

電磁気観測で推定する火山体内部の地下水流動

相澤 広 記¹⁾

1. はじめに

空隙の多い火山では、天水は地下に容易に浸透し、大量の地下水が山体内に蓄えられる。地下水に深部からの火山ガスの寄与があれば、高温の地下水(熱水)となって存在する。この地下水は噴火前に上昇してきたマグマと出会い、様々なマグマ-地下水相互作用を起こす可能性がある。例えば1990年に雲仙普賢岳で起こった、微動発生、水蒸気爆発から溶岩ドーム出現に至る一連の火山活動は、上昇してくるマグマと地下水の相互作用によって説明されている(Kagiyama *et al.*, 1999)。

噴火前には地下水自体に顕著な異常が生じることもある。例えば桜島1779年安永噴火、1914年大正噴火では、噴火の数時間前に井戸水が沸騰し(井村, 1998)、2000年有珠山噴火では噴火の数ヶ月前に地下水位が変動した(Shibata and Akita, 2001)。地下水自体の異常以外にも地震、地殻変動、熱消磁などの噴火の前兆現象は、表層から深さ数kmまでの地下水が豊富に存在する領域で起こることが多い。噴火の前兆現象のメカニズムを理解するためには、火山体内部の地下水を研究することが重要である。さらに、火山の一生を通じて低頻度の現象ではあるが、山麓に大きな被害をもたらす山体崩壊には、山体内の地下水や熱水変質体の分布が大きく関係することが示されている(Lopez and Williams, 1993; Finn *et al.*, 2001; Reid, 2004)。地下水についての情報は、今後、火山を理解する基礎として活用される機会が増えると考えられるが、ボーリング数の不足のためか、これまでその研究は多くはなかった。

2. 活火山における電磁気観測

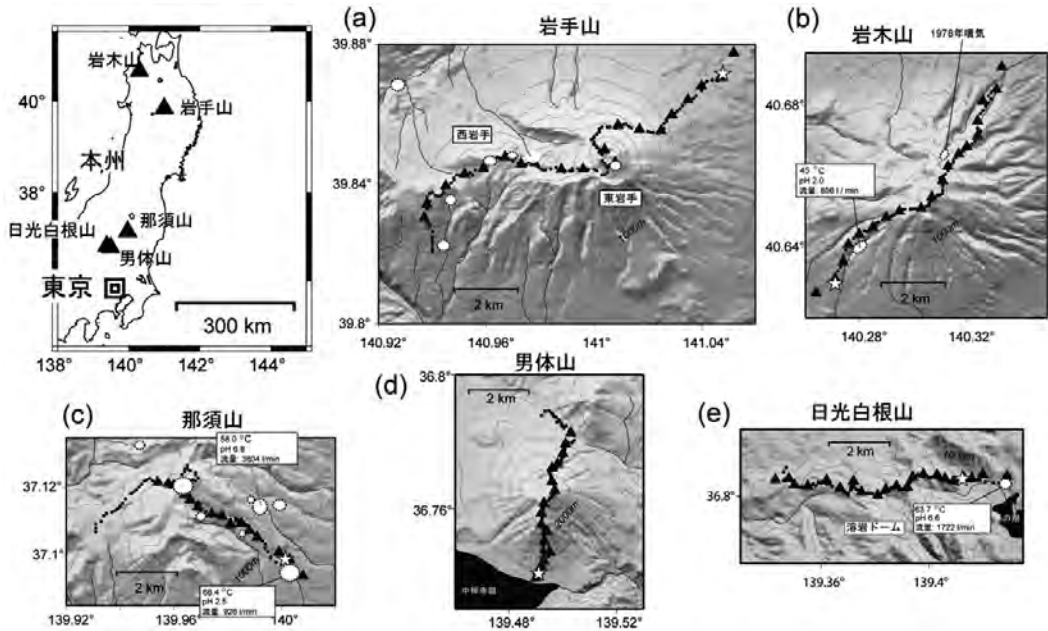
自然電位分布や比抵抗構造は地下水を研究する上で重要な情報である。自然電位は、多孔質な岩石中を地下水が動くことによって発生する物理量である。一般的には岩石の物性境界や、地下水の吸い込み、湧き出し口など、界面動電現象で運ばれる電流(携帯電流)が変化する場所で伝導電流ソースが発生し、その周りに自然電位異常を作る。発生する電位異常は、水の流速以外にも地下の比抵抗、浸透率、ゼータ電位、誘電率など多くのパラメータに依存し、自然電位異常だけから地下水の流動を推定するのは容易ではない。

比抵抗は水の存在に敏感な物理量である。特に空隙の多い岩石で構成される火山では、水に乏しい不飽和帯と地下水で満たされている帯水層が、明瞭な比抵抗コントラストとして認識される。但し火山において、比抵抗の解釈には大きな問題点が存在する。それは水だけではなく、スメクタイトに代表される熱水変質した粘土鉱物も、表面伝導により顕著な低比抵抗を示し(高倉, 2000)、低比抵抗層が観測されたとしても、地下水によるものか熱水変質した粘土鉱物によるものかという解釈に不確定性があるためである。

本稿では、自然電位と比抵抗の2種類の観測から、火山体内部の地下水流動を推定した筆者らの研究(Aizawa *et al.*, 2009)を紹介する。観測は岩手山、岩木山、那須山、日光白根山、男体山の5火山で行った。最近、男体山で1万年以内の噴火が確認されたため(石崎・及川, 2008)、対象とした火山はいずれも活火山に分類される。比抵抗構造推定には10,000-0.3Hzの電磁場を測定するAMT法を用いた。第1図に観測点分布図を示す。

1) 東京大学 地震研究所
113-0032 東京都文京区弥生1-1-1

キーワード: 比抵抗, 自然電位, 地下水, 熱水変質, 山体崩壊, 火山



第1図 三角がAMT観測点，星印と黒丸はそれぞれ自然電位の基準点と測定点である．地図中の実線は河川的位置を示す．地表の地熱兆候は白色で示した．

3. 火山体内部は斜面によって大きく異なる

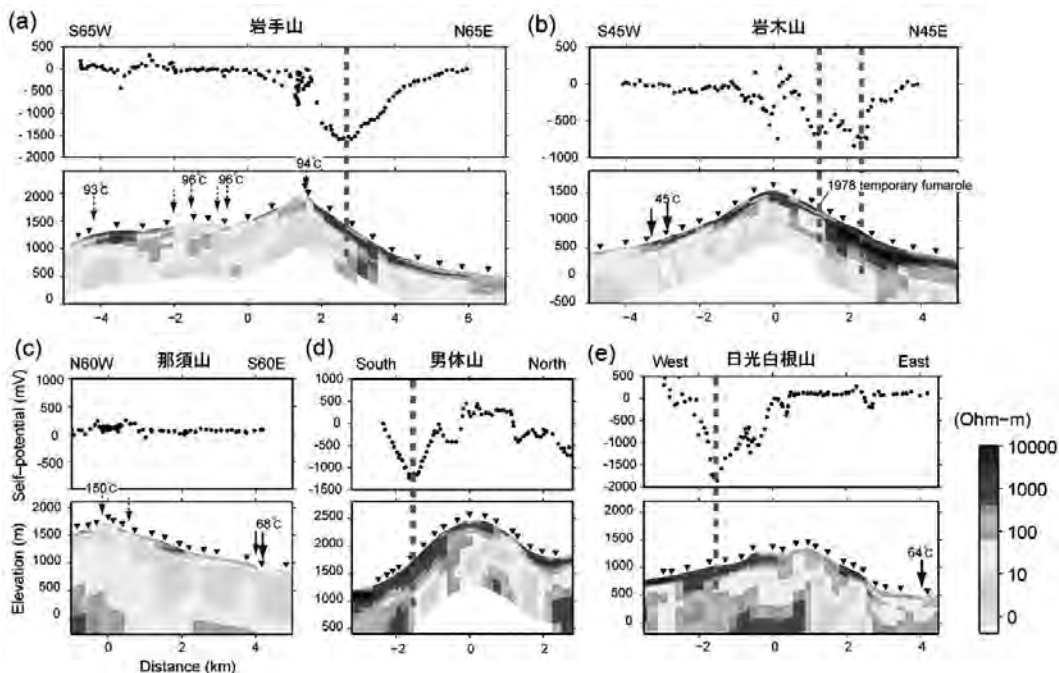
第2図に，地表の自然電位分布と，同じ測線で2次元インバージョン (Ogawa and Uchida, 1996) によって得られた深さ1kmまでの比抵抗構造をそれぞれ示す．自然電位分布，比抵抗構造とも同じ火山であっても斜面によって大きく異なることが分かる．自然電位を見ると，電位異常がほとんど存在しない斜面と，顕著なマイナス異常が存在する斜面が明瞭に分けられる．また自然電位異常は地下の比抵抗構造と大きな関係がある．電位異常がほとんど存在しない斜面の地下は低比抵抗体が広がっているのに対し，マイナス電位異常が存在する斜面の地下では，電位の極小を境に，山頂側低比抵抗，山麓側高比抵抗となっている．

地表の噴気や温泉の位置に注目すると，地熱兆候は例外なく自然電位異常が存在せず低比抵抗体が広がっている斜面に存在している．さらに火山体斜面を流れる川の位置 (第1図) に注目すると，川はマイナス電位異常が顕著な斜面に存在せず，電位異常が存在しない斜面に多い．以上の自然電位，比抵抗構造，地熱，川の存在の関係を第1表にまとめた．本観測

で得られたような数kmに渡って1,000mVを超えるマイナス電位異常は，大量の地下水が流れていないと説明できない．最近岩石のゼータ電位 (岩石-水の境界のすべり面の電位：界面動電現象によって運ばれる電流はゼータ電位に比例する) の場所による違いによって自然電位異常を説明する試みが行われているが (長谷ほか, 2008)，対象とした5火山で得られた岩石のゼータ電位を測定しても自然電位を説明する結果は得られなかった (Aizawa, 2008)．自然電位と比抵抗構造との関係は，自然電位の極小地下で地下水流動が大きく変化していることを示唆している．

4. 解釈 (地熱地帯と活火山の違い)

先に述べたように，活火山浅部でしばしば観測される10 (ohm-m) を下回るような低比抵抗領域は，熱水によるものか，熱水変質した粘土鉱物によるものか，または両者の混合であるのかを判断することは難しい．これに対し地熱開発地域では多くのボーリングが掘られ，検層データから比抵抗構造の解釈が比較的定まっている．地熱地域でのボーリング結果を見ると10 (ohm-m) を下回る低比抵抗領域はスメクタイト



第2図 自然電位分布(上側パネル)と比抵抗構造(下側パネル). 逆三角はAMT観測点. 下向き矢印は地表の地熱兆候(破線:噴気, 実線:温泉)を示す. 破線は自然電位の極小の位置を示す.

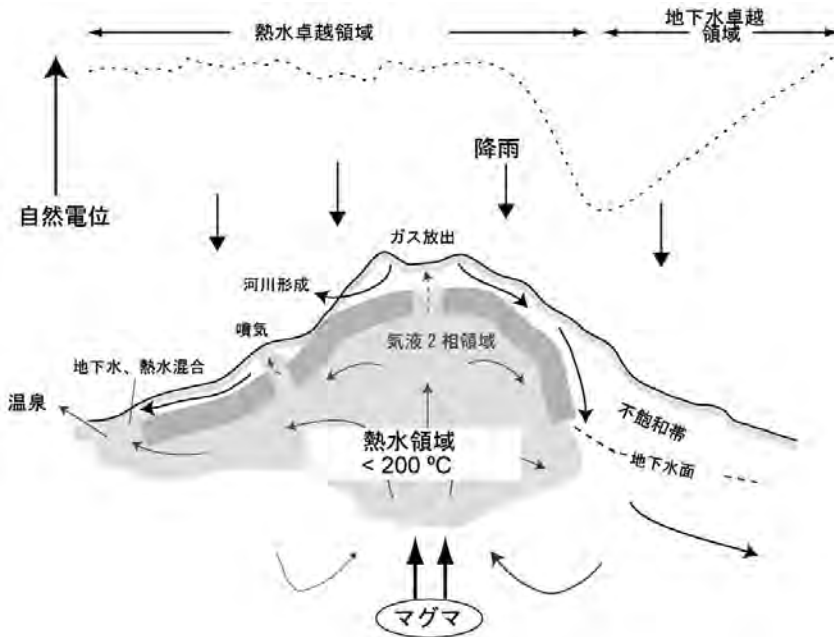
第1表 自然電位, 比抵抗, 地表の地熱, 川の存在の関係.

場所	自然電位異常	比抵抗構造	地表の地熱	川
那須山, 岩手山西斜面, 岩木山南西斜面, 日光白根山東斜面	ほとんど無し	低比抵抗が広がっている	斜面に多く存在	多い
岩手山東斜面, 岩木山北東斜面, 男体山, 日光白根山西斜面	顕著なマイナス異常	マイナス異常の極小を境に山側低比抵抗, 麓側高比抵抗	山頂部以外に存在せず	少ない

で代表される粘土鉱物が主で低浸透率となっており, 200°Cを超える高温の熱水はそれより深部のやや高比抵抗領域に存在している(内田・村上, 1989; Pellerin *et al.*, 1996; Uchida and Sasaki, 2006; Spichak and Manzella, 2009). ところが, この地熱地帯での解釈を, 今回5つの活火山で得られた結果にそのまま適用することはできない. なぜなら第2図から分かるとおり, 実際に地表で温泉や噴気が存在する領域直下は低比抵抗領域となっており, 低比抵抗が全て粘土とする解釈と矛盾するからである.

比抵抗を強く支配するのは実は温度である. 強導電性粘土鉱物のスメクタイトの存在が温度によって支配されるためである(Pytte and Reynolds, 1989; Lee *et al.*, in press). 実際, 地熱開発のボーリング検層データでも 200°Cの温度を超えると低比抵抗であるスメ

クタイトはイライトやクロライトへと変わり比抵抗が上昇する例が多い. つまり200°Cを境にそれより低温が低比抵抗, 高温が高比抵抗となっている. では, 火山体内の温度はどのくらいであろうか. 数少ない活火山でのボーリング結果を見ると, 1,000mを超える深度まで温度はおしなべて200°C以下という結果が得られている(Zablocki *et al.*, 1974; Nakada *et al.*, 2005). また, スメクタイトと200°C以下の熱水の共存を示唆する結果も得られている(Fitterman *et al.*, 1988). 活火山浅部の10(ohm-m)を下回るような低比抵抗領域は, 大雑把には温度200°C以下の低温熱水と, 熱水変質した粘土鉱物を含む岩石の複合体であると考えた方が観測事実を説明できそうである. 活火山体内では200°Cを超えるような高温部分は存在するにしても火道周辺の狭い領域に限られると考えられる.



第3図

火山体内部の地下水流動の概念モデル。矢印が地下水の流れを示す。灰色で示した部分が低比抵抗領域として観測される。低比抵抗体の最上部(濃い灰色)は最も低浸透率となっている。実際の火山は三次元であるので、図に対して垂直向きの地下水の流れもあることに注意。

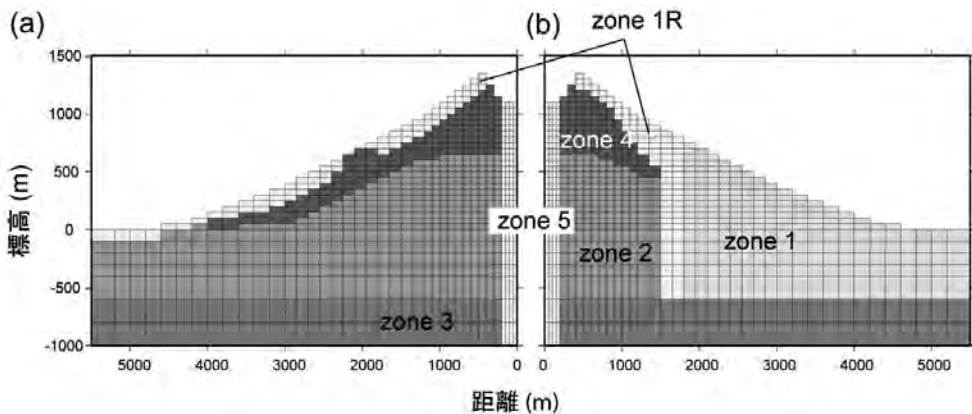
本稿では表層から続く高比抵抗体は水に乏しい不飽和帯と解釈する。火山表層の高比抵抗はしばしば空隙の少ない溶岩流と解釈されるが、成層火山は溶岩流やスコリア、火山灰が何重にもかさなってできたものであり、1枚の溶岩流と解釈するのは不自然である。高比抵抗体(不飽和帯)は自然電位マイナス異常が存在する斜面で、自然電位の極小よりも山麓側に厚く存在している。自然電位の極小より山頂側では低比抵抗が表層近くまで存在している(第2図)。これらの観測事実を説明するために、本研究では低比抵抗体の最上部が特に低浸透率となっており、その上を流れる地下水の「底」となっているという概念を導入する。この考えを導入すると、自然電位の極小の外側で高比抵抗の不飽和帯が厚くなっているのは、地下水の「底」が急激に深くなっているからと解釈できる。低比抵抗体を低温熱水と熱水変質した岩石の複合体と解釈したが、熱水の存在域の最上部が低浸透率となっているのは活火山ではこれまでも提唱されてきた考えである(Lowell *et al.*, 1993; Ingebritsen and Sorey, 1988)。

以上の解釈をまとめ、比抵抗、自然電位の関係から推測した火山体内部の水の流れについての考えを第3図に示す。低比抵抗領域は熱水変質のため低浸透率であるが、その最上部は特に低浸透率となっ

ている。自然電位のマイナス異常が存在する斜面(第3図右側)の地下では、低比抵抗体の上面に沿って地下水が急激に落ち込むため、その外側に分厚い不飽和帯を形成する。不飽和帯は水に乏しいため高比抵抗として観測される。自然電位マイナス異常は不飽和帯が高比抵抗であることと、下に流れ落ちる地下水の効果で発生すると考えられる。自然電位異常が存在せず、低比抵抗が広がっている斜面(第3図左側)の地下には熱水系が発達している。こうした斜面では天水を山体内に溜め込むことができず、地表に河川を形成する。天水を蓄えにくいこと、低比抵抗体が電位を小さくすること、2つの効果が合わさり自然電位異常が発生しないと考えられる。また、こうした斜面において、低浸透率領域が破碎など何らかの要因で部分的に高浸透率となれば地表に温泉や噴気などが形成される。

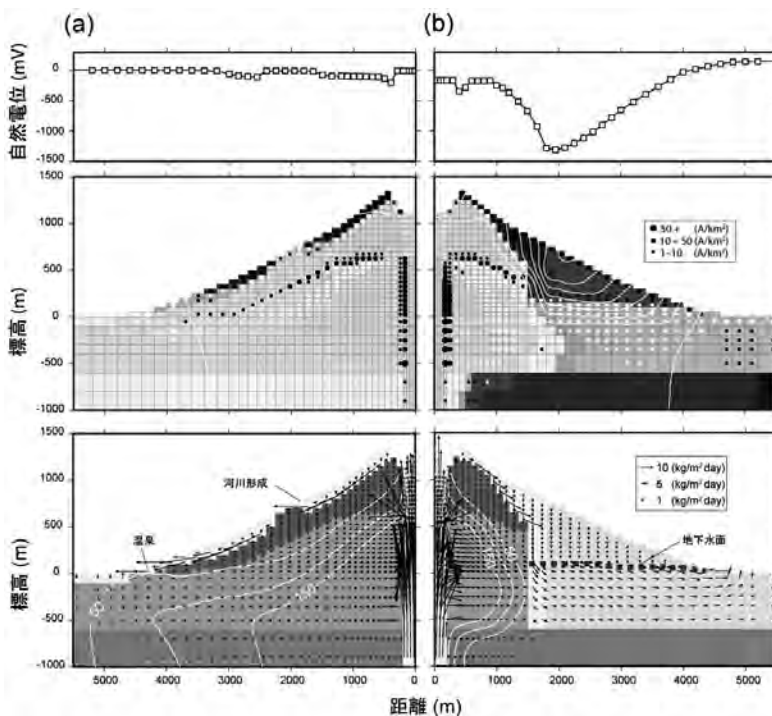
5. 熱水流動シミュレーションによるモデルの検証

第3図に示した概念モデルが、実際に観測を説明できるかどうかをシミュレーションによって検証した。計算は(1)浸透率構造と流体ソースを与え地下水流動を計算する、(2)地下水流動分布から比抵抗構造



Rock unit	Rock type	Porosity	Tortuosity	X direction permeability (m ²)	Z direction permeability (m ²)	Rock resistivity (Ω·m)
Zone 1	Fresh rock	0.3	2	10 ⁻¹³	2 · 10 ⁻¹⁴	100,000
Zone 1R	Fractured rock surrounding hydrothermal zone	0.3	2	10 ⁻¹³		100,000
Zone 2	Hydrothermal zone	0.1	2	3 · 10 ⁻¹⁵		10
Zone 3	Basement	0.05	4	3 · 10 ⁻¹⁸		100,000
Zone 4	Sealing zone	0.01	4	3 · 10 ⁻¹⁶		2
Zone 5	Conduit	0.1	2	10 ⁻¹²		10

第4図 計算に用いた構造と、岩石のパラメータ。



第5図 計算結果：(上段)地表の自然電位，(中段)比抵抗と自然電位ソース，(下段)地下水流量と温度分布。(a)は流体ソースを与えてから5万年後，(b)は流体ソースを与えてから150年後をそれぞれ示している。中段の比抵抗構造のカラーは第2図と，下段の浸透率構造のカラーは第4図とそれぞれ共通である。中段の白実線は山体内部の自然電位コンターを示している。また自然電位ソースのうち白はプラス，黒はマイナスをそれぞれ表している。

と自然電位のソースを計算する, (3) 両者から自然電位分布を計算する, という3段階に分けて行った. 計算はSTARとEKPポストプロセッサを用いるIshido and Pritchett (1999)の手法を用い, 比抵抗構造の計算にはGlover *et al.* (2000)の修正アーチーの式を, 自然電位の計算にはDey and Morrison (1979)の定式化をそれぞれ用いた. 熱水系の広がっている斜面とそうでない斜面の2つを想定し, 2次元軸対称構造で(a), (b)2通りの計算を行った. 第4図に与えた浸透率構造を示す. 熱水存在域は低浸透率とし, さらにその最上部は最も低浸透率とした. また両者とも中央部に低浸透率の火道を設定した. 流体のソースとして地表に0.4m/yearの降水を, 火道最深部に1万トン/dayの熱水(200°C, 質量分率0.036g/lのNaCl含む)をそれぞれ与えた.

第5図に計算結果を示す. 第3図に示した自然電位と比抵抗の関係, それに伴う地下水の流れを再現できており, 第3図の概念モデルは観測と矛盾しないことが示された.

6. 山体崩壊と地下構造の関係

これまで示してきたように, 一見均質に見える火山でもその山体内部は斜面によって大きく異なる. これは成層火山が常に火道中心から放射状に均等に成長していくと考えると不自然に思える. 本稿では斜面の不均質が過去の山体崩壊に大きく関わっている可能性を指摘したい. 地質学的研究によれば成層火山はその一生を通じ, 頻度は低いながらも崩壊を繰り返し, その度に馬蹄形カルデラを形成する(Siebert *et al.*, 1987). その後, 山頂部からの溶岩流やスコリアなどが崩壊跡地を埋め立て表面上は元の地形に戻る. ここで埋め立てた溶岩流やスコリアは新鮮で変質をほとんど受けていないため, 低浸透率で高比抵抗となると考えられる. つまり自然電位のマイナス異常と, 厚い高比抵抗層の存在が顕著な斜面(第3, 4, 5図右側)は過去に山体崩壊を起こした痕跡を表している可能性がある. 実際, 第2図中, 顕著なマイナス電位異常が観測されている岩手山北東斜面, 岩木山北東斜面では過去に山体崩壊が発生している(伊藤・土井, 2005; 橋本ほか, 1979). さらに富士山の2,900年前の推定山体崩壊発生位置は顕著な自然電位マイナス異常域に一致している(Aizawa *et al.*, 2005; 宮地,

1988).

自然電位異常が存在しない斜面(第3, 4, 5図左側)は熱水系が発達し, 熱水変質が進行している. こうした斜面では山体崩壊のリスクが高まり(Lopez and Williams, 1993; Finn *et al.*, 2001), いずれは崩壊し馬蹄形カルデラを形成する可能性が高い. ここで, もしその後, 新しい噴出物がカルデラを埋め立てれば, マイナス電位異常と, 厚い高比抵抗層が存在する斜面(第3, 4, 5図右側)に変化すると考えられる. 成層火山が崩壊と埋め立てを繰り返しながら成長していく中で, 電磁気観測はその一時代のスナップショットを捉えているように思われる.

7. まとめ

本稿では, 観測から得られた自然電位と比抵抗構造の関係を制約として火山体内部の地下水流動を推定した研究を紹介した. ここで注意が必要なのは, 火山体内より深部の基盤内にも熱水が存在する可能性があるということである. 今後, より深部までの比抵抗構造を求め, 温泉水の化学分析も交え, さらに深部の地下水流動も研究していきたいと考えている.

一見均質に見える火山でも, その山体内部は斜面によって大きく異なっている場合がある. 将来, 面的調査により火山体内部の不均質構造と地下水流動を把握しておくことは, 噴火の前兆現象や火山活動の解釈に役立つと共に, 山体崩壊の痕跡や将来の崩壊危険斜面の推定という観点からも重要であると考え.

謝辞: ミニシンポジウム「貯留層変動探査法の目指したこと」で発表の機会を与えてくださった方々に感謝致します. 本稿の内容は, 筆者が日本学術振興会特別研究員として東京工業大学火山流体研究センターにおいて3年間在籍し, 行った研究に基づいております.

参考文献

- Aizawa, K., R. Yoshimura, N. Oshiman, K. Yamazaki, T. Uto, Y. Ogawa, S. B. Tank, W. Kanda, S. Sakanaka, Y. Furukawa, T. Hashimoto, M. Uyeshima, T. Ogawa, I. Shiozaki and T. Hurst (2005): Hydrothermal System beneath Mt. Fuji volcano inferred from Magnetotellurics and Electric Self-potential, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 235, 343-355.
- Aizawa, K. (2008): Classification of self-potential anomalies on volcanoes and possible interpretations for their subsurface struc-

- ture, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 175, 253-268, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.03.011.
- Aizawa, K., Y. Ogawa and T. Ishido (2009) : Groundwater flow and hydrothermal systems within volcanic edifices: Delineation by electric self-potential and magnetotellurics, *Journal of Geophysical Research*, 114, B01208, doi: 10.1029/2008JB005910.
- Dey, A. and H. F. Morrison (1979) : Resistivity modeling for arbitrarily shaped three dimensional structures, *Geophysics*, 44, 753-780.
- Fitterman D. V., W. D. Stanley and R. J. Bisdorf (1988) : Electrical structure of Newberry volcano, Oregon. *J. Geophys. Res.*, 93, 10, 119-10,134.
- Finn, C. A., T. W. Sisson and M. Deszcz-Pan (2001) : Aerogeophysical measurements of collapse-prone hydrothermally altered zones at Mount Rainier volcano, *Nature*, 409, 600-603.
- Glover P. W. J., M. J. Hole and J. Pous (2000) : A modified Archie's law for two conducting phases, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 180, 369-383.
- 橋本尚幸・磯山 功・窪木時雨郎・奥海 靖・大沢 穰(1979) : 岩木火山の北半分の地形学的考察, *地調月報*, 30, 369-377.
- 長谷英彰・石戸経士・神田 径・森 真陽(2008) : ゼータ電位を考慮した開聞岳の自然電位解釈, *物理探査*, 61, 301-312.
- 井村隆介(1998) : 史料からみた桜島火山安永噴火の推移, *火山*, 43, 373-383.
- Ingebritsen, S. E. and M. L. Sorey (1988) : Vapor-Dominated Zones Within Hydrothermal Systems: Evolution and Natural State. *J. Geophys. Res.*, 93, 13635-13655.
- Ishido, T. and J. W. Pritchett (1999) : Numerical simulation of electrokinetic potentials associated with subsurface fluid flow. *J. Geophys. Res.*, 104, 15247-15259.
- 石崎泰男・及川輝樹(2008) : 男体火山の山頂火口内に見られる湖沼堆積物とアグルチネートの¹⁴C年代, 日本地質学会秋季大会, 秋田.
- 伊藤順一・土井宣夫(2005) : 岩手火山地質図 火山地質図, 産総研地質調査総合センター.
- Kagiyama, T., H. Utada and T. Yamamoto (1999) : Magma ascent beneath Unzen Volcano, SW Japan, deduced from the electrical resistivity structure. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 89, 35-42.
- Lee, J. O., Kang, I. M. and Cho, W. J. Smectite alteration and its influence on the barrier properties of smectite clay for a repository, *Applied Clay Science*, In Press.
- López, D.L. and S. N. Williams (1993) : Catastrophic volcanic collapse; relation to hydrothermal processes. *Science*, 260, 1794-1796.
- Lowell, R. P., P. V. Cappellen and L. N. Germanovich (1993) : Silica precipitation in fractures and the evolution of permeability in hydrothermal upflow zones. *Science*, 260, 192-194.
- 宮地直道(1988) : 新富士火山の活動史, *地質学雑誌*, 94, 433-452.
- Nakada, S., Uto, K., Sakuma, S., Eichelberger, J.C. and Shimizu, H. (2005) : Scientific results of conduit drilling in the Unzen Scientific Drilling Project (USDPP). *Sci. Drill.* 1, 18-22.
- Ogawa, Y. and T. Uchida (1996) : A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift. *Geophys. J. Int.*, 126, 69-76.
- Pellerin, L., J. M. Johnston and G. W. Hohmann (1996) : A numerical evaluation of electromagnetic methods in geothermal exploration, *Geophysics*, 61, 121-130.
- Pytte, A. M. and Reynolds, R. C. (1989) : The thermal transformation of smectite to illite, In: Naeser, N. D., McCulloch, T. H. (Eds.), *Thermal History of Sedimentary Basins*, Springer-Verlag, New York, pp.133-140.
- Reid, M. E. (2004) : Massive collapse of volcano edifices triggered by hydrothermal pressurization, *Geology*, 32, 373-376, doi: 10.1130/G20300.1.
- Shibata, T. and Akita, F. (2001) : Precursory changes in well water level prior to the March, 2000 eruption of Usu volcano, Japan, *Geophys. Res. Lett.* 28, 1799-1802.
- Siebert, L., Glicken, H. and Ui, Y. (1987) : Volcanic hazards from Bezymianny- and Bandai-type eruptions. *Bull. Volcanol.*, 49, 435-459.
- Spichak, V. and A. Manzella (2009) : Electromagnetic sounding of geothermal zones. *J. Apply. Geophys.* 68, 459-478. doi: 10.1016/j.jappgeo.2008.05.007.
- 高倉伸一(2000) : 粘土鉱物を含む試料の比抵抗と物理・化学・力学的特性との関係. *物理探査*, 53, 415-426.
- 内田利弘・村上 裕(1989) : 地熱レーザーバと比抵抗構造, *物理探査*, 42, 438-468.
- Uchida, T. and U. Sasaki (2006) : Stable 3D inversion of MT data and its application to geothermal exploration. *Exploration Geophysics*, 37, 223-230.
- Zablocki, C. J., Tilling, R. I., Peterson, D. W. and Christiansen, R. L. (1974) : A deep research drill hole at the summit of an active volcano, Kilauea, Hawaii., *Geophys. Res. Lett.*, 1, 323-326.

AIZAWA Koki (2010) : Groundwater Flow and Hydrothermal Systems within Volcanic Edifices Inferred from Electric Self-Potential and Magnetotellurics.

< 受付 : 2009年11月10日 >