

阿蘇火山中央火口丘における自然電位観測

長谷英彰*・田中良和*・橋本武志*・坂中伸也**

* 京都大学大学院理学研究科

** 秋田大学工学資源学部地球資源学科

要旨

阿蘇山中央火口丘において自然電位分布の測定をした。中岳第一火口を中心とする、流動電位によるものと思われる正の電位異常分布があることが明らかとなった。この電位異常をダイポールソースモデルで近似することによって、火口直下のおよそ1kmの深さまで熱水上昇が存在することが推察された。また阿蘇山中腹に存在する温泉湧出地域においても、正の電位異常の存在が明らかとなった。

キーワード：自然電位，阿蘇山，ダイポールソース，熱水，温泉

1. はじめに

Zablocki (1976) はハワイのキラウエア火山における自然電位の正の電位異常を熱水上昇に伴う流動電位を考慮することで説明している。このような流動電位を考慮に入れた自然電位の解釈が行われるようになってから、自然電位法を用いて地下の熱水流動系を推定する試みが盛んに行われるようになった。日本の火山でも Nishida et al. (1996) が、有珠山、北海道駒ヶ岳、雄阿寒岳、恵山、三宅島における自然電位調査を行っており、流動電位で電位異常を説明している。また Ishido et al. (1997) や Hashimoto (1997) は自然電位分布の時間的な変化の追跡を行っている。Ishido et al. (1997) は1989年から五年間にわたる伊豆大島における自然電位の観測で1989年から1990年の一年間でカルデラ内部の自然電位が100mV減少したことを報告している。また Hashimoto (1997) では雲仙火山の1991年噴火直後から五年間にわたる観測で、溶岩ドーム出現前後の山頂部における電位上昇や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。また Ishido et al. (1997) や安川・茂木(1998)では熱水流動によっ

て生じる流動電位を二次元領域でシミュレーションを行っている。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いる。

阿蘇火山では過去に南葉(1939)によるものや橋本らによる局所的な自然電位測定は行われていたものの、大局的な阿蘇火山の自然電位分布を知る上においては、測定はほとんど行われていない状態であった。このようなことから本研究では阿蘇火山の広域的な自然電位測定を展開して、山体全体に見られる電位分布の特徴と阿蘇火山中腹部に点在する局所的な温泉湧出地域との関わりなどを解明することを目標に1998年から測定を行ってきた。

2. 測定の概要

2.1 測定地域及び測定方法

本研究では山体形成年代が比較的新しい杵岳・往生岳周辺地域や、地獄・垂玉・湯ノ谷・吉岡などの温泉湧出地域が存在する中岳火口の西側地域から測定を行った(測定点分布を Fig. 1 に示した)。

測定点総数は現在までに1027点で、測定が困難な

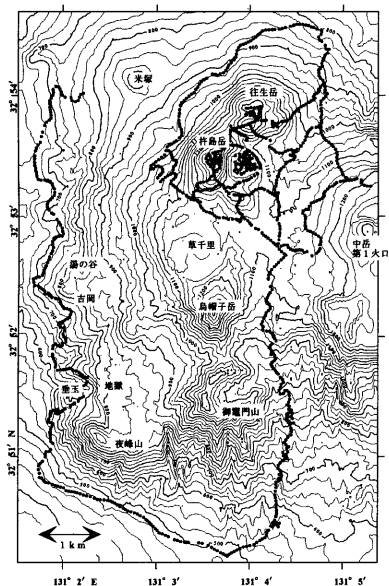


Fig. 1 Measurement points of self-potential

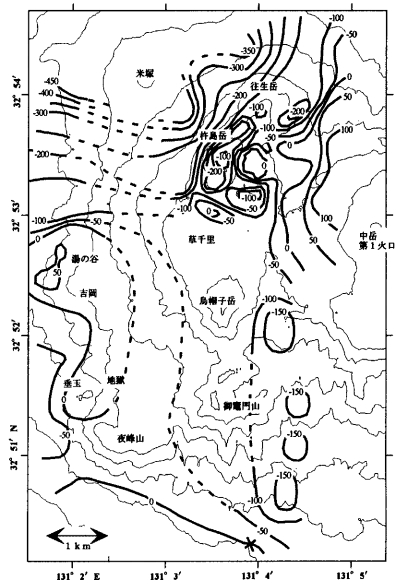


Fig. 2 Self-potential distribution. SP values are given in units of millivolts. The point of voltage reference is ×.

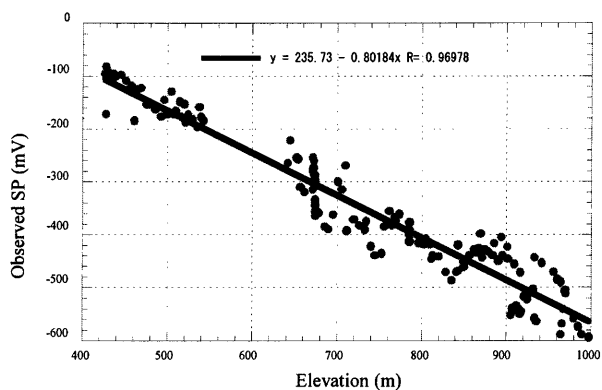


Fig. 3 Relation between the topographic elevation (horizontal axis) and the observed self-potential (vertical axis). The solid line shows regression line. R means a coefficient of correlation.

場所でない限り 50m 間隔での測定を基本として行った。しかし杵島岳・往生岳の火口周辺は、場所により測定値が急激な変化を見せたため、測定間隔を密にして測定した。電極には非分極性電極である銅-硫酸銅電極を使用した。自然電位の測定方法には、2つの電極を交互に移動させていく方法(尺取り法)と、1つの基準電極から測線を延ばしてもう一方の測定電極で測定する方法(全電位法)があるが、今回は測定誤差の蓄積が少ないと期待される後者の方法を用いた。各測定点での測定は、局所的な異常を避けるために約 5 cm から 10 cm の深さに掘った 3ヶ所で測定を行い、10 mV 以上ばらつきが見られる際には更に測定場所を増やして測定を行った。測定値は局所的な異常値と思われるものを除いた中から平均的な値を示している一つを選択して測定値とした。測定には 10 M Ω 入力インピーダンスのデジタルテスターを使用した。また九州地域には 22.2 kHz の VLF 電波が卓越しているため、測定に使用する電線がアンテナとなり VLF 電波がノイズとして測定値に影響を及ぼす可能性がある。そのため VLF 電波ノイズの影響を取り除くための CR フィルターをデジタルテスター入力部に設置した。

2.2 全電位法

全電位法で測定を行なう場合、基準電極は測定を開始してから 1 測線の測定が終わるまで埋めておくため、電極電位の安定性が重要な問題となってくる。九里 (1958) は銅-硫酸銅電極の温度依存性について、飽和溶液における温度係数が 0.9 mV/°C であると報告している。このように銅-硫酸銅電極は非分極性電極であるが温度依存性が示唆されている為、基準電極の埋設や測定電極の持ち運びには十分注意する必要がある。

本研究では基準電極は温度変化の影響をなるべく少なくするために、地表から 20 cm 以上の深さにしっかりと埋設した。測定電極は測定のとき以外、極力手で触る事を避け、持ち運びの際は専用の収納ケースに収めることによって電極に対する温度影響をできる限り少なくするように配慮した。また基準電極・測定電極何れの設置の際にも、電極と大地の接触抵抗を軽減させるため、電極と大地の間に粘土鉱物であるベントナイトを使用した。

また本研究では測定値の"基準点"を基準電極とするのではなく、近隣の別の地点に"基準点"を設け、基準電極は"仮基準点"として測定を行った。これは"基準点"では測線の接続点となる可能性が高いが、基準電極はしっかり埋設するのに対して測定電極は掘った穴底の表面に接触するだけであるため、各測

線の接続の際に設置条件をそろえる為に設けた措置である。また電極間の固有電位差を取り除くという理由においても、基準電極とは別の場所に"基準点"を設置することが望ましいと考えられる。

3. 測定結果

3.1 測定電位分布

現在まで測定した測定電位分布(基準点は×印点)を Fig. 2 に示した。また特徴的な点を挙げてみると以下に示すものが挙げられる。

- (1) 中岳近傍では 100 mV 以上の高電位地域が存在する。またそれとは対照的に杵島岳・往生岳北西地域には低電位地域が存在する。
- (2) 杵島岳・往生岳周辺では局所的な高電位地域と低電位地域が存在する。
- (3) 湯ノ谷付近で 50 mV 以上の高電位となっている。また地獄・垂玉地域でも比較的高電位となっている。

自然電位データを流動電位の理論に基づいて解析を行なう場合、標高差による単純な流体の移動に伴う電位効果(地形効果)を除去するために、標高に対する補正が必要である。この地形効果はその場所における土壌の空隙率や浸透率に依存すると考えられており測定地域により異なるものの、Ishido (1989)によると標高と自然電位の間には -1 ~ -10 mV の勾配で線形関係があると説明している。例えば現在までに、霧島火山: -1.4 mV/m (Hashimoto et al., 1994)、桜島火山: -1.0 mV/m (橋本他, 1999)、伊豆大島火山: -1.0 mV/m (Ishido et al., 1997)、諏訪・瀬島火山: -0.9 mV/m (神田他, 1999)、三宅島火山: -1.5 mV/m、-0.86 mV/m (Nishida et al., 1996) などが報告されている。今回の測定データ全体からは直ちに地形効果と判断できるような関係、つまり標高と自然電位との間に明瞭な線形関係を見出せなかった。これは今回の測定範囲が上記の(1)~(3)に示したように地形効果とは別な電位異常地域が多く存在しており、地形効果は存在するもののデータに明瞭に現れていなかったと推察される。そこで(1)~(3)の地域を除いたデータで地形効果について検討を試みた。その結果 Fig. 3 に示したように標高と自然電位の間にはほぼ線形で約 -0.8 mV/m という関係があることが明らかとなった。

3.2 地形効果補正後の電位分布

前節で求めた標高と自然電位の勾配 (-0.8 mV/m) を地形効果として、データ全体にわたって一様に線

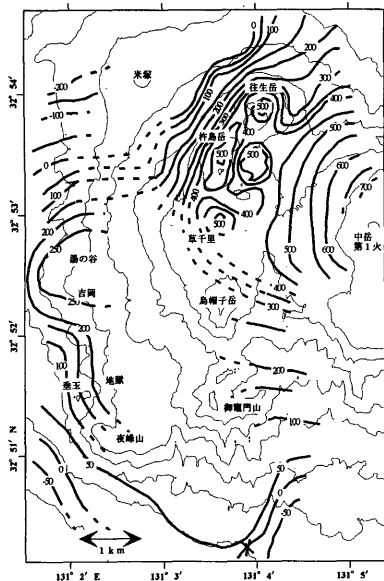


Fig. 4 Observed SP distribution revised value with topographic effect (-0.8mV/m). The point of voltage reference is $\times$.

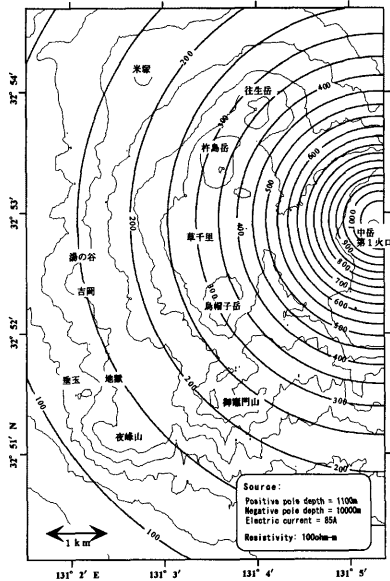


Fig. 5 Theoretical SP distribution (positive pole = 1100m, negative pole = 10000m, electric current = 85A, resistivity = 100 ohm-m)

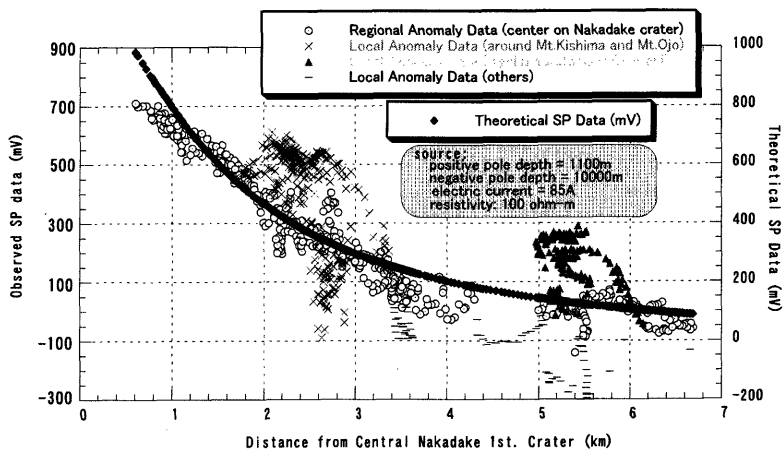


Fig. 6 Observed SP data revised value with topographic effect (-0.8mV/m) and theoretical SP data (positive pole = 1100m, negative pole = 10000m, electric current = 85A, resistivity = 100 ohm-m)

形関係が成り立つと仮定した上で Fig. 2 で示した測定データから地形効果の補正を行った (Fig. 4)。補正の結果、中岳第一火口を中心とする 700mV 以上の非常に大きな正の電位異常の存在が明らかとなった。また杵島岳の山頂火口や南山腹にある爆裂火口跡、往生岳山頂付近、草千里北部で部分的な正の電位異常が見られた。そして温泉湧出地域である湯ノ谷・吉岡地域でも正の電位異常がみられた。

4. 議論

4.1 正の電位異常

火山地域において自然電位分布を調べると、1V を超えるような大きな正の異常域が観測される場合がある (e.g. Michel and Zlotnicki, 1998)。そのメカニズムとして、流体の流動に伴う流動電位が考えられる。

液相と固相が接している状態を考えた場合、イオンの分配平衡が起こり、液相が正、固相が負に帯電し二相境界面に電気二重層が形成される。正に帯電した液相に流れが生じるとその流れに伴って正の電荷が運ばれていく。これは界面動電現象と呼ばれている。Ishido et al. (1981) は、界面動電現象から流動電位を求め、数 100mV を超える大きな電位差も作り得ることを実験的に確かめている。

現在も噴気・噴煙活動などを続けているような火山地域では、地下の熱源の存在により熱水対流系が発達していることが考えられるため、熱水の上昇に起因する流動電位が大きな正の異常を作る主要原因と考えられる。中岳第一火口は現在も噴気活動があり、地下にある熱源からの作用に伴って、熱水上昇が発生している可能性は高く、700mV を超える大きな正の異常は、熱水上昇に起因すると考えることが妥当である。また湯ノ谷・吉岡・地獄・垂玉などの温泉湧出地域においても、温泉の上昇に起因する流動電位が正の異常を形成していると考えられる。しかしながら噴気活動や温泉湧出が見られない杵島岳・往生岳の正の異常についての解釈は、現在までのところ明確な見解は得られていない。

4.2 ダイポールソースによる電位モデル

前節の正の電位異常について、電位異常の原因が流動電位で形成されていると仮定した場合に、流体流動がどのくらいの深さで起こっているかを推定するため、半無限均質媒質中におけるダイポール電荷配置によるモデルを使って解析を行った。

比抵抗 ρ が一様な半無限媒質中に点電荷 $+Q$ が存在する場合、 $+Q$ から距離 r の表面電位 ψ は電流が

I とすると、

$$\psi = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (1)$$

で表される。距離 r を深さ方向 D と水平方向 R の成分にそれぞれ分けると、

$$r = \sqrt{D^2 + R^2} \quad (2)$$

である。ダイポールソースを仮定する場合、重ね合わせの原理により $+Q$ と $-Q$ を足し合わせることができるから $+Q$ 、 $-Q$ の深さをそれぞれ D_1 、 D_2 とすると水平距離 R の表面電位 ϕ は

$$\phi = \frac{\rho I}{2\pi\sqrt{D_1^2 + R^2}} - \frac{\rho I}{2\pi\sqrt{D_2^2 + R^2}} \quad (3)$$

と表される。

本研究ではダイポール電荷を $+Q$ を上方として中岳第一火口直下に鉛直に配置して計算を行った。計算条件は比抵抗 ρ を $100 \Omega \cdot \text{m}$ とした。また計算の便宜上、標高は一樣であると仮定した。計算は Try & Error 方式で行なった結果、最適解のパラメーターとして D_1 は 1100m、 D_2 は 10000m、電流 I は 85 A と求まった。求めたパラメーターを使用して求めた表面電位を Fig. 5 に示した。

得られたモデルはあくまでも等価な電流源であるが、これをもとに火口直下の熱水系の分布を以下のように推定することができる。

D_1 の深さのまで下からの熱水供給が存在し、この深さで熱水は噴気になり電荷を運ばない状態で火口表面まで移動する。このため D_1 の深さの面で電荷がトラップされ、 D_1 に正の電荷が蓄積することにより大きな電位を作り出していると解釈できる。また D_2 の解釈はその場所に D_1 と等価な負の電荷が存在するのではなく、そのように等価となるような広範囲に微小な負の電荷がたくさん存在していると考えのほうが自然である。そのため熱水流動によって D_1 に集まった正の電荷に対して、取り残された負の電荷が広範囲に存在していると解釈することができる。

4.3 測定データとモデルデータ

Fig. 6 に地形効果を補正した自然電位の測定データとダイポールソースモデルによる表面における理論電位を、横軸を中岳第一火口からの距離、縦軸を電位として表示した。測定データは (1) 中岳第一火口を中心とした正の異常データ (2) 杵島岳・往生岳周辺

の電位異常データ(3)温泉湧出地域のデータ(4)その他の局所的な異常データの四種類に分けて表示した。測定データの全体をみると、広範囲に及ぶ中岳第一火口を中心とした大きな正の異常と、局所的な杵島岳・往生岳の電位異常、温泉湧出地域の電位異常とで、それぞれ明らかにプロファイルが異なることが見てとれる。モデルデータについて注目してみると、中岳第一火口近傍で測定データとのずれが大きくなっている。これはモデルデータの仮定において標高は無視して考えているが、ソースに近づくにつれて電界が強くなるために、標高を無視した扱いによるソースと測定点の距離の誤差が大きく影響してくるためであると考えられる。

5. まとめ

阿蘇山中央火口丘において自然電位分布の測定した結果、広い範囲に電位異常が存在することが推定された。地形効果を補正することにより、中岳第一火口を中心とする、流動電位によるものと思われる正の電位異常分布があることが明らかとなった。この電位異常のメカニズムを明らかにするために、ダイポール電荷ソースで近似したモデルと比較することによって、火口直下のおよそ1kmの深さまで熱水上昇が存在し、その深さでトラップされた熱水がそこから噴気となって火口へ上昇していることが推察された。また阿蘇山中腹に存在する温泉湧出地域においても正の電位異常の存在が明らかとなり、温泉湧出に伴い流動電位による正の電位異常が形成された可能性が考えられる。

今後は自然電位の測定範囲を中岳東部地域へ広げて、阿蘇山中央火口丘全体について考察していくことや、比抵抗構造の変化を考慮に入れたモデルの構築や杵島岳・往生岳周辺の電位異常の解釈などを進めていく必要があると考えている。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、地球電磁気講座実習生に協力して頂いた。また京都大学大学院附属地球熱学研究施設火山研究センターの教官を始めとした、各位との議論は有益でありました。ここに厚く謝意を表します。

参考文献

神田 徑, 橋本 武志, 大島 弘光 (1999) : 諏訪の瀬島火における自然電位分布, 京都大学防災研究所年報,

Vol. 42, B-1, 11-18.

九里 尚一 (1958) : 物理探鉱, Vol. 11, No. 4, pp. 167. 南葉 宗利 (1938) : 火山山腹の上向地電位に就て, 地球物理, Vol. 3, No. 4, pp. 129-141

橋本 武志, 田中 良和, 西田 泰典, 茂木 透, 山本 圭吾, 神田 徑, 平林 順一, 石原 和弘 (1999) : 桜島火山の自然電位と熱水系 (第2報), 京都大学防災研究所年報, Vol. 42, B-1, pp. 19-25.

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 一数值モデリングによるアプローチ一, 物理探査, Vol. 51, No. 1, pp. 17-26.

Hashimoto, T., T. Kagiya, F. Masutani (1994) : Self-potential Measurements on Shinmoe-Dake, Kirishima Volcanic Group, Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo, Vol. 69, pp. 257-266.

Ishido, T. and H. Mizutani (1981) : Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its application to geophysics, J. Geophys. Res., Vol. 86, pp. 1763-1775.

Ishido, T. (1989) : Self-potential generation by subsurface waterflow through electrokinetic coupling, in Lecture notes in earth sciences, Vol. 27, Detection of subsurface flow phenomena, Springer Verlag, pp. 121-131.

Ishido, T., T. Kikuchi, N. Matsushima, Y. Yano, S. Nakao, M. Sugihara, T. Tōsha, S. Takakura and Y. Ogawa (1997) : Repeated self-potential profiling of Izu-Oshima volcano, Japan, J. Geomag. Geoelectr., Vol. 49, pp. 1267-1278.

Michel, S. and J. Zlotnicki (1998) : Self-potential and magnetic surveying of La Fournaise volcano (Réunion Island): Correlations with faulting, fluid circulation, and eruption, J. Geophys. Res., Vol. 103, No. B8, pp. 17845-17857.

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, J. 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 Resource, San Francisco CA. U. S. Govt. Printing Office, Washinton, D. C., Vol. 2, pp. 1299-1309.

Self-potential measurements on the central cones of Aso Volcano

Hideaki HASE*, Yoshikazu TANAKA*, Takeshi HASHIMOTO* and Shin'ya SAKANAKA**

*Graduate School of Science, Kyoto University

**Institute of Applied Earth Science, Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University

synopsis

We have been conducted self-potential (SP) surveys since 1998 in the central cones of Aso Volcano, southwestern Japan. As a result of the survey, we detected characteristic positive anomalies: (i) a regional anomaly which centers on the Nakadake crater; (ii) local anomalies around the hot spring areas. To explain the observed anomalies (i), we assume a dipole source that positive and negative poles located at 1km and at 10km in depth under the Nakadake crater, respectively.

Keyword: self-potential, Aso volcano, dipole source, hot spring