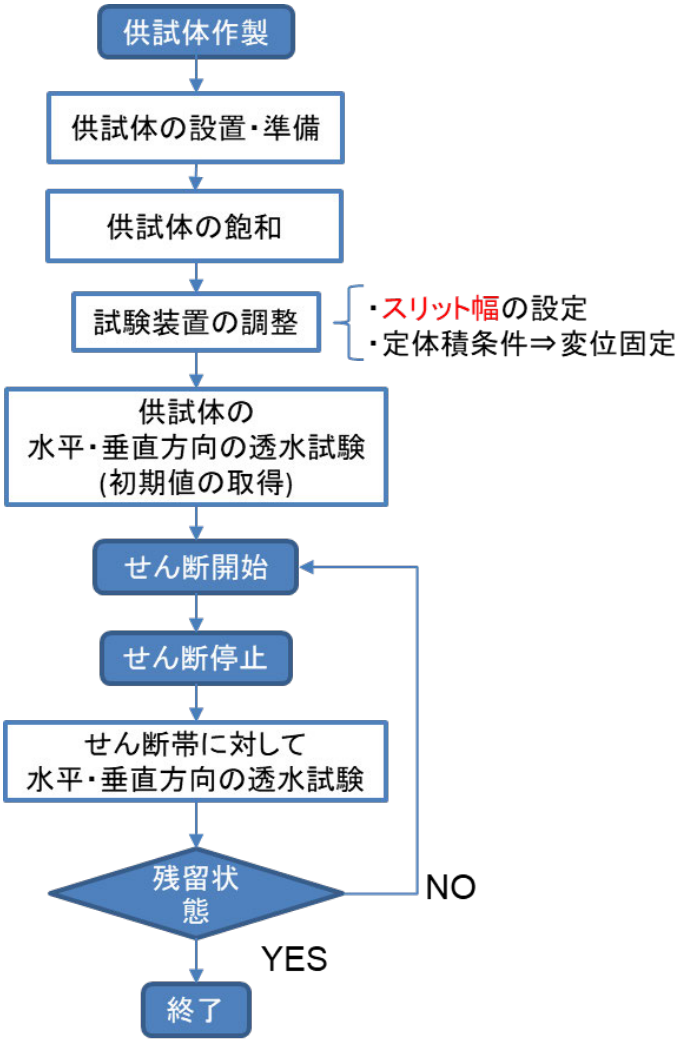


図 4-4- 7　リングせん断試験の実施フローチャート

(iv) せん断透水試験の結果の整理方法

供試体の内側と外側では、同一の回転角度においてもせん断変位が異なる。図 4-4-8 に示す回転角度とせん断変位の関係のように、本試験では供試体の中心線上(半径 25 mm の位置)でせん断変位δ(m)と定義した。せん断変位は式(4-4-4)により算出した。

$$\delta = \pi(r_i + r_o) \times \frac{\theta}{360} \tag{4-4-4}$$

r_i：供試体リング内側(中空部分)半径(m)、r_o：供試体リング外側半径(m)、θ：回転角度(°)

また、せん断時に生じるせん断応力 τ (kPa)は、トルク T(kN・m)を用いて式(4-4-5)に従い算出した (Bishop et al.、1971)。

$$\tau = \frac{3T}{2\pi({r_2}^3 - {r_1}^3)} \tag{4-4-5}$$

T：トルク(kN・m)、r_1、r_2：供試体の半径、供試体内空洞の半径 (m)

供試体の透水性は、図 4-4-9 に示す通り、せん断面に直交する方向、および、水平な方向についてそれぞれ評価した。鉛直方向の透水係数kは、変水位透水試験における透水係数の算出方法に従い式(4-4-6)により算出した。

$$k = \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} ln \frac{h_1}{h_2} \tag{4-4-6}$$

t_1、t_2：時間(s)、 A ：供試体断面積(m²)、a：ビュレット断面積(m²)、L：供試体高さ(m)、 h_1、h_2 ：t_1、t_2における水頭(m)

水平方向における透水では、流入部と流出部ではスリット幅が等しく、これらの断面積はスリット幅と周長から明確に与えられるが、流入部から流出部に至る通水経路は理想的な一次元流れにはならない可能性がある。図 4-4-10 に示すように供試体内部ではスリット幅より広い範囲で移流が生じることが予想される。そのため水平方向の透水性を示すパラメータは、見かけの透水係数 k'として、透水条件を定水位、リング外側から内側への一次元放射流と仮定して式 (4-4-7)により算出した。放射流の透水係数の計算については、酒井・川北(1958)における供試体高さをスリット幅に置き換えた。

$$k' = \frac{ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi} \cdot \frac{Q}{lH(t_2 - t_1)} \tag{4-4-7}$$

Q：流量(m³)、r_1、r_2：供試体の半径、供試体内空洞の半径(m)、l：スリット幅(m)、
H：水頭(m)

また、透水係数と見かけの透水係数については、前述したとおり理想的な一次元流れにはならない点において評価上の不確実性がある。そのため、鉛直方向の透水係数とは直接的に比較することには注意を要する。透水性の変化の傾向を比較するために、せん断前の値を用いてせん断後の透水係数および見かけの透水係数を正規化した。正規化には式(4-4-8)を用いた。

$$k_{normalized} = \frac{k_n}{k_0} \tag{4-4-8}$$

$k_{normalized}$：正規化された透水係数もしくは見かけの透水係数、k_0：せん断前の透水係数もしくは見かけの透水係数(m/s)、k_n：任意のせん断変位おける透水係数もしくは見かけの透水係数(m/s)

(v) せん断透水試験後の分析

せん断透水試験後、供試体の一部を使って含水比と浸出陽イオン量を測定した。含水比は、供試体を上部・中部・下部に分割して測定した。人工海水を用いたケースでは、人工海水を 110℃で 24 時間炉乾燥した際の蒸発残留分を考慮し、式(4-4-3)により含水比の補正を実施した。浸出陽イオン量(Na、K、Ca、Mg)は、図 4-4-11 の通り、上下方向の三分割に加えて、さらに半径方向に内側・中・外側に分割した試料について、アルコール洗浄した後、SFSA 改良法をベースにした方法(③に詳述)により測定した。

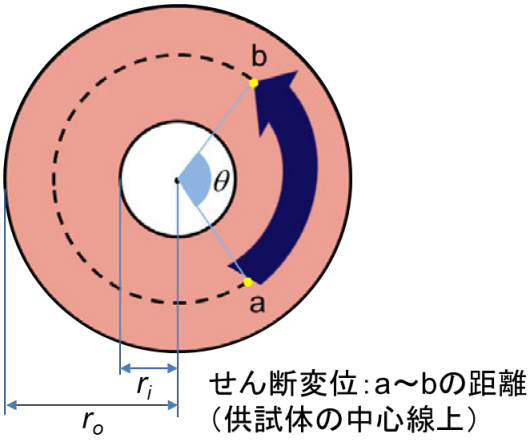
残りの供試体は凍結乾燥し、せん断位置付近の構造を走査型電子顕微鏡(SEM：JEOL JSM-7001M)で観察した。観察する断面は、凍結乾燥後の供試体を割った面とし、せん断透水試験直後の骨格構造を可能な限り保持しつつ、乾燥時の供試体表面の粒子の配向の変化等の影響を無視できるよう留意した。また、一部試料については、より詳細に骨格構造を観察するため、凍結乾燥試料に樹脂(シアノボンド)を浸透させた後、せん断帯に直交するように供試体を乾式で切断し、紙やすりで研磨することで薄片試料を作製した。この薄片試料について、電界放出型電子顕微鏡(FESEM-EDS; JEOL JSM-7001M)による観察を行った。

(vi) 供試体の圧縮方向の影響に関する透水試験

せん断透水試験において、鉛直方向の透水係数は供試体作製時の圧縮方向の向きに透水することで測定される一方、水平方向のみかけの透水係数は、供試体の圧縮方向に対して 90°の向きで測定される。ベントナイトに含まれるモンモリロナイトは、その形状が扁平であることから、圧縮方向に応じて供試体内部で配向が生じることで、特性の異方性が発

現する可能性が指摘されている（Sato、2003)。そこで、せん断透水試験で得られた各透水係数について、圧縮方向による透水異方性の影響を確認するため、柔壁型の透水試験(三軸透水試験）を実施した。剛壁型ではなく柔壁型の透水試験を選定した理由は、トリミング法による供試体作製方法を採用したことによる。具体的には、トリミング後の供試体を剛壁型の透水試験に用いた場合、供試体と剛壁セルの間に隙間が生じ、その隙間を通水液が選択的に通ること(側壁漏れ)が懸念されたため、ゴムスリーブと側方圧により供試体を拘束することで、側壁漏れを軽減できる柔壁型とした。使用した試料は、クニゲル V1－砂混合土およびクニボンド単体であり、通水液は、イオン交換水あるいは人工海水(1 倍)を用いた。図 4-4-12 の通り、圧縮成型方向、および圧縮成型方向を 90°回転させた方向について、直径 60 mm、高さ 20 mm の円柱形供試体として削り出し(トリミング)、柔壁型の透水試験を実施した。

締固め時の圧縮成型供試体の寸法は、直径 100 mm、高さ 100 mm である。直径 60 mm、高さ 20 mm の円柱形供試体へのトリミングには、トリマーやワイヤーソー、ストレートエッジを用いた。トリミングの際、自然含水比で作製した供試体は端面が破損しやすかったことから、含水比は自然含水比よりも若干高い値(表 4-4-6 参照)とした。トリミングした供試体は、直径 59 mm、厚さ 0.4 mm のゴムスリーブ(ネオプレーン製)を被せた後、高分子フィルター(材質：ポリプロピレン、親水性、最大孔径：0.25 μm×0.075 μm、空孔率：45%、厚み：25 μm)とポーラスメタルを供試体の両端面に接触させた状態で三軸透水試験機に設置した。通水において、配管等に空気が残留することを避けるため、あらかじめ真空ポンプで試験セル内を減圧し、供試体下部から予め脱気した溶液を供給した。このとき、供試体の膨潤変形を抑制するため、有効拘束圧として(a)(ii)透水膨潤圧試験で得た平衡膨潤圧を参考にしたセル圧を作用させた。供試体の膨潤の有無は、図 4-4-13 に示す差圧計で計測した三軸セルと内セルの水位差を、供試体の体積変化に換算することで確認した。供試体上部側から流出水を確認してから、透水試験を実施した。背圧を増加させた前後の透水係数が変化しないことを確認し、供試体が飽和状態であると見なした。



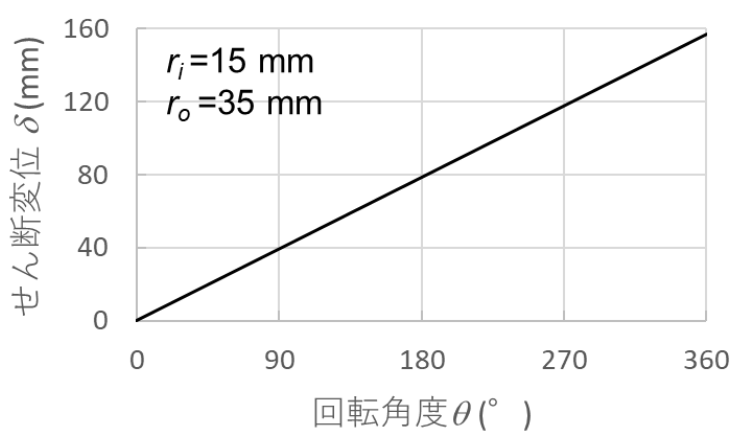


図 4-4- 8　回転角度とせん断変位の関係

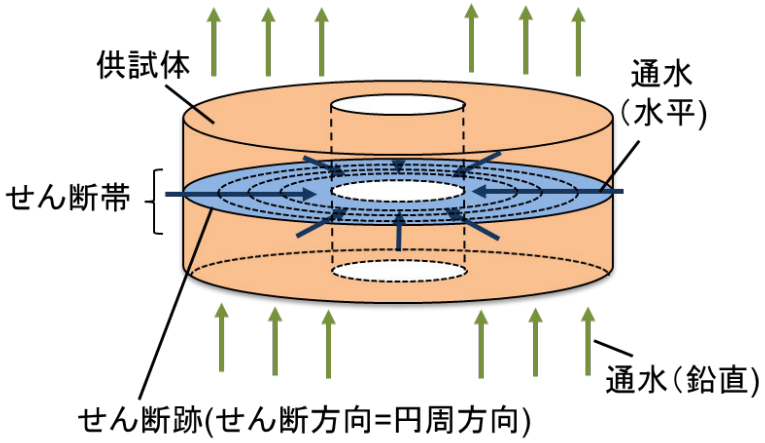


図 4-4- 9　供試体に対する通水方向の概略図

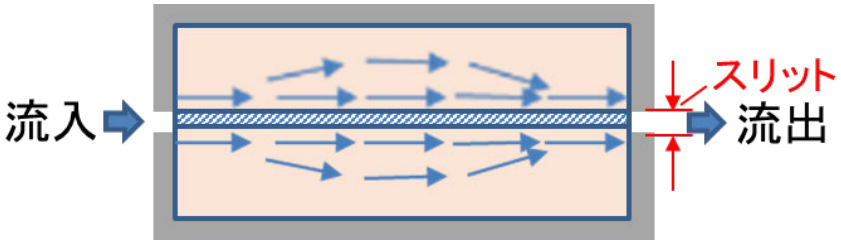
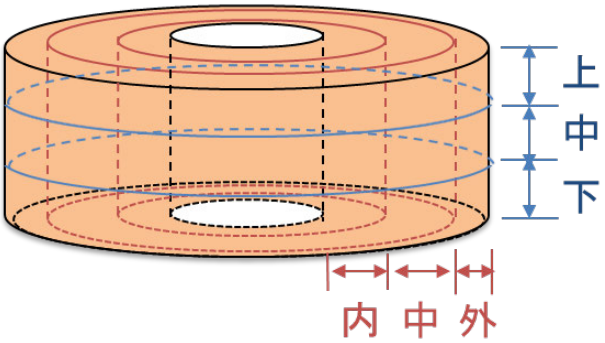


図 4-4- 10　水平方向の見かけの透水係数に関する通水経路のイメージ



	上			
内	上-内	上-中	上-外	外
	中-内	中-中	中-外	
	下-内	下-中	下-外	
	下			

図 4-4- 11　リングせん断試験後の供試体の分割方法のイメージと各部位の呼称

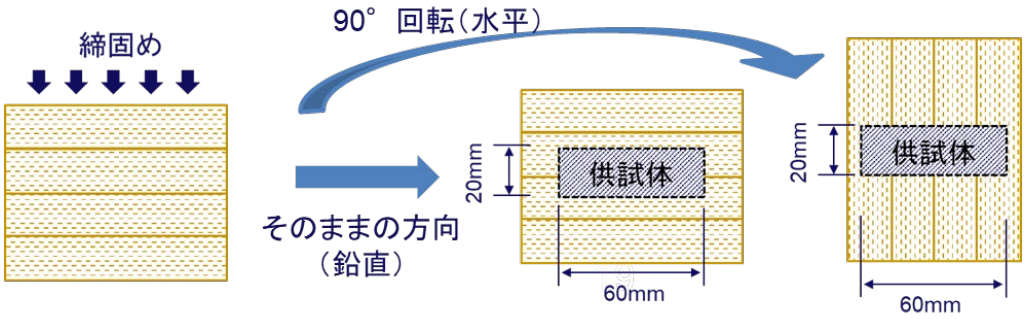


図 4-4- 12　圧縮成型方向と供試体作製の概念図

表 4-4- 6　締固め時の含水比

通水液	クニゲル V1－砂混合土の含水比(%)		クニボンド単体の含水比(%)	
	圧縮方向に鉛直の向きに通水	圧縮方向に水平の向きに通水	圧縮方向に鉛直の向きに通水	圧縮方向に水平の向きに通水
イオン交換水	11.6	11.8	17.2	17.3
人工海水(濃度 1 倍)	12.0	12.0	17.5	17.5

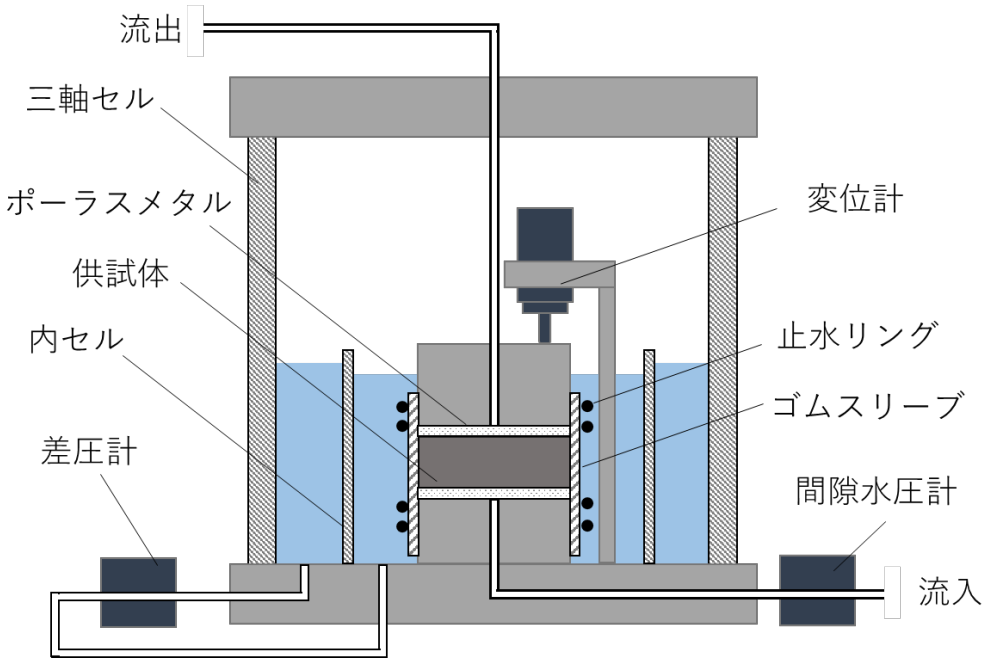


図 4-4- 13　三軸透水試験機の概略図

⑤　結果および考察

(a)　ベントナイトと海水平衡ベントナイトの基礎物性

試料として各試験に用いる各ベントナイトの土粒子の密度とメチレンブルー吸着量を表 4-4-7 に示す。クニゲル V1 とクニボンドの土粒子の密度はそれぞれ 2.769 Mg/m^3 と 2.672 Mg/m^3 であった。クニゲル V1 と海水平衡クニゲル V1 のメチレンブルー吸着量は、81 mmol/100g と 80 mmol/100g であった。また、クニボンドと海水平衡クニボンドのメチレンブルー吸着量は、122 mmol/100g と 120 mmol/100g であった。これらの結果をもとに算出したモンモリロナイト含有率は、クニゲル V1 と海水平衡クニゲル V1 において、それぞれ 57.9%と 57.1%、クニボンドと海水平衡クニボンドにおいて、それぞれ 81.3%と 80.0%であった。スポット法におけるメチレンブルー吸着量の測定精度(ここでは MB 溶液±1 mL、すなわち MB 吸着量±2 mmol/100g は誤差と判断)を考慮すると、それぞれのベントナイトと海水平衡ベントナイトで、モンモリロナイト含有率はほとんど変化していないと考えられる。なお、各海水平衡ベントナイトの土粒子の密度は測定していないが、海水平衡処理前後でモンモリロナイト含有率が変化していないことから、土粒子の密度についても同様と考え、各計算に用いた。

図 4-4-14 は、各ベントナイトと各海水平衡ベントナイトの浸出陽イオン量である。クニゲル V1 は、海水平衡処理により浸出 Na イオンの割合が減少し、Mg イオンの割合が増加したことで、相対的に 2 価の浸出陽イオンの割合が増加した。クニボンドは、海水平衡処理により浸出 Ca イオンの割合が減少し、浸出 Na イオンと Mg イオンの割合が増加したことで、相対的に 1 価の浸出陽イオンの割合が増加した。海水平衡クニゲル V1 と海水平衡クニボンドの比較では、モンモリロナイト含有率はそれぞれ異なるために浸出陽イオンの総量は異なるものの、割合としては、各海水平衡ベントナイト間の差は浸出 Na イオンで 2.7%、浸出 Ca イオンで 4.65%、浸出Kイオンで 0.81%、浸出 Mg イオンで 1.16%の差と、おおよそ同じイオン比となった。

(b)　試験に使用した人工海水の成分および pH

各試験で用いた人工海水の主要成分および pH の実測値を表 4-4-8 に示す。

表 4-4- 7　本研究で使用したベントナイトの基礎物性

測定項目	クニゲル V1	クニボンド	海水平衡 クニゲル V1	海水平衡 クニボンド
土粒子の密度 (Mg/m³)	2.769	2.672		
メチレンブルー吸着量 (mmol/100g)	81	122	80	120
モンモリロナイト含有率 (%)	57.9	81.3	57.1	80.0

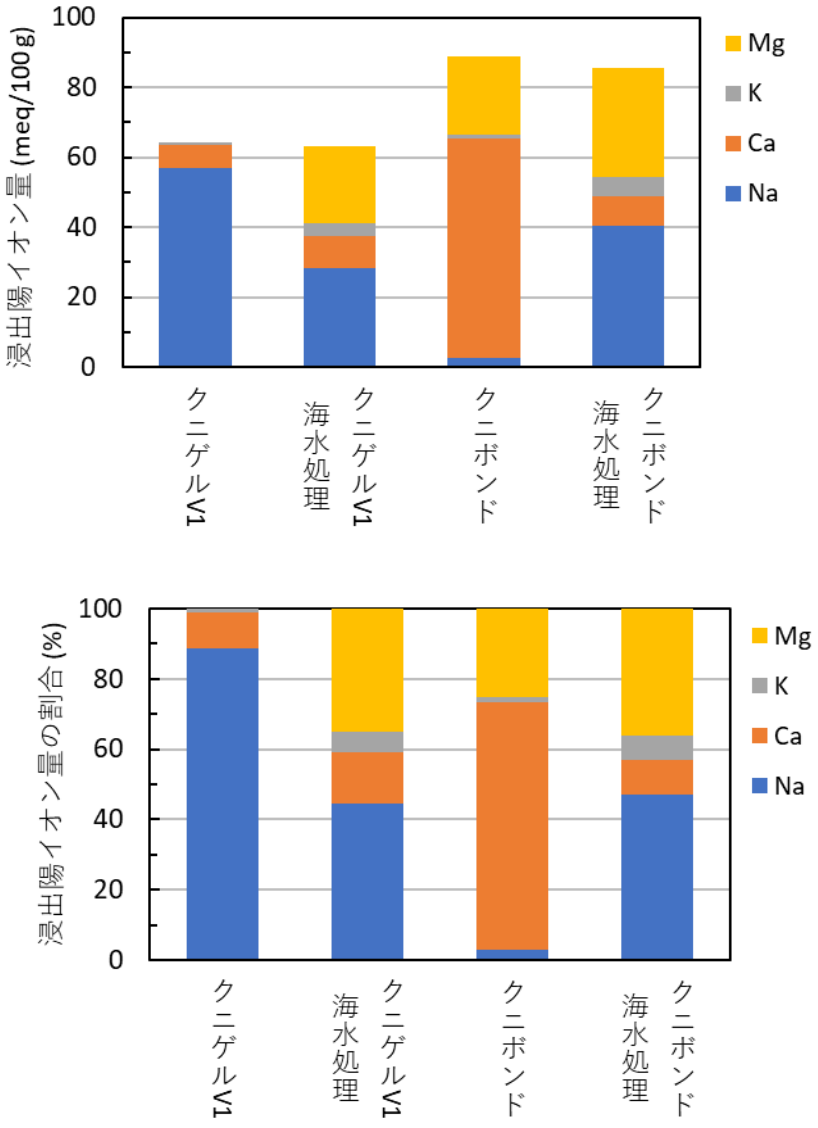


図 4-4- 14　イオン交換処理前後の浸出陽イオン量

表 4-4- 8　人工海水の作製濃度および pH

イオン種	成分表 (mg/L)	作製後濃度(mg/L)		
		1 倍濃度	2 倍濃度	3 倍濃度
Na	9860	9508	19604	29602
Ca	402	382	780	1149
K	346	345	700	1044
Mg	1165	1190	2314	3184
SO_4	2596	2668	5380	8419
Cl	17594	17283	35149	52814
pH	記載なし	8.01	7.75	7.59

(c) 透水膨潤圧試験

(i) 未処理供試体の海水平衡化

クニゲル V1 単体の供試体に対して、多量の人工海水(1 倍)を通水した際の透水係数の変化を図 4-4-15 に、流出水の水質の変化を図 4-4-16 に示す。なお、流出水の Al、Fe イオン濃度は全試験期間を通じて検出下限値以下であったため、グラフは割愛する。イオン交換の進行に対する人工海水の累積通水量の影響を考慮し、グラフの横軸はポアボリューム比(PV 比)で整理した。図 4-4-15 より、PV 比が小さいときに得られた透水係数は、後述の(ii)で示す透水膨潤圧の試験結果(PV 比=1 以下)と同等の値であった。しかし、PV 比の増加に伴い、透水係数は漸次低下した。透水係数の低下の要因としては、種々の現象が重畳的に影響したと考えられるが、そのひとつとして、通水初期の間隙水濃度の高さが挙げられる。図 4-4-16 から、特に流出水の Na 濃度は人工海水(1 倍)よりも 250 mmol/L ほど濃度が高い。この起源としては、イオン交換により試料中の層間 Na イオンが放出されたほか、例えば芒硝石等の可溶性塩(鈴木ら、2007)が溶けだしたものと考えられる。また、他の要因としては供試体の微視的構造の変化が考えられる。先行研究(渡邊ほか、2013)では、Ca 型ベントナイトの透水試験において、水の流れにより土粒子の移動が生じ、土骨格に対して目詰まりが生じる可能性が指摘されている。本試験では、平衡膨潤圧を超えない透水圧として動水勾配約 1000～1530 の範囲で約 500 日間通水を継続したが、長期間の透水試験において、このような影響を排除することは困難と考えられる。上述の結果・考察を鑑みると、短期間の試験で得られる透水係数は、長期間の試験と比較して、透水性は高めに評価される可能性がある。

図 4-4-16 より、流出水の濃度は、イオンごとに変化傾向が異なるものの、PV 比=30 程度において概ね安定し、流入溶液のイオン濃度に漸近した。そこで、PV 比=40 程度(通水期間：約 500 日間)まで通水を継続した後、透水試験を終了した。図 4-4-17 は、透水試験後の含水比分布である。流出側・中部・流入側の何れも含水比は約 35%であり、供試体中に概ね均等に水が行き渡っていたと考えられる。

図 4-4-18 は、試験後の供試体の浸出陽イオン組成の分布である。浸出陽イオン組成の割合は、流出部・中部・流入部においてほぼ同等であるほか、海水平衡クニゲル V1 と比較すると、Na が約 5%多く、Ca が約 2%、K が約 1%、Mg が約 1%少ないという軽微な差異であり、ほとんど相違ないことが確認された。したがって、人工海水(1 倍)を PV 比=40 程度まで通水すると、供試体全体が均一に海水平衡ベントナイトに近い状態に至ることが確認された。

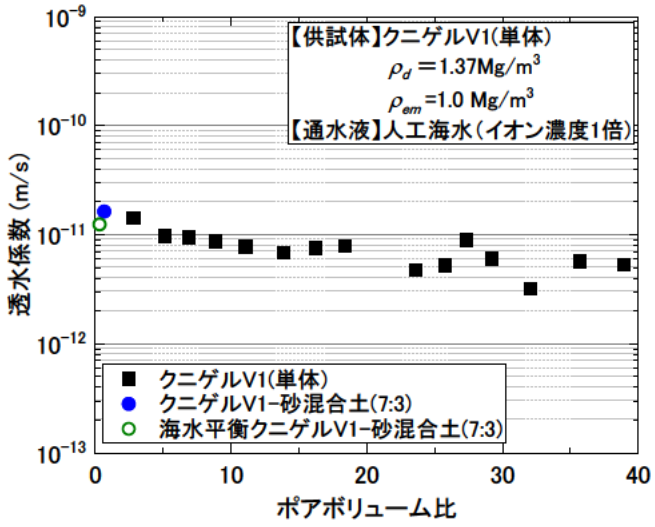


図 4-4- 15　ポアボリューム比に対する透水係数の変化

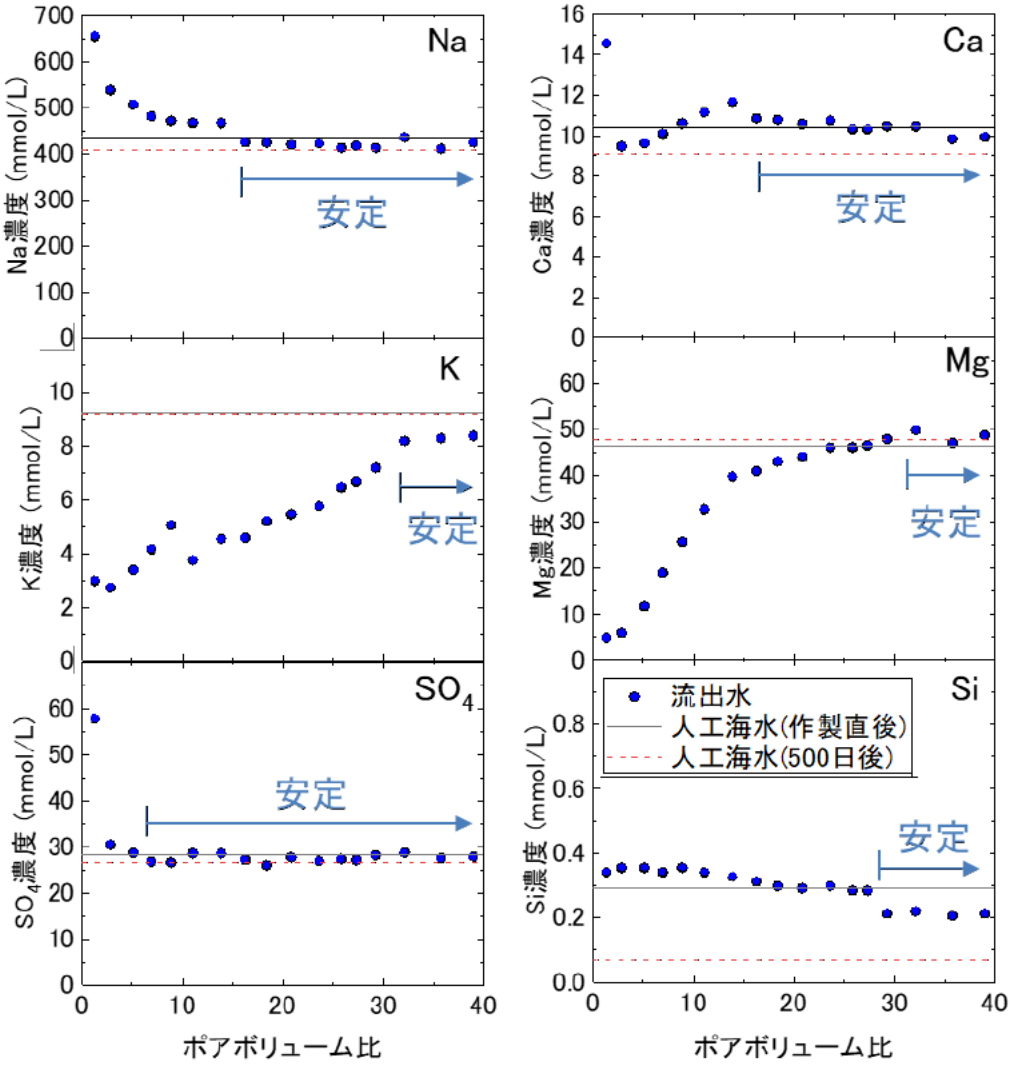


図 4-4- 16　ポアボリューム比に対する流出水の水質の変化

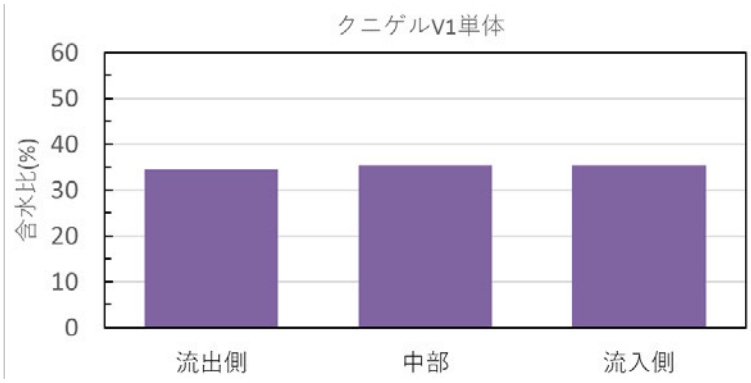
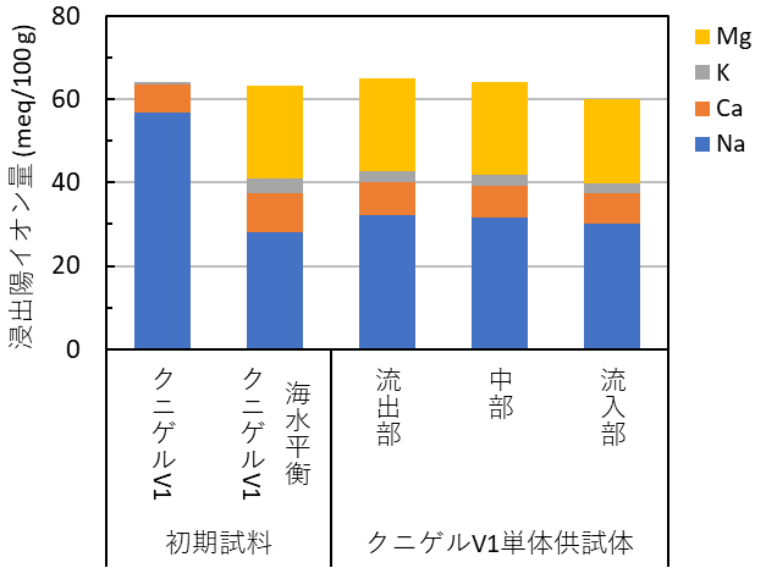


図 4-4- 17　透水試験後の含水比分布



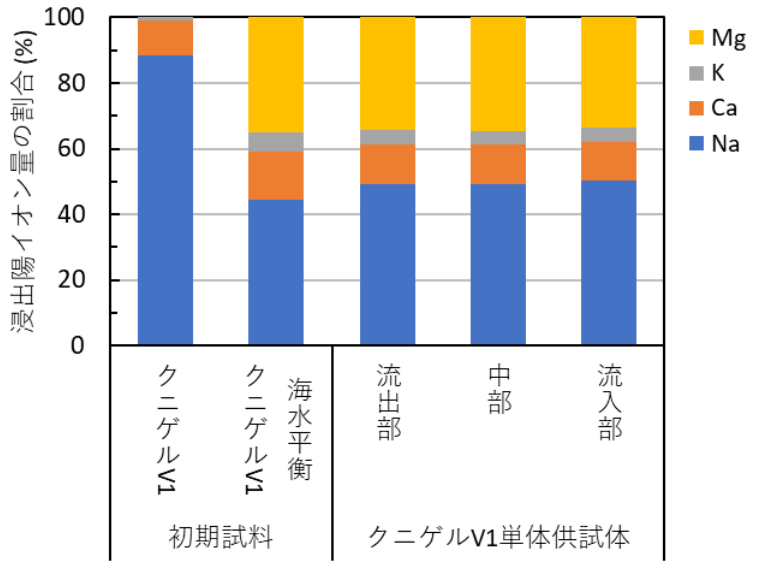


図 4-4- 18　初期試料と人工海水透水後の圧縮成型供試体の浸出陽イオン組成

(ii) 透水膨潤圧試験後の供試体の含水比・飽和度・浸出陽イオン分布

透水膨潤圧試験後の供試体について、流入側・中部・流出側に分割した各部の含水比・飽和度を図 4-4-19 に、浸出陽イオン量、およびその割合を図 4-4-20 に示す。

図 4-4-19 より、含水比および飽和度は、クニゲル V1－砂混合土のイオン交換水条件において若干ばらつきがあったものの、全てのケースにおいて飽和度は 95%以上であった。圧力解放や供試体解体時の影響もあり、河野・西垣(1982)の方法で取得した飽和度よりも若干低い値ではあるが、透水試験中の供試体は概ね飽和していたと考えられる。

図 4-4-20 より、通水液として人工海水を用いた場合、クニゲル V1－砂混合土では、イオン交換水を用いた場合と比較して浸出 Na イオンの割合が減り、浸出 Mg イオンの割合が増える傾向が示された。一方、クニボンド単体では、イオン交換水を用いた場合と比較して浸出 Ca イオンの割合が減り、浸出 Na イオンの割合が増える傾向が示された。これら未処理供試体に対する海水影響については、通水量が PV 比 1 以下の範囲で若干異なるものの、イオン濃度の倍率が増加するほど顕著であり、海水平衡ベントナイトの浸出陽イオン組成に近づく傾向が確認された。海水平衡ベントナイトを用いた場合、通水液の種類に依らず、浸出 Na イオンは 39.1～46.6%、浸出 Ca イオンは 9.6～21.3%、浸出 K イオンは 4.7～10.9%、浸出 Mg イオンは 29.3～39.8%と浸出陽イオン組成の割合は同様の傾向を示し、試験全期間を通じて海水平衡ベントナイトと同じイオン組成を保ったと考えられる。したがって、海水平衡ベントナイトを用いたケースについては、イオン交換がほとんど生じない条件において、人工海水を用いた透水膨潤圧試験が実施されていると考えられる。後述の(iii)において、透水係数や膨潤圧に対するイオン濃度の影響を検討する。なお、各試料における浸出陽イオン量の総量の差については、供試体中のモンモリロナイトの分布の不均一性や、分析用試料の分取方法、アルコール洗浄時の試料損失、分析精度等が影響すると考えられる。

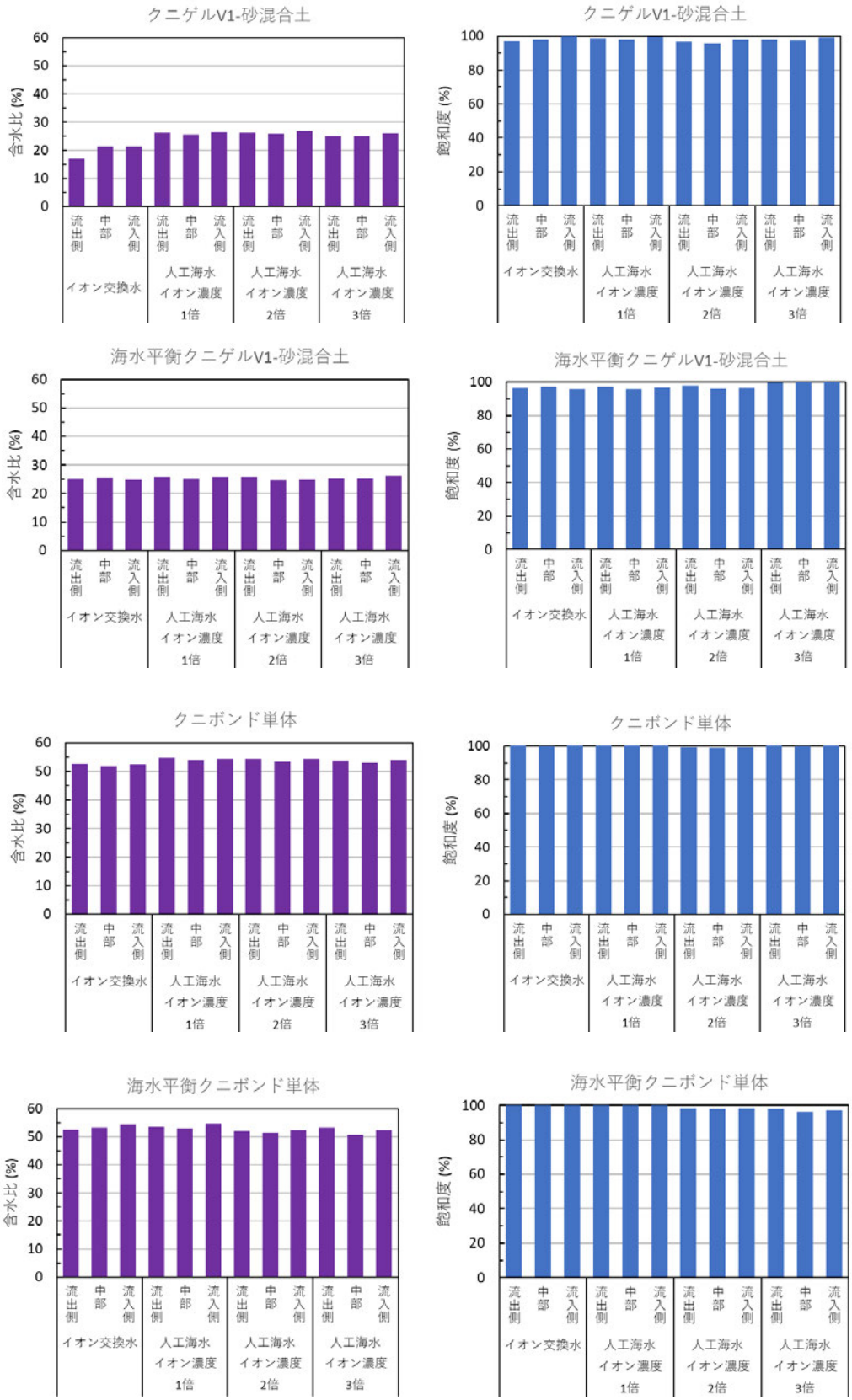


図 4-4- 19　透水試験後の含水比・飽和度分布
(左：含水比、右：飽和度)

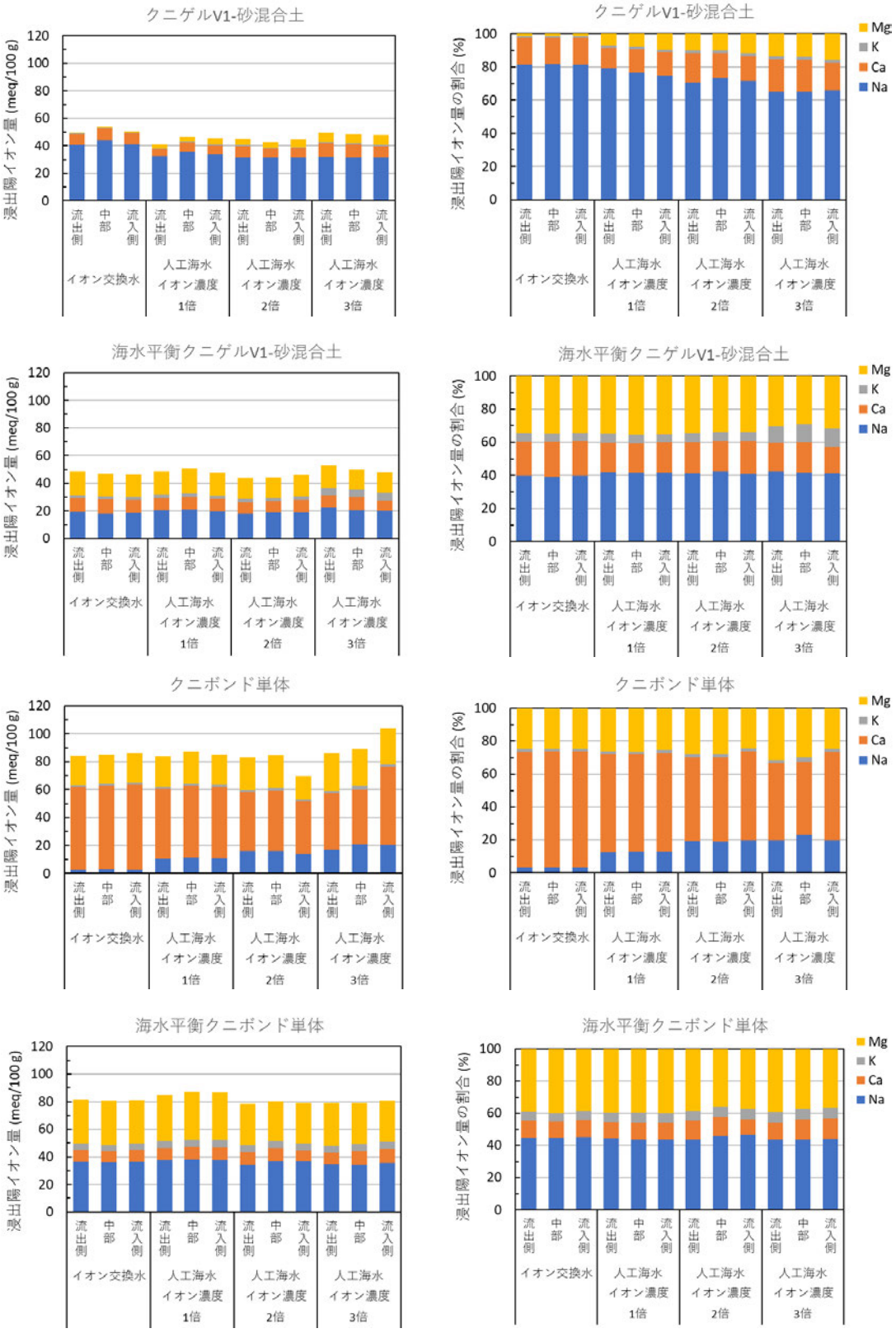


図 4-4- 20　透水膨潤圧試験後の浸出陽イオン組成
(左：浸出陽イオン量、右：浸出陽イオンの割合)

(iii) 平衡膨潤圧および透水係数

イオン交換水および人工海水のイオン濃度倍率と平衡膨潤圧との関係を図 4-4-21、透水係数との関係を図 4-4-22 に示す。透水膨潤圧試験で得られたイオン交換水条件における平衡膨潤圧は、クニゲル V1－砂混合土において約 550 kPa、クニボンド単体において約 1100 kPa であった。既往の研究におけるイオン交換水条件の平衡膨潤圧は、有効モンモリロナイト乾燥密度 0.943～1.093 Mg/m^3 のクニゲル V1－砂混合土において約 500～1000 kPa(鈴木・藤田、1999)、有効モンモリロナイト乾燥密度 1.012～1.031 Mg/m^3 のクニボンドにおいて約 1600kPa(前田ら、1998)である。本試験結果は、これらと比較すると下限に近い、もしくは小さい値であった。また、イオン交換水条件における透水係数について、本試験ではクニゲル V1－砂混合土において 5.0×10^{-13} m/s、クニボンドにおいて 1.0×10^{-12} m/s であり、既往の研究(鈴木ら、1992；長谷川、2004)と大差ない結果となった。

本試験で用いた有効モンモリロナイト乾燥密度 1.0 Mg/m^3 の供試体については、全てのケースにおいて、人工海水のイオン濃度の増加に伴い平衡膨潤圧は低下し、透水係数は増加する傾向がみられた。この傾向はクニゲル V1－砂混合土では顕著であり、クニボンド単体では隠微であった。この理由として、次のようなことが考えられる。クニゲル V1 は、モンモリロナイト層間に交換性 Na イオンを多く含むため、イオン交換水を用いた場合、締め固めた供試体の膨潤性が高く、透水性は低い。間隙水のイオン濃度の増加に伴い浸透圧が減少し、Na モンモリロナイトの結晶層間が拡大しにくくなるため、人工海水を用いた場合、透水性が高くなったと考えられる。一方、クニボンドは、モンモリロナイトの層間に交換性 Ca イオンを多く含む。Ca モンモリロナイトの結晶層間の拡大には限りがある(Fukushima、1984)ことから、人工海水のイオン濃度の増加に伴う層間距離の変化が小さく、透水性の変化も小さかったと考えられる。本試験条件では、イオン交換水を用いた場合の透水係数は、クニボンド単体の方がクニゲル V1－砂混合土よりも 0.5 オーダーほど高かったが、各人工海水条件において透水係数の大小関係は逆転した。ただし、透水係数は乾燥密度によって異なることから、異なる供試体条件において透水係数の大小関係が上述と同じようになるとは限らないため、留意する必要がある。

海水平衡クニゲル V1－砂混合土および海水平衡クニボンド単体については、(ii)に記述した通り、通水液の違いによる膨潤圧および透水係数の差は、主にイオン濃度が影響した結果と捉えることが出来る。イオン濃度が高いほど膨潤圧が低下し、透水係数が増加する傾向は、各未処理供試体と比較して若干ではあるが、海水平衡クニゲル V1－砂混合土では隠微になり、海水平衡クニボンド単体では顕著になった。これにより各値はクニゲル V1－砂混合土とクニボンド単体の中間の値に寄ったものの、基本的に、未処理試料の結果に近い値を示した。試験前の予想では、海水平衡後のクニゲル V1 は、海水平衡前と比較して、交換性 Na イオンが減少し、交換性 Mg イオンの割合が増加することで、これらのイオンによる結晶層間の電気的引力が強まり、海水のイオン濃度の影響を受けにくくなると考えられた。また、海水平衡後のクニボンドは、海水平衡前と比較して交換性 Ca イオ

ンが減少し、交換性 Na イオンの割合が増加することで、これらのイオンによる結晶層間の電気的引力が弱まり、海水のイオン濃度の影響を受けやすくなると考えられた。海水平衡処理後の浸出陽イオン組成がほぼ同じであったこと(図 4-4-14)を考慮すると、両海水平衡ベントナイトの膨潤圧および透水係数は、近い値を示すことが予想された。しかし、試験結果から、その傾向は僅かであった。すなわち、海水平衡処理による層間陽イオン組成の変化は、各種ベントナイトが示す膨潤圧や透水係数に、ほとんど影響しない可能性が示唆された。

図 4-4-23 は、図 4-4-21 および図 4-4-22 の透水係数を平衡膨潤圧で整理したグラフである。海水平衡処理の有無に関わらず、元々が同一種類のベントナイトであれば、透水係数は平衡膨潤圧に依存することが確認された。もとのベントナイトの種類が異なる場合、透水係数に寄与すると考えられているパラメータ(ここでは、有効モンモリロナイト乾燥密度、浸出陽イオン組成、通水液のイオン組成・濃度)が同一であっても、平衡膨潤圧および透水係数は有意に異なる値を示した。また、平衡膨潤圧が近いプロットであっても、もとのベントナイトの種類が異なる場合、透水係数は有意に異なる値を示した。

以上の結果から、各ベントナイトの透水係数の差異には、膨潤による低透水性の発現以外の要因が影響している可能性が示された。したがって、その要因について検討することは今後の課題として重要と考えられる。その検討の一つとして、項目(iii)に砂混合の有無の影響の検討結果を示す。

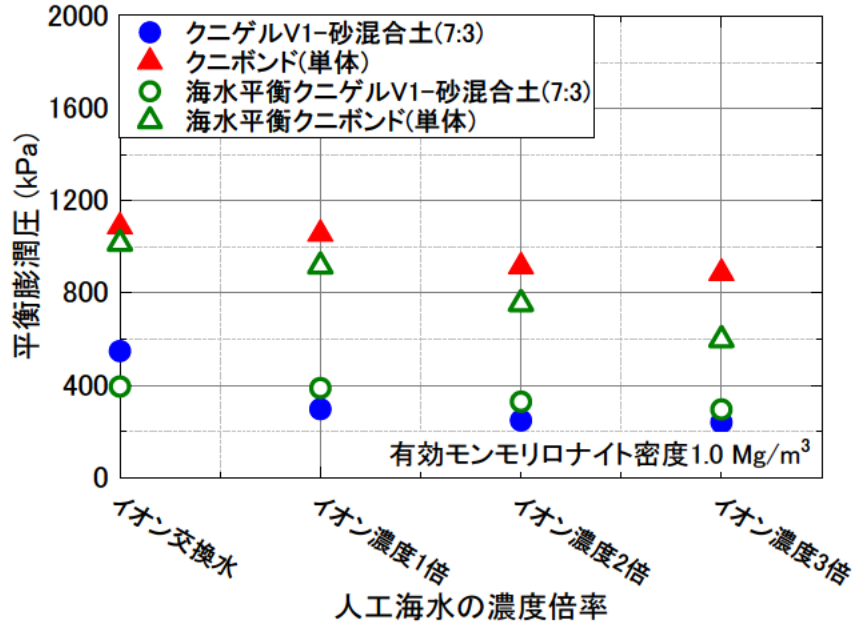


図 4-4- 21　人工海水のイオン濃度倍率と平衡膨潤圧の関係

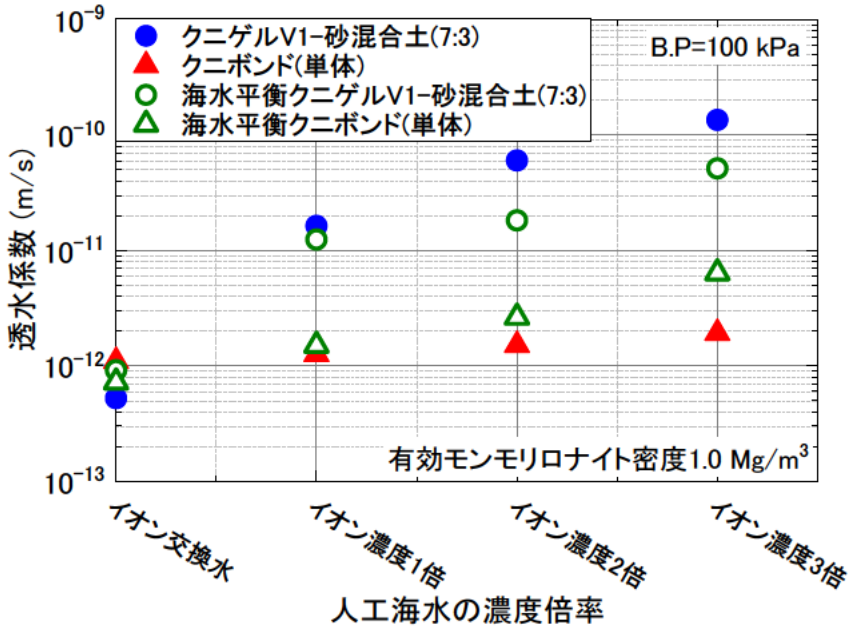


図 4-4- 22　人工海水のイオン濃度倍率と透水係数の関係

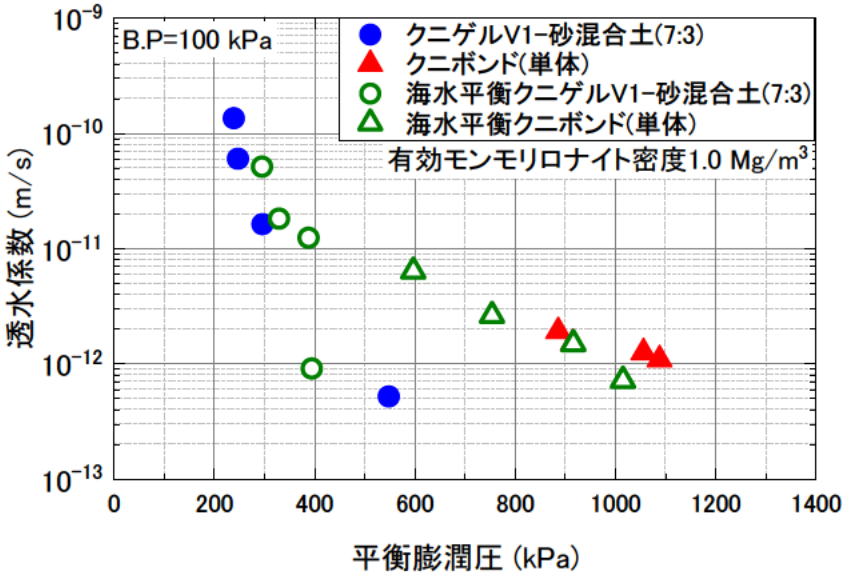


図 4-4- 23　平衡膨潤圧と透水係数の関係

(iv) 砂混合の有無の透水係数への影響

図 4-4-24 は、各通水液における海水平衡クニゲル V1 単体の透水係数を、図 4-4-22 に追記したグラフである。なお、(i)で示した人工海水(1 倍)におけるクニゲル V1 単体の透水係数(通水初期および定常時の値)も記載した。これらのケースについて、透水係数測定時のイオン交換の状態は、クニゲル V1 単体(未処理)の通水初期では過渡期、その他のケースでは海水平衡状態であった（表 4-4-9 参照)。これらの透水係数について、(iii)で示した海水平衡クニゲル V1－砂混合土と比較すると、その差は僅かであり、ほぼ同等と考えられる。少なくとも、ベントナイト単体の供試体として比較した場合、クニボンド単体や海水平衡クニボンド単体の透水係数とは顕著に異なることが確認された。したがって、(iii)で確認された各供試体による透水係数の差は、少なくとも、砂混合の有無によるものではないことが明らかになった。

図 4-4-25 は、透水試験後の含水比分布である。試験ケースによらず、含水比は 30～35%であり、供試体全体に概ね均等に水が行き渡っていたと考えられる。

ベントナイトの種類による各特性の差異について、他に考え得る要因としては、モンモリロナイト(一次粒子)の形状や、随伴鉱物、圧縮成型時の配向や一次粒子が凝集した集合体(二次粒子)の形状の相違などが考えられることから、将来的な課題として、粉体状態および圧縮成型後の構造を詳細に観察していくことが重要と考えられる。

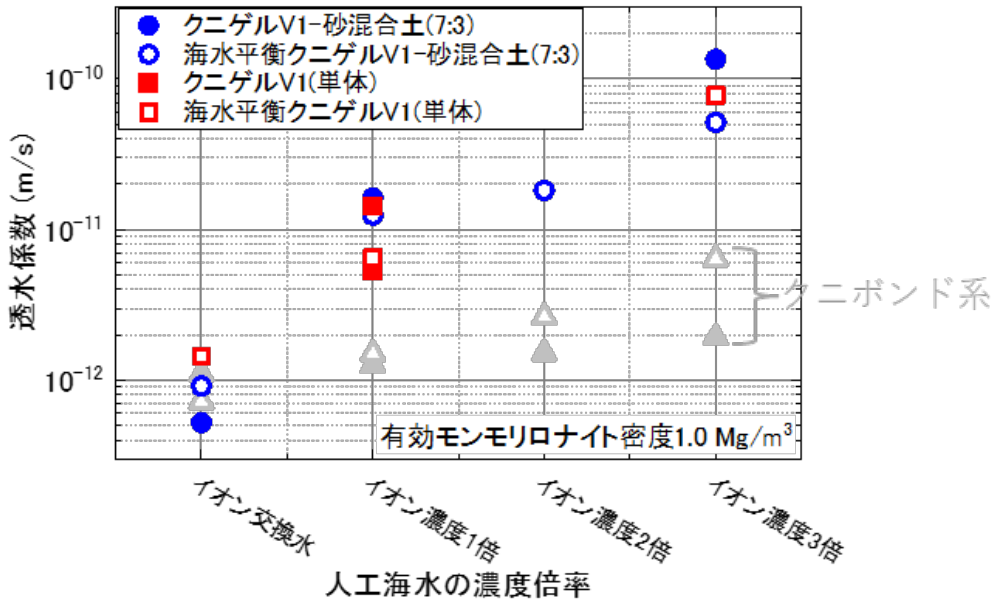


図 4-4- 24　クニゲル V1 および海水平衡クニゲル V1 単体と砂混合土の透水係数の比較

表 4-4- 9　透水膨潤圧試験の各ケースにおけるイオン交換の状態

	試料	通水液	PV 比	イオン交換の状態
砂あり（砂混合土）	クニゲル V1 -砂混合土 （未処理）	イオン交換水 人工海水 1 倍 人工海水 2 倍 人工海水 3 倍	0.202 0.662 0.307 0.534	過渡期
	海水平衡 クニゲル V1-砂混合土	イオン交換水 人工海水 1 倍 人工海水 2 倍 人工海水 3 倍	0.350 0.316 0.241 0.271	海水平衡
砂なし（単体）	クニゲル V1 単体 （未処理）	人工海水 1 倍	40.621	過渡期（通水初期） 海水平衡（定常時）
	海水平衡 クニゲル V1 単体	イオン交換水 人工海水 1 倍 人工海水 3 倍	0.331 0.335 0.473	海水平衡

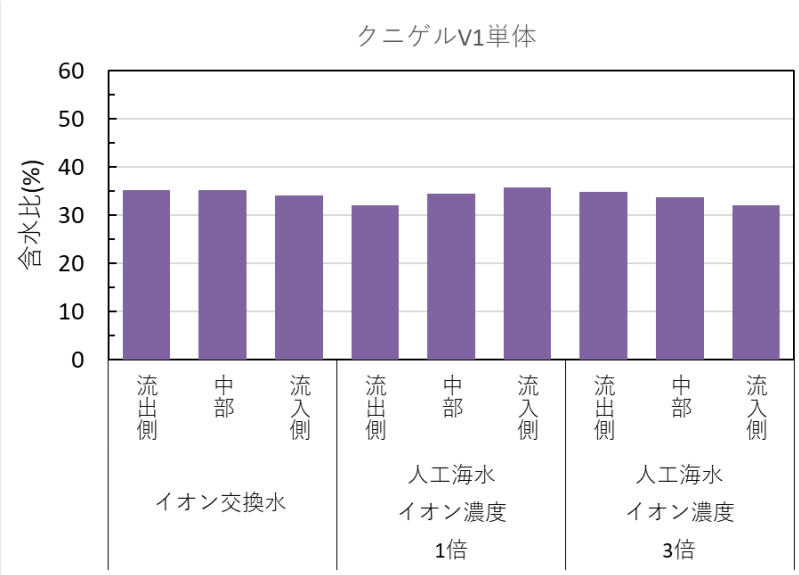


図 4-4- 25　透水試験後の含水比分布

(d) カオリン粘土を用いたせん断透水試験の予備試験

せん断透水試験の予備検討において実施したカオリン粘土の圧密時の圧縮曲線を図 4-4-26 に示す。圧縮曲線の傾きは、定荷重条件の供試体において 0.10、定体積条件の供試体において 0.16 であった。既往研究ではカオリン粘土の圧縮曲線の傾きは 0.31 として報告されており(金山、2001)、本試験で得られた傾きはこれより小さい値であった。本試験における垂直荷重は最大 500 kPa であり、静的締固めによる供試体作製時のプレス圧は約 15 MPa であった。このことから、供試体が過圧密状態であったため、圧縮曲線の傾きは文献値の圧縮曲線の傾きより小さくなったと考えられる。

図 4-4-27 は、カオリン粘土供試体のせん断に伴う供試体高さの変化である。500 kPa の定荷重条件におけるせん断では、せん断初期において 0.5 mm 程度の沈下が見られた。その後、供試体高さは約 19.6 mm とほぼ一定の値に収束した。これに対し、定体積条件におけるせん断では、初期供試体高さ 20 mm からほとんど変化がなかった。図 4-4-28 は、カオリン粘土供試体のせん断に伴うせん断応力の変化である。定荷重条件においては、初期にピーク強度が発現した後、せん断変位 40～50 mm にかけてせん断応力が増加した。その後、せん断変位 80 mm 付近でせん断応力は低下し、ほぼ一定の値に収束した。一方、定体積条件では、定荷重条件の試験と比較して、せん断初期に明瞭なピークがみられなかった。せん断変位の増加に伴い、せん断応力は緩やかに増加しながら、ほぼ一定の値に収束した。双方とも、せん断変位 157 mm(360°)においてせん断応力は 230～250 kPa を示し、残留状態に至った。

せん断に伴うカオリン粘土(イオン交換水)の透水性の変化を図 4-4-29 に示す。(a)は透水係数および見かけの透水係数の測定値であり、(b)は(a)を正規化したグラフである。せん断変位を与えた後については、鉛直方向の透水係数は、せん断変位によらずほとんど値が変化しなかったが、水平方向に関しては透水性の低下が生じた。また、正規化した透水係数と見かけの透水係数を比較した場合、鉛直方向より水平方向の方が透水性の低下が著しかった。いずれの透水方向においても、透水性の増加が生じていなかったことから、せん断に伴う水みちは生じていなかったと考えられる。

図 4-4-30 は、せん断後の供試体(側方)の写真である。カオリン粘土(イオン交換水)では、破断部が連結した明瞭なせん断破壊が生じており、図 4-4-31 の通り、せん断位置で供試体を上下に分割することができた。

以上のように、非膨潤性粘土であるカオリン粘土を用いて定体積ならびに定荷重条件においてせん断透水試験を実施し、供試体の体積、せん断応力、透水性の変化量や傾向を把握した。膨潤性粘土を用いた試験に展開する上での一連の試験手順、および、種々の挙動に関する基礎データを得ることができた。

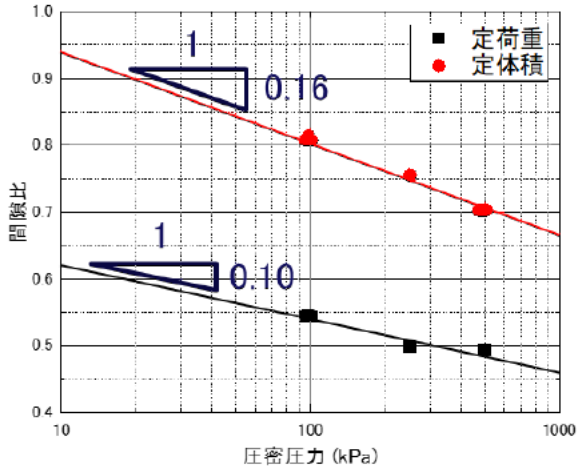


図 4-4- 26　カオリン粘土供試体の圧縮曲線

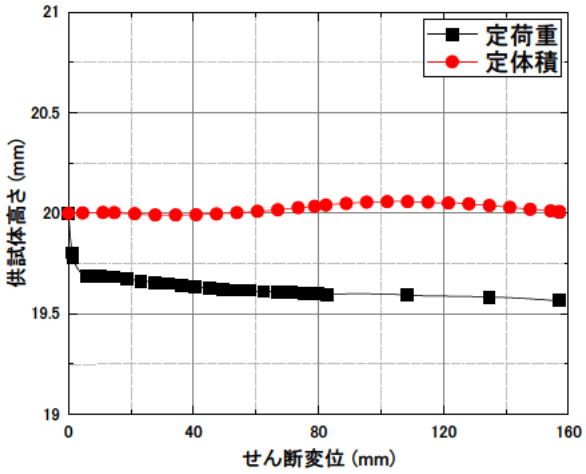


図 4-4- 27　カオリン粘土供試体のせん断に伴う供試体高さの変化

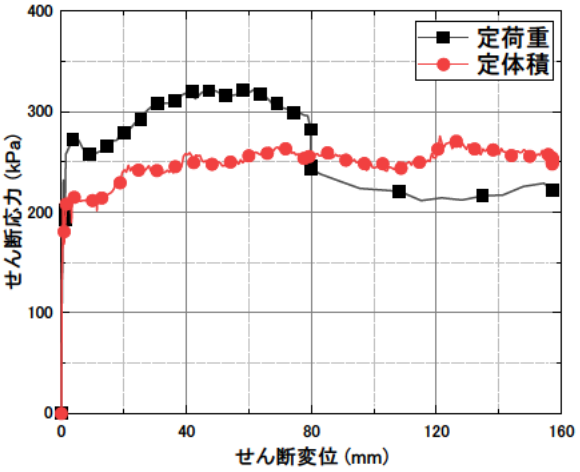


図 4-4- 28　カオリン粘土供試体のせん断に伴うせん断応力の変化

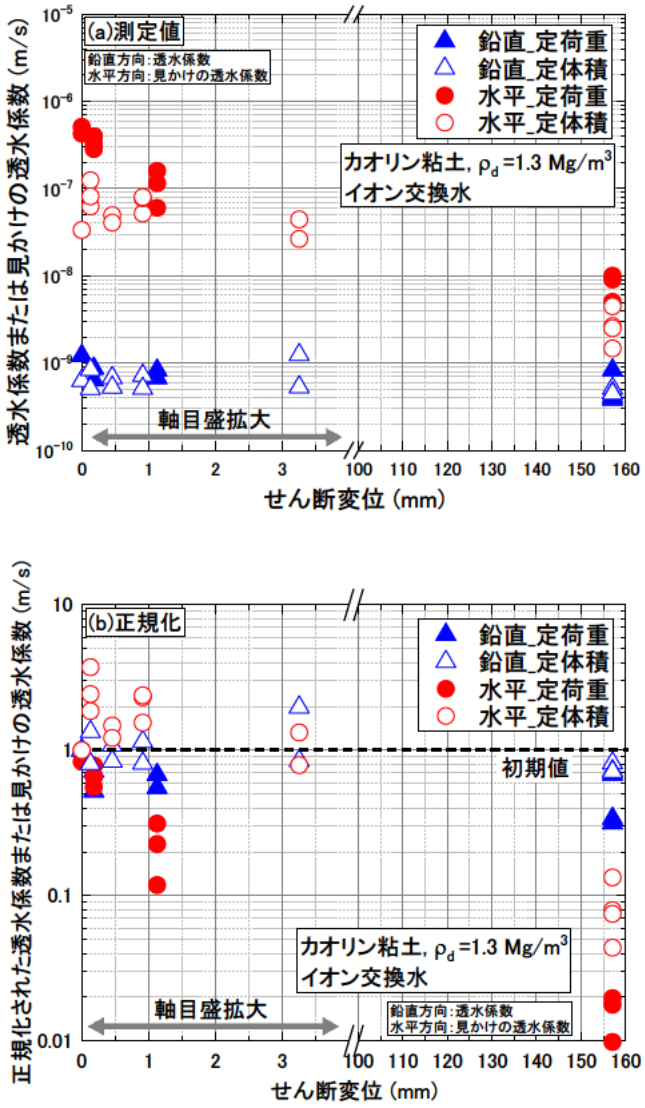


図 4-4- 29　せん断に伴うカオリン粘土(イオン交換水)の透水性の変化
(上：測定値、下：正規化)

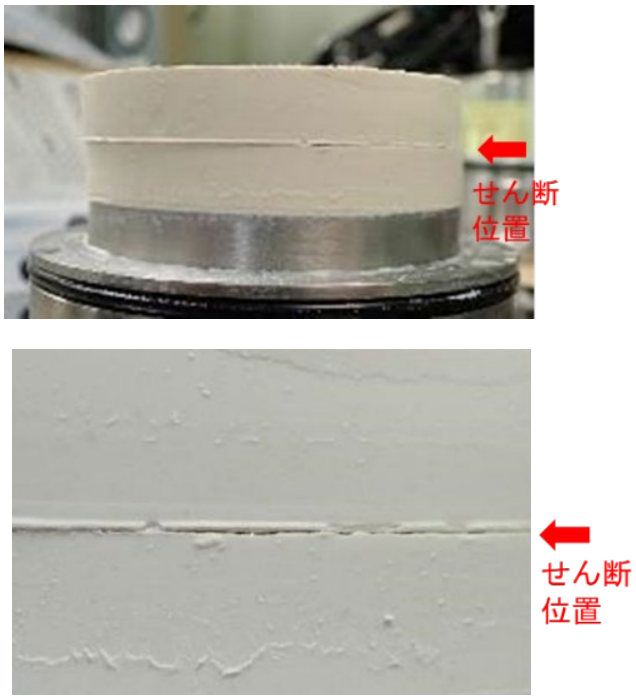


図 4-4- 30　カオリン粘土(イオン交換水)のせん断後の供試体(側方)の写真(左)および
その拡大写真(右)

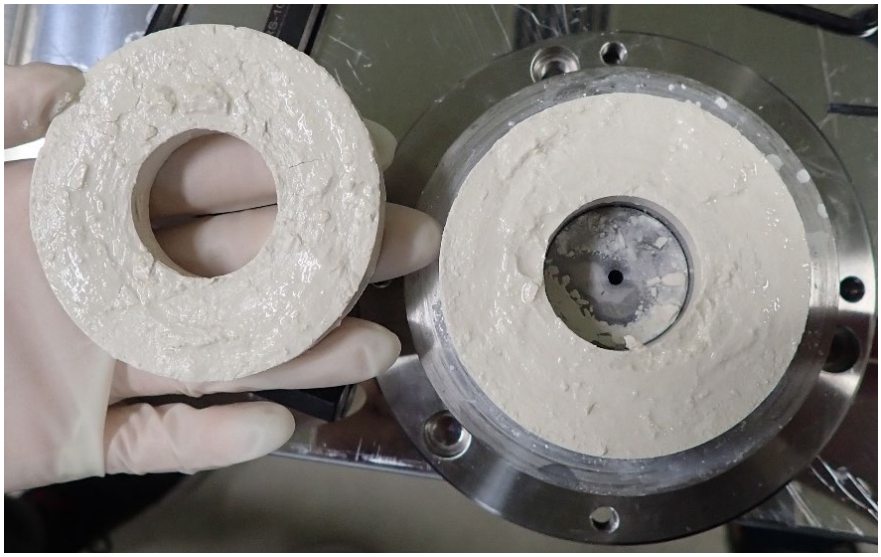


図 4-4- 31　せん断位置において上下に分割したカオリン供試体のせん断面の写真

(e) ベントナイト供試体を用いたせん断透水試験

表 4-4-10 は、せん断透水試験に用いた各供試体の初期乾燥密度を示す。これらの供試体を用いて実施したせん断透水試験について、膨潤圧、せん断特性、およびせん断の進行に伴う透水性の変化を以下に示す。

表 4-4- 10　せん断透水試験の各ベントナイト供試体の初期乾燥密度

試料	飽和・通水液	目標乾燥密度 (Mg/m^3)	初期供試体高さ(cm)	初期乾燥密度(Mg/m^3)
クニゲル V1－砂混合土（7:3）	イオン交換水	1.60	20.02	1.59
	人工海水(濃度 1 倍)		19.94	1.60
海水平衡クニゲル V1－砂混合土（7:3）	人工海水(濃度 1 倍)		20.00	1.60
	人工海水(濃度 1 倍)（途中透水なし）		19.72	1.62
	人工海水(濃度 2 倍)		19.08	1.68
	人工海水(濃度 3 倍)		19.85	1.57
クニボンド（単体）	イオン交換水	1.12	19.15	1.15
	人工海水(濃度 1 倍)		19.58	1.14
海水平衡クニボンド（単体）	人工海水(濃度 1 倍)		19.83	1.13
	人工海水(濃度 2 倍)		19.89	1.12
	人工海水(濃度 3 倍)		20.00	1.12

(i) 膨潤圧

図 4-4-32～図 4-4-35 は、各供試体・各通水液条件の給水過程において測定された鉛直圧から供試体設置圧を差し引いた値、すなわち膨潤圧である。全てのケースにおいて、膨潤圧は初期にピークを示した後に一度低下し、平衡膨潤圧へと至った。図 4-4-32 のクニゲル V1－砂混合土に対しイオン交換水を通水したケースでは、給水開始から 270～340 時間において機器の不具合によりデータロギングがされなかった。

図 4-4-32 より、クニゲル V1－砂混合土では、通水液としてイオン交換水を用いた場合の平衡膨潤圧は約 400 kPa、人工海水(1 倍)を用いた場合の平衡膨潤圧は約 180 kPa であった。クニゲル V1－砂混合土の平衡膨潤圧は、人工海水(1 倍)を用いた場合、イオン交換水の場合の約半分に低下しており、その要因としてイオン交換反応と凝集の両方が考えられる。図 4-4-33 より、海水平衡クニゲル V1-砂混合土についても、人工海水のイオン濃度の増加に伴い、平衡膨潤圧が低下した。人工海水(1 倍)を通水した場合、平衡膨潤圧は約 250 kPa、2 倍で約 195 kPa、3 倍で約 50 kPa であった。海水平衡クニゲル V１は、人工海水とのイオン交換反応が平衡状態にある試料であることから、主に凝集の影響によって平衡膨潤圧が低下したと考えられる。同様に、図 4-4-34 より、クニボンドにイオン交換水を通水した場合、平衡膨潤圧は約 1090 kPa、人工海水(1 倍)を通水した場合、800 kPa であった。また図 4-4-35 より、海水平衡クニボンドに人工海水(1 倍)を通水した場合、平衡膨潤圧は約 600 kPa、2 倍で約 530 kPa、3 倍で約 360 kPa であった。

図 4-4-36 は、せん断透水試験で得られた平衡膨潤圧と⑤(c)(iii)で前述した透水膨潤圧試験で得られた平衡膨潤圧の比較である。せん断透水試験では、透水膨潤圧試験と比較して、膨潤圧が小さく測定されることが明らかになった。これらの試験における相違として、透水膨潤圧試験では、供試体リング(試験セル)内で試料を直接締固めたのに対し、リングせん断試験では、中空供試体を締固め用のモールド内で締固め、それを試験セルに移し替えている。さらに、せん断透水試験では、スリット制御部位に関して供試体の応力開放に伴うリバウンドを考慮し、中空供試体と装置側の間にはわずかなクリアランスを設けている。こうした装置の構造上の特徴により、せん断透水試験では供試体が膨潤する時に緩みが生じ、平衡膨潤圧としては小さく計測されたと考えられる。

ここで得られた平衡膨潤圧は、せん断透水試験における供試体の初期拘束圧として考える。

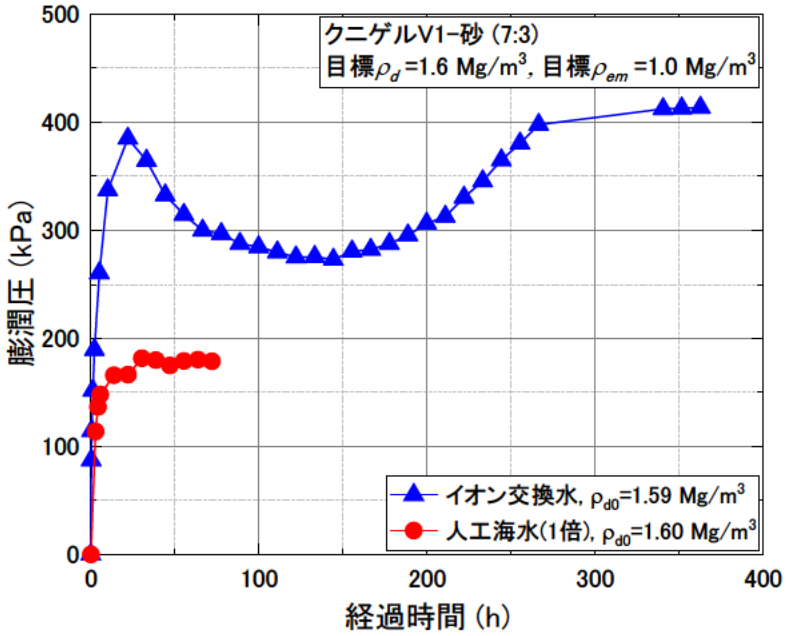


図 4-4- 32　クニゲル V1－砂混合土(イオン交換水、人工海水 1 倍)の膨潤圧

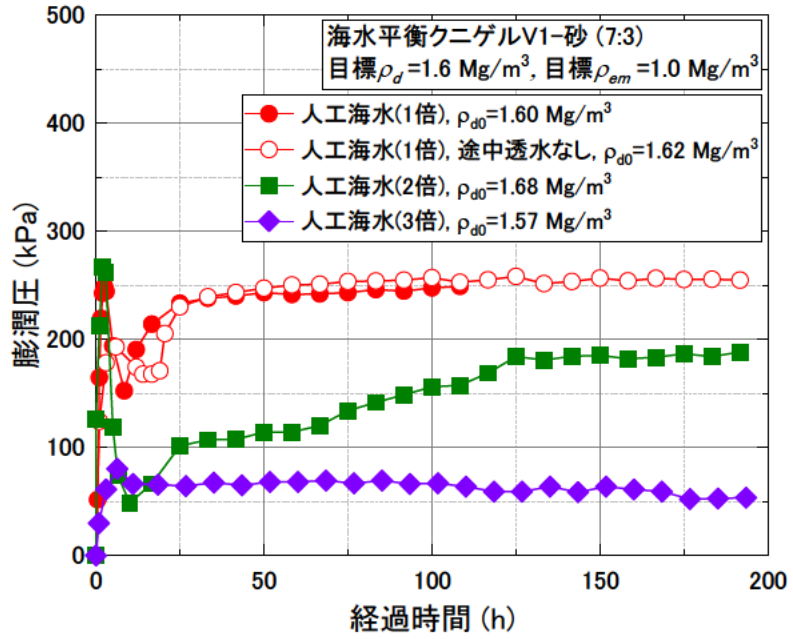


図 4-4- 33　海水平衡クニゲル V1－砂混合土(人工海水 1 倍、2 倍、3 倍)の膨潤圧

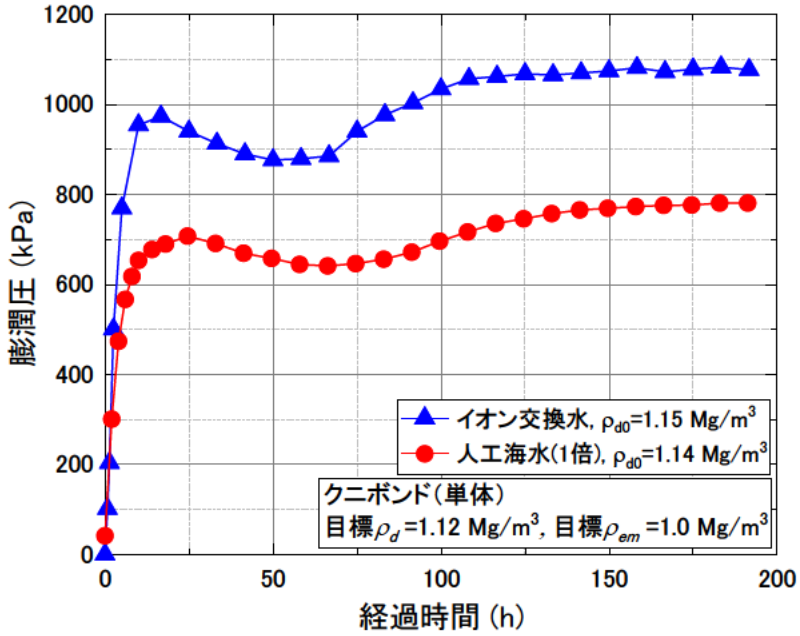


図 4-4- 34　クニボンド単体(イオン交換水、人工海水 1 倍)の膨潤圧

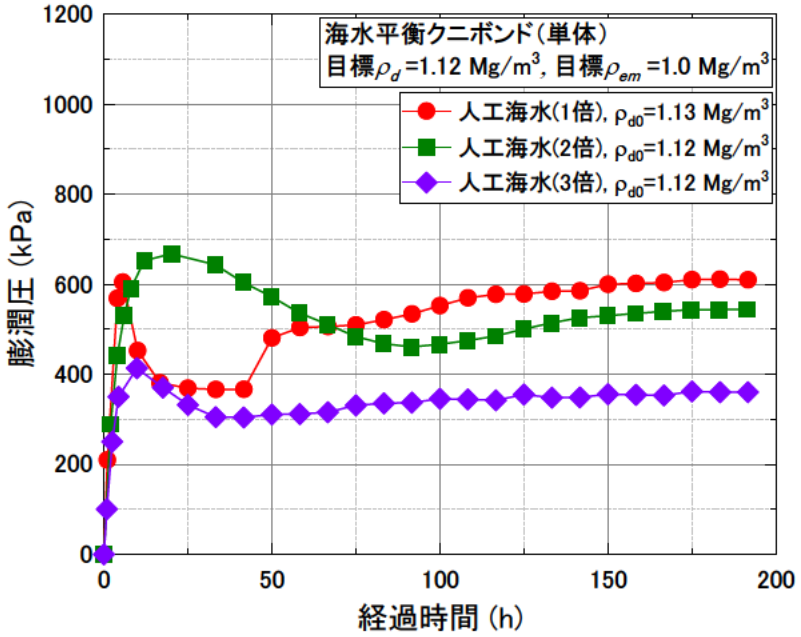


図 4-4- 35　海水平衡クニボンド単体(人工海水 1 倍、2 倍、3 倍)の膨潤圧

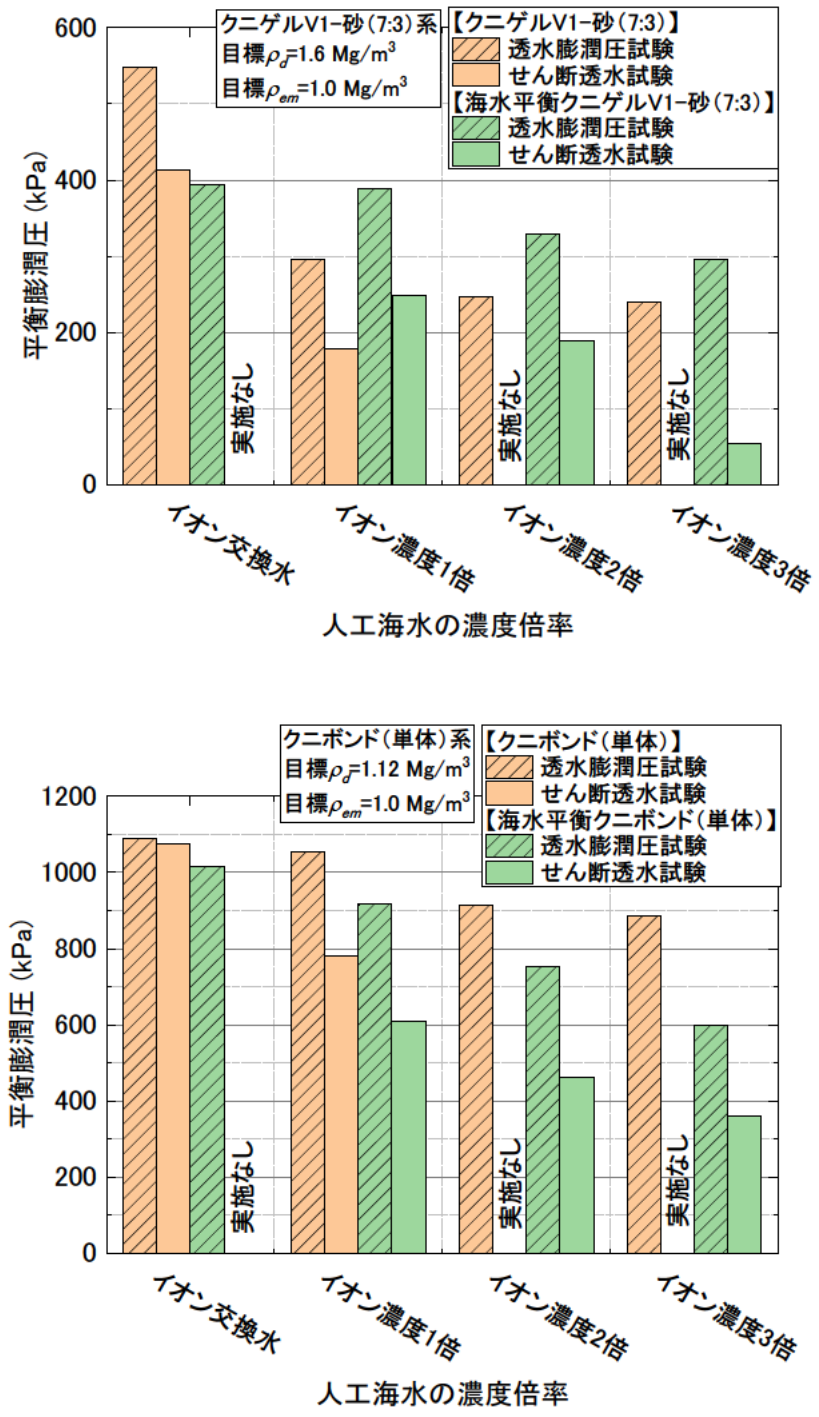


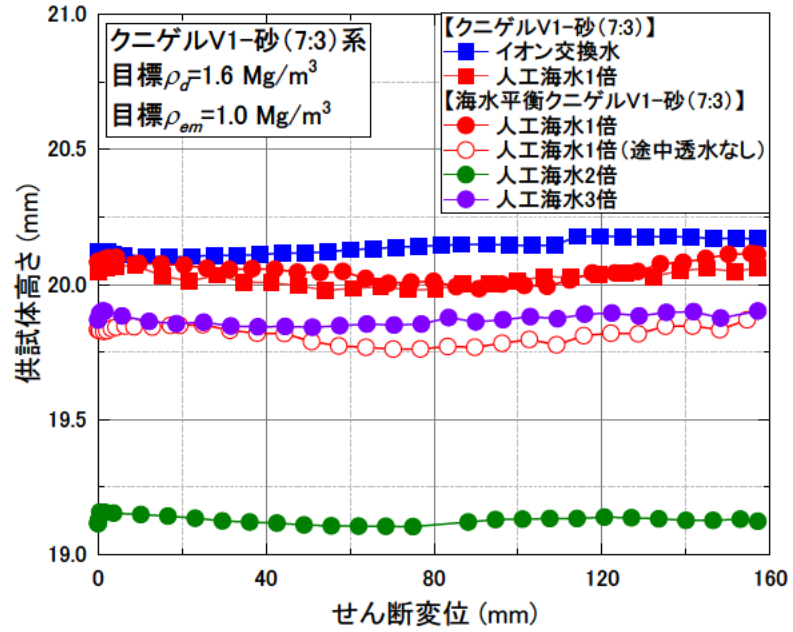
図 4-4- 36　せん断透水試験および透水膨潤圧試験における平衡膨潤圧の比較

(ii) せん断強度

図 4-4-37 は、せん断に伴う供試体高さの変化である。表 4-4-10 の通り、試験ケースごとに、同一の目標乾燥密度の供試体であっても初期乾燥密度には差異があり、供試体高さの初期値にもばらつきが生じた。しかし、全ての供試体においてせん断中の供試体高さは概ね一定値であり、試験中の定体積条件は保たれていたと考えられる。

図 4-4-38～図 4-4-41 は、各供試体・各通水液条件におけるせん断に伴うせん断応力の変化である。なお、透水試験のためのせん断停止中のデータは除外した。また、海水平衡クニゲル V1－砂混合土に対して人工海水(1 倍)を用いた試験において、任意のせん断変位でせん断を停止し透水試験を行うことの影響を確認した。せん断応力の変化から、せん断過程におけるせん断応力の若干の増減は確認されたが、ピーク強度や残留強度に違いは生じなかった。したがって、上述の操作による明確な影響は確認されなかった。

表 4-4-11 は、各ケースにおけるピーク位置、ピーク強度、および残留強度の一覧である。ここで記載した残留強度は、せん断位置 157 mm(回転角度 360°)のときの値とした。各ケースのピーク位置は、クニゲル V1－砂混合土系のケースではせん断変位 0.81～2.47 mm であったのに対し、クニボンド単体系のケースでは、せん断変位 0.37～0.71 mm と相対的に小さい値を示した。ピーク強度については、クニゲル V1－砂混合土系のケースでは 151～230 kPa であり、クニボンド単体系のケースでは 303～515 kPa であった。残留強度については、クニゲル V1－砂混合土系のケースでは 111～164 kPa、クニボンド単体系のケースでは 65～135 kPa であった。



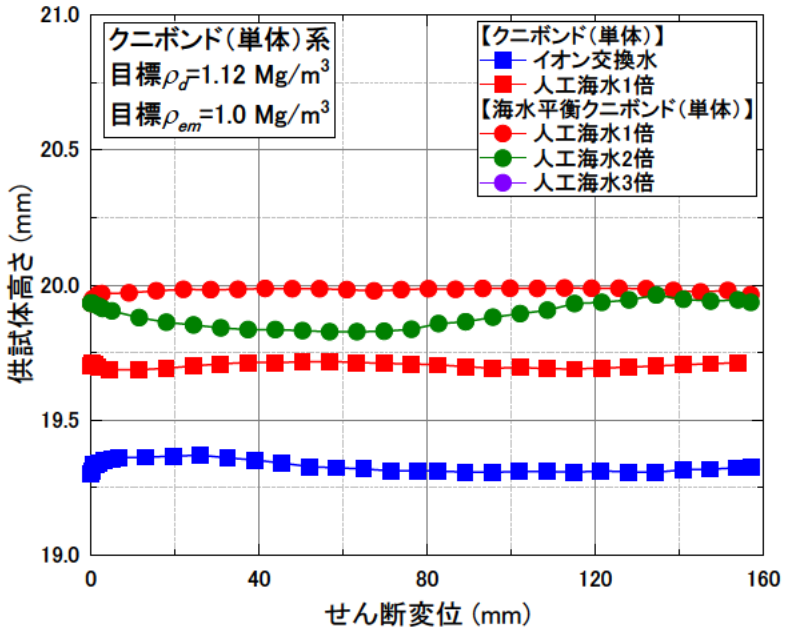


図 4-4- 37　各供試体のせん断に伴う供試体高さの変化

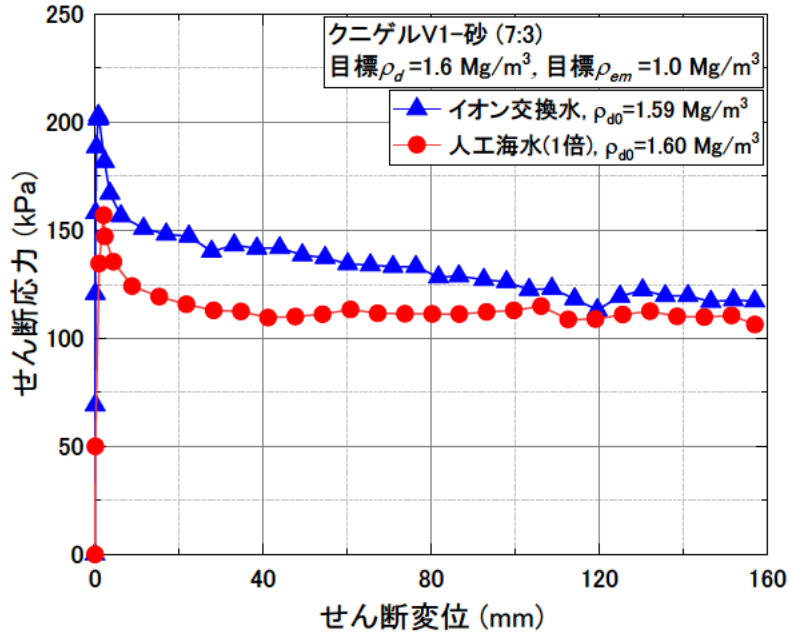


図 4-4- 38　クニゲル V1－砂混合土のせん断に伴うせん断応力の変化

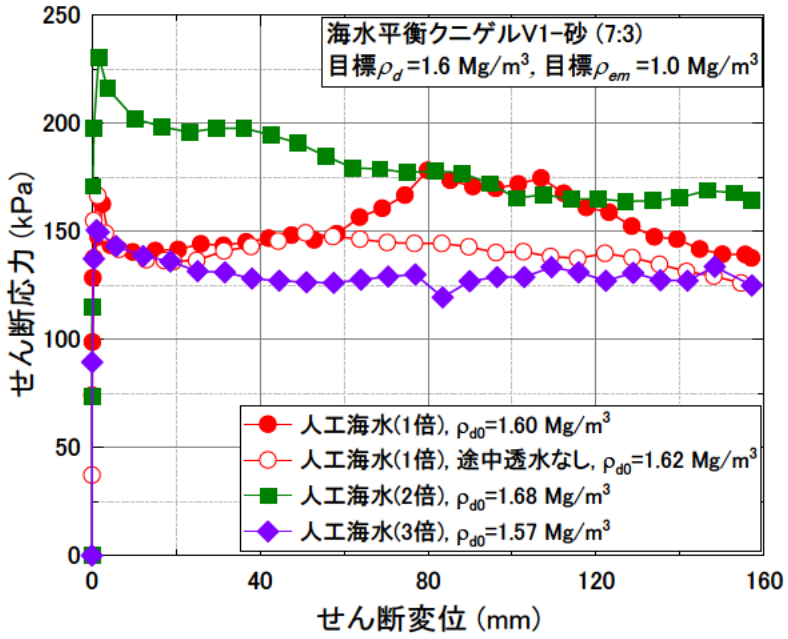


図 4-4- 39　海水平衡クニゲル V1－砂混合土せん断に伴うせん断応力の変化

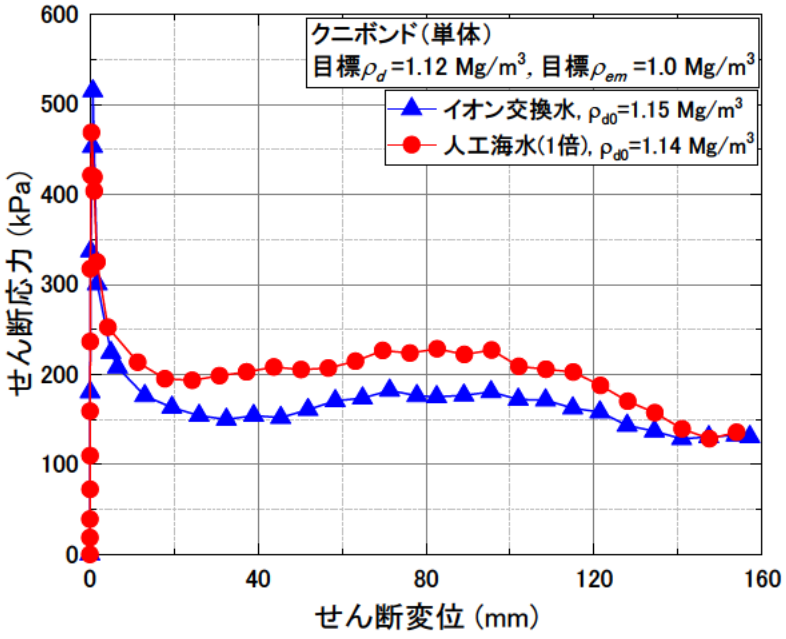


図 4-4- 40　クニボンド単体のせん断に伴うせん断応力の変化

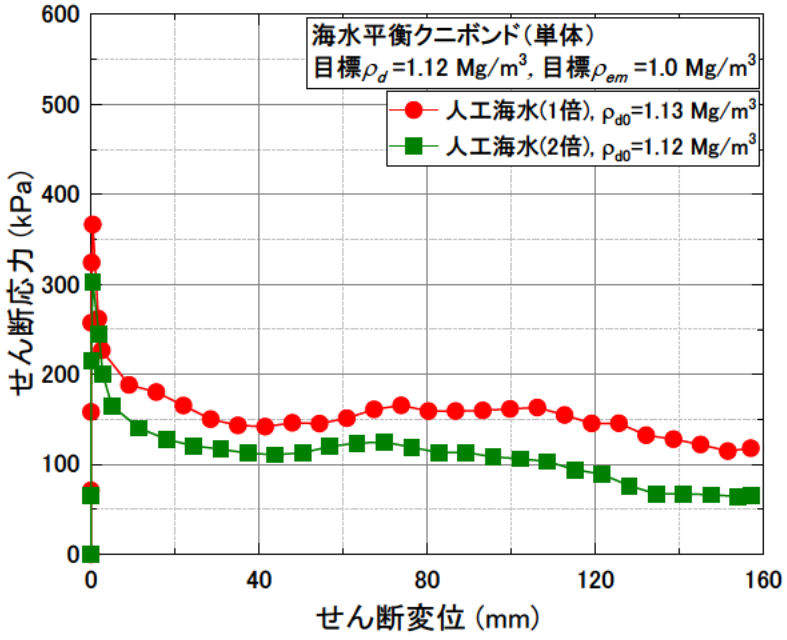


図 4-4- 41　海水平衡クニボンド単体のせん断に伴うせん断応力の変化

表 4-4- 11　せん断強度の一覧

試料	飽和・通水液	ピーク位置（mm）	ピーク強度（kPa）	残留強度（kPa）
クニゲル V1－砂混合土（7:3）	イオン交換水	0.81	203	117
	人工海水(濃度 1 倍)	2.05	157	111
海水平衡クニゲル V1－砂混合土（7:3）	人工海水(濃度 1 倍)	2.47	162	138
	人工海水(濃度 1 倍)（途中透水なし）	1.37	167	126
	人工海水(濃度 2 倍)	1.61	230	164
	人工海水(濃度 3 倍)	1.09	151	124
クニボンド（単体）	イオン交換水	0.71	515	135
	人工海水(濃度 1 倍)	0.37	469	131
海水平衡クニボンド（単体）	人工海水(濃度 1 倍)	0.44	366	118
	人工海水(濃度 2 倍)	0.38	303	65

※残留強度は、せん断変位 157 mm（回転角度 360°）の位置の値

(iii) 有効応力経路

図 4-4-42～図 4-4-45 は、各供試体・各通水液条件における有効応力経路である。なお、(ii)と同様に透水試験のためのせん断停止中のデータは除外した。イオン交換水条件のクニゲルＶ１－砂混合土およびクニボンド単体では、残留状態における内部摩擦角 ϕ_rは 14°および 9°であった。既往の研究(矢田部、1991)において、スメクタイトを多量に含む粘性土の ϕ_rは 10°より小さいと報告されており、本研究で得られた値も概ね近い値であった。クニゲルＶ１－砂混合土では、砂が混合されるため、 ϕ_rはやや大きい値になったと考えられる。いずれの供試体においても、人工海水を用いた場合、イオン交換水を用いたケースと比較して ϕ_rおよびピーク強度における内部摩擦角 ϕ_pが大きくなった。これは、間隙水濃度の増加に応じて ϕ_rおよび ϕ_pが増加傾向にあるという先行研究(鈴木、2003)と矛盾しないものである。

クニゲル V1－砂混合土の供試体に関して、図 4-4-42 および図 4-4-43 より、 ϕ_rと ϕ_pがイオン交換水を用いた場合には異なるのに対し、人工海水を用いた場合には同一になった。海水平衡クニゲル V1－砂混合土に人工海水を用いた場合も同様である。ここで、粘土含有率が 25%以下の場合、限界状態における内部摩擦角 ϕ'と ϕ_rがほぼ同一である(石原、2020；Lupini ら、1981)ことが知られている。本研究では、正規圧密状態における試験を実施していないため、厳密には ϕ'は明らかではないが、 $\phi' \fallingdotseq \phi_p$と仮定すると、 ϕ_rと ϕ_pが同一であったことから、粘土含有率が小さい材料のような挙動であったと解釈できる。実際には粘土含有率の高い供試体ではあったが、人工海水を用いた場合、凝集により力学挙動に寄与する見かけの粒子径が大きくなり、粘土含有率が小さい材料のような挙動を示した可能性が考えられる。

クニボンド単体および海水平衡クニボンド単体に関して、図 4-4-44 および図 4-4-45 より、イオン交換水を用いた場合だけではなく人工海水を用いた場合も ϕ_rと ϕ_pが異なる値を示したことから、海水条件であっても粘土含有率が高い材料の挙動であったと解釈できる。クニゲル V1－砂混合土と比較して、クニボンド単体は通水液(イオン交換水と人工海水)の違いによる特性変化が生じにくいという点において、⑤(c)(iii)の透水膨潤圧試験の結果とも矛盾しない結果であった。

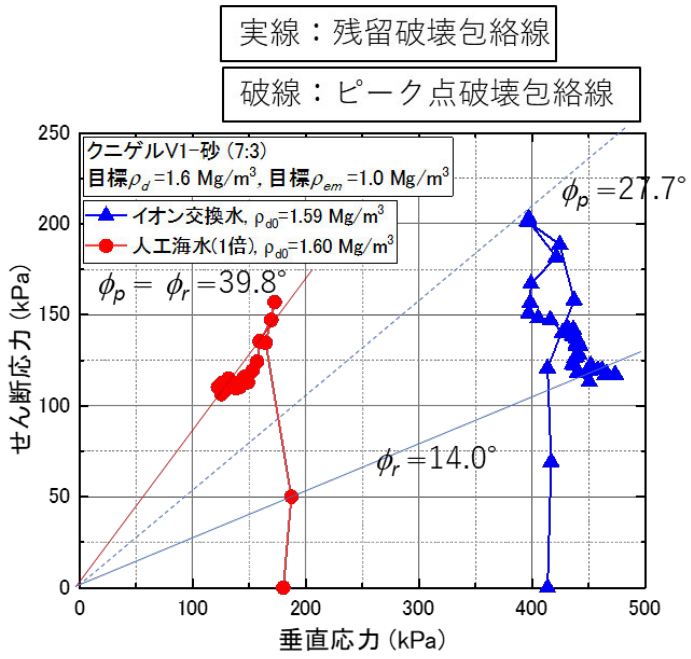


図 4-4- 42　クニゲル V1－砂混合土の有効応力経路

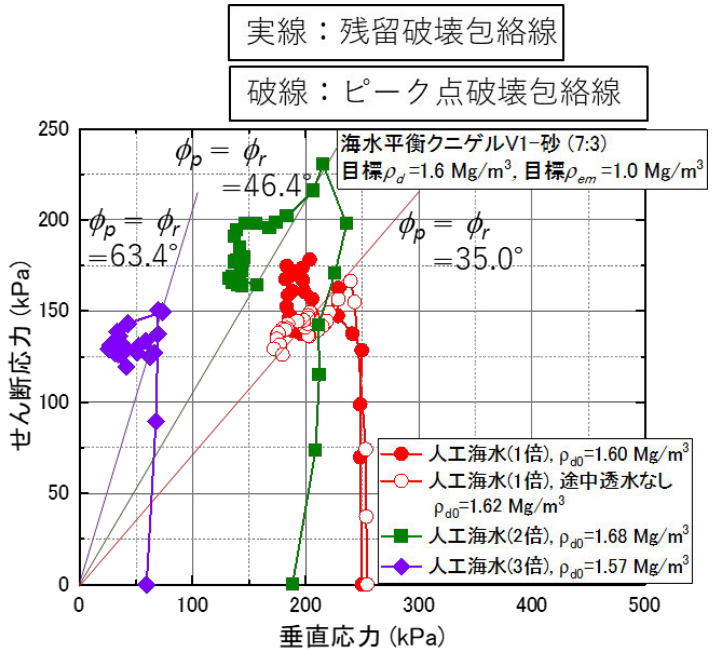


図 4-4- 43　海水平衡クニゲル V1－砂混合土の有効応力経路

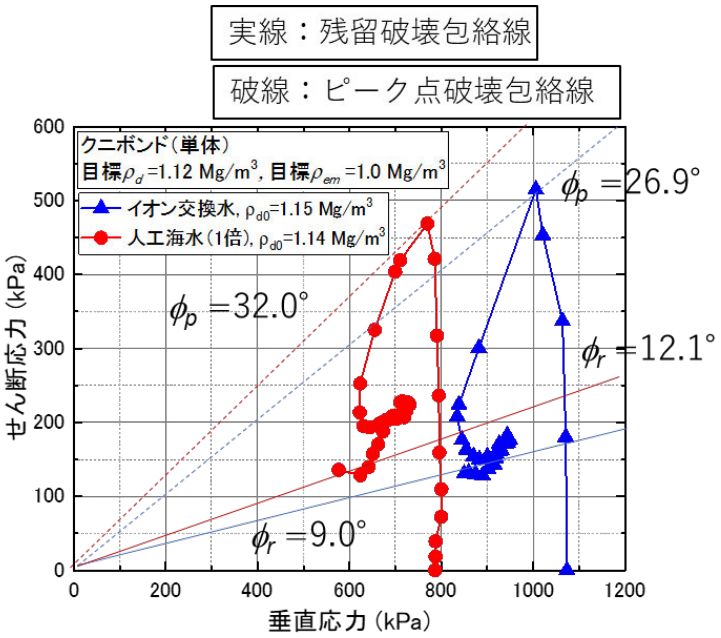


図 4-4- 44　クニボンド単体の有効応力経路

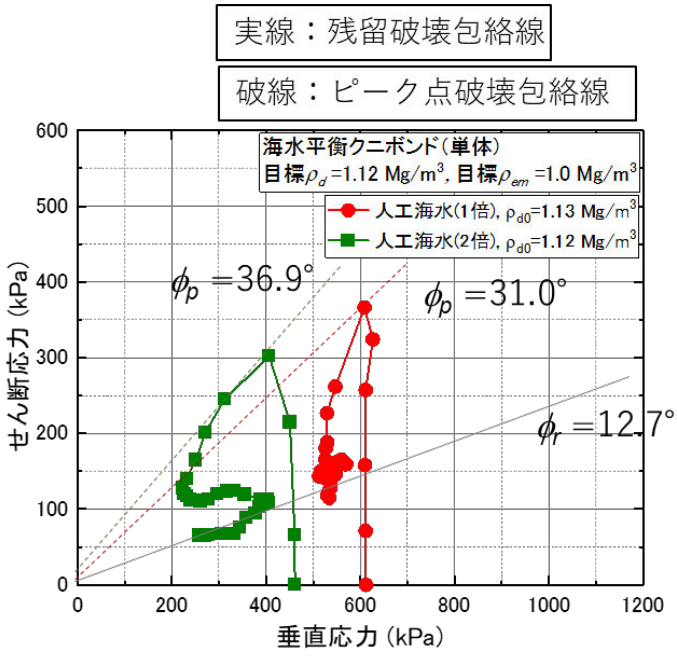


図 4-4- 45　海水平衡クニボンド単体の有効応力経路

(iv) 透水特性

せん断の進行に伴う透水性の変化を図 4-4-46～図 4-4-49 に示す。試料ごとに、測定値と正規化した値を図示した。鉛直方向の透水係数に関しては、せん断変位 0 における値が⑤(b)(iii)透水膨潤圧試験による結果とよく一致する結果が得られた(初期乾燥密度に差があった海水平衡クニゲル V1-砂混合土の人工海水(2 倍)のケースは除く)。試験装置が異なる場合も、同一試料については同等の透水係数が得られることが確認された。

透水係数および見かけの透水係数は、全ケース共通の傾向として、残留強度に至る過程において低下した。クニボンド単体については、鉛直・水平ともに透水性はせん断前の 0.8～0.6 倍とその変化が軽微であったが、その他の試料では、条件によってはせん断前の 0.1 倍を下回る値まで低下した。透水性の低下の割合としては、鉛直方向より水平方向の方が大きい傾向であったが、透水係数の変化は各方向で概ね連動していた。なお、いくつかのケース(海水平衡クニゲル V1－砂の人工海水(3 倍)、クニボンド単体の人工海水(1 倍)、海水平衡クニボンド単体の人工海水(1 倍))では、鉛直方向の透水係数が、ピーク強度手前で高くなる現象が確認された。いずれについても、ピーク強度を超えると透水係数は漸次低下した。水平方向の透水性については、全てのケースにおいて、せん断の進行に伴う値の増加は確認されなかった。

以上の試験結果より、せん断の進行に伴う透水性の増加は生じなかったことから、定体積せん断を受けた供試体に透水性の高い領域(水みち)は生じていなかったと考えられる。

各方向の測定値を比較すると、水平方向の見かけの透水係数は、鉛直方向の透水係数と比較して、値が 2 オーダーほど高かった。この要因として、各方向の透水係数の算出式が異なることや、水平方向における通水経路の考え方と実現象の相違、あるいは圧縮方向に応じた粘土粒子の配向と透水性の異方性などが考えられる。せん断透水試験において透水係数を絶対値として比較する上で、このような要因について考察を深めることは今後の課題である。

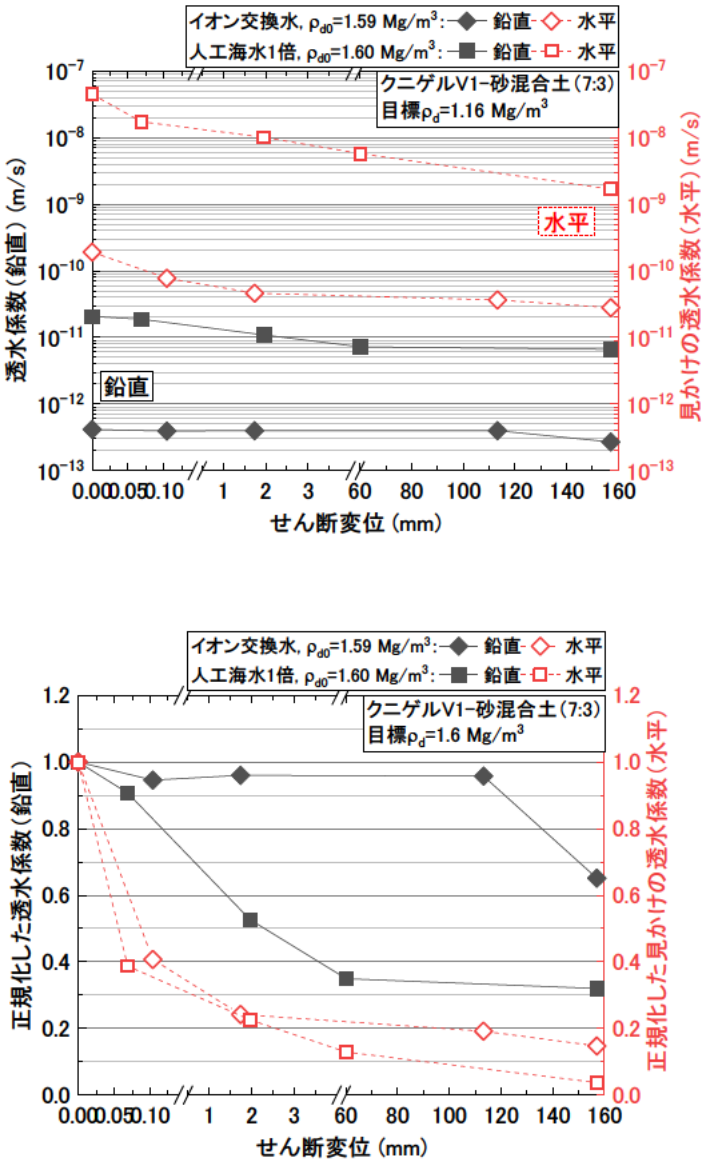


図 4-4- 46　せん断に伴うクニゲル V1－砂混合土の透水性の変化(上:測定値、下:正規化)

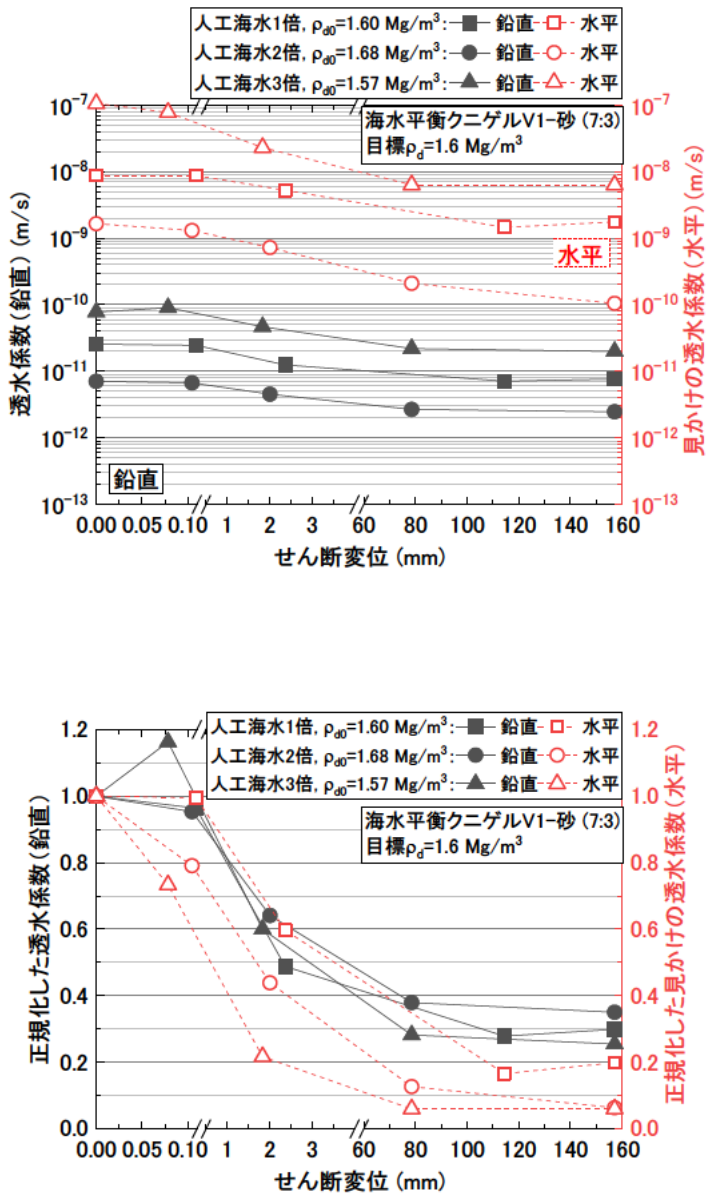


図 4-4- 47　せん断に伴う海水平衡クニゲル V1ー砂混合土の透水性の変化(上:測定値、下:正規化)

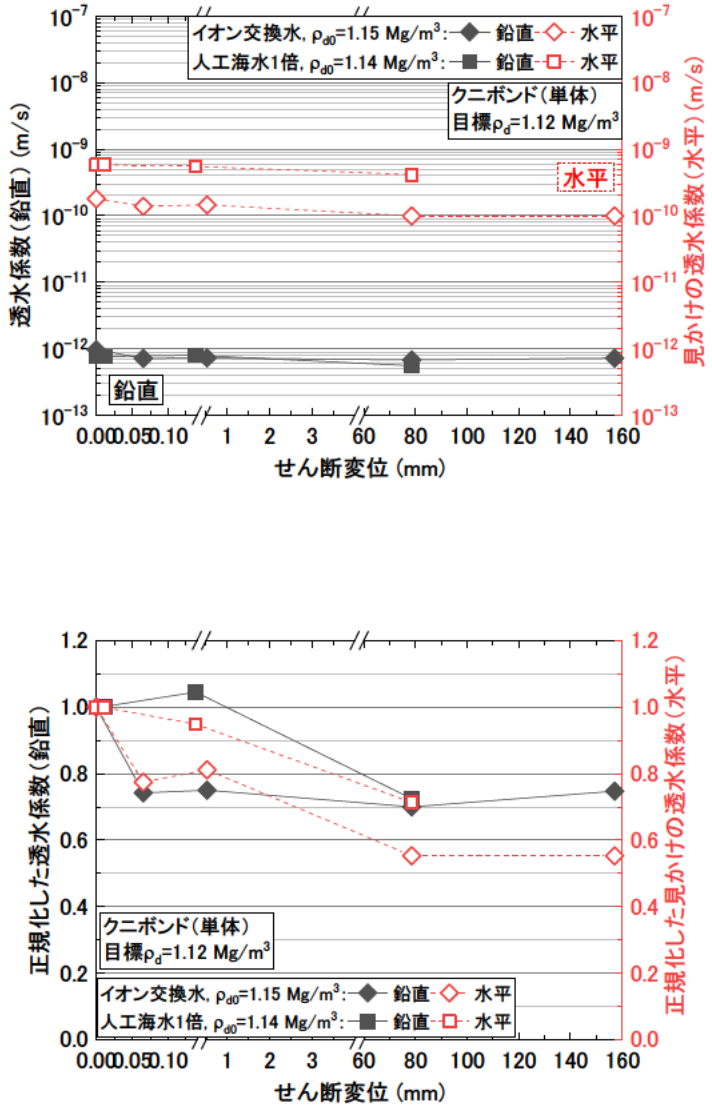


図 4-4- 48　せん断に伴うクニボンド単体の透水性の変化
(上:測定値、下:正規化)

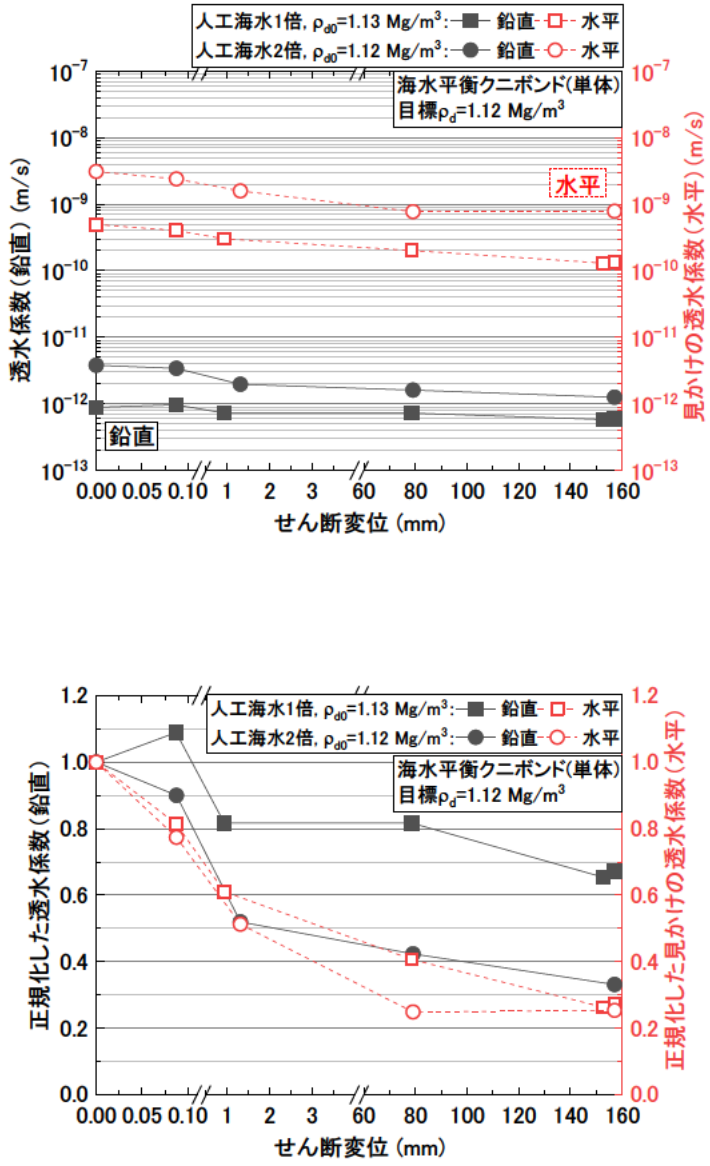


図 4-4- 49　せん断に伴う海水平衡クニボンド単体の透水性の変化
(上:測定値、下:正規化)

(v) せん断透水試験後の含水比および浸出陽イオン分布

図 4-4-50 は、せん断透水試験後の供試体を側方から撮影した写真である。全ての供試体において、高さ方向中央部分にせん断の跡と思われる箇所が観察されたが、海水平衡クニボンドの人工海水(1 倍)条件を除き、明確な破断部や開口部は観察されなかった。クニゲル V1－砂混合土は比較的均一な外観を示した一方、海水平衡クニゲル V1－砂混合土では上下端面近くの色が若干白色に近づいた。クニボンド単体および海水平衡クニボンド単体においては、供試体上側の端面およびせん断帯付近において明確に白色に近づく傾向が観察された。

図 4-4-51 は、せん断透水試験後の各供試体の含水比分布である。全体的な傾向として、供試体の上側で含水比が高く、特にクニボンド単体系でその傾向は顕著だった。図 4-4-50 において観察された色の違いと関連する可能性がある。

図 4-4-52～図 4-4-58 は、人工海水を通水した供試体の浸出陽イオン組成の分布(浸出陽イオン量および割合)である。各部における浸出陽イオン量の総和には差が生じており、海水平衡クニゲル V1－砂混合土で顕著であった。試料中の陽イオン交換容量はほとんどモンモリロナイトによるものと考えると、浸出陽イオン量の総和に差が生じたことは、供試体各部位においてモンモリロナイトが占める割合に変化が生じたことが原因と考えられる。特に砂混合の条件で浸出陽イオン量の総量の差が著しかったことから、分析試料の採取方法等の影響によって、不均一性が顕著に現れた可能性が考えられる。一方、浸出陽イオンの割合は、部位に依らずほぼ均一であった。

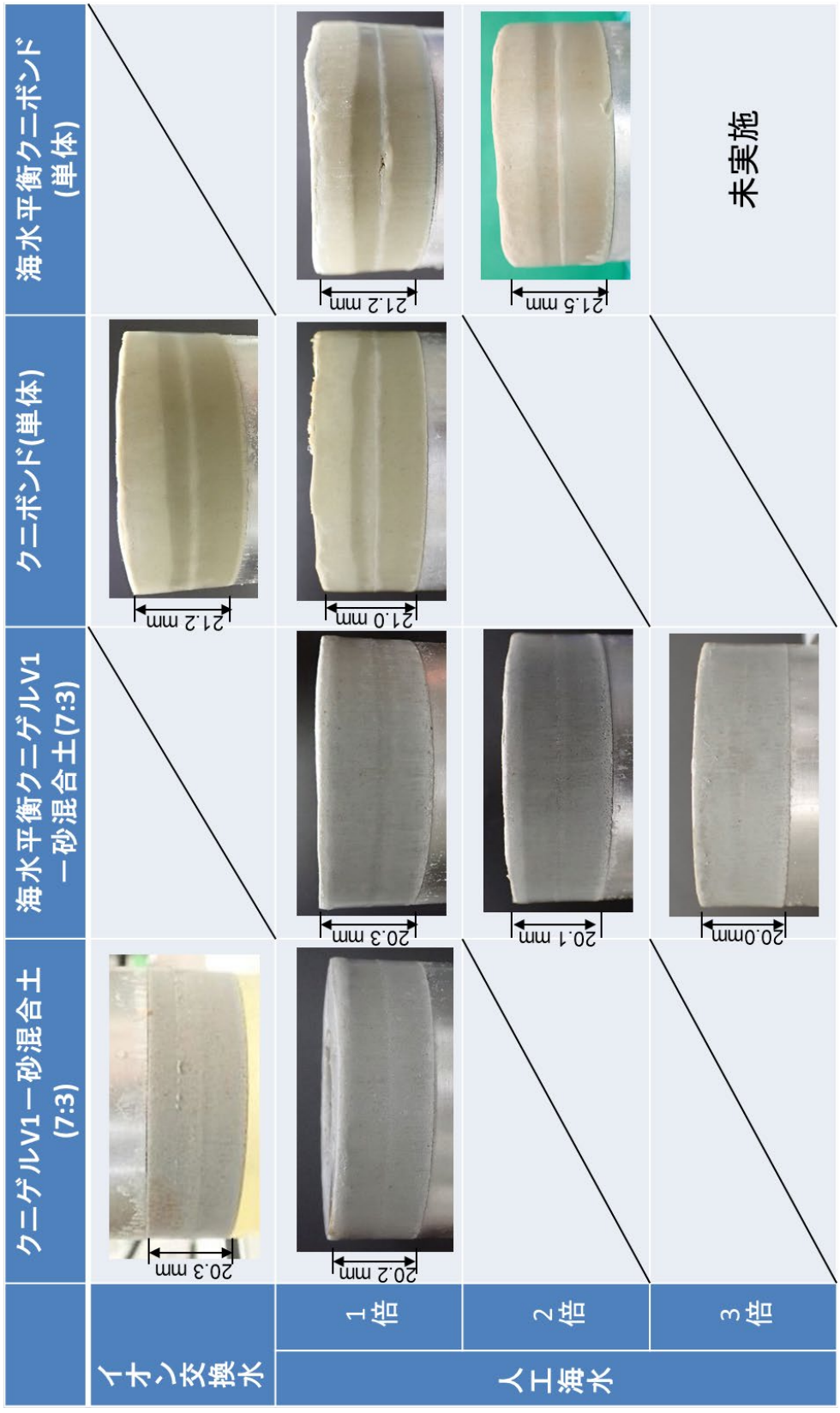


図 4-4- 50　せん断透水後の各供試体の写真（側方から応力解放された状態で撮影）

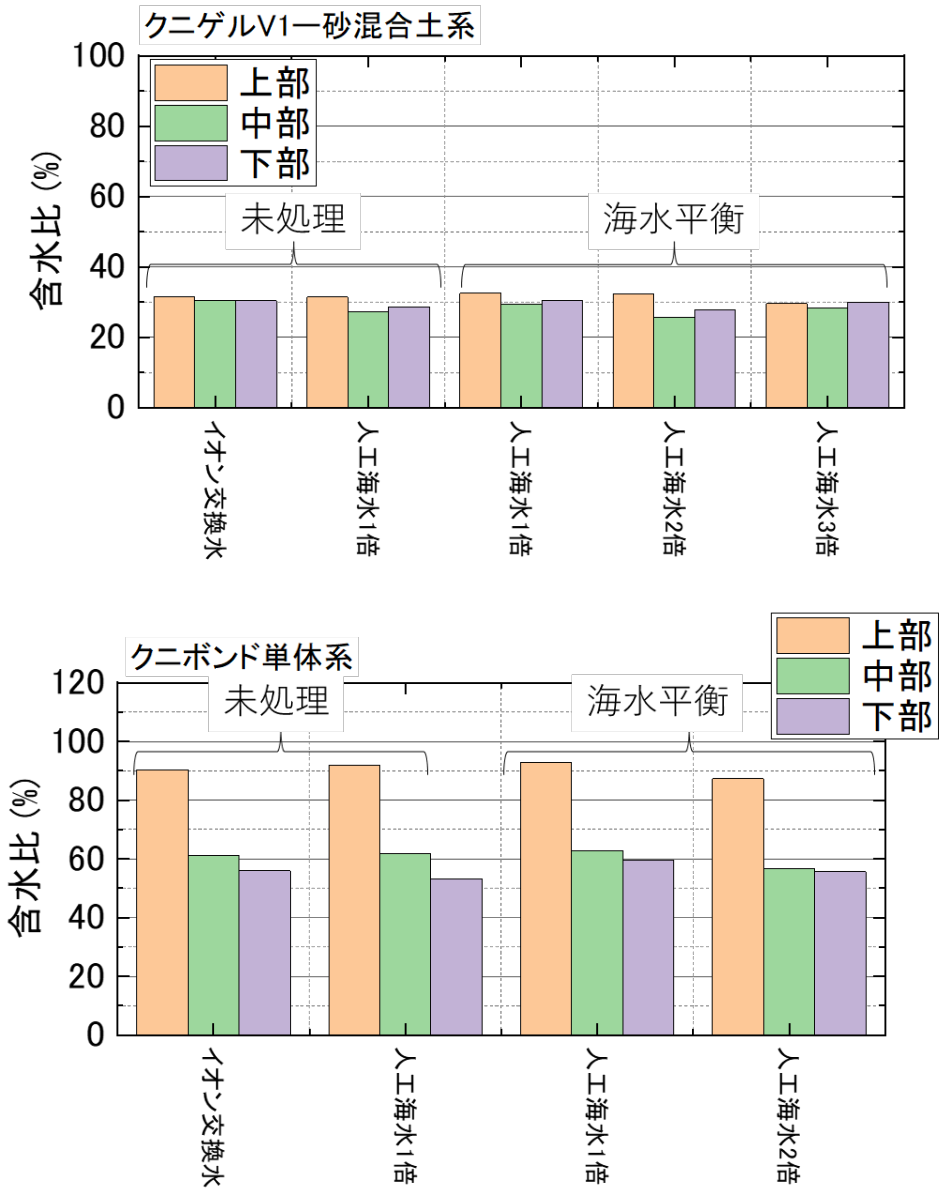


図 4-4- 51　せん断透水試験後の供試体の含水比分布

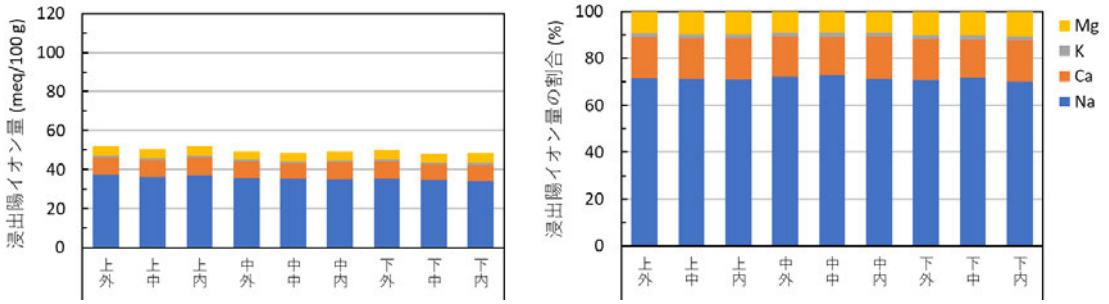


図 4-4- 52　せん断透水試験後のクニゲル V1－砂混合土(人工海水濃度 1 倍)の浸出陽イオン分布(左：浸出陽イオン量、右：浸出陽イオン量の割合)

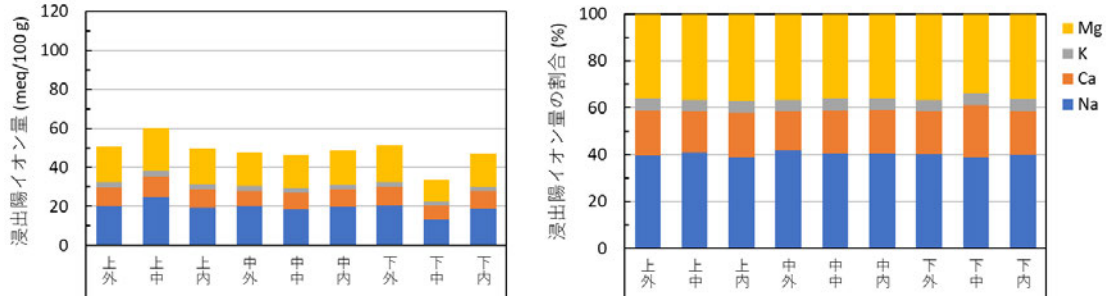


図 4-4- 53　せん断透水試験後の海水平衡クニゲル V1－砂混合土(人工海水濃度 1 倍)の浸出陽イオン分布(左：浸出陽イオン量、右：浸出陽イオン量の割合)

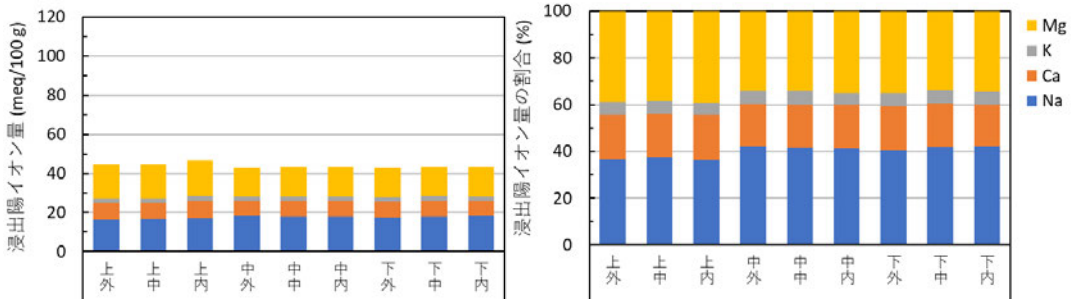


図 4-4- 54　せん断透水試験後の海水平衡クニゲル V1－砂混合土(人工海水濃度 2 倍)の浸出陽イオン分布(左：浸出陽イオン量、右：浸出陽イオン量の割合)

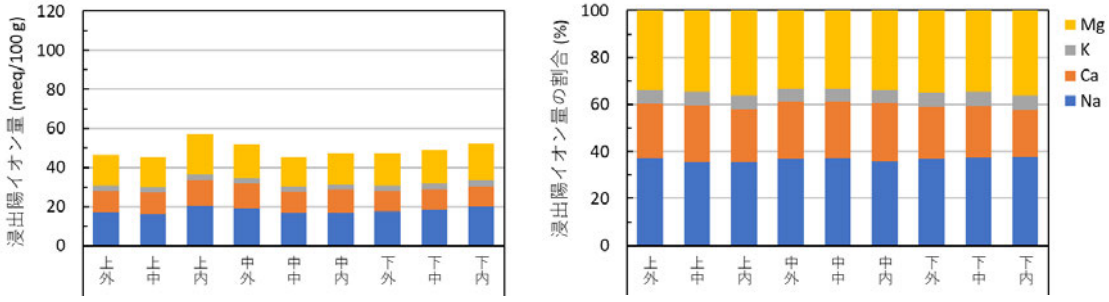


図 4-4- 55　せん断透水試験後の海水平衡クニゲル V1－砂混合土(人工海水濃度 3 倍)の浸出陽イオン分布
(左：浸出陽イオン量、右：浸出陽イオン量の割合)

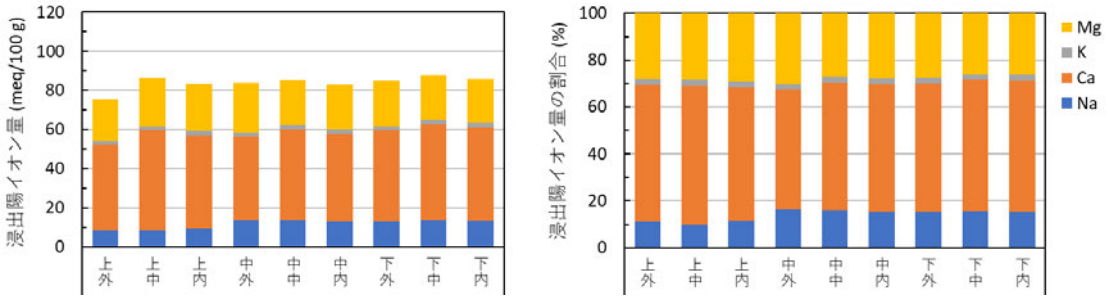


図 4-4- 56　せん断透水試験後のクニボンド単体(人工海水濃度 1 倍)の浸出陽イオン分布(左：浸出陽イオン量、右：浸出陽イオン量の割合)

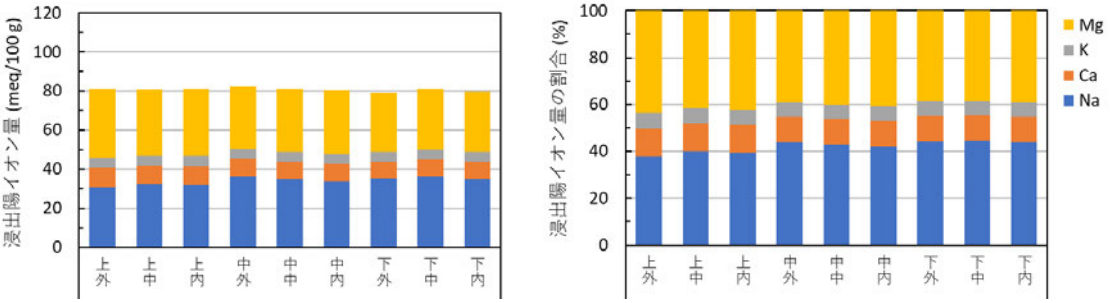


図 4-4- 57　せん断透水試験後の海水平衡クニボンド単体(人工海水濃度 1 倍)の浸出陽イオン分布(左：浸出陽イオン量、右：浸出陽イオン量の割合)

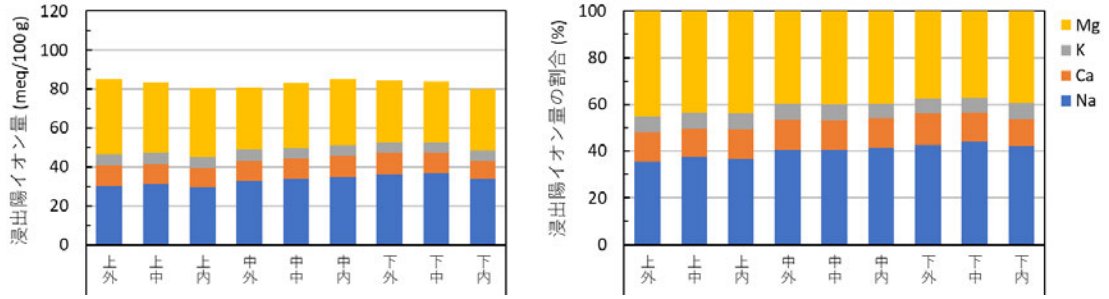


図 4-4- 58　せん断透水試験後の海水平衡クニボンド単体(人工海水濃度 2 倍)の浸出陽イオン分布
(左：浸出陽イオン量、右：浸出陽イオン量の割合)

(vi) せん断帯の観察

図 4-4-59 は、湿潤状態の供試体について、側方からせん断帯付近を撮影した写真である。クニゲル V1－砂混合土や海水平衡クニゲル V1－砂混合土では、せん断位置付近に微細な径の孔が存在した。クニボンド単体や、特に海水平衡クニボンド単体のせん断位置付近では、色の違いだけでなく、凹凸が観察された。

図 4-4-60 は、凍結乾燥供試体のせん断位置付近の写真である。クニゲル V1－砂混合土系と比較してクニボンド単体系の供試体は非常に脆く、断面の形状が保たれなかったため、クニゲル V1 系については供試体断面、クニボンド系については供試体側面の写真を掲載する。各供試体に関して、せん断位置付近において、せん断帯と思われる幅を持った帯状の跡が観察された。特にクニゲル V1－砂混合土および海水平衡クニゲル V1－砂混合土に人工海水を通水したケースは、せん断帯と思われる部分とその上下の境界位置において、明確な亀裂が生じていた。これはせん断位置付近とその上下において、凍結乾燥による乾燥収縮の程度に差異があることで生じた亀裂であると考えられる。すなわち、せん断帯と考えられる部分と、その上下部において、微視構造の相違が生じていた可能性がある。せん断帯と思われる部分の幅は、クニゲル V1－砂混合土系では、1～2 mm 程度である一方、クニボンド単体系では、約 0.5～1 mm 程度であった。

図 4-4-61～図 4-4-68 は、各供試体断面の SEM 観察画像である。クニゲル V1－砂混合土にイオン交換水を通水したケースについて、せん断位置付近の領域では、粒径が小さい土粒子がほとんどであり、比較的大きい砂(粒径が 0.3～0.5 mm 程度)はほとんど確認されなかった。また、せん断位置から離れた領域では、比較的大きい砂が多く確認された。一方、クニゲル V1－砂混合土に人工海水を通水したケースについては、比較的大きい砂がせん断位置付近の領域において多く観察され、その上下では粒径が小さい土粒子がほとんどであった。このように、傾向は一概に言えないが、せん断位置付近において比較的大きい砂の分布に不均一性が生じることが認められた。海水平衡クニゲル V1－砂混合土についても同様に、せん断位置付近において砂の分布が生じた様子や、その上下部で外見が異なる部分が観察された。

クニボンド単体や海水平衡クニボンド単体に関しては、凍結乾燥後の供試体断面の状態の影響により、せん断位置付近の構造はほとんど観察できなかった。ただし、人工海水を用いたケースについては、せん断位置付近に供試体の内側と外側を連結する亀裂が生じており、それに沿う面(SEM 画像の奥行方向)は、比較的平滑である様子が確認された。

上述した凍結乾燥試料の SEM 観察では、粒子の積層構造の観察や定量化において限界があることから、薄片試料を作製し、FE-SEM による観察を実施した。図 4-4-69、および図 4-4-70 は、クニゲル V1－砂混合土にイオン交換水を通水したケースの薄片試料の SEM 観察画像および元素マッピング画像である。ここでは、Si を砂、Al をモンモリロナイト(ベントナイト)、C を樹脂として区別している。また、図 4-4-71 および図 4-4-72 は、海水平衡クニゲル V1－砂混合土に人工海水(2 倍)を通水したケースの薄片試料の

SEM 観察画像および元素マッピング画像である。どちらの試料においても、せん断位置付近，すなわちせん断帯と思われる部分において、空隙(樹脂充填箇所)の形状が方向性を有していた。応力開放された湿潤供試体を凍結乾燥したことで空隙が生じ、その部分に樹脂が充填されていると考えると、方向性のある空隙が多く観察された領域では、粘土粒子が配向していたことが予想される。また、クニゲル V1－砂混合土にイオン交換水を通水したケースにおいては、せん断帯と思われる部分の内側には粒径が大きい砂は比較的少ない一方、せん断帯の上下近傍(境界部分)において、砂粒子が密集している様子が観察された。海水平衡クニゲル V1－砂混合土に人工海水(2 倍)を通水したケースにおいても、せん断帯と思われる部分では、空隙の形状と分布が周囲と比べて特徴的であった。

図 4-4-73 は、クニボンド単体にイオン交換水を通水したケースの薄片試料の SEM 観察画像である。クニゲル V1－砂混合土や海水平衡クニゲル V1－砂混合土と比較して、せん断帯と思われる部分として幅を持った領域は特定できなかった。ただし、画像中央部分に左右を横断する一直線の亀裂が観察された。この亀裂が、せん断面に相当する部分と考えられる。

今後は、薄片試料を用いてより詳細な観察を進めるとともに、画像解析等により砂の分布や粘土の配向について定量化を検討する必要がある。

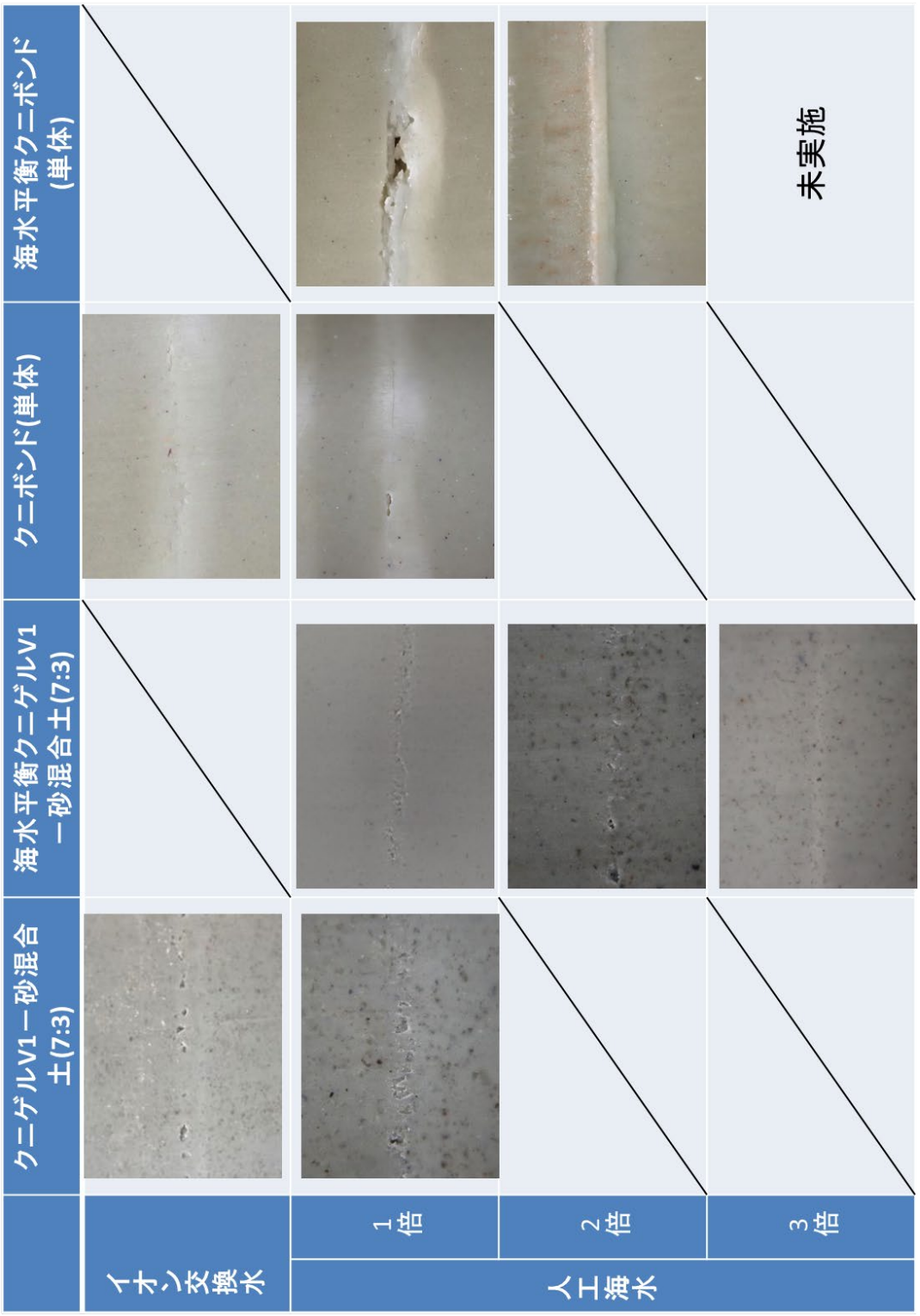


図 4-4- 59　せん断透水後の各供試体側方のせん断帯付近の写真
（高さ方向約 5 mm）

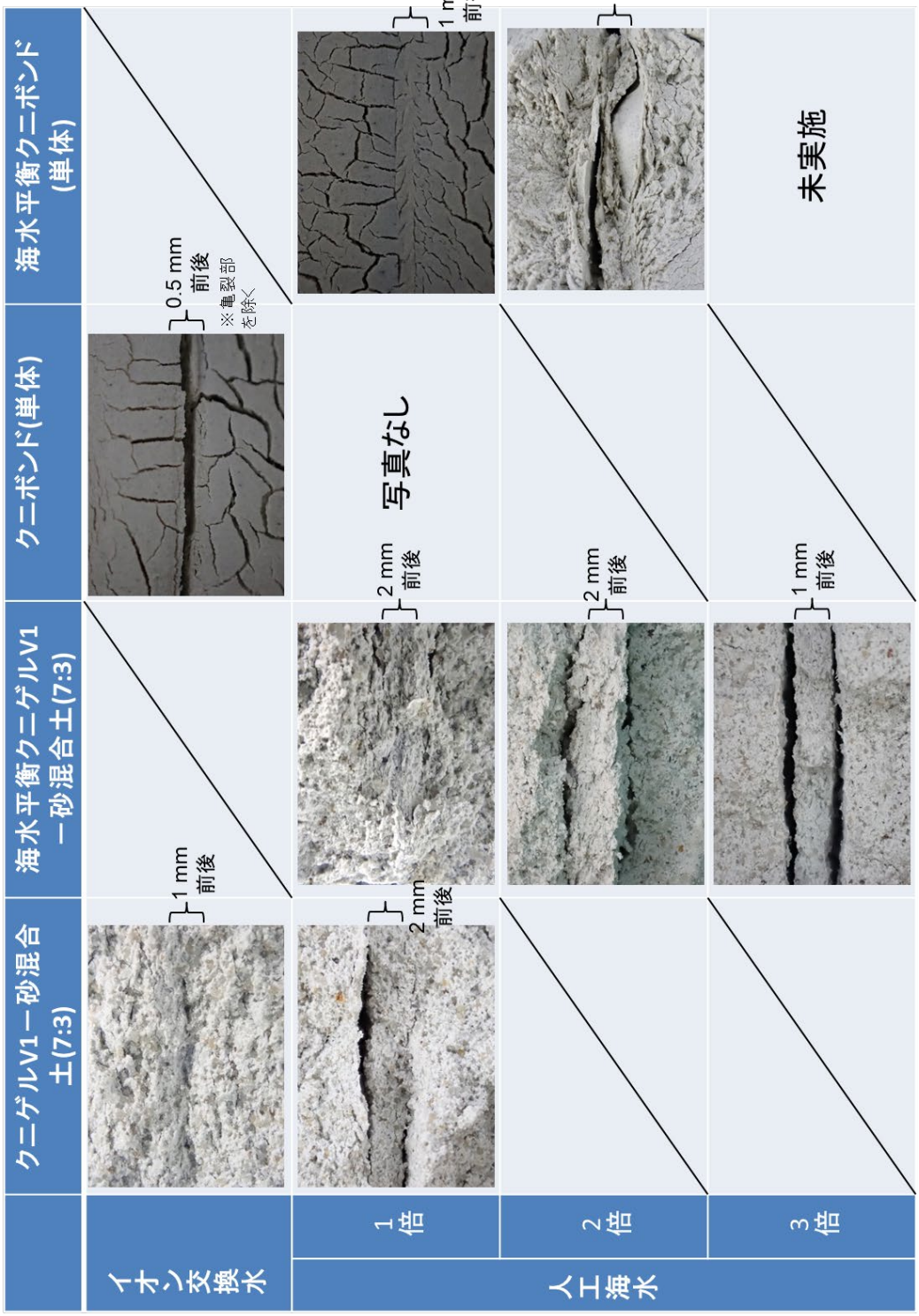


図 4-4- 60　せん断透水後に凍結乾燥した試料のせん断位置付近の写真
(クニゲル系：凍結乾燥後に分割した断面、クニボンド系：供試体側面)

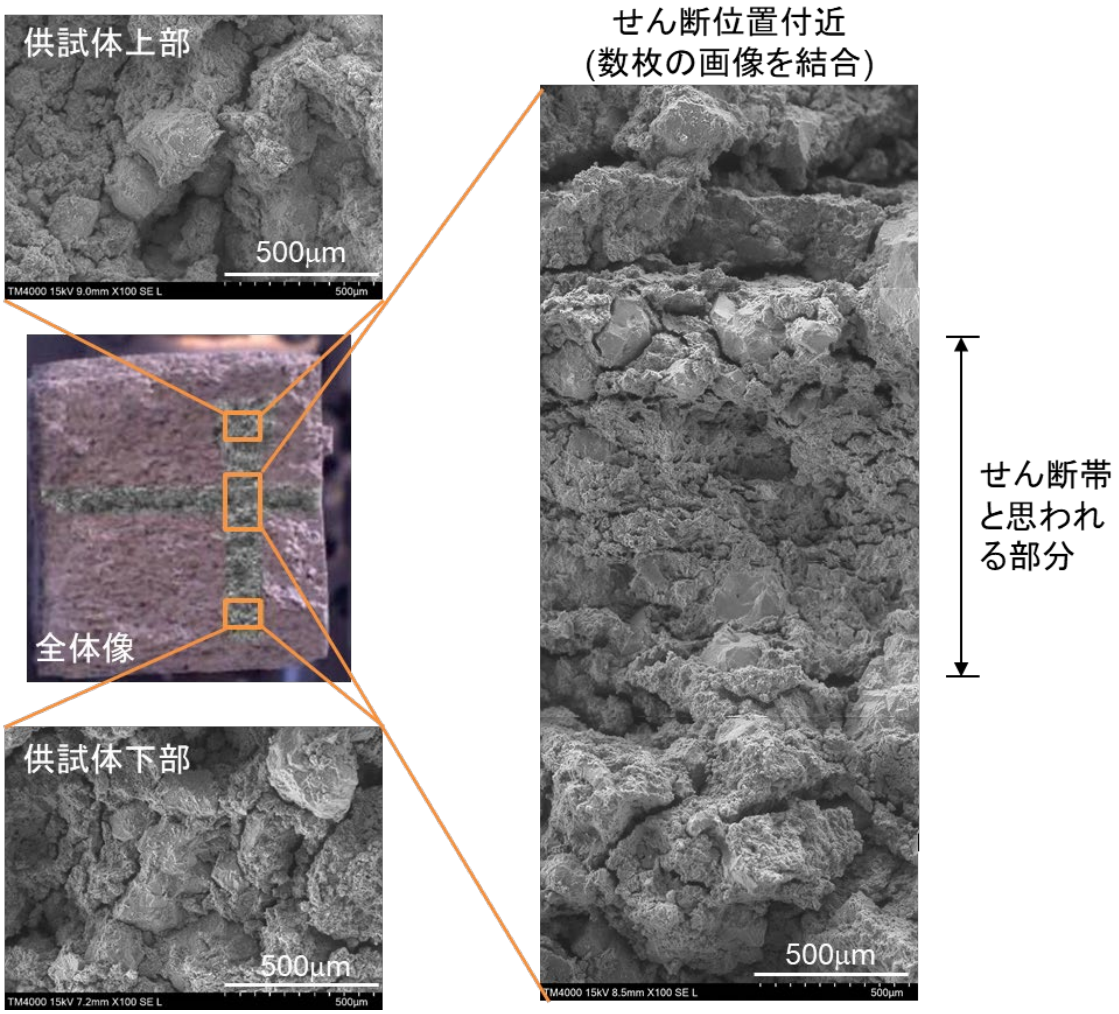


図 4-4- 61　せん断後のクニゲル V1－砂混合土(イオン交換水)の供試体断面の SEM 観察画像(電子顕微鏡倍率：100 倍)

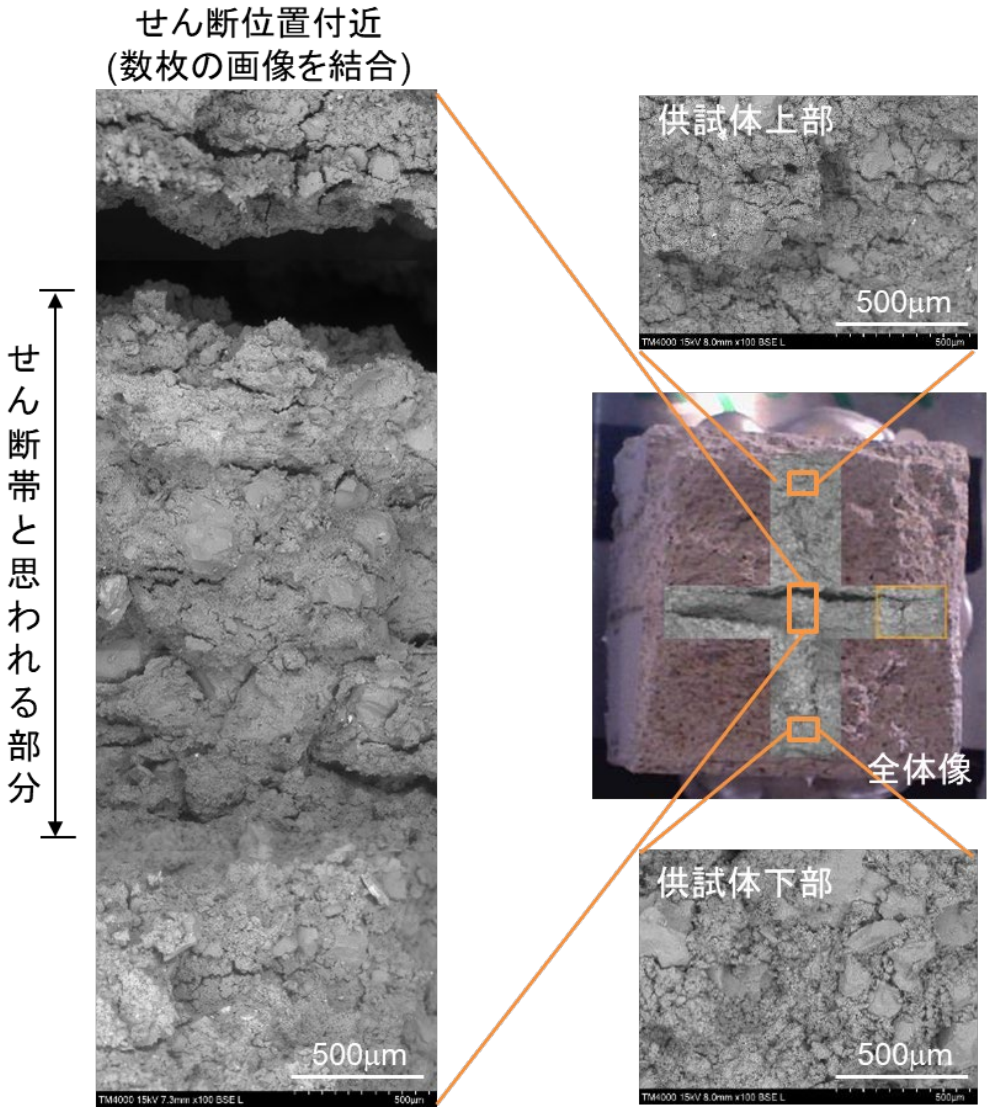


図 4-4- 62　せん断後のクニゲル V1－砂混合土(人工海水濃度 1 倍)の供試体断面の写真
(電子顕微鏡倍率：100 倍)

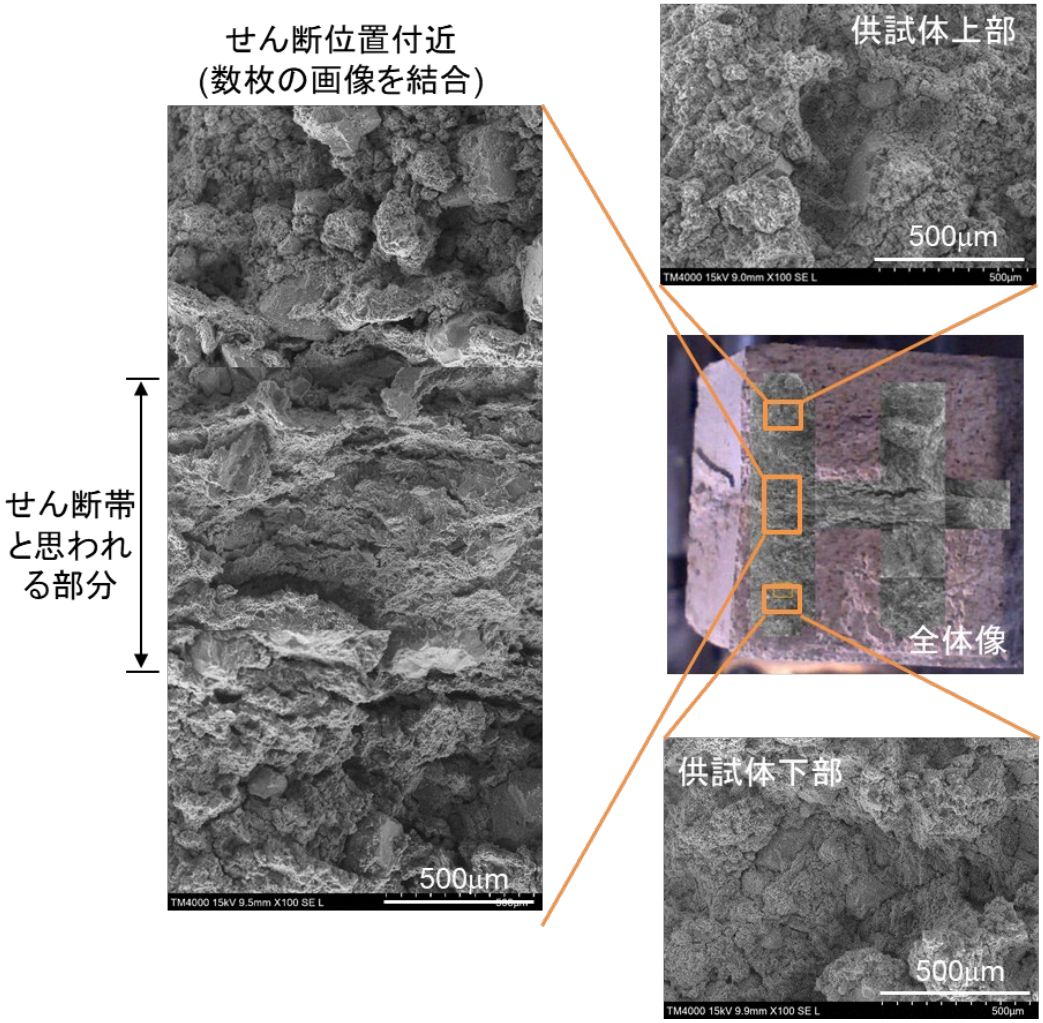


図 4-4- 63　せん断後の海水平衡クニゲル V1－砂混合土(人工海水濃度 1 倍)の供試体断面の SEM 観察画像
(電子顕微鏡倍率：100 倍)

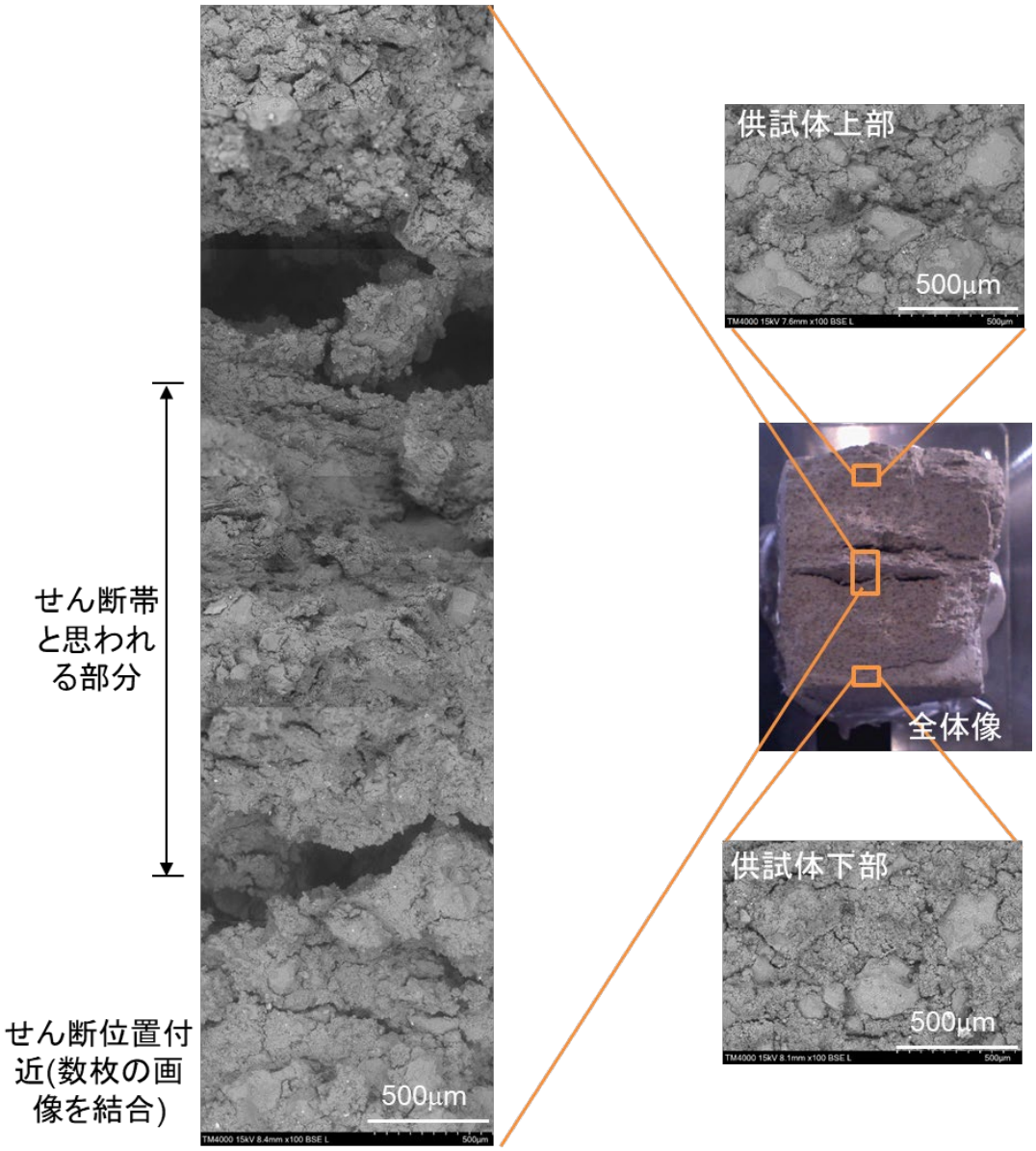


図 4-4- 64　せん断後の海水平衡クニゲル V1－砂混合土(人工海水濃度 2 倍)の供試体断面の写真
(電子顕微鏡倍率：100 倍)

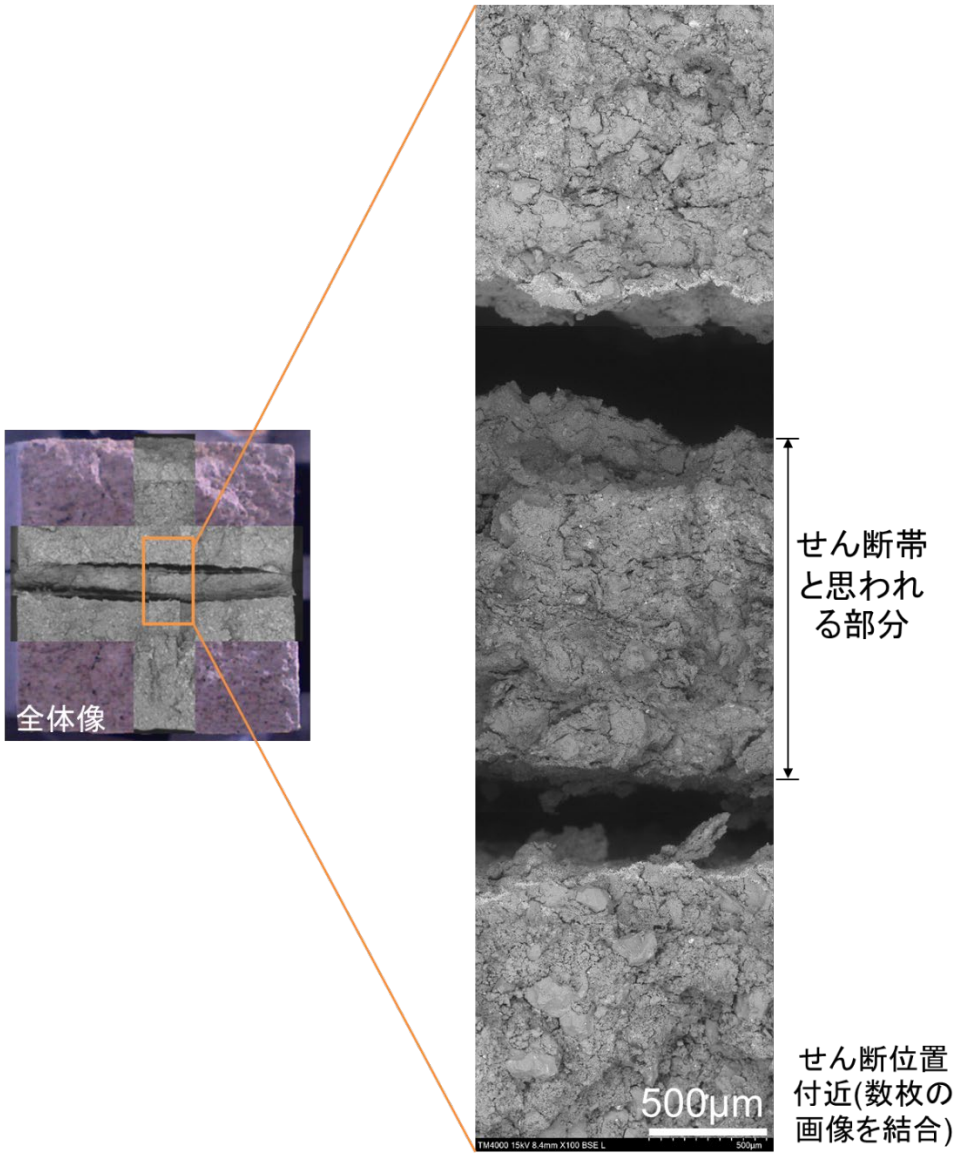


図 4-4- 65　せん断後の海水平衡クニゲル V1－砂混合土(人工海水濃度 3 倍)の供試体断面の写真
(電子顕微鏡倍率：100 倍)

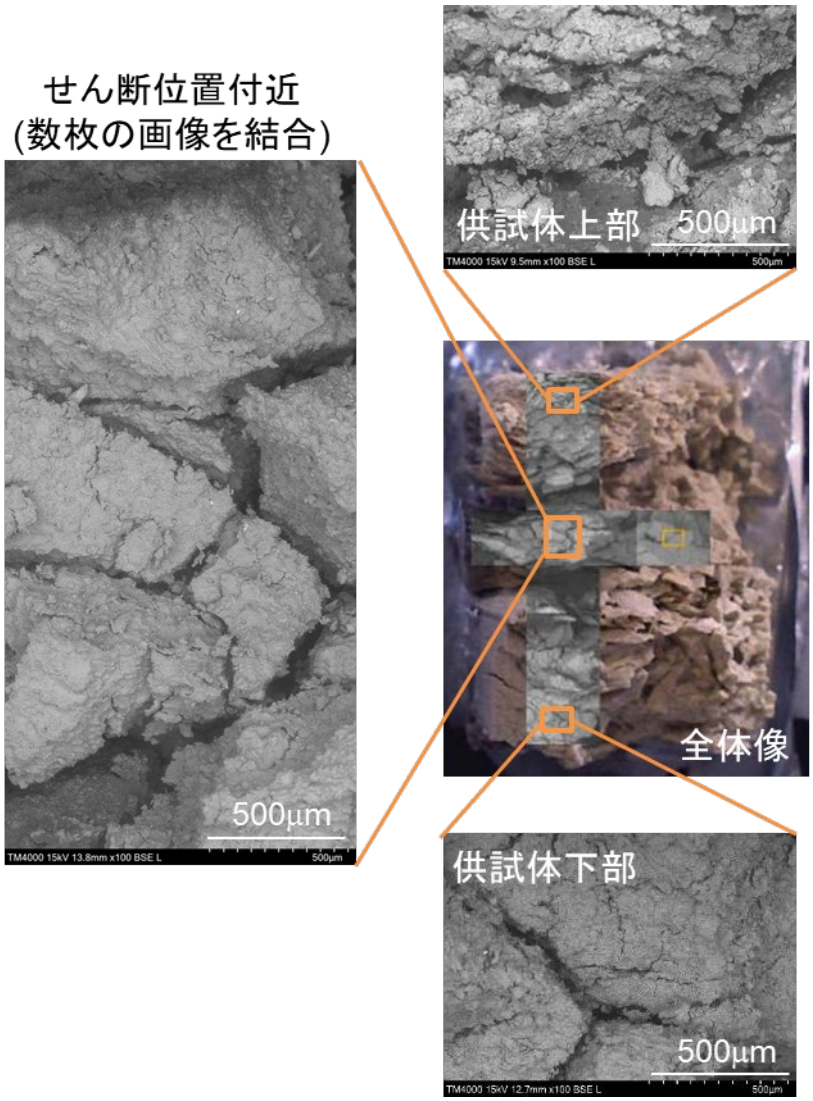


図 4-4- 66　せん断後のクニボンド単体(イオン交換水)の供試体断面の写真
(電子顕微鏡倍率：100 倍)

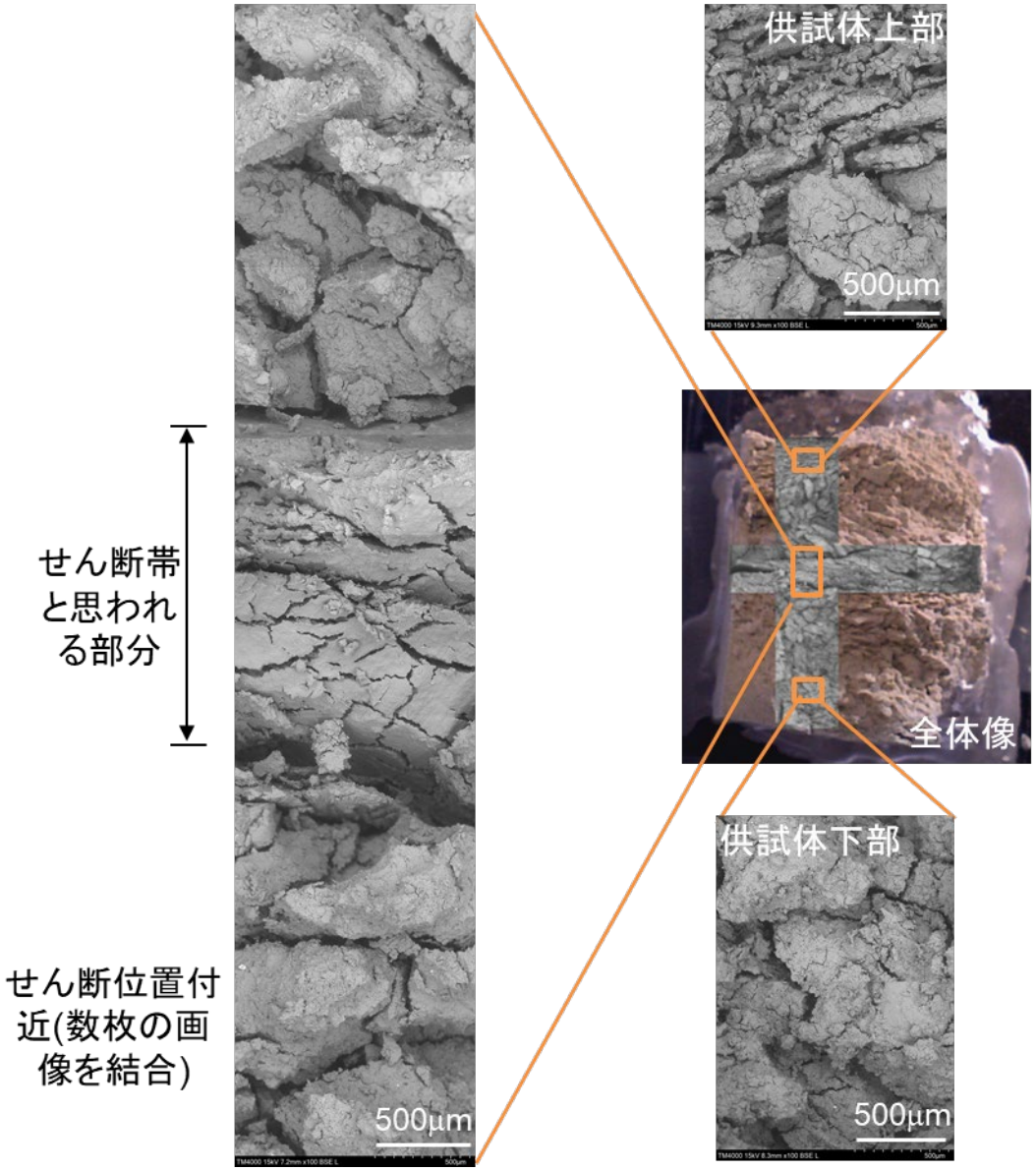


図 4-4- 67　せん断後の海水平衡クニボンド単体(人工海水濃度 1 倍)の供試体断面の写真
(電子顕微鏡倍率：100 倍)

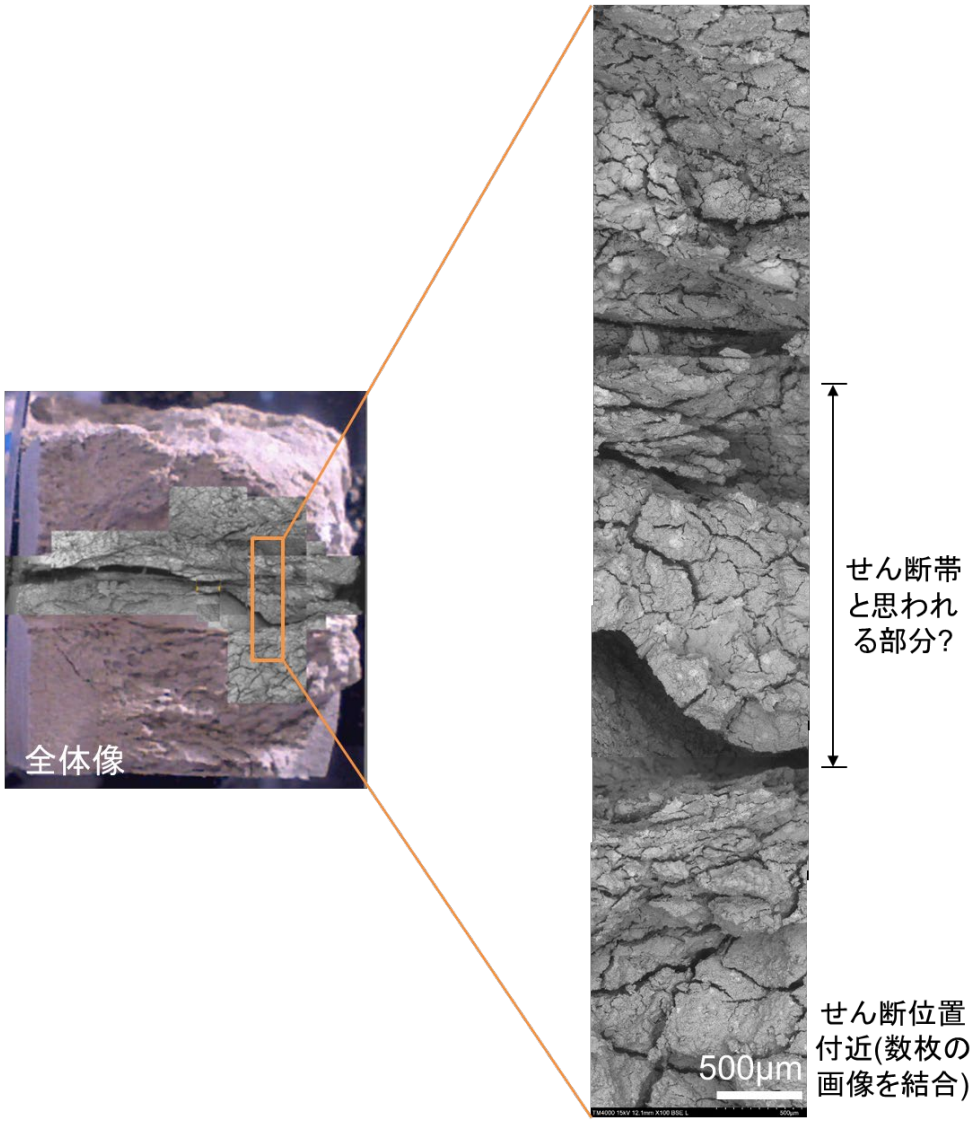


図 4-4- 68　せん断後の海水平衡クニボンド単体(人工海水濃度 2 倍)の供試体断面の写真
(電子顕微鏡倍率：100 倍)

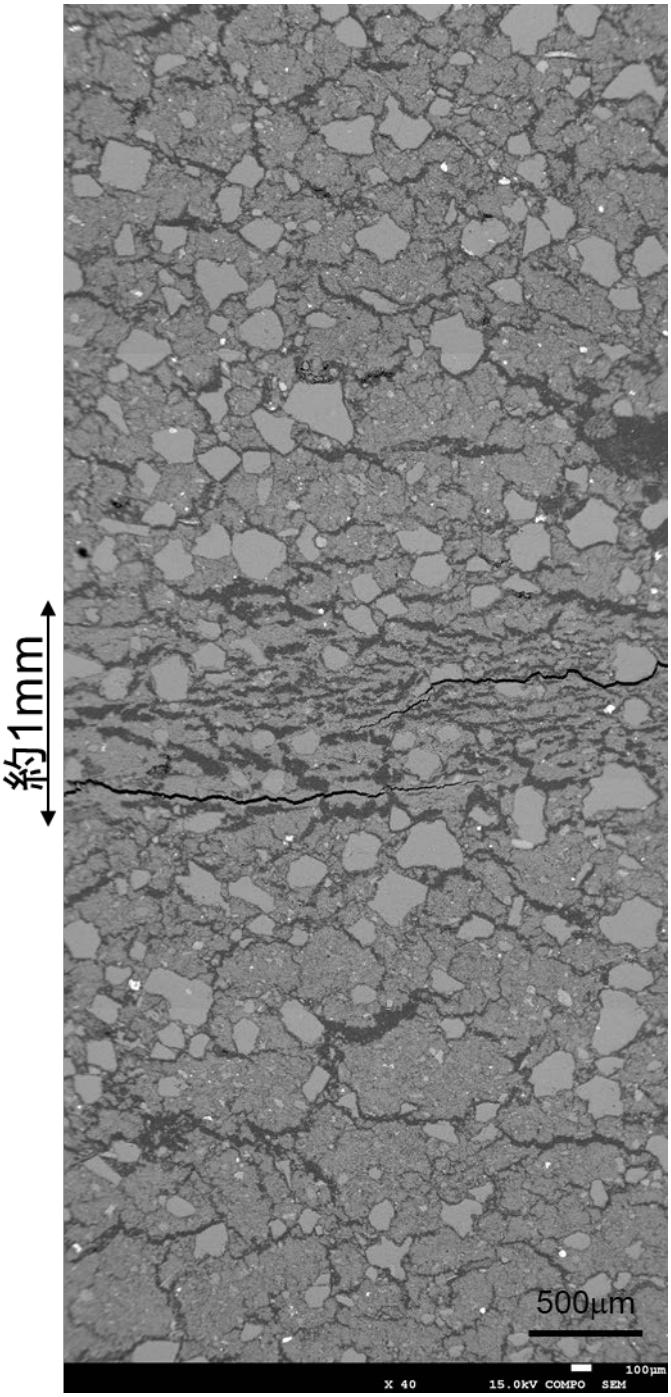


図 4-4- 69　せん断後のクニゲル V1-砂混合土(イオン交換水)の薄片試料の FE-SEM 観察画像
(電子顕微鏡倍率：40 倍)

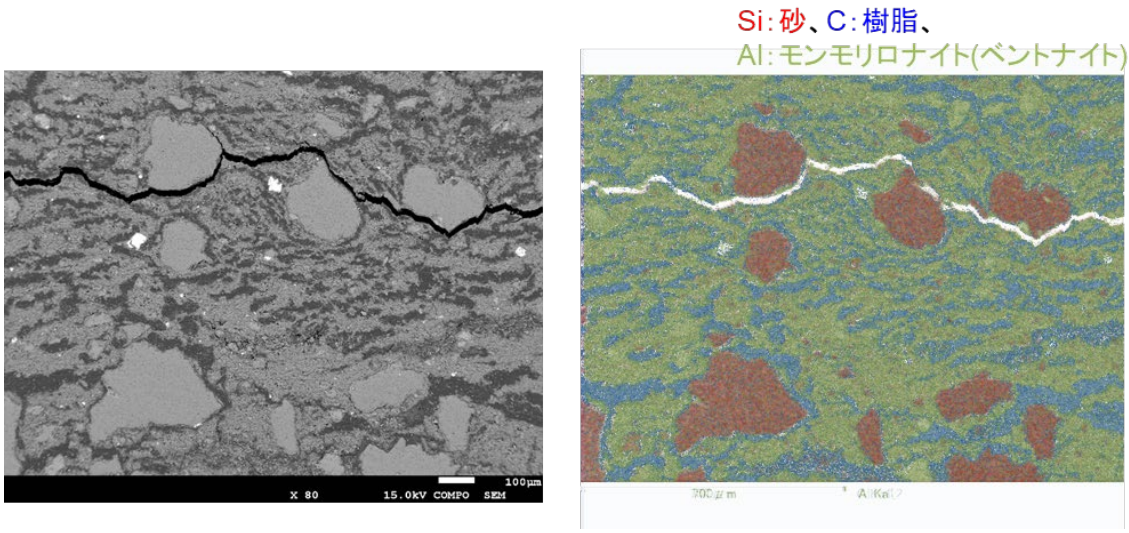


図 4-4- 70　せん断後のクニゲル V1-砂混合土(イオン交換水)の薄片試料の FE-SEM 観察画像(電子顕微鏡倍率：80 倍)(右)および元素マッピング画像(左)

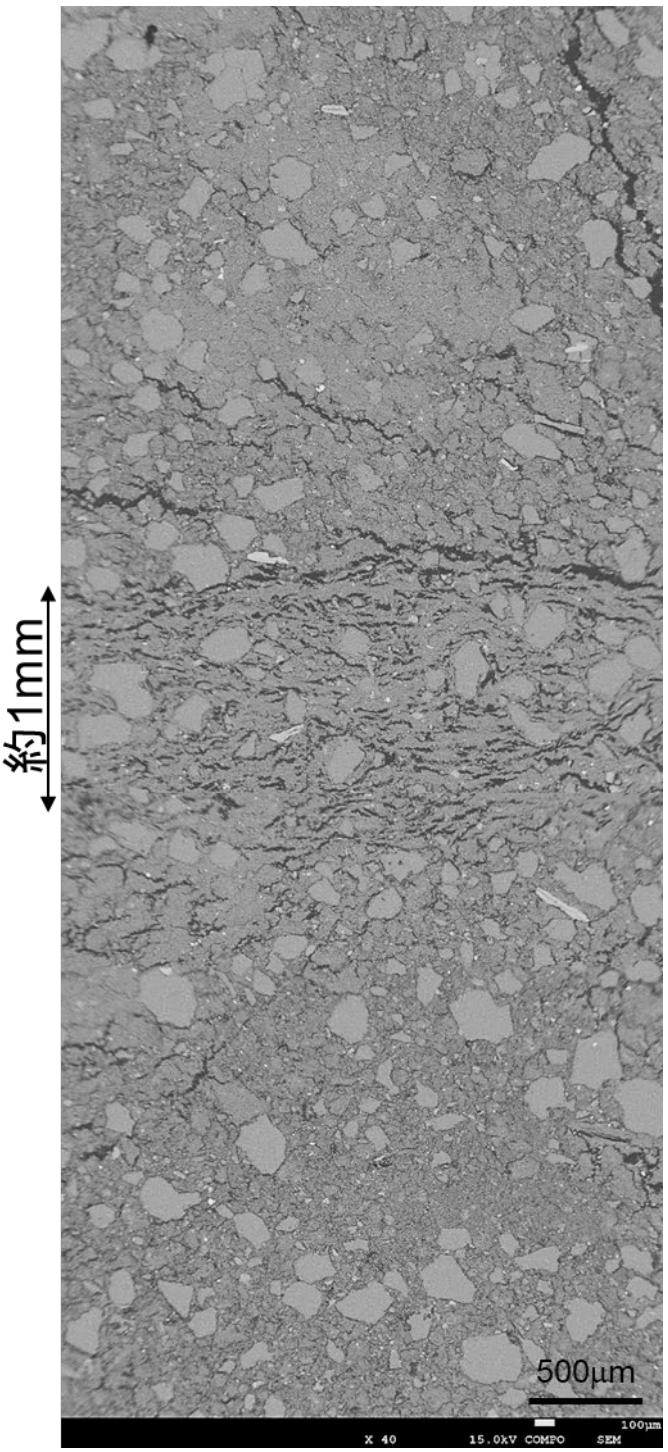


図 4-4- 71　せん断後の海水平衡クニゲル V1-砂混合土(人工海水濃度 2 倍)の薄片試料の FE-SEM 観察画像
(電子顕微鏡倍率：40 倍)

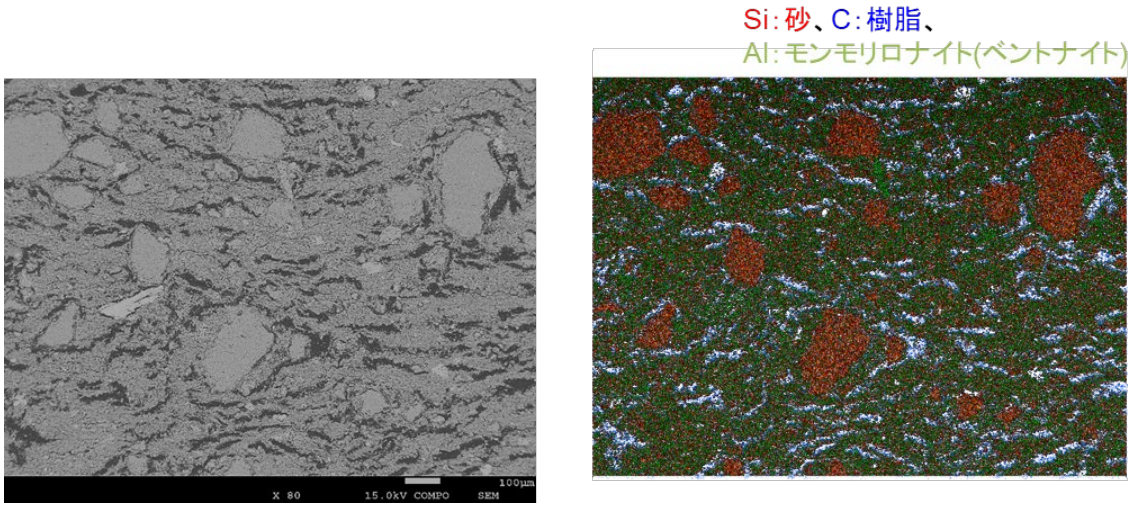


図 4-4- 72　せん断後の海水平衡クニゲル V1-砂混合土(人工海水濃度 2 倍)の薄片試料の FE-SEM 観察画像
(電子顕微鏡倍率：80 倍)(右)および元素マッピング画像(左)

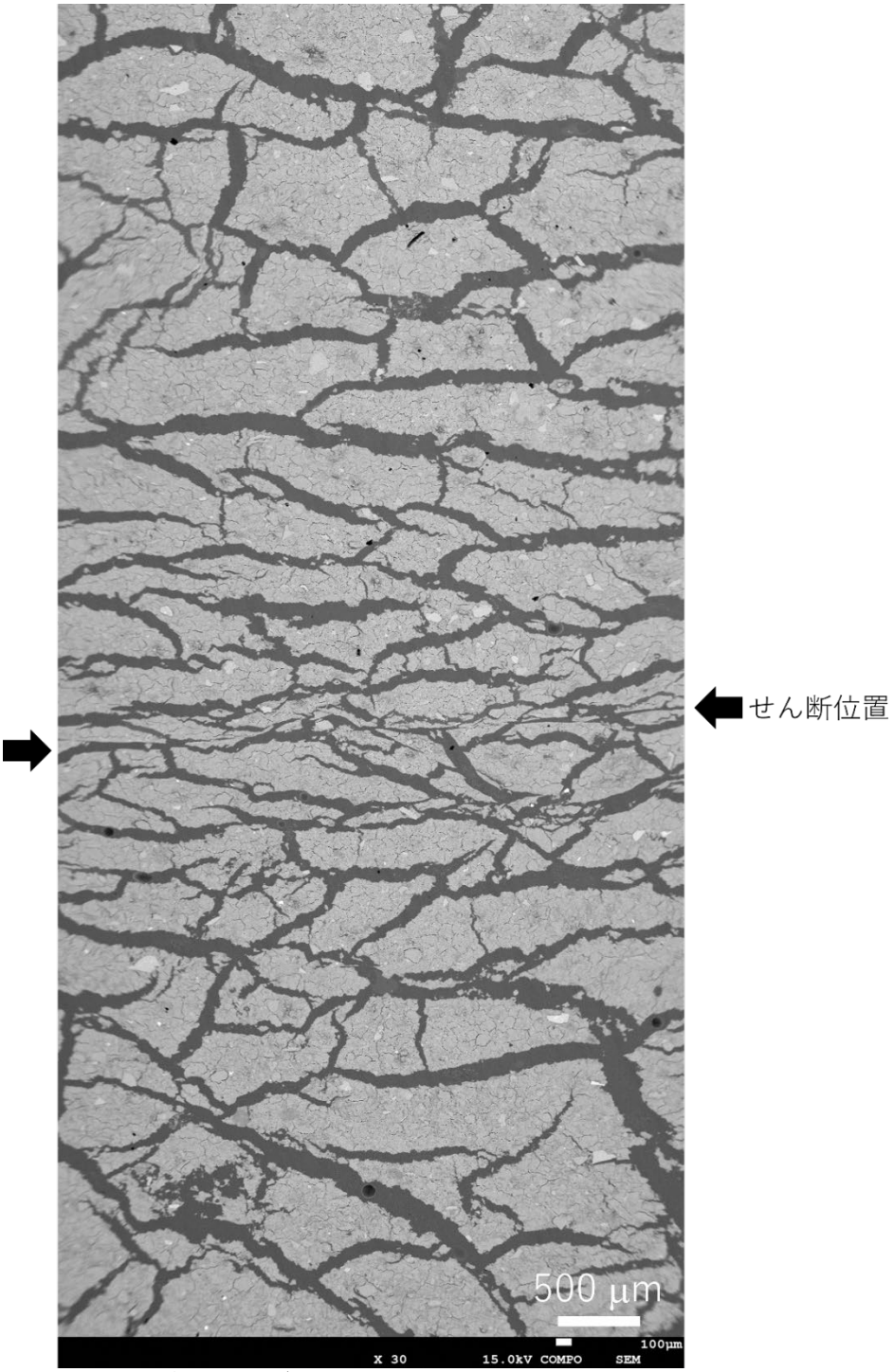


図 4-4- 73　せん断後のクニボンド単体(イオン交換水)の薄片試料の FE-SEM 観察画像
(電子顕微鏡倍率：30 倍)

(vii) 透水異方性

前述(iii)において、供試体鉛直方向の透水係数と、水平方向の見かけの透水係数に差異が生じたことを記述した。考え得る要因の一つとして、圧縮方向に応じた粘土粒子の配向の影響がある。そこで、トリミング供試体の三軸透水試験によって、圧縮方向による透水性の異方性の有無を確認した。

表 4-4-12 は、各試験ケースの目標乾燥密度と、試験の各段階における実測乾燥密度である。三軸透水試験中の乾燥密度は、試験中に計測している供試体の体積から算出している。透水試験中の乾燥密度は、全てのケースで作製時よりも若干増加した。特に、クニゲル V1－砂混合土では、増加の割合が大きかった。三軸透水試験は柔壁型であるため、供試体の変形を抑制するためにセル圧を調整するが、膨潤圧相当のセル圧を厳密に作用させることは難しく、供試体作製時の初期乾燥密度を完全に保つことは困難であった。ただし、鉛直・水平方向間で乾燥密度の差は、クニゲル V1－砂混合土で 0.019 Mg/m^3、クニボンド単体で 0.034 Mg/m^3 であった。この差は、有効モンモリロナイト乾燥密度に直すとクニゲル V1－砂混合土で 0.008 Mg/m^3、クニボンド単体で 0.028 Mg/m^3 である。透水係数が 1 オーダー異なる際の有効モンモリロナイト乾燥密度の差は、少なくとも 0.2 Mg/m^3 程度(地盤工学会、2016)であり、本研究における同一試料間の透水異方性の確認には支障ないと考えられる。

図 4-4-74 は、クニゲル V1－砂混合土およびクニボンド単体について、人工海水(1 倍)を通水したケースの結果である。各試料について、圧縮方向に鉛直、および水平の向きの透水係数を示す。鉛直方向の透水係数について、(c)で示した剛壁型の透水膨潤圧試験と比較すると、クニゲル V1－砂混合土の透水係数は 0.5 オーダーほど低い値となった。表 4-4-12 の通り、三軸透水試験中の乾燥密度が目標乾燥密度よりも高いため、透水係数が低かったと考えられる。クニボンド単体については、透水膨潤圧試験と概ね同じ値であった。

三軸透水試験における鉛直、水平方向を比較すると、クニゲル V1－砂混合土において、水平方向のほうが鉛直方向よりも 0.5 オーダーほど高い値となった。一方、クニボンドについては、鉛直・水平方向による透水係数の差異は認められなかった。いずれのケースについても、ここで認められた透水係数の差は、(iii)で認められた各方向の透水係数の差と比較すると軽微であった。今後も、引き続き、せん断透水試験における各方向の透水係数に差異が生じる要因について、検討を進める必要がある。

表 4-4- 12　三軸透水試験における目標乾燥密度と実測乾燥密度

試料		目標乾燥密度 (Mg/m³)	供試体作製時 乾燥密度(Mg/m³)	三軸透水試験中 乾燥密度(Mg/m³)
クニゲル V1－ 砂混合土	鉛直	1.6	1.642	1.722
	水平		1.641	1.741
クニボンド単体	鉛直	1.12	1.123	1.173
	水平		1.121	1.139

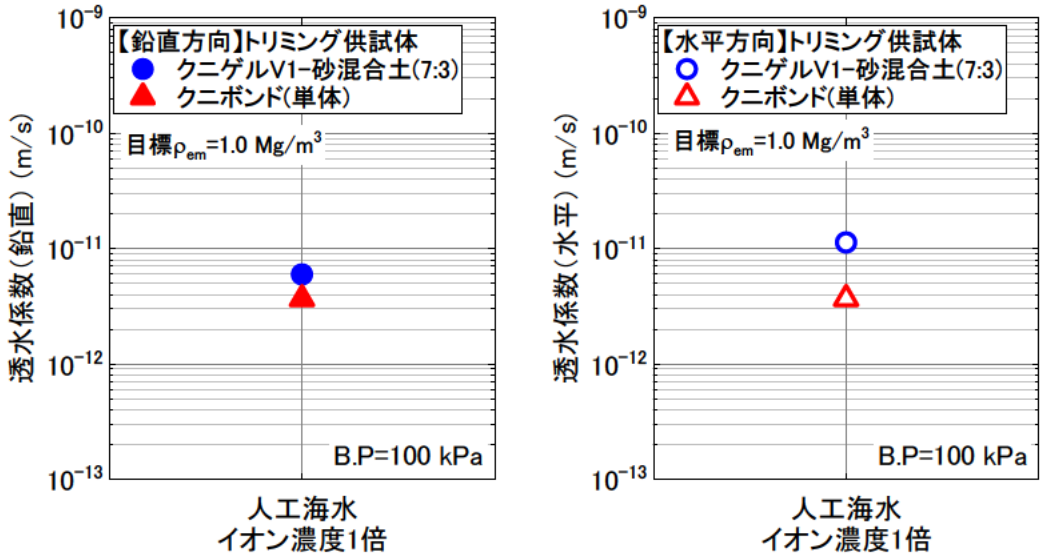


図 4-4- 74　三軸透水試験による圧縮方向に対して鉛直・水平方向の透水係数

⑥　要素試験(力学)のまとめ

令和 4 年度までの要素試験において、海水のイオン濃度等の環境条件や、ベントナイトの種類(Na 型、Ca 型、海水平衡状態)などの材料条件から、処分サイトや緩衝材仕様を選定することに資する基礎データを取得した。圧縮ベントナイトに一定以上の人工海水が通水することで、人工海水とのイオン交換が供試体中で均一に平衡(海水平衡)状態になることが確認された。この状態を模した海水平衡ベントナイトを用いて透水試験や、透水膨潤圧試験、せん断透水試験を実施した。

有効モンモリロナイト乾燥密度 1.0 Mg/m^3 の供試体に対する海水の影響としては、イオン濃度の増加に伴い膨潤圧は低下し、透水係数は増加する傾向が認められた。この傾向は、Na 型ベントナイト(クニゲル V1－砂混合土)において顕著である一方、Ca 型ベントナイト(クニボンド単体)では隠微であった。海水平衡処理により、両者の差は軽減したが、値は一致しなかった。透水係数に寄与すると考えられているパラメータ(有効モンモリロナイト乾燥密度、層間陽イオン組成、通水液のイオン組成・濃度)が同一であっても、透水係数は異なったことから、各ベントナイトの透水係数の相違には、これまで考えられてきた膨潤による低透水性の発現以外の要因が影響している可能性が示唆された。

海水平衡ベントナイトについては、人工海水を用いた試験中のイオン交換はほとんど生じていなかったため、イオン濃度による影響に限定して試験できているものと解釈できた。その上で、イオン交換水および人工海水(イオン濃度 1 倍~3 倍)により飽和した状態において、定体積条件でせん断を受けた供試体では、せん断帯に沿った方向とそれに直交する方向において透水性は増加しなかった。このことから、イオン交換が生じた後の状態や比較的高いイオン濃度であっても、定体積条件であれば、せん断を受けた供試体中に明確な水みち(短絡経路)は生じていないと考えられた。試験後の凍結乾燥供試体および薄片試料の顕微鏡観察では、せん断帯近傍では粒子が配向していたと考えられる様相が見られた。今後、薄片試料を用いたせん断帯の観察、および画像解析による定量化を進めることで、せん断帯の形成と透水性の関連について考察を深める必要がある。

⑦　4 ヵ年のまとめ（要素試験(力学)）

要素試験(力学)では、処分サイトや緩衝材仕様の選定に資するため、緩衝材に海水系地下水が侵入する状況を想定して試験条件を設定した。具体的には、緩衝材が直ちに海水に曝される場合や、緩衝材が大量の海水に曝された後の状態のほか、オーバーパックの変位や腐食膨張などにより緩衝材にせん断変形が生じた状態を想定し、その際の性能の変化について検討することで、以下に示す成果を得た。

平成 31 年度は、既往の研究や予備検討を参考に、要素試験の試験条件を設定した。また、透水膨潤圧試験やせん断透水試験を実施するための試験環境の整備を実施した。せん断透水試験においては、せん断帯に直交する方向、およびせん断帯に沿う方向の透水性を調べるため、既往の力学試験であるリングせん断試験装置の機構を援用し、試験装置を作製した。

各試験に用いる圧縮成型供試体については、ベントナイトの種類やベントナイト混合率が異なる場合を考慮し、可能な限り平等な条件において特性を比較・検討するため、有効モンモリロナイト乾燥密度を 1.0 Mg/m^3 に統一した。

令和 2 年度は､海水によるイオン交換反応が平衡に至った状態のベントナイトを想定し、海水平衡ベントナイトを作製した。また、圧縮ベントナイトの透水性に対する海水影響、ならびに力学的観点からの自己修復性を検討するため、透水膨潤圧試験およびせん断透水試験を実施した。透水膨潤圧試験においては、Na 型ベントナイト(クニゲル V1－砂混合土)および Ca 型ベントナイト(クニボンド単体)を締め固めた供試体を用いた。通水液としては人工海水を用いた。なお、国内で観測された高濃度の海水系地下水を参考に、人工海水の濃度すなわちイオン濃度は 1 倍、2 倍および 3 倍とした。このとき、イオン比は変えずに各濃度の人工海水を作製した。各供試体におけるイオン濃度の影響を調べた結果、クニゲル V1－砂混合土については、通水液のイオン濃度の増加に伴い膨潤圧は低下し、透水係数は増加した。一方、クニボンド単体については、通水液のイオン濃度が増加しても、その性能の変化幅は小さかった。また、せん断透水試験においては、供試体の飽和後、定体積条件におけるせん断強度のピーク前、ピーク後および残留状態となるせん断変位において、各方向の透水性を調べた。通水液としてイオン交換水のほか人工海水の濃度 1 倍を使用し、供試体としてはクニゲル V1－砂混合土および海水平衡クニゲル V1－砂混合土を対象に試験を実施した。その結果、いずれの条件においても、せん断開始初期(せん断強度のピーク前)から残留状態に至るまで、各方向の透水性の増加は生じなかった、あるいは若干低下した。したがって、上記試験条件におけるせん断後の供試体に関して、透水性の高い領域(水みち)は生じなかったと考えられた。

令和 3 年度は、主に各海水平衡ベントナイトを用いて、透水性に対する海水影響および力学的観点からの自己修復性を検討した。各海水平衡ベントナイトの透水係数および平衡膨潤圧は、基本的に海水平衡処理前の特性に近い数値を示した。したがって、海水平衡処理による層間陽イオン組成の変化は、膨潤圧や透水係数にほとんど影響しない可能性が示唆された。せん断透水試験では、クニボンド単体や各海水平衡ベントナイトの圧縮成型供試体について、せん断による透水性の変化を調べ、透水性の高い領域(水みち)は生じない結果が得られた。さらに、せん断による透水性への影響について、供試体の微視的構造の観点から検討するため、電子顕微鏡(SEM)を用いて試験後の供試体(凍結乾燥試料、薄片試料)を観察した。せん断帯付近では、砂の分布に変化が生じるとともに、粘土が配向している様子が観察された。

令和 4 年度は、各試験においてデータの拡充を図るとともに、得られた結果の考察を深めるための検討を実施した。未処理試料の圧縮成型供試体に人工海水を多量に通水し、供試体中の浸出陽イオン組成の分布を調べた結果、一定以上の通水により、イオン交換が平衡(海水平衡)状態に近づくことが確認された。また、せん断透水試験における各方向の透水係

数の差異を検討するため実施した三軸透水試験では、供試体の圧縮方向による透水異方性は確認されなかった。

以上のように、4 ヵ年の検討を通じて、海水のイオン濃度等の環境条件や、ベントナイトの種類(Na 型、Ca 型、海水平衡状態)などの材料条件から、処分サイトや緩衝材仕様を選定することに資する基礎データを取得した。要素試験(力学)で得た透水係数や膨潤圧は、今後数値解析のパラメータ設定において活用されることが期待される。今後は、原位置における化学的多様性を考慮して、セメント-海水反応を考慮した水質条件における各性能についても検討する必要がある。

（３）　要素試験（化学）

①　要素試験（化学）の背景および目的

地層処分施設を沿岸海底下に建設する場合、緩衝材に対し、周辺岩盤に含まれる海水由来の地下水が浸透することが想定される。そのため、上述の要素試験（力学）では、海水に対してイオン交換反応が進行している、もしくは、完了したベントナイト（以下、「海水平衡ベントナイト」という）の工学的性質を調べている。一方、海水が緩衝材に浸透する前に周辺部材と反応する可能性を考慮すると、緩衝材に浸透する地下水の水質にバリエーションが生じる。例えば、原子力発電環境整備機構（2021）で示されている地層処分施設の概念図では、セメント系材料が支保工として、緩衝材の近くに設置されている。また、海水がセメント系材料と反応すると、液固比に応じて多様な組成の反応液が生成することが知られている（原子力環境整備促進・資金管理センター、2005）。そのため、セメント系材料との反応により水質変化した地下水が緩衝材に浸透することが想定され得る。また、緩衝材中のモンモリロナイトが有する層間陽イオン組成は、ベントナイトの種類やベントナイトと周囲の地下水の相互作用に応じて変化することが想定される。例えば、ベントナイトは産地や採掘場所によってモンモリロナイトの層間陽イオン組成が異なることが知られており（例えば、原子力発電環境整備機構、2022）、想定されるモンモリロナイトの層間陽イオン組成は、緩衝材として使用するベントナイトの種類に依る。また、モンモリロナイトの層間陽イオン組成は、緩衝材に浸透する溶液の組成に応じて生じるイオン交換反応によっても変化する。セメント系材料と反応した地下水の浸透や、想定され得るモンモリロナイトの層間陽イオン組成の多様性を考慮すると、緩衝材に地下水が浸透した際の化学環境にバリエーションが生じる。また、それぞれの化学環境においてベントナイトが変質した場合、その化学条件に応じて工学的性質が変化することが懸念される。そのため、緩衝材の性能評価では、化学的多様性を考慮した上で、その工学的性質の変化幅を把握しておくことが重要である。

そこで、要素試験（化学）では、緩衝材に浸透する地下水の水質変化やモンモリロナイトの層間陽イオン組成に起因する化学的多様性を考慮した場合のベントナイトの変質反応やそれに伴う透水性変化を把握することを目的とする。なお、化学的多様性に応じたベントナイトの工学的性質変化を考慮すべき期間は長期に渡るものの、要素試験では再冠水を検討対象期間としていることから、比較的短期の反応に着目する。令和 4 年度は、幅広い化学条件におけるベントナイトの変質反応を理解するため、セメント系材料と海水を反応させた試験溶液とベントナイトの相互作用を調べるバッチ試験を実施した。

②　試料と試験方法

(a) 試料

セメント系材料と海水の反応による水質変化を模擬した試験溶液の作製には、人工海水とセメントペーストを用いた。人工海水は、試薬であるマリンアート SF-1（大阪薬研）を

イオン交換水に溶解させることにより作製した。一方、セメントペーストは普通ポルトランドセメントペースト（以下、「OPC」という）を用いた。これは、2013 年に水セメント比 35 で打設し、その後、湿空養生を継続したものである。

バッチ試験に用いるベントナイトとして、クニゲル V1（クニミネ工業；以下、「KV」という）とクニボンド（クニミネ工業；以下、「KB」という）を使用した。これらは、産地が異なり、かつ、層間陽イオン組成が異なっている。また、これらに対し、海水がベントナイトに浸透した後にセメント-海水反応液が浸透するケースを模擬するため、要素試験（力学）に記載した方法により作製した海水平衡クニゲル V1（以下、「SKV」という）と海水平衡クニボンド（以下、「SKB」という）も用いた。

(b) 試験方法

(i) 試験溶液の作製

バッチ試験に用いる試験溶液の作製条件を検討するため、人工海水と OPC を用いた予備試験を実施した。具体的には、OPC を 4.75 mm ふるいを全量通過するまでハンマーで粗粉砕し、アセトンに 3 時間浸漬させた後、乾燥させた。乾燥後は、ボールミルやメノウ乳鉢を用いて、250 μm ふるいを全量通過するまで粉砕した。粉砕後の OPC は、液固比 10、100、200、1000、2000 の条件にて人工海水と混合し、窒素ガスを充填したグローブボックス内で養生した。養生期間は、3 日（ただし、液固比 1000、2000 の条件のみ）、10 日、20 日（ただし、液固比 10、100、200 の条件のみ）、30 日、41 日、52 日間である。養生期間中は定期的にハンドシェイクした。養生後は、遠心分離機を用いて固液分離した後、溶液は 0.2 μm 孔径のメンブレンフィルターで濾過することにより回収し、後述する分析に供した。

上述の予備試験の結果を基に決めた条件にて、バッチ試験に用いる試験溶液を作製した。具体的には、上述の方法で粉砕した OPC を液固比 10、100、1000 の条件にて、人工海水と混合し、窒素ガスを充填したグローブボックス内で 30 日間養生した（以下、それぞれの液固比条件にて作製した試験溶液を「S10」「S100」「S1000」という）。養生期間中は定期的にハンドシェイクした。養生後は必要に応じて遠心分離機を用いて固液分離した後、溶液は 0.2 μm 孔径のメンブレンフィルターで濾過することにより回収した。溶液の一部は後述の分析に供するとともに、バッチ試験の試験溶液として用いた。

なお、本試験ではセメント系材料の影響を幅広く検討するため、3 条件の試験溶液（S10、S100、S1000）を作製した。海水とセメント系材料の液固比は、これらの相互作用により生じる反応溶液の経時的な水質変化を模擬すると考えらえている（原子力環境整備促進・資金管理センター、2005）。また、処分施設では、海水とセメント系材料の反応により生じる溶液は、セメント系材料と緩衝材の距離に応じて、海水により希釈されることが想定される。本試験では、上述の反応溶液の経時的な水質変化に加え、この様な海水による希釈率を模擬するため、液固比を上記の 3 条件に設定した。つまり、本試験の液固

比の違いは、処分施設における時間経過や、セメント系材料と緩衝材の距離の違いによるセメント系材料の影響の大きさを反映していると考えられる。

(ii) ベントナイト-試験溶液のバッチ試験

4 種類のベントナイト（KV、SKV、KB、SKB）と 3 条件の試験溶液（S10、S100、S1000）を用いてバッチ試験を実施した。バッチ試験は、窒素雰囲気のグローブボックス内で 30 日間実施した。具体的には、各ベントナイトの含水比を測定し、乾燥質量が約 4.0 g になるように計算した湿潤質量を秤取り、ボトルに加えた。そこに、液固比 30 の条件にて試験溶液を混合した。なお、この試験は各条件につき 2 つずつ実施した。また、試験溶液のみをボトルに仕込んだブランク試験も実施した。養生期間中は定期的にハンドシェイクし、30 日経過後に、遠心分離機を用いて固液分離した後、上澄み液は 0.2 μm 孔径のメンブレンフィルターで濾過した。また、バッチ試験後の固相は、80%アルコールを用い、上澄み液に硝酸銀溶液を垂らしても白濁しなくなるまで洗浄した後、減圧乾燥した。

(iii) 分析方法

予備試験後の溶液の pH は、グローブボックス内で pH 計（堀場製作所製、D-200P/9618S-10D）を用いて測定した。また、溶存 Na、Ca、K、Mg、Al、Si、Fe、S 濃度は、誘導結合プラズマ発光分光分析装置（ICP-OES；サーモフィッシャーサイエンティフィック製、ICAP7400）を用いて測定した。具体的には、溶液試料を 0.2 μm 孔径のメンブレンフィルターで濾過した後、必要に応じて希釈し、体積百分率で約 0.1%の硝酸を添加し測定した。

バッチ試験前後の溶液の pH、EC、ORP は、グローブボックス内で pH 計（堀場製作所製、D-200P/9618S-10D）、EC 計（堀場製作所製、ES-51/9382-10D）、ORP 計（堀場製作所製、D-200P/9300-10D）を用いて測定した。また、溶存 Na、Ca、K、Mg、Al、Si、Fe 濃度は、ICP-OES を用いて上述の方法で測定した。一方、溶存 Cl、SO_4、Br、NO_3 濃度は、溶液試料を 0.2 μm 孔径のメンブレンフィルターで濾過し、陰イオンクロマトグラフィー（IC；メトロノーム社製、IC881）を用いて測定した。溶存 CO_3、HCO_3 濃度を求めるため、溶液試料を 0.2 μm 孔径のメンブレンフィルターで濾過し、0.01 mol/L 硫酸で滴定しながら pH を測定した。CO_3 や HCO_3 濃度は、アメリカ地質調査所（United States Geological Survey）による Alkalinity Calculator（https://or.water.usgs.gov/alk/）を用い、滴定曲線や初期の EC の値を入力し、Infection point 法により計算した。

バッチ試験前後の固相の質量変化を調べるため、バッチ試験後の固相の乾燥質量を求めた。具体的には、質量測定作業時に固相が急激に吸湿することを防ぐため、減圧乾燥した固相をまず大気に馴染ませた。その後、固相の湿潤質量を測るとともに、その際の固相の含水比を、110ºC の恒温炉で 1 日以上乾燥させた際の質量変化を測定することにより求めた。この時の固相の湿潤質量と含水比より、固相の乾燥質量を求めた。

モンモリロナイトの浸出イオン組成を調べるため、塩化ベンジルトリメチルアンモニウムクロリド（以下、「BTM」という）溶液を用いた抽出方法（佐治ほか、2005）を基に、一部変更して測定した。具体的には、バッチ試験前後の固相の含水比を、110ºC の恒温炉で 1 日以上乾燥させた際の質量変化を測定することにより求めた。また、この時の含水比から、乾燥質量 0.5 g となる湿潤質量を求め、秤取った。秤取った固相に 6%BTM 溶液を 50 mL 加え、超音波分散器を用いて固相を分散した。分散液を 1 時間静置した後、上澄み液を 0.2 µm 孔径のメンブレンフィルターで濾過し、必要に応じて希釈した。体積百分率で約 0.1%の硝酸を添加し、ICP-OES を用いて Na、Ca、K、Mg、S 濃度を測定した。なお、溶液分析の際に用いた標準液の作製には、抽出作業に用いた BTM 溶液を必要に応じて希釈し、使用した。

固相の鉱物組成は、X 線回折（以下、「XRD」という）装置（リガク製、SmartLab）を用いて測定した。具体的には、不定方位試料に対し、Cu の管球を用い、管電圧：45 kV，管電流：30 mA，IS スリット・RS1 スリット・RS2 スリット：1/12°，20 mm，開放，スキャンスピード：1°/min，スキャンステップ：0.02°の条件で測定した。

赤外吸収（以下、「IR」という）スペクトルは、フーリエ変換赤外分光光度計（日本分光株式会社製、FT/IR-6100）を用いた全反射吸収分光法（attenuated total reflection：以下、「ATR」という）によって取得した。測定では、ATR 結晶としてダイヤモンドを用いており、4 cm^{-1} の分解能で 100 回の積算を行った。

モンモリロナイト層間の膨張挙動を調べるため、初期試料と S10 を用いたバッチ試験後の固相について、エチレングリコール（以下、「EG」という）処理を施した定方位試料の XRD 測定を行った。具体的には、固相をイオン交換水に分散し、遠心分離機を用いて、分散液を 1,000 rpm（190 G）で 4 分間遠心分離した。遠心分離後の上澄み液をさらに 14,000 rpm（27,172 G）で 10 分間遠心分離し、固相試料をデシケーター内で減圧乾燥することにより、粒径 2µm 以下の水簸試料を回収した。水簸試料 8 mg 程度をイオン交換水に分散させ、スライドガラスに塗布し、風乾させて定方位試料を作製した。定方位試料は、EG 溶液を含む密閉容器内に静置し、60 ºC の恒温炉で 1 日以上 EG 蒸気に曝した。EG 処理後の試料は、Cu の管球を用い、管電圧：45 kV，管電流：30 mA，IS スリット・RS1 スリット・RS2 スリット：1/12°，20 mm，開放，スキャンスピード：5°/min，スキャンステップ：0.01°の条件で XRD 測定に供した。

モンモリロナイト層間の収縮挙動を調べるため、初期試料と S10 を用いたバッチ試験後の固相について、250 ºC に加熱しながら XRD 測定を行った。具体的には、30 ºC の環境を 10 分間保持し XRD 測定を行った後、250 ºC の環境を 120 分以上保持し XRD 測定を行った。測定では不定方位試料を用い、Cu の管球を用い、管電圧：45 kV，管電流：30 mA，IS スリット・RS1 スリット・RS2 スリット：1/12°，20 mm，開放，スキャンスピード：5°/min，スキャンステップ：0.02°の条件で測定した。

③　結果および考察

(a) セメント-海水相互作用により生じる反応溶液

各液固比で実施した予備試験の結果を表 4-4-に示す。反応溶液の組成は、養生期間が 20—52 日間では顕著に変化しなかった。このことから、バッチ試験で用いる試験溶液の養生期間は 30 日で十分であると判断した。また、反応溶液の pH は、液固比が 10 の条件において最も高かった。液固比 10 の条件に次いで液固比 100 の条件において反応液の pH は高く、液固比 200、1000、2000 の条件では低くなる傾向が認められた。反応溶液の pH 条件に幅を持たせ、セメント-海水相互作用におけるセメント系材料の影響を幅広く検討するため、液固比は、S10、S100、S1000 に設定した。

人工海水と、S10、S100、S1000 それぞれの試験溶液の組成を表 4-4-14 に示す。人工海水に対して OPC の影響が大きくなるほど（i.e., 液固比が小さいほど)、pH や EC は上昇する傾向が認められた。また、ORP は小さくなり、還元的な条件を示す傾向が認められた。いくつかの溶存イオン濃度は、条件により大きく変化していた。例えば、溶存 Ca イオン濃度は条件により大きく異なり、S100 の条件において最も高い濃度を示した。また、溶存 Mg イオンは、S10、S100 の条件では定量下限未満まで濃度が低下していた。溶存 SO_4 イオンや CO_3 イオン、HCO_3 イオンもまた、S10 の条件において濃度が顕著に低下していた。

原子力環境整備促進・資金管理センター（2005）では、OPC と人工海水を液固比 10、100、200、1000、2000 の条件で 1 か月間浸漬させた反応溶液の組成が報告されている。そこで、この先行研究と S10、S100、S1000 の組成を比較した（図 4-4-)。試験溶液の pH や SO_4 濃度、Ca 濃度、Mg 濃度は、原子力環境整備促進・資金管理センター（2005）と整合的な値を示した。一方、Na や K 濃度は先行研究と異なる値を示した。Na や K 濃度はそれぞれの試験において使用した人工海水の Na や K 濃度に近い値を示していたため、その違いは用いた人工海水の濃度の差に起因するものと考えられる。

表 4-4- 13　予備実験におけるセメント-海水反応液の溶液組成

液固比	日数	pH	Na	Ca	K	Mg	Al	Si	Fe	SO_4
10	10	12.55	430.5	38.6	10.3	ND	ND	ND	ND	1.0
	20	12.52	430.2	37.3	10.3	ND	ND	ND	ND	0.4
	30	12.62	439.7	37.0	10.4	ND	ND	ND	ND	0.3
	41	12.61	441.4	37.3	10.6	ND	ND	ND	ND	0.3
	52	12.40	437.8	37.4	10.4	ND	ND	ND	ND	0.2
100	10	11.26	426.8	52.3	8.8	ND	ND	ND	ND	24.7
	20	11.30	426.2	52.7	8.8	ND	ND	ND	ND	25.1
	30	11.35	429.3	52.8	9.2	ND	ND	ND	ND	24.7
	41	11.36	434.1	52.4	9.0	ND	ND	ND	ND	24.0
	52	11.22	424.5	52.2	8.8	ND	ND	ND	ND	24.5
200	10	9.65	439.2	38.8	8.7	12.5	ND	ND	ND	26.3
	20	9.71	430.5	39.3	8.6	11.3	ND	ND	ND	26.2
	30	9.58	426.8	39.8	8.8	11.0	ND	ND	ND	26.5
	41	9.63	424.4	40.4	8.9	11.2	ND	ND	ND	26.3
	52	9.52	422.3	40.5	8.9	11.1	ND	ND	ND	26.3
1000	3	9.63	424.3	12.9	8.8	39.8	ND	ND	ND	26.2
	10	9.51	436.7	13.5	9.0	40.1	ND	ND	ND	26.0
	30	9.46	426.6	13.0	9.1	40.0	ND	ND	ND	25.9
	41	9.47	424.8	13.4	9.1	39.2	ND	ND	ND	26.7
	52	9.34	426.1	13.7	9.1	39.2	ND	ND	ND	27.0
2000	3	9.44	419.7	10.6	9.0	42.2	ND	ND	ND	26.3
	10	9.34	427.2	10.6	9.0	42.7	ND	ND	ND	25.6
	30	9.32	437.5	10.6	8.8	43.9	ND	ND	ND	26.2
	41	9.27	432.4	10.5	8.7	43.9	ND	ND	ND	26.2
	52	9.12	425.3	10.4	8.8	43.6	ND	ND	ND	26.4

注）溶存イオン濃度の単位は、mmol/L で示す。ND は定量下限未満を示す。

表 4-4- 14　人工海水と試験溶液の組成

	人工海水	S10	S100	S1000
pH	8.20	12.86	11.48	9.48
EC (mS/cm)	46.3	51.6	47.9	46.6
ORP (mV)	102	-153	-86	45.8
Na	433	427	422	421
Ca	10	39	55	15
K	8	10	9	8
Mg	42	ND	ND	36
Al	ND	ND	ND	ND
Si	ND	ND	ND	ND
Fe	ND	ND	ND	ND
Cl	471	448	469	471
SO_4	25.9	ND	23.9	26.0
Br	0.83	0.78	0.83	0.84
NO_3	0.42	0.42	0.40	0.36
CO_3	0.06	ND	1.09	0.18
HCO_3	2.53	ND	0.03	0.47

注）溶存イオン濃度の単位は、mmol/L で示す。ND は定量下限未満を示す。

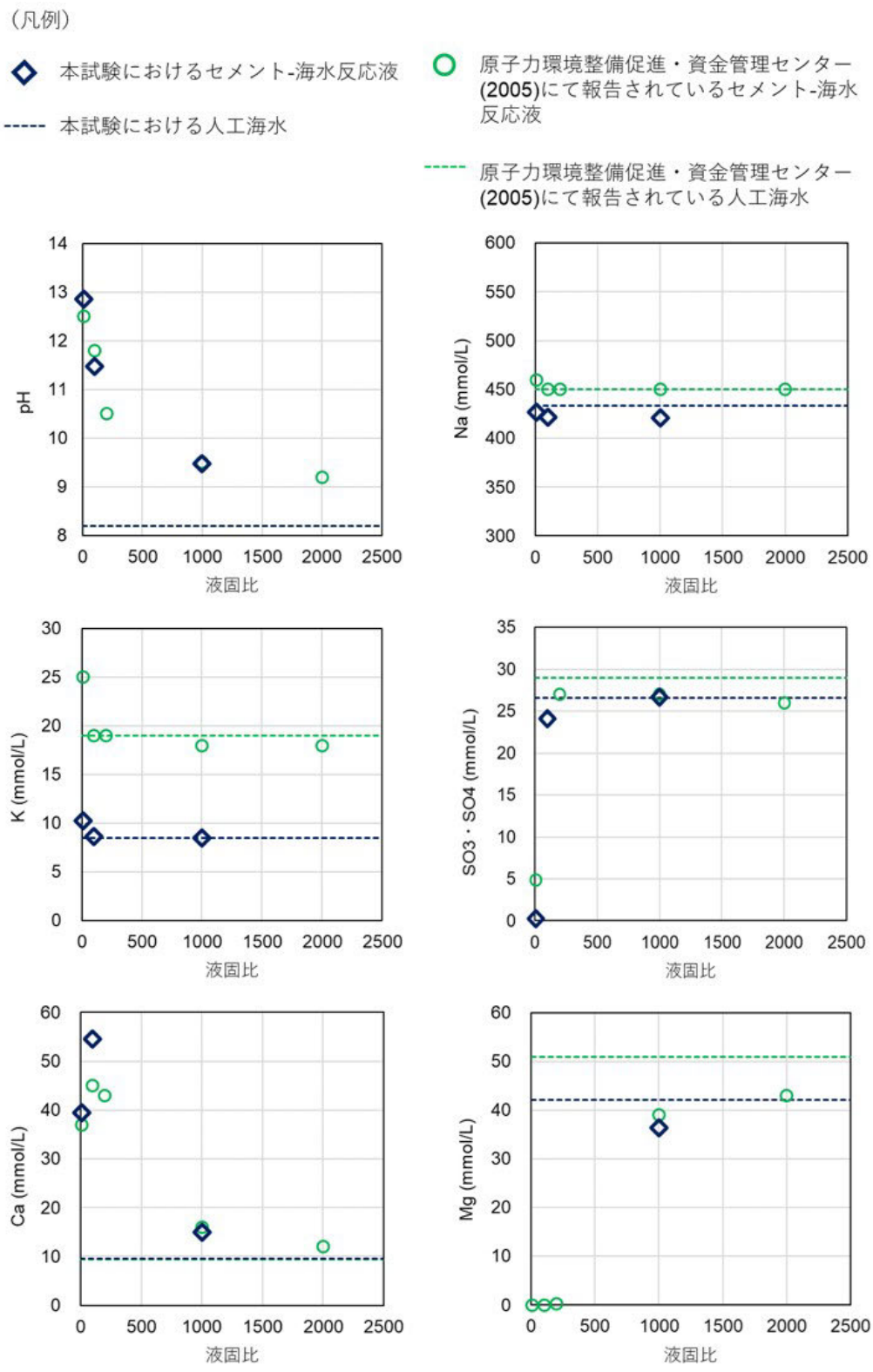


図 4-4- 75　人工海水と試験溶液の組成

(b) バッチ試験による溶液濃度変化

ブランク試験後の溶液組成を表 4-4-15 に示す。ブランク試験後の溶液組成は、表 4-4-14 に示したブランク試験前の試験溶液の組成と概ね同様の値を示したものの、S10 の条件における溶存 CO_3 イオン濃度がブランク試験後に増加していた。本試験は、窒素雰囲気のグローブボックス内で実施したものの、用いたガスには不純物として CO_2 ガスが存在する。これらのことから、S10 の条件では、試験中に CO_2 ガスが溶解したことにより、溶存 CO_3 イオン濃度が増加したと考えられる。

KV、SKV、KB、SKB を用いたバッチ試験後の反応溶液の溶液組成をそれぞれ、表 4-4-16、表 4-4-17、表 4-4-18、表 4-4-19 に示す。バッチ試験は、各条件について 2 つずつ実施したものの、同じ条件における反応溶液の溶液組成は類似の値を示した。一方、バッチ試験後の反応溶液の溶液組成は、初期溶液として用いた試験溶液とは異なる溶液組成を示した。具体的には、全ての試験において、pH の低下が認められた。特に、KB や SKB を用いた試験における pH の低下は顕著であった。また、S10 条件における溶存 Ca イオン濃度の減少や、すべての条件における溶存 Si イオン濃度の増加、KB を用いた S100 条件における溶存 SO_4 イオン濃度の減少が認められた。さらに、ブランク試験と比較して、S10 の条件における CO_3 濃度の減少が認められた。

表 4-4- 15　ブランク試験後の反応溶液の溶液組成

試験条件	S10	S100	S1000
pH	12.58	11.48	9.54
EC (mS/cm)	52.1	47.7	46.7
ORP (mV)	-155.1	-128.4	-74.0
Na	430.4	427.6	426.1
Ca	40.8	57.8	15.9
K	10.7	9.3	9.1
Mg	ND	ND	39.2
Al	ND	ND	ND
Si	0.1	0.1	0.1
Fe	ND	ND	ND
Cl	445	464	465
SO_4	ND	23.9	26.0
Br	0.79	0.83	0.83
NO_3	0.42	0.44	0.31
CO_3	5.69	1.10	0.21
HCO_3	0.01	0.03	0.43

注）溶存イオン濃度の単位は、mmol/L で示す。ND は定量下限未満を示す。

表 4-4- 16　KV を用いたバッチ試験後の反応溶液の溶液組成

試験条件	S10		S100		S1000	
pH	12.08	12.10	10.84	10.85	8.37	8.38
EC (mS/cm)	47.3	47.3	47.4	47.4	47.1	46.9
ORP (mV)	-134.1	-137.5	-83.9	-88.5	-24.8	-24.7
Na	432.5	436.6	438.7	442.2	442.0	427.7
Ca	22.5	21.8	50.2	51.3	15.1	15.2
K	8.6	8.4	7.4	7.7	7.6	7.7
Mg	ND	ND	ND	ND	35.4	35.1
Al	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Si	0.4	0.4	1.0	1.0	0.4	0.4
Fe	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cl	445	445	466	465	467	467
SO_4	ND	ND	24.2	24.2	26.3	26.3
Br	0.79	0.79	0.84	0.83	0.84	0.84
NO_3	0.30	0.29	0.31	0.29	0.30	0.26
CO_3	3.46	3.33	0.93	0.91	0.02	0.02
HCO_3	0.02	0.02	0.10	0.09	0.58	0.58

注）溶存イオン濃度の単位は、mmol/L で示す。ND は定量下限未満を示す。

表 4-4- 17　SKV を用いたバッチ試験後の反応溶液の溶液組成

試験条件	S10		S100		S1000	
pH	12.00	11.98	9.06	9.06	8.19	8.19
EC (mS/cm)	46.1	46.0	47.2	47.0	46.8	46.8
ORP (mV)	-120.8	-118.8	-75.8	-71.6	-64.5	-60.6
Na	433.6	432.0	434.2	433.7	437.7	439.3
Ca	24.2	24.5	54.7	55.0	16.3	16.2
K	10.0	9.9	9.1	9.2	9.0	9.1
Mg	ND	ND	1.6	1.6	41.3	41.6
Al	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Si	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5
Fe	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cl	448	449	467	470	469	468
SO_4	ND	ND	24.0	24.1	26.4	26.4
Br	0.79	0.84	0.83	0.84	0.84	0.84
NO_3	0.25	0.23	0.26	0.24	0.40	0.26
CO_3	1.19	1.49	0.03	0.03	0.01	0.01
HCO_3	0.01	0.01	0.19	0.18	0.51	0.51

注）溶存イオン濃度の単位は、mmol/L で示す。ND は定量下限未満を示す。

表 4-4- 18　KB を用いたバッチ試験後の反応溶液の溶液組成

試験条件	S10		S100		S1000	
pH	10.20	10.22	8.48	8.47	7.66	7.60
EC (mS/cm)	43.8	43.8	46.8	46.8	46.9	46.9
ORP (mV)	-90.0	-88.3	-39.6	-40.3	-23.0	-21.3
Na	415	417	418	420	423	421
Ca	27.4	27.3	59.4	60.6	24.4	24.5
K	8.7	8.6	8.0	8.0	8.1	8.0
Mg	ND	ND	1.60	1.60	39.92	39.92
Al	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Si	1.7	1.7	0.7	0.7	0.7	0.8
Fe	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cl	446	447	468	471	469	467
SO_4	ND	ND	21.3	22.4	26.3	26.3
Br	0.79	0.79	0.84	0.85	0.84	0.84
NO_3	0.28	0.29	0.27	0.29	0.27	0.31
CO_3	0.52	0.53	0.02	0.01	0.00	0.00
HCO_3	0.23	0.23	0.31	0.27	0.28	0.29

注）溶存イオン濃度の単位は、mmol/L で示す。ND は定量下限未満を示す。

表 4-4- 19　SKB を用いたバッチ試験後の反応溶液の溶液組成

試験条件	S10		S100		S1000	
pH	10.18	10.18	8.50	8.50	7.66	7.67
EC (mS/cm)	43.7	43.8	47.1	47.1	46.7	47.0
ORP (mV)	-103.0	-103.4	-70.2	-68.2	-64.0	-63.8
Na	425.2	425.0	425.3	425.5	426.9	426.6
Ca	21.3	21.2	52.4	52.4	15.6	15.5
K	9.4	9.3	8.9	8.9	8.7	8.7
Mg	ND	ND	3.1	3.1	40.6	40.5
Al	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Si	1.7	1.7	0.5	0.5	0.5	0.5
Fe	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cl	448	447	466	467	468	468
SO_4	ND	ND	24.3	24.3	26.5	26.5
Br	0.79	0.80	0.83	0.84	0.84	0.84
NO_3	0.30	0.32	0.35	0.45	0.35	0.47
CO_3	0.54	0.53	0.01	0.01	0.00	0.00
HCO_3	0.25	0.25	0.21	0.19	0.24	0.24

注）溶存イオン濃度の単位は、mmol/L で示す。ND は定量下限未満を示す。

(c)　質量変化

バッチ試験前後の固相の乾燥質量比を図 4-4-76 に示す。S100 や S1000 の条件において、バッチ試験前後の乾燥質量比は 1 に近い値を示した。このことは、バッチ試験中に生じたベントナイトの構成鉱物の溶解反応や二次生成物の沈殿反応による固相の質量変化は顕著ではないことを示唆する。一方、S10 の条件では、バッチ試験前後の乾燥質量比が 1 より大きく、固相の乾燥質量がバッチ試験中に増加していることが考えられた。このことから、試験溶液中の溶存イオンを取り込んだ二次生成物の沈殿反応が生じていると推察された。

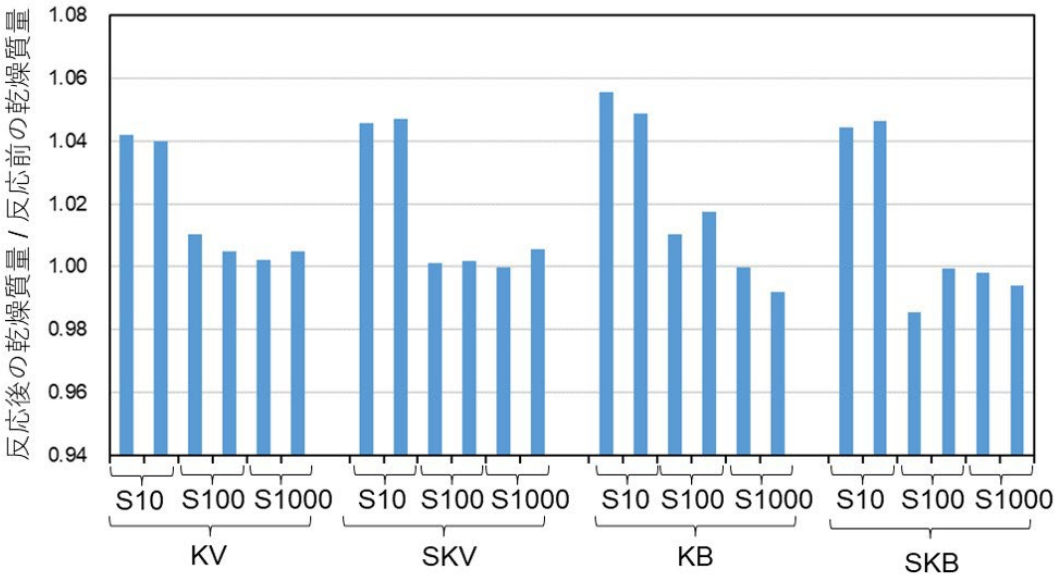


図 4-4- 76　バッチ試験前後の乾燥質量の変化

(d) 鉱物組成

バッチ試験前後の固相の XRD プロファイルを図 4-4-77 に示す。また、鉱物組成を表 4-4-20 に示す。試験前の KV や SKV は、モンモリロナイトや石英、斜長石、クリノプチロライト、カルサイト、パイライトから主に構成されていた。一方、試験前の KB や SKB はモンモリロナイトやクリストバライト、石英、長石から主に構成されていた。

バッチ試験後の KV や SKV では、S10 の条件における KV を除き、鉱物組成に顕著な変化は認められなかった。一方、S10 の条件における KV では、7.91 Åを示す回折ピークが認められた。この鉱物は第一強線しか認められなかったため同定出来ておらず、今後、SEM 観察などの結果と合わせて同定することが課題である。また、KB と SKB ともに、S100 や S1000 の条件においてジプサムが認められた。ジプサムのピークは、特に、S100 の条件における KB にて顕著であった。

バッチ試験前後の KV や SKV の IR プロファイルを図 4-4-78 に、KB や SKB の IR プロファイルを図 4-4-79 に示す。S100 や S1000 の条件における試験後の固相の IR プロファイルは、初期のベントナイトの IR プロファイルと類似していた。一方、S10 の条件における試験後の固相の IR プロファイルは、初期のベントナイトのものと異なるピークが認められた。具体的には、試験後の固相の IR プロファイルでは 1428-1480 cm^{-1} にブロードなピークが認められた。カルサイトやドロマイト、マグネサイト、バテライト、アラゴナイトといった炭酸塩の CO_3 に帰属する非対称伸縮振動は、それぞれ 1420-1427 cm^{-1}、1443 cm^{-1}、1450 cm^{-1}、1482 cm^{-1}、1492-1404 cm^{-1} にピークを示す（Fernández-

Carrasco et al., 2012; Makreski and Jovanovski, 2003)。そのため、S10 の条件で新たに認められた IR のピークは、炭酸塩に由来すると考えられる。

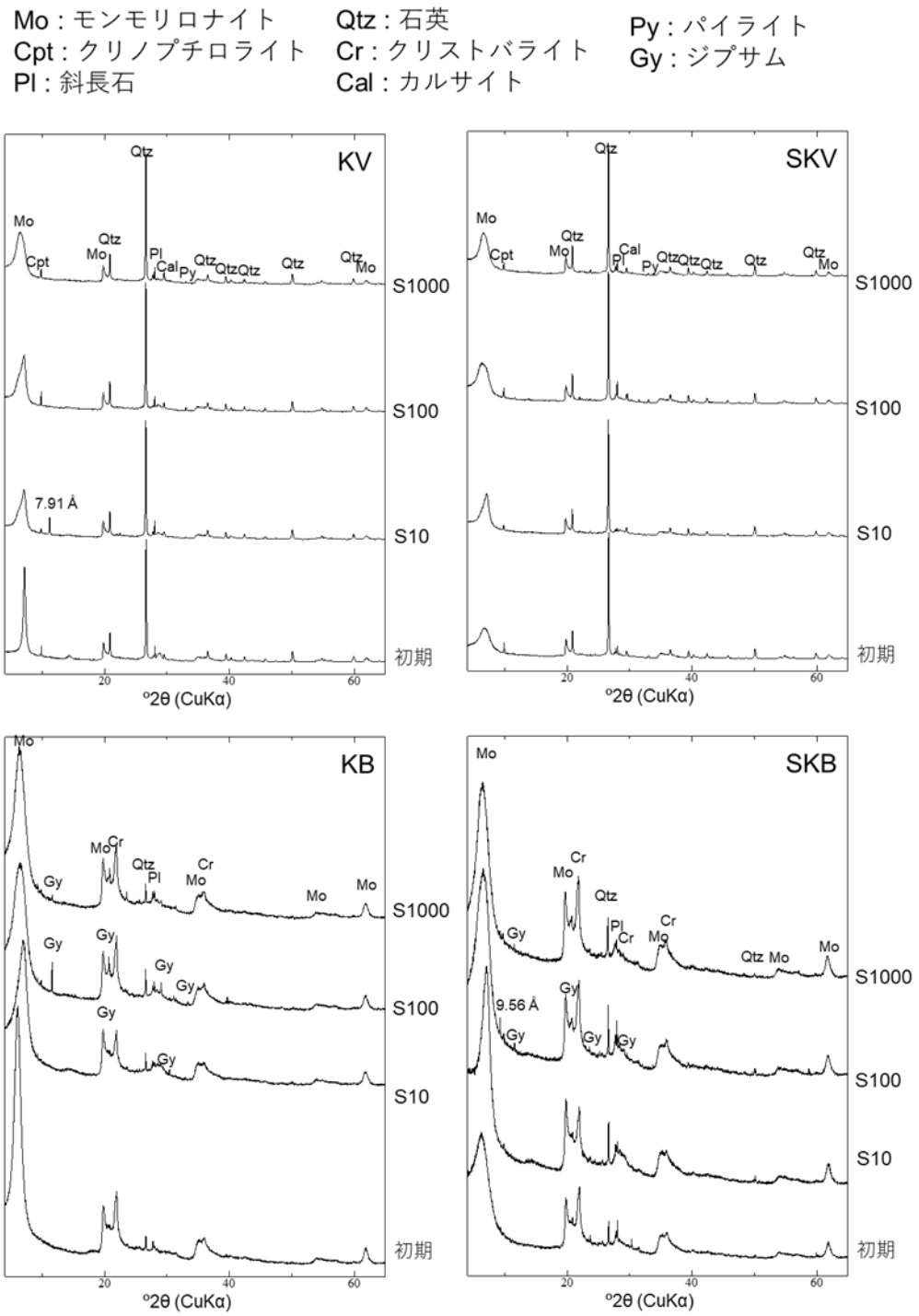


図 4-4- 77　バッチ試験前後の固相の XRD プロファイル

表 4-4- 20　XRD 分析による同定結果

試験条件		Mo	Cpt	Pl	Qtz	Cr	Cal	Py	Gy	備考
KV	初期	○	○	○	○		○	○		
	S10	○	○	○	○		○	○		7.91
	S100	○	○	○	○		○	○		
	S1000	○	○	○	○		○	○		
SKV	初期	○	○	○	○		○	○		
	S10	○	○	○	○		○	○		
	S100	○	○	○	○		○	○		
	S1000	○	○	○	○		○	○		
KB	初期	○	?	○	○	○				
	S10	○	○	○	○	○				9.56
	S100	○	○	○	○	○			○	9.56
	S1000	○	○	○	○	○			○	9.56
SKB	初期	○	○	○	○	○				9.56
	S10	○	○	○	○	○				9.56
	S100	○	○	○	○	○			○	9.56
	S1000	○	○	○	○	○			○	9.56

注）○：回折ピークが確認される，？：ピークが不明瞭, Mo：モンモリロナイト, Cpt：クリノプチロライト, Pl：斜長石, Qtz：石英, Cr：クリストバライト, Cal：カルサイト, Py：パイライト, Gy：ジプサム. 備考欄には同定できなかったピークの d 値(Å)を示している。

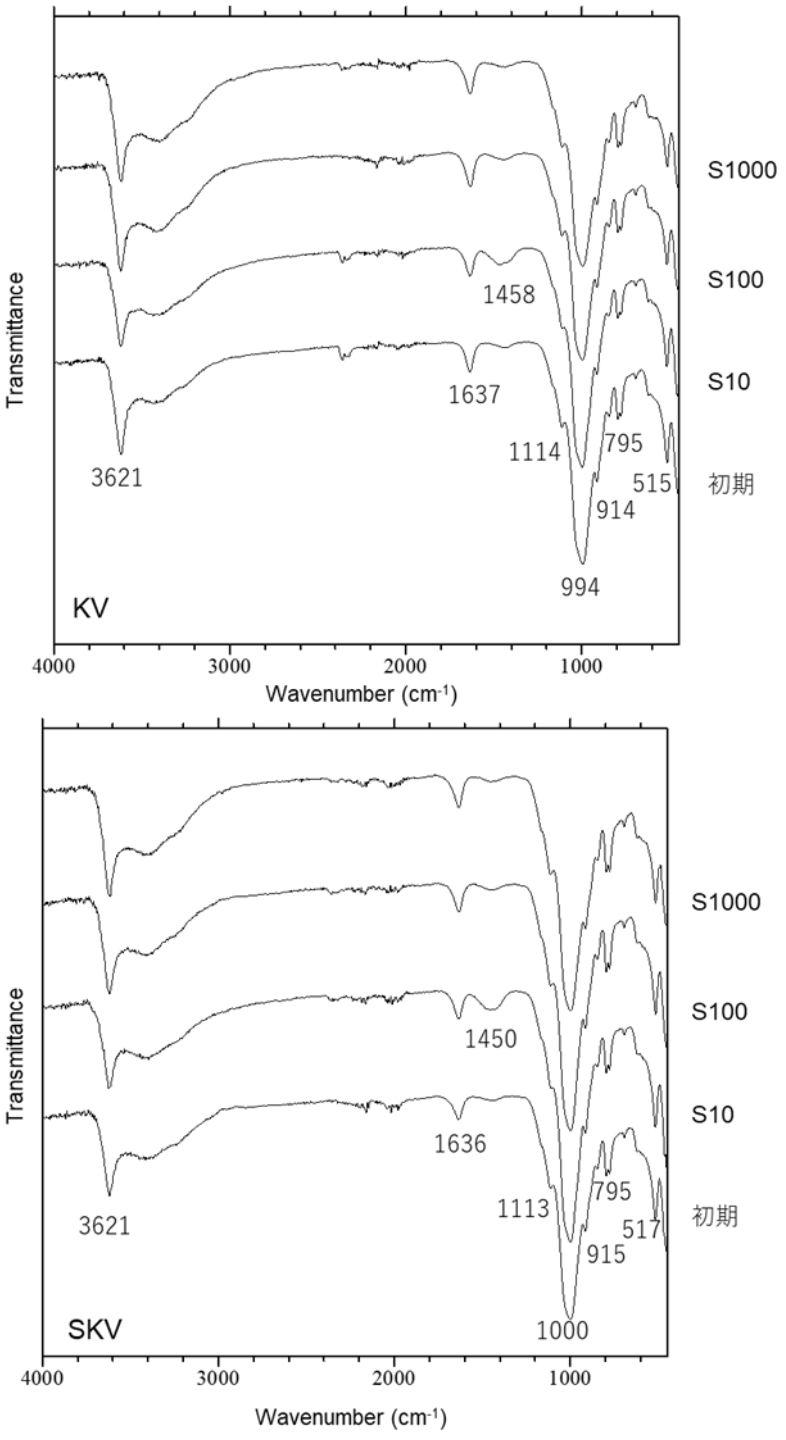


図 4-4- 78　バッチ試験前後の KV や SKV の IR スペクトル

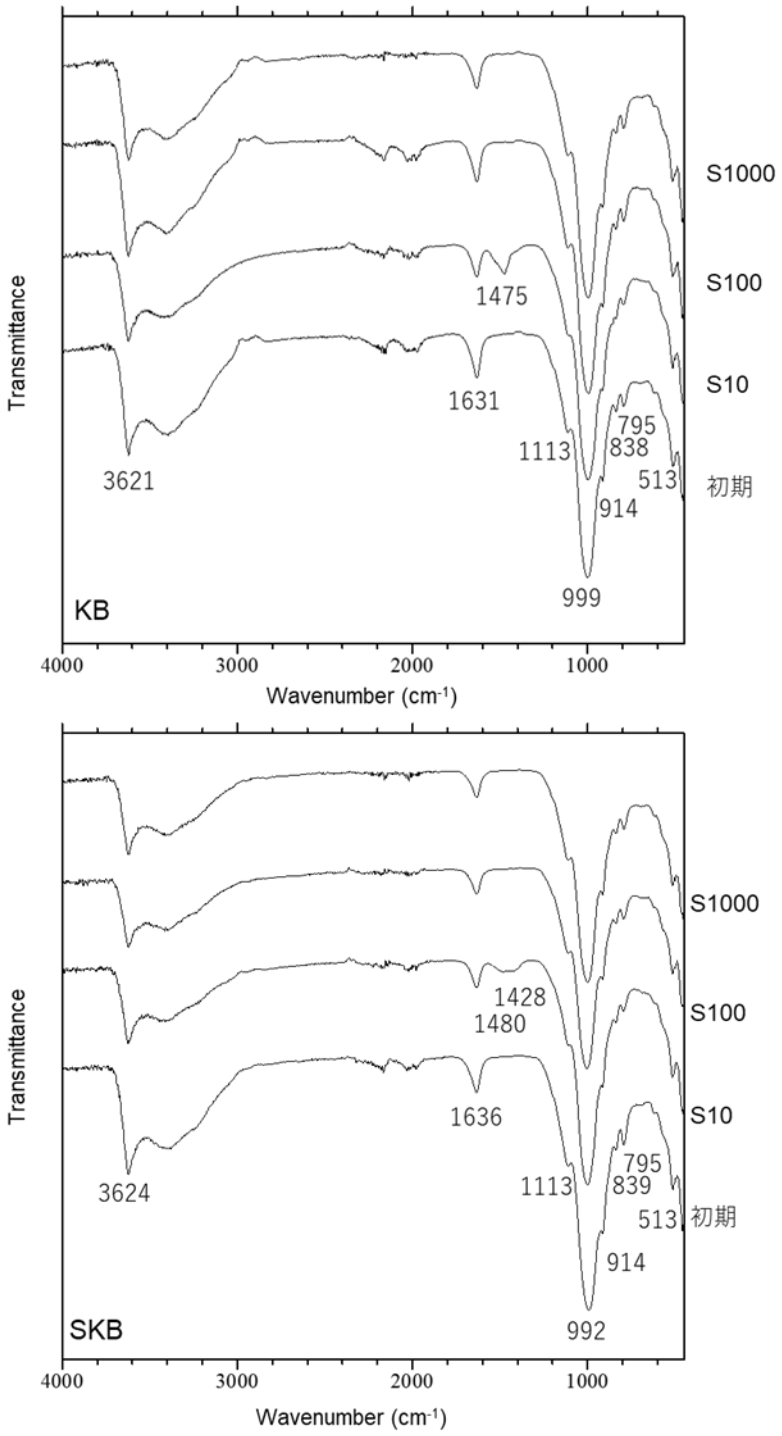


図 4-4- 79　バッチ試験前後の KB や SKB の IR スペクトル

(e) 初期鉱物の溶解反応および二次生成物の沈殿反応

バッチ試験後の反応溶液では、溶存 Si 濃度が増加していた。このことから、バッチ試験中に、Si を含有する初期鉱物の溶解が生じたことが推察される。

一方、S10 の条件では、バッチ試験前後の固相の質量変化から二次生成物が沈殿していることが推察された（図 4-4-76）。また、IR 分析では、S10 条件において、炭酸塩の生成が示唆された（図 4-4-78、図 4-4-79）。前述の通りブランク試験では、反応溶液の溶存 CO_3 イオン濃度が、不純物として存在する CO_2 ガスの影響により増加したと考えられた。CO_2 ガスは、バッチ試験にも同様の影響を与えたと予想される。他方、ブランク試験と比較して、S10 の条件におけるバッチ試験後の反応溶液の溶存 CO_3 濃度は減少していた。これらのことから、バッチ試験では、試験中に CO_2 ガスが溶解した影響で、炭酸塩が生成したことが示唆される。

KB や SKB を用いた S100 や S1000 の条件では、ジプサムの生成が認められた(表 4-4-20)。また、ジプサムの生成が特に顕著であった KB を用いた S100 の条件では、バッチ試験後の反応溶液の溶存 SO_4 イオン濃度は減少していた（表 4-4-18）。これらのことから、試験溶液に含まれる溶存 SO_4 イオンを消費してジプサムが生成したことが示唆される。

(f) イオン交換反応

バッチ試験前後の各ベントナイト 100 g 当たりの浸出イオン量を図 4-4-80 に示す。浸出陽イオン分析は本来、モンモリロナイトの層間陽イオンを抽出し、その組成や量を調べるための方法である。しかし、陰イオンである SO_4 も抽出された。この浸出 SO_4 イオンは、KB を用いた S100 の条件にて顕著であり、この条件では、浸出陽イオン総量（浸出 Na イオン、Ca イオン、K イオン、Mg イオンの合計）も僅かに増加していた。さらに、この条件では XRD 分析により硫酸カルシウムであるジプサムが顕著に認められた（図 4-4-77）。これらのことから、抽出過程において二次生成物（特に、硫酸カルシウム）の溶解が生じ、浸出 SO_4 イオンと浸出陽イオン（特に、カルシウムイオン）量の増加に繋がったと考えられる。

図 4-4-81 は、浸出陽イオン（Na イオン、Ca イオン、K イオン、Mg イオン）量の割合を示したものである。バッチ試験後の浸出陽イオン組成は初期試料とは異なっていた。また、その浸出陽イオン組成は、用いたベントナイトの種類ではなく、用いた試験溶液の種類（i.e., S10、S100、S1000）に応じて変化する傾向が認められた。具体的には、初期試料の KV は Na イオン、KB は Ca イオン、SKB や SKV は Na イオンと Mg イオンに富んでいる一方、S1000 の条件におけるバッチ試験後では Na イオンや Mg イオン、S10 や S100 では Na イオンや Ca イオンに富んでいる傾向が認められた。上述したように、抽出過程における二次生成物の溶解が浸出陽イオン組成に影響を与えていることが考えられる

ものの、バッチ試験後の浸出陽イオン組成は初期試料と異なっていることから、バッチ試験中にモンモリロナイトのイオン交換反応が進行していたと考えられる。

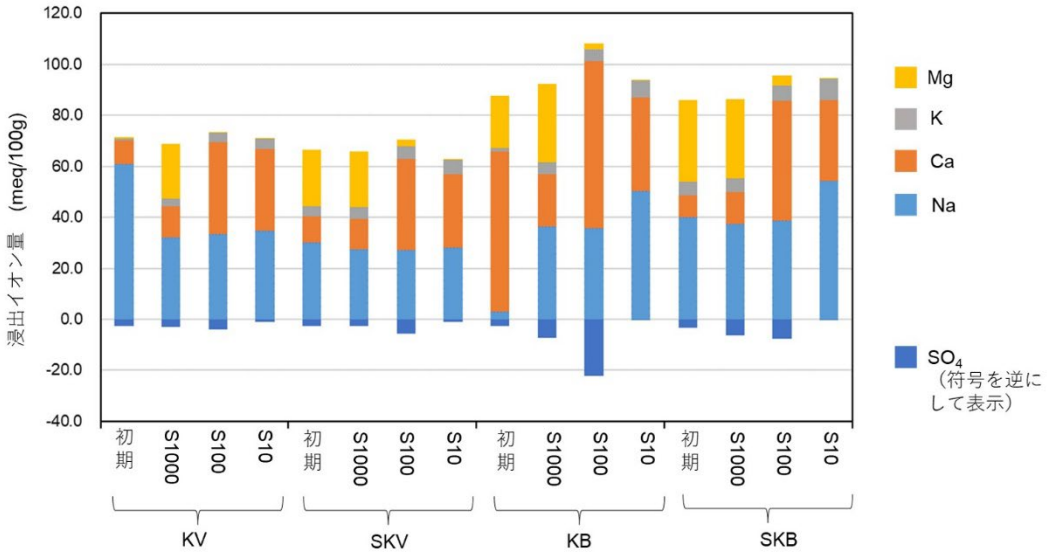


図 4-4- 80　バッチ試験前後の固相の浸出イオン量

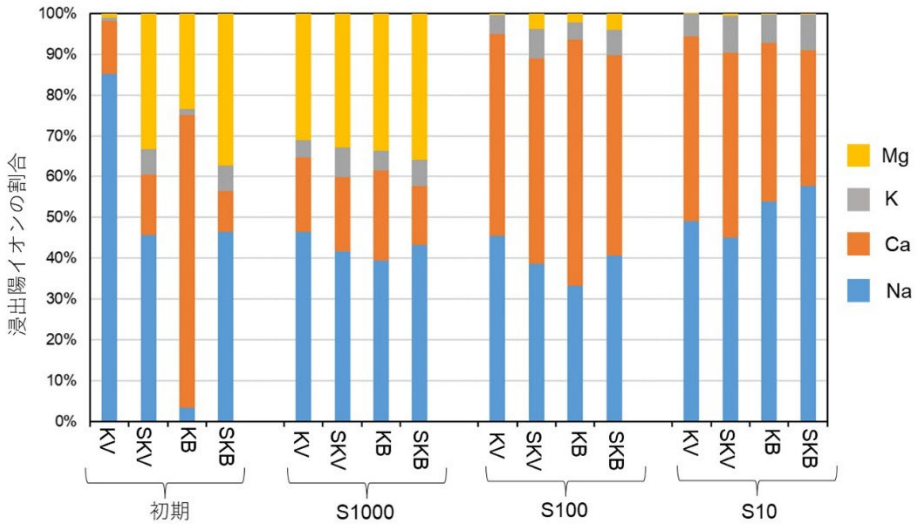


図 4-4- 81　バッチ試験前後の固相の浸出陽イオン組成

(g) モンモリロナイトの鉱物学的特徴変化

SKV や KB、SKB を用いた S10 や S100 の条件では、バッチ試験後の浸出 Mg イオンの割合が減少していた（図 4-4-81）。一方、S10 の条件では、バッチ試験後の溶液組成として溶存 Mg イオンの増加は認められなかった。これらのことから、バッチ試験前にモンモリロナイトの層間に存在していた Mg イオンは、バッチ試験後に、モンモリロナイトの層間陽イオン以外の形態で固相として消費されたことが推察される。層間 Mg イオンを有する締固めベントナイトに対しアルカリ性の溶液を接触させた既往の拡散実験では、Mg 含有二次生成物の生成や（Fernández et al., 2009）、モンモリロナイトの層間にブルーサイト層を有するクロライト様生成物の生成が報告されている（Fernández et al., 2009, 2013）。また、クロライト様生成物が生成することにより、モンモリロナイト層間の膨張・収縮挙動が変化したことが認められている（Fernández et al., 2009, 2013）。ここでは、本試験における Mg の消費先として、先行研究で報告されているクロライト様生成物の生成の可能性について議論するため、EG 処理を施すことでモンモリロナイト層間の膨張挙動を、加熱前後のピーク位置の変化を測定することでモンモリロナイト層間の収縮挙動を調べた。

初期試料と S10 の条件の試料について、EG 処理後の XRD プロファイルを図 4-4-82 に、EG 処理後のピーク位置を表 4-4-21 に示す。また、加熱前後（250℃）の XRD プロファイルを図 4-4-83 に、加熱前後のピーク位置を表 4-4-22 に示す。モンモリロナイト層間の EG 処理による膨張挙動や、加熱による収縮挙動は、試料間で顕著な違いは認められなかった。これらのことから、モンモリロナイト層間でのブルーサイト層の形成は顕著ではないと考えられる。そのため、バッチ試験前にモンモリロナイトの層間に存在していた Mg イオンは、Mg 含有二次生成物の沈殿等によって消費されたことが推察される。今後、SEM 観察などを通じて、Mg 含有二次生成物について分析を進めることが課題である。

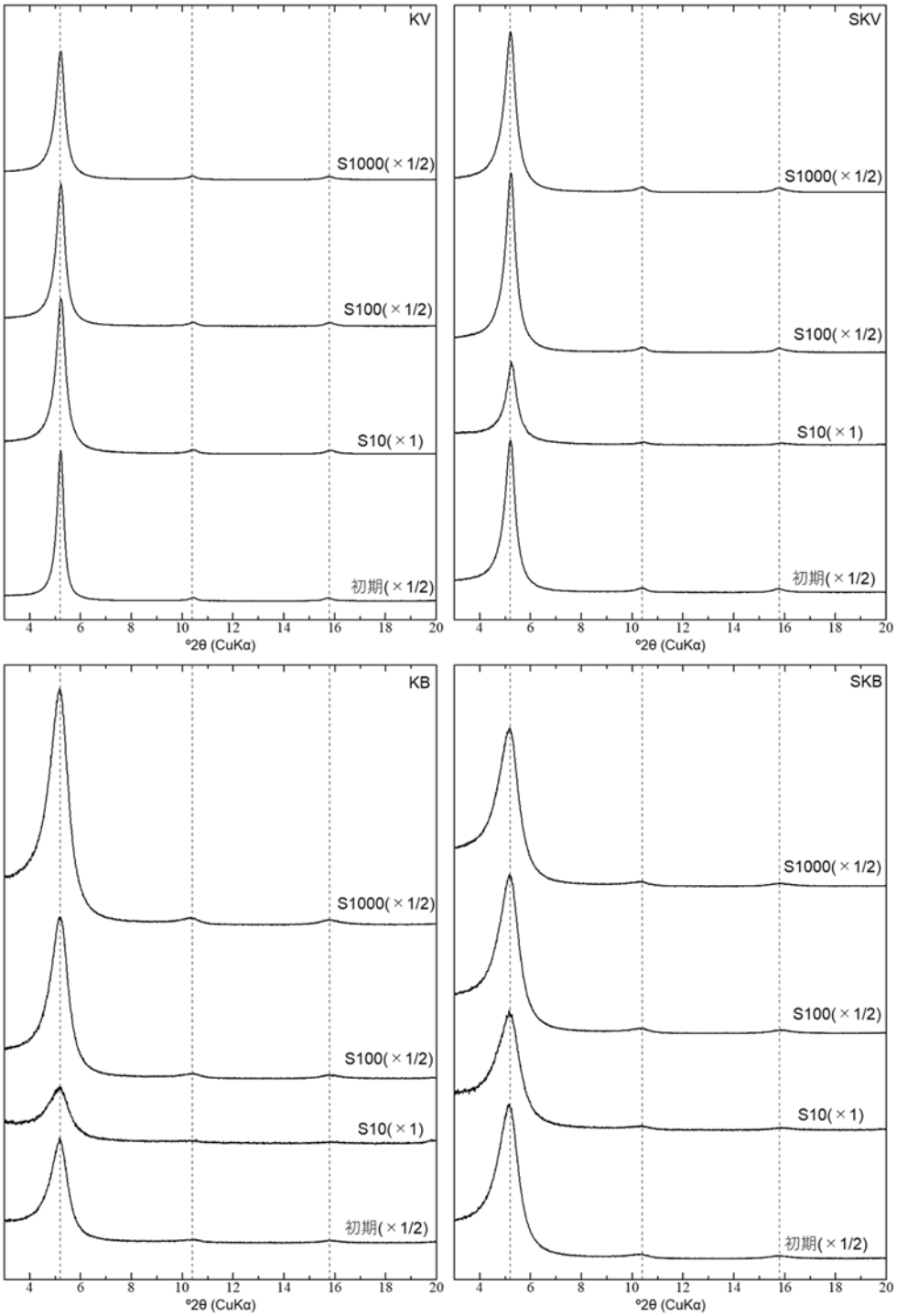


図 4-4- 82　EG 処理後の XRD プロファイル

表 4-4- 21　EG 処理後の d 値

試験条件		d 値（Å）		
KV	初期	16.91	8.49	5.62
	S10	16.85	8.45	5.59
	S100	16.88	8.47	5.61
	S1000	16.91	8.49	5.62
SKV	初期	16.93	8.48	5.63
	S10	16.79	8.45	5.60
	S100	16.88	8.48	5.62
	S1000	16.92	8.49	5.62
KB	初期	16.92	8.46	5.61
	S10	17.00	8.42	5.55
	S100	16.95	8.52	5.62
	S1000	17.06	8.52	5.62
SKB	初期	17.07	8.56	5.62
	S10	16.91	8.53	5.60
	S100	16.97	8.53	5.59
	S1000	17.05	8.55	5.63

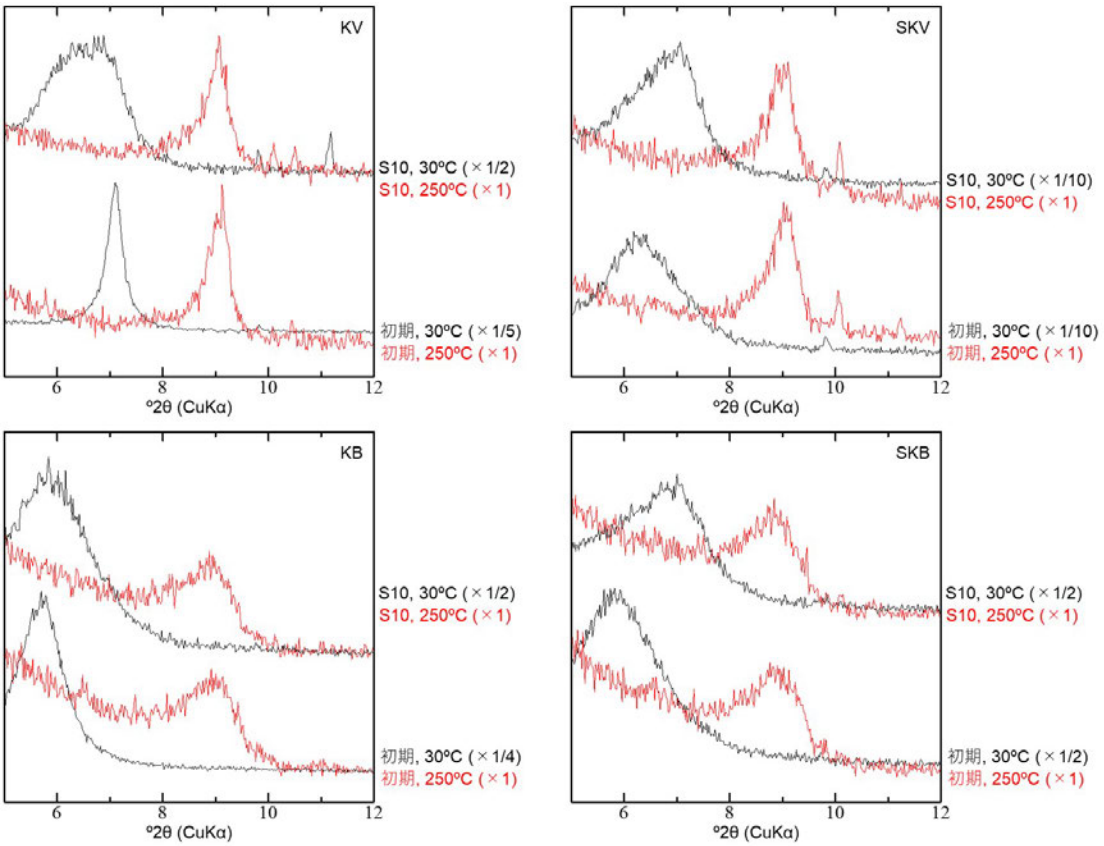


図 4-4- 83　加熱前後の XRD プロファイル

表 4-4- 22　加熱前後の d 値

試験条件		測定温度（ºC）	d 値（Å）
KV	初期	30	12.43
		250	9.68
	S10	30	13.14
		250	9.78
SKV	初期	30	14.12
		250	9.69
	S10	30	12.47
		250	9.83
KB	初期	30	15.36
		250	9.82
	S10	30	15.24
		250	9.87
SKB	初期	30	15.13
		250	9.85
	S10	30	12.52
		250	9.98

④　要素試験（化学）のまとめ

要素試験（化学）では、地下水の水質変化やモンモリロナイトの層間陽イオン組成に起因する化学的多様性を考慮した場合のベントナイトの変質反応を理解するため、異なる液固比で人工海水と OPC を反応させて作製した試験溶液に対し、異なる層間陽イオン組成を有するベントナイトを反応させたバッチ試験を実施した。その結果、ベントナイトの変質反応として、Si を含有する初期鉱物の溶解反応や、モンモリロナイトのイオン交換反応、二次生成物の生成反応が認められた。二次生成物は、S10 条件における炭酸塩の生成や、KB や SKB を用いた S100 や S1000 の条件におけるジプサムの生成が認められた。今後は、圧縮したベントナイトに対し試験溶液を通水することにより、ベントナイトのこれらの変質が透水性に与える影響を調べることが必要である。

（4） 模型試験

① 模型試験の背景及び目的

沿岸部を地層処分施設のサイトとして想定した場合、長期にわたり人工バリアである緩衝材に海水成分を含有する地下水が浸透することが考えられる。処分施設閉鎖後、地下水が緩衝材に浸透し飽和するまでの再冠水期間は数十から百数十年とされ、その間に緩衝材は膨潤変形し、緩衝材と岩盤やオーバーパックとの隙間や継ぎ目を充填する。再冠水後については、オーバーパックの自重により緩衝材が圧密(二次圧密)され、オーバーパックが長期にわたり沈下することが考えられている(中村・田中、2004; 原子力発電環境整備機構、2021)。

再冠水後の緩衝材が膨潤した後の、オーバーパックの自重沈下による緩衝材の長期健全性評価については数値解析により検討されている(原子力発電環境整備機構、2021)。このオーバーパックの自重沈下解析は、処分場閉鎖後の長期間におけるオーバーパックの自重沈下による緩衝材の厚さの変化について評価することができ、初期の緩衝材の材料や密度の設定条件の検討に利用されてきた。一方で、オーバーパックの自重沈下解析の初期条件は再冠水完了時までに緩衝材が飽和して均一に膨潤変形し、オーバーパックは定置場所から動いていない限られた条件であり、再冠水期間におけるオーバーパックの変位挙動については初期条件に含まれていない。ここで、地下水の組成が海水とした場合の、再冠水過程の緩衝材とオーバーパックの挙動のイメージを図 4-4-84 に示す。再冠水期間には、緩衝材が膨潤変形して緩衝材と岩盤やオーバーパックとの隙間や継ぎ目を充填するだけでなく、緩衝材の剛性や間隙水圧の変化が生じ、オーバーパックも移動することが考えられる。また、緩衝材への地下水の浸透によってベントナイトのイオン交換反応が進行することが考えられる。

再冠水期間における緩衝材の変形挙動は、緩衝材の主な材料となるベントナイトのイオン型や密度、緩衝材に浸潤する地下水の組成、廃棄体の熱、緩衝材周囲の岩盤の剛性など複合的な条件によって異なる。すなわち再冠水期間にオーバーパックが移動した場合、再冠水後のオーバーパックの自重沈下解析の初期条件がこれまでの解析の初期条件と異なる。したがって、最終的には再冠水期間から再冠水後までの連続した緩衝材の変形挙動とオーバーパックの移動について数値解析検討をすることになる。一方で、緩衝材とオーバーパック、緩衝材に浸潤する液体などの複合的な挙動の把握に対して、数値解析の妥当性を検証する実験データも必要となるが、数十年を超える実規模レベルの大型模型試験や原位置試験は実施場所(広さや深さなど)、実施期間、経済的な制約によって容易ではない。

そこで、相似則に基づいて物理現象を時間短縮して再現可能な遠心力模型試験によって、オーバーパックの移動(変位挙動)を把握する研究が行われてきた(例えば中村・田中、2004)。具体的な時間加速効果として、想定される処分孔の 1/30 サイズの模型を作製し、30 G 場で試験を行った場合、相似則に基づくと 30 日間の試験で約 74 年間の物理現象を再現できる。

模型試験では、海水成分を含む地下水環境に対しても柔軟に対応できる材料仕様オプションを視野に入れ、緩衝材や通水する試験用水の条件を変えて試験を行ってきた(図 4-4-85)。平成 31 年度は海水条件下での性能の変化の小さい Ca 型ベントナイトを緩衝材の材料とした条件で、令和 2 年度は緩衝材中のベントナイトのイオン交換反応が平衡状態に至った場合の想定として、海水平衡させたベントナイトを使用した試験を行った。なお、温度条件については、いずれも廃棄体模型の加熱をしない条件であった。西本ほか (2014)では岩盤を含めた複雑模型を用いて廃棄体が 95 ℃の条件で試験を行い、再冠水過程以降のベントナイト中の間隙水分布、オーバーパックの変位挙動が加熱なしの条件と異なることを示した。令和 3 年度は Ca 型ベントナイトを緩衝材の材料とした条件で、廃棄体温度を 90 ℃とした場合の模型試験を行い、緩衝材の変形やオーバーパックの変位挙動に対する廃棄体の熱の影響を把握した。

一方でこれまでの本事業における模型試験では、緩衝材の透水性が高くなる限られた条件でしか緩衝材全体に試験用水が通水した試験例がなく、緩衝材再冠水期間におけるオーバーパックの変位挙動を十分に把握するための模型試験手法が必要となる。令和 3 年度は実寸法の 1/30 サイズの模型を使用し、30 G 場で 43 日間、実物換算時間 105 年の模型試験を実施した。すなわちより長い年月の挙動を把握するためには、遠心力模型試験の期間を延長するか、縮尺倍率を上げる必要がある。このうち、廃棄体温度調整や各種センサー類は遠心力加速度下で長期的に安定させることが難しいことや、緩衝材が飽和し安定するまでには、これまでの模型試験の 2 倍以上の試験期間が想定されることから、単純に試験期間を延長することは現実的ではないと考えられた。そこで令和 4 年度は 1/50 サイズの模型を作製し、50 G 場で実物換算時間約 273 年間の模型試験を実施した。

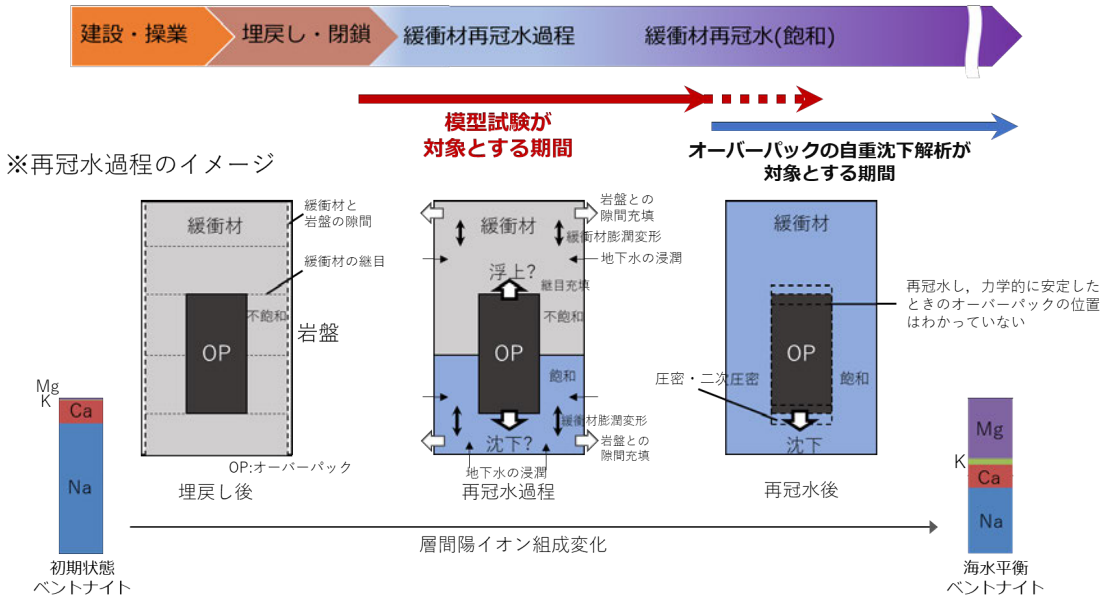


図 4-4- 84 緩衝材再冠水過程で生じる現象のイメージ

○：試験例がある △：限られた条件で試験例がある ✕：試験例がない		試験用水		廃棄体の熱		再冠水後の挙動
		純水	人工海水	加熱なし	加熱	長期試験
緩衝材の材料	Na型ベントナイト	○	○	○	○ (R04)	○ (R04)
	Ca型ベントナイト	○ (H31,R02)	○ (H31,R02)	○ (H31,R02)	○ (R03,R04)	○ (R04)
	海水平衡ベントナイト	–	○ (R02)	○ (R02)	✕ (R05)	✕ (R05)

図 4-4- 85 遠心力載荷試験装置を用いた模型試験による研究例

② 遠心力場における相似則の成立性

(a) 遠心力模型試験における静的場の相似則（一般論）

遠心模型試験とは、遠心力を付与できる遠心力載荷装置に幾何学的に縮小（1/n）された小型模型を設置し、nG の遠心加速度が作用する場で小型模型の挙動を調べる「物理模型実験」の一つの手法である。このため化学的な挙動については原則、対象にしていない（物理式に換算できる現象についてはその限りではない)。

小型・大型、重力場・遠心力場など、ほかの物理模型実験と同様、その直接的な目的は対象で生じる相互作用（土木分野であれば、地盤あるいは地盤と構造物の相互作用など）を観測、解釈、解析することである。

物理模型実験において、重力場、遠心力場問わず、模型と実物とを関連づけるために相似則が用いられる。相似則は従来様々な角度から解説されてきた（例えば、Taylor、1995; 木村・日下部、1987; Craig et al.、1988)。

基本的に要約すると、

- ある現象に影響する独立なパラメータをすべてリストアップし、バッキンガムの Π 定理により関係する無次元量を求め、１つひとつの無次元量が縮尺模型と実物で共通な値を持つ様に相似率を決定する。
- 現象を表現する構成関係（物理法則の定式化や支配方程式）を模型と実物で共通に満足する様に相似率を決定する。

である（岡村ほか、2004)。すなわち、単なる幾何学的相似則のみならず、力学的相似則を満足することが求められる。ここで一般的な物理量に対して、バッキンガムの Π 定理から求まる静的条件における遠心力場の相似則を表 4-4-23 に示す。なお相似則については、Garnier et al.（2007）が 15 のカテゴリに分けて現状までの知見及び未解決の課題について詳細な整理をしている。詳細はそちらを参照されたい。

表 4-4- 23　静的場における遠心場の相似測

物理量		無次元数	相似条件	相似率 （模型/実物）
加速度	a		$\Pi_a =$	n
模型寸法	l		$\Pi_l =$	$1/n$
土密度	ρ		$\Pi_\rho =$	1
土粒子寸法	d	d/l	$\Pi_d =$	1
間隙比	e	e	$\Pi_e =$	1
飽和度	S_r	S_r	$\Pi_{Sr} =$	1
液体密度	ρ_l	ρ_l/ρ	$\Pi_{\rho l} = \Pi_\rho =$	1
表面張力	σ_t	$\sigma_t/\rho_l adl$	$\Pi_{\sigma t} = \Pi\rho\,\Pi_a\Pi_d\Pi_l =$	1
毛管上昇	h_c	$h_c\rho_l ad/\sigma_t$	$\Pi_{hc} = \Pi_{\sigma t}\Pi_\rho^{-1}\Pi_a^{-1}\Pi_d^{-1} =$	$1/n$
粘性	η	$\eta/(\rho_l d(al)^{1/2})$	$\Pi_\eta = \Pi_\rho\Pi_d\Pi_a^{1/2}\Pi_l^{1/2} =$	1
透水係数	k	$k\eta/(d^2\rho la)$	$\Pi_k = \Pi_d^2\Pi_\rho\Pi_a\Pi_\eta^{-1} =$	n
温度	T	T	$\Pi_T =$	1
土粒子摩擦角	φ	φ	$\Pi_\varphi =$	1
土粒子強度	σ_c	$\sigma_c/\rho al$	$\Pi_{\sigma c} = \Pi_\rho\Pi_a\Pi_l =$	1
粘着力	c	$c/\rho al$	$\Pi_c = \Pi_\rho\Pi_a\Pi_l =$	1
弾性率	E	$E/\rho al$	$\Pi_E = \Pi_\rho\Pi_a\Pi_l =$	1
変位	δ	δ	$\Pi_\delta =$	$1/n$
応力	σ	$\sigma/\rho al$	$\Pi_\sigma = \Pi_\rho\Pi_a\Pi_l =$	1
ひずみ	ε	ε	$\Pi_\varepsilon =$	1
時間（層流）	t_f	$t_f(k/l)$	$\Pi_{tf} = \Pi_l\Pi_k^{-1} =$	$1/n^2$
時間（クリープ）	t_c	t_c	$\Pi_{tc} =$	1

(b) 地層処分研究に適用する遠心力模型試験の意義

遠心力模型試験の大きな優位点として、

Ⅰ、実物に対する縮尺模型上の相似な位置において等価な自重応力状態を再現できること

Ⅱ、圧密やダルシー則を満たすような透水現象などの時間を加速して再現できる(現象の時間短縮の効果)ことである。

Ⅰに関して、遠心力模型試験では、縮尺 $1/n$ の模型に nG 場を作用させることにより、実物と 1：1 対応の応力レベルを模型に発生させることができる。すなわち、模型上におけるオーバーパックの自重応力や、岩盤・緩衝材などで生じる応力、水圧分布などの応力や圧力によって生じる変位や変形などの挙動において、実現象と相似性が成立する。1 G 場での小さな模型を使用する模型試験では自重応力が実物と大きく違うため、実際の現象をうまく再現することが難しい。また、実規模レベルの 1 G 場大型模型試験や原位置試験は、実施場所(広さや深度など)、実施期間、経済的な制約などによって必ずしも容易ではない。このような問題に関しては、実際に起こり得る物理現象を小型の模型で再現でき得る遠心力模型試験が有効である。

Ⅱの時間の加速とは、圧密現象や、ダルシー則が成立するような非常に緩やかな流れの場合において、模型上で地盤中を浸透する水の流れを加速し、結果としてそれによって生じる現象の時間を短縮して再現することである。簡単には、地盤中の水の浸透、圧密、膨潤などのゆっくりとした水の流れで現象が支配されるものについて、$1/n$ に縮尺した小型模型に nG の遠心加速度を与える。これにより距離が $1/n$、現象の速度(水頭差)が n 倍になるために、実現象の時間を $1/n^2$ に短縮する効果が得られる。一般的に、遠心力模型試験における成立性(現象の再現性)は、Modeling of prototype(実物スケールの試験と縮尺模型を用いた遠心力模型試験で同じ挙動を示すことの確認)や Modeling of models(模型縮尺と遠心加速度を変化させた挙動確認)の考え方に基づいて取り組まれている。

地層処分研究に関連して、中村・田中 (2004)では、遠心力模型試験におけるベントナイトの圧密、膨潤変形における相似則の成立性を検討するために、厚さや密度が異なる供試体を用いた圧密試験、膨潤変形試験を実施した。その結果、膨潤ひずみと t/H^2 (t：時間、H：層厚)の関係において供試体の寸法の影響がほとんど無く寸法則が成立すること、これといくつかの仮定から膨潤変形、圧密に関する時間の相似則が成立することを導いている。その上で、緩衝材(ベントナイト)とオーバーパック一組からなる処分場の縮尺模型を作製し、金属製容器に封入した上で、模型に注水、30、50、100G 場(1/30、1/50、1/100 サイズの模型)においてオーバーパックの鉛直変位を計測する遠心力模型試験を実施した。その結果、遠心力の大きさに依らず、オーバーパックの実物換算変位量がほぼ等しく、沈下傾向が変化する時間がほぼ同じで、沈下の傾向が似通った挙動であったことを示した。このことは、ベントナイトにおける透水、圧密、膨潤変形を通じて、オーバーパック変位挙動の Modeling of models の考え方が成立することを示している。

また、緩衝材中の試験用水の浸潤速度について、大気圧下での一次元浸潤速度取得試験(原子力環境整備促進・資金管理センター、2018。以下「1 G 場試験」)と $n = 20$、30、40 の遠心力模型試験（日本原子力研究開発機構・原子力環境整備促進・資金管理センター、2019、2020）の比較がされている。結果として $n = 20$、30、40 では遠心力模型試験の相似則が成立するが、1 G 場試験に比べて遠心力模型試験の浸潤速度は遅くなる傾向が見られた。遠心力模型試験では、模型上下方向の遠心加速度の不均一性や、材料(砂など)と模型の寸法効果などの試験上の制約があり、遠心力模型試験で 1 G 場の結果を完全に再現することは難しかったと考えられている（日本原子力研究開発機構・原子力環境整備促進・資金管理センター、2020)。ただし、1 G 場試験と遠心力模型試験における緩衝材中の試験用水の飽和度までの時間の違いを定量的に把握した上で遠心力模型試験を実施することなどにより実スケールでの緩衝材中の試験用水の浸潤速度を推定でき、オーバーパックの変位挙動についてもより確からしく把握できると考えられる。

③　試験装置

(a)　超長期遠心載荷岩盤実験装置

本事業で使用した遠心力載荷装置は、(一財)電力中央研究所所有の超長期遠心載荷岩盤実験装置(日鉄レールウェイテクノス社製)で、回転アームが 4 柱ビーム式(模型搭載側、カウンターウエイト側固定)、総質量約 80 t、最大有効半径 3.2 m の装置であり、直径約 10 m のコンクリートピット内に格納している(図 4-4-86)(Nishimoto et al.、2016)。本装置で付与できる最大遠心加速度は、静的条件で 100 G(167.2 rpm)である。模型を搭載するプラットホームの面積は、2.64 m^2(1.60 m×1.65 m)と同規模の遠心力載荷装置と比較して非常に広く、大型模型が搭載可能である。プラットホームには最大で 150 G・t(100 G 時に最大 1.5 t)積載でき、任意の遠心加速度で着座できる油圧着座方式を採用している。バランス機構は、長期間の運転を考慮し複雑な制御を行わない手動カウンターバランス方式を採用している。中心回転軸には動力用スリップリング(4 極、AC200 V/60 A 及び 2 極、AC100 V/60 A)、制御用スリップリング(17 極)、通信用無線 LAN 機器(2 セット)、油圧・水圧・空圧を付与できるロータリージョイント(各 2 ポート)を設置ており、機外から回転体内部へ電力や油圧などを供給できる。また、圧力容器の応力制御のために、回転軸付近のアーム上面に圧力発生装置(送水ポンプ)を 8 台搭載している。圧力発生装置の制御及び実験データは無線 LAN を通じて計測室内の PC で制御・保存する。

本装置の最大の特徴は、最長 6 ヶ月間連続運転ができる仕様である(既存の同規模の遠心力載荷装置は通常数時間～数十時間程度)。また、長期運転を行うことから、装置を格納しているコンクリートピット内は空気抵抗による温度上昇を防止するために大型空調設備による温度一定制御が可能である。加えて本体装置の瞬停対策用電源装置も備えている。本事業では遠心力載荷装置のプラットホームに、模擬廃棄体・オーバーパック・緩衝材からなる模型を封入した試験容器、注水用ポンプ、各種センサー取得用のデータロガーを設置した。

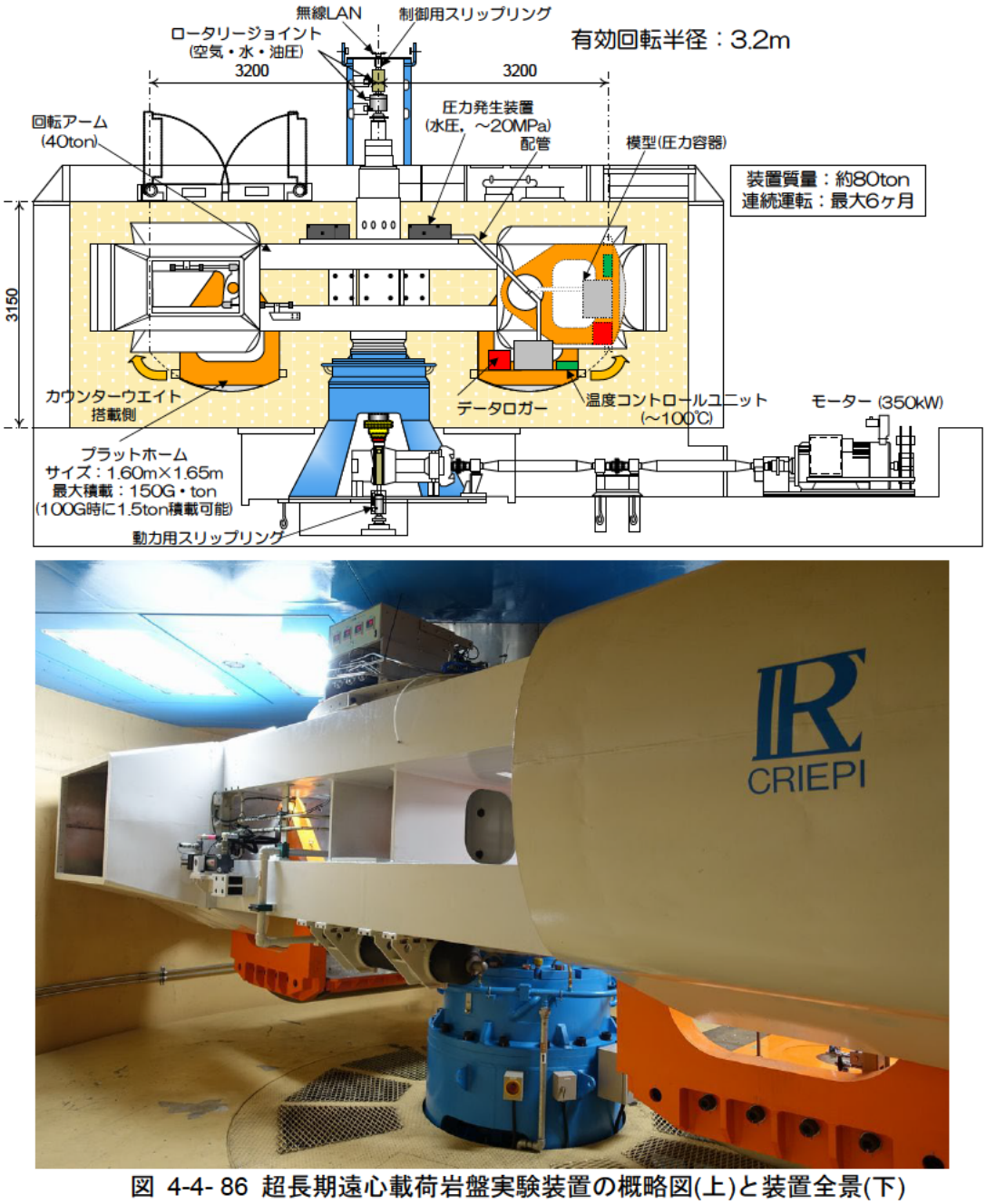


図 4-4- 86 超長期遠心載荷岩盤実験装置の概略図(上)と装置全景(下)

(b) 想定した施設と模型

包括的技術報告(原子力発電環境整備機構、2021)のオーバーパック自重沈下解析では、不確実性に配慮した十分な裕度の確保、及びこれまでの技術開発を活用することとして第2次取りまとめ(核燃料サイクル開発機構、1999)を参考に緩衝材の厚さを 700 mm と設定した。本事業では縦置き処分を対象とし、オーバーパック周囲の緩衝材の厚さは 700 mm、緩衝材上部の坑道までに設置される埋戻し材(緩衝材と同じ材料)も一体と考え、緩衝材と呼称する。本年度はより長期的なオーバーパックと緩衝材の挙動を把握するため、実寸法の 1/50 のサイズの模型(図 4-4-87)を新たに設計し、作製した。模型は直径 44.4 mm、高さ 82.6 mm である。実際には緩衝材の挙動は岩盤の変形も考慮する必要があるが、今回は緩衝材とオーバーパックの鉛直挙動のみに着目し、緩衝材の周辺が変形しない金属の試験容器に模型を封入した。

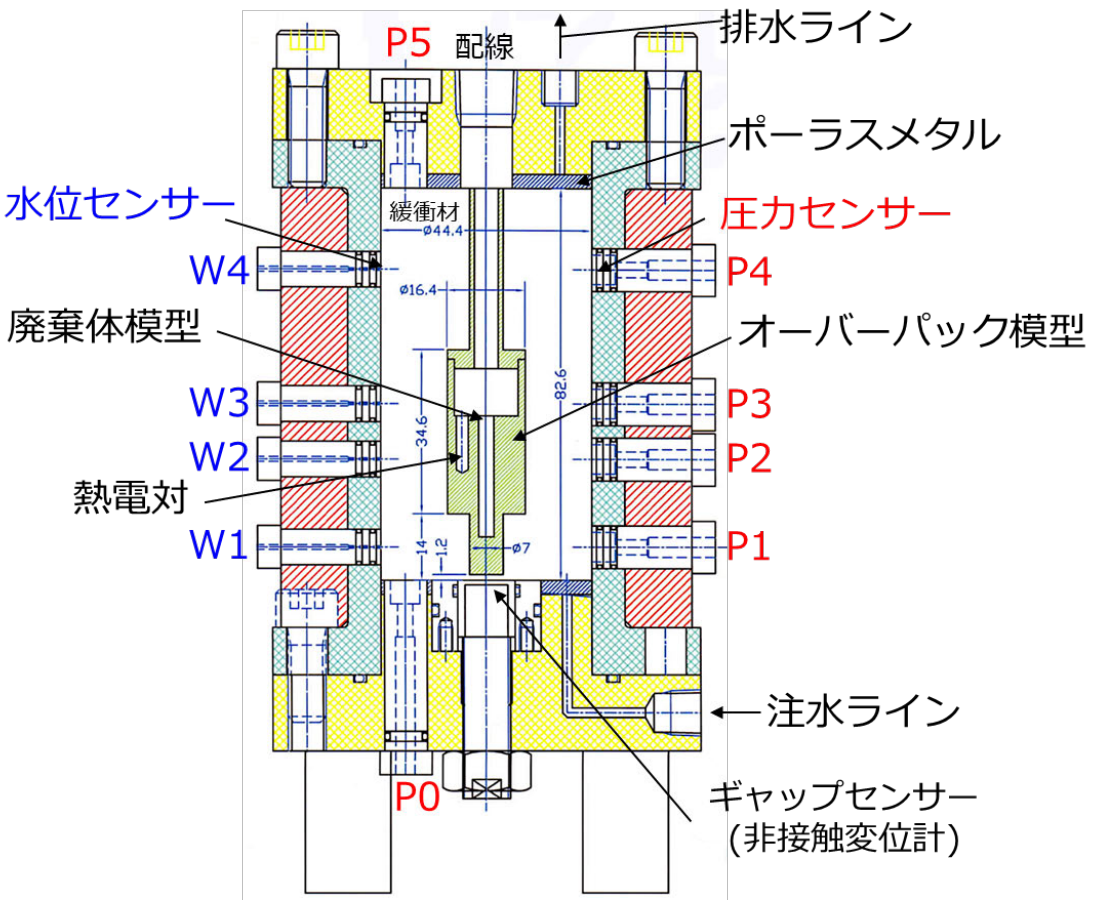


図 4-4- 87 試験容器の概略、及び模型、センサー配置

(c) 試験容器及びセンサー

試験容器の概要は図 4-4-87 のとおりである。容器は金属製であり、封入された緩衝材のバルクとしての周変位及び鉛直変位(体積)は拘束される。模型(緩衝材)底面全面からの注水、頂部全面への排水のために底面と頂部にポーラスメタルを設置した。なお、今回は緩衝材の膨潤変形挙動とオーバーパックの変位挙動の直接的な関係を得るために、緩衝材下部から注水した。注水に用いた試験装置は図 4-4-88 に示す。

試験容器には計 6 個の圧力計を設置した。圧力計及び水位センサーの設置箇所は令和 3 年度まで用いた 1/30 模型と、縮尺倍率を考慮した高さが同じになる位置に設置した。。圧力計の名称は試験容器下部に設置したものから P0～P5 とした。水位センサーの名称は試験容器下部に設置したものから W1～W4 とした。ポーラスメタルには圧力計設置用の穴を設け、底面及び頂部の圧力計は模型の緩衝材と接している。なお、圧力計には試験容器内の緩衝材の土圧や間隙水圧、膨潤圧といった複合的な圧力(応力)が作用すると考えられるため、本事業では圧力計で取得した値を緩衝材の全応力とする。水位センサーは 2 つの電極と抵抗で構成され、片側から電流を印加し、もう一方の電極で電圧計測する 2 極法を適用した。供試体内の水分量が変化すると電流量(電気伝導度)が変化するため、計測する電圧と抵抗から飽和度の経時変化を取得できる。入力に用いたファンクションジェネレーターの設定上、出力電圧が 3 V に達すると緩衝材がほぼ飽和した状態とみなせる。一方、2 極法ではノイズ成分を比較的多く計測することや、電極と材料との接触状態が変化した場合、同じ飽和度でも出力値が異なってくる特性を持つため、正確な飽和度への正確な変換が困難であった。このため結果では、相対的な飽和度の違いを示す出力電圧値をそのまま示した。

試験容器底部には非接触変位計を設置し、ターゲットバー(模擬オーバーパックと剛結)との距離の変化からオーバーパック変位(浮上と沈下)量を測定した。非接触変位計は渦電流式の変位センサーであり、センサー内部のコイルに高周波磁界を発生させ、測定対象物との距離に応じたインピーダンスによる電圧変化から距離を取得する方法である。本試験ではあらかじめ、試験に使用するターゲットを用いて非接触変位計をキャリブレーションした。非接触変位計では最大 2.5 mm (実物換算距離 75 mm)の浮上まで測定可能である。

廃棄体の発熱を想定し、オーバーパックの中にはヒーターを設置した。ヒーターの配線は試験容器の上部から取り出せる設計となっている。

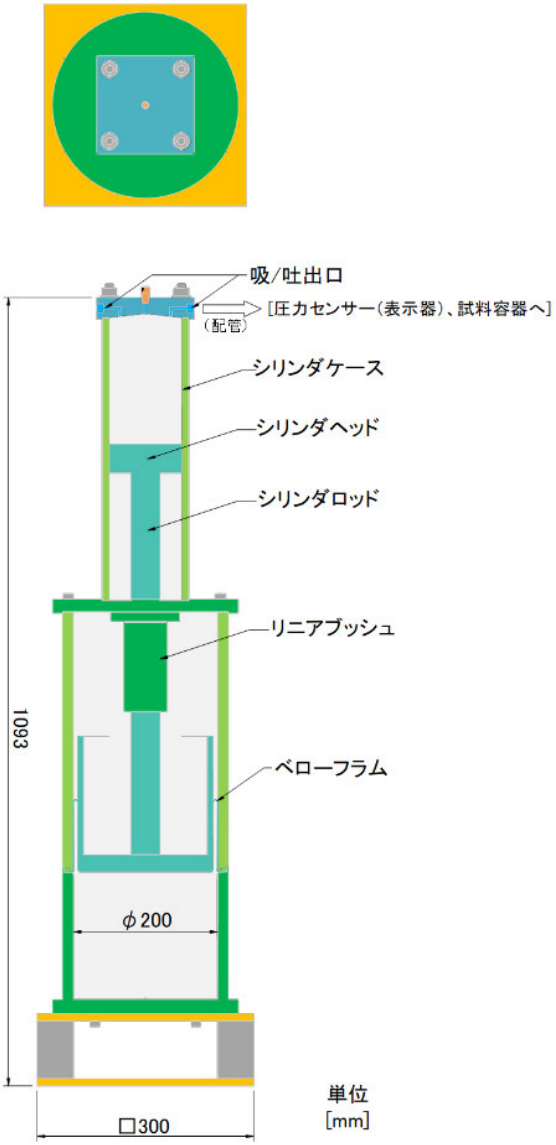


図 4-4- 88 注水ポンプの概略

(d) X 線 CT 装置

遠心力模型試験後は、試験容器を遠心力載荷試験装置から取り外し、試験容器ごと X 線 CT 画像撮影を行った。X 線 CT 画像撮影は、(一財)電力中央研究所　サステナブルシステム研究本部所有の超高精細 CT スキャナ(キヤノンメディカルシステムズ社製、Aquilion Precision：TSX-304A/2A)を使用し CT 画像を取得した(図 4-4-89)。マルチスライスヘリカル CT スキャナは、寝台が移動し X 線照射源と検出器が対象物の周囲を螺旋状に回転しデータを取得する装置である。Aquilion Precision は同時に 160 列の断面データを収集でき、空間分解能は最小で 0.15 mm である。ガントリー開口径は 720 mm で最大撮影領域径は 500 mm、最大積載可能質量は 300 kg、撮影時の管電圧は 135 keV である。撮影時間は撮影対象の大きさにもよるが数秒程度である。

図 4-4- 89 医療用マルチスライスヘリカル CT スキャナ

④　模型の材料(試料)

(a)　緩衝材

本事業では、緩衝材の材料として Ca 型ベントナイトのクニボンド(クニミネ工業)を使用した。試料の基礎物性として、モンモリロナイト含有率は JIS Z 2451 によりメチレンブルー吸着量を測定し算出した。クニボンドのメチレンブルー吸着量は 122 mmol/100 g であり、クニボンド中に含まれるモンモリロナイトのメチレンブルー吸着量を 140 mmol/100 g と仮定して(渡邊・横山、2020)有効モンモリロナイト密度を算出した。

(b)　オーバーパック

緩衝材中に設置する模擬オーバーパックの形状は直径 16.4 mm、高さ 34.6 mm であり、非接触変位計のターゲットとなる金属棒(SUS316L、模擬オーバーパックと同一素材)、ヒーターラインの取り出し口と一体となっている。模擬オーバーパックの密度は、実物相当のガラス固化体を含めた全密度に合わせ、模擬オーバーパックの質量を調整し 6.35 Mg/m^3 とした。

(c)　試験容器

平成 31 年度は鋼製(SUS316L)の試験容器を使用したが、試験後の X 線 CT 撮影の際、試験容器の透過性が低いために模型を試験容器から取り出して撮影する必要があった。試験容器から模型を取り出だす際の除荷の影響や取り出し作業において緩衝材に亀裂が生じたため、令和 2 年度以降は試験容器に模型が封入されたまま X 線 CT 撮影が行えるよう、鋼製の試験容器よりも X 線の透過性が高いアルミ製の試験容器を作製して使用した。本年度も 1/50 サイズのアルミ製の試験容器を作製して使用した。

⑤　試験条件及び試験手順

(a)　遠心力模型試験の条件

遠心力模型試験では再冠水過程のうち約 273 年間を相似則により模擬する、40 日間の試験を行った。試験手順は、遠心力模型試験、遠心力模型試験後の模型の X 線 CT 画像撮影、緩衝材の密度測定、浸出陽イオン量測定とした。

遠心力模型試験は、緩衝材の材料の異なる 2 条件、廃棄体模型の温度条件を変えた 2 条件の計 4 条件とし、それ以外の条件は同一とした(表 4-4-24)。緩衝材の材料は Na 型ベントナイトであるクニゲル V1 と、Ca 型ベントナイトであるクニボンドを使用した。廃棄体模型の温度条件は加熱なしと 90 ℃とした。なお、90 ℃条件においても試験容器の外側は遠心力載荷試験装置の室温で一定に保たれているため、模擬廃棄体から試験容器外側にかけて温度勾配が生じることとなる。緩衝材の密度条件に関しては、平成 31 年度、令和 2 年度、令和 3 年度の模型試験、及び要素試験と同様に有効モンモリロナイト密度を 1.0 Mg/m^3 とした。注水圧は 1.0 MPa であり、試験容器下部からポーラスメタルを通して試験用水を注水した。試験用水は試験条件、品質の安定性の観点から人工海水(マリンアート SF-1、大阪薬研)を使用した。

表 4-4- 24 遠心力模型試験で用いた緩衝材の材料と条件

緩衝材に使用した試料	有効モンモリロナイト密度(Mg/m^3)	注入水	注水圧(MPa)	排水/非排水条件	加熱	*n*	試験期間(日)	実物換算期間(年)
Na-8 クニゲルV1+砂混合土	1.00	人工海水	1.0	排水	**なし**	50	40	273
Na-9T クニゲルV1+砂混合土	1.00	人工海水	1.0	排水	**90℃**	50	40	273
Ca-7 クニボンド	1.00	人工海水	1.0	排水	**なし**	50	40	273
Ca-8T クニボンド	1.00	人工海水	1.0	排水	**90℃**	50	40	273

(b) 模型の作製手順

模型の作製及び遠心力載荷試験装置に設置するまでの状況を図 4-4-90 に示す。図の a は緩衝材中のオーバーパック模型を示している。熱源となるヒーター(廃棄体模型)及び温度測定用の熱電対をオーバーパック模型内に封入した。オーバーパック模型中の上部の空間は樹脂で埋めるとともに、オーバーパック全体の密度を調整した。緩衝材は、遠心力載荷装置に設置する試験容器内に所定の量の緩衝材の材料を撒き出し、試験容器内で緩衝材を直接締め固めた(図 4-4-90b、c)。締固めは 10 層に分けて行った。最後の上端面部の締固めでは、上端面より上に補助コーンをつけた上で緩衝材の材料を撒き出し締固めを行い、可能な限り模型上端面と試験容器上蓋の間にも隙間が生じないよう作製した。したがって本事業での試験の初期条件として緩衝材と試験容器、及び緩衝材とオーバーパックの間に隙間はほぼ存在しない。試験容器側面に設置するセンサー類は締固め時にはダミープラグを仮設置し、締固め後にダミープラグを取り外してから計測用センサー類を設置した(図 4-4-90b)。センサー類を設置後、遠心力載荷試験装置のプラットホーム上に試験容器を設置した(図 4-4-90d)。すべての測定機器などを設置したプラットホーム上の様子は図 4-4-91 のとおりである。

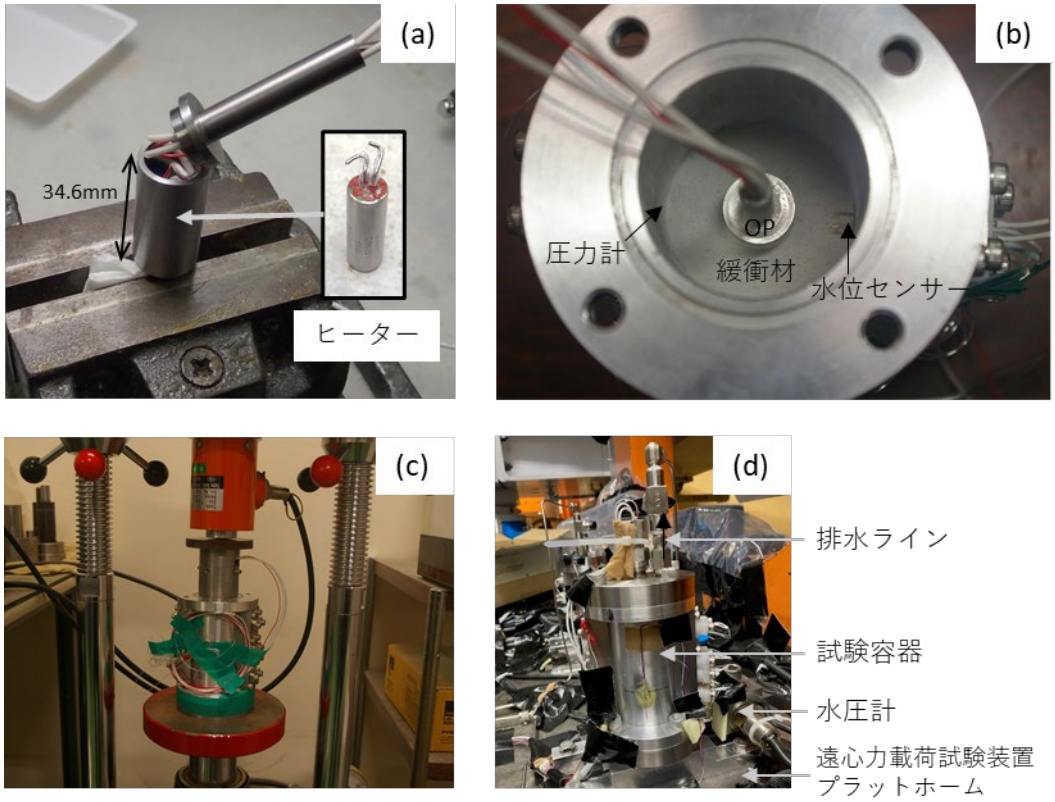


図 4-4- 90 模型作製の様子

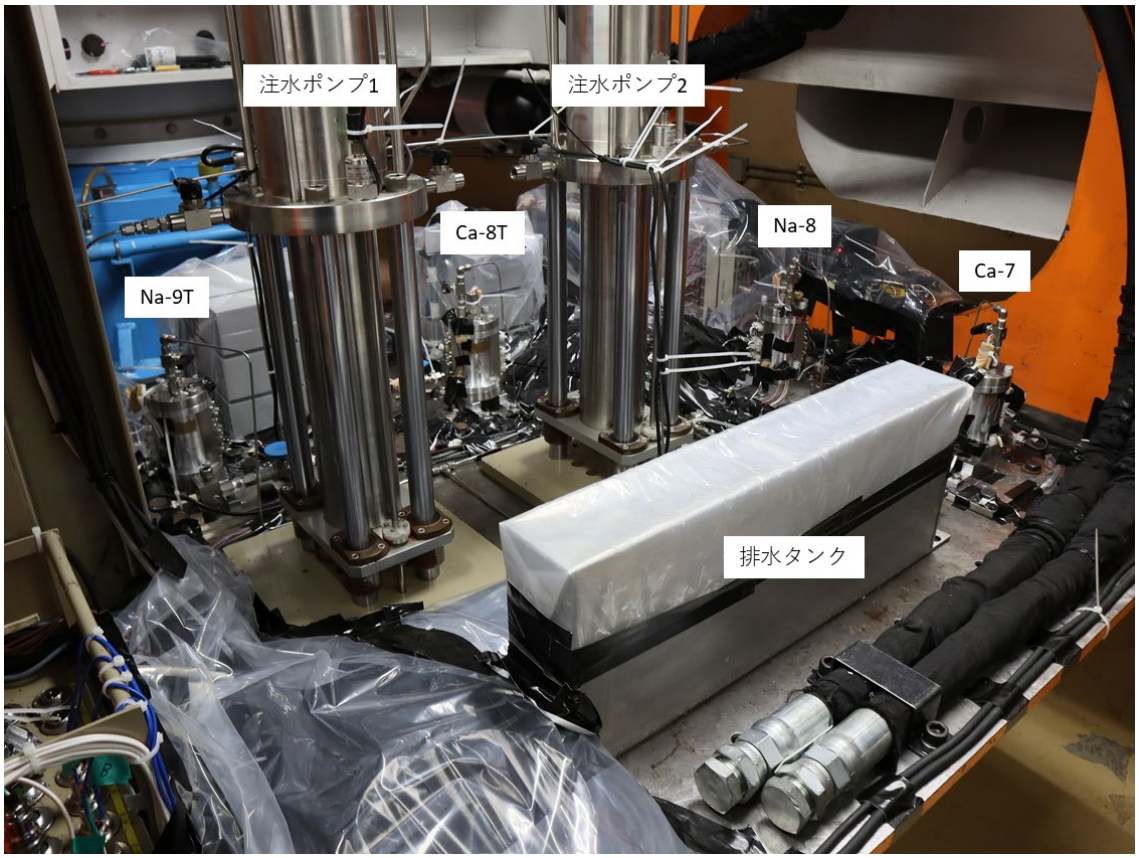


図 4-4- 91 遠心力載荷試験装置プラットホーム上の様子

(c) 遠心力模型試験の手順

遠心力載荷装置に試験容器及び注水用ポンプを設置して装置の運転を開始し、遠心加速度が 50 G で安定した後に注水用ポンプと試験容器がつながるバルブを遠隔操作で開け、試験用水の注水を開始した。試験の開始時間は注水開始時とし、圧力計の値は注水開始直前の値を 0 MPa とした。試験中は遠隔で制御系及びセンサー類の挙動を監視しつつ、40 日間(実物換算 273 年間分)連続で遠心力を載荷した。

(d) X 線 CT 画像撮影

遠心力模型試験後は試験容器をプラットホームから取り外した。また、X 線 CT 画像撮影時には、金属製品が緩衝材中に明瞭な偽像を発生する原因となるため、試験容器側方に接続していた圧力計及び水位センサーを取り外し、密度の低い樹脂製のダミープラグを設置し(図 4-4-92)た。ダミープラグは各種センサーを設置していた試験容器の穴から、圧力開放により緩衝材が突出することを防ぐ役割がある。試験容器にダミープラグを設置後、速やかに X 線 CT 画像撮影(図 4-4-89)を行った。模型全体を撮影するため、三次元画像の視野サイズは 50 mm×50 mm×90 mm とした。撮影時の管電圧は 135 keV である。取得した画像は供試体水平方向のマトリクスサイズは 1024×1024 pixel、鉛直方向 360 枚の断面画像で構成される。また、CT 撮影時には温度や湿度が若干 CT 値に影響するため、模型撮影後に密度が既知のキャリブレーション用試料(ポリエチレン、アクリル、ポリ塩化ビニリデン、フッ素樹脂、アルミニウム、ステンレス)を撮影した(図 4-4-93)。

図 4-4- 92 試験容器ダミープラグ設置の様子

図 4-4- 93 キャリブレーション試料の CT 画像撮影の様子(令和 3 年度成果報告書より引用)

(e) 緩衝材の飽和度分布の取得

X 線 CT 画像撮影後、試験容器から緩衝材とオーバーパック全体を抜き出した。さらに緩衝材は高さごとに輪切りで 11 分割し、さらに輪切り試料の半分の試料から含水比を測定した。残りの半分の試料は浸出陽イオン測定用に保存した。含水比測定用に採取した試料それぞれノギスで高さを測定して体積を算出し、JGS 0122 に従い模型試験後の湿潤密度、乾燥質量、含水比w(%)を求めた。なお、試験容器から取り出した後にノギスで計測した供試体の高さは試験容器内部の高さより大きい値となっていたため、試験容器から取り出した段階で緩衝材が膨潤変形したと考えられる。そこで緩衝材の体積は、試験容器から取り出した際に緩衝材が鉛直方向に均一に膨潤変形したとみなして、全体のひずみから補正した高さを用いて算出した。また、乾燥質量と体積から模型試験後の乾燥密度ρ_d(Mg/m^3)を求めた。なお、人工海水条件では塩の成分が含まれるが、模型試験後の供試体の高さごとの間隙流体の塩の量を把握することは困難であるため、塩の成分は考慮せず間隙流体の密度ρ_wは 1.0 Mg/m^3 と仮定して飽和度S_r(%)を求めた。

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100(\%) = \frac{w}{\rho_w}\frac{m_s}{V_v} = \frac{w}{\rho_w}\frac{\rho_{solid}\rho_d}{(\rho_{solid} - \rho_d)} \quad (4\text{-}4\text{-}9)$$

ρ_{solid}は緩衝材の土粒子密度(Mg/m^3)、V_vは空隙体積(m^3)、V_wは空隙中の試験用水の体積(m^3)、m_sは緩衝材の質量(Mg)である。この手順で求めた飽和度は、高さごとに切り分けた緩衝材の水平方向の平均的な値となる。

(a) 浸出陽イオン量測定

遠心力模型試験後の試料に対し、浸出陽イオン量の測定を行った。供試体を高さ方向に下部、中部、上部の 3 箇所から試料を採取し、それぞれアルコール洗浄の後に SFSA 改良法(佐治ほか、2005)により浸出陽イオン量(Na、K、Ca、Mg)を測定する。本年度は令和 3 年度に行った遠心力模型試験後の試料に対して浸出陽イオン量を測定した。

⑥　試験結果

表 4-4-24 に示した 4 つ条件で遠心力模型試験を実施し、計測から得られた、水位センサー出力電圧、緩衝材応力、実物換算オーバーパック鉛直変位の結果を示す。図 4-4-94 には模擬廃棄体近傍の熱電対(図 4-3-38)で取得した温度変化を示す。90 ℃の加熱制御を行った Na-9T 及び Ca-8T では 90 ℃前後でぶれはあるものの、40 日間の試験で大きな温度変化はなく制御できていたことがわかる。加熱なし条件である Na-8 及び Ca-7 では、温度制御されている遠心力載荷試験室内の温度とほぼ同等な値で推移した。図 4-4-95 の(a)～(c)は加熱なしの Na-8、(d)～(f)は模擬廃棄体を 90 ℃で制御した Na-9T の結果である。また、図 4-4-96 の(a)～(c)は加熱なしの Ca-7、(d)～(f)は模擬廃棄体を 90 ℃で制御した Ca-8T の結果である。図の横軸の下側には試験時間から換算した実物換算時間(年、year)を示している。図中の、P0～P5 及び W1～W4 は試験容器に設置されたセンサーの名称であり、試験容器下部から上に向かい順番に設置されている(図 4-4-87)。オーバーパック変位量は浮上を正、沈下を負とした。

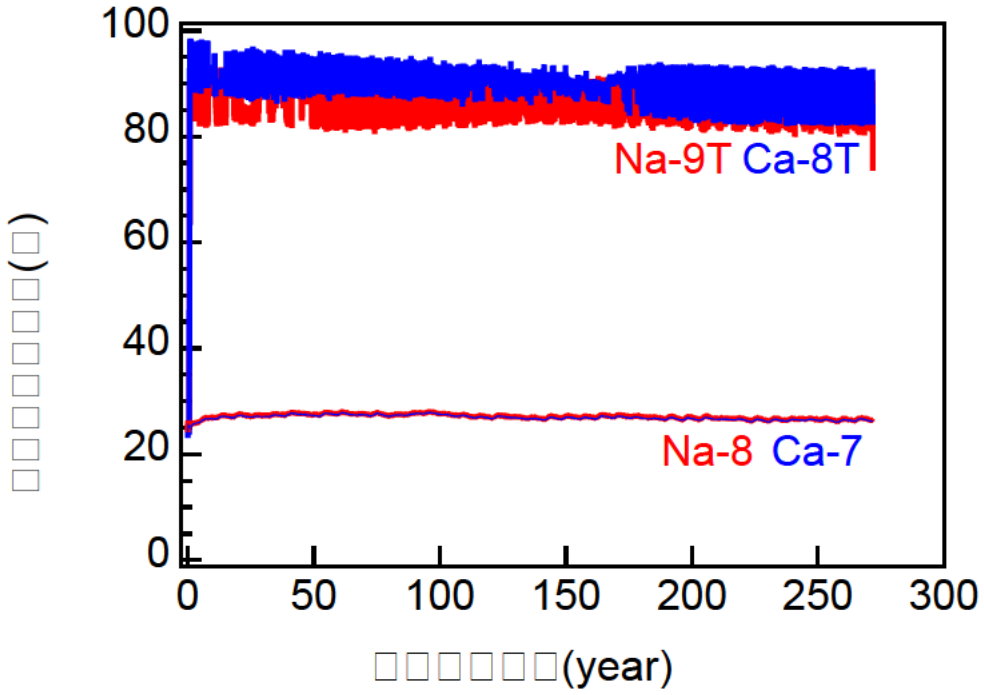


図 4-4- 94 4 条件の温度変化

(a) 遠心力模型試験結果

(i) Na-8 (クニゲル V1+砂混合土、加熱なし条件)の試験結果

水位センサー(図 4-4-95a)は下部の W1 から上方に向かって概ね順に出力電圧が上昇し、約 50 年で試験用水が上部まで浸潤する様子が確認できた。緩衝材応力(図 4-4-95b)も底面から順番にセンサーが反応し、緩衝材応力の値が上昇していることがわかる。試験終了までに P0、P1 は 1 MPa に近い値まで上昇した。なお、P4 の圧力計は不具合で値を取得できなかったため図中には示していない。オーバーパックの変位(図 4-4-95c)は約 50 年までに 18 mm 浮上し、その後安定した挙動となった。

(ii) Na-9T (クニゲル V1+砂混合土、90 ℃条件)の試験結果

水位センサー(図 4-4-95d)は下部の W1 から上方に向かって概ね順に出力電圧が上昇し、約 100 年で試験用水が上部まで浸潤する様子が確認できた。緩衝材応力(図 4-4-95e)は全体的に安定しない挙動を示した。最初に P0 が 1 MPa まで上昇しているのは、1 MPa の圧力の試験用水が注入されて圧力計が反応したものと思われる。緩衝材応力は時間変化とともに複雑な挙動を示しているが、概ね下部の緩衝材応力が上昇し、上部の緩衝材応力が低い推移を示した。また、100 年後あたりからそれぞれの緩衝材応力の値に振れ幅が生じていたが、原因はわかっていない。オーバーパック(図 4-4-95f)は最初期に 3 mm 浮上したが、その後 75 年後まで沈下し、100 年後までに再び 2 mm 程度上昇して安定した挙動となった。

(iii) Ca-7 (クニボンド、加熱なし条件)の試験結果

水位センサー(図 4-4-96a)は下部の W1 から上方に向かって出力電圧が上昇し、試験終了時の 273 年で W4 もほぼ安定となる値まで上昇し、試験用水が上部まで浸潤する様子が確認できた。緩衝材応力(図 4-4-96b)は試験開始時に P0 が 1.6 MPa 付近まで上昇し、その後減少に転じた。試験終了時の 273 年後では概ね下部の緩衝材応力が上昇し、上部の緩衝材応力が低い推移を示した。オーバーパック(図 4-4-96c)は 50 年までに一度浮上、沈下した後に浮上し続ける結果であった。273 年までに初期位置から約 9 mm 浮上した。

(iv) Ca-8T (クニボンド、90 ℃条件)の試験結果

水位センサー(図 4-4-96d)は下部の W1 から上方に向かって出力電圧が上昇し、試験終了時の 273 年で W4 もほぼ安定となる値まで上昇し、試験用水が上部まで浸潤する様子が確認できた。水位センサーの反応は全体的に Ca-7 よりも早い傾向であった。緩衝材応力(図 4-4-96e)は試験開始時に P0 が 1.1 MPa まで上昇し、その後減少に転じた。全体的に 50 年～200 年付近まで安定した挙動であったが、200 年を過ぎてから緩衝材応力が上昇する傾向が見られた。オーバーパック(図 4-4-96f)は初期に 3 mm まで浮上、沈下した後

に、40 年で浮上傾向に転じた。ただし、200 年付近でも一度沈下・浮上するなど複雑な変位挙動を示した。

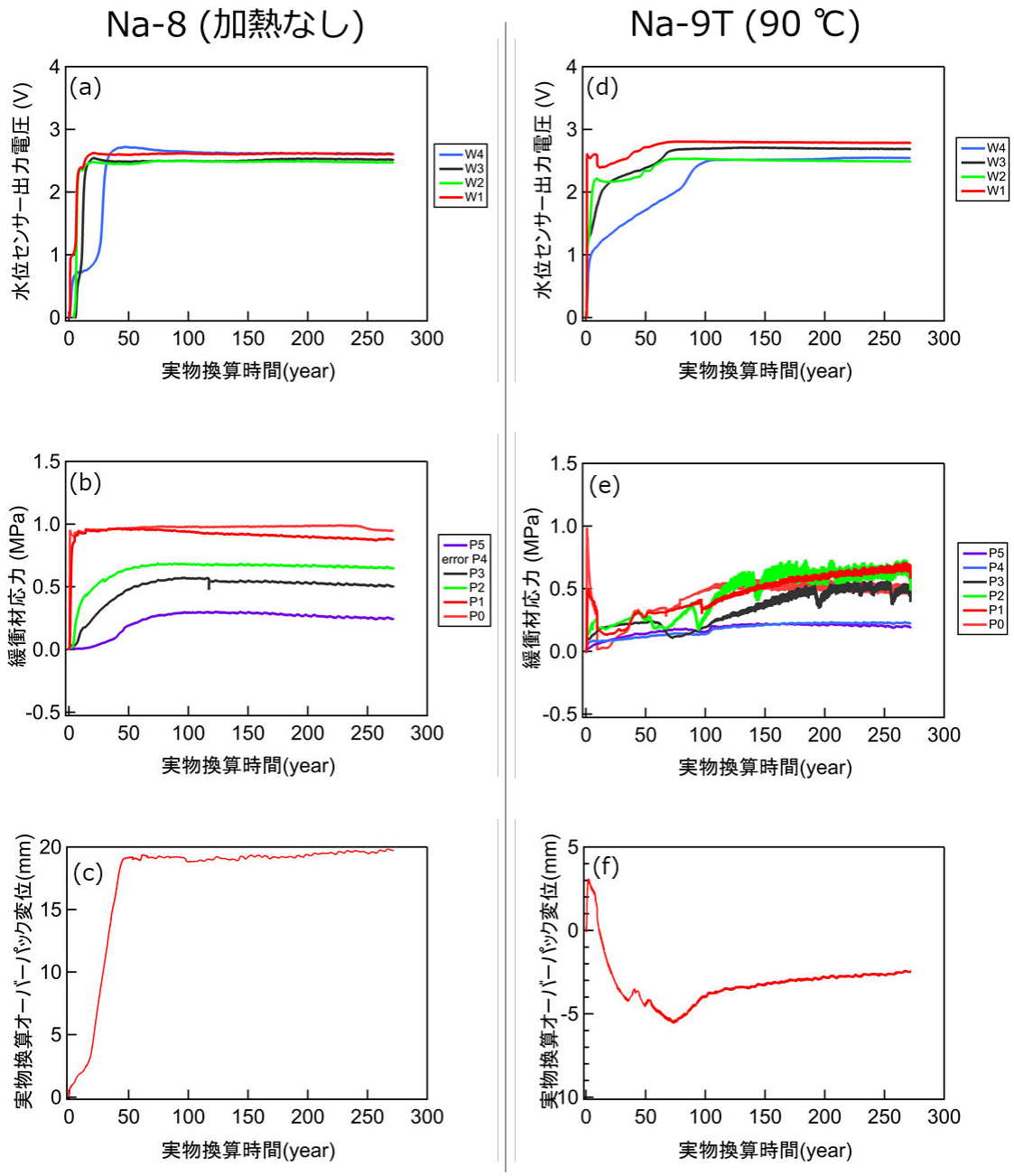


図 4-4- 95 Na-8 条件(a)～(c)、Na-9T 条件(d)～(f)の遠心力模型試験結果

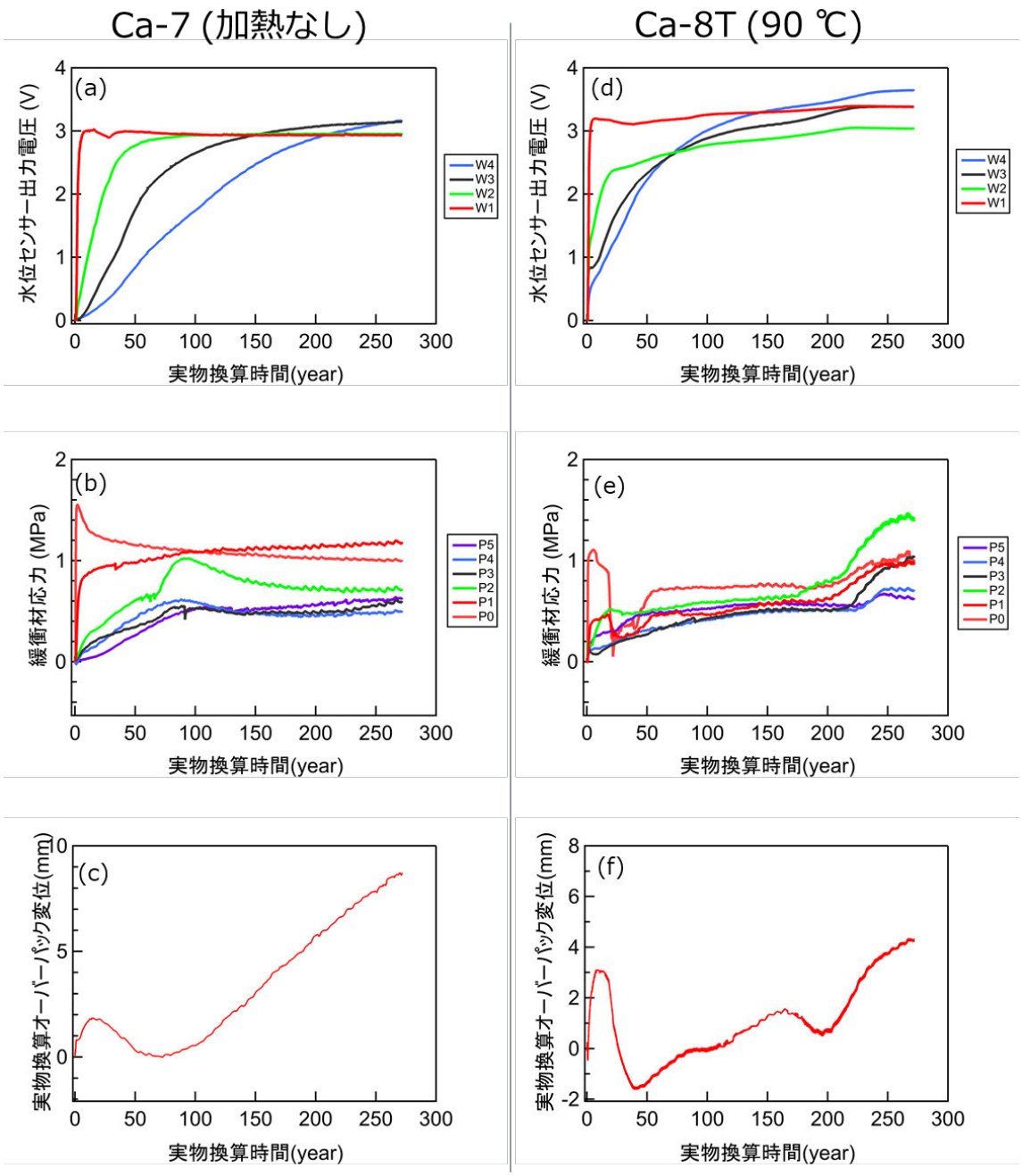


図 4-4- 96 Ca-7(a)～(c)、Ca-8T(d)～(f)の遠心力模型試験結果

(b) CT 画像解析結果

(i) キャリブレーション用試料の CT 画像解析結果

図 4-4-97 には撮影した CT 画像と、中心部を通る測線の CT 値を示す。それぞれの試料の物理密度は既知であり、CT 画像から試料中心部 10 mm の範囲における CT 値の平均値と標準偏差を求めた(表 4-4-25)。なお、CT 値は水(1.0 Mg/m^3)を 0 HU、空気を-1024 HU と設定しているため、-1024 HU として扱う。CT 画像は基本的には撮影対象の密度が高いほど白色となり、密度が低いほど黒色を示す。各試料の CT 値は、密度差に大きな変化のない試料中心部 20～22 mm を抽出し、平均値及び引数を母集団の標本とみなす標準偏差を算出した。

標準偏差については、ステンレス以外の試料に大きな違いは見られなかった。一方でステンレスに関しては標準偏差が比較的大きく、図 4-4-97 の CT 値も場所により大きく異なっていた。これは、物理密度が高い金属は X 線の減衰の影響が大きいことと、CT 画像撮影時に試料が若干斜め向きであったことに起因すると考えられる。次に、平均 CT 値と物理密度のグラフを図 4-4-98 に示す。今年度では令和 3 年度と同様に、緩衝材の密度とは大きく異る高い密度のステンレスを除外した試料の結果から、物理密度と CT 値の線形近似を行った(図 4-3-46、赤線)。結果として傾きは 1068.9、切片は-1106.5、R^2 値は 0.96 と算出された。

(ii) 遠心力模型試験後の CT 画像解析結果

図 4-4-99 に Na-9T の CT 画像の例を示す。図 4-4-99a は試験容器を含めた全体の三次元画像である。3 方向の断面のうち、軸方向を Axial 断面、中央部を切ったときに試験容器に水位センサーや圧力計を設置する穴がある方向を Coronal 断面、センサー類のない方向を Sagittal 断面とする。Axial 断面及び Coronal 断面を見ると、センサー類を設置するための穴付近の緩衝材の CT 値が周囲と異なり、ノイズが大きいことがわかる。これはオーバーパック及び試験容器のような高い密度の物質と、周辺の密度が極端に異なるために生じるメタルアーチファクト(偽像)である。ここではメタルアーチファクトの影響の少ない Sagittal 断面を切り出して CT 値分布を求める。

Na-8、Na-9T、Ca-7、Ca-8T それぞれの遠心力模型試験後の CT 画像の Sagittal 断面の画像を図 4-4-100、図 4-4-101、図 4-4-102、図 4-4-103 に示す。測線 A-A'は鉛直方向、測線 B-B'から E-E'はそれぞれ水位センサー及び圧力センサー設置位置の高さに相当する。CT 値分布のオーバーパック(金属)の近傍は緩衝材の CT 値が急激に下がる箇所があるが、模型解体時に緩衝材とオーバーパックの間に隙間は見られなかったことから、緩衝材とオーバーパックの密度差が大きいために生じたと考えられる。

本年度の試験結果では、緩衝材部の CT 値が全体的に大きく変わらず、緩衝材上部まで試験用水が通水していたと考えられる。また、令和 3 年度のクニボンドを緩衝材の材料とした廃棄体模型温度 90 ℃の条件では、実物換算時間 105 年の段階ではオーバーパック周

囲の緩衝材が不飽和の領域が観察された。本年度の模型試験結果では、90 ℃条件である Na-9T(図 4-4-101)、Ca-8T(図 4-4-103)いずれもオーバーパック周囲の緩衝材部の CT 値が明瞭に小さいといった結果は見られず、オーバーパック周囲の緩衝材の不飽和領域は観察されなかった。

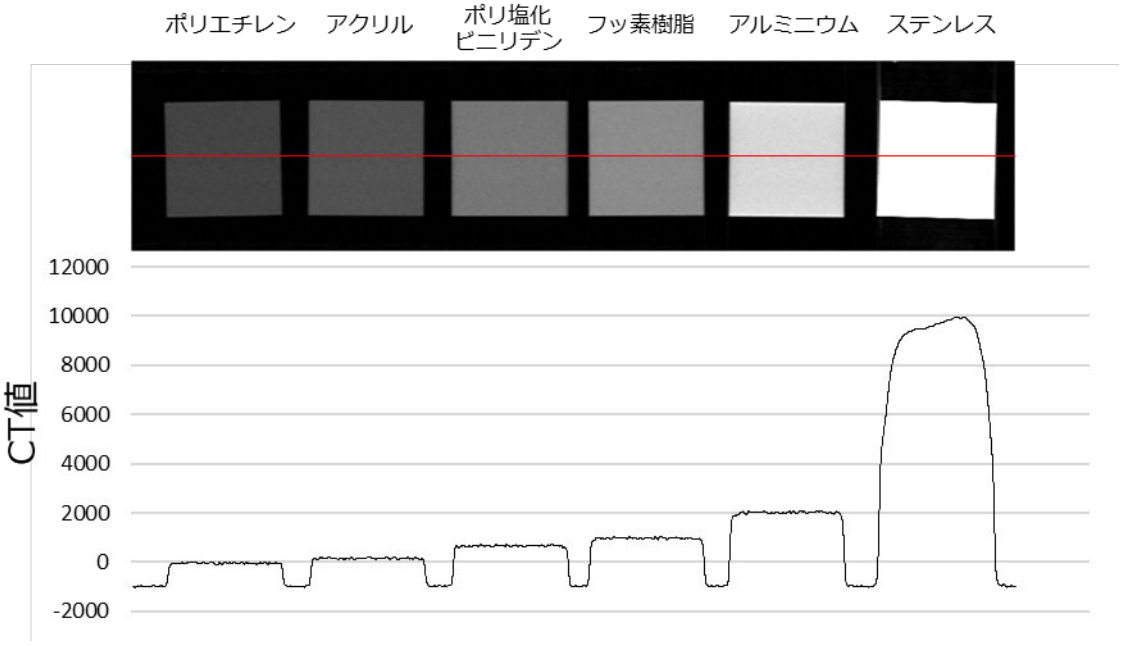


図 4-4- 97 キャリブレーション用試料の CT 画像と測線(赤線)の CT 値

表 4-4- 25 キャリブレーション用試料の物理密度と平均値、標準偏差

サンプル	物理密度 (Mg/m^3)	平均CT値 (HU)	CT値 標準偏差
空気	(0.00)	(-1024)	-
ポリエチレン	0.96	-44	24
アクリル	1.19	145	26
ポリ塩化ビニリデン	1.81	662	25
フッ素樹脂	2.17	970	24
アルミニウム	2.63	2016	35
ステンレス	7.91	9612	257

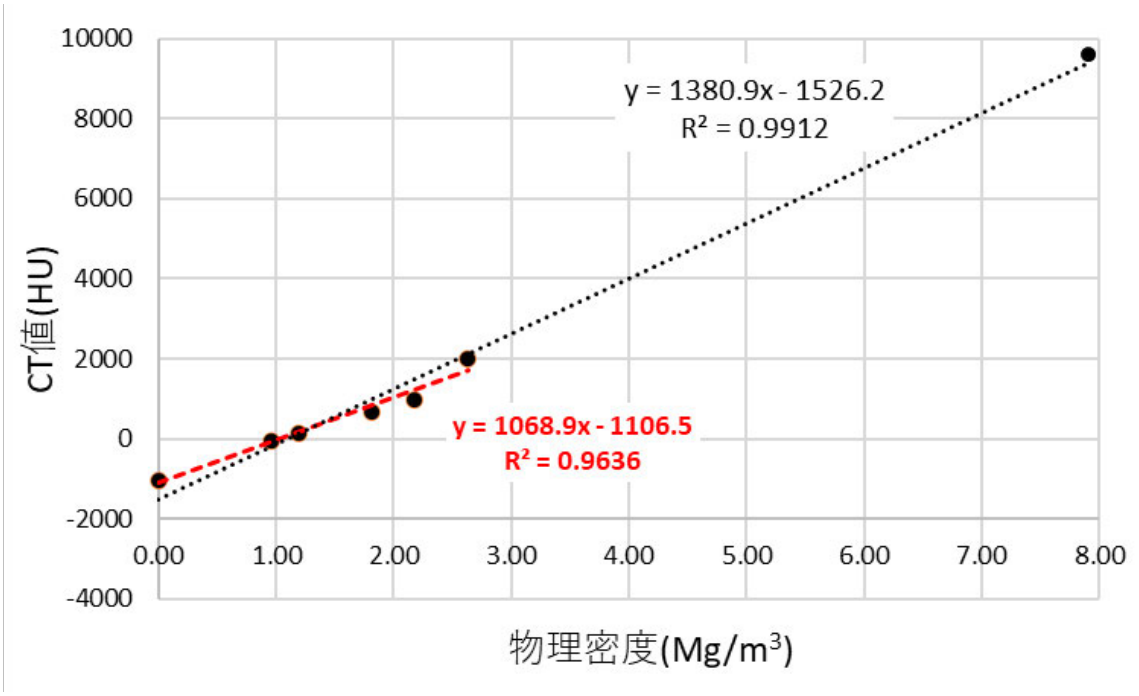


図 4-4- 98 キャリブレーション用試料の物理密度と CT 値の関係

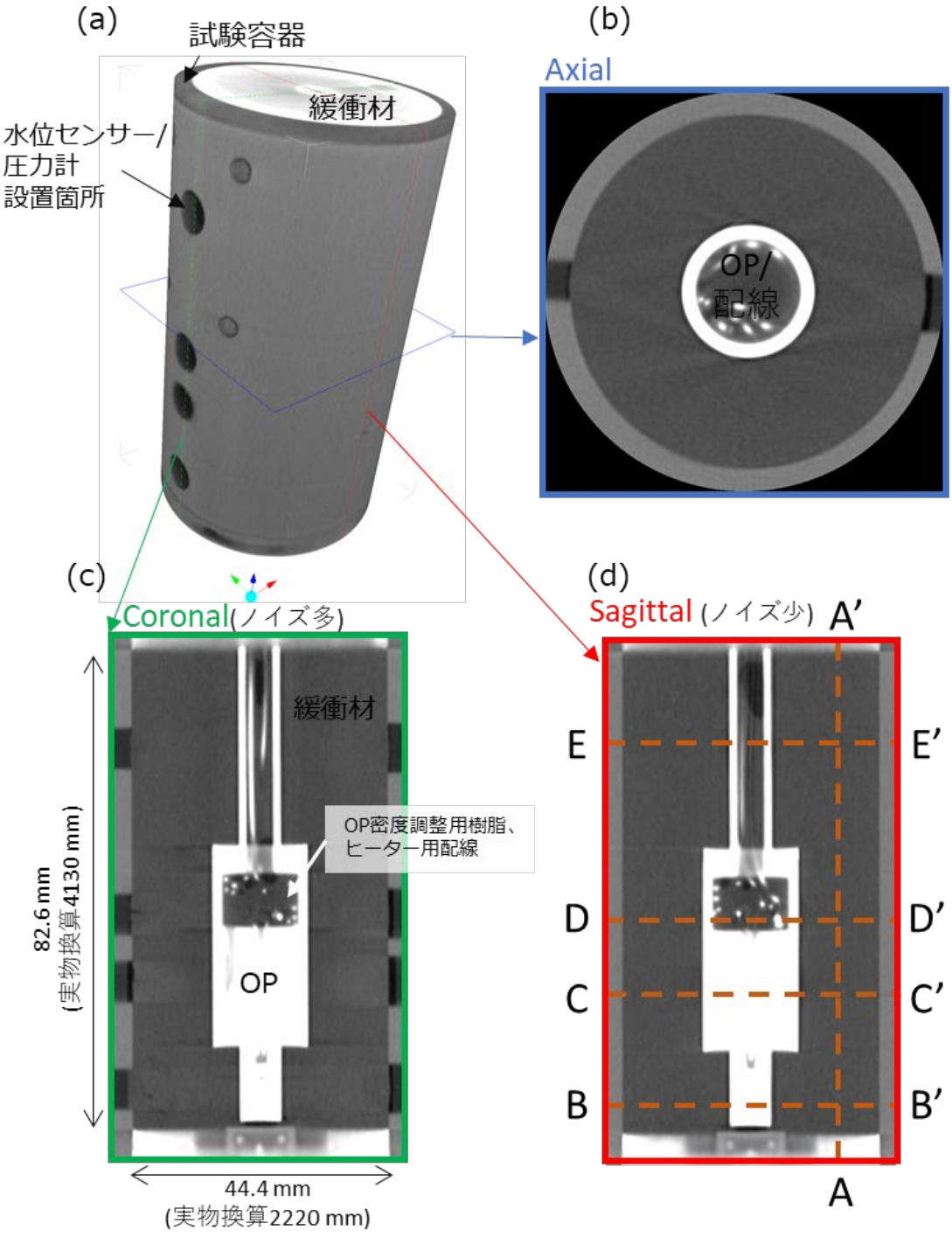


図 4-4- 99 Na-9T の三次元 CT 画像

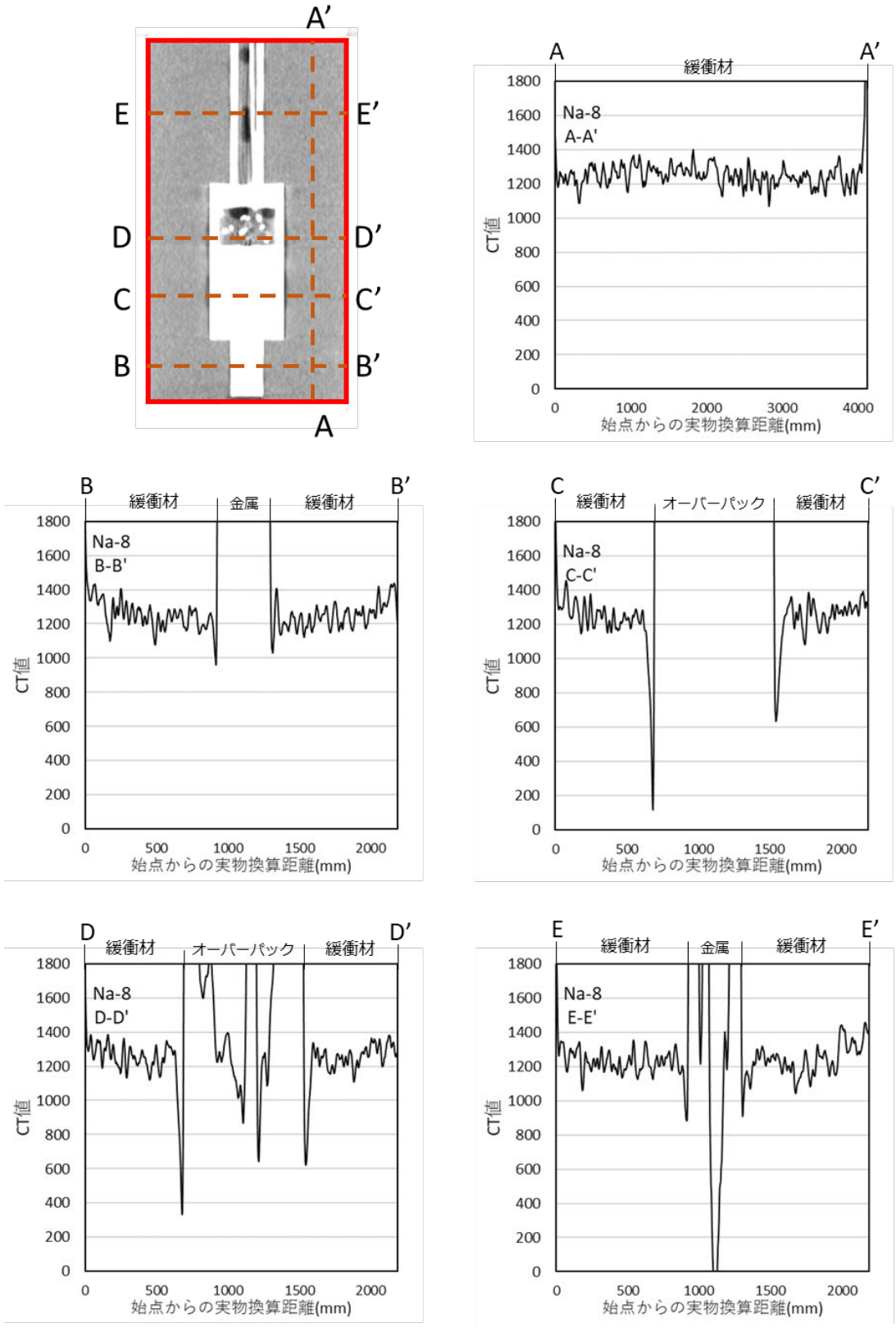


図 4-4- 100 Na-8 の試験後の CT 値分布

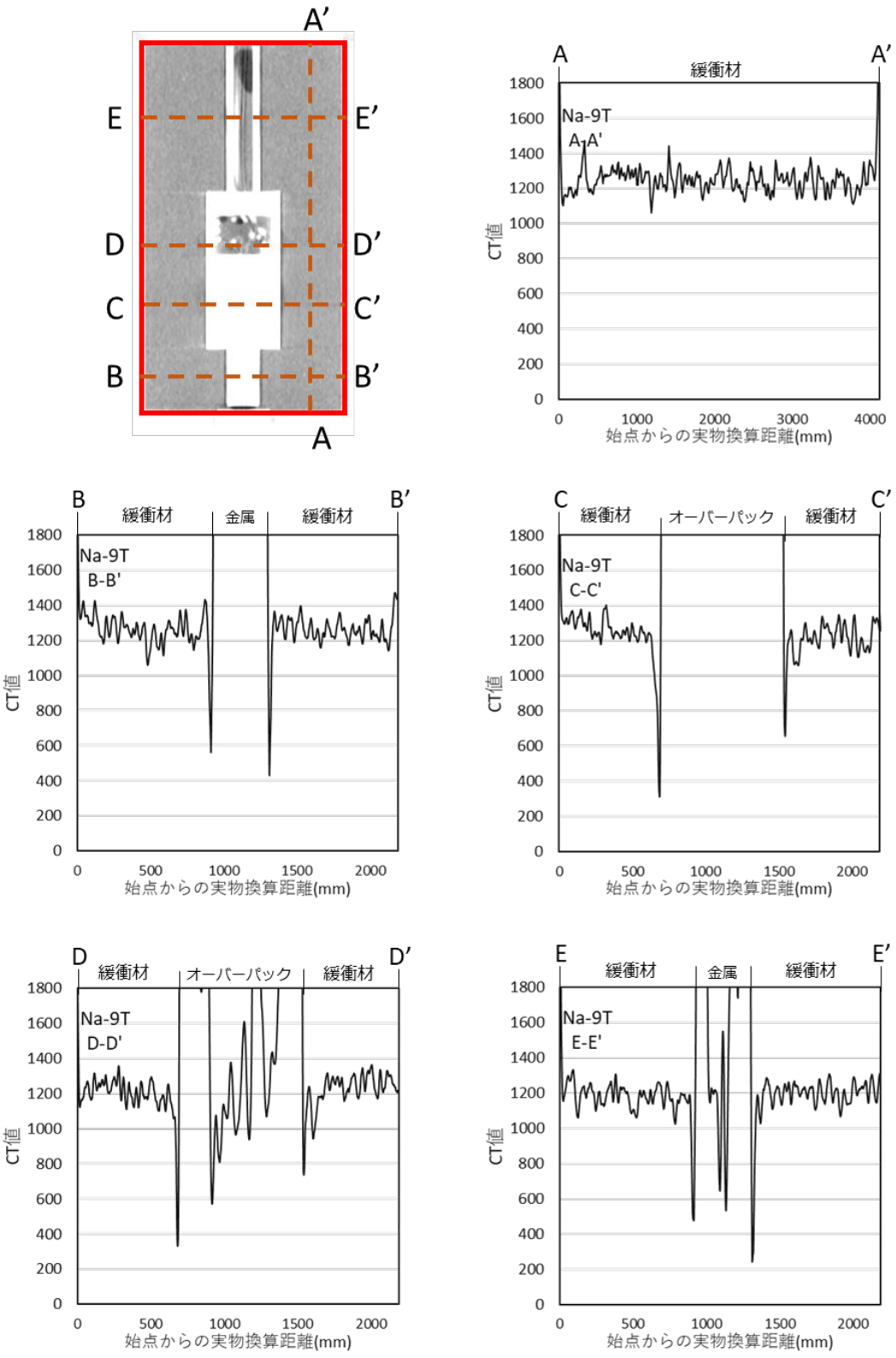


図 4-4- 101 Na-9T の試験後の CT 値分布

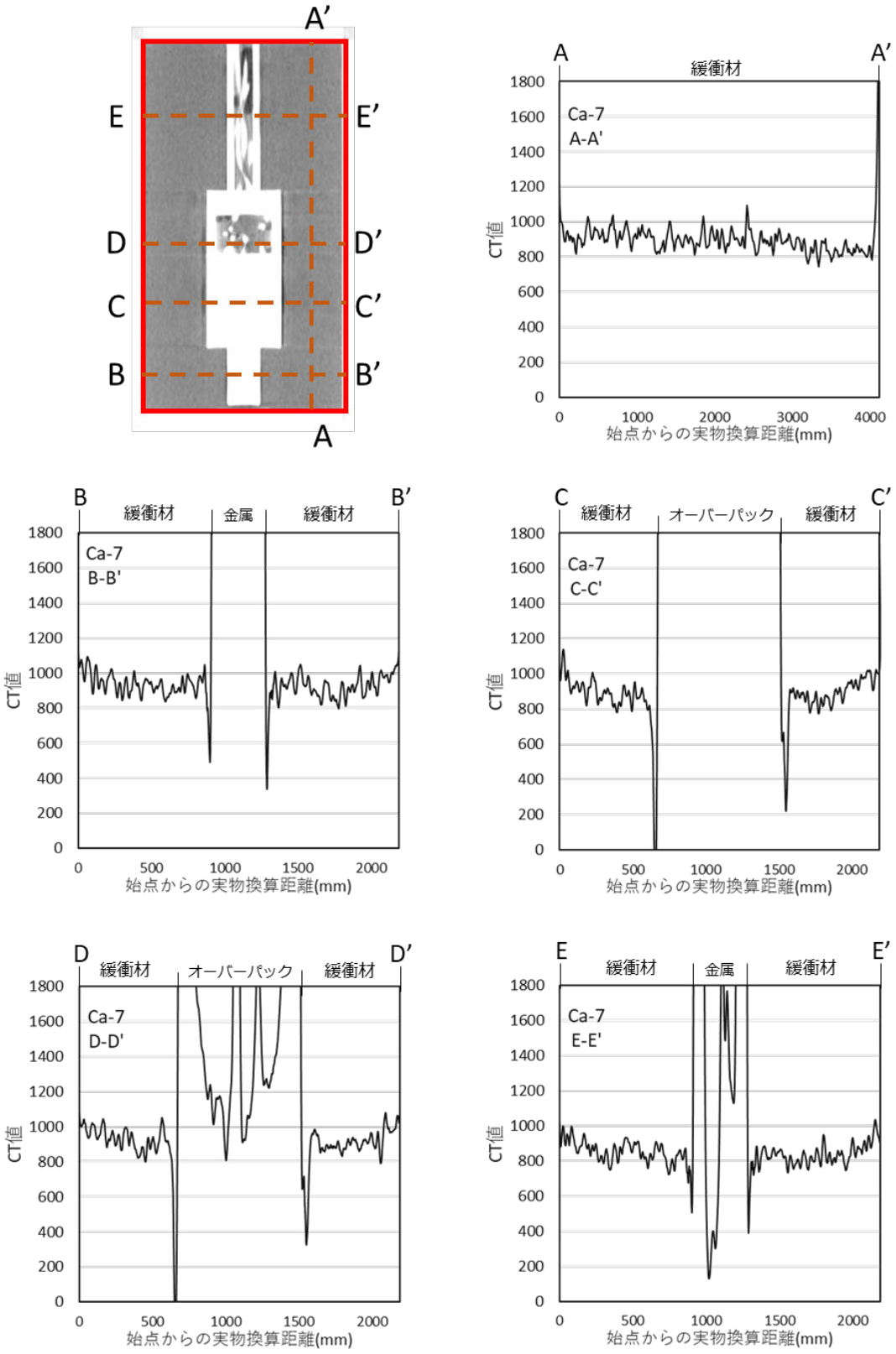


図 4-4- 102 Ca-7 の試験後の CT 値分布

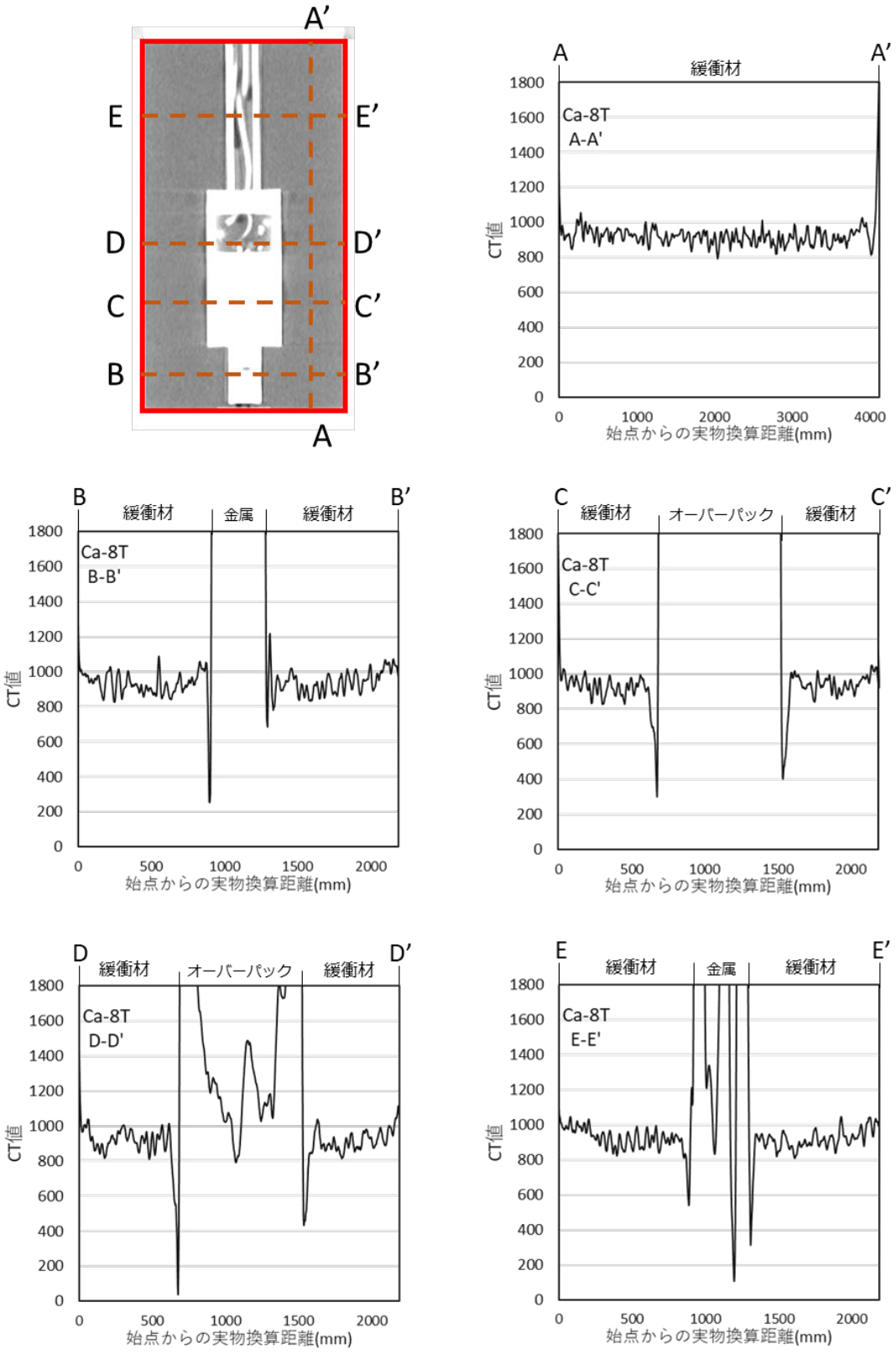


図 4-4- 103 Ca-8T の試験後の CT 値分布

(c) 遠心力模型試験後の飽和度測定結果

図 4-4-104 に、遠心力模型試験後の緩衝材の飽和度分布を示す。Na-8 は緩衝材下部の飽和度が 100 %を超える高い値となり、上部は飽和度 70 %と比較的低い結果であった。鉛直方向の CT 値分布はほぼ一定であったことから、緩衝材を試験容器から取り出したときに緩衝材が変形し、下部が圧縮され密度が高くなり、相対的に上部の密度は減少したと考えられる。対して Na-9T は全体的に飽和度が高く、緩衝材上部も約 90 %であった。Ca-7 は緩衝材下部から上部にかけて、飽和度は若干減少傾向が見られた。Ca-8T は全体的に飽和度が高く、緩衝材上部でも飽和度約 90 %あるいはそれ以上であった。Na 型 Ca 型ともに、加熱なし条件よりも 90 ℃条件の方が緩衝材上部の飽和度が高い傾向が得られた。

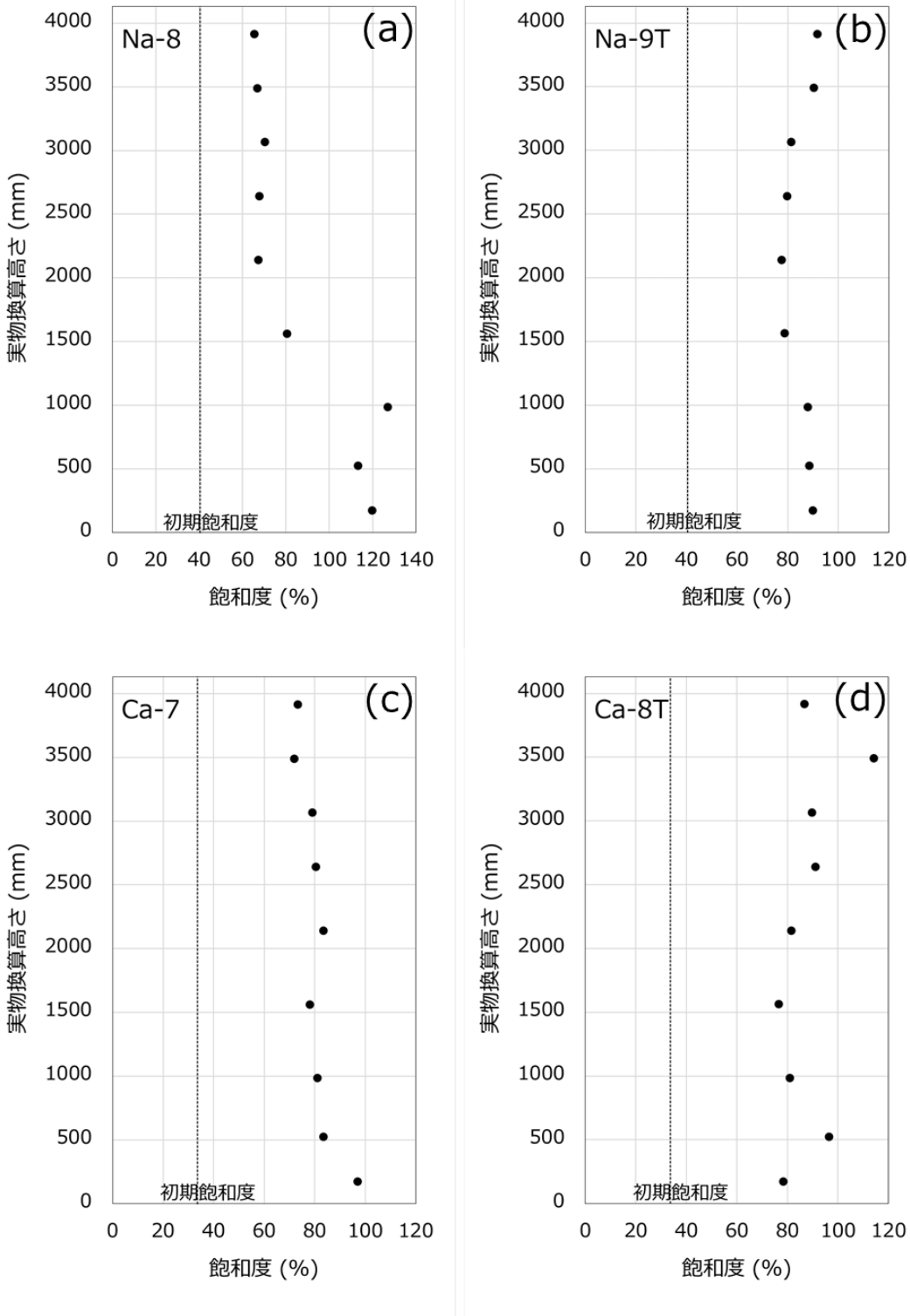


図 4-4- 104 遠心力模型試験後の緩衝材の飽和度分布

(d) 浸出陽イオン量測定結果

本年度は令和 3 年度に行った遠心力模型試験後の浸出陽イオン量測定を行った。令和 3 年度の遠心力模型試験の条件は表 4-4-26 のとおりであり、浸出陽イオン量測定を行った条件はクニボンドを緩衝材の材料とし、廃棄体模型を 90 ℃とした Ca-6T である。試験条件の詳細は令和 3 年度成果報告書(産業技術総合研究所、原子力環境整備促進・資金管理センター、電力中央研究所 2022)のとおりである。遠心力模型試験後の緩衝材の飽和度分布を図 4-4-105 に示す。Ca-6T では、緩衝材底面付近では飽和に近い値であり、実物換算距離約 2000 mm 付近から飽和度は減少したが、緩衝材上部でも 50 %以上の飽和度を示した。

図 4-4-106 に、各試験後の緩衝材下部から 11 分割した緩衝材の浸出陽イオン量の割合と、遠心力模型試験に用いた緩衝材の材料の浸出陽イオン量の割合を示す。Ca-6T の条件では試験未使用のクニボンド試料に対して、下部では緩衝材下部の No. 5 まで浸出 Ca イオン量の割合が減少し、浸出 Na イオン量の割合が増加していた。浸出 Mg イオン量の割合は全体を通してあまり変化がなかった。

表 4-4- 26 令和 3 年度の試料及び試験条件(令和 3 年度成果報告書より引用)

サンプル名	緩衝材に使用した試料	有効モンモリロナイト密度(Mg/m^3)	注入水	注水圧(MPa)	排水/非排水条件	試験期間(日)	実物換算期間(年)	温度条件
Ca-5	クニボンド	1.00	人工海水	1.0	排水	43	105	加熱なし
Ca-6T	クニボンド	1.00	人工海水	1.0	排水	43	105	90°C

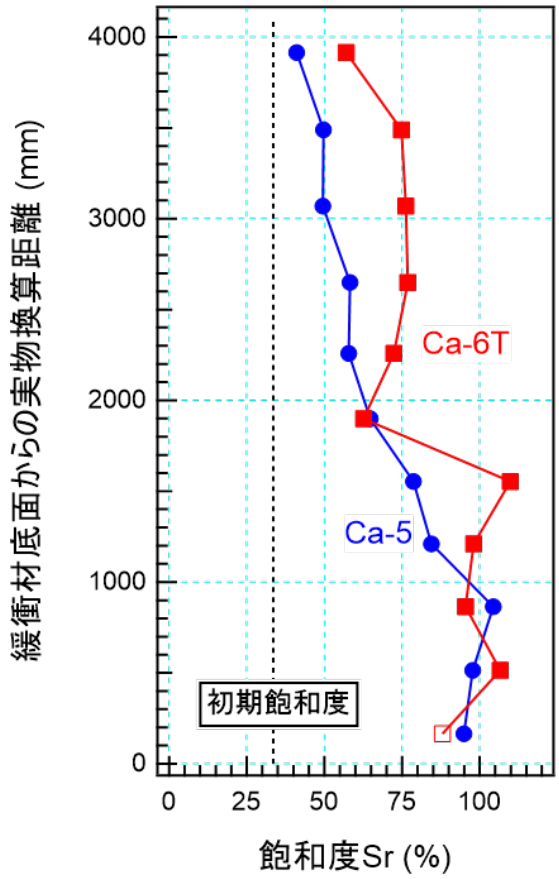


図 4-4- 105 遠心力模型試験後の緩衝材の飽和度分布(令和 3 年度成果報告書より引用)

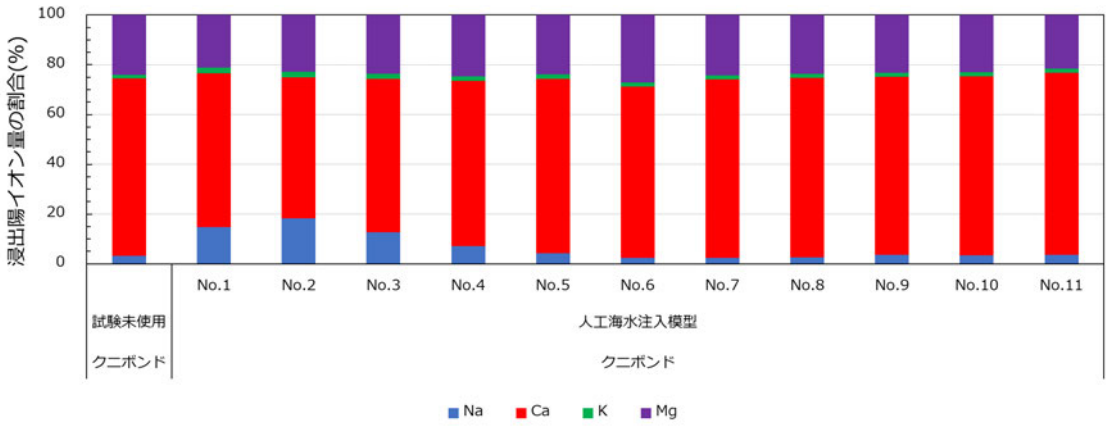


図 4-4- 106 遠心力模型試験後の緩衝材の高さごとの浸出陽イオン量の割合

⑦ 考察

(a) ベントナイトを緩衝材の材料とした遠心力模型試験の再現性

本事業では平成 31 年度より、Ca 型ベントナイトであるクニボンドを緩衝材の材料とした遠心力模型試験を行ってきたため、それぞれの試験結果におけるオーバーパック変位挙動の比較をする。比較する遠心力模型試験の試験条件は、緩衝材の材料がクニボンド、有効モンモリロナイト密度は 1.0 Mg/m^3、注水する試験用水は人工海水であることを基本条件とした。異なる試験条件としては、試験容器の素材、排水/非排水条件、オーバーパック模型の形状、加熱条件、縮尺倍率、試験期間である。試験容器は、平成 31 年度はステンレス製であったが、模型試験後の緩衝材を乱さず CT 画像撮影を行うためには緩衝材を試験容器から取り出さないで CT 画像撮影を行う必要があったため、令和 2、3、4 年度は密度の低いアルミ製の試験容器を用いた。排水条件として、令和 2 年度は非排水条件で、平成 31 年度と令和 3、4 年度は排水条件で行った。オーバーパック模型の形状として、令和 3、4 年度はオーバーパック変位量の計測を試験容器下部で行うためにオーバーパック模型の形状が平成 31 年度、令和 2 年度と異なる。縮尺倍率は平成 31 年度及び令和 2、3 年度は $n = 30$、令和 4 年度は $n = 50$ で行った。

オーバーパック変位の経時変化について、緩衝材模型の加熱なし条件と 90 ℃条件でまとめたものを図 4-4-107 に示す。なお、図の横軸の試験時間は、相似則に基づき実物換算時間に計算して揃えた。加熱なしの 4 試験の結果を比較すると、試験初期を除き、オーバーパックの変位量、浮上から沈下及び沈下から浮上に移行するタイミングがほぼ同様であった。令和 2 年度は非排水条件であったが、試験終了時までに緩衝材全体が試験用水で飽和するまでには至っていなかったため、排水条件に近い試験結果となったと考えられる。また、試験容器の素材やオーバーパック模型の形状、縮尺倍率の違いによる影響も小さいと考えられる。廃棄体模型 90 ℃条件においても、オーバーパックの変位量、浮上から沈下及び沈下から浮上に移行するタイミングがほぼ同様であった。ただし、90 ℃条件は加熱なしの条件に比べてオーバーパックが沈下して以降、浮上するタイミングが速かったため、廃棄体模型の熱が緩衝材の挙動や浸潤速度に変化をもたらしたと考えられる。

一連の試験結果から、遠心力模型試験開始後約 5 年以内のオーバーパックの鉛直方向の変位量が実物換算で 1～2 mm 程度異なるが、それ以降のオーバーパック変位挙動は同様であり、相似則が成り立つとともに再現性が確認できたと考えられる。

(b) 加熱による試験用水の浸潤挙動の変化

クニボンドを緩衝材の材料とした条件で、模擬廃棄体加熱なしと 90 ℃条件の試験後の様子を比較した図を図 4-4-108 に示す。図の左側は遠心力模型試験に試験容器から緩衝材を取り出し、オーバーパック模型の高さ方向に半分程度の位置の断面の写真であり、比較をしやすくするために写真全体の明るさを調整した。図の右側は遠心力模型試験後の CT 画像鉛直断面である。図の(a)及び(b)は令和 3 年度の試験結果であり、模擬廃棄体加熱な

し条件と 90 ℃条件の実物換算時間 105 年後を示している。図の(c)は令和 4 年度の試験結果であり、模擬廃棄体 90 ℃条件の実物換算時間 273 年後を示している。

令和 3 年度の試験の結果、遠心力模型試験開始後、実物換算時間 105 年後において、模擬廃棄体加熱なしの条件よりも 90 ℃条件のほうが緩衝材上部まで試験用水が注入されていることを示しており、加熱したほうが試験用水の注水速度が速いことが示された。模擬廃棄体が 90 ℃条件の場合、緩衝材及び間隙水の温度も上昇する。間隙水は温度が高くなることで粘度が減少し、緩衝材中の浸透率が上昇することが考えられる。温度によって試験用水の密度も変化するが、密度変化による浸透率の変化量は粘度による違いに比べて非常に小さい。また、温度の高いオーバーパック周辺では、蒸発量も多くなることが考えられる。これらのことから加熱なしの条件よりも、90 ℃条件のほうが緩衝材中の試験用水の移動は速くなると考えられる。図 4-4-108 の(a)を見ると、締固め表面の影響や金属試験容器及びオーバーパックによる偽像の影響も見られるが、加熱なしの条件では緩衝材の下部から上部に向かい、比較的均一に CT 値が減少していることがわかる。一方図の(b)では上部まで試験用水が浸潤しつつあるが、模擬廃棄体の位置からオーバーパック模型の上部にかけて、オーバーパック模型周囲に CT 値が低い領域が観察された。この CT 値が比悪意領域は飽和度が周囲よりも低いと考えられる。試験後の断面写真でも緩衝材の色が異なる領域が目視で確認できたため、オーバーパック模型周囲の緩衝材は、温度の影響により飽和度が低くなったと考えられる。ここで、オーバーパック周囲の緩衝材の飽和度分布について考察するため、過去に行われた遠心力模型試験(西本ほか 2012、2014)を参照する。西本ほか (2012、2014)では、処分施設周辺(ニアフィールド)の長期挙動評価のため、緩衝材の周辺岩盤を含めた 1/30 サイズの模型を用いて遠心力模型試験を行った。緩衝材の材料として Na 型ベントナイトであるクニゲル V1 を使用して、西本ほか (2012)では模擬廃棄体を加熱せず、西本ほか 2014 では 95℃に設定した。遠心力模型試験後はいずれも医療用マルチスライスヘリカル CT スキャナ(図 4-4-89)を用いて岩盤を含む模型全体の CT 画像を取得した。図 4-4-109 に 2 条件の遠心力模型試験後の CT 画像と CT 値分布を示す。図中の TG-17 は廃棄体温度 95 ℃であり、TG-10 は加熱なしの条件である。加熱なし条件では岩盤からベントナイト(Be、緩衝材模型)まで CT 値は大きな変化は見られないが、95 ℃条件ではベントナイトの CT 値が、外側の岩盤よりも低い様子がわかる。この CT 値分布となった理由として、廃棄体を 95 ℃と設定していることによる間隙水の蒸発による可能性が考察された。背圧は 0.5 MPa では間隙水が沸騰することは考えにくいが、温度の高いオーバーパック周辺のベントナイトでは周辺岩盤に比べ相対的に多くの水蒸気が発生し、間隙水がベントナイト部から岩盤部に移動する圧力が生じる可能性が考察された。

図 4-4-108(b)の結果も同様に、注水圧は 1 MPa であり、廃棄体の温度は 90 ℃であるため、オーバーパック周囲の緩衝材中の間隙水が蒸発しやすい状況である。また、試験容器下部から注水しているため、オーバーパック下部は飽和に近い状態で、オーバーパック上部では飽和度が低い分布を形成していたと考えられる。ただし、実物換算時間 273 年後

の図 4-4-108(c)では、オーバーパック周囲の CT 値が低い領域は確認されなかった。すなわち、模擬廃棄体 90 ℃条件では緩衝材はオーバーパック周囲から飽和が進むものの、次第にオーバーパック周囲も飽和度が高くなるような浸潤挙動を示すことが考えられる。

(c) オーバーパック変位挙動

クニボンドを用いたこれまでの遠心力模型試験の結果（図 4-4-107)、いずれの模型も試験開始から実物換算時間 10～20 年の間にオーバーパックが一度浮上し、その後沈下する挙動であった。これは、試験初期に底面から 1 MPa の注水圧が与えられたことによって下部からオーバーパックが押されて浮上し、ある程度緩衝材に試験用水が浸潤すると緩衝材の剛性が低下して沈下したと考えられる。さらにオーバーパックは加熱なし条件では約 70 年、90 ℃条件では約 55 年で浮上し始めた。この原因としては緩衝材の上部まで試験用水が注水され始め、オーバーパック上部の緩衝材も剛性が低下したことにより、上下の注水圧及び緩衝材の膨潤圧の関係から浮上した可能性がある。90 ℃条件のほうが加熱なし条件に比べてオーバーパックが沈下から浮上に切り替わるタイミングが速いのは、温度の影響により試験用水の粘性が低下し、浸潤速度が速くなったためにオーバーパック上部の緩衝材の剛性低下も速くなったと考えられる。

一方で、クニゲル V1+砂を緩衝材の材料として用いて、試験用水を人工海水とした条件における遠心力模型試験の結果では、廃棄体模型加熱なし条件と 90 ℃条件でオーバーパックの変位量が大きく異なっていた。平成 31 年度と令和 2 年度には $n = 30$ で有効モンモリロナイト密度、試験用水は本年度の加熱なし条件と同様の条件で試験を行った。その結果、平成 31 年度は試験開始後の実物換算時間約 15 年で 24 mm オーバーパックが浮上し、47 年後には初期位置から約 20 mm 浮上した地点で安定していた。令和 2 年度は試験開始から 70 年で 16 mm 浮上し、その後 87 年後までにやや沈下していく結果が得られた。本年度の加熱なし条件(Na-8)では試験開始後 50 年で 18 mm 浮上し、その後安定していた。これらの結果から、クニゲル V1+砂、人工海水、模擬廃棄体加熱なしの条件では、試験開始後 70 年頃までに 15～20 mm 浮上し、その後安定もしくは緩やかに沈下する傾向が得られたと言える。模擬廃棄体 90 ℃条件では加熱なし条件とは異なり、一度試験開始直後に 3 mm 浮上した後に初期位置から-5 mm まで沈下し、試験開始後 100 年以降は-4 mm で安定していた。オーバーパックの変位の違いは、模擬廃棄体 90 ℃条件ではオーバーパック周辺の緩衝材中を流れる試験用水の浸潤挙動が異なるためと考えられる。

結果として、クニボンドを緩衝材の材料とした場合、模擬廃棄体の温度条件が緩衝材中の試験用水の浸潤速度及びオーバーパックの変位に影響をおよぼすものの、影響量自体は限定的と考えられる。クニゲル V1+砂を緩衝材の材料とした場合、試験用水が純水(イオン交換水)である場合は非常に浸潤速度が遅いが、試験用水が人工海水の場合は浸潤速度が速くなり、遠心力模型試験の実物換算時間上では数十年程度で緩衝材上部まで浸潤する結果

が得られている。また、本年度の結果から模擬廃棄体の熱の影響によってオーバーパックの変位挙動もクニボンドに比べて大きく変化することが示唆された。

(d) CT 画像解析を用いた遠心力模型試験後の緩衝材の密度の推定

CT 画像解析及びキャリブレーション結果から、遠心力模型試験後の緩衝材の密度の推定を試みた。比較としては、試験中に緩衝材の膨潤やオーバーパックの移動とともに緩衝材が変形していると考えられるため、飽和度ではなく試験後の含水比測定時に測定した緩衝材の密度、及び CT 値から換算した密度を比較した。ここで、密度は単位体積あたりの粒子と流体の合計質量であり、飽和度が高いほど密度も高いことを示す。CT 値は図 4-4-99 の測線 A の CT 値を使用し、キャリブレーションの値から密度に換算した。それぞれの取得方法による Na-8、Na-9T、Ca-7、Ca-8T の鉛直方向の緩衝材の密度分布を図 4-4-110 に示す。図中には緩衝材の初期含水比から算出された初期密度と、計算上飽和となる飽和密度を点線で示した。なお、模型試験後の供試体の高さごとの間隙流体の塩の量を把握することは困難であるため、塩の成分は考慮せず間隙流体密度は 1.0 Mg/m^3 と仮定して密度を求めた。

CT 値から換算した密度は、いずれも飽和密度よりも高い結果が得られた。これはより密度の高い金属製のオーバーパックや試験容器の存在により、画像全体の CT 値が増加してしたためと考えられる。ただし、絶対値としては真値とずれが生じるものの、相対的な密度の違いは比較可能である。

Na-8 は試験終了後に測定した密度は緩衝材下部で大きく、上部で小さかった。鉛直方向の CT 値分布はほぼ一定であったことから、緩衝材を試験容器から取り出したときに緩衝材が変形し、下部が圧縮され密度が高くなり、相対的に上部の密度は減少したと考えられる。Na-9T は測定した密度も緩衝材全体で飽和密度に近く、上部まで試験用水が浸潤していた。Ca-7 については CT 値、測定値ともに緩衝材下部から上部にかけて、密度が減少したため、試験終了時でも上部まで試験用水が十分には浸潤していなかったことを示している。Ca-8T では測定した密度も緩衝材全体で飽和密度に近く、上部まで試験用水が浸潤していたと考えられる。

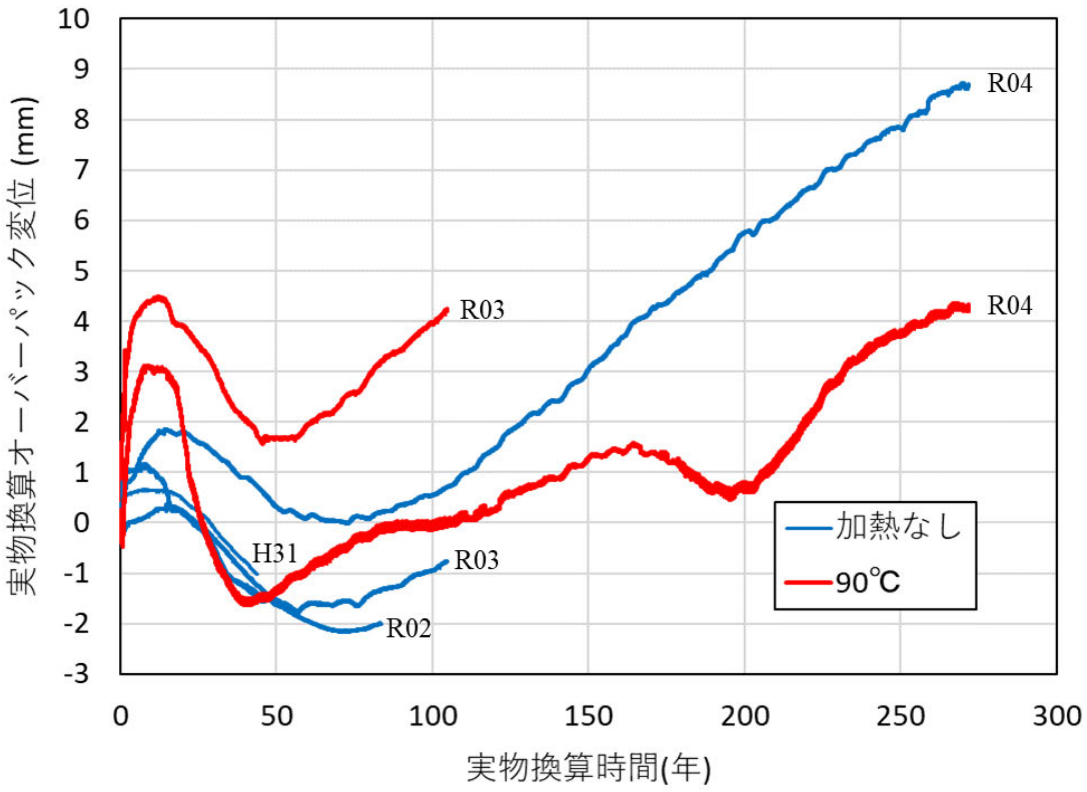


図 4-4- 107 Ca 型ベントナイトの緩衝材におけるオーバーパック変位挙動の比較

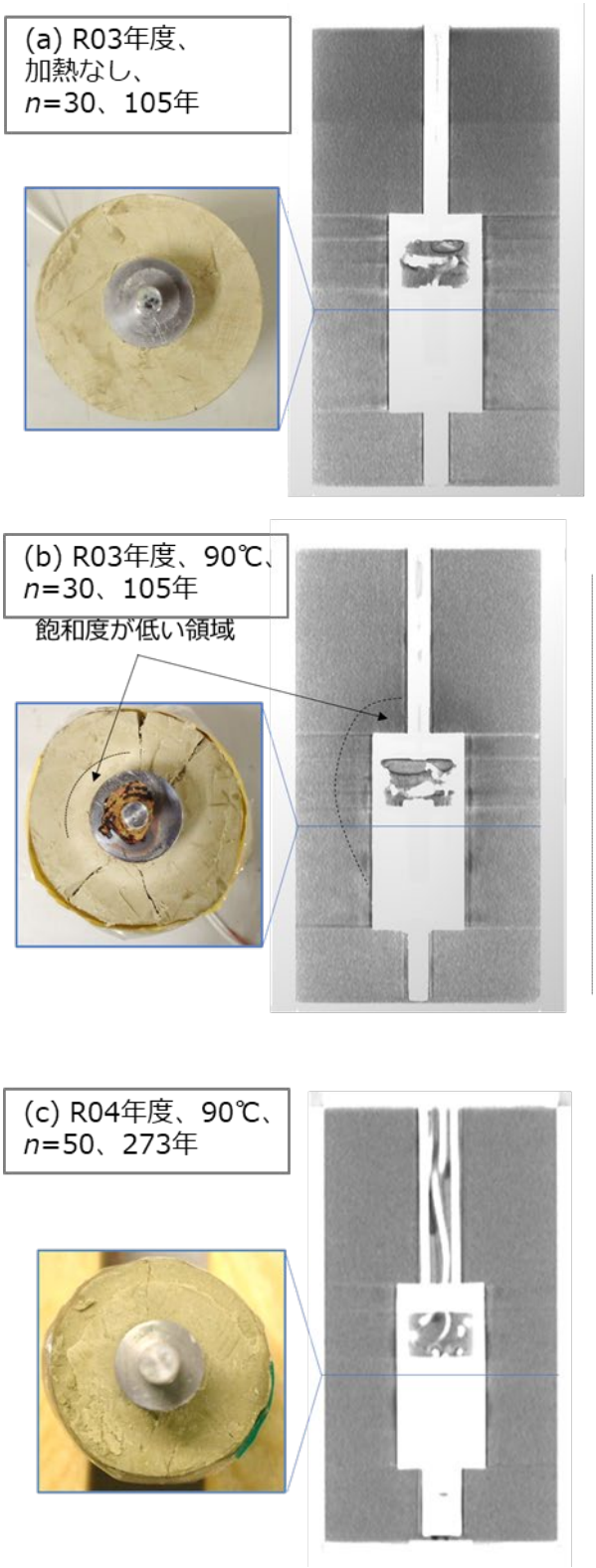


図 4-4- 108 模擬廃棄体の加熱によるオーバーパック周囲の緩衝材の飽和度の違い

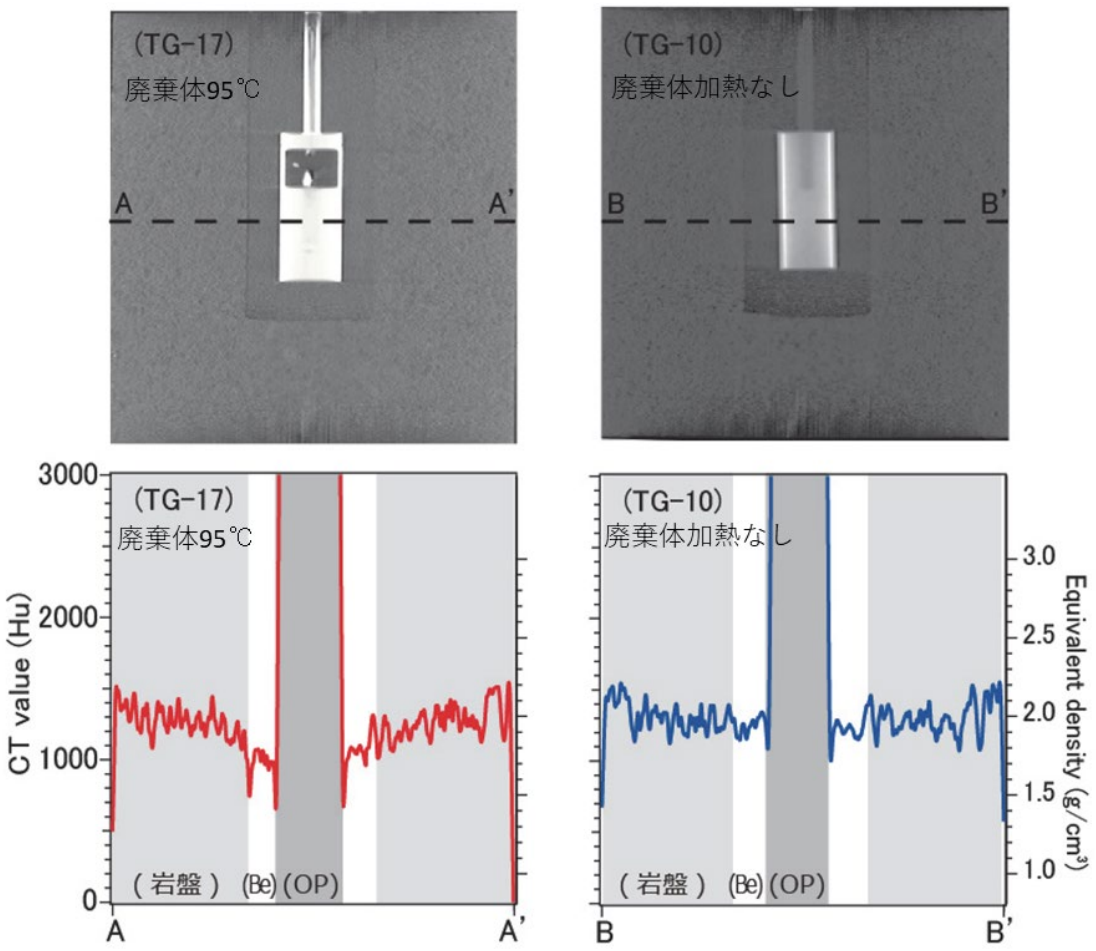


図 4-4- 109 遠心力模型試験後の CT 画像と測線の CT 値分布
(西本ほか,2014 を一部加筆)

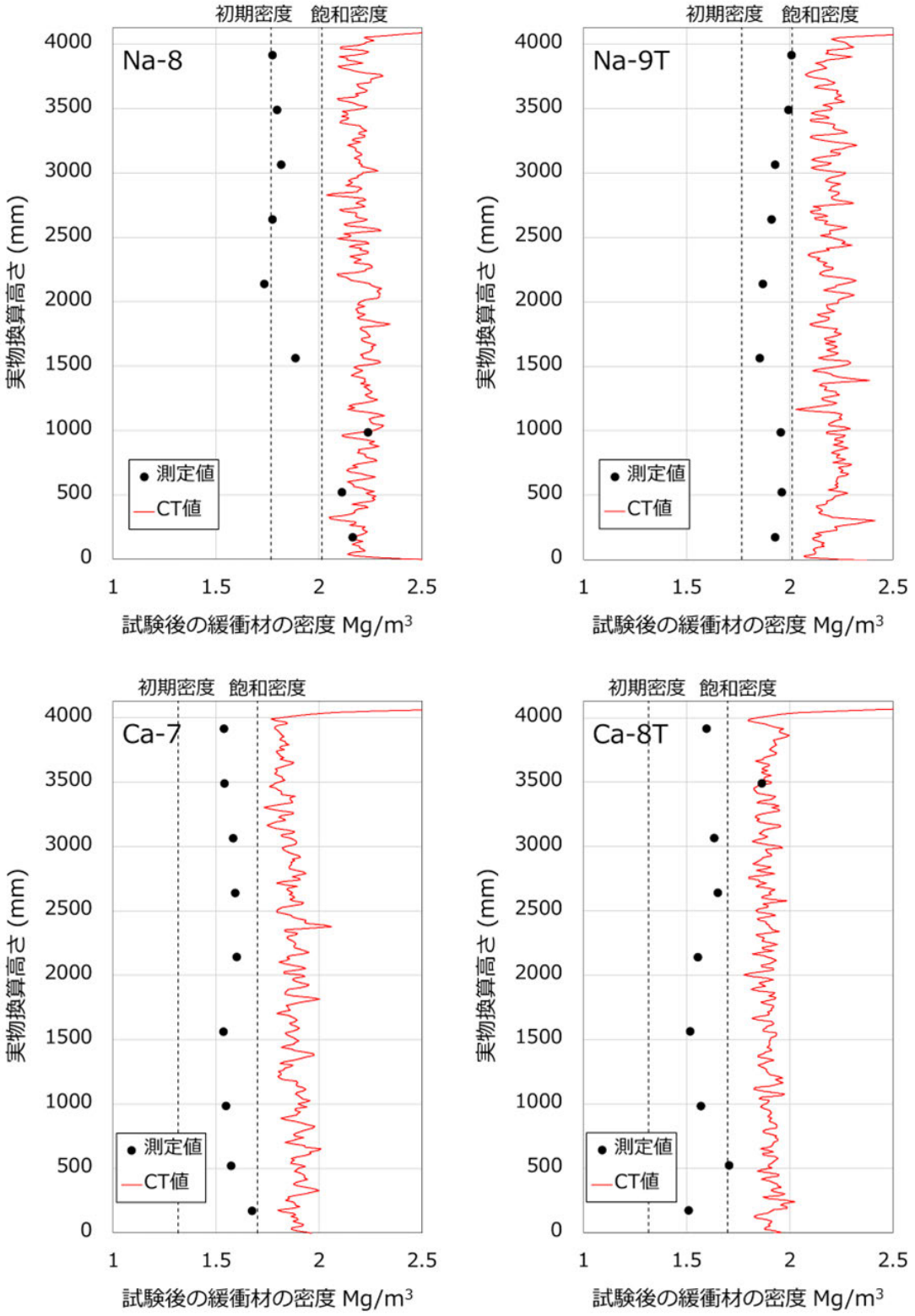


図 4-4- 110 遠心力模型試験後の緩衝材の密度分布の比較

⑧　模型試験のまとめ

令和 2 年度までの模型試験(n = 30；1/30 サイズの模型、30 G)試験用水の浸潤速度が速く緩衝材がほぼ飽和となった条件もあるが、多くの条件において緩衝材が飽和に至るまでの試験は行えていなかった。数値解析と模型試験の両方で、より長期的な緩衝材とオーバーパックの比較検討をすることで、より精度の高い評価が可能になると考えられる。n = 30 では十分な試験期間の確保が困難であることから、n = 50 の遠心力模型試験を行うことで相似則により時間加速し、より長期的な緩衝材とオーバーパックの挙動を把握することが課題として挙げられた。

そこで令和 4 年度は、Na 型ベントナイトであるクニゲル V1 と砂の混合土、及び Ca 型ベントナイトであるクニボンドを緩衝材の材料とした条件で、模擬廃棄体の加熱なし/90 ℃とした場合の遠心力模型試験(実物換算時間 273 年相当)を行った。また、試験中の緩衝材中の試験用水(人工海水)の浸潤やオーバーパックの変位挙動に対する熱の影響について調査した。

平成 31 年度よりクニボンドを緩衝材の材料とした遠心力模型試験を n = 30 と n = 50 の縮尺模型を用いて行ってきたため、それぞれのオーバーパックの変位挙動の経時変化について比較した。その結果、模擬廃棄体加熱なし、90 ℃条件において、試験開始直後を除いてそれぞれほぼ同様なオーバーパック変位挙動が得られた。これにより遠心力模型試験の再現性が得られたことが確認されたとともに、Modeling of models の考え方が成立することが示され、数値解析の検証データとしても利用可能であることが示唆された。また、緩衝材中の試験用水の浸潤挙動に着目すると、加熱なしの条件では緩衝材下部から上部に向けて一様に浸潤が進むものの、90 ℃条件ではオーバーパックから離れた試験容器周辺からの浸潤が早く進み、時間が経つに連れてオーバーパック周囲にも浸潤する結果が得られた。また、緩衝材上部への浸潤速度は 90 ℃条件のほうが加熱なし条件より速かった。オーバーパック変位挙動に着目すると、加熱なしの条件に比べて 90 ℃条件のほうが沈下から浮上に変わるタイミングが速く、試験用水の浸潤速度の違いを反映した変位挙動を示すことが示唆された。ただし、オーバーパックの浮上・沈下プロセスは同様であり、移動量も大きくは変わらないことから、クニボンドを緩衝材の材料とした場合の緩衝材模型の温度の影響は限定的であると考えられる。

一方でクニゲル V1+砂を緩衝材の材料とした場合、試験用水が純水(イオン交換水)である場合は非常に浸潤速度が遅いが、試験用水が人工海水の場合は浸潤速度が速くなり、遠心力模型試験の実物換算時間上では数十年程度で緩衝材上部まで浸潤する結果が得られている。また、本年度の結果から廃棄体模型の熱の影響によってもオーバーパックの変位挙動も、クニボンドに比べて大きく変化することが示唆された。

本年度までの試験条件で、緩衝材の材料(クニゲル V1+砂、クニボンド)、試験用水(純水、人工海水)、廃棄体模型の熱(加熱なし、90 ℃)の違いを確認し、n = 50 での長期間を想定した模型試験が実施可能であることを示した。ただし、長期的な緩衝材への海水の浸

潤により、緩衝材中のベントナイトのイオン交換反応が平衡に至った後のオーバーパックの変異挙動を把握することは、遠心力模型試験の試験期間の制約上困難である。緩衝材の材料としてあらかじめ海水平衡したベントナイトを緩衝材の材料として実験を行うことで、より長期的なオーバーパック変位挙動を補間することが可能であると考えられる。海水平衡ベントナイトを用いた遠心力模型試験は令和 2 年度に、$n = 30$、加熱なしの条件で行っていて、クニゲル V1 と砂の混合土と、クニボンドを緩衝材の材料とした模型試験の中間的なオーバーパック変位挙動を示すことが得られたが、試験期間は短く(34 日間、83 年相当)、長期的なデータは得られていない。そこで、令和 5 年度はあらかじめ海水平衡したベントナイトを緩衝材の材料とし、今年度実施可能であることを確認した $n = 50$ の、模擬廃棄体温度を考慮した遠心力模型試験を行う予定である(図 4-4-85)。

（５）　数値解析

①　背景・目的

(a) 背景

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、人工バリア定置後に廃棄体の発熱や周辺岩盤から人工バリアへの地下水の浸入、地下水の浸入による緩衝材の膨潤などの現象が相互に影響する熱・水理・力学連成現象（THM 連成現象）が発生する。このような連成現象を予測評価することは、ニアフィールド環境の明確化、処分孔・緩衝材の設計の観点から重要な課題の一つであり、評価期間が長期に及ぶことから数値解析が不可欠となる。このような背景から電力中央研究所においても、緩衝材の膨潤特性に対する評価式を多様な条件の室内試験から導き、その評価式を数値モデル化した THM 連成解析コード LOSTUF（澤田ほか、2006）を開発した。

このような数値解析手法の適用は、これまで人工バリアの緩衝材として多くの研究例がある Na 型ベントナイトを対象として実施されているが、沿岸部への高レベル放射性廃棄物の地層処分を考慮した場合、海水との平衡を考慮したイオン型の異なる Ca 型ベントナイトに着目することも重要である。その際、検討すべき人工バリア性能評価上の不確実性の一つとして、膨潤性の異なる緩衝材に対するオーバーパックの変位挙動（緩衝材–オーバーパックの力学的相互作用）が挙げられる。このような観点から、Ca 型ベントナイトを含めて緩衝材や水質の異なる条件に対し、膨潤性や透水性の異なる緩衝材を使用することで生じる影響を確認する必要があり、廃棄体の加熱の有無を考慮した数値解析を実施した。

(b) 目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分において緩衝材としての研究例の多い Na 型ベントナイトに加え、沿岸部の地層処分で有望と考えられる海水との平衡を考慮した Ca 型ベントナイトを含め、緩衝材の仕様（Na 型・砂混合/Ca 型）と廃棄体の加熱の有無を考慮して実施した実験条件を対象とした数値解析を行う。また、解析で考慮する緩衝材や廃棄体の条件や水質（純水/人工海水）の違いにより生じる影響の感度解析を実施し、緩衝材条件による膨潤特性や透水性の違いにより、オーバーパックの変位挙動に生じる影響を確認する。また、実験結果との比較検証を行うことで沿岸部の地層処分におけるニアフィールド長期予測評価に対する数値解析の適用性について検討する。

② 解析コードの概要

本研究では数値解析に、電力中央研究所で開発した「放射性廃棄物地層処分における地下空洞長期安定性解析プログラム（LOSTUF)」を使用する。LOSTUF は熱・水・応力（THM）連成解析コード（澤田ほか、2006）である。ここでは、LOSTUF の支配方程式および解析に必要となるパラメータについて解説する。

（a）THM 連成の支配方程式

LOSTUF では、地盤を粒子骨格と水・空気で満たされた空隙で構成される多相システムとして取り扱い、地下水の連続式、エネルギーの保存則、力の釣り合い式と、応力－ひずみ関係、透水挙動に関するダルシー則、熱伝導に関するフーリエ則、水蒸気の拡散挙動に関するフィック則等の各種構成則から導かれた支配方程式を用いている。間隙ガス圧は一定で大気圧に等しいとしている。支配方程式は、Rutqvist et al. (2001)を参考に導出した。以下にその支配方程式について簡単に記す。以下の解説で「地盤」は固相、液相、気相を含めた多孔質媒体の系全体を表している。式の導出過程の詳細については文献（澤田ほか、2006）を参照されたい。

地下水の連続式から以下の式が導かれる。

$$\rho_l S_l \frac{\partial(\nabla\cdot\mathbf{u})}{\partial t} + \{\rho_{l0}\phi S_l\beta_{Pl} + (\rho_l-\rho_v)C_{lP} + \rho_l C_{vP}\}\frac{\partial P_l}{\partial t} - (\rho_{l0}\phi S_l\beta_{Tl} - \rho_l C_{vT})\frac{\partial T}{\partial t}$$
$$+\nabla\cdot\left\{\left(-\rho_l\frac{\mathbf{k}k_{rl}}{\mu_l} - \rho_l D_{Pv}\mathbf{I}\right)\nabla P_l\right\} + \nabla\cdot\{(-\rho_l D_{Tv}\mathbf{I})\nabla T\} = Q_B + \nabla\cdot\left(\rho_l\frac{\mathbf{k}k_{rl}}{\mu_l}\mathbf{g}\right) \quad (4\text{-}4\text{-}10)$$

ここで、ρ_lは水の密度、ρ_vは水蒸気の密度、S_lは飽和度、ρ_{l0}は初期条件の水の密度、ϕは間隙率、β_{Pl}は水の圧縮係数、β_{Tl}は水の熱膨張係数、$\mathbf{k}$は固有透過度テンソル、k_{rl}は相対透水係数、μ_lは水の粘性係数、$\mathbf{I}$は単位テンソル、Q_Bは水のソース項、$\mathbf{g}$は重力加速度ベクトルである。未知数は変位ベクトル$\mathbf{u}$、間隙水圧P_l、温度Tであり、変位ベクトル$\mathbf{u}$により、ひずみテンソル$\boldsymbol{\varepsilon}$および体積ひずみε_Vが$\boldsymbol{\varepsilon} = 0.5(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^{tr})$、$\varepsilon_V = \nabla\cdot\mathbf{u}$と定義される。なお、不飽和状態において、サクションsは間隙水圧P_lと間隙ガス圧P_gにより、

$$s = P_g - P_l \quad (4\text{-}4\text{-}11)$$

と定義される。さらに LOSTUF では間隙ガス圧に大気圧を仮定しているので、$s = -P_l$となる。

また、C_{lP}は水分特性曲線（飽和度S_lとサクションsの関係を表す曲線）から算出される係数で比水分容量と呼ばれる。C_{vP}、C_{vT}はそれぞれ以下のように書ける。

$$C_{vP} = \frac{\phi S_g \rho_v}{\rho_l^2 R_v T} \quad (4\text{-}4\text{-}12)$$

$$C_{vT} = \frac{\phi S_g}{\rho_l}\frac{\partial\rho_{vS}}{\partial T}RH - \frac{\phi S_g P_l}{\rho_l^2 R_v T^2} \quad (4\text{-}4\text{-}13)$$

ここで、S_gは空隙中の気体の体積占有率（$=1-S_l$）、R_vは水蒸気の比気体定数（＝461.5 J/kg K）、ρ_{vS}は飽和水蒸気密度（温度の関数）、RHは相対湿度である。

D_{Pv}およびD_{Tv}は多孔質媒体中における等温下での水蒸気拡散係数、温度勾配による水蒸気拡散係数であり、水蒸気の拡散を表すフィック則を展開することで得られる。水蒸気の流束q_{rv}は、間隙ガス圧が一定であるという仮定のもと、以下のフィック則で表せる。

$$q_{rv} = -D_v I \nabla \rho_v \tag{4-4-14}$$

ここで、D_vは水蒸気の分散係数であり、

$$D_v = \phi S_g \tau D_m \tag{4-4-15}$$

と書ける。τは屈曲度を表す。D_mは大気圧下での水蒸気の分子拡散係数であり、温度の関数として以下の式を用いる。

$$D_m(\mathrm{m^2/s}) = 2.16 \times 10^{-5}(T/273)^{1.8} \tag{4-4-16}$$

水蒸気の密度ρ_vは以下のように書ける。

$$\rho_v = \rho_{vS}(T)RH = \rho_{vS} exp\left(\frac{P_l}{\rho_l R_v T}\right) \tag{4-4-17}$$

ここで、ρ_{vS}は飽和水蒸気密度であり温度の関数である。式(4-4-14)内の水蒸気密度の勾配は式(4-4-17)を用いて次のように展開できる。

$$\mathbf{q}_{rv} = -\rho_l(D_{Pv}\mathbf{I}\nabla P_l + D_{Tv}\mathbf{I}\nabla T) \tag{4-4-18}$$

ここで、

$$D_{Pv} = \frac{D_v \rho_v}{\rho_l^2 R_v T} \tag{4-4-19}$$

$$D_{Tv} = D_v\left(\frac{RH}{\rho_l}\frac{\partial \rho_{vS}}{\partial T} - \frac{\rho_v P_l}{\rho_l^2 R_v T^2}\right) \tag{4-4-20}$$

である。

式(4-4-10)において、左辺の第 1 項は多孔質体の骨格変化、第 2 項は飽和度の変化、第 3 項は温度変化による間隙流体の密度変化、第 4 項は水分移動（ダルシー則およびフィック則からの展開）、第 5 項は温度勾配による水分移動（フィック則からの展開）を表す。

エネルギー保存則からは次の支配方程式が導かれる。

$$(1-\phi)3K_D\beta_{TD}T\frac{\partial(\nabla\cdot\mathbf{u})}{\partial t} + (\rho c)_m\frac{\partial T}{\partial t} - \nabla\cdot\left\{T\left(\frac{\beta_{Tl}}{\beta_{Pl}}\right)\frac{\mathbf{k}k_{rl}}{\mu_l} + \rho_l L D_{Pv}\mathbf{I}\right\}\nabla P_l - \nabla \cdot (\lambda_m \mathbf{I}\nabla T) + (c_l\mathbf{q}_l)\cdot\nabla T = Q_{TB} \tag{4-4-21}$$

ここで、K_Dは固相の体積弾性係数（排水条件）、β_{TD}は固相の熱膨張係数（排水条件）、Lは単位体積あたりの水蒸気の潜熱、$\mathbf{q}_l$は流束ベクトル、Q_{TB}は熱量のソース項である。λ_m、$(\rho c)_m$はそれぞれ地盤の熱伝導率、熱容量であり、次式で求まる。

$$\lambda_m = S_l\lambda_{sat} + (1-S_l)\lambda_{dry} \tag{4-4-22}$$

$$(\rho c)_m = \phi S_l \rho_l c_l + (1-\phi)\rho_s c_s \tag{4-4-23}$$

ここで、λ_{sat}は飽和時の地盤の熱伝導率、λ_{dry}は絶乾時の地盤の熱伝導率、c_lは水の比熱、c_sは固相の比熱、ρ_sは固相の密度である。

式(4-4-21)において、左辺の第 1 項は多孔質体の変形による可逆的な内部エネルギーの変化、第 2 項は内部エネルギーの変化、第 3 項は間隙水圧の変化および水蒸気に相変化することによる内部エネルギーの変化、第 4 項は熱伝導による内部エネルギーの変化（フーリエ則）、第 5 項は熱移流による内部エネルギーの変化を表す。

次に応力の釣り合い式について述べる。有効応力を次式で定義する。

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}' - \mathbf{I}\bar{P} \tag{4-4-24}$$

ここで、$\boldsymbol{\sigma}$は応力テンソル、$\boldsymbol{\sigma}'$は有効応力テンソル、$\bar{P}$は間隙圧である。ここでは、間隙ガス圧が大気圧に等しいとしているので、

$$\bar{P} = \chi P_l + (1-\chi)P_g = \chi P_l \tag{4-4-25}$$

となる。χは Bishop の有効応力パラメータであり、通常飽和度の関数として定義する。本研究では、飽和時$\chi = 1$、不飽和時$\chi = 0$を仮定する。模型実験に用いるベントナイト、岩石は非常に大きなサクションを持つ材料であるため、サクションを独立な応力成分とした。不飽和段階においてサクションの減少に伴って進行するベントナイトの膨潤については、後述するように応力ひずみ関係とは別に等価な節点力を作用させることでモデル化する。この仮定により、不飽和時の間隙圧は大気圧に等しくなる。この有効応力を用いて力学構成式は以下のように書ける。

$$d\boldsymbol{\sigma}' = \mathbf{D}\colon(d\boldsymbol{\varepsilon} - d\boldsymbol{\varepsilon}_T) = \mathbf{D}\colon(d\boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{I}\beta_{TD}dT) \tag{4-4-26}$$

ここで、$\mathbf{D}$は固相の剛性テンソルで、等方線形弾性体を仮定する場合はヤング率Eとポアソン比νで定義できる。

また、式(4-4-24)および式(4-4-26)を応力の釣り合い式に代入することで以下の支配方程式が得られる。

$$\nabla\cdot\left\{\mathbf{D}\colon\frac{\partial\boldsymbol{\varepsilon}}{\partial t}\right\} + \nabla\cdot\left(-\mathbf{I}\chi\frac{\partial P_l}{\partial t}\right) + \nabla\cdot\left\{(-\mathbf{D}\colon\mathbf{I}\beta_{TD})\frac{\partial T}{\partial t}\right\} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m\mathbf{g}) + \mathbf{F}_B \tag{4-4-27}$$

ρ_mは地盤の湿潤密度、$\mathbf{F}_B$は外力ベクトルである。膨潤については外力項を与えることでその効果を導入する。次小節でその取り扱いについて述べる。

式(4-4-27)において、左辺の第 1 項は弾性応力、第 2 項は間隙水圧、第 3 項は熱応力を表す。

（b）緩衝材の膨潤モデル

LOSTUF に導入されている緩衝材の膨潤挙動モデルについて説明する。緩衝材の膨潤圧は、有効粘土密度の関数として表される（さらに同じ種類のベントナイト単体であれば、乾燥密度や間隙率の関数として表すことができる）。ある有効粘土密度の緩衝材について、与えられた平均応力σ_mにおける最大膨潤ひずみε_{smax}が得られる。その関係を式で表すと以下のようになる。

$$\sigma_m = f(\varepsilon_{smax}) \tag{4-4-28}$$

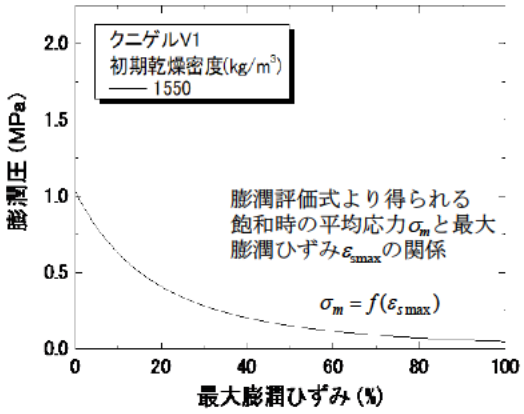
緩衝材の膨潤ひずみは外力項として取り扱う。水が浸透した要素（間隙水圧が上昇した要素）に対して膨潤計算を実施する（以下、膨潤要素と称す）。式(4-4-28)をグラフで表したものが図 4-4-111 の左上図である。これを用いて、膨潤要素に作用している応力状態から、その応力状態に対する飽和時の最大膨潤ひずみ$\varepsilon_{s\max}$を式(4-4-28)により算出する。また、間隙水圧の上昇（負値～ゼロ、サクションの低下）とともに膨潤が進行するとして、不飽和状態での最大膨潤ひずみ$\omega_{s\max}$を次式より算出する。

$$\omega_{s\max} = \varepsilon_{s\max}\left(\frac{|P_l - P_{l0}|}{|P_{l0}|}\right)^l \tag{4-4-29}$$

ここで、P_lは間隙水圧、P_{l0}は基準となる間隙水圧（負値）、lは不飽和時の膨潤の進行に関するパラメータである。これまでは$l = 1$を仮定し、間隙水圧の上昇量と線形に$\omega_{s\max}$の値が決めるようにしてきた。算出された最大膨潤ひずみ$\omega_{s\max}$を発生させるための等価な節点力$\mathbf{F}_p$を、膨潤要素を構成する節点に作用させ、変形、応力を計算する。計算された体積ひずみを累積膨潤ひずみε_{aw}とする。

$$\mathbf{F}_p = \int \mathbf{B}^T\mathbf{D}(\omega_{smax} - \varepsilon_{aw})\mathbf{I}dV \tag{4-4-30}$$

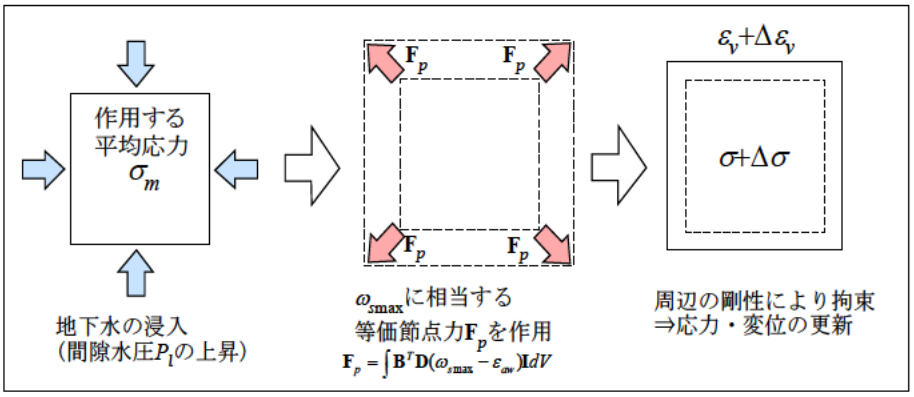
ここで、$\mathbf{B}$はひずみ－変位マトリクスである。最大膨潤ひずみが累積膨潤ひずみよりも大きければその差に相当するひずみを発生させるための等価な節点力を再び節点に作用させ、変形、応力を計算する。計算されたひずみを累積膨潤ひずみに加算する。以後、作用している応力での最大膨潤ひずみが累積膨潤ひずみを下回るまで膨潤計算を繰り返し、全膨潤要素において膨潤計算が終了したら次ステップへ移行する。この膨潤計算のフローおよび概念図を図 4-4-に示す。この膨潤計算の繰り返し中は温度および間隙水圧は固定している。前ステップからの間隙水圧の上昇がない場合、飽和後、作用している平均応力時の最大膨潤ひずみが既に発生している場合、膨潤は発生しない。



不飽和段階での最大膨潤ひずみω_{smax}

$$\omega_{s\max}(P_l) = \varepsilon_{s\max}\left(\frac{|P_l - P_{l0}|}{|P_{l0}|}\right)^{l}$$

ε_{smax} : 飽和時の最大膨潤ひずみ
P_l : 間隙水圧（不飽和時は負値）
P_{l0} : 初期間隙水圧
l : 膨潤の進行に関するパラメータ



累積膨潤ひずみε_{aw}が不飽和段階での最大膨潤ひずみ$\omega_{smax}(P_l)$に達するまで繰り返し計算

図 4-4- 111 LOSTUF における緩衝材膨潤モデル

（c）THM 連成ジョイント要素

緩衝材とオーバーパック（O/P）や岩盤との間は接触面であり、ジョイント要素など不連続接触を取り扱える要素を用いてこれを表現する必要がある。地盤や岩盤と構造物の隙間や、断層面など弱層のモデル化に用いられる一般のジョイント要素では、THM 連成の現象は取り扱わないが、本研究におけるニアフィールドの長期挙動評価ではこれを考慮する必要がある。そこで、LOSTUF では熱・水と力学の相互作用を考慮した THM 連成ジョイント要素を導入している。この要素は、Zienkiewicz et al. (2013)らによって導入されたジョイント要素と同様の定式化となっており、極薄いアイソパラメトリック要素に対して、前述の THM 連成系の支配方程式に基づく構成式を適用している。なお、ジョイント要素は本来、接触面をモデル化するものであることから、弾性体のポアソン効果がないことや、間隙率や熱膨張などの取り扱いについて、ソリッド要素とは幾つかの違いがある。しかし、基本的には剛性だけでなく水や熱の流れに対し、異方性の特性を設定可能なソリッド要素として導入されており、接触面のモデル化の他、剥離時に非線形性の高い小さな剛性を用いることで隙間のモデル化も可能である。

③　解析モデルの諸元・解析条件

実施した検討の解析モデルと解析条件について以下に説明を行う。解析の対象は本研究で実施した遠心模型試験を対象としており、Na 型ベントナイト（クニゲル V1）と砂混合土を掛け合わせたもの、および Ca 型ベントナイト（クニボンド）を用いた緩衝材を使用し、間隙水として人工海水を注水する条件下において、廃棄体加熱の有無による影響を検討したものである。供試体の寸法等は地層処分研究開発第 2 次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構、1999）で示されている処分孔竪置き方式の仕様例を図 4-4-112 のように 1/50 に収縮したものであり、本研究の解析ではこれを実寸でモデル化したものを解析対象とする。

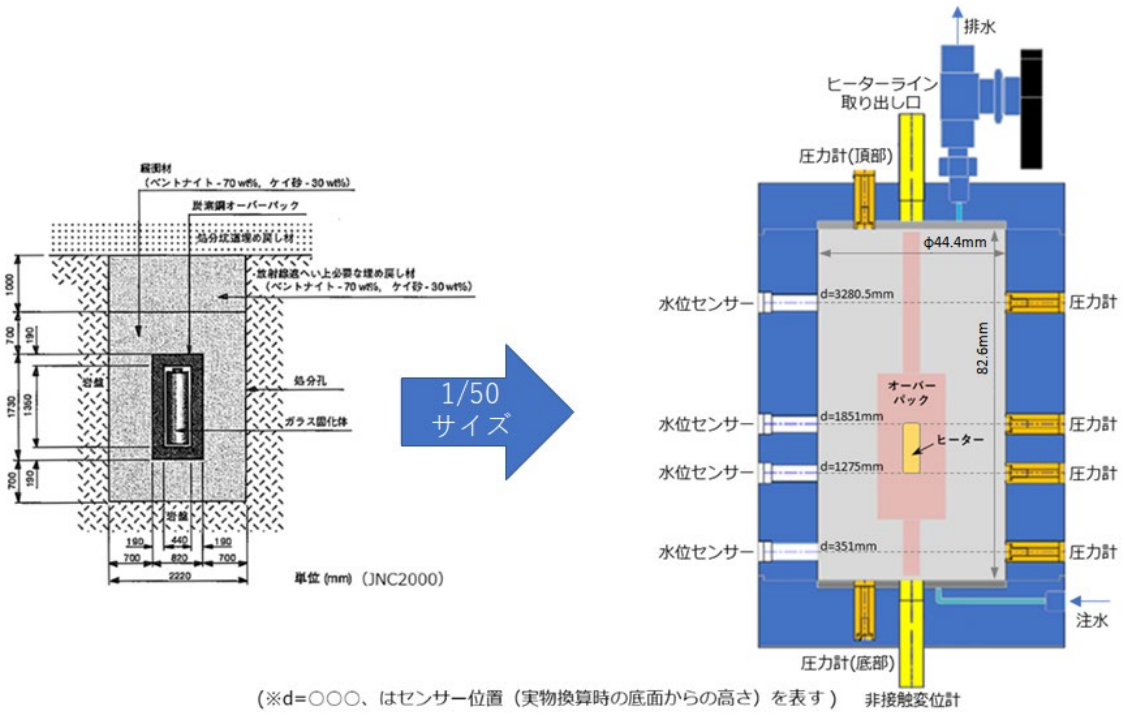


図 4-4- 112　対象とした遠心模型試験の概要

(a)　　解析対象ケース

解析対象とした遠心模型試験の対応する実験ケースの内容を表 4-4-27 に示す。混合土のケースはベントナイトと珪砂 6 号を 7：3 で混合したものであり、注水は下面から行い排水は上面から行っている。なお、実施した実験の注入水は人工海水のみであるが、解析ではその影響を検討するために純水を用いたケースも設定している。

表 4-4- 27　解析の対象とする実験ケース

ケース名	緩衝材に使用した試料	有効モンモリロナイト密度(Mg/m^3)	注入水	注水圧(MPa)	加熱	試験期間（日）	実物換算期間(年)
Na-8	クニゲル V1+砂混合土	1.00	人工海水	1.0	なし	40	273
Na-9T	クニゲル V1+砂混合土	1.00	人工海水	1.0	90℃	40	273
Ca-7	クニボンド	1.00	人工海水	1.0	なし	40	273

(b)　　解析モデル

対象は円筒容器内の現象であり、数値解析は軸対象解析として実施した。図 4-4-113 に実験に使用された小型圧力容器の概略図を示し、オーバーパック変位と緩衝材土圧および水位と水分量センサーの設置位置と対応する解析上の出力位置の名称を紫色字で示す。解析では実寸換算（50 倍）で計測位置に対応する位置に要素節点が配置されるように解析メッシュを作成した。

解析メッシュは地層処分研究開発第 2 次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構、1999）で示されている処分孔竪置き方式の仕様例の寸法通りに作成し、4cm 強の格子幅となるようにメッシュを作成した。オーバーパックの内側は均質化したモデル化とし、また実験模型に含まれる計測のための芯棒を実寸換算し、直径 21cm としてモデル化した。図 4-4-114 に解析メッシュを示す。なお、緩衝材と小型圧力容器の境界面およびオーバーパック模型との境界面には THM 連成ジョイント要素を配置し、図中に黄緑色の線で示した。

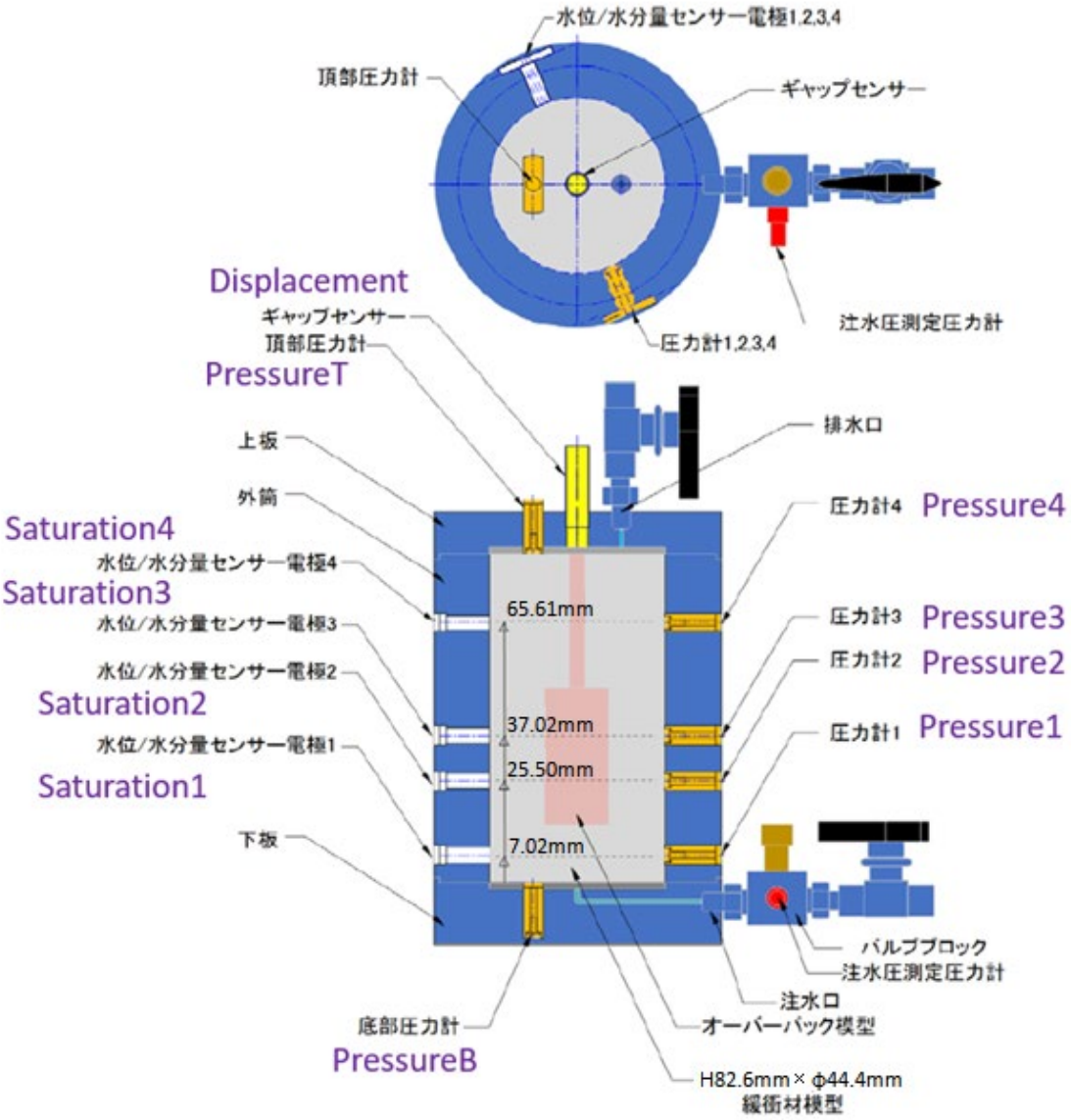


図 4-4- 113　小型圧力容器の概略図と計測位置

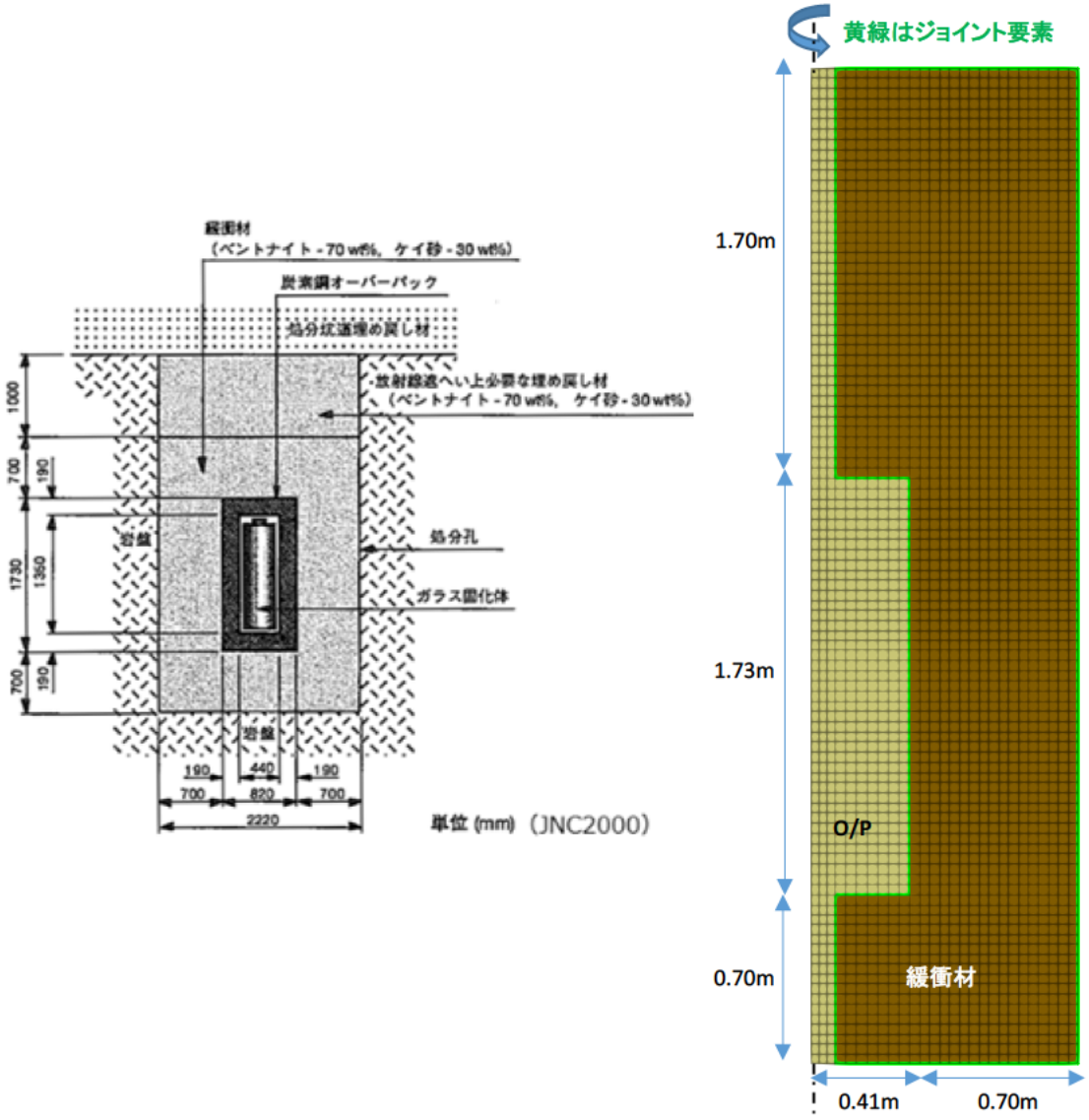


図 4-4- 114　軸対象解析に用いる解析メッシュ

(c)　　解析条件

対象実験の加熱の有無の違いにより、数値解析は水理-力学（HM）または熱-水理-力学（THM）連成解析として行った。初期条件として、サクションは後述の通り 55 MPa、温度は模型試験実施中の平均室温から 25℃とした。以降に、解析を行う上で設定した各種条件について説明する。

(i) 境界条件

解析で設定した力学および水理境界条件を図 4-4-115 に示す。力学境界は中心軸も含め全周ローラー支持条件であり、O/P 模型の上下の芯棒先端を除いて境界面に配置したジョイント要素の境界面側の自由度を拘束した。水理境界条件は下面注水圧を 1.0 MPa とし、上面は浸出面境界とすることで排水を行い、中心軸と外側面は非排水条件とした。加熱を考慮したケースでは、芯棒部分を除く O/P 模型内側と上下側面は温度制御し、1.5 ヵ月で昇温させて以降は温度一定条件とした。なお、水理境界と温度境界についてはジョイント要素の両面の節点に同じ設定を適用し、また両面間の水分移動は考慮していない。

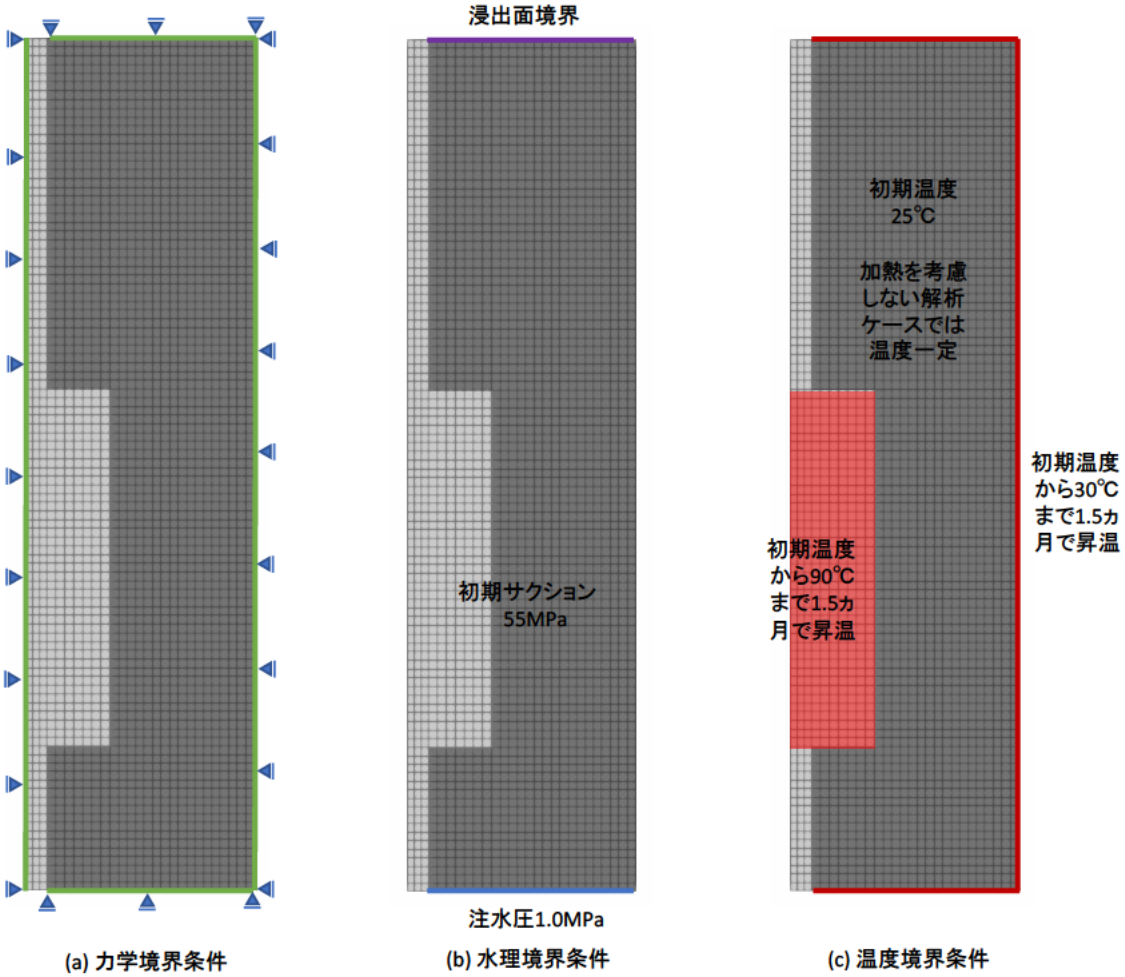


図 4-4- 115　解析上の境界条件

(ii) 基本的な検討ケースで使用する力学特性値

本研究の解析検討では、全 4 ケースの試験条件を想定した基本検討を最初に行い、その後に結果を踏まえて追加検討を実施している。これらの解析で対象とする緩衝材の諸条件は令和 3 年度の沿岸部処分システム評価確証技術開発（産業技術総合研究所、原子力環境整備促進・資金管理センター、電力中央研究所、2021）で実施されたものと同一であり、一覧にして表 4-4-28 に示す。

緩衝材の力学特性は浸潤過程で大きく変化し、剛性低下が進行するとともに間隙水の作用によりポアソン比が大きくなることから、弾性パラメータの飽和度依存性を考慮した数値解析ケースが設定されている。本検討においても 1 ケースを除いてこれを踏襲し、ヤング率とポアソン比について以下の式に示される飽和度依存性を設定した。

$$E_{50} = 171 - 174S_l \quad (E_{50} \geq 10MPa) \tag{4-4-31}$$

$$\nu = 0.30 + 0.19S_l \tag{4-4-32}$$

なお、ヤング率のE_{50}値は平成 27～28 年度の処分システム工学確証技術開発（原子力環境整備・資金管理センター、2016、2017）で、クニゲル V1 と砂の混合土（7：3）の含水比を変えた各供試体の圧縮試験時に取得されたデータに基づいているが、飽和近傍におけるデータは取得しておらず、2000 年レポート（核燃料サイクル機構、1999）を参考としてヤング率の下限値を 10MPa に設定している。また、本検討でも解析対象とするクニボンドに対する対応データは取得されていないため、クニゲル V1 と同じ特性をそのまま用いた。

膨潤特性としては要素試験結果より有効粘土密度ρ_cと飽和時に生じる最大膨潤圧P_sの関係を整理し、式(4-4-33)に示すパラメータpとqを設定している。

$$P_s = p \cdot exp\,(q \cdot \rho_c) \tag{4-4-33}$$

不飽和時に生じる膨潤圧の大きさは前述の通り、要素に生じる平均応力とサクションから計算し、その進行速度はパラメータlによって制御され、本研究では$l = 1$を仮定した。

式(4-4-33)の有効粘土密度と膨潤圧の関係より、膨潤ひずみと最大膨潤圧の関係を整理したグラフを図 4-4-116 に示す。また、表 4-4-29 に基本的な検討ケースで設定した力学特性の一覧を示す。

この他、オーバーパック模型は鉄製であり、同様の模型試験と再現解析を実施した平成 28 年度の処分システム工学確証技術開発の報告（原子力環境整備促進・資金管理センター、2017）を参照し、表 4-4-30 に示す力学特性を設定した。

表 4-4- 28　対象とする緩衝材の諸条件一覧

ベントナイトの種別		クニゲルV1砂混合		クニボンド	
間隙水の種別		純水	塩水	純水	塩水
初期乾燥密度	Mg/m^3	1.60	1.60	1.12	1.12
初期間隙比	—	0.71	0.71	1.39	1.39
初期間隙率	—	0.42	0.42	0.58	0.58
ベントナイト混合率	%	70	70	100	100
初期有効粘土乾燥密度	Mg/m^3	1.37	1.37	1.12	1.12
モンモリロナイト含有率	%	57.9	57.9	81.3	81.3
有効モンモリロナイト乾燥密度	Mg/m^3	1.00	1.00	1.00	1.00
固相の密度	Mg/m^3	2.74	2.74	2.67	2.67
間隙水密度	Mg/m^3	1.00	1.02	1.00	1.02

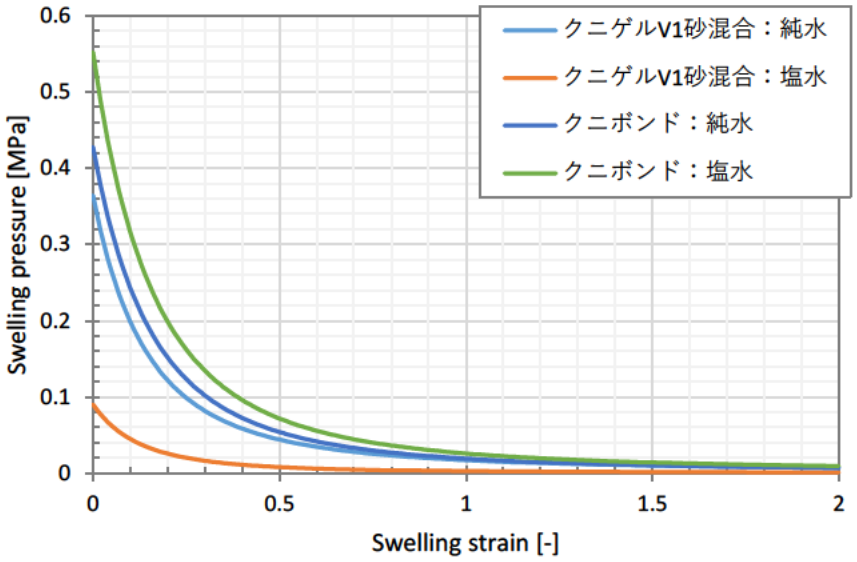


図 4-4- 116　各緩衝材条件における膨潤ひずみと膨潤圧の関係

表 4-4- 29　基本的なケース検討で使用する力学特性の一覧

ベントナイトの種別		クニゲルV1砂混合		クニボンド	
間隙水の種別		純水	塩水	純水	塩水
ヤング率	MPa	式※1		式※1	
ポアソン比	—	式※2		式※2	
膨潤特性パラメータp (※3)	—	1.38E-03	1.50E-04	8.57E-04	1.21E-03
膨潤特性パラメータq (※3)	—	4.08	4.68	5.57	5.49
膨潤の進行速度パラメータl	—	1.00	1.00	1.00	1.00

※1 式(4-4-31)、※2 式(4-4-32)、※3 最大膨潤圧を設定する式(4-4-33)のパラメータ。

表 4-4- 30　オーバーパック模型に設定した力学特性

密度(Mg/m^3)	ヤング率(GPa)	ポアソン比(－)
6.35	193.0	0.30

(iii) 基本的な検討ケースで使用する水理特性値

水理特性は保水特性と透水試験結果を整理して設定し、表 4-4-31 に示す条件を設定した。水分特性曲線は式(4-4-34)に示す van Genuchten モデル（van Genuchten、1980）から設定し、$S_{l0} = 0.1$および$S_{lmax} = 1.0$として計算した。なお、S_lは飽和度、sはサクションであり、P_0は水分特性曲線の骨格を制御する基準サクションである。また、透水係数は式(4-4-35)から有効粘土密度の関数として設定した。

$$S_l = S_{l0} + (S_{lmax} - S_{l0})\left[1 + \left(\frac{s}{P_0}\right)^{\frac{1}{1-\lambda}}\right]^{-\lambda} \quad (4\text{-}4\text{-}34)$$

$$k_w = a \cdot exp\,(b \cdot \rho_c) \quad (4\text{-}4\text{-}35)$$

図 4-4-117 に各緩衝材条件における有効粘土密度と透水係数の関係のグラフを示す。なお、初期サクションはクニゲル V1 を対象に取得された既往検討（原子力環境整備促進・資金管理センター、2017）を参照し、全ケースで一律に 55MPa とし、緩衝材の相対透水係数は三乗則から設定を行った。各緩衝材条件における初期飽和度の一覧を表 4-4-32 に、水分特性曲線および相対透水係数と飽和度の関係を図 4-4-118 に示す。

表 4-4- 31　基本的な検討ケースで使用する水理特性の一覧

ベントナイトの種別		クニゲルV1砂混合		クニボンド	
間隙水の種別		純水	塩水	純水	塩水
水分特性曲線P_0 (※1)	MPa	0.9	2.6	3.5	5.2
水分特性曲線 λ (※1)	—	0.27	0.31	0.30	0.35
透水係数パラメータa (※2)	—	2.85E-10	4.84E-06	4.35E-05	4.35E-05
透水係数パラメータb (※2)	—	-4.8	-9.81	-14.6	-14.6
相対透水係数	—	S_l^3	S_l^3	S_l^3	S_l^3

※1 van Genuchten モデルのパラメータ

※2 透水係数を設定する数式のパラメータ

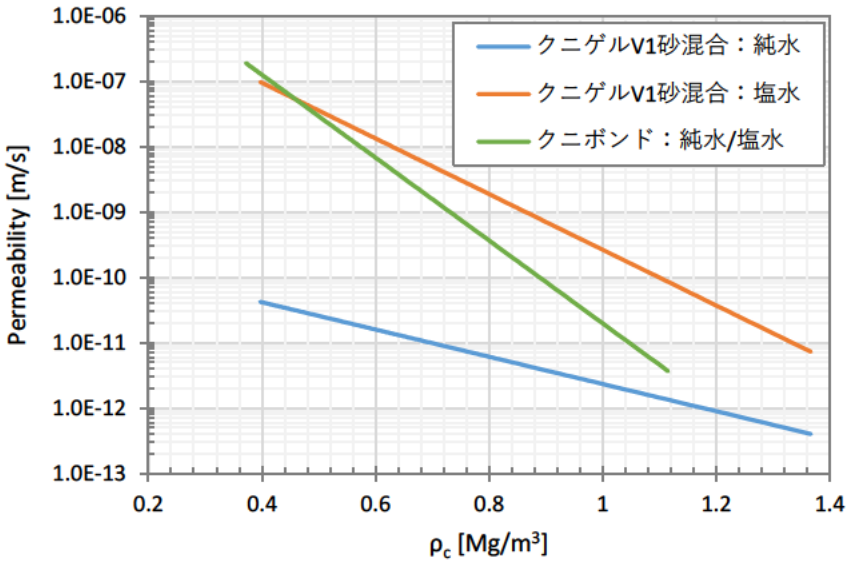


図 4-4- 117　各緩衝材条件における有効粘土密度と透水係数の関係

表 4-4- 32　各緩衝材条件における初期飽和度の一覧

ベントナイトの種別		クニゲルV1砂混合		クニボンド	
間隙水の種別		純水	塩水	純水	塩水
初期飽和度	%	29.6	32.8	37.5	35.0

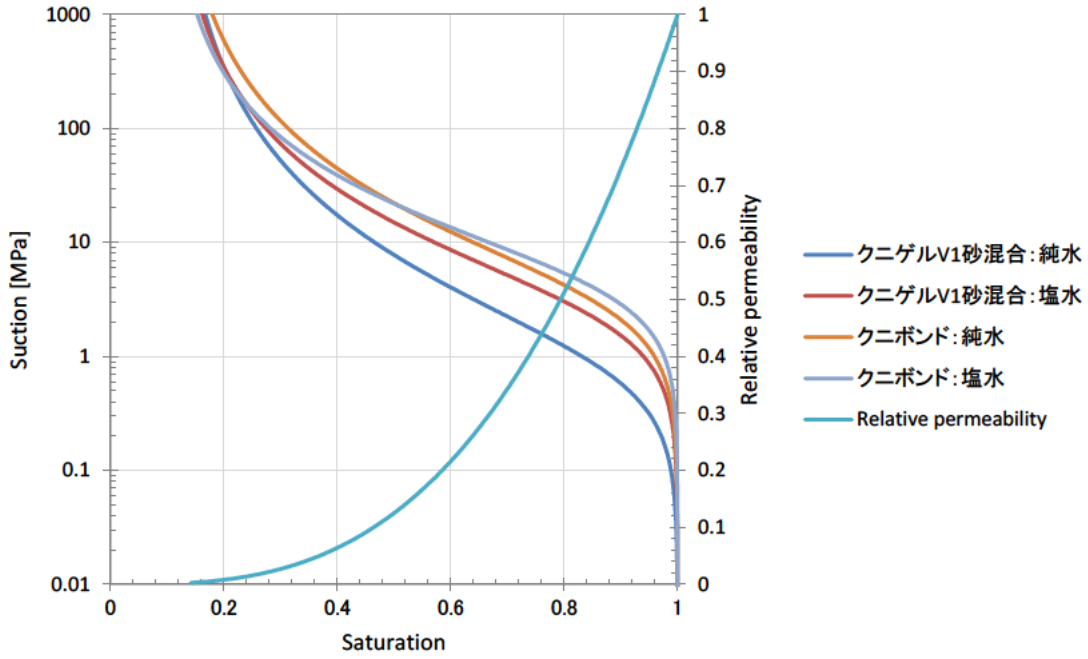


図 4-4- 118　各緩衝材条件における水分特性曲線と相対透水係数

(iv) 基本的な検討ケースで使用する伝熱特性値

クニゲル V1 の伝熱特性は既往の検討（原子力環境整備促進・資金管理センター、2017、2018）を参照し、クニボンドの特性は新たに実施した要素試験結果を整理して、表 4-4-33 に示す条件を設定した。なお、クニボンドの固相の比熱は温度依存性を考慮して式(4-4-36)から設定している。

表 4-4- 33　基本的な検討ケースで使用する伝熱特性の一覧

ベントナイトの種別		クニゲルV1砂混合		クニボンド	
間隙水の種別		純水	塩水	純水	塩水
乾燥時の熱伝導率	W/m K	0.465	0.465	0.300	0.300
飽和時の熱伝導率	W/m K	2.188	2.188	1.300	1.300
固相の比熱	J/kg K	884	884	式※	
線膨張係数	K^{-1}	2.05×10^{-5}	2.05×10^{-5}	1.16×10^{-5}	1.16×10^{-5}

※ 式(4-4-36)

$$c_s = 1.5T + 811 \qquad (4\text{-}4\text{-}36)$$

(v) 間隙水としての海水の考慮

純水と海水では特性が異なり、特に加熱を考慮した解析ケースでは物性条件に温度依存性があることから影響が生じると考えられる。令和 3 年度の沿岸部処分システム評価確証技術開発（産業技術総合研究所、原子力環境整備促進・資金管理センター、電力中央研究所、2021）では純水を基本としており、海水については間隙水密度の違いのみ考慮していたが、本検討では透水性や潜熱の温度依存性や密度変化の特性の違いを考慮し、純水と海水を区別した。海水の物性は MIT の SEAWATER THERMOPHYSICAL PROPERTIES LIBRARY（Nayar et. al, 2016）を参照し、塩分濃度 36 g/kg、大気圧条件下で 0～100℃の範囲の温度依存性の組み込みを行った。

間隙水の密度ρと粘度μには温度Tに対する依存性があるため透水係数にも温度依存性がある。しかし、本検討では要素試験結果から有効粘度密度と透水係数の関係を整理して透水性を評価しているため、温度依存性を考慮する上では要素試験時の温度を 20℃として固有透過度を評価している。参考として透水係数kと固有透過度κの関係を LOSTUF では下式で整理しており、これまで純水のみを対象としているが、海水を使用した際の温度依存性の評価のために同様の整理を行った。透水性に関する温度依存性の純水と海水の違いを表 4-4-34 に示す。

$$\frac{k}{\kappa}=\frac{\rho g}{\mu}=A_2+\frac{A_1-A_2}{1+exp\left(\frac{T-x_0}{dx}\right)} \qquad [m^{-1}s^{-1}] \tag{4-4-37}$$

また、間隙水の潜熱については下式で温度依存性を整理している。表 4-4-35 に純水と海水の式中のパラメータの違いを示す。

$$L=A_2+A_1(T-x_0) \qquad [J/g] \tag{4-4-38}$$

この他、間隙水の密度に対する圧力および温度依存性の条件として圧縮係数と熱膨張係数、温度依存性が殆ど見られない物性条件として間隙水の比熱があり、純水と海水の設定条件の違いを表 4-4-36 に示す。

表 4-4- 34　透水係数と固有透過度の関係についての純水と海水の違い

式中のパラメータ		純水	海水
A_1	$m^{-1}s^{-1}$	-1.42710×10^{7}	-1.02362×10^{7}
A_2	$m^{-1}s^{-1}$	8.71280×10^{7}	6.96165×10^{7}
X_0	K	382.80361	368.32329
dx	K	76.88589	66.83427

表 4-4- 35　潜熱の温度依存性についての純水と海水の違い

式中のパラメータ		純水	海水
A_1	J/gK	-2.36680	-2.34744
A_2	J/g	2500.80	2412.42
X_0	K	273.15	273.15

表 4-4- 36 密度および比熱に関する純水と海水の違い

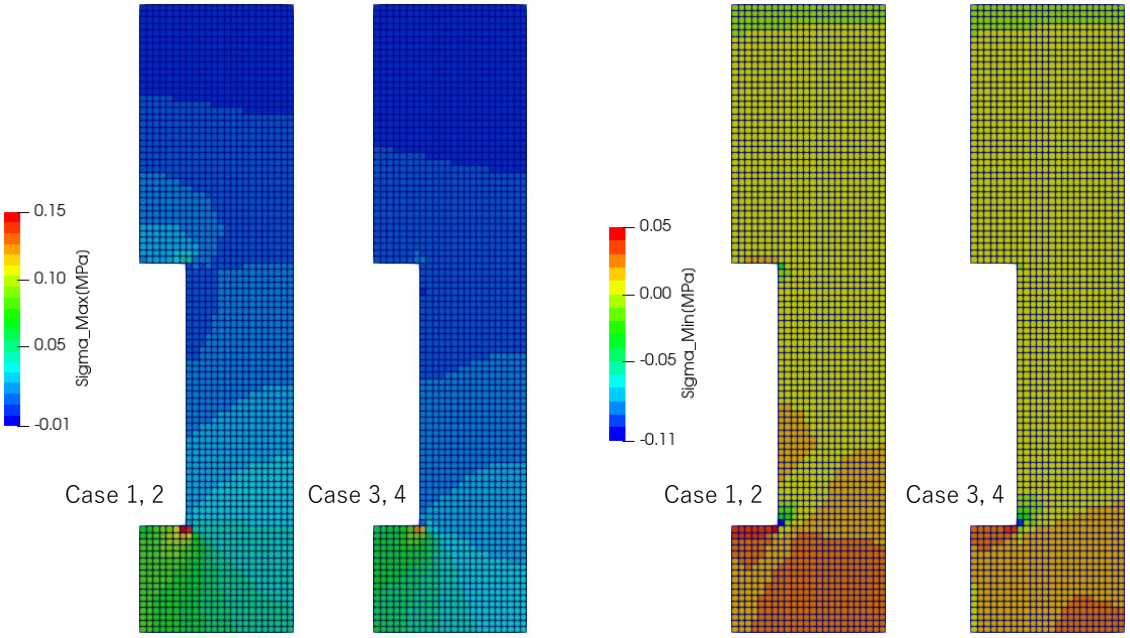
間隙水物性		純水	海水
基準密度	Mg/m^3	1.000	1.020
圧縮係数	1/MPa	5.0×10^{-4}	4.4×10^{-4}
熱膨張係数	1/K	5.0×10^{-4}	5.2×10^{-4}
比熱	J/kg K	4200	4000

(vi) 接触面のモデル化

小型圧力容器およびオーバーパックと緩衝材の間にはジョイント要素を配置している。ジョイント要素は剥離や滑動が生じた際には剛性が消失する非線形要素であり、接地時の剛性は一般に両面のより剛性の高い方を基準に設定する。本検討ではオーバーパックのヤング率と同じ条件とし（Zienkiewicz 型ジョイントの取り扱いはソリッド要素と同様である）、摩擦係数は既往検討（原子力環境整備促進・資金管理センター、2017）と同様に一律 0.3 とした。なお、LOSTUF で使用する THM 連成ジョイント要素では伝熱や水理特性を設定可能であるが、本検討では接触面を介した水分移動や熱の移動を考慮する必要がないため、透水性は 0 とするとともに両面で同じ温度境界条件を適用している。

(vii) 初期応力

緩衝材の膨潤挙動には拘束圧が関係するため初期応力の設定は重要である。本検討ではジョイント要素による接触面の非線形挙動を考慮した初期応力解析を実施し、これを初期応力として設定した。実施した初期応力解析結果より、各ケースの圧縮を正とする初期の主応力分布を図 4-4-119 に示す。



(a) 最大主応力分布　　(b) 最小主応力分布

図 4-4- 119　各ケースにおける初期応力分布（圧縮を正とする）

(d)　　追加の検討ケース

遠心模型試験 4 ケースを対象に数値解析を実施し、その結果を踏まえて追加の検討ケースを実施し、解析条件によって生じる結果への影響の大きさを確認した。追加検討ケースは実験結果との比較検討において見られた違いなどに着目し、Case 1 以外の各ケースを対象として設定し、特に Case 4 を対象とする解析ケースを多く実施した。

(i) 追加検討ケースの一覧

追加検討では、試験対象としては実施していない間隙水を純水とする検討を、加熱を考慮した基本ケースに対して設定している。また、クニボンドを対象としたケースでは透水性が試験結果より大きいため、透水性の小さい要素試験データに着目して透水性を小さくしたケースを基本とし、また水蒸気拡散に影響する屈曲度の大きさの感度を確認した。表 4-4-37 に Case 2 に対する追加検討ケースの一覧、表 4-4-38 に Case 3 に対する追加検討ケースの一覧を示す。更に、Case 4 では O/P 変位に直接影響する膨潤特性や熱膨張の違い、伝熱特性や緩衝材の弾性パラメータを変更するなどの多くの検討条件を設定している。に Case 4 に対して設定した追加検討ケースの一覧を示す。

表 4-4-37　Case 2 に対する追加検討ケース一覧

ケース名	検討内容
Case 2-1	間隙水を純水に変更する。水理特性や膨潤特性が変わることによる影響を確認。

表 4-4- 38　Case 3 に対する追加検討ケース一覧

ケース名	検討内容
Case 3-1	透水性の小さい試験データに着目して透水係数を見直す。
Case 3-2	Case 3-1 を基にして、緩衝材の屈曲度を 0.67 から 1.0 へ修正する。

表 4-4- 39　Case 4 に対する追加検討ケース一覧

ケース名	検討内容
Case 4-1	透水性の小さい試験データに着目して透水係数を見直す。
Case 4-2	Case 4-1 を基にして、間隙水を純水に変更する。
Case 4-3	Case 4-1 を基にして、緩衝材の屈曲度を 0.67 から 1.0 へ修正する。
Case 4-4	Case 4-2 を基にして、膨潤特性を変更する(膨潤変形試験のデータに基づく)。
Case 4-5	Case 4-1 を基にして、緩衝材の線膨張係数を 0 として熱応力の影響を確認する。
Case 4-6	Case 4-1 を基にして、飽和時の熱伝導率を 0.6W/mK に低下させて不確実性を検討。
Case 4-7	Case 4-1 を基にして、膨潤の進行を飽和度の関数で制御する（元はサクションで制御）。
Case 4-8	Case 4-1 を基にして、O/P 模型の芯棒の線膨張係数を 0 とする。
Case 4-9	Case 4-1 を基にして、緩衝材のポアソン比を飽和度依存ではなく 0.3 で一定とする。

(ii) 緩衝材の透水性の見直し

クニボンドを対象とした Case 3 および Case 4 では実験結果に比べて浸潤速度が大きい傾向があったことから透水性を小さくする見直しを行った。要素試験結果より透水性の小さいデータに着目し、透水係数を有効粘土密度の関数として定義した式(4-4-35)のパラメータの内、aを見直して 1.59E-5 とする修正を全ての追加検討ケースで採用した。図 4-4-120 に追加検討で採用した条件を含む各緩衝材条件の有効粘土密度と透水係数の関係を示す。

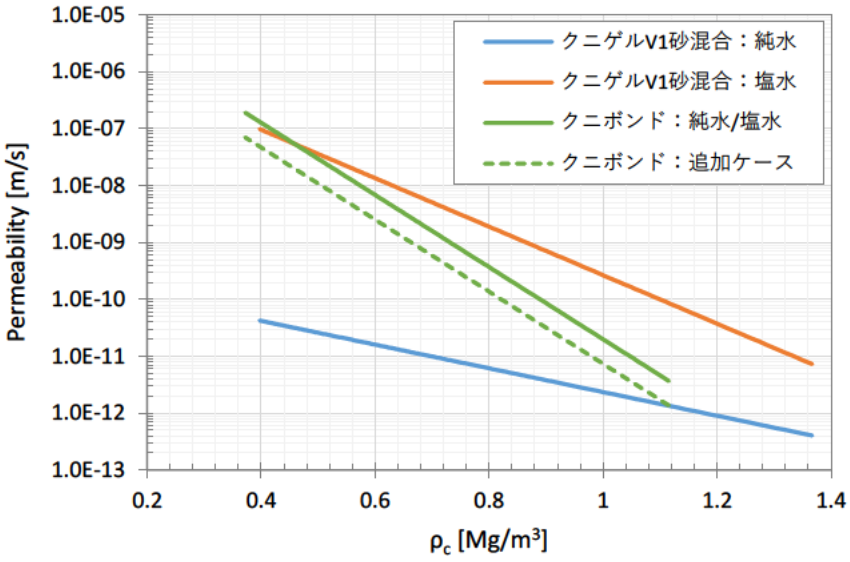


図 4-4- 120　追加検討を含む各緩衝材条件における有効粘土密度と透水係数の関係

(iv) 緩衝材の膨潤特性の変更

Case 4-4 ではクニボンドの最大膨潤ひずみと膨潤圧の関係を他のケースと変更している。このケースは間隙水を純粋に変更した Case 4-2 を基に設定しており、膨潤変形試験結果に基づいて下式から膨潤圧 σ_m (MPa)と膨潤ひずみε_{smax} (%)の関係を定義している。比較対象となる Case 4-2 の条件と合わせ、図 4-4-121 に膨潤ひずみと最大膨潤圧の関係を示す。

$$\varepsilon_{smax} = -11.4301 - 28.7232 \log \sigma_m \tag{4-4-39}$$

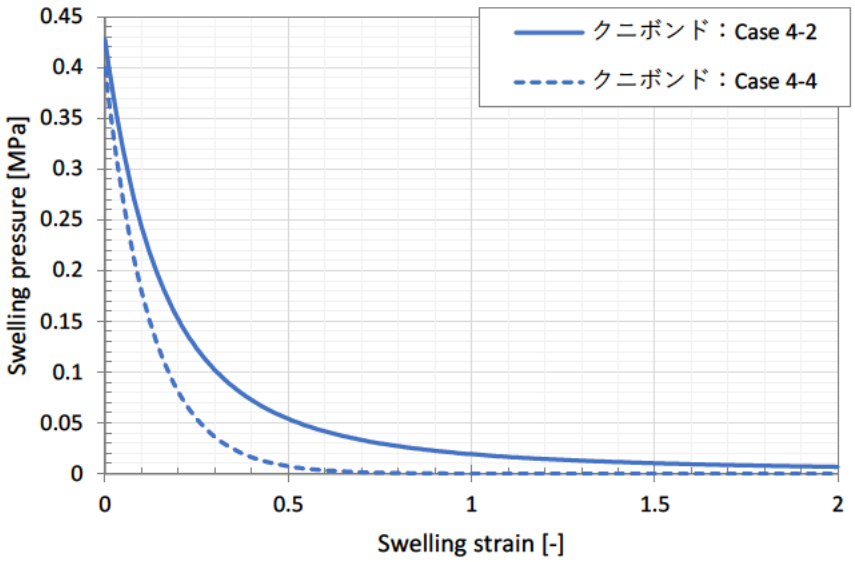


図 4-4- 121　クニボンド：純水を対象とする追加検討ケースの膨潤ひずみと膨潤圧の関係

④　解析結果（基本の検討ケース）

基本的なケースの解析結果より各ケースの 1000 年経過時における最終変位分布を図 4-4-122 に示す。また、以降の図 4-4-123 から図 4-4-152 に、オーバーパック変位、各位置の緩衝材土圧と飽和度の経過時間変化をグラフで示し、合わせて 1、10、50、100、1000 年経過時における緩衝材の飽和度、乾燥密度、含水比の分布、加熱を考慮したケースについては温度の分布図を示す。解析結果はケース毎にまとめて示し、各ケース結果の末尾に解析結果に対する考察を添えている。

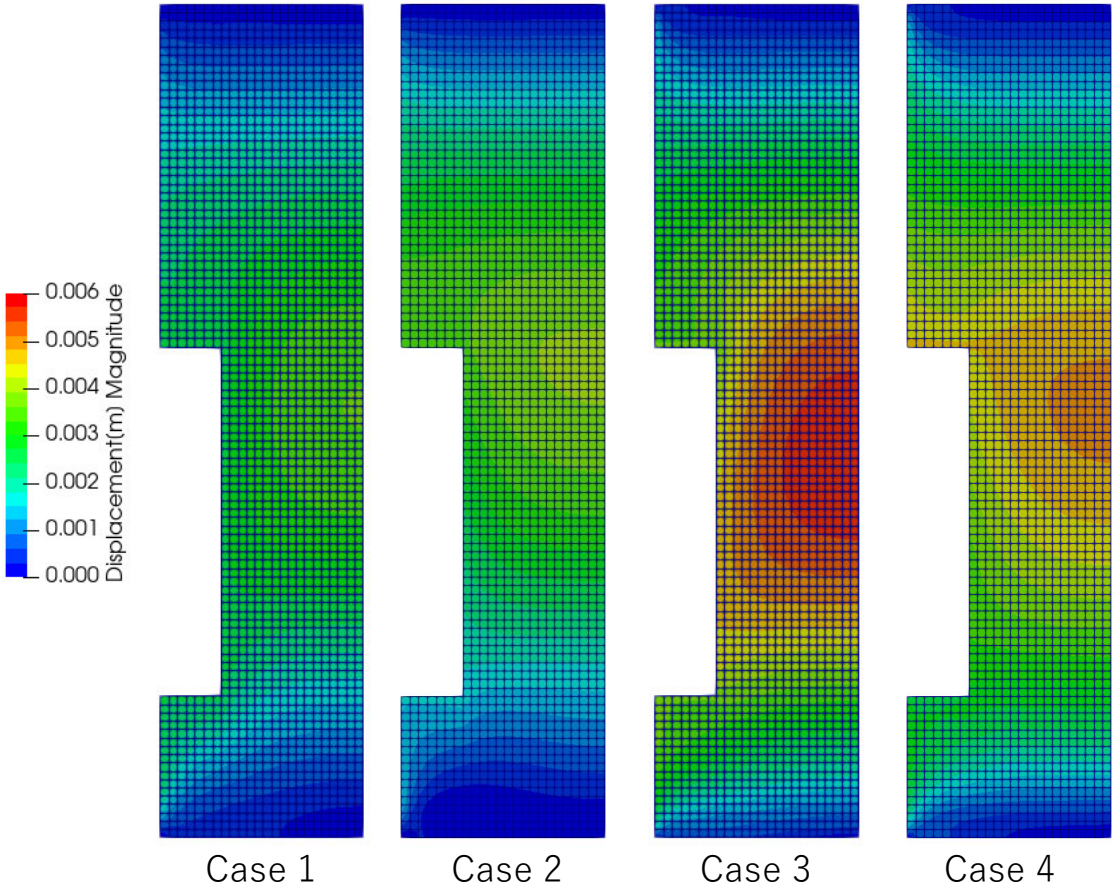


図 4-4- 122　各ケースの最終変位分布

(a) Case 1 の解析結果

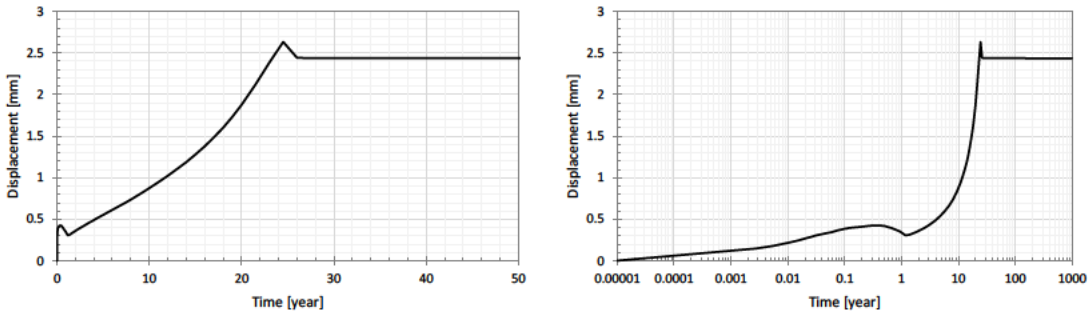


図 4-4- 123　Case 1 の O/P 変位の経時変化

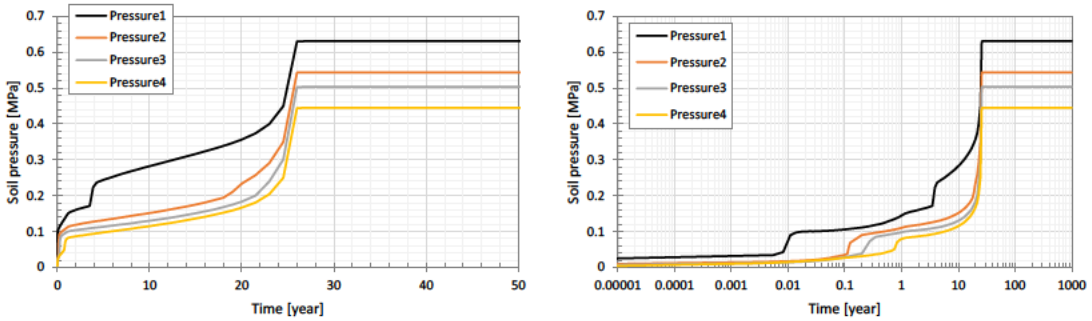


図 4-4- 124　Case 1 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化

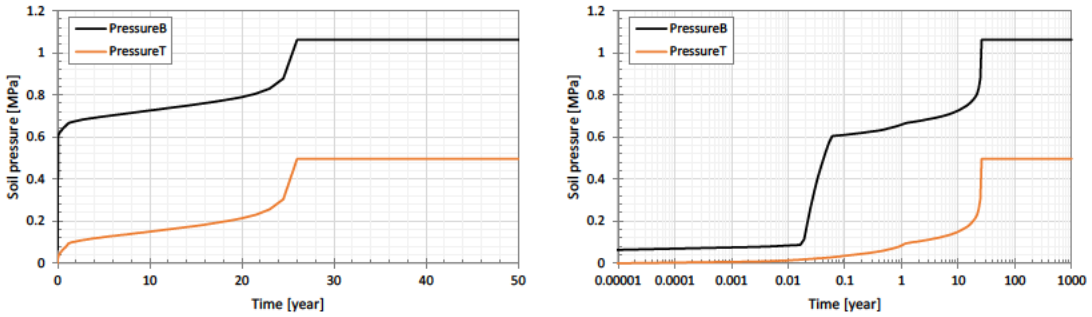


図 4-4- 125　Case 1 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化図

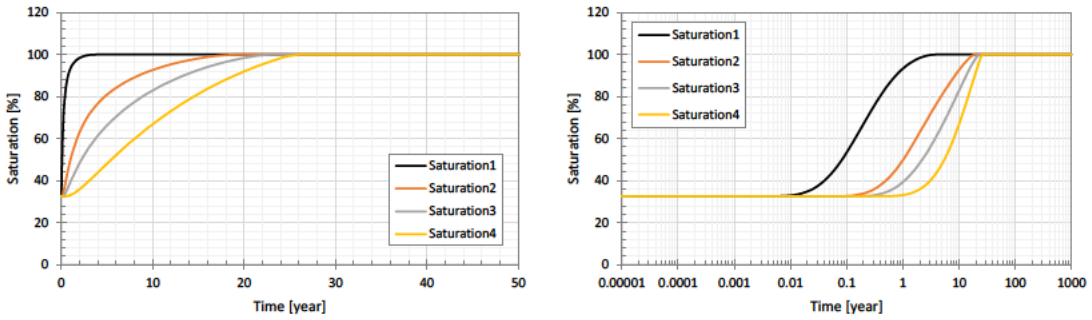


図 4-4- 126　Case 1 の各位置の飽和度の経時変化

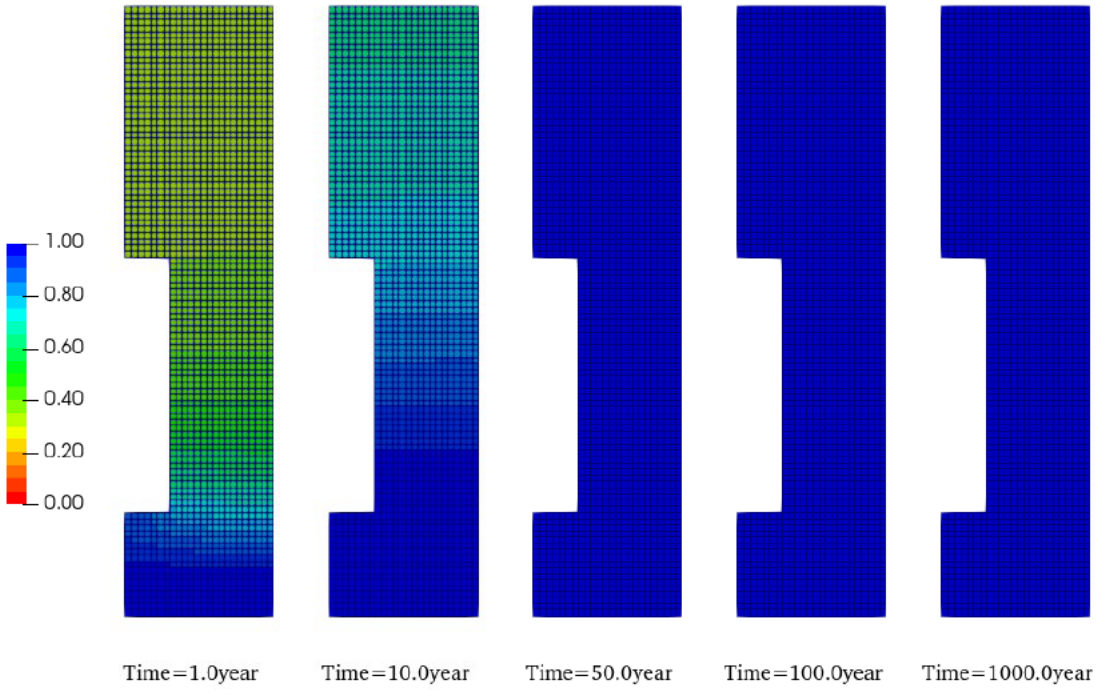


図 4-4- 127　Case 1 の飽和度分布の経時変化

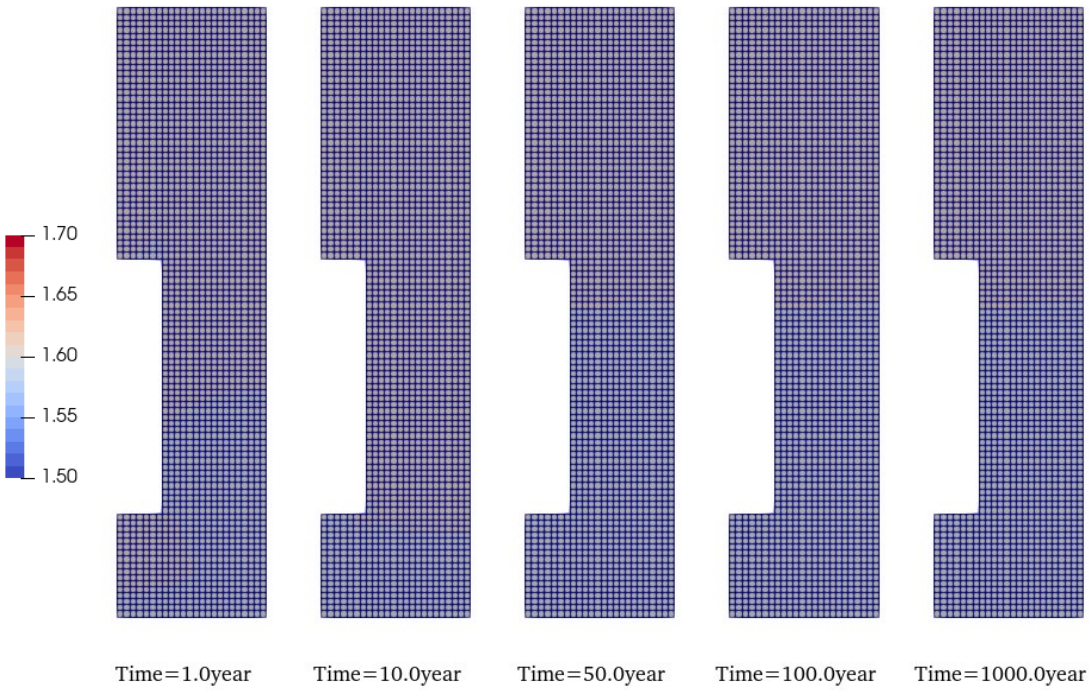


図 4-4- 128　Case 1 の乾燥密度分布の経時変化

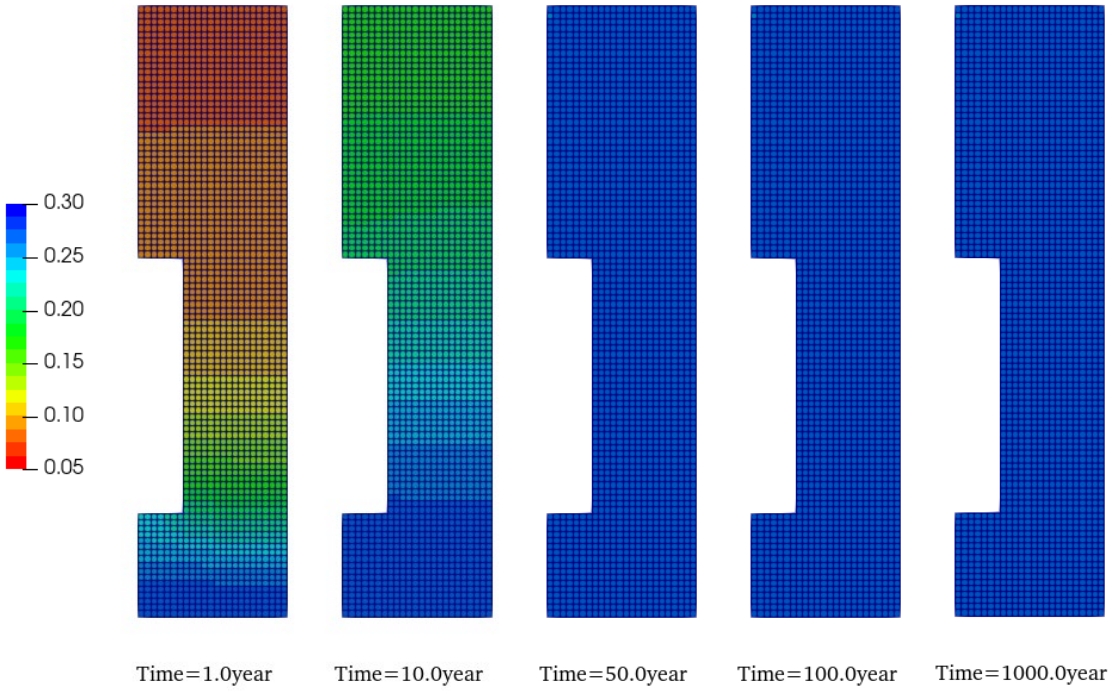


図 4-4- 129　Case 1 の含水比分布の経時変化図

このケースはクニゲル V1+砂混合土と人工海水を組み合わせた緩衝材条件であり、O/P 模型の加熱は考慮していない。底面は飽和に至るのが早いため膨潤作用の立ち上がりも早く、O/P の変位量は注水開始から直ぐ上昇を開始する。しかし、下部緩衝材の膨潤で O/P が上昇しているにも関わらず、1 年経過時頃に変位量が少し小さくなっていることが認められ、これは芯棒部分が滑りを生じて一時的に復元したためであり、芯棒の下端変位を計測対象としていることによる。その後、浸潤の進行により急激に変位量が立ち上がり、25 年経過時頃には上部も飽和に至るため、上部緩衝材の膨潤作用や間隙水圧の発生により O/P は押し戻されている。そして、全体が冠水して以降は過渡的な変化は生じなくなっている。O/P の芯棒付け根部分を除いて一様な円筒断面であり、密度や含水過程に斑は殆ど生じていないことが確認できる。

(b) Case 2 の解析結果

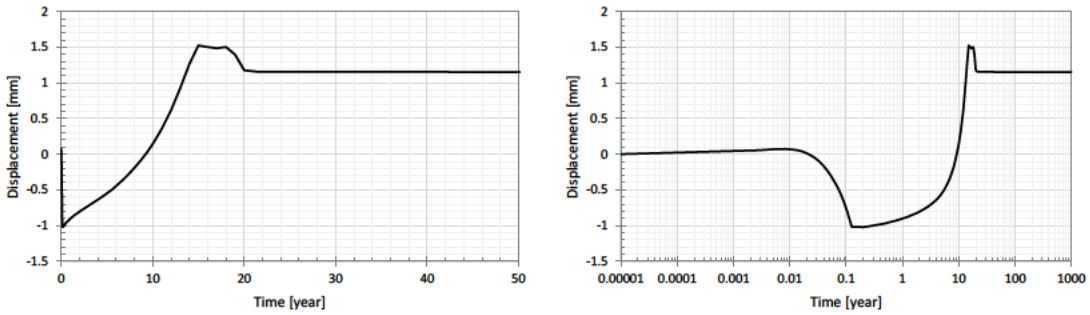


図 4-4- 130　Case 2 の O/P 変位の経時変化

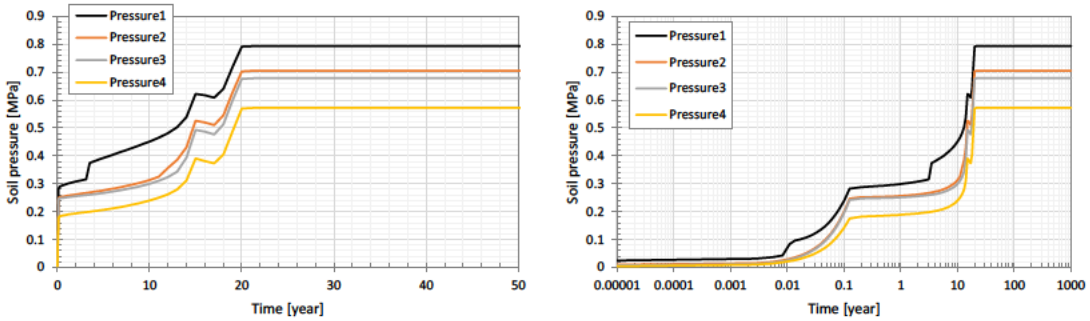


図 4-4- 131　Case 2 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化

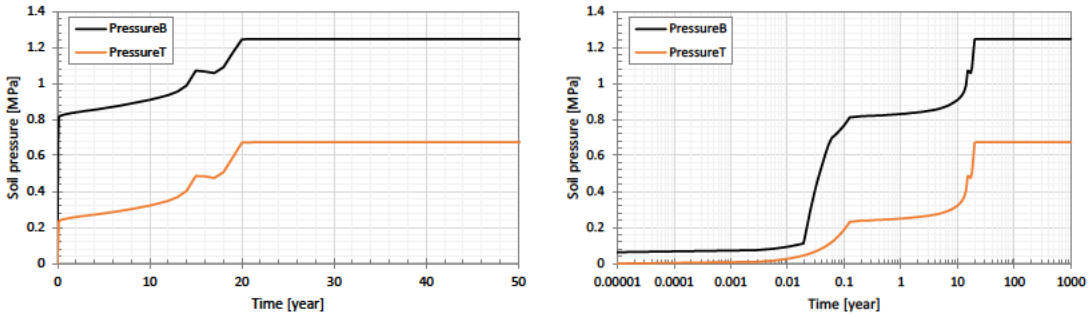


図 4-4- 132　Case 2 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化

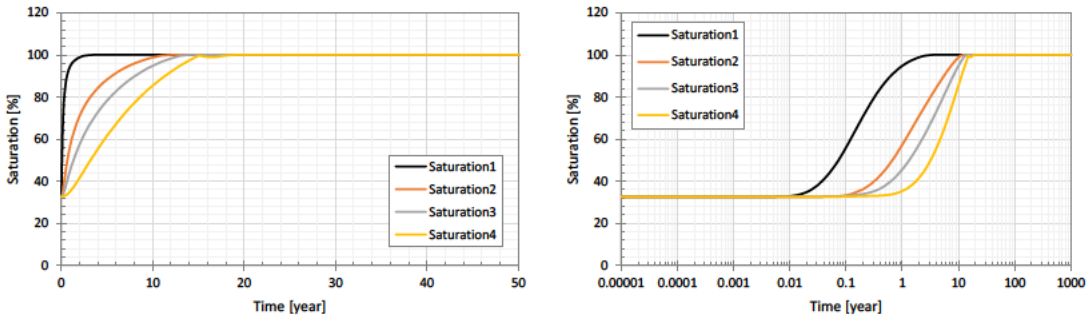


図 4-4- 133　Case 2 の各位置の飽和度の経時変化

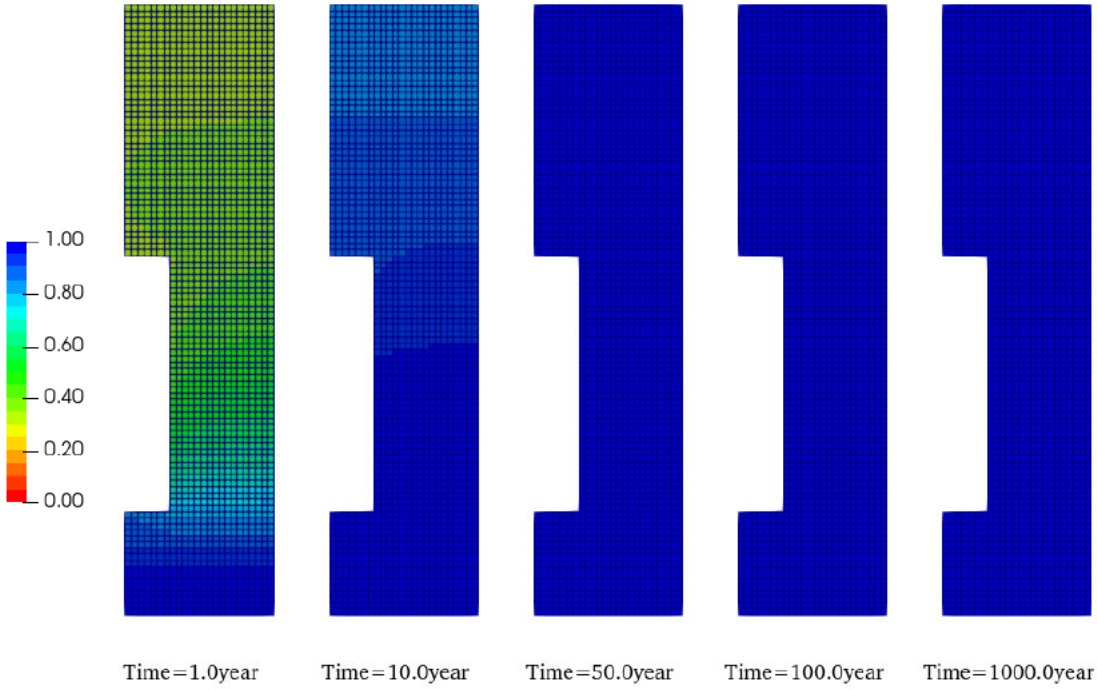


図 4-4- 134　Case 2 の飽和度分布の経時変化

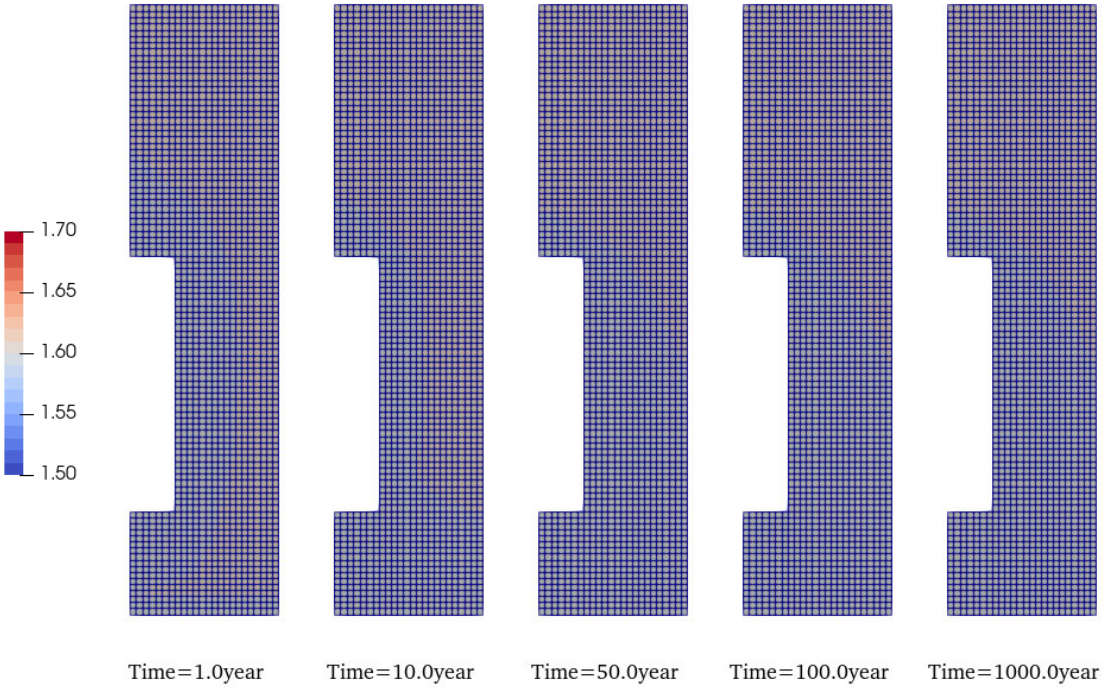


図 4-4- 135　Case 2 の乾燥密度分布の経時変化

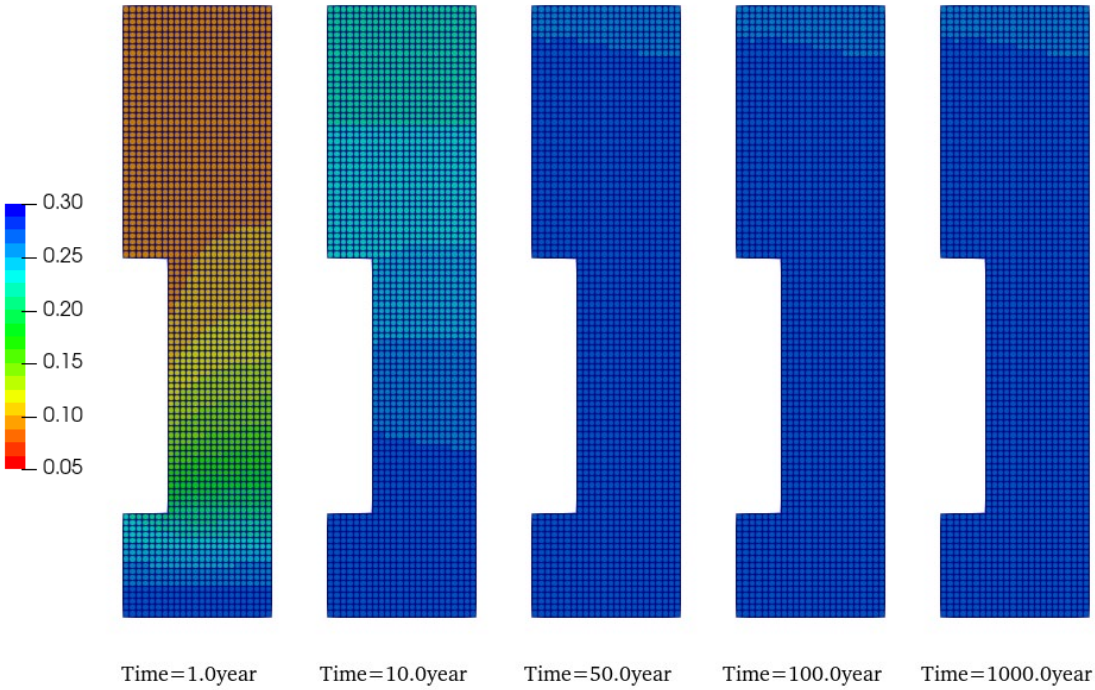


図 4-4- 136　Case 2 の含水比分布の経時変化

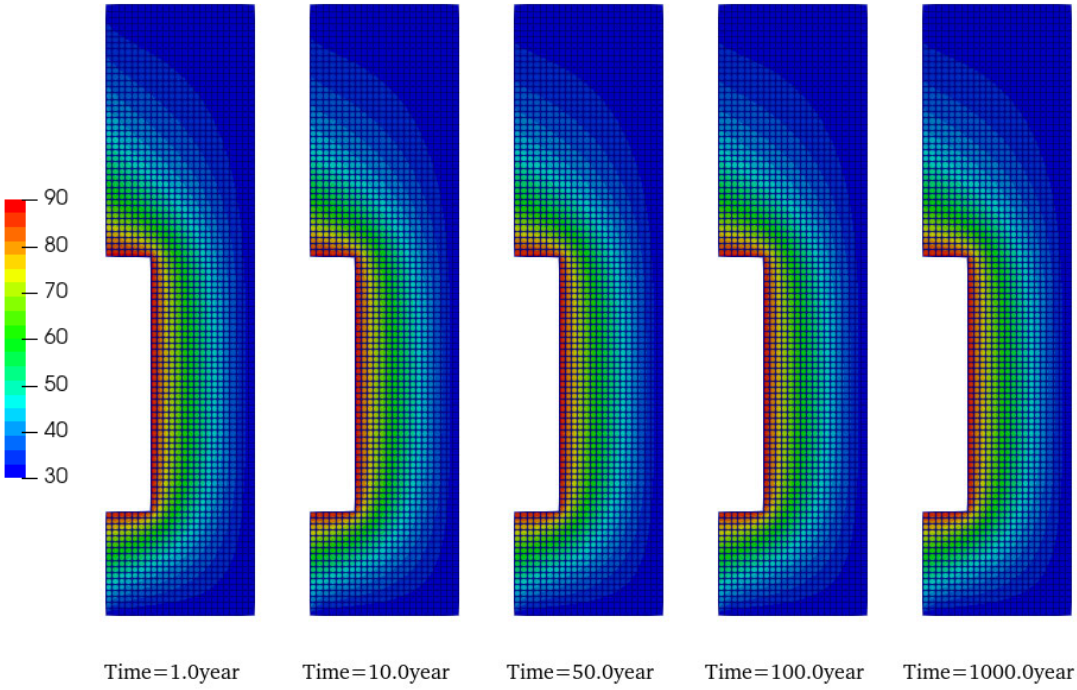


図 4-4- 137　Case 2 の温度分布の経時変化

このケースはクニゲル V1+砂混合土と人工海水を組み合わせた緩衝材条件であり、O/P 模型の加熱を考慮したケースである。Case 1 に対して加熱を考慮している点のみが異なり、浸潤速度が大きく、緩衝材土圧や O/P 変位量に違いが見られる。緩衝材や O/P 模型は加熱により膨張するため、容器内の応力は全体的に大きくなるが、一方で O/P 変位は小さくなっている。これは、芯棒下端を計測対象としているためであり、芯棒の下部の熱膨張によって初期に下端が沈下する方向に変位しており、その影響が過渡応答の終息時まで影響している。なお、Case 2 では上部緩衝材が飽和した後に一時的に不飽和に戻るタイミングが生じている。これは、乾燥し易い条件であるため、一度上部が飽和した際に上部緩衝材が大きく膨張し、骨格の間隙率が大きくなったために生じている現象である。この際、有効応力が大きく変動するため全体の緩衝材土圧や O/P 変位に大きな影響が生じている。その後は冠水して過渡的な変化は生じなくなるが、加熱なし条件と比べると時期が遅れるとともに、密度や含水過程に多少の斑を生じている。

(c) Case 3 の解析結果

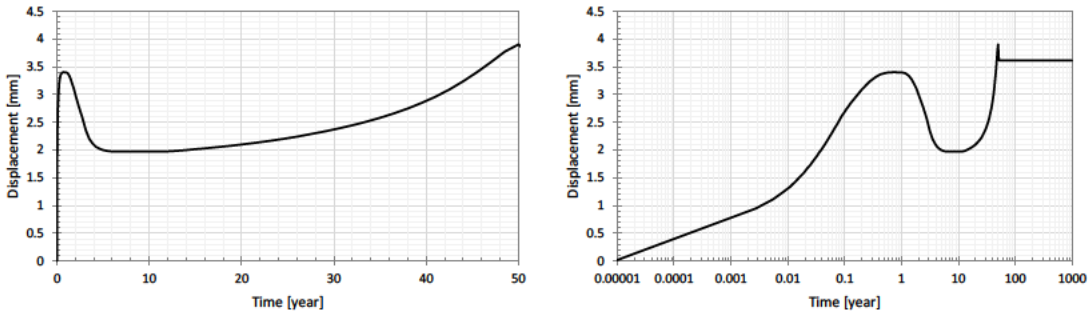


図 4-4- 138　Case 3 の O/P 変位の経時変化

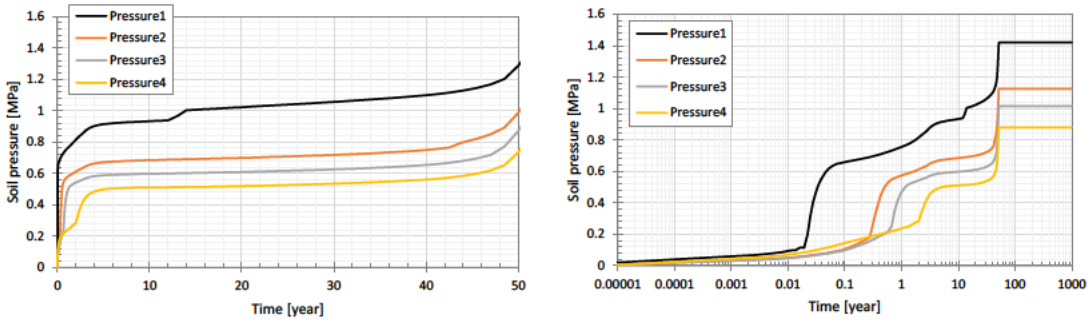


図 4-4- 139　Case 3 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化

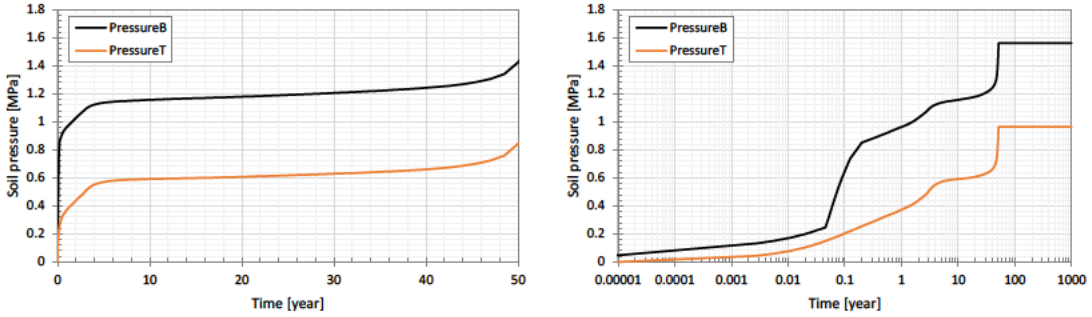


図 4-4- 140　Case 3 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化

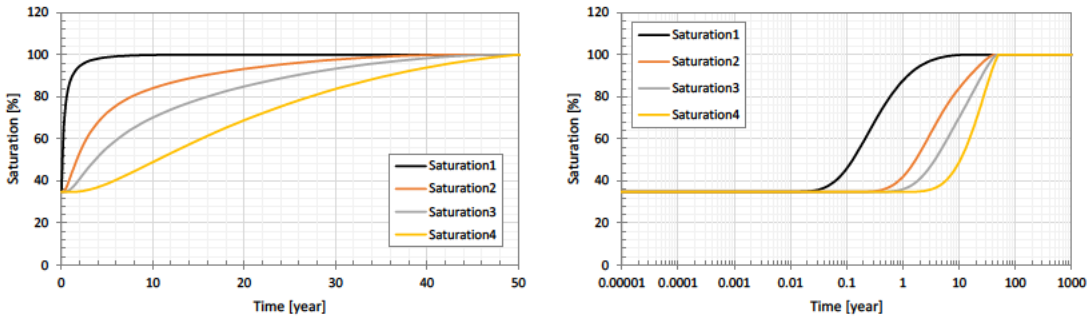


図 4-4- 141　Case 3 の各位置の飽和度の経時変化

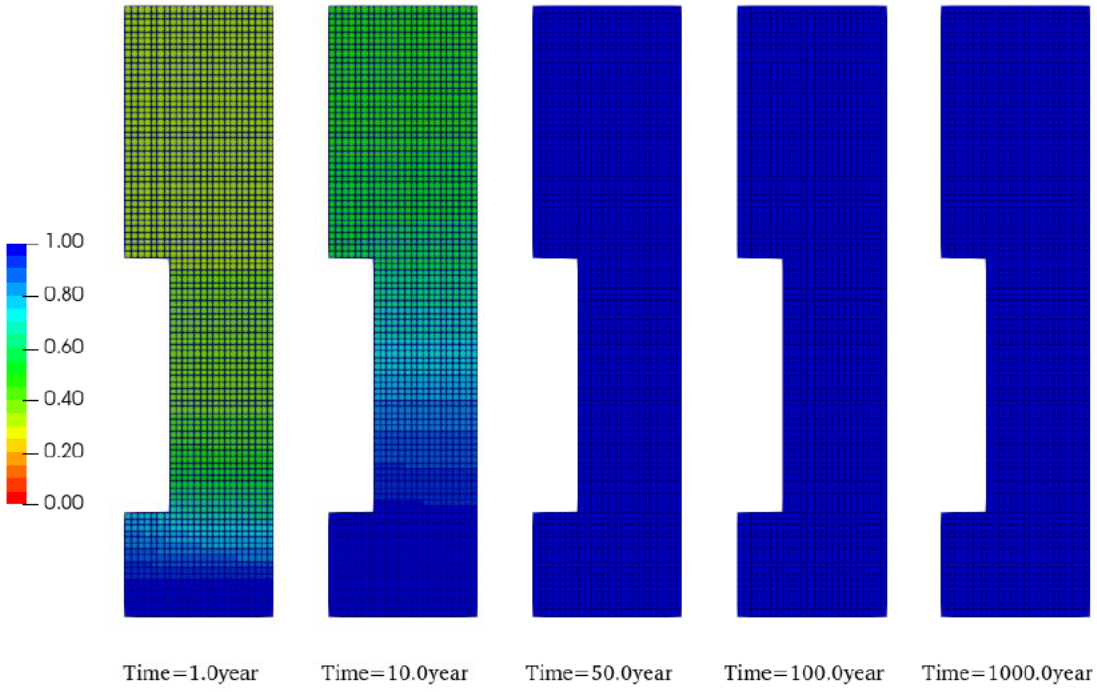


図 4-4- 142　Case 3 の飽和度分布の経時変化

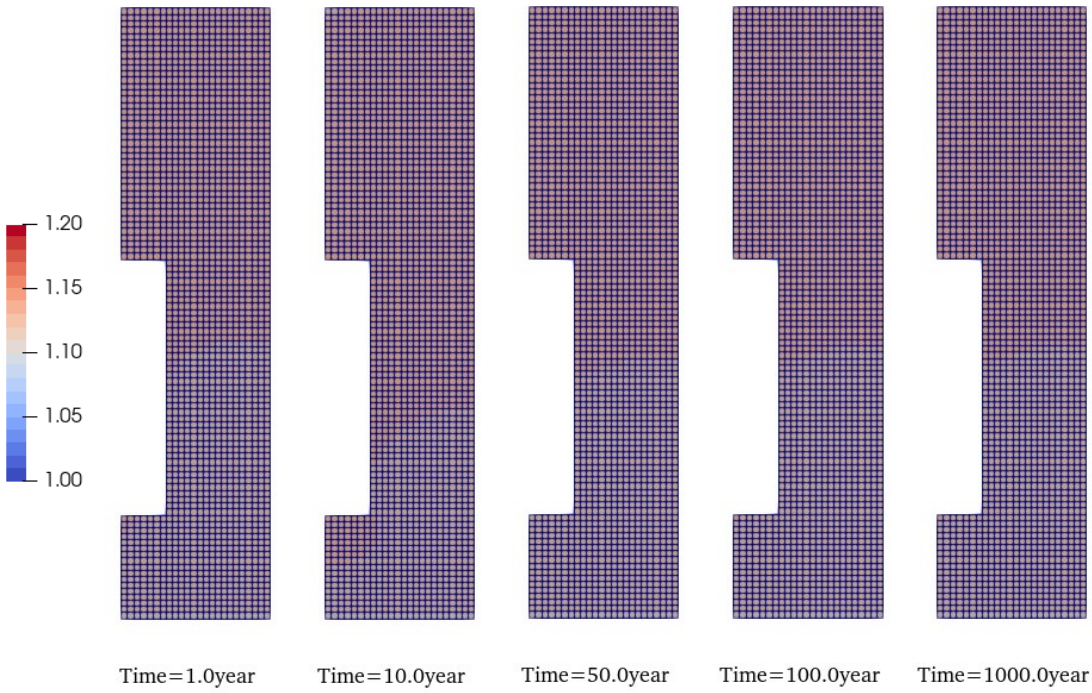


図 4-4- 143　Case 3 の乾燥密度分布の経時変化

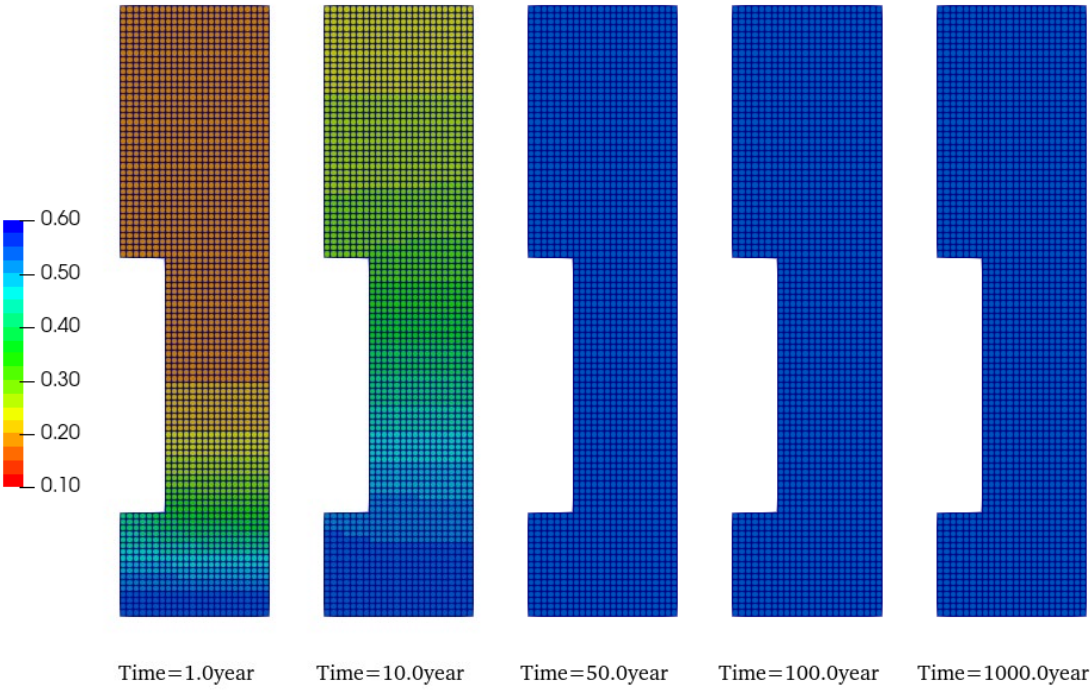


図 4-4- 144　Case 3 の含水比分布の経時変化

このケースはクニボンドと人工海水を組み合わせた緩衝材条件であり、O/P 模型の加熱は考慮していない。混合土ではないため、クニゲル V1 ケースに比べて透水性が小さく、膨潤圧も大きいため、Case 1 に比べて浸潤過程が少し遅く、緩衝材土圧や O/P 変位量が大きい傾向にある。土圧や変位量は大きいものの、O/P 変位に見られる過渡的な現象は Case 1 とほぼ同様であるが、土圧が大きいため初期段階で芯棒が滑動するなどの現象は発生していない。50 年経過時頃までには冠水し、過渡的な変化は生じなくなっており、浸潤過程や最終的な密度斑などは小さい。

(d) Case 4 の解析結果

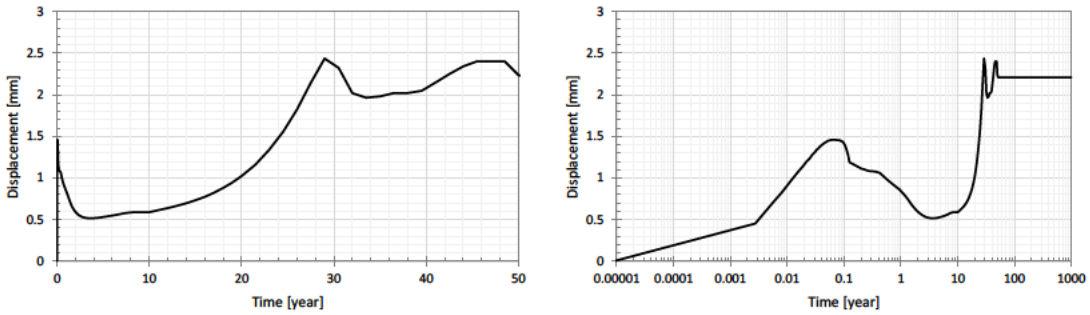


図 4-4- 145　Case 4 の O/P 変位の経時変化

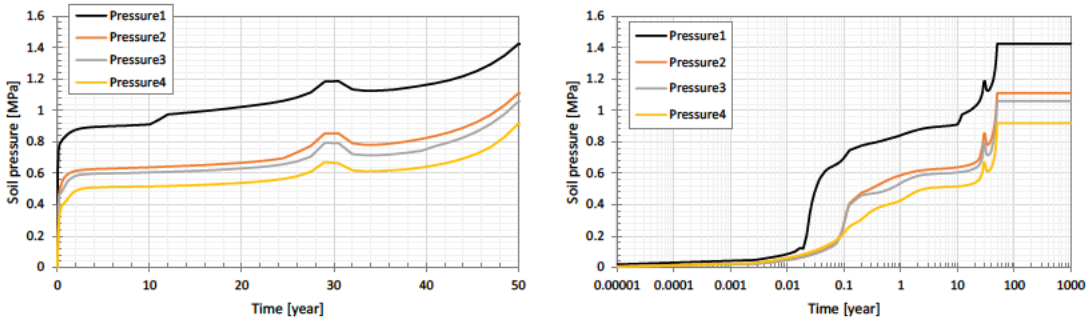


図 4-4- 146　Case 4 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化

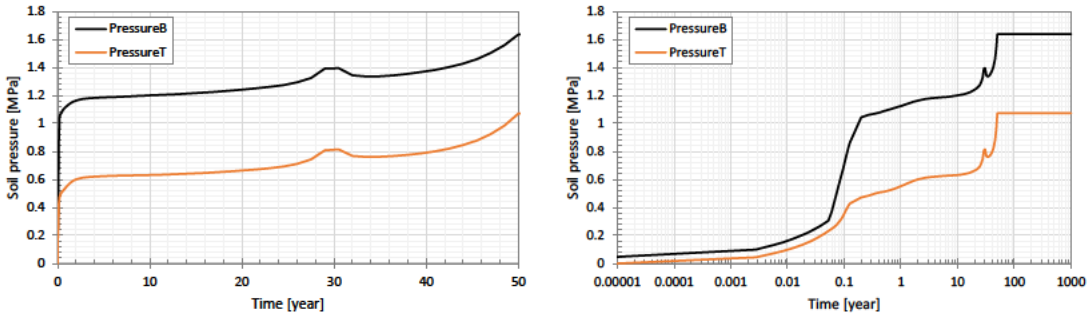


図 4-4- 147　Case 4 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化

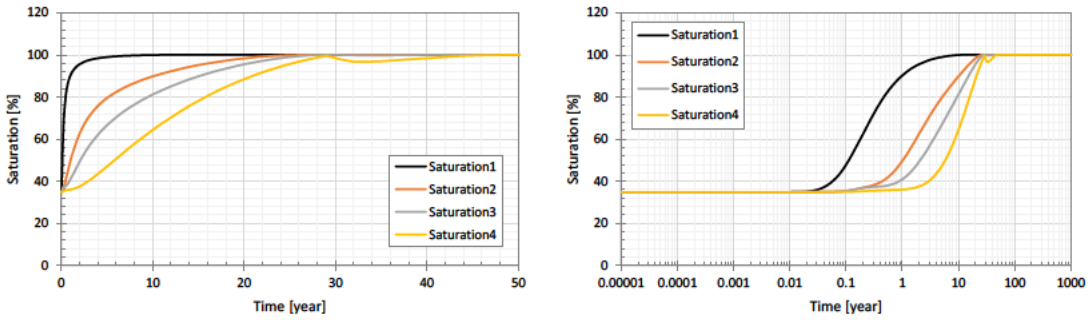


図 4-4- 148　Case 4 の各位置の飽和度の経時変化

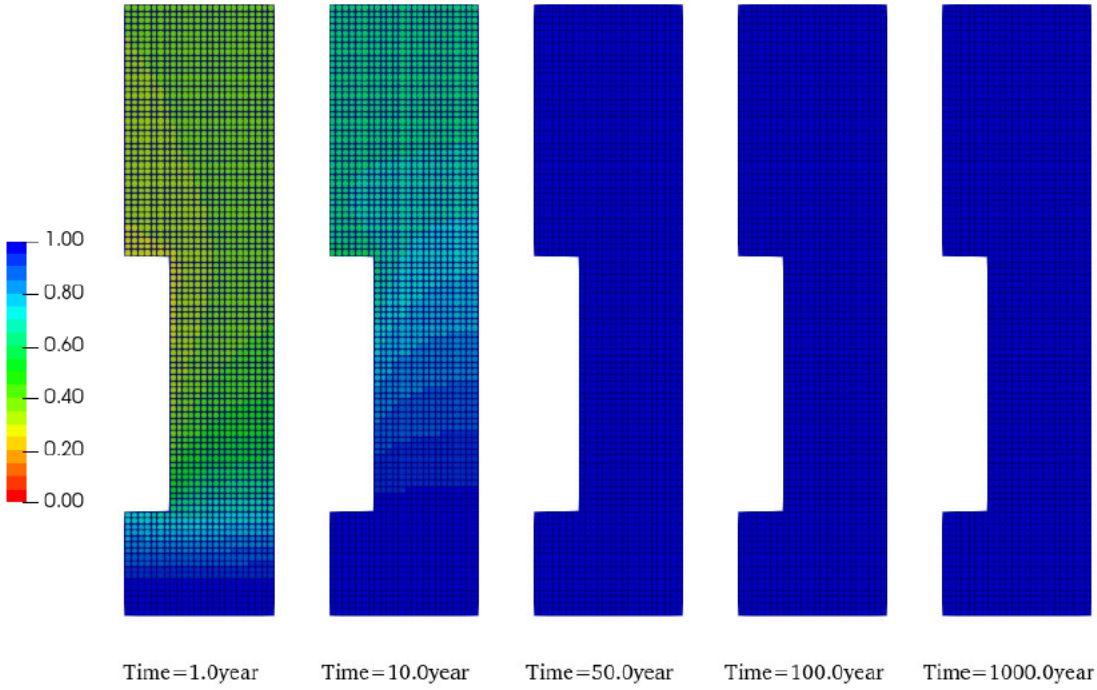


図 4-4- 149　Case 4 の飽和度分布の経時変化

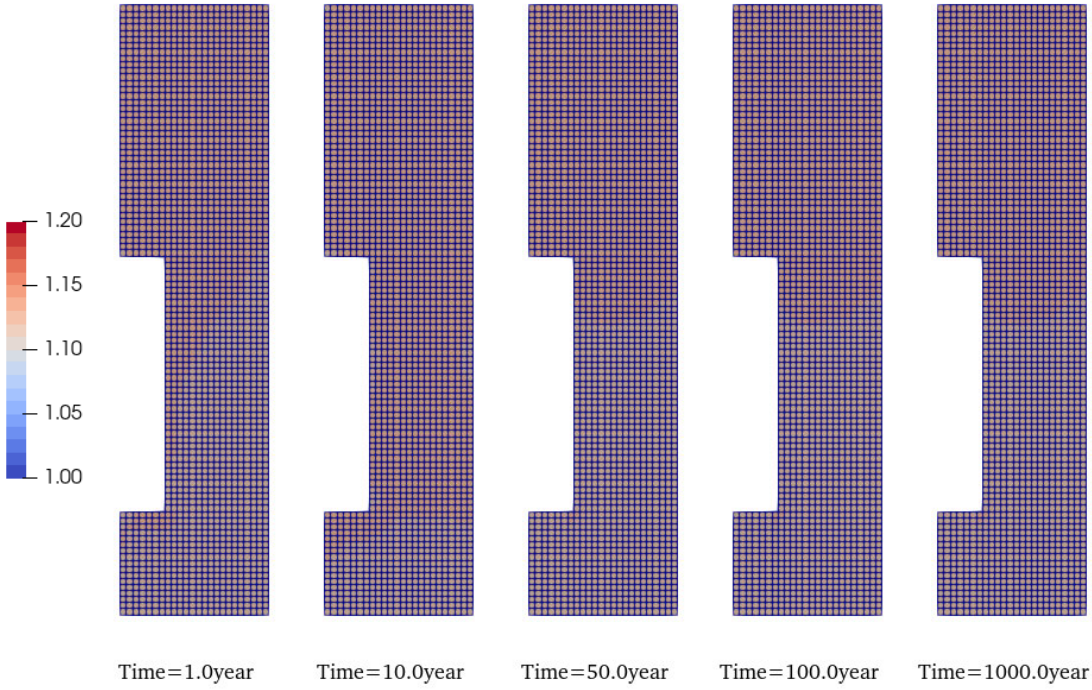


図 4-4- 150　Case 4 の乾燥密度分布の経時変化

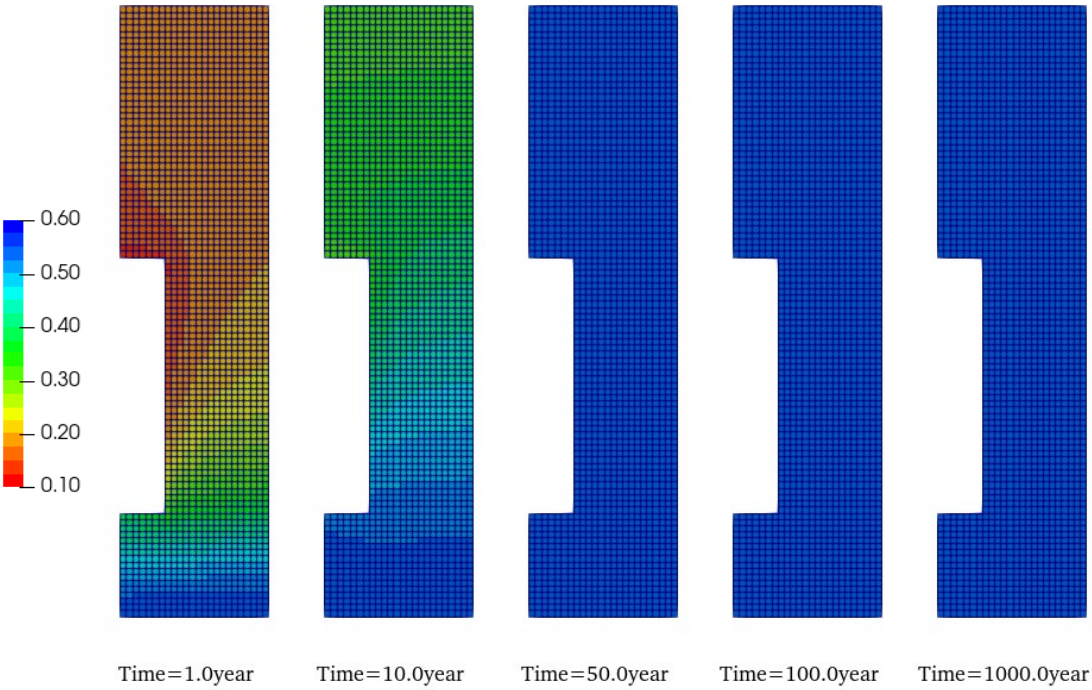


図 4-4- 151　Case 4 の含水比分布の経時変化

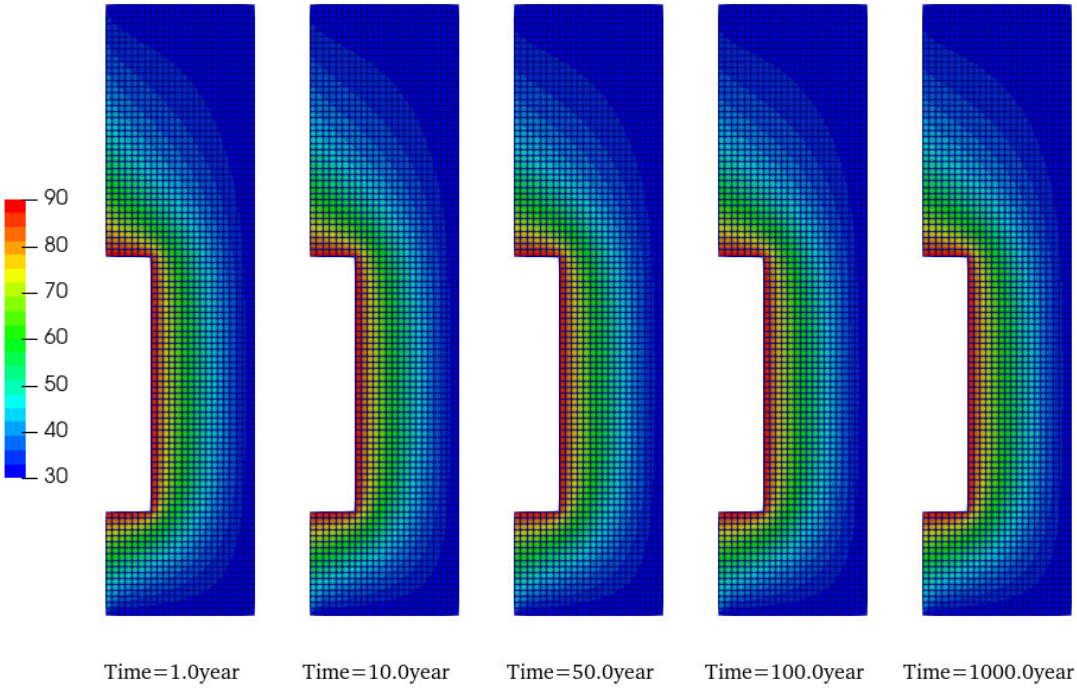


図 4-4- 152　Case 4 の温度分布の経時変化

このケースはクニボンドと人工海水を組み合わせた緩衝材条件であり、O/P 模型の加熱を考慮したものである。クニゲル V1 のケースと同様に間隙水の動粘度の変化から浸潤速度は大きくなり、緩衝材や O/P の熱膨張により全体の土圧が大きくなっている。O/P 変位については芯棒下端を計測しているため、芯棒下端の熱膨張により沈下方向への変位影響があり、加熱を考慮していない Case 3 に比べて変位量は小さくなっている。また、土圧が大きいため膨潤作用による変位が小さくなっている。なお、緩衝材条件の異なる Case 2 と比較しても温度分布には特に差はないため、含水比や密度分布等に大きな違いはなく、浸潤速度が遅いことが特徴である。なお、Case 2 で見られた上部緩衝材が飽和後に一度不飽和に戻る現象は Case 4 でも見られ、より大きな影響を生じている。

⑤　解析結果（追加の検討ケース）

追加の検討ケースの解析結果より各ケースの 1000 年経過時における最終変位分布を図 4-4-153 と図 4-4-154 に示す。また、以降の図 4-4-155 から図 4-4-248 にオーバーパック変位、各位置の緩衝材土圧と飽和度の経過時間変化をグラフで示し、合わせて 1、10、50、100、1000 年経過時における緩衝材の飽和度、乾燥密度、含水比、加熱を考慮したケースについては温度の分布図を示す。解析結果はケース毎にまとめて示し、各ケース結果の末尾に解析結果に対する考察を添えている。

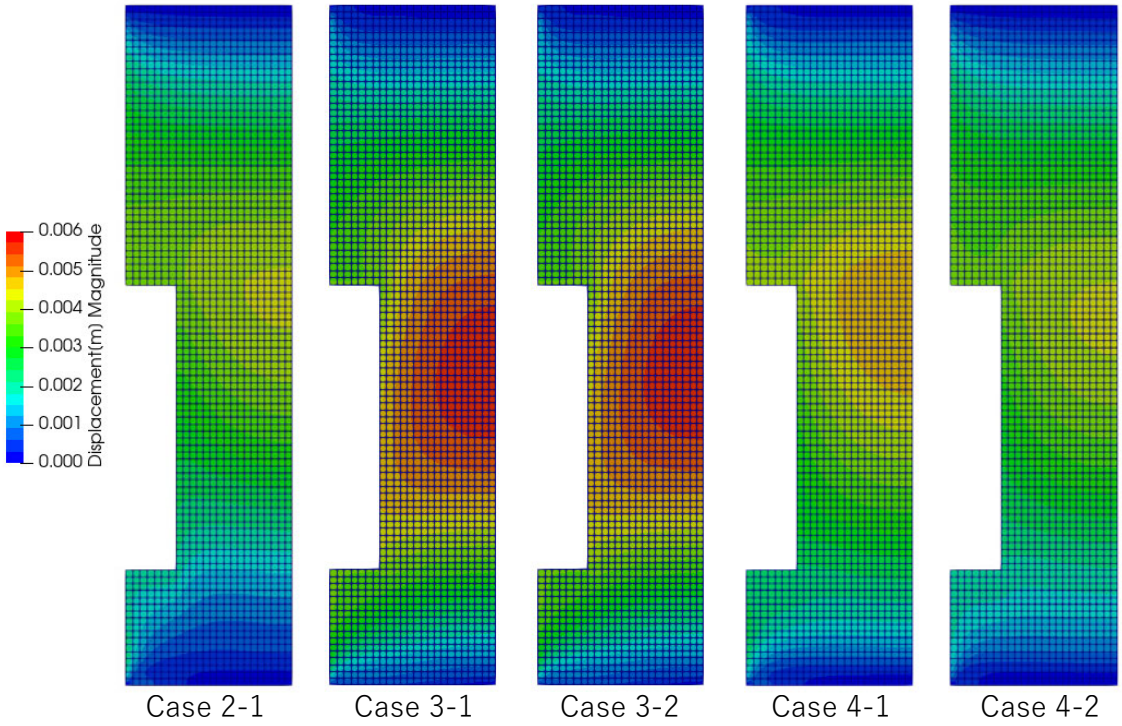


図 4-4- 153　追加検討ケース(Case 2-1～Case 4-2)の最終変位分布

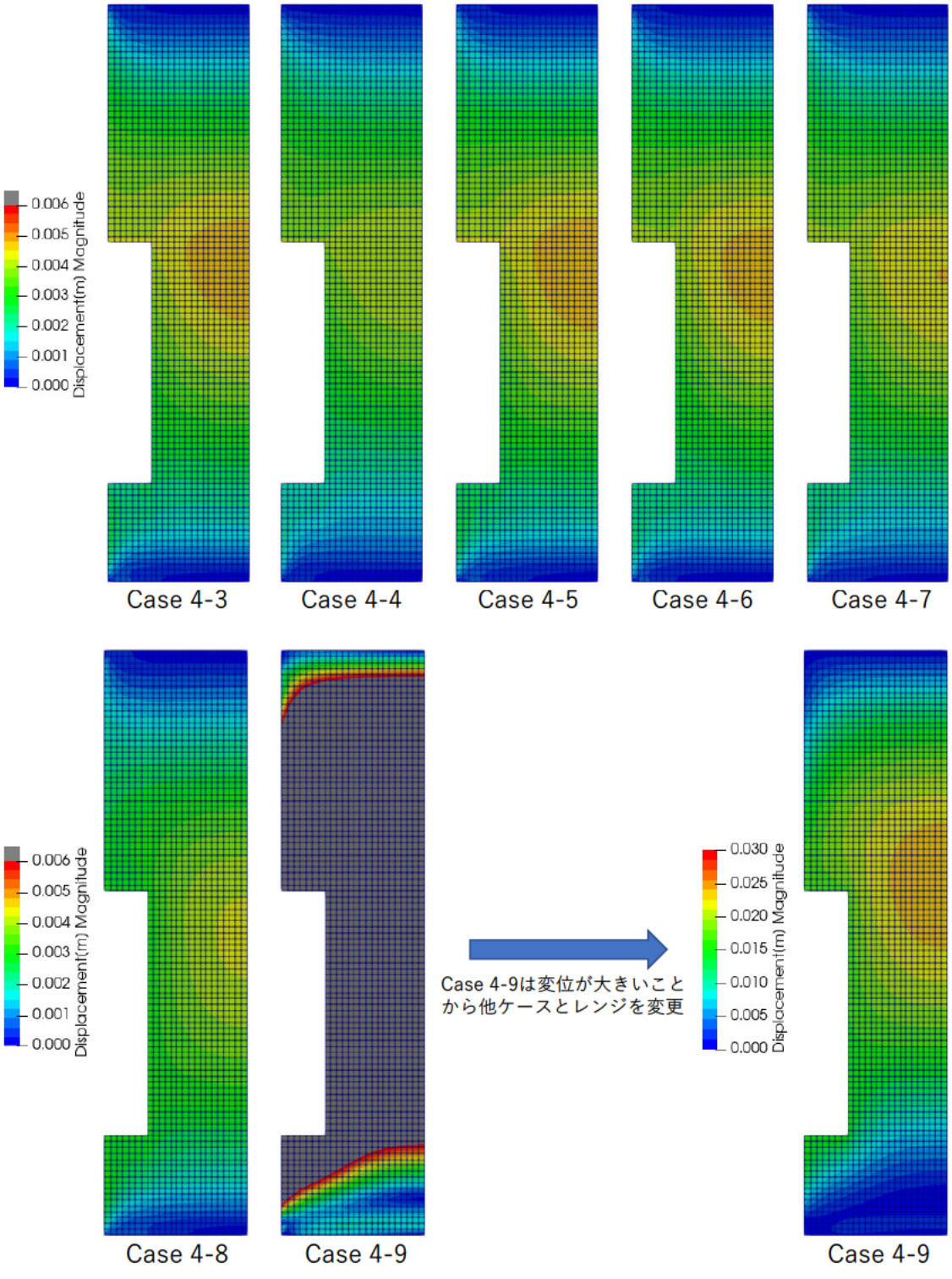


図 4-4- 154　追加検討ケース(Case 4-3～Case 4-9)の最終変位分布

(a) Case 2-1 の解析結果

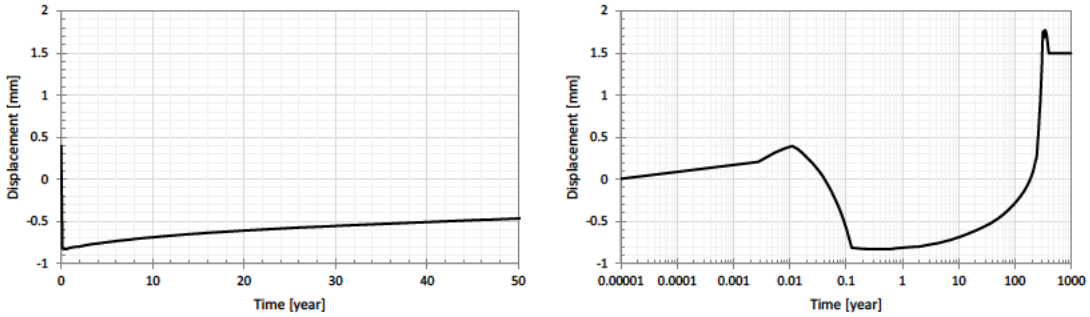


図 4-4- 155　Case 2-1 の O/P 変位の経時変化

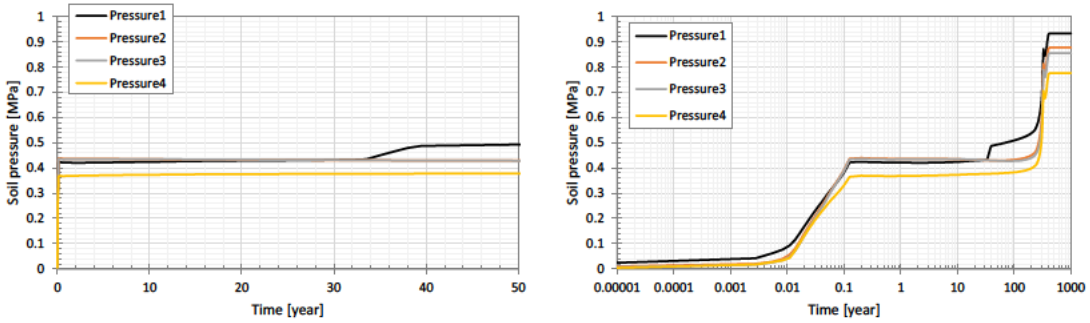


図 4-4- 156　Case 2-1 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化

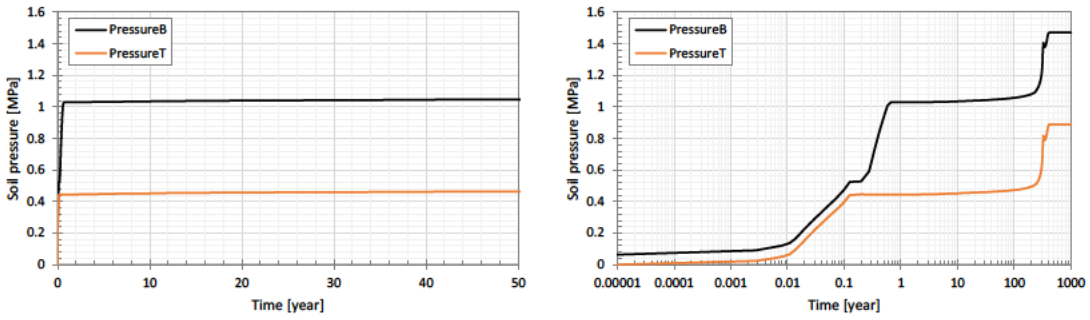


図 4-4- 157　Case 2-1 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化

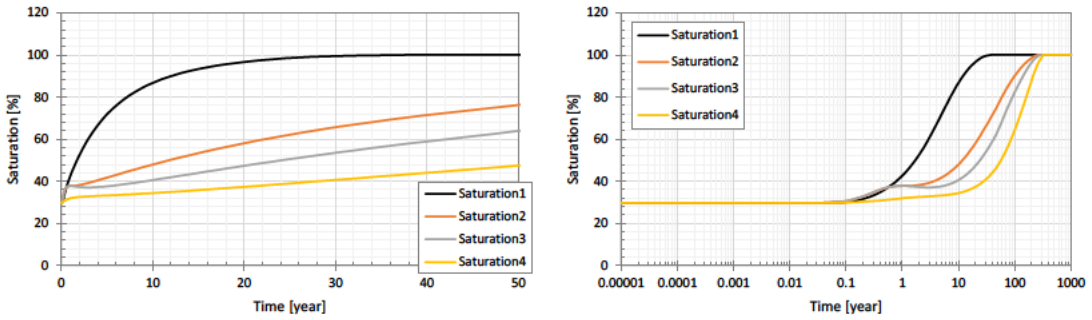


図 4-4- 158　Case 2-1 の各位置の飽和度の経時変化

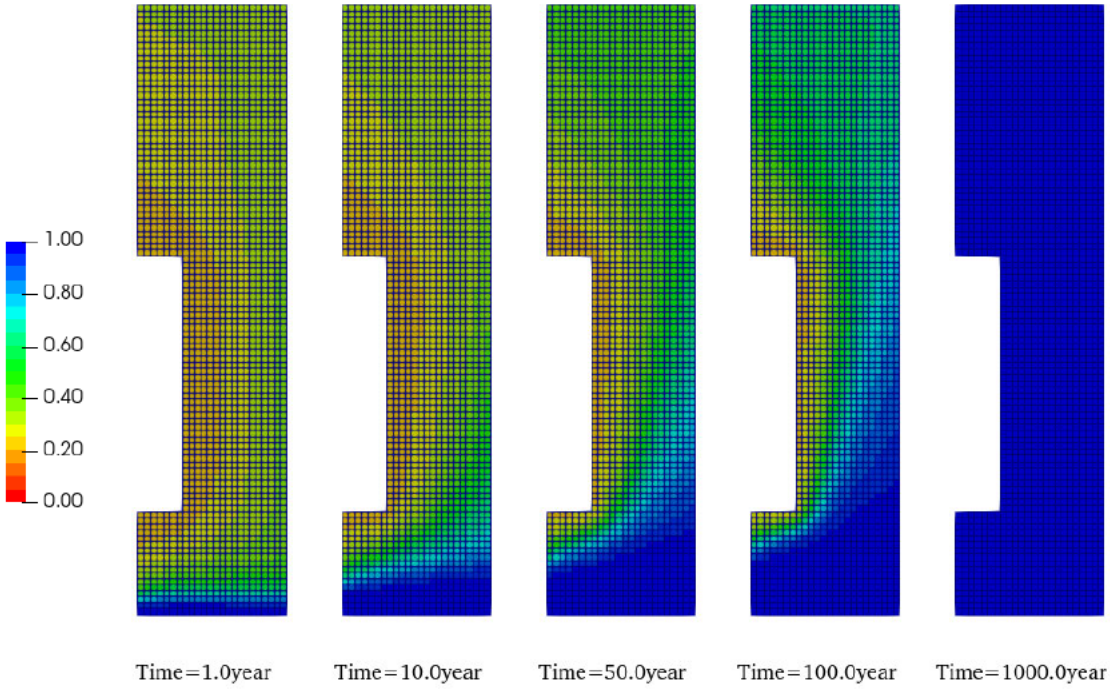


図 4-4- 159　Case 2-1 の飽和度分布の経時変化

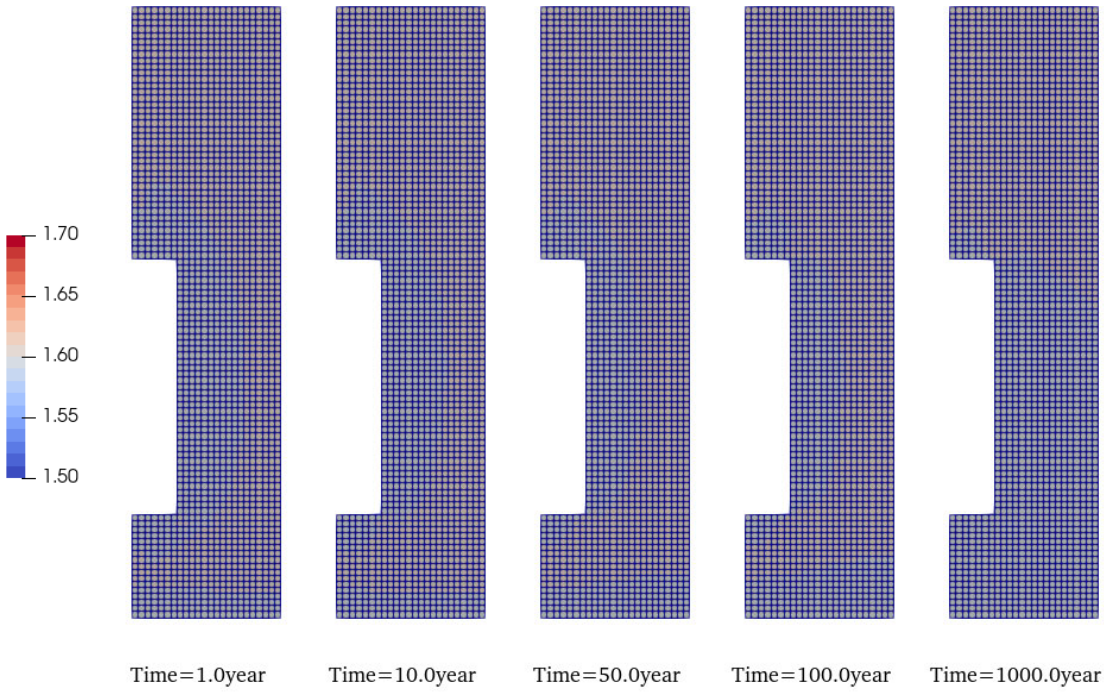


図 4-4- 160　Case 2-1 の乾燥密度分布の経時変化

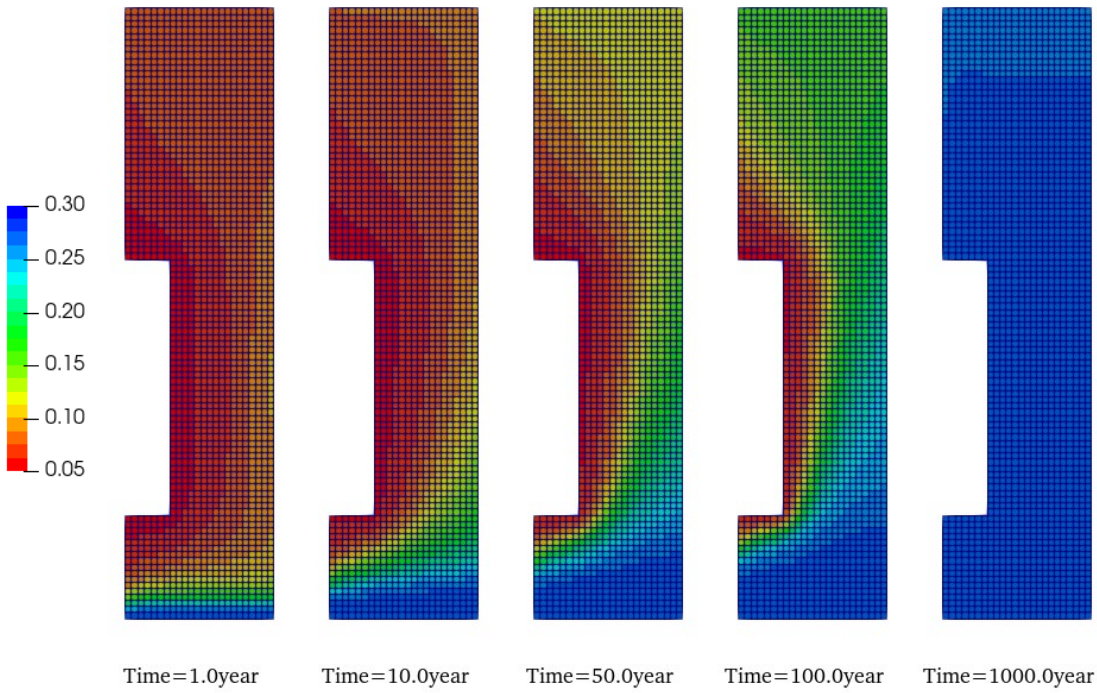


図 4-4- 161　Case 2-1 の含水比分布の経時変化

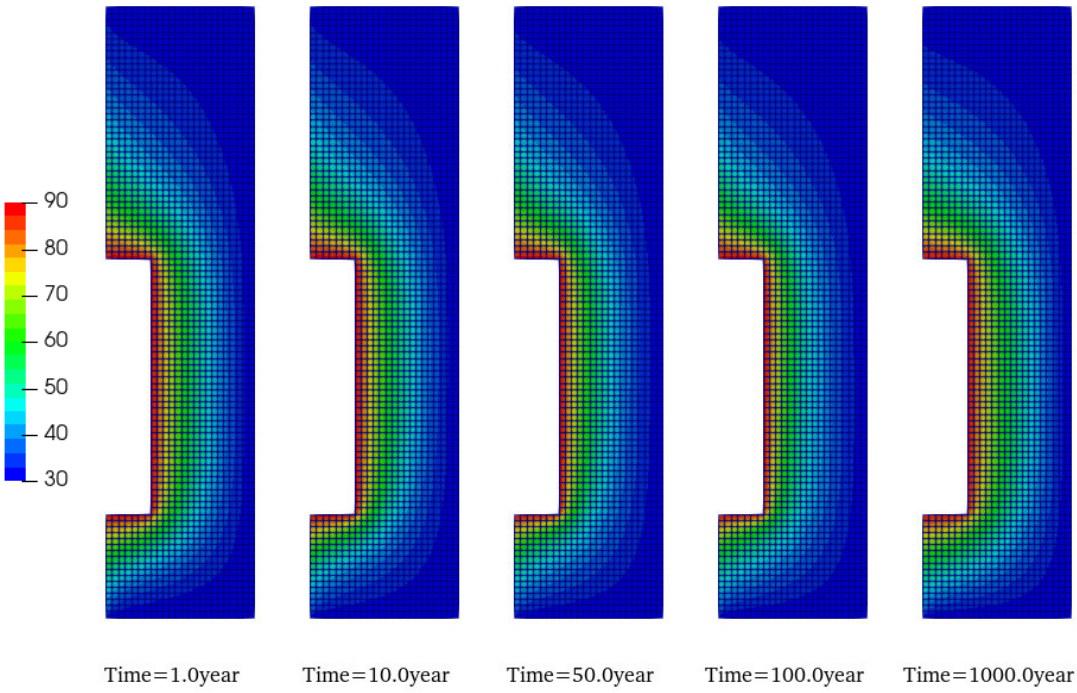


図 4-4- 162　Case 2-1 の温度分布の経時変化

Case 2（クニゲル V1 砂混合土+海水の加熱ありケース）に対して間隙水を純水に変更したものである。純水の透水性は小さいため、冠水までに非常に長い時間を要するとともに、緩衝材土圧も大きくなる条件である。そのため、O/P の上昇も緩やかになり芯棒下端の変位は初期段階で沈下方向に生じ、また土圧が大きいため容器内で拘束された結果 O/P 変位量は小さくなっている。浸潤速度が小さいため特に O/P 周辺は長期に渡って不飽和のままであり、上部緩衝材は 300 年経過時頃には概ね飽和に至るが、全体が冠水するまでには非常に長い年月を要している。

(b) Case 3-1 の解析結果

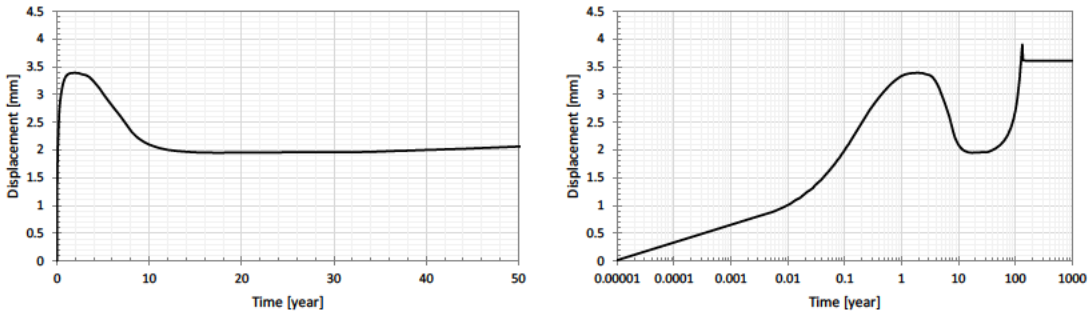


図 4-4- 163　Case 3-1 の O/P 変位の経時変化

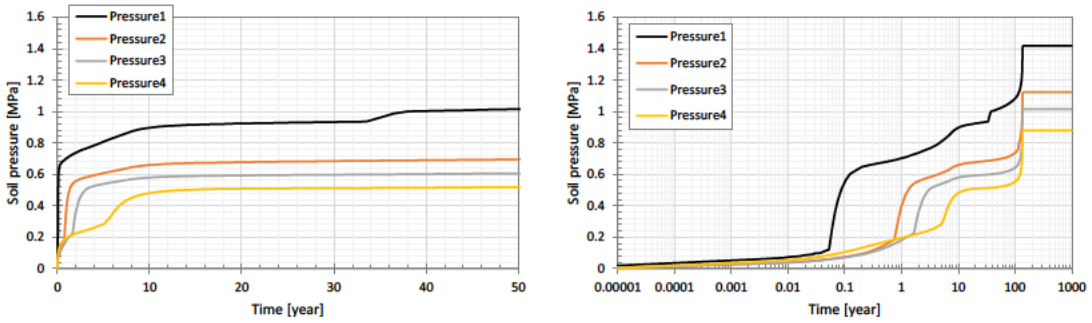


図 4-4- 164　Case 3-1 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化

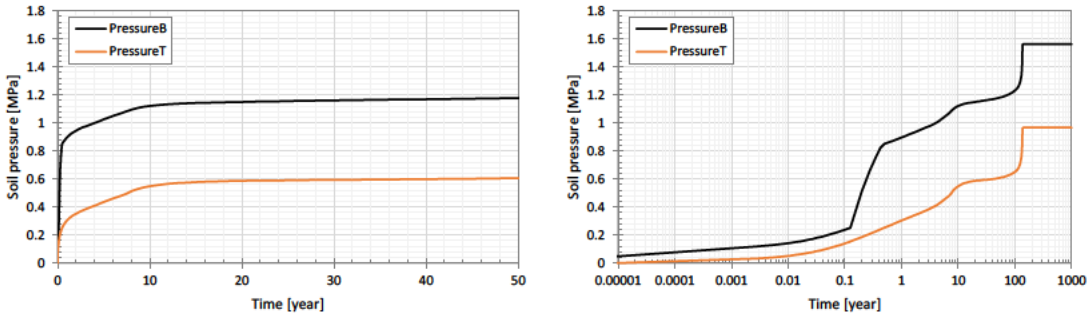


図 4-4- 165　Case 3-1 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化

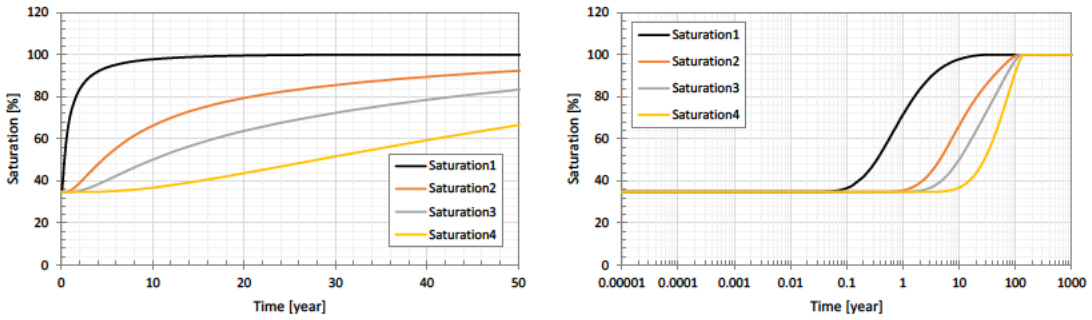


図 4-4- 166　Case 3-1 の各位置の飽和度の経時変化

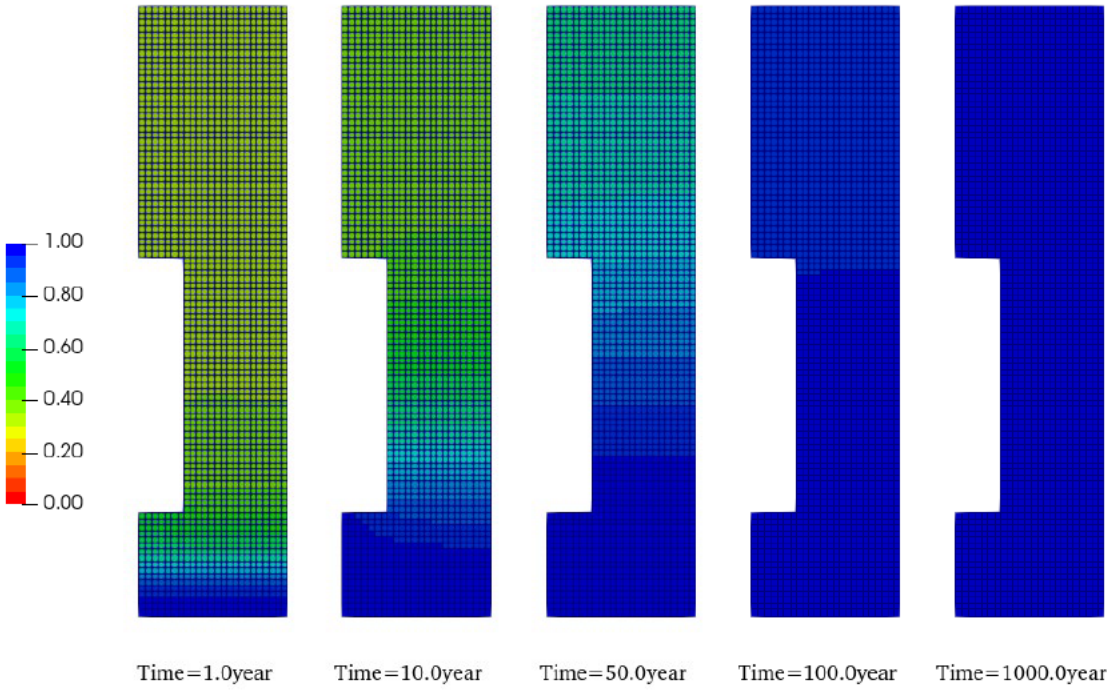


図 4-4- 167　Case 3-1 の飽和度分布の経時変化

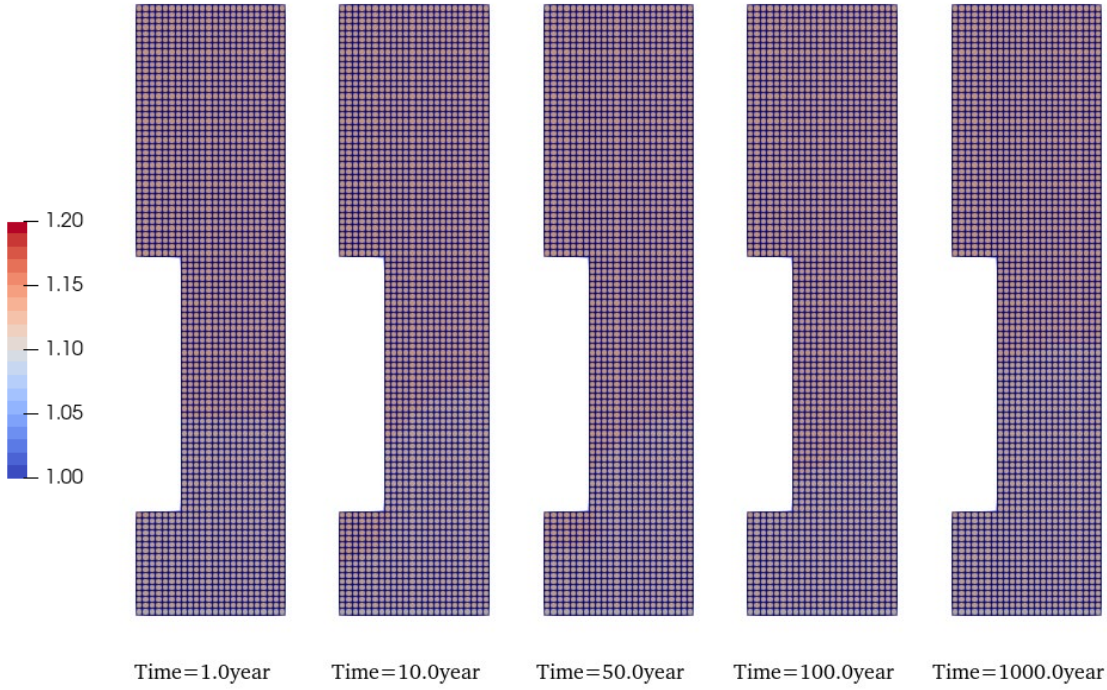


図 4-4- 168　Case 3-1 の乾燥密度分布の経時変化

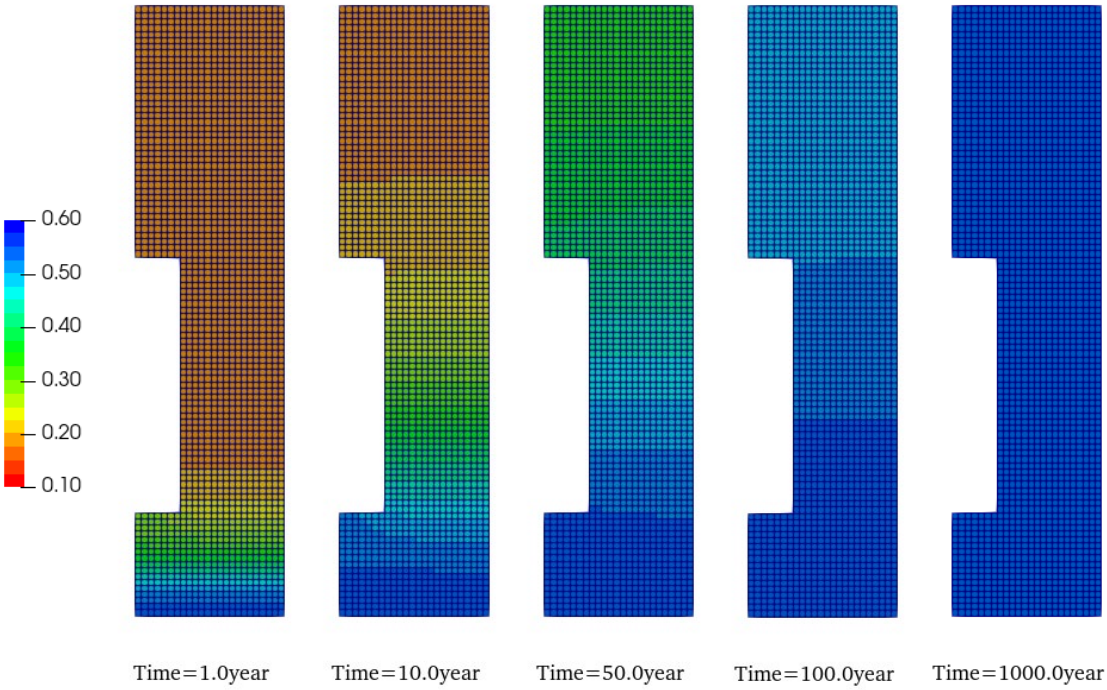


図 4-4- 169　Case 3-1 の含水比分布の経時変化

Case 3（クニボンド+人工海水の加熱なし）に対して緩衝材の透水性の見直しを図ったものであり、試験結果に比べて浸潤速度が速いことから、要素試験の透水性の小さい結果に着目して有効粘土密度依存の透水性を落としたケースである。そのため、浸潤速度や飽和時期に遅れが生じ、100 年経過時点でも冠水していないが、土圧や O/P 変位量自体へは有意な違いは生じていない。最終的な変形状態については基になった Case 3 とほぼ同様であることが確認できる。

(c) Case 3-2 の解析結果

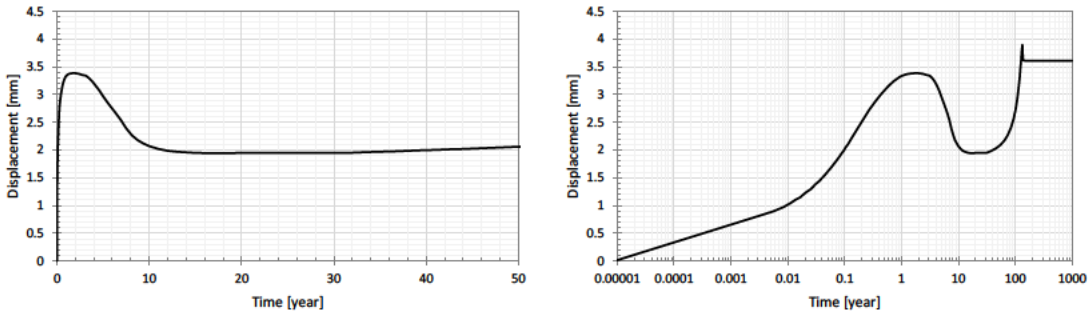


図 4-4- 170　Case 3-2 の O/P 変位の経時変化

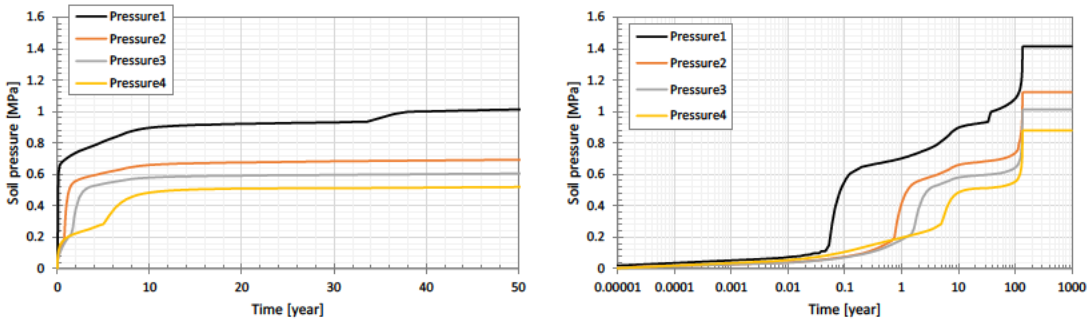


図 4-4- 171　Case 3-2 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化

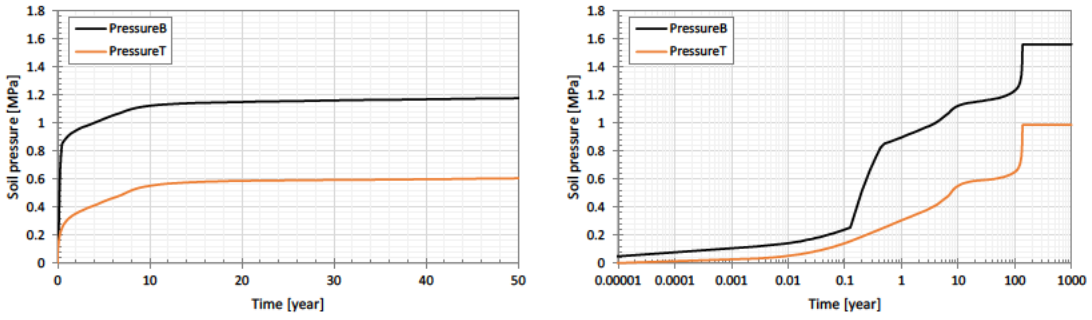


図 4-4- 172　Case 3-2 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化

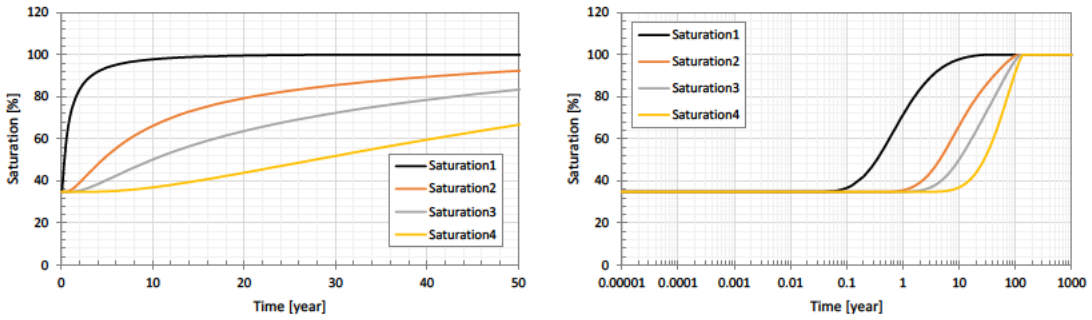


図 4-4- 173　Case 3-2 の各位置の飽和度の経時変化

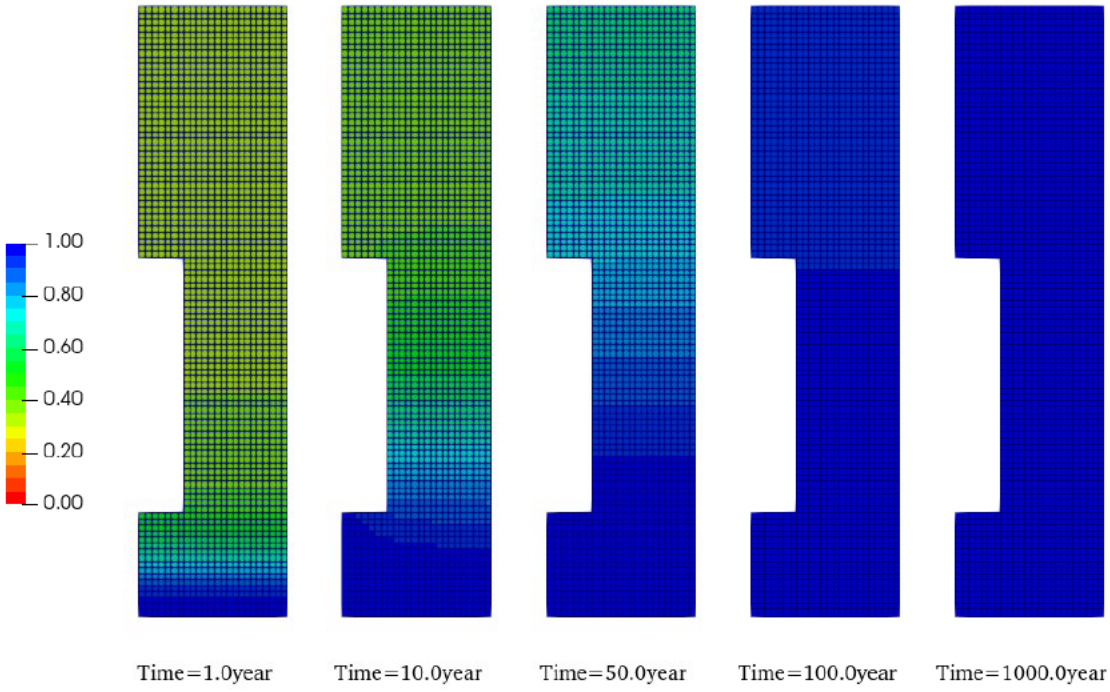


図 4-4- 174　Case 3-2 の飽和度分布の経時変化

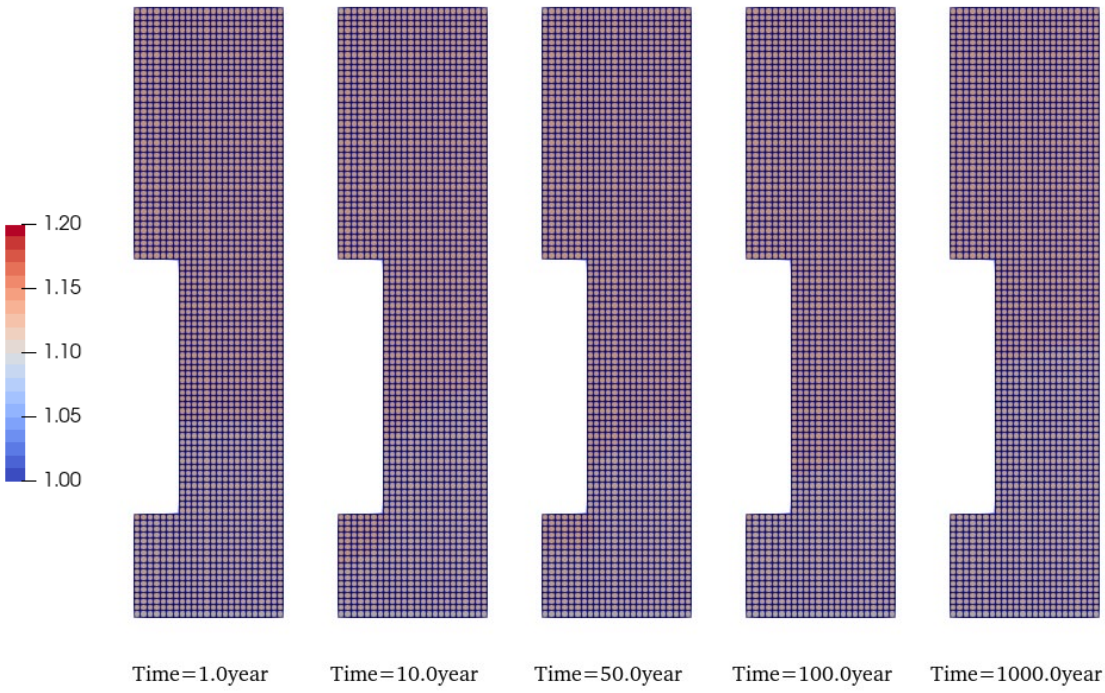


図 4-4- 175　Case 3-2 の乾燥密度分布の経時変化

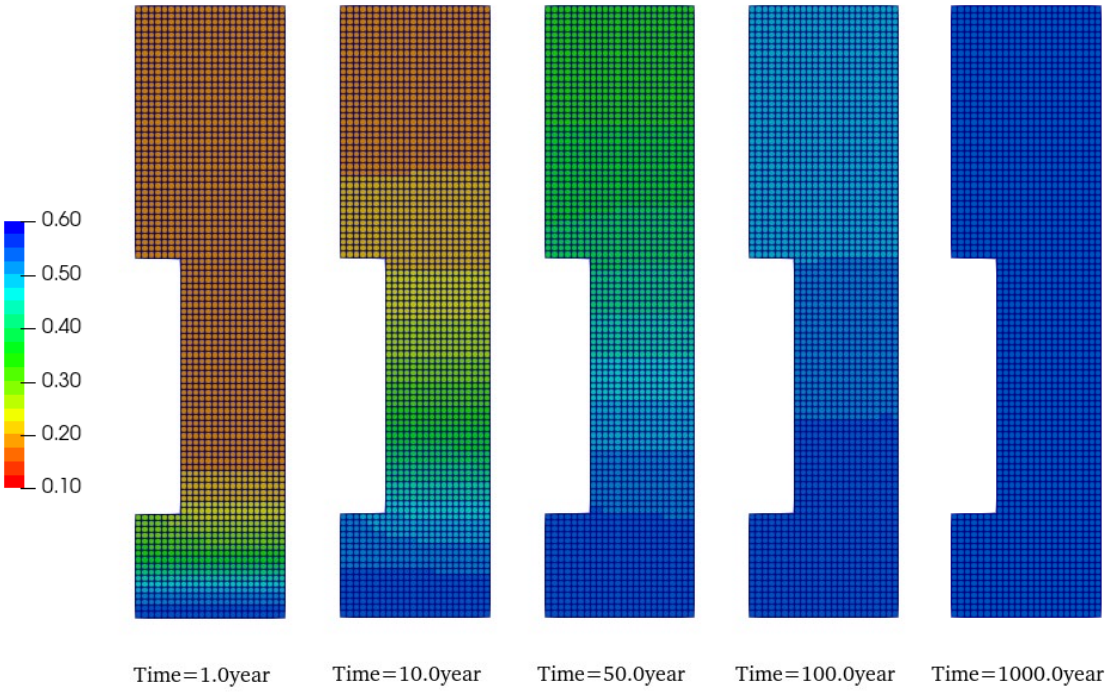


図 4-4- 176　Case 3-2 の含水比分布の経時変化

クニボンドの透水性の見直しを図った Case 3-1 に対し、緩衝材の屈曲度を大きくしたケースであり、水蒸気の拡散速度に影響がある。しかしながら、このケースでは O/P 模型の加熱を考慮していないため、水蒸気移動の影響が殆どなく、過渡応答や状態分布から Case 3-1 との現象の違いは殆ど認められない。同様の検討ケースは加熱を考慮した Case 4 に対しても実施しており、後述の Case 4-3 が直接の比較対象ケースとなる。

(d) Case 4-1 の解析結果

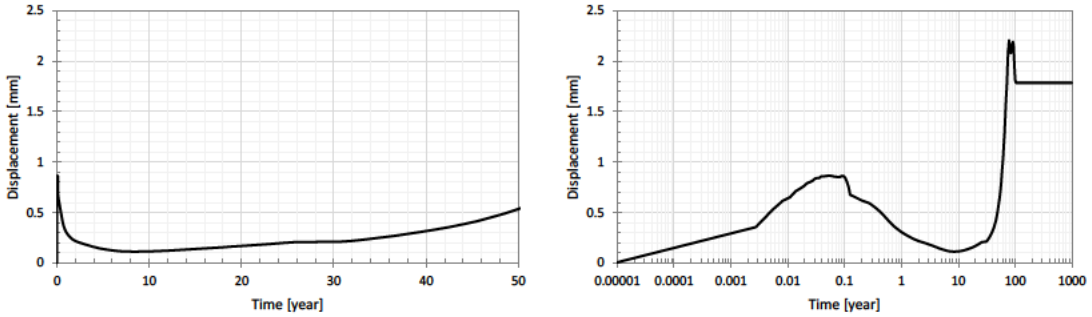


図 4-4- 177　Case 4-1 の O/P 変位の経時変化

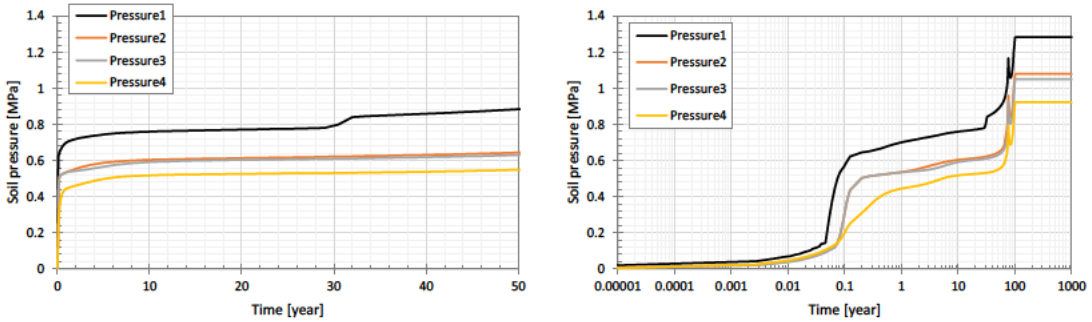


図 4-4- 178　Case 4-1 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化

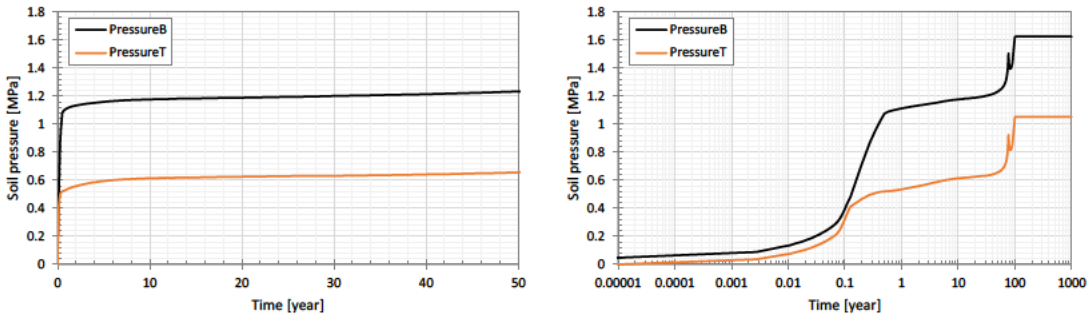


図 4-4- 179　Case 4-1 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化

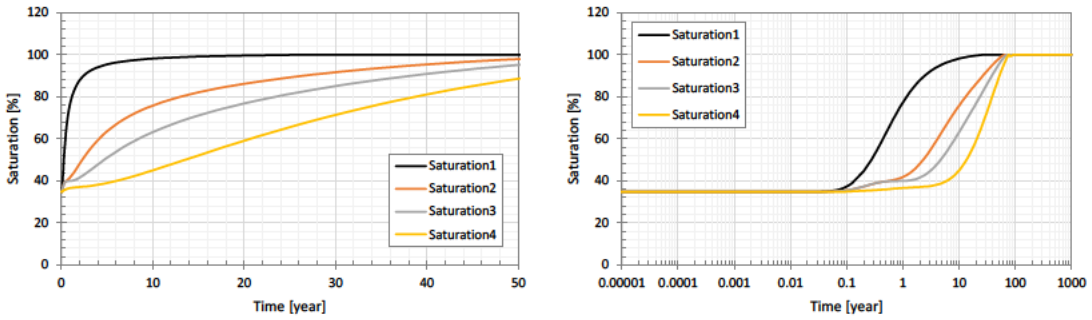


図 4-4- 180　Case 4-1 の各位置の飽和度の経時変化

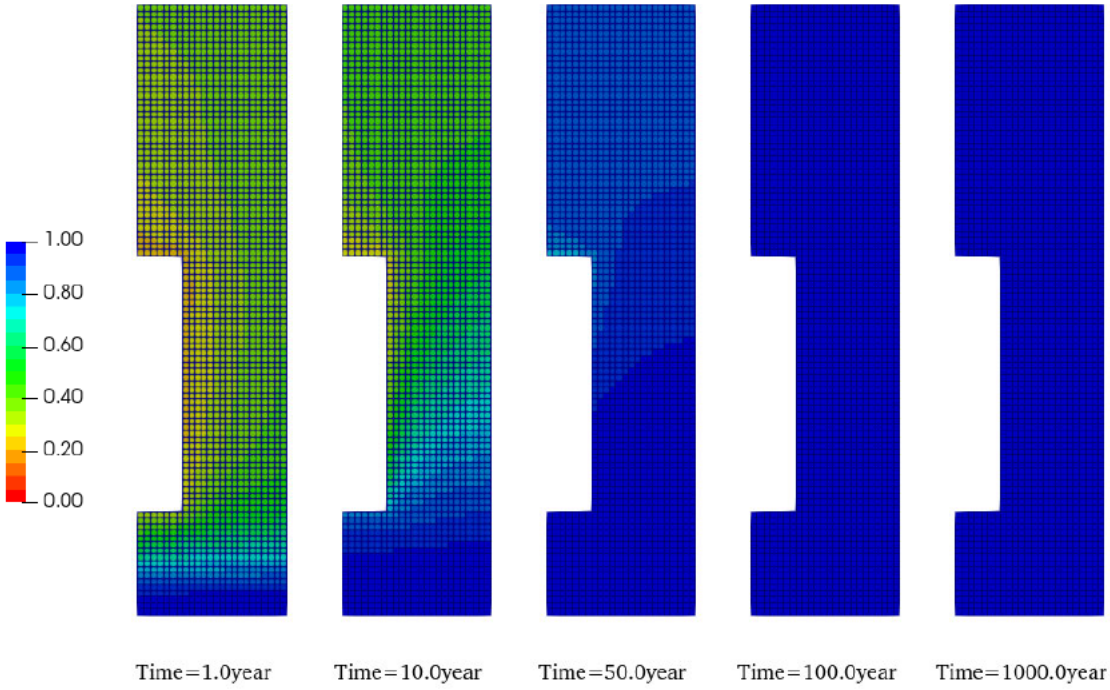


図 4-4- 181　Case 4-1 の飽和度分布の経時変化

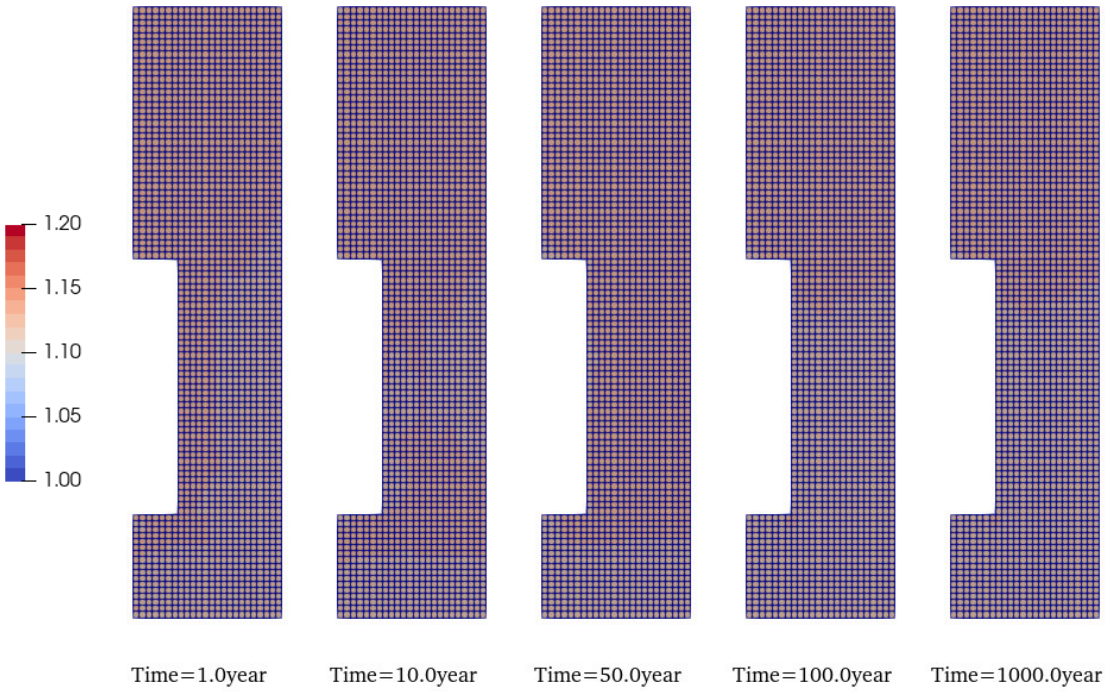


図 4-4- 182　Case 4-1 の乾燥密度分布の経時変化

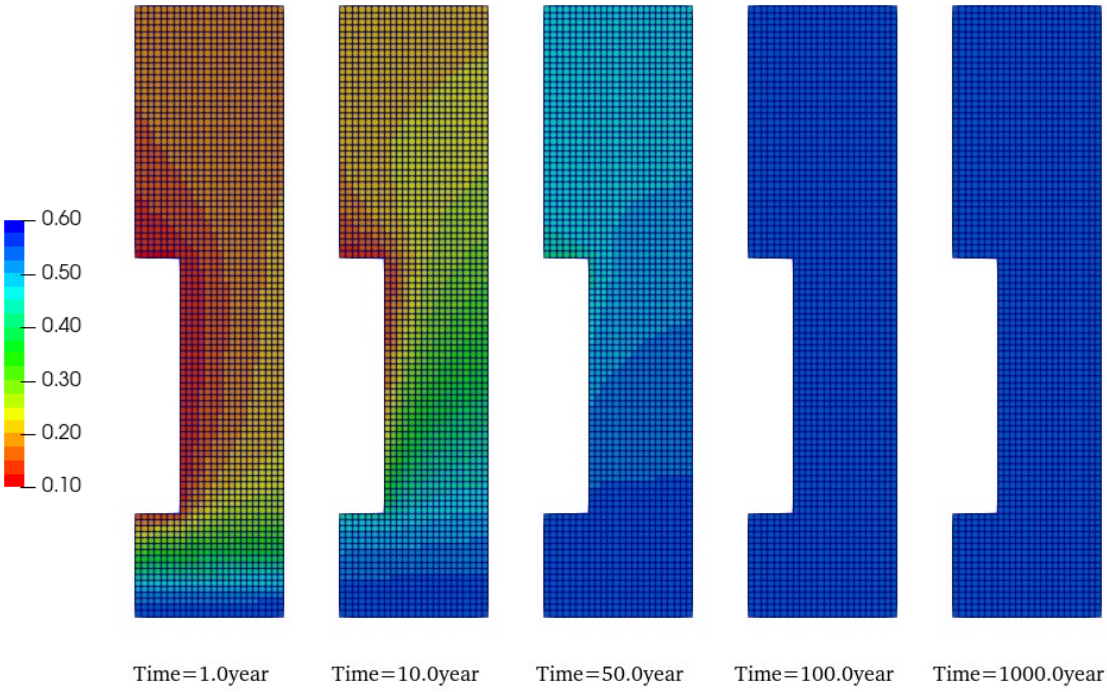


図 4-4- 183　Case 4-1 の含水比分布の経時変化

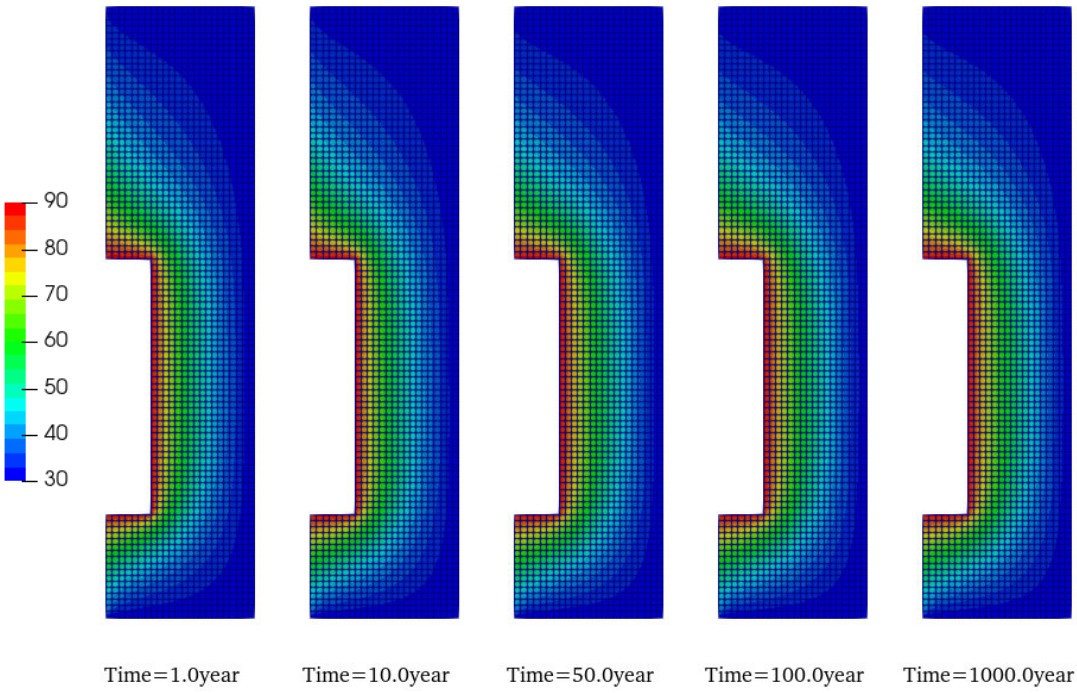


図 4-4- 184　Case 4-1 の温度分布の経時変化

Case 4（クニボンド+人工海水の加熱あり）に対して、Case3-1 と同様に緩衝材の透水性を見直したものであり、有効粘土密度依存の透水性を小さく設定している。そのため、Case 3-1 と同様に Case 4 に対して浸潤速度が大幅に低下しており、冠水に至るまでに 100 年近い年月を要している。なお、加熱を考慮していない Case 3-1 とは傾向が異なる点として、一度飽和した上部緩衝材が一時的に不飽和に戻る現象が見られ、基となった Case 4 とは過渡的な現象が終息した後の応力ひずみ状態に差異が生じている。これは透水性が小さくなったため、飽和時に生じる間隙水圧の影響が大きくなったためと考えられる。一時的に不飽和に戻ることで全体の有効応力は大きく変動するため、土圧や O/P 変位量に影響が生じていることが確認できるが、その影響は Case 4 に比べると小さい。

(e) Case 4-2 の解析結果

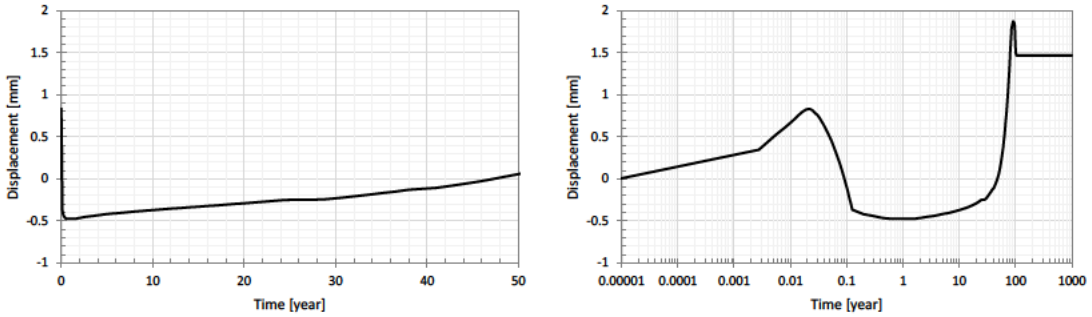


図 4-4- 185　Case 4-2 の O/P 変位の経時変化

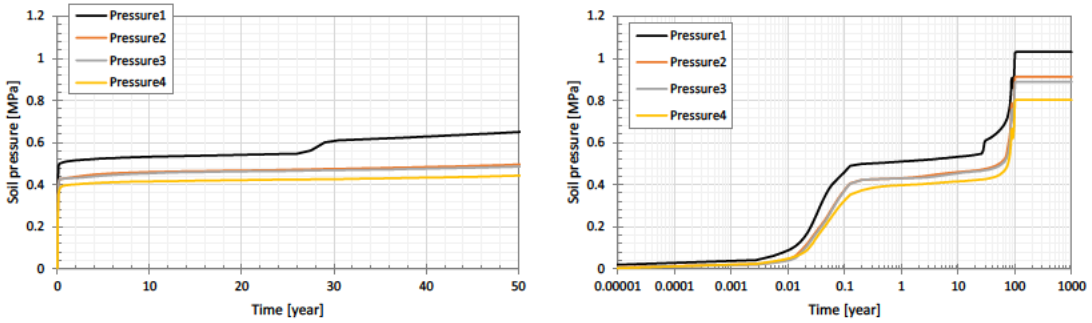


図 4-4- 186　Case 4-2 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化

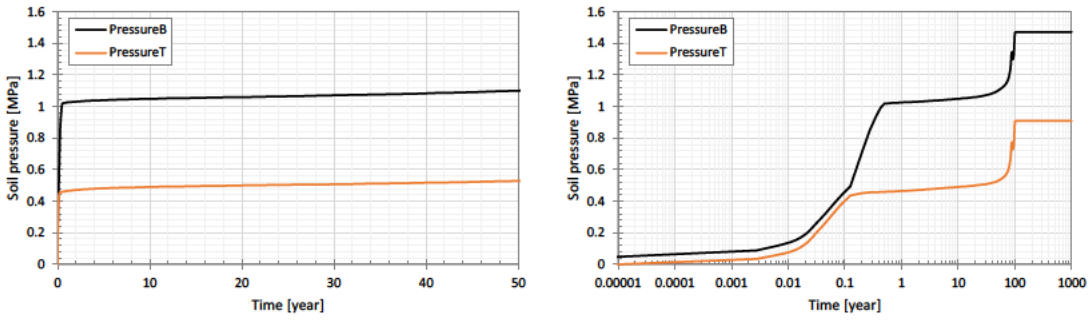


図 4-4- 187　Case 4-2 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化

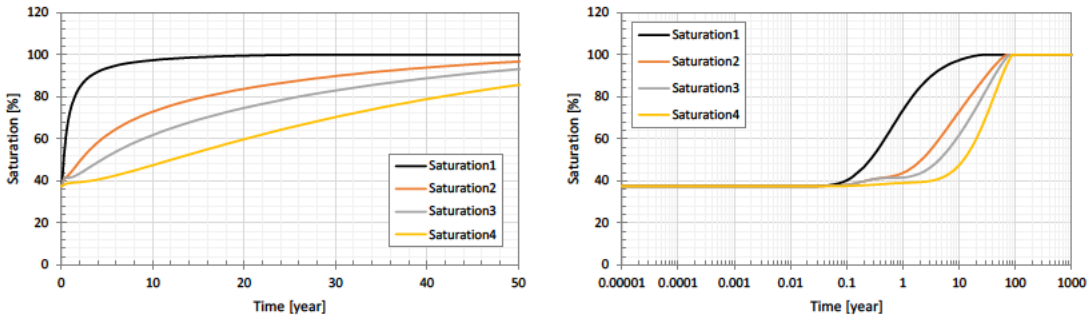


図 4-4- 188　Case 4-2 の各位置の飽和度の経時変化

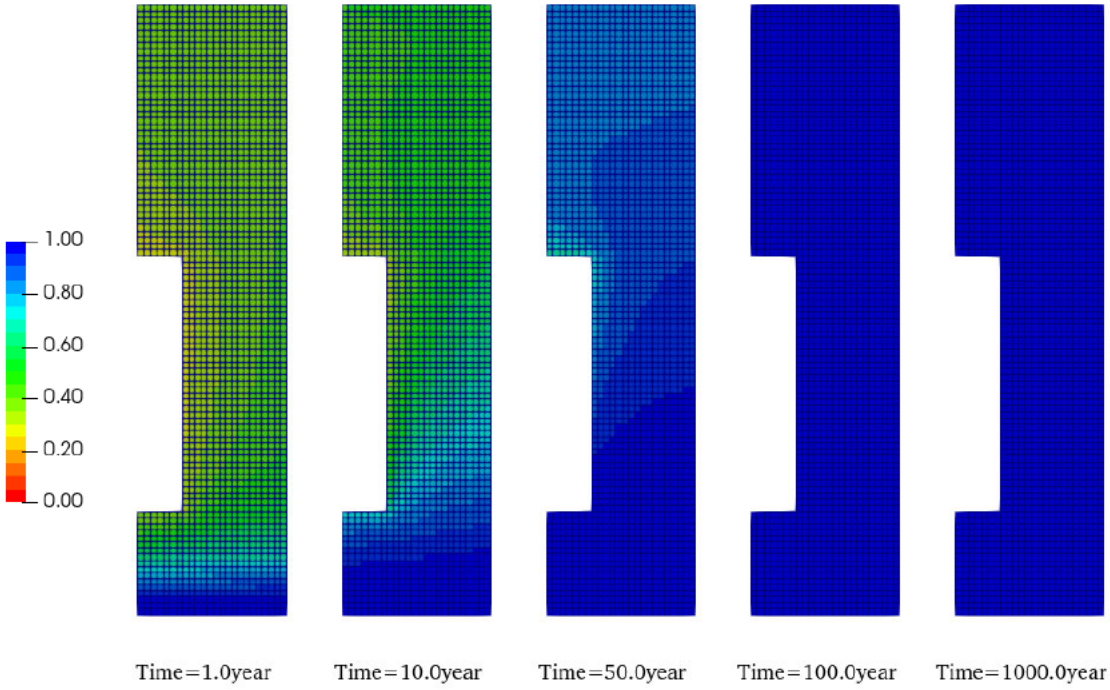


図 4-4- 189　Case 4-2 の飽和度分布の経時変化

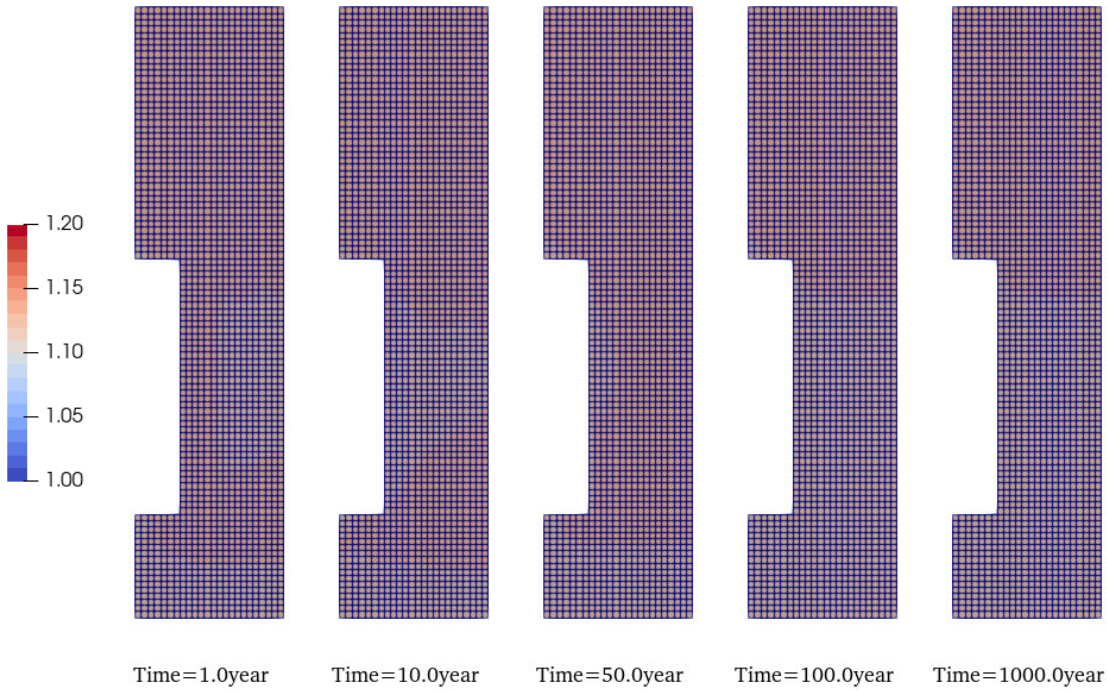


図 4-4- 190　Case 4-2 の乾燥密度分布の経時変化

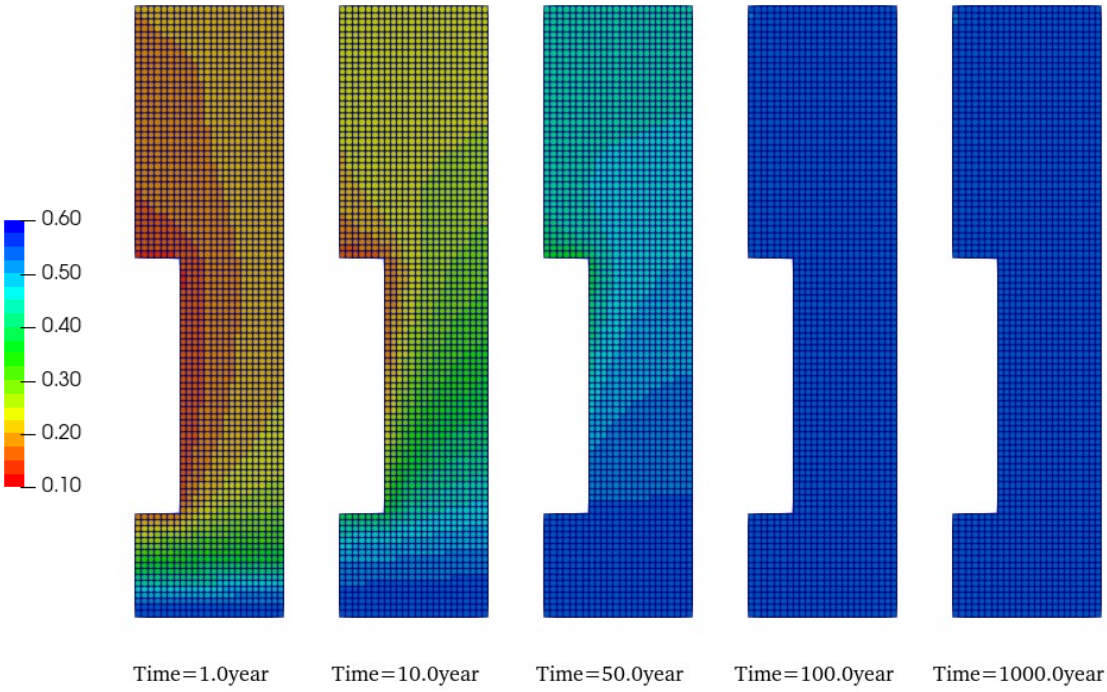


図 4-4- 191　Case 4-2 の含水比分布の経時変化

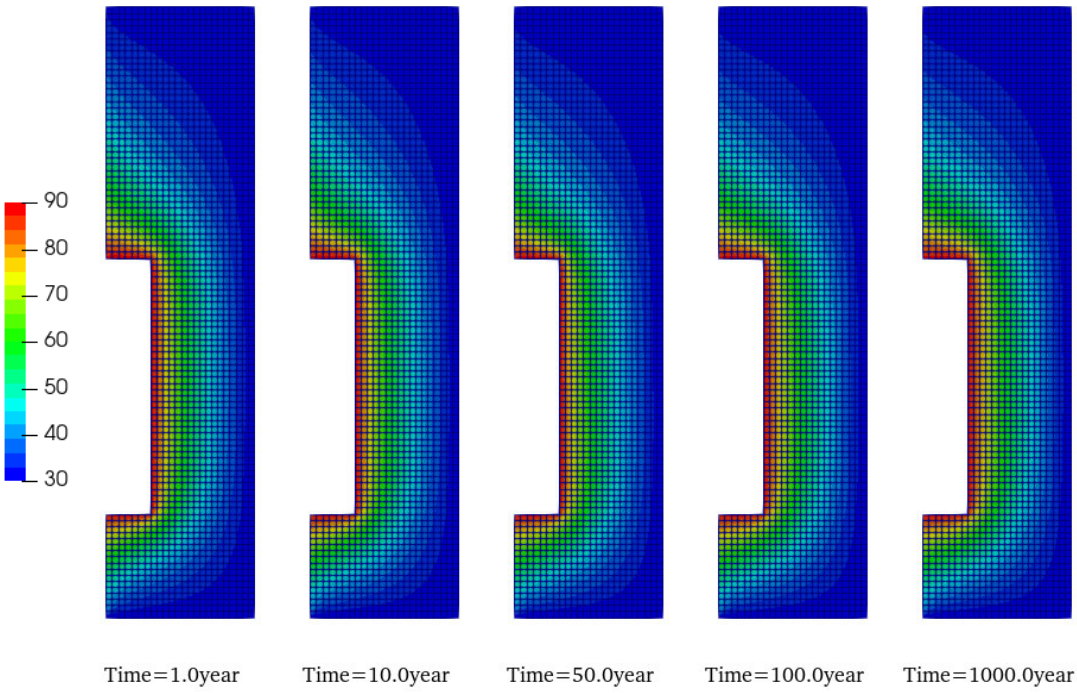


図 4-4- 192　Case 4-2 の温度分布の経時変化

加熱を考慮する条件でクニボンドの透水性の見直しを図った Case 4-1 に対し、間隙水を純水に変更したケースである。間隙水が変わることで膨潤特性や不飽和特性に差異が生じるが、クニボンドを対象とした検討では有効粘土密度に対する透水性係数は人工海水と純水で共通であるため、クニゲル V1 を対象とした Case 2-1 ほどの大きな変化は生じていない。しかし、膨潤作用や水分特性の違いにより浸潤過程は少し遅れを生じており、また土圧が小さく O/P 模型の芯棒の熱膨張による先端の沈下量が大きくなっている。そのため、最終的な変位量が Case 4-1 に比べて小さいが、発生する過渡応答は概ね Case 4-1 と似ている。

(f) Case 4-3 の解析結果

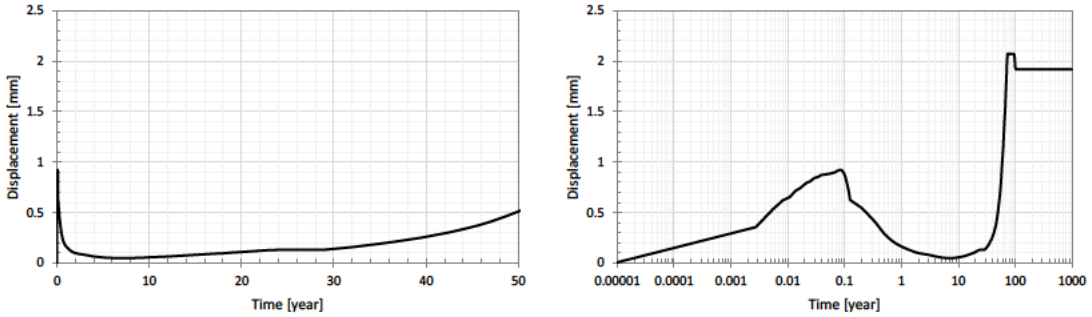


図 4-4- 193 Case 4-3 の O/P 変位の経時変化

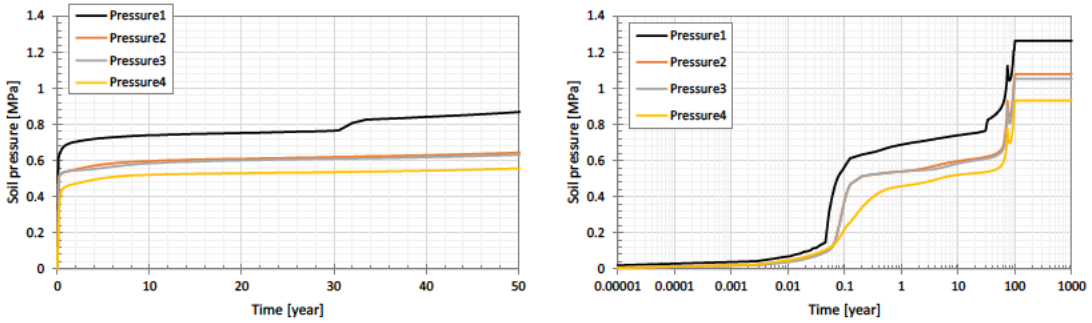


図 4-4- 194 Case 4-3 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化

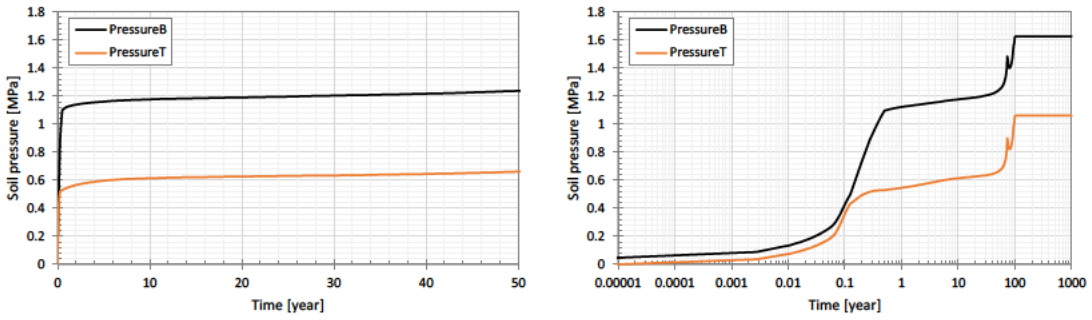


図 4-4- 195 Case 4-3 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化

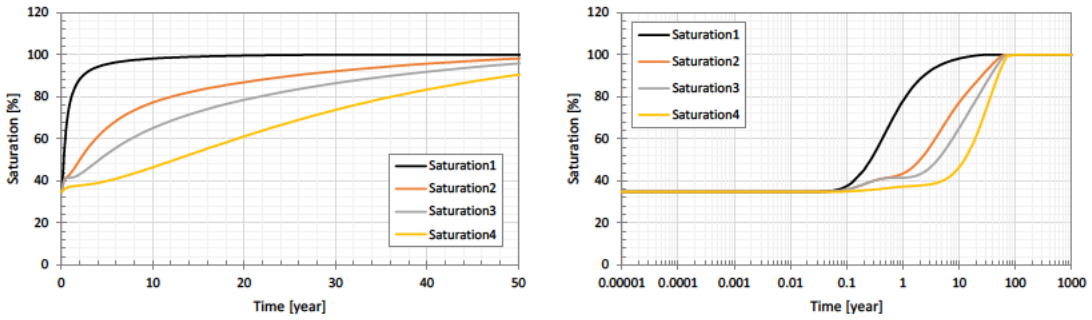


図 4-4- 196　Case 4-3 の各位置の飽和度の経時変化

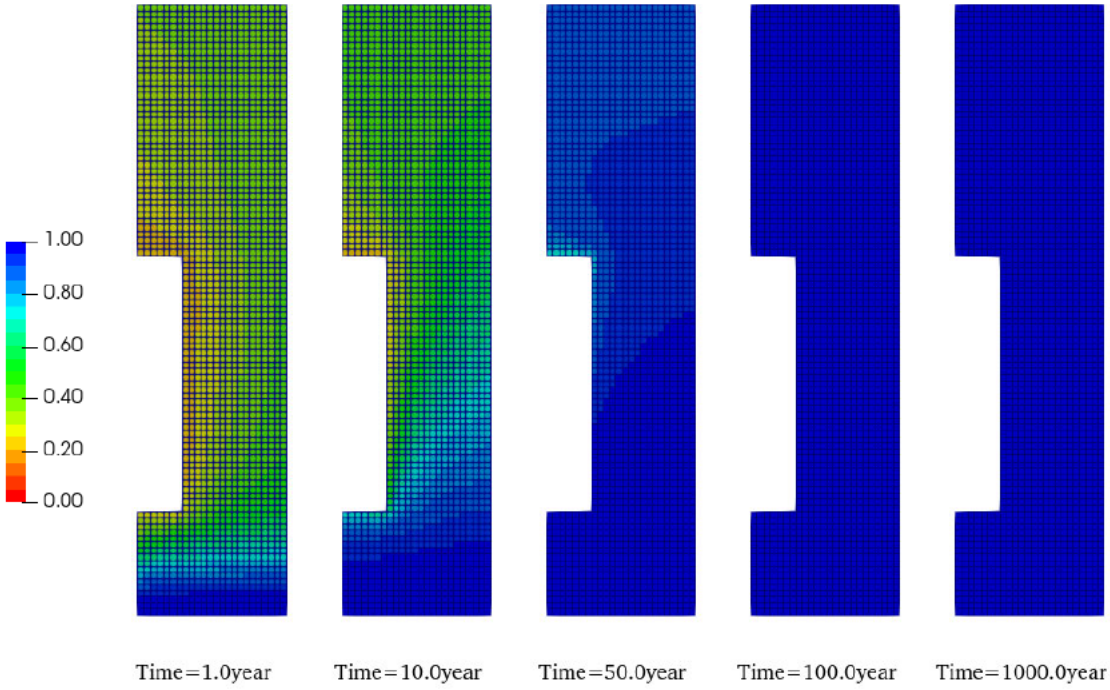


図 4-4- 197　Case 4-3 の飽和度分布の経時変化

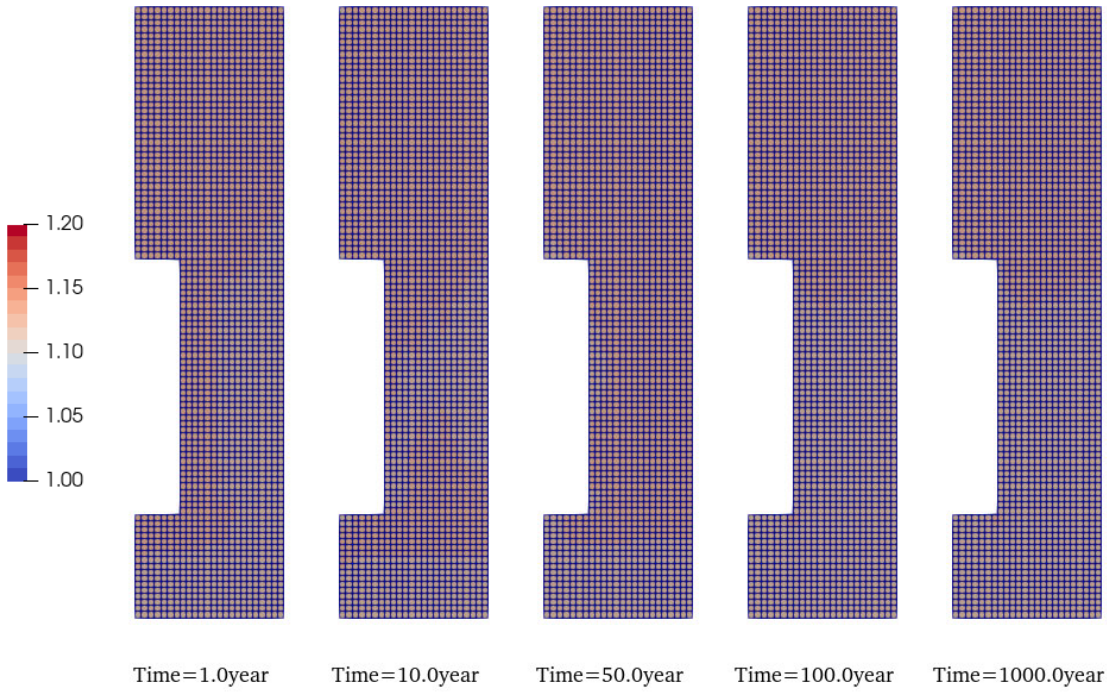


図 4-4- 198　Case 4-3 の乾燥密度分布の経時変化

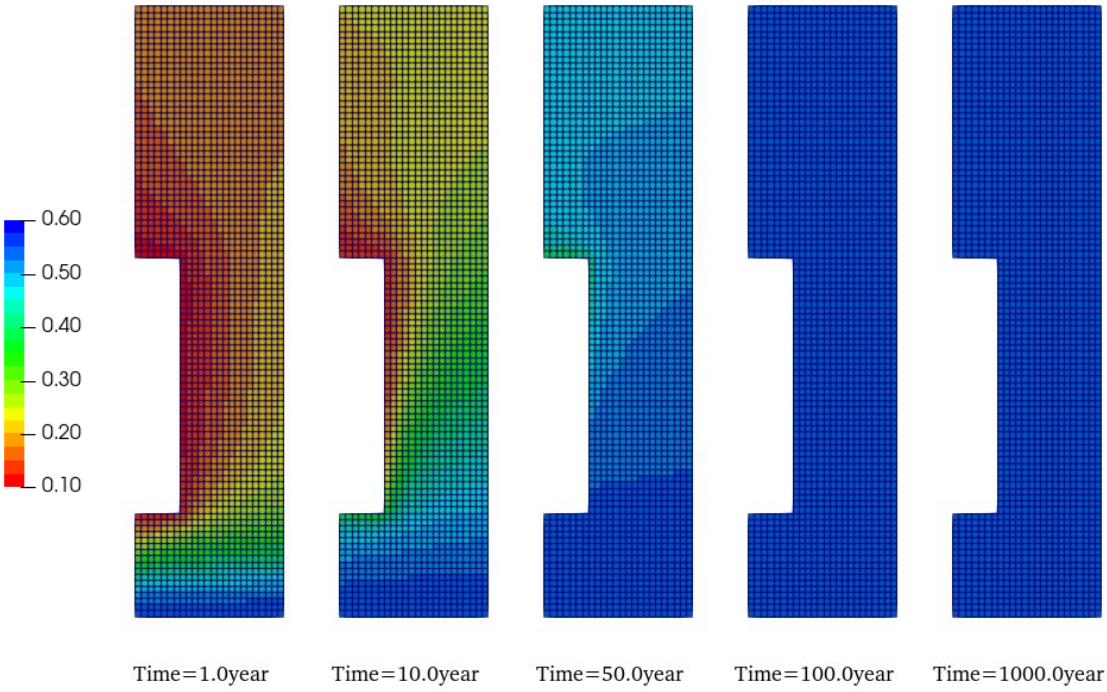


図 4-4- 199　Case 4-3 の含水比分布の経時変化

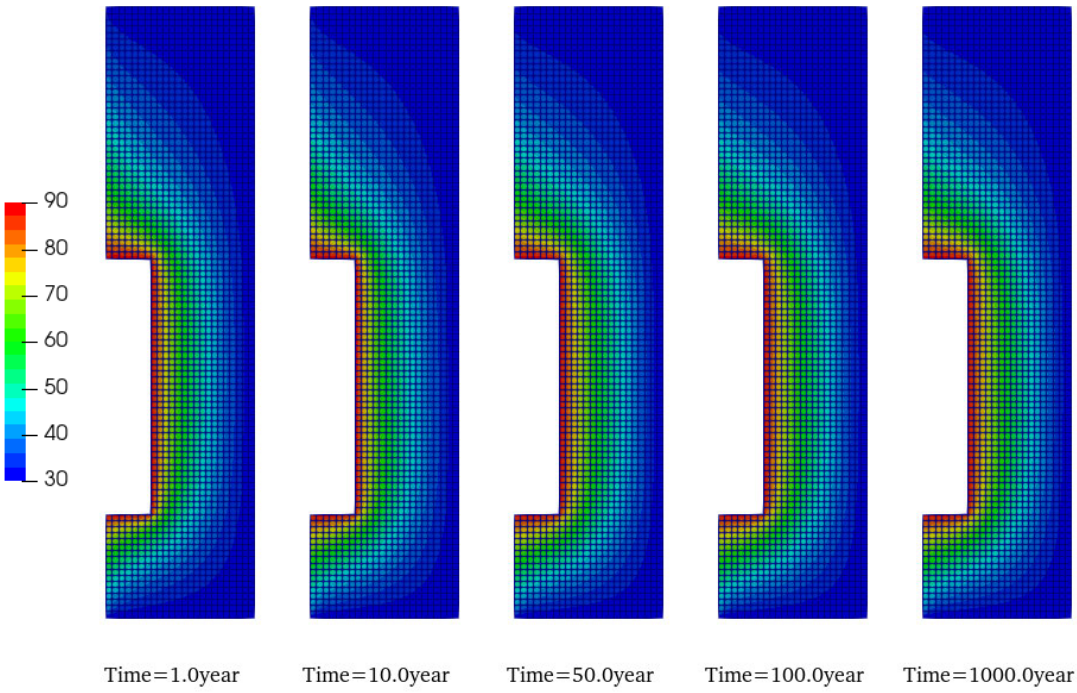


図 4-4- 200　Case 4-3 の温度分布の経時変化

クニボンドの透水性の見直しを図った Case 4-1 に対し、屈曲度を大きくしたケースである。このケースでは加熱を考慮しているため、加熱を考慮してない同様のケースであった Case 3-2 に比べると影響が大きいと考えられる。しかしながら、水蒸気拡散による影響は大きいものではないので、Case 4-1 に対して有意な違いは殆ど見られていない。なお、上部緩衝材が飽和後に一度不飽和に戻る現象は Case 4-1 と同様に発生しているが、水蒸気の拡散係数が大きくなるためか、不飽和状態となる期間が短くなるとともに多少影響が緩和していることが土圧や O/P 変位の経時変化から確認できる。このことからも、この現象は乾燥のし易さに起因していると考えられる。

(g) Case 4-4 の解析結果

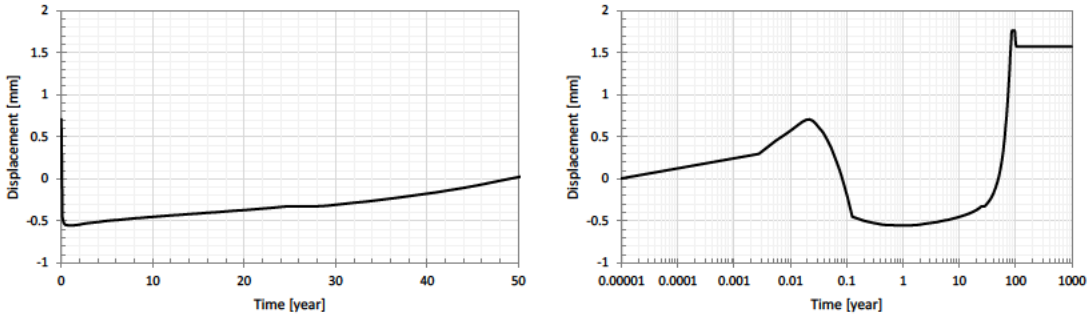


図 4-4- 201　Case 4-4 の O/P 変位の経時変化

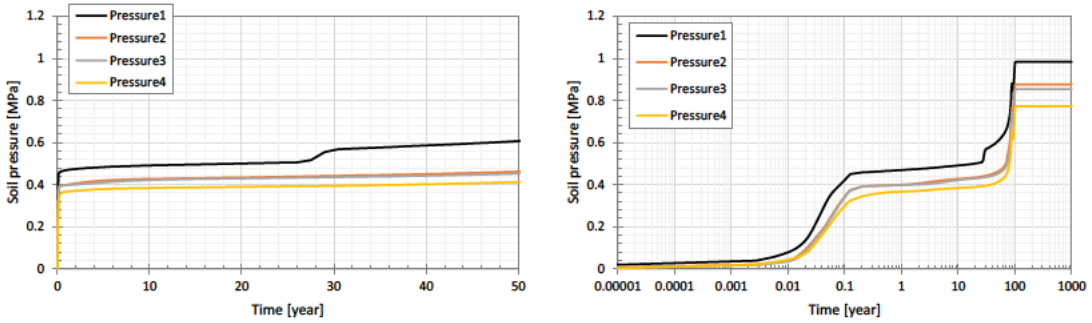


図 4-4- 202　Case 4-4 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化

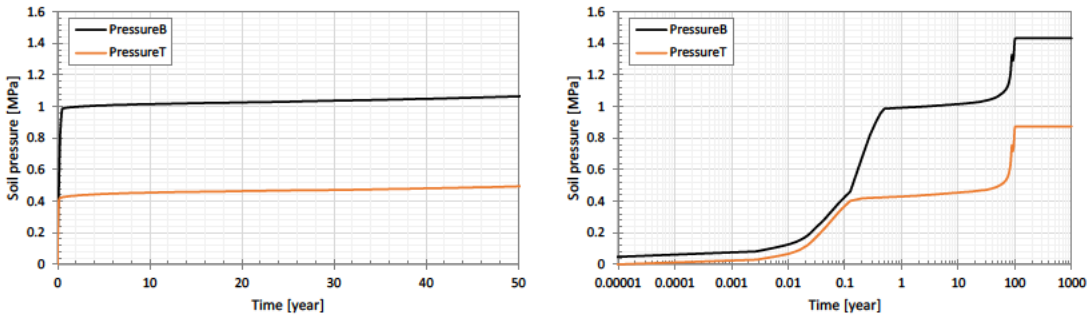


図 4-4- 203　Case 4-4 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化

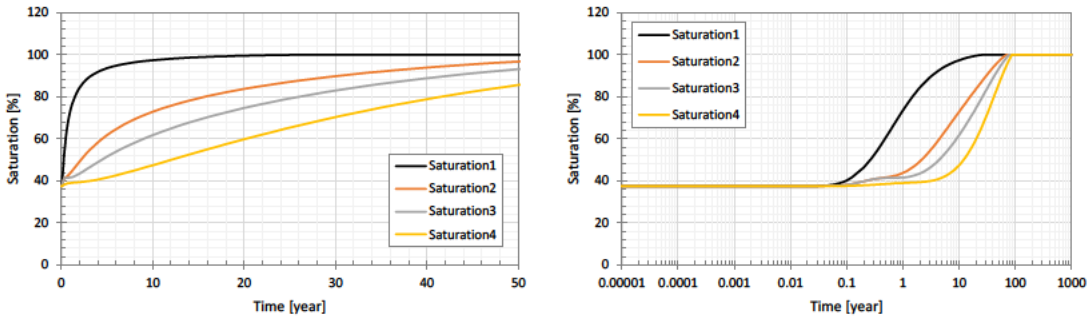


図 4-4- 204　Case 4-4 の各位置の飽和度の経時変化

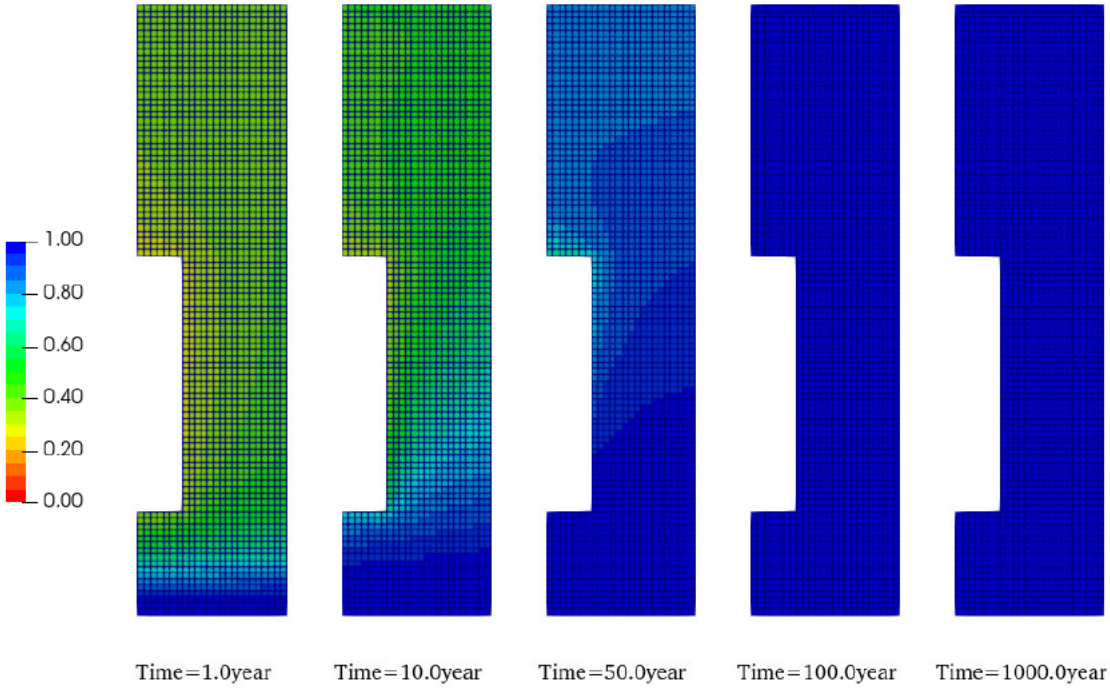


図 4-4- 205　Case 4-4 の飽和度分布の経時変化

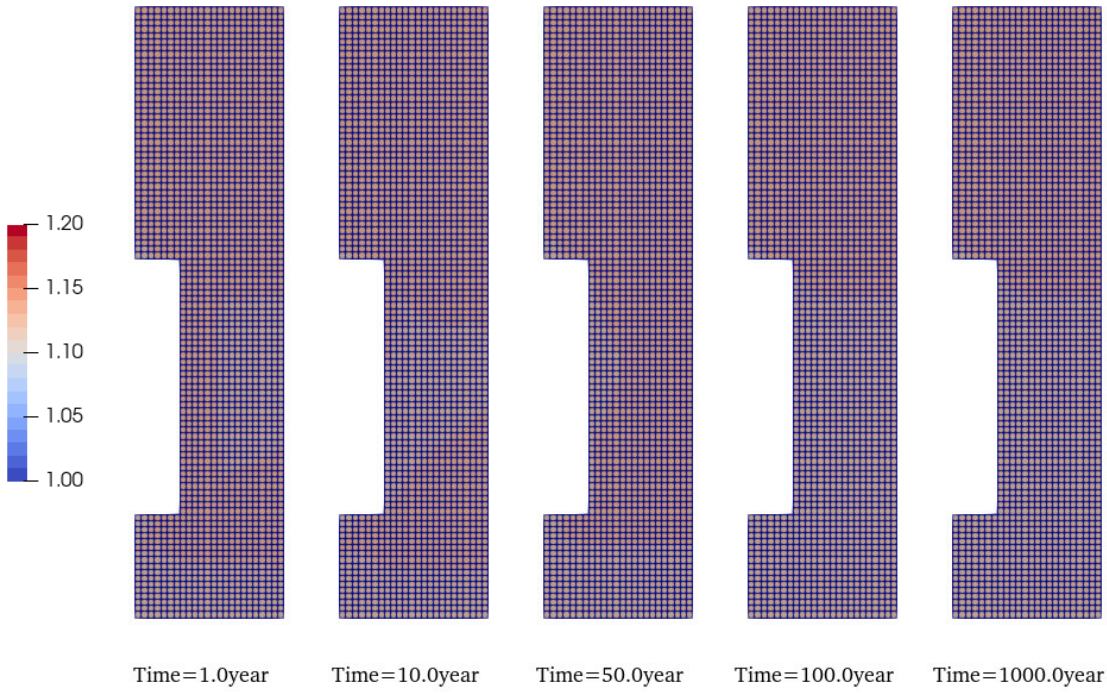


図 4-4- 206　Case 4-4 の乾燥密度分布の経時変化

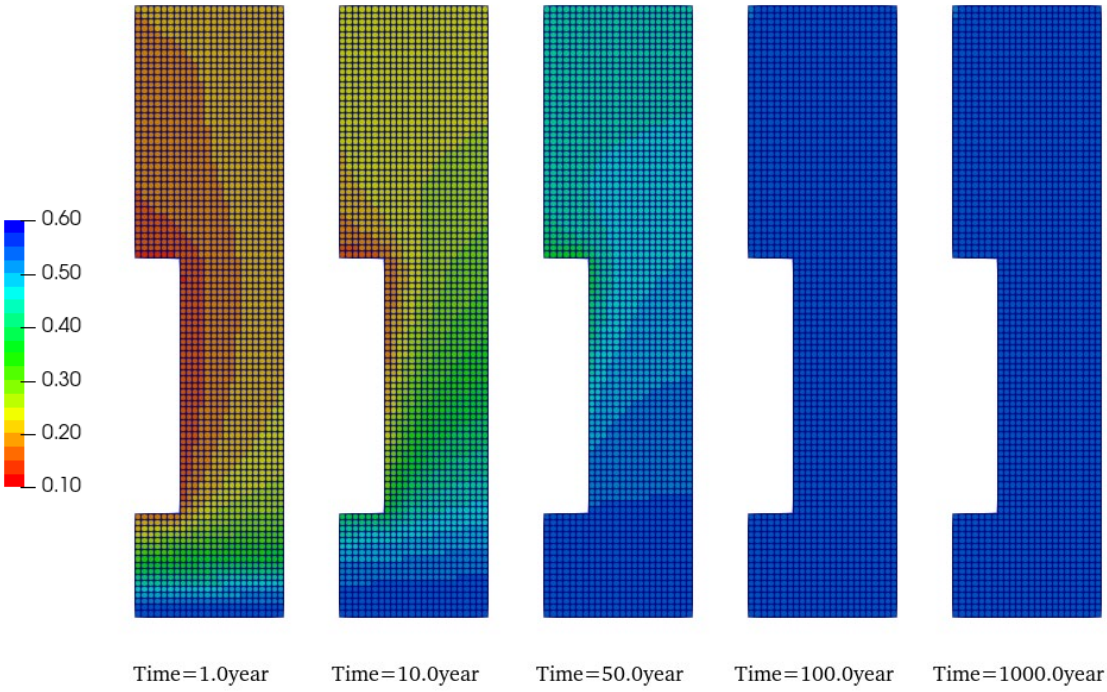


図 4-4- 207　Case 4-4 の含水比分布の経時変化

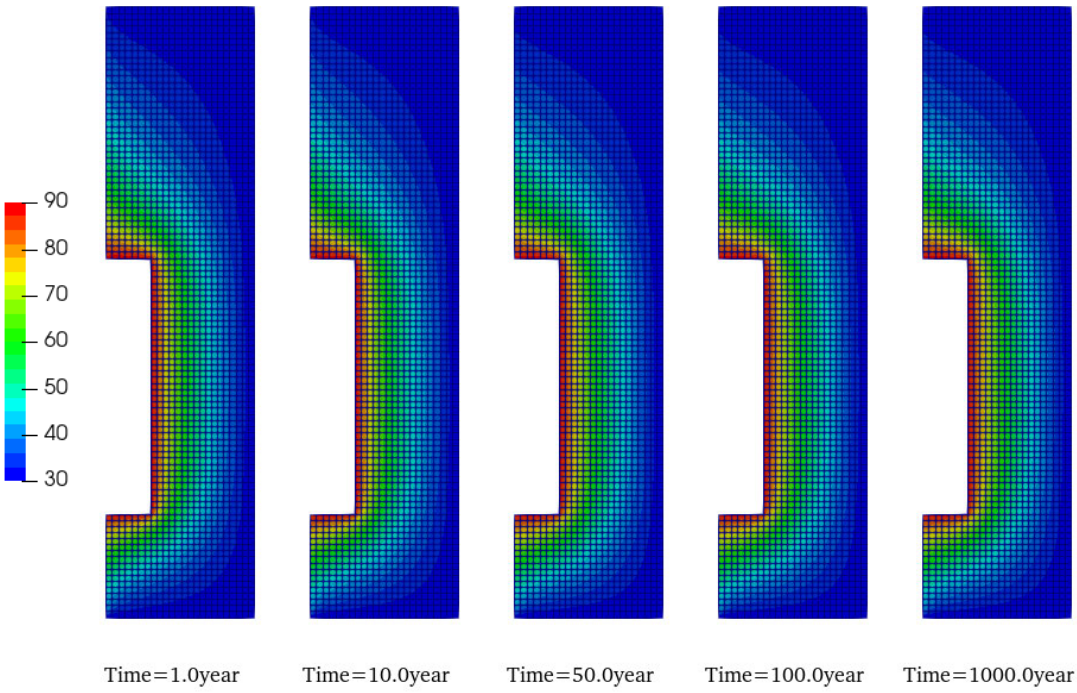


図 4-4- 208　Case 4-4 の温度分布の経時変化

Case 4-2（クニボンド+純水の加熱あり）に対して膨潤特性を変更したものであり、これは間隙水が純水の条件で実施された膨潤変形試験の結果に基づき、基の条件に比べて低拘束圧時の最大膨潤ひずみを小さく評価するものである。注水直後から土圧が上昇するため、この影響はあまり大きくなく、O/P 変位や浸潤速度には殆ど影響が認められないが、膨潤作用が低減して発生する土圧は確かに小さくなっていることが確認できる。しかし、それ以外に有意な差異は認められない。

(h) Case 4-5 の解析結果

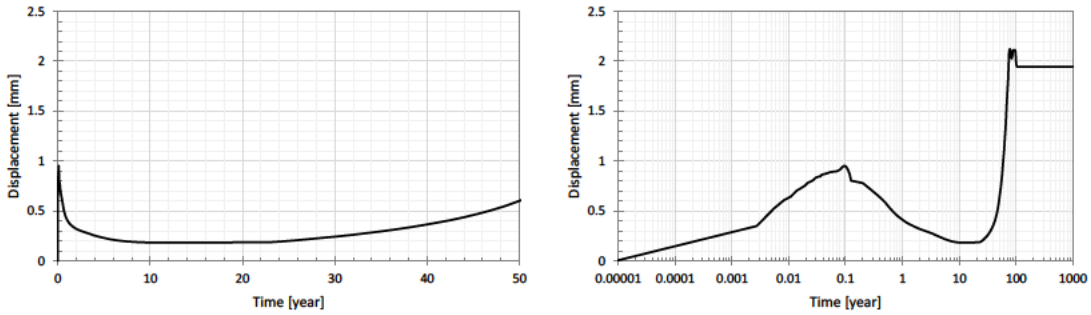


図 4-4- 209　Case 4-5 の O/P 変位の経時変化

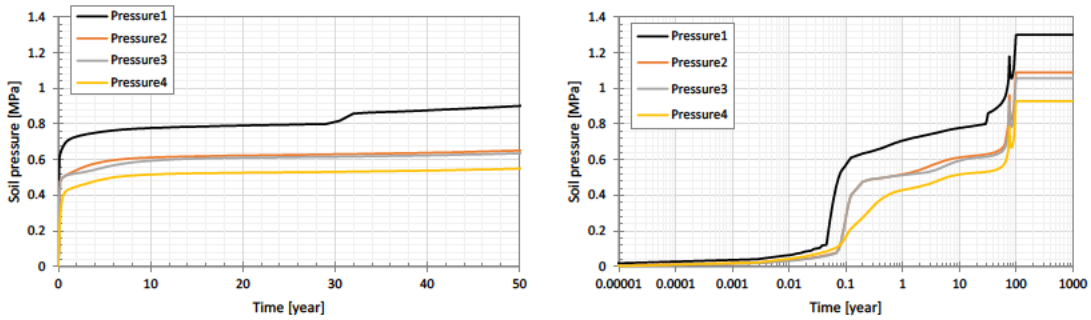


図 4-4- 210　Case 4-5 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化

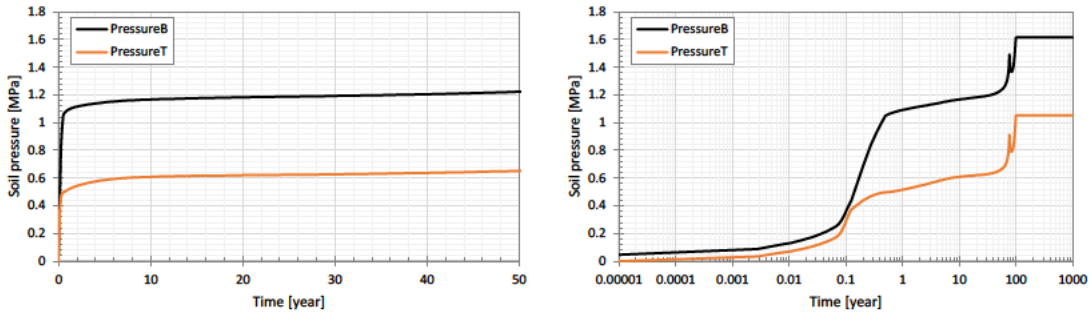


図 4-4- 211　Case 4-5 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化

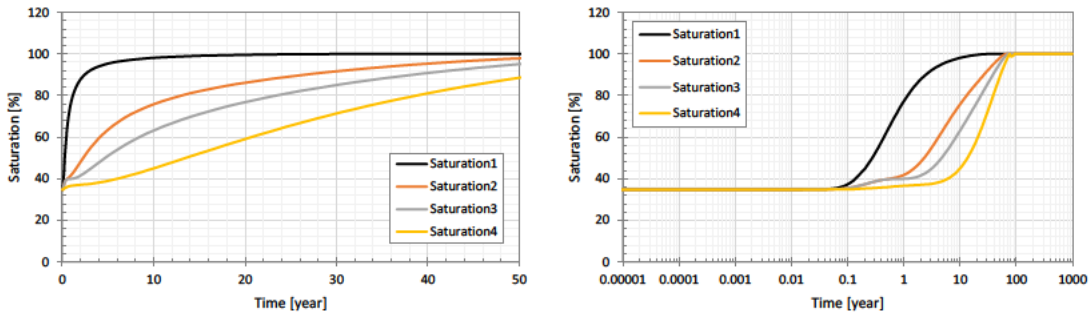


図 4-4- 212　Case 4-5 の各位置の飽和度の経時変化

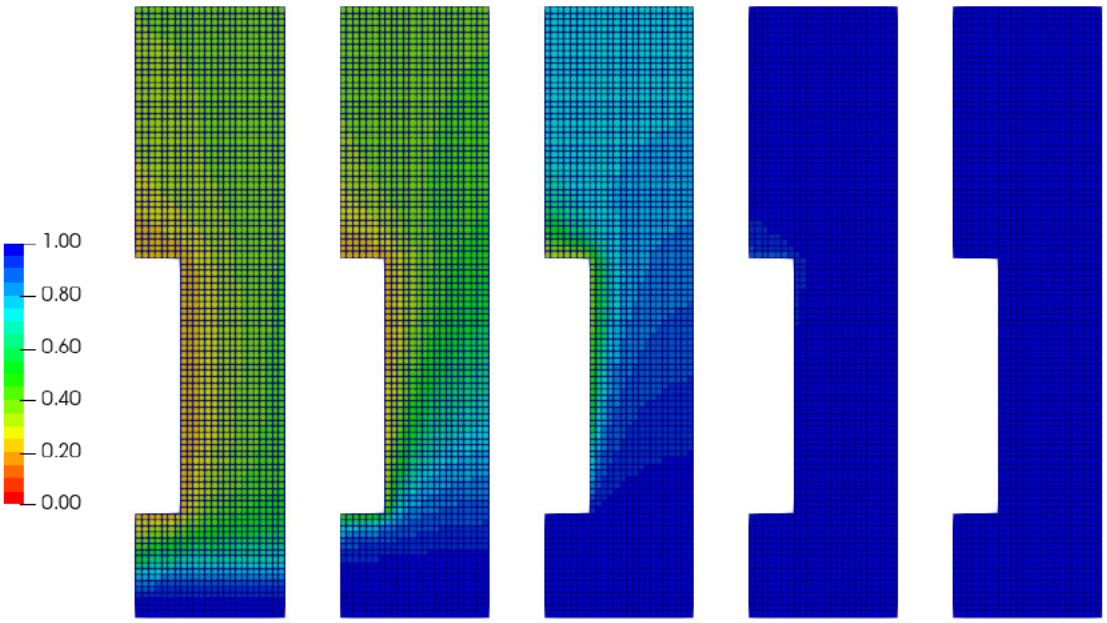


図 4-4- 213　Case 4-5 の飽和度分布の経時変化

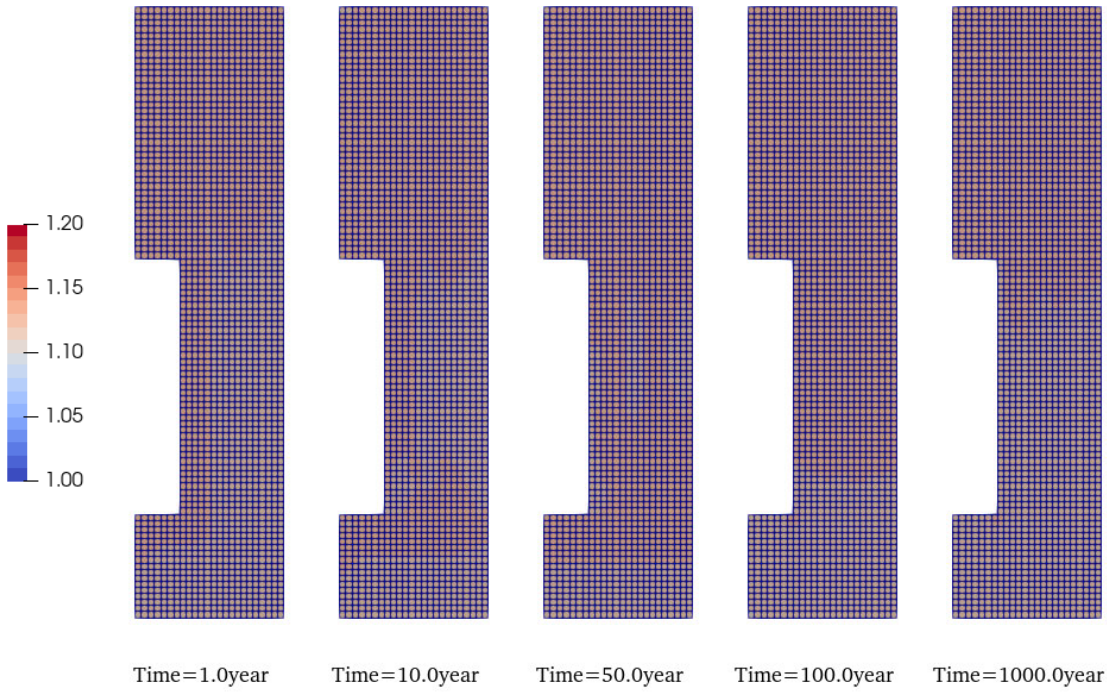


図 4-4- 214　Case 4-5 の乾燥密度分布の経時変化

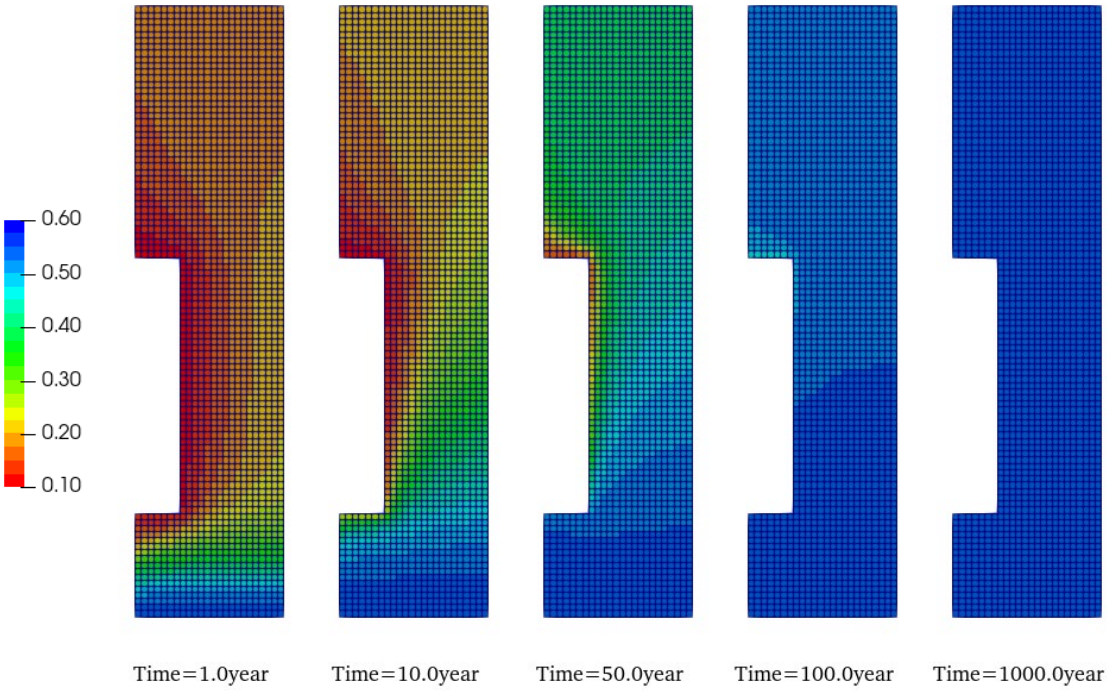


図 4-4- 215　Case 4-5 の含水比分布の経時変化

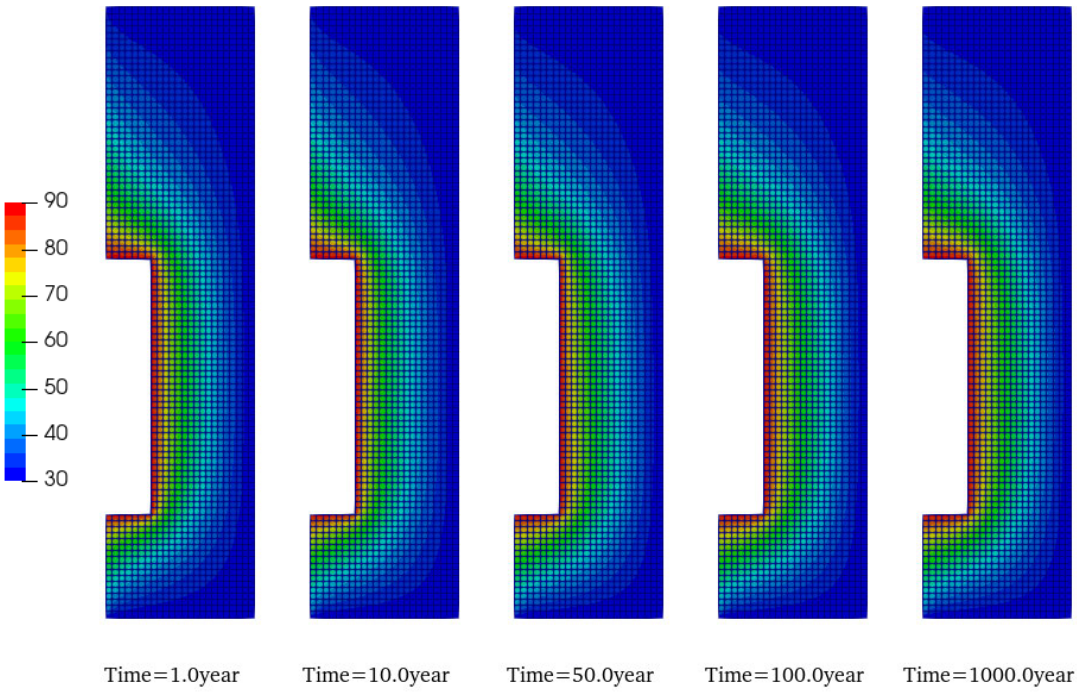


図 4-4- 216　Case 4-5 の温度分布の経時変化

クニボンドの透水性の見直しを図った Case 4-1 に対し、緩衝材の線膨張係数を 0 に修正するものである。緩衝材の熱膨張が無くなることで拘束圧が小さくなり、その分膨潤作用が大きく働くと考えられる。解析結果から発生土圧に差異はないが、O/P 変位量の過渡応答や最終片が少し大きくなっており、その影響自体は大きくないものの熱応力による拘束効果が確認できる。

(i) Case 4-6 の解析結果

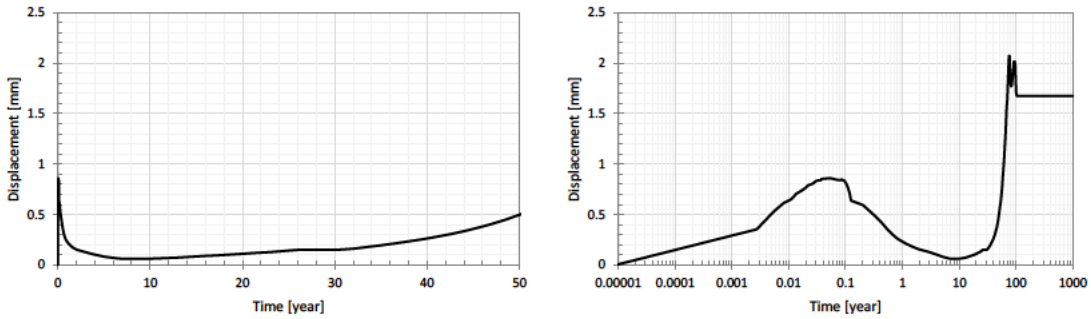


図 4-4- 217 Case 4-6 の O/P 変位の経時変化

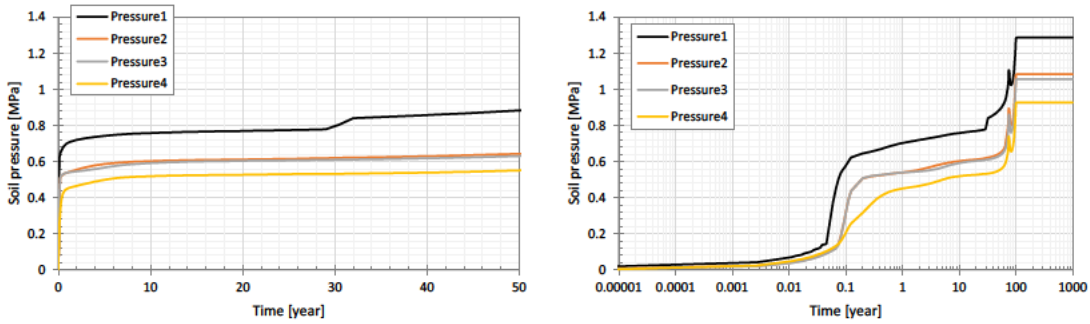


図 4-4- 218 Case 4-6 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化

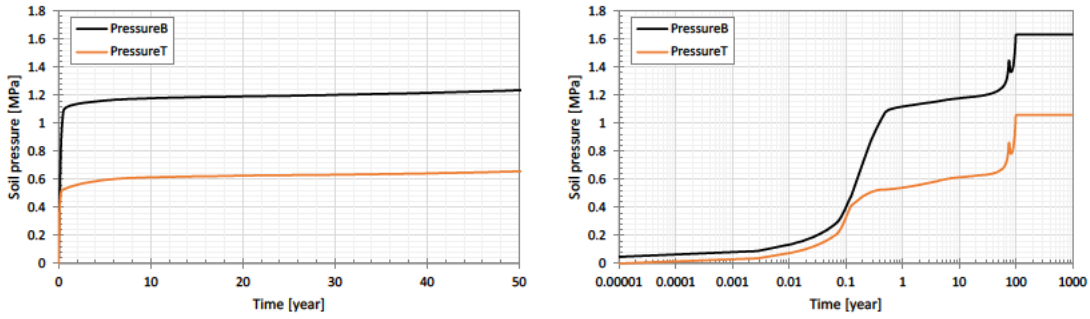


図 4-4- 219 Case 4-6 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化

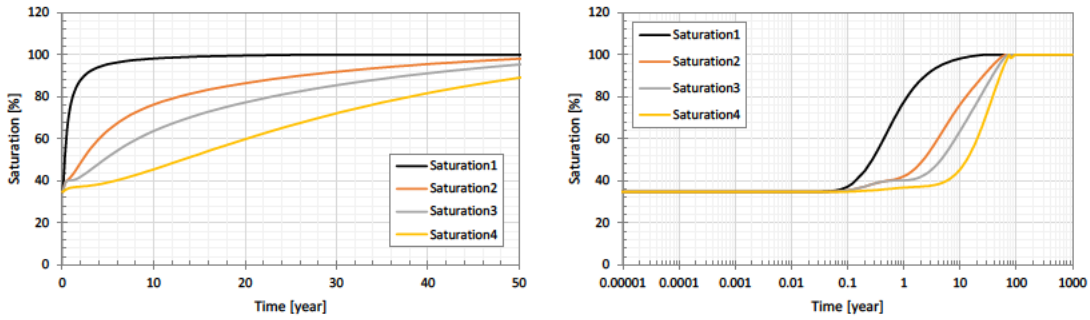


図 4-4- 220　Case 4-6 の各位置の飽和度の経時変化

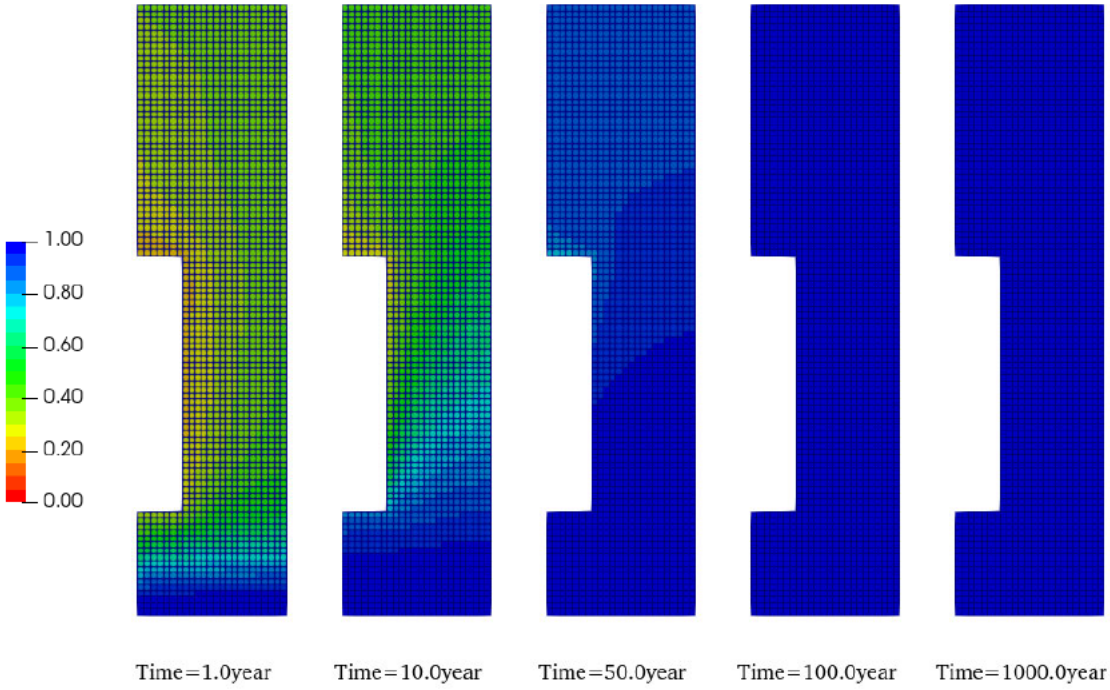


図 4-4- 221　Case 4-6 の飽和度分布の経時変化

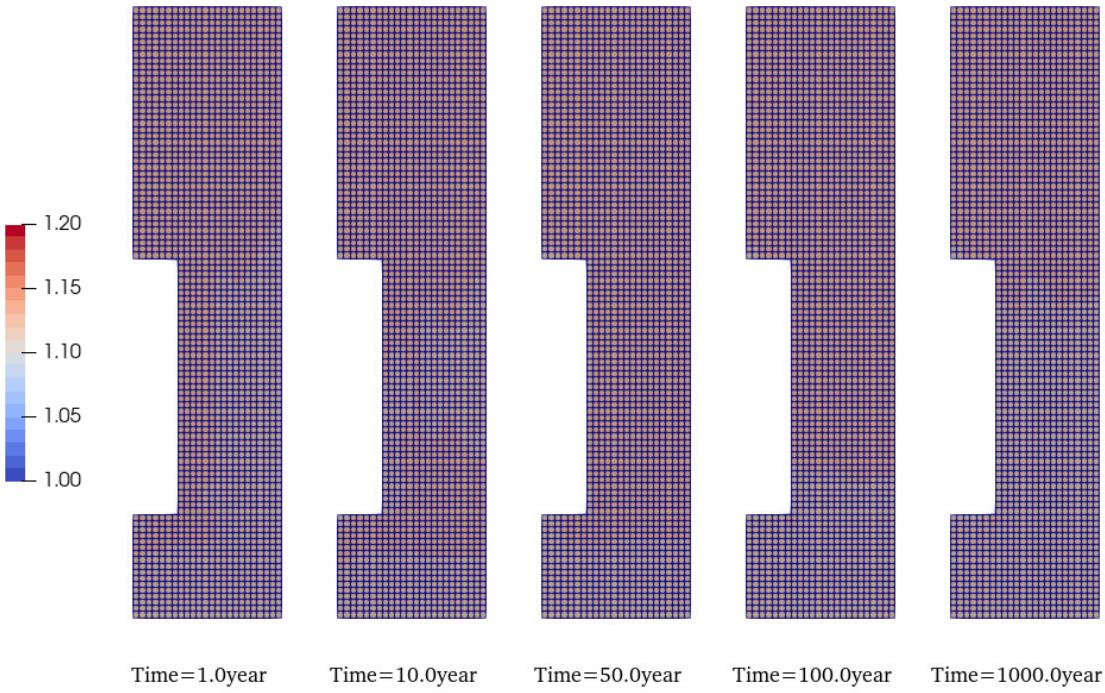


図 4-4- 222　Case 4-6 の乾燥密度分布の経時変化

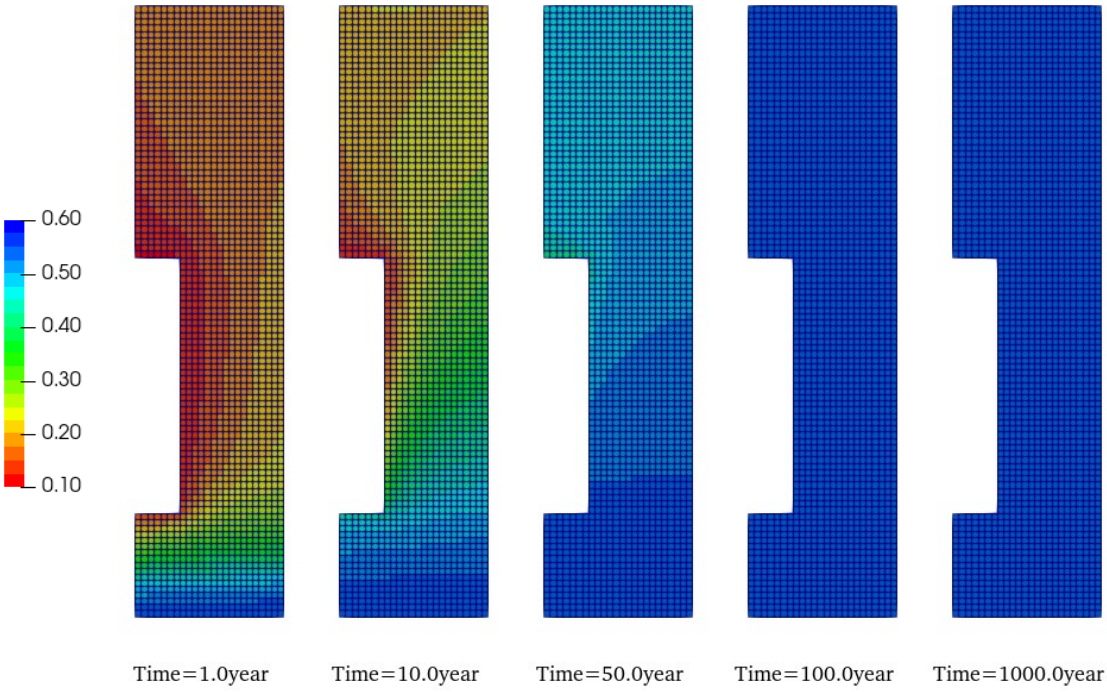


図 4-4- 223　Case 4-6 の含水比分布の経時変化

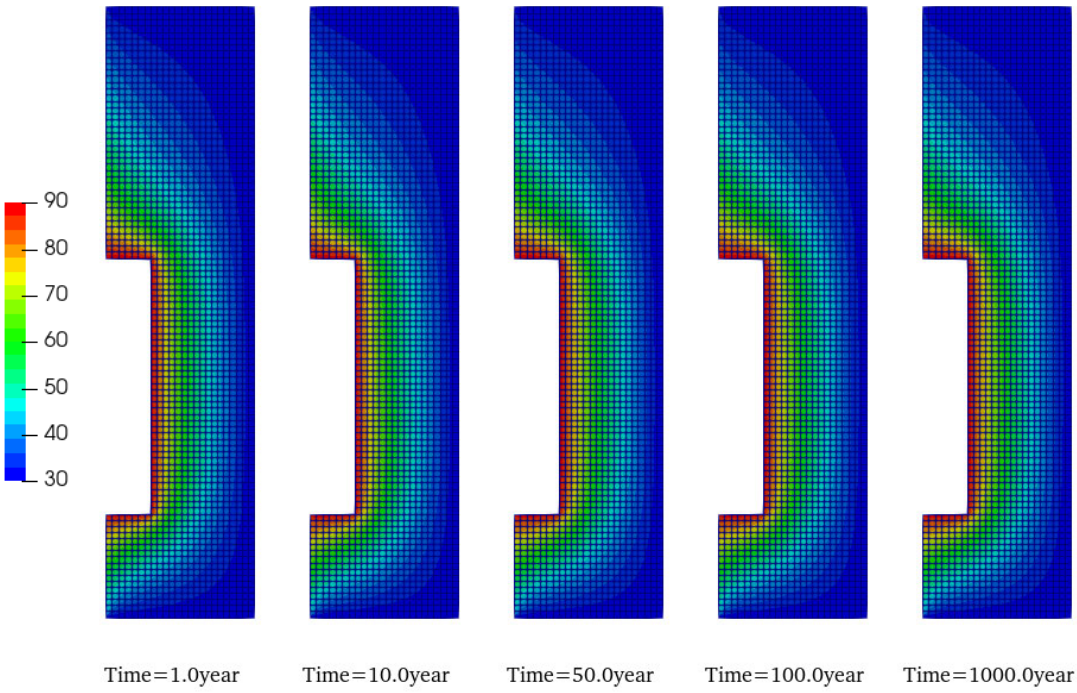


図 4-4- 224　Case 4-6 の温度分布の経時変化

クニボンドの透水性の見直しを図った Case 4-1 に対し、飽和時の緩衝材の熱伝導率を小さくするものであり、物性値の不確実性を検討するケースである。緩衝材の温度分布に影響すると考えられるが、その影響は小さいため土圧や O/P 変位における変化は小さい。しかし、屈曲度の影響を検討した Case 4-3 と同様に、温度分布が変化することで上部緩衝材に見られる飽和後に一時的に不飽和に戻る現象の影響が僅かに緩和することが確認できる。

(j) Case 4-7 の解析結果

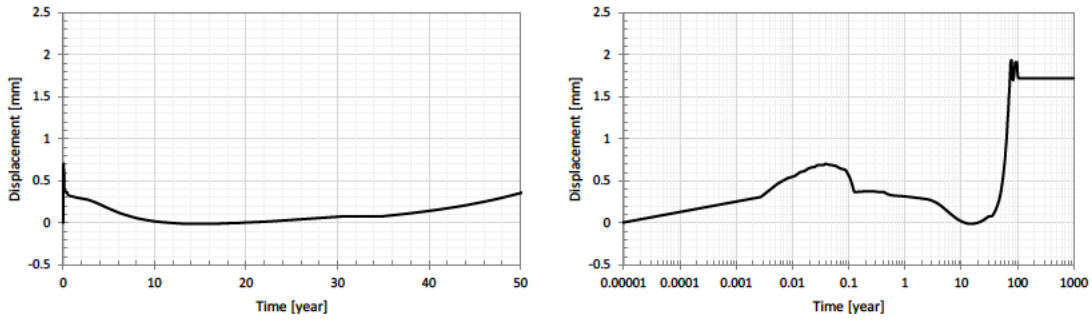


図 4-4- 225 Case 4-7 の O/P 変位の経時変化

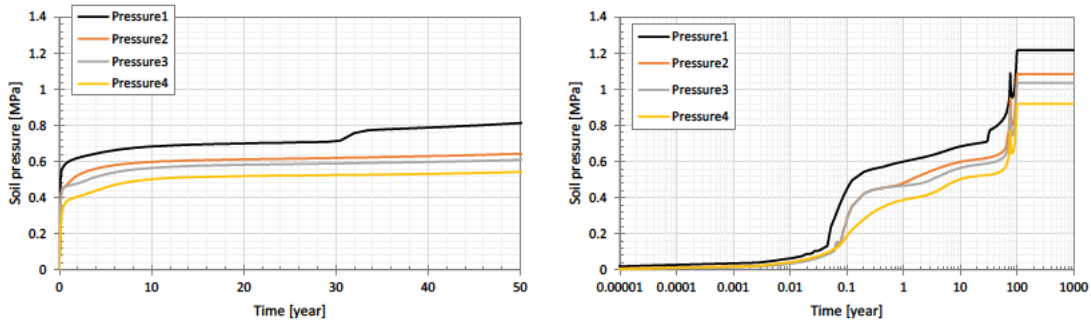


図 4-4- 226 Case 4-7 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化

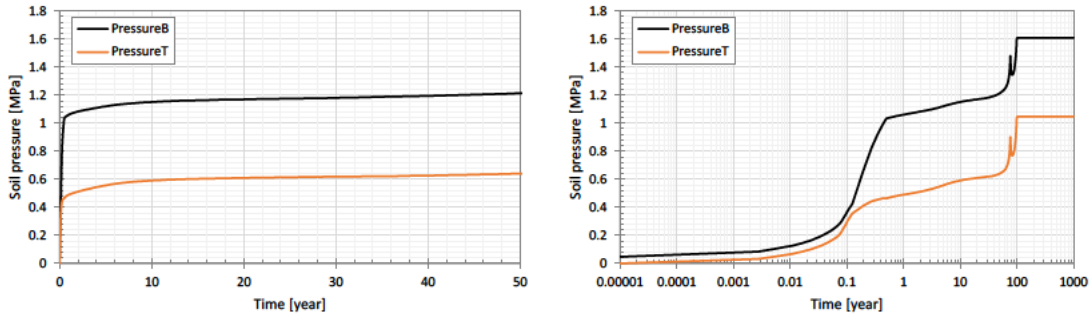


図 4-4- 227 Case 4-7 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化

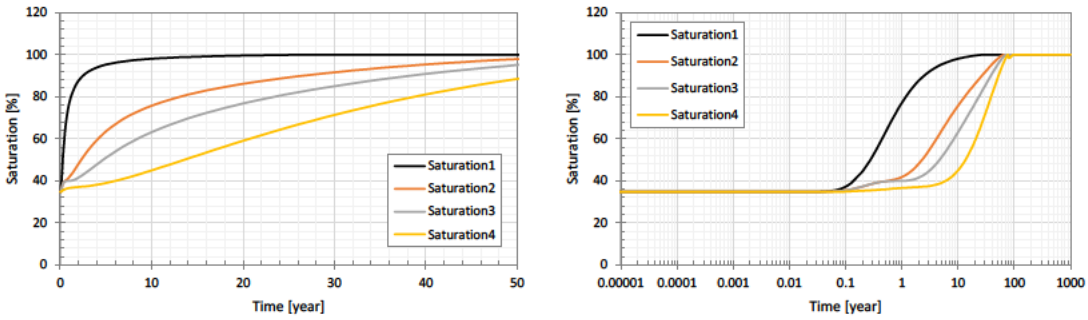


図 4-4- 228　Case 4-7 の各位置の飽和度の経時変化

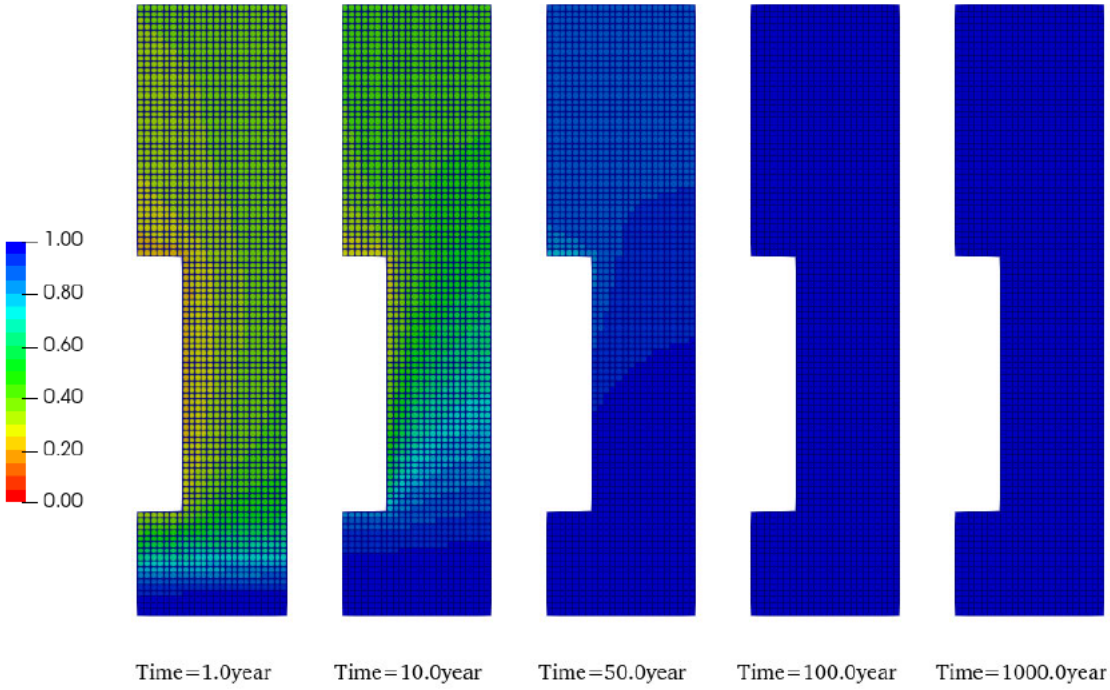


図 4-4- 229　Case 4-7 の飽和度分布の経時変化

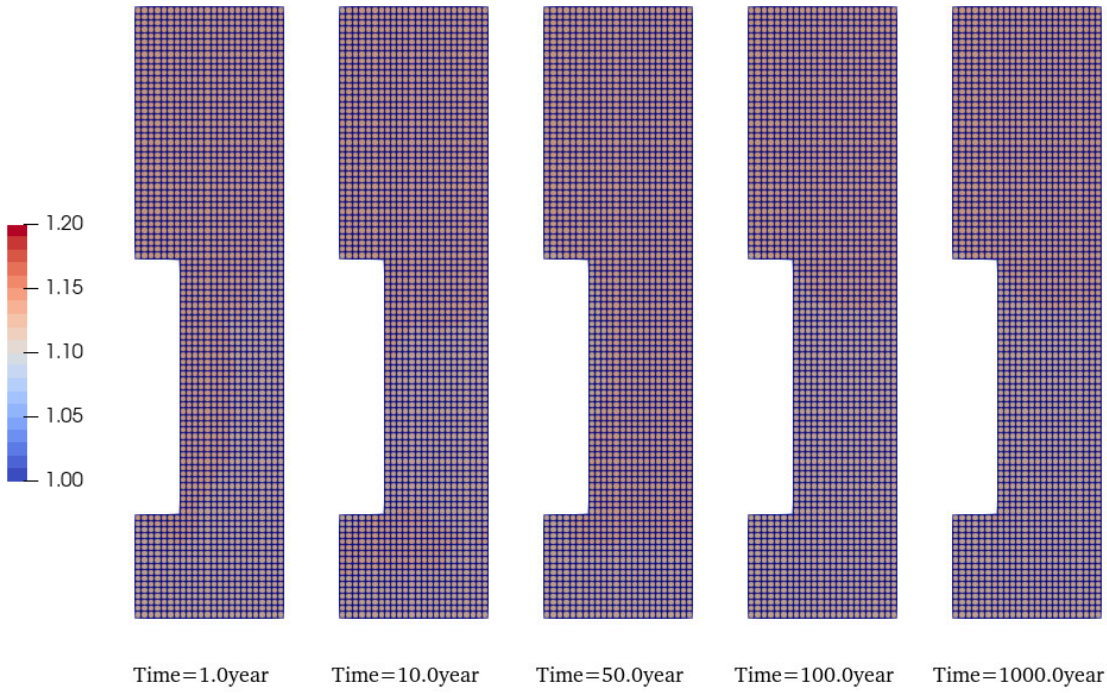


図 4-4- 230　Case 4-7 の乾燥密度分布の経時変化

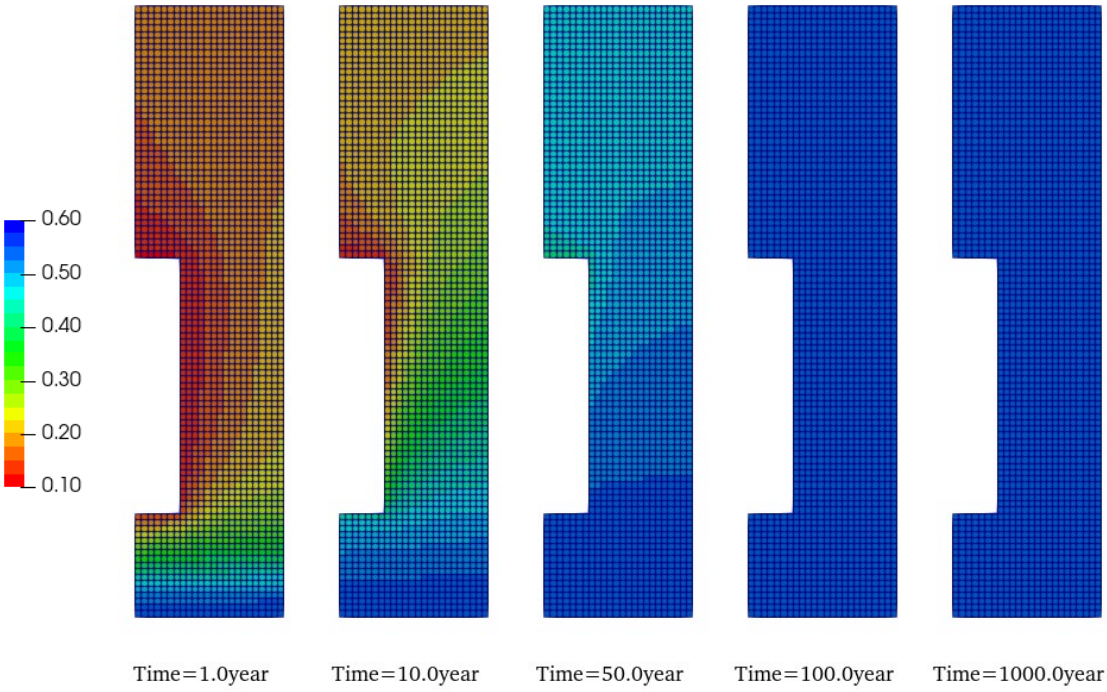


図 4-4- 231　Case 4-7 の含水比分布の経時変化

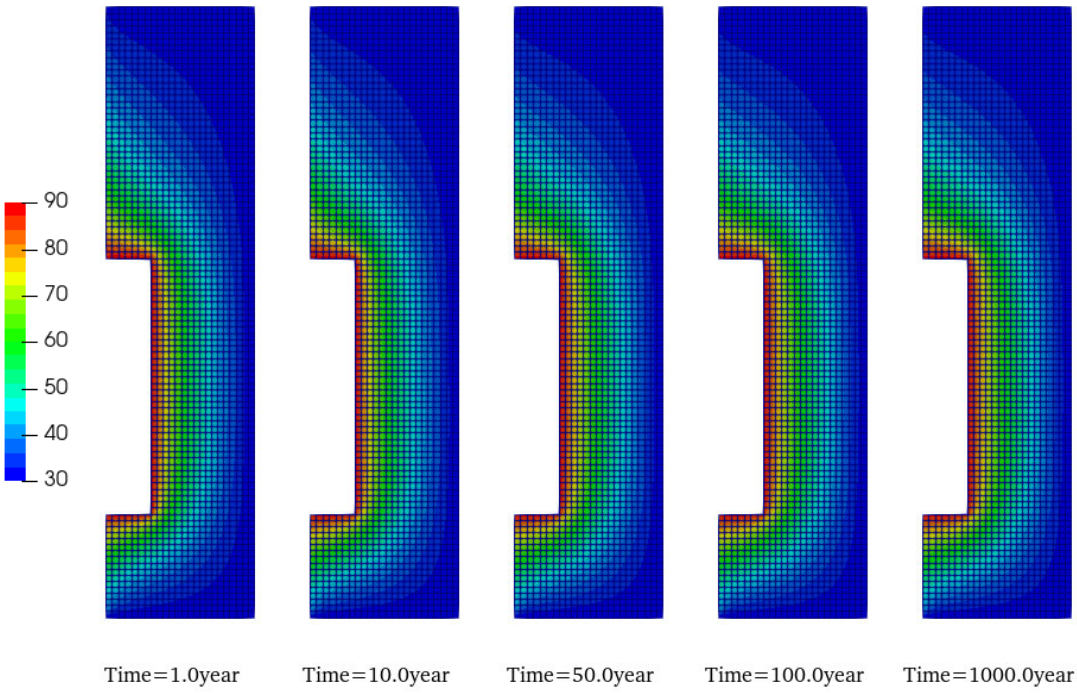


図 4-4- 232　Case 4-7 の温度分布の経時変化

クニボンドの透水性の見直しを図った Case 4-1 に対し、膨潤の進行をサクション変化に依存するものでなく、飽和度変化に依存するように修正を行ったケースである。この違いは水分特性曲線の形状に大きく依存し、膨潤進行が速くなるか遅くなるかは一概には言えない。Case 4-1 と比較すると注水直後の緩衝材土圧の立ち上がりは僅かに緩くなり、また土圧の上昇速度が小さいことから膨潤進行が僅かに遅くなったことが確認できる。なお、この解析条件では全体の現象に対する影響は小さいが、O/P 変位の過渡応答などに多少の違いが認められる。

(k) Case 4-8 の解析結果

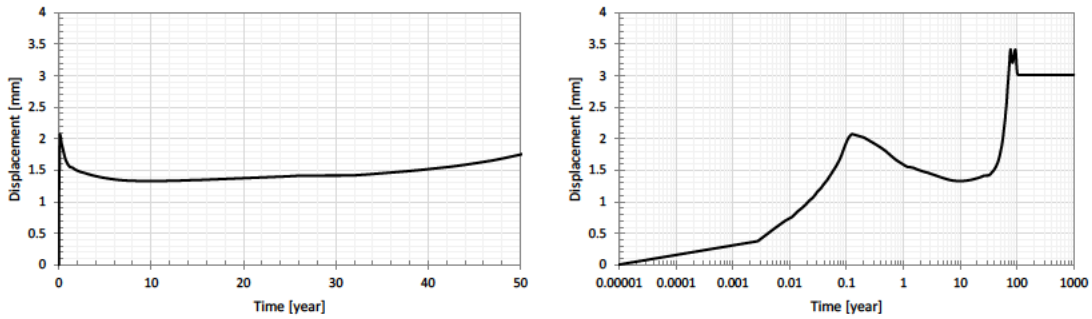


図 4-4- 233　Case 4-8 の O/P 変位の経時変化

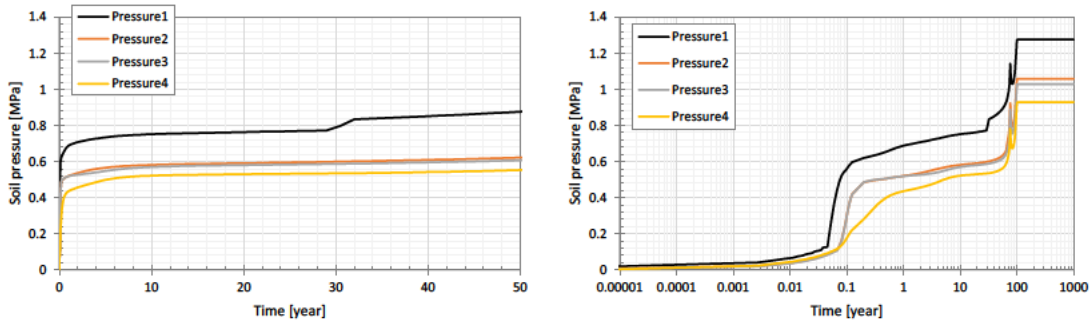


図 4-4- 234　Case 4-8 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化

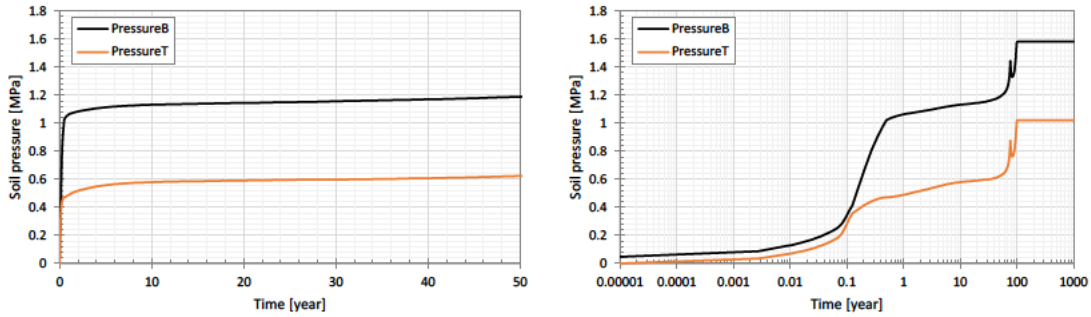


図 4-4- 235　Case 4-8 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化

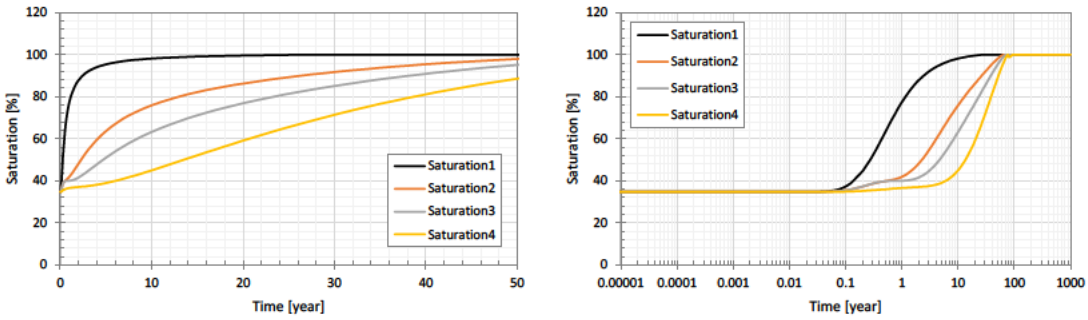


図 4-4- 236　Case 4-8 の各位置の飽和度の経時変化

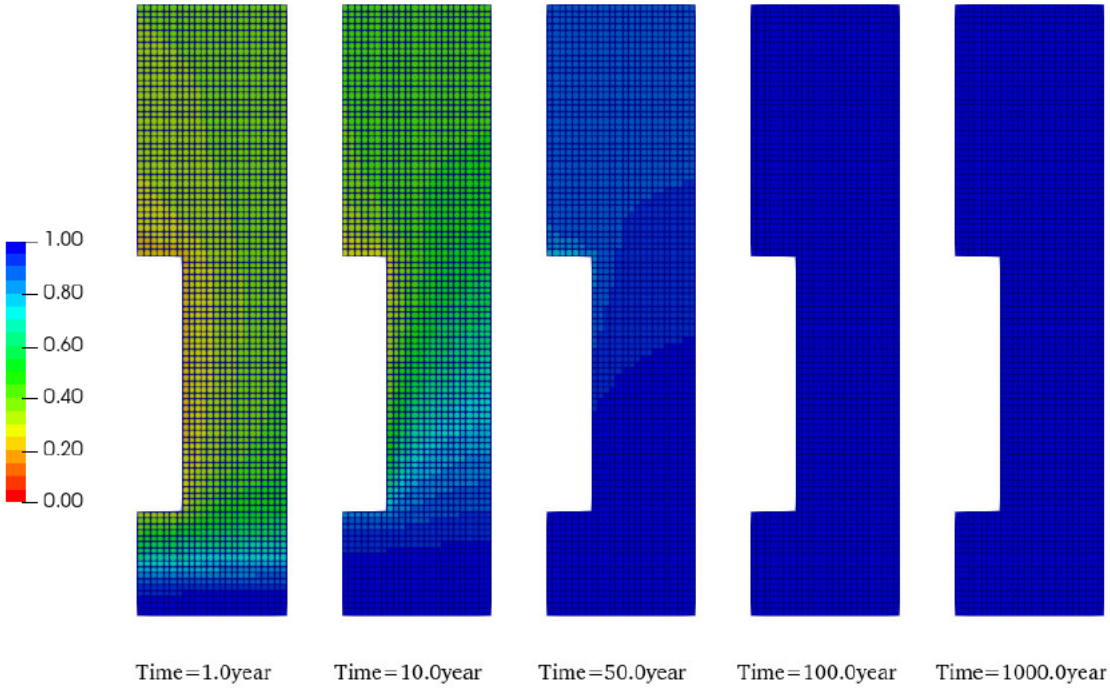


図 4-4- 237　Case 4-8 の飽和度分布の経時変化

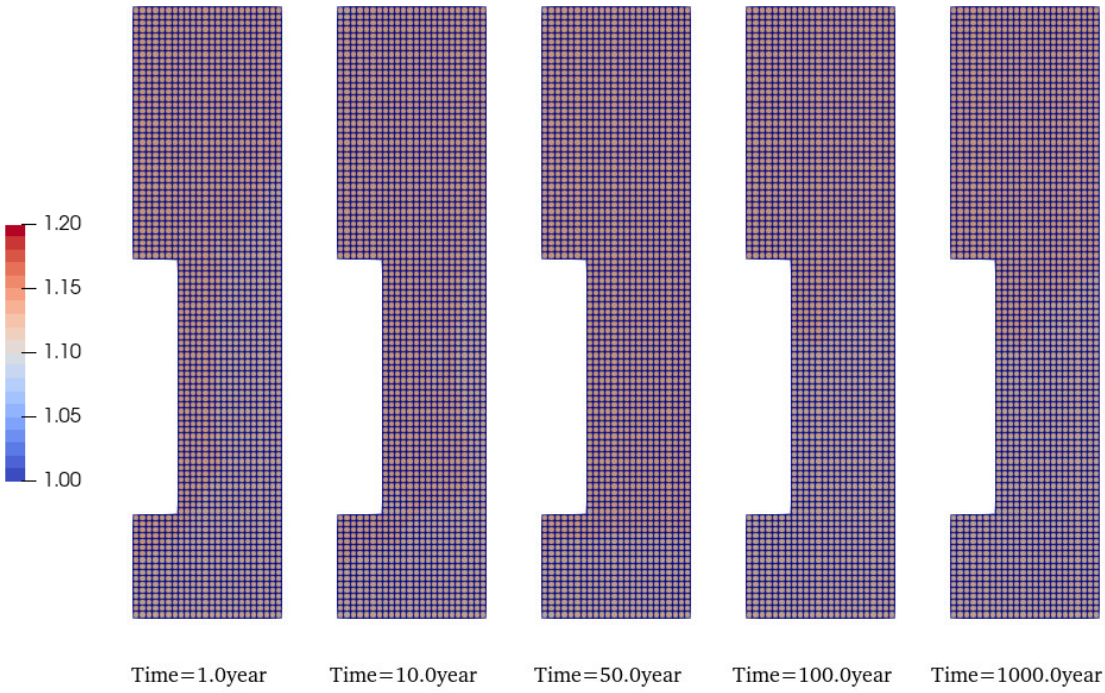


図 4-4- 238　Case 4-8 の乾燥密度分布の経時変化

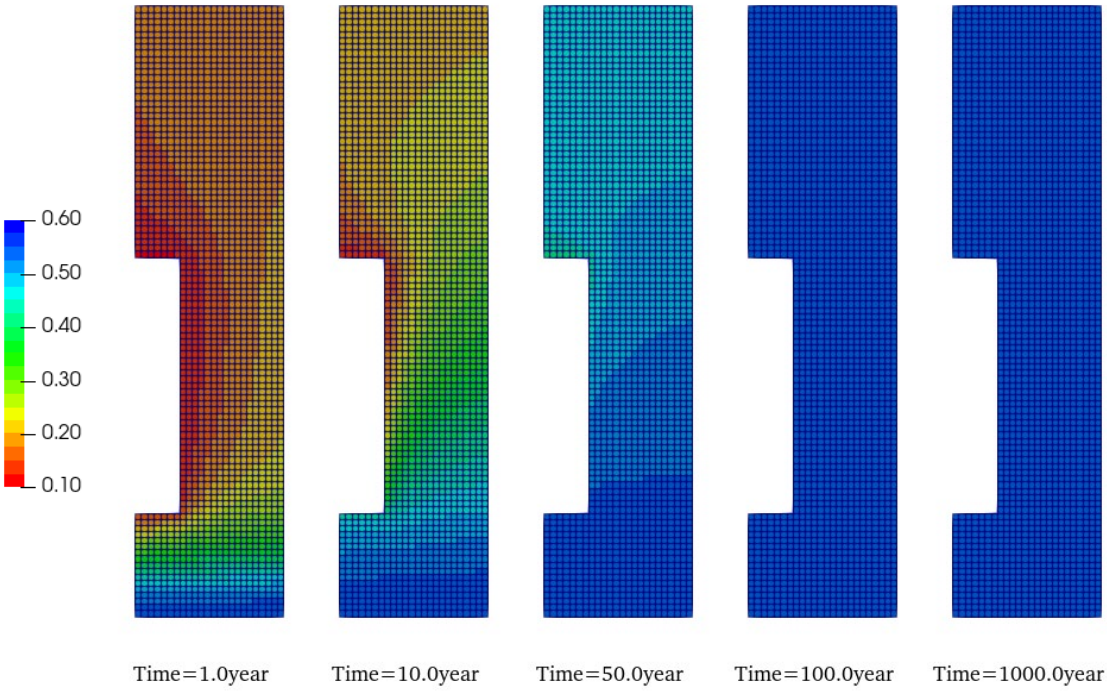


図 4-4- 239　Case 4-8 の含水比分布の経時変化

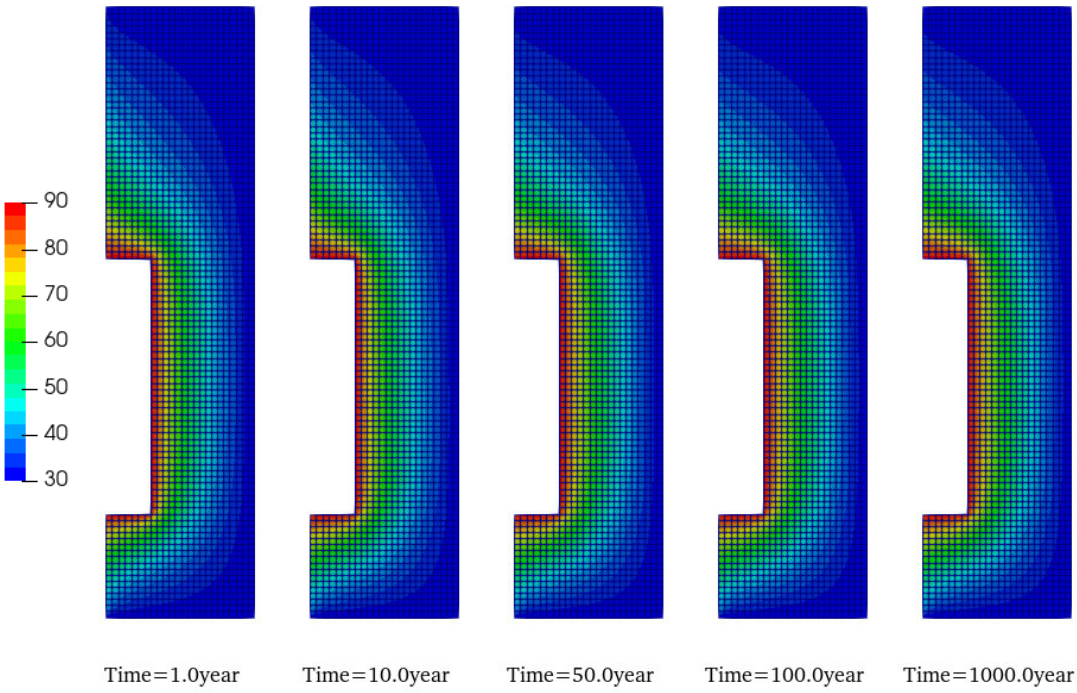


図 4-4- 240　Case 4-8 の温度分布の経時変化図

クニボンドの透水性の見直しを図った Case 4-1 に対し、O/P の線膨張係数を 0 に変更したケースである。芯棒下端を計測している関係から O/P 変位には影響が大きく、熱膨張分の沈下が発生しなくなることから変位量は大きくなっている。また、熱膨張によって生じる圧力の影響や、O/P と緩衝材間の滑動現象にも関係するため、O/P 変位だけでなく緩衝材土圧にも多少の影響が認められる。

(l)　Case 4-9 の解析結果

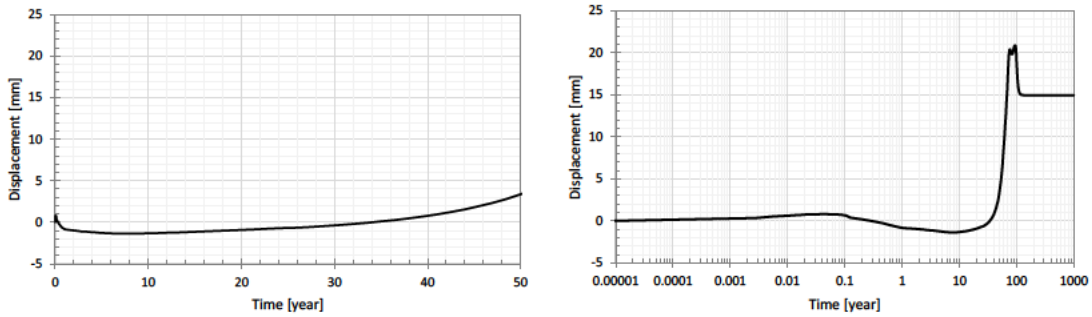


図 4-4- 241　Case 4-9 の O/P 変位の経時変化

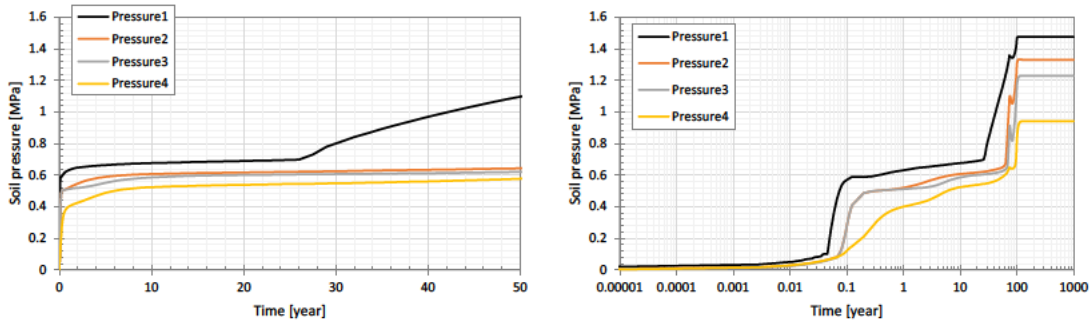


図 4-4- 242　Case 4-9 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化

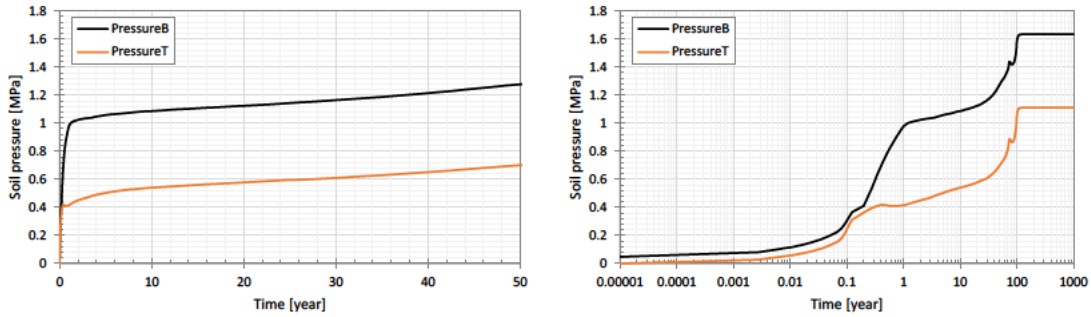


図 4-4- 243　Case 4-9 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化

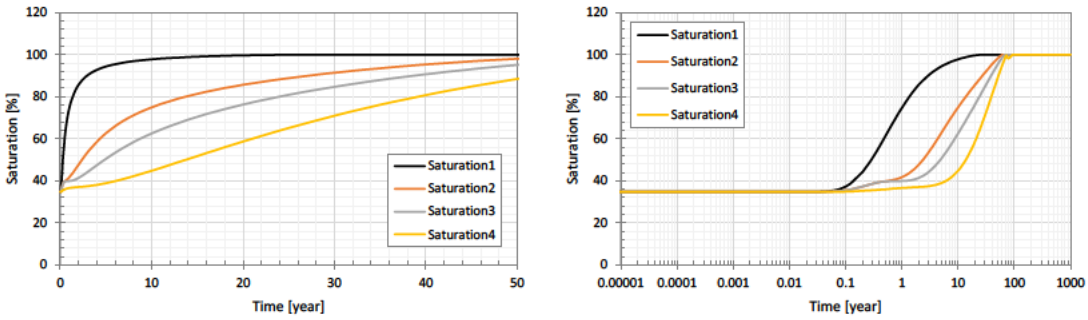


図 4-4- 244　Case 4-9 の各位置の飽和度の経時変化

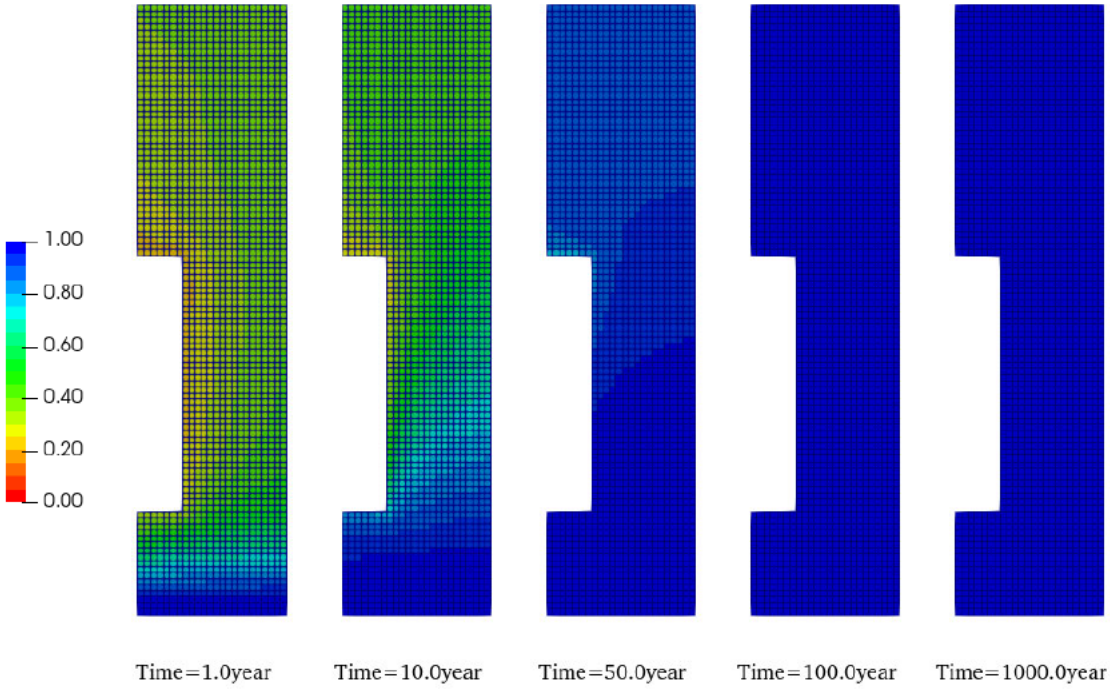


図 4-4- 245　Case 4-9 の飽和度分布の経時変化

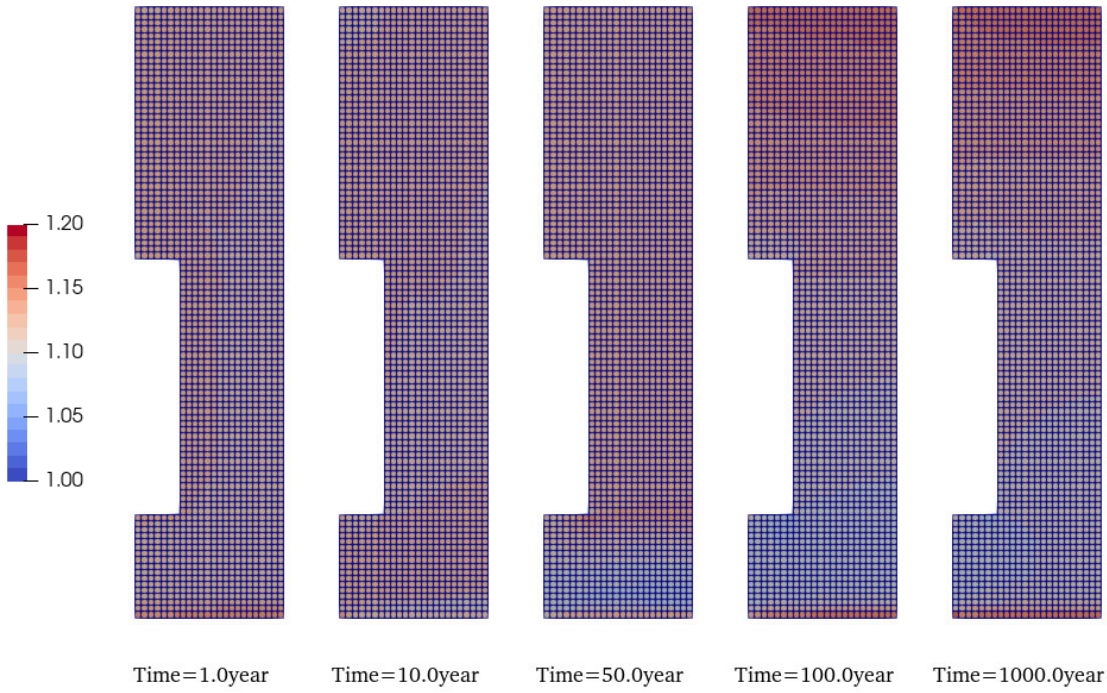


図 4-4- 246　Case 4-9 の乾燥密度分布の経時変化

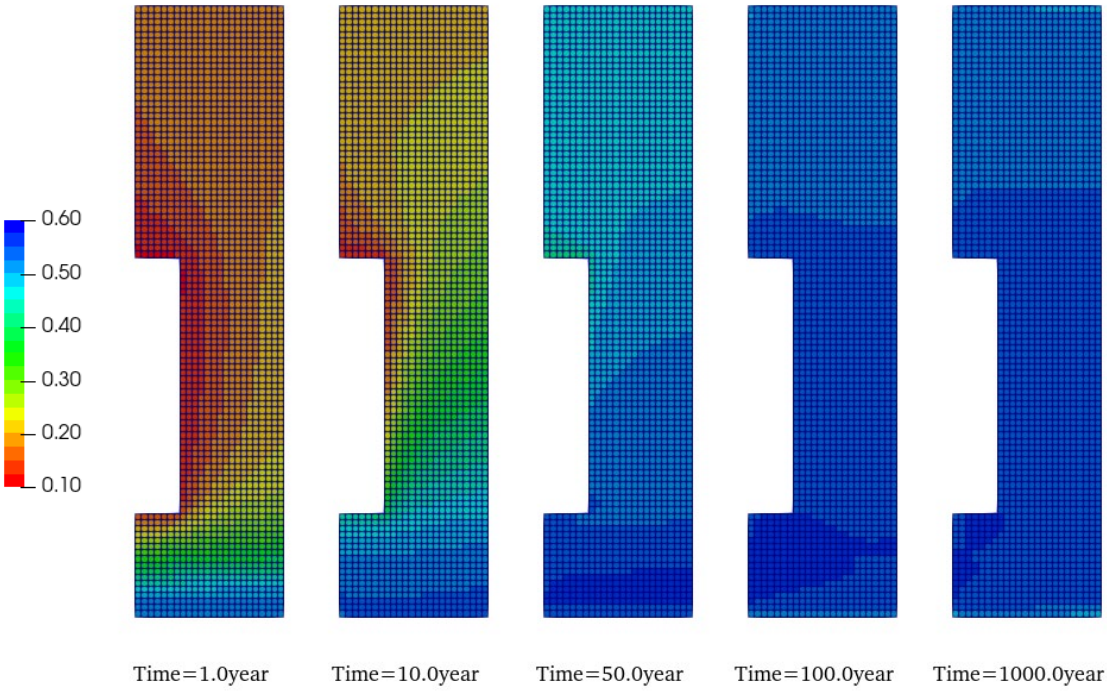


図 4-4- 247　Case 4-9 の含水比分布の経時変化

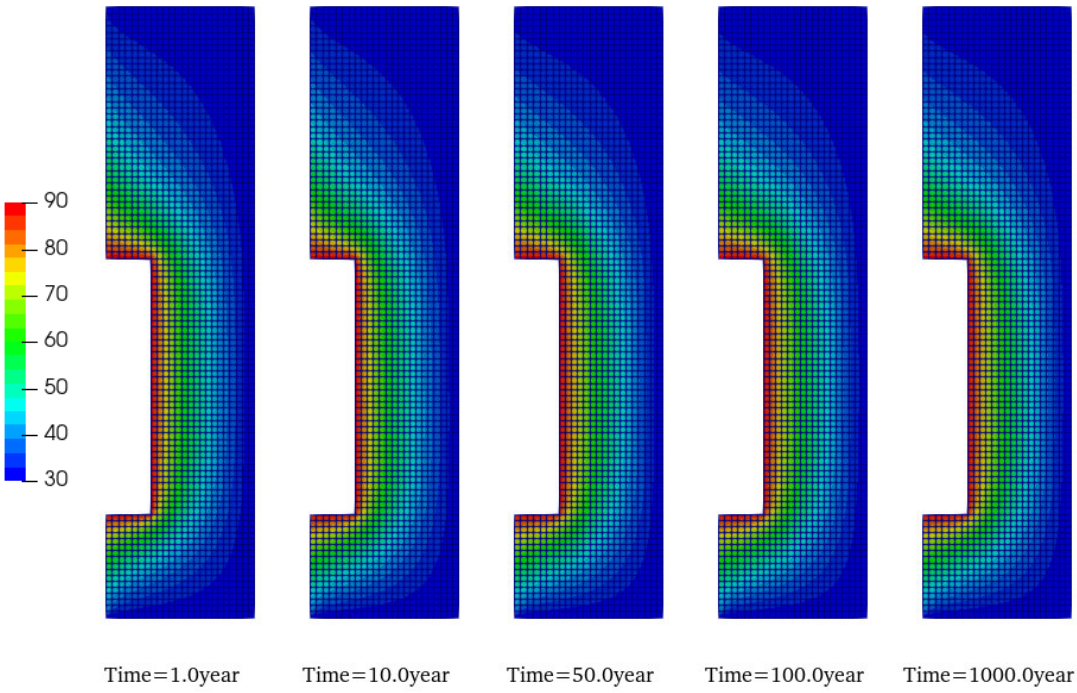


図 4-4- 248　Case 4-9 の温度分布の経時変化

クニボンドの透水性の見直しを図った Case 4-1 に対し、緩衝材のポアソン比を 0.3 で一定とする設定に変更したケースである。他の全てのケースでは飽和度の上昇に伴い線形で 0.49 まで上昇する設定となっており、浸潤に伴う剛性低下に対応する体積弾性率の維持や等方的な膨潤作用の発生を意図しているが、この検討ケースではこの影響を除外している。そのため、膨潤作用による変形が大きく、また発生土圧の軸差が大きくなっている。なお、O/P 変位量は他のケースの 5 倍程度となっているが、有効粘土密度の変化による浸潤速度等への影響はそれほど大きくはない。また、膨潤変形が大きいため、他のケースに比べて乾燥密度の斑が大きい結果となっている。

⑥　数値解析のまとめ

令和 4 年度では、緩衝材の仕様（Na 型・砂混合/Ca 型）と廃棄体模型の加熱の有無を組み合わせて実施した遠心模型試験を対象に、実規模大の現象の数値解析を実施した。膨潤特性や透水性は要素試験データを有効粘土密度で整理して設定し、基本的な解析条件を統一して全 4 ケースの数値解析を実施し、緩衝材条件の違いによる影響を確認した。また、クニボンドを対象としたケースで浸潤速度が大きい傾向が見られ、要因を分析する目的や、解析条件による感度を確認するために条件を変更した追加検討を実施した。本研究で得られた成果は以下のようにまとめられる。

(a)　　緩衝材仕様と加熱の有無による影響

遠心模型試験のケースを対象とした基本 4 ケースの結果より、緩衝材仕様と加熱の有無による影響を確認した。間隙水は何れも人工海水であり、Na 型ベントナイトであるクニゲル V1 と砂の混合土のケースに比べ、Ca 型ベントナイトであるクニボンドを使用したケースで浸潤期間が長く、また膨潤圧が大きいために O/P 変位量が大きい。各ケースで、下部緩衝材の膨潤で O/P が押し上げられた後、上部の膨潤で押し戻され、下部で生じた間隙水圧により再上昇した後、冠水で再び押しも戻される挙動が確認できる。しかし、加熱を考慮したケースでは変位量が抑制される傾向にあり、特にクニゲル V1 を対象とする Case 2 では初期に沈下を生じているが、これは O/P 変位の評価位置が計測用芯棒の下端であり、芯棒部分の熱膨張による影響が大きい。また、加熱を考慮したケースでは間隙水の動粘度が小さくなるため浸潤速度が大きく、他に水蒸気拡散等の影響が考えられる。特に加熱を考慮したケースは乾燥し易いため、上部緩衝材が飽和後に膨張して一時的に不飽和に戻る現象が発生しており、土圧や O/P 変位にも影響が見られる。なお、クニボンドを使用したケースでは浸潤速度は実験結果に比べて大きい傾向にあり、追加検討では透水性を見直したケースを基本としている。

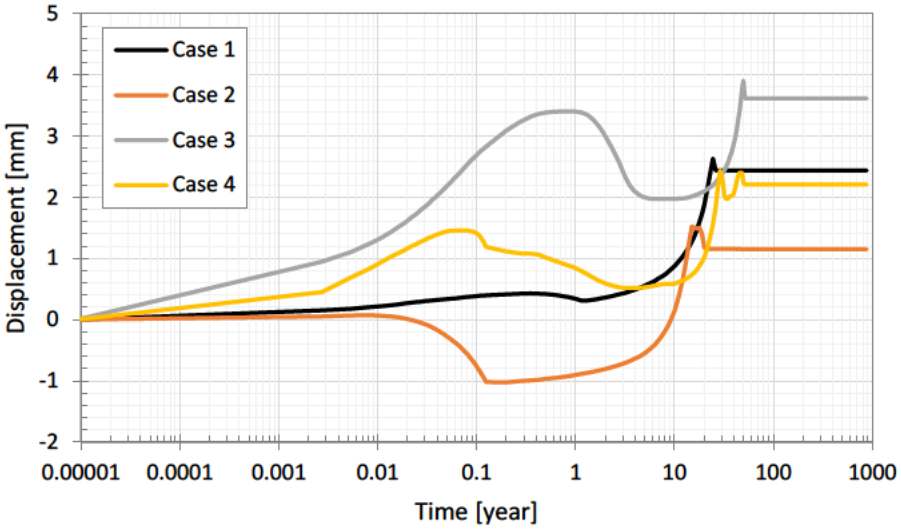


図 4-4- 249　O/P 変位の経時変化の基本ケース間の比較

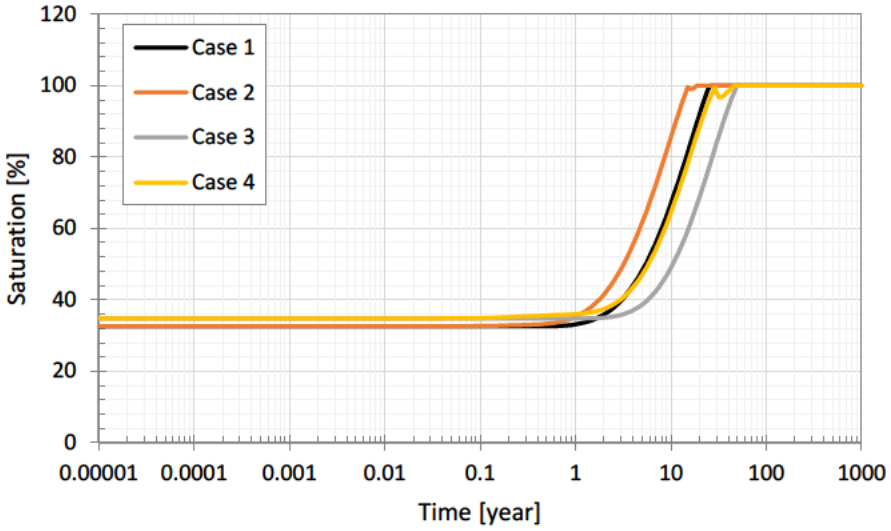


図 4-4- 250　緩衝材上部位置における飽和度の経時変化の基本ケース間の比較

(b)　　緩衝材の剛性や間隙水の違いによる影響

緩衝材は浸潤過程で間隙水による影響が大きくなり、剛性の低下や見かけのポアソン比の変化が生じるため、飽和度依存のヤング率とポアソン比を用いた解析を実施しているが、クニボンドを対象とした Case 4-9 のみポアソン比は 0.3 で一定としている。また、緩衝材の間隙水を純水に変更することで水理特性や膨潤特性に違いが生じ、O/P 変位に与える影響が大きいことからこれらのケースの結果を比較した。

クニゲル V1 を対象としたケースでは間隙水を純水に変更することで、透水性が小さくなり、膨潤圧は大きくなることから冠水時期が遅れるとともに O/P 変位量が大きくなっている。一方で、クニボンドを対象としたケースでは、膨潤圧が小さくなることから O/P 変位量も小さくなる。なお、水理物性は保水性に対してのみ間隙水の違いを考慮しており、各ケースで浸潤速度に大きな違いはないが、追加検討ケースではクニボンドの透水性を見直しているため基本ケースに比べて浸潤期間が長くなっている。Case 4-2 と Case 4-4 では膨潤特性に違いがあるが、その影響は殆ど生じていない。他のケースに比べてポアソン比の小さい Case 4-9 は変位量が大きいため、有効粘土密度が変化することで浸潤期間が短くなっていることが確認できる。このように、O/P 変位量や浸潤挙動に与える緩衝材の剛性や間隙水の違いによる影響は大きい。

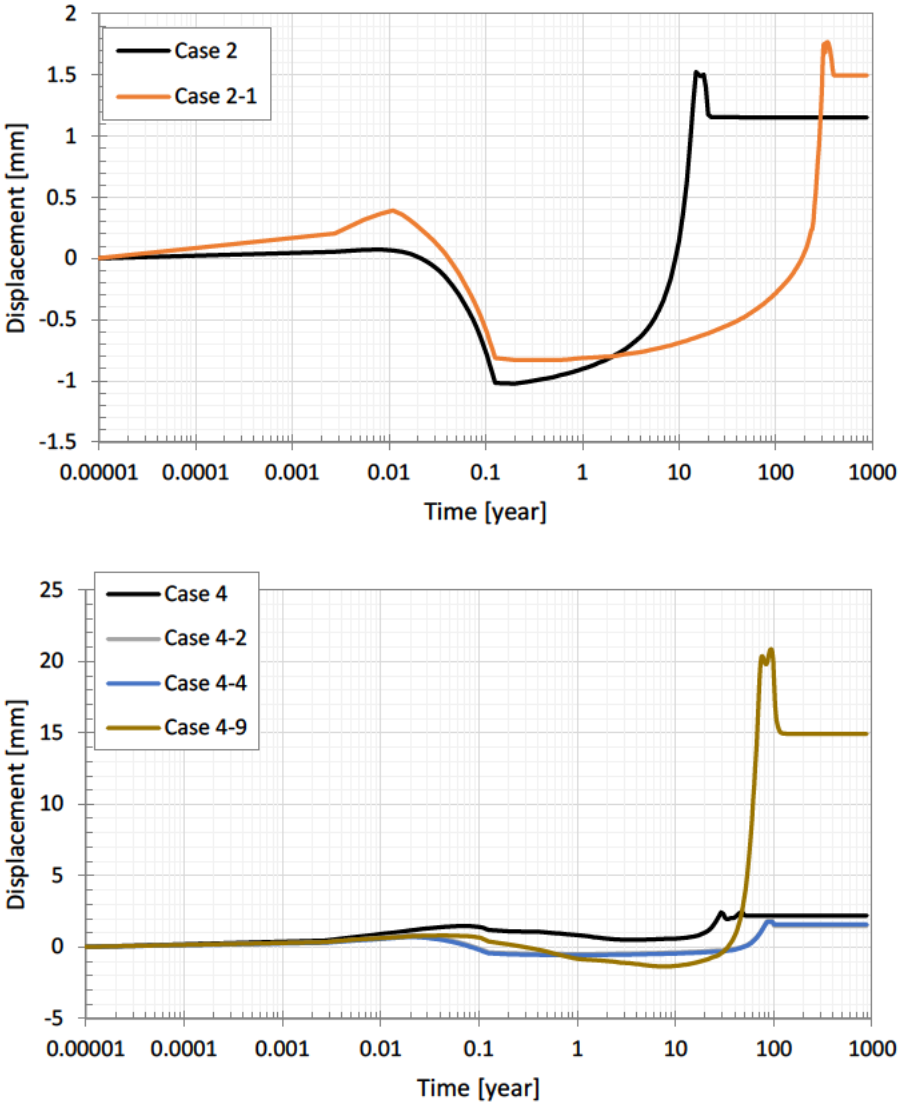


図 4-4- 251　O/P 変位の経時変化の検討ケース間の比較

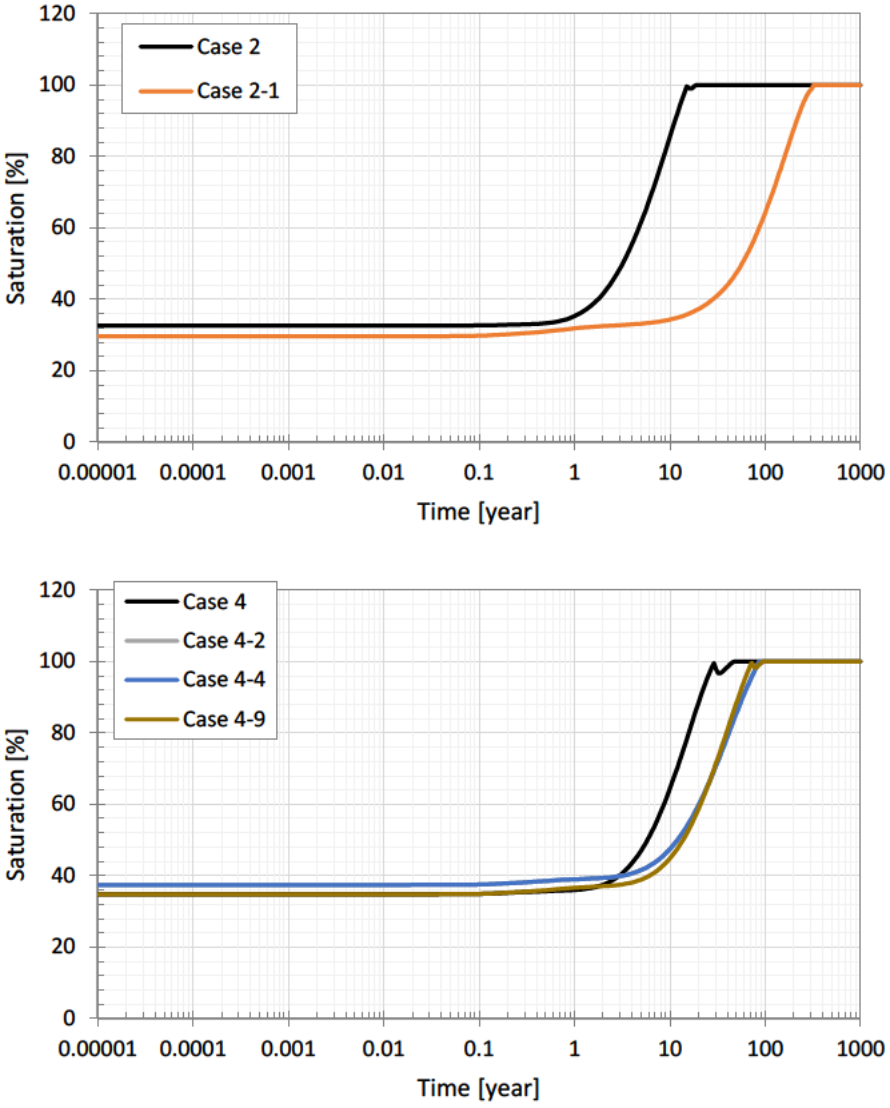


図 4-4- 252　緩衝材上部位置における飽和度の経時変化の検討ケース間の比較

(c)　　緩衝材の水理特性およびその他の条件が及ぼす影響

クニボンドと人工海水を組み合わせた緩衝材条件を対象に、透水性や伝熱物性等を変更した多くの検討ケースを実施した。しかしながら、剛性や膨潤特性に関係しない解析条件の変更が与える影響は相対的に小さい。これらのケースでは透水性の見直しを図っているため、基本ケースと比較すると冠水に至るまでの期間が長いが、各ケース間での差異は小さく、O/P 変位に与える影響も小さい。特に加熱を考慮していない Case 3 とその比較ケース間では平衡状態に至った際の変位量に差がないことが確認できる。また、加熱を考慮したケースでは、差異は小さいが浸潤が速いケースで O/P 変位が大きく、遅いケースで小さい傾向がある。なお、Case 4-8 のみ変位量が大きく異なるが、芯棒の熱膨張を考慮してないためであり、他の検討ケースとの本質的な違いではない。

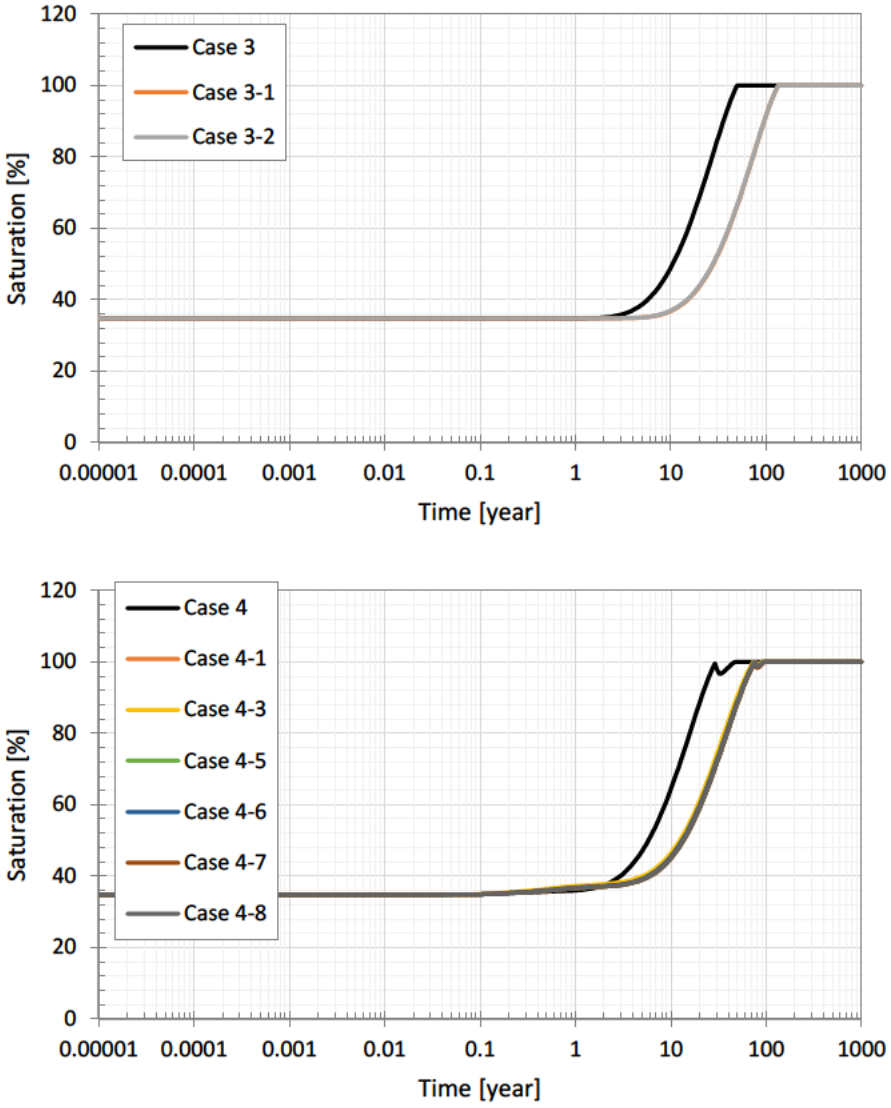


図 4-4 -253　緩衝材上部位置における飽和度の経時変化の検討ケース間の比較

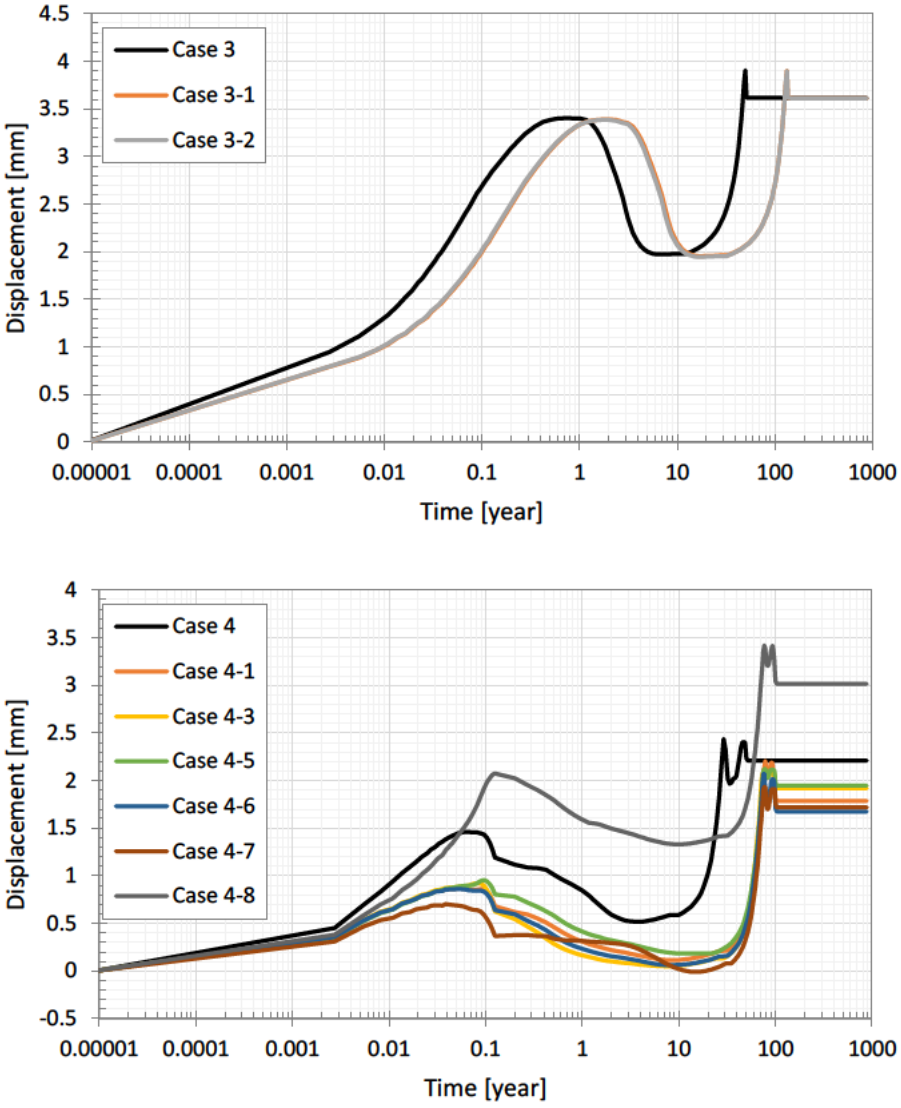


図 4-4- 254　O/P 変位の経時変化の検討ケース間の比較

参考文献

ASTM International, ASTM D6467-13 Standard Test Method for Torsional Ring Shear Test to Determine Drained Residual Shear Strength of Cohesive Soils, 2013.

Bishop, A. W., Green, G. E., Garga, V. K., Andresen, A., Brown, J. D., New Ring Shear Apparatus and Its Application to the Measurement of Residual Strength, Géotechnique, vol. 21, 1971, pp. 273-328.

Craig, W. H., James, R. G., Schofield, A. N. (eds.), Centrifuges in soil mechanics, Balkema Rotterdam, 1988, 274p.

Fernández, R., Mäder, U., Rodríguez, M., Virgildela Villa, R., and Cuevas, J., Alteration of compacted bentonite by diffusion of highly alkaline solutions. European Journal of Mineralogy, vol. 21, no. 4, 2009, pp. 725–735.

Fernández, R., Vigil de la Villa, R., Ruiz, A. I., García, R., and Cuevas, J., Precipitation of chlorite-like structures during OPC porewater diffusion through compacted bentonite at 90℃, Applied Clay Science, vol. 83–84, 2013, pp. 357–367.

Fernández-Carrasco, L., Torrens-Martín, D., Morales, L. M., and Martínez-Ramírez, S., Infrared spectroscopy in the analysis of building and construction materials. Infrared Spectroscopy - Materials science, engineering and technology, 2012, pp. 369-382, DOI: 10.5772/36186.

Fukushima, Y., X-ray diffraction study of aqueous montmorillonite emulsions, Clays and Clay Minerals, vol. 32, 1984, pp. 320-326.

Garnier, J., Gaudin, C., Springman, S. M., Culligan, P. J., Goodings, D., Koning, D., Kutter, B., Phllips, R., Randlph, M. F. and Thorel, L., Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modelling, Int. J. Phys. Model. geoechnics, vol. 7, no. 3, 2007, pp. 1-23.

Kusakabe, O., 6. Foundations, Geotechnical Centrifuge Technology, R. N. Taylor (Ed.), Blackie Academic & Professional, 1995, pp. 118–197.

Lupini, j. F., Skinner, A. E., Vaughan, P. R., The drained residual strength of cohesive soils, Géotechnique, vol. 31, no. 2, 1981, pp. 181-213.

Makreski, P., and Jovanovski, G., Minerals from Macedonia. IX. Distinction between some rhombohedral carbonates by FT IR spectroscopy, Bulletin of the Chemists and Technologists of Macedonia, vol. 22, no.1, 2003, pp. 25–32.

Mualem, Y., A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Resources Research, vol. 12, no. 3, 1976, pp. 513-522.

Nayar, K. G., Sharqawy, M. H., Lienhard V, J. H., SEAWATER THERMOPHYSICAL PROPERTIES LIBRARY Version 3.1.3 (December 21, 2016), http://web.mit.edu/seawater/ (2023.03.20).

Nishimoto, S., Sawada, M., Okada, T., New Rapid Evaluation for Long-Term Behavior in Deep Geological Repository by Geotechnical Centrifuge. Part 1: Test of Physical Modeling in Near Field Under Isotropic Stress-Constraint Conditions, Rock Mechanics and Rock Engineering, vol. 49, 2016, pp. 3323-3341.

Rutqvist, J., Börgesson, L., Chijimatsu, M., Kobayashi, A., Jing, L., Nguyen, T. S., Noorishad, J. and Tsang, C.-F., Thermohydromechanics of partially saturated geological media: governing equations and formulation of four finite element models, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol. 38, 2001, pp.105-127.

Sato, H., Suzuki, S., Fundamental study on the effect of an orientation of clay particles on diffusion pathway in compacted bentonite, Applied clay science, no. 23, 2003, pp. 51-60.

Tatsuoka, F., Goto, S., Tanaka, T., Tani, K. and Kimura, Y., Particle size effects on bearing capacity of footing on granular material. Deformation and progressive failure in geomechanics, 1997, pp. 133–138.

Taylor, R. N. (ed.), Geotechnical Centrifuge Technology. London, Blackie Academic & Professional., 1995, 296p.

van Genuchten. M. Th., A closed-form equation for predicting hydraulic of unsaturated soils, Soil Science Society American Journal vol. 44, 1980, pp. 892-898.

Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., Fox, D. D. (eds.), The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics (7TH), Butterworth-Heinemann, 2013, 624 p.

石原研而, 第 3 版土質力学, 丸善出版株式会社, 2018, 320p.

岡村未対, 竹村次朗, 上野勝利, 遠心模型実験－実験技術と実務への適用－ 2.遠心模型の相似則, 実験技術－利点と限界, 土と基礎, vol. 52, no. 10, 2004, pp. 37–44.

核燃料サイクル開発機構, わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性; 地層処分研究開発第 2 次取りまとめ(分冊 2)地層処分の工学技術, JNC-TN1400-99-022, 1999.

金山素平, 肥山浩樹, 東孝寛, 高山昌照, 粘土の二次圧密係数, 農業土木学会論文集, no. 211, 2001, pp. 75-81.

菊池広人, 棚井憲治, 幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験(試験報告), JNC-TN8430 2004-005, 2005.

宜保清一, 残留強度測定のためのリングせん断試験装置とその測定精度, 地すべり学会誌, vol. 31, no. 3, 1994, pp. 24-30.

木村孟, 日下部治, 講座 遠心模型実験 2.序論, 土と基礎, vol. 35, no. 11, 1987, pp. 68–74.

原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 16 年度地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処分技術調査-人工バリア長期性能確証試験-報告書, 2005.

原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 27 年度地層処分技術調査等事業「処分システム工学確証技術開発」報告書（第３分冊）－人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築－, 2016.
原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 28 年度地層処分技術調査等事業「処分システム工学確証技術開発」報告書（第３分冊）－人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築－, 2017.
原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 29 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 処分システム工学確証技術開発(第 2 分冊)－人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材, 2018.
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-20-03, 2021.
原子力発電環境整備機構, 国内産ベントナイトおよびベントナイト混合土の基本特性データ, NUMO-TR-21-02, 2022.
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-20-03, 2021.
河野伊一郎, 西垣誠, 室内透水試験法に関する 2, 3 の考察, 土質工学会論文報告集, vol. 22, no. 4, 1982, pp.181-190.
小峯秀雄, 緒方信英, 高レベル放射性廃棄物処分のための緩衝材・埋戻し材の膨潤評価式の提案－砂とベントナイトの配合割合およびベントナイト中の陽イオンの種類・組成の影響－, 電力中央研究所研究報告, U99013, 1999.
佐治慎一, 伊藤雅和, 柴田雅博, 神徳敬, 磯貝武司, 河川水と接触したベントナイト鉱床の化学特性変化―試料採取と分析結果―, 核燃料サイクル開発機構研究報告, JNC-TN8400 2005-017, 2005.
佐藤稔, 西本壮志, 沿岸部の地下水環境を想定した Ca 型/Na 型ベントナイト緩衝材中の廃棄体変位挙動評価, 電力中央研究所研究報告, N21003, 2021.
佐藤努, 粘土鉱物の水和と吸着層の構造, 鉱物学会誌, vol. 25, no. 3, 1996, pp. 99-110.
酒井左武郎, 川北米良, 放射流式透水試験機の試作実験について, 土木学会論文集, vol. 64, 1958, pp. 39-47.
酒井直樹, 豊田浩史, 中村公一, 杉本光隆, リングせん断試験による残留状態の評価と残留強度測定法に関する検討, 土木学会論文集, no. 743/III-64, 2003, pp. 223-228.
澤田昌孝, 岡田哲実, 長谷川琢磨, 高レベル放射性廃棄物処分地下施設の長期挙動予測評価プログラムの開発―緩衝材膨潤評価式の数値モデル化と熱・水・応力連成解析スキームの構築―, 電力中央研究所研究報告, N05028, 2006.
澤田昌孝, 岡田哲実, 西本壮志, 遠心力載荷装置を用いた高レベル放射性廃棄物処分場周辺の長期挙動評価(その 3)－等温条件の模型試験に対する水・応力連成解析－, 電力中央研究所研究報告, N11037, 2012.

産業技術総合研究所, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 平成 31 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(沿岸部処分システム評価確証技術開発)成果報告書, 2020.
産業技術総合研究所, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 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(沿岸部処分システム評価確証技術開発)成果報告書, 2021.
産業技術総合研究所, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 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(沿岸部処分システム評価確証技術開発)成果報告書, 2022.
地盤工学会編, 地盤工学用語辞典, 2006, 661p.
地盤工学会編, 電子レンジを用いた土の含水比試験方法, 地盤材料試験の方法と解説, JGS 0122-2009, 2009.
地盤工学会編, 低透水性土質系材料の活用と性能評価技術に関する研究委員会 研究報告書, 地盤工学シンポジウム論文集, no. 60, 2016.
鈴木英明, 柴田雅弘, 山形順二, 広瀬郁郎, 寺門一馬, 緩衝材の特性試験(I), 動力炉・核燃料開発事業団報告書, PNC TN8410 98-057, 1992.
鈴木英明, 藤田朝雄, 緩衝材の膨潤特性, JNC-TN8400 99-038, 1999.
鈴木啓三, 高木慎介, 佐藤努, 米田哲朗, 高精製モンモリロナイトの調整とキャラクタリゼーション, 粘土科学, vol. 46, no. 3, 2007, pp. 147-155.
高山裕介, 菊池広人, 塩水条件での緩衝材の力学挙動に対する弾塑性構成モデルの適用性に関する研究, 原子力バックエンド研究, vol. 27, no. 1, 2020, pp. 12-21.
高治一彦, 重野喜政, 下河内隆文, 幌延の地下水環境下におけるベントナイト混合材料の力学特性に関する研究, 核燃料サイクル機構 業務委託報告書, JNC-TJ5400 2003-007, 2003.
高村弘毅, 丸井敦尚, 地下鹹水の定義と事例, 日本海水学会誌, vol. 60, no. 2, 2006, pp. 86-90.
田中幸久, 中村邦彦, 海水の濃度と高温履歴がベントナイトの膨潤特性に及ぼす影響, 電力中央研究所報告, N04007, 2004.
直井優, 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲, 百瀬和夫, 坂上武晴, 各種ベントナイト系緩衝材の膨潤特性に及ぼす人工海水の影響, 土木学会論文集, no. 785/Ⅲ-70, 2005, pp.39-49.
中村邦彦, 田中幸久, 高レベル放射性廃棄物処分孔での廃棄体の沈下挙動－遠心模型実験と簡易沈下予測法の提案－, 電力中央研究所研究報告, U03074, 2004.
西本壮志, 岡田哲実, 澤田昌孝, 遠心力載荷装置を用いた高レベル放射性廃棄物処分場周辺の長期挙動評価(その 2)－ニアフィールド模型試験法の確立と等方応力拘束条件下における長期挙動－, 電力中央研究所研究報告, N11040, 2012.

西本壮志, 岡田哲実, 澤田昌孝, 遠心力載荷装置を用いた高レベル放射性廃棄物処分場周辺の長期挙動評価(その 4)―加熱型廃棄体を用いた等方応力拘束条件下における熱－水－応力連成模型実験―, 電力中央研究所研究報告, N14003, 2014.

日本規格協会編, JIS Z 2451, ベントナイトなどのメチレンブルー吸着量の測定方法, 2019.

日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 30 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報告書, 2019.

日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 31 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報告書, 2020.

日本工業規格編, JIS A 1202:2009 土粒子の密度試験方法, 2009a.

日本工業規格編, JIS Z 2451:2019 ベントナイトなどのメチレンブルー吸着量の測定方法, 2009b.

長谷川琢磨, ベントナイトの透水・浸潤特性への海水影響, 電力中央研究所研究報告, N04005, 2004.

濵口拓, 神野郁夫, 電流モードエネルギー分解 CT による実効原子番号および電子数密度の測定, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 講演予稿集, 19a-A304-3, 2018.

古谷保, 残留強度の性質とその測定方法について, 地すべり, 第 20 巻, 第 1 号, 1983, pp. 21-27.

前田宗宏, 棚井憲治, 伊藤勝, 三原守弘, 田中益弘, カルシウム型化及びカルシウム型ベントナイトの基本特性－膨潤圧, 透水係数, 一軸圧縮強度及び弾性係数－, 動力炉・核燃料開発事業団報告書, PNC TN8410 98-021, 1998.

村松容一, 濱井昴弥, 山野恭, 千葉仁, 早稲田周, 千葉県房総半島および茨城県南東部における非火山性温泉の水質および安定同位体比とその地質鉱物学的解釈, 温泉科学, vol. 62, 2012, pp. 112-134.

村尾英彦, 釜井俊孝, 野坂徹, リングせん断試験のせん断面と地すべり面における微視的構造の比較, 地すべり学会誌, vol. 52, no. 3, 2015, pp. 11-19.

渡邊保貴, 横山信吾, メチレンブルー吸着試験の測定精度を考慮したベントナイトのモンモリロナイト含有率の評価, 土木学会論文集 C, vol. 76, no. 1, 2020, pp. 23-39.

渡邊保貴, 田中幸久, 中村邦彦, 廣永道彦, Ca 型ベントナイト混合土の透水試験方法(その 1)－室内締固め供試体に対する剛性容器を用いた方法－, 電力中央研究所研究報告, N13005, 2013.

第５章　　おわりに

５－１ 本研究の成果（まとめ）

（１） 海陸連続３次元地質環境モデルの構築手法の高度化

① 地質環境モデルの構築と地下水流動解析の高度化

地質モデルの不確実性が地下水流動に与える影響を明らかにし、不確実性を低減するための方策を示すことを目的として、駿河湾沿岸部を対象とした地質モデルの作成ならびに地下水流動解析の事例研究を実施している。

昨年度までに、想定される複数の地質モデルを用いて、逆解析による透水係数の推定を試みた。推定結果によると、浅部地層の透水係数の推定誤差は小さく、これらの透水係数の推定値には深度依存性が認められた。一方、深部地層や断層の透水係数の推定誤差は大きく、これらの透水係数は推定できないことが示唆された。ここで使用した逆解析の手法は、推定値近傍の感度しか計算しないことから、今年度は、透水係数の感度を広い値の範囲で調べられるグローバル感度解析を実施し、逆解析の結果と相補的な考察を行った。グローバル感度解析の結果によると、浅部地層の透水係数に感度が認められたが、深部地層や断層の透水係数の感度は小さかった。このことは、地表付近の観測値から、浅部地層の透水係数を推定できる可能性はあるが、深部地層や断層の透水係数は推定できないことを示唆する。この結果は、逆解析の推定誤差とも整合的であった。以上より、深部地層の透水係数を推定するには、ボーリング調査による観測値の拡充が必要であることが分かった。このように、地下水モデルの校正を通して、不確実性が大きい地層を特定することは、次の調査地点の選定などに利用できる。グローバル感度解析や逆解析などの方法で不確実性を定量化し、これを調査へ反映することで、地下水モデルの不確実性は低減できると考えられる。

地形勾配と透水係数が海水準変動中の地下水流動、塩分分布、滞留時間に与える影響を明らかにすることを目的に、海水準を考慮した地下水流動・物質移行解析を実施した。地形勾配が小さい場合、動水勾配も小さくなり、沿岸海底下に塩水地下水は広く分布した。さらに、透水係数が小さいとき、滞留時間が長い塩水地下水は沿岸海底下に広く分布した。ここでは、単一地形勾配を仮定した数値実験ではあるものの、以上のことから、地形勾配が 2%以下で透水係数が 10^{-9} m/s 以下の地層であれば、滞留時間の長い塩水地下水は、沿岸海底下に広く分布する可能性を示した。また、解析で滞留時間を考慮することによって、海水準変動に伴う淡水と塩水の入れ替わりや地下水の長期的な安定性を議論することができた。このため、実際のフィールドにおける古い地下水年代を評価できる指標（^{4}He や ^{14}C 年代測定）の調査が重要であることを示した。

今後、ボーリング調査結果を反映して、地質モデルおよび地下水モデルの更新を行う予定である。さらに、ボーリング地点や周辺での地下水調査結果を加えて、地下水モデルの校正を実施する。これにより、これらの調査結果をモデルに反映することによる、地下水モデルの不確実性の低減度合いや感度の変化などを明らかにする。

② 塩淡境界近傍における地下水流動解析の高度化

海岸線から約 300m の距離にて掘削中のボーリング孔（FGB-2 孔）周辺の、淡水系地下水と塩水系地下水の実態把握を目的とし、密度流解析をおこなった。解析では地下水年代が最も古い領域と地下水の速さが最も小さい領域は必ずしも一致しないことや、海岸線から数 km オーダーの塩淡境界の形状は、表層地質の透水性、涵養フラックスの大小、そして異方性によっても変化することがわかった。また、浅層地下水流動の活発さと無関係に塩水系地下水の年代が決まる深度領域が存在しうる。このような結果は、塩水系地下水の調査によって測定しにくいパラメータを推定するための手段としての可能性を示唆する。

後述するように、本年度、FGB-2 孔の調査が大きく進んだが、次年度はボーリング調査と密度流解析のデータの受け渡しにおける課題抽出も視野にいれ、調査結果をモデルに反映させる予定である。

（2） 海陸連続 3 次元地質環境モデルの妥当性の検証に向けたデータ取得方法の高度化

① 陸域から海域にかけての地質環境特性の把握技術の高度化

ボーリング孔（FGB-2 孔）について、昨年度の到達深度 400m から今年度は深度 800m まで掘進した。現在、国内外において深層の塩淡境界からその下位の塩水領域の挙動を調査した野外調査例は皆無であることから、本ボーリング調査の目的として、①陸域と海域の地下水の連続性の把握、②塩淡境界付近における地下水の流向・流速の確認、③塩水領域の地下水質と年代の把握を設定した。なお、本年度は、不透水基盤への到達も目的の 1 つとしていたが、結果的に深度 800m でも基盤には到達しなかった。この結果は文献調査の限界という観点で重要であることから、基盤深度推定に係る経緯を記した。一方、FGB-2 孔が塩水領域を掘進していることから、淡水領域から塩淡境界上部に対しては深度 120m の FGB-3 孔を掘削することにより、その状況の把握をおこなった。水理試験および採水に関しては FGB-2 孔では新たに 4 深度（約 403m、566m、704m、798m）、FGB-3 孔では 5 深度（約 22m、43m、83m、97m、113m）で実施した。過年度実施分と合わせて、淡水系地下水－塩淡境界－塩水系地下水にわたって 13 深度で調査をおこなったことになる。さらに、FGB-3 孔では流向流速測定を 3 深度で実施し、こちらは過年度分と合わせて 5 深度での調査となった。

以上のような精密な調査を行った結果、透水係数、実水頭、淡水水頭、水温、塩分濃度、溶存酸素、各種イオン、同位体、年代トレーサーなどの鉛直プロファイルが明らかになった。本地点の淡水域の下限は深度 70m 付近であり、塩淡境界の下限は深度 200m である。従来の報告とは異なり、塩淡境界では塩水域上面からわずかな距離で塩分濃度が低下し、その濃度分布は下に凸になっている。また、水温は塩淡境界の内部では上昇するが、塩水領域に達すると低下し、深度 500m 付近から再び上昇する。以上の塩分濃度と水温の分布は、従来、知られていない事実であり、次年度に実施する密度流解析にてこの現象についてさらなる検討を行う予定である。また、実水頭と淡水水頭の検討から、本地域では深度 43m から 83m

に大きな水頭のギャップが存在し、それはこの間に存在する難透水層によるものであることが推定された。また、$\delta^{13}C$ は－10‰程度であり、海水の $\delta^{13}C$ がほぼ 0‰であることを考えると有機物等が溶解したことが示唆されており、^{14}C 濃度は塩淡境界およびその下位の塩水で低くなるが、10pMC 以上である。この炭素同位体の分析結果は塩水が流動していることを示唆している。また、流向流速測定では、最も浅層の深度 43m のダルシー流速は 0.2m/日、塩淡境界最上部の深度 83m では 0.01m/日あるいは測定下限に近い値となっており、少なくとも塩淡境界最上部の地下水のダルシー流速は浅部の 1/20 となっている。これ以深については整合性のある結果が得られておらず、深度 113m 以下は検出不可能なほど、地下水の動きが遅いことが明らかになった。

② 地下水の流出場及び海底地形把握技術の高度化

海底地形の詳細把握に係る技術と、陸域地下水の流出場の特定手法や海底湧出地下水から陸域地下水の化学的特徴の推定手法の高度化を目的として、特に ROV とサイドスキャンソナーなどで得られる音響画像の解析を組み合わせた湧出水の探査手法について検討を行った。令和 4 年度は実際の沿岸部海域での試験を通して、海底地形や湧出地点との関係性や湧出量の評価、及び陸－海の地下水の連続性の評価に関わるデータ収集と検討を進めた。また、地下水の流出場の特定や海底下の構造などを探査する技術について、これまでに収集した文献情報に基づいて地形や地質等の解析と整理を行った。

具体的な成果として、ROV と音響画像の解析の組み合わせ探査により、実際の海域条件下においても高精度に湧出水の位置を検出するとともに、面的なデータ収集が可能であることを示した。これは、サイドスキャンソナー等の広域で行われる探査と、原位置測定などの狭い範囲で行われる探査の間を補完できる手法として、沿岸部での適用が期待される。また、連続的に取得された音響画像に基づく湧出量の評価手法を実海域に適用し、湧出量分布を推定した。湧出量については暫定的な結果であり、シーページメータなど他の手法を用いた検討も必要と考えられる。さらに検出した湧出水の化学成分に基づいて、湧出水が富士山周辺の地下水を起源とするものであり、掘削孔周辺の地下水とは異なることを見出した。

過年度に収集した文献に基づいて、34 地域の沿岸部地下水や海底湧出地下水に関わる地形や地質等の情報を GIS で解析して整理した。今後は整理した情報に基づき、地下水の湧出や沿岸部の地下水流動に関わる地形・地質の特徴の解析や、実際の海域における有効な探査手法の整理といった観点でとりまとめることが必要である。

③ 物理探査技術の高度化

大型の調査船舶が必要となるという調査上の制限から、定置網や岩礁への影響を避けるために、これまでデータの空白域となっていた沿岸部の水深 5～20m 程度の浅海域を対象とした新たな三次元音波探査手法の確立を目的として、マルチ振源音波探査手法の高度化を実施した。令和 4 年度は昨年度に引き続き、パルス型音源（水中スピーカー）を用いた 3

次元音波探査手法について、浅海域調査への展開における可能性の確認と、海底下深度 500 m程度の調査を目標とした測定システムの検証を、北海道幌延町沿岸海域と神奈川県横須賀市沿岸海域において実施した。今年度の成果としては、探査深度は目標に達しなかったものの、過年度事業で得られた陸域の反射法データとの整合性が確認され、また測定条件次第では、既存の非パルス型音源（ブーマー）を用いた調査結果よりも、より深い深度までデータを取得することができたことから。浅海域における本調査手法の有効性が示された。一方で、目標の探査深度を得るためには、水中スピーカーの低周波数域の出力増と中心周波数付近の周波数特性をフラットにすることが重要であり、引き続き検討の必要があることが明らかとなった。

（3） 沿岸海底下特有の地質環境に着目した工学技術の高度化

① セメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充

処分場の坑道の支保工や覆工の操業から再冠水完了までの期間における空洞安定性を確保した設計時に反映すべき沿岸部の多様な組成の地下水に接触するセメント系材料の化学的な変質に伴う力学特性変化に関する情報の整備を目的とし、模擬地下水への浸漬等によりデータの取得を進め、解析的な特性変化の予測方法について検討した。沿岸部の多様な地下水組成に対するセメント系材料の化学組成の変化に関するデータが少ないことから、化学変質に影響が考えられる HCO_3^-、SO_4^{2-}および Mg^{2+}等に着目して沿岸部の地下水を類型化し、それらに基づいた模擬地下水による化学変質挙動とそれに伴う力学特性への地下水組成の影響に関するセメントペースト試料の浸漬試験や、化学変質に関連した特性変化に関するデータの少ないコンクリートにおいて地下環境を想定したフロースルーや浸漬による試験を実施した。加えて、これらの試験の検証のために、分野間連携の活動の一環として実地下水を使用した試験を実施した。その結果、試料の表面における CaO の溶脱や二次鉱物の生成等の化学変質は、浸漬期間が 3 か月や 10 か月と短いため少なく、ビッカース硬度による力学特性の変化は明確に認められていない。また、これまで課題であったセメント系材料の表層に二次鉱物が生成する挙動の解析方法について、固相外部に析出層を設定したモデル体系を構築して検討し、その予測が可能となる見通しを得た。今後は、浸漬試験等により化学変質の進行した状態での力学特性に関するデータを取得し、地下水組成やセメント系材料の種類（セメント種類やコンクリート種類）と化学変質と力学特性の関連に関する情報を体系的な整理を進め、処分施設の設計に必要な基礎情報とすると共に、化学解析における外部の析出層の設定の見直しや強度の推定手法案の策定を進め、安全評価の初期状態の予測にも役立てる予定である。

② 緩衝材の機能変化に係るデータの拡充

沿岸部の地下水環境下における緩衝材の仕様成立範囲を決定する上で影響が大きい自己

シール性に関する評価に必要な、多様な地下水の組成に応じた緩衝材の膨潤率の予測方法や基盤情報を整備することを目的とし、自己シール性に対する影響の大きい、モンモリロナイトの層間陽イオンの交換反応の進行及び陽イオン種とイオン強度の膨潤率への影響に関する試験等を実施した。これまでに整備されている緩衝材のイオン交換係数は、希薄溶液中での分散系での測定結果に基づいて設定されたものであるが、処分場において地下水が浸潤する過程では、緩衝材は圧縮された状態であること、圧縮時と希薄溶液中とでは間隙水の濃度が異なるためイオン交換係数が異なる可能性があることから、圧縮した緩衝材中での沿岸部で想定されるイオン強度でのイオン交換係数を算定するための試験データの取得や、解析によるイオン交換挙動の予測手法について検討している。膨潤率に関しては、これまでにセメント系材料からの影響による Ca 型化や海水での影響についてデータが整備されているが、沿岸部での多様な地下水組成を踏まえ、海水系と降水系の混合した地下水の組成における影響や、Mg や K 等の陽イオンの膨潤率への影響に関して検討をしている。令和 3 年度は、イオン強度 0.5 及び 0.25 の KCl と NaCl の混合溶液により圧縮状態での K-Na のイオン交換係数を通水試験結果より得ることができ、イオン交換係数を検証するための実地下水による通水試験を開始した。また、令和 2 年度に実施した通水試験の条件での従来のイオン交換係数を用いた解析により、概ね試験結果を再現でき、Ca-Na のイオン交換係数は従来よりも高い可能性があることも分かった。膨潤率に関しては、上載圧を施した膨潤量試験により、最大膨潤率はイオン強度の平方根に反比例して 0 から 0.2 までの間に大きく低下し、陽イオン種(Na、K、Ca 及び Mg)によらず整理できる可能性が高いことがわかった。実地下水による試験データも取得し、この膨潤率に関する整理と概ね同様な傾向にあることを確認した。今後は、Ca や Mg のイオン交換係数の取得を進めると共に、解析手法を令和 3 年度の通水試験の再現等により検証しイオン交換反応の進行の予測への適応性を高める検討や、膨潤率に関しては、イオン強度と陽イオン種の影響に関する試験を継続して体系的な整備を進め、沿岸域での地下水環境に適用した緩衝材の設計（仕様成立範囲）に関するデータ及び、イオン交換の結果や、冠水時の膨潤挙動を受けた、安全評価の初期状態の設定に係るデータを整備する予定である。

③ 緩衝材-オーバーパックの相互作用と緩衝材仕様に関わるデータの拡充

緩衝材－オーバーパックの相互作用と緩衝材仕様に関わるデータの拡充では、沿岸部特有の地下水環境（海水）を考慮し、Na 型ベントナイトに加えて代替オプションとなり得る海水との平衡を考慮したイオン型の異なる材料（Ca 型/Ca 型化ベントナイト等）に着目した検討を行った。すなわち、塩分を含む環境では、①緩衝材中のオーバーパックの変位（移動）挙動、②オーバーパックの変位に伴い緩衝材中に生じるせん断帯の自己修復性、等について、特にイオン型の異なるベントナイトではあまり検討されていない。このため、沿岸部特有の地下水環境下であることを考慮した人工バリア性能評価に資するデータの拡充を行うため、要素試験、模型試験および数値解析を実施している。要素試験は、本年度から力学

的な観点に加え、化学的な影響に関する検討も実施した。

要素試験（力学）では、圧縮ベントナイトの透水性に対する海水影響、および力学的観点からの自己修復性を検討するため、透水膨潤圧試験およびせん断透水試験を実施した。試験では、Na 型、Ca 型、および海水平衡ベントナイトを締め固めた供試体に対して、いくつかのイオン濃度（イオン比一定）の人工海水を通水した。透水膨潤圧試験において、Na 型ベントナイトについては、イオン濃度の増加に伴い膨潤圧は低下し、透水係数は増加した。一方、Ca 型ベントナイトについては、イオン濃度による性能の変化幅は小さかった。各海水平衡ベントナイトは、基本的に海水平衡処理前に近い値を示したことから、層間陽イオン組成の変化は、膨潤圧や透水係数にほとんど影響しない可能性が示唆された。せん断透水試験では、いずれの条件においても、残留状態までのせん断によって透水性の高い領域(水みち)は生じない結果が得られた。

要素試験（化学）では、人工海水と普通ポルトランドセメントペーストを異なる液固比で反応させて作製した試験溶液に対し、異なる層間陽イオン組成を有するベントナイトを反応させたバッチ試験を実施した。その結果、ベントナイトの変質反応として、Si を含有する初期鉱物の溶解反応や、モンモリロナイトのイオン交換反応、ジプサムや炭酸塩等の生成反応が認められた。今後は、ベントナイトのこれらの変質が透水性に与える影響を調べることが必要である。

模型試験では、試験用水(純水、人工海水)の緩衝材への浸潤にともなうオーバーパックの変位挙動を把握するため、昨年度までに Na 型、Ca 型、海水平衡ベントナイトを緩衝材の材料とした遠心力模型試験を行ってきた。本年度は廃棄体模型の熱をコントロールしつつ、これまでよりも長期(実物換算 273 年相当)のオーバーパック変位挙動を模擬する 1/50 縮尺模型を用いた模型試験を実施可能にした。試験結果として、これまでの Ca 型ベントナイトを用いた研究結果とも合わせ、オーバーパック変位挙動について異なる縮尺でも同様の結果が得られたとともに、遠心力模型試験の再現性が確認できた。Na 型ベントナイトを用いた場合は、試験用水だけでなく廃棄体模型の熱の影響によってもオーバーパックの変位挙動が大きく変化することが示唆された。

数値解析では、熱－水理—力学連成解析が可能なコードを用い、令和 4 年度に実施した人工海水を用いた遠心力模型実験の解析を実施した。その結果、Na 型衝材を用いたケースよりも、Ca 型衝材を用いたケースで飽和に要する期間が長く、また膨潤圧が大きいためにオーバーパック変位量が大きい傾向が得られた。また、加熱を考慮したケースでは間隙水の動粘度が小さくなるため浸潤速度が大きくなる。温度勾配による水蒸気の拡散が生じるため、オーバーパックの周囲（特に直上）で飽和に要する期間がその外側よりも長い傾向が得られた。透水性や伝熱物性等を変更した多くの検討ケースを実施したが、剛性や膨潤特性に直接関係しない解析条件の変更が、オーバーパック変位に与える影響は大きくなかった。

５－２　図目次

図 2-1- 1　繰り返しアプローチの概念図 9
図 2-1- 2　本研究のフローチャート 10
図 2-1- 3　研究対象地域の地下水流動の概念図 12
図 2-1- 4　ボーリング調査位置図（産業技術総合研究所、2016） 12
図 2-1- 5　SKB 孔の柱状図および揚水地下水（黄色）と間隙水（緑色・水色）の水質 .. 13
図 2-1- 6 沿岸部における地下水流動の概念図（Machida et al., 2016） 13
図 2-1- 7　富士山周辺での酸素同位体比の分布 16
図 2-1- 8　観測値の位置 17
図 2-1- 9　透水係数の逆解析で使用した解析モデル（2021 年度） 18
図 2-1- 10　相関係数マトリクス 22
図 2-1- 11　Pilot Point および観測値の配置図 26
図 2-1- 12　数値実験の逆解析結果 27
図 2-1- 13　観測値と計算値の比較（数値実験） 28
図 2-1- 14　逆解析中の目的関数の推移（数値実験） 28
図 2-1- 15　逆解析中の目的関数の推移 30
図 2-1- 16　透水係数分布の変化 30
図 2-1- 17　同定率の概念図 31
図 2-1- 18　Pilot Point ごとに評価された同定率のマッピング 31
図 2-1- 19　感度解析手法の体系的な整理図　（Pianosi et al., 2016）に加筆 34
図 2-1- 20　Morris 法の評価方法（Wicaksono, 2016） 35
図 2-1- 21　グローバル感度解析で使用する解析モデル 37
図 2-1- 22　グローバル感度解析で使用した観測値 38
図 2-1- 23　Morris 法における透水係数のサンプリング箇所 40
図 2-1- 24　軌道の数と EE の絶対値の平均（μ*） 41
図 2-1- 25　Morris 法の評価結果 42
図 2-1- 26　サンプリング数と Sobol'の感度指標 44
図 2-1- 27　Sobol'法の評価結果 45
図 2-1- 28　グローバル感度解析と逆解析結果の概要 47
図 2-1- 29　解析で考慮した海水準変動 49
図 2-1- 30　単一地形勾配の 2 次元鉛直モデル 50
図 2-1- 31　相対塩水体積および平均滞留時間を計算する領域の概要図 52
図 2-1- 32　地形勾配 2%モデルの解析結果（24 万年～36 万年） 54
図 2-1- 33　地形勾配 5%モデルの解析結果（24 万年～36 万年） 55
図 2-1- 34　相対塩水体積（RSV）の経時変化 56

図 2-1- 35　平均滞留時間（MRT）の経時変化 57
図 2-2- 1 沿岸部における地下施設設置のイメージ 65
図 2-2- 2 沿岸部周辺の淡水系地下水と塩水系地下水の流動イメージ 65
図 2-2- 3　動水勾配が小さいときに起こりそうなダルシ―の法則からのずれ 66
図 2-2- 4 3 つの水文地質単元（モデルレイヤー） 69
図 2-2- 5 完新統基底面標高分布図 69
図 2-2- 6 上部更新統基底面標高分布図 70
図 2-2- 7 3 次元モデルの鳥瞰図（縦：横＝2：1） 70
図 2-2- 8 2 次元モデルの地質分布（縦：横＝3：1） 73
図 2-2- 9 昨年度の 2-2 節でおこなわれた解析領域（紫色の枠）と、本研究の解析領域（赤色の点線)。 74
図 2-2- 10 基本モデルでの解析結果（塩分濃度） 76
図 2-2- 11 基本モデルでの FGB-2 孔周辺の解析結果（塩分濃度） 77
図 2-2- 12 基本モデルでの解析結果（地下水年代） 78
図 2-2- 13　基本モデルでの FGB-2 孔周辺の解析結果（地下水年代） 79
図 2-2- 14 基本モデルでの解析結果（地下水の速さ） 80
図 2-2- 15 基本モデルでの FGB-2 孔周辺の解析結果（地下水の速さ） 81
図 2-2- 16 基本モデルおよび完新統の透水係数を 8 倍にしたケースでの解析結果の比較（塩分濃度） 84
図 2-2- 17 基本モデルおよび完新統の透水係数を 8 倍にしたケースでの解析結果の比較（地下水年代） 85
図 2-2- 18 基本モデルおよび完新統の透水係数を 8 倍にしたケースでの解析結果の比較（地下水の速さ） 86
図 2-2- 19 基本モデルおよび完新統の透水係数を 8 倍にしたケースでの解析結果の比較 87
図 2-2- 20 基本モデルおよび上部更新統の透水係数を 5 倍にしたケースでの解析結果の比較（塩分濃度） 88
図 2-2- 21 基本モデルおよび上部更新統の透水係数を 5 倍にしたケースでの解析結果の比較（地下水年代） 89
図 2-2- 22 基本モデルおよび上部更新統の透水係数を 5 倍にしたケースでの解析結果の比較 90
図 2-2- 23 完新統の透水係数に異方性を与えた場合（Kh ＝ 1.0×10-4 m/s、Kv = 1.0×10-5m/s）FGB-2 孔周辺の変化。上段の左から塩分濃度分布、地下水年代分布、速さの分布である。中段左は塩分濃度分布の比較であり、左は基本モデル、右は異方性を与えたケース。下段は同様に地下水の流向流速分布。 92
図 2-2- 24 基本モデルおよび上部更新統の透水係数に異方性を与えた場合 93
図 2-2- 25 上部更新統の透水係数に異方性を与えた場合 94

図 2-2- 26 基本モデルおよび分散長を 1/10 にしたケース（塩分濃度） 96
図 2-2- 27 基本モデルおよび分散長を 1/10 にしたケースでの解析結果の比較..... 97
図 2-2- 28 基本モデルおよび分散長を 1/10 にしたケースでの解析結果の比較..... 98
図 2-2- 29 3 次元モデルにおける塩淡境界位置（上：地質、下：塩分濃度） 100
図 2-2- 30 FGB-2 孔を通る断面における 3 次元密度流解析初期モデルによる塩分濃度分布（上）と地下水年代分布（上から 2 番目）、流さの分布（上から三番目）。下段の図は断面位置。 101
図 2-2- 31 3 次元密度流解析（基本モデル，FGB-2 を通る断面の解析結果） 102
図 2-2- 32 SKB 孔を通る断面における 3 次元密度流解析初期モデルによる塩分濃度分布（上段）と地下水年代分布（中段）。下段の図は断面位置。 103
図 2-2- 33 3 次元密度流解析（基本モデル，SKB 孔を通る断面の解析結果） 104
図 2-2- 34 3 次元密度流解析による塩分濃度分布（FGB-2 を通る断面の解析結果； 上：基本モデル，下：変更ケース） 106
図 2-2- 35 3 次元密度流解析による塩分濃度分布（SKB を通る断面の解析結果； 上：基本モデル，下：変更ケース） 107
図 2-2- 36 塩淡境界と地下水流動方向（GL-300m） 109
図 2-2- 37 塩淡境界と地下水流動方向（GL-800 m） 109
図 3-1- 1 地下地質ごとの地下水の区分.....115
図 3-1- 2 調査地点 FGB-2 孔の位置図 115
図 3-1- 3 駿河湾における海水中の 222Rn 濃度分布.....116
図 3-1- 4 駿河湾における音波の散乱域（産業技術総合研究所，2013 に加筆） 118
図 3-1- 5 SKB 孔における水質の深度プロファイル 118
図 3-1- 6 水質や地下水年代から想定される駿河湾沿岸部における 119
図 3-1- 7 FGB-2 孔におけるケーシングプログラム 122
図 3-1- 8 ボーリングコア..... 123
図 3-1- 9 ボーリングコア..... 124
図 3-1- 10 ボーリングコア（本事業実施分：その 1） 125
図 3-1- 11 ボーリングコア（本事業実施分：その 2） 126
図 3-1- 12 FGB-2 孔における孔内物理検層結果..... 128
図 3-1- 13 FGB-2 孔における孔内物理検層結果（400～800m） 129
図 3-1- 14 FGB-2 孔水理試験の装置の概要 131
図 3-1- 15 FGB-3 孔におけるケーシングプログラム 133
図 3-1- 16 比重の違いによる試験溶液の移動イメージ..... 137
図 3-1- 17 FGB-3 孔 17.68 m~25.59 m 水理試験の装置の概要..... 140
図 3-1- 18 FGB-3 孔 112.28 m~113.28 m水理試験（2 回目）の装置の概要..... 140
図 3-1- 19 FGB-3 孔 ダブルパッカーを用いた水理試験の装置の概要 141

図 3-1- 20　地下水の実水頭、淡水水頭、透水係数 146
図 3-1- 21　FGB-2 および FGB-3 から得られた地下水の水質（その 1） 147
図 3-1- 22　GB-2 および FGB-3 から得られた地下水の水質（その 2） 148
図 3-1- 23　地質断面図から推定された不透水基盤深度 150
図 3-1- 24　当初推定していた地質図 151
図 3-1- 25　平成 25 年度深部反射法結果と深部・浅部統合解析結果の比較(a) H25 年度深部反射法深度断面、(b) 深部統合解析 CMP 重合解析結果。 152
図 3-2- 1　ROV と高精度音響カメラを用いた探査の測線配置図 157
図 3-2- 2　ROV と高精度音響カメラで推定した湧出量の分布図 160
図 3-2- 3　水試料の炭素同位体および V 濃度 161
図 3-2- 4　文献情報に基づき GIS で解析した集水域、表層地質及び海底地形図 163
図 3-2- 5　集水域内の主要な表層地質、傾斜角及び海底地形勾配の関係 166
図 3-2- 6　海底湧出地下水に関する文献の調査地域 167
図 3-3- 1 振動試験の方法（イメージ図） 173
図 3-3- 2　試験に用いた大型水槽の概要 174
図 3-3- 3　振動試験結果の比較 176
図 3-3- 4　水中スピーカーの構造 176
図 3-3- 5　試験レイアウト 178
図 3-3- 6　性能評価試験の検証結果 180
図 3-3- 7　水中スピーカーの振動面にかかる水圧の影響 182
図 3-3- 8　振動面にかかる水圧低減の方法 182
図 3-3- 9　曳航試験における発振器と受振器のレイアウト 183
図 3-3- 10　大型スピーカーの性能評価試験結果 185
図 3-3- 11　小型スピーカーの性能評価試験結果 185
図 3-3- 12　疑似ランダム波の受振波形（相関計算後） 186
図 3-3- 13　幌延町沿岸海域における測線位置 191
図 3-3- 14　データフロー処理図（左：2 次元記録、右：3 次元記録） 194
図 3-3- 15　2D-01 測線の時間断面記録から推定された 3 つの境界線 198
図 3-3- 16　2D-01 測線の時間断面図と陸域のボーリング柱状図との比較 199
図 3-3- 17　陸域の浅部反射法データとの連続性の検討 200
図 3-3- 18　海域における電磁淡データと陸域ボーリングにおける間隙水の Cl-濃度変化との比較 201
図 3-3- 19　2D-01 測線と 2D-03 測線の比較（黒の点線は不連続構造の位置を示す） .. 202
図 3-3- 20　2D-01 測線と 2D-02 測線の比較（黒の点線は不連続構造の位置を示す） .. 203
図 3-3- 21　2D-01 測線と 3D キューブの比較（青矢印は不整合の位置） 204
図 3-3- 22　3D キューブのタイムスライスの比較（左 30ms，中央 40ms、右 50ms） . 205

図 3-3- 23　調査測線の位置図（森ほか，2015；阿部・青柳，2006 に加筆）..... 207
図 3-3- 24　測定結果の比較（KT2-1 測線）.....211
図 3-3- 25　測定結果の比較（KT2-2 測線）..... 212
図 3-3- 26　3D 測線における昨年度の結果との比較..... 213
図 3-3- 27　模擬 3D 処理の結果（3D キューブ）..... 214
図 3-3- 28　受振器の形状の違いによる測定結果の比較..... 215
図 3-3- 29　既存測定結果との比較（黄線は多重反射面）　上：測線 KT2-1、下：測線 KN3（森ほか，2015）..... 217
図 3-3- 30　既存測定結果との比較　上：測線 KT2-10、下：測線 KN2（森ほか，2015）..... 218
図 3-3- 31　既存測定結果との比較..... 219
図 3-3- 32　フルサイクルとハーフサイクルの疑似ランダム波（Nakamura et al., 2015）..... 223
図 3-3- 33　複数の漁船を利用した測定システム..... 223
図 4-1- 1　沿岸部処分において構成要素に作用する外的要因の整理..... 229
図 4-1- 2　支保工において想定される状態変遷の一例..... 230
図 4-1- 3　緩衝材において想定される状態変遷の一例図 230
図 4-2- 1　坑道の支保工及び覆工の状態変遷と維持期間のイメージ..... 233
図 4-2- 2　今フェーズの検討課題と研究のアプローチ及び成果の目標 237
図 4-2- 3　浸漬試験の模式図..... 241
図 4-2- 4　分類した地下水の化学組成 247
図 4-2- 5　希釈した人工海水と比較した FGB-3_113 m のヘキサダイヤグラム 250
図 4-2- 6　コンクリートの力学的特性に影響を与える地下水の成分の整理..... 252
図 4-2- 7　ペースト試料の 10 箇月間浸漬後の低アルカリ性化領域の測定結果 259
図 4-2- 8　FGB-2_167.70～171.78 m　ペースト試料 10 箇月浸漬　μXRD 測定結果.... 261
図 4-2- 9　FGB-2_214.75～220.52 m　ペースト試料 10 箇月浸漬　μXRD 測定結果.... 262
図 4-2- 10　人工海水　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果..... 270
図 4-2- 11　海水 B　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果..... 271
図 4-2- 12　海水 G　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果 272
図 4-2- 13　降水 A　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果..... 273
図 4-2- 14　降水 D+F　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果..... 274
図 4-2- 15　FGB-2_167.70～171.78 m　ペースト試料 10 箇月浸漬　ヤング率測定結果..... 275
図 4-2- 16　FGB-2_214.75～220.52 m　ペースト試料 10 箇月浸漬　ヤング率測定結果..... 276

図 4-2- 17　FGB-2_167.70～171.78 m　吹付け想定 OPC　 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果 278
図 4-2- 18　FGB-2_167.70～171.78 m　吹付け想定 BFSC　 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果 279
図 4-2- 19　FGB-2_167.70～171.78 m　セグメント想定 OPC　 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果..... 280
図 4-2- 20　FGB-2_167.70～171.78 m　セグメント想定 BFSC　 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果..... 281
図 4-2- 21　FGB-2_214.75～220.52 m　吹付け想定 OPC　 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果 282
図 4-2- 22　FGB-2_214.75～220.52 m　吹付け想定 BFSC　 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果 283
図 4-2- 23　FGB-2_214.75～220.52 m　セグメント想定 OPC　 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果..... 284
図 4-2- 24　FGB-2_214.75～220.52 m　セグメント想定 BFSC　 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果..... 285
図 4-2- 25　ペースト試料の反射電子像の低輝度面積の変化率と硬度の変化率の関係.... 288
図 4-2- 26　人工海水　3 箇月浸漬　吹付け想定 OPC の微細領域元素分布測定結果 291
図 4-2- 27　海水 B　3 箇月浸漬　吹付け想定 OPC の微細領域元素分布布測定結果..... 292
図 4-2- 28　海水 G　3 箇月浸漬　吹付け想定 OPC の微細領域元素分布布測定結果 293
図 4-2- 29　降水 A　3 箇月浸漬　吹付け想定 OPC の微細領域元素分布測定結果 294
図 4-2- 30　FGB-2_167.70～171.78 m　10 箇月浸漬　 吹付け想定 OPC の微細領域元素分布測定結果..... 295
図 4-2- 31　 FGB-2_167.70～171.78 m　10 箇月浸漬　 吹付け想定 BFSC の微細領域元素分布測定結果 296
図 4-2- 32　 FGB-2_214.75～220.52 m　10 箇月浸漬　 吹付け想定 OPC の微細領域元素分布測定結果..... 297
図 4-2- 33　 FGB-2_214.75～220.52 m　10 箇月浸漬　 吹付け想定 BFSC の微細領域元素分布測定結果 298
図 4-2- 34　地下水化学組成が硬度に与える影響（吹付け OPC） 301
図 4-2- 35　地下水化学成分が硬度に与える影響（吹付け想定 BFSC） 301
図 4-2- 36　地下水化学成分が硬度に与える影響（セグメント想定 OPC） 302
図 4-2- 37　地下水化学成分が硬度に与える影響（セグメント想定 BFSC..... 302
図 4-2- 38　各部材で想定した環境条件 304
図 4-2- 39　フロースルー試験の模式図 313
図 4-2- 40　浸漬試験の模式図 313

図 4-2- 41　コンクリート表面への二次鉱物生成の確認試験の模式図 313
図 4-2- 42　コンクリート試料の 10 箇月間浸漬後の低アルカリ性化領域の評価結果..... 315
図 4-2- 43　降水 A　コンクリート試料 10 箇月浸漬　μXRD 測定結果..... 317
図 4-2- 44　FGB-2_167.70～171.78 m 318
図 4-2- 45　人工海水流速変更　コンクリート試料 10 箇月浸漬　μXRD 測定結果..... 319
図 4-2- 46　降水 A　コンクリート試料 10 箇月浸漬　ヤング率測定結果 324
図 4-2- 47　FGB-2_167.70～171.78 m　コンクリート試料 10 箇月浸漬　ヤング率測定結果 325
図 4-2- 48　人工海水流速変更　コンクリート試料 10 箇月浸漬　ヤング率測定結果..... 326
図 4-2- 49　降水 A　吹付けコン OPC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果 328
図 4-2- 50　降水 A　吹付けコン BFSC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果 329
図 4-2- 51　降水 A　セグメント OPC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果 330
図 4-2- 52　降水 A　セグメント BFSC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果 331
図 4-2- 53　FGB-2_167.70～171.78 m　吹付けコン OPC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果 332
図 4-2- 54　FGB-2_167.70～171.78 m　吹付けコン BFSC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果 333
図 4-2- 55　FGB-2_167.70～171.78 m　セグメント OPC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果 334
図 4-2- 56　FGB-2_167.70～171.78 m　セグメント BFSC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果 335
図 4-2- 57　人工海水流速変更　吹付けコン OPC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果..... 336
図 4-2- 58　人工海水流速変更　吹付けコン BFSC　10 箇月浸漬　EPMA 測定結果..... 337
図 4-2- 59　降水 A　コンクリート試料 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果 平均濃度プロファイル（1/3） 338
図 4-2- 60　降水 A　コンクリート試料 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果 平均濃度プロファイル（2/3） 339
図 4-2- 61　降水 A　コンクリート試料 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果 平均濃度プロファイル（3/3） 340
図 4-2- 62　FGB-2_167.70～171.78 m　コンクリート試料 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果　平均濃度プロファイル（1/3） 341
図 4-2- 63　FGB-2_167.70～171.78 m　コンクリート試料 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果　平均濃度プロファイル（2/3） 342
図 4-2- 64　FGB-2_167.70～171.78 m　コンクリート試料 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果　平均濃度プロファイル（3/3） 343

図 4-2- 65　人工海水（流速早い）コンクリート試料 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果　平均濃度プロファイル（1/3） 344
図 4-2- 66　人工海水（流速早い）コンクリート試料 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果　平均濃度プロファイル（2/3） 345
図 4-2- 67　人工海水（流速早い）コンクリート試料 10 箇月浸漬　EPMA 測定結果　平均濃度プロファイル（3/3） 346
図 4-2- 68　コンクリートの反射電子像の強度低下領域の面積比と硬度の変化率の関係 349
図 4-2- 69　コンクリート表面への二次鉱物生成確認の結果（目視観察） 351
図 4-2- 70　地下水化学成分が硬度に与える影響（10 箇月浸漬　吹付けコン OPC） 354
図 4-2- 71　地下水化学成分が硬度に与える影響（10 箇月浸漬　吹付けコン BFSC） .. 354
図 4-2- 72　地下水化学成分が硬度に与える影響（10 箇月浸漬　セグメント OPC） 355
図 4-2- 73　地下水化学成分が硬度に与える影響（10 箇月浸漬　セグメント BFSC） .. 355
図 4-2- 74　相平衡多元素移動計算コードの模式図 357
図 4-2- 75　降水 A10 箇月浸漬　セグメント OPC　EPMA 測定結果と解析結果の比較 367
図 4-2- 76　降水 A10 箇月浸漬　セグメント OPC　EPMA 測定結果と解析結果の比較（石灰石骨材の Ca の影響を補正） 368
図 4-2- 77　セグメント OPC の 10 箇月降水 A 浸漬　コンクリートの組成解析結果 369
図 4-2- 78　降水 A10 箇月浸漬　セグメント BFSC　EPMA 測定結果と解析結果の比較（石灰石骨材の Ca の影響を補正） 372
図 4-2- 79　セグメント BFSC の 10 箇月降水 A 浸漬　コンクリートの組成解析結果 . 373
図 4-2- 80　人工海水 10 箇月浸漬セグメント OPC　EPMA 測定結果と解析結果の比較（石灰石骨材の Ca の影響を補正） 376
図 4-2- 81　セグメント OPC の 10 箇月人工海水浸漬　コンクリートの組成解析結果 .. 377
図 4-2- 82　人工海水 10 箇月浸漬セグメント BFSC　EPMA 測定結果と解析結果の比較（石灰石骨材の Ca の影響を補正） 380
図 4-2- 83　セグメント BFSC の 10 箇月人工海水浸漬　コンクリートの組成解析結果 381
図 4-2- 84　FGB-2_167.70～171.78 m10 箇月浸漬セグメント OPC　EPMA 測定結果と解析結果の比較（石灰石骨材の Ca の影響を補正） 384
図 4-2- 85　セグメント OPC の 10 箇月 FGB-2_167.70～171.78 m 浸漬　コンクリートの組成解析結果 385
図 4-2- 86　μXRD の分析箇所（例） 386
図 4-2- 87　FGB-2_167.70～171.78 m10 箇月浸漬セグメント BFSC　EPMA 測定結果と解析結果の比較（石灰石骨材の Ca の影響を補正） 388
図 4-2- 88　セグメント BFSC の 10 箇月 FGB-2_167.70～171.78 m 浸漬　コンクリートの組成解析結果 389
図 4-2- 89　外部析出層の設定イメージ図 396

図 4-2- 90　VCCTL モデルによる水和後のセメントペーストの 三次元的イメージデータの例 413
図 4-2- 91　コンクリートの強度予測モデルの構築方法 413
図 4-2- 92　VCCTL モデルによる強度予測モデルの検討フロー 415
図 4-2- 93　セメントの粒度分布の測定結果 419
図 4-2- 94　粗骨材の点載荷試験結果 427
図 4-2- 95　切断後のペースト（上半分） 429
図 4-2- 96　モルタルの X 線 CT 測定結果（左：断面、三次元画像） 433
図 4-2- 97　乾燥前のコンクリートの X 線 CT 測定結果 435
図 4-2- 98　乾燥後のコンクリート（打設面側）の X 線 CT 測定結果 435
図 4-2- 99　乾燥後のコンクリート（底面側）の X 線 CT 測定結果 436
図 4-2- 100　VCCTL による水和反応の解析結果（左：反応前、右：反応後） 440
図 4-2- 101　VCCTL によるセメントの水和解析結果 440
図 4-2- 102　セメントペーストの解析モデル 444
図 4-2- 103　硬化セメントペーストの応力ひずみ曲線（左：圧縮、右：引張） 444
図 4-2- 104　引張時の応力ひずみ曲線 444
図 4-2- 105　モルタルの解析モデル（青：砂、赤：セメントペースト相） 446
図 4-2- 106　モルタルの応力ひずみ曲線（左：圧縮、右：引張） 446
図 4-2- 107　引張時の応力ひずみ曲線 446
図 4-2- 108　コンクリートの解析モデル（青：骨材、赤：モルタル相） 448
図 4-2- 109　コンクリートの一軸圧縮時の応力ひずみ計算結果 448
図 4-2- 110　コンクリートの一軸圧縮時のひずみと損傷の関係（赤：損傷） 449
図 4-3- 1　沿岸部地下水（産業技術総合研究所ほか, 2019）のイオン強度 463
図 4-3- 2　沿岸部実地下水（FGB-2 孔_167.70~171.78 m）及び沿岸部地下水（産業技術総合研究所ほか, 2019）の成分中の陽イオン量 471
図 4-3- 3　試験装置概念図 473
図 4-3- 4 K Cl-NaCl 混合溶液、イオン強度 0.125（ケース⑥）の分析結果 475
図 4-3- 5 CaCl2-NaCl 混合溶液、イオン強度 0.5（ケース⑧）の分析結果 475
図 4-3- 6　沿岸部実地下水 FGB2 孔_167.70～171.78m（ケース⑫）の分析結果 475
図 4-3- 7 イオン強度とイオン交換選択係数の関係（通水試験） 478
図 4-3- 8 イオン強度とイオン交換選択係数の関係（バッチ試験） 480
図 4-3- 9 層間陽イオン量の分析結果（バッチ試験試料） 481
図 4-3- 10 各算出方法による陽イオン交換選択係数結果の比較 481
図 4-3- 11 圧縮系及び分散系におけるイオン交換選択係数とイオン強度の関係 483
図 4-3- 12 乾燥密度と Ca/Na の選択係数 logKGT の関係（イオン強度 0.5 mol/L） 486
図 4-3- 13 乾燥密度による層間の電位分布の違い 486

図 4-3- 14　乾燥密度による層間陽イオンの濃度分布 487
図 4-3- 15　乾燥密度と Ca-Na イオン交換選択係数の関係（ポアソン-ボルツマン方程式と分子動力学法の比較） 487
図 4-3- 16 イオン強度と Ca/Na の選択係数 logKGT の関係 （乾燥密度 1.00Mg/m3,モル濃度比 Ca:Na:Cl = 4:3:11） 489
図 4-3- 17 イオン強度と Ca-Na 選択係数 log KGT の関係（ポアソン-ボルツマン方程式と分子動力学法の比較） 489
図 4-3- 18　検討の流れ 495
図 4-3- 19　「②イオン交換選択係数の取得」の通水試験の再現解析水分特性曲線と比透水係数 500
図 4-3- 20 排水中のイオン濃度の経時変化 504
図 4-3- 21 層間陽イオンの当量分率 504
図 4-3- 22　排水中イオン濃度の経時変化及び層間陽イオンの当量分率（ケース④） 505
図 4-3- 23 排水中イオン濃度の経時変化及び層間陽イオンの当量分率（ケース⑧） 505
図 4-3- 24　排水中イオン濃度の経時変化及び層間陽イオンの当量分率（ケース⑫） 505
図 4-3- 25　Mg の Na に対するイオン交換選択係数を変更して実施したケース⑩の解析結果（排水中の陽イオン濃度変化）と試験結果の比較 507
図 4-3- 26　試験終了時点の解析結果と試験結果（層間陽イオンの当量分率）の比較.... 507
図 4-3- 27 カルサイト溶解を考慮した解析結果と非考慮の解析結果の比較 509
図 4-3- 28　透水-膨潤圧試験の試験手順 512
図 4-3- 29　載荷空気圧（試験における想定値） 512
図 4-3- 30　透水 - 膨潤圧試験の再現解析に使用した水分特性曲線と比透水係数 515
図 4-3- 31　試験終了後の吸着陽イオン組成と 通水終了時点（71.8 日後）での解析結果との比較 517
図 4-3- 32　海水平衡ベントナイトについての試験終了後の吸着陽イオン組成と 平衡時（5,000 日後）の解析結果との比較 517
図 4-3- 33　緩衝材の膨潤率に対する溶存陽イオンの影響把握に係る検討フロー 521
図 4-3- 34　本研究で使用する膨潤量に係る試験装置の概略図 523
図 4-3- 35　膨潤率の経時変化 （試験Ⓔ：Na＋イオン以外の陽イオン種ごとのイオン強度の影響） 528
図 4-3- 36　膨潤率と経過変化 （試験Ⓕ：複数の陽イオン種を含むイオン強度の影響） 528
図 4-3- 37　膨潤率の経時変化 （Ⓖ 沿岸部実地下水の影響） 529
図 4-3- 38　膨潤率の経時変化 （Ⓗ KCl 水溶液 イオン強度 0.2 初期乾燥密度の影響） 529

図 4-3- 39　イオン強度と最大膨潤率の関係　（試験Ⓔ：Na＋イオン以外の陽イオン種ごとのイオン強度の影響） 529
図 4-3- 40　イオン強度と最大膨潤率の関係（全試験結果） 530
図 4-3- 41　イオン強度と最大膨潤率の関係（1 価の陽イオン（Na+,K+）の影響） 530
図 4-3- 42　イオン強度と最大膨潤率の関係（２価の陽イオン（Ca2+,Mg2+）の影響） 530
図 4-3- 43　イオン強度と最大膨潤率の関係（1 価と２価の陽イオンの影響） 530
図 4-3- 44　イオン強度と最大膨潤率の関係（試験Ⓖ：沿岸部実地下水の影響） 530
図 4-3- 45　イオン強度と最大膨潤率の関係（試験Ⓕ：複数の陽イオン種を含むイオン強度の影響） 531
図 4-3- 46　イオン強度と最大膨潤率の関係　（複数の陽イオン（NaCl+CaCl2 混合溶液 NaCl+MgCl2 混合溶液 、沿岸実地下水）の影響） 531
図 4-3- 47　イオン強度と最大膨潤率の関係　（初期乾燥密度の影響） 531
図 4-4- 1　透水膨潤圧試験装置の概略 548
図 4-4- 2　せん断透水試験装置の概略 550
図 4-4- 3　せん断透水試験装置の写真 550
図 4-4- 4　スリットの調整手順 551
図 4-4- 5　供試体未設置時のスリット幅とトルクおよび透水係数の関係 553
図 4-4- 6　せん断透水試験において透水試験を実施するせん断変位の考え方 555
図 4-4- 7　リングせん断試験の実施フローチャート 555
図 4-4- 8　回転角度とせん断変位の関係 559
図 4-4- 9　供試体に対する通水方向の概略図 559
図 4-4- 10　水平方向の見かけの透水係数に関する通水経路のイメージ 560
図 4-4- 11　リングせん断試験後の供試体の分割方法のイメージと各部位の呼称 560
図 4-4- 12　圧縮成型方向と供試体作製の概念図 561
図 4-4- 13　三軸透水試験機の概略図 561
図 4-4- 14　イオン交換処理前後の浸出陽イオン量 563
図 4-4- 15　ポアボリューム比に対する透水係数の変化 566
図 4-4- 16　ポアボリューム比に対する流出水の水質の変化 566
図 4-4- 17　透水試験後の含水比分布 567
図 4-4- 18　初期試料と人工海水透水後の圧縮成型供試体の浸出陽イオン組成 567
図 4-4- 19　透水試験後の含水比・飽和度分布 569
図 4-4- 20　透水膨潤圧試験後の浸出陽イオン組成 570
図 4-4- 21　人工海水のイオン濃度倍率と平衡膨潤圧の関係 573
図 4-4- 22　人工海水のイオン濃度倍率と透水係数の関係 573
図 4-4- 23　平衡膨潤圧と透水係数の関係 574

図 4-4- 24　クニゲル V1 および海水平衡クニゲル V1 単体と砂混合土の透水係数の比較 576
図 4-4- 25　透水試験後の含水比分布 577
図 4-4- 26　カオリン粘土供試体の圧縮曲線 579
図 4-4- 27　カオリン粘土供試体のせん断に伴う供試体高さの変化 579
図 4-4- 28　カオリン粘土供試体のせん断に伴うせん断応力の変化 579
図 4-4- 29　せん断に伴うカオリン粘土(イオン交換水)の透水性の変化 580
図 4-4- 30　カオリン粘土(イオン交換水)のせん断後の供試体(側方)の写真(左)およびその拡大写真(右) 581
図 4-4- 31　せん断位置において上下に分割したカオリン供試体のせん断面の写真 581
図 4-4- 32　クニゲル V1－砂混合土(イオン交換水、人工海水 1 倍)の膨潤圧 584
図 4-4- 33　海水平衡クニゲル V1－砂混合土(人工海水 1 倍、2 倍、3 倍)の膨潤圧 584
図 4-4- 34　クニボンド単体(イオン交換水、人工海水 1 倍)の膨潤圧 585
図 4-4- 35　海水平衡クニボンド単体(人工海水 1 倍、2 倍、3 倍)の膨潤圧 585
図 4-4- 36　せん断透水試験および透水膨潤圧試験における平衡膨潤圧の比較 586
図 4-4- 37　各供試体のせん断に伴う供試体高さの変化 588
図 4-4- 38　クニゲル V1－砂混合土のせん断に伴うせん断応力の変化 589
図 4-4- 39　海水平衡クニゲル V1－砂混合土せん断に伴うせん断応力の変化 589
図 4-4- 40　クニボンド単体のせん断に伴うせん断応力の変化 590
図 4-4- 41　海水平衡クニボンド単体のせん断に伴うせん断応力の変化 590
図 4-4- 42　クニゲル V1－砂混合土の有効応力経路 593
図 4-4- 43　海水平衡クニゲル V1－砂混合土の有効応力経路 593
図 4-4- 44　クニボンド単体の有効応力経路 594
図 4-4- 45　海水平衡クニボンド単体の有効応力経路 594
図 4-4- 46　せん断に伴うクニゲル V1－砂混合土の透水性の変化(上:測定値、下:正規化) 596
図 4-4- 47　せん断に伴う海水平衡クニゲル V1－砂混合土の透水性の変化(上:測定値、下:正規化) 597
図 4-4- 48　せん断に伴うクニボンド単体の透水性の変化 598
図 4-4- 49　せん断に伴う海水平衡クニボンド単体の透水性の変化 599
図 4-4- 50　せん断透水後の各供試体の写真（側方から応力解放された状態で撮影） ... 601
図 4-4- 51　せん断透水試験後の供試体の含水比分布 602
図 4-4- 52　せん断透水試験後のクニゲル V1－砂混合土(人工海水濃度 1 倍)の浸出陽イオン分布(左：浸出陽イオン量、右：浸出陽イオン量の割合) 603
図 4-4- 53　せん断透水試験後の海水平衡クニゲル V1－砂混合土(人工海水濃度 1 倍)の浸出陽イオン分布(左：浸出陽イオン量、右：浸出陽イオン量の割合) 603

図 4-4- 54　せん断透水試験後の海水平衡クニゲル V1－砂混合土(人工海水濃度 2 倍)の浸出陽イオン分布(左：浸出陽イオン量、右：浸出陽イオン量の割合) 603
図 4-4- 55　せん断透水試験後の海水平衡クニゲル V1－砂混合土(人工海水濃度 3 倍)の浸出陽イオン分布 603
図 4-4- 56　せん断透水試験後のクニボンド単体(人工海水濃度 1 倍)の浸出陽イオン分布(左：浸出陽イオン量、右：浸出陽イオン量の割合) 604
図 4-4- 57　せん断透水試験後の海水平衡クニボンド単体(人工海水濃度 1 倍)の浸出陽イオン分布(左：浸出陽イオン量、右：浸出陽イオン量の割合) 604
図 4-4- 58　せん断透水試験後の海水平衡クニボンド単体(人工海水濃度 2 倍)の浸出陽イオン分布 604
図 4-4- 59　せん断透水後の各供試体側方のせん断帯付近の写真 607
図 4-4- 60　せん断透水後に凍結乾燥した試料のせん断位置付近の写真 608
図 4-4- 61　せん断後のクニゲル V1－砂混合土(イオン交換水)の供試体断面の 609
図 4-4- 62　せん断後のクニゲル V1－砂混合土(人工海水濃度 1 倍)の供試体断面の写真 610
図 4-4- 63　せん断後の海水平衡クニゲル V1－砂混合土(人工海水濃度 1 倍)の供試体断面の SEM 観察画像 611
図 4-4- 64　せん断後の海水平衡クニゲル V1－砂混合土(人工海水濃度 2 倍)の供試体断面の写真 612
図 4-4- 65　せん断後の海水平衡クニゲル V1－砂混合土(人工海水濃度 3 倍)の供試体断面の写真 613
図 4-4- 66　せん断後のクニボンド単体(イオン交換水)の供試体断面の写真 614
図 4-4- 67　せん断後の海水平衡クニボンド単体(人工海水濃度 1 倍)の供試体断面の写真 615
図 4-4- 68　せん断後の海水平衡クニボンド単体(人工海水濃度 2 倍)の供試体断面の写真 616
図 4-4- 69　せん断後のクニゲル V1-砂混合土(イオン交換水)の薄片試料の FE-SEM 観察画像 617
図 4-4- 70　せん断後のクニゲル V1-砂混合土(イオン交換水)の薄片試料の FE-SEM 観察画像(電子顕微鏡倍率：80 倍)(右)および元素マッピング画像(左) 618
図 4-4- 71　せん断後の海水平衡クニゲル V1-砂混合土(人工海水濃度 2 倍)の薄片試料の FE-SEM 観察画像 619
図 4-4- 72　せん断後の海水平衡クニゲル V1-砂混合土(人工海水濃度 2 倍)の薄片試料の FE-SEM 観察画像 620
図 4-4- 73　せん断後のクニボンド単体(イオン交換水)の薄片試料の FE-SEM 観察画像 621

図 4-4- 74　三軸透水試験による圧縮方向に対して鉛直・水平方向の透水係数..... 623
図 4-4- 75　人工海水と試験溶液の組成..... 634
図 4-4- 76　バッチ試験前後の乾燥質量の変化..... 641
図 4-4- 77　バッチ試験前後の固相の XRD プロファイル 642
図 4-4- 78　バッチ試験前後の KV や SKV の IR スペクトル..... 644
図 4-4- 79　バッチ試験前後の KB や SKB の IR スペクトル..... 645
図 4-4- 80　バッチ試験前後の固相の浸出イオン量 647
図 4-4- 81　バッチ試験前後の固相の浸出陽イオン組成 647
図 4-4- 82　EG 処理後の XRD プロファイル..... 649
図 4-4- 83　加熱前後の XRD プロファイル 651
図 4-4- 84 緩衝材再冠水過程で生じる現象のイメージ..... 656
図 4-4- 85 遠心力載荷試験装置を用いた模型試験による研究例 656
図 4-4- 86 超長期遠心載荷岩盤実験装置の概略図(上)と装置全景(下)..... 662
図 4-4- 87 試験容器の概略、及び模型、センサー配置..... 663
図 4-4- 88 注水ポンプの概略..... 665
図 4-4- 89 医療用マルチスライスヘリカル CT スキャナ..... 666
図 4-4- 90 模型作製の様子..... 669
図 4-4- 91 遠心力載荷試験装置プラットホーム上の様子 670
図 4-4- 92 試験容器ダミープラグ設置の様子 672
図 4-4- 93 キャリブレーション試料の CT 画像撮影の様子(令和 3 年度成果報告書より引用)..... 672
図 4-4- 94 4 条件の温度変化 674
図 4-4- 95 Na-8 条件(a)～(c)、Na-9T 条件(d)～(f)の遠心力模型試験結果..... 676
図 4-4- 96 Ca-7(a)～(c)、Ca-8T(d)～(f)の遠心力模型試験結果..... 677
図 4-4- 97 キャリブレーション用試料の CT 画像と測線(赤線)の CT 値..... 679
図 4-4- 98 キャリブレーション用試料の物理密度と CT 値の関係 680
図 4-4- 99 Na-9T の三次元 CT 画像..... 681
図 4-4- 100 Na-8 の試験後の CT 値分布..... 682
図 4-4- 101 Na-9T の試験後の CT 値分布 683
図 4-4- 102 Ca-7 の試験後の CT 値分布 684
図 4-4- 103 Ca-8T の試験後の CT 値分布..... 685
図 4-4- 104 遠心力模型試験後の緩衝材の飽和度分布 687
図 4-4- 105 遠心力模型試験後の緩衝材の飽和度分布(令和 3 年度成果報告書より引用) 689
図 4-4- 106 遠心力模型試験後の緩衝材の高さごとの浸出陽イオン量の割合 689
図 4-4- 107 Ca 型ベントナイトの緩衝材におけるオーバーパック変位挙動の比較..... 694
図 4-4- 108 模擬廃棄体の加熱によるオーバーパック周囲の緩衝材の飽和度の違い 695

図 4-4- 109 遠心力模型試験後の CT 画像と測線の CT 値分布 696
図 4-4- 110 遠心力模型試験後の緩衝材の密度分布の比較 697
図 4-4- 111 LOSTUF における緩衝材膨潤モデル 705
図 4-4- 112　対象とした遠心模型試験の概要 707
図 4-4- 113　小型圧力容器の概略図と計測位置 709
図 4-4- 114　軸対象解析に用いる解析メッシュ 710
図 4-4- 115　解析上の境界条件 711
図 4-4- 116　各緩衝材条件における膨潤ひずみと膨潤圧の関係 713
図 4-4- 117　各緩衝材条件における有効粘土密度と透水係数の関係 716
図 4-4- 118　各緩衝材条件における水分特性曲線と相対透水係数 716
図 4-4- 119　各ケースにおける初期応力分布（圧縮を正とする） 719
図 4-4- 120　追加検討を含む各緩衝材条件における有効粘土密度と透水係数の関係 721
図 4-4- 121　クニボンド：純水を対象とする追加検討ケースの膨潤ひずみと膨潤圧の関係 722
図 4-4- 122　各ケースの最終変位分布 723
図 4-4- 123　Case 1 の O/P 変位の経時変化 724
図 4-4- 124　Case 1 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化 724
図 4-4- 125　Case 1 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化図 724
図 4-4- 126　Case 1 の各位置の飽和度の経時変化 725
図 4-4- 127　Case 1 の飽和度分布の経時変化 725
図 4-4- 128　Case 1 の乾燥密度分布の経時変化 726
図 4-4- 129　Case 1 の含水比分布の経時変化図 726
図 4-4- 130　Case 2 の O/P 変位の経時変化 728
図 4-4- 131　Case 2 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化 728
図 4-4- 132　Case 2 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化 728
図 4-4- 133　Case 2 の各位置の飽和度の経時変化 729
図 4-4- 134　Case 2 の飽和度分布の経時変化 729
図 4-4- 135　Case 2 の乾燥密度分布の経時変化 730
図 4-4- 136　Case 2 の含水比分布の経時変化 730
図 4-4- 137　Case 2 の温度分布の経時変化 731
図 4-4- 138　Case 3 の O/P 変位の経時変化 732
図 4-4- 139　Case 3 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化 732
図 4-4- 140　Case 3 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化 732
図 4-4- 141　Case 3 の各位置の飽和度の経時変化 733
図 4-4- 142　Case 3 の飽和度分布の経時変化 733
図 4-4- 143　Case 3 の乾燥密度分布の経時変化 734

図 4-4- 144　Case 3 の含水比分布の経時変化 734
図 4-4- 145　Case 4 の O/P 変位の経時変化 736
図 4-4- 146　Case 4 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化 736
図 4-4- 147　Case 4 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化 736
図 4-4- 148　Case 4 の各位置の飽和度の経時変化 737
図 4-4- 149　Case 4 の飽和度分布の経時変化 737
図 4-4- 150　Case 4 の乾燥密度分布の経時変化 738
図 4-4- 151　Case 4 の含水比分布の経時変化 738
図 4-4- 152　Case 4 の温度分布の経時変化 739
図 4-4- 153　追加検討ケース(Case 2-1～Case 4-2)の最終変位分布 740
図 4-4- 154　追加検討ケース(Case 4-3～Case 4-9)の最終変位分布 741
図 4-4- 155　Case 2-1 の O/P 変位の経時変化 742
図 4-4- 156　Case 2-1 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化 742
図 4-4- 157　Case 2-1 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化 742
図 4-4- 158　Case 2-1 の各位置の飽和度の経時変化 743
図 4-4- 159　Case 2-1 の飽和度分布の経時変化 743
図 4-4- 160　Case 2-1 の乾燥密度分布の経時変化 744
図 4-4- 161　Case 2-1 の含水比分布の経時変化 744
図 4-4- 162　Case 2-1 の温度分布の経時変化 745
図 4-4- 163　Case 3-1 の O/P 変位の経時変化 746
図 4-4- 164　Case 3-1 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化 746
図 4-4- 165　Case 3-1 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化 746
図 4-4- 166　Case 3-1 の各位置の飽和度の経時変化 747
図 4-4- 167　Case 3-1 の飽和度分布の経時変化 747
図 4-4- 168　Case 3-1 の乾燥密度分布の経時変化 748
図 4-4- 169　Case 3-1 の含水比分布の経時変化 748
図 4-4- 170　Case 3-2 の O/P 変位の経時変化 750
図 4-4- 171　Case 3-2 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化 750
図 4-4- 172　Case 3-2 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化 750
図 4-4- 173　Case 3-2 の各位置の飽和度の経時変化 751
図 4-4- 174　Case 3-2 の飽和度分布の経時変化 751
図 4-4- 175　Case 3-2 の乾燥密度分布の経時変化 752
図 4-4- 176　Case 3-2 の含水比分布の経時変化 752
図 4-4- 177　Case 4-1 の O/P 変位の経時変化 754
図 4-4- 178　Case 4-1 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化 754
図 4-4- 179　Case 4-1 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化 754

図 4-4- 180　Case 4-1 の各位置の飽和度の経時変化 755
図 4-4- 181　Case 4-1 の飽和度分布の経時変化 755
図 4-4- 182　Case 4-1 の乾燥密度分布の経時変化 756
図 4-4- 183　Case 4-1 の含水比分布の経時変化 756
図 4-4- 184　Case 4-1 の温度分布の経時変化 757
図 4-4- 185　Case 4-2 の O/P 変位の経時変化 758
図 4-4- 186　Case 4-2 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化 758
図 4-4- 187　Case 4-2 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化 758
図 4-4- 188　Case 4-2 の各位置の飽和度の経時変化 759
図 4-4- 189　Case 4-2 の飽和度分布の経時変化 759
図 4-4- 190　Case 4-2 の乾燥密度分布の経時変化 760
図 4-4- 191　Case 4-2 の含水比分布の経時変化 760
図 4-4- 192　Case 4-2 の温度分布の経時変化 761
図 4-4- 193　Case 4-3 の O/P 変位の経時変化 762
図 4-4- 194　Case 4-3 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化 762
図 4-4- 195　Case 4-3 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化 762
図 4-4- 196　Case 4-3 の各位置の飽和度の経時変化 763
図 4-4- 197　Case 4-3 の飽和度分布の経時変化 763
図 4-4- 198　Case 4-3 の乾燥密度分布の経時変化 764
図 4-4- 199　Case 4-3 の含水比分布の経時変化 764
図 4-4- 200　Case 4-3 の温度分布の経時変化 765
図 4-4- 201　Case 4-4 の O/P 変位の経時変化 766
図 4-4- 202　Case 4-4 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化 766
図 4-4- 203　Case 4-4 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化 766
図 4-4- 204　Case 4-4 の各位置の飽和度の経時変化 767
図 4-4- 205　Case 4-4 の飽和度分布の経時変化 767
図 4-4- 206　Case 4-4 の乾燥密度分布の経時変化 768
図 4-4- 207　Case 4-4 の含水比分布の経時変化 768
図 4-4- 208　Case 4-4 の温度分布の経時変化 769
図 4-4- 209　Case 4-5 の O/P 変位の経時変化 770
図 4-4- 210　Case 4-5 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化 770
図 4-4- 211　Case 4-5 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化 770
図 4-4- 212　Case 4-5 の各位置の飽和度の経時変化 771
図 4-4- 213　Case 4-5 の飽和度分布の経時変化 771
図 4-4- 214　Case 4-5 の乾燥密度分布の経時変化 772
図 4-4- 215　Case 4-5 の含水比分布の経時変化 772

図 4-4- 216　Case 4-5 の温度分布の経時変化 773
図 4-4- 217　Case 4-6 の O/P 変位の経時変化..... 774
図 4-4- 218　Case 4-6 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化 774
図 4-4- 219　Case 4-6 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化 774
図 4-4- 220　Case 4-6 の各位置の飽和度の経時変化 775
図 4-4- 221　Case 4-6 の飽和度分布の経時変化..... 775
図 4-4- 222　Case 4-6 の乾燥密度分布の経時変化 776
図 4-4- 223　Case 4-6 の含水比分布の経時変化..... 776
図 4-4- 224　Case 4-6 の温度分布の経時変化 777
図 4-4- 225　Case 4-7 の O/P 変位の経時変化..... 778
図 4-4- 226　Case 4-7 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化 778
図 4-4- 227　Case 4-7 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化 778
図 4-4- 228　Case 4-7 の各位置の飽和度の経時変化 779
図 4-4- 229　Case 4-7 の飽和度分布の経時変化..... 779
図 4-4- 230　Case 4-7 の乾燥密度分布の経時変化 780
図 4-4- 231　Case 4-7 の含水比分布の経時変化..... 780
図 4-4- 232　Case 4-7 の温度分布の経時変化 781
図 4-4- 233　Case 4-8 の O/P 変位の経時変化..... 782
図 4-4- 234　Case 4-8 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化 782
図 4-4- 235　Case 4-8 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化 782
図 4-4- 236　Case 4-8 の各位置の飽和度の経時変化 783
図 4-4- 237　Case 4-8 の飽和度分布の経時変化..... 783
図 4-4- 238　Case 4-8 の乾燥密度分布の経時変化 784
図 4-4- 239　Case 4-8 の含水比分布の経時変化..... 784
図 4-4- 240　Case 4-8 の温度分布の経時変化図..... 785
図 4-4- 241　Case 4-9 の O/P 変位の経時変化..... 786
図 4-4- 242　Case 4-9 の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化 786
図 4-4- 243　Case 4-9 の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化 786
図 4-4- 244　Case 4-9 の各位置の飽和度の経時変化 787
図 4-4- 245　Case 4-9 の飽和度分布の経時変化..... 787
図 4-4- 246　Case 4-9 の乾燥密度分布の経時変化 788
図 4-4- 247　Case 4-9 の含水比分布の経時変化..... 788
図 4-4- 248　Case 4-9 の温度分布の経時変化 789
図 4-4- 249　O/P 変位の経時変化の基本ケース間の比較 791
図 4-4- 250　緩衝材上部位置における飽和度の経時変化の基本ケース間の比較..... 791
図 4-4- 251　O/P 変位の経時変化の検討ケース間の比較 793

図 4-4- 252　緩衝材上部位置における飽和度の経時変化の検討ケース間の比較..... 794
図 4-4 -253　緩衝材上部位置における飽和度の経時変化の検討ケース間の比較..... 795
図 4-4- 254　O/P 変位の経時変化の検討ケース間の比較 796

５－３　表目次

表 2-1- 1 地質の水理特性..... 15
表 2-1- 2 逆解析で使用する解析モデルの境界条件 19
表 2-1- 3 解析モデルの基本透水係数 20
表 2-1- 4 ボーリング調査（SKB 孔）を追加した透水係数の逆解析結果 22
表 2-1- 5 数値実験で使用する解析モデルの境界条件..... 23
表 2-1- 6　4He の観測値を仮定した数値実験の逆解析結果 24
表 2-1- 7 海水準変動解析の解析条件 51
表 2-2- 1 解析条件（境界条件）.....73
表 2-2- 2 基本モデルでの水理パラメータ.....74
表 2-2- 3 基本ケースと変更ケースに与えた透水係数..... 105
表 3-1- 1　FGB-2 孔における孔内物理検層の実施工程..... 127
表 3-1- 2　水理試験の実施概要 130
表 3-1- 3　採水時の多項目水質計による水質および蛍光染料濃度..... 132
表 3-1- 4　流向流速測定の概要 135
表 3-1- 5　流向流速測定で得られた流向流速..... 136
表 3-1- 6　水理試験の実施概要 139
表 3-1- 7　FGB-3 採水時の多項目水質計による水質および蛍光染料濃度..... 142
表 3-1- 8　水理試験で得られた水理定数..... 144
表 3-2- 1　ROV と高精度音響カメラを用いた探査の測線長と探査面積の一覧..... 158
表 3-2- 2　対象とした地域と集水域の一覧 162
表 3-2- 3　解析に使用したデータの一覧..... 162
表 3-2- 4　GIS で解析した集水域、表層地質及び海底地形勾配の一覧 164
表 3-2- 5　海底湧出地下水周辺の地質と湧出機構 168
表 3-2- 6　海底湧出地下水の検出や性状等の把握に用いられるトレーサー 169
表 3-3- 1　振動試験の仕様..... 173
表 3-3- 2　水中スピーカーの周波数特性に影響を与える項目 177
表 3-3- 3　水中スピーカーの改良点と期待される成果..... 177
表 3-3- 4　性能評価試験の仕様 178
表 3-3- 5　曳航試験の仕様..... 183
表 3-3- 6　使用機材一覧（*1 は産総研からの貸与） 187
表 3-3- 7　データ取得の仕様..... 188
表 3-3- 8　作業工程表..... 192
表 3-3- 9　測線名および測定目的..... 192
表 3-3- 10　全測定内容 193

表 3-3- 11　作業工程表（上段：9/7～9/11，下段：11/30～12/3） 208
表 3-3- 12　測線名および測定目的 209
表 3-3- 13　全測定内容 209
表 4-2- 1　本フェーズの年度展開 238
表 4-2- 2　浸漬試験の試験条件 241
表 4-2- 3　セメントペースト試料による浸漬試験の水準 243
表 4-2- 4　セメントペースト試料の材料 245
表 4-2- 5　セメントペースト試料の構成割合 245
表 4-2- 6　模擬地下水の化学組成 248
表 4-2- 7　FGB-2 及び FGB-3 ボーリング孔の実地下水の分析結果 250
表 4-2- 8　試験に使用した浸漬溶液の化学組成 254
表 4-2- 9　微小部エックス線回折（μXRD）分析条件 257
表 4-2- 10　FGB-2_167.70～171.78 m　ペースト試料 10 箇月浸漬　μXRD 測定結果 261
表 4-2- 11　FGB-2_214.75～220.52 m　ペースト試料 10 箇月浸漬　μXRD 測定結果 261
表 4-2- 12　模擬地下水に 3 箇月間浸漬した試料の硬度測定結果（kN/mm2） 265
表 4-2- 13　実地下水に 10 箇月間浸漬した試料の硬度測定結果（kN/mm2） 265
表 4-2- 14　人工海水　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm2） 266
表 4-2- 15　海水 B　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm2） 266
表 4-2- 16　海水 G　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm2） 267
表 4-2- 17　降水 A　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm2） 267
表 4-2- 18　降水 D+F　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm2） 268
表 4-2- 19　FGB-2_167.70～171.78 m　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm2） 268
表 4-2- 20　FGB-2_214.75～220.52 m　ペースト試料 3 箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm2） 269
表 4-2- 21　SEM 反射電子像によるセメントペースト試料の空隙率の測定結果 287
表 4-2- 22　接液面近傍の元素組成分布測定結果と硬度低下率 290
表 4-2- 23　吹付けコン試料による浸漬試験の水準 306
表 4-2- 24　セグメント試料による浸漬試験の水準 306
表 4-2- 25　コンクリート表面への二次鉱物生成の確認試験の試験水準 307
表 4-2- 26　吹付けコンのベースコンクリートの配合 309
表 4-2- 27　セグメントの配合 309
表 4-2- 28　吹付けコンのフロースルー試験の試験条件 311
表 4-2- 29　セグメントの浸漬試験条件 311
表 4-2- 30　コンクリート表面への二次鉱物生成の確認試験の試験条件 312
表 4-2- 31　降水 A　コンクリート試料 10 箇月浸漬　μXRD 測定結果 317

表 4-2- 32　FGB-2_167.70～171.78 m　コンクリート試料 10 箇月浸漬　μXRD 測定結果 317
表 4-2- 33　人工海水流速変更　コンクリート試料 10 箇月浸漬　μXRD 測定結果..... 318
表 4-2- 34　浸漬試験 10 カ月後の硬度測定結果（kN/mm2） 322
表 4-2- 35　降水 A　コンクリート試料 10 箇月浸漬　ヤング率測定結果（kN/mm2） . 322
表 4-2- 36　FGB-2_167.70～171.78 m　コンクリート試料 10 箇月浸漬　ヤング率測定結果（kN/mm2） 323
表 4-2- 37　人工海水流速変更　コンクリート試料 10 箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm2） 323
表 4-2- 38　 SEM 反射電子像によるコンクリート試料の空隙率の測定結果..... 348
表 4-2- 39　コンクリート表面への二次鉱物生成確認の結果（目視観察） 352
表 4-2- 40　解析コードの検証と外部析出層の影響を検討するための計算条件 359
表 4-2- 41　OPC 及び BFSC の化学組成及び密度 359
表 4-2- 42　セグメント OPC 及びセグメント BFSC の配合及び空気量..... 359
表 4-2- 43　OPC の鉱物組成及び反応率..... 360
表 4-2- 44　BFSC の鉱物組成及び反応率..... 360
表 4-2- 45　計算に考慮した液相イオン種、拡散係数及び境界条件..... 361
表 4-2- 46　各鉱物の反応式とその熱力学的平衡定数 - 1..... 362
表 4-2- 47　各鉱物の反応式とその熱力学的平衡定数- 2 363
表 4-2- 48　使用した C-A-S-H 溶解平衡モデルの反応式とその熱力学的平衡定数 364
表 4-2- 49　解析コードの検証と外部析出層の影響を検討するための物質移行解析条件（表面から約 10 mm） 364
表 4-2- 50　解析コードの検証と外部析出層の影響を検討するための物質移行解析条件 365
表 4-2- 51　セグメント OPC の 10 箇月降水 A 浸漬の鉱物相　 試験結果と解析結果の比較 370
表 4-2- 52　セグメント BFSC の 10 箇月降水 A 浸漬の鉱物相　 試験結果と解析結果の比較..... 374
表 4-2- 53　セグメント OPC の 10 箇月人工海水浸漬の鉱物相　 試験結果と解析結果の比較..... 378
表 4-2- 54　セグメント BFSC の 10 箇月人工海水浸漬の鉱物相　 試験結果と解析結果の比較 382
表 4-2- 55　セグメント OPC の 10 箇月 FGB-2_167.70～171.78 m 浸漬の鉱物相　 試験結果と解析結果の比較..... 386
表 4-2- 56　セグメント BFSC の 10 箇月 FGB-2_167.70～171.78 m 浸漬の鉱物相　 試験結果と解析結果の比較..... 390
表 4-2- 57　Google Scholar を用いた外部析出層を考慮した文献調査の検索条件 392

表 4-2- 58　海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（1/8）..... 398
表 4-2- 59　海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（2/8）..... 399
表 4-2- 60　海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（3/8）..... 400
表 4-2- 61　海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（4/8）..... 401
表 4-2- 62　海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（5/8）..... 402
表 4-2- 63　海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（6/8）..... 403
表 4-2- 64　海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（7/8）..... 404
表 4-2- 65　海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（8/8）..... 405
表 4-2- 66　コンクリートの強度予測モデル 411
表 4-2- 67　 モデルのインプットデータ及び検証データの取得のための分析項目 415
表 4-2- 68　強度予測モデル検証用の試験体の作製条件..... 417
表 4-2- 69　強度予測モデル検証用の試験体の作製に使用した材料..... 417
表 4-2- 70　作製した強度予測モデル検証用の試験体の配合..... 417
表 4-2- 71　セメントの粒度分布測定条件..... 419
表 4-2- 72　セメントの化学組成、ig.loss 421
表 4-2- 73　セメントの鉱物組成測定条件..... 423
表 4-2- 74　セメントの鉱物組成測定結果..... 423
表 4-2- 75　骨材の粒度分布..... 425
表 4-2- 76　粗骨材の点載荷試験結果..... 427
表 4-2- 77　ig.loss 及び insol.測定結果..... 429
表 4-2- 78　ペーストの鉱物組成測定条件..... 431
表 4-2- 79　ペーストの鉱物組成測定結果..... 431
表 4-2- 80　ペーストのセメント鉱物相の反応率..... 431
表 4-2- 81　ペースト、モルタル、コンクリートの圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比 438
表 4-2- 82 鉱物組成の比較..... 441
表 4-2- 83　セメントペーストの解析に用いた値..... 443
表 4-2- 84　試験値と推定値の比較..... 451
表 4-3- 1　緩衝材の安全機能の確保に必要な緩衝材の設計要件の確認方法 463
表 4-3- 2　通水試験の計画..... 467
表 4-3- 3　沿岸部実地下水（FGB-2 孔_167.70~171.78 m）の組成 470
表 4-3- 4　分散系でのベントナイトのイオン交換反応試験ケース..... 470
表 4-3- 5　クニピア F のセルへの充填量（作製数 各ケース n=2） 473
表 4-3- 6　通水試験条件 473
表 4-3- 7　通水試験結果から算出したイオン交換選択係数（logKGT） 478
表 4-3- 8　各平衡溶液から算出されたイオン交換選択係数一覧（バッチ試験） 480
表 4-3- 9　固相分析を基に算出した陽イオン交換選択係数..... 481

表 4-3- 10　ポアソン-ボルツマン方程式から求めた Ca/Na 選択係数と通水試験結果における Ca/Na 選択係数の比較 491
表 4-3- 11 再現解析の対象とするケース 495
表 4-3- 12　飽和・不飽和浸透流解析用パラメータ（1/2） 498
表 4-3- 13　飽和・不飽和浸透流解析用パラメータ（2/2） 499
表 4-3- 14　「②イオン交換選択係数の取得」の通水試験の再現解析移流分散用解析パラメータ 501
表 4-3- 15　「②イオン交換選択係数の取得」の通水試験の再現解析に用いたイオン交換選択係数 501
表 4-3- 16　再現解析に用いた初期状態におけるイオン交換サイトの組成表 501
表 4-3- 17　圧力境界条件 513
表 4-3- 18　透水 - 膨潤圧試験の再現解析における飽和・不飽和浸透流解析用パラメータ 514
表 4-3- 19　透水 - 膨潤圧試験の再現解析に用いたイオン交換選択係数 515
表 4-3- 20　透水 - 膨潤圧試験の再現解析に用いた初期状態におけるイオン交換サイトの組成 515
表 4-3- 21 膨潤量試験の試験ケース 520
表 4-3- 22　沿岸部実地下水の組成 522
表 4-3- 23　供試体の諸元 523
表 4-3- 24 試験ケースにおける最大膨潤率表 527
表 4-4- 1　本研究に関わる全体の試験計画 537
表 4-4- 2　人工海水（マリンアート SF-1）の成分表 540
表 4-4- 3　要素試験における各供試体条件 543
表 4-4- 4　令和 4 年度までの要素試験（力学）における実施状況の一覧 545
表 4-4- 5　せん断透水試験の試験条件 553
表 4-4- 6　締固め時の含水比 561
表 4-4- 7　本研究で使用したベントナイトの基礎物性 563
表 4-4- 8　人工海水の作製濃度および pH 564
表 4-4- 9　透水膨潤圧試験の各ケースにおけるイオン交換の状態 576
表 4-4- 10　せん断透水試験の各ベントナイト供試体の初期乾燥密度 582
表 4-4- 11　せん断強度の一覧 591
表 4-4- 12　三軸透水試験における目標乾燥密度と実測乾燥密度 623
表 4-4- 13　予備実験におけるセメント-海水反応液の溶液組成 632
表 4-4- 14　人工海水と試験溶液の組成 633
表 4-4- 15　ブランク試験後の反応溶液の溶液組成 636
表 4-4- 16　KV を用いたバッチ試験後の反応溶液の溶液組成 637

表 4-4- 17　SKV を用いたバッチ試験後の反応溶液の溶液組成……..638
表 4-4- 18　KB を用いたバッチ試験後の反応溶液の溶液組成……639
表 4-4- 19　SKB を用いたバッチ試験後の反応溶液の溶液組成……..640
表 4-4- 20　XRD 分析による同定結果……643
表 4-4- 21　EG 処理後の d 値……650
表 4-4- 22　加熱前後の d 値……652
表 4-4- 23　静的場における遠心場の相似測……658
表 4-4- 24 遠心力模型試験で用いた緩衝材の材料と条件……668
表 4-4- 25 キャリブレーション用試料の物理密度と平均値、標準偏差……680
表 4-4- 26 令和 3 年度の試料及び試験条件(令和 3 年度成果報告書より引用)……...688
表 4-4- 27　解析の対象とする実験ケース……708
表 4-4- 28　対象とする緩衝材の諸条件一覧……713
表 4-4- 29　基本的なケース検討で使用する力学特性の一覧……714
表 4-4- 30　オーバーパック模型に設定した力学特性……714
表 4-4- 31　基本的な検討ケースで使用する水理特性の一覧……715
表 4-4- 32　各緩衝材条件における初期飽和度の一覧……716
表 4-4- 33　基本的な検討ケースで使用する伝熱特性の一覧……717
表 4-4- 34　透水係数と固有透過度の関係についての純水と海水の違い……718
表 4-4- 35　潜熱の温度依存性についての純水と海水の違い……718
表 4-4- 36 密度および比熱に関する純水と海水の違い……...718
表 4-4- 37　Case 2 に対する追加検討ケース一覧……..720
表 4-4- 38　Case 3 に対する追加検討ケース一覧……..720
表 4-4- 39　Case 4 に対する追加検討ケース一覧……..721

５－４　写真目次

写真 3-1- 1 防潮堤からの風景（上）と FGB-2 孔の櫓..... 121
写真 3-3- 1　令和 3 年度と 4 年度の水中スピーカー（大型）の外観の比較..... 177
写真 3-3- 2　発振器固定フレーム..... 179
写真 3-3- 3　固定フレームに取り付けられた水中スピーカー..... 179
写真 3-3- 4　大型水槽に沈めた水中スピーカー（測定中）..... 179
写真 3-3- 5　制作した水中翼..... 182
写真 3-3- 6　曳航試験の様子（曳航時）..... 184
写真 3-3- 7　使用した水中翼（左から小、中、大）..... 184
写真 3-3- 8　ブイの状態（左　空気抜き前、右　空気抜き後）..... 184
写真 3-3- 9　使用した水中スピーカー（左：大型、右：小型）..... 189
写真 3-3- 10　使用したストリーマーケーブル（左：48ch、右：24ch）..... 189
写真 3-3- 11　使用した GPS（左：船位測定用、右：受信器位置の測定用..... 189

（様式２）

二次利用未承諾リスト

報告書の題名：
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
（沿岸部処分システム評価確証技術開発）成果報告書

委託事業名：
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

受注事業者名：
国立研究開発法人　産業技術総合研究所
公益財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター
一般財団法人　電力中央研究所

頁	図表番号	タイトル
9	図2-1- 1	繰り返しアプローチの概念図
10	図2-1- 2	本研究のフローチャート
12	図2-1- 3	研究対象地域の地下水流動の概念図
17	図2-1- 8	観測値の位置
18	図2-1- 9	透水係数の逆解析で使用した解析モデル（2021年度）
22	図2-1- 10	相関係数マトリクス
26	図2-1- 11	PilotPointおよび観測値の配置図
28	図2-1- 12	数値実験の逆解析結果
29	図2-1- 13	観測値と計算値の比較（数値実験）
29	図2-1- 14	逆解析中の目的関数の推移（数値実験）
31	図2-1- 15	逆解析中の目的関数の推移
31	図2-1- 16	透水係数分布の変化
32	図2-1- 17	同定率の概念図
32	図2-1- 18	PilotPointごとに評価された同定率のマッピング
39	図2-1- 21	グローバル感度解析で使用する解析モデル
40	図2-1- 22	グローバル感度解析で使用した観測値
42	図2-1- 23	Morris法における透水係数のサンプリング箇所
43	図2-1- 24	軌道の数とEEの絶対値の平均（μ*）
44	図2-1- 25	Morris法の評価結果
46	図2-1- 26	サンプリング数とSobol'の感度指標
47	図2-1- 27	Sobol'法の評価結果
49	図2-1- 28	グローバル感度解析と逆解析結果の概要
51	図2-1- 29	解析で考慮した海水準変動
52	図2-1- 30	単一地形勾配の2次元鉛直モデル
54	図2-1- 31	相対塩水体積および平均滞留時間を計算する領域の概要図
56	図2-1- 32	地形勾配2%モデルの解析結果（24万年～36万年）
57	図2-1- 33	地形勾配5%モデルの解析結果（24万年～36万年）
58	図2-1- 34	相対塩水体積（RSV）の経時変化
59	図2-1- 35	平均滞留時間（MRT）の経時変化
67	図2-2-2	沿岸部周辺の淡水系地下水と塩水系地下水の流動イメージ
71	図2-2-4	3つの水文地質単元（モデルレイヤー）
71	図2-2-5	完新統基底面標高分布図
72	図2-2-6	上部更新統基底面標高分布図
72	図2-2-7	3次元モデルの鳥瞰図（縦：横＝2：1）
75	図2-2-8	2次元モデルの地質分布（縦：横＝3：1）
76	図2-2-9	昨年度の2-2節でおこなわれた解析領域（紫色の枠）と、本研究の解析領域（赤色の点線）。
78	図2-2-10	基本モデルでの解析結果（塩分濃度）
79	図2-2-11	基本モデルでのFGB-2孔周辺の解析結果（塩分濃度）
80	図2-2-12	基本モデルでの解析結果（地下水年代）
81	図2-2-13	基本モデルでのFGB-2孔周辺の解析結果（地下水年代）
82	図2-2-14	基本モデルでの解析結果（地下水の速さ）
83	図2-2-15	基本モデルでのFGB-2孔周辺の解析結果（地下水の速さ）
86	図2-2-16	基本モデルおよび完新統の透水係数を8倍にしたケースでの解析結果の比較（塩分濃度）

87	図2-2-17	基本モデルおよび完新統の透水係数を8倍にしたケースでの解析結果の比較（地下水年代）
88	図2-2-18	基本モデルおよび完新統の透水係数を8倍にしたケースでの解析結果の比較（地下水の速さ）
89	図2-2-19	基本モデルおよび完新統の透水係数を8倍にしたケースでの解析結果の比較
90	図2-2-20	基本モデルおよび上部更新統の透水係数を5倍にしたケースでの解析結果の比較（塩分濃度）
91	図2-2-21	基本モデルおよび上部更新統の透水係数を5倍にしたケースでの解析結果の比較（地下水年代）
92	図2-2-22	基本モデルおよび上部更新統の透水係数を5倍にしたケースでの解析結果の比較
94	図2-2-23	完新統の透水係数に異方性を与えた場合（Kh ＝ 1.0×10-4 m/s、Kv = 1.0×10-5m/s）FGB-2孔周辺の変化。
95	図2-2-24	基本モデルおよび上部更新統の透水係数に異方性を与えた場合（Kh＝1.0×10-5 m/s、Kv=1.0×10-6 m/s）（塩分濃度）
96	図2-2-25	上部更新統の透水係数に異方性を与えた場合（Kh＝1.0×10-5 m/s、Kv=1.0×10-6
98	図2-2-26	基本モデルおよび分散長を1/10にしたケース（塩分濃度）
99	図2-2-27	基本モデルおよび分散長を1/10にしたケースでの解析結果の比較
100	図2-2-28	基本モデルおよび分散長を1/10にしたケースでの解析結果の比較
102	図2-2-29	3次元モデルにおける塩淡境界位置（上：地質、下：塩分濃度）
103	図2-2-30	FGB-2孔を通る断面における3次元密度流解析初期モデルによる塩分濃度分布（上）と地下水年代分布（上から2番目）、流さの分布（上から三番目）。
104	図2-2-31	3次元密度流解析（基本モデル，FGB-2を通る断面の解析結果）
105	図2-2-32	SKB孔を通る断面における3次元密度流解析初期モデルによる塩分濃度分布（上段）と地下水年代分布（中段）。
106	図2-2-33	3次元密度流解析（基本モデル，SKB孔を通る断面の解析結果）
108	図2-2-34	3次元密度流解析による塩分濃度分布（FGB-2を通る断面の解析結果；　上：基本モデル，下：変更ケース）
109	図2-2-35	3次元密度流解析による塩分濃度分布（SKBを通る断面の解析結果；　上：基本モデル，下：変更ケース）
110	図2-2-36	塩淡境界と地下水流動方向（GL-300m）
111	図2-2-37	塩淡境界と地下水流動方向（GL-800 m）
117	図3-1-1	地下地質ごとの地下水の区分
117	図3-1-2	調査地点FGB-2孔の位置図
118	図3-1-3	駿河湾における海水中の222Rn濃度分布
120	図3-1-4	駿河湾における音波の散乱域（産業技術総合研究所，2013に加筆）
120	図3-1-5	SKB孔における水質の深度プロファイル
121	図3-1-6	水質や地下水年代から想定される駿河湾沿岸部における
124	図3-1-7	FGB-2孔におけるケーシングプログラム
125	図3-1-8	ボーリングコア
126	図3-1-9	ボーリングコア
127	図3-1-10	ボーリングコア（本事業実施分：その1）
128	図3-1-11	ボーリングコア（本事業実施分：その2）
130	図3-1-12	FGB-2孔における孔内物理検層結果
131	図3-1-13	FGB-2孔における孔内物理検層結果（400～800m）
133	図3-1-14	FGB-2孔水理試験の装置の概要
135	図3-1-15	FGB-3孔におけるケーシングプログラム
139	図3-1-16	比重の違いによる試験溶液の移動イメージ
142	図3-1-17	FGB-3孔　17.68 m~25.59 m水理試験の装置の概要
142	図3-1-18	FGB-3孔　112.28 m~113.28 m水理試験（2回目）の装置の概要
143	図3-1-19	FGB-3孔　ダブルパッカーを用いた水理試験の装置の概要
148	図3-1-20	地下水の実水頭、淡水水頭、透水係数
149	図3-1-21	FGB-2およびFGB-3から得られた地下水の水質（その1）
150	図3-1-22	GB-2およびFGB-3から得られた地下水の水質（その2）
152	図3-1-23	地質断面図から推定された不透水基盤深度
153	図3-1-24	当初推定していた地質図
154	図3-1-25	平成25年度深部反射法結果と深部・浅部統合解析結果の比較
159	図 3-2-1	ROVと高精度音響カメラを用いた探査の測線配置図
162	図 3-2-2	ROVと高精度音響カメラで推定した湧出量の分布図
163	図 3-2-3	水試料の炭素同位体およびV濃度
165	図 3-2-4	文献情報に基づきGISで解析した集水域、表層地質及び海底地形図
168	図 3-2-5	集水域内の主要な表層地質、傾斜角及び海底地形勾配の関係
169	図 3-2-6	海底湧出地下水に関する文献の調査地域
175	図 3-3-1	振動試験の方法（イメージ図）
176	図 3-3-2	試験に用いた大型水槽の概要

178	図 3-3-3	振動試験結果の比較
178	図 3-3-4	水中スピーカーの構造
180	図 3-3-5	試験レイアウト
182	図 3-3-6	性能評価試験の検証結果
184	図 3-3-7	水中スピーカーの振動面にかかる水圧の影響
184	図 3-3-8	振動面にかかる水圧低減の方法
185	図 3-3-9	曳航試験における発振器と受振器のレイアウト
187	図 3-3-10	大型スピーカーの性能評価試験結果
187	図 3-3-11	小型スピーカーの性能評価試験結果
188	図 3-3-12	疑似ランダム波の受振波形（相関計算後）
193	図 3-3-13	幌延町沿岸海域における測線位置
196	図 3-3-14	データフロー処理図（左：2次元記録、右：3次元記録）
200	図 3-3-15	2D-01測線の時間断面記録から推定された3つの境界線
201	図 3-3-16	2D-01測線の時間断面図と陸域のボーリング柱状図との比較
202	図 3-3-17	陸域の浅部反射法データとの連続性の検討
203	図 3-3-18	海域における電磁淡データと陸域ボーリングにおける間隙水のCl-濃度変化との比較
204	図 3-3-19	2D-01測線と2D-03測線の比較（黒の点線は不連続構造の位置を示す）
208	図 3-3-20	2D-01測線と2D-02測線の比較（黒の点線は不連続構造の位置を示す）
206	図 3-3-21	2D-01測線と3Dキューブの比較（青矢印は不整合の位置）
207	図 3-3-22	3Dキューブのタイムスライスの比較（左30ms，中央40ms、右50ms）
209	図 3-3-23	調査測線の位置図（森ほか，2015；阿部・青柳，2006に加筆）
213	図 3-3-24	測定結果の比較（KT2-1測線）
214	図 3-3-25	測定結果の比較（KT2-2測線）
215	図 3-3-26	3D測線における昨年度の結果との比較
216	図 3-3-27	模擬3D処理の結果（3Dキューブ）
217	図 3-3-28	受振器の形状の違いによる測定結果の比較
219	図 3-3-29	既存測定結果との比較（黄線は多重反射面）　上：測線KT2-1、下：測線KN3（森ほか，2015）
220	図 3-3-30	既存測定結果との比較　上：測線KT2-10、下：測線KN2（森ほか，2015）
221	図 3-3-31	既存測定結果との比較
225	図 3-3-32	フルサイクルとハーフサイクルの疑似ランダム波（Nakamura et al., 2015）
225	図 3-3-33	複数の漁船を利用した測定システム
231	図 4-1-1	沿岸部処分において構成要素に作用する外的要因の整理（研究の位置づけ等を整理するために作成したイメージ）
232	図 4-1-2	支保工において想定される状態変遷の一例（研究の位置づけ等を整理するために作成したイメージ）
232	図 4-1-3	緩衝材において想定される状態変遷の一例図（研究の位置づけ等を整理するために作成したイメージ）
235	図 4-2-1	坑道の支保工及び覆工の状態変遷と維持期間のイメージ
239	図 4-2-2	今フェーズの検討課題と研究のアプローチ及び成果の目標
243	図 4-2-3	浸漬試験の模式図
249	図 4-2-4	分類した地下水の化学組成
252	図 4-2-5	希釈した人工海水と比較したFGB-3_113 mのヘキサダイヤグラム
254	図 4-2-6	コンクリートの力学的特性に影響を与える地下水の成分の整理
261	図 4-2-7	ペースト試料の10箇月間浸漬後の低アルカリ性化領域の測定結果
263	図 4-2-8	FGB-2_167.70～171.78 m　ペースト試料10箇月浸漬　?XRD測定結果
264	図 4-2-9	FGB-2_214.75～220.52 m　ペースト試料10箇月浸漬　?XRD測定結果
272	図 4-2-10	人工海水　ペースト試料3箇月浸漬　ヤング率測定結果
273	図 4-2-11	海水B　ペースト試料3箇月浸漬　ヤング率測定結果
274	図 4-2-12	海水G　ペースト試料3箇月浸漬　ヤング率測定結果
275	図 4-2-13	降水A　ペースト試料3箇月浸漬　ヤング率測定結果
276	図 4-2-14	降水D+F　ペースト試料3箇月浸漬　ヤング率測定結果
277	図 4-2-15	FGB-2_167.70～171.78 m　ペースト試料10箇月浸漬　ヤング率測定結果
278	図 4-2-16	FGB-2_214.75～220.52 m　ペースト試料10箇月浸漬　ヤング率測定結果
280	図 4-2-17	FGB-2_167.70～171.78 m　吹付け想定OPC　10箇月浸漬　EPMA測定結果
281	図 4-2-18	FGB-2_167.70～171.78 m　吹付け想定BFSC　10箇月浸漬　EPMA測定結果
282	図 4-2-19	FGB-2_167.70～171.78 m　セグメント想定OPC　10箇月浸漬　EPMA測定結果
283	図 4-2-20	FGB-2_167.70～171.78 m　セグメント想定BFSC　10箇月浸漬　EPMA測定結果
284	図 4-2-21	FGB-2_214.75～220.52 m　吹付け想定OPC　10箇月浸漬　EPMA測定結果
285	図 4-2-22	FGB-2_214.75～220.52 m　吹付け想定BFSC　10箇月浸漬　EPMA測定結果
286	図 4-2-23	FGB-2_214.75～220.52 m　セグメント想定OPC　10箇月浸漬　EPMA測定結果
287	図 4-2-24	FGB-2_214.75～220.52 m　セグメント想定BFSC　10箇月浸漬　EPMA測定結果
290	図 4-2-25	ペースト試料の反射電子像の低輝度面積の変化率と硬度の変化率の関係

293	図 4-2-26	人工海水　3箇月浸漬　吹付け想定OPCの微細領域元素分布測定結果
294	図 4-2-27	海水B　3箇月浸漬　吹付け想定OPCの微細領域元素分布布測定結果
295	図 4-2-28	海水G　3箇月浸漬　吹付け想定OPCの微細領域元素分布布測定結果
296	図 4-2-29	降水A　3箇月浸漬　吹付け想定OPCの微細領域元素分布測定結果
297	図 4-2-30	FGB-2_167.70～171.78 m　10箇月浸漬　吹付け想定OPCの微細領域元素分布測定結果
298	図 4-2-31	FGB-2_167.70～171.78 m　10箇月浸漬　吹付け想定BFSCの微細領域元素分布測定結果
299	図 4-2-32	FGB-2_214.75～220.52 m　10箇月浸漬　吹付け想定OPCの微細領域元素分布測定結果
300	図 4-2-33	FGB-2_214.75～220.52 m　10箇月浸漬　吹付け想定BFSCの微細領域元素分布測定結果
303	図 4-2-34	地下水化学組成が硬度に与える影響（吹付けOPC）
303	図 4-2-35	地下水化学成分が硬度に与える影響（吹付け想定BFSC）
304	図 4-2-36	地下水化学成分が硬度に与える影響（セグメント想定OPC）
304	図 4-2-37	地下水化学成分が硬度に与える影響（セグメント想定BFSC
306	図 4-2-38	各部材で想定した環境条件
315	図 4-2-39	フロースルー試験の模式図
315	図 4-2-40	浸漬試験の模式図
315	図 4-2-41	コンクリート表面への二次鉱物生成の確認試験の模式図
317	図 4-2-42	コンクリート試料の10箇月間浸漬後の低アルカリ性化領域の評価結果
319	図 4-2-43	降水A　コンクリート試料10箇月浸漬　?XRD測定結果
320	図 4-2-44	FGB-2_167.70～171.78 m
321	図 4-2-45	人工海水流速変更　コンクリート試料10箇月浸漬　?XRD測定結果
326	図 4-2-46	降水A　コンクリート試料10箇月浸漬　ヤング率測定結果
327	図 4-2-47	FGB-2_167.70～171.78 m　コンクリート試料10箇月浸漬　ヤング率測定結果
328	図 4-2-48	人工海水流速変更　コンクリート試料10箇月浸漬　ヤング率測定結果
330	図 4-2-49	降水A　吹付けコンOPC　10箇月浸漬　EPMA測定結果
331	図 4-2-50	降水A　吹付けコンBFSC　10箇月浸漬　EPMA測定結果
332	図 4-2-51	降水A　セグメントOPC　10箇月浸漬　EPMA測定結果
333	図 4-2-52	降水A　セグメントBFSC　10箇月浸漬　EPMA測定結果
334	図 4-2-53	FGB-2_167.70～171.78 m　吹付けコンOPC　10箇月浸漬　EPMA測定結果
335	図 4-2-54	FGB-2_167.70～171.78 m　吹付けコンBFSC　10箇月浸漬　EPMA測定結果
336	図 4-2-55	FGB-2_167.70～171.78 m　セグメントOPC　10箇月浸漬　EPMA測定結果
337	図 4-2-56	FGB-2_167.70～171.78 m　セグメントBFSC　10箇月浸漬　EPMA測定結果
338	図 4-2-57	人工海水流速変更　吹付けコンOPC　10箇月浸漬　EPMA測定結果
339	図 4-2-58	人工海水流速変更　吹付けコンBFSC　10箇月浸漬　EPMA測定結果
340	図 4-2-59	降水A　コンクリート試料10箇月浸漬　EPMA測定結果 平均濃度プロファイル（1/3）
341	図 4-2-60	降水A　コンクリート試料10箇月浸漬　EPMA測定結果 平均濃度プロファイル（2/3）
342	図 4-2-61	降水A　コンクリート試料10箇月浸漬　EPMA測定結果 平均濃度プロファイル（3/3）
343	図 4-2-62	FGB-2_167.70～171.78 m　コンクリート試料10箇月浸漬　EPMA測定結果 平均濃度プロファイル（1/3）
344	図 4-2-63	FGB-2_167.70～171.78 m　コンクリート試料10箇月浸漬　EPMA測定結果 平均濃度プロファイル（2/3）
345	図 4-2-64	FGB-2_167.70～171.78 m　コンクリート試料10箇月浸漬　EPMA測定結果 平均濃度プロファイル（3/3）
346	図 4-2-65	人工海水（流速早い）コンクリート試料10箇月浸漬　EPMA測定結果 平均濃度プロファイル（1/3）
347	図 4-2-66	人工海水（流速早い）コンクリート試料10箇月浸漬　EPMA測定結果 平均濃度プロファイル（2/3）
348	図 4-2-67	人工海水（流速早い）コンクリート試料10箇月浸漬　EPMA測定結果 平均濃度プロファイル（3/3）
351	図 4-2-68	コンクリートの反射電子像の強度低下領域の面積比と硬度の変化率の関係
353	図 4-2-69	コンクリート表面への二次鉱物生成確認の結果（目視観察）
356	図 4-2-70	地下水化学成分が硬度に与える影響（10箇月浸漬　吹付けコンOPC）
356	図 4-2-71	地下水化学成分が硬度に与える影響（10箇月浸漬　吹付けコンBFSC）
357	図 4-2-72	地下水化学成分が硬度に与える影響（10箇月浸漬　セグメントOPC）
357	図 4-2-73	地下水化学成分が硬度に与える影響（10箇月浸漬　セグメントBFSC）
359	図 4-2-74	相平衡多元素移動計算コードの模式図
369	図 4-2-75	降水A10箇月浸漬　セグメントOPC　EPMA測定結果と解析結果の比較

370	図 4-2-76	降水A10箇月浸漬　セグメントOPC　EPMA測定結果と解析結果の比較 （石灰石骨材のCaの影響を補正）
371	図 4-2-77	セグメントOPCの10箇月降水A浸漬　コンクリートの組成解析結果
374	図 4-2-78	降水A10箇月浸漬　セグメントBFSC　EPMA測定結果と解析結果の比較 （石灰石骨材のCaの影響を補正）
375	図 4-2-79	セグメントBFSCの10箇月降水A浸漬　コンクリートの組成解析結果
378	図 4-2-80	人工海水10箇月浸漬セグメントOPC　EPMA測定結果と解析結果の比較 （石灰石骨材のCaの影響を補正）
379	図 4-2-81	セグメントOPCの10箇月人工海水浸漬　コンクリートの組成解析結果
382	図 4-2-82	人工海水10箇月浸漬セグメントBFSC　EPMA測定結果と解析結果の比較（石灰石骨材のCaの影響を補正）
383	図 4-2-83	セグメントBFSCの10箇月人工海水浸漬　コンクリートの組成解析結果
386	図 4-2-84	FGB-2_167.70～171.78 m10箇月浸漬セグメントOPC　EPMA測定結果と解析結果の比較（石灰石骨材のCaの影響を補正）
387	図 4-2-85	セグメントOPCの10箇月FGB-2_167.70～171.78 m浸漬　コンクリートの組成解析結果
388	図 4-2-86	μXRDの分析箇所（例）
390	図 4-2-87	FGB-2_167.70～171.78 m10箇月浸漬セグメントBFSC　EPMA測定結果と解析結果の比較（石灰石骨材のCaの影響を補正）
391	図 4-2-88	セグメントBFSCの10箇月FGB-2_167.70～171.78 m浸漬　コンクリートの組成解析結果
398	図 4-2-89	外部析出層の設定イメージ図
415	図 4-2-90	VCCTLモデルによる水和後のセメントペーストの 三次元的イメージデータの例
415	図 4-2-91	コンクリートの強度予測モデルの構築方法
417	図 4-2-92	VCCTLモデルによる強度予測モデルの検討フロー
421	図 4-2-93	セメントの粒度分布の測定結果
429	図 4-2-94	粗骨材の点載荷試験結果
431	図 4-2-95	切断後のペースト（上半分）
435	図 4-2-96	モルタルのX線CT測定結果（左：断面、三次元画像）
437	図 4-2-97	乾燥前のコンクリートのX線CT測定結果
437	図 4-2-98	乾燥後のコンクリート（打設面側）のX線CT測定結果
438	図 4-2-99	乾燥後のコンクリート（底面側）のX線CT測定結果
442	図 4-2-100	VCCTLによる水和反応の解析結果（左：反応前、右：反応後）
442	図 4-2-101	VCCTLによるセメントの水和解析結果
446	図 4-2-102	セメントペーストの解析モデル
446	図 4-2-103	硬化セメントペーストの応力ひずみ曲線（左：圧縮、右：引張）
446	図 4-2-104	引張時の応力ひずみ曲線
448	図 4-2-105	モルタルの解析モデル（青：砂、赤：セメントペースト相）
448	図 4-2-106	モルタルの応力ひずみ曲線（左：圧縮、右：引張）
448	図 4-2-107	引張時の応力ひずみ曲線
450	図 4-2-108	コンクリートの解析モデル（青：骨材、赤：モルタル相）
450	図 4-2-109	コンクリートの一軸圧縮時の応力ひずみ計算結果
451	図 4-2-110	コンクリートの一軸圧縮時のひずみと損傷の関係（赤：損傷）
477	図4-3- 4	K Cl-NaCl混合溶液、イオン強度0.125（ケース⑥）の分析結果
477	図4-3- 5	CaCl2-NaCl混合溶液、イオン強度0.5（ケース⑧）の分析結果
477	図4-3- 6	沿岸部実地下水FGB2孔_167.70～171.78m（ケース⑫）の分析結果
480	図4-3- 7	イオン強度とイオン交換選択係数の関係（通水試験）
482	図4-3- 8	イオン強度とイオン交換選択係数の関係（バッチ試験）
483	図4-3- 9	層間陽イオン量の分析結果（バッチ試験試料）
483	図4-3- 10	各算出方法による陽イオン交換選択係数結果の比較
485	図4-3- 11	圧縮系及び分散系におけるイオン交換選択係数とイオン強度の関係
488	図4-3- 12	乾燥密度とCa/Naの選択係数logKGTの関係（イオン強度0.5 mol/L）
488	図4-3- 13	乾燥密度による層間の電位分布の違い
489	図4-3- 14	乾燥密度による層間陽イオンの濃度分布
489	図4-3- 15	乾燥密度とCa-Naイオン交換選択係数の関係（ポアソン-ボルツマン方程式と分子動力学法の比較）
491	図4-3- 16	イオン強度とCa/Naの選択係数logKGTの関係 （乾燥密度1.00Mg/m3,モル濃度比 Ca:Na:Cl = 4:3:11）
491	図4-3- 17	イオン強度とCa-Na選択係数log KGTの関係（ポアソン-ボルツマン方程式と分子動力学法の比較）
502	図4-3- 19	「②イオン交換選択係数の取得」の通水試験の再現解析水分特性曲線と 比透水係数
506	図4-3- 20	排水中のイオン濃度の経時変化
506	図4-3- 21	層間陽イオンの当量分率

507	図4-3- 22	排水中イオン濃度の経時変化及び層間陽イオンの当量分率（ケース④）
507	図4-3- 23	排水中イオン濃度の経時変化及び層間陽イオンの当量分率（ケース⑧）
507	図4-3- 24	排水中イオン濃度の経時変化及び層間陽イオンの当量分率（ケース⑫）
509	図4-3- 25	MgのNaに対するイオン交換選択係数を変更して実施したケース⑩の解析結果（排水中の陽イオン濃度変化）と試験結果の比較
509	図4-3- 26	試験終了時点の解析結果と試験結果（層間陽イオンの当量分率）の比較
511	図4-3- 27	カルサイト溶解を考慮した解析結果と非考慮の解析結果の比較
514	図4-3- 29	載荷空気圧（試験における想定値）
517	図4-3- 30	透水 - 膨潤圧試験の再現解析に使用した水分特性曲線と比透水係数
519	図4-3- 31	試験終了後の吸着陽イオン組成と 通水終了時点（71.8日後）での解析結果との比較
519	図4-3- 32	海水平衡ベントナイトについての試験終了後の吸着陽イオン組成と 平衡時（5,000日後）の解析結果との比較
530	図4-3- 35	膨潤率の経時変化 （試験Ⓔ：Na＋イオン以外の陽イオン種ごとのイオン強度の影響）
530	図4-3- 36	膨潤率と経過変化 （試験Ⓕ：複数の陽イオン種を含むイオン強度の影響）
531	図4-3- 37	膨潤率の経時変化 （Ⓖ 沿岸部実地下水の影響）
531	図4-3- 38	膨潤率の経時変化 （Ⓗ KCl水溶液 イオン強度0.2 初期乾燥密度の影響）
531	図4-3- 39	イオン強度と最大膨潤率の関係 （試験Ⓔ：Na＋イオン以外の陽イオン種ごとのイオン強度の影響）
532	図4-3- 40	イオン強度と最大膨潤率の関係（全試験結果）
532	図4-3- 41	イオン強度と最大膨潤率の関係（1価の陽イオン（Na+,K+）の影響）
532	図4-3- 42	イオン強度と最大膨潤率の関係（２価の陽イオン（Ca2+,Mg2+）の影響）
532	図4-3- 43	イオン強度と最大膨潤率の関係（1価と２価の陽イオンの影響）
532	図4-3- 44	イオン強度と最大膨潤率の関係（試験Ⓖ：沿岸部実地下水の影響）
533	図4-3- 45	イオン強度と最大膨潤率の関係（試験Ⓕ：複数の陽イオン種を含むイオン強度の影響）
533	図4-3- 46	イオン強度と最大膨潤率の関係 （複数の陽イオン（NaCl+CaCl2 混合溶液 NaCl+MgCl2混合溶液 、沿岸実地下水）の影響）
533	図4-3- 47	イオン強度と最大膨潤率の関係 （初期乾燥密度の影響）
550	図 4-4- 1	透水膨潤圧試験装置の概略
552	図 4-4- 2	せん断透水試験装置の概略
552	図 4-4- 3	せん断透水試験装置の写真
553	図 4-4- 4	スリットの調整手順
555	図 4-4- 5	供試体未設置時のスリット幅とトルクおよび透水係数の関係
557	図 4-4- 6	せん断透水試験において透水試験を実施するせん断変位の考え方
557	図 4-4- 7	リングせん断試験の実施フローチャート
561	図 4-4- 8	回転角度とせん断変位の関係
561	図 4-4- 9	供試体に対する通水方向の概略図
562	図 4-4- 10	水平方向の見かけの透水係数に関する通水経路のイメージ
562	図 4-4- 11	リングせん断試験後の供試体の分割方法のイメージと各部位の呼称
563	図 4-4- 12	圧縮成型方向と供試体作製の概念図
563	図 4-4- 13	三軸透水試験機の概略図
565	図 4-4- 14	イオン交換処理前後の浸出陽イオン量
568	図 4-4- 15	ポアボリューム比に対する透水係数の変化
568	図 4-4- 16	ポアボリューム比に対する流出水の水質の変化
569	図 4-4- 17	透水試験後の含水比分布
569	図 4-4- 18	初期試料と人工海水透水後の圧縮成型供試体の浸出陽イオン組成
571	図 4-4- 19	透水試験後の含水比・飽和度分布
572	図 4-4- 20	透水膨潤圧試験後の浸出陽イオン組成
575	図 4-4- 21	人工海水のイオン濃度倍率と平衡膨潤圧の関係
575	図 4-4- 22	人工海水のイオン濃度倍率と透水係数の関係
576	図 4-4- 23	平衡膨潤圧と透水係数の関係
578	図 4-4- 24	クニゲルV1および海水平衡クニゲルV1単体と砂混合土の透水係数の比較
579	図 4-4- 25	透水試験後の含水比分布
581	図 4-4- 26	カオリン粘土供試体の圧縮曲線
581	図 4-4- 27	カオリン粘土供試体のせん断に伴う供試体高さの変化
581	図 4-4- 28	カオリン粘土供試体のせん断に伴うせん断応力の変化
582	図 4-4- 29	せん断に伴うカオリン粘土(イオン交換水)の透水性の変化
453	図 4-4- 30	カオリン粘土(イオン交換水)のせん断後の供試体(側方)の写真(左)およびその拡大写真(右)
583	図 4-4- 31	せん断位置において上下に分割したカオリン供試体のせん断面の写真
586	図 4-4- 32	クニゲルV1－砂混合土(イオン交換水、人工海水1倍)の膨潤圧
586	図 4-4- 33	海水平衡クニゲルV1－砂混合土(人工海水1倍、2倍、3倍)の膨潤圧

587	図 4-4- 34	クニボンド単体(イオン交換水、人工海水1倍)の膨潤圧
587	図 4-4- 35	海水平衡クニボンド単体(人工海水1倍、2倍、3倍)の膨潤圧
588	図 4-4- 36	せん断透水試験および透水膨潤圧試験における平衡膨潤圧の比較
590	図 4-4- 37	各供試体のせん断に伴う供試体高さの変化
591	図 4-4- 38	クニゲルV1－砂混合土のせん断に伴うせん断応力の変化
591	図 4-4- 39	海水平衡クニゲルV1－砂混合土せん断に伴うせん断応力の変化
592	図 4-4- 40	クニボンド単体のせん断に伴うせん断応力の変化
592	図 4-4- 41	海水平衡クニボンド単体のせん断に伴うせん断応力の変化
595	図 4-4- 42	クニゲルV1－砂混合土の有効応力経路
595	図 4-4- 43	海水平衡クニゲルV1－砂混合土の有効応力経路
596	図 4-4- 44	クニボンド単体の有効応力経路
596	図 4-4- 45	海水平衡クニボンド単体の有効応力経路
598	図 4-4- 46	せん断に伴うクニゲルV1－砂混合土の透水性の変化(上:測定値、下:正規化)
599	図 4-4- 47	せん断に伴う海水平衡クニゲルV1－砂混合土の透水性の変化 (上:測定値、下:正規化)
600	図 4-4- 48	せん断に伴うクニボンド単体の透水性の変化
601	図 4-4- 49	せん断に伴う海水平衡クニボンド単体の透水性の変化
603	図 4-4- 50	せん断透水後の各供試体の写真（側方から応力解放された状態で撮影）
604	図 4-4- 51	せん断透水試験後の供試体の含水比分布
605	図 4-4- 52	せん断透水試験後のクニゲルV1－砂混合土(人工海水濃度1倍)の浸出陽イオン分布 (左：浸出陽イオン量、右：浸出陽イオン量の割合)
605	図 4-4- 53	せん断透水試験後の海水平衡クニゲルV1－砂混合土(人工海水濃度1倍)の 浸出陽イオン分布(左：浸出陽イオン量、右：浸出陽イオン量の割合)
605	図 4-4- 54	せん断透水試験後の海水平衡クニゲルV1－砂混合土(人工海水濃度2倍)の 浸出陽イオン分布(左：浸出陽イオン量、右：浸出陽イオン量の割合)
605	図 4-4- 55	せん断透水試験後の海水平衡クニゲルV1－砂混合土(人工海水濃度3倍)の 浸出陽イオン分布
606	図 4-4- 56	せん断透水試験後のクニボンド単体(人工海水濃度1倍)の浸出陽イオン分布 (左：浸出陽イオン量、右：浸出陽イオン量の割合)
606	図 4-4- 57	せん断透水試験後の海水平衡クニボンド単体(人工海水濃度1倍)の 浸出陽イオン分布(左：浸出陽イオン量、右：浸出陽イオン量の割合)
606	図 4-4- 58	せん断透水試験後の海水平衡クニボンド単体(人工海水濃度2倍)の浸出陽イオン分布
606	図 4-4- 59	せん断透水後の各供試体側方のせん断帯付近の写真
610	図 4-4- 60	せん断透水後に凍結乾燥した試料のせん断位置付近の写真
611	図 4-4- 61	せん断後のクニゲルV1－砂混合土(イオン交換水)の供試体断面の
612	図 4-4- 62	せん断後のクニゲルV1－砂混合土(人工海水濃度1倍)の供試体断面の写真
613	図 4-4- 63	せん断後の海水平衡クニゲルV1－砂混合土(人工海水濃度1倍)の供試体断面のSEM観
614	図 4-4- 64	せん断後の海水平衡クニゲルV1－砂混合土(人工海水濃度2倍)の供試体断面の写真
615	図 4-4- 65	せん断後の海水平衡クニゲルV1－砂混合土(人工海水濃度3倍)の供試体断面の写真
616	図 4-4- 66	せん断後のクニボンド単体(イオン交換水)の供試体断面の写真
617	図 4-4- 67	せん断後の海水平衡クニボンド単体(人工海水濃度1倍)の供試体断面の写真
618	図 4-4- 68	せん断後の海水平衡クニボンド単体(人工海水濃度2倍)の供試体断面の写真
619	図 4-4- 69	せん断後のクニゲルV1-砂混合土(イオン交換水)の薄片試料のFE-SEM観察画像
620	図 4-4- 70	せん断後のクニゲルV1-砂混合土(イオン交換水)の薄片試料のFE-SEM観察画像 (電子顕微鏡倍率：80倍)(右)および元素マッピング画像(左)
621	図 4-4- 71	せん断後の海水平衡クニゲルV1-砂混合土(人工海水濃度2倍)の薄片試料の FE-SEM観察画像
622	図 4-4- 72	せん断後の海水平衡クニゲルV1-砂混合土(人工海水濃度2倍)の薄片試料の FE-SEM観察画像
623	図 4-4- 73	せん断後のクニボンド単体(イオン交換水)の薄片試料のFE-SEM観察画像
625	図 4-4- 74	三軸透水試験による圧縮方向に対して鉛直・水平方向の透水係数
643	図 4-4- 76	バッチ試験前後の乾燥質量の変化
644	図 4-4- 77	バッチ試験前後の固相のXRDプロファイル
646	図 4-4- 78	バッチ試験前後のKVやSKVのIRスペクトル
647	図 4-4- 79	バッチ試験前後のKBやSKBのIRスペクトル
649	図 4-4- 80	バッチ試験前後の固相の浸出イオン量
649	図 4-4- 81	バッチ試験前後の固相の浸出陽イオン組成
651	図 4-4- 82	EG処理後のXRDプロファイル
653	図 4-4- 83	加熱前後のXRDプロファイル
658	図 4-4- 84	緩衝材再冠水過程で生じる現象のイメージ
658	図 4-4- 85	遠心力載荷試験装置を用いた模型試験による研究例
676	図 4-4- 94	4条件の温度変化
678	図 4-4- 95	Na-8条件(a)～(c)、Na-9T条件(d)～(f)の遠心力模型試験結果
679	図 4-4- 96	Ca-7(a)～(c)、Ca-8T(d)～(f)の遠心力模型試験結果

681	図 4-4- 97	キャリブレーション用試料のCT画像と測線(赤線)のCT値
682	図 4-4- 98	キャリブレーション用試料の物理密度とCT値の関係
683	図 4-4- 99	Na-9Tの三次元CT画像
684	図 4-4- 100	Na-8の試験後のCT値分布
685	図 4-4- 101	Na-9Tの試験後のCT値分布
686	図 4-4- 102	Ca-7の試験後のCT値分布
687	図 4-4- 103	Ca-8Tの試験後のCT値分布
689	図 4-4- 104	遠心力模型試験後の緩衝材の飽和度分布
691	図 4-4- 105	遠心力模型試験後の緩衝材の飽和度分布(令和3年度成果報告書より引用)
691	図 4-4- 106	遠心力模型試験後の緩衝材の高さごとの浸出陽イオン量の割合
696	図 4-4- 107	Ca型ベントナイトの緩衝材におけるオーバーパック変位挙動の比較
697	図 4-4- 108	模擬廃棄体の加熱によるオーバーパック周囲の緩衝材の飽和度の違い
698	図 4-4- 109	遠心力模型試験後のCT画像と測線のCT値分布
707	図 4-4- 111	LOSTUFにおける緩衝材膨潤モデル
709	図 4-4- 112	対象とした遠心模型試験の概要
711	図 4-4- 113	小型圧力容器の概略図と計測位置
712	図 4-4- 114	軸対象解析に用いる解析メッシュ
713	図 4-4- 115	解析上の境界条件
715	図 4-4- 116	各緩衝材条件における膨潤ひずみと膨潤圧の関係
718	図 4-4- 117	各緩衝材条件における有効粘土密度と透水係数の関係
718	図 4-4- 118	各緩衝材条件における水分特性曲線と相対透水係数
721	図 4-4- 119	各ケースにおける初期応力分布（圧縮を正とする）
723	図 4-4- 120	追加検討を含む各緩衝材条件における有効粘土密度と透水係数の関係
724	図 4-4- 121	クニボンド：純水を対象とする追加検討ケースの膨潤ひずみと膨潤圧の関係
725	図 4-4- 122	各ケースの最終変位分布
726	図 4-4- 123	Case 1のO/P変位の経時変化
726	図 4-4- 124	Case 1の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化
726	図 4-4- 125	Case 1の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化図
727	図 4-4- 126	Case 1の各位置の飽和度の経時変化
727	図 4-4- 127	Case 1の飽和度分布の経時変化
728	図 4-4- 128	Case 1の乾燥密度分布の経時変化
728	図 4-4- 129	Case 1の含水比分布の経時変化図
730	図 4-4- 130	Case 2のO/P変位の経時変化
730	図 4-4- 131	Case 2の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化
730	図 4-4- 132	Case 2の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化
731	図 4-4- 133	Case 2の各位置の飽和度の経時変化
731	図 4-4- 134	Case 2の飽和度分布の経時変化
732	図 4-4- 135	Case 2の乾燥密度分布の経時変化
732	図 4-4- 136	Case 2の含水比分布の経時変化
733	図 4-4- 137	Case 2の温度分布の経時変化
734	図 4-4- 138	Case 3のO/P変位の経時変化
734	図 4-4- 139	Case 3の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化
734	図 4-4- 140	Case 3の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化
735	図 4-4- 141	Case 3の各位置の飽和度の経時変化
735	図 4-4- 142	Case 3の飽和度分布の経時変化
736	図 4-4- 143	Case 3の乾燥密度分布の経時変化
736	図 4-4- 144	Case 3の含水比分布の経時変化
738	図 4-4- 145	Case 4のO/P変位の経時変化
738	図 4-4- 146	Case 4の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化
738	図 4-4- 147	Case 4の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化
739	図 4-4- 148	Case 4の各位置の飽和度の経時変化
739	図 4-4- 149	Case 4の飽和度分布の経時変化
740	図 4-4- 150	Case 4の乾燥密度分布の経時変化
740	図 4-4- 151	Case 4の含水比分布の経時変化
741	図 4-4- 152	Case 4の温度分布の経時変化
742	図 4-4- 153	追加検討ケース(Case 2-1～Case 4-2)の最終変位分布
743	図 4-4- 154	追加検討ケース(Case 4-3～Case 4-9)の最終変位分布
744	図 4-4- 155	Case 2-1のO/P変位の経時変化
744	図 4-4- 156	Case 2-1の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化
744	図 4-4- 157	Case 2-1の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化
745	図 4-4- 158	Case 2-1の各位置の飽和度の経時変化
745	図 4-4- 159	Case 2-1の飽和度分布の経時変化
746	図 4-4- 160	Case 2-1の乾燥密度分布の経時変化
746	図 4-4- 161	Case 2-1の含水比分布の経時変化

747	図 4-4- 162	Case 2-1の温度分布の経時変化
748	図 4-4- 163	Case 3-1のO/P変位の経時変化
748	図 4-4- 164	Case 3-1の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化
748	図 4-4- 165	Case 3-1の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化
749	図 4-4- 166	Case 3-1の各位置の飽和度の経時変化
749	図 4-4- 167	Case 3-1の飽和度分布の経時変化
750	図 4-4- 168	Case 3-1の乾燥密度分布の経時変化
750	図 4-4- 169	Case 3-1の含水比分布の経時変化
752	図 4-4- 170	Case 3-2のO/P変位の経時変化
752	図 4-4- 171	Case 3-2の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化
752	図 4-4- 172	Case 3-2の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化
753	図 4-4- 173	Case 3-2の各位置の飽和度の経時変化
753	図 4-4- 174	Case 3-2の飽和度分布の経時変化
754	図 4-4- 175	Case 3-2の乾燥密度分布の経時変化
754	図 4-4- 176	Case 3-2の含水比分布の経時変化
756	図 4-4- 177	Case 4-1のO/P変位の経時変化
756	図 4-4- 178	Case 4-1の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化
756	図 4-4- 179	Case 4-1の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化
757	図 4-4- 180	Case 4-1の各位置の飽和度の経時変化
757	図 4-4- 181	Case 4-1の飽和度分布の経時変化
758	図 4-4- 182	Case 4-1の乾燥密度分布の経時変化
758	図 4-4- 183	Case 4-1の含水比分布の経時変化
759	図 4-4- 184	Case 4-1の温度分布の経時変化
760	図 4-4- 185	Case 4-2のO/P変位の経時変化
760	図 4-4- 186	Case 4-2の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化
760	図 4-4- 187	Case 4-2の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化
761	図 4-4- 188	Case 4-2の各位置の飽和度の経時変化
761	図 4-4- 189	Case 4-2の飽和度分布の経時変化
762	図 4-4- 190	Case 4-2の乾燥密度分布の経時変化
762	図 4-4- 191	Case 4-2の含水比分布の経時変化
763	図 4-4- 192	Case 4-2の温度分布の経時変化
764	図 4-4- 193	Case 4-3のO/P変位の経時変化
764	図 4-4- 194	Case 4-3の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化
764	図 4-4- 195	Case 4-3の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化
765	図 4-4- 196	Case 4-3の各位置の飽和度の経時変化
765	図 4-4- 197	Case 4-3の飽和度分布の経時変化
766	図 4-4- 198	Case 4-3の乾燥密度分布の経時変化
766	図 4-4- 199	Case 4-3の含水比分布の経時変化
767	図 4-4- 200	Case 4-3の温度分布の経時変化
768	図 4-4- 201	Case 4-4のO/P変位の経時変化
768	図 4-4- 202	Case 4-4の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化
768	図 4-4- 203	Case 4-4の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化
769	図 4-4- 204	Case 4-4の各位置の飽和度の経時変化
769	図 4-4- 205	Case 4-4の飽和度分布の経時変化
770	図 4-4- 206	Case 4-4の乾燥密度分布の経時変化
770	図 4-4- 207	Case 4-4の含水比分布の経時変化
771	図 4-4- 208	Case 4-4の温度分布の経時変化
772	図 4-4- 209	Case 4-5のO/P変位の経時変化
772	図 4-4- 210	Case 4-5の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化
772	図 4-4- 211	Case 4-5の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化
773	図 4-4- 212	Case 4-5の各位置の飽和度の経時変化
773	図 4-4- 213	Case 4-5の飽和度分布の経時変化
774	図 4-4- 214	Case 4-5の乾燥密度分布の経時変化
774	図 4-4- 215	Case 4-5の含水比分布の経時変化
775	図 4-4- 216	Case 4-5の温度分布の経時変化
776	図 4-4- 217	Case 4-6のO/P変位の経時変化
776	図 4-4- 218	Case 4-6の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化
776	図 4-4- 219	Case 4-6の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化
777	図 4-4- 220	Case 4-6の各位置の飽和度の経時変化
777	図 4-4- 221	Case 4-6の飽和度分布の経時変化
778	図 4-4- 222	Case 4-6の乾燥密度分布の経時変化
778	図 4-4- 223	Case 4-6の含水比分布の経時変化
779	図 4-4- 224	Case 4-6の温度分布の経時変化
780	図 4-4- 225	Case 4-7のO/P変位の経時変化

780	図 4-4- 226	Case 4-7の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化
780	図 4-4- 227	Case 4-7の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化
781	図 4-4- 228	Case 4-7の各位置の飽和度の経時変化
781	図 4-4- 229	Case 4-7の飽和度分布の経時変化
782	図 4-4- 230	Case 4-7の乾燥密度分布の経時変化
782	図 4-4- 231	Case 4-7の含水比分布の経時変化
783	図 4-4- 232	Case 4-7の温度分布の経時変化
784	図 4-4- 233	Case 4-8のO/P変位の経時変化
784	図 4-4- 234	Case 4-8の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化
784	図 4-4- 235	Case 4-8の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化
785	図 4-4- 236	Case 4-8の各位置の飽和度の経時変化
785	図 4-4- 237	Case 4-8の飽和度分布の経時変化
786	図 4-4- 238	Case 4-8の乾燥密度分布の経時変化
786	図 4-4- 239	Case 4-8の含水比分布の経時変化
787	図 4-4- 240	Case 4-8の温度分布の経時変化図
788	図 4-4- 241	Case 4-9のO/P変位の経時変化
788	図 4-4- 242	Case 4-9の各位置の緩衝材土圧（水平方向）の経時変化
788	図 4-4- 243	Case 4-9の各位置の緩衝材土圧（鉛直方向）の経時変化
789	図 4-4- 244	Case 4-9の各位置の飽和度の経時変化
789	図 4-4- 245	Case 4-9の飽和度分布の経時変化
790	図 4-4- 246	Case 4-9の乾燥密度分布の経時変化
790	図 4-4- 247	Case 4-9の含水比分布の経時変化
791	図 4-4- 248	Case 4-9の温度分布の経時変化
793	図 4-4- 249	O/P変位の経時変化の基本ケース間の比較
793	図 4-4- 250	緩衝材上部位置における飽和度の経時変化の基本ケース間の比較
795	図 4-4- 251	O/P変位の経時変化の検討ケース間の比較
796	図 4-4- 252	緩衝材上部位置における飽和度の経時変化の検討ケース間の比較
797	図 4-4 -253	緩衝材上部位置における飽和度の経時変化の検討ケース間の比較
798	図 4-4- 254	O/P変位の経時変化の検討ケース間の比較
15	表2-1- 1	地質の水理特性
19	表2-1- 2	逆解析で使用する解析モデルの境界条件
20	表2-1- 3	解析モデルの基本透水係数
22	表2-1- 4	ボーリング調査（SKB孔）を追加した透水係数の逆解析結果
23	表2-1- 5	数値実験で使用する解析モデルの境界条件
24	表2-1- 6	4Heの観測値を仮定した数値実験の逆解析結果
53	表2-1- 7	海水準変動解析の解析条件
75	表2-2-1	解析条件（境界条件）
76	表2-2-2	基本モデルでの水理パラメータ
107	表2-2-3	基本ケースと変更ケースに与えた透水係数
129	表3-1-1	FGB-2孔における孔内物理検層の実施工程
132	表3-1-2	水理試験の実施概要
134	表3-1-3	採水時の多項目水質計による水質および蛍光染料濃度
137	表3-1-4	流向流速測定の概要
138	表3-1-5	流向流速測定で得られた流向流速
141	表3-1-6	水理試験の実施概要
144	表3-1-7	FGB-3採水時の多項目水質計による水質および蛍光染料濃度
146	表3-1-8	水理試験で得られた水理定数
160	表 3-2-1	ROVと高精度音響カメラを用いた探査の測線長と探査面積の一覧
164	表 3-2-2	対象とした地域と集水域の一覧
164	表 3-2-3	解析に使用したデータの一覧
166	表 3-2-4	GISで解析した集水域、表層地質及び海底地形勾配の一覧
170	表 3-2-5	海底湧出地下水周辺の地質と湧出機構
171	表 3-2-6	海底湧出地下水の検出や性状等の把握に用いられるトレーサー
175	表 3-3-1	振動試験の仕様
179	表 3-3-2	水中スピーカーの周波数特性に影響を与える項目
179	表 3-3-3	水中スピーカーの改良点と期待される成果
180	表 3-3-4	性能評価試験の仕様
185	表 3-3-5	曳航試験の仕様
189	表 3-3-6	使用機材一覧(*1は産総研からの貸与)
190	表 3-3-7	データ取得の仕様
194	表 3-3-8	作業工程表
194	表 3-3-9	測線名および測定目的
195	表 3-3-10	全測定内容
210	表 3-3-11	作業工程表(上段:9/7～9/11, 下段:11/30～12/3)

211	表 3-3-12	測線名および測定目的
211	表 3-3-13	全測定内容
240	表4-2-1	本フェーズの年度展開
243	表4-2-2	浸漬試験の試験条件
245	表4-2-3	セメントペースト試料による浸漬試験の水準
247	表4-2-4	セメントペースト試料の材料
247	表4-2-5	セメントペースト試料の構成割合
250	表4-2-6	模擬地下水の化学組成
252	表4-2-7	FGB-2及びFGB-3ボーリング孔の実地下水の分析結果
256	表4-2-8	試験に使用した浸漬溶液の化学組成
259	表4-2-9	微小部エックス線回折（μXRD）分析条件
263	表4-2-10	FGB-2_167.70～171.78 m　ペースト試料10箇月浸漬　μXRD測定結果
263	表4-2-11	FGB-2_214.75～220.52 m　ペースト試料10箇月浸漬　μXRD測定結果
267	表4-2-12	模擬地下水に3箇月間浸漬した試料の硬度測定結果（kN/mm2）
267	表4-2-13	実地下水に10箇月間浸漬した試料の硬度測定結果（kN/mm2）
268	表4-2-14	人工海水　ペースト試料3箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm2）
268	表4-2-15	海水B　ペースト試料3箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm2）
269	表4-2-16	海水G　ペースト試料3箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm2）
269	表4-2-17	降水A　ペースト試料3箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm2）
270	表4-2-18	降水D+F　ペースト試料3箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm2）
270	表4-2-19	FGB-2_167.70～171.78 m　ペースト試料3箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm2）
271	表4-2-20	FGB-2_214.75～220.52 m　ペースト試料3箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm2）
289	表4-2-21	SEM反射電子像によるセメントペースト試料の空隙率の測定結果
292	表4-2-22	接液面近傍の元素組成分布測定結果と硬度低下率
308	表4-2-23	吹付けコン試料による浸漬試験の水準
308	表4-2-24	セグメント試料による浸漬試験の水準
309	表4-2-25	コンクリート表面への二次鉱物生成の確認試験の試験水準
311	表4-2-26	吹付けコンのベースコンクリートの配合
311	表4-2-27	セグメントの配合
313	表4-2-28	吹付けコンのフロースルー試験の試験条件
313	表4-2-29	セグメントの浸漬試験条件
314	表4-2-30	コンクリート表面への二次鉱物生成の確認試験の試験条件
319	表4-2-31	降水A　コンクリート試料10箇月浸漬　μXRD測定結果
319	表4-2-32	FGB-2_167.70～171.78 m　コンクリート試料10箇月浸漬　μXRD測定結果
320	表4-2-33	人工海水流速変更　コンクリート試料10箇月浸漬　μXRD測定結果
324	表4-2-34	浸漬試験10カ月後の硬度測定結果（kN/mm2）
324	表4-2-35	降水A　コンクリート試料10箇月浸漬　ヤング率測定結果（kN/mm2）
325	表4-2-36	FGB-2_167.70～171.78 m　コンクリート試料10箇月浸漬　ヤング率測定結果（kN/mm2）
325	表4-2-37	人工海水流速変更　コンクリート試料10箇月浸漬　ヤング率測定結果（N/mm2）
350	表4-2-38	SEM反射電子像によるコンクリート試料の空隙率の測定結果
354	表4-2-39	コンクリート表面への二次鉱物生成確認の結果（目視観察）
361	表4-2-40	解析コードの検証と外部析出層の影響を検討するための計算条件
361	表4-2-41	OPC及びBFSCの化学組成及び密度
361	表4-2-42	セグメントOPC及びセグメントBFSCの配合及び空気量
362	表4-2-43	OPCの鉱物組成及び反応率
362	表4-2-44	BFSCの鉱物組成及び反応率
363	表4-2-45	計算に考慮した液相イオン種、拡散係数及び境界条件
364	表4-2-46	各鉱物の反応式とその熱力学的平衡定数 - 1
365	表4-2-47	各鉱物の反応式とその熱力学的平衡定数- 2
366	表4-2-48	使用したC-A-S-H溶解平衡モデルの反応式とその熱力学的平衡定数
366	表4-2-49	解析コードの検証と外部析出層の影響を検討するための物質移行解析条件（表面から約10 mm）
367	表4-2-50	解析コードの検証と外部析出層の影響を検討するための物質移行解析条件
372	表4-2-51	セグメントOPCの10箇月降水A浸漬の鉱物相　試験結果と解析結果の比較
376	表4-2-52	セグメントBFSCの10箇月降水A浸漬の鉱物相　試験結果と解析結果の比較
380	表4-2-53	セグメントOPCの10箇月人工海水浸漬の鉱物相　試験結果と解析結果の比較
384	表4-2-54	セグメントBFSCの10箇月人工海水浸漬の鉱物相　試験結果と解析結果の比較
388	表4-2-55	セグメントOPCの10箇月FGB-2_167.70～171.78 m浸漬の鉱物相　試験結果と解析結果の比較
392	表4-2-56	セグメントBFSCの10箇月FGB-2_167.70～171.78 m浸漬の鉱物相　試験結果と解析結果の比較
394	表4-2-57	Google Scholarを用いた外部析出層を考慮した文献調査の検索条件
400	表4-2-58	海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（1/8）

401	表4-2-59	海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（2/8）
402	表4-2-60	海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（3/8）
403	表4-2-61	海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（4/8）
404	表4-2-62	海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（5/8）
405	表4-2-63	海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（6/8）
406	表4-2-64	海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（7/8）
407	表4-2-65	海水系の液相と長期間接触したコンクリートのデータ抽出結果（8/8）
413	表4-2-66	コンクリートの強度予測モデル
417	表4-2-67	モデルのインプットデータ及び検証データの取得のための分析項目
419	表4-2-68	強度予測モデル検証用の試験体の作製条件
419	表4-2-69	強度予測モデル検証用の試験体の作製に使用した材料
419	表4-2-70	作製した強度予測モデル検証用の試験体の配合
421	表4-2-71	セメントの粒度分布測定条件
423	表4-2-72	セメントの化学組成、ig.loss
425	表4-2-73	セメントの鉱物組成測定条件
425	表4-2-74	セメントの鉱物組成測定結果
427	表4-2-75	骨材の粒度分布
429	表4-2-76	粗骨材の点載荷試験結果
431	表4-2-77	ig.loss及びinsol.測定結果
433	表4-2-78	ペーストの鉱物組成測定条件
433	表4-2-79	ペーストの鉱物組成測定結果
433	表4-2-80	ペーストのセメント鉱物相の反応率
440	表4-2-81	ペースト、モルタル、コンクリートの圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比
443	表4-2-82	鉱物組成の比較
445	表4-2-83	セメントペーストの解析に用いた値
453	表4-2-84	試験値と推定値の比較
542	表 4-4- 2	人工海水（マリンアートSF-1）の成分表
545	表 4-4- 3	要素試験における各供試体条件
547	表 4-4- 4	令和4年度までの要素試験（力学）における実施状況の一覧
555	表 4-4- 5	せん断透水試験の試験条件
563	表 4-4- 6	締固め時の含水比
565	表 4-4- 7	本研究で使用したベントナイトの基礎物性
566	表 4-4- 8	人工海水の作製濃度およびpH
578	表 4-4- 9	透水膨潤圧試験の各ケースにおけるイオン交換の状態
584	表 4-4- 10	せん断透水試験の各ベントナイト供試体の初期乾燥密度
593	表 4-4- 11	せん断強度の一覧
625	表 4-4- 12	三軸透水試験における目標乾燥密度と実測乾燥密度
634	表 4-4- 13	予備実験におけるセメント-海水反応液の溶液組成
635	表 4-4- 14	人工海水と試験溶液の組成
638	表 4-4- 15	ブランク試験後の反応溶液の溶液組成
639	表 4-4- 16	KVを用いたバッチ試験後の反応溶液の溶液組成
640	表 4-4- 17	SKVを用いたバッチ試験後の反応溶液の溶液組成
641	表 4-4- 18	KBを用いたバッチ試験後の反応溶液の溶液組成
642	表 4-4- 19	SKBを用いたバッチ試験後の反応溶液の溶液組成
645	表 4-4- 20	XRD分析による同定結果
652	表 4-4- 21	EG処理後のd値
654	表 4-4- 22	加熱前後のd値
670	表 4-4- 24	遠心力模型試験で用いた緩衝材の材料と条件
682	表 4-4- 25	キャリブレーション用試料の物理密度と平均値、標準偏差
710	表 4-4- 27	解析の対象とする実験ケース
715	表 4-4- 28	対象とする緩衝材の諸条件一覧
716	表 4-4- 29	基本的なケース検討で使用する力学特性の一覧
716	表 4-4- 30	オーバーパック模型に設定した力学特性
717	表 4-4- 31	基本的な検討ケースで使用する水理特性の一覧
718	表 4-4- 32	各緩衝材条件における初期飽和度の一覧
719	表 4-4- 33	基本的な検討ケースで使用する伝熱特性の一覧
720	表 4-4- 34	透水係数と固有透過度の関係についての純水と海水の違い
720	表 4-4- 35	潜熱の温度依存性についての純水と海水の違い
720	表 4-4- 36	密度および比熱に関する純水と海水の違い
722	表 4-4- 37	Case 2に対する追加検討ケース一覧
722	表 4-4- 38	Case 3に対する追加検討ケース一覧
723	表 4-4- 39	Case 4に対する追加検討ケース一覧
123	写真3-1-1	防潮堤からの風景（上）とFGB-2孔の櫓
179	写真3-3- 1	令和3年度と4年度の水中スピーカー（大型）の外観の比較

181	写真3-3- 2	発振器固定フレーム
181	写真3-3- 3	固定フレームに取り付けられた水中スピーカー
181	写真3-3- 4	大型水槽に沈めた水中スピーカー（測定中）
184	写真3-3- 5	制作した水中翼
186	写真3-3- 6	曳航試験の様子（曳航時）
186	写真3-3- 7	使用した水中翼（左から小、中、大）
186	写真3-3- 8	ブイの状態（左　空気抜き前、右　空気抜き後）
191	写真3-3- 9	使用した水中スピーカー（左：大型、右：小型）
191	写真3-3- 10	使用したストリーマーケーブル（左：48ch、右：24ch）
191	写真3-3- 11	

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

（沿岸部処分システム評価確証技術開発）

成果報告書　分冊

APPENDIX

目　次

Appendix Ⅰ　幌延浜里試験地における地下水位観測・・・・・・・・・・・ 850

Appendix Ⅱ　地下水中のガス濃度モニタリング・・・・・・・・・・・・・ 854

Appendix Ⅲ　富士川河口部における微動アレイ調査・・・・・・・・・・・ 863

Appendix Ⅳ　GETFLOWS について・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 867

Appendix Ⅴ　都市域の海岸部における塩淡境界の把握に向けた

電磁探査手法の適用性の検証・・・・・・・・・・・・・・・・・ 874

Appendix Ⅵ　複合解析を用いたスポットデータの代表性評価

にかかる検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 891

Appendix Ⅶ　緩衝材の機能変化に係るデータの拡充・・・・・・・・・・・ 907

Appendix Ⅷ　分野間連携・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 938

Appendix Ⅸ　プロジェクトの評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 968

Appendix I

幌延浜里試験地における地下水位観測

（１）浜里試験地

①概要

北海道天塩郡幌延町浜里試験地の、海岸線から 300m の位置にあるスクリーン深度が異なる 4 観測孔においてそれぞれ設置型自記水位計により地下水位を連続観測し、その変動状況を明らかにした。4 孔はそれぞれ水井戸（スクリーン区間深度：GL-5m～GL-21m）、DD-2 孔（同：GL-91m～GL-100m）、DD-3 孔（同：GL-133m～GL-148m）、DD-4 孔（同：GL-337m～GL-348m）である。

自記水位計は、あらかじめ観測開始予約の設定作業を行い、2022 年 7 月 24 日に設置した。翌日 7 月 25 日に、後に回収する自記観測データの検証に用いる参照水位を得るため、携帯型ロープ式水位計を用いて 4 孔の地下水位を測定した。9 月 15 日に、同様にあらかじめ観測開始を予約設定した自記水位計を準備し、その日まで観測していた自記水位計と交換して設置するとともに、その前日と翌日に参照水位測定を行った。10 月 25 日に、検証に用いる参照水位を得るための水位測定後、4 孔から自記水位計を撤去してデータ回収を行った。また過年度の地下水位データをあわせて整理し、水井戸、DD-2、DD-3 について 2 年以上、DD-4 について 8 ヶ月以上の水位データを取得した。ただし DD-4 の井戸洗浄後のデータは 3 ヶ月間である（前年度報告書参照）。

取得したデータから 4 孔の地下水位時系列データを整理し、今年度の観測データを分析して帯水層の水頭拡散率計算の前提となる潮汐による地下水位振動成分が含まれるかどうかを検討した。地下水位の潮汐応答が認められた 3 孔については、それぞれの地下水位変動と潮位変動の関係から一定の仮定のもとに帯水層の水理定数（水頭拡散率）を計算した。

②結果

図 1 に、4 孔の地下水位の主に今年度観測した期間の時系列グラフを、最寄りのアメダス地点の日降水量とともに示す。最も観測対象深度が浅い水井戸では降水に応答してごく小さな水位上昇がみられ、潮位の満潮・干潮と同様に概ね半日または日周期の周期的振動となるはずの潮汐応答は確認されなかった。DD-2、DD-3、DD-4 では、潮汐応答と考えられる幅数 cm 程度までの水位の振動がみられた。これら 3 孔ではまた、概ね半日周期・日周期の潮汐応答とは別に、一部の降雨の際に 1～2 日間一時的に平均的な水位が 10cm 程度高くなる現象も認められた（例えば 9 月 7 日前後、10 月 4 日前後）。この要因として次の 3 つが考えられる：①降雨による地下水かん養の影響、②低気圧の接近・通過による一時的気圧低下の影響（いわゆる「気圧効果」）、③低気圧の接近・通過による一時的気圧低下により近傍の海洋潮位が一時的に上昇した影響（半日周期・日周期より長周期の潮汐応答）。DD-2～DD-

4 の一時的水位上昇のタイミングや波形は互いに類似している一方、水井戸の降雨応答とはそれらが異なることから考えて、①よりは②または③の可能性が高いと考えられる。近傍の潮位で同じタイミングの一時的上昇が認められなければ③は否定されるが、一時的潮位上昇が認められた場合には②と③を区別することが難しい可能性もある。いずれにしても近傍で潮位観測が行われていないため、このような 1～2 日間の一時的水位上昇の要因を明らかにすることは難しい。

DD-2では昨年度データにもみられた数cm程度の鋸歯状の一時的水位低下が散発的に認められた。変動波形からはこの孔の観測対象帯水層からの一時的揚水が散発的にあった影響と考えられる。多くの場合に水位低下がその日の7:00に始まり13:00頃（遅くとも18:00）に上昇に転じることからも、何らかの人為的な要因による可能性が高い。しかし周辺の揚水状況について情報がなく原因を確定できない。DD-4で、昨年度前半の観測データでは水位変化はほとんど無かったのに対して今年度は周期的な潮汐応答が認められたのは、昨年度後半に行われた井戸洗浄の効果が現れたものと考えられる。

図2に、4孔の地下水位時系列データ（2022年7月25日0:00からの2112時間データ）のフーリエ解析により作成した振幅スペクトルを示す。振幅スペクトルにおいても、DD-2、DD-3、DD-4の水位データのスペクトルでは潮汐に特徴的な周波数（O1、M2）にピークが確認できた。同じ3孔の24時間周期と12時間周期の成分のピークも潮汐振動に関連するものと考えられるが、これら成分は正弦振動ではない24時間周期の変動波形が時系列観測データに含まれる場合も現れる成分であるため、特にDD-2では鋸歯状変動の影響も合成されたものである可能性が高い。このスペクトルでは潮汐に特徴的な周期約12.4時間の正弦振動成分（M2）の振幅は、DD-2、DD-3、DD-4に対して順に12mm、12mm、7mmであった。周期約25.8時間の正弦振動成分（O1）の振幅がより正確に算出できると見込まれるデータ長2015時間での別途のフーリエ解析から、O1の振幅は同じ順に21mm、20mm、11mmであった。

表1に、潮汐の影響による振動が認められた3孔の地下水位観測データおよび気象庁による「留萌」地点の推算潮位データのM2成分を用いて計算した水頭拡散率を示す。計算された水頭拡散率は、①3孔で観測された地下水位の潮汐振動が最も近い海岸線の位置から帯水層を水平方向に伝播してきたものであり、②3孔に最も近い海岸線の位置での地下水位が気象庁の「留萌」地点の推算潮位の変動と同等であり、③海岸線から3孔までの間の（3孔それぞれの観測対象である）帯水層が均質で厚さ一定である、などの単純な水理地質構造を仮定すれば、その帯水層の水頭拡散率を求めていることになる。しかし帯水層や潮汐振動の伝播がそのような均質・単純な条件である場合、同一の帯水層について振幅比から計算される水頭拡散率と位相遅れから計算される水頭拡散率は一致することが理論上予想される。表に示したように実際に求められた水頭拡散率には2～5倍の不一致があることから、この現場が上記のような単純な水理地質構造の条件であるとは考えにくい。ここで計算された水頭拡散率は帯水層の水理的性質を反映しているはずではあるが、具体的にどこを通って振動

が伝播してきたのか（どの部分の帯水層の性質を表しているか）明らかではなく、数値自体はみかけの水頭拡散率と考えるべきである。

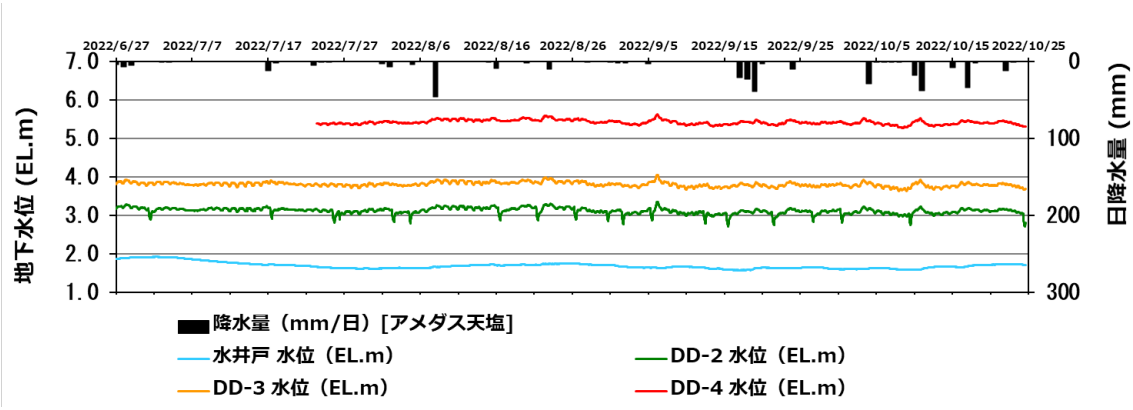


図１　浜里調査地における各観測孔での地下水位変動観測結果

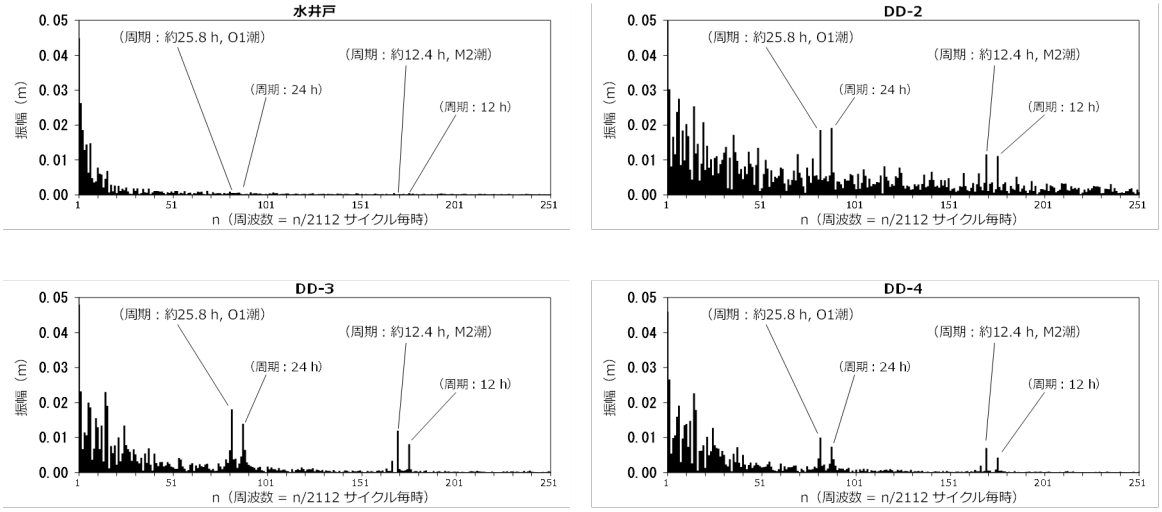


図２　各観測孔の地下水位時系列データのフーリエ解析結果

横軸は周波数（その逆数が周期）、縦軸は水位データに含まれる各周波数の正弦振動成分の振幅である。

表1　地下水位観測データおよび水頭拡散率

設定					結果		
地点	潮位地点からの伝播距離（仮）	フーリエ解析 対象データ長・サンプリング間隔	対象データ始点	分潮	振幅／初期位相[*3]	振幅比／位相遅れ（潮位に対し）	水頭拡散率（振幅比による／位相遅れによる）
留萌推算潮位[*1]		1416H・1h	2022/7/30 0:00	M2[*2]	0.045 m		
					5.38 rad		
DD-2水位	300 m	1416H・1h	2022/7/30 0:00	M2[*2]	0.013 m	29.0%	4.1 m^2/s
					4.61 rad	0.78 rad	10.51 m^2/s
DD-3水位	300 m	1416H・1h	2022/7/30 0:00	M2[*2]	0.012 m	27.2%	3.7 m^2/s
					4.82 rad	0.56 rad	20.2 m^2/s
DD-4水位	300 m	1416H・1h	2022/7/30 0:00	M2[*2]	0.007 m	16.0%	1.9 m^2/s
					4.55 rad	0.83 rad	9.1 m^2/s

*1 https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/tide/suisan/index.php

*2 周期：12.420601 h

*3 振動を正弦関数で表した時の時刻零点（2022/8/28 0:00）での位相

※ バンドパスフィルタ後にフーリエ解析

（２）下沼観測井

①概要

浜里の調査孔での調査結果（前節）の考察のため、また、潮汐変動が影響する範囲を調べるために、幌延幌延町の下沼地区の地下水位の観測をおこなった。調査地点は、北海道天塩郡幌延町から海岸までをつなぐ道道 972 号線沿いの、海岸からの距離約 5km に位置する観測孔 3 孔（湿原東孔 2 本：14m 深と 71m 深）である。これに小型の自記水位計を設置し、10 分間隔の測定を行った。このうち、自噴していない湿原東 14m については手計りにて管頭高から水面での高さを測定して地下水位を確認した。また、上述の浜里試験地にて 0.5mm の転倒マス型降水計を設置し、を 10 分間隔で測定した。測定期間は 2022 年 7 月 13 日～9 月 13 日である。

②結果

観測開始時及び終了時による手計り水位および気圧補正をおこなった地下水位を図 3 に示す。湿原東 71m は自噴井であり、観測開始時と終了時の手計り水位を得ることが困難であったため、正しい水位になっていない。この理由で図 3 においては、水位はやや低い値となっており、湿原東 71m の管頭高（2.26m)よりも低くなっている。測定中は井戸上部の蓋を閉めて、ビニールテープで地下水が自噴しないようにしたため、（絶対値は信頼できないものの）水圧の変化傾向は測定できていると思われる。

湿原 14m と 71m の水位変動傾向は調和的である。湿原 14m とほぼ同深度の浜里の水井戸では潮汐変動は認められるが、地球潮汐との分離ができず、これが海岸から伝播してきたものであるのかは判断できなかった。

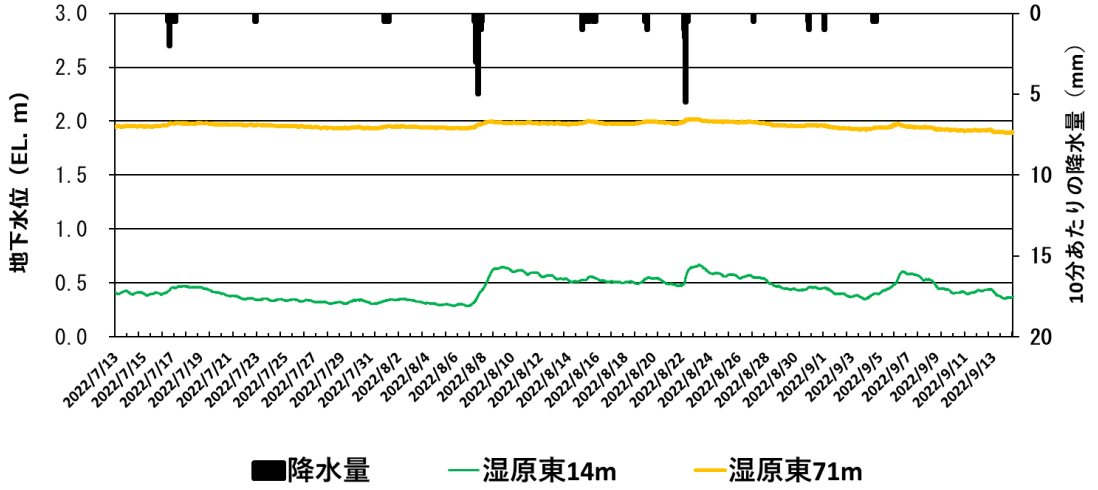


図 3　湿原東 14m および湿原東 71m における地下水位変化

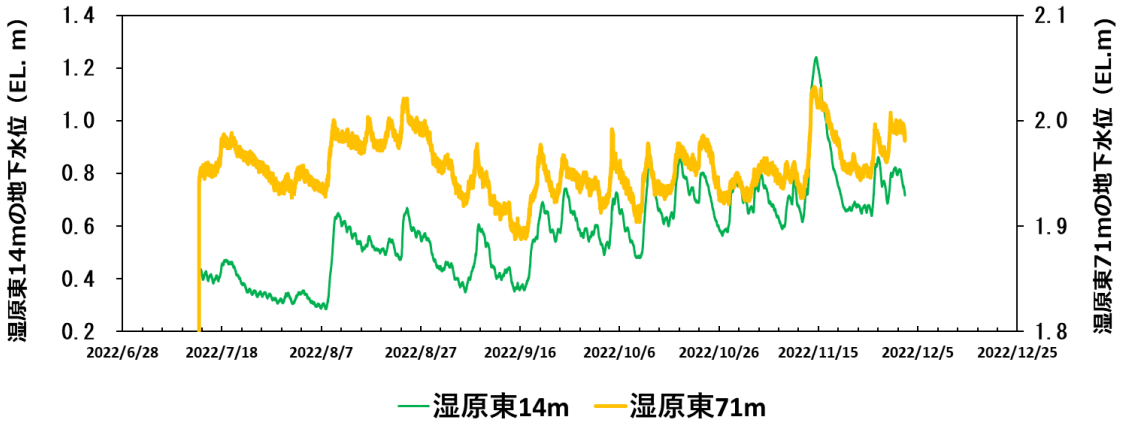


図 4　両地点の比較

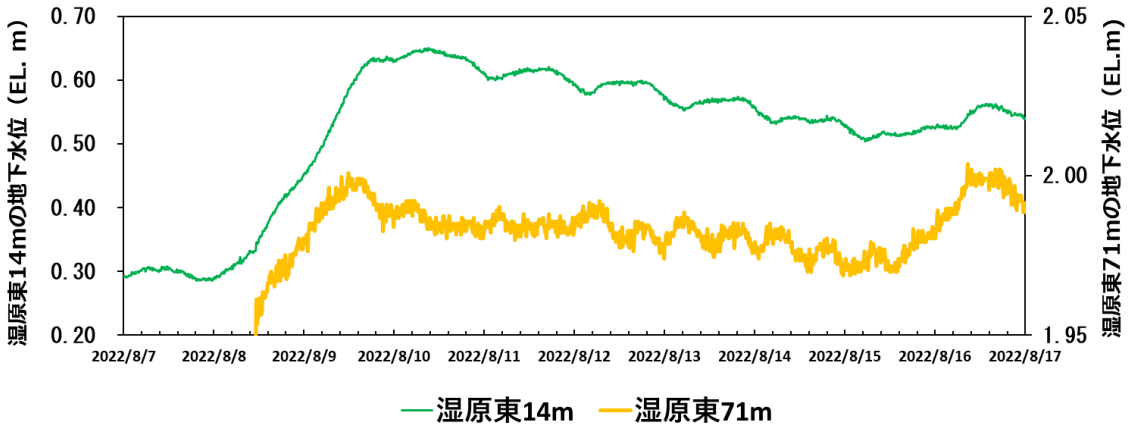


図 5　拡大図

謝辞

観測孔の選定および利用に対し、公益財団法人北海道科学技術総合振興センター幌延地圏環境研究所（幌延ライズ）にご協力をいただいた。謝意を表す。

Appendix II

地下水中のガス濃度モニタリング

（1）装置概要

環境システムにおけるガスの動態およびそれに関連するプロセスは、特定の時点で得られたデータからは評価できないことがしばしば生じる。近年、Gasometric 社より可搬型溶存ガス質量分析計 miniRUEDI が開発され、様々な水文調査に用いられている（Popp et al., 2019; Roques et al., 2020）。本研究ではこの装置を、本編第 3-1 節で述べた FGB-3 孔の深度 43m での連続揚水試験に適用し、その有効性を確認した。

Matthias et al.（2016）によれば、本装置は Gas-Equilibrium Membrane-Input Mass Spectrometric (GE-MIMS) system と呼ばれるシステムを用いており、He、Ar、Kr、N_2、O_2、CO_2 および CH_4 などの分圧を同時かつ連続に測定することが可能である。Gas-Equilibrium Membrane という名称からもわかる通り、地下水と溶存しているガスを溶解平衡の元で分離する。地下水から溶存ガスを分離するのは、写真 1 で示した膜モジュールである。分離されたガスは質量分析計に送られるが、このときのガスの消費量は非常に少ないため（< 0.1mL/min）、モジュール内の気液平衡が崩れない。なお、ガス濃度の測定値から、ヘンリーの法則を基に地下水中の溶存ガス濃度を算出するため、気温も同時に測定されている。ガス抽出から本体までのガスの移動時間は 80 秒、分析時間は 1 分程度である。本体に送られたガスはイオン化され、イオンビームは特定の *m/z*(m:イオン質量数、z: イオン電荷数)に設定された四重極質量フィルターを通過する。この *m/z* 値でのイオンビーム強度は、ファラデーカップ（F）または二次電子増倍管（M） 検出器のいずれかを使用して定量化される。また、本装置は消費電力が小さい利点はあるが、今回の調査地点は街中だったため一般電源を用いた。また毒性のある化学物質を利用しないため、リスクは低く操作は簡単という利点もある。

（2）分析項目と分析精度

定量限界は ppm オーダー、測定誤差は 1～3%とされる。風早ほか（2002）が挙げた希ガスと自然存在度は ^{4}He（5.24ppm）、^{20}Ne（18.18ppm）、^{40}Ar（0.934%）、Kr（1.14ppm）、Xe（0.087ppm）である。ただし、^{20}Ne は $H_2{}^{18}O$ の寄与があり、測定値をそのまま使用することができないため、今回は測定項目から外した。また、試みに濃度の低い ^{129}Xe について測定をおこなったところ、測定誤差が測定値を上回り、正しい測定ができなかった。以上より、^{4}He（4）、N_2（28）、O_2（32）、Ar（40）、Kr（84）を測定した（カッコのなかは分子量）。なお、本装置では小型ガスボンベ等を用いた標準ガスは利用可能であるが、希ガスに対しては大気も良い標準物質とされている（Matthias et al., 2016）。そこで今回は、大気を標準物質として用い、（通常の分析シーケンスと同様、ドリフト補正のために）地下水の

連続測定期間中に一定間隔で大気標準を測定した。標準物質の測定は 1 時間間隔が推奨されている。

ボーリング現場での作業風景を写真 2 に示す。昼夜および雨天時に対応できるよう、装置を車内に設置し、揚水した地下水を車内まで導水した。Gasometrix 社によれば、通水流量は 0.8～1.0L/min が適正とのことである。1 日以上の連続揚水試験ではゆるやかながらも水位降下が生じているため、徐々に流量が低下する。そのため、数時間毎に通水流量を測定した。

（3）結果

ここでは FGB-3 孔の深度 43m からの連続揚水試験結果を示す。連続揚水試験時のガス濃度の再現性を確認するため、試験は 2022 年 10 月 11 日～12 月 26 日に実施した。結果は図 1 に示す通りである。10 月 11 日～13 日までの 3 回の測定では、測定終了前の 1 時間の平均値が、それぞれ、6.6×10^{-5} ccSTP/g、1.9×10^{-4} ccSTP/g、1.8×10^{-4} ccSTP/g であった。しかし 12 月 15 日と 12 月 19 日の測定では 2.2×10^{-3} ccSTP/g、1.9×10^{-3} ccSTP/g と 1 オーダー高くなった。現場の揚水地下水を溶存酸素計で実測したところ、0.2～0.3mg/L で変動していた。1L=1000cc、1mol＝22.4L、酸素分子 1mol を 32g とすると、0.2～0.3mg/L の O_2 濃度は 1.4×10^{-4}～2.1×10^{-4}ccSTP/g に相当し、10 月の測定値と整合している。したがって、測定当初は正しい測定値が得られていたものが、何らかの理由により不調に陥ったと推定される。

以上のように、本研究では測定当初は溶存酸素量が正しい測定値を示していたが、後半は濃度が高くなった。本研究中、地下水を通水する膜モジュールは逆洗をおこなったが、地下水中の溶存物質（鉄と思われる）により、徐々に変色していった。溶存酸素の上昇はこのような膜モジュールの部分が問題なのかもしれない。本装置は特に揚水試験の際に重要なデータを与えてくれる可能性を持つものの、今後も検討が必要である

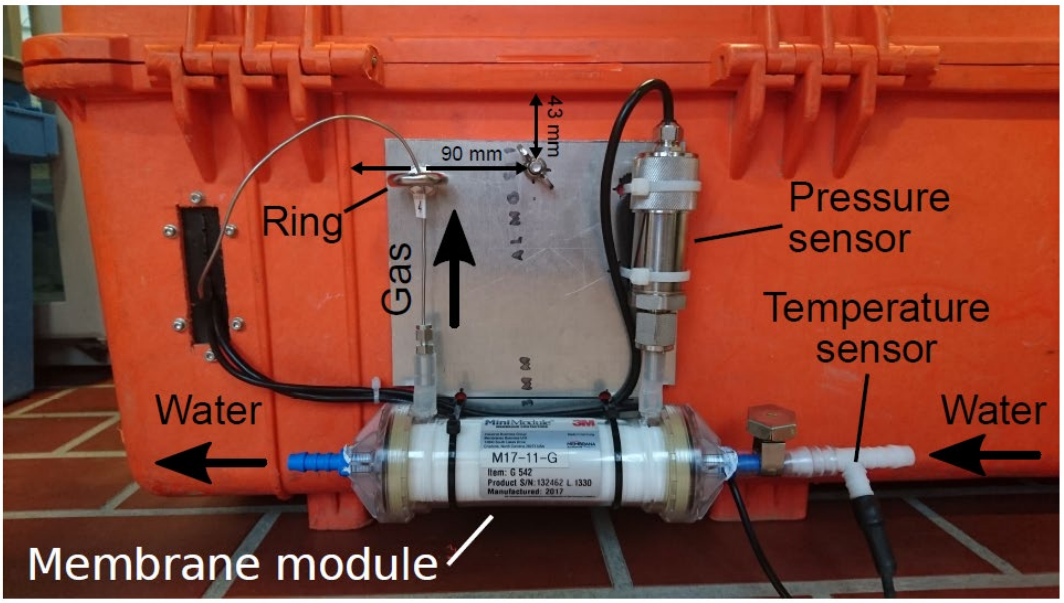


写真 1　miniRUEDI の背面にとりつけた GE-MIMS モジュール
カラムの左側でガスが分離し、ステンレスチューブを通って本体に運ばれる。

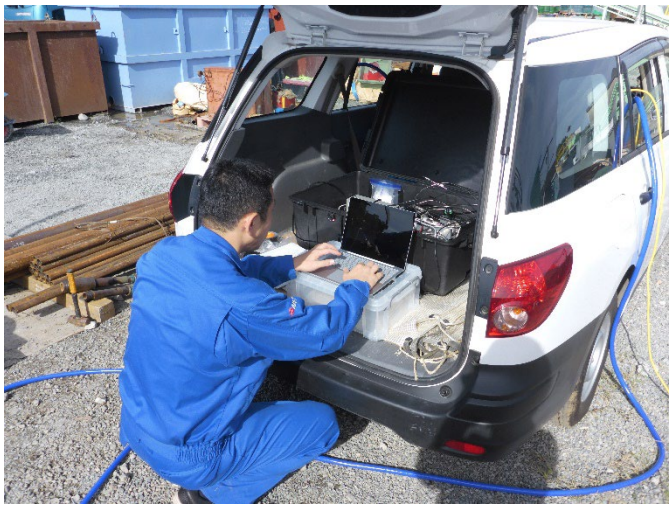


写真 2　野外での測定風景

写真上の奥は FGB-3 孔。青色のホースにより地下水を導水している。写真中および写真下は、miniRUEDI を車内に搭載したところ。

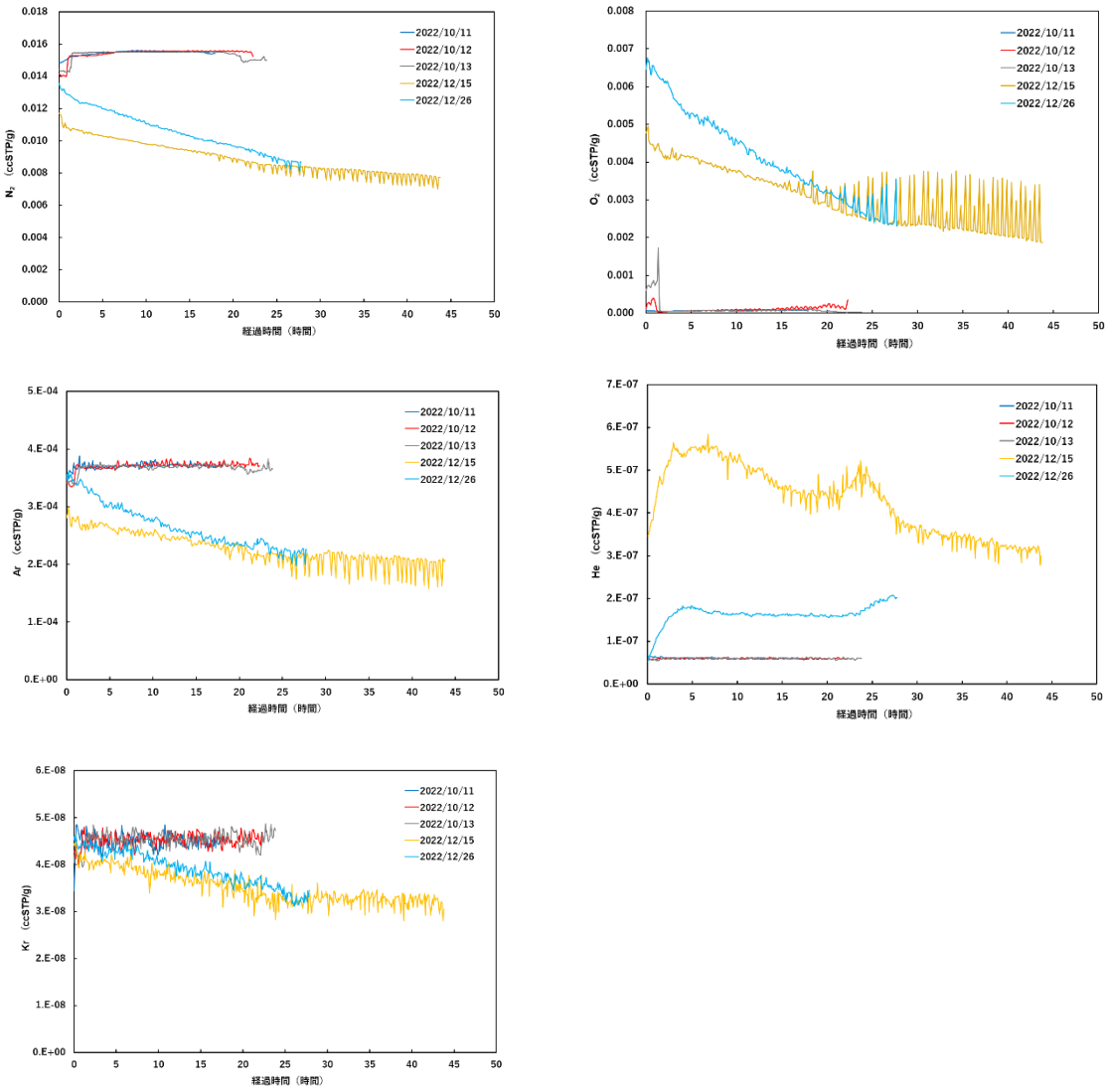


図 1　miniRUEDI による希ガス連続測定結果

参考文献

Brennwald M.S., Schmidt M., Oser J., and Kipfer R.(2016): A portable and autonomous mass spectrometric system for on-site environmental gas analysis. Environmental Science & Technology, 2016, 50, 13455−13463.

Popp A.L., Scheidegger A., Moeck C., Brennwald M.S., Kipfer F.(2017): Integrating Bayesian Groundwater Mixing Modeling　With On-Site Helium Analysis to Identify UnknownWater Sources. Water resources research, 55, 10, 10602-10615, https://doi.org/10.1029/2019WR025677

Roques C, Weber U.W., Brixel B., Krietsch H., Dutler N., Brennwald M.S., Villiger L., Doetsch J., Jalali M., Gischig V., Amann F., Valley B., Klepikova M. and Kipfer R.(2020): In situ observation of helium and argon release during fuid-pressure-triggered rock deformation. Scientific reports, 10, 6949. https://doi.org/10.1038/s41598-020-63458-x

風早康平・安原正也・高橋浩・森川徳敏・大和田道子・戸崎裕貴・浅井和由（2002）：同位体・希ガストレーサーによる地下水研究の現状と新展開．日本水文科学会誌，37（4），221-252.

Appendix III

富士川河口部における微動アレイ調査

（1）はじめに

FGB-2 孔での不透水基盤深度の推定のため、深度 30～1,000m の 1 次元 S 波速度構造の把握を目的とした微動アレイ調査をおこなった。微動アレイ調査では、波浪等の自然現象や交通振動等の人間活動により引き起こされた地面の微小な振動（常時微動）を地表に群設置した地震計で同時観測し、このデータを周波数解析し、微動の伝播速度と周波数の関係から地下構造を反映する表面波の位相速度を計算する。そして表面波の位相速度から、地盤の強度や地震の振動に関係する地下の S 波速度構造モデル(1 次元構造)を求める(水永, 2020)。以下、令和 4 年度に実施した本調査の概要を示す。

（2）現地観測

（a）受振点測量

受振器の設置場所は、予め CAD 図面から計画のアレイ配置の座標値を求めておき、GNSS-RTK 測量により現地で計画のアレイポイントに誘導し、受振点の位置出しを行った。GNSS-RTK 測量は、座標既知点である基地局からその地点の補正観測情報を無線で移動局に送信し、移動局では送信される補正観測情報と自局の観測情報を利用して即座に移動局における位置情報を高精度に求めるものである。今回は基地局として移動型通信端末（RTK 方式）を利用し、測量座標は世界測地系（測地成果 2000（JGD2000））を用いた。

（b）微動観測

探査に使用する観測機器は、地震計と記録器から構成される。観測は各観測点の独立同時記録方式であり、記録器には GPS 時刻校正機能が備わる。観測機器の設置状況例を図 1 に示す。観測は、予め決められたアレイ配置に従って観測機器を設置し、数時間の地盤振動を記録する。

（c）解析方法

解析は、解析ソフト（SeisImager/SW：応用地質社製）を用いて SPAC 法に基づく処理手順を用いた。得られた観測データから空間自己相関を計算し、周波数－位相速度の関係を示した位相速度イメージを作成した。そこから、卓越する値を読み取って分散曲線を作成し、分散曲線を用いてインバージョン計算を行って、S 波速度構造を推定した。

（d）その他

探査で使用する測定器・受振器は、測定前にハドルテストを実施し、取得される波形特性に問題がないことを確認した。受振器は地面にスパイクを利用して設置した。

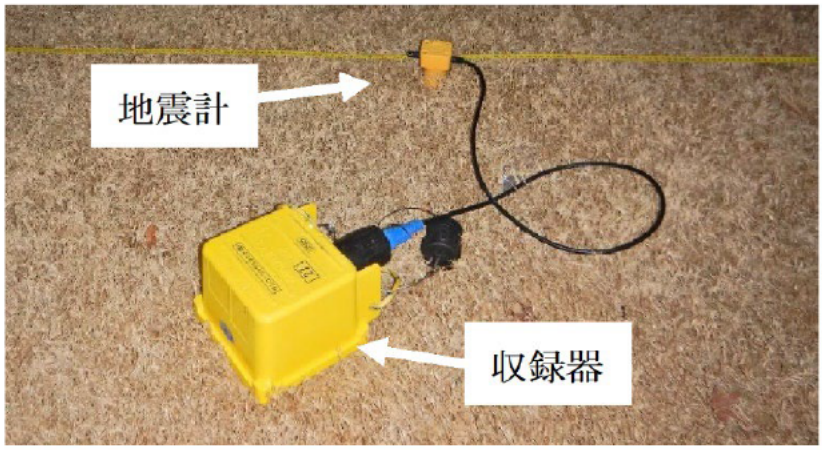


図１　観測機器の設置状況例

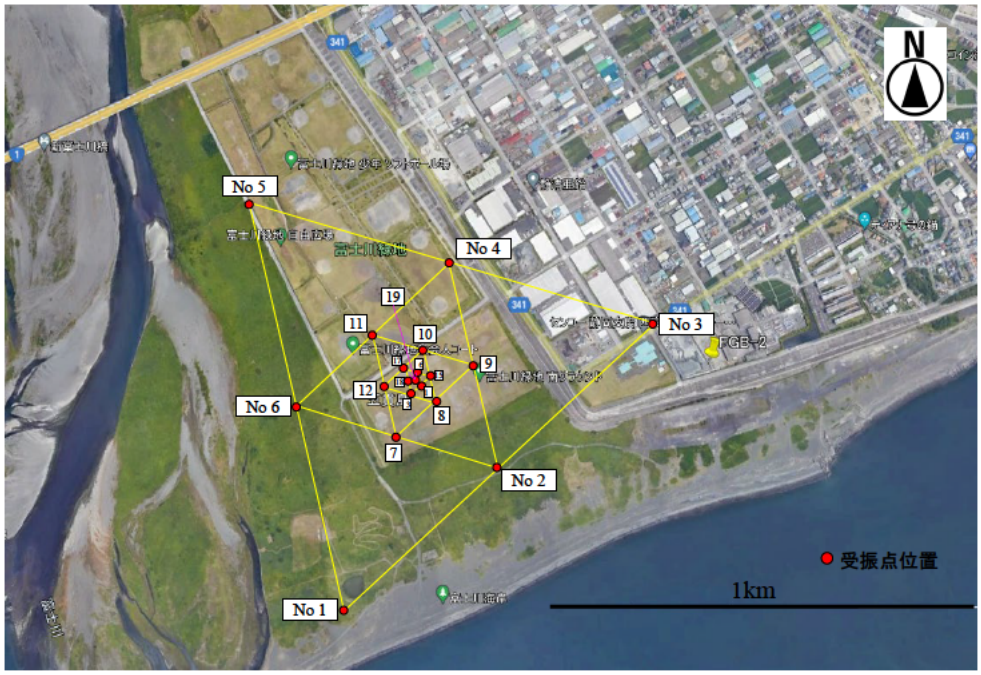


図２　１次元微動探査の受振点配置図（Google Earth を編集・加筆）

表１　１次元微動探査の受振点座標

受振点番号	X	Y
No.1	−97763.165	12981.573
No.2	−97439.190	13362.414
No.3	−97115.214	13743.254
No.4	−96947.384	13272.263
No.5	−96779.554	12801.271
No.6	−97271.360	12891.422
No.7	−97355.275	13126.918
No.8	−97274.281	13222.128
No.9	−97193.287	13317.338
No.10	−97151.329	13199.590
No.11	−97109.372	13081.842
No.12	−97232.323	13104.380
No.13	−97253.302	13163.254
No.14	−97233.053	13187.057
No.15	−97212.805	13210.859
No.16	−97202.316	13181.422
No.17	−97191.826	13151.985
No.18	−97222.564	13157.620
No.19	−97219.311	13175.366

（4）結果

測定は、2022 年 12 月 5 日の 21 時～12 月 6 日 2 時ごろにかけて行い、この中から 3 時間以上の記録を抜き出して解析に使用した。解析の結果得られた S 波速度構造を図 3 に示す。得られた S 波速度は、深度 1200m までであり、深度 200m 付近までは深度とともに速度が増加する。深度 350m 付近をピークとして、Vs=1300m/s 程度を示し、深度 420m 付近より速度の低下傾向が認められ、深度 750m 付近で Vs=1250m/s 程度を示す。これより深部は、若干の速度の上昇が見られ、深度 1200m で 1280m/s 程度となる。この速度は熔岩などと比較して小さく（水永，2020)、調査をおこなった深度領域には不透水基盤は分布していないと判断される。

参考文献

水永秀樹（2020）：はじめの一歩　物理探査学入門．九州大学出版会，344p.

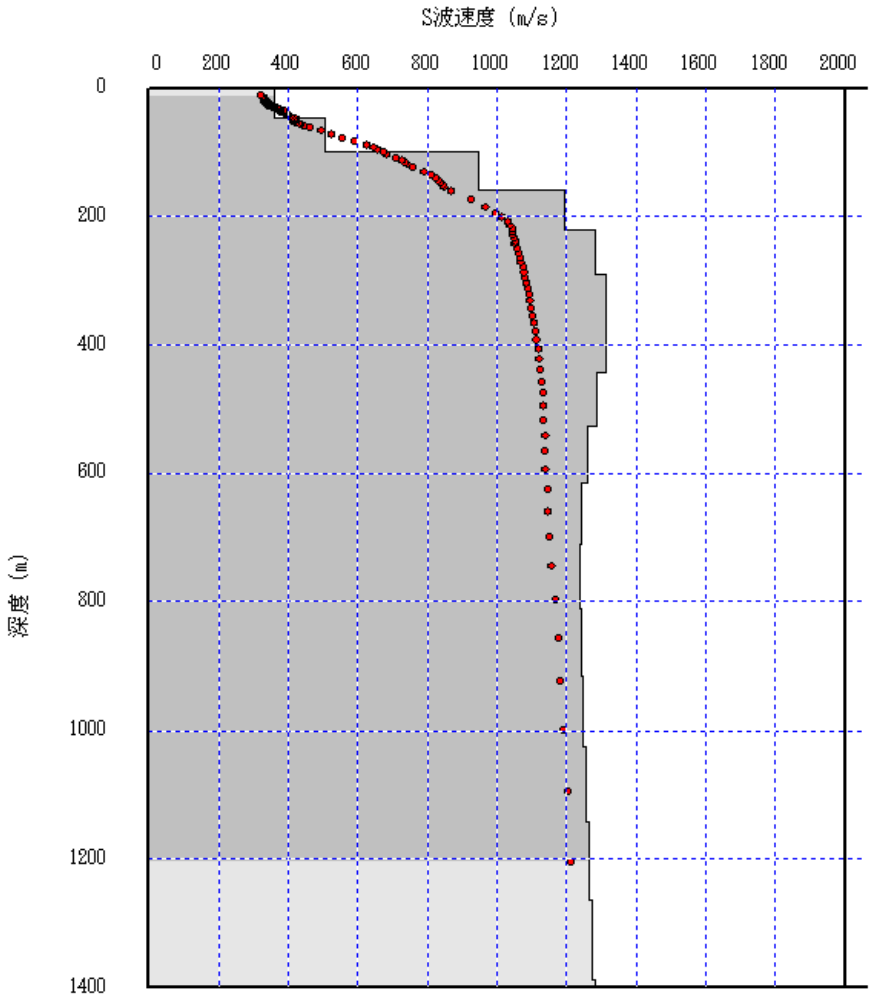


図３　１次元Ｓ波速度構造（インバージョン結果）

※赤丸：観測値の速度・周波数から 1/3 波長測を基に計算した深度プロット

Appendix IV

GETFLOWS について

（1）GETFLOWS が対象とするプロセス

本研究で用いた、地圏流体シミュレータ GETFLOWS（Itoh et al., 2000; Mori et al., 2015; Tosaka et al., 2000, 2010）について概説する。GETFLOWS は、様々な時間・空間スケールの多相多成分系を対象とすることができる流域モデリングツールであり、これまでに国内外の実サイトを対象として 1000 事例程度の適用実績を有する。

図 1 に GETFLOWS が対象とする物質・熱輸送システムの概念を示す。

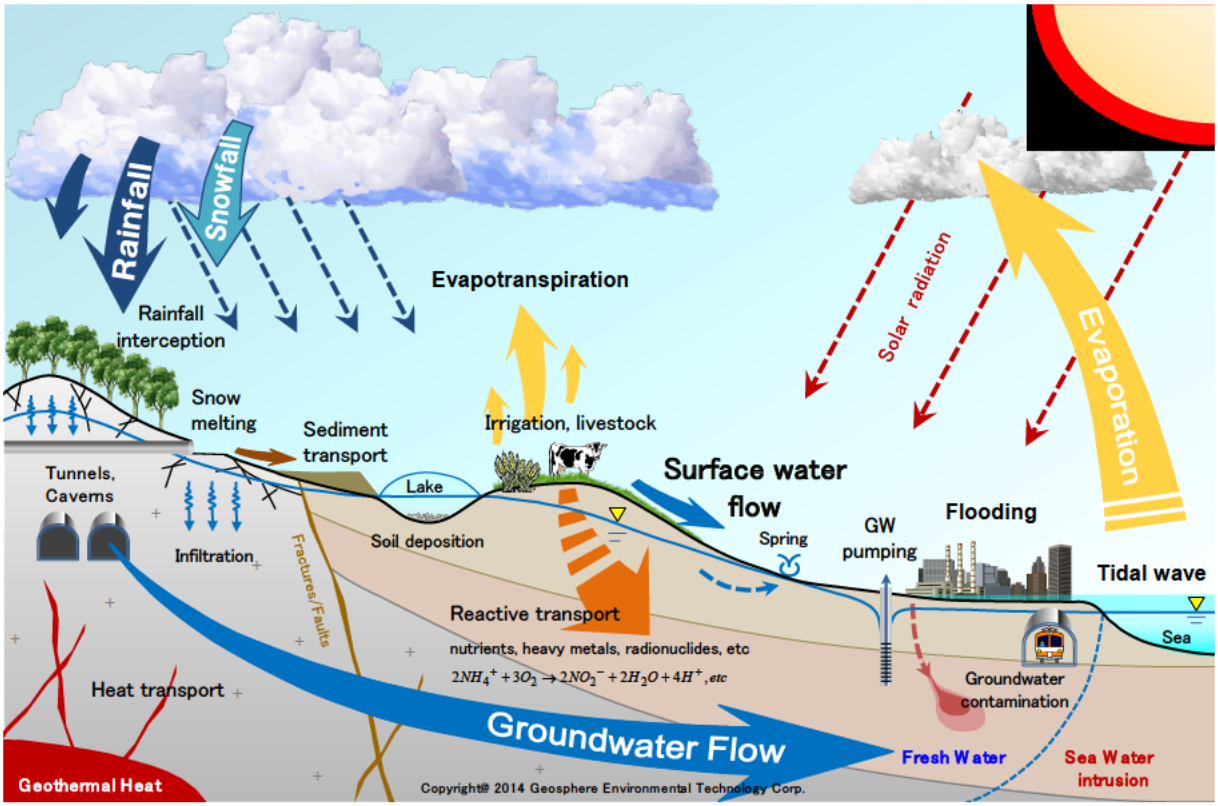


図 1　GETFLOWS が対象とする物質・熱輸送システム

本シミュレータは、大気、海洋、陸面及び地下の場に対して、源流域から河口の河川流域に存在する流体、化学物質、土砂及び熱の一体的挙動を追跡する。取扱う主な物理化学過程は次の通りである。

- 陸面水文過程（降水、積雪・融雪、降水遮断、日射、蒸発散、潜熱・顕熱輸送、浸食・堆積、潮位変化）
- 地上・地下流体の等温・非等温流れ
- 地表・地下間を通過する物質及び熱フラックス（地上・地下相互作用）
- 水相・気相中における化学物質の移行（移流分散、崩壊など）
- 溶解、揮発、吸着等の相間物質移動

- 水の相変化（凝縮・蒸発）
- 混合粒径土砂の浸食、輸送及び堆積
- 土砂浸食・堆積に伴う地形変化
- 熱輸送（移流、熱伝導）と熱交換
- 地下水揚水、河川水取水、営農、ダム操作等の人間活動

多くの流域モデリングツールでは、解析者があらかじめ解析対象とする領域における水の流れを決定し、その領域を河川や斜面、地下の不飽和帯、地下飽和帯などの特徴の異なる複数のコンポーネントに分割して、コンポーネント間でデータをやり取りしながら計算を行っていく。一方、GETFLOWS では、地表面から地下までを含めた領域全体を多数の六面体の連結によって直接表現し、解析対象とする領域における水の流れを 1 つのモデルの中でシームレスに計算していくため、水の流れはシミュレーションの結果として現れてくるのが大きな特徴である。

以下に、GETFLOWS における数値的な取扱いについて示す。

（2）支配方程式

本検討で対象とする等温状態における水・空気・塩分 2 相 3 成分流体系の支配方程式は、以下に示す水相、空気相、水相中の塩分の質量収支式により記述される。

$$-\nabla \cdot M_w + \rho_w q_w = \frac{\partial}{\partial t}(\rho_w \phi S_w) \tag{1}$$

$$-\nabla \cdot M_a + \rho_a q_a = \frac{\partial}{\partial t}(\rho_a \phi S_a) \tag{2}$$

$$-\nabla \cdot M_w C_w + \nabla \cdot D_w \nabla(\rho_w C_w) + \rho_w q_w C_w = \frac{\partial}{\partial t}(\rho_w \phi S_w C_w) \tag{3}$$

また、直接年代解析は、”Age Mass”と呼ばれる水の質量と平均年代の積（次元は質量×時間）が保存されるとし、溶存物質の移流、分散、拡散を考慮した質量収支式とのアナロジーから得られる以下の収支式に基づく（森ほか, 2011）。

$$-\nabla \cdot M_w A_w + \nabla \cdot D_w \nabla(\rho_w A_w) + \rho_w q_w A_w + \rho_w \phi S_w A_w = \frac{\partial}{\partial t}(\rho_w \phi S_w A_w) \tag{4}$$

式中の記号の説明は以下の通りである。

∇ ; 微分演算子

M_p ; 流体相$p(= w, a)$の質量フラックス$(kg/m^2/s)$

ρ_p ; 流体相$p(= w, a)$の密度(kg/m^3)

q_p ; 流体相$p(= w, a)$の生成・消滅量$(m^3/m^3/s)$

ϕ ; 間隙率$(-)$

S_p ; 流体相$p(= w, a)$の飽和率$(-)$

t ; 時間(s)

D_w ; 水相中の塩分の水力学的分散係数(m^2/s)

C_w ; 水相中の塩分の濃度(m^3/m^3)

A_w　　；水相の平均年代(s)

w, a　　；流体相（それぞれ水相、空気相）を識別する添え字を示す

流体相pの質量フラックスM_pは以下の式で評価する。格子モデルの第 2 層に該当する地表層格子（後述）における水平方向の水の質量フラックスに対してのみマニング則を仮定した開水路流れの浅水波近似式に線形化拡散波近似（Tosaka et al., 2000）を適用した(5)式を用い、その他にはダルシー則を仮定した(6)式を用いる。

$$M_w = -\frac{\rho_w R^{\frac{2}{3}}}{n_l}\sqrt{\left|\frac{\partial z}{\partial l}+\frac{\partial h}{\partial l}\right|}\,sgn\left(\frac{\partial z}{\partial l}+\frac{\partial h}{\partial l}\right) \tag{5}$$

$$M_p = -\frac{\rho_p K_p k_{rp}}{\mu_p}\nabla\Psi_p \tag{6}$$

式中の記号の説明は以下のとおりである。

R　　；径深(m)

n_l　　；粗度係数$(m^{-1/3}s)$

l　　；地表水流れ方向の距離(m)

z　　；基準面からの標高(m)

h　　；地表水の水深(m)

K_p　　；流体相$p(=w, g)$の絶対浸透率(m^2)

k_{rp}　　；流体相$p(=w, g)$の相対浸透率$(-)$

μ_p　　；流体相$p(=w, g)$の粘性係数$(Pa\cdot \mathrm{s})$

Ψ_p　　；流体相$p(=w, g)$の流体ポテンシャル(Pa)

水相、空気相の流体ポテンシャルは、それぞれ次式で表される。

$$\Psi_w = P_w + \rho_w g z \tag{7}$$

$$\Psi_a = P_a + \rho_a g z \tag{8}$$

ここに、P_w、P_a、gはそれぞれ水相、空気相の圧力(Pa)、重力加速度(m/s^2)である。支配方程式中の未知量はP_a、S_w、C_wの 3 変数である。直接年代解析では、A_wが未知数となる。他のパラメータは等温状態を仮定して以下のような関数として扱う。

$$P_c = P_c[S_w] = P_a - P_w \tag{9}$$

$$\phi = \phi[P_g] = \phi_0(1 + C_r(P_a - P_0)) \tag{10}$$

$$k_{rp} = k_{rp}[S_w] \tag{11}$$

$$\rho_w = \rho_w[P_w, C_w] \tag{12}$$

$$\rho_a = \rho_a[P_a] \tag{13}$$

$$\mu_p = \mu_p[P_p] \tag{14}$$

ここに、P_cは水-空気系の毛細管圧力(Pa)であり、式中の$k_{rp}[S_w]$などはk_{rp}がS_wの関数であることを意味している。また、C_rは固相圧縮率$(1/Pa)$を、ϕ_0は標準状態における間隙率$(-)$を、P_0は標準状態における圧力(Pa)を示す。本研究においては準定常状態（一定の外力条件を与え続けた非定常解析において、未知量の変化が安定した状態）を扱っていることから、不飽和帯には一定の

涵養フラックスを与えていることになる。また、地表流については計算をおこなっていない。

（３）数値解法

空間離散化は、複雑な地形起伏や地盤物性分布を、完全三次元格子を用いて表現可能な積分型有限差分法（Integral Finite Difference Method: IFDM）による。格子形状には、コーナーポイント型差分格子と呼ばれる多面体形状を用いることができ、それぞれの格子体積および隣接格子間の絶対浸透率を正確に評価する。本手法は、格子毎の厳密な質量収支を保存することができるため、油層工学など、多相流れを取り扱う分野に多くの適用実績をもつ。離散化手法に関してはライナー・ヘルミック（2004）が詳しい。

強い非線形性を有する三次元流体問題を解く必要性から、時間離散化には方程式系の完全陰的有限差分展開を行ったものに Newton-Raphson 法を適用し、各流体成分の方程式を反復的に解く手法を採用している。基本方程式を上記 IFDM によって空間離散化すると 7 重対角行列を係数行列とした連立方程式を得る。行列の各成分は解くべき変数である空気相圧力、水相飽和率、塩分濃度、または、平均年代を未知数とした 3×3、または、1×1 小行列となり、システム全体の自由度は格子数 NBLK×未知数 NEQ（＝3、または、1）となる。これを、前処理付き GBi-CGStab(s,L)法で解く。前処理は Block-ILU 分解を適用している。上述した流体物性や 2 相流パラメータの非線形性は Newton-Raphson 法により繰り返し収斂させる。また, 大容量計算を高速処理するため、非線形反復過程の中で収斂した格子をソルバーから自動的に除外する逐次陽化処理（Successive Locking Process）（H. Tosaka, et al., 1987）や領域分割法（Domain Decomposition Method）（A. Toselli et al., 2005）による高速並列計算を採用し、実用規模の大規模三次元問題をより効率的に解く。

三次元格子モデルの概念を図 2 に示す。格子システムは大別して役割の異なる 3 つの層（大気層、地表層、地下地盤層）から構成される。各層の概要を以下に示す。

地上の大気層（接地境界層）は格子モデルの第一層として表現される。ここは、物理的には毛細管圧力は 0（自由空間）で、非常に大きな容量をもつ大気空間であることから間隙率は数値的無限大とし、絶対浸透率は非常に大きく、水相飽和率は極めて小さな空間として設定する。容量の大きい大気空間では圧力や飽和率などの状態量の変化が生じない。大気層を構成する個々の格子には通常、絶対浸透率、間隙率に 1.0×10^{30} のような極端に大きな数値を与える。大気格子と地表格子の境界では圧力勾配に従う空気流動が計算される。次に述べる地表層中の空気は地表流の状態に応じて大気層を出入りする。

本研究では扱わないが、地表層格子では河川や斜面を流れる地表水、湖沼・海洋の停留水を表現する。層流状態の空気相の流動も同時に考慮される。地表水の移動は地表格子層に沿う浅水流として扱い、質量保存式と拡散波近似を適用した運動量保存式により記述される。場所による地表水の移動し易さの相違は土地利用や被覆状態に応じた粗度係数として考慮され、個々の格子に与えられる。また、地表層の間隙率は通常 1.0 であり、毛細管圧力 0 であるが、地下浸透・湧出においては疑似毛管効果（Tosaka, et al., 2000）が計算され、浸透・湧出が整合的に表現される。

地下地盤層を構成する格子は、一般化ダルシー則に従った多相多成分流体流動を表現する。個々の格子には地層の水理物性（間隙率、絶対浸透率、毛細管圧力、相対浸透率）を与え、流体相圧力と飽和率、濃度が状態量（未知量）として解かれる。

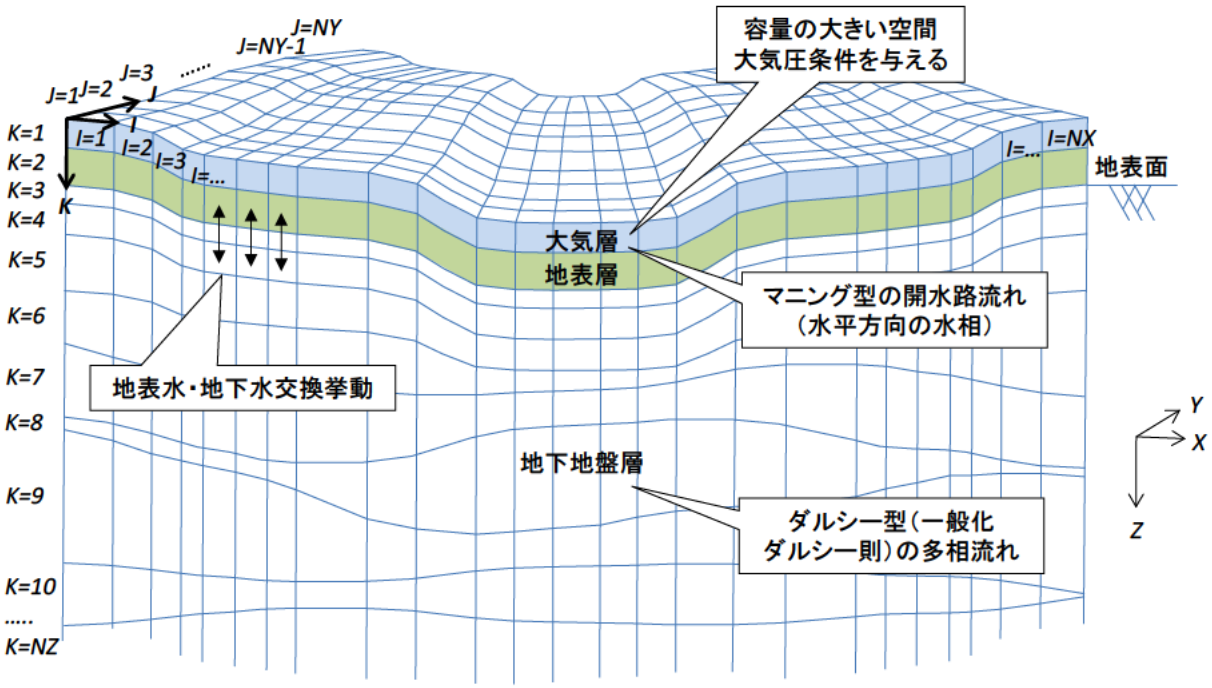


図２　三次元格子モデルの概念

参考文献

Itoh K., Tosaka H., Nakajima K. and Nakagawa M. (2000): Application of surface-subsurface flow coupled with numerical simulator to runoff analysis in an actual field. Hydrol. Processes 14, 417–430.

Mori K., Tada K., Tawara Y., Ohno K., Asami M., Kosaka, K. and Tosaka, H. (2015): Integrated watershed modeling for simulation of patiotemporal redistribution of post-fallout radionuclides: application in adiocesium fate and transport processes derived from the Fukushima accidents. Environ. Modelling Software 72, 126–146.

Tosaka H., and Matsumoto Y.(1987): An Efficient Reservoir Simulation by The Successive Explicitization Process, Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology Vol.52, No.4.

Tosaka H., Itoh K. and Furuno T. (2000): Fully coupled formulation of surface flow with 2-phase subsurface flow for hydrological simulation. Hydrol. Processes 14, 449–464.

Tosaka H., Mori K., Tada K., Tawara Y. and Yamashita K. (2010): A general-purpose terrestrial fluids/heat flow simulator for watershed system management. Proceedings of IAHR International Groundwater Symposium 2010, Valencia Spain.

Toselli A. and Widlund O. (2005). Domain Decomposition Methods – Algorithms and Theory, Springer Series in Computational Mathematics.

棚橋隆彦（1996）：はじめての CFD—移流拡散方程式—，コロナ社, 75p.

森康二，多田和広，田原康博，登坂博行（2011）：かん養起源及び年代推定の数値解析に関する一考察，日本地下水学会 2011 年秋季講演会講演要旨, 30-35.

ライナー・ヘルミック著，平田健正，樫山和男監訳，小林健一郎訳（2004）：地下環境での多相流と輸送現象 現象理解の基礎から数値解析まで，シュプリンガー・フェアラーク東京株式会社, 99-218.

APPENDIX V

都市域の海岸部における塩淡境界の把握に向けた電磁探査手法の適用性の検証

（1）はじめに

沿岸部の特徴的な地質環境特性として塩淡境界の存在が挙げられる。塩淡境界は沿岸部における地下水の流出や流動に大きな影響を与えることから、地層処分事業において、塩淡境界の深度や形状を把握することは、非常に重要である。塩淡境界の深度や形状を確認する手法としては、電気探査や電磁探査が一般的であり、地層処分のような比較的広範囲にわたる調査を実施する場合には電磁探査が使われる（産業技術総合研究所ほか，2022）。代表的な電磁探査手法として自然電位を使用した MT 法と、人工的に作り出した磁場を利用する TEM 法が一般的である。MT 法は広範囲の測定に対応可能であり、また 2 次元や 3 次元の解析まで実施できるという利点があるが、送電線や鉄道など、社会活動にともなう人工電磁ノイズの影響を受けやすく、人間活動が盛んな沿岸地域における適応は限定される。過年度事業では、北海道幌延町沿岸地域において、海陸接合の MT 探査が実施され、陸域の淡水が海底下数キロにわかって、海域にも保存されているということが明らかとなったが（Ikawa et al., 2014; Ueda et al., 2014）、たが、これは、当該地域に人工ノイズが存在しなかったことが、高い精度でのデータ取得につながったと考えられる。先述したように、日本国内の沿岸域は平野が多く、また多くの産業や物流等の社会活動の拠点となっていることから、自然電位を利用したＭＴ法の適用は制限されることが予想されるが、それらの手法に関する検討は光畑（2006）などわずかである。そのため、鉄道や大型工場などが海岸部付近に隣接している人工的な電磁ノイズが多きい場所において、このような調査環境でも適応できる電磁探査手法についての検討を行った。

（2）調査手法

本事業では、電磁探査手法として一般的な TEM 法を利用した。TEM 法とは、金属鉱床探査、地下水調査、土木関連調査など広範囲に利用されている時間領域電磁探査法であり。産総研においても、2012 年に東北太平洋地震の津波による沿岸帯水層への塩水侵入の影響把握のために利用した探査方法である

時間領域の電磁探査では、図 1 に示すように送信電流遮断後の過渡応答（渦電流による誘導磁場）を測定する。電流遮断後の時間経過とともに渦電流は地下深部に伝搬し、この電流により誘導される磁場はより地下深部の比抵抗を反映している。この磁場の時間変化から地下の比抵抗を求めるのが本手法の原理である。

TEM 法で測定するデータは磁場の過渡応答であり、コイルセンサーからは測定電圧（経過時間ごとの電圧の時間微分値）として出力される。測定電圧は受信装置の換算式を用いて見掛比抵抗値に変換し、解析に用いている。

（3）検証方法

本事業では、人工ノイズが大きく、また塩水の影響が大きな海岸部において TEM 法の適用性を検証するために、過年度事業ならびに本事業で実施している調査孔の物理検層データを用いて取得データの検証を試みた。具体的には過年度事業で掘削した静岡県の富士川右岸に掘削した SKB 孔と、本事業で左岸側に掘削した FGB 孔における比抵抗検層データ、複数深度の地下水の電気伝導度、ならびに地質柱状図と、TEM 法によって取得したデータから逆解析した比抵抗深度プロファイルを比較することで、取得データの信頼性を検証した。測定点の位置を図 2 に示す。

（4）測定機器

現地測定では、Geonics 社製の PROTEM 受信機と、Geonics 社製 TEM47 及び TEM67 送信機を使用した。測定点の位置座標計測には携帯型 GPS を使用している。PROTEM システムの仕様を表 1 に示す。

PROTEM システムは仕様上、深度 1000m まで探査可能な機材である。システム構成として送信機は TEM67 送信機と小型の TEM47 送信機を組み合わせて使用する。PROTEM 受信機では u、v、h、H、M、L の 6 周波数モードで、仕様の時間帯（6.8μs から 70ms 程度）のデータを取得する。u、v、h は TEM47 と HFCoil 受信センサーで測定し、H、M、L は TEM67 と LFCoil 受信センサーで測定する。

また、測定する地域で使用している商用電源の周波数に合わせて商用電源ノイズを軽減するために、50Hz と 60Hz に対応した送信周波数設定に切り替えて測定する。

50Hz と 60Hz に対応する u、v、h、H、M、L の Gate Time 一覧表を表 2 に示す。

①送信ループ

送信ループには単芯撚線電線、AWG12（導体断面積 3.5 mm^2）を使用した。送信ループの形状は調査エリアの地形的な制約を考慮し、測定点 01 では 130m×70m の長方形ループ、測定点 02 では 100m×100m の正方形ループとした。

②測点数

測点数は図-2 に示した測定点 01、02 の 2 点である。各測定点は送信ループの中心点であるが、本測定では、ループの中心を基点として 30m の測線を設定し 5m 間隔で 7 点の測定を行っている。測点および送信ループの設置にはコンパスと測量テープを用いた簡易測量を行い、携帯用 GPS で座標を記録している。

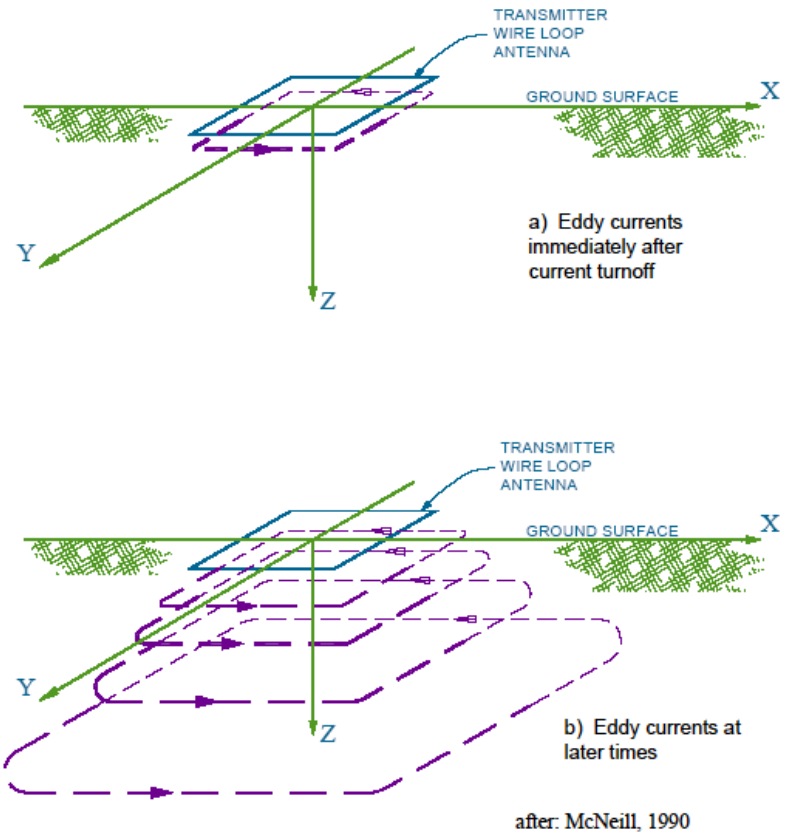


図 1　TEM 法測定概念図

図 2　測定地点

表 1　TEM 法測定装置概要

PROTEM Receiver

Measured Quantity	Rate of decay of induced magnetic field along 3 axes, in nV/m2
EM Sensor	Air-cored coils
Channels	1 channel used sequentially for 3 components, or 3 channels for 3 component simultaneous operation
Time Gates	20 gates covering 2 time decades or 30 gates covering 3 time decades
Dynamic Range	23 bits (132 dB)
Base Frequency	0.3, 0.75, 3, 7.5, 30, 75 and 285 Hz or 0.25, 0.625, 2.5, 6.25, 25, 62.5 and 237.5 Hz
Integration Time	0.5, 2, 4, 8, 15, 30, 60 or 120 s
Display	240 x 64 dot graphic LCD
Data Handling	Solid-state memory for 3,300 datasets, RS232 output
Synchronization	Reference cable or, optionally, highly stable quartz crystal
Power Supply	12 V rechargeable battery for 8 h continuous operation
Weight	15 kg
Dimensions	34 x 38 x 27 cm

TEM-47 Transmitter

Current Waveform	Bipolar rectangular current with 50% duty cycle
Base Frequency	30, 75 or 285 Hz where powerline frequency is 60 Hz 25, 62.5 or 237.5 Hz where powerline frequency is 50 Hz
Turn-Off Time	2.5 us at 3A into 40 x 40 m loop. Faster into smaller loop
Transmitter Loop	5 x 5 to 100 x 100 m single turn loop or 5 x 5 m 8-turn loop
Output Voltage	0 9 V, continuously variable
Power Supply	Internal 12 V rechargeable battery
Battery Life	5 h continuous operation at 2A output
Weight	5.3 kg
Dimensions	10.5 x 24 x 32 cm

TEM-67 Transmitter

Current Waveform	Bipolar rectangular current with 50% duty cycle
Base Frequency	0.3, 0.75, 3, 7.5 or 30 Hz where powerline frequency is 60 Hz 0.25, 0.625, 2.5 or 25 Hz where powerline frequency is 50 Hz Rates below 1 Hz available from PROTEM Receiver through reference cable
Turn-Off Time	20 to 750 us depending on transmitter loop size, current and number of turns.
Transmitter Loop	Up to 2,000 x 2,000 m minimum
Output Current	25 A maximum
Output Voltage	18 to 150 V continuously adjustable
Synchronization	Reference cable or, optionally, quartz crystal
Power Supply	4,500 W, 115 or 110/220 V, 50/60 Hz single-phase with 8 h continuous operation motor generator
Transmitter Protection	Electronic and electromechanical protection short circuit
Transmitter Weight	15 kg (TEM-57 MK. 2); 12 kg (TEM-67 power module)
Transmitter Dimensions	43 x 25 x 25 cm (TEM-57 Mk. 2); 42 x 20 x 31 cm (TEM-67 power module)

表 2　Gate Time 設定一覧

u(ms)	v(ms)	h(ms)	H(ms)	M(ms)	L(ms)
285/237.5Hz	75/62.5Hz	30/25Hz	30/25Hz	7.5/6.25	3/2.5Hz
0.006813	0.03525	0.08813	0.08813	0.3525	0.8813
0.008688	0.04275	0.1069	0.1069	0.4275	1.069
0.01113	0.0525	0.1313	0.1313	0.525	1.313
0.01419	0.06745	0.1619	0.1619	0.6745	1.619
0.01807	0.08025	0.2006	0.2006	0.8025	2.006
0.02306	0.1003	0.2506	0.2506	1.003	2.506
0.02944	0.1258	0.3144	0.3144	1.258	3.144
0.03756	0.1583	0.3956	0.3956	1.583	3.956
0.04794	0.1998	0.4994	0.4994	1.998	4.994
0.06113	0.2525	0.6313	0.6313	2.525	6.313
0.07794	0.3198	0.7994	0.7994	3.198	7.994
0.09938	0.4055	1.014	1.014	4.055	10.14
0.1267	0.5248	1.287	1.287	5.248	12.87
0.1664	0.6543	1.636	1.636	6.543	16.36
0.206	0.8323	2.081	2.081	8.323	20.81
0.2628	1.059	2.648	2.648	10.59	26.48
0.3352	1.349	3.373	3.373	13.49	33.73
0.4277	1.719	4.297	4.297	17.19	42.97
0.5456	2.19	5.475	5.475	21.9	54.75
0.6959	2.792	6.978	6.978	27.92	69.78

（5）測定データの処理方法

測定データは，次の手順にて解析用データへ変換した。

①前処理

測定データ（red 形式）のダウンロード

②IX1D 解析ソフト用データファイルの作成

測定データ（red 形式）から Interpex 社の解析ソフト IX1D 用のファイル（IXR 形式）に変換。IXR ファイルは[測点名.IXR]として保存。

6 種類の送信周波数に対応する測定データを変換。ただし 3 回測定の中から 1 つの測定データを選択して変換している。

③IX1D 解析ソフトでの解析用ファイルの作成

IXR 形式のファイルを測定点ごとに読み込み、解析用のファイル（IXP 形式）を作成。

解析では 6 つの送信周波数モード［TEM47（u、v、h）と TEM67（H、M、L)］から 3 つの周波数を選択し、解析用データセットとしている。このデータセットファイルには測定データおよび解析結果情報が保存されている。各測定点の使用したデータセットとファイル名は以下の通りとした。

測定点 01：FJ-01-D.IXP（v、H、L のデータセット）

測定点 02：FJ-02-D.IXP（u、H、L のデータセット）

測定点 01 では送信ループの形状の影響か、地表付近の影響か判断できないが、送信周波数モードｕは符号が反転していたため使用せず、ｖ、H、Ｌのセットとしている。

④解析で使用したデータの出力

（a）測定データ

時間-測定電圧の ASCII 形式出力ファイル（TEM 形式）出力

時間-測定電圧の ASCII 形式出力ファイル出力

時間-見掛比抵抗の ASCII 形式出力ファイル出力

（b）解析データ

IX1D で対応している画像データで出力（DXF、CGM、WMF 形式に対応）

解析断面モデルの比抵抗-［深度、層厚］ASCII 形式出力ファイル（xyz 形式）

（7）解析用データの一次元解析結果

解析には Interpex 社のソフトウエア IX1D を用いて１次元インバージョンを行った。インバージョン方法は、測定点ごとに設定した。初期モデルは最大解析深度を７００m、初期比抵抗値は 10～110Ωm として計算を行った。モデルの層数は、データ数と同じ 60 層とし

ている。

解析パラメータは 1 次元インバージョン結果と比抵抗検層データなどを比較しながら、最適な組み合わせとなるように変更している

測定データは全てインループ配置のデータとして解析を行った。測定点 01、測定点 02 ともに 7 点ずつ比抵抗モデルを解析した。

解析結果例として測定点 01 と測定点 02 の送信ループ中心点での測定値と計算値のグラフおよび解析比抵抗モデルを図-3 と図 4 にそれぞれ示す。結果の評価には計算値と測定値の最小二乗誤差（RMS%）を用いた。解析した点すべてで同様の評価を行い、得られた解析比抵抗モデルを各点の 1 次元比抵抗構造とした。最小二乗誤差は測定点 01 で 6~9 %、測定点 02 で 4～6%程度であった。

（8）解析結果の表示

測定点 01 と測定点 02 の解析結果を南北方向の測線として断面図を作成した。図 5 と図 6 に各測定点の比抵抗断面図を示す。解析比抵抗値は 1Ωm～100Ωm を Log スケールのカラーバーで色分けして表示している。

①測定点 01 の比抵抗構造断面

1 次元インバージョン解析結果から測定点 01 の比抵抗構造は、表層より高-中-低比抵抗の 3 層構造であるとした。比抵抗構造断面においても表付近の高比抵抗から、深度とともに中比抵抗、低比抵抗の構造となることが分かる。中比抵抗層と低比抵抗層の境界となる深度は 150m 付近である。

10Ωm 以下の低比抵抗層には数 Ωm の層が 2 箇所（深度 160m 付近と 300m 付近）あり低比抵抗層中の比抵抗構造の違いが明瞭である。

②測定点 02 の比抵抗構造断面

1 次元インバージョン解析結果から表層より高-低-中-低比抵抗の 4 層構造であるとした。比抵抗構造断面でも表層付近の高比抵抗/低比抵抗から深度とともに中比抵抗、低比抵抗の構造となることが分かる。中比抵抗層と低比抵抗層の境界は深度 320m 前後である。低比抵抗層は概ね数 Ωmであり、測定点 01 のように低比抵抗層中の構造の変化はない。

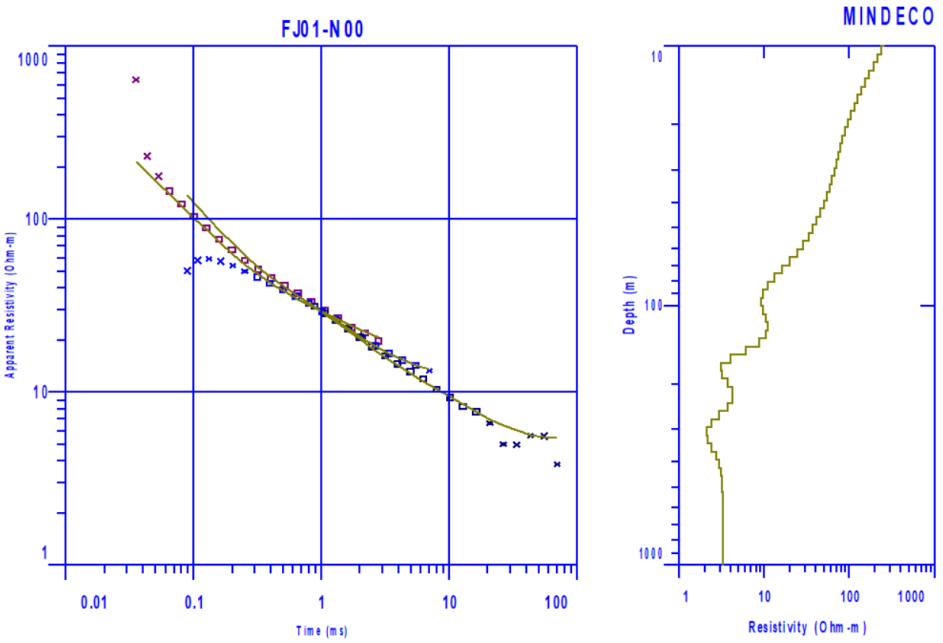


図 3　測定点 01 の FJ01-N00 における 1 次元インバージョン解析結果
左：測定データと計算値、右：比抵抗構造モデル

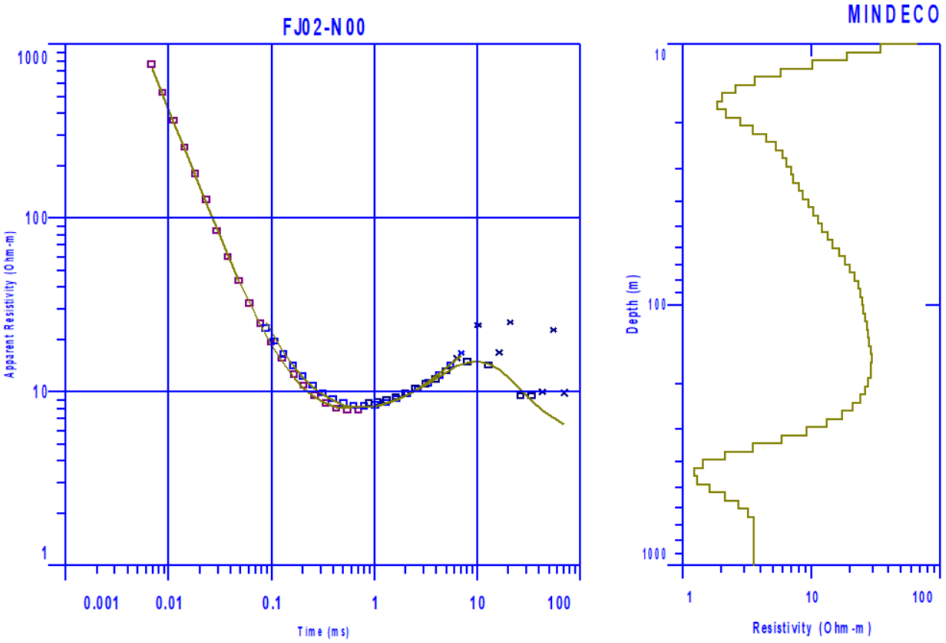


図 4　測定点 02 の FJ02-N00 における 1 次元インバージョン解析結果
左：測定データと計算値、右：比抵抗構造モデル

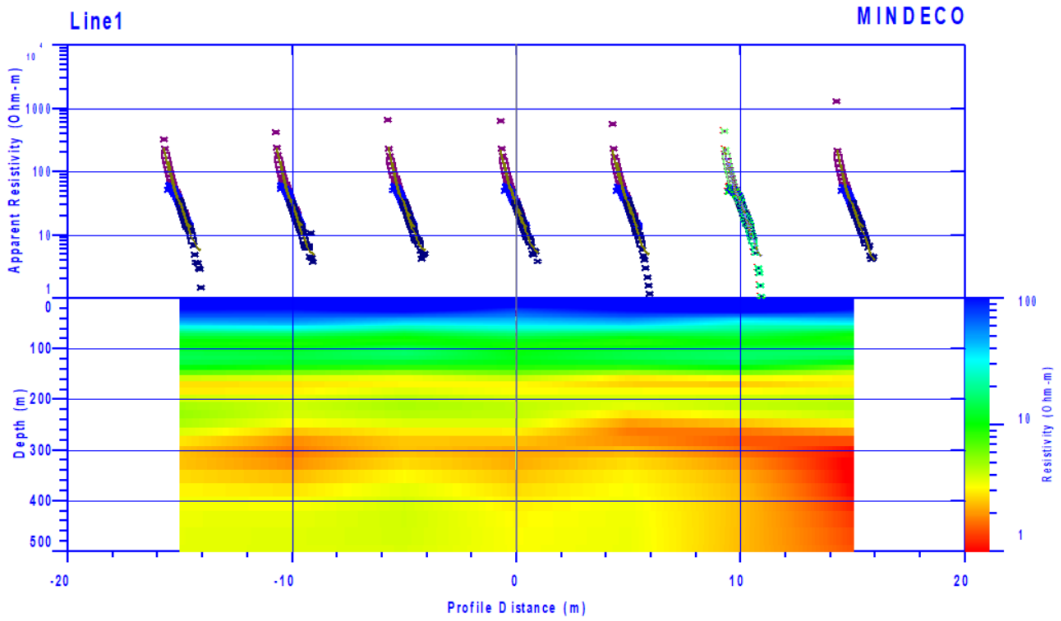


図 5　測定点 01 の解析比抵抗断面図（南北断面）

上段：見掛比抵抗値（□印）と見掛比抵抗理論曲線（実線）

下段：比抵抗構造断面

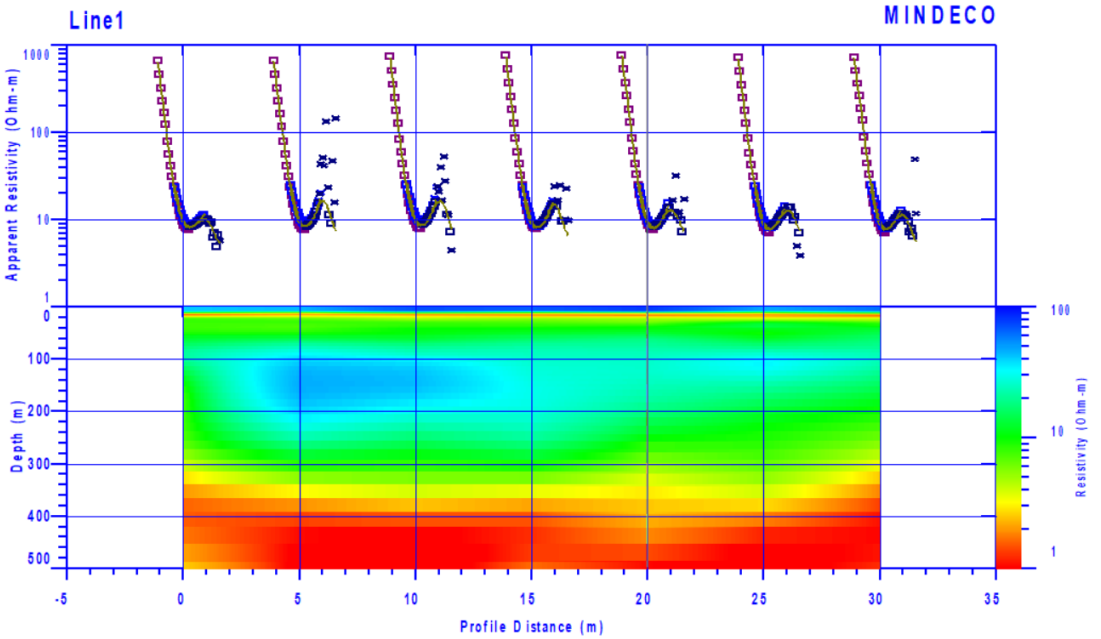


図 6　測定点 02 の解析比抵抗断面図（南北断面）

上段：見掛比抵抗値（□印）と見掛比抵抗理論曲線（実線）

下段：比抵抗構造断面

（9）検層データとの比較

測定点 01 については調査孔 SKB 孔、測定点 02 については調査孔 FGB 孔の検層データを用いて、検討を行った。検討に使用したデータは、比抵抗検層データ、地質柱状図および地下水の電気伝導度測定データである。

地質柱状図によれば掘削範囲はほぼ砂層である。図 7 に示すように砂の比抵抗値と間隙水の比抵抗値の関係は対数軸上でリニアであり、間隙水の比抵抗値が高くなると砂の比抵抗値も大きくなることが分かる。ただし、海水の比抵抗値 0.3Ωm でも砂の比抵抗値は 1Ωm 以上である。このことから、比抵抗検層データおよび解析比抵抗値が数 Ωm を示す範囲を海水が飽和している状態の砂層であるとして検討を進める。

砂に含まれる塩分濃度と比抵抗の関係については図 8 に示す。図中の塩分濃度が 32500ppm のグラフが海水の飽和度と比抵抗の関係を示している。

地下水の電気電度測定データについては、図 9 に示す水の一般的な電気伝導度の値と比較した。塩淡境界に関連する電気伝導度の値として、地下水（淡水）は 30～500μS/cm、海水（塩水）は 20,000～50,000μS/cm 位の値を示す。汽水域はこの中間の 2,000～20,000μS/cm である。

①測定点 01 の検層データに関する検討

調査孔 SKB 孔で取得された検層データの中から、比抵抗検層データと地質柱状図および地下水サンプルの電気伝導度データを使用し、TEM 法データから解析した比抵抗モデルと比較検討した。

比抵抗モデルは、深度—比抵抗検層データ（Short Normal、Long Normal）のグラフに重ね、図 10 （左図）に示す。地質柱状図は中央に、深度－電気伝導度のグラフは右にそれぞれ示す。検層データの縦軸は標高であるが、柱状図と電気伝導度の縦軸は深度となっているため、比抵抗検層データのプロット開始付近を深度 0m として合わせている。SKB 孔と FJ01 間の距離は約 70m である。

検層データの比抵抗値と地質柱状図を対比すると、表層 5m 程度の厚さの盛土部分では数百 Ωm 以上の高比抵抗である。盛土の下部は-100m 付近までシルトや粘土層が挟在する砂層であり、その下部は深度 350m まで砂層となっている。この地質層序に対する比抵抗検層データは 50m 付近まで数 10Ωm～数 Ωm へ低くなる傾向を示すが、-60m から-120m で 100Ωm と変化する。その下層は-140m 付近まで徐々に低くなり、-320m 付近まで 10Ωm 前後で推移している。-320m から孔底までは数 Ωm である。

このように同じ砂層でも 100Ωm～数 Ωm まで深度方向で比抵抗値が変化していることから、淡水、汽水、塩水などの飽和度の影響を考慮する必要がある。

電気伝導度のグラフにはその値に応じて淡水、汽水、塩水の境界を赤線で示している。この区分と比抵抗検層データを比較すると表層から-60m までは汽水、-60m から-140m までは淡水、-140m から-350m までは塩水と対応付けられる。

一方比抵抗モデルの表層付近は数百 Ωm と検層データの比抵抗値と同じであるものの、－90m 付近まで深度とともに比抵抗値は 10Ωm 程度まで低くなり、-140m 程度まで同じ構造である。-140m 以深は数 Ωm の構造を示す。電気伝導度の区分と比較すると、表層から-140m 付近までは汽水、-140m 以深は海水に対応する。この塩水域より深部の比抵抗モデルは比抵抗検層データと調和的な構造を示している。

②測定点 02 の検層データに関する検討

測定点 02 については調査孔 FGB-1 孔、FGB-2 孔で取得された比抵抗検層データと地質柱状図（FGB-2 孔）および地下水サンプルの電気伝導度データを使用し、TEM 法データから解析した比抵抗モデルと比較検討した。

比抵抗モデルは、深度―比抵抗検層データ（FGB-1 孔は Short Normal、Long Normal / FGB-2 孔は Shallow、Deep）のグラフに重ね、図 11 （左）に示す。地質柱状図は（中央）に、深度－電気伝導度のグラフは（右）にそれぞれ示す。検層データの縦軸は標高であるが、柱状図と電気伝導度の縦軸は深度となっているため、比抵抗検層データのプロット開始付近を深度 0m として合わせている。FGB 孔と測定点 FJ02 間の距離は約 340m である。

検層データの比抵抗値と地質柱状図を対比すると、表層から-320m 付近まで玉石混じり砂礫層にシルト層や安山岩層が挟在している。その下部は-800m まで砂層に玉石混じり砂礫層が挟在している。この地質層序に対する比抵抗検層データは-90m 付近まで数 100Ωm であり、その下層は-140m 付近まで徐々に低くなり、-150m 付近の安山岩層で 100Ωm 程度まで高くなるものの、数 10Ωm 前後で推移している。-180m から-320m までは数 10Ωm（shallow）～数 Ωm（Deep）であり、-320m から-340ｍまでは 1Ωm 程度となっている。このように SKB 孔と同様に、砂層でも 100Ωm～1Ωm まで深度方向で比抵抗値が変化している。

電気伝導度のグラフにはその値に応じて汽水、淡水、海水の境界を赤線で示している。この区分と比抵抗検層データを比較すると表層から-80m までは地下水、-80m から-180m までは汽水、-180m から-340m までは海水と対応付けられる。

一方比抵抗モデルの表層付近は数百 Ωm と検層データの比抵抗値と同じであるものの、－10m 付近では 1Ωm となり、-100m から-320m 程度までは数 10Ωm である。320m 以深は数 Ωm の構造を示す。電気伝導度の区分と比較すると、浅い部分では淡水と合わない結果となっているが、-80m 以深の汽水、-200ｍ以深の海水と対比できる。

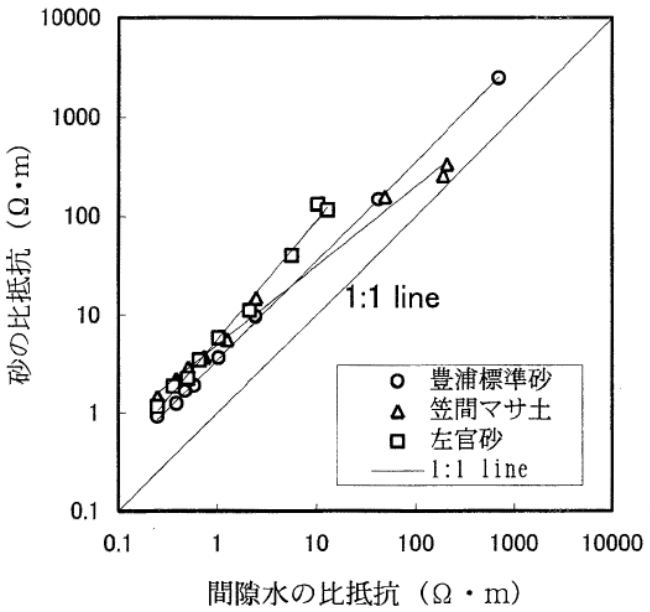


図 7　飽和状態における砂の比抵抗と間隙水の比抵抗との関係（林他,2001）

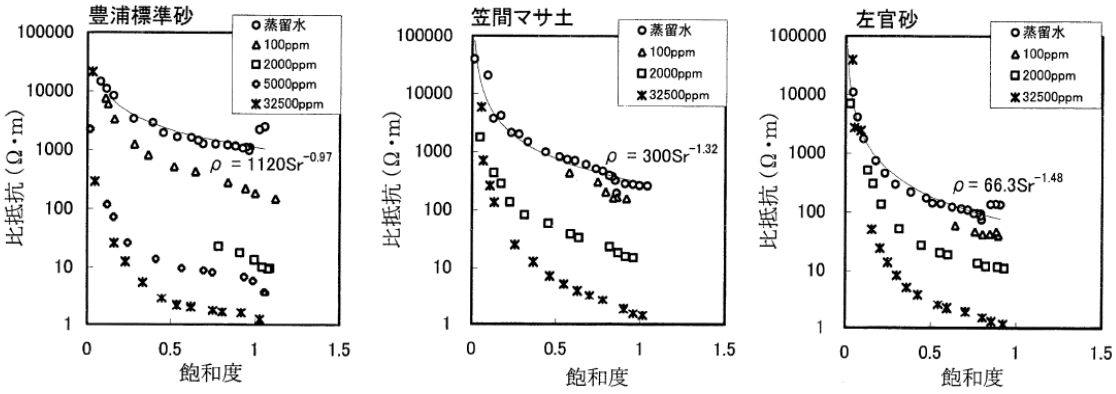
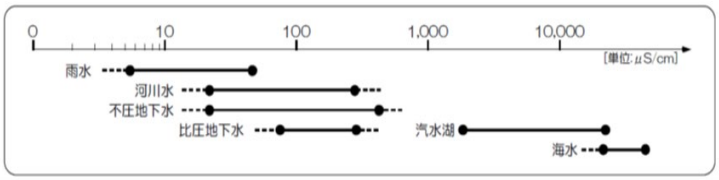


図 8　各種 NaCl 濃度における比抵抗と飽和度のとの関係（林他,2001）



雨水	5~50μS/cm
河川水	30~400μS/cm
地下水	30~500μS/cm
海水	20,000~50,000μS/cm

図 9　水の一般的な電気伝導度

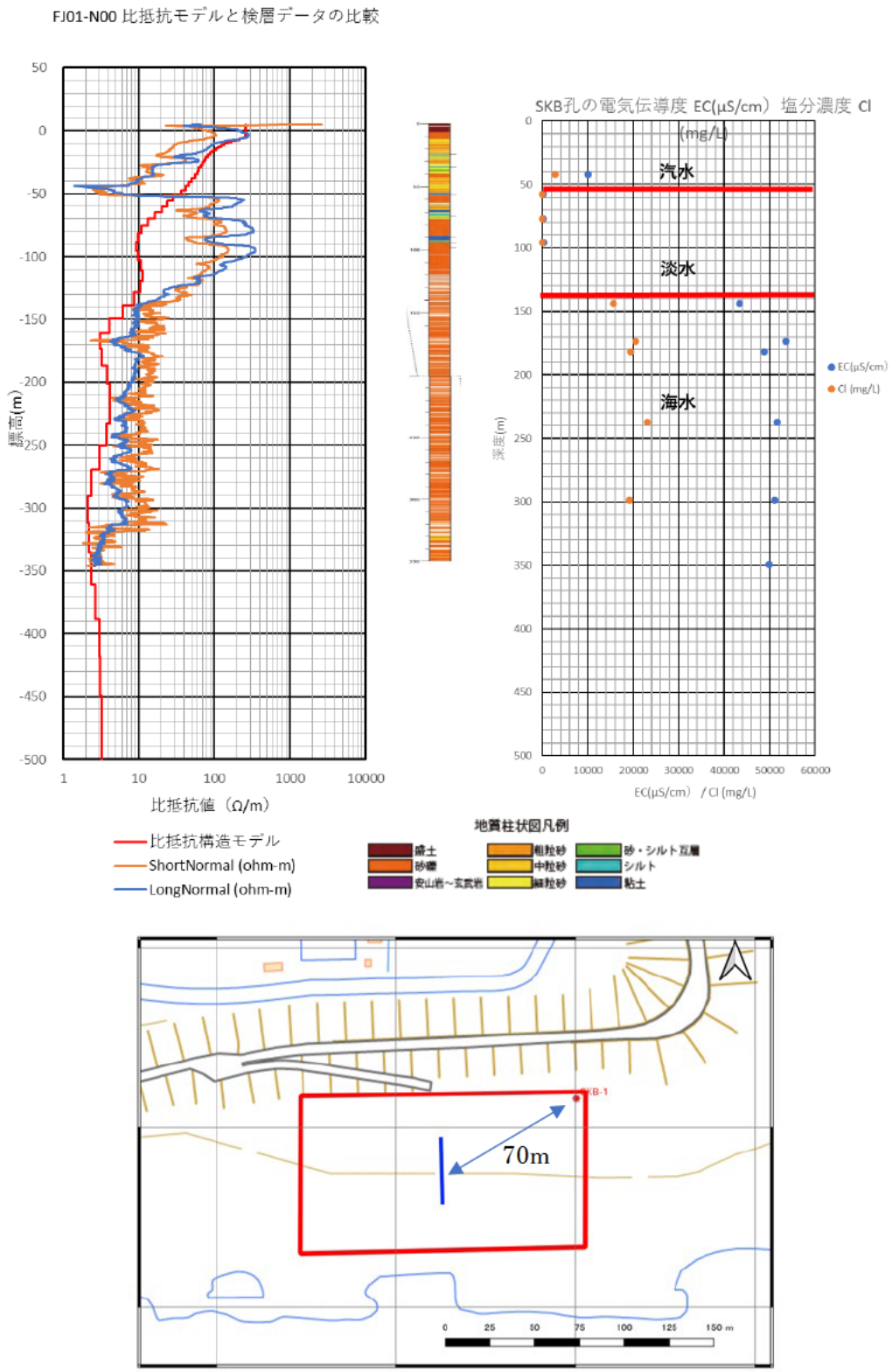


図 10　測定点 01 における比抵抗モデルと SKB 孔の比抵抗検層データ、地質柱状図および電気伝導度データとの比較

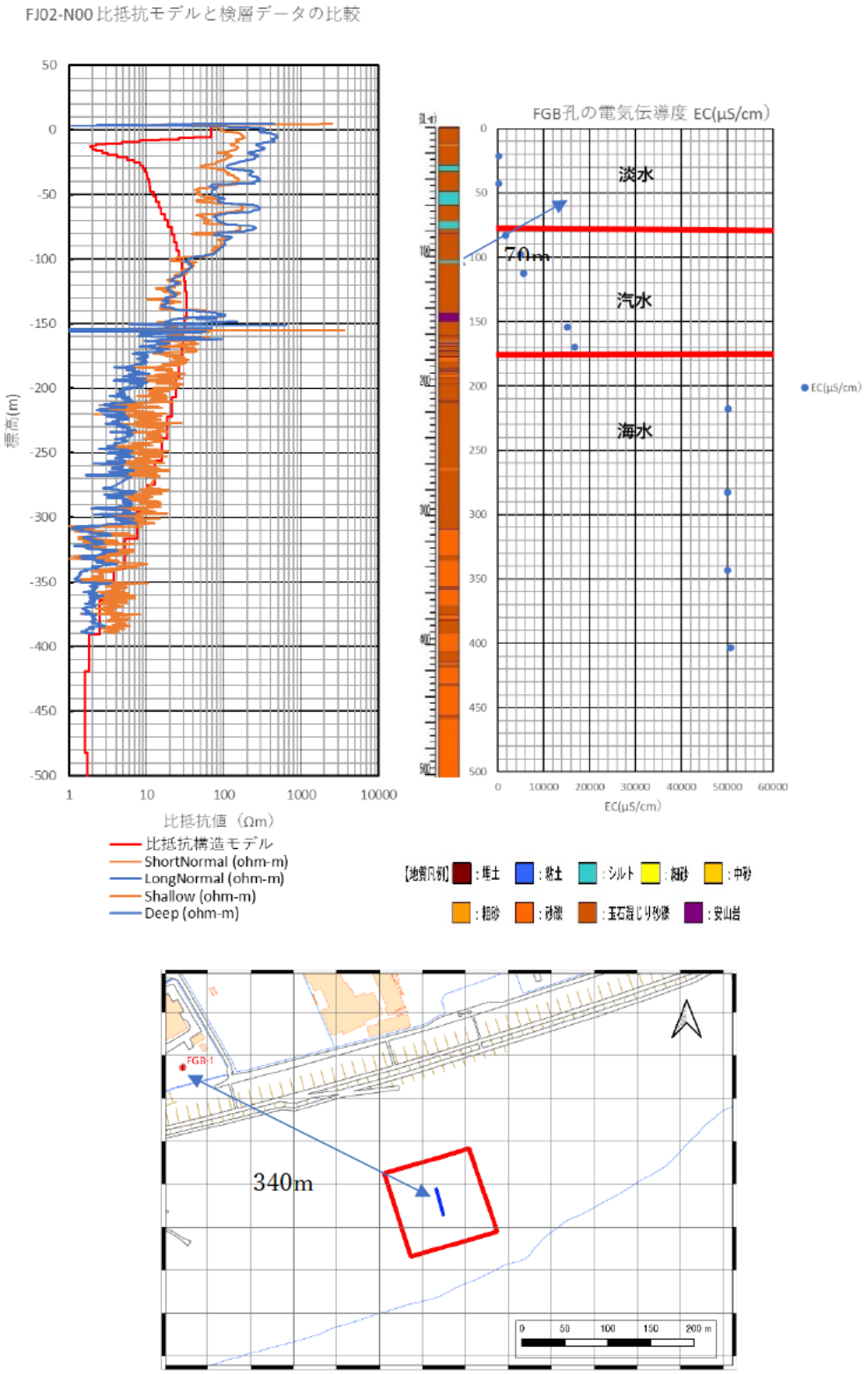


図 11　測定点 02 における比抵抗モデルと FGB 孔の比抵抗検層データ、地質柱状図および電気伝導度データとの比較

まとめ

本事業ではＭＴ法の適用が難しい人工ノイズの大きな海岸部において、TEM 法探査を実施し、その有効性を検証した。
その結果、浅部において、実際の調査孔における検層データと一致しない所もあるが、深部の塩水部分においては、おおよそ物理検層によって得られた比抵抗プロフィイルを再現することができた。令和 4 年度の調査結果をもとに注意すべき点について以下にまとめる
。
・海岸付近の低比抵抗構造の TEM 法調査では送信信号強度を大きくすることが必要。
FJ02 では L の測定電圧が小さくばらついていたので、ループサイズを大きくする、発電機の容量を上げるなどの送信モーメントを大きくする対策が必要。
・FJ01 のように地表付近の構造の影響を受ける場合があるので、その時は送信ループを小さくして測定するなどの対策をとる。
・富士川河口の FJ01、FJ02 のように、同じエリアでも比抵抗構造が大きく異なることがあり、解釈には地質構造の情報が重要である。
・地下水の電気伝導度測定による淡水域、汽水域、塩水域の区別は有効であり、比抵抗構造と電気伝導度および比抵抗検層データとの検討が重要になる。
・富士川河口は深部まで砂層であり、比抵抗値に関しては砂層と海水の含有率の関連を考察すればよかったが、塩淡境界が砂層ではなく粘土層中にある場合などの比抵抗構造の変化についての知見が必要である。

参考文献

IKawa R., I. Machida, M. Koshigai, S. Nishizaki, A. Marui, Coastal aquifer system in late Pleistocene to Holocene deposits at Horonobe in Hokkaido, Japan, Hydrogeology Journal, Vol.22, 2014, pp.987-1002.

光畑裕司, 2006, 電磁探査法による海岸平野における高塩分地下水調査－九十九里浜平野における例―, 地学雑誌, 115(3), pp.416-424.

産業技術総合研究所, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 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（沿岸部処分システム評価確証技術開発）成果報告書, 2021, pp.280-283.

Ueda T., Y. Mitsuhata, T. Uchida, A. Marui, A new marine magnetotelluric measurement system in a shallow-water environment for hydrogeological study, Journal of Applied Geophysics, vol. 100, 2014, pp.23-31.

APPENDIX VI

複合解析を用いたスポットデータの代表性評価にかかる検討

（1）はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分事業の概要調査段階においては、候補地点において地表地質踏査、物理探査、ボーリング調査により、サイトの地質環境特性を評価し、処分地としての適性を確認することとなる。このうちボーリング調査は地下深部の地質環境特性を確認するうえで重要な調査項目となる。ボーリング調査では、物理検層、孔内での原位置試験、採取された岩石コアを用いた室内試験などにより、地下深部の地質環境特性に係るデータが取得される。原位置での試験や岩石コアを用いた室内試験で取得されたデータは、それぞれの特性データとして地質環境特性モデル（SDM；原子力発電環境整備機構、 2021）の構築に利用されるが、データの代表性やデータのばらつきに関して評価が求められる。すなわち、取得されたデータには地質の不均質性、試験の不具合などが包含されているため、これらを評価したうえでその代表値やばらつきを検討する必要がある。原位置試験、岩石コア室内試験ともに地質状況を勘案したうえで特定の深度において実施されるものの、その数に限りがあり、取得されたデータがばらついた際にそのばらつきが地質の不均質性によるものか、試験の不具合によるものかの判断が難しい。そのために、本項では孔内の全深度において連続的に実施される物理検層データを用いて、スポットデータ（孔内原位置試験及び岩石コア室内試験によるデータ）の代表性やそのばらつきの要因の評価について検討する。

複数の物理検層もしくは物理探査データから地盤の透水性や力学強度を導く「複合解析」手法は、石油探査分野において発展してきた。

泥質砂岩を対象とし粘土粒子による電気伝導現象（過剰伝導現象）を考慮したモデルは電気伝導度モデルと呼ばれ、地盤の電気比抵抗と透水性との相関性を解明するため、連続性のある間隙を水と電流の共通の通り道と考え、間隙の屈曲性を考慮した電気伝導モデルなども提案されている（Goode and Sen、1988; Sen et al。、 1990; Lima and Sharma、 1990など）。さらに、Lima (1995)は水理的屈曲性および過剰伝導現象を考慮した電気伝導モデルに基づき、複数の物理検層結果から透水係数を導く理論を提案している。これらの研究から、地盤の透水性を考慮した比抵抗モデルは、土質地盤や新第三紀以降の堆積岩など粒子間の間隙に透水性が支配される「多孔質地盤」と、新鮮な結晶質岩や先第三紀の堆積岩など主として開口割れ目に透水性が支配される「硬質岩盤」に大別するのが妥当と考えられる。鈴木 (2002、 2013) は、堆積性軟岩および結晶質岩で行われた複数の物理検層データに対し、Lima (1995) およびKatsube and Hume (1987)に基づき透水係数プロファイルの算出を試み、その妥当性を検証している。

次に、地盤の力学強度を評価する研究事例について述べる。鈴木ほか（2002）は、複数の物理探査法（電気探査、IP法、マイクロ重力探査）による物性値から地盤の一軸圧縮強度を

導く手法を提案し、実際の石炭灰埋め立て処分場を対象に複数の物理探査による解析断面から一軸圧縮強度の空間分布を推定している。この手法では、石炭火力発電所より排出された様々な種類の石炭灰供試体を使用した室内試験を行っており、得られた地盤物性値と一軸圧縮強度との相関性に基づく手法である。また、高橋ほか（2016）は、岩石の弾性波速度、間隙率、一軸圧縮強度の関係をモデル化した岩石物理モデルを構築し、国内ダムの材料試験から得られた様々な種類の岩石試料の弾性波速度と一軸圧縮強度データに適用し、一軸圧縮強度の最大値を弾性波速度から推定できることを示している。上記の背景から、本事業では、複合解析手法を用いて室内試験によって得られたスポットデータの代表性評価について検討を実施した。

検討にかかる具体的な手順は以下のとおりである。

①物理検層データの複合解析から求められた各特性の値と実際の試験値とを比較することにより、同解析法の有効性を評価する。

②有効であった場合は、物理検層データを用いて多数の深度で複合解析を実施し、各特性値の特徴（値の分布、バラツキ、地質依存性、深度依存性など）を評価し、SDMへ導入するデータ情報を整理する。

③複合解析で求めた値と実際の試験値にずれがあった場合は、解析値に対する試験値のずれ（偏差）を計算し、偏差の方向と大きさを評価する。それに基づき物理検層データから求められた複合解析値に対して偏差を考慮した試験値を想定し、これらの想定した試験値の特徴（値の分布、バラツキ、地質依存性、深度依存性など）を評価したうえで、SDMへ導入するデータ情報を整理する。

（2）実施概要

本事業では、駿河湾沿岸部陸域で実施したFGB-2孔井の物理検層データを用いて、上記の手順で透水特性（透水係数）と力学強度（一軸圧縮強度）の代表値およびばらつき（偏差）を評価することを目標としている。そのための事前準備として、令和4年度は、令和3年度までにFGB-2孔で得られたデータや、他の事業で取得されているデータを用いて、以下の検討を実施した。

FGB-2孔については、泥質砂岩を対象としたLima (1995)による複数の物理検層データから透水係数プロファイルを導く手法を適用した。また、室内透水試験データや他の物理検層データと対比し、本手法の有効性について考察した。次に、電力中央研究所が幌延地域で実施したコントロールボーリングにより採取した岩石コアより得られた一軸圧縮試験を含む各種室内試験データに対し、クロスプロット法および高橋ほか（2016）に基づく岩石物理モデルにより一軸圧縮強度を計算し、室内での一軸圧縮試験による一軸圧縮強度との整合性を評価した。さらに、統合物理探査技術の問題点と今後の研究課題について整理した。

（3）解析結果

①FGB-2孔の物理検層データによる複合解析

図1に駿河湾沿岸域FBG-2孔で得られた物理検層データのうち、透水係数を算出するために使用した自然γ線検層、電気検層、間隙率のプロファイルを示す。図2は同孔で行われたNMR検層より得られた間隙率と透水係数のプロファイルである。これらの図中において、深度30～105mの砂礫層中の4か所に散在する礫混りシルト層と深度144～150mの安山岩・玄武岩の分布域を黄色のハッチで、深度160～168mの孔壁崩壊部をピンク色のハッチで示す。礫混りシルト層は砂礫層に対して、自然γ線強度は大きく、比抵抗は小さく、間隙率は大きい傾向を示す。また、安山岩・玄武岩の自然γ線強度は小さく、比抵抗は大きく、間隙率は小さい。また、表1に原位置透水試験による透水係数と採水試料による比抵抗を示す。

解析フローに基づき算出した透水係数プロファイルを図3に示す。解析に使用したデータは、電気検層による比抵抗、中性子検層による間隙率、自然γ線検層より算出した粘土分体積比である。なお、図3には現地採水試料から測定した採水の比抵抗（表1）から外挿した間隙水比抵抗も示す。これらの検層データより算出した透水係数プロファイルによると、全深度の透水係数は10^{-7}～10^{-5}m/sオーダーを示し、礫混りシルト層の分布区間は砂礫層よりも透水係数が大きい傾向を示した。また、算出された透水係数は原位置試験によって得られた値と概一致しているように見えることから、解析結果は概ね妥当であると判断される

図2におけるNMR検層による透水係数は、全深度区間で10^{-10}～10^{-8}m/sオーダーを示し、原位置透水試験結果（6×10^{-7}～6。9×10^{-6}m/s）より3桁ほど低くなっていることがわかる。図4に中性子検層とNMR検層による間隙率（全間隙率）を対比した結果を示す。これより、全般的に両者とも岩種による相違は整合しており、中性子検層による間隙率は、玉石混り砂礫は20～35%、砂礫は30～50%、礫混りシルトは50～60%、安山岩・玄武岩は22～40%を示す。しかし、中性子検層による間隙率に対し、NMR検層の方は1/2～1/3と小さい。このため、透水係数は小さく算出されたものと推定される。

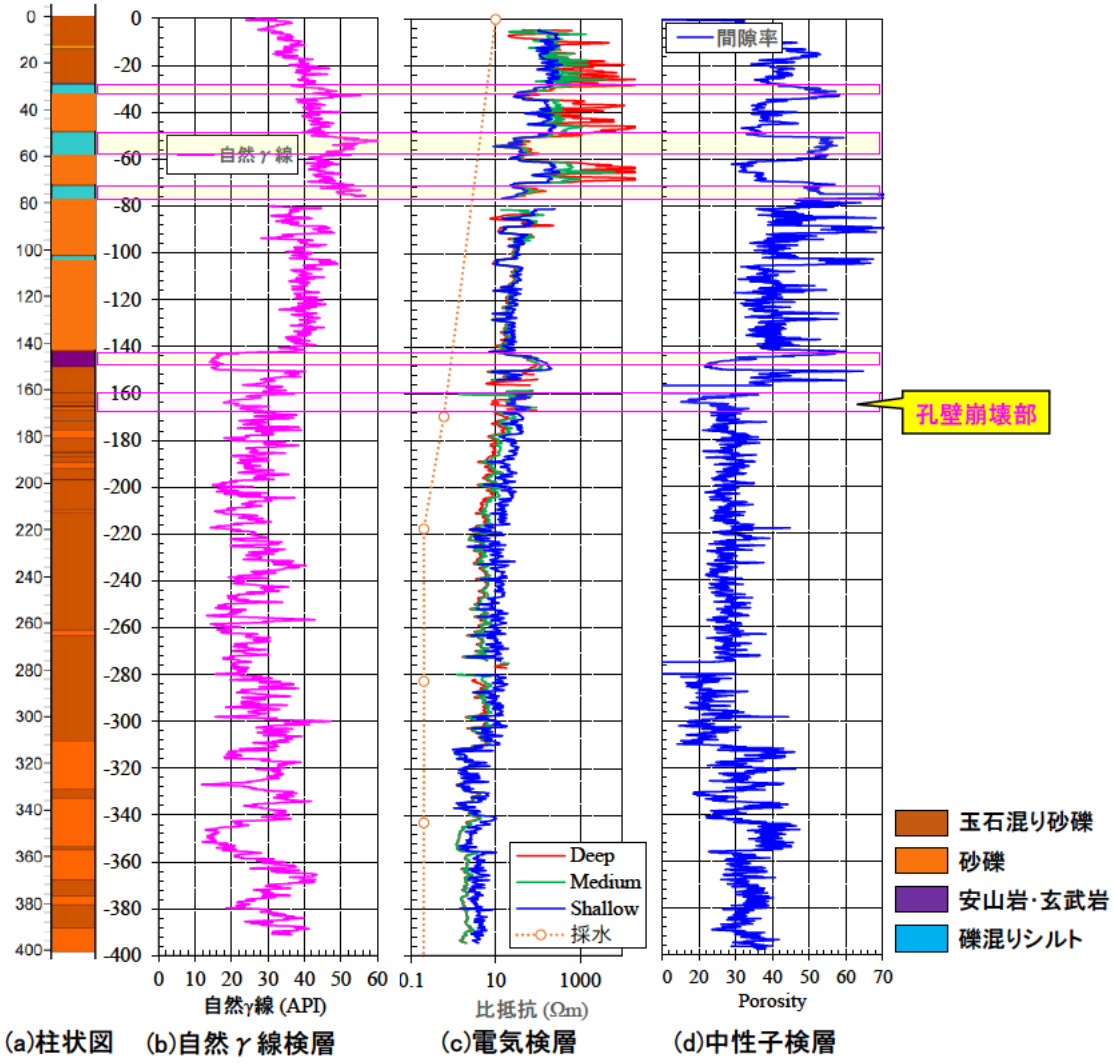


図 1　複合解析に使用した物理検層によるプロファイル（駿河湾 FGB-2 孔）

表 1　原位置透水試験結果および採水の比抵抗

深度(m)	透水係数(m/s)	採水の比抵抗(Ωm)
169.74	6.90E-06	0.596
217.635	3.50E-06	0.199
282.75	1.50E-06	0.200
343.15	6.00E-07	0.200
403.55		0197

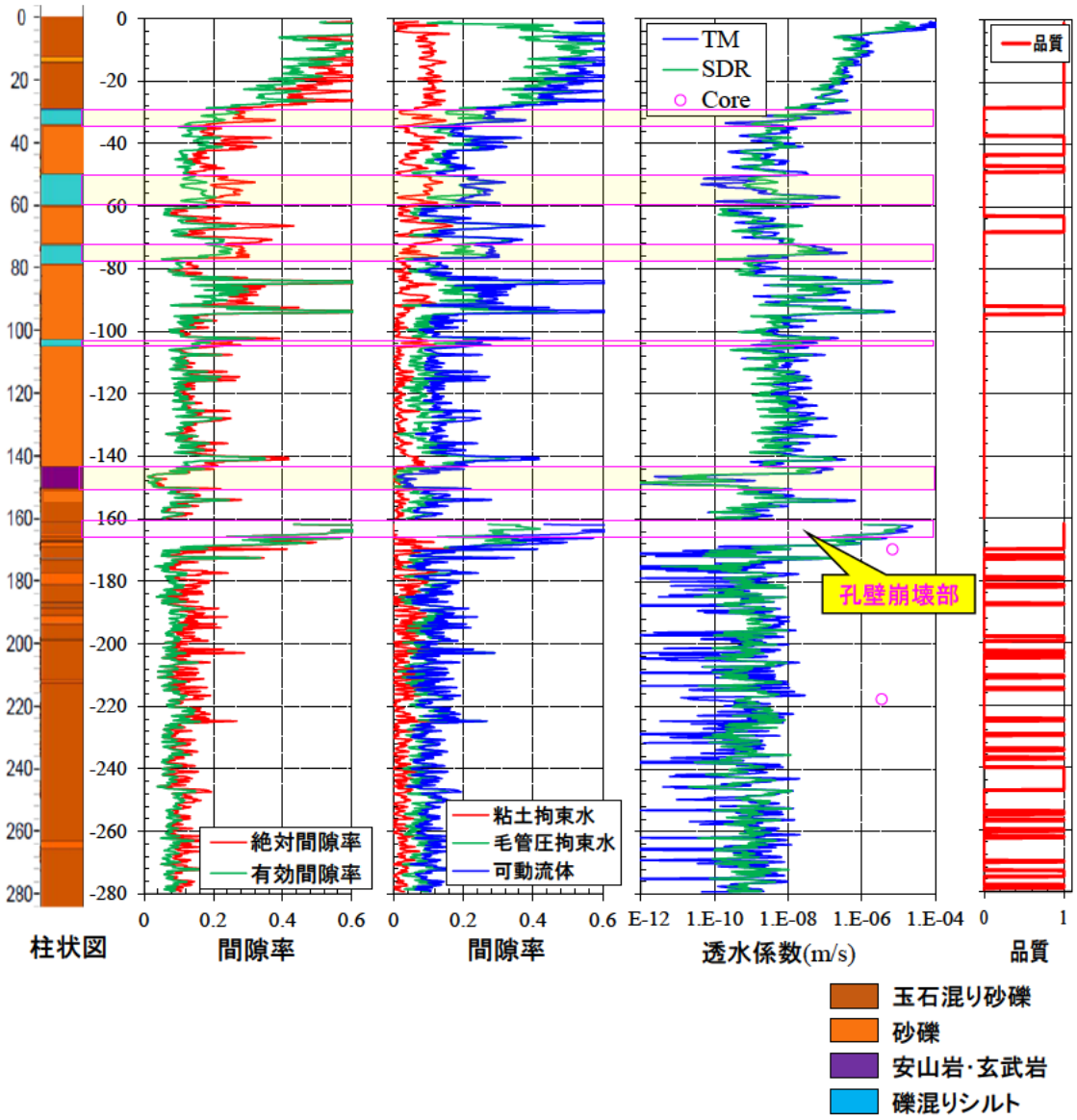


図 2　NMR 検層による間隙率と透水係数のプロファイル（駿河湾 FGB-2 孔）

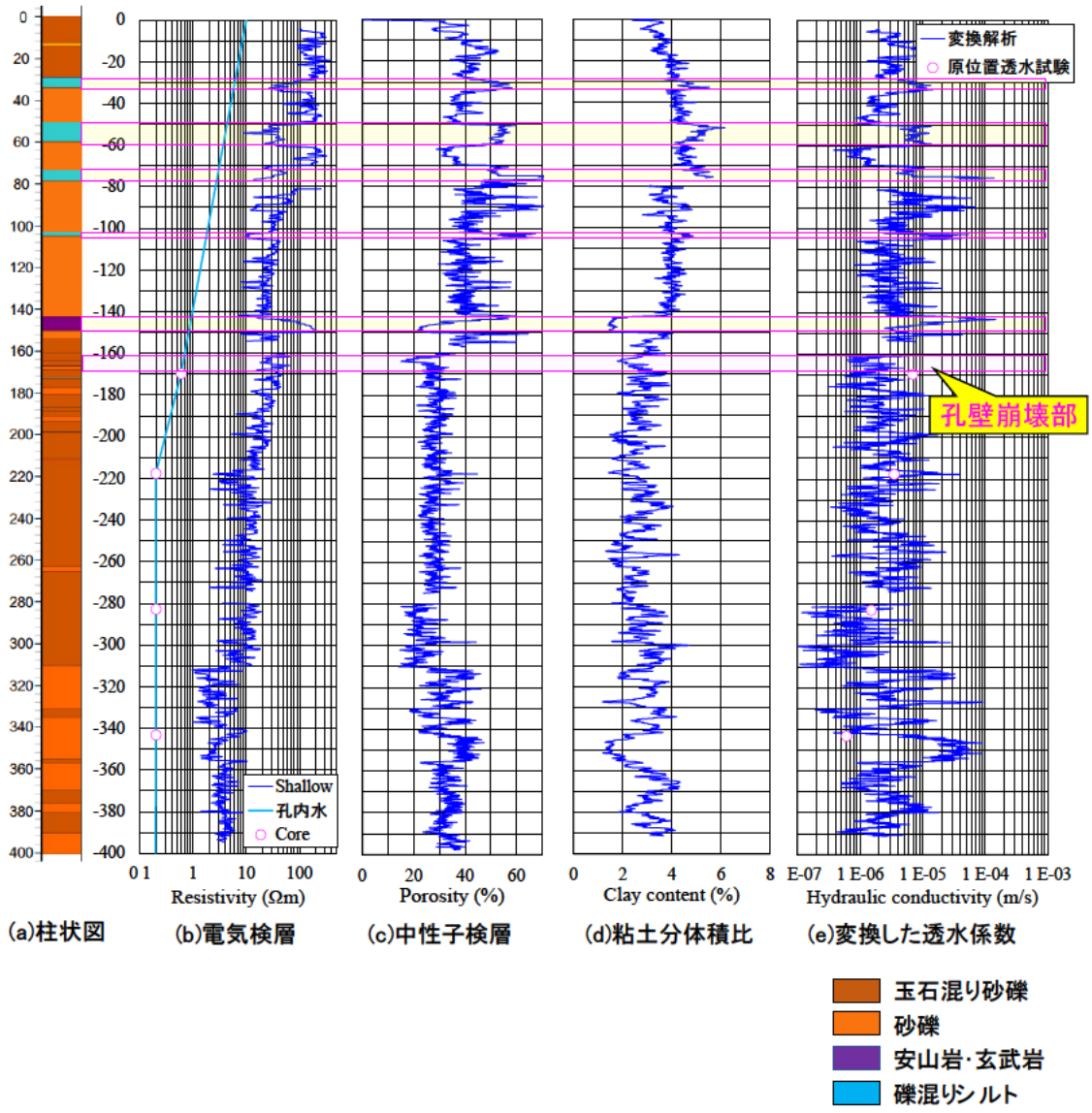


図3　物理検層データより変換した透水係数プロファイル（駿河湾FGB-2孔）

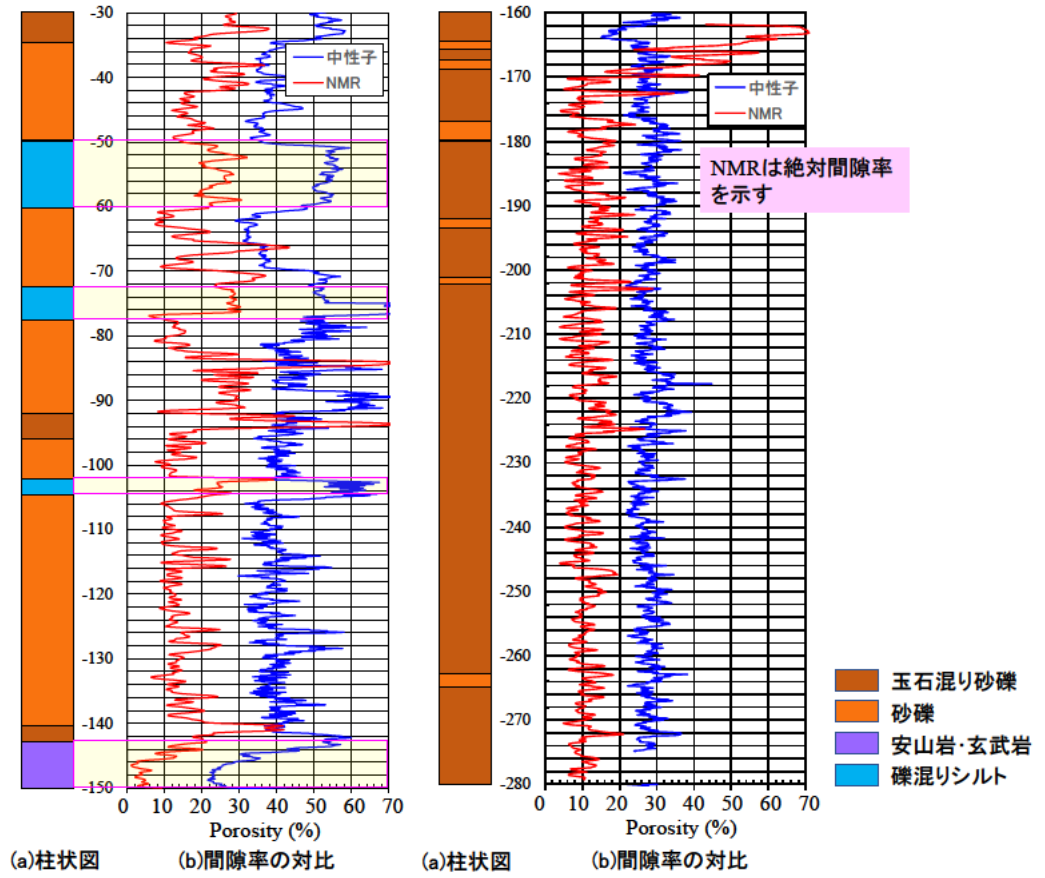


図4　中性子検層とNMR検層による間隙率の対比（駿河湾FGB-2孔）

②幌延地域の室内試験データを用いた複合解析

（a）クロスプロット法によるイチジク圧縮強度

本事業では、電力中央研究所が北海道幌延町で過去に実施したコントロールボーリングHCD-3孔において、76か所の深度より採取したコア試料による室内試験データを用いて、クロスプロット法および高橋ほか（2016）に基づく岩石物理モデルにより一軸圧縮強度を計算し、室内での一軸圧縮試験による一軸圧縮強度との整合性の評価を実施した。図5(a)～(d)に、地質柱状図および間隙率、湿潤密度、音波速度（P波速度、S波速度）データを示す。これより、深度840mまでは稚内層、深度840～855mは遷移層、深度855m以深は声問層が分布していることが分かる。

図5(b)～(d)で示したデータから計算した動ポアソン比と弾性係数およびせん断弾性係数を図5(e)と(f)に示す。これより、深度200～400m区間の動ポアソン比は0。05～0。3となっているが、同じ稚内層の動ポアソン比に対して異常に低い値となっている。この要因として、この区間の間隙率や密度はそれ以深の深度400～810m区間の同じ稚内層と類似した値を示すにもかかわらず、音波速度、特にS波速度が深度400m以深と比較して極めて高い値となっており、測定誤差が大きくデータの信頼性が良くないと推測される。よって、この区間のデータに対しては、これ以降に記述する複合解析の評価は行わないことにする。

図6と表2に不良データ削除前後の相関式と相関係数を示す。これより、動弾性係数が一軸圧縮強度と最も相関性が良いことがわかる。次に、室内試験データを物理検層データとみなして、相関式（$\sigma_c = a \cdot E_d{}^b$、$a$=4。45、$b$=0。725）としたクロスプロット法により、動弾性係数E_dから一軸圧縮強度σ_cを計算した結果を図7に示す。これには、室内試験により測定した一軸圧縮強度も合わせて示している。これより、両者の大局的な傾向は整合したが、室内試験値σ_m（2～28MPa）の方が複合解析変換値σ_c（5～17MPa）より分布範囲が大きく、両者の差分値（σ_c-σ_m）／σ_mの平均は23%となった。図8に複合解析と室内試験による一軸圧縮強度の相関図を稚内層と声問層で分けて示す。同図中の深度値は、複合解析値より室内試験値が著しく低い深度を示す。

室内試験による一軸圧縮強度の分布範囲が大きくなっている要因は、高橋ほか（2016）でも示されている通り、採取コア試料に含まれるマイクロクラックに大きく依存していると推測される。そのため、クロスプロット法では室内試験データを移動平均処理したような結果となってしまい、マイクロクラックの影響を受けない力学強度、すなわち岩石の基質部の力学強度を合理的に見積ることは難しいと考えられる。

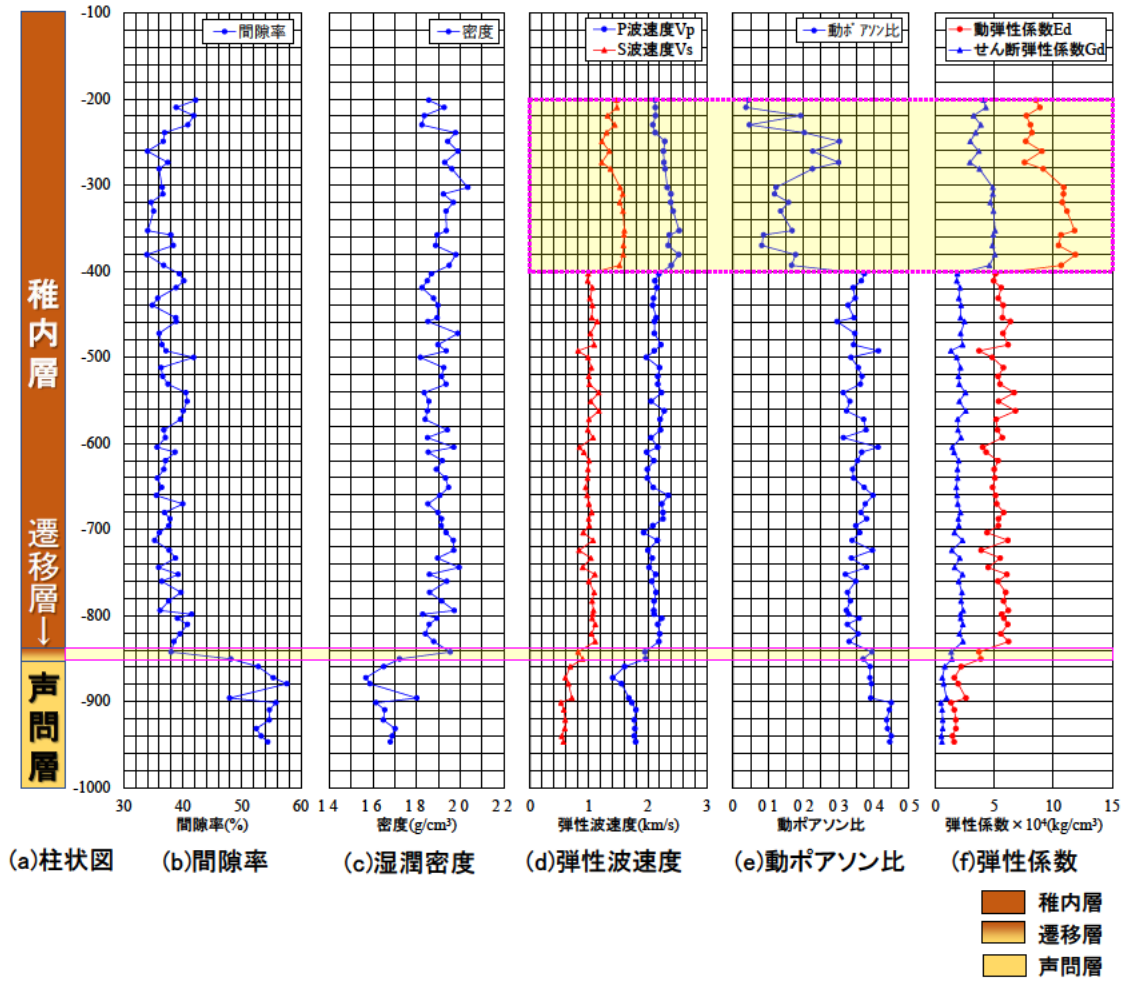


図５　複合解析に使用した岩石コア試料による室内試験データ（幌延 HCD-3 孔）
黄色ハッチ箇所は弾性波速度の読み取り精度が良くない深度区間を示す

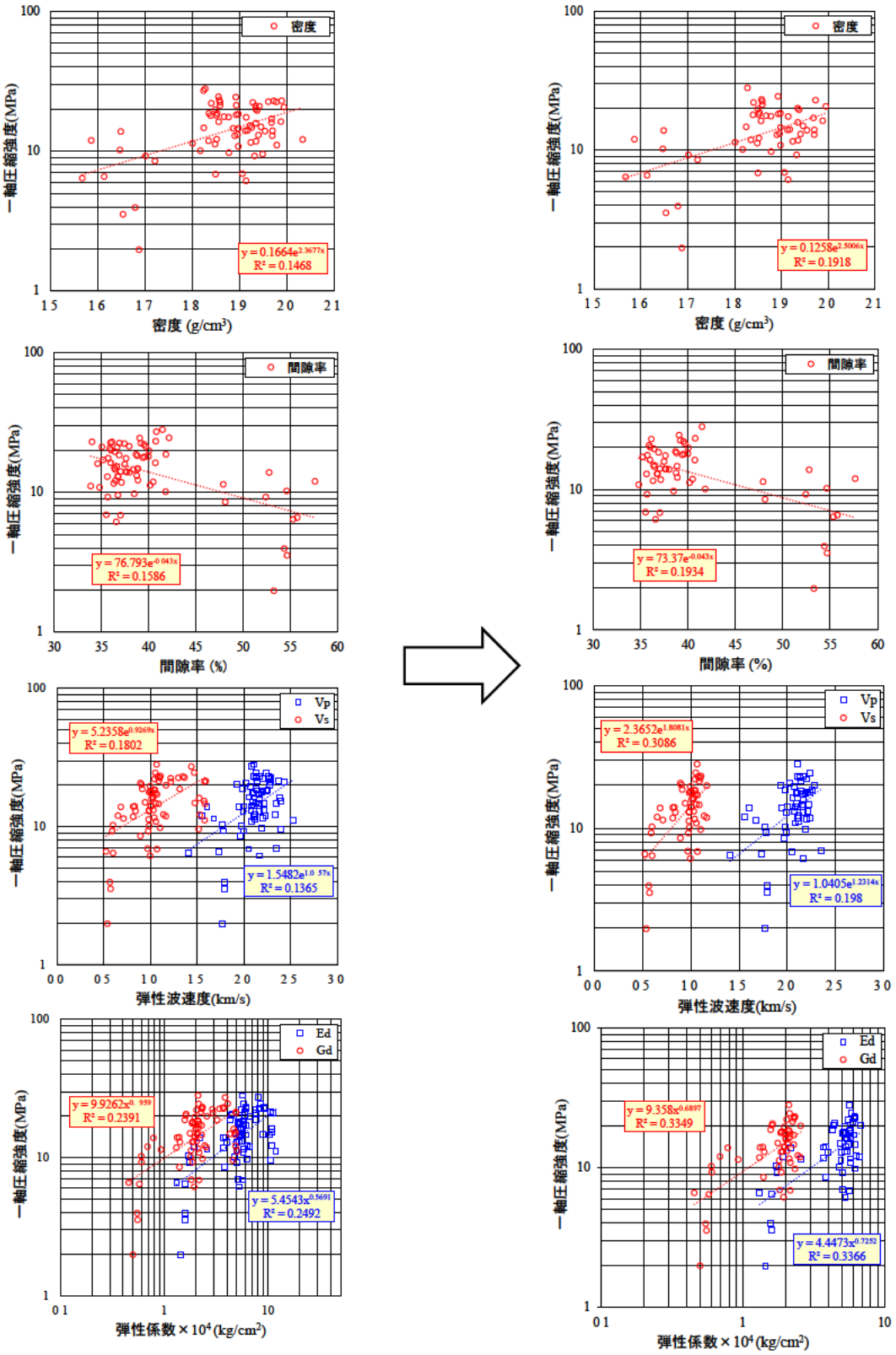


図 6　室内試験による各種物理特性と一軸圧縮強度との関係（幌延 HCD-3 孔）
（左）深度 200～400m の不良データ削除前、(右)不良データ削除後

表 2　不良データ削除前後の各物理特性の相関係数

物理特性	削除前	削除後	改善率
間隙率	0。1586	0。1934	1。219
密度	0。1468	0。1918	1。307
P 波速度 V_p	0。1365	0。1980	1。451
S 波速度 V_s	0。1802	0。3086	1。713
弾性係数 E_d	0。2492	**0。3366**	1。351
せん断弾性係数 G_d	0。2391	**0。3349**	1。401

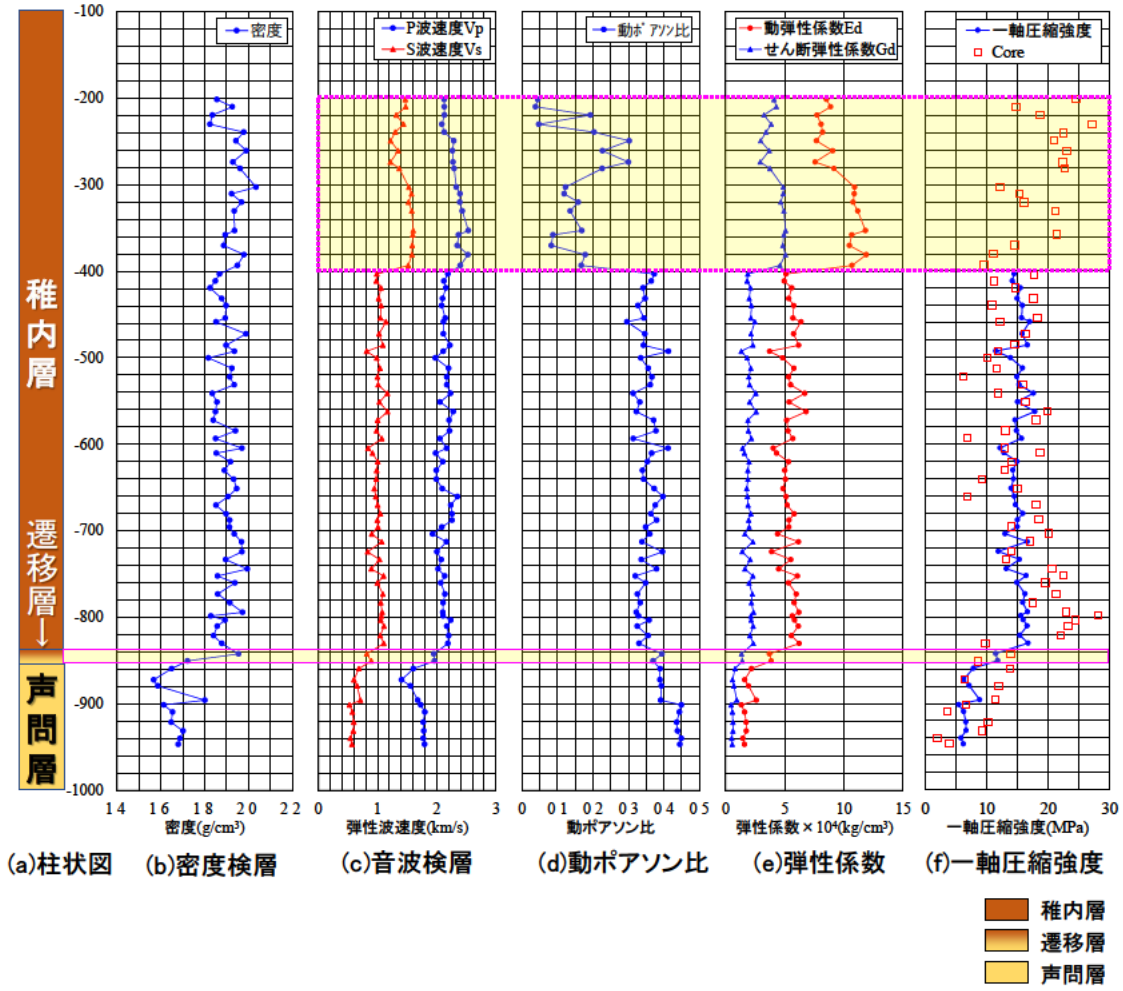


図 7　物理検層データより算出した力学強度プロファイル（幌延 HCD-3 孔）
—クロスプロット法による計算結果—

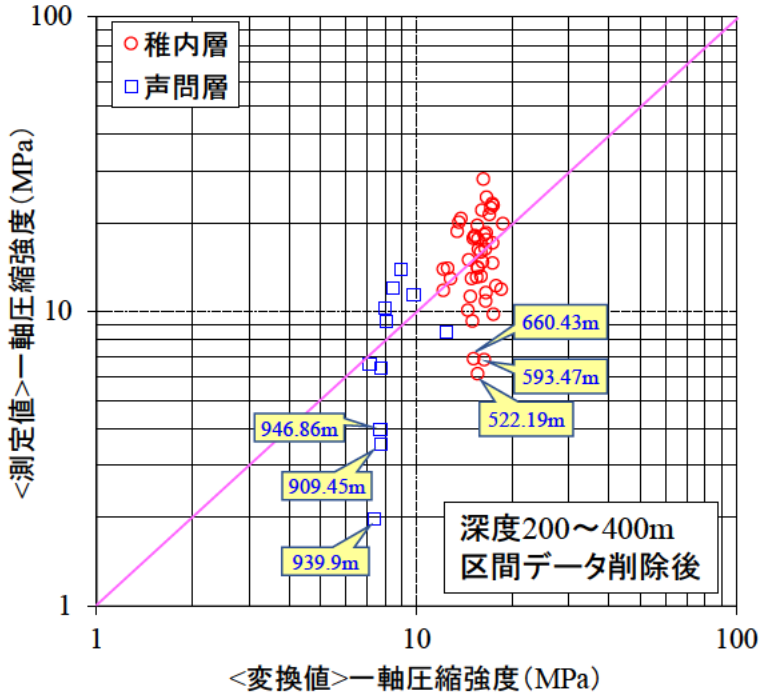


図8　室内試験と変換解析による一軸圧縮強度の比較（幌延HCD-3孔）

（b）岩石物理モデルによる一軸圧縮強度

続いて、高橋ほか（2016）に基づく岩石物理モデルによる方法を適用した結果を述べる。図9に計算した間隙率と一軸圧縮強度との関係を示す。同図には、一般財団法人電力中央研究所による調査孔（幌延HCD-3孔）および国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、JAEAとする）による調査孔（HDB4～10）より採取した岩石コア試料により計測した間隙率と一軸圧縮強度のデータを岩種（稚内層、声問層、勇知層）ごとに示している。

次に、計算した間隙率と弾性波速度、および弾性波速度と一軸圧縮強度の関係を図10に示す。また、これらの結果から求めたP波速度およびS波速度と一軸圧縮強度との関係を図11に示す。凡例に示す"相関式"は高橋ほか（2016）に示されている値に基づき計算したが、コア試料による弾性波速度をうまく説明できなかったため、砂岩の弾性係数K_sだけ36。6→150GPaとしている。

図11(b)より、岩石物理モデルによるS波速度は、稚内層、声問層、勇知層とも一軸圧縮強度とほぼ整合していると考えられる。ここで、図中に示す5次の多項式は、S波速度と一軸圧縮強度の関係式に対する近似曲線である。この多項式により、S波速度から一軸圧縮強度を算出した結果を図12に示す。これより、室内試験によるS波速度の信頼性の高い深度400m以深では、岩石物理モデルによる一軸圧縮強度（図12(e)）はその最大値として概ね整合しており、クロスプロット法による一軸圧縮強度（図12(d)）よりも妥当な結果が得られていると考えられる。なお、岩石物理モデルによる一軸圧縮強度（以降σ_cと記す）は、声問層よりも稚内層の方が室内試験による一軸圧縮強度（以降σ_mと記す）より全般的に高い傾向を示す。この要因として、稚内層のコア試料には声問層よりマイクロクラックの影響が大きく作用し、σ_cよりもσ_mの方が小さくなったことが考えられる。なお、今回、図10と図11に示した通り、頁岩質砂岩モデルにより計算したP波速度とS波速度の両者とも同時に室内試験値と整合させることは困難であった。この要因として、モデル計算に使用した各種物性値や平均化指数などのパラメータが最適ではなく、再検討する必要があると考えられる。さらに、P波速度、S波速度、密度から算出される弾性係数やせん断弾性係数から一軸圧縮強度を導くなど、計算精度の向上を図る必要があり、今後の検討課題としたい。

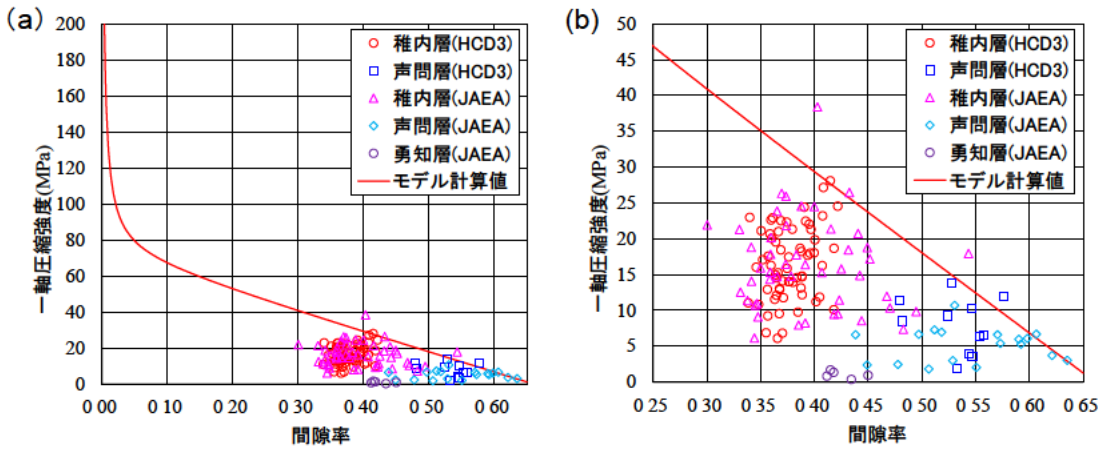


図 9　間隙率と一軸圧縮強度の関係、(b)は(a)の点線範囲を拡大して表示
（JAEA の室内試験データは大山ほか、 2010 より引用）

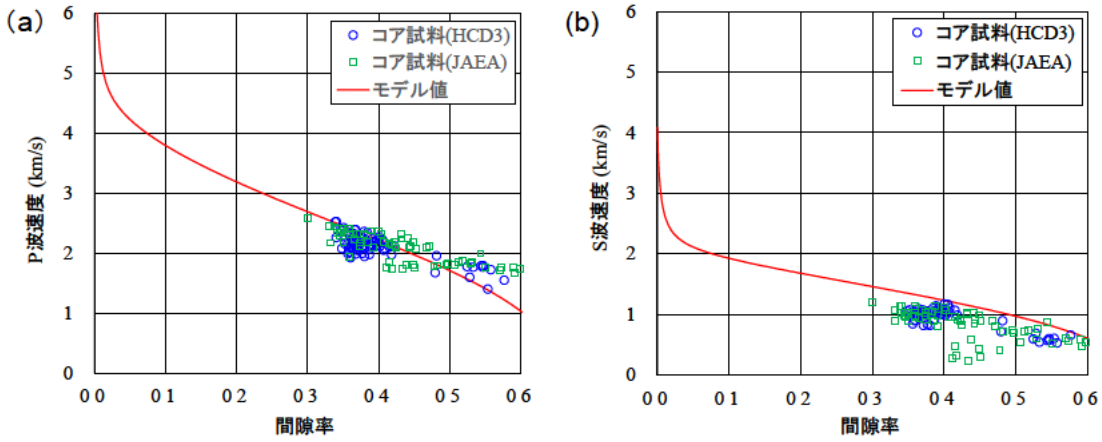


図 10　(a)間隙率と P 波速度および(b)間隙率と S 波速度の関係
（JAEA の室内試験データは大山ほか、 2010 より引用）

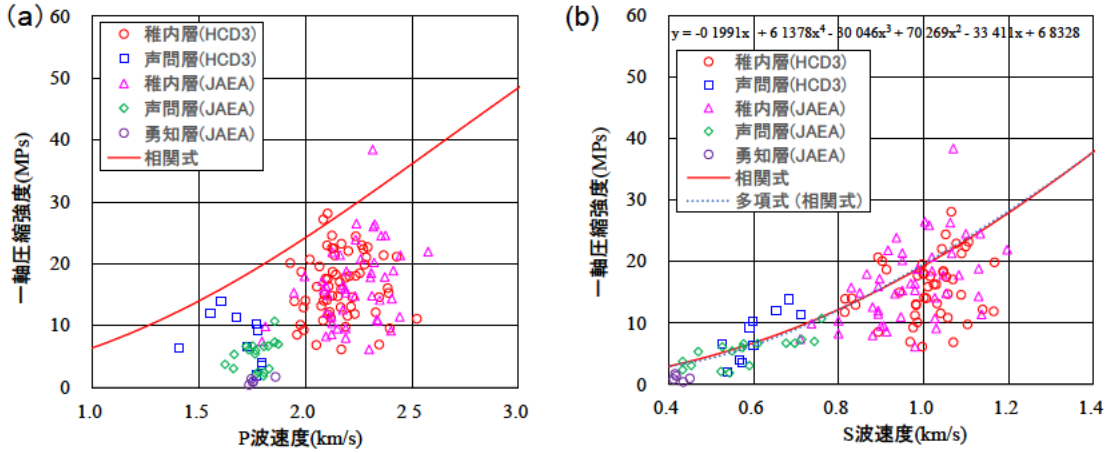


図 11　P 波速度および S 波速度と一軸圧縮強度の関係
（JAEA の室内試験データは大山ほか、 2010 より引用）

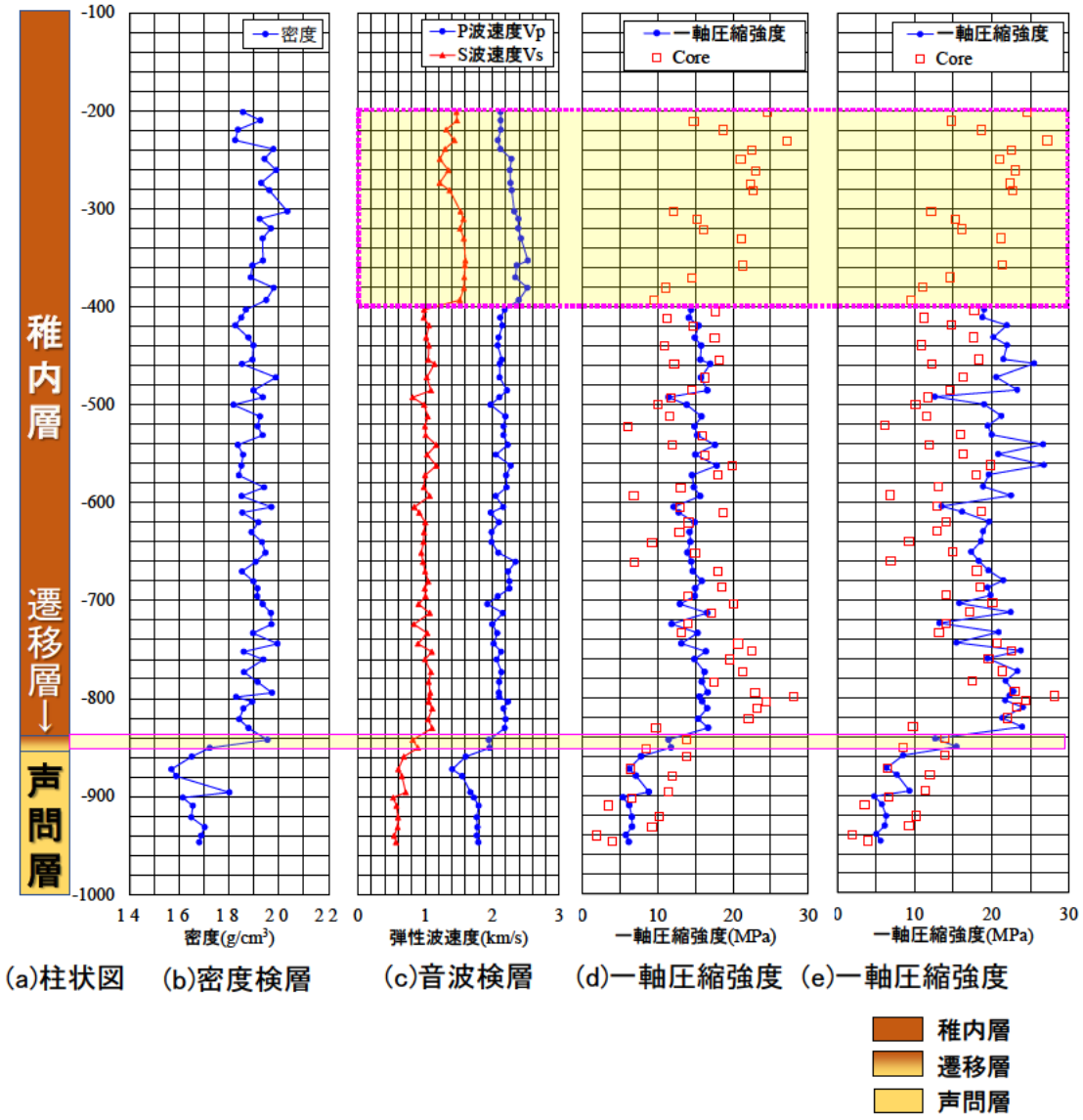


図 12　物理検層データより算出した力学強度プロファイル（幌延 HCD-3 孔）
—(d)クロスプロットによる方法と(e)岩石物理モデルによる方法の対比—

（4）まとめ

駿河湾FGB-2孔で行われた複数の物理検層データ（電気検層、自然γ線、中性子検層）を使用して、Lima(1995)に基づく変換解析により透水係数を算出し、NMR検層による透水係数、およびコア試料による透水係数と比較した。その結果、以下の知見が得られた。

・複合解析による透水係数は10^{-7}～10^{-5}m/s となり、現位置透水試験結果（6×10^{-7}～6。9×10^{-6}m/s）とほぼ整合する値が導かれた。
・NMR検層による透水係数は10^{-10}～10^{-8}m/sとなり、原位置透水試験結果より3桁ほど低くなった。この要因として、中性子検層による間隙率に対し、NMR検層による間隙率は1/2～1/3と小さく見積もっているため、透水係数は小さく算出されたと推定される。

次に、幌延地点HCD-3孔より採取した岩石コア試料より得られた物性値を物理検層データとみなして、クロスプロット法および岩石物理モデルによる方法を用いて複合解析を試みた。その結果、以下の知見が得られた。

・クロスプロット法により相関係数の最も良い体積弾性率から一軸圧縮強度を算出した。その結果、岩種の相違に伴う両者の大局的な傾向は整合したが、室内試験値の方が計算値より分布範囲が大きくなった。
・岩石物理モデルによる方法により、S波速度から一軸圧縮強度を計算したところ、コア試料による一軸圧縮強度の最大値、すなわちマイクロクラックの影響を受けない岩石基質部の力学強度を反映した結果が得られたと考えられる。
・クロスプロット法では、岩石基質部の力学強度を妥当に見積ることは難しいと考えられる。
・今後は、頁岩質砂岩モデルに基づき、S波速度にP波速度と密度も合わせて、これらの値より導かれる弾性係数やせん断弾性係数から一軸圧縮強度を導く手法を検討する。

参考文献

原子力発電環境整備機構（2021）：包括的技術報告：我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―（概要編）

Goode、 P。 A。、 and Sen、 P。 N。 (1988): Charge density and permeability in clay bearing sandstones: *Geophysics*、 **53**、 1610-1612。

Katsube、T。J。and Hume、J。P。(1987): Permeability determination in crystalline rocks by standard geophysical logs、 *Geophysics*、 **52**、 342-352。

Lima O。 A。 L。 and Sharma、 M。 M。 (1990): A grain conductivity approach to shaly sandstone、 *Geophysics*、 **55**、 1347-1356。

Lima O。A。L。(1995): Water saturation and permeability from resistivity、dielectric、and porosity logs、 *Geophysics*、 **60**、 1756-1764。

大山隆弘・木方建造・鈴木浩一・ほか15名（2010）：幌延における堆積岩の特性研究(その2)－電力中央研究所／日本原子力研究開発機構共同研究 平成16～20年度成果報告－

Sen、 P。 N。、 Straley、 C。、 Kenton、 W。 E。、 and Whittingham、 W。 S (1990): Surface-to-volume ratio、 charge density、 nuclear magnetic relaxation、 and permeability in clay-bearing sandstones、 *Geophysics*、 **55**、 61-69。

鈴木浩一 (2002)：物理探査法による地盤の工学的物性値の可視化について－地盤の透水係数を例として－、 応用地質、**42**、342-350。

鈴木浩一 (2013)：岩石物理学に基づく物理探査結果の解釈技術の動向－物理探査および物理検層データに対する複合解析の適用－、Journal of MMIJ (資源と素材)、**129**、151-157。

高橋亨・田中壮一 (2016)：岩石の一軸圧縮強さと弾性波速度の関係のモデル化、第44回岩盤力学シンポジウム講演集、土木学会

Appendix Ⅶ

緩衝材の機能変化に係るデータの拡充

第１章　はじめに

本付属書は、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（沿岸部処分システム評価確証技術開発）報告書（以下、令和４年度報告書とする）のうち 4-2 節の「緩衝材の機能変化に係るデータの拡充」において、本文中の試験結果や解析結果等の詳細を補足する内容を記したものである。表 1-1 に、内容と本編の対応する項を示す。なお、本編に掲載した図の一部も必要に応じて比較できるように再掲した。

表 1-1　本付属書に記した内容

本付属書における章	内容	令和４年度報告書に対応する項
2	イオン交換選択係数の取得	4-3(3)②
2-1	圧縮系通水試験における排水液の濃度変化	4-3(3)②(d)(i)
2-2	分散系のバッチ試験における分析結果	4-3(3)②(d)(ii)
2-3	イオン強度とイオン交換選択係数の関係	4-3(3)②(f)(ii)1)
3	イオン交換反応評価のための解析方法の整備	4-3(3)③
3-1	通水試験の再現解析における初期間隙水組成	4-2(2)③(c)(ii)
3-2	カルサイトの溶解の影響に関する解析の条件	4-2(2)③(c)(iv)2)
3-3	透水－膨潤圧試験の再現解析条件（初期間隙水組成）	4-2(2)③(d)(iii)
4	緩衝材の膨潤率に対する溶存陽イオンの影響把握試験	4-3(4)
4-1	膨潤量試験の供試体の解体	4-2(3)③
4-2	ベントナイト試料の層間陽イオン量	

第２章　イオン交換選択係数の取得

令和 4 年度に、試験が終了した KCl-NaCl 混合溶液（イオン強度 0.125）を乾燥密度 1.00Mg/m^3 の供試体に通水したケース⑥、$CaCl_2$-NaCl 混合溶液（イオン強度 0.5）を乾燥密度 1.00 Mg/m^3 の供試体に通水したケース⑧、沿岸部実地下水を乾燥密度 1.00 Mg/m^3 の供試体に通水した。また、KCl-NaCl 混合溶液（イオン強度 0.5）を乾燥密度 0.88 Mg/m^3 の供試体に通水したケース③、KCl-NaCl 混合溶液（イオン強度 0.5）を乾燥密度 1.27Mg/m^3 の供試体に通水したケース⑦、$MgCl_2$-NaCl 混合溶液（イオン強度 0.5）を乾燥密度 1.00 Mg/m^3 の供試体に通水したケース⑩の通水試験を実施した。

通水試験の計画

ケース	通水溶液	有効モンモリロナイト乾燥密度 (Mg/m^3)	イオン強度	令和2年度	令和3年度	令和4年度	令和5年度
①	KCl溶液	0.88	0.50	○			
②		1.27	0.50	○			
③	KCl-NaCl混合溶液	0.88	0.50			○	
④		1.00	0.50		○		
⑤			0.25		○		
⑥			0.125		○	○	
⑦		1.27	0.50			○	○
⑧	$CaCl_2$-NaCl混合溶液	1.00	0.50		○	○	
⑨			0.25				○
⑩	$MgCl_2$-NaCl混合溶液	1.00	0.50			○	
⑪			0.25				○
⑫	沿岸部実地下水 (FGB-2孔_ 167.70~171.78m)	1.00	0.28		○	○	

2-1　圧縮系通水試験における排水液の濃度変化

上記の通水試験のケース③、ケース⑩の排水液中の陽イオン濃度変化を図 2-1-1 及び図 2-1-2 に示す。ここで示す陽イオン濃度は簡易イオン電極による分析結果である。

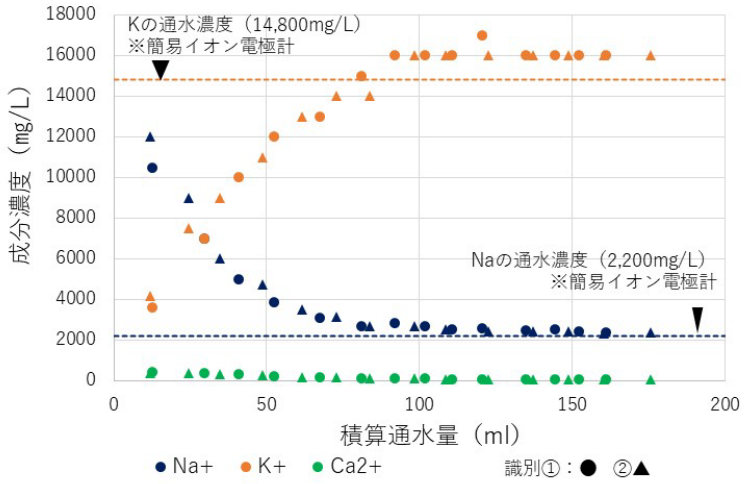


図 2-1-1　排水液の陽イオン濃度の分析結果

KCl-NaCl 混合溶液（イオン強度 0.5）乾燥密度 0.88 Mg/m³ のケース③

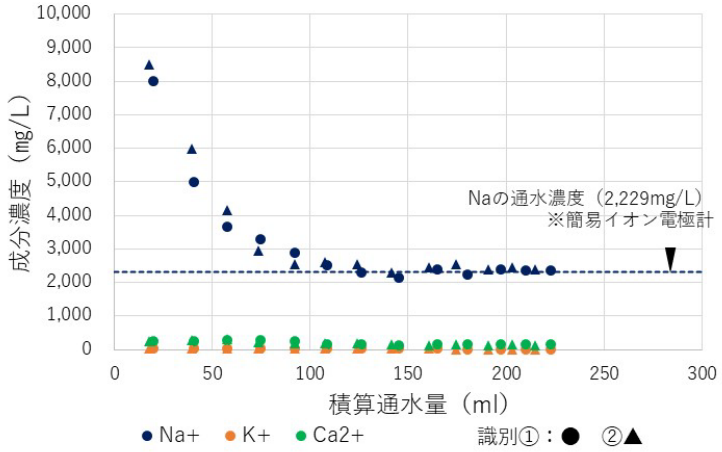


図 2-1-2　排水液の陽イオン濃度の分析結果

$MgCl_2$-NaCl 混合溶液（イオン強度 0.5）乾燥密度 1.00 Mg/m³ のケース⑩

2-2　分散系のバッチ試験における分析結果

各浸漬溶液のバッチ試験で得られた液相及び固相の分析結果を**表 2-2-1～表 2-2-3** に示す。

表 2-2-1　K/Na 系の浸漬試験結果

ｲｵﾝ強度	No.	液相									固相									
		初期濃度 (mol/L)				平衡液濃度 (mol/L)					初期収着量 (meq/100g)					平衡収着量 (meq/100g)				
		$[Na^+_0]$	$[K^+_0]$	$[Ca^{2+}_0]$	$[Mg^{2+}_0]$	$[Na^+]$	$[K^+]$	$[Ca^{2+}]$	$[Mg^{2+}]$	ｲｵﾝ強度	(Na_0)	(K_0)	(Ca_0)	(Mg_0)	total	(Na)	(K)	(Ca)	(Mg)	total
0.500	①	0.103	0.404	0.002	0.002	0.140	0.359	0.003	0.002	0.514	101.8	1.3	18.2	0.9	122.2	9.46	116.0	10.5	1.05	137.0
	②					0.140	0.359	0.003	0.002	0.514						7.86	115.1	11.7	1.85	136.5
	③					0.138	0.362	0.003	0.002	0.516						14.0	107.7	9.6	1.10	132.4
	④					0.144	0.361	0.004	0.002	0.523						0.0	110.9	7.63	0.00	118.5
	⑤					0.135	0.358	0.003	0.002	0.507						20.1	118.2	12.8	1.81	153.0
0.250	①	0.051	0.200	0.001	0.001	0.084	0.163	0.002	0.001	0.256	101.8	1.3	18.2	0.9	122.2	18.3	92.1	11.4	0.71	122.5
	②					0.083	0.161	0.002	0.001	0.253						19.4	98.4	11.3	0.70	129.8
	③					0.083	0.162	0.002	0.001	0.254						20.0	96.8	11.4	0.71	129.0
0.125	①	0.025	0.101	0.000	0.000	0.056	0.069	0.001	0.000	0.130	101.8	1.3	18.2	0.9	122.2	23.7	80.3	14.1	1.28	119.5
	②					0.058	0.069	0.001	0.000	0.131						21.1	79.1	14.1	1.27	115.6
	③					0.057	0.068	0.001	0.000	0.129						22.7	83.3	14.0	1.23	121.1
0.050	①	0.011	0.040	0.000	0.000	0.035	0.019	0.000	0.000	0.057	101.8	1.3	18.2	0.9	122.2	40.6	53.7	16.3	0.00	110.6
	②					0.035	0.018	0.000	0.000	0.055						40.3	55.9	17.1	1.06	114.3
	③					0.035	0.018	0.000	0.000	0.055						41.1	56.1	17.1	1.06	115.4

表 2-2-2　Ca/Na 系の浸漬試験結果

ｲｵﾝ強度	No.	液相								固相									
		初期濃度	平衡液濃度				初期収着量				平衡収着量								
		(mol/L)				(mol/L)				ｲｵﾝ強度	(meq/100g)					(meq/100g)				
		$[Na^+_0]$	$[K^+_0]$	$[Ca^{2+}_0]$	$[Mg^{2+}_0]$	$[Na^+]$	$[K^+]$	$[Ca^{2+}]$	$[Mg^{2+}]$		(Na_0)	(K_0)	(Ca_0)	(Mg_0)	total	(Na)	(K)	(Ca)	(Mg)	total
0.500	①	0.097	0.000	0.129	0.002	0.134	0.001	0.113	0.002	0.478	101.8	1.3	18.2	0.9	122.2	10.5	0.0	99.7	0.0	110.2
	②					0.137	0.001	0.113	0.002	0.483						1.11	0.0	97.9	0.0	99.0
	③					0.136	0.002	0.113	0.002	0.483						3.97	0.0	97.9	0.0	101.5
	④					0.134	0.002	0.112	0.002	0.478						10.2	0.0	102.1	0.0	112.3
	⑤					0.136	0.001	0.113	0.002	0.480						5.01	0.0	99.8	0.0	104.9
0.250	①	0.049	0.000	0.064	0.001	0.085	0.001	0.049	0.001	0.237	101.8	1.3	18.2	0.9	122.2	11.8	0.0	90.2	0.0	102.0
	②					0.084	0.001	0.048	0.001	0.232						13.2	0.0	96.9	0.0	110.1
	③					0.084	0.000	0.050	0.001	0.238						13.5	1.1	86.5	0.0	101.1
0.125	①	0.025	0.000	0.032	0.000	0.059	0.000	0.016	0.000	0.108	101.8	1.3	18.2	0.9	122.2	16.1	0.42	101.8	0.95	119.3
	②					0.058	0.000	0.016	0.000	0.108						17.1	0.70	100.1	0.93	118.8
	③					0.059	0.000	0.016	0.000	0.109						15.0	0.44	100.0	0.83	116.3
0.050	①	0.010	0.000	0.012	0.000	0.035	0.000	0.001	0.000	0.039	101.8	1.3	18.2	0.9	122.2	38.7	0.57	73.5	0.81	113.6
	②					0.035	0.000	0.001	0.000	0.040						37.6	0.71	73.5	0.82	112.6
	③					0.035	0.000	0.001	0.000	0.039						37.9	1.10	73.6	0.82	113.4

表 2-2-3　Mg/Na 系の浸漬試験結果

イオン強度	No.	液相									固相									
		初期濃度				平衡液濃度					初期収着量					平衡収着量				
		(mol/L)				(mol/L)				イオン強度	(meq/100g)					(meq/100g)				
		$[Na^+_0]$	$[K^+_0]$	$[Ca^{2+}_0]$	$[Mg^{2+}_0]$	$[Na^+]$	$[K^+]$	$[Ca^{2+}]$	$[Mg^{2+}]$		(Na_0)	(K_0)	(Ca_0)	(Mg_0)	total	(Na)	(K)	(Ca)	(Mg)	total
0.500	①	0.096	0.000	0.001	0.127	0.132	0.000	0.004	0.114	0.485	101.8	1.3	18.2	0.9	122.2	12.1	1.00	3.41	3.41	67.7
	②					0.133	0.000	0.004	0.114	0.487						8.87	2.45	3.46	3.46	66.3
	③					0.132	0.000	0.004	0.113	0.482						11.4	1.65	3.50	3.50	73.3
	④					0.134	0.000	0.004	0.114	0.488						6.70	1.96	3.38	3.38	65.9
	⑤					0.132	-0.001	0.004	0.114	0.485						12.1	2.76	3.39	3.39	66.7
0.250	①	0.052	0.000	0.000	0.062	0.083	0.000	0.003	0.047	0.232	101.8	1.3	18.2	0.9	122.2	23.5	0.85	8.01	8.01	76.5
	②					0.084	0.000	0.002	0.046	0.229						22.9	1.31	8.37	8.37	82.7
	③					0.084	0.001	0.002	0.047	0.231						22.4	0.02	8.23	8.23	79.5
0.125	①	0.024	0.000	0.000	0.032	0.057	0.000	0.002	0.016	0.109	101.8	1.3	18.2	0.9	122.2	19.7	0.95	11.7	11.7	79.5
	②					0.057	0.000	0.002	0.016	0.109						20.1	1.41	11.7	11.7	79.8
	③					0.057	0.000	0.002	0.016	0.110						19.3	0.51	11.7	11.7	79.5
0.050	①	0.010	0.000	0.000	0.012	0.036	0.000	0.000	0.001	0.042	101.8	1.3	18.2	0.9	122.2	35.2	1.28	16.6	16.6	55.8
	②					0.036	0.000	0.000	0.001	0.042						35.9	1.08	16.6	16.6	55.8
	③					0.037	0.000	0.000	0.002	0.043						34.0	1.04	16.6	16.6	55.6

2-3　イオン強度とイオン交換選択係数の関係

ポアソン-ボルツマン方程式（以降「PB 方程式」とする。）を解くことで得られたイオン強度と Ca-Na のイオン交換選択係数の関係については、正の相関はわずかであり、ほぼイオン強度に対して横ばいの傾向が見られた（図 2-3-1）。この傾向について層間の電位分布（図 2-3-2）及び、陽イオン濃度分布（図 2-3-3）から検討した。以下にその内容を示す。

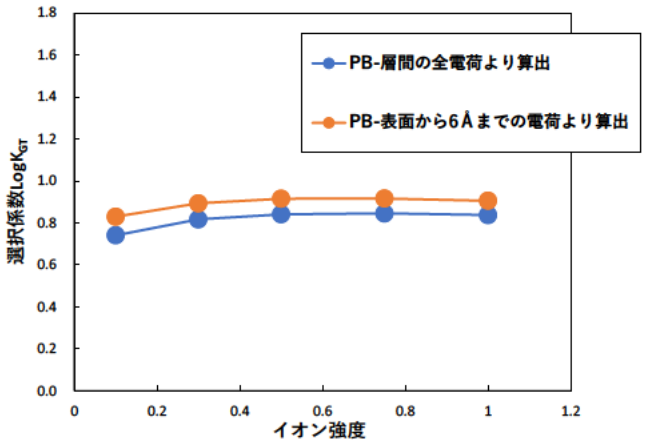


図 2-3-1　PB 方程式から得られたイオン強度と Ca-Na のイオン交換選択係数 $logK_{GT}$ の関係

（乾燥密度 1.00 Mg/m^3,モル濃度比 Ca-Na:Cl＝4:3:11）

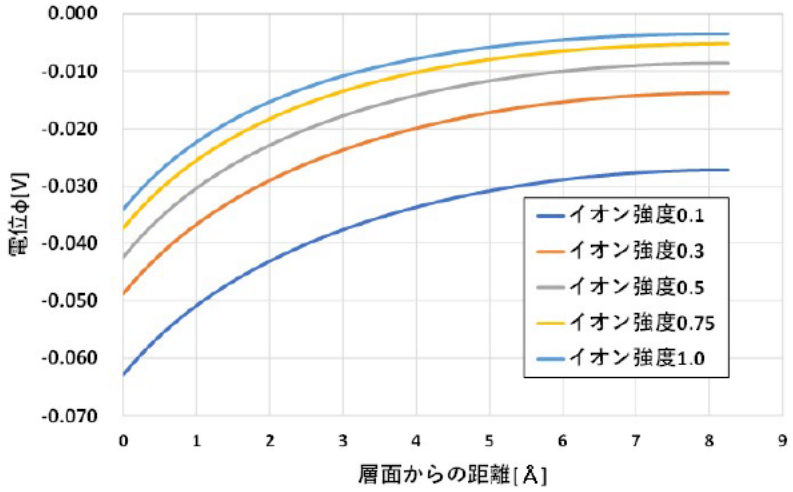
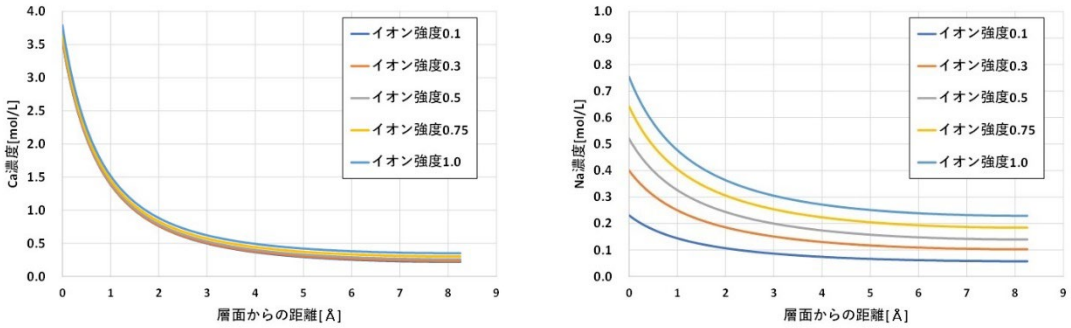


図 2-3-2 イオン強度による層間の電位分布



(a) Ca イオン　　(b) Na イオン

図 2-3-3　イオン強度による層間の陽イオン濃度分布

図 2-3-2 に示すように、粒子表面からの電位分布は、イオン強度によらずほぼ同じ形状であり、イオン強度が大きいほど電位が高い傾向が見られる。つまり、イオン強度による層間の電位の違いはあるが、電場は不変ということである。したがって、あるイオン強度における電位分布をϕ(x)とすると、別のイオン強度の電位分布の解は、ϕ(x)+A（A は x によらず一定）と近似できることになる。まずはこのような近似が成り立つ理由について考察する。

図 2-3-2 より、電位$\phi(x)$が約-0.03V と仮定すると、$\exp\left(\frac{-e\phi(x)}{kT}\right)$は 3.2、$\exp\left(\frac{-2e\phi(x)}{kT}\right)$は 10.3、$\exp\left(\frac{e\phi(x)}{kT}\right)$は 0.31 である。ここで、$e$は電荷素量、$k$はボルツマン定数、$T$は絶対温度である。ここで $\exp\left(\frac{e\phi(x)}{kT}\right) \ll \exp\left(\frac{-e\phi(x)}{kT}\right) \ll \exp\left(\frac{-2e\phi(x)}{kT}\right)$ とみなすと、ポアソン-ボルツマン方程式は、$\exp\left(\frac{-2e\phi(x)}{kT}\right)$を含む Ca の項のみで近似できる。

$$\begin{aligned}\frac{d^2\phi(x)}{dx^2} &= -\frac{e}{\varepsilon_0\varepsilon_r}\sum_i c_{ext,i}Z_i \exp\left(\frac{-Z_i e\phi(x)}{kT}\right) \\ &= -\frac{e}{\varepsilon_0\varepsilon_r}\{c_{ext,Na}\times 1\times \exp\left(\frac{-e\phi(x)}{kT}\right) + c_{ext,Ca}\times 2 \\ &\quad \times \exp\left(\frac{-2e\phi(x)}{kT}\right) + c_{ext,Cl}\times(-1)\times \exp\left(\frac{e\phi(x)}{kT}\right)\} \\ &\approx -\frac{e}{\varepsilon_0\varepsilon_r}c_{ext,Ca}\times 2\times \exp\left(\frac{-2e\phi(x)}{kT}\right)\end{aligned} \tag{1}$$

$c_{ext,Ca}$=$c_{ext,Ca,1}$で、上記の近似したポアソン-ボルツマン方程式の解が$\phi(x) = \phi_1(x)$のとき、$c_{ext,Ca}$=$c_{ext,Ca,2}$のときの近似したポアソン-ボルツマン方程式の解は、$\phi(x) = \phi_2(x)$=$\phi_1(x) + A$と表現できる（ここで、$c_{ext,Ca,1} = c_{ext,Ca,2} \times \exp\left(\frac{-2eA}{kT}\right)$である。）。これが、あるイオン強度における電位分布がϕ(x)のとき、別のイオン強度の電位分布も同様の形状となり、ϕ(x)+A（A は x によらず一定）と近似できる理由である。

このとき、$c_{ext,Ca}$=$c_{ext,Ca,1}$のときの Ca^{2+}濃度分布は、電位$\phi(x)$の近似解$\phi(x) = \phi_1(x)$を用いて次の式(2)で表せる。

$$c_{Ca}(x) \approx c_{ext,Ca,1} \exp\left(\frac{-2e\phi_1(x)}{kT}\right) \tag{2}$$

一方、$c_{ext,Ca}$=$c_{ext,Ca,2}$のときの Ca^{2+}濃度分布は、電位$\phi(x)$の近似解$\phi(x) = \phi_1(x)$+A（ただし、$c_{ext,Ca,1} = c_{ext,Ca,2} \times \exp\left(\frac{-2eA}{kT}\right)$）を用いて、次の式(3)で表せる。

$$c_{Ca}(x) \approx c_{ext,Ca,2} \exp\left(\frac{-2e\phi_1(x)}{kT}\right) \times \exp\left(\frac{-2eA}{kT}\right) = c_{ext,Ca,1} \exp\left(\frac{-2e\phi_1(x)}{kT}\right) \tag{3}$$

すなわち、$c_{ext,Ca}$=$c_{ext,Ca,1}$でも、$c_{ext,Ca}$=$c_{ext,Ca,2}$でも、Ca^{2+}濃度分布は同一となる。これが、Ca^{2+}濃度分布はイオン強度によらずほぼ同じである理由と考えられる。

最後に、Ca/Na 選択係数 $\log K_{GT}$ は、イオン強度との相関性がわずかであることの考察、つまり、選択係数K_{GT}がイオン強度（すなわち、$c_{ext,Ca}$と$c_{ext,Na}$）を変えても同じになる理由を考察する。

選択係数K_{GT}を求める際に用いるhの範囲で、$\exp\left(\frac{-e\phi(x)}{kT}\right) \ll \exp\left(\frac{-2e\phi(x)}{kT}\right)$が成立すると、$n_{Na} \ll n_{Ca}$となり、$Ca^{2+}$の当量分率 Xは以下の式(4)のように近似できる。

$$X = \frac{2n_{Ca}}{n_{Na} + 2n_{Ca}} \approx 1 \tag{4}$$

一方、Na^{+}の当量分率 1-X は、以下の式(5)のように近似できる。

$$1-X=\frac{n_{Na}}{n_{Na}+2n_{Ca}}\approx\frac{n_{Na}}{2n_{Ca}}=\frac{2\times Area\times\int_0^{h/2}c_{Na}(x)dx}{2\times2\times Area\times\int_0^{h/2}c_{Ca}(x)dx}$$
$$\approx\frac{\int_0^{h/2}c_{ext,Na}\exp\left(\frac{-e\phi(x)}{kT}\right)dx}{2\int_0^{h/2}c_{ext,Ca}\exp\left(\frac{-2e\phi(x)}{kT}\right)dx} \quad (5)$$

「$c_{ext,Ca}$=$c_{ext,Ca,1}$かつ$c_{ext,Na}$=$c_{ext,Na,1}$」、「$c_{ext,Ca}$=$c_{ext,Ca,2}$かつ$c_{ext,Na}$=$c_{ext,Na,2}$」のそれぞれの場合について、上記で近似的に求めた電位分布の解 $\phi(x)=\phi_1(x)$、$\phi(x)=\phi_2(x)$=$\phi_1(x)+A$（ただし、$c_{ext,Ca,1}=c_{ext,Ca,2}\times\exp\left(\frac{-2eA}{kT}\right)$）を用い、選択係数$K_{GT}$を求めると、式(6)及び式(7)のように近似でき、いずれも同じ値になる。なお、ここでは、$\gamma_{Na}^2/\gamma_{Ca}$が、イオン強度によって変化が小さいことを前提としている。これがイオン強度を変えても選択係数K_{GT}がわずかにしか変わらない理由と考えられる。

$$K_{GT,1}=\frac{X\{Na^+(aq)\}^2}{(1-X)^2\{Ca^{2+}(aq)\}}\approx\frac{\{2\int_0^{\frac{h}{2}}c_{ext,Ca,1}\exp\left(\frac{-2e\phi_1(x)}{kT}\right)dx\}^2\ c_{ext,Na,1}^2\gamma_{Na,1}^2}{\{2\int_0^{\frac{h}{2}}c_{ext,Na,1}\exp\left(\frac{-e\phi_1(x)}{kT}\right)dx\}^2\ c_{ext,Ca,1}\gamma_{Ca,1}}$$
$$\approx\frac{c_{ext,Ca,1}\{2\int_0^{\frac{h}{2}}\exp\left(\frac{-2e\phi_1(x)}{kT}\right)dx\}^2}{\{2\int_0^{\frac{h}{2}}\exp\left(\frac{-e\phi_1(x)}{kT}\right)dx\}^2}\times\frac{\gamma_{Na,1}^2}{\gamma_{Ca,1}} \quad (6)$$

$$K_{GT,2}=\frac{X\{Na^{+}(aq)\}^{2}}{(1-X)^{2}\{Ca^{2+}(aq)\}}\approx\frac{\{2\int_{0}^{\frac{h}{2}}c_{ext,Ca,2}\exp\left(\frac{-2e\phi_{2}(x)}{kT}\right)dx\}^{2}\,c_{ext,Na,2}^{2}\gamma_{Na,2}^{2}}{\{2\int_{0}^{\frac{h}{2}}c_{ext,Na,2}\exp\left(\frac{-e\phi_{2}(x)}{kT}\right)dx\}^{2}\,c_{ext,Ca,2}\gamma_{Ca,2}}$$

$$\approx\frac{c_{ext,Ca,2}\left(\exp\left(\frac{-2eA}{kT}\right)\right)^{2}\{2\int_{0}^{\frac{h}{2}}\exp\left(\frac{-2e\phi_{1}(x)}{kT}\right)dx\}^{2}}{\left(\exp\left(\frac{-eA}{kT}\right)\right)^{2}\{2\int_{0}^{\frac{h}{2}}\exp\left(\frac{-e\phi_{1}(x)}{kT}\right)dx\}^{2}}\times\frac{\gamma_{Na,2}^{2}}{\gamma_{Ca,2}}$$

$$=\frac{c_{ext,Ca,2}\exp\left(\frac{-2eA}{kT}\right)\{2\int_{0}^{\frac{h}{2}}\exp\left(\frac{-2e\phi_{1}(x)}{kT}\right)dx\}^{2}}{\{2\int_{0}^{\frac{h}{2}}\exp\left(\frac{-e\phi_{1}(x)}{kT}\right)dx\}^{2}}\times\frac{\gamma_{Na,2}^{2}}{\gamma_{Ca,2}}\qquad(7)$$

$$\approx\frac{c_{ext,Ca,1}\{2\int_{0}^{\frac{h}{2}}\exp\left(\frac{-2e\phi_{1}(x)}{kT}\right)dx\}^{2}}{\{2\int_{0}^{\frac{h}{2}}\exp\left(\frac{-e\phi_{1}(x)}{kT}\right)dx\}^{2}}\times\frac{\gamma_{Na,2}^{2}}{\gamma_{Ca,2}}=K_{GT,1}$$

第３章　イオン交換選択係数の取得

3-1　通水試験の再現解析における初期間隙水組成

通水試験の再現解析における間隙水の初期組成は、初期含水比においてイオン交換体と溶液との平衡計算を行ったときに、表 3-1-1 に示した交換体の初期組成を与えるようなものとし、具体的には次の手順により設定した。

① 浸潤試験の供試体の初期含水比（14.0 wt%）と CEC (122.2 meq/100g-soil) から、間隙水 1kg 当たりのイオン交換体の量（122.2×10÷0.14）を求める。
② 小田・柴田 (1999)により得られた固液比 0.25 のクニピア F 抽出水（蒸留水）の組成を、供試体の初期含水比の固液比（1÷0.14=7.14）に相当する値に比例倍し、これを初期値とする。電荷バランスが取れない場合は、ナトリウムイオン（Na^{+}）濃度を調節する。
③ 地球化学解析コード PHREEQC を用いて、①の量のイオン交換体と、②の組成の溶液との平衡計算を行う。
④ 計算結果が表 2.3-13 に示した交換体の組成になっていれば、②の溶液組成を間隙水の組成とする。なっていなければ、②の溶液中の陽イオン組成を、陽イオン電荷量を変えない範囲で増減させて更新する。

⑤　以後、表 2.3-13 に示した交換体の組成が得られるまで、③と④を反復する。

前記①から⑤の手順により得られた初期間隙組成を表 3-1-2 に示す。

表 3-1-1　通水試験の再現解析に用いた初期状態におけるイオン交換サイトの組成

イオン交換体の初期組成	当量 (meq/100g-soil)	根拠
ZNa	101.8	通水試験前のクニピア F について、SFSA 改良法により測定した値。CEC は左記の合計 122.2meq/100g-soil としている。（産業技術総合研究所ほか, 2021）
ZK	1.3	
Z_2Ca	18.2	
Z_2Mg	0.9	

表 3-1-2　再現解析に用いた初期間隙水組成（液温: 25℃）

イオン	濃度(mol/kgw)
Na^+	0.8006
K^+	0.0026
Ca^{2+}	0.0124
Mg^{2+}	0.0055
Cl^-	0.0801
SO_4^{2-}	0.3794

その他	
イオン強度	0.9201
pH	9.915

3-2　カルサイトの溶解の影響に関する解析の条件

KCl-NaCl 混合溶液（イオン強度 0.5）を乾燥密度 1.00 Mg/m^3 の供試体に通水したケース④に対し、供試体中の反応鉱物としてカルサイトを追加した解析を実施した。カルサイトの溶解反応モデルとしては、平衡または速度論の 2 通りが考えられるが、溶液組成が同一の場合、基本的に前者の方が溶解量は大きくなることから、ここでは平衡でモデル化することとした。カルサイトの溶解平衡定数には、PHREEQC に付属する熱力学データベース PHREEQC.DAT 中の値を用いた。

解析条件は基本的にケース④の再現解析と同一とした。但し、初期間隙水組成については、ケース④の再現解析で得られた間隙水組成を初期値とし、PHREEQC を用いてカルサイトを含めた場合の平衡計算を改めて行うことにより求めた。得られた初期間隙水組成を表 3-2-1 に示す。同表中の値を前掲表 3-1-2 と比較すると、pH がわずかに高くなっていることなどを除けば、ほぼ同一の値である。

また、流入溶液には、KCl 0.4 mol/L, NaCl 0.1 mol/L の混合溶液が標準大気組成の二酸化炭素（314 ppm）と平衡したものを想定し、その組成は PHREEQC を用いた平衡計算により設定した。

表 3-2-1　カルサイト溶解を考慮した解析に用いた初期間隙水組成（液温: 25℃）

イオン	濃度(mol/kgw)
Na	0.8007
K	0.0026
Ca	0.0124
Mg	0.0055
Cl	0.0800
S(6)	0.3794
C(4)	0.0001

その他	
イオン強度	0.9201
pH	9.943

3-3　透水 - 膨潤圧試験の再現解析条件（初期間隙水組成）

透水 - 膨潤圧試験の再現解析における間隙水の初期組成は、初期含水比においてイオン交換体と溶液との平衡計算を行ったときに、表 3-3-1 に示した交換体の初期組成を与えるようなものとし、具体的には次の手順により設定した。

①　浸潤試験の供試体の初期含水比（8.159 wt%）と CEC から、間隙水 1kg 当たりのイオン交換体の量（44.9×10÷0.08159）を求める。

②　小田・柴田(1999)により得られた固液比 0.5 のクニゲル V1 抽出水（蒸留水）の組成を、供試体の初期含水比の固液比（1÷0.08159=12.26）に相当する値に比例倍する。電荷バランスが取れない場合は、C(4)濃度（C(4)とは、酸化数+4 の C を持つ成分の総称であり、炭酸イオン CO_3^{2-}や炭酸水素イオン HCO_3^-がこれに該当する。）で調節する。

③　地球化学解析コード PHREEQC を用いて、①の量のイオン交換体と、②の組成の溶液との平衡計算を行う。

④　計算結果が表　　に示した交換体の組成になっていれば、②の溶液組成を間隙水の組成とする。なっていなければ、②の溶液中の陽イオン組成を、陽イオン電荷量を変えない範囲で増減させて更新する。

⑤　以後、表 に示した交換体の組成が得られるまで、③と④を反復する。

上記①から⑤の手順により得られた初期間隙組成を表 3-3-2 に示す。

表 3-3-1　透水 - 膨潤圧試験の再現解析に用いた初期状態におけるイオン交換サイトの組成

イオン交換体の初期組成	当量 (meq/100g-soil)	根拠
ZNa	39.8	産業技術総合研究所ほか (2022) に示された試験前のクニゲル V1 の浸出陽イオン量の値に、クニゲル V1-ケイ砂混合土のクニゲル V1 の重量割合 0.7 を乗じたものである
ZK	0.5	
Z_2Ca	4.6	
Z_2Mg	0	

表 3-3-2　透水 - 膨潤圧試験の再現解析に用いた初期間隙水組成（液温: 25℃）

イオン	濃度(mol/kgw)
Na^+	0.7041
K^+	0.0037
Ca^{2+}	0.0647
Mg^{2+}	0.000001
Cl^-	0.0222
SO_4^{2-}	0.2947
CO_3^{2-}	0.1447

その他	
イオン強度	0.827
pH	9.355

第 4 章　緩衝材の膨潤率に対する溶存陽イオンの影響把握試験

令和 4 年度までに表 4-1 に示す試験ケースを設定して膨潤量試験を実施した（本編 4-2(3)）。全てのケースにおいて膨潤量を測定した後、膨潤率を算出し、膨潤率の経時変化として示した。また、一部の試験ケースにおいて試験後のベントナイトの層間陽イオンに関するデータ及び供試体の乾燥密度分布及び含水比分布を取得した。これらの結果を 4-1 節から 4-3 節に示す。

表 4-1　試験ケース

	溶液の種類	イオン強度	初期乾燥密度 (Mg/m^3)
リファレンス	イオン交換水	0	1.2、1.6、2.0
Ⓐ高イオン強度で陽イオン種の影響の検討	NaCl 水溶液	0.5	1.2、1.6、2.0
	KCl 水溶液		1.2、1.6、2.0
	$CaCl_2$水溶液		1.2、1.6、2.0
	$MgCl_2$水溶液		1.2、1.6、2.0
Ⓑ 高イオン強度での異なる陽イオン種の混合に伴う影響の検討	NaCl-KCl 混合溶液（モル濃度比 1：1）	0.5	1.2、1.6、2.0
Ⓒ 塩水場から淡水場を想定し、高イオン強度からイオン交換水に交換した影響の検討	NaCl 水溶液→イオン交換水	0.5→0	1.2、1.6、2.0
	KCl 水溶液→イオン交換水	0.5→0	1.2、1.6、2.0
Ⓓ Na を主としたイオン強度の影響の検討	NaCl 水溶液	0.025、0.050、0.075、0.10、0.15、0.20	1.6
Ⓔ Na 以外の陽イオン種ごとのイオン強度の影響の検討	KCl 水溶液	0.025、0.10、0.20	1.6
	$CaCl_2$水溶液	0.025、0.10、0.20	1.6
	$MgCl_2$水溶液	0.025、0.10、0.20	1.6
Ⓕ 複数イオン種を含む溶液のイオン強度の影響の検討	$CaCl_2$と NaCl の混合溶液（モル濃度比 1.5：1）	0.025、0.10	1.6
	$MgCl_2$と NaCl の混合溶液（モル濃度比 0.4：1）	0.025、0.10	1.6
Ⓖ 沿岸部実地下水の影響の検討	FGB-2_167.70-171.78m	0.283	1.6
	FGB-2_214.75-220.52m	0.727	1.6
Ⓗ イオン種ごとの初期乾燥密度の影響の検討	NaCl 水溶液	0.2	1.2、　2.0
	KCl 水溶液		1.2、　2.0
	$CaCl_2$水溶液		1.2、　2.0
	$MgCl_2$水溶液		1.2、　2.0

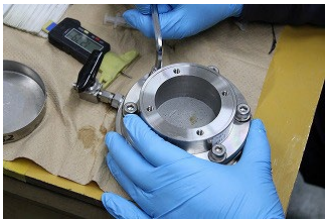
4-1 膨潤量試験の供試体の解体

前述の膨潤量試験に供した試料のうち、令和 4 年度に膨潤率が定常状態に至ったと判断したものについては、適宜解体し、供試体の含水比、および乾燥密度の高さ方向の分布を確認した。

含水比分布及び乾燥密度分布の取得にあたり、図 4-1-1 に示す解体手順に従い解体した。本 Appendix に含水比分布及び乾燥密度分布を掲載するケースを表 4-1-1 に示す。

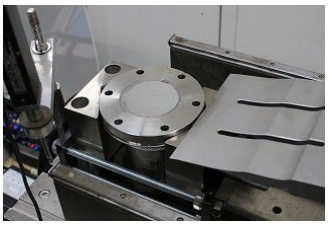
解体前

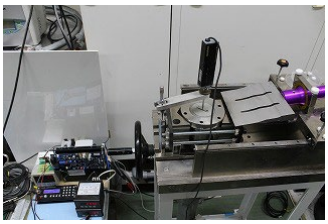
解体前供試体高さ計測

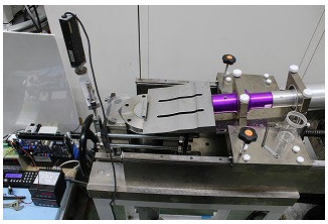

試験装置の解体

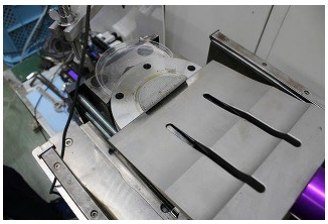
湿潤質量計測

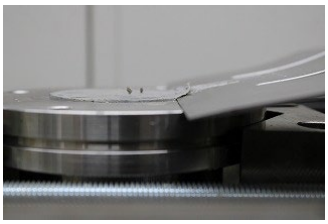
超音波カッターへの設置


供試体の高さ調整


スライス状況①


スライス状況②


スライス状況③


スライス状況（拡大）

スライス後の供試体の採取

乾燥質量の計測

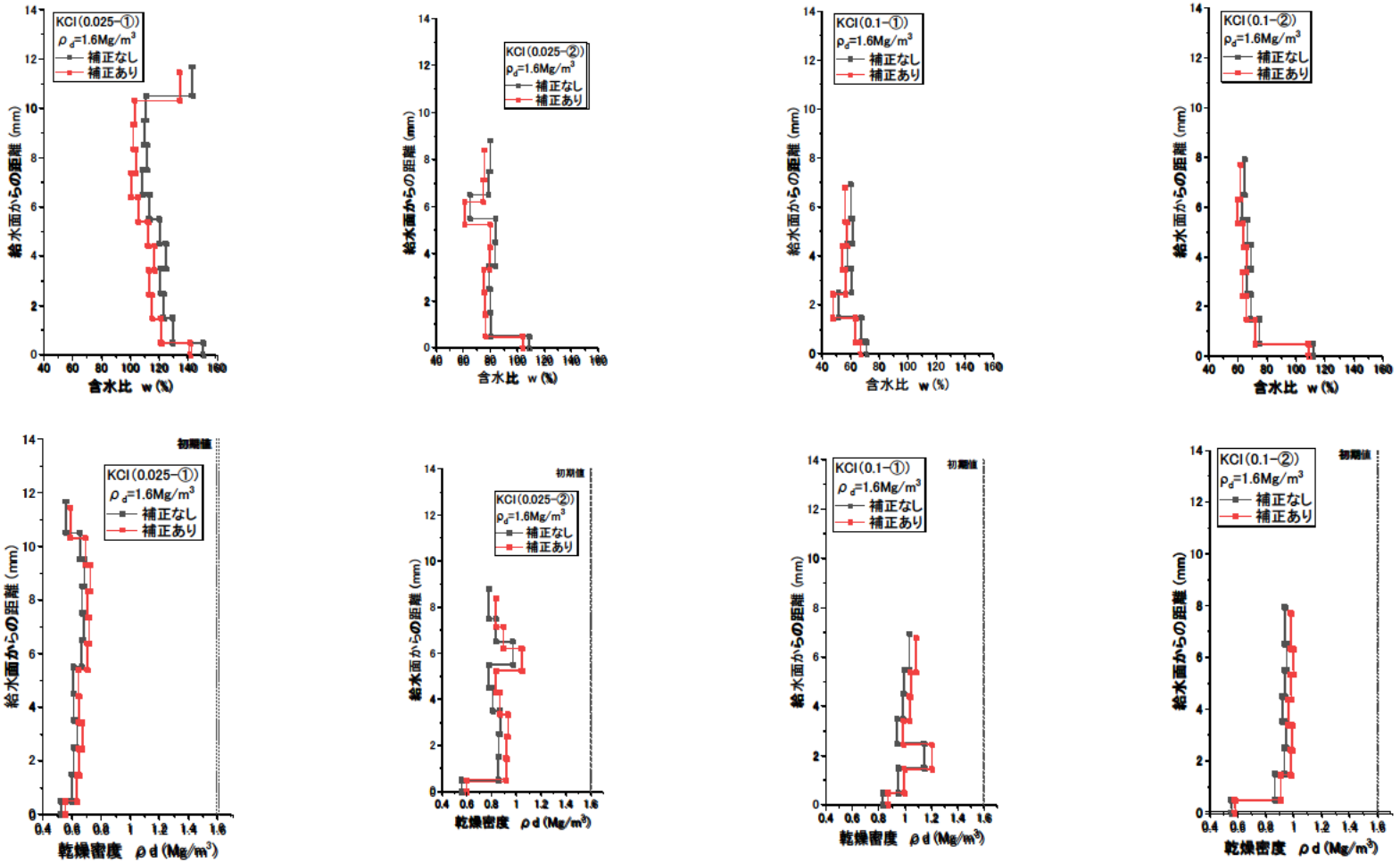
図 4-1-1　解体手順

表 4-1-1　含水比分布及び乾燥密度（令和 4 年度解体試料）

	溶液の種類	イオン強度	初期乾燥密度 (Mg/m^3)
Ⓔ Na 以外の陽イオン種ごとのイオン強度の影響の検討	KCl 水溶液	0.025①	1.6
		0.025②	1.6
		0.10①	1.6
		0.10②	1.6
	$CaCl_2$水溶液	0.025①	1.6
		0.025②	1.6
		0.10②	1.6
	$MgCl_2$水溶液	0.025①	1.6
		0.025②	1.6
		0.10①	1.6
		0.10②	1.6
		0.20	1.6
Ⓕ 複数イオン種を含む溶液のイオン強度の影響の検討	$CaCl_2$と NaCl の混合溶液（モル濃度比 1.5：1）	0.025	1.6
		0.10	1.6
	$MgCl_2$と NaCl の混合溶液（モル濃度比 0.4：1）	0.025	1.6
		0.10	1.6
Ⓖ 沿岸部実地下水の影響の検討	FGB-2_214.75-220.52m	0.727	1.6
Ⓗ イオン種ごとの初期乾燥密度の影響の検討	KCl 水溶液	0.2	1.2
		0.2①	1.6
		0.2②	1.6
		0.2①	2.0
		0.2②	2.0

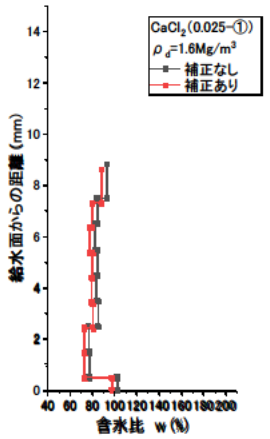
含水比分布及び乾燥密度分布について、ⒺNa 以外の陽イオン種ごとのイオン強度の影響の検討に用いた試料の結果を図 4-1-2（1/3）～（3/3）に、Ⓕ複数イオン種を含む溶液のイオン強度の影響の検討に用いた試料の結果は図 4-1-3 に、Ⓖ沿岸部実地下水の影響の検討に用いた試料の結果を図 4-1-4 に、Ⓗイオン種ごとの初期乾燥密度の影響の検討結果を図 4-1-5 に示す。これらの結果に示す補正ありの結果は、間隙水に含まれる塩が乾燥時に析出して固相として計測されることの補正及びスライス試料の高さの総和と試験終了時の供試体高さの差の補正をした結果である。

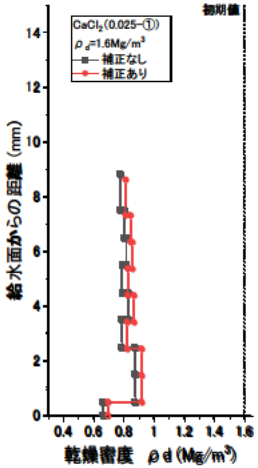
図から、各ケースにおける含水比分布に着目すると、含水比は、給水面から排水面に向かって漸減する傾向を示している。また、給水面の含水比は、イオン強度が低くなるにつれて高い傾向にある。この含水比の漸減傾向に伴って、乾燥密度は、給水面から排水面に向かって高くる傾向を示す。



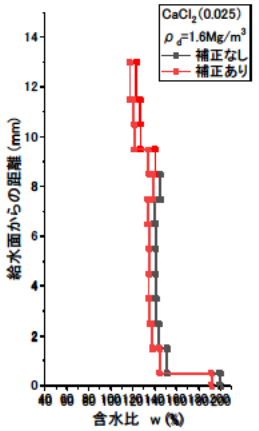
KCl、イオン強度 0.025①　　KCl、イオン強度 0.025②　　KCl、イオン強度 0.10①　　KCl、イオン強度 0.10②

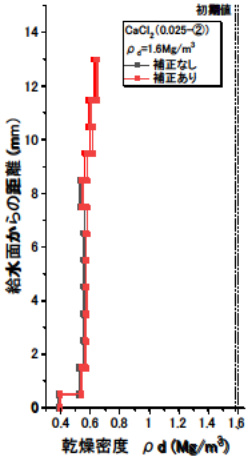
図 4-1-2　Na 以外の陽イオン種ごとのイオン強度の影響の検討に用いた試料（1/3）



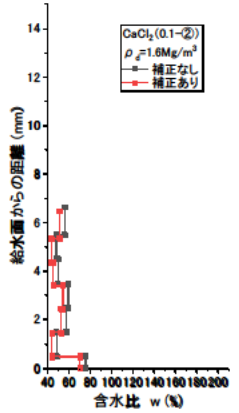


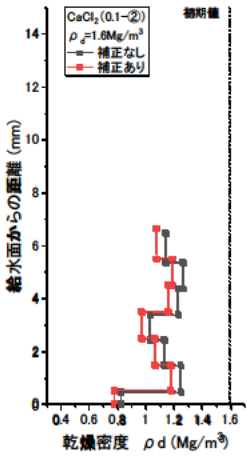
$CaCl_2$、イオン強度 0.025①





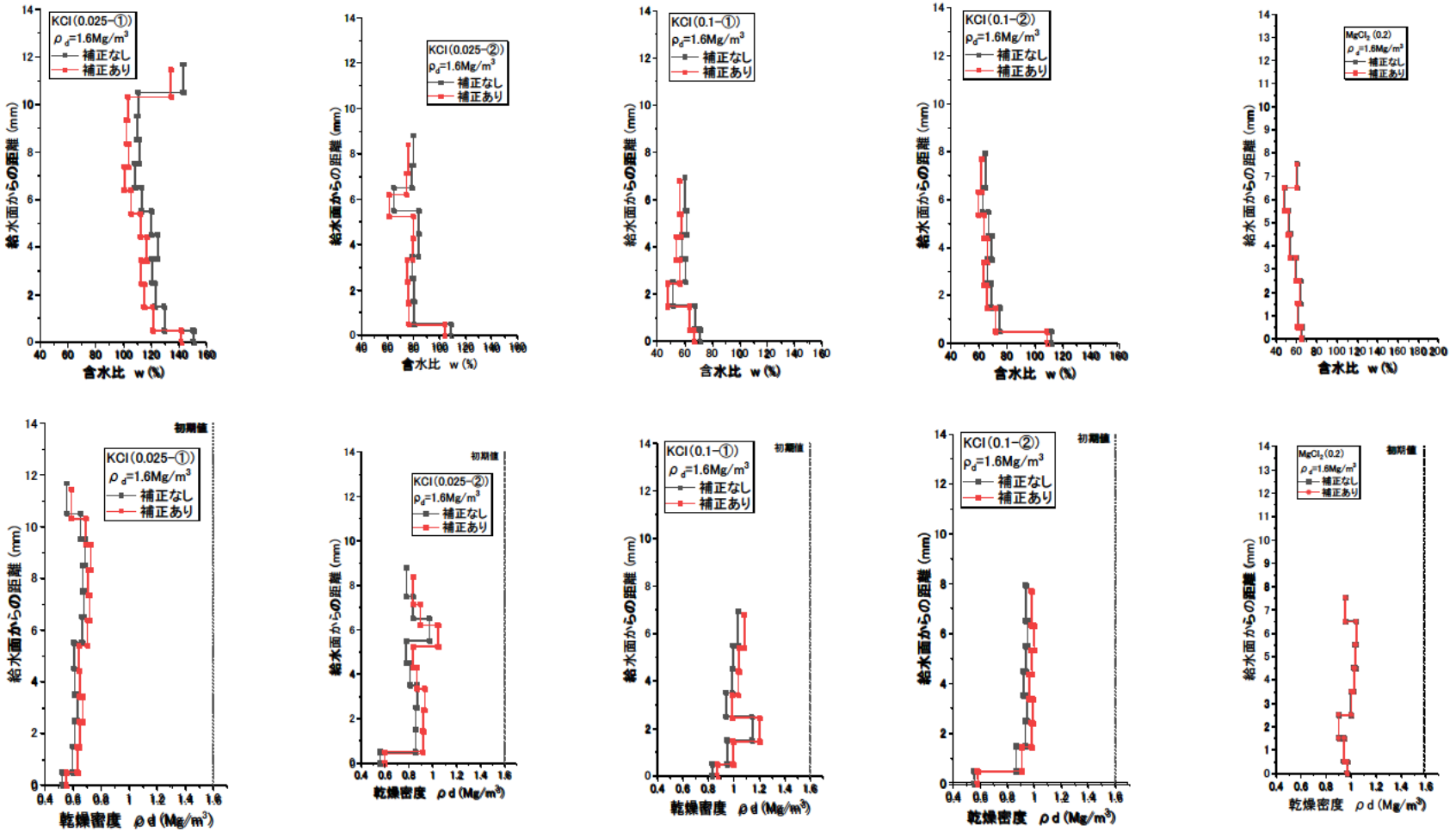
$CaCl_2$、イオン強度 0.025②





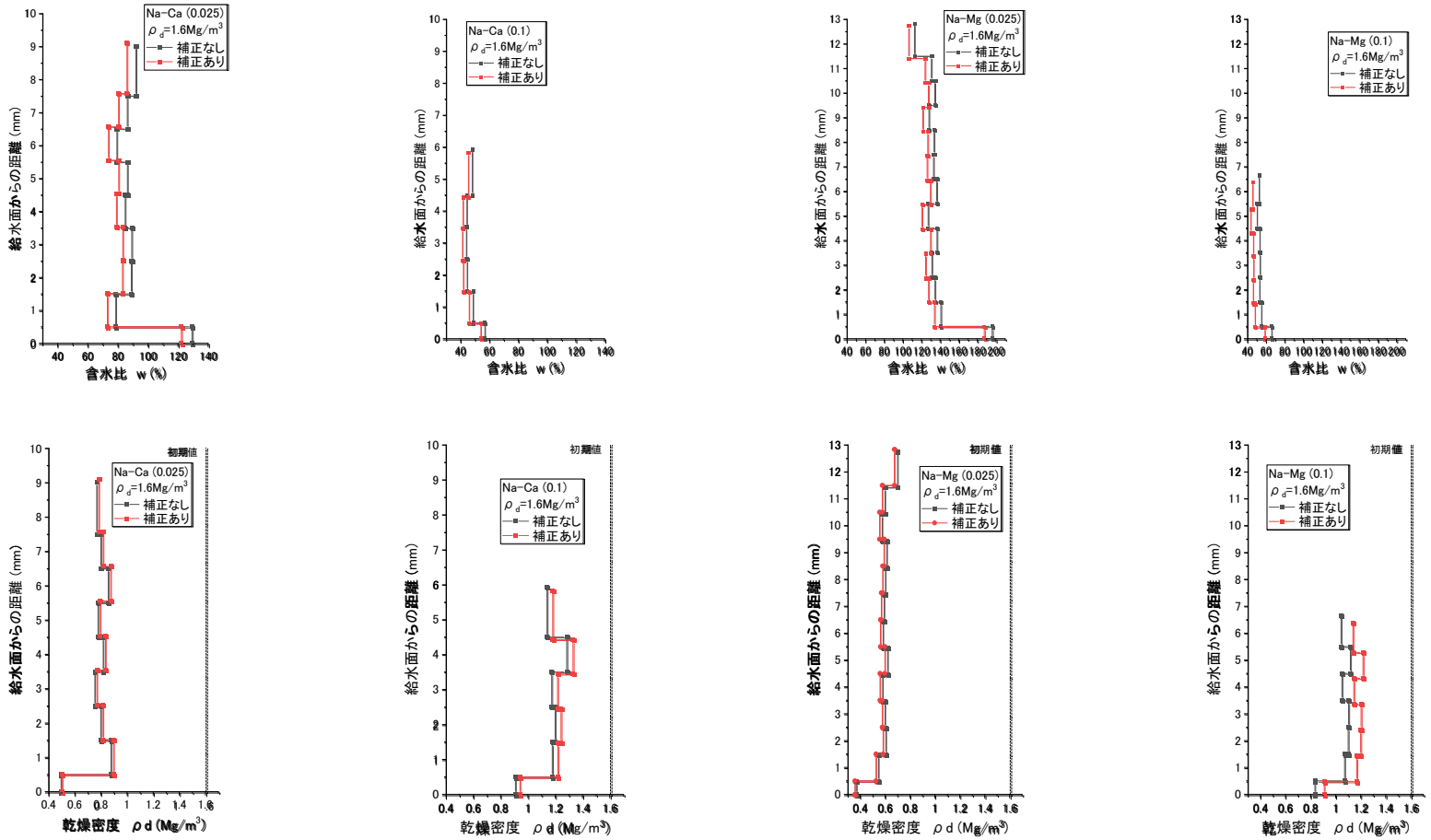
$CaCl_2$、イオン強度 0.10②

図 4-1-2　Na 以外の陽イオン種ごとのイオン強度の影響の検討に用いた試料（2/3）



$MgCl_2$、イオン強度 0.025①　　$MgCl_2$、イオン強度 0.025②　　$MgCl_2$、イオン強度 0.10①　　$MgCl_2$、イオン強度 0.10②　　$MgCl_2$、イオン強度 0.20

図 4-1-2　Na 以外の陽イオン種ごとのイオン強度の影響の検討に用いた試料（3/3）



$CaCl_2$ と NaCl の混合溶液
（モル濃度比 1.5 : 1）
イオン強度 0.025

$CaCl_2$ と NaCl の混合溶液
（モル濃度比 1.5 : 1）
イオン強度 0.10

$MgCl_2$ と NaCl の混合溶液
（モル濃度比 0.4 : 1）
イオン強度 0.025

$MgCl_2$ と NaCl の混合溶液
（モル濃度比 0.4 : 1）
イオン強度 0.10

図 4-1-3　複数イオン種を含む溶液のイオン強度の影響の検討に用いた試料

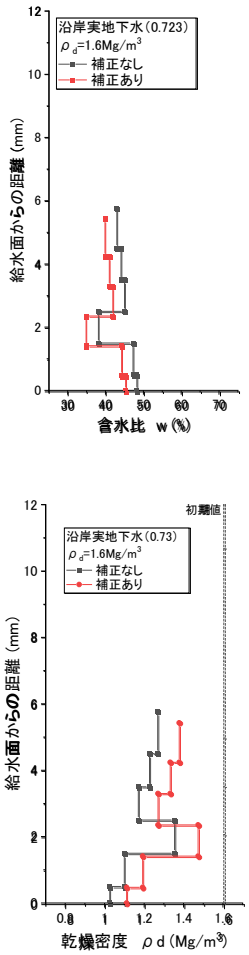
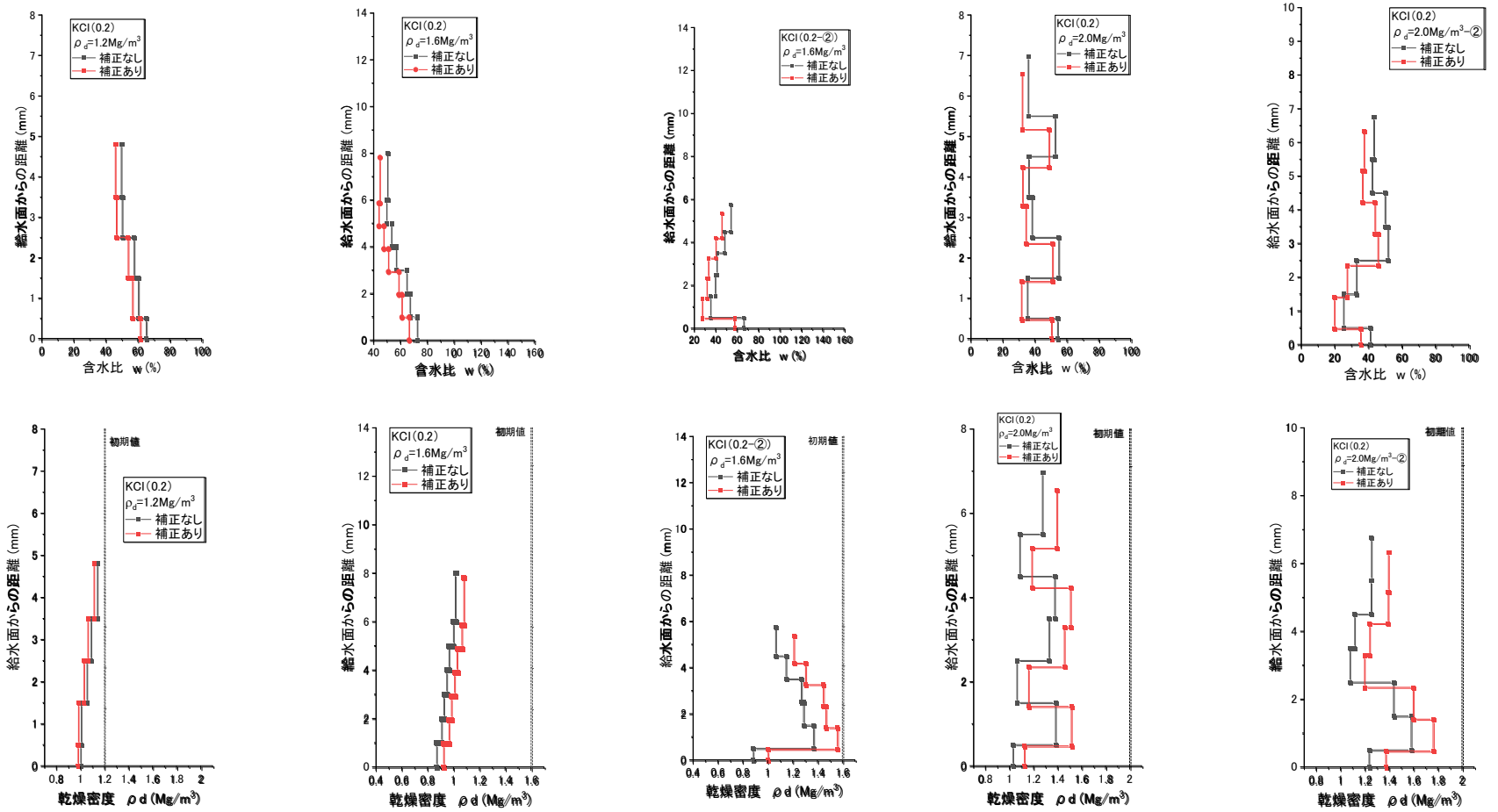


図 4-1-4　Ⓖ 沿岸部実地下水の影響の検討に用いた試料



KCl、イオン強度 0.2
乾燥密度 1.2Mg/m³

KCl、イオン強度 0.2
乾燥密度 1.6Mg/m³①

KCl、イオン強度 0.2
乾燥密度 1.6Mg/m³②

KCl、イオン強度 0.2
乾燥密度 2.0Mg/m³①

KCl、イオン強度 0.2
乾燥密度 2.0Mg/m³②

図 4-1-5 Ⓗ イオン種ごとの初期乾燥密度の影響の検

4-2 ベントナイト試料の層間陽イオン量

一部の試験ケースについて、ベントナイトの層間陽イオン量を固相分析（鉱物分析）によって測定した。また、固相分析の結果を補足するデータとして、排水のイオン量も測定した。それぞれを（1）項及び（2）項に示す。

（1） 固相分析（鉱物分析）

表 4-2-1 に令和 4 年度に実施した SFSA 改良法によるベントナイトの層間陽イオン量を測定したケースを示す。また、試験前に粉体のクニゲル V1 についても同様に層間陽イオン量を測定した。本 Appendix にはこれらの層間陽イオン量のデータを示す。

表 4-2-1 層間陽イオン量を測定したケース

	溶液の種類	イオン強度	初期乾燥密度 (Mg/m^3)
Ⓔ Na 以外の陽イオン種ごとの イオン強度の影響の検討	KCl 水溶液	0.025①	1.6
		0.10①	1.6
	$CaCl_2$ 水溶液	0.025①	1.6
	$MgCl_2$ 水溶液	0.025①	1.6
		0.10①	1.6
Ⓕ 複数イオン種を含む溶液のイオン強度の影響の検討	$CaCl_2$ と NaCl の混合溶液（モル濃度比 1.5：1）	0.025①	1.6
		0.10①	1.6
	$MgCl_2$ と NaCl の混合溶液（モル濃度比 0.4：1）	0.10①	1.6

① 前処理

試験終了後の供試体から、給水面からの距離 2 - 3 mm の部分をスライスした。スライスした供試体（塊状試料）は、下記 1)から 10)の方法に従って前処理し、分析試料とした。試料の前処理の結果と洗浄液の電気伝導率の測定結果を表 4-2-2 及び図 4-2-1 に示す。

【分析試料の前処理方法】

1) 洗浄液（エタノール 80 vol%+イオン交換水 20 vol%）を作製する。
2) 塊状試料をメノウ乳鉢で粉砕し、ふるいに通して 90 μm 以下に調整する。
3) 遠沈管に粉末試料 1 層分と洗浄液 40 g を入れスラリー状にする。
4) ハンドシェイクおよび、10 分程度の超音波でスラリーを分散させる。

5) 凝集が無いことを確認し、遠心分離（4000 rpm×5 min）する。
6) 透明な上澄みを回収し、電気伝導度を計測する。
7) 遠沈管に新たな洗浄液 40 g を入れ、洗浄を 5 回実施する。
8) 同一遠沈管内で 4）～6）の操作を 5 回実施する。
※ 洗浄は 5 回とするが、電気伝導度の値が明らかに高い場合は洗浄を追加する。
9) 洗浄後の固相を回収し 160 ℃に設定した恒温槽で 24 時間乾燥する。
10) 乾燥した試料を粉砕し、90 μm のふるいで分級し、分析試料とする。

② 分析方法

（1）①で前処理した試料を用い、以下に記す 1）- 3）の操作で浸出陽イオンの分析（SFSA 改良法）を行った。

1) 試料 0.5g にベンジルトリメチルアンモニウムクロライド 6%溶液を 50ml 加える。
2) 試料を分散させた後 1 時間静置し、溶出液を 0.45μm フィルターでろ過する。

ろ過液 2ml を 50ml に定容し、原子吸光分析装置で Na、K、Ca、Mg を測定する。

③ 分析結果

浸出陽イオンの分析の結果を表 4-2-2 及び図 4-2-1 に示す。また、2020 年度から本年度までの分析結果を液種毎に整理すると、図 4-2-2（1/2）～図 4-2-3（2/2）のようになる。図から、NaCl 水溶液、$CaCl_2$ 水溶液、および $MgCl_2$ 水溶液に関しては、溶液のイオン強度の増加に伴って、層間陽イオンのうち、各溶液中の陽イオンが占める割合が大きくなっており、陽イオン交換されていることが分かる。一方、KCl 水溶液に関しては、イオン強度 0.5 における K^+イオンの浸出イオン量がイオン強度 0.2 の値よりも小さく、上記の傾向は確認できない。この陽イオン交換の影響は、膨潤量試験における供試体の膨潤性能に影響を及ぼす可能性があるため、今後は、分析試験数を拡充し、それらの影響についての詳細な検討が必要である。

表 4-2-2　試験後の試料の浸出陽イオンの分析結果

溶液		初期乾燥密度 (Mg/m³)	浸出陽イオン量 SFSA 法(meq/100 g)				
種類	イオン強度		Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Total
試験前クニゲル V1 粉体	ー	1.6	64.1	0.6	1.3	17.4	83.4
イオン	0	1.6	28.8	0.2	4.0	36.2	69.2
KCl 水溶液	0.025①	1.6	21.1	12.0	2.0	17.4	52.5
KCl 水溶液	0.1①	1.6	0.0	29.5	1.3	15.0	45.8
CaCl2 水溶液	0.025①	1.6	28.0	1.0	1.9	23.4	54.3
$MgCl_2$ 水溶液	0.025①	1.6	32.2	0.9	6.0	17.1	56.2
$MgCl_2$ 水溶液	0.1①	1.6	0.2	0.5	28.2	15.4	44.3
$CaCl_2$ と NaCl 混合溶液	0.025①	1.6	30.7	1.2	2.2	23.7	57.8
$CaCl_2$ と NaCl 混合溶液	0.1①	1.6	19.8	0.7	1.8	32.3	54.6
$MgCl_2$ と NaCl 混合溶液	0.1①	1.6	37.2	0.6	4.8	15.5	58.1

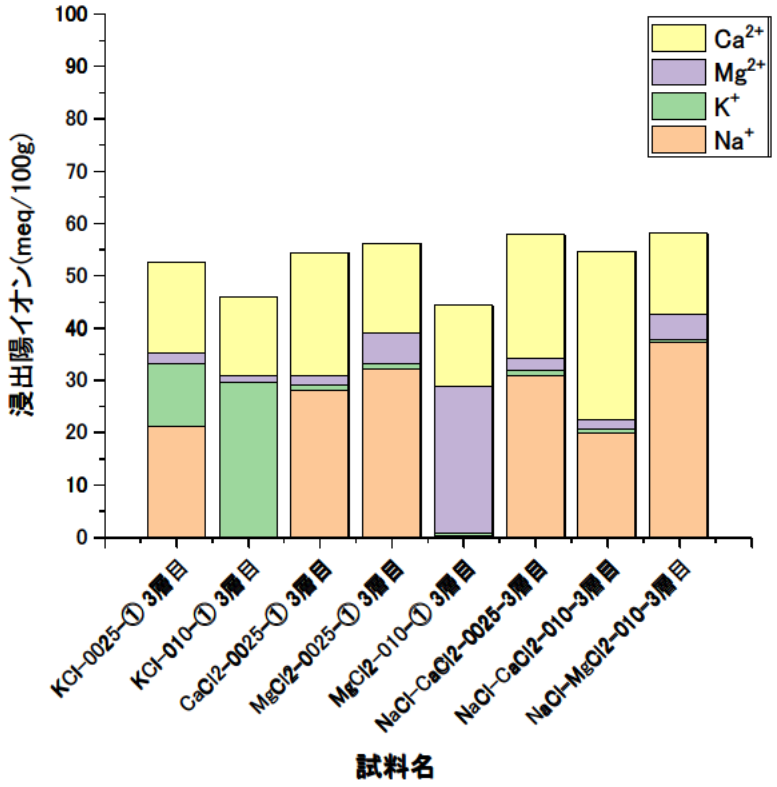
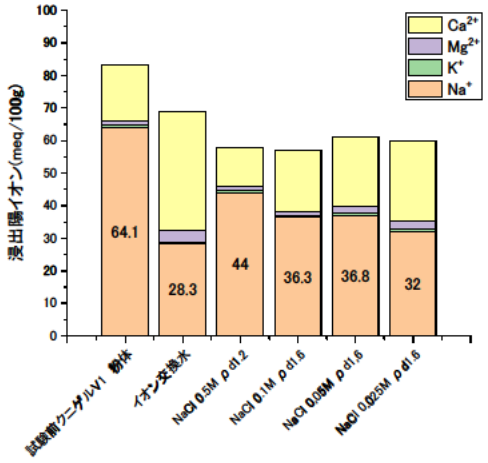
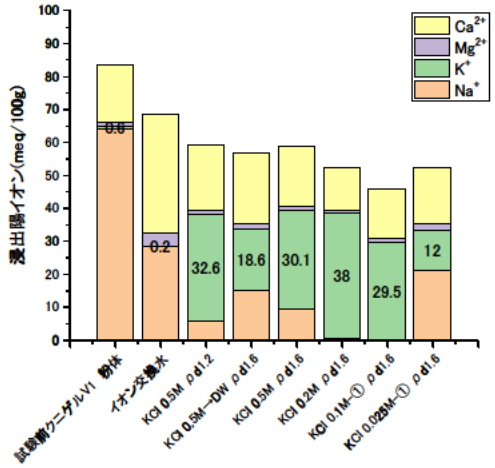


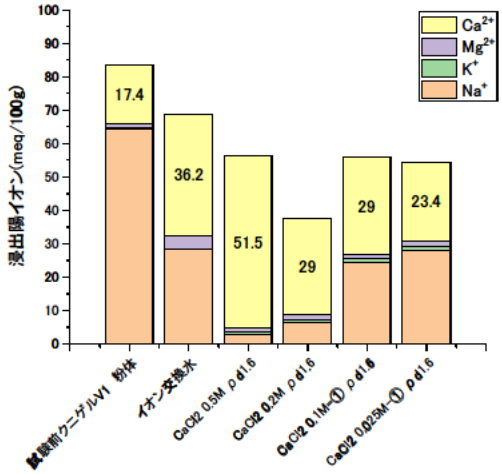
図 4-2-1　試験後試料の浸出陽イオンの分析結果



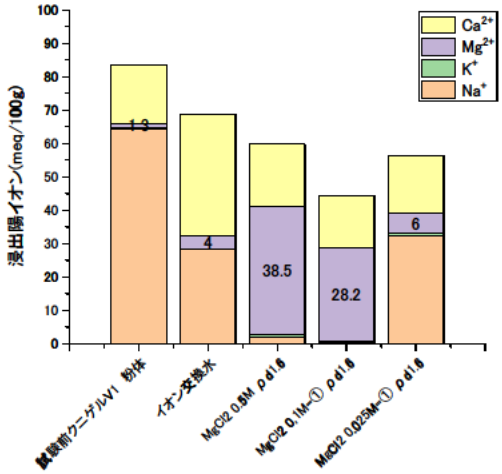
(a) NaCl 水溶液



(b) KCl 水溶液

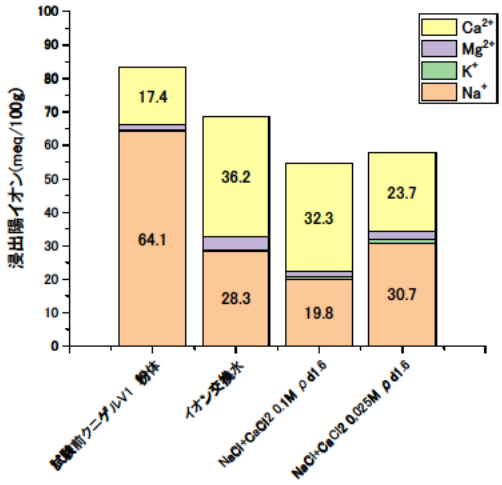


(c) $CaCl_2$ 水溶液

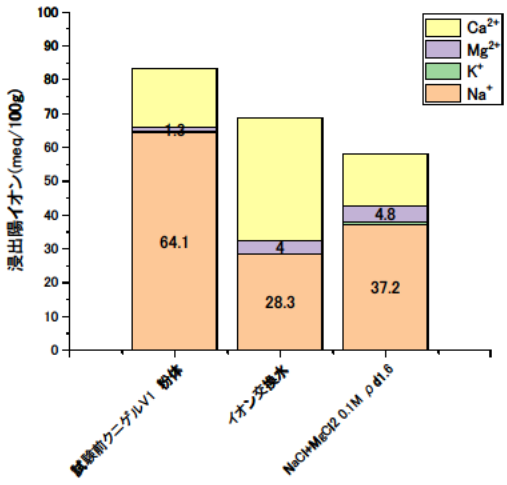


(d) $MgCl_2$ 水溶液

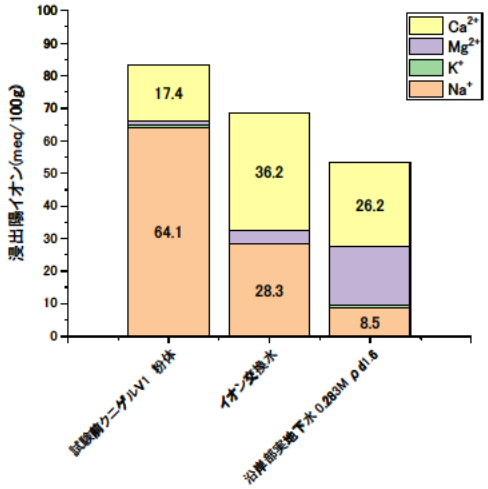
図 4-2-2　浸出陽イオンの分析結果まとめ（1/2）



(e) NaCl+$CaCl_2$ 水溶液



(f) NaCl+$MgCl_2$ 水溶液



(g) 沿岸部実地下水

図 4-2-3　浸出陽イオンの分析結果まとめ（2/2）

（２）　液相分析（排水分析）

排水分析を実施したケースを表 4-2-3 に示す。また、分析するイオン種とその分析方法を表 4-2-4 に、排水分析の結果を表 4-2-5 に示す。また、表 4-2-5 には、本年度実施した乾燥密度 1.6Mg/m^3、イオン強度 0.10 における KCl 水溶液、$CaCl_2$ 水溶液、$MgCl_2$ 水溶液および沿岸部実地下水の FGB2_214.75-220.52m を通水した場合の排水の組成相違を示すとともに、令和３年度に取得した液相の分析結果も合わせて示す。

本年度取得したイオン強度が 0.1 の KCl 水溶液の分析結果を、イオン強度が 0.025 のケースと比較すると、Na^+イオン、Ca^{2+}イオン、Mg^{2+}イオンが増加していることが分かる。これは、モンモリロナイトの層間中の Na^+イオン、Ca^{2+}イオン、Mg^{2+}イオンが水溶液中の K^+イオンと陽イオン交換反応したためと考えられる。また、K^+イオンと Cl-イオンも増加している原因に関しては、水溶液のイオン強度（濃度）の違いによるものであり、K^+イオンに関しては、陽イオン交換しなかった分の影響が表れたと考える。以上と同様の考察は、イオン強度が 0.1 の $CaCl_2$ 水溶液と $MgCl_2$ 水溶液の分析結果にも共通する。FGB-2_214.75-220.52m と F FGB-2_167.70-171.78 m の分析結果を比較すると、FGB-2_214.75-220.52m の Na^+イオンの量が顕著であるが、水溶液中の成分量の違い（FGB-2_214.75-220.52m は FGB-2_167.70-171.78 m と比較して Na^+イオンが多い）によるものと考える推察される。

表 4-2-3　排水分析を実施したケース

	溶液の種類	イオン強度	初期乾燥密度 (Mg/m^3)
Ⓔ Na 以外の陽イオン種ごとのイオン強度の影響の検討	KCl 水溶液	0.10	1.6
	$CaCl_2$ 水溶液	0.10	1.6
	$MgCl_2$ 水溶液	0.10	1.6
Ⓖ 沿岸部実地下水の影響の検討	FGB-2_214.75-220.52m	0.727	1.6

表 4-2-4　分析するイオン種とその分析方法

イオン種	分析方法
Na イオン	JIS K 0102（2016）48
K イオン	JIS K 0102（2016）49
Ca イオン	JIS K 0102（2016）50
Mg イオン	JIS K 0102（2016）51
Cl イオン	JIS K 0102（2016）35
SO_4 イオン	JIS K 0102（2016）41
Al イオン	JIS K 0102（2016）57
Si	JIS K 0116　発光分光分析通則

表 4-2-5　排水の分析結果

溶液		実施	pH	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO_4	Al	Si	ｲｵﾝ	備考
種類	イオン強度	年度		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	強度	
イオン交換水	0	2021	8.4	150	0.8	0.7	<0.1	3.3	2.6	<0.5	8.0	0.003	最終サンプル（給水開始から 584～613 日目まで）
			8.8	803	3.7	3.9	0.5	569	394	<0.2	8.1	0.038	最初のサンプル（給水開始から 160 日目まで）
KCl 水溶液→イオン交換水	0.5→0		8.5	74	100	0.9	<0.1	1.9	29	<0.5	8.0	0.004	KCl(0.5)から 1 ヶ月でイオン交換水に交換後の最終サンプル（給水開始から 273～283 日程度）
$MgCl_2$ 水溶液	0.5		8.0	4900	41	250	1800	13000	180	<0.5	19	0.455	最終サンプル（給水開始から 35 日目まで）
$CaCl_2$ 水溶液	0.5		7.5	5500	37	2500	56	14000	250	<0.5	20	0.452	最終サンプル（給水開始から 33 日目まで）
NaCl 水溶液	0.025		8.4	1200	4.9	6.3	0.8	1500	240	<0.5	16	0.053	最初のサンプル（給水開始から 57 日目まで）
KCl 水溶液	0.025		8.6	1500	35	13	0.9	1200	1100	<0.5	21	0.074	最初のサンプル（給水開始から 60 日目まで）
$CaCl_2$ 水溶液	0.025		8.8※	1500	5.8	9.4	0.8	850	1400	<0.5	30	0.074	最初のサンプル（給水開始から 60 日目まで）
$MgCl_2$ 水溶液	0.025		9.1※	1600	6.2	9.5	2.4	890	1400	<0.5	28	0.077	最初のサンプル（給水開始から 67 日目まで）
FGB-2_ 167.70-171.78 m	0.285		8.0※	2200	27	830	770	6600	1100	<0.5	12	0.269	最初のサンプル（給水開始から 1 日目まで）
KCl 水溶液	0.10②	2022	8.4	2500	470	29	4.6	4200	210	<0.1	70	0.145	最初のサンプル（給水開始から 91 日目まで）
$CaCl_2$ 水溶液	0.10②		8.5※	2200	11	36	3.4	3100	590	<0.1	23	0.112	最初のサンプル（給水開始から 86 日目まで）
$MgCl_2$ 水溶液	0.10②		8.4	2200	13	19	31	3300	300	<0.1	67	0.123	最初のサンプル（給水開始から 116 日目まで）
FGB-2_ 214.75-220.52m	0.728		7.8	10000	65	590	560	21000	3000	<0.1	23	0.658	最初のサンプル（給水開始から 34 日目まで）

注）“＜”印は定量下限値未満であることを示す。

注）“※”印は液量が少ないため、簡易 pH 計で測定

参考文献

小田治恵, 柴田雅博, ベントナイト―水相互作用の実験とモデル化, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-032, 67p., 1999.

産業技術総合研究所・原子力環境整備促進・資金管理センター・電力中央研究所, 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（沿岸部評価確証技術開発）令和 2 年度 報告書, 2021.

産業技術総合研究所・原子力環境整備促進・資金管理センター・電力中央研究所, 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（沿岸部評価確証技術開発）令和 3 年度 報告書, 2022.

Appendix Ⅸ

分野間連携

1. はじめに

1.1 背景

高レベル放射性廃棄物の処分事業の実施に際しては、様々な技術の適用が必要である。処分事業においては、これらの技術を地質環境、工学技術（処分場の設計）、安全評価の 3 つの分野に区分し、これらの分野を有機的に結びつける、換言すればこれらの分野を連携することにより、事業を円滑にかつ安全に進めることを目指している。

処分事業はいまだ開始してはいないものの、このような趣旨に沿って、日本原子力研究開発機構（以降：JAEA）では分野内や分野間の連携を図りつつ、幌延や瑞浪での地下研究施設での作業を進めており、ここで蓄積された知見が将来の処分事業に生かされることが期待されている。

一方、高レベル放射性廃棄物処分事業の実施主体である原子力発電環境整備機構（以降：NUMO）においては、適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築を目指して作業を進め、これらの成果を「包括的技術報告：我が国における安全な地層処分の実現」として取りまとめている。本作業はあくまでも、現在の技術的な知見に基づき一般的なデータを用いて仮想的な作業を行っている。この作業を進める際には、3 つの分野が連携して多様な地形、地質条件に則した地質環境モデルを作成している。

2017 年に公表された科学的特性マップでは、特に輸送でも好ましい地域として沿岸域に焦点を当てており、これらの情勢を受けて本受託研究の前フェーズである「沿岸部処分システム高度化開発（平成 27 年度～平成 30 年度）」が、産業技術総合研究所（以降：産総研）、JAEA、原子力環境整備促進・資金管理センター（以降：原環センター）、電力中央研究所（以降：電中研）の 4 者共同研究としておこなわれた。これは複数機関による初めての沿岸部にかかる共同研究である。当初、この事業では 4 機関はそれぞれの要素研究を遂行することとしていたが、研究が進むにつれて機関間や分野間の連携が可能ではないか、との意見が出されるようになってきた。その下地にあったのは共同研究の形をとったことである。各研究機関の研究者が顔を合わせて進捗を報告しあったことで、徐々に打ち解け合い、議論が活発化したことが最も大きな理由である。その後、連携を意識した多くのミーティングをおこなったが、専門分野が近い場合はたとえ研究機関が異なっていても連携が十分になされたものの、分野間の連携には大きな困難があることがわかってきた。

分野間の連携に関しては、後述する Supply list および Requirement list の必要性や、実際の研究地をもとにした地質環境から安全評価までの一連の流れを実施する必要性などが論じられた。しかしながら、当該事業はもともと要素研究の遂行が目的であったこともあり、具体的な成果とするには至らなかった。加えて、連携のための目的が定まっていなか

ったこと、実務者の協議体がなかったこと、連携にあたりリーダーシップを発揮する者の不在等が課題としてあげられた。

1.2 目的

以上の背景を受けて、2019 年度（平成 31 年度）開始した受託研究「沿岸部処分システム評価確証技術開発」では、以下の目的を設定したうえで、改めて分野間（内）連携を実施することとした。

・分野間連携を実施することにより、効率的な分野間連携のシステムを構築するとともに、各分野の研究成果の高度化を目指す

・分野内および分野間の連携により不確実性を低減するための効率的かつ実効的な調査・評価体系を構築する。

分野間連携の具体的な検討を実施するにあたっては、実務者による協議体（分野間連携 WG）を設置し、分野間（内）連携の在り方や進め方を検討する。

2. 分野間連携の進め方

2.1 基本方針

分野間連携については、全フェーズの受託研究「沿岸部処分システム高度化開発」において同様な試みがされているが、公開された成果はない。これまでの分野間連携では、各分野が提供できるデータリスト（Supply List）と他分野へ要求するデータリスト（Requirement List）による連携を図ってきたが、この手法では、各分野での情報の共有化ができても、具体的なアクションにつなげにくい。一方、NUMO のセーフティケースの構築に際しては Site Descriptive Model（SDM）をインターフェースにした各分野間の連携が図られている。そこで、本事業での分野間連携に際しても、これと同様に SDM をインターフェースに連携を進めることとした。また、対象地点としては、これまでにデータが蓄積されており、今後とも調査が実施される予定の駿河湾地域と幌延沿岸域とした。

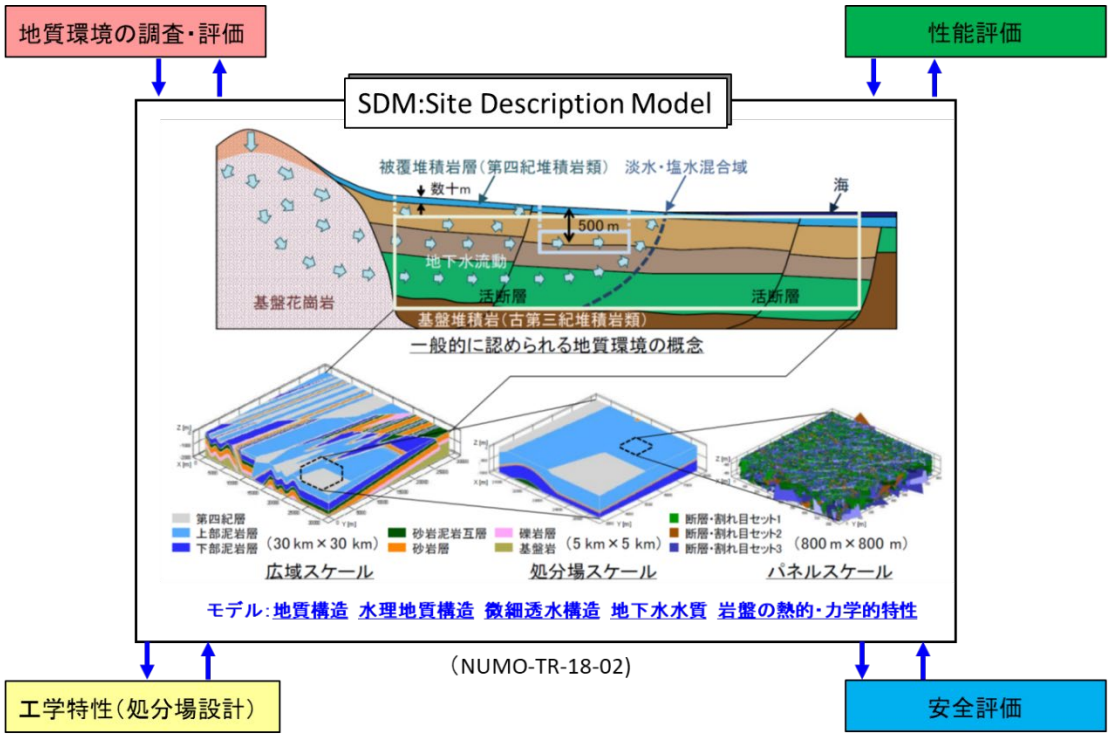
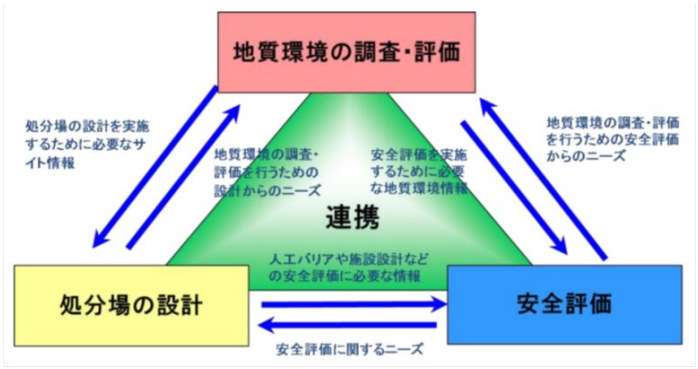


図 2.1 - 1　SDM をインターフェースとした分野間連携の概念

技術分野については、NUMO の包括的技術報告によれば、“地質環境の調査・評価”、“処分場の設計”および“安全評価”の 3 分野となっているが、先行するフィンランドやスウェーデンでのセーフティケースではこれらの 3 分野に“性能評価”を含めた 4 分野の構造となっているため、今回の検討でも 4 分野の構造として取り扱うこととした（図 2.1 - 1）。

ただし、今回のプロジェクトには JAEA が参加しておらず、このため現状では処分場設計、安全評価の分野の参加がないため、当面は“地質環境の調査評価”と“性能評価（工学特性：緩衝材の性能評価など）”の 2 分野での連携から開始する。

【従来】



（NUMO-TR-18-02）

【今回】

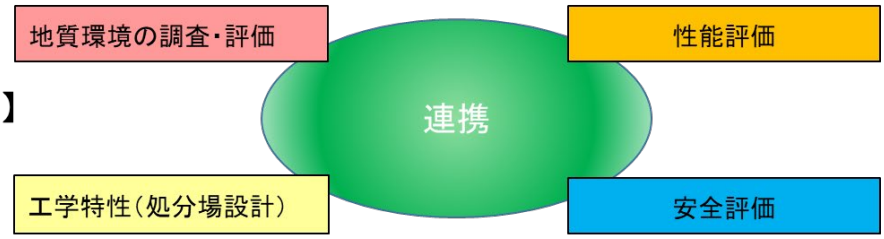


図 2.1 - 2　連携する分野

沿岸部を対象に初期の限定的なフィールドデータから SDM を構築するための手法やその際の不確実性の評価方法を具体化するような方向で連携を進め、分野間連携の在り方を検討する。検討された分野間連携の在り方に基づき本フェーズの共同研究を進め、連携の在り方をブラッシュアップするとともに，効率的な共同研究の推進に寄与する。

2.2　分野間連携 WG の概要

背景でも述べたように、本受託事業は基本的には要素技術開発であり、分野間連携に関しては副次的な作業となる。すなわち要素技術開発を主体としてその中で分野間連携をすることにより、より効率的な研究開発を行うことになる。そのためには、各機関、さらには分野間の情報共有や共通の目標設定が必要となる。このための体制として、各研究機関で研究の実務を担当する研究者を構成委員とする分野間連携 WG を昨年度に引き続き設置し、開催した。

共同研究に参加する産総研、原環センター、電中研から委員およびオブザーバーを選出した。また、昨年度と同様に JAEA からはこれまでの知見をもって本委員会をサポートしてもらうために“パートナー”として、実施主体の NUMO からは事業者の立場からの要望や助言を得るために“アドバイザー”として参加してもらうこととした。

地質環境分野内及び地質環境特性分野と工学特性分野の分野間連携については、令和 3 年度までに順調に実施されてきたため、本年度の分野間連携 WG は全体計画に関する情報共有を目的に年 1 回の開催とした。開催時期については、同様のメンバーが出席する運営

会議の後に開催することとした。分野間連携 WG では人工材料（緩衝材、セメント系材料）の性能評価については詳細な議論ができなかった。このため、令和３年度より連携を深める目的で工学技術 WG を設置、開催した。詳細については 2.3 で詳述する。

分野間連携 WG の活動状況を表 2.2 - 1 に、議事概要を表 2.2 - 2 に取りまとめ、分野間連携 WG の議事録を資料 - 1（P943~949）として示した。

表 2.2 - 1　WG の活動状況

	開催日時	開催場所	参 加 者					概要
			産総研	電中研	RWMC	JAEA	NUMO	
第1回（第18回）	2022年5月20日 16時～17時30分	Web会議	井川、町田、木方	長谷川、西本	大和田、林	水野	三枝	第1回運営会議 令和4年度の実施計画

表 2.2 - 2　WG の議事概要

	開催日時	概要、目的	主な議論の項目
第1回（第18回）	2022年5月20日 16時～17時30分	第1回運営会議 令和3年度の実施計画	令和4年度の連携に関する計画 ・駿河湾地域の地質、地下水モデル構築の連携 ・ボーリング調査の体系化 ・人工バリア材料試験への原位置地下水供与 ・状態変遷の概念図化とそれを踏まえた連携

資料 - 1

令和 4 年第 1 回分野間連携 WG　議事録

１．日時：令和 4 年 5 月 20 日（水）　16 時～17 時 30 分

２．会議形態：Web 会議

３．参加予定者

井川、町田、木方（産総研）

長谷川、西本（電中研）

大和田、林（原環センター）

水野（JAEA）

三枝（NUMO）

４．議題と議論

分野間連携に係る令和 4 年度の実施計画

（１） 分野間連携の全体概要

（２） 令和 4 年度の連携案件と実施計画

【地質分野内連携】

① 地質 CM(産総研)と地質 SDM(電中研)の連携

・昨年度の取りまとめを踏まえた、それぞれの対比と統合について説明

・両者がどのようなデータに基づきモデル化しているかを整理する必要がある。

・両者が持っているデータを統合することにより精度の高いモデルを構築することを目指したい。

② 現場データを活用した密度流解析（産総研）と地質モデル（電中研）との連携

・密度流解析の概要説明

・電中研が作成した 3 次元地質構造モデルおよび水理パラメータ、解析によって得られた 3 次元水頭分布およびフラックス分布、計算に使用した境界条件などの使用に関する依頼、

・潮汐や塩淡境界の影響について今後議論したい。

【地質／工学分野間連携】

③ 施設設計へのデータ供与を考慮したボーリング調査項目選定と調査の体系化

・FGB-2 孔のコア試験結果の代表性評価のための物理検層とコア試験について説明

・コア試験によるばらついたデータの代表性を評価する必要がある。この点を試験結果と関連のある物理検層の連続データを用いて評価する。これを可能にするための複合解析について今後検討を進める。

④ 人工バリア構成材料の耐久性試験に対する地下水挙動変化に関する情報供与と原位置地下水の提供

・FGB-2 孔の延伸掘削計画と採水計画の説明

・原位置地下水を用いた耐久性試験計画に関して説明

・新たに FGB-3 孔井を掘削し、浅い箇所での地下水の動きなどを計測する予定。

・分析項目は例年通り、同位体や地球科学研究で測定する希ガスや年代トレーサの測定がメインとなる。

【工学特性分野内連携】

⑤ セメント系材料に接触した地下水組成とその緩衝材への影響

・セメント系材料と接触した地下水の影響を含めた、総合的な実施計画の説明

・過去（平成 19 年）に実施したセメント系材料を通した地下水（人工海水を含む）の水質に関する情報を有している。

・セメント材料の影響を受けた地下水の緩衝材への影響については、そのプロセスも多様であることを考慮する必要がある。

⑥ 緩衝材の性能評価に関する連携：層間陽イオン、時間軸を意識した状態変遷の概念図化

その他

・情報交換会においても NUMO の視点から意見を頂きたく、NUMO 担当者には議論に加わって頂きたい。

以上

2.3 工学技術WGの概要

工学技術 WG は、電力中央研究所（CRIEPI）及び原子力環境整備促進・資金管理センター（RWMC）の工学技術分野の担当者、オブザーバ（産業技術総合研究所：AIST）から構成し、下記の点を活動のポイントやねらいとして実施した。

(a) CRIEPI と RWMC 間で、研究計画や結果等を相互に確認、（令和 5 年度取りまとめに向けて検討の方向性や見落としがないか等の視点）、意見交換を行い、研究の品質向上に役立てる。緩衝材に関する研究内容に関して、共通する事項(の現象の解釈やまとめかた等)について分野内での整合をはかる。

(b) 工学技術分野内の連携について、(a)の研究内容の相互理解をもとに、CRIEPI と RWMC で実施中の研究内容の間でデータの相互活用や R5 年度の工学技術の最終とりまとめに向けた活動(緩衝材の状態変遷に関する概念図化など)を推進する。

(c) 工学技術分野内の連携活動に関して、今後の活動や地層処分事業に伝達すべき情報の記録を残す。

工学技術 WG は、下記の日程で全 3 回実施した。以下の(1)から(3)にそれぞれに WG の活動内容を、(4)に令和 3 年度の活動の総括を示す。

・第 1 回 WG：令和 4 年 6 月 29 日
・第 2 回 WG：令和 4 年 10 月 17 日
・第 3 回 WG：令和 5 年 2 月 6 日

（1） 第 1 回 WG

日　時：令和 4 年 6 月 29 日（水） 13:15～15:10
場　所：TV 会議
出席者：
（CRIEPI）西本、渡邊、横山、吉川、佐藤
（RWMC）大和田、林、丸山、菊池、八木、坂本、安田
（AIST）井川、木方

- 工学技術 WG の活動計画を確認した。
  ・活動のポイントやねらい
  (a) CRIEPI と RWMC 間で、研究計画や結果等を相互に確認（令和 5 年度の取りまとめに向けて検討の方向性や見落としがないか等の視点）、意見交換を行い、研究の品質向上に役立てる。緩衝材に関する研究内容に関して、共通する事項(の現象の解釈やまとめかた等)について分野内での整合をはかる。
  (b) 工学技術分野内の連携について、(a)の研究内容の相互理解をもとに、CRIEPI と RWMC で実施中の研究内容の間で電中研と原環センターで実施中の研究内容の間

でデータの相互活用や R5 年度の工学技術の最終とりまとめに向けた活動(緩衝材の状態変遷に関する概念図化など)を推進する。

(c) 工学技術分野内の連携活動に関して、今後の活動や地層処分事業に伝達すべき情報の記録を残す。

- 工学技術分野の各実施項目の内容紹介を担当者より紹介し、内容の相互理解、活動のポイントやねらいの(a)及び(b)関わる議論を行った。主な内容を以下に示す。
  - ・試験方法の詳細や検討のねらい等に関して共有した。
  - ・CRIEPI のセメント系材料との反応を考慮した水質の検討に関して、効率的に進められるよう、RWMC のこれまでの検討の知見等で活用できることがあれば提供して進めることを確認した。
  - ・令和 3 年度に議論した、CRIEPI の緩衝材の要素試験結果に関する RWMC のイオン交換挙動の解析手法による再現について、令和 4 年度に RWMC で解析を実施することとし、解析条件など議論をしていくこととした。RWMC の現状の解析ではモンモリロナイトを対象としており、CRIEPI の試験はベントナイトを対象としている違いがあり、解析で随伴鉱物の影響までは考慮できないが、今回は随伴鉱物の影響を考慮せずに解析し、イオン交換挙動に随伴鉱物の影響が大きいかなどを考察することなどの概略の進め方を議論した。

- 緩衝材の状態変遷に関する概念図の検討の本年度の進め方について意見交換を行なった。
  - ・状態変遷に関する概念図は、これまでに NUMO の包括的技術報告書のストーリーボードや LLW の中深度処分などがある。RWMC のこれまでの研究の中で、処分場の状態変遷に関する類似の図がいくつかあることから、それらもピックアップし参考にすることとした。
  - ・概念図の検討は、令和 4 年度は暫定的に概略で状態変遷図を示すことを目標とし、令和 5 年度に詳細化の検討をするスケジュールで進めることとした。
  - ・状態変遷図は、外的要因に応じて多くのパターンのものを作成することができるが、膨大な作業量になる懸念もあるため、本 WG では作業量も鑑み、研究内容を説明する際のツールとなるよう、各検討項目の位置づけやそれらの連携、残された課題などを盛り込むことを中心に進めることを議論した。

- 駿河湾ボーリングの地下水の各種試験への活用について、令和 4 年度の計画について情報共有をした。
  - ・令和 4 年度も引き続き、AIST が駿河湾のボーリングで採水する地下水を、RWMC のセメント系材料及び緩衝材の試験で活用する。ボーリングのスケジュールや採水

する深度などの計画について共有した。

・採水は FGB-3 孔の-100m（淡水に海水が混合）と 2 月中旬 FGB-2 孔の-800m（基盤岩：海水相当）で実施する計画で、前者は早ければ 7 月中、後者は 2 月中旬にそれぞれ採取する予定である。

（2） 第 2 回 WG

日　時：令和 4 年 10 月 17 日（月）　10:00～12:00

場　所：TV 会議

出席者：

（CRIEPI）西本、渡邊、横山、吉川、佐藤

（RWMC）大和田、林、丸山、菊池、八木、坂本、安田

（AIST）井川、木方

- 緩衝材の要素試験試験結果に関するイオン交換挙動の再現解析の計画について議論をした。
  - ・CRIEPI で過年度に実施した緩衝材の要素試験結果を対象として、RWMC にてイオン交換挙動の解析を実施する。実施にあたって、試験時の通水の条件や、解析における間隙水組成の設定のしかたなど、CRIEPI と RWMC で相互に試験や解析の条件を共有して計画について確認した。

- ベントナイトの性能変化をもたらす化学的要因の検討に関して予備試験を実施した結果の議論をした。
  - ・CRIEPI で実施中のセメント系材料に海水を接触させた容液の作製のための予備試験について、令和 3 年度に RWMC より情報提供した試験結果等を参考に実施した結果が紹介され、既往の試験結果と同様な傾向を示しており妥当な結果であることが確認された。

- 緩衝材の状態変遷に関する概念図の作成にあたり、既往の類似の図を調査した結果が報告、WG で共有し、今後の作業の進め方について議論をして、検討や作成の方向性を確認した。
  - ・RWMC で調査した類似の図は時空間のスケールの大きなものが多いが、それぞれの検討で必要に応じたスケールになっている。沿岸部の工学技術分野の検討内容に関する状態変遷図は、ある程度時空間スケールなどを絞って検討を進める。
  - ・緩衝材の状態変遷とセメント系材料の変遷や両者の時空間における関連を整理し共有していくことも重要である。緩衝材とセメント系材料でそれぞれ 1 枚作成し、関連等の検討を進める。

・工学分野内の個々の検討の位置づけや想定の理解を助けるためのツールとすることを念頭に状態変遷図の作成を進める。

（3） 第 3 回 WG

日　時：令和 5 年 2 月 6 日（月）　10:00～12:00

場　所：TV 会議

参加者：

（CRIEPI）西本、渡邊、横山、吉川、佐藤

（RWMC）大和田、林、丸山、菊池、八木、坂本、安田

（AIST）井川、木方

- 第 3 回委員会での緩衝材の検討に関する委員からのコメントに関し、各試験での圧密状態と分散状態でのイオン交換挙動の比較について、共通した解釈に関する議論をした。
  ・CRIEPI と RWMC の試験内容を相互に説明した上で、RWMC の圧密状態と分散状態のイオン交換挙動の比較の詳細について議論した。CRIEPI の試験結果より圧密状態と分散状態で同様であるとの説明に対し、RWMC の試験では、異なるとの説明をしている。RWMC の分散系の試験によるイオン交換選択係数は、結果を取りまとめている過程にあるが、詳細にみれば K/Na と Mg/Na は概略で似ているが、Ca/Na は小田・柴田の値とは違う（大きい）模様である。圧密状態と分散状態のイオン交換選択係数を比較すると圧密状態が小さい結果もある。引き続きこれらの点に関し、情報を共有することとした。

- RWMC にて実施した、CRIEPI の緩衝材の要素試験結果のイオン交換挙動の再現解析結果について報告し、解析結果をもとに上記のイオン交換挙動の共通の解釈に関して議論した。
  ・解析結果は、Ca のイオン交換選択係数が小田・柴田の値より大きい場合に試験結果の再現性が良く前述の議論との整合することを共有した。
  ・一方でイオン交換選択係数の 0.1 や 0.2 程度の違いは解析結果の違いにならない様であり、イオン交換選択係数が圧密や分散など状態によって変ってもイオン交換挙動はほぼ変わらない可能性も考えられ、そうであれば CRIEPI の試験結果も説明が可能と考えられる。今後も試験結果の整理や解釈等に基づき議論が必要であるが、本 WG の議論を通じてイオン交換挙動に関する共通した解釈が出来る見込みを得ることが出来た。

- 令和 4 年度工学技術 WG の活動を振り返り、まとめかたの議論や今後の作業について

確認した。

・状態変遷に関する概念図を協力して作成したことが本年度の成果の一つであり、この図を用いて研究の位置づけ等を説明することで、本事業の工学技術での取り組みを他事業との差別化が出来る。このため、報告書の 4 章（工学技術）の冒頭に節を設け、説明することとした。

・工学 WG で既往の状態変遷図を調査し、位置づけや作成の方向性を議論した内容について Appndix に記載することとした。

・令和 3 年度と同様に総括表を作成して関係者で確認することとした。

（4）令和 4 年度の活動総括

工学技術 WG における活動内容や今後の課題を、本 WG の活動のポイントやねらい毎に整理し表 2.3 - 1 に示す。本事業の最終とりまとめへ向けて、引き続き活動を継続する予定である。

表 2.3 - 1 令和 4 年度工学技術 WG 活動総括

活動のポイントやねらい	活動内容、今後の課題
(a) CRIEPI と RWMC 間で、研究計画や結果等を相互に確認（令和 5 年度の取りまとめに向けて検討の方向性や見落としがないか等の視点）、意見交換を行い、研究の品質向上に役立てる。緩衝材に関する研究内容に関して、共通する事項(の現象の解釈やまとめかた等)について分野内での整合をはかる。	○工学技術分野内の実施内容を共有し相互理解を深め、品質向上に結び付く活動をした。具体的には、 ・セメント系材料に接触した溶液の作製に関する意見交換 ・イオン交換挙動の圧密状態と分散状態での試験間の結果の解釈の整合性に関する議論 ・地質環境分野のボーリング調査で採取した地下水での材料試験に関する情報の共有 ○引き続き、情報交換、意見交換の活動を継続する。
(b) 工学技術分野内の連携について、(a)の研究内容の相互理解をもとに、CRIEPI と RWMC で実施中の研究内容の間で電中研と原環センターで実施中の研究内容の間でデータの相互活用や R5 年度の工学技術の最終とりまとめに向けた活動(緩衝材の状態変遷に関する概念図化など)を推進する。	○CRIEPI で過年度に実施した緩衝材の要素試験結果を活用し、RWMC にてイオン交換挙動の解析を実施した（報告書本編 4-3）。 ○状態変遷に関し、研究内容を説明する際のツールとなるよう、各検討項目の位置づけやそれらの連携、残された課題などを議論し WG 内にて協力して概念（図）化を進めた。本年度は、現時点での研究の位置づけや課題、連携などについて概略で状態変遷を概念図化して示すこととし、報告書 4 章の 4-1 に掲載した。 ○引き続き、活動を継続する
(c)工学技術分野内の連携活動に関して、今後の活動や地層処分事業に伝達すべき情報の記録を残す。	○議事要旨を作成 ○今後の類似の活動に役立つ様、現状に対してどのような活動をしたかを報告書(Appendix)へまとめた。

３．分野間連携の作業内容

3.1　分野間連携の概要

今フェーズにおける分野間（内）連携、さらには機関間（内）の連携については、本受託研究の各要素技術開発に合わせて鋭意実施してきた。これらの連携の全体像を図 3.1-1 に示す。また、主たる連携項目の今フェーズにおける全体計画（スケジュール）を図 3.1-2 に示す。

今フェーズの本プロジェクト研究の実施機関は産総研、電中研、原環センターであり、それぞれの機関で実施している研究項目を枠内に記述すると共に、それぞれの研究項目間の連携を矢印で示した。このうち、工学特性 WG で議論している人工材料の評価に関する連携を赤字で示した。受託研究機関以外として、JAEA（パートナー）および NUMO（アドバイザー）を示し、これらとの連携についても矢印で示した。

ここでは、図 3.1-2 に示した各連携項目の概要を記述するとともに、このうちの主たる 3 つの連携項目についは、次項以降で詳細を記述する。

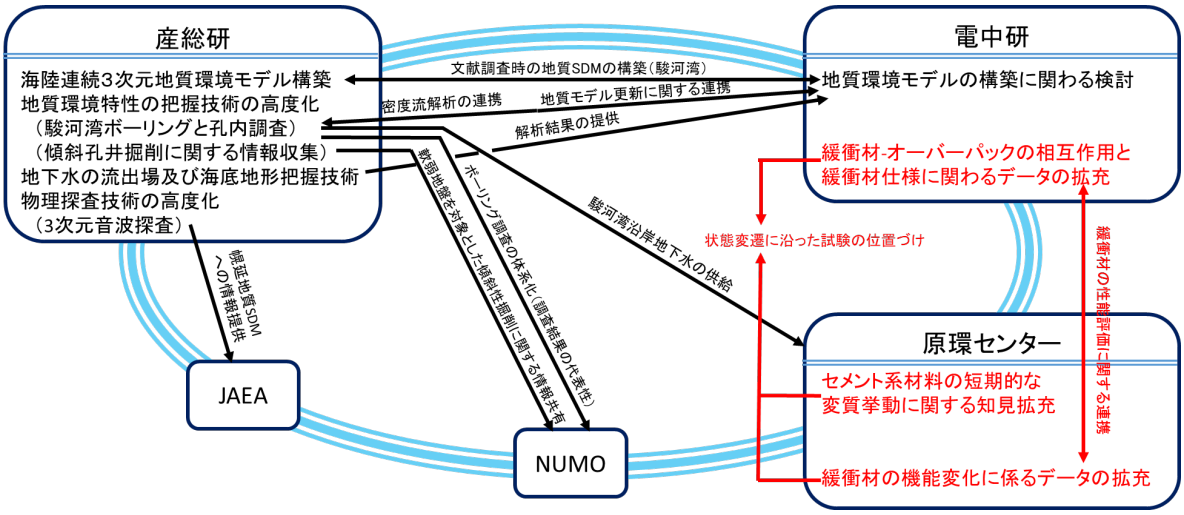
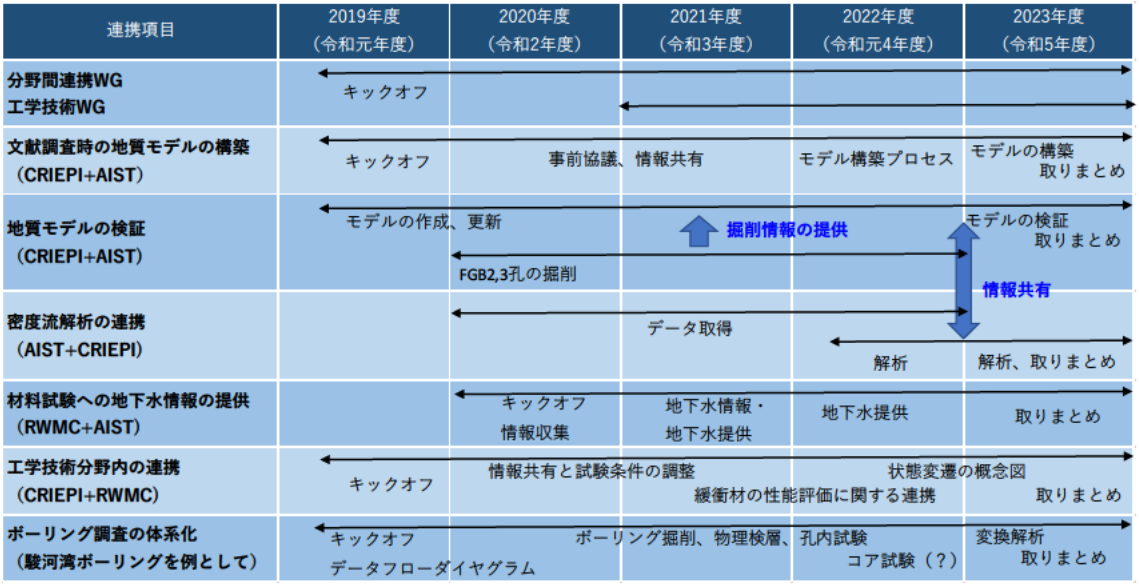


図 3.1 - 1　分野間（内）・機関間（内）連携の概要

（赤字：工学技術 WG で取り扱う連携）

表 3.1 - 1　分野間連携の主たる連携項目と実施スケジュール



（1）文献調査時の地質モデルの構築

【地質環境特性分野内（地質と地下水）連携】

事業内容

電中研：駿河湾地域における既存資料の解析結果、さらには新たに産総研が掘削するボーリングの地質環境特性に関する情報に基づき、地層処分対象岩盤を包含する地層の地質、地下水流動に関する各々の段階の地質環境モデルを構築する。

産総研：全国的に整備された地形、地質、物理探査のデータベースに基づくコンセプチュアルモデルを構築しており、駿河湾地域においても地質環境モデル（CM）の構築とこれに基づく地下水流動解析を実施している。

分野間連携

駿河湾地域において産総研が構築する地質環境モデル（CM） と電中研が構築する地質環境モデルは、それぞれ使用するデータやモデル構築のプロセス、目的が異なるものの、文献調査段階に得られるデータに基づくモデルと捉えることができる。これまで、これら両者のモデルと、両者が用いたデータを相互比較し、それぞれのモデルの特徴を考慮したうえで、両者のモデルを統一することを目標に議論を進めた。しかしながら、産総研の構築したモデルは地下水流動に関するコンセプチュアルモデルであるため、両者の比較、統合が困難であると結論付けられた。

電中研が駿河湾地域で構築した初期地質モデル（文献調査段階の地質モデルに相当）では、地表のデータに比較して地下深部のデータが不足し、3 次元地質モデルの不確実性が低減できないことが明らかとなっている。これに対して、産総研がモデル構築に用いたデータは、「沿岸域沿岸境界・断層評価技術高度化開発」の際に収集した地形分類図、数値

地質図、ボーリングデータ、数値標高モデル、間隙率に関するデータである。特に深部情報としてのボーリングデータに関しては、収集したボーリングデータの全データ数が12,210本、掘削深度が200m以上のデータ数が4,040本、先新第三系に到達したデータ数は2,010本と充実している（越谷ほか、2011）。本データ収集は全国レベルの水文学的な検討を行うために行われており、その観点から各孔井の地層のデータに関しては、新第三紀以降の地層を対象として鹿野ほか（1991）の地質時代区分に基づき以下のような層序区分がなされている。

Q2：第四系中部更新統

Q1：第四系下部更新統

N3：新第三系鮮新統～上部中新統上部

N2：新第三系上部中新統下部～中部中新統中部

N1：新第三系中部中新統下部～下部中新統中部

文献調査段階において、収集されたこれらのボーリングデータが有用と想定されることから、次年度は文献調査段階で利用しやすくするためのデータ整備を進めることとした。

（2）駿河湾地域における地質環境モデルと現地ボーリング調査のデータ共有

【地質環境特性分野内（地質と地下水）連携】

事業内容

電中研：駿河湾地域における既存資料の解析結果、さらには新たに産総研が掘削するボーリングの地質環境特性に関する情報に基づき、地層処分対象岩盤を包含する地層の地質、地下水流動に関する各々の段階の地質環境モデルを構築する。

産総研：駿河湾の沿岸部において、地下深部における地質分布の確認や沿岸域特有の塩淡境界の分布、塩淡境界以下の地下水流動の評価技術開発のために、FGB‐2孔井（深度400～800m）および新たなFGB‐3孔井（深度0～120m）のボーリング掘削とそれに伴うコア、カッティングスによる地質調査、各種検層、孔内試験等を実施している。また、孔内における各種水理学的な調査で得られた観測値や文献値に基づいたモデルでの密度流解析を実施し、解析値と計測値を比較することにより沿岸域特有の地下水流動の評価技術の高度化を図った。

分野間連携

駿河湾地域において電中研が構築する地質環境モデルの深部方向への不確実性を低減することを目的に、産総研が沿岸域で実施しているボーリング調査によって得られる各種データを供与する。なお、本年度のボーリング掘削、調査が3月上旬まで及んだため、400-800mで取得されたデータを用いた電中研のモデル更新は令和5年度の作業となる。

一方、産総研が駿河湾沿岸部のFGB-2孔井を中心として範囲で実施している密度流解析の境界条件として、電中研が構築した2021年度のモデルを陸側の側面として採用した。

（3）人工バリア構成材料の耐久性試験に対する実地下水採取

【工学特性（材料耐久性）分野と地質環境特性分野の連携】

事業内容

原環センター：沿岸海底下特有の地質環境に着目した工学技術の高度化を目指して、①沿岸部に特有な地下水化学環境におけるセメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充、②同様の環境における緩衝材の機能変化にかかわるデータ拡充、についてそれぞれデータ取得とその後の検討のための実験などを実施中である。

産総研：水理基盤の上部層を対象として、層序の確認及び沿岸域特有の地下水流動の検討を目的として FGB - 2 孔井の深度 400m から 800mを延伸掘削する。本孔井では水理特性評価のための孔内水理試験及び地下水採水を行う。

分野間連携

上述の事業項目のうち①～②については、再冠水までの処分場周辺の地下水組成の変遷を考慮して、それぞれの材料に対する試験を行う必要がある。沿岸域における初期から超長期に及ぶ地下水流動の変遷やそれに伴う処分場周辺の地下水の水質の変化については、地質環境特性分野において数々の知見を有しており、現在実施中のシステマティック解析では、これらの知見を踏まえて過去～現状～将来の一連の地下水変遷を検討する予定である。これらの情報を共有することにより、より的確な試験条件を設定することができると期待できる。また、FGB-2 孔において、事前に想定した深度に対する地下水水質に沿って、2 深度の実地下水を採取し、これらの実地下水を人工材料の耐久性試験に提供する。

（4）緩衝材の性能評価に関する連携（時空間を意識した状態変遷の観点から）

【工学特性（材料耐久性）分野内連携】

事業内容

原環センター：沿岸海底下特有の地質環境に着目した工学技術の高度化を目指して、①沿岸部に特有な地下水化学環境におけるセメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充、②同様の環境における緩衝材の機能変化にかかわるデータ拡充、についてそれぞれデータ取得とその後の検討のための実験などを実施中である。

電中研：工学技術高度化を目指して③緩衝材－オーバーパックの相互作用と緩衝材仕様に関わるデータの拡充、についてそれぞれデータ取得とその後の検討のための実験などを実施中である。

分野間連携

【地下水環境と時間軸を意識した状態変遷の概念の共有】

上記事業内容のうち②および③の緩衝材の試験については、試験目的を踏まえて各機関で実施可能な技術を用いて検討を進めているが、個別の試験だけでみると、対象とするタイムスケールやシーンが限定されるため、数十年～数百年以上にわたる緩衝材の状態変遷を個別の試験だけではカバーすることができない。このため、沿岸部特有の地下水環境や

時間軸を意識しつつ、緩衝材の状態変遷を概念的に整理し、状態変遷の理解を深める。

【セメントの影響を受けた地下水水質：緩衝材への影響の観点から】

これまで主に緩衝材への地下水の浸潤および膨潤、イオン交換等とそれに伴う性能変化を中心に取り扱ってきた。一方で処分場内への地下水の侵入に当たっては、周囲の岩盤と接する形で吹き付けコンクリートやコンクリート製の支保工、覆工コンクリート等が施工され、沿岸部において想定される環境、特に海水系地下水と接触したセメント系材料の変遷と、そのために溶出するセメント成分の組成やその影響に関してのデータは豊富には得られてこなかった。このため、これまでに実施されたセメント系材料の変質試験と液相の分析結果について情報を共有して、今後、海水系地下水に於ける緩衝材の長期変遷評価に向けた試験条件等の設定の参考情報として利用する。

（5）ボーリング掘削・調査の体系化

【地質環境特性からの情報提供：体系化】

事業内容

産総研：駿河湾の沿岸部において、地下深部における地質分布の確認や沿岸域特有の塩淡境界の分布、塩淡境界以下の地下水流動の評価技術開発のために、令和 2 年度より孔長 800m のボーリング（FGB-2 孔井）掘削とそれに伴うコア、カッティングスによる地質調査、各種検層、孔内試験等を実施している。また、孔内における各種水理学的な調査で得られた観測値や文献値に基づいたモデルでの密度流解析を実施し、解析値と計測値を比較することにより沿岸域特有の地下水流動の評価技術の高度化を図った。

分野間連携

今回のボーリング掘削・調査の主たる目的は沿岸域特有の地下水流動を理解するとともに、その評価技術を高度化することにある。一方、地層処分に係るボーリング調査を行う場合は、実事業での予備検討の位置づけとしてボーリング掘削、調査計画を立案したうえで、それに沿って掘削や各種調査を行い、作業における知見を蓄積したうえでボーリング掘削、調査の体系化を行うのが一般的である。

本事業が処分事業の一環であることから、本事業においてもこのような観点で事前に得られる情報に基づきボーリング掘削、調査計画を策定した。しかしながら、本地域には火山麓扇状地堆積物（vf4）が厚く堆積しており、この基盤となる処分に適した岩体の分布深度が想定以上の深く、計画した掘削深度では当該の岩体に到達できなかった。このため処分候補岩体を対象とした掘削や各種試験を実施することができず、これらの知見を得ることができなかった。

令和 3 年度から 4 年度にかけて、当初計画深度までのボーリング掘削や孔内での検層、調査などを実施したので、概要調査段階のボーリング掘削、調査の体系化に資すため、これらの概要を取りまとめた。

3.2　人工バリア構成材料の耐久性試験に対する実地下水採取

（１）　実地下水による試験の必要性

工学技術分野の検討では、沿岸部の多様な地下水における、処分場の構成材料の設計や性能評価のための体系的なデータ整備や評価手法の検討を実施している。報告書本編の4-1（セメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充）ではセメント系材料の化学変質に伴う力学特性について、4-2（緩衝材の機能変化に係るデータの拡充）では緩衝材の自己シール性に関わる膨潤率やイオン交換挙動について、それぞれ、多様な地下水組成に対しての試験データを、材料への影響がある地下水成分に着目して試薬で模擬した溶液（模擬地下水）を使用して室内試験により取得している。

実地下水は、様々なイオンや微量な成分等を含んでおりそれらの試験結果への影響が考えられ、室内試験結果と比較してフィードバックすべき点など確認することが必要である。また、精密調査における実地下水で材料の性能評価の必要性も予想されることから、試験方法の適応性を把握しておくことも重要と考えられる。

そのため、これらの模擬地下水を使用した室内試験の試験データや評価方法の検証やフィードバック、加えて、実地下水を用いた室内試験での留意点を抽出のために、現在室内試験を実施している試験系で実地下水を使用した試験の必要性がある。

（２）　FGB - 2 孔実地下水の採取

現場における実地下水の採取深度および採取日は以下の通りである。

・深度 112.28～113.28m（2022 年 11 月 3 日）
・深度 795.00～801.35m（2023 年 2 月 9 日）

掘削泥水の影響を除去するため、採水前には十分な揚水を行い、泥水に加えていたトレーサ濃度が 3%以下となるようにした。採水の際は揚水地下水をホースで導水し、ホース口をボトル内に入れて十分にオーバーフローさせて、なるべくボトル内に空気が入らないように留意した。採取した地下水はその日のうちに冷蔵便でラボへ郵送した。

表 3.2-1　工学技術分野の試験における地下水を使用した試験

分類	試験項目	地下水の種類	必要量	試験実施時期
緩衝材	膨潤量試験	FGB-2(EL-160m)：R3採水済 (海水の1/3程度)	2L (0.5L×4本)	R3年度より
		FGB-3(EL-115m) (海水の1/10程度)	2L (0.5L×4本)	R5年度実施で計画予定
		FGB-2(EL-800m) (基盤岩：海水相当) R4採水	1L (0.5L×2本)	R5年度実施で計画予定 (化学組成を確認して計画)
	イオン交換挙動把握試験	FGB-2(EL-160m)：R3採水済 (海水の1/3程度)	2L (0.5L×4本)	R3年度より
セメント系材料	セメントペーストの詳細浸漬試験	FGB-2(EL-160m)：R3採水済 (海水の1/3程度)	8L (2L×4本)	R3年度より
		EL-220m、-280m、-340mのうち1種 (海水程度)：R3採水済	各4L (2L×2本)×3	R3年度より
	コンクリート試料の浸漬試験	FGB-2(EL-160m)：R3採水済 (海水の1/3程度)	8L (2L×4本)	R3年度より
	コンクリート試料のフロースルー試験	FGB-2(EL-160m)：R3採水済 (海水の1/3程度)	10L (2L×5本)	R3年度より

（3）　実地下水を用いた材料試験

工学技術分野の試験で、実地下水を用いた材料試験について、それぞれの試験での比較検討の内容について以下に示す。

1) セメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充（本編 4-2 節）

セメント系材料に関する検討において、セメント系材料の化学変質に影響及ぼす成分を考慮して沿岸部の地下水組成を類型化し、類型化した各地下水グループの化学組成の模擬地下水を作製してセメントペースト試料を浸漬し、各地下水グループでの化学変質と力学特性に関するデータを取得している。実地下水による浸漬試験を実施して、模擬地下水での試験データと比較し、変質挙動や力学特性の類似性を確認する。実地下水を使用した試験は、令和 3 年度に採取した海水の 1/3 程度の濃度で Mg の濃度が比較的高い地下水（FGB - 2 孔 167.70～171.78m）、海水同等の地下水（FGB - 2 孔深度 210m から 350m で採取した地下水）を使用して浸漬試験を実施してデータを取得が進めている（本編 4-2(2) セメント系材料の化学変質と力学的特性挙に関する検討）。

また、支保工における地下水の接触条件を考慮したフロー試験や浸漬試験を、知見の少ないコンクリート試料を使用し、模擬地下水で化学変質と力学特性に関するデータを取得しており、実地下水（FGB - 2 孔 167.70～171.78m）を加えて実施している。これにより、データの拡充を図り解析の検証データに活用する（本編 4-2(3) 現実的な材料及び条件における力学変質と力学的特性に関する検討）。

2) 緩衝材の機能変化に係るデータの拡充（本編 4-3 節）

緩衝材の性能に影響がある層間陽イオンの交換挙動は、沿岸部の地下水で想定されるイオン強度の高い地下水や圧密した緩衝材でのデータは少ない。そのため陽イオン種や濃度、緩衝材の乾燥密度をパラメータとして、試薬で調整した溶液と圧密状態の試料による通水試験（室内試験）で挙動を確認し、イオン交換係数を取得している。加えて、イオン交換挙動を予測する解析手法についても検討を実施している。実地下水（FGB－2 孔 167.70～171.78m）を使用した通水試験を実施した。今後、試験結果の再現解析等より解析手法の検証や改善等を行う予定である。（本編 4-3(3) イオン交換選択性に関する検討）

緩衝材の自己シール性に関する評価に使用する膨潤率に関して、沿岸部の地下水の組成を踏まえ、イオン強度や陽イオン種をパラメータとして試薬を調整した溶液による膨潤率試験でデータを取得し、評価方法を検討している。陽イオン種による膨潤率の差は比較的小さく、イオン強度が大きくなるほど膨潤率は小さくなる傾向があることをこれまでに把握してきている。2 種類の実地下水（FGB－2 孔 167.70～171.78m 及び FGB－2 孔 214.75～220.52m）で膨潤率のデータをそれぞれ令和 3 年と令和 4 年度に取得し、これまでに試験で把握したイオン強度と膨潤率の関係と概ね同様な傾向を示すことを確認した。（本編 4-3(4) 緩衝材の膨潤率に対する溶存陽イオンの影響把握試験）。なお、令和 4 年度採水分の地下水による試験は、今後、令和 5 年度の試験計画への反映を検討する予定である。

3.3 緩衝材の性能評価に関する連携

（1）沿岸部処分の構成要素において想定される状態変遷の概念図の作成経緯

高レベル放射性廃棄物処分に関わる研究・技術開発は過去から行われてきている中、本事業では、沿岸海底下特有の地質環境に着目して工学技術の高度化に向けた検討を実施している。将来的な課題も含めて必要な検討を効率よく進めるには、本事業の特徴を考慮したうえで多角的な視点から課題を整理し、複数機関で連携して取り組むことが重要と考えられる。しかし、中長期的に取り組むべき課題もあることや、関係者が多岐にわたることを理由に、上述した取り組みを継続的に実行することは必ずしも容易ではない。そこで本事業では、沿岸部処分に関わる課題解決を進める中で関係者間の連携を強化することを目的に、まずは工学技術のパートにおいて、課題や研究の位置づけに関する認識を関係者間で共有するための一つのツールとして状態変遷の概念図を作成し、活用することにした。以下、状態変遷の概念図の作成経緯について詳述する。

処分施設の構成要素（例えば、支保工や緩衝材）において生じる現象は、構成要素間の相互作用を含め複雑であり、建設から閉鎖後長期まで幅広い時間スケールに及ぶものである。処分事業における課題を精査し、複数機関で連携して課題解決に取り組むうえでは、処分施設で起こりうる現象を時間軸あるいは空間軸を意識して整理し、研究の位置づけや相互関係を明確にすることが重要な検討プロセスになると考えられる。しかし、時間・空間スケールの捉え方には実施担当者ごとに認識のずれが生じることもある。例えば、緩衝

材の飽和度の時間変化を考える場合に、緩衝材全体を想定することもあれば、岩盤と接する緩衝材の一部を想定することもある。こうした認識のずれが共通認識の形成を阻害する一要因になる。そこで、本事業においては、実施担当者ごとの認識のずれを軽減し、共通認識の形成につなげるために、想定される現象や研究の位置づけを“見える化”することを検討した。処分施設で想定される現象の整理、表現方法については、以下のような先行事例がある。

NUMOは、処分システム全体のふるまいを俯瞰し、時間・空間スケールに関する整合性を確認できるように、ストーリーボードと称して、処分場の構成要素について考慮すべき熱的・水理学的・力学的・化学的な状態の変化を整理している（NUMO、2021）。例えば、時間スケールは、「処分場閉鎖から再冠水完了までの期間」や「再冠水完了から放射性核種の移行が生ずるまでの期間」などと区分し、空間スケールは、「広域スケール（数十 km×数十 km）」や「ニアフィールドスケール（人工バリアおよび処分坑道とその周辺 100 m程度）」などと区分して、各々の時空間区分に対応する状態変遷などを整理している。平成 29 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（原子力環境整備促進・資金管理センター、2017）では、オーバーパック、緩衝材、岩盤という構成要素に対し、発熱や地下水といった外的要因を考え、建設初期から再冠水にかけた力学的過渡状態で起こる事象、その後の化学・拡散浸透が支配的になる状態で起こる事象を整理している。類似の試みは、中深度処分においても行われており、人工バリア性能の変化をセメント系材料とベントナイト系材料で想定される力学的・化学的な影響因子から説明している（土木学会、2009）。ここでは、コンクリートピット、低拡散層、低透水層の各々で想定される状態変遷を文章で表現することに加え、人工バリアの状態変遷を描いた状態図が例示されている。

NUMO（2021）のストーリーボードは、本事業において、処分施設で想定される現象を時間軸あるいは空間軸を意識して整理する際に参考になる考え方であった。NUMO（2021）では処分システム全体を俯瞰する狙いで時間・空間スケールを大きく区分しているため、本事業の研究対象に対しては、時間・空間スケールの区分を改めて検討する必要があると考えられる。原子力環境整備促進・資金管理センター（2017）の例では、構成要素と外的要因の関係を整理している点、各構成要素の規模に対応した空間スケールで検討している点で研究対象とのつながりが分かりやすく、本事業において参考となる考え方であった。土木学会（2009）においても、構成要素ごとに想定される状態や主要な影響要因を示していた点は同様であり、構成要素間の相互関係を理解するうえで有用な整理方法であった。また、状態変遷の例を図示することは感覚的にも理解しやすい表現方法であった。

以上の考え方や表現方法を参考に、本事業では、支保工と緩衝材の空間スケール、建設から再冠水完了程度までの時間スケールにおいて、沿岸部処分の外的要因と各構成要素の熱的・水理学的・力学的・化学的な状態の変化を図化し、想定される現象や研究の位置づけを“見える化”することを試みた。ここでは、概念を示すことに主眼を置き、定量的で

ある必要はないものとした。ただし、支保工や緩衝材の内部に対しても空間スケールを意識して検討した。例えば、緩衝材を一様なものと捉えるのではなく、廃棄体側から岩盤側にかけて状態変遷に空間的な差異が生じうることを前提に検討した。また、先行研究や本事業の成果から根拠づけられる状態だけではなく、検討の過程で気づいた課題についても表示した。これにより、本事業における実施内容と今後の課題の関連がより明確になると考えた。

状態変遷の概念図を活用することにより、課題や研究の位置づけに関する認識を関係者間で共有し、専門分野間での協力や多角的な視点からの課題整理といった連携強化につながることが期待される。状態変遷の概念図を通じて本事業での取り組みの状況が第三者からも分かりやすくなり、協力体制の拡大にもつながることが期待される。なお、本報告書で示した状態変遷の概念図は、研究と並行して作成している途中段階のものであり、最新知見や関係者間の議論に応じて今後も更新を加えていくものである。支保工や緩衝材の挙動を理解するうえでは岩盤中地下水が一つの外的要因となるが、地質・地下水の専門的見解を交えて状態変遷の概念図を更新することは今後の課題である。

3.4　ボーリング掘削調査の体系化

FGB-2 孔井の掘削・調査の主たる目的は沿岸域特有の地下水流動を理解するとともに、その評価技術を高度化することにある。一方、地層処分に係る調査・研究においてボーリング調査を行う場合は、実事業での予備検討の位置づけとしてボーリング掘削、調査計画を立案したうえで、それに沿って掘削や各種調査を行い、作業における知見を蓄積したうえでボーリング掘削、調査の体系化を行い、概要調査段階のボーリング掘削・調査に備えるのが一般的である。

本事業が処分事業の一環であることから、本事業においてもこのような観点で事前に得られる情報に基づきボーリング掘削、調査計画を策定した。しかしながら、本地域には火山麓扇状地堆積物（vf4）が厚く堆積しており、透水基盤と想定した前期～中期更新世の別所層や処分に適した新第三紀以前の岩体の分布深度が想定以上の深く、計画した掘削深度では当該の岩体に到達できなかった。このため処分候補岩体を対象とした掘削や各種試験を実施することができず、これらの知見を得ることができなかった。

以上の様に、今回の事業では処分候補岩体を対象とした掘削、調査は実施できなかったが、地下深部情報が不確定な条件下での掘削計画とそれに伴う孔内検層や孔内調査を実施したので、これらの概要を取りまとめることで、ボーリング掘削、調査の体系化に資することとする。

(1)　ボーリング掘削、調査の概要

FGB-2 孔井掘削に際しては、周辺の地質文献情報と駿河湾地域の沿岸部で産総研が掘削した SKB 孔井および FGB 孔井の掘削情報に基づき掘削計画を作成した。なお、それぞれの孔井の概要は以下のとおりである。

・SKB 孔井：孔長 350m、FGB-2 孔井の約 2.1 ㎞西方の海岸部に位置する。富士川河口の西側で、入山瀬断層の東側に位置する。深度約 9m 以浅は埋土、深度 9～160m までは富士川扇状地砂礫層が分布し、深度 145～150.5m に安山岩～玄武岩溶岩を挟在する。

・FGB 孔井：孔長 160ｍ、FGB-2 孔井の約 150m 西方に位置する。深度 6.6m 以浅は埋土、深度 6.6～352.1m までは富士川扇状地砂礫層が分布する。

以上の情報および以下の着目点に基づき、掘削、調査計画（ケーシングプログラム）を作成し、掘削、調査を実施した。

●最終孔径の設定

－試験、検層および設置物（地震計・井戸ポンプ等）に必要な孔径確保

●年度ごとの掘削長の設定

－工期や仕様から、年度ごとの掘削長を確認し、年度ごとにケーシングを設置して終了できるように立案する

●地層構成とケーシングプログラムの立案

－最初に文献などから地質を想定し、分布深度と保孔の難易度を評価する

－土砂の場合、軟弱・脆弱な地層ほど設置区間長を短く設定する

－岩盤の場合、逸水層と多亀裂部および泥岩系の場合には吸水膨張や張付きを想定して設定する

●各ケーシングの設置長と段数

－1 段あたりの設置長は、可能な限り区間長を長く設定、段数は可能な限り少なくする

－段数が多いほど、口元の掘削径が大きくなり仮設が大規模化するため

－段数が多いと孔内検層の出動回数が増加する

1） FGB-2 孔井のケーシングプログラム

上記の着目点に基づき、FGB-2 孔井のケーシングプログラム（図 3.4 - 1）を策定した。

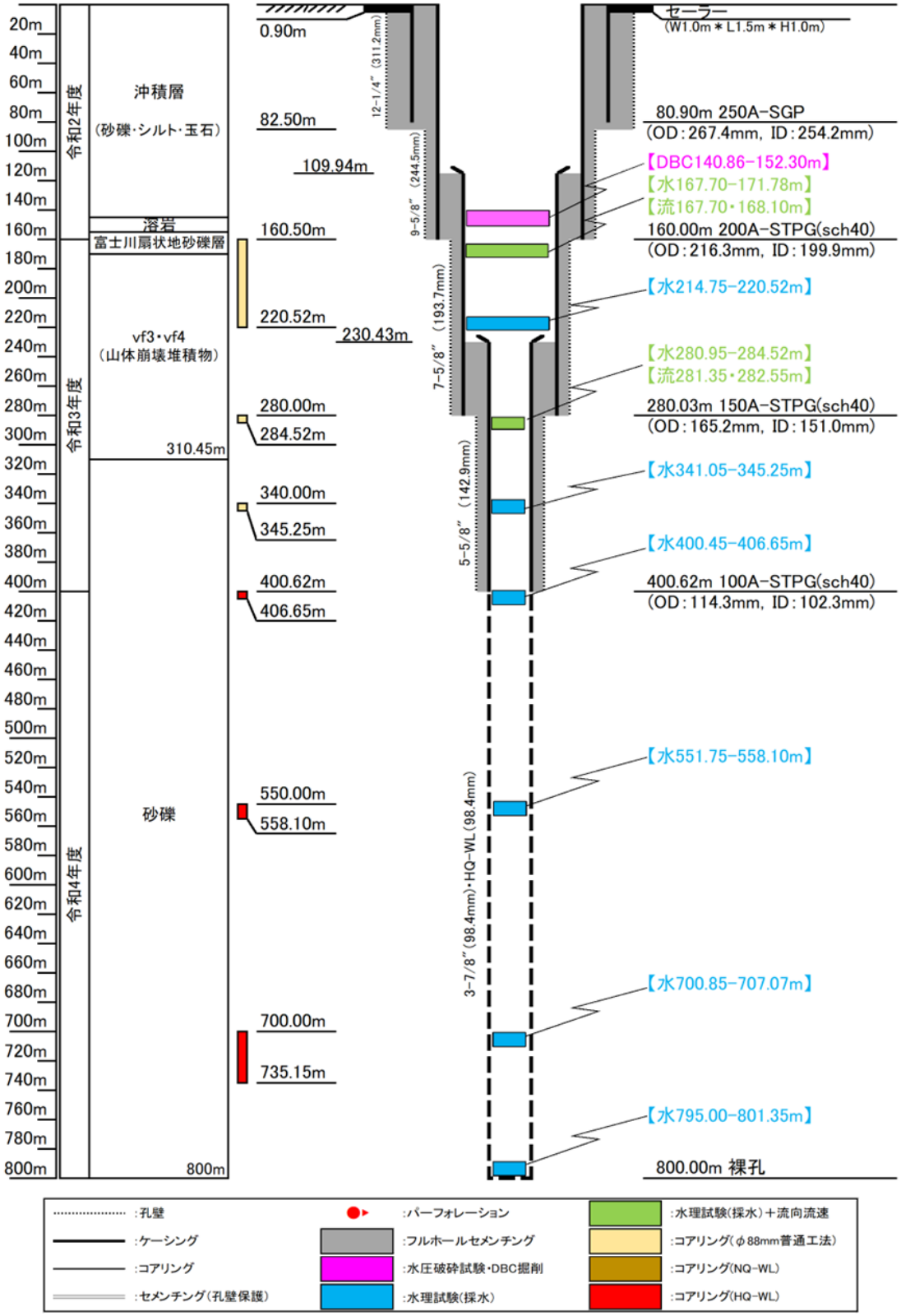


図 3.4 - 1　ケーシングプログラム（FGB-2）

FGB-2 孔井は当初令和 2 - 3 年度の 2 か年で掘削する予定で、これまでに掘削、調査により取得されたデータを活用することを前提に、上記着目点に基づき以下のように策定された。

・既存の地質情報からは定かでないが、透水基盤もしくは処分候補岩体が 400m 以浅に分布すると想定し、最終深度を 400m とする。

・各種の孔内検層や透水試験を実施するため、最終孔径を 3 - 7/8”（98.4mm）- HQ-WL（98.4mm）とする。

・基盤の到達深度は 400m 付近であり、ほとんどの深度は未固結の砂礫地盤であることから、4 回の段落としにより孔壁を保持する。

・最終段階の段落とし区間である深度 280m～400m 区間では、普通工法 3 - 7/8”（98.4mm）で掘削したのち、孔底深度に分布が想定される基盤での確実な水理試験を実施するために、当該区間を 5 - 5/8”で拡径、100A-STPG ケーシングを立て込み、セメントで裏込めをしたうえで、孔底を HQ - WL（98.4mm）で掘削して試験区間を確保した。

・400m を掘削した段階で、想定した岩体が出現しないため、深度 800m までの延伸掘削を決定し、当該区間を HQ-WL（98.4mm）で掘削した。

・ごく近傍に掘削された FGB 孔井において深度 160m までのコアリング掘削が実施されており、FGB - 2 孔井では 160m まではトリコンビットによるノンコア掘削とする。ただし FGB 孔井で確認されていた、溶岩を対象に応力測定を実施したため、当該区間は HQ-WL によるコア掘削を実施した。

・160 以深は基本的にコア掘削として開始したが、地質状況が不良で掘進率が予想以上に低かったため、途中から最終孔底（深度 800m）まではノンコア掘削に変更した。ただし孔内透水試験区間ではダブルパッカーの遮水性能を高める観点から、孔壁をスムーズに削孔するためダイヤモンドビットによるコア掘削を行い、併せて試験区間の地質状況を観察した。

2）検層・試験項目

地下環境特性を把握するために、孔内において物理検層、応力測定、水理試験、採水、流向流速測定を実施した。

物理検層および応力測定の概要を表 3.4 - 1 に、水理試験、採水、流向流速測定の概要を表 3.4－2 に示す。

表 3.4－1　物理検層および応力測定実施一覧

		令和2年度 掘削深度：0-160m	令和3年度 掘削深度：160-400m	令和4年度 掘削深度：400-800m
物理検層	自然γ線検層 （各ツールに併設：深度補正）	各ツールに準ずる	各ツールに準ずる	各ツールに準ずる
	温度検層	0-82.5m、0-160m	0-280m、0-400m	0-800m
	孔径検層	0-82.5m、82.5-160m	160-280m、280-400m	400-800m
	密度検層	0-82.5m、82.5-160m	160-280m、280-400m	400-800m
	中性子検層	0-82.5m、82.5-160m	160-280m、280-400m	400-800m
	比抵抗検層（インダクション）	0-82.5m、82.5-160m	160-280m、280-400m	400-800m
	比抵抗検層（ノーマル）	0-82.5m		
	音波（PS）検層	0-82.5m、82.5-160m	160-280m、280-400m	400-800m
	核磁気共鳴検層（BMR）	0-82.5m、82.5-160m	160-280m	
	XRMI（坑壁画像）検層	0-82.5m、82.5-160m	160-280m、280-400m	
	BHTV（坑壁画像）検層	145-150m付近	160-280m、280-400m	400-800m
	CBL（セメントボンドログ）	0-80.9m、82.5-160m		
	流体電気伝導度検層			0-800m
応力測定	二重解放コア変形法	146.23-146.78m		
	水圧破砕法	145.65-146.35m		

表 3.4－2　水理試験、採水、流向流速測定実施一覧

		令和2年度 FGB-2：0-160m	令和3年度 FGB-2：160-400m	令和4年度 FGB-2：400-800m	令和4年度 FGB-3：0-120m
水理試験	段階透水試験		孔底において シングルパッカー 167.70-171.78m 214.75-220.52m 280.95-284.52m 341.05-345.25m	孔底において シングルパッカー 400.45-406.65m 551.75-558.10m 700.85-707-07m 795.00-801.35m	17.68-25.25m 42.43-4343m 82.46-83.46m 95.44-96.40m 112.28-113.28m
	定流量透水試験				
	回復試験				
	平衡推移測定				
採水	ｐＨ、水温				
	電気伝導度				
	溶存酸素濃度				
	酸化還元電位				
	蛍光染料濃度				
流向流速測定			167.70m、168.10m 281.35m、282.55m		43.30m 83.10m、83.35m 112.40m、112.84m 112.70m

物理検層は効率的に実施する、すなわちラン回数を極力少なくする見地から、それぞれ段落としをする直前の裸孔で行った。そのため、孔底が 82.5m、160m、280m、400mおよび 800mの深度に到達した段階の裸孔区間で検層を実施した。実施項目や手順については次項に述べる。

FGB - 2 孔井の掘削の前段階で掘削された FGB 孔井の深度約 150m付近に安山岩～玄武岩溶岩が分布することが確認されていたため、本岩体を対象に応力測定を計画した。FGB - 2 孔井の同様の深度において、二重解放コア変形法および水圧破砕法による試験を

実施した。

水理試験と採水は同深度で実施した。地質の深度方向の分布が予想できないため、透水試験及び採水箇所は、決められた箇所数を均等の間隔で実施した。深度 400m までに 4 回の段落としをしており、2 段目（160m）、3 段目（280m）および 4 段目（400m）の孔底深度およびそれぞれの中間位置 220mおよび 340m付近で区間設定した。400m以深では700m付近で基盤が出ると想定し、基盤で 2 深度（700mおよび 800m）、その上位の砂礫層の中間深度 550m付近で区間を設定した。

それぞれ設定された区間においては、①パッカーの遮水性を確保するために孔壁をスムーズに仕上げる、②区間の地質状況を確認する目的で、ダイヤモンドビットによるスポットコアリング掘削を実施した。

表層を厚く覆う砂礫層は上部から下部に従い透水性が徐々に低くなると想定され、このため FGB - 2 孔井の深度 168m および 282m 付近の 2 深度において令和 3 年度に流向流速測定を実施した。その結果、168mでは測定が可能な地下水の動きがあることが確認できたため、令和 4 年度に掘削された FGB - 3 孔井の 3 深度において、干潮、満潮の影響を考慮した測定を実施した。

(2) 物理検層の体系化

令和 2 年度の報告書にも述べたように、駿河湾地域の地質状況を考慮して FGB－2 孔井の調査項目は選定されており、本連携の範囲外ではあるが施設設計に関連する評価を可能にする調査項目に関連した物理検層項目を選定した（図 3.4 - 1）。物理検層の一般的な目的としては、

① 連続的な物理特性データの取得
② コア試験結果のばらつきの評価の指標
③ 物理探査の解釈上のリファレンスデータの供給

である。

FGB - 2 孔の物理検層に関して、①についてはコア掘削されていない区間について、取得された物理特性の連続プロファイルから、地質特性、水理特性、力学特性などのプロファイルが推定できる。また、②については、今後取得されたコアを用いた諸試験のデータのばらつきの評価に利用できる。

駿河湾における FGB - 2 孔掘削に伴い実施する物理検層の体系化を目指して、①物理検層項目の選定、②物理検層機器の選択、③物理検層の手順および④物理検層結果の評価、活用という手順で作業を実施しており、これまでに①～③については、令和 2 年度に検討を行った。令和 3 年度以降の物理検層の実施に伴い③に関して新たな知見を得たので、改めて孔内物理検層の手順に関する考慮項目を記述する。

また、令和 4 年度から④のうち、特に物理検層結果の活用について検討を開始した。詳細は本編に譲るとして、概略を記述する。

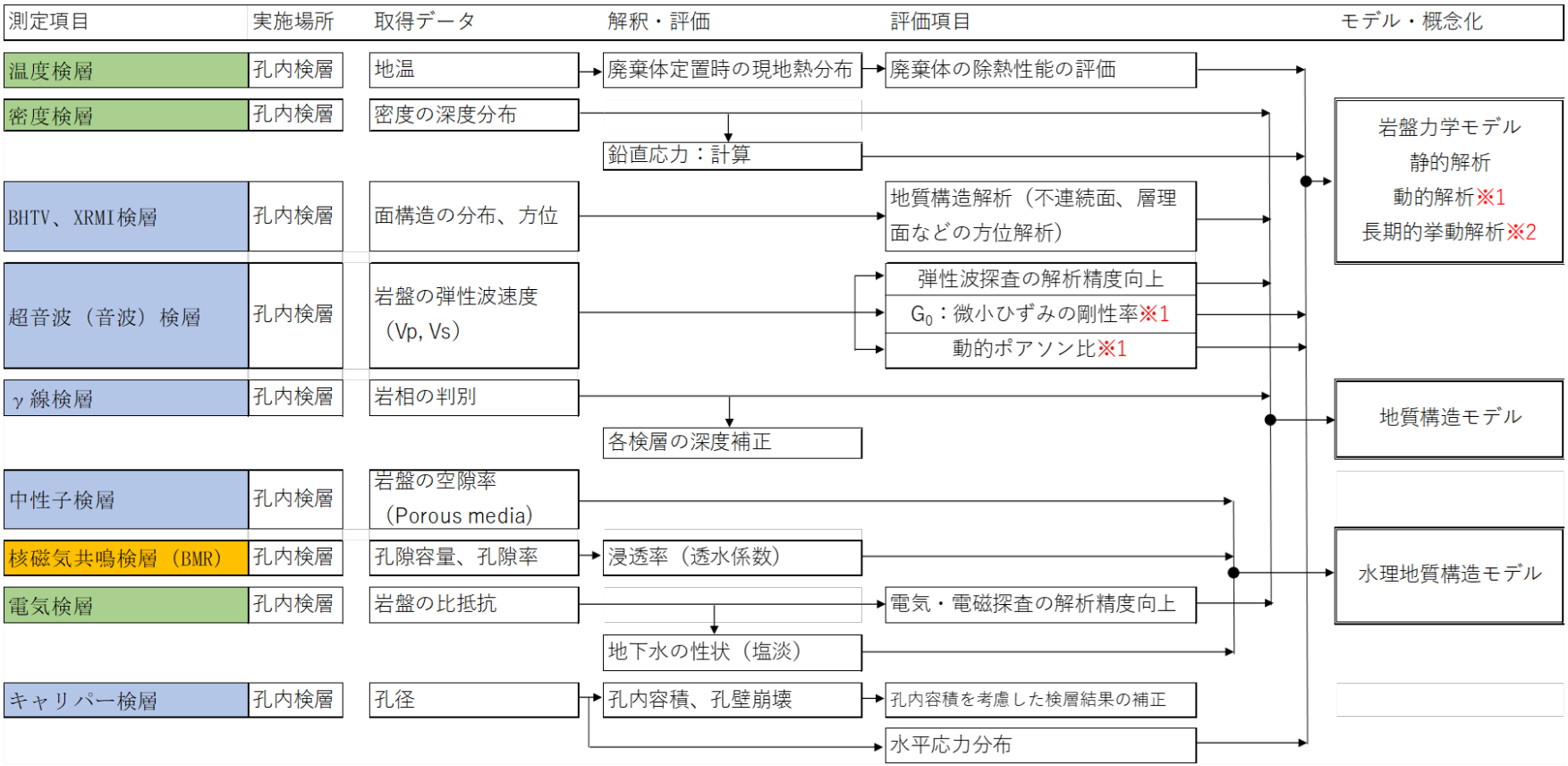


図 3.4 - 2　施設設計に関連するデータフローダイアグラム（物理検層項目の選定）

1）物理検層の手順の考え方

・通常、掘削終了後に孔内検層を実施するまでにはある程度時間を要するため、孔内では地下の温度勾配とほぼ平衡状態となっている可能性が高い。このため、孔内が乱される前の初期状態で温度検層を実施する。

・放射線検層（中性子検層、密度検層）は装置内に放射線源を設置することから、線源の管理に注意を要する。特に孔内にスタックされるとその後の処理、対策が複雑となるため、スタックの危険性を考慮して、孔壁が不安定な場合は孔壁が比較的安定した検層の初期に実施する。

・孔内に刺激を与えない検層から順番に実施する（セントラライザーやアームなど孔壁を刺激する装置は後回しにする）。

・自然ガンマ線検層（Natural γ ray）は天然放射性元素が改変する際に放出される自然ガンマ線を測定する。堆積岩の場合粘土鉱物の含有量の算定に用いられ、簡便に実施可能で、再現性があることから、各検層装置と併用して深度補正データとして用いる。

・検層時に 50m 程度の区間でリピート検層を実施、検層結果の再現性を確認する。

・なるべく少ないランで検層を実施するために、1 回のランで複数の検層項目を実施する。

2）物理検層結果の活用

高レベル放射性廃棄物地層処分事業の概要調査段階においては，候補地点において地表地質踏査、物理探査、ボーリング調査により、サイトの地質環境特性を評価し、処分地としての適性を確認することとなる。このうちボーリング調査は地下深部の地質環境特性を確認するうえで重要な調査項目となる。ボーリング調査では、孔内検層、孔内での原位置試験、採取された岩石コアを用いた室内試験などにより、地下深部の地質環境特性に係るデータが取得される。

原位置での試験や岩石コアを用いた室内試験で取得されたデータはそれぞれの特性データとして地質環境特性モデル（SDM)構築に利用されるが、データの代表性やデータのばらつきに関して評価が求められる。すなわち、取得されたデータには地質の不均質性、試験の不具合などが包含されているため、これらを評価したうえでその代表値やばらつきを検討する必要がある。原位置試験、コア室内試験ともに地質状況を勘案したうえで特定の深度において実施されるものの、その数に限りがあり、取得されたデータがばらついた際にそのばらつきが地質の不均質性によるものか、試験の不具合によるものかの判断が難しい。

そのために、ここでは孔内の全深度において実施される孔内検層の連続データを用いてスポットデータ（孔内原位置試験及び岩石コア室内試験によるデータ）の代表性やそのばらつきの要因の評価について検討する。

孔内物理検層の物理データを用いて岩盤の水理学的特性（透水性）や力学特性（一軸圧

縮強度）を想定する試みがなされている。以下の手順で検討を進める。
①物理検層データの複合解析から求められた各特性の値と実際の試験値とを比較することにより変換解析の有効性を評価する。
②有効であった場合は、物理検層データを用いて多数の深度で複合解析を実施し、各特性値の特徴（値の分布、バラツキ、地質依存性、深度依存性など）を評価し、SDM へ導入するデータ情報を整理する。
③複合解析で求めた値と実際の試験値にずれがあった場合は、解析値に対して試験値がどの程度ずれたかをそれぞれ計算し、偏差の方向と大きさを評価する。それに基づき物理検層データを多数の深度で複合解析し、解析値に対してバラツキを考慮した試験値を想定し、これらの想定した試験値の特徴（値の分布、バラツキ、地質依存性、深度依存性など）を評価したうえで、SDM へ導入するデータ情報を整理する。

具体例として、FGB-2 孔井の物理検層データを用いて、上記の手順で透水特性（透水係数）と力学特性（一軸圧縮強度）の代表性及びばらつきを評価することを試みる。なお、FGB - 2 孔井は孔底まで未固結の砂礫層であったため、力学特性については他の孔井データを用いて検討する。

参考文献：

NUMO（2021）包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現、NUMO-TR-20-03.

土木学会（2009）余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理及び検査の考え方、土木学会エネルギー委員会低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会.

原子力環境整備促進・資金管理センター（2017）平成 29 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（処分システム工学確証技術開発）.

越谷賢、丸井敦尚、伊藤成輝、吉澤拓也（2012）：日本列島における三次元水文地質モデルの構築と地下水賦存量の試算、地下水学会誌、第 53 巻、第 4 号、pp.357-377.

鹿野和彦、加藤禎一、柳沢幸夫、吉田史郎（1991）：日本の新生界層序と地史、地質調査所報告、第 274 号.

Appendix IX

プロジェクトの評価

委員の評価；採点は４段階
AおよびaIは、想定以上の結果が得られた
Bおよびｂは、期待通りの結果が得られた
Ｃおよびｃは、期待通りの結果が得られなかった
Ｄおよびｄは、内容を考え直した方が良い

	委員 A	委員 B	委員 C	委員 D	委員 E
１．事業の目的・位置づけの妥当性					
２．研究開発等の目標設定の妥当性	B	A	A	A	B
⑴ 研究開発等の目標設定は適切かつ妥当か。					
１．地質環境調査技術	a	a	a	a	a
２．工学技術	b	a	a	b	b
３．分野間連携	b	a	a	a	b
３．事業化、橋渡しについての妥当性	B	C	A	B	B
⑴事業化や橋渡しへの貢献については妥当か。					
１．地質環境調査技術	b	b	a	a	b
２．工学技術	c	b	a	b	b
３．分野間連携	c	c	a	b	b
４．研究開発マネジメント・体制等の妥当性					
（1）研究開発計画は適切かつ妥当か。	b	a	a	b	a
（2）研究開発の体制は適切かつ妥当か。	b	a	a	b	a
（3）変化への対応は妥当か。	b	a	a	a	b

(4) 研究の基盤整備は妥当か。	b	b	b	a	b
5．総合評価	B	A	A	A	A

大項目	回答者	肯定的意見	問題点・改善すべき点
1. 事業の目的・位置づけの妥当性	委員A	・2015年5月の「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」の基本方針の改定の中でも示されているように、国が前面に立って地域住民とコミュニケーションを取ることが明示され、国の役割は重要である。また、2017年7月に国が「科学的特性マップ」を公表し、全国の県庁所在地（福島県を除く）でNUMOと共に意見交換会を行ったことにより、国民的関心は元より沿岸部の住民にとっては現実的なこととして関心が高まっている。社会的インパクトも大きく、処分の技術や方向性に係る意味は大きい。 2020年11月に北海道の2つの自治体で文献調査が始まったことにより、実施主体のNUMOとの具体的な連携は元より、これまで以上に国の役割と責任は大きいものとなっている。 ・この事業は、地層処分技術の中でも、特に沿岸海底下に特化し、地質環境調査・評価技術、工学技術、安全評価技術の3本柱の分野について、これまでの技術や情報を踏まえて、日本全国を対象に、総合技術として構築する必要があると共に、多くの関係機関や自治体が関与することになり、政治的意味合いも大きく、この意味からも国の説明責任も大きい。また、実用的な方法論として進めるためには、3本柱の分野間連携を実用的かつ具体的な形にすることが重要である。 このプロジェクトを通じて、分野間連携については、地質環境特性調査と工学技術について具体的に実施されてきており、当初に比べれば飛躍的に整備されているという側面で実施している効果が出ている。	・既に文献調査が始まっており、終了時期も近づいていることから、段階的に得られた情報に基づいて、具体的な進め方や分野間連携などについて詰めておく必要がある。特に、文献調査の終わりに提示される概要調査地区の選定に関わる事項は優先されるべきであるが、現状では、安全評価との連携が手薄となっていることから、精密調査を含めて検討しておく必要がある。関係機関とのパートナーシップ等を上手く活用するなどの工夫が必要である。 あるいは、次のフェーズに向けて具体的な課題として明示するのも一案である。
	委員B	・本事業では、地層処分のサイト選定上のオプションである沿岸域を想定した基盤技術が蓄積されてきている。既に文献調査が進んでおり、この先の概要調査も視野に入れるべきフェーズにあることから、文献調査から概要調査を念頭においた技術開発が行われている本事業は、社会のニーズを踏まえた国のプロジェクトとして重要な位置づけにある。また、本事業で検討されている地質環境条件は、NUMOの包括的技術報告書にある、新第三紀堆積岩類に類似した地質環境を対象に進められているものと認識され、人工バリア関連の試験は塩水を対象とした室内試験などが実施されていることから、NUMOの包括的技術報告書をベースとした条件設定となっていると考えられる。 ・上記のような状況の下、現状で利用可能な手法や装置を適用した現地での調査や室内試験が行われており、社会・経済的な観点を踏まえて検討されているものと考えられる。さらに現地調査においては、地域の特性を踏まえた調査手法やモデル化・解析手法が工夫されてきており、新たな科学技術的知見も提示されている。 以上により、国のプロジェクトとしての本事業の目的や位置づけは妥当と評価される。	特に無し。
	委員C	我が国における地層処分の1つの実施オプションである、沿岸底での地層処分を実施するにあたって、基礎となるデータや技術開発を国として実施し、データおよびノウハウを蓄積することは国の責務と考える。そういう意味でも、国プロジェクトとして適当と判断する。 NUMOの包括的技術報告書においては、沿岸底をターゲットとして整備されたものではないが、陸域での技術・データの比較検討のほか、その過不足についての議論も進められており、整合性は満たされていると判断する。 事業の社会的、経済的意義、科学的、技術的意義に関しても、もちろん、それぞれの組織としてのノウハウや得意、不得意分野はあるものの、常にこれらの意義を意識して実施しており、その目的、位置付けも明確だと判断する。	今後も、これまでのような形で、これまでの過不足を意識されつつ展開されるといいのではないと思います。
	委員D	(1) 国は科学的特性マップを作成し，高レベル放射性廃棄物の最終処分においては沿岸20kmの範囲を好ましい範囲としている。しかし，沿岸陸域から海底下においては，塩水の影響や海陸接合部などの沿岸部固有の環境を考慮した地質環境の調査技術・工学技術の高度化が必要であるが，このような高度の技術開発は，国のプロジェクトとして進めるのが妥当である。 本事業は，我が国における沿岸部固有の環境を踏まえ，概要調査段階から精密調査段階等で必要となる地質環境分野・工学技術分野の調査・技術開発に取り組み，地層処分技術の信頼性及び安全性の更なる向上を測ることを目的としている。国として責任をもって推し進めてゆく高レベル放射性廃棄物の最終処分に関わる技術の信頼性および安全性の向上を図る	(1) 国のプロジェクトをどう考えるかは難しい問題であるが重要な点だと思う。国プロジェクトとして適当であるか，国の関与が必要とされる事業か，という事に関しては【肯定的意見】に書いたとおりである。ここでは，別の観点から意見を述べてみたい。 少なくとも，「国プロジェクト＝NUMOの事業」ではないと思うので，開発した技術やデータベースなどの幅広い有用性（例えば，産総研が開発している「沿岸部地質環境データベース」や海底湧出地下水調査手法の開発，浅海域での海上音波探査技術の改良，等は様々な分野における利用があると思われる）についても報告書には書き込むべきであると考える。さらに，報告書に書き込むだけでなく，様々な分野における利用に関しては論文にまとめる等，関連学会や社会に広くアピールする事も重要である。このような技術に関しては，完成したものの維持管理だけでなく技術の更新も

		ことは国民や社会のニーズに合っており，そのような観点からも，本事業が国のプロジェクト進められることは妥当である。また，本事業は、NUMOの包括的技術報告書を十分に検討して、最終処分に必要な技術開発やデータの拡充等を事業目的としており、整合性は満たされている。 (2) 高レベル放射性廃棄物の最終処分事業を着実に進めるためには，天然の岩盤（天然バリア）と人工的な構築物（人工バリア）から構成される多重バリアシステムの成立性や安全性に係る長期的な信頼性を一層高めていく必要がある。そのためには天然バリアと人工バリアの特性把握と将来変化に係る調査・評価技術の信頼性向上が重要な課題である。特に，本事業においては，沿岸部固有の環境を考慮した地質環境の調査技術・工学技術の高度化を目的として，調査・研究が進められている。具体的には以下のとおりである。 地質環境分野においては，日本列島の一般的な地下水流動モデルや地下水流出場及び海底地形把握技術の高度化等の最終処分に必要な新しい技術開発が進められている。工学技術分野では，セメント系材料やベントナイト系材料などへの海水の影響調査，各材料への地下水水質変動の影響等，沿岸海底下特有の地質環境に着目した工学技術の高度化が進められている。 上述したように本事業は沿岸域における処分の信頼性および安全性の向上を図るものであり，事業の社会的・経済的意義は高い。さらに，それらの新しい技術は他分野への展開も期待されるので，事業の科学的・技術的意義も十分に認められる	必要であるため，例えば，活用できる分野については民間へ技術の移譲を行う，等も検討すべきではないか。 (2) 成果報告では，ケーススタディーの報告が多かったように思う。その報告内容については十分成果が出ており問題ないと考える。ただ，NUMOは今後様々な地域で調査を実施すると考えられるが，そのような状況を想定すると，本事業で対象となった地域（ケーススタディー）とは異なる地域での調査に対応できる技術，ノウハウが必要になると思われる。それに対する回答はなかなか難しいと思うが，本事業で行われている「地質環境モデルの構築と地下水流動化遺跡の高度化」が1つのアプローチとして捉えることができるのではないか。（内陸に比べて調査データが少ない沿岸部での地質環境モデル構築に関し，不確実性の影響を明らかにし，不確実性を低減化する方策を提案する。） そのような状況を考えると，国のプロジェクトとしては個々のケーススタディーから得られた知見を整理し，ケーススタディーとは異なる地域での調査に対応できる技術，ノウハウを想定した知見を導き出すことが重要であると考える。（ある意味では，各分野において不確実性の影響を明らかにし，不確実性を低減化する方策を提案する，という事になるのではないか。） 最終報告書には，そのような方向から成果をまとめて欲しい。もちろん，この5年間で全て解決するのは不可能であるが，限定的でもいいので，ある因子（例えば，地下水水質変動の主要元素）のいくつかの濃度のデータをまとめるのではなく，それらの結果から導かれた総合的な影響を明らかにした，という事をまとめてほしい。非常に難しいことを言っているのは承知しているが，少しでもこのようなアプローチで本事業の報告書がまとめられることを期待するものである
	委員E	科学的特性マップで沿岸付近での処分場建設が注目されている中、また文献調査が沿岸に位置している北海道の2つの自治体で実施されている中、塩淡境界に位置するような沿岸での処分の安全性に関わる基盤技術や調査の内容や進め方の重要性が益々高まっている。そんな中で、人間の活動の場ともなっている沿岸で概要調査や精密調査、引いては処分場の建設をするにあたって、どのような事が考慮されるべきであるかを考察する機会となっている本プロジェクトは、社会的、科学的、技術的意義の高いものであると考える。また、放射性廃棄物の地層処分研究は、研究領域が多岐に渡っているため分野間の連携が必須となるが、それらの連携も充実されて進められている本事業は、今後の処分研究のモデルになり得る重要なものとなっている。本プロジェクトの性質上、国民や社会それからNUMOのニーズに合っていることが優先されると思うので、まさに国の関与が必要な事業であると考える。	上述のように、本研究は国民や社会のニーズに合っていることが必要であると考えられるし、何より国民やステークホルダーの理解醸成につながるものでなければならないと考える。そのような意味でも、論文や学会発表で成果を積極的に公表することはもちろんの事、一般国民にもアウトリーチされる機会を作っていく努力が必要になると考えられる。
2. 各課題や事業者が行う研究開発等の目標設定の妥当性	委員A	・地質モデルについて、国民の誰でも知ること、議論できることを前提に、公表されたデータを収集整理し、データベースとしてまとめる意義は大きい。また、地質環境モデルについて、文献調査と概要調査を考慮したストーリーとして連続性を持たせることは重要である。 ・地下水流動について、透水係数分布と塩淡境界との関係について、調査、実験、解析を踏まえて進展しており、解析的に滞留時間を含めて説明ができる意義は大きい。 ・海上物理探査について、社会的課題（漁期、網など）を配慮した中で調査技術が進展している。また、地下水の湧出地点や湧水量測定と評価技術にも具体的な進展が見られ、定量的な評価ができつつある。 ・工学技術について、地質環境モデルを条件に、処分場・人工バリアを設計し、安全評価において安全性の成立性を解析評価した上で、工学技術にフィードバックし、処分場の最適化を実施することになり、3分野の連携が現実的に不可欠となる。現状では、支保工で使用されるコンクリート、人工バリアについて、沿岸域に特化した個別のデータ取得を行っているが、その条件設定などについては、RWMCやCRIEPIなど、担当実施機関との連携を図りながら進められている。 ・工学技術について、コンクリートの強度等について、モデルの検討が進んでいる。操業期間中の維持期間と大きく関連することから、閉鎖までのシナリオと具体的な保持期間について検討する上で重要と思われる。	・工学技術について、特にセメントの長期挙動は、操業期間は力学的特性が重要であるが、閉鎖後などの長期的には、残置したセメントの変質、人工バリアや核種移行への影響など、安全評価へつながるような事項（本事業では安全評価は範囲外）について検討することも重要である。これらの課題を含めた連携上の課題については、本事業で解決できないとしても具体的な項目として列挙することも検討頂きたい（どのようにすれば何ができ、何が課題かなど）。 ・工学技術について、コンクリートの強度等は、操業期間と大きく関連することから、閉鎖までのシナリオと具体的な保持期間について提示できることも検討頂きたい（操業期間が決まっているわけではないことから、今後、技術的にシナリオを検討する上でも技術的維持期間として提示することも大事）。

	委員B	地質環境分野、設計・工学技術分野のそれぞれの分野で設定された要素研究の個別テーマについては、それぞれ適切な目標設定がなされているものと評価される。また、いずれのテーマともチャレンジングな課題であり、その結果、高い技術レベルの開発に取り組んでいると評価できる。今後、沿岸域でサイト調査が行われる際に適用可能な手法として整理されることが期待される。	各要素研究のテーマの目標設定は明確であるが、その達成度を測定・判断するための指標は明確にされていない。これは、本来、事前に設定されるべきものであるが、それは容易なものではないと思われる。本研究を通して、最終的にどのような指標の設定が可能なのかを、最終的な評価結果として提示するのも一案ではないか？
	委員C	AISTおよび CRIEPI所掌の地質環境分野, CRIEPIおよびRWMCが進める工学バリアに関する研究開発について、これまでの実施内容、成果の蓄積も含め今年度実施項目の目標設定は適切かつ妥当と判断する。とくに現場掘削などでの調査内容は、実際、掘削するまではどれほどの確度で、想定されることが的を得ているのかがわからない状況の中で、試行錯誤を繰り返し、現場のハンドリングも含め、上手く対応していると思います。おそらくこのような状況が実際の沿岸底サイト特性調査（のみならず地層処分の地表サイトでのサイト特性調査段階で）生じる試行錯誤でもあると考えられるので、今回の目標設定の仕方そのものも、本プロジェクトで得ることのできる大きな成果として明示することが大事と考えます。	特になし
	委員D	＜1. 地質環境調査技術・2. 工学技術＞ 高レベル放射性廃棄物等の地層処分において沿岸部固有の環境を考慮して，実際に必要となる高度な調査技術開発（地質環境分野：地質環境モデルの高度化，地質環境モデルの検証データの取得手法の高度化；設計・工学技術分野：沿岸海底下特有の地質環境に着目した工学技術の高度化）を目標として設定しており妥当である。 各課題ごとに，毎年の目標を具体的に，そして明確に設定しており，目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されている。 ＜3. 分野間連携＞ JAEAが本事業に参加していないため「安全評価」を除いた「地質環境特性」と「工学特性」の分野間連携及びそれぞれの分野内連携を進めている。それぞれの分野内連携だけではなく，分野間連携も推し進めていることは評価できる。本分野間及び分野内連携において，情報交換だけではなく試料の供給（地下水）も実施し着実に成果を出している。 本事業での分野間連携及びそれぞれの分野内連携は放射性廃棄物関連の他のエネ庁事業に対して1つの見本となるものである。	＜1. 地質環境調査技術・2. 工学技術＞ ・非常に高度な技術開発であるが，実際にその技術を適応する場所は現状では予測できない。実際の適用を考えると，「では，他の地域ではどうなのか」，ということになると思う。「1. 事業の目的・位置づけの妥当性」にも書いたが，本事業で開発や検証した環境とは異なる所でも適応できるために，何か方策が必要なのではないか。例えば，「ケーススタディー」で得られた成果をジェネリックなケースにまとめ上げ，大きな不確実性を与える要因を抽出し，その不確実性を低減化する事が必要になるのではないか。 ・NUMOがそれぞれの段階（例えば，概要調査，精密調査等）で必要としている技術・情報はある程度わかっているので，スケジュール管理を適切に行う必要がある。すなわち，概要調査で使用する技術や情報はそれほど時間的余裕がないので，早急に最終成果をNUMOに渡せるようにする必要がある。一方，概要調査以降で必要となる技術や情報に関しては少し時間的余裕があるが技術開発やデータベース作成等に必要なスケジュールを立案し，着実に成果を上げることが必要である。そのためには，長期的な視点から事業を考える必要があるのではないか。すなわち，5年間ではなくもっと長期間に渡る事業を提案する事も検討すべきではないか。 ＜3. 分野間連携＞ 分野間連携は，本事業だけの問題ではなく，性能評価も含めた連携を構築する必要がある。いずれ性能評価も含めた分野間連携が必要になることは明らかであるので，制約は多いと思うができる限り，そのための基盤を築いてほしい。 （これに関しては，既に今年度の評価委員会における分野間連携の発表で述べられているので，問題ないとは思うが，重要なことでもあり，また，そう簡単に進められることではないと思うので，確認のために指摘したものである。） 上述したように，本事業での分野間連携及びそれぞれの分野内連携は放射性廃棄物関連の他のエネ庁事業に対して1つの見本となることを期待する。さらに，将来的には1つの事業だけではなく，他のエネ庁事業も含めた多くの事業を対象に情報交換や連携を推し進める組織が必要になると考える。このような組織に関しては，現状のように研究機関からメンバーを出して運営するのが良いのか，エネ庁主導で行くのが良いかは分からないが，いずれにしても，情報交換や連携を推し進める事は重要な課題となると思われる。
	委員E	研究開発等の目標設定は概ね適切かつ妥当であり、地質環境・工学技術とも本事業終了までの具体的な目標が示されていることは評価したい。特に、地質環境に関する課題では、事業者間の連携が取れるようになってから、目標設定や終了時点での目標水準やアウトプットに関して明確に提示されるようになり、事業開始時に比べて成熟度がさらに増しているように感じた。	地質環境に関する課題が、上述のように、事業者間の連携が取れるようになってから、目標設定や終了時点での目標水準やアウトプットに関して明確に提示されるようになり、本年度はさらに連携が成熟しているように感じた。一方、工学技術の方の連携では努力は認められるものの、いまだにその成熟度は低く、工学技術としてどのようにインテグレートしていこうとしているかの絵姿が見えてこないのが残念であった。最終年度に向けて、今後のさらなる進展を期待したい。

3. 事業化への貢献、成果発表についての妥当性	委員A	・地質環境モデルについて、地質モデルや地下水流動モデルの導出は、工学技術にとっては、処分場の設計、人工バリアの設計、長期挙動解析に密接に関連し、安全評価にとっては、工学技術で設定された設計条件と周辺環境における放射性核種の移動などを解析する上での基礎的条件であることから、重要である。地質モデルについては、全国規模のデータベース化と公開について具体的に進展しており、ほぼ全ての海岸平野を網羅する地質モデルが例示できるまでに進展しており、また、工学技術との連動も具体的になされている。 ・工学技術について、沿岸海底下を想定した条件について、特に化学的影響（地質環境モデルの調査で得られた地下水条件を反映）に対するセメント、緩衝材に関する基礎データの拡充が進んでいる。また、セメントについては、強度に関するモデルの進展も見られる（新しい試み）。 ・地質環境（AIST）と工学技術（RWMC、CRIEPI）について、具体的な事項（地下水水質など）について連携している。	・地質環境モデルや地下水流動モデルについて、具体的なエリアが与えられた場合を想定し、AIST、CRIEPI、NUMO間で、モデル構築の進め方や具体的な解析方法・技術などについて、まとめ方や継承の方法などを整理しておいた方が良いと思う（抽象的な事項ではなく、具体的に）。 ・工学技術について、基礎データの拡充が進んでいるが、得られた情報やデータ、知見について、データベース化やデータの取扱いについて余り具体的でない。これらのデータは、操業期間の安全性や長期的なバリア材の挙動解析と結び付くことから、解析手法（技術）と共に整理することが望ましい。現事業でできないまでも、課題を含めてまとめ方の整理は重要である。 この場合、実施主体のNUMOとの意見交換も大事である。 ・分野間連携について、今後の活用を考えると、その成果のまとめ方、記述の仕方は重要である。全てのデータや知見、調査結果はこれら分野間連携を通じて最適化されることになる。 ・これまでに得られた各分野の成果（外部発表、技術報告書、論文など）について、リストなどを作成し、何がどこで公開されたか分かるようにリスト化し提示すると分かりやすいと思う。
	委員B	沿岸域におけるサイト選定を行う上での技術や方法論が蓄積されており、また適宜、NUMOへの情報提供もなされているものと思われるが、次年度の最終とりまとめに向けて一層の協力体制が整備されることを期待したい。 地質環境分野では、地下水流動解析の不確実性低減手法については考え方が整備されていると評価される。また、低流速地下水の流向流速測定については、現有装置での測定は困難な状況であり、電気伝導度検層やPFL（ポシバ・フロー・ログ）などのより、低流速場の測定手法を導入するなど検討されたい。海底湧水や音波探査手法については様々な技術的な工夫が検討されており、評価できる。今後とも最新技術の動向を踏まえながら、より適切な評価ができる手法を試行されることを期待したい。 設計・工学技術分野では、地質環境条件（特に地下水条件）に応じた試験データが蓄積されており、さらに、人工バリアの変質や強度の予測手法の検討なども実施されており、実施内容については評価される。今後、解析結果の妥当性・室内試験結果の再現性についてさらに詳細な検討を期待したい。	
	委員C	「事業化の橋渡し」については、まずはNUMOへの技術移転が挙げられるが、基本、分野間連携でもその点は議論されていると理解していますので（期待も含め）、今後の取りまとめ方も含め、さらにその部分は関係者間で詰めてまとめられることを期待します。逆に言えば、これまでの研究で残された課題は、では何なのか。現有の技術で、もし沿岸底がサイトとして決まった場合に、確実に進められるのか。もし不安要素があるのであれば、それは何で、なぜなのか。と言うスタンス、観点で見直して見るといいのではないかと思います。それによって見えてくるものが次の課題であり、次のフェーズでのプロジェクトとしての課題／目標になるはずです。 また、そのような試行錯誤にできるだけ多くの関係者が関わることで、その関わった技術者、研究者が次の世代の日本の地層処分の技術を牽引する専門家になって行くと信じていますので、ぜひ、このような意見交換、議論を行うことで、事業化や橋わたしといった貢献をより確実なものにして行っていただきたいと考えます。	特にありません。強いて言えば、日本の地層処分のために、さらに議論を重ねてください。
	委員D	(1) 事業化や橋渡しへの貢献については妥当か 各課題において，目標の中に事業化や橋渡しを想定しており，また，需要という点からも地質分野・工学分野，共に詳しく書き込んでおり，十分貢献していると考えられる。 さらに，文献調査，概要調査，そして精密調査段階におけるそれぞれの作業を想定して，必要な技術の高度化等を確実に進めており，十分な成果が得られつつある。 分野間連携に関しても成果が上がってきているので，その成果を共同研究という形で発表されることを期待する。	(1) 事業化や橋渡しへの貢献については妥当か ・「1．事業の目的・位置づけの妥当性」のところでも書いたが，事業化に関しては，国のプロジェクトということを考えるならば地層処分関連分野だけを目標とするのではなく，様々な方面への応用を視野に入れて進めるべきである。報告書においても，そのような他分野への応用の可能性等，についても少し書いても良いのではないか。 ・本事業において，最終的にNUMOに渡す成果がはっきり見えない課題もあるように思う。技術や装置開発であれば分かりやすいが，データベースや知見であれば，どのようなものを5カ年の成果としてNUMOに渡すのか，また，本事業で最終の完成版を渡せるのかどうか，を明らかにする必要がある。もし，本事業で最終の完成版をNUMOに渡すことができないのであれば，最終の完成版としてどのようなものを考えているか，そして本事業ではその内ここまで渡すことができる，ということを明らかにする必要がある。 ・高レベル放射性廃棄物の最終処分は非常に長い期間を想定する必要があるため，その間の技術の進歩をどのように取り入れるか，技術の更新をどうするか，ということも検討する必要があるのではないか。国の事業に対し，エンドレスに継続しているという批判を受けないためにも，開発した成果を完成品としてNUMOに渡す事も必要であろう。もし，コンピュータ・コードではなく，技術製品のような場合でNUMOが実際に使用するまで成果を引き取れない，というのであれば，誰が保管し維持・管理（更新も必要か？）をするのか，その費用はどうするのか，というようなことをはっきりさせる必要がある。

			・成果発表については，1-2年で成果が出てくるようなものではないので，毎年毎年成果が見えるような形で発表できるものではない事は理解できる。ただ，そうは言っても5年間の事業であるため，事業の終わりには，成果を見えるものにし，成果発表も確実に行う事が求められている。特に，知見，情報，データベースをNUMOに成果物として渡す場合は，論文化して信頼性を高めるとともに，多くの人が利用できるようにする必要がある。来年度は最終年度であるので，その事を良く理解して事業を展開して欲しい。また，成果発表に関しては，最終年度内ではなく，その後（1年以内？）に多くの成果が出てくることは良くあることである。最終報告書を書き上げた段階で力を抜かずに，出来る限り成果を発表するようにお願いしたい。そのためにも，事業終了後，少なくとも1年間ぐらいは成果を丁寧にフォローアップする仕組みが必要である。（フォローアップの仕組みについては，研究機関へのコメントではなく，エネ庁へのお願いになるかもしれないが。）
	委員E	地層処分の実施主体であるNUMOが、分野間連携のワーキンググループや委員会にアドバイザーやオブザーバーとして参加することにより、地質環境調査や工学設計技術に係るNUMOの意見を本事業計画の策定に積極的に取り入れている。また、本年度は、それ以外にも機会を作りNUMOとの連携も深まっているようで、事業化への貢献度はさらに高まっているように感じる。	成果発表について十分に社会に対して発信されているか、学術論文や解説記事等として後世に残るようなものになっているか、十分に判断できる材料が提示されていない。 また、学術論文や学会での公表だけでなく、国民やステークホルダーの理解醸成のための成果発表についても本事業の視点の中に加えていく必要性を感じた。昨年度の本評価や委員会でも指摘してきたことなので、対応していただきたい。
4．研究開発マネジメント・体制等の妥当性	委員A	・3機関（AIST、RWMC、CRIEPI）は、それぞれの分野の専門家集団であり、これまでも地層処分に関する各分野の調査研究を行ってきており、多くの経験、実績、知識を有している。また、この事業の過程で人材育成や継承も行われつつある。 ・事業マネジメントについて、全体を統括するリーダー、各タスクのリーダーが選任されており、適切に調整しながら運営されている。 ・分野間連携は、そのまま機関連携と言っても過言でないが、現状では分野間は限られているものの、年々目覚ましく具体化され、連携が取れつつある。 ・研究基盤整備について、どの機関も、各分野の専門家を投入しており、その実施の過程で、委託業者を含めて人材育成と継承が進んでいる。	・地質環境と工学技術については、具体的な事項について分野間連携が進められつつあるものの、安全評価との連携が手薄となっているのは否めない。事業範囲外という側面もあるが、時間軸を考えた場合、圧倒的に閉鎖後の方が長期の挙動として重要となる。また、工学技術の成立性は、安全評価結果を踏まえる必要があり、フィードバックシステムが欠かせない重要な関りがある。今後、概要調査に進んだ場合、安全評価との連携は必須となることから、JAEAなどの安全評価を得意とする機関との連携についても具体化すべきと思う。あるいは、具体的な課題として、この分野との連携を含めて既存の課題を列挙する際に考慮することをお勧めしたい。 ・分野間連携について、人材育成と同時に、その具体的な方法や分野間で引き渡すべきパラメータなどについて、経験論と併せて、初期の関係者以外の人でも対応できるように整理し、まとめておくことが大切である。その際、文献調査、概要調査、精密調査の各段階を踏まえた考え方、時間軸の考慮も必要である。
	委員B	⑴ 研究開発計画、スケジュールは適切であり、分野間の連携も着実に進展している。 ⑵ 研究開発を進める上で、プロジェクトリーダーが適切にリーダーシップを発揮するとともに、プロジェクト関係者の協力の下、適切にプロジェクトが管理・運営されているものと評価できる。分野間の連携環境も着実に整っているものと見受けられる。 ⑶ 当委員会におけるコメント等がプロジェクトに反映され、適宜、計画が見直されているものと評価される。さらに、個別のテーマ内においても成果を踏まえた計画の見直しが行われており、合理的に研究開発が進められていると評価される。 ⑷ 研究の技術基盤に関しては、現状においては適切な人材配置が行われているものと思料される。特に、プロジェクト途中からのプロジェクトリーダーのバトンタッチがあったが、後任にプロジェクトリーダーが適切にプロジェクトを引き継いでおり、高く評価される。	⑷ 今後、当該分野の一層の人材育成、とりわけ、若手研究者の確保を意識していただきたい。さらに、得られた知識基盤を知識マネジメントシステム的なデータベースシステムとして整備していくことを積極的に検討されたい。
	委員C	⑴ 研究開発計画は適切かつ妥当か 事業の目標を達成するための計画、研究スケジュール、課題ごとの連携についてですが、現場での研究活動の展開も含めても、臨機応変に対応できているなど、適切かつ妥当と判断します。 ⑵ 研究開発実施者の事業体制・運営は適切かつ妥当か 研究開発チーム構成での実施体制、実施者間の連携および環境について、これまでのコロナ禍での活動制限もあるなかで、具体的なデータや機器開発などもされており、その体制および運営は適切かつ妥当と判断します。 ⑶ 変化への対応は妥当か 社会経済情勢等周辺の状況変化への対応について、具体的には掘削現場での状況判断をどう研究成果として反映されるかであるが、これについても難しい沿岸部分でのボーリング調査など、対応は適切にされていると判断します。 ⑷ 研究の基盤整備は妥当か 研究に関する人材の育成・確保、研究支援体制や知的基盤の整備等について、基本、それぞれの組織でチームを構成し、また分野間での連携も具体的で妥当と判断する一方で、人材育成に関しては、もう少し具体性を持たせてもいいなあ、と言うのが正直な感想です。これは各組織というよりはプロジェクトしての課題でもあるかもしれません。私自身、ちょっと反省しているところです。	上記しました。

	委員D	(1) 事業のエンドポイントを明確にし，毎年の目標が設定されている。また，ほとんどの課題は長期にわたる調査・研究であるが研究スケジュールも詳細に検討されており，妥当である。研究機関，さらに分野間の連携についても，すべての研究機関，そして，すべての課題において，その重要性を認識しており，分野間や分野内の情報共有だけでなく共同研究または共同作業を行い，実際に成果を出している事は評価に値する。 (2) 5年間の最終目的を念頭に置きつつ，前年度までの事業の成果をベースに研究開発体制が構築されており，事業体制・運営は適切かつ妥当である。また，分野間連携においても，（1）で述べたように情報および試料の共有も行っており，それらの成果が表れてきている。総合的に判断して，適切な実施体制である。 (3) 分野間連携により，実際の地下水を用いた実験を組み込んで成果を得ている。また，分野間連携に力点が置かれており，目立たないが分野内連携も成果を上げている（文献調査時における地質モデル構築，地質モデル更新，密度流解析，緩衝材の性能評価）。このような連携に関する事は当初は予定されていないか，予定されていても具体的ではなかったと思うが，短時間に成果を出している点は高く評価できる。 コロナ過であり，思うように作業が出来なかったと想像できるが，困難な状況にうまく対応し，着実に成果が得られている。これらの結果から変化への対応は十分行われている，と判断できる。 (4) それぞれの研究機関がこれまでに得られた知見・技術を用いて，事業を着実に進めており，問題ない。	(1) 前述したように，本事業のエンドポイントは明確であるが，開発した成果物を，いつ，どのような形でNNUMOに提供するのか，良く分からないものもある。NUMOに渡すべき成果物について，はっきり明示し議論する必要があるのではないか。 また，本事業のエンドポイントではなく，それぞれの課題について目指している最終のエンドポイントを明らかにし，そのエンドポイントを得るまでにどの程度の年数が必要であるのかもはっきりさせる必要がある。例えば，コンクリートの浸漬実験。長期間のデータをとる必要性は十分理解できる。しかし，上述したように，むやみに5カ年の事業を続けるのではなく，最終のエンドポイントを明らかにし，そのエンドポイントを得るまでにどの程度の年数が必要であるのかをはっきりさせる必要がある。
	委員E	研究開発計画、その実施のための体制や運営は、概ね良好であった。事業の体制や管理に関してはさらに良好で、、特に井川プロジェクトリーダーが積極的に他分野や他機関の担当者とコンタクトして問題点を発掘・解決している点は高く評価される。今後も引き続き強いリーダーシップを発揮して本事業をけん引していただきたいと願う。	昨年、一昨年同様、委員会等の実施者からの発表で、若手が登壇する機会がかなり増えてきた。若手研究者の貢献が見える事業になってきたことは、研究の基盤整備として望まれる体制に近づいてきていると判断できる証である。一方で、若手研究者のディスカッション力、特に問題を把握し、課題を設定し、課題解決のための方法とゴールを設定するような内容に関するディスカッション力には不十分さを感じてしまう。本事業をけん引するリーダークラスの方々には、事業所内の研鑽として、実施している研究開発の過程でそのような能力醸成にも努めていただきたいとお願いしたい。
5. 総合評価	委員A	・本事業は、沿岸海底下に特化した調査評価技術の高度化、データ拡充などについて実施しているが、これらの知見、情報、技術、データ等は、沿岸海底下のみならず、陸域での地層処分においても有用であり、2020年11月から始まっている文献調査、それ以降の調査（概要調査、精密調査）を進める上で、有益かつ重要な情報、知見、データ、技術となる。 また、具体的に地質環境情報やモデルの作成は、工学技術やその後の安全評価を進める上での土台となり、その具体的な構築方法や情報・データの橋渡しについて進展している。 ・地質環境モデルについて、データベース化が進んでおり、課題はあるが、沿岸平野の地質構造、地下水流動場の概念モデルを提示できるまでに至っている。また、それらの情報やデータは、モデルは、工学技術などの研究とも具体的に連動している部分もある。 ・工学技術について、現在取得されつつある基礎データを含めて、処分場の設計解析や長期挙動の側面から有用なデータが蓄積されつつある。セメントの強度については、基礎データとモデルを含めて一定の進展が見られる。 ・分野間連携について、限られた分野ではあるものの、具体的な連携に至っており、数年前に比べれば格段に意識が向上し、具体化しており、着実に進展している。	・地層処分は、操業期間で100年スパンの事業であることから、何世代かに亘り継続性が必要である。そのためには技術の維持・継承が不可欠であり、方法論は元より、技術やデータ、知見、情報などの人材育成に関する方策について、継続性の観点から具体化し整理しておく必要がある。 ・地質環境、工学技術、安全評価の各分野における情報量や内容、精度などは、文献調査、概要調査、精密調査の各段階において異なることから、時間軸に照らし合わせて具体化し整理しておく必要がある。事業の範囲を照らし合わせて、具体的な課題とすることも大事である。 ・分野間連携について、当初に比べれば比較にならないほど具体的に進められているが、地質環境と工学技術に限定されている。先ずは、両者の具体的な連携項目、進め方、課題などについて、まとめ方を含めて整理することが重要である。 安全評価との連携については、参加機関との関係により手薄になっている点は否めないが、今後の課題を含めて整理しておく必要がある。 ・得られた成果（外部発表、技術報告書、論文など）について、分野ごとでも良いが、リスト化し、整理しておくと良い。
	委員B	沿岸域での処分システムの基盤整備として、本事業における実施内容やこれまでの成果は有用であり、地層処分技術の開発への貢献度は高い。実際の処分サイトが未定の状況下で現地調査が実施できていることに対して、プロジェクト関係者のご尽力に敬意を表したい。この貴重な機会を十二分に生かして、沿岸域における地層処分の可能性についての評価の提示を多いに期待したい。	
	委員C	総じて、本事業は研究として有用であり、日本の地層処分技術開発に大きく貢献している理解、判断します。理由については、各部分で述べていますので、ここでは省略します。	今後の人材育成については、先に若干触れましたが、今後の数十年間の技術品質の維持管理も含め、各組織のことにまで立ち入るつもりはないものの、エネ庁としてこのプロジェクトを通して、では将来にどう人材育成も含め反映させていくのか、、、と言った議論などが今後必要かもしれないと思った次第です。
	委員D	高レベル放射性廃棄物の最終処分地候補として沿岸から20km以内が考えられているが，沿岸陸域から海底下においては，塩水の影響や海陸接合部などの沿岸部固有の環境を考慮した地質環境の調査技術・工学技術の高度化が必要である。本事業は，我が国における沿岸部固有の環境を踏まえ，概要調査段階から精密調査段階等で必要となる地質環境分野・工学技術分野の調査・技術開発の高度化を着実に進めており，地層処分技術の開発に大いに貢献するものである。 沿岸部地質環境データベース，地下水の流出場及び海底地形把握技術の高度化等，他分野への実用化も視野に入れており，研究としても有用である。また，様々な濃度の海水や深部の地下水を用いたセメント系材料の変質研究等は，海に囲	既に別の評価項目でも書いたが，最終的にNUMOに提供できる技術，開発機器，さらにデータベース等について，具体的に示す必要がある。それは，この5年間のプロジェクトでの成果だけではなく，沿岸処分を想定した場合のエンドポイントとして，提供するものを提示する必要がある。 特に，知識やデータベース等は，個々の実験成果ではなく全体としてどのようなものになるのか，想像がつかないところもあるので，具体的な議論をするためにも最終的な成果物について明らかにしてもらいたい。

		まれた日本では今後の地域開発においても貴重な知見を提供するものである。	
	委員E	本事業は研究として有用であり、地層処分技術の開発に貢献している。具体的な肯定的意見は上述の通り。	具体的な問題点・改善すべき点も上述の通り。