

地質環境の長期安定性に関する研究

これまでの研究成果と今後の計画について

地殻構造の高空間分解能イメージング技術

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
バックエンド研究開発部門

第3期中期計画(H27～33)

① 調査技術の開発・体系化

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

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

③-1) ウラン系列放射年代測定法の実用化

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

背景

■ 地層処分に著しい影響を与える現象(回避の対象)

最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価(総合エネルギー調査会地層処分技術WG, 2014)

○ 火山・火成活動(マグマの貫入・噴出, 地熱活動)

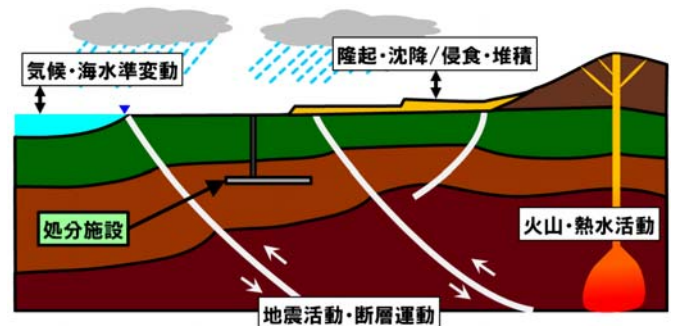
第四紀火山が存在しない地域にあっても, 現在, 上部マントル内にマグマが発生・上昇する温度・圧力条件が存在し, 将来の火山・火成活動が生じる可能性が高い地域は回避すべき。

○ 非火山性熱水および深部流体

深部流体は, pHが低く炭酸化学種が高濃度に含まれる等の特徴があり, 化学場や熱環境に影響を与える。そのため、深部流体の流入の可能性が高い範囲を回避すべき。

○ 断層活動

地下深部から地表・地下浅部に達するような断層のずれが発生し, 処分場が力学的に破壊される場合, 断層およびその周辺の岩盤の透水性が増加し, 地下水の移行経路が変化した場合について, 著しい影響がある。そのため, 将来も活動する可能性が高く, 繰り返し活動し, 変位の規模が大きい断層は回避する必要がある。



目標とこれまでの実施内容

【目標】

地表からの調査段階において, 将来の地層処分システムに重大な影響を及ぼす可能性がある地下深部の震源断層や高温流体等の存否や構造を確認するための技術を整備する。

【実施内容】

○ 地球物理・化学的手法によるマグマ・深部流体の推定

地震波トモグラフィ, 地磁気・地電流(MT)法, 温泉水・ガスのヘリウム同位体比測定による流体分布の推定

○ 地震学的手法の高度化

堆積層(地表付近の低速度層)厚の不均質を考慮した震源再決定法の構築と地震波トモグラフィへの応用

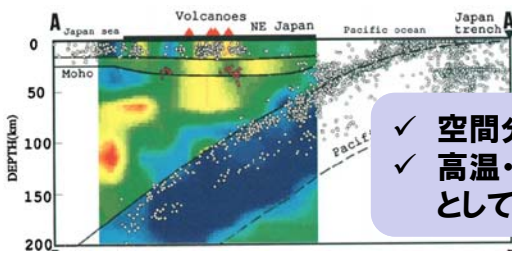
○ 電磁探査手法の高度化

観測データの品質向上を目指したスタッキング法, 比抵抗構造の不連続を考慮した3次元インバージョン法の開発

地球物理・化学的手法によるマグマ・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

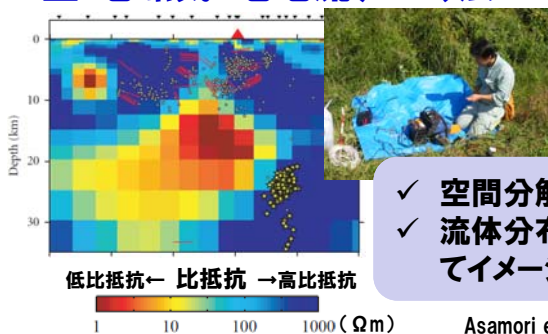
■ 地震波トモグラフィ



- ✓ 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)

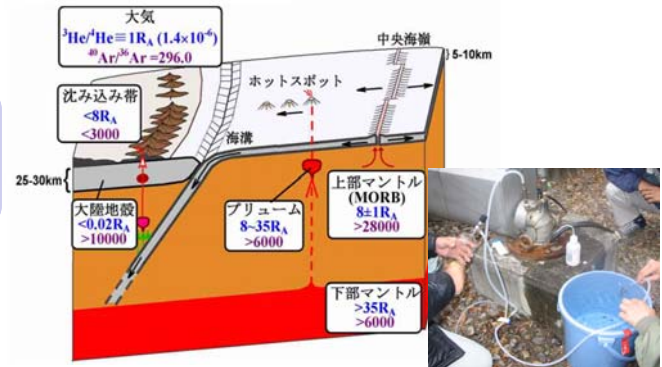
■ 地磁気・地電流(MT)法



- ✓ 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($^3\text{He}/^4\text{He}$)比



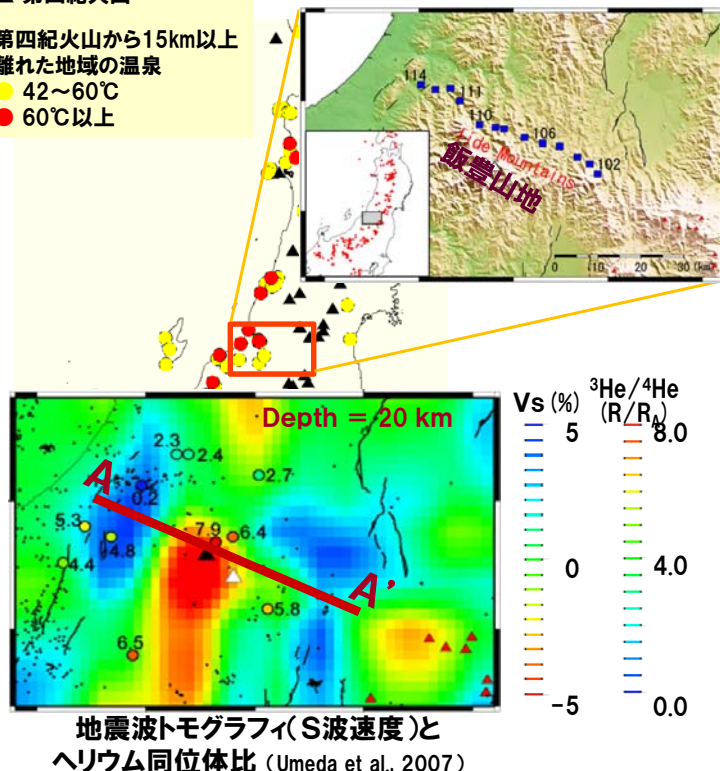
- ✓ 地下水溶存ガス・遊離ガスの $^3\text{He}/^4\text{He}$ を測定
- ✓ 大気 ($R_A = 1.4 \times 10^{-6}$)・地殻 ($0.02R_A$)・マントル ($<8R_A$) で大きく異なる値
- ✓ 高ヘリウム同位体比はマントル起源ヘリウムの供給を示唆

地球物理・化学的手法によるマグマ・深部流体の推定

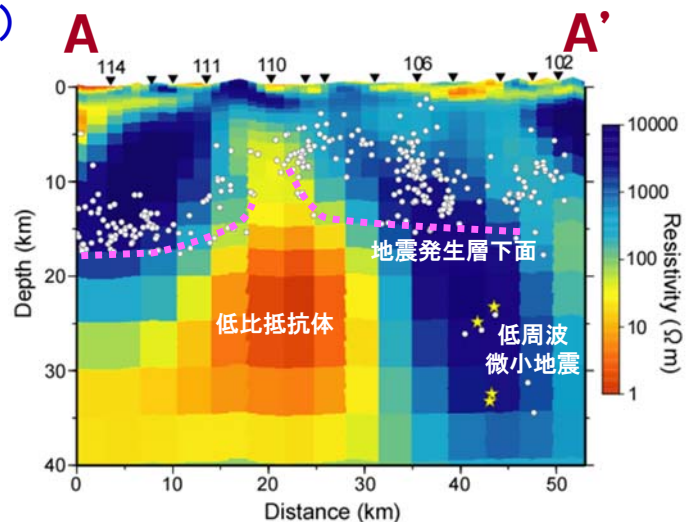
■ 非火山地帯における熱源の推定 (飯豊山地)

▲ 第四紀火山

第四紀火山から15km以上離れた地域の温泉
 ● 42~60℃
 ● 60℃以上



地震波トモグラフィ (S波速度) とヘリウム同位体比 (Umeda et al., 2007)



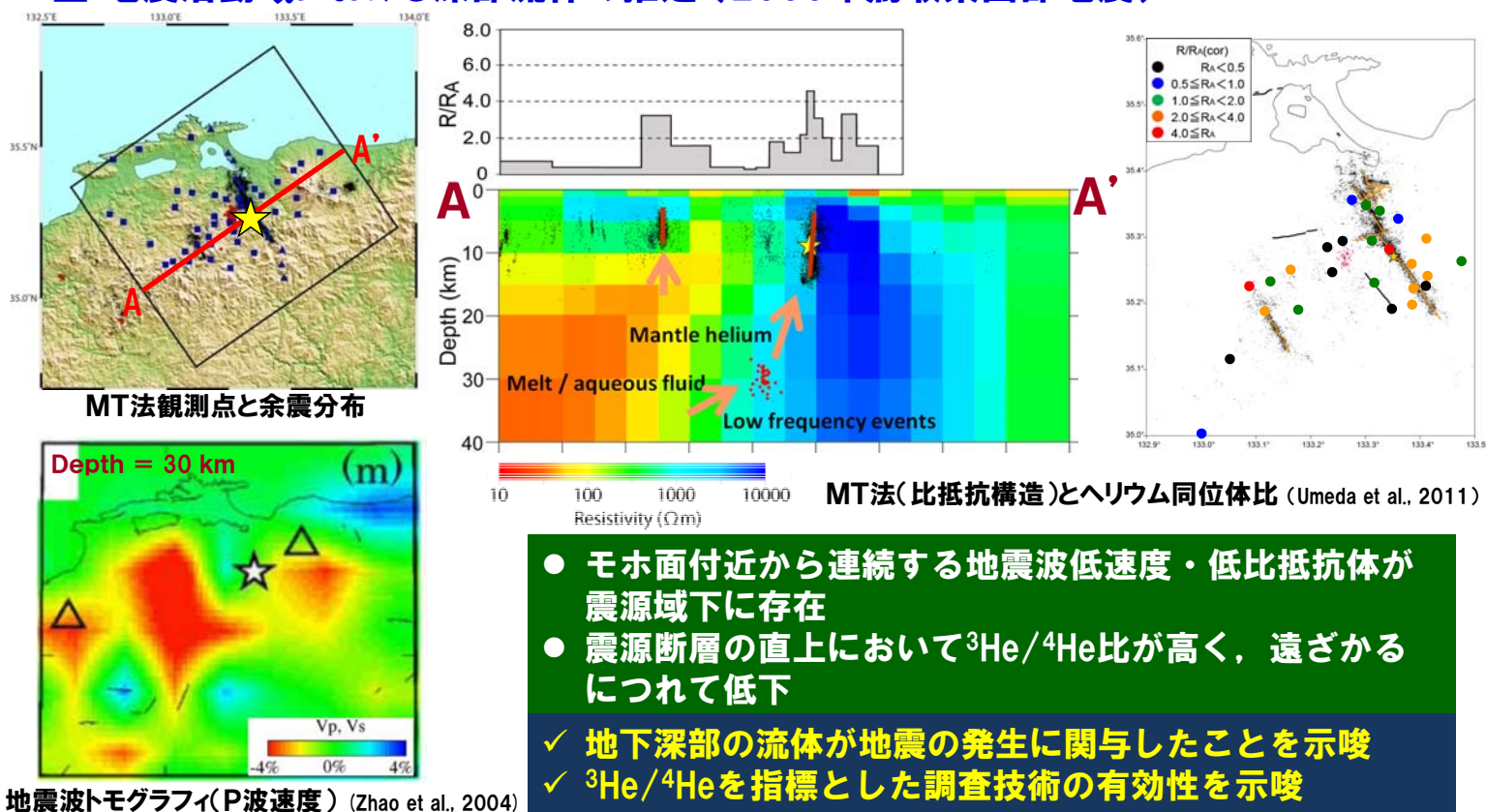
MT法 (比抵抗構造) (Umeda et al., 2007)

- 地震波低速度・低比抵抗体の直上において、最も高いヘリウム同位体比
- 非火山地域においても、地殻深部に部分熔融域が存在することを示唆

✓ 複数の手法を組み合わせ、高温流体の分布を推定した事例を提示

地球物理・化学的手法によるマグマ・深部流体の推定

■ 地震活動域における深部流体の推定（2000年鳥取県西部地震）

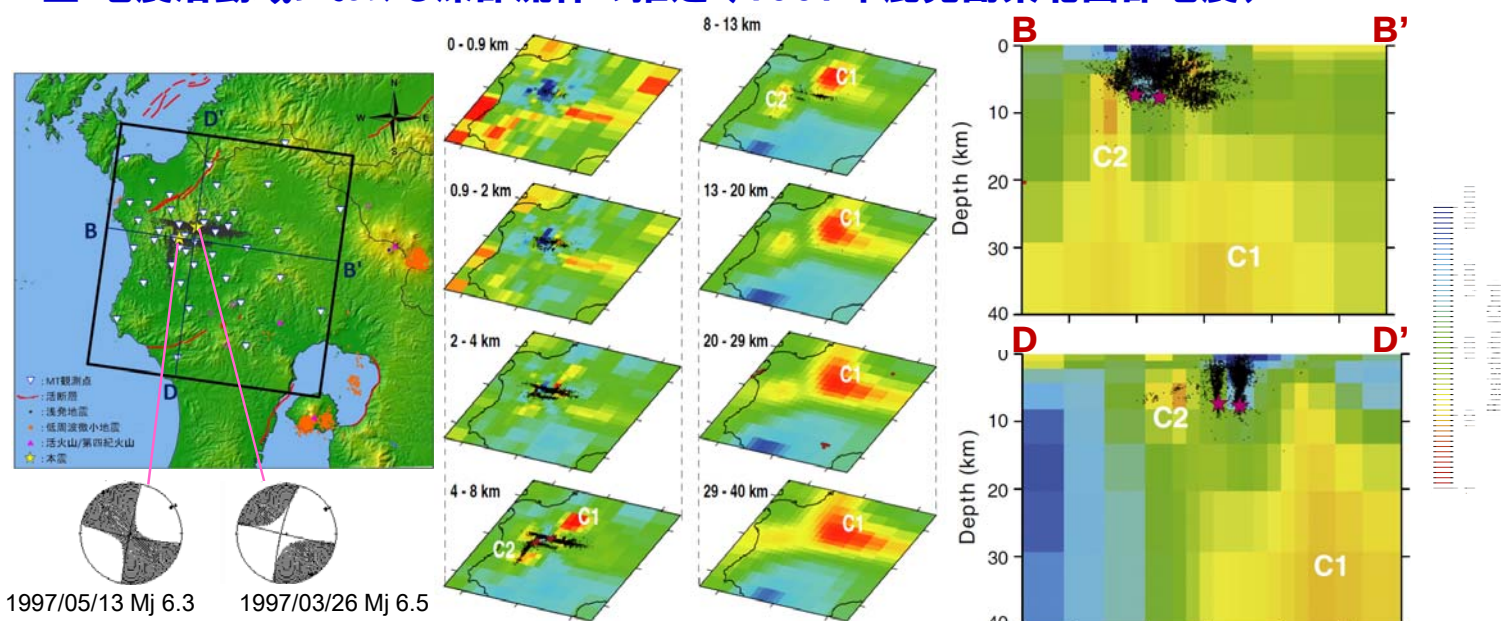


地質環境の長期安定性研究検討委員会

第14回（平成28年3月1日） 6

地球物理・化学的手法によるマグマ・深部流体の推定

■ 地震活動域における深部流体の推定（1997年鹿児島県北西部地震）



- 地表地震断層は確認されていない
- 未成熟な断層の活動 (村田, 1999)

- 震源断層は低比抵抗体の端部に位置する
- 2つの本震は低比抵抗体の近傍で発生
- ✓ 地殻流体の分布を指標として、震源断層の存否や構造等を明らかにできる可能性を示唆

地質環境の長期安定性研究検討委員会

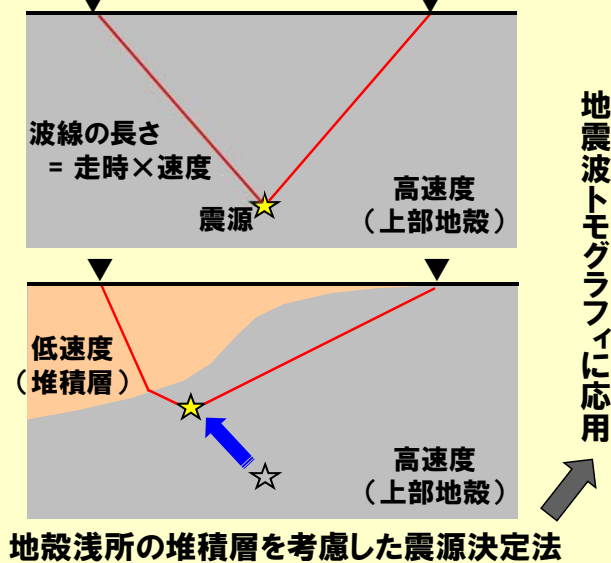
第14回（平成28年3月1日） 7

地震学的手法・電磁探査手法の高度化

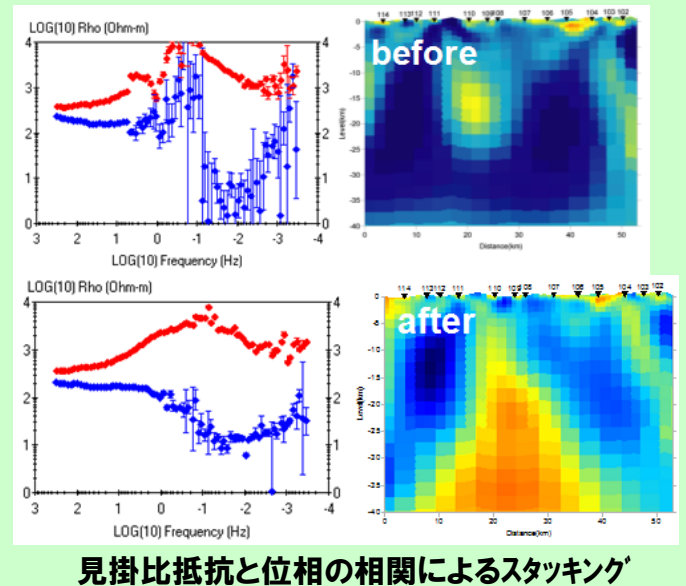
■ 解析手法の高度化

①汎用性, ②空間分解能, ③精度の向上

地震学的手法



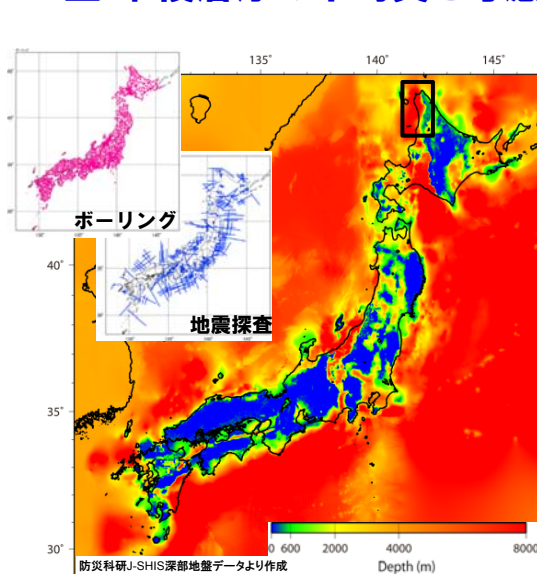
電磁探査手法



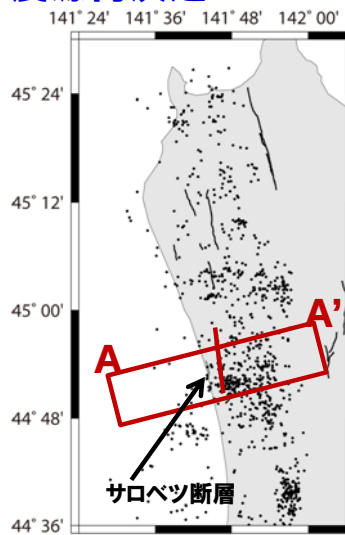
地磁気地電流法における観測データの処理方法及び装置(特許第4512790号)

地震学的手法の高度化

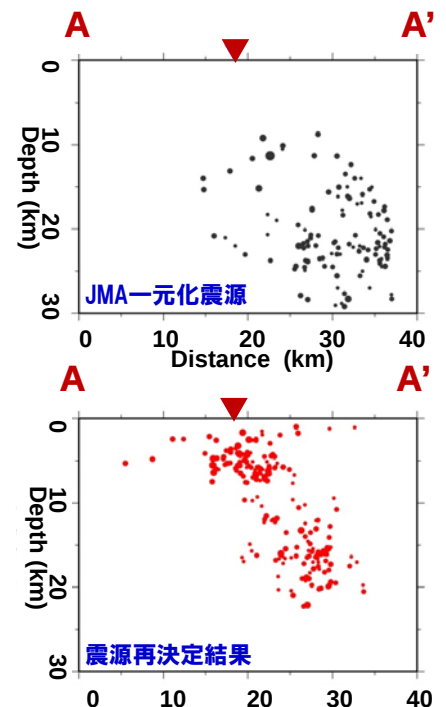
■ 堆積層厚の不均質を考慮した震源再決定



地震基盤面深度分布(防災科学技術研究所, 2010)



サロベツ断層下の震源再決定
東傾斜逆断層: 変位速度1m/千年



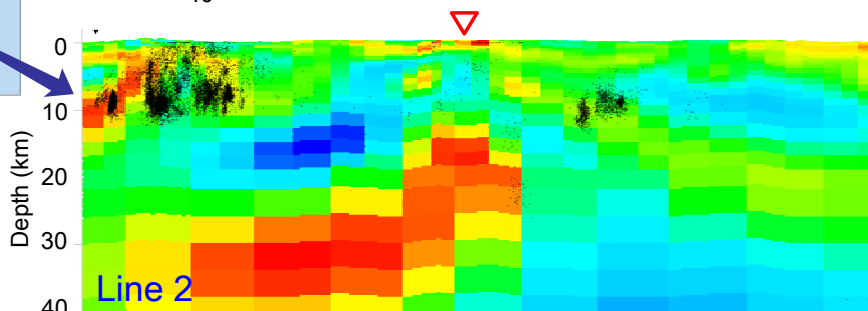
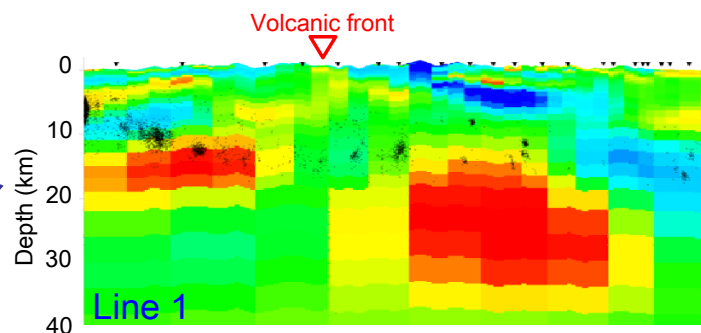
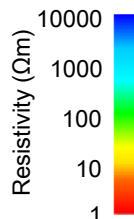
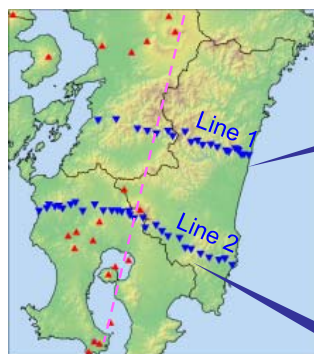
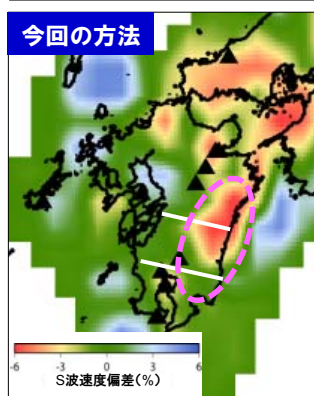
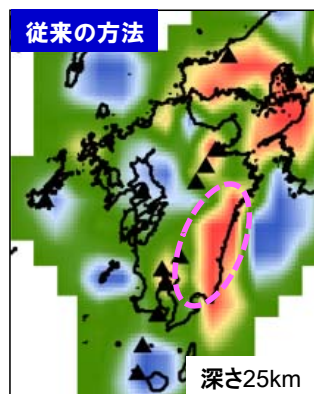
● 震源再決定後の分布は、断層の傾斜と調和的であり、断層形状を反映していることを示唆

✓ とくに沿岸域(堆積層厚の急変域)への適用に効果的な手法

✓ 新たな観測網の展開に依らないため、既観測データへの適用が可能

地震学的手法の高度化

■ 地震波トモグラフィへの応用と検証



- 地震波低速度異常体に対応する低比抵抗体を検出
- 前弧域における非火山性の地殻流体が存在することを示唆

✓ 両手法の組合せにより、従来より高い信頼性をもって地殻構造を推定した事例を提示

これまでの成果と課題

【これまでの成果】

- ✓ 地震波トモグラフィ、地磁気・地電流(MT)法、温泉水・ガスのヘリウム同位体比測定の組合せにより、地殻内の流体分布を推定した事例を提示
- ✓ 堆積層厚の不均質を考慮した地震波トモグラフィ、MT法データスタッキング法、比抵抗不連続構造を考慮した3次元MTインバージョン法の構築

【今後の課題】

- ✓ 沿岸部(浅海域)における適用性の検討
- ✓ 地殻構造イメージング手法の高度化
 - 人工ノイズの低減によるMT法観測データ品質の向上
 - 後続波を用いた地震波トモグラフィの高分解能化
- ✓ 測地学的手法を用いた震源断層の調査技術

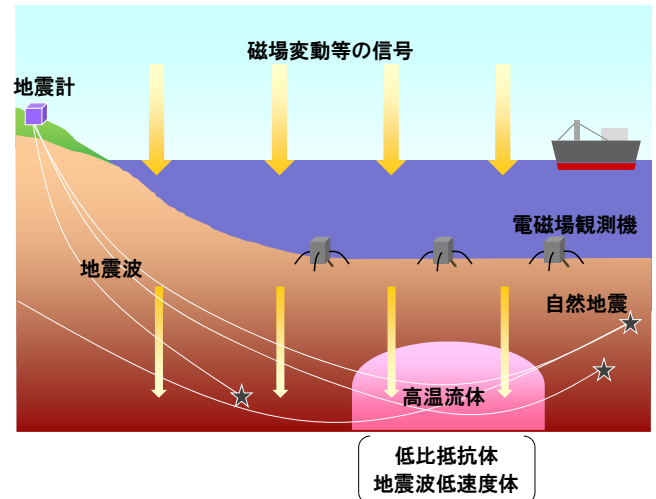
今後の課題

■ 沿岸部(浅海域)における適用性の検討

海底下の地殻深部における高温流体(溶融体や深部流体)等の存否や構造を把握するために必要な調査技術を提示する。

- ✓ 浅海域における海底電磁探査(MT法)
- ✓ 地震観測網外の領域を対象とした地震波トモグラフィ
- ✓ 低周波微小地震の活動域等への適用による事例の提示

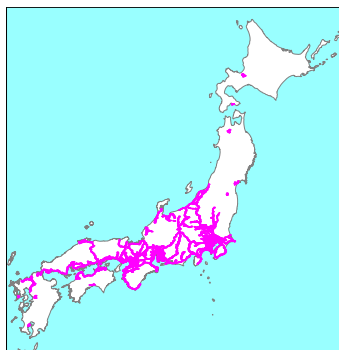
低比抵抗体・地震波低速度体の整合性や海底下の震源分布などから高温流体の分布を把握



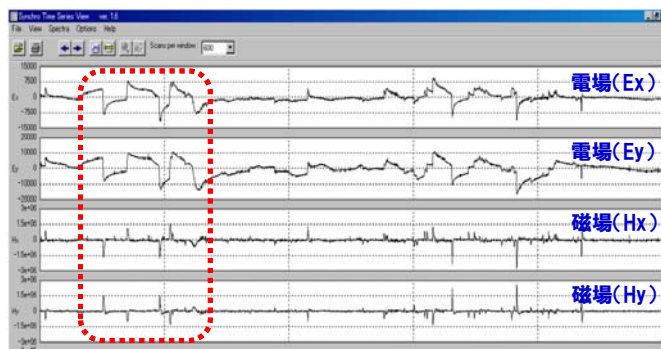
今後の課題

■ 人工ノイズ低減によるMT法データ品質の向上

現状では、直流電車の漏洩電流等の人工ノイズが観測での大きな障害となり、線路から数十km以内の領域は観測に不適



直流電化区間の分布



MT法観測データの例(漏洩電流によるノイズ)

【磁場データ】
ノイズ混入区間の同定

観測点とリモート点の磁場時系列データの分散比等にもとづいたノイズ混入区間の同定 (Kappler, 2012)

【磁場データ】
ノイズ混入区間の補間

カルマンフィルタを用いてノイズ混入区間の磁場データを補間 (Fujii and Kanda, 2008)

【電場データ】
ノイズの分離と除去

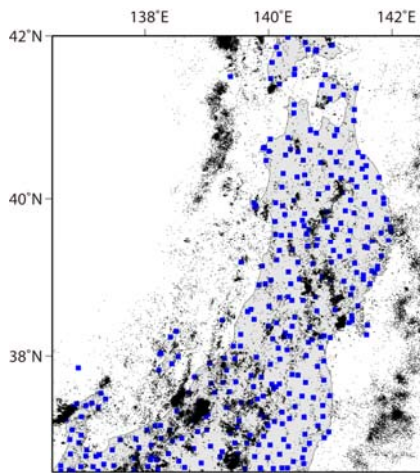
観測データ処理フロー

直流電化区間等の人工ノイズ源周辺における調査に必要なMT法観測データのS/N比向上・ノイズ処理技術を構築する。

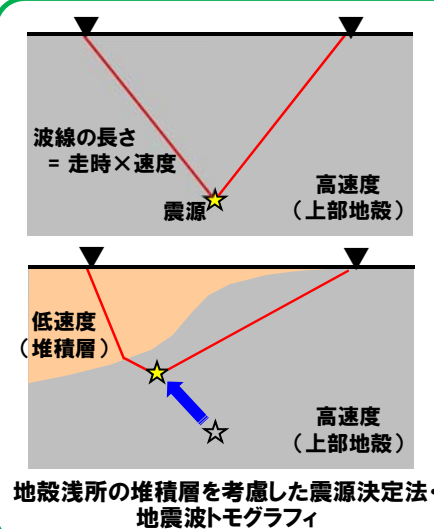
今後の課題

■ 後続波を用いた地震波トモグラフィの高分解能化

- ✓ 現状では、地震活動が活発でない内陸部での分解能はおよそ20～30km
- ✓ 観測網の外側に位置する沿岸部(浅海域)での精度は極端に低下



東北地方における定常地震観測点(■)および浅発地震の震央(●)分布



【内陸部】

- ✓ 後続波(PmP, SmS, sSmS等)の読み取り・解析への適用
- ⇒ 分解能の向上(～10km)

【沿岸部】

- ✓ 後続波(sP depth phase等)の読み取り・解析への適用
- ⇒ 分解能・解析精度の向上

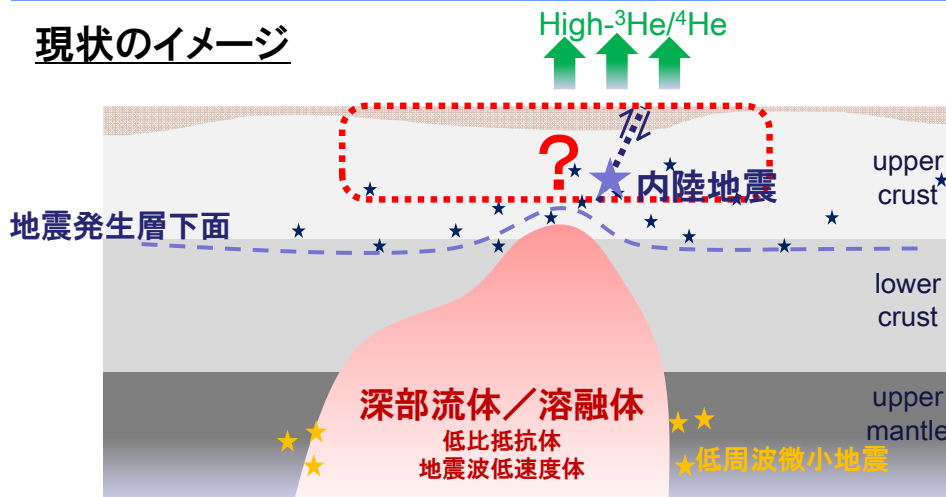
地震活動が静穏な地域や沿岸部への適用に必要な、高精度・高分解能の地震波トモグラフィを提示する。

今後の課題

■ 測地学的手法を用いた震源断層の調査技術

- ✓ 地殻構造等に関する知見から、内陸地震を引き起こした震源断層の活動に深部流体が関与していることが指摘
- ✓ しかし、これまでのアプローチのみで断層の存否や分布を推定することは困難

現状のイメージ



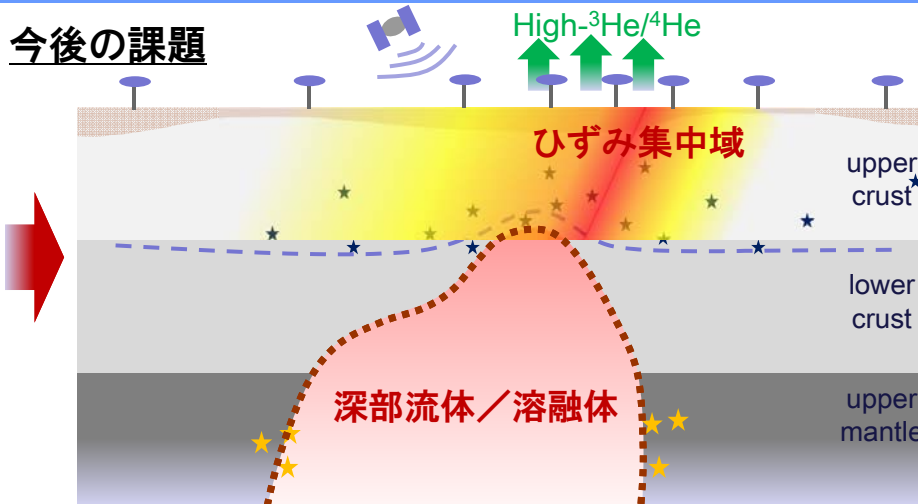
地表からの調査に基づき、地下深部の震源断層の存否や分布範囲をあらかじめ確認するための技術を構築する。

今後の課題

■ 測地学的手法を用いた震源断層の調査技術

- ✓ 地殻構造等に関する知見から、内陸地震を引き起こした震源断層の活動に深部流体が関与していることが指摘
- ✓ しかし、これまでのアプローチのみで断層の存否や分布を推定することは困難

今後の課題



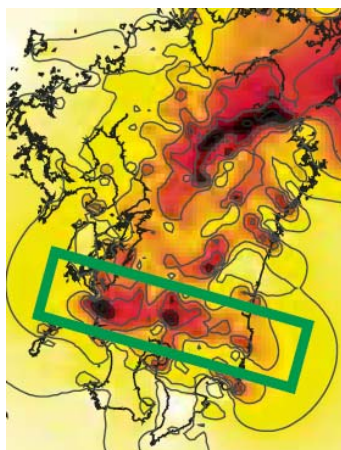
- ✓ 地殻構造イメージング技術の高度化
⇒ **本研究項目**
- ✓ 数値シミュレーションによる地殻変動場の推定
- ✓ 測地・地質学的手法による事例観測
⇒ **時間スケールに応じた地圏環境変動の予測技術**

地表からの調査に基づき、地下深部の震源断層の存否や分布範囲をあらかじめ確認するための技術を構築する。

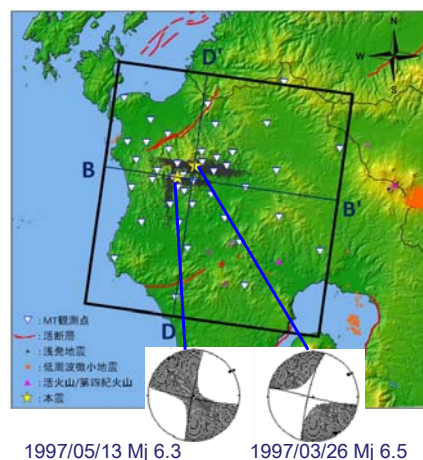
今後の課題

■ 測地学的手法を用いた震源断層の調査技術

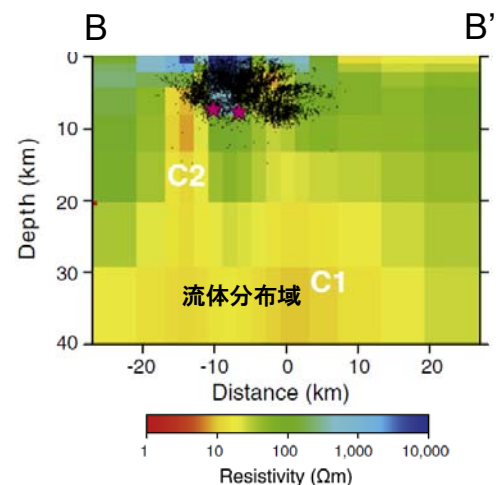
【九州南部せん断帯を事例とした観測】



GPS観測によるせん断ひずみ分布
(Wallace et al., 2009)



鹿児島県北西部地震の震源域における比抵抗分布 (Umeda et al., 2014)



南九州せん断帯

内陸地震のメカニズム解は、この地域に認定されている活断層の変位センスとは異なる。せん断帯東部では最終間氷期以降、隆起速度が急激に増大(長岡, 2010)

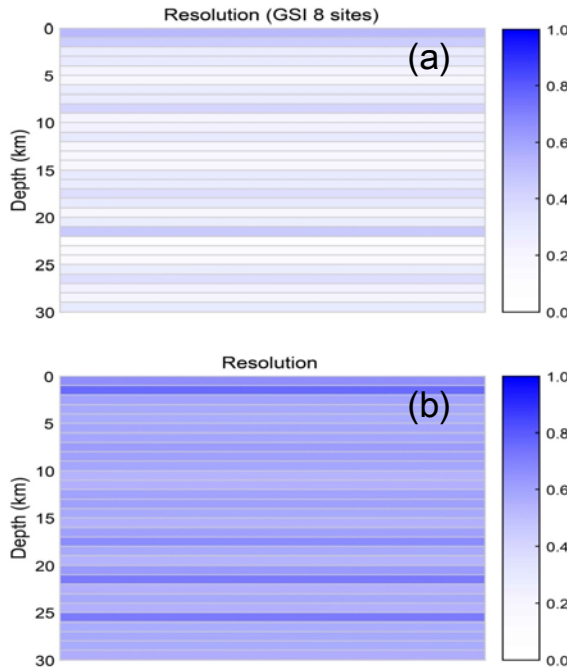
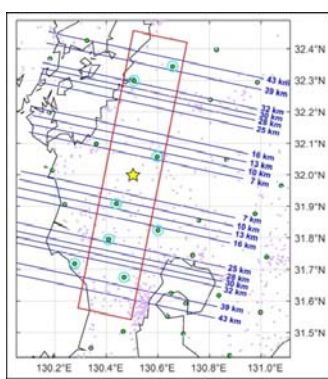
鹿児島県北西部地震

内陸地震の活動は、震源域～霧島下の地殻深部に存在する流体も関与

今後の課題

■ 測地学的手法を用いた震源断層の調査技術

【九州南部せん断帯を事例とした観測】



(a) GEONET観測点および (b) 新たに10地点を追加した場合の解像度分布
(すべり面として、傾斜90°の横ずれ断層を仮定)

● GPS稠密観測

- せん断帯下にすべり面が存在すると仮定した場合に期待される地表変動を効果的にとらえることが可能な観測点配置を検討
- GPS観測データを用いたインバージョンによるすべり面解析を想定した分解能テスト(Menke, 1989)を実施
- 対象領域内に分布するGEONET観測点のみでは、十分な分解能を確保することが困難
- 新たな観測点として10地点を想定した場合、せん断帯中心より7, 10, 13, 16, 25, 28, 30, 32, 39, 43 kmの地点での観測が最適

今後の計画

✓ 沿岸部(浅海域)における適用性の検討

- 低周波微小地震の活動域等を事例としたMT法および地震波トモグラフィ等の適用

✓ 地殻構造イメージング手法の高度化

- 人工ノイズの低減によるMT法観測データ品質の向上
- 後続波を用いた地震波トモグラフィの高分解能化

✓ 測地学的手法を用いた震源断層の調査技術

- 地殻流体を考慮した数値シミュレーションによる地殻変動場の推定
- ひずみ集中域や地震活動域を対象とした事例観測
(九州南部せん断帯におけるGPS稠密観測, 古地磁気測定等)