

ゼータ電位を考慮した開聞岳の自然電位解釈

長谷英彰(産総研)・石戸経士(産総研)・神田徑(京大防災研)・森真陽(京大防災研)

Volcanic structure of Kaimondake estimated from self-potential profiles

Hideaki Hase (AIST), Tsuneo Ishido (AIST), Wataru Kanda (DPRI, Kyoto Univ.)
and Shinyo Mori (DPRI, Koto Univ.)

Abstract

Positive self-potential (SP) anomalies were observed on many active volcanoes and geothermal areas. It is generally thought to be caused by streaming potential associated with hydrothermal upflows. However, positive SP anomalies were observed on Kaimondake volcano where no sign of volcanic or hydrothermal activity is present.

Zeta potential, a key factor of streaming potential generation, was measured for rock samples (11 samples) from the Kaimondake volcano by Hase et al. (2004). The results show that the zeta potentials of all samples are negative ($-1 \sim -20$ mV) in polarity and its variation seems to correspond to the variety of geological formations. In order to study the influence of inhomogeneous distribution of the zeta potential on the observed SP profile, we conducted numerical simulations by using the STAR reservoir simulator and EKP-postprocessor.

As a result of the simulations, the specific SP profile on Kaimondake volcano can be interpreted to be created by simple groundwater flow with zeta potential variations on each geological rock stratum. This result implies that distribution of geological rock stratum can be estimated by using SP and zeta potential surveys if groundwater flow in the survey area is not complicated.

はじめに

これまで多くの活動的火山や地熱地域で自然電位調査が行なわれ、特徴的な自然電位異常が観測されている。これらの自然電位異常の発生メカニズムには、地下水流動に伴って発生する流動電位が最も寄与していると考えられている。通常、流動電位は地下水流動に伴いプラスの電荷が運ばれることにより発生するため、例えば火山の麓付近ではポジティブ、山頂付近ではネガティブの自然電位異常が期待される。また火山の山頂付近でポジティブな自然電位異常が観測された場合、一般的に地下に熱水上昇流が存在していると解釈される。このように自然電位調査は地下水の流れを推定することに用いられ、特に熱水系の駆動源となっている浅部熱源の推定や火山活動度を評価する上でも有効な手段のひとつとなっている。

近年では数値シミュレーションによる定量的な解釈が行なわれるようになり、具体的な地下の流体流動の位置やフラックスの推定が行われるようになってきている(Ishido and Pritchett, 1999; Hase et al., 2005)。また流動電位の決定要素のひとつであるゼータ電位の岩石実験が精力的に行なわれ、岩石の構成元素の違いによりゼータ電位の値はかなり変化に富んでいることが明らかとなってきた(Hase et

al., 2003). これらの結果は、地下水流動の方向やフラックスが同じであっても、地下水流動域を構成している岩石種等の違いにより発生する流動電位が異なることを意味している。そのため複数の岩石ユニットで構成されているような火山では、重力ポテンシャルに伴う単純な地下水流動しか存在していなくても、流動電位によって形成された自然電位分布に特徴的な電位異常が形成される可能性がある。本研究では岩石組成の違いと自然電位分布の関係を評価するために、岩石ゼータ電位を考慮に入れた開聞岳の自然電位数値シミュレーションを行って観測された自然電位分布の解釈を行なった。

開聞岳の概要

開聞岳は九州南部、薩摩半島の最南端に位置している。火山活動は約 4000 年前に始まり、西暦 885 年の噴火まで活動的であり少なくとも 12 回の主要な噴火があったとされる(藤野・小林, 1997)。噴出物の大半はスコリアで現在火山活動は休止している。山体は円錐形に近い形をしており、標高は 922m、基底部分の直径は約 4.5km であり、山頂部の中央火口丘(溶岩ドーム)と下部の成層火山からなる二重式火山であ



第1図: 開聞岳
Fig.1: Kaimondake

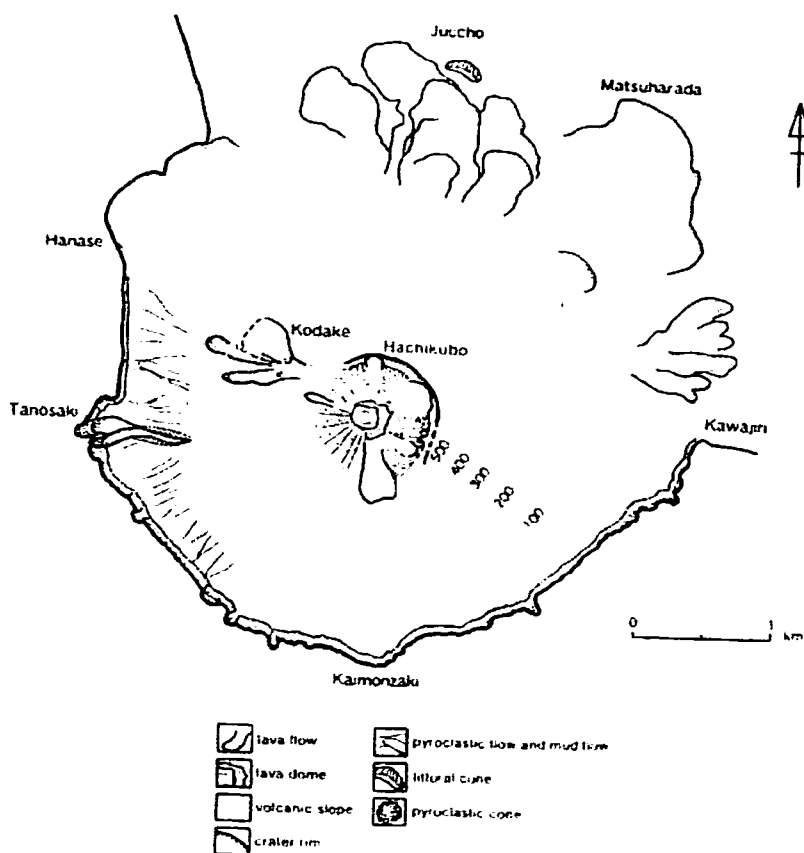


Fig. 2. Geomorphological map of Kaimondake Volcano.

第2図: 開聞岳の地形と地質分布(藤野・小林, 1997)

Fig.2 Geological map of Kaimondake (data from Fujino and Kobayashi (1997))

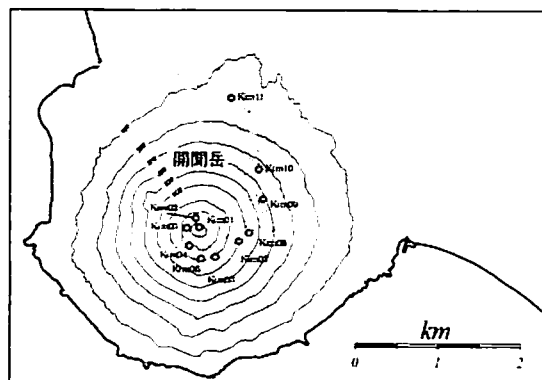
る(第1図)。中央火口丘と成層火山の境界は北半部で火口地形として残っており、鉢窪火口と呼ばれている。875年の噴火で形成された最も新しい溶岩流は、山頂中央付近から北西、南方向等に分布している(第2図)。

観測データ

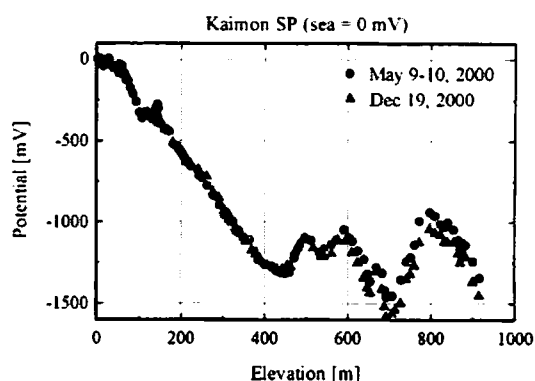
開聞岳では、2000年5月及び12月、2001年12月の3回に渡って自然電位測定が行われている(神田ほか, 2004)(第3図)。測定は登山道路沿いで行われ、標高が上がるに従って約 -3mV/m の割合で電位が下がる地形効果が標高400m付近まで存在している(第4図)。また鉢窪火口の境界付近及び山頂に近い標高800m付近の2ヶ所で $+400\text{mV}$ 程度の相対的な電位異常が観測されており、鉢窪火口より標高が高い2ヶ所については、溶岩流や溶岩ドームの分布とよく対応している。

VLF-MT法による比抵抗探査では、全体的に数百 Ωm を示し、相対的な高比抵抗地域では自然電位が最も低電位の地域とよい対応が見られている。位相は山麓において45度程度であり変化はないが、山腹では次第に位相が大きくなり、標高600mより上では60度以上の値を示している(第5図)。

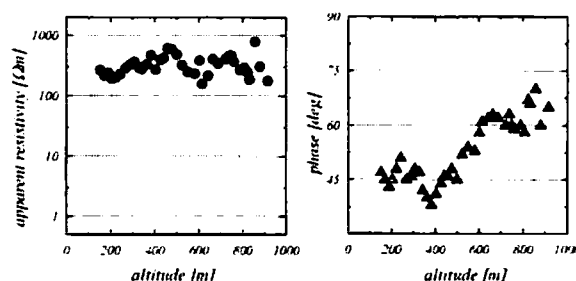
岩石のゼータ電位測定は自然電位測定路線沿いの11点で地表付近の岩石を採取したものについて測定されている(長谷他, 2004)。測定結果によると採取した11サンプルすべてに於いて値が負($-1\sim -20\text{mV}$)であった(第1表)が、ゼータ電位値がゼロに近いサンプルの分布地域とポジティブな自然電位異常地域が対応している。



第3図: 自然電位測線と岩石サンプル地点
Fig.3: SP Survey line and rock sampling points



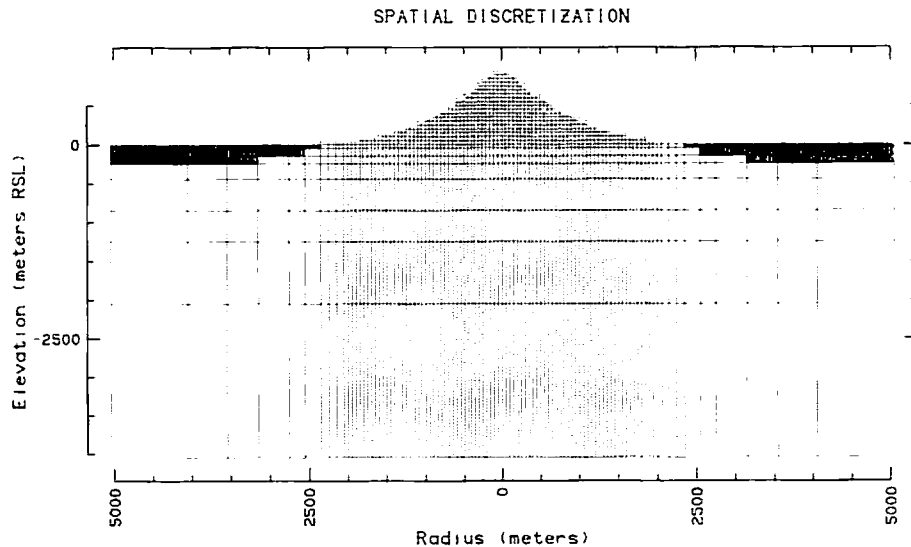
第4図: 自然電位プロファイル
Fig.4: SP profile on Kaimondake



第5図: VLF-MT法による開聞岳の比抵抗とその位相
Fig.5: Results of Resistivity and its phase on Kaimondake by VLF-MT method

第1表: 開聞岳の岩石ゼータ電位
Table 1: Results of ζ potential of rocks on Kaimondake

Sample point	Kim01	Kim02	Kim03	Kim04	Kim05	Kim06	Kim07	Kim08	Kim09	Kim10	Kim11
zeta-potential (mV)	-19.7	-18.0	-17.6	-8.4	-20.4	-18.8	-17.6	-1.3	-7.9	-10.7	-11.2

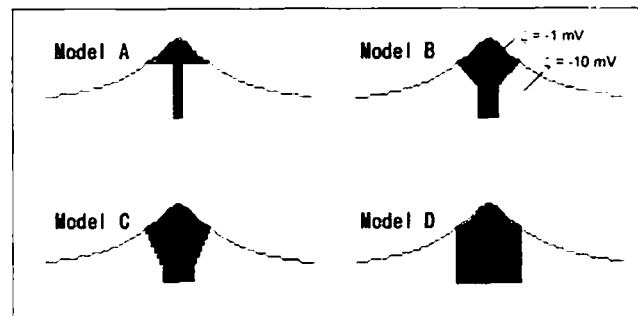


第6図: STARとEKP ポストプロセッサの計算グリッド
Fig. 6: A simulation grid for STAR and EKP postprocessor

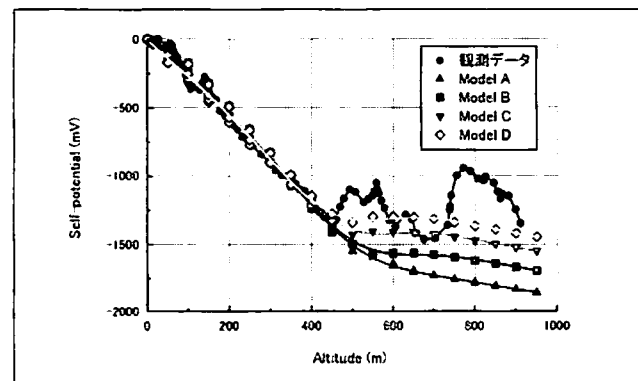
モデル計算

開聞岳の岩石ゼータ電位は大きく分けると①山頂溶岩流(約 20mV)、②溶岩ドーム(約 1mV)、③山麓成層火山(約 10mV)の三つの岩石ユニットに分けることができる。岩石ユニットごとにゼータ電位が異なる場合、その流動電位カップリング係数も異なるため、一様な地下水流動があったとしても発生する流動電位は異なる。本研究ではこのような岩石ユニットごとに異なるゼータ電位の影響がSP分布にどのような影響を与えているか検証するため、数値

シミュレーションを用いた検討を行なった。シミュレーションはまず STAR を用いて流体流動について計算した後、EKP ポストプロセッサ(e.g. Ishido and Pritchett, 1999)を用いて SP について計算を行なった。計算モデルは軸対称三次元で、グリッド数は 50×28 、スケールは $5000\text{m} \times 5000\text{m}$ で計算を行なった(第6図)。開聞岳は周りの半分以上を海に囲まれているため、モデルに海水の影響も考慮して計算を行なっている。流体流動のモデル計算の結果では、山体を流動してきた淡水が海底下の領域に浸透している結果を得ている。



第7図: 計算に用いた4つの溶岩ドームの潜在形状モデル
Fig.7: Four models of the latent dome shape for SP simulations



第8図: 溶岩ドームの潜在形状の違いを考慮した SP 計算結果

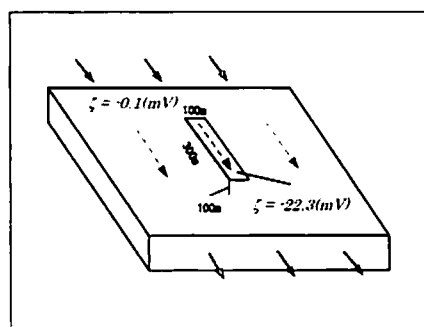
Fig.8: Results of the SP simulations which are considered by the latent dome shape

開聞岳は大局的に鉢窪火口跡より上部の溶岩ドームと下部の山麓成層火山に分けられる。本研究では、まずこの2つの異なるユニットが SP 分布に与える影響をシミュレーションした。これまで溶岩ドームの山体内部の形状は明らかとなっていないため、本研究では4つの溶岩ドームモデル(Model A~D, 第7図)を用意してそれぞれの違いについて計算を行なった。ゼータ電位は溶岩ドーム(約 1mV)、山麓成層火山(約 10mV)とした。山体の比抵抗値は固定値を与えるのではなく、流体の浸透に伴って変化するキャピラリーモデル計算を行い、およそ $300\sim 500\Omega\text{m}$ (VLF-MTの結果を参考)となるようにトーチュオシティ(迂回率)を設定した。

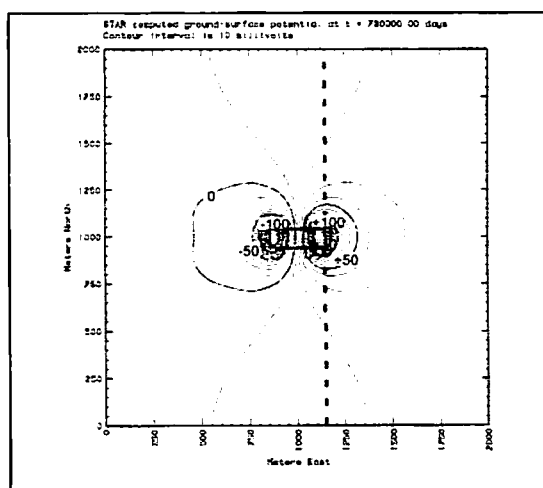
計算の結果、何れのモデルも山麓成層火山地域で地形効果(標高とSPに線形関係)がみられるが、溶岩ドーム地域で自然電位がほぼ一定となった。しかし溶岩ドームの形状の違いにより SP は山麓成層火山の境界付近からオフセット的に値の差がみられることが示された(第8図)。

観測された SP は溶岩ドーム地域で地形効果がみられなくなり、大局的にみれば標高に対する SP 変化はほぼフラットである。しかしこの地域では標高とは関係ない SP 異常が顕著にみられ、 $-1000\sim -1500(\text{mV})$ の間で変動している(第4図)。本研究では溶岩ドームと山頂溶岩流の位置関係とゼータ電位値の違い(山頂溶岩流(約 20mV)、溶岩ドーム(約 1mV))に注目し、それらの影響で SP 異常が形成された可能性についてシミュレーションによる検証を行なうことにした。計算はA.広域的でゼータ電位の小さな媒質の中に、B.局所的でゼータ電位の大きい媒質を与え、一様に流体が流動しているモデルを用いた(第9図)。

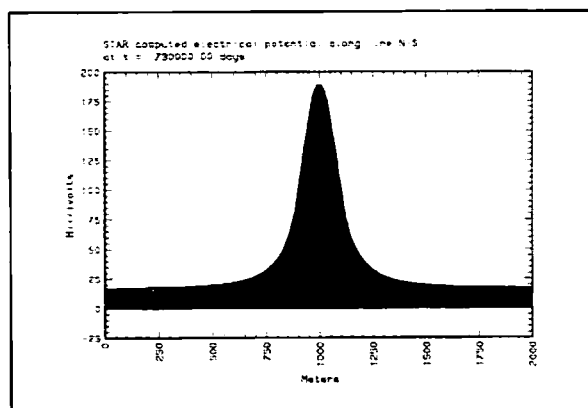
計算の結果、流体流動方向に対するBの境界で SP 異常が発生し(第10図)、流動方向に対し垂直方向に横切るプロファイルにおいて SP 異常が観測されることが示された(第11図)。この結果を考慮して開聞岳の溶岩ドーム地域の自然電位を考



第9図: 山頂溶岩流近傍の SP 計算モデル
Fig.9: A model for SP simulations at the vicinity of the summit lava flow on the dome



第10図: 山頂溶岩流近傍の SP 計算結果
Fig.10: Result of SP simulation at the vicinity of the summit lava flow



第11図: 山頂溶岩流を横切る自然電位プロファイル
(第10図の点線)
Fig.11: Result of the SP profile across the lava flow
(along the dash line in Fig.10).

察すると、SP 測定路線が山頂溶岩流を横切る場所で SP 異常が発生したと解釈することができる。

まとめ

開聞岳の岩石ゼータ電位はすべて負であり、流動電位係数の違いによる SP 変化はあまり期待できない状況であった。しかし岩石ゼータ電位を考慮した SP シミュレーションを行った結果、開聞岳の SP は重力ポテンシャルに伴う単純な地下水流動だけで解釈できることが示唆された。これは岩石ユニット毎のゼータ電位値にコントラストがあるため、そこで発生する流動電位に有意に差が生じ、結果的に特徴的な SP 分布を形成したと考えられる。

本研究の結果は、岩石ゼータ電位の符号に関係なく値のコントラストが大きければ、単純な地下水流動だけで観測可能な自然電位異常を形成することを示しており、定性的な自然電位解釈においても観測地域の流動電位を注意深く検討する必要があることを示唆している。また岩石ユニットの違いが自然電位に強く影響することから、高精度な 3 次元流体—SP シミュレーションを行うことにより、岩石ユニットの詳細な空間分布を推定することが可能になると考えられ、今後検討を行っていきたいと考えている。

参考文献

- H. Hase, T. Hashimoto, S. Sakanaka, W. Kanda and Y. Tanaka, Hydrothermal system beneath Aso volcano as inferred from self-potential mapping and resistivity structure, *J. Volcano. Geotherm. Res.*, 143, 259-277, 2005.
- 長谷英彰・石戸経士・橋本武志・神田径・田中良和, 九州 4 火山(開聞岳・九重山・猿葉山・雲仙岳)の岩石のゼータ電位測定, *Conductivity Anomaly 研究会 2004 年論文集*, 25-32, 2004.
- H. Hase, T. Ishido, S. Takakura, T. Hashimoto, K. Sato and Y. Tanaka, ζ potential measurement of volcanic rocks from Aso caldera, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.30, No. 23, 2210, doi:10.1029/2003GL018694, 2003.
- 藤野直樹・小林哲夫, 開聞岳火山の噴火史, *火山*, 42(3), 195-211, 1997.
- T. Ishido and J. W. Pritchett, Numerical simulation of electrokinetic potentials associated with subsurface fluid flow, *J. Geophys. Res.* 104(B7), 15,247-15,259, 1999.
- 神田径・森真陽・長谷英彰, 開聞岳の自然電位分布について, *地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会論文集*, v055-p034, 2004.