

AMT法による桜島火山の浅部比抵抗構造調査2011

神田 径*・小川康雄*・高倉伸一**・小山崇夫***・橋本武志****
小森省吾****,*****・園田忠臣*****・佐藤 泉*・井上直人*****・宇津木 充*****
Nurnaning Aisyah*****,*****・Aditya Sebastian Andreas*****

- * 東京工業大学火山流体研究センター
- ** 産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門
- *** 東京大学地震研究所
- **** 北海道大学大学院理学研究院
- ***** 京都大学大学院理学研究科
- ***** 現：台湾中央研究院地球科学研究所
- ***** 京都大学防災研究所
- ***** (財)地域地盤環境研究所
- ***** インドネシア火山地質災害センター

要 旨

桜島火山の浅部構造を明らかにすることを目的として、AMT (audio-frequency magnetotellurics) 法による地下構造調査を山麓の23点において実施した。本調査は、2007年度に取得された27観測点のAMTデータを補足する形で観測点を設定し、うち3観測点では繰り返し観測を行った。測定の結果、火山活動の活発化に伴うと考えられる地下構造の時間変化はほとんど見られなかった。また、観測領域を広げたことによって、地下構造の空間分解能が上がり、桜島山麓の比抵抗分布がより明瞭になった。

キーワード： 桜島火山，比抵抗構造，AMT法，熱水系，山腹噴火

1. はじめに

平成23年度の「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」における「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究（課題番号1809）」により、AMT法 (Audio-frequency Magneto-Tellurics) を用いた浅部比抵抗構造調査を行ったので、これまでに得られている結果について報告する。

桜島火山では、1955年にはじまった南岳山頂火口における噴火活動が2000年代初頭まで継続していたが、2006年6月からは昭和火口において活発な爆発的噴火を繰り返すようにな

り、2010年以降は年間800回を超える爆発回数を記録している（鹿児島地方気象台HP）。一方、歴史時代に溶岩流を流出した大きな噴火（天平宝宇，文明，安永，大正）では、いずれも山腹に火口を形成しており、現在の昭和火口における活動も将来的に山腹噴火へ至る可能性は十分に考えられる。このような活動状況にある桜島火山の浅部構造を明らかにし、山腹からの噴火可能性を評価することを主たる目的として、2007年度の第10回桜島火山の集中総合観測において、AMT法による地下構造調査を実施した。調査の概要と二次元および三次元構造解析の結果については既に報告されており（神田・他，2008; Kanda et al., 2012），

桜島地下浅部の不均質な構造が明らかとなっている。しかしながら、前回の調査では、桜島の山腹に設定した3測線に沿ってデータが取得されたため、空間的な分解能に問題があった。今回の調査では、いくつかの観測点で繰り返し観測を行い、火山活動の活発化に伴って地下構造に時間変化があったかどうかを調べるとともに、2007年度調査の観測領域を広げて、より広範囲のデータ取得を行った。

2. 観測の概要とデータ

観測は、2011年10月24日から10月29日にかけて実施した。前回の調査の結果、熱水系の存在を示唆する浅部低比抵抗層の盛り上がりが見出された引の平溶岩ドーム～大正火口の周辺、および同様の構造が存在する可能性のある北部安永火口の周辺、観測点のなかった南側山腹を中心に観測点を設定した。測定はS/Nの良い夜間に行い、合計23観測点において

各点一晚の電磁場データを取得した(Fig.1)。このうち、3点(A1, A2, D1)が2007年に測定した観測点(それぞれNS06, NS05, AK03)の繰り返し測定であった。測定装置には、2007年調査時と同じPhoenix Geophysics社製のMTU-5Aシステムを計7台使用し、鉛-塩化鉛電極およびインダクションコイルAMTC-30を用いて電場2成分・磁場3成分の測定を行った。1日あたり6観測点で時刻同期したデータを取得し、相互にリファレンス処理(Gamble et al., 1979)を行ってインピーダンスを推定した。なおC3では、測定機器の不調により期間中のデータ取得ができなかったため、後日昼間に約2時間の測定を行い、シングルサイト処理でインピーダンスを算出した。

Fig.2にインピーダンステンソルの非対角成分から算出した全観測点の見掛け比抵抗と位相を示す。データは概ね良好であったが、C3では10Hz以上のデータしか使えないうえ、1000~3000Hzのデータも取れていない。また、

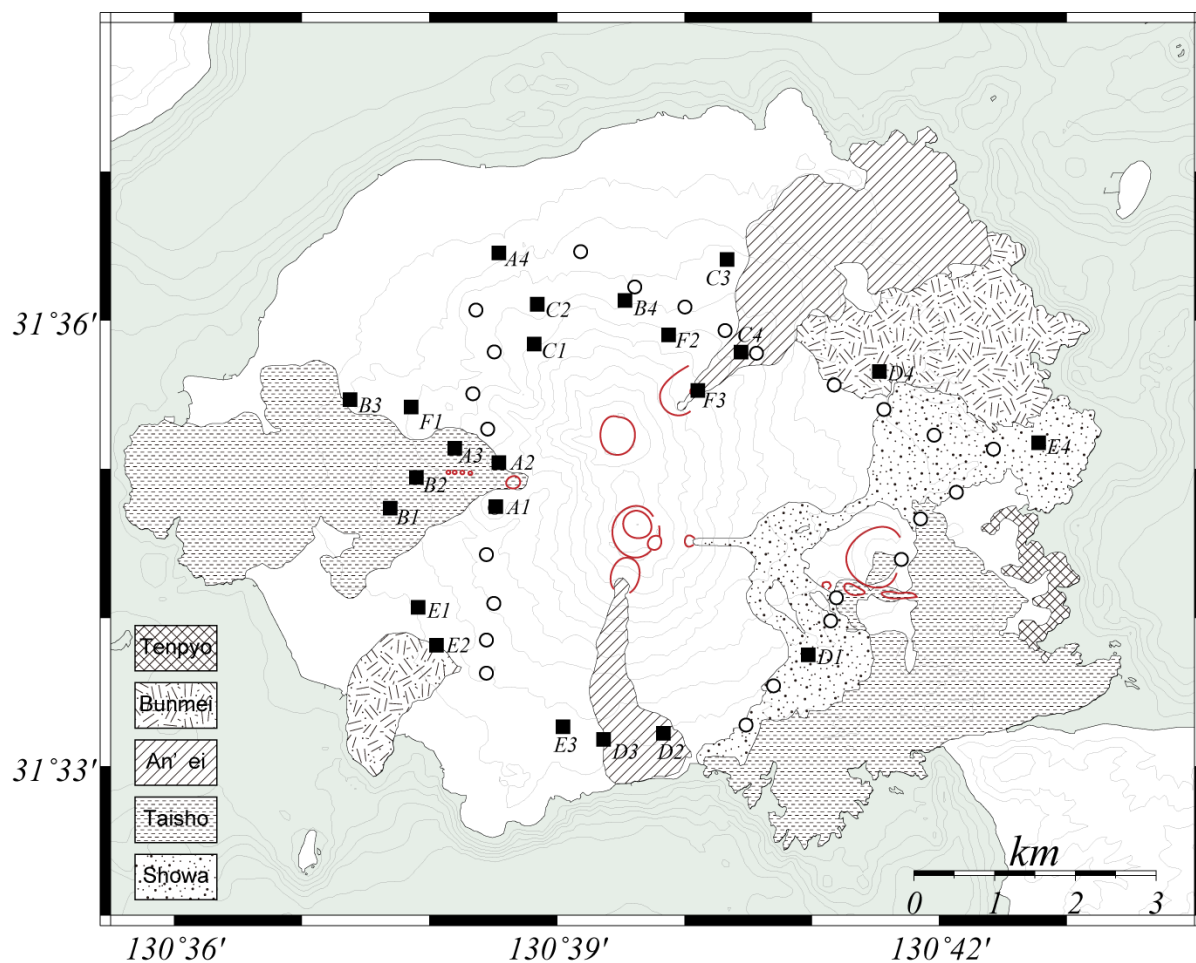


Fig. 1 Location of AMT sites (solid squares). Open circles denote the AMT sites measured in 2007 (Kanda et al., 2008). The main craters and lava distributions from different historic ages (Fukuyama and Ono, 1981) are represented by gray outlines and hachure patterns, respectively.

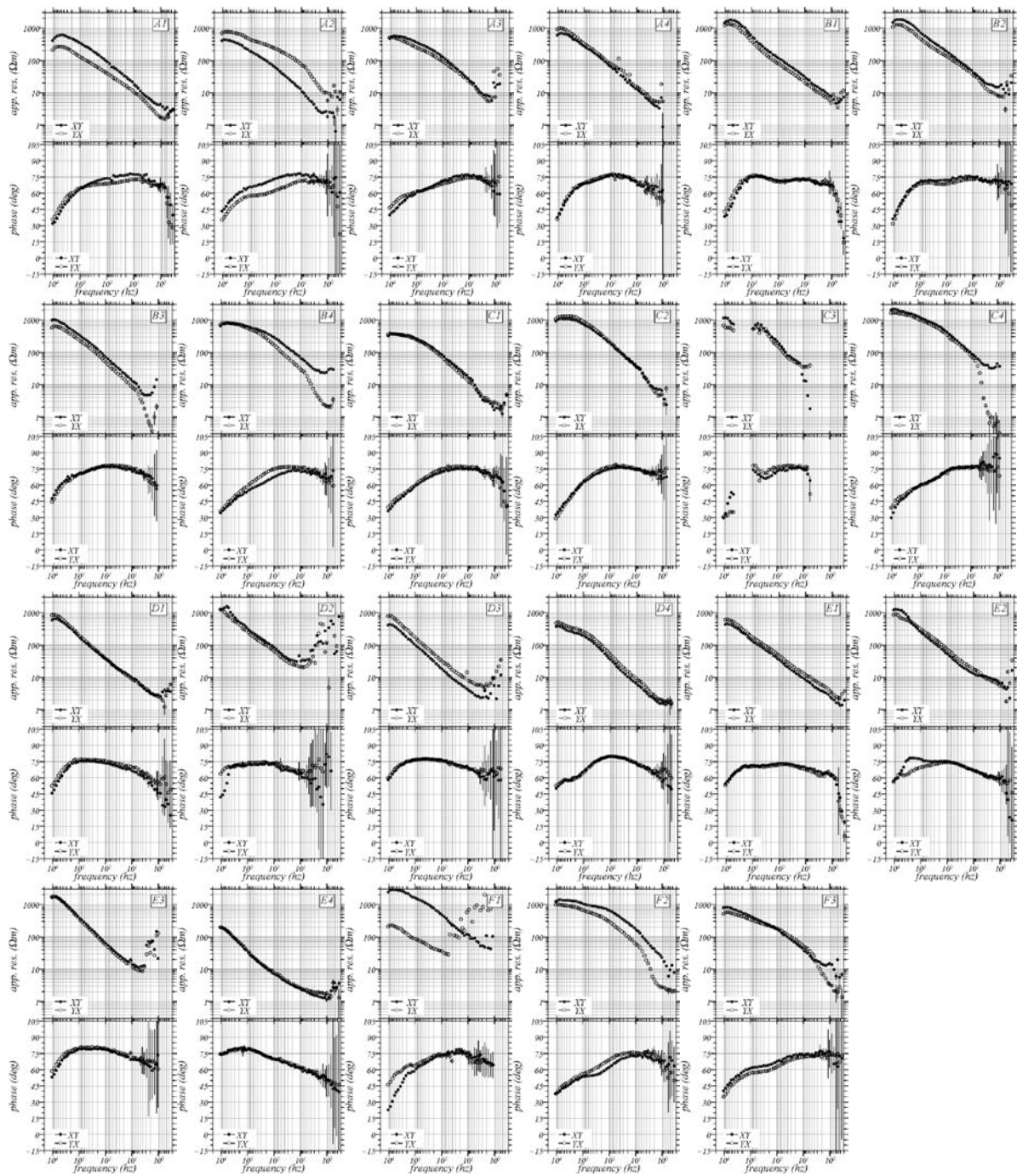


Fig. 2 Sounding curves of measured AMT data. The apparent resistivity (app. res.; upper plots) and the phase (lower plots) computed from the Z_{XY} -component (black dots) and from the Z_{YX} -component (white dots) are shown. Note that the Z_{YX} -component of phase is expressed through a rotation of 180° .

D2やF1も人工ノイズのため、低周波数側でデータの質が悪い。

見掛け比抵抗は、数百~千 Ωm 程度の値を示す高周波数側から数 Ωm 程度の低周波数側へかけてほぼ単調に減少する傾向が、ほぼ全ての観測点で見られる。XY成分とYX成分がほぼ重なる一次元的な特徴を示す観測点が多いことも、前回の調査と同様である。前回の調査では接地抵抗と機材のローパスフィルタの

影響により高周波数側で歪められたデータが多く、多くの観測点で測定されたが、今回はその影響はほとんど見られない。

位相曲線についても、高周波数側が $30\sim 50^\circ$ の低位相で、周波数が低くなるに従って 70° を超える高位相を示すという多くの観測点に共通の傾向が、前回同様見られる。ただし、D2, D3およびE1-E3の山体南側の観測点については、高周波数側から位相が 60° 程度と高い。E4は、高周波側で 70° を超えており、

表層付近から低比抵抗であることが示唆される。海岸線に近いことから、表層付近に海水が浸透している影響と思われる。

データの全体的な性状を把握するために、フェーズテンソル(Caldwell et al., 2004)を導入する。フェーズテンソル Φ は、インピーダンステンソル Z の実部 X および虚部 Y を用いて (1) 式のように定義される。

$$\Phi = X^{-1}Y \quad (1)$$

(1) 式から自明なように、フェーズテンソルはインピーダンステンソルの全成分から算出される。さらに (1) 式は、回転行列 $R(\theta)$ を用いて (2) 式のような形式で表現できる。

$$\Phi = R^T(\alpha - \beta) \begin{pmatrix} \Phi_{\max} & 0 \\ 0 & \Phi_{\min} \end{pmatrix} R(\alpha - \beta) \quad (2)$$

ここで、 Φ_{\max} 、 Φ_{\min} 、 β は座標系によらない回転不変量である。フェーズテンソルは、表層の不均質構造による影響（ガルバニック歪）を受けにくい性質があるため、地下構造の次元性や走向を示す指標として用いられることが多い。(2)式で得られるテンソル成分の最大値 (Φ_{\max}) および最小値 (Φ_{\min}) は、楕円表現における長軸および短軸の長さを表し、長軸の方向は $\alpha - \beta$ で与えられる。地下構造が一次元であれば、フェーズテンソルは円 ($\Phi_{\max} = \Phi_{\min}$) となり、二次元であれば、 $\beta = 0$ となって主軸の方向が構造走向を表す。

Fig.3に、フェーズテンソルの分布を3つの周波数について2007年のデータと併せて示す。楕円の分布は、2007年と2011年のデータセットで整合的である。桜島の東側では各周波数とも円に近い楕円形状を示しており、構造が一次元的であることを示唆している。その他の地域でも、楕円の主軸方向は水平方向で連続的に分布しており、周囲の観測点で矛盾は見られない。桜島北東部の観測点付近（2007年データのGK測線中央部付近）では、楕円形状の傾向が地形起伏を境に西側と東側で顕著に変化しており、地形に沿った構造境界の存在が推測される。

3. 繰り返し観測の結果

前述のように、A1, A2, D1の3観測点は、2007年11月にもほぼ同一の場所で測定を行っている。探査曲線を比較してやると、3観測点ともほぼ重なっているが、高周波数帯域および数Hz帯域において若干のずれも見られた。フェーズテンソルの分布 (Fig.3) を

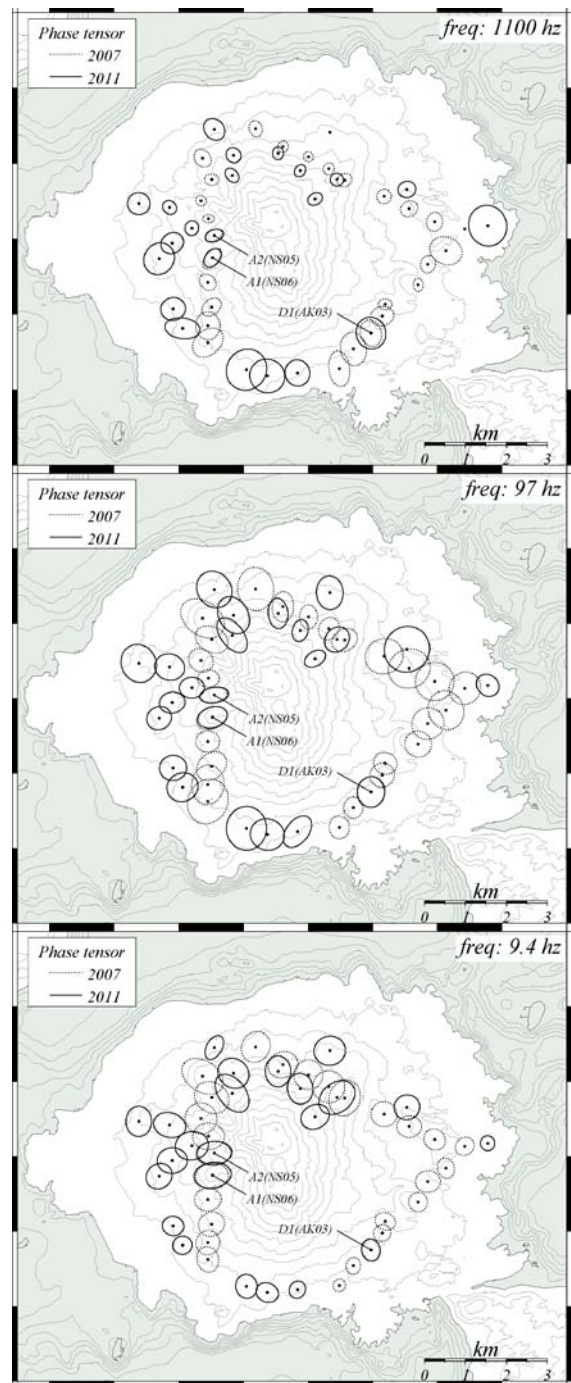


Fig. 3 Phase tensor ellipses of measured AMT data at frequencies (freq) of 1100, 97, and 9.4 Hz. The data obtained in 2007 (dashed line) and in 2011 (solid line) are shown.

見ても楕円は概ね重なっているが、各周波数で完全には重なっておらず、特に1100HzではD1 (AK03) におけるずれが大きい。

これを明確にするために、ミスフィットテンソル (Heise et al., 2007) を用いてフェーズテンソル全成分の差異を表現する。ミスフィットテンソル Δ は、2007年および2011年データのフェーズテンソル (Φ_{2007} および Φ_{2011}) を用いて (3) 式のように定義

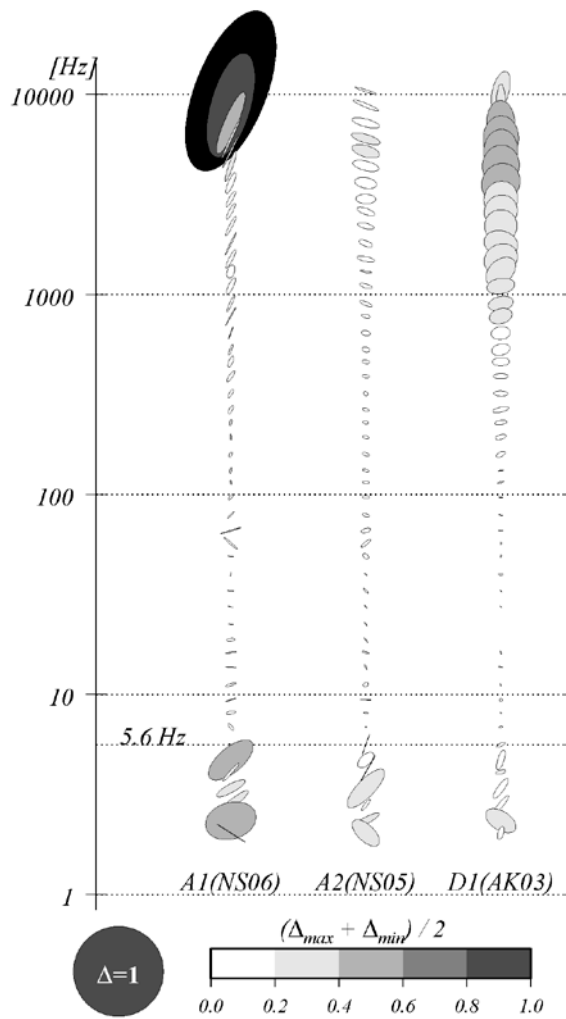


Fig. 4 Misfit-tensor ellipses calculated for the data obtained in 2007 and in 2011 at 3 repeated sites. The vertical axis indicates the frequency in Hz. The color used to fill the ellipses shows the arithmetic mean of the maximum and minimum misfit $(\Delta_{\max} + \Delta_{\min})/2$.

される。

$$\Delta = \mathbf{I} - \left(\frac{\Phi_{2011}^{-1} \Phi_{2007} + \Phi_{2007} \Phi_{2011}^{-1}}{2} \right) \quad (3)$$

ただし、 \mathbf{I} は単位行列である。定義から明らかなように、両データ全成分の一致度が良いほどミスフィットテンソルは小さくなり、楕円表現は点に近づく。

Fig.4に、繰り返し観測を行った3観測点について、信頼できる応答が得られた2Hz以上の全測定周波数におけるミスフィットテンソルを示す。A1 (2007年観測時のNS06; Fig.4左) では、数千Hzから数Hzまで極めて良い一致を示しているが、6000Hz以上の高周波数でかなりの差異が見られる。A2 (Fig.4中) においても、数千Hz以上の周波数で良い一致を示しており、数千Hz帯では若干のずれが認められる。高周波数帯

での大きな誤差楕円については、2007年測定データにおいて、機材のローパスフィルタにより高周波数側で探查曲線が歪められた影響によるものが大きい。前述のように、2011年測定データではこの影響がほとんど見られないため、高周波数帯での大きな誤差楕円となって現れたと考えられる。低周波数側では、測定に用いたインダクションコイル (AMTC-30) の感度が落ち始める5.6Hzより低い周波数で3観測点とも差が大きくなり始める。低周波数側でのやや大きな楕円は、S/Nが悪くなったことに起因していると思われる。

D1 (AK03; Fig.4右) については、約1000Hzより高周波数側でやや大きな誤差楕円が得られている。探查曲線を比べてみると、特に2011年データの位相が1000Hzより高周波数側で高位相ヘシフトしている。これは、ローパスフィルタの影響のみではなく、比抵抗構造にも若干の変化があったものと考えられる。試みに、両データのXY成分を用いてオッカムインバージョン (Constable et al., 1987) により推定した一次元構造をFig.5に示す。深さ約100mより深いところでは、10 Ω m以下のほぼ同じ構造が得られているが、深さ100mまでの高比抵抗部では、2011年データから推定した構造の方が最大で一桁程度大きな値を示している。

桜島では、2008年5月~2009年7月にかけて、島内の2か所において広帯域MT連続観測による比抵抗モニタリングが行われており、見掛け比抵抗で最大20%、

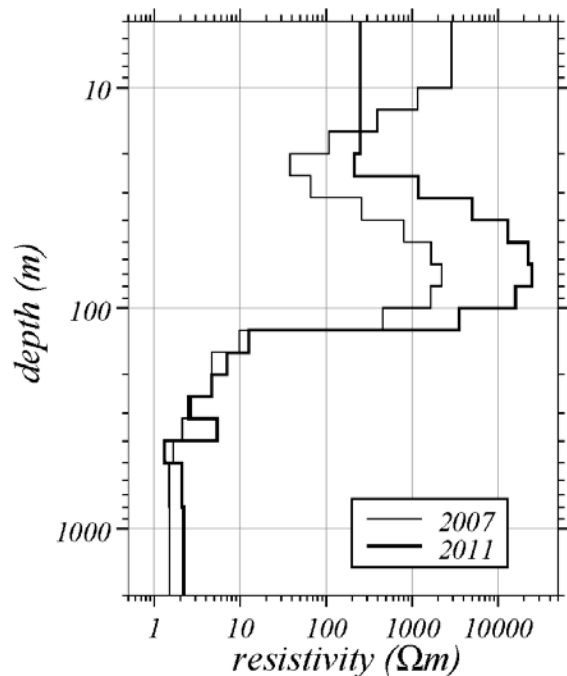


Fig. 5 One-dimensional models inferred from the data measured in 2007 (thin line) and in 2011 (thick line) at site D1. The XY-component was used for the inversion.

位相で最大2度の変動を検出したことが報告されている(相澤・他, 2010; Aizawa et al., 2011)。また、2010年2月からは、観測点を6点に増やして連続観測が行われている(相澤・他, 2011)。Aizawa et al. (2011)によれば、観測された変動は、海水準付近における地下水または海水とマグマから脱ガスした火山ガスの混合により発生したと解釈されている。D1の標高は約180mであるので、一次元モデルにより比抵抗構造に違いが現れた表層100mは、海水準よりも上に位置している。また、比抵抗値も $1k\Omega m$ を超える高い値を示すため、地下水層が発達しているとは考えにくい。一方、今回の繰り返し観測では、海水準付近における比抵抗変動は議論できるほど有意には変化していない(Fig.4, Fig.5)。D1は、昭和火口から最も近い距離にあり、2010年以降の昭和火口の活発化に伴って、地表付近には2007年観測当時よりも火山灰が堆積している。探査曲線に見られた差が、測定条件の違い(全く同一の点でない、使用した電極が違う、など)に起因しているものでなければ、このことが関係しているかもしれない。

4. 比抵抗分布

2007年から2011年にかけて地下構造に軽微な変化しかなかったと仮定し、両方のデータセットをあわせて見掛け比抵抗の分布をしてみる。Fig.5は、インピーダンスの回転不変量の一つである $\det(\text{Re}(\mathbf{Z}))$ から算出した見掛け比抵抗の空間分布を、代表的な3周波数について示したものである。ここで用いた $\det(\text{Re}(\mathbf{Z}))$ は、良導体の分布を適切に反映する量だとされる(Szarka and Menvielle, 1997)。なお、繰り返し観測を行った3点については、2011年のデータを使用した。

2007年に測定したデータのみから作成された比抵抗分布(神田・他, 2008)と比較すると、概略の分布は各周波数で変わっていない。今回の観測の目的の一つであった北部安永火口周辺では、熱水系の存在を示唆するような低比抵抗異常領域は得られておらず、むしろ厚い高比抵抗域が観測されている。また、引の平周辺の低比抵抗異常域についても、周囲に広がっておらず、引の平周辺に限定されていることがわかった。この他、新たに観測領域を広げたことによって、いくつかの特徴が明らかとなっている。桜島南部では、東西の測線端の観測点と矛盾ない比抵抗値を示しており、異常領域は見られない。桜島北部から西部にかけては、一般的に高比抵抗であるが、北西部の一部地域では、低比抵抗異常が顕著に存在する。表層地質は北岳起源の藤野溶岩(福山・小野, 1981)に対応しているが、低比抵抗異常の成因

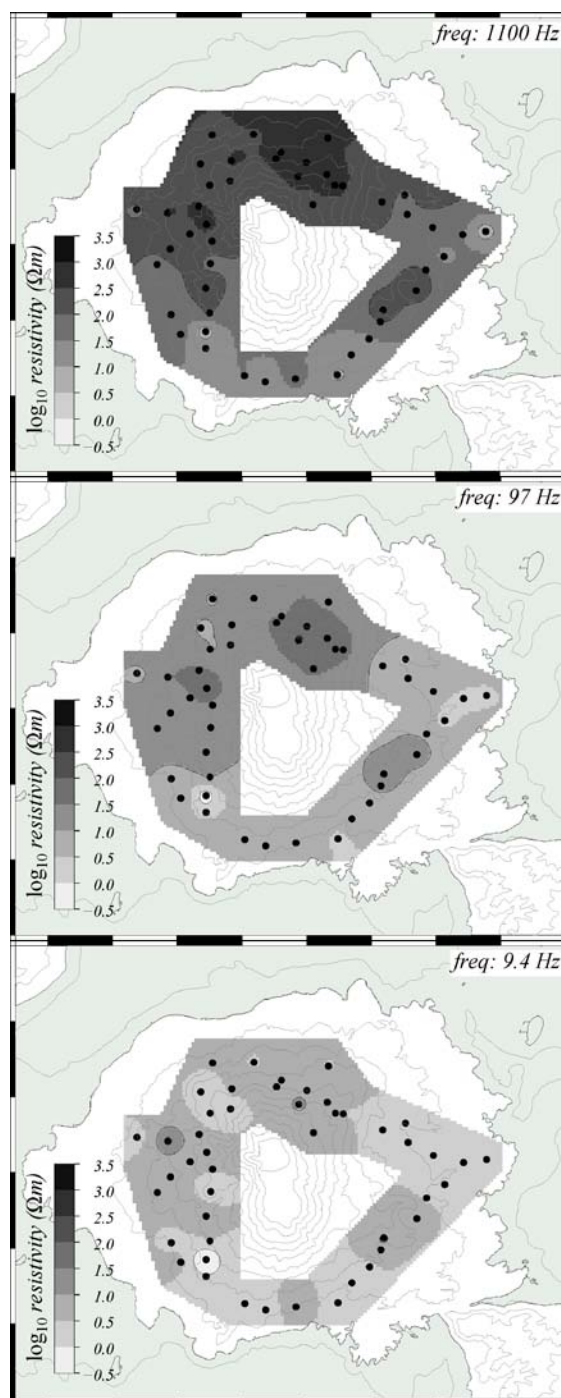


Fig. 6 Spatial distribution of apparent resistivity at frequencies (freq) of 1100, 97, and 9.4 Hz. The data obtained in 2007 and in 2011 are used together. Apparent resistivity is calculated from $\det(\text{Re}(\mathbf{Z}))$, a rotational invariant of the magnetotelluric impedance tensor.

は、現時点では不明である。

5. まとめ

桜島火山の浅部比抵抗構造を明らかにするために、

2007年の第10回桜島火山の集中総合観測に引き続き、AMT法比抵抗構造探査を山麓の23点で実施した。このうち3点では、2007年とほぼ同一の地点での繰り返し測定を行った。これまでの解析の結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 繰り返し測定からは、2007年に取得したデータとほぼ一致する探査曲線が得られたが、昭和火口に最も近い観測点では、高周波数側（≒深さ100mより浅い部分）で、2007年よりは比抵抗が高くなる方向へ変化していた。地下浅部における比抵抗構造変化の要因は、現時点で不明である。
- (2) 見掛け比抵抗の分布は、2007年測定データから得られた分布と矛盾しない結果を示した。観測領域を広げ、観測点の空間密度を上げたことによって、北部安永火口周辺の地下構造に顕著な低比抵抗異常が見られないこと、引の平周辺の低比抵抗異常域が周囲に広がっていないことが確認された。また、桜島北西部にも低比抵抗異常が存在することが明瞭となった。

今後は、2007年データと2011年データを同時に用い、地形を考慮した三次元比抵抗構造モデルを構築する予定である。

謝 辞

AMT観測を実施するにあたり、国土交通省九州地方整備局大隈河川国道事務所ならびに同桜島砂防出張所、林野庁九州森林管理局鹿児島森林管理署、鹿児島市危機管理課ならびに同河川港湾課にご協力をいただきました。また、京都大学防災研究所の井口正人教授をはじめとする火山活動研究センターの皆様ならびに地震防災研究部門の吉村令慧准教授からもご協力をいただきました。記してお礼申し上げます。

参考文献

相澤広記・神田 径・小川康雄・井口正人・横尾亮彦・八木原 寛・菅野貴之 (2010) : MT連続観測による桜島地下浅部の比抵抗変化、「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のた

めの研究」平成21年度報告書, pp.73-80.

相澤広記・小山崇夫・長谷英彰・上嶋 誠 (2011) : MT連続観測による桜島地下浅部の比抵抗変化(2), 「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究」平成22年度報告書, pp.61-66.

神田 径・山崎友也・橋本武志・坂中伸也・山田健太・小川康雄・相澤広記・高倉伸一・小山崇夫・小林 幸・小森省吾・桜島電磁気構造探査グループ (2008) : 桜島火山におけるAMT法比抵抗構造調査, 第10回桜島火山の集中総合観測, pp.89-104.

福山博之・小野晃司(1981) : 桜島火山地質図, 1:25,000 火山地質図1, 地質調査所.

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.*, Vol.199, pp.165-175.

Caldwell, T. G., Bibby, H. M., and Brown, C. (2004): The magnetotelluric phase tensor, *Geophys. J. Int.*, Vol.158, pp.457-469.

Constable, S. C., Parker, R. L., and Constable, C. G. (1987): Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data, *Geophysics*, Vol.52, pp.289-300.

Gamble, T. D., Goubau, W. M., and Clarke, J. (1979): Magnetotellurics with a remote magnetic reference, *Geophysics*, Vol.44, pp.53-68.

Heise, W., Bibby, H. M., Caldwell, T. G., Bannister, S. C., Ogawa, Y., Takakura, S., and Uchida, T. (2007): Melt distribution beneath a young continental rift: The Taupo Volcanic Zone, New Zealand, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.34, L14313.

Kanda, W., Yamazaki, T., Ogawa, Y., Hashimoto, T., Sakanaka, S., Aizawa, K., Takakura, S., Koyama, T., Yamada, K., Kobayashi, T., and Komori, S. (2012): Shallow resistivity structure of Sakurajima volcano revealed by audio-frequency magnetotellurics, *Bull. Volcanol. Soc. Jpn.*, in press.

Szarka, L. and Menvielle, M. (1997): Analysis of rotational invariants of the magnetotelluric impedance tensor, *Geophys. J. Int.*, Vol. 129, pp.133-142.

Audio-frequency Magnetotelluric Survey of Sakurajima Volcano 2011

Wataru KANDA*, Yasuo OGAWA*, Shinichi TAKAKURA**, Takao KOYAMA***,
Takeshi HASHIMOTO****, Shogo KOMORI***** · *****, Tadaomi SONODA***** · *****, Izumi SATO*,
Naoto INOUE***** · *****, Mitsuru UTSUGI***** · *****, Nurnaning AISYAH***** · *****,
Aditya Sebastian ANDREAS ***** · *****

- * Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology
- ** National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)
- *** Earthquake Research Institute, the University of Tokyo
- **** Faculty of Science, Hokkaido University
- ***** Graduate School of Science, Kyoto University
- ***** Now at: Institute of Earth Sciences, Academia Sinica (TAIWAN)
- ***** Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University
- ***** Geo-Research Institute
- ***** Center for Volcanology and Geological Hazard Mitigation (INDONESIA)

Synopsis

We investigated a shallow resistivity structure of Sakurajima volcano by using an audio-frequency magnetotelluric (AMT) method in fiscal year 2011. Measurement was made at 23 locations on the flanks of the volcano, which was supplementary to the AMT data of 27 sites measured in fiscal year 2007. Among these, 3 sites were measured repeatedly at almost the same locations of the 2007 survey. As a result of measurements, time change of the underground resistivity structure, that was considered to be attributed to the activation of volcanic activity, was not observed. In addition, by having extended the survey area, the spatial resolution of underground structure was significantly improved and distribution of shallow resistivity layers of Sakurajima volcano became clearer.

Keywords: Sakurajima volcano, electrical resistivity structure, AMT, hydrothermal system, flank eruption