

地層処分技術に関する研究開発報告会

— 第3期中長期目標期間の成果取りまとめ(CoolRepR4)について —

地質環境の長期安定性研究

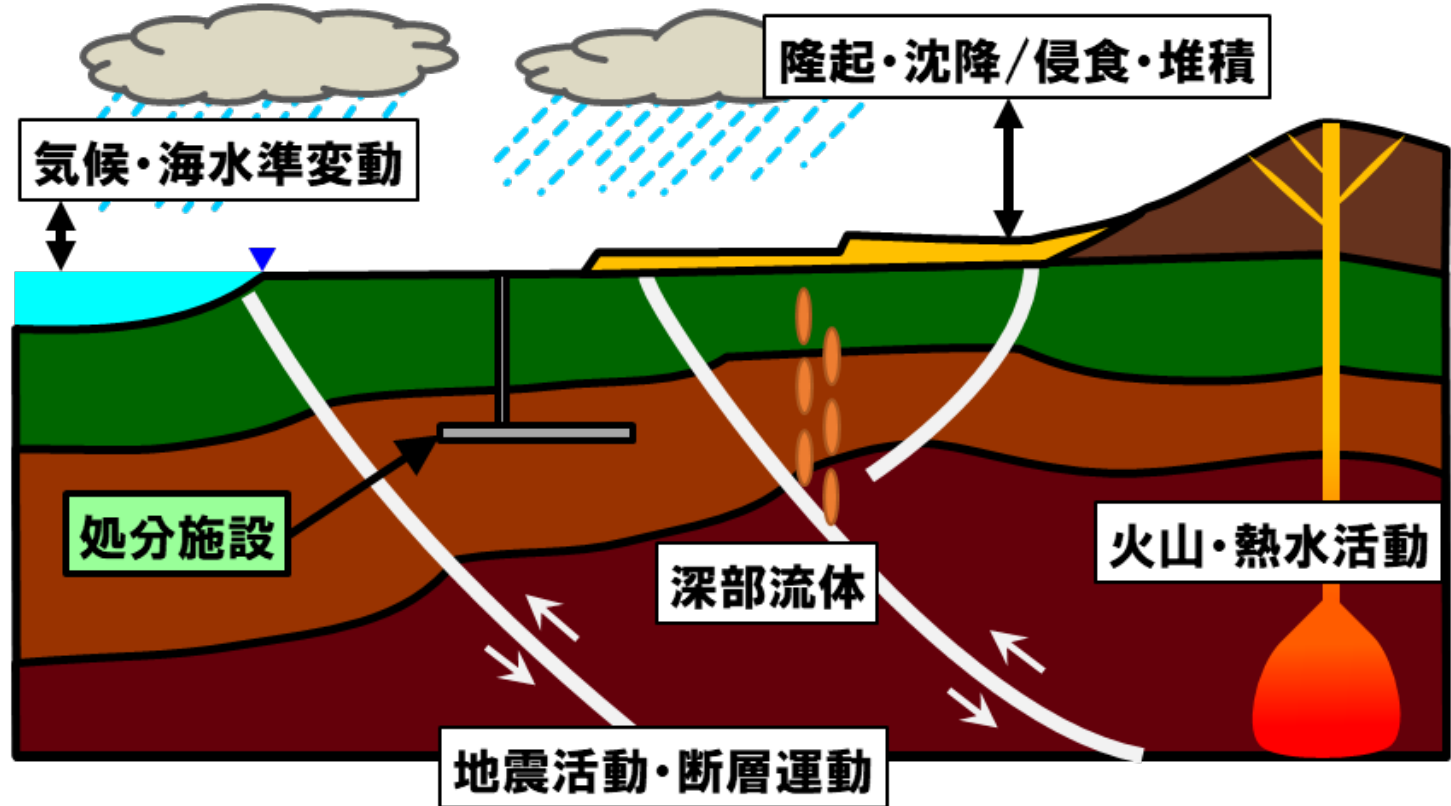
2022年9月30日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
核燃料・バックエンド研究開発部門
東濃地科学センター 地層科学研究部

丹羽 正和

地質環境の長期安定性に関する研究

【地層処分において考慮すべき自然現象】



地域によって様々な地質環境(火山や活断層の分布、地下地質等)を有する我が国において、地層処分サイト選定における自然現象の影響評価に適切に対応できるよう、幅広い調査・評価技術を整備しておく必要がある。

第3期中長期計画と研究開発課題

【第3期中長期計画】

自然現象に伴う地質環境の変化を予測・評価する技術を、地球年代学に係る最先端の施設・設備も活用しつつ整備する。

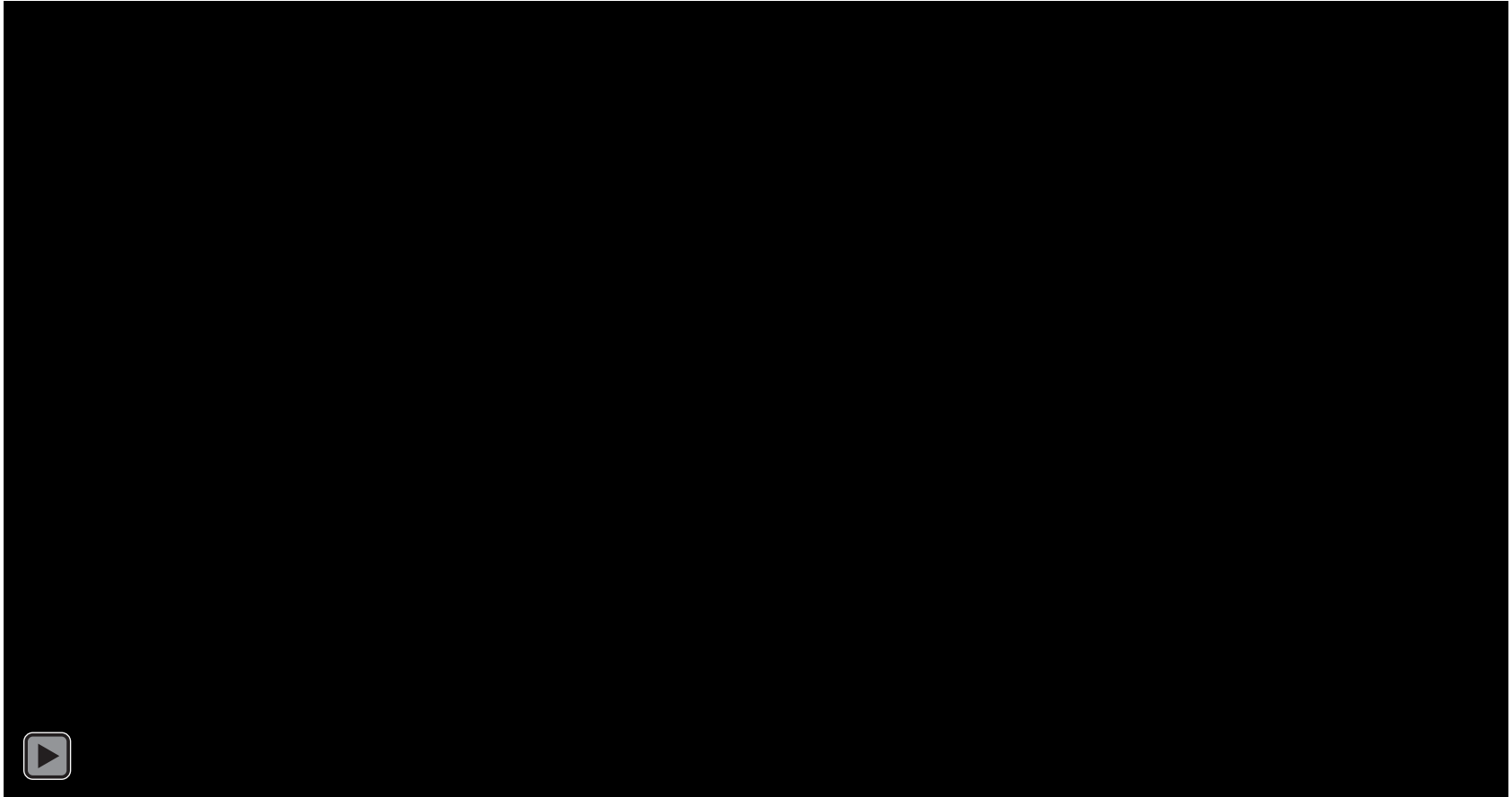
- ①調査技術の開発・体系化
- ②長期予測・影響評価モデルの開発
- ③年代測定技術の開発

【具体的な研究開発課題(CoolRepR4における記載内容)】

- 1) 変動地形が明瞭でない活断層等に係る調査技術
- 2) 地殻内の震源断層等に係る調査技術
- 3) 地下で遭遇した断層の活動性に係る調査技術
- 4) 内陸部の隆起・侵食速度の算出に係る調査技術
- 5) 年代測定技術の開発

第3期中長期目標期間の成果ダイジェスト

CoolRepR4



※このページでご紹介した内容は、下記のリンクからもご参照頂けます。

[①CoolRepR4](#) [②成果ダイジェスト](#) [③カーネル\(2.1.1\)](#) [④成果情報](#)

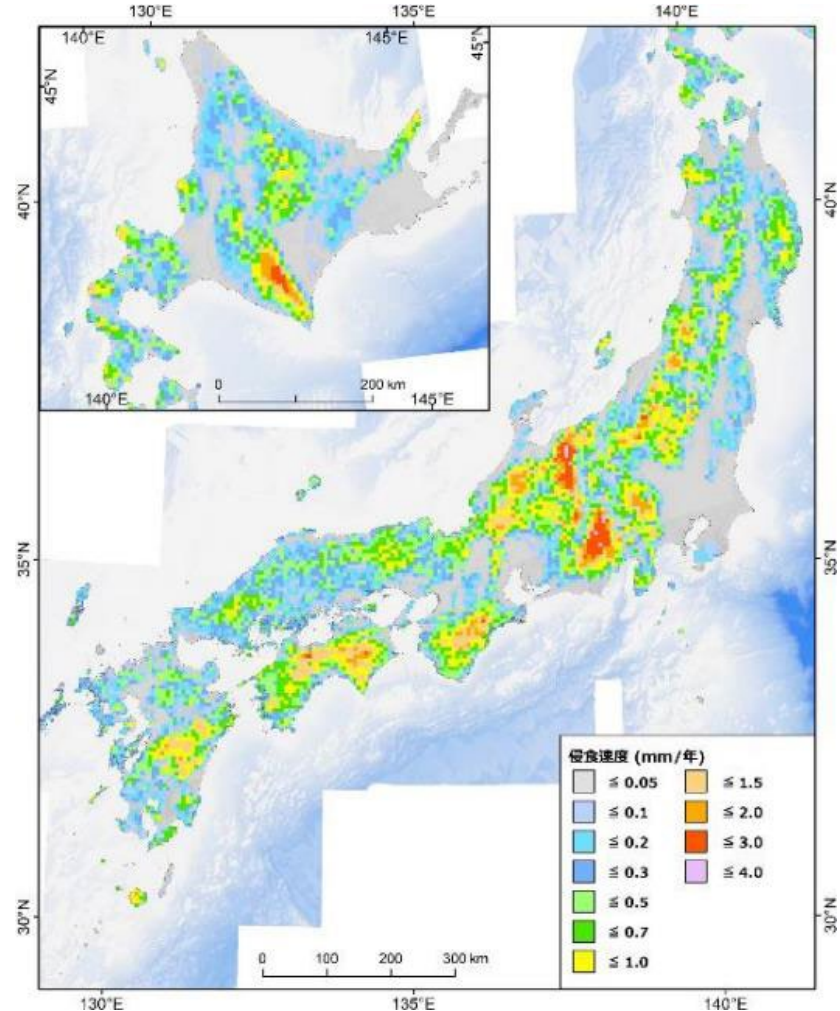
成果の反映

➤ 文献調査

- ✓ 第2次取りまとめ以降の科学的知見の拡充(JAEAが蓄積してきた成果も含む)を取り込んだ**日本全国レベルでのマップの更新**

➤ 概要～精密調査

- ✓ 最新の科学的知見を取り入れた調査技術の提示(査読付論文等による品質の確保)
- ✓ 体系化された手法として提示(調査フロー、マニュアル等)



【第2次取りまとめ時の情報(藤原ほか, 1999)】
数十年間の侵食速度分布図(約6 kmメッシュ)
ダム堆砂量に基づく短い時間のデータのみ

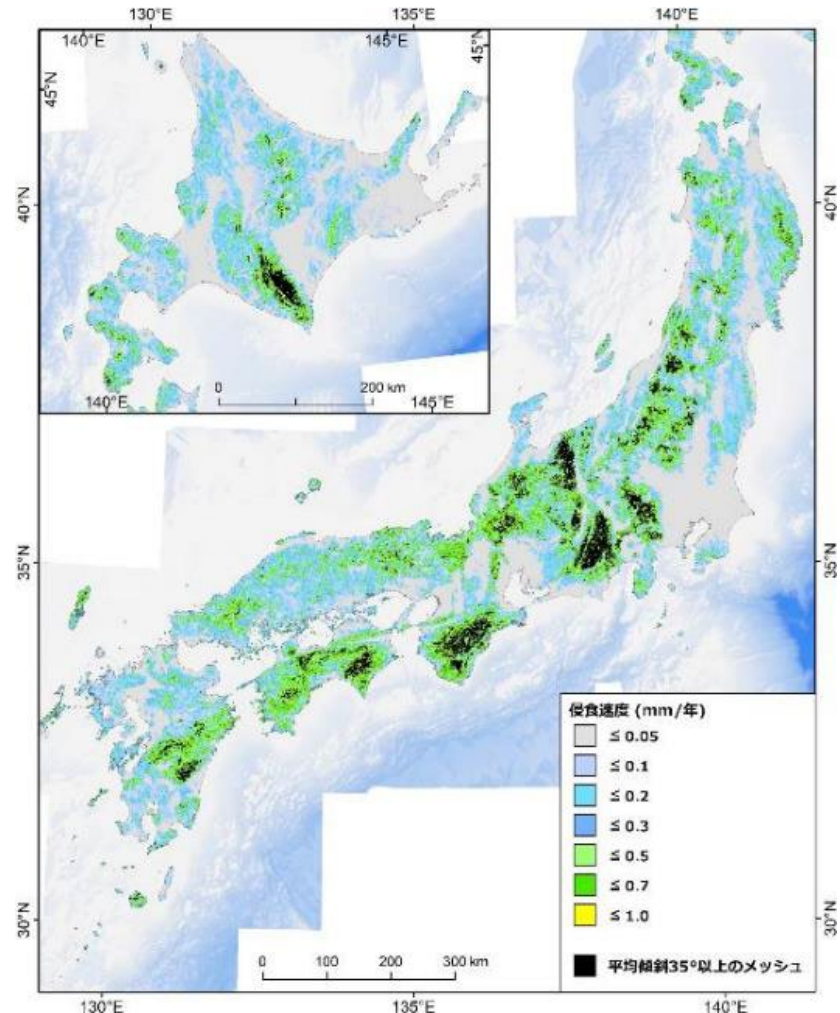
成果の反映

➤ 文献調査

- ✓ 第2次取りまとめ以降の科学的知見の拡充(JAEAが蓄積してきた成果も含む)を取り込んだ**日本全国レベルでのマップの更新**

➤ 概要～精密調査

- ✓ 最新の科学的知見を取り入れた調査技術の提示(査読付論文等による品質の確保)
- ✓ 体系化された手法として提示(調査フロー、マニュアル等)



【新たに更新された情報】

数百～1万年間の侵食速度分布図(約1 kmメッシュ)
宇宙線生成核種・熱年代のより長い時間のデータも反映

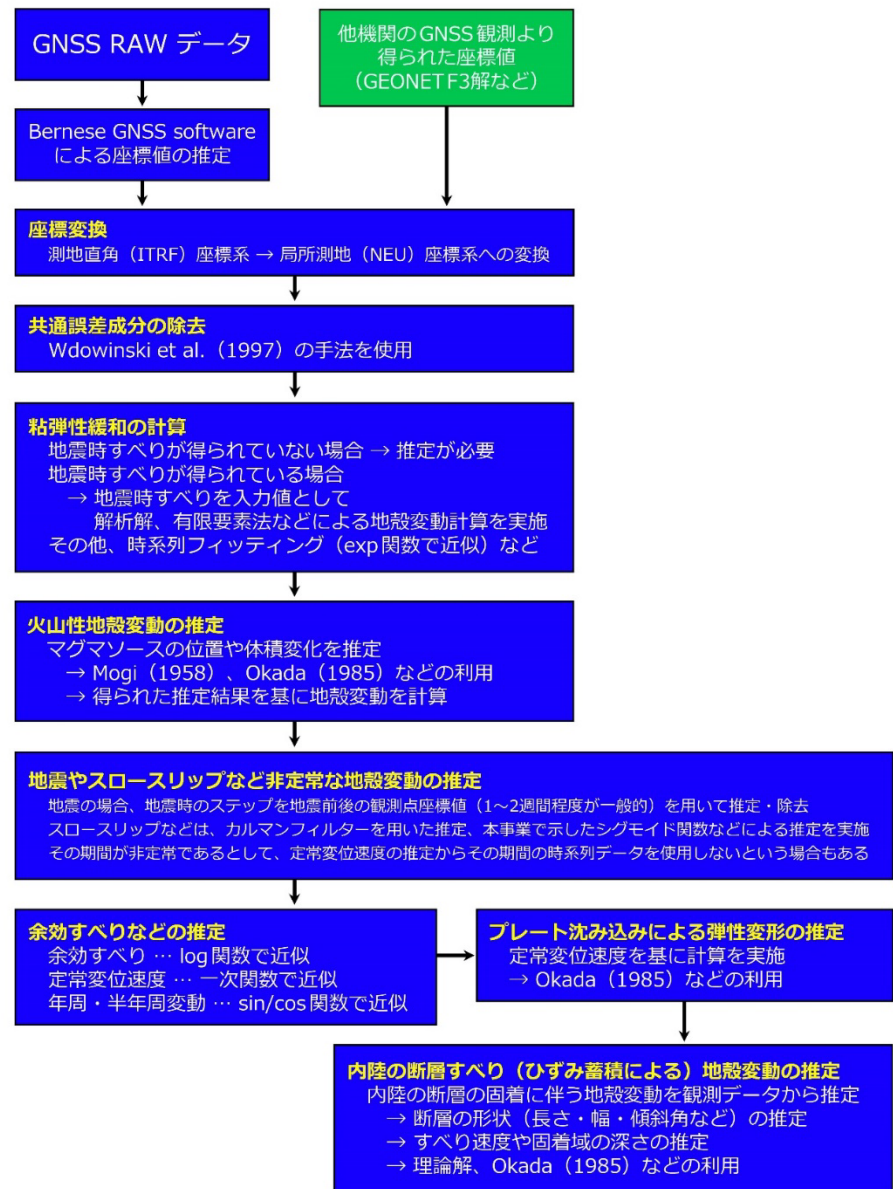
成果の反映

文献調査

- 第2次取りまとめ以降の科学的知見の拡充(JAEAが蓄積してきた成果も含む)を取り込んだ日本全国レベルでのマップの更新

概要～精密調査

- 最新の科学的知見を取り入れた調査技術の提示(査読付論文等による品質の確保)
- 体系化された手法として提示(調査フロー、マニュアル等)



調査フローの例(GNSSデータ解析の場合)

成果の反映

得られた成果については、一般の方へも分かりやすく提示し、処分事業の国民的な理解促進に資することも重要。

⇒**顕著な成果のプレスリリースや地域の皆様への成果紹介(サイエンスカフェ等)を積極的に実施するとともに、博物館等の企画展や招待講演にも協力した。**



岐阜県土岐市でのサイエンスカフェ



博物館企画展示
(静岡県立ふじのくに地球環境史
ミュージアム)

主要な成果の概要

CoolRepR4における項目

- 1) 変動地形が明瞭でない活断層等に係る調査技術
- 2) 地殻内の震源断層等に係る調査技術
- 3) 地下で遭遇した断層の活動性に係る調査技術
- 4) 内陸部の隆起・侵食速度の算出に係る調査技術
- 5) 年代測定技術の開発

1) 変動地形が明瞭でない活断層等に係る調査技術

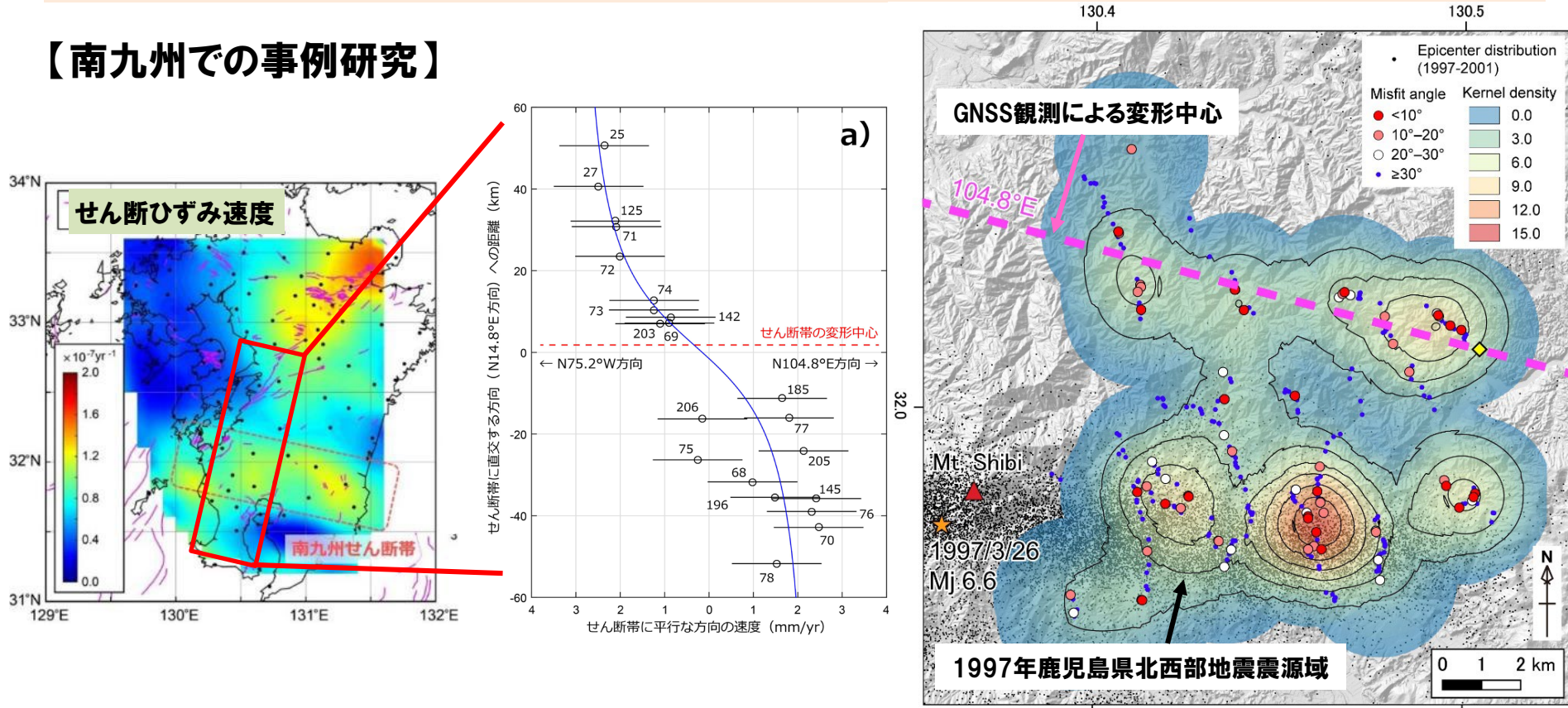
測地学的手法(GNSS観測)、地震学的手法(震源メカニズム解析)、地形解析、地表踏査(小断層解析等)、シミュレーションを組み合わせた事例研究を通じ、地形的に不明瞭な活構造を把握する手法を提示した。



1) 変動地形が明瞭でない活断層等に係る調査技術

測地学的手法(GNSS観測)、地震学的手法(震源メカニズム解析)、地形解析、地表踏査(小断層解析等)、シミュレーションを組み合わせた事例研究を通じ、地形的に不明瞭な活構造を把握する手法を提示した。

【南九州での事例研究】



(左)GNSS観測に基づく左ずれせん断帯の抽出

(右)震源メカニズム解析から計算したせん断応力と地表踏査で検出した小断層の運動方向との角度差のカーネル密度分布

1) 変動地形が明瞭でない活断層等に係る調査技術

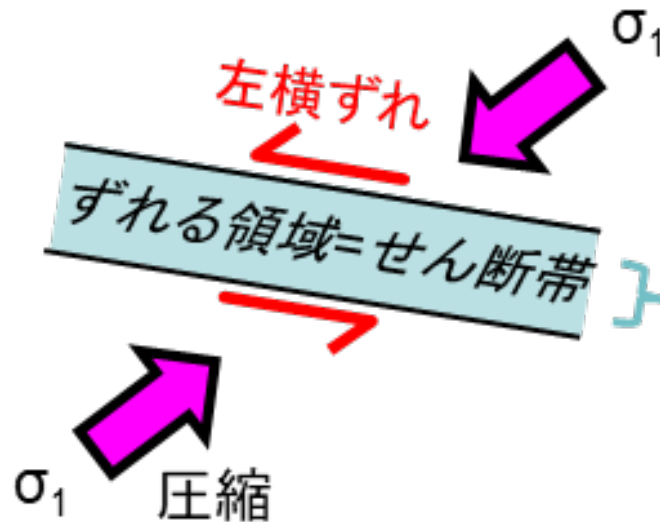
【現場作業(小断層解析)のイメージ】



震源メカニズム解析

+

小断層解析



せん断帯の応力場によって変位した断層を含む範囲

1) 変動地形が明瞭でない活断層等に係る調査技術



本成果の一部は受賞講演(日本応用地質学会令和2年度研究発表会優秀講演者賞)、招待講演(JpGU2021「変動帯ダイナミクス」)として注目を頂いた。現在、手法の更なる信頼性向上に向けた技術開発を継続中。

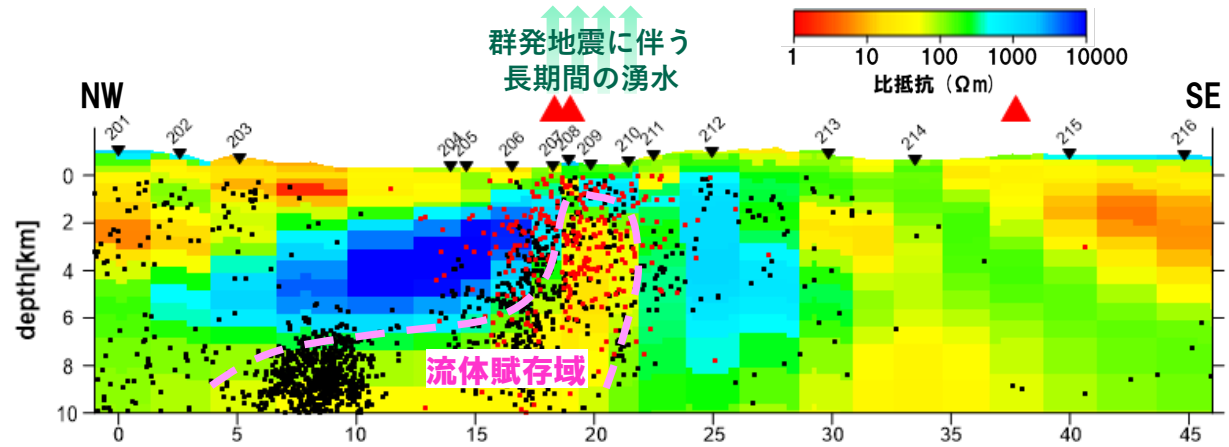
※このページでご紹介した内容は、下記のリンクからもご参照頂けます。

[①カーネル\(2.1.1\)](#)

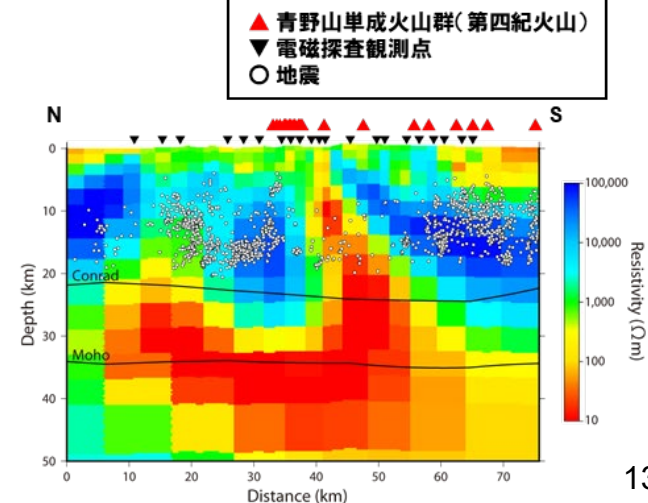
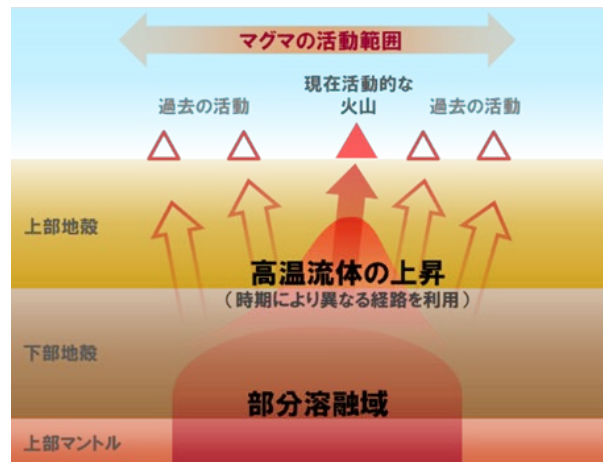
2) 地殻内の震源断層等に係る調査技術

地殻内の震源断層やマグマ、深部流体の分布を明らかにする上で有効な手法となる地震波トモグラフィや電磁探査による調査・解析技術の高精度化を図るとともに、多数の事例研究の実施を通じ、主に概要調査に適用するための手法の妥当性を示した。

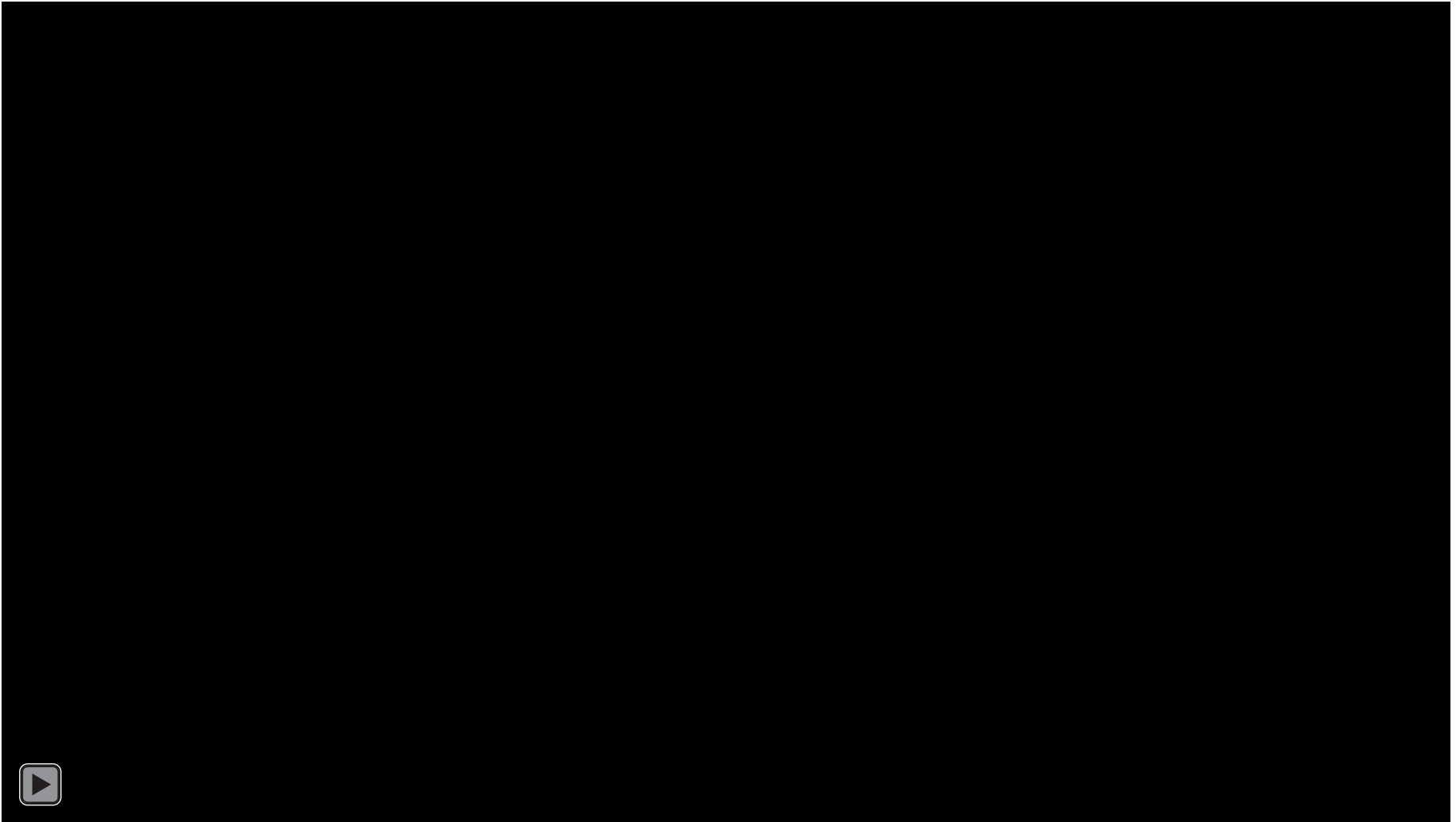
地震に伴い長期間の異常湧水が観測された長野県松代群発地震発生域を事例対象とした電磁探査の例



マグマの活動範囲に関する概念モデル(左)と電磁探査の例(右)



2) 地殻内の震源断層等に係る調査技術



※このページでご紹介した内容は、下記のリンクからもご参照頂けます。

[①カーネル\(2.1.2\)](#)

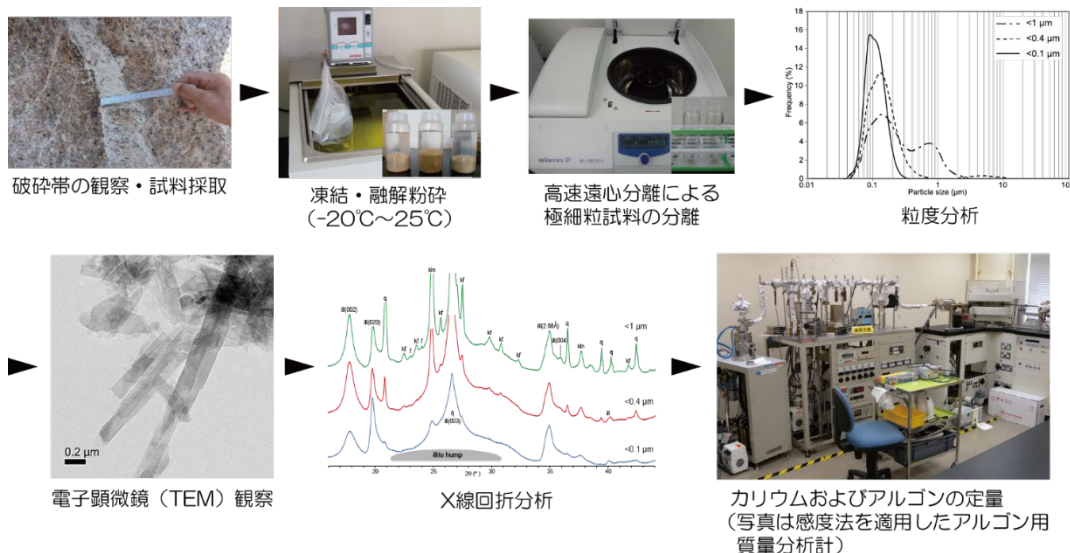
3) 地下で遭遇した断層の活動性に係る調査技術

ボーリングや坑道掘削中に新たに遭遇した断層の評価として、破砕帯物質の年代測定手法(K-Ar法、U-Pb法、ルミネセンス法、フィッション・トラック法等)の開発や、化学組成データ等の多変量解析に基づく評価手法の開発を進めた。

破砕帯に含まれるイライト(粘土鉱物)のK-Ar年代測定を行うプロセス

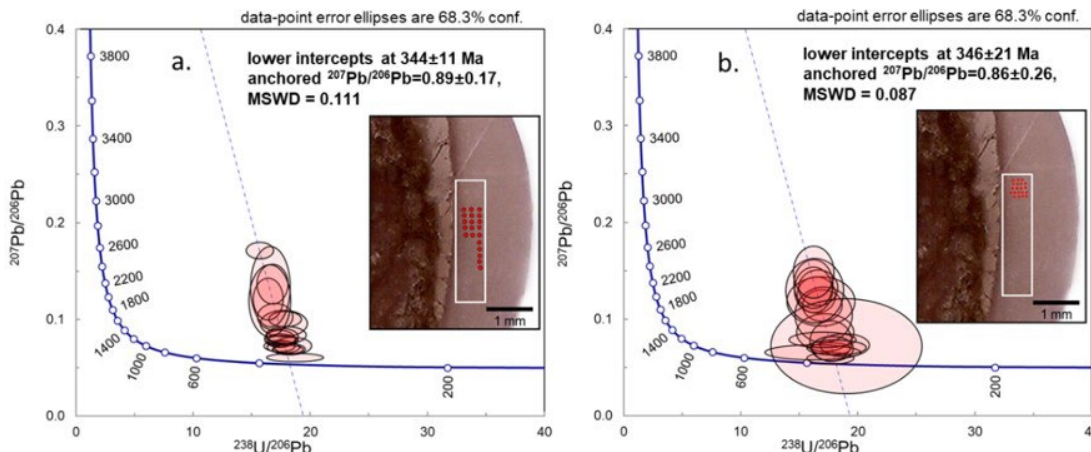
(高速増殖原型炉「もんじゅ」の敷地内破砕帯にも適用し、地質学的に古い断層であることを提示)

(Niwa et al., 2016, Clays and Clay Minerals)

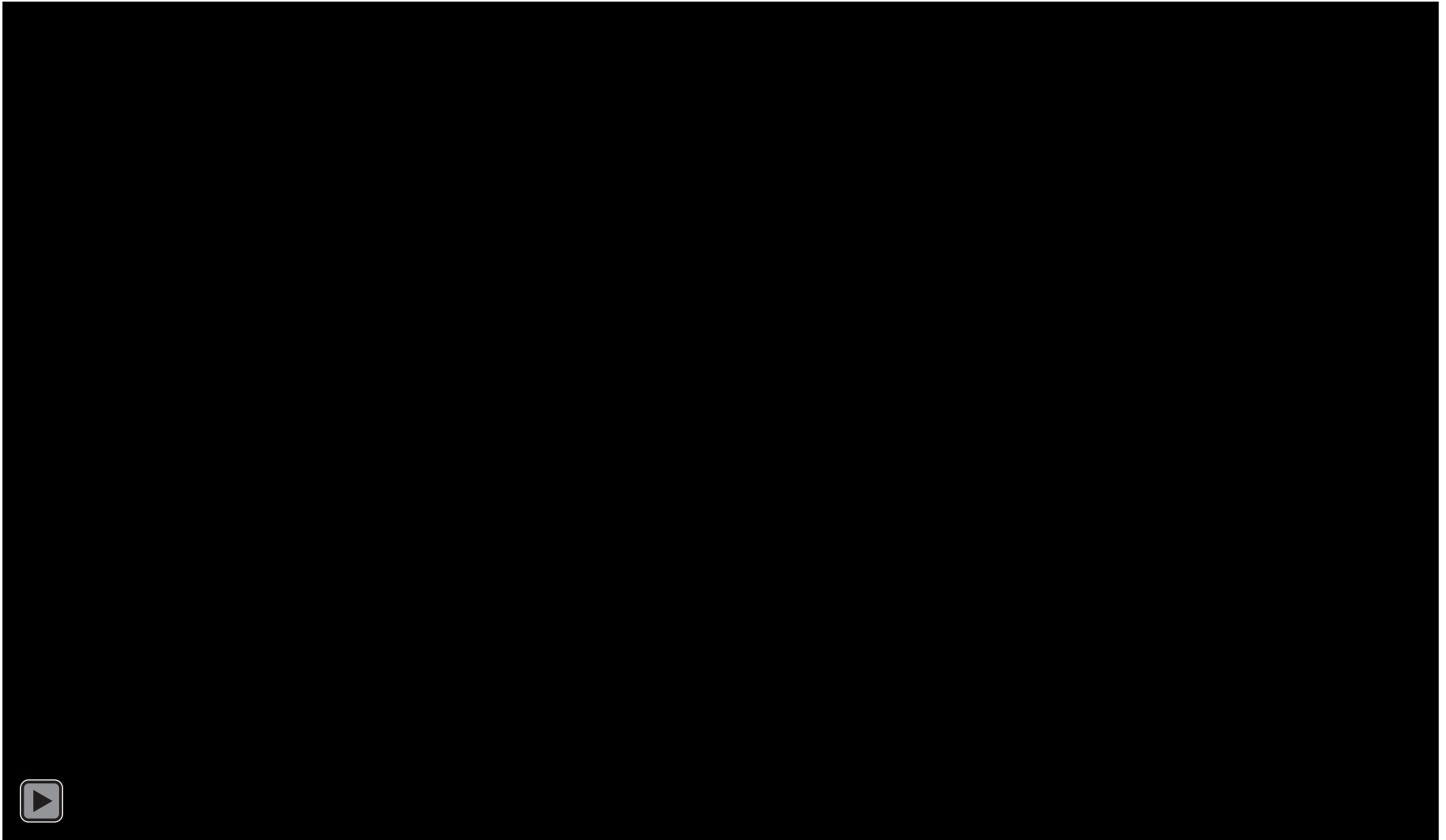


炭酸塩を対象とした微小領域でのU-Pb年代測定の例 (2018年11月プレス発表)

(Yokoyama et al., 2018, Geochemical Journal)



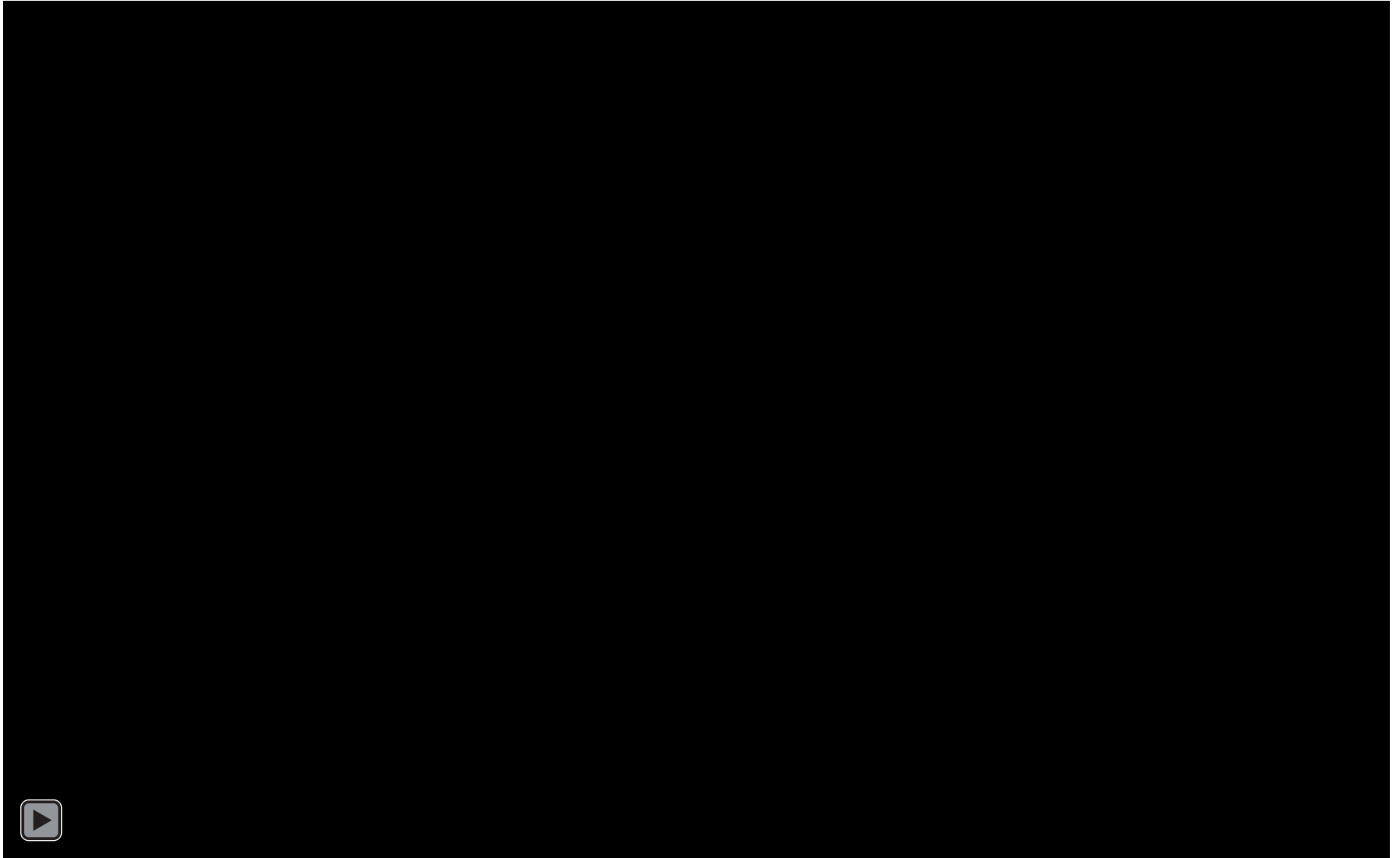
3) 地下で遭遇した断層の活動性に係る調査技術



※このページでご紹介した内容は、下記のリンクからもご参照頂けます。

[①カーネル\(2.1.3\)](#)

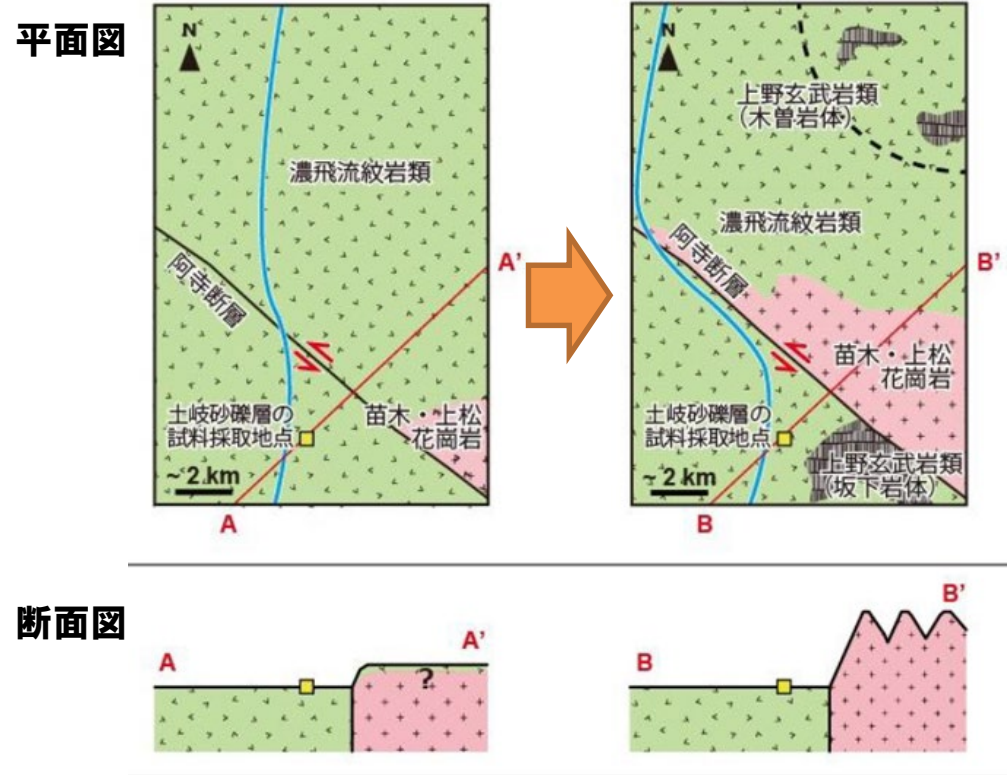
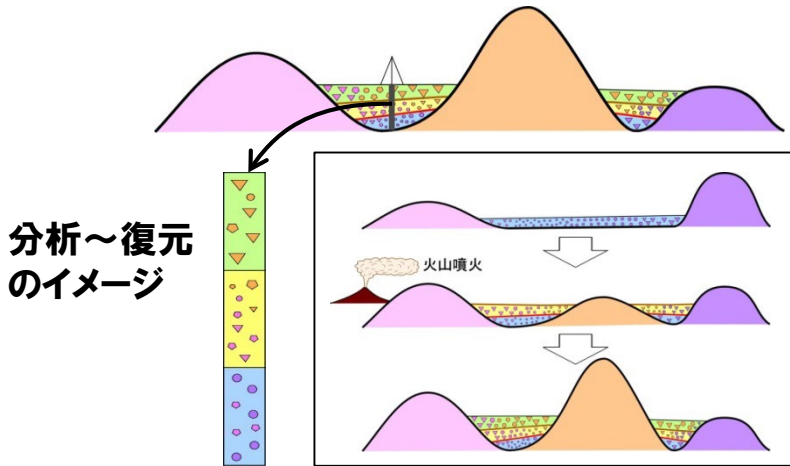
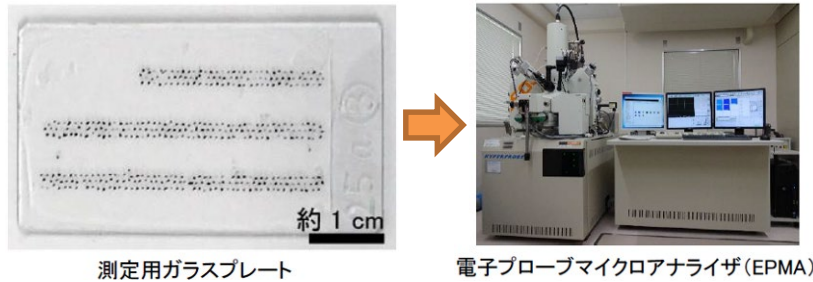
4) 内陸部の隆起・侵食速度の算出に係る調査技術



資源エネルギー庁からの受託事業「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」において作成した地質環境長期変遷モデルのアニメーション(一部)

4) 内陸部の隆起・侵食速度の算出に係る調査技術

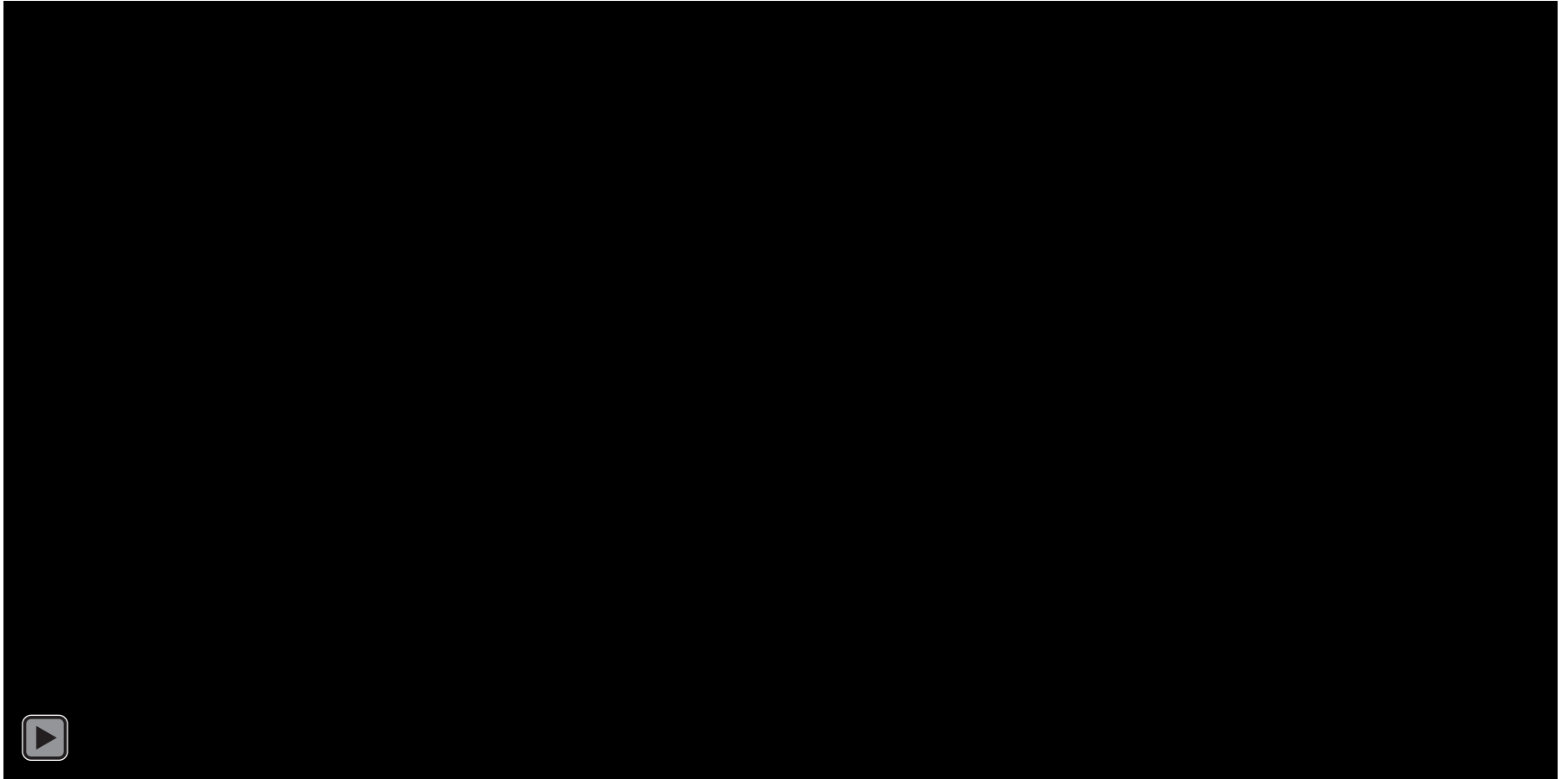
数十万年スケールでの長期的な広域地下水流動の変化に影響を及ぼす山地の発達過程を明らかにするための調査技術について、多様な地質環境に対して適用するための様々なアプローチ(後背地解析や熱年代学的解析等)で手法開発を進めた。



堆積物中の鉱物粒子の化学組成を大量かつ系統的に分析し、その変化から、山地の発達過程を復元した例 ([2019年3月プレス発表](#))

(Shimizu et al., 2019, Island Arc)

4) 内陸部の隆起・侵食速度の算出に係る調査技術



資源エネルギー庁からの受託事業「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」において作成した地質環境長期変遷モデルのアニメーション(<https://www.jaea.go.jp/04/tono/gsp/visualizations.html>)。

※このページでご紹介した内容は、下記のリンクからもご参照頂けます。

[①カーネル\(2.1.4\)](#)

5) 年代測定技術の開発

過去に発生した自然現象の活動時期やその変動の方向・速度を精度良く把握する上で不可欠な年代測定技術について、幅広い地質環境や時間スケールに対応するために多様な手法の開発を進めた。

対象施設	年代測定法	年代測定範囲(年前)							主な反映先	対象物質	実用化へのスケジュール
		10 ⁹	10 ⁸	10 ⁷	10 ⁶	10 ⁵	10 ⁴	10 ³			
加速器質量分析装置 (JAEA-AMS-TONO-5MV & 300kV)	¹⁴ C法							—	断層運動	地下水, 有機物	実用化済
	¹⁰ Be法			—	—				侵食速度	石英	実用化済
	²⁶ Al法			—	—				侵食速度	石英	実用化済
	³⁶ Cl法				—	—			地下水年代	地下水	試験中
	¹²⁹ I法			—	—	—			地下水年代	地下水	実用化済
希ガス質量分析装置	K-Ar法	...	—	—	—	—			断層運動	自生雲母粘土鉱物	実用化済
四重極型質量分析装置	(U-Th)/He法		...	—	—	...			侵食速度	アパタイト, ジルコン	実用化済
光ルミネッセンス測定装置	OSL法						...	—	断層運動	石英	実用化済
					...	—			隆起速度	長石	実用化済
電子スピン共鳴装置	ESR法			...	—	—	...		断層運動	石英	実用化済
										炭酸塩鉱物	試験中
高精度希ガス質量分析装置	希ガス法			—	—	—	—		地下水年代	地下水	実用化済
電子プローブマイクロアナライザ	CHIME法	—	—	...					後背地解析	モナサイト, ジルコン	実用化済
レーザーアブレーション誘導 結合プラズマ質量分析装置	U-Pb法	—	—	—	...				後背地解析	ジルコン	実用化済
		—	—	—	...				断層運動	炭酸塩鉱物	実用化済
フィッシュトラック自動計測装置	FT法		...	—	—	...			侵食速度	アパタイト, ジルコン	実用化済

東濃地科学センター 土岐地球年代学研究所で天然試料への適用試験を実施し実用化を進めた年代測定法の一覧

5) 年代測定技術の開発

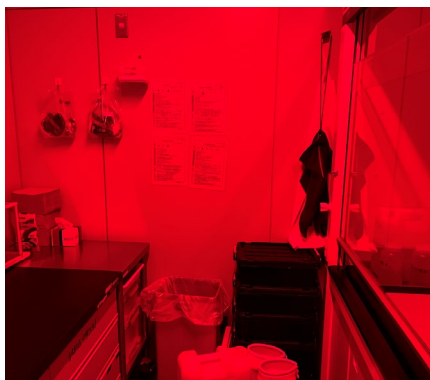
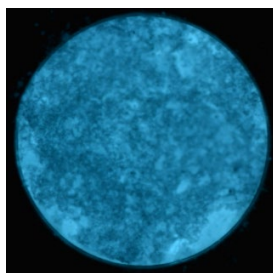
◆OSL熱年代

1000 m級のボーリングコアを用いた分析により、その場の隆起・侵食速度の推定が可能な新しい手法を開発

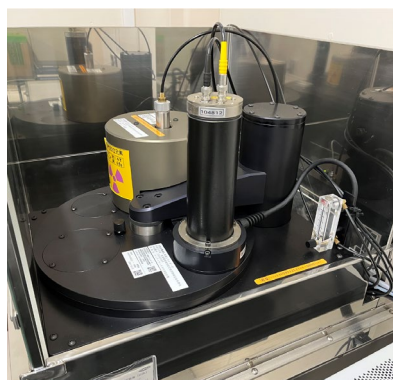
(Ogata et al., 2022, Earth and Planetary Science Letters)

従来はデータ取得が困難であった**侵食速度が遅い地域**に対しても適用性を確認

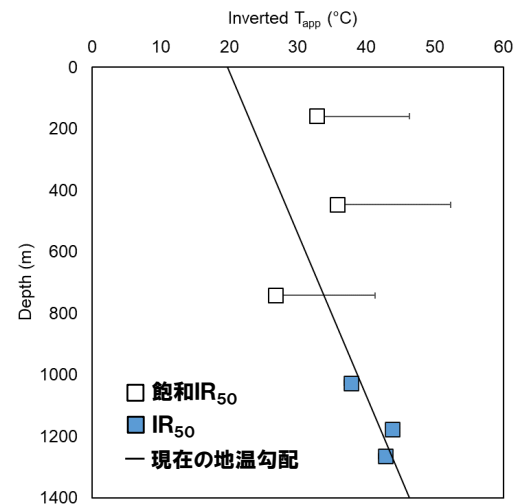
ルミネッセンス
(石英の場合)



赤色灯下で抽出した鉱物粒子にベータ線を照射して測定



【瑞浪のコアでの測定・解析事例】



コア深部の試料のOSL信号強度から推定される温度履歴が、現在の地温勾配とほぼ同じ
→最近約10万年以上、ほとんど侵食を受けていない

CoolRepR4では、[2.1.4「内陸部の隆起・侵食速度の算出に係る調査技術」](#)の項で説明

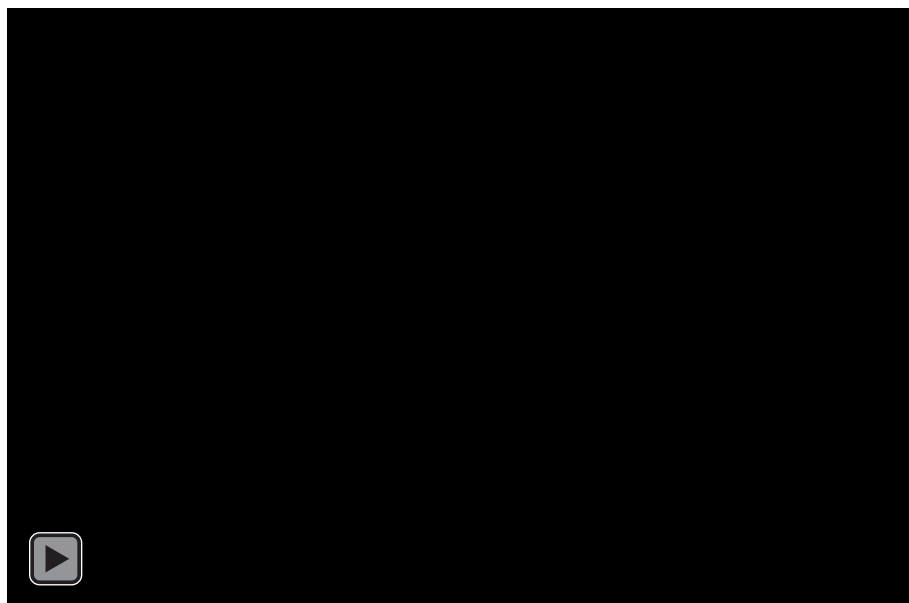
5) 年代測定技術の開発

◆U-Pb年代

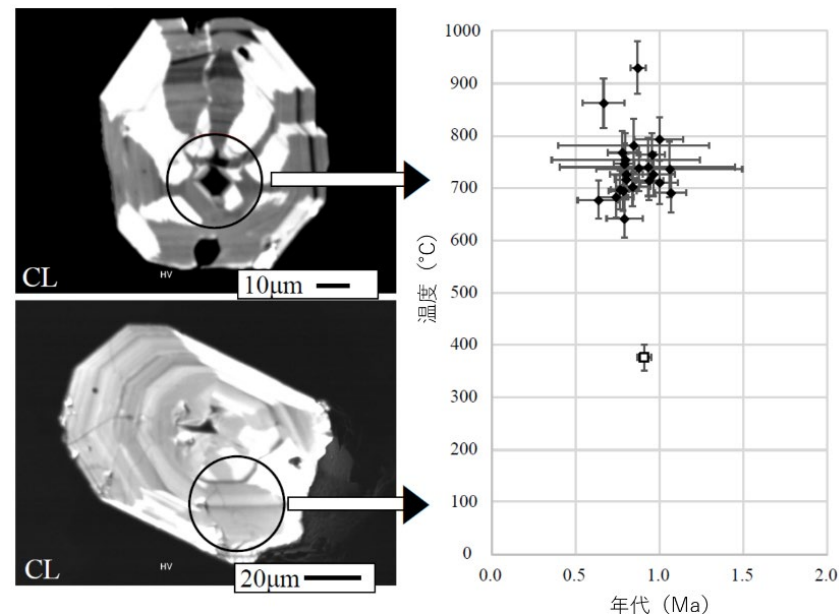
U-Pb年代測定と鉱物結晶化温度推定のためのチタン濃度測定をジルコンの微小領域局所分析で同時に行う手法を開発(2020年11月プレス発表)

(Yuguchi et al., 2020, Lithos)

火山活動(マグマの形成史)や隆起・侵食(山地の発達過程)に関する調査技術として反映可能



ジルコンにレーザー(径50 μm)を照射して分析する様子

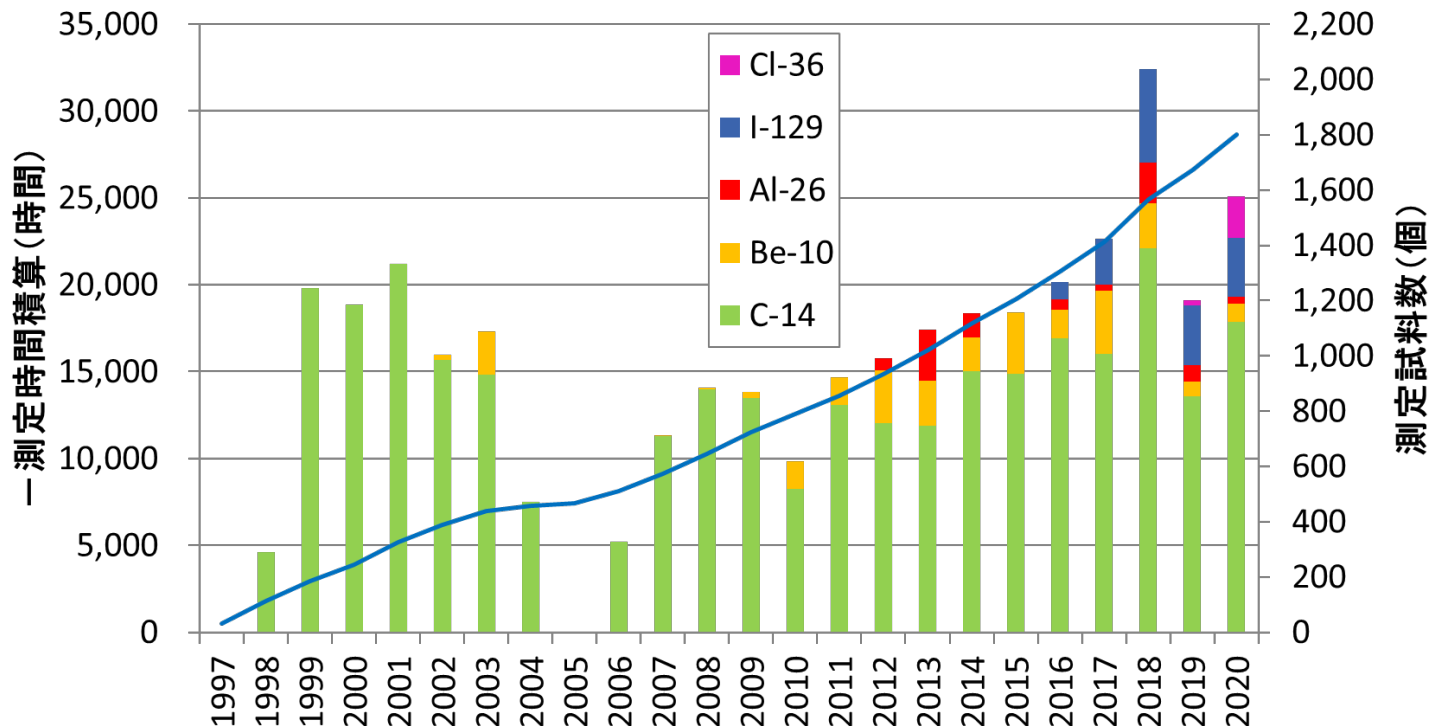


単一のジルコン粒子に対するU-Pb年代と温度の分析結果

5) 年代測定技術の開発

◆加速器質量分析

従来から実施中の放射性炭素年代(C-14)に加え、宇宙線生成核種(Be-10, Al-26; 隆起量・侵食量の推定に適用)、I-129(深部流体の判別等に適用)、Cl-36(地下水年代測定に適用)の開発を進めた。

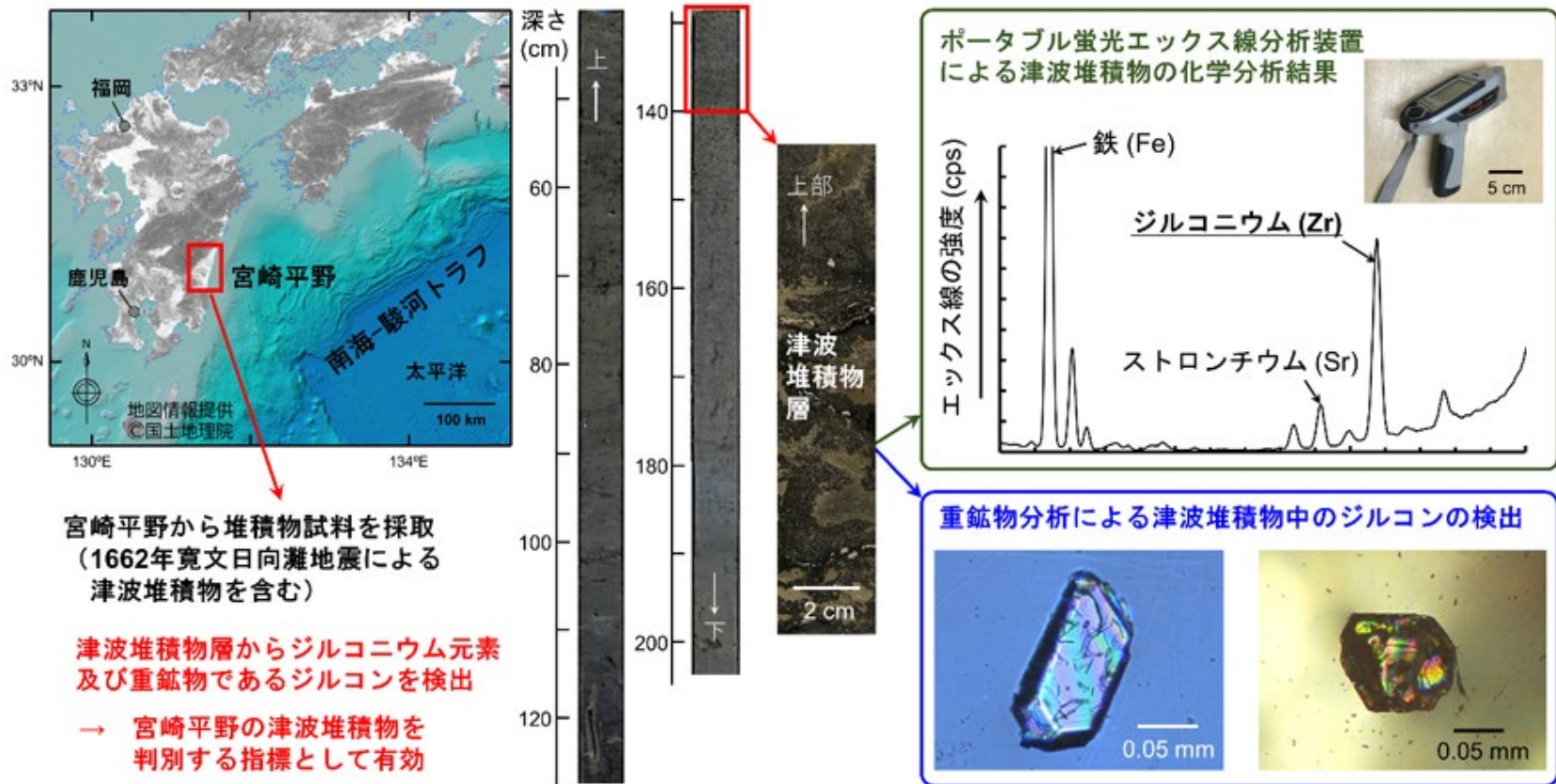


東濃地科学センターの加速器質量分析計(JAEA-AMS-TONO-5MV)の測定時間の積算と各年度の測定試料数(CoolRepR4(カーネル2.1.5)に掲載)

5) 年代測定技術の開発

◆分析試料前処理手法の高度化

年代測定の精度・信頼性の向上や効率化を目的として、様々なアプローチで試料の前処理手法や分析手法の高度化を進めた。



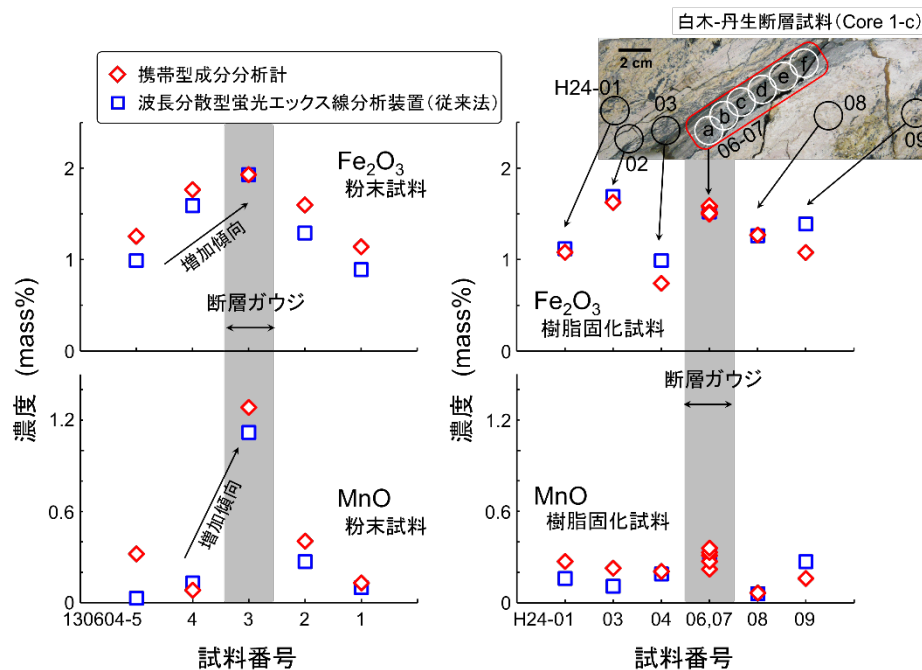
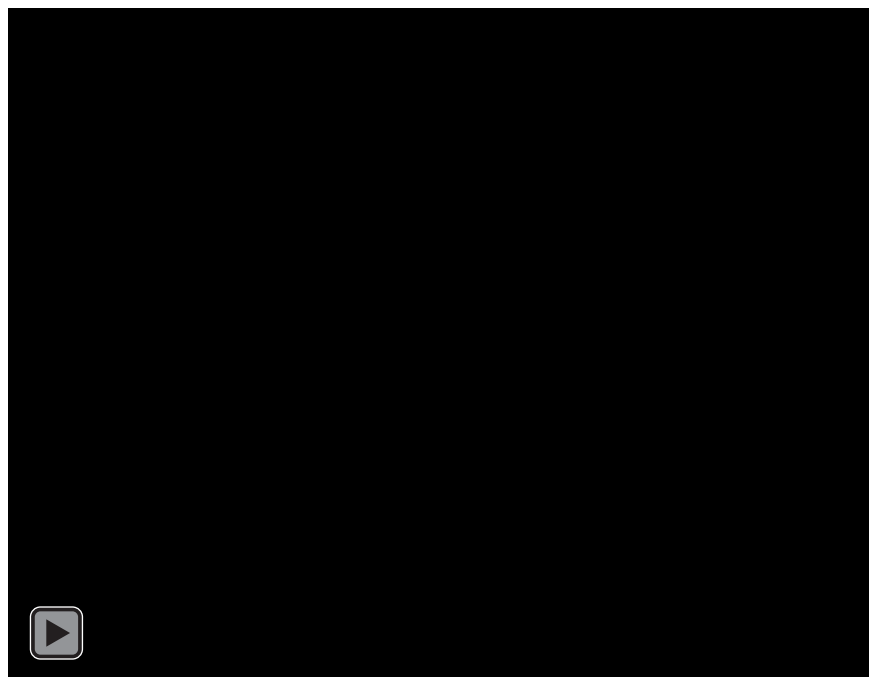
ポータブル蛍光X線分析装置を用いて効率化された分析手法に基づき津波堆積物の存在を示した例(2022年2月プレス発表)

(Watanabe et al., 2022, Marine Geology)

5) 年代測定技術の開発

◆分析試料前処理手法の高度化

年代測定の精度・信頼性の向上や効率化を目的として、様々なアプローチで試料の前処理手法や分析手法の高度化を進めた。



(左)ポータブル蛍光X線分析装置による津波堆積物や断層破碎帯のコア試料の分析の様子

(右)断層破碎帯のコア試料に対する分析結果の例([CoolRepR4 \(カーネル2.1.5\)](#)に掲載)

(Watanabe et al., 2021, Journal of Mineralogical and Petrological Sciences)

まとめ

【成果：コアメッセージ】

- 地層処分システムに影響をおよぼす活断層や隆起・侵食などの調査・評価技術について、調査手法の新規構築や研究事例の蓄積などにより高度化することができた。
- 10万年～100万年スケールでの地質試料の年代測定を可能にする編年技術を、高精度の放射年代測定法の研究開発やその他の年代測定法の実用化などにより高度化することができた。



第3期中長期目標期間における成果は、地層処分のサイト選定における調査計画の策定や、安全評価において考慮すべき事項の確認に貢献できる。

自然現象の影響は地層処分の信頼性確保において国民的な関心の高い、非常に重要な課題であり、今後も、概要～精密調査へ反映するための調査・評価技術の信頼性の向上を、最先端の科学的知見を取り入れつつ進めていく必要がある。