

# MT連続観測による桜島地下浅部の比抵抗変化 (2)

相澤広記\*・小山崇夫\*・長谷英彰\*・上嶋誠\*

\* 東京大学地震研究所

## 要 旨

2010年2月中旬より7月上旬までの期間、桜島火山の6地点において地磁気-地電流(MT)連続観測を行った。2008~2009年の期間に実施した同種の観測(相澤他, 第11回集中観測報告書)に類似した結果が得られた。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3%程度の変動が全観測点において観測された。変動開始時期には1週間程度のタイムラグが存在し、見掛け比抵抗変動の極性は観測点ごとに異なっていた。変動の極性とバックグラウンドの比抵抗構造(神田他, 2008, 第10回集中観測報告書)を比較したところ、もともとの比抵抗が低い領域と、比抵抗が高い領域では、変動の極性が異なることが示唆された。

**キーワード:** 桜島火山, MT法, 比抵抗, 構造変化

## 1. はじめに

比抵抗は流体に敏感な物理量であり、火山活動によってその構造が変化する可能性がある。実際、伊豆大島火山や三宅島火山では噴火前後の比抵抗変動が報告されている(Yukutake et al., 1990; Zlotnicki et al., 2003)。これらの観測は直流電気探査によるものであり、探査深度や時空間分解能は限られているものの、火口周辺で観測を行ったことにより±50パーセントほどの明瞭な見掛け比抵抗を捉えることに成功し、マグマ上昇や熱水系の変化により比抵抗が変化し得ることを明らかにした。

現在、比抵抗構造を推定するのに最も用いられるのは自然の電磁場変動をソースとするMT法である。人工的に電流を流す手法に対し、大掛かりな装置が必要なく、人工ノイズの少ない地域では深さ数10kmまでの比抵抗構造を推定できる利点がある。ところが、これまでMT法を火山のモニタリングとして適用した例は報告されておらず、その有効性は未知数であった。著者等は2008年~2009年に桜島の黒神地域とハルタ山の2地点でMT連続観測を行い以下の結果を得た。(1) ±20パーセントの見掛け比抵抗変化, ±2度程度の位

相変動が得られた。(2) 変化の開始は山頂方向が隆起する時期に一致した。(3) 両観測点で変動は逆相関を示した。(4) 変化開始時期には1週間程度のタイムラグが存在した。(5) 雨量と見掛け比抵抗変動は強い相関が認められなかった。これらの結果や解釈については第11回桜島火山集中観測報告書(相澤他, 2009)や、投稿論文(Aizawa et al., 2011)としてまとめられている。本稿では2010年2月中旬から、7月上旬まで、新たに行ったMT連続観測の初期的な結果について報告する。

## 2. MT連続観測

観測点は南岳山頂部をとりかこむような配置で6点設置した(Fig. 1)。観測点を増やすことで、桜島内のどこを中心にするかのような変動が起こっているかを明らかにし、見掛け比抵抗変動のメカニズムを考察することが狙いである。

観測は全点で、Metronix社製ADU07を用い、地磁気3成分-地電位差2成分を測定した。ADU07はLinuxベースのデータロガーであり、測定時間、周波数を自由に設定することが出来る。今回の観測では夜間のみ測定とし、サンプリングは32768Hz (1:30-1:32 JST), 1024Hz (2:00-3:00 JST),

32Hz (0:00-5:00 JST)と設定した。本装置はデータを外部 USB 記憶装置に蓄積できるため頻繁に現地へ行きデータ回収をする必要がない。しかしながら、観測当時は器械が開発されて間もなく様々なトラブルが頻発した。そのため1月に1度程度、著者等が現地へ行きトラブル対処やデータ回収を行ったが、期間の1割程度の欠測が生じた。ADU07はLANポートにより通信を行うため、無線LAN等の通信網が整備されれば、将来的にリアルタイムでデータを入手することが可能である。

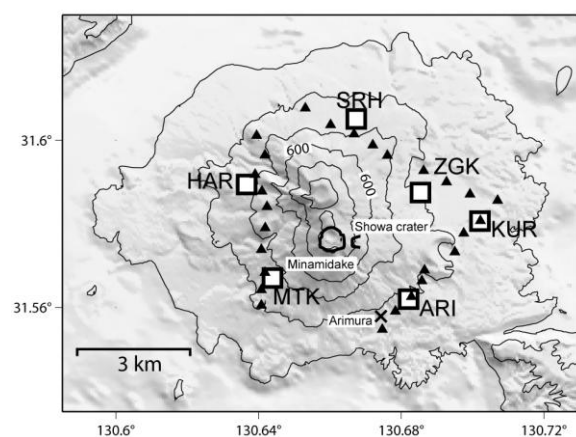


Fig. 1 Locations of sites of continuous MT measurements at Sakurajima volcano (squares). Large three characters indicate site names. Small triangles indicate sites of audio-magnetotelluric (AMT) measurement (Kanda et al., 2008).

### 3. MT インピーダンス

#### 3.1 見掛け比抵抗一位相変化

桜島では1 Hzより低周波の見掛け比抵抗や位相の変動を高時間分解能で求めることは人工ノイズのため厳しいことが、これまでの観測により分かっている。そのため本解析では1 Hzより高周波のデータの時間変化のみ議論する。10 (ohm-m) 地下均質媒質を仮定すると1 Hzの探査深度 (skin depth) はおよそ1.5 kmに相当する。

観測点は注意深く選定したが、得られた時系列データには商用電源の影響が認められた。電場-磁場のスペクトルとも60 Hz、及びその奇数倍の高調波、3次の低調波が認められた。解析ではこれら人口ノイズの影響を小さくするため、時系列に対しフーリエ変換及び逆変換を用いたFFTフィルタを適用し、60 Hzおよびそのharmonics成分をゼロとした時系列を作成した。その後BIRRP (Chave and Thomson, 2004)を適用し相互リモートリファレンス処理 (Gamble et al., 1979)によって

10000~1 Hzのインピーダンス時間変化を求めた。

Fig. 2にS/N比の目安とし南北電場( $E_x$ )、東西電場( $E_y$ )のprediction coherence (観測時系列と理論時系列間のcoherence)を示す。両者は10~300 Hzで概ね0.8を超え、インピーダンスの決定精度が高いことを示唆するのに対し、その他の周波数帯では0.2~0.8となり推定誤差が大きい。また $E_x$ に比べ、 $E_y$ のモードのほうが質の高い結果が得られた。

Fig. 2から明らかなようにデータの質は観測点ごと、周波数ごとに異なる。ここでは予察的に、全観測点とも比較的prediction coherenceの高い80 Hzのデータを抜き出して示す(Fig. 3)。図中、 $Z_{xy}$ と示してあるのが南北電場-東西磁場のインピーダンス、 $Z_{yx}$ と示してあるのが東西電場-南北磁場のインピーダンスである。本稿では簡単のため、見掛け比抵抗のみ示し位相は割愛する。図中、比較のため有村観測坑道の雨量、水管傾斜計の火口方向成分、噴火に伴う空振強度をそれぞれ示した。Fig.2-3とも $Z_{xy}$ に比べ $Z_{yx}$ のほうが精度よくインピーダンスが求まっていることを示している。そこで本稿ではAizawa et al. (2011)と同様に $Z_{yx}$ の見掛け比抵抗変動についてのみ議論することとする。

Fig. 3の $Z_{yx}$ 成分に注目すると、全観測点で見掛け変動が見られる。変動の大きさは±20パーセント程度(Logスケールで±0.1程度)である。ここでは示さないが対応する位相の変動は±3°程度であった。見掛け比抵抗変動で特徴的なのは変動の極性が観測点ごとに異なることである。欠測のためやや分かりにくいだが、2月下旬や6月下旬に注目すると、見掛け比抵抗が上昇するグループとしてHAR, ZGK, SRH、見掛け比抵抗が現象するグループとしてMTK, ARI, KURと分類することが出来る。この極性の違いについては後ほど考察する。

#### 3.2 観測点間のタイムラグ

変動の極性が異なることに加え、重要な観測事実は観測点の変化にタイムラグであることである。場所が近く、変化が良く似ているMTKとARIを例にとると、変化には微小なタイムラグが存在することがわかる。例えば3月上旬や6月中旬等ではMTKの変化がARIに比べ数日~1週間程度先行している。このタイムラグの存在はAizawa et al. (2011)でも指摘された事象であり、変動の解釈に重要な意味を持つ。

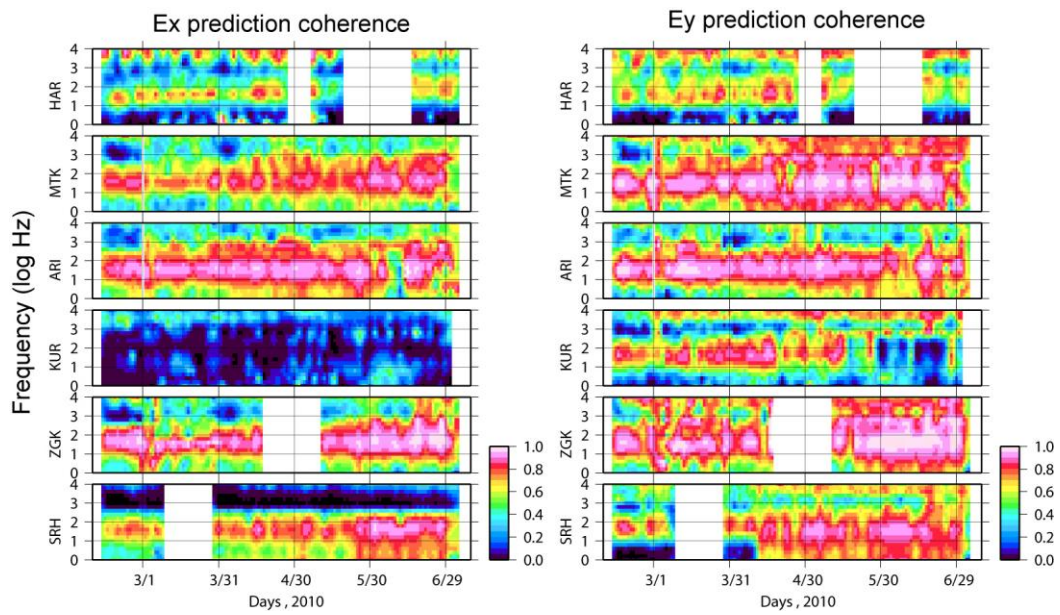


Fig. 2 Temporal changes of prediction coherence that is calculated by observed and calculated time series data.

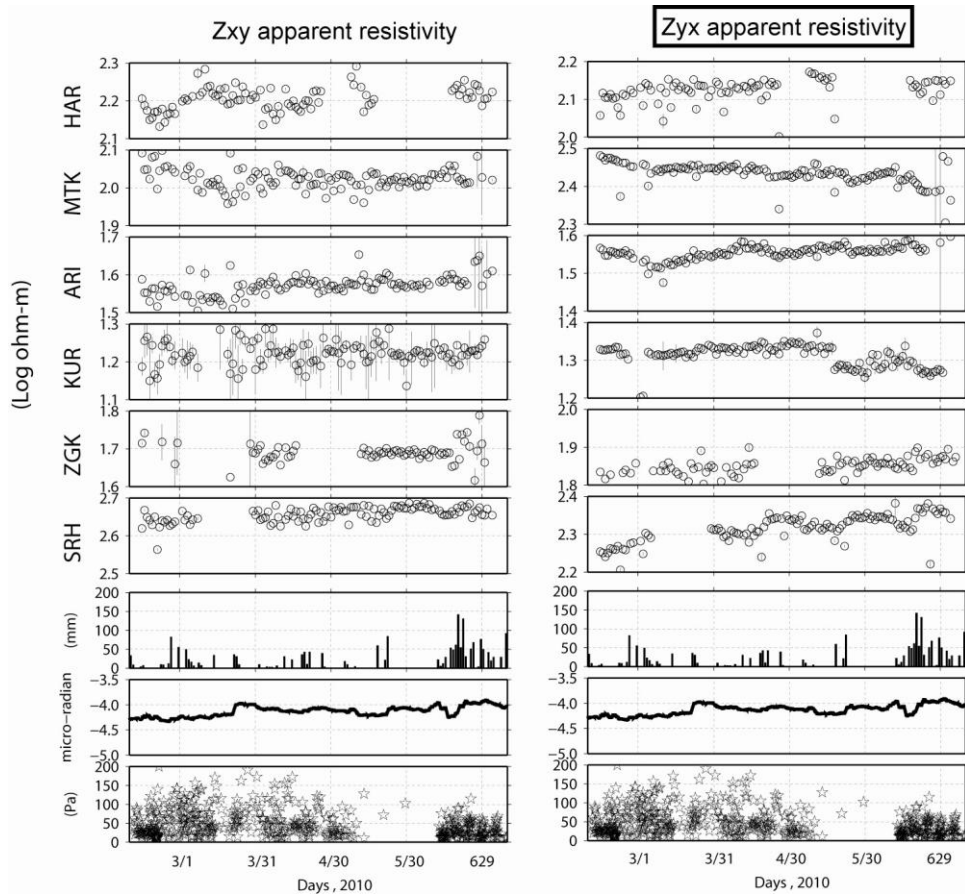


Fig. 3 Temporal variations in apparent resistivity at a frequency of 80 Hz. Also shown are precipitation, tilt, and maximum infrasound with eruptions. All were recorded at Arimura (location is shown in Fig. 1). Tilt record represent a radial component (direction of Minami-dake crater), which was smoothed using a 1-day moving average. Higher values indicate uplift in the summit direction.

MT法では自然の電磁場変動をソースとして用いるが、これには平面波近似が前提となっている。もしこの仮定が崩れれば、地下の比抵抗が変化していてもソースの変化により見掛け比抵抗変動が表れる可能性がある。しかしながらこうした場合、変化は全観測点で同時に現れるはずであり、タイムラグの存在を説明できない。このため観測された見掛け比抵抗変動は、見掛け上のものでなく、地下の比抵抗構造の変化を表していると考えられる。

タイムラグの存在により比抵抗変化の原因も絞ることが出来る。例えば、岩石に応力がかかると間隙流体のネットワークに変化が生じ、比抵抗変動が期待される(Yanagidani and Yamashita, 2007)。ところがこうした変動はそれほど時間をかけず生じるはずであり、数日~1週間程度のタイムラグを説明することはできない。

#### 4 比抵抗変動の解釈

今季間と、2008~2009年度で得られた結果は良く似ている。これまでの観測事実をまとめると以下の通りである。(1) ±20パーセントの見掛け比抵抗変化、±3度程度の位相変化。(2) 見掛け比抵抗変動の極性が観測点ごとに異なる。(3) 観測点間の変動に数日~1週間程度のタイムラグが存在する。

以上の観測の一方で、今季間では、2008~2009年度に見られたような、傾斜計との見掛け比抵抗変動の対応が明瞭でなかった。この理由として、今季間は特に噴火活動が活発であったため、マグマが地下浅部に蓄積されにくく、傾斜計に目立った変化を及ぼさなかったことが考えられる。傾斜計はマグマの上昇量ではなく、上昇量と噴出量の差を表すのに対し、比抵抗変動はマグマの上昇量と関連が深いと考えると一応の説明はつく。

今季間は観測期間が5カ月程度と短期間であったこともあり降雨が比抵抗変動の原因であることを明確に否定する結果は得られなかった。しかしながら2008~2009年度の結果によれば、比抵抗変動の原因が降雨と解釈しづらいため、その他の要因が桜島の比抵抗変動を引き起こしていると考えられる。

比抵抗変動の原因を探るためバックグラウンドの比抵抗構造と、比抵抗変動の極性の比較を試みた。Fig. 4に神田他(2008)による2次元比抵抗構造に今期間のMT連続観測点を重ねて示す。3.1章で議論した比抵抗変動の極性によるグループ分けに応じ、色を変えてMT連続観測点を示した。Fig. 4はバックグラウンドの比抵抗構造と、比抵抗変動の極性に対応があることを示唆している。HAR, ZGK, SRHのグループでは表層の高比抵抗層が厚く、海拔下の低比抵

抗層の値が数10(ohm-m)とやや高めであるのに対し、MTK, ARI, KURのグループでは表層の高比抵抗層が薄く、その下の低比抵抗層の値が数(ohm-m)と低い。

相澤他(2009)や、Aizawa et al.(2011)は、マグマから脱ガスした揮発性成分が、山体内の地下水に混入し比抵抗変動を引き起こしたと推測した。この解釈は比抵抗構造と比抵抗変動の極性の対応関係に矛盾しない。例えば、HAR, ZGK, SRHのグループでは厚い高比抵抗層とその下にやや低比抵抗層が存在しているが、こうした構造は天水起源の地下水が帯水層を形成していると解釈できる。このような状況下で、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。一方、MTK, ARI, KURのグループ下の比抵抗構造は、低比抵抗が顕著なため、海水の混入を強く受けていると解釈できる。こうした状況下では揮発性成分が混入すると、海水の存在比が下がり比抵抗値は上昇すると定性的には解釈できる。同様の事例は太田(1986)による古里温泉の連続測定によっても推測されている。3.2章で述べたタイムラグの存在も揮発性成分が時間をかけて広がっていくことを考えれば定性的には説明可能である。

以上の解釈を採用するならば、今季間得られた見掛け比抵抗変動から、2010年3月上旬、4月下旬、5月下旬、6月下旬から、揮発性成分の量が増加したと推測される。現在のところ、同時期に他の観測データに目立った異常は報告されていないが、比抵抗変動は火山活動に微小な揺らぎがあることを示唆しているのかもしれない。もし解釈が正しいのであれば、全観測点で比抵抗変動が認められるため、揮発性成分の影響は桜島内全域に及んでいることが示唆される。

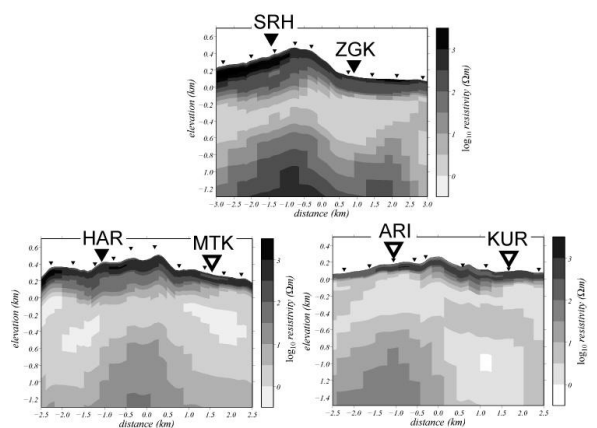


Fig. 4 2D resistivity structure (Kanda et al., 2008). The MT continuous measurement sites in this study (large inverted triangles with characters) are shown on the figures. Black and white indicates the polarity of apparent resistivity change (see explanation on the text).

## 5. まとめと今後の課題

今季間の観測では、新たな器械を導入したにもかかわらず、以前の器械とほぼ同様の結果が得られた。そのため、何らかの要因でMT測定装置の特性がふらつき、見掛け上、比抵抗変動を示した可能性は極めて低い。また、タイムラグの存在から、MT法のソースの問題で、見掛け比抵抗変動が生じたのではなく、地下の比抵抗構造が変化したと考えられる。

今季間で重要な結果は、桜島全域で比抵抗変動が観測されたこと、比抵抗変動の極性とバックグラウンドの比抵抗構造の間に関連があることが示唆されたことである。今後、これらの観測事実が定量的に説明できるか検討する必要がある。解析は現時点でまだ予察段階であるが、今後、定量的な議論のため、Fig. 2に見られる、モードや周波数によるデータの質のばらつきを、何らかの手法により減じることが重要である。このことにより、3次元インバージョンの適用が可能となり、見掛け比抵抗変化から、比抵抗構造の変化を導くことが可能となる。

解釈に関しては、本稿で述べた、微小な揺らぎばかりでなく、Fig. 3のMTKやSRHに見られるような長期のトレンド変化に注目することが有効と思える。こうした変動は短期的な揺らぎに比べはるかに大きいため、別種の観測データと関連が示される可能性がある。今後MT連続観測の常設点を設け、長期的変動と火山活動との関連を調べることが比抵抗変動の原因を解明するために重要と考えられる。

## 謝 辞

本研究の遂行には東京大学地震研究所一般共同研究「広帯域MT連続観測による桜島比抵抗変動源の推定」の援助を受けた。また本研究は「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクト 細目1-3」の一貫として行われた。京都大学桜島火山観測所のスタッフより観測点の設置や悪天候時の注意点など、様々なご指導を頂いた。地元公民館長および地権者様には観測の実施を快諾して頂いた。雨量データ、傾斜計データは国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所から提供を受けた。観測の許可申請に関しては、以下の機関に協力して頂いた。鹿児島地域振興局建設部河川港湾課、鹿児島市役所環境保全課、国土交通省大隅河川国道事務所、鹿児島県環境林務部自然保護課、鹿児島自然保護官事務所。以上、記して感謝します。

## 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: MT連続観測による桜島浅部の比抵抗変化, 第11回桜島火山の集中総合観測報告書, 89-104, 2009
- 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・桜島電磁気探査グループ: 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報告書, 京都大学防災研究所附属火山活動研究センター, 89-104, 2008.
- 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.
- Aizawa, K., W. Kanda, Y. Ogawa, M. Iguchi, A. Yokoo, H. Yakiwara, T., Sugano 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.
- Chave A., D., Thomson, D., J., 2004. Bounded influence magnetotelluric response function estimation, *Geophys. J. Int.*, 157, 988-1006, doi:10.1111/j.1365-246X.2004.02203.x.
- Gamble, T.D., Goubau, W. M., Clarke, J., 1979. Magnetotellurics with a remote magnetic reference. *Geophysics* 44, 53-68.
- Yanagidani, T. and Yamashita, F., 2007. In situ detection of resistivity changes produced by pressurized water-injection at the active fault zone using the AC dipole-dipole method with the GPS synchronized phasesensitive-detection technique, *Geodynamics of Atotsugawa Fault System*, 181-186.
- Yukutake, T., Yoshino, T., Utada, H., Watanabe, H., Hamano, Y., Shimomura, T., 1990. Changes in the electrical resistivity of the central cone, Mihara-yama, of Oshima volcano observed by a direct current method. *J. Geomag. Geoelectr.* 42, 151-168.
- Zlotnicki, J., Sasai, Y., Yvetot, P., Nishida, Y., Uyeshima, M., Fauquet, F., Utada, H., Takahashi, H., Donnadieu, G., 2003. Resistivity and self-potential changes associated with volcanic activity : The July 8, 2000 Miyake-jima eruption (Japan). *Earth and Planet. Sci. Lett.* 205, 139-154.

## **Electric Resistivity Change of Sakurajima Volcano from Magnetotelluric Continuous Observation (2)**

Koki AIZAWA\*, Takao KOYAMA\*, Hideaki HASE, Makoto UYESHIMA

\* Earthquake Research Institute, University of Tokyo

### **Synopsis**

Continuous magnetotelluric (MT) measurements were conducted from February to July, 2010 at Sakurajima volcano. Six observation sites were established at locations approximately 2~3 km away from the summit crater. The sampling frequency were 32Hz (15:00~20:00 UT), 1024Hz (17:00~18:00UT), and 32768Hz (14:30~14:32). By applying the comb filter to reduce the harmonics of 60Hz and the robust MT response function estimation code (Chave and Thomson, 2004), we obtained the impedance tensor in the frequency range of 10,000 ~ 1Hz. The diagonal component of impedance tensor ( $Z_{xy}$ ,  $Z_{yx}$ ) showed temporal variations in apparent resistivity of approximately  $\pm 20\%$  and phase of  $\pm 3\%$ , which is similar to the previous observations in May 2008 to July 2009 (Aizawa et al., 2011, JVGR). The results are also similar to the previous paper in that the polarity of apparent resistivity change is not the same, and in that there are time lags of resistivity change.

**Keywords:** Sakurajima volcano, resistivity, magnetotelluric, structure change