

# 九州の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

長谷英彰\*・石戸経士\*\*・橋本武志\*\*\*・神田径\*\*\*\*・田中良和\*

\* 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設火山研究センター

\*\* 産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門

\*\*\*北海道大学大学院理学研究科附属地震火山研究観測センター

\*\*\*\*京都大学防災研究所附属火山活動研究センター

## $\zeta$ potential measurements of volcanic rocks from four volcanoes in Kyushu Island (Kaimon, Kuju, Saruba and Unzen)

Hideaki Hase\*, Tsuneo Ishido\*\*, Takeshi Hashimoto\*\*\*, Wataru Kanda\*\*\*\* and Yoshikazu Tanaka

\*Aso Volcanological Laboratory, Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Sciences, Kyoto Univ.

\*\*Institute for Geo-Resources and Environment, Geological Survey of Japan, AIST

\*\*\*Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Sciences, Hokkaido Univ.

\*\*\*\*Sakurajima Volcano Research Center, DPRI, Kyoto Univ.

### 1. はじめに

近年、自然電位(SP)を測定して火山や地熱地域の熱水対流系、あるいは地下水の流動を推定する試みが行われるようになってきた。例えば、伊豆大島 (Ishido et al., 1997), 三宅島 (Nishida et al., 1996), 阿蘇山 (長谷ら, 2000), 雲仙岳 (Hashimoto and Tanaka, 1995), 桜島 (橋本ら, 1999) 等では、山体規模の SP 異常が観測されている。これらの SP 異常は、定性的に多孔質媒質中の流体流動に伴って発生する界面動電現象によるものと解釈されている。界面動電現象とは、固-液界面に働く電場や液体の流動に伴って発生する一連の現象を指し、特に液体の流動に伴って発生した電位のことを流動電位と呼んでいる。このような界面動電現象を考慮すると、火山体内部に存在する地下水と岩石の境界では電気化学的な分極が発生していると考えられ、地下水が流動することによって流動電位が形成されると期待できる。

ゼータ電位は一般的に固-液界面に発生する分極の強さを表し、流動電位を規定する重要な要素のひとつである。Si 元素を多く含む物質では、ゼータ電位の符号は負になることが知られ(e.g., Ishido and Mizutani, 1981), 通常岩石のゼータ電位も符号が負であることが期待される。そのため、近年多くの火山で測定された SP 異常は、岩石のゼータ電位は負である仮定のもとで、流動電位によって形成されたと解釈するのが通例であった。しかし最近の研究で阿蘇山に正のゼータ電位を示す岩石が数多く存在することが明らかとなり、特にその傾向が顕著である高岳周辺では、正のゼータ電位効果と思われる、通常とは逆センスの SP 地形効果が存在することが明らかとなった (Hase et al. 2003)。このように実際の火山のフィールドで正のゼータ電位を示す岩石が発見され、SP データに影響を与えているケースはこれまでに報告例がないため、この岩石が阿蘇山地域に特異的に存在するものか、それとも普遍的に広く存在するものかは定かではなかった。

そこで本研究では、この問題を解明する為に、既に SP 測定が行われている九州の4つの火山(開聞岳・九重山・猿葉山・雲仙岳)の岩石についてゼータ電位測定を行い、正のゼータ電位を示す岩石が阿蘇山以外に存在しているのかを確かめるとともに、その地域の SP データとの比較を行った。

## 2. ゼータ電位

### 2.1 ゼータ電位と流動電位

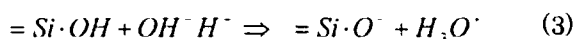
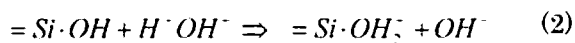
固体と液体が接しているとき、一般的にその界面ではイオンの分離が起きている。金属酸化物が電解質溶液の中にある場合を考えると、固体表面に負イオンが、また液体側には正イオンが集まり、全体としては正負イオンの中性が保たれているような電荷分布を形成している。このような構造は一般的に電気二重層と呼ばれている。電気二重層中における対イオンの広がり程度の Debye パラメーター ( $\kappa$ ) で表され、電気二重層の厚さは  $\kappa^{-1}$  で定義されている。また固体表面の外側に接する液体側第1層目イオンの中心面 ( $\phi_s$ ) をシュテルン (Stern) 面または外部ヘルムホルツ (Helmholtz) 面と呼んでいる。実際に測定されるゼータ電位 ( $\zeta$ ) は、これよりさらに外側の滑り面での電位である (第1図)。シュテルン面に存在するイオンは固体表面イオンに吸着して動くことができないが、シュテルン面から離れるに従って自由度が高くなり、イオンの流動性も高くなる。このような電気二重層を形成している液体が流動すると、液体中の分離イオンも一緒に運ばれ、結果的に流動した液体の流れ先と元の間で電位差が発生する。これが流動電位である。流動電位 ( $\Phi$ ) とゼータ電位 ( $\zeta$ ) の一般的な関係式は次のようになる。

$$\Delta\Phi = \frac{\varepsilon\zeta}{\sigma\mu} \Delta P \quad (1)$$

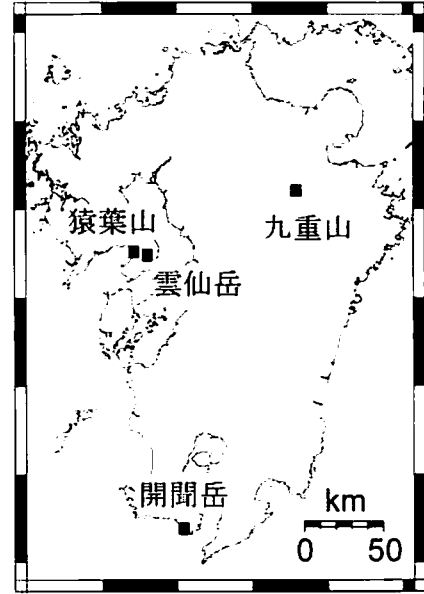
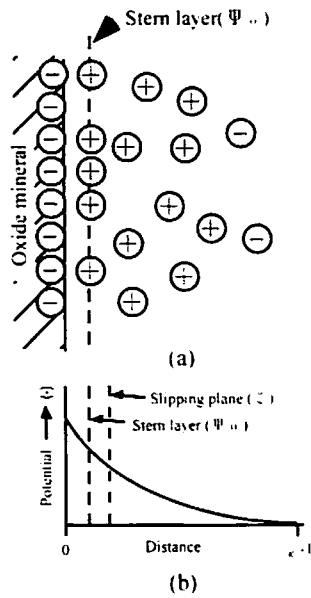
$\varepsilon$ : 水の誘電率 (F/m),  $\sigma$ : 水の電気伝導度 ( $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ),  $\mu$ : 水の粘性率 (Pa · s),  $P$ : 水の圧力 (Pa) である。地中では地下水の流動などにより、このような流動電位が発生していると考えられ、流動電位によってつくられた地表の電位分布を測定することが可能である。

### 2.2 ゼータ電位と pH

岩石などの金属元素を多く含む固体表面は金属酸化物であるため、水と接すると水和を起こして必ず OH 基を有することが知られている。このような系の場合、媒質中の pH 値によって界面における電位が変化するため、ゼータ電位の変化は pH 依存が高いことが知られている (e.g., Ishido and Mizutani, 1981)。例えば  $\text{SiO}_2$  を例にとると



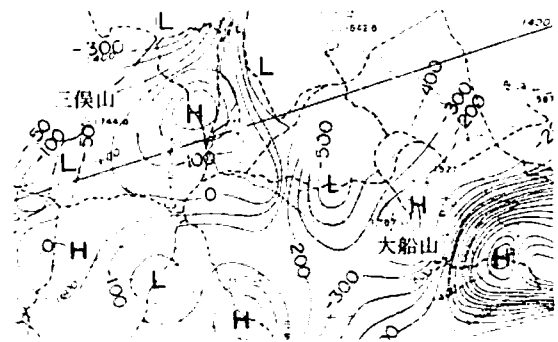
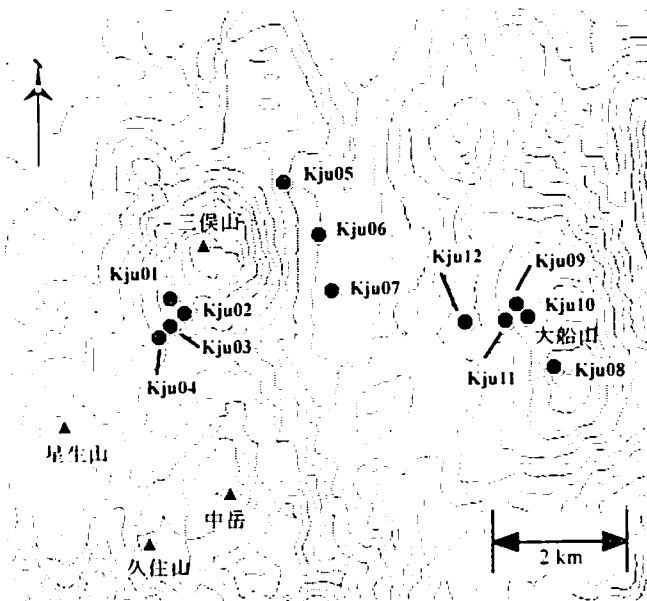
となる。低い pH ではプロトン付加により正の電位を帯び (式(2)), 逆に pH が高くなると OH 基からプロトンの引き抜きで負に帯電する(式(3))。このような酸化物表面は、ある pH で見かけ上ゼータ電位がゼロになる等電位点 (isoelectric point; IEP) が存在するが、その値は酸化物の酸性度によって異なる (北原ら, 1995)。



第1図 (a)シュテルンモデルによる電気二重層 (b)電気二重層断面の電位 第2図 岩石のサンプリング地域

第1表 九重山サンプルのゼータ電位

Sampling point	Kju01	Kju02	Kju03	Kju04	Kju05	Kju06	Kju07	Kju08	Kju09	Kju10	Kju11	Kju12
Zeta-potential (mV)	+5.6	+20.0	+13.9	+18.4	+7.5	+8.7	+4.1	+17.6	-9.3	-18.4	+6.8	+16.8



第3図 九重山地域のサンプリング地点

第4図 九重山(三俣山・大船山)周辺のSP分布(NEDO, 1985)

### 3. 測定結果と考察

測定の対象としたのは、九重山・開聞岳・雲仙岳・猿蓑山で、過去に行われた SP の空間分布から、岩石のゼータ電位が正である可能性が高い地域である(第2図)。実験に用いた岩石サンプル数は、九重山 12, 開聞岳 11, 雲仙岳 7, 猿蓑山 8 の合計 48 である。実験条件は Hase et al. (2003)で行った阿蘇山サンプルと同じく、温度 30℃, 溶液の電解質濃度  $10^{-3}\text{mol/l}$  KCl, pH: 4~10 とした。

#### 3.1 九重山 (三俣山・大船山周辺)

九重火山地域では 1995 年に星生山中腹にある通称硫黄山付近で水蒸気爆発があり、現在でも噴気活動が活発である。この地域は新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)(1985)によって広域的な SP 調査が行われており、現在では火山活動がみられない三俣山や大船山周辺で SP の高電位異常が観測されている。本研究ではこれらの地域を中心として 12 サンプルの採取を行った(第3図)。

ゼータ電位測定の結果、Kju09 と Kju10 以外のサンプルすべてが正の値を示していることが明らかとなった(第1表)。特に三俣山の南麓付近の Kju02, Kju03, Kju04 や大船山山頂と西麓の Kju08, Kju12 などでは、ゼータ電位が+10mV 以上であり、正の傾向が顕著である。

NEDO (1985) の SP 結果をみると、大船山付近では山頂近傍で正、麓で負になっている(第4図)。三俣山南東部の麓に法華院温泉が存在するが、大船山周辺では噴気等の地熱兆候はみられないため、大船山の山頂方向に上昇する熱水流体が存在する可能性は低いと考えられる。また大船山山頂と西麓で岩石のゼータ電位が+10mV 以上であることを考慮すると、この地域では阿蘇山高岳周辺でみられたような逆センスの地形効果が卓越している可能性が考えられる。しかしながら大船山北側の Kju09 と Kju10 は負のゼータ電位を示しており、また三俣山周辺ではゼータ電位と SP の関係が明確ではなく、一概に本研究のゼータ電位測定結果が上記の SP に反映されているとは言い難い。この地域で NEDO (1985)が行った SP は測定間隔が 500m と粗いため、局所的な SP 電位を適切に反映していない可能性も考えられる。そのためゼータ電位との対応を比べる際には、さらに詳細な SP 測定を行い、ゼータ電位との対応を調べる必要があると思われる。

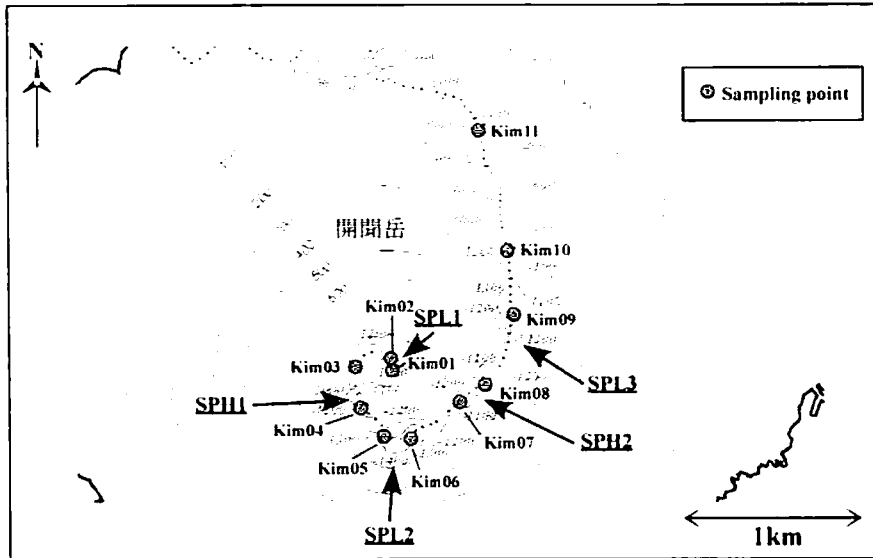
#### 3.2 開聞岳

開聞岳は霧島火山帯に属し、九州南端に位置する火山である。活動は約 4,000 年前から始まり、成層火山形成後、ガス爆発による山頂部の破壊を経て火口を埋める溶岩ドームが形成された。その構造は下部の成層火山と上部溶岩ドームの二つの部分にきれいに分けられるため、二重式火山構造と呼ばれている(中村, 1967)。その後約 1,000 年前にガス爆発を起こして以来、火山活動は休止している。

ゼータ電位に用いた岩石サンプルは、開聞岳山頂部から麓まで登山道沿いに 11 サンプルを採取した(第5図)。測定の結果、岩石のゼータ電位はすべてのサンプルで値が負であった(第2表)。既に測定された SP データ(太線)とその局所的な電位異常(灰色影部分)も第5図に示しているが、Kim03, Kim10, Kim11 以外のサンプルは、正または負の電位異常地域に接している。ここで電位異常地域に接していない岩石サンプル Kim10, Kim11 を基準グループ B として、B よりゼータ電位が低い値をもつグループ Lx, 高い値をもつ Hx に別けて SP の電位異常と比較すると(La:Kim01,02,03, Ha:Kim04, Lb:Kim05,06,07, Hb:Kim08, 09), SP の低電位異常地域(SPLx)と Lx, 高電位異常地域(SPHx)と Hx が系統的に同じ地域に分布していることがわかる。これはこの地域の SP の地形効果が、岩石のゼータ電位の違いを反映していると考えられる。これは岩石のゼ

第2表 開聞岳サンプルのゼータ電位

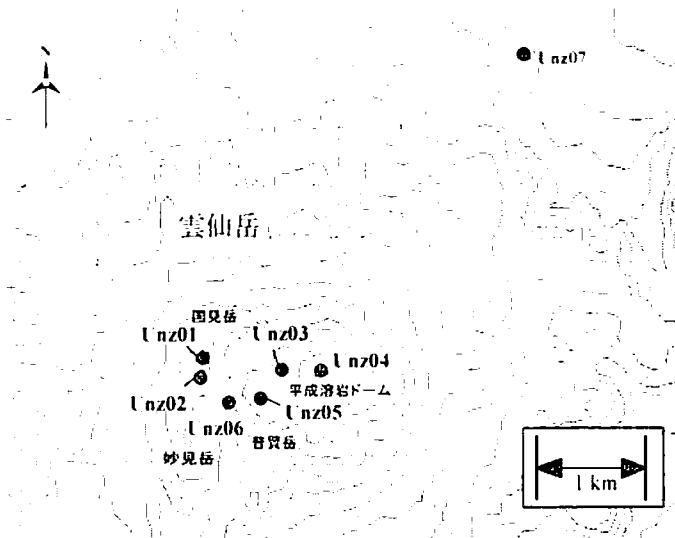
Sample point	Kim01	Kim02	Kim03	Kim04	Kim05	Kim06	Kim07	Kim08	Kim09	Kim10	Kim11
zeta-potential (mV)	-19.7	-18.0	-17.6	-8.4	-20.4	-18.8	-17.6	-1.3	-7.9	-10.7	-11.2



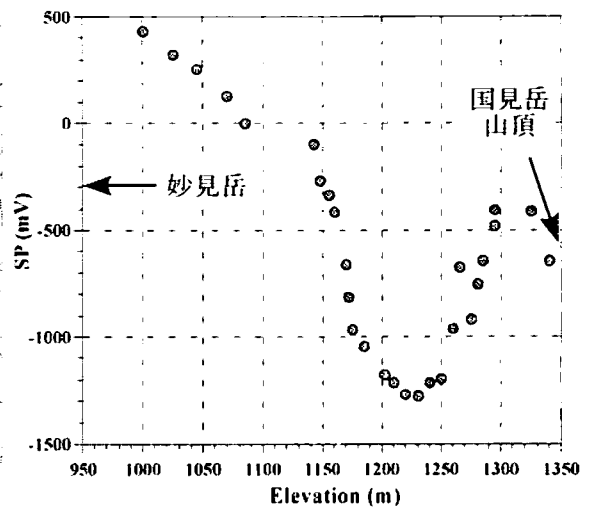
第5図 開聞岳地域のサンプリング地点とSP分布図

第3表 雲仙岳サンプルのゼータ電位

Sampling point	Unz01	Unz02	Unz03	Unz04	Unz05	Unz06	Unz07
Zeta-potential (mV)	+2.1	+0.1	-21.3	-32.8	-20.2	-13.7	-24.2



第6図 雲仙岳地域のサンプリング地点



第7図 妙見岳北から国見岳山頂のSP分布(橋本, 私信)

一タ電位の違いに伴い、そこで発生する流動電位も異なると考えられ、地形効果の割合がゼータ電位の違いによって場所ごとに変化していると推察することができる。

### 3.3 雲仙岳

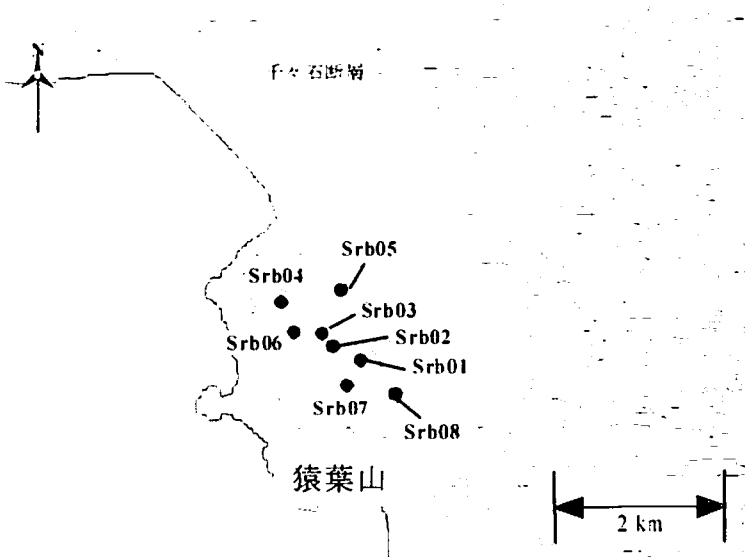
雲仙岳は島原半島中央部の普賢岳をはじめとした、いくつかの火山で構成される複合火山の総称であり、東西 20km、南北 25km の大きさを有している。およそ 50 万年前から火山活動が始まり、近年では 1990 年に水蒸気爆発を起こし 1991 年には普賢岳東にデイサイトの溶岩ドームを形成した(渡辺・星住, 1995)。

岩石サンプルは国見岳・普賢岳・平成溶岩ドーム周辺を中心として 7 サンプルを採取した(第 6 図)。ゼータ電位の測定結果は、国見岳山頂(Unz01)と南山麓(Unz02)で正の値であった。これら以外のサンプルでは、ゼータ電位はすべて負で値が大きく( $< -10\text{mV}$ )、特に平成溶岩ドーム山頂付近のサンプル(Unz04)では、 $-32.8\text{mV}$ を示している(第 3 表)。

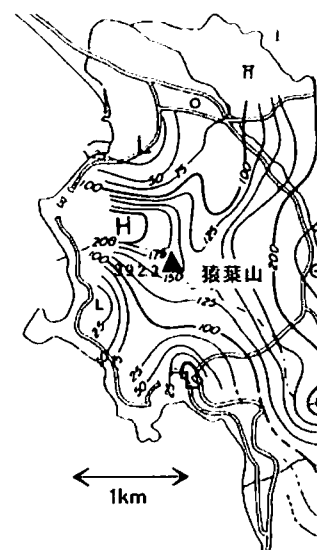
ゼータ電位が正であった Unz01 と Unz02 に注目してこの地域で測定された SP データと比較してみると、国見岳周辺では標高が 1,230m 以上の山頂部で、標高が高くなるにつれて SP の値が高くなっている(第 7 図)。国見岳は新期雲仙火山のひとつであり、妙見岳と同時期のおよそ 2~3 万年前に山体が形成されたと考えられている(渡辺・星住, 1995)。国見岳は普賢岳よりも山体形成年代が古く、山体周辺において噴気や温泉などの流体上昇を示すような兆候はみられない。そのため、この地域でも逆センスの地形効果が存在していると推察される。

第 4 表 猿葉山サンプルのゼータ電位

Sampling point	Srb01	Srb02	Srb03	Srb04	Srb05	Srb06	Srb07	Srb08
Zeta-potential (mV)	-4.5	-11.5	-12.6	-2.9	+2.7	-24.7	-22.3	-8.4



第 8 図 猿葉山地域のサンプリング地点



第 9 図 猿葉山周辺の SP 分布 (NEDO, 1986)

### 3.4 猿葉山

猿葉山は島原半島西岸に隣接し、千々石断層の南、雲仙普賢岳から西へおよそ5kmの場所に位置する。地質学的な分類では古期雲仙火山に属し、おもに紫蘇輝石普通輝石黒雲母角閃石安山岩を含む溶岩が山体を形成していると考えられている(倉沢・高橋, 1965)。

岩石サンプルは、およそ2km四方で猿葉山を囲む範囲においてSrb01~08の8サンプルを採取した(第8図)。ゼータ電位の測定結果はSrb05でゼータ電位が正の値(+2.7mV)であり、その他のサンプルはすべて負の値であった(第4表)。猿葉山のゼータ電位の特徴としては、およそ南東で負の傾向が強く、北西で正の傾向が強いことがわかる。

この地域はNEDO(1985)によってSP測定が行われている。この結果をみると猿葉山北西で正の電位異常が存在している(第9図)。この結果は地形効果補正後のデータであるため、通常ならば熱水上昇によって形成されたSP異常と解釈されるであろう。しかし猿葉山は古期雲仙火山に属しており、山体形成は少なくとも17万年よりも古く現在は全く火山活動がみられない。そのため熱水上昇がこの地域で発生していることは考え難い。しかしゼータ電位は猿葉山の北西地域で正の傾向であることから、この地域では間違ったSPの地形補正によって見かけ上の正のSP異常となった可能性が高い。

## 4. まとめ

九州火山(九重山, 開聞岳, 雲仙岳, 猿葉山)の岩石のゼータ電位測定の結果, 九重山サンプルの大半と, 雲仙岳・猿葉山サンプルの一部でゼータ電位の値が正であることが明らかとなった。今回の実験から, 阿蘇山以外にも岩石のゼータ電位が正の値をもつものが多数存在することが明らかとなった。

また観測されたSPデータと比較を行うことにより, ゼータ電位の値の違いがSPの電位異常分布に影響を与えていることが多くの地域で見られた。例えば開聞岳のようにゼータ電位の値がすべて負であっても, ゼータ電位の値にある程度の明瞭な違いがあれば, 地形効果による影響だけでSPの電位異常を形成することが可能であることが推察された。このような結果から岩石のゼータ電位測定は, SPデータを定量的に考察することはもとより, 定性的に考察する上でも重要な要素であることが示唆された。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり, 産業技術総合研究所地質調査センターに於いて高倉伸一氏, 松島喜雄氏をはじめとした関係者の方々にご協力を頂いた。また京都大学大学院附属地球熱学研究施設の柴田知之氏, 川本竜彦氏には測定に関する指導や議論をして頂いた。ここに厚く謝意を表します。

## 参考文献

- 北原文雄・古澤邦夫・尾崎正孝・大島広行 (1995) :ゼータ電位－微粒子界面の物理化学, サイエンティスト社, pp. 1-180.
- 倉沢一・高橋清 (1965) :九州雲仙火山岩の岩石学および化学的性質について, 地質調査所月報, 13, pp.258-274.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1985) :「地熱開発促進調査久住地域地上調査報告書」の付帯資料, 「昭和60年度電気探査(自然電位)調査報告書」, pp.1-38.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1988) :「地熱開発促進調査雲仙西部地域地上調査報告書」の付帯資料, 「昭和63年度電気探査(自然電位)調査報告書」, pp.175-176.
- 中村真人 (1967) :開聞岳の火山噴出物と火山活動史, 第2集 第12巻 第3号, pp119-131.
- 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, Vol. 42, B-1, pp. 19-25.
- 長谷英彰・田中良和・橋本武志・坂中伸也 (2000) :阿蘇火山中央火口丘における自然電位観測, 京都大学防災研究所年報, Vol. 43, B-1, pp.47-53.
- 松本徭夫 (1983) :九重火山群の火山地質学的研究, 山口大学理学部地質学鉱物学教室, pp.91.
- 渡辺一徳・星住英夫 (1995) :雲仙火山地質図, 地質調査所, 火山地質図8.
- Hase, H., T. Ishido, S. Takakura, T. Hashimoto, K. Sato, and Y. Tanaka (2003) :  $\zeta$  potential measurement of volcanic rocks from Aso caldera, *Geophys. Res. Lett.*, 30(23), 2210. doi:10.1029/2003GL018694.
- Hashimoto, T., T. Kagiya, F. Masutani (1994) : Self-potential Measurements on Shinmoe-Dake, Kirishima Volcanic Group, *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, Vol. 69, pp. 257-266.
- Hashimoto, T., and Y. Tanaka (1995) : A large self-potential anomal on Unzen volcano, Shimabara peninsula, Kyushu island, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 22(3), pp191-194.
- 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.
- 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.
- 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, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII(Geophysics)*, Vol.10, pp.63-77.