

火山電磁気観測の進展

相澤 広 記*

(2015年11月17日受付, 2016年1月15日受理)

Recent Progress in Electromagnetic Observations for Volcanology

Koki AIZAWA*

This paper reviews electromagnetic studies on volcanoes that were published between 2006 and 2015. Recent progress of the studies of resistivity structure, geomagnetic fields, electric self-potential, and volcanic lightning were summarized, respectively. Among these, a precise imaging of resistivity structure has substantially contributed to interpret volcanic activity in terms of the role of fluids. Moreover, it has been suggested that reliable resistivity structure is a key to understand the geomagnetic and self-potential variations on active volcanoes.

Key words: resistivity structure, geomagnetic field, self-potential, volcano lightning

1. はじめに

本小論では電磁気学的手法を使った火山観測研究の最近の成果をレビューするとともに、今後の進展について展望する。近年複数の観測項目から火山を研究する論文が多く発表されており、本論でもその有効性を強調するが、便宜上、比抵抗、地磁気、自然電位、火山雷の4項目に分けて概観を試みた。特に2006年～2015年の10年間の研究の進展にスポットライトをあてるため、それ以前の文献は紹介しきれないがご容赦頂きたい。火山電磁気観測の歴史的な経過、背景などについては10年前の「火山」特集号の総説(橋本, 2005)を、比抵抗構造推定のためのMT法の原理や発展、火山以外への適用例については「地震」特集号(上嶋, 2009)、および「岩石鉱物科学」特集号(市原・市来, 2011)にレビュー論文が出版されており、そちらを参照して頂きたい。

2. 比抵抗

2-1 深部比抵抗構造

自然の電磁波変動を利用するMT法を用いた火山体比抵抗構造研究はこの10年間で飛躍的に進展した。特に解析手法がこれまでの1, 2次元から3次元に移行したことが重要である。2005年まではフォワード計算により3

次元構造を推定した例はあったが、インバージョンによる客観的な構造推定は1次元、2次元解析が主体であった。ところが、2000年代から3次元比抵抗インバージョンコードが相次いで開発され(e.g., Newman and Alumbaugh, 2000; Sasaki, 2004; Siripunvaraporn *et al.*, 2005)、計算機の発達とともに実データに適用されるようになった。特に、Siripunvaraporn *et al.* (2005); Siripunvaraporn and Egbert (2009)による差分法を用いた3次元比抵抗インバージョンコードは計算領域をモデルスペースからデータスペースに変換することにより、メモリ使用量および計算時間を大幅に削減することに成功した。その結果、大規模モデルへの適用が可能になり、高空間解像度の比抵抗構造推定に多大な威力を発揮した。さらに、このコードが研究者コミュニティに無償で公開されたことによって、2000年代後半から火山で得られたMTデータを用いた3次元比抵抗構造解析がなされるようになった。近年では公開されるコードも増えており(Egbert and Kelbert, 2012; Kelbert *et al.*, 2014)、3次元解析はルーチン的に行われるようになりつつある。解析手法の進展に対して、この10年の観測機器の進展は、磁場センサー(インダクションコイル)が小型化し、電位差計測に特化したロガーが開発されたことが挙げられる(相澤・他, 2015)。新たな手

* 〒855-0843 長崎県島原市新山2-5643-29
九州大学地震火山観測研究センター
Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 2-5643-29 Shin'yama, Shimabara,

Nagasaki 855-0843, Japan.

e-mail: aizawa@sevo.kyushu-u.ac.jp

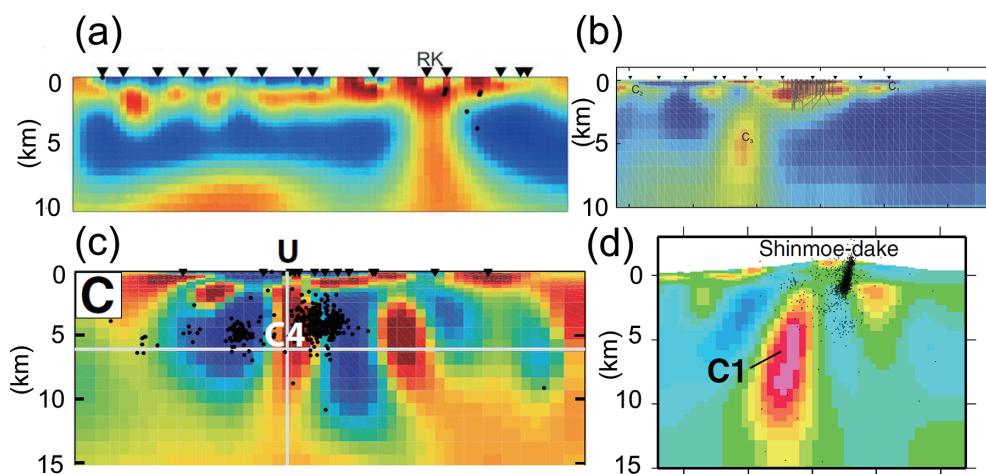


Fig. 1. Electric resistivity structures of (a) Taupo volcanic zone, New Zealand (Bertrand *et al.* 2012), (b) Ohaaki geothermal field, New Zealand (Bertrand *et al.* 2013), (c) Volcán Uturuncu, Bolivia (Comeau *et al.* 2015), and (d) Kirishima volcanoes, Japan (Aizawa *et al.* 2014). Each figure shows a vertical slice of the 3-D resistivity structure. Red color represents conductive zones, while blue color represents resistive zones. Vertical depth scale is added by the author. Vertical and horizontal ratios are 1:1 in all figures. (b) is reprinted from Journal of Volcanology and Geothermal Research, 268, Bertrand E.A. *et al.*, Magnetotelluric imaging of the Ohaaki geothermal system, New Zealand: Implications for locating basement permeability, 36-45, Copyright (2013), with permission from Elsevier.

法の開発や新たな観測機器の登場による今後の展望については2-4節で後述する。

3次元比抵抗構造解析は、言うまでもなく3次元性の高い構造に対して威力を発揮する。火山の場合、元来複雑で3次元的な構造が予想されるが、実際に得られるMTデータの一般的な性質として、浅部は1次元性であるのに対して、深部へ行くにつれ3次元性が強くなる傾向がある。その意味で3次元解析は特に深さ約20kmに達する深部構造探査に最も重要な貢献を果たしている。3次元インバージョンによって推定された火山体の深部比抵抗構造の例をFig. 1に示す。全体的に深さ数kmまでの浅部には低比抵抗層が広がっており、その下部が高比抵抗となっているが、特筆すべきは深部と浅部を鉛直方向、場合によっては斜め鉛直につなぐ低比抵抗体の存在である。こうした鉛直低比抵抗体（Sub-vertical conductor）は地表の火口や地熱地帯に向かって伸びており、マグマやガス、熱水などの火山性流体の通路と解釈されている（Hill *et al.*, 2009; Heise *et al.*, 2010; Bertrand *et al.*, 2012; Bertrand *et al.*, 2013; Aizawa *et al.*, 2014; Ogawa *et al.*, 2014; Comeau *et al.*, 2015; Diaz *et al.*, 2015）。この解釈に基づけば低比抵抗体の形状から、火山性流体の通路は直径が数kmほど、鉛直方向に10kmほどと巨大であることが示唆される。このように巨大な通路が火山直下に存

在していることはMT法3次元解析によって指摘され始めた重要な点である。鉛直低比抵抗体が周辺より permeable で、火山性流体の通り道となり得ることは温泉水の同位体観測からも示唆されている。富士山周辺で行われたMT観測によると、深さ数km～10kmの領域では、周辺より低比抵抗体の領域が火口を中心に北-南方向に伸びており、この低比抵抗体近傍では、ヘリウム同位体比および炭素同位体比測定からマグマ性ガスの寄与が大きいことが示された（Aizawa *et al.*, 2016）。火山性流体の通路は噴火活動に直接関連していることが2011年1月26日の霧島新燃岳噴火で示唆された。この噴火では、3回のサブプリニー式噴火と同期して、火口から北西6km、深さ5～10kmを中心とした地盤の収縮が観測されたが、収縮力源と新燃岳火口の間には時計回りに上昇する斜め鉛直な低比抵抗体が推定されている（Fig. 1d）。噴火と完全に同期して遠く離れた場所が沈降した事実は、噴火直前に火口とマグマ溜りを結ぶマグマの通路が形成されていたことを示しているため、Aizawa *et al.* (2014) は低比抵抗体の一部を伝いマグマが地表に噴出したと考えた。

例は少ないが、深部に存在すると考えられるマグマ溜まりも3次元解析によって推定されるようになってきた（Aizawa *et al.*, 2014; Comeau *et al.*, 2015; Diaz *et al.*, 2015）。

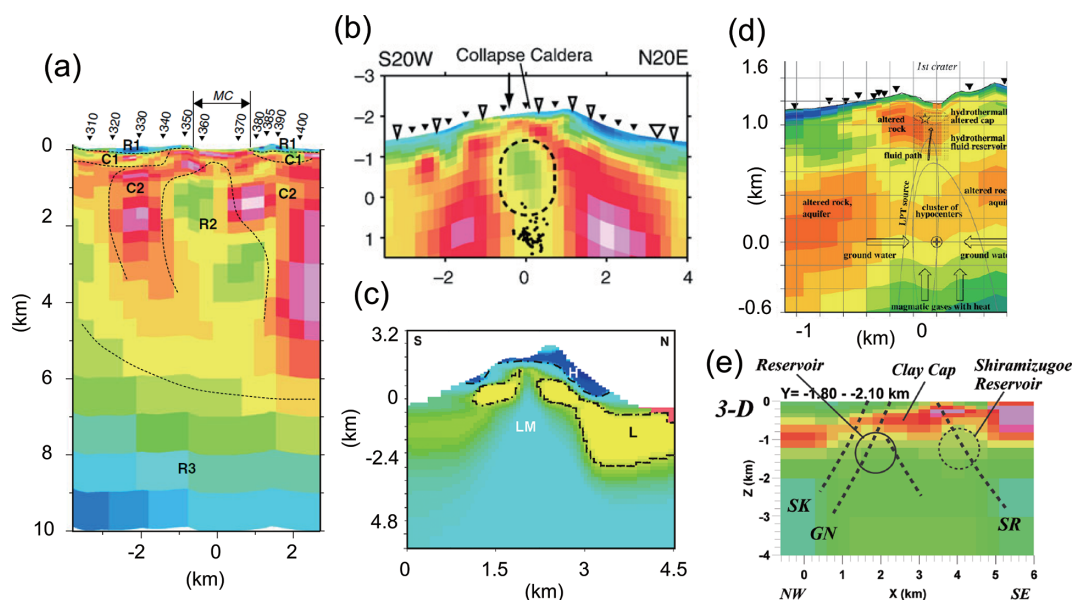


Fig. 2. Electric resistivity structures from (a) Taal Volcano, Philippines (Yamaya *et al.* 2013), (b) Asama volcano, Japan (Aizawa *et al.* 2008a), (c) Tenerife Island, Spain (Pina-Varas *et al.* 2014), (d) Aso volcano, Japan (Kanda *et al.* 2008), and (e) Ogiri geothermal field (Uchida and Sasaki, 2006). Red color represents conductive zones, while blue color represents resistive zones. Vertical and horizontal scales are added by the author. Note that (a)-(d) are obtained at active volcanoes, while (e) is obtained at a zone of geothermal exploration. (a) is reprinted from Bulletin of Volcanology, A large hydrothermal reservoir beneath Taal Volcano (Philippines) revealed by magnetotelluric resistivity survey: 2D resistivity modeling, 75, 2013, 729, Yamaya Y. *et al.*, ©Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013, with permission of Springer. (c) is reprinted from Surveys in Geophysics, 3-D Magnetotelluric Exploration of Tenerife Geothermal System (Canary Islands, Spain), 35, 2014, 1045–1064, Piña-Varas P. *et al.*, ©Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014, with permission of Springer. (d) is reprinted from Journal of Volcanology and Geothermal Research, 178/1, Kanda W. *et al.*, A preparation zone for volcanic explosions beneath Naka-dake crater, Aso volcano, as inferred from magnetotelluric surveys, 32–45, Copyright (2008), with permission from Elsevier. (e) Permission to reuse the Figure from Exploration Geophysics, Volume 37 (2006) page 227 has been granted by CSIRO Publishing and ASEG, and the authors of original manuscript agree.

いずれも深さ 10 km 以深で 100 km³ 上の体積を持つ低比抵抗体をマグマ溜りと解釈している。このうち Aizawa *et al.* (2014) による霧島火山群の例では、マグマ溜まりと考えられる低比抵抗体の上面に地殻変動源が存在しており、地殻変動源はマグマ溜まりと言うより、むしろその下の巨大なマグマ溜まりから上昇貫入を受けている領域であることが示唆されている。

より深部に目を向けると、沈み込みに伴って生産されたマグマの上昇経路について、1990 年代に九州地方で得られた NTT 電話線網を使い測定された Network-MT (Uyeshima *et al.*, 2001) データを、2 次元および 3 次元解析した結果が公表された (Hata *et al.*, 2012, 2015)。活火山を通る断面では火山フロントより背弧側の深さ 100 km 程度から火山地帯方向の中下部地殻まで伸びる低比抵抗領域がイメージングされ、プレート沈み込みによ

って生産されたマグマの上昇ルートと解釈されている。その一方で九州山地の非火山性領域でもやや低比抵抗の領域が深 50 km より深部にイメージングされており、深部流体の上昇ルートの存在が示唆された。

2-2 浅部比抵抗構造探査

深さ 2 km 程度までをターゲットとした浅部比抵抗構造探査もこの 10 年間、精力的に行われた。この深度では 3 次元性の影響が深部ほど強くないため、1 次元ないし、測線を設定しての 2 次元解析が主流であったが (e.g., Nurhasan *et al.*, 2006; Aizawa *et al.*, 2008a; Kanda *et al.*, 2008; Srigutomo *et al.*, 2008; Aizawa *et al.*, 2009a; Aizawa *et al.*, 2009b; Onizawa *et al.*, 2009; Kanda *et al.*, 2010; Komori *et al.*, 2013b; Yamaya *et al.*, 2013; Komori *et al.*, 2014b; Seki *et al.*, 2015)、最近では 3 次元解析も行われるようになってきている (Jones *et al.*, 2008; Yamaya *et al.*,

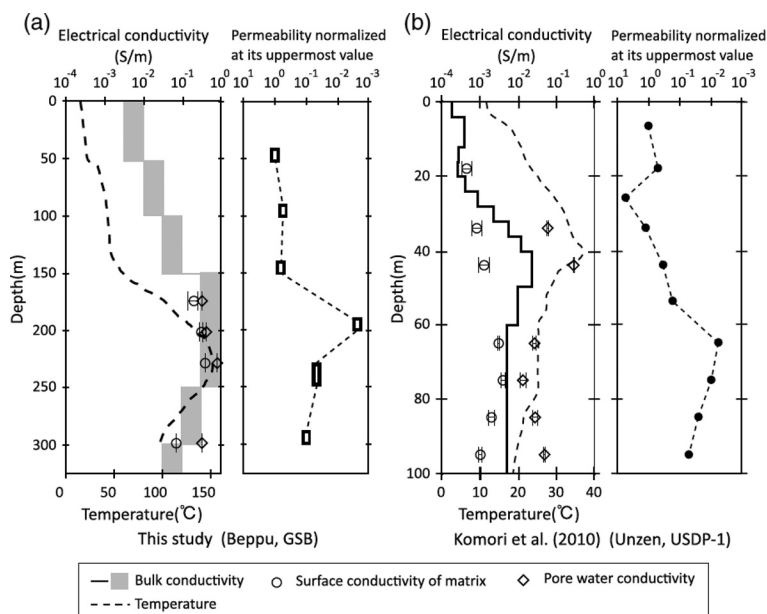


Fig. 3. Vertical profiles of temperature, bulk conductivity, pore water conductivity and estimated surface conductivity of the matrix after temperature correction (Komori *et al.* (2013a)). (a) Data from borehole GSB at Beppu geothermal area. (b) Data from drilling site USD-1 at Unzen volcano. Reprinted from Journal of Volcanology and Geothermal Research, 264, Komori S. *et al.*, Effect of the hydrothermal alteration on the surface conductivity of rock matrix: Comparative study between relatively-high and low temperature hydrothermal systems, 164–171, Copyright (2013), with permission from Elsevier.

2009; Kanda *et al.*, 2013; Pina-Varas *et al.*, 2014). 浅部比抵抗構造は、地震、地殻変動、熱消磁など火山浅部で起こり得る様々な変動の理解に重要な役割を果たすという観点から、特に我が国の研究者によって精力的に研究が行われた。浅部に対応する 1 Hz より高周波の周波数応答関数は、1 か所 1 晩程度の測定によって得られるため、機材を次々に移設して多点でデータを取得することができ、前節の深部構造推定に比較すると、比抵抗構造推定のための労力は少なくなる。

火山浅部に低比抵抗な領域が広がっていることは以前から知られていたが（例えば鍵山・他, 1997）、この 10 年でその中にスポット的に存在する高比抵抗体の重要性が広く認識されるようになってきた。高比抵抗体は火口や高温噴気地帯の直下、もしくは過去のマグマ噴出中心の下に存在し、その上部と横方向は低比抵抗領域にとり囲まれている (Fig. 2)。このような形状や、高比抵抗が数 $10 \Omega\text{m}$ 、低比抵抗が数 Ωm 程度であるという事実は、地熱開発地域で得られる比抵抗構造 (e.g., Pellerin *et al.*, 1996; Uchida and Sasaki, 2006; Gasperikova *et al.*, 2015) と類似していることから、多くの場合、地熱開発により蓄積されてきた解釈が適用されている。すなわち 200°C より

高温では、顕著な低比抵抗を示す粘土鉱物 (smectite) が存在し得ないため、高比抵抗領域は周辺より温度が高い。その一方で、周辺の低比抵抗領域は温度が低く、粘土鉱物が多く存在する低浸透率な領域で、その下面が 200°C 等温度面であると解釈される。高比抵抗領域でなぜ局所的に温度が高くなっているのかについては 2 つの説明がなされている。一つは、より深部から 200°C を超える高温の火山性流体の供給を受けているとする考えである。この解釈は主に火口や、高温噴気帯の下部の高比抵抗領域に対してなされる。もう一つの解釈は、固化したマグマ貫入域がまだ高温を保っている領域であるという考えである。この解釈は過去の噴出中心の下部に高比抵抗領域が推定された場合になされることが多い。重力異常や地震活動、熱消磁の情報も含めてどちらの解釈が適切か判別されるが、解釈によって火山学的な示唆が異なる。例えば、前者の場合、高比抵抗領域は高温の火山性流体が蓄積され、気相もしくは気液二相状態となっている領域であることが示唆され (Nurhasan *et al.*, 2006; Kanda *et al.*, 2008; Yamaya *et al.*, 2009; Seki *et al.*, 2015)、これは水蒸気噴火の発生源となり得る。後者の場合、高比抵抗領域が新たなマグマ上昇を阻む役割を果たすことが

示唆されている (Aizawa *et al.*, 2008a; Kanda *et al.*, 2008; Aizawa *et al.*, 2009b; Aizawa *et al.*, 2014).

低比抵抗体が、浅部の低温の水と、深部の高温の水を分離する働きをしているという考えがこの10年で提唱され、熱水系の形成モデルに示唆を与えた (Nurhasan *et al.*, 2006; Aizawa *et al.*, 2009a; Kanda *et al.*, 2010). Nurhasan *et al.* (2006) は草津白根火山から草津温泉にいたる測線で MT 探査を行い、低比抵抗体が深さ 100 m ~ 1 km の領域に広がっていることを示した。この低比抵抗体が粘土層として浅部の天水と深部の熱水を分離するように働いており、熱水と天水の混合は低比抵抗層が薄くなっている場所で起こっていると解釈した。Aizawa *et al.* (2009) は、比抵抗構造、自然電位分布、地表の地熱地帯や河川の有無の対応関係を見出し、それらを説明する熱水流動シミュレーションにより、低比抵抗体の上面付近が特に低浸透率となっている可能性を示した。彼らの結果によると、高温の地熱地帯が存在する斜面では必ず地表に川が存在し、その下に低比抵抗体が広がっている。川の存在は、浸透した天水が地表に排出されやすいことを示しているが、低比抵抗上部が低浸透率となることで、地下水を蓄えにくい構造となっていると考えられた。また、熱水と天水の混合は高温地熱地帯や温泉の比較的近傍で起こっていると推測されている。Kanda *et al.* (2010) は口永良部島で得られた MT 観測から、やはり低比抵抗層が浅部天水と深部熱水の混合を妨げる役割を果たしていると推測した。また、温泉水に寄与する熱水と天水の混合は火口直下で起こっていると推測している。いずれにせよ MT データからは、地表から浸透する冷たい天水に対して、低比抵抗領域が地下で「傘」の役割を果たしており、それにより高温の熱水系が発達することが示唆された。

これまで述べてきた通り、火山浅部の数 Ωm の低比抵抗領域は粘土鉱物が卓越しており低浸透率領域と解釈されることが多い。しかし、現実には推定された低比抵抗領域の直上には噴気帯や温泉が存在している例も多く、低比抵抗領域が完全に不透水と考えるのには無理がある。粘土鉱物以外に熱水や温泉水自体も顕著な低比抵抗を示すため、火山浅部の低比抵抗領域が実際にどのような状態であるかは単純ではなく、低比抵抗領域の解釈として、その他の情報も含め、smectite 粘土 = 低浸透率、粘土 + 熱水 = 中浸透率、亀裂 + 熱水 = 高浸透率と、場合に応じて異なる解釈が適用されているのが現状である。地下の低比抵抗体の実体に迫った数少ない例として Komori *et al.* (2010); Komori *et al.* (2013a) による研究が挙げられる。彼らは低温 (40°C) と、高温 (150°C) の熱水が実際に地下を流れている地域で掘削によって得られた岩石試

料、検層結果 (温度、浸透率)、MT 法によって推定された比抵抗構造を比較し、熱水によるイオン伝導の効果と、粘土鉱物による表面伝導の効果がバルクとしての比抵抗に与える影響を検討している。それによると低温の場合、粘土鉱物の影響は小さいが、高温になると粘土鉱物の効果が増加し、粘土鉱物と熱水が共存することでバルクとして低比抵抗となっているという結論を得ている。浸透率と、比抵抗、温度との比較では、低温熱水は低浸透率の上を、高温熱水は低浸透率の下を流れていることが示唆されている (Fig. 3)。低比抵抗領域には粘土以外にも熱水の寄与があること、熱水の比抵抗は含まれるイオンの量により低下することから、マグマから山体内に散逸し地下水に溶け込んだガスのフラックスを、比抵抗構造と地下水流動計算を用いて推定した研究も行われた (Komori *et al.*, 2014a)。

浅部の比抵抗構造を推定し、火山体斜面の不安定性について考察する研究も行われた。Etna 火山では GPS 観測により東斜面が数 cm/年の速度で地すべりのように動く現象が知られていたが、Siniscalchi *et al.* (2012) は MT 法により比抵抗構造を求め、地殻変動データと対応させることで、地表から深さ 3 km までスプーン状に落ち込むすべり面を推定した。すべり面は低比抵抗体の下部に推定され、粘土鉱物や熱水の影響が示唆された。同様の議論はカナリア諸島 Cumbre Vieja 火山での MT 探査によっても成されている (Garcia and Jones, 2010)。熱水変質により崩壊危険性が高くなっている場所をより直接的に推定するためには、空中からの計測が有効である。ヘリコプターに搭載した送信機から電磁波を発生させ、それにより誘導された 2 次磁場を計測することで面的に低比抵抗領域の広がりを推定し、地表の傾斜角度の情報も併せ、崩壊危険箇所を推定することができる (Finn *et al.*, 2007)。こうした空中電磁探査の探査深度は、従来の周波数領域での探査では 100 m 程度であったが、時間領域の計測を行うシステムの開発により、より深部までの面的な測定が行われている (Sorensen and Auken, 2004; d'Ozouville *et al.*, 2008)。日本では時間領域の測定に加え、送信機を長さ 2 ~ 3 km ほどの地表電流ダイポールとし、空中計測は受信機のみとするシステムの開発がなされた。これにより条件が良ければ 1,000 m 程度の深さまでの比抵抗構造推定が可能になり、斜面崩壊の危険性予測のみならず火山活動研究にも利用されている (Mogi *et al.*, 2009; 茂木・他, 2011; Ito *et al.*, 2014)。

直流電気探査によって表層付近の比抵抗構造を精度よく推定する研究も精力的に行われた。MT 法では探査深度の目安である skin depth が比抵抗 ρ (Ωm)、周期 T (s) を用いて $\sqrt{500 \rho T}$ (m) で表されるが、現状の

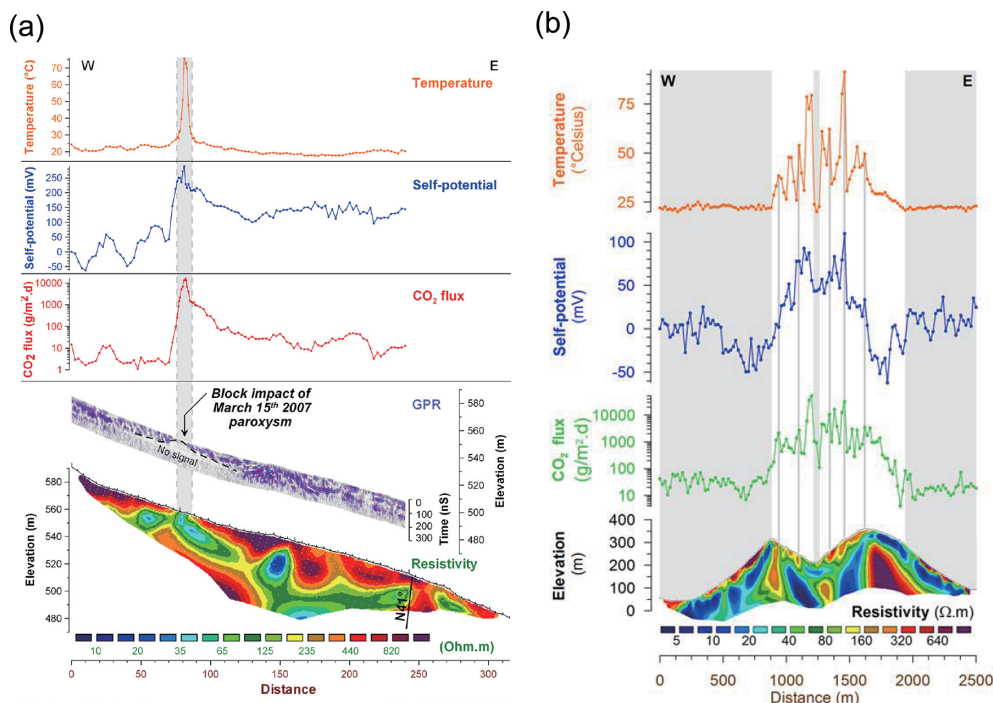


Fig. 4. Comparison between the temperature measurements (performed at a depth of 30 cm), the self-potential measurements, the soil CO₂ flux data, and the 2-D electrical resistivity structure by DC method. (a) North eastern flank of Stromboli volcano (Finizola *et al.* 2010). Reprinted from Journal of Volcanology and Geothermal Research, 196, Finizola A. *et al.*, Adventive hydrothermal circulation on Stromboli volcano (Aeolian Islands, Italy) revealed by geophysical and geochemical approaches: Implications for general fluid flow models on volcanoes, 111–119, Copyright (2010), with permission from Elsevier. (b) E-W profile across La Fossa di Vulcano (Revil *et al.* 2008).

MT法で計測される最も高周波数な10,000Hzの電磁場を計測しても、火山表層の比抵抗が1,000Ωmである場合、探査深度が150mまで達し、それより浅部の構造を精度よく推定することができない。それに対し、直流電気探査は深部構造の推定精度は大きく落ちるが、地表付近に感度が高い、一定間隔に設置した多数の電極から電流電極ペアと電位電極ペアを切り替えながら測定を行う高密度電気探査はElectric Resistivity Tomography (ERT)と称され、主にフランスのグループによって精力的に用いられた(e.g., Finizola *et al.*, 2006; Nicollin *et al.*, 2006; Revil *et al.*, 2008; Finizola *et al.*, 2010; Barde-Cabusson *et al.*, 2012)。彼らはERTと、地表の温度、自然電位、CO₂フラックス測定をセットで行い、それらの対応から噴気や地熱地帯を形成する流体の通路を論じている(Fig. 4)。彼らの調査は基本的にFinizola *et al.* (2002); Finizola *et al.* (2003)で行われた観測を、よりシステマティックに大規模に行ったものであるが、最近の進展として高密度電気探査データに対し3次元インバージョンを適用した結果

を報告している(Revil *et al.*, 2010)。

2-3 比抵抗構造の時間変化

比抵抗構造の時間変化から熱水やマグマの地下での移動や状態変化を推定できる。これまでの最も顕著な実例は、伊豆大島1986年噴火時の火口を挟んだ直流電気探査の繰り返し観測と、それをマグマ上昇と解釈した研究(Yukutake *et al.*, 1990; Utada, 2003)であり、伊豆大島では次に予想される噴火に備え、地表に設置した人工電流ソースによって誘導された磁場を離れた場所で観測し、両者の周波数応答関数から地下の比抵抗構造を連続的にモニターする手法(ACTIVE: Array of Controlled Transient-electromagnetics for Imaging a Volcanic Edifice)が開発され、来るべき噴火に備え継続的に運用されている(Utada *et al.*, 2007)。現在、得られたデータの解釈はフォワード計算によるが、今後インバージョンにより3次元比抵抗構造を推定する手法が開発されるだろう。ACTIVEシステムは、標高の高い火山の火口近傍など、観測条件の厳しい地域においては、連続的に運用せず繰り返し観測と

することも可能である。阿蘇山ではこうした繰り返し観測が中岳火口近傍で、年間数回行われ、明瞭な応答関数の変化と1次元構造を仮定した解釈が行われている(宇津木・他, 2015)。それによると推定された比抵抗変化の深さ(100 m~150 m)は地磁気変化源の深さと調和的であり、高温のマグマが上昇してきたことで地下水が押しつけられ比抵抗が相対的に高くなったと解釈されている。同じく人工電流を用いた手法としては、loop 状の電流源から発生した磁場により、誘導された二次磁場を同じ loop で受けるという coincident-loop 法による比抵抗モニタリング法も開発されつつある(長竹・他, 2010)。この手法は送信にも受信にも電極を用いないため、大地と電極の接地状態を長期間良好に保つ必要がないことが利点である。

通常の MT 観測を繰り返し、もしくは連続して行えば、比抵抗構造の時間変化を推定することができる。三宅島では1996年から2000年7月の山頂陥没および噴火直前まで、山頂の雄山で60秒サンプリングでの MT 観測が連続して行われていた(Zlotnicki *et al.*, 2009)。サンプリング周波数の問題で比抵抗構造推定には至らなかったが、得られたデータからは、周期200秒の見掛け比抵抗が、2000年6月14日から、6月28日にかけて大きく低下したことが示された(Fig. 5)。この変化は地震活動活発化や山頂陥没に先駆けて生じており、6月27日の最初の海底噴火前のマグマの移動によるものと推定された。桜島と霧島硫黄山で1年以上に亘って行われた広帯域 MT 連続観測では、 $\pm 20\%$ ほどの見掛け比抵抗時間変化が報告され、それぞれ坑道の傾斜計、噴気帯の温度変化と同期していた(Aizawa *et al.*, 2011; Aizawa *et al.*, 2013)。原因は明らかになっていないが、変動が推定された深さが地下数100 mと浅いため、地下水層の変化を反映していると解釈された。上記の火山の事例では観測点が1~2点と少なく比抵抗構造推定の不確実性が高かったが、南オーストラリア Paralana 地熱開発地域の観測により、MT 法が地下の流体流動のイメージングに役立つことが実証されている(Peacock *et al.*, 2012; Peacock *et al.*, 2013)。これらの研究では、注水サイトを中心とした11点の MT 連続観測点、56点の MT 繰り返し観測点が設置され、注水前後で周期1秒より長周期側の応答関数の系統的な変化が報告された。Peacock *et al.* (2013) はこの変化を説明するため3次元フォワード計算を行い、実際に注水が行われた深度付近、深さ3.3 kmを上面に $1.5 \times 0.4 \times 0.8$ kmの領域が高比抵抗から低比抵抗に変化したことでデータが説明されることを示した。さらに3次元インバージョンにより同様の変化も客観的に推定されるようになった(Rosas-Carbajal *et al.*, 2015)。変化が現れた領

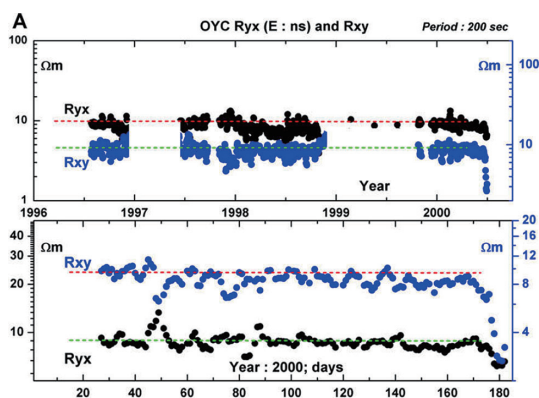


Fig. 5. Apparent resistivity change before the 2000 eruption at Miyakejima volcano (Zlotnicki *et al.* 2009). The observation site (OYC) is located at the summit of Oyama, where the new crater was formed on 8 July, 2000. Reprinted from Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 34, Zlotnicki *et al.*, Electromagnetic and geochemical methods applied to investigations of hydrothermal/volcanic unrests: Examples of Taal (Philippines) and Miyake-jima (Japan) volcanoes, 394–408, Copyright (2009), with permission from Elsevier.

域の深さや大きさは火山浅部で想定されるマグマ溜まりやガス溜まりと大きな違いはなく、backgroundの比抵抗構造にもよるが、火山地域でも多点観測を行えば、火山流体の変化を3次的に捉えられることを期待させる。

直流電気探査による時間変化としては火口湖の地下浅部での比抵抗変動が報告された。Legaz *et al.* (2009b) は New Zealand の Inferno Crater Lake において繰り返し電気探査を行い、火口湖の湯量や温度の低下に応じて、火口湖近傍深さ50 m付近の比抵抗が $1/40$ に低下することを推定し、気液二相領域の一部が液体の水に置き換わったことによると解釈した。Saba *et al.* (2007) は有珠山2000年噴火以降、新たに形成された西山付近の地熱地帯で繰り返し電気探査を行い、深さ数10 mの高比抵抗領域が縮小していく様子を捉え、 100°C を超える蒸気ゾーンが熱水に変化していった過程と解釈した。

2-4 比抵抗構造研究の課題と今後の展望

MT法の3次元解析手法の発展により、比抵抗構造推定の信頼性は飛躍的に向上しつつある。今後、多くの火山において同様の観測解析が行われ、その結果が火山活動の解釈に大きく貢献するようになるであろう。ここでMT法の解決すべき問題点を指摘しておきたい。その一つは地形のモデリングである。火山体は急峻な地形を成している場合が多いが、この10年になされた研究の多くは、地表をフラットなものとして3次元計算を行って

いる。山地形の上で得られた MT データを地形を考慮せずモデリングすると、その直下に低比抵抗の虚像を生んでしまう危険性があるために、地形を考慮することは重要である。これまで 3 次元解析で地形を考慮した研究例もあるが (Muller and Haak, 2004; Commer *et al.*, 2006; Jones *et al.*, 2008; Newman *et al.*, 2008; Yamaya *et al.*, 2009; Aizawa *et al.*, 2014; Pina-Varas *et al.*, 2014), 差分法による直方体ブロックを用いて階段状に地形を表現しており、計算メモリの制約のためブロックサイズを細かくしきれない以上、実際のデータとフォワード計算による計算値には違いが生じてしまう。これを解決するには有限要素法の四面体メッシュによって地形を滑らかに表現する方法が考えられる。有限要素法と並列計算による MT 法 3 次元インバージョンコードは最近開発され (Usui, 2015), 既に火山で得られた実データにも適用されつつある (臼井, 私信)。今後、実データへの適用例を増やすことで有効性が検証されるであろう。

MT 法一般の問題としては、表層付近の観測点直下の不均質 (static shift) や 水平方向の不均質 (galvanic distortion) の問題がある。インバージョンの入力として通常用いられる impedance tensor が, static shift によって値がかさ上げされ, galvanic distortion によって歪められてしまい、場合によっては得られた構造が真実と大きく異なってしまう可能性がある。この問題を回避する手段として大きく分けて、(1) impedance tensor 以外の表層の不均質の影響が小さいパラメータ (induction vector や phase tensor (Caldwell *et al.*, 2004)) をインバージョンの入力とする (e.g., Patro *et al.*, 2013; Kanda and Ogawa, 2014), (2) 表層不均質の効果をインバージョンの目的関数に組み込む (e.g., Ogawa and Uchida, 1996; Usui, 2015), の二通りが提案され実データに適用されている。(1) は表層不均質の影響を気にしないでよい半面、見掛け比抵抗の情報を捨ててしまうため、比抵抗の値自体を拘束しづらいという問題点がある。表層不均質の問題は火山に限らず MT 法一般の問題であり、実データへの有効性や問題点を含めて今後、活発に議論が成されるであろう。

高度なモデリング手法の開発とともに、多点で観測データを取得することは比抵抗構造を高解像度で推定するためには必須であり、観測が困難な火山でいかに多点観測を効率よく行うかは極めて重要な課題である。ヘリコプターを用いた空中電磁探査では面的な測定により空間カバレッジや解像度を飛躍的に上げることができる。急峻な地形や安全上の理由により地上での測定が困難な地域でも、測線長 200 km 程度の探査を 1 日で行うことができるため、探査深度 1 km 程度までの比抵抗構造調査には今後、電流源を地上に設置した空中電磁探査法が

広く適用されるかもしれない。特に空中磁気探査と併せて水蒸気噴火が予想される地下の気液二相ゾーン (ガス溜まり) のイメージングに期待がかかる。空中磁気測量は無人機での探査が可能になったが、空中電磁探査は重量の面で実現されていない。今後、軽量化により無人機で利用できる電磁探査測定機の開発が望まれる。軽量化の点で、日本で開発された地表送信型のシステムは、航空機に搭載する機材が受信機のみとなるため有利である。

1 km より深部の比抵抗構造推定のためには 1 Hz より長周期の電磁場も測定する広帯域 MT 法が有効である。しかしながら既存の広帯域 MT 装置は総重量 30 kg 以上、消費電力 12~16 W、価格も高額であり、さらに長周期の応答関数算出のために装置を長期間稼働させる必要があるため、多点観測には多大な労力が必要であった。実際、火山地域でこれまで 100 点近い多点観測が行われているのは、ヘリコプターで観測者と測定器を現地に運び設置作業を行っているニュージーランドの火山や、地形的起伏や植生が少ない火山に限られていた。この状況を打開するため、GPS 時刻校正付の小型省費電力 (1.6 W) 電位差計が開発され (相澤・他, 2015), 九重山での火山体構造探査に利用された (塩谷・他, 2015)。既存の広帯域 MT 装置による観測点を少なくし、設置が容易な電位差計を多点で展開することにより、観測点を効率的に増やすことができる。今後、電場と磁場の測定場所が離れている効果をモデリングに組みこめば、比抵抗構造探査の標準手法になる可能性がある。

海底 MT 観測の技術も着実に進歩している。3 次元解析では見たいターゲットが深くなるにつれ、観測点を広範囲に設ける必要があるが、これは離島火山において大きな問題になる。例えば三宅島はその直径が 7 km ほどであるが、深さ 10 km までのマグマ供給系を推定しようとすると、陸上のデータだけでは拘束しきれない可能性が高く、OBEM を用いた海底 MT 観測が必要である。調査のターゲットとなる離島火山付近の浅海では、複雑で活発な底層流によるセンサーの揺れが深刻なノイズを発生させるため MT 探査が困難であったが、この 10 年で揺れを低減する技術の開発により探査が実現可能となった。実際、始良カルデラでは、深さ 10 km 程度に推定される地殻変動膨張力源から桜島火口に至るマグマ供給系をターゲットとして海底 MT 観測が行われ、得られたデータから 3 次元構造が推定されている (神田・他, 2012)。海底での観測は陸上に比べて費用や手続きの面で敷居が高いが、得られている陸上のデータの解析から、海底 MT 観測を行えば新たに何が拘束できるか見出しおくことが必要であろう。

比抵抗構造推定の主なものには、浅いところから直流電気探査、空中電磁探査、MT探査が考えられる。それぞれ得られるデータの形式は異なるが、比抵抗を対象とする点としては共通である。例えば、1つの火山で、異なる種類の探査が行われている場合、得られているデータの統合解析を行えば浅部から深部まで統一的な比抵抗構造が得られる。火山でこうした試みが行われた例としてクッタラ火山日和山溶岩ドームで、直流電気探査データと人工電流によるMTデータから2次元比抵抗構造を推定した例がある(Goto and Jomori, 2013)。彼らは同じ計算メッシュを使い、電気探査データのインバージョンとMTデータのインバージョンを交互に繰り返しながら両者のデータを良く説明する比抵抗構造を推定した。異なる種類のデータを一括してジョイントインバージョンする手法も開発されつつあり、今後、火山の比抵抗構造推定に利用されるであろう。

比抵抗構造の時間変化については、連続測定データの転送と、解析の自動処理によって準リアルタイムに比抵抗構造が追えるようになるであろう。世界的にこれに近い体制が整っているのは火口近傍に通信網が整備された伊豆大島のACTIVEシステム(Utada *et al.*, 2007)のみと思われるが、他の火山でも省電力データ伝送機器の開発と、応答関数の算出およびインバージョンの自動処理化により、比抵抗構造変化を把握する手法の開発が望まれる。1986年伊豆大島噴火前後には顕著な比抵抗構造変化が観測されたが、他の火山でも平常時も含め比抵抗変化が生じているのか検証していく必要がある。GNSS連続観測により伊豆大島、浅間山、桜島など活動的な火山では平常時においても数か月～数年程度の膨張期と収縮期を繰り返すことが知られるようになった。また次節の地磁気連続観測から、多くの火山の浅部において数か月～10年かけて磁場変動が繰り返されることが明らかになった。これらのゆっくりした変動は火山性流体の間欠的な貫入による噴火の準備過程と考えられているが、対応するような比抵抗変動が観測されるか検証するとともに、変動量から流体の種類や貫入量にどのような拘束を与えられるか検討すべきであろう。繰り返し観測では特に水蒸気噴火が予想される地下の気液2相ゾーン(ガス溜まり)のモニタリングのため、テスト火山を設定し数年おきに浅部比抵抗構造の変化を推定するような試みは有望と思える。

比抵抗構造の解釈については、活火山浅部の低比抵抗領域と、ガス溜まり上部に想定される低浸透率領域との関係を、系統的に解明することが望まれる。低比抵抗領域を温度200℃以下で粘土鉱物が卓越する低浸透率領域とする解釈は地熱開発地域の掘削によって蓄積された知

見に依るところが大きい。2-2節の通り、火山浅部では必ずしもその解釈が成立しない。また、活動的な火山では酸性熱水が多く見られ、そのような環境下でsmectiteは不安定なため(Amram and Ganor, 2005)、地熱開発地域の解釈をそのまま適用して良いか疑問もある。Nurhasan *et al.* (2006)は、粘土自体が酸性熱水の浸透を阻むため、酸性熱水とsmectite粘土が住み分けていると推測しているが、smectite生成に寄与する中性熱水の存在場所や形態については不明である。浅部比抵抗構造の実態解明には、火口近傍で深度1~2km程度の掘削を行い、得られた地層データと、地表の広帯域MT稠密観測から推定された比抵抗構造を比較することが最も近道と考えられる。

3. 地磁気

3-1 連続観測

岩石磁化は温度上昇に伴い減少するために、地表に磁力計を設置し、その時間変化を観測すれば地下の温度変化を間接的に推定できる。この用途では、40年前から現在に至るまで全磁力(地磁気の絶対値)測定が主流である。これはプロトン磁力計にドリフトがなく温度変化にも強く現場でも扱い易いことによる。これまで阿蘇中岳火口近傍やWhite Islandなど、多くの火山での全磁力観測により、地磁気が火山活動に伴い数か月～数年の単位で増減を繰り返すことが報告されている(Tanaka, 1993; Hurst *et al.*, 2004)。磁場変化は地下の岩石が消磁および帯磁した場合に期待される変動と調和的なことから、温度変化に伴う磁場変化であることが裏付けられてきた。こうした磁場変動は長期間のデータから初めて見えてくるものであり、以下に紹介する研究は長年の観測の蓄積がこの10年間に科学論文として報告されたものである。

全磁力変化が直線的でなく、その中にゆらぎや間欠性が生じる意義については、橋本(2015)によって整理されているが、本小論でもふれたい。Kanda *et al.* (2010)は口永良部島山頂部の5観測点で2000年後半から2008年にかけて全磁力連続観測を行い、大局的には消磁が継続していること、その中に少なくとも4回、間欠的に消磁が加速している時期があることを報告した(Fig. 6)。この間欠的な消磁の加速は、GPS観測の基線長の伸びと同期しており、さらにその時期には火口直下200mを中心とした地震が増加した。このような全磁力変化が地殻変動と同期して発生したという報告は世界初と思われる。Kanda *et al.* (2010)は比抵抗構造もあわせて、深部からの火山ガス供給が間欠的に増え、一部は粘土層の下部に蓄積され圧力上昇とともに地殻変動を加速し、一部は粘土層の上部の帯水層とぶつかり熱消磁や地震を引き起こし

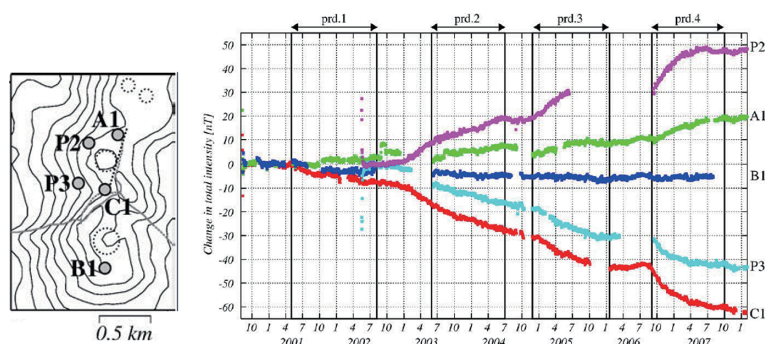


Fig. 6. Trend components of the geomagnetic variation extracted from the data observed at five sites around the Shin-dake and Furu-dake craters of Kuchi-erabu-jima volcano (Kanda *et al.* 2010). Reprinted from Journal of Volcanology and Geothermal Research, 189, Kanda W. *et al.*, A heating process of Kuchi-erabu-jima volcano, Japan, as inferred from geomagnetic field variations and electrical structure, 158–171, Copyright (2010), with permission from Elsevier.

たと説明している。

草津白根山で行われた全磁力観測と比抵抗構造の対応からは、水蒸気噴火に重要な示唆が得られた。湯釜火口周辺で30年間に渡って継続された繰り返し全磁力観測では、1995年を境にそれ以前は消磁、それ以降は帯磁傾向が得られ、磁場変動源の位置は、地下400～700mと阿蘇や口永良部島に比較して深い位置に推定された。この深度はNurhasan *et al.* (2006)による2次元低比抵抗体の下面付近に相当することから、粘土層の下に深部流体が蓄積されると熱消磁に、逆にそこから放出されれば帯磁になると解釈された (Takahashi and Fujii, 2014)。この対応は稠密MT観測による3次元比抵抗構造によって、より明確になっている (小川私信)。磁場変動源が粘土層の下部にあたるという解釈は、阿蘇中岳直下の比抵抗構造研究からも示唆された (Kanda *et al.*, 2008)。

上述の研究は全て、磁場変化が熱によるものとの解釈によっているが、それ以外の要因で発生する地磁気変化も報告された。Napoli *et al.* (2008)はEtna火山の磁場連続観測により群発地震活動に伴う急激な全磁力変化を観測した。応力によって岩石磁化が変化するピエゾ磁気効果を想定しフォワード計算を行ったところ、磁場変動とGPSデータの両者を良く説明するダイクが推定された。この研究は単に地殻変動モデルが磁場変化を説明したということだけでなく、磁場変化データがより積極的に貫入ダイクの向きや深さに制約を与えることを示したことに意義がある。さらにNapoli *et al.* (2011)はStromboli火山での全磁力観測で同様の急激な変化とその後のなだらかな緩和を発見し、変動を南北走行のダイクで説明するとともに、磁場変化の緩和の時定数とMaxwell粘弾性モデルを用いて、岩石の粘性係数を 10^{16} ～ 10^{17} Pa sと見積もっ

ている。ピエゾ磁気効果以外にも、有珠山2000年噴火に伴い新たに形成された西山地熱地帯の全磁力観測からは、外部磁場により非常に長い時間かけて二次的に磁化を獲得していく効果が温度上昇によって急速化するという粘性熱残留磁 (TVRM) の効果も無視できないことが示された (Hashimoto *et al.*, 2008)。有珠西山の場合、マグマ貫入源が考えにくい場所で帯磁が観測され、その付近に78万年以前の松山期に逆帯磁した岩石が発見されるというかなり特殊な状況であったが、熱消磁やピエゾ磁気で説明がつかない磁場変動が観測された場合、粘性熱残留磁化効果が解になり得ることを示した。

地磁気研究の解析 (解釈) 面での進展では、ソースとして三軸不等楕円体モデルが導入されたことが挙げられる。地磁気変化源のモデルとしては、等価磁気双極子によるモデルが主流であるが、ソースが浅く観測点が近ければ、ソースの大きさの影響が無視できないという問題があった。この問題の解決のため、三軸不等楕円体モデルの解析式 (Clark *et al.*, 1986) の実用性が示された (笹井, 2006)。三軸不等楕円体モデルは、パラメータの数が増えるため多くのデータが必要となるが、球状にとどまらず、シル状・ダイク状のソースも考えることができるため応用範囲が広く、実際にTaal火山 (Zlotnicki *et al.*, 2009)、口永良部島火山 (Kanda *et al.*, 2010)、草津白根火山 (Takahashi and Fujii, 2014) で適用されている。また地上で得られたデータ以外にも次節の空中磁気探査データへの応用も容易である。

3-2 空中磁気探査

火山体の磁化構造の推定は、磁場変化の解釈を行う上で有用である。この10年間、全磁力マッピングにより火山体内部の磁化構造を推定する研究が多く行われた。

磁化構造推定には地上探査も行われているが、航空機を用いた空中磁気探査が最も有効である。有人ヘリコプターを用いた空中磁気探査は、雲仙 (Okubo *et al.*, 2005; Okubo *et al.*, 2006), Vulcano (Okuma *et al.*, 2006), 浅間 (Nakatsuka *et al.*, 2009), 桜島 (Okubo *et al.*, 2009), Stromboli (Okuma *et al.*, 2009), 口永良部島 (宇津木, 2011), 九重山 (宇津木, 2011), Etna (Caracciolo *et al.*, 2014), で報告された。得られた磁気異常の解析では、火山体を角柱に分割し、角柱の磁化の向きが現在の地球磁場と同じと仮定し、おのおのの角柱の磁化強度をインバージョンにより推定する磁化強度マッピングが行われる。解析結果は火口や噴気帯の近傍が熱水変質によって低磁化に、溶岩流など新しい噴出物が高磁化にイメージングされることが多い。また、山頂付近の低磁化領域の空間的な広がりから熱水系の広がりが推定され、ローカルな高磁化域の存在から地下で固化した貫入マグマの存在が推定されるなどしている。

空中磁気探査には無人飛行体も利用されるようになった。軽量の無人ヘリコプターは、人命を危険にさらす必要がないという利点の他に、飛行高度の制限が無いため、低高度を飛行することができ、よりローカルな磁気異常も識別できるという利点もある。伊豆大島 (Kaneko *et al.*, 2011), 霧島新燃岳 (Koyama *et al.*, 2013), 樽前山 (Hashimoto *et al.*, 2014) では実際に無人ヘリコプターを用いた探査が行われ、有人ヘリコプターの結果に比べ、より高空間解像度の磁気異常が得られている。

空中磁気測量では、地磁気変化の検出が実用段階になった。浅間火山、九重山、有珠山の有人飛行では位置決定制度の誤差を加味してもなお有意な磁場変動が火口直下で推定された (Nakatsuka *et al.*, 2009; 宇津木, 2011; Hashimoto *et al.*, 2011)。空中磁気探査の繰り返し測量では、全く同じ航路を飛ぶことはできないため、空間エイリアシングによる誤差の問題が常に存在するが、これを解決するため、Nakatsuka and Okuma (2006) は拡張交点コントロール法を提案した。交点コントロール法は、測線の交点における測定値の誤差評価に用いられる手法であるが、拡張交点コントロール法では、これを二つの期間の磁場変化量の検出に拡張し、空間エイリアシングの影響を低減できることを示し、浅間山、有珠山での磁場変動検出に適用された。

無人ヘリコプターではあらかじめプログラムしておいた飛行経路を正確にトレースしながら測定することができるため、飛行経路の再現性が高く、繰り返し観測による磁場変化の検出に有利である。Koyama *et al.* (2013) は霧島新燃岳噴火後の 2011 年 5 月と 10~11 月で 2 回の無人ヘリコプターによる空中磁気測量を行い、火山活動に

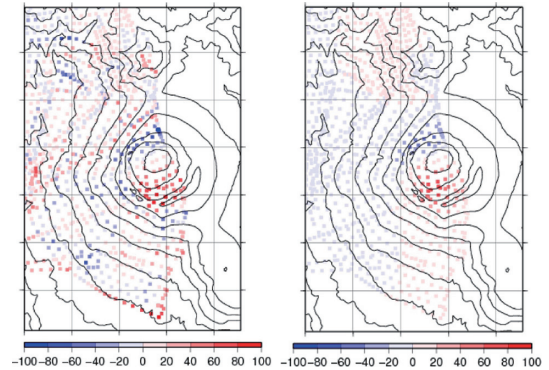


Fig. 7. The difference in the total magnetic field between two aeromagnetic surveys around Shinmoe-dake crater, Kirishima volcanoes (Koyama *et al.*, 2013). Left: The difference between the two surveys measured in October–November 2011 and in May 2011. Right: Computed magnetic anomalies, assuming that all $1.5 \times 10^7 \text{ m}^3$ of the lava in the summit crater of Shinmoe-dake acquired a magnetization of 1.5 A/m by cooling.

伴う磁場変化を検出した。2回の飛行経路の微小な違いの影響の補正のため、まず5月の磁場データを説明する磁化構造をインバージョンにより推定し、その結果を用いて10~11月の飛行経路上での磁場をフォワード計算により再現した。この計算値と10~11月の飛行で得られた磁場観測値を比較することで、新燃岳火口を中心に北側で減少、南側で増加の全磁力変化が推定され、火口を満たした溶岩が冷やされ帯磁したことで説明された (Fig. 7)。

3-3 地磁気観測の課題と今後の展望

全磁力変化を解釈する上で、比抵抗構造と磁場変動源の対応は重要である。特に低比抵抗の粘土層の下部に熱が蓄積され消磁を引き起こすというモデルは、熱消磁域が水蒸気噴火の発生場であることを示唆するため、徹底した検証が必要である。現在まで、信頼性の高い事例が不足しているため、引き続き比抵抗構造と消磁源の推定精度を上げ両者の対応を検討するべきである。この過程で、活火山直下の比抵抗構造と、地熱開発地域で得られる比抵抗構造の違いに注目すべきかもしれない。火山では、地熱開発地域に比べ高比抵抗抗体がより低比抵抗に包み囲まれるように存在する傾向がある (Fig. 2)。低比抵抗を低浸透率と解釈するならば、これは熱や圧力を溜め込みやすい構造に違いなく、もし上記のモデルが普遍的であるとしたら、比抵抗構造から圧力蓄積域 (気液二相ゾーン) の大きさを推定することで水蒸気噴火のポテンシャル評価を行い、地磁気や比抵抗構造の時間変化から

その状態変化を監視することが可能かもしれない。

橋本 (2005) は、阿蘇山での磁場変化と火口湖からの放熱量観測から、地磁気変化として表れている浅部の温度変化は、地表への熱フラックス総量の 1 割程度のゆらぎに起因することを示唆した。全磁力観測と熱観測を他の火山でも系統的に行い比較することで、全磁力変化が火山活動の中でどのような意味をもつか理解する上で重要であろう。もし全磁力変化のゆらぎが深部からの熱供給のゆらぎを反映しているのであれば、水蒸気噴火の誘因に繋がる可能性もある。深部からの熱供給の増大に地表からの放出が間に合わず、ガス溜まりの圧力が増加し噴火に至ることが想定されるからである。この観点から、口永良部島で発見された消磁の加速期と山体の膨張期が同期しているという現象は興味深く、他の火山でも同様の事例が存在するのか、地殻変動と磁場変動が同期しない場合があるかどうか、観測により検証していくことが必要である。

消磁のメカニズムとして、通常は地下での温度上昇が想定されるが、岩石に含まれる磁鉄鉱が熱水へ溶けだすことによっても消磁は起こり得るため、解釈の信頼性を高めるには別の情報が有用である。比抵抗構造時間変化の研究はこの用途役に立つかもしれない。消磁が熱水変質作用によるならば低比抵抗へ、熱の蓄積によるならば低比抵抗の smectite が illite や chlorite へ変性することや、気液二相ゾーンの拡大によって、高比抵抗への変化が期待されるからである。現在、全磁力と比抵抗モニタリングの両者が行われているのは伊豆大島、阿蘇山のみであるが、今後比抵抗モニタリングの実例を増やすことが望まれる。また、空中磁気探査と深さ 1 km までの構造推定が可能な空中電磁探査を組み合わせることも有効であろう。

火山活動に伴う微小な全磁力の時間変化は空中磁気測量によっても捕えられるようになってきた。特に拡張交点コントロール法による解析技術の進展と、無人ヘリコプターの登場により、飛行経路を精度よく再現できるようになったことが大きい。究極的には観測機材の軽量化により、ラジコンヘリやドローンなどの商用機にセンサーを搭載した探査が期待されるが、このためには磁気抵抗素子を用いた小型省電力磁場センサーの開発などのブレイクスルーが必要と思われる。

空中磁気探査によって得られたデータを、山体を角柱に分解することで説明する磁化強度マッピングは、深さによって磁化強度は変化しないと仮定している。しかし温度や熱水変質度合、岩石の種類は深さに応じて変化するため、この仮定は妥当とはいえない。ある種の制約の下で 3 次元解析を行う手法も開発され、実データに適用

されているが (Okuma *et al.*, 2009; Okuma *et al.*, 2014), ユニークな解を得ることは難しい。推定される 3 次元磁化構造への拘束が弱い以上、別の先見情報が必要であり、MT 法や空中電磁探査による比抵抗構造はこの点でも重要である。

4. 自然電位

大地の任意の 2 地点間には電位差が存在し、そのうち自然や人工の電磁場による変動成分を除いた DC 成分は自然電位と呼ばれる。活動的火口や地熱地帯では相対的に数 10 mV ~ 数 1,000 mV 程度の高電位異常を示すことが多い (e.g., Ishido *et al.*, 1997; Zlotnicki and Nishida, 2003)。さらに 1991 ~ 95 年に雲仙普賢岳で実施された連続および繰り返し観測により、自然電位分布が噴火により大きく変動することが明らかになった (Hashimoto and Tanaka, 1995; Hashimoto, 1997)。火山での自然電位分布の大半は地下水の流動によって生じていると考えられ、これは他種の探査で得られない情報であることから、この 10 年間も自然電位マッピングや、その時間変化の観測が精力的に行われた。

自然電位の一般的な解釈では、火口付近の相対的に高電位異常域は、地下の上昇流によって生じると考えられていた。しかしこの考えはこの 10 年で大きく変わった。端緒となったのは Ishido (2004) による研究である。Ishido (2004) は Darcy 則による 2 次元地下水流動計算とその結果を用いた自然電位フォワード計算により、火口直下に低比抵抗体が柱上に存在していれば、上昇流が無くとも相対的に高電位異常が発生し得ることを示した。その後、伊豆大島火山では MT 観測により推定された比抵抗構造を組み込んだ 3 次元地下水流動とそれに伴う自然電位分布が計算され、自然電位異常は上昇流より、重力による下降流の寄与が大きいという Ishido (2004) と同様の結論が報告された (Onizawa *et al.*, 2009)。Ishido (2004) の考えは東北、九州地方の 11 火山で行われた自然電位測定からも支持され (Aizawa, 2008)、さらに比抵抗構造の結果を組み込んだ数値計算により、自然電位分布は地下浅部の低比抵抗な粘土層の形状と関連が深いことが示唆された (Aizawa *et al.*, 2009a)。これらの研究によって、自然電位から熱水上昇のフラックスや深さ方向の広がりを推定することは困難なことが分かってきたが、自然電位分布は一つの火山体の中でも斜面に応じて大きく異なるため (Aizawa, 2008)、火山体内の不均質構造やそれに伴う地下水流動の不均質性の推定に役立つことが明らかになった。

上昇流より下降流のほうが自然電位発生に重要であるという考え方はヨーロッパでは必ずしも受け入れられて

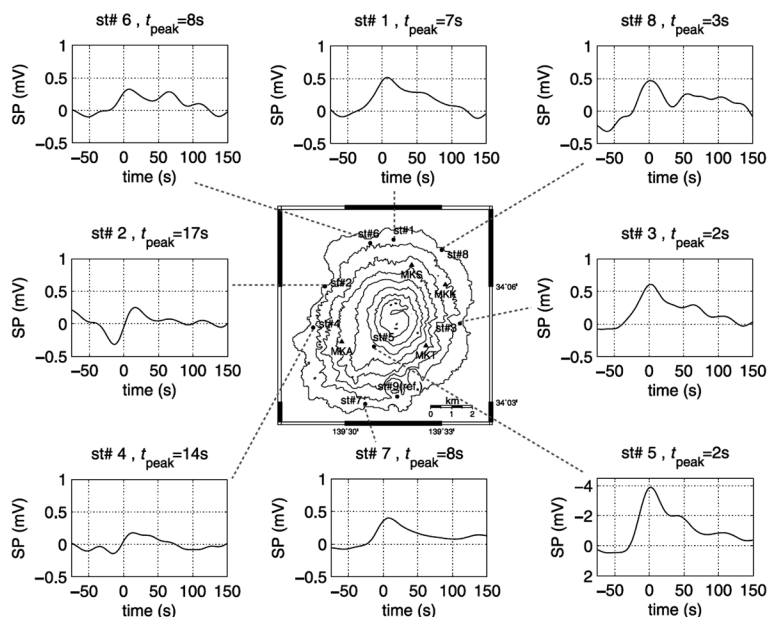


Fig. 8. Stacked SP waveform at each SP station (Kuwano *et al.* 2015). Time of the peak of the SP signal (t_{peak}) is indicated above each waveform. Site 9 is used as a reference point.

はいない。その理由は自然電位の相対的な高電位異常域と、高温領域、高 CO_2 フラックス域が一致する例が多いためである。こうした対応は特に数 m～数 10 m のローカルな電位異常に対して良く成立しているが、山体スケールでも見られることがある (Fig. 4)。ここで注意すべきは自然電位発生に寄与するパラメータが多い点である。比抵抗や浸透率だけでなく、岩石種の違いによっても運ばれる電流の量は異なり、特にローカルな電位異常の解釈には注意が必要なが指摘されていた (Hase *et al.*, 2003; Aizawa *et al.*, 2008b; 長谷・他, 2008)。自然電位の解釈はどこを電位の基準とし、どこを異常域と見るかに大きく依存するため、広範囲に探査を行い、妥当な電位の基準点 (海面や、火山から遠く離れた場所など) を設定することが必要である。その上で他の探査による情報も併せることが火山の地下水流動推定には必要である。特に比抵抗構造は重要であり、私見であるがフランスグループの自然電位データの大部分は比抵抗構造の効果によって説明できるかもしれない。

この 10 年に報告された自然電位の時間変化は局所的な変動にとどまるものが多かったが (e.g., Barde-Cabusson *et al.*, 2009; Finizola *et al.*, 2009; Barde-Cabusson *et al.*, 2012), 山体全体に及ぶ明瞭な時間変化が三宅島の繰り返し観測で得られた。島を南北に縦断する測線での 5 回の繰り返し観測から 2000 年噴火以前は極めて安定して

いた山頂付近の高電位異常域が 2000 年噴火以降、10 年かけ振幅を弱めつつ水平方向に数 km 拡大していることが明らかになった (Uyeshima *et al.*, 2015)。三宅島ほど明瞭ではないが同様の変化が St. Helens 火山溶岩ドームでの繰り返し観測によっても報告された (Bedrosian *et al.*, 2007)。両者の変化とも熱水系が時間とともに水平方向に拡大していることを示唆している。

より速い現象として、長周期地震と同期した数 10 秒～数 10 分の自然電位変動が三宅島と Merapi 火山で発見された (Sasai *et al.*, 2002; Byrdina *et al.*, 2003)。Kuwano *et al.* (2015) は三宅島で得られた変動を詳細に解析し、電位変動のピークの時刻が場所ごとに異なることや、低比抵抗な海の近傍でも振幅の大きな変化が得られていることから (Fig. 8), 長周期地震の圧力変動が島内全域の地下水流動変化を引き起こし、それにより自然電位変動が生じたというモデルを提案した。現象が発見された当初は、長周期地震と同期した自然電位変動から、震源域での流体流動について拘束できるとの期待がかかったが、Kuwano *et al.* (2015) のモデルによると、むしろ観測点近傍の物性や地下水流動の推定に役立つ結果を示している。その他の短時間の変動としては、間欠泉の噴出に先立つ前兆的な自然電位変動も報告され (松尾・他, 2006; Legaz *et al.*, 2009a), 水蒸気噴火直前の地下水流動の理解に役立つ可能性が示唆された。

以上、概観したように、自然電位についての理解はこの10年間で大きく進んだが、その解釈は定量的のみならず定性的にも不確かな状況が続いている。改善のためには地下の比抵抗構造やCO₂フラックスと自然電位の対応を引き続き丁寧に検討していく必要がある。特に比抵抗構造研究と歩調を合わせ、詳細な自然電位分布を求め両者の対応を比較することが必要である。また、深さ方向への電位分布は地下水流動モデリングの際の重要な拘束条件となるため、科学掘削において地表から掘削底に至る自然電位検層を実施することは有効であることを指摘しておきたい。

自然電位の時間変化は地下水の流動変化という他の探査では得られない情報をもたらすため貴重である。熱水系の拡大を示唆するような長い時間スケールでの変化については比抵抗構造の変化と併せて変動原因を検討すべきである。三宅島やMerapi火山で報告されたような数秒～数10分の短い時間スケールの自然電位変動については、長周期地震に伴ってのものだけでなく、噴火前後の自然電位変動の有無を火口近傍の観測で検証してことが有効かもしれない。自然電位変動の時間スケールが短くなればなるにつれ、ノイズとなる自然の電磁場変動や、人間活動に起因する電磁場変動の影響は大きくなる。近傍の磁場3成分データを用いてそれらを除去することが重要であるが、その点で自然電位連続観測は、近傍の地磁気3成分観測とセットで行われるべきであろう。

5. 火山雷

火山雷は噴火に伴った一般的な現象で、マグマの性質によらず世界中の火山で発生が報告されている (McNutt and Williams, 2010)。そのため、天候が悪く火口が目視できない状況でも火山雷観測から噴火強度や噴煙をモニターできる可能性が指摘されていた (McNutt and Davis, 2000)。これまで観測器械を使った火山雷研究はほとんどなされてこなかったが、New Mexico 工科大学のグループが、雷観測の手法をそのまま火山に適用し始めたことでこの10年間で研究が急速に進んだ。彼らの手法では、先駆放電 (リーダー: 雷が伸びていく過程) から派生するVHF帯 (30 MHz～300 MHz) の電磁波が観測点へ到達する時刻を観測し、その到来時間差からVHF電磁放射源の時空間分布を決定する。地震波の走時情報を使った震源決定に相当するこの手法では、適切な観測点配置をとればその推定精度が数m以内と高く、雷の形状や、その時間発展を得ることができ、さらに先駆放電に伴うエネルギーも電磁放射の振幅から推定することができる (Thomas *et al.*, 2007; Thomas *et al.*, 2012; Behnke *et al.*, 2013; Behnke *et al.*, 2014)。Augustine 火山, Redoubt 火山

で行われた観測から、火山雷は三つのタイプに分類された (Thomas *et al.*, 2012)。一つは火口近傍の極めて小規模な10～100m程度の長さの放電、二つ目は噴煙が発達中に生じる長さ数km継続時間0.01～0.1s程度の放電であり、これら二つは火山灰粒子同士の衝突や、マグマの破碎によって粒子が帯電することで発生すると考えられた。三つめは噴煙高度が十分発達し、噴煙中の水蒸気が氷晶に変化した後に発生すると考えられるもので、その発生メカニズムは通常の雷と同じである。最初の二つのタイプの放電は噴煙のダイナミクスと関係している可能性があり、火山雷に伴うVHF放電の様相の変化から噴煙の状態変化を推定した研究も発表された。Behnke and Bruning (2015) はRedoubt火山で得られたVHF放電のデータを5分ごとに区切り、横軸に雷の長さ、縦軸にエネルギーをとったスペクトルの時間発展から、噴煙中の乱流渦の時間発展を論じた。また、噴火を再現する衝撃波管実験に伴っても火山雷が発生することが報告され、フィールドの火山雷と実験室の火山雷、双方から噴煙のダイナミクスを研究する可能性が提案された (Cimarelli *et al.*, 2014)。

VHF帯の電磁波観測による雷研究は強力な手法であるが、その電磁放射のほとんどが先駆放電に対応し、先駆放電直後のReturn strokeに代表される大放電現象について情報が得られない (Behnke and McNutt, 2014)。さらに放射源から観測点まで地形に遮られていないことが条件となるため、火口の中や火道の中で放電があったとしても観測することができない。そのため雷の全貌に迫るためにはより低周波なLF帯 (300 kHz～30 kHz) やVLF帯 (30 kHz～3 kHz) の電磁場観測が必要である。この周期帯の電磁波は遠方まで到達するため、広い領域での雷モニタリングのため、各国の気象観測機関によりregionalまたはglobalスケールでのLF/VLF帯観測ネットワークが運用されている。Eyjafjallajökull火山の2010年噴火ではイギリス気象庁の観測網で捉えられた火山雷起源のシグナルの特徴が報告されたが、こうした観測網では観測点密度がまばらで、小規模の火山雷の多くを検出することができない (Arason *et al.*, 2011)。火山雷の観測のためには火山に近い位置でLF/VLF帯の観測を行う必要であり、MT法の観測機材がこの目的で使用された。きっかけは桜島火山のMT連続観測データ (Aizawa *et al.* 2011) 中に火山雷起源のシグナル (Aizawa *et al.*, 2010) が発見されたことであったが、最近ではより高いサンプリングレート (65 kHz) の電磁場観測を、高速 (3,000 frame/s) な可視映像観測と組み合わせる研究がおこなわれている (Aizawa *et al.*, 2016)。その結果からは、桜島火山雷の特徴が気象雷と多くの点で共通であること、その空間ス

ケール、時間スケール、放電量が気象雷の 1/10~1/100 程度であることが示されている。また気象雷との相違点として正の電荷を大地に供給する +CG (+Cloud-to-Ground lightning) が多いことや、放電の空間スケールが小さいことから火山噴煙の電荷分布は雷雲の電荷分布に比べ複雑であることが示唆されている。

火山雷研究は今後、噴煙規模推定への応用が有望と思われる。火山雷起源の電磁放射は天候に左右されないため、火口が目視できない場合や、雲に遮られて気象レーダーの精度が落ちる場合でも、火山雷データから噴煙の高度や向きを推定することが可能である。雷観測ネットワークにより VHF 帯や LF/MF 帯の電磁放射源を準リアルタイムに推定することが可能になりつつあり、今後、活動的な火山で恒久的に雷ネットワークが維持運用され噴煙モニタリングが行われるかもしれない。またそうしたネットワークで蓄積されたデータにより火山雷研究は進むであろう。特に火山雷と映像、気象レーダーデータ、空振データ等を組み合わせて噴煙のダイナミクスに迫る研究の発展が期待される。また、長期のデータ蓄積により火山雷が発生しやすい条件も理解されるだろう。現在、確実に分かっているのは噴煙高度と火山雷の発生数に良い相関があることのみであるが、それ以外にも、噴煙の乱流強度、マグマの破碎条件、マグマの含水量、気象条件などが火山雷発生に寄与している可能性がある。さらに、実験室における火山雷発生実験や火山灰粒子の帯電実験も行い、火山雷観測から、火山学的にどのように価値ある情報が引き出せるか検討していく必要がある。

6. おわりに

本小論では比抵抗、地磁気、自然電位、火山雷に分けて研究の進展を概観してきた。全体としての割合は、この 10 年で出版された論文数と、筆者の独断に応じている。便宜上 4 項目に分割したが、複数の項目にまたがる研究も多く発表されるようになり、今後そのような研究の重要性は増すであろう。多種の観測データを結びつけ、火山下で進行している現象を理解するには物理法則に基づいたシミュレーション研究が有用である。例えば火山体浅部では、熱水流動計算により各種パラメータの分布や時間変動を計算することができる。3 次元比抵抗構造からおおまかな浸透率構造設定し、それに基づき熱水流動シミュレーションを行い、地磁気、比抵抗、自然電位、さらには地殻変動の時間変化を説明するように、浸透率構造や、熱水の貫入量を調整していくことが考えられる。この過程から信頼できる浸透率構造が得られれば、水蒸気爆発に至る条件と、その時に期待される観測

データをシミュレーションで予測することができ、活動予測に役立つかもしれない。熱水流動シミュレーションでは地下の温度圧力はもちろんのこと、比抵抗や自然電位 (Ishido and Pritchett, 1999)、磁場も計算できるようになりつつあり (e.g., Okubo and Kanda, 2010)、観測データから、火山下で起こっている現象を定量的に把握することが期待される。

本小論で概観したように、比抵抗構造は火山活動を解釈する上でも非常に重要である。もし近年の三宅島、有珠山、霧島新燃岳、御嶽山、口永良部島の噴火の発生前に、精度の高い 3 次元比抵抗構造が得られていたら、地殻変動、群発地震、水蒸気噴火の解釈、地下のマグマ移動経路の推定にとって重要な貢献ができたであろう。いまや十分なデータが得られさえすれば、3 次元比抵抗構造の推定は可能になった。比抵抗構造は、火山活動に伴う磁場変化と自然電位変化の解釈にとっても重要であり、信頼性の高い高解像度な比抵抗構造を得ることは、火山電磁気観測の基礎的課題と筆者は考えている。

今後、解析の手法はますます洗練され、3 次元比抵抗構造はルーチン的に推定されるようになるであろう。そのとき研究はどのような方向性をとるべきであろうか。比抵抗構造解析のデータ取得と解析によって、しばらくは新たな知見が得られるであろう。特に比抵抗構造と地震、地殻変動、磁場変動を対比させ火山活動を理解しようという研究は、海外でほとんど行われておらず、我が国発のモデル提唱へ繋がる一つの方向性と言える。火山活動予測の観点からは、比抵抗構造と地磁気変動源の時間変化を準リアルタイムかつ自動で推定するシステム開発がなされるべきである。これらに加え、筆者は観測による新たな電磁気現象の発見を期待したい。近年の地震分野の例を挙げれば、地震発生と同時に磁場変動 (Okubo *et al.*, 2011) や、津波による電磁場変動 (Toh *et al.*, 2011) が日本の研究者によって発見され、理論的研究や応用の可能性について盛んに議論が行われている。新たな手法、新たな観測機材の開発により、火山においても予想もしなかった電磁場変動が発見され、研究が進展することを期待したい。

謝 辞

火山 60 周年記念特集号に本小論の執筆機会を与えて下さった編集委員の皆さまに深く感謝致します。本小論執筆の上で、神田 径 博士と上嶋 誠 博士との議論は有益でした。投稿前の原稿には志藤あずさ博士から有益なコメントを頂きました。橋本武志博士、神田 径 博士からの査読コメントは本稿の改善に大きく役立ちました。特に神田 径 博士からのコメントは筆者の理解が

足りない部分を大きく埋める役割を果たしました。記して感謝致します。

引用文献

- Aizawa, K. (2008) Classification of self-potential anomalies on volcanoes and possible interpretations for their subsurface structure. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **175**, 253–268, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.03.011.
- Aizawa, K., Ogawa, Y., Hashimoto, T., Koyama, T., Kanda, W., Yamaya, Y., Mishina, M. and Kagiya, T. (2008a) Shallow resistivity structure of Asama Volcano and its implications for magma ascent process in the 2004 eruption. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **173**, 165–177, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.01.016.
- Aizawa, K., Uyeshima, M. and Nogami, K. (2008b) Zeta potential estimation of volcanic rocks on 11 island arc-type volcanoes in Japan: Implication for the generation of local self-potential anomalies. *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, **113**, B02201, doi: 10.1029/2007jb005058.
- Aizawa, K., Ogawa, Y. and Ishido, T. (2009a) Groundwater flow and hydrothermal systems within volcanic edifices: Delineation by electric self-potential and magnetotellurics. *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, **114**, doi: 10.1029/2008jb005910.
- Aizawa, K., Ogawa, Y., Mishina, M., Takahashi, K., Nagaoka, S., Takagi, N., Sakanaka, S. and Miura, T. (2009b) Structural controls on the 1998 volcanic unrest at Iwate volcano: Relationship between a shallow, electrically resistive body and the possible ascent route of magmatic fluid. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **187**, 131–139, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2009.08.009.
- Aizawa, K., Yokoo, A., Kanda, W., Ogawa, Y. and Iguchi, M. (2010) Magnetotelluric pulses generated by volcanic lightning at Sakurajima volcano, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, doi: 10.1029/2010gl044208.
- Aizawa, K., Kanda, W., Ogawa, Y., Iguchi, M., Yokoo, A., Yakiwara, H. and Sugano, T. (2011) Temporal changes in electrical resistivity at Sakurajima volcano from continuous magnetotelluric observations. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **199**, 165–175, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2010.11.003.
- Aizawa, K., Koyama, T., Uyeshima, M., Hase, H., Hashimoto, T., Kanda, W., Yoshimura, R., Utsugi, M., Ogawa, Y. and Yamazaki, K. (2013) Magnetotelluric and temperature monitoring after the 2011 sub-Plinian eruptions of Shinmoe-dake volcano. *Earth Planets Space*, **65**, 539–550, doi: 10.5047/eps.2013.05.008.
- Aizawa, K., *et al.* (2014) Three-dimensional resistivity structure and magma plumbing system of the Kirishima Volcanoes as inferred from broadband magnetotelluric data. *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, **119**, 198–215, doi: 10.1002/2013jb010682.
- Aizawa, K., *et al.* (2016) Gas pathways and remotely triggered earthquakes beneath Mt. Fuji, Japan. *Geology*, **44**, 127–130, doi: 10.1130/G37313.1.
- 相澤広記・他 17 名 (2015) 地電位差計を用いた大分県中南部の広帯域 MT 観測. 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 千葉幕張.
- Aizawa, K., Cimarelli, C., Alatorre-Ibargüenitoia, A. M., Yokoo, A., Dingwell, D. B. and Iguchi, M. (2016) Physical properties of volcanic lightning: constraints from magnetotelluric and video observations at Sakurajima volcano, Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **444**, 45–55, doi: 10.1016/j.epsl.2016.03.024.
- Amram, K. and Ganor, J. (2005) The combined effect of pH and temperature on smectite dissolution rate under acidic conditions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**, 2535–2546, doi: 10.1016/j.gca.2004.10.001.
- Arason, P., Bennett, A. J. and Burgin, L. E. (2011) Charge mechanism of volcanic lightning revealed during the 2010 eruption of Eyjafjallajökull. *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, **116**, doi: 10.1029/2011jb008651.
- Barde-Cabusson, S., *et al.* (2009) Transient self-potential anomalies associated with recent lava flows at Piton de la Fournaise volcano (Reunion Island, Indian Ocean). *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **187**, 158–166, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2009.09.003.
- Barde-Cabusson, S., *et al.* (2012) Structural control of collapse events inferred by self-potential mapping on the Piton de la Fournaise volcano (La Reunion Island). *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **209**, 9–18, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2011.09.014.
- Bedrosian, P. A., Unsworth, M. J. and Johnston, M. J. S. (2007) Hydrothermal circulation at Mount St. Helens determined by self-potential measurements. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **160**, 137–146, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2006.09.003.
- Behnke, S. A. and McNutt, S. R. (2014) Using lightning observations as a volcanic eruption monitoring tool. *Bull. Volcanol.*, **76**, doi: 10.1007/s00445-014-0847-1.
- Behnke, S. A. and Bruning, E. C. (2015) Changes to the turbulent kinematics of a volcanic plume inferred from lightning data. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 4232–4239, doi: 10.1002/2015gl064199.
- Behnke, S. A., Thomas, R. J., McNutt, S. R., Schneider, D. J., Krehbiel, P. R., Rison, W. and Edens, H. E. (2013) Observations of volcanic lightning during the 2009 eruption of Redoubt Volcano. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **259**, 214–234, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2011.12.010.
- Behnke, S. A., Thomas, R. J., Edens, H. E., Krehbiel, P. R. and Rison, W. (2014) The 2010 eruption of Eyjafjallajökull: Lightning and plume charge structure. *J. Geophys. Res.-Atmosphere*, **119**, doi: 10.1002/2013JD020781.
- Bertrand, E. A., *et al.* (2012) Magnetotelluric imaging of upper-crustal convection plumes beneath the Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L02304, doi: 10.1029/2011gl050177.
- Bertrand, E. A., Caldwell, T. G., Hill, G. J., Bennie, S. L. and Soengkono, S. (2013) Magnetotelluric imaging of the Ohaaki geothermal system, New Zealand: Implications for locating basement permeability. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **268**, 36–45, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2013.10.010.
- Byrdina, S., Friedel, S., Wassermann, J. and Zlotnicki, J. (2003) Self-potential variations associated with ultra-long-

- period seismic signals at Merapi volcano. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 2156, doi: 10.1029/2003gl018272.
- Caldwell, T.G., Bibby, H.M. and Brown, C. (2004) The magnetotelluric phase tensor. *Geophys. J. Int.*, **158**, doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02281.x.
- Caracciolo, F.D.A., Nicolosi, I., Carluccio, R., Chiappini, S., De Ritis, R., Giuntini, A., Materni, V., Messina, A. and Chiappini, M. (2014) High resolution aeromagnetic anomaly map of Mount Etna volcano, Southern Italy. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **277**, 36–40, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2014.03.008.
- Cimarelli, C., Alatorre-Ibarguengoitia, M.A., Kueppers, U., Scheu, B. and Dingwell, D.B. (2014) Experimental generation of volcanic lightning. *Geology*, **42**, 79–82, doi: 10.1130/g34802.1.
- Clark, D.A., Saul, S.J. and Emerson, D.W. (1986) Magnetic and gravity anomalies of a triaxial ellipsoid. *Exploration Geophysics*, **17**, 189–200.
- Comeau, M.J., Unsworth, M.J., Ticona, F. and Sunagua, M. (2015) Magnetotelluric images of magma distribution beneath Volcan Uturuncu, Bolivia: Implications for magma dynamics. *Geology*, **43**, 243–246, doi: 10.1130/g36258.1.
- Commer, M., Helwig, S.L., Hoerd, A., Scholl, C. and Tezkan, B. (2006) New results on the resistivity structure of Merapi Volcano (Indonesia), derived from three-dimensional restricted inversion of long-offset transient electromagnetic data. *Geophys. J. Int.*, **167**, 1172–1187, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03182.x.
- d'Ozouville, N., Aukens, E., Sorensen, K., Violette, S., de Marsily, G., Deffontaine, B. and Merlen, G. (2008) Extensive perched aquifer and structural implications revealed by 3D resistivity mapping in a Galapagos volcano. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **269**, 517–521, doi: 10.1016/j.epsl.2008.03.011.
- Diaz, D., Heise, W. and Zamudio, F. (2015) Three-dimensional resistivity image of the magmatic system beneath Lastarria volcano and evidence for magmatic intrusion in the back arc (northern Chile). *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 5212–5218, doi: 10.1002/2015gl064426.
- Egbert, G.D. and Kelbert, A. (2012) Computational recipes for electromagnetic inverse problems. *Geophys. J. Int.*, **189**, doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05347.x.
- Finizola, A., Sortino, F., Lenat, J.F. and Valenza, M. (2002) Fluid circulation at Stromboli volcano (Aeolian Islands, Italy) from self-potential and CO₂ surveys. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **116**, 1–18.
- Finizola, A., Sortino, F., Lenat, J.F., Aubert, M., Ripepe, M. and Valenza, M. (2003) The summit hydrothermal system of Stromboli. New insights from self-potential, temperature, CO₂ and fumarolic fluid measurements, with structural and monitoring implications. *Bull. Volcanol.*, **65**, 486–504, doi: 10.1007/s00445-003-0276-z.
- Finizola, A., Revil, A., Rizzo, E., Piscitelli, S., Ricci, T., Morin, J., Angeletti, B., Mochain, L. and Sortino, F. (2006) Hydrogeological insights at Stromboli volcano (Italy) from geoelectrical, temperature, and CO₂ soil degassing investigations. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L17304, doi: 10.1029/2006gl026842.
- Finizola, A., Aubert, M., Revil, A., Schutze, C. and Sortino, F. (2009) Importance of structural history in the summit area of Stromboli during the 2002–2003 eruptive crisis inferred from temperature, soil CO₂, self-potential, and electrical resistivity tomography. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **183**, 213–227, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2009.04.002.
- Finizola, A., *et al.* (2010) Adventive hydrothermal circulation on Stromboli volcano (Aeolian Islands, Italy) revealed by geophysical and geochemical approaches: Implications for general fluid flow models on volcanoes. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **196**, 111–119, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2010.07.022.
- Finn, C.A., Deszcz-Pan, M., Anderson, E.D. and John, D.A. (2007) Three-dimensional geophysical mapping of rock alteration and water content at Mount Adams, Washington: Implications for lahar hazards. *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, **112**, B10204, doi: 10.1029/2006jb004783.
- Garcia, X. and Jones, A.G. (2010) Internal structure of the western flank of the Cumbre Vieja volcano, La Palma, Canary Islands, from land magnetotelluric imaging. *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, **115**, 12, doi: 10.1029/2009jb006445.
- Gasperikova, E., Rosenkjaer, G.K., Arnason, K., Newman, G.A. and Lindsey, N.J. (2015) Resistivity characterization of the Krafla and Hengill geothermal fields through 3D MT inverse modeling. *Geothermics*, **57**, 246–257, doi: 10.1016/j.geothermics.2015.06.015.
- Goto, Y. and Jomori, A. (2013) Resistivity Structure of the Hiyoriyama Cryptodome at Kuttara Volcano, Hokkaido, Japan. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **58**, 365–376.
- Hase, H., Ishido, T., Takakura, S., Hashimoto, T., Sato, K. and Tanaka, Y. (2003) ξ potential measurement of volcanic rocks from Aso caldera. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 2210, doi: 10.1029/2003gl018694.
- 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.
- 橋本武志 (2005) 火山の電磁気観測—歴史・意義・展望—. 火山, **50**, S115–S138.
- 橋本武志 (2015) 火山地磁気効果と水蒸気噴火. Conductivity anomaly 研究会論文集, 75–81.
- Hashimoto, T. (1997) Self-potential changes and subsurface hydrothermal activity accompanying the 1990–1995 eruption of Unzen Volcano. *J. Geomag. Geoelect.*, **49**, 977–993.
- Hashimoto, T. and Tanaka, Y. (1995) A large self-potential anomaly on unzen volcano, Shimabara peninsula, Kyushu-island, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 191–194, doi: 10.1029/94gl03077.
- Hashimoto, T., Hurst, T., Suzuki, A., Mogi, T., Yamaya, Y. and Tamura, M. (2008) The role of thermal viscous remanent magnetisation (TVRM) in magnetic changes associated with volcanic eruptions: Insights from the 2000 eruption of Mt Usu, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **176**, 610–616, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.05.009.
- Hashimoto, T., Utsugi, M., Nakatsuka, T., Okuma, S., Koyama, T. and Kanda, W. (2011) Temporal magnetic changes possibly due to cooling magmas as revealed by repeat

- helicopter-borne surveys over an active volcano. *The 10th SEGJ International Symposium, Kyoto, Japan*.
- Hashimoto, T., Koyama, T., Kaneko, T., Ohminato, T., Yanagisawa, T., Yoshimoto, M. and Suzuki, E. (2014) Aeromagnetic survey using an unmanned autonomous helicopter over Tarumae Volcano, northern Japan. *Exploration Geophysics*, **45**, 37–42, doi: 10.1071/eg12087.
- Hata, M., Oshiman, N., Yoshimura, R., Tanaka, Y. and Uyeshima, M. (2012) Fluid upwelling beneath arc volcanoes above the subducting Philippine Sea Plate: Evidence from regional electrical resistivity structure. *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, **117**, B07203, doi: 10.1029/2011jb009109.
- Hata, M., Oshiman, N., Yoshimura, R., Tanaka, Y. and Uyeshima, M. (2015) Three-dimensional electromagnetic imaging of upwelling fluids in the Kyushu subduction zone, Japan. *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, **120**, 1–17, doi: 10.1002/2014jb011336.
- Heise, W., Caldwell, T. G., Bibby, H. M. and Bennie, S. L. (2010) Three-dimensional electrical resistivity image of magma beneath an active continental rift, Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L10301, doi: 10.1029/2010gl043110.
- Hill, G. J., Caldwell, T. G., Heise, W., Chertkoff, D. G., Bibby, H. M., Burgess, M. K., Cull, J. P. and Cas, R. A. F. (2009) Distribution of melt beneath Mount St Helens and Mount Adams inferred from magnetotelluric data. *Nature Geoscience*, **2**, 785–789, doi: 10.1038/ngeo661.
- Hurst, A. W., Rickerby, P. C., Scott, B. J. and Hashimoto, T. (2004) Magnetic field changes on White Island, New Zealand, and the value of magnetic changes for eruption forecasting. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **136**, 53–70, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2004.03.017.
- 市原 寛・市来雅啓 (2011) 地殻・上部マントルの電気比抵抗構造: 観測の原理・精度と物性データの現状. 岩石鉱物科学, **40**, 73–90.
- Ishido, T. (2004) Electrokinetic mechanism for the “W”-shaped self-potential profile on volcanoes. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L15616, doi: 10.1029/2004gl020409.
- Ishido, T. and Pritchett, J. W. (1999) Numerical simulation of electrokinetic potentials associated with subsurface fluid flow. *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, **104**, 15247–15259.
- Ishido, T., Kikuchi, T., Matsushima, N., Yano, Y., Nakao, S., Sugihara, M., Tosha, T., Takakura, S. and Ogawa, Y. (1997) Repeated self-potential profiling of Izu-Oshima Volcano, Japan. *J. Geomag. Geoelect.*, **49**, 1267–1278.
- Ito, H., Kaieda, H., Mogi, T., Jomori, A. and Yuuki, Y. (2014) Grounded electrical-source airborne transient electromagnetics (GREATEM) survey of Aso Volcano, Japan. *Exploration Geophysics*, **45**, 43–48, doi: 10.1071/eg12074.
- Jones, K. A., Ingham, M. R. and Bibby, H. M. (2008) The hydrothermal vent system of Mount Ruapehu, New Zealand — a high frequency MT survey of the summit plateau. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **176**, 591–600, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.05.006.
- 鍵山恒臣・歌田久司・三ヶ田均・筒井智樹・増谷文雄 (1997) 霧島火山群の構造とマグマ供給系. 火山, **42**, S157–S165.
- 神田 径・小川康雄・橋本武志・八木原寛・小山崇夫・笠谷貴史 (2012) 海域に推定されるマグマ供給系の地下構造調査による実体解明. 科学研究費助成事業研究成果報告書.
- Kanda, W. and Ogawa, Y. (2014) Three-dimensional electromagnetic imaging of fluids and melts beneath the NE Japan arc revisited by using geomagnetic transfer function data. *Earth Planets Space*, **66**, 39, doi: 10.1186/1880-5981-66-39.
- Kanda, W., Tanaka, Y., Utsugi, M., Takakura, S., Hashimoto, T. and Inoue, H. (2008) A preparation zone for volcanic explosions beneath Naka-dake crater, Aso volcano, as inferred from magnetotelluric surveys. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **178**, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.01.022.
- Kanda, W., Utsugi, M., Tanaka, Y., Hashimoto, T., Fujii, I., Hasenaka, T. and Shigeno, N. (2010) A heating process of Kuchi-erabu-jima volcano, Japan, as inferred from geomagnetic field variations and electrical structure. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **189**, 158–171, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2009.11.002.
- Kanda, W., et al. (2013) Shallow Resistivity Structure of Sakurajima Volcano Revealed by Audio-frequency Magnetotellurics. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **58**, 251–267, doi: 10.1186/1880-5981-66-39.
- Kaneko, T., Koyama, T., Yasuda, A., Takeo, M., Yanagisawa, T., Kajiura, K. and Honda, Y. (2011) Low-altitude remote sensing of volcanoes using an unmanned autonomous helicopter: an example of aeromagnetic observation at Izu-Oshima volcano, Japan. *Int. J. Remote Sensing*, **32**, 1491–1504, doi: 10.1080/01431160903559770.
- Kelbert, A., Meqbel, N., Egbert, G. D. and Tandon, K. (2014) ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data. *Computers & Geosciences*, **66**, 40–53, doi: 10.1016/j.cageo.2014.01.010.
- Komori, S., Kagiya, T., Hoshizumi, H., Takakura, S. and Mimura, M. (2010) Vertical mapping of hydrothermal fluids and alteration from bulk conductivity: Simple interpretation on the USDP-1 site, Unzen Volcano, SW Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **198**, 339–347, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2010.09.019.
- Komori, S., Kagiya, T., Takakura, S., Ohsawa, S., Mimura, M. and Mogi, T. (2013a) Effect of the hydrothermal alteration on the surface conductivity of rock matrix: Comparative study between relatively-high and low temperature hydrothermal systems. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **264**, 164–171, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2013.08.009.
- Komori, S., Kagiya, T., Utsugi, M., Inoue, H. and Azuhata, I. (2013b) Two-dimensional resistivity structure of Unzen Volcano revealed by AMT and MT surveys. *Earth Planets Space*, **65**, 759–766, doi: 10.5047/eps.2012.10.005.
- Komori, S., Kagiya, T. and Fairley, J. P. (2014a) Possibility of effective magma degassing into groundwater flow systems beneath Unzen volcanic area, SW Japan, inferred from the evaluation of volcanic gas fluxes using electrical conductivity structures. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **283**, 73–81, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2014.05.024.
- Komori, S., Utsugi, M., Kagiya, T., Inoue, H., C. H., Chen.,

- Chiang, H. T., Chao, B. F., Yoshimura, R. and Kanda, W. (2014b) Hydrothermal system in the Tatun Volcano Group, northern Taiwan, inferred from crustal resistivity structure by audio-magnetotellurics. *Progress in Earth and Planetary Science*, **1**, 759–766, doi: 10.5047/eps.2012.10.005.
- Koyama, T., Kaneko, T., Ohminato, T., Yanagisawa, T., Watanabe, A. and Takeo, M. (2013) An aeromagnetic survey of Shinmoe-dake volcano, Kirishima, Japan, after the 2011 eruption using an unmanned autonomous helicopter. *Earth Planets Space*, **65**, 657–666, doi: 10.5047/eps.2013.03.005.
- Kuwano, O., Yoshida, S., Nakatani, M. and Uyeshima, M. (2015) Origin of transient self-potential signals associated with very long period seismic pulses observed during the 2000 activity of Miyakejima volcano. *J. Geophys. Res. - Solid Earth*, **120**, 3544–3565, doi: 10.1002/2014jb011740.
- Legaz, A., Revil, A., Roux, P., Vandemeulebrouck, J., Gouedard, P., Hurst, T. and Boleve, A. (2009a) Self-potential and passive seismic monitoring of hydrothermal activity: A case study at Iodine Pool, Waimangu geothermal valley, New Zealand. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **179**, 11–18, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.09.015.
- Legaz, A., Vandemeulebrouck, J., Revil, A., Kemna, A., Hurst, A. W., Reeves, R. and Papasin, R. (2009b) A case study of resistivity and self-potential signatures of hydrothermal instabilities, Inferno Crater Lake, Waimangu, New Zealand. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L12306, doi: 10.1029/2009gl037573.
- 松尾元広・小川康雄・氏原直人・相澤広記 (2006) 鬼首間歌泉における電磁気観測. Conductivity anomaly 研究会論文集, 18–23.
- McNutt, S. R. and Davis, C. M. (2000) Lightning associated with the 1992 eruptions of Crater Peak, Mount Spurr Volcano, Alaska. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **102**, 45–65.
- McNutt, S. R. and Williams, E. R. (2010) Volcanic lightning: global observations and constraints on source mechanisms. *Bull. Volcanol.*, **72**, 1153–1167, doi: 10.1007/s00445-010-0393-4.
- Mogi, T., Kusunoki, K., Kaieda, H., Ito, H., Jomori, A., Jomori, N. and Yuuki, Y. (2009) Grounded electrical-source airborne transient electromagnetic (GREATEM) survey of Mount Bandai, north-eastern Japan. *Exploration. Geophysics*, **40**, 1–7.
- 茂木 透・伊藤久敏・海江田秀志・楠建一郎・城森 明・結城洋一 (2011) 地表ソース型空中電磁法 (GREATEM) による探査. 地質ニュース, **677**, 22–27.
- Muller, A. and Haak, V. (2004) 3-D modeling of the deep electrical conductivity of Merapi volcano (Central Java): integrating magnetotellurics, induction vectors and the effects of steep topography. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **138**, 205–222, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2004.05.023.
- 長竹宏之・小川康雄・神田 徑 (2010) VOLCANO LOOP の理論計算. Conductivity anomaly 研究会論文集, 18–23.
- Nakatsuka, T. and Okuma, S. (2006) Crossover analysis for the aeromagnetic survey at varying elevations, and its application to extracting temporal magnetic anomaly change. *Butsuri Tansa*, **59**, 449–458.
- Nakatsuka, T., Utsugi, M., Okuma, S., Tanaka, Y. and Hashimoto, T. (2009) Detection of aeromagnetic anomaly change associated with volcanic activity: An application of the generalized mis-tie control method. *Tectonophysics*, **478**, 3–18, doi: 10.1016/j.tecto.2009.02.018.
- Napoli, R., Currenti, G., Del Negro, C., Greco, F. and Scandura, D. (2008) Volcanomagnetic evidence of the magmatic intrusion on 13 (th) May 2008 Etna eruption. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L22301, doi: 10.1029/2008gl035350.
- Napoli, R., Currenti, G., Del Negro, C., Di Stefano, A., Greco, F. and Boschi, E. (2011) Magnetic features of the magmatic intrusion that occurred in the 2007 eruption at Stromboli Island (Italy). *Bull. Volcanol.*, **73**, 1311–1322, doi: 10.1007/s00445-011-0473-0.
- Newman, G. A. and Alumbaugh, D. L. (2000) Three-dimensional magnetotelluric inversion using non-linear conjugate gradients. *Geophys. J. Int.*, **140**, 410–424, doi: 10.1046/j.1365-246x.2000.00007.x.
- Newman, G. A., Gasperikova, E., Hoversten, G. M. and Wannamaker, P. E. (2008) Three-dimensional magnetotelluric characterization of the Coso geothermal field. *Geothermics*, **37**, 369–399, doi: 10.1016/j.geothermics.2008.02.006.
- Nicollin, F., Gibert, D., Beauducel, F., Boudon, G. and Komorowski, J. C. (2006) Electrical tomography of La Soufriere of Guadeloupe Volcano: Field experiments, 1D inversion and qualitative interpretation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **244**, 709–724, doi: 10.1016/j.epsl.2006.02.020.
- Nurhasan, Ogawa, Y., Ujihara, N., Tank, S. B., Honkura, Y., Onizawa, S., Mori, T. and Makino, M. (2006) Two electrical conductors beneath Kusatsu-Shirane volcano, Japan, imaged by audiomagnetotellurics, and their implications for the hydrothermal system. *Earth Planets Space*, **58**, 1053–1059.
- Ogawa, Y. and Uchida, T. (1996) A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift. *Geophys. J. Int.*, **126**, 69–76.
- Ogawa, Y., Ichiki, M., Kanda, W., Mishina, M. and Asamori, K. (2014) Three-dimensional magnetotelluric imaging of crustal fluids and seismicity around Naruko volcano, NE Japan. *Earth Planets Space*, **66**, doi: 10.1186/s40623-014-0158-y.
- Okubo, A., Tanaka, Y., Utsugi, M., Kitada, N., Shimizu, H. and Matsushima, T. (2005) Magnetization intensity mapping on Unzen Volcano, Japan, determined from high-resolution, low-altitude helicopter-borne aeromagnetic survey. *Earth Planets Space*, **57**, 743–753.
- Okubo, A. and Kanda, W. (2010) Numerical simulation of piezomagnetic changes associated with hydrothermal pressurization. *Geophys. J. Int.*, **181**, 1343–1361, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04580.x.
- Okubo, A., Nakatsuka, T., Tanaka, Y., Kagiya, T. and Utsugi, M. (2006) Aeromagnetic constraints on the sub-surface structure of the Unzen Graben, Kyushu, Japan. *Earth Planets Space*, **58**, 23–31.
- Okubo, A., Kanda, W., Tanaka, Y., Ishihara, K., Miki, D.,

- Utsugi, M., Takayama, T. and Fukushima, M. (2009) Apparent magnetization intensity map on Sakurajima Volcano, Kyushu, Japan, inferred from low-altitude, high-density helicopter-borne aeromagnetic surveys. *Tectonophysics*, **478**, 34–42, doi: 10.1016/j.tecto.2008.07.020.
- Okubo, K., Takeuchi, N., Utsugi, M., Yumoto, K. and Sasai, Y. (2011) Direct magnetic signals from earthquake rupturing: Iwate-Miyagi earthquake of M 7.2, Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **305**, 65–72, doi: 10.1016/j.epsl.2011.02.042.
- Okuma, S., Nakatsuka, T., Komazawa, M., Sugihara, M., Nakano, S., Furukawa, R. and Supper, R. (2006) Shallow subsurface structure of the Vulcano-Lipari volcanic complex, Italy, constrained by helicopter-borne aeromagnetic surveys. *Exploration Geophysics*, **37**, 129–138, doi: 10.1071/eg06129.
- Okuma, S., Stotter, C., Supper, R., Nakatsuka, T., Furukawa, R. and Motschka, K. (2009) Aeromagnetic constraints on the subsurface structure of Stromboli Volcano, Aeolian Islands, Italy. *Tectonophysics*, **478**, 19–33, doi: 10.1016/j.tecto.2009.02.035.
- Okuma, S., Nakatsuka, T. and Ishizuka, Y. (2014) Aeromagnetic constraints on the subsurface structure of Usu Volcano, Hokkaido, Japan. *Exploration Geophysics*, **45**, 24–36, doi: 10.1071/eg13041.
- Onizawa, S., Matsushima, N., Ishido, T., Hase, H., Takakura, S. and Nishi, Y. (2009) Self-potential distribution on active volcano controlled by three-dimensional resistivity structure in Izu-Oshima, Japan. *Geophys. J. Int.*, **178**, 1164–1181, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04203.x.
- Patro, P.K., Uyeshima, M. and Siripunvaraporn, W. (2013) Three-dimensional inversion of magnetotelluric phase tensor data. *Geophys. J. Int.*, **192**, 58–66, doi: 10.1093/gji/ggs014.
- Peacock, J.R., Thiel, S., Reid, P. and Heinson, G. (2012) Magnetotelluric monitoring of a fluid injection: Example from an enhanced geothermal system. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L18403, doi: 10.1029/2012gl053080.
- Peacock, J.R., Thiel, S., Heinson, G.S. and Reid, P. (2013) Time-lapse magnetotelluric monitoring of an enhanced geothermal system. *Geophysics*, **78**, B121–B130, doi: 10.1190/geo2012-0275.1.
- Pellerin, L., Johnston, J.M. and Hohmann, G.W. (1996) A numerical evaluation of electromagnetic methods in geothermal exploration. *Geophysics*, **61**, 121–130.
- Pina-Varas, P., Ledo, J., Queralt, P., Marcuello, A., Bellmunt, F., Hidalgo, R. and Messeiller, M. (2014) 3-D Magnetotelluric Exploration of Tenerife Geothermal System (Canary Islands, Spain). *Surv. Geophys.*, **35**, 1045–1064, doi: 10.1007/s10712-014-9280-4.
- Revil, A., *et al.* (2008) Inner structure of La Fossa di Vulcano (Vulcano Island, southern Tyrrhenian Sea, Italy) revealed by high-resolution electric resistivity tomography coupled with self-potential, temperature, and CO₂ diffuse degassing measurements. *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, **113**, B07207, doi: 10.1029/2007jb005394.
- Revil, A., Johnson, T.C. and Finizola, A. (2010) Three-dimensional resistivity tomography of Vulcan's forge, Vulcano Island, southern Italy. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L15308, doi: 10.1029/2010gl043983.
- Rosas-Carbajal, M., Linde, N., Peacock, J., Zyserman, F.I., Kalscheuer, T. and Thiel, S. (2015) Probabilistic 3-D time-lapse inversion of magnetotelluric data: application to an enhanced geothermal system. *Geophys. J. Int.*, **203**, 1946–1960, doi: 10.1093/gji/ggv406.
- Saba, M., Nishida, Y., Mogi, T., Takakura, S. and Matsushima, N. (2007) Development of geothermal field following the 2000 eruption of Usu volcano as revealed by ground temperature, resistivity and self-potential variations. *Annals of Geophysics*, **50**, 79–92.
- 笹井洋一 (2006) 一様磁化した三軸不等楕円体の作る磁場. Conductivity Anomaly 研究会論文集, 151–157.
- Sasai, Y., Uyeshima, M., Zlotnicki, J., Utada, H., Kagiya, T., Hashimoto, T. and Takahashi, Y. (2002) Magnetic and electric field observations during the 2000 activity of Miyake-jima volcano, Central Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **203**, 769–777.
- Sasaki, Y. (2004) Three-dimensional inversion of static-shifted magnetotelluric data. *Earth Planets Space*, **56**, 239–248.
- Seki, K., Kanda, W., Ogawa, Y., Tanbo, T., Kobayashi, T., Hino, Y. and Hase, H. (2015) Imaging the hydrothermal system beneath the Jigokudani valley, Tateyama volcano, Japan: implications for structures controlling repeated phreatic eruptions from an audio-frequency magnetotelluric survey. *Earth Planets Space*, **67**, doi: 10.1186/s40623-014-0169-8.
- 塩谷太郎・宇津木充・相澤広記・上嶋 誠・小山崇夫・神田 径 (2015) 広帯域 MT 探査による九重連山周辺の比抵抗構造推定. 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 千葉幕張.
- Siniscalchi, A., Tripaldi, S., Neri, M., Balasco, M., Romano, G., Ruch, J. and Schiavone, D. (2012) Flank instability structure of Mt. Etna inferred by a magnetotelluric survey. *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, **117**, doi: 10.1029/2011jb008657.
- Siripunvaraporn, W. and Egbert, G. (2009) WSINV3DMT: Vertical magnetic field transfer function inversion and parallel implementation. *Phys. Earth. Planet. Int.*, **173**, 317–329, doi: 10.1016/j.pepi.2009.01.013.
- Siripunvaraporn, W., Egbert, G., Lenbury, Y. and Uyeshima, M. (2005) Three-dimensional magnetotelluric inversion: data-space method. *Phys. Earth. Planet. Int.*, **150**, 3–14, doi: 10.1016/j.pepi.2004.08.023.
- Sorensen, K.I. and Auken, E. (2004) SkyTEM - a new high-resolution helicopter transient electromagnetic system. *Exploration Geophysics*, **35**, 194–202.
- Srigitomo, W., Kagiya, T., Kanda, W., Munekane, H., Hashimoto, T., Tanaka, Y., Utada, H. and Utsugi, M. (2008) Resistivity structure of Unzen Volcano derived from time domain electromagnetic (TDEM) survey. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **175**, 231–240, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.03.033.
- Takahashi, K. and Fujii, I. (2014) Long-term thermal activity revealed by magnetic measurements at Kusatsu-Shirane

- volcano, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **285**, 180–194, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2014.08.014.
- Tanaka, Y. (1993) Eruption mechanism as inferred from geomagnetic changes with special attention to the 1989–1990 activity of Aso volcano. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **56**, 319–338, doi: 10.1016/0377-0273 (93) 90024-l.
- Thomas, R. J., Krehbiel, P. R., Rison, W., Edens, H. E., Aulich, G. D., Winn, W. P., McNutt, S. R., Tytgat, G. and Clark, E. (2007) Electrical activity during the 2006 Mount St. Augustine volcanic eruptions. *Science*, **315**, 1097–1097, doi: 10.1126/science.1136091.
- Thomas, R. J., McNutt, S. R., Krehbiel, P. R., William, R., Aulich, G., Edens, H. E., Tytgat, G. and Clark, E. (2012) Lightning and Electrical Activity during the 2006 Eruption of Augustine Volcano. *U.S. Geological Survey Professional Paper edited by Power, J. A., Coombs, M. L., and Freymueller, J. T.*, **1769**, 579–608.
- Toh, H., Satake, K., Hamano, Y., Fujii, Y. and Goto, T. (2011) Tsunami signals from the 2006 and 2007 Kuril earthquakes detected at a seafloor geomagnetic observatory. *J. Geophys. Res. -Solid Earth*, **116**, B02104, doi: 10.1029/2010jb007873.
- Uchida, T. and Sasaki, Y. (2006) Stable 3D inversion of MT data and its application to geothermal exploration. *Exploration Geophysics*, **37**, 223–230.
- Usui, Y. (2015) 3-D inversion of magnetotelluric data using unstructured tetrahedral elements: applicability to data affected by topography. *Geophys. J. Int.*, **202**, 828–849, doi: 10.1093/gji/ggv186.
- Utada, H. (2003) Interpretation of time changes in the apparent resistivity observed prior to the 1986 eruption of Izu-Oshima volcano, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **126**, 97–107, doi: 10.1016/s0377-0273 (03) 00119-7.
- Utada, H., Takahashi, Y., Morita, Y., Koyama, T. and Kagiya, T. (2007) ACTIVE system for monitoring volcanic activity: A case study of the Izu-Oshima Volcano, Central Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **164**, 217–243, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2007.05.010.
- 宇津木充 (2011) 京都大学における空中磁場観測への取り組み. 地質ニュース, **677**, 34–39.
- 宇津木充・大倉敬宏・横尾亮彦・鍵山恒臣 (2015) 2014 年阿蘇火山噴火に伴う電磁気観測の結果について. 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 千葉幕張.
- 上嶋 誠 (2009) MT 法による電気伝導度構造研究の現状. 地震, **61**, S225–S238.
- Uyeshima, M., Utada, H. and Nishida, Y. (2001) Network-magnetotelluric method and its first results in central and eastern Hokkaido, NE Japan. *Geophys. J. Int.*, **146**, 1–19.
- Uyeshima, M., Zlotnicki, J., Hase, H., Aizawa, K., Yamaya, Y., Koyama, T. and Y., S. (2015) On temporal variation of SP spatial distribution on Miyakejima Island before and after the 2000 summit eruption. *IUGG General Assembly, Prague, Czech Republic*.
- Yamaya, Y., Mogi, T., Hashimoto, T. and Ichihara, H. (2009) Hydrothermal system beneath the crater of Tarumai volcano, Japan: 3-D resistivity structure revealed using audio-magnetotellurics and induction vector. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **187**, 193–202, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2009.09.008.
- Yamaya, Y., Alanis, P. K. B., Takeuchi, A., Cordon, J. M., Jr., Mogi, T., Hashimoto, T., Sasai, Y. and Nagao, T. (2013) A large hydrothermal reservoir beneath Taal Volcano (Philippines) revealed by magnetotelluric resistivity survey: 2D resistivity modeling. *Bull. Volcanol.*, **75**, doi: 10.1007/s00445-013-0729-y.
- Yukutake, T., Yoshino, T., Utada, H., Watanabe, H., Hamano, Y. and Shimomura, T. (1990) Changes in the electrical resistivity of the central cone, Miharayama, of Oshima volcano observed by a direct-current method. *J. Geomag. Geoelect.*, **42**, 151–168.
- Zlotnicki, J. and Nishida, Y. (2003) Review on morphological insights of self-potential anomalies on volcanoes. *Surv. Geophys.*, **24**, 291–338.
- Zlotnicki, J., Sasai, Y., Toutain, J. P., Villacorte, E., Harada, M., Yvetot, P., Fauquet, F., Bernard, A., Nagao, T. and Team, P. (2009) Electromagnetic and geochemical methods applied to investigations of hydrothermal/volcanic unrests: Examples of Taal (Philippines) and Miyake-jima (Japan) volcanoes. *Physics and Chemistry of the Earth*, **34**, 394–408, doi: 10.1016/j.pce.2008.09.012.

(編集担当 橋本武志)