

4 人工バリアの性能確認及び地下水等確認に関するモニタリング評価の妥当性に係る科学的・技術的知見の取得

4.1 はじめに

IAEA⁽¹⁾⁽²⁾では、中低レベル廃棄物埋設施設に関して比較的短命の放射性核種を含む廃棄物を対象として安全目標が達成されているかどうかを直接的に管理するために、施設閉鎖後の数百年間、地下水または周辺環境に放出された放射性核種のモニタリングを推奨している。また、1.3(3)に記述したとおり、わが国の原子力規制委員会における検討（2018年度時点）では、「中深度処分における操業中の廃棄物埋設施設に係る要求の骨子案」第14条1において、「廃棄物埋設施設には、廃棄物埋設地の周囲における地下水の水位、廃棄物埋設地から漏えいする放射性物質の濃度及び線量等を監視し、及び測定する設備を設けなければならない。」としている。また、その解釈において、「六 埋設の終了から廃止措置の開始までの間においては、以下を考慮した設計がなされていること。① 放射性物質の濃度及び線量等を監視及び測定できる設備の撤去後において放射性物質が移行しやすい経路が生じないよう、撤去及び埋戻しを行うことができる見通しがあるものであること。② 廃棄物埋設地からの放射性物質の漏えいがあった場合、比較的早期に放射性物質が到達すると考えられる地点に設置すること。③ 測定期間及び使用環境に適応したものであること。」としている。

この埋設終了から廃止措置の開始までの管理期間（中深度処分の場合、300～400年間）におけるモニタリング等の実施に際して、事業者の視点ではモニタリング設備の撤去後、放射性物質が移行しやすい経路が生じないよう撤去及び埋戻しを行うことができる見通しを得ておくことが必要であり、かつ数百年といった長期にわたるモニタリングの方法を整備しておくことが必要になる。一方、規制者の視点では、事業者が提示するモニタリング計画に対してその妥当性を判断するための技術的根拠を、事業者とは独立して保持しておく必要がある。

トンネル・ボーリング孔に関わる移行経路には、岩盤中の割れ目などの他に、トンネル・ボーリング孔の空洞、トンネル・ボーリング孔掘削時に近傍に生じ得る掘削損傷領域（EDZ: Excavation Damage Zone や BDZ: Borehole Damage Zone）、トンネルの覆工コンクリート・ボーリング孔のケーシングなどの保坑・保孔部背面などが想定され、地質条件の違いやトンネル・ボーリング孔の目的に応じて異なる仕様（深さや径など）も踏まえて、様々な移行経路の閉鎖確認に係る課題の有無や内容、重要性の程度を整理しておく必要がある。

トンネルについては、ヨーロッパや日本（瑞浪超深地層研究所、幌延深地層研究センター）において結晶質岩・堆積岩を対象とした複数の実規模埋戻し試験が実施されているものの⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾、主にトンネル空洞部の埋戻し技術の開発や施工品質を確認するための計測が行われており、前述の様々な移行経路の閉鎖確認の観点での知見は整理されていない。

ボーリング孔については、平成30年度事業⁽⁸⁾において、文献調査によりモニタリング開始前からモニタリング終了後の孔閉鎖に関連する情報まで、国内外の既存情報を整理した。その結果、ボーリング孔の閉鎖に関しては、埋戻し技術（孔埋戻し設計に関わる空洞部の閉塞材料の選択や搬送方法など）自体が研究開発段階にあり、前述の様々な移行経路の閉鎖確認に係る科学的・技術的知見が非常に少なく、事業各段階において直接的・間接的な閉鎖確認に係る知見を順次整理す

る必要があることが示された。そのため、平成 30 年度は、実際の事例に基づく知見の取得が可能な東濃地域の結晶質岩中のボーリング孔に主眼を置き、モニタリング装置などが問題なく撤去された後の孔空洞部の埋戻しを想定して、孔の経路閉鎖設計の妥当性確認および妥当性の評価指標に係る科学的・技術的知見を取得した。これらの結果をとりまとめたものを表 4.1-1～表 4.1-3 に示す。

なお、本稿では、孔空洞部を埋め戻す材料全般を「埋戻し材」とし、埋戻し材の内、特に孔を閉塞する（孔空洞部の移行経路を遮断する）目的で定置する材料を「閉塞材」と呼称する。

結晶質岩のような割れ目媒体に掘削されたボーリング孔空洞部の埋戻しについては、ヨーロッパの先行事例として Sandwich-concept（図 4.1-1）と呼ばれる埋戻し概念が示されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾。また、堆積岩地域において、ベントナイトペレットとバライト（重晶石）泥水を用いたモニタリング孔の埋戻し事例がある⁽¹⁴⁾。しかし、これらが実施された場合の移行経路の閉塞確認に係る科学的・技術的知見は少ない。平成 30 年度は、既存情報を整理した結果、ボーリング孔の埋戻しにおいて、天然素材で自己シール性があることを理由に代表的閉塞材として挙げられているベントナイトについて、孔内の非拘束状態（ベントナイトの大きさがボーリング孔径よりも小さく、ベントナイトと孔壁の間に空間が存在する状態）を再現して実施した室内試験により得られた有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係に基づいて、閉塞の妥当性を確認できる可能性が示された。しかしながら、砂やベントナイトなどの複数材料の組み合わせや、不均質な状態で膨潤したベントナイトの閉塞の妥当性に関する知見は得られていない。さらに、これまでにベントナイトの閉塞性に関する既往の知見の多くが室内試験の結果であり⁽¹⁰⁾⁽¹⁵⁾、原位置で実際に孔を閉塞した際における閉鎖確認についての知見を取得する必要があると考えられた。

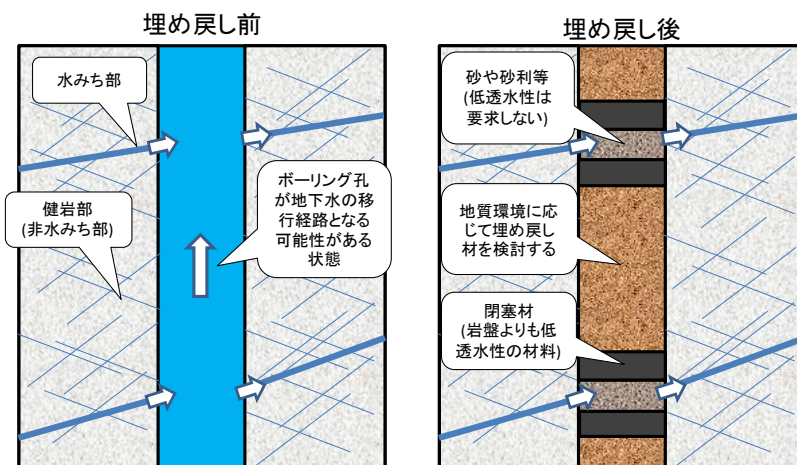


図 4.1-1 Sandwich-concept のイメージ図

平成 31 年度事業では、トンネルに比べ課題の多いボーリング孔の閉鎖に主眼を置き、経路閉鎖設計の妥当性確認および妥当性の評価指標の抽出に必要な科学的・技術的知見の取得を試みた。ボーリング孔の閉鎖を想定した場合、移行経路には孔の空洞部、掘削損傷領域（BDZ）、ケーシング背面などが想定されるが、掘削損傷領域（BDZ）やケーシング背面の影響についてはモニタリング地点の地質環境によって影響の程度が異なると考えられる。そこで、本事業では、モニタリ

ングを実施する上で必ず発生することになる孔空洞部を主な対象として、実際の事例に基づく知見の取得が可能な東濃地域の結晶質岩中のボーリング孔に主眼を置き、平成 30 年度事業で整理された代表的閉塞材の一つであるベントナイトを用いた閉鎖設計（ベントナイトや砂などを閉鎖場所の環境条件に応じて配置する）に基づいた以下の室内試験（①）と原位置試験（②）を実施した。その結果から、結晶質岩のような割れ目媒体の地質に掘削されたモニタリング孔が閉塞された場合において、適切に閉塞されたと判断するための判断項目を抽出し、妥当性確認をする上での評価指標を整理した（③；表 4.1-3）。

- ① 室内試験により、原位置の非拘束条件やベントナイトと砂が併用された条件での閉鎖確認の妥当性判断に係る知見を取得する。また、平成 30 年度事業の検討委員会での意見に基づき、異なる水質や水圧条件でのベントナイトの閉塞性に係る知見も取得する。
- ② 研究用坑道の既存ボーリング孔（数 m～数十 m）を対象に経路閉鎖設計を立案し、試験に適用可能な試験装置を製作した上で、原位置での孔閉鎖確認試験を実施する。この結果から、孔空洞部の閉鎖設計の妥当性確認に必要な科学的・技術的知見を整理する。
- ③ ①、②で得られた結果に基づき、孔の埋戻し、閉鎖の妥当性を判断に係る科学的・技術的知見を抽出・整理する。

表 4.1-1 モニタリングに係る判断項目、確認内容、課題（地質環境調査段階）

実施項目	内容	判断項目	確認内容	課題
地質環境調査				
ボーリング掘削	地質環境調査のボーリング孔を掘削し、調査結果に基づき地質環境モデルを構築する。	1 ボーリング掘削の品質管理	<ul style="list-style-type: none"> 掘削水にトレーサーを用い、ボーリング孔掘削時の送排水量・場所、電気伝導度、トレーサー濃度、掘削水圧、カッティングス、掘削速度などの作業に関わる重要な品質管理データを取得しているか。 掘削水・掘削泥材・逸水防止剤・ボーリングビット由来の鉄粉など、作業で用いた消耗品材料の残留の有無を把握し、地下水への汚染の程度を整理しているか。 	<ul style="list-style-type: none"> ケーシング抜管の可否およびケーシングを残置した場合の移行経路化に関する知見の取得 孔内残置物が長期的に閉塞性能に与える影響およびその評価方法に関する知見の取得
		2 掘削時の孔内情報の整理	<ul style="list-style-type: none"> 掘削水の逸水や平衡水位などの孔内情報を取得し、異なる帯水層の地下水の混合に関する情報を整理しているか。 	
		3 ケーシングやグラウトの有無	<ul style="list-style-type: none"> 孔内に設置する保孔用ケーシングやセメンチング等が、閉塞時の考慮事項になることを踏まえ、使用量を最小限に抑えているか。 ケーシングを設置する場合は、その抜管が可能な範囲での使用か。 ケーシングの残置が想定される場合、それが移行経路になる可能性とその影響を評価しているか。 	
モニタリング機器の設置	地質環境モデルに基づき、地質環境調査のボーリング孔からモニタリング場所、方法、項目を選定する。	1 観測地点・区間の選定根拠	<ul style="list-style-type: none"> 観測地点は、処分場周辺の水理地質構造を予測し、処分場から連続した地下水の移行経度になると考えられる地質・地質構造（礫岩層や断層など）を通じた地下水流動を把握できる地点が選定されているか。 観測地点は、処分場周辺の地下水流動を予測し、その上流側・下流側のデータが取得可能な配置か。 観測地点は、モニタリング孔同士が干渉して原位置のデータが乱される可能性がない配置か。 観測区間は、ボーリング掘削時に得られた岩盤中の地下水のデータに基づき選定されているか。 	<ul style="list-style-type: none"> モニタリング機器の長期運用（寿命やメンテナンス）に関わる知見の取得 モニタリング孔やケーシングの長期運用（を対象とした寿命や交換可能性など）に関わる知見の取得 上記を踏まえたモニタリング方法の選定に関する考え方の整理
		2 観測方法の選定根拠	<ul style="list-style-type: none"> 地下水がモニタリング孔へ定期的流れ込むような擾乱を起こさない方法か。 選定された観測すべき区間を網羅できる観測方法が選定されているか。 地下水の水質に応じて生じる現象（脱ガスによるエア噛み等）を想定して観測方法が選定されているか。 観測方法に応じた採水やメンテナンス等の作業に伴いデータ欠測期間が生じることを考慮してあるか。 メンテナンス性や回収可能性を考慮したモニタリング機器が選定されているか。 処分場閉鎖後の漏洩モニタリングへ転用される可能性があることを踏まえ、放射性核種の検出を妨げる材料が使われていないか。 	
		3 モニタリング項目	<ul style="list-style-type: none"> 水理/地球化学モデルの構築に必要な地点・深度の水圧・水質のデータを取得しているか。 地下施設の建設・操業による水圧・水質の変化を正確に把握するために、地球潮汐や地震等の自然現象によるデータの変動幅を取得しているか。 	

表 4.1-2 モニタリングに係る判断項目、確認内容、課題（処分場の建設・操業・閉鎖段階）

実施項目	内容	判断項目	確認内容	課題
処分場の建設・操業				
地下施設建設前～操業時のモニタリング	<p>・施設建設前の初期環境状態を把握する。</p> <p>・施設建設時・操業時・閉鎖時のモニタリング結果に基づき、周辺環境影響を把握する。</p> <p>・周辺環境影響の程度に基づいて施設への連続性が高いモニタリング地点を選別する。</p>	1 モニタリング項目	<p>・地下施設の建設・操業により生じると予想される地下水流動や水質の変化の内容を予測し、その程度を判断可能なモニタリング項目を選定しているか。</p> <p>・地下水流動や水質の変化の時間スケールを予測して、その変化を判断可能な間隔でサンプリングがなされているか。</p> <p>・観測機器や採水方法等により生じるデータ品質の違いを考慮しているか。</p> <p>・地質環境調査で得られた、地下施設の建設・操業以外の自然現象（地球潮汐や地震等）により生じるパラメータの変動を考慮しているか。</p>	<p>・モニタリング機器の長期運用（寿命やメンテナンス）に関わる知見の取得</p> <p>・モニタリング孔やケーシングの長期運用（を対象とした寿命や交換可能性など）に関わる知見の取得</p> <p>・上記を踏まえたモニタリング方法の選定に関する考え方の整理</p>
		2 データの品質管理	<p>・ボーリング掘削時の品質保証の結果を踏まえたモニタリングをしているか。</p> <p>・水圧変化や大気との接触到に敏感な水質項目（pH、ORP、DO、溶存ガス濃度、Fe濃度、S濃度、微生物分析等）を念頭において、採水方法・測定方法を適切に立案・実施しているか。</p>	
		3 メンテナンスの計画と実施内容	<p>・メンテナンスの判断基準を検討した上で、適切な間隔で機器のメンテナンスを実施しているか。</p> <p>・メンテナンスの影響を受けたデータの品質管理が適切に行われているか。</p> <p>・モニタリング機器の長期利用を想定してメンテナンス計画が立案されているか。</p> <p>・孔の健全性を確認しているか。</p>	
処分場の閉鎖				
施設閉鎖後の漏洩モニタリング	<p>・施設の閉鎖後に漏洩モニタリングを実施する（中深度処分）</p>	1 観測地点・区間の選定根拠	<p>・地下施設周辺の地下水流動と閉鎖後の予測解析を踏まえ、漏洩を早期に検知できると想定される地点にモニタリング孔が配置されているか。</p> <p>・地下施設の建設・操業の影響を受け、地下施設と地質学的・水理学的な連続性（水みちの連結性）が高いと判断された観測区間が選定されているか。</p> <p>・これまでの観測結果から継続不要と判断されたモニタリング孔がある場合は、早期に閉塞措置をとっているか。</p>	<p>・モニタリング機器の長期運用（寿命やメンテナンス）に関わる知見の取得</p> <p>・モニタリング孔やケーシングの長期運用（を対象とした寿命や交換可能性など）に関わる知見の取得</p> <p>・上記を踏まえたモニタリング方法の選定に関する考え方の整理</p>
		2 観測方法の選定根拠	<p>・数百年間のモニタリングを想定して観測方法を選定しているか。</p>	
		3 モニタリング項目	<p>・漏洩する可能性がある放射性核種が選定されているか。</p> <p>・放射性核種の移行挙動に関わるモニタリング項目が網羅されているか。</p>	
		4 データの品質管理	同上	
		5 メンテナンスの計画と実施内容	同上	

表 4.1-3 モニタリングに係る判断項目、確認内容、課題（廃止措置段階）

実施項目	内容	判断項目	確認内容	課題
モニタリング孔の閉塞				
観測機器の撤去	・モニタリング装置を撤去する。 ・ケーシングを撤去する。	1 残置物の有無	・残置物が発生する場合、それが閉塞に与える影響を評価しているか。	・ケーシング抜管の可否およびケーシングを残置した場合の移行経路化に関する知見の取得 ・残置物が長期的に閉塞に与える影響およびその評価方法に関する知見の取得
		2 ケーシングの残置の有無	・ケーシングが撤去されているか。 ・ケーシングを残置する場合、それが移行経路になる可能性とその影響を評価しているか。	
経路閉鎖設計： 埋戻しのレイアウト設計	・閉塞材および埋戻し材のレイアウトを検討する。	1 孔内情報の整理	・割れ目分布や孔壁の状況を把握し、健岩部と割れ目帯の区分がされているか。 ・岩盤の湧水量、透水係数が取得されており、水みち部が把握されているか。	・処分場との距離や水理学的連続性に応じた閉塞方法の考え方に関する知見の取得 ・ケーシングの残置を許容する場合のレイアウト設計の考え方
		2 レイアウト設計の根拠	水みち部の上下に閉塞区間が設定されているか。	
経路閉鎖設計： 閉塞材・埋戻し材の材料設計	・ベントナイト・埋戻し材の選定および調整内容を検討する。	1 ベントナイトの調整根拠	・位置・膨潤後のベントナイトの密度と透水係数が、孔内の岩盤の状況を踏まえて設計されているか。 ・ベントナイトが孔内で膨潤して密度が低下することを想定して材料設計がなされているか。 ・原位置の地下水のイオン強度や水圧を想定して設計されているか。	・ベントナイトブロック内における気相の挙動と閉塞に与える影響に関する知見の取得 ・ベントナイトコーティング、セメント等の長期的影響に関する知見の取得
		2 埋め戻し材の選定根拠	・閉塞に与える影響が評価されているか。 ・人工物を残置する場合は、その長期的な状態の変化や閉塞に与える影響が評価されているか。 ・原位置の地下水のイオン強度や水圧を想定して設計されているか。	
経路閉鎖設計： 閉塞作業の手順設計	・閉塞材および埋め戻し材を孔内に搬送する手順を検討する。	1 閉塞材・埋め戻し材の搬送方法の選定根拠	・ベントナイトをレイアウト設計した深度に搬送・定置可能な方法か（目詰まり等が生じない方法か）。 ・材料設計で設定した密度を担保できる搬送方法か（搬送途中にベントナイトの脱落等が生じないか）。	・ベントナイトの搬送方法に関する知見の取得 ・ケーシングの残置を許容する場合のレイアウト設計に応じた閉塞作業に関する知見の取得
		2 閉塞材・埋め戻し材の搬送手順	・ベントナイトの膨潤前に、その閉塞性に影響を与える砂などの埋め戻し材を投入しない手順となっているか。	
		3 閉鎖確認手順の計画	・ベントナイトの閉塞性を確認する手順（閉鎖確認手順）が立案されているか。 ・膨潤後のベントナイトの頂部を確認し、透水係数が計算される手順となっているか。	
		4 ケーシングの影響の評価	・ケーシングを残置する場合、閉塞性に係る影響を念頭においた設計となっているか。	
閉塞および閉鎖確認	・孔を閉塞する。 ・閉鎖されたことを確認する。	1 閉塞作業の確認	・各設計のとおり閉塞作業がなされたか。	・実際の孔長100m規模のボーリング孔を対象とした閉塞作業に関する知見の取得 ・閉鎖状態の長期的な挙動に関する知見の取得
		2 閉鎖確認	・膨潤後のベントナイトの頂部を測定して体積を算出し、有効粘土密度から透水係数を算出しているか。 ・水理試験および有効粘土密度の計算結果から、ベントナイトが設計どおりの性能を発揮したことを確認しているか。	
廃止措置終了後～安全評価期間				
埋戻し・閉塞後の性能保証	・安全評価期間中に起こり得る環境変化に対する頑健性に係る見直しを得る。	1 安全評価期間中の環境変化	・安全評価期間中の環境変化について予測評価しているか。	・安全評価期間中の環境変化に関わるシナリオの整理 ・環境変化に対する埋戻し設計の冗長性に係る知見の取得
		2 システムの頑健性	・安全評価期間中に起こり得る環境変化に対して、埋戻し閉塞箇所の頑健性が評価されているか。	

本事業で科学的・技術的知見の取得対象として整理した項目

4.2 室内試験による知見の取得

4.2.1 複数の埋戻し材を用いる場合の閉塞性の確認

対象地域の岩盤が結晶質岩などの割れ目媒体とみなせる場合、顕著な逸水・湧水が無く孔全体が低透水性であるような場合から、顕著な逸水・湧水が生じるような透水性の高い割れ目が複数存在するような場合まで、幅広い地質環境条件を想定する必要がある。特に、後者の場合は、逸水・湧水によって閉塞材がボーリング孔内から流亡する可能性が考えられる。したがって、事業者から示される孔埋戻し計画については、孔全体を単一の閉塞材（ベントナイト等）で充填する場合と、前述の Sandwich-concept のように地質環境に応じた複数の材料を用いて閉塞材の流亡が生じないように孔空洞部を閉鎖する場合が想定される。平成 30 年度事業において、前者の場合については、その透水性は孔内に定置・膨潤後のベントナイトの有効粘土密度（有効モンモリロナイト密度）を計算することで推測できる可能性があることと示された。一方で、後者の複数材料を用いるものであった場合、閉塞材（ベントナイト）を定置させる閉塞区間と、閉塞材を支持するための砂等を充填する埋戻し区間を交互に設けることになると想定されるが、この設計では、非拘束条件下で膨潤したベントナイトと砂材が混合することで、埋め戻された孔空洞部に不均質な水みちが形成される可能性もあり、閉塞後に設計上の閉塞性が担保されないことが懸念される。その妥当性を直接的に判断することは困難であると考えられることから、埋戻し計画や埋戻し中の品質管理などにより、間接的に孔空洞部埋戻し後の閉鎖が妥当である見通しを得るための判断指標について整理するための試験を行った。

本試験では、埋戻し区間の材料を珪砂とし、割れ目が認められず淡水系地下水で地下水の流れがない岩盤に埋戻し材を定置すると想定した上で、非拘束条件（ベントナイトの大きさが試験セルの直径よりも小さく、浸水したベントナイトが膨潤して体積が変化する条件）で膨潤させたベントナイトの上位に珪砂を投入し、埋戻し材の堆積状況と閉塞部の透水性を確認した。珪砂投入のタイミングは、ベントナイトが浸水・膨潤してアクリルセルの壁面と密着したタイミングとした。また、参照試験として、珪砂を投入しない場合と、閉塞材がセルの壁面と密着する前に珪砂を投入した場合の試験も実施した。ベントナイトは、加圧して成型したブロック状の試料を用いた。

なお、市販のベントナイトペレット（ベントナイト産業社製ペルプラグ、以下「ペレット」）を用いた同様の試験を実施したが、この試験結果は付録Ⅲ-B に記述する。

4.2.1.1 室内試験

A) 実験手法

ベントナイトブロック（以下「ブロック」）は、粉末ベントナイト（クミネ工業社製クニゲル VI）と蒸留水を調製して作成した。粉末ベントナイトは、主要粘土鉱物の Na 型スメクタイトの他、不純物として玉髄、石英、斜長石、カルサイト、ドロマイト、方沸石、黄鉄鉱などが含まれており、その粒度分布は 10 μm 以下が 70.3 %、10～22 μm が 6.2 %、22 μm 以上が 23.5 %と報告されている⁽¹⁶⁾。また、粉末ベントナイト中のモンモリロナイト含有率は、59.3 %である⁽¹⁷⁾。定温乾燥機を用いて粉末ベントナイトを乾燥させ、乾燥前後の重量から自然含水比を算出した上で、最終的なブロックの初期含水比が 15 %になるようにベントナイト粉末と蒸留水を混合した。混合時は

粉末ベントナイトに蒸留水を加え、スタンドミキサーで15分かけて混合した。その後、混合した材料をナイロン型枠に入れ、油圧機でプレスしてブロック状に成型した。圧縮圧力はナイロン型枠の耐圧性能を考慮して30 MPaとした。この条件で作成した室内におけるブロックの乾燥密度は約1.6~1.8 g/cm³、有効モンモリロナイト密度は1.4~1.5 g/cm³となる。含水比の設定根拠は付録III-Aに詳述する。

ブロックの直径は、4.3で実施する原位置試験に必要なブロック膨潤後の有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係に係る知見を収集することも踏まえ、原位置試験のボーリング孔径とブロックの大きさの比率（ブロック径が孔径の約72%）に合わせ、膨潤試験に用いる小型アクリルセルの内径74 mmに対しブロックの直径55 mm（ブロック径がセル内径の約74%）を基本ケースとした。なお、有効モンモリロナイト密度が異なるベントナイトのデータを取得することを目的として、直径が43 mmおよび63 mmのブロックも試験に用いた。ブロックの高さは5 cmとした。

試験では、アクリルセルの底に0.45 μmのメンブレンフィルターを敷き、その上に珪砂を厚さが約1 cmとなるように敷き詰めてからブロックを定置した。その後、セル内を水で満たし、ブロックの膨潤過程を観察し、膨潤量をノギスで測定した。珪砂投入の有無に関しては、①ブロックが側壁と密着し、止水性を確認した時点で珪砂を投入した場合（以下「①膨潤後に砂投入」）、②珪砂を入れずに膨潤・透水試験を実施した場合（以下「②砂なし」）、③ブロックを浸水した直後に珪砂を投入した場合（以下「③砂即投入」）の3ケースとした。珪砂の投入量はセルの容積を踏まえ300 gとし、セル上部から乾燥状態で投入した。また、試験結果のバラつきを確認することを目的として、同じ条件の試験を3回実施した。膨潤期間は、①膨潤後に砂投入のケースにおいて、ブロックの膨潤が収束したと判断したタイミング（後述）に合わせ、15日間とした。試験で使用した珪砂は珪砂5号、水は蒸留水である。

膨潤期間の経過後、ブロックの閉塞性能を確認するための簡易透水試験を実施した。セル内を水で完全に満たし、手押しポンプを用いてセル内を約0.2 MPaに加圧し、吐出口から出てくる水量が落ち着いた時点で流量と要した時間を計測した。これらの結果を用いて、式(1)により透水係数を算出した。

$$k = \frac{Q}{A \times \frac{dH}{L}} \quad (1)$$

ここで、kは透水係数 (m/sec)、Aは供試体の断面積 (m²)、Qは吐出口からの流量 (m³/sec)、dHは加圧時の水頭差 (m)、Lは供試体の高さ (m) である。

また、膨潤期間の途中の段階でブロックとセル側壁との密着状況を確認した。膨潤期間中はセル下流側のチューブを水で満たしているが、このチューブを上下させてチューブ内の水位を観察し、チューブ内からセル内へ水が流れなくなった時点で、ブロックがセル側壁と密着したと判断した。なお、この確認試験は珪砂投入のタイミングを検討する目的で実施したため、透水係数は算出していない。

B) 結果

膨潤状況の確認

①膨潤後に砂投入のケースでは、直径55 mmと63 mmのブロックを用いた。両方のブロック

は、浸水開始から約 3 日経過した時点でセルの側壁に密着した。この時点でセルの上部から珪砂 5 号を 300 g 投入した。珪砂の投入後もブロックは鉛直上向きに膨潤し、10 日経過した以降は体積変化が認められなかった (図 4.2-1)。このことから、浸水開始から 15 日経過した時点で閉塞性能を確認するための簡易透水試験に移行した。ブロックの高さは膨潤前と比較してどちらも 1.4 倍程度となり、その体積は、55 mm のブロックは約 3.2 倍、63 mm のブロックは約 2.2 倍となった。

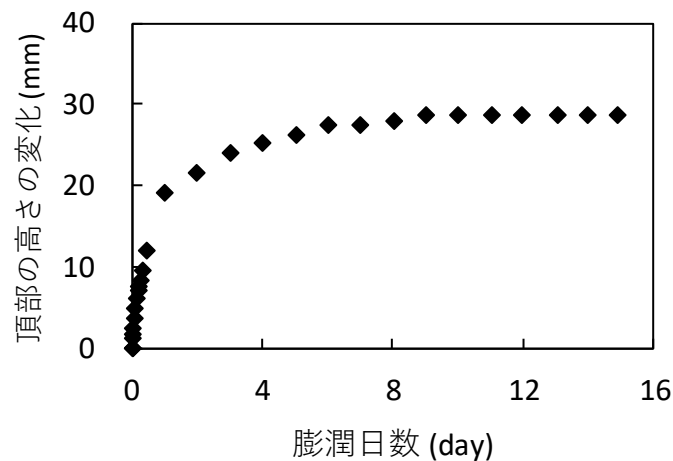


図 4.2-1 ケース①におけるブロック頂部の高さの経時変化

②砂なしのケースでは、直径 55 mm と 43 mm のブロックを用いた。ブロックは浸水開始直後から膨潤し始め、浸水開始から約 3 日経過した時点でセルの側壁に密着した。その後もブロックは継続して膨潤したが、ケース①と比較するため、本ケースの膨潤期間は 15 日とした。15 日後には膨潤前と比較して高さが約 2 倍程度になった。体積は、55 mm のブロックは約 3.5 倍、43 mm のブロックは約 5.5 倍となった。

③砂即投入のケースでは直径 55 mm のブロックを用いた。ケース③では、ブロックを浸水させた直後に 300 g を上から投入した。投入した珪砂は、ブロックとセル側壁の間および閉塞材の上位に堆積した。試験開始から約 2 日間が経過すると、側壁に堆積した珪砂粒子の隙間にベントナイトが充填している様子が確認された。試験開始から 5 日後に高さの変化が認められなくなったが、ケース①および②と比較するため、本ケースの膨潤期間は 15 日とした。簡易透水試験後に珪砂を取り除いてその形状を測定した結果、その高さは膨潤前と比較して約 2 倍、体積は約 3.3 倍に膨潤していた。

各ケースにおけるブロックの膨潤の様子を図 4.2-2 に示す。

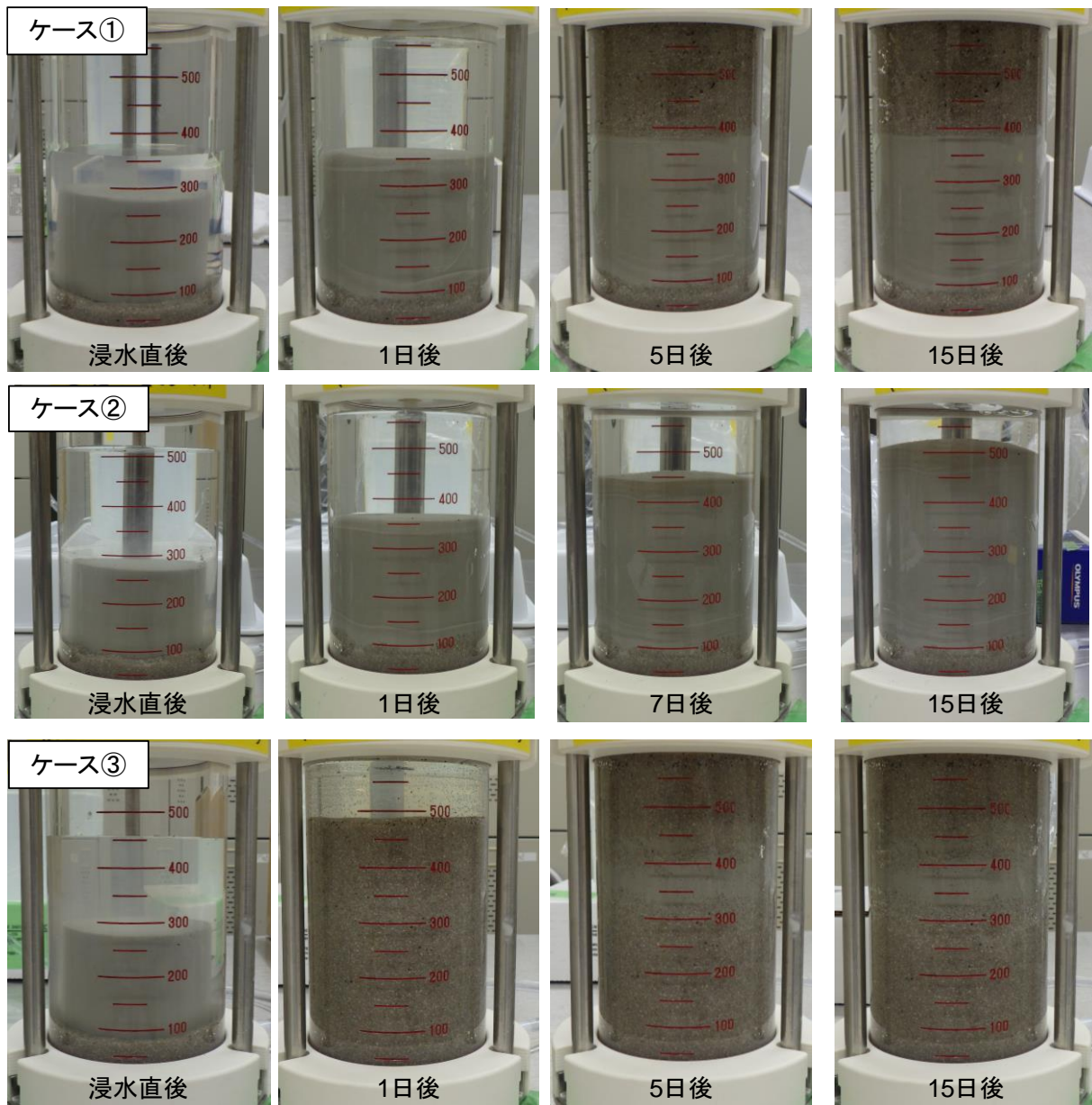


図 4.2-2 ブロック（直径 55 mm）の膨潤の様子

閉塞性能の確認

膨潤後のブロックの有効モンモリロナイト密度と簡易透水試験で得られた透水係数との関係を図 4.2-3 に示す。直径 55 mm のブロックを用いて実施した各ケースの透水係数を比較すると、①膨潤後に砂投入および②砂なしのブロックは、両者とも 10^{-10} m/sec オーダーであった。なお、ケース②のブロックがケース①のブロックと比較して有効モンモリロナイト密度が高い傾向があるのは、ブロックにより持ち上げられた珪砂がセル上部まで到達したことでブロックがこれ以上膨張できなくなったためと考えられる（付録Ⅲ-A 参照）。一方で、③砂即投入のケースでは、ブロックの透水係数は $10^{-7} \sim 10^{-6}$ m/sec オーダーと算出され、ケース①および②と比較して 3 オーダー以上高い値を示した。この原因として、セルとブロックの隙間に砂の層があることが視認されたことから、簡易透水試験で注水した水が砂層を選択的に通過し、透水係数が高くなったと考えら

れた。

このことから、ブロックが側壁と密着した後で砂材を投入したとしても、砂材はブロックの上位に堆積し、閉塞部の透水性に大きな影響を与えないと考えられる。しかし、ケース③のようにブロックの膨潤前に砂材を投入した場合は、砂材が不均質に堆積して水みちが形成され、設計上の閉塞性が担保できなくなると考えられる。

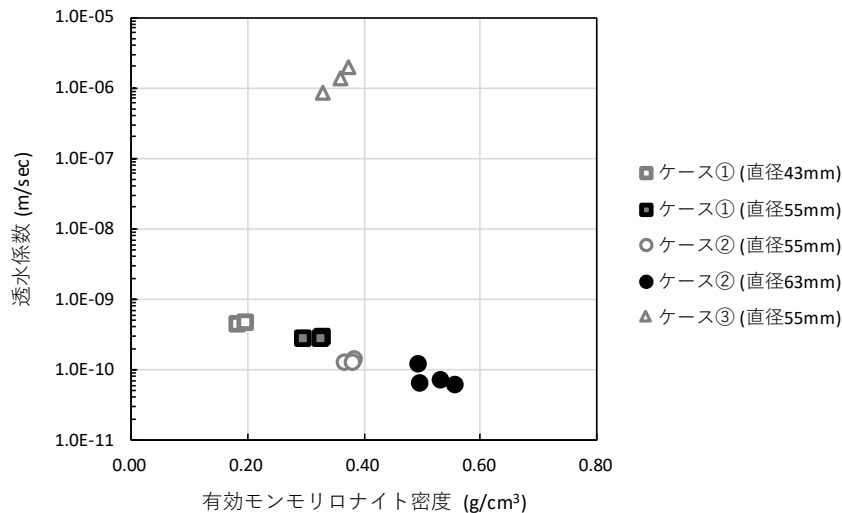


図 4.2-3 膨潤後のブロックの有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係

4.2.1.2 得られた知見について

以上の結果から、複数の材料を利用する埋戻し計画の場合、ベントナイトが膨潤する前に砂材を投入するとそれらが不均質に定置され、孔空洞部の閉塞性が担保できなくなることが確認された。これらは、施工上の品質管理に関わる問題であるが、孔空洞部の閉鎖の妥当性を間接的に確認する上で、事業者の孔埋戻し計画に、これらの施工上の品質管理項目（材料投入時期など）が含まれていることが重要な確認項目の一つと考えられた。

4.2.2 ベントナイトブロックが不均質に配置された場合の閉塞性の確認

ベントナイトブロックを用いて孔空洞部を埋め戻す計画の場合、複数のブロックが非拘束条件で不均質に膨潤したり、孔内で偏芯して定置されることにより、閉塞部の閉塞性が不均質となることが想定される。しかし、そのような不均質な状態の孔空洞部の閉塞性に係る知見が不足しており、埋め戻された後に設計上の閉塞の妥当性を直接的に判断することは困難である。そのため、埋戻し計画や埋戻し中の品質管理などにより、孔空洞部埋戻し後の閉鎖が妥当であるかどうかを間接的に判断するために必要な知見を整理するための試験を行った。

本試験では、原位置で起こり得る閉塞材の不均質な配置を想定し、複数のブロックを不均質に積み上げたケース、斜め孔にブロックを積み上げたケースの2つの室内試験を実施し、ブロックの膨潤挙動およびこれらの条件が閉塞部の閉塞性に与える影響の有無を確認した。

4.2.2.1 複数のブロックを不均質に積み上げた際の閉塞性の確認

A) 実験手法

4.2.1と同様に、アクリルセルを用いた室内試験を実施した。ブロックの直径は55 mmとし、高さ1.6 cm程度のブロックを3つ使用した。ブロックの有効モンモリロナイト密度は、4.2.1と同様に1.4~1.5 g/cm³となるように調整した。フィルターと珪砂を敷いたセル内にブロックを不均質に積み上げ、セル内を蒸留水で満たした。膨潤期間は4.2.1に合わせて15日間とし、その後、簡易透水試験を実施した。

B) 結果

膨潤状況の確認

ブロックの膨潤の様子を図4.2-4に示す。ブロックは浸水直後から膨潤し、ブロック同士の隙間が充填され始めた。膨潤開始から3日が経過した時点で、隙間は完全に充填されていないが、セル側壁とブロックが密着していた。膨潤開始から15日が経過すると、ブロックの境界部の痕跡が肉眼で確認できるものの、ほぼ全ての隙間がベントナイトで充填されていた。

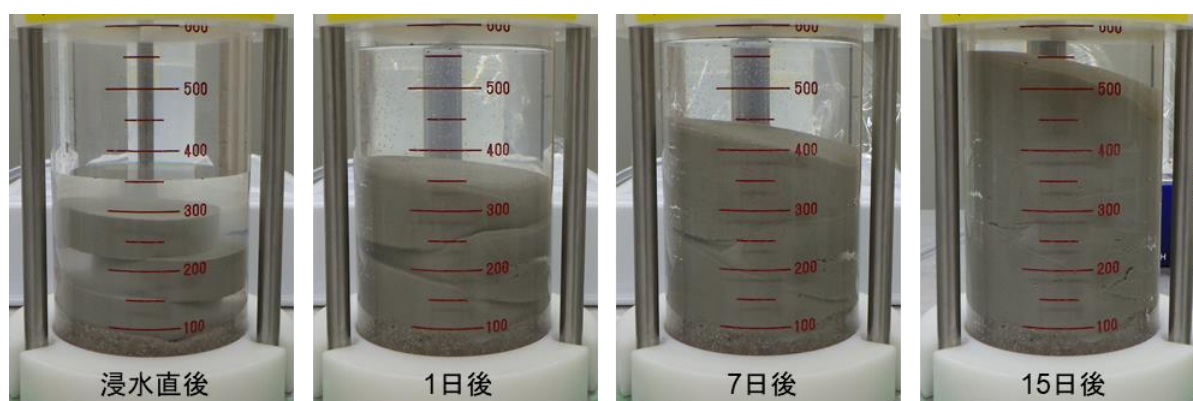


図 4.2-4 複数のブロックを不均質に積み上げた場合のブロックの膨潤の様子

閉塞性能の確認

本ケースのブロックから得られた透水係数および有効モンモリロナイト密度と、4.2.1で実施した単ブロックの試験結果を比較したグラフを図4.2-5に示す。有効モンモリロナイト密度と透水係数の値の関係は、両者ではほぼ同じ傾向を示した。

このことから、ブロックを不均質に積み上げて閉塞部を設ける場合では、ブロック単体を用いた場合と比較してその膨潤は不均質になるものの、閉塞性に与える影響は小さいと考えられる。

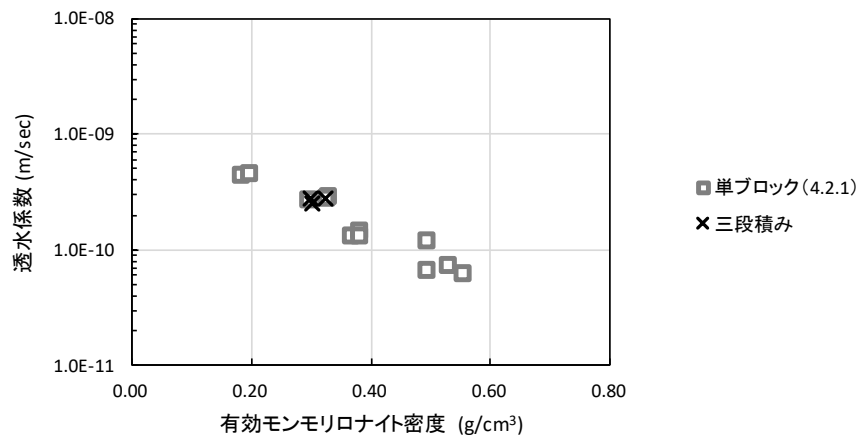


図 4.2-5 ブロックを不均質に積み上げた場合の有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係

4.2.2.2 斜め孔にブロックを積み上げた際の閉塞性の確認

鉛直下向き以外のボーリング孔を想定し、原位置試験(4.3 参照)で対象とするボーリング孔(斜め孔)を模擬したアクリル管を用いた室内試験を実施した。アクリル管を傾斜 30° で固定してから水で満たし、管内にブロックを定置してその膨潤状況の確認および透水試験を実施した。材料の条件は、原位置試験の条件に合わせ、アクリル管は内径 86 mm、ブロックは直径 63 mm とした(内径 : 直径 = 約 73%)。ブロックの高さは 10 cm、膨潤前の有効モンモリロナイト密度は 1.4~1.5 g/cm³ である。試験は、水道水を用いたケースと、原位置試験の経路閉鎖設計(4.3.1)に資することを目的として 10MI25 号孔の地下水を用いたケースの 2 ケースで実施した。

試験①

A) 実験手法

試験①では、原位置試験用の閉塞材挿入プローブの動作確認(付録Ⅲ-C 参照)を兼ねて、プローブから排出する形でブロックをアクリル管の底部へ定置し、膨潤過程を観察した。そのため、ブロックと砂層の間には閉塞材挿入プローブに使用したガラス製の底フタが配置された状態である。試験①ではアクリル管内を水道水で満たした。試験①ではブロック数が単一のケースと複数のケースの 2 ケースを実施したが、原位置試験(4.3)の工程の制約があったため、複数ブロックのケースでは試験時間が短期になるようブロック数を 2 個に設定した。

ブロック 2 つのケースでは、膨潤後に透水試験を実施した。試験は定圧注水試験とし、注水圧力は 0.3 MPa とした。なお、本試験では水道水を用いているが、水道水のイオン強度は 0.001(表 4.2-1)であり、4.2.3 で述べるとおり、水道水の水質はブロックの閉塞性に大きな影響を与えないと考えられる。

表 4.2-1 水道水の水質組成

測定項目	単位	結果
pH	-	8.3
EC	mS/m	10.5
Na ⁺	mg/L	5.9
K ⁺	mg/L	1.2
Ca ²⁺	mg/L	6.9
Mg	mg/L	1.3
M-Alkalinity	meq/L	0.38
F ⁻	mg/L	<0.1
Cl ⁻	mg/L	6.1
SO ₄ ²⁻	mg/L	9.7
Si	mg/L	6.6
Al	mg/L	<0.01
T-Fe	mg/L	0.06

B) 結果

膨潤過程の確認

ブロック1つのケースでは、水中にブロックを定置して31日間観察し、その後ブロックを取り出してその内部を観察した。

ブロックは、定置して3日～6日後に、アクリル管の壁面に接触していると視認された（図4.2-6）。定置して31日経過しても、ブロック表面に割れ目は視認されなかった。31日後に、ブロックをアクリル管内から回収してヘラで切断し、その内部の状況を確認した（図4.2-7）。ブロックの内部は全体にわたって浸潤していた。一方で、ブロックの頂部の切断時に、頂部付近にほぼ密着した割れ目が内在していることが認められた。ブロックをアクリル管から回収する際に、ブロックの頂部を押し出す形で回収したため、割れ目の開口幅は不明である。

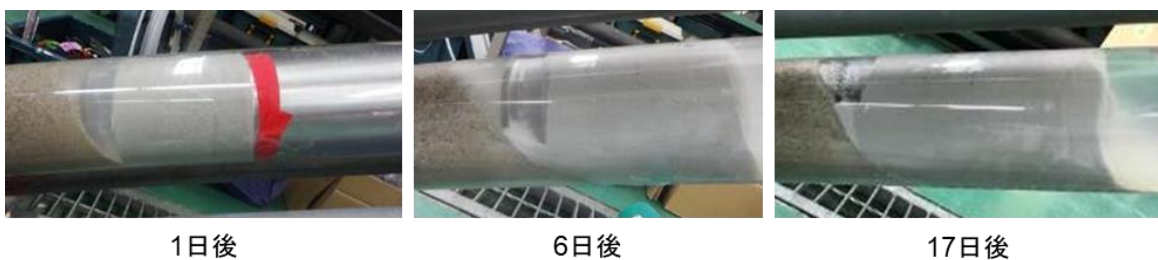


図 4.2-6 試験①のブロック1つのケースにおけるブロックの膨潤の様子



図 4.2-7 アクリル管内から回収したブロック（試験①のブロック 1つのケース）

ブロック 2つのケースでは、水中にブロックを定置して 33 日間観察し、透水試験を実施してからブロックを取り出してその内部を観察した。

ブロックの膨潤過程を図 4.2-8 に示す。ブロックは、定置から 5 日後にアクリル管の壁面に接触していた。また、プローブから排出する際に生じた縦方向の亀裂（付録Ⅲ-C 参照）や 2つのブロックの間の隙間も、5 日目には視認できなかった。また、定置から 4 日後、ブロックの表面に幅数 mm 程度の溝が複数発生していたが、5 日後には視認できなくなった。定置から 33 日後まで観察した結果、ブロックの表面に若干の空洞が確認されたものの、割れ目は確認されなかった。

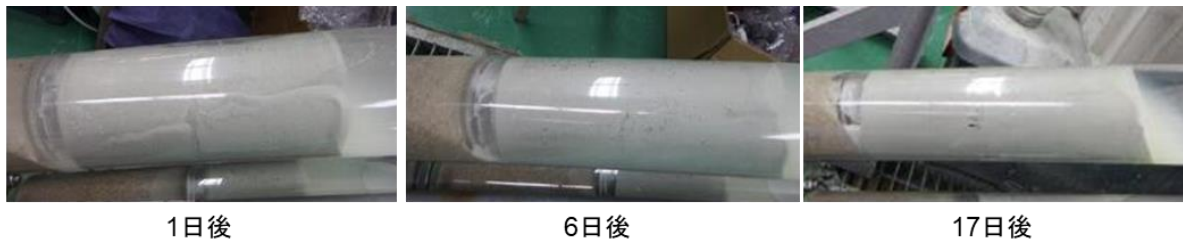


図 4.2-8 試験①のブロック 2つのケースにおけるブロックの膨潤の様子

透水試験

ブロック 2つのケースでは、定置から 33 日後に注水試験を実施し、ブロックの透水係数を算出した。その結果、排水流量は 0.003 mL/min となった。この時の注水圧 (0.3 MPa) と排水量から式(1) を用いて計算すると、ブロックの透水係数は 9.5×10^{-11} m/sec と算出された。また、ブロックの長さは、注水試験直前の時点で 33 cm であり、膨潤後のブロックの有効モンモリロナイト密度は 0.45 g/cm^3 と算出された。この有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係は、4.2.1 で実施した偏芯していない試験の結果と同じ傾向を示した (図 4.2-9)。このことから、ブロックが斜め孔に偏芯して定置されたとしても、そのことが閉塞性に与える影響は小さいと考えられる。

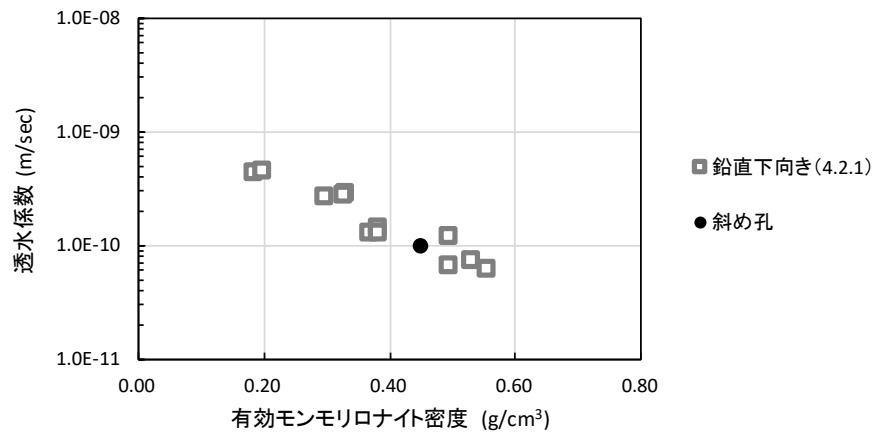


図 4.2-9 斜め孔に積み上げた場合のブロックの透水係数と有効モンモリロナイト密度の関係

透水試験後のブロック内部の様子

注水試験の終了後、ブロックをアクリル管内から回収して内部を観察した（図 4.2-10）。ブロックの内部は全体にわたり浸潤しており、顕著な空洞は確認されなかったが、断面に一部亀裂が存在していた。一方で、2つのブロック間の継ぎ目や、プローブ排出時に生じた縦方向の亀裂（付録Ⅲ-C 参照）の痕跡は視認されなかった。



図 4.2-10 試験①のブロック 2つのケースにおいてアクリル管内から回収したブロック

試験②

A) 実験手法

傾斜 30° で固定したアクリル管内に上部から珪砂を投入して、管内を地下水で満たした。その後、ブロックを管の上部から投入し、その後の膨潤状況を観察した。なお、アクリル管の下部に地下水が供給可能なチューブを設置し、アクリル管の上部をラップで塞いだ。

ブロック 1つのケースでは、図 4.2-11 に示すように、投下したブロックが底部まで滑り落ち、珪砂の層と接触した位置で定置された。しかし、ブロックが 4つの場合は、投入したブロックのうち、底から 2つ目のブロックが 1つ目のブロックの頂部まで滑り落ちる前にアクリル管の壁面に付着し、上から荷重をかけても底部まで移動しなかった。このため、1つ目と 2つ目のブロック

の間に隙間がある状態で3つ目および4つ目のブロックを投入した(図 4.2-12)。

どちらのケースも、底部の珪砂の層とブロックの間に隙間が存在していた(図 4.2-11; 図 4.2-12)。

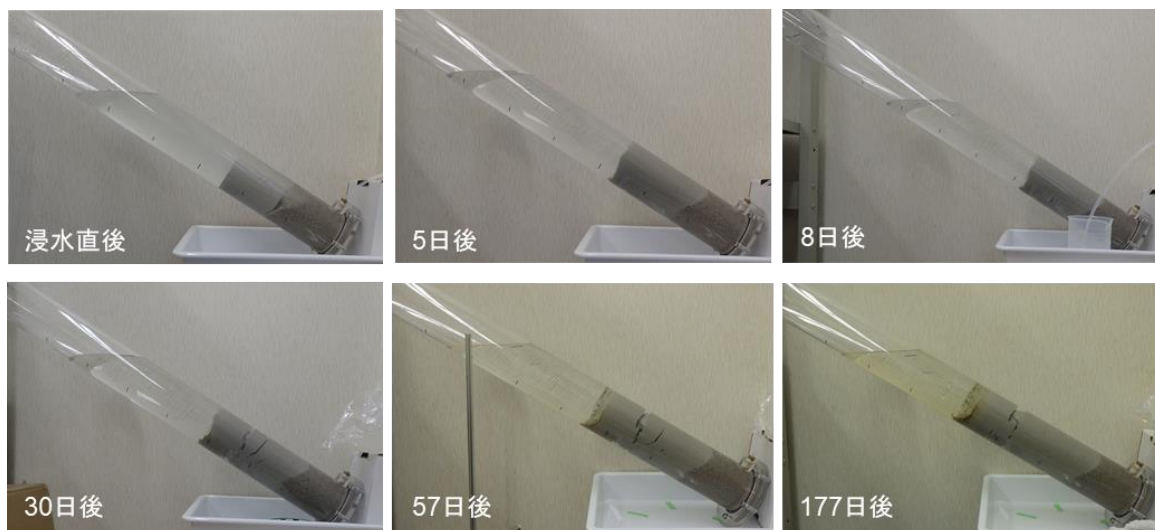


図 4.2-11 試験②のブロックを1つ投入したケースのブロックの膨潤の様子



図 4.2-12 試験②のブロックを4つ投入したケースのブロックの膨潤の様子

B) 結果

ブロック1つのケースでは、浸水開始から5日経過すると、ブロックが膨潤してブロックと珪砂の層との隙間が充填された。また、浸水開始から5日経過した時点で、ブロックがアクリル管の壁面と密着していた。その後もブロックは上方向へ膨潤し続けた。浸水開始から9日後、ブロックに幅数mm、長さ2~3cm程度の水平方向の割れ目が発生した(図 4.2-13)。この割れ目は時間の経過とともに徐々に開口し、さらに同程度の大きさの水平方向の割れ目が新たに複数形成された。目視で観察すると、いずれの割れ目内も空気で満たされていた。膨潤開始から約50日経過すると、ブロックの体積変化、割れ目の開口や新規形成は認められなくなった。割れ目および割

れ目内の空気は、浸水開始から 177 日経過後も維持された。

ブロック 4 つのケースでは、浸水直後に存在していたブロック周辺の隙間は、浸水開始から 7 日後に、ブロックが膨潤して充填された (図 4.2-12)。また、ブロック同士の境界部も目視では認められなくなった。またこの時点で、ブロックがアクリル管の壁面と密着していた。一方で、浸水開始から 4 日後、ブロック側面に長さ 2~3 cm、幅 2~3 mm 程度の割れ目が、アクリル管の方向に対して垂直方向に複数発生した (図 4.2-14)。浸水開始から 30 日経過した時点では、ブロックの上部で複数の割れ目が連結した。目視で観察したところ、割れ目内は空気で満たされていた。割れ目および割れ目内の空気は、浸水開始から 172 日経過後も維持された。



図 4.2-13 試験②のブロックを 1 つ投入したケースにおいてブロックに発生した割れ目



図 4.2-14 試験②のブロックを 4 つ投入したケースにおいてブロックに発生した割れ目

4.2.2.3 ブロックに生じた割れ目中の気相について

予察的に実施した地下水条件でのブロックの膨潤試験 (試験②) では、ブロックを浸漬して 4~9 日後に、ブロックの外側へ連続する割れ目が発生した。一方、水道水条件で実施した試験①では、ブロック外側には連続しないものの、その内部に割れ目が発生していたと考えられた。この割れ目の規模の違いは、(1) 溶液の条件が試験①は水道水だが試験②は地下水、(2) ブロックの設置方法が試験①はプローブだが試験②は上から投入、の 2 点である。この条件の違いと割れ目の発生に関する検討は課題として残されている。

また、試験②で発生した割れ目内は空気で満たされていた。圧縮成型したベントナイトブロック中に空気が存在することは既往研究でも言及されていることから、割れ目内の空気はブロック

中に存在していたものと推定される。割れ目は、各々が連続することで水みちとなり得ることから、その連結性の有無や閉塞の妥当性判断への影響を確認することが重要になると考えられる。

4.2.2.4 得られた知見について

以上の試験結果から、非拘束条件で複数ブロックを定置した場合、ブロック内に気相の残留が認められ（気相の残留は単一ブロックでも起こり得るが、複数ブロックになることで総気相量が増加する）、ブロック内部の不均質性により場所によって透水性が異なる可能性が示されたものの、全体としては閉塞性を有することが確認された。ただし、ベントナイトブロックの仕様（成型時の空隙率など）によっては、気相部が増加しそれらが連結することで閉塞性が変化することも懸念される。

実際のポーリング孔空洞部にブロックを定置した場合、ブロックには水深に応じた水圧がかかるため、気相による割れ目内に含まれる空気も水圧に応じて圧縮され、割れ目の大きさが変化すると想定される。水圧と気相体積の関係は付録Ⅲ-A.3のように計算できるが、原位置の水圧条件下でのブロック中の気相について実験的な知見は得られていない。今後、原位置水圧条件下において気相割れ目がベントナイトの閉塞性能に与える影響に関する知見を収集し、経路閉鎖設計の妥当性判断への影響について確認していく必要がある。

4.2.3 水質や水圧（流速）が変化したときのベントナイトの閉塞性

様々な水質条件でのベントナイトの透水性に関わる情報の多くが、拘束条件の室内実験で得られたものである。本試験では、平成30年度の検討委員会における委員からの指摘事項として、イオン強度の異なる水質下で拘束条件で得られている既存の知見を非拘束条件の孔空洞部の埋戻しに参照可能か確認するため、また、実際の孔空洞部の水圧条件でのベントナイトブロックの透水性を確認するため、様々な水質・水圧条件下での室内試験を行った。

4.2.3.1 様々な水質条件・非拘束条件でのベントナイトの閉塞性

A) 実験手法

液相のイオン強度は、海水相当（0.57）のNaCl溶液の条件（以下「塩水条件」）と、原位置試験の経路閉鎖設計（4.3.1）に資することを目的として10MI25号孔の地下水（イオン強度0.009；表4.2-2）の条件（以下「地下水条件」）の2ケースを設定した。膨潤期間は4.2.1と同じ15日間とした。試験に用いたブロックは、高さ5cm、直径55mmとした。なお、塩水条件の試験のみ、有効モンモリロナイト密度が異なるベントナイトのデータを取得することを目的として、直径が43mmおよび63mmのブロックを用いた試験を追加で実施した。

膨潤期間の経過後に、4.2.1と同様に簡易透水試験を実施した。

表 4.2-2 地下水の水質組成

測定項目	単位	結果
pH	-	8.8
EC	mS/m	96
Na ⁺	mg/L	140
K ⁺	mg/L	1.1
Ca ²⁺	mg/L	30
Mg	mg/L	1.2
M-Alkalinity	meq/L	0.98
F ⁻	mg/L	7.7
Cl ⁻	mg/L	221
SO ₄ ²⁻	mg/L	0.5
Si	mg/L	7.6
Al	mg/L	0.09
T-Fe	mg/L	0.20

B) 結果

膨潤状況の確認

塩水条件下では、浸水直後からブロックの外側の一部が崩壊し、ブロックとセルの側壁の隙間に崩壊物が堆積した。その後、崩壊物および残ったブロックが膨潤した。浸水から約 1 日経過して以降はブロックの体積変化は認められなくなった（図 4.2-15）。

地下水条件下では、浸水してから約 1 日が経過した時点で側壁と密着していた。また、15 日経過した時点で、ブロックは高さが約 1.5 倍、体積が約 2 倍まで膨潤した。この体積変化量は、4.2.1 の蒸留水条件下で実施した試験結果と比較して小さい。

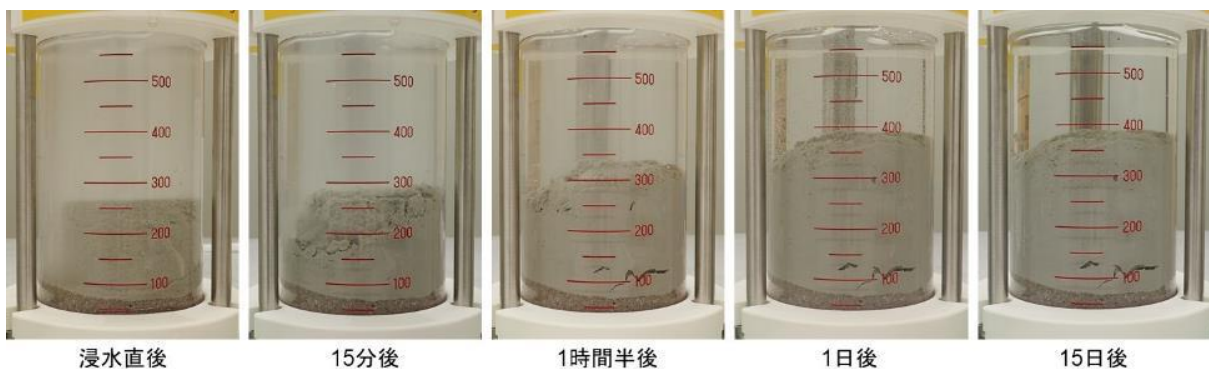


図 4.2-15 塩水条件下におけるブロックの膨潤の様子

閉塞性能の確認

簡易透水試験で得られた透水係数と有効モンモリロナイト密度との関係を蒸留水条件のデータと比較したグラフを図 4.2-16 に示す。

塩水条件下では、ブロックの透水係数が蒸留水条件下のブロックと比較して 1~2 オーダー高

い。拘束条件の試験結果でも、塩水条件下でのベントナイトの透水係数は、有効モンモリロナイト密度が同じブロックであれば蒸留水条件下のブロックと比較して1~2オーダー高い⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾。既往研究によれば、イオン強度が高い溶液の場合は、ベントナイト中の水みちと考えられるモンモリロナイトの結晶層間内に陽イオンが侵入し、結晶層間の水分吸着力の低下や層間の水の密度・粘性係数の変化により透水係数が増加すると考えられている⁽²¹⁾。このことから、非拘束条件の場合においても、ブロックの透水性は既往の拘束条件と同様の傾向であると考えられる。

一方、地下水条件下のブロックの試験結果は、蒸留水条件下の試験結果と同等の値であった。既往研究によれば、拘束条件かつベントナイトの有効粘土密度が1.17~1.80 g/cm³（有効モンモリロナイト密度に換算した場合、0.66~1.22 g/cm³）の場合、溶液のイオン強度が0.2以下であれば溶液の違いはベントナイトの透水係数に影響しない⁽¹⁷⁾。本試験では、非拘束かつ有効モンモリロナイト密度が低い条件であるが、地下水のイオン強度が低いことから、蒸留水条件下の試験と同等の結果が得られたと考えられる。

これらの結果は、非拘束条件下の孔空洞部の埋戻しにおいて地下水のイオン強度がベントナイトの閉塞性に与える影響は、既往の拘束条件で得られた透水係数と有効モンモリロナイト密度の関係に基づいて設計が可能であることを示す。

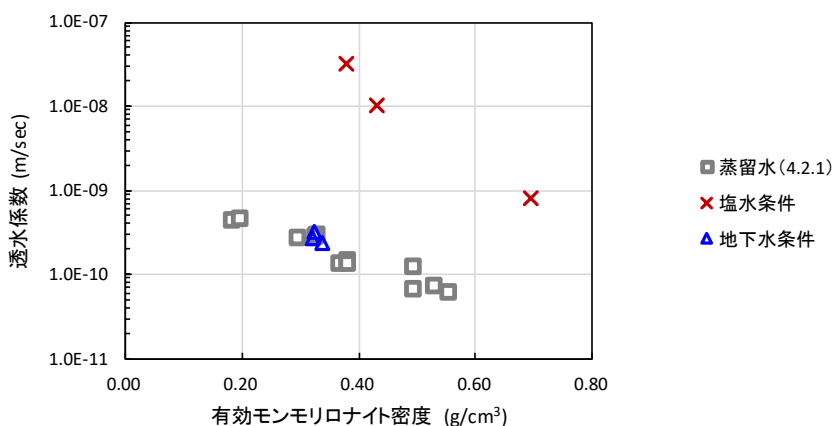


図 4.2-16 水質を変化させた場合のブロックの有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係

4.2.3.2 加圧・非拘束条件でのベントナイトの閉塞性

A) 実験手法

透水性を測定可能なアクリルセルを用い、想定される埋設環境を考慮して、水深60mに該当する0.6 MPaの加圧環境を維持しながらブロックを膨潤させてその膨潤状況を確認した後で、透水試験を実施した。本試験では、内径が100mmのアクリルセル、直径が76mmで高さが5cmのブロックを用いた。溶液は蒸留水を用い、膨潤期間は15日とした。膨潤期間が経過後、低透水性材料の透水試験法（JGS 0312-2018）に基づき透水試験を実施し、ブロックの透水係数を算出した。なお、同じ大きさのブロックを2つ用意し、試験を2回実施した。

B) 結果

膨潤状況の確認

ブロックは、浸水から約 2 日後にはセル側壁と密着した。ブロックは 7 日～8 日でセルの上部に接触し、それ以降体積変化が認められなくなった（図 4.2-17）。この時のブロックは、膨潤前と比較して高さが約 2 倍、体積が約 3.2 倍になった。セル側壁との密着までの時間は、4.2.1 で実施した大気圧条件下での試験結果とほぼ同程度であった。

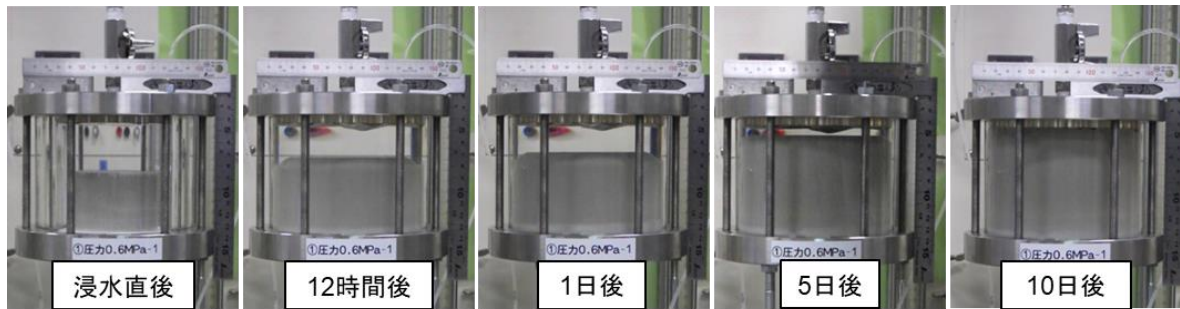


図 4.2-17 0.6 MPa の水圧条件下におけるブロックの膨潤の様子

閉塞性能の確認

透水試験 d は、流入量が安定するまで試験を継続し、安定した時点での流入量を用いてブロックの透水係数を算出した。本試験で得られたブロックの有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係を、4.2.1 で実施した大気圧条件の試験結果と比較すると、加圧条件下のブロックの結果は大気圧条件下のブロックの結果とほぼ一致した（図 4.2-18）。

このことから、原位置の状態を想定した加圧環境下において膨潤したブロックの閉塞性を設計する際には、大気圧条件下で膨潤したブロックの閉塞性を参照可能であると考えられる。

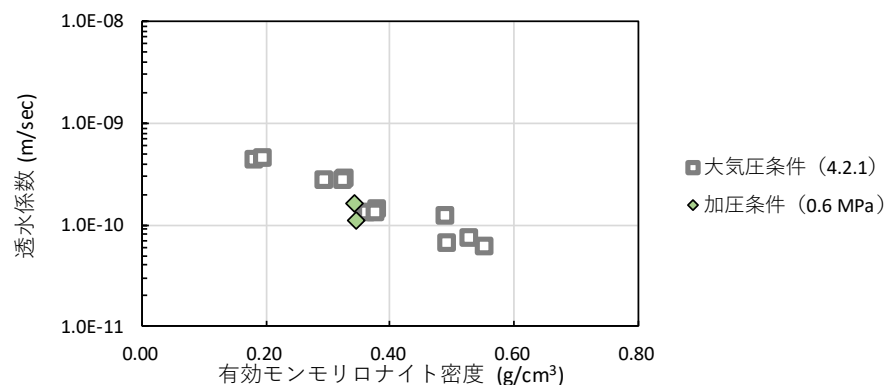


図 4.2-18 加圧条件の場合のブロックの有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係

4.2.3.3 得られた知見について

以上の結果から、液相のイオン強度とベントナイトの透水性の関係性については、非拘束条件においても既往の拘束条件下における試験結果と同様の傾向であることが認められた。このこと

から、水質が異なる環境での孔空洞部の閉塞の妥当性確認においては、既往の拘束条件で得られた透水係数と有効モンモリロナイト密度の関係に基づいて閉鎖設計がされていても問題がないと考えられる。

また、非拘束条件において大気圧条件下と加圧条件下での有効モンモリロナイト密度と閉塞性の関係に大きな違いはないことが確認された。ただし、ここで得られた透水係数は、既往の拘束条件下で同じ有効モンモリロナイト密度の透水係数よりも約 1 桁大きな値であることから、孔空洞部の閉塞の妥当性確認においては、非拘束条件で得られたベントナイトの透水係数と有効モンモリロナイト密度の関係に基づいて閉鎖設計がなされていることを確認する必要がある。

なお、加圧条件での試験では、地震等により閉塞区間の上下に一時的な差圧が生じた場合、噴砂現象等の発生により閉塞区間の閉塞性が担保できなくなる可能性があることが懸念された。孔空洞部の閉塞の妥当性の確認において、このような現象を念頭におく要否に関しては知見が不足しており、今後の課題である。

4.2.4 閉鎖確認手順の更新

以上の結果をもとに、平成 30 年度に整理された原位置での閉鎖確認手順（案）を更新した。

- ✓ 閉塞部の閉塞性を損なわない埋戻し材の定置手順が重要な確認項目として追加された。
- ✓ 埋戻し材の不均質な配置や原位置の地下水圧は、重要項目ではないと考えられた。
- ✓ 地下水水質が変化する場合は、ベントナイトの遮水性能の変化について既往の知見を参照しておくことが確認項目として追加された。

4.3 原位置でのボーリング孔閉鎖確認試験による経路閉鎖設計に係る知見の取得

ボーリング孔の経路閉鎖設計の妥当性確認に必要な科学的・技術的知見を取得するために、室内試験における知見および先行事例に基づき、ボーリング孔空洞部の閉鎖設計を行った上で、その設計に従い原位置の孔空洞部を閉塞し、閉鎖設計に係る妥当性判断指標について詳細な知見の取得を行った。

4.3.1 原位置でのボーリング孔内経路閉鎖設計

本事業で試験対象としたボーリング孔は、スウェーデンやフィンランドと同様の割れ目媒体の結晶質岩に掘削されている。このような地質条件では、長期的な閉塞材流失のリスクを下げるため事業者が前述の **Sandwich-concept** を参照する可能性があると考えられたため、ベントナイトと砂による孔埋戻しを行うこととした。なお、ボーリング孔空洞部の閉鎖設計に関わる項目及び重要な確認項目として以下のようなものが挙げられる。

- ✓ 埋戻し材のレイアウト設計：前述のように埋戻し材の配置は、割れ目が発達し透水性が高い区間を砂や砂利等で、透水性が低い健岩部区間をベントナイトでそれぞれ充填する。したがって、埋戻し材のレイアウト設計は、ボーリング孔内の水理地質学的な情報に基づいて行われていることが重要である。
- ✓ ベントナイトの搬送方法：ベントナイトは水に触れると膨潤が始まるため、搬送途中のベントナイトが膨潤して孔に詰まってしまうおそれがある。ベントナイトの搬送方法については、ボーリング孔内の閉塞対象深度に定置し、かつその定置深度を確認可能な方法であることが重要である。
- ✓ ベントナイトの仕様設計：孔空洞部が核種の移行経路にならないよう処置するためには、閉塞部を周辺岩盤よりも低透水性のベントナイトで閉塞する必要がある⁽²²⁾。このため、岩盤の透水性が把握されていることに加え、孔内に定置した後のベントナイトの透水性について要求水準値を設定した上で、それを満たす仕様としてあることが重要である。
- ✓ 閉鎖確認方法：孔空洞部が核種の移行経路にならないよう閉鎖されたことを確認するため、孔空洞部を閉塞した際に、ベントナイトが要求水準どおりの低透水性を発揮しているかどうかを確認することが重要である。

これらの観点を整理し、原位置試験で用いるボーリング孔の状況を確認した上で閉鎖設計を行った。原位置試験は、瑞浪超深地層研究所の深度 300 m 研究坑道内の 11 m 計測横坑内に掘削された 10MI25 号孔(掘削長:約 35 m、掘削角度:水平下向き約 30°、孔径:φ 86 mm)を対象とした(図 4.3-1)。

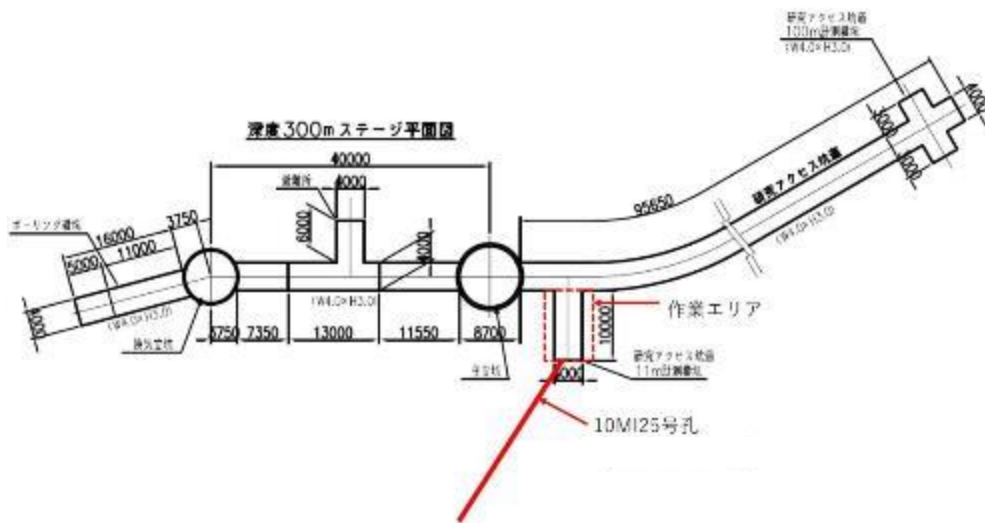


図 4.3-1 閉鎖確認実証試験の作業エリア（深度 300m ステージ）

4.3.1.1 レイアウト決定に必要な孔内情報の取得

孔内の状況確認を目的とした BTV 検層およびフローメータ検層

埋戻しのレイアウトを決定するため、既存情報を収集した。原位置試験の対象となる 10MI25 号孔の掘削時のフローメータ検層の情報⁽²³⁾によると、本孔では 20～23 mabh（meter along borehole）の深度の一箇所のみ湧水地点が確認されており、その湧水量は 100 mL/min 程度である。また、割れ目密度およびボーリングコアの RQD（Rock Quality Designation）のデータによれば、10～11 mabh、16～19 mabh、20～22 mabh の各深度において割れ目が発達している。

ボーリング孔掘削から 9 年間経過しているため、現在の孔の状態を確認するためにフローメータ検層およびボアホールテレビ（以下「BTV」）検層を実施した。使用したフローメータ検層装置は、電磁流量計式である。この装置には BTV カメラが取り付けられており、フローメータ検層と同時に孔壁の状況を確認することが可能である。検層は図 4.3-2 に示した装置を使用して実施した。孔内部ゾンデを孔底まで挿入した後、一定速度で巻き上げて BTV 検層を実施した。フローメータ検層は BTV 検層と同時に実施し、巻き上げ（検層）時に 1 m 毎にゾンデを停止して流速を計測した（図 4.3-2）。

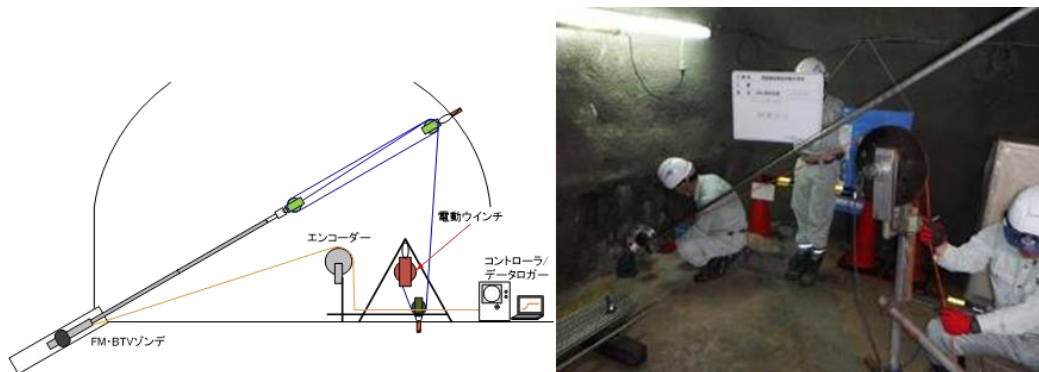


図 4.3-2 フローメータ・BTV 検層の概略図と実施状況

BTV 検層結果を図 4.3-3 に示す。BTV 検層は、孔ロケーシングの先端である 5.0 mabh から孔底付近の 35 mabh まで実施した。明確な割れ目が確認された深度は、10～11.5、16～18、19～25 mabh であった。一方で、深度 12～16 mabh 付近に明確な割れ目は確認されず、相対的な健岩部であると考えられた。

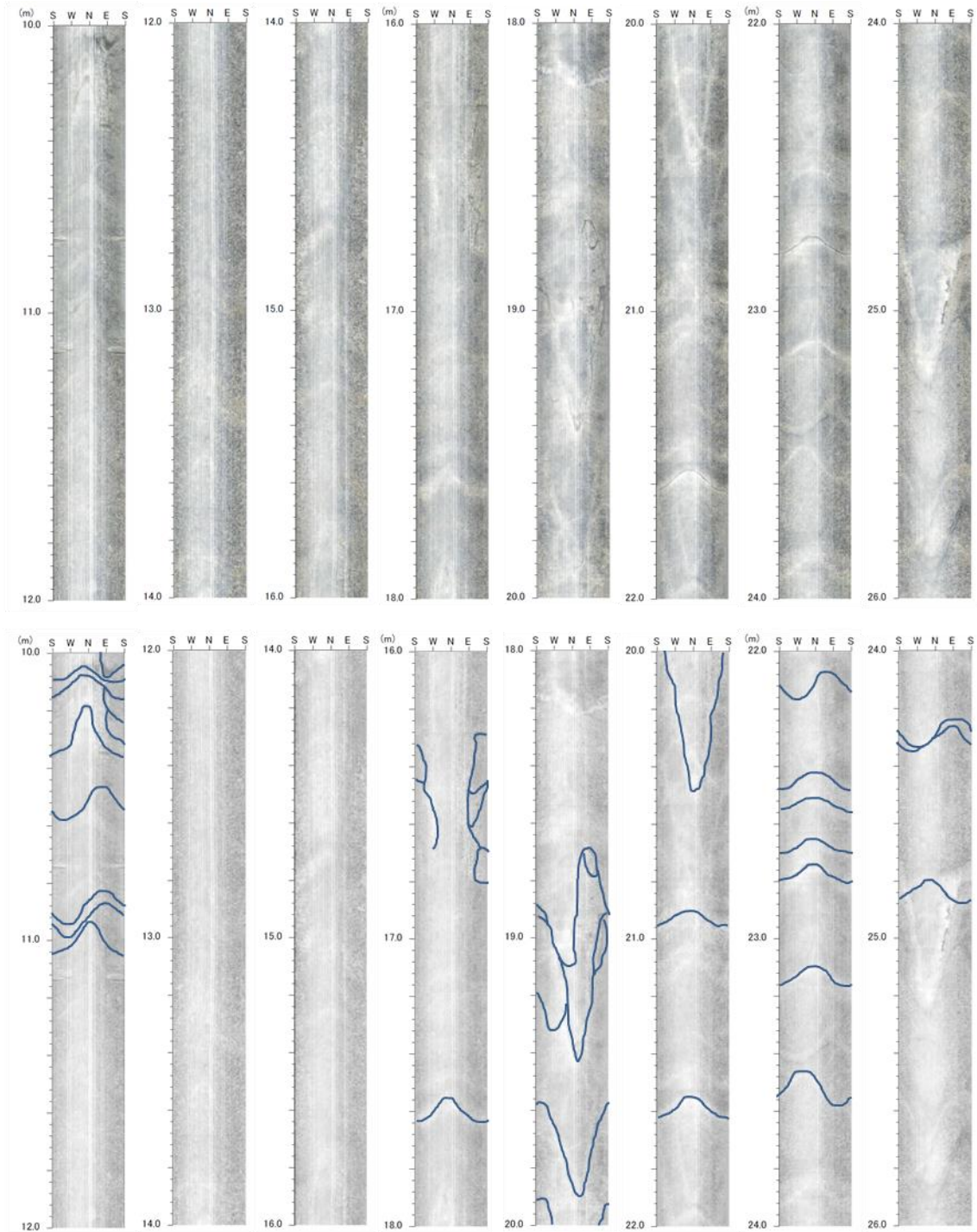


図 4.3-3 BTV 検層結果 (10.0～26.0 mabh)

上の図は BTV 画像、下の図は割れ目部をなぞったもの

フローメータ検層結果を図 4.3-4 に示す。本件で使用したフローメータ検層装置の流量計測の分解能は 50 mL/min 程度であったが、湧水量は計測できなかった。これは、各深度における湧水量が、検層装置の分解能以下であったことを示す。このため、パッカーを使用した湧水量計測に切り替えた。

パッカーを使用した湧水量計測は、パッカー下端から孔底までを計測区間とするシングルパッカー方式とした。計測区間深度は、既存の報告情報⁽²³⁾に基づき 20～23 mabh を中心に、パッカーの上端深度で 18～25 mabh とし、1m 毎に計測した。パッカーを所定深度まで挿入した後、湧水量が安定するのを待ってメスシリンダーを使用して湧水量を計測した。湧水量の計測時には、孔口からの湧水量も同時に計測した。

湧水量計測の結果（図 4.3-4 右）、孔全体の湧水量は約 70 mL/min であり、19～20 mabh および 22～23 mabh において 10 mL/min 程度の変化が確認された。この結果は、これらの深度に湧水点が存在していることを示唆する。

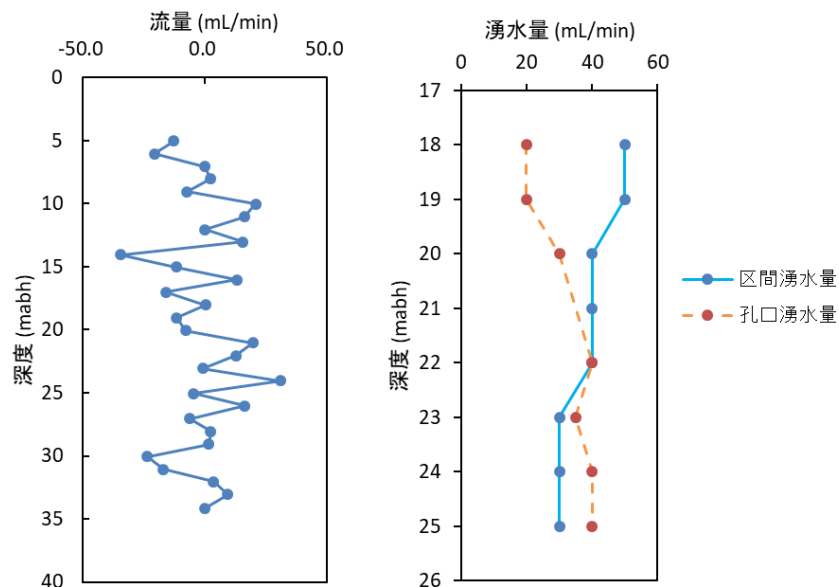


図 4.3-4 フローメータ検層結果（左）および湧水量計測結果（右）

BTV 検層および湧水量計測の結果から、11.5～16 mabh の区間は湧水が生じておらず割れ目が発達していない健岩部であり、19～20 mabh と 22～23 mabh では湧水割れ目が分布していると推定された。

岩盤の透水性の確認

閉塞区間には、周囲の岩盤よりも低透水性であることが求められる⁽²²⁾。このことから、経路閉鎖設計では、膨潤後のベントナイトの透水性が 10MI25 号孔周辺の岩盤よりも低くなるように材料設計する。この材料設計のためには、10MI25 号孔の岩盤の透水性に関する情報を取得する必要がある。

①のフローメータ検層および BTV 検層により湧水深度および健岩部を特定できたため、本試験

では、確認された湧水箇所および健岩部を分断するように閉塞区間を設け、孔内の水理データを取得するために湧水量を計測した。湧水量計測には定圧注水試験装置を用いた（図 4.3-5）。口元パッカーを含めたトリプルパッカー編成を基本とし、健岩部（12～14 mabh）およびその上下の合計 3 区間の水圧および湧水量を計測した。

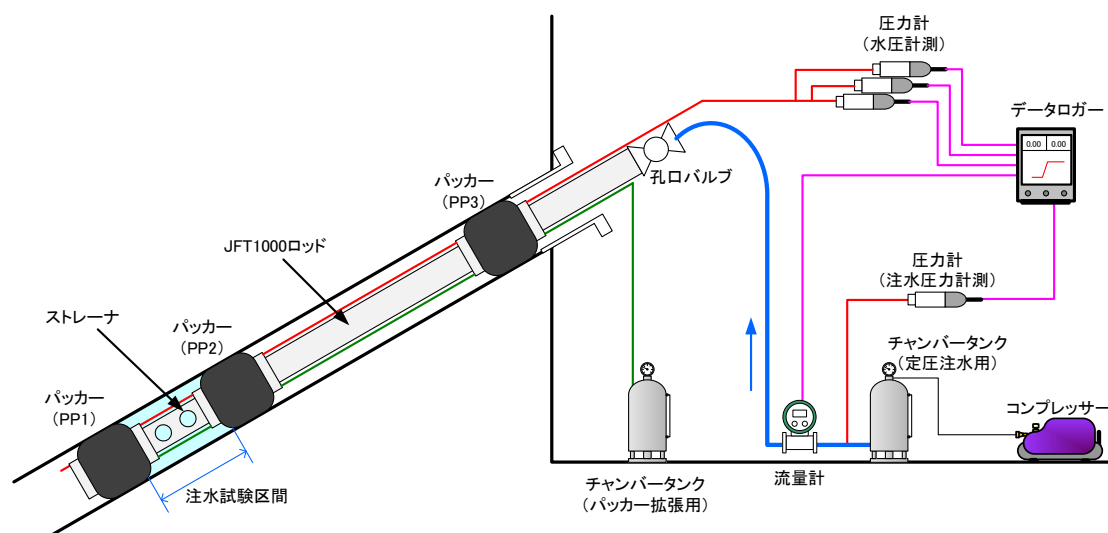


図 4.3-5 定圧注水試験装置の概略図

湧水量の確認では、以下の手順で試験を実施した。

1. 孔内部装置を設置し、パッカーを拡張する。
2. 間隙水圧を計測し、水圧の安定を確認する。
3. 各計測区間のバルブを開放し湧水量を計測する

以上の内容をそれぞれの区間に対して実施し、対象となる区間の透水係数を算出した。パッカーの長さは 60 cm である。その設置場所は、健岩部の下部（14.1～14.7 mabh）、健岩部の上部（11.5～12.1 mabh）および孔口付近（5.9～6.5 mabh）とし、測定区間をパッカーに挟まれた 2 区間および最下部パッカーから孔底までの 1 区間の合計 3 区間とした。

得られた結果を基に、それぞれの区間の透水係数を算出した。本試験は、単孔を利用した透水試験の定常法に該当するため、地盤工学会編⁽²⁴⁾の該当する計算式（式(2)）を用いて透水係数を算出した。

$$k = \frac{Q}{2\pi L(H_2 - H_1)} \ln\left(\frac{L}{r}\right) \quad (2)$$

ここで、 k ：透水係数（m/sec）、 Q ：注水量（m³/sec）、 L ：試験区間長（m）、 r ：ボーリング孔半径（m）、 H_1 ：試験前水圧（mH₂O）、 H_2 ：注水試験圧（mH₂O）である。湧水量計測の場合、注水量に湧水量の観測値を、試験前水圧に 0 を、注水試験圧に区間水圧の観測値を代入することで、対象区間の透水係数が算出される。

最深部の区間の区間湧水量は 53.3 mL/min であり、湧水圧は 1.7 MPa であった。この湧水は、

BTV 観測および湧水量観測で確認された 19～20 mabh と 22～23 mabh に分布する湧水割れ目から湧出していると考えられる。このことから、湧水区間長を 19～20 mabh と 22～23 mabh の 2m と設定して当該区間の透水係数を算出すると、 1.6×10^{-9} m/sec となった。閉塞区間に相当する健岩部（12.1～14.1 mabh）の区間湧水量は 1.6 mL/min、湧水圧は 1.5 MPa であった。これらの値から同様に当該区間の透水係数を計算すると、 5.3×10^{-11} m/sec と算出された。また、健岩部の直上に該当する区間の区間湧水量は 15 mL/min、湧水圧は 1.1 MPa であった。この湧水は、BTV 観測で確認された 10.0～11.5 mabh に分布する割れ目から湧き出しているものであると想定される。このことから、湧水区間長（試験区間長）を 10.0～11.5 mabh の 1.5 m と設定して当該区間の透水係数を計算すると、 8.4×10^{-10} m/sec と算出された。これらの結果を図 4.3-6 に示す。

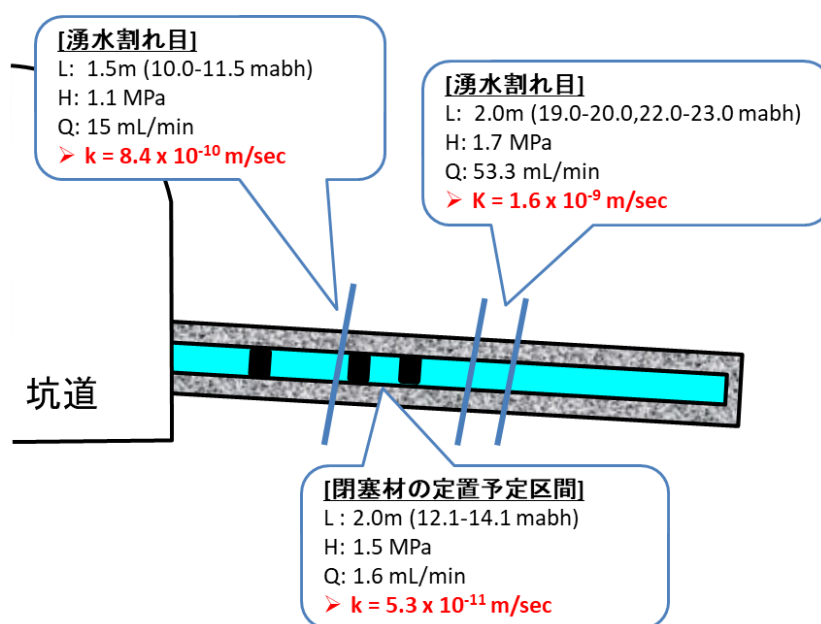


図 4.3-6 各区間の湧水圧、湧水量および透水係数

本試験の結果、健岩部の上下に湧水割れ目が分布しており、その湧水量は健岩部の 10 倍以上、透水係数は 1～2 オーダー高いことが把握された。

4.3.1.2 ベントナイトの搬送方法

ボーリング孔内にベントナイトを搬送する複数の方法が提案されているが、現時点では確立されていない⁽¹³⁾。本事業では、閉塞作業に伴う残置物が発生せず、ベントナイトが搬送中に水と触れない状態で搬送・定置が可能なコンテナ法を採用することとした。

昨年度および今年度の室内試験の結果から、ベントナイトの透水係数はその膨潤後の有効モンモリロナイト密度に依存しており、孔径に対して可能な限り大きなベントナイトを定置することでより低い透水性を発揮することが想定された。このことから、ベントナイトを搬送するコンテナは、孔内への挿入が可能な範囲で大きくすることが望ましいと考えられる。10MI25 号孔の内径は 86 mm であること⁽²³⁾から、外径 80 mm の円筒状のコンテナを設計することとした。また、10MI25 号孔は斜め下向き 30° に掘削されており、このこととボーリング横坑の天井の高さを考慮すると、

コンテナの長さが全長 2 m を超えるとボーリング孔内へのコンテナの挿入が困難となる。これらのことを考慮してコンテナを設計した結果（付録Ⅲ-C 参照）、コンテナには直径 63 mm、長さ 600 mm の円筒状のベントナイトが収納可能であると考えられた。

4.3.1.3 レイアウト設計

レイアウト設計については、海外で検討された複数材料を組み合わせる方法を参考にすると、湧水割れ目の区間に砂等を配置し、その上下に閉塞材であるベントナイトを配置し、それ以外の場所は岩盤と同程度の材料で埋める配置が想定される。4.3.1①で孔内の地質情報を取得した結果、健岩部（12～14 mabh）の上下に湧水割れ目が分布していることから、湧水割れ目の区間に砂等の埋戻し材を、その上下にベントナイトを配置するレイアウトが理想的な設計となる。本事業では、現場の作業工程上の制約があったことから、本試験では異なる深度に分布する帯水層をボーリング孔が連結しないように閉鎖する設計とし、閉塞材の定置区間を 1 深度とし、それ以外は砂等で埋め戻す設計とした（図 4.3-7）。

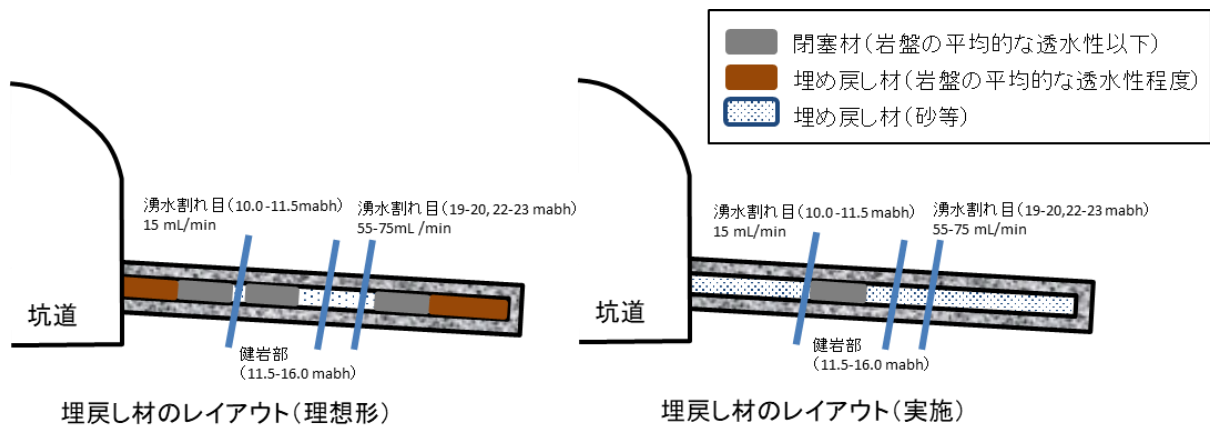


図 4.3-7 ボーリング孔の状況を踏まえたレイアウト設計の概念図

4.3.1.4 ベントナイトの仕様設計

本試験では、異なる深度に分布する湧水割れ目をボーリング孔が連結しないようにベントナイトを配置する。このことから、ベントナイトの透水係数は下位の湧水割れ目よりも低くなるように設計することとした。すなわち、膨潤後のベントナイトの透水係数が 10^{-10} オーダーよりも低くなるよう設計した。

次にブロックの材料設計を実施した。4.2 の結果をまとめたグラフを図 4.3-8 に示す。このグラフに基づくと、ブロックの膨潤後の有効モンモリロナイト密度が 0.3 g/cm^3 程度であれば、その透水係数が 10^{-10} m/sec オーダーになると想定される。4.2.1 で実施した室内試験では、ベントナイトの直径がアクリルセルの内径の約 74 % の条件で実施し、ブロックの体積が最大で約 3.5 倍まで膨張し、密度が約 0.3 倍に低下することが確認された。原位置試験では、コンテナの設計上ブロックの直径が 63 mm となり（4.3.2 および付録Ⅲ-C 参照）、孔径 86 mm に対するその直径は約 73% となる。このことから、原位置試験においても、ブロックは室内試験の結果と同様に体積が 3.5 倍、

密度が 0.3 倍になると推定された。これらの結果から逆算すると、室内で成型したブロックの有効モンモリロナイト密度を 1.3 g/cm^3 以上に調製しておけば、ベントナイトがボーリング孔内で約 3.5 倍まで膨潤しても 10^{-10} m/sec オーダーの低透水性を發揮すると想定された。

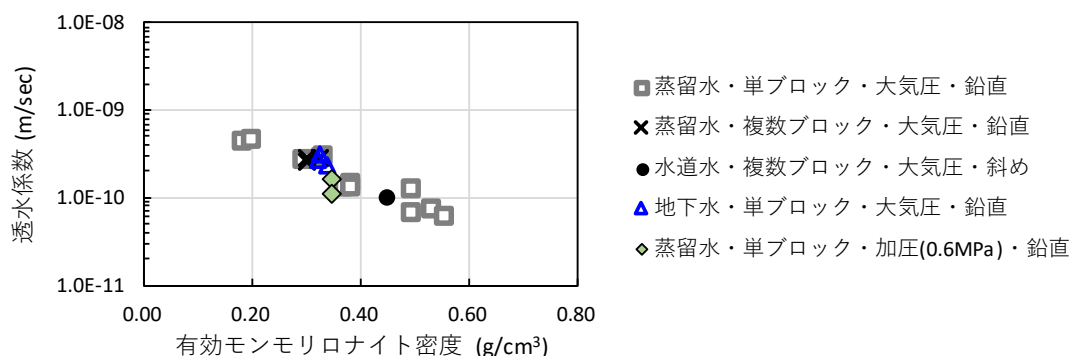


図 4.3-8 4.2 において実施した室内試験の結果

4.3.1.5 閉鎖確認方法

昨年度の成果として、ボーリング孔における閉塞状況の確認方法に関する技術的知見が得られている。その概念図を図 4.3-9 に示す。

閉塞材定置直後は閉塞材とボーリング孔の間に隙間が生じているため、一定圧力での注水を行うと、閉塞上部区間に存在する水みち A および閉塞下部区間に存在する水みち B から注入水は逸水する (手順①)。次に、閉塞材膨潤後に同一圧力条件で注水を行うと、閉塞材とボーリング孔との隙間が閉鎖されていれば、注入水は閉塞上部区間からのみ逸水することとなり、注入流量は減少する (手順②)。したがって、一定圧力条件での注水における閉塞上部区間の逸水量を事前に把握することができれば、実際のボーリング孔においても閉塞状況を確認することが可能であると考えられた。この結果に基づくと、ベントナイトを搬送する前と後で同じ場所にパッカーを設置し、一定圧力条件で注水を行うことで、ベントナイトが低透水性を發揮してボーリング孔が閉塞されたかどうかを判断することが可能であると想定される。

なお、ベントナイトの定置後に閉塞状況の確認試験を実施するためには、ベントナイトを定置後、その上位にパッカーを設置する必要がある。パッカーの長さが約 60 cm、健岩部の長さが 4.5 m (11.5~16 mabh)、定置後のベントナイトの高さが 2 倍程度に膨潤することを想定すると、本試験では定置するベントナイトの長さを 1.9 m 以下にする必要があると考えられた。

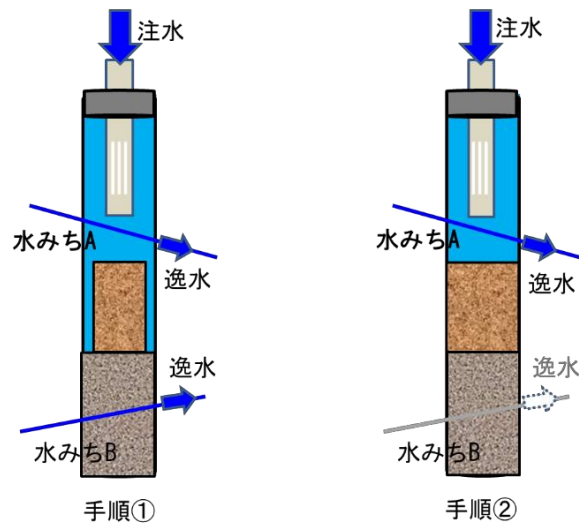


図 4.3-9 閉塞状況確認方法の概念（昨年度の報告書）

4.3.1.6 閉鎖手順

以上のとおり述べたデータから立案された概念設計をまとめると以下のとおりである。

- ✓ 湧水量計測と BTV 検層の結果から、19～20 mabh と 22～23 mabh に湧水を伴う割れ目が発達していると推定された。12～16 mabh には割れ目の存在が確認されない。このことから、孔底～16 mabh までは砂や砂利等で充填する区間とし、ベントナイトで充填する健岩部の区間を 12～16 mabh とする。
- ✓ ベントナイトの搬送方法は、閉塞作業に伴う残置物が発生せず、ベントナイトが搬送中に水と触れない状態で搬送・定置が可能なコンテナ法を採用する。試験場の空間サイズを考慮すると、コンテナの全長は 2 m 以下であり、1 回の挿入で搬送可能なベントナイトは最大で直径 63 mm、長さ 600 mm となる。
- ✓ ベントナイトは、その膨潤後に閉塞区間の下位に分布する湧水割れ目区間の透水係数（ 10^{-9} m/sec オーダー）よりも低い透水係数である 10^{-10} m/sec オーダーにする必要があるため、ペレットではなくブロックを用いる設計とする。期待する低透水性を発揮させるために、成型時のベントナイトブロックの有効モンモリロナイト密度が 1.3 g/cm^3 以上になるよう調製する。
- ✓ 閉塞状況の確認は、ベントナイトの定置前後で同じ位置にパッカーを設置して注水試験を行うことで判断可能であると考えられた。原位置の検層結果から、定置するブロックの長さは 1.9 m 以下にする必要があると想定された。

なお、ベントナイトの充填区間の長さについては、閉塞材を搬送するプローブの閉塞材収納部が設計上 600 mm となる（4.3.2 および付録Ⅲ-C 参照）ため、この整数倍かつ 1.9 m を超えない長さとして、1.8 m にすることとした。

また、ベントナイトの膨潤期間については、ベントナイトが膨潤しきるかどうかという観点ではなく、瑞浪超深地層研究所の別の現場試験および工事工程の制約を受け、最大限確保できる待機期間として約 17 日と設定した。

以上の結果に基づき、孔閉鎖および孔閉鎖確認の手順を設計した。

- ① 孔底から閉塞材の定置予定深度までを砂等で充填する。
- ② 閉塞材挿入プローブを使用して、閉塞材を定置区間へ搬送・定置する。
- ③ 閉塞材の定置後、11.5 mabh にパッカーを設置し、膨潤するまで待機する。
- ④ 膨潤時間が経過した後に、定圧注水試験を実施する。
- ⑤ 孔口まで砂等で充填する。

4.3.2 ボーリング孔に適用可能な試験装置の製作

昨年度の成果を踏まえ、閉塞材を搬送するための閉塞材挿入プローブ（以下「プローブ」）を製作した。製作したプローブを図 4.3-10 に示す。

プローブは、4.3.1.2 のとおり外径 80 mm とした。材質はステンレス製とし、閉塞材の排出機能はピストン構造とした。閉塞材の収納時には、プローブの底をガラス製の蓋で閉鎖し、閉塞材の排出時にガラス製の蓋を残置する設計とした。プローブの製作および稼働試験の結果は付録Ⅲ-C に記す。



図 4.3-10 閉塞材挿入プローブ（左：組立前、右：組立後）

4.3.3 実際のボーリング孔を使用した閉鎖確認試験

4.3.1 で設計した孔閉鎖設計に基づき閉鎖確認試験を実施し、経路閉鎖設計の妥当性確認に必要な知見を収集した。

4.3.3.1 閉塞材の定置と定置深度の確認

閉塞材の定置区間は、設計のとおり 14～16 mabh とした。閉塞材の定置には、4.3.2 で製作したプローブを使用した。高さ約 10 cm のブロック 6 個（約 60 cm）をプローブに組み込み、3 回に分けて 1.8m 分のブロックをボーリング孔内へ搬送・定置した。定置後の閉塞材の上端深度は、塩ビ管を孔内に挿入して確認した。閉塞材の定置予定深度までプローブを挿入し、拡張圧力 2.5 MPa でパッカーを拡張し、プローブ内部に注水して閉塞材を排出した。

閉塞材定置後の閉塞材上端の深度は、1 回目の挿入では 15.25 mabh、2 回目の挿入では 14.63

mabh、3回目の挿入では 14.00 mabh であった。このことから、閉塞材は 15.88～14.00 mabh の深度に定置されたと判断した。

閉塞材の定置後、定圧注水試験用の孔内部装置を 11.5 mabh 以浅に設置してパッカーを拡張し、約 17 日間放置してベントナイトを膨潤させた。

4.3.3.2 閉鎖確認試験（注水試験）

砂および閉塞材を定置する前と、砂を充填後に閉塞材を定置してから 17 日経過後に定圧注水試験を実施し、閉鎖性確認作業の妥当性を評価した。定圧注水試験では、4.3.1.1 で実施した湧水量計測と同じ装置を用いた。

定圧注水試験の結果を図 4.3-11 に示す。

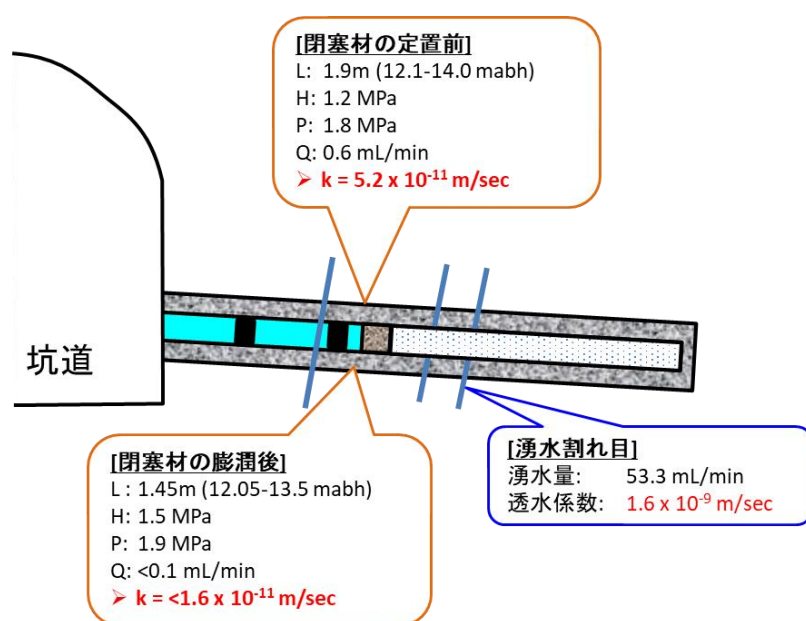


図 4.3-11 閉塞材定置前後の定圧注水試験の結果

L=区間長 (m)、H=区間圧 (MPa)、P=注水圧 (MPa)、Q=注水流量 (mL/min)、k=透水係数 (m/sec)

閉塞材の定置前に、12.1～14.0 mabh を対象としてパッカーで区間を設定して注水試験を実施した。その結果、区間圧は 1.2 MPa、注水圧は 1.8 MPa、注水流量は 0.6 mL/min であった。地盤工学会編⁽²⁴⁾の単孔を利用した定常法の計算式(式(2))を用いて計算された当該区間の透水係数は $5.2 \times 10^{-11} \text{ m/sec}$ となった。この結果は、湧水量計測の結果から算出した同区間の岩盤の透水係数 ($5.3 \times 10^{-11} \text{ m/sec}$; 4.3.1.1 参照)と調和的であった。

閉塞材の膨潤期間経過後には、閉塞材の上部にパッカーを設置し、12.05 mabh 以深を対象とした定圧注水試験を実施した。その結果、区間圧は 1.5 MPa、注水圧は 1.9 MPa、注水流量は 0.1 mL/min 以下であった。試験終了後にブロック上端の深度を確認したところ 13.5 mabh であったことから、試験区間を 12.05～13.5 mabh として式(2)で計算すると、試験区間の透水係数は $1.6 \times 10^{-11} \text{ m/sec}$ 以下と算出された。

閉塞材の定置前後で、対象区間の透水係数が $5.3 \times 10^{-11} \text{ m/sec}$ と $1.6 \times 10^{-11} \text{ m/sec}$ 以下となり、両

者の値に差があるが、定圧注水試験における注水流量が非常に少なかったため、流量の計測誤差が影響している可能性がある。そのため、本項ではこの透水係数の差は考慮しないこととし、当該区間の岩盤の透水係数を 10^{-11} m/sec オーダーとして考える。

4.3.1.1 の湧水量計測の結果、閉塞材定置深度の下部に分布する湧水割れ目の湧水量は 53.3 mL/min であり、透水係数は 10^{-9} m/sec オーダーと算出された。このことから、仮にブロックが低透水性を発揮していなかった場合は、閉塞材の膨潤期間経過後の注水試験で注水流量が大きくなると想定された。しかし、2 回実施した試験の注水流量は 0.1~0.6 mL/min であり、閉塞材の定置前後でほぼ一致した。この結果は、ブロックがパッカーと同程度の閉塞性を発揮したことを示している。

一方で、経路閉鎖設計において設定したブロックの透水係数は 10^{-10} m/sec であり、注水試験から想定された透水係数 (10^{-11} m/sec オーダー) は設計よりも 1 オーダー低かった。注水試験後に測定したブロックの頂部の深度 (13.5 mabh) から計算するとブロックの体積は約 2.4 倍に膨潤したと算出され、事前の予測 (3.5 倍) よりも膨潤量が少なかったと想定される。つまり、ブロックが設計時よりも膨潤しなかったことで密度低下が抑制され、透水性が低くなったと考えられる (付録 III-D 参照)。

4.3.3.3 ボーリング孔の充填

水理試験の終了後に、閉塞材の定置深度から孔口までを砂で充填した。ボーリング孔の充填には 1 号珪砂 (平均粒径 : 2.36 mm) を使用した。ボーリング孔充填時は、塩ビパイプ (VP50) をボーリング孔内に挿入して、珪砂を孔底側から充填するようにした。この充填により、Sandwich- concept に基づいた砂、ベントナイト材料を孔内の地質状況に応じて配置する作業を終了した。

4.3.4 得られた知見について

本試験では、閉塞作業の前に BTV 検層と湧水量計測を実施し、孔内における閉塞材のレイアウトを設計した。また、設計したレイアウトに基づき、コンテナ法を用いてベントナイトをボーリング孔内へ搬送・定置した。定圧注水試験による閉鎖確認の結果、閉塞材はボーリング孔の周辺岩盤と同程度以下の低透水性を発揮していると確認されたことから、本事業の孔空洞の閉鎖設計は適切であったと判断した。

孔空洞の埋戻しでは、孔全体の埋戻し後にその閉塞確認を行うことは困難であるが、個々の閉塞部の閉塞材定置前後に判断指標としてその透水性を注水試験により確認することで、閉塞の妥当性を確認することができると考えられた。なお、本試験では工程上実施できなかったが、埋め戻された孔全体の閉塞性の確認については、孔の上部を一部埋め戻さずに処置し、地下水位を観測することで確認できる可能性がある (地下水位を変化させて、その回復速度に基づき孔全体としての閉塞性を推測する)。

4.4 モニタリング孔を閉塞する際の閉鎖確認のための妥当性評価の判断指標の抽出・整理

ボーリング孔全体を埋め戻した後に孔空洞部の閉塞性を直接的に確認することは困難であり、孔埋戻し前の計画～埋戻し作業の段階で、間接的に孔空洞部の閉塞の妥当性に係る確認を行うことが、閉塞の見通しを確認する上で重要と考えられる。

平成 30 年度事業および平成 31 年度事業において得られた知見に基づいて、割れ目媒体とみなせる岩盤の孔空洞部が適切に閉鎖されたことの妥当性を評価するための判断項目として、以下の点が挙げられる。

① 孔埋戻し計画における間接的な妥当性判断

- A) 孔内の水理地質学的状況に応じて埋戻し材のレイアウトが設計されているか
- B) 閉塞部の透水性は岩盤の透水性と同等以下になる設計か
- C) 閉塞材としてベントナイトを使用する場合は、その膨潤を想定して有効モンモリロナイト密度が設計されているか
- D) ベントナイト、砂等の複数材料を使用する場合は、レイアウト設計・材料設計どおりの性能を発揮するようにベントナイトの膨潤挙動・速度を考慮した閉鎖設計か

② 孔空洞部の埋戻しにおける直接的な妥当性判断

- E) 閉塞材の定置前後に水理試験を実施し、閉塞部が岩盤と同等の透水性以下になっているか

A、B、C は、平成 30 年度事業において実施した文献調査および室内試験から抽出・整理された項目であり、今年度の原位置試験において判断項目として妥当であることを確認した。D は、今年度実施した室内試験において知見を取得した結果、新たに追加された判断項目である。E は、今年度の室内試験の結果を踏まえて平成 30 年度事業において整理された閉鎖確認手順（案）を確認・更新し、さらに原位置試験において実際に閉塞部の透水性を推測した上で、判断項目として追加されたものである。

一方で、現時点で知見が少なく、課題として残されている項目として、以下の点が挙げられる。

- 本事業で確認したレイアウト設計は、花崗岩のような割れ目媒体を対象とした考え方であり、堆積岩など他の岩種の地質条件（透水性や水質等）に応じたレイアウト設計の妥当性に関する科学的・技術的知見の整理が必要である。
- 本事業では、モニタリング装置が抜管された後の孔を想定して原位置試験を行ったが、モニタリング装置やケーシングの抜管などにより孔壁が崩壊している場合では、補孔作業を行う等の措置が必要になる可能性があり、さらなる留意点があると想定される。このような知見の整理は課題として残されている。
- 本事業では、ベントナイトブロック内の気相が残留して連結することで、閉塞部が不均質になることが示されており、それが閉塞の妥当性に与える影響の確認が課題として残されている。また、地震等に伴い閉塞区間に差圧が生じるような長期的な現象について、閉塞の妥当性を判断する上で留意すべきか否か今後確認する必要がある。

- 本事業では、閉塞材の搬送方法が確立していないことから、原位置試験で 30 m ほどの短い孔での試験に基づき知見を取得したが、中深度処分を念頭において、100 m 規模のボーリング孔閉鎖経験に基づいて本事業で得られた知見を再確認していく必要がある。

4.5 まとめ

経路閉鎖設計の妥当性確認に必要な科学的・技術的知見を取得することを目的として、閉塞材としてのベントナイト材料の妥当性を確認するための室内試験を実施するとともに、実際のボーリング孔周囲の地質、水圧、湧水状況などを踏まえたうえで、経路閉鎖設計（ベントナイトや砂などの孔内配置、ベントナイトブロックの仕様、埋戻し材の定置方法、閉塞性の確認方法など）と原位置試験を実施した。地下水に触れない状態で閉塞材を閉塞箇所へ搬送・定置し、孔全体および閉塞区間を対象とした定圧注水試験を行うことで、埋め戻された孔空洞部の閉塞の妥当性を確認する手順を提示した。また、本事業で得られた知見に基づき、孔空洞部を埋め戻し閉塞する際に適切に閉鎖されたことの妥当性を評価するための判断指標を抽出・整理した。

孔空洞部の埋戻し、閉塞については、閉塞部のベントナイトの不均質性が閉塞の妥当性に与える影響について確認することが課題として残されている。また、本事業で対象とした結晶質岩中のボーリング孔以外の地質条件、ボーリング孔空洞部以外を対象とした移行経路となり得る対象の整理と、それらの閉鎖の妥当性確認に係る知見の整理が今後の課題として残されている。

第4章の引用文献

- (1) International Atomic Energy Agency, Classification of Radioactive Waste. IAEA, Vienna, IAEA Safety Standards Series No. GSG-1 (2009).
- (2) International Atomic Energy Agency, Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. IAEA, Vienna, IAEA Safety Standards Series No. SSG-14 (2011).
- (3) Pusch, R., Borgesson, L. and Svemar, C., Äspö Hard Rock Laboratory; Prototype Repository Final Report (Deliverable D36), SKB, IPR-04-27 (2004).
- (4) Garcia-Sineriz, J.L., Mazon, M.R. and Mayor, J.-C., The engineered barrier experiment at Mont Terri Rock Laboratory, ANDRA, Science and Technology Series n° 334 (2008).
- (5) Ericsson et al., A demonstration project on controlling and verifying the excavation-damaged zone: SKB, Experience from the Äspö Hard Rock Laboratory. SKB, R-14-30 (2015).
- (6) DOPAS consortium and Posiva, DOPAS Final Report, DOPAS Project FP7 EURATOM, no.323273. http://www.posiva.fi/files/4526/DOPAS_Final_Report_final_EC.pdf (2020年2月閲覧)
- (7) 中山 雅, 大野宏和, 幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験 350m 調査坑道における人工バリアの設置および坑道の埋め戻し, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2019-007 (2019).
- (8) 日本原子力研究開発機構, 平成 30 年度原子力規制庁委託成果報告書 廃棄物埋設における性能評価手法に関する調査, 日本原子力研究開発機構, pp.4-1 - 4-49 (2019).
- (9) Pusch R. and Ramqvist, G., Borehole project – Final report of Phase 3. SKB, R-07-58 (2007).
- (10) Sanden, T., Dueck, A., Akesson, M., Borgesson, L., Nilsson, U., Goudarzi, R., Jensen, V, Karland, O., Sealing of investigation boreholes, Laboratory investigations of sealing components, SKB, P-17-10 (2017).
- (11) Pusch R. and Ramqvist, G.: Äspö Hard Rock Laboratory, Borehole sealing, preparative steps, design and function of plugs – basic concept, SKB, IPR-04-57 (2004).
- (12) Ratio, T: Borehole plugging experiment in OL-KR24 at Olkiluoto, Finland, Posiva, WR 2006-35 (2006).
- (13) Sandén, T., Nilsson, U., Johannesson, L.-E., Hagman, P. and Nilsson, G., Sealing of investigation boreholes –Full scale field test and large-scale laboratory tests, SKB, TR-18-18 (2018).
- (14) Nagra, SMA/WLB, Bohrlochversiegelung/ -verfüllung SB4a/schräg, Nagra, NTB 02-24 (2002).
- (15) 小峯秀雄, 緒方信英, 砂・ベントナイト混合材料および各種ベントナイトの膨潤特性, 土木学会論文集. No.701/III-58 (2002), pp.373-385.
- (16) 伊藤雅和, 岡本真由美, 鈴木啓三, 柴田雅博, 佐々木康雄: ベントナイトの鉱物組成分析, 日本原子力学会誌. vol.36, no.11 (1994), pp.1055-1058.
- (17) 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, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8430 2004-2005 (2005).
- (18) 菊池広人, 棚井憲治, 松本一浩, 佐藤治夫, 上野健一, 鐵剛志: 緩衝材の飽和透水特性-II-海水性地下水が緩衝材の透水性に及ぼす影響-, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8430 2003-002 (2003).

- (19) 棚井憲治, 菊池広人, 中村邦彦, 田中幸久, 廣永道彦: ベントナイト系材料の標準的室内試験法構築に向けての試験法の現状調査と試験による検討, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2010-025 (2010).
- (20) Dixon, D., Sandén, T., Jonsson, E., Hansen, J., Backfilling of deposition tunnels, Use of bentonite pellets, SKB, P-11-44 (2011).
- (21) 小峯秀雄, 安原一哉, 村上 哲: 人工海水環境下における各種ベントナイトの透水係数, 土木学会論文集 C, vol.67, no.2 (2011), pp.276-287.
- (22) SKB, Long term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation, Main report of the SR-Can project, SKB, TR-06-09 (2006).
- (23) 電力中央研究所, 地層処分技術調査等委託費(地層処分共通技術調査: 岩盤中地下水移行評価技術高度化開発) -岩盤中物質移行特性評価技術高度化調査 報告書 (2011).
- (24) 地盤工学会編, 地盤調査の方法と解説, 丸善 (2004).

5. 廃棄物埋設に関する研究に必要な国内外の情報収集

5.1 MoDeRn2020

平成 31 年 4 月に開催された MoDeRn2020 (Development and demonstration of monitoring strategies and technologies for geological disposal) 国際会議に参加し、放射性廃棄物の処分事業におけるモニタリングに関する最新の情報を収集した。

本会議では、欧州におけるモニタリング戦略に関する議論を中心に、モニタリング方法・項目の選定や、そのステークホルダーとの対話への活用等について議論がなされた。

モニタリングに関わる 5W1H のうち、5W は戦略があるものの、モニタリング項目・方法 (How) はサイトの特性に強く依存し、現時点では確立されない。また、モニタリング項目は事業の進捗に応じてスクリーニングされると想定できるが、その決定が次世代のステークホルダーの考えと直結するため、現時点でスクリーニングされる項目を予測・決定することは難しい。またモニタリングは、関連する知識分野が多岐に亘り、かつ世代を超えて行われるため、適切な知識管理が必要であると提案された。さらに、モニタリング結果はステークホルダーとの信頼関係の構築に有効利用できると考えられるが、事業者と彼らの目線がしばしば一致しない点が課題である。数多くの視点を取り入れ、技術的・社会的観点の両面における問題点、目標や戦略を共通認識して事業の進捗を評価する上で、モニタリングが有効であると考えられる。

フィンランドとスイスにおける規制者側のモニタリングに関して、その 5W1H の考え方は基本的には事業者側と類似するが、事業の段階が進むごとにその計画を見直し更新する必要があると考えられている。一方、処分場閉鎖後の規制要件は、現時点では閉鎖後のモニタリング計画が具体化されておらず、明確な内容は示されていない。モニタリングの技術開発としては、無線式センサーを用いた人工バリアのモニタリングや、原位置試験でのセンサーの長期健全性について報告がなされた。Grimsel 試験場の FEBEX (Full-scale Engineered Barriers Experiment) 試験及び Mont Terri 試験場の FE (Full-scale Emplacement) 試験の結果、長期健全性の観点では光ファイバー式センサーが有効であり、センサー選定の重要性が示された。

5.2 2019年バックエンド部会夏期セミナー

令和元年8月に青森で開催されたバックエンド部会夏期セミナーに参加して、平成30年度の地形変化評価に関する成果を発表するとともに、関連する情報の収集を行った。

ポスターセッションにおいては、計8件の発表があり、「核種移行へ影響を与える隆起・侵食・海水準変動による地形変化評価の検討」と題した発表を行った。

主な質疑・コメントは以下の通り。

Q: 河道移動は、堤防が整備されている現在では、ほとんど生じないのではないか。

A: 堤防により緩慢な蛇行などは抑制されると想定されるが、洪水による氾濫などによって堤防が大規模に決壊し、河道が移動することは今後も可能性があると考えている。

C: 長期的な地形変化による動水勾配の変動など、核種移行評価の観点からこのようなアプローチは重要であり、核種移行までの評価を取りまとめて公表し、これらの重要性を指摘していただきたい。

A: 地形変化に伴う地下水流動解析を海水準変動も考慮して実施して、核種移行までの評価を現在進めており、ご指摘いただいたように論文化して公表したい。

C: 不確かさを持つとはいえ、将来の地形変化の幅として評価できることに感心した。

このほか、夏期セミナーでは以下の講演が行われた。

- ・原子燃料サイクルの現況 (JNFL 小山暁)
- ・低レベル放射性廃棄物処分の現況 (JNFL 宮内善浩)
- ・高レベル放射性廃棄物処分の現況 (NUMO 藤島敦)
- ・研究施設等廃棄物処分の現況 (JAEA 坂本義昭)
- ・福島第一原子力発電所の現況 (NDF 加藤和之)
- ・福島第一原子力発電所 廃棄物分析の現況 (JAEA 駒義和)

また、日本原燃六ヶ所原子燃料サイクル施設見学に参加し、余裕深度埋設の調査坑道を見学した。堆積岩で地表から約100mの深度に位置する調査坑道で、人工バリアを模擬した構造物の試験が実施されている。坑道掘削時に目視で確認したという坑道壁面の亀裂について質問したところ、岩盤の割れ目は非常に少なかったとの回答を得た。

5.3 2019年日本原子力学会秋の大会

令和元年9月に開催された日本原子力学会秋の大会に参加して関連する情報の収集を行った。

山田ら⁽¹⁾から「放射性物質によるコンクリート汚染の機構解明と汚染分布推定に関する研究 (2)Cs と Sr の浸透・溶出特性に及ぼすコンクリート特性の影響に関する実験的検討」について報告があった。彼らは、放射性廃棄物処分に重要な Cs と Sr のコンクリートへの浸透・溶脱挙動について、両者の共存効果、濃度影響、材料影響、コンクリート状態影響を実験的に調べた。その結果、今回の条件では共存効果はなく、濃度依存性も確認されなかったこと、浸透深さは OPC(ポルトランドセメント)のほうが FAC(フライアッシュセメント)よりも大きくなったこと、粘土を含有する川砂 (RS) の使用による Cs 移動の遅延を示した。

・栗飯原ら⁽²⁾から「放射性物質によるコンクリート汚染の機構解明と汚染分布推定に関する研究 (3)アルファ核種の収着挙動に関する基礎試験」について報告があった。彼女らは、プルトニウム溶液にセメント試験片や粉末を浸漬させ、溶液濃度変化からプルトニウムの挙動を評価した。プルトニウムは pH が上がることにより加水分解を起こし沈殿が生じる等液性の影響を大きく受けること、セメント種によるプルトニウム挙動の影響は少なかったが、変質状態により大きな影響を与えることを示した。

・富田⁽³⁾から「放射性物質によるコンクリート汚染の機構解明と汚染分布推定に関する研究 (4)セメント系材料に対する Cs、Sr の収着挙動のモデル化」について報告があった。彼女らは、表面錯体反応を用いた C-S-H と Cs、Sr の相互作用を、C/S 比を変えた合成 C-S-H に対する Cs、Sr の収着試験結果にフィッティングしモデル化を検討した。フィッティングしたモデル中 C/S 比で平衡定数が異なったが、各平衡定数を 50、60 年後のコンクリート中の C/S 比を実際に確認して決定すると言及した。また、モデルを用いて模擬変質試料に対する収着を検討した。その結果、計算結果は試験結果をおおむね再現可能なことを示した。

- (1) 山田 一夫、五十嵐 豪、大澤 紀久、富田 さゆり、芳賀 和子、丸山 一平、駒 義和、放射性物質によるコンクリート汚染の機構解明と汚染分布推定に関する研究 (2)Cs と Sr の浸透・溶出特性に及ぼすコンクリート特性の影響に関する実験的検討, 2019年日本原子力学会秋の大会要旨集, 2B06(2019).
- (2) 栗飯原 はるか、柴田 淳広、駒 義和、富田 さゆり、丸山 一平、放射性物質によるコンクリート汚染の機構解明と汚染分布推定に関する研究 (3)アルファ核種の収

- 着挙動に関する基礎試験, 2019 年日本原子力学会秋の大会要旨集, 2B07(2019).
- (3) 富田 さゆり、丸山 一平、芳賀 和子、山田 一夫、五十嵐 豪、駒 義和、細川 佳史, 放射性物質によるコンクリート汚染の機構解明と汚染分布推定に関する研究
- (4) セメント系材料に対する Cs、Sr の収着挙動のモデル化, 2019 年日本原子力学会秋の大会要旨集, 2B08(2019).

Appendix -I 人工バリアの性能評価に係る科学的・技術的知見の取得

- I-A 文献調査結果の概要
- I-B 二次鉱物の分類に係るフローの前に鉱物リストに抽出されなかった鉱物
- I-C C-A-S-H ゲルモデルの詳細
- I-D 計算に使用した熱力学データ及び速度データ

I-A 文献調査結果の概要

文献名	Rock alteration in alkaline cement waters over 15 years and its relevance to the geological disposal of nuclear waste ⁽¹⁾
著者等	Moyce et al. (2014)
試験系	Dolomite に富んだ岩石 (Quartz、Mica、Dolomite、Calcite、Orthoclase、Hematite、Anatase で構成) をアルカリ溶液に浸漬したバッチ試験
溶液	YNEP : KOH 及び NaOH が支配的 (pH 13.0) ENFG : Ca(OH) ₂ が支配的 (pH 12.2)
温度	70°C
二次鉱物等	両溶液共通 <ul style="list-style-type: none"> • Illite/Smectite の混合層が生成した可能性があり、Smectite は Mg-rich saponite であると考えられる。 • Talc (Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂) の生成も認められた。 ENFG <ul style="list-style-type: none"> • マイナーな鉱物相として、Nontronite 及び Celestite の生成が認められた。
特記事項	<ul style="list-style-type: none"> • 本試験は 15 年にわたる長期間の試験であり、同様の試験を 15 か月間行った試験では、本試験で認められた鉱物の生成は認められなかった。 • 一方、15 か月間の試験で生成が認められた C(A)(K)SH、Apophyllite については、本試験での生成は認められなかった。

文献名	Alteration of compacted bentonite by diffusion of highly alkaline solutions ⁽²⁾
著者等	Fernández et al. (2009)
試験系	FEBEX bentonite (montmorillonite の層間を Mg ²⁺ に置換) にアルカリ溶液を接触させた拡散試験
溶液	YCW : KOH、NaOH、Na ₂ SO ₄ 、Ca(OH) ₂ より構成 (pH13.5) ECW : 飽和 Ca(OH) ₂ 溶液 (pH12.5)
温度	60°C
二次鉱物等	YCW <ul style="list-style-type: none"> ・Montmorillonite の層間に Brucite が入り込んだ構造の鉱物が生成したと推定された。 ・ Brucite の生成が認められ、Gibbsite 及びゼオライト (K-phillipsite、K-merlinoite) の生成が示唆された。 ECW <ul style="list-style-type: none"> ・最大 12 か月の試験で新たな鉱物の生成は認められなかった。
特記事項	アルカリ溶液の pH は界面付近で緩衝されているが、陽イオンは拡散し、montmorillonite の層間陽イオンを交換することが示された。

文献名	Precipitation of chlorite-like structures during OPC porewater diffusion through compacted bentonite at 90°C ⁽³⁾
著者等	Fernández et al. (2013)
試験系	FEBEX bentonite (montmorillonite の層間を Mg ²⁺ に置換) にアルカリ溶液を接触させた拡散試験
溶液	YCW : KOH、NaOH、Na ₂ SO ₄ 、Ca(OH) ₂ より構成 (pH13.5) ECW : 飽和 Ca(OH) ₂ 溶液 (pH12.5)
温度	90°C
二次鉱物等	YCW <ul style="list-style-type: none"> • Montmorillonite の層間に Brucite が入り込んだ構造の鉱物の生成が認められた。 ECW <ul style="list-style-type: none"> • 二次鉱物の生成は確認されなかった。
特記事項	<ul style="list-style-type: none"> • ベントナイト全体に対して、一部の montmorillonite の層間が 1 価の陽イオン (Na⁺及び K⁺) と交換していることが認められた。 • EDX 分析により測定したベントナイト中の K₂O 濃度が 60°C の試験 (Fernandez et al., 2009) のものよりも低くなっていることから、空隙の閉塞による拡散の抑制が示唆された。

文献名	Geochemical conditions for the formation of Mg silicates phases in bentonite and implications for radioactive waste disposal ⁽⁴⁾
著者等	Fernández et al. (2018)
試験系	室内試験 <ul style="list-style-type: none"> • FEBEX bentonite と OPC を接触させた拡散試験 in situ 試験 <ul style="list-style-type: none"> • Grimsel Test Site で FEBEX bentonite とコンクリートが 13 年間接触したものを採取
溶液	室内試験：Spanish clayey formation の塩水を模擬した合成塩水
温度	室内試験：セルの下部（ベントナイト側）から 100℃に加熱
二次鉱物等	両試験共通 <ul style="list-style-type: none"> • Montmorillonite の層間に Brucite が入り込んだ構造の鉱物（Mg ケイ酸塩）の生成が認められた。 室内試験 <ul style="list-style-type: none"> • 2:1 型の 3 八面体 smectite 又は Talc-like mineral の生成が認められた。 • Aragonite と思われる炭酸カルシウムの生成が認められた。 in situ 試験 <ul style="list-style-type: none"> • 1:1 型層状ケイ酸塩の Serpentine の生成が認められた。
特記事項	<ul style="list-style-type: none"> • Mg ケイ酸塩が生成することで、ベントナイト中の空隙が減少するため、アルカリフロントの進行を妨げる影響が示唆された。 • Mg イオンを多量に有している FEBEX bentonite を使用したため、これ以外の Bentonite では、Mg ケイ酸塩が生成しない可能性が示唆された。

文献名	Lime mortar-compacted bentonite-magnetite interfaces: An experimental study focused on the understanding of the EBS long-term performance for high-level nuclear waste isolation DGR concept ⁽⁵⁾
著者等	Cuevas et al. (2016)
試験系	<p>Bentonite</p> <ul style="list-style-type: none"> • FEBEX bentonite 又は同 bentonite を KCl (1 M)-NaCl (1 M)-CaCl₂ (0.5 M)溶液への浸漬を行った Pretreated (aged) bentonite <p>モルタル</p> <ul style="list-style-type: none"> • Quartz-sand と CaO を 2:1 で混合し、固液比 1 で混合 <p>試験ケース (6 ケース)</p> <ul style="list-style-type: none"> • (FEBEX or Pretreated) bentonite を溶液に浸漬 • (FEBEX or Pretreated) bentonite の両端をモルタル及び Magnetite のそれぞれで挟んだものを溶液に浸漬 • モルタルと Pretreated bentonite を接触させたものを溶液に浸漬 • Magnetite と Pretreated bentonite を接触させたものを溶液に浸漬
溶液	Spanish reference clayey formation の間隙水を模擬したもの
温度	60°C
二次鉱物等	<ul style="list-style-type: none"> • FEBEX bentonite の両端をモルタル及び Magnetite のそれぞれで挟んだものでは、モルタルと接触している側で Ca イオン濃度が低下し、Mg イオン濃度が最大となる箇所があり、これにより M-S-H の生成が示唆された。 • モルタルの空隙に Ettringite のような針状結晶の Calcium aluminum sulfate の生成が認められた。また、Monosulfate 又は Carboaluminate といった AFm-like phase の生成も認められた。 • FEBEX bentonite とモルタルの接触では、C-S-H の生成が認められた。 • FEBEX bentonite 及び Pretreated bentonite の両者について、粘土と C-S-H の混合層の生成が示唆された。 • Magnetite の接触では、いずれのケースも変質が認められなかった。
特記事項	<ul style="list-style-type: none"> • FEBEX bentonite では M-S-H の生成した領域が界面から 1-1.5 mm であることに対し、Pretreated bentonite では C-S-H の生成した領域が界面から 3-4 mm であった。このことから、交換性の Mg イオンを有する Bentonite は、M-S-H の生成により、カルシウムのアルカリフロントの進行及び C-S-H の生成を抑制する効果があると考えられる。

文献名	15 years of in situ cement–argillite interaction from Tournemire URL: Characterisation of the multi-scale spatial heterogeneities of pore space evolution ⁽⁶⁾
著者等	Gaboreau et al. (2011)
試験系	Tournemire underground Research Laboratory において、Toarcian argillite と OPC type cement paste が 15 年間接触していたものを採取し、分析した in situ 試験
温度	平均温度は 15°C
二次鉱物等	<ul style="list-style-type: none"> • 接触界面付近の密度が低下していること、連結性の空隙 (connected porosity) が小さくなっていることから、Toarcian argillite の空隙に密度の小さい二次鉱物が生成していることが示唆された。 • Toarcian argillite のセメントとの接触影響は、界面から 1.5-2 cm の範囲で限定されており、空隙を閉塞したものは結晶性の低い C-(A)-S-H であることが示唆された。この空隙の閉塞は、ゼオライトや炭酸塩によるものではないことも併せて示唆している。
特記事項	• BET 測定により、mesopore (2-50 nm) は閉塞されているが、micropore (<2nm) は影響を受けていないことが示された。

文献名	Reactivity of the cement–bentonite interface with alkaline solutions using transport cells ⁽⁷⁾
著者等	Fernández et al (2006)
試験系	FEBEX bentonite と OPC を接触させた状態の通水試験
溶液	NaOH 0.25 M 及び飽和 Ca(OH) ₂
温度	25、60、120°C
二次鉱物等	<p>25°C、NaOH</p> <ul style="list-style-type: none"> ・変質領域は 1 年間で 0.1 mm 未満であり、界面の空隙を閉塞するように Brucite の生成が認められた。 <p>60°C、NaOH</p> <ul style="list-style-type: none"> ・Tobermorite type の C-S-H gel の生成が認められた。 <p>120°C、NaOH</p> <ul style="list-style-type: none"> ・Analcime、C-S-H gel 及び構造に MgO を含む非晶質相の生成が認められた。 <p>25°C、60°C、Ca(OH)₂</p> <ul style="list-style-type: none"> ・界面において、Mg、Ca に富んだ非晶質相が認められた。 ・ほとんどの微細空隙において、鉱物の変質は認められなかった。 <p>120°C、Ca(OH)₂</p> <ul style="list-style-type: none"> ・C-S-H gel の生成が認められたものの、他のケイ酸塩の生成は認められなかった。
特記事項	<ul style="list-style-type: none"> ・溶液の浸透量から算出したベントナイトの空隙量 (pore volume) は、試験時間とともに増加する傾向が認められたものの、透水係数は 1.4 g/cm³ のベントナイトの透水係数として妥当な範囲 (10⁻¹³ m/s) のままであった。 ・120°C、NaOH 溶液については、溶液の flow-path の形成が示唆された。

文献名	高アルカリ環境における圧縮ベントナイト中のシリカ鉱物の溶解 ; X 線 CT 観察および地球化学モデリングによる定量的評価 ⁽⁸⁾
著者等	中林ほか (2013)
試験系	クニゲル V1 (乾燥密度 0.3 Mg/m ³) にアルカリ溶液を通水
溶液	NaOH (0.3 M)
温度	70°C
二次鉱物等	・ Analcime の生成が認められた。また、ベントナイト初期鉱物である Chalcedony の溶解も認められた。
特記事項	・ 透水係数は 10 ⁻¹⁰ m/s オーダーから徐々に増加し 10 ⁻⁹ m/s のオーダーへ移行

文献名	The alkaline reaction of FEBEX bentonite: a contribution to the study of the performance of bentonite/concrete engineered barrier systems ⁽⁹⁾
著者等	Cuevas et al. (2006)
試験系	FEBEX bentonite を使用したバッチ試験及び通水試験を実施 本ページではバッチ試験について記載 ・バッチ試験①、② 液：固＝3：1
溶液	・バッチ試験① NaOH、KOH、Ca(OH) ₂ の単体又は混合溶液 ・バッチ試験② Na-Ca-OH 溶液 (pH 12.90、pH13.26、pH13.52)
温度	・バッチ試験① 35、60、90℃ ・バッチ試験② 25、75、125、200℃
二次鉱物等	バッチ試験① ・35-90℃、Na-K-OH (pH = 13.5)、12 か月の条件で bentonite を浸漬したもの及び 90℃、Na-OH (pH = 13.5)、12 週間の条件でふるい分けした Montmorillonite (<2 μ m fraction) を浸漬したもので Phillipsite type のゼオライトの生成が認められた。 ・90℃、Na-OH、12 週間の条件でふるい分けした Montmorillonite を浸漬したものでは Analcime の生成も認められた。 バッチ試験② ・125-200℃の条件において、Analcime 及び Tobermorite の生成が認められた。 ・25-75℃では、溶液の Ca 濃度は低下しているが、Portlandite 及び nanocrystalline-C-S-H のピークが認められないことから、非晶質の C-S-H gel が生成したと推定している。 ・200℃、NaOH 0.5M (pH 13.52) の高温、高アルカリ条件において、Montmorillonite が Saponite に変質していることが認められた。
特記事項	

文献名	The alkaline reaction of FEBEX bentonite: a contribution to the study of the performance of bentonite/concrete engineered barrier systems ⁽⁹⁾
著者等	Cuevas et al. (2006)
試験系	FEBEX bentonite を使用したバッチ試験及び通水試験を実施 本ページでは通水試験について記載 <ul style="list-style-type: none"> 通水試験① Bentonite 乾燥密度 1.2 g/cm³ と OPC を接触させて通水 通水試験② Bentonite 乾燥密度 1.4 g/cm³ と OPC mortar を接触させて通水
溶液	<ul style="list-style-type: none"> 通水試験① Granitic 組成溶液 (pH8.1) 通水試験② 飽和 Ca(OH)₂、NaOH 0.25 M
温度	<ul style="list-style-type: none"> 通水試験① 35、60、90℃ 通水試験② 25、60、120℃
二次鉱物等	<p>通水試験①</p> <ul style="list-style-type: none"> 35-60℃の試験において、CEC の Ca イオン量が未変質のベントナイトの値 (100 cmol/kg) よりも大きい値 (150-200 cmol/kg) であるのは、非晶質な C-S-H gel が生成したためと考えられる。 バッチ実験で認められたゼオライトの生成は認められなかった。 セメント・ベントナイトの界面において、Mg イオンの濃集が認められた。 <p>通水試験②</p> <ul style="list-style-type: none"> 120℃、NaOH 溶液の試験終了時には、Analcime、C-S-H gel による mesoporosity (数 1 μm の空隙) が閉塞していることが認められた。 25-60℃の条件では、NaOH 溶液の試験で変質が認められるものの、C-S-H の生成は<0.1 mm と限定的であり、この領域内に Tobermorite-like gel、Mg-clay、Brucite も認められた。また、Analcime も界面の一部に認められた。 120℃の条件では、C-S-H gel の層が界面から 1-1.5 mm の領域で認められた。また、この領域を超えた範囲まで Analcime の生成が認められた。
特記事項	<ul style="list-style-type: none"> 通水試験②において、NaOH 溶液を通水した場合は、Ca(OH)₂ 溶液を通水した場合よりも通水量が多くなったが、どちらも 1.4 g/cm³ のベントナイトとして妥当な透水係数 10⁻¹³ m/s を維持していた。 120℃、NaOH 溶液の試験終了時には、透水係数が 2 桁程度大きくなり、アウトプット溶液の pH は pH 12.3 まで上昇した。これは、Montmorillonite の溶解が顕著であり、卓越経路が形成されたためと判断している。

文献名	放射性廃棄物処分におけるベントナイト系材料のアルカリ溶液による変質挙動（その1） ⁽¹⁰⁾
著者等	横山ほか（2010）
試験系	クニゲル V1 を 1.6 Mg/m ³ に圧縮成形し、アルカリ溶液への浸漬と透水試験を繰り返し行ったもの
溶液	NaOH（pH 12、14）、KOH（pH 12、14）又は Ca(OH) ₂ （pH 12）
温度	60℃
二次鉱物等	<ul style="list-style-type: none"> ・ NaOH（pH 14）では、Analcime 及び Phillipsite の生成が認められた。 ・ KOH（pH 14）では、Phillipsite の生成が認められた。 ・ NaOH 及び KOH（どちらも pH 14）では、Montmorillonite の Beidellite 化が認められた。 ・ KOH を用いた試験では、Montmorillonite の層間が K イオンとなった非膨潤性の Illite に類似した性質を持つ層が認められた（層間イオンを再度交換すると膨潤性を有する。）。
特記事項	<ul style="list-style-type: none"> ・ NaOH（pH 12）及び Ca(OH)₂ を用いた試験の透水係数は、初期からほぼ変わらず 3×10^{-13} m/s 程度 ・ KOH（pH 12）を用いた試験の透水係数は、4.5×10^{-13} m/s から 1.2×10^{-12} m/s へ増大 ・ NaOH 及び KOH（どちらも pH 14）を用いた試験の透水係数は、NaOH が 3.7×10^{-12} m/s から 2.7×10^{-11} m/s、KOH が 7.8×10^{-12} m/s から 2.6×10^{-11} m/s に増大

文献名	放射性廃棄物処分におけるベントナイト系材料のアルカリ溶液による変質挙動（その2） ⁽¹¹⁾
著者等	横山ほか（2011）
試験系	Volclay bentonite（未処理（Na型）又はCa交換処理を行ったもの）（15 wt%）に珪砂（85 wt%）を混合し、乾燥密度 1.55 Mg/m ³ に圧縮成形したのに対し、アルカリ溶液への浸漬と通水を繰り返し行ったもの
溶液	NaOH（pH 13.3±0.1）又は Ca(OH) ₂ （pH 12.0±0.1）
温度	50℃
二次鉱物等	<ul style="list-style-type: none"> ・ Ca(OH)₂ では C-S-H（若干量の Al を含む。）の生成が認められた。 ・ NaOH 及び Ca(OH)₂ の両方で、Montmorillonite の Beidellite 化が認められた。
特記事項	<ul style="list-style-type: none"> ・ NaOH では、試験開始から 21 日以降から連続的に透水係数が増加した。 ・ Ca(OH)₂ では、試験開始から連続的に透水係数が低下し、試験期間中に透水係数が 2 桁以上低下した。

文献名	Formation of C-A-S-H phases from the interaction between concrete or cement and bentonite ⁽¹²⁾
著者等	Fernández et al. (2016)
試験系	拡散試験、バッチ試験
溶液	<ul style="list-style-type: none"> ・ 拡散試験① コンクリートと FEBEX bentonite を接触 ・ 拡散試験② Lime mortar (quartz-sand/CaO を 2:1 で混合) と FEBEX bentonite を接触 ・ バッチ試験 FEBEX bentonite (粉末、<2μm mont.) を Ca(OH)₂ 溶液に浸漬
温度	<ul style="list-style-type: none"> ・ 拡散試験① ベントナイトの底部から 100°Cで加熱 (コンクリートとの界面の温度は~40°C) ・ 拡散試験② 60°C ・ バッチ試験 60°C及び 120°C
二次鉱物等	<ul style="list-style-type: none"> ・ 主に針状結晶の C-A-S-H の生成が認められた。 ・ その他鉱物については、Cuevas et al. (2016)⁽⁵⁾を参照
特記事項	<ul style="list-style-type: none"> ・ 60°Cで行われた実験 (拡散試験②及びバッチ試験) で生成した C-A-S-H の Ca/Si 比は Tobermorite (Ca/Si=0.66) と Jennite (Ca/Si=1.33) の範囲におおむね入る。 ・ 傾向として、温度が高くなると C-A-S-H 中の Al と Si 量が増加する。

文献名	Formation of Fe- and Mg-rich smectite under hyperalkaline conditions at Narra in Palawan, the Philippines ⁽¹³⁾
著者等	Shimbashi et al. (2018)
試験系	高アルカリ性の地下水と碎屑性堆積物との反応が認められるフィールド
二次鉱物等	・高アルカリ性の地下水と碎屑性堆積物との反応により、非晶質な M-S-H を経て、Mg-rich smectite が生成した可能性が提示された。
特記事項	・高アルカリ環境下における Smectite の溶解、変質に伴う二次鉱物として M-S-H が生成されることは室内試験等で示されているが、生成した M-S-H が再度 Smectite (当初とは別の構造) になる可能性を示した。
検証	<ul style="list-style-type: none"> ・浅部の地層では Smectite よりも M-S-H 等の含有量が多い一方、より長い期間高アルカリ性の地下水と接触していると考えられる深部の地層では Smectite の含有量が多くなっていることから、M-S-H 等を経由して Smectite へ変質したものと判断している。 ・しかしながら、M-S-H 等を前駆体として Smectite へ変質する条件は明確となっていない。

文献名	Minimal alteration of montmorillonite following long-term interaction with natural alkaline groundwater: Implications for geological disposal of radioactive waste ⁽¹⁴⁾
著者等	Milodowski et al. (2016)
試験系	蛇紋岩化作用により生じた高アルカリ性の地下水とベントナイトの接触が認められるフィールド
二次鉱物等	・ 繊維状の Mg に富んだ鉱物及び Palygorskite-like (又は Fe に富んだ Palygorskite) 構造の鉱物の生成が認められた。
特記事項	・ 高アルカリ性の地下水とベントナイトの接触期間は 1 万年～100 万年と推定されるが、ベントナイトの変質は限定的としている。
検証	<ul style="list-style-type: none"> ・ Palygorskite は Smectite からの変質により生成したものと考えられるが、Palygorskite の生成には pH 12 以上が必要であるが、そのような条件に達していない点が疑問点として残っている。 ・ 非晶質シリカの溶解による高い Si 濃度の間隙水が存在することで、Smectite の変質が生じた可能性も考えられることを示唆している。

Appendix I-A の参考文献

- (1) Moyce E. B. A., Rochelle C., Morris K., Milodowski A. E., Chen X., Thornton S., Small J. S., Shaw S., Rock alteration in alkaline cement waters over 15 years and its relevance to the geological disposal of nuclear waste, *Applied Geochemistry*, 50, 2014, pp. 91-105.
- (2) Fernández R., Mäder U. K., Rodríguez M., Vigil de la Villa R., Cuevas J., Alteration of compacted bentonite by diffusion of highly alkaline solutions, *European Journal of Mineralogy*, 21, 2009, pp. 725-735.
- (3) Fernández R., Vigil de la Villa R., Ruiz A. I., García R., Cuevas J., Precipitation of chlorite-like structures during OPC porewater diffusion through compacted bentonite at 90°C, *Applied Clay Science*, 83-84, 2013, pp. 357-367.
- (4) Fernández R., González-Santamaría D., Angulo M., Torres E., Ruiz A. I., Turrero M. J., Cuevas J., Geochemical conditions for the formation of Mg silicates phases in bentonite and implications for radioactive waste disposal, *Applied Geochemistry*, 93, 2018, pp. 1-9.
- (5) Cuevas J., Ruiz A. I., Fernández R., Torres E., Escibano A., Regadío M., Turrero M. J., Lime mortar-compact bentonite-magnetite interfaces: An experimental study focused on the understanding of the EBS long-term performance for high-level nuclear waste isolation DGR concept, *Applied Clay Science*, 124-125, 2016, pp. 79-93.
- (6) Gaboreau S., Prêt D., Tinseau E., Claret F., Pellegrini D., Stammose D., 15 years of *in situ* cement-argillite interaction from Tournemire URL: Characterisation of the multi-scale spatial heterogeneities of pore space evolution, *Applied Geochemistry*, 26, 2011, pp. 2159-2171.
- (7) Fernández R., Cuevas J., Sánchez L., Vigil de la Villa R., Leguey S., Reactivity of the cement-bentonite interface with alkaline solutions using transport cell, *Applied Geochemistry*, 21, 2006, pp. 977-992.
- (8) 中林亮, 木嶋達也, 塚田康元, 佐藤努, 大竹翼, 金子勝比古, 米田哲朗, 高アルカリ環境における圧縮ベントナイト中のシリカ鉱物の溶解; X線 CT 観察および地球化学モデリングによる定量的評価, *粘土科学*, 第 52 巻, 2013, pp. 9-22.
- (9) Cuevas J., Vigil de la Villa R., Ramírez S., Sánchez L., Fernández R., Leguey S., The alkaline reaction of FEBEX bentonite: a contribution to the study of the performance of bentonite/concrete engineered barrier systems, *Journal of Iberian Geology*, 32, 2006, pp. 151-174.
- (10) 横山信吾, 中村邦彦, 放射性廃棄物処分におけるベントナイト系材料のアルカリ溶液による変質挙動 (その 1) —アルカリ性の各種溶液に浸漬した締固めベントナイトの鉱物学的な変質と透水性の変化—, *電力中央研究所報告*, 研究報告: N09015, 2010.
- (11) 横山信吾, 中村邦彦, 田中幸久, 廣永道彦, 放射性廃棄物処分におけるベントナイト系材料のアルカリ溶液による変質挙動 (その 2) —アルカリ溶液の種類がベントナイト混合土の透水性へ及ぼす影響—, *電力中央研究所報告*, 研究報告: N10037, 2011.
- (12) Fernández R., Ruiz A. I., Cuevas J., Formation of C-A-S-H phases from the interaction between concrete or cement and bentonite, *Clay Minerals*, 51, 2016, pp. 223-235.
- (13) Shimbashi M., Sato T., Yamakawa M., Fujii N., Otake T., Formation of Fe- and Mg-Rich Smectite

under Hyperalkaline Conditions at Narra in Palawan, the Philippines, *Minerals*, 8, 155, 2018.

- (14) Milodowski A. E., Norris S., Alexander W. R., Minimal alteration of montmorillonite following long-term interaction with natural alkaline groundwater: Implications for geological disposal of radioactive waste, *Applied Geochemistry*, 66, 2016, pp. 184-197.

I-B 二次鉱物の分類に係るフローの前に鉱物リストに抽出されなかった鉱物

2.3.4 項において、抽出された二次鉱物の分類に係るフローの前に鉱物リストに抽出されなかった鉱物と、抽出されなかった根拠について示す。

	鉱物名	分子式	抽出されなかった根拠
ゼオライト	Mesolite	$\text{Na}_2\text{Ca}_2(\text{Al}_6\text{Si}_9\text{O}_{30})(\text{H}_2\text{O})_8$	モンモリロナイトよりも Si/Al が小さいため(1) 天然、あるいは実験から高温で生成あるいは高温でのみ安定とされているため(1)
	Scolecite	$\text{Ca}_8(\text{Al}_{16}\text{Si}_{24}\text{O}_{80})(\text{H}_2\text{O})_{24}$	モンモリロナイトよりも Si/Al が小さいため(1) 天然、あるいは実験から高温で生成あるいは高温でのみ安定とされているため(1)
	Natrolite	$\text{Na}_2(\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10})(\text{H}_2\text{O})_2$	モンモリロナイトよりも Si/Al が小さいため(1) 天然において少数例のため(1)
	Thomsonite	$\text{Na}_4\text{Ca}_8(\text{Al}_{20}\text{Si}_{20}\text{O}_{80})(\text{H}_2\text{O})_{24}$	モンモリロナイトよりも Si/Al が小さいため(1)
	Wairakite	$\text{Ca}_8(\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96})(\text{H}_2\text{O})_{16}$	天然、あるいは実験から高温で生成あるいは高温でのみ安定とされているため(1) 天然において少数例のため(1)
	Dachiardite	$\text{Ca}_2\text{Al}_4\text{Si}_{20}\text{O}_{48}(\text{H}_2\text{O})_{18}$	天然において生成頻度が低く、性状、生成条件がよくわかっていないため(1)
	Yugawaralite	$\text{Ca}_2(\text{Al}_4\text{Si}_{12}\text{O}_{32})(\text{H}_2\text{O})_8$	天然において生成頻度が低く、性状、生成条件がよくわかっていないため(1)
	Mordenite	$\text{Ca}_4(\text{Al}_8\text{Si}_{40}\text{O}_{96})(\text{H}_2\text{O})_{28}$	天然において少数例のため(1)
Erionite	$\text{K}_{10}(\text{Al}_{10}\text{Si}_{26}\text{O}_{72})(\text{H}_2\text{O})_{28}$	天然において少数例のため(1)	
長石	Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	天然、あるいは実験から高温で生成あるいは高温でのみ安定とされているため(1)
	Anorthite	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	天然、あるいは実験から高温で生成あるいは高温でのみ安定とされているため(1)
スメクタイト	Nontronite	$\text{Ca}_{0.165}(\text{Fe}_2)(\text{Al}_{0.33}\text{Si}_{3.67})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	NA において生成が確認されているものの(2)、今回の検討では鉄成分は含まれないため
硫酸塩	Thaumasite	$\text{Ca}_6(\text{Si}(\text{OH})_6)_2(\text{SO}_4)_2(\text{CO}_3)_2(\text{H}_2\text{O})_{24}$	硫酸塩濃度が高く、炭酸イオンが継続的に供給され、かつ、環境温度が低いという条件がすべて満たされたときに C-S-H や Portlandite と反応して生成するとされているため(3) 国内では報告例がなく、発生の可能性も低いと推定されるため(4)

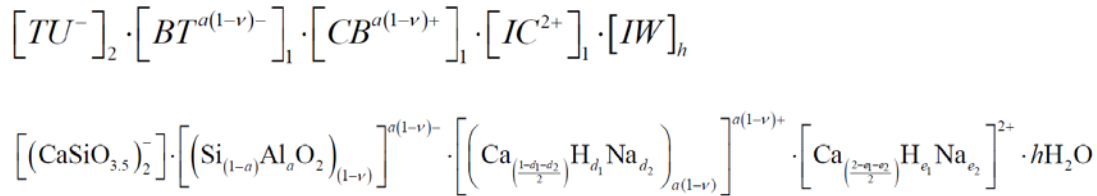
Appendix I-B の参考文献

- (1) 小田ほか, 緩衝材の鉱物学的長期変遷シナリオ, JNC TN8400 2005-020 (2005).
- (2) 公益財団法人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 T R U 廃棄物処理・処分技術高度化開発報告書, (2018).
- (3) 大脇英司, 平尾空, 二戸信和, 硫酸塩浸食に抵抗できるコンクリートの開発, 大成建設技術センター報, 40 (2007).
- (4) 吉田夏樹, 山田一夫, ソーマサイト生成硫酸塩劣化一劣化機構の整理とリスクの評価方法のレビュー, コンクリート工学, 43(2005) 20-27.

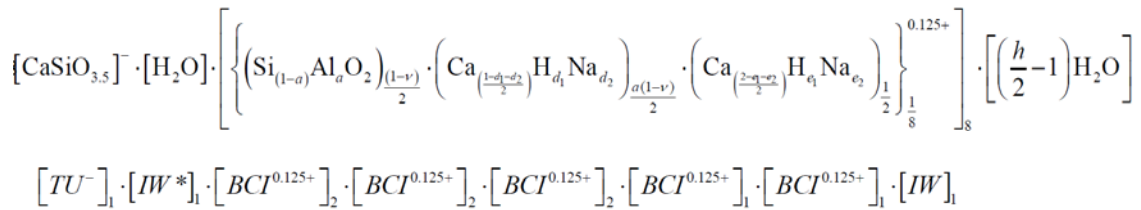
I-C C-A-S-H ゲルモデルの詳細

現行の鉱物リストにおいて、C-A-S-H 型鉱物として設定している鉱物は **Katoite** である。C-S-H ゲルに Al イオンが取り込まれた C-A-S-H ゲルの生成は室内試験等で認められているが、C-A-S-H ゲルモデルは国内外の機関等の鉱物モデルにも取込まれていない。C-A-S-H ゲルモデルの取り込みを検討するため、現状報告されている C-A-S-H ゲルモデルについて調査を行った。

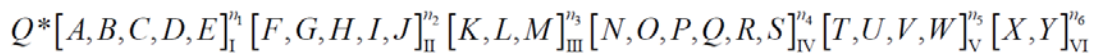
Myers et al. (2014)⁽¹⁾では、図 A-1 のような C-(N-)A-S-H 構造を基に、副格子 (sublattice) モデルを作成している。C-(N-)A-S-H を表現するため、BT サイトに Al が置換し、CB サイト及び IC サイトでは Ca、H、Na で電荷バランスをとっている。



上記式を基に、5つの BCI サイト (BCI = BT + CB + IC) を有する固溶体モデルを作成している。



端成分 (End-member) の設定のため、6種類の異なる組成が5つの BCI サイトに入ることを想定しており、5つのサイトに入ることができるそれぞれの組成及びその配置は以下のとおりである。



$\text{Ca}_{0.0625}\text{O}_{0.0625}\text{H}_{0.125}^{0.125+}$	A, F, K, N, T
$\text{Si}_{0.0625}\text{O}_{0.125}\text{H}_{0.125}^{0.125+}$	B, G, L, O, U
$\text{Si}_{0.0625}\text{O}_{0.125}\text{Na}_{0.125}^{0.125+}$	D, I, M, Q, V
$\text{Al}_{0.0625}\text{O}_{0.125}\text{H}_{0.1875}^{0.125+}$	C, H, P
$\text{Al}_{0.0625}\text{Na}_{0.0625}\text{O}_{0.125}\text{H}_{0.125}^{0.125+}$	E, J, R
$\text{Ca}_{0.0625}\text{O}_{0.0625}\text{Na}_{0.125}^{0.125+}$	S, W

上記の5つの BCI サイトを埋めたもののうち、以下に示す8つのものを端成分として選定している。

End-member	Chemical formula
5CA	$(\text{CaO})_{1.25}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{0.125}(\text{SiO}_2)_1(\text{H}_2\text{O})_{1.625}$
INFCA	$(\text{CaO})_1(\text{Al}_2\text{O}_3)_{0.15625}(\text{SiO}_2)_{1.1875}(\text{H}_2\text{O})_{1.65625}$
5CNA	$(\text{CaO})_{1.25}(\text{Na}_2\text{O})_{0.25}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{0.125}(\text{SiO}_2)_1(\text{H}_2\text{O})_{1.375}$
INFCNA	$(\text{CaO})_1(\text{Na}_2\text{O})_{0.34375}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{0.15625}(\text{SiO}_2)_{1.1875}(\text{H}_2\text{O})_{1.3125}$
INFCN	$(\text{CaO})_1(\text{Na}_2\text{O})_{0.3125}(\text{SiO}_2)_{1.5}(\text{H}_2\text{O})_{1.1875}$
T2C	$(\text{CaO})_{1.5}(\text{SiO}_2)_1(\text{H}_2\text{O})_{2.5}$
T5C	$(\text{CaO})_{1.25}(\text{SiO}_2)_{1.25}(\text{H}_2\text{O})_{2.5}$
TobH	$(\text{CaO})_1(\text{SiO}_2)_{1.5}(\text{H}_2\text{O})_{2.5}$

当該 C-(N-)A-S-H ゲルモデルを用いて、OPC 及びスラグ混合セメントの水和反応のシミュレーションを行った例がある (Elakneswaran et al. (2016)⁽²⁾)。このシミュレーションでは上記端成分のうち、C-S-H 及び C-A-S-H に関係するものとして、5CA、INFCA、T2C、T5C 及び TobH の 5 つ並びに C-S-H の端成分として $(\text{CaO})_{1.667}(\text{SiO}_2):2.1\text{H}_2\text{O}$ (Lothenbach et al. (2008)⁽³⁾) を加えた計 6 つの端成分を仮定した固溶体モデルを採用している。シミュレーション結果として、実験結果を比較的良く再現できているが、実験結果と比べて、C-S-H 及び C-A-S-H の生成量が過小評価となること、Ca/Si 比又は Al/Si 比が実験値と差があることが報告されている。

上記モデルのほか、Roosz et al. (2018)⁽⁴⁾では、C-A-S-H ゲルの合成実験から組成及び熱力学データを取得し、Ca/Si 比 0.7~1.6、Al/Si 比 0、0.02、0.05、0.1 の範囲を表現した C-A-S-H モデルを作成している。C-S-H、C-A-S-H 等の安定相図を示しており、Katoite、 C_3AH_6 (Hydrogarnet) 及び Straetlingite を追加すると C-A-S-H の安定領域が狭まることを示している。また、C-A-S-H ゲルと比べて、ゼオライトがより熱力学的に安定な鉱物であることを示しているが、C-A-S-H ゲルの生成速度が大きい等の理由により、ゼオライトと C-A-S-H ゲルが共存を示唆している。

新たに導入する C-A-S-H ゲルモデルについて、その妥当性を検証するため、現行の C-S-H ゲルモデルとの比較を行った。比較として、生成する C-(A-)S-H ゲルの Ca/Si 比に対応する液相の Si 濃度、Ca 濃度及び pH について比較を行った (図 A-2)。なお、C-S-H ゲルモデルとの比較のため、液相に Al イオンは含まれていない。それぞれのモデルで取りうる Ca/Si 比の幅は異なるものの、おおむね同様の傾向を示しており、C-S-H ゲルの溶解挙動を C-A-S-H ゲルモデルで再現することが可能であると判断した。

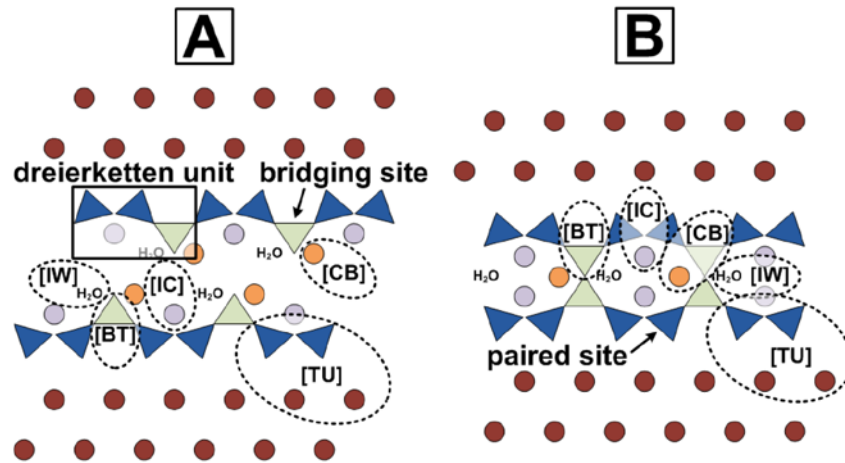


図 A-1 C-(N-)A-S-H の構造の模式図⁽⁸⁰⁾ (BT : 架橋四面体、CB : 架橋四面体に対する層間電荷バランス種、IC : TU サイトに対する層間電荷バランス種、IW : 層間水)

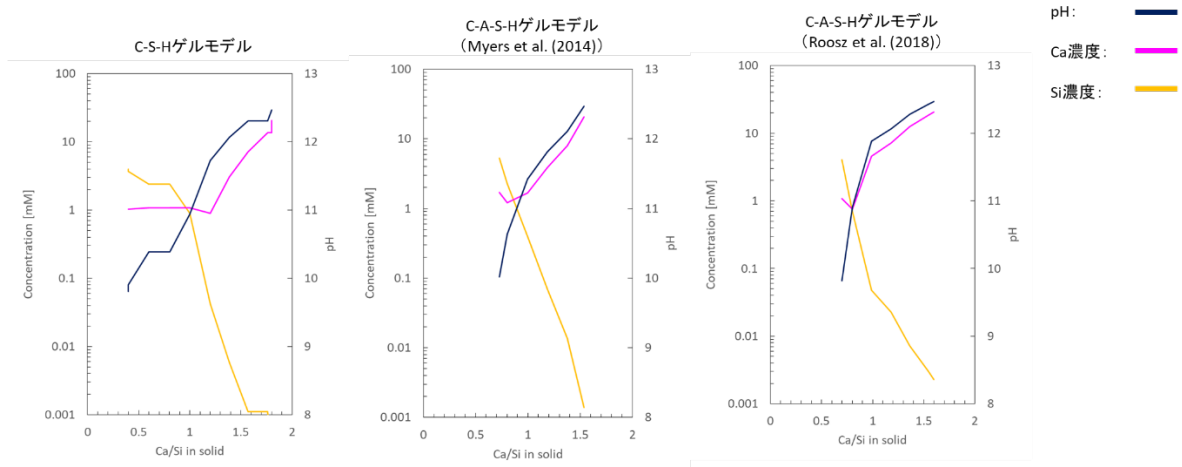


図 A-2 C-S-H ゲルモデル及び C-A-S-H ゲルモデルの比較

Appendix I-C の参考文献

- (1) Myers R. J., Bernal S. A., Provis J. L., A thermodynamic model for C-(N-)A-S-H gel: CNASH ss. Derivation and validation, Cement and Concrete Research, 66, 2014, pp. 27-47.
- (2) Elakneswaran Y., Owaki E., Miyahara S., Ogino M., Maruya T., Nawa T., Hydration study of slag-blended cement based on thermodynamic considerations, Construction and Building Materials, 124, 2016, pp. 615-625.
- (3) Lothenbach B., Matschei T., Möschner G., Glasser F. P., Thermodynamic modelling of the effect of temperature on the hydration and porosity of Portland cement, Cement and Concrete Research, 38, 2008, pp. 1-18.
- (4) Roosz C., Vieillard P., Blanc P., Gaboreau S., Gailhanou H., Braithwaite D., Montouillout V., Denoyel R., Henocq P., Madé B., Thermodynamic properties of C-S-H, C-A-S-H and M-S-H phases: Results from direct measurements and predictive modelling, Applied Geochemistry, 92, 2018, pp. 140-156.

I-D 計算に使用した熱力学データ及び速度データ

使用した熱力学データの一覧を記載する。

表 App. I-D-1 計算に使用した熱力学データ (1/3)

	鉱物名	化学式	反応式	Log K	モル体積 (cm ³ /mol)		
スメクタイト	Na-Montmorillonite*	Na _{0.34} Mg _{0.34} Al _{1.66} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	Na-Montmorillonite + 6H ⁺ + 4H ₂ O = 1.66Al ³⁺ + 0.34Mg ²⁺ + 0.34Na ⁺ + 4H ₄ SiO ₄	3.394	(1)	133.98	(1)
	Ca-Montmorillonite*	Ca _{0.17} Mg _{0.34} Al _{1.66} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	Ca-Montmorillonite + 6H ⁺ + 4H ₂ O = 1.66Al ³⁺ + 0.34Mg ²⁺ + 0.17Ca ²⁺ + 4H ₄ SiO ₄	5	(1)	135.59	(1)
	Beidellite(Na)	Na _{0.34} Al _{2.34} Si _{3.66} O ₁₀ (OH) ₂	Beidellite(Na) + 7.36H ⁺ + 2.64H ₂ O = 2.34Al ³⁺ + 0.34Na ⁺ + 3.66H ₄ SiO ₄	3.35	(1)	132.5	(1)
	Saponite(Na)	Na _{0.33} Mg ₃ Al _{0.33} Si _{3.67} O ₁₀ (OH) ₂	Saponite(Na) + 7.32H ⁺ + 2.68H ₂ O = 0.33Al ³⁺ + 3Mg ²⁺ + 0.33Na ⁺ + 3.67H ₄ SiO ₄	28.91	(1)	140.96	(1)
ケイ酸塩	Illite	K _{0.85} Mg _{0.25} Al _{2.3} Si _{3.5} O ₁₀ (OH) ₂	Illite + 8.4H ⁺ + 1.6H ₂ O = 2.35Al ³⁺ + 0.85K ⁺ + 0.25Mg ²⁺ + 3.4H ₄ SiO ₄	11.011	(1)	140.07	(1)
	Muscovite	K(Al ₂)(AlSi ₃)O ₁₀ (OH) ₂	Muscovite + 10H ⁺ = 3Al ³⁺ + K ⁺ + 3H ₄ SiO ₄	11.34	(1)	140.81	(1)
	Kaolinite (AS ₂ H ₂)	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	Kaolinite + 6H ⁺ = 2Al ³⁺ + 2H ₄ SiO ₄ + H ₂ O	6.471	(1)	99.34	(1)
	Pyrophyllite (AS ₄ H)	Al ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	Pyrophyllite + 6H ⁺ + 4H ₂ O = 2Al ³⁺ + 4H ₄ SiO ₄	-0.453	(1)	128.1	(1)
Mgケイ酸塩	Clinochlore	Mg ₅ Al(AlSi ₃)O ₁₀ (OH) ₈	Clinochlore + 16H ⁺ = 2Al ³⁺ + 5Mg ²⁺ + 3H ₄ SiO ₄ + 6H ₂ O	61.682	(1)	211.47	(1)
	Sepiolite	Mg ₄ Si ₆ O ₁₅ (OH) ₂ ·6H ₂ O	Sepiolite + 8H ⁺ + H ₂ O = 4Mg ²⁺ + 6H ₄ SiO ₄	31.42	(1)	285.5	(1)
	MSH (0.82)	Mg _{0.82} SiO _{2.385} (OH) _{0.87}	MSH (0.82) + 0.745H ₂ O + 1.64H ⁺ = 0.82Mg ²⁺ + H ₄ SiO ₄	9.12	(2)	28.8	(2)
	MSH (1.07)	Mg _{1.07} SiO _{2.075} (OH) _{1.99}	MSH (1.07) + 2.14H ⁺ = 1.07Mg ²⁺ + H ₄ SiO ₄	12.73	(2)	33.7	(2)
二酸化ケイ素	Quartz*2	SiO ₂	Quartz + 2H ₂ O = H ₄ SiO ₄	3.394	(1)	22.69	(1)
	Chalcedony	SiO ₂	Chalcedony + 2H ₂ O = H ₄ SiO ₄	-3.453	(1)	22.69	(1)
長石	K-feldspar	KAlSi ₃ O ₈	K-feldspar + 4H ⁺ + 4H ₂ O = K ⁺ + Al ³⁺ + 3H ₄ SiO ₄	0.302	(3)	108.87	(3)
	Albite	NaAlSi ₃ O ₈	Albite + 4H ⁺ + 4H ₂ O = Al ³⁺ + Na ⁺ + 3H ₄ SiO ₄	4.14	(1)	100.43	(1)
水酸化物	Portlandite	Ca(OH) ₂	Portlandite + 2H ⁺ = Ca ²⁺ + 2H ₂ O	22.809	(1)	33.06	(1)
	Brucite	Mg(OH) ₂	Brucite + 2H ⁺ = Mg ²⁺ + 2H ₂ O	17.109	(1)	24.63	(1)
	Gibbsite	Al(OH) ₃	Gibbsite + 3H ⁺ = Al ³⁺ + 3H ₂ O	7.734	(1)	31.96	(1)
炭酸塩	Calcite	CaCO ₃	Calcite = CO ₃ ²⁻ + Ca ²⁺	1.85	(1)	36.93	(1)
	Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂	CaMg(CO ₃) ₂ + 2H ⁺ = 2HCO ₃ ⁻ + Ca ²⁺ + Mg ²⁺	3.533	(1)	64.37	(1)
硫酸塩	Gypsum	CaSO ₄ ·2H ₂ O	Gypsum = Ca ²⁺ + SO ₄ ²⁻ + 2H ₂ O	-4.607	(1)	74.69	(1)
	Celestite	SrSO ₄	Celestite = SO ₄ ²⁻ + Sr ²⁺	-6.62	(1)	46.25	(1)
	Barite	BaSO ₄	Barite = Ba ²⁺ + SO ₄ ²⁻	-10.05	(1)	52.1	(1)

* モンモリロナイトの溶解は、TRU2 次レポートにおいて使用された溶解速度式を設定した⁽⁴⁾。

Log K の値は、飽和度項を計算するために使用した。

*2 Quartz の溶解速度は、Knauss and Worley の溶解速度式を設定した⁽⁵⁾。Log K の値は、飽和度項を計算するために使用した。

表 App. I-D-1 計算に使用した熱力学データ (1/3) 計算に使用した熱力学データ (2/3)

	鉱物名	化学式	反応式	Log K	モル体積 (cm ³ /mol)		
					(6)	(7)	(7)
C-S-H型	C-S-H (1.8)	CaSi _{0.556} O _{2.112} •1.047H ₂ O	C-S-H (1.8) + 2H ⁺ = Ca ²⁺ + 0.556H ₄ SiO ₄ + 0.935H ₂ O	17.597	(6)	50.5	(7)
	C-S-H (1.5)	CaSi _{0.667} O _{2.334} •1.056H ₂ O	C-S-H (1.5) + 2H ⁺ = Ca ²⁺ + 0.667H ₄ SiO ₄ + 0.722H ₂ O	16.643	(6)	57.3	(7)
	C-S-H (1.3)	CaSi _{0.769} O _{2.538} •1.065H ₂ O	C-S-H (1.3) + 2H ⁺ = Ca ²⁺ + 0.769H ₄ SiO ₄ + 0.527H ₂ O	15.87	(6)	63.2	(7)
	C-S-H (1.1)	CaSi _{0.909} O _{2.818} •1.076H ₂ O	C-S-H (1.1) + 2H ⁺ = Ca ²⁺ + 0.909H ₄ SiO ₄ + 0.258H ₂ O	14.983	(6)	70.9	(7)
	C-S-H (1.0)	CaSiO ₃ •1.084H ₂ O	C-S-H (1.0) + 2H ⁺ = Ca ²⁺ + H ₄ SiO ₄ + 0.084H ₂ O	14.514	(6)	75.8	(7)
	C-S-H (0.9)	CaSi _{1.111} O _{3.222} •1.093H ₂ O	C-S-H (0.9) + 0.129H ₂ O + 2H ⁺ = Ca ²⁺ + 1.111H ₄ SiO ₄	14.061	(6)	81.6	(7)
	C-S-H (0.833)	Ca _{0.833} SiO _{2.833} •0.917H ₂ O	C-S-H (0.833) + 0.25H ₂ O + 1.666H ⁺ = 0.833Ca ²⁺ + H ₄ SiO ₄	11.436	(6)	71.8	(7)
	C-S-H (0.6)	Ca _{0.6} SiO _{2.6} •0.661H ₂ O	C-S-H (0.6) + 0.739H ₂ O + 1.2H ⁺ = 0.6Ca ²⁺ + H ₄ SiO ₄	7.312	(6)	65.4	(7)
	C-S-H (0.4)	Ca _{0.4} SiO _{2.4} •0.440H ₂ O	C-S-H (0.4) + 1.16H ₂ O + 0.8H ⁺ = 0.4Ca ²⁺ + H ₄ SiO ₄	3.907	(6)	59.3	(7)
	Tobermorite	Ca ₅ Si ₆ O ₁₆ (OH) ₂ (H ₂ O) _{9.5}	Tobermorite + 10H ⁺ = 5Ca ²⁺ + 6H ₄ SiO ₄ + 3.5H ₂ O	62.939	(1)	351.3	(1)
	Jennite	Ca ₉ Si ₆ O ₁₆ (OH) ₁₀ (H ₂ O) ₆	Jennite + 18H ⁺ = 9Ca ²⁺ + 6H ₄ SiO ₄ + 8H ₂ O	147.327	(1)	456.4	(1)
	Afwillite	Ca ₃ Si ₂ O ₄ (OH) ₆	Afwillite + 6H ⁺ = 3Ca ²⁺ + 2H ₄ SiO ₄ + 2H ₂ O	49.419	(1)	129.53	(1)
	Gyrolite	Ca ₂ Si ₃ O _{7.5} (OH)(H ₂ O) ₂	Gyrolite + 4H ⁺ + 1.5H ₂ O = 2Ca ²⁺ + 3H ₄ SiO ₄	22.34	(1)	137.34	(1)
水和物	Hydrogarnet (C ₃ AH ₆)	3CaO•Al ₂ O ₃ •6H ₂ O	Hydrogarnet + 12H ⁺ = 2Al ³⁺ + 3Ca ²⁺ + 12H ₂ O	80.33	(1)	149.52	(1)
	Ettringite (AFt)	Ca ₆ Al ₂ (SO ₄) ₃ (OH) ₁₂ (H ₂ O) ₂₆	Ettringite + 12H ⁺ = 2Al ³⁺ + 6Ca ²⁺ + 3SO ₄ ²⁻ + 38H ₂ O	56.958	(1)	710.32	(1)
	Monosulfate (AFm)	Ca ₄ Al ₂ (SO ₄)(OH) ₁₂ (H ₂ O) ₆	Monosulfate + 12H ⁺ = 2Al ³⁺ + 4Ca ²⁺ + SO ₄ ²⁻ + 18H ₂ O	73.09	(1)	311.26	(1)
	Hydrotalcite (HT)	Mg ₄ Al ₂ (OH) ₁₄ (H ₂ O) ₃	Hydrotalcite + 14H ⁺ = 2Al ³⁺ + 4Mg ²⁺ + 17H ₂ O	73.735	(1)	227.36	(1)
	Friedel's salt	Ca ₄ Al ₂ (OH) ₁₂ Cl ₂ (H ₂ O) ₄	Friedel's salt + 12H ⁺ = 2Al ³⁺ + 4Ca ²⁺ + 2Cl ⁻ + 16H ₂ O	74.925	(1)	276.24	(1)
	Stratlingite_Al	Ca ₂ Al ₂ SiO ₂ (OH) ₁₀ (H ₂ O) ₃	Stratlingite_Al + 10H ⁺ = 2Ca ²⁺ + 2Al ³⁺ + H ₄ SiO ₄ + 11H ₂ O	49.9039	(3)	216.005	(3)
	Monocarboaluminate	Ca ₄ Al ₂ (CO ₃)(OH) ₁₂ (H ₂ O) ₅	Monocarboaluminate + 13H ⁺ = 2Al ³⁺ + HCO ₃ ⁻ + 4Ca ²⁺ + 16.68H ₂ O	80.545	(1)	261.96	(1)
	C4AH13	4CaO•Al ₂ O ₃ •13H ₂ O	C4AH13 + 14H ⁺ = 2Al ³⁺ + 4Ca ²⁺ + 20H ₂ O	103.644	(1)	269.2	(1)
	C4AH19	4CaO•Al ₂ O ₃ •19H ₂ O	C4AH19 + 14H ⁺ = 4Ca ²⁺ + 2Al ³⁺ + 26H ₂ O	103.9287	(3)	371	(3)
酸化物	Sodium oxide	Na ₂ O	Sodium oxide + 2H ⁺ = 2Na ⁺ + H ₂ O	67.457	(1)	25.88	(1)
	Potassium oxide	K ₂ O	Potassium oxide + 2H ⁺ = 2K ⁺ + H ₂ O	84.105	(1)	40.38	(1)

表 App. I-D-1 計算に使用した熱力学データ (1/3) 計算に使用した熱力学データ (3/3)

	鉱物名	化学式	反応式	Log K	モル体積 (cm ³ /mol)		
					(8)	(8)	
C-A-S-H	C-A-S-H	CaO _x (Al ₂ O ₃) _y (SiO ₂)(H ₂ O) _z	C-A-S-H固溶体モデル	-	(8)	57.3-85	(8)
	Katoite (C ₃ ASH ₄)	Ca ₃ Al ₂ (SiO ₄)(OH) ₈	Katoite + 12H ⁺ = 2Al ³⁺ + 3Ca ²⁺ + H ₄ SiO ₄ + 8H ₂ O	71.157	(1)	141.51	(1)
ゼオライト	Phillipsite (K)	KAlSi ₃ O ₈ · 3H ₂ O	Phillipsite (K) + 4H ⁺ + H ₂ O = Al ³⁺ + K ⁺ + 3H ₄ SiO ₄	0.04	(1)	148.97	(1)
	Phillipsite (Na)	NaAlSi ₃ O ₈ · 3H ₂ O	Phillipsite (Na) + 4H ⁺ + H ₂ O = Al ³⁺ + Na ⁺ + 3H ₄ SiO ₄	1.45	(1)	149.69	(1)
	Phillipsite (Ca)	Ca _{0.5} AlSi ₃ O ₈ · 3H ₂ O	Phillipsite (Ca) + 4H ⁺ + H ₂ O = Al ³⁺ + 0.5Ca ²⁺ + 3H ₄ SiO ₄	2.32	(1)	151.15	(1)
	Heulandite (Na)	Na _{2.14} Al _{2.14} Si _{6.86} O ₁₈ · 6.17H ₂ O	Heulandite (Na) + 8.56H ⁺ + 3.27H ₂ O = 2.14Al ³⁺ + 2.14Na ⁺ + 6.86H ₄ SiO ₄	2.801	(1)	315.65	(1)
	Heulandite (Ca)	Ca _{1.07} Al _{2.14} Si _{6.86} O ₁₈ · 6.17H ₂ O	Heulandite (Ca) + 8.56H ⁺ + 3.27H ₂ O = 2.14Al ³⁺ + 1.07Ca ²⁺ + 6.86H ₄ SiO ₄	2.461	(1)	315.65	(1)
	Clinoptilolite (K)	K _{1.1} (Si _{4.9} Al _{1.1})O ₁₂ · 2.7H ₂ O	Clinoptilolite (K) + 4.4H ⁺ + 4.9H ₂ O = 1.1Al ³⁺ + 1.1K ⁺ + 4.9H ₄ SiO ₄	-1.162	(1)	210.73	(1)
	Clinoptilolite (Na)	Na _{1.1} (Si _{4.9} Al _{1.1})O ₁₂ · 3.5H ₂ O	Clinoptilolite (Na) + 4.4H ⁺ + 4.1H ₂ O = 1.1Al ³⁺ + 1.1Na ⁺ + 4.9H ₄ SiO ₄	-0.134	(1)	214.78	(1)
	Clinoptilolite (Ca)	Ca _{0.55} (Si _{4.9} Al _{1.1})O ₁₂ · 3.9H ₂ O	Clinoptilolite (Ca) + 4.4H ⁺ + 3.7H ₂ O = 1.1Al ³⁺ + 0.55K ⁺ + 4.9H ₄ SiO ₄	-2.107	(1)	209.66	(1)
	Analcime	Na _{0.99} Al _{0.99} Si _{2.01} O ₆ · H ₂ O	Analcime + 3.96H ⁺ + 1.04H ₂ O = 0.99Al ³⁺ + 0.99Na ⁺ + 2.01H ₄ SiO ₄	6.644	(1)	96.68	(1)
	Laumontite	CaAl ₂ Si ₄ O ₁₂ · 4H ₂ O	Laumontite + 8H ⁺ = 2Al ³⁺ + Ca ²⁺ + 4H ₄ SiO ₄	11.673	(1)	207.53	(1)
	Chabazite	Ca(Al ₂ Si ₄)O ₁₂ · 6H ₂ O	Chabazite + 8H ⁺ = 2Al ³⁺ + Ca ²⁺ + 4H ₄ SiO ₄ + 2H ₂ O	11.517	(1)	251.16	(1)
	Merlinoite(K)	K _{1.04} Al _{1.04} Si _{1.96} O ₆ · 1.69H ₂ O	Merlinoite(K) + 4.16H ⁺ + 0.15H ₂ O = 1.04Al ³⁺ + 1.04K ⁺ + 1.96H ₄ SiO ₄	9.474	(1)	112.78	(1)
鉄鉱物	Pyrite	FeS ₂	Pyrite + H ₂ O + 3.5O ₂ = 2H ⁺ + Fe ²⁺ + 2SO ₄ ²⁻	217.3959	(3)	23.94	(3)
	Siderite	FeCO ₃	Siderite + H ⁺ = Fe ²⁺ + HCO ₃ ⁻	-0.2008	(3)	29.378	(3)
	Magnetite	Fe ₃ O ₄	Magnetite + 6H ⁺ = 3Fe ²⁺ + 0.5O ₂ + 3H ₂ O	-6.504	(3)	44.524	(3)
	Iron(II) hydroxide	Fe(OH) ₂ (s)	Iron(II) hydroxide + 2H ⁺ = Fe ²⁺ + 2H ₂ O	11.1021	(3)	26.43	(3)
	Chukanovite	Fe ₂ (OH) ₂ CO ₃	Chukanovite = -3H ⁺ + 2Fe ²⁺ + HCO ₃ ⁻ + 2H ₂ O	28.61	(9)	57.5	(10)
	Goethite	FeO(OH)	Goethite + 2H ⁺ = Fe ²⁺ + 1.5H ₂ O + 0.25O ₂	-8.2291	(3)	20.82	(3)
	Melanterite	FeSO ₄ · 7H ₂ O	Melanterite = Fe ²⁺ + SO ₄ ²⁻ + 7H ₂ O	-2.0106	(3)	146.54	(3)
	Berthierine_7A	Fe ₂ Al(AlSi) ₅ (OH) ₄	Berthierine + 10H ⁺ = 2Fe ²⁺ + 2Al ³⁺ + H ₄ SiO ₄ + 5H ₂ O	32.4524	(3)	104.94	(3)
Greenalite_7A	Fe ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	Greenalite_7A + 6H ⁺ = 3Fe ²⁺ + 2H ₄ SiO ₄ + H ₂ O	21.7058	(3)	115	(3)	

C-A-S-H 固溶体モデルについては、Appendix 3 を参照。

* モンモリロナイトの溶解速度式

Sato-Cama 式⁽⁴⁾

$$\begin{aligned} \text{Rate}[\text{mol/s}] = & (4.74 \times 10^{-6} e^{-39.57/RT} \frac{177 e^{20.37/RT} a_{\text{OH}^-}}{1 + 177 e^{20.37/RT} a_{\text{OH}^-}} \\ & + 1.70 e^{-69.67/RT} \frac{0.0297 e^{23.53/RT} a_{\text{OH}^-}}{1 + 0.0297 e^{23.53/RT} a_{\text{OH}^-}}) \\ & A_{\text{min}} \{1 - \exp(-6 \times 10^{-10} (2\Delta G_r / RT)^6)\} \end{aligned}$$

R [J/K/mol] : 気体定数、 T [K] : 絶対温度、 a_{OH^-} [-] : 水酸化物イオン活量、 A_{min} [m²] : モンモリロナイト反応表面積、 ΔG_r [J/mol] : 反応のギブス自由エネルギー変化

*2 Quartz の溶解速度式

Knauss and Worley 式⁽⁵⁾

$$R_A [\text{mol/m}^3/\text{s}] = k A (a_{\text{H}^+})^n (1 - Q / K)$$

$$k = 10^{-16.3}$$

$$A = 9.53 \times 10^3$$

$$n = -0.5$$

k [mol/m²/s] : 速度定数、 A [m²/m³] : 単位体積当たりの比表面積、 a_{H^+} [-] : 水素イオン活量、 Q [-] : イオン活量積、 K [-] : 平衡定数

Appendix I-D の参考文献

- (1) <https://thermoddem.brgm.fr/>
- (2) C. Roosz, P. Vieillard, P. Blanc, S. Gaboreau, H. Gailhanou, D. Braithwaite, V. Montouillout, R. Denoyel, P. Henocq, B. Madé, Thermodynamic properties of C-S-H, C-A-S-H and M-S-H phases: Results from direct measurements and predictive modelling, *Appl. Geochemistry*. 92 (2018) 140–156.
- (3) <https://migrationdb.jaea.go.jp/>
- (4) 電気事業連合会・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.
- (5) K.G. Knauss, T.J. Wolery, The dissolution kinetics of quartz as a function of pH and time at 70°C, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52 (1988) 43-53.
- (6) A. Atkinson, J.A. Hearne, C.F. Knights, Aqueous chemistry and thermodynamic modeling of CaO-SiO₂-H₂O gels, AERE R 12548, UK AEA. (1987).
- (7) 須田裕哉, 佐伯竜彦, 斎藤豪, C-S-H の組成がゲル空隙の量および ゲル空隙の空隙径分布に及ぼす影響, *土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)* . 70 (2014) 134–152.
- (8) R.J. Myers, S.A. Bernal, J.L. Provis, A thermodynamic model for C-(N-)A-S-H gel: CNASH-ss. Derivation and validation, *Cem. Concr. Res.* 66 (2014) 27–47.
- (9) 大塚伊知郎, 瀧洋, 山口徹治, 飯田芳久, 山田文香, 稲田大介, 田中忠夫, 処分場の緩衝材間隙水の酸化還元電位へのオーバーパック腐食の影響—重要パラメータの取得及び Eh の予備解析—, *JAEA-Research* 2008-043 (2008).
- (10) <https://www.mindat.org/>

Appendix –II 天然バリアにおける核種移行評価手法の整備

II-A 諸外国の既往情報の調査 (SR-PSU, SR-Site)

II-B 地形変化評価

- II-B.1 パラメータの影響度評価
- II-B.2 近似モデルの作成結果
- II-B.3 古地形の評価結果
- II-B.4 過去～現在の評価結果
- II-B.5 現在～将来の評価結果

II-C 地下水流動解析

- II-C.1 現在～将来の地下水流動解析
- II-C.2 埋設深度における流速に対する不確かさの影響

II-D 人工バリアに対する条件設定

II-E 上北地域を対象としたデータ調査

- II-E.1 隆起速度の推定
- II-E.2 侵食速度の推定
- II-E.3 地質係数の推定
- II-E.4 地質断面の収集
- II-E.5 水理定数

II-A 諸外国の既往情報の調査 (SR-PSU, SR-Site)

(1) SKB (SR-PSU) (低中レベル放射性廃棄物)

a) 処分施設・安全評価概要

スウェーデンでは、スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社 (SKB 社) が短寿命の低中レベル放射性廃棄物の処分を SFR 処分場で行っている。SFR 処分場はストックホルム北方約 160km のフォルスマルク発電所の近くに 1988 年に建設され、操業を開始した。処分施設は水深 5m 以深の海底下約 50m の花崗岩質の岩盤に建設され、1 基のサイロと 4 基の水平空洞から構成されている。中レベル処分用のサイロは、直径約 30m、高さ約 50m のコンクリートサイロとなっている。また BMA と呼ばれる中レベル処分用の水平空洞は、長さ約 160m の水平空洞にコンクリートピットが構築され、その内部に廃棄体が定置される構造となっている。SKB 社は 2014 年に SFR の拡張を申請しており、安全評価のレポート (SR-PSU) がまとめられている。図 II-A-1 に SFR 処分場のレイアウト (灰色部：既設部分、青色部：拡張部分) を、図 II-A-2 にサイロおよび BMA の構造を示す。

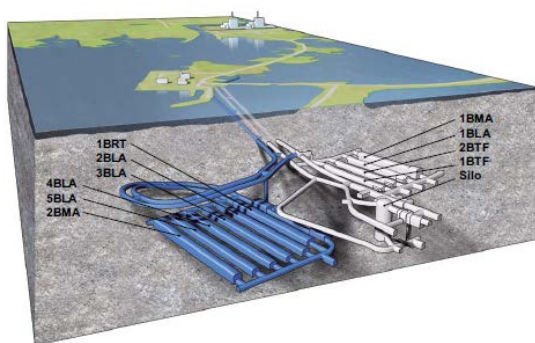


図 II-A-1 SFR 処分場レイアウト⁽¹⁾

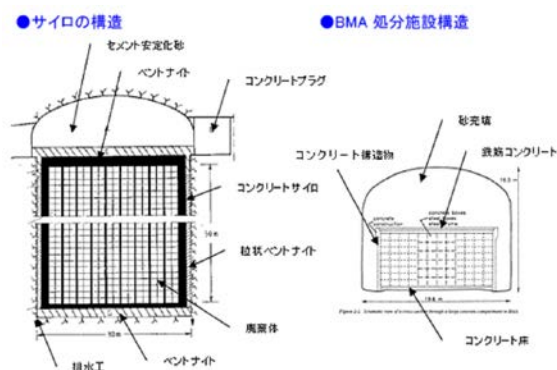


図 II-A-2 サイロおよび BMA の構造

b) 地下水流動解析の概要

SR-PSU では、処分場周辺の地下水流動を Regional scale および Repository scale に分けて評価している (図 II-A-3)。このように空間的なスケールの異なる複数のモデルを用いた階層的な解析を行う理由として、SR-PSU 以前に行われた SFR に対する安全評価 (SAFE) の報告書⁽²⁾では、数値解析をする上で 1 つのモデルで表現できる情報量に制限があるため、と記載されている。

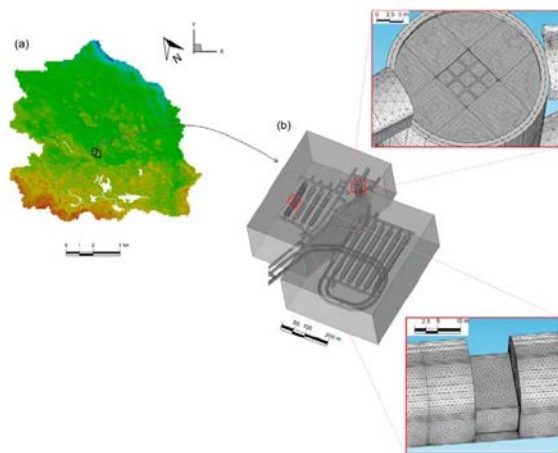


図 II-A-3 SR-PSU における地下水流動解析のモデル概念図⁽³⁾

((a) Regional scale, (b) Repository scale)

SFR 周辺の水理地質構造の概念図を図 II-A-4 に、水理地質構造の各区分の概要を表 II-A-1 に示す。

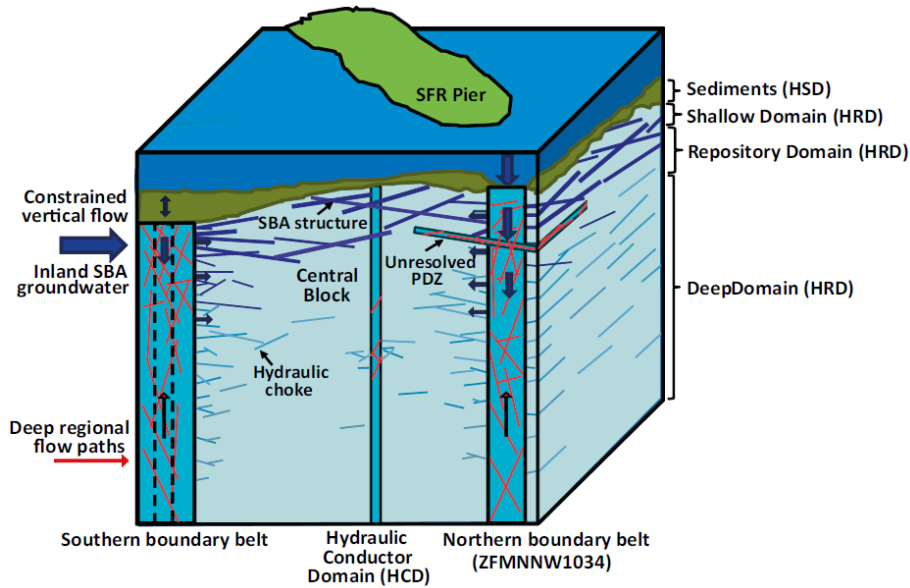


図 II-A-4 SFR 処分場周辺の水理地質構造の概念図⁽⁴⁾

表 II-A-1 水理地質構造の各区分概要

表層	HSD	表土：第四紀堆積物
母岩	HCD(Hydraulic Conductor Domain)	透水性の破碎帯
	SBA (Eight gently dipping shallow bedrock aquifer structures)	ほぼ平行な透水性の高い亀裂 (8つのネットワーク)
	HRD(Hydraulic Rock Mass Domain)	破碎帯 (HCD) 間の亀裂が少ない健岩部 ・ Unresolved PDZ (Possible Deformation Zone) ・ DFN (Discrete Fracture Networks)
	Northern boundary belt (厚さ 200-400m, 長さ 30km 以上)	Northern/Southern boundary belt は複数の延性・脆性の変形帯から構成される。これらを境界としたテクトニクス的な領域が Central Block である。
	Southern boundary belt (厚さ 50-100m, 長さ 3-4km)	

各スケールの目的、使用したコード、解析種別、解析領域、解析時期、境界条件、メッシュ、バリアの再現度、不均質性、考慮する変動ケースについて整理した結果を、表 II-A-2 に示す。また SR-PSU における各解析の関連性のフローチャートを、図 II-A-5 に示す。

表 II-A-2 SR-PSU の地下水流動解析の概要 (1 / 4)

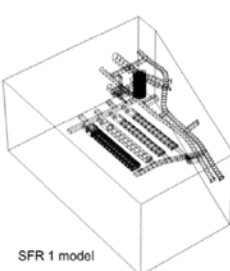
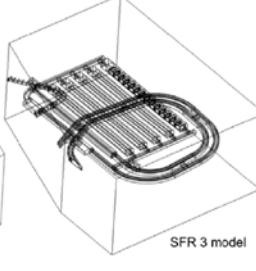
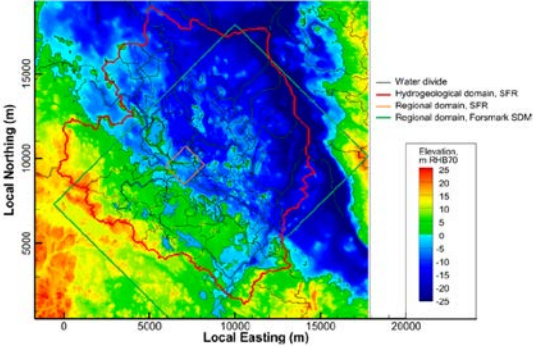
スケール	Repository scale	Regional scale
レポート	TR-13-08	TR-13-25
目的	<ul style="list-style-type: none"> ● 飽和—不飽和状態にある処分場中での地下水の流れの推定 (→核種移行解析のインプット) ● 地下水の観点からシステムの理解を深める 	<ul style="list-style-type: none"> ● 水理地質モデリングの総合評価手法・結果の提示 (→Repository scale の地下水流動解析の境界条件) ● 水理地質モデルのベースケースと変動ケース (流れが速い/遅いケース) の根拠の提示
コード	COMSOL [有限要素法] (CAD に対応しており処分場の詳細なジオメトリを再現するのに適しているため)	DarcyTools [有限体積法]
解析種別	飽和—不飽和、定常状態 (密度流なし)	飽和—不飽和、定常状態 (密度流なし)
解析領域	<p>処分場の水理特性の変化が Regional scale の水理モデルの流れに影響を与えないという条件で解析的に決定 (3.4.2 を参照)</p> <p>SFR1 : X 370m × Y 485m × Z 205m SFR3 : X 400m × Y 500m × Z 205m</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div>	<p>分水嶺に沿って設定 十数 km × 十数 km、下部：深度-1.1km</p> 

表 II-A-2 SR-PSU の地下水流動解析の概要 (2 / 4)

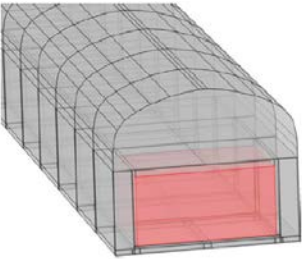
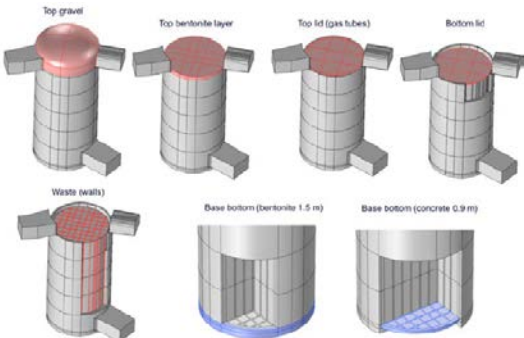
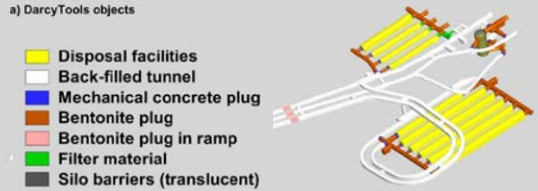
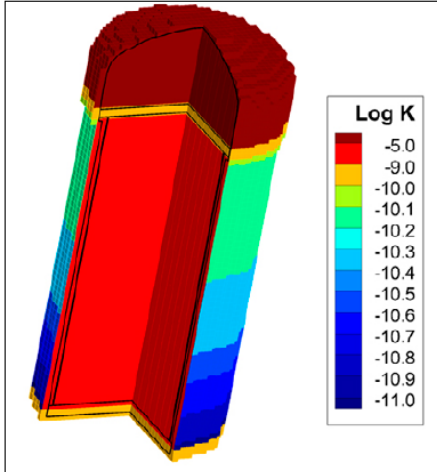
スケール	Repository scale	Regional scale
バリアの再現度	<p>1BMA・2BMA のボールドはコンパートメントのレベルまで、サイロはシャフトのレベルまで再現</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 1BMA のボールド (コンクリート、廃棄体、砂)  <ul style="list-style-type: none"> ● サイロ (上層・下層 (ベントナイト・砂)、廃棄体、ベントナイト、コンクリート、サイロの蓋) 	<p>ボールド、サイロ、プラグのレベルまで再現</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 処分場  <ul style="list-style-type: none"> ● サイロ (内部・外部 (z 方向に深度依存性)) 

表 II-A-2 SR-PSU の地下水流動解析の概要 (3 / 4)

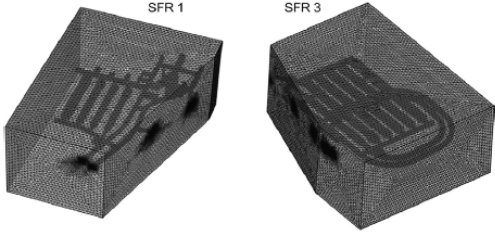
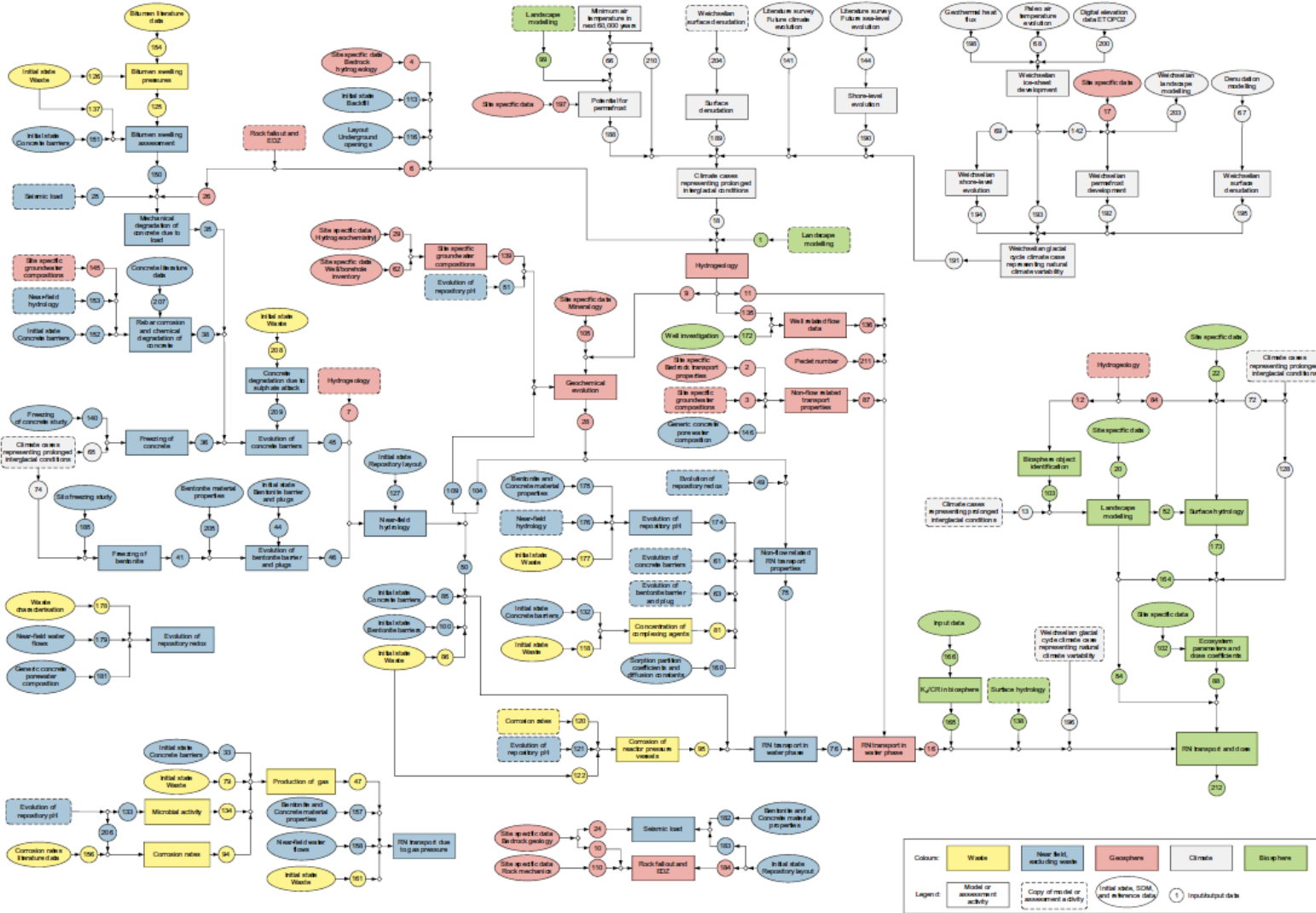
スケール	Repository scale	Regional scale																																		
メッシュ	<ul style="list-style-type: none"> ● 要素： 不規則な四面体 (2 次要素) ● 要素数： SFR1 : 10,748,580 要素、SFR3 : 11,548,320 要素 ● メッシュサイズ： 境界付近 : Regional scale と同程度 	<ul style="list-style-type: none"> ● 要素： 不規則な直方体 ● メッシュサイズ： 平均 : $8 \times 8 \times 8 \text{ m}^3$ 下部境界近傍 : $16 \times 16 \times 16 \text{ m}^3$ トンネル近傍 : $2 \times 2 \times 2 \text{ m}^3$ 地表のメッシュ : 高さは最小で $1.0 \sim 0.25 \text{ m}$ <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Hydraulic domain</th> <th rowspan="2">Location</th> <th colspan="2">Max. cell side length</th> </tr> <tr> <th>ΔL_x (m)</th> <th>ΔL_z (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>HRD, HCD</td> <td>Outside SFR Regional domain</td> <td>128</td> <td>128</td> </tr> <tr> <td>PFM Sheet joints</td> <td>Outside SFR Regional domain</td> <td>64</td> <td>16</td> </tr> <tr> <td>HSD</td> <td>Outside SFR Regional domain</td> <td>32</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>HRD, HCD</td> <td>Inside SFR Regional domain</td> <td>16</td> <td>16</td> </tr> <tr> <td>HSD</td> <td>Inside SFR Regional domain</td> <td>4</td> <td>0.25</td> </tr> <tr> <td>SFR tunnel</td> <td>Inside SFR Regional domain</td> <td>2</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>Shallow bedrock¹⁾</td> <td>Inside SFR Regional domain</td> <td>8</td> <td>8</td> </tr> </tbody> </table>	Hydraulic domain	Location	Max. cell side length		ΔL_x (m)	ΔL_z (m)	HRD, HCD	Outside SFR Regional domain	128	128	PFM Sheet joints	Outside SFR Regional domain	64	16	HSD	Outside SFR Regional domain	32	1	HRD, HCD	Inside SFR Regional domain	16	16	HSD	Inside SFR Regional domain	4	0.25	SFR tunnel	Inside SFR Regional domain	2	2	Shallow bedrock ¹⁾	Inside SFR Regional domain	8	8
Hydraulic domain	Location	Max. cell side length																																		
		ΔL_x (m)	ΔL_z (m)																																	
HRD, HCD	Outside SFR Regional domain	128	128																																	
PFM Sheet joints	Outside SFR Regional domain	64	16																																	
HSD	Outside SFR Regional domain	32	1																																	
HRD, HCD	Inside SFR Regional domain	16	16																																	
HSD	Inside SFR Regional domain	4	0.25																																	
SFR tunnel	Inside SFR Regional domain	2	2																																	
Shallow bedrock ¹⁾	Inside SFR Regional domain	8	8																																	
解析時期	Shoreline position 1, 2, 3 (海水準変動による汀線位置の変化を考慮 (※気候変動の欄に記載))	Temperate climate domain (永久凍土や氷床がない時期) : 2,000, 2,500, 3,000, 3,500, 5,000, 9,000 AD Periglacial climate domain (寒期 (氷床はない))																																		
境界条件	Regional scale の結果を内挿 (圧力・フラックス (トンネル断面位置))	側方 (分水嶺)・下部 : 不透水 地表 : Temperate → 涵養条件 Periglacial → 大気圧 湖・河川 : 固定水頭 海底 : 海水圧																																		

表 II-A-2 SR-PSU の地下水流動解析の概要 (4 / 4)

スケール	Repository scale	Regional scale																																																																																																			
不均質性	<ul style="list-style-type: none"> ● バリア： <ul style="list-style-type: none"> ・SFR1 の BTF ポールトと SFR1・SFR3 の BLA ポールトは均質として扱われている (①異なるタイプの廃棄物のタイプを広範囲に再現することの複雑さ、②処分場での廃棄物の将来的な空間的分布・各廃棄物のタイプの水理特性の不確かさ) ・すべての廃棄物コンパートメント・シャフトは同じ透水係数を持つと仮定 ● 母岩： <ul style="list-style-type: none"> 3 パターンの感度解析を実施 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Repository-scale model</th> <th>Case number in regional-scale model</th> <th>Regional-scale model</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Base case</td> <td>Case 1</td> <td>Base_Case1_DFN_R85</td> </tr> <tr> <td>High Flow Case</td> <td>Case 11</td> <td>nc_DEP_R07_DFN_R85</td> </tr> <tr> <td>Flow Flow Case</td> <td>Case 15</td> <td>nc_NoD_R01_DFN_R18</td> </tr> </tbody> </table>	Repository-scale model	Case number in regional-scale model	Regional-scale model	Base case	Case 1	Base_Case1_DFN_R85	High Flow Case	Case 11	nc_DEP_R07_DFN_R85	Flow Flow Case	Case 15	nc_NoD_R01_DFN_R18	<ul style="list-style-type: none"> ● バリア： <ul style="list-style-type: none"> 不均質性を考慮しない ● HCD： <ul style="list-style-type: none"> 5 パターン (均質な場合 / 異方性を考慮 / 透水係数の深度依存性を考慮 / Southern boundary belt の直交方向の透水性を考慮) ● HRD： <ul style="list-style-type: none"> 3 パターンの DFN (亀裂ネットワークモデル) <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">No.</th> <th rowspan="2">Label</th> <th colspan="3">HCD</th> <th rowspan="2">HRD</th> </tr> <tr> <th>Conditioning</th> <th>Depth trend</th> <th>Variability</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>BASE_CASE1_DFN_R85</td> <td></td> <td></td> <td>Homogeneous</td> <td>R85</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>BASE_CASE1_DFN_R18</td> <td rowspan="2">Yes</td> <td rowspan="2">Yes</td> <td rowspan="2">Anisotropic SBB</td> <td>R18</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>BASE_CASE2_DFN_R85</td> <td>R85</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>nc_DEP_HOM_DFN_R03</td> <td rowspan="3">No</td> <td rowspan="3">No</td> <td rowspan="3">Homogeneous</td> <td>R03</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>nc_DEP_HOM_DFN_R85</td> <td>R85</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>nc_NoD_HOM_DFN_R85</td> <td>R85</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>CD_DEP_R01_DFN_R85</td> <td>Yes</td> <td rowspan="3">Yes</td> <td rowspan="3">Heterogeneous, R01</td> <td>R85</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>nc_DEP_R01_DFN_R85</td> <td rowspan="2">No</td> <td rowspan="3">Yes</td> <td rowspan="3">Heterogeneous, R07</td> <td>R18</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>nc_DEP_R01_DFN_R18</td> <td>R18</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>CD_DEP_R07_DFN_R85</td> <td>Yes</td> <td rowspan="2">No</td> <td rowspan="2">Heterogeneous, R01</td> <td>R85</td> </tr> <tr> <td>11</td> <td>nc_DEP_R07_DFN_R85</td> <td rowspan="2">No</td> <td rowspan="2">No</td> <td rowspan="2">Heterogeneous, R07</td> <td>R18</td> </tr> <tr> <td>12</td> <td>nc_DEP_R07_DFN_R18</td> <td>R18</td> </tr> <tr> <td>13</td> <td>nc_NoD_R01_DFN_R03</td> <td rowspan="3">No</td> <td rowspan="3">No</td> <td rowspan="3">Heterogeneous, R01</td> <td>R03</td> </tr> <tr> <td>14</td> <td>nc_NoD_R01_DFN_R85</td> <td>R85</td> </tr> <tr> <td>15</td> <td>nc_NoD_R01_DFN_R18</td> <td>R18</td> </tr> <tr> <td>16</td> <td>nc_NoD_R07_DFN_R03</td> <td rowspan="2">No</td> <td rowspan="2">No</td> <td rowspan="2">Heterogeneous, R07</td> <td>R03</td> </tr> <tr> <td>17</td> <td>nc_NoD_R07_DFN_R85</td> <td>R85</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Label	HCD			HRD	Conditioning	Depth trend	Variability	1	BASE_CASE1_DFN_R85			Homogeneous	R85	2	BASE_CASE1_DFN_R18	Yes	Yes	Anisotropic SBB	R18	3	BASE_CASE2_DFN_R85	R85	4	nc_DEP_HOM_DFN_R03	No	No	Homogeneous	R03	5	nc_DEP_HOM_DFN_R85	R85	6	nc_NoD_HOM_DFN_R85	R85	7	CD_DEP_R01_DFN_R85	Yes	Yes	Heterogeneous, R01	R85	8	nc_DEP_R01_DFN_R85	No	Yes	Heterogeneous, R07	R18	9	nc_DEP_R01_DFN_R18	R18	10	CD_DEP_R07_DFN_R85	Yes	No	Heterogeneous, R01	R85	11	nc_DEP_R07_DFN_R85	No	No	Heterogeneous, R07	R18	12	nc_DEP_R07_DFN_R18	R18	13	nc_NoD_R01_DFN_R03	No	No	Heterogeneous, R01	R03	14	nc_NoD_R01_DFN_R85	R85	15	nc_NoD_R01_DFN_R18	R18	16	nc_NoD_R07_DFN_R03	No	No	Heterogeneous, R07	R03	17	nc_NoD_R07_DFN_R85	R85
Repository-scale model	Case number in regional-scale model	Regional-scale model																																																																																																			
Base case	Case 1	Base_Case1_DFN_R85																																																																																																			
High Flow Case	Case 11	nc_DEP_R07_DFN_R85																																																																																																			
Flow Flow Case	Case 15	nc_NoD_R01_DFN_R18																																																																																																			
No.	Label	HCD			HRD																																																																																																
		Conditioning	Depth trend	Variability																																																																																																	
1	BASE_CASE1_DFN_R85			Homogeneous	R85																																																																																																
2	BASE_CASE1_DFN_R18	Yes	Yes	Anisotropic SBB	R18																																																																																																
3	BASE_CASE2_DFN_R85				R85																																																																																																
4	nc_DEP_HOM_DFN_R03	No	No	Homogeneous	R03																																																																																																
5	nc_DEP_HOM_DFN_R85				R85																																																																																																
6	nc_NoD_HOM_DFN_R85				R85																																																																																																
7	CD_DEP_R01_DFN_R85	Yes	Yes	Heterogeneous, R01	R85																																																																																																
8	nc_DEP_R01_DFN_R85	No			Yes	Heterogeneous, R07	R18																																																																																														
9	nc_DEP_R01_DFN_R18						R18																																																																																														
10	CD_DEP_R07_DFN_R85	Yes	No	Heterogeneous, R01			R85																																																																																														
11	nc_DEP_R07_DFN_R85	No			No	Heterogeneous, R07	R18																																																																																														
12	nc_DEP_R07_DFN_R18		R18																																																																																																		
13	nc_NoD_R01_DFN_R03	No	No	Heterogeneous, R01	R03																																																																																																
14	nc_NoD_R01_DFN_R85				R85																																																																																																
15	nc_NoD_R01_DFN_R18				R18																																																																																																
16	nc_NoD_R07_DFN_R03	No	No	Heterogeneous, R07	R03																																																																																																
17	nc_NoD_R07_DFN_R85				R85																																																																																																
人工バリアに対する変動ケース	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートバリアの劣化 ・プラグの劣化 ・バリアがない (コンクリートとプラグが完全に劣化) ・アイスレンズ (サイロ深さまで永久凍土が達した) ・他の閉鎖措置 (通常：ベントナイト・コンクリート・プラグ) ・操業時以降に追加のバリアや構造物を設置しないケース ・永久凍土 	なし																																																																																																			

Assessment Model Flowchart, AMF



Appendix G

図 II-A-5 SR-PSU における評価のフローチャート(1)

c) 水理地質構造の不確かさに対する考え方

SKB では、データの取得状況に応じて水理地質構造および不確かさの設定がされている。

・データの取得状況

SFR では、1980～2010 の期間に Regional model area において計 60 本のボーリングデータを取得している。特に既存の SFR 施設および将来拡張の可能性のある範囲をカバーする Local model domain においては、高い密度でデータが取得されている（図 II-A-6）。

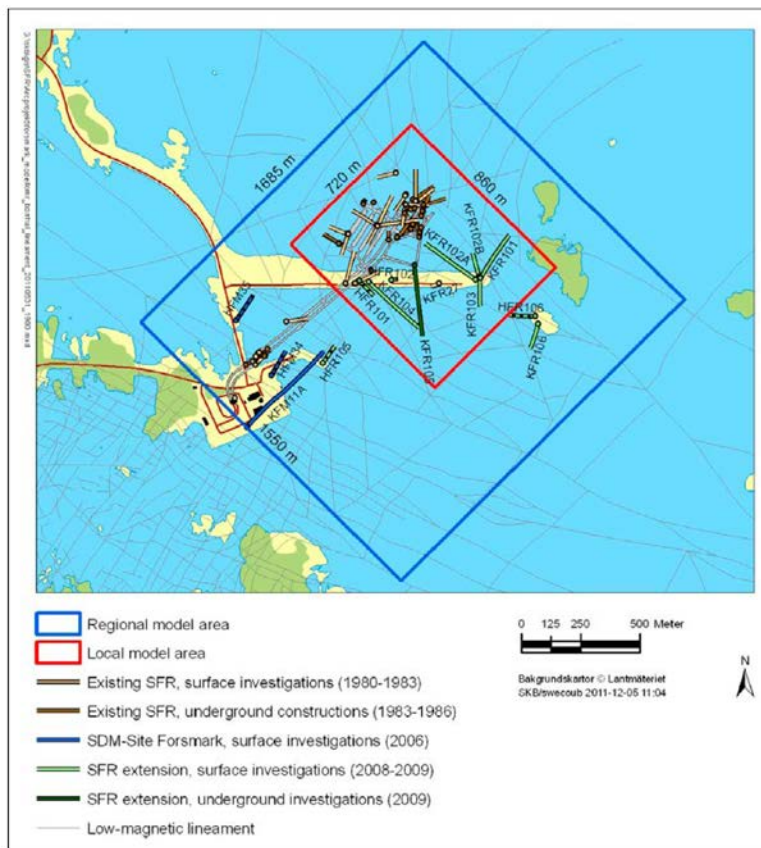


図 II-A-6 Regional model と Local model の設定範囲およびボーリング実施位置⁽⁵⁾

・基本ケースにおけるデータの取得状況に応じたモデルの作成

Regional model area における HCD のモデル化⁽⁶⁾では、Local model と Regional model のそれぞれに対してモデルを作成し、それらを組み合わせている（図 II-A-7）。

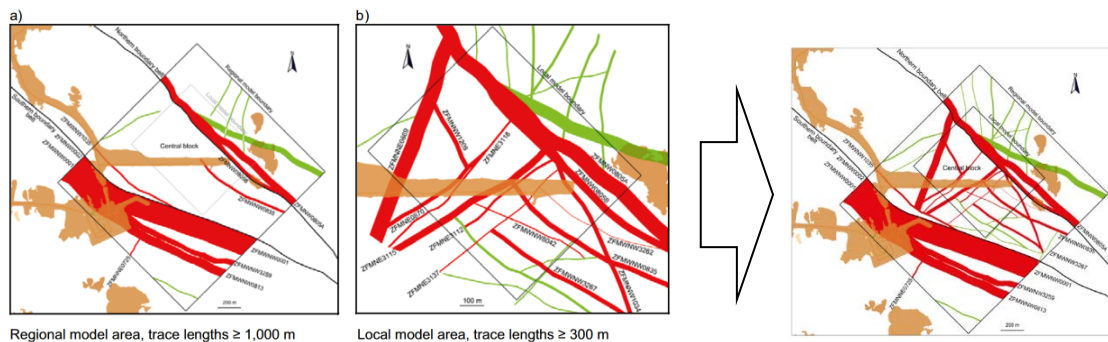


図 II-A-7 Regional model area における HCD のモデル化⁽⁶⁾

- ・変動ケースにおけるデータの取得状況に応じた不確かさの設定

これまでの解析で SFR における性能指標はニアフィールドの母岩のパラメータ設定に支配されていることが示されていることから、Regional model area 内のみで母岩のパラメータ設定に対する感度解析が行われている (Regional model area 外は固定)。

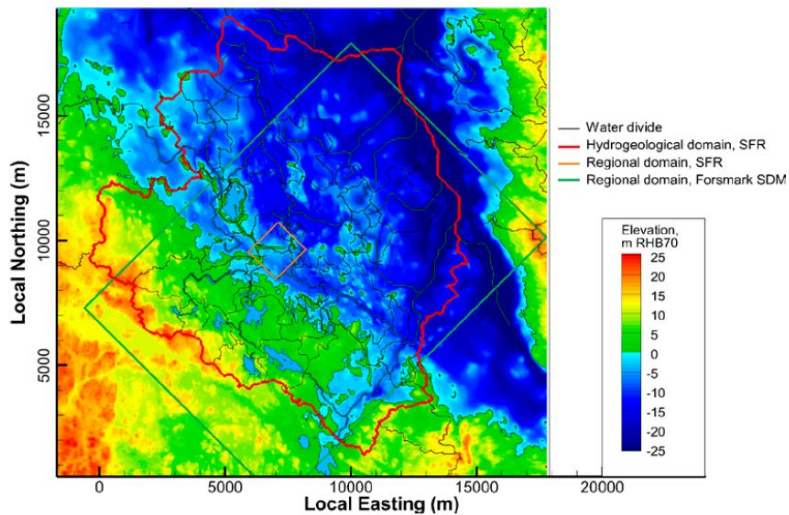
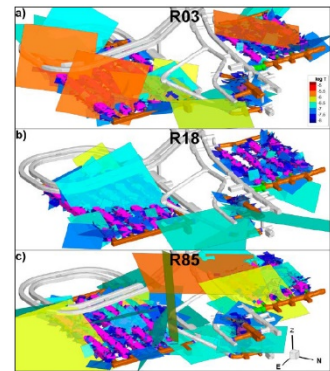


図 II-A-8 水理地質構造のモデル範囲と Regional domain の関係⁽⁴⁾

Regional model area における水理地質構造の不確かさの設定を、表 II-A-3 に示す。

表 II-A-3 SFR Regional model area における水理地質構造の不確かさの設定

区分	扱い		概要																																									
	地質的	水理的																																										
HCD	決定的 (Curtis et al. 2011 ¹⁾)	不確かさを考慮	ボーリングデータによる条件設定の有無 (Conditioning)、深度依存性、透水係数の異方性・異質性に応じた複数のケースを選択																																									
			<table border="1"> <thead> <tr> <th>HCD variant</th> <th>Conditioning</th> <th>Depth trend</th> <th>Transmissivity variability</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>BASE_CASE1</td> <td>Yes</td> <td>Yes</td> <td>Homogeneous</td> </tr> <tr> <td>BASE_CASE2</td> <td>Yes</td> <td>Yes</td> <td>Homogeneous, Anisotropic SBB</td> </tr> <tr> <td>nc_DEP_HOM</td> <td>No</td> <td>Yes</td> <td>Homogeneous</td> </tr> <tr> <td>nc_NoD_HOM</td> <td>No</td> <td>No</td> <td>Homogeneous</td> </tr> <tr> <td>CD_DEP_R01</td> <td>Yes</td> <td>Yes</td> <td>Heterogeneous, R01</td> </tr> <tr> <td>nc_DEP_R01</td> <td>No</td> <td>Yes</td> <td>Heterogeneous, R01</td> </tr> <tr> <td>CD_DEP_R07</td> <td>Yes</td> <td>Yes</td> <td>Heterogeneous, R07</td> </tr> <tr> <td>nc_DEP_R07</td> <td>No</td> <td>Yes</td> <td>Heterogeneous, R07</td> </tr> <tr> <td>nc_NoD_R01</td> <td>No</td> <td>No</td> <td>Heterogeneous, R01</td> </tr> <tr> <td>nc_NoD_R07</td> <td>No</td> <td>No</td> <td>Heterogeneous, R07</td> </tr> </tbody> </table>	HCD variant	Conditioning	Depth trend	Transmissivity variability	BASE_CASE1	Yes	Yes	Homogeneous	BASE_CASE2	Yes	Yes	Homogeneous, Anisotropic SBB	nc_DEP_HOM	No	Yes	Homogeneous	nc_NoD_HOM	No	No	Homogeneous	CD_DEP_R01	Yes	Yes	Heterogeneous, R01	nc_DEP_R01	No	Yes	Heterogeneous, R01	CD_DEP_R07	Yes	Yes	Heterogeneous, R07	nc_DEP_R07	No	Yes	Heterogeneous, R07	nc_NoD_R01	No	No	Heterogeneous, R01	nc_NoD_R07
HCD variant	Conditioning	Depth trend	Transmissivity variability																																									
BASE_CASE1	Yes	Yes	Homogeneous																																									
BASE_CASE2	Yes	Yes	Homogeneous, Anisotropic SBB																																									
nc_DEP_HOM	No	Yes	Homogeneous																																									
nc_NoD_HOM	No	No	Homogeneous																																									
CD_DEP_R01	Yes	Yes	Heterogeneous, R01																																									
nc_DEP_R01	No	Yes	Heterogeneous, R01																																									
CD_DEP_R07	Yes	Yes	Heterogeneous, R07																																									
nc_DEP_R07	No	Yes	Heterogeneous, R07																																									
nc_NoD_R01	No	No	Heterogeneous, R01																																									
nc_NoD_R07	No	No	Heterogeneous, R07																																									
SBA	決定的 (Öhman et al. 2012 ²⁾)	決定的	8つのネットワークを決定的に再現																																									
HRD	Unresolved PDZ	ボーリング孔の切片に対する条件付	99個のDFNの再現結果から、悲観的(大きな亀裂がサイトに交差)・楽観的(サイトに交差する大きな亀裂が少ない)な3ケースを選択																																									
	DFN	透水性はサイズに相関をもつ	<ul style="list-style-type: none"> ・ R03 : SFR3 に対して 悲観的なケース ・ R18 : SFR1 に対して 楽観的なケース ・ R85 : SFR1 に対して 悲観的なケース 																																									



d) 気候変動・海水準変動の考え方

・気候変動シナリオ

SR-PSU の Climate report⁽⁷⁾では、4つの気候シナリオを作成している。ただし最近の科学的知見によると、人間活動による温室効果ガスの濃度上昇に伴い、前のサイクルよりも現在の間氷期(温暖期)は長く継続することが示されている。そのため、Weichselian glacial cycle climate case は、フォルスマルクにおける将来 10 万年間の代表ケースとしては判断されていない。

- Global warming climate case (CO₂ 排出の影響 (中程度のレベル))
- Early periglacial climate case (CO₂ 排出の影響 (低いレベル))
- Extended global warming climate case (CO₂ 排出の影響 (高いレベル (人間活動)))
- Weichselian glacial cycle climate case (過去十万年間と同じ)

・気候区分

気候は以下の 3 つに区分されている。地下水流動解析では、将来 10 万年間に想定される気候として、Temperate climate domain と Periglacial climate domain の 2 つを評価している。

- Temperate climate domain (永久凍土や氷床がない時期) :
3 つの中で最も暖かい。四季や降雨・降雪があり、海に覆われている。
- Periglacial climate domain (永久凍土がある時期)
寒期だが、氷床は見られない。
- Glacial climate domain (氷床に覆われる時期)
3 つの中で最も寒い。降雨はなく降雪のみである。

・各シナリオの気候変動・海水準変動の設定

各シナリオの気候変動・海水準変動の設定を以下に示す。相対海水準の変動は、氷河性地殻均衡 (GIA) のシミュレーションにより予測されている。これは、氷と水といった地球表層における質量再分配が引き起こすアイソスタシー現象をシミュレートするものである。

● Global warming climate case

Global warming climate case における気候変動・海水準変動 (気候区分・相対海水準・永久凍土の深さ) を図 II-A-9 に示す。

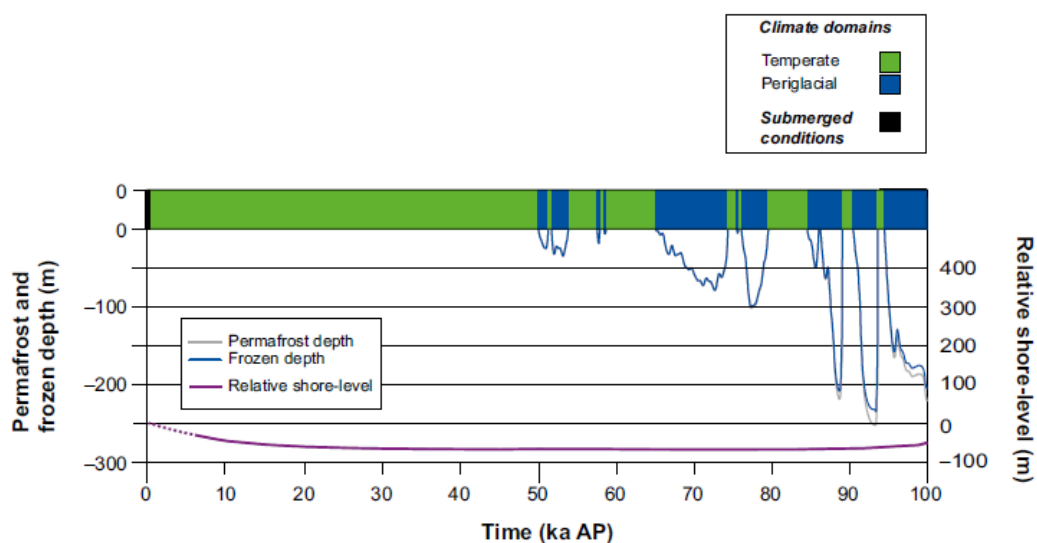


図 II-A-9 Global warming climate case における気候変動の設定⁽⁷⁾

- Early periglacial climate case

Early periglacial climate case における気候変動・海水準変動（気候区分・相対海水準・永久凍土の深さ）を図 II-A-10 に示す。海水準変動の設定は Global warming climate case と同じである。

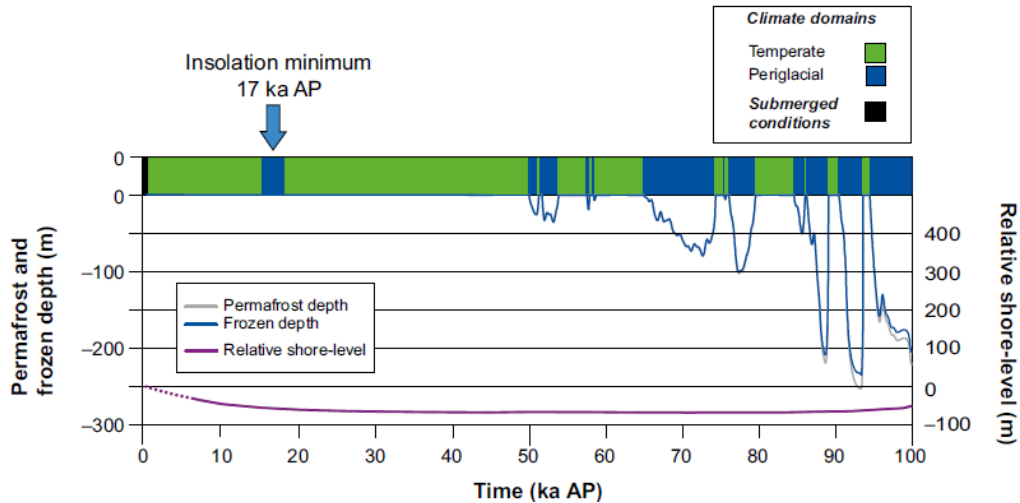


図 II-A-10 Early periglacial climate case における気候変動の設定⁽⁷⁾

- Extended global warming climate case

Extended global warming climate case における気候変動・海水準変動（気候区分・相対海水準・永久凍土の深さ）を図 II-A-11 に示す。複数のプロセスによる長期の海水準上昇に対する最大寄与については、表 II-A-4 のように想定されている。

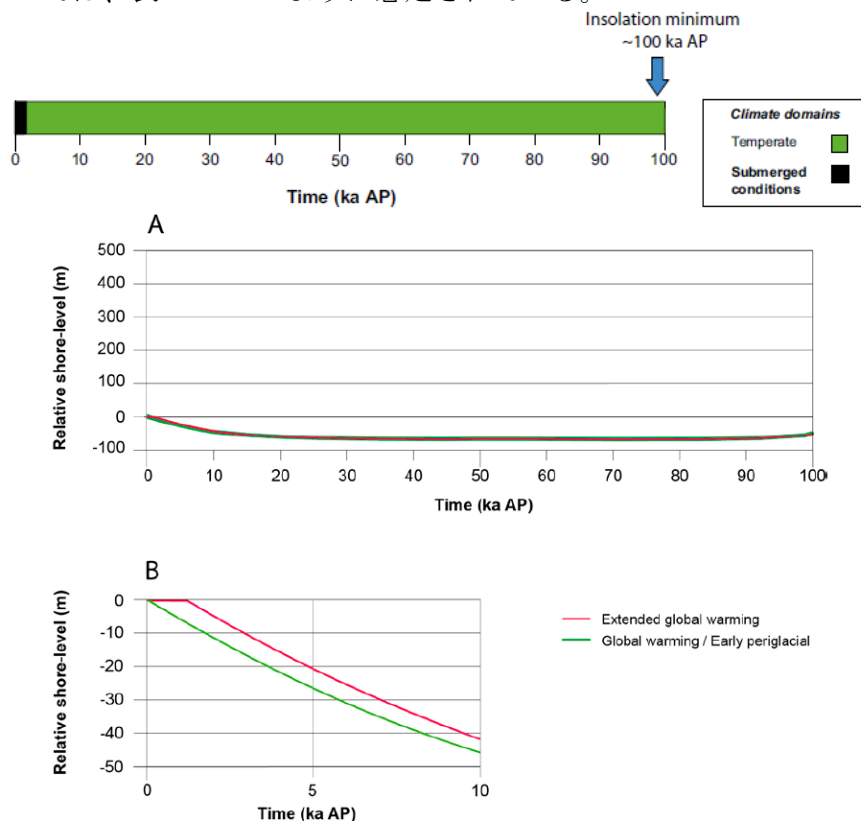


図 II-A-11 Extended global warming climate case における気候変動の設定⁽⁷⁾

表 II-A-4 複数のプロセスによる長期の海水準上昇に対する最大寄与⁽⁷⁾

Process	Maximum contribution to global mean sea level rise	Reference	Maximum contribution to sea level rise in the Baltic Sea	Reference
Melting of West Antarctic Ice Sheet	3.3 m	Bamber et al. (2009), Figure 3.	~3.4 m	Bamber et al. (2009), Figure 3.
Complete melting of Greenland ice sheet	7.3 m	Bamber et al. (2001)	0-0.7 m	Present report, Section 3.3.4 and Pimenoff et al. (2012)
Complete melting of all glaciers and ice caps	0.5 m	IPCC 2007	0.5 m	IPCC 2007
Thermosteric sea level rise	5.8	Li et al. 2013 (see Section 3.3.4)	5.8 m	Li et al. 2013 (see also Section 3.3.4)
		Sum	~10 m	

e) 地形変化の考え方

地下水流動解析では、母岩のジオメトリは固定して評価されているが、以下の点で地形変化が考慮されている。

- ・ 相対的な海水準変動の評価 (GIA) :
氷河性地殻均衡による隆起が考慮されている
- ・ 表土のジオメトリ :
表土のジオメトリを **Regolith-lake development model** によって評価している。
(8500 BC-7000 AD までのシミュレーション (タイムステップ : 500 年))

・ **Regolith-lake development model (RLDM)**

RLDM は、地表の堆積物の厚さ・層序を評価するモデルである。モデルは **Marine module** と **Lake module** の 2 つに分かれている。RLDM における評価の流れを図 II-A-12 に示す。

● **Marine module**

海における風によって起こされる波による侵食・土砂移動・堆積を計算し、堆積物厚さを出力する。対象とするセルが湖と判定されるまで **Marine module** での計算を行う。このモジュールでは、Wind データを用いて **STWAVE** (M. Smith et al. (2001)) によりフォルスマルクおよびバルト海の波について計算を行い、表面における波の最大軌道速度 U_{max} を用いて、堆積/侵食の判定を行っている。

- ・ $U_{max} \leq 0.53$: シルトの堆積が発生
- ・ $U_{max} > 0.53$: シルトの侵食が発生
- ・ $U_{max} > 1.09$: 泥の侵食が発生

ただし過去および将来の Wind データの取得には限りがあるため、過去数十年の Wind データを全ての期間の計算に使用している。

● **Lake module**

湖での堆積 (泥またはシルト)、植物の成長に伴う埋積を計算し、堆積物厚さを出力する。フォルスマルクの 6 つの湖に対する統計的な検証の結果、堆積率は主に湖の体積に依存することが示されており、これを考慮した式を使用している。

$$\begin{aligned} \text{堆積率}(\text{m}^3/\text{y}) &= 49.967 + 102.786 \times \text{水の体積} \\ \text{植物の成長}(\text{m}^2/\text{y}) &= 100 + 8.3/10000 \times \text{湖の範囲} \end{aligned}$$

RLDM による評価結果の例を図 II-A-13 に示す。

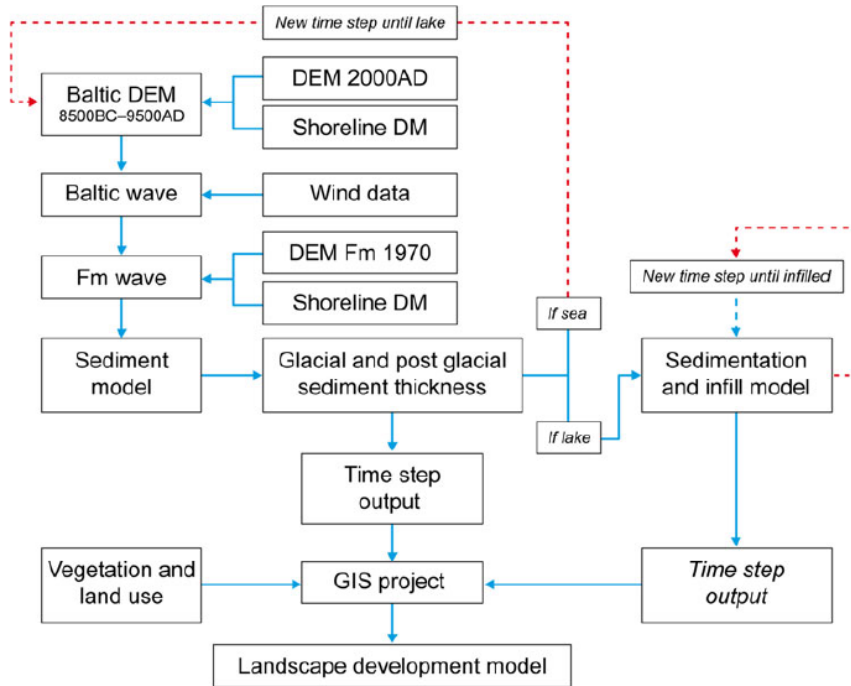


図 II-A-12 RLDM の計算のフロー⁽⁸⁾

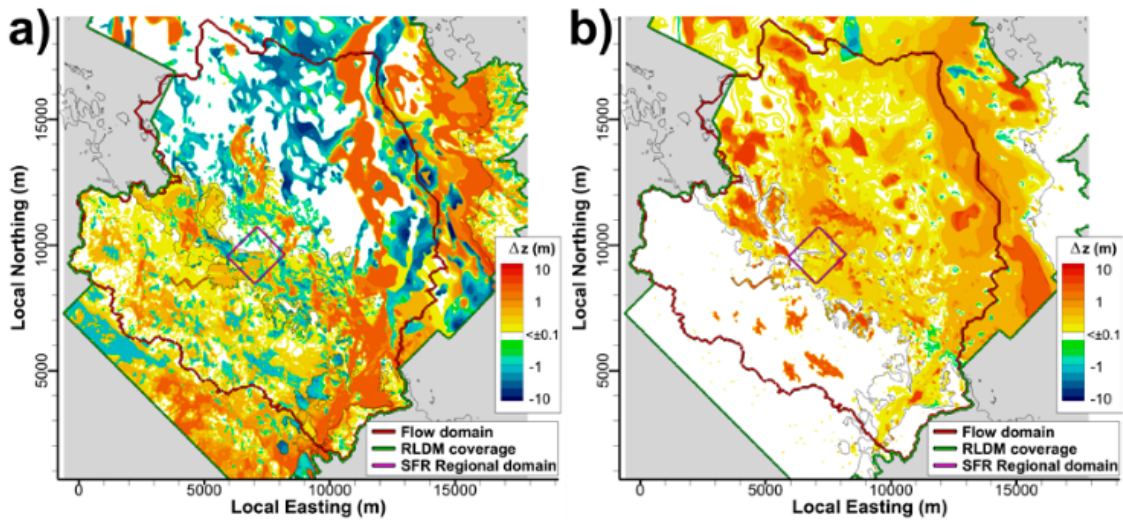


図 II-A-13 RLDM によるレゴリス (表土) の評価結果⁽⁹⁾

(a) 現在(2000AD)に対する RLDM による評価結果と SDM Site/SR Site で構築された表土のモデルの標高差, b) 2000 AD と 9000 AD の差 (灰色部 : RLDM のモデル範囲外)

(2) SKB (SR-Site) (高レベル放射性廃棄物)

a) 処分施設・安全評価概要

スウェーデンでは、原子力発電所で発生した使用済燃料を再処理せずに、高レベル放射性廃棄物として地下約 500m の深さの結晶質岩中に地層処分する方針である。実施主体は SKB 社である。処分場の建設予定地としてフォルスマルクが選定され、2011 年 3 月に処分場の立地・建設の許可申請が行われている。検討されている KBS-3 概念という処分方法は、使用済燃料をキャニスタ（外側が銅製・内側が鋳鉄製の 2 重構造）に封入し、その周囲を緩衝材で取り囲むものであり、キャニスタの定置方法として縦置きと横置きが検討されている。SKB 社は安全評価の取りまとめを、サイト調査の候補地選定前 (SR97 (1999 年))、詳細特性調査の候補地選定前 (SR-Can (2006 年))、処分場の立地・建設の許可申請前 (SR-Site (2011 年)) に行っている。処分場のレイアウトを図 II-A-14 に、KBS-3 処分概念を図 II-A-15 に示す。

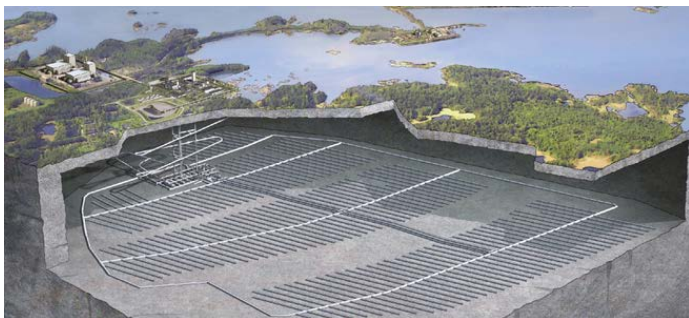


図 II-A-14 使用済燃料処分場レイアウト⁽¹⁰⁾

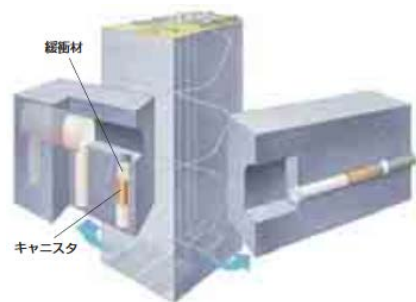


図 II-A-15 KBS-3 処分概念

b) 地下水流動解析

SR-Site では、閉鎖後初期（間氷期）においては、Repository-scale, Site-scale, Regional-scale に分けた評価がされている（図 II-A-16）。閉鎖後長期（氷期）では Regional-scale の代わりに Super-regional scale のモデルを使用し、同様に Site-scale と Regional-scale を用いた評価がされている。

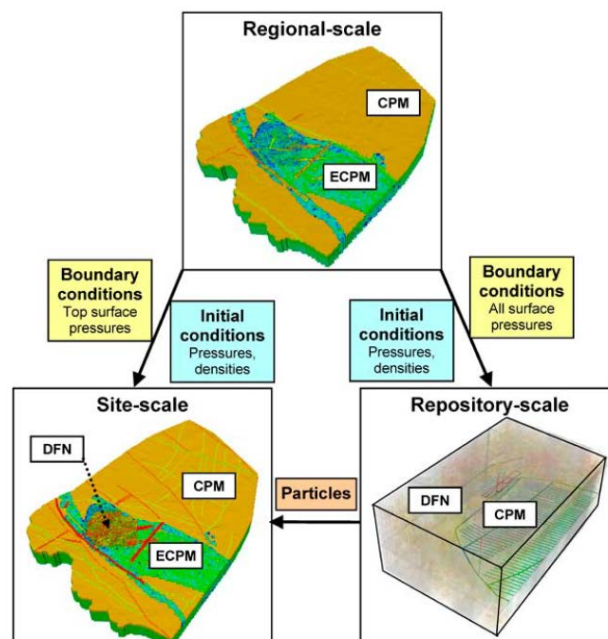


図 II-A-16 SR-Site（閉鎖後初期）のモデル⁽¹¹⁾

処分場周辺の水理地質構造の概念図を図 II-A-17 に示す。水理地質構造の各区分の内容は SR-PSU と共通している。

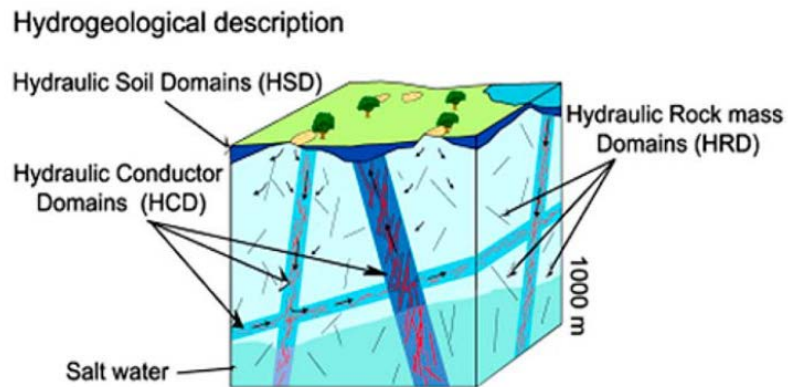


図 II-A-17 SR-Site における水理地質構造の概念図⁽¹¹⁾

閉鎖後初期に対する評価の整理結果を表 II-A-5 に、閉鎖後長期に対する評価の整理結果を表 II-A-6 に示す。また、SR-Site における解析の関連性の詳細を図 II-A-18 (閉鎖後初期) および図 II-A-19 (閉鎖後長期) に示す。

c) 水理地質構造の不確かさの考え方

SR-Site では閉鎖後初期において、スケール毎に以下の不確かさを考慮している。なお各ケースにおいて、亀裂ネットワークモデルによる複数のリアライゼーションが考慮されている。

- ・ 亀裂半径と透水係数の相関に関する設定の違い (全スケール)
- ・ 変形帯の可能性のある領域の考慮 (全スケール)
- ・ 深度依存性に対する設定 (Regional scale, Site scale)
- ・ 処分場領域外での亀裂の設定の有無 (Regional scale, Site scale)

表 II-A-5 SR-Site (閉鎖後初期) の地下水流動解析の概要 (1 / 2)

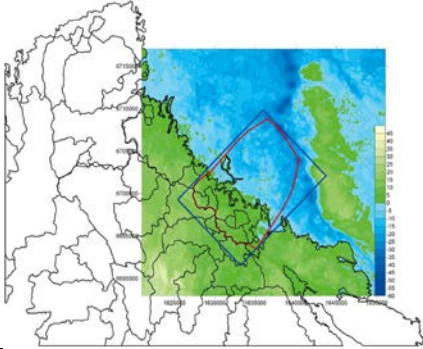
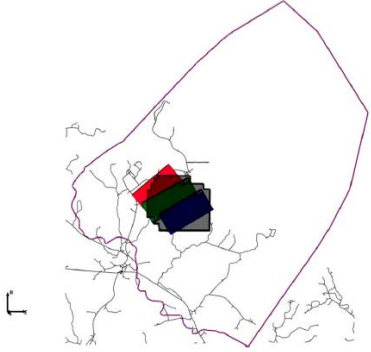
スケール	Regional scale	Site scale	Repository scale
目的	Site scale, Repository scale の境界条件・初期条件を与える	性能指標 (移行時間、移行経路、等価流量、等価フラックス、F 値)、流出位置 (Repository scale での粒子追跡線解析の結果を Site scale に接続、連続的な粒子追跡線解析を実施)	
変動ケース	<ul style="list-style-type: none"> ・ DFN に対する設定 (全てのスケール) ・ 変形帯の可能性のある領域の考慮 (全てのスケール) ・ 透水係数の深度依存性の考慮の有無 (Regional scale と Site scale で考慮) ・ 処分場領域外の DFN に対する領域設定 (Regional scale と Site scale で考慮) ・ EDZ・crown に対する条件設定 (Repository scale で考慮) ・ ボーリング孔の影響 (Repository scale で考慮) 		
領域範囲	約 15km×約 11km×約 2.1km (分水嶺 (R-08-95 1.6))		約 2km×約 2km
			
モデル	HCD: ECPM HRD: ECPM/CPM HSD: CPM 主要トンネル: - 処分トンネル: - 処分孔: - 他の処分場の構造: - EDZ: -	HCD: Single fracture surfaces HRD: DFN/ECPM/CPM HSD: CPM 主要トンネル: 亀裂 処分トンネル: 亀裂 処分孔: - 他の処分場の構造: 亀裂 EDZ: 亀裂	HCD: Single fracture surfaces HRD: DFN HSD: - 主要トンネル: CPM 処分トンネル: CPM 処分孔: CPM 他の処分場の構造: 亀裂 EDZ: 亀裂
コード	ConnectFlow (CPM/ ECPM)		
定常／非定常	非定常	定常／非定常	非定常
飽和／不飽和	飽和	飽和／不飽和	飽和
密度流	考慮	考慮しない	考慮しない

表 II-A-5 SR-Site (閉鎖後初期) の地下水流動解析の概要 (2 / 2)

スケール	Regional scale	Site scale	Repository scale
境界条件 (浸透流)	上部：流入一流出条件 側面：不透水 底面：不透水	上部：圧力固定 (間氷期：Regional scale、 氷期：Super-regional scale) 側面：不透水 底面：不透水	表面：圧力固定 (間氷期：Regional scale、 氷期：Super-regional scale)
境界条件 (塩分濃度)	表面：濃度フラックス 側面：フラックスゼロ 底面：濃度固定	密度固定 (間氷期：Regional scale、氷期：Super-regional scale)	密度固定 (間氷期：Regional scale、氷期：Super-regional scale)
メッシュ (多孔質 媒体)	HRD: 処分場領域内 20 m, 領域外：100 m HSD: 厚さ数 m	HRD: 処分場領域内 20 m, 領域外：60 m (粒子追跡線 解析を行うため細分化して いる) HSD: 厚さ数 m	— (亀裂のみ)
粒子追跡 線解析	—	出発点：Q1, Q2, Q3 に最も 近い処分トンネルに交差す る割れ目 粒子数：1 つの処分孔に 1 個	出発点：処分孔位置 粒子数：1 つの処分孔に 3 個

表 II-A-6 SR-Site (閉鎖後長期) の地下水流動解析の概要 (1 / 2)

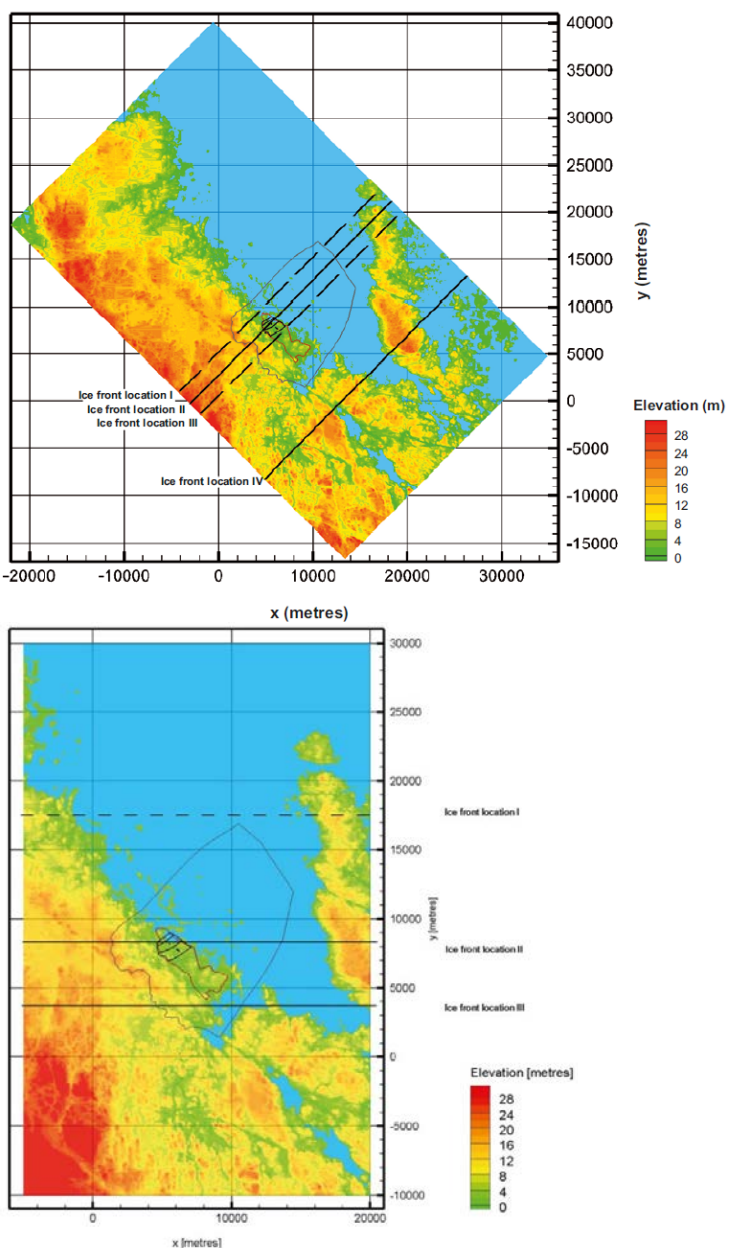
スケール	Super-regional scale	
ケース	A. 永久凍土が発達しない場合 (計3ケース) B. 永久凍土が発達する場合 (計2ケース)	
評価期間	19000年間 (pre-LGM (約1000年間)、LGM (約16000年間)、post-LGM (約1000年間))	
領域範囲	<p>•Case(a), (c)~(e): 約50km×約30km×約2km ×約25km×約2km</p> 	<p>•Case(b): 約40km</p>
モデル	<p>HSD : CPM HRD : 処分場候補領域内 : ECPM、領域外 : CPM 主要トンネル : -, 処分トンネル : -, 処分孔 : -, 他の処分場の構造 : -, EDZ : -</p>	

表 II-A-6 SR-Site (閉鎖後長期) の地下水流動解析の概要 (2 / 2)

スケール	Super-regional scale		
コード	DarcyTools (ECPM/CPM)		
解析種別	飽和, 非定常状態 (密度流を考慮)		
境界条件 (浸透流)	<p>[間氷期]</p> <p>地表: 圧力 0</p> <p>海面: $P=g\rho 0$</p> <p>側面: 不透水</p> <p>底面: 不透水</p>	<p>[氷期 (永久凍土なし)]</p> <p>地表: 圧力 0</p> <p>海面: $P=g\rho 0$</p> <p>氷下: 氷厚さに応じた圧力</p> <p>側面: 不透水</p> <p>底面: 不透水</p>	<p>[氷期 (永久凍土あり)]</p> <p>地表 (永久凍土, タリク (不凍土層)): 圧力 0</p> <p>海面: $P=g\rho 0$</p> <p>氷下: 氷厚さに応じた圧力</p> <p>側面: 不透水</p> <p>底面: 不透水</p>
境界条件 (塩分濃度)	<p>[間氷期]</p> <p>地表: $C=0$</p> <p>海面: $C=0\%$</p> <p>側面: フラックス=0</p> <p>底面: $C=5.94\%$</p>	<p>[氷期 (永久凍土なし)]</p> <p>地表: $C=0$</p> <p>海面: $C=0\%$</p> <p>氷下: $C=0\%$</p> <p>側面: フラックス=0</p> <p>底面: $C=5.94\%$</p>	<p>[氷期 (永久凍土あり)]</p> <p>地表 (永久凍土, タリク (不凍土層)): $C=0$</p> <p>海面・氷下: $C=0$</p> <p>側面: フラックス=0</p> <p>底面: $C=5.94\%$</p>
メッシュ	<p>地表: 水平方向 32 m (50mDEM の再分割)、高さ 2m</p> <p>底面: 128 m</p> <p>処分場領域外: 最大 (512m)³</p> <p>処分場領域内: (32 m)³</p> <p>(計 910 万要素)</p>		

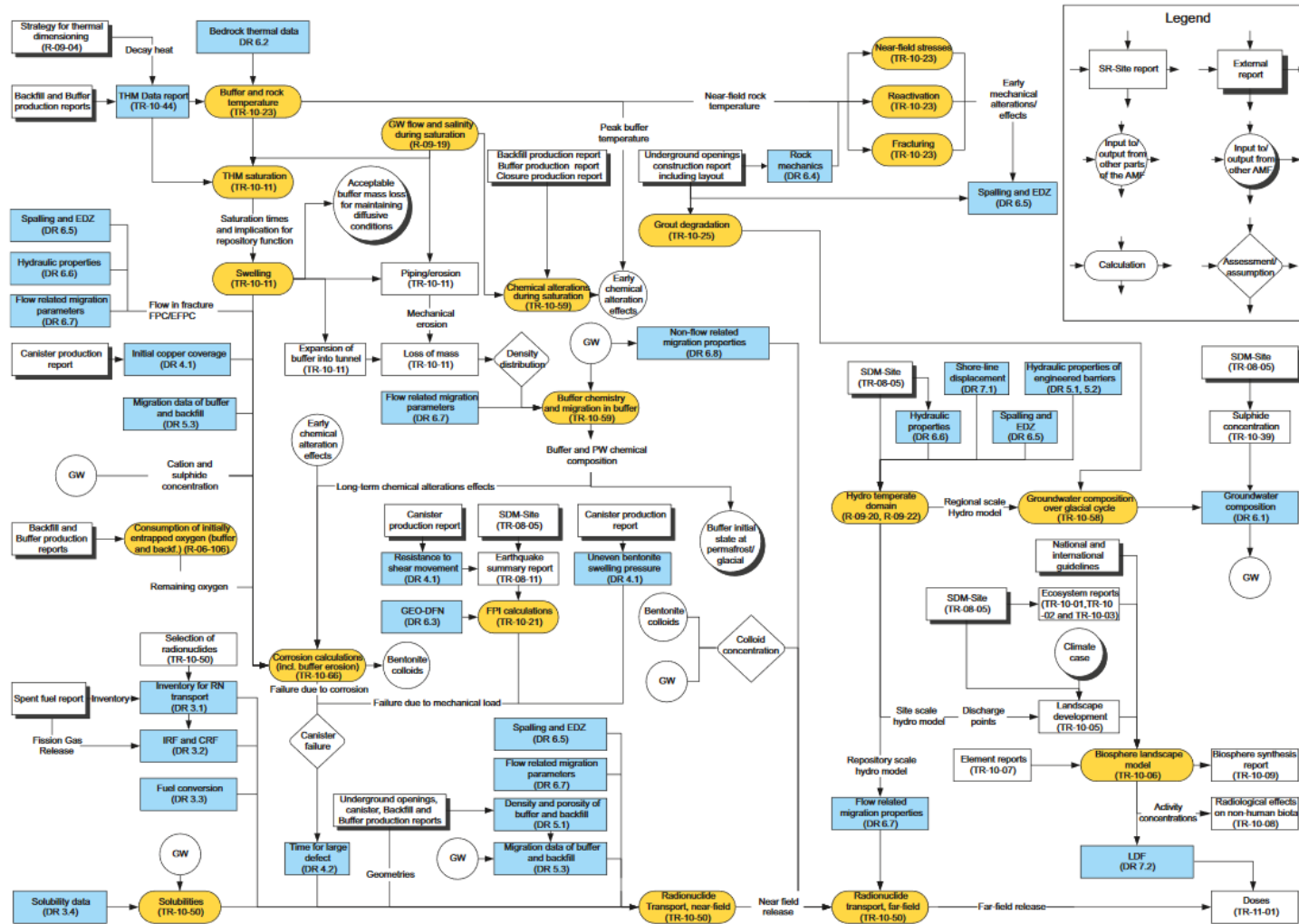


図 II-A-18 SR-Site における評価のフローチャート (閉鎖後初期) (12)

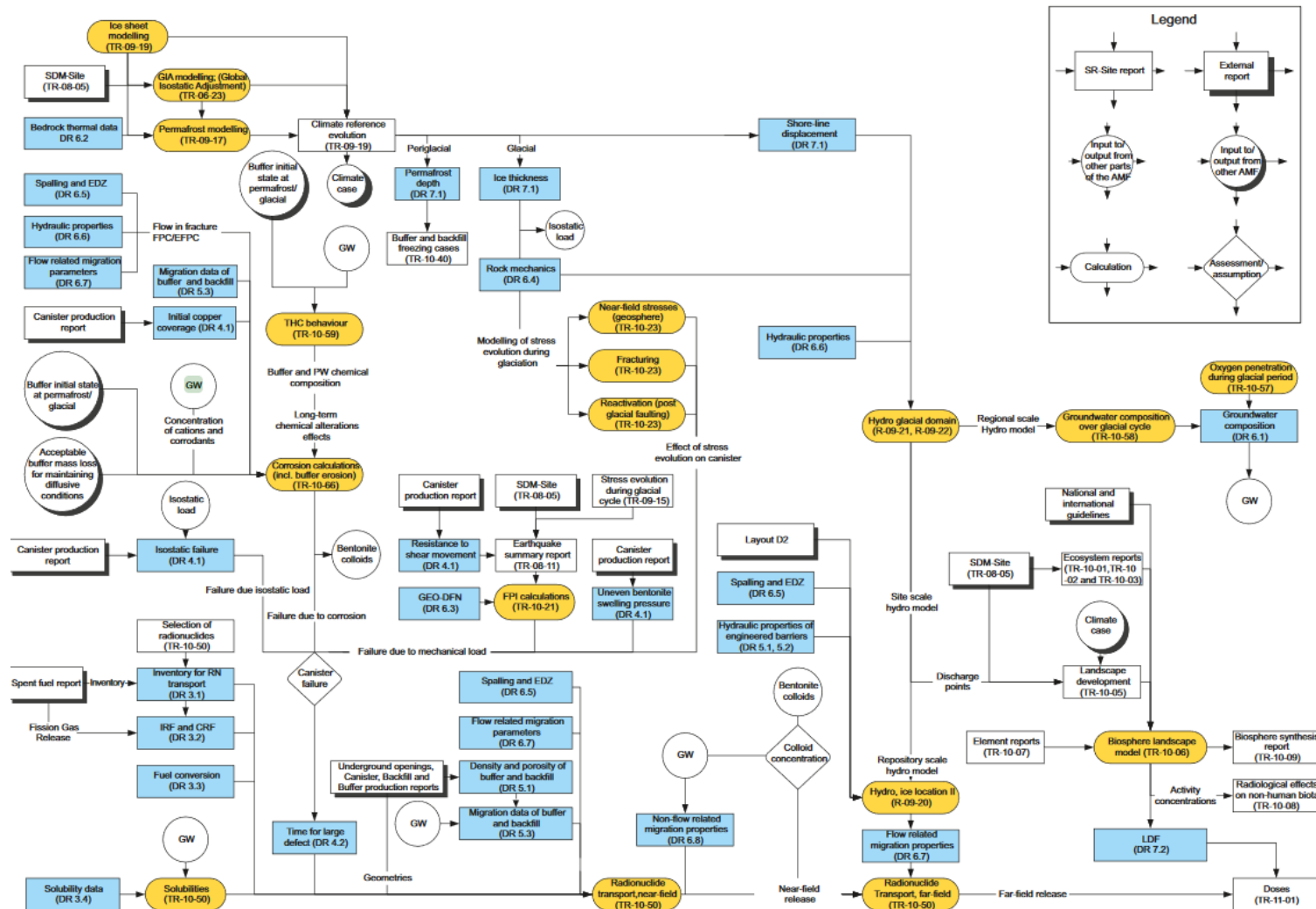


図 II-A-19 SR-Site における評価のフローチャート (閉鎖後長期) ⁽¹²⁾

d) 気候変動・海水準変動の考え方

SR-Site で考慮されている気候変動シナリオの一覧を図 II-A-20 に示す。SR-PSU と考慮するシナリオは同様だが、温暖化の影響を考慮したシナリオだけでなく、過去十万年間の気候変動の外挿（Reference glacial cycle）も基本ケースとしている点が大きく異なる。

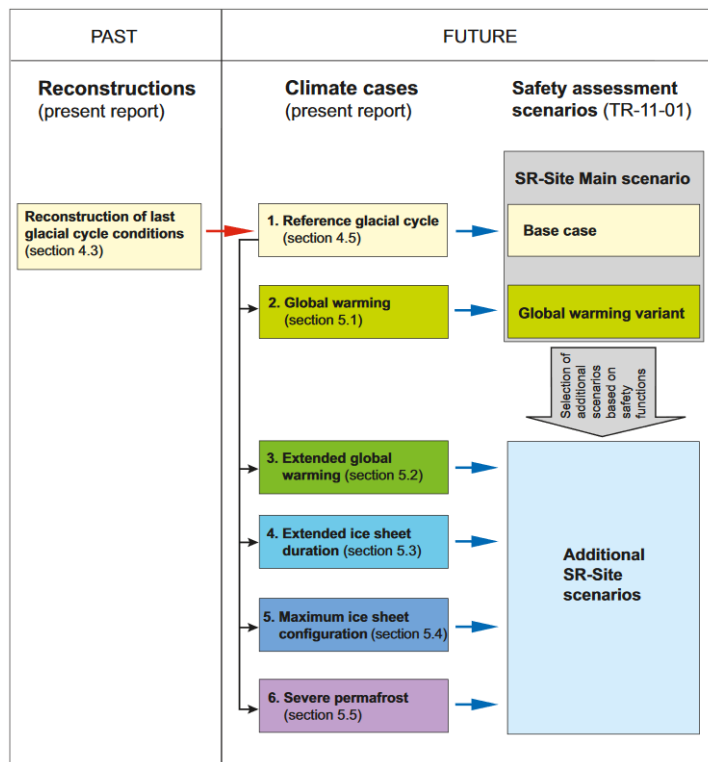


図 II-A-20 SR-Site における気候変動シナリオの設定と安全評価の関係⁽¹³⁾

Reference glacial cycle における気候区分・相対海水準・氷床・永久凍土の厚さの変動を図 II-A-21 に示す。

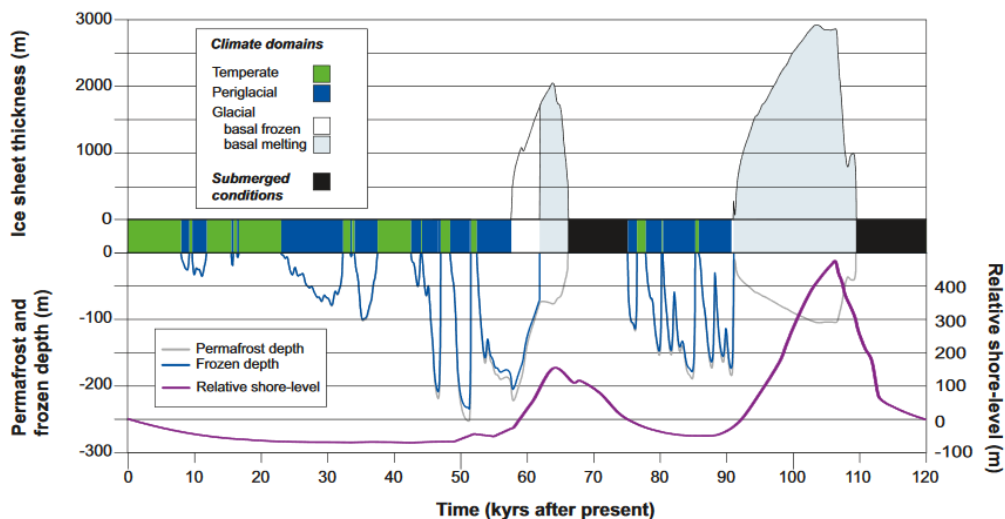


図 II-A-21 Reference glacial cycle における気候変動の設定⁽¹³⁾

Global warming の気候変動・海水準変動の設定は、SR-PSU の設定と同じである。

e) 地形変化の考え方

SR-SiteにおいてもSR-PSUと同様に、母岩のジオメトリは固定するが、氷河性地殻均衡による隆起、および、表土のジオメトリの変化（RLDM）が考慮されている。RLDMの評価はSR-PSUと同じモデルで実施されており、9500 BC（氷床の融解が始まる時期）～11,500 ADの評価を行い、後氷期の堆積厚の調査結果を再現するようにキャリブレーションが行われている。評価結果の一例を図 II-A-22 に示す。

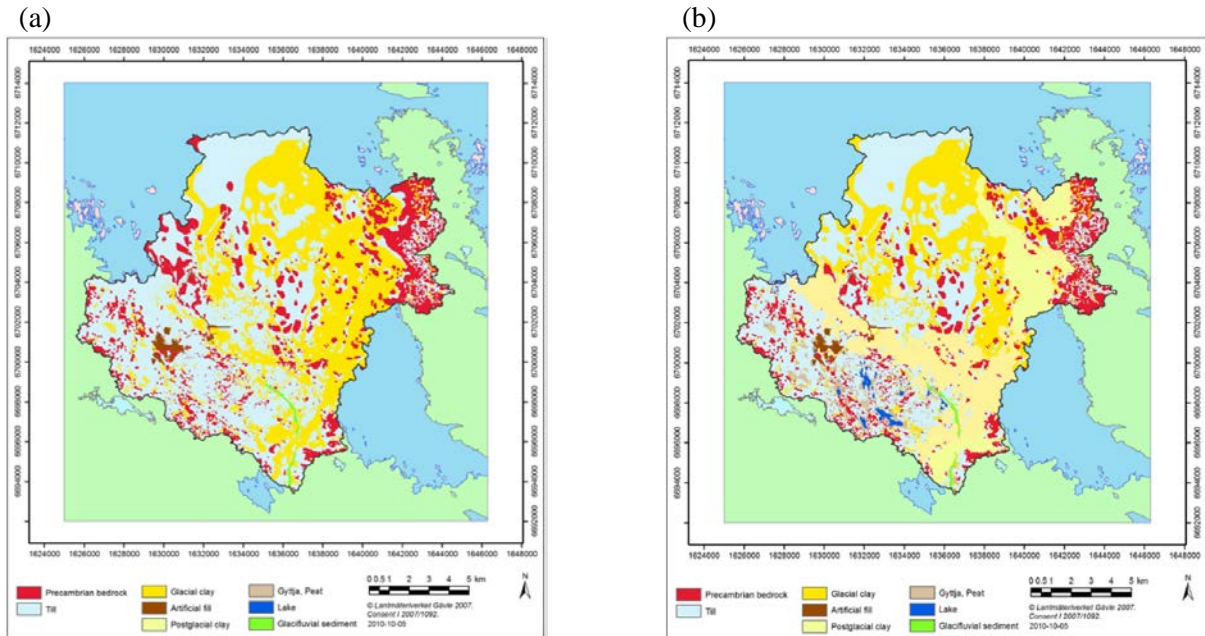


図 II-A-22 SR-SiteにおけるRLDMによる評価結果⁽¹⁴⁾
 ((a) 9500 BC, (b) 2000 AD)

II-B 地形変化評価

II-B.1 パラメータの影響度評価

地形変化シミュレーションにおいて使用されるパラメータと従来の解析での設定値を、表 II-B.1-1 に示す。パラメータを実測データ等から固定できないもの（11 個）のうち、パイル高さを除く 10 個のパラメータに対し、EE 法によって拘束条件に対する影響度を評価した。評価に用いる変動幅は、従来の設定値に基づき設定（評価例がない／少ないものは大きめに設定）した。

■ 拘束条件：

- ✓ 河床縦断形（河成段丘判読位置）が同気候（0 年と約 12 万年後）で一致*1
- ✓ 埋没谷深度（最寒冷期（10 万年後）における現河口（流下長 35.4km）の標高）が推定値（-55 m）に一致
- ✓ 平均侵食速度（期間・領域平均）が推定値（0.089/0.0445 mm/y）に一致
- ✓ 谷底侵食低地の幅が同気候で一致

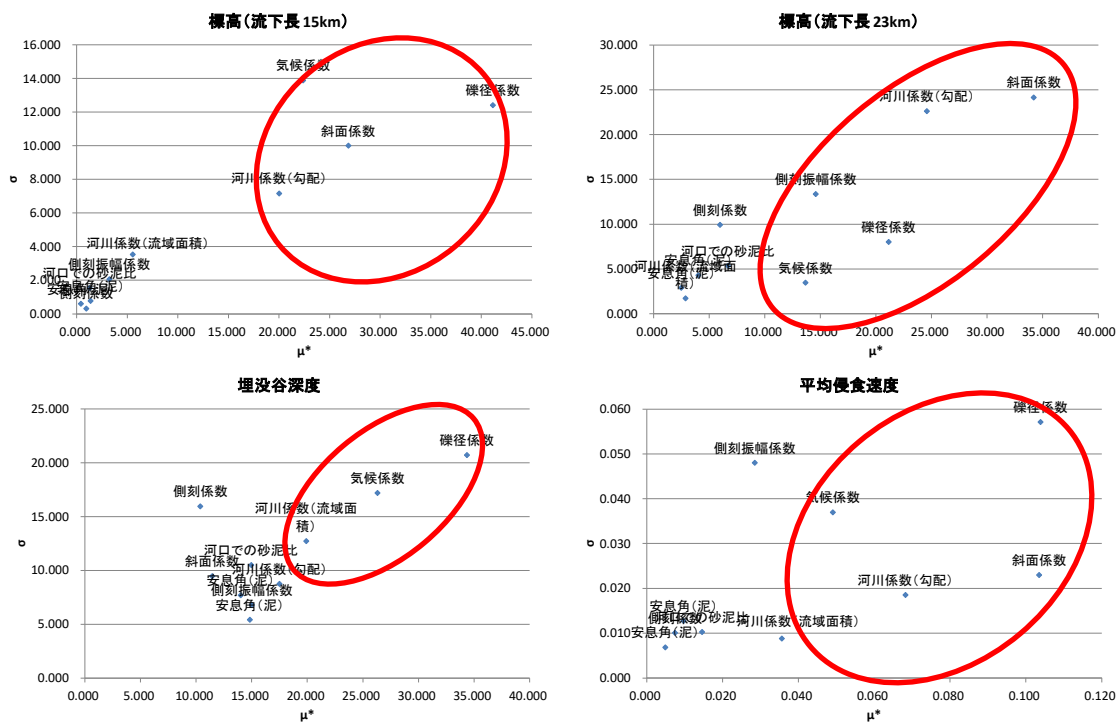


図 II-B.1-1 EE 法によるパラメータ影響度評価の結果

河床縦断形・埋没谷深度・平均侵食速度に対する評価の結果を図 II-B.1-1 に示す。図から、影響の大きいパラメータとして以下の 6 つを抽出した。

斜面係数、河川係数(勾配)、河川係数(流域面積)、礫径係数、気候係数、側刻振幅係数

表 II-B.1-1 地形変化シミュレーションに使用されるパラメータと従来の解析・影響度評価での設定値

パラメータ	名称	単位	固定できる？ (H30外注での設定値)		従来の解析での設定値			EE法		備考	
					H21水文 (房総)	H24東濃	H30東濃 (天野川)	min	max		
時間設定	シミュレーションのステップ年	TIME_STEP	y	○	10		1	1			・ステップ毎に流路を見直し(※洪水頻度FLDtimeintは昔のパラメータ) ・洪水は数十年間隔で起こると想定(DAKOU_p) (利根川:15~16年に1回(=1700年代以降の250年間に16回))
侵食・運搬	斜面領域／河川領域の境界	iGSL2	m	○	1000	5000	3000	1000			厚沢部における流域面積の平方根
	斜面係数	iGSD	—	×	0.0018	0.025	0.015	0.006	0.0001	0.01	係数F_SD=2.5をかけて以前のモデル(勾配に比例)と比較している
	河川係数(SPI法、流域面積に比例)	F_AREA	—	×	0.0016			0.002	0.0001	0.01	
	河川係数(SPI法、勾配に比例)	F_SLP	—	×	0.0005			0.002	0.0001	0.01	
	斜面の土砂平均移動距離	iG_Wslp	m	○	50		50	50			1つ下流のメッシュに堆積する(メッシュサイズ:57.7m)
	河川域上流端での運搬距離	iG_Winit	m	○	50		500	50			1つ下流のメッシュに堆積する(メッシュサイズ:57.7m)
	礫径係数	iG_DIFF_K	—		7	5.0	7.0	5.0	4	8	H21土岐川での実験に基づく値:4前後
	河口に到達した土砂の海底に堆積する割合	Siltation_ratio	—	○	1		1	1			全量堆積
気候係数	気候係数	GLC_FACTOR	—	×	0.36	0.66	0.30	0.7*	0.3	0.7	
側刻・蛇行	側刻強度	SIDE_ER_F	—	×	0.03		1		0.01	1	
	蛇行が始まる流下長	DAKOU_L	m	○	3162						厚沢部において側刻が現れる流域面積(10km ²)の平方根
	蛇行が始まる勾配	DAKOU_SLP	—	○	0.02						7河川での計測結果より
	蛇行幅の算出係数	DAKOU_a	—	○	573						7河川での計測結果より(W=DAKOU_a*ln(DAKOU_L^2)-DAKOU_b)
	蛇行幅の定数項	DAKOU_b	—	○	-1500						
	側刻振幅係数	DAKOU_k	—	×	0.3				0.1	0.5	最大:パイル半径=沖積幅の半分、最小:沖積幅を再現するため0より大きい値を設定
	蛇行時の確率	DAKOU_p	%	○	10						洪水の頻度で考慮可能
	パイル1段の高さ	PILE_H	m	×	1.0				1	1	固定(根拠なし)
海域での堆積	海に到達した土砂の堆積する割合	Depo_F	—	○	1		1	1			全量堆積
	安息角(泥)	Repose_angle	—	×	0.0175 (1°)				1	6	5海域での計測結果:2°~3°(0°~6°)
	水深20m以浅の安息角(砂)	Shore_angle	—	×	0.0875 (5°)				1	6	
	河口での砂泥比(=砂/(砂+泥))	Sand_ratio	—	×	0.5				0	1	
	堆積物の空隙率 堆積時に体積が増加する	Sed_porosity	—	○	0						堆積物の空隙を考慮しないとする
	1ステップで土砂が移動できる最大回数	MAX_ITR	—	○	50						移動しければよい

II-B.2 近似モデルの作成結果

① 古地形の推定

基本ケース・変動ケース（隆起速度・地質係数）とも、各拘束条件に対し作成した近似モデルの自由度調整済み決定係数は概ね 0.9 以上であった。

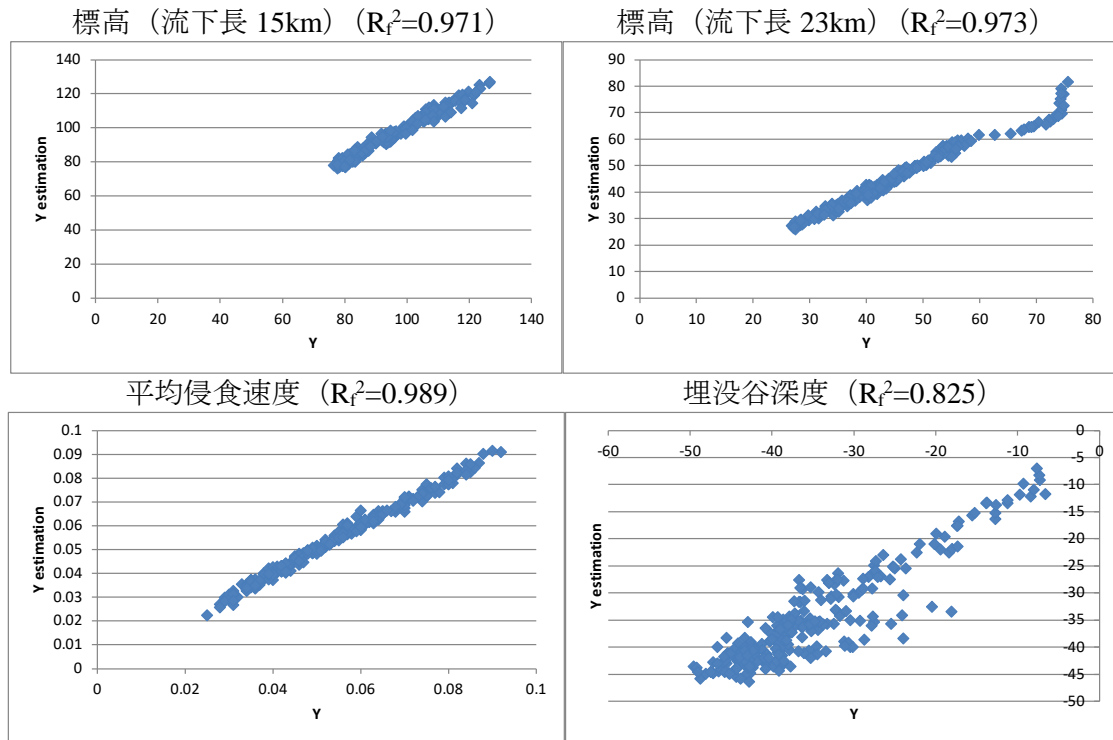


図 II-B.2-1 近似モデル（古地形の推定）（基本ケース）

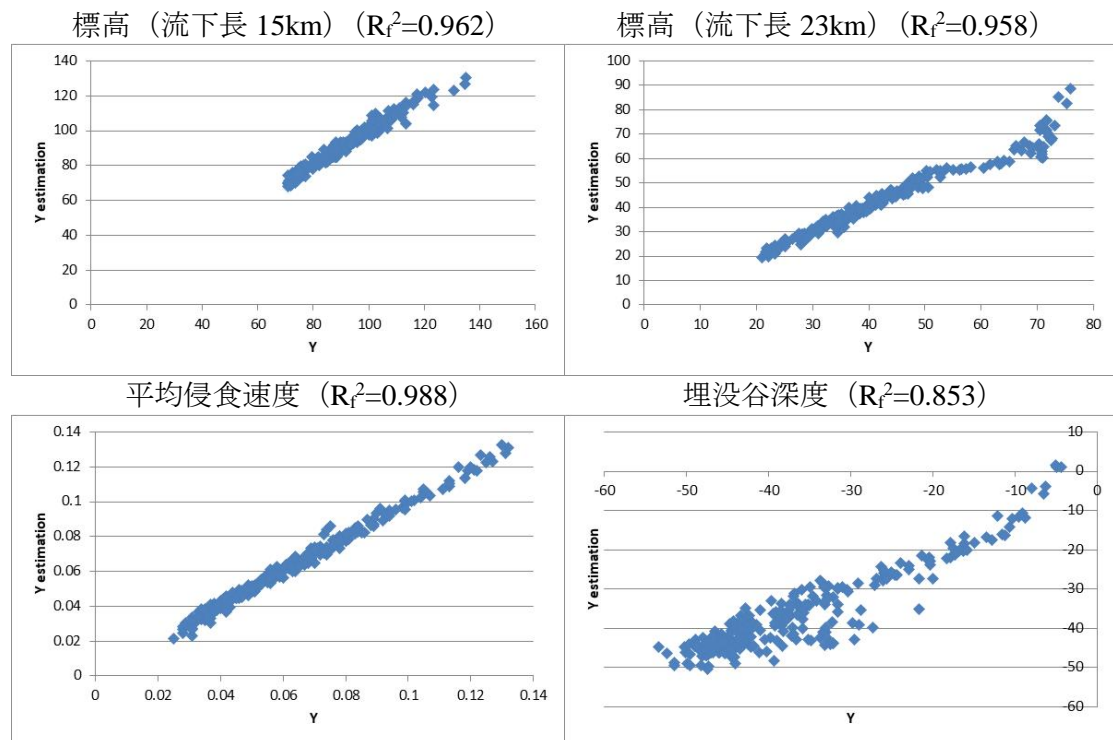


図 II-B.2-2 近似モデル（古地形の推定）（変動ケース（隆起速度））

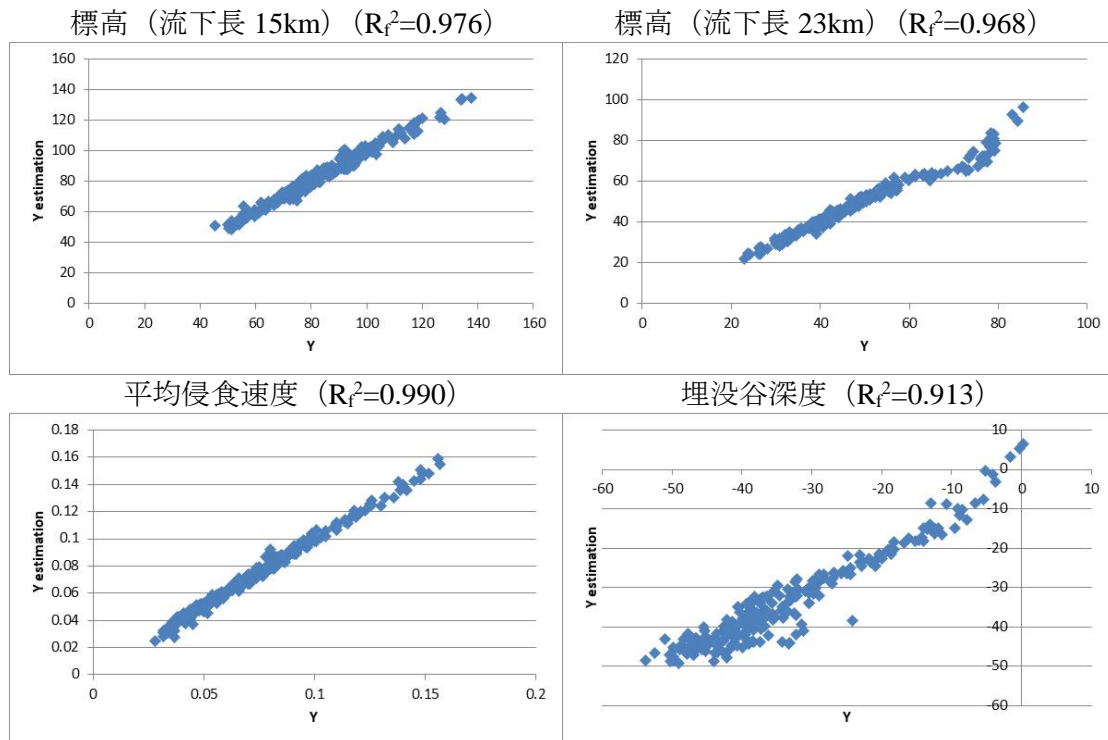


図 II-B.2-3 近似モデル (古地形の推定) (変動ケース (地質係数))

② 現在を再現するパラメータの推定

基本ケース・変動ケース (隆起速度・地質係数) とともに、各拘束条件に対し作成した近似モデルの自由度調整済み決定係数は概ね 0.9 以上であった。

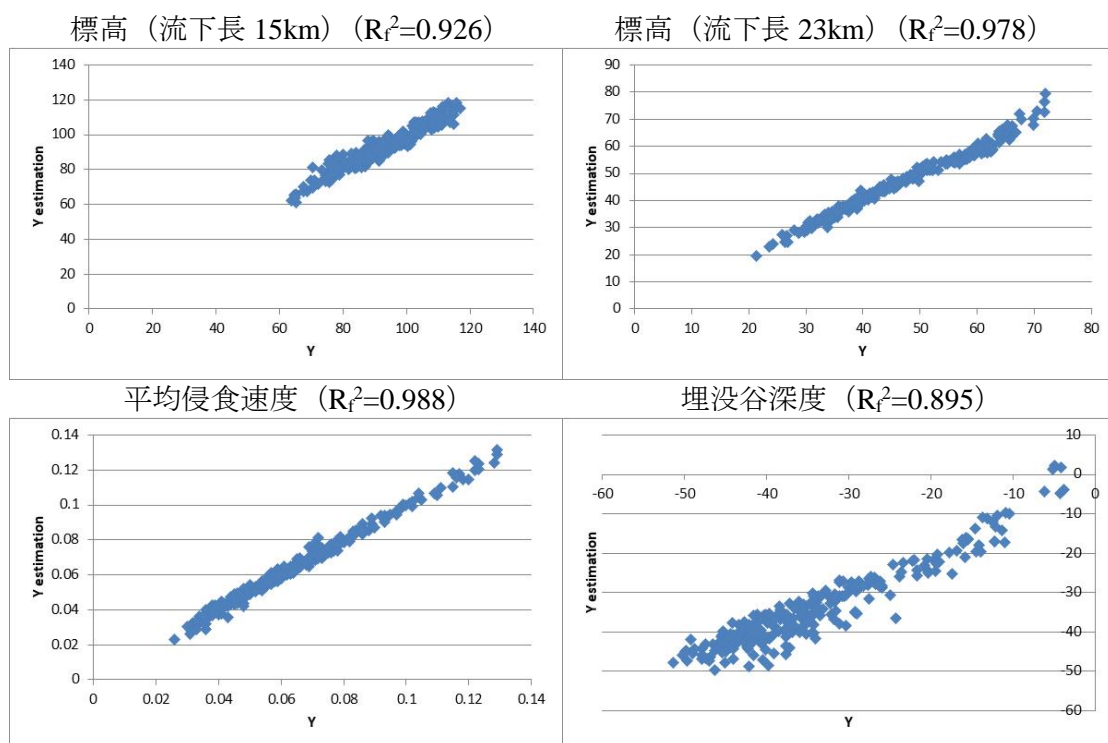


図 II-B.2-4 近似モデル (現在の再現) (基本ケース)

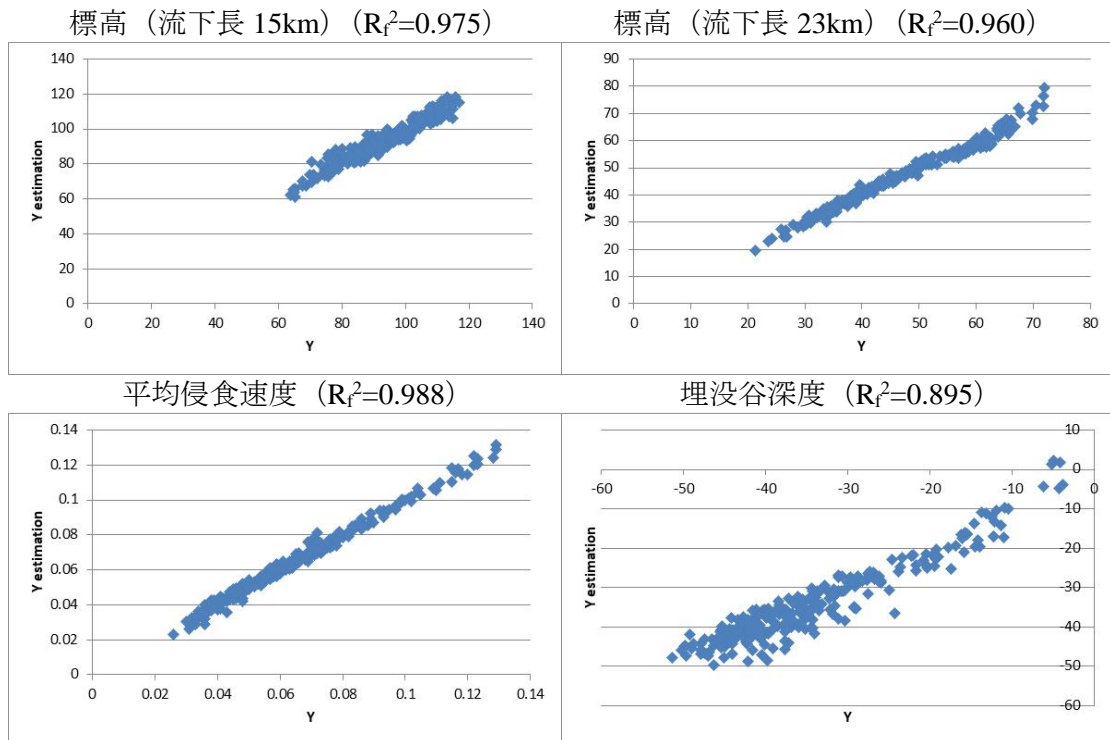


図 II-B.2-5 近似モデル (現在の再現) (変動ケース (隆起速度))

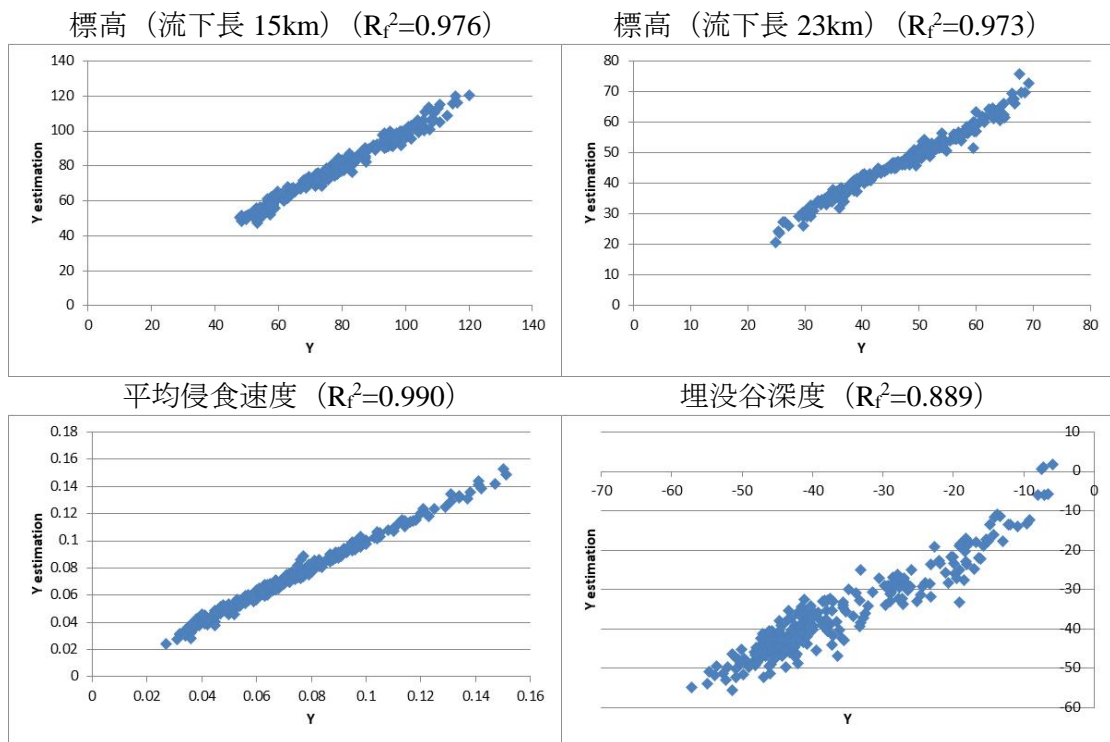


図 II-B.2-6 近似モデル (現在の再現) (変動ケース (地質係数))

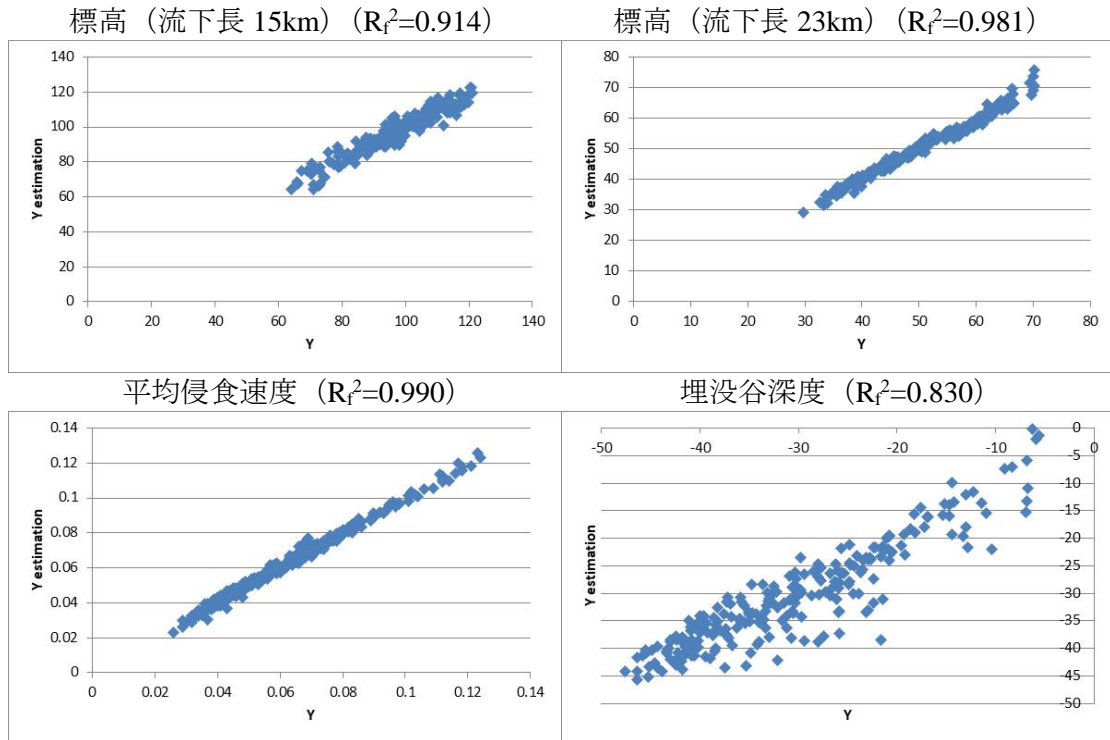


図 II-B.2-7 近似モデル（現在の再現）（変動ケース（侵食速度））

II-B.3 古地形の評価結果

基本ケース・変動ケース（隆起速度・地質係数・平均侵食速度）に対する古地形の推定結果を以下に示す。

● 基本ケース

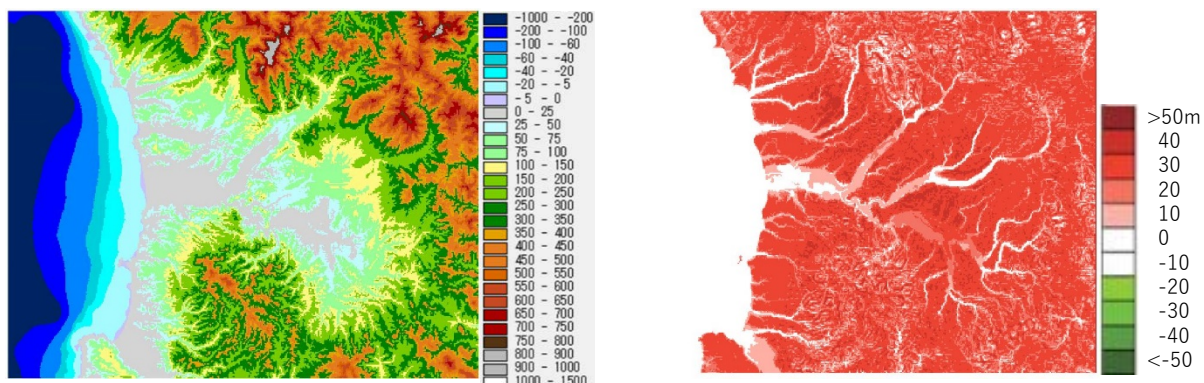


図 II-B.3-1 推定した古地形（基本ケース）
 (左図：標高 (m)、右図：現在の地形と推定した古地形の標高差)

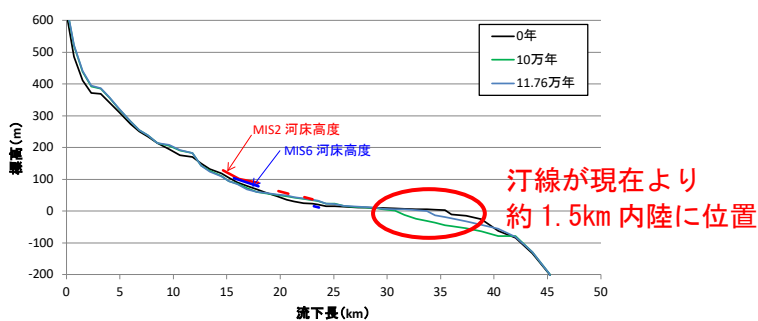


図 II-B.3-2 12 万年間の河床縦断面の変化（古地形の推定）（基本ケース）

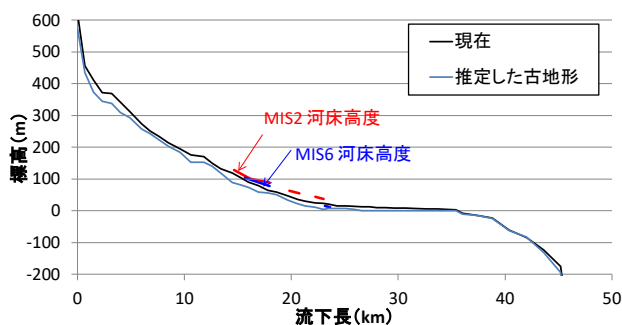


図 II-B.3-3 推定した古地形と現在の地形の河床縦断面比較（基本ケース）

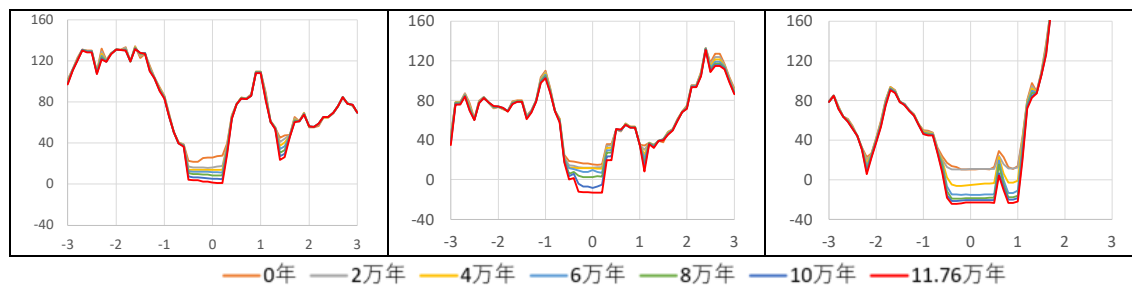


図 II-B.3-4 12 万年間の河床横断面の変化（古地形の推定）（基本ケース）

● 変動ケース（隆起速度）

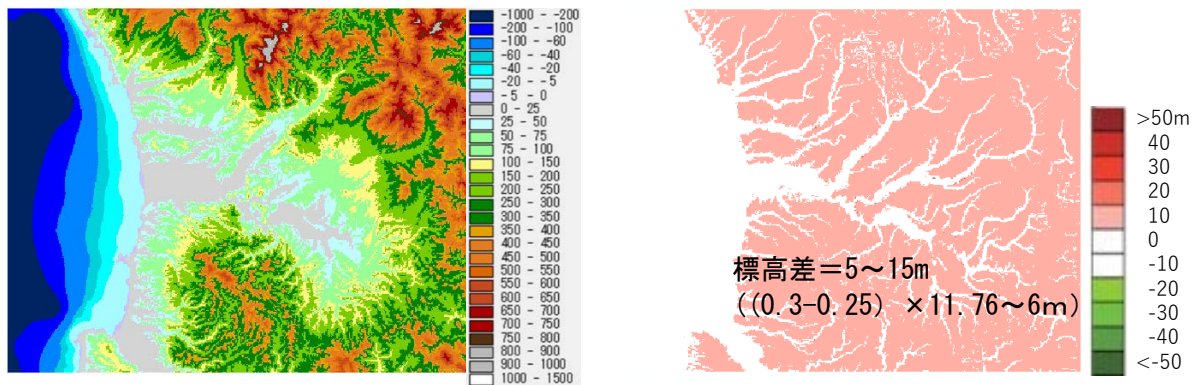


図 II-B.3-5 推定した古地形（変動ケース（隆起速度））
（左図：標高（m）、右図：古地形（基本ケース）との標高差）

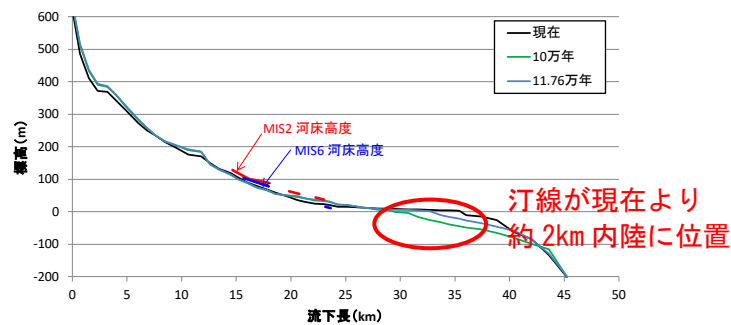


図 II-B.3-6 12 万年間の河床縦断形の変化（古地形の推定）（変動ケース（隆起速度））

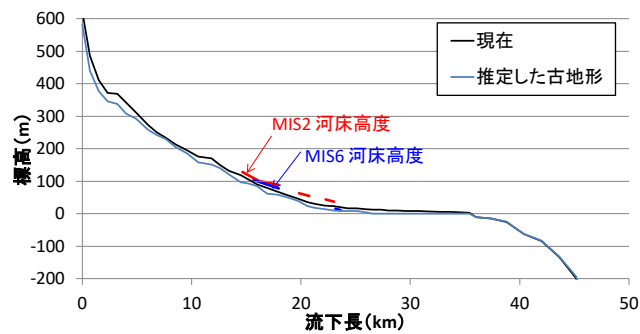


図 II-B.3-7 推定した古地形と現在の地形の河床縦断形比較（変動ケース（隆起速度））

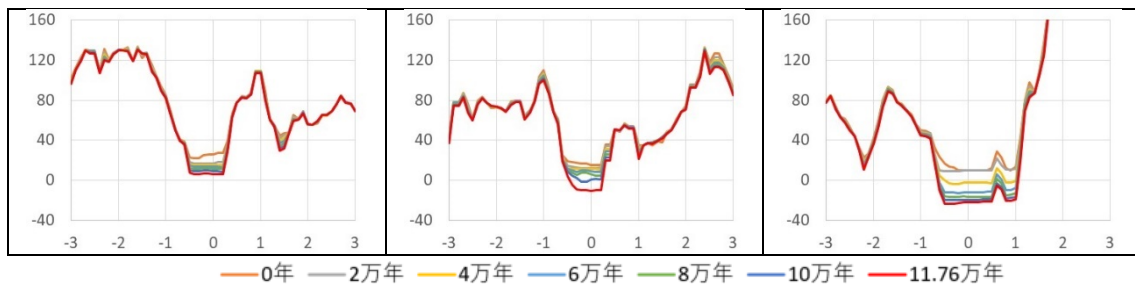


図 II-B.3-8 12 万年間の河床横断面の変化（古地形の推定）（変動ケース（隆起速度））

● 変動ケース（地質係数）

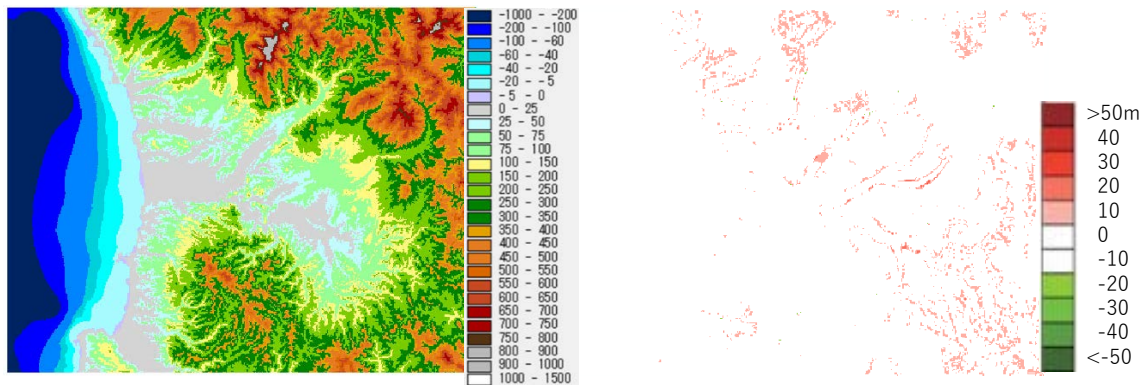


図 II-B.3-9 推定した古地形（変動ケース（地質係数））
（左図：標高（m）、右図：古地形（基本ケース）との標高差）

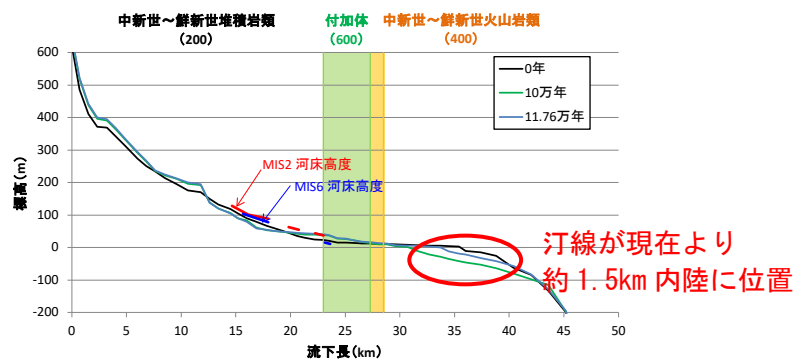


図 II-B.3-10 12 万年間の河床縦断形の変化（古地形の推定）（変動ケース（地質係数））

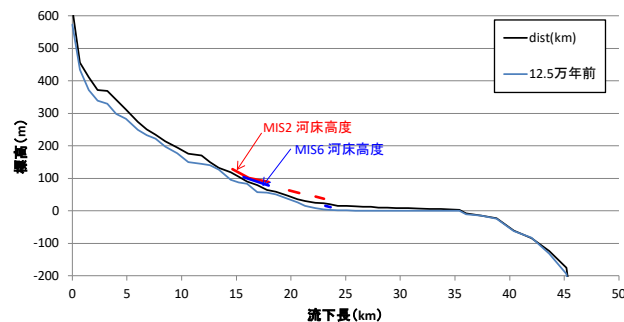


図 II-B.3-11 推定した古地形と現在の地形の河床縦断形比較（変動ケース（地質係数））

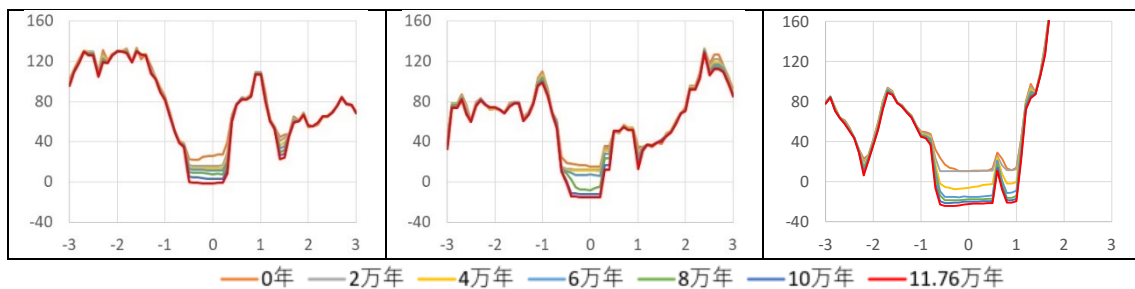


図 II-B.3-12 12 万年間の河床横断面の変化（古地形の推定）（変動ケース（地質係数））

● 変動ケース（平均侵食速度）

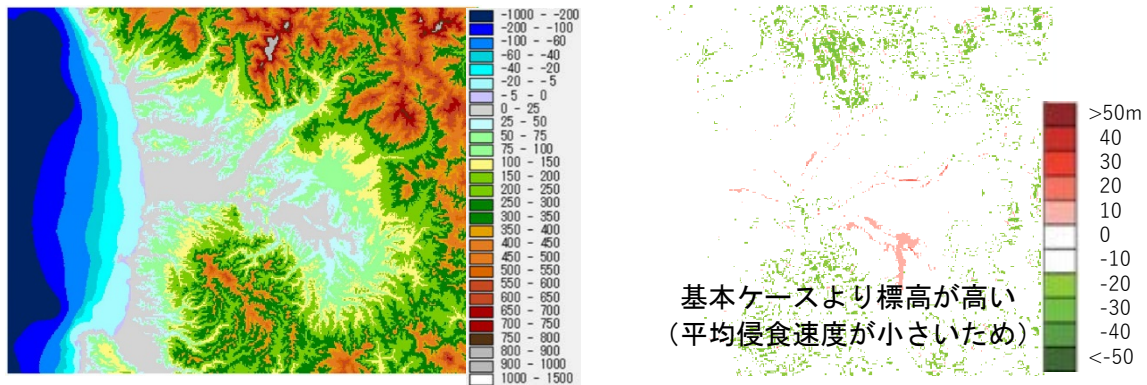


図 II-B.3-13 推定した古地形（変動ケース（侵食速度））
（左図：標高（m）、右図：古地形（基本ケース）との標高差）

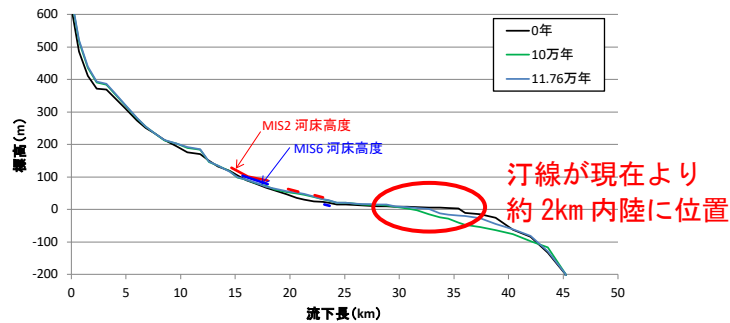


図 II-B.3-14 12 万年間の河床縦断形の変化（古地形の推定）（変動ケース（侵食速度））

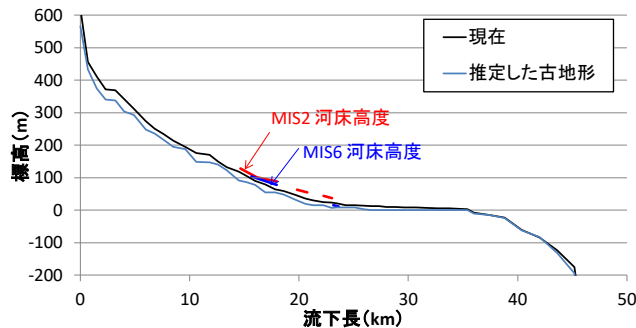


図 II-B.3-15 推定した古地形と現在の地形の河床縦断形比較（変動ケース（侵食速度））

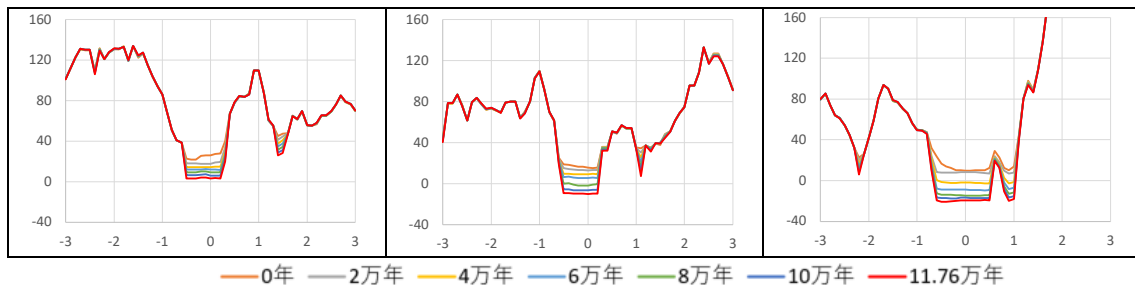


図 II-B.3-16 12 万年間の河床横断面の変化（古地形の推定）（変動ケース（侵食速度））

II-B.4 過去～現在の評価結果

基本ケース・変動ケース（隆起速度・地質係数・平均侵食速度）に対する過去～現在の評価結果を以下に示す。

● 基本ケース

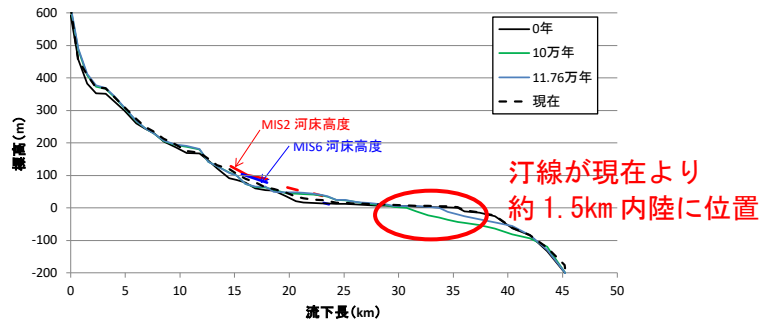


図 II-B.4-1 12 万年間の河床縦断面形の変化（現在の地形の再現）（基本ケース）

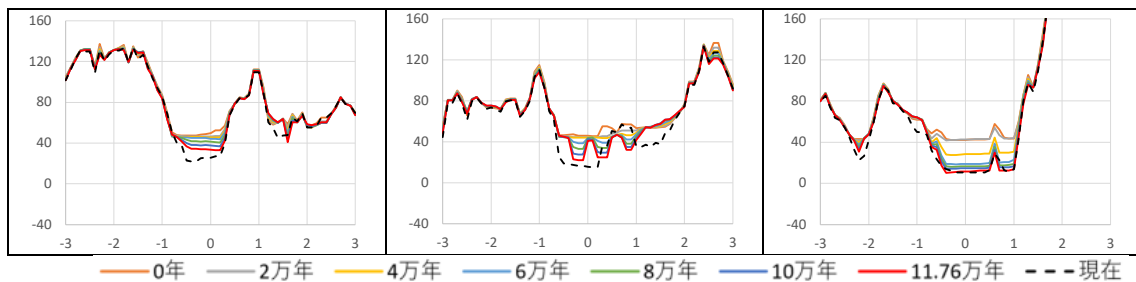


図 II-B.4-2 12 万年間の河床横断面の変化（現在の地形の再現：基本ケース）

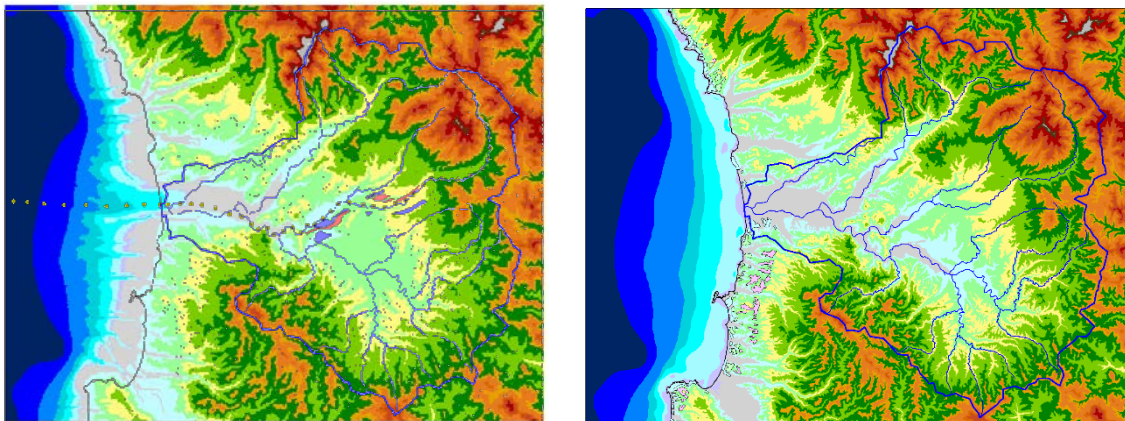


図 II-B.4-3 推定した現地形（左）と実際の現地形（右）の標高（基本ケース）

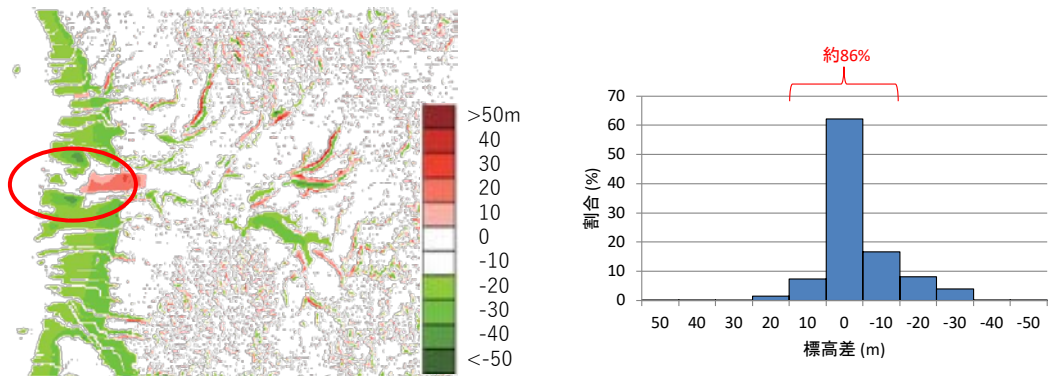


図 II-B.4-4 推定した地形と現在の地形との標高差（基本ケース）

● 変動ケース（隆起速度）

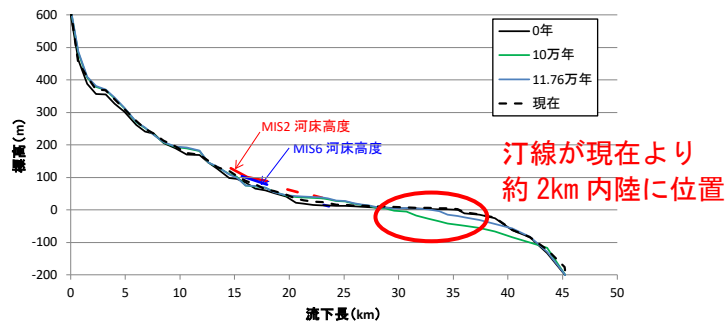


図 II-B.4-5 12 万年間の河床縦断面の変化（現在の地形の再現）（変動ケース（隆起速度））

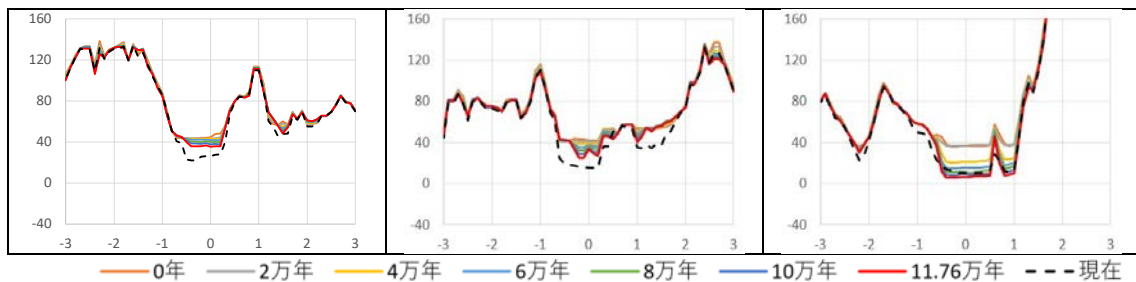


図 II-B.4-6 12 万年間の河床横断面の変化（現在の地形の再現）（変動ケース（隆起速度））

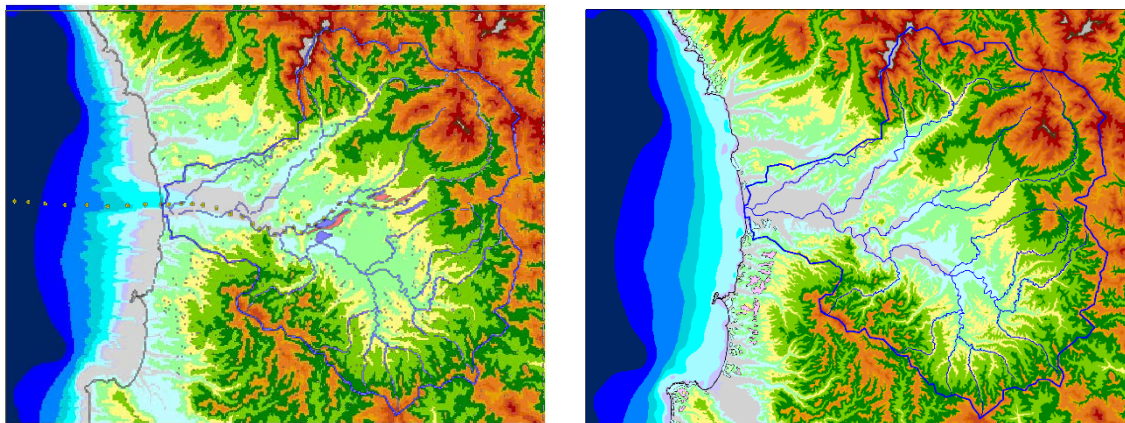


図 II-B.4-7 推定した現地形（左）と実際の現地形（右）の標高（変動ケース（隆起速度））

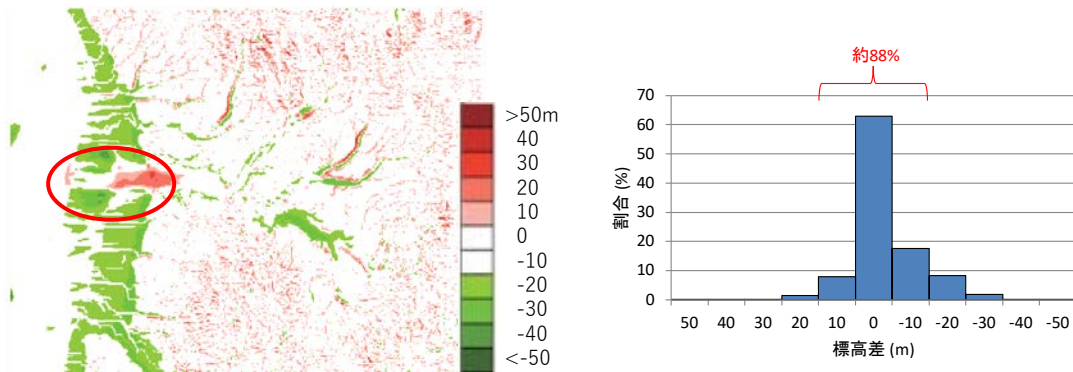


図 II-B.4-8 推定した地形と現在の地形との標高差（変動ケース（隆起速度））

● 変動ケース（地質係数）

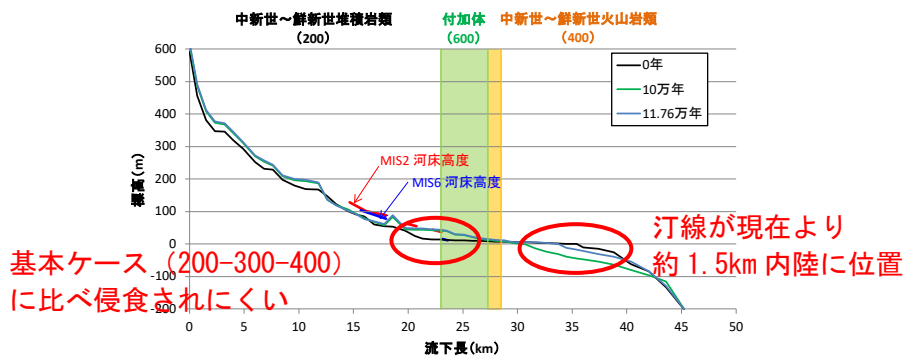


図 II-B.4-9 12 万年間の河床縦断面の変化（現在の地形の再現）（変動ケース（地質係数））

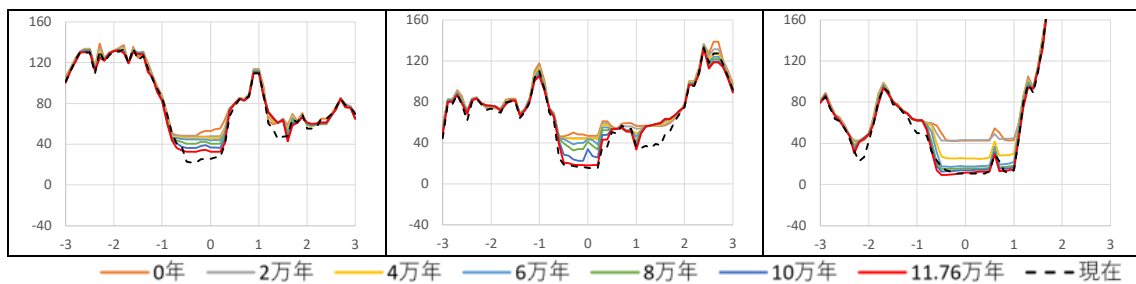


図 II-B.4-10 12 万年間の河床横断面の変化（現在の地形の再現）（変動ケース（地質係数））

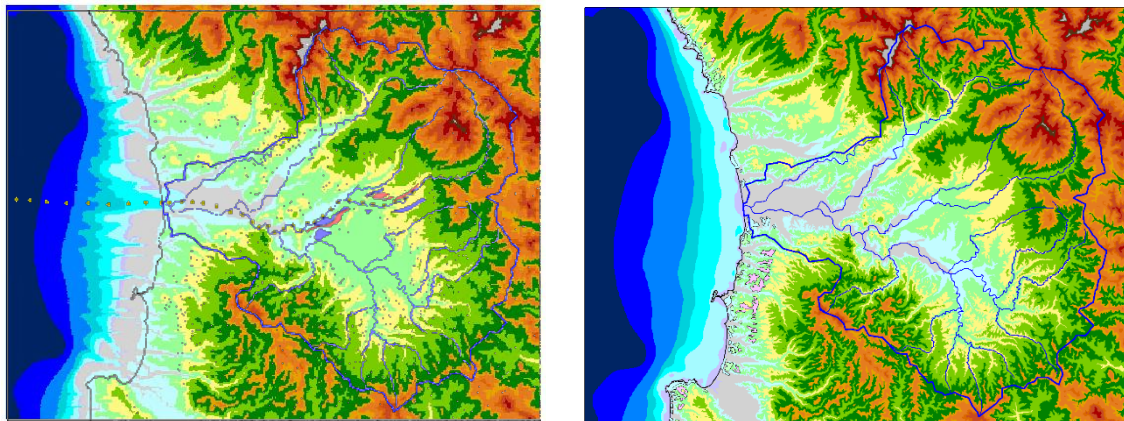


図 II-B.4-11 推定した現地形（左）と実際の現地形（右）の標高（変動ケース（地質係数））

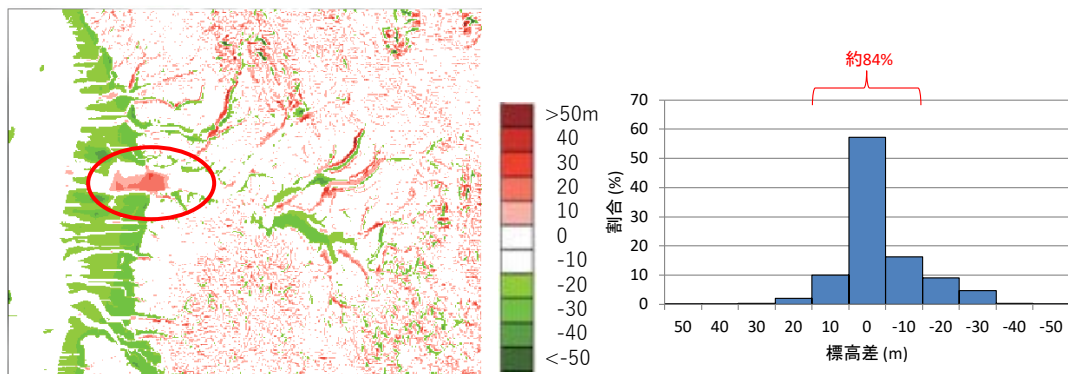


図 II-B.4-12 推定した地形と現在の地形との標高差（変動ケース（地質係数））

● 変動ケース（平均侵食速度）

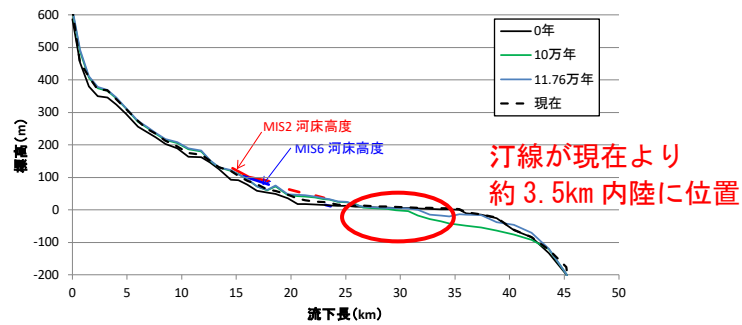


図 II-B.4-13 12 万年間の河床縦断面形の変化（現在の地形の再現）（変動ケース（侵食速度））

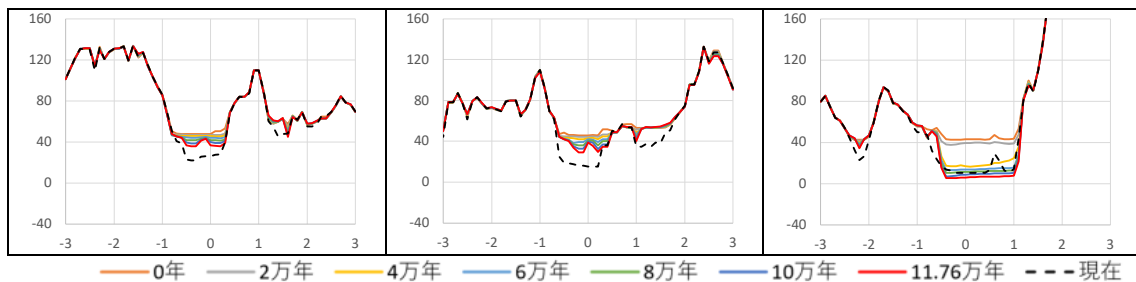


図 II-B.4-14 12 万年間の河床横断面の変化（現在の地形の再現）（変動ケース（侵食速度））

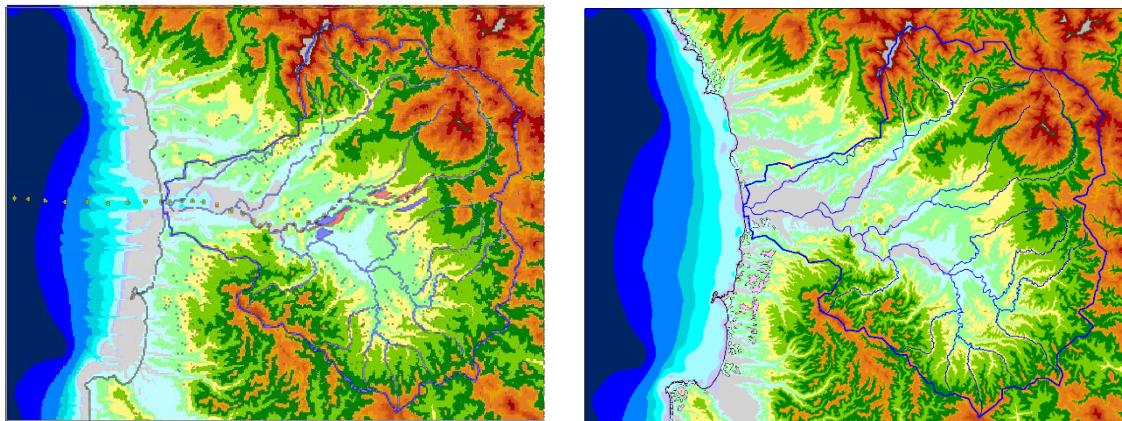


図 II-B.4-15 推定した現地形（左）と実際の現地形（右）の標高（変動ケース（侵食速度））

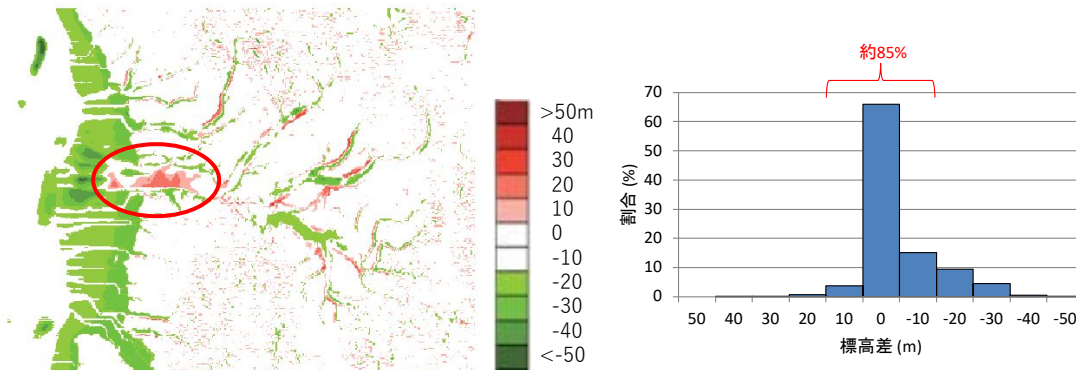


図 II-B.4-16 推定した地形と現在の地形との標高差（変動ケース（侵食速度））

II-B.5 現在～将来の評価結果

A. 基本ケース

- 海水準変動 ケース 2 (過去 12.5 万年間を単純化)

- ・ 標高・沖積層厚さ・汀線の変動幅

現在・最寒冷期・12.5 万年後の標高・沖積層厚さを図 II-B.5-1 に示す。また、汀線の変動幅 (10.8 万年, 12.5 万年) を 12.5 万年後の図に合わせて示す。地形変化の傾向はケース 1 と同様だが、ケース 1 より埋没谷が深く形成され、これに伴い 12.5 万年後の汀線位置が内陸部に深く入り込んでいる。これは、海水準変動の単純化により 8~10 万年後の海水準がケース 1 より低い時期が継続したことで侵食が大きくなったことが原因である (河川域および斜面域の侵食 $\propto 1/\text{気候係数}$ 、気候係数 \propto 海水準)。

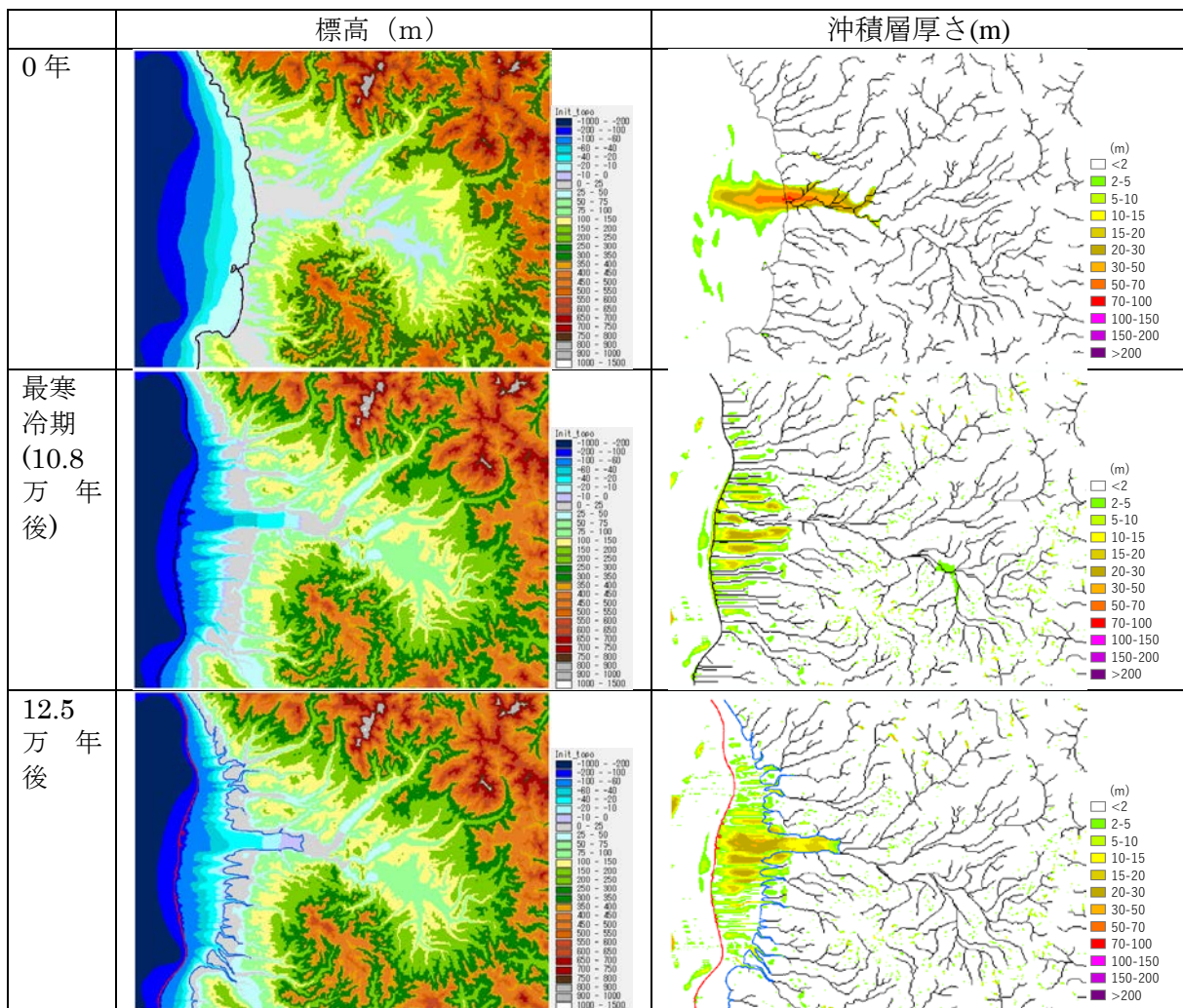


図 II-B.5-1 標高・沖積層厚さ・汀線の変動幅 (A-2)

● 海水準変動 ケース 3 (イギリス(CRU) : AN1-7 に類似)

・ 標高・沖積層厚さ・汀線の変動幅

現在・最寒冷期・12.5 万年後の標高・沖積層厚さを図 II-B.5-2 に示す。また、汀線の変動幅 (10.8 万年, 12 万年) を 12.5 万年後の図に合わせて示す。ケース 3 では現在の海水準が約 6 万年間続くと想定しているため、ケース 1 に比べ海域での堆積量が多い。海退により陸化した地域のうち河川域では堆積した沖積層の削剥が起こる。

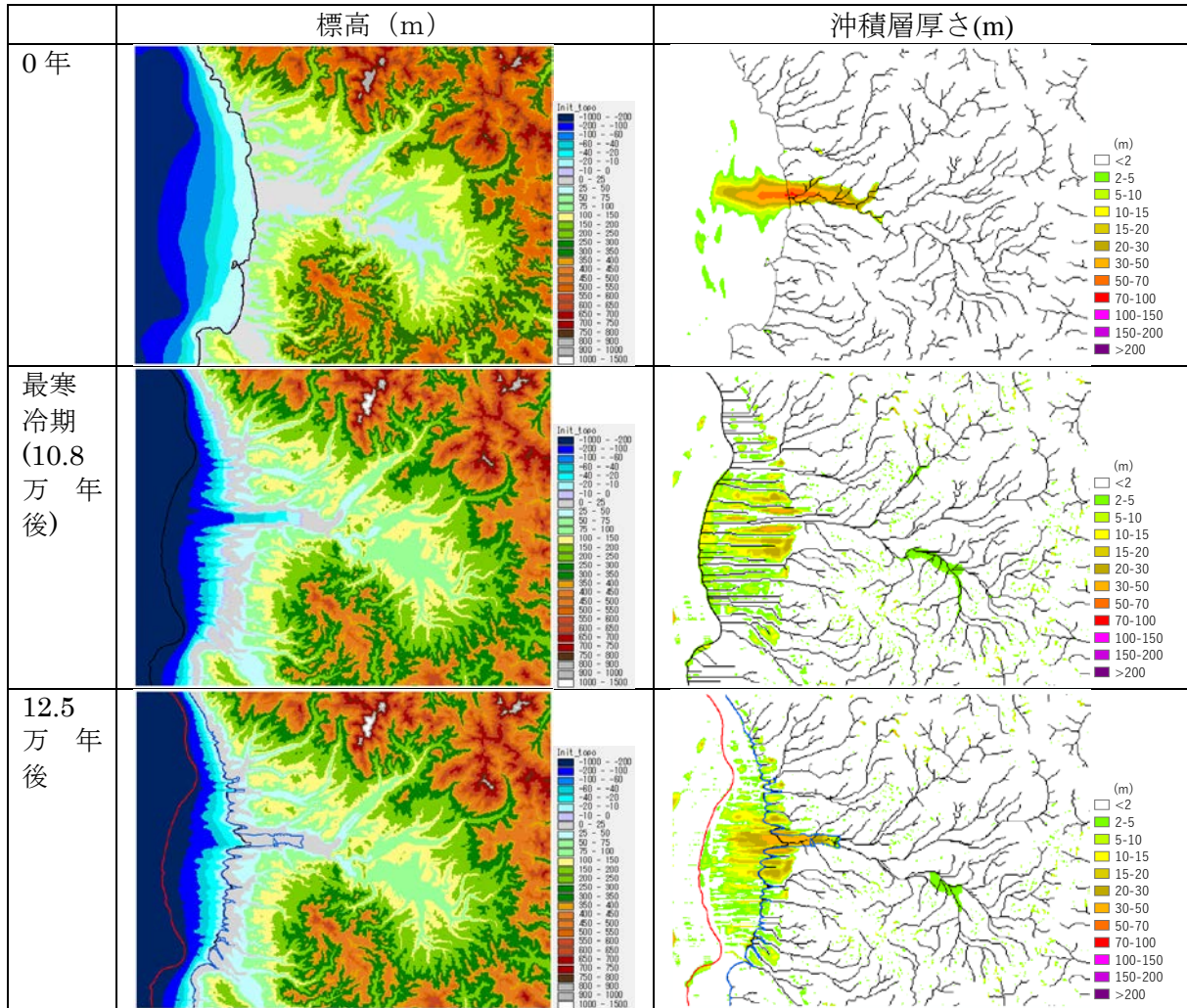


図 II-B.5-2 標高・沖積層厚さ・汀線の変動幅 (A-3)

● 海水準変動 ケース 4 (イギリス(CRU) : AN8 に類似)

・ 標高・沖積層厚さ・汀線の変動幅

現在・最寒冷期・12.5 万年後の標高・沖積層厚さを図 II-B.5-3 に示す。また、汀線の変動幅 (10.8 万年, 12.5 万年) を 12.5 万年後の図に合わせて示す。ケース 4 では海水準が現在からあまり変動しないため、全ケース中海域での堆積厚が最も大きい。また、汀線の変動幅は現汀線位置から海側に 2km 程度である (主要河川の河口付近で汀線が内陸に入り込んでいるのは、陸側にある-0.01m 程度の標高をひろっているためであり、実際は汀線は海側に広がっている)。

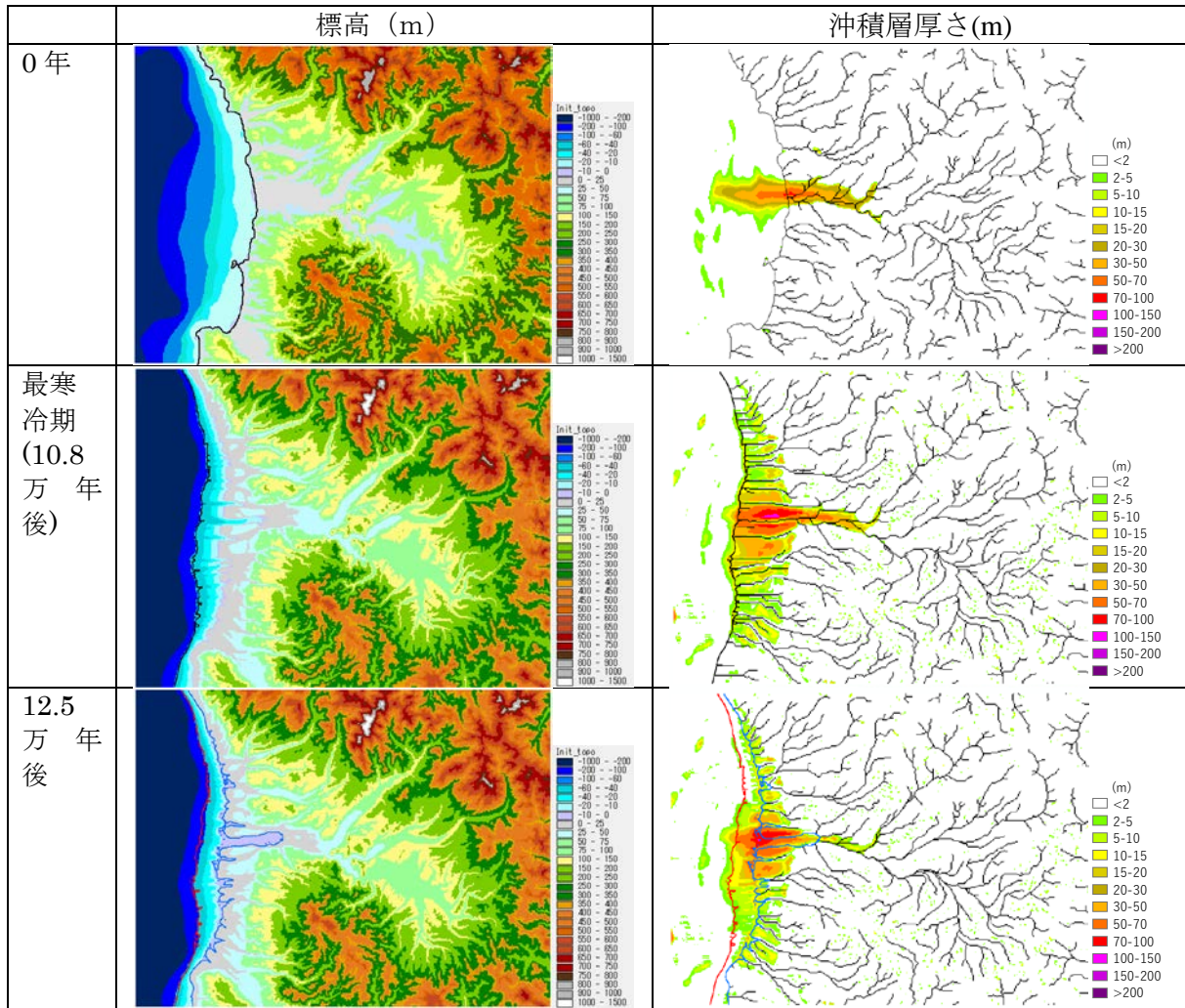


図 II-B.5-3 標高・沖積層厚さ・汀線の変動幅 (A-4)

● 海水準変動 ケース 5 (初期に大きく低下し、一定期間海水準を維持する)

・ 標高・沖積層厚さ・汀線の変動幅

現在・最寒冷期・12.5 万年後の標高・沖積層厚さを図 II-B.5-4 に示す。また、汀線の変動幅 (10 万年, 12.5 万年) を 12.5 万年後の図に合わせて示す。ケース 5 では海水準が低い時期が継続するため、河川の下刻による侵食がケース 1 より大きく起こる。これにより、12.5 万年後の汀線は現在より約 5km 内陸に入り込む。

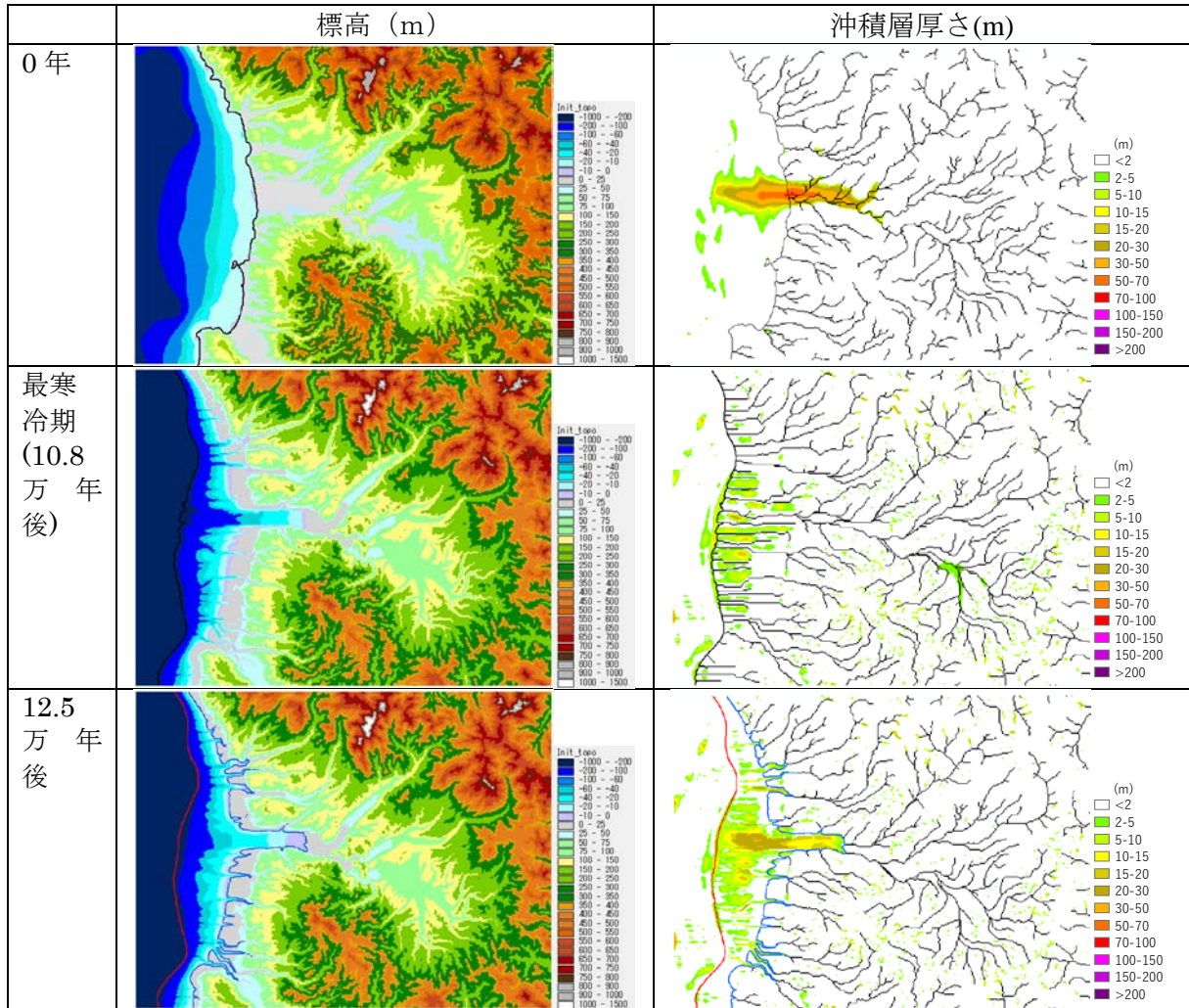


図 II-B.5-4 標高・沖積層厚さ・汀線の変動幅 (A-5)

B. 変動ケース（隆起速度）

海水準変動の各ケースによる地形変化の傾向は基本ケースと同様であった。そこで不確かさを考慮したケースでは、基本ケースとの比較、各海水準変動のケース間の比較結果を示す。

● 基本ケースとの比較

標高：陸域では、隆起速度を基本ケースより 0.05mm/y 小さく想定しているため約 6m 標高が低い。河川域では大きな差は見られないが、これはパラメータ評価で拘束条件（同時期で河床縦断形が一致）を課しているためである。海域では大きな差は見られない。
 水系網：基本ケースとの違いは海水準変動のケース間の違いと同程度である。ケース 1・4 では 12.5 万年後の汀線は基本ケースより陸側に入り込んでいる。これは隆起速度が基本ケースより小さくなったために、侵食の影響が大きく現れたことが原因と考えられる。

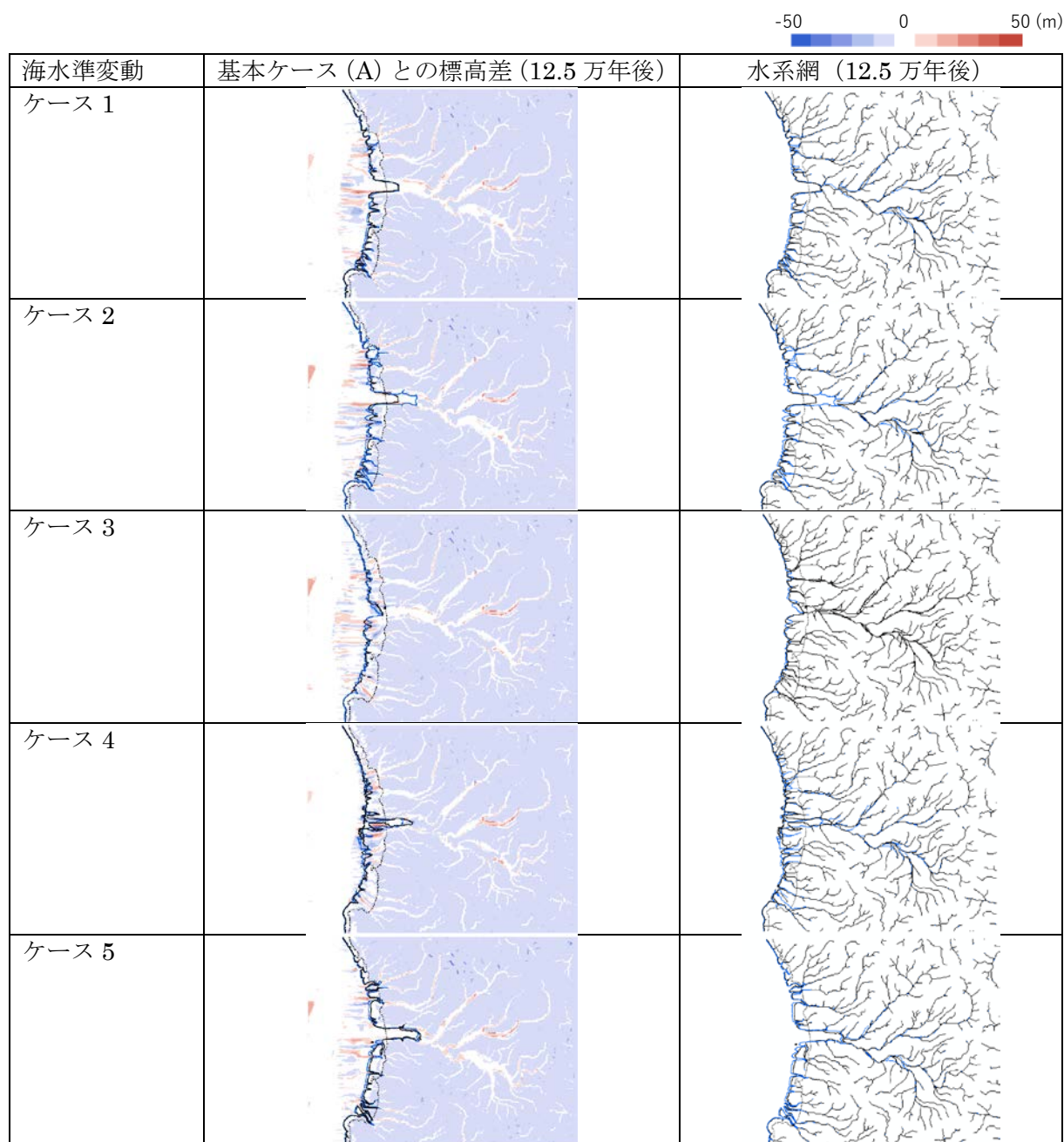


図 II-B.5-5 基本ケースとの比較（変動ケース（隆起速度））（12.5 万年後の標高・水系網）

● ケース間の経時変化の比較

地質・領域毎に設定した領域における、地形勾配の平均値の経時変化を図 II-B.5-6 に示す。全体としての傾向は基本ケースと同様である。

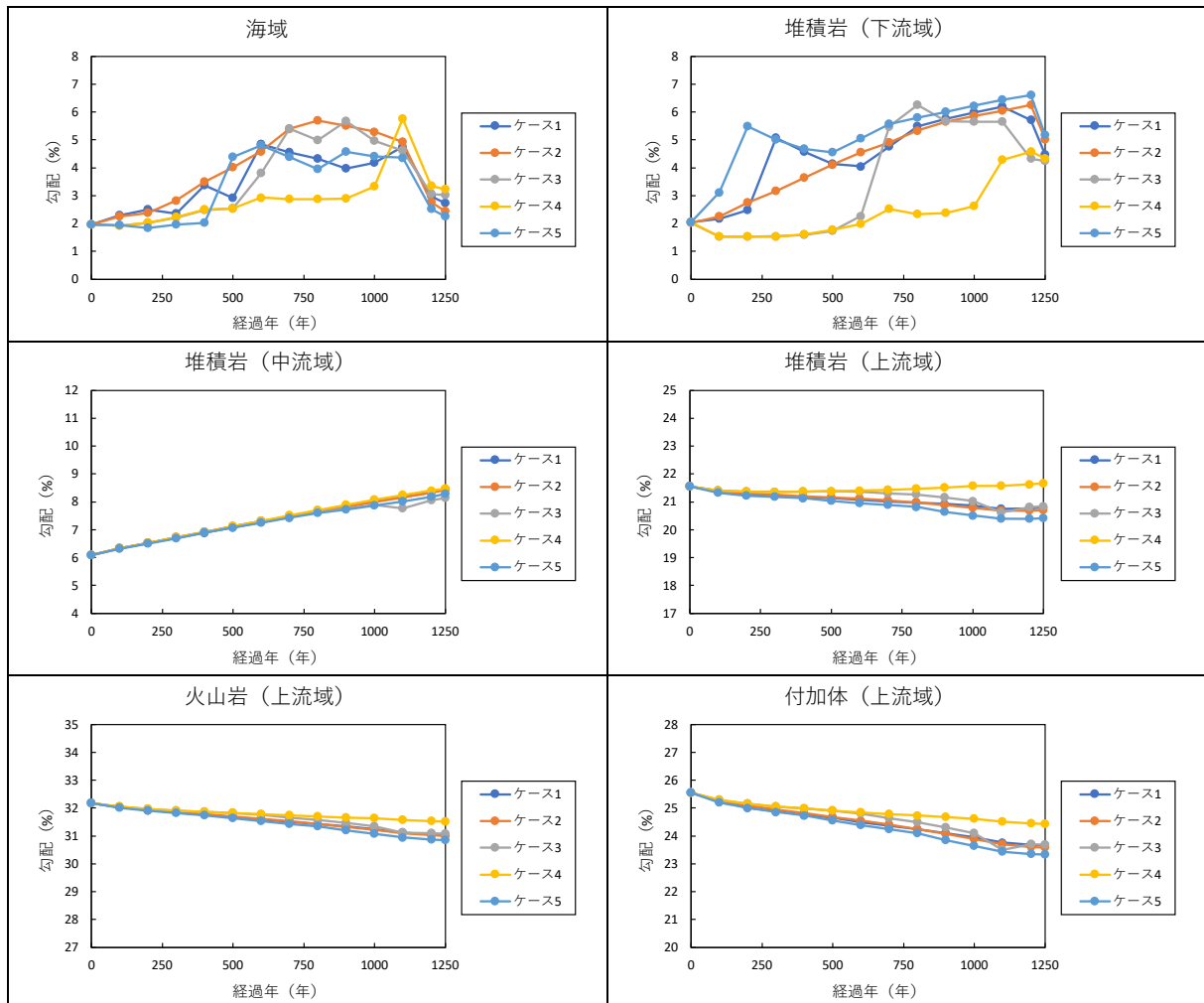


図 II-B.5-6 各地質・領域の平均勾配の経時変化 (変動ケース (隆起速度))

C. 変動ケース（地質係数）

- 基本ケースとの比較

標高および水系網に対し基本ケースと差をとった結果を、図 II-B.5-7 に示す。

標高については、陸域・海域ともに大きな差は見られなかった。このことから地質係数が 100 変動しても、拘束条件を満たすように過去～現在の地形変化を再現するパラメータが求まることにより、標高の計算結果に大きな差は出ないことがわかる。斜面域では、基本ケースより斜面係数が大きいため侵食によって標高が低くなっている。

水系網については、基本ケースとほぼ変わらない結果となった。

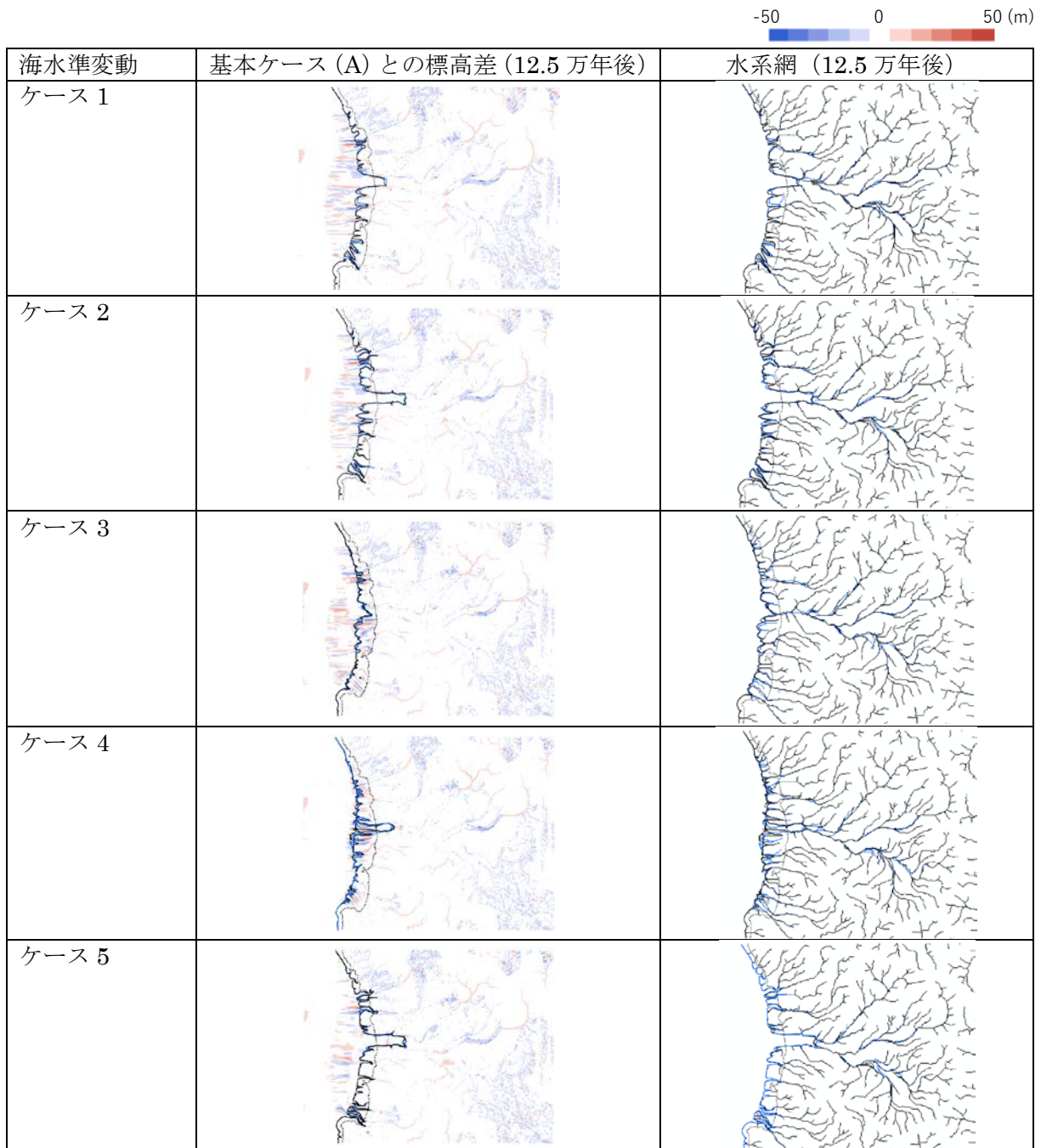


図 II-B.5-7 基本ケースとの比較（変動ケース（地質係数））（12.5 万年後の標高・水系網）

● ケース間の経時変化の比較

地質・領域毎に設定した領域における、地形勾配の平均値の経時変化を図 II-B.5-8 に示す。全体の傾向は基本ケースと同様だが、海域および堆積岩（下流域）においては基本ケースより勾配の変化が大きく、最大6%の変動が見られた。これは、堆積岩に対し基本ケース(300)より小さな地質係数(200)を設定しているため侵食されやすく、これに伴い海域での堆積量も増えたためである。

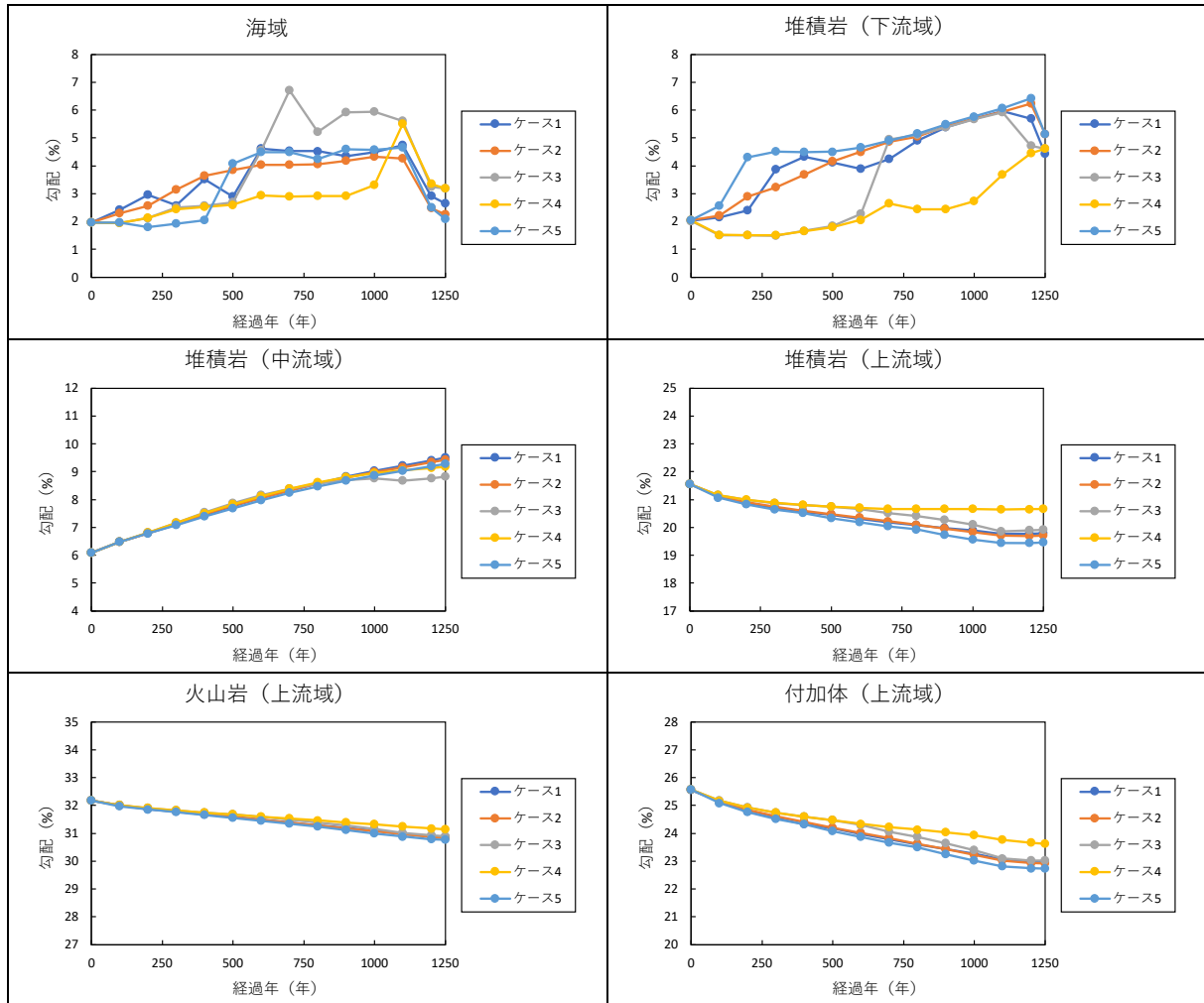


図 II-B.5-8 各地質・領域の平均勾配の経時変化 (変動ケース (地質係数))

D. 変動ケース（侵食速度）

- 基本ケースとの比較

標高および水系網に対し基本ケースと差をとった結果を、図 II-B.5-9 に示す。

標高については、陸域では平均侵食速度を小さく想定しているために基本ケースより 10m 前後標高が高くなっている。海域の標高が基本ケースより高いが、これは気候係数が基本ケースより小さいため寒冷期の侵食・堆積量が大きいためである。

水系網については、基本ケースとほぼ変わらない結果となった。

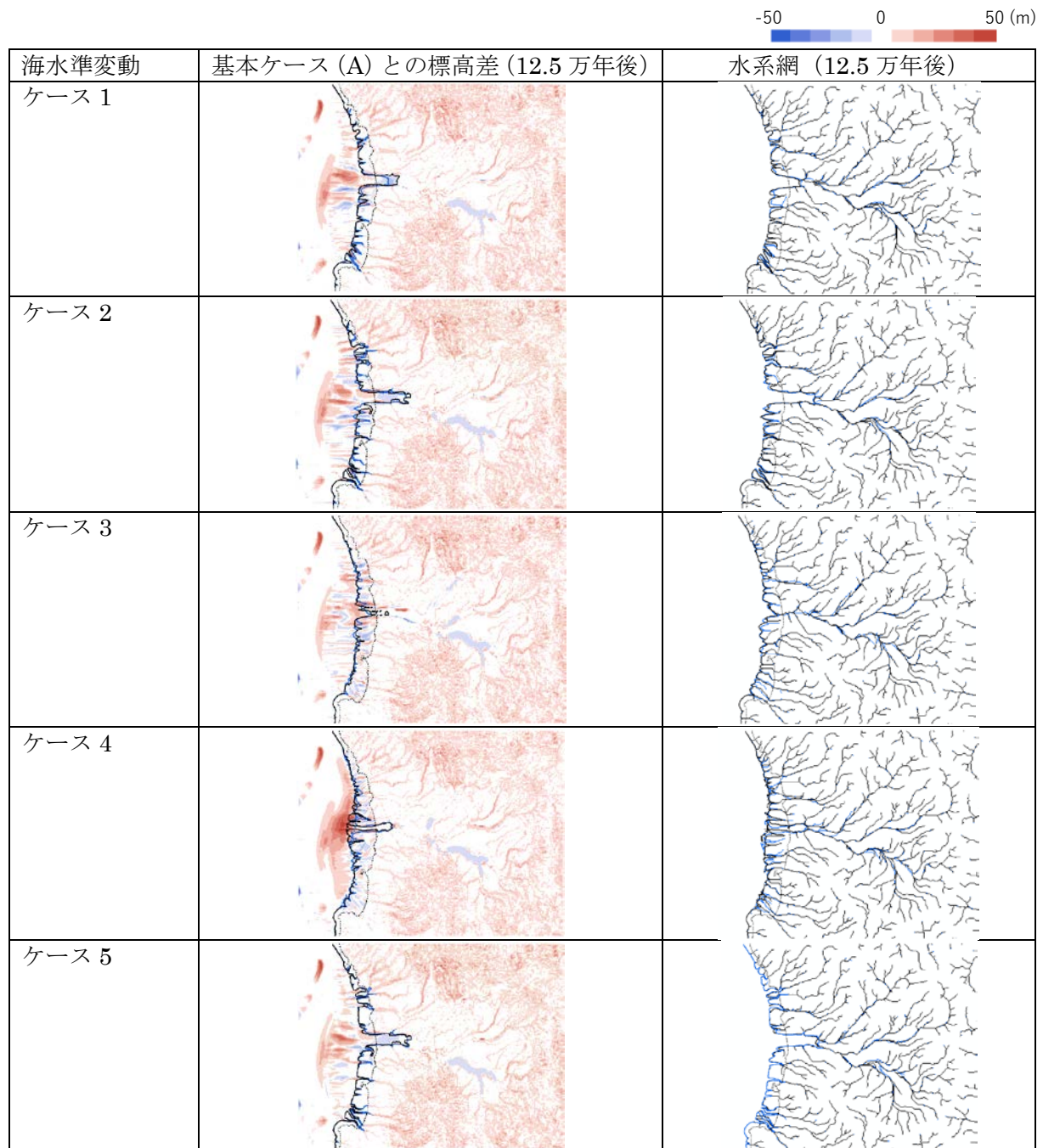


図 II-B.5-9 基本ケースとの比較（変動ケース（侵食速度））（12.5 万年後の標高・水系網）

● ケース間の経時変化の比較

地質・領域毎に設定した領域における、地形勾配の平均値の経時変化を図 II-B.5-10 に示す。全体の傾向は基本ケースと同様だが、斜面域では全ての地質で勾配が大きくなる傾向にある。これは、平均侵食速度が小さくなったために、斜面係数の値が小さいことが原因である。

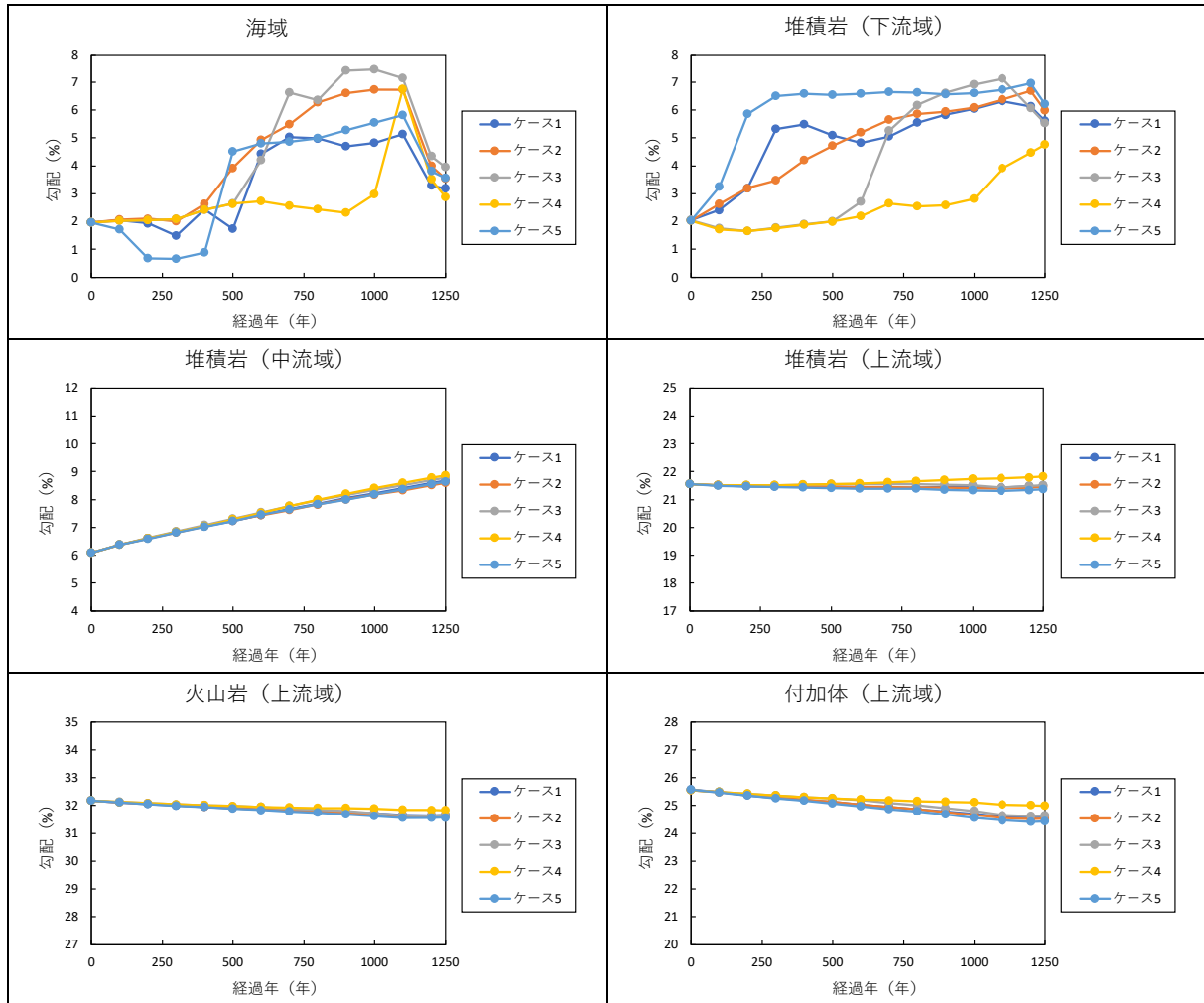


図 II-B.5-10 各地質・領域の平均勾配の経時変化 (変動ケース (侵食速度))

II-C 地下水流動解析

II-C.1 現在～将来の地下水流動解析

ケース A-3, A-4, C-1, D-1 に対する現在～将来の地下水流動解析の評価結果を以下に示す。

● A-3 (基本ケース・海水準変動 ケース 3 (間氷期が継続・海水準変動大))

汀線位置の違いにより、6 万年移行の流出域が A-1 と異なる。また海水準変動に伴う境界条件の設定は、標高と解析時刻の海水準から自動で設定したが、12.5 万年後では海域の地形が凹状になっている影響で、塩分濃度分布が海域で一様になっておらず、その影響が流出域にも出ていることが確認される。

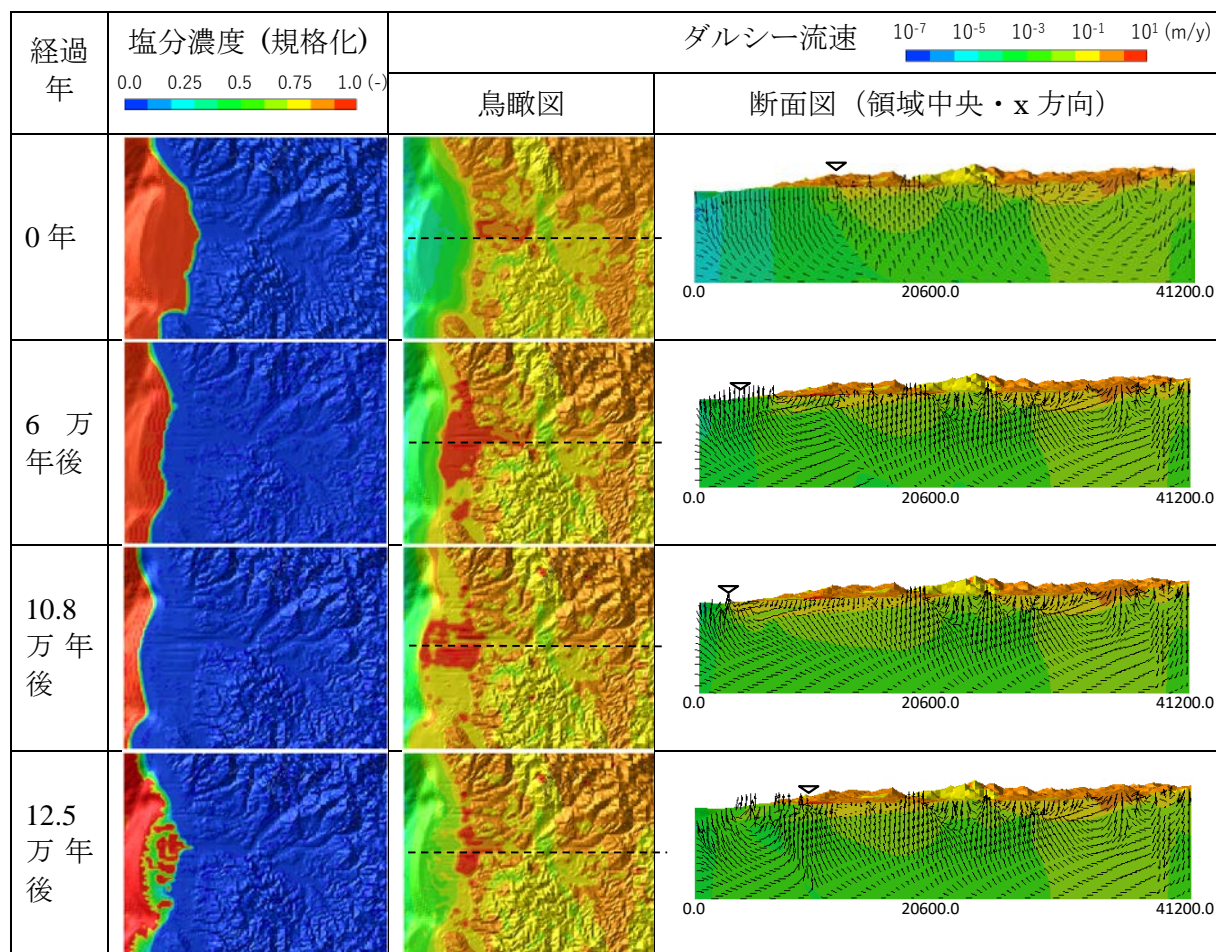


図 II-C.1-1 現在～将来の地下水流動解析の結果 (A-3)

- C-1 (変動ケース (地質係数)・海水準変動 ケース 1 (過去 12.5 万年間と同じ))
 塩分濃度分布・流速分布の経時変化はケース A-1 と同様であり、地質係数の設定の違いによる影響は大きく見られない。

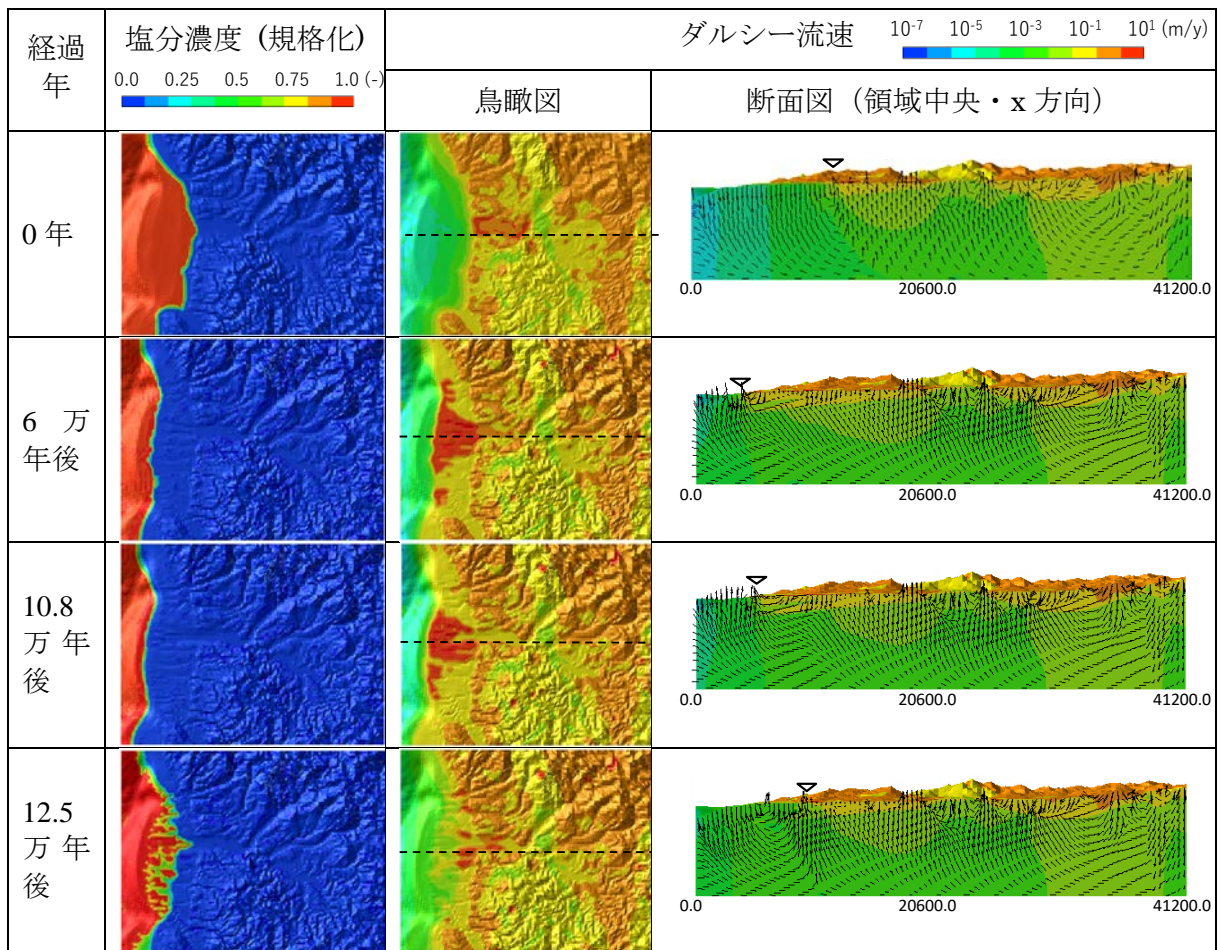


図 II-C.1-2 現在～将来の地下水流動解析の結果 (C-1)

● D-1 (変動ケース (侵食速度)・海水準変動 ケース 1 (過去 12.5 万年間と同じ))

塩分濃度分布・流速分布の経時変化はケース A-1・C-1 と同様であり、侵食速度の設定の違いによる影響は大きく見られない。12.5 万年後に陸域で一部塩分濃度が 1 となっている領域が見られるが、これは海水準変動に伴う境界条件の変更を標高と解析時刻の海水準から自動的に行っているためである。ただし塩分濃度が 1 となったのは表面の 3 節点のみであり、解析結果には大きく影響しないものと考えられる。

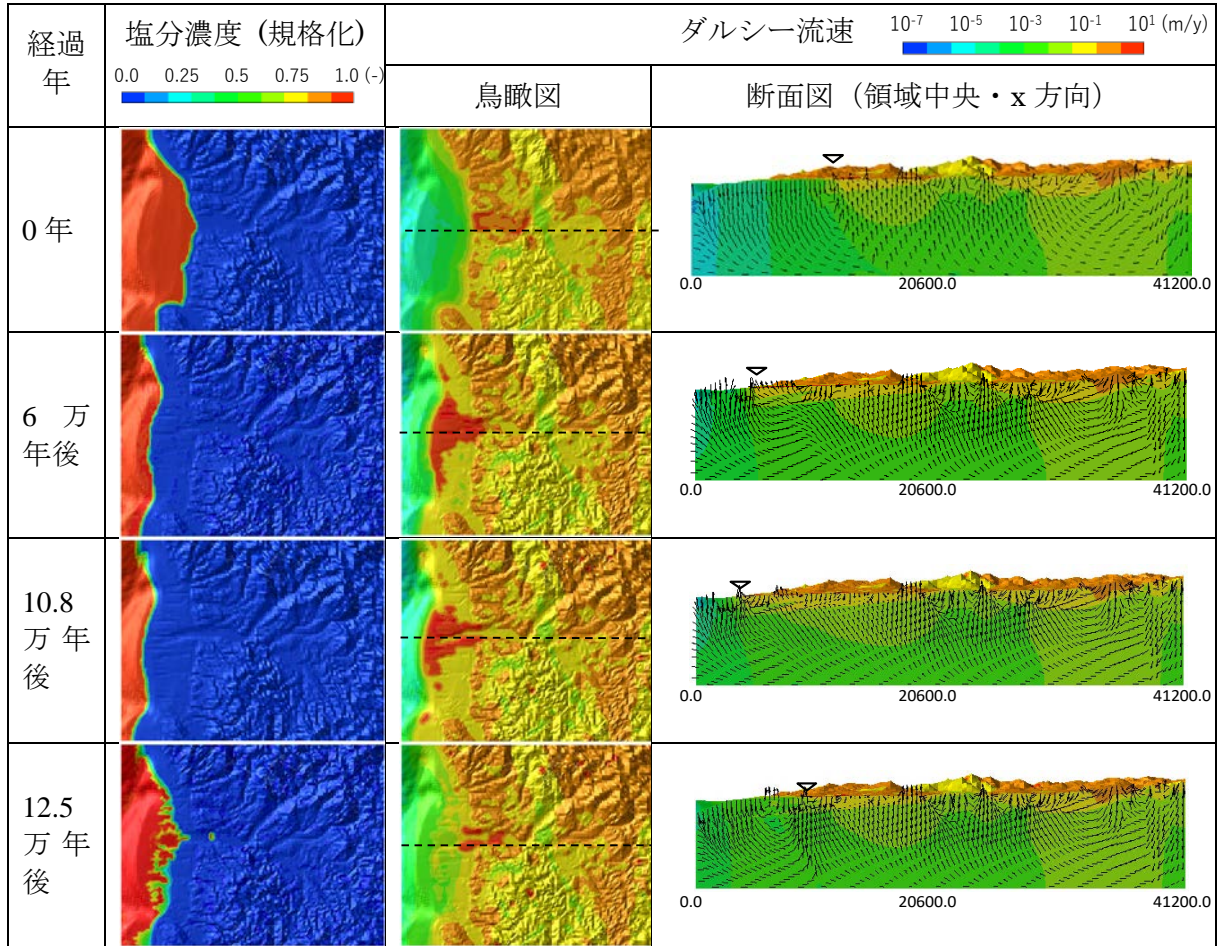


図 II-C.1-3 現在～将来の地下水流動解析の結果 (D-1)

II-C.2 埋設深度における流速に対する不確かさの影響

埋設深度（現在：深度 100m）におけるダルシー流速について、現在の値と各時刻の値を比較した結果を、各ケースに対し以下に示す。

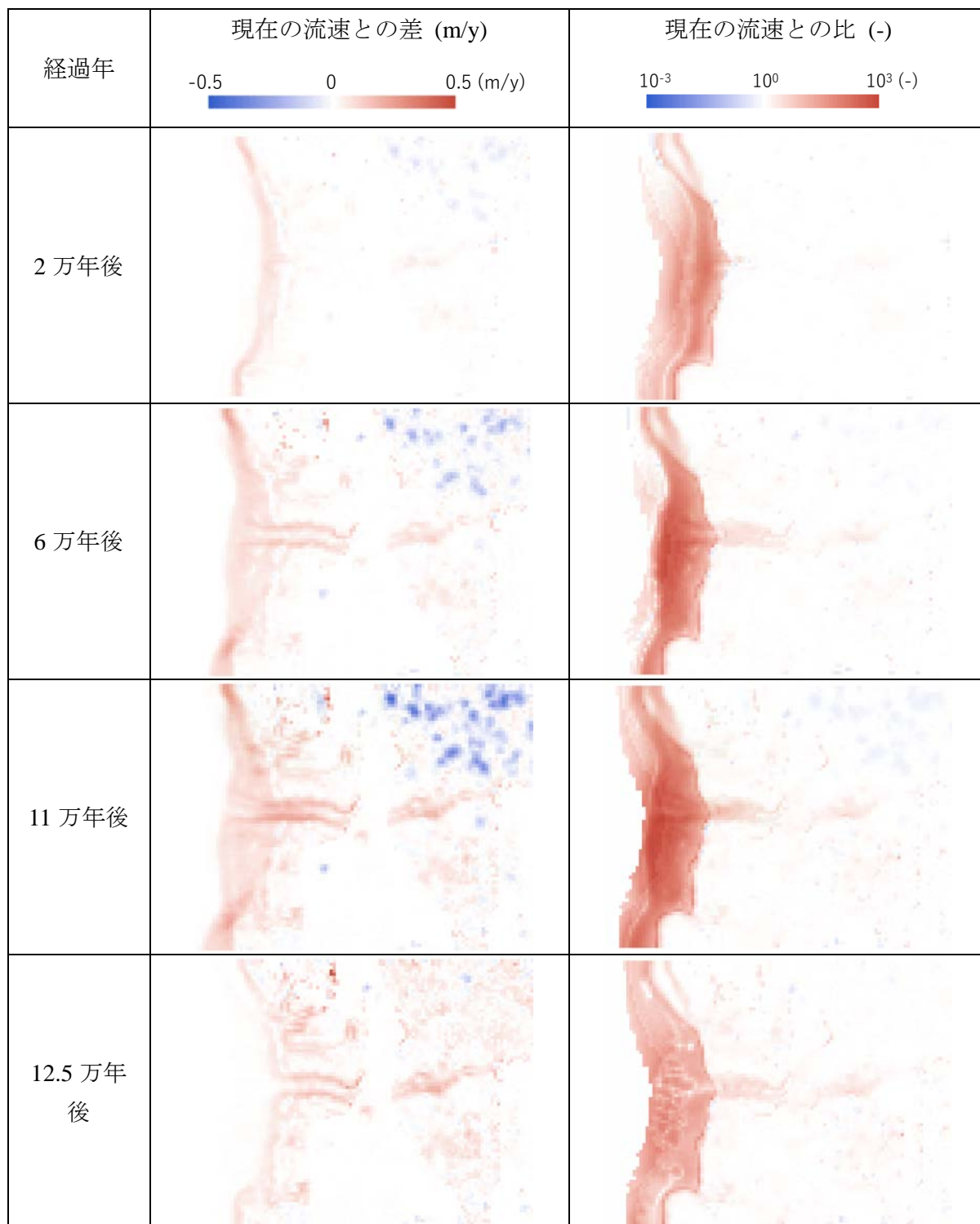


図 II-C.2-1 現在の流速との比較 (A-1)

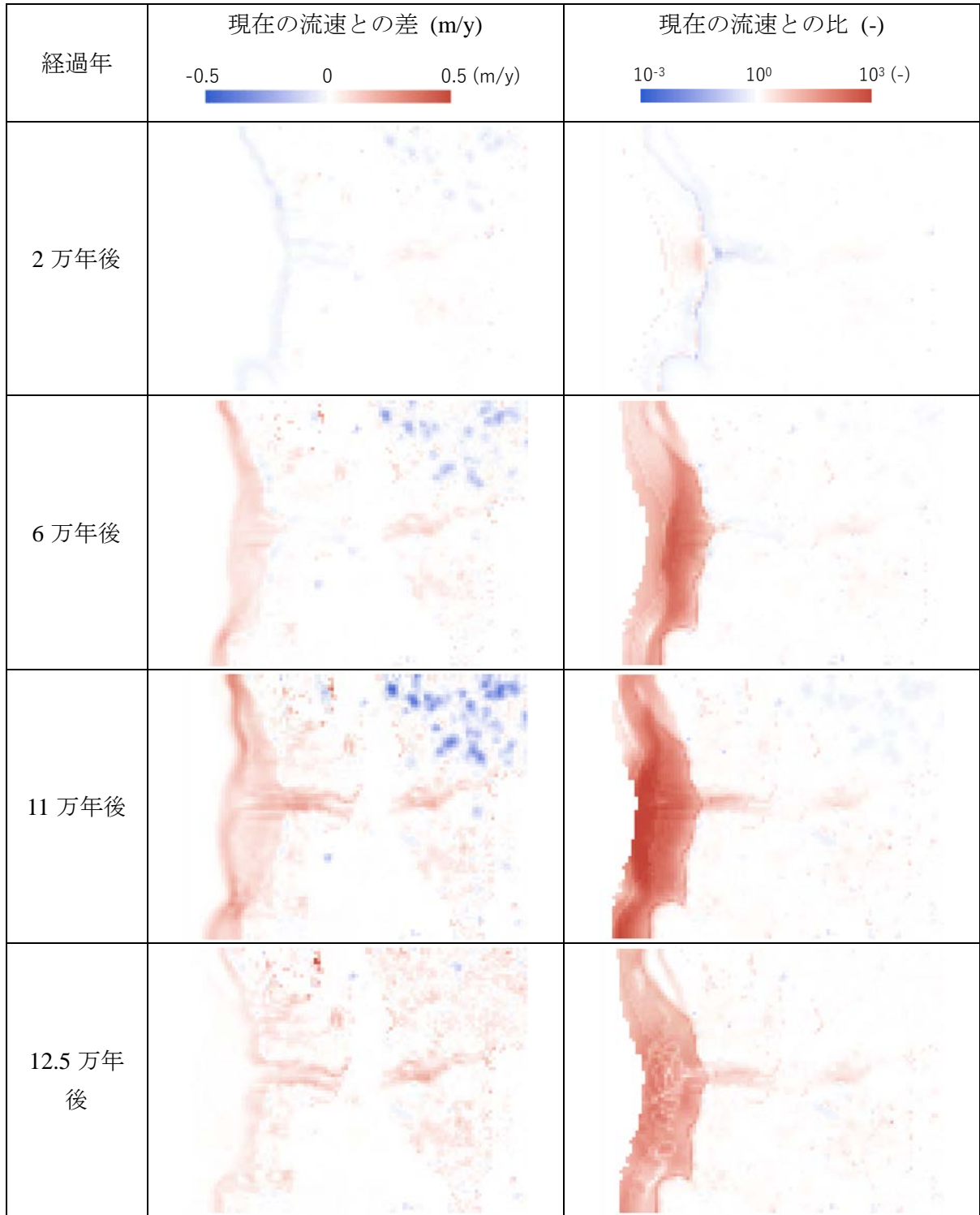


図 II-C.2-2 現在の流速との比較 (A-3)

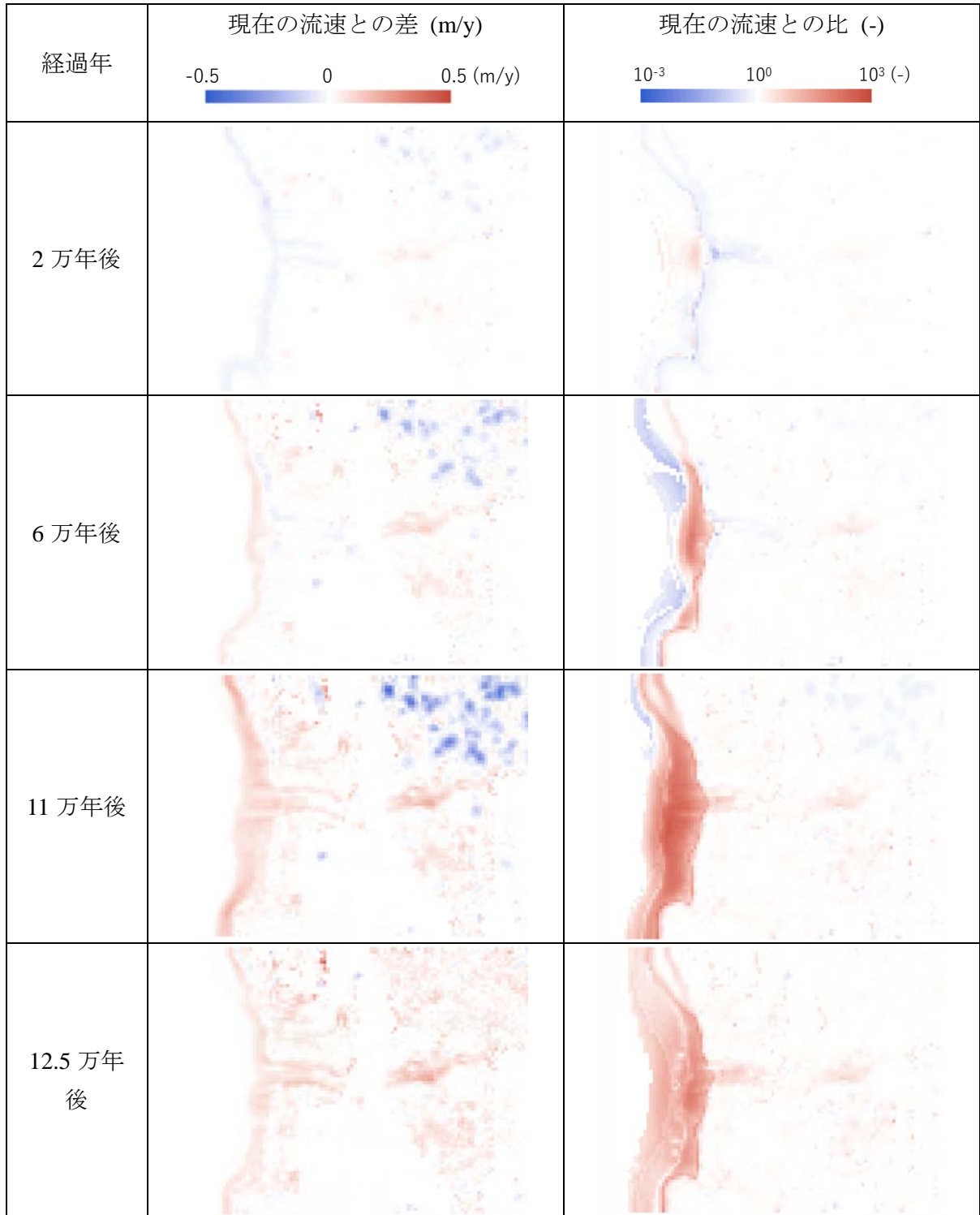


図 II-C.2-3 現在の流速との比較 (A-4)

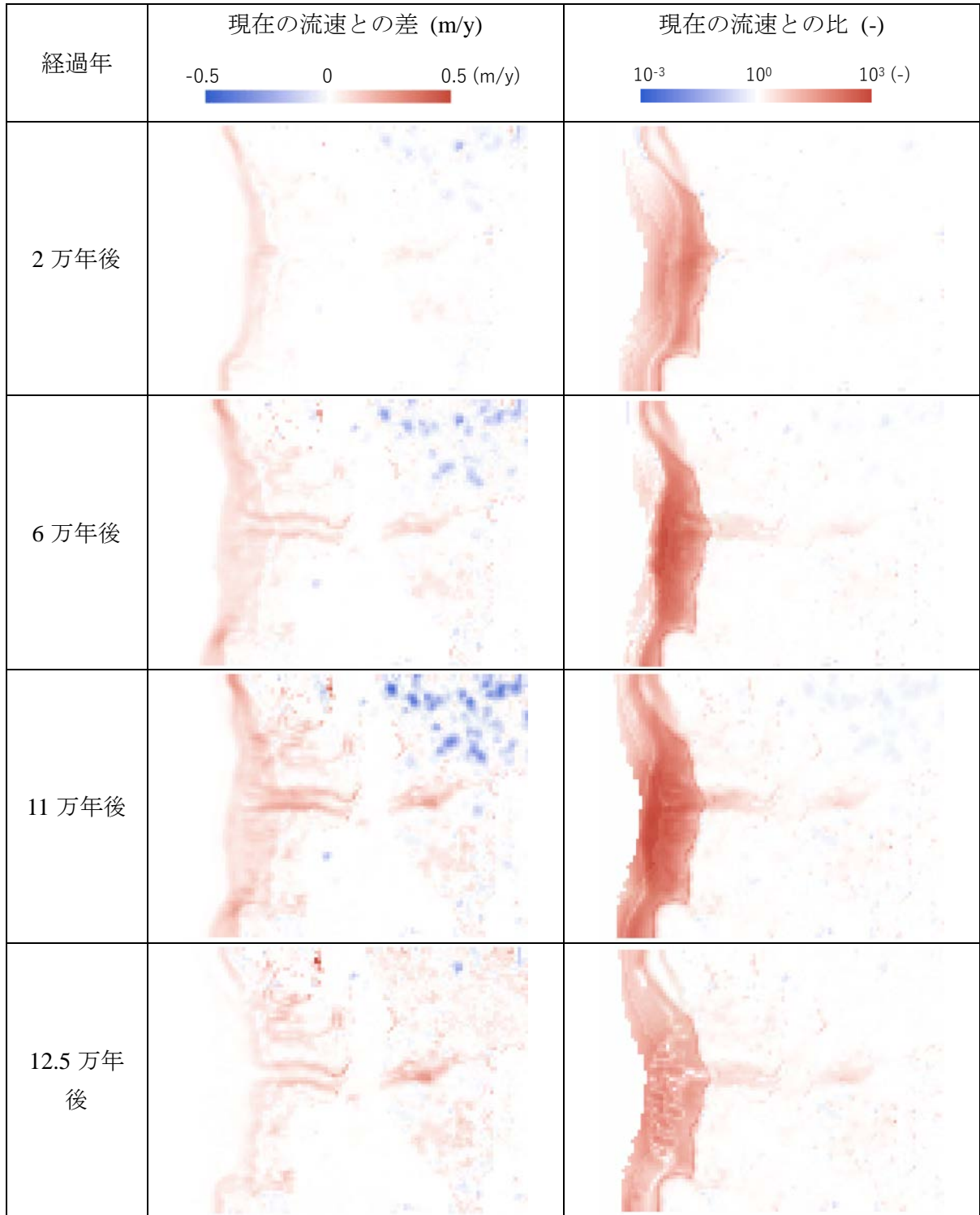


図 II-C.2-4 現在の流速との比較 (C-1)

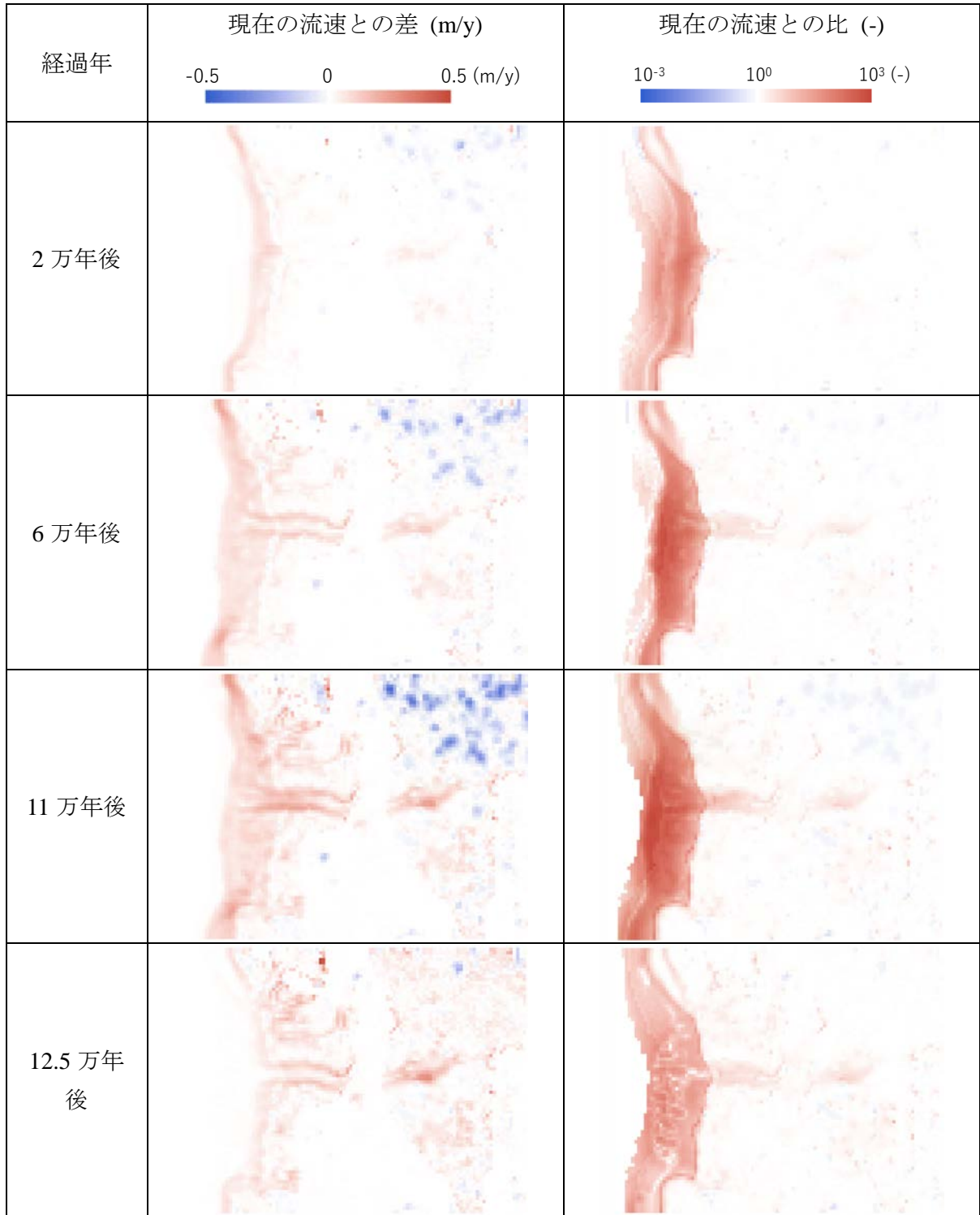


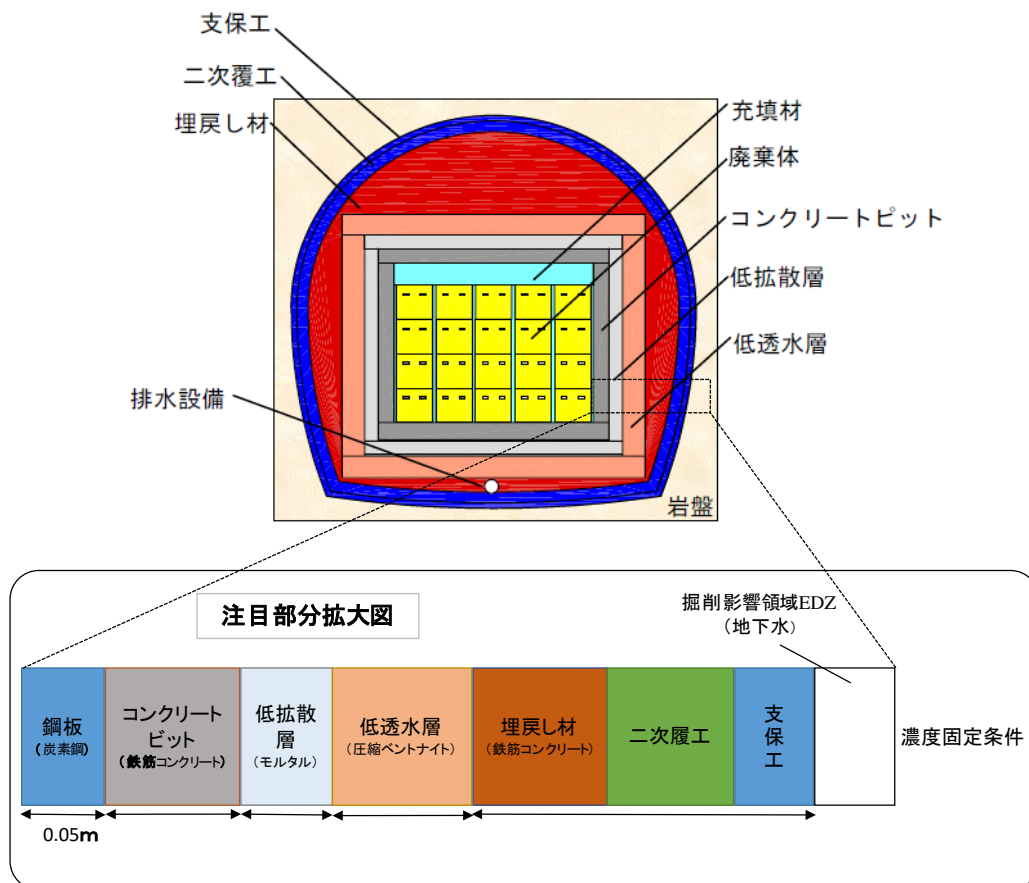
図 II-C.2-5 現在の流速との比較 (D-1)

II-D 人工バリアに対する条件設定

3.4 ニアフィールドの解析で使用した人工バリアに対する水理定数は、人工バリアの変遷解析における初期物性値を参考に設定した。初期物性値の設定根拠を以下に示す。

(1) 体系

体系は、電気事業連合会の第2回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合（平成27年02月12日(木)）の「原子力発電所等の廃止措置及び放射性廃棄物の処分について」⁽¹⁵⁾を参考に設定した。図 II-D-1 に解析体系概念図を示す。処分容器の鋼板については厚さ5 cm に便宜的に間隙率27.3 vol%を考慮し6.878 cm とした。コンクリートピットは厚さ0.7m を設定した。低拡散層については、厚さ0.6 m を設定した。低透水層については、厚さ1.0m を設定した。埋戻し材、二次覆工、支保工については、全て鉄筋コンクリートとして厚さ1.8m を設定した。解析体系は、1次元解析体系とした。



一次元解析体系

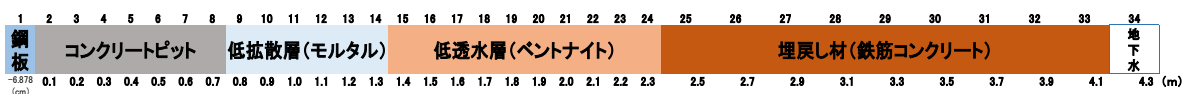


図 II-D-1 人工バリア変遷解析の体系の概念

(2) 初期物性値

人工バリア変遷解析の初期組成を表 II-D-1 に示す。コンクリートピット、低拡散層、埋戻し材については、第2次 TRU レポートで人工バリアに使用されるセメント系材料として示されている普通ポルトランドセメント (OPC) を採用した。低透水層については、第2次取りまとめにおいて示されているベントナイト系緩衝材の国内外ベントナイト鉱物組成および第2次 TRU レポートで変質評価解析にて使用されている、クニゲル V1 を採用した。

3.4 の解析では、表 II-D-1 の黄色網掛けで示す間隙率および透水係数を使用した。

表 II-D-1 初期組成

		鋼板	コンクリートピット(鉄筋入りセメントペースト硬化体)	低拡散層(セメントペースト硬化体)	低透水層(ベントナイト)	埋戻し材(鉄筋入りセメントペースト硬化体)
鉱物量(wt%)	Ca(OH) ₂		13.78	15.33		13.78
	C-S-H (1.8)		54.19	60.30		54.19
	Monosulfate (AFm)		8.91	9.91		8.91
	Hydrogarnet		11.19	12.45		11.19
	Brucite		1.60	1.78		1.60
	K ₂ O		0.14	0.16		0.14
	Na ₂ O		0.07	0.08		0.07
	Montmorillonite				49.0	
	Quartz				38.0	
	Analcime				3.0	
	Calcite				2.5	
	Pyrite				0.6	
	SiO ₂ (砂)					
	Fe(c)	100	10.12			10.12
	other minerals				6.9	
total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
水セメント比 (kg/kg)	W/C	-	0.65	0.4	-	0.65
鉱物量 (mol/L-water)	Ca(OH) ₂		1.062E+01	1.500E+02		1.062E+01
	C-S-H (1.8)		2.450E+01	3.461E+02		2.450E+01
	Monosulfate (AFm)		8.175E-01	1.155E+01		8.175E-01
	Hydrogarnet		1.690E+00	2.387E+01		1.690E+00
	Brucite		1.567E+00	2.214E+01		1.567E+00
	K ₂ O		8.723E-02	1.232E+00		8.723E-02
	Na ₂ O		6.629E-02	9.363E-01		6.629E-02
	Montmorillonite				9.222E-01	
	Quartz				2.625E+01	
	Analcime				5.657E-01	
	Calcite				1.037E+00	
	Pyrite				2.076E-01	
	SiO ₂ (砂)					
	Fe(c)	3.75E+02	1.035E+01			1.035E+01
鉱物量(vol%)	other minerals (V _{c_rock})				6.1	
間隙率		0.273	-	-	0.385	-
間隙率(毛細管間隙)		-	0.273	0.05	-	0.273
間隙率(物質移動毛細管間隙)		-	0.100	0.005	-	0.100
間隙率(貯留毛細管間隙)		-	0.172	0.045	-	0.172
有効拡散係数(m ² /s)		5.370E-11	5.370E-11	2.685E-12	3.685E-11	5.370E-11
透水係数(m/s)		-	1.000E-07	1.000E-07	6.380E-13	1.000E-07

各部材の設定について以下に示す。

- 鋼板
間隙率・有効拡散係数：隣接する鉄筋入りセメントペースト硬化体と同じ間隙率・有効拡散係数の多孔質と仮定（鋼板を一つのセルとして間隙水との化学反応を計算するため、鋼板についても間隙率を与える）
- 低拡散層（セメントペースト硬化体）
W/C（水セメント比）：セメントが水和するのに必要な W/C の最小値とされる 40% と設定
鉍物量：平成 21 年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査報告書⁽¹⁶⁾を参考に設定
間隙率・有効拡散係数：下記評価モデル「セメント間隙変遷モデル式」に基づき設定
透水係数：低透水層（ベントナイト）に対し相対的に十分大きい値とし 1×10^{-7} m/s と仮定
- 低透水層（ベントナイト）
鉍物量：本事業におけるこれまでの設定（平成 23 年度～平成 27 年度）と同様の値を設定
間隙率：乾燥密度 1.6 Mg/m^3 （実験による実測値⁽¹⁷⁾）および真密度 2.6 Mg/m^3 （クニミネ工業 クニゲル V1 カタログ）より算出
有効拡散係数：評価モデル「緩衝材中におけるアルカリ拡散係数式」に基づき設定
透水係数：下記評価モデル「ベントナイト透水係数式」に基づき設定
- コンクリートピット・埋め戻し材（鉄筋入りセメントペースト硬化体）
W/C：建築用コンクリートでは水セメント比は 50～65% であり、国の指針では、普通ポルトランドセメントの水セメント比は 65% 以下と定められている。低拡散層に対して大きい拡散係数を持たせ、より保守側の評価となるように、上限値の 65% と設定
鉍物量 (Fe(c))：鉄筋入りセメントペースト硬化体中の鉄筋量を 2.0vol% として、W/C=65% としたときの重量割合を設定
間隙率・有効拡散係数：下記評価モデル「セメント間隙変遷モデル式」に基づき設定
透水係数：低透水層（ベントナイト）に対し相対的に十分大きい値とし 1×10^{-7} m/s と仮定

評価モデル

評価には、これまでに「放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査」^(16,18,19)においてベントナイト変質における評価手法として整備したモデルを使用した。今回評価に使用したモデル式を以下に示す。

- ・ベントナイト透水係数式

$$K_w = 1.2 \times 10^{-7} I_s^{1.5} 10^{-0.0042 \rho_m} (7.9 \times 10^{-5} T^2 - 1.9 \times 10^{-2} T - 0.21) \quad (\text{II-D-1})$$

K_w ：透水係数 (m s^{-1})

ρ_m ：有効モンモリロナイト密度 (kg m^{-3})

I_s ：イオン強度 (mol dm^{-3})

T ：温度 (K) (25°C と設定)

- ・緩衝材中におけるアルカリ拡散係数式

$$D_e = 5.0 \times 10^{-7} \varphi^{2.1} e^{-18600/RT} \quad (\text{II-D-2})$$

D_e ：有効拡散係数 ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$)

φ ：間隙率 (-)

T ：間隙水の絶対温度 (K) (25°C と設定)

R ：ガス定数 ($8.31 \text{ kJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

- ・セメント硬化体の空隙率変遷モデル式

$$De = 5.37 \times 10^{-10} \varphi_{tra} \quad (\text{II-D-3})$$

$$\varphi_{tra}(t) = V_{cp-tra}(t) / V_{tot} \quad (\text{II-D-4})$$

$$V_{tot} = V_w + V_c = V_{hyd}(0) + V_{cp}(0) \quad (\text{II-D-5})$$

De : 有効拡散係数($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

$\varphi_{tra}(t)$: 時刻 t における物質移動毛細管空隙率

V_{tot} : セメント硬化体の総体積

V_w : 配合時の水の体積

V_c : 配合時のセメントの体積

$V_{hyd}(0)$: 初期の水和鉱物総体積

$V_{cp-tra}(t)$: 時刻 t における物質移動空隙率

- 初期の物質移動空隙の体積

$$V_{cp-sto}(0) = mV_{cp}(0) \quad (0.381 < W/C \leq 0.57) \quad (\text{II-D-6})$$

$$V_{cp-sto}(0) = mV_{cp,W/C=0.57}(0) \quad (0.57 < W/C) \quad (\text{II-D-7})$$

$$V_{cp-tra}(0) = V_{cp}(0) - V_{cp-sto}(0) \quad (\text{II-D-8})$$

$V_{cp-tra}(0)$: 初期の物質移動空隙の体積

m : 貯留空隙の全毛細管空隙に対する割合を示す定数

(=0.9, Yamaguchi et al., 2008⁽²⁰⁾)

II-E 上北地域を対象としたデータ調査

(1) 対象地域

対象地域は青森県小川原湖の流入する七戸川流域とし、これを内包する東西約 100km、南北 88km (面積 8,800km²) とした。対象地域の地質単元を集約したシームレス地質図 (産業総合研究所, 2017) ⁽²¹⁾ を図 II-E-1 に示す。

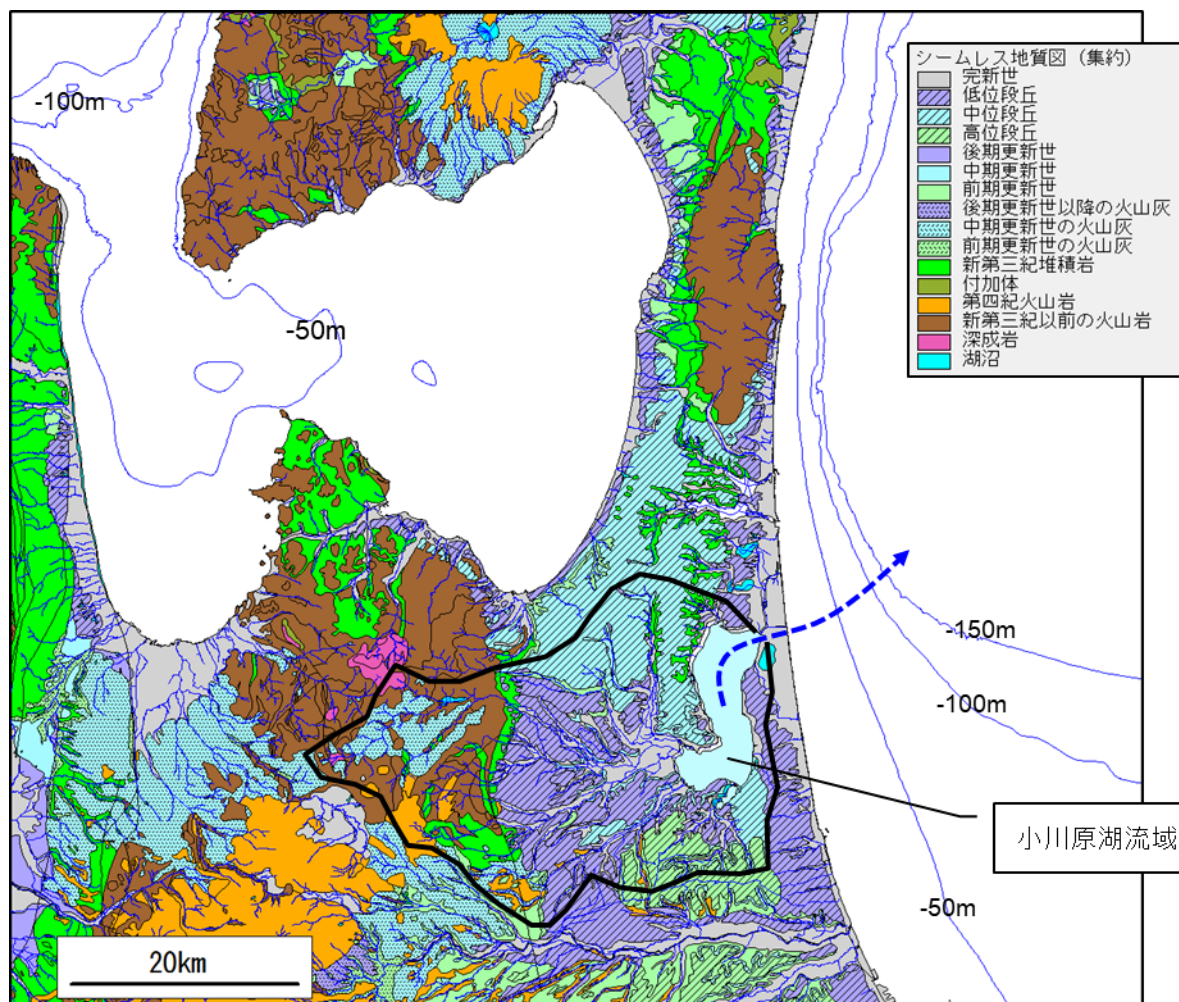


図 II-E-1 対象地域のシームレス地質図 産業総合研究所 (2017) ⁽²¹⁾

東北日本北部の地質について宮内 (1985) ⁽²²⁾ は次のように概括している。奥羽脊梁山脈以西の内帯には新第三系が広く分布し、主に山地では第四紀の火山岩類に、平野・盆地周辺では第四紀の堆積岩に覆われている。内帯の西半部では、波長の短い南北性の褶曲構造や断層が著しく発達している。外帯では北上山地をつくる中・古生層と、北上山地と脊梁山脈の間を埋めるように堆積した新第三系・第四系が分布する。しかし、内帯にみられるような著しい地殻変動は外帯には現われていない。

脊梁山脈と北部北上山地の間にはさまれた地域は、第三紀末以降における地質構造上の堆積盆で、新第三系・第四系が厚く堆積している (Chinzei, 1966) ⁽²³⁾。上北平野およびその周辺の新第三系の層序については Otuka (1934, 1939) ⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾、北村ほか (1972) ⁽²⁶⁾ によって、第四系の層序については岩井 (1951) ⁽²⁷⁾、中川 (1972) ⁽²⁸⁾ によって、また地質構造については斎藤 (1965) ⁽²⁹⁾、鎮西 (1958 a, b) ⁽³⁰⁾⁽³¹⁾、Chinzei (1966) ⁽²³⁾ によって詳しく研究されている。

小川原湖を含む上北平野の特徴は MIS5e (12.5 万年前)、MIS7 (21.5 万年前) および MIS9

(33 万年前) の 3 つの海成段丘が残存することにより、これら海成段丘は第三紀鮮新世の鷹架層（たかほこ）とこれを被う更新世前期～中期の野辺地層から構成される。これら段丘を構成する地質は、十和田カルデラを形成した際の火山噴出物（八戸降下火山灰：15.5ka、大不動降下火山灰：35ka）によって広く不整合に被われている。

表 II-E-1 は建設省 (1971) ⁽³²⁾ の「むつ小河原地域大規模開発計調査 土地条件調査報告書」による地質区分を示した。段丘を構成する更新世前期～中期の野辺地層群はシルト・砂および砂礫からなり、これを更新世末期～完新世の火山灰層等が不整合に被う。野辺地層の N 値は層相によって変化するが、一般には 40～60 程度であり軟岩に相当する。

表 II-E-1 むつ小河原地域の地質区分 建設省 (1971) ⁽³²⁾

地質時代		地質学的標準区分		地盤地質区分		音波探査による地層区分	N 値 (地盤支持力)		
新 生 代	第 三 紀	沖積新世 (完新世)	沖積後期層	八戸層	最上部層 Um	A	砂 10~20		
			高瀬浮石層	火山灰層上部	上部火山灰層 Vu				
			沖積中期砂層		上部砂層 Us				
			南浮石層		上部火山灰層 Vu				
	第 四 紀	洪積・更新世 (最新世)	末期	沖積前期泥層	八戸層	下部砂レキ層 LS	D	砂レキ 20~30	
				高瀬浮石層	火山灰層上部	中部火山灰層 Vm			
			後期	沖積末期泥砂互層	八戸火山灰層下部	下部粘土・砂互層 LA	下部火山灰層 V1	E	粘土 3~7 砂 5~16
				八戸レキ層	高館火山灰層	下部砂レキ層下部層 LSt	中部火山灰層 Vm	F	砂 20~30 粘土 6~15 40~60
			中期	高館砂レキ層	天狗峠火山灰層	最下部層 Lm		G	
				前期	野辺地層	沼崎層		基盤土層	
			七崎層		最高位段丘火山灰層				
			第 三 紀	鮮新世	野左掛層				
尻内層群 (砂子又層)									
中 生 代	第 三 紀	末期	三戸層群 (鷹架層)	上部	基盤岩類 BR	注) この N 値は頻出度の多い範囲のみを記載してある。			
		後期中期		下部					
		初期	第三紀下部層群						
古 生 代	中生代	花崗岩類							
		中生代噴出岩類							
古 生 代	古生層								

(2) 対象地域の地形

ここでは小川原湖周辺の上北地域の地形について概括する。上北大地は、吹越鳥帽子（ふっこしえぼし）山地南端から小川原湖南方までの約40km、東西10kmで、南北に長い長方形の形をなし、これら上北大地はMIS7およびMIS9の海成段丘面をからなっている(図II-E-2)。標高は台地北端では140m前後であるが、南方ほど標高を減じ、小川原湖西方ではおよび上北大地南部では70m前後となる。MIS7の海成段丘の低地側にはMIS5eの海成段丘が分布し、特に太平洋側で広く分布し、東側のMIS5eの標高は40m前後、西側は30m前後である。

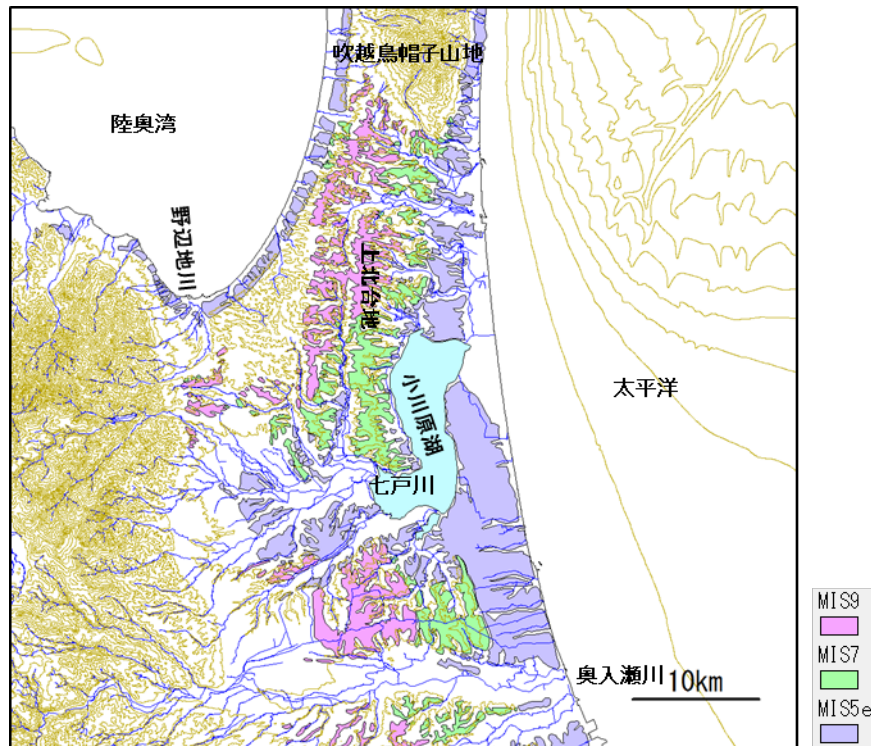


図 II-E-2 小川原湖付近の海成段丘と地形

上北台地を刻む谷は、主として南北および東西の格子状水系をなす。台地の分水嶺は台地西側に偏っており、これより東側では東流して太平洋へ、西側では西流して陸奥湾へと注ぐ。このように分水嶺が西に偏っていることから、分水嶺西側ではやや深い谷が形成され、東側では一般に谷底の広い浅い谷を形成している。

II-E.1 隆起速度の推定

(1) 海成段丘による隆起速度データの収集

対象地域の海成段丘の旧汀線高度や、段丘面上面高度については小池・町田編（2001）⁽³³⁾の「日本の海成段丘」があり、これは既往論文を収集・体系化した資料となっている。図 II-E.1-1 はこのうち7図幅のデータをまとめてあり、対象地域では隆起速度は0.15～0.35mm/年と推定されている。なお、陸奥湾に面した野辺地区図幅では0.15～0.33mm/年と0.15mm/年前後のやや小さい隆起速度が推定されているが、野辺地区図幅を除くと隆起速度は0.2～0.35mm/年の範囲に収まる。

また、2001年以降の文献としては石田ほか（2006）⁽³⁴⁾があり、その段丘面高度から推定される隆起速度は図 II-E.1-2 に示すように0.2～0.35mm/年に収まり、これらの値は小池・町田編（2001）⁽³³⁾とほぼ一致している。

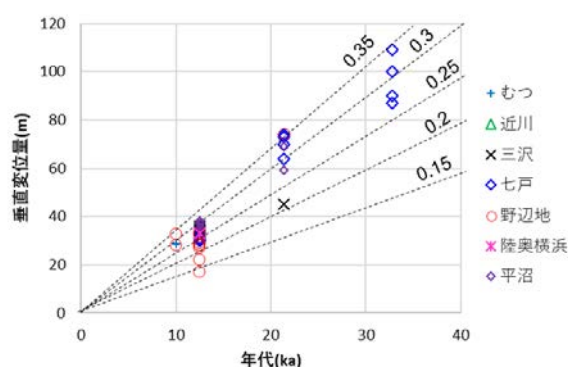


図 II-E.1-1 海成段丘から推定される隆起速度 小池・町田（2001）⁽³³⁾

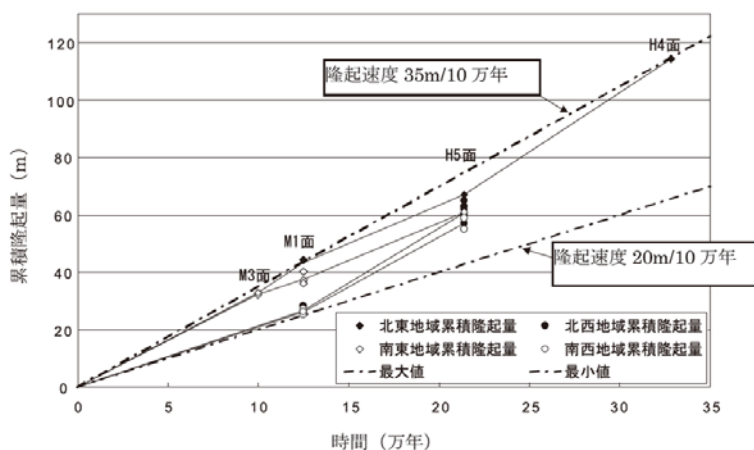


図 II-E.1-2 敷地周辺の M3 面～H4 面の隆起速度（石田ほか, 2006）⁽³⁴⁾

これ以外のデータとしては小池・町田（2001）⁽³³⁾のデータに河成段丘等から推定した隆起速度データ（野村ほか, 2016）⁽³⁵⁾があるが、対象地域には小池・町田（2001）⁽³³⁾のデータのみとなっている。

図 II-E.1-3 に小池・町田（2001）⁽³³⁾による隆起速度推定点（53点）を示した。夏泊半島や下北半島西海岸部を除き、MIS5e 段丘が沿岸に沿って分布することから、他の地域に比較して隆起速度がかなり詳細に検討されている地域となっている。また、上北平野は平野奥まで海成段丘が分布していることから、上北平野では沿岸部だけでなく、山麓付近までの隆起速度分布が判明している地域となっている。

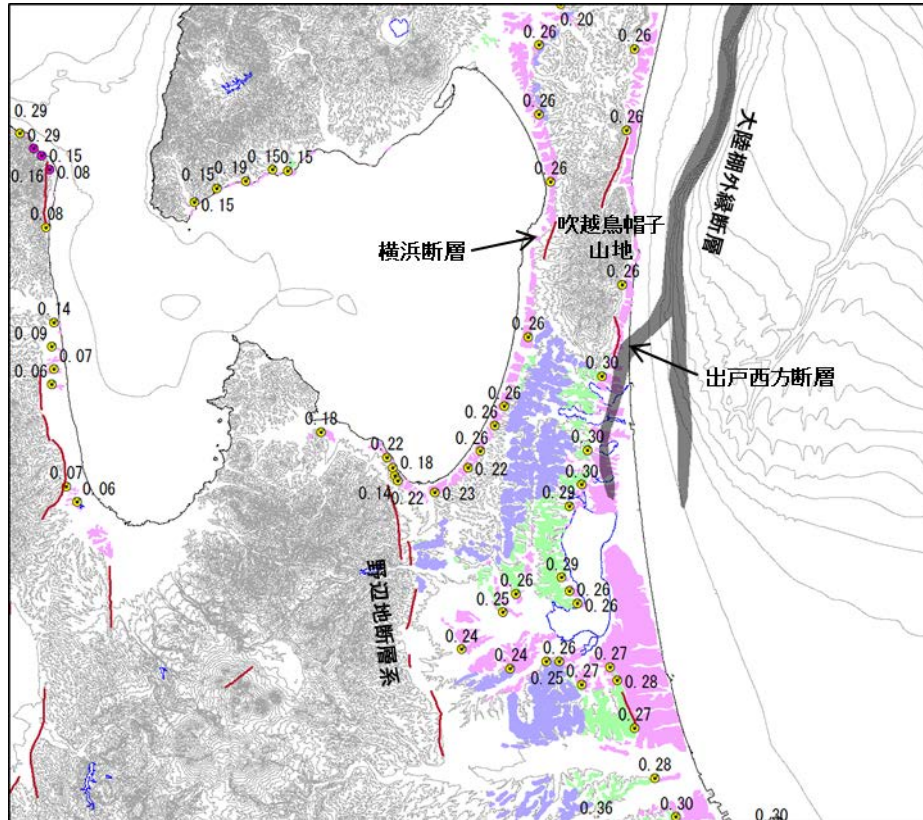


図 II-E.1-3 海成段丘から推定される隆起速度計測点 (mm/年) と海成段丘および断層

図 II-E.1-3 で示すように吹越烏帽子山地南方では隆起速度は 0.3mm/年程度で、小川原湖西方では 0.25mm/年とやや小さい。夏泊半島よりも西側での隆起速度は 0.1~0.15mm/年と小さくなり、全体として隆起速度は西側で小さくなっている。

(2) 大陸棚外縁断層の検討

下北半島の吹越烏帽子山地付近の活断層について渡辺 (2008) ⁽³⁶⁾ は以下のように纏めている。下北地域には複数の南北走向の活断層が知られている (図 II-E.1-3)。このうち、比較的明瞭なものは出戸西方断層 (活断層研究会編, 1980, 1991) ⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾ と横浜断層 (活断層研究会編, 1980, 1991 ; 中田・今泉編, 2002) ⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾⁽³⁹⁾ である。出戸西方断層の延長は約 4 km であり、西側が相対的に隆起しており MIS 5e の海成段丘面に 15m 程度変位があるとされている。なお、調査地域北東の海域では、大陸棚外縁部の断層の存在が推定されている (活断層研究会編, 1980, 1991 ; 図 3-3) ⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾。この延長は約 80km であり、南への延長は分岐し、西側のトレースは出戸西方断層付近で上陸するように、東側のトレースは南の海域に連続するように示されている (海上保安庁水路部, 1982) ⁽⁴⁰⁾。この断層は数 10 万年前に活動を停止しているとする、音波探査結果に基づく見解がある (東北電力株式会社, 1996) ⁽⁴¹⁾。

渡辺 (2008) ⁽³⁶⁾ では出戸西方断層は、大陸棚外縁断層の派生した副次的な断層と考察しており、出戸西方断層が MIS3 に活動していることから、大陸棚外縁断層についても MIS3 以降にも活動していたと推定している。また、大陸棚外縁断層が上陸した付近の MIS5e 面が海側に傾き、同様の変形は下部の新第三系の構造に累積していると解釈している (図 II-E.1-4)。この大陸棚外縁断層は海域では急斜面と一致しており、南方ではこのような急斜面が認められなくなる。

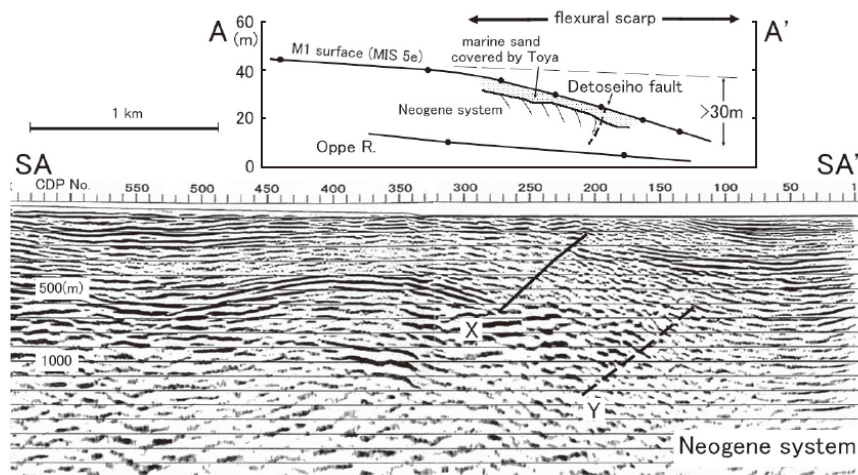


図 II-E.1-4 出戸西方断層付近を横断する地形地質断面 渡辺 (2008) (36)

(3) 野辺地断層の検討

図 II-E.1-3 に示した七戸西方の奥羽山地山麓部には南北に連続する野辺地断層系が位置する。なお、活断層研究会 (1991) (38)では北側から野辺地断層、上原子断層及び天間林断層とそれぞれ個別の断層と記載している。東北電力 (2016) (42)の敷地周辺陸域の地質・構造に関する調査結果では、野辺地断層北部は第四紀に活動した痕跡がなく、この南方延長の上原子断層 (延長 5km) とこれにほぼ連続する七戸西方断層 (延長 22km) の 2 つを更新世後期に活動した可能性のある活断層としている。

一方、地震調査研究推進本部 (1995) (43)の「平成 7 年度 津軽山地西縁断層帯及び野辺地断層帯に関する調査成果報告書」では、市ノ渡地点で実施した浅層反射法弾性波探査の結果及び地形面区分結果から推定される高位段丘堆積物の基底の変位量は約 70m 以上としている。高位段丘面の年代を約 44~46 万年前とし、撓曲の活動が約 8 万年前までであるとすれば、西側が隆起する逆断層であり変位速度は 0.18~0.19mm/年となる活動断層としている。

本検討では、これら南北方向に連なる断層系を「野辺地断層系」と称し、変位量は地震調査研究推進本部 (1995) (43)の 0.18mm/年を用いた。

野辺地断層系の延長は約 30km 程度と推定されることから、断層幅は内閣府 (2006) (44)の「断層のモデル化」の資料を参考とすると、図 II-E.1-5 から断層幅は約 12km となる。野辺地断層を 45 度傾斜の逆断層とすると、断層運動に伴う水平変位幅は約 8.5km となる。

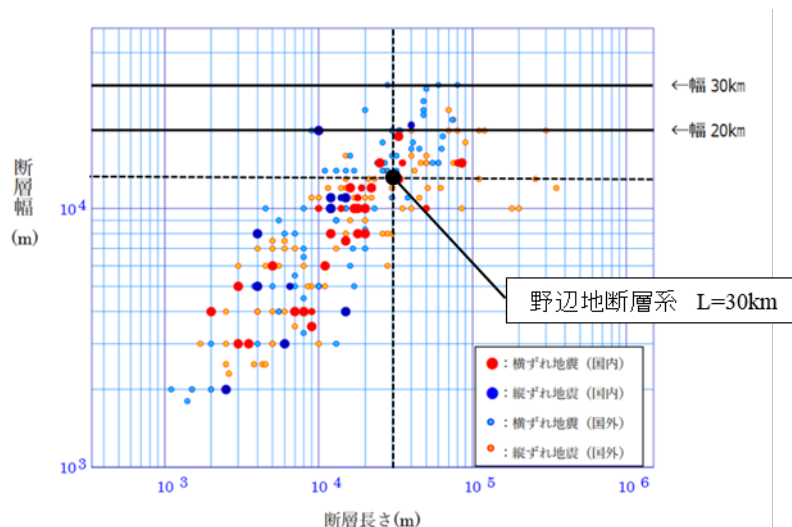


図 II-E.1-5 断層の長さと断層幅の関係 内閣府 (2006) (44)

(4) 海成段丘および2つの活断層による隆起速度分布図の作成

①海成段丘での計測値による推定

海成段丘から推定した隆起速度で対象地域を内挿すると図 II-E.1-6 となる。

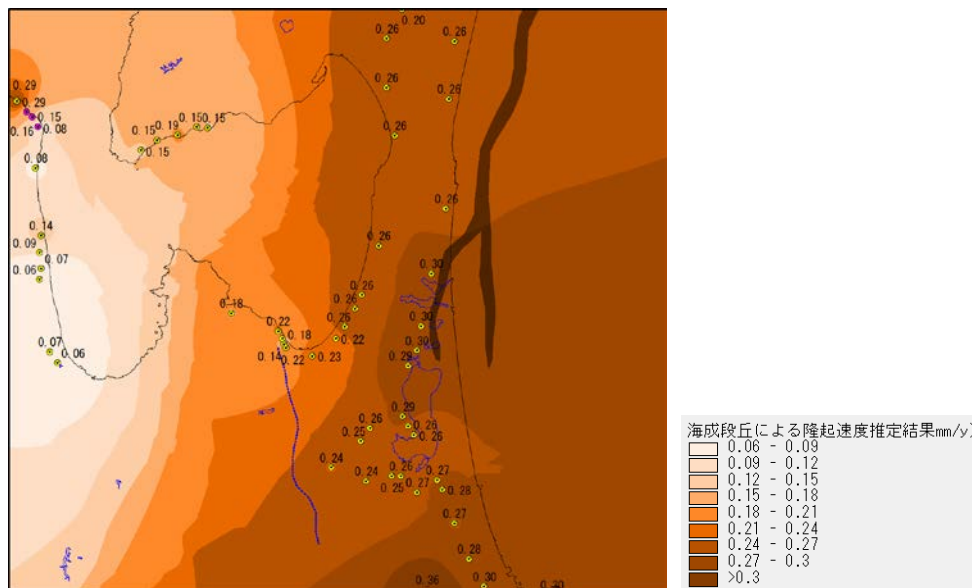


図 II-E.1-6 海成段丘から推定される隆起速度による内挿結果

②大陸棚外縁断層の追加

図 II-E.1-6 に示すように、西側で隆起速度が小さく、東側ほど大きい。ただし、出戸西方断層や大陸棚外縁断層は西傾斜の逆断層と推定されていることから、海域では隆起速度が小さくなると推定される。なお、大陸棚外縁断層は南部で2つに分岐すると考えられ、断層西側の段丘面からは0.3mm/年程度の隆起速度が推定されている。渡辺(2008)⁽³⁶⁾の検討では、出戸西方断層の西側ではMIS5eの段丘面高度は40m強であり、東側へ20~30m系統的に低下する。MIS5e西側での隆起速度は0.3mm/年程度であり、東側では西側よりも0.16~0.24mm/年程度隆起速度が小さい。

断層北部および東側トレースである大陸棚外縁断層の変位量は不明のため、外縁断層東縁で0mm/年とし、断層西縁で0.1mm/年とした。また、陸域に連続する西側トレースでは渡辺(2008)⁽³⁶⁾が推定した変位量差を平均化し、西側トレースの東縁では隆起速度は西側よりも平均0.2mm/年よりもやや小さい0.1mm/年とした。

さらに、海域の南側へも大陸棚外縁断層を延長し、海域の沖合いでは0mm/年とした。大陸棚外縁断層の南方延長については中塚・大熊(2009)⁽⁴⁵⁾に示されている下北半島沖合いの正の磁気異常の西縁付近に位置しており、この磁気異常西縁はさらに南方へ延長していることからこれを参考として南方へ断層を延長した。

以上の方法で海成段丘の隆起速度の値に大陸棚外縁断層の補助線を与えると、図 II-E.1-7 となる。

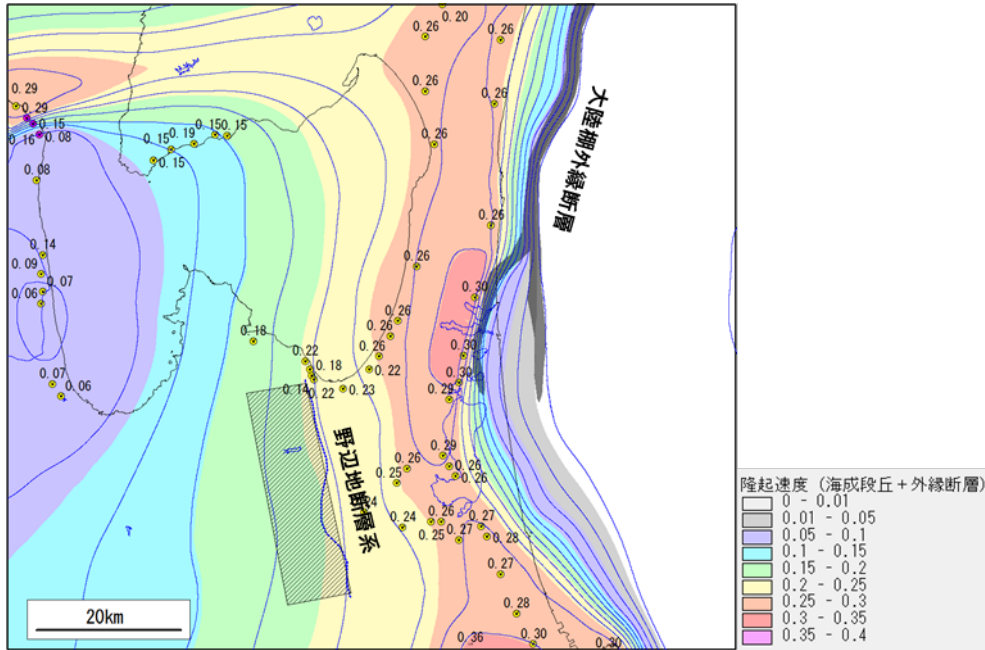


図 II-E.1-7 海成段丘の隆起速度測定データの修正
(網掛け：野辺地断層の地表での変位範囲)

③野辺地断層系の追加

野辺地断層の地表での変位範囲は前項で述べた 8.5km とし (図 II-E.1-7)、地表に現れた断層部で 0.18mm/年とし、図 II-E.1-7 の網掛け範囲の外側で 0mm/年となるモデルとした。なお、野辺地断層の東側は断層を境界として 0mm/年とする。

この内挿結果と図 II-E.1-7 を合成すると図 II-E.1-8 となる

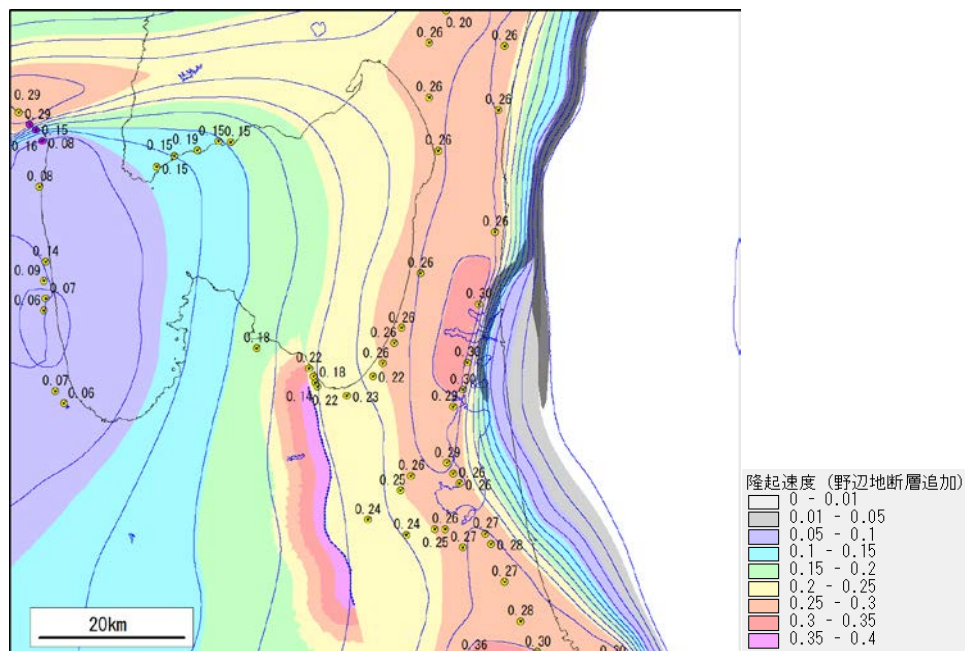


図 II-E.1-8 野辺地断層系を加えた隆起速度分布図

II-E.2 侵食速度の推定

(1) 使用した標高データおよび段丘の侵食速度

国土地理院の 10m メッシュ DEM を用いて侵食速度を測定した。この DEM は 0.4 秒間隔で作成されていることから、WGS84 UTM ゾーン 54 で 10m 間隔のメッシュデータに変換し、リサンプリングには共一次内挿法を用いた。

10mDEM では小川原湖、尾鮫湖（おぶち）、鷹架湖（たかほこ）などの海水準と等しい水域は内水域として扱われ、標高値 0m となっている。太平洋や陸奥湾などの海は領域外とするデータが格納されている。

上北地域に認められる海成段丘の侵食速度は、図 II-E.2-1 に示す 34 段丘面について段丘面全体の段丘面侵食速度と、侵食された部分の開析谷侵食速度を計測した。

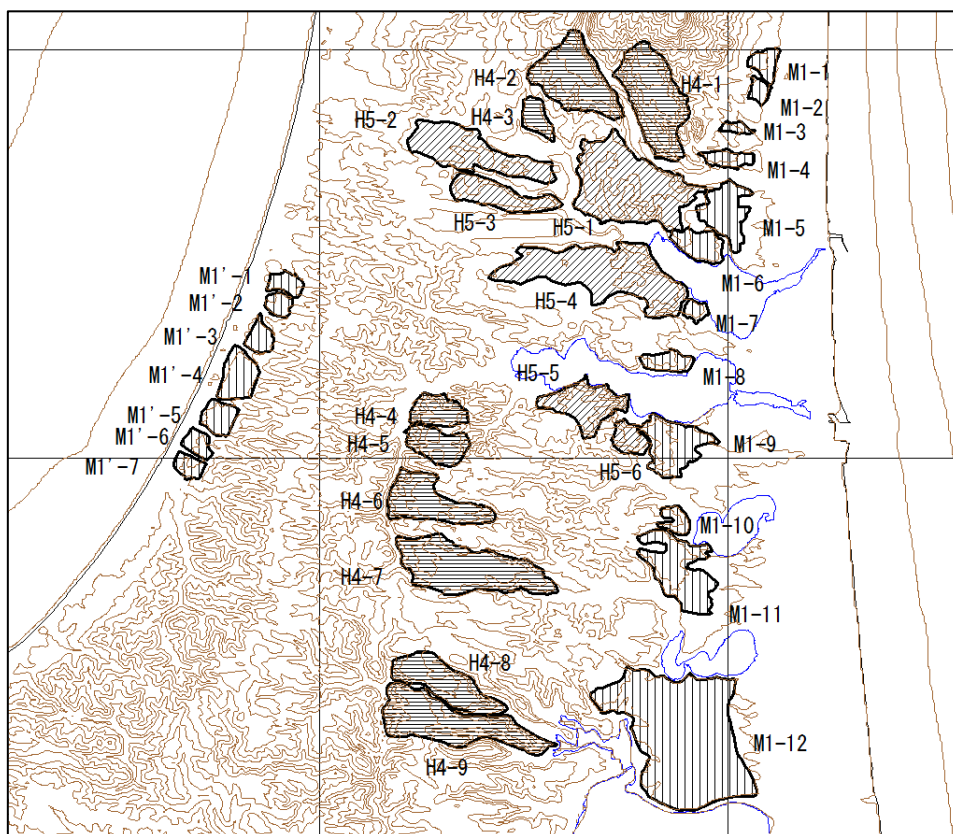


図 II-E.2-1 侵食速度測定を測定した海成段丘位置図 メッシュ間隔は 10km

段丘面の判読は石田ほか（2006）⁽⁴⁶⁾を用い、このうち計測した段丘面は上面高度から M1 面、H4 面、H5 面の 3 種に区分される。小池・町田（2001）⁽³³⁾によると H5 面は MIS7（21.5 万年前）、M1 面は MIS5e（12.5 万年前）に対比される。H5 面については多くは MIS9 相当（33 万年前）であるが、一部は MIS11 に対比されるとしている。

表 II-E.2-1 に 34 段丘面の測定結果を示した。

表 II-E.2-1 海成段丘の侵食速度測定結果

番号	年代	面積(m ²)	平均標高(m)	最高標高(m)	平均傾斜(度)	高度分散量(m)	①段丘面侵食速度(mm/年)	②開析谷侵食速度(mm/年)	②面積/①面積
H4-1	330000	3,007,500	130.98	213.4	8.41	30.29	0.0651	0.0658	0.990
H4-2	330000	2,700,000	124.55	178.4	7.24	22.60	0.0433	0.0433	0.999
H4-3	330000	510,000	63.40	78.5	5.35	13.98	0.0311	0.0324	0.959
H4-4	330000	840,000	51.46	81.5	9.28	23.42	0.0688	0.0700	0.984
H4-5	330000	1,055,000	62.26	86	6.73	21.90	0.0491	0.0515	0.953
H4-6	330000	1,927,500	67.10	85.9	5.77	12.24	0.0333	0.0396	0.841
H4-7	330000	3,735,000	63.55	86.3	5.46	12.71	0.0340	0.0366	0.930
H4-8	330000	1,945,000	67.42	91.6	6.40	15.03	0.0386	0.0410	0.941
H4-9	330000	3,305,000	61.63	87.6	8.43	17.02	0.0492	0.0547	0.900
H5-1	215000	4,480,000	51.54	91.8	5.63	15.62	0.0573	0.0603	0.950
H5-2	215000	2,520,000	61.13	79.3	3.24	11.54	0.0276	0.0295	0.935
H5-3	215000	1,325,000	55.62	75	6.77	12.85	0.0526	0.0548	0.960
H5-4	215000	4,537,500	50.03	68	3.61	9.60	0.0275	0.0354	0.776
H5-5	215000	1,550,000	50.04	69.6	7.83	17.60	0.0652	0.0698	0.934
H5-6	215000	530,000	43.01	64.6	7.25	17.49	0.0776	0.0807	0.961
M1-1	125000	410,000	38.47	46.9	3.44	12.25	0.0346	0.0367	0.941
M1-2	125000	237,500	32.57	43.3	2.92	11.10	0.0439	0.0453	0.970
M1-3	125000	165,000	38.27	45	4.89	12.41	0.0389	0.0477	0.816
M1-4	125000	412,500	37.57	48.1	4.28	10.62	0.0328	0.0432	0.760
M1-5	125000	1,265,000	34.24	44.8	2.22	9.96	0.0163	0.0235	0.692
M1-6	125000	757,500	32.06	43.9	4.18	12.24	0.0425	0.0483	0.880
M1-7	125000	232,500	25.44	38.3	6.43	14.76	0.0678	0.0691	0.980
M1-8	125000	502,500	35.41	48.1	5.95	12.24	0.0619	0.0636	0.973
M1-9	125000	1,592,500	34.82	47.9	4.18	11.99	0.0444	0.0496	0.895
M1-10	125000	365,000	35.67	46.5	7.18	15.40	0.0687	0.0700	0.982
M1-11	125000	2,177,500	38.61	54.5	3.36	10.41	0.0356	0.0400	0.888
M1-12	125000	8,340,000	29.94	54.5	1.99	8.22	0.0207	0.0338	0.613
M1'-1	125000	360,000	26.86	47.1	3.21	9.19	0.0535	0.0537	0.997
M1'-2	125000	302,500	24.39	42.8	3.37	10.46	0.0591	0.0593	0.997
M1'-3	125000	405,000	26.84	39.9	2.74	7.80	0.0381	0.0382	0.997
M1'-4	125000	915,000	25.33	46.4	2.31	11.02	0.0344	0.0346	0.995
M1'-5	125000	567,500	23.82	39.1	2.52	7.92	0.0314	0.0322	0.973
M1'-6	125000	345,000	17.14	27.3	2.40	13.11	0.0239	0.0282	0.847
M1'-7	125000	337,500	19.38	31.5	3.01	11.52	0.0420	0.0442	0.952

● 段丘面侵食速度の計測方法

段丘面の侵食速度は GIS ソフトの接峰面作成方法を用いており、図 II-E.2-2 に示すように任意点で半径 R の範囲を設定し、その地点よりも低い範囲を埋積する方法を用いている。この際、人工物はあらかじめ除外している。この方法では探索範囲 R によって形成される接峰面が変化することから、段丘面を刻む谷が埋積される半径 200m を用いている。

表 II-E.2-1 に示した MIS5e の平均侵食速度は 0.0416mm/年であり、藤原ほか (2005) ⁽⁴⁷⁾ では同地域の段丘面侵食速度を 0.048mm/年としており、測定結果とほぼ一致した。

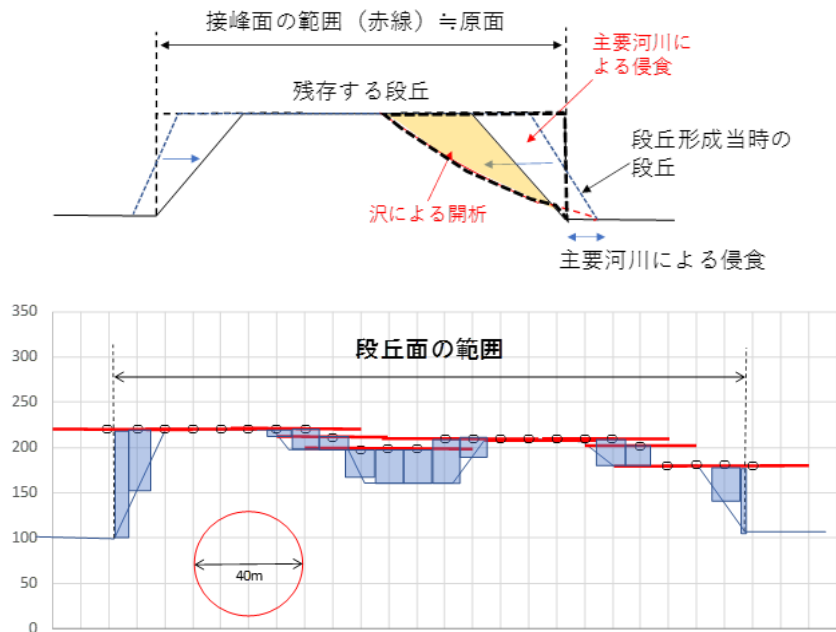


図 II-E.2-2 侵食速度を計測する際の復元面

● 開析谷侵食速度

開析谷侵食速度は図 II-E.2-2 で示された侵食を受けた部分から計算しており、接峰面と接するメッシュは除外している。ただし、この方法では、段丘面に若干の起伏があるため多くの地域が接峰面以下となっている。MIS5e の開析谷侵食速度は平均 0.0453mm/年であり、段丘面侵食速度より僅かに大きい程度となっている。一方、藤原ほか (2005)⁽⁴⁷⁾では上北地域の MIS5e の開析谷侵食速度は 0.098mm/年と 2 倍程度大きく、この違いは開析谷の範囲の定義方法による。表 II-E.2-1 の「②面積/①面積」は段丘面侵食速度の測定面積に対する、開析谷侵食速度の測定面積比を示し、多くは 0.9 以上 (平均 0.92) となっている。したがって、推定される侵食速度もほぼ同じ値となってしまう。一方、藤原ほか (2005)⁽⁴⁷⁾では開析谷の範囲を判読しており、この範囲は接峰面と比高 5m 以上の範囲に概ね相当している。

(2) 段丘面の侵食速度と地形量の関係

(1) の MIS5e~MIS9 に相当する段丘面の侵食速度を用いて、侵食速度と地形量との関係を検討した。地形量の計測項目は平均傾斜、最高標高および高度分散量の 3 項目とした。平均標高や平均傾斜は図 II-E.2-1 の計測段丘面内で算出した。高度分散量は計測面積にに応じて値が大きくなることから (Ohmori, 1978) ⁽⁴⁸⁾、約 1km 四方のメッシュ単位で高度分散量を計測したのち、段丘面に重複するメッシュの高度分散量をメッシュ面積に応じて平均した。したがって、高度分散量の値には段丘面以外の範囲も含まれている。なお、集計は MIS9 (H4 面)、MIS7 (H5 面)、および西側と東側の MIS5e の 4 つに集計した。

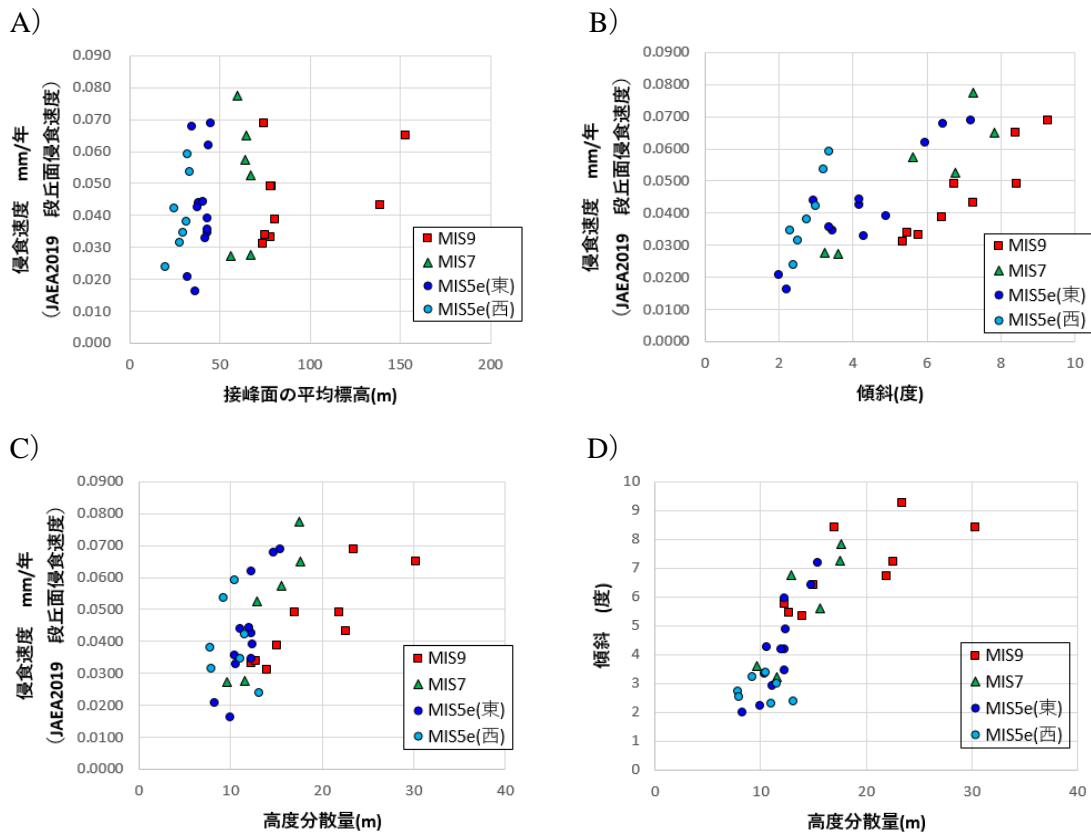


図 II-E.2-3 段丘面侵食速度と地形量の関係

図 II-E.2-3 A) は接峰面平均標高と侵食速度の関係であり、両者には相関は認められない。MIS9 面のうち吹越烏帽子山麓に位置する 2 段丘面 (H4-1、H4-2) は接峰面高度が 150m を超えるが、これ以外は標高 70~80m となっており、MIS7 は 60m 前後を示す。MIS5e (東) は 40m 前後、MIS5e (西) は 30m 前後であり、東側で隆起速度が大きいことを反映している。

B) の平均傾斜は 4 つの分類結果とも侵食速度と明瞭な相関を示しており、侵食速度は傾斜に支配されていると解釈できる。ただし、4 つの分類とも傾きが異なり、MIS5e の傾きは MIS9 の傾きよりも大きい。これは段丘面の河川による開析量が異なり、新しい時期に形成された段丘ほど未開析の段丘面が多く残されているため、新しい段丘面では平均傾斜が緩く算出されることによると推定される。なお、MIS5e (西) は MIS5e (東) に対して、傾きがより大きい。段丘面侵食速度の定義による可能性がある。図 II-E.2-3 で示したように段丘面は段丘面の崖下までの範囲としており、段丘の侵食量のこの部分で接峰面との比高が最も大きくなる。MIS5e (西) の断面は東側に比べて面積が小さく、段丘縁辺部の占める割合が増加するため、見かけ上侵食速度が大きく計算された可能性がある。

C) の高度分散量との関係では MIS9 でややばらつくが、MIS5e~MIS7 で高度分散量の増加

に伴い、概ね侵食速度が増加している。MIS9 がばらつく原因は、高度分散量の計算に吹越烏帽子山麓が含まれているためである。

D) は高度分散量と平均傾斜との関係では、吹越烏帽子山麓の影響を除くと、高度分散量は傾斜に対して明瞭な相関をもつ。この特徴により、藤原ほか (1999) (49) では高度分散量から侵食速度推定式を決定している。

$$E = 0.000044 \times D^{2.2} \quad (\text{II-E-1})$$

E : 侵食速度 (mm/年) D : 高度分散量 (m)

図 II-E.2-4 に測定した段丘面侵食速度と、藤原ほか (1999) (49) による侵食速度推定結果を示した。

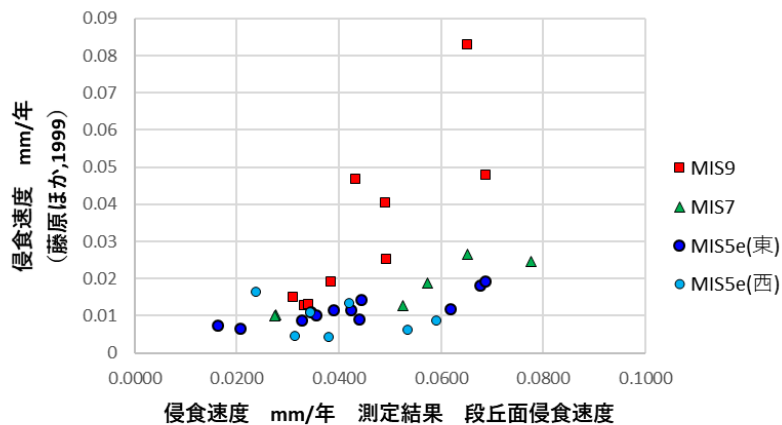


図 II-E.2-4 段丘面侵食速度と藤原ほか (1999) (49) による侵食速度の比較

段丘面の高度分散量は、前述した方法により集計しており、MIS9 では吹越烏帽子山麓の影響が現れている。MIS9 を除くと藤原ほか (1999) (49) の推定式は侵食速度測定結果の約 3.7 倍程度となっている。この理由は、藤原ほか (1999) (49) の侵食速度推定式はダム堆砂量から近似式を求めており、対象とする地質は第三紀以前の堆積岩、深成岩・変成岩類の他、火山岩類の硬岩を対象としている。一方、上北地域の段丘構成層は鮮新世前期～中期の軟岩であり岩石物性は大きく異なることによる。図 II-E.2-4 の関係が正しいとすると、これら更新世の軟岩では侵食に対する抵抗性が 1/3.7 程度小さいことになる。

藤原ほか (1999) (49) が前提とするダム流域の平均的な地質が不明であるが、約 100 ダムの流域について地質構成を算出した (表 II-E.2-2～5)。選別したダムは藤原ほか (1999) (49) と大半が重複する。

それぞれの単元に用いられる地質係数の範囲を表 II-E.2-2 の 2 段目に、その中間値を 1 段目に示した。また、ダムの平均的な地質構成比を 3 段目に示した。大雑把な計算ではあるが、ダム集水域の平均的な地質係数は 450 前後となる。

したがって、段丘を構成する更新世前期～中期の軟岩の地質係数は $450/3.7=120$ 程度となる。この数値は更新世前期～中期の軟岩としてはやや大きな値となる。

表 II-E.2-2 ダム集水域の地質構成 (1/3)

ダム名	第四紀堆積岩類	中新世～鮮新世堆積岩類	古第三紀以前の堆積岩類	付加体	第四紀火山岩類	第三紀以前の火山岩類	深成岩類	変成岩類	平均地質係数
地質係数	50	200	400	400	400	400	750	500	461
範囲	<100	100～300	300～500	300～500	300～500	300～500	500～1000	400～600	
ダム平均	0.03	0.06	0.00	0.29	0.07	0.24	0.22	0.07	1.00
旭川	0.06	0.02	0.01	0.11	0.00	0.15	0.24	0.41	500
綾南	0.00	0.00	0.00	0.87	0.13	0.00	0.00	0.00	399
雨畑	0.00	0.00	0.00	0.97	0.00	0.02	0.00	0.01	399
白中	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	0.83	0.00	0.00	400
塩川	0.08	0.00	0.00	0.19	0.04	0.18	0.51	0.00	552
奥裾花	0.00	0.63	0.00	0.00	0.00	0.37	0.00	0.00	273
温海川	0.00	0.55	0.00	0.00	0.00	0.07	0.37	0.00	419
下久保	0.00	0.00	0.00	0.96	0.00	0.00	0.00	0.03	402
下湯	0.04	0.00	0.00	0.00	0.81	0.15	0.00	0.00	386
加治川治水	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00	0.01	0.77	0.00	668
河本	0.03	0.05	0.00	0.10	0.00	0.50	0.13	0.19	442
柿元	0.02	0.81	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	285
刈谷田川	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	399
岩見	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.95	0.00	732
岩瀬	0.18	0.00	0.00	0.33	0.48	0.01	0.00	0.00	335
岩知志	0.03	0.02	0.00	0.46	0.00	0.04	0.35	0.11	517
久賀	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26	0.50	0.22	590
宮川	0.00	0.00	0.00	0.99	0.00	0.01	0.00	0.00	399
魚切	0.04	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.90	0.00	700
魚梁瀬	0.00	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	398
境川	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	400
鏡	0.00	0.00	0.00	0.96	0.00	0.00	0.00	0.04	404
芹川	0.08	0.00	0.00	0.00	0.88	0.03	0.00	0.00	370
熊野川	0.00	0.00	0.00	0.43	0.00	0.07	0.39	0.11	545
御所	0.26	0.11	0.00	0.00	0.22	0.39	0.02	0.00	292
広瀬	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.03	0.91	0.00	716
綱取	0.00	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.01	401
荒川	0.00	0.00	0.00	0.09	0.09	0.12	0.69	0.00	640
荒沢	0.01	0.06	0.00	0.05	0.00	0.33	0.54	0.00	573
高根第一	0.00	0.00	0.00	0.60	0.37	0.02	0.00	0.00	398
高坂	0.00	0.30	0.00	0.00	0.00	0.69	0.01	0.00	342
高瀬	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.05	0.91	0.00	716
黒瀬	0.00	0.00	0.11	0.03	0.00	0.04	0.00	0.81	479
黒木	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.77	0.05	660
犀川	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	400
坂本	0.03	0.00	0.00	0.89	0.00	0.00	0.08	0.00	416
三瀬谷	0.05	0.00	0.00	0.46	0.00	0.00	0.00	0.49	431
三成	0.09	0.01	0.00	0.00	0.01	0.26	0.62	0.00	584
三保	0.00	0.04	0.00	0.00	0.01	0.42	0.53	0.00	578
室牧	0.02	0.06	0.00	0.00	0.00	0.20	0.15	0.56	488

表 II-E.2-3 ダム集水域の地質構成 (2/3)

ダム名	第四紀堆積岩類	中新世～鮮新世堆積岩類	古第三紀以前の堆積岩類	付加体	第四紀火山岩類	第三紀以前の火山岩類	深成岩類	変成岩類	平均地質係数
祝子	0.00	0.01	0.00	0.32	0.00	0.03	0.63	0.00	619
諸塚	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	400
小屋	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.94	0.00	0.00	384
小河内	0.00	0.00	0.00	0.80	0.00	0.00	0.20	0.00	468
小見野々	0.01	0.00	0.00	0.98	0.00	0.00	0.00	0.00	395
上市川第2	0.00	0.01	0.00	0.18	0.00	0.10	0.68	0.04	639
新中野(再)	0.00	0.02	0.00	0.00	0.33	0.65	0.00	0.00	397
新鶴子	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.90	0.00	0.00	400
深山	0.00	0.00	0.00	0.00	0.55	0.30	0.15	0.00	453
真野	0.04	0.05	0.00	0.00	0.00	0.41	0.48	0.01	542
水窪	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	399
正木	0.00	0.00	0.00	0.95	0.00	0.00	0.00	0.04	402
青蓮寺	0.04	0.08	0.00	0.00	0.00	0.36	0.35	0.16	507
赤石	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	400
千屋	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.48	0.36	0.10	518
川内	0.15	0.12	0.00	0.07	0.00	0.66	0.00	0.00	325
早口	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	0.71	0.01	0.00	404
早出川	0.00	0.01	0.00	0.10	0.00	0.30	0.59	0.00	602
相俣	0.03	0.31	0.00	0.00	0.00	0.61	0.05	0.00	344
草木	0.01	0.00	0.00	0.29	0.10	0.34	0.26	0.00	489
大日川	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.85	0.12	0.00	440
大門	0.64	0.00	0.00	0.00	0.09	0.26	0.00	0.00	175
大夕張(元)	0.03	0.01	0.03	0.71	0.00	0.03	0.00	0.18	403
朝日小川	0.02	0.00	0.00	0.53	0.00	0.20	0.25	0.00	480
長谷	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.49	0.47	0.00	553
津賀	0.00	0.00	0.00	0.97	0.00	0.00	0.00	0.02	400
津川	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.38	0.39	574
椿山	0.00	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	398
田代八重	0.00	0.01	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	397
刀利	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.91	0.00	0.00	400
東荒川	0.00	0.00	0.00	0.00	0.71	0.21	0.07	0.00	425
奈川渡	0.05	0.00	0.00	0.55	0.15	0.07	0.18	0.00	443
内の倉	0.00	0.01	0.00	0.07	0.00	0.05	0.87	0.00	700
内川	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	399
二居	0.02	0.07	0.00	0.00	0.20	0.32	0.38	0.00	513
二川	0.00	0.00	0.00	0.91	0.00	0.00	0.00	0.08	408
日向	0.00	0.00	0.00	0.89	0.00	0.00	0.00	0.10	407
日向神	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	0.00	0.18	414
日中	0.00	0.52	0.00	0.03	0.00	0.45	0.00	0.00	294
入畑	0.00	0.29	0.00	0.02	0.16	0.53	0.00	0.00	342
萩形	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.49	0.49	0.00	568
白川	0.03	0.48	0.00	0.01	0.00	0.38	0.09	0.00	322
畑薙第一	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	400
比奈知	0.06	0.16	0.00	0.00	0.00	0.15	0.51	0.13	538

表 II-E.2-4 ダム集水域の地質構成 (3/3)

ダム名	第四紀堆積岩類	中新世～鮮新世堆積岩類	古第三紀以前の堆積岩類	付加体	第四紀火山岩類	第三紀以前の火山岩類	深成岩類	変成岩類	平均地質係数
浜田(元)	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.37	0.02	431
富郷	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	500
富村	0.00	0.00	0.00	0.24	0.44	0.31	0.00	0.00	400
布部	0.04	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.93	0.00	711
布目	0.04	0.16	0.00	0.00	0.00	0.09	0.64	0.08	587
平鍋	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	400
別子	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99	497
北川	0.01	0.02	0.00	0.85	0.05	0.08	0.00	0.00	394
幌満川第3	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.57	0.37	612
面河第3	0.01	0.00	0.08	0.41	0.00	0.22	0.00	0.27	423
木地山	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	749
目屋(元)	0.00	0.13	0.00	0.01	0.00	0.86	0.01	0.00	378
矢木沢	0.01	0.00	0.00	0.34	0.00	0.04	0.60	0.00	604
立花	0.00	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	399
龍ヶ鼻	0.00	0.13	0.00	0.00	0.00	0.87	0.00	0.00	374
和田川	0.12	0.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	181

図 II-E.2-1 で示したように計測対象とした段丘は 34 面と少なく、また MIS9 のように高度分散量が山麓の影響を受けている場合もあるため、MIS5e～MIS9 が残る上北地域北部について段丘面の高度分散量を算出した。集計方法は前述と同じ方法である。

表 II-E.2-5 に 4 区分した平均侵食速度と、計測段丘および上北北部の段丘面から集計した高度分散量による侵食速度（藤原ほか, 1999）⁽⁴⁹⁾を示した。

表 II-E.2-5 平均侵食速度と藤原ほか（1999）⁽⁴⁹⁾による侵食速度結果（mm/年）

	測定侵食速度	計測段丘	上北北部
MIS9	0.0458	0.0336	0.0159
MIS7	0.0513	0.0172	0.0154
MIS5e(東)	0.0423	0.0116	0.0095
MIS5e(西)	0.0404	0.0091	0.0095
平均	0.0450	0.0179	0.0126

表 II-E.2-5 で示したように、計測した侵食速度は MIS5e で 0.040～0.042mm/年、MIS7 で 0.0513mm/年、MIS9 で 0.0458mm/年と平均 0.045mm/年程度であり、形成年代による侵食速度の差はほとんど無い。計測段丘の高度分散量から推定した侵食速度は MIS9 で 0.0336mm/年と大きい、これは前述した吹越烏帽子山麓の影響が大きい。一方、上北北部で計測した侵食速度では 0.0159mm/年と MIS7 とほぼ一致している。

図 II-E.2-5 左は、計測した段丘侵食速度の平均値と、計測段丘の高度分散量から推定した侵食速度の比較であり、山麓の影響により MIS9 が他のデータと乖離していることを示す。一方、上北北部の段丘面の高度分散量から侵食速度を推定すると、図 II-E.2-5 右となり、測定値との相関はかなり良くなる。この際の回帰直線の傾きは 0.28 であるので、藤原ほか(1999)⁽⁴⁹⁾の推定値は実際の 3.6 倍大きいことを示す。

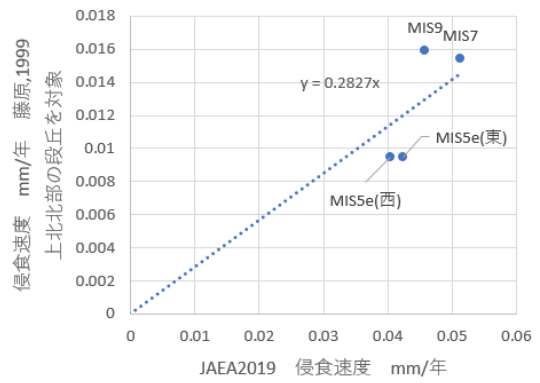
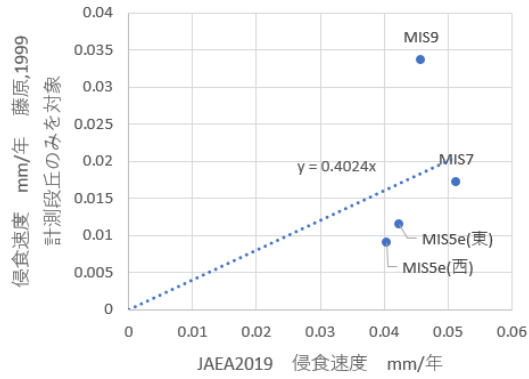


図 II-E.2-5 計測した平均侵食速度と藤原ほか (1999) (49)による推定値の比較

図 II-E.2-6 に計測した平均侵食深と経過時間の関係を示した。赤丸は MIS5e～MIS9 それぞれの平均値を示す。図で示したように平均侵食深は傾き 0.0046 の直線上に位置することから、これら段丘はほぼ等速で侵食されていることになる。

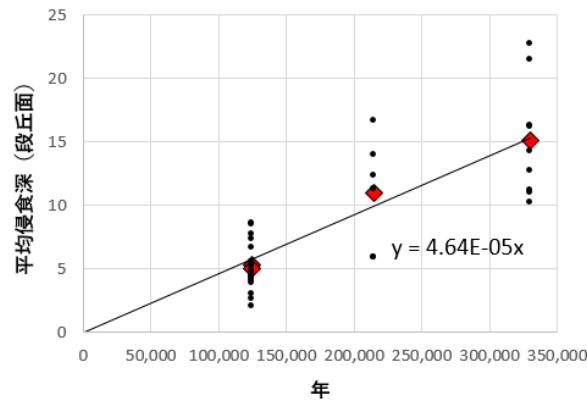


図 II-E.2-6 計測した段丘面の平均侵食深

(3) 藤原ほか (1999) (49)による対象地域の侵食速度

対象地域について約 1km の矩形領域毎に 10m メッシュ DEM から高度分散量を算出し、藤原ほか (1999) (49)による侵食速度推定式を用いて侵食速度を推定した。

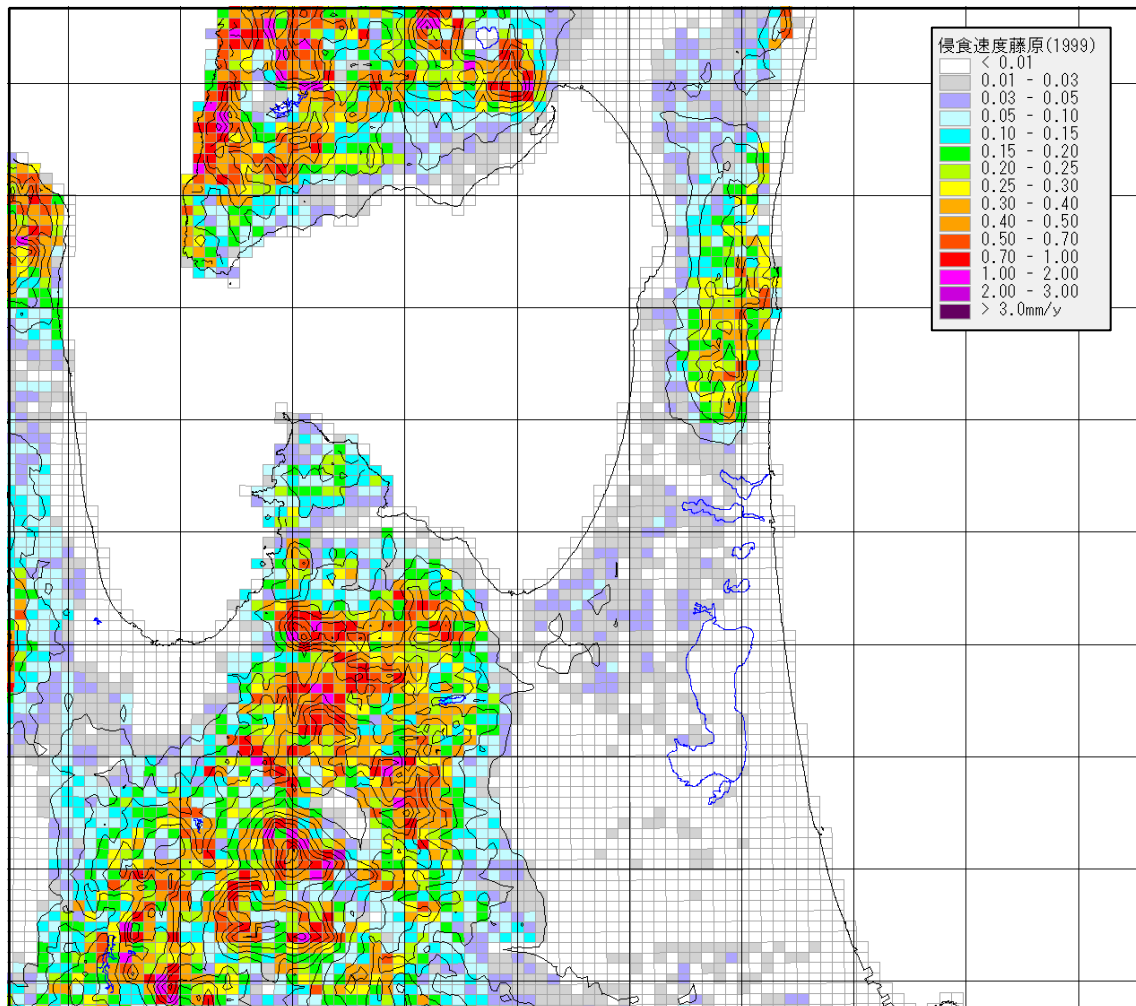


図 II-E.2-7 対象地域の侵食速度分布 藤原ほか (1999) (49)による
(メッシュ間隔 大:10km、小:1km)

対象地域は侵食速度の小さい平野部を多く含むため平均侵食速度は 0.14mm/年と小さい値を示す。最大侵食速度は八甲田山付近の 2.05mm/年であり、脊梁山地付近は赤で示した 0.7~1.0mm/年程度と推定される。海成段丘が分布する丘陵部では 0.05mm/年以下であり、平野部では 0.01mm/年以下となっている。

縮尺 1/20 万シームレス地質図(50)を表 II-E.2-6 の 15 単元に集約した。本地域では段丘を構成する更新世堆積岩および山麓から丘陵を被覆する十和田カルデラ等の火山灰層が広く分布しており、これらを細分した。なお、火山灰や火砕流堆積物が厚い場合には、起伏等の地形特徴はこれらが被う下位の地質は反映しないが、薄い場合には侵食により下位の地質を反映すると予想される。

高位段丘~低位段丘は地形的な区分であり、表層は段丘形成以降の堆積物が被う。段丘を構成する地質は更新世前期~中期の堆積岩によって構成されているので表 II-E.2-6 の単元 15、16 と同じとなる。更新世前期~後期の火山灰は、十和田カルデラ等の火山噴出部からなる。

表 II-E.2-6 地質単元別の地形特徴と侵食速度

単元	地質	Area	侵食速度	平均標高	補正係数	修正侵食速度	傾斜
10	完新世(10)	605.6	0.015	52.3	3.7	0.057	2.2
11	低位段丘(11)	452.4	0.009	40.8	3.7	0.032	2.3
12	中位段丘(12)	311.0	0.020	64.8	3.7	0.074	5.6
13	高位段丘(13)	94.0	0.008	70.1	3.7	0.029	3.1
14	更新世後期(14)	41.1	0.018	53.0	3.7	0.065	2.3
15	更新世中期(15)	49.4	0.020	51.3	3.7	0.073	6.1
16	更新世前期(16)	187.8	0.050	123.6	3.7	0.186	7.4
20	新第三紀堆積岩類(20)	526.2	0.102	129.3	1.0	0.102	11.3
61	更新世後期火山灰(61)	14.0	0.143	467.5	1.0	0.143	18.0
62	更新世中期火山灰(62)	482.0	0.142	272.5	1.0	0.142	14.0
63	更新世前期火山灰(63)	47.8	0.173	249.2	1.0	0.173	10.3
50	付加体(50)	22.3	0.483	227.2	1.0	0.483	11.1
60	第四紀火山岩類(60)	403.8	0.322	674.1	1.0	0.322	13.4
70	新第三紀以前の火山岩類(70)	914.0	0.306	267.8	1.0	0.306	17.3
80	深成岩類(80)	20.5	0.467	423.3	1.0	0.467	22.5
荷重平均		4172.1	0.142	204.5		0.162	10.0

図 II-E.2-8 に単元別の平均標高と傾斜を、図 II-E.2-9 に平均標高と平均傾斜との関係を示した。高原などを除くと、一般に平均標高が高くなると平均傾斜は大きくなる。また、硬岩では一般に傾斜が急な地形を形成し、軟岩は緩やかな地形を形成することから、開析の進んだ山地では、傾斜が地質硬さを反映する1つの指標となる。

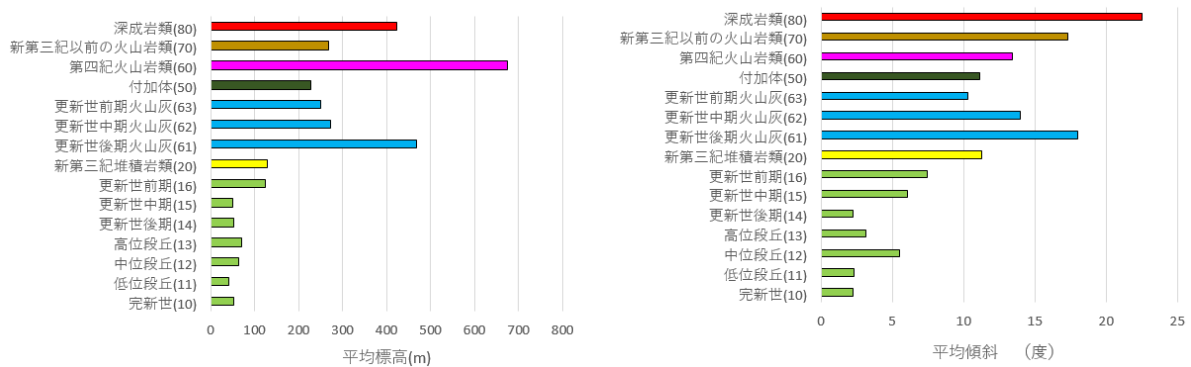


図 II-E.2-8 上北地域の単元別地形特徴

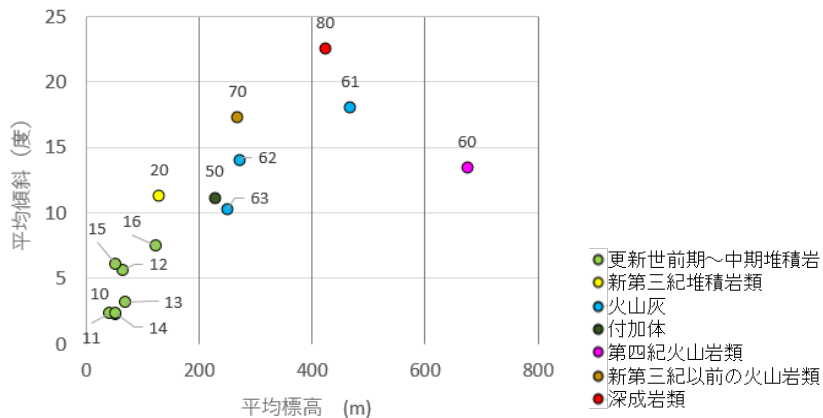


図 II-E.2-9 標高と傾斜の関係 (単元別)

図 II-E.2-9 で示したように、更新世前期（16）、更新世中期（15）は新第三紀堆積岩よりも平均傾斜が緩く、耐食性が低いことを示唆する。火山噴出に被われた地域（61～63）は平均標高、平均傾斜とも大きく、付加体、新第三紀堆積岩類～新第三紀以前の火山岩に近い値を示すことから、これら物性に近いことを示し、火山灰は一般に薄く、下位の地形特徴を反映していると推定される。

低位～高位段丘（11～13）では、更新世前期～中期の堆積岩よりも傾斜が緩いが、これらの面はまだ十分開析されておらず、平坦面が残ることによる。対象地域の段丘面は、更新世前期～中期の堆積岩類から構成されており、物性は更新世前期や中期と同じ物性とすべきである。

以上から対象地域の物性は以下の 8 単元に分類した。

- ①完新世、更新世後期堆積物
- ②更新世前期～中期堆積岩
- ③新第三紀堆積岩類
- ④火山灰
- ⑤付加体
- ⑥第四紀火山岩類
- ⑦新第三紀以前の火山岩類
- ⑧深成岩類

なお、④の火山灰はこれらが被う地質を反映した地形特徴を示すと推定される。下位の地質は新第三紀堆積岩類、付加体および第三紀以前の火山岩類の平均的な物性を与えた。

図 II-E.2-10 に 8 単元に集約した結果を示す。

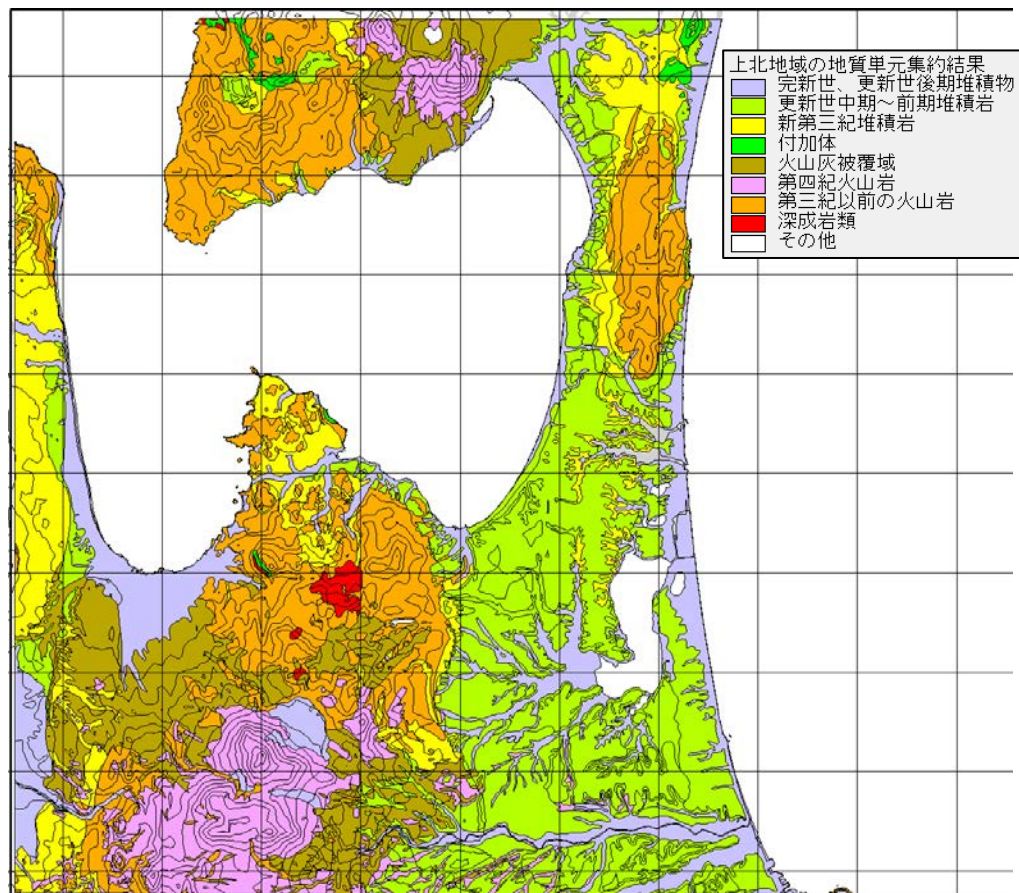


図 II-E.2-10 集約後の地質図 メッシュ間隔 10km

図 II-E.2-11 に藤原ほか (1999) ⁽⁴⁹⁾による単元別の侵食速度と地形量の関係を示した。侵食速度は標高、傾斜と相関があることから右上がりのグラフとなる。新第三紀堆積岩類では平均 0.1mm/年程度の侵食速度となり、火山岩類、付加体および深成岩類は山地に分布することから 0.3~0.5mm/年と大きい。更新世前期~中期の堆積岩は侵食速度が 0.01~0.05mm/年と小さいが、これは地質の耐食性を考慮していないためである。(4) で検討したように、段丘面の侵食速度は 0.05mm/年程度であり、藤原ほか (1999) ⁽⁴⁹⁾から推定される侵食速度の 3.7 倍程度となっている。

また、表 II-E.2-6 に地質による補正項を示し、これに乗じた侵食速度を示した。全体の侵食速度は 0.16mm/年となり、0.02mm/年程度大きくなる程度の変化と推定される。

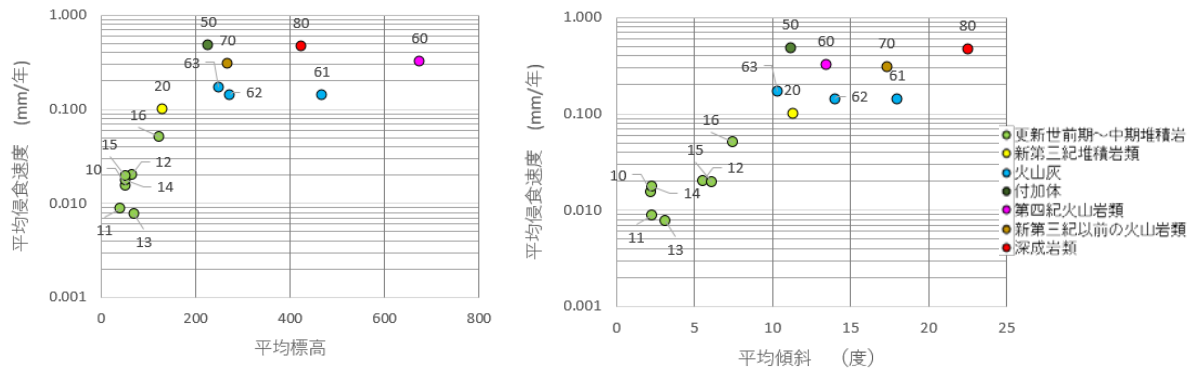


図 II-E.2-11 侵食速度と地形量の関係 (単元別)

(4) 原子力機構・電中研 (2019) ⁽⁵¹⁾による侵食速度

地形量を用いた侵食速度推定式には前述した藤原ほか (1999) ⁽⁴⁹⁾の他に、原子力機構・電中研 (2019) ⁽⁵¹⁾の推定式がある。この推定式は宇宙線生成核種法を用いて推定される流域の侵食速度と流域の地形量の関係から侵食速度を導いており、図 II-E.2-12 に示すように ¹⁰Be からは決定係数が 0.8 を超える良好な関係が得られている。

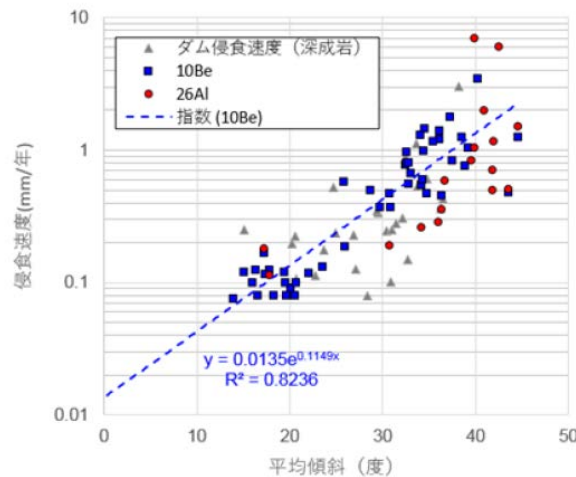


図 II-E.2-12 原子力機構・電中研 (2019) ⁽⁵¹⁾による侵食速度推定式

図 II-E.2-7 で作成した 1km メッシュの地形量の平均傾斜を用いて、図 II-E.2-12 の推定式から侵食速度を計算すると 0.097mm/y となり表 II-E.2-6 の 0.142mm/y の 2/3 程度の侵食速度となる。ダム堆砂速度と地形量との相関が悪いことから、藤原ほか (1999) ⁽⁴⁹⁾の推定値はやや大きめに推定されている可能性がある。よって、対象地域の平均侵食速度は 0.1mm/y 程度と推定される。

II-E.3 地質係数の推定

(1) 岩石の侵食抵抗性と物性

II-E.2 で述べたように、対象地域の太平洋側の丘陵部は鮮新世前期～中期の堆積岩からなる。これら単元の分布域の平均標高は新第三紀堆積岩よりもやや低い程度であるが、傾斜は明らかに小さい値を示す。したがって、更新世前期～中期の堆積岩の物性値は新第三紀堆積岩類よりも小さくする必要がある。

岩石の侵食抵抗性を検討した実験として Sunamura et al., 1985⁽⁵²⁾があり、回転ドラムに供試体を入れ、ドラムを回転することで物性と摩耗性について検討している。この結果では岩石の一軸圧縮強度に対し、岩石の摩耗性は反比例の関係にあることを示している。また、井上(2013)⁽⁵³⁾は、軟岩河床 ($q_u=1\sim 10\text{Mpa}$) の侵食速度について簡易的な実験により一軸圧縮強度との関係を検討し、一軸圧縮強度の 2 乗に反比例するとしている。両者の結果にはやや違いがあるが、岩石の摩耗・侵食速度は一軸圧縮強度の増加とともに小さくなり、一軸圧縮強度で物性を代表させている。

また、地形変化シミュレーションに用いる耐食性に地質係数を導入し、ロックコントロールを再現している。この地質係数は図 II-E.3-1 および図 II-E.3-2 に示すように一軸圧縮強度や P 波速度からの換算が可能である。

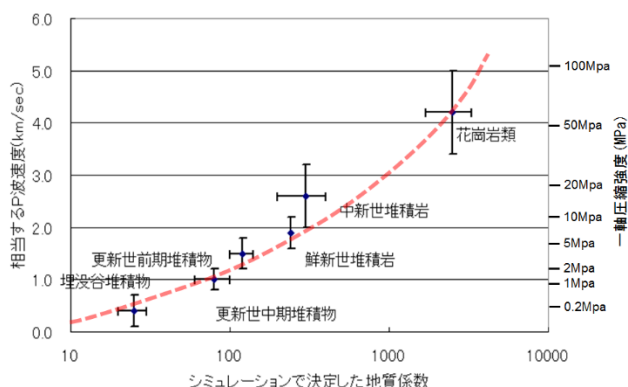


図 II-E.3-1 地質係数と P 波速度および一軸圧縮強度の関係

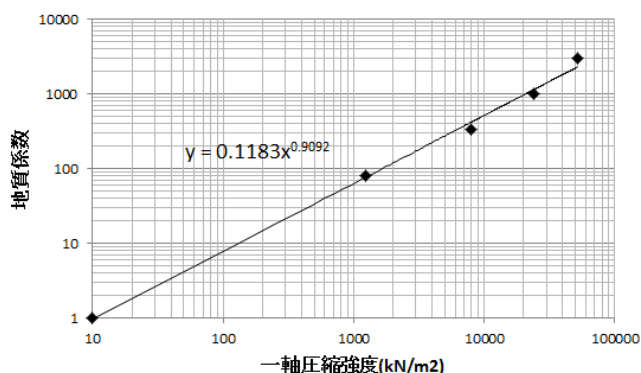


図 II-E.3-2 一軸圧縮強度と地質係数の関係

図 II-E.3-3 に菊池 (1990)⁽⁵⁴⁾による堆積岩類の一軸圧縮強度を示した。中新世堆積岩では数 MPa～10MPa (10～100kgf/cm²) であり、鮮新世～更新世堆積岩では 0.1MPa～数 MPa 程度、更新世では 0.1～0.5MPa 相当となる。これを図 II-E.3-2 により地質係数に読み替えると中新世堆積岩類では 100～400 程度、鮮新世～更新世堆積岩で 10～100 程度、更新世堆積岩で 10～40 程度の地質係数が想定される。

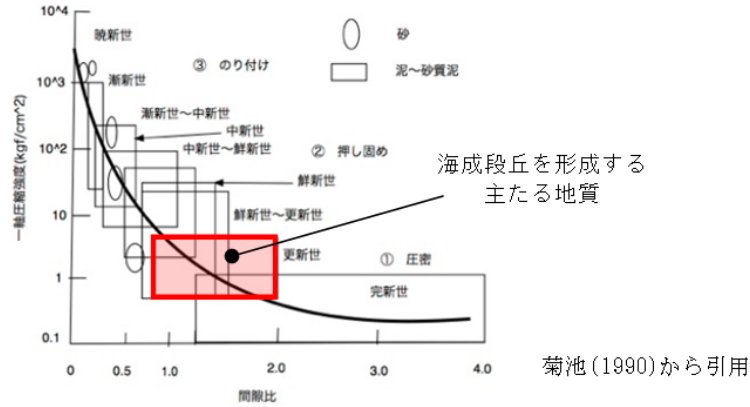


図 II-E.3-3 堆積岩類の一軸圧縮強度

(2) N 値による地質係数の推定

N 値は標準貫入試験 (JIS A 1219) によって求められる地盤の強度等を求める試験結果 (数値) である。その定義は『質量 63.5 ± 0.5 キログラムのドライブハンマーを 76 ± 1 センチメートル自由落下させて、ボーリングロッド頭部に取り付けたノッキングブロックを打撃し、ボーリングロッド先端に取り付けた標準貫入試験用サンプラーを地盤に 30 センチメートル打ち込むのに要する打撃回数』である。したがって、N 値が大きいほど地盤強度は大きくなり、逆に未固結泥では自沈することにより N 値が 0 となる場合もある。

図 II-E.3-4 に地盤工学会 (2017) ⁽⁵⁵⁾ による N 値と一軸圧縮強度の関係を示した。N 値と一軸圧縮強度の関係は土質にもよるが、粘性土では概ね

$$\text{一軸圧縮強度 (MPa)} = 50 \times N \quad N : N \text{ 値} \quad (\text{II-E-2})$$

で表現される。更新世の堆積物では $N=10 \sim 50$ 程度であるので一軸圧縮強度は $0.5 \sim 2.5 \text{ MPa}$ と推定され、図 II-E.3-2 から地質係数は $20 \sim 100$ が推定される。なお、沖積層は $N < 10$ であるので地質係数は 20 未満が推定される。

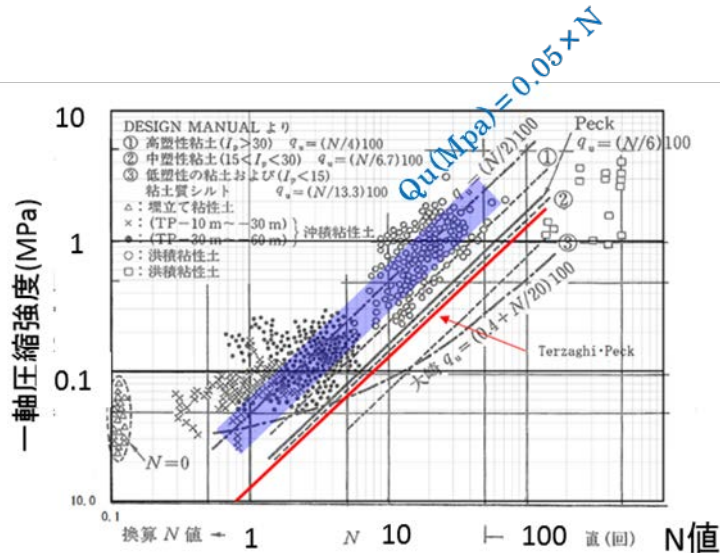


図 II-E.3-4 N 値の一軸圧縮強度への換算 地盤工学会 (2017) ⁽⁵⁵⁾

(3) 上北地域の更新世堆積岩の地質係数の検討

上北地域の堆積岩類の一軸圧縮強度や N 値を文献から収集した結果を表 II-E.3-1 に示す。また、図 II-E.3-5 に N 値および一軸圧縮強度から換算した地質係数を示す。図中の誤差範囲は標準偏差を示している。N 値から一軸圧縮強度への換算は図 II-E.3-4 の上の式を用い、一軸圧縮強度から地質係数への換算は図 II-E.3-2 の回帰式を用いた。

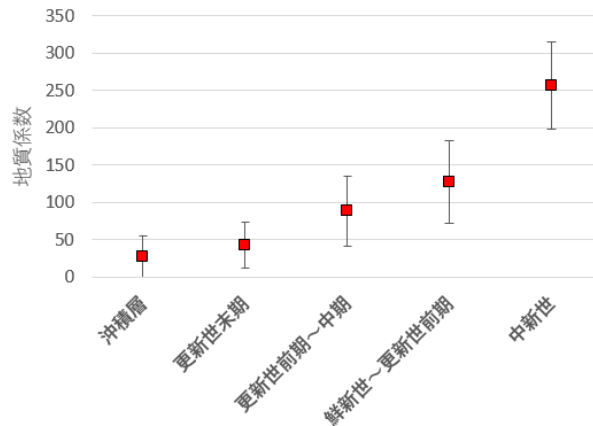


図 II-E.3-5 中新世以降の堆積岩・堆積物の地質係数

野辺地層（更新世前期～中期）は、砂質部では N 値は一般に高く、地質係数は 100 を超えるが、粘性土では地質係数は 20～30 と低い値を示す。これら中新統～完新統の物性値は図 II-E.3-5 に示すように古いほど大きくなり、地質係数の範囲は図 II-E.3-1 で示したこれまでの範囲とほぼ一致する。したがって、中新世の堆積岩（鷹架層）は地質係数 250 程度、更新世前期～中期は 80 前後（粘性土のデータが少ないため、少し低く設定）程度と推定される。

表 II-E.3-1 中新世以降の堆積岩の物性値

層序	時代	地質	N 値	一軸圧縮強度		地質係数		出典			
				MPa	地質係数	平均	標準偏差				
鷹架層	中新世	凝灰質シルト	98	4.9	268	268		大沼(1972) ⁽⁵⁶⁾			
砂小又層	鮮新世～更新世前期	細粒砂岩	49.9	2.495	145	158	19	大沼(1972) ⁽⁵⁶⁾			
			60	3	172			下北地域広域行政組合(2017) ⁽⁵⁷⁾			
野辺地層	更新世前期～中期	砂礫	43	2.15	127	86	48	大沼(1972) ⁽⁵⁶⁾			
			火山灰層	40	2			119	建設省(1971) ⁽³²⁾		
				60	3			172			
砂質土層		17	0.85	55							
		50	2.5	145							
		35	1.75	105							
粘性土層		7	0.35	24							
		9	0.45	31							
高位段丘		粘性土～砂質土	5	0.25	18			86		48	野々村ほか(2013) ⁽⁵⁸⁾
			33	1.65	100						
	22		1.1	69							
高位段丘	シルト～砂	19	0.95	60	86	48	下北地域広域行政組合(2017) ⁽⁵⁷⁾				
		32	1.6	97							
更新世末期	更新世末期	砂礫	20	1.00	63	43	31	建設省(1971) ⁽³²⁾			
			30	1.50	91						
		砂	5	0.25	18						
			16	0.80	52						
		粘土	3	0.15	11						
7	0.35		24								
沖積層	完新世	砂	10	0.5	34	27	27	建設省(1971) ⁽³²⁾			
			20	1	63						
		粘土	1	0.05	4						
			2	0.1	8						

(4) 対象地域の基盤

根元・氏家 (2009) ⁽⁵⁹⁾による対象地域の層序対比表を図 II-E.3-6 に示す。対象地域は夏泊半島、下北半島、上北および田子地域 (青森県南部の奥羽山地) について抜粋する。

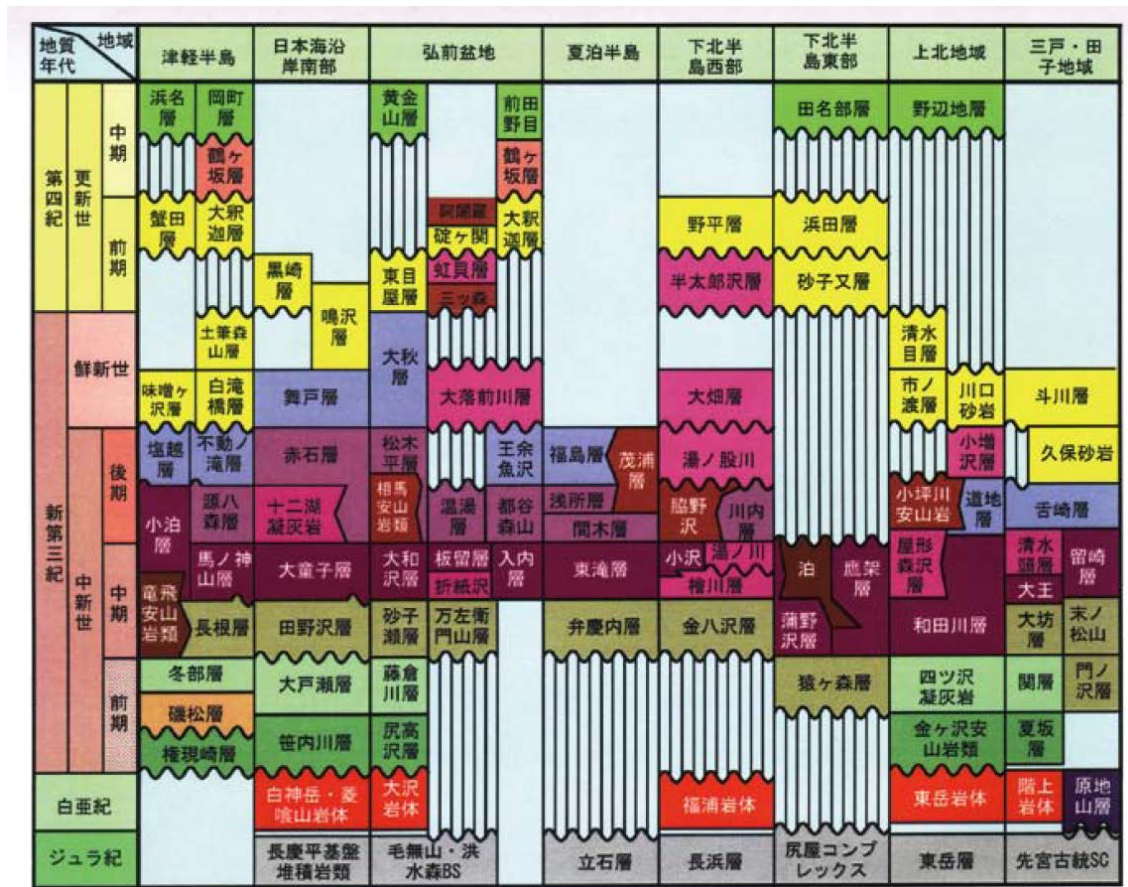


図 II-E.3-6 対象地域の層序対比表 根元・氏家 (2009) ⁽⁵⁹⁾

根元・氏家 (2009) ⁽⁵⁹⁾による夏泊半島、下北半島、上北および田子地域の地質 (第三紀以前) を以下に要約する。なお、各層についてはII-E.4 で別途説明する。

- 中生界
 - 夏泊半島：立石層 (層状チャート) と東岳層 (石灰岩、チャート)
 - 下北半島：長浜層 (石灰岩、チャート)
- 深成岩類
 - 夏泊・下北西部：東岳岩体 (花崗閃緑岩等)、福浦岩体 (石英閃緑岩)
- 新第三系堆積岩類
 - 夏泊半島：弁慶内層 (凝灰岩等)、間木層 (泥岩)、浅所層 (凝灰質シルト)
 - 福島層 (凝灰質シルト岩・砂岩)
 - 下北地域：猿ヶ森層 (礫岩、シルト岩、砂岩等)、蒲野沢層 (泥岩、シルト岩)
 - 鷹架層 (凝灰質砂岩、シルト岩)
 - 上北地域：四沢凝灰岩 (凝灰岩)、和田川層 (泥岩)、道地層 (シルト岩、凝灰質砂岩)
 - 屋形森沢層 (凝灰岩)、市ノ渡層 (砂岩、礫岩)
 - 清水目層 (凝灰質砂岩、シルト岩)、川口砂岩 (砂岩、礫岩)

甲地層（砂岩、シルト岩）

田子地域：関層（凝灰岩）、大王層（シルト岩）、清水頭層（凝灰岩）

- 新第三系火山岩類

夏泊半島：茂浦層（安山岩等）

下北地域：泊層（安山岩、〃火砕岩）

上北地域：金ヶ沢安山岩類（プロピライト、〃火山角礫岩）

小坪川安山岩類（安山岩、〃凝灰角礫岩）、小増沢層（石英流紋岩等）

月日山火山岩類（安山岩、〃凝灰角礫岩）

田子地域：大坊層（石英安山岩、〃火砕岩）

- 第四紀堆積岩類

下北半島：砂小又層（凝灰質砂岩、凝灰岩）、浜田層（砂岩、シルト岩）

田名部層（細粒砂、礫、粘土）

上北地域：野辺地層（軟質な砂岩）

- 第四紀火山岩類

第四紀火山岩類については、火山ごとに活動史を含めて概括する。

- ① 十和田火山噴出物

十和田湖周辺に広く分布し、噴出物の主体は降下火山灰と火砕流堆積物で、各地で海成または河成段丘堆積物と密接な関係を持つ。十和田火山の先カルデラ火山の活動の詳細は不明だが、約 20 万年前には玄武岩質安山岩～安山岩溶岩が噴出し、小規模な山体を複数形成した。約 4 万年前～13,000 年前にはデイサイト～流紋岩質の大規模噴火が 3 回起こり、奥瀬、大不動、八戸の各火砕流を噴出し、外側カルデラを形成した。

その後カルデラ南半部での玄武岩質安山岩の噴出が成層火山を形成したが、デイサイト質の噴火へと変化し、山体を陥没させて中湖カルデラを形成し、周囲に降下軽石を供給した。その山体の名残が中山、御倉両半島である。平安時代にも毛馬内火災流が噴出し、御倉半島の突端に溶岩ドームを形成した。

- ② 八甲田火山群

青森県中央部に位置する八甲田火山群は、東西 20km、南北 15km の火山群である。南北 2 つの山塊から構成され、それぞれ北八甲田火山群、南八甲田火山群と称する。南八甲田火山群の活動は、約 100 万年前にその西縁で始まった。噴火は徐々に東へ移動し、楡ヶ峯等の山体を形成した後、その北東の田代平で鶴ヶ坂層、八甲田凝灰岩の噴出を伴うカルデラの形成があった。

南八甲田火山群の活動は、カルデラ形成中および直後にも継続し、乗鞍岳や駒ヶ峯が形成された。カルデラ形成後はその南西部で火山活動が起こり、北八甲田火山群が形成された。その年代は 10 数万年前以降である。また、約 1,000 年前以降にも小規模な水蒸気爆発があったことが知られている。

(5) 対象地域の構造発達史
(根元・氏家, 2009⁽⁵⁹⁾から引用)

● 古第三紀以前

日本列島がほぼ現在の位置に到達したのは新第三紀中新世であり、それ以前の岩石は日本海形成時に現在の位置に移動して来た。青森県に分布するジュラ系は、異質岩塊を含む泥質岩からなり、付加体の性質を示す。これはジュラ紀にユーラシア大陸東縁の海溝において、海洋プレートの沈み込みにより形成された。このジュラ系は白亜紀の花崗岩類に貫かれる。このことは、ジュラ紀に形成された付加体が白亜紀には大陸の地下に存在したことを意味する。なお、階上岩体はアダカイト質マグマ起源であり、この時期に海嶺の沈み込みがあったことを示す。また、原地山層は階上岩体と同年代であり、この時代には火山活動があったことも覗える。さらに、白神岳岩体のマイロナイト化した花崗岩類の年代は43Maであり、青森県の基盤岩類は古第三紀まで大陸の地下に存在していたことを示唆する。

● 新第三紀

中新世になると日本海の誕生に関連してグリーンタフを形成した大規模な火山活動が始まった。その生成物の下部は溶結凝灰岩を挟み、陸上で堆積したと考えられる。また、阿仁合型化石植物群を産し、冷涼な陸上環境を示唆する。津軽地方では磯松層、大戸瀬層、藤倉川層から海生貝化石が産し、前期中新世後期には日本海側地域で海進が始まったと考えられる。この時期の地層からは台島型化石植物群が産出し、温暖な陸上環境が推定される。なお、下北半島西部と夏泊半島では下部中新統を欠く。これは、両地域が前期中新世を通して陸域であったこと、そしてグリーンタフを供給した火山活動が本県北半部では東西2地域に分かれて行われたことを示唆する。ただし、両地域とも十分な年代値が得られていない。

中部中新統下部では、一般には上位に向い古水深が増加する。これは日本海の拡大に伴う引張応力場下での沈降を示す。しかし、地域間で、あるいは同一層内でもほぼ同層準に浅海相と漸深海相が見られる場合がある。これは、この時期に起伏に富んだ海底地形が出現したことを示唆する。この時期の浅海成の地層からは大型有孔虫や暖海生軟体動物の化石が産する。これは熱帯海中気候事件に対応し、熱帯～亜熱帯の海洋気候が出現したことを反映している。引き続き古水深は増加し、中部中新統上部を特徴づける珪質泥岩の少なくとも一部は、漸深海帯下部以深で堆積した。ただし、現在の脊梁山脈に対応する地域では活発な火山活動があり、火砕岩が優勢である。また、下北半島東部や三戸地域では硬質泥岩の発達も乏しく、古水深はやや浅かった可能性がある。珪質泥岩が堆積した海底は酸素に乏しかったが、その原因は太平洋からの酸素極小層水の流入と考えられている。

鮮新世になると塊状の珪藻質泥岩が堆積し、日本海の海底が酸素に富むようになったことを示し、当時の日本列島の隆起により日本海に酸素極小層水が流入しなくなったためと解釈される。この隆起は東西圧縮応力場によるもので、今日見られる南北性の逆断層や褶曲軸を形成した。また、鮮新世以降海は急激に退いた。

鮮新世以降には、奥羽山脈西部で激しい珪長質火山活動が継続し、いくつかのカルデラが形成された。弘前盆地南東縁から十和田-八甲田地域にかけては、湯ノ沢カルデラ、碓ヶ関カルデラ、沖浦カルデラ、八甲田カルデラ、十和田カルデラが立て続けに出現した。下北半島西部では得られている年代値が乏しいものの、野平の環状凹地や薬研盆状構造等の地形はカルデラを示唆する。また、それらの周辺には半太郎沢凝灰岩や大畑層等の火砕岩主体の鮮新～更新統が分布し、下北半島西部においても鮮新世以降にカルデラ群が発達したと考えられる。

対象地域については根元・氏家 (2009) ⁽⁵⁹⁾から、以下のように要約できる。

① 古第三紀以前の堆積岩類

古第三紀以前の中生界は対象地域にほとんど分布しない。

② 付加体

夏泊半島の一部のごく一部に露出する。

③ 深成岩類

夏泊半島の中心部に小規模に露出し、花崗岩類からなる。

④ 新第三紀堆積岩類

夏泊半島～七戸西部の山地、および吹越山地の周辺部に分布し、砂岩、泥岩、シルト岩および凝灰岩からなる。

⑤ 第四紀堆積岩類

上北地域～下北半島に広く分布し、砂岩、凝灰岩からなる。

⑥ 第三紀火山岩類

八甲田山北部～夏泊半島および吹越山地に分布し、主として安山岩、安産岩質火砕岩～凝灰角礫岩から構成される。

⑦ 第四紀火山岩類

八甲田～十和田カルデラを中心として分布し、安山岩、石英安山岩および流紋岩とこれら火砕岩からなる。

II-E.4 地質断面の収集

(1) 対象地域の地質概括

対象地域の地質概説については根本・氏家（2009）⁽⁵⁹⁾が構造発達史と層序各論についてまとめている。このうち構造発達史に関してはII-E.3で同文献を引用した。ここでは各地域の単元について時代別にとりまとめた。

● 地質概要（根本・氏家, 2009⁽⁵⁹⁾から引用）

青森県の基盤岩類は、ジュラ系付加体とこれを貫く白亜紀の深成岩から主に構成される。この基盤岩類は、八戸地域南東部と白神山地に広く分布するほか、県内各地に散在する（図II-E.4-1）。また、白亜系火砕岩類が八戸地域の海岸沿いにわずかに分布する。

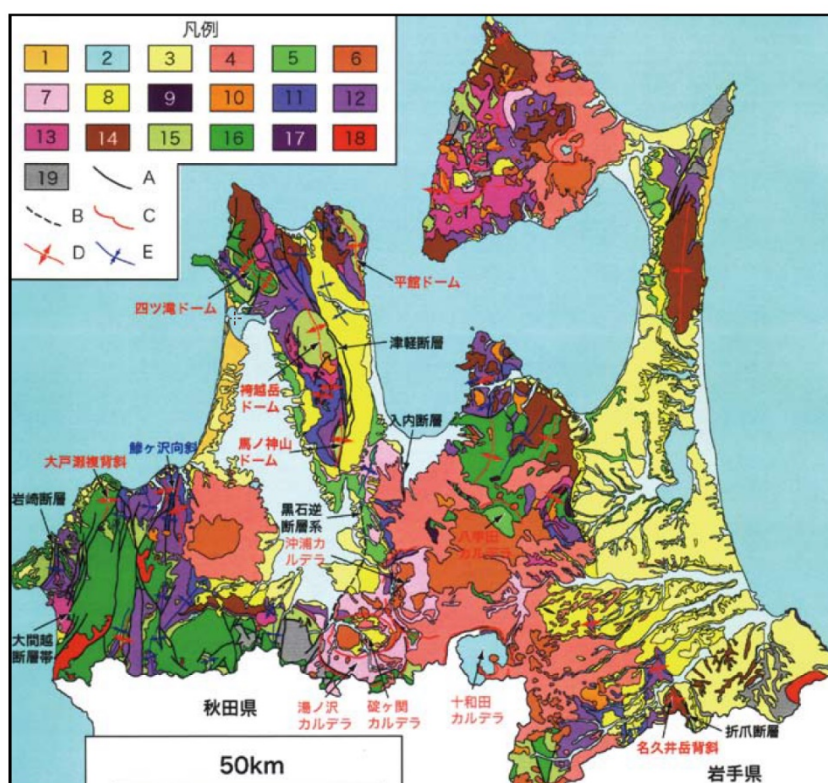


図-2 青森県の地質概略図。1:砂丘堆積物、2:沖積層、3:段丘堆積物、4:火砕岩(中期更新世以降)、5:堆積物(中部更新統)、6:デイサイト～安山岩溶岩(鮮新世以降)、7:凝灰岩類(鮮新統～下部更新統)、8:砂質岩(鮮新統～下部更新統)、9:貫入岩(安山岩、玄武岩)、10:貫入岩(珪長質)、11:珪藻質泥岩(上部中新統～鮮新統)、12:泥質岩(中～上部中新統)、13:珪長質溶岩-同質火砕岩(中～上部中新統)、14:安山岩溶岩-同質火砕岩(中～上部中新統)、15:砂質岩(中部中新統下部)、16:下部中新統、17:白亜系、18:深成岩、19:中生界、A:断層、B:伏在断層、C:カルデラ壁、D:背斜軸、E:向斜軸。

図 II-E.4-1 対象地域の地質概略図 根本・氏家（2009）⁽⁵⁹⁾

これら基盤岩類は、新第三系に不整合に覆われる。新第三系は一般に、いわゆるグリーンタフ層準の火砕岩類、中部中新統下部の砂質岩、中部中新統～鮮新統の泥質岩、砂質岩の順に重なる（図II-E.3-6参照）。隆起帯の中心に下位の火砕岩類が露出し、外部に向かってより上位の地層が分布する。新第三系は、更新世以降の堆積物と火山噴出物に覆われる。

なお、本事業では津軽平野より西側は対象としていないため地質概説からは割愛する。

● 中生界

対象地域の中生界（白亜系を除く）は、著しく変形した泥質岩を主とし、異地性岩塊を含む。中生界の分布は、主に隆起帯の中心とその延長に限られるが、八戸南方の丘陵縁辺にも広く分布する。以下に、分布が比較的広いものを概説する。

① 夏泊半島

夏泊半島周辺の中生界は、半島東岸の立石層と半島南方の東岳層である。立石層は、半

島東岸の立石海岸に分布する。層状チャートと石灰岩から構成され、しばしば苦鉄質凝灰岩を挟む。石灰岩からは三疊紀のコノドント化石が産する。

東岳層は、青森市東部の東岳西麓に小規模に分布する。石灰岩、チャート、泥質岩からなり、苦鉄質噴出岩を含む。

② 下北半島

下北半島の中生界は、半島西岸と半島北東端に分布する。前者は長浜層、後者は尻屋コンプレックスである。

長浜層は、下北郡佐井村佐井南東に分布する。石灰質泥岩、緑色岩、チャートの岩塊を含む片理の発達した泥岩からなる。チャートから三疊紀中頃を示すコノドント化石が検出されている。

尻屋コンプレックスは、尻屋崎周辺と下北郡東通村猿ヶ森北西に分布する。主に変形の著しい泥質岩よりなり、チャートと石灰岩の岩塊を含む。チャートからジュラ紀の放散虫化石、泥岩からジュラ紀末期～白亜紀初頭の放散虫化石が報告されている。

③ 八戸南方

八戸南方に分布する中生界は、含まれる岩塊の優劣に基づいて細分されるが、これを付加体堆積物と捉え、先宮古統堆積岩コンプレックスと一括する。

先宮古統堆積岩コンプレックスは、三戸郡階上（はしかみ）町から三戸郡南部町名川にかけて広く分布する。緑色岩、石灰岩、チャート、砂岩の岩塊を含む泥質岩からなる。

● 白亜系

対象地域では、白亜紀の火砕岩類を主体とする原地山層が八戸市以南の海岸沿いにわずかに分布する。

原地山層は、八戸市蕪島から階上町の海岸沿いに分布する。主にデイサイト～流紋岩溶岩と同質火砕岩からなり、一部で粘板岩を挟む。

● 深成岩

対象地域に分布する深成岩は、ジュラ系付加体を貫く花崗岩類からなる。主要な岩体を以下に概説する。

① 夏泊・下北西部地域

青森県の中軸部では、深成岩は夏泊半島基部と下北半島西岸に分布する。前者は東岳岩体、後者は福浦岩体と呼ばれる。

東岳岩体は、青森市東部の東岳西方に分布する。優白質の花崗閃緑岩と花崗閃緑斑岩からなる。時代未詳だが、ジュラ紀の付加体を貫き、中新統に不整合に覆われる。

福浦岩体は、佐井村福浦付近に露出する。主に粗～中粒の石英閃緑岩からなる。本岩体の貫入により形成されたホルンフェルスの K-Ar 年代は 108Ma である。

● 新第三系

① 夏泊半島地域

夏泊半島は起伏に富む山地～丘陵からなり、南の奥羽山脈に連続する。本半島に広く分布する中新統は、北東海岸にわずかに露出する中生界を不整合に覆う。本地域の中新統は、下位より弁慶内（せっけない）層、東滝層、間木（まぎ）層、浅所層、福島層が整合に重なる。茂浦層は、浅所層と福島層の同時異相である。

弁慶内層は、東津軽郡平内町弁慶内付近に小範囲に分布する。基底礫岩とその上位の緑色の凝灰岩類よりなる。層厚は 100～150m である。立石層を不整合に覆う。

東滝層は、平内町東滝を中心に分布する。層厚は 230～700m である。緑色の火砕岩と黒色のシルト岩よりなる。弁慶内層を整合に覆う。

間木層は、夏泊半島北部に広く分布する。東滝層を整合に覆い、層厚は 400m に達する。層理明瞭な暗褐色泥岩よりなる。

浅所層は、夏泊半島に広く分布する。層厚は 180~250m である。主に珪質な凝灰質シルト岩よりなり、凝灰岩と凝灰質砂岩を頻繁に挟む。間木層を整合に覆う。

福島層は、平内町福島付近を中心に分布する。層厚は 280~300m である。凝灰質シルト岩と凝灰質砂岩よりなる。浅所層を整合に覆い、茂浦層上部と指交する。

茂浦層は、夏泊半島に断続的に分布し、層厚は 1,600m である。主に安山岩~デイサイト溶岩、火砕岩よりなる。浅所層と福島層に指交する。

② 下北地域

下北地域は、奥羽山脈の北方延長の下北山地と太平洋側の吹越山地、さらに両者を隔てる田名部低地からなる。半島西岸は急崖をなして平館海峡に面し、中生界とこれを不整合に覆う新第三系が分布する。下北山地東部では、第四系火山噴出物が新第三系を覆う。吹越山地は主に新第三系からなり、尻屋崎には中生界が露出する。田名部低地は厚い第四系により埋積される。

③ 下北半島西部

下北半島西部は、東西の山地に細分され、それらの間にカルデラ起源の大畑と野平（のだい）の環状低地が南北に連なる。本地域の新第三系は、西海岸に露出する基盤岩類を囲んで半ドーム状に分布する。それらは、金八沢（きんぱちざわ）層、檜川層、湯ノ川層、小沢層、川内層、脇野沢安山岩類、湯ノ股川層、大畑層に区分される。分布が限られる地層があり、層序関係は必ずしも明確ではない。

金八沢層は、下北半島西岸に露出する基盤岩類を取り巻いて広範囲に断続的に分布する。基盤岩類を不整合に覆い、層厚は最大約 500m である。黒色の珪質泥岩を主とし、玄武岩、凝灰岩、砂岩等を挟む。

檜川層は、佐井村北部と同村南部~むつ市川内に分布する。層厚は 500~730m である。珪長質火山岩類と緑色の火砕岩により代表される（口絵-3）。金八沢層を整合に覆い、一部で基盤岩を直接覆う。湯ノ川層は、大畑川中~上流域より湯ノ川南方にかけて分布する。層厚は約 450m である。主にデイサイト質火砕岩類よりなる。檜川層を不整合に覆う。

小沢層は、陸奥燧岳周辺~むつ市脇野沢と下北郡大間町周辺に断続的に分布する。層厚は約 150m である。黒色の泥岩を主とし、玄武岩溶岩と同質岩床を挟む（写真-7）。檜川層下部を整合に覆い、一部で檜川層最上部と指交する。

川内層は、むつ市川内から陸奥燧岳南西麓に分布する。層厚は 250~450m である。デイサイト質凝灰岩を主とし、礫岩、砂岩、シルト岩を挟む。小沢層および湯ノ川層と整合、一部不整合の関係にある。

脇野沢安山岩類は、下北半島北西端と南西端に別れて分布する。層厚は 500m を超える。デイサイト~安山岩質火砕岩を主とし、安山岩溶岩を挟む。小沢層と川内層を整合に覆うが、一部では指交する。

湯ノ股川層は、恐山北西麓に分布する。層厚は約 300m である。デイサイト質凝灰角礫岩、軽石凝灰岩、溶結凝灰岩を主体とする。湯ノ川層と川内層を不整合に覆う。

大畑層は、大畑川流域と陸奥燧岳北麓に分布する。層厚は約 200m である。軽石凝灰岩、凝灰質砂岩、軽石質砂岩を主とする。下位層を不整合に覆う。

④ 下北半島東部

下北半島東部の新第三系は、半島頸部の吹越山地を軸として背斜状に分布する。本地域には、先第三系を覆って新第三系が広く分布する。下部中新統猿ヶ森層の上位に、北部では蒲野沢（がまのさわ）層、南部では鷹架層が重なる。泊層は蒲野沢層下部に指交する。

猿ヶ森層は、東通村猿ヶ森西方~砂子又南方に分布する。層厚は 50~200m である。礫

岩、シルト岩・砂岩互層、シルト岩、砂岩よりなる。中生界を不整合に覆う。

蒲野沢層は、田名部川上流域から朝比奈平付近にかけて分布する。層厚は 65～800m である。主に珪質泥岩と珪藻質シルト岩よりなり、下部は砂質で礫岩を挟む。猿ヶ森層を不整合に覆い、泊層と指交する。浮遊性有孔虫の N8～N9 帯、放散虫の *Eucyrtidium inflatum* 帯～*Lithopera bacca* 帯、珪藻の *Denticulopsis praelauta* 帯～*T. yabei* 帯に相当する。

泊層は、吹越山地に広く発達する。層厚は一般に 300～400m で、最大で 1,600m に及ぶ。安山岩溶岩と同質火砕岩よりなり、砂岩、泥岩を挟む。北部では蒲野沢層を整合に覆い、一部は同層と指交する。南部では鷹架層最下部に挟まれる。12.8±1.0～15.2±0.5Ma の K-Ar 年代が得られている。

鷹架層は、吹越山地南西麓から小川原湖北方にかけて分布する。凝灰質砂岩とシルト岩を主体とし、凝灰岩、礫質砂岩を挟む。浮遊性有孔虫の N9～N10 帯に相当する。

⑤ 上北地域

上北地域は、八甲田山系と夏泊半島を結ぶ隆起帯から東に広がる。その地質構造は、脊梁山脈の背斜と東縁の撓曲で特徴づけられる。撓曲は天間林付近で著しく、北部では緩やかになる。本地域の下部中新統は、金ヶ沢安山岩類に四沢凝灰岩が整合に重なる。中部中新統以上は、下位から和田川層、道地（どうち）層、屋形森沢層、小増沢層、市ノ渡層、清水目層、川口砂岩に区分される。また、上北台地には甲地（かっち）層が散点的に露出する。

金ヶ沢安山岩類は、八甲田山系北麓から夏泊半島基部にかけて分布する。層厚は 500m である。プロピライト溶岩と同質火山角礫岩を主体とし、全般に変質が著しい。東岳周辺の先第三系を不整合に覆う。

四沢凝灰岩は、金ヶ沢安山岩類分布域の東西の山地と上北郡七戸町西方の丘陵に分布する。層厚は 300m を超える。主に緑色の凝灰岩類からなり、強変質の玄武岩～流紋岩質火砕岩、溶岩等を挟む。金ヶ沢層を整合に覆うが、一部では指交する。

和田川層は、七戸町の和田川中流域を中心とする背斜構造を取り巻いて分布し、夏泊半島基部にも断片的に分布する。層厚は和田川流域で 500m を超え、北部では 150m 以下になる。硬質な泥岩と珪質泥岩よりなり、一部で凝灰質砂岩や火山礫凝灰岩と互層する。下部に流紋岩質軽石凝灰岩を、中部にデイサイト溶岩と同質火砕岩を挟む。四沢凝灰岩を整合に覆い、一部はその上部と指交する。

道地層は、七戸町西部の和田川と道地川の流域に分布する。最大層厚は約 300m である。塊状のシルト岩と凝灰質細粒砂岩を主とし、軽石凝灰岩、安山岩質凝灰岩類を挟む。和田川層から整合漸移し、屋形森沢層と小坪川安山岩類に指交する。

屋形森沢層は、七戸町北西部の屋形森付近から和田川流域にかけて分布する。層厚は 300～500m である。流紋岩質凝灰岩、同質火山礫凝灰岩を主体とする。小坪川安山岩類、和田川層、道地層と指交する。

小坪川安山岩類は、上北地域北半部に広く分布する。安山岩溶岩と同質凝灰角礫岩を主体とする。層厚は 400m を超える。道地層、屋形森沢層と指交する。

小増沢層は、道地層の分布域の南縁を取り巻いて分布する。層厚は最大で約 300m である。デイサイト～流紋岩質軽石凝灰岩、砂質凝灰岩、凝灰質砂岩よりなり、礫岩やシルト岩を挟む。一般に道地層を整合に覆うが、一部では下位層と不整合関係にある。珪藻の *R. californica* 帯に相当する。

月日山（つきひやま）火山岩類は、十和田湖北東方に散点的に分布する。最大層厚は約 250m である。安山岩溶岩と同質火砕岩を主体とし、火山礫凝灰岩、凝灰質砂岩、細礫岩を挟む。小増沢層中～上部と指交する。5.49±0.38～5.06±0.15Ma の K-Ar 年代が報告されている。

市ノ渡層は、小坪川安山岩類分布域の東縁に分布する。層厚は 600m を超える。下部に礫

岩が発達し、その上位に本層の主体をなす砂質凝灰岩、凝灰質砂岩、軽石凝灰岩が重なる。屋形森沢層と小坪川安山岩類を不整合に覆う。

清水目層は、上北郡東北町の清水目川流域～七戸町の作田川下流域の丘陵に南北に分布する。層厚は 100～250m である。凝灰質細粒砂岩とシルト岩を主とし、粗粒砂岩、礫岩等を挟む。市ノ渡層を整合に覆う。

川口砂岩は、十和田市市街地西方の丘陵に分布する。層厚は 100～400m である。凝灰質中～粗粒砂を主とし、亜炭、礫層、シルト層を挟む。小増沢層を整合、一部不整合に覆う。

甲地層は、上北台地の広い範囲に断続的に露出する。主に砂岩、シルト岩よりなり、凝灰岩を挟む。3.8±0.4～1.2±0.2Ma の FT 年代が報告されている。

⑥ 田子（たっこ）地域

田子地域は、青森県南部の奥羽山脈東麓に位置する。本地域の新第三系は、夏坂層、関層、大坊層、大王層、清水頭層、舌崎層が順に重なる。ここでは、夏坂層～清水頭層について概説する。

夏坂層は、田子町南西部にわずかに分布する。層厚は 200m 以上である。主に安山岩溶岩と同質火砕岩からなり、流紋岩溶岩を挟む。

関層は、田子町竜ヶ森以南に分布する。層厚は 150～430m である。主に酸性凝灰岩と凝灰角礫岩からなり、シルト岩、溶岩を挟む。夏坂層を整合に覆う。

大坊層は、田子町西部に広く分布する。層厚は 80～100m である。主にデイサイト溶岩、同質火砕岩、安山岩質火砕岩からなる。関層を整合に覆う。

大王層は、田子町市街地西方の丘陵にはほぼ南北に分布する。層厚は 150～500m である。暗色のシルト岩を主体とし、砂岩、礫岩を挟む。大坊層を整合に覆う。放散虫の *E. inflatum* が報告されており、中部中新統である。

清水頭層は、田子町市街地西方の丘陵に分布する。層厚は 50～1,000m である。白色の凝灰岩を主体とし、凝灰角礫岩、砂岩を挟む。大王層に整合に重なる。

● 第四系

第四紀の下限の年代が約 2.56Ma に変更されたため、従来第三系とされていた地層の一部を第四系として概説する。

① 下北半島西部

下北山地と恐山山地の間に、野平、畑両カルデラに関連する堆積物が分布する。

半太郎沢層は、野平カルデラの噴出物で、野平盆地を取り巻いて分布する。層厚は約 200m である。塊状のデイサイト質軽石凝灰岩を主体とし、一部は溶結している。基底礫岩をもって檜川層下部を不整合に覆う。

野平層は、野平と畑の凹地にのみ分布する。層厚は 50～260m である。薄成層する火山灰、凝灰質砂、シルトよりなる。基底礫層をもって下位層に不整合に重なる。

② 下北半島東部

下北半島東部では、北部丘陵に砂小又層が、吹越山地西麓に浜田層が分布し、それらを田名部（たなぶ）層が不整合に覆う。

砂子又層は、田名部低地帯東方丘陵に分布する。層厚は 30～150m である。凝灰質砂岩、凝灰岩、礫岩の不規則互層からなる。下位層を傾斜不整合に覆う。珪藻の *N.koizumii* 帯に相当する可能性が高い。

浜田層は、むつ市東部から小川原湖周辺まで分布する。むつ市新川付近での層厚は 350m で、南へ薄化する。下～中部は軟質な砂岩、上部はシルト岩からなる。浮遊性有孔虫の *N. pachyderm* (d.) / *Globorotariaorientalis* 帯上部に相当する。下位層を傾斜不整合に覆う。

田名部層は、むつ市関根浜付近から尾駱沼北方まで、陸奥湾東岸に分布する。層厚は 50m 以上である。細～中粒砂、礫、粘土からなる。下位層を不整合に覆う。

③ 上北地域

上北地域には数段の段丘面が発達し、その基盤として野辺地層が段丘崖に露出する。

野辺地層は、上北台地の基盤をなして広く分布する。層厚は 150m である。一般に軟質な砂岩から構成され、泥層を挟む。下位層を不整合に覆う。

④ 田代平

八甲田火山群のカルデラ湖の痕跡である田代平には、田代平層が分布する。主に砂、礫、粘土の細互層からなり、火山灰を挟む。

八甲田火山群および十和田火山についてはII-E.3 ですでに引用している。
(引用ここまで)

(2) 地質断面の収集

図 II-E.4-2 に示した 24 の地質断面は以下の文献から収集した。地質断面図を図 II-E.4-3～図 II-E.4-26 に示す。

北村 編 (1986) 新生代東北本州弧資料集⁽⁶⁰⁾

5 万分の 1 地質図

上村ほか (1959) 5 万分の 1 地質図幅説明書「蟹田」⁽⁶¹⁾

藤井 (1981) 油川地域の地質 地域地質研究報告⁽⁶²⁾

長森ほか (2013) 青森西部地域の地質 地域地質研究報告⁽⁶³⁾

村岡・長谷 (1990) 黒石地域の地質 地域地質研究報告⁽⁶⁴⁾

上村 (1975) 陸奥川内地域の地質 地域地質研究報告⁽⁶⁵⁾

上村 (1983) 浅虫地域の地質 地域地質研究報告⁽⁶⁶⁾

工藤 (2005) 十和田地域の地質 地域地質研究報告⁽⁶⁷⁾

宝田・村岡 (2004) 八甲田山地域の地質 地域地質研究報告⁽⁶⁸⁾

今井 (1961) 5 万分の 1 地質図幅説明書「近川」⁽⁶⁹⁾

海底地質図

玉木ほか (1978) 八戸沖海底地質図⁽⁷⁰⁾

奥田ほか (1993) 下北半島沖海底地質図⁽⁷¹⁾

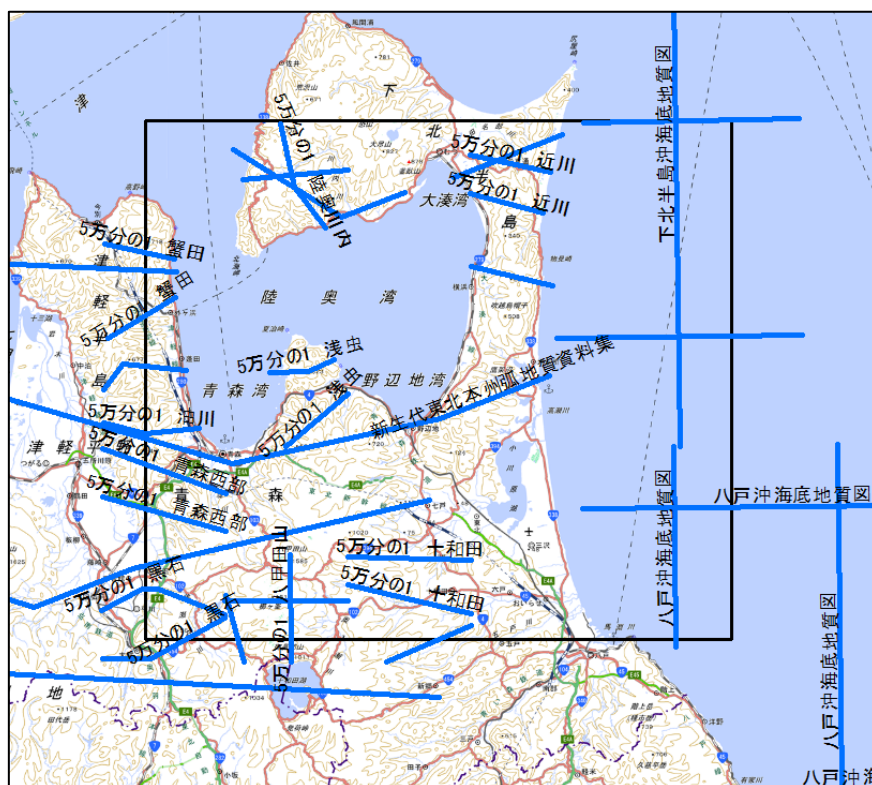


図 II-E.4-2 収集した地質断面図



時代		層序名
第四紀		沖積層
第三紀	鮮新世	蟹田層
		増川石英安山岩
	鮮新世～中新世	今別安山岩類
	中新世	塩越層
		小泊層
冬部層		
磯松層		
権現崎層		
古生代		古生層

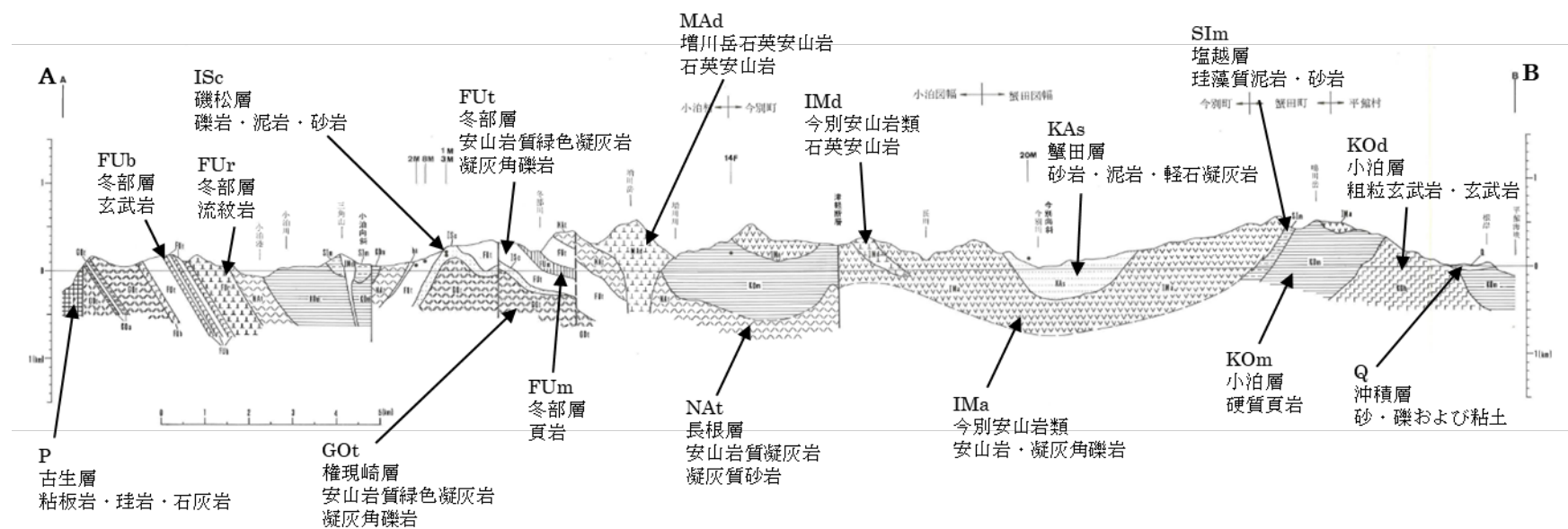
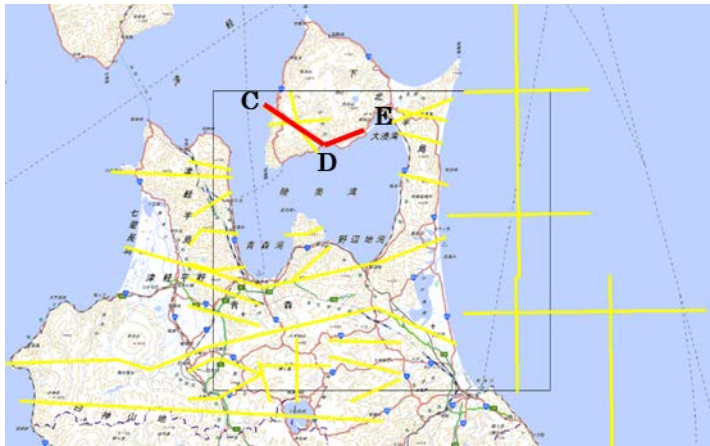


図 II-E.4-3 新生代東北本州弧地質資料集⁽⁶⁰⁾ No.8 (蟹田)



時代		層序名
第四紀	完新世～更新世	段丘堆積物
	更新世	恐山火山噴出物
第三紀	中新世	川内層
		檜川層
		金八沢層
古生代		古生層

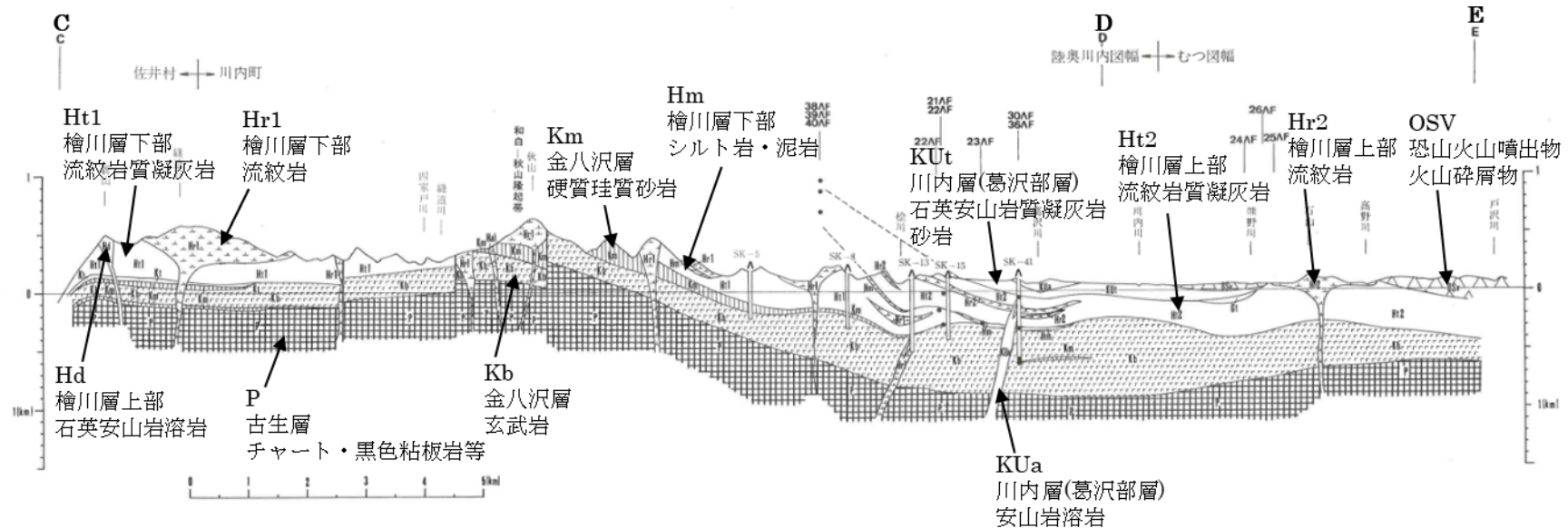


図 II-E.4-4 新生代東北本州弧地質資料集⁽⁶⁰⁾ No.8 (佐井町～むつ市桜木町)



時代		層序名
第四紀	更新世	野辺地層
	鮮新世	砂子又層
第三紀	中新世	蒲野沢層
		猿ヶ森層
		泊安山岩質集塊岩
古生代		基盤岩類

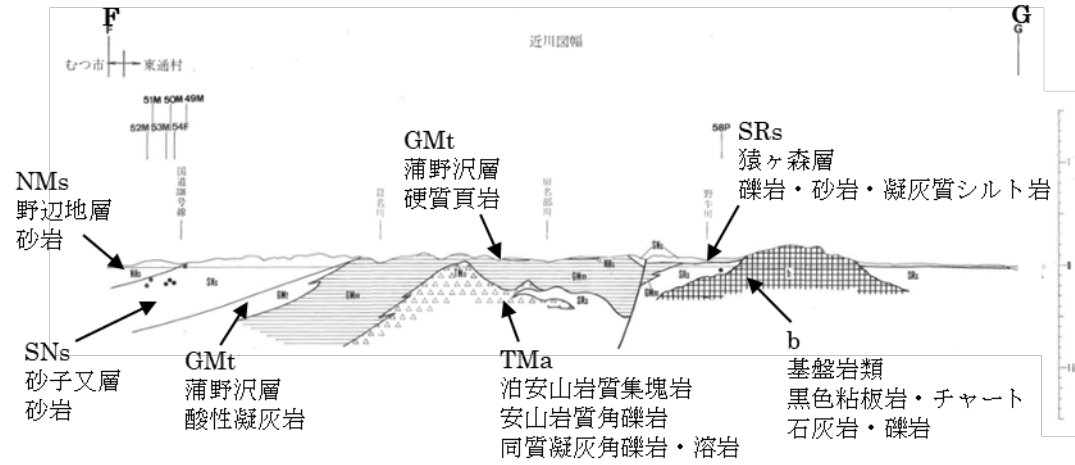
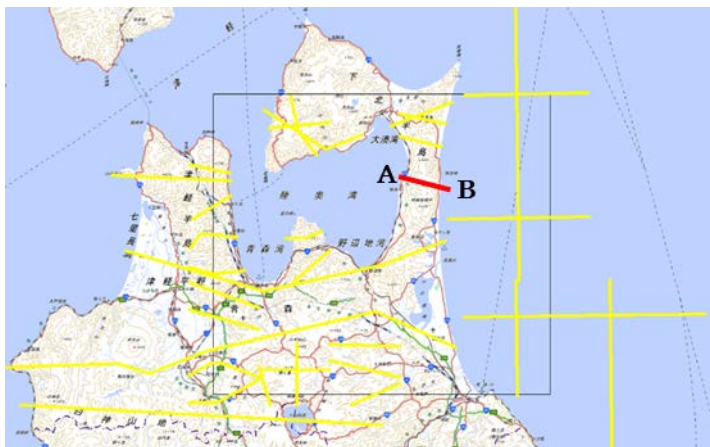


図 II-E.4-5 新生代東北本州弧地質資料集⁽⁶⁰⁾ No.8 (むつ市～東通村)



時代		層序名
第四紀	更新世	段丘堆積物
		沼崎層
		野辺地層
第三紀	鮮新世	砂子又層
	中新世	猿ヶ森層
		泊層
		棚沢層

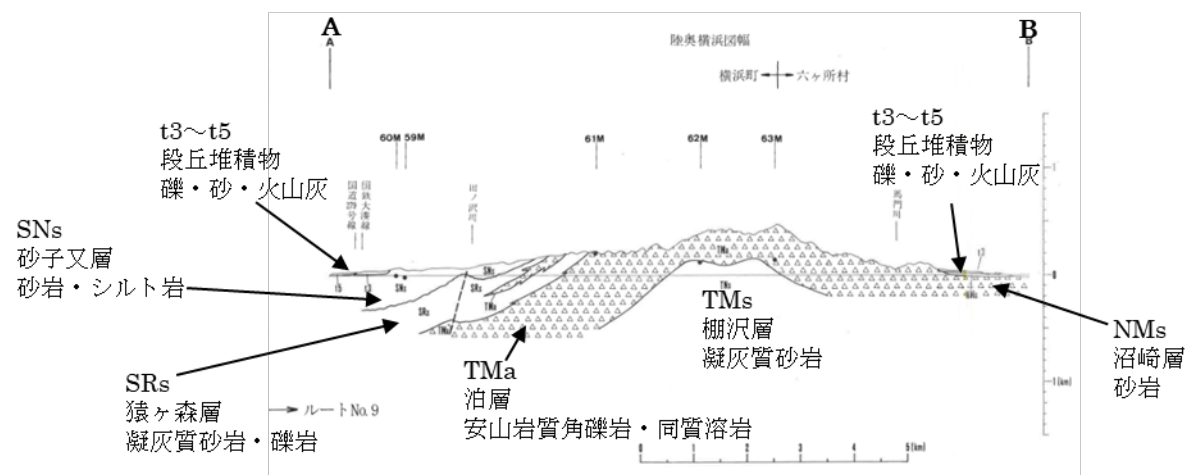


図 II-E.4-6 新生代東北本州弧地質資料集⁽⁶⁰⁾ No.9



時代		層序名
第四紀		沖積層
		段丘堆積物
		岡町層
		前田野目層
第三紀	中新世	鶴ヶ坂層
		大釈迦層
		四ツ沢層
		天田内川層
		土筆森山層
		不動滝層
		源八森層
		馬ノ神山層

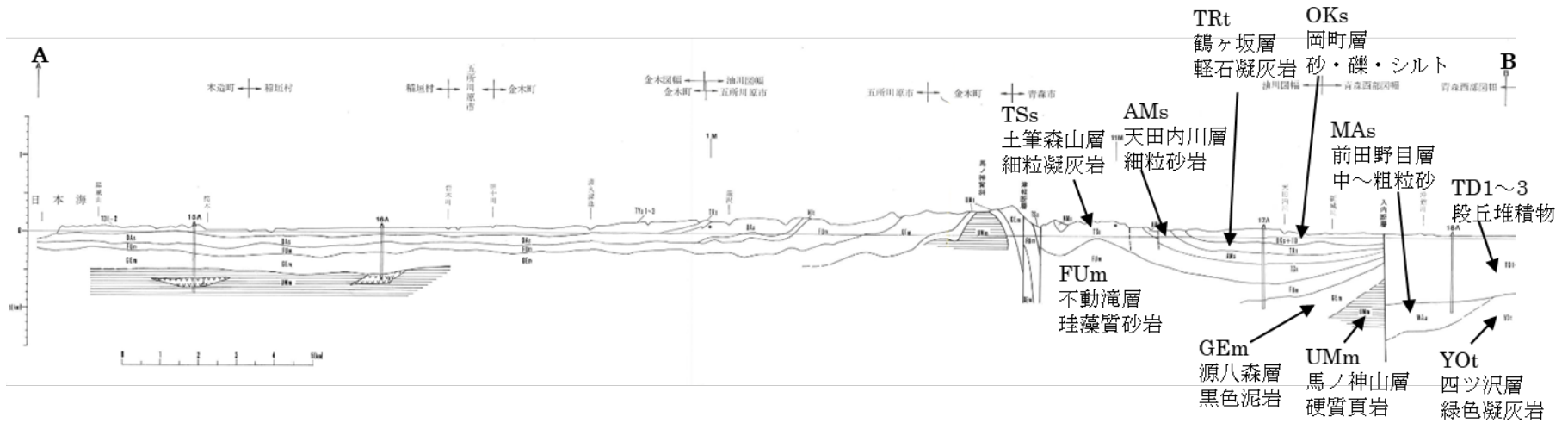
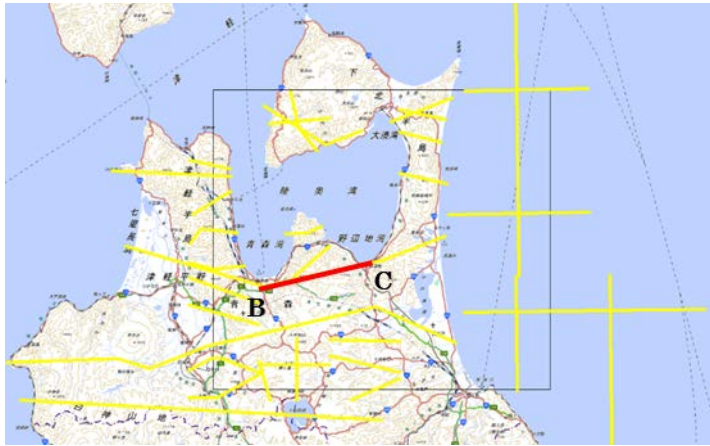


図 II-E.4-7 新生代東北本州弧地質資料集⁽⁶⁰⁾ No.10 (～青森市)



時代		層序名
第四紀		沖積層
		十和田火山灰
		段丘堆積物
		三沢層
第三紀	鮮新世	甲地層
	鮮新世	鷹架層
	中新世	市ノ渡層
		和田川層
		四ツ沢層
		貫入岩

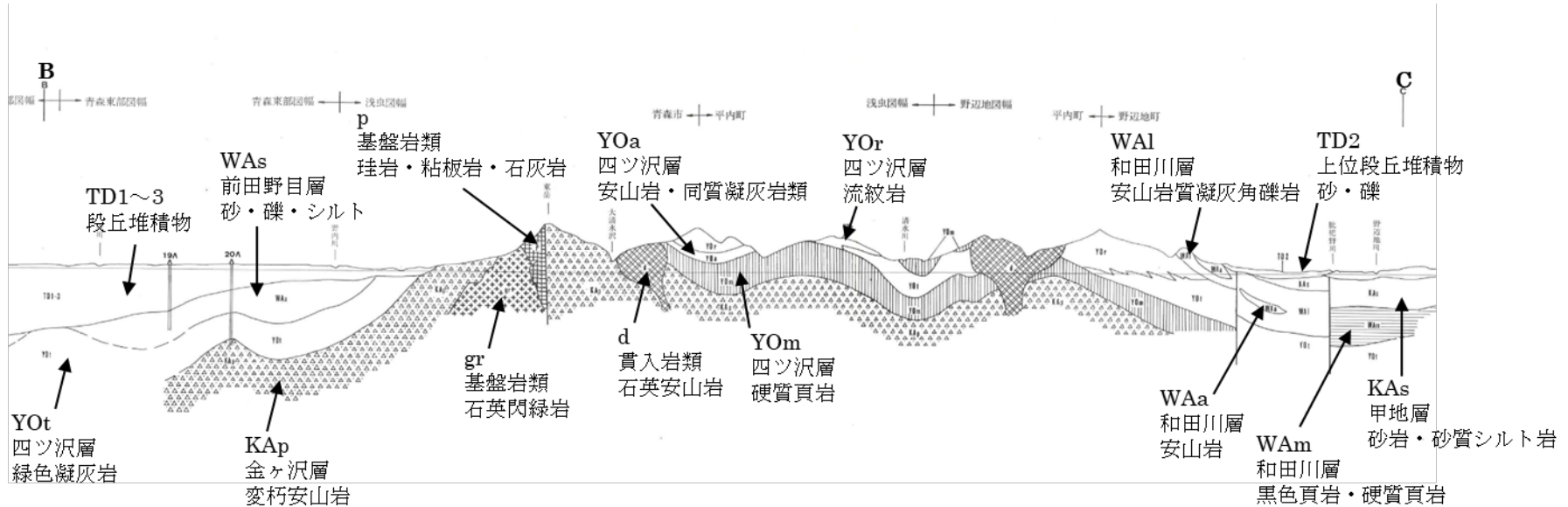


図 II-E.4-8 新生代東北本州弧地質資料集⁽⁶⁰⁾ No.10 (青森市～野辺地町)



時代		層序名
第四紀		沖積層
		十和田火山灰
		段丘堆積物
第三紀	鮮新世	三沢層
		甲地層
		鷹架層

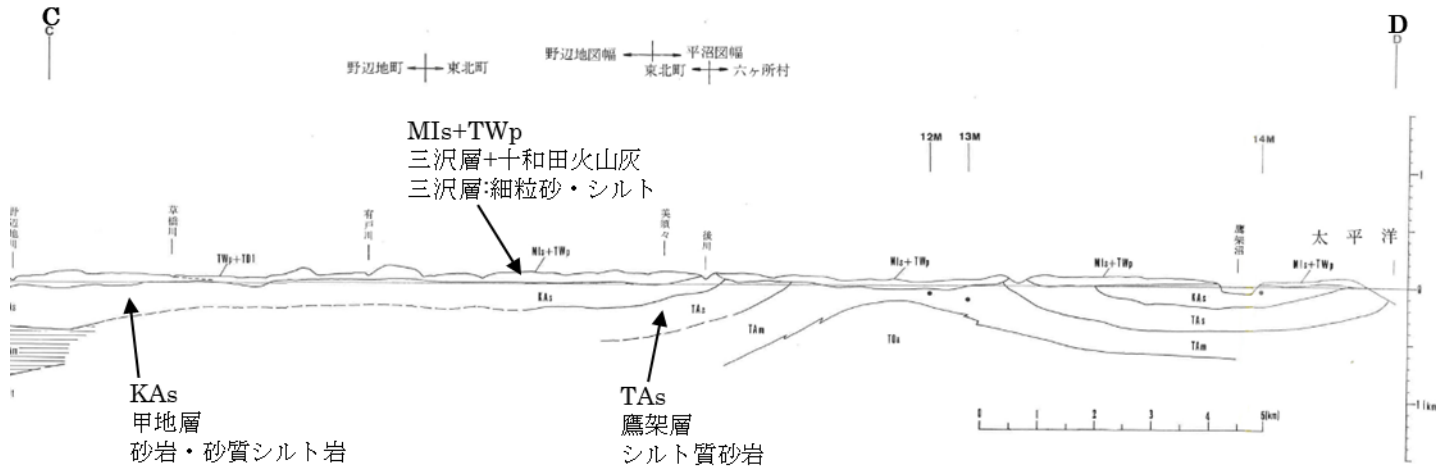


図 II-E.4-9 新生代東北本州弧地質資料集⁽⁶⁰⁾ No.10 (野辺地町～六ヶ所村)



時代		層序名	
		黒石図幅	青森東部図幅
第四紀		沖積層	
		段丘堆積物	
		十和田火山噴出物	
		八甲田連峰火山噴出物	
		田代平溶結凝灰岩	
第三紀	鮮新世	大釈迦層	
		竹館層	
	中新世	王余魚沢層	四ツ沢層
		大川原層	和田川層
		入内層	

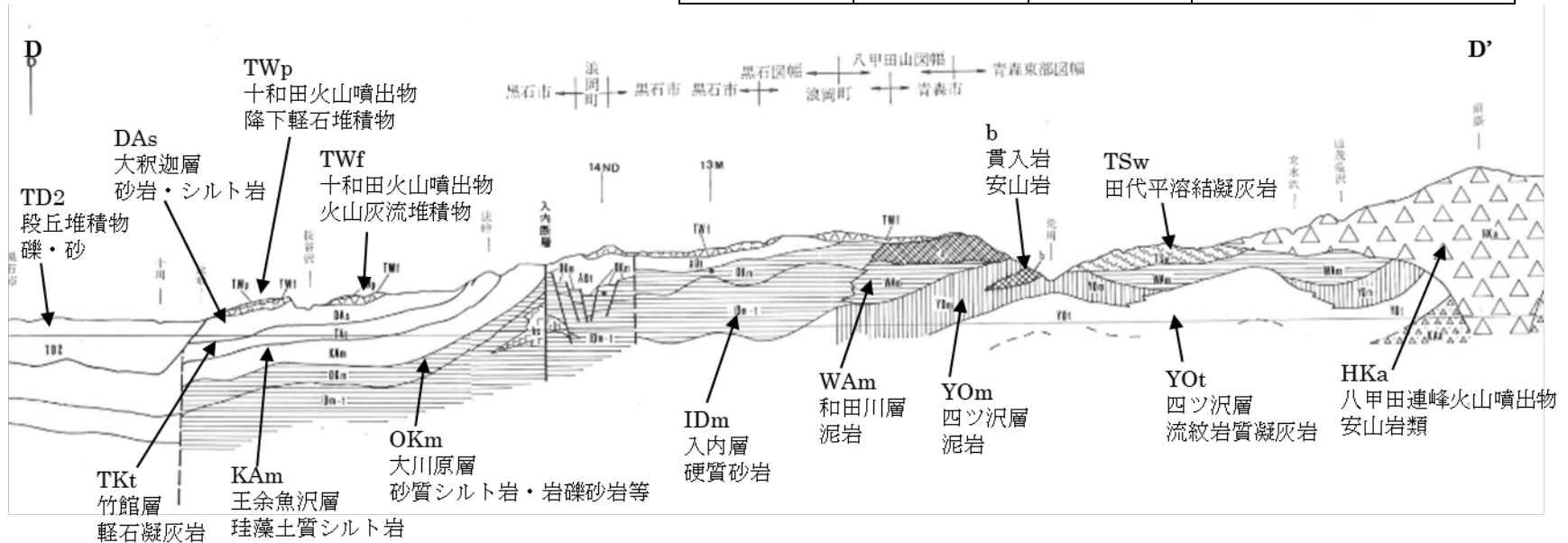


図 II-E.4-10 新生代東北本州弧地質資料集⁽⁶⁰⁾ No.11 (黒石市～八甲田山)



時代		層序名
第四紀		沖積層
		段丘堆積物
		十和田火山噴出物
		八甲田連峰火山噴出物
		田代平湖水堆積物
第三紀	中新世	三沢層
		市ノ渡層
		和田川層
		四ツ沢層
		貫入岩

- App. II-105 -

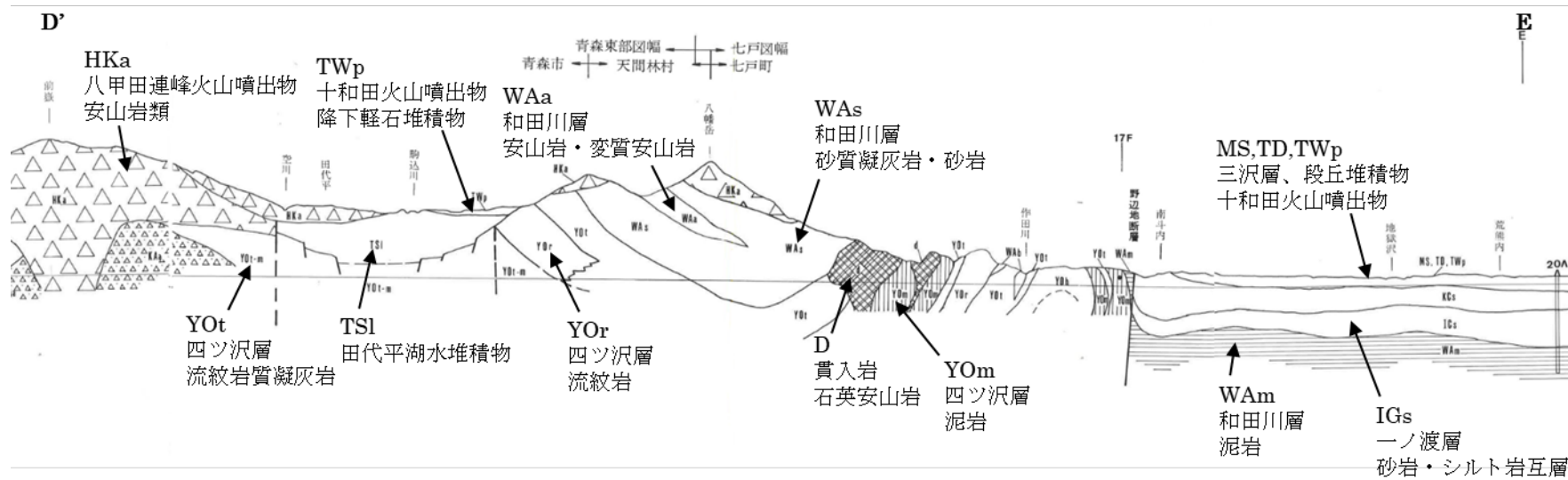


図 II-E.4-11 新生代東北本州弧地質資料集⁽⁶⁰⁾ No.11 (八甲田山～七戸町)



時代		沖積層
第四紀		段丘堆積物
		三沢層
第三紀	中新世	市ノ渡層
		和田川層

- App. II-106 -

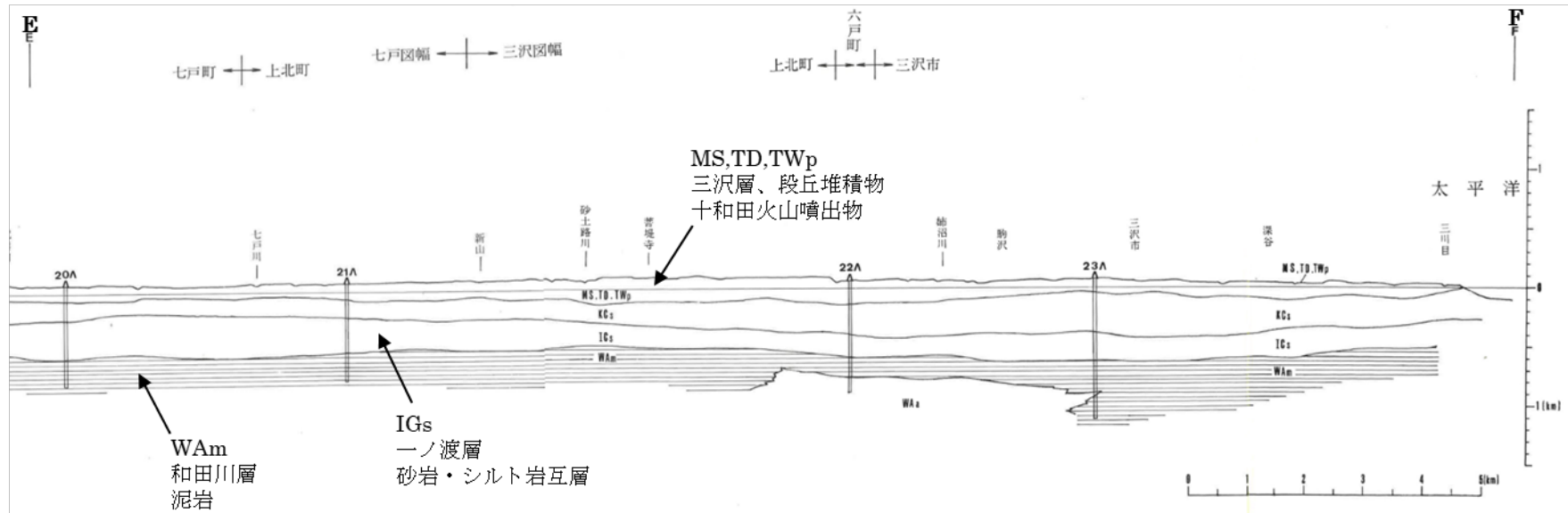


図 II-E.4-12 新生代東北本州弧地質資料集⁽⁶⁰⁾ No.11 (八甲田山～七戸町)



時代	層序名	
第四紀	沖積層	
	扇状地堆積物	
	段丘堆積物	
第三紀	鮮新世	蟹田層
	鮮新世～中新世	今別安山岩類
		塩越層
	中新世	粗粒玄武岩類
		母衣月火山岩類
		小泊層
		長根層
		冬部層

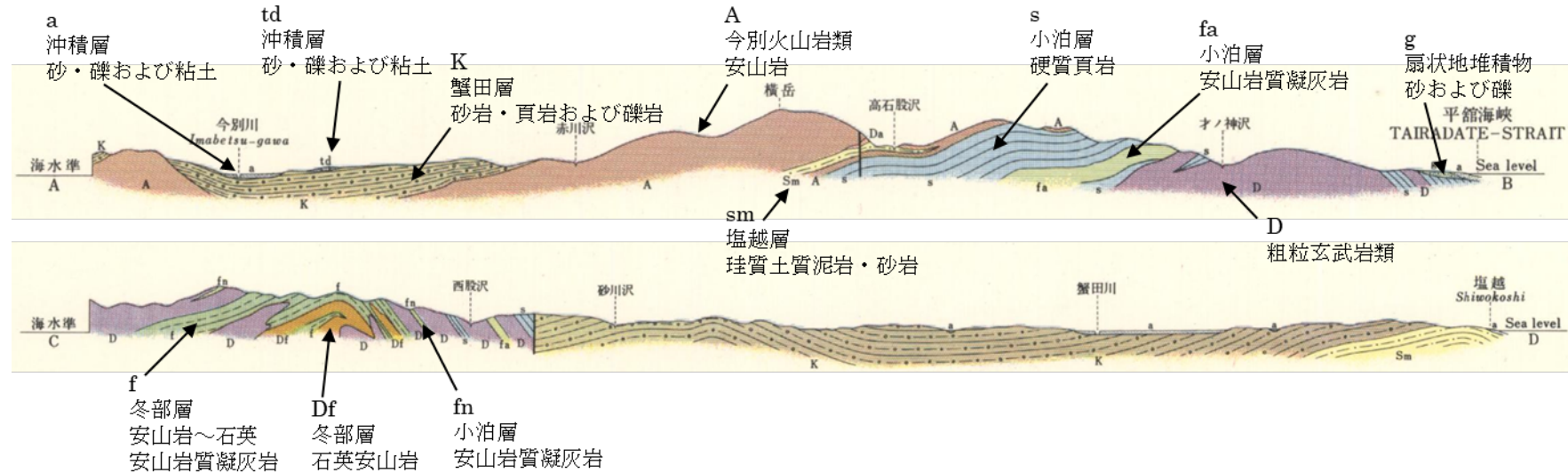
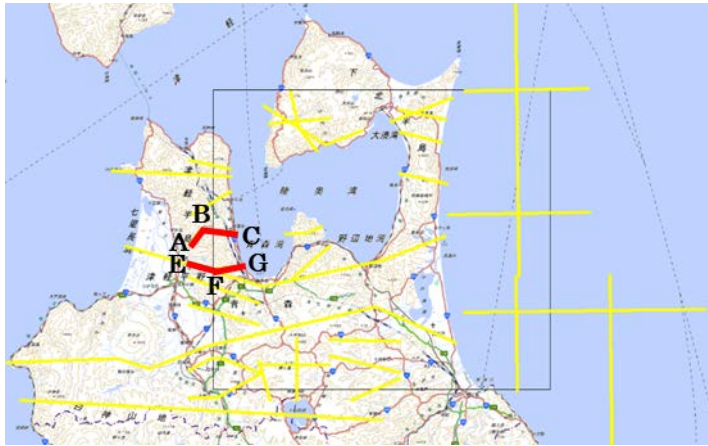


図 II-E.4-13 5万分の1地質図幅⁽⁶¹⁾ (蟹田)



時代		層序名
第四紀	完新世	沖積層
	更新世	段丘堆積物
第三紀	鮮新世	岡町層
		立山層
		沢内沢層
		六枚橋層
		白滝橋層
	中新世	味噌ヶ沢層
		不動滝層
		岩脈及び岩床
		源八森層
		馬ノ神山層
	長根層	

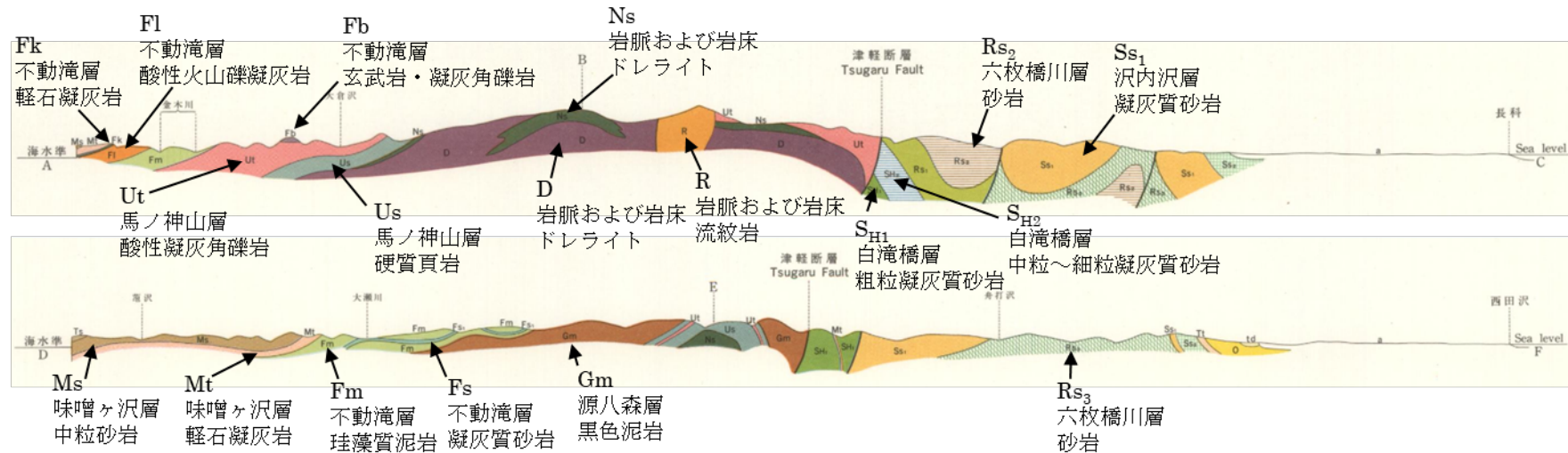
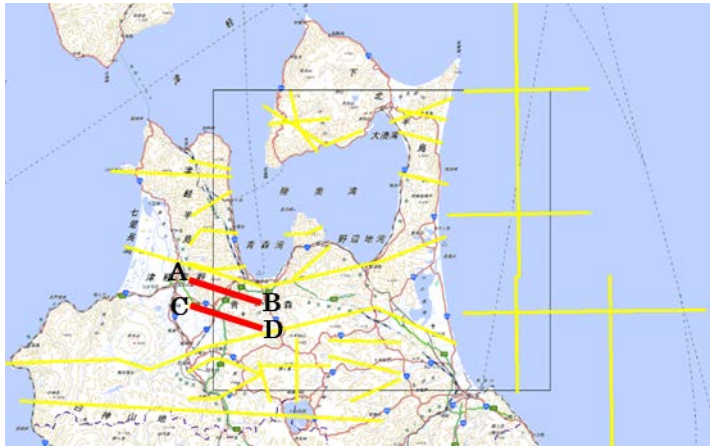


図 II-E.4-14 5万分の1地質図幅⁽⁶²⁾ (油川)



時代		層序名
第四紀	完新世	低地堆積物
		沖積段丘堆積物
		低位段丘堆積物
		高位段丘堆積物
		前田目層
第三紀～第四紀	鮮新世～更新世	八甲田第一期火砕流堆積物
		高頭森山スコリア質火山碎屑岩
		正平津川軽石質火山碎屑岩
第三紀	中新世	尾開山火砕流堆積物
		磯田山層
		不動滝層
		源八森層
		入内層
		流紋岩貫入岩
		大田軽石火山碎屑岩
		馬ノ神山層

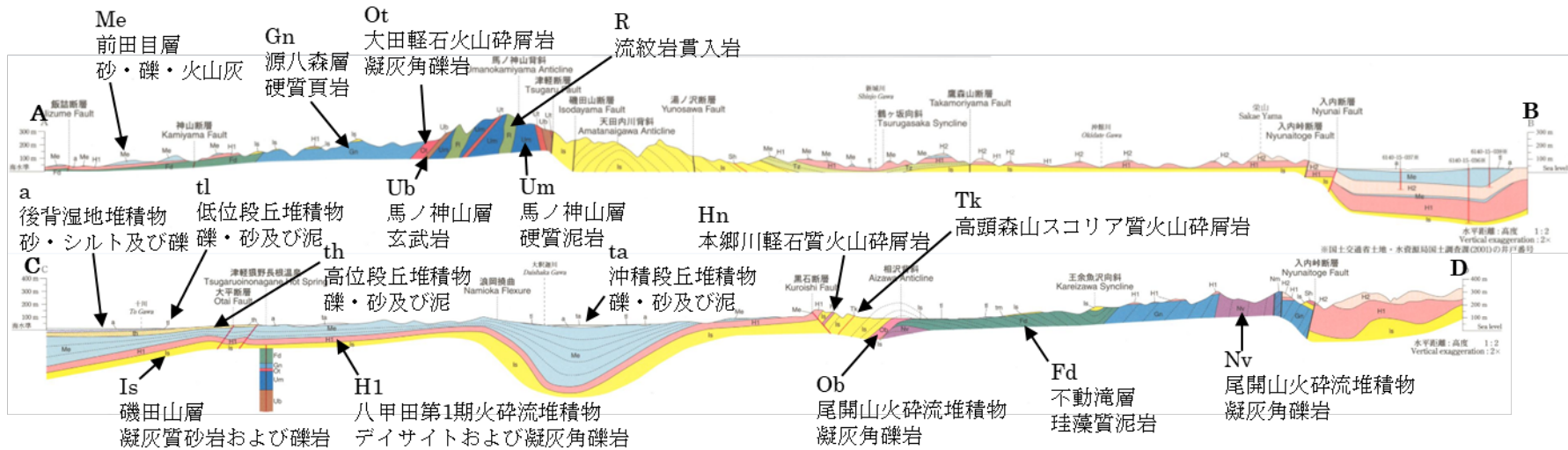


図 II-E.4-15 5万分の1地質図幅⁽⁶³⁾ (青森西部)



時代		層序名	時代	層序名
第四紀	完新世	沖積層	鮮新世	阿闍羅山安山岩溶岩
		崖錐堆積物		碓ヶ崎層
		崖錐及び崩積堆積物		大釈迦層
		十和田軽石流堆積物		鮮新世岩脈類
		扇状地堆積物		虹貝凝灰岩
		段丘堆積物		尾関山凝灰岩
		大鱈湖成堆積物		浅瀬石川玄武岩
	更新世	黒石扇状地堆積物	中新世	貝吹山デイサイト
		八甲田第2期火砕流堆積物		温湯層
		小国湖成堆積物		板留層梨木沢凝灰岩部層
		稲荷平湖成堆積物		板留層下部層
		六萬平層		折紙沢層
		八甲田第1期火砕流堆積物		万佐衛門山層
		南八甲田火山岩類		
中生代	沖浦デイサイト	ジュラ紀?	西股山層	
	カルデラ内青荷凝灰岩			
	カルデラ外青荷凝灰岩			

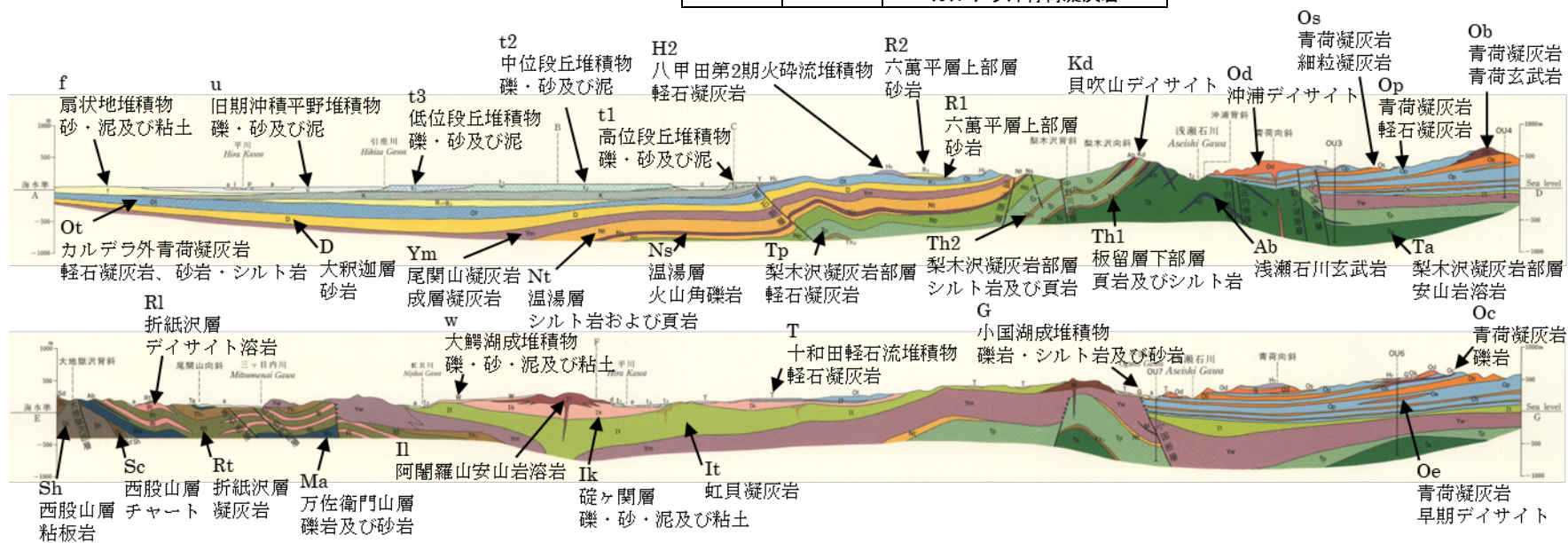
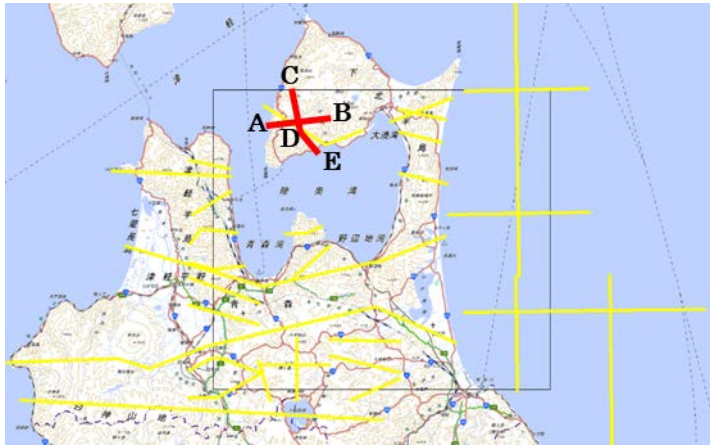


図 II-E.4-16 5万分の1地質図幅⁽⁶⁴⁾ (黒石)



時代	層序名
第四紀	沖積層
	段丘堆積物
	恐山火山噴出物
	於法岳安山岩類
	野平層
第三紀	半太郎沢溶結凝灰岩類
	大畑層
	脇野沢安山岩類
	湯ノ股川層
	湯ノ小川層
	小沢層
	湯ノ川層
	檜川層
先第三紀	金八沢層
	石英閃緑岩
	長浜層

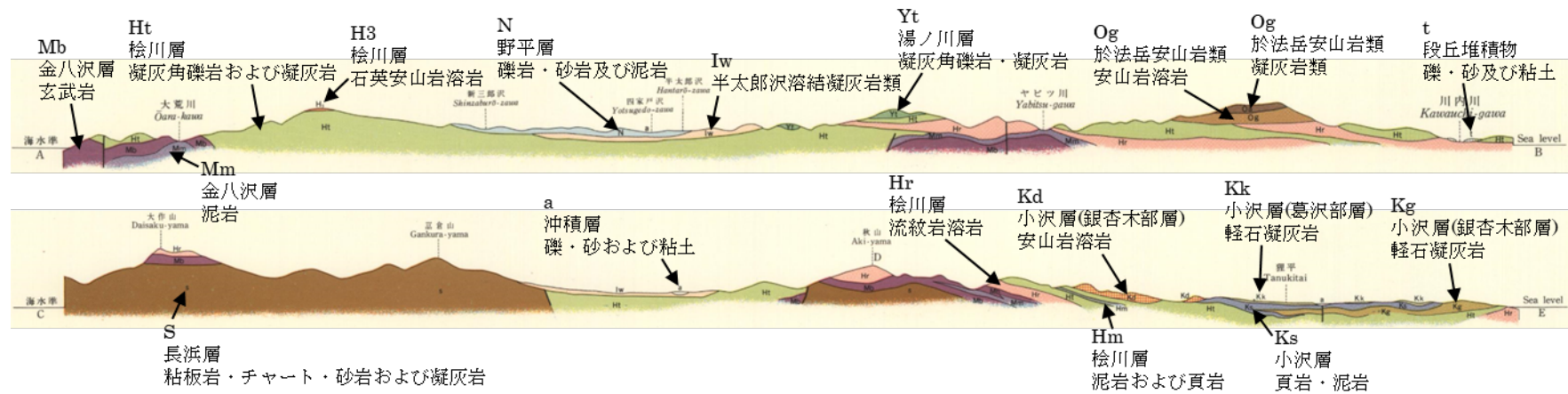
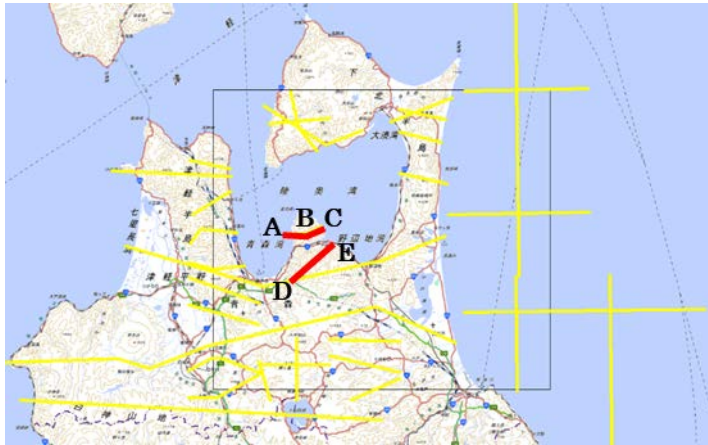


図 II-E.4-17 5万分の1地質図幅⁽⁶⁵⁾ (陸奥川内)



時代		層序名
第四紀	更新世～完新世	沖積層
		崖錐堆積物
		低位段丘堆積物
		軽石流堆積物
		中位段丘堆積物
第三紀	中新世	茂浦安山岩類
		笹森火山岩類
		和田川層
		四沢層
		西ノ沢層
		東滝層
		弁慶内層
中生代	三畳紀～ジュラ紀	金ヶ沢層
		花崗閃緑岩
		立石層
		東岳層

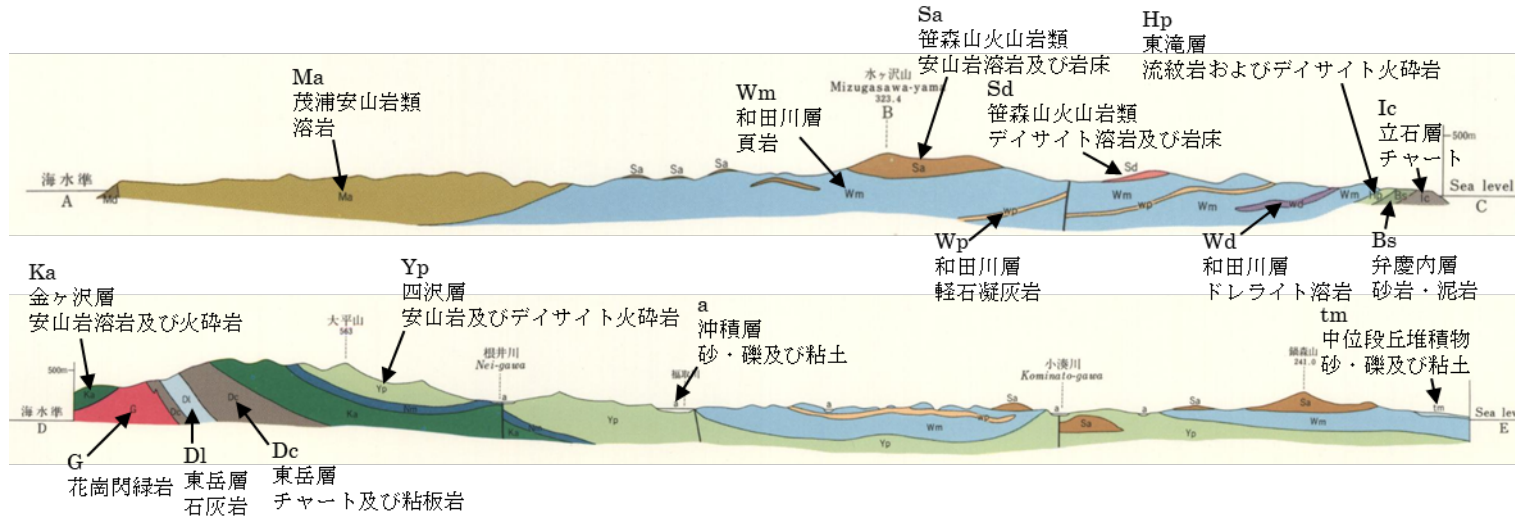
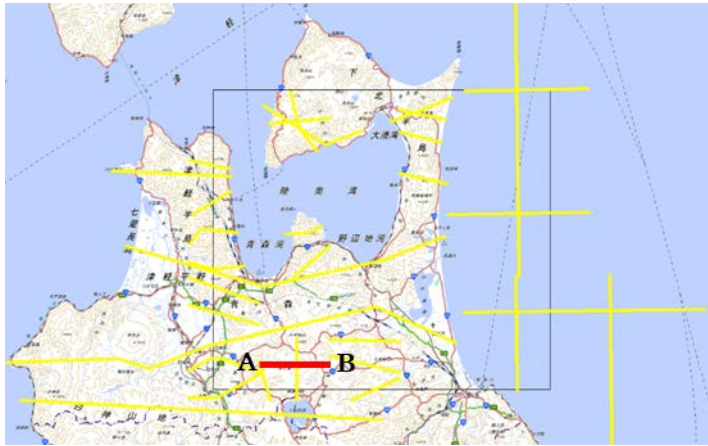


図 II-E.4-18 5万分の1地質図幅⁽⁶⁶⁾ (浅虫)



時代		層序名
第四紀	後期更新世	十和田八戸火砕流堆積物
	中期更新世	鳶岩層なだれ堆積物
		八甲田第2期火砕流堆積物
		南八甲田第3ステージ溶岩・火砕岩
		鳶川火砕堆積物
	前期更新世	南八甲田第2ステージ溶岩・火砕岩
新第三紀	鮮新世	大小川沢土石流堆積物
	中新世	青荷凝灰岩
		虹貝凝灰岩
	中新世	尾開山凝灰岩
		梨木沢凝灰岩部層
中新世	板留層下部層	

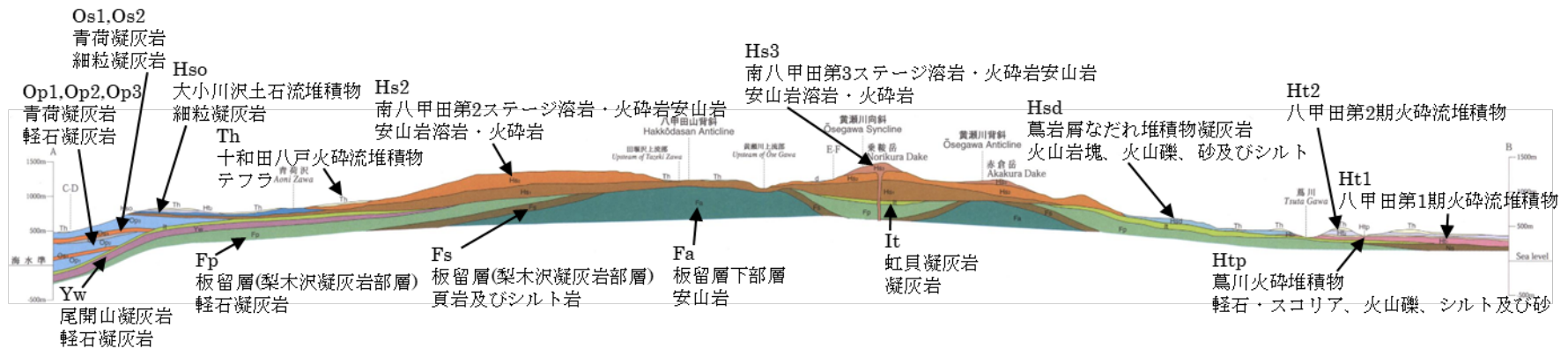


図 II-E.4-19 5万分の1地質図幅⁽⁶⁸⁾ (八甲田山 A-B)



時代		層序名
第四紀	後期更新世	十和田八戸火砕流堆積物
	中期更新世	八甲田第2期火砕流堆積物
		八甲田第1期火砕流堆積物
	前期更新世	大小川沢土石流堆積物
		南八甲田第1ステージ溶岩・火砕岩
		小国湖成層
新第三紀	鮮新世	沖浦デイサイト
		青荷凝灰岩
	中新世	虹貝凝灰岩
		尾開山凝灰岩
		板留層

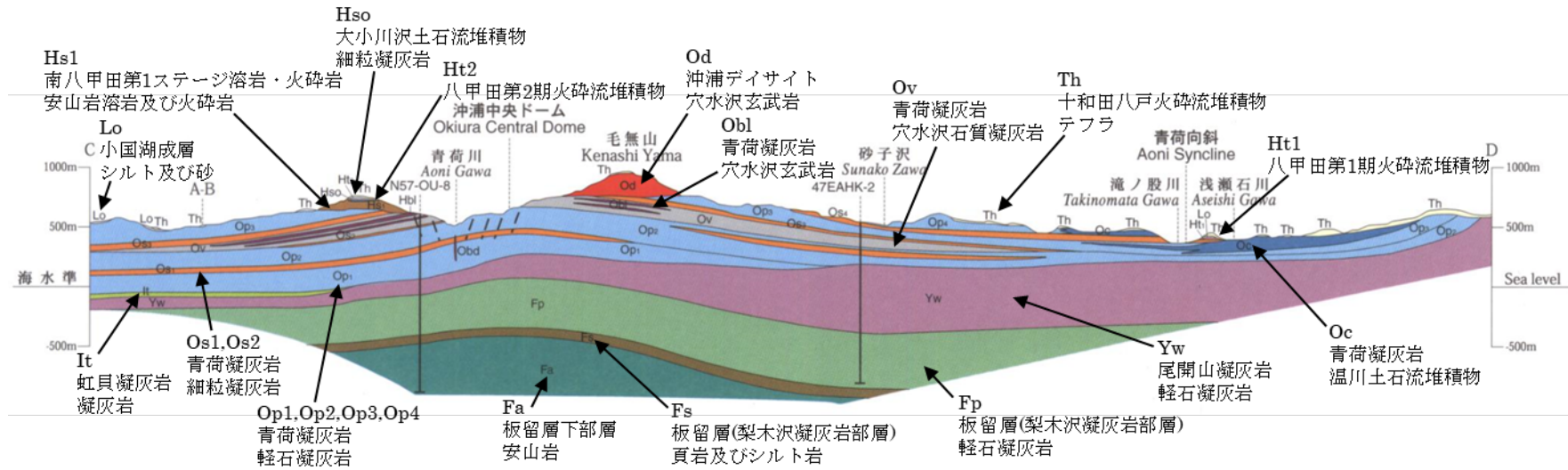
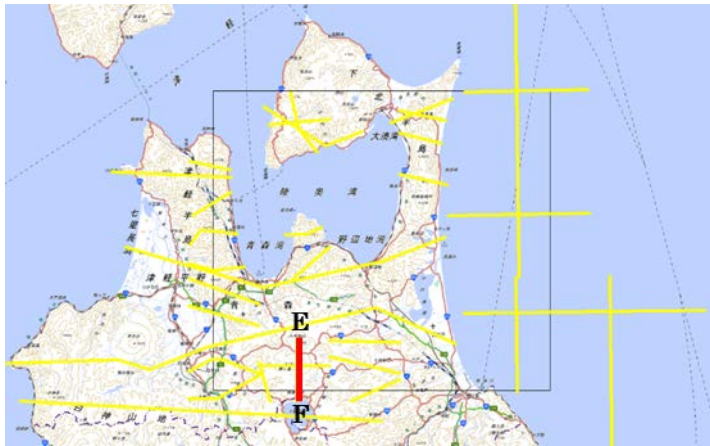


図 II-E.4-20 5万分の1地質図幅⁽⁶⁸⁾ (八甲田山 C-D)



時代		層序名	時代	層序名		
第四紀	完新世	十和田毛馬内火砕流堆積物	第四紀	田茂菴岳溶岩		
	後期更新世	十和田八戸火砕流堆積物		田代平湖成層		
		青撫山火砕物・溶岩		八甲田第2期火砕流堆積物		
		大岳火砕岩		南八甲田第3ステージ溶岩・火砕岩		
		大岳第3ステージ溶岩		鳶川火砕堆積物		
		赤倉岳火砕岩		八甲田第1期火砕流堆積物		
		大岳第2ステージ溶岩		南八甲田第2ステージ溶岩・火砕岩		
		井戸岳溶岩		南八甲田第1ステージ溶岩・火砕岩		
	中期更新世	赤倉岳溶岩		新第三紀	鮮新世	虹貝凝灰岩
		硫黄岳溶岩		中新世		板留層
	大岳第1ステージ溶岩					
	仙人岱溶岩・火砕岩					

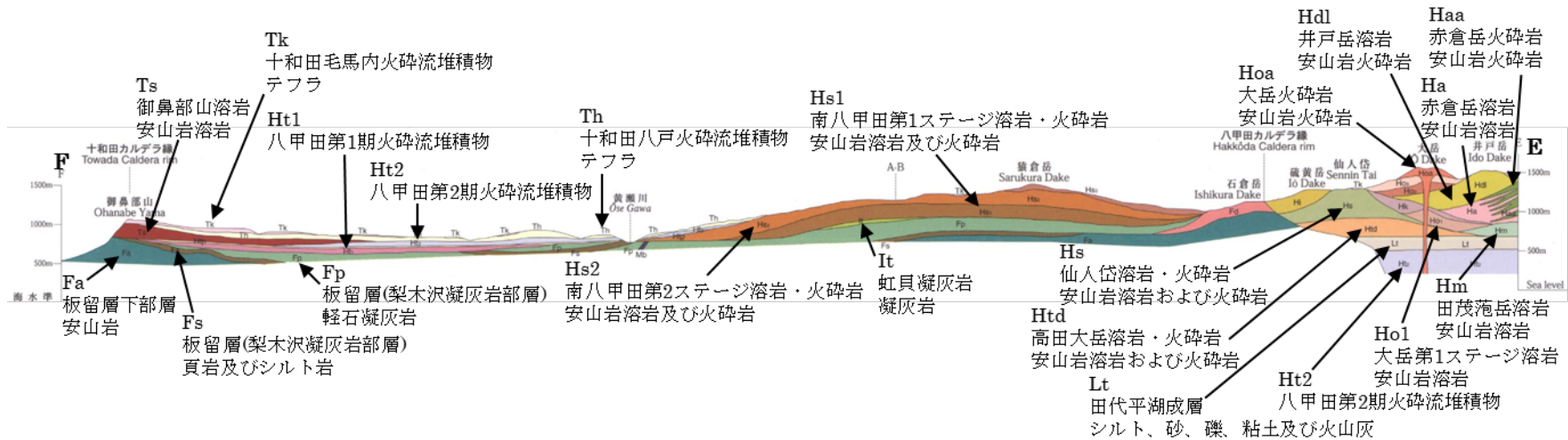
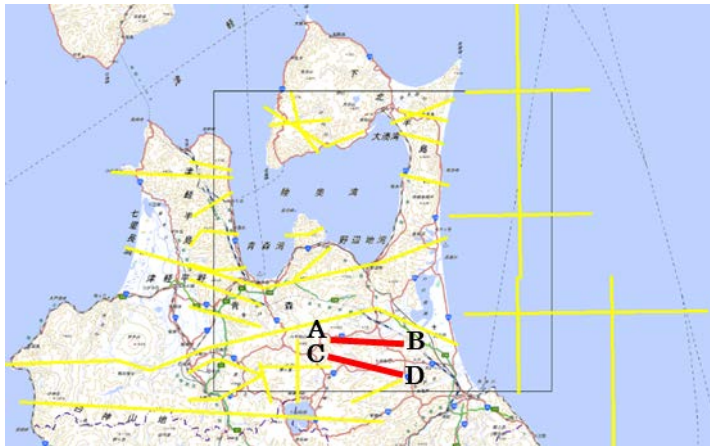


図 II-E.4-21 5万分の1地質図幅⁽⁶⁸⁾ (八甲田山 E-F)



時代		層序名	時代	層序名	
第四紀	完新世	現河床堆積物	新第三紀	法量北溶岩	
		崖錐堆積物		鮮新世	斗川層
		明戸段丘堆積物		後期中新世	月日山火山岩類
		下切田段丘堆積物			小増沢層
	後期更新世	十和田段丘堆積物		中期-後期中新世	道地層
		十和田八戸火砕流堆積物	和田川層		
		十和田大不動火砕流堆積物		中期中新世	板留層
		十和田奥瀬火砕流堆積物			
	七戸段丘堆積物				
	中期-後期更新世	漆畑段丘堆積物			
	前期-中期更新世	八甲田第2期火砕流堆積物			
		野辺地層			
		八甲田第1期火砕流堆積物			
		八甲田高峠火砕流堆積物			
	高森山層				

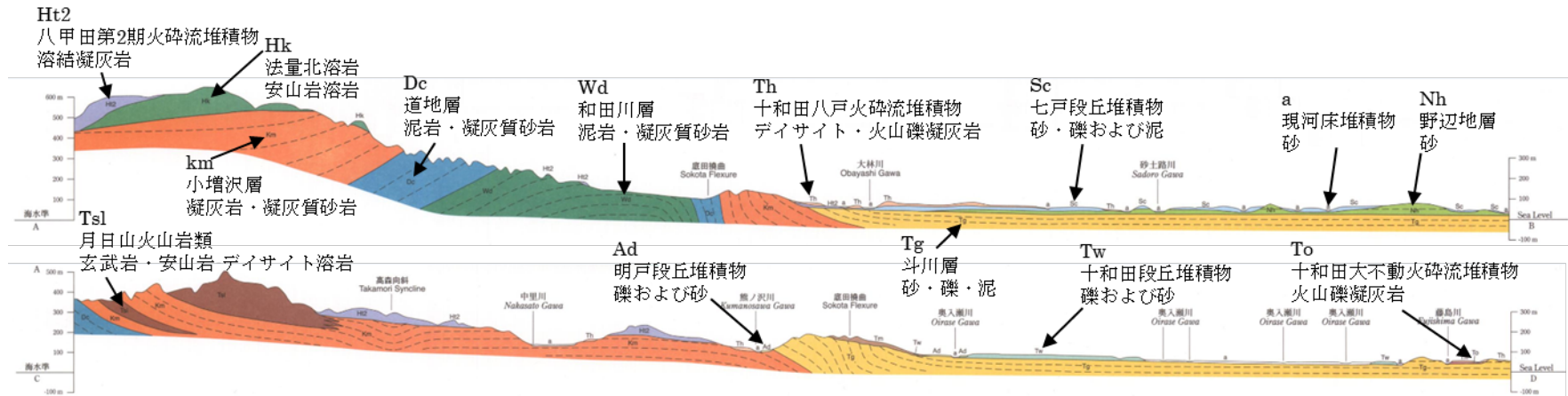
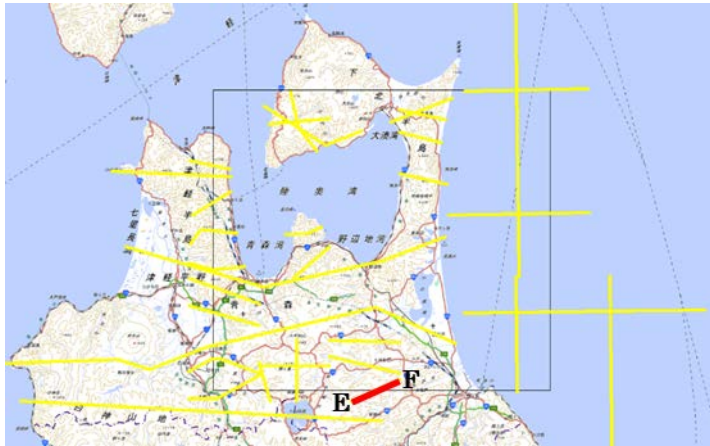


図 II-E.4-22 5万分の1地質図幅⁽⁶⁷⁾ (十和田 A-B, C-D)



第四紀		時代	層序名	時代	層序名	
第四紀	完新世	新第三紀	現河床堆積物	鮮新世	法量北溶岩	
			崖錐堆積物		斗川層	
			明戸段丘堆積物		後期中新世	月日山火山岩類
			下切田段丘堆積物			小増沢層
	後期更新世	中期-後期中新世	十和田段丘堆積物	道地層		
			十和田八戸火砕流堆積物	和田川層		
			十和田大不動火砕流堆積物		板留層	
			十和田奥瀬火砕流堆積物			
	中期-後期更新世	中期中新世	七戸段丘堆積物			
			漆畑段丘堆積物			
	前期-中期更新世		八甲田第2期火砕流堆積物			
			野辺地層			
			八甲田第1期火砕流堆積物			
			八甲田高峠火砕流堆積物			
			高森山層			

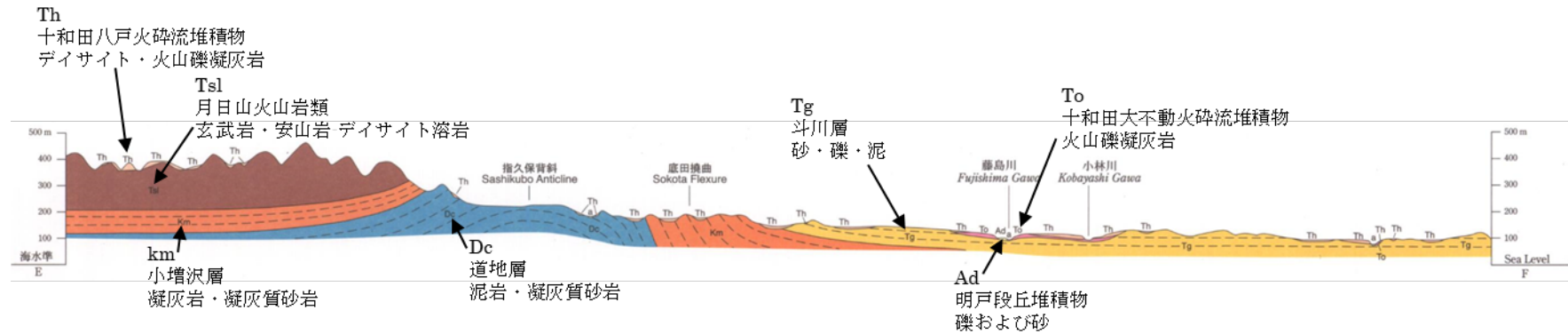
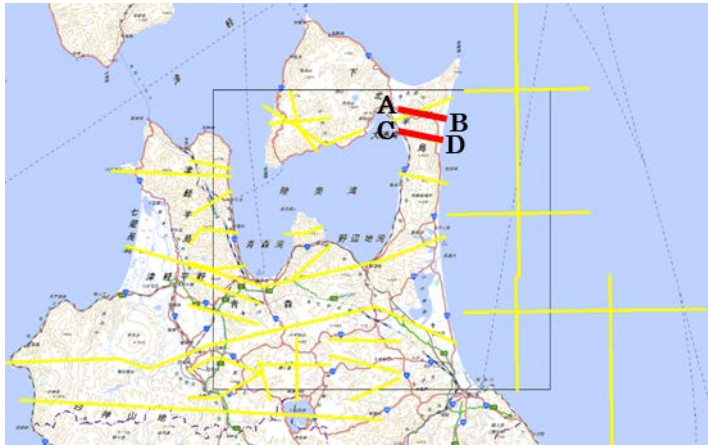


図 II-E.4-23 5 万分の 1 地質図幅⁽⁶⁷⁾ (十和田 E-F)



時代		層序名
第四紀		沖積層
		崖錐堆積物
		火山灰層
		段丘堆積物
		田名部累層
第三紀	中新世～鮮新世	砂子又累層
		泊累層
	暁新世～漸新世	蒲野沢累層
		尻屋層

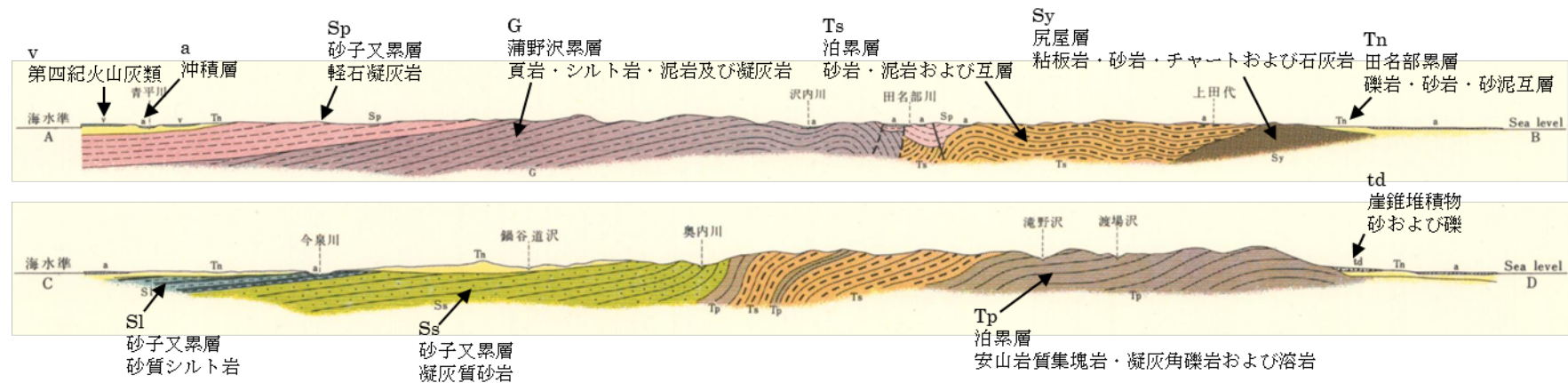
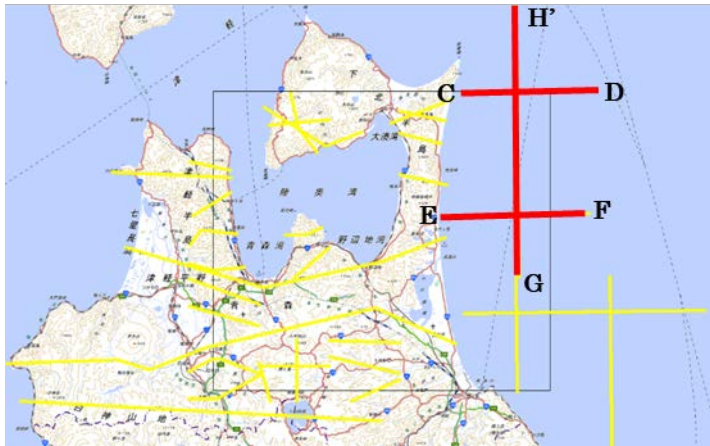


図 II-E.4-24 5万分の1地質図幅⁽⁶⁹⁾ (近川)



時代		層序名
第四紀	完新世	下北沖層上部
第三紀	鮮新世後期～完新世	下北沖層
	鮮新世後期	大畑沖層
	中新世後期	天ヶ森沖層
	中新世中期～中新世後期	八戸沖火山岩類
	中新世前期～中新世中期	物見埼沖層
古第三紀		野田沖層群
		音響基盤

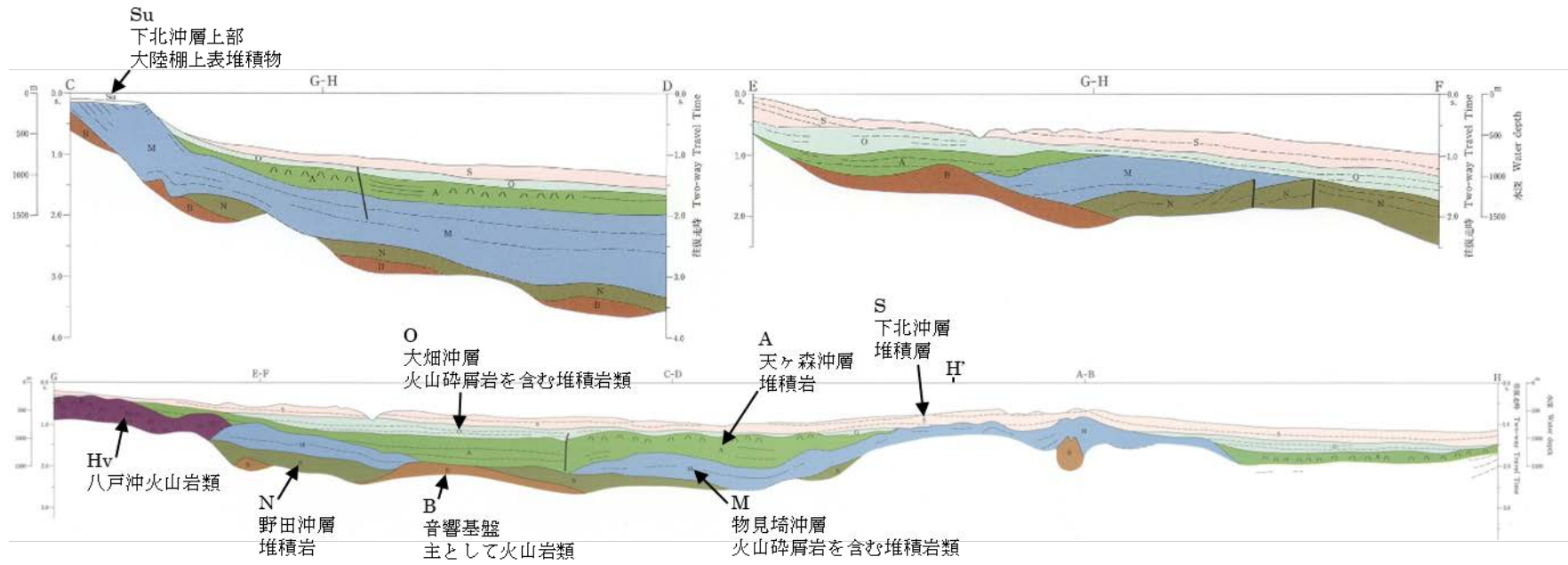
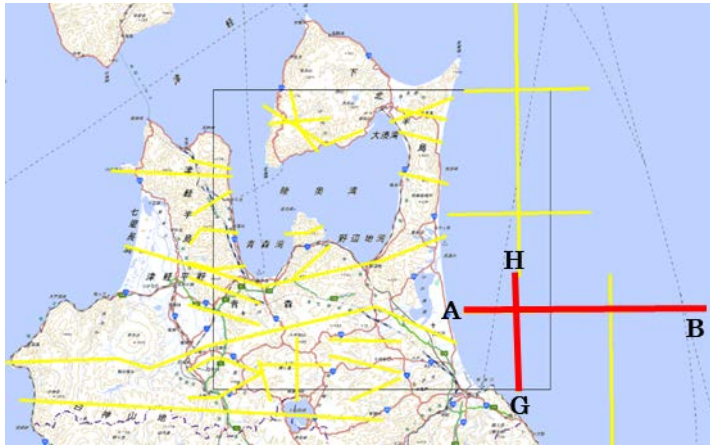


図 II-E.4-25 下北半島沖海底地質図⁽⁷¹⁾



時代		層序名
第四紀	完新世	大陸棚被覆堆積物
第三紀 ~第四紀	鮮新世 ~第四紀	大陸棚および大陸斜面堆積物
第三紀	中新世前期 ~中期	八戸沖層
	新第三紀	八戸沖火山岩類 八戸沖火山岩類伏在分布域
	古第三紀	野田層群
白亜紀		堆積岩 (種市層・久慈層群・宮古層群および陸中層群に相当)
中生代		火成岩類 (三崎・黒崎・閉伊崎火山岩類および久喜花崗岩に相当)

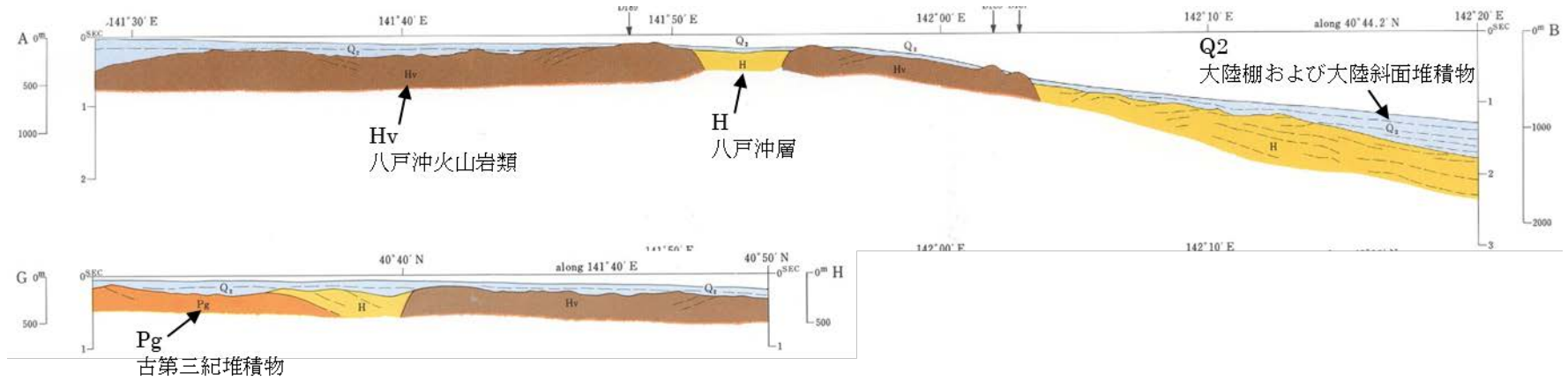


図 II-E.4-26 八戸沖海底地質図⁽⁷⁰⁾

II-E.5 水理定数

(1) 透水係数

① 対象地域の透水係数の既存データ

表 II-E.5-1 に透水係数をデータベース化した梅田（1996）⁽⁷²⁾による分類表を示した。

梅田（1996）⁽⁷²⁾による透水係数データベースのうち、対象地域およびその周辺におけるデータを表 II-E.5-2、表 II-E.5-3 に示した（40 データ）。また、抜粋データの位置を図 II-E.5-1 に示した。試錐コアの試料では同一地点で取得されているため、代表となる番号のみが示されている。

表 II-E.5-2、表 II-E.5-3 に示したように透水係数の測定方法は回復法、揚水試験、ルジオンなどいくつかの手法で測定されているが、測定方法が不明のデータも多い。

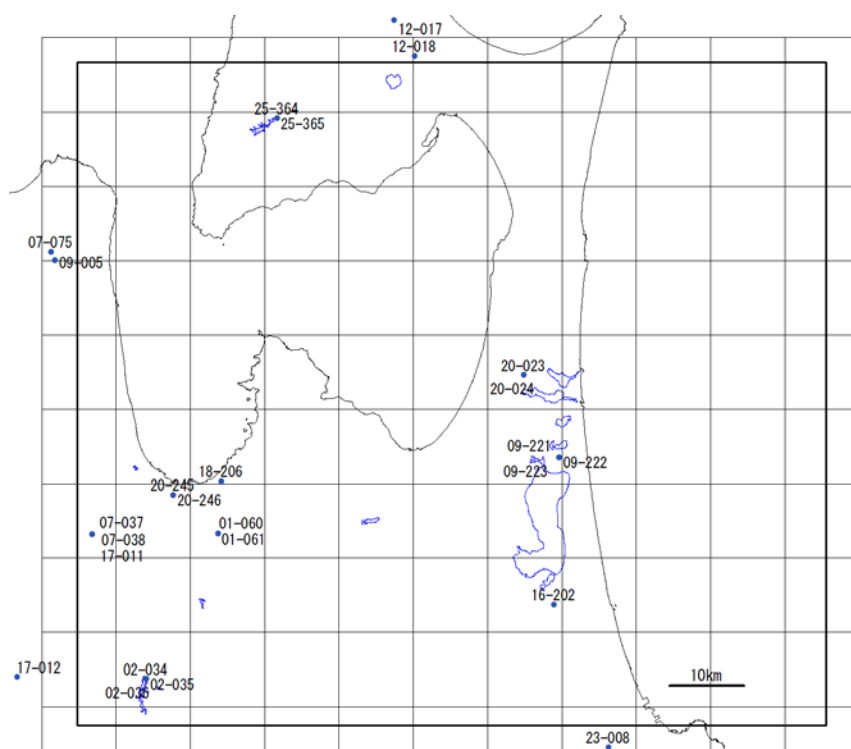


図 II-E.5-1 梅田（1996）⁽⁷²⁾による透水係数（対象地域の抜粋）

表 II-E.5-1 梅田の分類

単元	時代	岩相の特徴	固結度
Nms	新第三紀	海成堆積物	固結～軟岩
Nvp	新第三紀	主として海底火山噴出物	硬岩
P-Mnscvp	古生代～前期中生代	堆積岩	硬岩
Q2-Hmsg	後期更新世～完新世	非海成から浅海性堆積物	未固結
Qmsg	第四紀	非海成から浅海性堆積物	未固結～半固結
Qp	第四紀	火山性碎屑岩	未固結～硬岩
Nvp	新第三紀	主として海底火山噴出物	硬岩
Qv	第四紀	火山岩～火山性碎屑物	未固結～硬岩

表 II-E.5-2 対象地域で得られている透水係数（中新世堆積岩類、付加体） 梅田（1996）⁽⁷²⁾から抜粋

NO	番号	十進緯度	十進経度	地層名	岩質	風化状況	地質大区分	梅田の区分	透水係数 m/sec	測定法	深度 (m)	平均 透水係数 (m/sec)	
414	07-037	40.7683	140.6066	大釈迦層	砂岩		第三紀堆積岩類	Nms	5.0E-04	—	40	3.9E-05	
415	07-038	40.7683	140.6066	大釈迦層	泥岩				5.0E-07	—	40		
452	07-075	41.1100	140.5383	蟹田層	砂岩、泥岩・凝灰岩互層				1.6E-04	—			
476	07-099	41.1100	140.5383	蟹田層	砂岩				2.0E-06	—	63		
724	09-005	41.1000	140.5450	蟹田層	砂岩、頁岩、れき岩				1.1E-06	P	120		
750	09-221	40.8616	141.3516	砂子又層	細砂				1.4E-05	T	5		
751	09-222	40.8616	141.3516	砂子又層	細砂				1.8E-05	T	10		
752	09-223	40.8616	141.3516	砂子又層	細砂				1.4E-05	T	16		
753	09-224	40.8616	141.3516	砂子又層	細砂				6.2E-06	T	20		
754	09-225	40.8616	141.3516	砂子又層	細砂				1.2E-05	T	26		
967	17-011	40.7683	140.6066	大釈迦層	砂岩				1.6E-05	—	80		
995	18-012	41.1000	140.5450	上部蟹田層	砂岩				1.1E-06	R			
1149	20-024	40.9616	141.2950	砂子又砂層	砂				3.2E-06	—	35		
1406	25-263	40.5933	140.6933	青荷層	凝灰岩、凝灰角礫岩				6.0E-07	RT	50		
1446	25-303	40.5933	140.6933	青荷層	礫岩				1.0E-06	RT	45		
126	02-035	40.5933	140.6933	長谷沢凝灰岩	凝灰岩				Nvp	1.6E-07	RT		35
127	02-036	40.5933	140.6933	青荷層	凝灰岩					6.7E-07	RT		30
1445	25-302	40.5933	140.6933	青荷層	凝灰岩					7.1E-07	RT		40
1447	25-304	40.5933	140.6933	沖浦層	凝灰角礫岩					3.2E-07	RT		50
1507	25-364	41.2733	140.9000	長浜層	珪質岩・粘板岩互層	風化	付加体	P-Mmscvp		2.7E-06	RT	40	2.4E-06
1508	25-365	41.2733	140.9000	長浜層	チャート、輝緑凝灰岩	(破碎質)			2.1E-06	RT	90		

測定法) P:揚水法、RT:ルジオンテスト、T:トリチューブ+回復法、R:回復法、L:室内試験、PA:加圧注入法、—:不明

表 II-E.5-3 対象地域で得られている透水係数（第四紀堆積岩類、火山岩類） 梅田（1996）⁽⁷²⁾から抜粋

NO	番号	十進緯度	十進経度	地層名	岩質	風化状況	地質大区分	梅田の区分	透水係数 m/sec	測定 法	深度 (m)	平均 透水係数 (m/sec)
1298	20-245	40.8166	140.7350		砂		更新世後期～完新世	Q2-Hmsg	3.2E-06	—	15	1.6E-06
1299	20-246	40.8166	140.7350		シルト				1.0E-08	—	17	
955	16-202	40.6833	141.3416		泥炭		更新世前期～中期	Qmsg	3.0E-07	L	1	1.8E-05
968	17-012	40.5950	140.4883		れき混じり砂				1.6E-05	—	6	
1024	18-206	40.8333	140.8116		粘土				2.6E-09	—		
1148	20-023	40.9616	141.2950	野辺地層	砂				3.2E-06	—	10	
1324	23-007	40.5000	141.5033		小れき混り中砂				1.1E-05	—	97	
1325	23-008	40.5100	141.4283		基底れき				7.8E-05	—		
60	01-060	40.7700	140.8066	田代平溶結凝灰岩	未固結粗粒凝灰岩	半固結ないし粘土状	第四紀火山碎屑物	Qp	1.6E-06	—		8.7E-06
61	01-061	40.7700	140.8066	田代平溶結凝灰岩	未固結粗粒凝灰岩	ルーズ			1.6E-05	—		
125	02-034	40.5933	140.6933		石英安山岩		新第三紀火山岩類	Nvp	2.7E-06	RT	20	8.8E-07
128	02-037	40.5933	140.6933	沖浦層	玄武岩	風化			1.9E-06	RT	40	
129	02-038	40.5933	140.6933	沖浦層	玄武岩	新鮮			1.3E-07	RT	40	
795	12-017	41.3916	141.0883	薬研下部層	安山岩, 同質凝灰岩類	変質			1.2E-08	PA	1000	
796	12-018	41.3483	141.1216		石英安山岩	貫入岩			1.8E-09	PA	1503	
1405	25-262	40.5933	140.6933	沖浦層	玄武岩	弱風化～新鮮			6.0E-07	—	65	
1407	25-264	40.5933	140.6933		石英安山岩		第四紀火山岩類	Qv	8.4E-06	RT	20	6.5E-06
1443	25-300	40.5933	140.6933		石英安山岩				1.0E-05	RT	20	
1444	25-301	40.5933	140.6933	長谷沢層	軽石凝灰岩				1.0E-06	RT	30	

測定法) P:揚水法、RT:ルジオンテスト、T:トリチューブ+回復法、R:回復法、L:室内試験、PA:加圧注入法、—:不明

梅田（1996）⁽⁷²⁾の分類では No.126、127 などの凝灰岩は「Nvp」に分類されており、安山岩等の火山岩類と同じカテゴリとなっている。凝灰岩の成因を考えれば堆積岩と火山岩の中間的な性格を帯びるが、水理的学的な観点から堆積岩として扱う。

図 II-E.5-2 に梅田（1996）⁽⁷²⁾から抜粋した対象地域の透水係数のヒストグラムを示した。堆積岩類の透水係数は $10^{-8} \sim 10^{-3} \text{m/s}$ の範囲をとり、最頻値は 10^{-5}m/s ($10^{-6} \sim 10^{-5} \text{m/s}$) となっている。火山岩類は $10^{-8} \sim 10^{-5} \text{m/s}$ の範囲をとり、最頻値は 10^{-5}m/s ($10^{-6} \sim 10^{-5} \text{m/s}$) であり、堆積岩と大きな差は認められない。

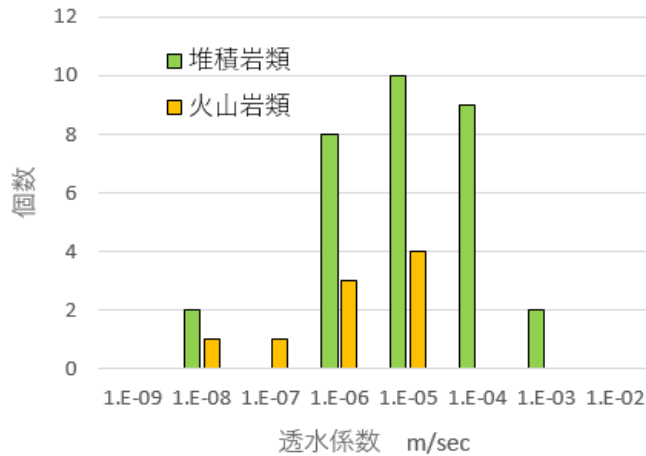


図 II-E.5-2 堆積岩と火山岩の透水係数のヒストグラム（対象地域）

農業用地下水研究グループ「日本の地下水」編集委員会編（1986）⁽⁷³⁾によれば青森平野の更新統の透水係数は $2 \sim 7 \times 10^{-5} \text{m/s}$ であり、上北地域の砂小又層（鮮新世～更新世前期）では $2 \sim 5 \times 10^{-5} \text{m/s}$ とされており、梅田（1996）⁽⁷²⁾の堆積岩の抜粋データと文献値はほぼ一致する。

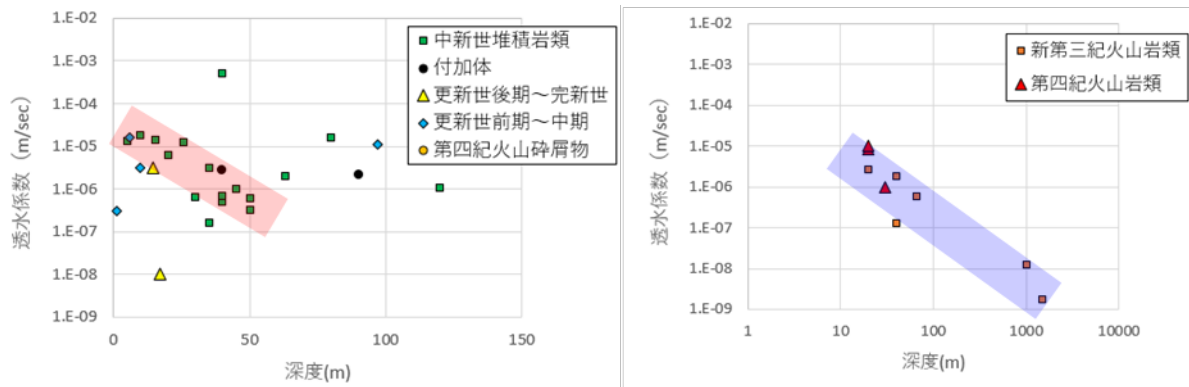


図 II-E.5-3 透水係数と深度の関係 左：堆積岩類 右：火山岩類

図 II-E.5-3 に表 II-E.5-2、表 II-E.5-3 の透水係数と深度の関係について検討した。中新世の堆積岩類では透水係数の大きな群を除くと、深度 0m 付近では 10^{-5}m/s が多く、深度 50m 付近で $2 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 程度まで低下する傾向を示し、透水係数は深度に依存していることを示唆している。

火山岩類では透水係数と深度との関係はより明瞭であり、深度 20m 付近では 10^{-5}m/s 程度、深度 1,000m 付近では $10^{-9} \sim 10^{-8} \text{m/s}$ と透水係数は 3 桁程度小さくなっている。

図 II-E.5-4 に第三紀堆積岩類+付加体、第四紀堆積岩類および火山岩類をまとめた透水係数と深度の関係を示した。第四紀堆積岩類は透水係数が小さいデータ (No.955、1299) があるが、堆積岩と火山岩類は深度に対してほぼ同じトレンドを持ち、深度が 2 桁大きくなると、

透水係数は3~4桁程度小さい値を示している。

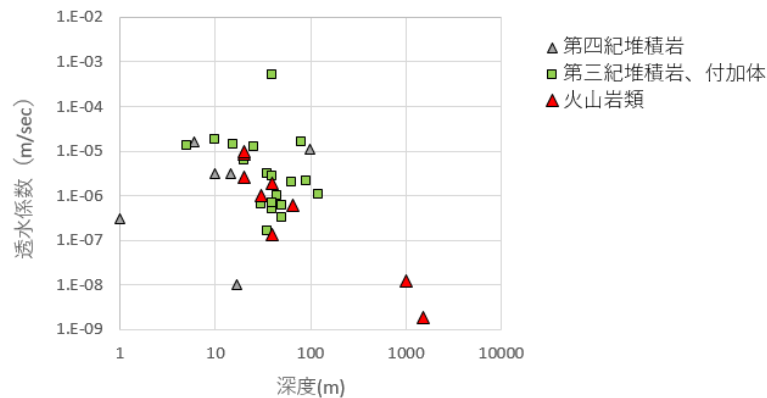


図 II-E.5-4 透水係数と深度の関係

以上から、対象地域の更新世堆積岩の透水係数(浅層)は 10^{-5} m/s前後と推定される。なお、この下位の中新世の鷹架層は深度に応じて透水係数が大きく変化するため、水理構造を設定するには深度とともに透水係数を変化させる必要がある。③で後述するように硬岩の透水係数は深度、特に開口性割れ目密度に依存すると推定される。対象地域では鷹架層について系統だってデータが取得されているが、付加体や火山岩類についても同様の変化を示すと推定される。

付加体の岩石は岩相によって透水係数が変化すると思われるが、 10^{-6} m/s程度が推定されている。また、第四紀火山岩類や第三紀堆積岩類についても 10^{-6} m/s程度が推定される。

② 平均的な透水係数との比較

①で述べたように、対象地域ではいくつかの地点で透水係数が推定されており、特に鷹架層については鉛直方向への透水係数の変化が明らかにされている。これら透水係数は岩相や岩盤の亀裂状態によって大きく変化すると推定される。ここでは、対象地域において取得された透水係数が一般的な岩相の透水係数と乖離していないかを検討した。

図 II-E.5-5 に梅田（1996）⁽⁷²⁾による時代別の透水係数集計結果を示した。新第三紀以前の岩石では $10^{-7} \sim 10^{-6} \text{m/s}$ と概ね一定の値を示し、更新世および完新世の堆積物ではこれより 1桁程度透水係数が大きい。新第三紀以降の岩石では透水係数のばらつきが大きいのは、砂や粘性土では透水係数が大きく変わるためと思われる。

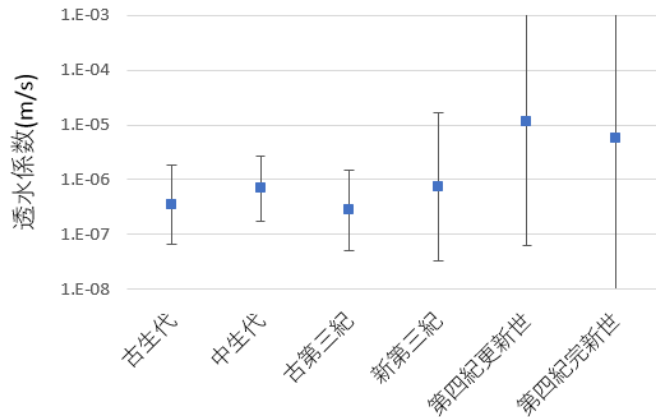


図 II-E.5-5 梅田（1996）⁽⁷²⁾による時代別の透水係数

図 II-E.5-6 に地盤工学会（2009）⁽⁷⁴⁾による一般的な土質が取り得る透水係数の範囲を示した。砂では $10^{-5} \sim 10^{-3} \text{m/s}$ 程度であり、シルトでは 10^{-7}m/s 前後、粘性土では 10^{-10}m/s と幅広い範囲を示す。梅田（1996）⁽⁷²⁾により対象地域において推定される透水係数は新第三紀堆積岩、火山岩ともに 10^{-6}m/s 前後であるので、細砂程度の透水係数であることを示し、透水係数としてはやや大きいと言える。

透水性	透水係数 k (m/s)										
	10^{-11}	10^{-10}	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
透水性	実質上不透水		非常に低い		低い		中位		高い		
対応する土の種類	粘性土 (C)		微細砂, シルト, 砂-シルト-粘土混合土 (SF) [S-F] (M)				砂および礫 (GW) (GP) (SW) (SP) (G-M)			清浄な礫 (GW) (GP)	
透水係数を直接測定する方法	特殊な変水位透水試験		変水位透水試験				定水位透水試験		特殊な変水位透水試験		
透水係数を間接的に推定する方法	圧密試験結果から計算		なし				清浄な砂と礫は粒度と間隙比から計算				

図 II-E.5-6 一般的な土質と透水係数 地盤工学会（2009）⁽⁷⁴⁾

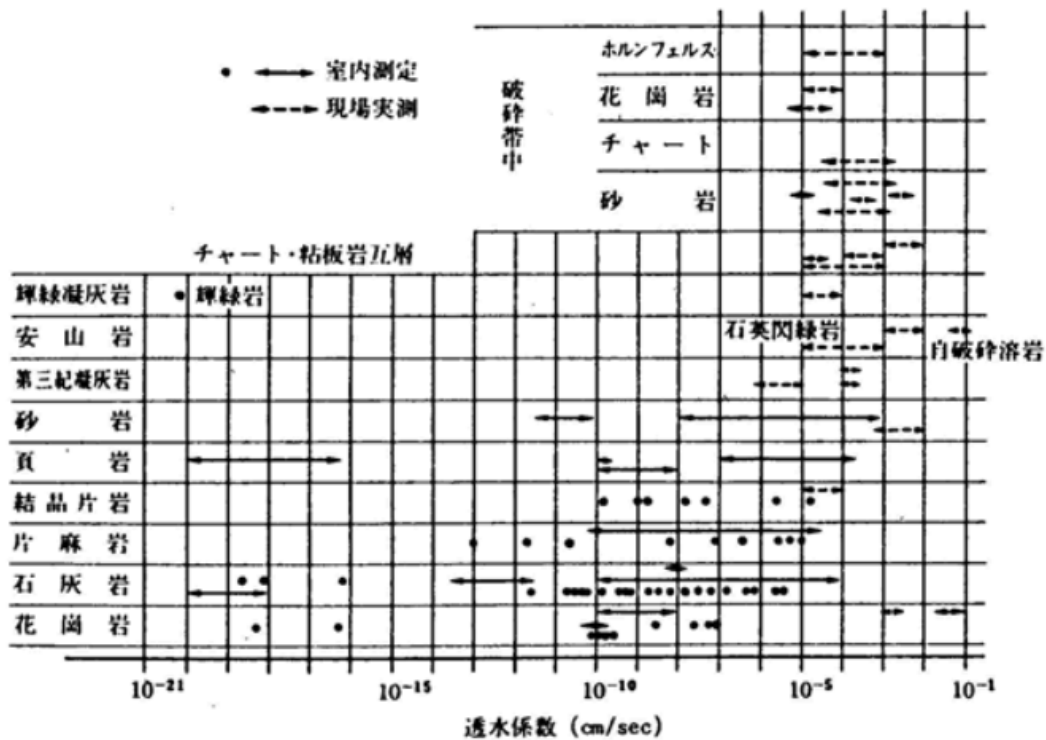


図 II-E.5-7 種々の岩盤の透水係数 佐藤・渡辺 (1978) (75)

図 II-E.5-7 に佐藤・渡辺 (1978) (75) による岩盤の透水係数を示した。破線の矢印は原位置試験であり、データ数としては少ない。破砕帯中では岩石によらず $10^{-7} \sim 10^{-5} \text{ m/s}$ が測定されている。凝灰岩では $10^{-8} \sim 10^{-7} \text{ m/s}$ が、砂岩では $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ m/s}$ と推定されている。砂岩の数値は対象地域の透水係数と概ね類似した値であるが、砂岩の粒子サイズや固結度によって透水係数が大きく変化するため、あまり参考とはならない。

これ以外に地質単元別に纏められた透水係数のデータとしては表 II-E.5-4 に示した地圏テクノロジー (2015) (76) のデータがある。これは地圏テクノロジーが 2009 年から実施している全国規模の地下水流動解析結果の国土情報プラットフォームであり、現在は第二次段階に移行している。第二次では水平解像度 1km で地質をモデリングし、降水量・気温・土地利用状況を考慮した全国的な地下水流動モデルを構築している。表 II-E.5-4 はこの地質モデリングに適用された透水係数と空隙率であり、地質単元が細かく細分され、また、風化度に応じて 4 段階の係数が設定されている。したがって、地質単元に透水係数を設定する際の参考資料となる。

表 II-E.5-5 は梅田 (1996) (72) と地圏テクノロジー (2015) (76) で地質単元を対応させ、それぞれの透水係数の平均値を比較した結果を示した。梅田 (1996) (72) では地質区分の平均値を、地圏テクノロジー (2015) (76) は風化・緩み区分 1~3 と深浅部の単純平均を比較した。図 II-E.5-9 中の黒破線は透水係数が 1:1 となるラインである。図で示したように地圏テクノロジー (2015) (76) の透水係数が 10^{-6} m/s 以上の単元 (第四紀更新世、完新世) は、梅田 (1996) (72) の透水係数とほぼ一致する。一方、これ以下の透水係数、特に Gr、ACM、CBR、OF の 4 単元は梅田 (1996) (72) では 10^{-6} m/s 前後であるが、地圏テクノロジー (2015) (76) では $10^{-8} \sim 10^{-9} \text{ m/s}$ と透水係数が 2~3 桁小さく設定されている。これら単元は花崗岩やかんらん岩等の深成岩類および古生代~中生代の頁岩等の硬い地質であり、他の文献等の値と比較しても梅田 (1996) (72) の平均値は小さいと考えられる。

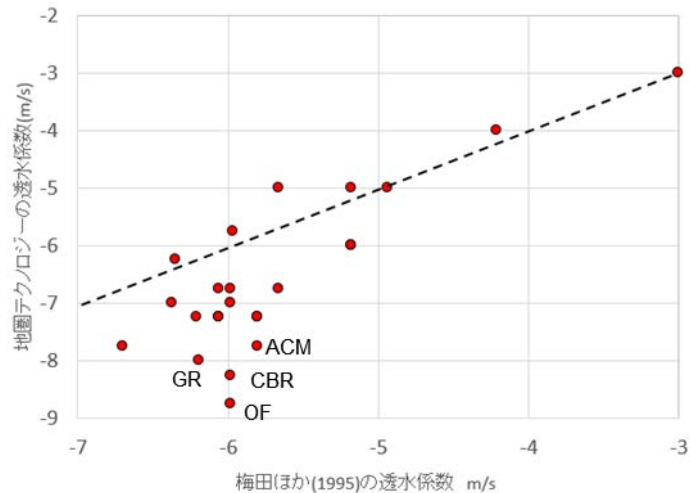


図 II-E.5-8 梅田 (1996) ⁽⁷²⁾と地圏テクノロジー (2015) ⁽⁷⁶⁾の対比結果

図 II-E.5-9 に梅田 (1996) ⁽⁷²⁾から対象地域の透水係数データを抜粋した結果と全国平均値の比較、および地圏テクノロジー (2015) ⁽⁷⁶⁾とを比較した。

図 II-E.5-9 左上は梅田 (1996) ⁽⁷²⁾から対象地域を抜粋した表 II-E.5-4 のデータと、同じカテゴリの全国平均の比較結果であるが、両者に対応関係は認められない。同様に表 II-E.5-5 に示した地圏テクノロジー (2015) ⁽⁷⁶⁾の同じカテゴリの透水係数を比較しても両者には相関が認められない。図 II-E.5-9 下に梅田 (1996) ⁽⁷²⁾の全国平均値と地圏テクノロジー (2015) ⁽⁷⁶⁾の比較を示した。第四紀火山岩、第三紀火山岩および付加体は梅田 (1996) ⁽⁷²⁾の透水係数が地圏テクノロジー (2015) ⁽⁷⁶⁾に比較してやや大きい、堆積岩類は 1:1 に近い関係が得られている。したがって、対象地域で抜粋した梅田 (1996) ⁽⁷²⁾のデータを信頼すれば、対象地域の堆積岩類の透水係数は他地域よりも透水係数が大きいこと表すが、データ数が少なく統計的な偏りで説明される可能性もある。

対象地域での新第三紀堆積岩類、付加体、火山岩類などの透水係数は、梅田 (1996) ⁽⁷²⁾の全国平均値や地圏テクノロジー (2015) ⁽⁷⁶⁾の透水係数に比較すると 1~2 桁程度小さな透水係数となっている。これらについては前述したように深度方向の透水係数の変化が大きく影響していると推定される。

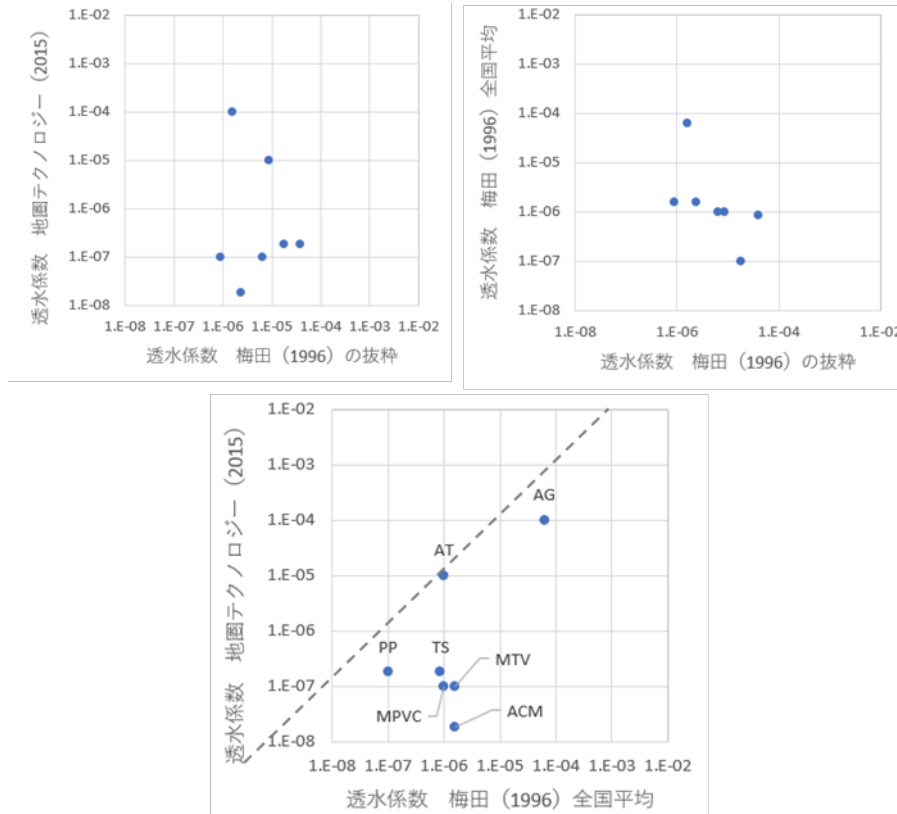


図 II-E.5-9 抜粋した透水係数と他文献との比較

表 II-E.5-6 は今井ほか (2009) (77)の幌延地域の地下水流動解析に用いられた水理定数を、表 II-E.5-7 は熊本ほか (2007) (78)の花崗岩地域の地下水流動解析に用いられた水理定数を示した。前者は地下数 km まで、後者は地下 1000m までを対象としている。

今井ほか (2009) (77)では古第三系～白亜紀の単位の透水係数を 10^{-11}m/s とほぼ不透水層として設定している。熊本ほか (2007) (78)の花崗岩では割れ目帯で $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{m/s}$ 程度、割れ目低密度帯で 10^{-8}m/s と設定している。これらを図 II-E.5-9 と比較すると深成岩類や古生代～中生代堆積岩類の値は、地圏テクノロジー (2015) (76)に近い値が設定されている。なお、梅田 (1996) (72)は課題として、取得したデータの目的、深度、試験方法がばらばらであること、また、土木系雑誌の目的から施工上問題となった比較的大きな透水係数を対象としたケースが多いことを指摘している。このため、収集されたデータは比較的高い透水係数に偏る傾向も考えられるとしている。図 II-E.5-9 の比較結果はこれらの問題を反映した可能性が高いと推定される。

表 II-E.5-4 地圏テクノロジー (2015) ⁽⁷⁶⁾の透水係数および間隙率

地層区分	記号	風化・緩み区分毎の水理特性							
		風化・緩み区分1		風化・緩み区分2		風化・緩み区分3		新鮮部	
		(著しい風化・急斜面に生じた著しい緩みゾーン)		(重力の影響で斜面に生じた深い緩みゾーン)		(構造運動で生じたわずかな緩みゾーン)			
		透水係数	有効	透水係数	有効	透水係数	有効	透水係数	有効
(m/s)	間隙率	(m/s)	間隙率	(m/s)	間隙率	(m/s)	間隙率		
陸域に分布する表土層：地表から厚さ 1m	S	1.00E-03	0.4						
海底堆積物：海底から厚さ 20m	MR	1.00E-06	0.2						
湖沼堆積物：湖底から厚さ 10m	LD	1.00E-06	0.3						
湖成層 湿地堆積物	AC	1.00E-08	0.15						
扇状地 崖錐 砂丘 モレーン 沖積表層 琉球石灰 火山岩屑	AG	1.00E-04	0.2						
盛土 自然堤防 段丘 洪積の崖錐 更新世火山岩屑	DG	1.00E-05	0.2						
厚い洪積層	DS	1.00E-05	0.2						
鮮新統 洪積層下部	PP	1.00E-06	0.2	1.00E-06	0.15	1.00E-07	0.15	1.00E-08	0.05
鮮新統以外の第三紀層 (中新統砂岩を除く)	TA	1.00E-06	0.2	1.00E-07	0.15	1.00E-08	0.05	1.00E-08	0.05
中新統砂岩	TS	1.00E-06	0.2	1.00E-06	0.15	1.00E-07	0.1	1.00E-08	0.05
中生層 泥質部	PMA	1.00E-06	0.2	1.00E-08	0.02	1.00E-08	0.02	1.00E-09	0.01
中生層 砂質部	PMS	1.00E-06	0.1	1.00E-07	0.05	1.00E-07	0.05	1.00E-09	0.01
中生層 石灰岩	PML	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1	1.00E-08	0.02	1.00E-09	0.01
付加体 泥質部 玄武岩ブロック	ACM	1.00E-06	0.1	1.00E-08	0.05	1.00E-08	0.02	1.00E-09	0.01
付加体 砂質部	ACS	1.00E-06	0.1	1.00E-07	0.05	1.00E-07	0.05	1.00E-09	0.01
付加体 石灰岩ブロック 変成岩中の石灰岩を含む	ACL	1.00E-04	0.1	1.00E-04	0.1	1.00E-07	0.05	1.00E-09	0.01
付加体 チャート	ACC	1.00E-05	0.1	1.00E-07	0.05	1.00E-08	0.02	1.00E-09	0.01
オフィオライト	OF	1.00E-06	0.1	1.00E-09	0.02	1.00E-10	0.005	1.00E-10	0.005
完新世 (H) の降下テフラ	AT	1.00E-05	0.3	1.00E-05	0.3	1.00E-05	0.3	1.00E-05	0.4
中新世～前期更新世 (Q1) の火山岩屑	MPVC	1.00E-05	0.1	1.00E-07	0.05	1.00E-07	0.05	1.00E-09	0.02
貫入岩	INT	1.00E-06	0.1	1.00E-07	0.05	1.00E-07	0.05	1.00E-08	0.05
第四紀の火山岩	QVL	1.00E-05	0.1	1.00E-05	0.05	1.00E-06	0.05	1.00E-07	0.05
中生代～新第三紀火山岩類 火砕流堆積物を含む	MTV	1.00E-05	0.1	1.00E-07	0.05	1.00E-07	0.05	1.00E-09	0.02
第四紀の火砕流堆積物	QPF	1.00E-05	0.2	1.00E-06	0.1	1.00E-07	0.05	1.00E-09	0.02
花崗岩 閃緑岩 花崗岩質片麻岩	GR	1.00E-05	0.2	1.00E-08	0.05	1.00E-09	0.01	1.00E-10	0.005
苦鉄質深成岩 変成岩等通常の基盤岩	CBR	1.00E-06	0.1	1.00E-08	0.05	1.00E-09	0.01	1.00E-10	0.005
砂質・珪質な基盤岩 (変成岩)	SBR	1.00E-05	0.1	1.00E-06	0.1	1.00E-08	0.02	1.00E-10	0.005

表 II-E.5-5 梅田 (1996) ⁽⁷²⁾と地圏テクノロジー (2015) ⁽⁷⁶⁾の対比結果 透水係数は m/s

梅田 (1996)				地圏テクノロジー (2015)			
単元	時代	岩石	透水係数	単元	透水係数	標準偏差	間隙率
Q-Hmsg	後期更新世～完新世	粘土、シルト、砂、礫	6.6E-06	MR	1.0E-06		0.20
Q-Hmsg	後期更新世～完新世	粘土、シルト、砂、礫	6.6E-06	LD	1.0E-06		0.30
Qtg	第四紀	礫、砂、シルト、粘土	6.2E-05	AG	1.0E-04		0.20
Q-Hmsg	後期更新世～完新世	粘土、シルト、砂、礫	6.6E-06	DG	1.0E-05		0.20
Qsmg	第四紀	礫、砂、シルト、粘土	1.1E-05	DS	1.0E-05		0.20
N-Qvp	鮮新世～更新世	溶岩、凝灰角礫岩、凝灰岩	1.0E-06	PP	1.8E-07	0.96	0.14
Nms	新第三紀	シルト、泥岩、頁岩	8.7E-07	TA	5.6E-08	0.96	0.11
Nms	新第三紀	シルト、泥岩、頁岩	8.7E-07	TS	1.8E-07	0.96	0.13
PG-Nmsg	古第三紀～中新世	砂岩、泥岩	2.0E-07	PMA	1.8E-08	1.26	0.06
Nms	新第三紀	シルト、泥岩、頁岩	8.7E-07	PMS	5.6E-08	1.26	0.05
P-Mls	古第三紀～白亜紀	石灰岩	4.5E-07	PML	5.6E-07	2.63	0.06
P-Mnscvp	古生代～前期中生代	頁岩、砂岩、チャート等	1.6E-06	ACM	1.8E-08	1.26	0.05
P-Mnscvp	古生代～前期中生代	頁岩、砂岩、チャート等	1.6E-06	ACS	5.6E-08	1.26	0.05
P-Mnscvp	古生代～前期中生代	頁岩、砂岩、チャート等	6.2E-05	ACC	5.6E-08	1.71	0.05
Sp	先第四紀	蛇紋岩、かんらん岩	1.6E-06	OF	1.8E-09	1.89	0.03
Qp	第四紀	火山灰、溶結凝灰岩	1.0E-06	AT	1.0E-05	0.00	0.33
N-Qvp	鮮新世～更新世	溶岩、凝灰角礫岩、凝灰岩	2.2E-06	MPVC	1.0E-07	1.63	0.06
Qv	第四紀	溶岩、凝灰角礫岩	1.0E-06	QVL	1.8E-06	0.96	0.06
Nvp	新第三紀	溶岩、凝灰角礫岩	1.6E-06	MTV	1.0E-07	1.63	0.06
Qp	第四紀	火山灰、溶結凝灰岩	1.0E-06	QPF	1.8E-07	1.71	0.09
Gr	先第四紀	花崗岩、花崗閃緑岩、片麻岩	2.2E-06	GR	1.0E-08	2.16	0.07
Sp	先第四紀	蛇紋岩、かんらん岩	1.0E-06	CBR	5.6E-09	1.71	0.04
P-Msch	古生代～前期中生代	結晶片岩	1.6E-06	SBR	5.6E-08	2.22	0.06

表 II-E.5-6 幌延における地下水流動解析の水理定数 今井ほか (2009) ⁽⁷⁷⁾

No	地質	透水係数(m/s)	間隙率(%)	比貯留係数(1/m)
1	古第三系+白亜系	1.0E-11	20	1.0E-05
2	増幌層+鬼土別層	5.0E-10	30	1.0E-05
3	稚内層	1.0E-07	50	1.0E-05
4	声間層	1.0E-07	50	1.0E-05
5	勇知層・更別層・第四系	1.0E-07	50	1.0E-05
6	大曲断層	1.0E-07	50	1.0E-05
7	サロベツ断層	1.0E-07	50	1.0E-05
8	S1-断層	1.0E-07	50	1.0E-05
9	S2-断層	1.0E-07	50	1.0E-05
10	S3-断層	1.0E-07	50	1.0E-05
11	S4-断層	1.0E-07	50	1.0E-05
12	表層 (地表より10m程度)	1.0E-07	50	1.0E-05

表 II-E.5-7 花崗岩地域における地下水流動解析の水力定数 熊本ほか (2007) (78)

地質・地質構造要素		透水係数		比貯留係数 Ss(1/m)
		水平方向 (断層面に平行) K _h (m/s)	鉛直方向 (断層面に直交) K _v (m/s)	
堆積岩	瀬戸層群	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05
	瑞浪層群	8.8E-08	8.8E-10	1.0E-06
	生俵累層	3.2E-09	3.2E-11	1.0E-06
	明世累層／本郷累層(本体)	4.0E-08	4.0E-08	1.0E-06
	明世累層／本郷累層(基底礫)	5.2E-07	5.2E-07	1.0E-06
	土岐夾炭累層(本体)	9.0E-08	9.0E-08	1.0E-06
花崗岩	土岐夾炭累層(基底礫)	3.0E-06	3.0E-06	1.0E-06
	上部割れ目帯(UHFD)	2.2E-07	2.2E-07	5.0E-07
	低角度割れ目帯(LAFZ)	1.1E-06	1.1E-06	5.0E-07
不連続構造	下部割れ目低密度帯(LSFD)	3.2E-08	3.2E-08	5.0E-07
	月吉断層の主要部	1.0E-11	1.0E-11	1.0E-06
	月吉断層に伴う割れ目帯	4.2E-07	4.2E-07	1.0E-06
	MIZ1FZ02	9.2E-06	9.2E-06	1.0E-07
	DH2FZ03/MIZ1FZ04	2.4E-07	2.4E-07	1.0E-07
	MSB3FZ	9.3E-09	1.0E-11	1.0E-07
	2D MIZ1FZ06	9.3E-09	1.0E-11	1.0E-07
	IF_SB0_01	9.3E-09	1.0E-11	1.0E-07
トレース長3km以上の断層	5.6E-06	1.0E-11	1.0E-07	

表 II-E.5-8 対象地域での透水係数と文献値の比較

	梅田 (1996) (72)			地圏テクノロジー (2015) (76)	
	対象地域	全国の平均値		透水係数	単元
		透水係数	単元		
更新世後期～完新世	1.6E-06	6.20E-05	Qtg	1.0E-04	AG
更新世前期～中期	1.8E-05	1.00E-07	N-Qvp	1.8E-07	PP
新第三紀堆積岩	3.9E-05	8.70E-07	Nms	1.8E-07	TS
付加体	2.4E-06	1.60E-06	P-Mmscvp	1.8E-08	ACM
第四紀火山噴出物	8.7E-06	1.00E-06	Qp	1.0E-05	AT
新第三紀火山岩	8.8E-07	1.60E-06	Nvp	1.0E-07	MTV
第四紀火山岩	6.5E-06	1.00E-06	Qp	1.0E-07	MPVC

③ 深度方向での透水係数の変化

図 II-E.5-4 で示したように対象地域の透水係数は深度方向に対して変化し、一般に深度が大きくなるほど透水係数は小さくなっている。対象地域のデータでは 300~1,000m 程度の地下では表層付近の 3~4 桁程度まで透水係数は小さくなっている。

図 II-E.5-10 は神岡鉱山における岩石（室内試験）と岩盤（原位置試験）の透水係数と深度の関係を示した。室内試験の透水係数は一般に原位置試験よりも小さな値を示し、木下ほか（1993）⁽⁷⁹⁾でも 2~6 桁程度透水係数が小さく求められている。また、原位置測定に比較して室内試験での透水係数はばらつきの小さいデータが取得されている。

一方、原位置試験では浅層の透水係数に対し、1,000m 地下では 4 桁程度透水係数が小さく、深度によって岩盤の透水係数が大きく変化することを示している。

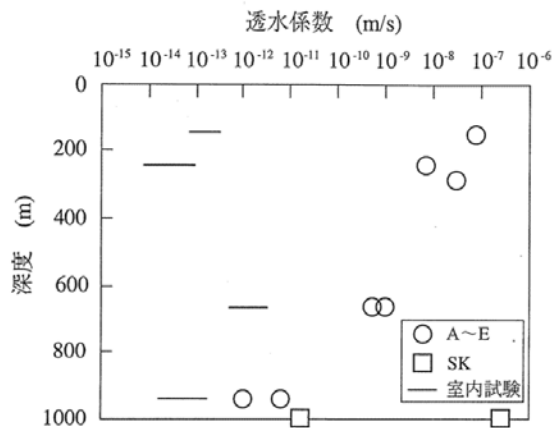


図 II-E.5-10 神岡鉱山における岩石・岩盤の透水係数と深度 木下ほか（1993）⁽⁷⁹⁾

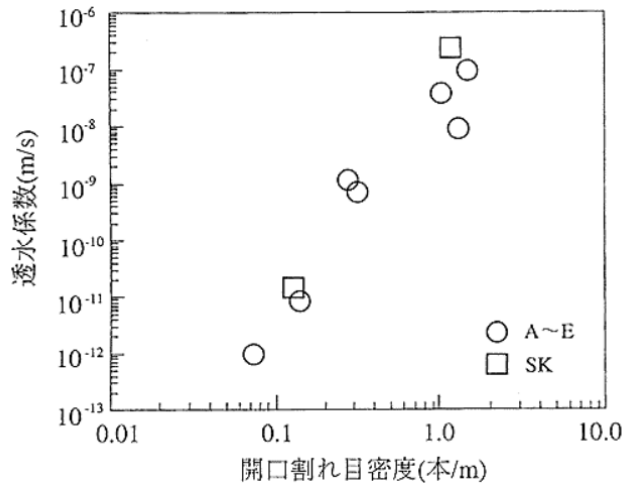


図 II-E.5-11 岩盤の透水係数と開口割れ目密度の関係 木下ほか（1993）⁽⁷⁹⁾

図 II-E.5-11 に木下ほか（1993）⁽⁷⁹⁾による神岡高山での開口性割れ目密度と岩盤の透水係数の関係を示した。この図から開口性割れ目の密度が透水係数に大きく影響し、固結した岩石では岩石自体の透水係数よりも岩盤の亀裂状態で透水係数が決定されることを示している。したがって、火山岩、深成岩あるいは固結した堆積岩類の岩相による透水係数の変化は $10^{-6} \sim 10^{-9} \text{m/s}$ 程度の範囲であるが、同じ岩石であっても亀裂密度の変化（深度の変化）によっても、透水係数が 3~4 桁程度変化してしまう。よって、岩石による透水係数の推定も重要であるが、深度方向の透水係数の変化も同程度留意すべきであることを示している。

④ 透水係数の検討結果

対象地域は完新世～更新世後期堆積物、更新世前期～中期堆積岩、新第三紀堆積岩類、付加体、第四紀火山噴出物、第四紀火山岩類、第三紀火山岩類、および深成岩の8単元に分けられる。表 II-E.5-9 に検討結果を示した。

表 II-E.5-9 対象地域の透水係数の検討結果

	完新世、更新世後期堆積物	更新世中期～前期堆積岩	新第三紀堆積岩	付加体	第四紀火山噴出物	新第三紀火山岩	第四紀火山岩	花崗岩
①梅田(1996) ⁽⁷²⁾ の抜粋	2×10^{-6}	2×10^{-5}	4×10^{-5}	3×10^{-6}	9×10^{-6}	9×10^{-7}	7×10^{-6}	---
②その他文献	---	$2-7 \times 10^{-5}$	1×10^{-7}	---	---	---	---	---
③梅田(1996) ⁽⁷²⁾ 平均	6×10^{-5}	1×10^{-7}	9×10^{-7}	2×10^{-6}	1×10^{-6}	2×10^{-6}	1×10^{-6}	2×10^{-6}
④地圏テクノロジー(2015) ⁽⁷⁶⁾	1×10^{-4}	2×10^{-7}	2×10^{-7}	2×10^{-8}	1×10^{-5}	1×10^{-7}	1×10^{-7}	1×10^{-8}
⑤熊本ほか(2007) ⁽⁷⁸⁾	---	---	$1 \times 10^{-5-7}$	---	---	---	---	$1 \times 10^{-6-8}$
⑥今井ほか(2009) ⁽⁷⁷⁾	2×10^{-7}	1×10^{-7}	1×10^{-7}	---	---	---	---	---
検討結果	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-7}	1×10^{-7}	5×10^{-6}	1×10^{-7}	1×10^{-7}	1×10^{-7}

完新世～更新世の堆積物は①と④の中間とし、更新世前期～中期の堆積岩は野辺地層が砂を主とする堆積岩であり、②の文献値を参考として決定した。

新第三紀堆積岩は②の文献値を参考とした。付加体は③と④の中間を与えた。

火山噴出物は①、③、④の中間とした。火山岩類は④を参考とした。花崗岩は③、④、⑤の中間的な値を与えた。

(2) 間隙率

表 II-E.5-10 に小島・中尾 (1995) ⁽⁸⁰⁾による岩石の空隙率を示した。火成岩類や変成岩類では安山岩や片岩でやや空隙率が高いが他は数%程度となっており、空隙率の変動幅は小さい。したがって、これら岩石の空隙率は表 II-E.5-10 を参考にした。

一方、堆積岩のうち砂岩や頁岩は空隙率が 1~50%以上と非常に広い範囲の値を示している。

表 II-E.5-10 未風化岩の物理特性・力学特性

岩種	比重	空隙率 (%)	吸水率 (%)	圧縮強度 (MN/m ²)	
				乾燥試料	湿潤試料
火成岩類					
流紋岩	2.5-2.7	1.0-7.0	0.1-5.6	-	-
安山岩	2.2-2.7	2.0-11.0	0.1-4.9	127-141	100-115
玄武岩	2.2-2.8	0.1-9.9	0.1-9.9	-	-
花崗岩	2.5-2.7	0.1-2.8	0.2-1.6	139-244	128-240
閃緑岩	2.7-2.9	0.1-4.0	0.1-0.4	199-290	-
かんらん岩	2.7-3.0	0.0-2.0	0.0-0.3	-	-
堆積岩類					
砂岩	1.9-2.6	0.5-42.0	0.7-13.8	107-255	103-255
シルト岩	2.2-2.5	2.2-24.0	0.4-6.3	-	-
頁岩	2.3-2.7	2.9-55.0	0.2-6.1	66-112	-
碎屑岩(火山性)	2.5-3.0	0.1-7.0	-	110-138	-
碎屑岩(石灰岩性)	2.3-2.5	1.0-35.0	-	-	-
ドロマイト	2.5-2.7	0.3-25.0	0.3-1.2	-	-
サンゴ	2.5-2.7	1.0-19.0	0.2-1.0	-	-
チャート	2.6-2.7	1.0-4.0	0.1-3.0	111-238	87-183
石炭岩(硬質)	2.5-2.7	0.8-27.0	0.1-1.8	133-199	-
石炭岩(軟質)	2.3-2.5	4.0-42.0	0.3-4.1	-	-
変成岩類					
片岩および粘板岩	2.6-2.8	0.4-10.0	0.1-0.8	103-189	-
片麻岩	2.6-3.2	0.3-0.4	0.1-1.0	168-250	158-255
珪岩	2.6-2.7	0.8-7.0	0.1-0.8	-	-
大理石	2.4-2.7	0.1-6.0	0.1-1.0	146-193	-

対象地域で空隙率(ないし空隙比)が測定された文献としては、川越ほか(2008) ⁽⁸¹⁾がある。川越ほか(2008) ⁽⁸¹⁾では段丘を構成する野辺地層とこれを被う高館面構成層の空隙比として報告されており、これを空隙率に換算した。これら空隙率は 46~56%の範囲に収まり、それぞれの平均値は 50%前後とほぼ一定の値を示す。したがって、対象地域の第四紀層以降の堆積岩については空隙率を 50%として良いと推定される。新第三紀堆積岩についてのデータはないが、第四紀層以降の堆積岩の空隙率を参考に 50%と設定した。

表 II-E.5-10 には凝灰岩の空隙率が記載されていないが、中村ほか(2010) ⁽⁸²⁾によれば一般的な凝灰岩の空隙率は 20~53% (平均 33%) とされる。よって、表 II-E.5-10、表 II-E.5-11 および中村ほか(2010) ⁽⁸²⁾から対象地域の空隙率を表 II-E.5-12 とした。

表 II-E.5-11 対象地域で測定された空隙率

地質	空隙比	空隙率	平均	
野辺地層 更新世 前期~中期	1.09	52	51	川越ほか(2008) ⁽⁸¹⁾
	1.28	56		
	0.95	49		
	0.92	48		
高館面構成層 更新世後期	0.85	46	49	川越ほか(2008) ⁽⁸¹⁾
	1.1	52		
	0.99	50		

表 II-E.5-12 間隙率の検討結果

	完新世、 更新世後期 堆積物	更新世 中期～前期 堆積岩	新第三紀 堆積岩	付加体	第四紀 火山 噴出物	新第三紀 火山岩	第四紀 火山岩	花崗岩
間隙率 (%)	50	50	50	3	33	7	7	5
引用元	A	A	A	B	C	B	B	B

A : 表 II-E.5-11 B : 表 II-E.5-10 C : 中村ほか (2010) ⁽⁸²⁾

(3) 比貯留係数の推定

比貯留係数は水頭 (h) が 1 増加した場合に単位体積に取り込まれる、または排出される水の体積を表し、不圧地下水のときは 0 に等しくなり、通常 Ss で表される。地盤工学会 (2017) ⁽⁸³⁾の比貯留係数の解説によれば、一般には堆積圧縮率から比貯留係数を概算値として推定している場合が多いとしている。

$$E(\text{lb/ft}^2) : \text{体積圧縮係数} \rightarrow \text{比貯留係数 } \gamma_w/E(1/\text{ft})$$

比貯留係数のオリジナルは Domenico et al., (1965) ⁽⁸⁴⁾に委ねており、値自体は Jumikis (1962) ⁽⁸⁵⁾を修正したものとされている。

表 II-E.5-13 に代表的な岩石の比貯留係数を示す。日本では⑥の単位系が用いられている。

表 II-E.5-13 比貯留係数の代表値 地盤工学会 (2017) ⁽⁸³⁾から引用

Material	①E(lb/ft ³) (1)	②1/E(ft ³ /lb) (2) =1/①	③1/E(m ² /N) (2)参考 =②×(0.3048) ² /4.445 =②×0.02090	④1/E(1/bar) (2)参考 =③×10 ⁵	⑤γ _w /E=Ss (1/ft) (1) =62.4269/①	⑥Ss(1/m) =⑤/0.3048 =⑤×3.2808
Plastic clay	1×10 ⁴ ~8×10 ⁴	1×10 ⁻⁴ ~1.25×10 ⁻⁵	2×10 ⁻⁶ ~2.6×10 ⁻⁷	2×10 ⁻¹ ~2.6×10 ⁻²	6.2×10 ⁻³ ~7.8×10 ⁻⁴	2.0×10 ⁻² ~2.6×10 ⁻³
Stiff clay	8×10 ⁴ ~1.6×10 ⁵	1.25×10 ⁻⁵ ~6.25×10 ⁻⁶	2.6×10 ⁻⁷ ~1.3×10 ⁻⁷	2.6×10 ⁻² ~1.3×10 ²	7.8×10 ⁻⁴ ~3.9×10 ⁻⁴	2.6×10 ⁻³ ~1.3×10 ⁻³
Medium hard clay	1.6×10 ⁵ ~3×10 ⁵	6.25×10 ⁻⁶ ~3.33×10 ⁻⁶	1.3×10 ⁻⁷ ~6.96×10 ⁻⁸	1.3×10 ⁻¹ ~6.96×10 ⁻³	3.9×10 ⁻⁴ ~2.08×10 ⁻⁴	1.3×10 ⁻³ ~6.82×10 ⁻⁴
Loose sand	2×10 ⁷ ~4×10 ⁵	5×10 ⁻⁶ ~2.5×10 ⁻⁶	1×10 ⁻⁷ ~5.2×10 ⁻⁸	1×10 ⁻² ~5.2×10 ⁻³	3.1×10 ⁻⁴ ~1.5×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻³ ~4.9×10 ⁻⁴
Dense sand	1×10 ⁸ ~1.6×10 ⁶	1×10 ⁻⁶ ~6.25×10 ⁻⁷	2×10 ⁻⁸ ~1.3×10 ⁻⁸	2×10 ⁻³ ~1.3×10 ⁻³	6.2×10 ⁻⁵ ~3.9×10 ⁻⁵	2.0×10 ⁻⁴ ~1.3×10 ⁻⁴
Dense sandy gravel	2×10 ⁹ ~4×10 ⁶	5×10 ⁻⁷ ~2.5×10 ⁻⁷	1×10 ⁻⁸ ~5.2×10 ⁻⁹	1×10 ⁻³ ~5.2×10 ⁻⁴	3.1×10 ⁻⁵ ~1.5×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁴ ~4.9×10 ⁻⁵
Rock, fissured, jointed	3×10 ⁹ ~6.25×10 ⁷	3.33×10 ⁻⁷ ~1.6×10 ⁻⁸	6.96×10 ⁻⁹ ~3.3×10 ⁻¹⁰	6.96×10 ⁻⁴ ~3.3×10 ⁻⁵	2.08×10 ⁻⁵ ~1×10 ⁻⁶	6.8×10 ⁻⁵ ~3.3×10 ⁻⁶
Rock, sound	6.25×10 ⁷ <	1.6×10 ⁻⁸ >	3.3×10 ⁻¹⁰ >	3.3×10 ⁻⁵ >	1×10 ⁻⁶ >	3.3×10 ⁻⁶ >
Water @25°C	—	2.3×10 ⁻⁸	4.8×10 ⁻¹⁰	4.8×10 ⁻³	—	—

表 II-E.5-6 に示した今井ほか (2009) ⁽⁷⁷⁾では比貯留係数を古第三紀～完新世、断層を含めすべて 10⁻⁵ (1/m) で設定している。表 II-E.5-7 に示した熊本ほか (2007) ⁽⁷⁸⁾では瀬戸層群を 10⁻⁵で、瑞浪層群を 10⁻⁶、花崗岩類を 5×10⁻⁷で設定しており、透水係数が小さくなると比貯留係数も小さくなる設定としている。ただし、比貯留係数は感度が鈍いためか、透水係数に比較してかなり大まかな設定となっている。

対象地域では主として中新世～鮮新世の堆積岩が卓越し、表 II-E.5-7 の熊本ほか (2007) ⁽⁷⁸⁾の堆積岩類と同時代であることから、これを参考として比貯留係数を設定した。

表 II-E.5-14 比貯留係数の検討結果

	完新世、更新世後期堆積物	更新世中期～前期堆積岩	新第三紀堆積岩	付加体	第四紀火山噴出物	新第三紀火山岩	第四紀火山岩	花崗岩
比貯留係数	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-05	1.00E-06	1.00E-06	5.00E-07
引用元	幌延表層	土岐瀬戸層群	土岐瑞浪層群	土岐瑞浪層群	土岐瀬戸層群	土岐瑞浪層群	土岐瑞浪層群	土岐花崗岩類

App.II の参考文献

- (1) SKB, Safety analysis for SFR. Long-term safety. Main report for the safety assessment SR-PSU, Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB TR-14-01 (2014).
- (2) J. G. Holmen, M. Stigsson, Modelling of future hydrogeological conditions at SFR, Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB R-01-02 (2001).
- (3) Abarca, E., Idiart, A., de Vries, L. M., Silva, O., Molinero, J., von Schenck H. Flow modelling on the repository scale for the safety assessment SR-PSU, Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB TR-13-08 (2013).
- (4) Odén, M., Follin, S., Öhman, J., Vidstrand, P., SR-PSU Bedrock hydrogeology. Groundwater flow modelling methodology, setup and results, Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB R-13-25 (2014).
- (5) SKB, Site description of the SFR area at Forsmark at completion of the site investigation phase, SDM-PSU Forsmark, Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB TR-11-04 (2013).
- (6) Curtis, P., Markström, I., Petersson, J., Triumf C-A, Isaksson, H., Mattsson, H., Site investigation SFR. Bedrock geology, Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB R-10-49 (2011).
- (7) SKB, Climate and climate related issues for the safety assessment SR-PSU, Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB TR-13-05 (2014).
- (8) Lindborg, T., Brydsten, L., Sohlenius, G., Strömgren, M., Andersson, E., Löfgren, A., Landscape development during a glacial cycle: modeling ecosystems from the past into the future, *Ambio* 42, 402–413 (2013).
- (9) Öhman, J., Follin, S., Odén, M., SR-PSU Hydrogeological modelling. TD11 – Temperate climate conditions, Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB P-14-04 (2014).
- (10) SKB, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, <https://www.skb.com/skb-swedish-nuclear-fuel-and-waste-management-company/>.
- (11) Joyce, S., Simpson, T., Hartley, L., Applegate, D., Hoek, J., Jackson, P., Swan, D., Marsic, N., Follin, S., Groundwater flow modelling of periods with temperate climate conditions – Forsmark, Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB R-09-20 (2010).
- (12) SKB, Data report for the safety assessment SR-Site, Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB TR-10-52 (2010).
- (13) SKB, Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-Site, Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB TR-10-49 (2010).
- (14) Brydsten, L., Strömgren, M., A coupled regolith-lake development model applied to the Forsmark site, Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB TR-10-56 (2010).
- (15) 電気事業連合会・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, p.590 (2005).
- (16) 日本原子力研究開発機構, 平成 21 年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 (2010).
- (17) 佐藤治夫, 高レベル放射性廃棄物地層処分における緩衝材の核種移行抑制機能, *Journal of MMIJ*. 125 (2009) pp.1–12.
- (18) 日本原子力研究開発機構, 平成 19 年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 (2008).
- (19) 日本原子力研究開発機構, 平成 20 年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 (2009).
- (20) T. Yamaguchi, F. Yamada, K. Negishi, S. Hoshino, M. Mukai, T. Tanaka, S. Nakayama, Development and verification of a reactive transport model for long-term alteration of bentonite-cement-seawater systems, *Physics and Chemistry of the Earth*. 33 (2008) pp.285–294.
- (21) 産業総合研究所, 地質調査所, 20 万分の 1 日本シームレス地質図 V2 (2017).
- (22) 宮内崇裕, 上北平野の段丘と第四紀地殻変動, *地理学評論*. 58(Ser. A)-8 (1985) pp.492–515.
- (23) Chinzei, K., Younger Tertiary geology of the Mabechi River valley, Northeast Honshu, Japan. *Jour. Fac. Sci. Univ. Tokyo. Sect. II*, 16 (1966) pp.161–208,.
- (24) Otuka, Y., Tertiary structures of the northwestern end of the Kitakami mountainland, Iwate Prefecture, Japan. *Bull. Earthq. Res. Inst.* 22 (1934) pp.568–638.
- (25) Otuka, Y., Mollusca from the Cainozoic system of eastern Aomori Prefecture, Japan. *Journal of the Geological Society of Japan*. vol.46 no.544 (1939) pp.23–31.
- (26) 北村信, 岩井武彦, 多田元彦, 青森県の新第三系, 青森県, 『青森県の地質』. (1972) pp.1–70.
- (27) 岩井淳一, 青森県東部の更新統, 東北大学地質学古生物学教室研究邦文報告, No.40, pp.1–31 (1951).

- (28) 中川久夫, 青森県の第四系. 青森県, 『青森県の地質』. (1972) pp.71-120.
- (29) 斎藤洋彦, 青森県七戸地方の山砂鉄鉱床一砂鉄鉱床の堆積環境と撓曲構造一. 岩石鉱物鉱床学会誌. 53 (1965) pp.176-187.
- (30) 鎮西清高, 北上山地北縁の新生界 I-岩手県福岡町付近の第三系について, 地質学雑誌. 67 (1958a) p.1-30.
- (31) 鎮西清高, 北上山地北縁の新生界 II-北上山地北端部鮮新統の層序, 地質学雑誌. 64 (1958b) p.526-536.
- (32) 建設省, 「むつ小河原地域大規模開発計調査 土地条件調査報告書」, 建設省国土地理院, 48p (1971).
- (33) 小池一之, 町田洋, 日本の海成段丘アトラス, 東京大学出版会, 122p (2001).
- (34) 石田裕樹, 守友常雄, 佐々木泰, 余裕深度処分の成立性確認に向けた地質環境調査について, 原子力バックエンド研究, Vol.13 No1, pp.37-48 (2006).
- (35) 野村勝弘, 谷川晋一, 雨宮浩樹, 安江 健一, 日本列島の過去約十万年間の隆起量に関する情報整理, JAEA-Data/Code 2016-015, 49p (2016).
- (36) 渡辺満久, 中田高, 鈴木康弘, 下北半島南部における海成段丘の撓曲変形と逆断層運動, 活断層研究. 29 (2008) pp.15-23.
- (37) 活断層研究会編「日本の活断層一分布図と資料」, 東京大学出版会, 363p (1980).
- (38) 活断層研究会編「新編日本の活断層一分布図と資料」, 東京大学出版会, 437p (1991).
- (39) 中田高, 今泉俊文編「活断層詳細デジタルマップ」, 東京大学出版会, 68p (2002).
- (40) 海上保安庁水路部, 5 万分の 1 海底地質構造図「むつ小河原」, 海上保安庁水路部 (1982).
- (41) 東北電力株式会社, 東通原子力発電所大陸棚外縁断層の評価について, 東北電力株式会社, 26p (1996).
- (42) 東北電力株式会社, 3. 敷地を中心とする半径 30km 範囲の断層 調査資料, 3-71, 55p (2013).
- (43) 地震調査研究推進本部「平成 7 年度 津軽山地西縁断層帯及び野辺地断層帯に関する調査成果報告書」, 青森県, 54p (1995).
- (44) 内閣府, 断層のモデル化 (2006).
- (45) 中塚正, 大熊茂雄, 日本空中磁気 DB による対地 1,500m 平滑面での磁気異常分布 データの編集, 地質調査総合センター研究資料集, 516 (2009).
- (46) 石田裕樹, 守友常雄, 佐々木泰, 余裕深度処分の成立性確認に向けた地質環境調査について, 原子力バックエンド研究. Vol.13 No1 (2006) pp37-48.
- (47) 藤原治, 柳田誠, 三箇智二, 守屋俊文, 地層処分から見た侵食作用の重要性一海成段丘を対象とした侵食速度の推定を例に一, 原子力バックエンド研究. vol11, No.2 (2005) pp139-146.
- (48) Ohmori, H., Relief structure of the Japanese mountains and their stages in geomorphic development, Bulletin of Department of Geography, University of Tokyo. 10 (1978) pp.31-85.
- (49) 藤原治, 三箇智二, 大森博雄, 日本列島における侵食速度の分布, サイクル機構技報. 5 (1999) pp.85-93.
- (50) 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 20 万分の 1 日本シームレス地質図.
- (51) 日本原子力研究開発機構, 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 地質環境長期安定性評価技術高度化開発, 194p (2019).
- (52) Sunamura, T., Matsukura, Y. and Tsujimoto, H., A Laboratory test of tractive abrasion of rock in water, Transactions of the Japanese Geomorphological Union. 3 (1985) pp.1-24.
- (53) 井上卓也, 村上泰啓, 伊藤 丹, 数馬田 貢, 流砂による軟岩侵食と岩の物性値の関係, 水工学論文集. 57 (2013) I_1039-1044.
- (54) 菊地宏吉, 地質工学概論, 土木工学社, pp.115-117 (1990).
- (55) 地盤工学会, 新編 土と基礎の設計計算演習, 土質工学会, 453p (2017).
- (56) 大沼善吉, 青森県むつ小川原地域の地質的特性について, 応用地質. 13, 1 (1972) pp.8-22.
- (57) 下北地域広域行政組合, 平成 29 年度 新ごみ処理施設建設予定地地質調査行, 無委託報告書, 19p (2017).
- (58) 野々村政一, 井浦智実, 崔瑛, 岸田潔, 木村 亮, 小土被り未固結地山における事前地山改良工による地山安定性の評価に関する一考察, 地盤工学ジャーナル. 8, 2 (2013) pp.165-177.

- (59) 根元直樹, 氏家良博, 青森県の地質, 大地, 学術会議資料. 50 (2009) pp.52-68.
- (60) 北村信 編, 新生代東北本州弧地質資料集, 第1~3巻, (株)宝文堂発行 (1986).
- (61) 上村不二雄, 対馬坤六, 斎藤正次, 5万分の1地質図幅説明書「蟹田」, 地質調査所, 39p (1959).
- (62) 藤井敬三, 油川地域の地質 地域地質研究報告 (5万分の1図幅), 地質調査所, 38p (1981).
- (63) 長森英明, 宝田晋治, 吾妻崇, 青森西部地域の地質 地域地質研究報告 (5万分の1図幅), 独立行政法人産業技術総合研究所, 75p (2013).
- (64) 村岡洋文, 長谷紘和, 黒石地域の地質 地域地質研究報告 (5万分の1図幅), 地質調査所, 134p (1990).
- (65) 上村不二雄, 陸奥川内地域の地質 地域地質研究報告 (5万分の1図幅), 地質調査所, 51p (1975).
- (66) 上村不二雄, 浅虫地域の地質 地域地質研究報告 (5万分の1図幅), 地質調査所, 45p (1983).
- (67) 工藤崇, 十和田地域の地質 地域地質研究報告 (5万分の1図幅), 地質調査所, 91p (2005).
- (68) 宝田晋治, 村岡洋文, 八甲田山地域の地質 地域地質研究報告 (5万分の1図幅), 独立行政法人産業技術総合研究所, 97p (2004).
- (69) 今井 功, 5万分の1地質図幅説明書「近川」, 地質調査所, 55p (1961).
- (70) 玉木賢策, 宮崎光旗, 本座栄一, 石橋嘉一, 湯浅真人, 上嶋正人, 木下泰正, 井上英二, 八戸沖海底地質図, 地質調査所 (1978).
- (71) 奥田義久, 石原丈実, 駒沢正夫, 下北半島沖海底地質図, 地質調査所 (1993).
- (72) 梅田浩司, 日本の地盤を対象とした透水係数データベースの作成 公開資料 PNC TN7450 96-002, 動力炉・核燃料開発事業団 東濃地科学センター. (1996) 103p.
- (73) 農業用地下水研究グループ「日本の地下水」編集委員会編, 日本の地下水. (1986) 1043p.
- (74) 地盤工学会, 地盤材料試験の方法と解説, 地盤工学会, 1156p (2009).
- (75) 佐藤邦明, 渡辺邦夫, 岩盤の透水性に与える種々の Crack 性状の影響, 埼玉大学工学部地盤水理年報. Vol.4 (1978).
- (76) 地圏テクノロジー, 国土水循環モデルの開発状況 第15回 GETFLOWS ユーザー会議資料, p48 (2015).
- (77) 今井久, 山下亮, 塩崎功, 浦野和彦, 笠博義, 丸山能生, 新里忠史, 前川恵輔, 地下水流動に対する地質環境の長期的変遷の影響に関する研究, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2009-001, 116p (2009).
- (78) 熊本創, 下茂道人, 三枝博光, 尾上博則, 孔間水理試験データを餅田地下水流動モデルのキャリブレーション, 第36回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会. (2007) 287-292.
- (79) 木下直人, 安部 透, 竹村友之, 横本誠一, 原位置透水試験による周辺岩盤の水理特性の調査, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集. (1993) pp.481-485.
- (80) 小島圭二, 中尾健児, 地質技術の基礎と実務, 鹿島出版会, 391p (1995).
- (81) 川越健, 浦越拓野, 池尻健, 湧水を伴う砂質土地山の安定性評価の検討, 土木学会第63回年次学術講演会. (2008) p.711-712.
- (82) 中村大, 後藤隆司, 伊藤陽司, 山下聡, 川口貴之, 片岡沙都紀, 乾燥状態と湿潤状態における岩石の強度の差異に関する研究, 地盤工学会技術報告集, 52, p.157-164 (2010).
- (83) 地盤工学会編, 比貯留係数 S_s の代表値 (資料 5-01), 地下水調査に用いる井戸理論式の整理及び解説 (2017年度版), (2017).
- (84) Domenico, P. A. and Mifflin, M. D., Water from low-permeability sediments and land subsidence, Water Resources Research. Vol.1, No.4 (1965) 563-576.
- (85) Jumikis, A.R., Soil Mechanics, D. Van Nostrand Book Company, p.384, New York (1962).

Appendix –Ⅲ 人工バリアの性能確認及び地下水等確認に関するモニタリング評価の妥当性に係る科学的・技術的知見の取得

Ⅲ-A ベントナイトブロックを用いた試験に関する詳細

Ⅲ-A.1 ベントナイトの最適含水比の把握

Ⅲ-A.2 膨潤圧と珪砂がベントナイトにかける荷重の関係に係る計算

Ⅲ-A.3 ベントナイト中に含まれる気相の量と水圧の関係に係る計算

Ⅲ-A.4 ベントナイトブロック内部の不均質性の確認

Ⅲ-B ベントナイトペレットを用いた場合の閉塞性の確認

Ⅲ-C 閉塞材挿入プローブの製作及び稼働試験

Ⅲ-D 原位置試験で実際に孔内へ定置したブロックの透水性

III-A ベントナイトブロックを用いた試験に関する詳細

III-A.1 ベントナイトの最適含水比の把握

目的

ベントナイトブロック（以下「ブロック」）を用いた試験では、非拘束条件下でのブロックの膨潤挙動と透水性を把握し、原位置試験に必要な経路閉鎖設計の立案に資するデータを取得することを目的としている。

昨年度、非拘束条件で膨潤させたブロックは体積が約 3.3 倍、密度が約 0.3 倍になると予想された。したがって、地上で作成したブロックを孔内で膨潤させると密度が最大で 0.3 倍まで低下すると想定される。一方で、原位置試験では花崗岩中に掘削されたボーリング孔（10MI25 号孔）を埋め戻す計画であり、湧水割れ目の透水係数は 10^{-9} m/sec オーダーである（4.3.1 参照）。このことから、原位置試験への適用を念頭に置くと、有効ベントナイト密度が高いブロック、すなわち乾燥密度が高いブロックを作成する必要があると考えられた。また、ブロックの乾燥密度は成型時の圧縮圧力に比例して高くなるが、圧縮圧力が同じであってもベントナイトの含水比に応じて変化する⁽¹⁾。つまり、透水係数の低いブロックを作成するためには、圧縮圧力に応じた最適含水比を把握しておく必要がある。

これらのことを踏まえ、室内試験に先立ち、ブロックを成形する際の条件を決めるための試験を実施した。具体的には、異なる初期含水比のベントナイトを圧縮成型し、乾燥密度が高くなる条件を選出した。

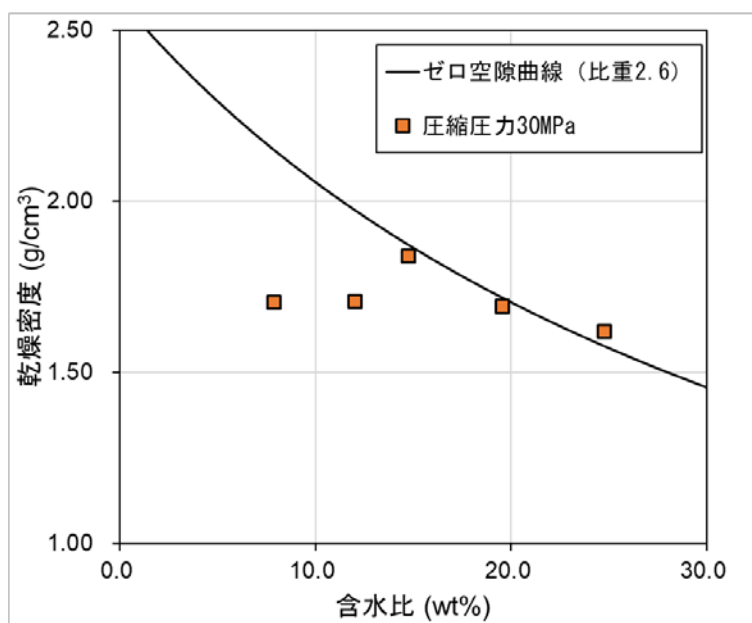
手順

材料は粉末ベントナイト（クニミネ工業社製クニゲル V1）100%と蒸留水である。これらの材料をミキサーで混合し、ナイロン型枠に入れ、油圧機で 15 分間以上プレスしてブロック状に成型した。圧縮圧力は、ナイロン型枠の耐圧性能を考慮して 30 MPa とした。ベントナイトの初期含水比が約 8%、12%、15%、20%、25%になるように、ベントナイトに加える蒸留水の量を調整した。

ブロックの高さは、室内試験で用いるセルの大きさとブロックの膨潤後の高さを考慮して、5 cm とした。ブロックの直径は 55 mm とした。

結果

それぞれの含水比になるよう調整したブロックの成型後の乾燥密度を付図III-A.1-1 に示す。この結果から、含水比が約 15%の場合に乾燥密度が最大になることが分かった。この結果を踏まえ、本事業の室内試験および原位置試験に用いるブロックは、初期含水比が最適含水比である 15%となるように調整した。なお、この条件で作成したブロックの乾燥密度は $1.6\sim 1.8$ g/cm³となる。



付図III-A.1-1 初期含水比と作成後のベントナイトブロックの乾燥密度の関係

III-A.2 膨潤圧と珪砂がベントナイトにかかる荷重の関係に係る計算

目的

4.2.1 で実施した室内試験では、ケース②（ベントナイトの膨潤後に砂を投入したケース）の直径 55 mm のブロックは、ケース①（砂を投入しなかったケース）の 55 mm のブロックの結果と比較して、透水係数が低く、有効ベントナイト密度が高い値を示した。この原因として、有効ベントナイト密度が高い値を示した原因として、ブロックの上位に珪砂を投入したことにより、ブロックの膨潤が抑制されたと推測される。

この膨潤の抑制は、珪砂の重量によるものと、珪砂が試験セルの上フタに達して物理的にブロックの膨潤を止めたことの 2 つの要因が考えられた。そこで、ブロックの膨潤圧を計算し、珪砂の重量と釣り合うかどうかを考察した。

計算結果

ブロックの膨潤圧は、菊池・棚井²⁾に基づき以下の式で算出した。

$$\sigma_{clay} = \exp(3.94\rho^3 - 13.71\rho^2 + 18.06\rho - 9.60) : [0.50 \leq \rho \leq 2.00] \quad (1)$$

ここで、 σ_{clay} はブロックの膨潤応力 (MPa)、 ρ は有効粘土密度 (Mg/m^3) である。なお、菊池・棚井²⁾は、本事業と粉末ベントナイト（クニゲル V1）を使用し、有効粘土密度を用いて式(1)を導出している。このことから、この計算では有効粘土密度を計算に用いる。ケース②において膨潤後のブロックを測定して得られた有効粘土密度である $0.6 \text{ g}/\text{cm}^3$ を代入すると、ブロックの膨潤圧は約 0.03 MPa (30 kPa) と算出された。次に、珪砂がブロックにかかる応力を計算する。珪砂がブロックにかかる応力は以下の式(2)(3)で表される。

$$\sigma_{sand} = F/A \quad (2)$$

$$F = 9.8W \quad (3)$$

ここで、 σ_{sand} は珪砂がブロックに負荷する応力 (MPa)、 F は荷重 (N)、 A は断面積 (mm^2)、 W は珪砂の重さ (kg) である。また、間隙が飽和している状態における砂の単位体積あたりの水中重量は以下の式(4)で表される。

$$\gamma_{sub} = (G_s - 1)/(1 + e) \times \gamma_w \quad (4)$$

ここで、 γ_{sub} は水中重量 (g)、 G_s は珪砂粒子の比重 (g/cm^3)、 e は間隙比、 γ_w は水の単位体積重量 (g/cm^3) である。投入した珪砂の間隙比は以下の式(5)で表される。

$$e = (S_{tot} - S_s)/S_s \quad (5)$$

ここで、 S_{tot} は珪砂の充填区間全体の体積 (cm^3)、 S_s は珪砂のみの体積 (cm^3) である。珪砂の充填区間が円柱状であるとする。セルの内径が 74 mm、投入した珪砂の重量が 300 g、珪砂の充填区間の高さが 50 mm であり、珪砂の粒子密度を $2.7 \text{ g}/\text{cm}^3$ ⁽³⁾ とすると、珪砂の水中重量が 98 g、珪砂がブロックにかかる応力が約 0.0002 MPa (0.2 kPa) と算出された。この値はブロックの膨潤圧よりも 2 オーダー低い。

以上の計算結果より、300g の珪砂の重量のみでは、有効粘土密度が約 $0.6 \text{ g}/\text{cm}^3$ のブロックの膨潤を抑制できないと考えられる。したがって、ケース②においてブロックの膨潤が抑制されたのは、ブロックにより持ち上げられた珪砂がセル上部まで到達したためであると推測される。

III-A.3 ベントナイト中に含まれる気相の量と水圧の関係に係る計算

目的

4.2.2の室内試験では、膨潤途中のブロックに割れ目が発生した。この割れ目内は空気で満たされていた。圧縮成型したベントナイトブロック中に空気が存在することは既往研究でも言及されていることから、割れ目内の空気はブロック中に存在していたものと推定される。

割れ目は、各々が連続することで水みちとなり得ることから、その体積を想定することが重要になると考えられる。一方で、実際にボーリング孔内へブロックを設置した場合、ブロックには水深に応じた水圧がかかるため、割れ目内に含まれる空気も水圧に応じて圧縮され、割れ目の大きさが変化すると想定される。そこで、ブロック中に存在する空気の体積を計算し、地下に定置した場合に割れ目中の空気が残存するかどうかを推測した。

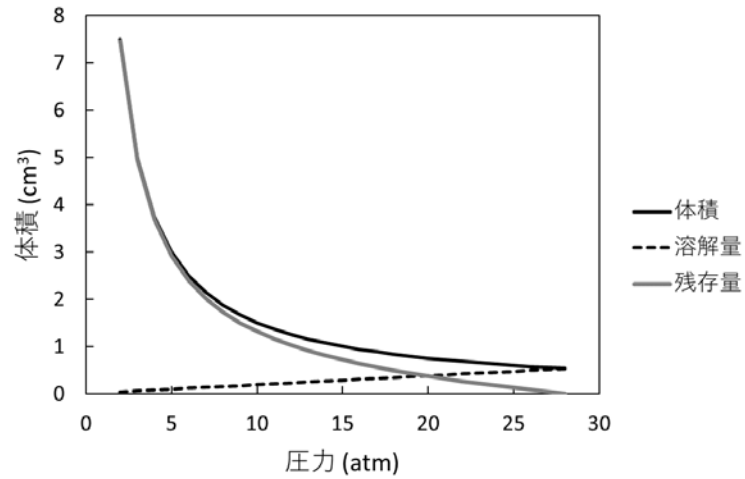
計算結果

膨潤前のブロック中に入っている空気の体積は、密度と含水比から算出できる。ここでは、4.2.2の試験で用いた直径 63 mm、長さ 10 cm のブロックを計算の対象とする。作成した供試体毎にばらつきはあるが、計算上、粘土粉末の粒子密度を 2.6 g/cm^3 、重量を 630 g、体積を 310 cm^3 、含水比を 15% とする。この条件の場合、水分量は 85 g となり、水の密度を 1 g/cm^3 とするとその体積は 85 cm^3 と算出される。空気の重量は小さいため無視できるとすると、残りの 545 g は粘土となる。545g 土の粒子密度 (2.6 g/cm^3) から粘土の体積は 210 cm^3 と算出される。したがって、ブロック 1 つに含まれる空気の体積は約 15 cm^3 ($310 - 210 - 85 = 15$) と算出される。

ここで、空気の水への溶解量を計算する。空気を窒素 8 : 酸素 2 と仮定し、1 L の水に対する窒素と酸素の溶解量 (20°C 、1 atm) をそれぞれ 0.016 cm^3 と 0.031 cm^3 とする⁽⁴⁾と、空気の溶解量は $0.019 \text{ cm}^3/\text{L}$ となる。したがって、ブロックに含まれる 15 cm^3 の空気を溶解させるためには、約 789 L の水が必要になると計算される。一方で、気体の体積と溶解量は圧力に関係するため、ブロックを定置した水深によってその挙動が異なると想定される。例えば、深度 100m にブロックを定置した場合は水圧が約 10 atm となるため、空気の体積はボイルの法則により 1.5 cm^3 に、水への溶解量はヘンリーの法則により $0.19 \text{ cm}^3/\text{L}$ と算出される。

仮に、今回の現場試験と同様に孔径 86 mm のボーリング孔に直径 63 mm のベントナイトブロックを定置した場合、孔壁とベントナイトの間に存在する水量は 10cm の区間に対して 270 mL と算出される。このことから、例えば水深 100m (10 atm) に長さ 10 cm のブロックを定置した場合は、水圧による気相の圧縮と溶解を踏まえると約 1.4 cm^3 の空気がブロック中に残存すると推定される。この残存量は水深=圧力に関係しており (付図III-A.1-1)、計算上は、圧力が 28 atm を超える (水深 280m 以深) とブロックに含まれていた空気が全て地下水に溶解する。

ただし、空気の溶解量は地下水中に溶存する酸素および窒素の量に依存しており、上記の例は地下水に窒素や酸素が溶存していないことが前提の計算結果である。例えば原位置の地下水が窒素に飽和している場合は、窒素は水圧に応じて圧縮されるが溶解はしないと想定される。



付図III-A.3-1 水圧が変化した際にブロック中に残る空気の種類

以上のことから、経路閉鎖設計において設定したベントナイトの設置深度に応じて、実際の孔内においてもブロック中の空気は残存する可能性はあると考えられる。この割れ目がベントナイトの閉塞性能に与える影響に関する知見を収集し、経路閉鎖設計へ反映する点が課題として残されている。

III-A.4 ベントナイトブロック内部の不均質性の確認

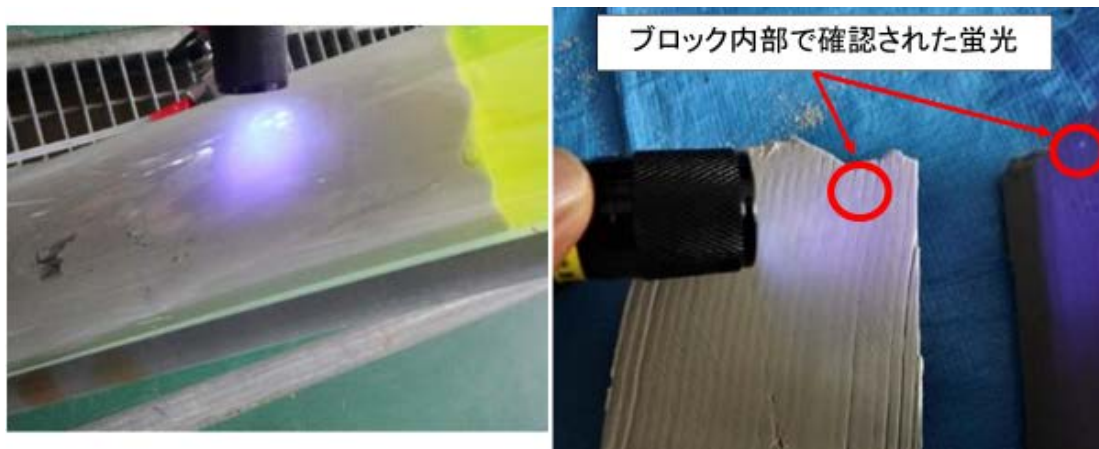
目的と手順

斜め孔に定置して偏芯したベントナイトブロック（以下「ブロック」）を対象とした透水試験（本文 4.2.2 参照）では、ブロックが不均質に膨潤してその内部に水みちが形成されているかを確認するため、注水試験で用いた水を蛍光染料で着色した（以下「着色水」）。着色水の分布は目視および紫外線照射（ブラックライト使用）で確認した。

結果

注水試験時には、ブロックとアクリル管の境界部を選択的に通過する着色水は認められなかった（付図III-A.4-1）。したがって、ブロックとアクリル管の境界部は水みちになっていないと考えられる。

注水試験後に取り出して切断したブロックの断面を観察したところ、割れ目や空隙のような構造は認められなかった。また、切断したブロックの断面を紫外線照射して確認した結果、複数個所で蛍光の輝点を確認されたものの、水みちのような連続した構造は認められなかった。このことは、偏芯した状態かつ縦に割れたブロックを斜め孔に定置して膨潤させたとしても、その内部に水みちが形成されるような不均質な膨潤は生じないことを示す。



付図III-A.4-1 紫外線を照射したブロックの様子

III-B ベントナイトペレットを用いた場合の閉塞性の確認

目的と手順

昨年度の文献調査では、石油井の閉塞方法としてベントナイトペレット（以下「ペレット」）を用いた実績があることを報告した。そこで本事業では、ペレットの透水性を把握するため、市販のペレット（ベントナイト産業社製ペルプラグ）を用いて、ペレット単体の透水性の確認と、ペレット充填部の上位に珪砂を投入した際の透水性を確認した。

試験条件は、ブロックでの試験と同様である。アクリルセルの底に $0.45\ \mu\text{m}$ のメンブレンフィルターと珪砂（厚さ $1\ \text{cm}$ ）を敷き詰めて、ペレットを投入した。その後セル内を水で満たし、ペレットの膨潤過程を観察した。膨潤期間は 7 日間とし、膨潤後に簡易透水試験を実施した。簡易透水試験ではセル内を $0.2\ \text{MPa}$ に加圧し、下流側から流出する水の流量と時間を計測し、式(1)に基づいて透水係数を算出した。

試験は以下の 7 ケースで実施した；ケース①：ペレットのみ（以下「砂なし」）、ケース②：浸水直後に珪砂を投入（以下「砂即投入」）、ケース③：浸水から 1 時間後に珪砂を投入（以下「1h 後に砂投入」）、ケース④：浸水から 2 時間後に珪砂を投入「2h 後に砂投入」、ケース⑤：浸水から 5 時間後に珪砂を投入「5h 後に砂投入」、ケース⑥：浸水から 7 時間後に珪砂を投入「7h 後に砂投入」、ケース⑦：浸水から 24 時間後に珪砂を投入「24h 後に砂投入」。試験に用いる珪砂の量は $300\ \text{g}$ とした。投入したペレットの量は、後から投入する珪砂の容積を考慮し、ケース①および②では $300\ \text{g}$ 、ケース③～⑦では $200\ \text{g}$ とした。

膨潤状況の確認結果

①砂なしのケースでは、ペレット同士の粒間をベントナイトが充填しつつ、全体的に鉛直上向きに膨潤した。膨潤速度はブロックと比較して早く、浸水から約 8 時間経過した以降は体積変化が認められなくなった（付図III-B-1）。

②砂即投入のケースでは、珪砂を入れた時点で、ペレット同士の粒間に珪砂が流れ込んだ（付図 2-2）。その後の膨潤速度はケース①と同様で、約 8 時間経過後に体積変化が認められなくなった。膨潤が収束した時点で、ペレット同士の粒間に流れ込んだ珪砂は粒間に残り続けていた（付図III-B-2）。

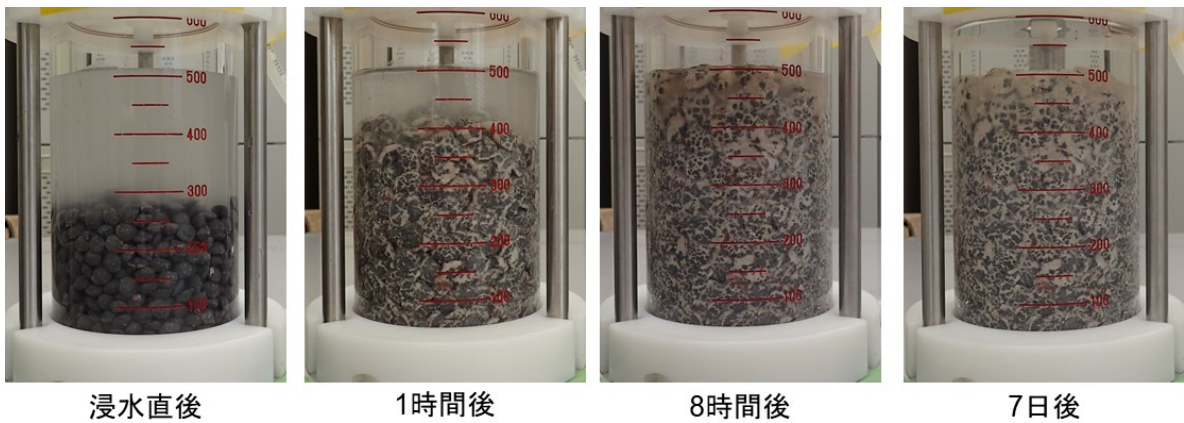
浸水してから 1 時間経過して以降に珪砂を投入したケース③～⑦については、珪砂がペレット同士の粒間に流れ込まず、全てペレットよりも上位に堆積した。また、各ケースにおいて、珪砂を投入した後のベントナイトの膨潤はほとんど認められなかった。ブロック試験の場合と異なり、③1h 後に砂投入のケースと④2h 後に砂投入のケースでは、15 日経過後も上端がセルの上フタに接触しなかった。ペレットには膨潤を遅延させる目的でコーティング処理が施してあり、その有効粘土密度を算出することができないため、膨潤圧と荷重の関係を計算することはできない。

閉塞性能の確認結果

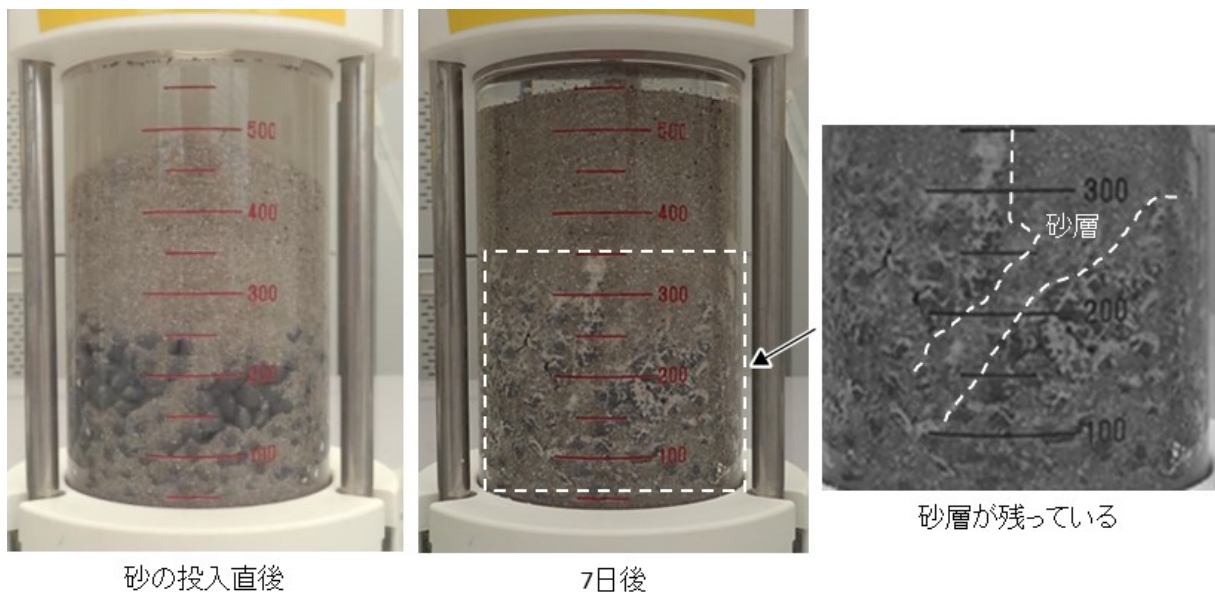
透水試験の結果と珪砂を投入した時間との関係を付図III-B-3 に示す。①砂なしのケースでは、ペレットの透水係数は $2.0 \times 10^{-8}\ \text{m/sec}$ であった。一方で、②砂即入れのケースでは、ペレットの透

水係数は 2.7×10^{-7} m/sec であり、ケース①と比較して1オーダー高い値を示した。ケース③～⑦のペレットの透水係数は $10^{-8} \sim 10^{-9}$ m/sec オーダーであり、ケース①と比較して同程度以下であった。

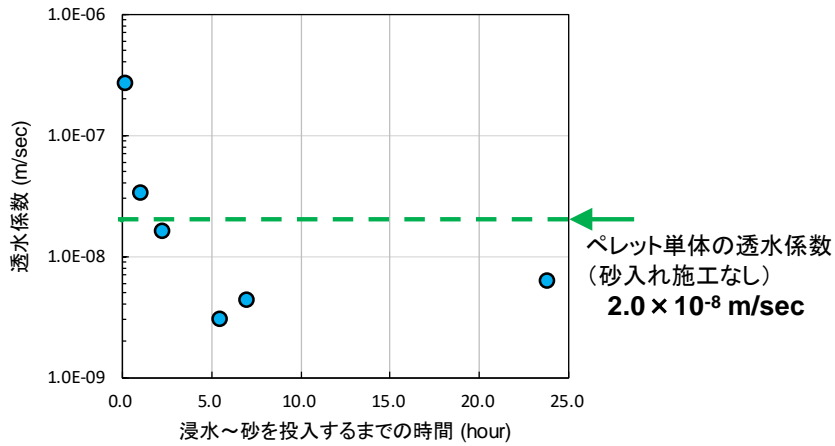
②砂即入れのケースでは、投入した珪砂がペレットの粒間に流れ込んでおり、透水係数が①砂なしのケースと比較して1オーダー高い。このことから、ペレットの粒間に流れ込んだ砂の層が水の流路になり、透水係数が高くなったと考えられた。一方で、ケース③～⑦の透水係数はケース①と同程度以下であった。これらのことから、ペレットの場合は浸水してから約1時間が経過する前に珪砂を投入すると透水性が高くなるが、1時間がすれば珪砂を投入してもペレットの透水性は上昇しないと考えられる。ただし、珪砂の投入タイミングが5時間を超えた以降、透水係数が徐々に上昇する傾向があることから、浸水から珪砂投入まで長時間経過した際にペレットの透水性が変化する可能性がある。



付図III-B-1 ペレットの膨潤の様子



付図III-B-2 ペレット浸水直後に砂を投入した場合のセル内の様子



付図III-B-3 ペレットの透水係数と浸水から珪砂投入までの時間との関係

以上の結果から、ペレットの場合は有効モンモリロナイト密度を算出できていないものの、本試験で用いたペレットを原位置における閉塞に用いた場合は $10^{-8} \sim 10^{-9}$ m/sec になると考えられた。つまり、岩盤の透水性が $10^{-8} \sim 10^{-9}$ m/sec と同程度または高い場合は、ペレットを用いた閉塞も適用できる可能性がある。

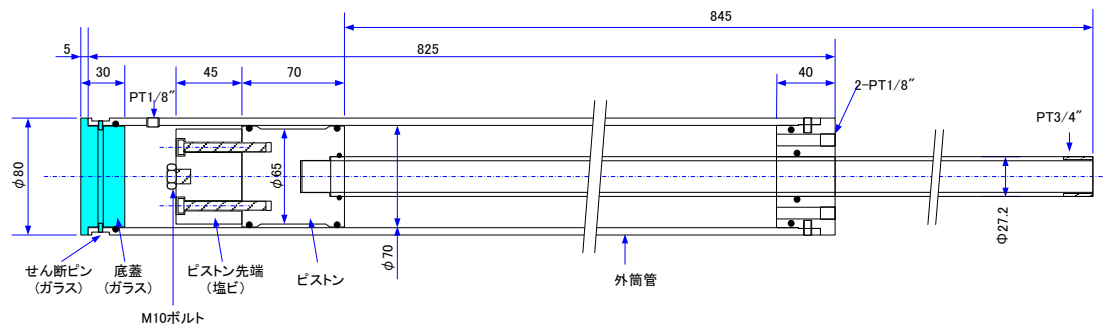
III-C 閉塞材挿入プローブの製作及び稼働試験

III-C.1 閉塞材挿入プローブの製作

昨年度の成果を踏まえ、閉塞材を搬送するための閉塞材挿入プローブ（以下「プローブ」）を製作した。プローブの構造を付図III-C.1-1に、製作したプローブを付図III-C.1-2に示す。

プローブは、試験孔（10MI25号孔）の孔径86mmに挿入可能であることを前提に外径 $\phi 80\text{mm}$ とし、ステンレス製とした。閉塞材の排出機能については、昨年度の実績を踏まえ、プローブ内部にピストンを有し、ピストン上部に注水することでピストンを下降させ、閉塞材をプローブ外に排出できる構造とした。坑道内で斜め下向き 30° のボーリング孔に、ピストンを最大まで引き上げて内部に閉塞材を収納した状態のプローブを挿入する場合、プローブの全長が2mを超えるとその挿入が困難になると想定された。このことを踏まえ、原位置試験において挿入可能な長さになるよう設計したところ、閉塞材の収納部は $\phi 66\text{mm}$ 、 $L=600\text{mm}$ となった。

プローブ下端は、閉塞材収納時には、底蓋で閉鎖する。底蓋は閉塞材を定置する際に孔内に残置されることから、化学的に安定なガラス製とした。また底蓋の固定はガラス製せん断ピン（ $\phi 3\text{mm}$ ）を使用し、閉塞材を装置外に排出する際には、せん断ピンを破断させる構造とした。プローブ上部には、パッカーおよび挿入用ロッドを接続する構造とした。使用するパッカーおよびロッドは4.3.1の定圧注水試験装置と共通とした。



付図III-C.1-1 閉塞材挿入プローブ 組立図



付図III-C.1-2 閉塞材挿入プローブ（左：組立前、右：組立後）

III-C.2 要素確認試験

製作したプローブについて、プローブの性能を確認する要素試験を実施した。

ピストン部への注水量とピストン変位量の関係を実測値から把握するための注水試験を実施した（付図III-C.2-1）。本試験では、プローブ内に閉塞材は収納していない。注水量はテストポンプの注水回数から算出した。試験の結果、ピストンを 10 cm 移動させるための注水量は約 330 mL と算出され、試験に使用するテストポンプの注水回数に換算すると 23 回に相当する。この結果を踏まえ、原位置試験では、テストポンプの注水回数でピストン変位量を管理することとした。なお閉塞材の長さを 600 mm とした場合、閉塞材を完全に排出するには 149 回の注水が必要である。

また、底蓋を固定するガラス製せん断ピンの破断圧力について確認する破断試験を実施した。試験方法は先の試験と同様とし、せん断ピンの破断圧力はテストポンプのブルドン管式圧力計にて計測した。せん断ピンの本数を 2 本、4 本および 8 本の 3 条件で実施した。また装置設置方向などの条件を変えて複数回実施した。破断試験の結果を付表III-C.2-1 に示す。ガラス製せん断ピンの破断圧力は、2 本の場合で 0.3 MPa、8 本使用した場合は 0.7~0.8 MPa となった。プローブにベントナイトブロックを 600 mm 収納したとしても 10 kg 程度となることから、せん断ピンの耐力はブロックを保持するのに十分であることが確認された。また底蓋種類や装置設置方向で、破断圧力に大きな差は確認されなかった。せん断ピン破断後、せん断ピンの破片などによるプローブの動作不良や、試験後のプローブ内部に顕著な傷などは確認されず、せん断ピン破断後もプローブが正常に作動することが確認された。

以上の要素試験の結果から、ガラス製底蓋およびせん断ピンは原位置での試験に必要な性能を有していることが確認された。原位置試験の際には、安全性や破断圧力を考慮しせん断ピン本数を 8 本とすることとした。



付図III-C.2-1 要素試験の状況（左：注水試験の様子、右：せん断ピン破断後の様子）

付表III-C.2-1 破断試験で得られたせん断ピンの破断圧力

ピン本数	底蓋種類	装置設置方向	破断時の圧力 (MPa)	破断時の荷重 (kgf)	プローブ内部
2	SUS蓋	鉛直	0.3	118	塩ビダミー
4	SUS蓋	鉛直	0.8	314	塩ビダミー
8	SUS蓋	鉛直	0.8	314	塩ビダミー
8	SUS蓋	水平下向き30度	0.8	314	塩ビダミー
4	ガラス蓋	水平下向き30度	0.5	196	ベントナイトブロック
8	ガラス蓋	水平下向き30度	0.7	275	ベントナイトブロック

III-C.3 作動確認試験

ボーリング孔を模擬した内径 $\phi 86$ mm のアクリル管でプローブの作動確認試験を実施した。アクリル管は 10MI25 号孔に合わせて水平下向き 30 度に設置し、管内に珪砂および水道水を入れた状態で試験を行った。試験はベントナイトブロック ($\phi 63$ mm、 $L \approx 100$ mm) を 1 個使用した場合と 2 個使用した場合の 2 回実施した。

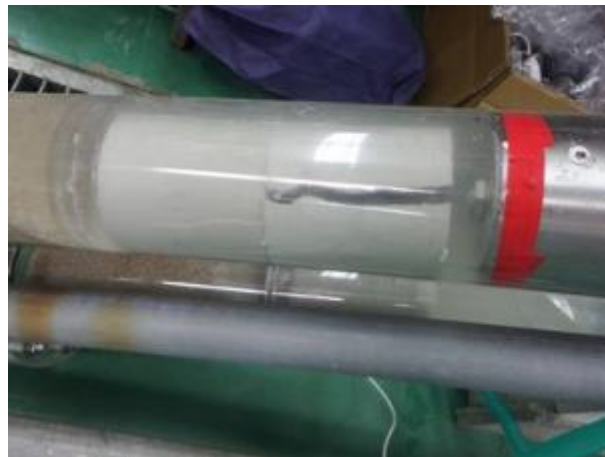
1 回目の試験は、ブロックを 1 個使用して実施した。ブロックの排出直後の状況を付図III-C.3-1 に示す。プローブの挿入およびブロックの排出に異常は確認されなかった。せん断ピンは 8 本使用し、破断時の圧力は約 0.6 MPa、破断後の注水量は 464 mL であった。ベントナイト排出後、約 24 時間後にプローブを回収したところ、ブロックがピストン下端と密着してプローブと同時にブロックも引き上げられた。そのため、アクリル管内の水を一度排水してからプローブをアクリル管から回収した後でブロックをプローブから引きはがし、ブロックをアクリル管内に再度定置してから水を溜め直した。この原因として、ブロックがアクリル管の壁に密着していなかったことに加え、プローブのピストン端面に凹凸がなく、ベントナイトが密着しやすい形状であったことが考えられる。この結果を踏まえ、ピストン端面に M10 ボルトを取り付けて、ベントナイトとの接着面積を減らす対策を施した。



付図III-C.3-1 ブロック 1 つで実施したプローブの作動確認試験の状況

2 回目の試験では、ブロックを 2 個使用して実施した。2 回目の試験では、排出されたブロック

のうち、上側のブロック（ピストンと接していたブロック）が割れている状況が確認された（付図III-C.3-2）。ブロックが割れた原因として、ピストン先端に M10 ボルトを追加した結果、ピストンの圧力がボルト先端に集中した結果と考えられる。プローブ内には高さ約 10 cm のブロック 6 個（約 60 cm）を入れて使用することを想定しており、製作したプローブを用いてブロックを 10MI25 号孔へ搬送・定置する作業において、最上部のブロックが破断する可能性が示された。ブロックの破断については、ブロック内部に水が入り内部の気相が抜けやすくなるとともに、膨潤がより早く進むと考えられ、その後の膨潤過程の観察と透水試験を実施した結果（4.2.2 参照）、ブロックが割れていない場合と同様の膨潤、低透水性を発揮することが確認された。



付図III-C.3-2 ブロック 2 つで実施したプローブの作動確認試験の状況

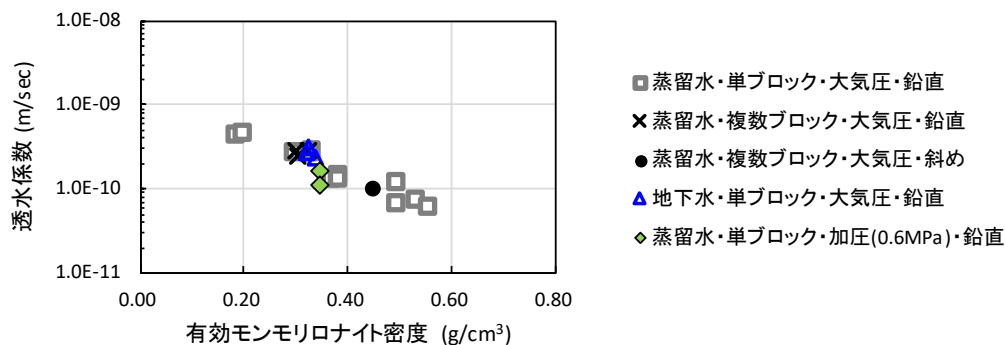
III-D 原位置試験で実際に孔内へ定置したブロックの透水性

閉塞材定置深度の直上にあたる 12~14 mabh の区間を対象とした、閉塞材の定置前および膨潤後の定圧注水試験の結果から、閉塞材の透水性について整理する。

当該区間の透水係数は、閉塞材の定置前は 5.2×10^{-11} m/sec、膨潤後は 1.6×10^{-11} m/sec 以下であった。当該区間の岩盤の透水係数は 10^{-11} m/sec オーダーであり、閉塞材の定置前後で大きく変化していない。また、閉塞材がパッカーと同程度の低透水性を発揮しており、その透水係数が 10^{-11} m/sec よりも低かったことが示された。一方、ブロックの仕様設計では、ブロックの透水係数を 10^{-10} m/sec オーダーとなるよう設計した。つまり、定置したブロックの実際の透水係数は、設計時よりも低い値になったと推測される。

この違いは、以下の理由から、ブロックの膨潤量の予測値と実際の違いによるものと考えられる。仕様設計の時点では、膨潤後のブロックの透水係数が 10^{-10} m/sec オーダーとなるよう、室内試験の結果（付図III-D-1）に基づき膨潤後のブロックの有効モンモリロナイト密度を 0.3 g/cm^3 以上と設定した。非拘束条件下で実施した室内試験の結果から、膨潤後のブロックが膨潤前と比較して体積が約 3.5 倍、密度が 0.3 倍に低下することを前提として、地上で調整するブロックの有効モンモリロナイト密度を 1.3 g/cm^3 以上と設定して調製した。他方、原位置試験では、ブロックの下端深度が 15.88 mabh、上端深度が 13.5 mabh であり、ガラス蓋を直径 63 mm、高さ 40 mm の円柱として計算すると、膨潤後のブロックの体積は約 2.4 倍になったと算出された。この時、ブロックが均等に膨潤したと仮定すると、その有効モンモリロナイト密度は 0.5 g/cm^3 、透水係数は 10^{-11} m/sec オーダーになると想定され、定圧注水試験の結果から推測された実際のブロックの透水係数のオーダーと一致する。つまり、原位置試験におけるブロックの膨潤量が材料設計時に想定した量よりも小さくなったことで、結果として透水係数が低くなったと考えられる。

このことから、適切な材料設計がなされたことの妥当性を確認するためには、原位置におけるブロックの膨潤量の予測方法に関する知見の取得が課題として残されている。



付図III-D.1 非拘束条件下でのブロックの有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係

Appendix III-D の参考文献

- (1) 小峰秀雄, 緒方信英, 塑性限界を導入した粘土の締固め特性の評価法の提案, 土木学会論文集. no.436/Ⅲ-16 (1991), pp.103-110.
- (2) 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, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8430 2004-2005(2005).
- (3) 地盤工学会, 土質試験 基本と手引き, 第2回改訂版, 丸善出版 (2017).
- (4) 国立天文台編, 理科年表, 丸善 (2010).

IV-A 平成 31 年度「廃棄物埋設における核種移行に係る性能評価に関する研究」
検討委員会名簿

	氏名	所属・職位
委員長	大江 俊昭	東電設計株式会社 顧問
委員	石田 哲也	東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 教授
〃	長田 昌彦	埼玉大学大学院 理工学研究科 環境科学・社会基盤部門 教授
〃	小崎 完	北海道大学大学院 工学研究院 エネルギー環境システム部門 教授
〃	須貝 俊彦	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 教授
〃	高橋 知之	京都大学 複合原子力科学研究所 原子力基礎工学研究部門 准教授
〃	林 武司	秋田大学 教育文化学部 地域文化学科 教授

検討委員会開催日

第 1 回 令和元年 6 月 21 日

第 2 回 令和元年 10 月 29 日

第 3 回 令和 2 年 2 月 21 日