

諏訪之瀬島火山における自然電位分布

神田 径・橋本武志*・大島弘光**

* 京都大学大学院理学研究科

** 北海道大学大学院理学系研究科

要 旨

1998年10月に実施された第3回諏訪之瀬島火山の集中総合観測の観測項目の一つとして、火山体の自然電位を測定した。諏訪之瀬島火山の自然電位分布には、他の多くの火山で観測されたような、山体中央部で平面的広がりが数 km の相対的に電位の高い異常領域が存在することが明らかとなり、地下浅部での活発な熱水活動の存在が示唆された。また、古い火口跡周辺でもやや規模の小さな正異常が存在し、熱水活動の中心が御岳活動火口周辺だけではなく、南西側にも存在している可能性があることがわかった。御岳旧火口周辺では、空間的広がりは小さいながら明瞭な負の異常がみられたが、その成因等は今のところ明らかではない。

キーワード： 諏訪之瀬島, 火山, 自然電位, 流動電位, 熱水系

1. はじめに

1998年10月～11月にかけて、諏訪之瀬島火山集中総合観測が実施され、その観測項目の一つとして、火山体の自然電位の調査を行った。火山の集中総合観測とは、火山活動の評価および予測、また噴火予知のための基盤データの整備を目的として様々な地球物理学的、地球科学的、地質学的調査を行うものであり、諏訪之瀬島における集中総合観測は1984年、89年に続いて3回目である。

諏訪之瀬島は鹿児島市の南西約200 kmに位置するトカラ列島の火山島である (Fig. 1)。中央部の御岳、北東部の富立岳、南西部の根上岳などの成層火山からなり、標高799 mの御岳山頂の東側には北東に開いた馬蹄形カルデラが形成されている (Fig. 2)。根上岳のさらに南西にはナベタオ火口跡が見られ、これらの火口や火山体の連なりは、北東－南西方向に並ぶ傾向がみられる。根上岳の活動は御岳の活動よりも古く、ナベタオ火口跡の形成年代も不明である。富立岳の活動はさらに古い。御岳の最も古い噴

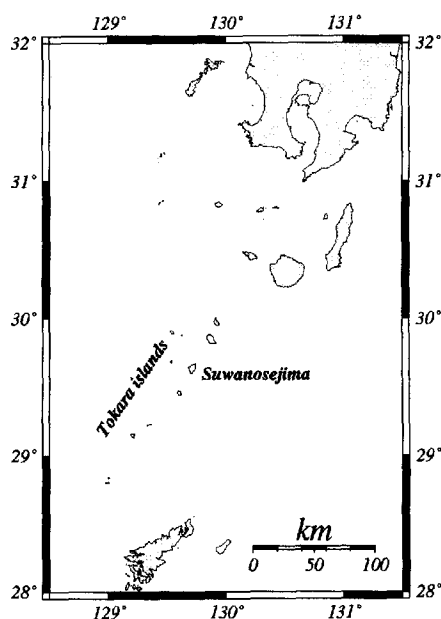


Fig. 1 Location map of Suwanosejima.

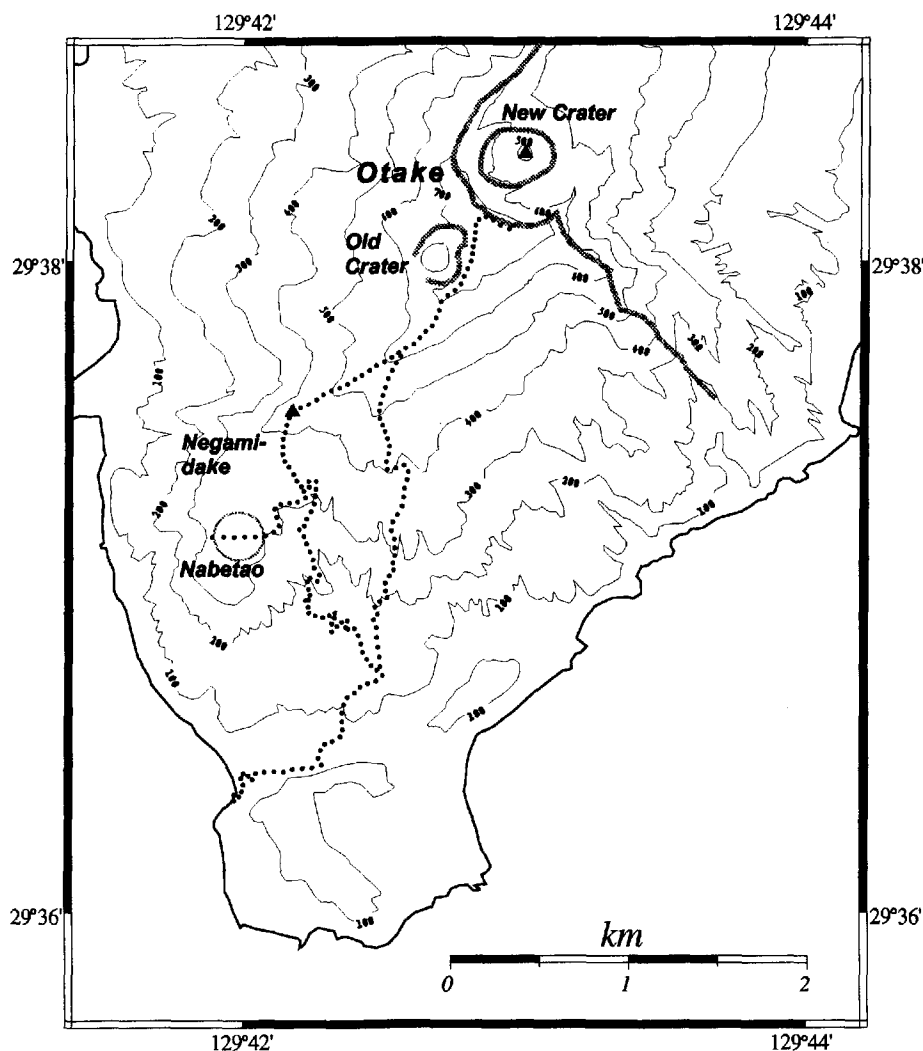


Fig. 2 Southern part of Suwanosejima island. Thick curve shows the outline of craters and the horse-shoe-shaped caldera. Measurement points of the self-potential survey in October 1998 are shown by black dots.

火記録は 1813 年～14 年の活動で、現在の活動火口から約 500 m 南西の文化火口から大量の溶岩流を噴出した。その後の山体崩壊を経て、1984 年～85 年には再び溶岩を流出し、馬蹄形カルデラ内に中央火砕丘を形成した (平沢・松本, 1983)。現在はこの中央火砕丘で、過去 40 年以上にわたって毎年のようにストロンボリ式噴火を特徴とする活動を繰り返している。

火山地域で自然電位の空間分布を調べると、しばしば 1 V を超えるような相対的に電位の高い正の異常領域が観測されることがある (例えば, Michel and Zlotnicki, 1998)。その異常の原因は、未だ完全には解明されていないが、最も有力なメカニズムとして、流体の流動に伴う流動電位現象が考えられている。これは、流体と固体との相互作用によって生

じる電位が、通常の地下の液相-固相を考える場合、流れの方向に正の電位差として現れる現象であり、数 100 mV を超えるような大きな電位差も作り得ることが実験的に確かめられている (例えば, Ishido and Mizutani, 1981)。従って、地下に上昇流が存在するような場所で自然電位の分布を調べると正の異常が観測され、逆に下降流の生じている場所では負の異常となって現れることが期待される。火山地域においては、地下に熱水系が発達している場合がしばしばあることから、熱水の上昇に起因する流動電位が、観測される大きな正の異常を作る主要原因と考えられている (例えば, Ishido et al, 1997)。このほか、熱起電力効果によっても正の電位が生じることが考えられるが、せいぜい 100 mV 程度の異常しか期待できず (Corwin and Hoover, 1979)、数百 mV

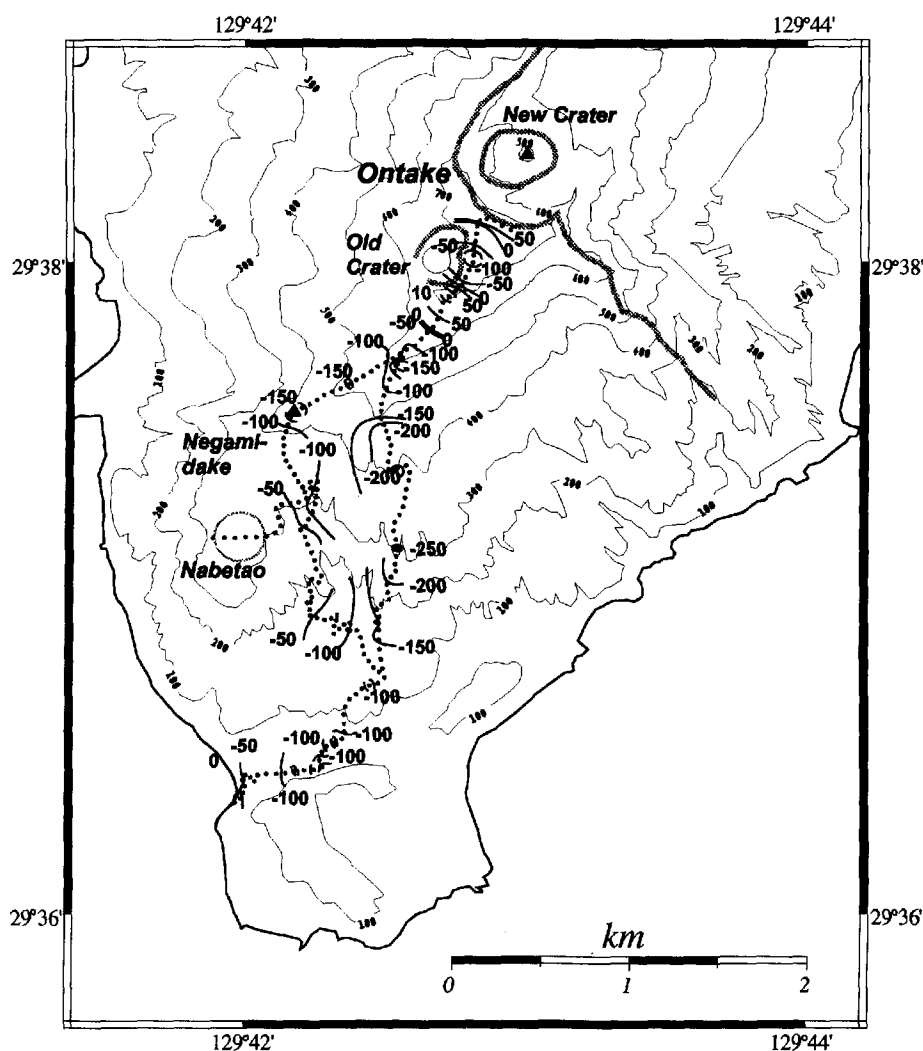


Fig. 3 Self-potential distribution of Suwanosejima volcano. Contours are in mV with 50 mV intervals.

を超えるような異常の主原因にはなりにくい。

このように、火山地域で観測される自然電位の正の異常の大きさや広がり、地下の熱水系の規模や広がりについての情報をもたらしとえられる。熱水系の規模や広がり、火山の熱エネルギー放出機構を考える上で重要な情報になりうる。本調査においても、諏訪之瀬島火山の地下熱水系の広がりや大きさについての知見を得ることを目的とし、特に、北東-南西方向の火口列と周辺地域との違い、および現在の活動火口周辺と古い山体周辺との違いに着目して調査を行った。

2. 測定の概要

諏訪之瀬島は、その高い活動度と急峻な地形のため、馬蹄形カルデラの南縁までしか近づくことはできず、測定可能な範囲は島の南半分に限られる。こ

うした状況から、Fig. 2 に示すように、測定は、南西側海岸から登山道沿いにカルデラ南縁までの路線、登山道入口から西側へ分岐し根上岳を通過して再び登山道へ合流する路線、の2路線で行った。後者は途中分岐し、ナベタオ火口跡を横断して西側リムまで測線範囲を広げた。両路線の南端にあたる南西側海岸では、電極を海に落として海水の電位と接続した。

測定方法としては、非分極性電極である鉛-塩化鉛電極と銅-硫酸銅電極を50 m 間隔で交互に接地して、両電極間の電位差を高入力抵抗のテスターで測定した。局所的な異常を避けるために、測定は深さ約5 cm の近接した3ヶ所で行い、値が大きく異なる場合はさらに測定場所を増やして、異常値を除いて平均した値を測定値とした。異なる電極を用いたのは、電極間電位差を故意に作ることによって、50 m 間隔では電位差がほとんど出ないような場所でも、精度よく測定を行うためである。そのため、

測定の起点と終点では、電極間電位差をやはり3ヶ所で測定し、測定値の補正を行っている(橋本・他, 1998)。鉛-塩化鉛電極を基準とした銅-硫酸銅電極の電位は530~560 mVであった。

3. 自然電位分布

Fig. 3に諏訪之瀬島南西海岸における海水の電位を基準とした各測定点の電位分布を示す。御岳文化火口周辺で規模は小さいものの約100 mVの明瞭な負の異常領域が見られ、そこから現在の活動の中心であるカルデラ内の中央火砕丘へ向かって、御岳南縁までに100 mVを超える正の異常領域が見られる。登山道に沿った東側の路線では、火口から離れ標高が下がるにつれ電位も低くなるが、標高300 m付近から下は標高と負の相関を示すようになる。これは、三宅島等多くの火山で報告された自然電位分布(Sasai et al., 1997)と同様のパターンで、熱水活動等に起因する正の異常と、標高と負の相関を示す所謂「地形効果」による負の異常との重ねあわせによって作られていると考えられる。すなわち、標高が上がるにつれ負電位が大きくなる「地形効果」の上に、活動火口を中心とし、ある標高になるとそれを凌駕するようになる大きな正の異常が存在する。一方、根上岳~ナベタオへ至る路線では、根上岳の山頂付近を除いて、明瞭な標高相関は見られない。むしろ、ナベタオ火口跡周辺で相対的な正の異常領域を形成しており、火口跡付近の地下においても熱水系が発達している可能性がある。

4. 議論

4.1 地形効果

多くの火山において自然電位の測定がされてきた結果、地形効果と呼ばれる標高の違いによって生じる電位は-1 ~ -10 mV/mの勾配を持つことわかってきた。その生成機構は、やはり完全には解明されていないが、地下の水を含む層の標高が空間的に異なることにより定常的な下降流が生じているためと考えられている(Ishido, 1989)。

標高相関が見られた登山道沿い路線の標高300 m以下のデータに対して、線形関係の地形効果(Ishido, 1989)を仮定してその勾配を求めてみると-0.9 mV/mであった。Fig. 4上図に、全測定データを2つの路線ごとに標高に対してプロットしたもの、および求められた勾配を直線で表したものを示す。

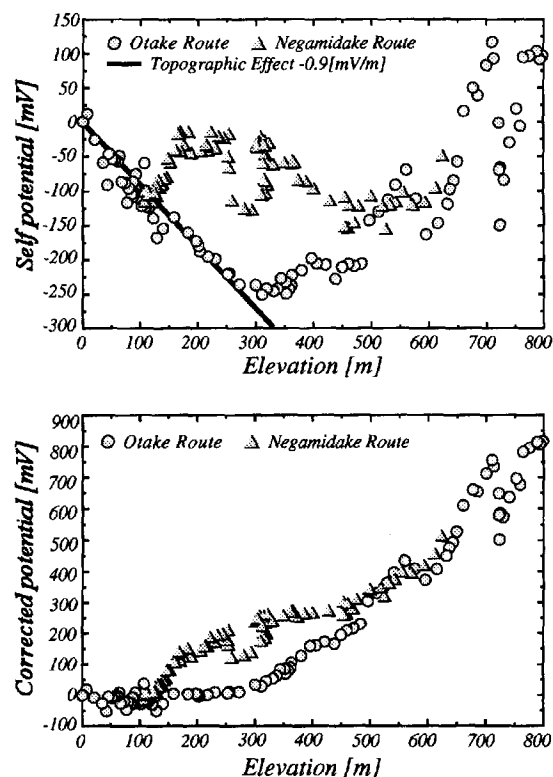


Fig. 4 Relation between topography (horizontal axis) and self-potential (vertical axis). Top panel shows the measured potential along two routes (circles and triangles). Thick line is a linear approximation for the data below 300 m altitude along the Otake route (-0.9 mV/m). Bottom panel shows the corrected potential by subtracting a linear topographic effect.

下図には、全データが上図で示した地形効果の勾配を持つと仮定してその効果を補正したものを示し、また、Fig. 5には、地形効果補正後の自然電位分布を示す。根上岳路線のデータ(Fig. 4図中△)は、標高150 m付近から登山道路線とは異なる傾向を示し、約100 mV程度の正の異常域を形成している。標高450 m付近からは登山道路線と同じ傾向を示すようになる。標高300 m付近は、小さな負の異常領域のように見えるが、これは、測定点が登山道路線(図中○)に近づいたため(Fig. 5)である。Zlotnicki et al. (1998)は、Mt. Peléeにおいて広範に測定した自然電位データについてその地形との相関を詳細に調べ、同じ火山でも地形効果の勾配が異なる(-0.44 ~ -1.83 mV/m)ことを示しており、一つの路線で求めた勾配を用いて単純に補正しても完全にはその影響を除ききれないと思われる。浸透率や電気伝導度等、流動電位の生成に深く関連する物理パラメー

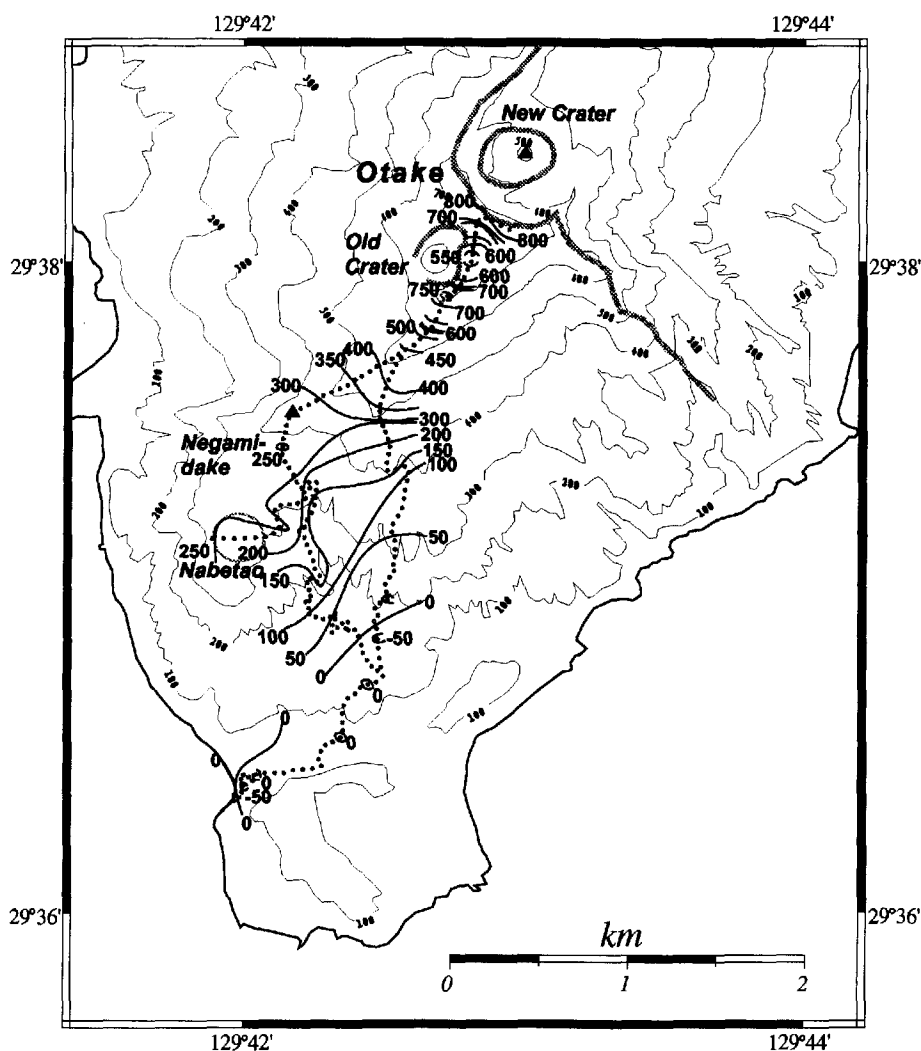


Fig. 5 Self-potential distribution of Suwanosejima volcano after correction of a linear topographic effect. Contours are shown every 50 mV.

タについても、その詳細な情報が必要である。

4.2 正異常について

前節で述べたように、今回の測定では、活動火口から南西方向の根上岳にかけて約 2.5 km の領域に相対的に電位の高い正の異常域が見つかった。その大きさは測定データで約 350 mV (Fig. 3), 線形の地形効果補正後のデータで約 800 mV (Fig. 5) であった。地理的制約から測定範囲は島の南側に限られているが、恐らく現在の活動火口を中心とした全島規模の異常であると思われる。また、ナベタオ火口跡周辺でも、100 mV 程度の正異常が存在することがわかった。

これを同じ離島火山で標高もほぼ同じある三宅島の観測例 (Nishida et al., 1996; Sasai et al., 1997)

と比較してみる。三宅島では、火口を中心とする約 1 km の範囲で電位勾配のほとんどない正電位異常領域が存在し、その外側は非常に急な電位勾配 (約 700 mV / 500 m) を形成し、正電位異常を解消している。つまり、正異常領域は山頂付近の 2 km ほどの同心円状の領域に限られている。一方、諏訪之瀬島では活動火口周辺の測定はないが、比較的ゆるやかな勾配 (約 350 mV / 2 km) で火山の南半分だけでも尾根沿いに 2.5 km ほどの広がりをもっている。この正異常の現れる広がりの違いが熱水活動に起因しているとするれば、その深さが異なるか広がり異なるためであろう。Magnetotelluric 法を用いた比抵抗調査により明らかにされた火口付近の水を多く含むと推定される層までの深さは、三宅島で 300 m (歌田ら, 1984), 諏訪之瀬島で 200 m (鍵山ら, 1993) である。帯水層の上面の深さが熱水上昇の上限に相

当するとすれば、熱水活動の起っている深さはほぼ同じか、諏訪之瀬島の方がむしろ浅いことになり、自然電位の正異常の現れる幅の違いは、熱水活動領域の広がりの違いが原因となっていると思われる。諏訪之瀬島の場合、火口列に沿ってのびる熱水活動の広がりを示唆するものかもしれない。

今回の集中観測が実施された1998年10月は、4月の予備調査の時点より明らかに噴気活動が活発であり、約3ヶ月後の1999年1月には小規模な噴火活動を起こしていることから、噴火の準備期にあたる考えられる。鍵山・増谷(1993)は、8ヶ月にわたる望遠観測から、噴火の準備期には噴気活動が活発化されることを確認しており、マグマの上昇によって帯水層とマグマあるいは火山ガスとの熱交換が起り、高温の水蒸気が生成された結果ではないかと推測している。今後、静穏期などに自然電位測定を繰り返して行うことによって、今回測定された自然電位が三宅島のように定常的に存在する(Sasai et al. 1997)のか、あるいは準備期の噴気活動が盛んな時に限られるのか確かめていく必要がある。

4.3 負異常について

Fig. 3, 5に示されたように、文化火口の東側で500 mほどの幅にわたって約-200 mVの負の異常域が見られた。負の電位異常が観測される要因としては、主として下降流による流動電位効果と電気化学的な効果が考えられる。下降流による流動電位は、断層(三宅島: Sasai et al., 1997)、カルデラ壁(Mt. Pelée: Zlotnicki et al., 1998)、火口底(霧島新燃岳: Hashimoto et al., 1994)など透水性のよい場所において顕著に観測され、そのおおよその大きさ/広がりは、-250 mV / 1000 m (三宅島)、-150 mV / 500 m (Mt. Pelée)、-150 mV / 500 m (霧島新燃岳)であった。今回の負異常とはいずれも同等の規模であることから、すぐ西側の文化火口に関連した異常なのか、あるいは新旧の山体の境界など透水性の良い場所があるためかもしれない。

電気化学的要因で生じる電位は、鉱物資源探査の見地から詳しく調べられている(Sato and Moony, 1960)。硫黄鉱物等の存在によって地下水と地中の酸素が酸化還元反応を起こし-400 mV程度までの負電位を生成すると見積もられており、同様の負電位は火山ガスと地下水との相互作用によっても生じると考えられる。平林ら(1993)が1989年に測定した土壌ガスの調査では、登山道沿いに限ると旧火口の南400 mの地点でのみ水素が検出され、マグマ起

源の火山ガスの漏れ口であると解釈されている。今回見つかった自然電位の負異常とは位置的には一致しないが、現在噴気活動を続けているカルデラ内の中央火砕丘から旧火口の南にかけて、マグマから供給される火山ガスが存在している証拠であり、酸化還元反応が負電位異常の原因である可能性も捨て切れない。いずれにしても、今回の測定だけではその広がりや原因を特定するのは困難であり、今後の追加測定および地球化学データ等とあわせて今後明らかにすべき問題である。

5. おわりに

1998年10月に実施された第3回諏訪之瀬島火山の集中総合観測の観測項目の一つとして、火山体の自然電位の分布を測定した。測定の結果、諏訪之瀬島火山の自然電位分布には、他の多くの火山で観測されたような、平面的広がりが数kmに及ぶ規模の正異常が存在することが明らかとなり、地下浅部での活発な熱水活動の存在が示唆された。また、古い火口跡周辺でも規模のやや小さな正異常が存在し、熱水活動の中心が御岳周辺だけではなく、南西側にも存在している可能性があることがわかった。御岳旧火口付近では、空間波長は短いものの明瞭な負異常の存在が確認されたが、その広がり・成因等は現時点では明らかではない。今後、調査範囲を広げて詳細な分布を把握した上で、他のデータを含めてその原因を検討する必要がある。

謝 辞

本研究は、第3回諏訪之瀬島火山の集中総合観測の一環として行なわれ、防災研究所特別事業費研究プロジェクト「火山体浅部の物理的状態と噴火様式に関する基礎研究」に一部を支援していただきました。十島村役場諏訪之瀬島出張所の伊東隆幸氏および関係者の皆様には車の借用を含めて多大なるご協力をいただきました。火山活動研究センターの石原和弘教授、井口正人助教授からは、観測や結果の解釈などについて多くのご教示をいただきました。また、京都大学地球熱学研究施設の田中良和助教授、および東京工業大学草津白根火山観測所の平林順一教授との議論は有益でした。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 歌田久司・笹井洋一・中川一郎・小山 茂・石川良宣・浜野洋三 (1984): 1983 年三宅島火山の噴火に関連した電気比抵抗変化, 火山, Vol.29, pp.S113-S124.
- 鍵山恒臣・増谷文雄・井口正人 (1993): 諏訪之瀬島火山の ELF, VLF-MT 測定, 第 2 回諏訪之瀬島火山の集中総合観測, pp.55-66.
- 鍵山恒臣・増谷文雄 (1993): 諏訪之瀬島火山の望遠観測, 第 2 回諏訪之瀬島火山の集中総合観測, pp.81-93.
- 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 (1989): 桜島火山西部の自然電位と熱水系, 京都大学防災研年報, 第 41 号 B-1, pp.145-151.
- 平沢晃一・松本幡郎 (1983): 鹿児島県トカラ列島 諏訪之瀬島の火山地質, 火山, 第 28 巻, pp.101-115.
- 平林順一・大場 武・藤井敏嗣・井口正人・坂元隼雄 (1993): 諏訪之瀬島火山の火山ガス, 土壌ガス測定と 1989 年 10 月の活動による噴出物, 第 2 回諏訪之瀬島火山の集中総合観測, pp.67-80.
- Corwin, R. F. and D. B. Hoover (1979): The self-potential method in geothermal exploration, *Geophysics*, Vol.44, pp.226-245.
- Hashimoto, T., T. Kagiya and 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. (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., T. Kikuchi, N. Matsushima, Y. Yano, S. Nakao, M. Sugihara, T. Tosha, S. Takakura and Y. Ogawa (1997): Repeated self-potential profiling of Izu-Oshima volcano, Japan, *J. Geomag. Geoelectr.*, Vol.49, pp.1267-1278.
- 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.
- 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, 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 -, *Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII (Geophysics)*, Vol.10, pp.63-77.
- Sasai, Y., J. Zlotnicki, Y. Nishida, P. Yvetot, P. Morat, H. Murakami, Y. Tanaka, Y. Ishikawa, S. Koyama and W. Sekiguchi (1997): Electromagnetic monitoring of Miyake-jima volcano, Izu-Bonin Arc, Japan: A preliminary report, *J. Geomag. Geoelectr.*, Vol.49, pp.1293-1316.
- Sato, M. and H.M. Mooney (1960): The electrochemical mechanism of sulfide self potentials, *Geophysics*, Vol.35, pp.226-249.
- Zlotnicki, J., G. Boudon, J.P. Viodé, J.F. Delarue, A. Mille and F. Brueré (1998): Hydrothermal circulation beneath Mount Pelée inferred by self potential surveying. Structural and tectonic implications, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol.84, pp.73-91.

Self-potential surveying of Suwanosejima Volcano

Wataru KANDA, Takeshi HASHIMOTO* and Hiromitsu OHSHIMA**

* Graduate School of Science, Kyoto University

** Graduate School of Science, Hokkaido University

Synopsis

In October 1998, we performed a self-potential measurement in the southern flank of Suwanosejima Volcano, as a part of the 3rd composite observation program of Suwanosejima Volcano. A large scale positive anomaly was revealed over the southern part of the volcano, which suggests the intensive hydrothermal circulation beneath the active edifice of Otake. A moderate size positive anomaly was also recognized around the old crater of Negamidake located at the southwestern tip of the crater row. Hydrothermal system might be elongated along the crater row or developed even beneath the non-active old edifice. Around the old crater of Otake, a small but sharp negative anomaly was found, though its origin is unknown for lack of the data including volcanic gases.

Keywords: Suwanosejima, volcano, self-potential, streaming potential, hydrothermal system