

薩摩硫黄島における自然電位・比抵抗調査

京都大学防災研究所 神田 径・森 真陽

1. はじめに

薩摩硫黄島は、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つの中央火口丘が位置する。これらの火山では、歴史時代の噴火活動の記録はないが、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、少なくとも数百年間にわたって 800 度を超える高温の噴気活動を続けていると考えられている¹⁾。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、1996年頃から山頂火口が拡大を続けており、1998年10月頃からは地震活動も活発化し、時折降灰が観測されている²⁾。

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が、火

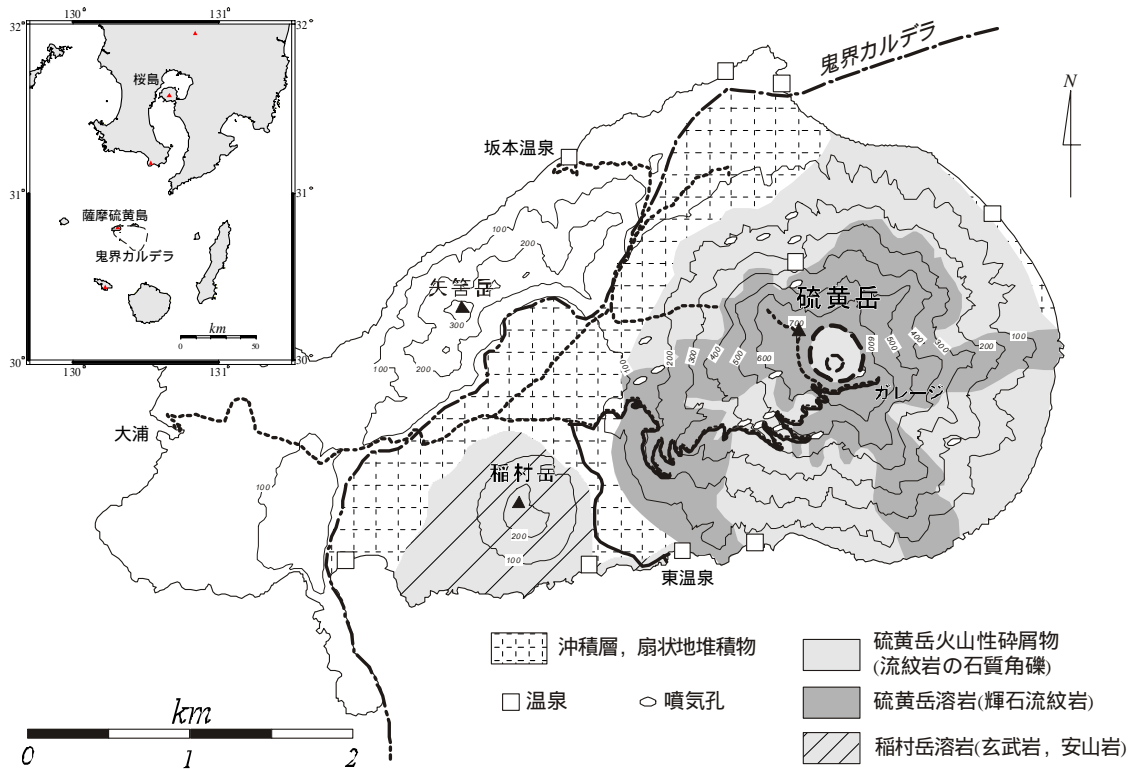


図 1. 薩摩硫黄島火山の位置図。鬼界カルデラ内の簡略化した地質図は小野・他(1982)³⁾による。自然電位の繰り返し測定は、実線で示した路線で行われた。また、1999年に行った調査路線を点線で示した。

山地域では、地下水の流動に伴う流動電位を主要原因と考えることが多い⁴⁾。我々は、薩摩硫黄島の地下熱水系を明らかにすることを目的として、1999年に2度、山麓から山頂にかけての自然電位調査を実施しており、概略の分布は既に明らかになっている(図2)^{5,6)}。これまでの研究から、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^{7,8)}ので、硫黄岳山体で大きな自然電位正異常が形成されていることが期待されたが、実際は予想外に小さな異常であった⁵⁾。そこで、今回の集中総合観測では、自然電位分布の時間変化を検出することを目的とした同一路線の繰り返し測定を行い、自然電位の発現と密接に関連する表層比抵抗の測定もあわせて行った。

2. 調査の概要

自然電位の測定は、2000年11月9日～11日に、島の南側の東温泉から硫黄岳登山道を通って山頂火口南東部のガレージまで50m間隔で行った(図1)。測定方法は、1999年の調査と同様、非分極性電極である鉛-塩化鉛電極を基準電極として接地し、銅-硫酸銅電極を50m毎に0m～400mまで移動させて、両電極間の電位差を高入力抵抗のデジタルテスターで測定した。各測定点では、深さ約5cmに掘った近接した3ヶ所で測定を行い、ばらつきが10mV以上ある場合にはさらに測定場所を増やして、異常値を除いた平均値を測定値とした。また、1999年のデータと比較するため、ガレージ前、展望台(標高約320m)、硫黄岳登山道入口の3ヶ所では、前回の測定と全く同一の場所で測定を行っている。

表層比抵抗の測定にはVLF-MT法を用いた。VLF-MT法とは、潜水艦の通信用にほぼ常時発信されているVLF帯の電波を利用して、地磁気・地電流法(MT法)から地下の比抵抗を推定する方法である。測定は、カルデラ境界付近から硫黄岳火口周辺にかけての自然電位測定路線沿いに、約30～100m間隔で行った。使用したテラテクニカ製のVL-101は、宮崎県えびの市のVLF局から送信されている周波数22.2KHzの電磁場を測定し、見かけ比抵抗と位相差を推定する。従って、MT法の原理⁹⁾から、測定される見かけ比抵抗は、地下の比抵抗が10mで一樣の場合約11m、100mの場合には約34mまでの深さの平均的な比抵抗値を表していると考えられる。

3. 自然電位分布

まず、図2に1999年の測定で得られた自然電位分布を示す。データは、1999年11月の測定データを基に、硫黄島西端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かう路線のみ、1999年7月のデータを接続した。まず特徴的なことは、

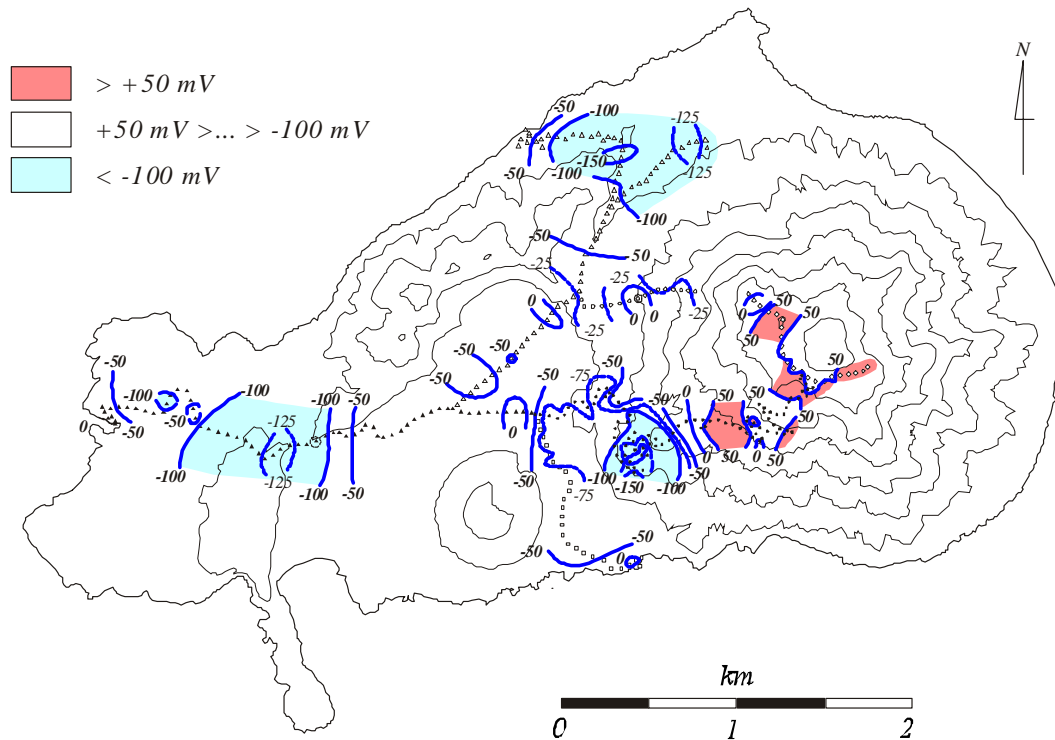


図 2. 1999 年に行われた自然電位測定の結果。測定間隔は 50m で、西端の大浦海岸(図 1)の海水の電位を基準にした相対値で表現されている。

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、 -100 mV よりも低電位を示す地域は、カルデラ外輪山部の 2 ヶ所、そして硫黄岳南西山腹の 1 ヶ所だけである。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。火山体浅部に熱源が存在すると考えられているにもかかわらず、自然電位の正異常の大きさは、最も低電位のところを基準にしても約 $200 \sim 250 \text{ mV}$ でしかない。

2000 年 11 月に行った調査においても、この傾向は同じであり、自然電位分布に大きな時間変化はなかったと考えられる。図 3 は、東温泉から硫黄岳山頂までの同一路線における 3 回の繰り返し測定の結果を標高に対してプロットしたものである。左図は、1999 年 11 月に測定した大浦海岸の電位を基準にした相対値で表したもので、他の時期のデータとは、硫黄岳登山道入口のキャリブレーションポイントで接続している。一方、右図は、硫黄岳山頂のガレージ前の同一測定点を基準にした相対値で表している。両図を見比べると、3 つのデータはほぼ同様のプロファイルを示しているものの、若干の差異が認められる。特に、年周変化等の影響を考慮する必要のない、1999 年 11 月のデータ(灰丸)と 2000 年 11 月のデータ(白丸)を比べると、海を基準にした場合には、標高 200m 付近より高いところで 1999 年のデータのほうが約 50 mV 大きい。しかしながら、山頂を基準にした場合には、中腹から山頂部にかけて両者の差はほとんど見られず、標高 200m 付近より下の山麓で 1999 年のデータの方が約 50 mV 程度低電位である。これらのことから、

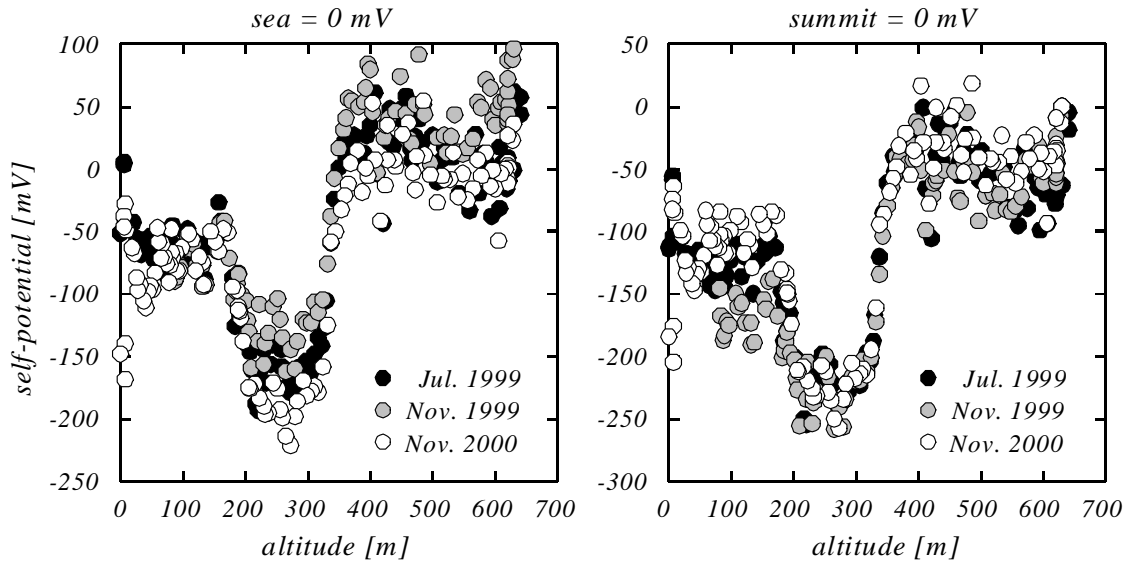


図 3. 東温泉からガレージまでの自然電位の標高に対するプロット。(左図) 大浦海岸の海水の電位を基準にした相対値。各期間のデータとは、硫黄岳登山道入口の同一測定点で接続されている。(右図) ガレージ前の同一測定点を基準にした相対値。

標高 200m 付近より山麓側では、1999 年 11 月に比べ 2000 年 11 月は 50mV 程度電位の高い状態であったと考えられる。

このように山頂部が変化せず、山麓部の電位が変化するという傾向は諏訪之瀬島火山でも見られた¹⁰⁾。諏訪之瀬島の観測例では、同じ季節の繰り返し観測の比較ではないものの、地形標高と負の相関を示す山麓の自然電位の標高相関係数が、火山活動が活発であった時期の方が大きいという結果が得られており、一つの可能性として、火山活動の消長により、恐らくはマグマの上昇などの影響で地下熱水系の流動パターンが僅かに変わったためと解釈されている。

各時期の薩摩硫黄島の火山活動を、京都大学防災研究所が西側山麓で常時観測している地震活動で見てみる。1998 年 4 月頃から活発化した地震活動は、6 月にいったん低レベルになったものの、1998 年 10 月頃からは再び活発化し、一月あたり 3000 ~ 5000 個の地震が起こるようになった。1999 年 6 月頃からはその数が一桁減り、自然電位測定が行われた 1999 年 7 月および 11 月はその少ない状態が続いていた。そして 2000 年 3 月頃より再び月あたり数千個のレベルに戻り現在に至っている。自然電位測定の行われた 2000 年 11 月の地震個数は 3513 個で 1999 年 7 月の 454 個、11 月の 248 個と比べても約 10 倍の数である。図 3 にも示されているように、薩摩硫黄島の自然電位変化も、地形と負の相関を示す標高 300m 以下のデータの地形相関係数は、地震活動の活発であった 2000 年 11 月のデータが最も大きい。諏訪之瀬島と同様、火山活動の消長に伴って山麓の自然電位が変化した可能性がある。

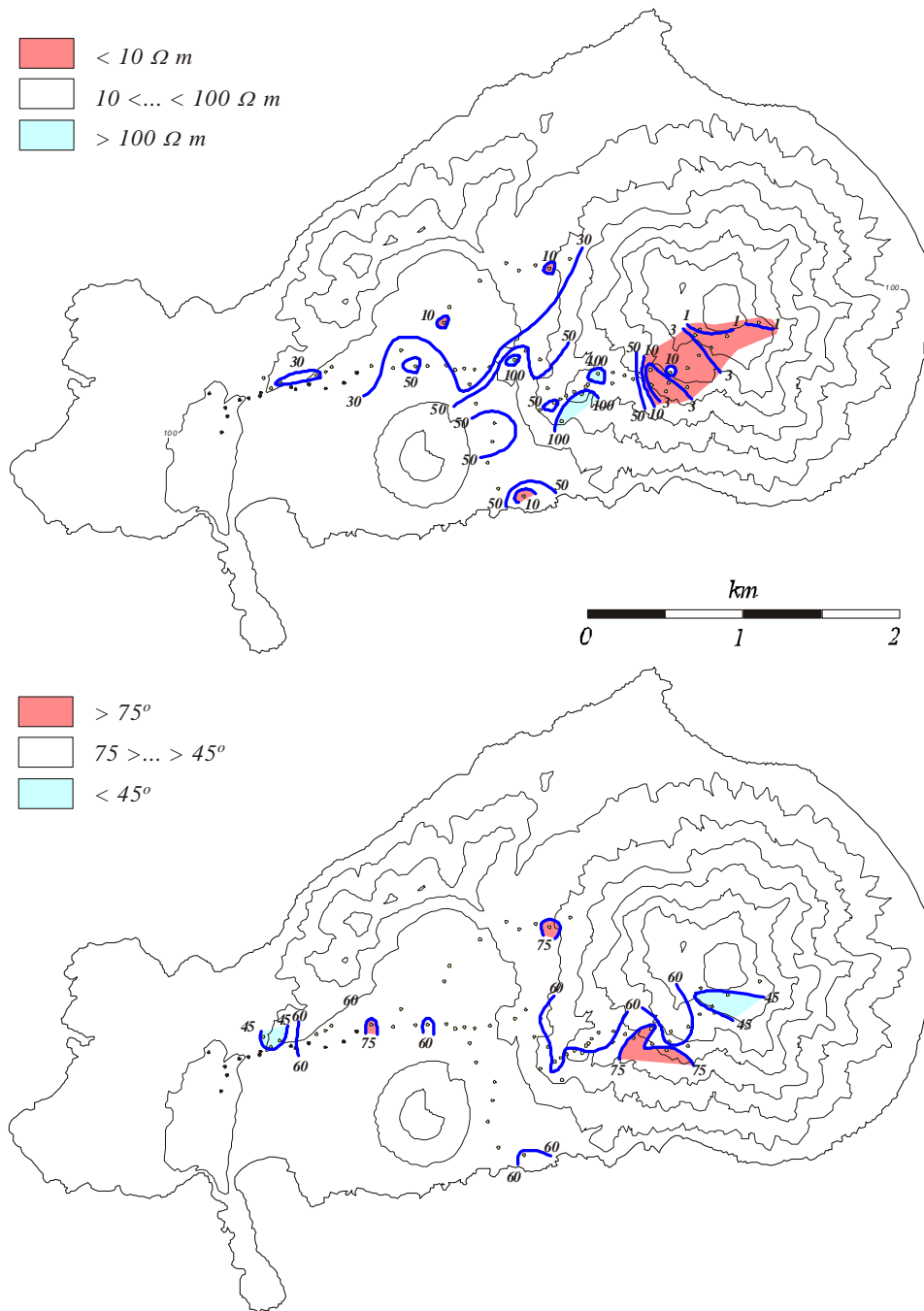


図 4. VLF - MT 法による比抵抗測定の結果。(上図)見かけ比抵抗,(下図)位相差の分布。黒丸の観測点は、商用電力の影響で信頼性が低いためコンターから除外している。

4. 表層比抵抗の分布

図 4 に VLF - MT 法により測定された表層比抵抗の分布を示す。測定可能な周波数が一つしかないため、探査深度程度までの平均的な比抵抗値を表す見かけ比抵抗(図 4 上)と、電場に対する磁場の遅れで定義される位相差(図 4 下)で表現している。図中黒丸で示したカルデラ境界周辺の測定点では、比抵抗・位相差とも局所的にばらついた値が得られた。これは、測定場所

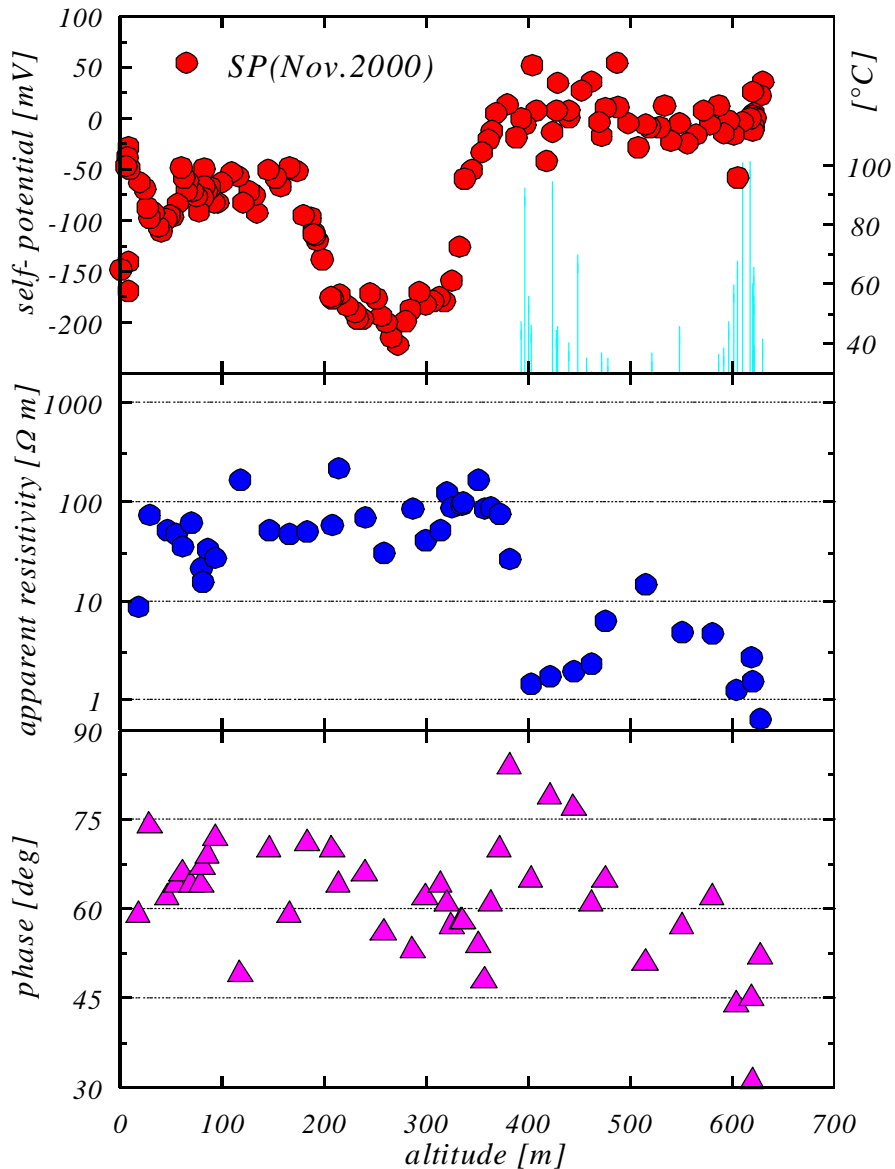


図 5. 東温泉からガレージまでの自然電位測定路線沿いの標高に対する(上図)自然電位, (中図)見かけ比抵抗, (下図)位相差のプロット。上図には, 1999 年 11 月に測定した 20cm 深地温の値を 40 以上について棒グラフで表している。

が商用電力線の直下やその近傍に限られたためと考えられ, データの信頼性が低くコンター作成の際には考慮していない。見かけ比抵抗分布の大きな特徴として, 硫黄岳の山体では, 標高 400m 付近より高いところで 10 m 以下に比抵抗が下がり, 特に山頂火口の近傍では 1~3 m の極めて低い値を示している。これは, 山頂火口周辺の岩石が硫気変質や白色珪化変質を受けているため³⁾と考えられる。一方, それ以外の地域では, 概ね数十 m の値を示し, 100 m を超えるような場所は硫黄岳山腹の数箇所に限られている。他の火山地域でしばしば観測される数百~千 m という高比抵抗値¹¹⁾は全く得られていない。

位相差については, 下部に表層より低比抵抗のものがあるか高比抵抗のものがあるかで, 45

度がひとつの目安となる。測定した地域では概ね 60 度程度のやや大きい値が得られており、地下に低比抵抗体が存在することを示唆している。硫黄岳の標高 400m 付近では、75 度を超えるような大きな値が得られており、見かけ比抵抗の分布からも示されているように、大きな比抵抗コントラストが存在することが考えられる。一方、45 度以下の場所は硫黄岳山頂火口の周辺とカルデラ境界付近の数箇所に限られているが、これらの場所の位相差は 45 度に近いので、探査深度程度(カルデラ境界付近では 10 ~ 30m, 山頂火口周辺では数 m)までは表層の比抵抗値が続く、ほぼ一様な構造をしていると思われる。

5. 議論

図5に、今回測定した自然電位、VLF - MTの結果を標高に対してプロットしたものを示す。また、1999年11月に測定した20cm深地温^{5,6)}を30 m以上について自然電位とともにあわせて示した。前述のように、硫黄岳では、標高400m付近で比抵抗が数 mに急激に下がり、山頂付近では1 m以下という極めて低い抵抗値を示す点さえある。位相の方もほぼ同じ場所にギャップが存在する。この低比抵抗地域は、高地温域とよく対応していて、標高500m付近では、見かけ比抵抗が10 m前後にわずかに高くなるが、地温も低い値が得られている。また、標高400m以上の低比抵抗・高地温域では、自然電位も相対的に高電位が保たれていて正異常域に対応している。表層のデータしかないが、一般にオームの法則から、流れる電流値が同じであれば比抵抗値が大きい程電位も大きくなるので、予想に反して大きくない硫黄岳の自然電位正異常⁵⁾は、極めて低い抵抗値のため電位が見かけ上小さくなっていることが一つの成因として考えられる。

また、標高300 ~ 400mにかけて、自然電位は約200mVも上昇する。これは、一様媒質中のダイポールソースを考えるようなモデル⁶⁾では完全には説明することができない。Nishida and Tomiya (1987)¹²⁾は、有珠山で観測された同様の電位上昇を説明するため、地下の比抵抗に10倍のコントラストがある場合の電位プロファイルを計算し、媒質境界の高比抵抗側で電位勾配が急になることを示した。硫黄岳の場合も標高400m付近を境にそれより下の高比抵抗側で電位勾配が急になっており、Nishida and Tomiya (1987)¹²⁾のモデルで定性的には説明できると思われる。位相差が標高350 ~ 400m付近で急激に大きくなることもこのモデルと矛盾しない。これらのことに加えて表層地質³⁾などを考慮すると、硫黄岳の山体は基本的には高温・低比抵抗の岩体で構成されているが、標高300 ~ 400m付近より下では透水性が高く高抵抗の崖錐堆積物に覆われている、と推測される。

6. おわりに

2000年11月に実施された薩摩硫黄島火山の集中総合観測の一観測項目として、火山体の自然電位および表層の比抵抗を測定した。測定の結果、薩摩硫黄島硫黄岳の自然電位分布には、1999年に行った調査結果と分布の傾向に大きな変化はなかったが、山麓の電位が50mV程度変化しており、火山活動度の違いを反映したものである可能性が示唆された。今後、繰り返し測定あるいは連続観測により、検証してゆく必要がある。

表層比抵抗の分布は、硫黄岳山麓から中腹にかけては数10～100m程度であったが、中腹から山頂にかけては、10m以下の低比抵抗であった。位相差も含めて比抵抗分布には標高400m付近に大きなギャップが存在し、山頂付近の低比抵抗域は、自然電位の高電位域・高地温域に対応していることが明らかになった。表層比抵抗が自然電位の発現に大きく寄与していることは明らかであり、自然電位の定量的なモデルを構築するためにも、もう少し深いところの比抵抗構造の調査が必要である。

謝辞

本研究は、薩摩硫黄島火山の集中総合観測の一環として行なわれた。比抵抗の測定に用いたVL-101は東京大学地震研究所共同研究プログラム(2000-G-10)により借用しました。薩摩硫黄島本田旅館および三島村関係者の皆様には、車の借用を含めて多大なるご協力をいただきました。また、京都大学防災研究所火山活動研究センターのスタッフおよび工業技術院地質調査所(現：産業技術総合研究所)の松島喜雄氏をはじめとした集中総合観測参加者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

- 1) 吉田 稔・小沢竹二郎 (1981): 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, 第26巻, pp.25 - 34.
- 2) 井口正人・石原和弘・高山鐵朗・為栗 健・篠原宏志・斎藤英二 (1999): 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, Vol.42 B-1, pp.1 - 10.
- 3) 小野晃司・曾屋龍典・細野武男 (1982): 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.
- 4) 例えば, Zlotnicki, J., Boudon, G., Viode, J. P., Delarue, J. F., Mille, 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.

- 5) 森 真陽・神田 径・井口正人 (2000): 薩摩硫黄島の自然電位分布, 京都大学防災研究所年報, Vol.43 B-1, pp.7 - 14.
- 6) Kanda, W. and Mori S. (2002): Self-potential anomaly of Satsuma-Iwojima volcano, Earth Planets Space, Vol.54, pp.231-237.
- 7) Shinohara, H., Giggenbach, W. F., Kazahaya, K., and Hedenquist, J. W. (1993): Geochemistry of volcanic gases and hot springs of Satsuma-Iwojima, Japan: Following Matsuo, *Geochem. J.*, Vol.27, pp.271 - 285.
- 8) 風早康平・篠原宏志 (1996): 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*, Vol.46, pp.91 - 104.
- 9) Cagniard, L. (1953): Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting, *Geophysics*, Vol.18, pp.605 - 635.
- 10) 神田 径・森 真陽・橋本武志・大島弘光 (2000): 諏訪之瀬島火山の自然電位, 全磁力測定, 第3回諏訪之瀬島火山の集中総合観測, 41 - 53.
- 11) 例えば, Kagiya, T., Utada, H., and Yamamoto, T. (1999): Magma ascent beneath Unzen Volcano, SW Japan, deduced from the electrical resistivity structure, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol.89, 35 - 42.
- 12) Nishida, Y. and Tomiya, H. (1987): Self-potential studies in volcanic areas (1) Usu Volcano, *Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII (Geophysics)*, Vol.8, pp.173 - 190.

(Received on December 22, 2001)