

桜島火山西部の自然電位と熱水系

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

* 京都大学大学院理学研究科

** 九州大学工学部

*** 北海道大学理学部

要 旨

桜島火山西部の大正噴火割れ目のやや北側に帯状の自然電位異常が検出された。一方、この異常を横切る測線での直流電気探査によって、爆裂火口である引ノ平の地下に高抵抗体が、高電位部の地下には低抵抗体が存在することが明らかになった。これらの結果から、この高電位異常は地下における熱水対流の上昇部に対応しており熱水の流動は溶岩の固結した火口ではなくそれに隣接した破砕域で卓越していることが推察される。

キーワード：自然電位、熱水系、桜島、火山、電気探査

1. はじめに

桜島山頂火口では 1956 年以降頻繁に溶岩が貯留していることが観察されており、火口直下には断続的ではあるが 40 年にわたりマグマに満たされた火道が存在すると考えられている。このように長期間滞留したマグマは地下水を加熱し、その周囲に熱水系を形成しているものと考えられる。大地の比抵抗や地震波速度など媒質の静的な構造だけではなく、動的な側面である物質流動をとらえることは熱水系を理解する上で有用である。本研究では、地下の流体流動を推定する一つの手法として地表において自然電位を測定した。研究の最終目的は、桜島火山の自然電位分布から全島規模での熱水の動きや対流の規模を推定し、地下から地表への熱放出過程におけるエネルギー分配や熱収支問題を考察することにある。また、並行して行われている地球化学的調査とも連携を取ることで、推定された水理モデルの妥当性を互いに検証できるものとする。

2. 自然電位の空間分布

2.1 測定の諸元

爆発的な噴火を伴う活動が続けている桜島火山において、現時点で山頂部を含む全島の自然電位分布を調査することは困難である。そこで本研究では手始めに桜島西部の中腹から海岸にかけての地域をその調査対象とした。調査領域は Fig. 1 に示される A および B の地域である。調査は平成 8 年 11 月 11 日から 16 日と、平成 9 年 5 月 7 日から 13 日の二つの時期に行った。本調査における測定では、固定電極として鉛-塩化鉛電極、移動電極として銅-硫酸銅電極を使用した。電線は全長 500 m のものを、電圧計には携帯型のデジタルテスターを使用して 1 mV の単位まで読みとった。測定の手順を簡単に説明する。まず、ある地点を電位の基準点として 10 cm 程度の深さに鉛-塩化鉛電極を埋設する。その後電線を延展しつつ原則として 50 m 毎に銅-硫酸銅電極を接地して両電極間の電位差を測定する。電線を延展しきった時点で巻き取り、最終地点を次の基準点として鉛-塩化鉛電極を埋設するという作業を繰り返す。ここで固定電極と移動電極に異なる種類のペアを使用した理由は、鉛-塩化

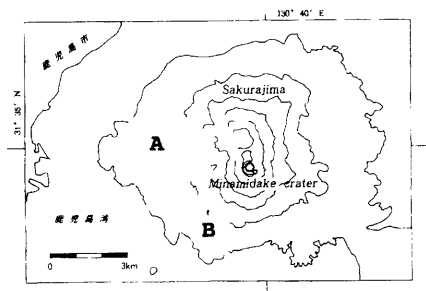


Fig. 1 Survey area of the self-potential in Sakurajima. The surveys were conducted in 1996 and 1997.

鉛電極と銅-硫酸銅電極の間にはもともと電極の種類に起因する固有の電位差があり(鉛側が 500 mV 程度高電位)、測定中に何らかのトラブルで電線が切断されたり電極の接地状態が損なわれた場合、ただちにそれが電位の乱れとして認識できるという利点があるためである。また、各測定点では、原則として近接した3カ所に深さ 5 cm 程度の接地穴を掘り、それらの電位の平均値を採用するという処理を施している。こ

れは、非常に局所的な電位の異常によるデータの乱れを防ぐためである。

2.2 測定結果

Fig. 1 のA地域における測定点の分布を Fig. 2 に示す。これは、東は引ノ平、春田山を含み、西は大正溶岩域を経て火山観測所に至る地域である。これら 511 箇所の点で測定された電位を火山観測所前の測点(TN225)を基準として等値線図にしたものを Fig. 3 に示す。等値線の単位は mV である。この電位分布図から一見してわかるように、標高の高い場所では電位が低くなっている。この傾向は一般に標高差の大きな地域でしばしば観測されるもので、自然電位の「地形効果」とか「標高相関の電位」などと呼ばれている。いわゆる地形効果は、高所から低所への地下水の流下に伴う流動電位がその原因ではないかと考えられている。これ以外にいくつか特徴的な点を列挙してみると以下の如くである。

- (1) この地域における「地形効果」の勾配は、おおよそ -1 mV/m の程度である。
- (2) 湯之平、引ノ平には地形の高まりに対応する低電位の極が見られる。また、湯之平の北西側にも一つの



Fig. 2 Measurement points of the self-potential in the survey area-A (total 511 points).

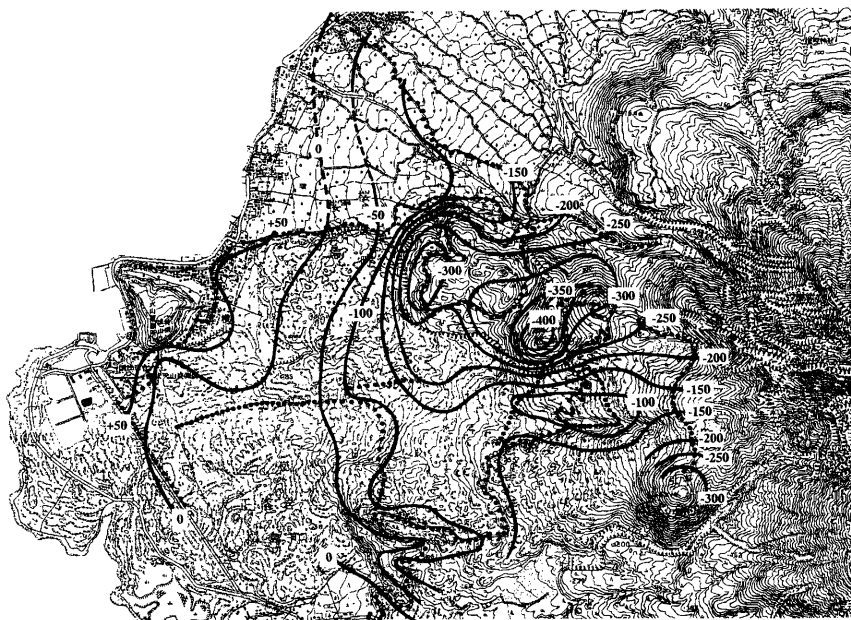


Fig. 3 Self-potential distribution in the area-A. SP values are given in units of millivolts. The point of voltage reference is at the volcano observatory.

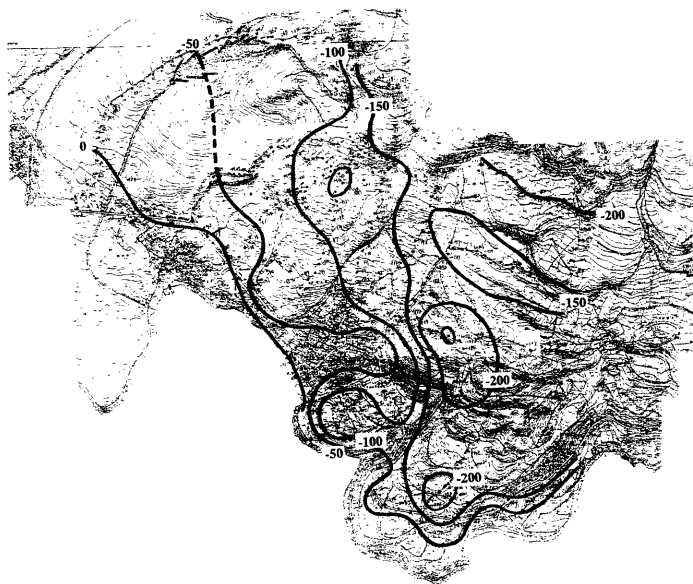


Fig. 4 Self-potential distribution in the area-B. Dots indicate measurement points (total 351 points). SP values are given in units of millivolts. The voltage reference is the sea water.

低電位の極が認められる (-300 mV の等電位線)。これに対して、春田山には低電位の極は認められない。

(3) 湯之平と引ノ平の間の谷部に帯状に電位の高い領域が認められる (-100 mV の等電位線)。

次に、Fig. 1 のB地域 (持木地区) における測定点 (351 点) と電位の分布を Fig. 4 に示す。この地域には海岸付近に温泉が湧出しており、山側から海側に向かって温泉水の流下する経路が推定されている。こうした温泉水の流路が自然電位の分布から推定できるかどうか今回の調査の目的の一つであった。電位の基準は海岸の点 (TN33) にとっている。この地域における電位分布の特徴は以下の如くである。

(4) A 地域と同じく基本的に標高相関の電位分布が卓越しており、その勾配は -1 mV/m の程度である。

(5) 調査地域の東寄り中腹部にやや電位の低い部分が認められる他は、特定の部分に地下水の流路を示唆する顕著な電位分布の異常は認められない。

(6) この地域には、地震観測や水位観測のために設けられたいくつかの井戸があるが、それらの井戸の近傍 (半径 10m 程度以内) では 100 mV を超す異常な低電位が観測された。こうした低電位は金属ケーシングの腐食による酸化還元効果がその原因であろうと考えられる。

2.3 地形効果の補正

前節に述べたように調査地域の電位分布には標高相関の成分が卓越している。それ以外の成分を取り出し考察するために標高補正を行う必要がある。ここでは、A 地域について以下のような補正を試みる。

Ishido (1989) の単純化された地形効果モデルによ

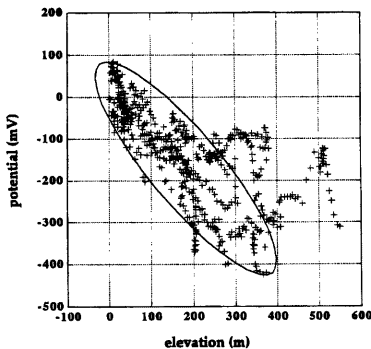


Fig. 5 Relation between the topographic elevation (horizontal axis) and the self-potential (vertical axis) in the area-A. The members in an ellipse has approximately a linear correlation.

れば、標高と自然電位の間には線形関係がある。ここでは、第1次近似としてこのような線形関係を仮定して標高差の補正を試みる。A 地域における全測定点の標高と電位の関係を Fig. 5 に示す。大まかな傾向としては前節に述べたように標高が高くなるに従って低電位となっているが、山頂に近い部分ではその傾向から外れるものも認められる。比較的線形性の良い中腹部から海岸にかけてのデータ (楕円で囲った部分) を用いて勾配を決定するとその値は約 -1 mV/m となる。これによって補正を施した電位分布を Fig. 6 に示す。ここに示された電位分布が地形効果以外の成分であると考えて以下の考察を進める。

前節 (3) において、湯之平と引ノ平間の谷地形部に帯状の高電位域が認められることを指摘した。この部分は、Fig. 7 に示した大正噴火時の割れ目とほぼ同じ位置にある。一般に噴火割れ目や噴火口に対応して自然電位の異常が観測されることがあるが、異常のあらわれ方は高電位になる場合 (例えば、Kilauea 火山 (Zablocki, 1976)) と低電位になる場合 (三宅島 (Nishida et al., 1996)) がある。前者の場合、地下に熱水対流があつて高電位部分に上昇流が想定される。後者の場合は高透水性の構造に沿って天水が浸透することにより低電位となると説明されている。桜島西部地域では割れ目部分が高電位になっているので前者の可能性はあるが、媒質の比抵抗や浸透率の不均質の効果も考慮すべき項目として残されている。ただ、この高電位は標高補正を施しても消えずに残っているので単純な地形効果では説明できないことがわかる。補正後の電位分布を詳細に見ると、東西に伸びる帯状の高電位は Fig. 7 の割れ目よりもやや北側にその中心軸があることがわかる。また、その極は、割れ目火口の東側への延長に位置する爆裂火口、引ノ平付近にあることが見て取れる。そこで、次の段階として、引ノ平火口付近に南北に測線を設けて帯状の高電位部分を横切る形で直流電気探査を実施し、大地の比抵抗と自然電位の異常がどのように対応しているのかを調べることにした。

3. 引ノ平における直流電気探査

平成9年12月24日から27日にかけて引ノ平火口付近で南北に測線をとって、直流電気探査を実施した。測定には千葉電子製高密度電気探査装置を用いた。測線は全長 400 m とし、10 m 間隔で金属製の電極を配置してさまざまな電極の組み合わせで探査深度と水平位置を変化させながらエルトラン配列とウェンナー配列の測定を行った。それぞれの電極の組み合わせ毎に 1/4 秒 サイクルの交代直流を5回スタッキング

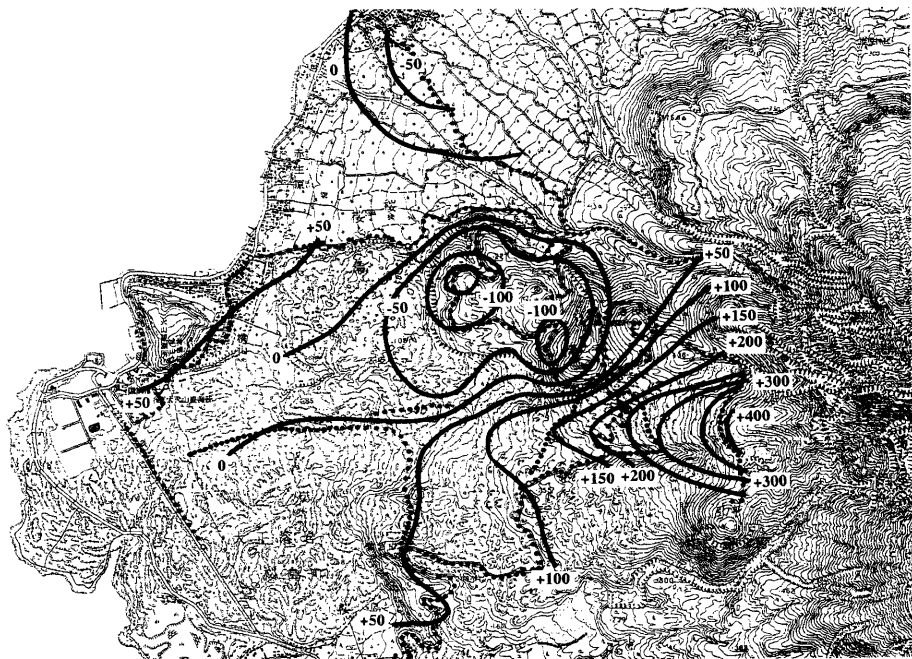


Fig. 6 Self-potential distribution in the area-A after a linear topographic correction.

した波形を記録して測定値とした。

得られた波形から交代直流の振幅を読みとり、上記2種の電極配列を組み合わせた2次元インバージョン(内田, 1993)を用いて比抵抗断面を得た (Fig. 8)。引ノ平火口は西側に開いた馬蹄型をしており探査測線

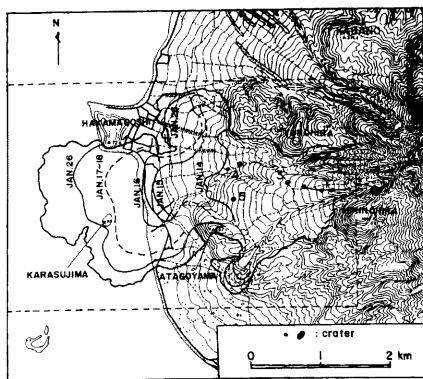


Fig. 7 Locations of craters and the progress of the 1914 lava flows on the western part of Sakurajima (after Ishihara et. al, 1985).

の南端部 300~400 m に位置している。測線の北側は丘陵になっており地表には大小の溶岩塊が散在する。比抵抗断面図を概観すると測線の北側と南側で大まかに電気構造が異なっていることがわかる。測線の北側では表層の 50 m 以浅に 100 ohm-m から 1 kohm-m の比較的高抵抗の層が分布し、その下部に低抵抗域が見られる。最下部での比抵抗値は 10 ohm-m 以下となっている。この部分が地表における自然電位の高電

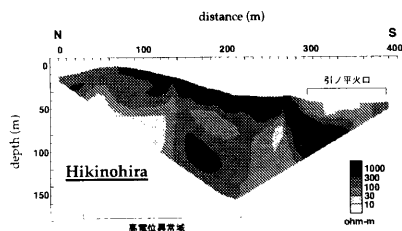


Fig. 8 A resistivity cross-section across the banded SP anomaly nearby Hikinohira crater obtained by an DC electric sounding. The inversion program invented by Uchida (1993) was applied.

位部分に対応していることを考慮すると、ここにみられる低抵抗域はさらに深部からの地熱流体の上昇に関連したものである可能性が高い。一方、表層では溶岩塊の積み重なりによる間隙の多い構造が高抵抗をもたらしていると考えられる。これに対して測線南部の引ノ平火口では表層の 20 m 程度が低抵抗でその下に 1 kohm-m を上回る高抵抗体が存在する。この高抵抗体の北側に再び低抵抗域が隣接している（水平位置約 250 m 地点）。おそらく、引ノ平火口の表層に存在する低抵抗層は火口内に堆積した火山灰で、その下部に位置する高抵抗体は固結した溶岩に対応しているものと推定される。北側に隣接する部分が低抵抗体であることは、この部分が大正期あるいはさらに古い時代の溶岩の貫入で破砕され、地熱流体が浸透していることを示唆している。上述した 3 つの低抵抗域のうち引ノ平火口の北側にある 2 つは、やや低抵抗の高い領域で区分されているように見えるが、地表における自然電位の分布はこの部分ではなめらかであることを考えると、両者は深部ではつながっており、自然電位異常の起源となっている共通の熱水系に端を発するものであろう。

4. 考 察

桜島島内における地下水、温泉水の分析（太田・露木, 1977）によれば、A 地域は淡水（天水）性地下水、B 地域は温度 45℃ 程度の温泉水であり、両地域は異なる地下水系に属すると考えられる。こうした水質の差異が地形効果の勾配に影響を与えているかどうかという視点から両地域の電位分布を比較してみる。圧力勾配に対する電位勾配の係数（流動電位係数）は、 $\varepsilon \zeta / \sigma \mu$ で表される。ここで ε は水の誘電率、 ζ はゼータ電位、 μ は水の粘性率、そして σ は液相および固相の平均的電気伝導度である。従って、一般に流動している流体の電気伝導度が高くなると流動電位は小さくなる傾向がある。いわゆる地形効果も、地下水が高所から低所に向かって流動することで生じる流動電位の一種と考えられるので、そこに流動する流体の性質によってあらわれ方が異なることが予想される。ところが、両地域における地形効果の勾配は、いずれも -1 mV/m の程度であって顕著な差異はない。流体の電気伝導度は、B 地域の方が大きいと思われるが、流動電位係数に大きな違いがないとすると、電気伝導度以外のパラメタ（例えばゼータ電位）がその効果を相殺している可能性も考えられる。ゼータ電位は固液界面における電気二重層の分極の強さを表しており岩石と水の組み合わせによって変化することから、地質の異なる地域ではその大きさも異なる可能性

があるからである。この点については、今後、多くの事例を比較検討することでさらなる考察を進めたい。

A 地域の自然電位分布と直流電気探査の結果を考えると、大正噴火の割れ目付近にみられる帯状の高電位異常は地下に形成された熱水系の上昇部分を反映している可能性が高い。ここで注目すべきことは、高電位の中心軸が噴火割れ目そのものではなく、やや離れた位置にあることである。電気探査の節でも指摘したように、噴火口の位置にある固結した溶岩そのものは電氣的に高抵抗で浸透性に乏しくなっているのに対して、それに隣接した領域では破砕が進行していて流体がその内部を流動しやすい状況にあることが推定される。Carrigan (1986) はマグマの冷却過程において地下水がどのように関与するかを単純なモデルで理論的に考察している。彼の理論によれば、冷却過程にあるマグマの周辺には不透水性の層があり、その外側にはフラクチャーが生じ地下水の浸透によって効率的に冷却が行われる領域が存在する。冷却の進行と共に透水性の領域が内側へ拡大していくが、その速度は媒質の浸透率と蒸気層の断熱効果に大きく依存する。また、蒸気の圧縮性の効果でマグマは深部から先に冷却されることや、マグマの大きさや媒質の条件によっては、固結に要する年月は数十年をこえることなどが示されている。桜島の場合、1914 年の大正噴火から既に 80 年以上が経過しているが、地下の熱水流動を示唆する自然電位の異常は、当時の貫入マグマが地下では現在もなお冷却の途上にある可能性を示している。

5. ま と め

桜島火山の北西部（大正溶岩域）と南西部（持木地区）で自然電位分布を調査した。また、引ノ平火口周辺で直流電気探査を実施した。これらの結果から以下の事柄が明らかになった。

- (1) 標高関連の電位勾配は両地域ともほぼ -1 mV/m の程度である。
- (2) 北西部の大正噴火割れ目に沿って自然電位に帯状の高電位異常が存在する。
- (3) この高電位は地下に形成された熱水系の上昇流に伴うものである可能性が高い。
- (4) 地熱流体の流動は固結した溶岩噴出口の位置ではなく、それに隣接してフラクチャーが発達した領域で卓越しているものと推定される。

謝 辞

本研究は、平成8年度桜島火山の集中観測および平成9年度京都大学防災研究所特定共同研究の一環として行った。代表者である東京工業大学の平林順一教授に本研究の機会を与えていただいたことを感謝申し上げる。桜島島内の調査に際して地元関係者ならびに桜島火山観測所の皆様には多大なる御協力を頂いた。また、電気探査の2次元インバージョンを行うにあたり地質調査所内田利弘氏からプログラムの提供を受けたことを付記して感謝申し上げる。

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*, 第28号 B-1, pp. 1-11.
- 内田利弘 (1993) : ABIC 最小化法による最適平滑化拘束の比抵抗2次元インバージョン, *物理探査*, 46, pp. 105-119.
- 太田一也・露木利貞 (1977) : 地下水・温泉の観測結果, 第2回桜島火山の集中総合観測報告書, pp. 81-87.
- Carrigan, C. R. (1986) : A two-phase hydrothermal cooling model for shallow intrusions, *J. Volcanol. and Geotherm. Res.*, Vol. 28, pp. 175-192.
- 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., N. Matsushima, A. Goto, Y. Nakayama, A. Oyamada, M. Utsugi and H. Oshima (1996) : Self-potential studies in volcanic areas (3) —Miyake-jima, Esan and Usu—, *Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII (Geophysics)*, Vol. 10, pp. 63-77.
- 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 the Western Part of Sakurajima Volcano

Takeshi HASHIMOTO*, Yoshikazu TANAKA*, Tohru MOGI**, Yasunori NISHIDA***, Shigeyuki OHBA*,
Keigo YAMAMOTO and Kazuhiro ISHIHARA

* Graduate School of Science, Kyoto University

** Faculty of Engineering, Kyushu University

*** Faculty of Science, Hokkaido University

Synopsis

A banded self-potential (SP) anomaly was found in the western part of Sakurajima volcano, southwestern Japan. This positive SP anomaly lies along the fissure of 1914 eruption and probably corresponds to the upflow part of subsurface hydrothermal convection. A DC electric sounding conducted along the survey line across the banded anomaly revealed that a conductive part exists 50-100m below the positive SP anomaly. These results suggest that the hydrothermal fluid flow is more prominent in the fractured zone adjacent to a vent than in the vent itself choked with the solidified lava.

Keywords: self-potential; hydrothermal system; Sakurajima; volcano; electric sounding