

MT連続観測による桜島地下浅部の比抵抗変化

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^{*}

* 東京大学地震研究所

** 東京工業大学火山流体研究センター

*** 京都大学防災研究所

**** 東北大学大学院理学研究科

***** 鹿児島大学大学院理工学研究科

要 旨

2008年5月1日より2009年7月10日までの期間、桜島火山のハルタ山、黒神の2地点において地磁気－地電流(MT)連続観測を行った。人工ノイズの影響が小さかった Zyx成分(東西電場－南北磁場の伝達関数)では、見掛け比抵抗として20%、位相として2%程度の数週間から数ヶ月続く変動が得られた。見掛け比抵抗変動は両観測点で逆相関を示し、変動の開始時期は火口方向が隆起を始める時期にほぼ一致している。さらに黒神観測点では、近傍の観測井内の温泉ガス増加に伴うように見掛け比抵抗が上昇した。以上のことから見掛け比抵抗変動は火山活動起源と考えられる。上昇してきたマグマから脱ガスした揮発性成分が横方向に移動した結果、浅部地下水に混入し比抵抗変動を引き起こしている可能性がある。

キーワード: 桜島火山、MT観測、比抵抗、脱ガス、揮発性成分

1. はじめに

地下のマグマやガスの移動を構造の変化として可視化することができれば、火山活動予測に重要な貢献ができる。地磁気－地電流(MT)法は、推定される比抵抗構造の時間分解能が高く、またマグマは低比抵抗体として周辺の岩石と区別できるため、構造変化をとらえる上で有望と考えられる。しかしながら上昇してくるマグマ本体を、危険な噴火口周辺ではなく安全に観測できる山麓の観測点で捕らえることは容易ではない。例えば桜島を対象としたモデル計算では、2km × 0.2km × 2km程度の巨大なダイク貫入でないと山麓では Geomagnetic Transfer Function の検出限界を超えないことが指摘されている(藤井, 2007)。

最近の地震波速度構造の時間変化(4D tomography)の研究によると、活動的火山では貫入ダイクそのものだけではなく、その周辺の広い領域で Vp/Vs 比が変化する可能性が指摘されてい

る(Patanè et al., 2006)。また、こうした変化はマグマから抜け出た流体が引き起こしていることが推定されている。桜島は頻繁に噴火を繰り返す活動的な火山であり、山体内部はマグマから抜け出した流体により満たされている。地表では場所によって 20 g/m²day 程度の高い土壤 CO₂ フラックスが観測され、ハルタ山観測井、有村観測井の温泉ガス中の CO₂ 濃度はそれぞれ、30 パーセントと 70 パーセントと高い(攬上, 2008)。また、南山麓には温泉が存在し、温泉水中にはマグマから脱ガスした成分の寄与が認められる(大場他, 1999)。重要なことは、こうした山麓部に存在するマグマ起源流体のフラックスが、山頂の噴火活動と連動して変化している可能性があることである(e.g., 太田, 1986; Hirabayashi et al., 1986)。最近では、長期的な変動だが、東山麓に位置する黒神観測井内の CO₂ 濃度が、昭和火口活動再開以降、2007 年 5 月から上昇を始めた例がある。それまで 2 パーセントであった CO₂ 濃度が、2007 年 10 月には 10 パーセ

ント、2008年1月には20パーセントと急上昇していることが報告されている(平林他, 2008)。以上のことから、マグマから抜け出た流体の火山体内への散逸を考慮すると、桜島山麓-山腹部においても比抵抗変動をとらえられると期待できる。本稿では2008年5月1日より2009年7月10までの期間、桜島で行ったMT連続観測の結果について報告する。データの2次元解析やその解釈等、より詳しい内容は投稿論文(Aizawa et al., submitted)としてまとめており、将来的にはそちらを参照されたい。

2. MT連続観測

観測点は2010年6月現在、中小規模な噴火を繰り返している昭和火口から、東に3.3km離れた黒神(KURMT)と、西北西に3km離れたハルタ山(HARMT)の2点に設置した(Fig. 1)。活動的火山における広帯域MT連続観測は著者等の知る限り世界で初めての試みである。両観測点共に、地磁気3成分-地電位差2成分をGPS clockを用いたPhoenix社製MTU-5により観測した。サンプリング周波数は15Hz(連続), 150Hz(4分ごとに16秒), 及び2500Hz(4分ごとに1秒)である。1週間に1度程度、観測点に赴き、バッテリー交換、データ回収、電極接地抵抗チェック等のメンテナンスを行った。

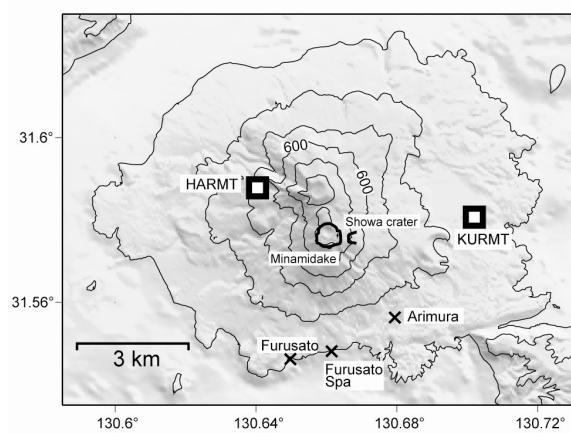


Fig. 1 Locations of sites of continuous MT measurements at Sakurajima volcano (squares) and sites of other geophysical/geochemical observations.

3. MTインピーダンス

3.1 見掛比抵抗変化

HARMTの時系列データに対し、国土地理院江刺観測所で得られた地磁気データを参照としたリモートリフランス解析(Gamble et al., 1979)を行った。KURMTの時系列データに対してはHARMTの地磁気データを参照点として同様の解析を行った。リモートリフランス処理によってデータの質は若干向上したが、当該観測点のデータのみを使った解析でも同様の結果が得られたため、以下の議論は解析方法には依存しないと考えられる。

得られたMTインピーダンスのうち、Zyx(東西電場-南北磁場)成分は300-4Hzの周期帯ほとんどでcoherenceが0.95を超える。対照的にZxy成分はcoherenceが0.7-0.9と高品質ではなく、微小な比抵抗変化を議論するために適していないと考え、本稿では用いないこととした。Fig. 2にZyxの変動を、横軸に時間、縦軸に周波数をとり、見掛け比抵抗および位相を用いて示した。4Hzより低周波のインピーダンスに関しては鹿児島市周辺の鉄道からの漏洩電流と思われるノイズに汚染され精度が高くなく、数日の時間変化を議論する本稿では用いない。本稿で用いた最も長周期な周波数(4Hz)は100(ohm-m)地下均質媒質を仮定すると探査深度(skin depth)が2.5kmに相当する。Fig. 2では見掛け比抵抗、位相とも顕著な変化はなく、観測期間を通じて大局的な比抵抗構造は安定していることを示している。

Fig. 3に、Fig. 2から各周波数の平均値を差し引いた変動分を示す。両観測点とも見掛け比抵抗として20%, 位相として2%程度の変動が存在していることが分る。

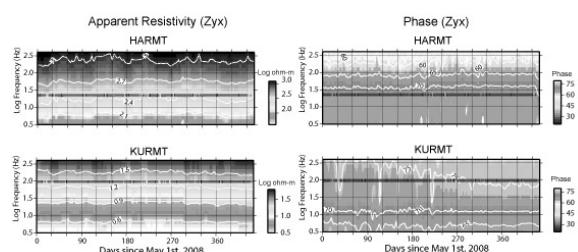


Fig. 2 Temporal changes in apparent resistivity and phase (Zyx). Small ‘plus’ symbols indicate the frequency used in Figs 4-6.

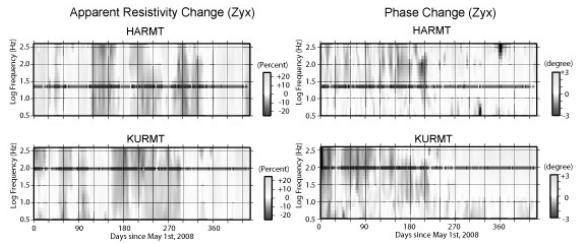


Fig. 3 Temporal changes in apparent resistivity and phase (Zyx). Relative change is normalized by the average values for each frequency.

3.2 観測点間のタイムラグ

見掛け比抵抗に注目し、Figs. 2-3から+印で示す特に変動が明瞭であった周波数の成分のみを抜き出しFig. 4aに示す。両観測点とも数週間～数ヶ月続く変動を示し、また逆相関を示している。この傾向は他の周波数でも同様である。

Fig. 4aに示された変動は両観測点でほぼ同時に見えるが、実際は微小なタイムラグが存在する。例えば Period 1 の期間では KURMT が HARMAT に比べ変動開始時期が先行している。両者の相互相関を計算すると KURMT が HARMAT に対し1週間程度先行して変化していることが示唆される(Fig. 4b)。これに対しPeriod 2ではHARMATの変動が先行しており (Fig. 4c)，両観測点間のタイムラグは必ずしも一定でないことが分かる。

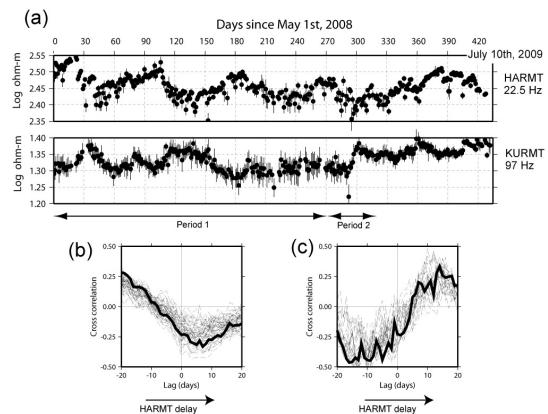


Fig. 4(a) Temporal variations in apparent resistivity (Zyx) at a frequency of 22.5 Hz at HARMAT and a frequency of 97 Hz at KURMT. The employed frequencies are marked in Figs 2–3. Error bars represent \pm two standard deviations. (b) Cross-correlation of two time series during period 1 (days 0–270). Thick line: cross-correlation between the two time series shown in (a). Thin dashed lines: cross-correlation calculated using all the other combinations of data at different frequencies. (c) Cross-correlation for period 2 (days 270–320). Other notations are the same as in (b).

3.3 他の地球物理観測データとの比較

得られた見掛け比抵抗変動の原因を探るため、他の観測量との比較を行った。Fig. 4aの見掛け比抵抗変動と、雨量、潮位、地殻変動、噴火活動とそれに伴う空振強度、深部低周波地震活動、深さ3kmより浅部の地震活動と比較したものをFig. 5に示す。雨量、潮汐は比抵抗変動の要因となり得るが(Utada et al, 1998), 本観測では明瞭な対応は見られなかった。一方、地殻変動と見掛け比抵抗では対応関係が見られた。Fig. 5eに有村観測坑道に設置された傾斜計の火口方向成分の生データに1日間の移動平均をかけた結果を示す。図中、6本の破線で示すように、火口方向の隆起開始と見掛け比抵抗の変動開始は大まかに一致している。傾斜計の変動は深さ3 km付近のマグマの増減を表していると推測されており(Ishihara, 1990; Iguchi et al., 2008; 立尾・井口, 2009), 見掛け比抵抗変動はマグマの移動に関連するものと考えられる。

Fig. 6f, h-i に示すように、見掛け比抵抗変動や傾斜計長周期成分は、噴火活動や深さ3 km以浅の地震活動など、浅部火山活動とそれほど対応しない。このことは見掛け比抵抗変動や傾斜計長周期成分は、浅部でなく、深さ3 km以深の火山活動に関連していることを示唆している。

Fig. 6g に桜島地下深さ15~30kmで発生した深部低周波地震を示す。マグニチュードが1を超えるイベント(大きな★印)は見掛け比抵抗変動のトレンドが変化する時期に発生しているように見え、原因是不明であるが深部流体の移動と浅部の比抵抗変動が関連している可能性がある。

3.4 温泉ガスデータとの比較

京都大学桜島火山観測所では、昭和火口活動開始以降の黒神観測井内CO₂濃度上昇を受けて、同地点で温泉ガス連続観測(CO₂, H₂)を開始した。観測井はKURMTからおよそ100m離れた場所に位置している。Fig. 6にMT観測から得られた見掛け比抵抗と、温泉ガス濃度の比較を示す。観測井内の温泉ガスはポンプにより1日に1度、黒神観測室に吸い上げられその場で測定される。期間中、設定エラーにより1日に2度吸い上げることがたびたび発生し、ガス濃度が大きく変動した。こうした期間を無視すると図中、横軸290-300の期間で見掛け比抵抗と温泉ガスが同期して変化しているように見える。この結果は浅部の地下水変動と比抵抗変動が関連していることを示唆している。

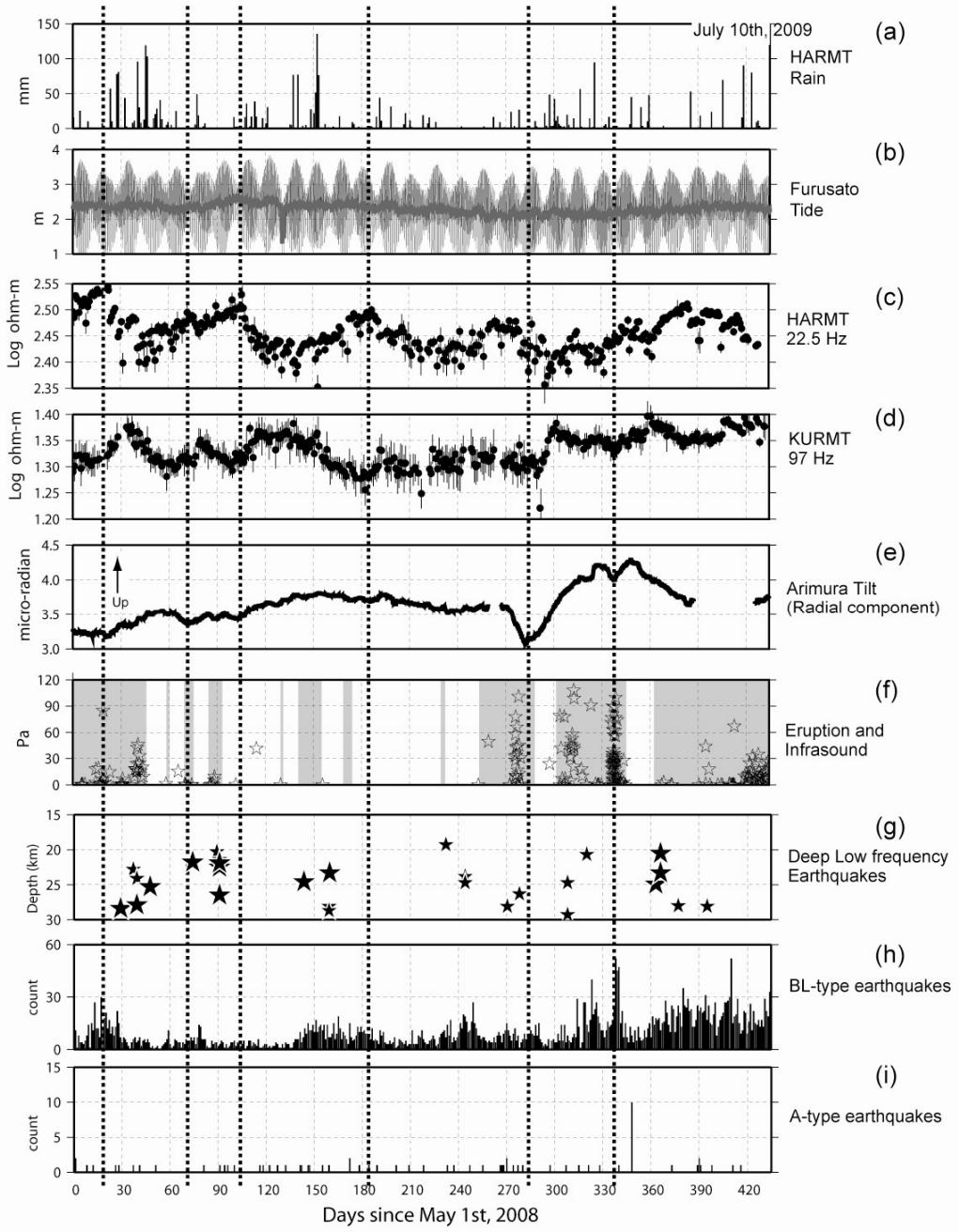


Fig. 5 Comparison of temporal variations in apparent resistivity (Z_{xy}) with rain, tides, ground deformation, eruption periods with major infrasound strength, and earthquakes around Sakurajima volcano. Vertical dashed lines indicate the possible start time of uplift in the summit direction. (a) Precipitation data recorded at a site located 150 m from HARMT. (b) Oceanic tides recorded at Furusato (Fig. 1). The raw data are shown along with a 1-day moving average. (c) and (d) Apparent resistivity data, as shown in Fig. 4. (e) Ground deformation (tilt record) observed in a tunnel at Arimura (Fig. 1). The radial component, which represents the direction of Minami-dake crater, was smoothed using a 1-day moving average. Higher values indicate uplift in the summit direction. (f) Infrasound data recorded at Arimura by low-frequency microphone. Gray hatched area represents a period of continuous ash emissions. (g) Deep low-frequency earthquakes (DLFs) occur in the southern part of Sakurajima at depths of the lower crust. Note that the vertical axis indicates the depth (km) of DLFs. Large and small stars represent DLFs with magnitudes of > 1.0 and < 1.0 , respectively. (e) BL-type earthquakes. (f) A-type earthquakes (volcano-tectonic earthquakes).

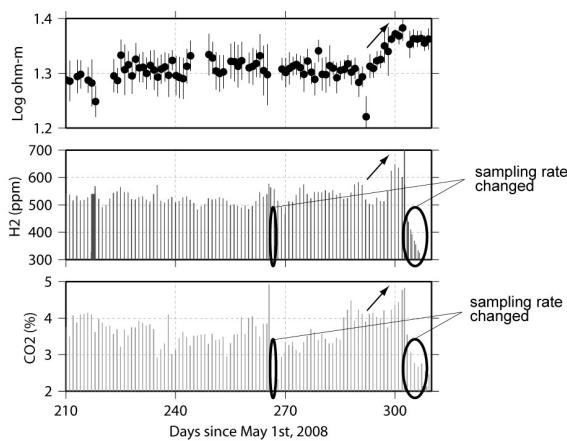


Fig. 6 Comparison between apparent resistivity (Z_{xy}) at KURMT and concentrations of CO_2 and H_2 in borehole gas. Note that the sampling interval was temporally changed to twice daily at days 267 and 304, thereby rapidly exhausting the gas; consequently, the values measured during these periods cannot be compared with those obtained by daily sampling.

4 比抵抗変動の解釈

得られた観測事実をまとめると以下の通りである。
(1) 見掛け比抵抗変動開始と火口方向隆起の開始がおおまかに一致している。(2) 黒神とハルタ山で見掛け比抵抗変動が逆相関を示す。(3) 両観測点間の変動に1週間程度のタイムラグが存在する。(4) 温泉ガスの変動と同期するように見掛け比抵抗が変動する。

Fig. 7に見掛け比抵抗変動の解釈を示す。上昇してきたマグマから脱ガスした揮発性成分が、横方向に移動した結果、浅部地下水に混入し比抵抗変動を引き起こしたと推測した。この解釈によれば(1), (4)の観測事実を説明することができる。また、(3)のタイムラグは脱ガス地点から観測点までの揮発性成分移動距離の違いによって説明することができる。

(4)の逆相関は観測点直下に存在する地下水と揮発性成分の比抵抗値の大小関係によって説明される。KURMT周辺地下は海岸に近いため海水の混入を強く受けていると考えられる。海水の存在は KURMT周辺の比抵抗が著しく低いことからも裏付けられる(Fig. 2)。こうした状況でFig. 7のように揮発性成分が混入すると、比抵抗は相対的に上昇することが期待される。一方、HARMTでは天水起源の地下水が豊富に存在するために揮発性成分が混入すると比抵抗が減少することが期待される。揮発性成分が地下水に混入したにもかかわらず比抵抗が上昇するという解

釈は奇異に思えるかもしれない。しかしながら、太田(1986)は、古里温泉(Fig. 1)で温泉水の比抵抗と温度の連続測定を行い、温度上昇と共に比抵抗も上昇する事例を報告している。こうした変動が南岳噴火前に起こること、古里温泉が海岸の近くに存在することから、マグマからの揮発性物質が海水に混入し、温度-比抵抗上昇を引き起こしたと推測している。

地殻変動と比抵抗変化がほぼ同期して起こることをFig. 7に従って説明するためには、揮発性成分の移動速度として数100~数1000 (m/day) 程度を想定する必要がある。この値は過去に伊豆大島で推測された揮発性成分移動速度 (Sano et al., 1988) に対し1~2桁程度大きい。また、特別な浸透率構造を仮定しない限り熱水流動シミュレーションで再現することは難しい (e.g., Hyba and Ingebritsen, 1997; Hurwitz et al., 2003)。これに対し、我々は太田(1986)と同様に、桜島地下ではfractureが揮発性成分の通り道として機能しており、移動速度が速いのではないかと推測している。実際、桜島の安永噴火、大正噴火では、地震活動の激化から20~30時間後に海岸付近の井戸水が沸騰したことが報告されており (井村, 1998)、マグマ貫入後、脱ガスした揮発性成分は極めて短時間に横方向に移動して地表に到達できることを示唆している。

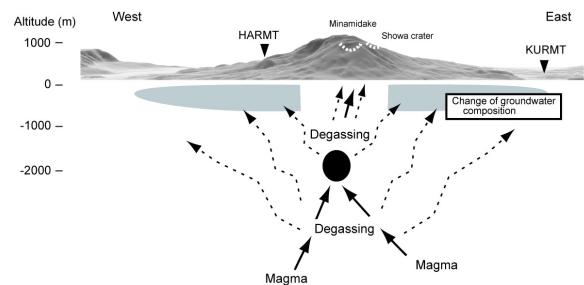


Fig. 7 Schematic model of change in apparent resistivity. The shallow magma chamber and route of magma ascent are inferred from previous studies (Eto and Nakamura, 1986; Kamo, 1989; Hidayati et al., 2007; Tateo and Iguchi, 2009). Solid and dashed arrows indicate the movement of magma and volatiles, respectively. Inverted triangles indicate MT sites. Gray shading indicates the area saturated with groundwater (i.e., mixture of a cold aquifer, hot spring water, and invading seawater).

5. おわりに

本観測の重要な結果は、これまで火口近傍以外では観測が難しいと考えられてきた比抵抗変動が山麓でとらえられたという点にある。これは噴火活動の激化により火口に近づけない場合でも山麓のMT観測により火山地下で進行している現象をとらえられる可能性を示している。今後、他火山での機動観測等に応用していきたいと考えている。本稿では、得られた見掛け比抵抗変動の解釈として、マグマから脱ガスした揮発性成分が、横方向に移動した結果、浅部地下水に混入し比抵抗変動を引き起こしたと推測した。今後この仮説を検証するために、地下水の同位体分析によるマグマ起源成分の定量的調査、熱水流動シミュレーションによるモデルの妥当性の検討を行いたい。また、2010年2月からは観測点を6点に増やし、同様の連続観測を桜島で開始した。今後、この多点観測データも解析し仮説の妥当性を検証していく。

謝 辞

本研究は筆頭著者である相澤広記が京都大学桜島火山観測所在籍中に行われたものである。研究を進めるにあたって観測所スタッフから様々なアドバイスを頂いた。記して感謝したい。解析にあたっては国土地理院江刺観測所の地磁気データをリモートリファレンス処理として使用した。国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所から傾斜計データの提供を受けた。

参考文献

- 井口 正人・高山 鐵朗・山崎 友也・多田 光宏・鈴木 敦生・植木 貞人・太田雄策・中尾 茂・前野 直・長尾 潤・馬場 幸二・大重 吉輝・放生会正美(2008)：桜島および姶良カルデラ周辺におけるGPS観測、第10回桜島火山の集中総合観測報告書(石原和弘編), pp. 53-62,
- 井村隆介(1998)：史料からみた桜島火山安永噴火の推移、火山、第43巻、第5号、pp. 373-383.
- 江頭庸夫・中村貞美(1986)：山頂噴火活動に伴なう地盤変動、第5回桜島火山の集中総合観測報告書(加茂幸介編), pp. 11-22.
- 太田一也(1986)：桜島火山における火山活動に対応した温泉の挙動、第5回桜島火山の集中総合観測報告書(加茂幸介編), pp. 103-114.

- 大場武・平林順一・野上健治・石原和弘・山本圭吾(1999)：桜島火山の地下水・熱水系、京都大学防災研究所共同研究集会「桜島火山の地下水・熱水系に関する研究」報告書(平林順一編), pp. 31-48.
- 撫上勇介(2008)：桜島火山の活動と火山ガス、東京工業大学化学科修士論文, 33pp.
- 立尾有騎・井口正人(2009)：桜島におけるBL型地震群発活動に伴う地盤変動、火山、第54巻、175-186.
- 平林順一・野上健治・撫上勇介・井口正人・味喜大介(2008)：桜島火山の活動と火山ガス組成および土壤からの二酸化炭素ガスの拡散放出、第10回桜島火山の集中総合観測報告書(石原和弘編), pp. 149-164.
- 藤井郁子(2007)：桜島における地磁気観測の可能性、地磁気観測所テクニカルリポート第4巻, pp. 1-7.
- Aizawa, K., W. Kanda, Y. Ogawa, M. Iguchi, A. Yokoo, H. Yakiwara, T., Sugano, Temporal Changes in Electrical Resistivity at Sakurajima Volcano from Continuous Magnetotelluric Observations: Possible Indication of Lateral Magma Degassing, submitted to Earth and Planetary Science Letters.
- Gamble, T.D., Goubau, W. M., Clarke, J., 1979. Magnetotellurics with a remote magnetic reference. Geophysics 44, 53-68.
- Hirabayashi, J., Ossaka, J., Ozawa, T., 1986. Geochemical study on volcanic gases at Sakurajima volcano, Japan. J. Geophys. Res. 91, 12167-12176.
- Hyba, D. O., Ingebritsen, S. E., 1997. Multiphase groundwater flow near cooling plutions. J. Geophys. Res. 102, 12235-12252.
- Hidayati, S., Ishihara, K., Iguchi, M., 2007. Volcano-tectonic earthquakes during the stage of magma accumulation at the Aira caldera, southern Kyushu, Japan. Bull. Volcanol. Soc. Japan 52, 289-309.
- Hurwitz, S., Kipp, K. L., Reid, M. E., Ingebritsen, S. E., 2003. Groundwater flow, heat transport, and water-table position within volcanic edifices: Implications for volcanic processes in the Cascade Range, J. Geophys. Res., 108, 2557, doi: 10.1029/2003JB002565.
- Iguchi, M., Yakiwara, H., Tameguri, T., Hendrasto, M., Hirabayashi, J., 2008. Mechanism of explosive eruption revealed by geophysical observations at the Sakurajima, Suwanosejima and Semeru volcanoes. J. Volcanol. Geotherm. Res. 178, 1-9, doi:10.1016/j.jvolgeores.2007.10.010.
- Ishihara, K., 1990. Pressure sources and induced ground deformation associated with explosive eruptions at an

andesitic volcano: Sakurajima volcano, Japan. In: Ryan M (ed) *Magma transport and storage*. Wiley, New York, pp 335-356.

Kamo, K., 1989. A dialogue with Sakurajima volcano. In Proc. Kagoshima International Conference on Volcanoes, 3-13.

Patanè D., Barberi, G., Cocina, O., Gori, P. De., Chiarabba, C., 2006. Time-Resolved Seismic Tomography Detects Magma Intrusions at Mount Etna. *Science* 313, 821-823, doi:10.1126/science.1127724.

Sano, Y., Nakamura, Y., Notsu, K., Wakita, H. 1988. Influence of volcanic eruptions on helium isotope ratios in hydrothermal system. *Geochim. Cosmochim. Acta* 52, 1305-1308.

Utada H., Yoshino, T., Okubo, T., Yukutake, T., 1998. Seismic resistivity changes observed at Aburatsubo, central Japan, revisited. *Tectonophys.* 299, 317-331.

Electric Resistivity Change of Sakurajima Volcano from Magnetotelluric Continuous Observation

Koki AIZAWA*, Wataru KANDA**, Yasuo OGAWA**, Masato IGUCHI***,
Akihiko YOKOO****, Hiroshi YAKIWARA*****[†], Takayuki SUGANO*

* Earthquake Research Institute, University of Tokyo

** Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

*** Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

**** Graduate School of Science, Tohoku University

***** Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University

Synopsis

Continuous magnetotelluric (MT) measurements were conducted from May 2008 to July 2009 at Sakurajima. Two observation sites were established at locations 3.3 km east and 3 km west-northwest of the summit crater. At both observation sites, the high-quality component of the impedance tensor (Z_{xy}) showed variations in apparent resistivity of approximately $\pm 20\%$ and phase change of $\pm 2\%$, which continued for 20–180 days in the frequency range between 320 and 4 Hz. The start of the period of changes in apparent resistivity approximately coincided with the start of uplift in the direction of the summit crater, as observed by a tiltmeter, which is one of the most reliable pieces of equipment with which to detect magma intrusion beneath a volcano. The concentrations of CO₂ and H₂ within gas sampled from a borehole near the MT site showed a change coincident with the change in apparent resistivity. These observations suggest that the change in apparent resistivity was caused by volatiles exsolved from the rising magma. We speculate that the degassed volatiles migrated not only vertically through the conduit but also laterally through a fracture network, mixing with shallow groundwater beneath sea level and thereby causing the observed resistivity change.

Keywords: Sakurajima volcano, resistivity, Sakurajima, volatile, degassing, groundwater