

薩摩硫黄島の自然電位分布

森 真陽・神田 径・井口正人

要 旨

薩摩硫黄島で自然電位観測を行った結果、硫黄岳では、山麓から順に、地形効果と考えられる低電位、高電位勾配、正異常の領域が見られ、山頂火口付近をピークとする 250mV 程度のルート (√) 字型の自然電位分布を示すことが明らかになった。山麓で見られた低電位は、天水及び熱水の下降流に起因し、高電位勾配は、地質構造に深く関わっていると推測される。一方、鬼界カルデラの境界付近では、透水性の高い構造に起因すると考えられる負の異常が見られた。

キーワード： 薩摩硫黄島，火山，自然電位，流動電位，熱水系

1. はじめに

薩摩硫黄島は、鹿児島県薩摩半島の南端から南へ 45km に位置する、東西 5.5km、南北 4km の火山島であり、約 6300 年前に大噴火した鬼界カルデラの北西縁に位置すると考えられている (Fig. 1)。島内東部に位置する流紋岩質火山の硫黄岳は、歴史時代の噴火記録こそないが (小野ら, 1982)、少なくとも過去千年間にわたって活発な噴気活動を続けている (吉田・小沢, 1981)。また、島内には温泉が多数存在し (Fig. 1, ○印)、周辺には変色海域が見られる。

自然電位観測は、地下の熱水活動を把握し、火山活動を評価する目的で多くの火山で行われており、これまでに活火口周辺や噴気地帯での高電位異常が報告されている (例えば、Nishida and Tomiya, 1987)。火山地帯では地下の熱源からの熱交換により熱水系が発達することが考えられ、その熱水上昇に伴う流動電位が、自然電位の正異常を形成する主要原因であると解釈される場合が多い。しかし、観測される自然電位には、前述した流動電位効果の他に、地形効果や熱電効果、酸化還元効果など様々な成因が複雑に関係していると考えられ、自然電位異常の原因を狭一に特定することは困難である。

硫黄岳では、これまでの地球物理学・化学的研究か

らマグマ頭位が浅部 (<1km) に位置すると考えられており (例えば、篠原ら, 1993)、大きな自然電位の正異常が形成されていることが期待される。

本研究は、硫黄岳を中心に行った自然電位測定から、薩摩硫黄島における熱水系の特徴を考察するのが目的である。また、周辺の温泉や鬼界カルデラの境界付近における自然電位分布についても触れる。

2. 測定の概要

島内の東半分を占める硫黄岳は、急峻な地形のため、硫黄岳登山道以外に山頂部へアクセスすることは困難である。こうした状況から、Fig. 1 に示すような路線で、1999 年 7 月と同年 11 月に自然電位の測定を行った。7 月の測定範囲は、東温泉から硫黄岳山頂の南東側リムまで、11 月は、大浦海岸から硫黄岳火口周辺、坂本温泉、硫黄岳北西山麓、までであった。

電極には、鉛-塩化鉛電極と銅-硫酸銅電極を用いた。基準電極 (鉛-塩化鉛電極) を埋設した後、ケーブルを延展しながら 50m 毎に銅-硫酸銅電極又は鉛-塩化鉛電極を接地し、携帯型のデジタルテスターを使用して電位差を読み取った。測定値には、ごく局所的な異常を避けるため、近接した 3ヶ所で測定した値の平均値を採用した。また、約 400m 毎に基準電極と移動電極

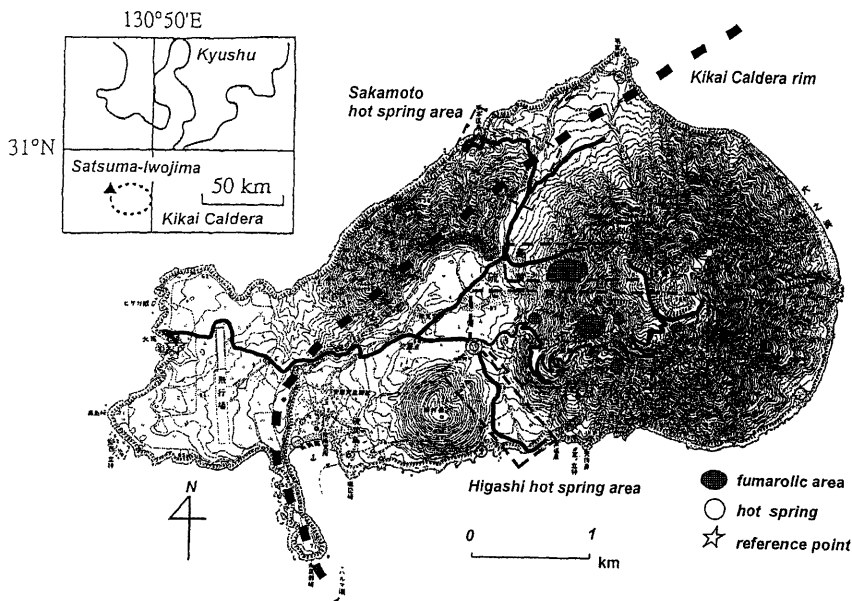


Fig. 1. Location map of Satsuma-Iwojima. Paths of the self-potential surveys are shown by solid lines. The calibration point of the two surveys is shown by a double circle.

との電極間電位差を近接した3ヶ所以上で測り、測定値の補正に用いた。基準電極（鉛-塩化鉛電極）と銅-硫酸銅電極の電位差は、410～540mVであり、鉛-塩化鉛電極と鉛-塩化鉛電極では、2～30mVであった。

硫黄岳では至るところに噴気孔が点在していることから、地下の熱的状況が自然電位に何らかの影響を及ぼしている可能性があると考え、11月の調査では自然電位測定と同一の点で地温測定も実施した。測定には、白山工業社製LS3300ptVと白金電極を用いて、10cm深及び20cm深における設置1分後の地温を測定した。

3. 測定結果

自然電位と地温測定の結果を、Fig. 2～Fig. 6に示す。自然電位の解析は、大浦海岸（Fig. 1, 硫黄島西端）における海水の電位を基準とした相対値で表した。7月に測定したデータは、Fig. 1中◎印で表した点での測定値が11月の測定値に等しいと仮定した。また、Fig. 2～Fig. 4では、東西方向に、Fig. 5～Fig. 6では、北西-南東方向にそれぞれ投影した分布を示す。

3.1 薩摩硫黄島の東西測線の自然電位分布

Fig. 2に薩摩硫黄島の東西測線（大浦海岸～硫黄岳山頂）の自然電位分布を示す。大浦海岸から東へ向かって硫黄岳登山道入り口（◎印）までの自然電位の値は、ほぼ地形標高と逆相関を示す。特に鬼界カルデラを横切る際に、約-150mVの最低電位になっている。

硫黄岳登山道（Fig. 1, EW①）の自然電位分布を、Fig. 3に示す。標高約300mまでは地形標高と逆相関を示し、そこから標高約360mにかけて、水平距離約300mの幅で200mV程度の電位の急上昇が見られる。また、標高約360mから山頂火口付近にかけては、電位のばらつきはあるが概ね高電位を保っており、しかも山頂火口に近づくにつれ、やや高電位になる傾向が見える。

次に、硫黄岳登山道の路線より約1km北の東西路線（Fig. 1, EW②）の結果をFig. 4に示す。急峻な崖の為、標高360～640mでは測定を行っていない。標高100～360mの自然電位の値には、地形標高と逆相関を示す地形効果的な分布は見られない。このことは、測定点近くに存在する噴気帯の影響や地形標高に対する電位勾配が小さい等の可能性が考えられるが、硫黄

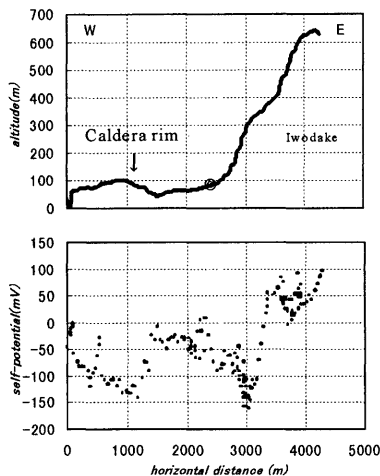


Fig. 2. The profile of topography (top) and self-potential (bottom). The observed S.P. data are projected on the east-west direction.

岳登山道路線 (EW①) に比べて測定点が少ないので、その詳細を確かめたうえでの議論が必要である。なお、標高 640m 以上では、硫黄岳登山道の路線の結果と同様に、標高 650~660m の低電位を除いては高電位を示している。

3.2 温泉地域の自然電位分布

島内に多数存在する温泉のうち、坂本温泉（島内北部）と東温泉（島内南部）の 2ヶ所をターゲットにした自然電位分布を得ることができた。

Fig. 5 に、坂本温泉地域（Fig. 1）の自然電位分布を示す。自然電位は、ほぼ地形効果的な分布を示し、坂本温泉に近い測定点においてもその傾向から大きく外れる分布は見られなかった。

次に、Fig. 6 に東温泉地域（Fig. 1）の自然電位分布を示す。自然電位は、ほぼ地形効果的な分布を示しているが、地形標高に対する電位勾配は小さい。東温泉に最接近した測定点では、自然電位が約 50mV 高くなっている。また、図中の最後と 2 つ前の測定値は、海水の電位を示している。

3.3 地温分布

地温測定の結果を Fig. 3 及び Fig. 4 に△印で示した。東温泉地域の測定は 7 月に行った為、地温のデータは測定されていない。硫黄岳の山頂火口周辺や噴気帯の近く、また坂本温泉でも地温の高い地域が見つ

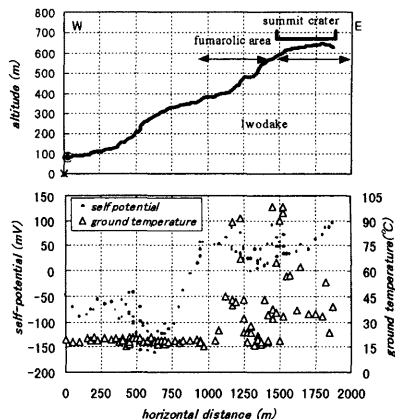


Fig. 3. Topography (top), self-potential and ground temperature (bottom) of EW① (Fig. 1) on the southwestern flank of Iwodake. The observed S.P. data are projected on the east-west direction.

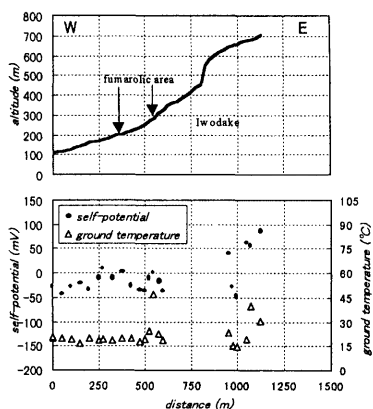


Fig. 4. Topography (top), self-potential and ground temperature (bottom) of EW② (Fig. 1) on the western flank of Iwodake. The observed S.P. data are projected on the east-west direction.

かり、その他の地域では、15~20℃以下の外気温と同程度の地温であった。

硫黄岳登山道 (EW①) では、Fig. 3 で示すように、標高約 380m から地温分布の傾向が変わり始める。これは、硫黄岳登山道に存在する噴気孔が出現し始める位置とほぼ一致する。最も地温が高いのは、山頂火口周辺で、90℃以上の値を示した。その他、標高 450m

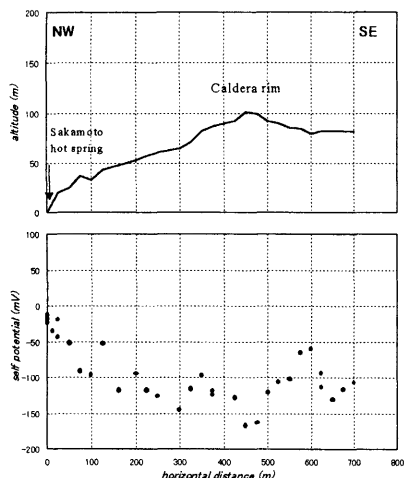


Fig. 5. Topography (top) and self-potential (bottom) of Sakamoto hot spring area. The observed S.P. data are projected on the northwest-southeast direction.

付近の噴気孔に近い場所でも 90℃以上の値を示した。硫黄岳西麓の路線 (EW②) においても、やはり山頂火口付近で地温が高くなっていて、山腹では、噴気孔の直上 (標高約 300m) の一点で、47℃を示した (Fig. 4)。また、坂本温泉の近傍でも、25℃の地温を示し、地熱兆候が認められた。

4. 議論

4.1 カルデラ壁の負異常

カルデラ境界を 2 つの路線で横断した結果、カルデラ壁周辺では、-140～-160mV 程度の低電位が見られ (Fig. 2, 5), それらの路線では、地形効果的な自然電位分布を示す事が分かった。Fig. 7 に硫黄岳東西測線の地形標高に対する自然電位の分布図を示す。図中 A は、地形効果を示す一定の電位勾配 (-0.5 mV/m, 図中実線) から外れるデータ群であり、負異常であることが見て取れる。

自然電位の地形効果は、重力に従って天水が地下に浸透する際、その下降流に伴って正の電荷が流れの方向に移動する為に生じる流動電位効果であると理解されている (Ishido, 1989)。過去には、多くの火山でその事例が観測されており (例えば、橋本ら, 1999), 最近では安川・茂木 (1998) によって、数値モデリングの手法を用いた定量的な評価も行われている。彼らの結果では、地形・浸透率・比抵抗・連結輸送係数等

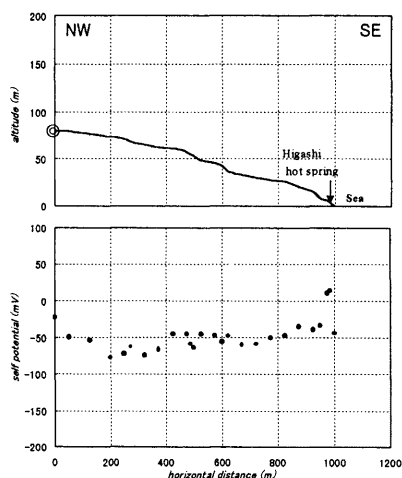


Fig. 6. Topography (top) and self-potential (bottom) of Higashi hot spring area. The observed S.P. data are projected on the northwest-southeast direction.

のパラメータの組み合わせによって現れる地形効果のパターンは様々で、また、必ずしも自然電位と地形標高が線形関係で表せるとは限らないとしている。

鬼界カルデラのような巨大カルデラ周辺の自然電位分布については観測例が少ない。Mt. Pelee では、カルデラ壁ごく近傍で負の異常が現れることが報告されている (Zlotnicki et al., 1998)。そこで、薩摩硫黄島のカルデラ壁の負異常を Mt. Pelee の場合と比較してみる。Mt. Pelee では、4ヶ所でカルデラ壁周辺を測定しており、カルデラ壁から幅 200～800m の範囲内で、500～800mV 程度の急激な電位の低下が観測されている。さらに、報告されたデータから、標高と自然電位が線形関係である事を仮定して、地形電位勾配を換算すると、地形効果に支配されると評価された地域では -0.4 ～ -1.8mV/m であるのに対して、カルデラ壁付近では -6.4 ～ -8.3mV/m であり、カルデラ壁付近では負異常が大きい。一方、薩摩硫黄島でも、地形効果と評価した地域では、-0.5mV/m であったのに対して、カルデラ壁付近では -1.4 ～ -1.5mV/m であった。両火山とも、カルデラ壁付近では、地形効果と比べて地形効果の勾配が大きい。恐らく、この勾配の違いは、カルデラ壁付近の構造境界を反映した透水性の違いに起因していると推測される。

4.2 硫黄岳の自然電位

前章に述べたように、硫黄岳の自然電位分布は、標

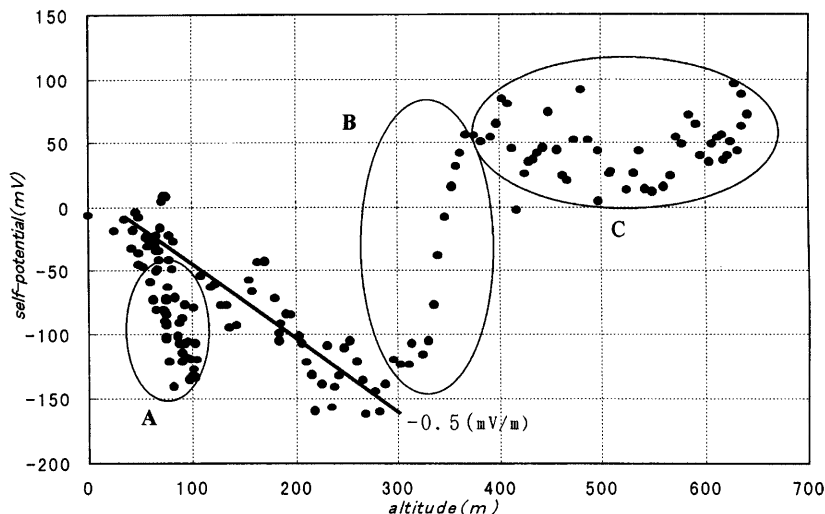


Fig. 6. The S.P. data shown in Fig.2 are plotted against altitude of the measurement point.

高 300m までは地形効果的な分布を示し、さらに標高 360m までが高電位勾配域、山頂火口付近では多少ばらつきはあるが、概ね一定を保った高電位である。これらのいわばルート（J）字型を成す自然電位分布のパターンは、三宅島火山のそれと類似している。三宅島では、標高 600m までは地形標高と逆相関があり、そこから水平距離約 500m で 500mV 程度の急上昇を示し、山頂火口付近では高電位を保っている（Sasai et al. 1997）。

しかし、自然電位のパターンは類似していても、異常の大きさや広がりと言った本質的な部分はそれぞれの火山によって異なる。以下では、それらについて、自然電位の地形効果、高電位勾配、正異常、さらに地電分布との関係を検討する。

(1) 地形効果

Fig. 3 及び Fig. 7 に示されたように、硫黄岳の標高 300m までに地形効果的な分布が見られた。低電位（負異常）の原因としては、流動電位効果や電気化学効果などが挙げられるが、噴気や硫黄鉱物等が見られず、また表層地質が崖錐堆積物であることから、前者の成因を考えた方が自然であると思われる。すなわち、天水の下降流に対応した流動電位に起因しているものと推測される。

また、地形標高に対する自然電位の勾配は、約 -0.5mV/m (Fig. 7) であった。同じ調査地域でも、異なる斜面によって地形電位勾配はそれぞれ異なる値を

示すので一概には言えないが、他の火山と比較してみると、諏訪之瀬島 -0.7mV/m (神田ら, 1999)、桜島 -1.0mV/m (橋本ら, 1999)、三宅島 -1.07mV/m (Sasai et al. 1997) であり、硫黄岳の場合はやや緩やかであることが分かった。

(2) 高電位勾配

Fig. 3 及び Fig. 8 中の B に示されたように、標高 300 ~ 360m にかけて、水平距離約 300m の幅で、200mV にも及ぶ電位の急上昇が見られた。

硫黄岳は、緻密で固い岩体とその周囲を覆う崖錐堆積物で成っていると考えられている（小野ら, 1993）。その地質構造境界と自然電位の高電位勾配域がほぼ一致することから、この高電位勾配域は、地質構造の違いを反映しているかもしれない。

Nishida and Tomiya (1987) は、埋没したダイポール型の電流ソースと異なる比抵抗媒質を水平方向に 2 つ並べたモデルで、水平方向の比抵抗変化が自然電位に及ぼす影響を定量的にシミュレートしている。その結果、比抵抗のコントラストが大きい（10 倍）とき、媒質の境界付近で電位勾配が急激に変化することが示されており、この地域でも硫黄岳の基盤岩体と崖錐堆積物の比抵抗差が高電位勾配に関与している可能性がある。さらに、地温測定の結果 (Fig. 3) では、自然電位の高電位勾配域から約 500m 山頂側に離れたところから、大きく変化している。これも、熱伝導度の良い岩体とそうでない崖錐堆積物との地質構造の違いを

反映しているものと推測される。地下の温度が上昇すると、 ζ 電位が大きくなり、流動電位係数が大きくなることが期待される (Ishido and Mizutani, 1981)。以上のことから、地下における熱的状态の違いによって高電位勾配域が形成されていると推測される。

(3) 正異常

正異常は、Fig. 4 及び Fig. 8 中の C に示されるように、標高 360m から山頂火口付近にかけて見られた。また、正異常域に対応して、地温分布も高温を示している (Fig. 4)。このことから、この自然電位の正異常は、熱水の上昇に伴う流動電位効果と流体の熱拡散や岩石の温度変化に伴う熱電効果との重ね合わせによって形成されたと推測できる。

硫黄岳の正異常の大きさを、日本の他火山における観測例と比較してみる。今回の正異常の大きさが 250mV であるのに対し、三宅島 700mV (Sasai et al., 1997)、有珠山 400mV (Nishida and Tomiya, 1987)、諏訪之瀬島 350mV (神田ら, 1999) となっており、硫黄岳の正異常は小さい。一つの解釈として、硫黄岳の山頂火口及びその周辺では、700~900℃の高温噴気帯が点在している事から (松島ら, 1998)、電荷を運び得ない乾いた蒸気が上昇している為、大きな流動電位が生成されないことが考えられる。Tyrand and Marsden (1985) は、湿った蒸気と乾いた蒸気をキャピラリー・チューブ中に流した場合、湿った蒸気は大きな電位を発生するが、乾いた蒸気の場合は流動電位が観測されないことを実験的に確かめている。

篠原ら (1993) は、地球化学的研究から薩摩硫黄島の熱水系モデルを提唱している。彼らは、すべての熱水試料 (火山ガス・温泉水) が、低圧下 (数気圧) での火山ガス、天水そして岩石との反応によって生じ得るため、深部における熱水系の存在を仮定する必要性がないと主張している。これらの事から、今回観測された小さな正異常は、多くの火山で報告されているように熱水の上昇と特定して成因を考えるよりも、あまり流動電位を生成しない高温の蒸気の上昇と熱水の上昇の両者が関係していると考えられる。しかし、硫黄岳の噴気地帯、特に山頂火口付近の岩石は、硫黄変質及び白色珪化変質を受けている (小野ら, 1982) ことから、比抵抗の低い変質鉱物の存在によって、或いは地下水と地中の火山ガスが酸化還元反応を起こすことで生じる負電位によって、見かけ上電位が下がっている可能性もあり、今後、地球化学的研究や比抵抗分布などの地球電磁気学研究的成果を待ったうえで、詳しい議論を行う必要がある。

4.3 温泉地域の自然電位

温泉地域では、熱水の上昇・流動に伴って、自然電

位の正異常が生成されることが期待される。観測事例として、阿蘇山で約 800m の幅で 100mV 程度の正異常 (田中ら, 1999)、Mt. Pelee で約 400m の幅で 400mV 程度の正異常 (Zlotnicki et al., 1998) などが報告されている。

今回、測定を行った坂本温泉地域と東温泉地域では、温泉水の地球化学的分析が既に行われており、それらの温泉は、地球化学的に異なる性質を持つことが知られている (篠原ら, 1993)。坂本温泉は、鬼界カルデラの外側にあることで、他の地下水系と大きく異なり、マグマ起源成分 (H_2O , S, Cl) をほとんど含まない天水・海水の単純混合系である。一方、東温泉は、マグマ起源成分を含む天水・海水・マグマ水の単純混合系である。

3.2 節で述べたように、坂本温泉付近では特に自然電位の異常は見られなかったが、東温泉付近では 2ヶ所で 50mV 程度ではあるが高電位の場所が見られた。両者の自然電位の異常の現れ方の違いが、地下からの熱水の供給形態に起因するという解釈もできようが、東温泉に最接近した測定点でもあと 100m の距離があり、東温泉付近での地温の測定が行われていないので、今後追加観測をすることによって確かめていく必要がある。

5. おわりに

1999 年 7 月と 11 月に、薩摩硫黄島の熱水系の特徴を考察する目的で自然電位観測を行った。その結果、鬼界カルデラの境界付近では、透水性の高い構造に起因すると思われる負の異常が見られた。硫黄岳では、山麓から山頂火口へ近づくに従って、順に地形効果と考えられる低電位、高電位勾配、正異常の領域が見られ、三宅島火山等で観測された分布に類似したルート (√) 字型の自然電位分布を示すことが明らかになった。低電位は、天水或いは熱水の下降流域に対応し、高電位勾配については、地質構造に深く関わっている事が推測される。山頂火口付近に存在する正異常は、その大きさが 250mV 程度であり、他の火山と比較しても小さい。硫黄岳では、地球化学的研究から深部の熱水系の存在が示唆されており、この小さな正異常は、多くの火山で報告されているように熱水の上昇と特定して成因を考えるより、山頂火口から放出される噴気温度が非常に高い事から、あまり流動電位を生成しない高温の蒸気の上昇と熱水の上昇の両者を成因として考えた方が自然である。

いずれにせよ、自然電位データだけからその成因を特定することは困難であり、今後、浅部の比抵抗構造や水理的構造を明らかにし、それらを十分考慮して

解釈することが重要である。

謝 辞

松島喜雄氏をはじめとする通産省工業技術院地質調査所の方々、薩摩硫黄島の皆様には、観測の際にご協力を頂きました。また、本稿を作成するにあたって、火山活動研究センターの石原和弘教授、京都大学理学研究科附属地球熱学研究施設の田中良和教授、橋本武志助手には、終始有益なご教示を頂きました。ここに記して深く感謝申し上げます。本研究は、1999 年度防災研究所特別事業費（防災研究経費）により行われた。

参考文献

- 小野晃司・曾屋龍典・細野武男（1982）：薩摩硫黄島の地質，地域地質研究報告（5 万分の 1 図幅），地質調査所，pp. 80.
- 神田 径・橋本武志・大島弘光（1999）：諏訪之瀬島火山における自然電位分布，京都大学防災研究所年報，第 42 号 B-1，pp. 11-18.
- 篠原宏志・風早康平・Hedenquist, J.W. (1993)：薩摩硫黄島の火山ガス・温泉・熱水系，地質ニュース，第 472 号，pp. 6-12.
- 田中良和・橋本武志・長谷英彰・坂中伸也・増田秀晴（1999）：阿蘇中央火口丘における自然電位（1），Conductivity Anomaly 研究会 1999 年論文集，pp. 187-192.
- 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（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，第 42 号 B-1，pp. 19-25.
- 松島喜雄・篠原宏志・風早康平（1998）：薩摩硫黄島火山硫黄岳の熱的活動状況（1996-1997），地球惑星科学関連学会合同大会予稿集，pp. 412.
- 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，第 51 巻，第 1 号，pp. 17-26.
- 吉田 稔・小沢竹二郎（1981）：薩摩硫黄島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，第 2 集，第 26 巻，第 1 号，pp. 25-34.
- 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.
- Ishido, T. and Mizutani, H. (1981)：Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock — Water systems and its applications to geophysics, J. Geophys. Res., Vol. 86, pp. 1763-1775.
- Nishida, Y. and Tomiya, H. (1987)：Self-potential studies in volcanic areas (I) —Uzu Volcano—, Jour. Fac. Sci. Hokkaido Univ., Ser. VII (Geophysics), Vol. 8, No. 2, pp. 173-190.
- Sasai, Y., Zlotnicki, J., Nishida, Y., Yvetot, P., Morat, P., Murakami, H., Tanaka, Y., Ishikawa, Y., Koyama, S. and Sekiguchi, W. (1997)：Electromagnetic monitoring of Miyake-jima volcano, Izu-Bonin Arc, Japan: A preliminary report, J. Geomag. Geoelectr., Vol. 49, pp. 1293-1316.
- Tyrand, C. K. and Marsden, S. S. Jr. (1985)：The streaming potential of steam. A paper presented at the Geothermal Resources Council Meeting in Hawaii in August 1985, pp. 71-74.
- Zlotnicki, J., Boudon, G., Viode, J. P., Delarue, J. F., Mile, A. and Bruere, F. (1998)：Hydrothermal circulation beneath Mount Pelee inferred by self potential surveying. Structural and tectonic implications, J. Volcanol. Geotherm. Res., Vol. 84, pp. 73-91.

Self-potential measurements in Satsuma-Iwojima

Shin'you MORI, Wataru KANDA and Masato IGUCHI

Synopsis

Satsuma-Iwojima is located in the northwestern margin of the Kikai Caldera that erupted about 6300 years before. Iwodake (rhyolitic lava dome) located at the eastern part of the island has continued its fumarolic activity for hundreds years. Self-potential (S.P.) observation was aimed to reveal the hydrothermal system beneath Satsuma-Iwojima volcano. A positive S.P. anomaly around the summit crater and a negative one at the foot of Iwodake were observed. They can be interpreted as electrokinetic potentials associated with the ascending and descending flows of the hydrothermal fluid, respectively. A large potential gradient observed around 300m a.s.l. was suggested to be caused by the difference in geological structure. Compared with other volcanoes, it is characteristic that magnitude of the positive anomaly is relatively small. High temperature vapor, which cannot carry the positive charge, and upward fluid flow beneath the active vent may contribute this positive anomaly.

Keywords: Satsuma-Iwojima, volcano, self-potential, electrokinetic potential, hydrothermal system