

自然電位から推定される薩摩硫黄島の浅部熱水系

神田 径・森 真陽

京都大学防災研究所火山活動研究センター

要旨

薩摩硫黄島で自然電位測定を行った結果、過去 1000 年以上も活発な噴気活動を続けている硫黄岳の山体では $+200 \sim +250\text{mV}$ の正異常が見つかった。急峻な地形と高温の火山ガスのため測定範囲は限られたが、正異常は中央火口に中心を持つような分布をしており、火口直下の海拔下数百 m に仮定した正負の伝導電流源の作る電位分布で概略は説明できた。正電流源は液相の熱水上昇域の上限を示している可能性があり、液相の水はその深さで減圧と熱のため気化していると考えられる。しかしながら、このモデルでは山頂火口周辺の電位分布は説明できず、熱によって火口周辺の天水下降流が抑制されている効果を考える必要がある。

1 はじめに

薩摩硫黄島火山は、約 6300 年前に形成された鬼界カルデラの北西端に位置する火山島である (図 1)。島の北側から西側にかけて、カルデラ形成前の山体である矢筈岳などが外輪山を構成し、カルデラ内にはカルデラ形成後に誕生した稲村岳と硫黄岳の 2 つの中央火口丘がある。これらの火山では、歴史時代の噴火の記録はないが、1934 年には島の 3km 東で海底噴火が起き、昭和硫黄島が形成されている。硫黄岳は、流紋岩質の溶岩ドームで、平家物語の記述などから、山頂火口から少なくとも 1000 年間にわたって活発な噴気活動を続けていると考えられている (吉田・小沢, 1981)。噴気孔は山腹にも見られ、山麓では温泉も多数湧出している (図 1)。最近では、1998 年 10 月より地震活動が活発化し、時折降灰も観測されている (井口・他, 1999)。

本研究の測定対象である自然電位とは、様々な原因によって地球表面に定常的に生じている電位のことである。活動的な火山で自然電位の分布を調べると、しばしば特徴的な電位分布が観測される (例えば、Sasai *et al.*, 1997)。山麓から中央へ標高が高くなるにつれ電位は緩やかに下降してゆくが、あるところを境に電位は上昇に転じ、中央火口丘の周辺では大きな正の異常域が形成されている。この分布を作る主要な原因として、地下水の流動に伴う流動電位が考えられている。流動電位とは、固体と液体との相互作用で電荷分離の生じた電気二重層に、流体の流動が加わることによって生じる電位差のことである。流体の流れによって正の電荷が運ばれ、結果的に流体の流れる方向に電位差が生じる。従って、上述のような電位分布は、地下水面の高さが違うために発生する定常的な天水下降流に起因する地形と負の相関を示す電位分布、および熱水上昇に伴って中央火口周辺で正異常を示す電位分布の重ね合せであると解釈されている (例えば、Zlotnicki *et al.*, 1998)。

本研究は、自然電位観測から薩摩硫黄島の熱水系を明らかにすることを目的としている。これまでの研究から、薩摩硫黄島では熱源であるマグマが比較的浅部に長期間滞留していると考えられている (例えば、風早・

篠原, 1996) ので、大きな自然電位正異常が形成されていることが期待でき、火山地域で観測される特徴的な自然電位分布の成因を検証する上で絶好のフィールドである。なお、本稿の内容はすでに Kanda and Mori (2001) にまとめられているので、詳細な議論はそちらを参照されたい。

2 自然電位分布

自然電位の測定は、1999 年の 7 月と 11 月、そして 2000 年の 11 月の 3 度行った。測定方法の詳細は、森・他 (2000) および Kanda and Mori (2001) に譲り、ここでは観測の概要を述べるにとどめる。図 1 に示したように、1999 年 7 月には、島の南側の東温泉から硫黄岳登山道を通して山頂火口南東部のガレージまで、同年 11 月の測定では、範囲をカルデラ外輪山部にまで広げ、島の西端の大浦海岸から硫黄岳を通してガレージまで、途中から北東部へ分岐して坂本温泉まで、そして硫黄岳の西山腹の測定を行った。また、自然電位と同一の点で 20cm 深の地温測定も同時に行っている。2000 年 11 月には再び東温泉からガレージまでの測定を行ったが、まだ十分に検討できていないので、本稿では 1999 年に行った 2 度の測定の結果について議論する。

図 2 に薩摩硫黄島全体の自然電位分布を示す。データは、1999 年 11 月のデータを基に、硫黄島西端の大浦海岸の海水の電位をゼロとした相対的な値で表している。硫黄岳登山道入口から東温泉へ向う路線のみ、1999 年 7 月のデータを接続した。まず特徴的なのは、全体が $-200 \sim +100\text{mV}$ という非常に狭い範囲に分布していることである。その中で、 -100mV よりも低電位を示す地域は、カルデラ外輪山部の 2 ケ所、そして硫黄岳南西山腹の 1 ケ所だけである。また、 $+50\text{mV}$ よりも高電位を示す地域は、山頂火口周辺と硫黄岳の中腹に限られている。

次に、1999 年 11 月の自然電位データを標高に対してプロットしたものを図 3 に示す。カルデラ外輪山部へ向かう路線 (▲と) では、地形と明瞭な負の相関が認められ、標高に対する自然電位分布の勾配は $-3 \sim -2\text{mV/m}$ でほぼ直線的な関係にある。硫黄岳登山道沿いの測定データ (●) でも標高 100~300m に地形との相関が見られるが、その勾配は $-0.5 \sim -1\text{mV/m}$ とカルデラ外輪山部よりも小さい値である。標高 300m~400m にかけて電位は 200mV 近く上昇し、標高 400m 以上ではその高電位が保たれている。この傾向は 1999 年 7 月の測定データでも全く同じであった。つまり、最も低電位のところを基準にすると硫黄岳の山体では $+200 \sim +250\text{mV}$ の正異常域が形成されていることになる。地温の方も標高 400m 以上で温度異常が認められたが、特に山頂火口縁と標高 400~450m 付近で 80°C 以上の高温を示し、高電位地域と対応している。硫黄岳西山腹 (○) では、地形との相関が明瞭でない。電位は $-50 \sim 0\text{mV}$ の範囲の値を示し、これは、登山道沿い路線の同じ標高の測定値よりも高い値である。地温は、図 3 中 W で示した一点だけ 47°C の高温を示した。この測定路線の南に噴気地帯があることを考えると、西側山麓では、ローカルな地熱の影響を受けて小さな正異常域が形成されているのかもしれない。

3 伝導電流源によるモデル化

硫黄岳の山体では、山麓で地形と負の相関を示し、火口周辺では正異常を形成するという、多くの火山で見つかった火山地域に特有の自然電位分布を示すことが明らかになった。この電位分布パターンを説明するために、図 4 で示した単純なモデルでフィッティングしてみた。正異常を作る原因が山頂火口直下にあると仮定し、ソースとシンクを持つダイポール型の等価伝導電流源で表現する。この電流源の作る電位は、それぞれソース・シンクからの距離の逆数に比例し (Patella, 1997)、線形の地形効果 (Ishido, 1989) を加味した (1) 式を用いて、観測点の位置情報 (r, z) から電位分布を計算する。

$$f(r, z) = A \cdot \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) - B \cdot z + C \quad (1)$$

$$R_1 = \sqrt{r^2 + (z - Z_s)^2}$$

$$R_2 = \sqrt{r^2 + (z - (Z_s - D))^2}$$

パラメータとしては、ソースの深さ Z_s とソースからシンクまでの距離 D 、および係数 A , B , C であり、その最適な組み合わせを、観測値と計算値との残差が小さくなるようにグリッドサーチで決めた。観測値としては、硫黄岳周辺の海岸線から山頂までの範囲をカバーしている 1999 年 7 月の測定データを用いた。

図 5 に、最もよくデータを説明できたパラメータの組み合わせおよびその時の計算値とデータとのフィッティングを示す。山頂火口周辺を除き、観測された SP のパターンを非常によく再現している。ここで示した組み合わせ以外にもいくつかのモデルが同程度のミスフィットレベルを示したが、どのモデルも正伝導電流源の深さ Z_s については、海拔下 200m から 0m の限られた範囲に求まった。つまり、海拔 0m 付近まで下方から正の電荷が運ばれ、伝導電流のソースが作られることを示している。山頂火口周辺でデータが説明できなかったのは、恐らく、山頂火口周辺でも線形の地形効果を仮定したためだと思われる。また、ここでは示していないが、西側山腹のデータについてもこのモデルでは説明できなかった。これは、やはり地形効果が成立していないのか、あるいは地形効果の勾配を表す B の値が南西側の登山道沿い路線とは異なるためではないかと考えられる。

4 議論

前節で示したように山頂火口周辺のデータは単純なモデルでは説明ができなかった。Ishido *et al.* (1997) は、伊豆大島の活動火口周辺で見つかった自然電位の正異常を説明するために、マグマの貫入前と後とで熱水対流と自然電位の数値シミュレーションを行っている。マグマ貫入前の定常状態では、天水は地形の高い方から低い方へ流れ、自然電位も地形と負の相関を示すような分布を示すが、マグマ貫入後には、山頂部では天水の下方への流れがほとんど消滅し、自然電位の正異常を形成するようになる。彼等は同時に行った温度などのシミュレーション結果から、また、乾いた蒸気が電荷を運び得ないという性質を考慮に入れ、山頂部での正異常の出現を、高温の蒸気やガスの上昇によってそれまで存在した天水の下降流が抑制されたためだと結論している。硫黄岳でも、800 °C を超えるガスが山頂火口から放出されているので、同様の状況が考えられる。つまり、硫

黄岳山頂部では天水下降流がほとんど存在しないか、山麓ほど強くないと考えられる。

等価伝導電流源モデルから推定された最適パラメータの値を用いて、電流値および流体の流量を推定することが可能である (例えば、石戸, 1991)。パラメータ A は、伝導電流の強さと媒質の比抵抗値との積に比例する。ミスフィットレベルが等価なモデルも含めると、 $A = 640 \sim 2000$ の範囲に決定されたので、平均的な硫黄岳山体の比抵抗値を $10\Omega\text{m}$ と仮定すると、電流値は $1 \sim 3\text{A}$ と推定される。この電流値が、流体の流動により作られる携帯電流の電流値 I_{drag} と等しいと仮定すると、流体の流量 J が推定できる。Ishido and Mizutani (1981) のキャピラリーモデルによれば、 I_{drag} と J の関係は $I_{\text{drag}} = \frac{\eta t^{-2} \epsilon |\zeta|}{\kappa} J$ と表される。ただし、 η 、 t 、 κ はそれぞれ媒質の空隙率、トーチュオシティ、浸透率、 ϵ は間隙水の誘電率、 ζ はゼータ電位である。これらのパラメータの値を実験データなどに基づいて次のように仮定する。空隙率を地殻の代表的な値として $\eta t^{-2} = 0.1$ 、誘電率は 200°C の水の値として $\epsilon = 3.1 \times 10^{-10} [\text{F/m}]$ (Helgeson and Kirkham, 1974)、ゼータ電位は 200°C における $\text{pH} \sim 8$ の水の値を採用して $\zeta = -0.1 [\text{V}]$ (Ishido *et al.*, 1983)、浸透率はオーダーで変化するので 1km 深における巨視的な浸透率の上限値から $\kappa = 2 \times 10^{-13} [\text{m}^2]$ (Manning and Ingebritsen, 1999) とした。従って、流体の流量は、 $J = 4 \sim 14 \times 10^3 [\text{ton/day}]$ と推定されるが、これは山頂部の天水下降流が抑制される効果を考慮に入れていないので、オーバーエスティメートである。

山頂部で天水下降流が完全に消失しており、しかも他に自然電位を作るソースが存在しない場合を考えると、山頂部の電位はゼロになるはずである。従って、観測された自然電位の正異常 $+200 \sim +250 \text{ mV}$ (図 3) のうち、地下の熱水上昇流の寄与分は、電位がプラスの部分 ($+50 \sim +100 \text{ mV}$) だけと考えられる。つまり、地下の液相の熱水上昇流の流量は、 $50/200 \sim 100/250$ の量の $J = 1 \sim 6 \times 10^3 [\text{ton/day}]$ と推定され、地球化学的データから推定されている地下の H_2O の流量 $J = 2.2 \times 10^4 [\text{ton/day}]$ (Hedenquist *et al.*, 1994) より一桁小さい値となる。ただし、推定に用いた浸透率の値は上限値であり、山頂部の天水下降流も完全に抑制されている場合を考えているので、実際の流量はさらに小さいと考えられる。

以上のような考察の結果、推定される薩摩硫黄島の浅部熱水系を図 6 に示す。硫黄岳の山麓あるいは、カルデラ外輪山部などからの天水下降流が地下の帯水層へ水を供給し、硫黄岳の地下では滞留しているマグマ周辺、あるいは脱ガスしたマグマ性ガス周辺の液相の水が熱によって駆動されて上昇し、正伝導電流源の深さまで正電荷を運ぶ。この深さでは、上昇した熱水は熱と減圧のためもはや電荷を運びえない蒸気となり、脱ガスした火山ガスと一緒に山頂火口から放出される。自然電位正異常を作っている地下の熱水上昇流は、脱ガスして火道を上昇するマグマ性ガスの流量よりもかなり小さく、最大でも一割程度の量にすぎない。従って、山頂火口から放出される H_2O の大部分がマグマ性であるという地球化学データ (Shinohara *et al.*, 1993) と矛盾しない。

5 まとめ

薩摩硫黄島で 1999 年に行った自然電位観測から、硫黄岳登山道沿い路線では、標高 400m 以上の正異常および山麓では地形と負の相関を示す自然電位分布が明らかになった。この分布は、線形地形効果と山頂火口

下の正負の伝導電流源を組み合わせたモデルでその概略が説明でき、正電流源の深さが海拔 0m 付近に推定された最適モデルは、データの特徴をよく再現した。マグマ周辺あるいは脱ガスしたマグマ性ガスの上昇流周辺に存在する少量の液相の熱水上昇流が、正異常の原因であると考えられる。しかしながら、自然電位の成因は複雑で物性パラメータにも大きな不確定性があるため、自然電位データの定量的解釈には曖昧さが残る。とりわけ、比抵抗と浸透率はオーダーで変化するので、より確実な定量的解釈を行うためにはこれらのパラメータの測定が不可欠である。

謝辞

火山活動研究センターの石原和弘教授、井口正人助教授および職員一同には継続して支援していただいた。京都大学理学研究科の田中良和教授、橋本武志助手との議論は非常に有益であった。また、地質調査所の石戸経士博士、篠原宏志博士からは多くの貴重なコメントをいただいた。ここに記して感謝申し上げる。本研究は、1999 年度防災研究所特別事業費プロジェクト「火山体浅部構造の比較研究」の支援を受けた。

参考文献

- Hedenquist, J., Aoki, M., and Shinohara, H., Flux of volatiles and ore-forming metals from the magmatic-hydrothermal system of Satsuma Iwojima volcano, *Geology*, **22**, 585–588, 1994.
- Helgeson, H. C. and Kirkham, D. H., Theoretical prediction of the thermodynamic behavior of aqueous electrolytes at high pressures and temperatures: I. Summary of the thermodynamic / electrostatic properties of the solvent, *Am. J. Sci.*, **274**, 1089–1198, 1974.
- 井口正人・石原和弘・高山鐵朗・為栗健・篠原宏志・斎藤英二, 薩摩硫黄島の火山活動 —1995 年～1998 年—, 京都大学防災研究所年報, **42 B-1**, 1–10, 1999.
- Ishido, T., Self-potential generation by subsurface water flow through electrokinetic coupling, in *Lecture notes in earth sciences*, **27**, *Detection of subsurface phenomena*, Springer-Verlag, Berlin, 121–131, 1989.
- 石戸経士, 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 1991 年論文集, 86–93, 1991.
- Ishido, T. and Mizutani, H., Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics, *J. Geophys. Res.*, **86**, 1763–1775, 1981.
- Ishido, T., Mizutani, H., and Baba, K., Streaming potential observations, using geothermal wells and in situ electrokinetic coupling coefficients under high temperature, *Tectonophysics*, **91**, 89–104, 1983.
- Ishido, T., Kikuchi, T., Matsushima, N., Yano, Y., Nakao, S., Sugihara, M., Tosha, T., Takakura, S., and Ogawa, Y., Repeated self-potential profiling of Izu-Oshima Volcano, Japan, *J. Geomag. Geoelectr.*, **49**, 1267–1278, 1997.
- Kanda, W. and Mori, S., Self-potential anomaly of Satsuma-Iwojima volcano, *Earth Planets Space*, **53**, 2001 (in press).
- 風早康平・篠原宏志, 活火山からの過剰な脱ガスについて — そのマグマ過程と機構 —, 地質学論集, **46**, 91–104, 1996.
- Manning, C. E. and Ingebritsen, S. E., Permeability of the continental crust: Implications of geothermal data and metamorphic systems, *Rev. Geophys.*, **37**, 127–150, 1999.
- 森真陽・神田径・井口正人, 薩摩硫黄島の自然電位分布, 京都大学防災研究所年報, **43 B-1**, 7–14, 2000.
- 小野晃司・曽屋龍典・細野武男, 薩摩硫黄島地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 図幅), 地質調査所, pp.80, 1982.
- Patella, D., Self-potential global tomography including topographic effects, *Geophys. Prosp.*, **45**, 843–863, 1997.

Sasai, Y., Zlotnicki, J., Nishida, Y., Yvoetot, P., Morat, P., Murakami, H., Tanaka, Y., Ishikawa, Y., Koyama, S., and Sekiguchi, W., Electromagnetic monitoring of Miyake-jima volcano, Izu-Bonin Arc, Japan: A preliminary report, *J. Geomag. Geoelectr.*, **49**, 1293–1316, 1997.

Shinohara, H., Giggenbach, W. F., Kazahaya, K., and Hedenquist, J. W., Geochemistry of volcanic gases and hot springs of Satsuma-Iwojima, Japan: Following Matsuo, *Geochem. J.*, **27**, 271–285, 1993.

吉田稔・小沢竹二郎, 薩摩硫黄島火山から放出される化学成分の量とその供給源に関する量的考察, *火山*, **26**, 1981.

Zlotnicki, J., Boudon, G., Viodé, J. P., Delarue, J. F., Mille, A., and Bruère, F., Hydrothermal circulation beneath Mount Pelee inferred by self potential surveying. Structural and tectonic implications, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **84**, 73–91, 1998.

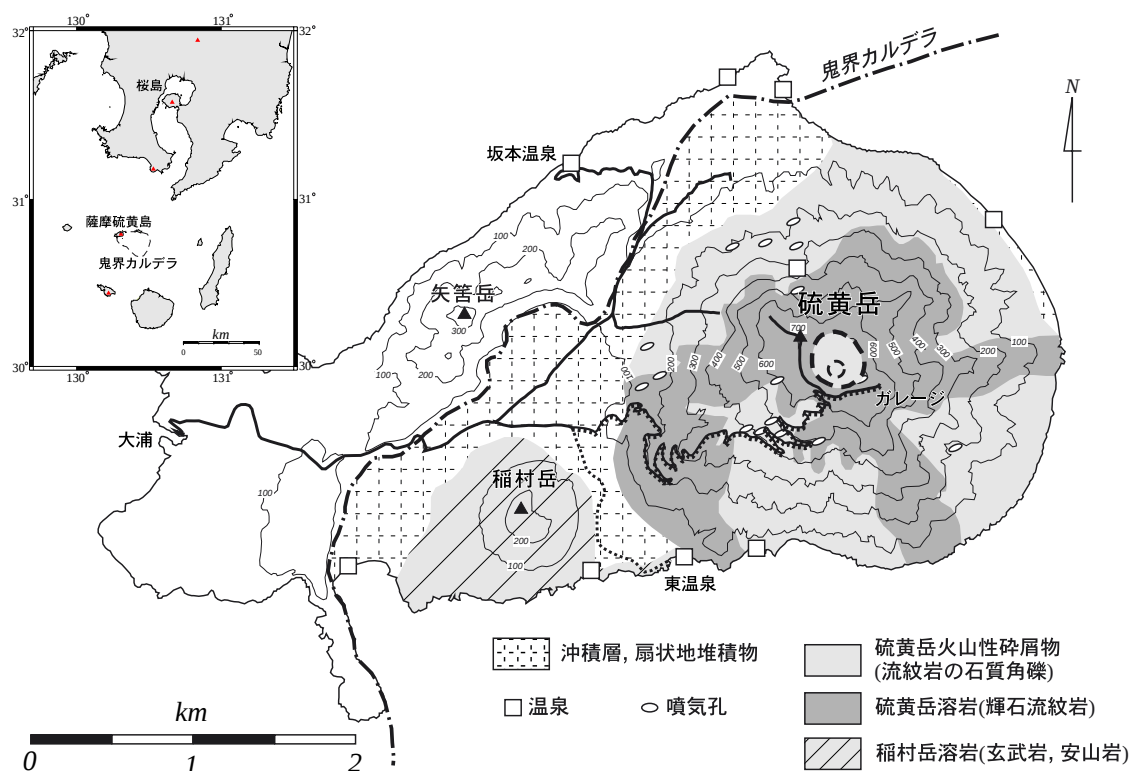


図 1: 薩摩硫黄島火山の位置図。鬼界カルデラ内の簡略化した地質図は小野・他 (1982) による。坂本温泉・東温泉等の温泉および噴気孔の位置をあわせて示した。自然電位の測定は、実線 (1999 年 11 月) および点線 (1999 年 7 月) で示した路線で行われた。

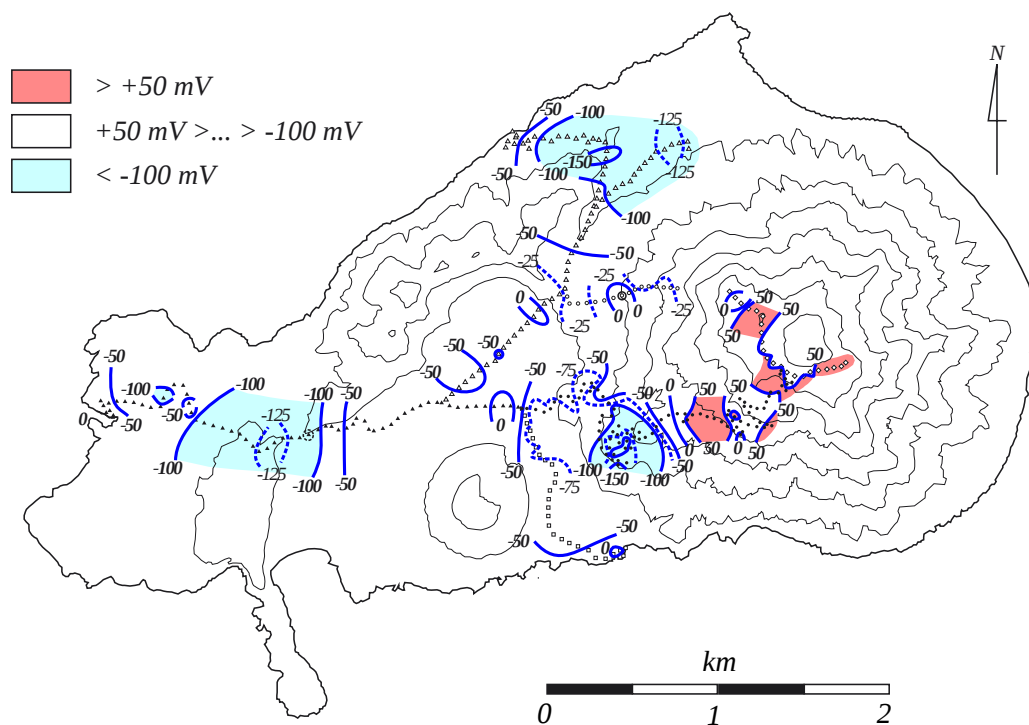


図 2: 1999 年に行われた自然電位測定の結果。島の西端の大浦海岸の海水の電位を基準にした相対値で表現されている。測定間隔は 50m で、カルデラ外輪山部は および▲、硫黄岳登山道は●、硫黄岳西山腹は○、山頂火口周辺は と、それぞれ地域毎に測定点を表すシンボルを変えている。

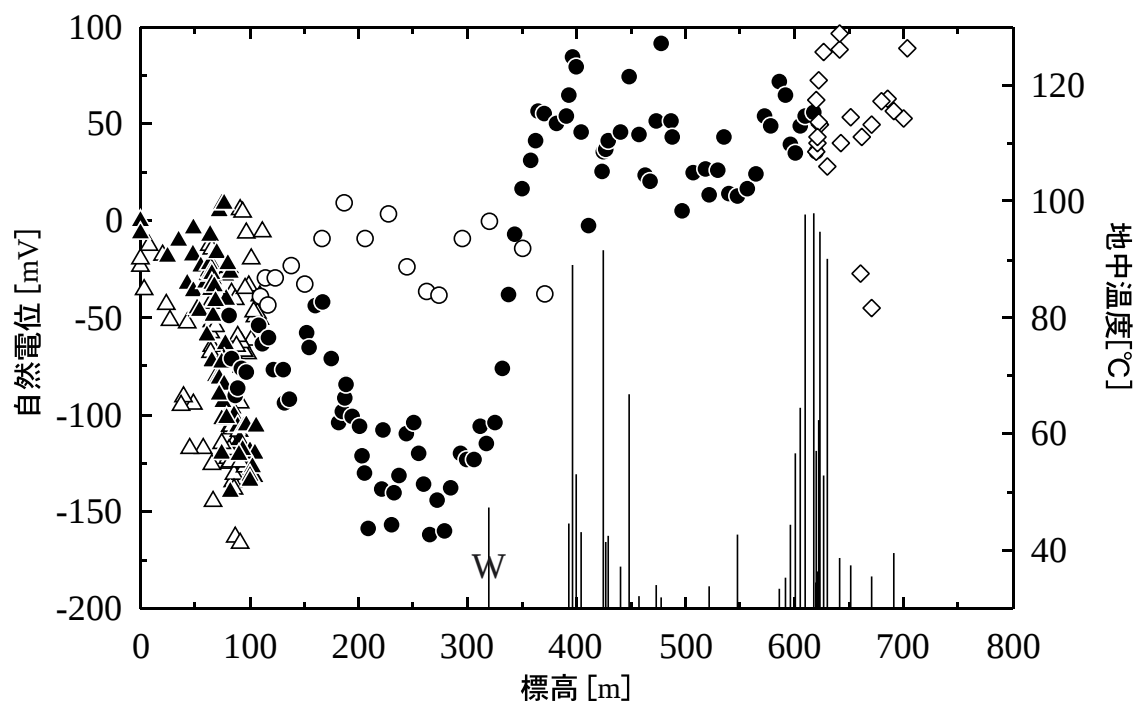


図 3: 1999 年 11 月の測定データの標高との関係。棒グラフは各自然電位測定点の 20cm 深地中温度を示す。各シンボルは図 2 で示された測定地域に対応する。

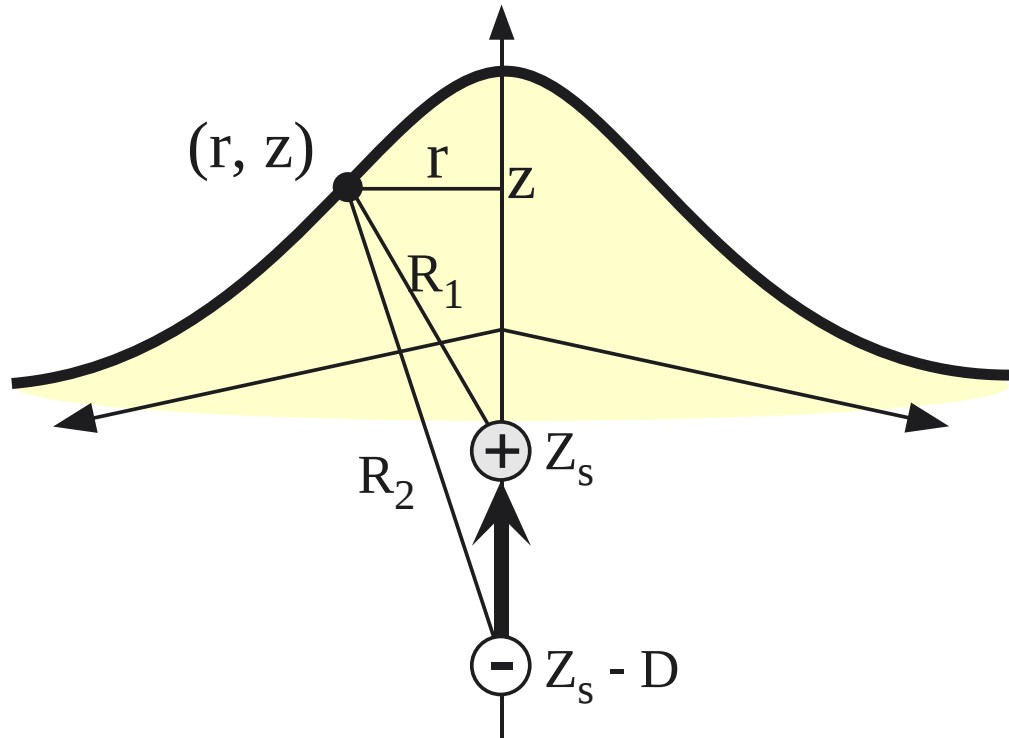


図 4: 等価電流源モデル。⊕と⊖の記号は、それぞれ伝導電流のソースとシンクを表す。

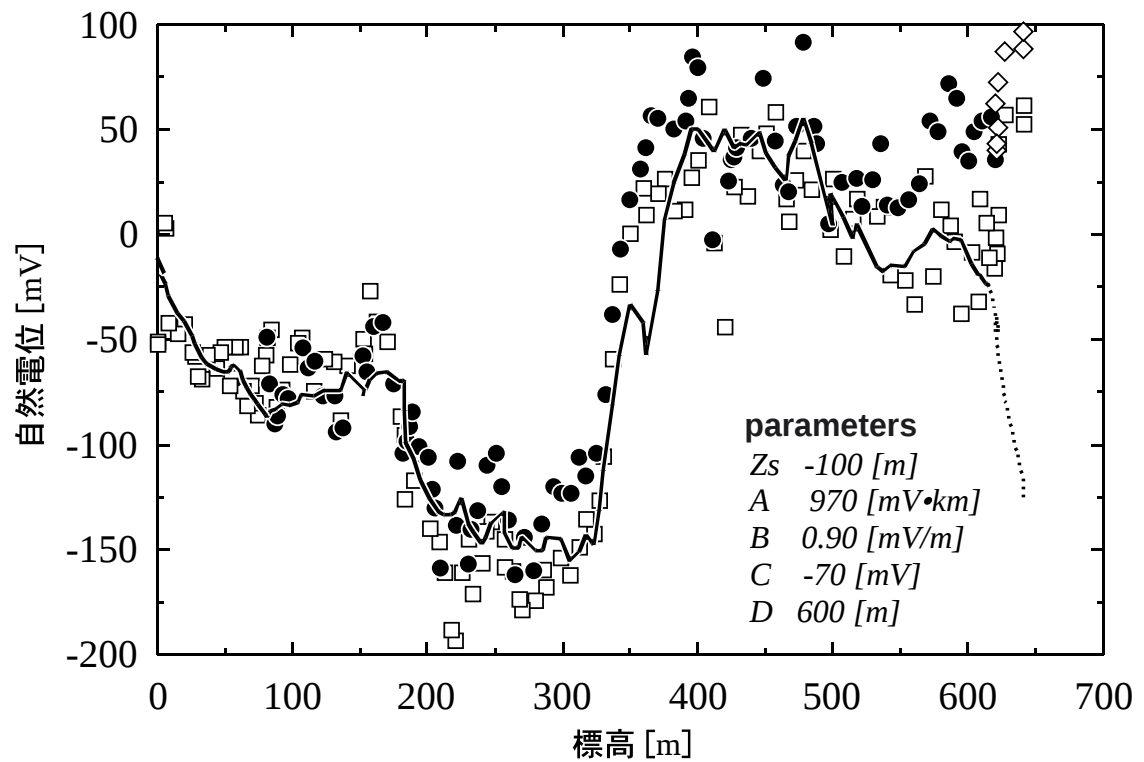


図 5: 最適なパラメータの組み合わせとその時に得られる電位分布とデータとのフィッティング。各シンボルは図 2 で示された測定地域に対応する。

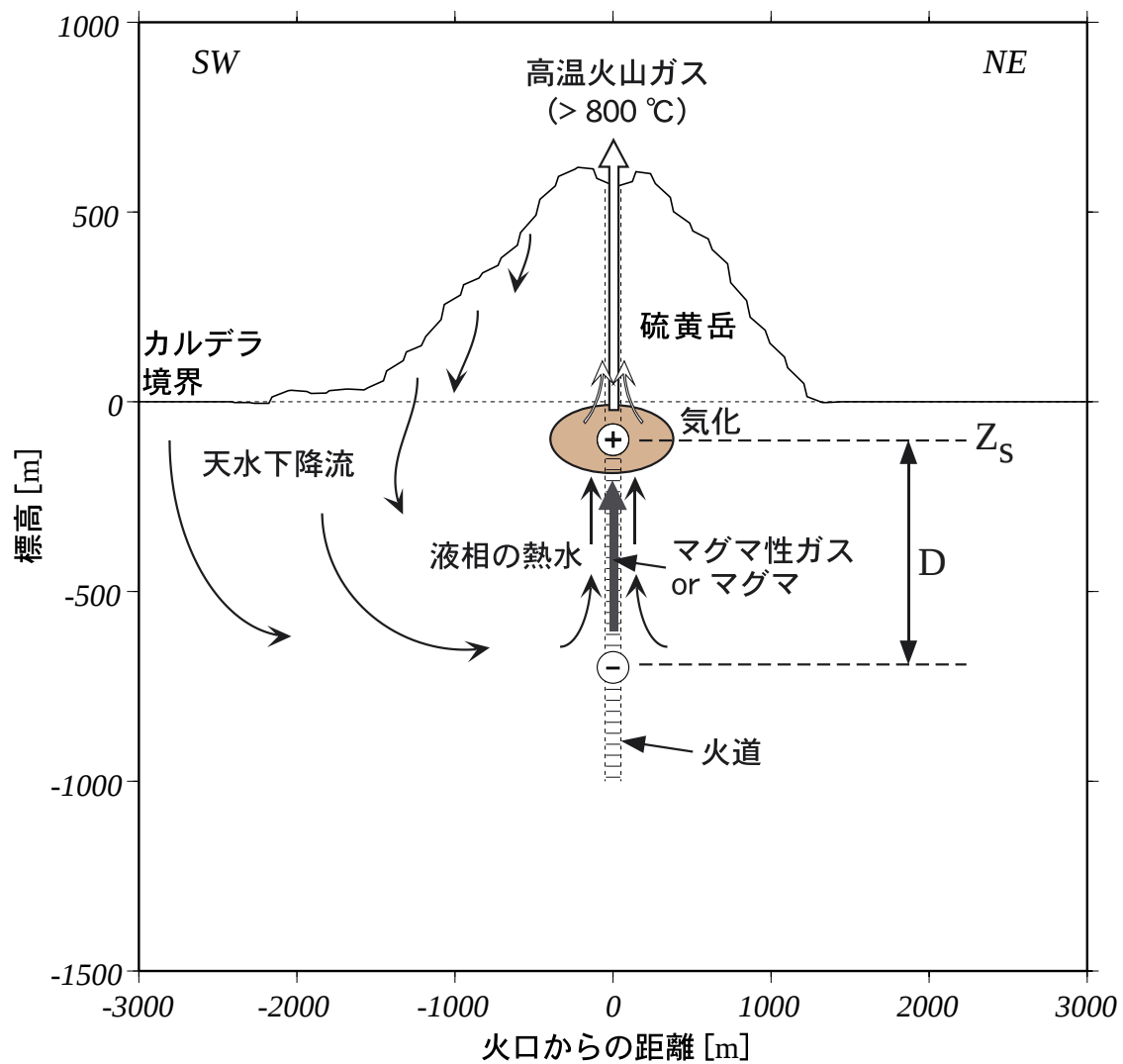


図 6: 自然電位分布から推定される薩摩硫黄島の浅部熱水系モデル。