

火山・地熱活動に関する研究

— 第1期中期計画期間(H17～H21)の研究成果について —

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

火山・地熱活動に関する研究

1. 地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術

- ・MT法による深部比抵抗構造の調査技術の高度化
- ・地球物理・地球化学的アプローチによるマグマ・高温流体の調査技術

2. 第四紀の火山・地熱活動等の調査技術

- ・RIPL法による火山活動史の編年技術
- ・(U-Th)/He年代測定システムの開発

3. 火山活動の長期予測モデルの開発

- ・ベイズ法による地球物理データを考慮した火山発生の確率モデルの開発

4. 熱水活動の影響評価モデルの開発

- ・magma2002による火山下の温度・地下水理のシミュレーション技術

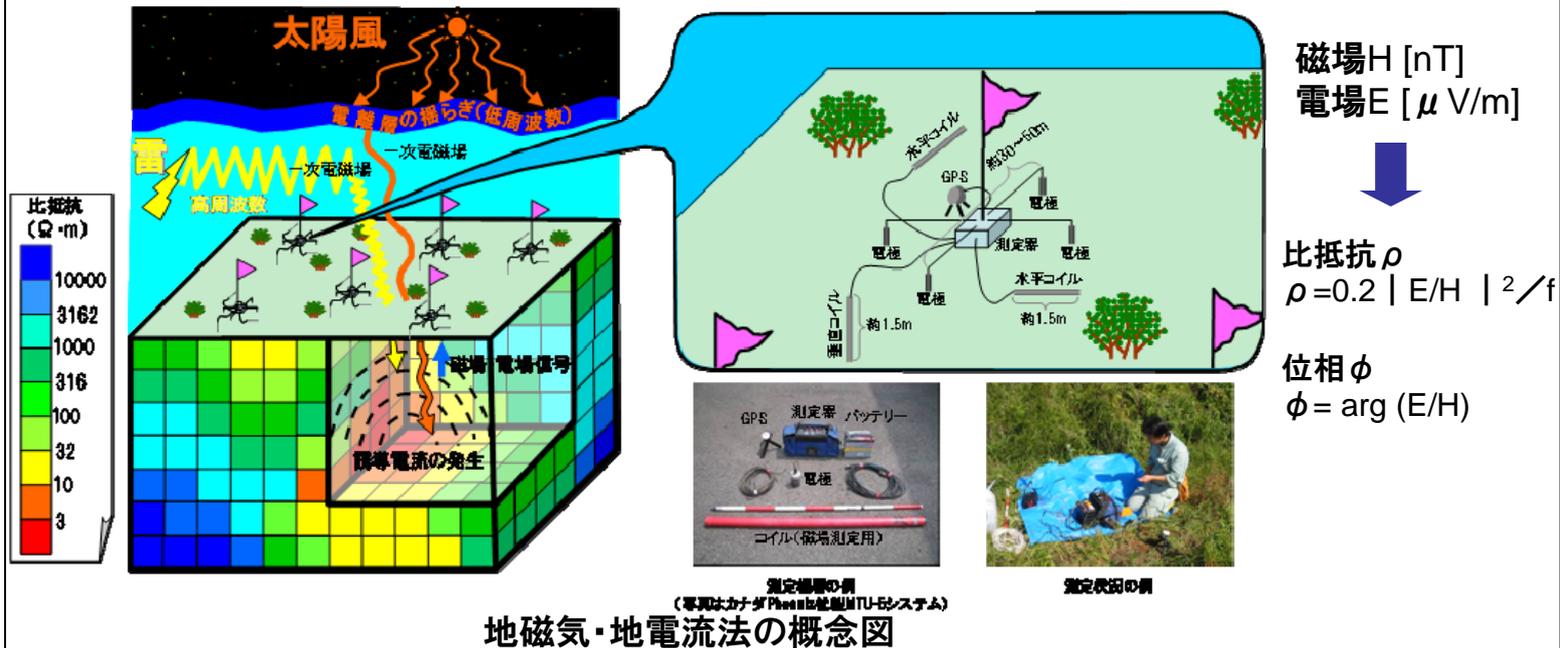
5. 構造運動による熱水活動に関する基盤研究

- ・非火山地帯の熱水活動のメカニズムの解明
- ・熱年代学的アプローチによる非火山地帯の熱水活動の熱履歴解析

MT法による深部比抵抗構造の調査技術の高度化

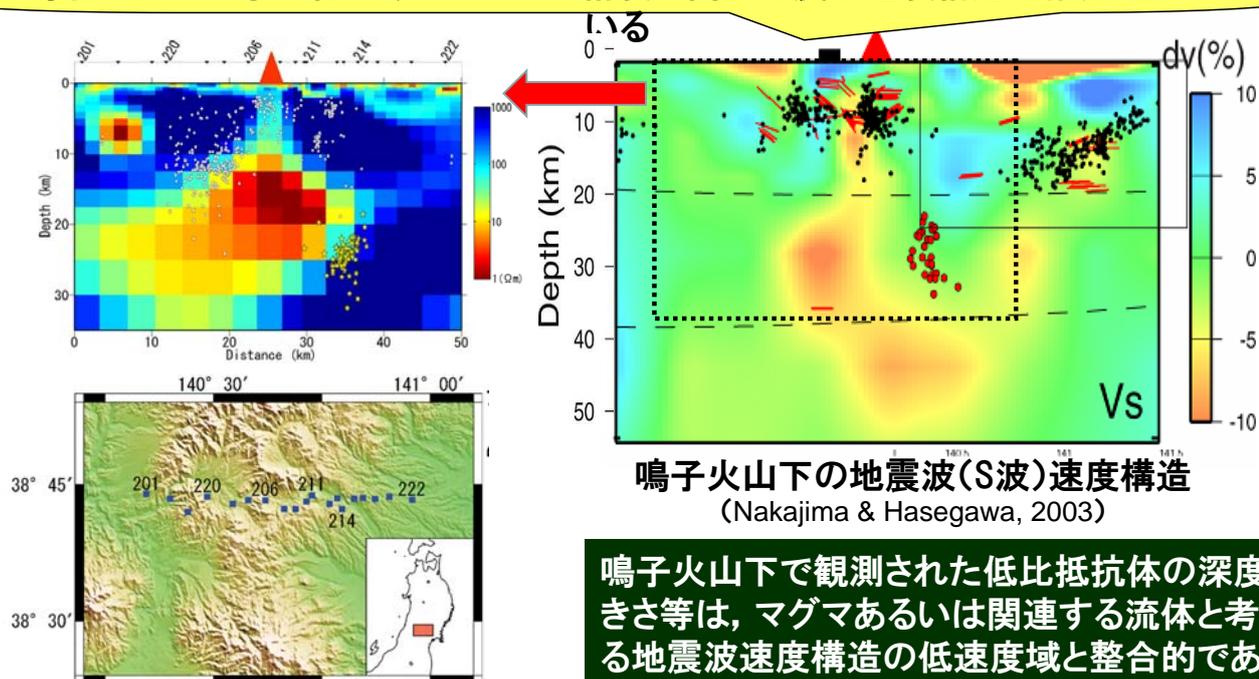
第1期中期計画期間の目標:

地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術への地磁気・地電流法(MT法)の適用性を検討するとともに、比抵抗構造解析手法の高度化を目指す。



MT法による深部比抵抗構造の調査技術の高度化

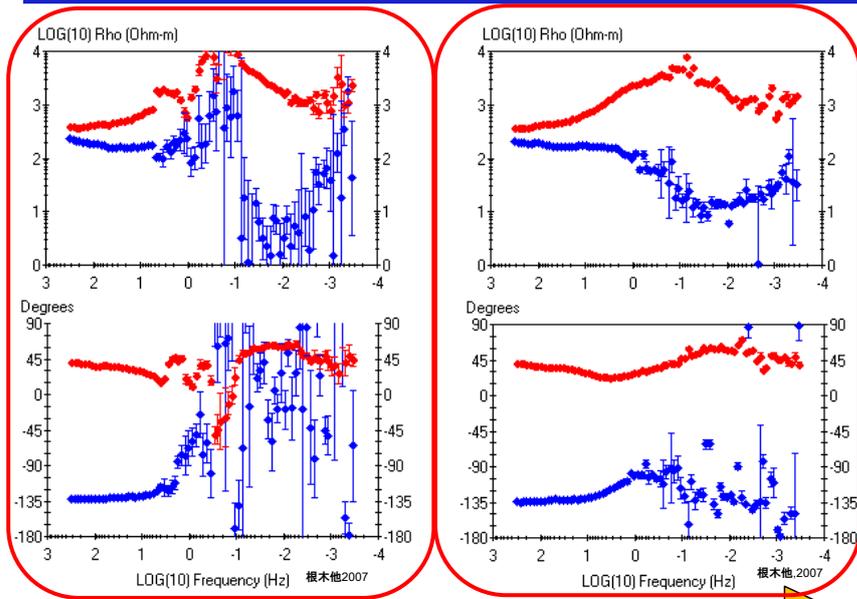
鳴子火山は大学の合同観測によって精度の高い地震波速度構造が推定されて



鳴子火山下で観測された低比抵抗体の深度や大きさ等は、マグマあるいは関連する流体と考えられる地震波速度構造の低速度域と整合的である。
→電磁気学的手法でも、マグマあるいは関連する流体を検出できる(概要調査等に反映)。

鳴子火山下の比抵抗構造および観測点

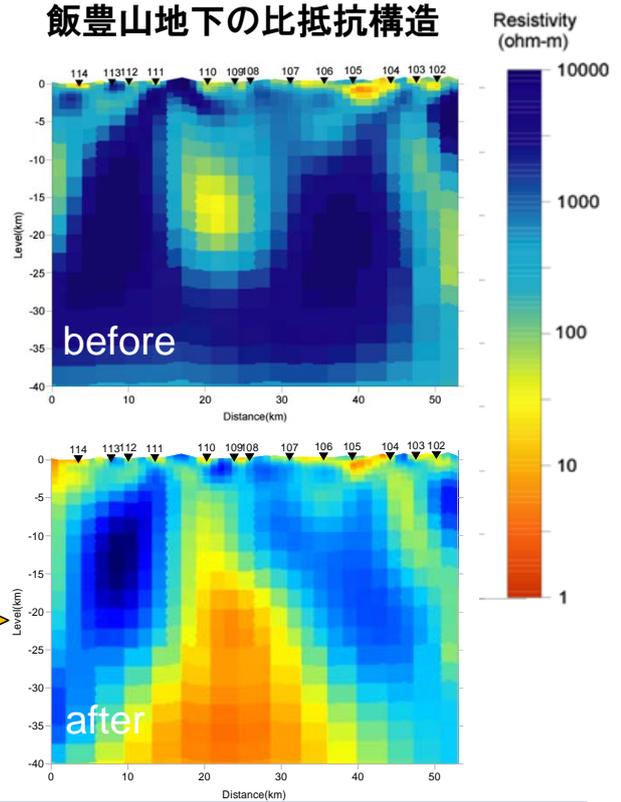
MT法による深部比抵抗構造の調査技術の高度化



周波数ごとの連続性, 誤差の低減によるデータの品質向上
(見掛け比抵抗と位相差の相関に基づく重み付けスタッキング)

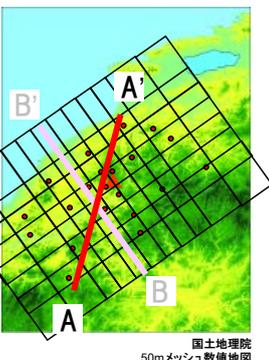
特許出願済み 発明の名称: 地磁気地電流法における
観測データの処理方法及び装置 (特願2007-302772)

飯豊山地下の比抵抗構造



MT法による深部比抵抗構造の調査技術の高度化

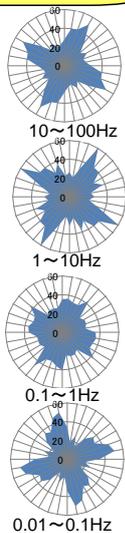
沿岸域では, 海水(低比抵抗)によってインバージョンの結果に影響(偽像)を及ぼす可能性。



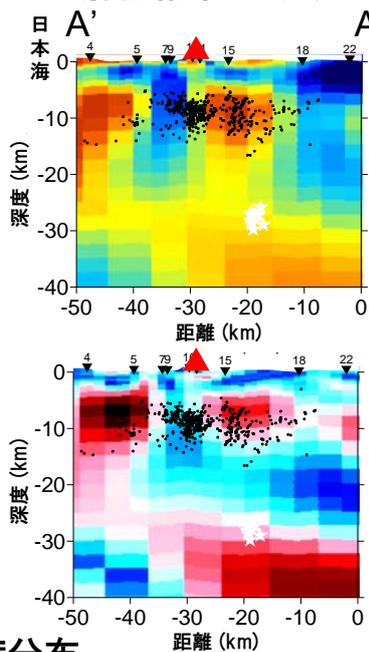
— 比抵抗断面

▲ 三瓶火山

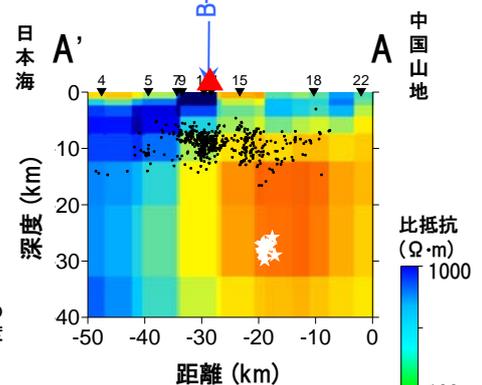
GB-strike の頻度分布



解析結果(二次元)



比抵抗値の変動の程度 (無次元)
0.3
0.2
0.1
0



●: 震源, 白★: 低周波微動

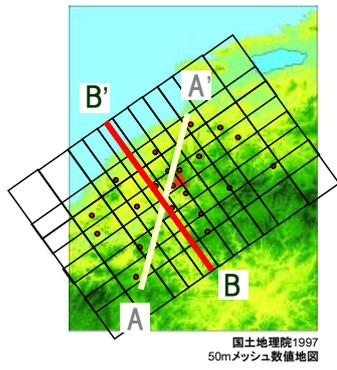
解析結果(三次元)

Sasaki (2004)の解析コードを使用

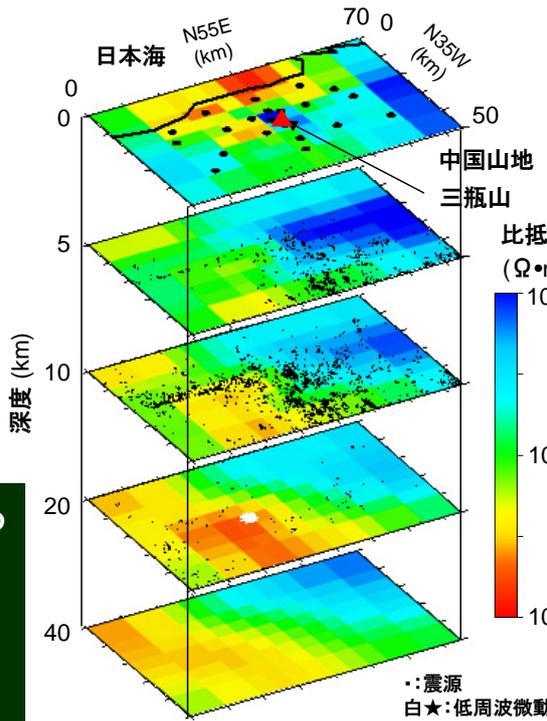
根本他2009

二次元解析の結果では, 日本海側の地下10km付近に低比抵抗体が存在。両者は比抵抗構造のパターンが著しく異なる。三次元の低比抵抗体と内陸地震の分布は比較的整合的。

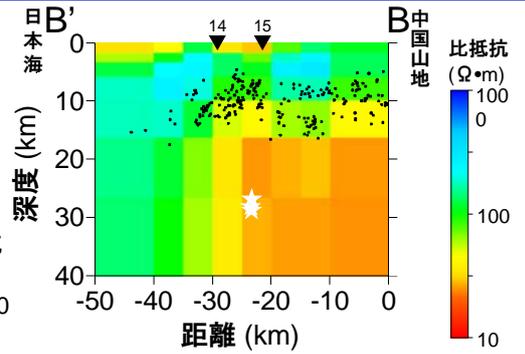
MT法による深部比抵抗構造の調査技術の高度化



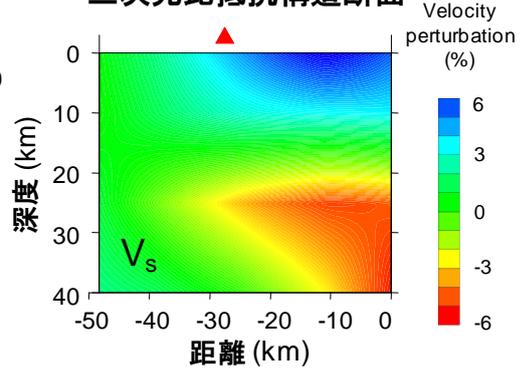
— 比抵抗断面
▲ 三瓶火山



三瓶火山下の三次元比抵抗構造
根本他, 2009



三次元比抵抗構造断面



地震波速度構造断面

Nakajima and Hasegawa (2007)のデータより作成

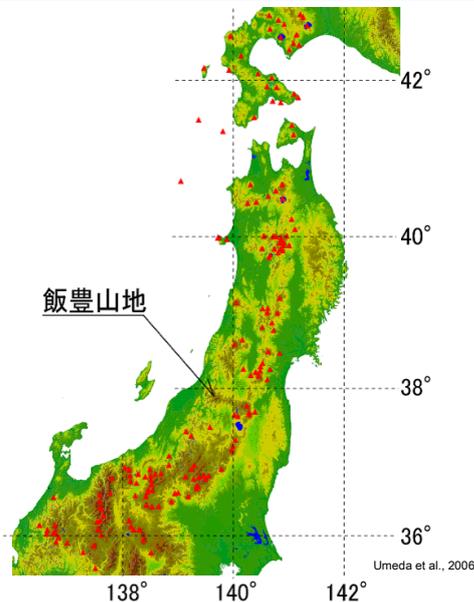
三次元比抵抗解析による低比抵抗体の深度・大きさは地震波の低速度域と整合的である。

→沿岸域では、三次元比抵抗構造解析が有効。

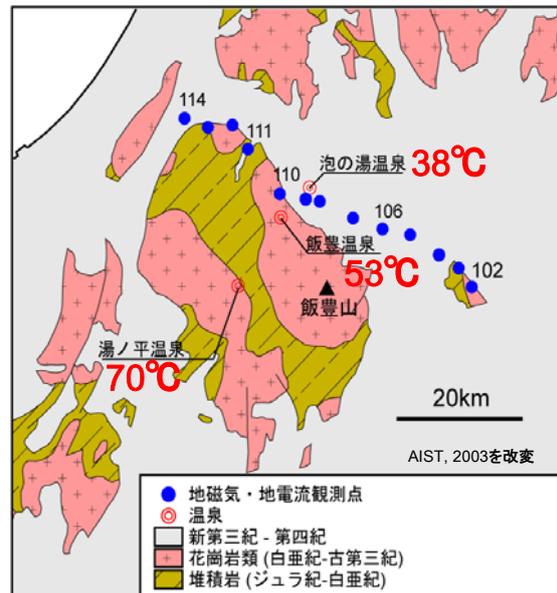
地球物理・地球化学的アプローチによるマグマ・高温流体の調査技術

第1期中期計画期間の目標:

地下深部のマグマ・高温流体等の存否を予め確認するため、地球物理、地球化学的手法を組合わせた総合的な調査技術を提示する。



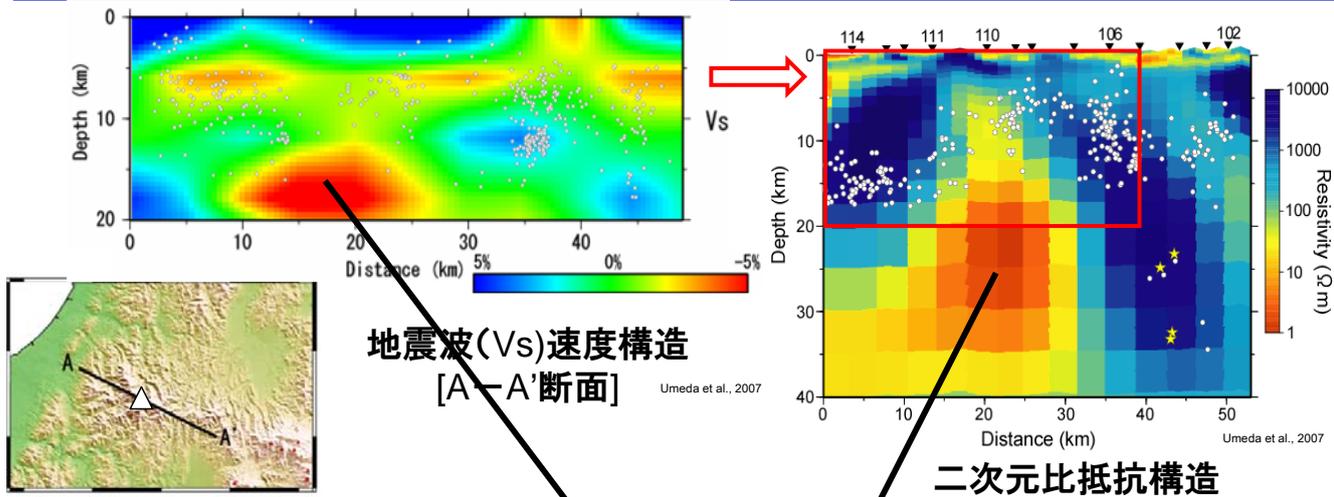
飯豊山地と第四紀火山(▲)の分布



飯豊山地周辺の地質図

Umeda et al., 2006

地球物理・地球化学的アプローチによるマグマ・高温流体の調査技術



地震波(V_s)速度構造
[A-A'断面]

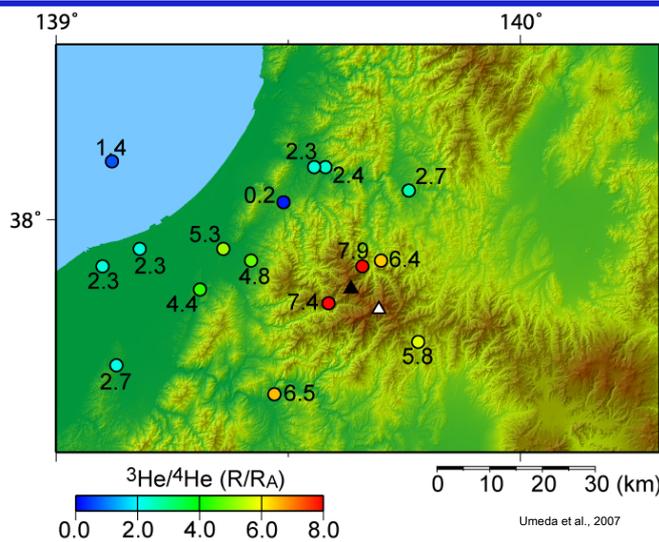
二次元比抵抗構造

- 飯豊山地の地下15km以深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

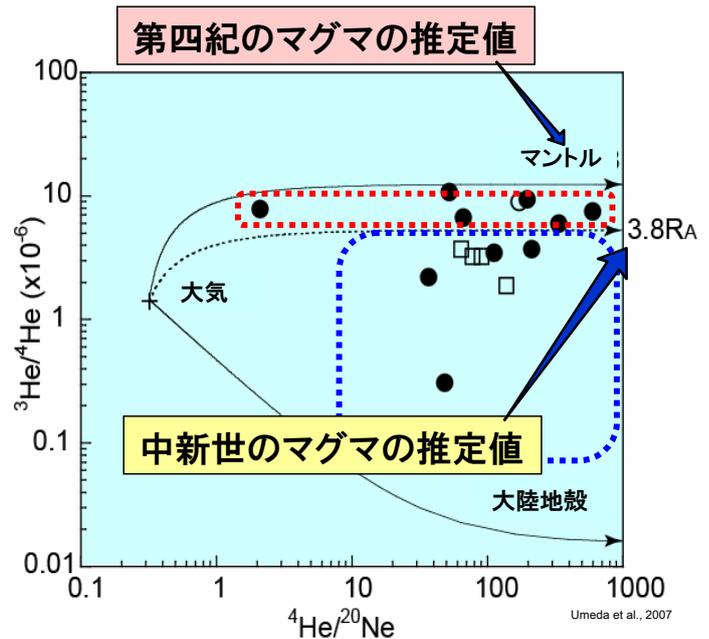
飯豊山地の地下には400°C以上の高温の物質が存在することが示唆

① 第四紀の火成活動に関連するマグマ? or ② 中新世の火成活動が熱的に維持?

地球物理・地球化学的アプローチによるマグマ・高温流体の調査技術



$^3\text{He}/^4\text{He}$ 比(RA)の地理的分布



ヘリウム同位体比は、中新世の貫入岩をソースとするヘリウム同位体比の推定値(3.8 RA)を超えることから、最近になって上昇したマグマと考えられる。

→熱源の存否や原因を特定できる調査技術(概要調査等に反映)

火山・地熱活動に関する研究

1. 地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術

- ・MT法による深部比抵抗構造の調査技術の高度化
- ・地球物理・地球化学的アプローチによるマグマ・高温流体の調査技術

2. 第四紀の火山・地熱活動等の調査技術

- ・RIPL法による火山活動史の編年技術
- ・(U-Th)/He年代測定システムの開発

3. 火山活動の長期予測モデルの開発

- ・ベイズ法による地球物理データを考慮した火山発生の確率モデルの開発

4. 熱水活動の影響評価モデルの開発

- ・magma2002による火山下の温度・地下水理のシミュレーション技術

5. 構造運動による熱水活動に関する基盤研究

- ・非火山地帯の熱水活動のメカニズムの解明
- ・熱年代学的アプローチによる非火山地帯の熱水活動の熱履歴解析

(U-Th)/He年代測定システムの開発

第1期中期計画期間の目標:

ベントナイトのイライト化の生じるような比較的低温(~100°C)の熱水活動の履歴を把握するため、閉鎖温度の低いジルコン等の(U-Th)/He年代を測定するためのシステムの構築および適用性の確認を行う。

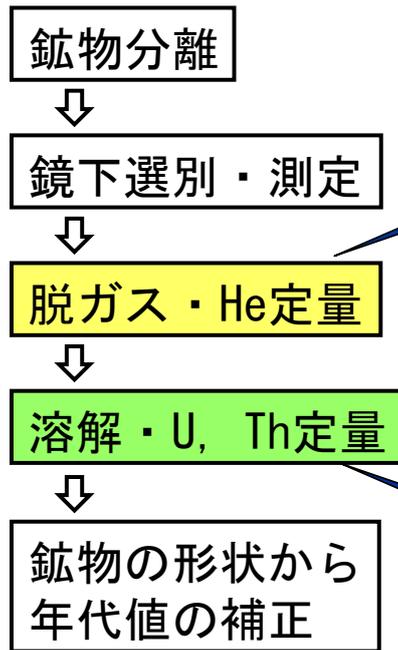
(U-Th)/He年代法の特徴

- 低温領域の熱履歴解析が可能
- 低濃度の分析が可能(バックグラウンドが低い)
- ジルコンなど風化に強い鉱物が対象
- U-PbやFT系の年代測定法と共通の試料
- 単結晶年代が測定可能
- 測定できるラボが我が国には存在しない

主な放射年代測定法の鉱物の閉鎖温度(°C)

| 鉱物の種類 | K-Ar法 | フィッソン・トラック法 | 熱ルミネセンス法 | (U-Th)/He法 |
|-------|---------|-------------|-----------|------------|
| 白雲母 | 350±50 | — | — | — |
| 黒雲母 | 300±50 | — | — | — |
| 長石類 | 230程度 | — | — | — |
| アパタイト | — | 130±30 | — | 70 |
| ジルコン | — | ~240 | — | 180 |
| 石英 | — | — | 80~90 | — |
| 適用年代 | 1万年~数億年 | 数万年~数億年 | 数千年~100万年 | 数万年~数億年 |

(U-Th)/He年代測定システムの開発



希ガス用質量分析装置およびレーザー照射装置(手前)

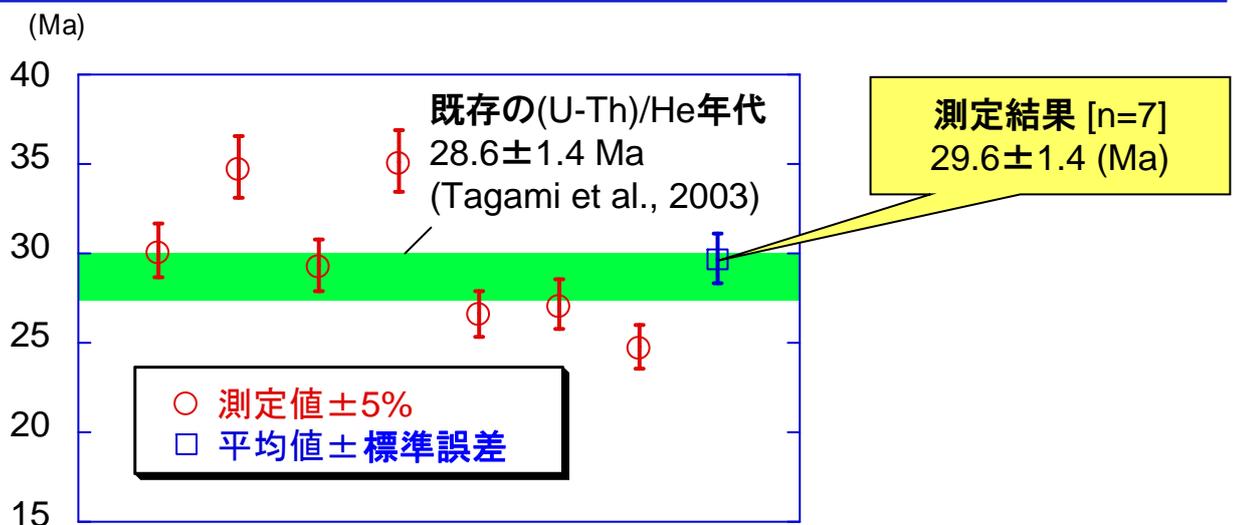


四重極ICP-MS



試料溶融用坩堝

(U-Th)/He年代測定システムの開発



Fish Canyon Tuff (米国コロラド州San Juan Caldera)中のジルコンの(U-Th)/He年代

(U-Th)/He年代測定システムを構築するとともに、国際年代標準試料の分析を通じて、ジルコンの年代測定の見通しを得た。

→過去に180°C程度の熱水活動が生じたか否かを判断する調査技術(概要調査等に反映) 今後は、アパタイト(70°C程度)の年代測定の実用化を目指す。

火山・地熱活動に関する研究

1. 地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術

- ・MT法による深部比抵抗構造の調査技術の高度化
- ・地球物理・地球化学的アプローチによるマグマ・高温流体の調査技術

2. 第四紀の火山・地熱活動等の調査技術

- ・RIPL法による火山活動史の編年技術
- ・(U-Th)/He年代測定システムの開発

3. 火山活動の長期予測モデルの開発

- ・ベイズ法による地球物理データを考慮した火山発生の確率モデルの開発

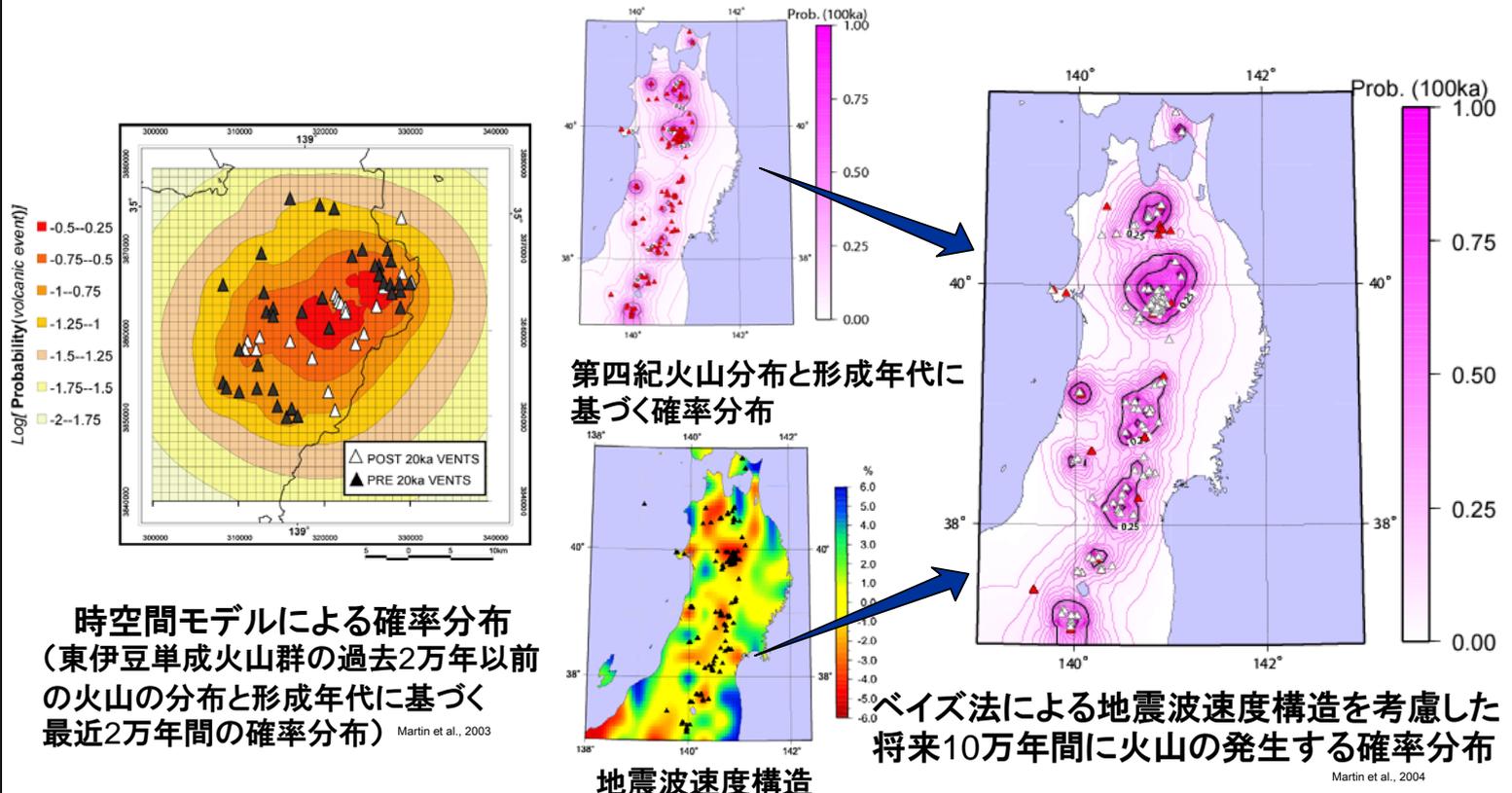
4. 熱水活動の影響評価モデルの開発

- ・magma2002による火山下の温度・地下水理のシミュレーション技術

5. 構造運動による熱水活動に関する基盤研究

- ・非火山地帯の熱水活動のメカニズムの解明
- ・熱年代学的アプローチによる非火山地帯の熱水活動の熱履歴解析

ベイズ法による地球物理データを考慮した火山発生の確率モデルの開発



火山・地熱活動に関する研究

1. 地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術

- ・MT法による深部比抵抗構造の調査技術の高度化
- ・地球物理・地球化学的アプローチによるマグマ・高温流体の調査技術

2. 第四紀の火山・地熱活動等の調査技術

- ・RIPL法による火山活動史の編年技術
- ・(U-Th)/He年代測定システムの開発

3. 火山活動の長期予測モデルの開発

- ・ベイズ法による地球物理データを考慮した火山発生の確率モデルの開発

4. 熱水活動の影響評価モデルの開発

- ・magma2002による火山下の温度・地下水理のシミュレーション技術

5. 構造運動による熱水活動に関する基盤研究

- ・非火山地帯の熱水活動のメカニズムの解明
- ・熱年代学的アプローチによる非火山地帯の熱水活動の熱履歴解析

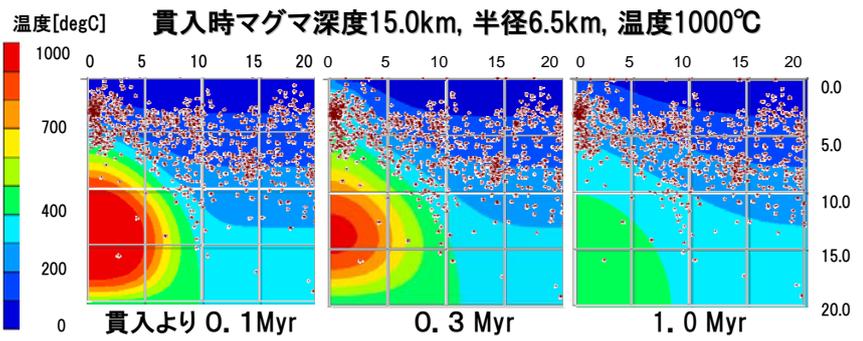
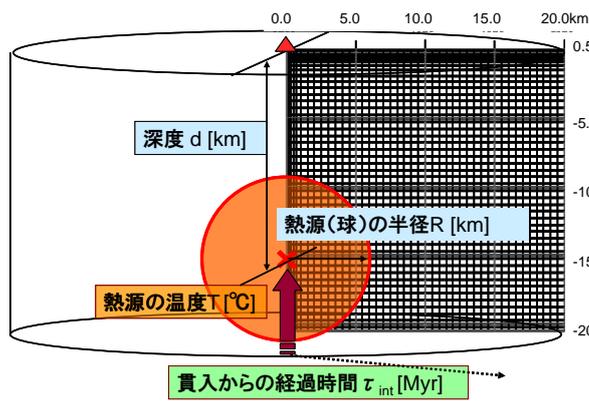
magma2002による火山下の温度・地下水理のシミュレーション技術

第1期中期計画期間の目標:

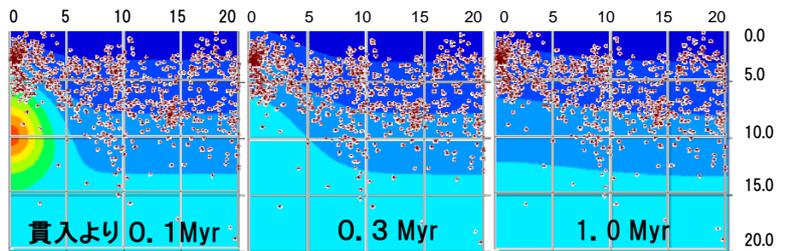
JAEAで開発したマグマ溜り周辺の温度・地下水理の時間変化を解析できるシミュレータ(magma2002)の適用性を実際の火山の地質・地球物理情報に基づく検討を行い、将来の地質環境条件の変動幅を提示するための技術とする。

- magma2002の概要:
 - － 既存の熱・流動解析用地熱シミュレータ“FIGS”を高温・高圧条件下で計算できるように改良
- 解法:
 - － 多孔質媒体内の熱・質量流束の保存則を完全陰解法で差分化して計算。
- 解析範囲:
 - － 温度: ~1000°C
 - － 圧力: ~0.2GPa
- 特徴:
 - － 直交座標系および円柱座標系の1次元, 2次元, 3次元グリッドの取り扱いが可能。
 - － 純水の液単相, 気液二相, 蒸気単相の混合状態および超臨界流体の取り扱いが可能。
 - － 比熱等の物性値を温度の関数として設定でき, 熱源(マグマ)のソリダス・リキダス温度の設定や相転移を表現可能。

magma2002による火山下の温度・地下水理のシミュレーション技術



【参考】貫入時マグマ深度10.0km, 半径3.0km, 温度1000°C



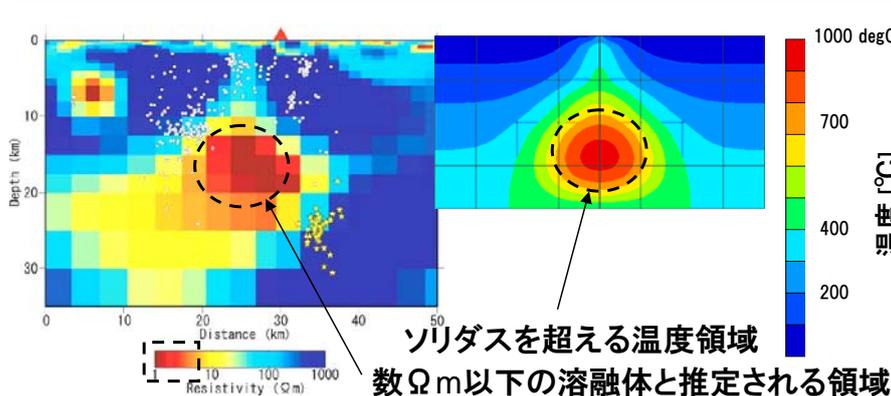
Saito and Umeda, 2008

温度構造の時間変化のシミュレーション
(鳴子火山の活動開始(30万年前)から100万年間)

| パラメータ | 計算範囲 |
|----------|------------------|
| 熱源の半径(R) | 2-7 km |
| 熱源の深度(d) | 10-16 km (G.L.-) |
| 熱源の温度(T) | 800-1000 °C |

Saito and Umeda, 2008

magma2002による火山下の温度・地下水理のシミュレーション技術

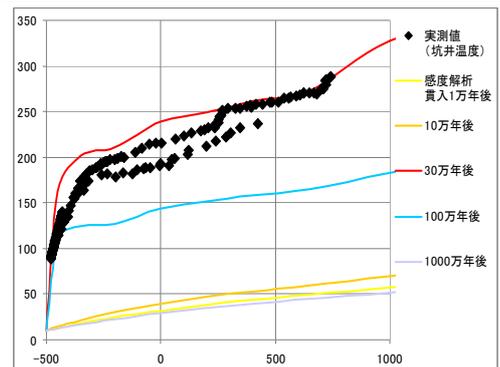


鳴子火山下の比抵抗構造と貫入30万年後の温度構造(右)

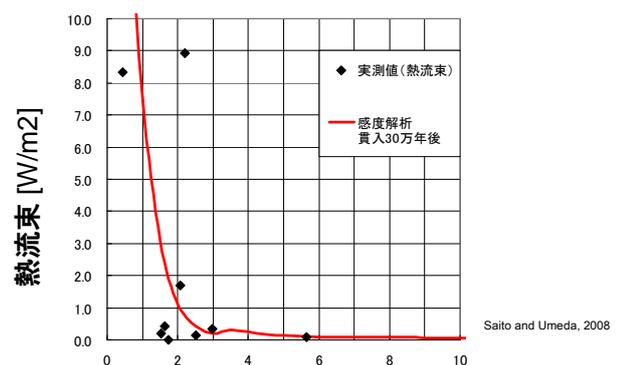
Saito and Umeda, 2008

半径6.5kmのマグマ溜りが地下15kmに形成された場合、現在観測される震源分布、比抵抗構造や坑井温度データと整合的。magma2002により過去30万年から現在までの温度構造の時間変化を概ね再現できた。

→シミュレータにより将来の温度構造を予測することが可能(変動シナリオの安全評価に反映)



各時代の坑井温度プロファイル



貫入30万年後の熱流束の水平分布

Saito and Umeda, 2008

火山・地熱活動に関する研究

1. 地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術

- ・MT法による深部比抵抗構造の調査技術の高度化
- ・地球物理・地球化学的アプローチによるマグマ・高温流体の調査技術

2. 第四紀の火山・地熱活動等の調査技術

- ・RIPL法による火山活動史の編年技術
- ・(U-Th)/He年代測定システムの開発

3. 火山活動の長期予測モデルの開発

- ・ベイズ法による地球物理データを考慮した火山発生の確率モデルの開発

4. 熱水活動の影響評価モデルの開発

- ・magma2002による火山下の温度・地下水理のシミュレーション技術

5. 構造運動による熱水活動に関する基盤研究

- ・非火山地帯の熱水活動のメカニズムの解明
- ・熱年代学的アプローチによる非火山地帯の熱水活動の熱履歴解析

非火山地帯の熱水活動のメカニズムの解明

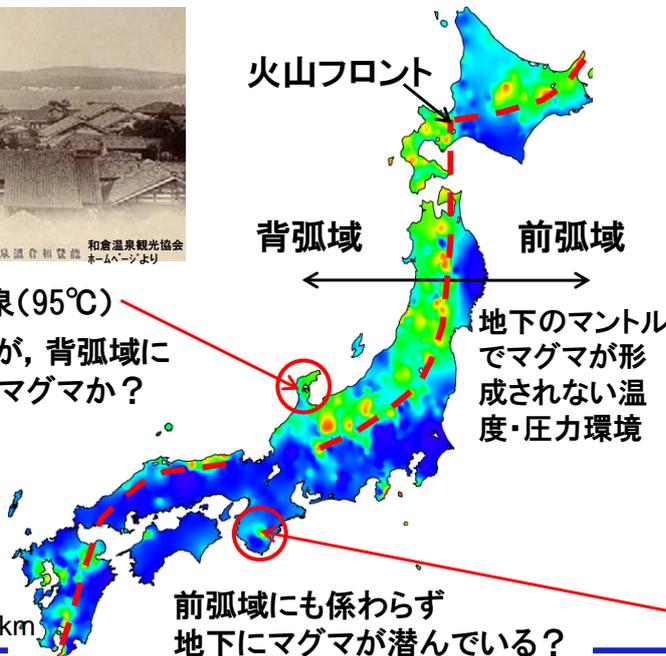
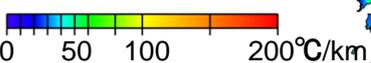
第1期中期計画期間の目標:

非火山地帯の熱水活動のメカニズムを明らかにすることにより、変動シナリオに制約条件を与える。



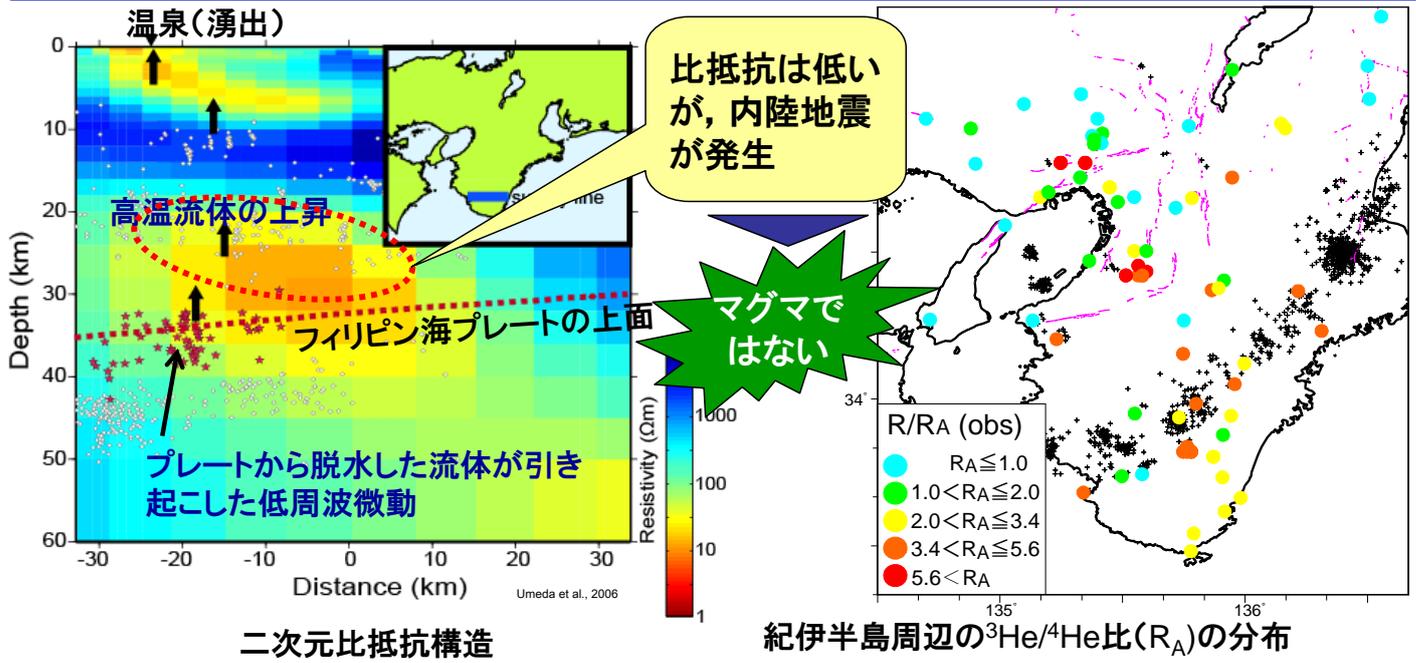
能登半島 和倉温泉(95°C)
火山から遠く離れているが、背弧域に位置しているから熱源はマグマか？

日本列島の
地下増温率(°C/km)
田中他2005AIST



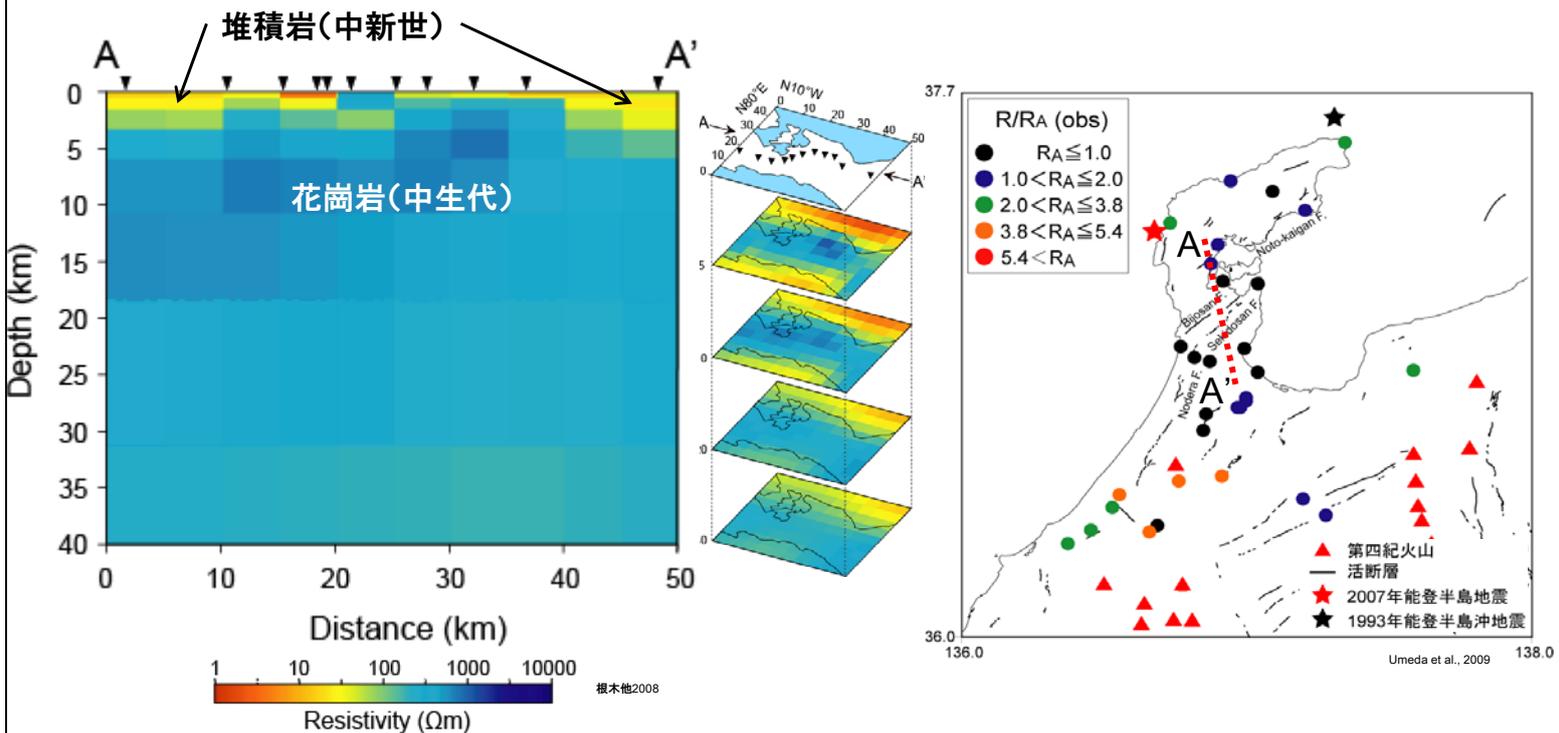
紀伊半島 上湯温泉(82°C)

非火山地帯の熱水活動のメカニズムの解明



紀伊半島の温泉ガスのヘリウム同位体比は、マントルに匹敵するような高い値を示すことから、新たな火成活動の前兆(Seno et al., 2001)と考えられていた。
 →低周波微動の震源分布および比抵抗構造から、フィリピン海プレートを起源とする高温流体(緑泥石の分解: ~600°C)の上昇に起因。

非火山地帯の熱水活動のメカニズムの解明

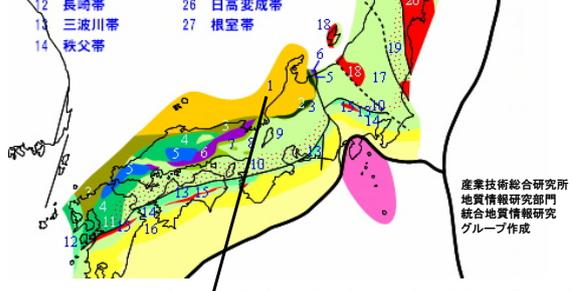


- 1 飛騨帯
- 2 飛騨外縁帯
- 3 三郎一連帯
- 4 周防帯
- 5 秋吉帯
- 6 舞鶴帯
- 7 超丹波帯
- 8 丹波帯
- 9 美濃帯
- 10 領家帯
- 11 肥後帯
- 12 長崎帯
- 13 三波川帯
- 14 秩父帯
- 15 黒瀬川帯
- 16 四万十帯
- 17 足尾帯
- 18 上越帯
- 19 阿武隈帯
- 20 南部北上帯
- 21 根田茂帯
- 22 北部北上帯
- 23 空知-エゾ帯
- 24 神居古澤帯
- 25 日高帯・常呂帯
- 26 日高変成帯
- 27 根室帯

上部地殻 (船津花崗岩) 上部地殻 下部地殻 下部地殻 リソスフェア アセノスフェア
 発熱量 厚さ 発熱量 厚さ 熱流量 熱流量

モデル計算 ▶ $Q = 4.0 \times 20 + 1.0 \times 15 + 1.0 + 30 = 120$
 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ km $\mu\text{W}/\text{m}^3$ km mW/m^2 mW/m^2 mW/m^2

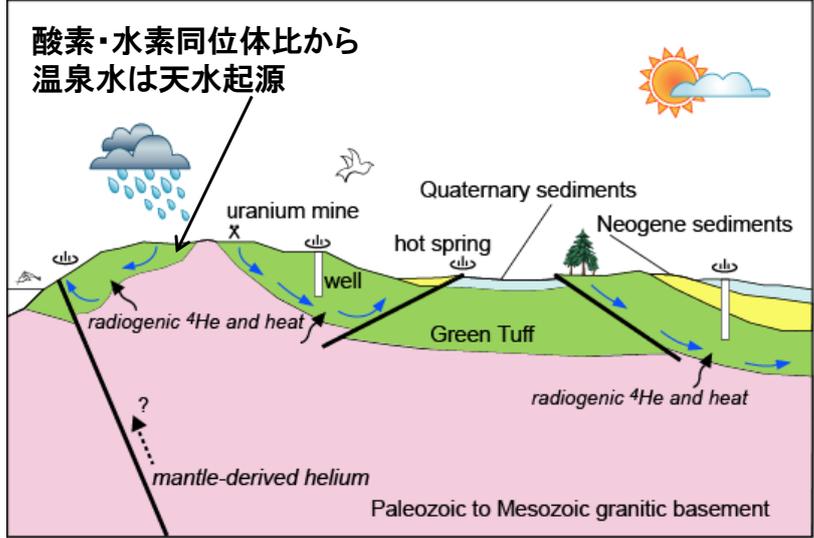
観測値 ▶ $Q = 51 \sim 186$
 mW/m^2 (average 95.0) mW/m^2



日本列島の地体構造区分(基盤岩)



船津花崗岩(高U・Th・K花崗岩)
 U: ~6ppm, Th~30ppm, K₂O: ~6.0%
 →→→ 発熱量: 4.0 $\mu\text{W}/\text{m}^3$



酸素・水素同位体比から
 温泉水は天水起源

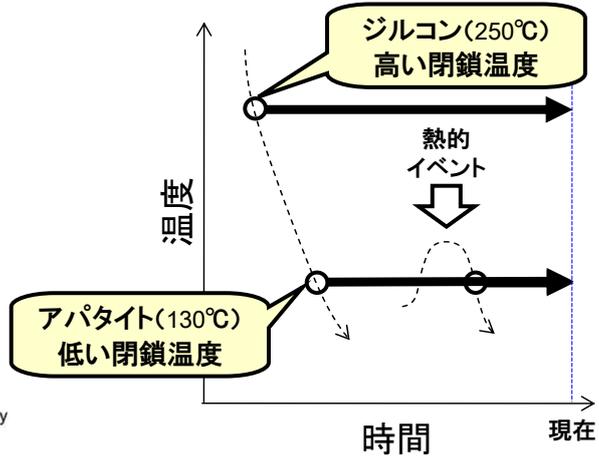
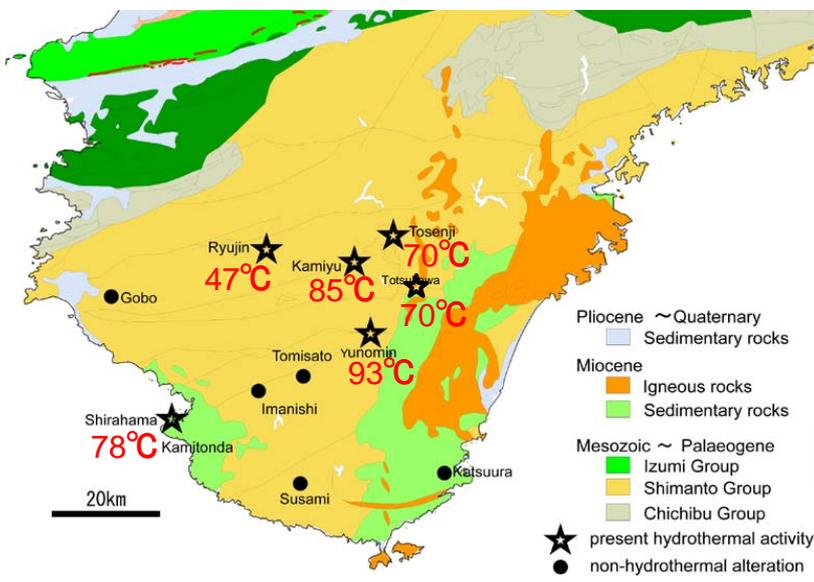
能登半島の熱水活動の概念モデル

Umeda et al., 2009

能登半島の温泉は、船津花崗岩に含まれるU, Th, Kの放射壊変によって生じた熱が地下水を温め、活構造に規制されながら地表にもたらされたと解釈できる。

熱年代学的アプローチによる非火山地帯の熱水活動の熱履歴解析

第1期中期計画期間の目標:
 放射年代法を用いた熱履歴解析から非火山地帯の熱水活動の活動時期や継続期間等を明らかにすることにより、変動シナリオに制約条件を与える。



熱年代学的アプローチによる非火山地帯の 熱水活動の熱履歴解析

| タイプ | ジルコンのFT年代 [平均値] | アパタイトのFT年代 [平均値] |
|------------------|-------------------------|------------------------|
| 現在, 熱水活動が生じている地域 | 53.5~83.3Ma [68.0Ma] | 2.7~8.5Ma [5.9Ma] |
| 熱水活動の痕跡が認められない地域 | 29.8~77.8Ma [53.8Ma] | 8.1~12.9Ma [11.3Ma] |

- ジルコンの年代値は白亜紀～古第三紀
→ジルコンの閉鎖温度(約250°C)まで達しておらず, 原岩の年代値を示すと考えられる
- 熱水活動の痕跡が認められない地域のアパタイトの年代値は概ね11Ma
→付加体の形成時の温度(約130°C)を反映している
- 現在, 熱水活動が生じている地域のアパタイトの年代値は~6Ma
→現在の熱水活動が生じた時期の年代を反映している

紀伊半島で生じている非火山性の熱水活動は, 150~250°Cの流体を伴っているが, これらの現象の開始年代は, 600万年前頃まで遡ると考えられる。
→紀伊半島南部の熱水活動は, これまで考えられてきたように数千年, 数万年前に活動を開始したのではなく, 数百万年オーダーの枠組みの現象であり, 今後10万年程度であれば回避できる。

火山・地熱活動に関する研究(まとめ)

1. 地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術
・地震波トモグラフィー, MT法, 希ガス同位体によるマグマ等の調査技術の提示
2. 第四紀の火山・地熱活動等の調査技術
・低温の熱水活動の痕跡の調査技術の提示
3. 火山活動の長期予測モデルの開発
・新規火山の発生確率を評価できるモデルの提示
4. 熱水活動の影響評価モデルの開発
・既存火山や新規火山に伴う熱・地下水理の影響を評価できるモデルの提示
5. 構造運動による熱水活動に関する基盤研究
・非火山地帯の熱水活動のメカニズムの提示
・上記の熱水活動の活動期間(安定性)の提示