

平成29年度における個別研究課題の現状および今後の予定

② 地質環境の長期安定性に関する研究

平成30年3月13日

日本原子力研究開発機構
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

地層処分の安全確保の考え方と研究開発のフレーム



地質環境の長期安定性に関する研究(第3期中長期計画)

*一部、資源エネルギー庁委託事業として実施

① 調査技術の開発・体系化 => サイトの選定や安全性の検討に必要なデータ取得技術

①-1) 断層の活動性に係る調査技術

①-2) 地殻構造の高空間分解能イメージング技術*

①-3) 深部流体の分布に関する調査技術

② 長期予測・影響評価モデルの開発 => 変動シナリオに基づく安全評価に必要な技術

②-1) 稀頻度自然現象による地質環境への影響の評価技術

②-2) 時間スケールに応じた地圏環境変動の予測技術*

③ 年代測定技術の開発 => ①, ②の信頼性を向上するための技術基盤

③-1) ウラン系列放射年代測定法の実用化*

技術の高度化・標準化は
極めて重要かつ基盤的な要素技術

③-2) 光ルミネッセンス(OSL)年代測定法の実用化*

③-3) アルミニウム-26年代測定法, 塩素-36年代測定法の実用化*

③-4) 高分解能のテフラ同定手法の開発*

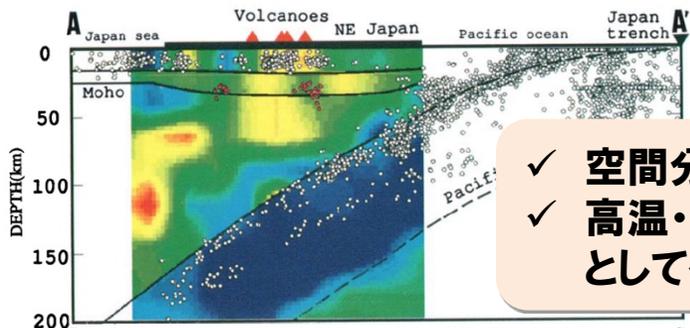
③-5) 地質試料を対象とした年代測定法及び化学分析手法の高度化

地殻構造の高空間分解イメージング技術

(地球物理・化学的手法による地下深部の震源断層やマグマ・深部流体の推定)

地殻構造の推定手法として汎用性の高い複数の手法を用いることで、地殻～マントル最上部におけるマグマや深部流体の存否・分布を総合的に推定する事例を蓄積

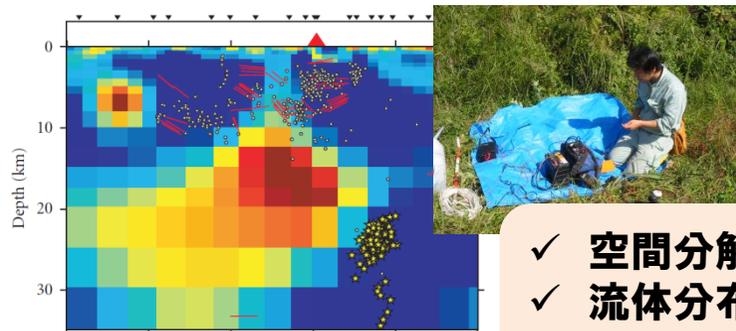
地震波トモグラフィ



- ✓ 空間分解能: 20-30 km
- ✓ 高温・流体分布域を低速度体としてイメージ

Zhao et al. (1992)

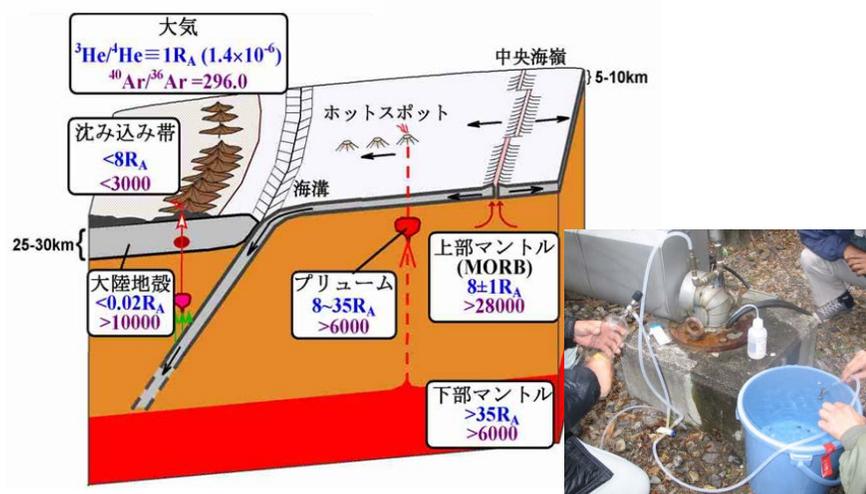
地磁気・地電流(MT)法



- ✓ 空間分解能: ~10 km
- ✓ 流体分布域を低比抵抗体としてイメージ

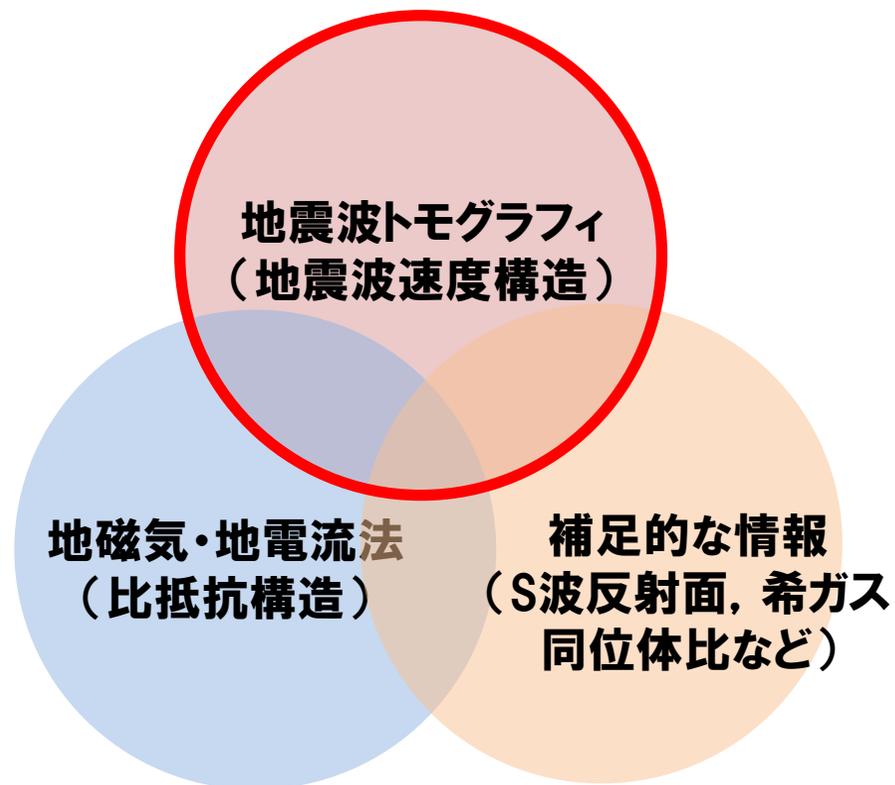
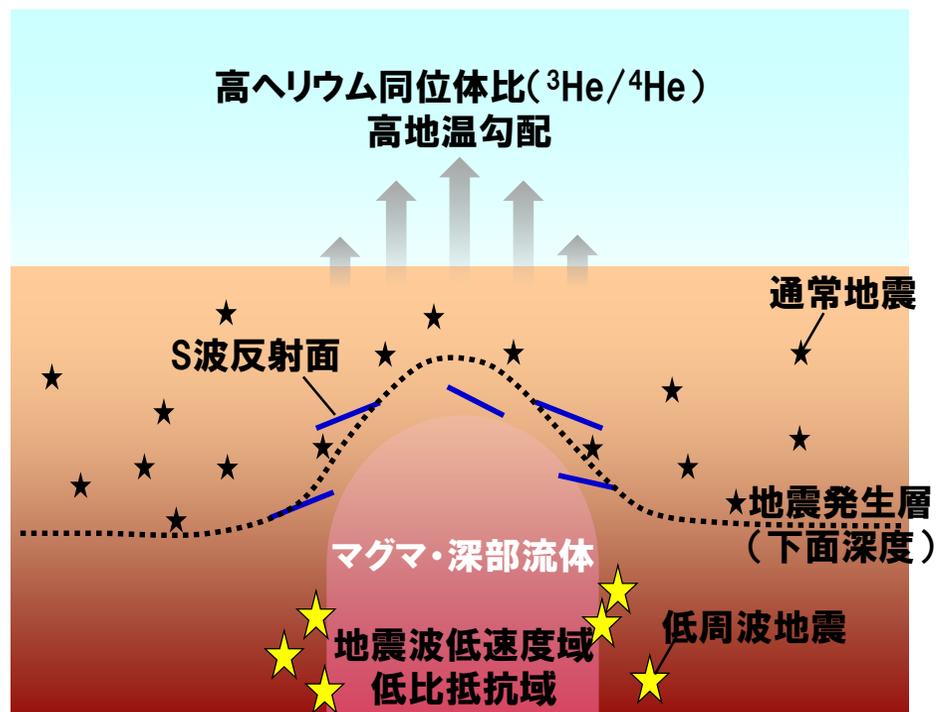
Asamori et al. (2010)

ヘリウム同位体(³He/⁴He)比



- ✓ 地下水溶存ガス・遊離ガスの³He/⁴Heを測定
- ✓ 大気 ($R_A = 1.4 \times 10^{-6}$)・地殻 ($0.02R_A$)・マントル ($<8R_A$) で大きく異なる値
- ✓ 高ヘリウム同位体比はマントル起源ヘリウムの供給を示唆

マグマ・深部流体の把握に向けたアプローチ



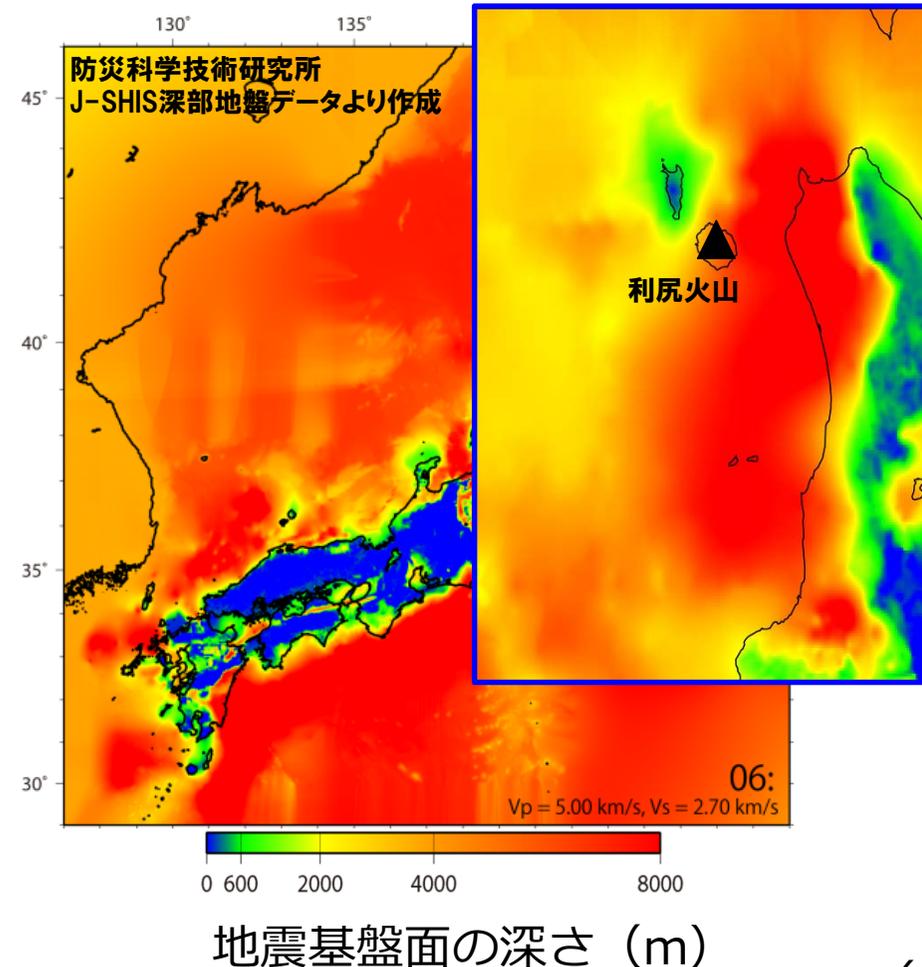
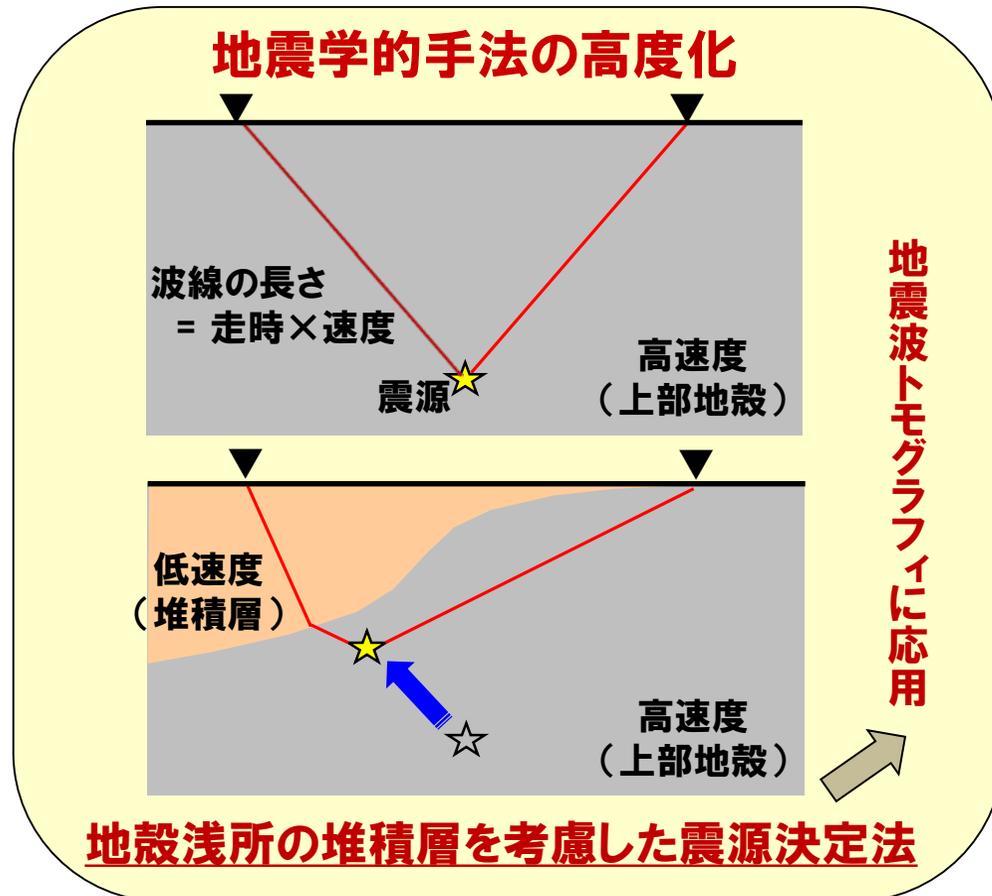
- 複数の手法を組み合わせによって総合的に調査することが重要
- それぞれの手法には、適用する場所によって、精度や分解能の低下などの課題がある

地震波トモグラフィの課題と解決に向けた検討

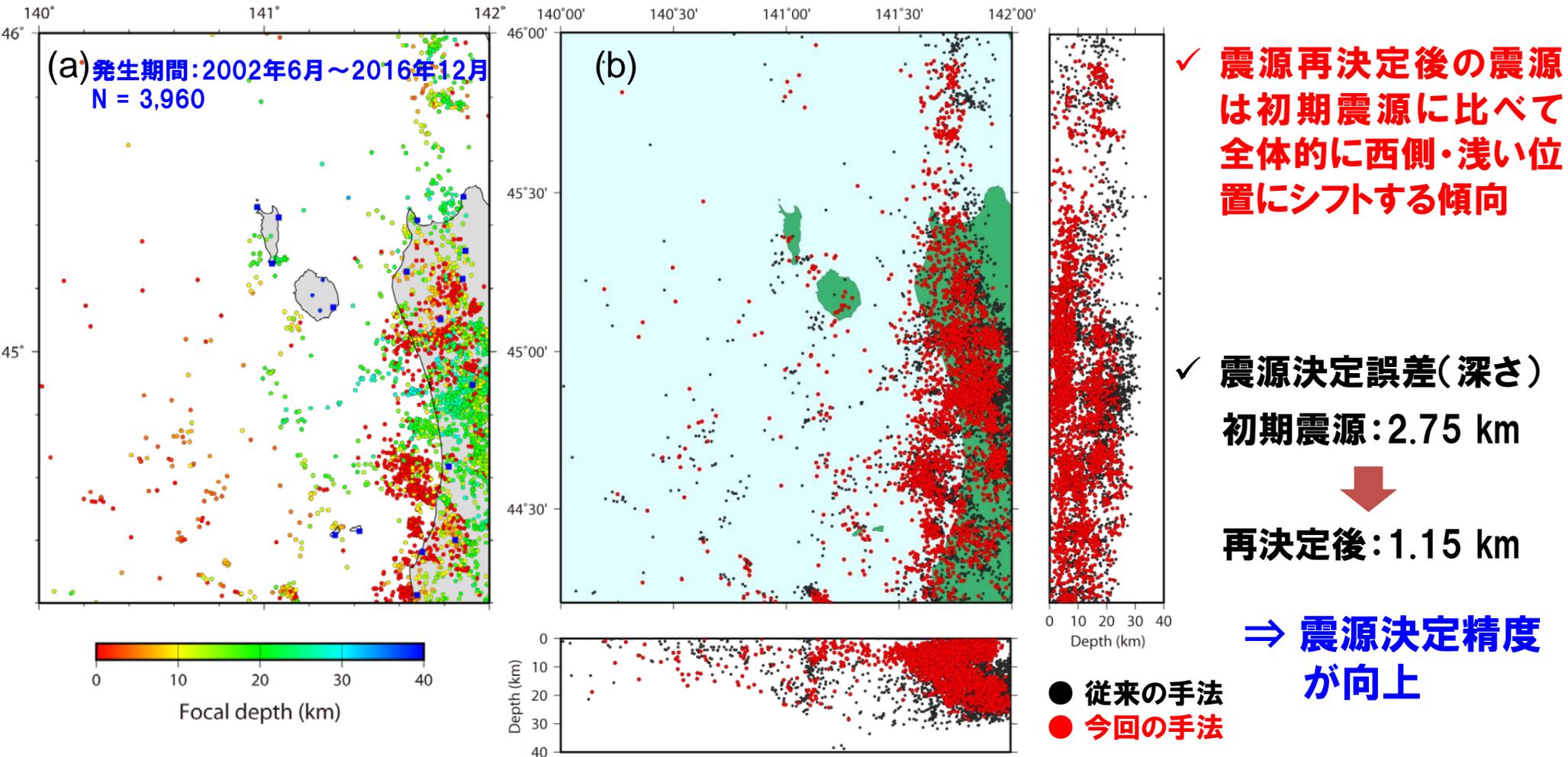
地震波トモグラフィ:

多量の地震観測データを使って, ①震源決定, ②伝播経路上の速度を推定

⇒ 地下浅所の地震波速度構造が複雑な場合(堆積層が厚く分布する地域やその周辺)は, 精度が低下

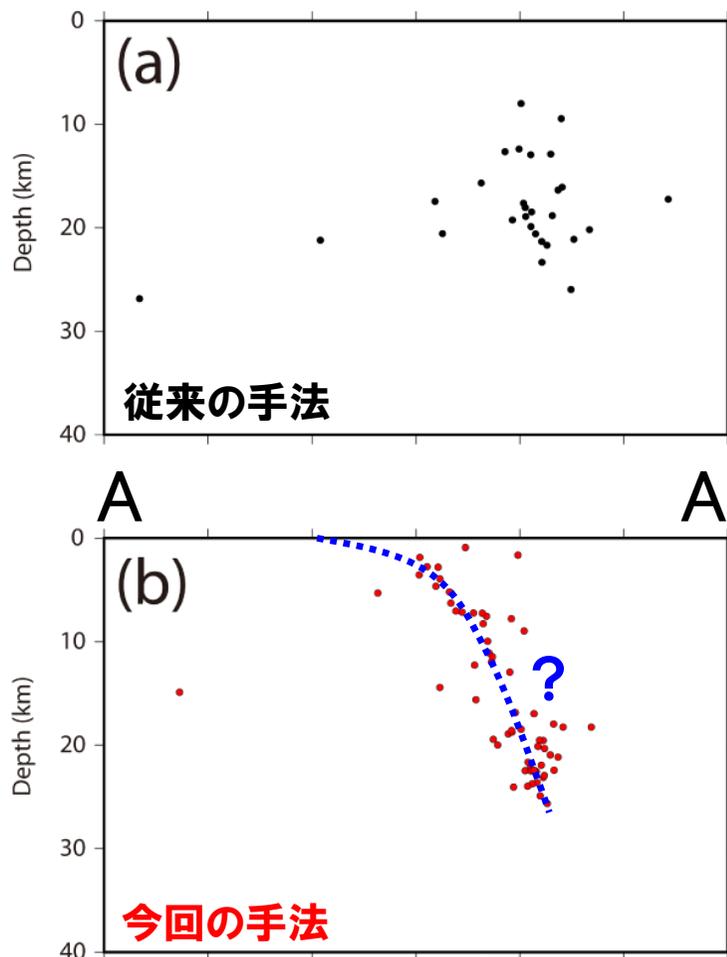
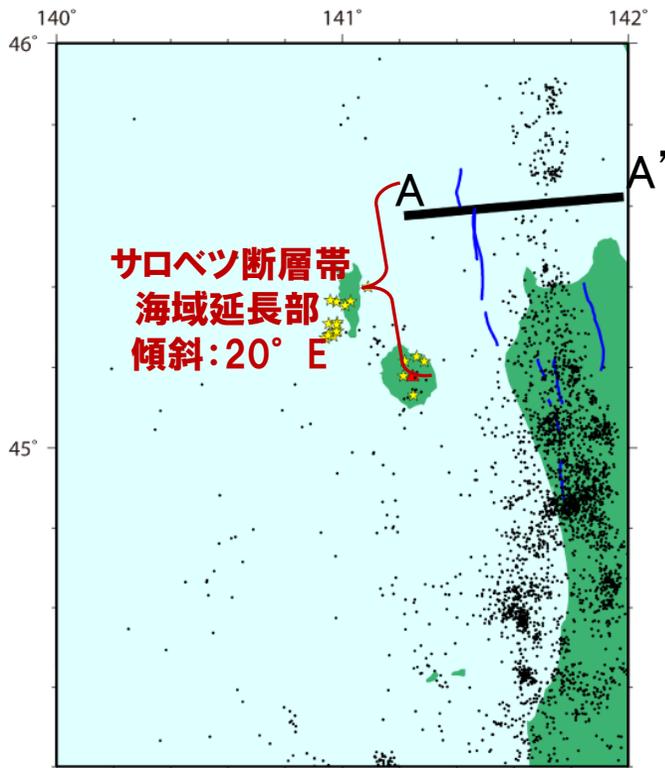


堆積層の層厚分布を考慮した震源決定解析（北海道北部地域の例）



(a) 解析領域における初期震源の震央及び観測点分布
(b) 震源再決定前後の震源の分布

堆積層の層厚分布を考慮した震源決定解析（北海道北部地域の例）



- ✓ 東に傾斜する震源の集中域が認められ、その地表延長部は活断層トレースのやや東方に位置
- ✓ 活断層の深部延長部における活動を示唆している可能性

⇒ 自然地震の震源決定精度向上に、堆積層の分布を考慮した震源決定が有効であることを示唆

⇒ 堆積層の層厚が急変する沿岸部においては特に有効

サロベツ断層帯海域延長部の周辺における
(a)初期震源の震央分布、(b)震源再決定後の震源の分布

地震波トモグラフィの高度化に向けたアプローチ

沿岸部への適用性の検討
技術的課題の抽出

解析精度の向上
波線追跡法の高精度化

空間分解能の向上
後続波の利用

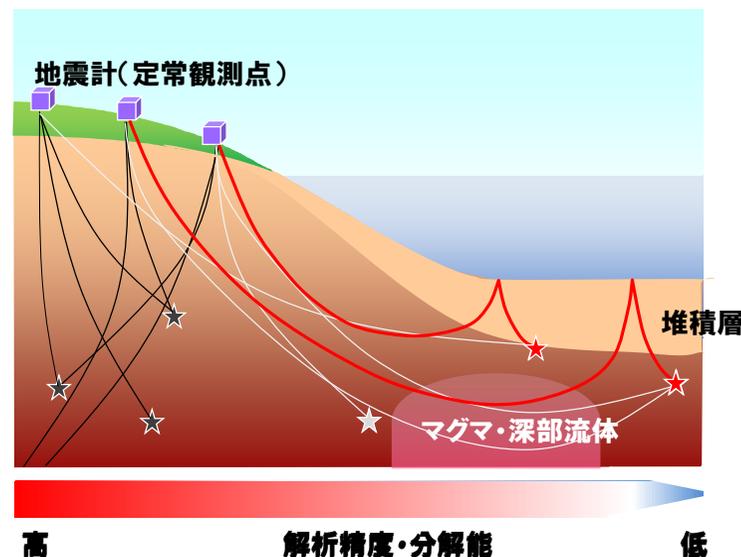
火山地域・非火山地域での事例
陸域・海域での事例

堆積層等の層厚の違いによる震源決定精度低下の改善

技術を応用

【今後の課題】

- ◆ 地震観測網の外側での精度・空間分解能低下の改善
- ◆ さらに高い空間分解能を目指した解析手法の高度化



地質環境の長期安定性に関する研究(第3期中長期計画)

*一部、資源エネルギー庁委託事業として実施

① 調査技術の開発・体系化 => サイトの選定や安全性の検討に必要なデータ取得技術

①-1) 断層の活動性に係る調査技術

①-2) 地殻構造の高空間分解能イメージング技術*

①-3) 深部流体の分布に関する調査技術

② 長期予測・影響評価モデルの開発 => 変動シナリオに基づく安全評価に必要な技術

②-1) 稀頻度自然現象による地質環境への影響の評価技術

②-2) 時間スケールに応じた地圏環境変動の予測技術*

③ 年代測定技術の開発 => ①, ②の信頼性を向上するための技術基盤

③-1) ウラン系列放射年代測定法の実用化*

技術の高度化・標準化は
極めて重要かつ基盤的な要素技術

③-2) 光ルミネッセンス(OSL)年代測定法の実用化*

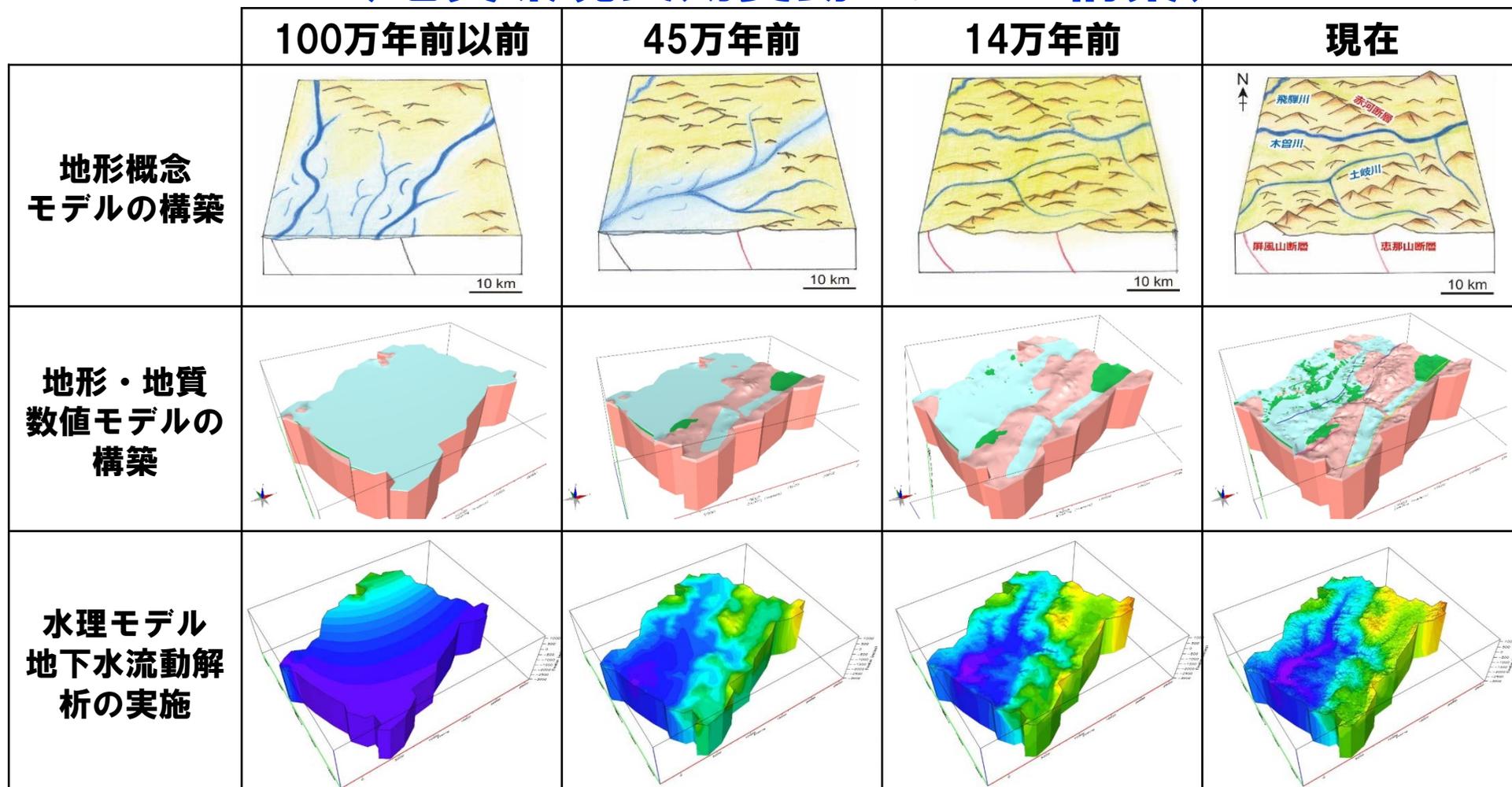
③-3) アルミニウム-26年代測定法, 塩素-36年代測定法の実用化*

③-4) 高分解能のテフラ同定手法の開発*

③-5) 地質試料を対象とした年代測定法及び化学分析手法の高度化

時間スケールに応じた地圏環境変動の予測技術

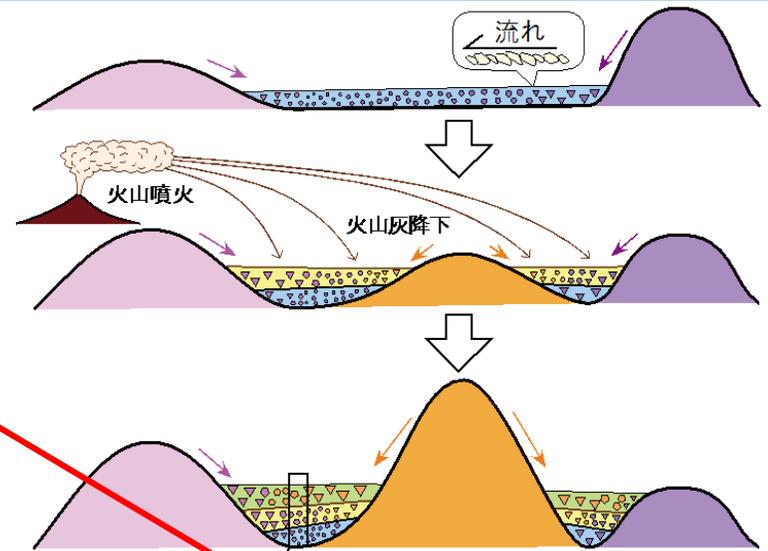
(地質環境長期変動モデルの構築)



- 過去から現在までの地形・地質モデルの構築およびそれに基づく地下水流動解析等を実施
⇒ 今後、地球化学モデルを踏まえたモデルの統合化と可視化および不確実性の評価手法の検討を実施

個別要素技術(後背地解析)の検討

山地や丘陵の隆起開始時期や形成過程を推定する手法の一つとして技術開発



(地質環境長期変動モデルの構築)

地下水流動の
長期的変化の把握

山地や丘陵の
形成プロセスの解明
(地形概念モデル)

後背地解析

熱年代学的手法

地形の数値解析

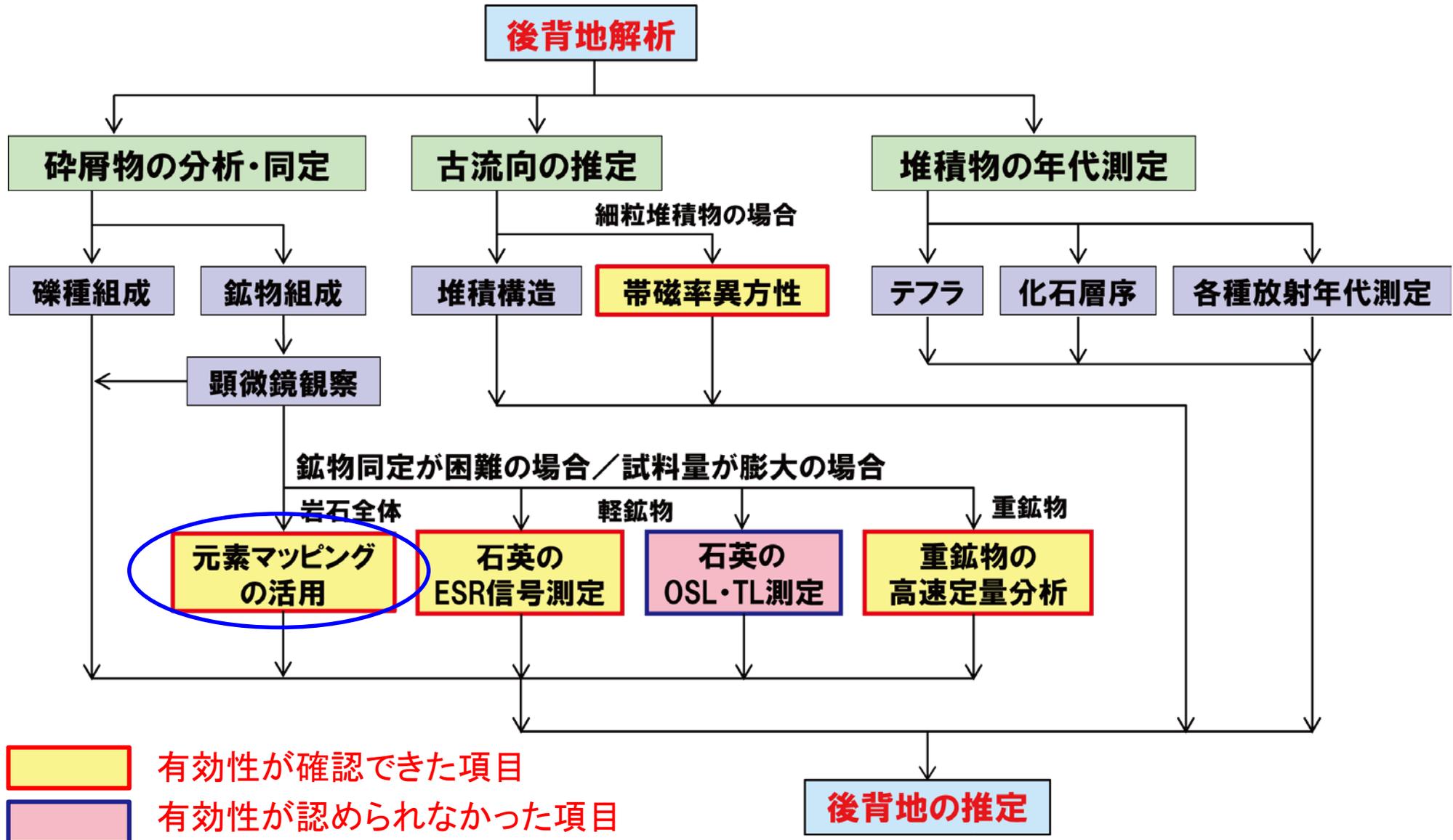
e.t.c.

水理モデル
地球化学モデル

地形・地質モデル

反映

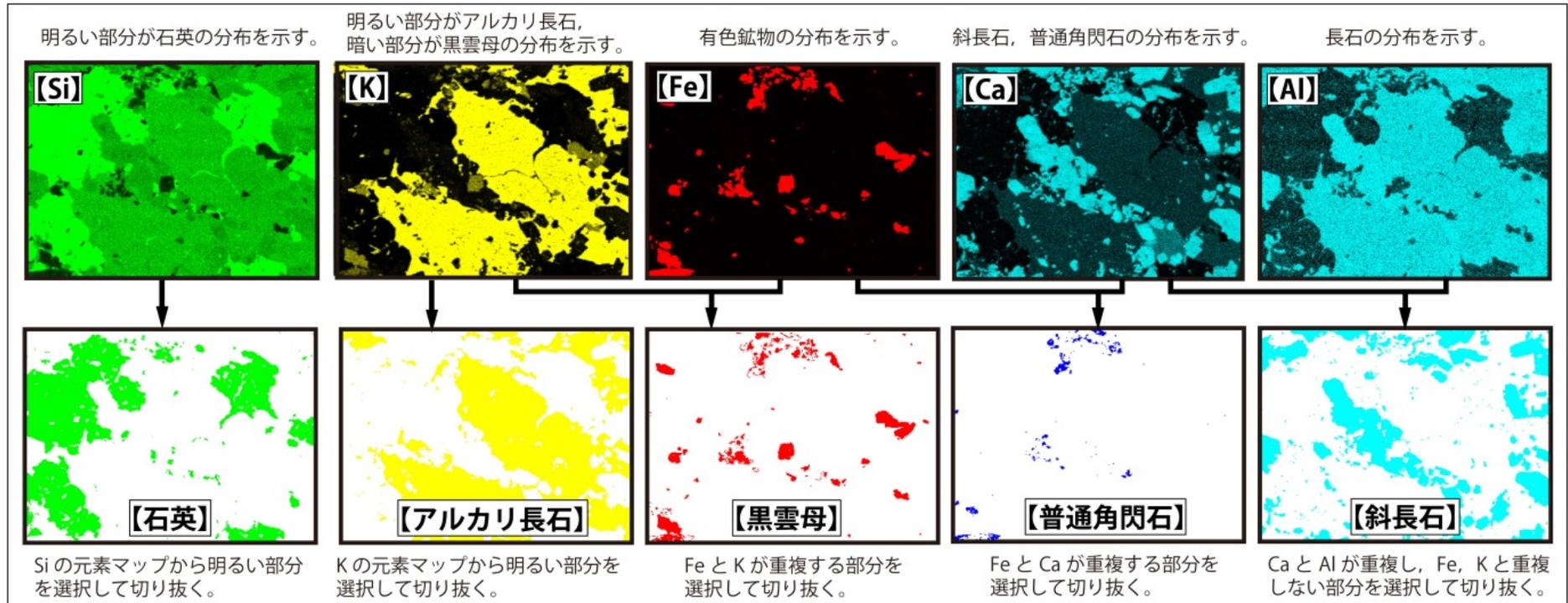
後背地解析技術の検討



砕屑物の分析・同定(元素マッピングの活用)

想定される後背地に分布する基盤岩と砕屑物とで岩石・鉱物学的特徴を比較することにより、砕屑物の給源岩石を推定

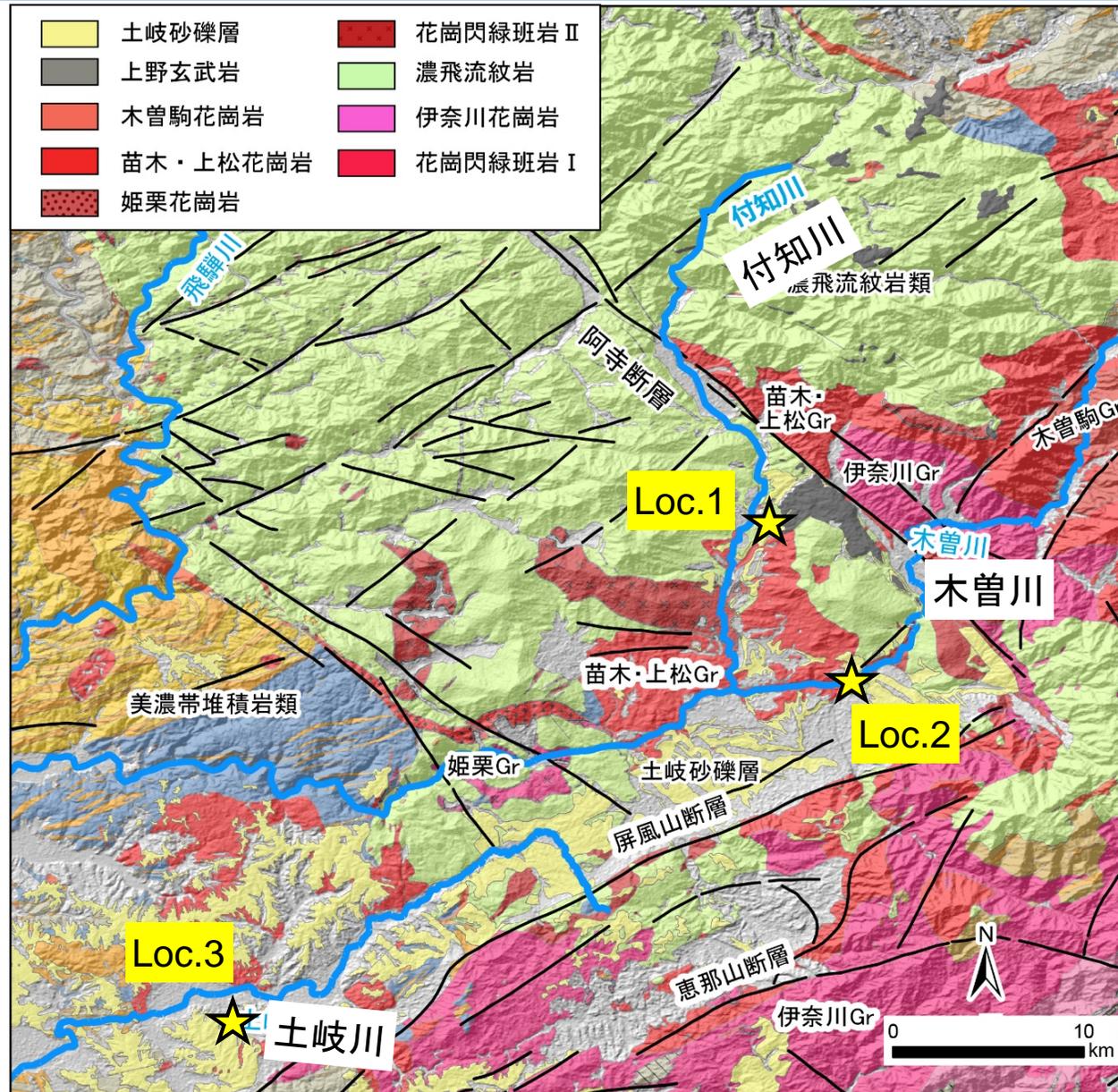
【元素マッピングを用いたモード測定の迅速化】



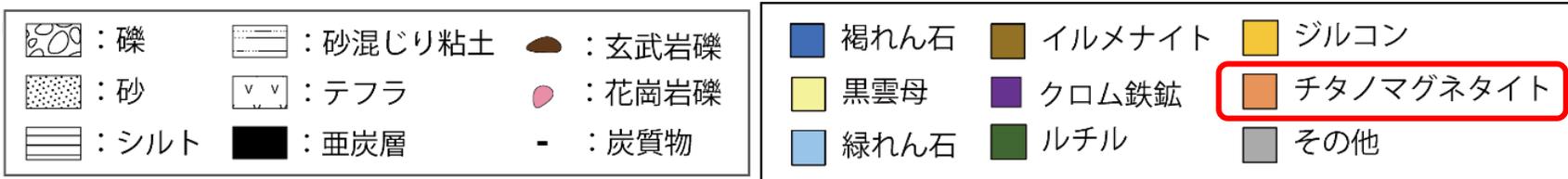
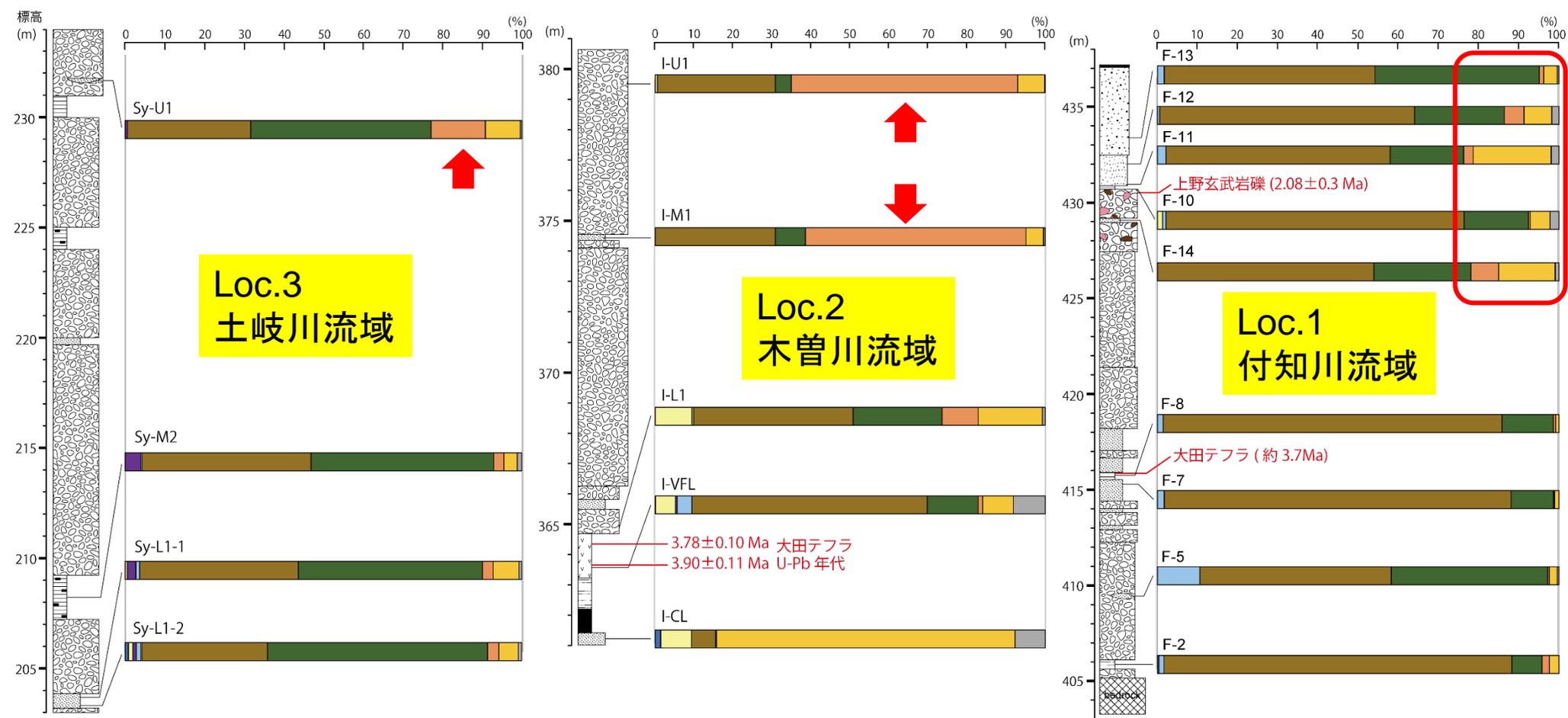
- ✓ X線分析顕微鏡(蛍光X線による元素マッピング)とAdobe Photoshop®、ImageJを用いて簡便かつ客観性を担保したモード測定手法を構築
- ✓ 新鮮な花崗岩試料に対して適用性を確認 (植木・丹羽, 2017, 地質雑に掲載)

後背地解析の事例研究（東濃地域）

- ✓ 山地では基盤岩まで十分な削剥が進行
→ 基盤岩の種類ごとの比較
- ✓ 基盤岩の形成年代に大きな差がない
→ 年代よりは鉱物・化学組成に基づく検討
- ✓ 堆積物(陸成)の風化が進行
→ 風化に強い鉱物に着目した検討
 - 石英のESR信号
 - 重鉱物の高速定量分析
- ✓ 山地の隆起を断層運動が主に支配
→ 断層発達史に着目した検討

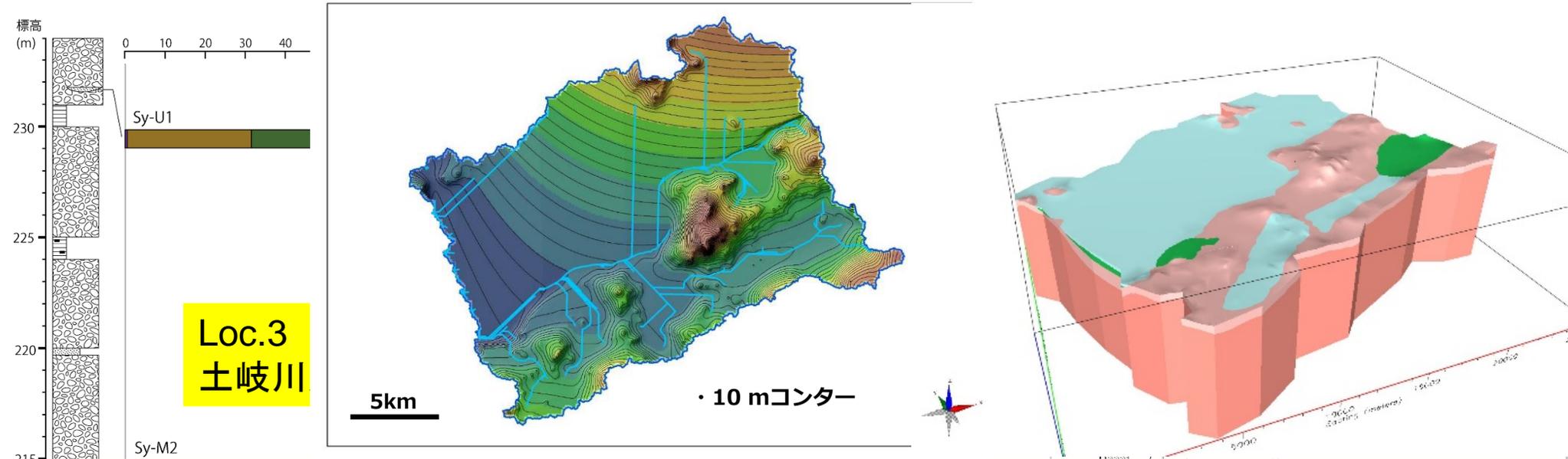


土岐砂礫層における重鉱物の高速定量分析【結果】



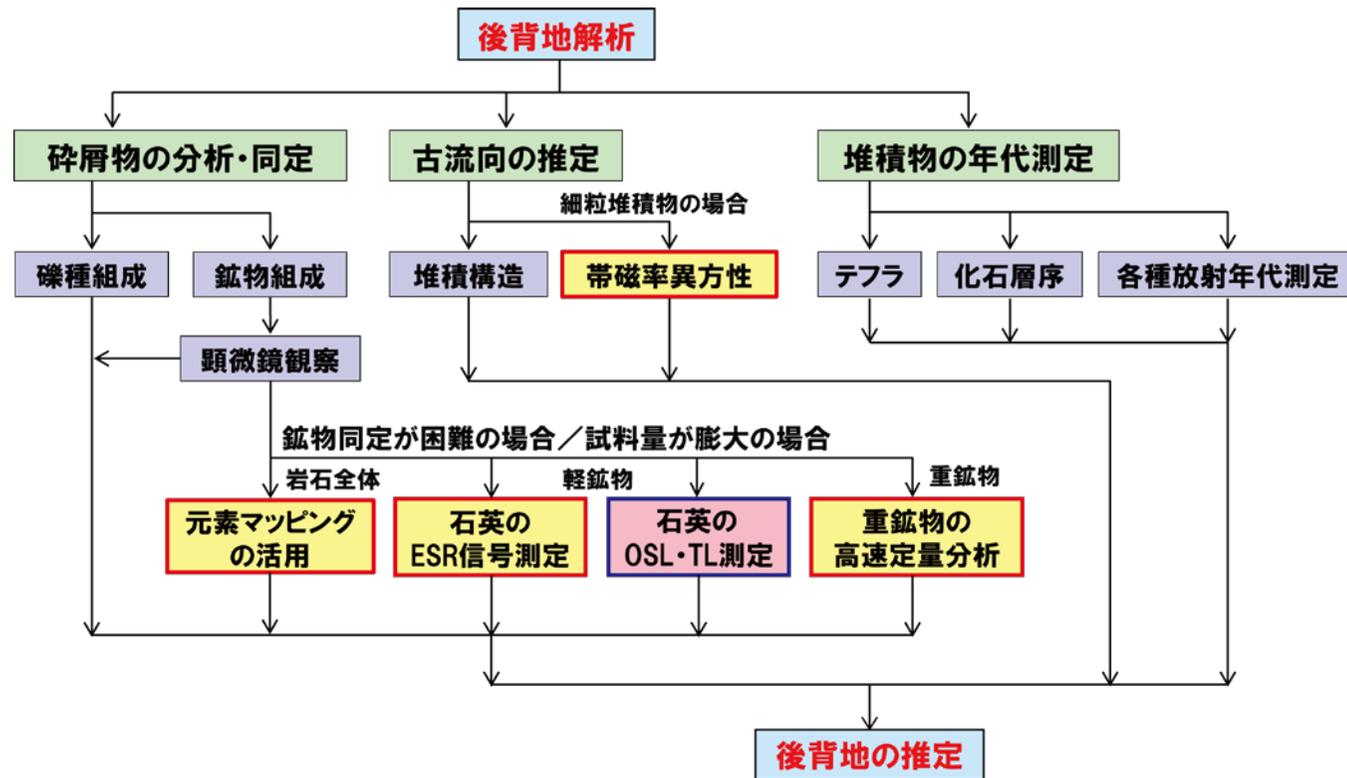
土岐砂礫層における重鉱物の高速定量分析【解釈】

約100万年前の復元地形・地質モデル



- ✓ 上部層ではチタノマグネタイトの割合が多くなる
- ✓ 本地域の基盤岩であるイルメナイト系列の火成岩(約2400万年前以前)には通常、チタノマグネタイトは存在しない
- ✓ チタノマグネタイトを含む木曾川上流の中部山岳地帯に点在する酸化的な火成活動起源の第四紀火山岩(約200万年前以降)の寄与を示唆
- ✓ 土岐川流域にも分布⇒少なくとも百万年程度前までは**当時の木曾川からの堆積物が土岐川方面に流下⇒地形・地質モデルとも整合的**

個別要素技術(後背地解析)の検討【まとめ】



- 後背地解析に係る個別要素技術について、現地調査を通じて適用性を確認し、山地・丘陵の形成プロセス解明のための後背地解析のフローを整備した。
- また、事例研究を通じて、地質環境長期変動モデルへの反映を念頭に置いた手法の確認を進めた。

地質環境の長期安定性に関する研究(第3期中長期計画)

*一部、資源エネルギー庁委託事業として実施

① 調査技術の開発・体系化 => サイトの選定や安全性の検討に必要なデータ取得技術

①-1) 断層の活動性に係る調査技術

①-2) 地殻構造の高空間分解能イメージング技術*

①-3) 深部流体の分布に関する調査技術

② 長期予測・影響評価モデルの開発 => 変動シナリオに基づく安全評価に必要な技術

②-1) 稀頻度自然現象による地質環境への影響の評価技術

②-2) 時間スケールに応じた地圏環境変動の予測技術*

③ 年代測定技術の開発 => ①, ②の信頼性を向上するための技術基盤

③-1) ウラン系列放射年代測定法の実用化*

技術の高度化・標準化は
極めて重要かつ基盤的な要素技術

③-2) 光ルミネッセンス(OSL)年代測定法の実用化*

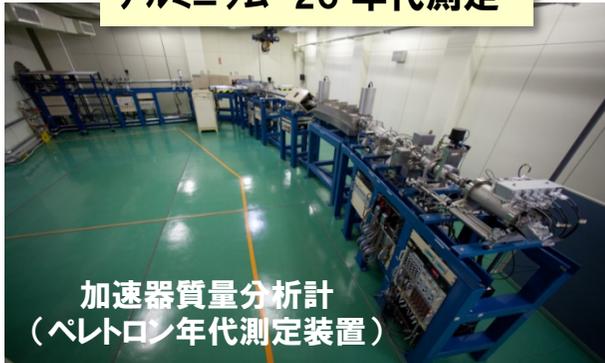
③-3) アルミニウム-26年代測定法, 塩素-36年代測定法の実用化*

③-4) 高分解能のテフラ同定手法の開発*

③-5) 地質試料を対象とした年代測定法及び化学分析手法の高度化

年代測定に係わる機器・分析装置

炭素-14, ベリリウム-10,
アルミニウム-26 年代測定



加速器質量分析計
(ペレトロン年代測定装置)

断層運動, 噴火年代等の推定に利用
(施設供用制度による依頼測定受託)

ウラン・トリウム・ヘリウム年代測定



四重極型質量分析装置

低温の熱水活動や侵食速度の推定に利用
(機構施設が国内で唯一測定が可能)

光ルミネッセンス年代測定



光ルミネッセンス(OSL)測定装置

土砂の供給源や堆積年代等の推定に利用
資源エネルギー庁の受託研究を実施中)

ウラン系列放射年代測定



レーザーアブレーションシステム付きマルチコレクター
誘導結合プラズマ質量分析装置 (LA-MC-ICP-MS)

炭酸塩鉱物(カルサイト等)の形成年代の推定に利用
(資源エネルギー庁の受託研究を実施中)

非放射性同位体年代測定
(ヘリウム, ネオン, アルゴン等)



マルチコレクター希ガス質量分析装置

地下水の滞留年代等の推定に利用
(資源エネルギー庁の受託研究を実施中)

年代測定技術の開発

さまざまな目的や状況に対応できるように各種年代測定法を開発整備

対象施設	年代測定法	年代測定範囲 (年)							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			
タンデム型加速器 質量分析計 (ペレトロン)	¹⁴ C法						■		断層運動	地下水, 有機物	実用化済
	¹⁰ Be法			■	■	■			隆起速度	石英	実用化済
	²⁶ Al法			■	■	■			隆起速度	石英	実用化済
	³⁶ Cl法				■	■	■		地下水年代	地下水	～H31
	¹²⁹ I法			■	■	■	■		地下水年代	地下水	～H33
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		■	■	■	■	■		隆起速度	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, 長石	実用化済
電子スピン共鳴装置	ESR法			■	■	■	■	■	後背地解析	石英, 炭酸塩鉱物	～H29
高精度希ガス質量分析装置	希ガス法		■	■	■	■	■		地下水年代	地下水	～H29
電子プローブマイクロアナライザ	CHIME法	■	■	■	■	■			後背地解析	モナザイト, 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 断層運動	ジルコン 炭酸塩鉱物	実用化済 ～H29
	²³⁰ Th- ²³⁴ U法				■	■	■		断層運動	炭酸塩鉱物	～H29
	FT法	■	■	■	■	■			隆起速度	ジルコン, アパタイト	～H29

■ 技術開発の対象年代範囲

炭酸塩鉛物のU-Pb年代測定法の実用化

レーザーアブレーション誘導結合プラズマ(LA-ICP)質量分析計による炭酸塩鉛物(局所領域)のU-Pb年代測定技術の開発

炭酸塩鉛物の高空間分解能な年代測定＝“挑戦的な技術開発”
開発の課題:U濃度(親核種)の低い試料への対応、標準試料の選定

① 親核種に富む領域を選ぶ技術(イメージング分析技術)の整備

・レーザーアブレーション装置と微量元素の分析を得意とするICP質量分析装置を利用して、2次元元素分布を取得することで、年代測定を実施する前にU濃度の高い領域(分析点)を選択可能

② 炭酸塩標準試料の選定・評価・決定

【炭酸塩標準試料の候補として、以下の2候補に絞込み評価】

- ・海水起源の蒸発岩Castile Formation (Becker et al.,2002) 中の方解石(以下、CFC)
- ・ペルム系石灰岩中の岩脈中の方解石 Walnut Canyon (以下、WC-1)(Roberts et al.,2017)

イメージング分析技術の整備

炭酸塩鉱物のU-Pb年代測定を実施する**微小領域**の分析点の選定と評価を行うため、**同位体イメージング分析の技術を整備**

同位体イメージング分析とは

レーザーを水平方向に走査して、四重極型ICP質量分析装置で元素イオンを検出し、得られたデータをつなぎ合わせ、2次元元素(同位体)分布を得る分析手法

※EPMAなど一般的な元素マッピングとの違い

- (利点)希土類元素などを含む**微量元素**について相対的な濃度分布を得ることができる
- (欠点)試料表面数～数十 μm の**破壊分析**



四重極型ICP質量分析計
(Agilent 7700x)



レーザーアブレーション装置
(Analyte G2)

微量元素定量分析
元素・同位体イメージング

同位体分析
(年代測定)



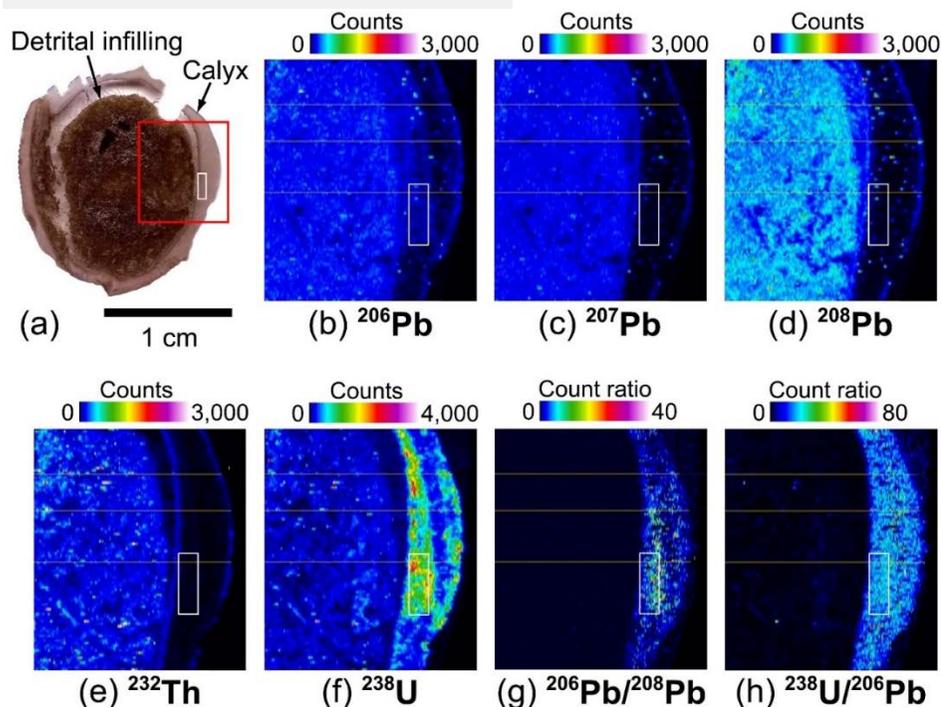
二重収束型マルチコレクタICP質量分析計
(Neptune-plus)

炭酸塩標準試料の評価・決定と試験試料の測定

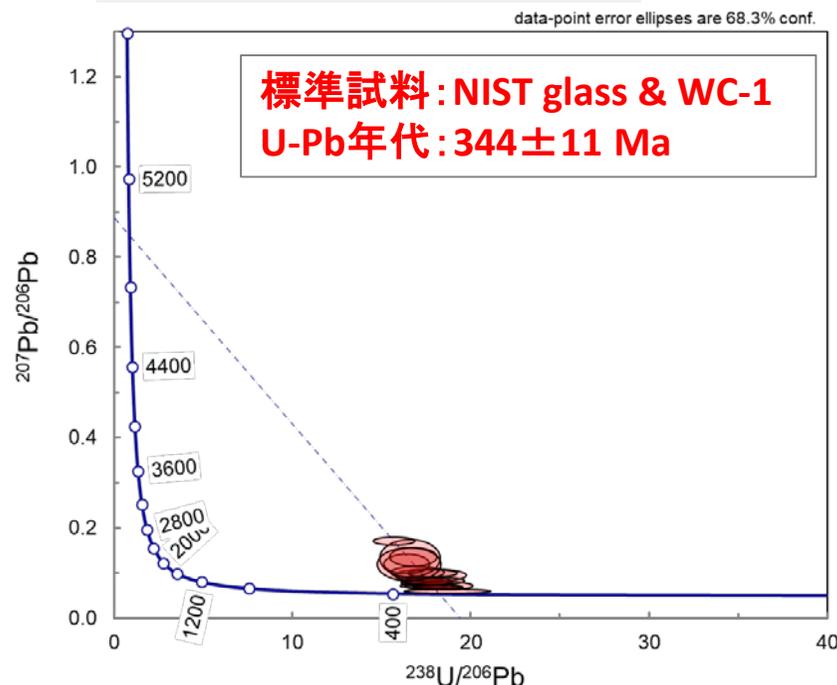
同位体イメージング分析とU-Pb同位体分析を実施し、標準試料候補CFC及びWC-1を評価

- ✓ CFCは、不純物の影響大
- ✓ WC-1は同位体分布について不均質であるが、親核種 (^{238}U) と子孫核種 (放射起源Pb ($^{206}\text{Pb}/^{208}\text{Pb}$)) の分布に相関が確認され、U-Pb系について閉鎖系⇒標準試料として採用

ウミツボミ同位体イメージング



ウミツボミU-Pb同位体分析結果



- ✓ 示準化石ウミツボミを試験試料として、同位体イメージング分析により分析点を選択し、WC-1を標準試料としてU-Pb年代測定を実施したところ、化石年代範囲(約339-318Ma)と有意差は見られず、本技術の妥当性、有効性及び再現性が確認された(国内初)

炭酸塩鉱物のU-Pb年代測定法の実用化【まとめ】

- LA-ICP質量分析計を用いて、同位体イメージング分析技術を整備し、**U濃度の低いことが予測される炭酸塩鉱物の局所領域分析手順を構築した。**
- 炭酸塩標準試料として、現時点では、**WC-1** (Roberts et al.,2017) が最も有用であることを確認した。
- **WC-1**を標準試料として、天然に存在する炭酸塩試料(海生示準化石:ウミツボミ(方解石);約339~318Ma)のU-Pb年代測定を行い、**本手法の妥当性、有効性及び再現性を確認した(国内初)。**

- ✓ 本技術開発は、東京大学、海洋研究開発機構、(株)京都フィッショントラック、学習院大学との共同研究、および熊本大学、山形大学との共同研究により進めた。
- ✓ 関連分野の研究者・技術者を交えたワークショップを東濃地科学センターにて開催し(2017/12/18)、情報共有や意見交換を通じて、学術領域を含む多方面への技術の普及を促進した。

平成30年度計画(案)

① 調査技術の開発・体系化

- 断層充填物質の鉱物学的・地球化学的データによる活動性評価の検討
- 地震波トモグラフィ解析の高度化
- 深部流体の移行経路に関する検討

② 長期予測・影響評価モデルの開発

- 南九州を事例とした測地学・地形学・地質学データの収集・解析
- 高温の深部流体の滞留時間に関する知見収集

③ 年代測定技術の開発

- ^{129}I 法、 ^{36}Cl 法による地下水の年代測定の検討
- 光ルミネッセンス(OSL)熱年代の適用性の検討

地層処分の技術的信頼性向上に向けた研究課題(参考)

「最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価」

(総合資源エネルギー調査会 地層処分技術WG:H26.5)

【地層処分の技術的信頼性向上に向けた研究課題】

- 繰り返し活動し、変位の規模が大きな断層の評価に反映するための、**地形的に不明瞭な活断層**の調査事例の蓄積および調査や評価方法の整備。
- 隆起量・侵食量の評価に反映するための、地形学的手法や**堆積物の年代測定**に基づく評価方法の整備。
- **深部流体および非火山性熱水**の流出の評価に反映するための、深部流体および非火山性熱水に関する形成・移動メカニズム等の調査事例の蓄積。
- 断層の活動性の評価に反映するための、地質断層の再活動性に関する調査事例および上載法の適用が困難な断層の活動性の評価方法(**断層岩や充填鉱物の年代測定方法**)の整備。
- 地震活動の評価に反映するための、**東北地方太平洋沖地震後に誘発された地震や湧水**(たとえば、2011年4月11日の福島県浜通り地震)に関する調査事例の蓄積。
- 地下水の動きが緩慢であることを評価するための**地下水年代測定**などの技術の確保や調査事例の蓄積。