

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確証技術開発

5 年報告書

平成 30 年 3 月

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

本報告書は、経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業として、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が実施した平成 25～28 年度地層処分技術調査等事業「地質環境長期安定性評価確証技術開発」及び平成 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「地質環境長期安定性評価確証技術開発」の 5 か年にわたる成果を取りまとめたものである。

目 次

1. はじめに	1
1.1 背景と目的	1
1.2 事業概要	2
1.2.1 地質環境長期変動モデルの開発	3
1.2.2 革新的要素技術の開発	6
2. 地質環境長期変動モデルの開発	10
2.1 統合数値モデル化、モデル検証及び不確実性の検討	10
2.1.1 長期変遷シナリオの整備	10
2.1.2 統合モデル構築のためのフローの提示	16
2.1.3 地下水流動状態の長期変動性評価に関する統合化データフローの提示	18
2.1.4 モデルの不確実性の定量化に向けた検討	19
2.1.5 モデルの妥当性の検討	22
2.1.6 モデルの可視化技術の提示	22
2.1.7 まとめ	23
2.2 個別モデル構築における検討	34
2.2.1 地形・地質モデル	34
2.2.2 水理モデル	41
2.2.3 地球化学モデル	47
2.2.4 地表環境モデル	53
3. 革新的要素技術の開発	60
3.1 後背地解析技術	60
3.1.1 背景と目的	60
3.1.2 個別要素技術の整備	62
3.1.3 事例研究による適用性の確認	71
3.1.4 まとめ	75
3.2 地殻変動予測技術	79
3.2.1 背景と目的	79
3.2.2 地殻変動の予測に係る不確実性（一様継続性）評価指標の検討	79
3.2.3 地殻変動シミュレーション技術の構築	81
3.2.4 地殻変動データの取得によるシミュレーションの妥当性の検討	84
3.2.5 まとめ	86
3.3 地下水涵養量推定技術	90
3.3.1 背景と目的	90
3.3.2 古気候・古地形を考慮した地下水涵養量の推定手法	90
3.3.3 事例研究による適用性の確認	91
3.3.4 まとめ	92
3.4 炭酸塩鉱物測定技術開発	97
3.4.1 背景と目的	97
3.4.2 放射年代測定法の開発	98

3.4.3 酸化還元電位測定技術の構築.....	101
3.4.4 地下水の年代測定技術の整備.....	104
3.4.5 まとめ.....	105
4. まとめ.....	109
謝辞.....	112
補遺 共同研究・外部発表リスト	

図 3.1-4 基盤岩試料の重鉍物組成・ジルコン中の Y_2O_3 量、ESR の Ti-Li 中心信号	63
図 3.1-5 地点 22 の堆積物試料の重鉍物組成・ジルコン中の Y_2O_3 量、 ESR の Ti-Li 中心信号	64
図 3.1-6 江若花崗岩と Cooma 花崗岩のモナザイトの PbO-ThO ₂ *プロットと年代計算結果	65
図 3.1-7 ESR 信号測定のための石英粒子の抽出フロー	66
図 3.1-8 OSL・TL 信号の特徴	66
図 3.1-9 基盤岩試料の OSL 信号のピーク強度比	67
図 3.1-10 OSL 年代測定結果	68
図 3.1-11 地点 22 における露頭観察結果及び 帯磁率異方性測定に基づく古流向の比較	69
図 3.1-12 段丘堆積物の柱状図と帯磁率異方性測定結果	70
図 3.1-13 土岐川流域の土岐砂礫層の柱状図及び重鉍物スクリーニングの結果	72
図 3.1-14 問寒別地区における帯磁率異方性測定による古流向の解析結果	73
図 3.1-15 幌延地域における重鉍物スクリーニングの結果	74
図 3.1-16 本事業において後背地解析への有効性を提示した技術	75
図 3.2-1 異なるデータより推定したせん断ひずみ速度	81
図 3.2-2 GEONET 点 020934 の鉛直変位時系列	82
図 3.2-3 二次元有限要素法によるシミュレーションのセットアップ	83
図 3.2-4 二次元有限要素法による 100 年間の粘弾性シミュレーション結果	83
図 3.2-5 30,000 年経過時のせん断ひずみ速度の深さ方向の分布	84
図 3.2-6 九州南部せん断帯付近の古地磁気の偏角分布	85
図 3.3-1 地域内における水収支の概念図	92
図 3.3-2 国内及び諸外国における年平均気温と年降水量の関係	93
図 3.3-3 年平均気温と実蒸発散量の関係	93
図 3.3-4 過去の河川流量推定の考え方	94
図 3.3-5 100 万年前の地形（山なしケース）を対象とした流路抽出結果	95
図 3.4-1 炭酸塩鉍物測定技術の開発に関する重要課題及び実施内容	98
図 3.4-2 ジルコン FC1 (1099 ± 0.6 Ma) の U-Pb 年代測定結果	99
図 3.4-3 方解石試料 CFC（左）と WC-1（右）の 元素・同位体イメージング分析結果	100
図 3.4-4 ウミツボミ試料の微小領域 U-Pb 年代測定結果	101
図 3.4-5 キレート樹脂を使用した希土類元素の濃縮方法	102
図 3.4-6 炭酸塩鉍物の微小領域分析における地質学的背景を 明らかにするための分析フローチャート	104

表 目 次

表 2.1-1	マトリクス形式による FEP の整理結果（汎用）	13
表 2.1-2	マトリクス形式による FEP の整理結果（山間部：東濃地域の例）	14
表 2.1-3	マトリクス形式による FEP の整理結果（平野部：幌延地域の例）	15
表 2.1-4	不確実性の反映方法	20
表 2.1-5	古地形の推定の概念化及び数値化（平野部：幌延地域の例）	21
表 2.1-6	水文環境の各構成要素の推定（山間部：東濃地域の例）	21
表 2.1-7	地下水流動解析の境界条件の設定例	21
表 2.2.1-1	地形・地質モデルにおける不確実性の整理	39
表 2.2.2-1	地下水流動状態の長期変動性評価に内在する不確実性	45
表 2.2.4-1	水文環境の各構成要素の推定結果（山間部：東濃地域を事例として）	57
表 2.2.4-2	水文環境の各構成要素の推定結果（平野部：幌延地域を事例として）	57
表 2.2.4-3	山間部における地表環境の状態の整理の結果 （山間部：東濃地域を事例として）	58
表 2.2.4-4	平野部における地表環境の状態の整理の結果 （平野部：幌延地域を事例として）	58
表 3.3-1	水文環境の各構成要素の推定結果（山間部：東濃地域）	94
表 3.3-2	水文環境の各構成要素の推定結果（平野部：幌延地域）	95
表 3.4-1	本節で記述する元素	98
表 3.4-2	理論式の適用条件の一覧	103

1. はじめに

1.1 背景と目的

本事業は、平成 25～28 年度地層処分技術調査等事業（地質環境長期安定性評価確証技術開発）及び平成 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（地質環境長期安定性評価確証技術開発）として、経済産業省資源エネルギー庁（以下、「資源エネルギー庁」という）から国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」という）が受託したものである。本報告書は、5 か年にわたる本事業の成果を取りまとめた報告書という位置づけである。

わが国においては、これまでの原子力発電の利用に伴って既に放射性廃棄物が発生しており、その処理処分対策を着実に進める必要がある。高レベル放射性廃棄物の地層処分計画を円滑に進めていくためには、地層処分の技術的信頼性をさらに高め、国民の理解と信頼を得ていくと同時に、実際の処分事業や安全規制の基盤となる技術を整備・強化していくための研究開発を着実に進めていく必要がある。また、研究開発の推進においては、全体として計画的かつ効率的に進め、その成果が実施主体や国の安全規制へ効果的に反映されるよう、関係研究機関の連携の強化も念頭に、体系的かつ中長期的な視点で研究開発計画を検討・調整する必要性が認識されてきた。

このような認識に鑑み、資源エネルギー庁及び国の基盤研究開発を担う関係機関（原子力環境整備促進・資金管理センター、電力中央研究所、産業技術総合研究所、放射線医学総合研究所（現、量子科学技術研究開発機構）、原子力機構、産業創造研究所[平成 19 年 4 月に解散]）を中心として、平成 16 年度以降、国の基盤研究開発を対象とした「研究開発全体マップ」を策定した。平成 17 年 7 月には、資源エネルギー庁の主導のもと、「地層処分基盤研究開発調整会議」（以下、「調整会議」という）が設置され、中長期的かつ体系的な視点から研究開発計画の検討・調整が行われてきた。平成 18 年 12 月には、調整会議により「高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画」（資源エネルギー庁、2006¹⁾）（以下、「全体計画」という）が策定され、関係研究機関は、この全体計画に基づき、それぞれの分野の研究開発を進めてきている。全体計画は、研究開発の進捗状況などを踏まえた継続的な見直しに加え、研究開発を取り巻く最近の状況などへの対応を加味して、全体計画の策定・改訂が適宜行われている（資源エネルギー庁、2009²⁾、2010³⁾）。平成 25 年 3 月には、平成 25 年度以降の 5 か年を対象とした「地層処分基盤研究開発に関する全体計画」が取りまとめられており（地層処分基盤研究開発調整会議、2013⁴⁾）、今後は地質環境特性の時間的な変化や地層処分システムの超長期的な安全性を検討するための体系的な手法の構築（例えば、過去から現在までの地質環境の長期的な変化を表現できる地質環境長期変動モデルの構築や、そのモデル構築に必要な要素技術の開発など）が求められている。また、全体計画における国の基盤研究開発の役割は、実施主体である原子力発電環境整備機構や安全規制関係機関が、調査・評価などを十分な技術的信頼性をもって円滑に行えるよう、先行的に技術基盤を整備していくことであるとされている。

地層処分は、人工バリアと天然の地層を適切に組み合わせた多重バリアシステムによって、数万年以上にも及ぶ極めて長い時間スケールの安全を確保しようとするものである。このため、地層処分システムの長期的な変化をモデル計算によって予測・評価しつつ、その結果に基づいてシステムの性能や安全性の判断が行われることになる。こうした評価にあたっては、遠い将来までを対象とする長い時間スケールに伴う不確実性に細心の注意を払うことが必要である（地層処分基盤研究開発調整会議、2013⁴⁾）。日本列島は変動帯に位置していることから、諸外国に比べて地殻変動や火成活動などが活発である。そのため、将来の自然現象に伴う地質環境の変動スケールやそのレジリエンス（復元性）を把握しておくことが重要であり、特に変動スケールを把握する技術の開発が必要となる。今後、地層処分の技術的信頼性をさらに高めていくうえでも、実際の

地質環境を構成する様々な要素について、過去の変動の履歴や現象プロセスなどを把握するための調査技術を整備するとともに、これらの科学的知見を統合しつつ、三次元的に表現できる数値モデルを開発することが極めて有効である。このため、本事業では、将来の自然現象に伴う超長期の地質環境の変動を考慮できる数値モデル及びその解析評価に必要な調査技術を整備することを目的とした。

1.2 事業概要

地層処分において重要となる数万年以上にわたる長期の自然現象の予測に関しては、これまでもその方法論や予測結果の信頼性が議論されてきた（楠瀬・小出，2002⁵⁾；田中，2011⁶⁾；梅田ほか，2014⁷⁾）。その主な方法としては、1)外挿法による予測、2)類推法による予測（予測しようとする現象と類似の事例を過去のデータから探索し、そのアナロジーによって将来の変動を予測する方法で、いわゆるナチュラルアナログと呼ばれている手法；湯佐，2002⁸⁾）、3)確率論による予測（例えば、Martin et al., 2012⁹⁾；NUMO, 2017¹⁰⁾）、4)モデルを用いたシミュレーションによる予測、とがある。長期の自然現象のように、プレート運動の枠組みで生じる永続性がある現象の場合、外挿法による予測が特に有効であると考えられている（日本地質学会地質環境の長期安定性研究委員会編，2011¹¹⁾）。

外挿法では、過去から現在までの変動の履歴を検討し、その中から時間的、空間的な変動の普遍性、法則性を見いだすことによって、その傾向を将来に延長（外挿）して予測することになる。時系列解析モデル（例えば、自己回帰移動平均モデル；北川，2005¹²⁾）の研究例によると、過去の期間（N）に成り立っていた関係性（定常性）は、将来になればなる程、その関係性そのものが変化していると考えられるので、0.1~0.2 N 程度であれば関係性が継続する確率が高いと考えられている（ビュー・コミュニケーションズ，2010¹³⁾）。この考えに基づくと、数万年~十万年程度の将来にわたる地質環境の変動を外挿法によって高い信頼性で予測するためには、数十万年~百万年程度の期間の過去から現在までの地質環境の長期変動を把握しておく必要がある。

地層処分の安全評価では、隆起・侵食などにより高レベル放射性廃棄物と人間との物理的距離が接近することによって人間環境に影響が及ぶことを想定した「接近シナリオ」に加え、地下水によって放射性物質が処分施設から最終的に人間環境に運ばれることを想定した「地下水シナリオ」が考慮すべき重要なシナリオとなる。その観点において、地質環境の長期変動を表現する要素としては、地形・地質、地表環境（古気候・古環境など）、水理（地下水流動）、地球化学（地下水の水質など）とがあるが、これらはそれぞれ密接に相互作用を及ぼしている。例えば、山地の隆起などの地形の変化によって動水勾配が変化し、地下水流動に影響が及んだり、地下水流動の変化が水と岩石との反応に影響を及ぼし、地下水の水質が変化したりといった関係である。したがって、地質環境の長期変動を地層処分の安全評価に対し効果的に反映できるような形で表現していくためには、個別の分野のモデルを構築・評価する技術を高度化するのみならず、各分野のモデル間の相互作用を考慮した統合モデルを構築し、評価していくことが重要である。

以上に基づき、本事業では、百万年ないしそれ以上の時間スケールで過去から現在までの地質環境の長期変動を評価する技術を確認するため、これまで個別に進められてきた「地形・地質モデル」、「地表環境モデル」、「水理モデル」及び「地球化学モデル」を統合化した地質環境長期変動モデルを構築するとともに、それに必要な可視化・数値化技術や不確実性の評価手法などの開発を進めてきた。同時に、個別モデルの精度・確度の高度化や統合モデルの信頼性を向上させるために必要となる新たな要素技術の開発も行ってきた。本事業では、これらをそれぞれ「地質環境長期変動モデルの開発」と「革新的要素技術の開発」と呼ぶこととした（図 1.2-1）。

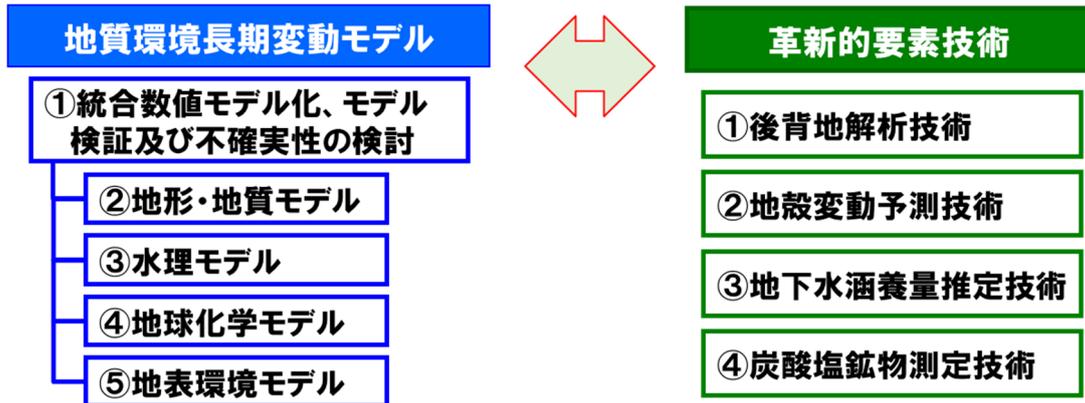


図 1.2-1 研究開発に係る全体フレーム

なお、研究開発によって得られた科学的知見やノウハウについては、「次世代型サイト特性調査情報統合システム」（調査全体の管理と迅速な判断を支援し、知識の統合・共有化などを行うシステム；日本原子力研究開発機構，2013¹⁴⁾）に適宜取り入れることとした。

1.2.1 地質環境長期変動モデルの開発

過去から現在までの地質環境の長期的な変化を表現できる地質環境長期変動モデルの開発に向け、深地層の研究施設から得られた地表及び地下の地質環境データが豊富に蓄積されている東濃地域と幌延地域をそれぞれ山間部と平野部の事例としてモデル構築手法を検討した。これまで個別に進められてきた「地形・地質モデル」、「地表環境モデル」、「水理モデル」及び「地球化学モデル」といった各分野のモデルを統合的に取り扱い（統合数値モデル化）、地質環境の長期的な変動を表現できる三次元地質環境長期変動モデル（Geological-Evolutionary Model；GEMs）の開発を進め、モデル構築の方法論を整備すると同時に、モデルの妥当性の確認及び不確実性の評価のための方法論、モデルを効果的に表現する可視化技術の検討を進めた（図 1.2-2）。これらの研究開発と並行して、個別のモデルの構築に係る技術的検討も併せて行った。

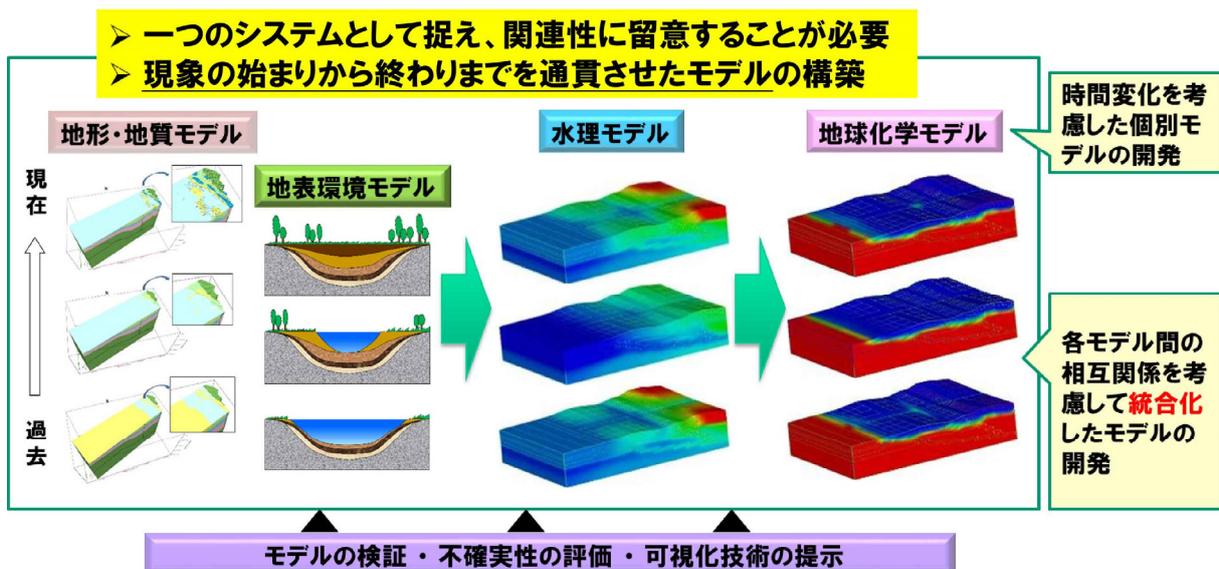


図 1.2-2 地質環境長期変動モデルの構成

(1) 統合数値モデル化、モデル検証及び不確実性の検討

統合数値モデル化にあたり、まず、東濃地域（山間部）と幌延地域（平野部）を事例とした各分野のモデル（地形・地質、地表環境、水理及び地球化学のモデル）に影響を与える特徴（Features）、事象（Events）及びプロセス（Processes）の（以上をFEPと呼ぶ）抽出と相互関係の整理を行った。その結果に基づき、長期変遷シナリオの整備を進め、統合モデル構築のイメージを示した。

地層処分で留意すべき地質環境特性の変動幅が相対的に小さい領域とは、安全評価を行う時間スケールにおいて自然現象による影響が小さく、長期的にみて地質環境特性の変化が非常に小さい（安定である）と考えられる領域である。特に、安全評価上重要な地質環境特性である地下水流動特性及び地球化学特性については、自然現象により地形や涵養量の変化が生じた場合においても、安全評価の時間スケールで地下水の動きが小さい領域（長期的滞留域）や、岩盤のもつ化学的緩衝能力により、pH や酸化還元状態といった化学的な条件が一定の範囲内に保たれている領域が重要であると考えられる。

このような地質環境特性の長期的な変動幅の評価手法を整備するためには、様々な時間・空間スケールに応じて自然現象の発生から地質環境特性が変化していくプロセスを把握するとともに、それらをモデル化する必要がある。モデル化に際しては、まず自然現象の過去の履歴を整理して現在までのシナリオを作成する。シナリオの作成においては、最も確からしい（蓋然性が高い）と考えられる基本シナリオに加え、得られたデータやシナリオ構築に含まれた不確実性を考慮したオプションシナリオを作成し、それぞれのシナリオに沿って「地形・地質モデル」と「地表環境モデル」を構築する。その後、「水理モデル」として、この地形・地質モデルと地表環境モデルを基盤とした過去から現在までの地下水流動特性の変化を推定するための地下水流動解析を行う。さらには、地下水の地球化学特性の変遷に関わるプロセスを整理して「地球化学モデル」を開発し、物質移行の観点から「水理モデル」との整合性を検討する。このように開発したモデルに基づき、地質環境特性の空間的な変動幅を把握することにより、例えば、地下水流動特性の場合には長期的滞留域を推定することができる。推定した長期的滞留域の妥当性については、現在の地下水理の情報からは検証が困難であることから、地下水年代や溶存成分濃度・分布といった化学的指標を利用した方法を検討する。また、これらのモデルや、モデル開発に必要な情報に基づき、地質環境特性のみならず地表環境の変化を推定することが可能となる。このような考え方によって地質環境長期変動モデルを統合化し、信頼性の高い評価結果を導出できるとともに、推定結果の妥当性を検討することができると考えられる（図 1.2-3）。

データ取得からモデル化に至る一連のアプローチには不確実性が内在する。統合数値モデルを地層処分の安全評価に活用するためには、モデルの不確実性が定量的に示されていることが望ましい。この不確実性の検討について、本事業で構築した地形・地質モデル及び地表環境モデルの長期変遷を考慮した水理モデルに対し感度解析（移流分散解析など；今井ほか, 2009¹⁵⁾）を行い、その結果を用いて、不確実性の定量化に向けた手法について取りまとめるとともに、モデルの妥当性の検証も行った。モデルの妥当性検証については、地形・地質モデルに対し、河川の土砂運搬・堆積過程を模擬して地形の大局的な変化を再現する地形変化シミュレーション（谷川ほか, 2016¹⁶⁾）を適用することによる検討も実施した。

さらに、地質環境の長期安定性に係る評価技術の共有化や理解促進を図るため、構築した統合数値モデルを効果的に可視化する技術を提示した。

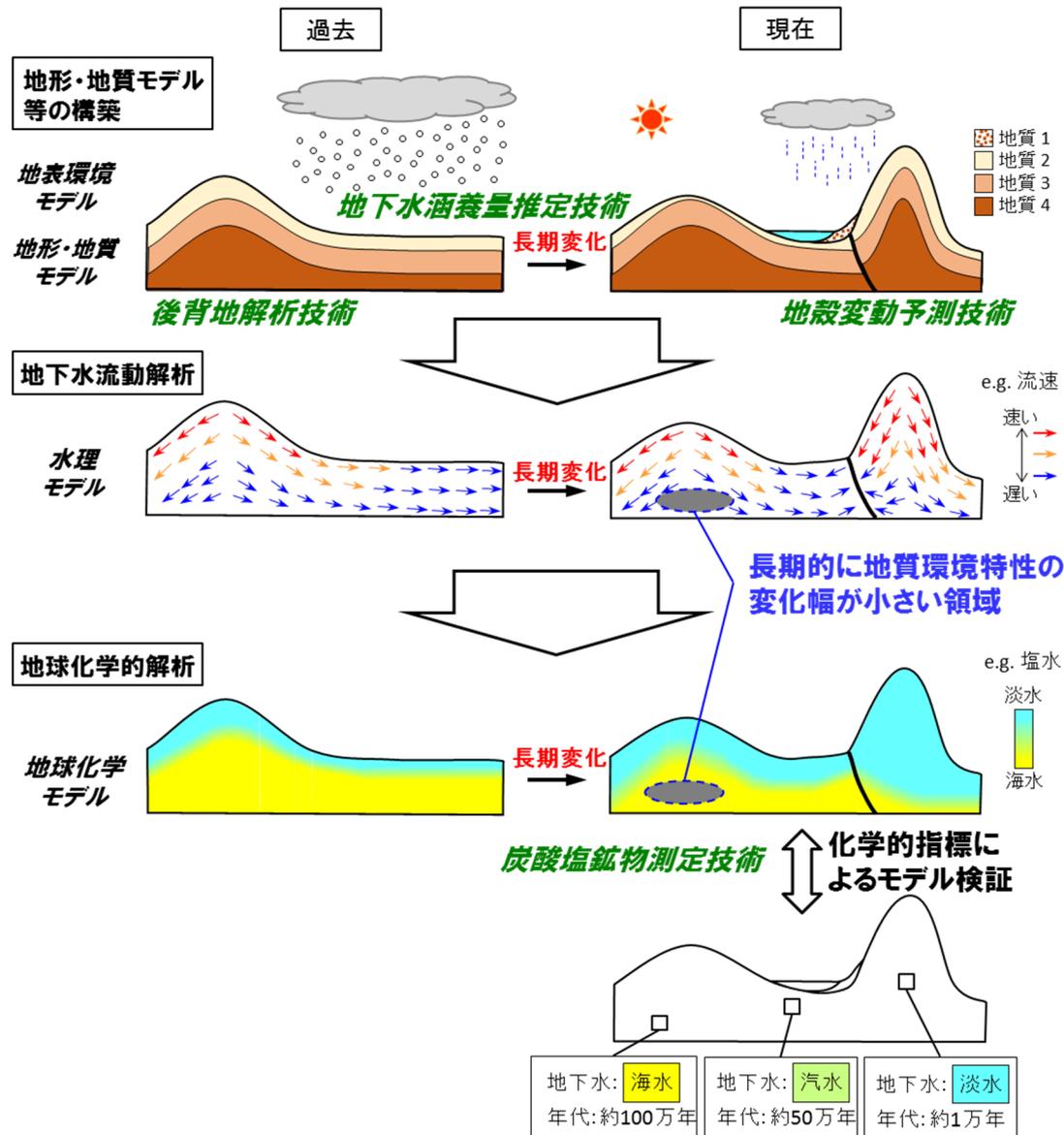


図 1.2-3 地質環境長期変動モデルの開発における統合化のイメージ

(2) 個別モデル構築における検討

① 地形・地質モデル

百万年ないしそれ以上の時間スケールでの地史（テクトニクス）の検討や、古地形の推定及び地質・地質構造の復元を行い、地形・地質モデルの構築やその方法論の整備を行った。

そのため、事例研究対象地域である東濃地域（山間部）と幌延地域（平野部）での研究成果を整理し、地形・地質モデルの開発における問題点と課題を抽出するとともに、抽出した課題に対する調査・解析などを実施した。そのうえで、不確実性を考慮しつつ、事例研究対象地域（山間部・平野部）の約百万年前以降の三次元地形・地質モデルを提示した。さらに、異なる環境におけるモデル構築の普遍化を目指したそれぞれの作業フローを提示し、フロー内の各作業に内在する不確実性の幅を比較しながら整理した。また、地形・地質モデルの高度化に必要な科学的知見を蓄積するため、断層の発達史や岩石風化過程の復元などに関し、当該分野の専門家との共同研究を実施した。

② 水理モデル

地形・地質モデルをベースに古気候・古環境を考慮した水理パラメータの設定と数値モデルの作成及びその数値モデルを用いた地下水流動の感度解析を実施し、過去から現在までの水理ポテンシャルや流動系の変化を明らかにするための方法論を整備するとともに、定量的な指標を用いて地下水流動特性の長期変動幅の空間分布の評価や水理モデルに与える重要因子の抽出を行った。さらに、これらの検討内容を踏まえ、地形・地質モデル及び地表環境モデルの情報に基づく水理モデル構築と解析条件設定の作業フローを異なる環境の特徴に着目して提示した。また、感度パラメータの変化に基づく地下水流動特性の変化量や影響度の評価手法を作業フローと組み合わせ、フロー内の各作業に内在する不確実性の幅を異なる環境で比較しながら整理した。

③ 地球化学モデル

地形・地質モデル、水理モデルを利用した解析結果及び古水理地質学的な検討結果に基づき、過去から現在までの地下水の水質、pH及び酸化還元状態などの変化を明らかにしつつ、地下水流動解析結果の妥当性を化学的指標から評価するための方法論を整備した。すなわち、地下水流動解析により得られた長期的な地下水流動の変遷と、地下水の水質や年代などの地球化学特性についての比較などを行うとともに、これまでに構築した水理モデルや条件設定に基づき、塩分濃度の変化に着目した移流分散解析を行った。また、現在の観察から明らかにされている地下水年代に基づき、地下水流動解析に用いる入力パラメータの妥当性を確認するとともに、地球化学特性の長期変動幅を推定した。さらに、モデルの妥当性確認に有効な化学的指標（地下水の年代値や割れ目充填鉱物の化学組成など）に関する知見を蓄積した。

④ 地表環境モデル

古地形・古気候・古環境や表層水環境などを考慮した地表環境条件を明らかにするとともに、地表環境の領域や状態の設定に関する検討を行い、地表環境モデルを構築するための方法論を整備した。

そのためにまず、本事業で開発した地下水涵養量推定技術を適用し、過去の降水量・流出量・蒸発散量の推定に係る解析とデータ整理を行い、様々な地形に対する地下水涵養量推定技術の適用可能性を検討した。また、長期変遷を考慮した地表環境の状態設定の作業フローを作成し、流出量などの推定結果と合わせて古地形・古気候・古環境を考慮した地表環境の状態設定の時間的変遷を整理するとともに、フロー内の各作業に内在する不確実性の幅を異なる環境間で比較して取りまとめた。

1.2.2 革新的要素技術の開発

本事業では、百万年ないしそれ以上の時間スケールを扱うが、日本列島におけるこの時間スケールの自然現象として、山地や丘陵の形成などが考えられる。このような現象を考慮した信頼性の高い地形・地質モデルを構築するためにも、地形形成過程が記録されている堆積物から必要な情報を取得するための後背地解析技術や地殻変動の一樣継続性に起因する様々な現象の発生に伴う不確実性を考慮するための地殻変動予測技術が重要となる。また、時間変化を考慮した信頼性の高い水理モデルを構築するためには、地下水流動系の上部境界条件となる地下水涵養量について、地形、気候及び水文環境などの変化を考慮した推定技術が重要となる。さらにこれらを統合したモデルの信頼性を向上させるためには、モデルの妥当性を検証する方法も合わせて整備する必要がある。検証には地下水の流れや水質などに関する過去の情報が必要であり、その情報源として、地下水中で沈殿した二次鉱物が有用である。この二次鉱物の中で長期的な変遷を推定する

ために特に有効なものが炭酸塩鉱物であり、その生成年代や元素組成及び生成環境などの地球化学的特性を把握する技術が重要である。

これらの点から、地質環境長期変動モデルを構築していくうえで、個別モデルの構築に必要な情報やモデルの検証に用いるデータを取得するための革新的な要素技術として、以下の技術開発を進めてきた（図 1.2-4）。

（1） 後背地解析技術

山地の形成過程を明らかにするための有効な手法の一つとして、供給源となる山地の下流域に分布する碎屑物の堆積学的・岩石学的アプローチによる後背地解析が挙げられる。

従来から行われてきた後背地解析では、露頭観察によって礫種組成や堆積構造を記載し、碎屑物の種類や古流向を明らかにすることにより、後背地の推定が行われてきたが、露頭の分布に制約がある場合などは、これらの手法のみで後背地を推定することがしばしば困難となる。一方、限られた露頭やボーリングコアなどの試料から細粒の碎屑物を大量に分析することができれば、後背地解析技術の有効性が格段に向上する。また、碎屑物はしばしば風化の影響を受けていることがあるが、ジルコンなど一部の重鉱物や石英は風化に強く、かつ比較的広く存在するため、これらの鉱物に着目した分析による後背地解析技術の整備が望まれる。

そこで本事業では、碎屑物の供給源を特定する手法として、ジルコンなどの重鉱物に着目した化学組成分析や、石英の電子スピン共鳴（ESR）信号、光ルミネッセンス（OSL）信号などを用いた後背地解析技術の開発を進めてきた。また、古流向の推定については、肉眼では堆積構造の識別が難しい細粒の堆積物（シルト～細粒砂）に対しても適用可能な帯磁率異方性を用いた手法の整備を行ってきた。これらの手法の適用性の検討については、モデル構築の事例研究の場となっている東濃地域（山間部）と幌延地域（平野部）を対象に進めてきた。

後背地解析においても、堆積物の形成時期の把握は重要なテーマである。本事業では、数万年～十万年以上の年代に対しても適用可能な OS� 年代測定技術の開発に加え、日本列島の鮮新世～更新世にかけてのテフラカタログの整備を行った。

（2） 地殻変動予測技術

地形・地質モデルの構築にあたっては、地殻変動の一様継続性に起因する様々な現象の発生に伴う不確実性を考慮する必要があるため、長期に及ぶ地殻変動を予測するための技術開発として、数値シミュレーションによる地殻変動解析を行ってきた。

まず、過去の変動に基づいたプレート間の力学的相互作用モデルの構築のため、活断層の変位速度に基づくひずみ速度分布やプレート境界における運動学的モデルの構築を行った。さらに、測地学的及び地形・地質学的な変位やひずみ速度などの観測データに基づき、地殻物性の検討、時間スケールに応じた地殻変動の予測に係る不確実性評価の指標の検討及び過去から現在の地殻変動モデルを構築するための数値シミュレーションによる解析を行った。

一方で、解析結果の検証及び地下構造の不均質による非弾性変形に関する検討のため、九州南部のせん断帯を事例とした古地磁気測定・解析を行うとともに、Global Navigation Satellite System（GNSS）による事例観測・解析を実施した。

(3) 地下水涵養量推定技術

汎世界的な気候変動を考慮しつつ、微化石分析データなどに基づくローカルな古気候・古環境（特に水文環境）の推定や、古地形の推定などに基づき涵養量（降水量、蒸発散量及び流出量など）を推定するための技術について検討を行った。例えば、過去の地形的特徴に着目した河川流出量の推定手法について提示した。

(4) 炭酸塩鉱物測定技術

岩石の割れ目を充填する炭酸塩鉱物の放射年代測定及び元素分布情報を取得する微小領域分析システムを構築した。

本事業では、炭酸塩鉱物の微小領域を対象としたウラン系列年代測定及び元素分布情報取得のための分析技術開発として、レーザーアブレーション付き誘導結合プラズマ質量分析計による年代測定に必要な標準試料の選定及び分析条件の最適化を図り、水理・地球化学モデルの構築や妥当性評価に必要な技術として成果を取りまとめた。

また、地下水から炭酸塩鉱物が生成する際に起きる水-鉱物間のミクروسケールの微量元素分配を推定する技術を構築するとともに、カソードルミネッセンス像などを用いた微小領域の結晶成長と微量元素との関連性の検討を行った。

なお、本技術の開発は挑戦的な側面を持っていることから、微小領域分析などの専門家との共同研究のもと進めてきた。

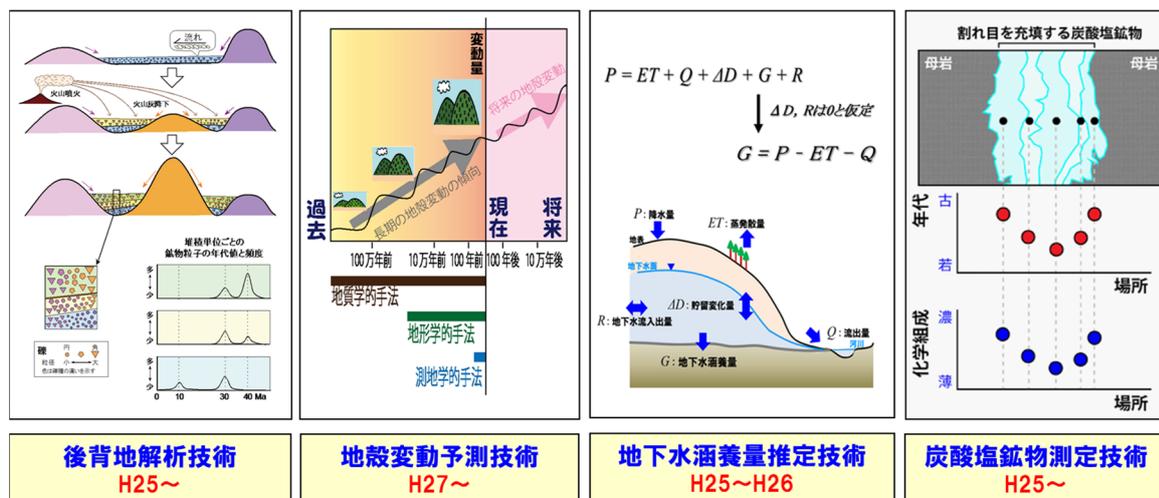


図 1.2-4 革新的要素技術開発の構成

引用文献

- 1) 資源エネルギー庁, 日本原子力研究開発機構, 高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画, 2006, 110p.
- 2) 資源エネルギー庁, 日本原子力研究開発機構, 高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画, 2009, 114p.
- 3) 資源エネルギー庁, 日本原子力研究開発機構, 高レベル放射性廃棄物および TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画, 2010, 139p.
- 4) 地層処分基盤研究開発調整会議, 地層処分基盤研究開発に関する全体計画(平成 25 年度～平成 29 年度), 2013, 79p.
- 5) 楠瀬勤一郎, 小出 仁, 地質環境予測期間と不確実性の取扱い, 資源と素材, vol.117, 2002, pp.808-815.
- 6) 田中和広, 地質環境の将来予測は可能か? - 重要構造物の立地選定や安全な設計に向けて, 電力土木, vol.351, 2011, pp.8-13.
- 7) 梅田浩司, 安江健一, 石丸恒存, バックエンド週末基礎講座 地層処分と地質環境の長期安定性: 地質環境の長期予測と不確実性についての検討例, 原子力バックエンド研究, vol.21, 2014, pp.43-48.
- 8) 湯佐泰久, 自然から学ぶ放射性廃棄物処分の知恵 - ナチュラルアナログのおしえ -, 資源と素材, vol.118, 2002, pp.631-640.
- 9) Martin, A. J., Umeda, K. and Ishimaru, T., Application of the Bayesian Approach to Incorporate Helium Isotope Ratios in Long-Term Probabilistic Volcanic Hazard Assessments in Tohoku, Japan, Updates in Volcanology - New Advances in Understanding Volcanic Systems, Dr. Karoly Nemeth (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/51859.
- 10) NUMO, TOPAZ project Long-term Tectonic Hazard to Geological Repositories -Toward practical application of the ITM-TOPAZ methodology, 2017, 94p.
<http://www.numo.or.jp/en/reports/pdf/TR-16-04.pdf> (2018.01.18)
- 11) 日本地質学会地質環境の長期安定性研究委員会編, 地質リーフレット 4, 日本列島と地質環境の長期安定性, 日本地質学会, 2011.
- 12) 北川源四郎, 時系列解析入門, 岩波書店, 東京, 2005, 265p.
- 13) ビュー・コミュニケーションズ, 時系列解析法としての ARIMA モデルと予測についての概説, ビュー・コミュニケーションズ, 2010.
- 14) 日本原子力研究開発機構, 平成 24 年度 地層処分技術調査等事業 地層処分共通技術調査 地質環境総合評価技術高度化開発 6 カ年とりまとめ報告書, 2013, 166p.
http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2012/24-3-12.pdf (2018.01.18)
- 15) 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(委託研究), JAEA-Research 2009-001, 2009, 116p.
- 16) 谷川晋一, 三箇智二, 安江健一, 河川の土砂運搬作用を考慮した河床縦断面形のシミュレーション, 地形, vol.37, 2016, pp.189-207.

2. 地質環境長期変動モデルの開発

2.1 統合数値モデル化、モデル検証及び不確実性の検討

2.1.1 長期変遷シナリオの整備

地質環境長期変動モデルは、地殻変動や火成活動などといった将来の自然現象による深部地質環境の変化を定量的に記述することを目的とする。そのためには、一つのイベントが様々なプロセスを経て次のイベントを引き起こし、これがさらに次のプロセス、イベントを誘発するという一連のメカニズム（事象）として明示的に捉えられるようにすることが重要となる。このようなイベント間の相関関係を明示したのものとして Features, Events and Processes (FEP) がある。そこでまず、研究対象として、山間部（東濃地域）及び平野部（幌延地域）での地表環境と地質環境における各分野（地形、地質、水理、地球化学）に関する調査結果について、国際 FEP リスト (BIOMOV5 II, 1996¹⁾; OECD/NEA, 2000²⁾) に基づき、FEP ごとに調査結果及び課題を整理した。そのうえで、各分野における FEP の相互関係を検討し、問題点や新たな着眼点を洗い出すとともに、地質環境特性の長期変遷を全体的に（各分野のモデルで）矛盾なく説明するための統合モデル構築の方法論の検討に反映した。この際、地層処分技術ワーキンググループ (WG) が示した地質環境の長期安定性への影響要因（地層処分技術 WG, 2014³⁾) についても参照した。

山間部及び平野部の両地域における蓋然性が高いシナリオ（各分野のシナリオを統合したシナリオ）を、時間スケールとともに図 2.1-1 及び図 2.1-2 にそれぞれ示す。それぞれの図においては、各モデルの範囲において、どのような地質環境特性が変化しているかを示した（図中、左側）。なお、本事業では地質環境特性に影響を与える要因が分布する領域（「広域スケール」）（地層処分技術 WG, 2014³⁾) における地質環境特性の長期的な変化を把握することが目的となるため、ローカルスケールで取り扱う物質移動などについては検討対象外としている。

東濃地域を対象事例とした山間部における統合シナリオ（図 2.1-1）では、土岐花崗岩が形成されたと考えられる約 75～70 Ma (Yuguchi et al., 2016⁴⁾) を起点としてシナリオを示している。中新世の瑞浪層群の堆積時からは海進、海退の影響により地下水の水質が変化したことが、花崗岩中の割れ目に産する鉱物の化学的特徴から推定ができる (Iwatsuki et al., 2002⁵⁾)。数 Ma 以降は山地の形成に伴い、動水勾配の増加や涵養域・流出域が変化したと考えられる (尾上ほか, 2009⁶⁾)。また、動水勾配の増加に伴い、より深部まで地表水が従来よりも早く浸透することにより地下水の地球化学特性も変化したと考えられる。

幌延地域を対象事例とした平野部における統合シナリオ（図 2.1-2）では、声問層が堆積していたと考えられる約 3 Ma (安江ほか, 2006⁷⁾; 新里ほか, 2007⁸⁾) を起点としている。稚内層と声問層の地層境界が最大埋没深度に到達する時期までは、続成作用に伴う圧密による鉱物相の変化や水圧の上昇、透水性の低下などが推定できる。隆起場へと変化した時期は場所によって異なるが、その後は東濃と同様に山地・丘陵の形成による動水勾配の増加や構造的割れ目の発達による水理学的変化並びに地表水の浸透による地下水の地球化学特性の変化が推定できる。これらのように対象領域における地質環境の変化を分野ごとに整理し、それらを統合することにより地質環境の長期的な変化がどのように相互作用し発生したかを示すことができる。

次に、表 2.1-1 に、上記で検討した重要な地質環境の変化が、どのような要因及びプロセスによって発生しているかを整理した (Mizuno et al., 2014⁹⁾)。今回のマトリクス形式による整理では、長期的な地表・地質環境に影響を及ぼす駆動力となる外的要因に関する FEP (表 2.1-1 の左側) と、それらの駆動力により影響を受ける地表・地質環境に関する FEP (表 2.1-1 の上段) のマトリクスとして、それらが相互作用することにより、どのような変化が生じるかを示した。地表・地質環境に関する FEP については、熱 (T)、水理 (H)、力学 (M)、化学 (C) 及び幾何形

状 (G) に分類し、駆動力となる各 FEP が、それぞれの地表・地質環境特性にどのような影響を与えるかを把握できるようにした。また、表 2.1-1 の赤字で示したプロセスについては、地層処分技術 WG が示した地質環境特性に著しい影響を与える事象及び課題としてあげられた項目である。表 2.1-2 及び表 2.1-3 は、表 2.1-1 を基準として、東濃及び幌延の両地域において考慮すべき FEP 及び既存のモデルで考慮している FEP を区分した。表 2.1-2 及び表 2.1-3 の赤色で示した箇所は、既存の数値モデルにおいて考慮されている FEP、灰色で示した箇所は両地域において考慮する必要がないと考えられる FEP、黒色で示した箇所は発生する可能性はあるものの、既存の数値モデルでは考慮されていない FEP を示す。東濃地域 (山間部) を例とすると、既存の数値解析において、「構造運動と造山運動」による「山地の形成」や「母岩」の「分布・形状の変化」については考慮されている。一方、「周氷河現象の影響」や「局所的な氷河と氷床の影響」については、東濃地域ではこれまで周氷河の影響や氷河が存在していないと考えられるため、考慮する FEP とはならない。東濃地域 (山間部) と幌延地域 (平野部) を比較した場合、「地質プロセスとその影響」による地表・地質環境の変化において考慮すべき FEP については、ほとんど差がないことがわかった。ただし、「気候プロセスとその影響」による地表・地質環境については、幌延地域が寒冷地及び沿岸域に位置することから、「海面変化」及び「周氷河現象の影響」を考慮する必要がある点で東濃地域とは異なる。

これらの検討から、地質環境の長期変動において考慮すべき FEP について、原因となる FEP と結果となる FEP に関する因果関係を明確にすることができる。なお、図 2.1-1 や図 2.1-2、表 2.1-1 において、外的要因によって生じる長期的な地質環境の変化は、地形や地質構造の変化を経て、最終的には地下水の流動状態や化学的性質へと影響する。そのため、統合数値モデルの構築では、地下水の流動状態や化学的性質の長期的な変化を示すモデルを構築することが目的となる。

また、本事業では、モデル化を行う対象領域や個別モデルの時間分解能についても検討を行った。モデル化の対象領域については、過去百万年以上を対象とした場合、山間部の事例である東濃地域では現在の地下水流動の涵養域から流出域までの領域 (20 km 四方程度)、平野部の事例である幌延地域では海退時の海岸線までを含む領域 (数十 km 四方) を考慮する必要があり、これらの領域が対象となる評価時間スケールと地質環境条件に応じて変化することを示した。各地質環境モデルに取り込まれる情報の時間分解能 (情報がどの程度の時間スケールにおける地質環境を把握するための情報か) については、千年オーダーから千万年オーダーまでの様々な時間分解能を有すると考えられた。

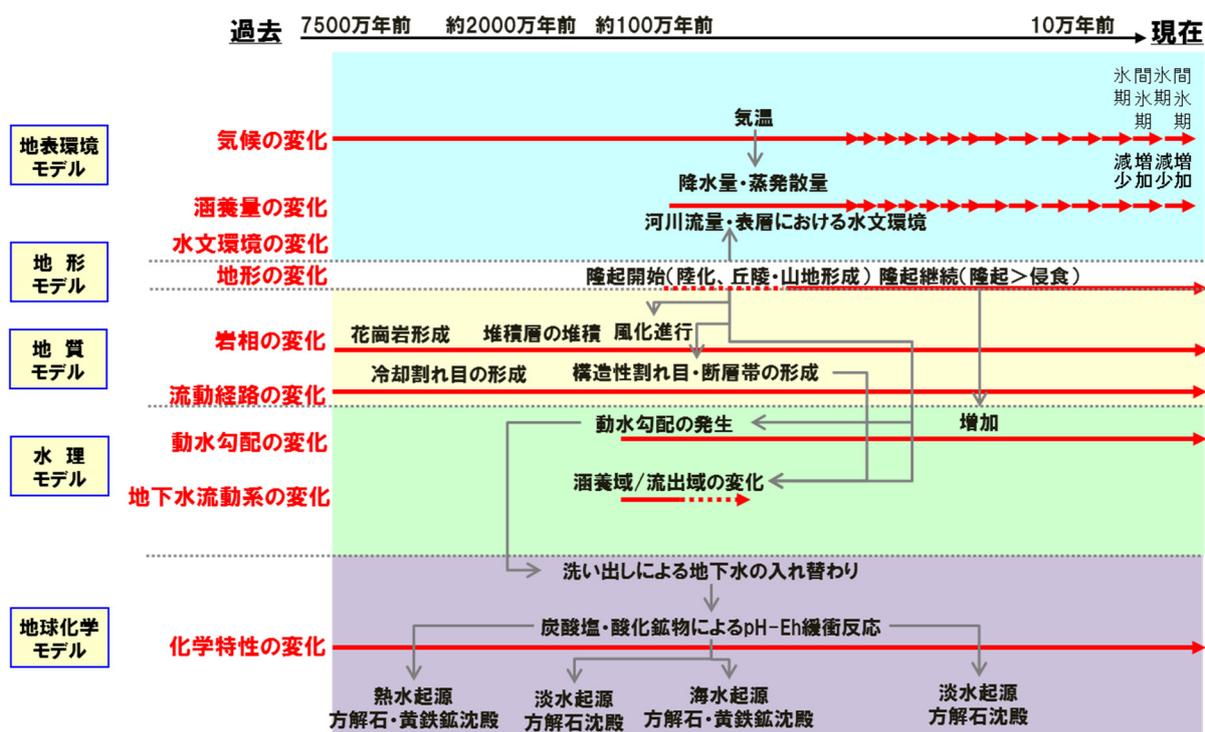


図 2.1-1 地質環境長期変動モデルにおける各分野の関係（山間部：東濃地域の事例）

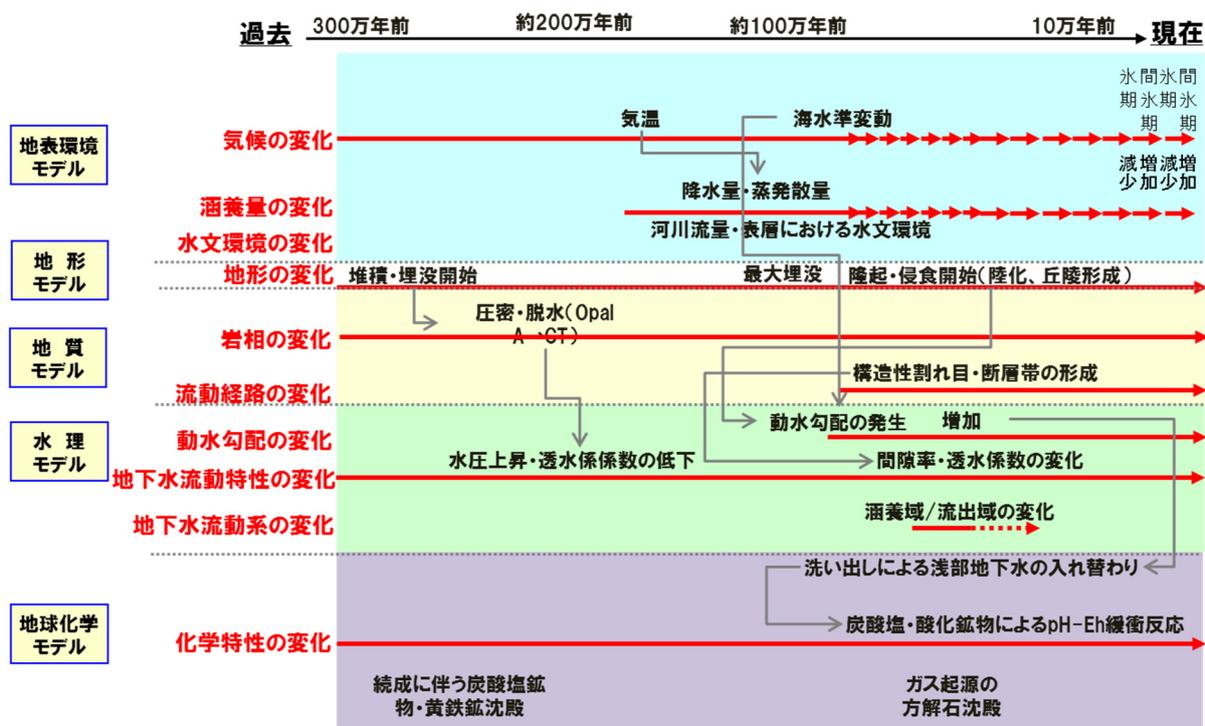


図 2.1-2 地質環境長期変動モデルにおける各分野の関係（平野部：幌延地域の事例）

表 2.1-1 マトリクス形式による FEP の整理結果 (汎用)

	幾何形状 (G)						力学 (M)	水理 (H)	化学 (C)	熱 (T)
	2.3.01 地形と形態	2.2.02 母岩	2.2.03 その他の地質ユニット	2.2.04 大規模な不連続性	2.2.06 力学的プロセスとその状態	2.2.07 水理学/水文地質学のプロセスとその状態				
1.2 地質プロセスとその影響	1.2.01 構造運動と造山運動 (含む、隆起沈降)	山地の形成	分布、形状の変化	断層・破砕帯の形成発達、岩脈の貫入	広域応力場の変化、物性(空隙率・圧縮強度・せん断強度)の変化	2.2.06 力学的プロセスとその状態	2.2.07 水理学/水文地質学のプロセスとその状態	2.2.08 化学/地球化学のプロセスとその状態	2.2.10 熱的プロセスとその状態	
	1.2.02 弾性、塑性または脆性的変形	分布、形状の変化	—	断層・破砕帯・割れ目の形成・発達	地殻的、局所的応力場の変化	—	—	—	熱伝導率	
	1.2.03 地震活動	—	分布、形状の変化	断層・破砕帯・割れ目の形成・発達	地殻的応力場の変化	—	—	—	—	
	1.2.04 火山、マグマ活動	—	—	—	—	—	—	—	—	
	1.2.06 熱水活動	—	鉱物組成の変化	鉱物組成の変化	—	—	—	—	—	
	1.2.08 結成作用	—	分布、形状の変化、鉱物組成の変化	分布、形状の変化、鉱物組成の変化	—	—	—	—	—	
	1.2.07 侵食と堆積	分布、形状の変化	分布、形状の変化、風化帯の形成	侵食・堆積による分布、形状の変化	除荷・載荷による応力場の変化	—	—	—	—	
	1.3.01 地球規模の気候変動	—	—	—	—	—	—	—	—	
	1.3.02 地域的及び局所的な気候変動	—	—	—	—	—	—	—	—	
	1.3.03 海面変化	—	—	—	—	—	—	—	—	
1.3 気候プロセスとその影響	1.3.04 周水河現象の影響	分布、形状の変化	—	—	—	—	—	—	—	
	1.3.05 局所的な水河と水床の影響	分布、形状の変化	分布、形状の変化	—	—	—	—	—	—	
	1.3.06 暖かい気候の影響 (熱帯と砂漠)	—	—	—	—	—	—	—	—	
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

表 2.1-2 マトリクス形式による FEP の整理結果（山間部：東濃地域の例）

	幾何形状 (G)						力学 (M)	水理 (H)	化学 (C)	熱 (T)
	2.3.01 地形と形態	2.2.02 母岩	2.2.03 その他の地質ユニット	2.2.04 大規模な不連続性	2.2.06 力学的プロセスとその状態	2.2.07 水理学/水文地質学的プロセスとその状態				
1.2 地質プロセスとその影響	1.2.01 構造運動と造山運動(含む、隆起沈降)	山地の形成	分布・形状の変化	断層・褶曲帯の形成発達、褶曲の貫入	広域応力場の変化、物性(空孔隙率・圧縮強度・せん断強度)の変化	2.2.07 水理学/水文地質学的プロセスとその状態	2.2.08 化学/地質化学プロセスとその状態	2.2.10 熱的プロセスとその状態		
	1.2.02 弾性、塑性または脆性的変形	分布・形状の変化	—	断層・褶曲帯、割れ目の形成・発達	地域的、局所的応力場の変化	流動経路の変化	既存地下水とは異なる地下水の混合による水質形成プロセスの変化	熱伝導率		
	1.2.03 地震活動	—	分布・形状の変化	断層・褶曲帯、割れ目の形成・発達	地層的応力場の変化	流動経路の変化 水頭変化	既存地下水との混合状態の変化、深部地下水の流入	—		
	1.2.04 火山・マグマ活動	—	—	—	—	—	既存地下水とは異なる地下水の混合による水質形成プロセスの変化	地温の上昇		
	1.2.06 熱水活動	—	鉱物組成の変化	鉱物組成の変化	—	密度・温度勾配の変化	既存地下水とは異なる地下水の混合による水質形成プロセスの変化	地温の上昇		
	1.2.08 統合作用	—	分布・形状の変化、鉱物組成の変化	割れ目の形成、発達	物性(空孔隙率・圧縮強度・せん断強度)の変化	透水性の変化	鉱物からの地下水による水質の変化	—		
1.3 気候プロセスとその影響	1.2.07 侵食と堆積	分布・形状の変化	侵食・堆積による分布・形状の変化	地層の堆積による地層境界の形成	除荷・載荷による応力場の変化	涌水量、涌出量、流動経路の変化 水頭変化	既存地下水とは異なる地下水の混合による水質形成プロセスの変化	—		
	1.3.01 地球規模の気候変動	侵食量の変化	—	—	—	涌水量の変化	—	—		
	1.3.02 地域的及び局所的な気候変動	侵食量の変化	—	—	—	涌水量・動水勾配の変化	—	—		
	1.3.03 海面変化	侵食量の変化、汀線の変化	侵食・堆積に伴う分布・形状の変化	—	—	涌水量、涌出量、動水勾配の変化	既存地下水とは異なる地下水の混合による水質形成プロセスの変化	—		
	1.3.04 周水河現象の影響	分布・形状の変化	—	—	—	涌水量、涌出量、動水勾配の変化	—	—		
	1.3.05 局所的な氷河と氷床の影響	分布・形状の変化	分布・形状の変化	—	—	涌水量、涌出量、動水勾配の変化	氷河・氷床溶融時における酸化的な地下水の浸透	—		
1.3.06 暖かい気候の影響(熱帯と砂漠)	侵食量の変化	—	—	—	—	涌水量の変化	—			

表 2.1-3 マトリクス形式による FEP の整理結果（平野部：幌延地域の例）

	幾何形状 (G)							力学 (M)	水理 (H)	化学 (C)	熱 (T)
	2.3.01 地形と形態	2.2.02 母岩	2.2.03 その他の地質ユニット	2.2.04 大規模な不連続性	2.2.06 力学的プロセスとその状態	2.2.07 水理学/水文地質学的プロセスとその状態	2.2.08 化学/地球化学的プロセスとその状態				
1.2 地質プロセスとその影響	1.2.01	構造運動と造山運動(含む、隆起沈降)	山地の形成	分布・形状の変化	断層・破砕帯・割れ目の形成・発達、岩脈の貫入	広域応力場の変化、物性(空隙率・圧縮強度・せん断強度)の変化	2.2.07 水理学/水文地質学的プロセスとその状態	2.2.08 化学/地球化学的プロセスとその状態	既存地下水とは異なる地下水の混合による水質形成プロセスの変化	熱伝導率	
	1.2.02	弾性、塑性または脆性的変形	分布・形状の変化	断層・破砕帯・割れ目の形成・発達	地域的、局所的応力場の変化	新たな流動経路の発達による水質形成プロセスの変化	—	—	—		
	1.2.03	地盤活動	—	断層・破砕帯・割れ目の形成・発達	地域的応力場の変化	既存地下水とは異なる地下水の混合による水質形成プロセスの変化	—	—	—		
	1.2.04	火山・マグマ活動	—	—	—	既存地下水とは異なる地下水の混合による水質形成プロセスの変化	—	—	—		
	1.2.06	熱水活動	—	—	—	既存地下水とは異なる地下水の混合による水質形成プロセスの変化	—	—	—		
1.3 気候プロセスとその影響	1.2.08	統成作用	—	分布・形状の変化、鉱物組成の変化	物性(空隙率・圧縮強度・せん断強度)の変化	—	—	—	—	—	
	1.2.07	侵食と堆積	分布・形状の変化	分布・形状の変化、風化帯の形成	除荷・載荷による応力場の变化	—	—	—	—		
	1.3.01	地球規模の気候変動	侵食量の変化	—	—	—	—	—	—	—	
	1.3.02	地域的及び局所的な気候変動	侵食量の変化	—	—	—	—	—	—	—	
	1.3.03	海面変化	侵食量の変化、干線の变化	侵食・堆積に伴う分布・形状の変化	—	—	—	—	—	—	
	1.3.04	周水河現象の影響	分布・形状の変化	—	—	—	—	—	—	—	
1.3.05	局所的な水河と水床の影響	分布・形状の変化	分布・形状の変化	—	—	—	—	—	—		
1.3.06	暖かい気候の影響(熱帯と砂漠)	侵食量の変化	—	—	—	—	—	—	—	—	

2.1.2 統合モデル構築のためのフローの提示

モデル化のための作業手順は、これまでも取りまとめられてきているものの（日本原子力研究開発機構, 2013¹⁰⁾）、それらは個別分野モデルの手順に留まっており、各分野を統合したモデル構築のための手順については、十分に検討がなされてきていなかった。そこで、統合数値モデルに含まれる個別分野のモデルの内容・範囲を明確にしたうえで、統合数値モデル構築のためのデータの流れをフロー図として整理した。

各モデルの相関関係を整理したものが図 2.1-3 である。ここでは、統合数値モデル構築までの全体像を把握することを目的とし、どのようなデータや地質環境要素が各モデルを相互に関連付けているかに着目した。図 2.1-3 から、長期的な地質環境の変動を対象とした統合数値モデルを構築する際には、外的要因である構造運動や気候変動及び堆積岩が分布する地域であれば地質環境要因である地層の堆積に関する情報が始点となる。これらの情報に基づき、断層の形成・発達や海水準変動、続成作用などの地質環境要素に関する情報を整理し、地形モデル及び地質モデルを構築する。地形・地質モデルからは、地質分布、地表形状の情報が得られ、それらに対象とする領域の水理特性に関する情報を追加することで水理地質構造モデルが構築できる。水理地質構造モデルからは水理特性分布が得られ、水深や涵養量の情報を利用することにより、地下水流動モデルが構築できる。本事業で構築した水理モデルは、この水理地質構造モデルと地下水流動モデルを組み合わせたものである。地下水流動モデルにより得られた地下水の流動系に関する情報を塩分濃度分布と統合することにより、最終的に地形・地質モデル及び水理モデルを考慮した地球化学モデルが統合数値モデルとして構築できる。地表環境については、地形・地質モデルから得られる地表形状や、地下水流動モデルから得られる流出域に関する情報、降水量・気温のデータなどを考慮し、モデル化する。

ここで示した統合数値モデル構築のための方法論については、事例対象地域である東濃及び幌延において検討した内容に基づいているものの、具体的な地域を想定していない。そのため、汎用的な方法論として利用することが可能である。

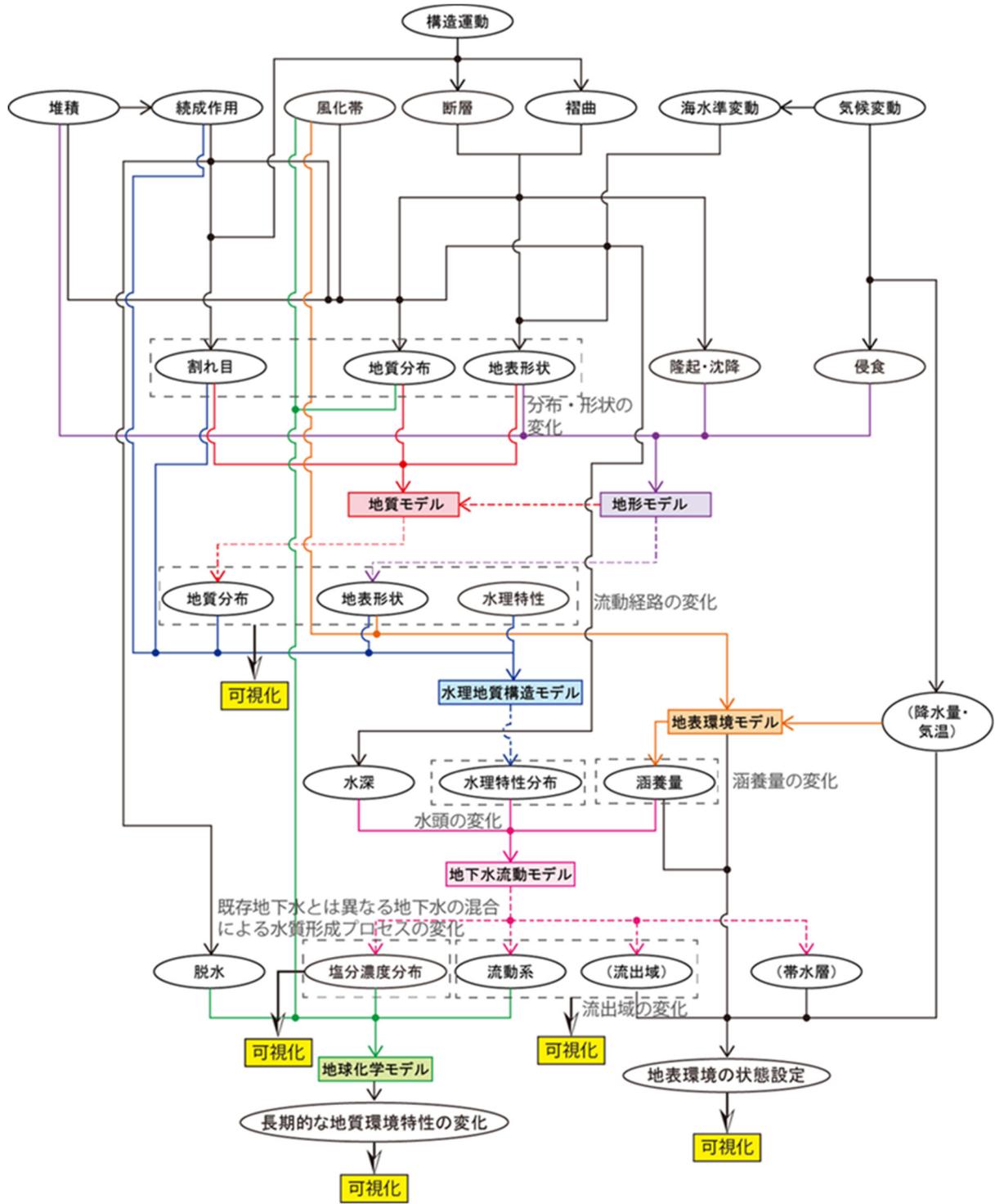


図 2.1-3 統合数値モデル構築までのフロー図

2.1.3 地下水流動状態の長期変動性評価に関する統合化データフローの提示

本事業における東濃地域及び幌延地域をそれぞれ山間部、平野部の事例とした検討の結果、地形変化及び気候変動が、地下水流動状態の長期的な変動性を評価するにあたっての重要な影響因子であることが確認できたとともに、それらが地下水流動状態に及ぼす長期的な変動性を定量的に評価する手法を構築した。構築した評価手法の概要は 2.3 に示す。図 2.1-4 に示すように地層処分事業では地質環境特性の推定が実施されるが、その際に構築した評価手法を適用することで、地下水流動状態の長期変動性を定量的に評価することができるため、より現実的なサイト選定が可能となる。地形変化及び気候変動が及ぼす影響の評価手法の体系化に資することを目的として、地下水流動状態の長期変動性評価を実施するための各分野のモデル間の関連性や統合の流れ、必要となるデータを統合化データフロー形式で提示した（図 2.1-5）。統合化データフローには、地下水流動状態の長期変動性評価を実施するための各モデル間の関連性や統合の流れを整理した。また、本事業において革新的な要素技術として技術開発を進めてきた後背地解析技術、涵養量推定技術及び炭酸塩鉱物年代測定技術の反映先も図示した。

地形・地質モデルのアウトプットとなる現在及び過去の地形や地質分布の数値情報は、地表環境モデル、水理モデル、地球化学モデルの基盤情報となる位置付けにある。地表環境モデルにおいては、地形・地質モデルで数値化した現在及び過去の地形データや水文環境データに基づき、過去から現在までの地表環境の変遷が解釈される。地球化学モデルにおいては、地形・地質モデルで推定した過去の地形モデルや水理モデルで推定した過去から現在までの地下水流動状態の変遷の情報に基づき、現在観察される水質分布の長期変化や pH・酸化還元電位の持続性といった過去から現在までの地球化学環境の変遷が推定される。水理モデルでは、各モデルにおける情報に基づき構築する複数の水理地質構造モデルを用いて、本事業で構築した地下水流動状態の長期変動性の評価手法を適用することで、過去から現在までの地下水流動状態の変遷の推定や地下水流動状態の長期変動性の評価が可能となる。各モデルの統合化データフローは、2.2 以降に示す。

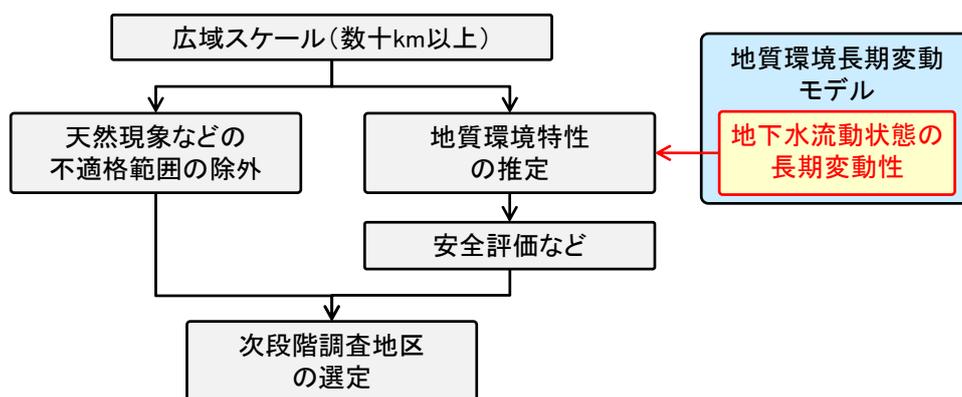


図 2.1-4 地質環境長期変動モデルの活用方法のイメージ

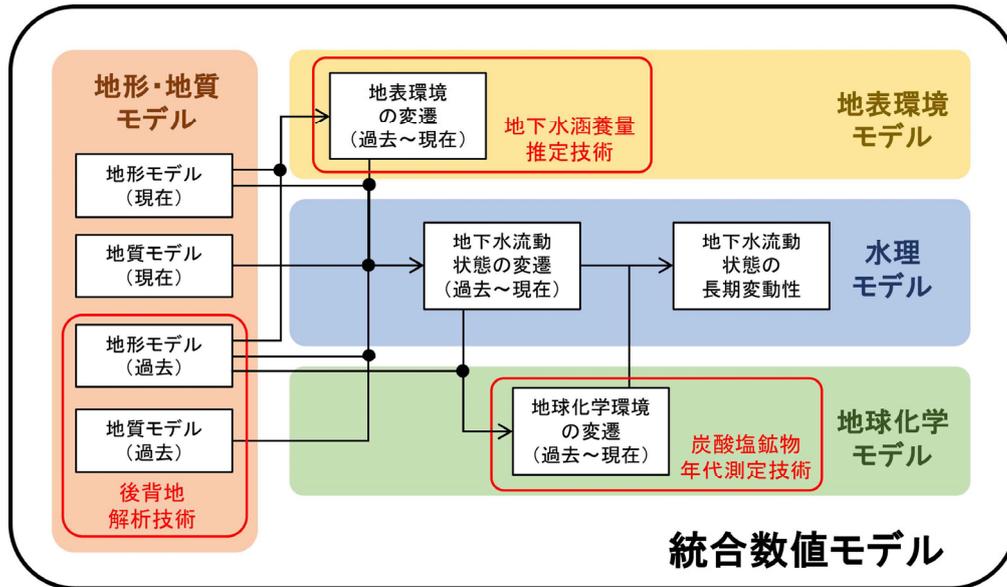


図 2.1-5 地下水流動状態の長期変動性評価に関する統合化データフロー

2.1.4 モデルの不確実性の定量化に向けた検討

スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB）では安全評価に含まれる不確実性を、システムの不確実性（System uncertainty）、概念の不確実性（Conceptual uncertainty）及びデータの不確実性（Data uncertainty）に区分している（SKB, 2011¹¹）。システムの不確実性は包括性の問題であり、シナリオに関連する全ての FEP が適切な方法で抽出されているか、また、除外された FEP は適切であったかなどが挙げられる。概念の不確実性は地質環境特性の変化に関する天然のプロセスの理解に関連しており、そのプロセスの理解だけではなく、数値モデル構築の際にどのように単純化するかという問題も含む。データの不確実性については、数値モデル構築に利用されるデータに関する不確実性であり、データ間の相関や認識に関する不確実性（知識の欠如）と偶然性に関する不確実性（天然の変動性）の区別を含んでいる。これらの考え方を本事業での統合数値モデル構築に適用した場合、システムの不確実性については、2.1.1 で述べたシナリオ構築や FEP の整理を通して、低減されつつある。具体的には、統合シナリオを構築することで各 FEP 間の相関性や網羅性を確保したことや、各 FEP に対する現状の知見を整理することで除外する FEP を明確にしたことが挙げられる。概念の不確実性については、具体的に統合数値モデルを構築する過程において、どのようにそのモデルを現実的に単純化していくかが課題となる。この点については、2.1.6 で後述する可視化の過程でどのような内容を表示させるかという課題と共通している。データの不確実性については、オプションシナリオを構築する過程で、基本シナリオとの差が、知識の欠如に起因するのか、天然の変動性に依存するかを判断することによって、不確実性を明示できると考えられる。

地下水流動状態の長期変動性評価を行うために必要となるデータや、そのデータの解釈、モデル化などの各過程で様々な不確実性が内在する。本事業で構築した評価手法を適用することで、これらの不確実性が地下水流動状態の長期変動性に及ぼす影響の定量的な評価が可能である。地下水流動状態の長期変動性の評価に不確実性を反映させる方法は、モデルバリエーションとパラメータ設定の二つに大別することができる（表 2.1-4）。モデルバリエーションでは、データの解釈や概念モデルなどの違いに基づいて、モデル化領域の範囲やモデルの上部境界面となる地形分布、数値化手法などが異なる複数の水理地質構造モデルを構築することで、地下水流動状態の長

期変動性の評価に反映させる。また、パラメータ設定ではデータ自体やデータの解釈の違いに基づいて、水理地質構造の水理特性や涵養量、海水準の設定が異なる複数の水理地質構造モデルを構築することで、地下水流動状態の長期変動性の評価に反映させる。

幌延地域を平野部の事例として、モデルバリエーションによる不確実性の定量化及び評価の考え方を示す。幌延地域において古地形を復元するにあたっては、幌延断層周辺の丘陵・山地の発達時期に不確実性があり、複数の地形変遷の概念が設定できる（表 2.1-5）。また、その概念の数値化処理もいくつかの方法が考えられる。これに基づき図 2.1-6 に示すように、三種類の地形モデルを構築し、それぞれの地形モデルを用いた地下水流動解析を実施することで、古地形の不確実性が地下水流動状態に及ぼす影響を定量的に評価することができる。次に、東濃地域を山間部の事例として、パラメータ設定による不確実性の定量化及び評価の考え方を示す。本事業で構築した涵養量推定技術を用いて涵養量を推定するにあたっては、気温、降水量、河川流出量、蒸発散量といった水文環境の各構成要素を推定する必要があるが、このうち、現在の気温や降水量は一定の値に収束する性質のものではないことから、それらの気象条件の影響を受ける現在の蒸発散量や河川流量もばらつきを有するパラメータとなる（表 2.1-6）。また、現在の各構成要素に基づいて推定される過去の各構成要素も、ばらつきを有するパラメータとなり、その結果として表 2.1-6 に示すように、涵養量は幅を持った値として推定される。表 2.1-7 に示すように、涵養量の推定結果に基づき異なる上部境界条件を設定した地下水流動解析を実施することで、涵養量の不確実性が地下水流動状態に及ぼす影響を定量的に評価することができる。

東濃地域（山間部）を事例として、地形・地質モデルを構築する際の各不確実性が、地下水流動状態の長期変動性評価に及ぼす影響分析の結果、地形変化の不確実性のうち古地形復元の概念やプロセスの違いに起因する不確実性が長期変動性の評価結果に及ぼす影響が大きく、地形・地質分布の復元解像度や地形面の認定・対比の違いが及ぼす影響は小さいことが明らかとなった（日本原子力研究開発機構, 2017¹²⁾）。このことから、古地形を復元するにあたっては、地表地形の細かな谷や尾根などの起伏や地質分布の復元精度を向上させるよりも、着目する地下水の涵養域及び流出域となる主要な山地や谷などの形成や位置といった大局的な地形分布を復元させることが重要であると考えられる。また、大局的な地形分布の復元に関する不確実性が適切に抽出されているかということが焦点になる。

統合数値モデルの構築や地下水流動状態の長期変動性評価に内在する各不確実性は可能な限り低減することが望ましいが、不確実性を完全に排除することは不可能である。本事業においては、その完全に排除できない不確実性について、地下水流動状態の長期変動性評価に及ぼす影響を定量的に評価することが可能な手法を概ね整備できたと言える。

表 2.1-4 不確実性の反映方法

	モデルバリエーション	パラメータ設定
地形・地質モデル	<ul style="list-style-type: none"> 抽出したFEPの適切性 地形・地質事象に関する天然のプロセスの理解 数値モデルの構築方法 地形・地質の分布・形状とその変化に関する情報の精度の違い 	—
水理モデル	<ul style="list-style-type: none"> 抽出したFEPの適切性 モデル化領域設定の違い モデル化手法の違い 離散化手法の違い 	<ul style="list-style-type: none"> 水理特性の設定値やばらつき 水理地質構造区分設定の違い
地表環境モデル	<ul style="list-style-type: none"> 抽出したFEPの適切性 	<ul style="list-style-type: none"> 境界条件の設定値やばらつき

表 2.1-5 古地形の推定の概念化及び数値化（平野部：幌延地域の例）

	地形変遷の概念	数値化処理
モデルA	海底にあった地形（丘陵）が150万年かけて現在の標高になったと仮定	—
モデルB	1 Ma以降、幌延断層以東（丘陵地）が平衡状態にあったと仮定	サロベツ向斜～幌延断層間を傾斜補正
モデルC		大曲断層～幌延断層間を傾斜補正

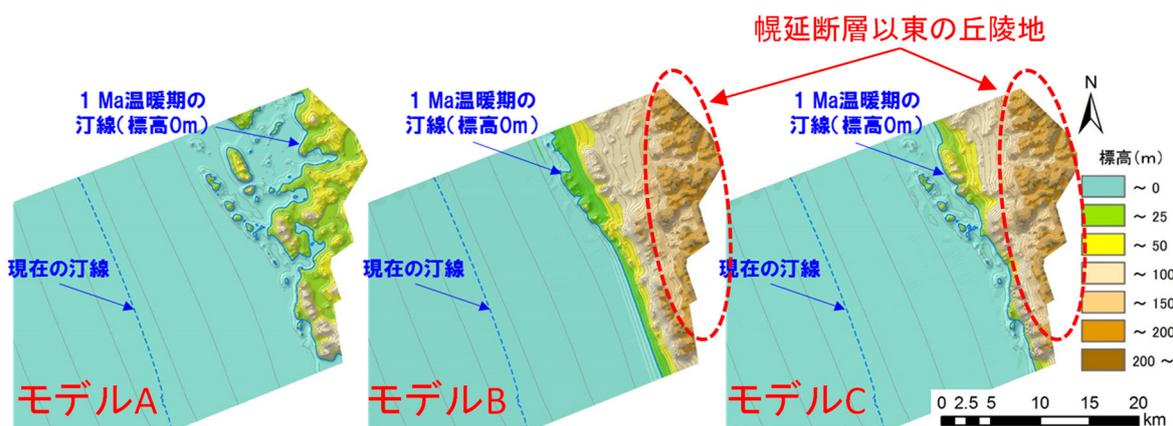


図 2.1-6 地形モデルのバリエーション（幌延地域の例：100 万年前モデル）

表 2.1-6 水文環境の各構成要素の推定（山間部：東濃地域の例）

時間断面	現在		14万年前		45万年前	
	温暖期	寒冷期	温暖期	寒冷期	温暖期	寒冷期
気候	温暖期	寒冷期	温暖期	寒冷期	温暖期	寒冷期
気温（℃）	13.6	3.6～ 5.6	12.6～ 14.6	3.6～ 5.6	12.6～ 14.6	3.6～ 5.6
降水量 （mm/年）	1759	818～ 935	1495～ 1710	818～ 935	1495～ 1710	818～ 935
河川流出量 （mm/年）	1198	557～ 637	882～1115	483～ 610	802～ 1035	439～ 566
実蒸発散量 （mm/年）	443	176～ 229	416～ 470	176～ 229	416～ 470	176～ 229
涵養量 （mm/年）	118	69～ 85	104～ 231	96～ 159	174～ 322	140～ 204

表 2.1-7 地下水流動解析の境界条件の設定例

水理モデル		現在	14万年前	45万年前
上部境界 条件（涵養量） [mm/年]	最小値	69	96	140
	平均値	93.5	163.5	231
	最大値	118	231	322

2.1.5 モデルの妥当性の検討

構築した統合数値モデルについては、そこに含まれる不確実性を評価するとともに、検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation) が重要である。検証は、仮定する数理モデルに対する数値計算が妥当であるかどうか、妥当性確認は、対象とする物理現象に対して適切な計算結果が得られるかどうかに関するものとされている (高田, 2011¹³⁾)。そのため、統合数値モデルの検証に関しては、適正な手法により計算がなされているかということが焦点になる。他方、妥当性確認は、数値モデルの計算結果が実際の現象を正しく再現しているかということが焦点になる。

数値モデルの妥当性確認の事例として、本事業では地形変化シミュレーションを用いて、地形的発達履歴に基づき復元した過去の地形モデルの信頼性や不確実性の幅について検討した。その結果、地形変化シミュレーションが数十万年を対象とした地形変化の推定に有効な技術であることが確認でき、その手順や留意点を技術的ノウハウとして整理した。古地形推定技術と地形変化シミュレーションを組み合わせることで、推定した古地形モデルの妥当性確認やそのモデルの不確実性の定量評価が可能となる。抽出した不確実性は、モデルバリエーションとして地下水流動状態の長期変動性評価に反映することができる。

また、東濃地域 (山間部) 及び幌延地域 (平野部) を事例として、地下水中の塩分濃度の変化に着目した移流分散解析の実施を通じて、¹⁴C 濃度などに基づき推定した地下水年代や地下水中の塩化物イオン濃度が水理モデルの妥当性確認及び更新に有効であることが示された (日本原子力研究開発機構, 2016¹⁴⁾, 2017¹²⁾)。解析的に推定した涵養域から評価対象地点までの移行時間を地下水の滞留時間として、¹⁴C 濃度などに基づく地下水年代と比較することで、その推定結果の妥当性を確認する。さらに、ボーリング調査で得られた地下水中の塩化物イオン濃度の情報に基づき、解析で推定した塩分濃度 (比濃度) 分布の妥当性を確認することができる。上記のアプローチは、図 2.2.3-3 にフローとして提示した。この一連のアプローチを実施することで、水理モデルの妥当性確認及び更新ができるとともに、現在の濃度分布を再現するための水理学的条件並びに地球化学的条件やその長期的な変動性を定量的に推定することが可能となる。

2.1.6 モデルの可視化技術の提示

モデルの可視化技術については、既存技術を利用することを前提とし、既存の可視化技術に関するレビューやインタビューを行うとともに、可視化技術の検討と合わせ、可視化すべき項目についても整理し、効果的な可視化手法を選択するための基盤的な情報を整備した (日本原子力研究開発機構, 2015¹⁵⁾)。また、本事業では、百万年以上に及ぶ時間スケールで変化していく地質環境を可視化するための技術が必要となることから、時間変化する現象を可視化する方法について検討・整理し、その方法のいくつかについて適用例を提示するとともに (日本原子力研究開発機構, 2016¹⁴⁾, 2017¹²⁾)、地質環境の長期安定性に係る評価技術の共有化や理解促進を図ることを目的として、様々な可視化事例についてカタログ形式で整理した (日本原子力研究開発機構, 2017¹²⁾)。これは地下という一般には見ることができない空間において時間的に変化する現象を分かりやすく表現することを目指した取り組みの一つであり、整理した可視化カタログは、原子力機構の公開 HP (<http://www.jaea.go.jp/04/tono/gsp/visualizations.html>) に掲載した。

また、過去の地形・地質発達史や地表環境の変遷履歴などの情報、数値モデル及び数値シミュレーションの結果を用いて、過去百万年前から現在までの地形変化や気候変動による地表環境の変化及びそれらに伴う地下水の流れを対象に、画像や動画などの効果的な可視化手法について検討した (図 2.1-7)。さらに可視化手法の検討結果を踏まえて、地下水流動の可視化や地形変化・気候変動の可視化コンテンツと簡易な CG を組み合わせて、「過去百万年前から現在までの地質環境の長期的な変化を表現できることやそのモデル化技術の整備が進められていること」をコアメ

メッセージとした、専門家以外の一般層を対象とした、山間部と平野部を事例とした可視化映像を制作した（図 2.1-8、図 2.1-9）。

2.1.7 まとめ

本事業では、地表環境と（深部）地質環境における各分野（地形、地質、水理、地球化学）を統合的に取り扱い、地表環境モデルと地質環境モデルの各モデルを統合的に表現する数値モデル（統合数値モデル）を構築するための方法論の提示を目的とした検討を進めてきた。

その結果、幌延地域と東濃地域をそれぞれ平野部と山間部の事例とした分野間の FEP の相互関係やその相互関係を踏まえた統合数値モデルを提示するとともに、統合数値モデル構築の流れや考え方をフロー図などで取りまとめた。また、統合数値モデル構築に内在する不確実性の定量化及び評価手法や、モデルの妥当性確認の手法を具体例として示した。さらに、既存の可視化技術のレビューや統合数値モデルの可視化手法の検討、研究成果の紹介映像の制作を通じて、超長期の時間スケールで変化する地表環境や地下空間を効果的に可視化するための手法や演出を技術的知見として整理した。

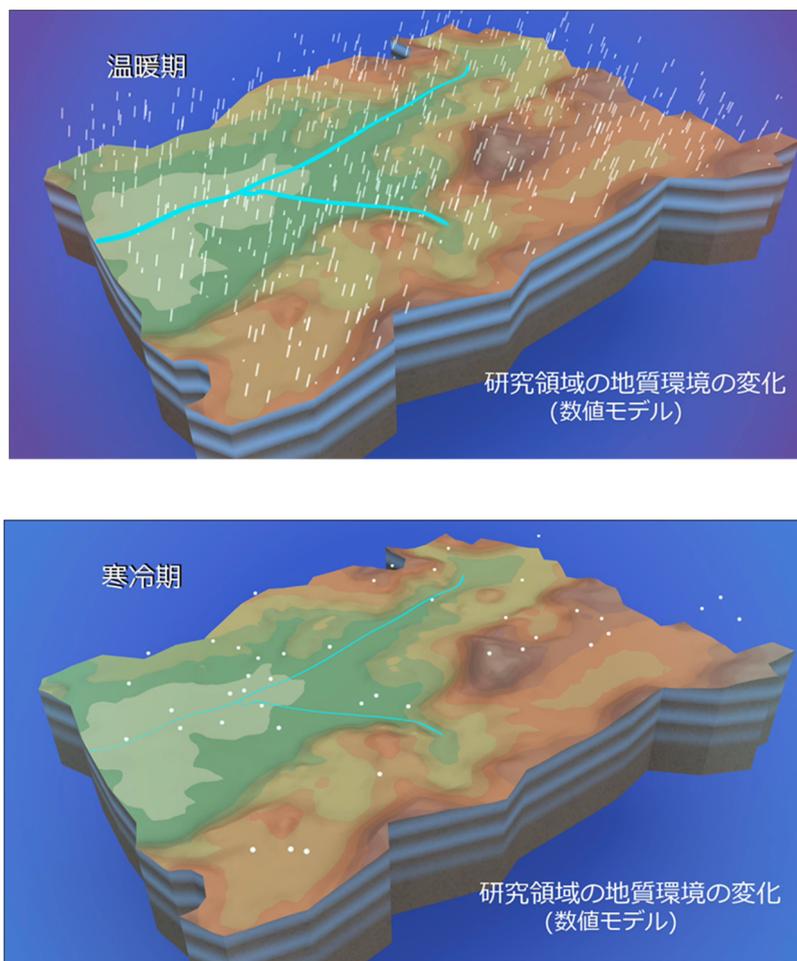


図 2.1-7 気候変動の表現の例
（上段：温暖期の表現、下段：寒冷期の表現）

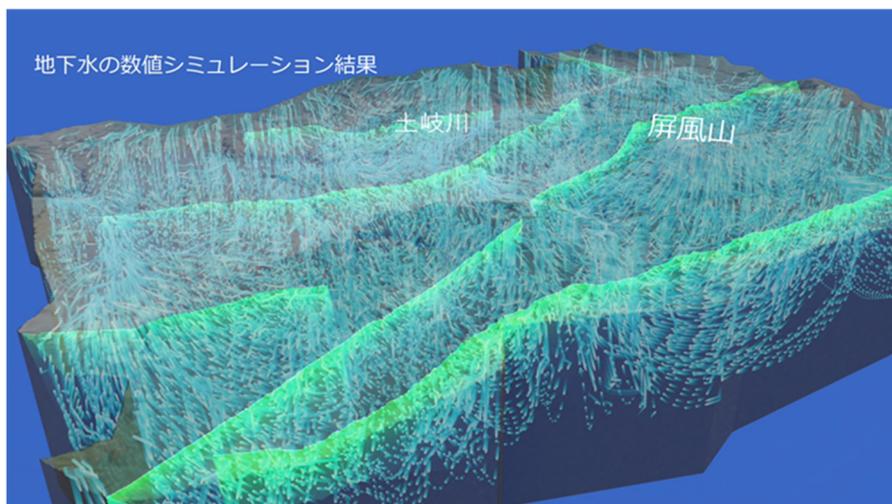
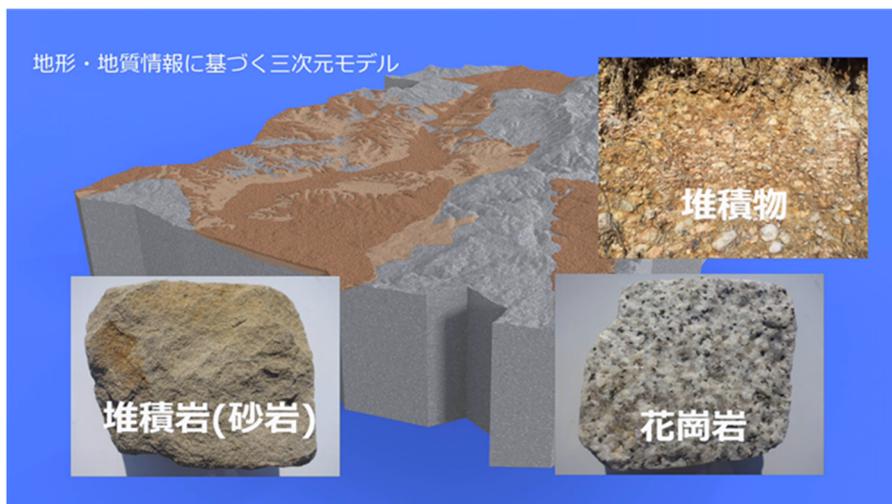
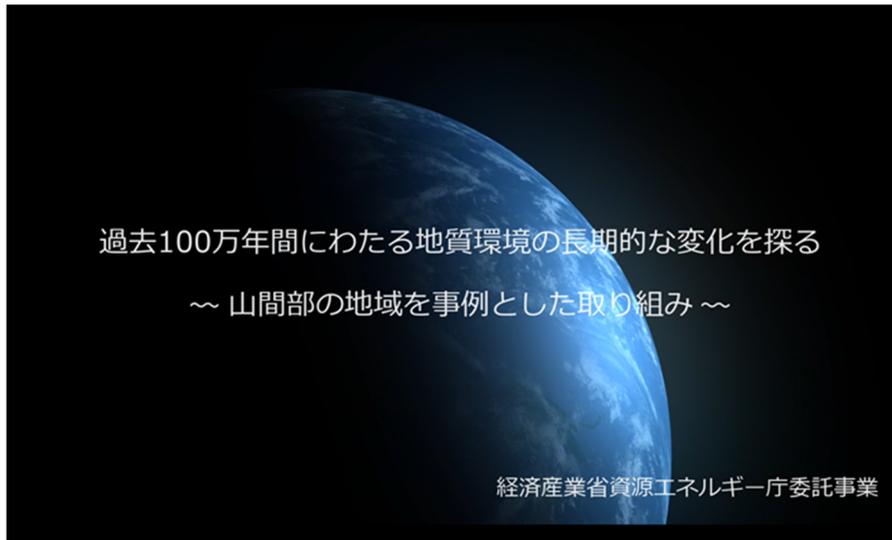


図 2.1-8(a) 制作した映像コンテンツのスクリーンショット（山間部：東濃地域の例）
（上段：イントロダクション、中段：研究領域における現在の地質環境の説明、
下段：研究領域における現在の地下水流動の説明）

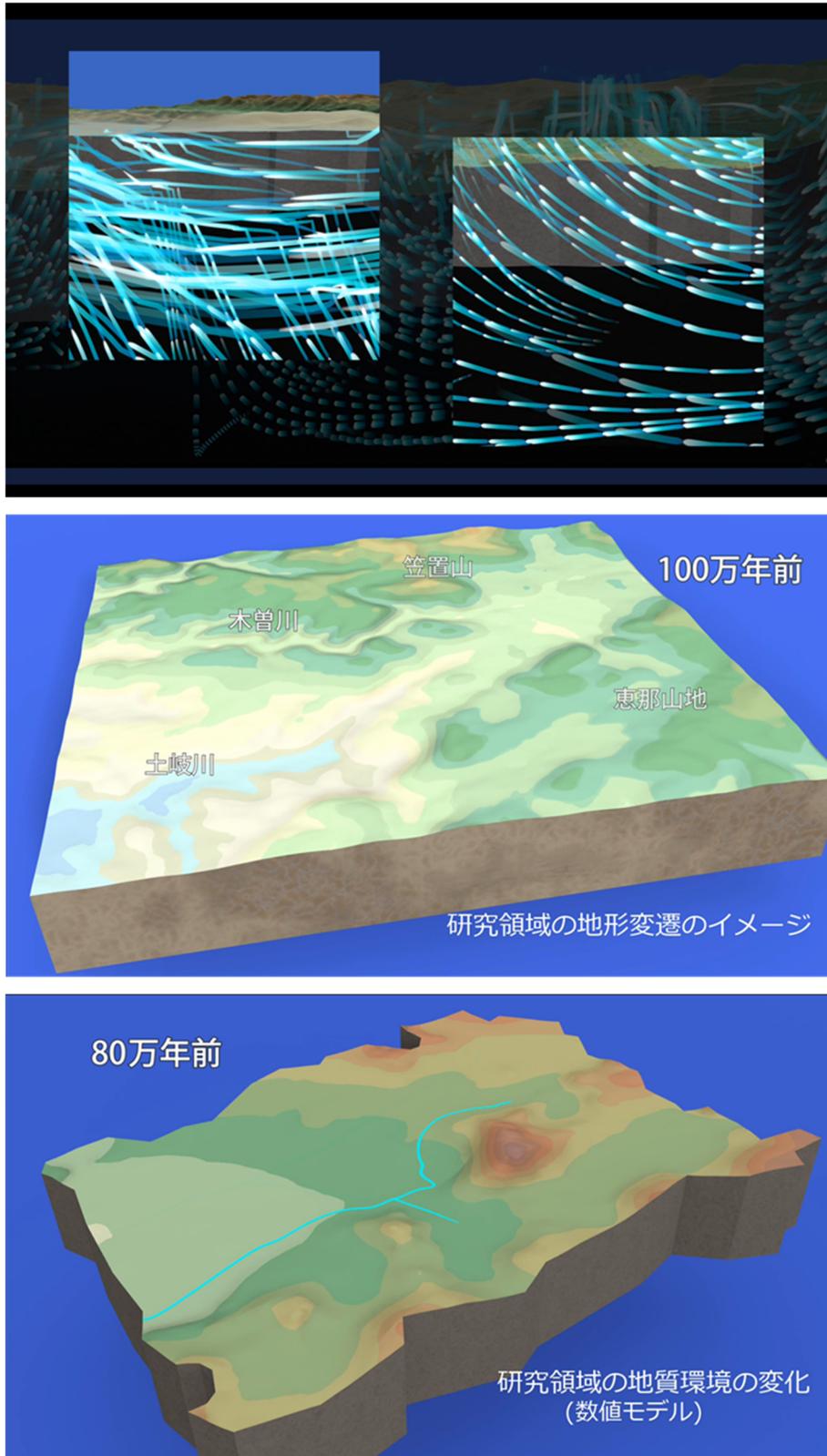


図 2.1-8(b) 制作した映像コンテンツのスクリーンショット（山間部：東濃地域の例）
 （上段：地表と地下数 km の地下水流動の比較、中段：過去から現在の地形・地表環境の変化の
 概要紹介、下段：研究領域における地形変化の説明）

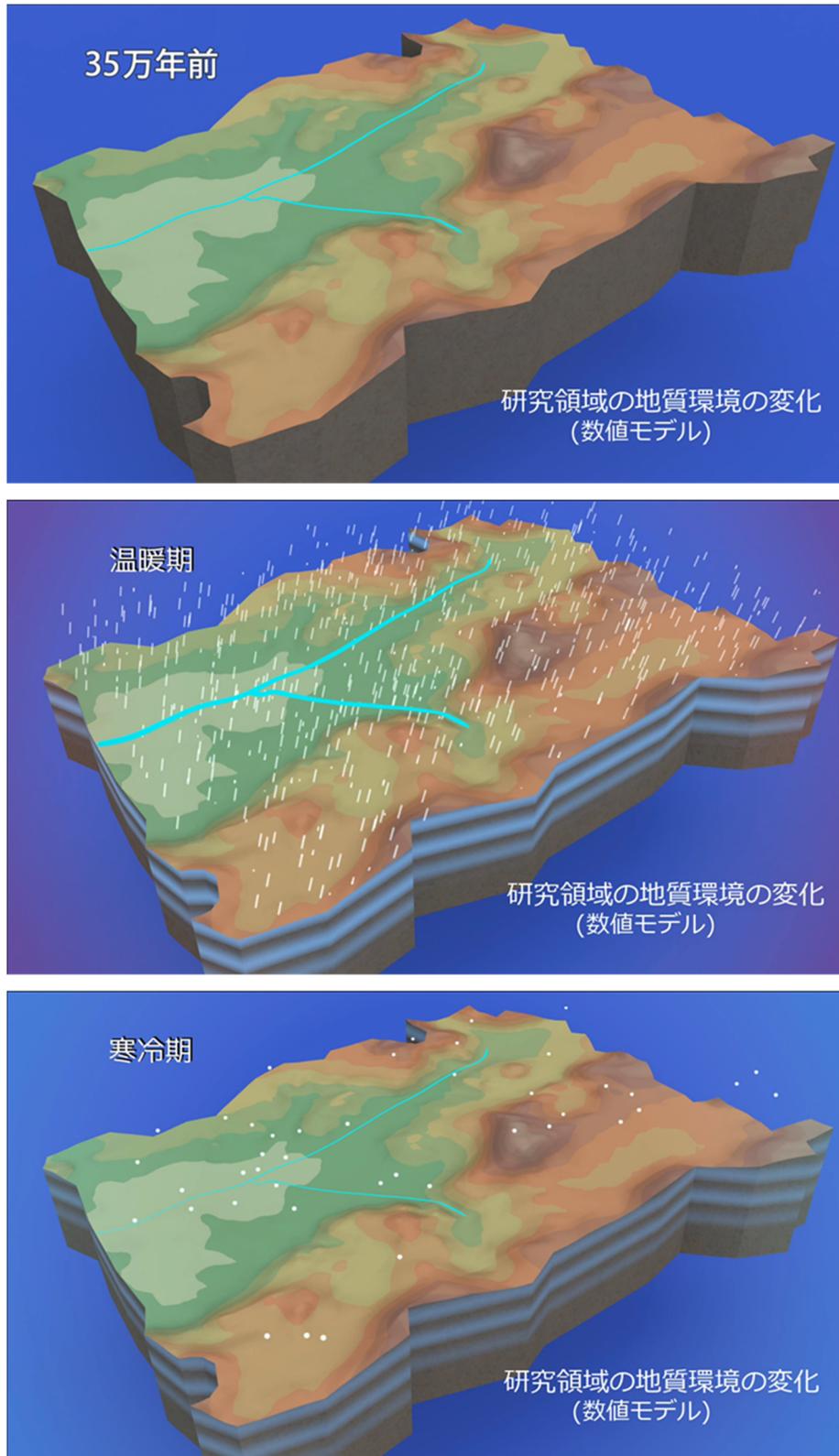


図 2.1-8(c) 制作した映像コンテンツのスクリーンショット（山間部：東濃地域の例）
 （上段：研究領域における地形変化の説明、中段：研究領域における気候変動の説明（温暖期）、
 下段：研究領域における気候変動の説明（寒冷期））

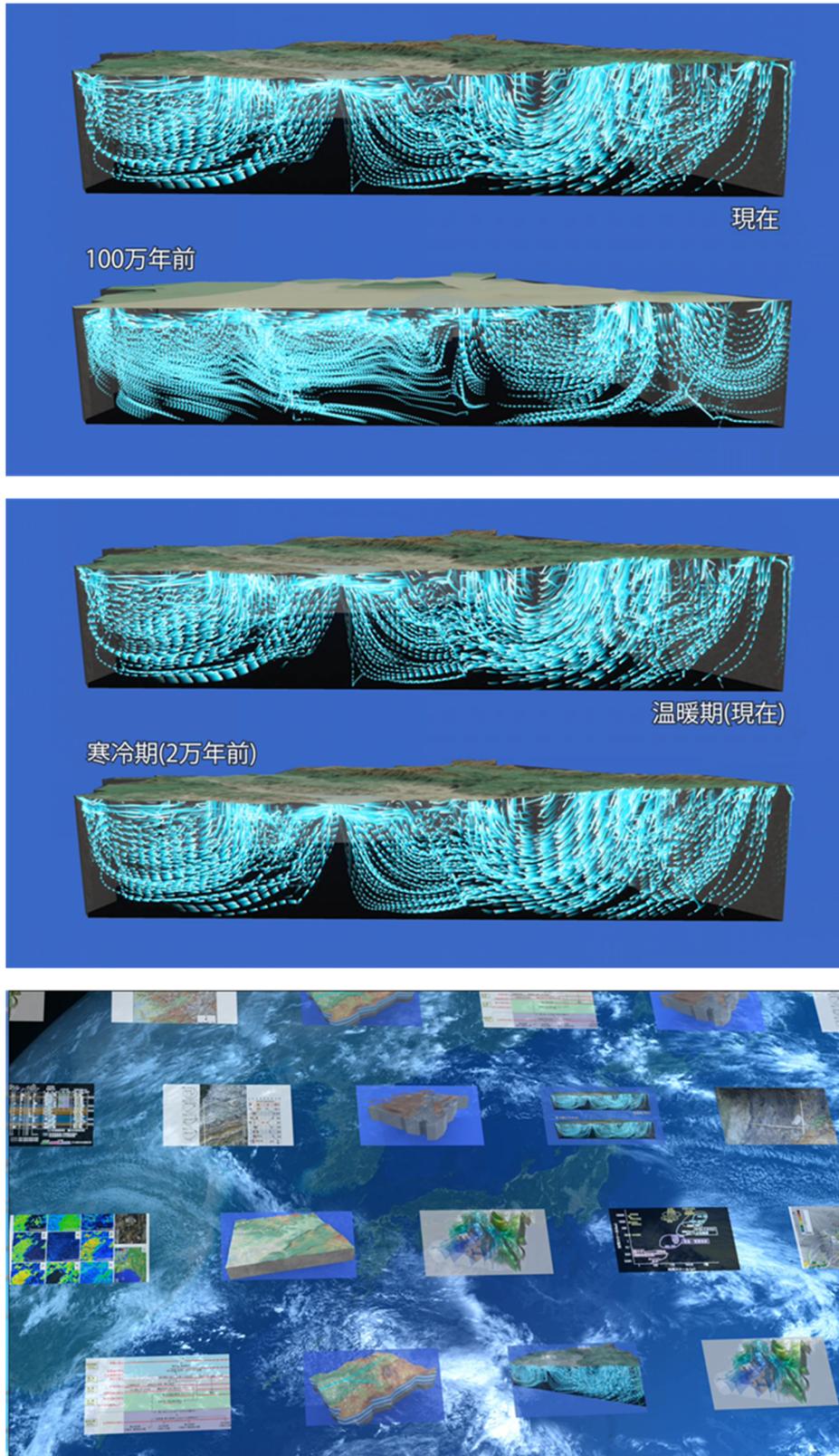


図 2.1-8(d) 制作した映像コンテンツのスクリーンショット（山間部：東濃地域の例）
 （上段：現在と過去の地形条件における地下水流動の比較、中段：温暖期と寒冷期における
 地下水流動の比較、下段：エンディング）

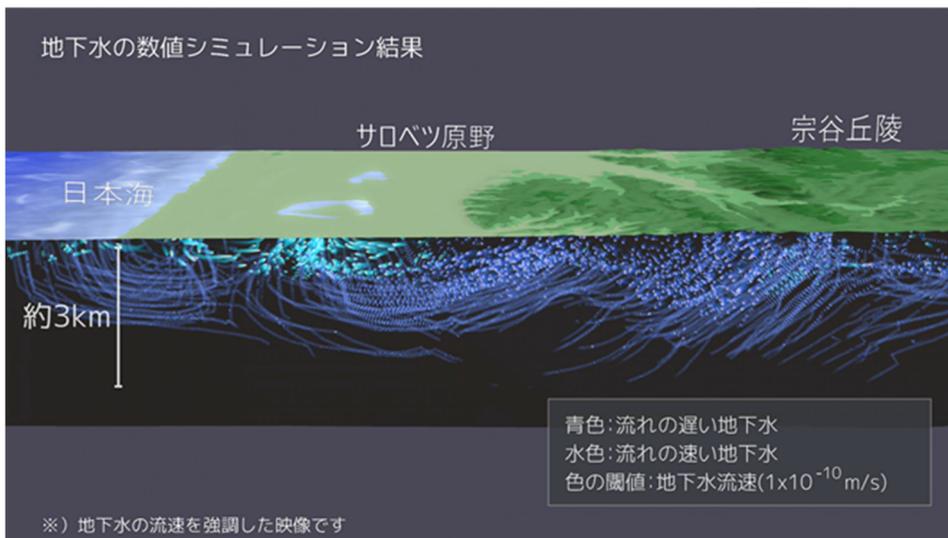
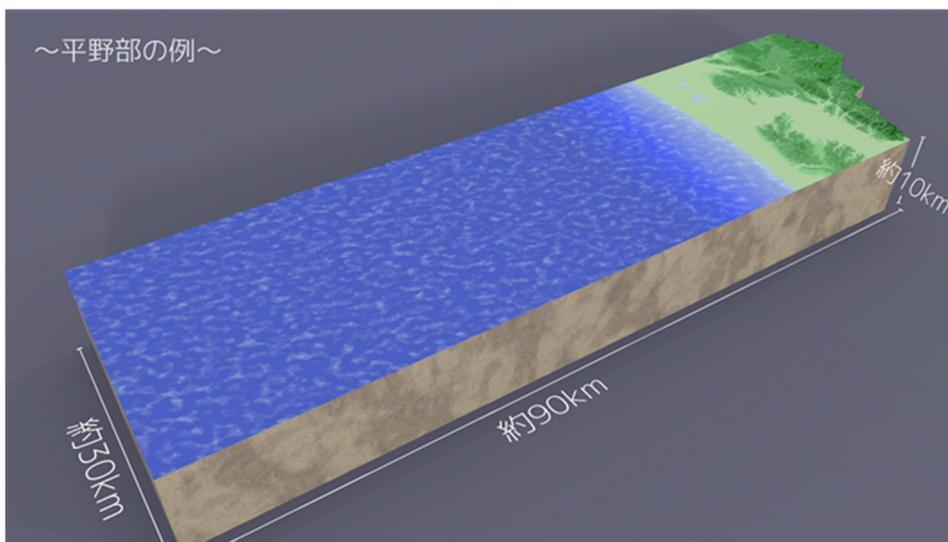
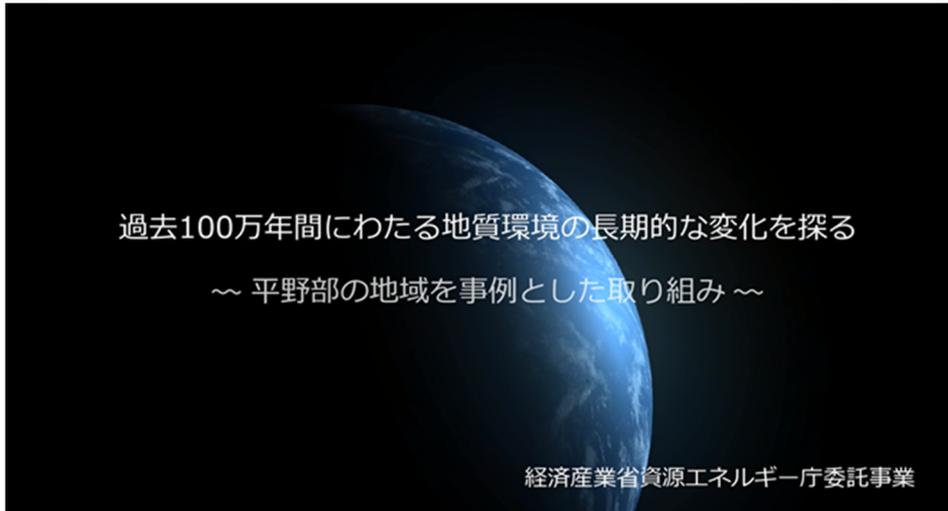


図 2.1-9(a) 制作した映像コンテンツのスクリーンショット（平野部：幌延地域の例）
 （上段：イントロダクション、中段：研究領域の説明、
 下段：研究領域における現在の地下水流動の説明）

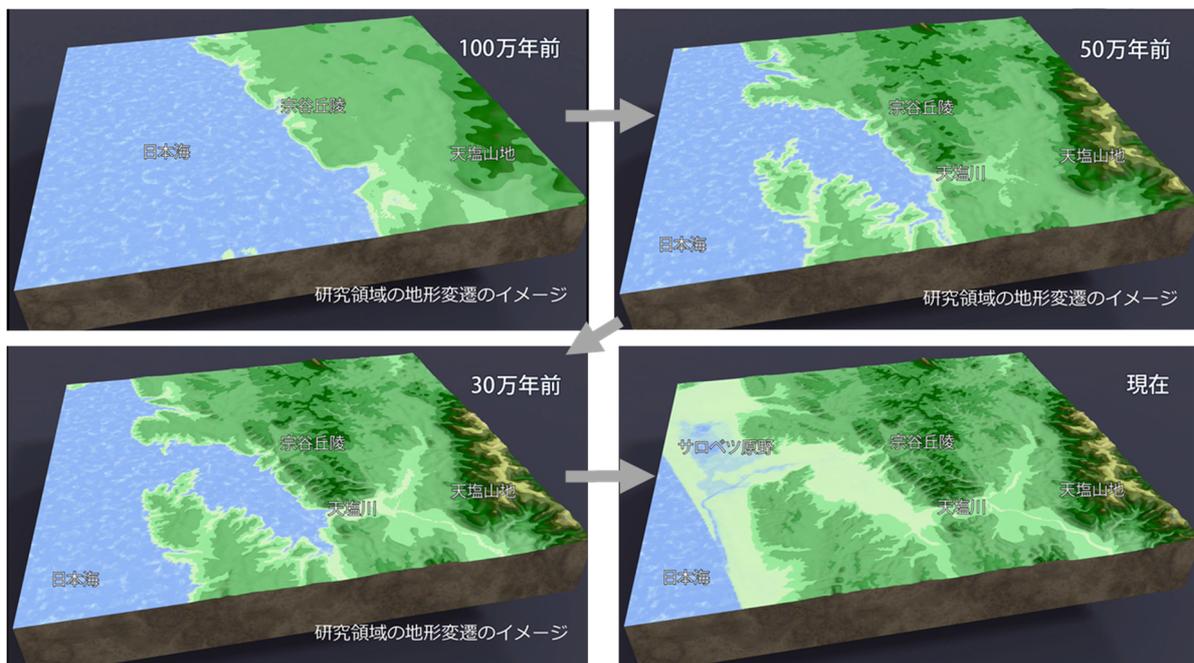
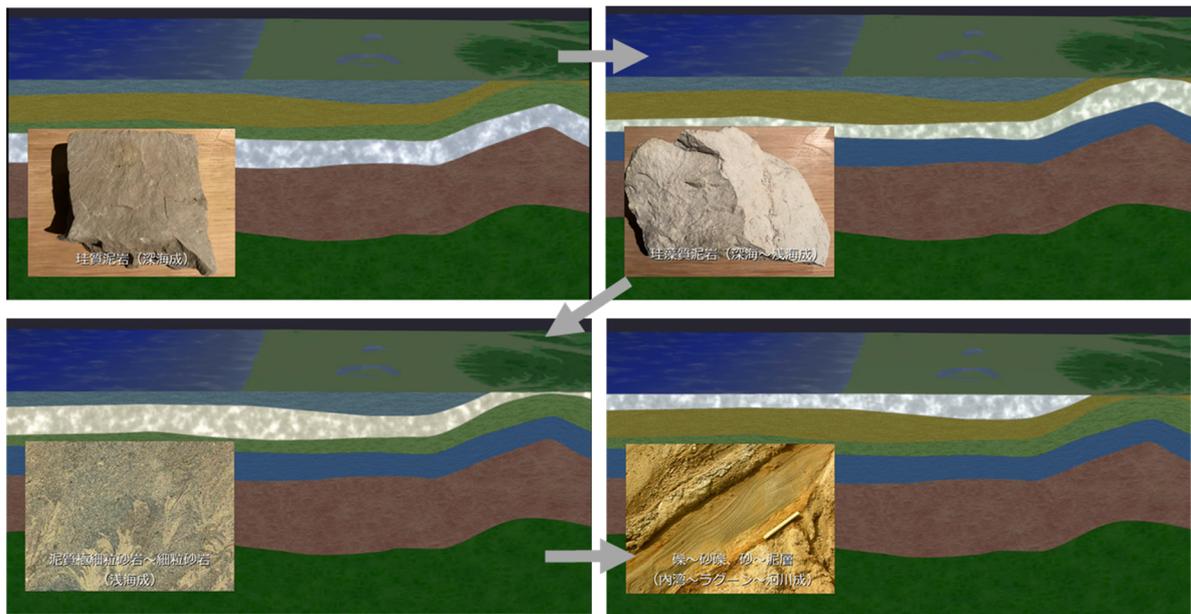


図 2.1-9(b) 制作した映像コンテンツのスクリーンショット（平野部：幌延地域の例）
 （上段：研究領域における現在の地質環境の説明、下段：研究領域における地形変化の説明）

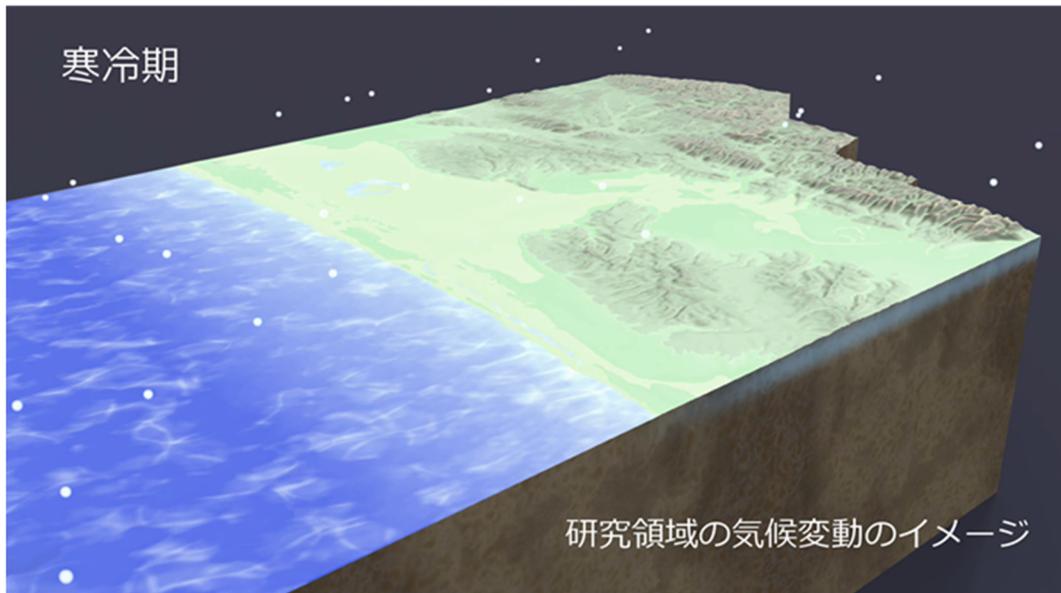
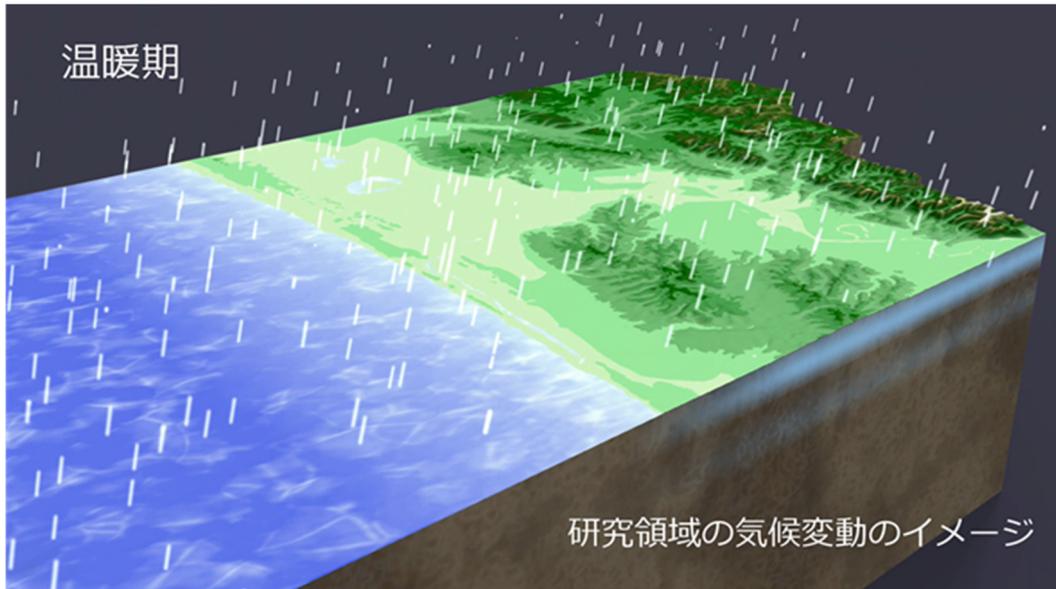


図 2.1-9(c) 制作した映像コンテンツのスクリーンショット（平野部：幌延地域の例）
（上段：研究領域における気候変動の説明（温暖期）、下段：研究領域における気候変動の説明（寒冷期））

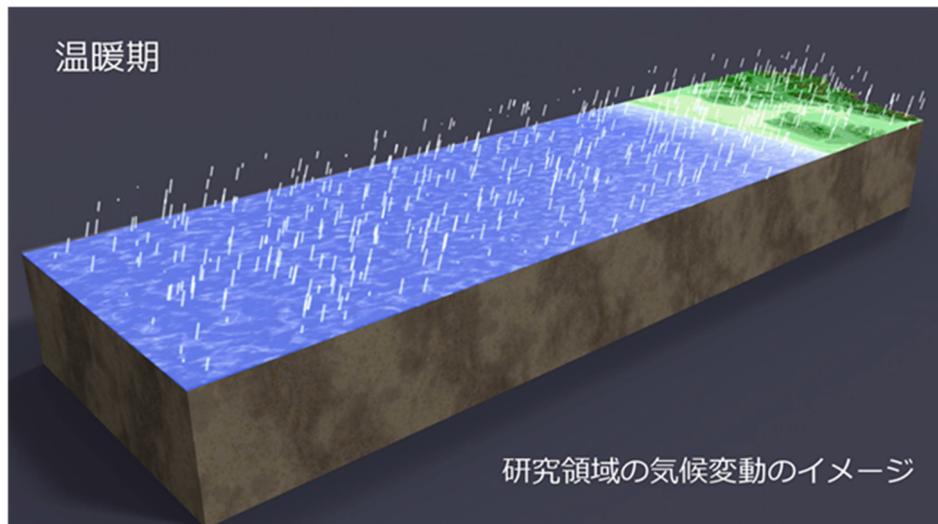
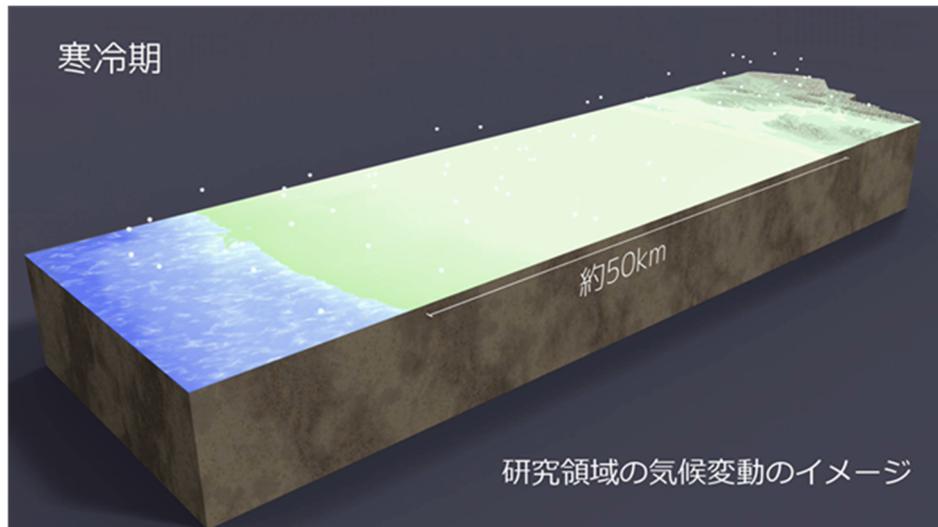
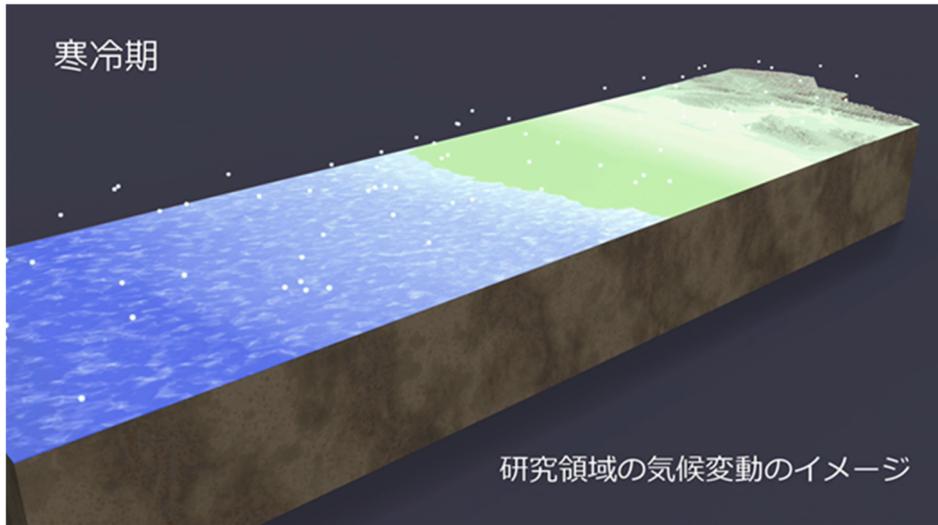


図 2.1-9(d) 制作した映像コンテンツのスクリーンショット（平野部：幌延地域の例）
（研究領域における海水準変動の説明）

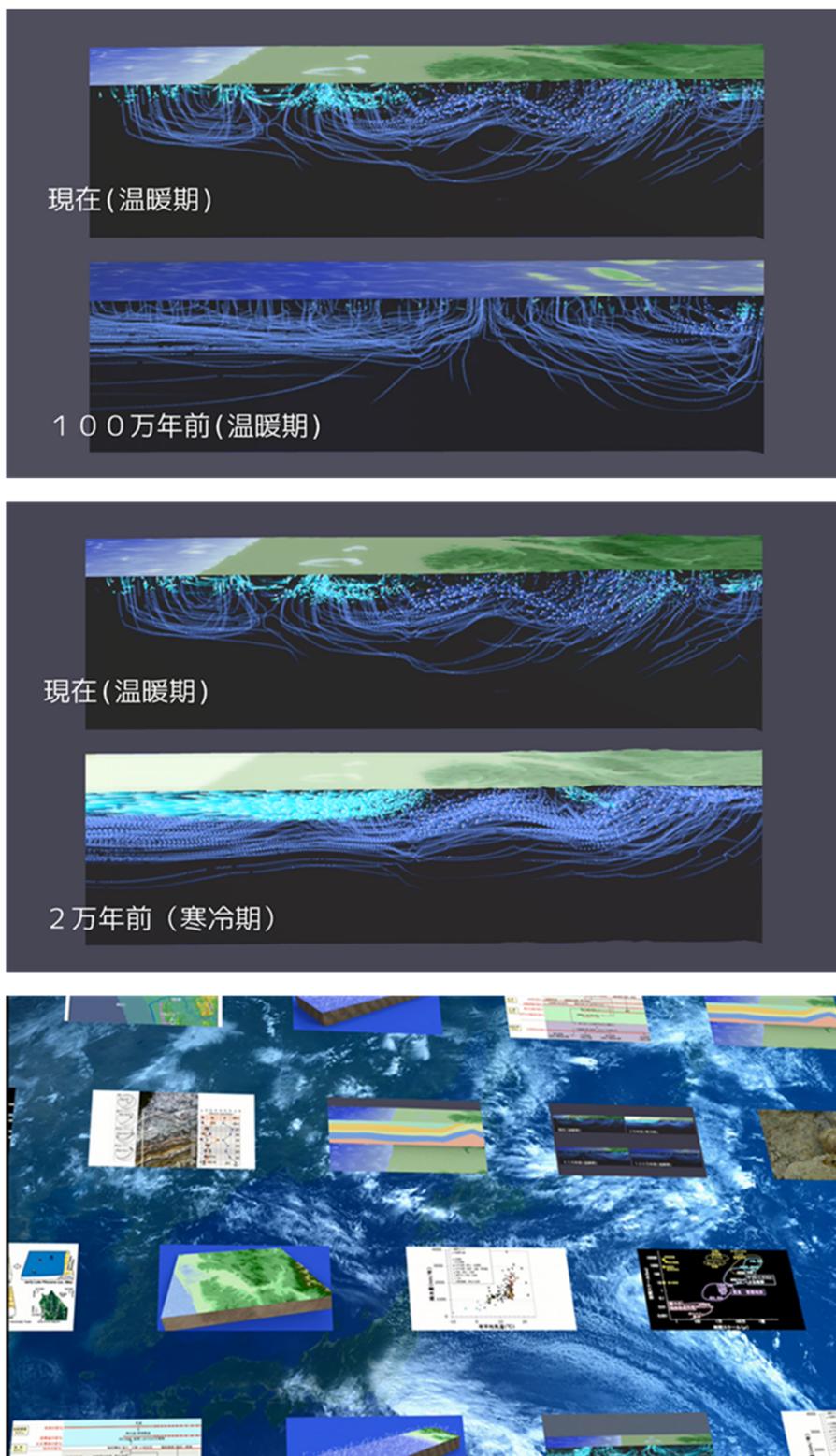


図 2.1-9(e) 制作した映像コンテンツのスクリーンショット (平野部: 幌延地域の例)
 (上段: 現在と過去の地形条件における地下水流動の比較、中段: 温暖期と寒冷期における地下水流動の比較、下段: エンディング)

引用文献

- 1) BIOMOVs II, Development of a Reference Biospheres Methodology for Radioactive Waste Disposal, BIOMOVs II Technical Report No.6, Swedish Radiation Protection Institute, Stockholm, Sweden, 1996.
- 2) OECD/NEA, Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste An International Database, OECD, 2000, 88p.
- 3) 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術 WG, 最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価 ―地質環境特性及び地質環境の長期安定性について―,
http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denryoku_gas/genshiryoku/chisou_shobun_wg/report_001.pdf (2015.1.29)
- 4) Yuguchi, T., Iwano, H., Kato, T., Sakata, S., Hattori, K., Hirata, T., Sueoka, S., Danhara, T., Ishibashi, M., Sasao, E. and Nishiyama, T., Zircon growth in a granitic pluton with specific mechanisms, crystallization temperatures and U-Pb ages: Implication to the 'spatiotemporal' formation process of the Toki granite, central Japan, *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 2016, vol.111, pp.9-34.
- 5) Iwatsuki, T., Satake, H., Metcalfe, R., Yoshida, H. and Hama, K., Isotopic and morphological features of fracture calcite from granitic rocks of the Tono area, Japan: a promising palaeohydrogeological tool, *Applied Geochemistry*, vol.17, 2002, pp.1241-1257.
- 6) 尾上博則, 笹尾英嗣, 三枝博光, 小坂 寛, 過去から現在までの長期的な地形変化が地下水流動特性に与える影響の解析的評価の試み, 日本原子力学会和文論文誌, vol.8, 2009, pp.40-53.
- 7) 安江健一, 秋葉文雄, 大平寛人, 石井英一, 北海道北部, サロベツ背斜付近に分布する声間層上部の鮮新統上部珪藻化石帯とフィッシュン・トラック年代, 地質学雑誌, vol.112, 2006, pp.284-293.
- 8) 新里忠史, 舟木泰智, 安江健一, 北海道北部, 幌延地域における後期鮮新世以降の古地理と地質構造発達史, 地質学雑誌, vol.113 (補遺), 2007, pp.119-135.
- 9) Mizuno T., Iwatsuki T., Saegusa H., Kato T., Matsuoka T., Yasue K., Ohyama T. and Sasao E., Challenge to increase confidence in geological evolution models, AGU fall meeting 2014, <https://agu.confex.com/agu/fm14/meetingapp.cgi#Paper/9951> (2015.2.25)
- 10) 日本原子力研究開発機構, 平成 24 年度地層処分技術調査等事業地層処分共通技術調査地質環境総合評価技術高度化開発 6 カ年とりまとめ報告書, 2013, 166p.
- 11) SKB, Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark Main report of the SR-Site project, *SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING AB (SKB) Technical Report*, TR-11-01, 2011, 276p.
- 12) 日本原子力研究開発機構, 平成 28 年度地層処分技術調査等事業地質環境長期安定性評価確認技術開発報告書, 経済産業省資源エネルギー庁, 2017, 230p.
- 13) 高田毅士, 原子力分野における耐震計算科学研究の果たす役割 ―認識論的不確定性の低減に向けて―, 第 22 回 CCSE ワークショップ, 2011.
- 14) 日本原子力研究開発機構, 平成 27 年度地層処分技術調査等事業地質環境長期安定性評価確認技術開発報告書, 経済産業省資源エネルギー庁, 2016, 265p.
- 15) 日本原子力研究開発機構, 平成 26 年度地層処分技術調査等事業地質環境長期安定性評価確認技術開発 報告書, 2015, 229p.

2.2 個別モデル構築における検討

2.2.1 地形・地質モデル

(1) 背景と目的

百万年に及ぶ長期間の地形・地質の変化が地下環境（特に地下水の流動特性と地球化学特性）に与える影響を評価する際に、数値シミュレーションは有効なアプローチとなる。そのような数値シミュレーションを行うにあたり、必要となるのが、現在及び過去の地形・地質の数値モデルである。そして地形・地質の数値モデルは、地下環境の変化の空間的差異を評価するという観点から二次元のものよりも三次元のものの方が望ましい。しかし、わが国において、現在の地形・地質を三次元で数値モデル化した例はあるが（例えば、木村ほか, 2013¹⁾）、過去の地形・地質を三次元で数値モデル化した例は極めて少ない。そこで本事業では、わが国の山間部と平野部における百万年前～現在までの地形・地質を三次元数値モデル（以下、「地形・地質モデル」という）で構築する技術の確立を目指し、岐阜県の東濃地域と北海道の幌延地域をそれぞれ山間部と平野部の事例に、(1) 地形・地質モデル構築に必要な情報の収集と統合化（日本原子力研究開発機構, 2015²⁾）と (2) 地形・地質モデルの構築（日本原子力研究開発機構, 2016³⁾, 2017⁴⁾）を行った。さらに、これらの一連の作業プロセスを通じて、地形・地質モデルの構築の考え方や流れを統合化データフローとして整理するとともに、地形・地質モデルの構築作業に内在する不確実性を抽出し、その発生要因や区分を整理した。これらの成果は、各年の報告書に記載されていることから、ここでは概要のみ以下に記す。

(2) 結果

① 情報の収集と統合化

東濃地域（山間部）と幌延地域（平野部）における過去百万年間の地形・地質発達史の理解に必要な既存文献及びデータ（ボーリングデータ、地質断面図、地形学図に代表される各種主題図など）を収集するとともに、不足するデータの作成を行った（日本原子力研究開発機構, 2015²⁾）。そして、それらの情報から地形・地質の長期変遷シナリオを読み取るために、編年表、地形・地質概念モデル図といった形で情報の統合化を行った。ここでは、東濃地域（山間部）における編年表と地形・地質概念モデル図の例を、図 2.2.1-1 に示す。

考慮した処理を、14 万年前の地形モデルに対しては「氷期における河谷の谷埋め」を考慮した処理をそれぞれ行った。東濃地域（山間部）の過去の地質モデルについては、「過去の地質境界の三次元的な形状は、現在と同様であった」と仮定したうえで、過去の地形モデルと同様の変位量を与えて作成した。作成した東濃地域の地形・地質モデルを図 2.2.1-4 に示す。

幌延地域（平野部）の過去の地形モデルに対しては、「地形の開析」、「断層・褶曲運動による隆起・沈降」、「東西圧縮による地層の変形」、「海底地形」の四点を考慮した処理を行なった。幌延地域の過去の地質モデルについては、現在の地質モデルに対して、地層の線長を考慮したバランス断面（例えば、Niizato et al., 2010⁵⁾）と隆起・沈降史（太田ほか, 2007⁶⁾; 新里ほか, 2007⁷⁾）を参照して作成した。作成した幌延地域の地形・地質モデルを図 2.2.1-5 に示す。

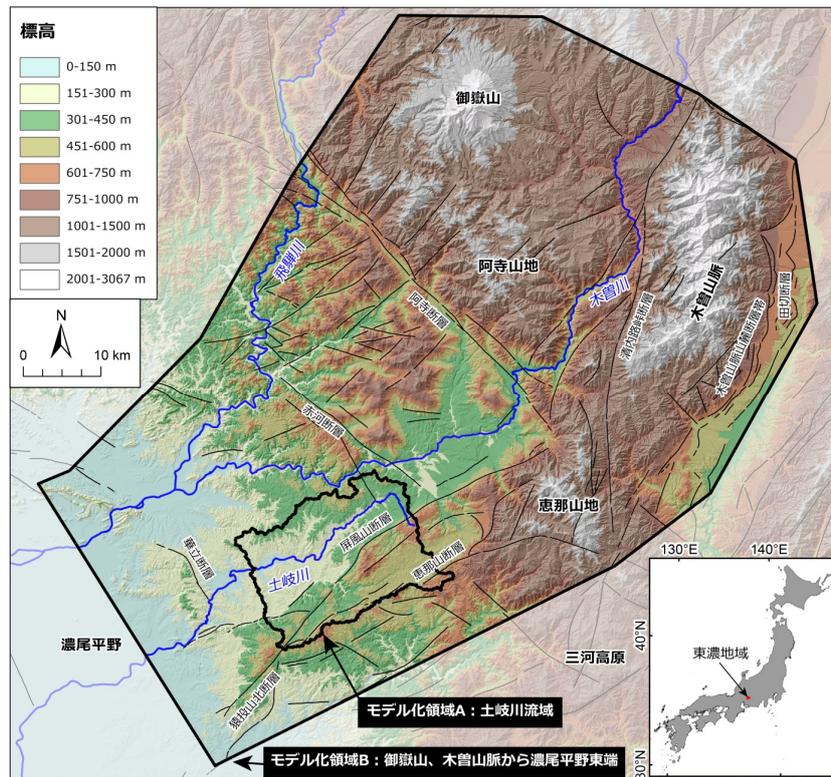


図 2.2.1-2 東濃地域（山間部）におけるモデル化領域

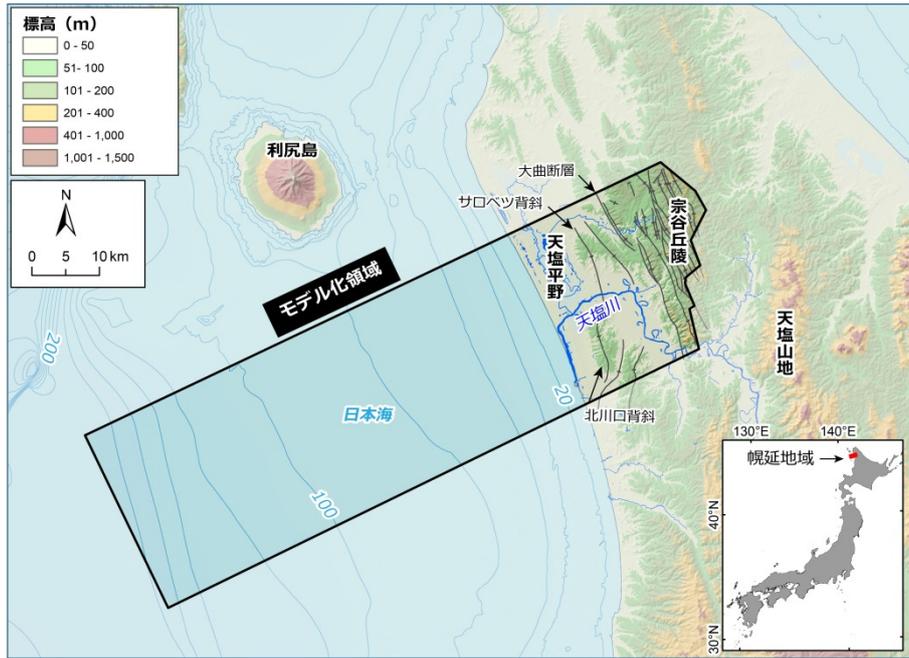


図 2.2.1-3 幌延地域（平野部）におけるモデル化領域

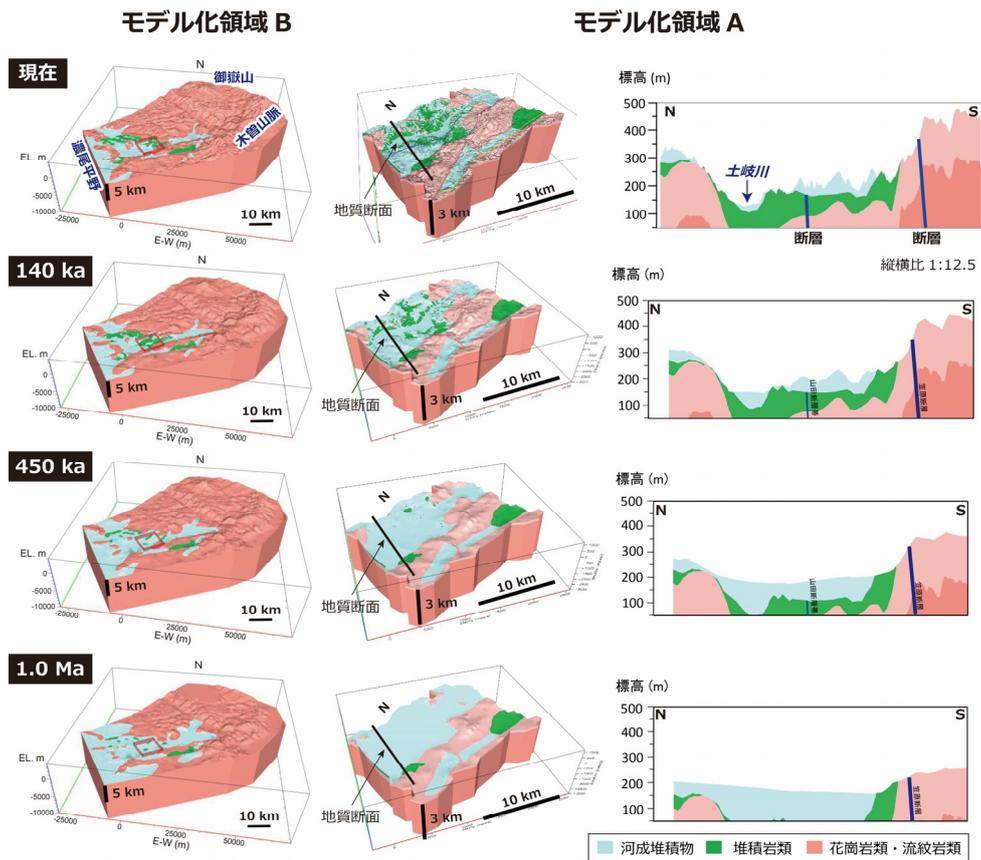


図 2.2.1-4 東濃地域（山間部）の地形・地質モデル
日本原子力研究開発機構 (2016³), 2017⁴)から作成。

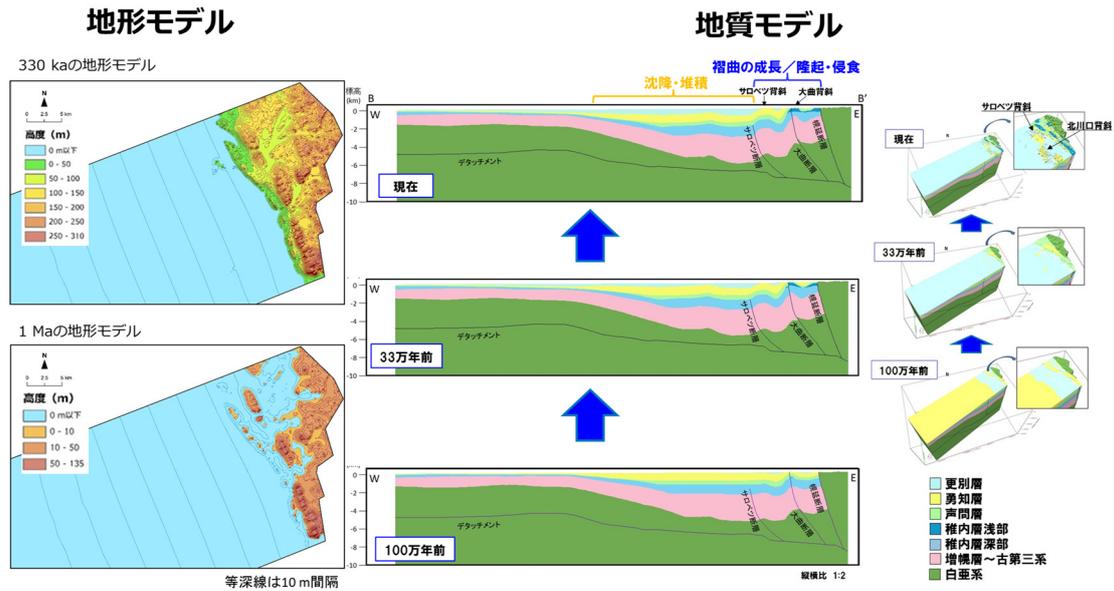


図 2.2.1-5 幌延地域（平野部）の地形・地質モデル
日本原子力研究開発機構 (2016)³⁾から作成。

③ 統合化データフロー及び不確実性の整理

東濃地域及び幌延地域をそれぞれ山間部と平野部の事例とし、百万年スケールの三次元地形・地質モデルの構築作業を踏まえて、地下水流動状態の長期変動性を評価するにあたっての過去の地形・地質モデル構築の考え方や流れを統合化フローとして整理した(図 2.2.1-6)。また、地形・地質モデルの構築作業に内在する不確実性を抽出し、その発生要因や区分を整理した(表 2.2.1-1)。統合化データフロー形式で整理することで、地形・地質モデルの構築において必要となるデータの種類やそれらを組み合わせた解釈・解析、及び概念モデルとアウトプット(数値モデル)作成までの流れを明示することができた。

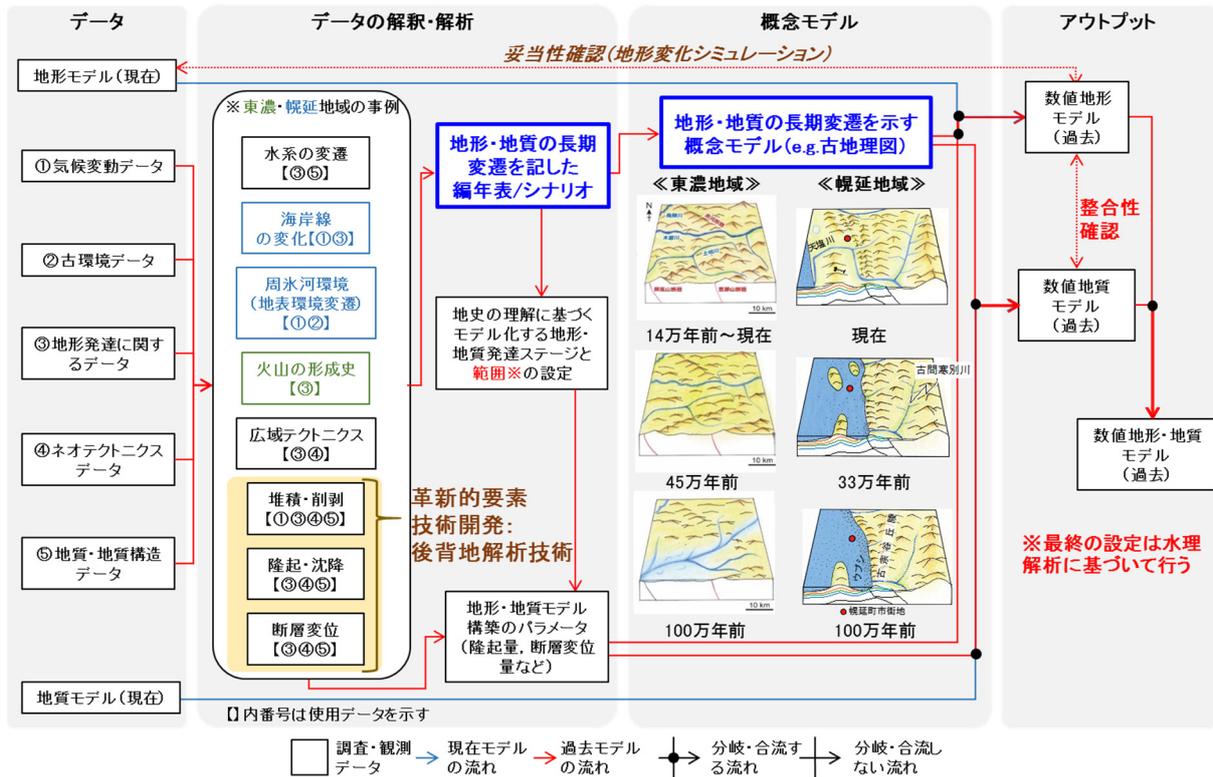


図 2.2.1-6 地下水流動状態の長期変動性評価に関する統合化データフロー（地形・地質モデル）

表 2.2.1-1 地形・地質モデルにおける不確実性の整理（日本原子力研究開発機構, 2017⁴⁾）

作業項目	作業内容	不確実性	不確実性の発生要因	不確実性区分
①情報の収集・整理	既存文献や調査結果に基づいて、地形（陸上、海底）及び地質の分布・形状、海岸線位置の変動範囲（沿岸地域の場合）及びそれらの変化（地史）に関わる情報や着目すべき地形・地質要素を把握するための地下水流動解析結果などの情報を収集・整理する。	地形・地質の分布・形状とその変化に関する情報の精度や解釈の違い	情報の欠如による理解不足や手法の違い（地形学的、地質学的、地球物理学的など）により異なる結果や解釈が得られる可能性がある。	データの不確実性
②FEP解析に基づく考慮すべき事象の抽出	収集・整理した情報に基づいて対象地域におけるFEP解析を実施し、百万年程度の期間で考慮すべき事象を抽出する。	抽出したFEPの適切性	収集した情報の不確実性や情報の欠如による理解不足により、関連するすべての事象が抽出できない（または、除外されたFEPが適切でない）可能性がある。	システムの不確実性
③編年表/シナリオの作成	百万年程度の期間を対象に抽出した事象を時系列で整理（気候・地形・地質・テクトニクスなどを時系列で並べた編年表を作成）するとともに、分野間で整合の取れた長期変遷シナリオを作成する。	地形・地質事象に関する天然のプロセスの理解	編年表に整理する各事象の発生時期や事象間の関連性（シナリオ）には、収集した情報の不確実性や情報の欠如による理解不足による影響が含まれており、複数のシナリオが想定できる可能性がある。	概念の不確実性 ／ 概念の不確実性
④モデル化領域の設定	概括的な地形・地質分布に基づいて、評価対象となる領域を通過する地下水流動系を包含しつつ、地下水の分水界となる尾根や河川などを境界とした領域を設定する。	モデル化領域設定の違い	百万年程度の期間では、海水準変動や地殻変動に伴う地形・地質分布の変化によって、地下水の分水界となる尾根や河川などが変化し、評価対象領域を通過する地下水流動系に影響を及ぼす可能性がある。	概念の不確実性
⑤概念モデルの構築	抽出した事象とシナリオに基づいて、考慮すべき事象とその変遷に関して概念的に記述したモデルを作成する。	地形・地質事象に関する天然のプロセスの理解	各事象に対して収集した情報や編年表・シナリオの不確実性（例えば、事象の時空間分布の解釈の違いなど）により、複数の概念モデルが構築できる可能性がある。	概念の不確実性
⑥数値モデルの構築	概念モデルで表示した各事象に関して、収集した情報に基づき、百万年程度の期間の数値モデルを作成する。	数値モデルの構築方法	数値的なばらつきや異なる解釈がある情報の取り扱い方や単純化の方法、地形・地質の分布・形状の復元プロセスの違いなどによって、複数の数値モデルが構築できる可能性がある。	概念の不確実性/ データの不確実性

(3) まとめ

本事業では、東濃地域と幌延地域を山間部と平野部の事例として、百万年前から現在までの複数の時間断面における地形・地質を三次元の数値モデル（地形・地質モデル）の形で復元する技術の開発を行った。地形・地質モデルの構築に至る一連の作業プロセスを通して明らかになった課題は、(1) 地形・地質モデルの構築過程において内在する不確実性が地形・地質モデルに与える影響や、そうした不確実性の幅を分析・評価すること、(2) 地形・地質モデル構築に係る情報や作業プロセス、そこに含まれるノウハウを含めた一連の流れを明確化し、百万年以上の時間スケールの地形・地質モデル構築に関する汎用性のある方法論を整備すること、である。

引用文献

- 1) 木村克己, 花島裕樹, 石原与四郎, 西山昭一, 埋没地形面の形成過程を考慮したボーリングデータ補間による沖積層基底面モデルの三次元解析: 東京低地北部から中川低地南部の沖積層の例, 地質学雑誌, vol.119, 2013, pp.537-553.
- 2) 日本原子力研究開発機構, 平成 26 年度地層処分技術調査等事業地質環境長期安定性評価確認技術開発報告書, 経済産業省資源エネルギー庁, 2015, 229p.
- 3) 日本原子力研究開発機構, 平成 27 年度地層処分技術調査等事業地質環境長期安定性評価確認技術開発報告書, 経済産業省資源エネルギー庁, 2016, 265p.
- 4) 日本原子力研究開発機構, 平成 28 年度地層処分技術調査等事業地質環境長期安定性評価確認技術開発報告書, 経済産業省資源エネルギー庁, 2017, 230p.
- 5) Niizato, T., Amano, K., Ota, K., Kunimaru, T., Lanyon B. and Alexander W.R., Development of Comprehensive Techniques for Coastal Site Characterisation (3) Conceptualisation of Long-term Geosphere Evolution, Proceedings of the ASME 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (ICEM2010), ICEM2010-40052, 2010, pp.97-106.
- 6) 太田久仁雄, 阿部寛信, 山口雄大, 國丸貴紀, 石井英一, 操上広志, 戸村豪治, 柴野一則, 濱克宏, 松井裕哉, 新里忠史, 高橋一晴, 丹生屋純夫, 大原英史, 浅森浩一, 森岡宏之, 舟木泰智, 茂田直孝, 福島龍朗, 幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階 (第 1 段階) 研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」, JAEA-Research 2007-044, 2007, 434p.
- 7) 新里忠史, 舟木泰智, 安江健一, 北海道北部, 幌延地域における後期鮮新世以降の古地理と地質構造発達史, 地質学雑誌, vol.113(補遺), 2007, pp.119-135.

2.2.2 水理モデル

(1) 背景と目的

地層処分における地質環境の安定性を評価するうえで、自然現象に伴う地質環境特性の長期変化を考慮することが重要であり、この地質環境特性の一つである地下水の流動方向や流速といった地下水流動特性の時間変化を評価するうえでは、水理モデルの構築が必要となる。水理モデルは、地形分布や水理地質構造の水理特性を反映した地下水の水圧分布や流速分布などの地下深部の地下水流動特性を数値化したものである。水理モデル構築に際しては、地下水流動特性に与える影響因子を抽出するとともに、それらを考慮した水理地質構造モデルの構築や地下水流動解析を実施する必要がある。さらには、水理モデルの構築作業に内在する不確実性を定量的に取り扱い、地質環境特性の長期的な変化を評価することが必要となる。

本事業では、東濃地域と幌延地域を山間部と平野部の事例として、既存情報から水理データを収集・整理し、2.2 に取りまとめた地形・地質モデルをベースとして水理地質構造モデルを構築するとともに、水理地質構造モデルを用いた地下水流動解析を試行しつつ、過去から現在までの地下水流動状態の長期的な変動性を評価するための方法論についての検討を行った。

(2) アプローチ

東濃地域と幌延地域をそれぞれ山間部と平野部の事例として、地下水流動特性の長期変遷を評価するうえで重要な FEP の抽出や、各 FEP の相関を整理するとともに、地下水流動特性に関連する長期変遷を考慮した地下水流動解析を実施することで、地下水流動状態の長期変動性を定量的に評価可能な手法の整備を進めた。また、水理モデルの構築作業に内在する不確実性を抽出し、その発生要因や区分について整理するとともに、不確実性が地下水流動状態の長期変動性に及ぼす影響の評価を試みた。さらに、地形変化と気候・海水準変動に着目し、それらが地下水流動状態に及ぼす長期変動性を評価するにあたっての水理モデル構築の考え方や流れ、地下水流動状態の長期変動性評価の手順や不確実性の反映方法について整理した。

(3) 実施結果

1) 地下水流動特性の長期変遷に関わる FEP の相関の整理

東濃地域（山間部）と幌延地域（平野部）における地下水流動特性の長期変遷に関わる FEP の相関については、図 2.2.2-1 のように整理することができた。地下水流動特性への影響因子としては、東濃地域では「地形変化」や「気候変動」が主な影響因子であり、幌延地域ではそれらに加えて「続成作用に伴う水理特性の変化」が主な影響因子として抽出された（日本原子力研究開発機構, 2014¹⁾）。大局的な「地形変化」や「続成作用に伴う水理特性の変化」は百万年オーダーで、局所的な「地形変化」や「気候変動」は十万年オーダーの時間スケールでの変化として捉えることが重要と言える。

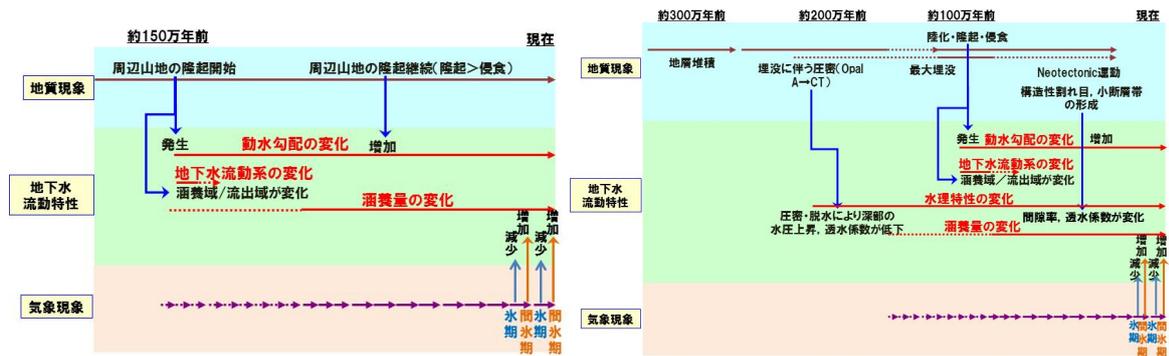


図 2.2.2-1 地下水流動特性の長期変遷に関わる FEP の相関 (左：東濃地域、右：幌延地域)

2) 地下水流動状態の長期変動性の評価手法の整備

過去から現在までに生じていたと想定される地形分布や涵養量・海水準を設定した複数の水理地質構造モデルを用いた定常状態の地下水流動解析及び粒子追跡解析を実施し、それらの解析結果を統計処理することで、地下水流動状態の長期変動性を定量的に評価可能な手法を整備した(日本原子力研究開発機構, 2015²⁾, 2016³⁾)。統計処理では、地形変化などに伴い地下水流動状態が受ける影響度を変動係数、地下水流動状態の変化の大小を標準偏差で整理する。なお、変動係数は標準偏差を算術平均で規格化したものであり、統計解析の母集団の数値の大小の影響を排除した影響度の評価指標である。東濃地域(山間部)及び幌延地域(平野部)を事例として本評価手法を適用した結果、過去から現在にかけての地下水流動状態の長期的な変動性を定量的かつ空間的に評価可能であることを具体例として提示した(図 2.2.2-2、図 2.2.2-3)。本評価手法を用いることで、山間部である東濃地域では地形変化が、平野部である幌延地域では地形変化と気候変動が、地下水流動状態の長期変動性評価における重要因子であることが明らかとなった(日本原子力研究開発機構, 2016³⁾, 2017⁴⁾)。さらに、平野部は山間部と比較して地下水流動特性は緩慢であるものの、自然現象の変化による影響を受けやすい特徴があることを定量的に示した(日本原子力研究開発機構, 2016³⁾)。

地下水流動状態の長期変動性評価に内在する不確実性を抽出し、地質環境の各モデルにおける作業プロセスごとに整理した(表 2.2.2-1)。東濃地域(山間部)及び幌延地域(平野部)を事例として、代表的な不確実性に基づく複数の水理地質構造モデルを構築し解析を実施した結果、本評価手法を適用することで不確実性を考慮した地下水流動状態の長期変動性の評価が可能であり、それぞれの不確実性が及ぼす影響の程度や違いの定量的な分析、重要な不確実性の抽出が可能であることを具体例として提示した(日本原子力研究開発機構, 2017⁴⁾)。

水理モデル構築の考え方や流れを図 2.2.2-4 の統合化データフローの形式で整理することで、水理モデルを構築するために必要なデータの種類やモデル化及び解析に至る一連の考え方、地質環境の各モデルで得られた情報との関連性や統合の流れを明示した(日本原子力研究開発機構, 2018⁵⁾)。また、図 2.2.2-5 に示すように地下水流動状態の長期変動性評価の作業フローでは、統合化データフローの概念モデルからアウトプットに至る各作業とそれらの流れ、抽出した不確実性の反映方法を整理した(日本原子力研究開発機構, 2018⁵⁾)。

(4) まとめ

東濃地域と幌延地域を山間部と平野部の事例として、百万年以上に及ぶ時間スケールで過去から現在までの地下水流動状態の長期変動性評価の考え方や手法といった技術基盤を整備した。本事業で整備した考え方や一連のアプローチを適用することで、地形変化や気候・海水準変動が地下水流動状態に及ぼす影響を定量的かつ空間的に評価することが可能となる。

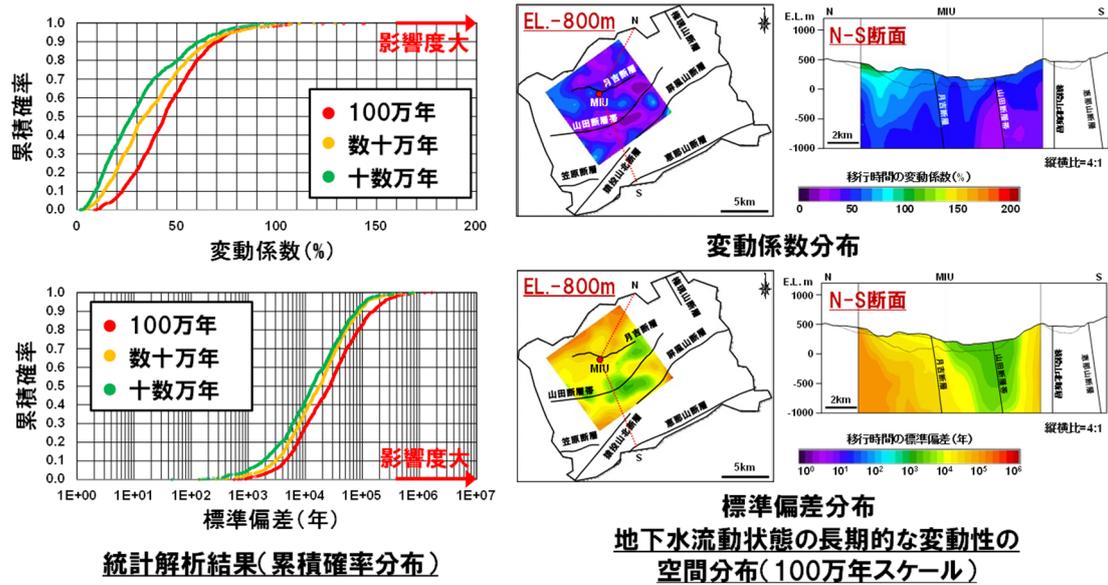


図 2.2.2-2 地下水流動状態の長期変動性評価の事例 (山間部：東濃地域)

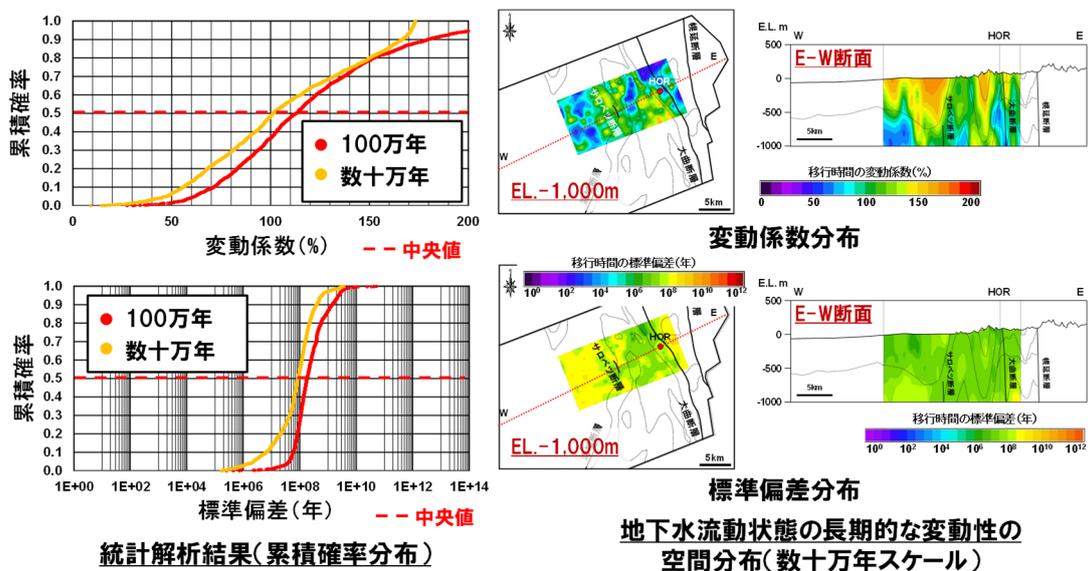


図 2.2.2-3 地下水流動状態の長期変動性評価の事例 (平野部：幌延地域)

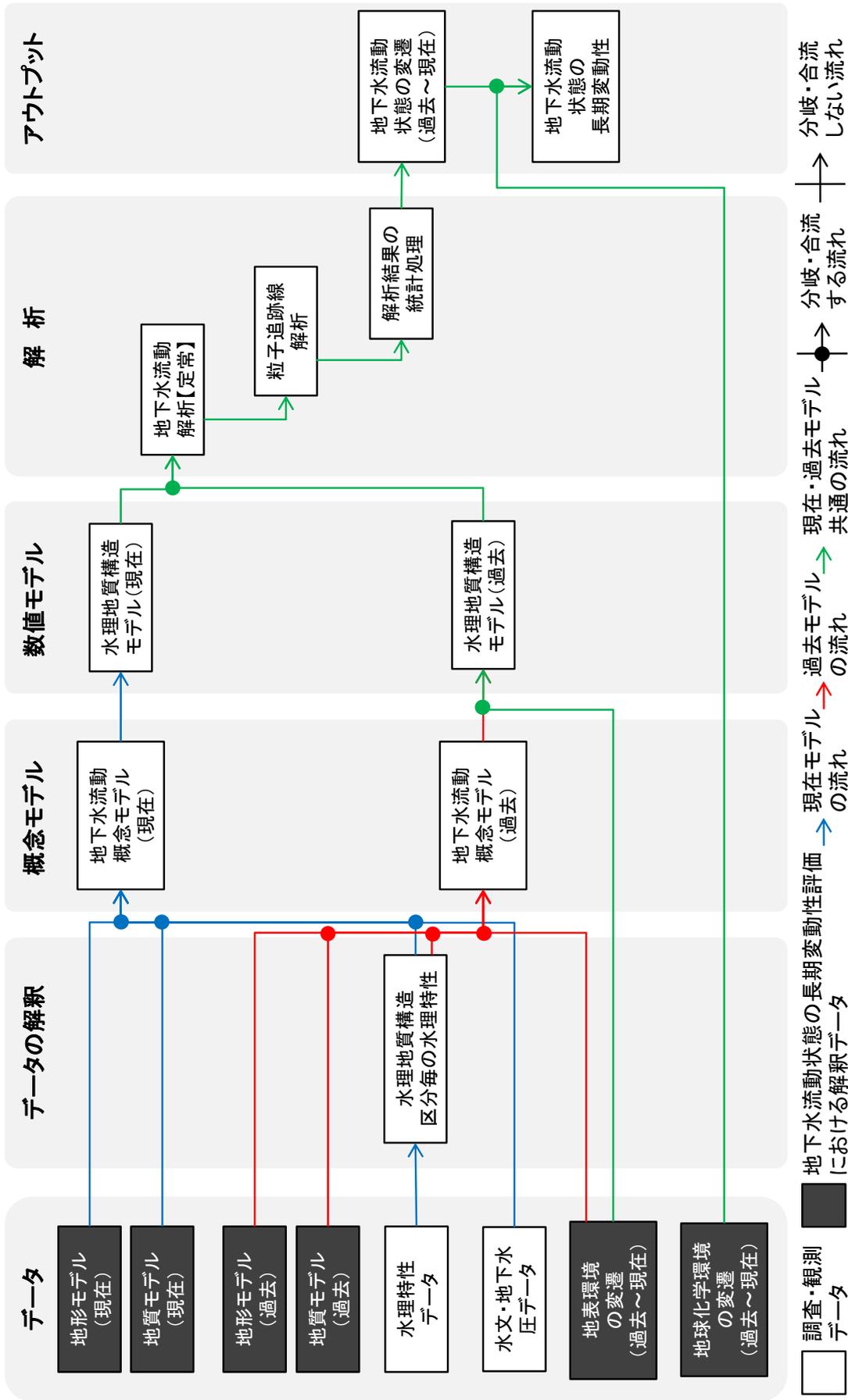


図 2.2.2-4 地下水流動状態の長期変動性評価の統合化データフロー (水理モデル)

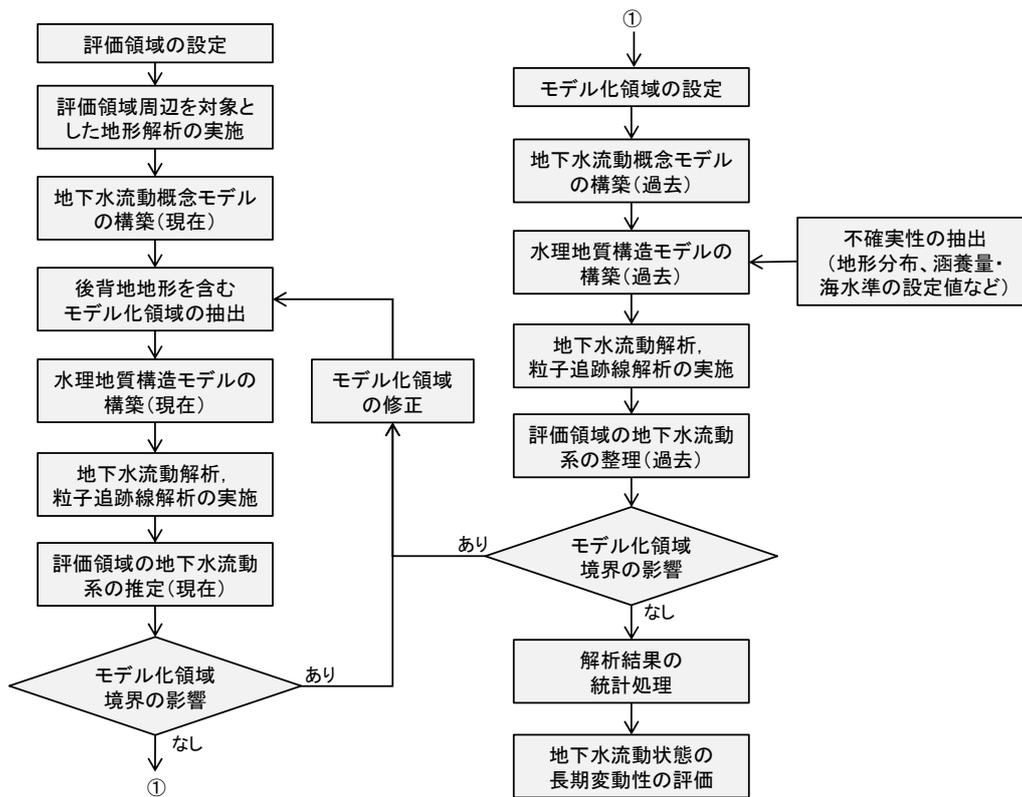


図 2.2.2-5 地下水流動状態の長期変動性評価の作業フロー

表 2.2.2-1 地下水流動状態の長期変動性評価に内在する不確実性

不確実性の区分	作業プロセス			
	データ	データの解釈	概念モデル	数値モデル
システムの不確実性			○抽出したFEPの適切性	
概念の不確実性			○地形・地質事象に関する天然のプロセスの理解 ○モデル化領域設定の違い	○数値モデルの構築方法 ○モデル化手法の違い ○離散化手法の違い
データの不確実性	○地形・地質の分布・形状とその変化に関する情報の精度の違い ○水理特性の設定値やばらつき ○境界条件の設定値やばらつき	○地形・地質の分布・形状とその変化に関する情報の解釈の違い ○水理地質構造区分設定の違い ○境界条件の設定値やばらつき		○数値モデルの構築方法 ○モデル化手法の違い

■: 全モデル共通, ■: 地形・地質モデル, ■: 地表環境モデル, ■: 水理モデル

引用文献

- 1) 日本原子力研究開発機構, 平成 25 年度地層処分技術調査等事業地質環境長期安定性評価確証技術開発報告書, 経済産業省資源エネルギー庁, 2014, 198p.
- 2) 日本原子力研究開発機構, 平成 26 年度地層処分技術調査等事業地質環境長期安定性評価確証技術開発報告書, 経済産業省資源エネルギー庁, 2015, 229p.
- 3) 日本原子力研究開発機構, 平成 27 年度地層処分技術調査等事業地質環境長期安定性評価確証技術開発報告書, 経済産業省資源エネルギー庁, 2016, 265p.
- 4) 日本原子力研究開発機構, 平成 28 年度地層処分技術調査等事業地質環境長期安定性評価確証技術開発報告書, 経済産業省資源エネルギー庁, 2017, 230p.
- 5) 日本原子力研究開発機構, 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地質環境長期安定性評価確証技術開発報告書, 経済産業省資源エネルギー庁, 2018, 206p.

2.2.3 地球化学モデル

(1) 背景と目的

地下水の地球化学特性（主に地下水の塩分濃度、pH 及び酸化還元状態など）は、地下水流動に伴う複数の異なる水質の地下水の混合や岩盤中での水-鉱物-微生物相互反応などにより形成される。そのため、地球化学特性の長期変遷を推測するためには、地下水流動に関わる諸現象と長期的な水-鉱物-微生物相互反応プロセスを理解する必要がある。地下水流動の長期変遷は水理地質構造の分布・発達過程や沿岸域においては海進・海退などに応じて変化する。長期的な水-鉱物-微生物相互反応は、鉱物の変質や二次鉱物の沈殿、堆積岩であれば地層中の有機物の熟成などに影響を受ける。これらの様々な現象が起きた時間断面での地下水の地球化学特性の変化やその際に作用したプロセスを推定することにより、地球化学特性の長期変遷に関わる影響の程度を推定することが可能となる。本節では、岐阜県東濃地域及び北海道幌延地域をそれぞれ山間部と平野部の研究事例として、重要な地質環境特性やイベント及びそれらに関わるプロセス（Features, Events and Processes; 以下、「FEP」という）を時間軸に沿って抽出し、地球化学特性の長期変遷に関わるモデル化手法の検討を行った。

(2) アプローチ

地下水流動に関わる水理モデルと地下水流動の影響を受ける可能性のある地球化学モデルの相互関連について確認し、それぞれのモデルに含まれる複数の FEP の相関性の強弱を把握することを目的として、地下水流動解析により得られた長期的な地下水流動の変遷（長期的な流動域や相対的滞留域の変化など）と、地下水の水質や年代など地球化学特性について比較を行った。また、東濃地域（山間部）を事例として、「地下水流動状態の長期的な変動性の小さい領域」と「相対的に変動性の大きい領域」におけるそれぞれの地下水について、水-鉱物反応に関わる熱力学的解析及び地下水流動に関わる移流分散解析により、領域ごとに地球化学特性（主に水質と pH）の長期的変動性について解析を行った。

(3) 結果・考察

① FEP の整理と長期的な地球化学特性に関わるシステム区分

東濃地域（山間部）及び幌延地域（平野部）における個々の諸現象と地球化学特性の関連については、時間断面ごとに図 2.2.3-1 のように整理することができた。また、地球化学特性の長期変遷を考察するための水理特性に関わるシステム区分と鉱物情報に基づく地球化学特性のシステム区分を図 2.2.3-2 のように整理することができた。東濃地域（山間部）と幌延地域（平野部）では、地球化学特性（地下水化学・鉱物・微生物）に係る変化の時間スケール、関連する主要プロセスが異なる。

山間部の事例である東濃地域では、研究領域北部（地下水流動上流域）において Na-(Ca)-HCO₃ 型地下水、瑞浪超深地層研究所（Mizunami Underground Research Laboratory; 以下、「MIU」という）が位置する南部（地下水流動下流域）において Na-(Ca)-Cl 型地下水が分布しており、流動域と滞留域の地下水年代と地球化学特性を理解することで、地下水流動・水質の長期変遷に関わる可能性のある様々な地質現象から、重要な地質現象を選別することが可能になると言える。水質、安定同位体比、放射性同位体、希ガス組成及び炭酸塩鉱物などの二次鉱物の起源や分布に基づいて FEP を整理した結果、地下水の滞留時間より短い地質現象（気候変動に伴う涵養量変化や表層地形変化、断層形成などに伴う透水性分布の変化など）は、地下水流動・水質に与えるインパクトが小さいと考えられた。

平野部の事例である幌延地域においては、浅部において Na-HCO_3 型地下水が、深部では Na-Cl 型地下水が分布し、地下水の総溶存成分濃度は深度とともに増加する傾向を示している。大局的な地下水の水質形成プロセスは、新第三系の堆積岩が堆積する過程で地層中に取り込まれた当時の海水が残留・変質し、浅部では淡水の浸透により希釈されていると解釈できる。現在の地下水の pH は中性付近に分布しており、長期間にわたり無機的な化学反応により維持されてきたと考えられる。地下水の酸化還元状態については、主に鉄と硫黄の酸化還元反応により、還元状態が長期的に維持されてきたと推定される。幌延地域に分布する地下水の年代は概ね地層の堆積年代を反映しており、特に深部では堆積時に取り込まれた当時の海水が長期的に滞留していることを示しており、表層環境の変化が地下深部の地球化学特性に与える影響は小さいと考えられた。

以上のように、両地域において主要な FEP の抽出と相互作用、地下水流動解析と比較するためのシステム区分を明らかにすることで、地下水流動が地球化学特性に与える影響について、より詳細に評価することが可能となる。

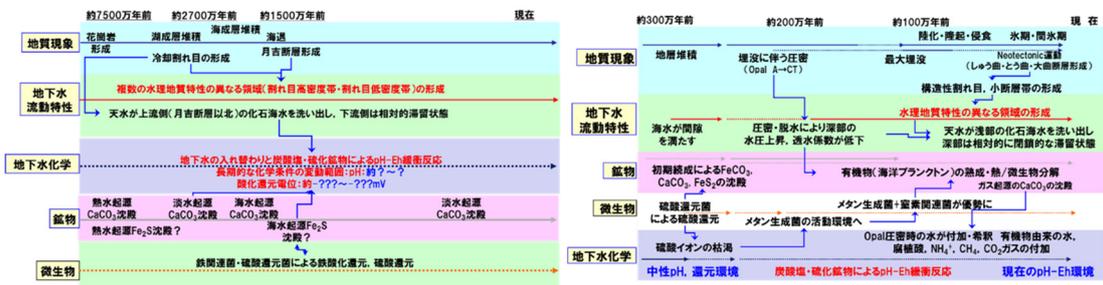


図 2.2.3-1 東濃地域(山間部)及び幌延地域(平野部)における地球化学特性に関わる FEP の相関

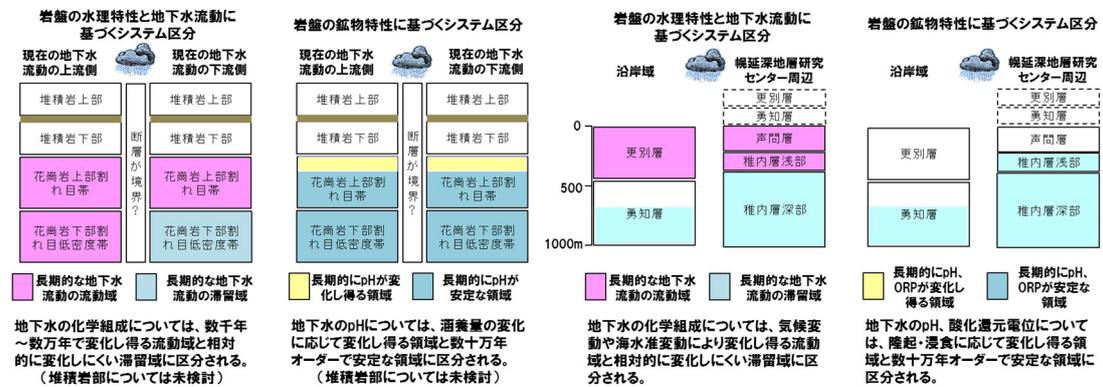


図 2.2.3-2 東濃地域(山間部)及び幌延地域(平野部)における長期的な地球化学特性に関わるシステム区分

② 地下水流動状態の長期的な変動性と地球化学特性の分布の比較

東濃地域(山間部)の古水理地質学的知見を踏まえて実施された地下水流動解析で推定された「地下水流動状態の長期的な変動性の大きい領域」の地下水年代は、 ^{14}C 濃度に基づいて数千年 - 一万数千年(デッドカーボン未補正)と見積もられており、涵養する水の入れ替わりに応じて地下水の化学組成が数千年 - 数万年で変化してきた可能性を示唆する。「地下水流動状態の長期的な変動性の小さい領域」においては、MIUで得られた ^{14}C 濃度から地下水の滞留時間は約3万年程度と見積もられている(Nakata et al., 2016¹⁾)。地下水流動解析で推定された同領域の地下水のダルシー流速は $10^{-10} \text{ m s}^{-1}$ オーダー(100 mの距離の地下水の移動時間は数万年程度)であり地

下水年代と整合的である。地下水の化学組成は長期的な地下水流動の変化に影響を受け得るが、涵養水が天水由来の淡水であり続ける限り、その化学組成は天水と現在観察される岩盤中の鉱物との数千年 - 数万年にわたる水-岩石反応により形成されることになる。特に水-鉱物反応が主な形成プロセスとなる pH や酸化還元電位などは、地下水流動の変化に伴う影響が小さいと考えられる。pH 条件が維持されてきた時間スケールは、隆起・侵食といった FEP の時間スケールと同等であり、pH に関わる炭酸塩鉱物の保存年代から長期的な pH の変動幅は小さいと推察される。

加えて、地下水中の塩分濃度の変化に着目した移流分散解析結果に基づき、解析領域内における地下水の水質分布の長期変遷に関する知見を取りまとめた。現在観察される塩分濃度分布を再現しうる水理学的条件として、本解析で解析領域として設定した土岐川流域の広範囲に分布する土岐花崗岩は、MIU 周辺で取得された物性値よりも 1 オーダー程度低い透水性を有すること、1 km 以深には $1.0 \times 10^{-10} \text{ m s}^{-1}$ オーダーの低透水性の岩盤が分布すること、それらの岩盤の透水性に応じた間隙率を有することが挙げられる。また、100 万年前においては地表から数 km の地下深部に、海水 (20,000 ppm) 相当の塩化物イオン濃度の地下水が分布することが地球化学的条件であることが明らかとなった。高塩分濃度地下水の長期的な変動性としては、100 万年前から現在における地形変化や涵養量の変化に伴って、地下水流動の変動域では洗い出されるものの、相対的な地下水流動の滞留域では 100 万年の間塩水として残留する可能性が解析的に示された。

幌延地域 (平野部) においては、深部 (勇知層) が地下水流動状態の長期的な変動性が小さい領域と推測され、幌延深地層研究センター周辺は、深部と比較すると相対的に地下水流動状態の長期的な変動性が大きい領域となった。幌延深地層研究センター周辺においては、海岸部深部と比較して相対的に地下水流動状態の長期的な変動性が大きい領域と目されるものの、地下水の滞留年代が 100 万年オーダーであり、かつ古海水由来の地下水が長期的に賦存しており、地球化学特性は長期的に安定状態にあったと言える。海岸部に分布する勇知層は、沖積層及び更別層の深度 500 m 付近まで天水由来の淡水系地下水が分布しており (氷河期に涵養した天水と示唆)、深度 800 m 以深の勇知層及び声間層で塩化物イオン濃度が現海水と同等の地下水が分布することが明らかになっている。地下水年代については、勇知層 (深度 800 m 以深) における ^{36}Cl 濃度による評価において、数十万年から百万年以上と見積もられている。なお、希土類元素やトリウムは、陸域起源の碎屑物由来の鉱物や堆積物埋没後の続成作用の過程で生じた二次鉱物に保持されており、現在に至るまで長期にわたり保持されている (村上ほか, 2016²⁾)。そのため、水理地質特性・岩相の長期的な変化が物質移動に関わる地球化学特性に与える影響は小さいと考えられる。

(4) まとめ

上記の結果を踏まえ、塩分濃度の長期的な変動性を解析的に推定するための実施項目やそれらの関係性をフローとして整理した (図 2.2.3-3)。これらの一連のアプローチを実施することで、過去の塩分濃度条件を定量的に推定でき、かつ過去から現在までの地下水流動状態の変化を考慮した地下水中の塩分濃度の変動プロセスを整理することが可能となる。

また、過去から現在にかけての地球化学環境の変遷に関する情報は、地下水流動の変動域や滞留域といった長期的な変動性の評価に必要となる。そのため、現在の水質・同位体・鉱物などのデータに基づく地球化学環境の変遷の推定に関する考え方や流れを統合化データフローとして整理した (図 2.2.3-4)。

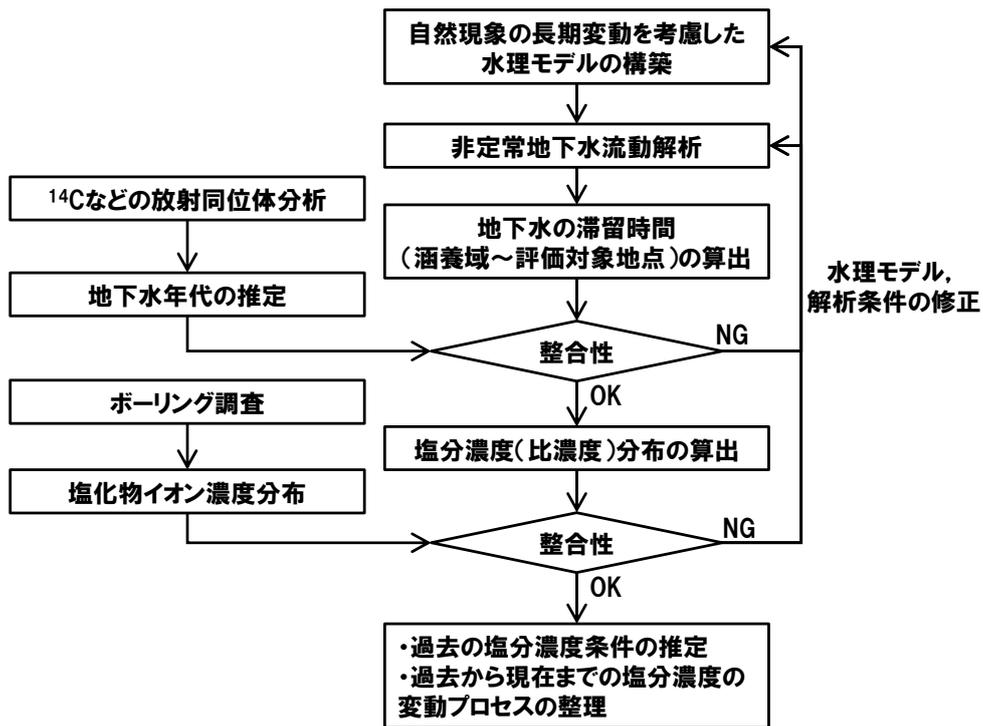


図 2.2.3-3 塩分濃度の長期的な変動性を推定するためのアプローチ

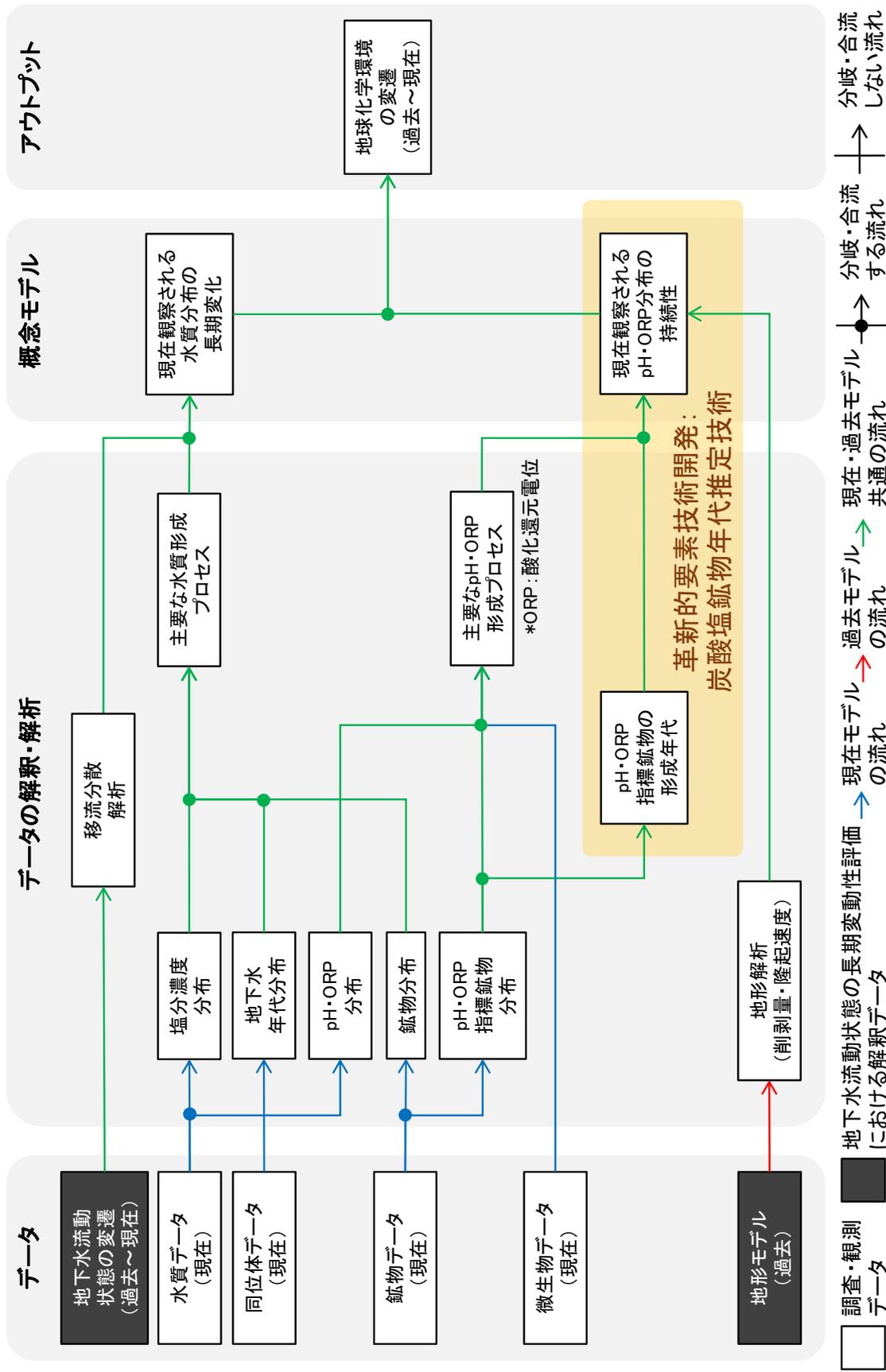


図 2.2.3-4 地下水流動状態の長期変動性評価の統合化データフロー (地球化学モデル)

引用文献

- 1) Nakata, K., Hasegawa, T., Iwatsuki, T. and Kato, T., Comparison of ^{14}C collected by precipitation and gas-strip methods for dating groundwater, *Radiocarbon*, vol.58, 2016, pp.491-503.
- 2) 村上拓馬, 笹本 広, 水野 崇, 希土類元素・トリウムおよびウランの堆積岩中における保持状態: 北海道幌延地域における調査例, *地球化学*, vol.50, 2016, pp.299-317.

2.2.4 地表環境モデル

地層処分における地質環境の安定性を評価する際には、自然現象に伴う地質環境特性の長期変化と統合的な地表環境の状態（降水量や蒸発散量及びそれらから推定される河川流出量や地下水涵養量など）を設定する必要がある。地表環境の状態を設定するにあたっては、自然現象に起因する地表環境や生物相の変化の結果、地表環境の構成要素にどのような影響を与えるかを整理したうえで、地下水流動解析の入力条件となる地下水涵養量の変化などを定量的に把握しておくことが重要である。

本事業では、自然現象の変化に伴う地表環境の変遷をモデル化するための方法論を構築することを目的として、古地形・古気候・古環境や表層水環境などを考慮した地表環境の状態を明らかにするとともに、地表環境の領域や状態の時間的変遷に関する検討を実施した。

なお、地表環境の状態の時間的変遷を考慮するにあたっては、対象とする時間断面における地形・水文環境（降水量、蒸発散量及び河川流出量）を推定することが肝要となる。そこで、平成26年度までに革新的要素技術開発において実施した地下水涵養量推定技術の成果を活用し、整備した推定手法の適用事例を蓄積するとともに、各推定手法の妥当性の確認・高度化について検討し、モデル化技術との連携を図った。

まず、諸外国における実際の地表環境条件を考慮した生活圏評価^{注1)}の方法論（例えば、SKB, 2011¹⁾など）を参考に、経時的な事象の変化に伴う地表環境の状態変遷を記述する方法を検討した。具体的には、経時的な事象の変化としては、地殻変動・気候変動に着目し、それらに応じて生じる地形・地質、気温、水収支などの変化が地表環境の状態整理及び概念化に与える影響について図 2.2.4-1 のように整理した。

また、地下水涵養量推定技術の成果を適用し、地表環境の状態設定において重要な要素となる浸透量や河川流出量、涵養量の変化について、東濃地域（山間部）及び幌延地域（平野部）を事例として、長期的な時間変遷を考慮した地形・水文環境の推定を実施した。地下水涵養量推定においては、まず、公開情報に基づく観測結果、気温と降水量及び気温と蒸発散量の関係性から、過去の降水量と蒸発散量を推定した。また、地形モデルに基づく地形変化を考慮した河川流出量推定手法により、過去の河川流量を推定した。これらの結果から、水収支法により過去の地下水涵養量を推定した。表 2.2.4-1 に東濃地域（山間部）、表 2.2.4-2 に幌延地域（平野部）における水文環境の各構成要素の推定結果を示す。これらの結果から、これまでに開発した地形、水文環境の推定手法を適用して山間部における過去の地表環境構成要素を推定できることが確認された。一方で、復元した100万年前の地形を対象とした河川流出量推定において、平坦地形での流路抽出に課題が確認された。また、平野部における地下水涵養量の推定においては、降水量、蒸発散量といった気象要素の変化に比べ、超長期における地形変化及び気候変化による海進、海退による地形的特徴の変化の影響が大きいこと、寒冷期の涵養量については降水量のみならず積雪融水量の推定が重要であることが示唆された。

注1) 地層処分の観点から見た地下の環境である「地質環境(岩盤やそこに含まれる地下水からなる)」の上部に広がる、人間が生活の範囲においてアクセス可能な環境を「地表環境」と定義する。地表環境で営まれる人間の生活様式を含めて「生活圏」と呼び、そこで人間が受ける地層処分による影響を評価したものを「生活圏評価」と呼ぶ。

図 2.2.4-1 の整理の結果及び前述の地下水涵養量推定技術を適用した長期的な時間変遷を考慮した地形・水文環境の推定結果から、東濃地域（山間部）及び幌延地域（平野部）における地表環境の状態整理及び概念化について、以下の点に着目して整理した。結果を表 2.2.4-3 及び表 2.2.4-4 に示す。

- ・ 図 2.2.4-1 に示す影響の中から、数 km～数十 km 程度の領域を設定した場合に地表環境の状態変化を生じ得る影響として、地形の変化、地下水流動路の変化、気温の変化及び降水量の変化
- ・ 特に、地形の変化と降水量の変化の影響を受けるプロセスとして、浸透量（涵養量）及び河川流出量に関して、地下水涵養量推定技術に基づく地表・水文環境の推定結果
- ・ 地表・水文環境の推定を行うにあたって参照した地形変化などの環境条件についても、地表環境の状態設定

地下水涵養量推定技術の成果を活用して、過去のいくつかの時間断面に対する地表・水文環境を推定し、山間部及び平野部における適用可能性を検討した。特に、山間部での地表・水文環境の推定に適用性が高い手法を平野部に適用することにより、いくつかの重要な留意点が抽出された。また、推定された地表・水文環境や地形・地質発達史をもとに、過去のいくつかの時間断面に対する地表環境の状態を整理し、概念化に必要な因子を抽出した。これらにより、様々な地表環境の状態を設定するにあたっての着眼点を整理することができた。

さらに、これらの検討結果を集約し、地表環境モデルの統合化データフローを作成した。図 2.2.4-1 にフローを示す。山間部及び平野部ともに同様の統合化データフローを適用することで、地表環境の長期変遷を考慮した概念モデル（地表環境の状態）の構築が可能である。

地表環境モデルの構築に必要なデータのうち気温（現在）、降水量（現在）は一定の値に収束する性質のものではないことから、それらの気象条件の影響を受ける蒸発散量（現在）や河川流量（現在）もばらつきを有するパラメータとなる。また、これら要素に基づいて推定される気温（過去）、降水量（過去）、蒸発散量（過去）、河川流量（過去）及び地下水涵養量（現在／過去）も、ばらつきを有するパラメータとなる。したがって、過去から現在までの地表環境の変遷については、地表環境を構成する各パラメータを一定の値としてではなく、幅を持った値として推定、評価することが重要である。

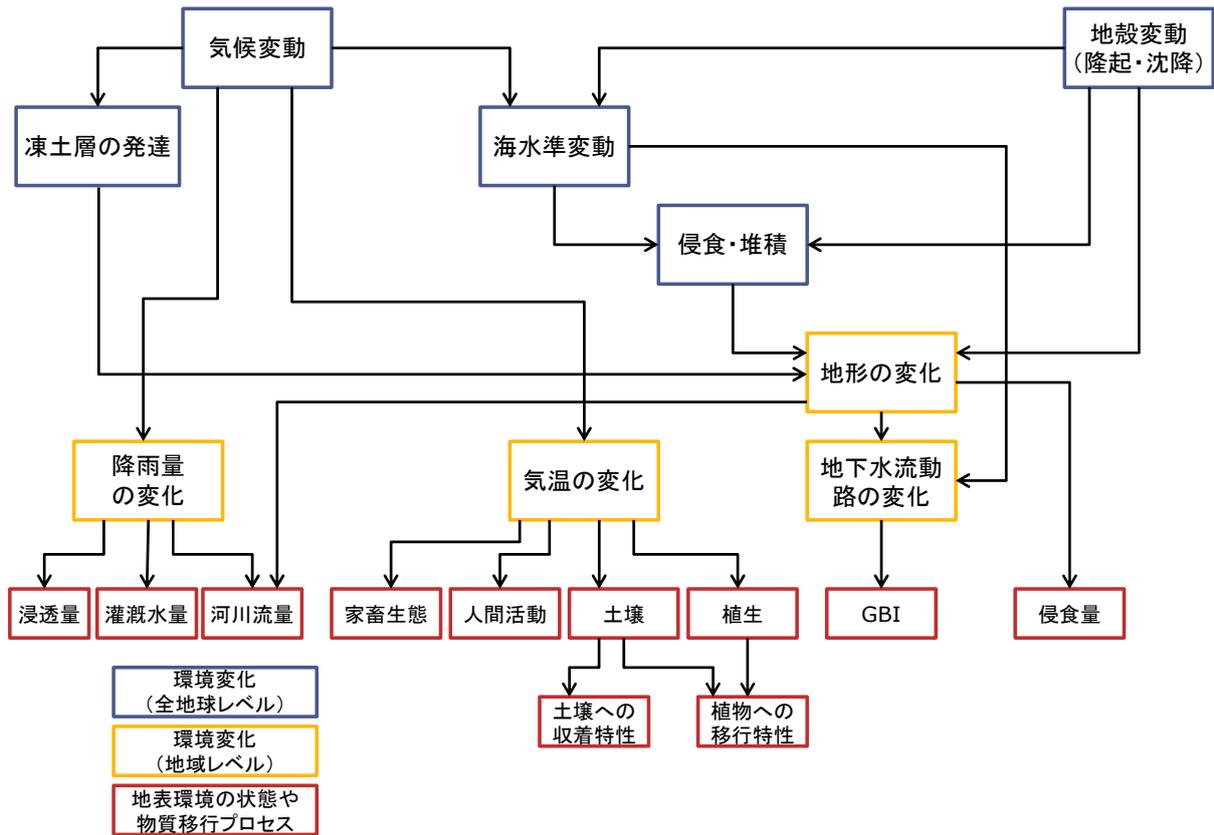


図 2.2.4-1 地殻変動・気候変動に起因して生じる地質学的プロセスが地表環境の状態やそこでの物質移行プロセスに与える影響とその関係

(GBI : 地質環境と生活圏とのインターフェイス、Geosphere-Biosphere Interface の略)

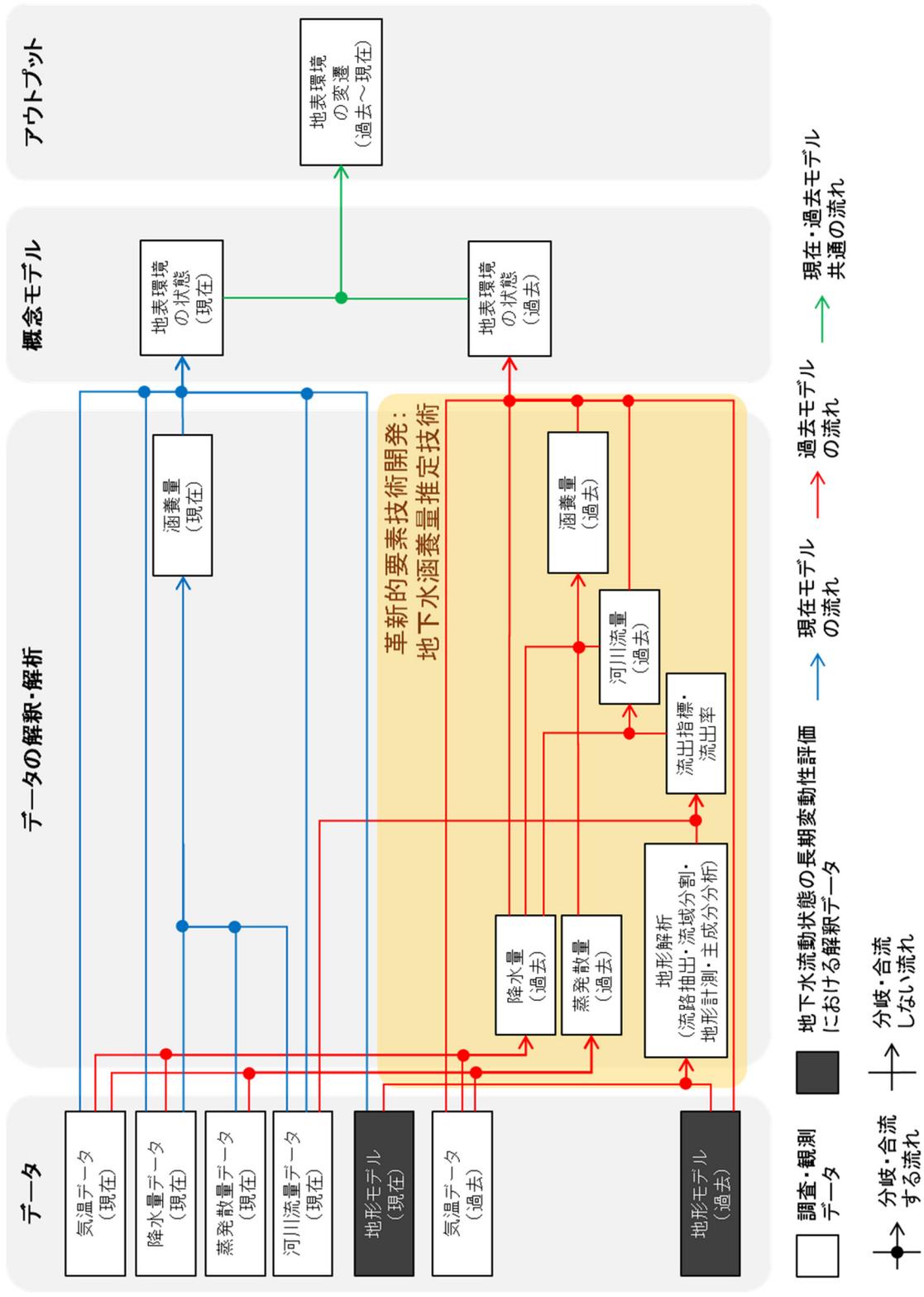


図 2.2.4-2 地表環境の長期変遷に関する統合化データフロー（地表環境モデル）

表 2.2.4-1 水文環境の各構成要素の推定結果（山間部：東濃地域を事例として）

時間断面	現在			14万年前				45万年前				備考
	間氷期 (現在)	氷期		間氷期		氷期		間氷期		氷期		
気温(°C)	13.6	3.6	5.6	12.6	14.6	3.6	5.6	12.6	14.6	3.6	5.6	
降水量 (mm/年)	1759	818	935	1495	1710	818	935	1495	1710	818	935	
河川流出量 (mm/年)	1198	557	637	928	1062	508	581	854	976	467	534	流出指標に基づく推定値
				975	1115	533	610	905	1035	495	566	140ka: 流出指標に基づく推定値+5% 450ka: 流出指標に基づく推定値+6%
				882	1009	483	552	802	918	439	502	140ka: 流出指標に基づく推定値-5% 450ka: 流出指標に基づく推定値-6%
実蒸発散量 (mm/年)	443	176	229	416	470	176	229	416	470	176	229	・気温との相関式(ばらつきの下限值考慮)から算出
地下水涵養量 (mm/年)	118	85	69	150	178	134	125	225	264	175	172	流出指標に基づく推定値
				104	125	109	96	174	205	147	140	140ka: 流出指標に基づく推定値+5% 450ka: 流出指標に基づく推定値+6%
				197	231	159	154	276	322	203	204	140ka: 流出指標に基づく推定値-5% 450ka: 流出指標に基づく推定値-6%

表 2.2.4-2 水文環境の各構成要素の推定結果（平野部：幌延地域を事例として）

時間断面	現在				33万年前				100万年前			
	間氷期		氷期		間氷期		氷期		間氷期		氷期	
気温(°C)	5.7	7.7	-2.3	-0.3	5.7	7.7	-2.3	-0.3	5.7	7.7	-2.3	-0.3
降水量※ (mm/年)	1662.5	1836.3	491.5	542.9	1662.5	1836.3	491.5	542.9	1662.5	1836.3	491.5	542.9
河川流出量 (mm/年)	881.1	973.2	78.6	86.9	532.0	587.6	19.7	21.7	182.9	202.0	9.8	10.9
実蒸発散量 (mm/年)	460.5	513.8	247.0	300.4	460.5	513.8	247.0	300.4	460.5	513.8	247.0	300.4
地下水涵養量 (mm/年)	320.9	349.3	165.9	155.6	670.0	734.9	224.9	220.8	1019.1	1120.5	234.7	231.7

※ 氷期については降水量+融雪水量に補正

表 2.2.4-3 山間部における地表環境の状態の整理の結果（山間部：東濃地域を事例として）

Time	サイクル	地表環境の概念化					
		地形の特徴（※1）	河川の状態（※1）	地下水涵養量の状態	永久凍土	気候の状態（※2）	植生の状態（※2）
現在	間氷期（現在）	山地の北側斜面では急峻な地形となっているものの、全体としてはなだらかな丘陵状の地形が広がっている。	本流とともに支流が発達している。	—	なし	暖温帯	照葉樹林
	氷期	同上	[現在]と比較して、5割程度の流量となる。	[現在]と比較して、6～7割程度の涵養量となる。	なし	亜寒帯～冷温帯	針葉樹林～ステップ
140ka	間氷期	河川上流部の地形が[現在]と比較してなだらかとなる。	[現在]と比較して、7～9割程度の流出量となる。河道形状はそれほど大きく変わらない。	[現在]と比較して、9割～2倍程度の涵養量となる。涵養量の増加の主な要因は地形がなだらかになることによる河川流出量の減少である。	なし	暖温帯	照葉樹林
	氷期	同上	[現在]と比較して、4～5割程度の流出量となる。	[現在]と比較して、8割～1.4倍程度の涵養量となり、概ね、現在と同等程度である。	なし	亜寒帯～冷温帯	針葉樹林～ステップ
450ka	間氷期	[現在]と比較して、山地の占める割合が減少する。河川周辺の地形の起伏がなだらかになり、支流が減少する。	[現在]と比較して、7～9割程度の流出量となるが140kaに比べ若干少ない。河道形状が大きく変化し、支流がほとんどなくなる。	[現在]と比較して、1.5～2.7倍程度の涵養量となる。涵養量の増加の主な要因は地形がなだらかになることによる河川流出量の減少である。	なし	暖温帯	照葉樹林
	氷期	同上	[現在]と比較して、4～5割程度の流出量となるが、140kaに比べ若干少ない。	[現在]と比較して、1.2～1.7倍程度の涵養量となり、現在よりも増加する。	なし	亜寒帯～冷温帯	針葉樹林～ステップ
1Ma	間氷期	[450ka]と比較して、山地の占める割合がさらに減少し、起伏がなだらかとなる。	[現在]と比較して、河道形状が大きく変化し、450kaと比較してさらに支流が短くなる。河川流出量は推定できず。	—	なし	暖温帯	照葉樹林
	氷期	同上	同上	—	なし	亜寒帯～冷温帯	針葉樹林～ステップ

（※1）形状に関しては、地形図などからの判読

（※2）町田ほか編（2003）²⁾を参考に設定

表 2.2.4-4 平野部における地表環境の状態の整理の結果（平野部：幌延地域を事例として）

時間	サイクル	地表環境の概念化					
		地形の特徴 ^{※1}	河川の状態 ^{※1}	地下水涵養量の状態	永久凍土の影響	気候の状態 ^{※2}	植生の状態 ^{※2}
現在	温暖期（現在）	東部の大半は山岳・丘陵地（森林帯）となっており、西部は細長く発達した海岸砂丘の海岸とその内陸に湿地帯や平野状の地形が広がっている。	一級河川の本流とともに支流が発達している。また、沼が存在する。	—	考慮せず	冷温帯	夏緑樹林
	寒冷期	[現在-温暖期]と比較して、氷期の海退により海域の陸化が進んでいる。平坦な地形が広く分布する。	平坦な（流出しにくい）地形が広く分布するため、[現在-温暖期]と比較して、1割弱程度の流量となる。	[現在]と比較して、2分の1程度の涵養量となる。	考慮せず	亜寒帯	針葉樹林
33万年前	温暖期	[現在-温暖期]と比較して、海進により陸域が大きく減少している。平坦な地形が広く分布する。	平坦な（流出しにくい）地形が広く分布するため、[現在-温暖期]と比較して、6割程度の流量となる。	[現在]と比較して、2倍程度の涵養量となる。	考慮せず	冷温帯	夏緑樹林
	寒冷期	[現在-温暖期]と比較して、氷期の海退により海域の陸化が進んでいる。平坦な地形が広く分布する。	平坦な（流出しにくい）地形が広く分布するため、[現在-温暖期]と比較して、数%程度のかなり小さい流量となる。	[現在]と比較して、6～7割程度の涵養量となる。	考慮せず	亜寒帯	針葉樹林
100万年前	温暖期	[現在-温暖期]と比較して、海進により陸域が大きく減少している。平坦な地形がさらに広く分布する。	平坦な（流出しにくい）地形が広く分布するため、[現在-温暖期]と比較して、2割程度の流量となる。	[現在]と比較して、3倍程度の涵養量となる。	考慮せず	冷温帯	夏緑樹林
	寒冷期	[現在-温暖期]と比較して、氷期の海退により海域の陸化が進んでいる。平坦な地形がさらに広く分布する。	平坦な（流出しにくい）地形が広く分布するため、[現在-温暖期]と比較して、1%程度のかなり小さい流量となる。	[現在]と比較して、7割程度の涵養量となる。	考慮せず	亜寒帯	針葉樹林

※1；形状に関しては、地形図などからの判読

※2；町田ほか編（2003）²⁾を参考に設定

引用文献

- 1) SKB, Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark Main report of the SR-Site project, SKB Tech. Rep. TR-11-01, 2011, 276p.
- 2) 町田 洋, 大場忠道, 小野 昭, 山崎晴雄, 河村善也, 百原 新編, 第四紀学, 朝倉書店, 2003, 336p.

3. 革新的要素技術の開発

3.1 後背地解析技術

3.1.1 背景と目的

日本列島では、過去十～二十万年程度までに関しては、編年に必要となる段丘などの地形学的情報が多くの地域で得られることから、その情報に基づき隆起・侵食などによる変動傾向や速度を把握することは可能と考えられる。一方、十万年を超えるような長期においては、山地の形成やそれに伴う侵食速度の増加などの大規模な地形変化が生じる可能性がある。山地の形成によっては、地下数百 m 以深の地質環境においても動水勾配や地下水移行経路が大きく変化する可能性がある（尾上ほか, 2009¹⁾; 草野ほか, 2011²⁾）。そのため、地質環境長期変動モデルのうち特に地形・地質モデルの構築において、十万年を超えるような期間の地質環境の変化を扱う場合には、山地の発達段階についても考慮することが重要となる。

山地の発達段階の把握、すなわち、その山地がいつから隆起を開始し、どのように成長してきたかという山地の形成過程を明らかにするための手法としては、複数の放射年代測定法から復元された過去の熱イベントの時期や温度などを用いて山地の削剥史を推定する熱年代学的手法（末岡ほか, 2015³⁾）や、起伏などの地形的形状を解析することにより山地の発達段階を評価する方法（浅森ほか, 2012⁴⁾）の他、供給源となる山地の下流域に分布する砕屑物の堆積学的・岩石学的アプローチによる後背地解析が有効であると考えられる（図 3.1-1）。

従来から行われてきた後背地解析では、露頭観察によって礫種組成や堆積構造を記載することにより、堆積物の岩種や古流向が調べられてきたが、露頭の分布に制約がある場合などは、これら古典的な手法のみで後背地を推定することがしばしば困難となる。限られた露頭やボーリングコアなどの試料から細粒の堆積物を大量に分析することができれば、後背地解析技術の有効性が格段に向上する。すなわち、それらの測定データを下流の堆積物試料と上流（後背地）に分布する源岩試料との間で比較することにより、後背地の変化の推定に利用できる。また、堆積物はしばしば風化の影響を受けているが、ジルコンなど一部の重鉱物や石英は風化に強く、かつ比較的広く存在するため、これらの鉱物に着目した分析による後背地解析技術の整備が望まれる。以上の背景に基づき、本事業では、山地・丘陵の隆起開始時期と形成過程の推定及び古地形の復元における精度や分解能の向上に必要な手法を整備するため、砕屑粒子の地球化学特性・物理化学特性・放射年代値などを指標とした手法を組み合わせた後背地解析技術の開発を行ってきた。

本事業を進めるにあたりまず、既存の後背地解析技術の情報を整理し、各手法の利点や問題点、技術開発における重要な着眼点の抽出を行った。その結果、堆積物を構成する砕屑粒子と供給源に分布する岩石の地質学的特徴を比較するのに有効な手法として、主成分及び微量元素の化学組成を用いた地球化学的手法、石英の電子スピン共鳴（Electron Spin Resonance: 以下、「ESR」という）・光ルミネッセンス（Optically Stimulated Luminescence: 以下、「OSL」という）・熱ルミネッセンス（Thermal Luminescence: 以下、「TL」という）信号を用いた物理化学的手法、ウラン-鉛（以下、「U-Pb」という）法、フィッシュン・トラック法、アルゴン-アルゴン法などの放射年代測定法が抽出された。さらに、古流向を把握する帯磁率異方性測定やテフラを用いた堆積時期の決定などが後背地解析において有効な手法となる可能性が高いことを示した。これらの情報を整理し、山地・丘陵の隆起開始時期と形成過程の推定及び古地形の復元に係る精度と分解能の向上に必要な後背地解析手法の開発フローを提示した（図 3.1-2）。

一方、抽出された個別要素技術の中には、高度化・最適化や適用性の検証が望ましい技術があり、後背地解析全体の中で特に重要と位置付けられる技術について、本事業の中で要素技術の整備を進めてきた。具体的には、1) 岩石の同定技術の効率化、2) 重鉱物の化学組成分析に基づく砕

屑物供給源の推定、3) 石英の ESR・OSL・TL 信号測定に基づく碎屑物供給源の推定、4) シルト～細粒砂の帯磁率異方性測定による古流向の推定、5) OSL 年代測定、6) 年代決定に有効なテフラカタログの整備である。本報告書ではまず、これら個別要素技術開発の概要と成果について述べる。

さらに、個々の技術の向上や有効性の確認及び対象地域に応じたそれらの技術の最適な組み合わせを検討するため、地質環境長期変動モデルの開発において事例研究対象とした、山間部としての東濃地域（平成 26 年度～）及び平野部としての幌延地域（平成 28 年度～）において、各技術の適用性の確認・検証を行った。事例研究地域では、後背地解析技術、さらには地形・地質モデルの構築に向けた反映に資する目的で、得られた分析・解析データを基に、堆積物供給源における古地形の変化や、山地の発達過程に関わる断層運動の履歴などについて議論した。

本事業による技術開発を通じて得られた知見やノウハウに基づき、後背地解析手法の開発フローを最適なものに更新し、地質環境長期変動モデルの構築に反映できるように考慮しながら、後背地解析技術に関する個々の手法の適切な組み合わせ及び総合的な評価について取りまとめた。



図 3.1-1 本事業における後背地解析技術開発の位置づけ

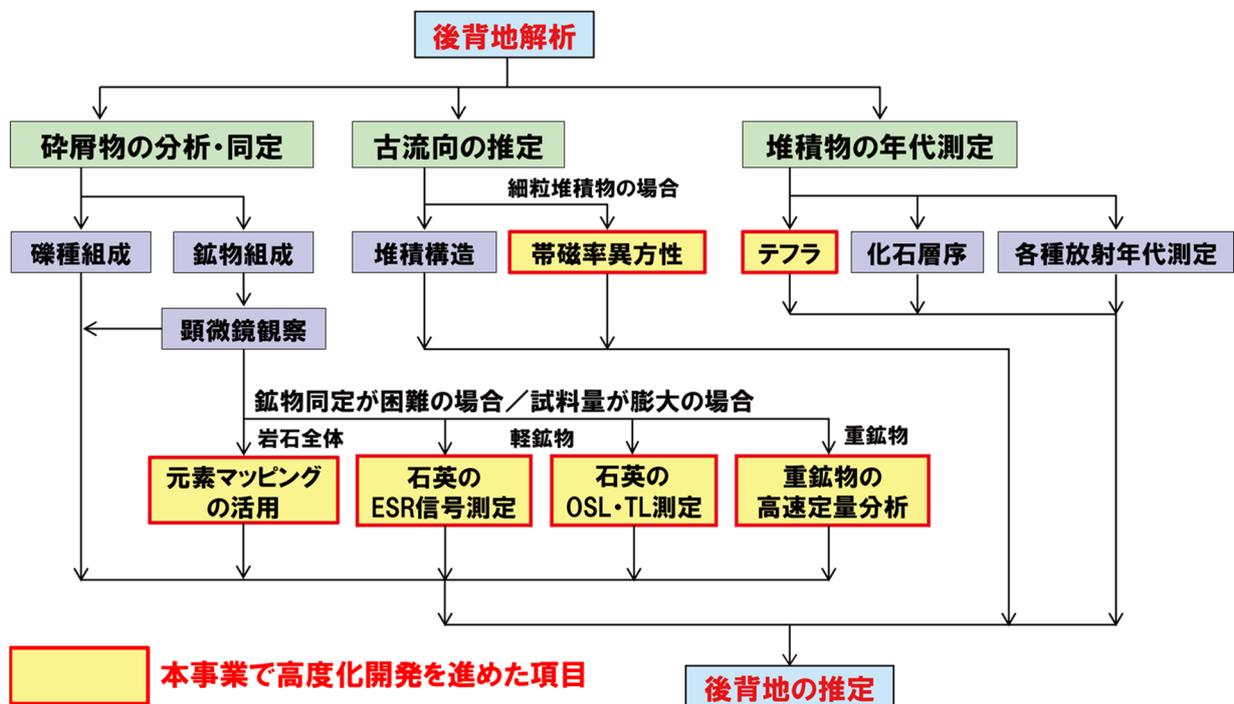


図 3.1-2 後背地解析技術の開発フロー

3.1.2 個別要素技術の整備

(1) 岩石の研磨片・薄片記載に基づく検討

後背地解析においては、碎屑物とその供給源となる地質体を比較するうえで、指標となりうる特徴を把握することが重要である。碎屑物中に岩石が礫として含まれる場合には、礫の組織や鉱物組み合わせ、モード組成、色指数といった記載岩石学的情報を指標とすることができる。このうちモード組成は、現在でもポイントカウンティング法による測定が一般的であるが、この手法は測定者の鉱物判別能力により結果が左右され、測定に多大な労力と時間を要する。そこで、モード測定の定量化及び効率化を目的として、走査型 X 線分析顕微鏡及び広く普及した画像処理・解析ソフトウェアを用いたモード測定手法を構築した（図 3.1-3；日本原子力研究開発機構, 2017⁵⁾；植木・丹羽, 2017⁶⁾）。この手法は、ソフトウェアでの難解な操作や高度なプログラミングの知識を特に必要とせず、かつポイントカウンティング法ほど測定者の鉱物判別能力が結果に影響しないため、特に花崗岩質岩石については、モード組成に基づく検討を効率よくかつ、より客観的な観点から進めることができる。

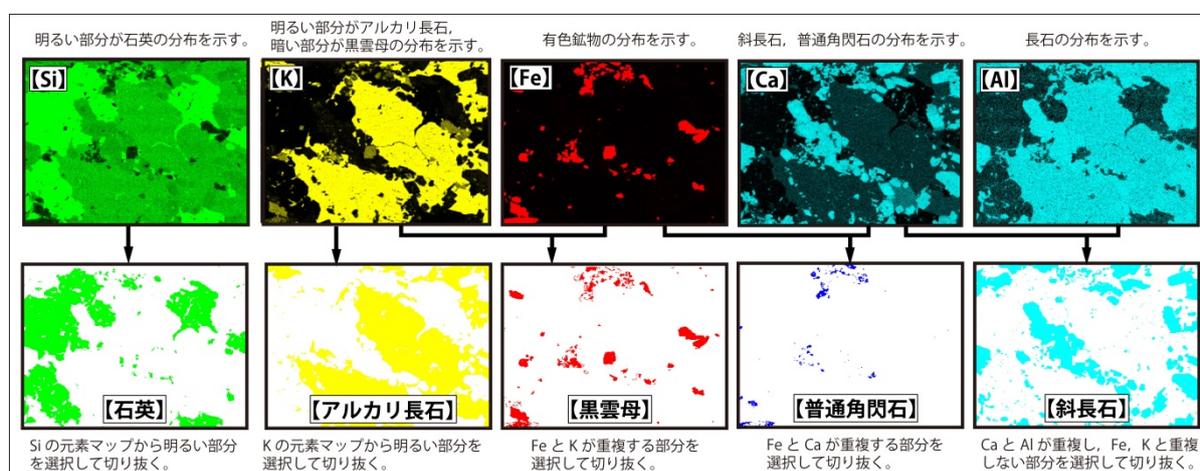


図 3.1-3 走査型 X 線分析顕微鏡の分析結果を利用した花崗岩の鉱物分布図作成の例

(2) EPMA を用いた重鉱物の分析技術

限られた露頭やボーリングコアなどの試料から細粒の碎屑物を大量に分析することができれば、後背地解析の効率が格段に向上することが期待される。特に、風化に強く、比較的普遍的に存在するジルコンなど一部の重鉱物や石英に着目した分析技術が整備されることが望ましい。

重鉱物については、化学組成に加え、U-Pb 年代（平田ほか, 2004⁷⁾）や CHIME（Chemical Th-U-total Pb Isochron Method；Suzuki and Adachi, 1991⁸⁾）年代といった放射年代が後背地解析の指標として利用できる。本事業では、フィールドエミッション電子プローブマイクロアナライザ（JEOL JXA-8530F FE-EPMA）（以下、「EPMA」という）を導入し、重鉱物の迅速な定量分析や CHIME 年代測定に関する技術開発を実施した。

1) 重鉍物の迅速な分析

EPMA を用いて重鉍物の粒子ごとの定量分析を連続的かつ迅速に行い、砕屑物や基盤岩に含まれる重鉍物の構成比や特定の重鉍物（ジルコンなど）の化学組成を対比することで後背地の推定を行う手法を開発した（以下、「重鉍物スクリーニング」という；日本原子力研究開発機構，2016⁹⁾；清水ほか，2017a¹⁰⁾）。重鉍物の構成比については、重液分離などにより重鉍物を濃集させ、ランダムに重鉍物を拾い出して粒子ごとに EPMA 分析を行ったうえで、その化学組成に基づき重鉍物の種類を同定し、存在比を計算する。化学組成比については、重液分離などで濃集させた重鉍物から、風化耐性のあるジルコンなど特定の鉍物のみを拾い出して EPMA 分析を行い、鉍物の化学組成を測定することで計算する。

開発した手法の有用性を確認するため、東濃地域の土岐砂礫層の試料（日本原子力研究開発機構（2017）⁹⁾の地点 22 で、露頭の下部から上部へ順に F2、F5、F7、F8、F14、F10、F11、F12 及び F13）にこの手法を適用し、露頭記載との比較を行った。また、試料採取地点の土岐砂礫層の後背地岩体と推定される基盤岩の試料（苗木・上松花崗岩、伊奈川花崗岩、濃飛流紋岩）についても同様に分析した。これらの基盤岩は、普通角閃石の有無やジルコンの Y_2O_3 含有量により区別することができる（図 3.1-4）。 Y_2O_3 に富むジルコンが苗木・上松花崗岩で多く確認されていることは Suzuki and Yogo (1986)¹¹⁾でも指摘されており、重鉍物スクリーニングの結果は既往研究とも矛盾しない。

地点 22 の砕屑物試料については、露頭の下部の試料（F2、F5、F7 及び F8）と上部の試料（F14、F10、F11、F12 及び F13）との間で傾向の違いが見られた（図 3.1-5）。すなわち、上部の試料では、黒雲母の風化生成鉍物である Al バーミキュライトの存在比がやや多くなることに加え、 Y_2O_3 に富むジルコンが特徴的に存在する。礫種組成は、下部は濃飛流紋岩の礫で占められるが、上部には花崗岩や玄武岩礫も存在する。重鉍物スクリーニングの結果は、上部と下部との礫種組成の違いと整合的であり、本手法の後背地解析への有効性が示せたと考えられる。

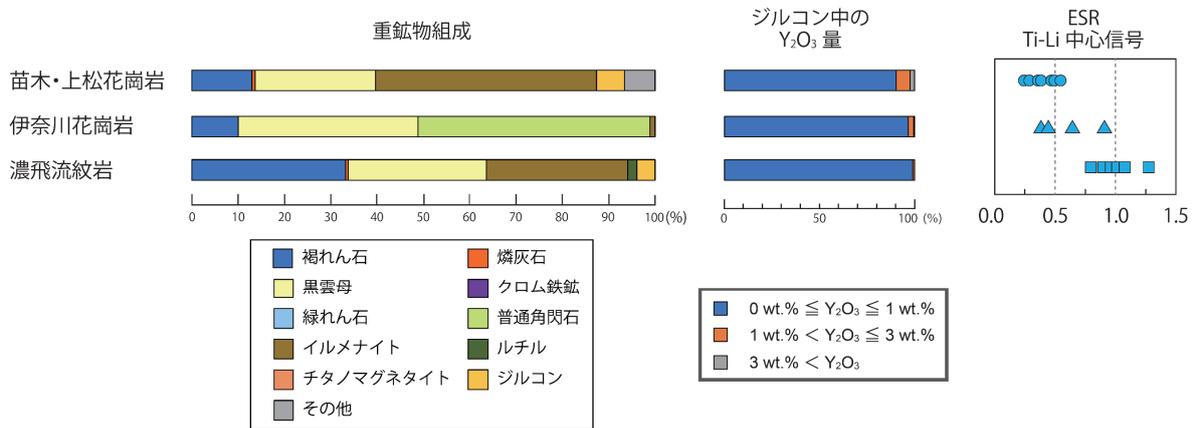


図 3.1-4 基盤岩試料の重鉍物組成・ジルコン中の Y_2O_3 量、ESR の Ti-Li 中心信号

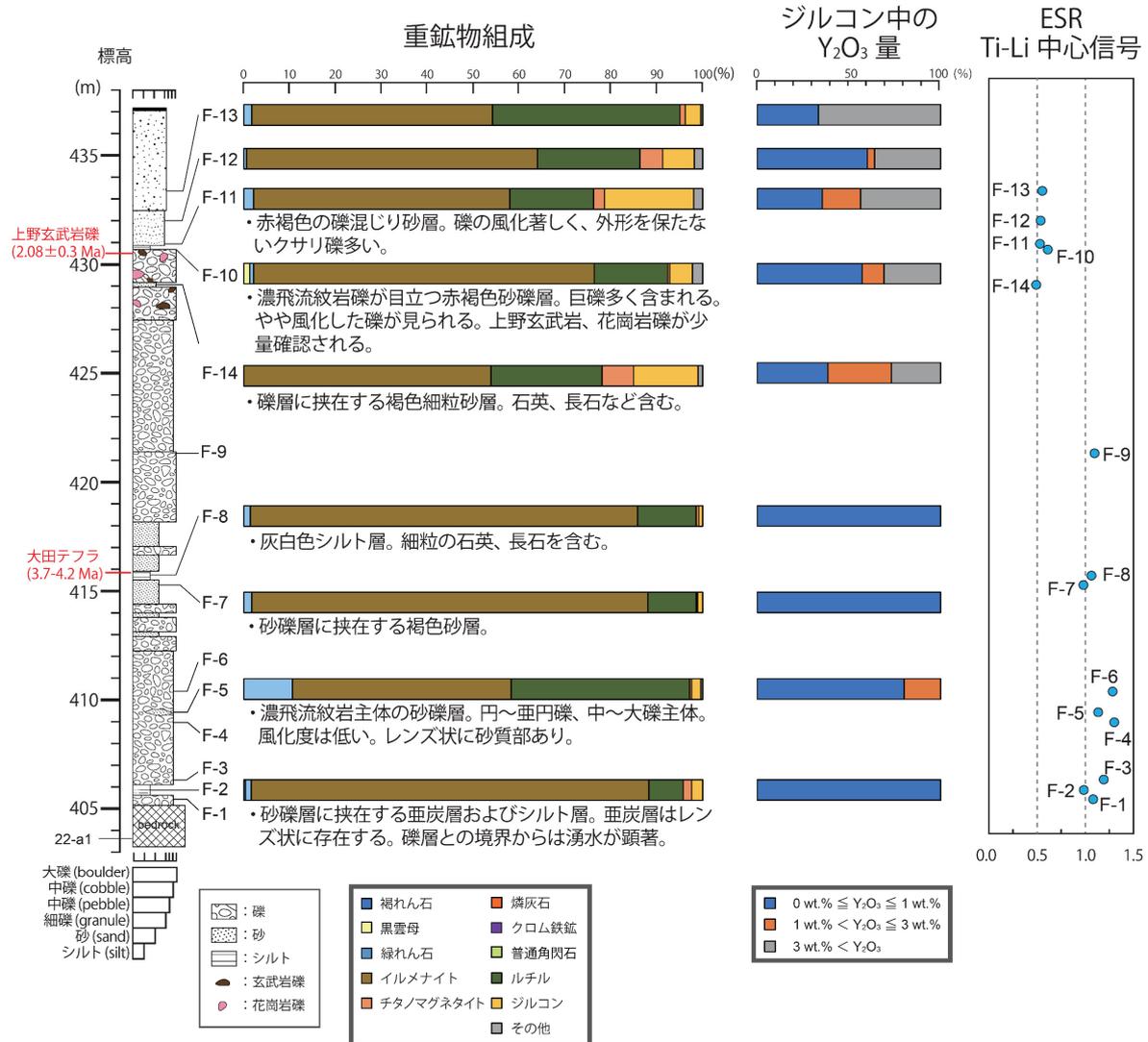


図 3.1-5 地点 22 の堆積物試料の重鉍物組成・ジルコン中の Y₂O₃ 量、ESR の Ti-Li 中心信号

2) CHIME 年代測定

CHIME 年代測定は、EPMA で鉍物粒子の微小領域に含まれる Th、U、Pb を定量して、粒子各部分の形成年代を決定する地質年代測定法である (Suzuki and Adachi, 1991⁸⁾; 鈴木, 2011¹²⁾)。特にモナザイトは、U や Th に富む一方で初期鉛をほとんど含まないという特徴を有するため、鉍物中の微小領域ごとの形成年代の情報を得られる EPMA を用いた CHIME 年代測定が有効であると考えられる。

本事業で導入した JEOL JXA-8530F FE-EPMA は波長分散型分光器を五台備えており、このうち三台は H 形と呼ばれる比較的新しいタイプの分光器である (日本原子力研究開発機構, 2015¹³⁾)。この H 形分光器は従来型の分光器よりも感度が高いため、より短時間での測定が可能であるが、一方で分解能は従来型に比べて低い。

本事業では、この H 形分光器の利点を生かして従来よりも短い時間でモナザイトの CHIME 年代測定を行うことを試みた。従来の分光器に比べて分解能が低い H 形分光器の問題を解決するため、Åmli and Griffin (1975)¹⁴⁾の方法による干渉補正を行いこの影響を克服した。この手法により求めた干渉補正係数を用いてモナザイトの CHIME 年代測定を行ったところ、福井県の江若花崗岩で 69 ± 8 Ma、オーストラリアの Cooma 花崗岩で 432 ± 26 Ma という結果を示し、いずれ

についても先行研究の結果と誤差の範囲で一致する結果が得られた (図 3.1-6 ; Shimizu et al., 2017¹⁵)。また、ジルコンとゼノタイムについても、本装置による CHIME 年代測定の適用性を確認した (柴田ほか, 2015¹⁶)。したがって、H 形分光器の特性を活かした CHIME 年代測定は実用化の見通しが得られたと考えられる。

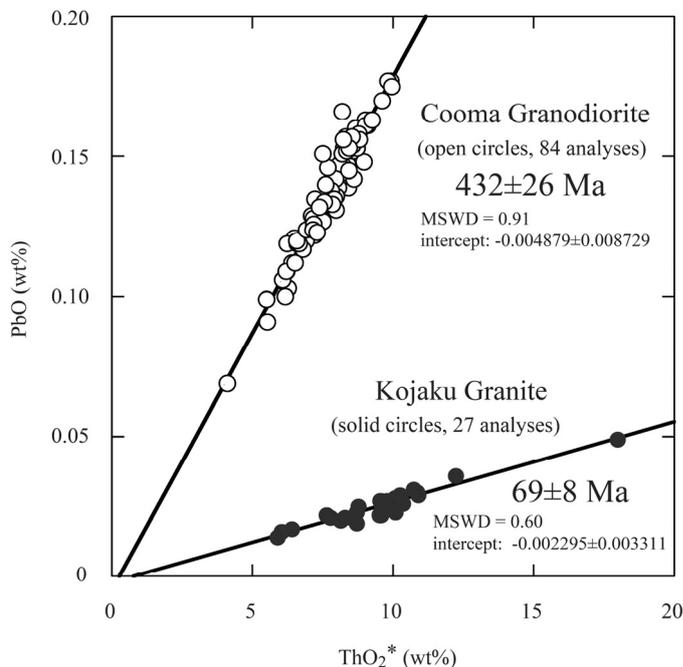


図 3.1-6 江若花崗岩と Cooma 花崗岩のモナザイトの PbO-ThO₂*プロットと年代計算結果

(3) 石英の ESR 信号を用いた技術

石英粒子などでは、自然放射線により損傷を受けて生成された不対電子が格子欠陥で捕獲される。このような不対電子は、ESR 信号として検出することができる。

石英は、堆積物中に普遍的かつ多量に存在するとともに、風化に強いことから、石英を利用した後背地解析が適用できれば非常に有効な手段となり得る。これまでも、石英粒子の ESR 信号に基づき、風成塵の供給源の推定が試みられた事例がある (例えば、Toyoda and Naruse, 2002¹⁷; Nagashima et al., 2007¹⁸)。

本事業では、この ESR 信号強度を用いて砕屑物及び後背地の岩体に含まれる石英の特徴の違いを比較することで、砕屑物の供給源の推定を試みた。ESR 信号測定のために試料から石英だけを抽出するための試料調製についても、幡谷・白井 (2003)¹⁹を参考に、本事業において最適な手法を構築した (図 3.1-7 ; 日本原子力研究開発機構, 2015¹³)。

ESR 信号測定は、JEOL RESONANCE JES-X320 により、石英の Al 中心信号、Ti-Li 中心信号及び E1'中心信号を測定した (日本原子力研究開発機構, 2017⁵)。東濃地域の基盤岩及び地点 22の堆積物試料に対して適用した結果、堆積物試料 (F-1~F-14) の Ti-Li 中心信号について、下部の F-1~F-9は濃飛流紋岩中の石英が示す値に近いのに対して、上部の F-10~F-14は花崗岩中の石英が示す値に近いことが分かった (図 3.1-4及び図 3.1-5)。この結果は、露頭の下部では本地点の基盤をなす濃飛流紋岩の礫で占められているのに対して、上部では濃飛流紋岩の他に花崗岩や玄武岩の礫が含まれているという露頭記載と整合的であると言える。このことから、砕屑物及び基盤岩中の石英の Ti-Li 中心信号を用いた比較についても、前述した重鉍物スクリーニングとともに、砕屑物の供給源の推定に適用できる場合があることが示された。

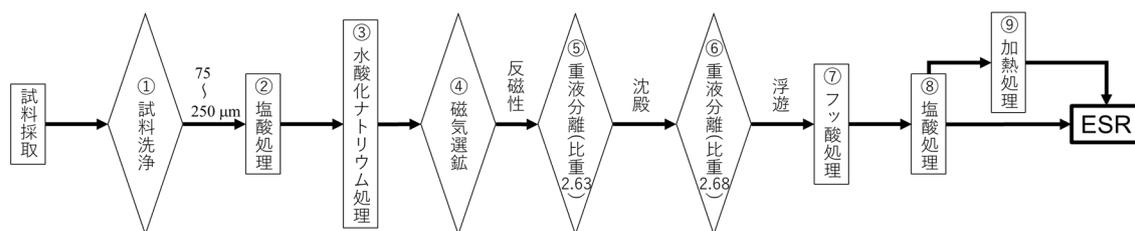


図 3.1-7 ESR 信号測定のための石英粒子の抽出フロー
比重の単位は「g cm⁻³」とする。

(4) 石英の OSL・TL 信号を用いた技術

OSL は、ある波長の光を鉱物・結晶などが受けた時に、自然放射線の被曝により生じた放射線損傷の解消によって鉱物・結晶が発光する現象である。一方 TL は、同様の放射線損傷が加熱により解消され発光する現象である。既往研究からは、砕屑物と花崗岩中に含まれる石英粒子の OSL 信号や TL 信号に基づき、砕屑物の供給源に関する情報が得られる可能性も示されている（例えば、Tsukamoto et al., 2011²⁰；高田, 2010²¹）。

本事業では、砕屑物及び後背地の岩体に含まれる石英粒子について OSL・TL 信号を測定し、これらの信号特性を用いた砕屑物の供給源を推定する手法の適用性を検討した（日本原子力研究開発機構, 2017⁵）。その際、信号強度やその変化傾向を決める要因を明らかにするための粒子径などとの比較や、複数の要因の重ね合わせからなるルミネッセンス信号特性を要因別に分離する手法についても開発を進めた。

基盤岩試料の OSL 信号測定結果（図 3.1-8）では、試料 10-a1 を除くすべての試料において、測定開始から早い時間に現れる 20-25 s 付近を頂点とするピーク（1st Peak）が見られる。また、試料 10-a2、13-a3、14、15、16、17、18-a1、20、21-a1、21-a2 及び 25-b1 では遅い時間に現れる 600-850 s 付近を頂点とするピーク（2nd Peak）が見られる。2つのピークが見られるものについて、ピーク強度の比（1st Peak / 2nd Peak）を計算して比較を行ったが、基盤岩の種類との明瞭な相関は認められなかった（図 3.1-9）。基盤岩試料の TL 信号測定結果では、100-110 及び 200-210 °C 付近にピークが見られ、100-110 °C 付近のピークが顕著に高く現れた。ただしこれについても、基盤岩の種類ごとの特徴的な違いの識別はできなかった。そのため、ESR 信号とは異なり、単純に OSL・TL 信号の違いのみから後背地の岩体を推定するのは困難であると考えられる。

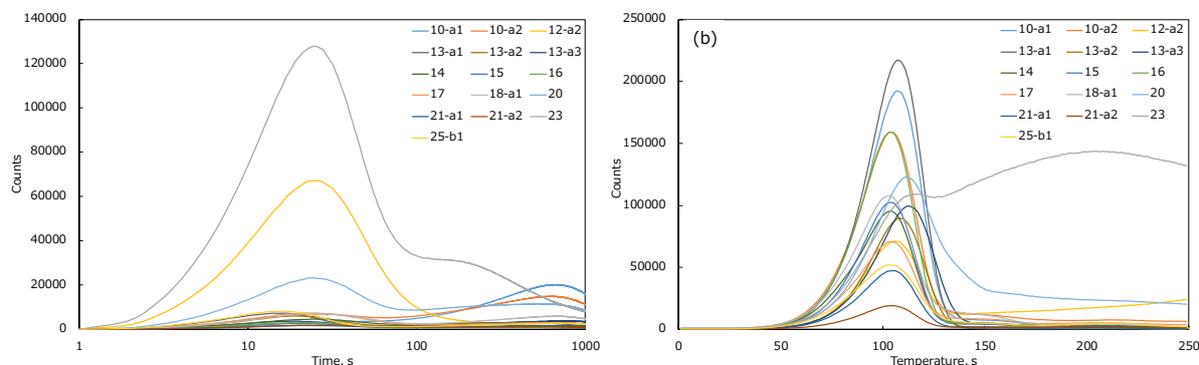


図 3.1-8 OSL・TL 信号の特徴
(a) : 基盤岩の OSL 信号、(b) : 基盤岩の TL 信号

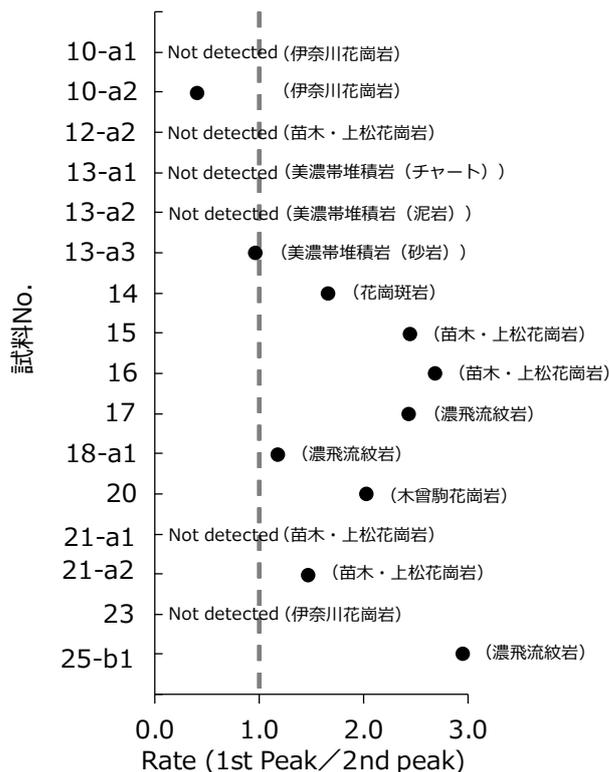


図 3.1-9 基盤岩試料の OSL 信号のピーク強度比

一方、自然放射線の被曝により生じた放射線損傷が時間とともに増加することを利用し、石英や長石などの OSL・TL 発光強度を測定することにより、数十万年前～数十年前に形成された堆積物の堆積年代を直接推定する OSL・TL 年代測定法の開発も進められている（幡谷・白井, 2003¹⁹⁾；塚本・岩田, 2005²²⁾；奥村・下岡, 2011²³⁾；徳安・田中, 2015²⁴⁾など）。数十万年というのは山地の発達過程やそれに伴う後背地の変化に関するのみならず、地層処分に係るサイト選定や安全評価にとって非常に重要な時間スケールであるため、本事業においても、石英の OSL 年代測定手法の検討を行った。

東濃地域及び幌延地域の OSL 年代測定の結果（図 3.1-10）、OSL 年代は年代誤差を含めておよそ 20～80 ka を示した。また、幌延地域の下層においては、100 ka 以上（蓄積線量 200 Gy 以上）の OSL 年代が検出された。得られた結果において、高い OSL 年代を示すもの（東濃地域の TDU）、また、自然及び飽和含水比によって OSL が大きく異にするもの（幌延地域の KS-2）がみられた。これは含水比が高いことが原因である可能性がある。また、測定した石英試料の OSL 信号には、光に対する反応速度が比較的遅い成分からの信号（medium 及び slow 成分）が含まれているため、年代値が小さく見積もられている可能性がある。そのため、反応速度の速い成分（fast 成分）からの信号だけを用いて年代測定を試み、既往研究の段丘編年、テフラ対比、二次堆積などを考慮して堆積時期を検討する必要がある。

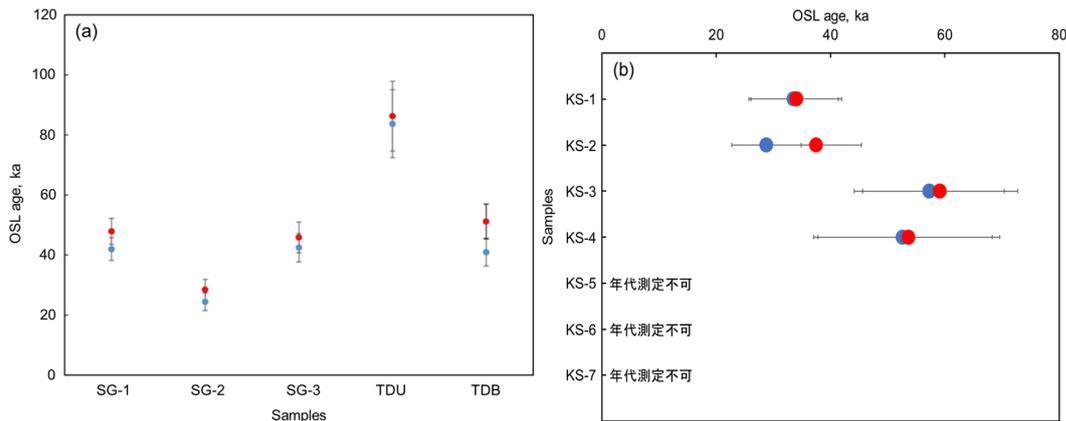


図 3.1-10 OSL 年代測定結果

(a)は東濃地域、(b)は幌延地域を示している。飽和含水比を用いた年代は赤色のプロット、自然含水比を用いた年代は青色のプロットで示している。幌延地域のKS-5~KS-7は、OSL年代検出限界以上（蓄積線量 200 Gy 以上）であったため、測定できなかった。

(5) 帯磁率異方性測定による古流向の推定

帯磁率は、外部磁場をかけたときに得られる磁化の変化率であり、磁場に対する磁化のしやすさを表す（中井, 2004²⁵）。堆積物中には様々な磁性鉱物が存在し、これらの分布、形状や配列により三次元的な帯磁率強度の分布に違いが生じる。こうした三次元的な帯磁率強度の偏りが帯磁率異方性と呼ばれる。帯磁率異方性は、長軸・中軸・短軸（Kmax、Kint、Kmin）の三軸からなる楕円体として表すことができる。堆積物の帯磁率異方性は、堆積物に含まれる個々の磁性鉱物の形状や配列様式を反映して生じることから、堆積物の流下方向や変形構造を客観的に知ることができる（例えば、Byrne et al., 1993²⁶; Ujiie et al., 2000²⁷; 川村ほか, 2002²⁸; 金丸ほか, 2008²⁹）。さらに、比較的少量の試料で測定することが可能で、一辺 2 cm 程度のプラスチックキューブで定方位採取した試料がしばしば測定に供される。以上のような特徴から、帯磁率異方性を用いた古流向の把握手法は、後背地解析技術として汎用性が高い手法の一つとなり得る。

古流向の推定は、礫の配列や砂層の堆積構造といった露頭観察に基づき行われるのが一般的であるが、シルト層のような細粒な地層に対しては、露頭観察のみでは古流向の推定が困難なことも多い。そのような場合、帯磁率異方性の測定から、粒子配列を直接観察・測定することが著しく困難な細粒碎屑粒子に対してファブリック解析を行い、古流向などを検討することが有効であると考えられる。

本事業では、平成 26 年度に導入した帯磁率異方性測定装置 AGICO 製 MFK1-FA を用いて、帯磁率異方性測定の古流向解析への適用性を検討した。まず、礫の配列や砂層の堆積構造から古流向が推定できる露頭について、細粒のシルト層を定方位採取し、帯磁率異方性を測定して結果を比較した（日本原子力研究開発機構, 2016⁹）。その結果、露頭観察と帯磁率異方性測定とで推定される古流向がほぼ一致することが示された（図 3.1-11; 丹羽ほか, 2017³⁰）。

さらに、帯磁率異方性の長軸・中軸・短軸それぞれの強度や分布に基づき、粒子形状あるいは流れの強さなどの堆積環境が推定できる場合もある（日本原子力研究開発機構, 2016⁹）。幌延地域における検討では、露頭観察によって擾乱の激しい層準と擾乱の少ない平穏な流れが示唆される層準とが識別される段丘堆積物において、それぞれシルト～細粒砂層の帯磁率異方性測定を行い、その測定結果からも、観察されるような堆積環境の違いを明瞭に識別することができた（図 3.1-12）。

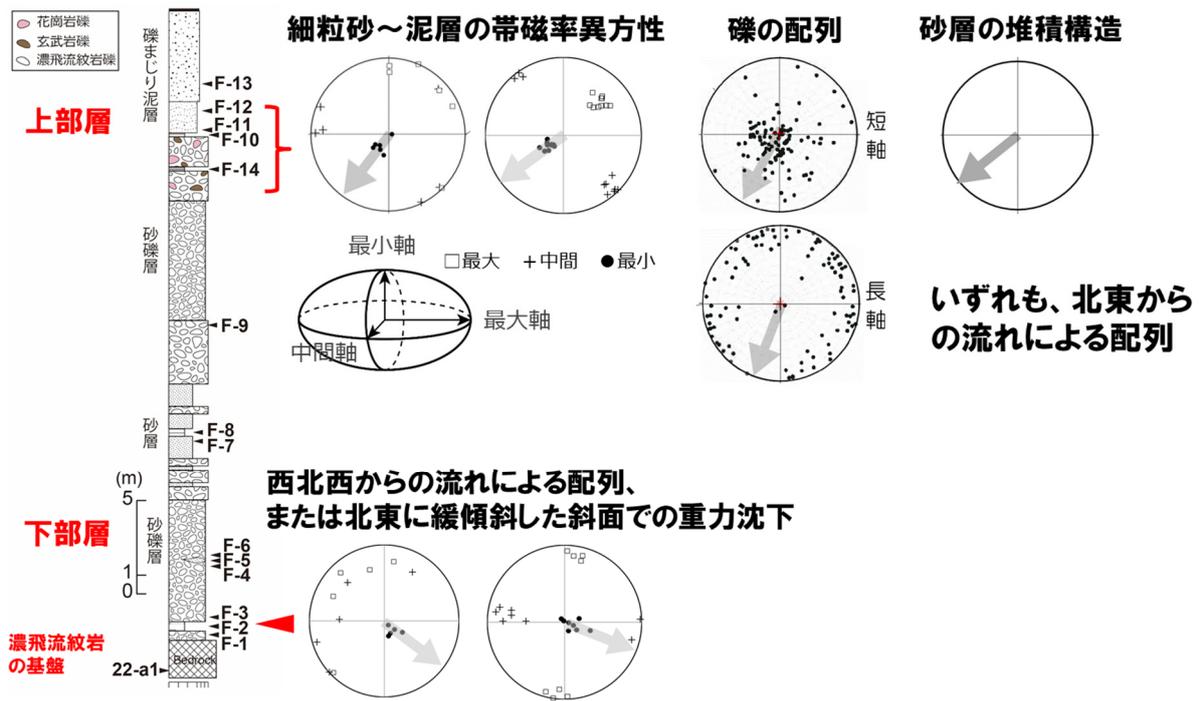


図 3.1-11 地点 22 における露頭観察結果及び帯磁率異方性測定に基づく古流向の比較

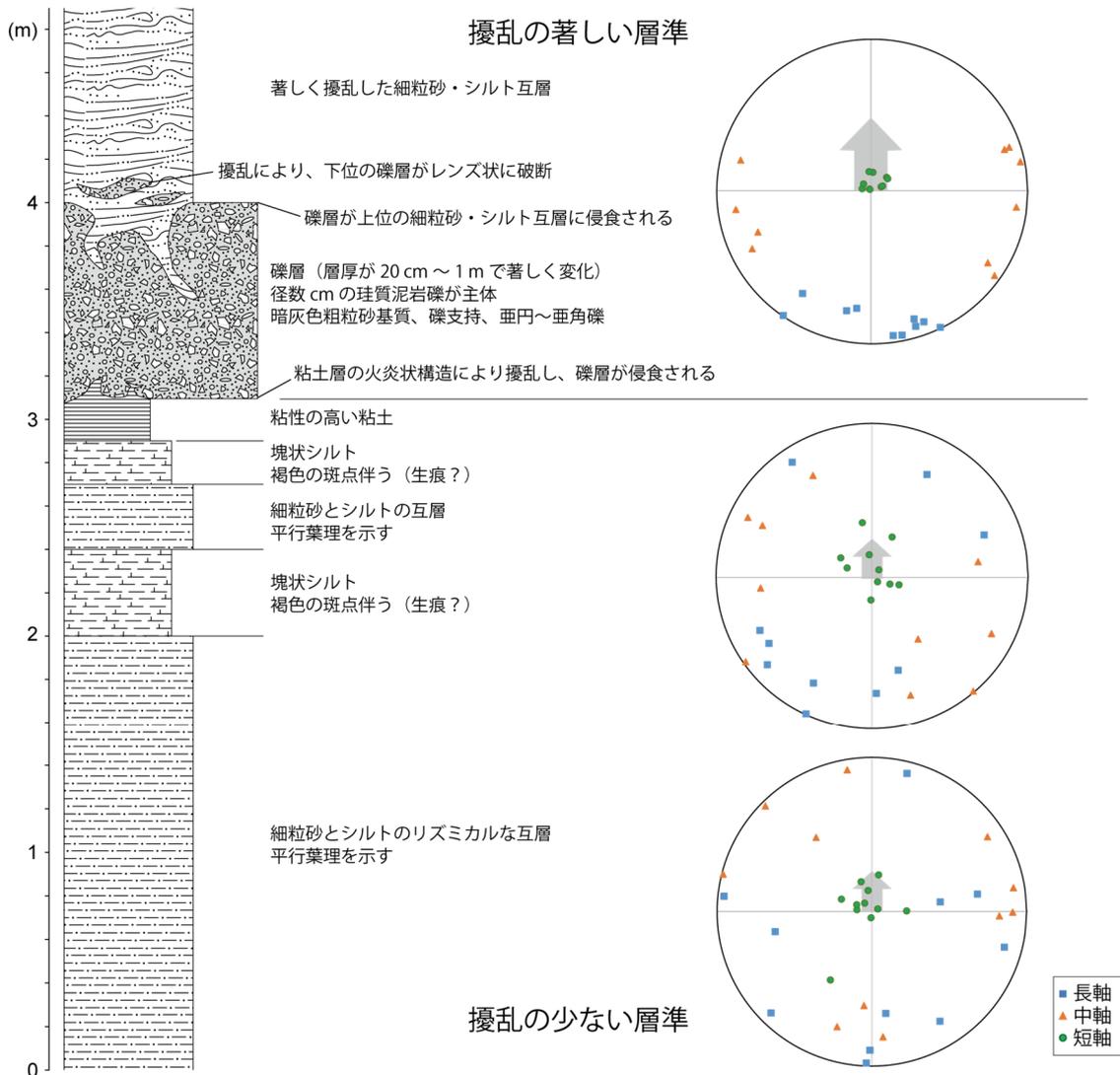


図 3.1-12 段丘堆積物の柱状図と帯磁率異方性測定結果

露頭位置は日本原子力研究開発機構 (2017)⁵⁾の開進地区に相当する。擾乱の激しい層準では、短軸だけでなく長軸、中軸の分布も良い集中を示し、北方向の速い流れによる配列（インブリケーション）を示唆するが、擾乱の少ない層準では、長軸、中軸の分布は低角方向でばらつき、北方向の弱い流れを示唆する。

(6) テフラカタログの整備

地質時代を通じ、日本列島の火山は時折、大規模火砕流が流出し、火山灰が広く日本列島を覆うような巨大噴火を繰り返してきた。降下した火山灰は地層の中に挟まって堆積する。火山灰は地質学的に短時間に降下・堆積するので、同一の噴火で堆積した火山灰は過去の同一時間を示す指標となる。これを用いて、堆積物の年代や山地の隆起時期などの地質学的な情報を得ることができるため、テフラに関する情報は、後背地解析においても重要である。

本事業では日本列島全域に幅広く適用できるテフラカタログの作成を目指し、既往研究による情報が十分でなかった北海道～東北地方のテフラを中心に鉱物組成や火山ガラスの形態・屈折率・化学組成などの特徴を記載・分析して整理した。整理結果の詳細については、日本原子力研究開発機構 (2015¹³⁾, 2016⁹⁾, 2017⁵⁾を参照されたい。

3.1.3 事例研究による適用性の確認

(1) 東濃地域（山間部）における事例

日本列島では一般に、山地では削剥が進行し、火成岩や変成岩、付加体堆積岩類のような基盤岩が広く露出している。東濃地域のような山間部の場合、後背地となり得る岩石は多くの場合これらの基盤岩から構成される。したがって、既往研究に基づき推定される地形・地質構造発達史を踏まえ、後背地の岩石の候補となる基盤岩試料を選定し、下流側の堆積物と同様の手法で分析して両者で結果を比較するという手順が後背地解析の基本となる。また、日本列島の山間部における山地の発達においては、断層運動がしばしば大きな寄与をもたらすことから、断層運動の履歴も考慮することが重要となる。

本地域に分布する主要な基盤岩における後背地の推定指標と関わる特徴については、既に図 3.1-4 に示した。さらに、土岐砂礫層の複数の露頭に対して重鉍物スクリーニングを実施したところ、上部礫部層（陶土団体研究グループ, 1994a³¹⁾）の上部に相当する層準にはチタノマグネタイトが特徴的に多く含まれることが明らかとなった。東濃地域の白亜紀～古第三紀火成岩類はイルメナイト系列火成岩であり、チタノマグネタイトは通常ほとんど存在しない。したがって、チタノマグネタイトの起源としては、第四紀に活動した上野玄武岩やさらにその上流の中部山岳地帯に点在する酸化的なマグマを生成する火成岩が考えられる。現在は土岐川流域に位置する地点においても、上部礫部層の上部に相当する層準でチタノマグネタイトの割合が多くなることから（図 3.1-13）、少なくとも百万年以上前は、木曾川が現在の土岐川を流下していたことが推定できる（日本原子力研究開発機構, 2018³²⁾）。この考察結果は、本事業において構築した百万年前の地形・地質モデル（日本原子力研究開発機構, 2016⁹⁾）とも整合的である。

断層運動に伴う山地の発達と後背地との関係については、前述の地点 22 における下部から上部への後背地岩体の変化が、近傍に位置する阿寺断層の横ずれ運動と密接に関連があることを指摘した（安江ほか, 2016³³⁾）。さらに、本地域南方に分布する屏風山断層の縦ずれ運動に伴う山地の形成と近傍の土岐砂礫層の後背地との関係についても議論した（日本原子力研究開発機構, 2017⁵⁾；清水ほか, 2017b³⁴⁾）。

(2) 幌延地域（平野部）における事例

幌延地域のように厚い堆積盆を有する平野部では、後背地岩体として山地に露出する火成岩や変成岩などの基盤岩だけでなく、平野部～中山間部に堆積している海成～陸成の地層の構成物がより新しい時代に二次堆積したものも候補として考えられる（新里ほか, 2007³⁵⁾）。また、本地域の基盤岩には苦鉄質岩が広く分布するため、珪長質岩がほとんどであった東濃地域とは異なる地質環境においても、重鉍物スクリーニングなどが適用できるかどうかのテストフィールドとなり得る。本地域は東西圧縮による fold-and-thrust belt となっており（小椋・掃部, 1992³⁶⁾）、かつ標高が高くない（高いところでも標高 200-300 m）ため、断層運動だけでなく、褶曲による山地の発達や、気候・海水準変動とも比較しながら検討することが必要である。そこで、向斜・背斜の両翼に分布するほぼ同層準の地層（更新統の更別層）を対象に重鉍物スクリーニングや帯磁率異方性測定を適用し、fold-and-thrust belt の発達と後背地との関係について議論した。

本地域の間寒別地区及び上幌延地区に分布する更別層を対象とした分析結果を図 3.1-14 及び図 3.1-15 に示す。その結果、間寒別地区東部の重鉍物組成は天塩山地の蛇紋岩体起源と推定される蛇紋石や酸化鉄が卓越するのに対し、間寒別地区西部及び上幌延地区（宗谷丘陵の背斜の両翼）の重鉍物組成ではこれらの鉍物はほとんど認められないことが明らかとなった。また、砂～シルト層の帯磁率異方性測定や砂礫層の堆積構造から推定される古流向は、更別層下部では東西性の方向が卓越するのに対し、上部では南北性の方向が卓越する傾向が認められた。

これらの重鉱物組成の違いや古流向の変化は、宗谷丘陵が陸化して削剥場となったことによって宗谷丘陵の両翼では新第三系の碎屑物が供給された一方、天塩山地の蛇紋岩体起源の碎屑物は問寒別地域が宗谷丘陵の陸化によって内湾～陸生的な環境となったことで、問寒別地区西部および上幌延地区まで運搬されなかったと推察される。問寒別地区における帯磁率異方性測定による古流向も東西方向から南北方向に変化しており、南に開けた構造盆地となったことを示している可能性がある。また、テフラの年代測定の結果や既往の生層序学的検討（岡・五十嵐, 1993³⁷）を踏まえると更別層上部の堆積時期である前期更新世の後期には、宗谷丘陵が陸化・成長していたと考えられ、1 Ma の時点では問寒別地区西部の山地が陸化していたとする本事業において構築した地形・地質モデルとも整合的であり、不確実性を考慮して設定したモデルバリエーションの絞り込みにおいて重要な情報を与えるものである。

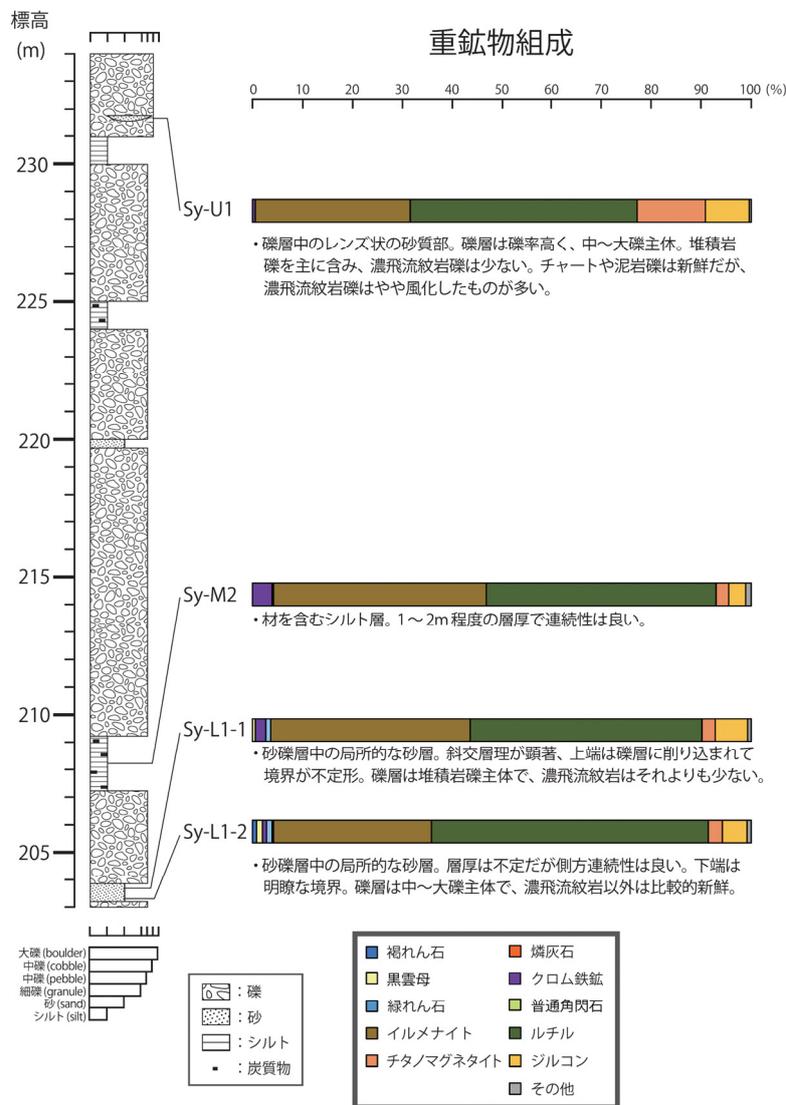


図 3.1-13 土岐川流域の土岐砂礫層（日本原子力研究開発機構, 2018³²）の地点 26) の柱状図及び重鉱物スクリーニングの結果

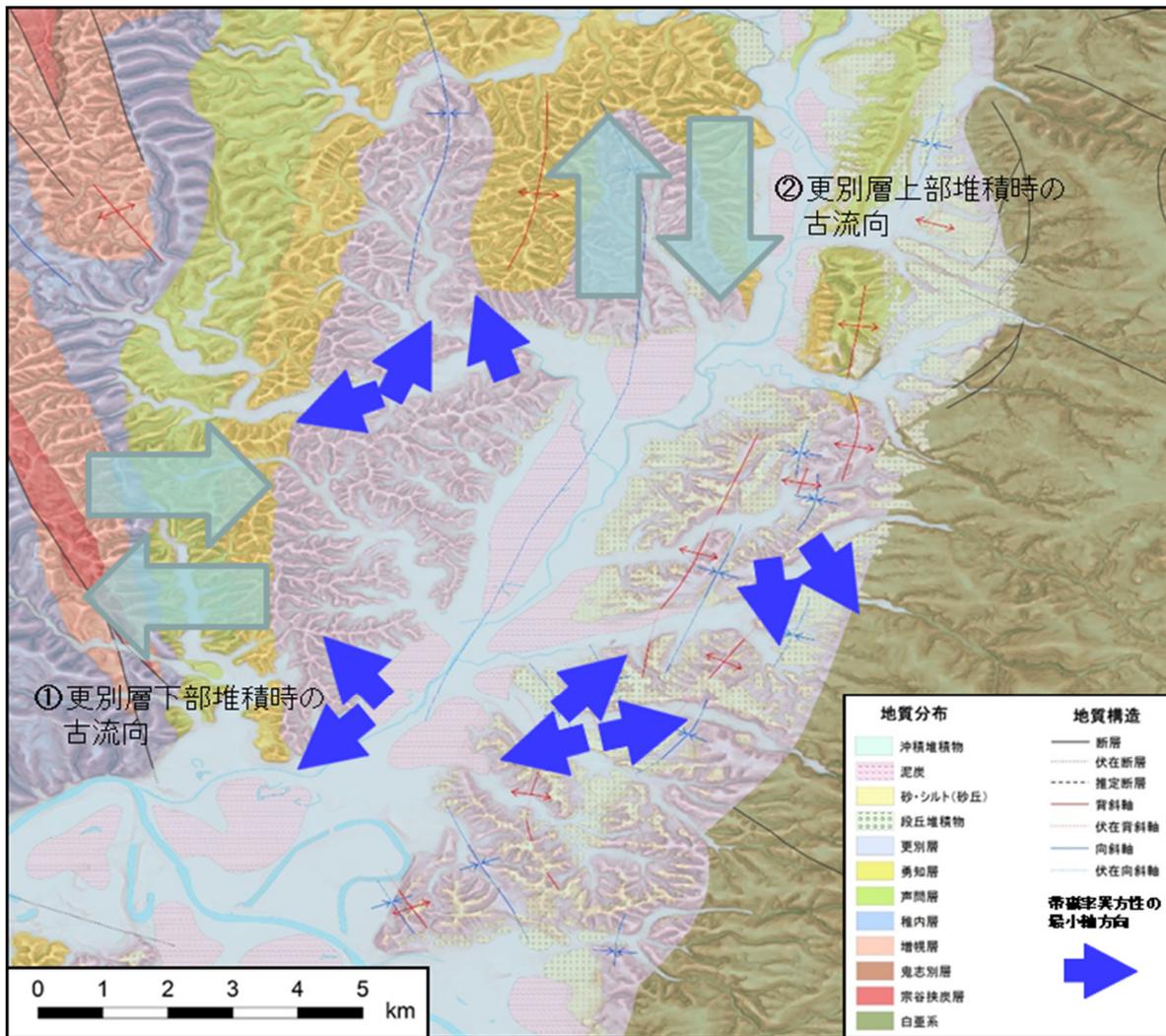


図 3.1-14 問寒別地区における帯磁率異方性測定による古流向の解析結果
 (日本原子力研究開発機構, 2018³²⁾)

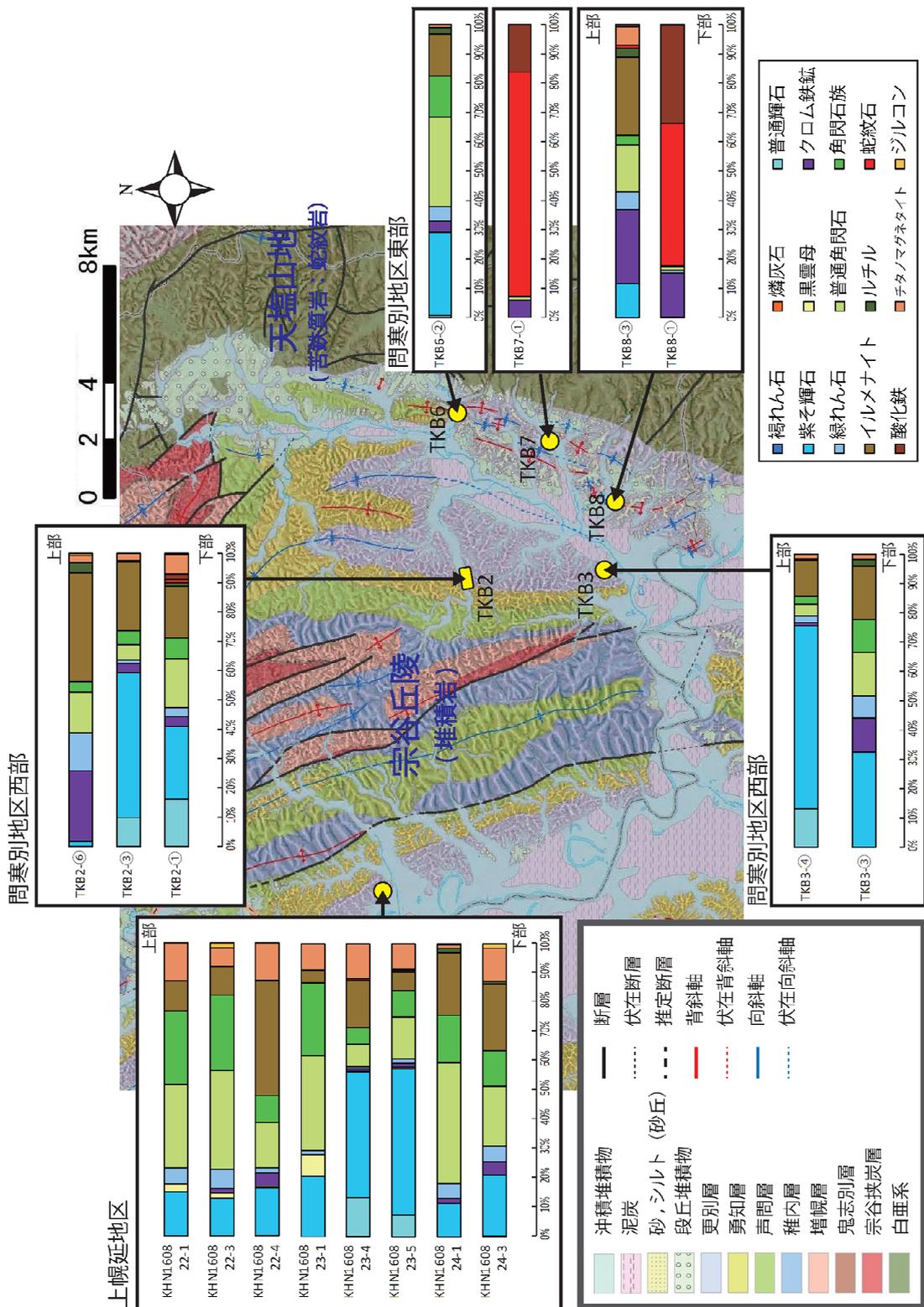


図 3.1-15 幌延地域における重鉱物スクリーニングの結果 (日本原子力研究開発機構, 2018³²⁾)

3.1.4 まとめ

本事業を通じ、地形・地質モデルの構築に反映できる革新的要素技術開発として後背地解析技術の高度化を進めてきた。特に、走査型 X 線分析顕微鏡及び画像処理・解析ソフトウェアを用いたモード測定手法の構築、重鉍物スクリーニングによる重鉍物組成分析・化学分析の迅速化、CHIME 年代や OSL 年代測定技術の整備、石英の ESR・OSL・TL 信号測定に基づく砕屑物供給源の推定手法の検討、細粒堆積物の帯磁率異方性測定による古流向の推定手法の検討、北海道～東北地方のテフラを中心としたテフラカタログの整備を行ってきた。また、これらの技術の適用性の確認として、東濃地域及び幌延地域において事例研究を実施した。その結果、OSL・TL 信号測定のように後背地解析への適用には課題の残った技術もあったが、重鉍物スクリーニングや帯磁率異方性測定のように、複数の技術についてその有効性を提示し、後背地解析技術の高度化及び適用範囲の拡大に貢献した。本事業において有効性を提示した技術について後背地解析のフローに反映すると、図 3.1-16 の通りとなる。

今後は、個々の調査・分析技術について、マニュアルなどの文献として整備・更新していくとともに、様々な地質条件の場に対する事例の蓄積を通じ、山地や丘陵の形成過程を推定するために必要な分析数などの定量的な基準が提示できるようになることが望ましいと考えられる。

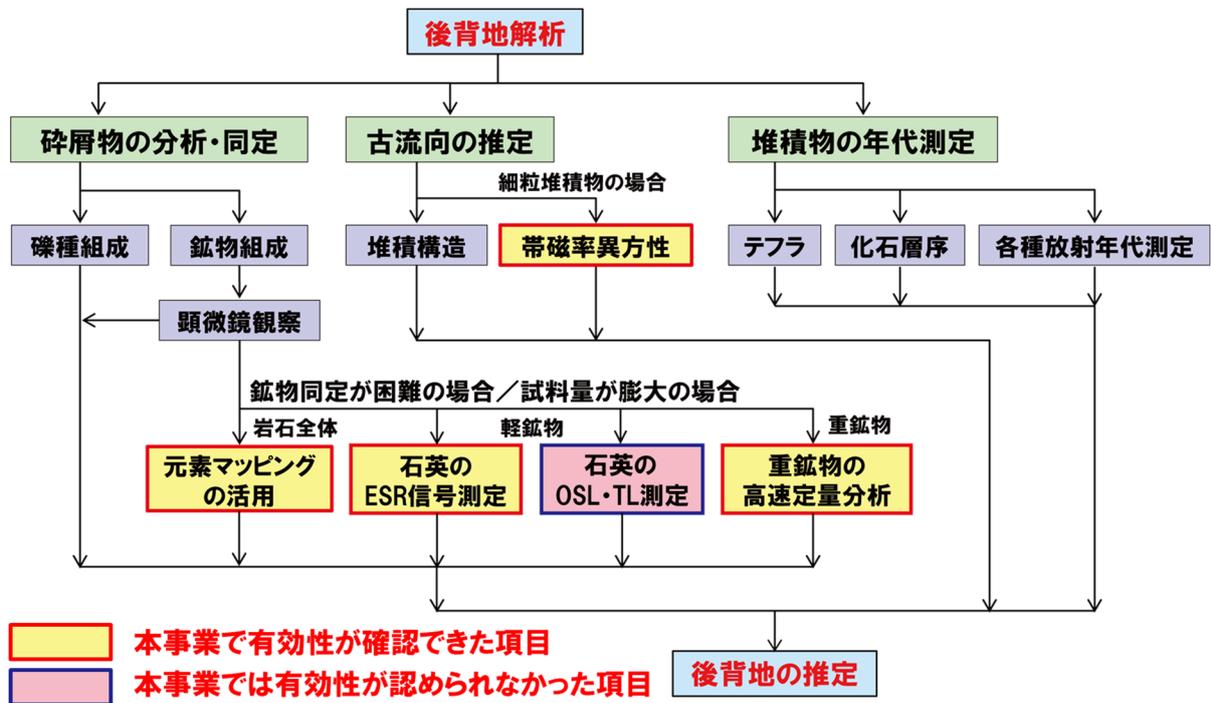


図 3.1-16 本事業において後背地解析への有効性を提示した技術

引用文献

- 1) 尾上博則, 笹尾英嗣, 三枝博光, 小坂 寛, 過去から現在までの長期的な地形変化が地下水流動特性に与える影響の解析的評価の試み, 日本原子力学会和文論文誌, vol.8, 2009, pp.40-53.
- 2) 草野友宏, 浅森浩一, 黒澤英樹, 國分(齋藤)陽子, 谷川晋一, 根木健之, 花室孝広, 安江健一, 山崎誠子, 山田国見, 石丸恒存, 梅田浩司, 「地質環境の長期安定性に関する研究」第1期中期計画期間(平成17年度~平成21年度)報告書(H22 レポート), JAEA-Research, 2010-044, 2011, 153p.
- 3) 末岡 茂, 堤 浩之, 田上高広, 低温領域の熱年代学の発展と日本の山地の隆起・剝削史研究への応用, 地球科学, vol.69, 2015, pp.47-70.
- 4) 浅森浩一, 丹羽正和, 花室孝広, 山田国見, 草野友宏, 幕内 歩, 高取亮一, 國分(齋藤)陽子, 松原章浩, 石丸恒存, 梅田浩司, 地質環境の長期安定性に関する研究 年度報告書(平成23年度). JAEA-research, 2012-024, 2012, 132p.
- 5) 日本原子力研究開発機構, 平成28年度地層処分技術調査等事業地質環境長期安定性評価確証技術開発報告書, 2017, 230p.
- 6) 植木忠正, 丹羽正和, 走査型 X 線分析顕微鏡と画像処理・解析ソフトウェアを用いたモード測定, 地質学雑誌, vol.123, 2017, pp.1061-1066.
- 7) 平田岳史, 浅田陽一, 大野 剛, 飯塚 毅, 早野由美子, 谷水雅治, 折橋裕二, レーザーアブレーション-誘導結合プラズマ質量分析法による地球化学試料の微量元素分析, 分析化学, vol.53, 2004, pp.491-501.
- 8) Suzuki, K. and Adachi, M., Precambrian provenance and Silurian metamorphism of the Tsubonosawa paragneiss in the South Kitakami terrane, Northeast Japan, revealed by the chemical Th-U-total Pb isochron ages of monazite, zircon and xenotime, *Geochemical Journal*, vol.25, 1991, pp.357-376.
- 9) 日本原子力研究開発機構, 平成27年度地層処分技術調査等事業地質環境長期安定性評価確証技術開発報告書, 2016, 266p.
- 10) 清水麻由子, 佐野直美, 鈴木和博, JAEA 東濃地科学センターの JEOL JXA-8530F FE-EPMA を用いた鉱物分析と年代測定, 名古屋大学年代測定研究, vol.1, 2017a, pp.36-43.
- 11) Suzuki, K. and Yogo, S., Microprobe analyses of zircons in some granitic rocks with special reference to the distribution of uranium, *Bulletin of Nagoya University Museum*, vol.2, 1986, pp.27-53.
- 12) 鈴木和博, EPMA による Th-U-Pb 化学アイソクロン年代測定法の開発と鉱物粒子年代測定への展開, 地球化学, vol.45, 2011, pp.113-128.
- 13) 日本原子力研究開発機構, 平成26年度地層処分技術調査等事業地質環境長期安定性評価確証技術開発報告書, 2015, 229p.
- 14) Åmli, R. and Griffin, W.L., Microprobe analysis of REE minerals using empirical correction factors, *American Mineralogist*, vol.60, 1975, pp.599-606.
- 15) Shimizu, M., Shibata, K., Suzuki, K., Sueoka, S. and Niwa, M., CHIME monazite dating: Pb analysis on an R_R= 100 mm spectrometer and correction of interferences between Th, U, and Pb with natural monazite. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, vol.112, 2017, pp.88-96.

- 16) 柴田健二, 清水麻由子, 鈴木和博, JAEA 土岐地球年代学研究所の JEOL FE-EPMA - JXA-8530F - を用いたジルコンの CHIME 年代測定, 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書, vol.26, 2015, pp.126-131.
- 17) Toyoda, S. and Naruse, T., Eolian dust from the Asian deserts to the Japanese islands since the last glacial maximum: the basis for the ESR method. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, vol.23, 2002, pp.811-820.
- 18) Nagashima, K., Tada, R., Tani, A., Toyoda, S., Sun, Y. and Isozaki, Y., Contribution of aeolian dust in Japan Sea Sediments estimated from ESR intensity and crystallinity of quartz, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol.8. 2007, Q02Q04, doi:10.1029/2006GC001364.
- 19) 幡谷竜太, 白井正明, 浅海成堆積物の OSL 年代測定, 第四紀研究, vol.42, 2003, pp.347-359.
- 20) Tsukamoto, S., Nagashima, K., Murray, A.S. and Tada, R., Variations in OSL components from quartz from Japan sea sediments and the possibility of reconstructing provenance, *Quaternary International*, vol.234, 2011, pp.182-189.
- 21) 高田将志, 起源の異なる石英の 110°C 熱ルミネッセンス信号特性 - 堆積物の供給源推定にむけて -, 奈良女子大学地理学地域環境学研究報告, vol.7, 2010, pp.105-112.
- 22) 塚本すみ子, 岩田修二, ルミネッセンス年代測定法の最近の進歩-適用年代の拡大と石英の OSL 成分について, 地質学雑誌, vol.111, 2005, pp.643-653.
- 23) 奥村 輔, 下岡順直, ルミネッセンス年代測定を開始するための心得 - 日本における年代研究の現状 -, 地質技術, vol.1, 2011, pp.5-17.
- 24) 徳安佳代子, 田中和広, 現世河川堆積物における OSL 信号リセット - 山口県錦川を例として -, 第四紀研究, vol.54, 2015, pp.1-9.
- 25) 中井睦美, ジオロジストのための岩石磁気学 帯磁率・古地磁気から AMS まで, 地学団体研究会, 2004, 178p.
- 26) Byrne, T., Bruckmann, W., Owens, W., Lallemand, S. and Maltaman, A., Structural synthesis: correlation of structural fabrics, velocity anisotropy, and magnetic susceptibility data, *Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific Results*, vol.131, 1993, pp.365-378.
- 27) Ujiie, K., Hisamitsu, T. and Soh, W., Magnetic and structural fabrics of the melange in the Shimanto accretionary complex, Okinawa Island: Implication for strain history during decollement-related deformation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.105, 2000, pp.25729-25741.
- 28) 川村喜一郎, 池原 研, 金松敏也, 藤岡換太郎, パレスベラ海盆から採取されたタービダイトの帯磁率異方性による古流向解析, 地質学雑誌, vol.108, 2002, pp.207-218.
- 29) 金丸龍夫, 木村一成, 田結庄良昭, 帯磁率異方性による現世凝灰質堆積物の古流向解析, 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, vol.43, 2008, pp.145-154.
- 30) 丹羽正和, 清水麻由子, 安江健一, 西村周作, 雨宮浩樹, 植木忠正, 堀内泰治, 山地の発達過程を把握するための後背地解析技術, 日本地質学会第 124 年学術大会講演要旨, 2017, R24-O-9.
- 31) 陶土団体研究グループ, 岐阜県恵那市周辺の瀬戸層群, 地球科学, vol.48, 1994a, pp.1-15.
- 32) 日本原子力研究開発機構, 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 地質環境長期安定性評価確認技術開発報告書, 2018, 206pp.

- 33) 安江健一, 徳安佳代子, 小松哲也, 堀内泰治, 清水麻由子, 丹羽正和, 電子スピン共鳴を用いた後背地解析技術の研究, 日本地質学会第 123 年学術大会講演要旨, 2016, pp.100.
- 34) 清水麻由子, 佐野直美, 植木忠正, 安江健一, 丹羽正和, 鈴木和博, EPMA を用いた重鉍物の存在比・化学組成分析による後背地解析の試み: 中部日本・屏風山断層の例, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 2017b, SGL36-P07.
- 35) 新里忠史, 舟木泰智, 安江健一, 北海道北部, 幌延地域における後期鮮新世以降の古地理と地質構造発達史, 地質学雑誌, vol.113 補遺, 2007, pp.119-135.
- 36) 小椋伸幸, 掃部 満, 天北・羽幌地域の石油地質 - 深部構造特性と炭化水素ポテンシャル -, 石油技術協会誌, vol.57, 1992, pp.32-44.
- 37) 岡 孝雄, 五十嵐八枝子, 北海道北部・問寒別構造盆地の鮮新 - 更新統 - とくに堆積相および花粉層序について -, 地質学雑誌, vol.99, 1993, pp.365-389.

3.2 地殻変動予測技術

3.2.1 背景と目的

地層処分における地質環境の予測及び評価は、過去の自然現象の偏在性や変動傾向に基づき、将来へ外挿することが基本となる。日本列島における第四紀後期の地殻変動には、変位の向きの一様性や変位の等速性といった経験則（一様継続性）が見出されている（例えば、笠原・杉村, 1978¹⁾; 松田, 1988²⁾）。一方で、時系列解析モデル（自己回帰移動平均モデル）の研究例によると、過去の期間（ N ）に成り立っていた関係性（定常性）は、将来になればなるほど、その関係性そのものが変化していると考えられるので、 $0.1\sim 0.2N$ 程度であれば関係性が継続する確率が高いと考えられている（梅田ほか, 2013³⁾）。また、過去のイベントや変動パターン・規模に係る記録は、遡る年代や地域によって識別できる分解能が異なることから、外挿による予測結果に伴う不確かさも様々である。さらに、時間スケールごとの変動方向や速度が大きく異なる場合は、その地域は一様継続性が成立しておらず、単純な外挿による予測には、より大きな不確実性が伴う。したがって、外挿法による予測においては、対象とする領域における変動の一様継続性の成立性が重要となる。

一般に、単純な外挿によって構築可能な将来の地形・地質モデルは、概念的なモデルに留まるため、その時空間的な変動を定量的かつ三次元的に評価することは難しい。また、地殻変動は時空間的に一様ではなく、地殻内の物性不均質などにも支配されると考えられる。このため、地形・地質学的手法による過去から現在までの長期的な変遷に基づいた帰納的な予測アプローチに加えて、変動のメカニズムを考慮した運動学的な数値シミュレーションにより、将来の地殻変動を定量的に評価する演繹的な手法を構築することも重要であると考えられる。

これらのことから、本事業では、地殻変動の一様継続性を評価するための指標について検討するとともに、地下構造の粘弾性不均質を考慮した数値シミュレーションによって、地形・地質構造の時間発展を定量的に予測する手法の開発を進めた。

3.2.2 地殻変動の予測に係る不確実性（一様継続性）評価指標の検討

地形・地質学的な情報や山地発達モデルによって推定された、日本列島におけるネオテクトニクスの成立時期に関する既存の研究によれば、第四紀の始めから百万年前頃には、多くの地域において現在の地殻変動の傾向が始まったと考えられている（梅田ほか, 2013³⁾）。しかしながら、日本海東縁、伊豆半島周辺、沖縄トラフでは、比較的若い時代（第四紀後半）に変動が開始したと考えられており、変動の方向や速度も将来予測の前提となる定常状態、すなわち一様継続に至っていないとも考えることができる。これは、測地学的な変動量と地形・地質情報から推定した変動量に大きなギャップが存在しているといった観測事実からもその可能性が示唆される。また、背弧海盆の拡大や海溝軸の移動などといったプレートシステムの転換に関する最近の研究（例えば、Strak and Schellart, 2014⁴⁾）によれば、数十万年～数百万年の時間スケールにおけるこれらの現象は、沈み込むスラブの形状や到達深度などに応じたいくつかの段階で加速度的な変動を示すことも指摘されている。

既に述べたように、地層処分における将来の地質環境の予測・評価は、過去の自然現象の偏在性や変動傾向に基づき、将来へ外挿することが基本となる。特に外挿法による予測においては、対象とする領域における変動の一様継続性の成立性が重要となる。ここでは、活断層の変位などの地形・地質学的な情報をもとに推定されるひずみ速度（地質学的ひずみ速度）と、Global Navigation Satellite System（以下、「GNSS」という）観測などで推定されるひずみ速度（測地学的ひずみ速度）との差に着目し、一様継続性の成立性を示唆する指標としての有用性について検討した。また、地質学的ひずみ速度の推定については、既存の手法を用いた解析を通じてその

課題を明らかにしたうえで、新たなアプローチについて検討した。

既存の手法に基づく地質学的ひずみ速度の推定においては、産業技術総合研究所が公開している活断層データベース（産業技術総合研究所, 2015⁵⁾）に記載された 418 セグメントの断層パラメータを用いた。ここでは、Wesnousky et al. (1982)⁶⁾により提案された手法を参考に、日本列島上に仮定された 80 km×80 km の個々の領域における平均的なひずみ速度を計算した。その結果、海洋プレートの沈み込み方向に短縮変形が卓越し、中部日本を含む西南日本では、概ね南北～北東－南西方向の伸長変形がみられるといった大局的な特徴が認められた。これらの結果は、Wesnousky et al. (1982)⁶⁾や Kaizuka and Imaizumi (1984)⁷⁾が推定したひずみ速度の結果と調和的であったが、活断層が分布しない領域のひずみ速度は推定できないといった課題が見出された。

そこで、新たなアプローチとして、同様の活断層データにディスロケーション（断層の食い違い）モデルを適用することで計算できる地表での変位速度をもとに、地質学的ひずみ速度の推定を行った。また、布田川・日奈久断層の運動によって 2016 年 4 月に発生した熊本地震に伴う地殻変動を事例として、この地震により解放された（測地学的に観測された）ひずみと、同断層の過去の活動履歴をもとにディスロケーションモデルによって推定した地質学的ひずみ速度とを比較することで、この手法の妥当性を検証した。

このうち熊本地震を事例とした検討では、活断層データ（産業技術総合研究所, 2015⁵⁾）に基づいて推定した地質学的ひずみ速度の分布が、GNSS による測地観測データに基づいて推定された地震時及びその余効変動によって生じた震源域周辺のひずみ分布と同様のパターンを示すことが明らかになった。さらに、布田川・日奈久断層の走向方向における過去の活動一回あたりのせん断ひずみを地質学的ひずみ速度から推定し、2016 年熊本地震により生じたひずみ（今回の活動一回あたりのせん断ひずみ）と比較した結果、両者は空間的な分布パターンとともに、定量的にも整合的であることが明らかになった。以上の成果は、地質学的ひずみ速度の推定手法として、本手法が概ね妥当であることを示唆すると考えられる。

また、九州地方全域に対して推定した地質学的ひずみ速度と測地学的ひずみ速度を比較した結果、九州北部においては両者が調和的な傾向を示すものの、九州南部では整合的ではないといった特徴が認められた（図 3.2-1）。九州南部においては、およそ東西方向に延びるせん断ひずみ速度の高い領域（以下、「せん断帯」という）の存在が GNSS 観測によって指摘されているが（Takayama and Yoshida, 2007⁸⁾; Wallace et al., 2009⁹⁾）、その活動に対応する明瞭な活断層の存在は認められていない。このことは、せん断帯が比較的若い時代に開始した活動によって生じていることを示唆すると考えられ、二つのひずみ速度に差が認められることと調和的である。さらに、日本列島全域を事例として実施した同様の検討では、奥羽脊梁山地の他、糸魚川-静岡構造線や中央構造線などにおける地質学的ひずみ速度と同領域での測地学的ひずみ速度の傾向が調和的であることが明らかになった。以上の成果は、ディスロケーションモデルを活断層データに適用することで推定される地質学的ひずみ速度と、GNSS などの測地観測データによって推定できる測地学的ひずみ速度との比較が、地殻変動の一樣継続性を検討するうえで、有用な情報を与えることができることを示唆すると考えられる。

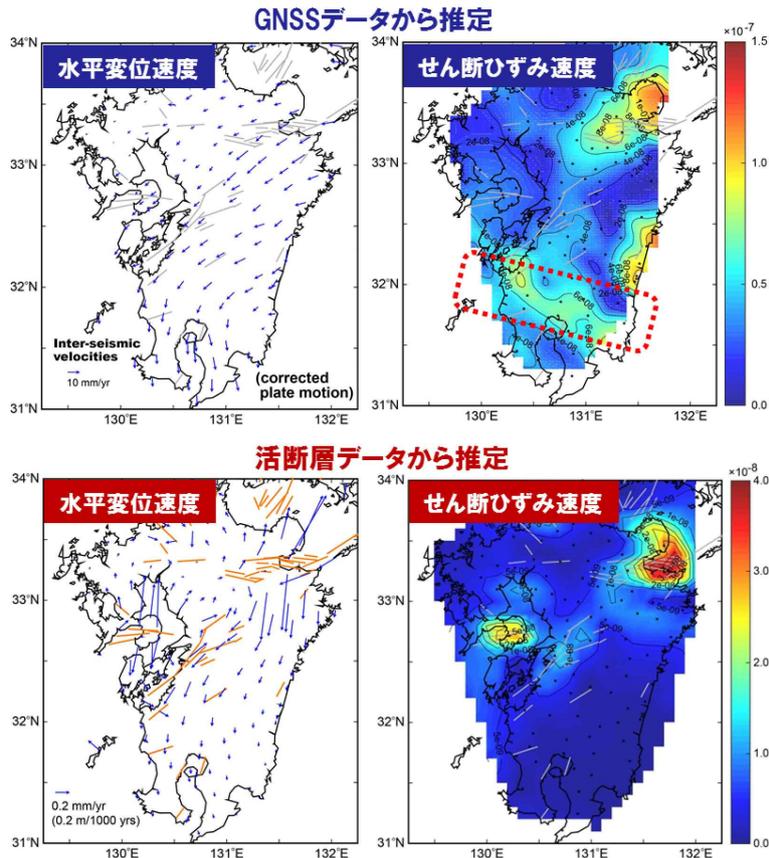


図 3.2-1 異なるデータより推定したせん断ひずみ速度

せん断ひずみ速度の推定に用いた GNSS 速度データ（上左図）、GNSS 速度データより推定したせん断ひずみ速度（上右図）、活断層データから推定した水平変位速度（下左図）、推定したせん断ひずみ速度（下右図）の分布を示す。（せん断ひずみ速度は yr^{-1} 単位で表示）

3.2.3 地殻変動シミュレーション技術の構築

一般に、地殻変動は空間的に一様ではなく、プレート間の相互作用の他、地殻内の物性不均質にも支配されると考えられる。特に、長期にわたる地殻変動をシミュレーションによって評価するためには、地下の温度構造や、近年明らかになりつつある地殻流体の存在などに伴う粘弾性不均質を考慮したシミュレーションにより、地殻の非弾性変形を模擬することが重要と考えられる。ここではまず、地殻深部における流体の粘性に係る情報を得るため、2011年東北地方太平洋沖地震に伴って顕著な沈降が確認されている東北地方の火山地域（Takada and Fukushima, 2013¹⁰; Ozawa and Fujita, 2013¹¹）を対象として地震後の地殻変動を求め、流体に関連した粘性係数の推定を行った。さらに、粘弾性不均質を考慮したシミュレーション技術を構築するため、2011年より茨城県・福島県県境付近において活発化した群発地震活動域を対象とした二次元シミュレーションを行うとともに、九州南部のせん断帯を事例とした三次元シミュレーションを実施した。

(1) 測地観測データを用いた地殻流体の粘性係数の推定

2011年東北地方太平洋沖地震に伴い、東北地方の火山地域では最大 10 cm にも及ぶ局所的な地表変位が測地学的な手法によって検出されている。これは地震により広域応力場が変化し、それに伴って地下のマグマ溜りが変形したことによる沈降であると指摘されている（Takada and Fukushima, 2013¹⁰）。岩石の粘性係数はその温度により変化するが、Takada and Fukushima

(2013)¹⁰⁾は、マグマ溜り自体の粘性係数は非常に小さく、事実上瞬時に起こったと考えてよいと述べている。しかし高温のマグマ溜りの周囲には、それより温度が低く、したがって粘性が大きい領域が存在すると考えられる。また、この領域は地震後一定の時間をかけて変形すると推測されるため、その微小な地表変位を観測することができれば、それに基づいて粘性係数を推定することができると考えられる。

火山地域下の流体の存在に係る粘性係数の推定には、国土地理院により蔵王周辺に設置された GEONET 観測点（観測点 020934）における鉛直変位のデータを使用した。また、解析には F3 解（中川ほか, 2009¹²⁾）を用い、年周変化は地震前の 5 年間のデータをもとに推定して除去した。図 3.2-2 に示す結果において、赤実線が指数関数によるフィッティングを示す。一般に、Maxwell 粘弾性体の時定数 τ は粘性係数 η と剛性率 G を用いて、 $\tau = \eta/G$ と表される。ここで、 G を 30 GPa（Wesnousky et al., 1982⁶⁾）と仮定すると、 $\eta = 3 \times 10^{17}$ Pa s（時定数約 4 ヶ月）と見積もられる。この解析結果には、本震の粘性緩和による地殻変動が重畳している可能性があるが、マンツルの粘性係数が 10^{19} Pa s のオーダーであることを考えると、推定された粘性係数はマンツルの粘性緩和とは異なる過程、すなわち地下のマグマ溜り周辺の粘弾性変形の粘性係数であると考えられる。以上の結果は、流体分布域またはその周辺域における粘性係数がマンツルに比べて 1~2 桁小さく、このような粘弾性不均質を考慮した地殻変動シミュレーションの重要性を示唆する。

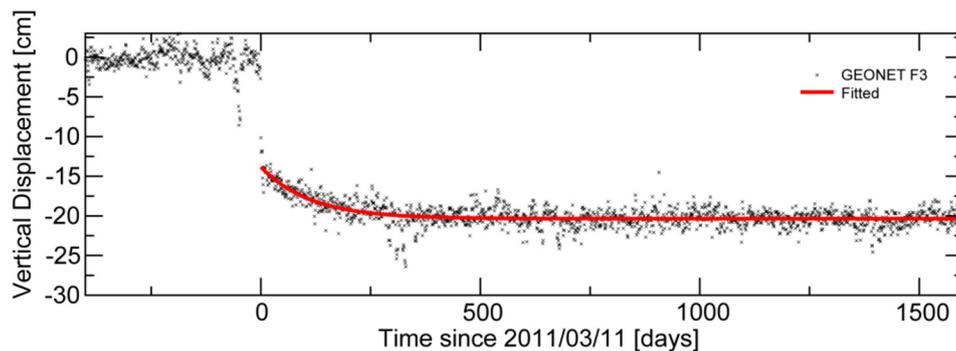


図 3.2-2 GEONET 点 020934 の鉛直変位時系列
赤の実線がフィッティングの結果を表す。

(2) 二次元シミュレーションによる検討

前項に述べた成果を踏まえた粘弾性シミュレーション技術の検討として、2011 年東北地方太平洋沖地震の発生後に正断層型の群発地震活動が活発化した茨城県・福島県県境付近（例えば、Kato et al., 2011¹³⁾）を事例として、二次元シミュレーションを実施した。ここでは、地震波トモグラフィ（Zhao, 2015¹⁴⁾）や MT 法（Umeda et al., 2015¹⁵⁾）によって見出された群発地震活動域下の地殻流体を粘弾性体と仮定し、北米プレート－太平洋プレート間におけるカップリング（Hashimoto et al., 2009¹⁶⁾；Uchida and Matsuzawa, 2011¹⁷⁾）を考慮したモデル（図 3.2-3）に基づいた計算によって、地域的な地殻変動に対する地殻内の流体の寄与について検討した。有限要素法コード PyLith（Aagaard et al., 2013¹⁸⁾）を用いたシミュレーションの結果、地殻流体分布域の上部で鉛直上向きの変位（隆起）が卓越するといった地形変化に関する傾向の他、深部流体分布域の直上では圧縮場である一方で、それ以浅では伸長場であるとの地殻応力場に関する特徴が認められた（図 3.2-4）。これらの結果は、当該地域が隆起場にあること（例えば、Suzuki, 1989¹⁹⁾）や、現在の応力場の特徴（Yoshida et al., 2015²⁰⁾）を定性的に再現していることから、地殻内に存在する流体が、その周辺の地殻変動場に寄与していることを示唆する。

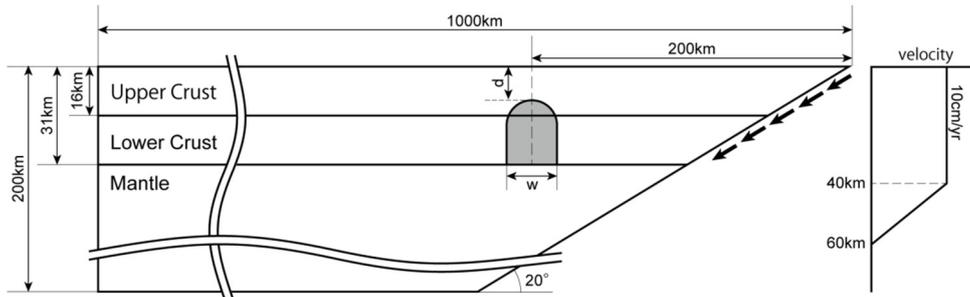


図 3.2-3 二次元有限要素法によるシミュレーションのセットアップ
灰色の領域が流体分布域に対応する粘弾性体を表す。

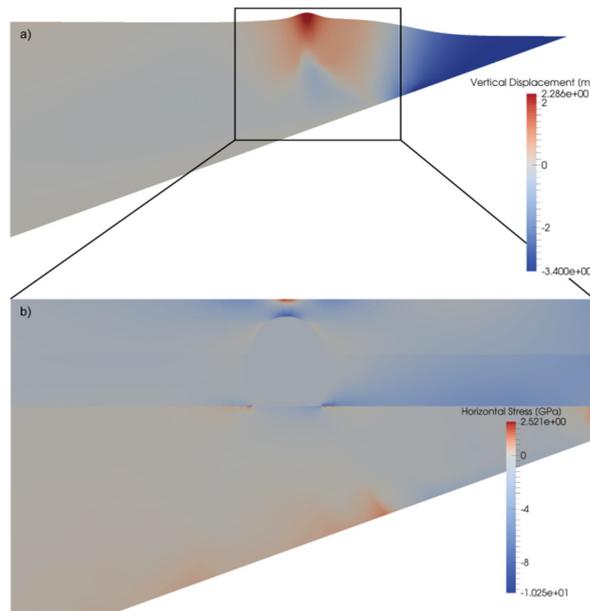


図 3.2-4 二次元有限要素法による 100 年間の粘弾性シミュレーション結果
a) 地形変化。実際の地形変化を 3,000 倍に強調したもの。カラーは鉛直変位量。b) 水平応力。
正の値（赤）は伸長を、負の値（青）は圧縮を示す。

(3) 三次元シミュレーション技術の構築

三次元シミュレーション技術の構築にあたっては、九州南部のせん断帯を事例とした解析を通じて検討を行った。当該領域においては、せん断帯の中央部に位置する霧島火山や、その西方で発生した 1997 年鹿児島県北西部地震の震源域下において、地殻内の流体の存在を示唆する低比抵抗体が見出されている (Aizawa et al., 2014²¹); Umeda et al., 2014²²)。解析では、これらの情報をもとに、地殻内の流体分布域を粘弾性体として仮定した。また、地表付近における構造不均質として、防災科学技術研究所による深部地盤構造モデル (藤原ほか, 2009²³) を媒質モデルに組み込んだうえで、フィリピン海プレートの沈み込み及び沖縄トラフの拡大を外力として作用させた地殻変動シミュレーションを実施した。その結果、GNSS 観測により見出されているせん断帯は、地殻内の粘弾性不均質を考慮しないモデルにおいても大局的な特徴として再現された。また、粘弾性不均質を考慮したモデルでは、せん断ひずみ速度分布の空間変化が比較的大きく、流体の存在を仮定した領域 (粘性率が低い領域) の直上に、せん断ひずみ速度の大きな領域が局所的に現れ、それらが地表へと繋がる様子が認められた (図 3.2-5)。この特徴は、GNSS 観測デー

タに基づいて推定された九州地方のせん断ひずみ速度分布 (Wallace et al., 2009⁹⁾) にも認められており、地殻内に存在する流体が、その周辺の地殻変動場に密接に関与していることを示唆する。以上の成果は、地殻変動シミュレーションにおける粘弾性不均質考慮の重要性を示唆すると考えられる。

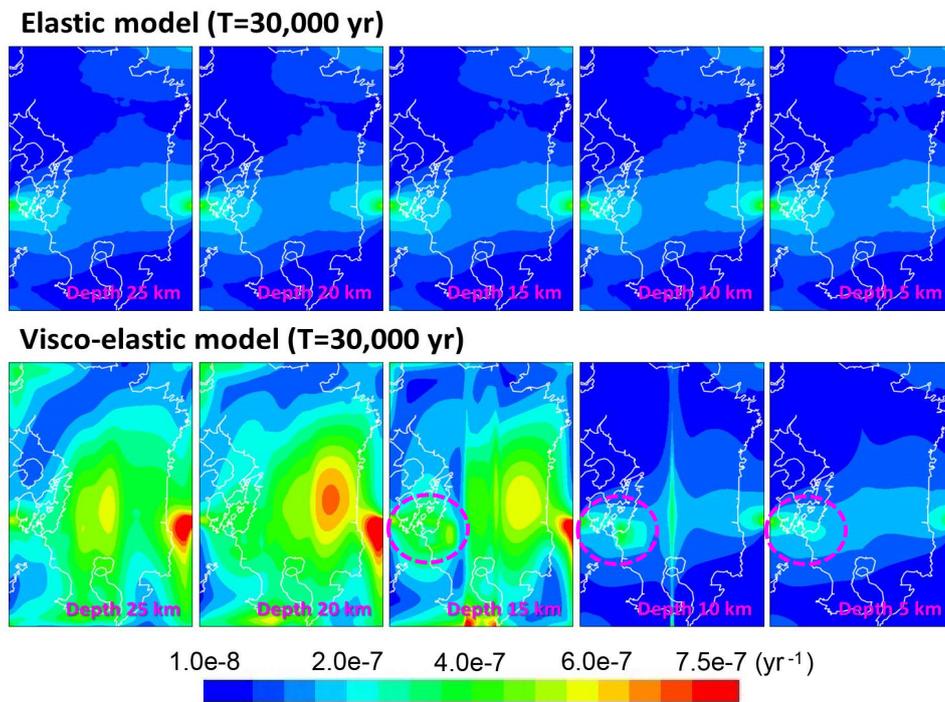


図 3.2-5 30,000 年経過時のせん断ひずみ速度の深さ方向の分布
(日本原子力研究開発機構, 2017²⁴⁾)

3.2.4 地殻変動データの取得によるシミュレーションの妥当性の検討

前項で述べた地殻変動シミュレーションの妥当性を評価するためには、その解析結果と観測などによって得られた地殻変動との比較を行うことが重要である。そのため、九州南部のせん断帯を事例として過去の地殻変動特性を推定するための古地磁気測定を行った。また、現行の地殻変動特性を把握するため、地震データを用いた地殻応力場の推定に加えて、GNSS 稠密観測により詳細な地殻変動を推定し、三次元地殻変動シミュレーション結果との比較を行った。

(1) 過去の地殻変動特性

地質学的に比較的若い時代に開始した変動の場合、明瞭な断層を伴わない可能性があるが、地形や地層に幅を持った変形構造として記録されている可能性がある。このような幅を持った変形構造の把握には、古地磁気学的手法が有効であると考えられることから、九州南部のせん断帯付近において、地質試料を用いた古地磁気測定及び大円法による解析を試みた。

測定した試料は、主に後期中新世～鮮新世の火山岩類であり、一部に更新世の火山岩類を含む。大円法を適用することによって、いくつかの地点では南北に近い方向によく収束した結果が得られたものの、解析結果 (方位) のばらつきが大きい地点も認められた (図 3.2-6)。これらは定方位試料採取時の誤差や、測定試料に火砕流が含まれていることによる不均質性が原因であると考えられる。ここで、十分な信頼性を有すると考えられる結果のみを参照した場合、領域全体として南北系が卓越することに対して、中央付近のせん断ひずみ速度が比較的大きい領域では南北系

以外に東西系に近い方向を示す地点も見られた。狭い範囲で方向が大きく異なる領域は、その原因として、地滑りや岩盤自体の移動や断層付近の局所的な変位・変形なども考えられる。そのため、測定結果とせん断帯での地殻変動との関係を厳密に議論することは難しいが、原因の一つとしてせん断帯の運動が関与している可能性を示唆するとも考えられる。

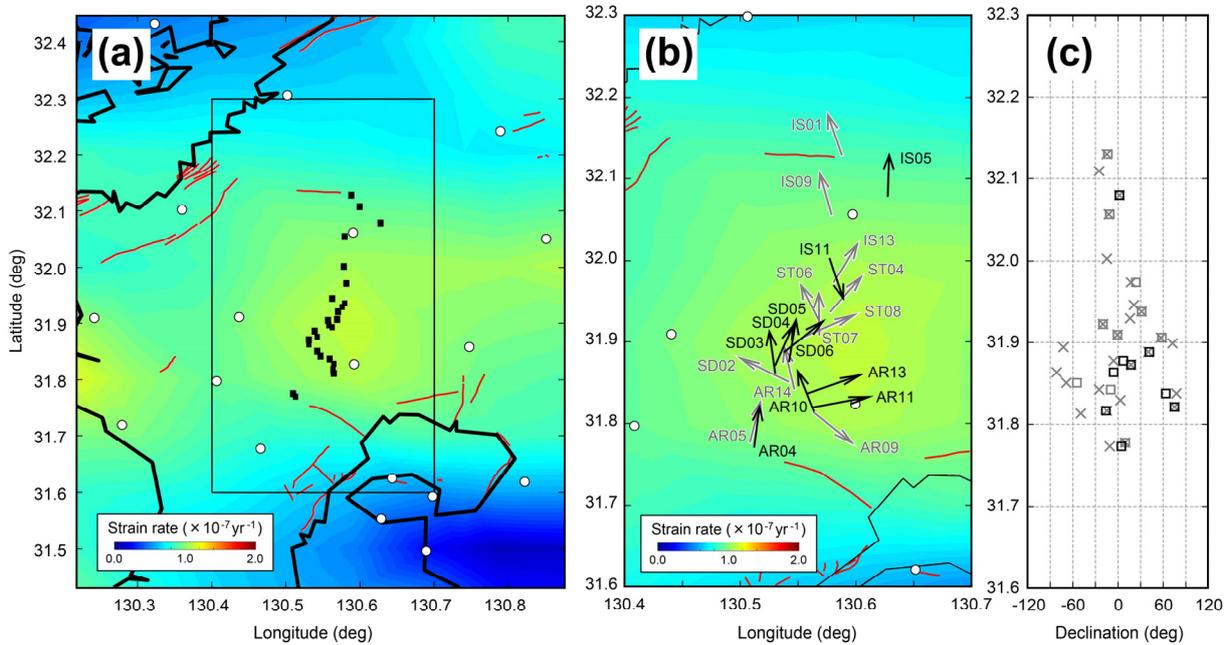


図 3.2-6 九州南部せん断帯付近の古地磁気の偏角分布

(a) ■は古地磁気測定地点であり、○はGNSS観測点、(b) 古地磁気の方向(偏角分布)、黒矢印は精度が高い地点、灰色矢印は比較的精度が低い地点、(c) 偏角分布、黒線四角は精度が高い地点、灰色線四角は比較的精度が低い地点、×印は大円法を適用しない場合の結果。(a)と(b)の背景には、GNSS変位速度データより推定されたせん断ひずみ速度を示す。

(2) 現行の地殻変動特性の推定

① 応カインバージョン法による地殻応力場の推定

九州南部のせん断帯周辺の地殻応力場の空間変化の特徴を明らかにし、三次元地殻変動シミュレーションの結果との比較を行うため、地震のメカニズム解データを用いた応カインバージョン解析を実施した。解析には、防災科学技術研究所の高感度地震観測網(High Sensitivity Seismograph Network Japan: 以下、「Hi-net」という)(Okada et al., 2004²⁵)によるイベント波形データを使用した。解析の対象とした地震は、2002年6月から2015年12月末までの期間にせん断帯周辺で発生したマグニチュード(M)1.9~3.5の微小地震561個である。まず、東京大学地震研究所で開発された微小地震波形検測支援システムWIN(卜部・東田, 1992²⁶)を利用し、これら微小地震の波形データの読み取りと震源決定を行った。解析に使用した地震観測点は、防災科学技術研究所のHi-net、気象庁、九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター及び鹿児島大学大学院理工学研究科附属南西島弧地震火山観測所が運用する63点の観測点である。次に、より精度の高いメカニズム解データを得るために、Double-difference法(Waldhauser and Ellsworth, 2000²⁷)を用いた震源再決定を行ったうえで、Hardebeck and Shearer (2002)²⁸によるメカニズム解決定プログラムHASH1.2を利用し、メカニズム解の決定を行った。震源再決定及びメカニズム解の決定の対象となった地震は551個である。最後に、こ

これらのメカニズム解データに対して Michael (1987)²⁹⁾による応力インバージョンの方法を適用し、せん断帯周辺における地殻応力場の空間変化の推定を行った。その結果、せん断帯の周辺は、最小主応力 (S_3) 軸が北北西-南南東ないし北西-南東方向の横ずれ型または正断層型の応力場となっていることが明らかになった。

一方、三次元地殻変動シミュレーションでは、せん断帯周辺の領域が西北西-東南東方向のほぼ一様な圧縮場となる結果が得られており、応力インバージョン解析結果とのずれが認められた。これは、既存の研究を参考に設定したフィリピン海プレートの沈み込み方向や沖縄トラフの拡大方向、さらには九州地方の太平洋側でのプレート間カップリングの空間変化といったシミュレーションでの外力条件が、実際とはやや異なることに起因すると考えられる。これらのことから、応力インバージョン解析によって推定される応力場に関する情報は、地殻変動シミュレーションに必要な境界条件を検討するうえで、有用な情報であると考えられる。

② GNSS 稠密観測による地殻変動の推定

九州南部のせん断帯を対象とした GNSS 稠密観測では、せん断帯周辺での現行地殻変動を詳細に推定するため、平成 28 年 2 月より観測を開始した。しかし、観測開始より約二か月後の同年 4 月 14~16 日に熊本地震が発生し、震源から 60 km 以上離れた稠密観測点にも、この地震に伴う地殻変動が捉えられた。そこで、この地震の余効変動を推定・除去するとともに、同観測期間における桜島の火山性変動についても補正したうえで、せん断帯周辺の詳細な地殻変動を推定した。また、せん断帯に対して平行な変動成分について、熊本地震前の変位速度 (2007 年 10 月 1 日から 2009 年 3 月 1 日まで) と地震後の変位速度 (2016 年 4 月 18 日から 2017 年 9 月 30 日まで) との比較を行った。その結果、両者には同様の *arctangent* 型の地殻変動パターンが認められ、せん断帯深部の断層すべりによる定常的な変動が、熊本地震の発生前後で同様に継続していることが確認できた。一方で、地殻変動シミュレーション結果においては、このような *arctangent* 型の地殻変動パターンは明瞭に認められなかった。このような両者の差異は、観測により推定されたせん断帯深部での (断層) すべりがシミュレーションには考慮されていないことが主な原因であると考えられる。以上の成果は、特に断層近傍を対象として、より詳細な地殻変動を推定するためには、モデル領域内に不連続面を導入することが重要であることを示唆すると考えられる。

3.2.5 まとめ

本事業では、過去から現在、さらには将来の地殻変動を予測する手法の開発を目的として、地殻変動の一樣継続性を評価する指標の検討を行うとともに、地下構造の粘弾性不均質を考慮した地殻変動シミュレーション技術の構築を進めた。また、シミュレーションの妥当性を検討するために必要な観測を継続して実施した。

このうち、一樣継続性を評価する指標の検討では、従来用いられてきた地質学的ひずみ速度の推定手法について抽出した課題に対し、ディスロケーションモデルに基づいた推定手法を提案するとともに、日本列島全域及び九州地方を事例とした地質学的ひずみ速度と測地学的ひずみ速度との比較によって、異なる時間スケールにおける地殻変動特性の差に着目した検討事例を示した。これらの検討によって得られた結果は、地質学的ひずみ速度と測地学的ひずみ速度のパターンの違いが、地殻変動の一樣継続性を議論するうえで有用な情報となり得ることを示唆すると考えられる。

地殻変動シミュレーション技術の構築では、地殻流体の存在が指摘されている茨城県・福島県県境付近の群発地震活動域や九州南部のせん断帯を事例として、地殻の粘弾性不均質を考慮した二次元及び三次元シミュレーションを実施した。その結果、GNSS などの観測によって推定され

た局所的な地殻変動が、流体分布域を粘弾性体として仮定したシミュレーションによって定性的に再現されることが確認できた。これらの成果は、地殻内の粘弾性不均質がその周辺の局所的な地殻変動に関与していることを示唆するとともに、地殻変動シミュレーションにおいて、地殻内の粘弾性不均質を考慮することの重要性を示すと考えられる。

また、地殻変動に係るデータの取得では、三次元シミュレーションの対象とした九州南部のせん断帯及びその周辺を事例として GNSS 稠密観測を実施するとともに、応力インバージョン法による地殻応力場の推定などを行った。その結果、せん断帯においては、その活動に対応する明瞭な活断層は認められていないものの、その深部におけるすべり面の存在が見出された。また、GNSS 稠密観測結果とシミュレーション結果との比較によって、シミュレーションによって地殻変動を推定するために参照すべき情報や、より詳細な地殻変動を推定するための技術に関する知見を示した。

引用文献

- 1) 笠原慶一, 杉村 新, 変動する地球 I - 現在および第四紀 -, 岩波書店, 1978, 岩波講座地球科学 10, 296p.
- 2) 松田時彦, 地殻変動からみた第三紀/第四紀 - 第四紀地殻変動の一樣観の検討 -, 地球, vol.10, 1988, pp.599-603.
- 3) 梅田浩司, 谷川晋一, 安江健一, 地殻変動の一樣継続性と将来予測 - 地層処分の安全評価の視点から -, 地学雑誌, vol.122, 2013, pp.385-397.
- 4) Strak, V. and Schellart, W. P., Evolution of 3-D subduction-induced mantle flow around lateral slab edges in analogue models of free subduction analysed by stereoscopic particle image velocimetry technique, *Earth and Planetary Science Letters*, vol.403, 2014, pp.368-379.
- 5) 産業技術総合研究所, 産業技術総合研究所地質調査総合センター地質情報データベース (2015年8月11日版), 2015, https://gbank.gsj.jp/activefault/index_gmap.html, (2017.01.10).
- 6) Wesnousky, S. G., Scholz, C. H. and Shimazaki, K., Deformation of an island arc: Rates of moment release and crustal shortening in intraplate Japan determined from seismicity and Quaternary fault data, *Journal of Geophysical Research*, vol.87, 1982, pp.6829-6852.
- 7) Kaizuka, S. and Imaizumi, T., Horizontal strain rates of the Japanese Islands estimated from quaternary fault data, *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University*, vol.19, 1984, pp.43-65.
- 8) Takayama, H. and Yoshida, A., Crustal deformation in Kyushu derived from GEONET data, *Journal of Geophysical Research*, vol.112, 2007, doi:10.1029/2006JB004690.
- 9) Wallace, L. M., Ellis, S., Miyao, K., Miura, S., Beavan, J. and Goto, J., Enigmatic, highly active left-lateral shear zone in southwest Japan explained by aseismic ridge collision, *Geology*, vol.37, 2009, pp.143-146.
- 10) Takada, Y. and Fukushima, Y., Volcanic subsidence triggered by the 2011 Tohoku earthquake in Japan, *Nature Geoscience*, vol.6, 2013, pp.637-641.
- 11) Ozawa, T. and Fujita, E., Local deformations around volcanoes associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Journal of Geophysical Research*, vol.118, 2013, pp.390-405.
- 12) 中川弘之, 豊福隆史, 小谷京湖, 宮原伐折羅, 岩下知真子, 川元智司, 畑中雄樹, 宗包浩志, 石本正芳, 湯通堂 亨, 石倉信広, 菅原安宏, GPS 連続観測システム (GEONET) の新しい解析戦略 (第4版) によるルーチン解析システムの構築について, 国土地理院時報, vol.118, 2009, pp.1-8.
- 13) Kato, A., Sakai, S. and Obara, K., A normal-faulting seismic sequence triggered by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake: Wholesale stress regime changes in the upper plate, *Earth, Planets and Space*, vol.63, 2011, pp.745-748.
- 14) Zhao, D., The 2011 Tohoku earthquake (Mw 9.0) sequence and subduction dynamics in Western Pacific and East Asia, *Journal of Asian Earth Science*, vol.98, 2015, pp.26-49.
- 15) Umeda, K., Asamori, K., Makuuchi, A., Kobori, K. and Hama, Y., Triggering of earthquake swarms following the 2011 Tohoku megathrust earthquake, *Journal of Geophysical Research*, vol.120, 2015, pp.2279-2291.
- 16) Hashimoto, C., Noda, A., Sagiya, T. and Matsu'ura, M., Interplate seismogenic zones along the Kuril-Japan trench inferred from GPS data inversion, *Nature Geoscience*, vol.2, 2009, pp.141-144.
- 17) Uchida, N. and Matsuzawa, T., Coupling coefficient, hierarchical structure, and earthquake cycle for the source area of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake inferred from small repeating earthquake data, *Earth, Planets and Space*,

- vol.63, 2011, pp.675-679.
- 18) Aagaard, B.T., Knepley, M.G. and Williams, C.A., A domain decomposition approach to implementing fault slip in finite-element models of quasi-static and dynamic crustal deformation, *Journal of Geophysical Research*, vol.118, 2013, doi:10.1002/jgrb.50217.pp.3059-3079.
 - 19) Suzuki, T., Late Quaternary crustal movements deduced from marine terraces and active faults, Joban coastal region, Northeast Japan, *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University*, vol.24, 1989, pp.31-42.
 - 20) Yoshida, K., Hasegawa, A. and Okada, T., Spatial variation of stress orientations in NE Japan revealed by dense seismic observations, *Tectonophysics*, vol.647-648, 2015, pp.63-72.
 - 21) Aizawa, K., Koyama, T., Hase, H., Uyeshima, M., Kanda, W., Utsugi, M., Yoshimura, R., Yamaya, Y., Hashimoto, T., Yamazaki, K., Komatsu, S., Watanabe, A., Miyakawa, K. and Ogawa, Y., Three-dimensional resistivity structure and magma plumbing system of the Kirishima Volcanoes as inferred from broadband magnetotelluric data, *Journal of Geophysical Research*, vol.119, 2014, pp.198-215.
 - 22) Umeda, K., Asamori, K., Makuuchi, A. and Kobori, K., Earthquake doublet in an active shear zone, southwest Japan: Constraints from geophysical and geochemical findings, *Tectonophysics*, vol.634, 2014, pp.116-126.
 - 23) 藤原広行, 河合伸一, 青井 真, 森川信之, 先名重樹, 工藤暢章, 大井昌弘, はお憲生, 早川讓, 遠山信彦, 松山尚典, 岩本鋼司, 鈴木晴彦, 劉瑛, 強震動評価のための全国深部地盤構造モデル作成手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料, vol.337, 2009, 272p.
 - 24) 日本原子力研究開発機構, 平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 地質環境長期安定性評価 確証技術開発報告書, 2017, 230p.
 - 25) Okada, Y., Kasahara, K., Hori, S., Obara, K., Sekiguchi, S., Fujiwara, H. and Yamamoto, A., Recent progress of seismic observation networks in Japan –Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net–, *Earth, Planets and Space*, vol. 56, 2004, pp.xv-xxviii.
 - 26) ト部 卓, 東田進也, win-微小地震観測網波形験測支援のためのワークステーション・プログラム (強化版), 地震学会予稿集, 1992, p.331.
 - 27) Waldhauser, F. and Ellsworth, W. L., A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault, California, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol.90, 2000, pp.1353-1368.
 - 28) Hardebeck, J. L. and Shearer, P. M., A new method for determining first-motion focal mechanisms, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol.92, 2002, pp.2264-2276.
 - 29) Michael, A. J., Use of focal mechanisms to determine stress: A control study, *Journal of Geophysical Research*, vol.92, 1987, pp.357-368.

3.3 地下水涵養量推定技術

3.3.1 背景と目的

わが国において地層処分システムの長期安定性を評価するにあたっては、地質環境の急激な変化を引き起こす可能性のある断層運動や火山活動などの自然現象だけでなく、緩慢ではあるが累積的・広域的な変化を引き起こす隆起・侵食や気候・海水準変動などの現象も重要であるとされている。このうち、気候・海水準変動が地下水流動特性に及ぼす影響としては、地球規模の気候変動に伴う海面変化による動水勾配の変化、塩淡境界面の移動や地下水系の規模及び水質の変化が考えられる。また、気候変動に伴う降水量の変化や隆起・沈降・侵食などに伴う地形分布の変化など、地表における水文環境の変化も地下水流動に影響を与えると考えられる。

地下水流動解析により長期的な気候変動や地形変化を考慮した地下水流動特性の変化を推定するためには、地下水流動系の上部境界条件となる過去の地下水涵養量について、古気候や古地形の情報から推定する技術が不可欠となる。そこで、本事業では古気候・古地形の長期変化を考慮した水収支法に基づく地下水涵養量推定技術を構築し、地質環境長期変動モデルの開発において事例研究対象とした、山間部の事例として東濃地域及び平野部の事例として幌延地域の両地域において、地表環境モデルの開発を通じて本技術の適用性確認を行った。

3.3.2 古気候・古地形を考慮した地下水涵養量の推定手法

水文学における水収支とは、ある地域内における一定期間内の水の流入・流出の均衡状態であり、この水の流入量と流出量の関係を示したものが水収支式である（山本, 1986¹⁾）。図 3.3-1 にある河川流域内における水収支を示す。一年以上の長期間を対象とした場合には、流域内における地下水の貯留量の変化は小さいと見なすことができ、さらに、他流域との地下水の流入量や流出量はないと仮定すると、水収支式は式 (3.3-1) で表わされる（登坂, 2006²⁾）。

$$P=E+Q+G \quad (3.3-1)$$

ここで、P：降水量、E：蒸発散量、Q：河川流出量、G：地下水涵養量を示す。

降水量は気温に対しておおまかに正の相関関係を示すとされ（登坂, 2006²⁾）、過去の気温を復元することによってその時代の降水量を見積もることができると考えられている。全国の気象観測点のうち、1983～2013年の気温・降水量データが得られた計 760 地点（気象庁, 2018³⁾）や寒冷地に位置する諸外国のデータ（国立天文台, 2013⁴⁾）からも同様の傾向を認めることができる（図 3.3-2）。蒸発散量については、草野ほか（2010⁵⁾）は日本国内及び高緯度域（アラスカ、シベリア、北欧など）で報告された既往の実蒸発散量について網羅的に情報を整理し、実蒸発散量が観測地点の位置（緯度）及び年平均気温の変化に対しておおむね調和的な変化を示すことを明らかにした（図 3.3-3）。これらの結果から、本事業では、過去の気温を推定し、気温と降水量、蒸発散量との相関関係から過去の降水量、蒸発散量を推定した。河川流出量に関しては、気候変動に伴う降水量の変化のみならず、地形変化に起因する河川形状や表面流出特性の変化も考慮する必要がある。降水量の変化に伴う河川流出量の変化については、現在における両者の関係（例えば、降水量に対する河川流出量の割合）を用いて考慮できる可能性がある。しかしながら、地形変化が生じた場合、河床勾配や河川流出特性が異なるため、現在の関係性が成立しないと考えられる。したがって、地形変化に伴う河川形状や河川流出特性の変化を考慮した推定方法の確立が課題となる。景山ほか（2010⁶⁾）は、現在の河川流域を対象として、地形特徴量をもとにした未観測流域の河川流量推定手法を提案している。

本事業では、景山ほか (2010)⁶⁾を適用し、地形復元により得られる過去の河川流域を未観測流域として現在の河川流域と過去の河川流域との間で共通の流出指標を求めることで、地形特徴を考慮した過去の河川流出量を推定することとした。さらに、河川流量に関する指標と河川流量と降水量との関係性を表す指標との関係を整理することで、気候変動に伴う降水量の変化を考慮することとした。図 3.3-4 に河川流出量推定の考え方を示す。

3.3.3 事例研究による適用性の確認

(1) 山間部における事例

山間部の事例として東濃地域を対象とした地表・水文環境の推定に地下水涵養量推定技術を適用した。ここでは、現在、14 万年前、45 万年前及び 100 万年前を対象に気候変化、地形変化を考慮した。降水量・蒸発散量・河川流量の推定結果及び水収支法に基づく地下水涵養量の推定結果を表 3.3-1 に示す。

各時間断面での気候条件の違いに着目すると、降水量・蒸発散量は間氷期に比べ氷期で減少している。また、降水量の減少により河川流出量も間氷期に比べ氷期で減少しており、この結果、地下水涵養量も間氷期に比べ氷期で減少する傾向であることが推定された。また、同一気候条件における時間断面の違いに着目すると、間氷期、氷期ともに現在の河川流出量に比べ過去の河川流出量は減少している。これは、過去に遡るにしたがい地形がなだらかに復元されているため、降水が流域外へと流出し難くなるためと考えられる。この結果、地下水涵養量は過去に遡るにしたがい多くなり、45 万年前の氷期の地下水涵養量は現在（間氷期）の地下水涵養量よりも多いと推定された。この結果から、山間部における地下水涵養量は気候変動に伴う降水量、蒸発散量の変化のみならず、地形変化に伴う河川流出量の変化に影響されることが示唆された。

これらの結果から、本推定手法を適用して山間部における過去の気候変化、地形変化を考慮した地表環境構成要素が推定できることが確認された。一方で、復元した 100 万年前の地形を対象とした河川流出量推定においては、小流域を形成する流路が抽出できなかった (図 3.3-5)。これは、復元された地形モデルの精度が 14 万年前や 45 万年前の地形モデルの精度より悪く、起伏などの地形変化が乏しい平坦な地形であったことから、流路抽出アルゴリズムが対応できなかった可能性が考えられる。なお、本適用事例の推定方法及び推定結果の詳細については、日本原子力研究開発機構(2016)⁷⁾を参照されたい。

(2) 平野部における事例

平野部の事例として、幌延地域を対象とした地表、水文環境の推定に地下水涵養量推定技術を適用した。ここでは、現在、33 万年前及び 100 万年前を対象に気候変化、地形変化を考慮した。降水量、蒸発散量、河川流量の推定結果及び水収支法に基づく地下水涵養量の推定結果を表 3.3-2 に示す。

気候条件の違いに着目すると、降水量は温暖期に比べ氷期で減少しており、氷期の降水量は間氷期の降水量の 27～32 %程度である。また、蒸発散量についても、間氷期に比べ氷期で減少しており、氷期の蒸発散量は間氷期期の蒸発散量の 48～65 %程度である。河川流出量については間氷期に比べ氷期で大きく減少しており、氷期の河川流出量は温暖期の 8～10 %程度となり、降水量、蒸発散量と比べて河川流出量の減少の割合は著しく大きい。これは、気候条件により降水量が異なることに加えて、間氷期の海進や氷期の海退による陸域領域の変化が寄与しているためと考えられる。つまり、氷期の海退では間氷期期の海底が陸地となり起伏の乏しいなだらかな地形が広く分布することで降水が流域外へと流出し難くなるため、河川流出量が減少する。また、100 万年前の間氷期でみられるように海進により陸域が減少した場合も河川流出量が減少するこ

ととなる。山間部では気候条件の違いで陸域の変化は生じないと想定できることから、気候変化に伴う海水準変動による陸域領域の変化は、遠浅な沿岸を含む平野部の特徴であると考えられる。水収支法により算出した地下水涵養量は、いずれの時間断面においても間氷期に比べ氷期での地下水涵養量の方が小さい。

これらの結果から、本推定手法を適用して平野部における過去の気候変化、地形変化を考慮した地表環境構成要素が推定できることが確認された。一方で、積雪を伴う間氷期の降水量推定にあたっては、一水文年間に全ての積雪が融雪せず、積雪として地表に貯留される可能性が高いことから融雪水量を正確に把握する必要があることが明らかとなった。また、遠浅な沿岸部を含む平野部では海水準変動により陸域が大きく変化し、特に、間氷期の海退により海底部の陸化が大きく進むような場合は、海域の地形特徴が河川流出特性に大きく影響することが明らかとなった。遠浅な沿岸部を含む平野部での本手法の適用にあたっては、海域の地形モデルの推定精度の確保が重要である。本適用事例の推定方法及び推定結果の詳細については、日本原子力研究開発機構(2017)⁸⁾を参照されたい。

3.3.4 まとめ

古気候・古地形などの長期変化を考慮した水収支法に基づく地下水涵養量推定技術を構築した。また、山間部及び平野部を対象とした事例研究を通して、本手法により地下水涵養量を含む地表環境構成要素の推定が可能であることを示すとともに、本手法の適用にあたっての留意事項を整理した。

水収支法による地下水涵養量の推定に必要なパラメータは年単位での変動を有するものであり、一定の値に収束する性質のものではない。また、長期的には氷期・間氷期といった気候変動の影響を受ける。河川流出量については降水量の変動に加えて地形変化の長期変遷により河川の位置や河床勾配が変わるといった影響も受ける。したがって、本手法の適用にあたっては、気候変化や地形変化による影響を踏まえた各パラメータの幅を考慮することが重要である。

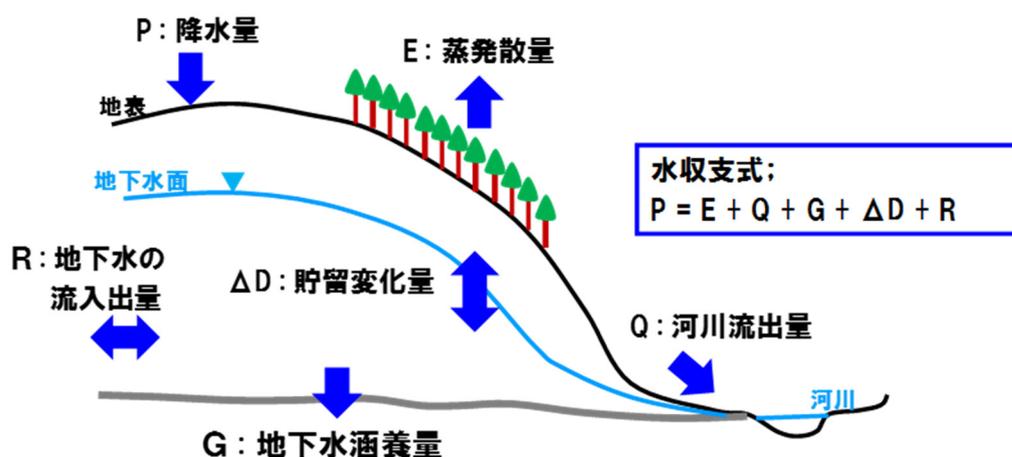


図 3.3-1 地域内における水収支の概念図

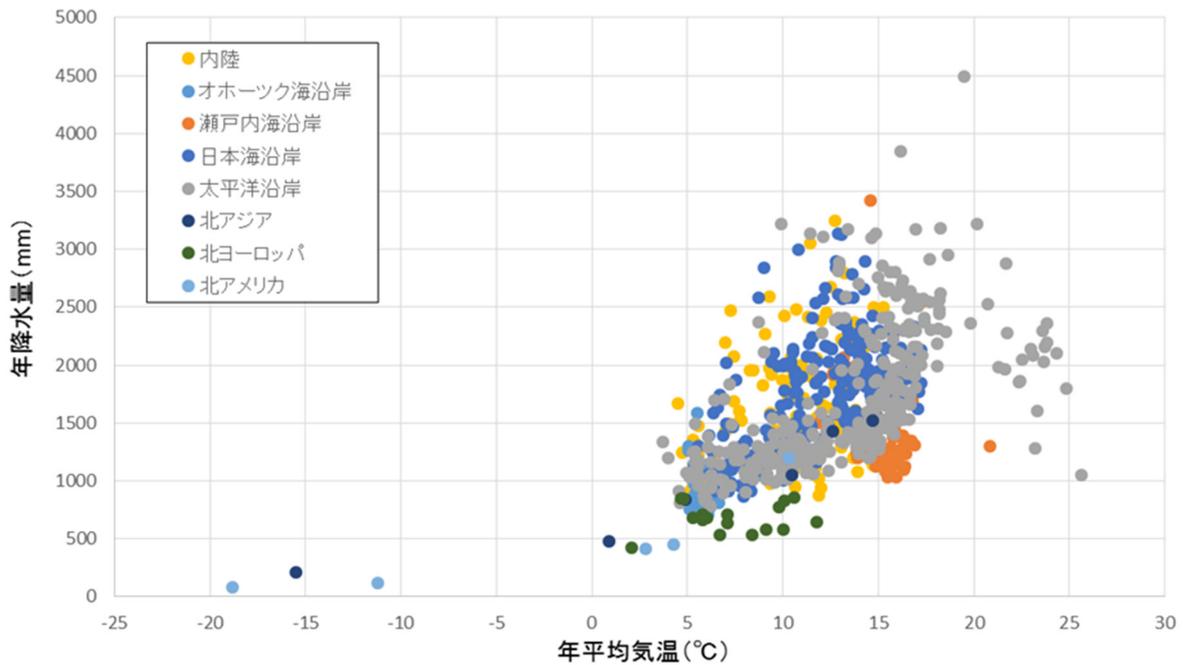


図 3.3-2 国内及び諸外国における年平均気温と年降水量の関係
 国内は 1983～2013 年の気象観測データ (気象庁, 2018³⁾)、諸外国は国立天文台 (2013)⁴⁾のデータを用いた。国内外それぞれの地域を色分けで示す。

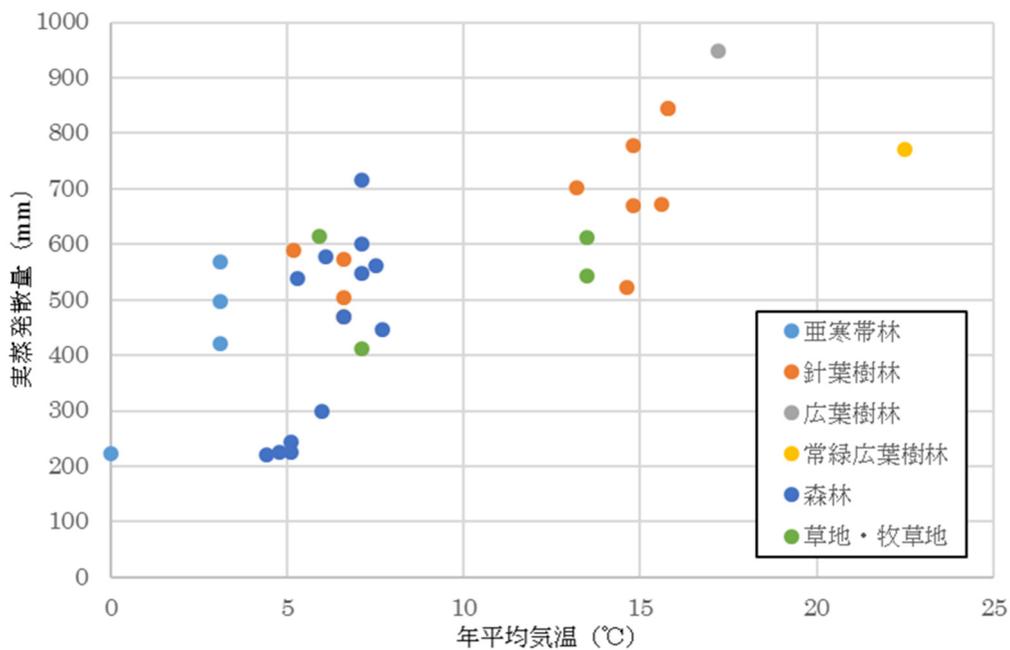


図 3.3-3 年平均気温と実蒸発散量の関係
 草野ほか (2010)⁵⁾のデータに基づき作成。観測地周辺の植生や土地利用ごとに色分けで示す。

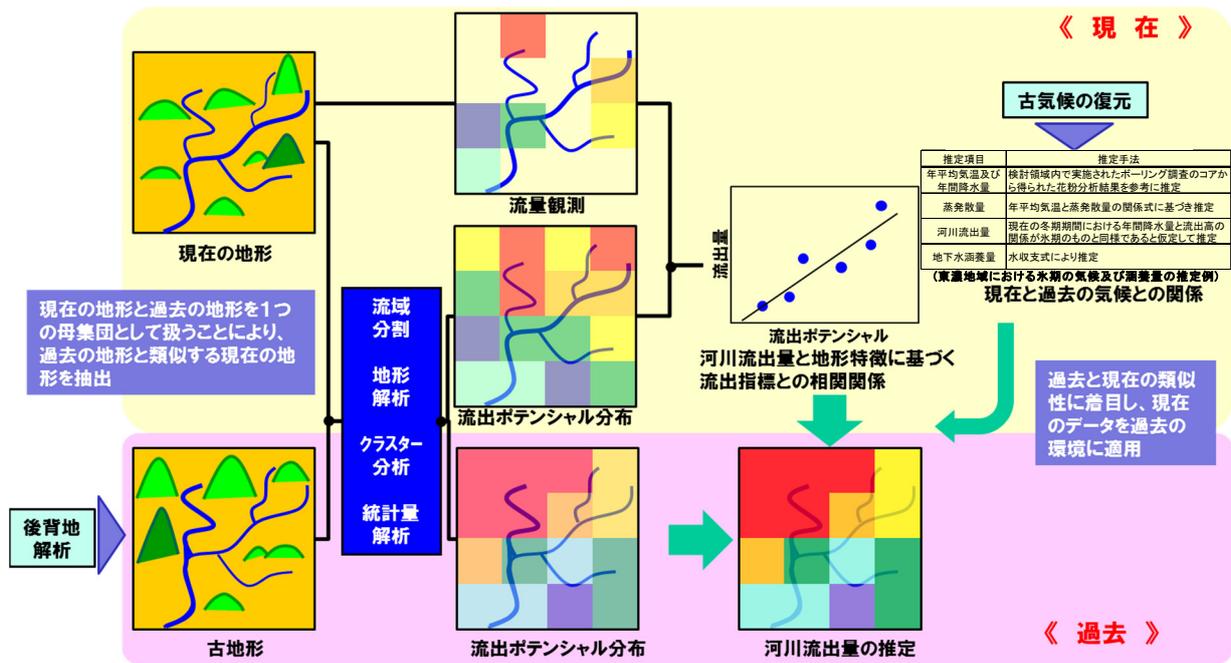


図 3.3-4 過去の河川流量推定の考え方

表 3.3-1 水文環境の各構成要素の推定結果（山間部：東濃地域）

時間断面	現在			14万年前				45万年前				備考
	間氷期 (現在)	氷期		間氷期	氷期			間氷期	氷期			
気温(℃)	13.6	3.6	5.6	12.6	14.6	3.6	5.6	12.6	14.6	3.6	5.6	
降水量 (mm/年)	1759	818	935	1495	1710	818	935	1495	1710	818	935	
河川流出量 (mm/年)	1198	557	637	928	1062	508	581	854	976	467	534	流出指標に基づく推定値
				975	1115	533	610	905	1035	495	566	140ka; 流出指標に基づく推定値+5%
				882	1009	483	552	802	918	439	502	450ka; 流出指標に基づく推定値+6%
実蒸発散量 (mm/年)	443	176	229	416	470	176	229	416	470	176	229	・気温との相関式(ばらつきの下限值考慮)から算出
地下水涵養量 (mm/年)	118	85	69	150	178	134	125	225	264	175	172	流出指標に基づく推定値
				104	125	109	96	174	205	147	140	140ka; 流出指標に基づく推定値+5%
				197	231	159	154	276	322	203	204	450ka; 流出指標に基づく推定値+6%

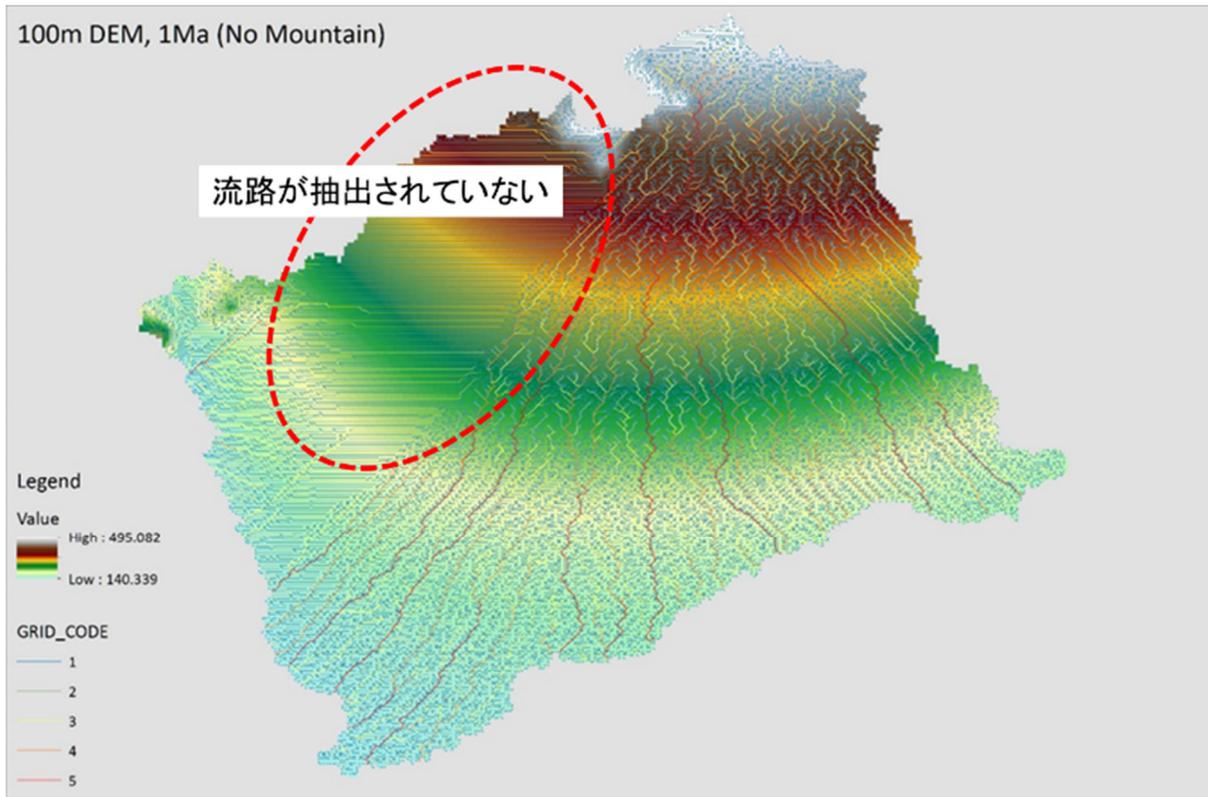


図 3.3-5 100 万年前の地形（山なしケース）を対象とした流路抽出結果

表 3.3-2 水文環境の各構成要素の推定結果（平野部：幌延地域）

時間断面	現在				33万年前				100万年前			
	間氷期		氷期		間氷期		氷期		間氷期		氷期	
気温 (°C)	5.7	7.7	-2.3	-0.3	5.7	7.7	-2.3	-0.3	5.7	7.7	-2.3	-0.3
降水量* (mm/年)	1662.5	1836.3	491.5	542.9	1662.5	1836.3	491.5	542.9	1662.5	1836.3	491.5	542.9
河川流出量 (mm/年)	881.1	973.2	78.6	86.9	532.0	587.6	19.7	21.7	182.9	202.0	9.8	10.9
実蒸発散量 (mm/年)	460.5	513.8	247.0	300.4	460.5	513.8	247.0	300.4	460.5	513.8	247.0	300.4
地下水涵養量 (mm/年)	320.9	349.3	165.9	155.6	670.0	734.9	224.9	220.8	1019.1	1120.5	234.7	231.7

※ 氷期については降水量+融雪水量に補正

引用文献

- 1) 山本莊毅編, 地下水学用語辞典, 古今書院, 1986, 141p.
- 2) 登坂博行編, 地圏の水環境科学, 東京大学出版会, 2006, 364p.
- 3) 気象庁, 気象統計情報, <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>, (2018.01.18).
- 4) 国立天文台編, 理科年表 平成 26 年, 丸善, 2013, 1081p.
- 5) 草野友宏, 安江健一, 竹内竜史, 三枝博光, 宮原智哉, 地下水流動特性の長期的変化の推定に用いる表層水理に関する情報の整理, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Review 2009-079, 2010, 56p.
- 6) 景山宗一郎, 池田 誠, 富山眞吾, 北海道下川地域における未観測流域の流出量を考慮した流域水収支の検討, 水文・水資源学会誌, vol.23, 2010, pp.301-311.
- 7) 日本原子力研究開発機構, 平成 27 年度地層処分技術調査等事業地質環境長期安定性評価確認技術開発報告書, 経済産業省資源エネルギー庁, 2016, 265p.
- 8) 日本原子力研究開発機構, 平成 28 年度地層処分技術調査等事業地質環境長期安定性評価確認技術開発報告書, 経済産業省資源エネルギー庁, 2017, 230p.

3.4 炭酸塩鉱物測定技術開発

3.4.1 背景と目的

炭酸塩鉱物は岩種や岩盤の形成過程に依存せずに、岩盤中に広く一般的に産出する鉱物であるため（西本ほか, 2008¹⁾; Nishimoto and Yoshida, 2010²⁾; Iwatsuki and Yoshida, 1999³⁾; Yoshida et al., 2000⁴⁾; 吉田, 2012a⁵⁾; Ono et al., 2016⁶⁾）、汎用的な古環境指標物質として利用可能である。炭酸塩鉱物から得られる情報に基づき、現在は直接確認することができない過去の地質環境の履歴を推測することで、長期的な地質環境変動モデルの構築ができると考えられる。

長期的な地質環境変動モデルを構築する際、地下水やガスの通路となり得る高透水性の地質構造を把握したうえで、その長期的な発達過程を推定することが重要となる。数十万年という時間スケールにおける割れ目の発達過程を推定するためには、割れ目やシーリングなどの形成・発達履歴を明らかにし、割れ目近傍の環境変化を推定する必要がある（吉田, 2012b⁷⁾）。割れ目の形成・発達履歴を解明するうえで、割れ目充填鉱物は様々な指標になり得る（石橋ほか, 2014⁸⁾; Ishibashi et al., 2016⁹⁾）。例えば、西本ほか（2008¹⁾や Nishimoto and Yoshida（2010²⁾では、割れ目充填鉱物の産状や晶出温度から、割れ目の形成・発達履歴が議論されている。また、変動シナリオを考慮した安全評価を行ううえでは、候補地に存在する断層の活動性を評価することが重要な課題であり、断層の活動性評価手法として、炭酸塩鉱物（例えば、方解石やアラレ石）などの充填鉱物の年代測定が行われている（例えば、柴田・高木, 1988¹⁰⁾; Vargas et al., 2011¹¹⁾; Yamasaki et al., 2013¹²⁾; Nuriel et al., 2012¹³⁾）。一方、長期的な地下水の地球化学特性（pH や酸化還元電位など）の推定は、地質環境の長期変動モデル構築のために重要なだけでなく、長期的な地下水流動解析結果の検証にも有効であると考えられる。しかし、過去の地球化学特性を反映した地下水は、地下水の滞留時間の範囲内でしか採取することができない。そのため、過去の地下水の地球化学特性を復元するためには、地下水の化学特性を反映しながら沈殿した二次鉱物である炭酸塩鉱物を利用する手法が有効である（Blyth et al., 2004¹⁴⁾）。

本事業では長期的な地史や地球化学特性の変化を推定するための調査技術の開発として、炭酸塩鉱物の形成年代推定手法（放射年代測定法の開発）と炭酸塩鉱物形成時点の地球化学特性（特に酸化還元電位）の推定手法の構築（酸化還元電位測定技術の構築）を進めた。また、炭酸塩鉱物から得られた過去から現在までの地球化学特性の変動幅の情報は、地質環境変動モデルによって示された自然現象に起因する外的インパクトによる地質環境の復元性（レジリアンス）に関する科学的信頼性を示すための重要な証拠となる。

本要素技術の開発を進めるにあたり、炭酸塩鉱物を対象とした「放射年代測定法の開発」及び「酸化還元電位測定技術の構築」における既存情報を整理し、重要課題を抽出した。その後、「放射年代測定法の開発」及び「酸化還元電位測定技術の構築」では取り組むべき共通の課題が多いことが判明し、平成 26 年度からはこれらを一本化し、「炭酸塩鉱物測定技術開発」として進めた。平成 26 年度から平成 27 年度にかけて、抽出した重要課題の解決に向けて、分析装置類の整備や個別の技術整備を実施した。また、平成 27 年度には「酸化還元電位測定技術の構築」に関して、構築した手法の妥当性を評価した。平成 28 年度から平成 29 年度においては、「放射年代測定法の開発」に関する分析手法の高度化を実施し、最終的には、年代が既知または狭い範囲に限定される試料を分析することにより、本事業で開発した放射年代測定法の有用性を確認した（図 3.4-1）。

本取りまとめ報告書では、「放射年代測定法の開発」及び「酸化還元電位測定技術の構築」の概要と成果について述べる。また、これまで炭酸塩鉱物の年代測定技術の開発とともに進めてきたマルチコレクタ希ガス質量分析計を用いた地下水の年代測定技術の整備に関しても、概要と成果を本節で報告する。

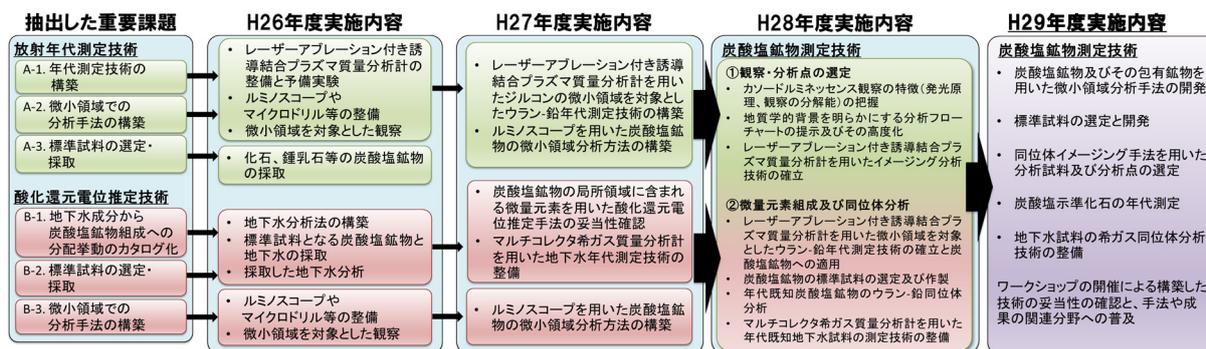


図 3.4-1 炭酸塩鉱物測定技術の開発に関する重要課題及び実施内容

以下、本節で記述する元素は、表 3.4-1 の通り原則として元素記号を用いて表記する。核種や同位体など、質量数を表示する必要がある場合は、慣例にしたがい、質量数を元素記号の左上付で表記する。ただし、単体、化合物やイオンなどは、元素記号を用いずに元素名で記す場合がある。また、本節における年代値の表記は、慣例にしたがい、Ma (Mega annum : 100 万年前) 単位を用いる (例 : 100 Ma = 1 億年前)。年代誤差は特に断りのない限り 1σ で表記する。

表 3.4-1 本節で記述する元素

元素名	元素記号	元素名	元素記号	元素名	元素記号
ヘリウム	He	ケイ素	Si	ストロンチウム	Sr
炭素	C	アルゴン	Ar	バリウム	Ba
フッ素	F	カルシウム	Ca	鉛	Pb
ネオン	Ne	マンガン	Mn	トリウム	Th
マグネシウム	Mg	鉄	Fe	ウラン	U
アルミニウム	Al	ヒ素	As		

3.4.2 放射年代測定法の開発

本技術開発を進めるにあたり、年代測定法に関する既往研究を整理し、地層処分で考慮すべき数十万年～数百万年という範囲について、炭酸塩鉱物に適用可能な年代測定法を抽出した結果、割れ目を充填する炭酸塩鉱物のような微量の試料を対象とした事例は少なく、手法の再検討が必要な測定法が多いことが判明した。そうした中で、特に放射性核種の崩壊を利用した年代測定法の適用性を検討したところ、いくつかの年代測定手法 (^{14}C 法、U-Th 法、U-Pb 法、(U-Th)/He 法) が適用できる可能性が示唆された。この検討をもとに、百万年を超える範囲まで議論ができる U-Pb 法を年代測定の手法として選択した。また、微量試料を対象とした年代測定技術の開発のため、平成 26 年度までに、土岐地球年代学研究所に真空紫外光 ArF エキシマレーザーアブレーション装置 (Photon Machines 社製 Analyte G2) 及び二重収束型誘導結合プラズマ質量分析装置 (Thermo Fisher Scientific 社製 Neptune-plus) の整備を行った。レーザーアブレーション装置から質量分析装置へ試料を導入する手法 (Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry ; 以下、「LA-ICP 質量分析法」という) を用いることにより、微小領域の分析が可能となる。この LA-ICP 質量分析法を用いたジルコンの U-Pb 年代測定の研究例は多く、国際的にも広く実施されている確立された手法であるため、この分析法を炭酸塩鉱物に応用す

ば、年代測定が比較的容易に実施できると推察された。

放射年代測定法の開発では、導入装置による分析手順の構築を目的として「(1) ジルコンの微小領域 U-Pb 年代測定による分析手順の構築」を実施し、同時に「(2) 炭酸塩試料の U-Pb 同位体分析に必須の標準試料の選定と開発」を進めた。また、「(3) 炭酸塩試料の微小領域の観察手法の構築」の後、「(4) 年代既知の炭酸塩試料の年代測定による手法有用性の評価」を行った。以下に、それぞれの概要を示す。

(1) ジルコンの微小領域 U-Pb 年代測定による分析手順の構築

平成 26 年度に導入した LA-ICP 質量分析装置を用いて、ジルコンを対象とした微小領域 U-Pb 同位体分析を実施した。その結果、U-Pb 年代値が既知であるジルコン試料について、マトリクス的一致しない標準ガラスを標準試料として用いた分析では、正確な年代測定を行うことができないことが判明した。一方で、マトリクス的一致した標準試料を用いたジルコンの微小領域 U-Pb 年代測定では、分析条件の検討の結果、マルチイオンカウンティング法による高精度な年代測定が可能となった(図 3.4-2; 日本原子力研究開発機構, 2017¹⁵)。これにより、炭酸塩試料の U-Pb 同位体分析の手順を整えた。炭酸塩試料の U-Pb 同位体分析においても、ジルコンと同様にマトリクス的一致した標準試料は必須である。

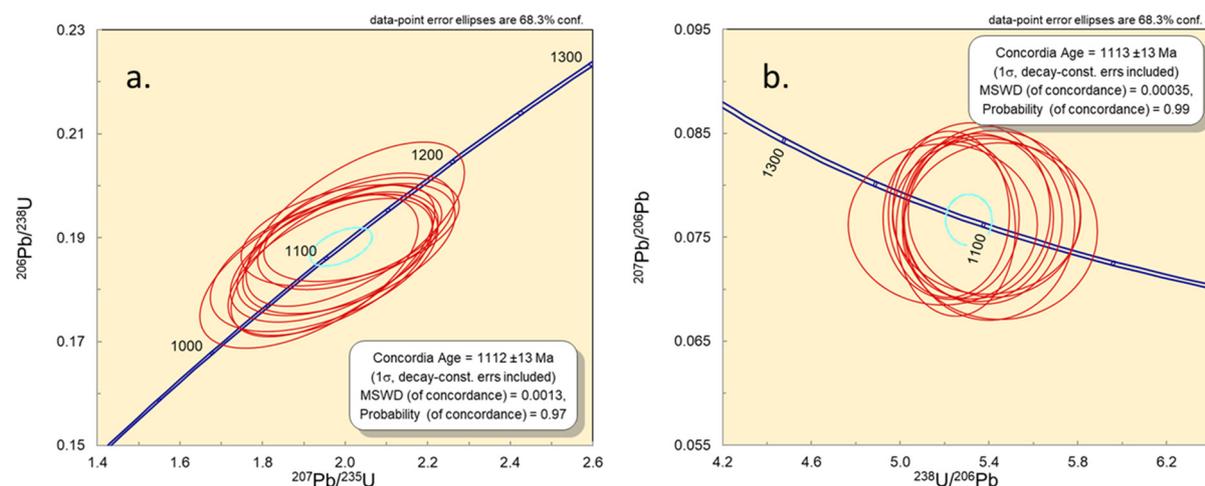


図 3.4-2 ジルコン FC1 (1099 ± 0.6 Ma) の U-Pb 年代測定結果
(a. Wetherill コンコーディア図; b. Tera-Wasserburg コンコーディア図)

(2) 炭酸塩試料の U-Pb 同位体分析に必須の標準試料の選定と開発

既述の通り、LA-ICP 質量分析法による微小領域 U-Pb 年代測定では、マトリクス的一致しない標準試料では正確な年代測定が困難である。そのため、共同研究「レーザーアブレーション付き誘導結合プラズマ質量分析計を用いた炭酸塩鉱物の分析手法の開発」を実施し、未選定であった炭酸塩標準試料の選定・開発を進めた。平成 28 年度までに、鍾乳石や海生化石及び陸成炭酸塩岩などの試料の中で、海水起源蒸発岩 Castile Formation (Becker et al., 2002¹⁶) 中の方解石(以下、「CFC」という)の標準試料としての有用性が確認されていた。一方で、米国南西部 Delaware 盆地にある上部ペルム系石灰岩から採取された方解石試料 (Walnut Canyon; 以下、「WC-1」という) が微小領域 U-Pb 同位体分析における標準試料として提唱された (Roberts et al., 2017¹⁷)。CFC と WC-1 それぞれについて微小領域 U-Pb 同位体分析を実施し、標準試料としての有用性を評価したところ、WC-1 がより有用であることが判明した。また、天然の炭酸塩

試料は U 及び Pb について有意な不均質性を有することが想定されるため、元素濃度既知の水溶液から炭酸塩を沈殿させる手法や、非晶質炭酸カルシウムに不適合元素を多量に取り込ませる手法 (Matsunuma et al., 2014¹⁸) などを試行し、U 及び Pb について均質な炭酸塩標準試料の作製も試みた。

(3) 炭酸塩試料の微小領域の観察手法の構築

炭酸塩試料の微小領域分析を実施するための観察手法を確立するため、主に共同研究「炭酸塩鉱物の微小領域分析手法の開発」を通じて、カソードルミネッセンス (以下、「CL」という) 像の取得や、主成分元素マッピングの取得を実施し、微小領域 (分析点) の地質学的背景を明らかにするための分析手法の合理的な手順の構築を進めた。また、LA-ICP 質量分析法による元素・同位体イメージング技術を整備し (図 3.4-3 ; 日本原子力研究開発機構, 2018¹⁹)、微量元素を含む同位体分布情報が取得可能となった。

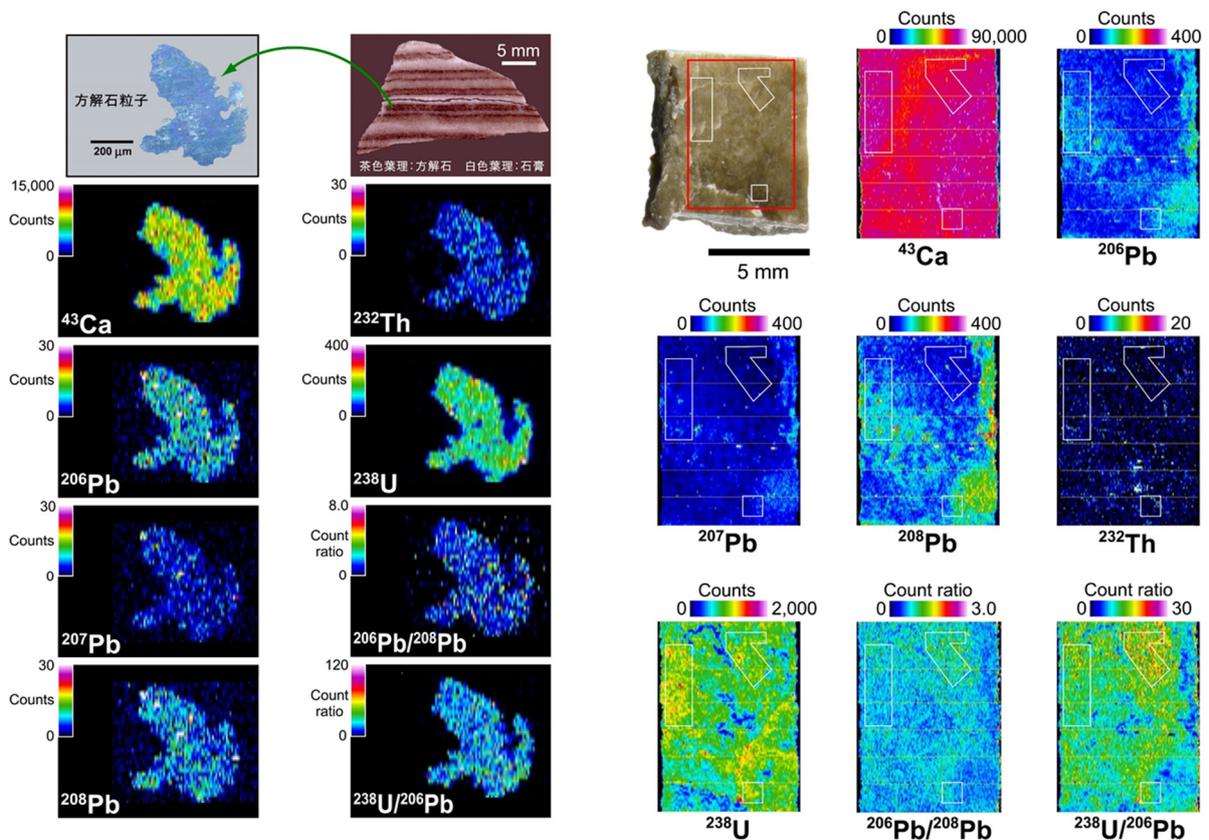


図 3.4-3 方解石試料 CFC (左) と WC-1 (右) の元素・同位体イメージング分析結果
CFC は粒子全体について、WC-1 は試料の赤枠内の領域についてイメージングを行った。

(4) 年代既知の炭酸塩試料の年代測定による手法有用性の評価

平成 26 年度に収集した海生化石試料は年代が判明していることから、これらを試験試料として、これまでに確立した微小領域 U-Pb 年代測定を実施し、その結果と化石年代を比較することで年代測定技術の有用性が評価できる。収集した 25 種の化石試料の内、次の三つの条件：(1) WC-1 と同じ方解石質である、(2) WC-1 の年代 (254.4 ± 3.2 Ma; Roberts et al., 2017¹⁷) に比較的近い年代を持つ、(3) 比較的狭い年代範囲を持つ；を満たす 4 試料（ウミツボミ、紡錘虫、ベレムナイト、六放サンゴ）を選定し、元素・同位体イメージング分析を実施したところ、ウミツボミ試料の中に U 濃度が高い（約 10 ppm）領域が存在することが判明した。この領域について、WC-1 を標準試料として、U-Pb 年代測定を 2 回実施した結果、 344 ± 11 Ma（1 回目）及び 346 ± 21 Ma（2 回目）が得られた。これらの年代値は、このウミツボミ試料の年代範囲 (339 - 318 Ma; Galloway and Kaska, 1957²⁰); Fabian, 1987²¹); Fossilworks, 2018²²) と良く一致し、測定の再現性も良好であることから、本技術による炭酸塩試料の年代測定が可能であることが示された（図 3.4-4；日本原子力研究開発機構, 2018¹⁹）。

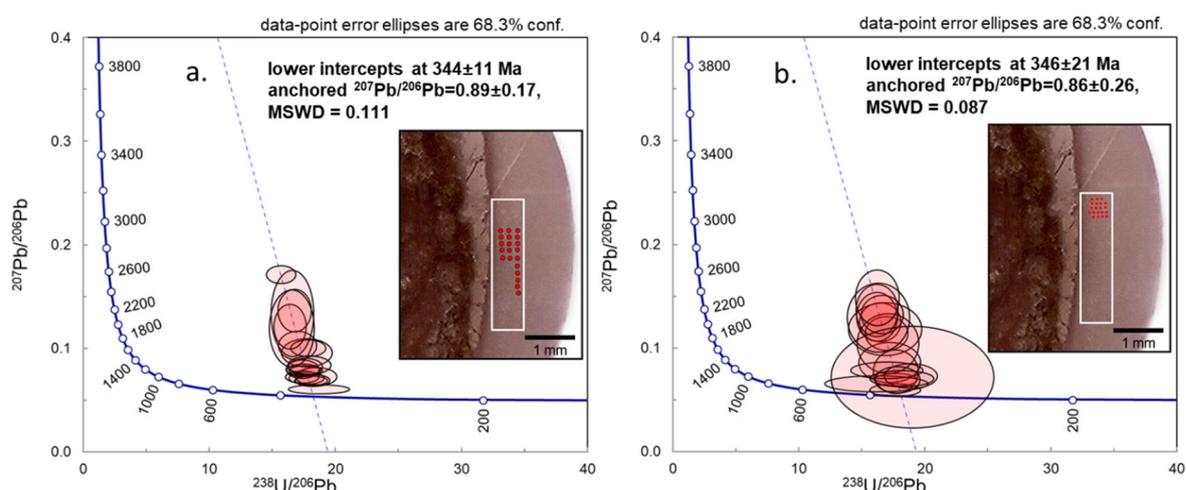


図 3.4-4 ウミツボミ試料の微小領域 U-Pb 年代測定結果

データの再現性確認のため、測定は 2 回実施した：(a) 1 回目 ($n = 20$ ；レーザー径 85 μm)、(b) 2 回目 ($n = 20$ ；レーザー径 50 μm)。MSWD は重みつき標準偏差の 2 乗平均。各図中の写真中の赤点はレーザー照射点を示す。

3.4.3 酸化還元電位測定技術の構築

地下水中の金属元素の挙動は、酸化還元電位 (Oxidation-reduction Potential; 以下、「ORP」という) の変化を反映する。また、炭酸塩鉱物に含まれる金属元素は、周辺の地下水の組成を反映している。すなわち、炭酸塩鉱物中の金属元素の含有量の変遷は、沈殿過程で ORP の変遷を記録していることを示す (水野・岩月, 2006²³)。よって、炭酸塩鉱物に含まれる Mn、Fe や U といった酸化還元状態に依存して状態が変化する金属元素の量が、炭酸塩鉱物沈殿時の地下水の ORP を知るための指標となる (Milodowski et al., 2005²⁴)。また、炭酸塩鉱物沈殿時における地下水の地球化学特性の変遷を推定するための指標として、希土類元素の有効性が知られている (例えば、Zhong and Mucci, 1995²⁵); Tanaka et al., 2004²⁶); Arthur et al., 2006²⁷)。このように既往研究において、地下水中の ORP を支配する元素 (Mn、Fe、U や希土類元素) から、その地下水から晶出する炭酸塩鉱物中の元素への分配が相関関係を持つことが示されている。この相関関係から得られた式に基づいて、炭酸塩鉱物から地下水の ORP が熱力学的に推定されてきた

した石灰華などの場合は、理論式を用いた計算値は実際の地下水と整合せず、酸化的な環境下で沈殿した炭酸塩鉱物は、本理論式の対象として適さないことが明らかとなった。これらの結果を踏まえて、理論式が適用できる地球化学的な条件は、①pH が極端に低くないこと、②ORP について Fe の酸化還元反応が支配的な環境であること及び地下水中に Fe が溶解しうる還元的な環境であること、③地下水の水質について、Ca²⁺濃度が地下水と炭酸塩鉱物のみの反応によって決まっていることに整理できた（表 3.4-2；日本原子力研究開発機構, 2016³²⁾）。具体的な除外地域の例としては、火山地域、堆積岩の分布域、海水などの高塩濃度地下水が存在する地域が挙げられる。ただし、この検討は目安でしかなく、対象とする地域において地下水の酸化還元状態を規定している化学反応を推測し、その結果を元に理論式が適用可能であるかどうかを判断することが重要である。

表 3.4-2 理論式の適用条件の一覧

要因	条件
pH	・ 極端に低くないこと
ORP	・ Fe の酸化還元反応が支配的な環境であること ・ 地下水中に Fe が溶解しうる還元的な環境であること
地下水の水質	・ Ca ²⁺ 濃度が地下水と炭酸塩鉱物の反応によって決まっていること

(3) 炭酸塩鉱物の微小領域を観察する手法の構築

微小領域の観察手法の構築については、共同研究「炭酸塩鉱物の微小領域分析手法の開発」を通じて、電子プローブマイクロアナライザ (Electron Probe Micro Analyzer；以下、「EPMA」という) の適用性について検討した。EPMA は最小ビーム径が 2 μm であり、空間分解能が高いものの、ビームのエネルギーが大きいため試料の融解や分解といった損傷を与えてしまう可能性があり炭酸塩鉱物に適した電流値やビーム径の設定などの開発が必要であることが判明した。また、炭酸塩鉱物の例として、有孔虫 (貨幣石)、鍾乳石及び花崗岩の割れ目に介在する炭酸塩鉱物を対象として、その成長構造を把握するため、ルミノスコープを用いた CL (optical-Cathodoluminescence；以下、「optical-CL」という) 像の観察や、走査型電子顕微鏡 (Secondary Electron Microscope) に付属した CL 装置で取得した CL (Secondary Electron Microscope-Cathodoluminescence；以下、「SEM-CL」という) 像の観察を行った。その結果、炭酸塩鉱物の微小領域分析における地質学的背景を明らかにする分析手法の合理的な手順として、①試料を準備・調製し、落射偏光顕微鏡観察によって試料の状態を確認する (分析面に亀裂などの凹凸が大きければ再調製を行う)、②ルミノスコープを用いた optical-CL 像を取得する、ここで得られる低倍率での optical-CL 像が、地質学的背景を議論できる十分な分解能を持つ場合、炭酸塩鉱物の微小領域における地球化学的特性や放射年代を取得するための分析へ移行するが、一方、取得した optical-CL 像が地質学的背景を議論できる十分な分解能を持たない場合は、③試料に炭素蒸着処理を行い、高倍率観察が可能な SEM-CL 像の観察を実施するという手順を提唱した (図 3.4-6)。

また、炭酸塩鉱物の CL の有無と色 (波長) が、Fe 及び Mn 濃度に起因していることを明らかにした。CL の有無及び色から Fe 及び Mn 濃度を半定量することができるため、CL から得られる情報から炭酸塩鉱物を沈殿させた地下水の組成の大まかな推定ができることが判明した。

加えて、観察の段階で炭酸塩鉱物中に包有されている石英などの異種鉱物が認められ、その供給源を明らかにすることにより、試料観察の時点で炭酸塩鉱物の形成年代にある程度の制限を与

え得ることが示唆された。例えば、割れ目を充填している炭酸塩鉱物の場合、その母岩の熱履歴などの形成過程が判明している時、この包有異種鉱物の形成過程が明らかとなれば、炭酸塩鉱物が形成した時期に制限を与えることが可能となる。平成 29 年度には、共同研究「炭酸塩鉱物及びその包有鉱物を用いた微小領域分析手法の開発」において、土岐花崗岩の割れ目を充填する炭酸塩鉱物中の異種包有鉱物（石英及び緑泥石）に着目し、炭酸塩鉱物の形成時期を推定することに成功した。

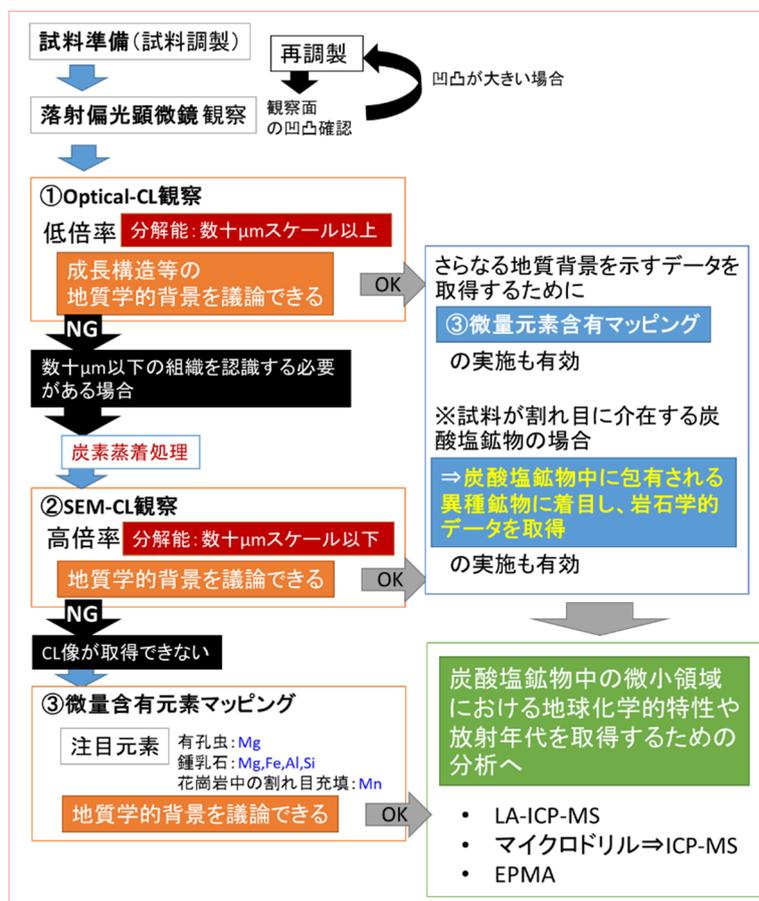


図 3.4-6 炭酸塩鉱物の微小領域分析における地質学的背景を明らかにするための分析フローチャート

3.4.4 地下水の年代測定技術の整備

地下水中の希ガス分析により、その地下水の滞留時間や年代などの情報を得ることができる。これは、炭酸塩鉱物の生成源である地下水の起源や動きについて議論するうえで重要である。平成 26 年度に希ガス質量分析装置を導入し、地下水に溶存する He、Ne 及び Ar の高精度同位体測定法の整備を行った。また、測定基準用水試料の作製、試料採取機材の整備、ガス抽出及び精製法の構築を行った。採水機材については、ボーリング坑からの採取と湧水部からの採取に対応した二種類を整備した。大気を用いて測定基準用水試料を作製し、これを用いて He 及び Ne 同位体比の高精度分析手法を構築した。この手法を天然の地下水試料（幌延深地層研究センターの研究坑道内で採取された湧水）に適用した結果、測定基準用水試料と同等の分析精度が得られたことから、その実用性が確認できた。

3.4.5 まとめ

炭酸塩鉱物を対象とした「放射年代測定法の開発」及び「ORP 測定技術の構築」においては、試料の分析点の選定や微小領域の地質学的意味合いを把握するために、試料観察の段階で共通に必要な技術が多く、この技術の開発は個々の開発・構築と同時に進行してきた。炭酸塩鉱物の放射年代測定及び ORP 測定においては分析の前段階で、対象とする試料の微細な構造や微小領域の化学組成を把握することが重要である。

本技術開発で確立した観察手法を含む一連の技術を用いて、炭酸塩試料の形成過程や元素及び同位体の分布を事前に把握し、同位体分析を行うことで、炭酸塩試料の年代測定が実施できることが確認された。炭酸塩試料の U 濃度については、WC-1 やウミツボミ試料のように 1~10 ppm オーダーの場合もあるが、環境水から方解石へ U の分配係数は 0.01 程度であることから (Jahn and Cuvellier, 1994³³⁾)、低濃度の試料が多い。こうした低 U 濃度試料については、U-Pb 年代測定の適用が困難となるが、CL 観察や元素・同位体イメージング分析によって試料内の高 U 濃度領域を探索することにより、年代測定が可能になると期待される。今後は分析装置の技術的改良によって、低濃度同位体測定技術の飛躍的向上が見込まれており、年代測定範囲の拡大が期待される。

ORP 推定技術の構築においては、地下環境などの還元的な環境下で生成された炭酸塩鉱物には、水野・岩月 (2006)²³⁾で提案された理論式が適用できることが確認された。一方で、酸化的な環境で生成された炭酸塩鉱物には適用が不可能であることも立証され、ORP 推定の際には対象とする地域において地下水の酸化還元状態を規定している化学反応を推測し、その結果をもとに理論式が適用可能であるかどうかを判断する必要があることが示唆された。

引用文献

- 1) 西本昌司, 鶴飼恵美, 天野健治, 吉田英一, 地下深部花崗岩の変質プロセス解析 : 土岐花崗岩を例にして, 応用地質, vol.49, 2008, pp.94-104.
- 2) Nishimoto, S. and Yoshida, H., Hydrothermal alteration of deep fractured granite : Effects of dissolution and precipitation, *Lithos*, vol.115, 2010, pp.153-162.
- 3) Iwatsuki, T. and Yoshida, H., Characterizing the chemical containment properties of the deep geosphere : Water-rock interactions in relation to fracture systems within deep crystalline rock in the Tono area, Japan, *Geological Society of London, Special Publications*, vol.157, 1999, pp.71-84.
- 4) Yoshida, H., Aoki, K., Semba, T., Ota, K., Amano, K., Hama, K., Kawamura, M. and Tsubota, K., Overview of the stability and barrier functions of the granitic geosphere at the Kamaishi mine ; Relevance to radioactive waste disposal in Japan, *Engineering Geology*, vol.56, 2000, pp.151-162.
- 5) 吉田英一, 地層処分 脱原発後に残される科学課題, 近未来社, 2012a, 168p.
- 6) Ono, T., Yoshida, H. and Metcalfe, R., Use of fracture filling mineral assemblages for characterizing water-rock interactions during exhumation of an accretionary complex: An example from the Shimanto Belt, southern Kyushu Japan, *Journal of Structural Geology*, vol.87, 2016, pp.81-94.
- 7) 吉田英一, 岩盤中の透水性亀裂とその長期的挙動 - 現状と今後の課題 -, 地学雑誌, vol.121, 2012b, pp.68-95.

- 8) 石橋正祐紀, 安藤友美, 笹尾英嗣, 湯口貴史, 西本昌司, 吉田英一, 深部結晶質岩における割れ目の形成・充填過程と透水性割れ目の地質学的特徴 - 土岐花崗岩を例として -, 応用地質, vol.55, 2014, pp.156-165.
- 9) Ishibashi, M., Yoshida, H., Sasao, E. and Yuguchi, T., Long term behavior of hydrogeological structures associated with faulting; An Example from the deep crystalline rock in the Mizunami URL, Central Japan, *Engineering Geology*, vol.208, 2016, pp.114-127.
- 10) 柴田 賢, 高木秀雄, 中央構造線沿いの岩石および断層内物質の同位体年代 - 長野県分杭峠地域の例 -, 地質学雑誌, vol.94, 1988, pp.35-50.
- 11) Vargas, G., Palacios, C., Reich, M., Luo, S., Shen, C.-C., González, G. and Wu, Y.-C., U-series dating of co-seismic gypsum and submarine paleoseismology of active faults in Northern Chile (23°S), *Tectonophysics*, vol.497, 2011, pp.34-44.
- 12) Yamasaki, S., Zwingmann, H., Yamada, K., Tagami, T. and Umeda, K., Constraining the timing of brittle deformation and faulting in the Toki granite, central Japan, *Chemical Geology*, vol.351, 2013, pp.168-174.
- 13) Nuriel, P., Rosenbaum, G., Zhao, J.-X., Feng, Y., Golding, S.D., Villemant, B. and Weinberger, R., U-Th dating of striated fault planes, *Geology*, vol.40, 2012, pp.647-650.
- 14) Blyth, A., Frapé, S., Ruskeeniemi, T. and Blomqvist, R., Origins, closed system formation and preservation of calcites in glaciated crystalline bedrock : evidence from the Palmottu natural analogue site, Finland, *Applied Geochemistry*, vol.19, 2004, pp.675-686.
- 15) 日本原子力研究開発機構, 平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 地質環境長期安定性評価確証技術開発 報告書, 2017, 230p.
- 16) Becker, M.L., Rasbury, E.T., Meyers, W.J. and Hanson, G.N., U-Pb calcite age of the Late Permian Castile Formation, Delaware Basin: a constraint on the age of the Permian-Triassic boundary (?), *Earth and Planetary Science Letters*, vol.203, 2002, pp.681-689.
- 17) Roberts, N.M.W, Rasbury, E.T., Parrish, R.R., Smith, C.J., Horstwood, M.S.A. and Condon, D.J., A calcite reference material for LA-ICP-MS U-Pb geochronology, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol.18, 2017, pp.2807-2814.
- 18) Matsunuma, S., Kagi, H., Komatsu, K., Maruyama, K. and Yoshino, T., Doping incompatible elements into calcite through amorphous calcium carbonate, *Crystal Growth & Design*, vol.14, 2014, pp.5344-5348.
- 19) 日本原子力研究開発機構, 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 地質環境長期安定性評価確証技術開発 報告書, 2018, 206p.
- 20) Galloway, J.J. and Kaska, H. V., Genus *Pentremites* and its species, *Geological Society of America Memoirs*, 1957, 114p.
- 21) Fabian, R., Relation of biofacies to lithofacies in interpreting depositional environments in the Pitkin Limestone (Mississippian) in northeastern Oklahoma (Part I), *Shale Shaker*, vol.37, 1987, pp.76-95.
- 22) Fossilworks: Gateway to the Paleobiology Database, 2018.

- http://fossilworks.org/bridge.pl?a=collectionSearch&taxon_no=30913&max_interval=Cambrian&country=United%20States&state=Oklahoma&is_real_user=1&basic=yes&type=view&match_subgenera=1 (2018.01.15)
- 23) 水野 崇, 岩月輝希, 地下深部における地球化学的環境の長期的変遷－炭酸塩鉱物中の微量元素に基づく解析例－, 地球化学, vol.40, 2006, pp.33-45.
 - 24) Milodowski, A.E., Tullborg, E.-L., Buil, B., Gómez, P., Turrero, M.-J., Haszeldine, S., England G., Gillespie, M.R., Torres, T., Ortiz, J.E., Zachariáš, J., Silar, J., Chvátal, M., Strnad, L., Šebek, O., Bouch, J.E., Chenery, S.R., Chenery, C., Shepherd, T.J. and McKervey, J.A., Application of mineralogical, petrological and geochemical tools for evaluating the palaeohydrogeological evolution of the PADAMOT study sites, *PADAMOT Project Technical Report WP2*, 2005, 206p.
 - 25) Zhong, S. and Mucci, A., Partitioning of rare-earth elements (REEs) between calcite and seawater solutions at 25 °C and 1 atm, and high dissolved REE concentrations, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol.59, 1995, pp.443-453.
 - 26) Tanaka, K., Ohta, A. and Kawabe, I., Experimental REE partitioning between calcite and aqueous solution at 25 °C and 1 atm: Constraints on the incorporation of seawater REE into seamount-type limestones, *Geochemical Journal*, vol.38, 2004, pp.19-32.
 - 27) Arthur, R.C., Iwatsuki, T., Sasao, E., Metcalfe, R., Amano, K. and Ota, K., Geochemical constraints on the origin and stability of the Tono Uranium Deposit, Japan, *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, vol.6, 2006, pp.33-48.
 - 28) Witkowski, F.W., Blundell, D.J., Gutteridge, P., Horbury, A.D., Oxtoby, N.H. and Qing, H., Video cathodoluminescence microscopy of diagenetic cements and its applications, *Marine and Petroleum Geology*, vol.17, 2000, pp.1085-1093.
 - 29) Bouch, J.E., Cathodoluminescence petrography and fluid inclusion microthermometry of vein calcites from Laxemar borehole KLX-01, Sweden, British Geological Survey, Commissioned Report, CR/04/161, 2004, 25p.
 - 30) 日本原子力研究開発機構, 平成 26 年度地層処分技術調査等事業地質環境長期安定性評価確認技術開発報告書, 2015, 229p.
 - 31) Watanabe, T., Saito-Kokubu, Y., Murakami, H. and Iwatsuki, T., Onsite chelate resin solid-phase extraction of rare earth elements in natural water samples: its implication for studying past redox changes by inorganic geochemistry, *Limnology*, vol.19, 2018, pp.21-30.
 - 32) 日本原子力研究開発機構, 平成 27 年度地層処分技術調査等事業地質環境長期安定性評価確認技術開発報告書, 2016, 266p.
 - 33) Jahn, B.-M. and Cuvellier, H., Pb-Pb and U-Pb geochronology of carbonate rocks: an assessment, *Chemical Geology*, vol.115, 1994, pp.125-151.

4. まとめ

本事業では、地層処分におけるサイト選定や安全評価において重要となる地質環境の長期的な変化を評価するための体系的な方法論の構築及びそれを支える要素技術の整備を目的とするものである。そのため、将来の自然現象に伴う長期の地質環境の変動スケールを把握するために必要な百万年ないしそれ以上の時間スケールで過去から現在までの地質環境の変化を三次元的に表現できる数値モデル「地質環境長期変動モデル」の開発と、モデルの構築に必要な個別要素技術の開発「革新的要素技術」の開発を進めてきた。

地質環境長期変動モデルの開発では、これまで個別に検討されてきた地形・地質モデル、水理モデル、地球化学モデル及び地表環境モデルを統合的に取り扱うため、山間部（東濃地域）及び平野部（幌延地域）を事例とした分野間の FEP の相互関係を整理し、地質環境の長期的な変化がどのように進むかのシナリオを整備した（図 2.1-1 及び図 2.1-2）。この検討結果に基づき、各種調査によって得られる様々なデータとの関係に着目しながら、各分野のモデル構築及びその反映先に係るフロー（図 2.2.1-6、図 2.2.2-4、図 2.2.3-4 及び図 2.2.4-2）、さらにはモデル間の相互関係を考慮した統合数値モデル構築までのフロー（統合化データフロー）を提示した（図 2.1-3）。サイト選定プロセスにおける地質環境特性の推定や安全評価では特に、地下水流動状態の長期的な変動性の評価が重要となるが、本事業における検討の結果、地形変化と気候変動がその影響因子としてとりわけ重要であることを確認した。

モデルに対する不確実性がどこにどれだけ内包されているかを明確にし、それらを低減するための道筋を示すことも構築したモデルの信頼性向上のためには重要である。地質環境長期変動モデルのシステムとしての不確実性については、各 FEP 間の相関性や網羅性を確保し、各 FEP に対する現状の知見を整理することで除外する FEP を明確にすることにより、低減されることを示した。概念としての不確実性、すなわち、地質環境特性の変化に対する天然のプロセスの理解度に関しては、モデルの単純化とも密接に関連しており、後述するように、構築したモデルを一般の幅広い対象に向けて理解してもらうための可視化技術を提示することで対応した。データの不確実性については、モデルバリエーションとパラメータ設定の大きく二つに大別される（表 2.1-4）。地下水流動状態の長期変動性の評価における場合、モデルバリエーションでは、データの解釈や概念モデルなどの違いに基づき、モデル化領域の範囲やモデルの上部境界面となる地形分布、数値化手法などが異なる複数の水理地質構造モデルを構築し、評価結果（この場合、地下水流動解析結果）を比較することで、不確実性を明示することができた。パラメータ設定では、データ自体やデータの解釈の違いに基づき、水理地質構造の水理特性や涵養量、海水準の設定が異なる複数の水理地質構造モデルを構築し、評価結果を比較することで、同様に不確実性を明示することができた。具体的には、山間部及び平野部を事例対象として、長期変遷を考慮した水理モデルにおける感度解析の結果を用いて不確実性の定量化手法を提示した。

モデルの不確実性の評価とともに妥当性についても確認・検証できることが重要である。本事業では、モデルの妥当性確認の事例として、河川の土砂運搬・堆積過程を模擬して地形の大局的な変化を再現する地形変化シミュレーションを用いた検討を行った。その結果、数十万年程度までを対象とした地形変化の復元であれば、地形変化シミュレーションが地形・地質情報に基づき推定した古地形モデルの妥当性確認やそのモデルの不確実性の定量評価に有効な技術であることを確認した。また、地下水中の塩分濃度の変化に着目した移流分散解析により、 ^{14}C 濃度などに基づき推定した地下水年代や地下水中の塩化物イオン濃度が水理モデルの妥当性確認及び更新に有効であることを示した。すなわち、解析的に推定した涵養域から評価対象地点までの移行時間を

地下水の滞留時間として、 ^{14}C 濃度などに基づく地下水年代と比較することで、その推定結果の妥当性を確認することができる。さらに、ボーリング調査で得られた地下水中の塩化物イオン濃度の情報に基づき、解析で推定した塩分濃度（比濃度）分布の妥当性を確認することができる。

構築した数値モデルを効果的に表現する可視化技術の提示については、既存の可視化手法を整理し、時間変化する現象を可視化するために必要な技術を抽出した。そのうえで、過去百万年から現在までの地形変化や気候変動による地表環境の変化及びそれらに伴う地下水の流れについて CG を用いて効果的に示すため、専門家以外の一般層を対象とした、山間部と平野部を事例とした可視化映像を制作し、それらを通じて得られた手法や演出を技術的知見として整理した。

以上の地質環境長期変動モデル構築に係る技術開発を通じ、個別のモデルのみでは把握が困難であった時間変化する地質環境の評価法の道筋を示したと言える。一方、本事業では、深地層の科学研究によりデータが充実している地域を事例としてモデルの構築やその不確実性評価、妥当性確認を行ってきている。実際のサイト選定や安全評価を考慮すると、既往のデータが十分とは言えない地域においても、一定の信頼性をもって地質環境の長期変動性を提示することができるよう、モデルの構築・評価手法の柔軟性や汎用性を向上させていくための更なる適用事例の蓄積が望まれる。パラメータの設定においては、その確度や設定（選定）根拠、設定に至った背景が事例ごとに明確な形で取りまとめられることが重要である。モデルの不確実性評価や妥当性確認において利用されるシミュレーションなどの数値解析については、第三者が追跡・追試できる形で提示されていることが重要である。本事業で構築した手法やノウハウあるいはその後の更なる高度化開発の成果については、引き続き論文などの形で公表を進め、第三者の専門家による評価を受ける取り組みが欠かせないと考えられる。

また、本事業で開発・提示した可視化技術については、一般層を対象とした地層処分に対する理解促進のための有効な手段の一つになり得ると考えられ、今後も様々な場で活用されることが望まれる。

本事業では、地形・地質、水理、地球化学及び地表環境のそれぞれ個別のモデルについてもその構築手法について整理し、本報告書の 2.2 や各年度の報告書の通り取りまとめている。これらの中で今後の課題についても若干示してはいるが、特に気候変動については、これら個別モデル構築のための技術開発の中で十分に検討できなかった部分である。気候変動を踏まえた隆起・侵食などの長期予測のために必要な要素技術開発については今後も高度化が望まれるとともに、それらの内容をモデル構築・評価にも反映できるような成果として提示していくことが重要である。

革新的要素技術の開発については、山地や丘陵の形成過程を推定する「後背地解析技術」、過去から将来の地殻変動を数値シミュレーションから推定する「地殻変動予測技術」、古気候・古環境・古地形などに基づき涵養量を推定する「地下水涵養量推定技術」、過去の地下水の化学的状態と年代を推定する「炭酸塩鉱物測定技術」の開発を進めてきた。

後背地解析技術については、主に地形・地質モデルの構築に反映できる技術として、走査型 X 線分析顕微鏡及び画像処理・解析ソフトウェアを用いたモード測定手法の構築、重鉱物スクリーニングによる重鉱物組成分析・化学分析の迅速化、CHIME 年代や OSL 年代測定技術の整備、石英の ESR・OSL・TL 信号測定に基づく碎屑物供給源の推定手法の検討、細粒堆積物の帯磁率異方性測定による古流向の推定手法の検討、北海道～東北地方のテフラを中心としたテフラカタログの整備を行ってきた。これら個別技術の適用性について東濃地域及び幌延地域における事例研究を通じて提示するとともに、適用性の確認できた技術については山地や丘陵の形成過程を推定するための後背地解析のフローに反映した（図 3.1-16）。後背地解析のフローは実際のサイト選定に係る調査技術への反映を考慮してのものであるが、その構築の過程では、個々の調査・分析技

術については、マニュアルなどの文献として整理されていることが、技術の継承・再検証・改善としては望ましいことが示唆された。そのため、今後も引き続き、個別の技術及び学術的知見について論文などの形で公表が進められていくことが望ましい。また、様々な地質条件の場に対する事例の蓄積を通じ、山地や丘陵の形成過程を推定するために必要な分析数などの定量的な基準が提示できることが今後の課題と言える。

地殻変動予測技術については、地殻変動の一樣継続性を評価する指標の検討を行うとともに、地下構造の粘弾性不均質を考慮した二次元及び三次元地殻変動シミュレーション技術の構築を進めた。一樣継続性を評価する指標の検討では、ディスロケーションモデルに基づいた地質学的ひずみ速度の推定手法を提案するとともに、日本列島全域及び九州地方を事例とした地質学的ひずみ速度と測地学的ひずみ速度との比較によって、異なる時間スケールにおける地殻変動特性の差に着目した検討事例を示した。地殻変動シミュレーション技術については、GNSSなどの観測によって推定された局所的な地殻変動が、流体分布域を粘弾性体として仮定したシミュレーションによって定性的に再現されることを確認した。さらに、三次元シミュレーションの対象とした九州南部のせん断帯及びその周辺を事例としてGNSS稠密観測を実施するとともに、応力インバージョン法による地殻応力場の推定などを行った結果、明瞭な活断層が認められていないせん断帯においても、その深部におけるすべり面の存在を見出すことができた。GNSS稠密観測結果とシミュレーション結果との比較からは、より詳細な地殻変動を推定するための技術に関する知見も示された。測地学などの地球物理学的手法と地形・地質学的手法を組み合わせることにより、地下深部の地殻変動の特徴を把握し、地下に伏在する断層の活動性やそれに伴う力学的影響を評価する技術へ高度化を図ることは、概要調査の段階における断層の調査・評価技術の整備として今後も非常に重要な課題と言える。

地下水涵養量推定技術については、気温との相関による降水量及び蒸発散量の推定手法と、地形特徴に着目した河川流出量の推定手法を組み合わせることで、涵養量の推定に必要なパラメータの推定が可能であることを提示し、長期的な気候変動及び地形変化を考慮した涵養量の推定技術として整備した。整備した成果については、地表環境モデルの構築に反映し、山間部及び平野部を対象とした適用事例の蓄積を行ってきた。この事例研究を通して、整備した手法により地下水涵養量を含む地表環境構成要素の推定が可能であることを示すことができた。

炭酸塩鉱物測定技術については、地球化学モデルの構築に反映できることを念頭に、普遍的に存在する鉱物の一つである炭酸塩鉱物を対象としたORP測定技術の構築及び放射年代測定法の開発などを進めてきた。ORP推定技術の構築においては、代表的な炭酸塩鉱物及び地下水の分析、希土類元素などの微量元素の定量分析の精度を向上させる技術の開発、ORP測定を行うための微小領域での分析手法の合理的な手順の検討及びORPを推定する理論式の適用性の検討を実施した。その結果、地下環境などの還元的な環境下で生成された炭酸塩鉱物には、既存の理論式が適用できることが確認された一方、酸化的な環境下で生成された炭酸塩鉱物への適用には問題があることも示され、ORP推定の際には地下水の酸化還元状態を規定している化学反応を検討することが重要であることを明確にした。放射年代測定法の開発については、LA-ICP質量分析法を用いたウラン系列の年代測定システムの整備、微小領域分析手法の構築及び高精度同位体分析に必要な標準試料の選定を行い、炭酸塩鉱物の微小領域U-Pb年代測定を可能とした。従来のU-Pb年代測定法の適用が困難な低U濃度試料についても、本事業で検討したCL観察や元素・同位体イメージング分析によって試料内の高U濃度領域を探索することにより、年代測定の適用性が広がる。今後は、分析機器・分析技術の改良によって低濃度同位体測定の飛躍的向上が見込まれることから、年代測定範囲の更なる拡大が期待される。

本事業全体としては、地質環境の変化を三次元的に表現する地質環境長期変動モデルの開発と、

モデルの構築を支える革新的要素技術の開発との相互連携を意識して進めてきた。理想的には、革新的要素技術の開発で得られた成果を地質環境長期変動モデルの開発に反映するプロセスが実現できるのが望ましいが、本事業では実施期間などの制約もあり、地下水涵養量推定技術を除き、そのような理想的な流れとはならなかった。ただし、例えば後背地解析技術においては、技術の適用性確認のための事例研究で得られた知見が、あらかじめ構築を進めていた地形・地質モデルに対する妥当性の確認やモデルバリエーションの絞り込みに貢献するというような成果は得ることができた。先に述べているように、本事業を通じて得られた個々の成果については、適用事例の蓄積や第三者の専門家による評価・追試などによりその精度・品質を向上していくこと、また、論文などによる成果の公表や普及活動などにより、幅広いユーザーに利用される機会を増やすとともに、広く一般層への理解促進に繋げていくことが望まれる。

謝 辞

本事業は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「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確証技術開発）」として、平成 25 年度から平成 29 年度の 5 か年にわたり実施されたものである。平成 29 年度に本事業を受託した国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が 5 か年の成果の取りまとめとして本報告書を作成した。

山崎晴雄委員長（首都大学東京 名誉教授）をはじめ、楮原京子委員（山口大学教育学部 講師）、竹内真司委員（日本大学 文理学部 教授）、遠田晋次委員（東北大学 災害科学国際研究所 教授）、古市幹人委員（国立研究開発法人海洋研究開発機構 主任研究員）、吉田英一委員（名古屋大学博物館 教授）（以上、五十音順）には、本事業の実施にあたって設置した「地質環境長期安定性評価確証技術開発委員会」において有益な意見・助言をいただいた。

名古屋大学の故鈴木和博名誉教授には、後背地解析技術における重鉱物の分析や CHIME 年代測定に関して多大なご教示を賜った。町田 洋東京都立大学名誉教授及び河尻清和相模原市立博物館学芸員には、テフラカタログの整備において大変お世話になった。地殻変動予測技術において実施した GNSS 稠密観測では、観測点の設置や施設の使用にあたり、関係する自治体などにご協力いただいた。地殻変動解析には、国土地理院 GEONET 観測網で取得された GNSS 観測データや F3 解、産業技術総合研究所の活断層データベース、防災科学技術研究所によって強震動評価のために作成された全国深部地盤構造モデルを使用させていただいた。震源決定及びメカニズム解の決定では、防災科学技術研究所の高感度地震観測網（Hi-net）、気象庁、九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター及び鹿児島大学大学院理工学研究科附属南西島弧地震火山観測所が管理する観測点で収録されたイベント波形データを使用させていただいた。

経済産業省 資源エネルギー庁 電気・ガス事業部 放射性廃棄物対策課の江橋 健課長補佐、真田祐幸氏、戸谷成寿氏及び石橋正祐紀氏には、事業全般にわたってご指導をいただいた。

以上の皆様及び関係機関に深く感謝いたします。

共同研究・外部発表リスト

1. 共同研究

平成 26 年度 (2015 年)

- (1) 東海層群の堆積機構に関する共同研究
国立大学法人信州大学
- (2) 東濃地域の断層の発達史に関する共同研究
国立大学法人新潟大学
- (3) ボーリング試料を用いた分析技術に関する共同研究
国立大学法人東京大学
- (4) EPMA による微小領域鉍物の分析技術の研究
国立大学法人名古屋大学
- (5) 炭酸塩鉍物の LA-ICP-MS による U-Pb 年代測定法の開発
国立大学法人京都大学
株式会社京都フィッション・トラック
- (6) 炭酸塩鉍物の LA-ICP-MS による同位体分析手法の開発
独立行政法人海洋研究開発機構
- (7) 炭酸塩鉍物の微小領域における化学組成測定手法の開発
美祢市立秋吉台科学博物館
国立大学法人山口大学
- (8) 地質環境長期安定性に係る知識集約のためのシステムの管理

平成 27 年度 (2016 年)

- (1) 風化状態の復元に関する共同研究
国立大学法人信州大学
- (2) 断層岩を用いた断層発達史の解明手法に関する共同研究
国立大学法人新潟大学
- (3) 石英粒子を用いた後背地解析技術に関する共同研究
国立大学法人東京大学
- (4) EPMA による微小領域鉍物の分析技術における干渉補正等に関する研究
国立大学法人名古屋大学
- (5) レーザーアブレーション付き誘導結合プラズマ質量分析計を用いた炭酸塩鉍物の分析手法の開発
国立大学法人京都大学
株式会社京都フィッション・トラック
国立研究開発法人海洋研究開発機構
- (6) 炭酸塩鉍物の微小領域分析手法の開発
国立大学法人山形大学
国立大学法人熊本大学

平成 28 年度 (2017 年)

- (1) 風化状態の復元に関する共同研究

国立大学法人信州大学

- (2) 炭酸塩鉱物の微小領域分析手法の開発

国立大学法人山形大学

国立大学法人熊本大学

- (3) レーザーアブレーション付き誘導結合プラズマ質量分析計を

用いた炭酸塩鉱物の分析手法の開発

国立大学法人東京大学

株式会社京都フィッション・トラック

国立研究開発法人海洋研究開発機構

学校法人学習院大学

平成 29 年度 (2018 年)

- (1) レーザーアブレーション付き誘導結合プラズマ質量分析計を

用いた炭酸塩鉱物の分析手法の開発

国立大学法人東京大学

株式会社京都フィッション・トラック

国立研究開発法人海洋研究開発機構

学校法人学習院大学

- (2) 炭酸塩鉱物及びその包有鉱物を用いた微小領域分析手法の開発

国立大学法人山形大学

国立大学法人熊本大学

2. 外部発表

2.1 誌上発表

- (1) 柴田健二, 清水麻由子, 鈴木和博, JAEA 土岐地球年代学研究所の JEOL FE-EPMA-JXA-8530F を用いたジルコンの CHIME 年代測定, 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書, vol. 26, 2015, pp. 126-131.
- (2) Watanabe, T., Saito-Kokubu, Y., Murakami, H. and Iwatsuki, T., Onsite chelate resin solid-phase extraction of rare earth elements in natural water samples: its implication for studying past redox changes by inorganic geochemistry, *Limnology*, vol. 19, 2017, pp. 21-30.
- (3) 清水麻由子, 佐野直美, 鈴木和博, JAEA 東濃地科学センターの JEOL JXA-8530F FE-EPMA を用いた鉱物分析と年代測定, 名古屋大学年代測定研究, vol. 1, 2017, pp. 36-43.
- (4) Shimizu, M., Shibata, K., Suzuki, K., Sueoka, S. and Niwa, M., CHIME monazite dating: Pb analysis on an $R_R=100$ mm spectrometer and correction of interferences between Th, U, and Pb with natural monazite, *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, vol. 112, 2017, pp. 88-96.
- (5) 植木忠正, 丹羽正和, 走査型 X 線分析顕微鏡と画像処理・解析ソフトウェアを用いたモード測定, 地質学雑誌, vol. 123, 2017, pp. 1061 - 1066.

2.2 学会発表

- (1) 後期更新世以降における岐阜県大湫盆地の堆積環境変遷

佐藤善輝, 安江健一, 須貝俊彦

2014年09月 @日本第四紀学会 2014年大会

- (2) 地質学的時間スケールにおける地下水流動特性の長期変動幅を

推測するための調査・解析・評価技術の構築, 1 全体概要

三枝 博光, 大山 卓也, 尾上 博則

2014年11月 @地下水学会 2014年秋季講演会

- (3) Challenge to Increase Confidence in Geological Evolution Models.

Mizuno, T., Iwatsuki, T., Saegusa, H., Kato, T., Matsuoka, T., Yasue, K., Ohyama, T. and Sasao, E.

2014年12月 @

American Geophysical Union 2014 Fall Meeting (AGU 2014)

- (4) Estimation of palaeohydrochemical conditions using carbonate minerals.

Amamiya, H., Mizuno, T., Iwatsuki, T., Yuguchi, T., Murakami, H. and Saito-Kokubu, Y.

2014年12月 @

American Geophysical Union 2014 Fall Meeting (AGU 2014)

- (5) JAEA 土岐地球年代学研究所の JEOL FE-EPMA

—JXA-8530F—を用いたジルコンの CHIME 年代測定

柴田健二, 清水麻由子, 鈴木和博

2015年01月 @第27回(2014年度)名古屋大学年代測定総合研究センターシンポジウム

- (6) 岐阜県南東部に位置する屏風山断層の破碎・変質履歴

香取拓馬, 小林健太, 安江健一, 丹羽正和, 小松哲也, 細矢卓志, 笹尾英嗣

2015年05月 @日本地球惑星科学連合 2015年大会

- (7) 土岐口陶土層における源岩構成の多様性

葉田野 希, 吉田孝紀, 笹尾英嗣, 足立佳子, 岩野英樹, 檀原 徹

2015年05月 @日本地球惑星科学連合 2015年大会

- (8) GPS 速度データより推定される九州地方のひずみ速度場

渡部 豪, 奥山 哲, 浅森浩一

2015年05月 @日本地球惑星科学連合 2015年大会

- (9) 数値標高モデル (DEM) を用いた未観測流域の河川流出量推定手法の確立

景山宗一郎, 池田 誠, 川村 淳, 竹内竜史, 尾上博則, 安江健一

2015年08月 @日本原子力学会バックエンド部会 第31回「バックエンド」夏期セミナー

- (10) 地形学図と後背地解析による鮮新-更新世の古地理復元の試み
小松哲也, 安江健一
2015年08月 @日本第四紀学会 2015年大会
- (11) 地質環境長期安定性評価確証技術開発 (1) 全体概要
水野 崇, 三枝博光, 梅田浩司, 安江健一, 笹尾英嗣, 岩月輝希, 加藤智子, 國分(齋藤)陽子, 竹内
竜史
2015年09月 @日本原子力学会 2015年秋の大会
- (12) 地質環境長期安定性評価確証技術開発 (2) 地質環境長期変動モデルの開発
三枝博光, 水野 崇, 梅田浩司, 安江健一, 笹尾英嗣, 岩月輝希, 加藤智子, 國分(齋藤)陽子, 竹内
竜史, 松岡稔幸
2015年09月 @日本原子力学会 2015年秋の大会
- (13) 山地形成過程の把握に必要な後背地解析技術の研究
-石英の放射線損傷を用いた手法-
安江健一, 小松哲也, 徳安佳代子, 田村糸子, 堀内泰治
2015年09月 @日本地質学会第122年学術大会
- (14) 地質環境長期安定性評価確証技術開発 後背地解析技術に関する研究
安江健一, 須貝俊彦, 徳安佳代子, 小松哲也, 堀内泰治, 清水 整, 森田泰彦
2015年09月 @日本地質学会第122年学術大会
- (15) レーザーアブレーション試料導入 -ICP 質量分析法による
炭酸塩鉱物の U-Th -Pb 年代測定技術の開発
横山立憲, 國分(齋藤)陽子, 村上裕晃, 平田岳史, 坂田周平, 檀原 徹, 岩野英樹, 常 青,
木村純一
2015年09月 @日本地球化学会 2015年度年会
- (16) キレート樹脂を用いた河川水および地下水中の希土類元素分析手法の検討
渡邊隆広, 國分(齋藤)陽子, 村上裕晃, 岩月輝希
2015年09月 @日本陸水学会 第80回大会
- (17) 活断層データベースを用いた地質学的ひずみ速度の推定
渡部 豪, 奥山 哲, 浅森浩一
2015年10月 @日本測地学会 第124回講演会
- (18) CHIME monazite dating using FE-EPMA equipped with R=100 mm spectrometers.
Shibata, K., Shimizu, M., Suzuki, K., Sueoka, S. and Niwa, M.
2015年12月 @American Geophysical Union 2015 Fall Meeting (AGU 2015)

- (19) 後背地解析技術開発に向けた鮮新・更新世堆積物とその周辺の基盤岩体中の
石英 ESR 信号特性
徳安佳代子, 安江健一, 小松哲也, 田村糸子, 堀内泰治
2016 年 03 月 @平成 27 年度 ESR 応用計測研究会・第 40 回フィッション・トラック研究会・
ルミネッセンス年代測定研究会 合同研究会
- (20) Study of fault evolution based on texture and chemical analyses of fault gouge: Case
study of the Byobuyama fault, Gifu prefecture, central Japan.
香取拓馬, 小林健太, 丹羽正和, 清水麻由子, 小松哲也, 安江健一, 堀内泰治
2016 年 05 月 @日本地球惑星科学連合 2016 年大会
- (21) 2016 年熊本地震に伴う九州南部のせん断帯における地殻変動 (序報)
渡部 豪, 浅森浩一, 梅田浩司, 雨宮浩樹, 野村勝弘, 中司 昇
2016 年 05 月 @日本地球惑星科学連合 2016 年大会
- (22) The progress of the CHIME monazite dating on JXA-8530F FE-EPMA equipped with
R=100 mm spectrometers.
清水麻由子, 柴田健二, 鈴木和博, 末岡 茂, 丹羽正和
2016 年 05 月 @日本地球惑星科学連合 2016 年大会
- (23) 河成段丘堆積物の OSL 年代測定と指標テフラ分析
徳安佳代子, 田村糸子, 小松哲也, 安江健一
2016 年 05 月 @日本地球惑星科学連合 2016 年大会
- (24) 地質環境長期安定性評価確証技術開発
安江健一, 笹尾英嗣, 尾上博則, 岩月輝希, 加藤智子, 竹内竜史, 國分(齊藤)陽子, 浅森浩一, 梅田
浩司
2016 年 05 月 @日本地球惑星科学連合 2016 年大会
- (25) 地質環境長期安定性評価確証技術開発 (1)地質環境長期変動モデル (東濃地域)
尾上博則, 小松哲也, 安江健一, 岩月輝希, 竹内竜史, 加藤智子, 笹尾英嗣, 梅田浩司
2016 年 05 月 @日本地球惑星科学連合 2016 年大会
- (26) 地質環境長期安定性評価確証技術開発 (2)地質環境長期変動モデル (幌延地域)
松岡稔幸, 小松哲也, 安江健一, 尾上博則, 大山卓也, 岩月輝希, 笹尾英嗣, 梅田浩司
2016 年 05 月 @日本地球惑星科学連合 2016 年大会
- (27) 地質環境長期安定性評価確証技術開発 (3)後背地解析技術
徳安佳代子, 安江健一, 小松哲也, 田村糸子, 堀内泰治
2016 年 05 月 @日本地球惑星科学連合 2016 年大会

- (28) 地質環境長期安定性評価確証技術開発 (4)地殻変動予測技術
渡部 豪, 奥山 哲, 浅森浩一, 梅田浩司
2016年05月 @日本地球惑星科学連合 2016年大会
- (29) 地質環境長期安定性評価確証技術開発 (5)地下水涵養量推定技術
竹内竜史, 尾上博則, 安江健一
2016年05月 @日本地球惑星科学連合 2016年大会
- (30) 地質環境長期安定性評価確証技術開発 (6)炭酸塩鉱物測定技術
渡邊隆広, 國分(齋藤)陽子, 村上裕晃, 横山立憲, 雨宮浩樹, 水野 崇, 久保田 満, 岩月輝希
2016年05月 @日本地球惑星科学連合 2016年大会
- (31) A Survey on New Standard Materials for U-Pb Dating of Carbonate Using LA-MC-ICP-MS.
Yokoyama, T., Saito-Kokubu, Y., Murakami, H., Watanabe, T., Hirata, T., Sakata, S., Danhara, T., Iwano,
H., Maruyama, S., Miyazaki, T., Senda, R., Chang, Q. and Kimura, J.-I.
2016年06月 @26th Goldschmidt International Conference 2016
- (32) High precision noble gas isotope measurement by NGX multi-collector noble gas mass spectrometer.
Tamura, H., Saito-Kokubu, Y. and Umeda, K.
2016年06月 @26th Goldschmidt International Conference 2016
- (33) 瀬戸層群下部陶土層の化学組成の地域間比較; 新第三紀の古風化条件復元に向けて
葉田野 希, 吉田孝紀, 笹尾英嗣, 久保田 満, 足立佳子
2016年09月 @日本地質学会第123年学術大会
- (34) EPMAを用いた東海層群土岐砂礫層の重鉱物の存在比・化学組成と後背地の解明
清水麻由子, 佐野直美, 安江健一, 柴田健二, 丹羽正和, 鈴木和博
2016年09月 @日本地質学会第123年学術大会
- (35) X線分析顕微鏡および画像処理・解析ソフトウェアを用いたモード測定
植木忠正, 丹羽正和
2016年09月 @日本地質学会第123年学術大会
- (36) カソードルミネッセンスを用いた炭酸塩鉱物の成長構造の把握
村上裕晃, 國分(齋藤)陽子, 横山立憲, 渡邊隆広, 湯口貴史, 藤川将之, 西山忠男
2016年09月 @日本鉱物科学会 2016年年会
- (37) 電子スピン共鳴法を用いた後背地解析技術の研究
安江健一, 徳安佳代子, 小松哲也, 堀内泰治, 清水麻由子, 丹羽正和
2016年09月 @日本地質学会第123年学術大会

- (38) 日本列島における測地・地質学的ひずみ速度の推定
渡部 豪, 浅森浩一
2016年10月 @日本測地学会第126回講演会
- (39) Paleoweathering condition in middle Miocene to early Pliocene period in Japanese Island; From paleopedology and chemistry of muddy sediments.
Hatano, N., Yoshida, K., Sasao, E., Kubota, M. and Adachi, Y.
2016年12月 @ American Geophysical Union 2016 Fall Meeting (AGU 2016)
- (40) Strain budget accompanied with the 2016 Kumamoto earthquakes inferred from geodetic and geological data.
Watanabe, T., Asamori, K. and Umeda, K.
2016年12月 @ American Geophysical Union 2016 Fall Meeting (AGU 2016)
- (41) 堆積物および基盤岩における石英の電子スピン共鳴信号特性信号の特徴
西村周作, 安江健一, 徳安佳代子, 斗澤皓正, 堀内泰治, 小松哲也
2017年01月 @第1回QST高崎シンポジウム
- (42) EPMAを用いた重鉍物の存在比・化学組成分析による後背地解析の試み
: 中部日本・屏風山断層の例
清水麻由子, 佐野直美, 植木忠正, 安江健一, 丹羽正和, 鈴木和博
2017年05月 @JpGU-AGU Joint Meeting 2017
- (43) 日本列島における地質学的ひずみ速度の推定
渡部 豪, 浅森浩一
2017年05月 @JpGU-AGU Joint Meeting 2017
- (44) 花崗岩地域における地下水の長期変遷に関わる地球化学解析
村上裕晃, 渡邊隆広, 岩月輝希
2017年05月 @JpGU-AGU Joint Meeting 2017
- (45) 地質環境長期安定性評価確証技術開発
(1)地質環境長期変動モデル構築に関する不確実性の抽出・分析
松岡稔幸, 尾上博則, 小松哲也, 安江健一, 岩月輝希, 竹内竜史, 加藤智子, 笹尾英嗣
2017年09月 @日本原子力学会 2017年秋の大会
- (46) 地質環境長期安定性評価確証技術開発
(2)地下水流動状態の長期的な変動性評価における不確実性の影響分析
尾上博則, 松岡稔幸, 小松哲也, 安江健一, 岩月輝希, 竹内竜史, 加藤智子, 笹尾英嗣
2017年09月 @日本原子力学会 2017年秋の大会

- (47) LA-ICP 質量分析法による炭酸塩鉱物の U-Pb 年代測定のための標準試料の探求
横山立憲、國分（齋藤）陽子、三ツ口丈裕、村上裕晃、平田岳史、坂田周平、檀原 徹、岩野英樹、丸山誠史、常 青、宮崎 隆、木村純一
2017 年 09 月 @日本地球化学会第 64 回年会
- (48) 地質環境長期安定性評価確証技術開発—「地質環境長期変動モデル」の概要—
石丸恒存、安江健一、尾上博則、松岡稔幸、小松哲也、岩月輝希、竹内竜史、加藤智子、笹尾英嗣
2017 年 09 月 @日本地質学会第 124 年学術大会
- (49) 後背地解析を目的とした EPMA による重鉱物の高速定量分析
清水麻由子、佐野直美、植木忠正、代永佑輔、丹羽正和
2017 年 09 月 @日本地質学会第 124 年学術大会
- (50) 山地の発達過程を把握するための後背地解析技術
丹羽正和、清水麻由子、安江健一、西村周作、雨宮浩樹、植木忠正、堀内泰治
2017 年 09 月 @日本地質学会第 124 年学術大会
- (51) 岩石・鉱物学的手法を用いた後背地解析指標の検討
植木忠正、清水麻由子、佐野直美、丹羽正和
2017 年 09 月 @日本地質学会第 124 年学術大会
- (52) Resolution of small neon isotope anomaly in helium rich gas samples from Kii peninsula, Japan by a NGX multi-collector noble gas mass spectrometer.
Tamura, H., Saito-Kokubu, Y., Umeda, K.
2017 年 09 月 @International conference on gas geochemistry 2017
- (53) 九州南部せん断帯における GNSS 観測
渡部 豪、雑賀 敦、浅森浩一
2017 年 10 月@日本測地学会第 128 回講演会
- (54) GNSS 稠密観測から推定される九州南部せん断帯の地殻変動
渡部 豪、雑賀 敦、浅森浩一
2017 年 10 月@日本地震学会 2017 年年度秋季大会
- (55) U-Pb dating of calcium carbonate using LA-MC-ICPMS.
Yokoyama, T., Saito-Kokubu, Y., Mitsuguchi, T., Murakami H., Hirata, T., Sakata, S., Danhara, T., Iwano, H., Maruyama, S., Miyazaki, T., Chang, Q. and Kimura, J.
2017 年 11 月@7th Asia-Pacific Winter Conference on Plasma Spectrochemistry
- (56) Identification of provenance rocks based on EPMA analyses of heavy minerals.
Shimizu, M., Sano, N., Ueki, T., Yonaga, Y., Yasue, K. and Niwa, M.
2017 年 12 月@American Geophysical Union 2017 Fall Meeting (AGU 2017)

(57) 北海道幌延地域の段丘堆積物における石英の OSL 及び ESR 信号の特徴

西村周作, 斗澤皓正, 丹羽正和

2018 年 02 月 @ ESR 応用計測研究会, ルミネッセンス年代測定研究会,
日本フィッション・トラック研究会 2017 年度合同研究発表会

2.3 その他

(1) 炭酸塩鉱物の局所領域年代測定に関するワークショップ

2017 年 12 月