

「火山・地熱活動に関する研究」の 研究成果および今後の計画について

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

関係法令・報告 (要求事項) <火山・地熱活動>

➤ 第四紀の火山の有無に関する判断が文献調査できない場合は、概要調査以降の調査において検討。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は、設計・施工・処分システム全体の安全性能との関連も踏まえ、取り扱いを審議。

概要調査地区選定段階以降の段階で考慮すべき環境要件 (原子力安全委員会, 2002)

➤ 「既存火山の巨大噴火」の影響の範囲の知見は不十分であるので、研究を特に促進。「新規火山」に係る事象は、原因となる事象の発生場所や影響の範囲についての知見がいまだ不十分であり、研究を特に促進。

➤ 「構造運動から生じる熱水活動 (非火山性の熱水活動)」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。

廃棄物安全小委員会報告 (総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会, 2003)

火山・地熱活動 (研究課題)

＜調査技術の開発・体系化＞

(1) 第四紀の火山・地熱等の活動履歴の調査技術

- ① 多量屈折率測定地質解析法による第四紀火山の同定技術
- ② 熱年代学的手法による古地温・熱水系の復元技術

(2) 地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術

- ① 地球物理学的・地球化学的手法の適用性の検討および体系化
- ② 非火山性の熱水活動に関する基盤的研究 (規模, タイプ, 活動履歴等)

＜長期予測・影響評価モデルの開発＞

(1) 火山活動等の長期予測モデル

- ① 確率論的アプローチによる火山活動の長期予測モデル

(2) 熱水活動等の影響評価モデル

- ① 一次元熱輸送モデルによる熱ポテンシャルの評価
- ② 三次元熱水系シミュレーション技術

多量屈折率測定地質解析法による第四紀火山の同定技術

概要調査においては、対象となる地域において予め第四紀火山の存在を確認。

第四紀火山の同定手法

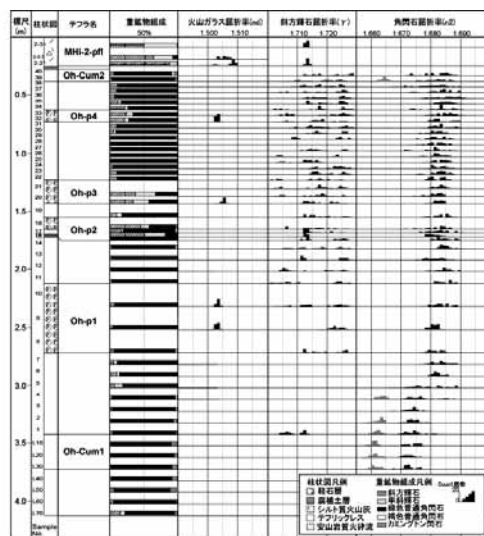
- ① 放射年代測定
- ② テフクロノロジー

高精度のテフクロノロジー技術の開発およびその適用性の検討

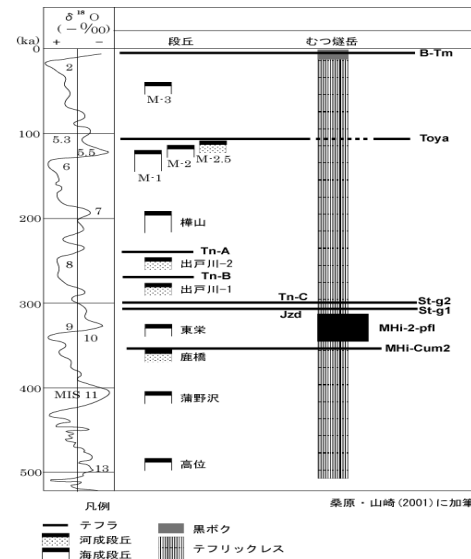


多量屈折率測定地質解析法 (Refractive Index Physical Labor method) とは
風成層等の堆積物を5～10cm間隔で連続的に採取した試料に含まれる火山ガラスや斑晶鉱物の屈折率を測定し、得られた大量のデータを統計的に解析することにより、肉眼では識別できないテフラ降灰層準を認定する方法。

多量屈折率測定地質解析法による第四紀火山の同定技術



各層準のモードおよびガラス・鉱物の屈折率とストグラム



海岸段丘面とテフラ層準の関係

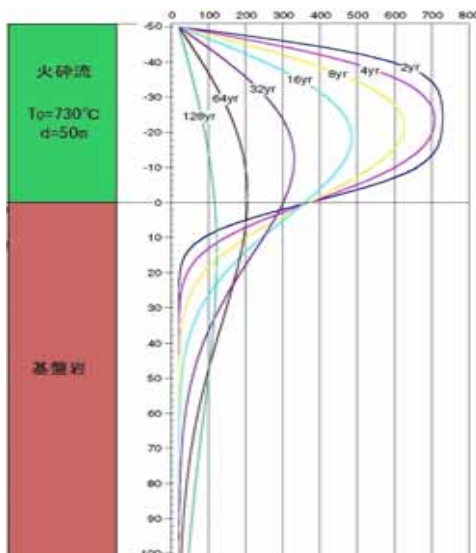
結論 ➤従来の火山灰層序学を応用した多量屈折率測定地質解析法を考案した。
➤火山岩の放射年代測定が適用できない場合にも、RIPL法を用いることにより、第四紀火山の認定が行える見通しを得た。

熱年代学的手法による古地温・熱水系の復元技術

- 概要調査では過去に著しい熱水活動の有無を確認。
- 巨大噴火による深部地質環境への影響は？

古地温・熱水系の復元手法
① シミュレーション
② 熱年代学的手法

①, ②を組合せた調査技術の体系化



1次元熱拡散モデルの概要

(Kamata et al., 1993)

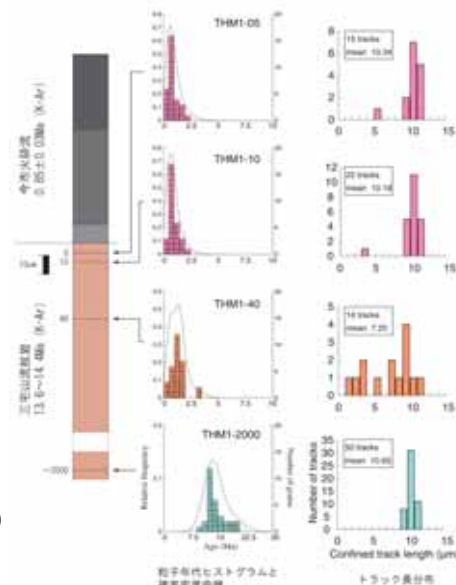
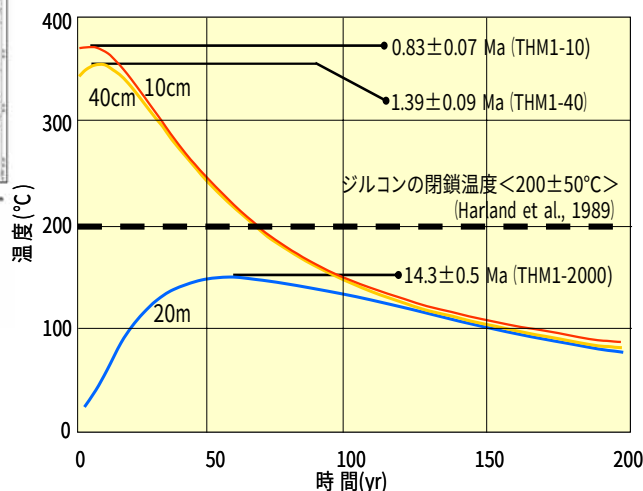
$$T = 0.5 (T_0 - T_s) \left[2 \operatorname{erf} \left\{ \frac{x/2}{\sqrt{\alpha t}} \right\} - \operatorname{erf} \left\{ \frac{(x-d)/2}{\sqrt{\alpha t}} \right\} - \operatorname{erf} \left\{ \frac{(x+d)/2}{\sqrt{\alpha t}} \right\} \right] + T_s$$

T: 深度xの温度 [°C]
x: 地表からの深度 (m)
t: 時間 (yr)
T₀: 火砕流堆積物の定置温度 [°C]
T_s: 大気と基盤の温度 [°C] (=20°C)
d: 火砕流堆積物の層厚 [m]
 α : 熱拡散率 [m²/yr] (=14.8 m²/yr)

結論 ➤熱拡散モデルによる感度解析では、地温が100°Cを超える領域は地表から数10m程度の範囲に限定。

熱年代学的手法を用いた事例研究によって解析結果の妥当性を確認！

熱年代学的手法による古地温・熱水系の復元技術



今市火砕流の基盤岩 (三宅山流紋岩) の深度ごとのFT年代とトラック長の頻度分布

結論 ➤古地温・熱水系の復元には、熱年代学的手法と数値シミュレーションを組合わせた調査技術が有効であると考えられる。

地下深部のマグマ・高温流体の調査技術

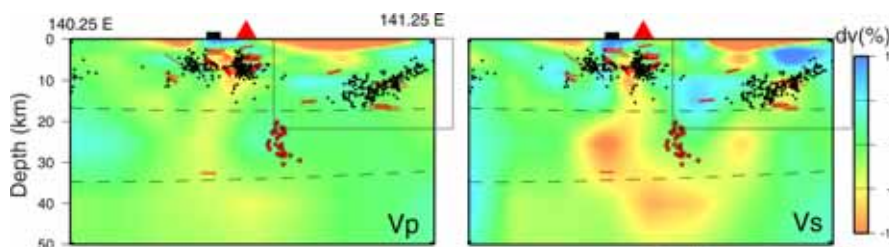
新たな火山の発生の可能性
や非火山性の熱水活動の
原因等を検討することが重要

マグマ・高温流体等の存在
の有無を確認する方法
① 地球物理学的手法
② 地球化学的手法

個別の調査手法の
適用性の検討およ
び①, ②を組合せた
調査技術の体系化

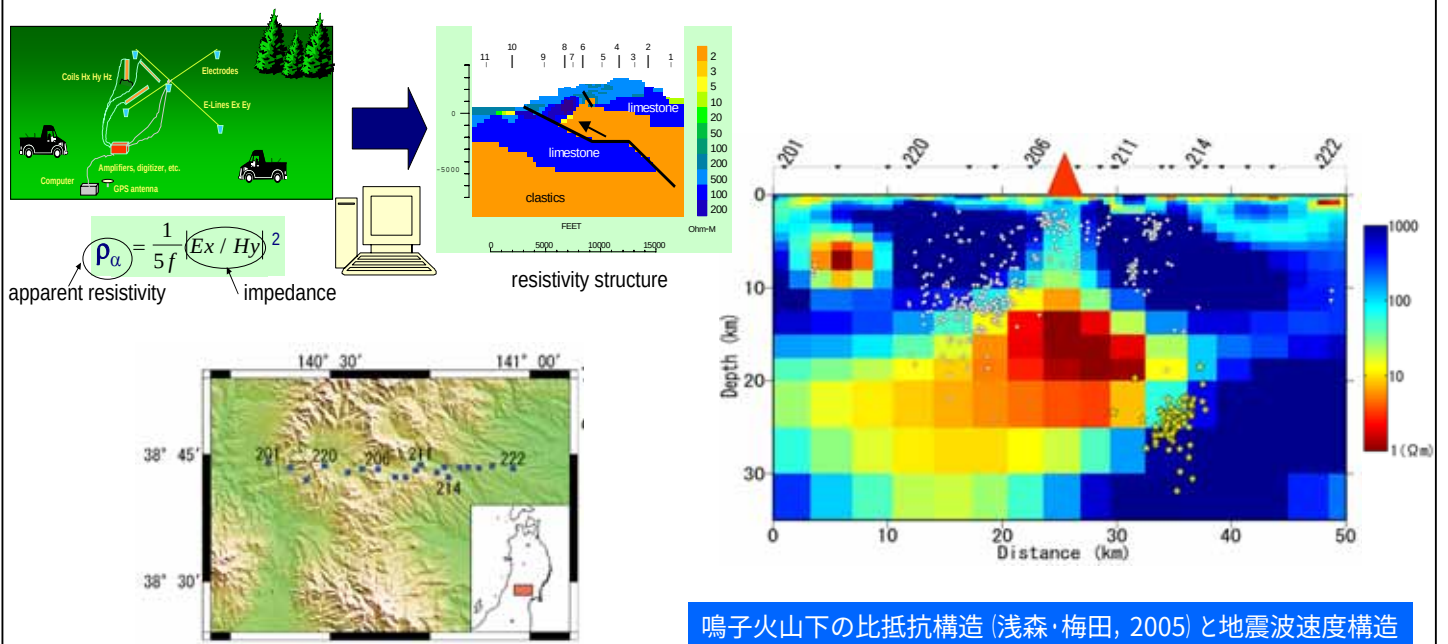
- 地震波低速度異常体 (seismic low-velocity zone)
地震波トモグラフィーによって、解析される地震波低速度異常体。マグマや流体が関与していると考えられる (e.g. Nakajima and Hasegawa, 2003)。
- 低周波微小地震 (Low-frequency micro-earthquake)
マグマや流体の移動に伴って発生すると考えられている (e.g. 岡田・長谷川, 2000)。
- 地震波反射面 (Seismic reflector)
地殻中の流体の存在に伴う地震波反射面 (e.g. 堀・他, 1999)。

地震活動が静穏な地域では、評価に不適。他の地球物理学的手法はないのか？その適用性は？



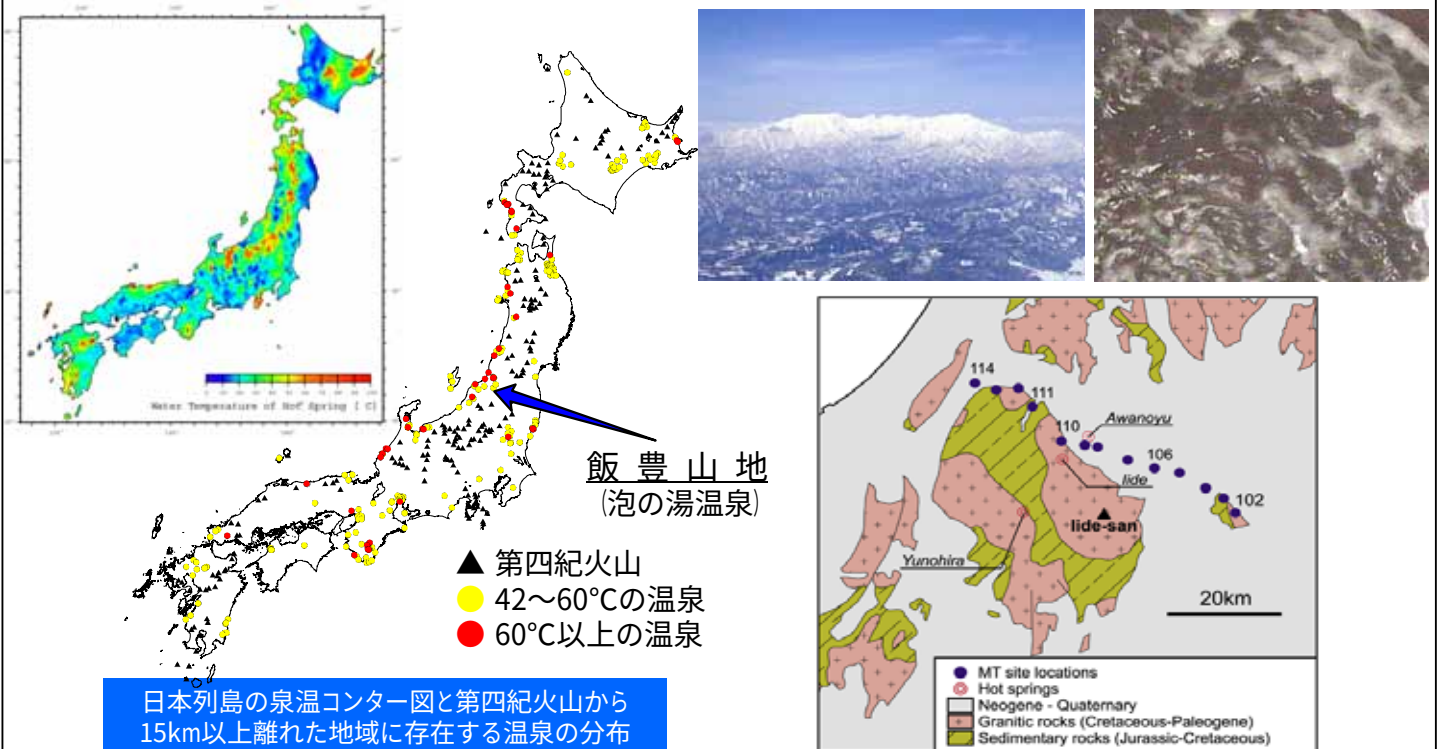
鳴子火山下の三次元地震波速度構造 (Nakajima and Hasegawa, 2003)

鳴子火山におけるMT法 (比抵抗構造) の適用例

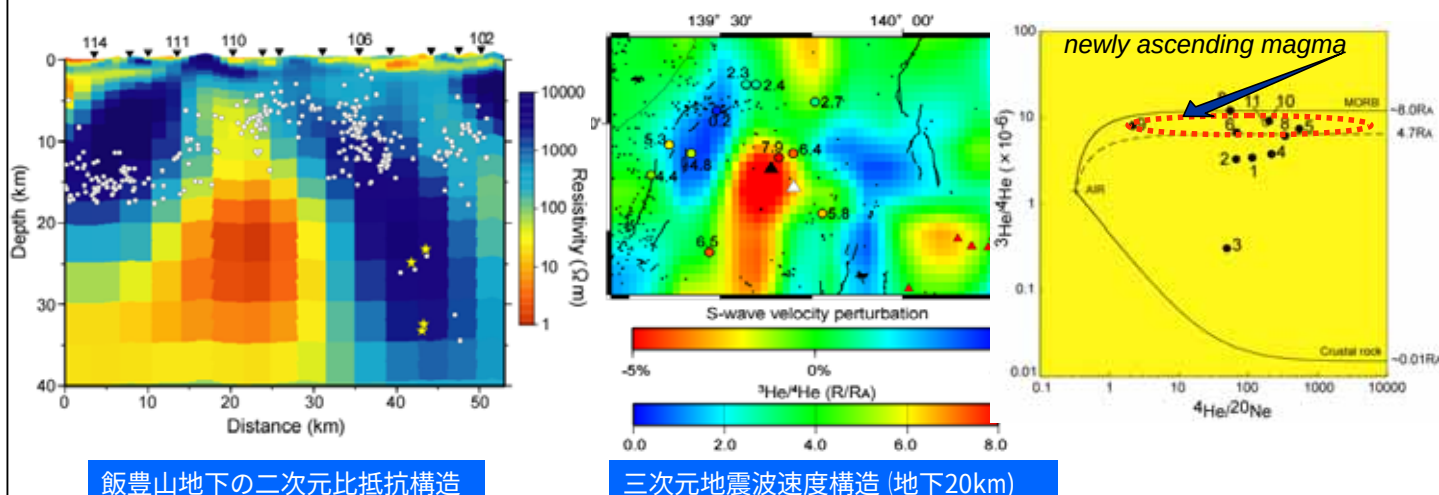


結論 ➤地震活動が静穏な地域においては、MT法が有効な手法と考えられる。

非火山性の熱水活動に関する基盤的研究



非火山性の熱水活動に関する基盤的研究



<高温異常の原因>

- ① 最近になって上昇・定置したマグマ
- ② 中新世の火成活動に伴う高温岩体 (固結したマグマ) を熱源とする熱水



中新世火成岩体によるマントルヘリウムの影響の評価

[Craig and Lupton, 1976]

$$P(^4\text{He}) = 0.2355 \times 10^{-12} \text{ U}^* \text{ (cm}^3\text{STP/g/year)}$$

$$\text{U}^* = \text{U} \{1 + 0.123 (\text{Th}/\text{U} - 4)\}$$

□ U = 1.0ppm, Th = 0.5 ppm, 初生マグマのヘリウム含有量:
 $^3\text{He} = 1 \times 10^{-11}$, $^4\text{He} = 1 \times 10^{-6}$ (cm³STP/g), t = 14 Ma

H18以降の計画

<調査技術の開発・体系化>

- (1) 多量屈折率測定地質解析法による第四紀火山の同定技術
 - 鮮新世～更新世前期の火山へのRIP L法の適用性の確認
 - 火山ガラス, 鉱物の微量成分を含めたテフラカタログの作成
- (2) 熱年代学的手法による古地温・熱水系の復元技術
 - ウラン・トリウム・ヘリウム年代測定システムの構築
 - アパタイト (閉鎖温度: 約100°C) 等を用いた熱年代学的手法の確立
- (3) 地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術
 - 後続波を利用した高精度の地震波トモグラフィーの導入
 - 希ガス同位体 (He, Ar等) を利用した調査技術の適用性の検討
 - 地球物理学的手法と地球化学的手法を組み合わせた総合的な調査技術の確立

火山・地熱活動 (研究課題)

＜調査技術の開発・体系化＞

(1) 第四紀の火山・地熱等の活動履歴の調査技術

- ① 多量屈折率測定地質解析法による第四紀火山の同定技術
- ② 熱年代学的手法による古地温・熱水系の復元技術

(2) 地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術

- ① 地球物理学的・地球化学的手法の適用性の検討および体系化
- ② 非火山性の熱水活動に関する基盤的研究 (規模, タイプ, 活動履歴等)

＜長期予測・影響評価モデルの開発＞

(1) 火山活動等の長期予測モデル

- ① 確率論的アプローチによる火山活動の長期予測モデル

(2) 熱水活動等の影響評価モデル

- ① 一次元熱輸送モデルによる熱ポテンシャルの評価
- ② 三次元熱水系シミュレーション技術

火山活動等の長期予測モデルの開発

火山フロントの日本海側や単成火山地域における新たな火山の発生の可能性を検討

長期予測の方法論

- ① 決定論的取り扱い
- ② 確率論的な取り扱い

個別のモデルの適用性の検討および
①, ②を組合せたモデルの高度化

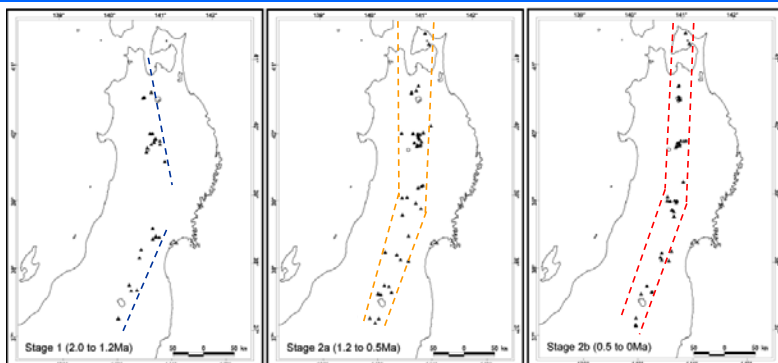
＞外挿法による予測 (過去の傾向を将来に延長して予測する方法)

[小出, 1992]

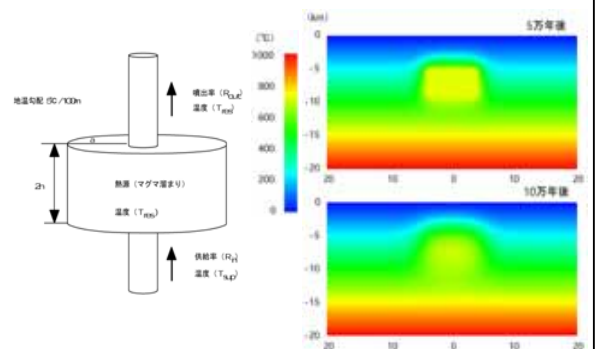
＞類推法による予測 (現在の現象と似た現象を, 過去のデータから探だし, それらの類推により将来予測を行う方法)

＞確率統計的予測 (現象の生起確率を統計的に求めて, 将来の発生確率を予測する方法)

＞数値シミュレーションによる予測 (概念モデルを構築し, コンピュータの数値実験によって将来予測を行う方法)

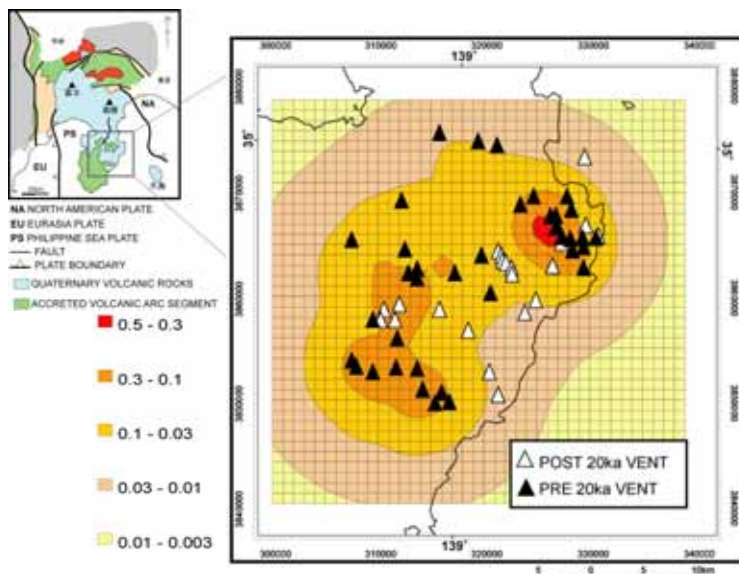


外挿法の例 (東北日本の火山フロントの変遷)



数値シミュレーションの例 (マグマ周辺の熱伝導解析)

確率論的アプローチによる火山活動の長期予測モデル



時空間モデルの概要

最近隣法 (nearest-neighbor method)により、地点pの単位時間・単位面積あたりの火山の分布密度を以下の式で求める。

$$\lambda_{x,y,t}(p) = m / \sum_{i=1}^m u_i t_i$$

u_i : 地点pから火山 v_i までの最短距離を半径とする面積

t_i : 火山 v_i が発生したから現在までの時間
また、地点pを中心とした領域aに時間tにおいて火山の発生する確率は、ポアソン分布を仮定し、以下の式で求める。

$$P[N \geq 1] = 1 - \exp[-t \cdot \lambda_{x,y,t}(p)]$$

東伊豆単成火山群を事例とした時空間モデルによる新たな火山の発生する確率分布

結論 ➤独立単成火山群における将来の火山活動の可能性の評価に際しては、空間モデルや時空間モデルが有効な手法であるという見通しを得た。

熱水活動等の影響評価モデルの開発

マグマによる地温上昇、水質変化等の影響については、処分システムとの関連も含めて検討が必要。

安全評価モデル(変動シナリオ)の構築や安全評価に用いる熱、地下水理等のパラメータの提供

熱源周辺の地質環境条件の変化を取り扱うシミュレータ開発およびその適用性の検討

開発コード: Magma 2002

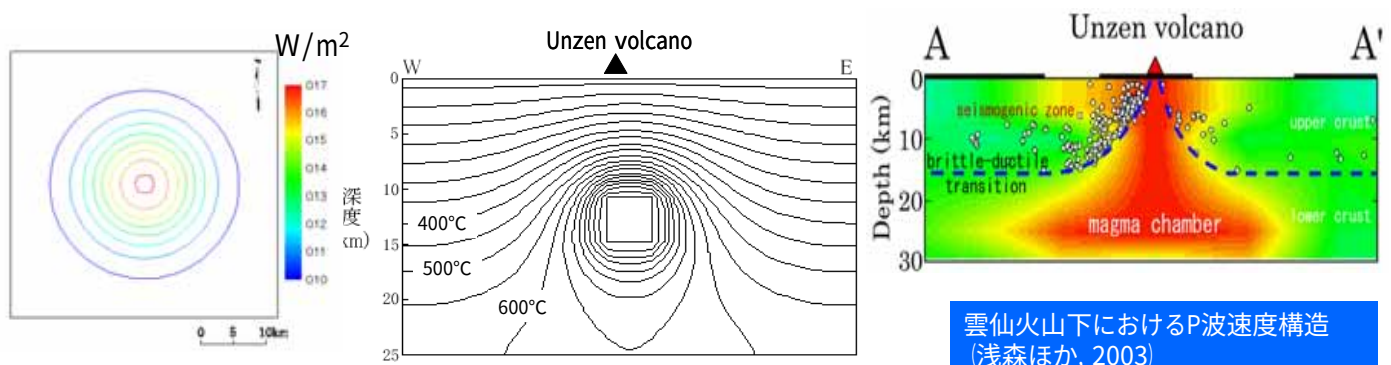
目的: マグマ溜まりおよびそれに伴う熱水対流系の生成・冷却過程のシミュレーション

概要: 既存の地熱シミュレータ FIGS3Cをベースとし、マグマ溜りを取り扱うよう温度1000°C、圧力1000barsまでの領域を計算できるよう改良。多孔質媒体中の熱・質量保存側を拡散方程式とともに、差分化して計算。

Magma 2002の特徴

項目	内容	備考
解法	完全陰解法	
差分化法	Integral Finite Difference	解析範囲がデカルト座標系格子状、円柱座標系格子状のほか任意の形状に分割可能
温度・圧力の解析範囲	5~1000°C, 0.1~1000bars	流体物性の外挿により2000°C, 2000barsまで計算できる
計算モード	熱・水連成、熱伝導のみ	

三次元熱水系シミュレーション技術



magma2002で計算した雲仙火山下の温度構造 (右) および熱流束 (左)
地下10kmに5km四方の立方体のマグマ溜りを仮定した場合、上面境界での熱流束は0.13~0.17W/m²であり、実測値 (0.15W/m²) と整合的である。

雲仙火山下におけるP波速度構造
(浅森ほか, 2003)

モデル化

結論

- 日本列島の坑井温度プロファイルを収集し、データベースを作成した。
- 上記のデータを用いて一次元熱輸送モデルにより熱流束の計算を行い、我が国の熱流束の分布の特徴を明らかにした。
- 1000°C, 1000barまでの熱源を取り扱える解析コード (magma2002) を開発した。
- 雲仙火山を事例として、上記のシミュレータの適用性の検討を行った。

H18以降の計画

<長期予測・影響評価モデルの開発>

- (1) 確率論的アプローチによる火山活動の長期予測モデル
 - ベイズ法等による地球物理データ (地震波速度, 熱流束等), 地球化学データ (希ガス同位体比等) の結合モデル
 - 予測モデルの検証方法の構築
- (2) 三次元熱水系のシミュレーション技術
 - 火成活動による熱・地下水理・地球化学的影響を評価するための総合的なシミュレーション技術の整備
 - シミュレーションの検証方法の構築

H17までの成果発表(論文)

(1) 第四紀の火山・地熱等の活動履歴の調査技術

- 古澤 明, 梅田浩司(2000):別府湾コアにおける最近7000年間の火山灰層序ーピストンコア中の火山灰と阿蘇, 九重火山のテフラとの対比ー, 地質学雑誌, 106, 31-49.
- 梅田浩司, 小松 亮, 棚瀬充史, 湯佐泰久(2001):西南日本領家帯(四国), 高浜花崗岩類の冷却史, 特に新第三紀貫入岩類による熱的影響, 岩石鉱物科学, 30, 17-27.
- 石丸恒存, 角田地文(2002): 日本列島における大規模火砕流の特徴と熱的影響解析, サイクル機構技報, no.14, 161-170.
- 松崎達二, 角田地文, 石丸恒存, 鎌田浩毅, 檀原徹, 岩野英樹, 吉岡哲(2004): 大規模火砕流による基盤岩への熱的影響の検討ーフィッシュン・トラック法による熱履歴解析, 応用地質, 45, 238-248.
- 梅田浩司, 古澤 明(2004): RIPL法によるテフラ降灰層準の認定と最新の噴火活動の推定, 月刊地球, 26, 395-400.
- 金沢 淳, 富山真吾, 及川輝樹, 梅田浩司(2005): 地質温度計による熱履歴の調査手法について, サイクル機構技報, no.26, 1-18.
- Oikawa, T., Umeda, K., Kanazawa, S. and Matsuzaki, T. (2006) : Unusual cooling of Middle Miocene Ichifusayama Granodiorite in Kyushu, Japan, Jour. Mineral. Petrol. Sci., 101, 23-28.

(2) 地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術

- 梅田浩司, 上原大二郎, 小川康雄, 工藤 健, 角田地文(2003): 広帯域MT法による紀伊半島の中新世珪長質火成岩体の深部構造, 火山, 48, 461-470.
- 上原大二郎, 石丸恒存, 棚瀬充史, 小川康雄, 鍵山恒臣(2003): MT法におけるファーマリモトリファレンス処理の効果と紀伊半島南部地域の深部抵抗構造, 応用地質, 44, pp.164-174.
- 梅田浩司, 浅森浩一, 及川輝樹, 角田地文, 趙 大鵬, 鎌谷紀子(2004): 前弧域の非火山地帯における高温異常域についてー紀伊半島中へ南部の地殻・マントル構造と温泉ガスのヘリウム同位体比ー, 月刊地球, 26, 407-413.
- 浅森浩一, 梅田浩司(2005): 地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術について, 原子力バックエンド研究, 11, 147-156.
- 上原大二郎, 小川康雄, 角田地文, 工藤 健, 梅田浩司, 棚瀬充史, 武田祐啓, 千葉昭彦, 菊池 晃, 鍵山恒臣(2005): 紀伊半島南部地域の重力異常と深部抵抗構造から推定される地熱構造, 地震第2輯, 57, 245-255.
- Umeda, K., Ogawa, Y., Asamori, K. and Oikawa, T. (2006) : Aqueous fluids derived from a subducting slab: observed high ^3He emanation and conductive anomaly in a non-volcanic region, Kii Peninsula southwest Japan : Jour. Volcanol. Geotherm. Res., 149, 47-61.
- Umeda, K., Kanazawa, S., Kakuta, C., Asamori, K. and Oikawa, T. (2006) : Variation in the $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios of hot springs on Shikoku Island, Southwest Japan, Geochim. Geophys. Geosyst., vol.7, DOI 10.1029/2005GC001210.
- Umeda, K., Asamori, K., Negi, T. and Ogawa, Y. (2006) : Magnetotelluric imaging of crustal magma storage beneath the Mesozoic crystalline mountains in a non-volcanic region, Northeast Japan, Geochim. Geophys. Geosyst., vol.7, DOI10.1042/2006GC001247.

H17までの成果発表(論文)

(3) 火山活動等の長期予測モデル

- Martin, A. J., Umeda, K. and Yusa, Y. (2003) : Probabilistic approaches for predicting the long-term spatial and temporal characteristics of monogenetic volcanoes; application to two monogenetic volcano fields in Japan, JNC Technical Review, no. 18, 59-70.
- Martin, A. J., Takahashi, M., Umeda, K. and Yusa, Y. (2003): Probabilistic methods for estimating the long-term spatial characteristics of monogenetic volcanoes in Japan, Act. Geophysica. Polonica. 51, 271-289.
- Martin, A. J., Umeda, K., Connor, C. B., Weller, J.N., Zhao, D., Takahashi, M. (2004) : Modeling long-term volcanic hazards through Bayesian inference: An example from the Tohoku volcanic arc, Japan. J. Geophys. Res. 109, B10208, DOI 10.1029/2004JB003201.
- 高橋正樹, Martin, A. J. (2004) : 今後10万年間にどこに火山はできるかーマagma供給システムの長期安定性をめぐってー, 月刊地球, 26, pp.386-394.

(4) 熱水活動等の影響評価モデル

- 坂川幸洋, 梅田浩司, 鈴木元孝, 梶原竜哉, 内田洋平(2004): 日本の坑井温度プロファイルデータベース, 地震第2輯, 57, 63-67
- 坂川幸洋, 梅田浩司, 浅森浩一(2005): 熱移流を考慮した日本列島の熱流束分布と雲仙火山を対象とした熱・水連成シミュレーション, 原子力バックエンド研究, 11, 157-166.
- 坂川幸洋, 梅田浩司, 浅森浩一(2006): 熱移流を考慮した日本列島の熱流束分布, 日本地熱学会誌, 28, 211-221.

(5) その他

- 浅森浩一, 石丸恒存, 岩月輝希(2002): 日本列島における火山周辺の酸性地下水分布, サイクル機構技報, no.15, 103-111.
- 石丸恒存, 角田地文, 棚瀬充史(2002): 単成火山(群)に関する文献調査, 核燃料サイクル開発機構, TN7420 2002-001.
- 浅森浩一, 梅田浩司, 石丸恒存, 小松亮(2003): 温泉地化学データベースの作成, 核燃料サイクル開発機構, TN7450 2002-003.
- Kimura, J., Kunikiyo, T., Osaka, I., Nagao, T., Yamauchi, S., Kakubuchi, S., Okada, S., Fujibayashi, N., Okada, R., Murakami, H., Kusano, T., Umeda, K., Hayashi, S., Ishimaru, K., Ninomiya, A. and Tanase, A. (2003): Late Cenozoic volcanic activity in the Chugoku area, southwest Japan arc during back-arc basin opening and reinitiation of subduction. The Island Arc, 12, 22-45.
- 武田精悦, 中司 昇, 梅田浩司(2004): 地質環境の長期安定性と地層処分ー今後の研究開発に向けた視点ー, 月刊地球, 26, 332-338.
- 梅田浩司, 大澤英昭, 野原 壯, 笹尾英嗣, 藤原 治, 浅森浩一, 中司 昇(2005): サイクル機構における「地質環境の長期安定性に関する研究」の概要ー日本列島のネオテクトニクスと地質環境の長期安定性ー, 原子力バックエンド研究, 11, 97-112.
- 川村淳, 牧野仁史, 梅田浩司, 瀬尾俊弘, 石丸恒存, 大澤英昭(2005): 高レベル放射性廃棄物処分における天然現象影響評価技術の高度化, サイクル機構技報, no.28, 53-64.
- Umeda, K. (2006) Deep structure of the Miocene igneous complex in the Kii peninsula, Southwest Japan, inferred from wide-band magnetotelluric soundings, in Advances in Geosciences - Vol. 1: Solid Earth (SE), edited by C. Yuntai, ISBN 981-256-985-5, World Scientific, Singapore (in press).