
地質環境の長期安定性に関する研究の 成果および今後の計画

－ 火山・地熱活動に関する研究 －

独立行政法人 日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門

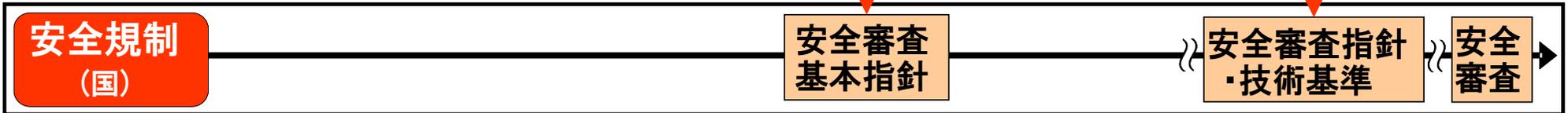
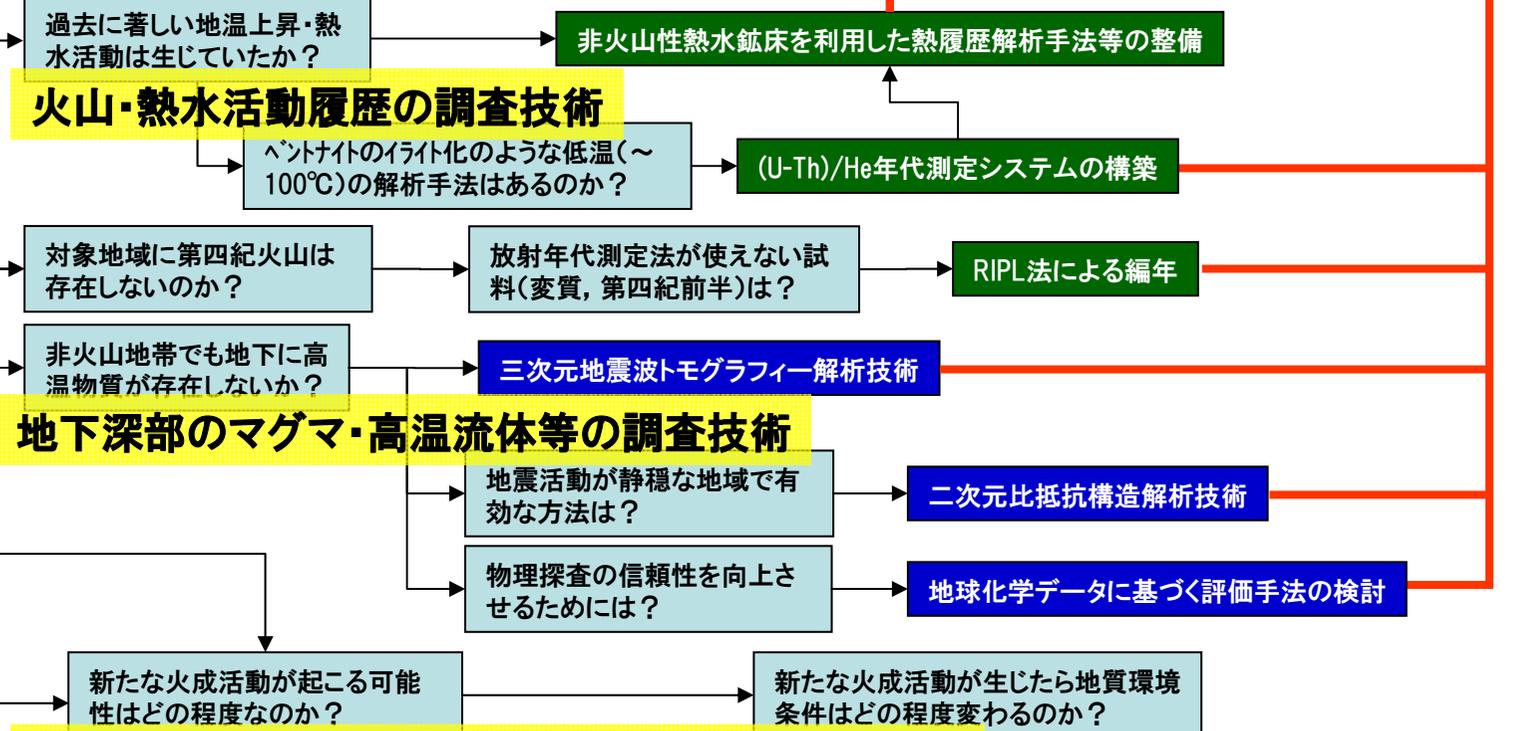
年度 2005 2010 2020



法定要件(概要調査)
最終処分を行おうとする地層およびその周辺の地層において、ボーリング、地表踏査、物理探査、トレンチ掘削を行い、自然現象による地層の著しい変動が長期間生じていないことを示す。

廃棄物小委員会報告
構造運動から生じる熱水活動(非火山地帯の熱水活動)については、場所、影響の範囲がほとんど不明であるので、研究を特に促進する必要がある。

環境要件(概要調査)
文献には存在しない(第四紀)火山の有無は、概要調査以降の調査で確認する。火山フロントより日本海側や単成火山の周辺地域での新たな火山の発生の可能性、マグマによる地温上昇、熱水対流の発生、地下水の水質変化等の影響について検討する。



火山・地熱活動に関する研究の実施項目

1) 火山・熱水活動履歴の調査技術

非火山性熱水鉱床を利用した熱履歴解析手法等の整備

紀伊半島南部地域における研究事例

(U-Th)/He年代測定システムの構築

(U-Th)/He年代測定システム構築の現状

2) 地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術

三次元地震波トモグラフィ解析技術

二次元比抵抗構造解析技術

地球化学データに基づく評価手法の検討

飯豊・朝日山地における研究事例

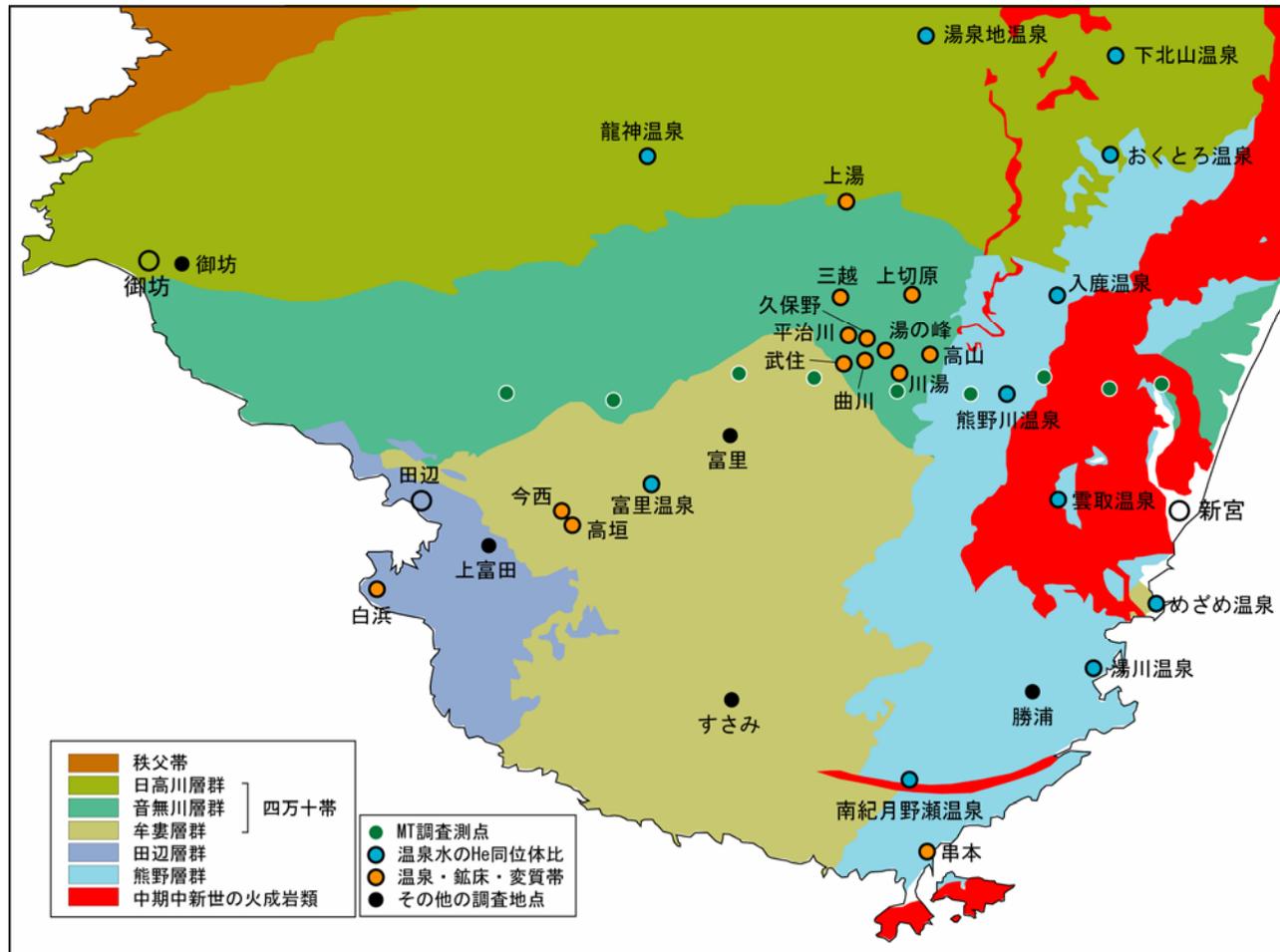
MT法解析におけるスタッキング技術の高度化

3) 火山・地熱活動の長期予測・影響評価モデルの開発

熱・地下水理・希ガス等のシミュレーション技術の検討

Magma2002によるシミュレーションの検討事例

紀伊半島南部地域における研究事例



対象地域:紀伊半島南部地域
 紀伊半島南部地域には第四紀火山が存在しないにもかかわらず、湯の峰温泉、湯泉地温泉などの高温泉や熱水変質帯が分布



第四紀火山が存在しない地域の地熱活動の影響の調査・評価手法を検討

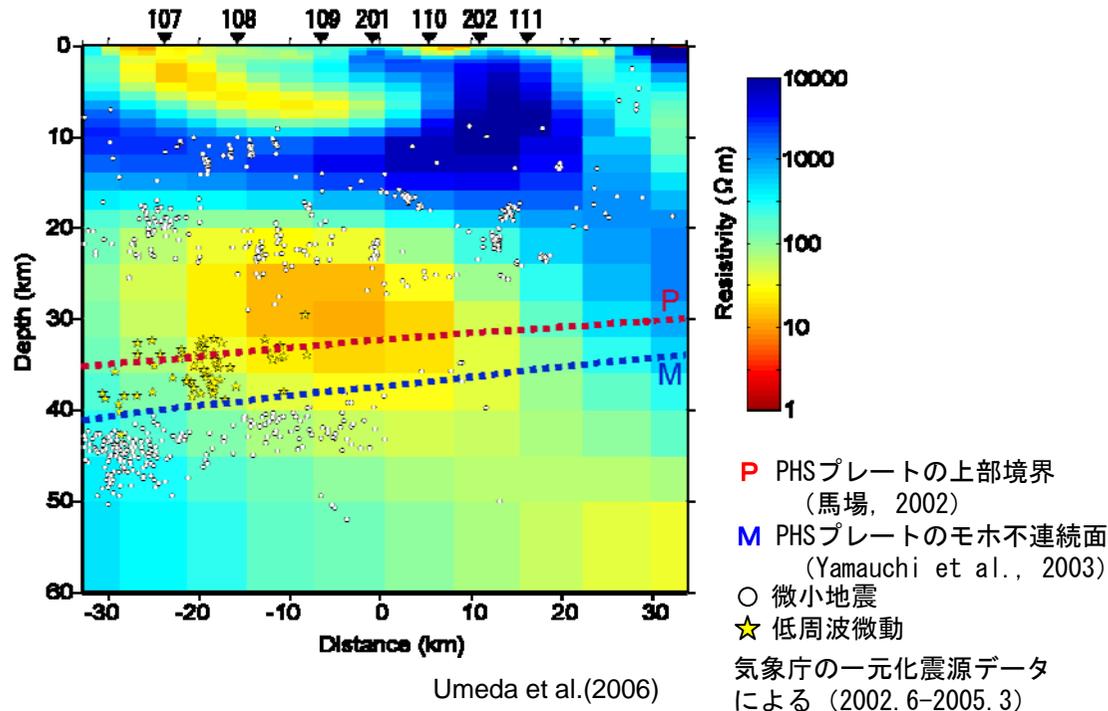
これまでにMT法比抵抗構造調査・温泉水のHe同位体比調査を実施し、地下深部の高温流体の存在を把握



既存の放射年代測定(熱ルミネセンス(TL), フィッション・トラック(FT), K-Ar)により熱履歴に関する調査を実施

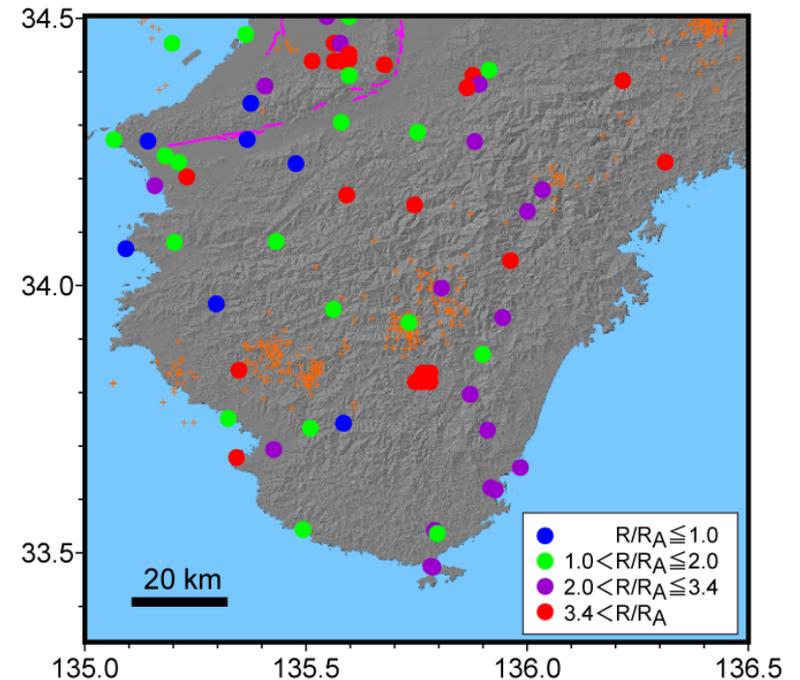
紀伊半島南部地域の地質と調査地点

紀伊半島下の高温流体の存在



紀伊半島下の二次元比抵抗構造

本宮地域の地下30km付近に低比抵抗体が分布。低比抵抗体分布域で微小地震が発生していることから、マグマではなく高温の流体が存在していると考えられる。

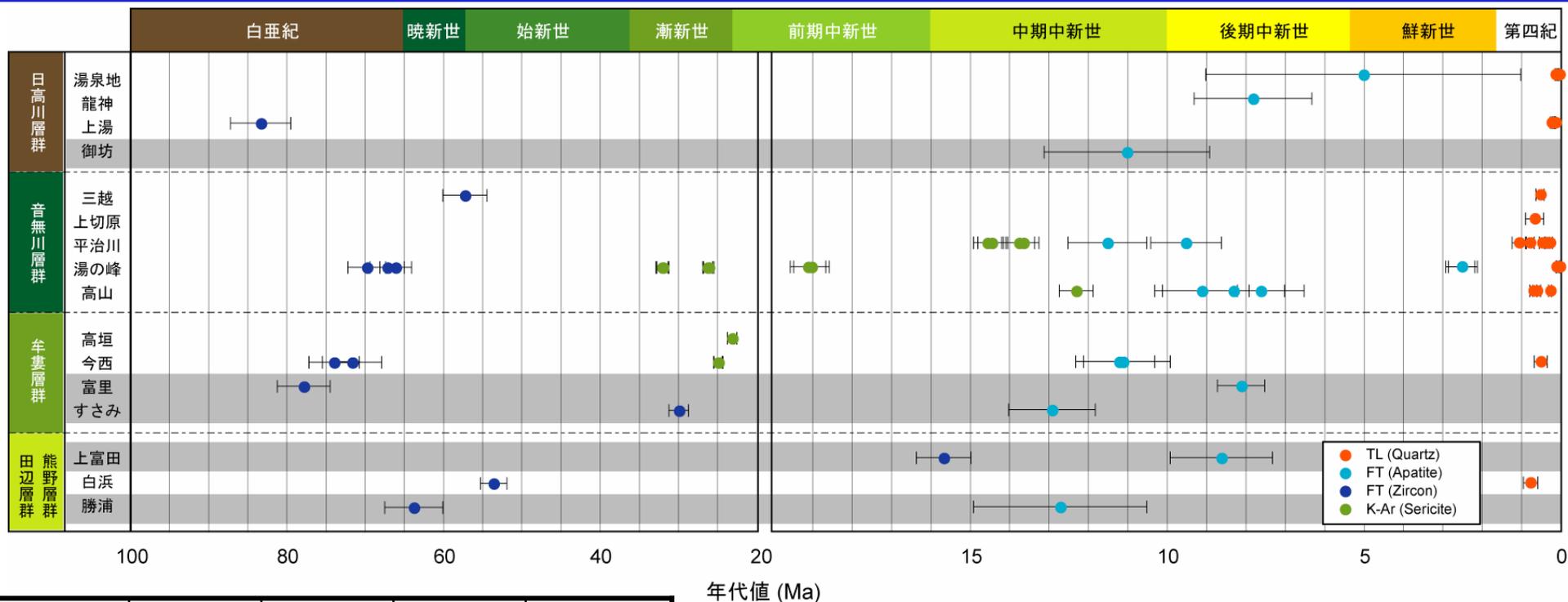


紀伊半島周辺のヘリウム同位体比

マントル由来の高い³He/⁴He比をもつヘリウムガスが地下深部からもたらされていると考えられる。

この高温流体の活動はいつごろから始まったのか。
 →低温の地熱活動履歴を既存の手法でどこまで把握できるかを確認

年代測定による地熱履歴の考察



鉱物の種類	K-Ar法	FT法	TL法	(U-Th)/He法
白雲母	350±50			
黒雲母	300±50			
長石類	230程度			
カリ長石	110~180			
アパタイト		130±30		70
ジルコン		~240		180
石英			80~90	

主な鉱物の各年代測定法における閉鎖温度 (単位: °C)

年代値 (Ma)

セリサイトK-Ar年代とアパタイトFT年代から、中期中新世頃までの比較的高温の活動と、数Ma以降の比較的低温の活動とが存在することが確認できたが、低温の活動については、アパタイトFT年代では数Maの年代でかなりの誤差を持ち、石英のTL年代では数十万年前までと、従来方法では限界がある。より低温の閉鎖温度で、数Maの年代測定についても理論上より高い精度で可能であると考えられている(U-Th)/He年代測定法の適用を目指す。

(U-Th)/He年代測定システム構築の現状

ジルコン・アパタイトなどの鉱物中に微量に含まれるU, Thの放射壊変により生じ、鉱物中に蓄積する α 粒子 (^4He) と、U, Thの量と年代値 t との間には以下の関係式が成り立つことから、鉱物中のHe, U, Thの量を測定することで年代を測定することができる。

$$^4\text{He} = 8 \text{ }^{238}\text{U}\{\exp(\lambda_{238}t) - 1\} + 7 \left(\frac{^{238}\text{U}}{137.88}\right)\{\exp(\lambda_{235}t) - 1\} + 6 \text{ }^{232}\text{Th}\{\exp(\lambda_{232}t) - 1\}$$

鉱物分離

対象となる鉱物（ジルコン、アパタイト等）を分離

鏡下選別

実体鏡下で形、大きさ、包有物に着目し選別

脱ガス（加熱） ⇒ He 分析

結晶が溶融しない温度（アパタイト1050°C：ジルコン1350°C）で脱ガスし、希ガス質量分析装置によりHeを定量

溶解

⇒ U, Th分析

試料を酸やアルカリで溶解し、ICP-MSによりU, Thを定量

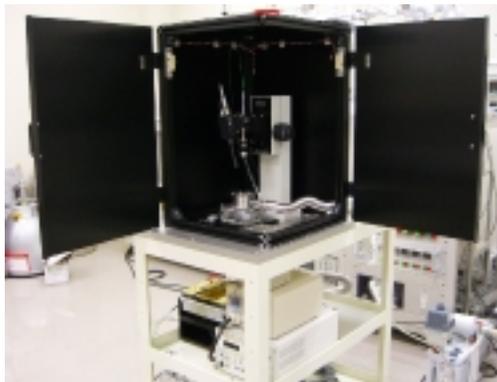
測定方法

Heの測定

1～4個の鉱物結晶を白金箔で包んだパッケージに真空チャンバー内でレーザーを照射することにより加熱・脱ガスを行い、液体窒素で冷却した活性炭とNE Getterで精製した後、希ガス質量分析装置で感度法による ^4He の定量を行う。

U,Thの測定

脱ガスした試料をパッケージごと融剤 (LiBO_2) とともにビードサンプラでガラス化し、フッ酸で溶液化してから蒸散させ、最終的に希硝酸溶液とする。標準添加法により四重極ICP質量分析装置で ^{238}U と ^{232}Th の定量を行う。



レーザー照射装置



レーザー照射時の
パッケージの様子



四重極ICP質量分析装置



試料溶融用のるつぼ

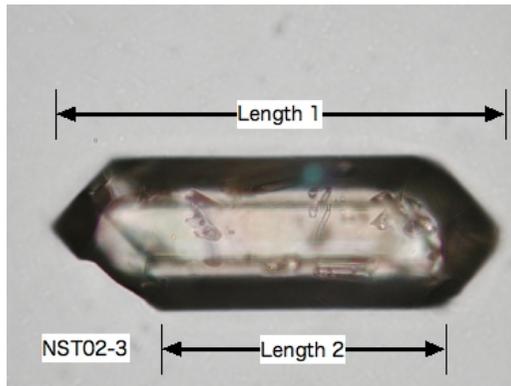
標準試料の測定結果

標準試料の測定例（仁左平デイサイト中のジルコン）

→原岩の黒雲母K-Ar : $21.0 \pm 0.3 \text{Ma}$, ジルコンFT : $23 \pm 1 \text{Ma}$

Sample	Length 1 (μm)	Length 2 (μm)	Width 1 (μm)	Width 2 (μm)	Mass (μg)	U (ppm)	Th (ppm)	4He (ncc/mg)	RE (%)	Ft	Age (Ma) Raw	Age (Ma) Corrected
NST02-1	283	185	142	110	16.1	52	127	667		0.83	66.7	80.2
NST02-2	273	160	106	102	10.3	169	45	679	0.36	0.80	31.1	38.8
NST02-3	161	102	60	55	1.9	143	87	869	6.98	0.60	43.6	65.6
NST02-6	245	190	71	66	4.5	236	67	952	2.56	0.73	31.0	42.7

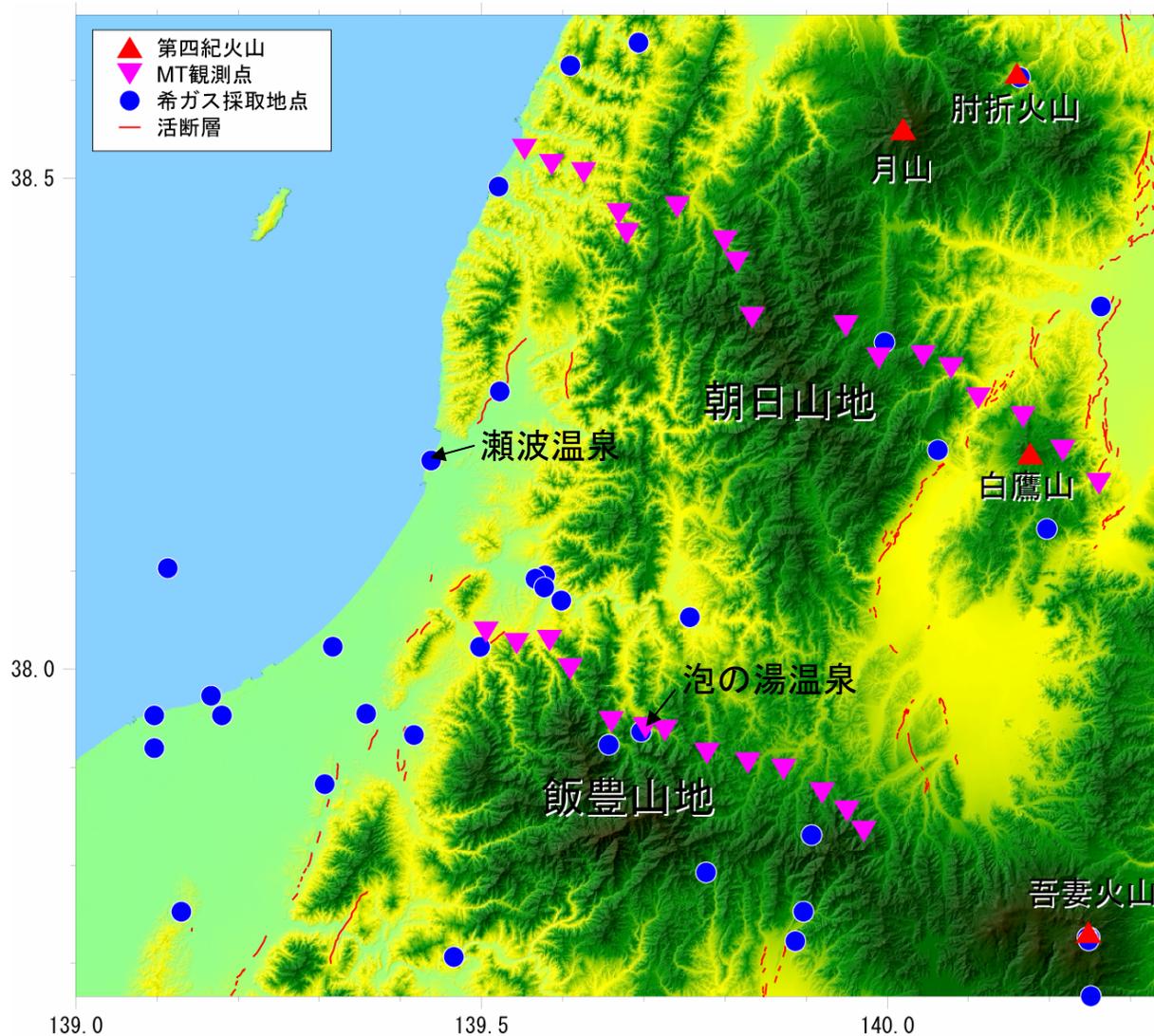
(山田ほか, 2007)



予察的に年代既知のジルコン（NST：仁左平デイサイト中のジルコン）の測定を実施した結果，他手法の測定結果に比べて数倍古い値が得られた。結晶の体積表面積比を元にした補正を含め，年代を算出するための数値解析については既報の測定値を用いて検証しているため，U,Thの濃度を過小評価している可能性が高いと考えられる。

年代測定を行うための手順・機器等は一通り整備できたが，分析上の問題点を解消し，標準試料の分析による分析精度の確認を行っていく必要がある。

飯豊・朝日山地における研究事例



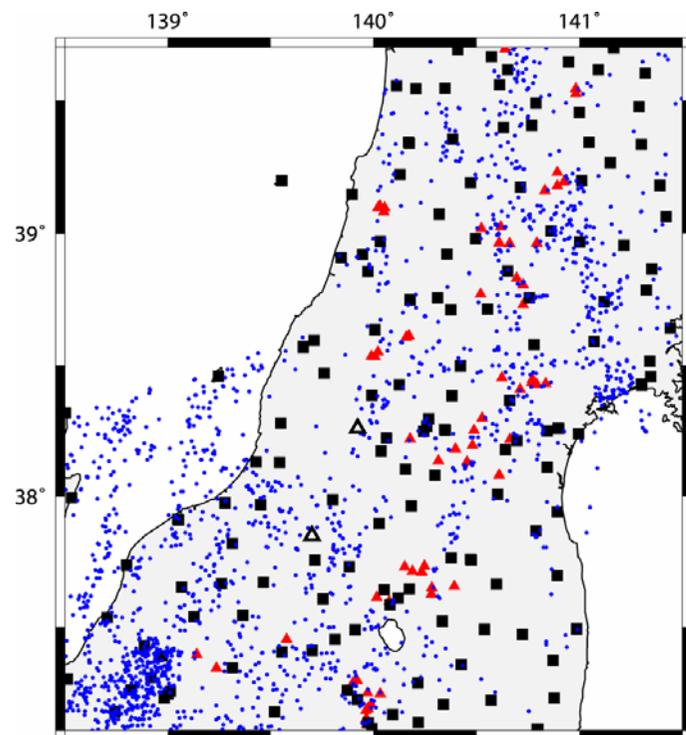
対象地域：飯豊・朝日山地

飯豊山地はジュラ紀～古第三紀の，朝日山地は白亜紀～古第三紀の花崗岩類・堆積岩類からなり，いずれも第四紀火山から数十km以上離れているにもかかわらず，周辺には泡の湯温泉，瀬波温泉などの高温泉が分布。

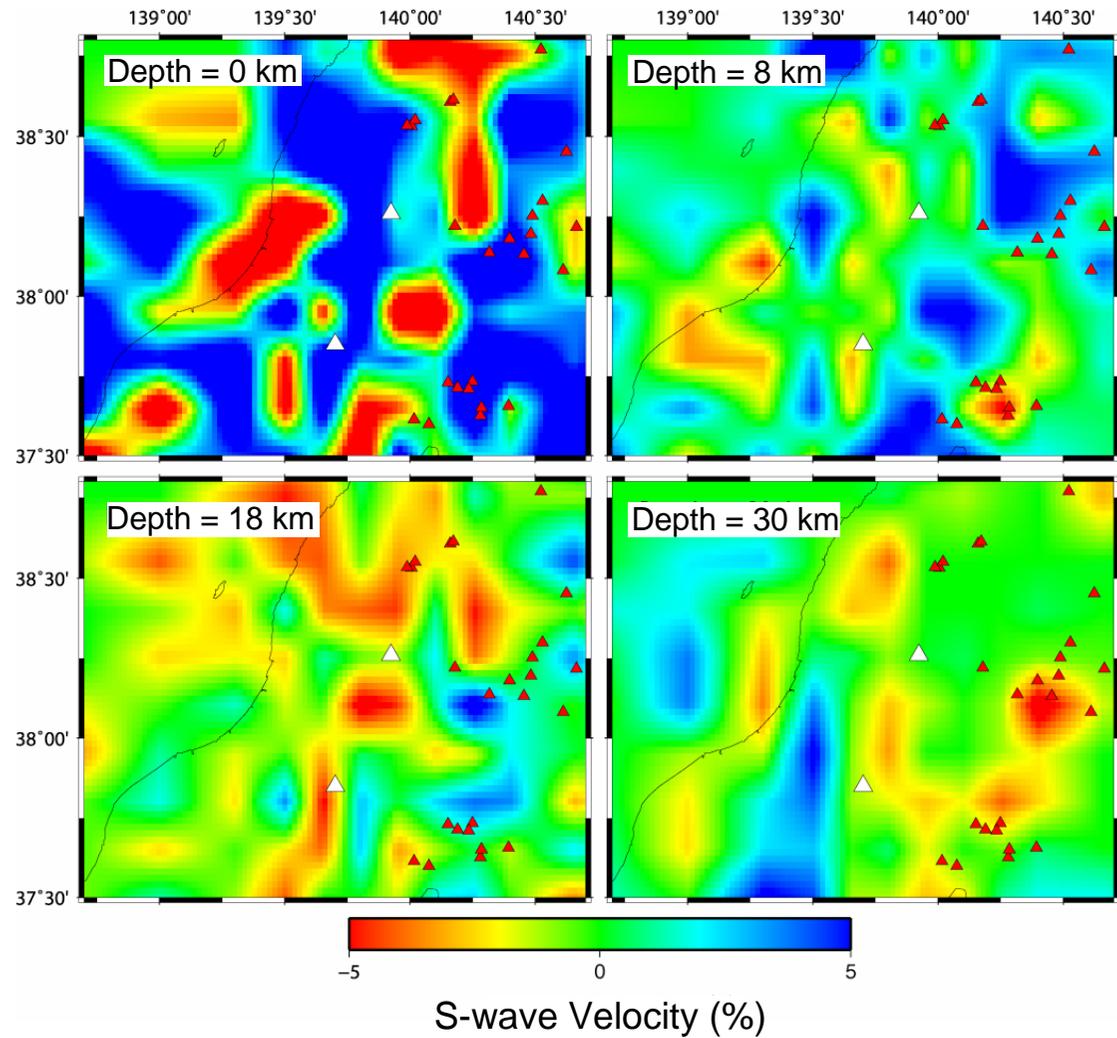
調査項目

- 地震波トモグラフィー
- MT法比抵抗構造調査
- 温泉水の希ガス同位体比

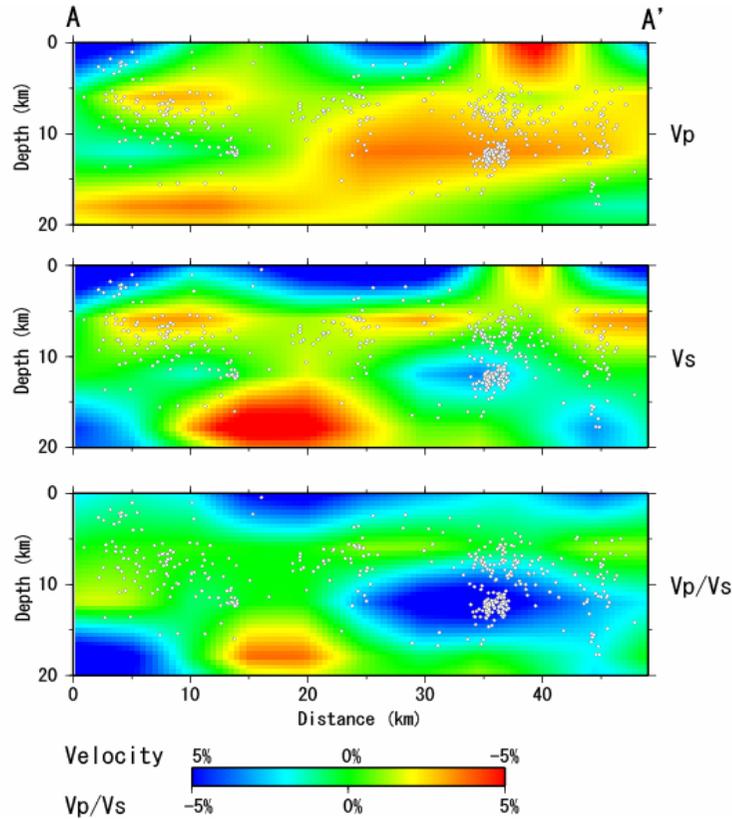
飯豊・朝日山地周辺の地震波トモグラフィ



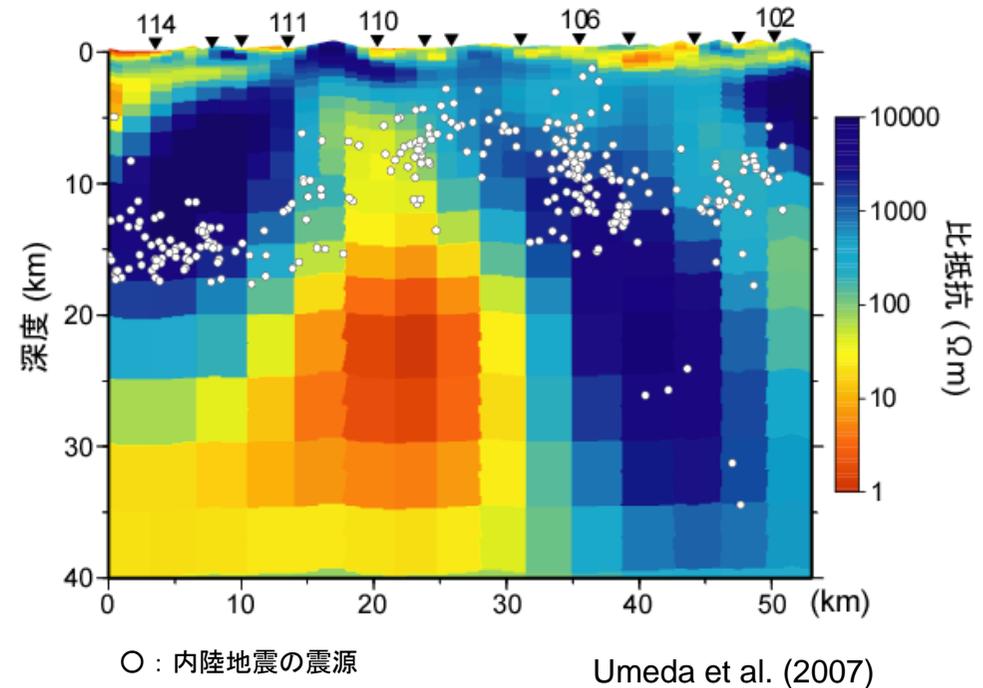
震源分布と観測点
(● : 震源, ■ : 観測点)



飯豊山地の地下構造



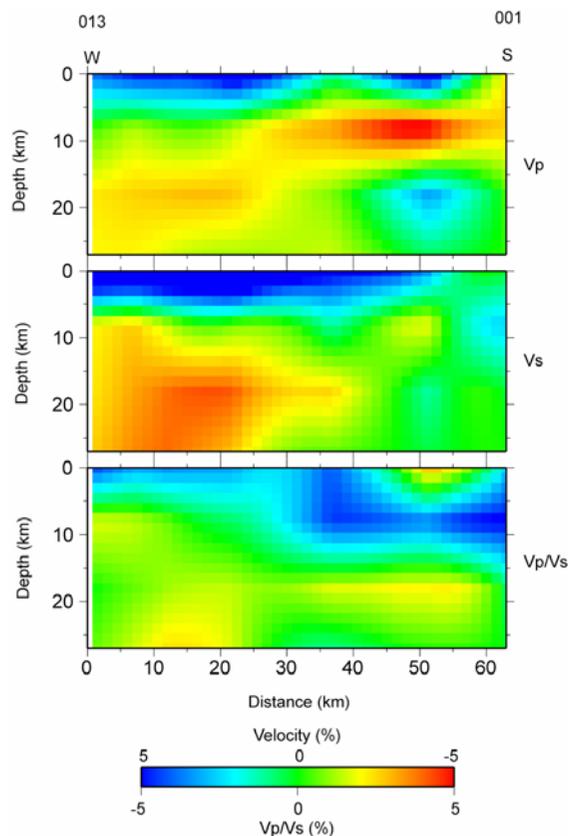
飯豊山地下の地震波速度構造



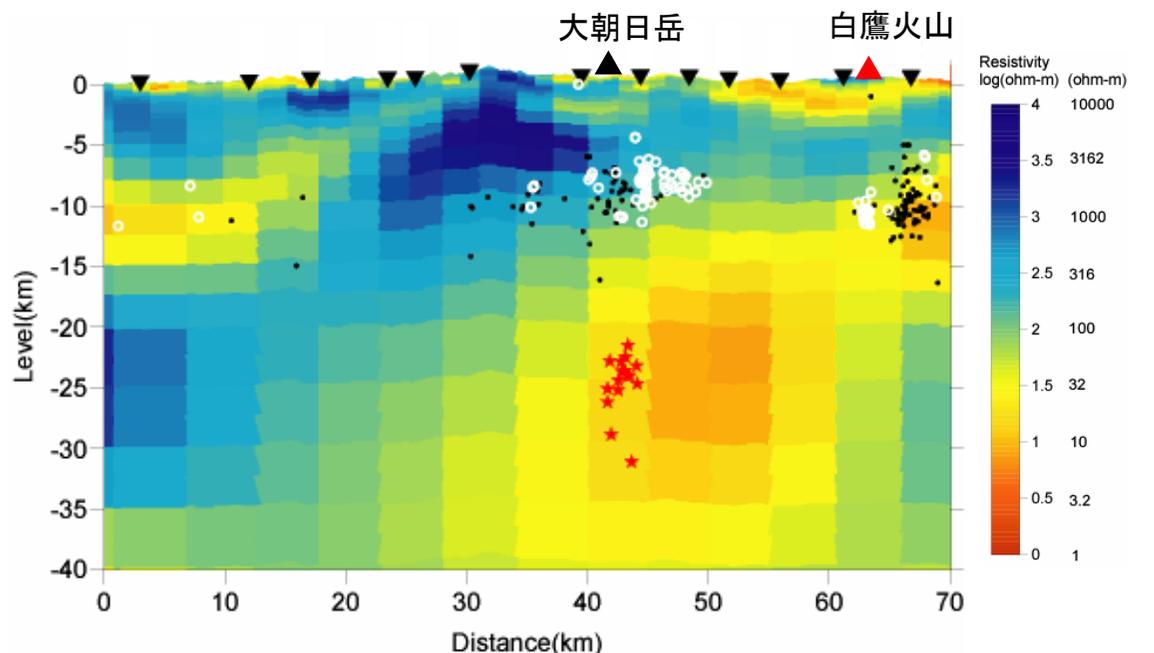
飯豊山地下の比抵抗構造

飯豊山の北西の北股岳の地下15km以深に顕著な低比抵抗体の存在が確認され、地震波のS波低速度域の分布と調和的である。また、低比抵抗体の上面の形状は、地殻内地震の震源の下限深度 (cut-off depth) と調和的であることから、地下15km以深には400°C以上の高温領域が存在することを強く示唆する。

朝日山地の地下構造



朝日山地下の地震波速度構造

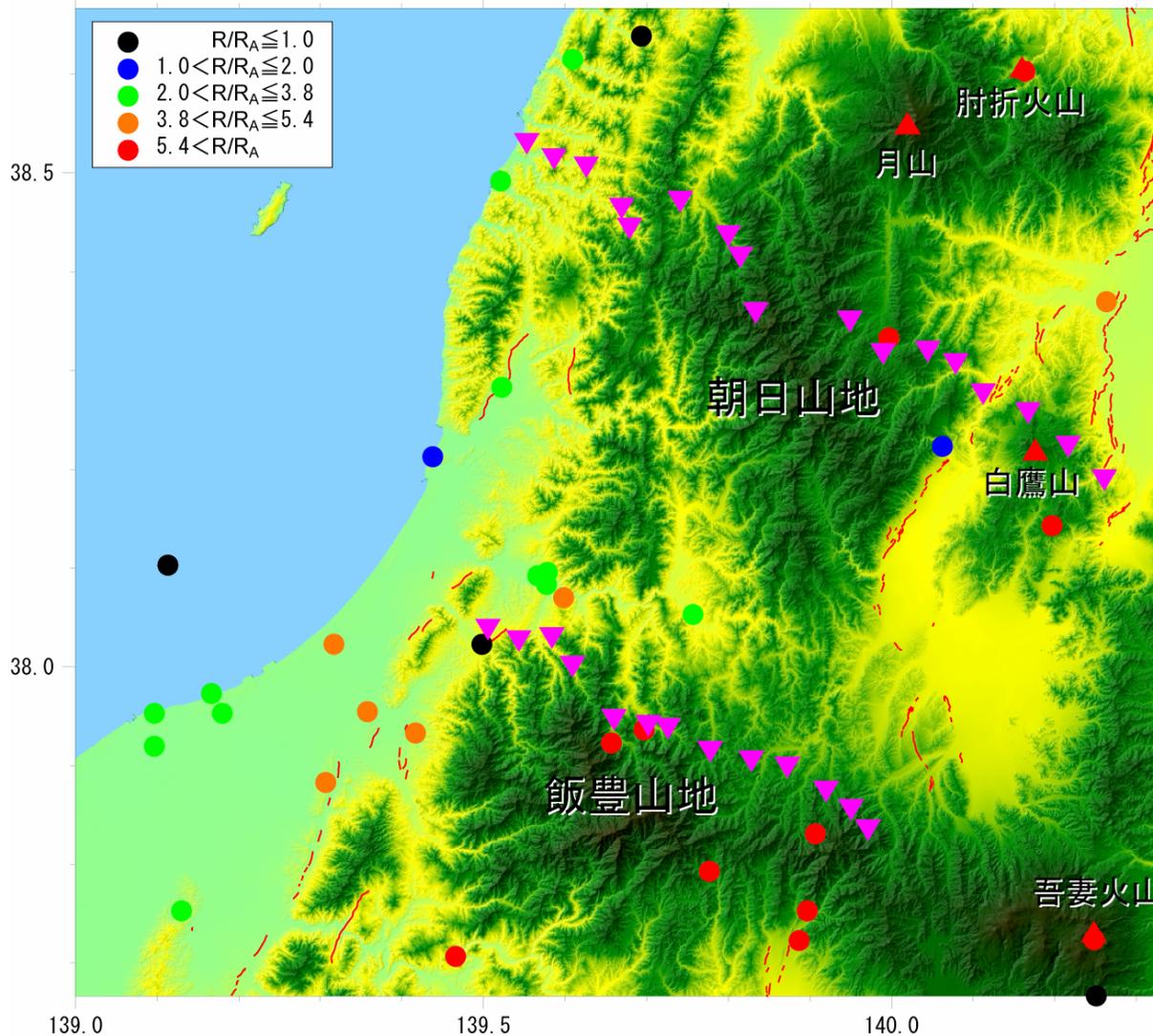


- ★ 低周波微動地震
- 地殻内地震（側線の北側5km以内）
- 地殻内地震（側線の南側5km以内）

朝日山地下の比抵抗構造

深度15km以浅の高比抵抗体は地表地質との関連から花崗岩と考えられる。一方、朝日山地東部の地下20~30km付近の低比抵抗体は低周波微動地震の分布との関連からマグマおよび関連する熱水の存在を示すと考えられる。朝日山地西方には地下10~15km付近に別の低比抵抗体が確認できる。MTによる低比抵抗体の分布と地震波のS波低速度域の分布が一致していないのは、本地域周辺で地震が少なく、トモグラフィの解像度が悪いことも一因であると考えられる。

飯豊・朝日山地周辺の温泉水中の希ガス同位体比



第四紀火山から放出される火山ガス

$${}^3\text{He}/{}^4\text{He} = \sim 8R_A$$

$$(1R_A = 1.4 \times 10^{-6})$$

新第三紀の高温岩体のHe同位体比

$${}^3\text{He}/{}^4\text{He} = \sim 3.8R_A$$

(U,Thによって生成される ${}^4\text{He}$ の効果

果

を計算して導出)

飯豊山地については、低比抵抗体に近い地域で温泉水の ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比が $3.8R_A$ を超える高い値を示しており、マントルから新たに上昇してきたマグマ由来の高 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比のヘリウムの寄与によると考えられる。朝日山地については、 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比が高い値を示す温泉と低比抵抗体の分布が対応しておらず、明瞭な傾向は確認できなかった。

地震波トモグラフィ, MT法比抵抗構造調査, 震源データ, He同位体比調査等を組み合わせることで, 地下深部のマグマとそれに伴う熱水流体の存在を把握することが可能となった。

MT法解析におけるスタッキング技術の高度化

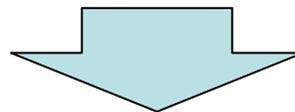
地震活動が静穏な場所での地下深部構造調査の有力な手法としてMT法がある。地形的な条件や人工ノイズにより、ノイズレベルの高い地域が存在する。ノイズレベルの高い地域でのMT法の適用性を高めるために、適切なデータのスタッキングによる低品質データの品質向上をはかる。

従来の手法

- コヒーレンスを基にしたスタッキング（自動計算）

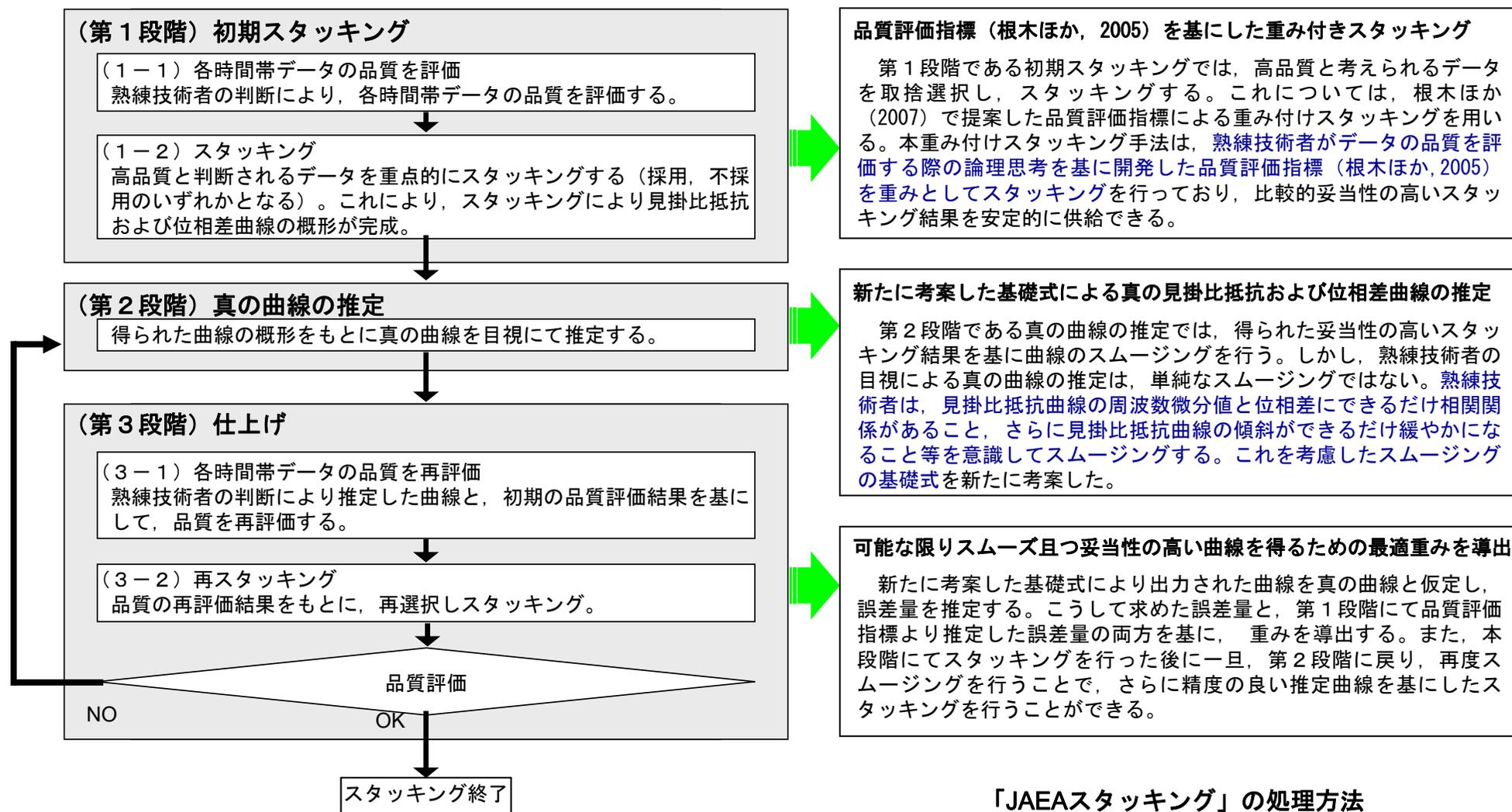
- 熟練技術者の目視によるデータ選別・スタッキング

技術者に熟練を要し、作業に時間がかかるが、コヒーレンスを基にしたスタッキングより安定した結果が得られ、信頼できる手法とされている



熟練技術者が目視によるスタッキングを行う論理思考を基にしたスタッキング処理方法「JAEAスタッキング（仮称）」を考案

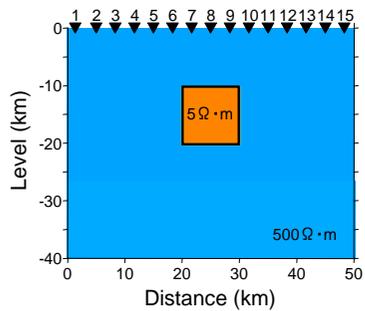
スタッキングを行う論理思考



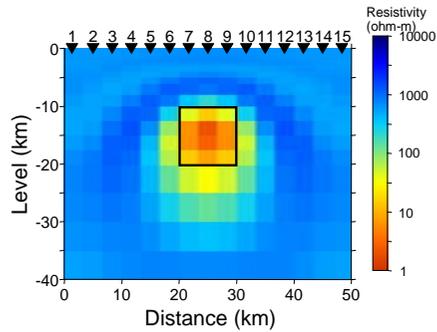
「JAESスタッキング」の処理方法

熟練技術者の目視によるデータ選別・スタッキングの論理思考

理論データによる比較

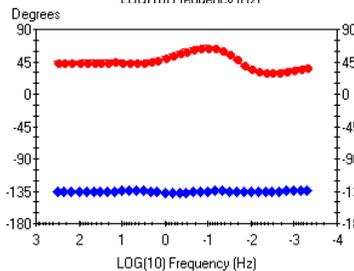
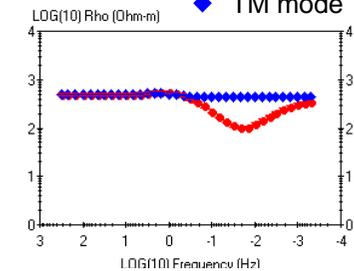


二次元モデル

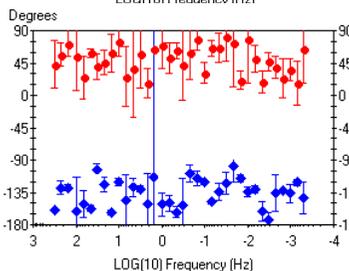
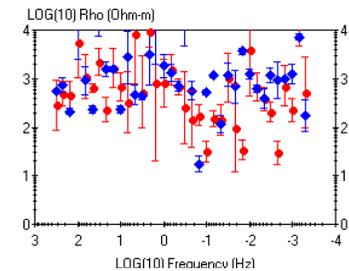


二次元インバージョン
解析結果

◆ TE mode
◆ TM mode

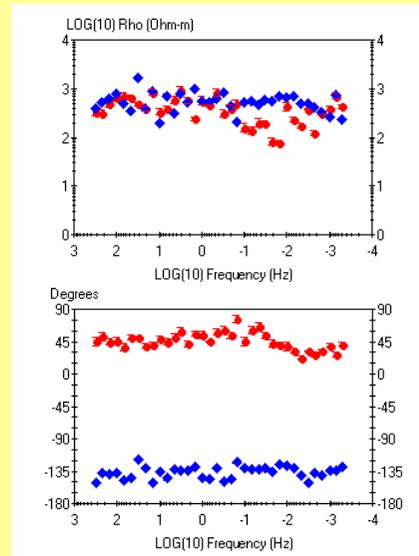


理論データ

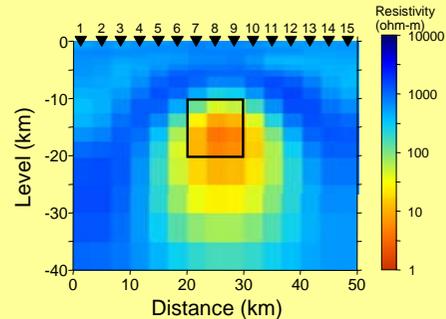


理論データにノイズを付加

スタッキング前の単一データ例 (測点5)

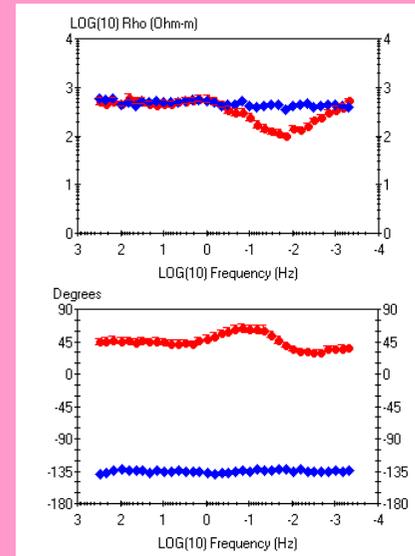


スタッキング処理結果 (測点5)

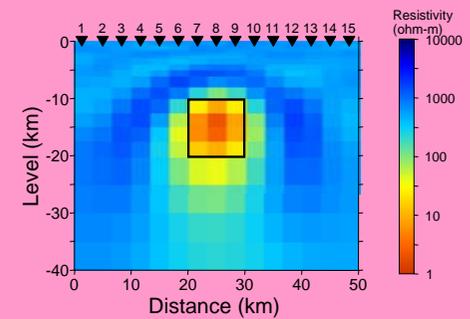


二次元インバージョン解析結果

従来のコヒーレンスを基にした
スタッキング処理



スタッキング処理結果 (測点5)



二次元インバージョン解析結果

「JAEAスタッキング」による処理

低品質実データに対する処理例

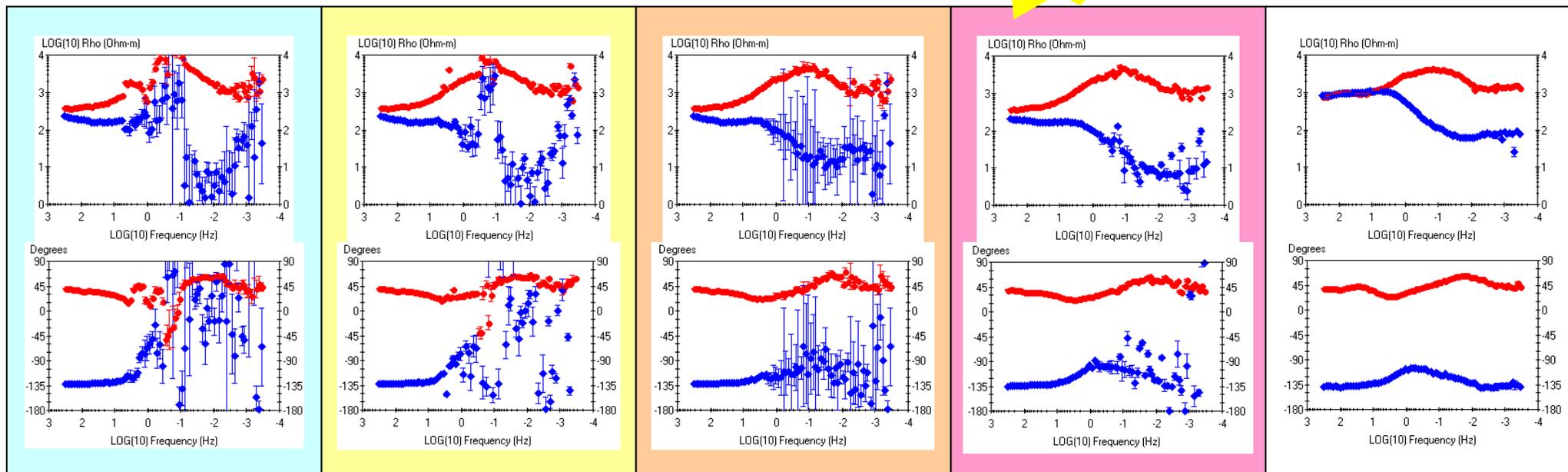
単純スタッキング

コヒーレンスを基にした
スタッキング

目視スタッキング

「JAEAスタッキング」

隣接測点の高品質データ



- ◆ TE mode
- ◆ TM mode

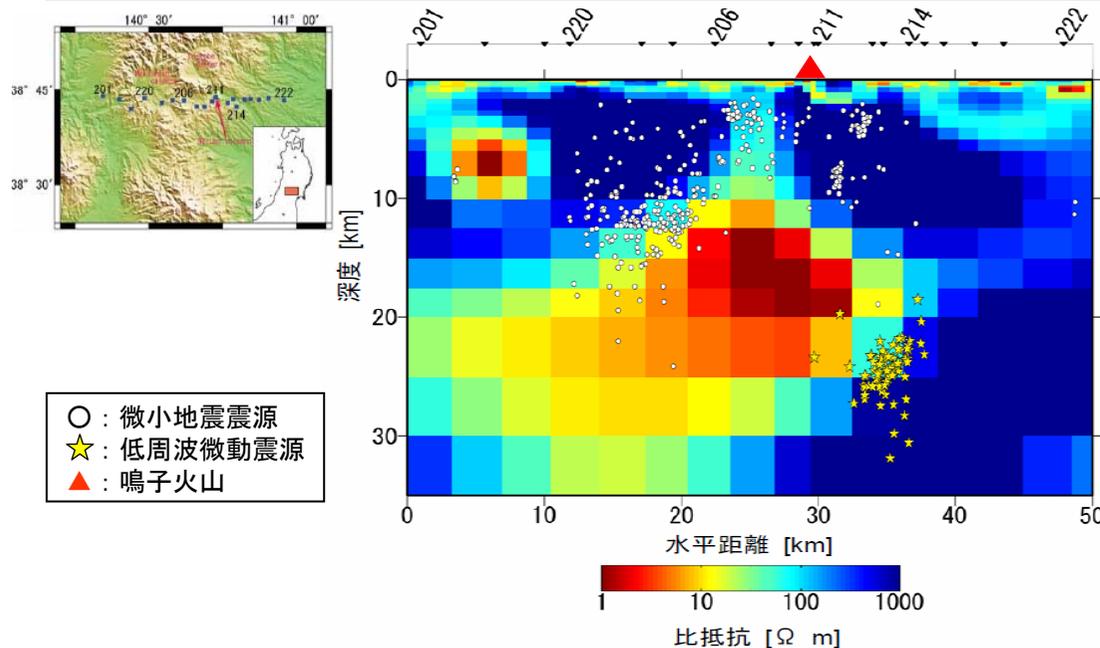
山形県山形市の測定例

「JAEAスタッキング」による低品質データ処理結果は、従来手法であるコヒーレンスをもとにしたスタッキングや目視スタッキングによる処理結果よりも連続性が良く、隣接測点の高品質データにも近い曲線が得られた。また、本測点の目視スタッキングには熟練者がほぼ丸一日を要するのに対して、「JAEAスタッキング」では同程度の処理に要する時間は市販のパソコンを用いて数分であり、解析業務の時間短縮にも大きく寄与することが期待される。

Magma2002によるシミュレーションの検討事例

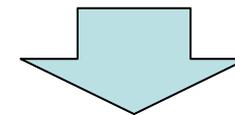
開発コード：Magma 2002

目的：マグマ溜まりおよびそれに伴う熱水対流系の生成・冷却過程のシミュレーション
概要：既存の地熱シミュレータFIGS 3Cをベースとし，マグマ溜まりを取り扱えるよう，温度1000°C，圧力1000barsまでの領域を計算できるように改良。多孔質媒体中の熱・質量保存則を拡散方程式とともに差分化して計算。



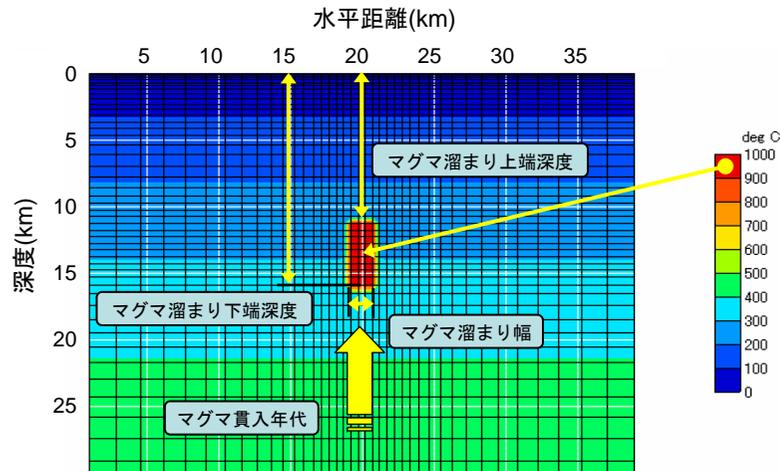
鳴子火山下の二次元比抵抗構造

鳴子火山を例として，MTで得られる地下深部の比抵抗構造から推定されるマグマをモデル化し，微小地震のCut off Depthが400°C等温線に対応すると仮定して感度解析を行い，マグマの貫入時期，マグマ溜まりの温度およびサイズについて検討を実施。



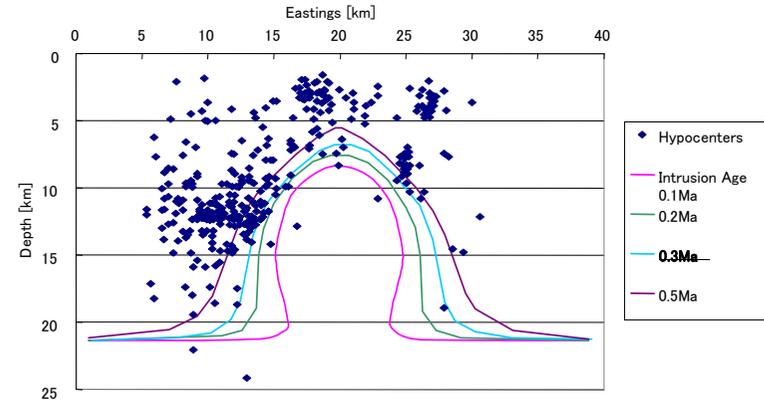
シミュレーションで得られた結果を地質データと比較し，結果の妥当性を確認。

鳴子火山下のシミュレーション結果



齋藤ほか (2007)

シミュレーションで用いた計算格子および初期温度分布図



齋藤ほか (2007)

浅発地震震源分布のCut off depthと400°C等温線の比較
(マグマ貫入年代による変化)

マグマ貫入年代：貫入からの経過時間を30万年としたとき、最も近い値を得た
→鬼首カルデラの年代測定結果 (0.2~0.3Ma) と整合的

シミュレーションをMT法による比抵抗断面の結果と組み合わせることで、時間スケールを含んだ情報(マグマ溜まりの生成時期, 継続期間, 熱的影響範囲の将来予測など)についての検討が可能となる。

H19以降の計画

1) 火山・熱水活動履歴の調査技術

○非火山性熱水鉱床を利用した熱履歴解析手法等の整備

- アパタイトFT年代データの充実化
- 他の年代測定手法の適用 (Ar-Ar, (U-Th)/Heなど)
- 流体成分の違いに基づく熱源の識別
(流体包有物の塩濃度, ガス成分など)
- 紀伊半島南部地域の地熱活動のモデル化

○(U-Th)/He年代測定システムの構築

- 分析上の問題点の解消
- 実試料の分析によるデータ蓄積
- 標準試料の分析による分析精度の確認

H19以降の計画

2) 地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術

○二次元比抵抗構造解析／地球化学データに基づく評価手法の検討

- 朝日山地周辺の補足調査
- 能登地域の調査（北陸の非火山性高温泉分布域）
- 地質構造・テクトニクスと関連付けた検討

○MT法解析におけるスタッキング技術の高度化

- 実際の調査への適用

3) 火山・地熱活動の長期予測・影響評価モデルの開発

○熱・地下水理・希ガス等のシミュレーション技術の検討

- 解析事例の蓄積
- 既存データをもとにした非火山地域での解析