

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

全体計画における達成目標(～H22頃)

- 地上からの調査段階において、具体的な地域を対象として、第四紀火山・熱水活動の履歴や地下深部のマグマ・高温岩体等の存在を確認するための体系的な調査技術を提示する。
- 安全評価基本指針等に資するため、日本海側、単成火山周辺等において、新たな火成活動の発生する可能性を概括的に評価できる手法を提示する。
- 地上からの調査段階において、構造運動から生じる深部流体の分布やその特徴を把握するとともに、地殻変動や断層活動等との関連性を概括的に把握できる手法を提示する。

全体計画における研究課題(～H22頃)

1. 地下深部のマグマ・高温岩体等の調査技術
2. 第四紀の火山・地熱活動等の調査技術
3. 火山・熱水活動の長期予測・影響評価モデルの開発
4. 構造運動による熱水活動(非火山性熱水活動)に関する基盤研究

1.地下深部のマグマ・高温岩体等の調査技術

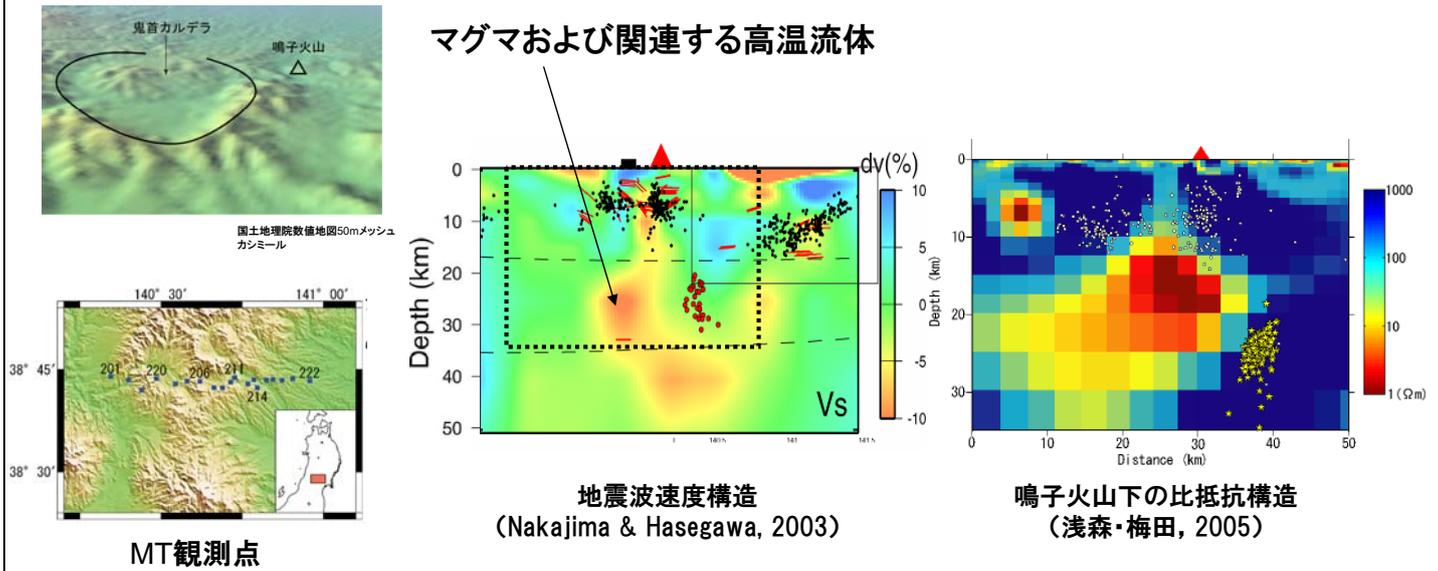
研究課題

既存の地球物理学的手法や地球化学的手法の適用性確認を通じて体系的な調査技術を構築する。

実施内容

- ・MT法の適用性の検討(鳴子火山の事例)
- ・MT法のデータ解析技術の高度化
- ・総合的なマグマ検出手法の適用性の確認(飯豊・朝日山地の事例)

MT法の適用性の検討(鳴子火山の事例)



MT法は、地震波トモグラフィーと同様に、マグマ・高温流体等を検出するための地球物理学的手法の一つであることを確認した。

MT法のデータ解析技術の高度化

「JAEAスタッキング」フローチャート

地震活動が静穏な地域でも有効なMT法であるが、人工ノイズに弱い。

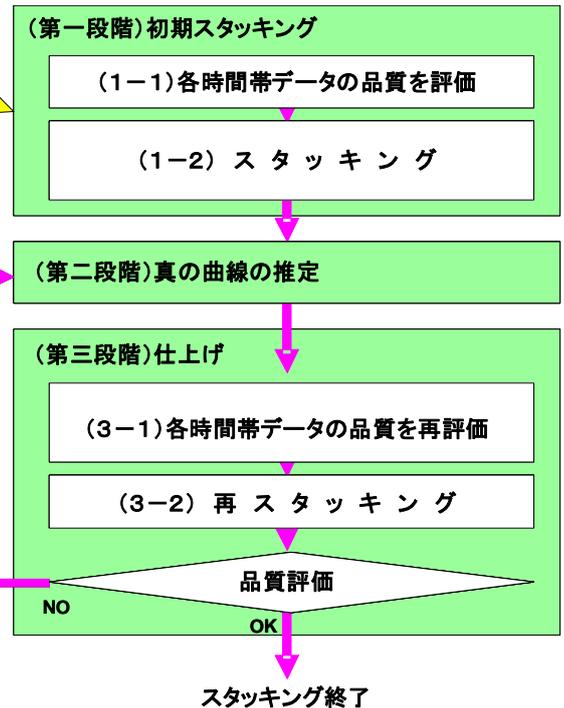
MT法のデータ解析技術の高度化が必要

信頼性指標による重み付けスタッキング

- ①見掛比抵抗の微分値と位相差の相関
- ②曲線の不連続性
- ③データの分散に基づく加重スタッキング

「JAEAスタッキング」

特許出願済み 発明の名称;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
出願番号;特願2007-302772

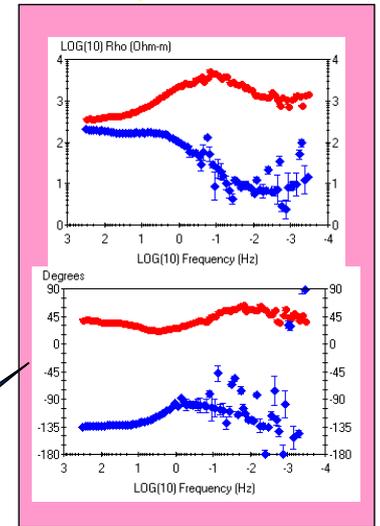
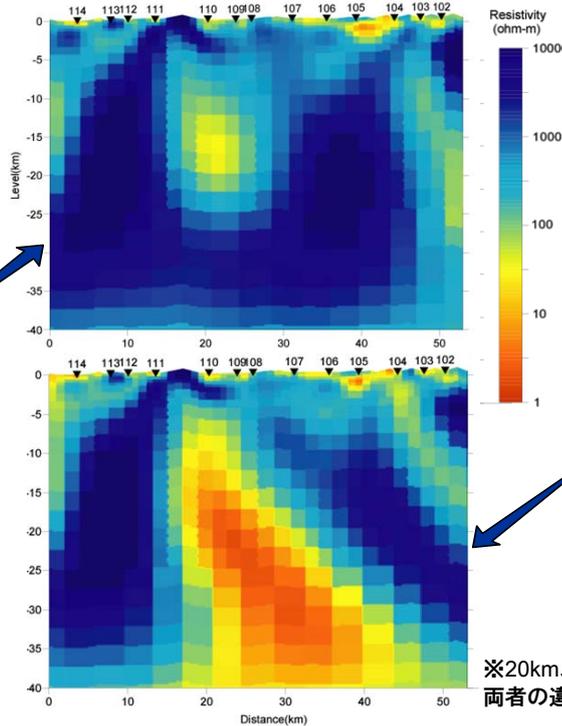
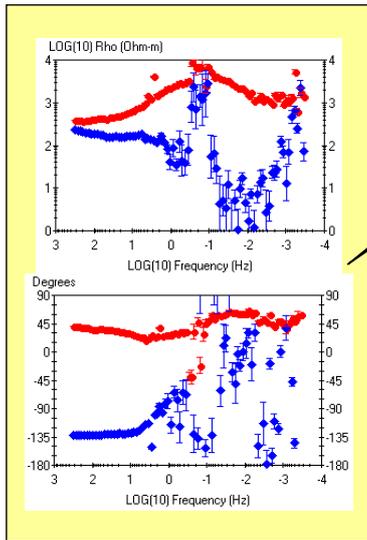


MT法のデータ解析技術の高度化

データの連続性向上, エラーバーの大きさ減少

「JAEAスタッキング」

電場と磁場の相関のみに
基づいたスタッキング



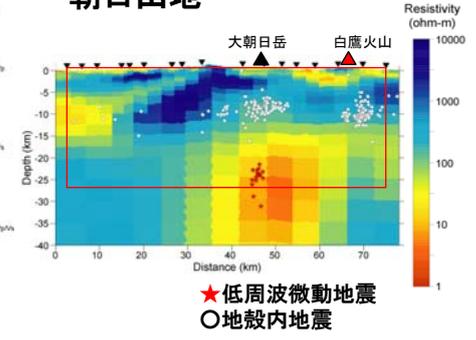
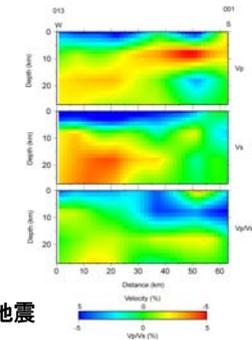
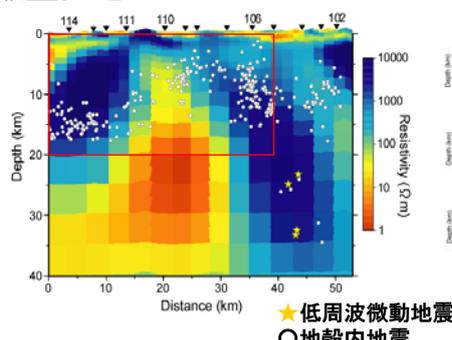
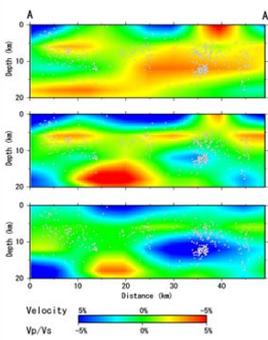
山形県山形市の測定例
 ◆ TE mode
 ◆ TM mode 根木ほか (2007)

※20km以浅は、高品質の高周波データによるため、両者の違いは明確ではない。

総合的なマグマ検出手法の適用性の確認 —地球物理学的手法—

飯豊山地

朝日山地



地震波速度構造
(Umeda et al., 2008)

比抵抗構造
(Umeda et al., 2007)

地震波速度構造

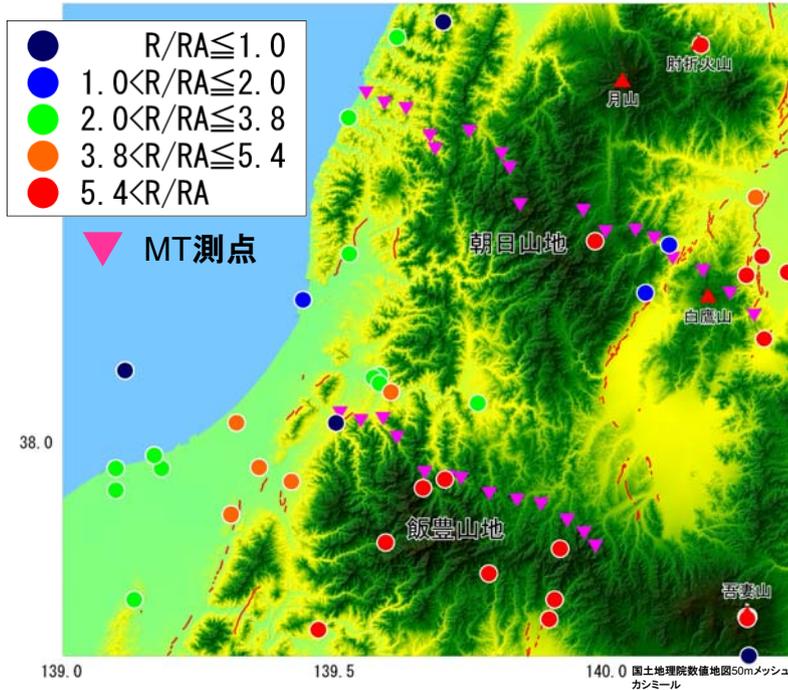
比抵抗構造
(Ninomiya et al., submitted)

- 飯豊山地と朝日山地の地殻中部には地震波低速度域と低比抵抗体が存在
- これらの異常体の上面は地殻内地震のcut-off depthと調和的

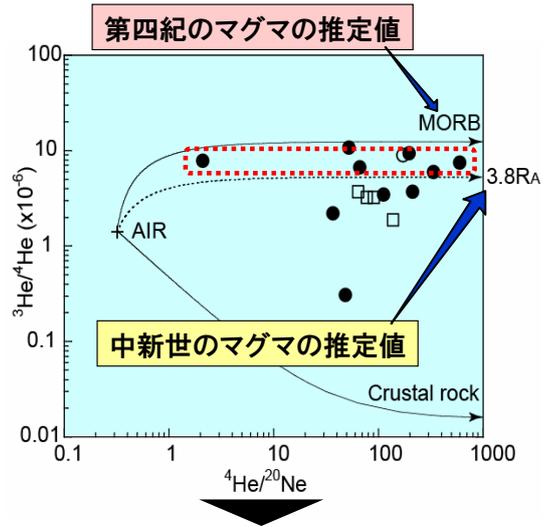
飯豊山地の地下には400°C以上の高温の物質が存在することが示唆される。これらは、

- ① (地表に噴出せず)地下に伏在しているマグマ
- ② 中新世の火成活動に由来する高温岩体に伴う熱水 の可能性が考えられる。

総合的なマグマ検出手法の適用性の確認 —地球化学的手法—



飯豊・朝日山地周辺の温泉ガスのヘリウム同位体比の分布



地球化学的手法により、飯豊山地と朝日山地下の高温領域は、（噴出せずに）伏在しているマグマであることが推定できる。

1. 地下深部のマグマ・高温岩体等の調査技術

これまでの成果

鳴子火山を事例として、MT法の適用性を確認した。また、JAEAスタッキングによる解析技術の高度化を図った。さらに、飯豊・朝日山地を事例に、地震波トモグラフィー、MT法、希ガス同位体等による、総合的なマグマ検出手法の適用性を検討した。



地下深部のマグマ・高温岩体等の調査技術として、地球物理、地球化学的手法を組合せた総合的なアプローチを提示した。

今後の課題

非火山地域の熱水活動の熱源や活断層等の調査技術としての実用性を検討する。MT法については、半島を事例に海流の影響を考慮した解析手法の高度化を目指す。

全体計画における研究課題(～H22頃)

1. 地下深部のマグマ・高温岩体等の調査技術
2. 第四紀の火山・地熱活動等の調査技術
3. 火山・熱水活動の長期予測・影響評価モデルの開発
4. 構造運動による熱水活動(非火山性熱水活動)に関する基盤研究

2. 第四紀の火山・地熱活動等の調査技術

研究課題

肉眼では識別できないテフラ起源粒子の屈折率の頻度分布などからの降灰層準の認定によって第四紀の火山噴出物を同定するための技術のほか、熱年代学的手法により古地温の変遷や熱水対流系の有無等を推定する調査技術を整備する。

実施内容

- ・ RIPL法による火山活動史の編年（むつ燧岳を事例として）
- ・ 熱年代学的手法を用いた非火山地域の地熱活動の熱履歴解析（紀伊半島南部地域を事例として）
- ・ (U-Th) /He年代測定システムの開発

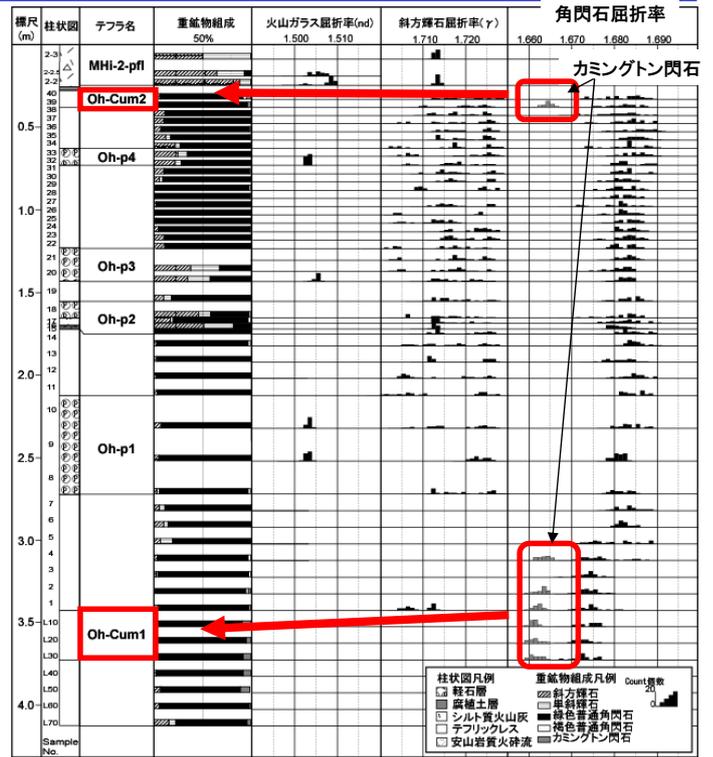
RIPL法による火山活動史の編年

RIPL法; 風成層, 湖沼・内湾堆積物を対象とし, 5~10cm間隔で採取した大量の試料から抽出した火山灰粒子を分析することにより, 肉眼では識別できないテフラ起源物質やテフラ降灰層準を認定する手法(梅田・古澤, 2005)。

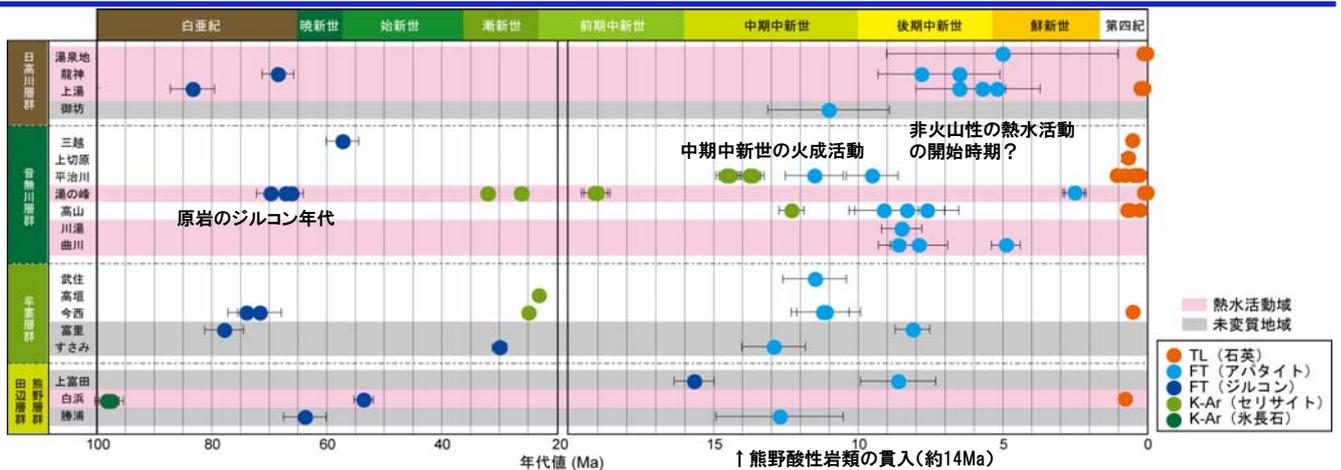
放射年代測定が行えない噴出物の年代の推定(例, 熱水変質, low-カリウム<K-Ar法>, ジルコン, アパタイト結晶の欠損<FT法>)

噴出物の上位と下位の風成層中から肉眼では確認できないテフラ層準をRIPL法によって識別。

年代既知の段丘を覆うテフラとの対比によって, 噴出年代を推定することが可能。



非火山地域の地熱活動の熱履歴解析



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)

紀伊半島南部地域における各種年代測定手法による年代測定結果

閉鎖温度の異なる年代測定法を組み合わせることによって, 熱履歴を推定することは可能。紀伊半島の非火山性の熱水活動は, 6Ma頃まで遡れるが, 数Maの年代に適応可能で, より閉鎖温度の低い年代測定法が必要。また, ベントナイトのイライト化を引き起こすような低温(~100°C)の熱水活動を評価するためにも, 適した年代測定法を整備することが急務!

(U-Th)/He年代測定システムの開発

鉍物分離

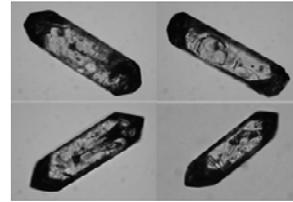
鏡下選別

脱ガス (加熱) ⇒ He 分析

溶解 ⇒ U, Th 分析



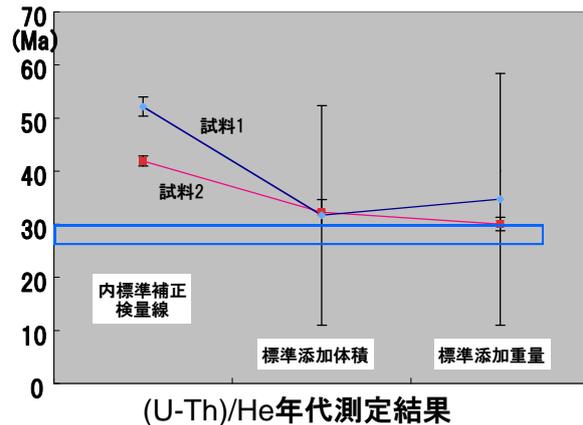
試料1



試料2



Fish Canyon Tuff (FC3) Zircon
年代値: 27.8 ± 0.2 (Ma) [FT年代]



2. 第四紀の火山・地熱活動等の調査技術

これまでの成果

下北半島の火山を事例としてRIPL法による火山活動史の編年を行った。また、紀伊半島の非火山性の地熱地域を事例に、K-Ar年代、FT年代、TL年代を用いた熱履歴解析を行った。また、低温領域(～100°C)の熱履歴を把握するための手法として(U-Th)/He年代測定システムを開発するとともに、年代標準試料を測定した。



更新世中期の火山の編年に対するRIPL法の有効性を確認した。個別の熱年代学的手法の熱履歴解析への適用性を確認した。(U-Th)/He年代については、ジルコンについて年代測定の見通しを得た。

今後の課題

ジルコン、アパタイトを対象とした(U-Th)/He年代測定の実用化を図る。

全体計画における研究課題(～H22頃)

1. 地下深部のマグマ・高温岩体等の調査技術
2. 第四紀の火山・地熱活動等の調査技術
3. 火山・熱水活動の長期予測・影響評価モデルの開発
4. 構造運動による熱水活動(非火山性熱水活動)に関する基盤研究

3. 火山・熱水活動の長期予測・影響評価モデルの開発

研究課題

火山フロントの日本海側の地域や単成火山群の周辺地域における新たな火山の形成の可能性を評価するため、空間統計学的手法を用いた確率モデル等の開発を行う。

地下深部のマグマや高温流体等から放出される熱エネルギーを適切に評価するための解析手法のほか、熱源周辺の地下水理の変化を予測するためのシミュレーション技術を開発する。

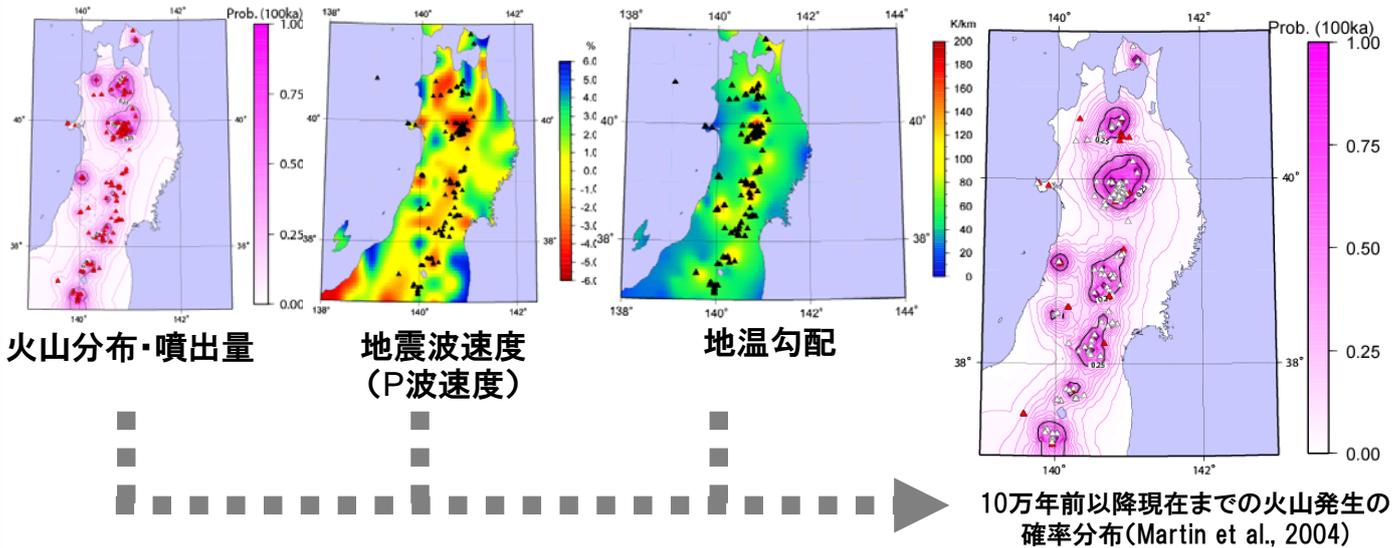
実施内容

- ・地球物理データを考慮した火山の発生確率モデルの高度化
(東北日本を事例として)
- ・マグマ溜まりの温度圧力条件の取り扱いが可能な解析コード(Magma2002)の開発を行うとともに、雲仙火山、鳴子火山を事例としたシミュレーションを実施した。

地球物理データを考慮した火山の発生確率モデル

<multiple inference モデル(ベイズ法)>

過去の火山の分布・噴出量, 地震波速度構造, 地温勾配分布を空間統計学手法によりモデル化し, ベイズ法により将来の成層火山の発生についての確率分布を計算する。発生確率は, 時空間モデルと同様に時間と空間を同じ重みで考慮する。

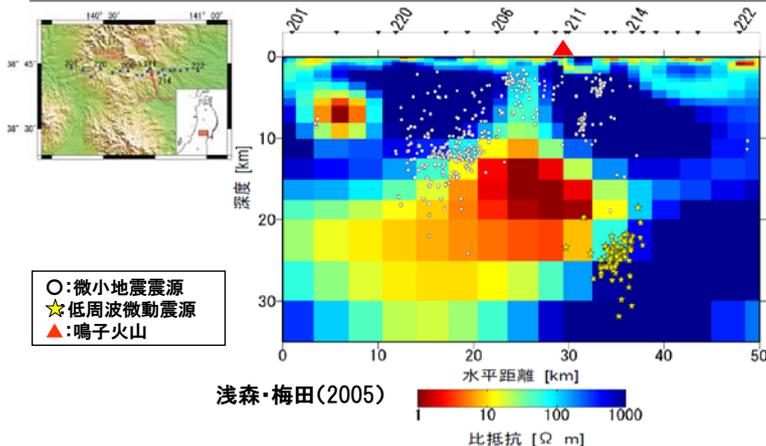


Magma2002の開発とシミュレーション

開発コード: Magma 2002

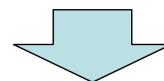
目的: マグマ溜まりおよびそれに伴う熱水対流系の生成・冷却過程のシミュレーション

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2000barsまでの領域を計算できるよう改良。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・鬼首火山下の二次元比抵抗構造

鳴子・鬼首火山を例として, 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。



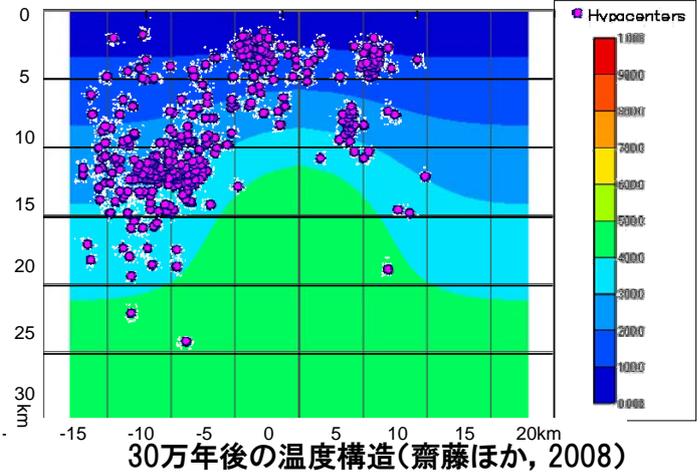
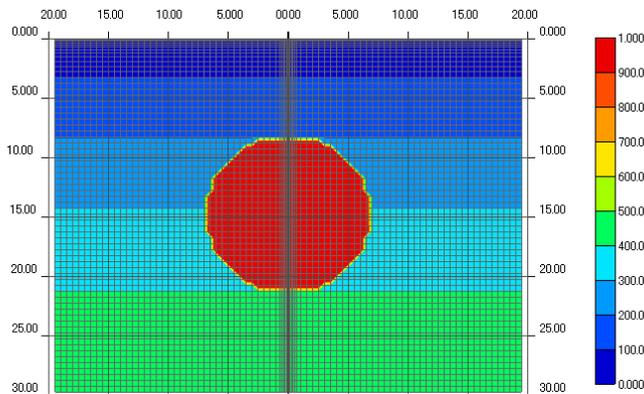
シミュレーションで得られた結果を地質データと比較し, 結果の妥当性を確認。

鳴子・鬼首火山下の温度構造のシミュレーション

解析ケースB-3

解析範囲	深度30km×直径40km
計算格子	軸対称格子 深度65×半径44

位置	鬼首カルデラ下 深度15km
半径	6.5km
体積	1150km ³
備考	鬼首カルデラの直径(13km)



半径6.5kmのマグマが定置した後、30万年後の周辺の温度構造が、地殻内地震の震源分布の下限(300~400°C)の分布と一致する。この結果は、鳴子・鬼首火山の活動開始時期と整合的である。

3. 火山・熱水活動の長期予測・影響評価モデルの開発

これまでの成果

新規火山の発生については、東北日本を事例に地震波速度、地温勾配を考慮した確率モデルを作成した。マグマの取り扱いが可能な解析コード(Magma2002)を開発するとともに、雲仙火山、鳴子火山を事例として、シミュレーションを実施した。



確率モデルの高度化に対してベイズ法の有効性を確認した。熱水活動のシミュレーションの結果と地質・地球物理データの比較により、Magma2002の適用性を確認した。

今後の課題

地球化学データ(ヘリウム同位体比等)を考慮した確率モデルを構築する。Magma2002をベースに、熱・水理・物質等の挙動をシミュレーションできるモデルを整備する。

全体計画における研究課題(～H22頃)

1. 地下深部のマグマ・高温岩体等の調査技術
2. 第四紀の火山・地熱活動等の調査技術
3. 火山・熱水活動の長期予測・影響評価モデルの開発
4. 構造運動による熱水活動(非火山性熱水活動)に関する基盤研究

4. 構造運動による熱水活動(非火山性熱水活動)に関する基盤研究

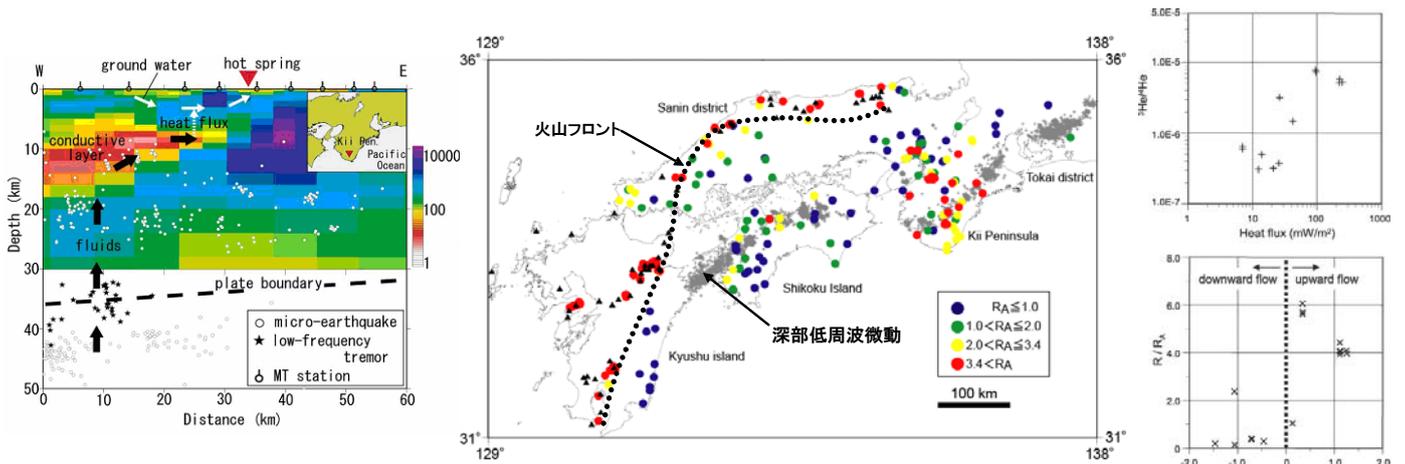
研究課題

日本列島スケールでの当該現象の分布やその特徴(胚胎構造, 温度, 化学組成等)に関する情報を収集しデータベース化するとともに, 非火山性の熱水活動のメカニズムを地質, 地球物理, 地球化学的データにより総合的に評価する手法を検討する。

実施内容

- ・日本全国を対象とした坑井温度プロファイルデータベース
および温泉地化学データベースの構築と公表
- ・地質, 地球物理, 地球化学データに基づく, 深部流体／非火山性熱水活動の熱源の推定
(紀伊半島, 能登半島等を事例として)

深部流体／非火山性水活動の熱源の推定(紀伊半島)



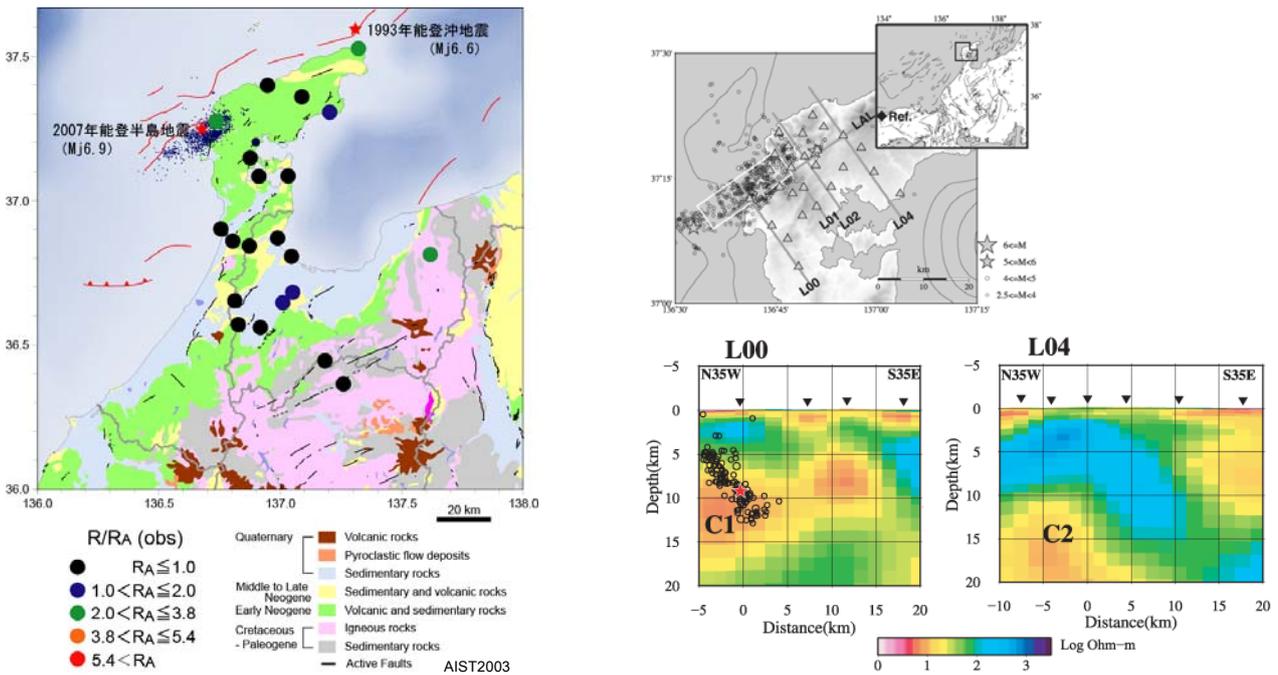
紀伊半島南部の比抵抗構造 (JAEA, 2006)

西南日本の³He/⁴He比 (R_A) の地理的分布 (Umeda et al., 2007a)

³He/⁴He比と熱流量・ペクレ数との関係 (Umeda et al., 2007b)

紀伊半島、四国では、低周波微動が発生している地域において、高いヘリウム同位体比が観測される。一方、九州東部では、深部低周波微動が認められず、ヘリウム同位体比も大気値より低い。紀伊半島では、ヘリウム同位体比と移流を考慮した熱流束、ペクレ数(伝導に対する移流の寄与率)に相関が認められることから、高いヘリウム同位体比は、マントル・ヘリウムがスラブ起源の流体の上昇によってもたらされたものと考えられる。

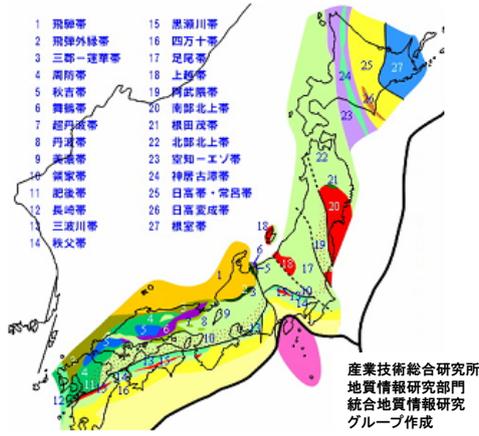
深部流体／非火山性水活動の熱源の推定(能登半島)



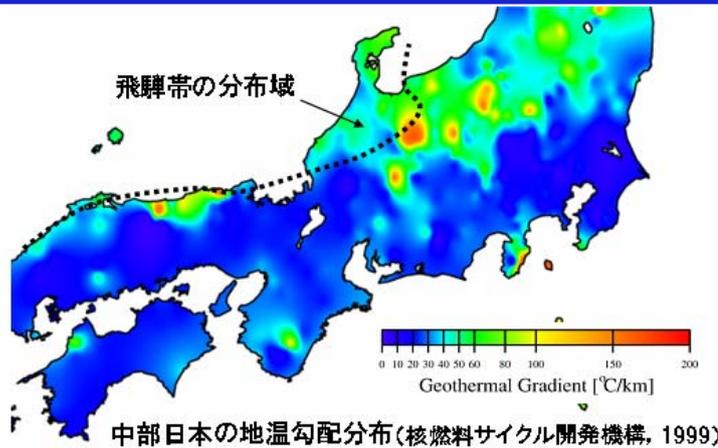
³He/⁴He比(R_A)の地理的分布(梅田ほか, 2008)

二次元比抵抗構造(Yoshimura et al., 2008)

深部流体／非火山性水活動の熱源の推定(能登半島)



産業技術総合研究所
地質情報研究部門
統合地質情報研究
グループ作成



中部日本の地温勾配分布(核燃料サイクル開発機構, 1999)



船津花崗岩(高U・Th・K花崗岩)
U:2.4ppm, Th31.2ppm, K₂O:6.32%
→ → → 発熱量: 3.5 μW/m³

モデル計算 ▶

上部地殻 (船津花崗岩)	上部地殻	下部地殻	下部地殻	リソフェア	アセノフェア
発熱量	厚さ	発熱量	厚さ	熱流量	熱流量
$3.5 \mu\text{W/m}^3$	15 km	$1.0 \mu\text{W/m}^3$	15 km	1.0 mW/m ²	30 mW/m ²

$$Q = 3.5 \times 15 + 1.0 \times 15 + 1.0 + 30 = 98.5 \text{ mW/m}^2$$

地下地温率 (能登平均) ▶ $Q = 0.45 \times 2.1 \times 1000 = 94.5 \text{ mW/m}^2$

グリーンタフ (能登平均) 熱伝導率 ▶ $2.1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

両者は整合的

能登半島の地殻熱流量(モデル計算 vs. 観測値)

4. 構造運動による熱水活動(非火山性熱水活動)に関する基盤研究

これまでの成果

坑井温度プロファイルデータベースおよび温泉地化学データベースを作成し、機構HPより公表した。また、「2. 地下深部のマグマ・高温岩体等の調査技術」で開発した手法を用いて、紀伊半島、能登半島等の非火山性熱水活動の熱源を検討した。



非火山性の熱水活動が卓越する地域を抽出した。また、異なるタイプの熱源(伏在するマグマ, スラブから脱水した流体の上昇, 花崗岩の放射壊変による熱)が存在することを示した。

今後の課題

地殻変動や断層活動等との関連性について検討を進めるとともに、非火山性の熱水活動の熱源のタイプを概括的に把握する。

H20以降の計画

1. 地下深部のマグマ・高温岩体等の調査技術

非火山地帯の熱水活動の熱源や活断層等の調査技術としての実用性を検討する。MT法については、半島を事例に海流の影響を考慮した解析手法の高度化を目指す。

2. 第四紀の火山・地熱活動等の調査技術

第四紀の低温熱履歴を把握するため、(U-Th)/He年代測定の実用化を図る。

3. 火山・熱水活動の長期予測・影響評価モデルの開発

地球物理データ(熱流量, 地震波速度等)に加えて地球化学データ(ヘリウム同位体比等)も考慮した予測モデルを構築する。また, Magma2002をベースに, 熱・水理・物質等の挙動をシミュレーションできるモデルを整備する。

4. 構造運動による熱水活動(非火山性熱水活動)に関する基盤研究

地殻変動や断層活動等との関連性について検討を進めるとともに, 非火山性の熱水活動の熱源のタイプを概括的に把握する。