

桜島火山の自然電位と熱水系（第2報）

橋本武志*・田中良和*・西田泰典**・茂木透***

山本圭吾・神田径・平林順一****・石原和弘

*京都大学大学院理学研究科

**北海道大学大学院理学研究科

***九州大学工学部

****東京工業大学草津白根火山観測所

要 旨

桜島火山東部において自然電位分布を測定した。海水面を等電位とみなして過去に得られた電位分布と接続することにより、島を東西に横断する測線で約3分の2の長さにわたって電位分布を得ることができた。桜島の山頂部に向かって電位が高くなる傾向が認められることから、島の中央部地下にその上昇部をもつ全島規模の熱水対流系が存在する可能性が示された。

キーワード：自然電位，流動電位，桜島，火山，熱水系，対流系

1. 本研究の位置付け

自然電位法を火山に適用して地下の流体流動を推定しようとする試みは、近年各地で行われるようになってきている。例えば、Zablocki (1976) はハワイのキラウエア火山の火孔群が数百 mV 程度の高電位を示すことを報告した。彼は、この高電位異常の原因として地下の熱水上昇に伴う流動電位を考えるとともに、VLF-MT や電気探査の結果と総合して、傾いた高温ダイクモデルを提出している。また、この研究は同一測線の繰り返し測定によって、1974 年の割れ目噴火前後に顕著な自然電位変化を捉えた点で注目される。Zablocki (1976) 以後、いくつかの火山で同様の試みがなされ、その多くで噴気地帯や噴火割れ目に対応する高電位異常が見い出されている。その中には、有珠山のように噴火後 20 年近く経過してもなお山頂部の高電位異常が安定して存在し続けている例もあり (Nishida et. al, 1996)，一旦形成された熱水対流系は数年程度の短期間の内には消滅しないことが伺える。しかし、活火山では常に高電位異

常ばかりが検出されるわけではないこともわかってきた。Nishida et. al (1996) は、有珠山、北海道駒ヶ岳、雌阿寒岳、恵山、三宅島における自然電位分布を比較して、電位異常の主たる原因が流動電位であるとする前提のもとに火山水理学的考察を加えている。彼らは、雌阿寒岳や恵山では、それらが分類上の活火山でありながら、顕著な高電位異常が確認できないとしている。彼らはまた、火山における自然電位異常の発現を3つのタイプに分類して、地下の含水層と熱源（マグマ）の深度が、地表における自然電位分布を特徴付けるのだと考えた。三宅島の例では、山頂火口の高電位異常に加えて、山腹の側火口や噴火割れ目付近、あるいは旧期カルデラ縁にあたる場所にむしろ負電位と考えるべき異常が見つかっている。彼らは、こうした場所ではフラクチャーが発達して透水性が高くなっているために、天水の下降流が強いのではないかと推測している。さらに、Hashimoto (1997) は雲仙火山の1991年噴火直後から5年間にわたって自然電位分布の時間変化を追跡しているが、この例では溶岩ドーム出現前後の山頂

部における急激な電位上昇だけでなく、ドーム出現後の周辺部における電位低下が報告されている。これは、熱源の貫入によって対流系が形成され始める際の過渡現象を捉えたもので、周辺部の電位低下は熱源近傍で加熱・放出された地下水を補うために周囲からの「巻き込み」が発生したことを示すものと解釈される。最近では、自然電位異常の大きさと広がりから等価的電流源の深さや電流量、ひいては一定の仮定の下で、流体の流量やそれに伴って放出されるエネルギー量を見積もったり（石戸, 1991）、熱水流動によって生じる流動電位を、媒質の電気抵抗や連結輸送係数などのパラメータを与えて計算機でシミュレートすることも行われるようになってきた（安川・茂木, 1998; 西他, 1998）。さらには、地表の自然電位分布から電流源の分布を推定する自然電位トモグラフィーを行った例もある（Di Maio et. al, 1998）。

このように、自然電位分布やその時間変化から地下の流体流動を間接的に推定する試みは、定性的にも定量的にも一定の成果を挙げており、流動電位の考え方は多くの観測事例をある程度矛盾なく説明することに成功している。しかしながら、かつて1950年代に金属鉱床の探査において盛んに議論された酸化還元反応による電位発生や、熱電気効果などの可能性を省みることなく、測定された自然電位を流動

電位起源であると即断することは危険である。火山の事例で主要項とみなされている流動電位は、多くの場合、さまざまな状況証拠から消去法的に採用された可能性のひとつであるに過ぎず、実際のフィールドで直接的な測定方法と比較して議論し、積極的に流動電位に原因を求めた例はむしろほとんどないとさえ言える。別の手法から推定された流体流動の情報を取り入れ議論した希少な事例として、水理構造が良く調べられたアトサヌプリ火山で巨視的なゼータ電位（界面動電現象の原因となる固液界面における電気二重層の強さを特徴付ける量）を推定した Oyamada et. al (1996) や、地下水の分析と電気探査および自然電位分布から雲仙・眉山周辺の熱水流動を推定しようとした川邊 (1997) などの研究がある。しかし、これらの試みは必ずしも十全とは言えない。例えば、川邊 (1997) は熱水の流路付近で自然電位が低くなるとする仮定の下で論を展開しているが、この仮定が有効かどうかは疑問である。我々は、現時点では、こうした室内実験と野外観測の中間に位置する「野外実験的研究」の事例をもっと積み重ねる必要があると考える。本研究もまた、そのような視点から企画されたものである。

桜島火山では、最近の数十年に亘り断続的にマグマが浅所に貯留していることから、地下ではマグマの熱により熱水対流系が存在しているものと推定さ

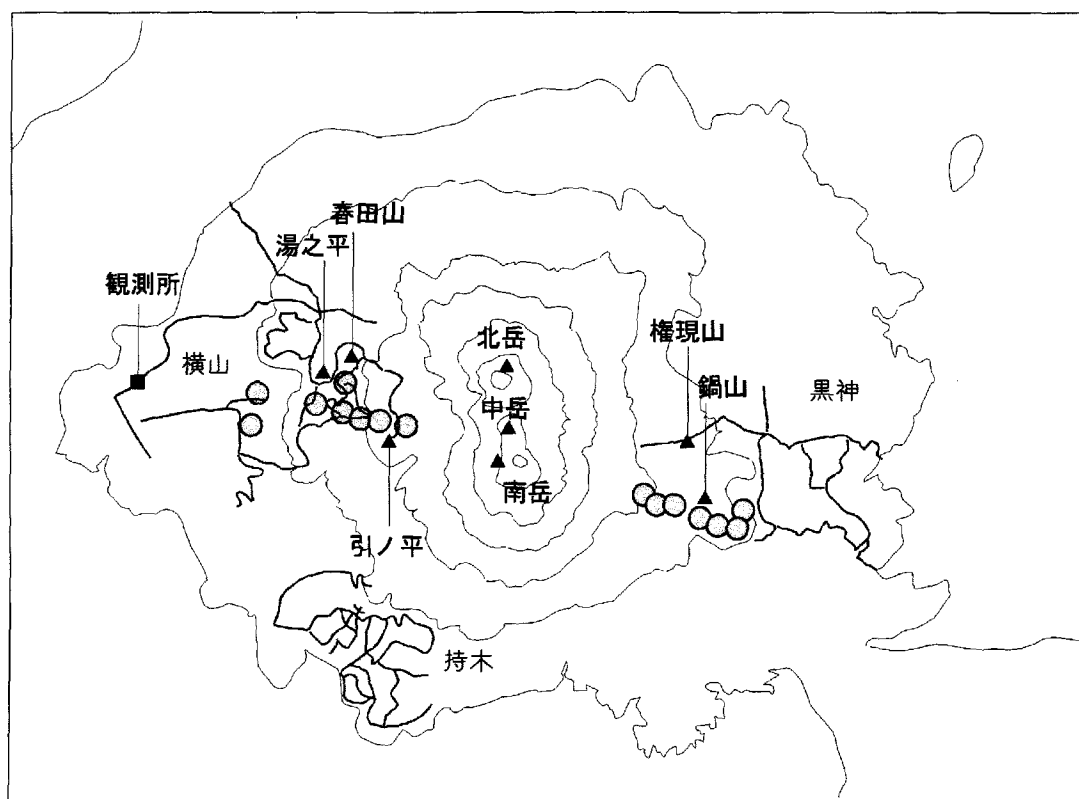


Fig. 1 Survey lines (thick lines) of self-potential in Sakurajima. Circles indicate the locations of craters in 1914.

れる。桜島火山ではまた、従来から地球化学的調査が精力的に行われており、温泉水や土壌ガスの研究から現在の南岳活動に関連したマグマからの揮発性物質がどのような経路で供給されているかが推定されている（平林、私信）。こうした物質科学的手法と併せて、自然電位から推定される水理モデルの妥当性を検証した上で、桜島全島スケールの対流系を考察することが本研究の最終的な目的である。本研究は現在進行中であり最終的な結論にはまだ至っていないが、本稿では経過報告として、現時点で得られている桜島の熱水系に関する知見を、自然電位の立場からまとめる。なお、本研究は平成 9-10 年度の防災研究所特定共同研究「桜島火山の地下水・熱水系の研究」の一部として実施した。

2. 測定地域および測定方法

前報告（橋本他、1998）では、桜島西部地域における自然電位分布を示し、1914 年の大正噴火における割れ目火口に対応した高電位帯とその原因について考察した。桜島火山の全島スケールでの熱水系について知るにはさらに測定領域を拡大する必要がある。理想的には、山頂部を横断する測線を複数取ることが望ましいが、現在の南岳は活動が活発であるため山頂部の測定は危険である。従って、今回は桜島東部地域を測定し、海水面を等電位として前回までの測定結果と接続することによって擬似的に桜島を東西に横断する測線を得ることにした。測線の分布を、これまでのものと併せて Fig. 1 に示す。今回の測定地域は、桜島東部の黒神地区から権現山および鍋山周辺までを含む。図中の丸印は、Omori (1914) および石原他 (1985) を参考にして描いた大正噴火の火口群の位置を示している。大正火口の火口列は南岳を挟んで東西にほぼ対称的に並んでいる。今回の測定を加えることにより、この火口列に沿って桜島をほぼ東西に横断する測線上で山頂部を除く約 3 分の 2 について電位分布を得ることができた。

桜島東部における電位測定は、平成 11 年 1 月 18 日から 20 日にかけて行った。測定にはデジタルテスターを使用し 1mV の単位まで読み取った。電極には鉛-塩化鉛電極と銅-硫酸銅電極のペアを用い、50m 長の電線でいわゆる「かえるとび」方式によって電極を交互に進めながら、2 点間の電位差を測定・累積する方法を採用した。50m 間隔の各測定点では近接した 3 箇所深さ 5cm 程度の接地穴を掘り、それらの電位の平均値を用いた。自然電位測定に併せて、同時期に黒神・鍋山地域で 2 次元電気探査を実施しているがこれについては稿を改めて報告する。

3. 測定結果

まず、桜島東部黒神地区の海岸線から権現山を経て南岳中腹に至る東西方向の測線に着目する。この測線上の電位分布を Fig. 2 に示す。海岸から権現山までは地形標高に対して電位が逆相関となっていることが見て取れる。権現山を越えて南岳に近づくとこの傾向は逆転し、山頂部に向かって電位が高くなる。次に、鍋山の東南端から黒神河原までの南北測線の電位分布を Fig. 3 に示す。この測線では、黒神河原の中央部（図中の 2000 m 付近）で 50 mV 程度の高電位が認められる以外は、ほぼ電位が標高

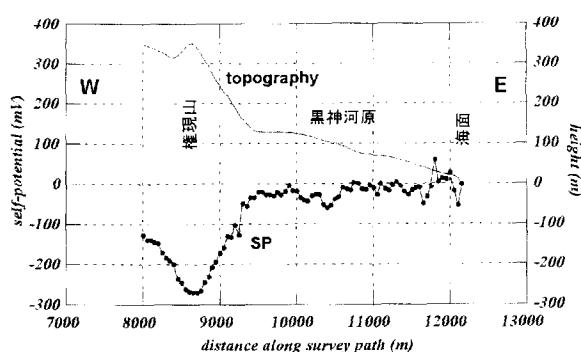


Fig. 2 Self-potential profile along the EW line of eastern Sakurajima, Kurokami area.

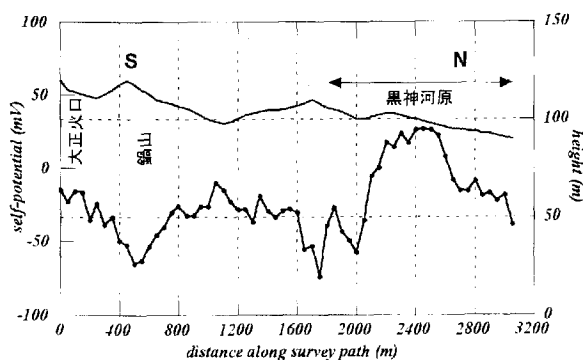


Fig. 3 Self-potential profile along the NS line of eastern Sakurajima. Potential values are referred to the sea.

に対して逆相関となり、「地形効果」的であるとみなすことができる。但し、この測線上では標高変化が小さいため、この傾向は東西測線に見られるほど明瞭ではない。なお、この測線の南端部は Fig. 1 に示したように、大正噴火の火口列の最低部付近に位置している。

上述の東西および南北測線上の電位と標高の関係を見るために、標高対電位のプロットを Fig. 4 に示

す。これによれば、標高 300~350 m にプロットされた一部の集団だけがそれ以外の点と異なる挙動を示していることがわかる。この集団は権現山から南岳に向かうルートに位置するデータ群である。この集団を除く測定データがこの地域の「地形効果」を代表していると考えて、その勾配を求めるとおよそ -1 mV/m となる。この値は、桜島西部地域および南西部地域で推定されたものとほぼ等しい。従って、桜島における「地形効果」の勾配は地域に関わらずほぼ -1 mV/m の程度であると考えられる。

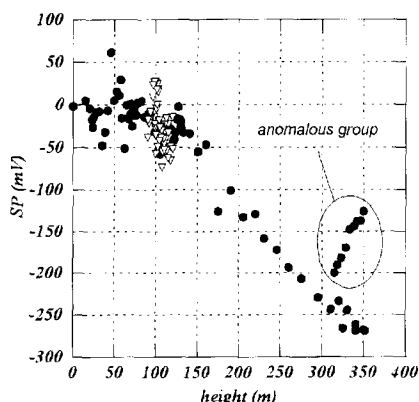


Fig. 4 A V-H diagram in the eastern Sakurajima. Horizontal and vertical axes denote the topographic height and SP, respectively. Circles and triangles indicate the measurements on EW and NS lines, respectively.

4. 考 察

4.1 全島スケールの電位分布

全島スケールの電位分布を見るために、橋本他 (1998) で報告した桜島西部の電位分布と、今回測定した東部の東西測線における電位分布を接続する。まず、西部地域の等電位線図を Fig. 5a および 5b に示す。特に地形効果補正後の Fig. 5b で、大正噴火の火口列に沿って高電位帯の分布が明瞭である。



Fig. 5a An equi-potential map in the western Sakurajima (before topographic correction).



Fig. 5b An equi-potential map in the same area (after topographic correction). (after Hashimoto et. al, 1998)

橋本他 (1998) は、この高電位が大正噴火によって地下に形成された熱水対流の上昇域に対応する可能性が高いとしている。ここでは、図中の点線に沿ってコンターから電位の再読み取りを行い、海面上の測定点における電位をゼロとして、桜島東部の東西測線 (Fig. 2) と接続した。両者をまとめたのち、地形標高と併せて表示したものが Fig. 6a および 6b である。図の作成にあたって線形地形効果補正の勾配は -1 mV/m とした。

地形効果補正前の Fig. 6a では、引ノ平火口のすぐ西側で電位の下がりが見られるが、Fig. 6b では地形補正によって除去されていて、全体として山頂側が高電位になっていることがわかる。また、前節でも指摘した如く、権現山よりも山頂側で電位の高まりが認められる。従って、桜島火山を全島規模で見ると、山頂部にひとつの大きな高電位異常が推定される。仮に Fig. 6b を東西両側から直線内挿した場合、ピークの電位は海面に対して 700 mV 程度の正電位と推定される。このような電位分布から考え得る最も単純なモデルは、桜島の中心部地下に上昇域をもつ全島スケールの熱水流動系であろう。しかし、最も重要な山頂部の測定が欠落しているため、対流系の特徴的深さや流量など詳しいことをここで論じることにはあまり意味が無い。また、ここでは大正噴火の火口列にほぼ沿った東西測線のみの情報をもとに考察を加えたが、全島スケールの考察を定量的に行うためには、火口列に直交する南北方向の測線についてもデータを集め、電位異常のパターンを明らかにしておく必要がある。

4.2 東西両地域の火口列

先述の如く、桜島火山には島の東西にそれぞれ大正噴火で溶岩を流出した火口列が存在する。西の火口列に対応して検出された高電位帯は、東の火口列にも存在するのであろうか。鍋山から黒神河原にか

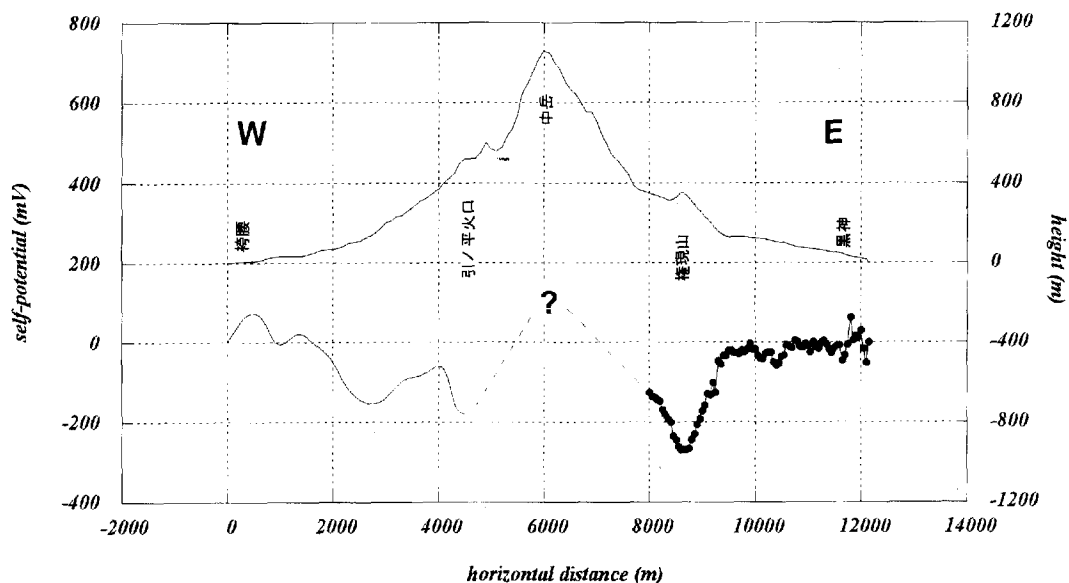


Fig. 6a Self-potential profile along the EW line across the Sakurajima volcano (lower plot). Horizontal axis is distance in meters. The upper plot shows the topographic height along the same line.

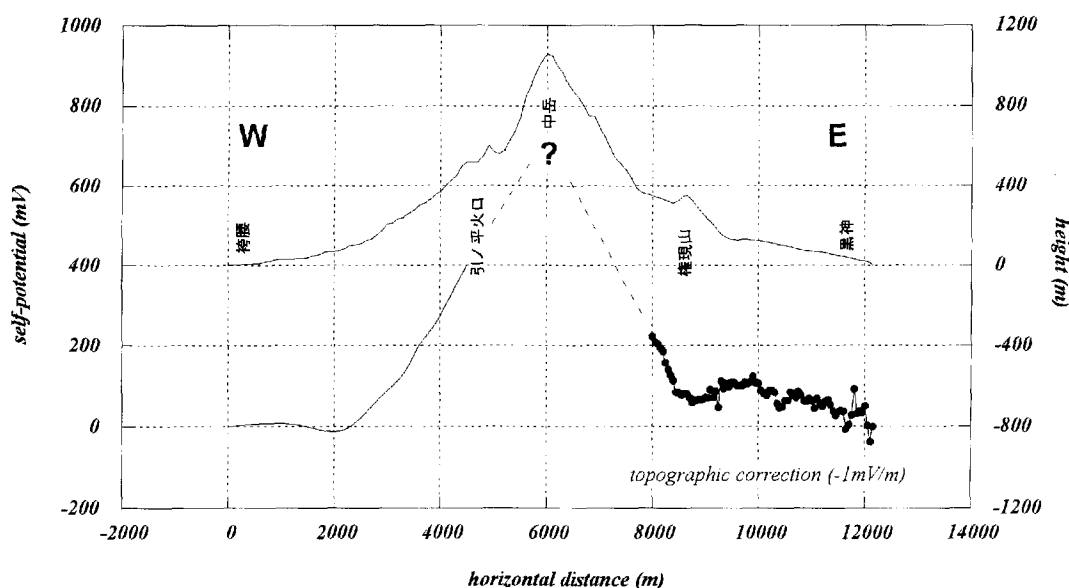


Fig. 6b Self-potential profile with a linear topographic correction along the same line as Fig. 6a.

けての南北測線 (Fig. 3) を見ると、測線の南端付近の数百 m でやや電位が高くなる傾向が認められるものの、それほど顕著とはいえない。そこで、火口の位置関係を比較してみると、今回我々が接近した鍋山東南端の火口は、東の火口列の中でも最低部に位置しており、西の火口列で高電位帯が検出された位置よりも 100~200 m 程度標高が低く、かつ山頂火口からも遠いことがわかる。仮に、島の中心に単一の対流上昇部を想定するならば、中心から離れた地点で電位異常が小さいのは当然と考えることもで

きる。東の火口列でもさらに山頂に近い部分では、高電位となっている可能性は残されているので、今回の結果から東西の火口列の差異について議論するのは難しい。

南北測線ではむしろ黒神河原の中央部に見られる 50mV 程度の高電位域の方が顕著である。黒神河原では同時期に 2 次元電気探査を実施しているので、この高電位については比抵抗分布と併せて稿を改めて議論したい。

4.3 媒質の不均質と「地形効果」について

本稿では、「地形効果」を、標高に対する1次の補正によって除去している。この方法は簡便であるため一般にしばしば利用されるが、定量的な解釈のためには必ずしも有効とはいえない場合がある。通常、自然電位におけるいわゆる「地形効果」は、重力による地下水のポテンシャル流が流動電位として現れたものであると考えられることが多い (Ishido, 1989)。この考え方によれば、地形高所は天水の浸透域、地形低所は湧出域となるため、自然電位には地形標高に対して負の依存性が生じて、高所では相対的に負電位となる。この機構は数値計算によっても確かめられている。例えば、安川・茂木 (1998) は大地の浸透率、連結輸送係数および比抵抗が地形効果にどのような影響を与えるかを調べるとともに、一般に不均質媒体では自然電位の標高に対する負の依存の線形性が崩れることを指摘した。さらに彼らは、他の情報が何も無い地域に対して自然電位のみを測定しても、アノマリーが何を意味しているかを判断することは難しく、電位データのみから流体の上昇ゾーン等を推定することには要注意であるとしている。

桜島の場合についてもこの指摘は重要である。例えば、海岸に近い扇状地と山間部を比較すれば大地の比抵抗は一般に扇状地の方が低いであろうから、海岸から山頂に向かって地形効果の勾配は大きくなるのが自然であろう。このことは、地形効果の明瞭な山間部のデータを重視してその勾配を見積もった場合、線形補正を施すと、低地部の電位が実際よりも相対的に低いと誤認する危険があることを意味する。このように、「地形効果」に局所性があることには十分留意しなければならないが、重力で駆動された流動電位による地形効果は、不均質媒体であってもやはり基本的なパターンとしては山頂部が低電位、山麓部が高電位となり、この傾向が逆になることはない。これは安川・茂木 (1998) に示された例からも明らかである。ただし、重力によるポテンシャル流に加えて熱対流が付加された場合の流動については時間変化を含めて単純でないことが予想される。従って、今後、定量的な議論を進めるにあたって、現状で知りうる限りの水理的、電気的情報を採り入れた数値計算による検証を行うことが必要である。

5. まとめ

桜島火山東部において自然電位分布を測定した。海水面を等電位とみなして過去に得られた電位分布と接続することにより、擬似的に桜島を東西に横断

する測線に沿った電位分布を得た。山頂火口に向かって電位が高くなる傾向が認められることから、島の中央部地下にその上昇部をもつ全島スケールの熱水対流系が存在する可能性が示された。定量的議論のためには測定地域をさらに拡充するとともに、自然電位の数値計算と物質科学的研究の成果を考慮に入れて、考察を進める必要がある。

本研究を遂行するにあたり、桜島観測所員の皆様ならびに桜島住民の皆様にお世話になったことを謹んでお礼申し上げます。

参考文献

- 石戸経士 (1991): 自然電位から推定される火山地域の地下流体流動, Conductivity Anomaly 研究会論文集, pp. 23-30.
- 石原和弘, 井口正人, 加茂幸介 (1985): 桜島火山の溶岩流 (II) —大正溶岩流のシミュレーション—, 京都大学防災研究所年報, Vol. 28, B-1, pp. 1-11.
- 川邊 洋 (1997): 雲仙・眉山周辺における熱水の流動, 火山, Vol. 42, No. 5, pp. 359-366.
- 西祐司, 石戸経士, 松島喜雄 (1998): 青ヶ島火山における自然電位分布: 調査結果及び地熱系シミュレーションによる解析, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, pp. 130.
- 橋本武志, 田中良和, 茂木透, 西田泰典, 大羽成征, 山本圭吾, 石原和弘 (1998): 桜島火山西部の自然電位と熱水系, 京都大学防災研究所年報, Vol. 41, B-1, pp. 145-151.
- 安川香澄, 茂木透 (1998): 地下水流動に伴う自然電位異常に対する地形の効果 —数値モデリングによるアプローチ—, 物理探査, Vol. 51, No.1, pp. 17-26.
- Di Maio, R., Mauriello, P., Patella, D., Petrillo, Z., Piscitelli, S. and Siniscalchi, A. (1998): Electric and electromagnetic outline of the Mount Somma-Vesuvius structural setting, J. Volcanol. Geotherm. Res., Vol. 82, pp. 219-238.
- Hashimoto, T. (1997): Self-potential changes and subsurface hydrothermal activity accompanying the 1990-1995 eruption of Unzen volcano, J. Geomag. Geoelectr., Vol. 49, pp. 977-993.
- Ishido, T. (1989): Self-potential generation by subsurface water flow through electrokinetic coupling, in Lecture notes in earth sciences, Vol. 27, Detection of subsurface flow phenomena, Springer Verlag, pp. 121-131.
- Nishida, Y., Matsushima, N., Goto, A., Nakayama, Y.,

- Oyamada, A., Utsugi, M. and Oshima, H. (1996): Self-potential studies in volcanic areas (3) —Miyake-jima, Esan and Usu—, J. Fac. Sci., Hokkaido Univ. Ser. 7, Vol. 10, pp. 63-77.
- Omori, F. (1914): The Sakura-Jima eruptions and earthquakes I [general account], Bull. Imperial Earthq. Investigation Committee, Vol. VIII, No. 1, pp.1-34.
- Oyamada, A., Oshima, H., Nishida, Y., Goto, A. and Furukawa, H. (1996): Self-potential studies in volcanic areas (4) —an attempt to estimate in-situ value of the electrokinetic coupling coefficient—, J. Fac. Sci., Hokkaido Univ. Ser.7, Vol. 10, pp. 79-87.
- Zablocki, C. J. (1976): Mapping thermal anomalies on an active volcano by the self-potential method, Kilauea, Hawaii, Proc. 2nd U. N. Sympos. on *The Development and Use of Geothermal Resources*, San Francisco CA. U. S. Govt. Printing Office, Washington, D. C., Vol. 2, pp. 1299-1309.

Self-Potential and Hydrothermal System in Sakurajima Volcano (2)

Takeshi HASHIMOTO*, Yoshikazu TANAKA*, Yasunori NISHIDA**,
Tohru MOGI***, Keigo YAMAMOTO, Wataru KANDA,
Jun'ich HIRABAYASHI**** and Kazuhiro ISHIHARA

* Graduate School of Science, Kyoto University

** Graduate School of Science, Hokkaido University

*** Faculty of Engineering, Kyushu University

**** Kusatsu-Shirane Volcano Observatory, Tokyo Institute of Technology

Synopsis

We conducted a self-potential survey in the eastern part of Sakurajima volcano. We combined the SP data with those of previous studies by assuming the equi-potential of the sea water. Consequently, we have obtained a SP profile across the Sakurajima from west to east, though the active summit area still remains to be measured. After the linear topographic correction, we found that the SP increases toward the summit of the volcano. It suggests a large hydrothermal convection cell of a whole-island scale with its upwelling part under the central vent.

Keywords: self-potential, streaming potential, Sakurajima, volcano, hydrothermal system, convection