

## 九州火山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・佐藤佳子\*\*\*

\* 京都大学大学院理学研究科

\*\* 産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門

\*\*\* 海洋科学技術センター固体地球統合フロンティア研究システム

### 要旨

九州の火山(九重山・開聞岳・雲仙岳・猿葉山)の岩石のゼータ電位を測定した。その結果、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符号が正であることが明らかとなった。岩石の主要構成元素とゼータ電位の関係について調べたところ、阿蘇山サンプルで得られた結果と同じく、岩石の構成元素の種類と含有率によってゼータ電位が示唆されていることが明らかとなった。

**キーワード:** ゼータ電位, 流動電位, 自然電位, 界面動電現象, 九州の火山

### 1. はじめに

近年、自然電位(SP)を測定して火山帯の熱水対流系、あるいは地下水の流動を推定する試みが様々な火山で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・他, 2000), 雲仙岳 (Hashimoto and Tanaka, 1995), 桜島 (橋本・他, 1999) 等では、山頂火口を中心とした山体規模の自然電位異常が分布している。こうした現象は、定性的に多孔質媒質中の流体流動に伴う界面動電現象によるものであると解釈されている。界面動電現象とは固-液界面に働く電場や流動に伴って発生する一連の現象を指し、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、火山の地下に存在する固体の岩石と、液体の地下水との固-液界面で電気化学的な分極が起こり、地下水が流動することで流動電位が形成されていると考えられる。このような流動電位は、固-液界面の分極の強さに

支配されている。

ゼータ電位は一般的に固-液界面そのものの電位を意味し、固-液界面の分極の強さを表す指標となっている。このゼータ電位は流動電位を規定する要素のひとつであり、SPデータの定量的解釈に必要な支配的な要素となっている。

### 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。例えば  $\text{SiO}_2$  のような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は 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 ( $\phi_\sigma$ ) 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 (fig. 1)。

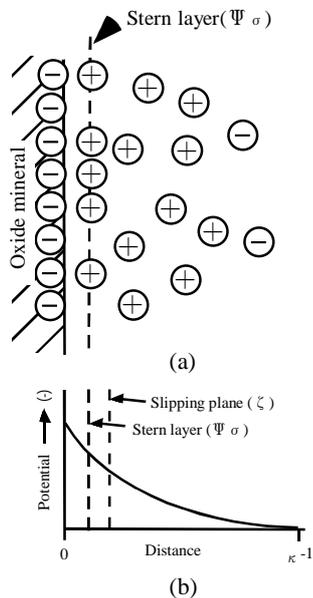


Fig. 1 (a) The Stern model of the electrical double layer. (b) Potential variation across the double layer.

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。

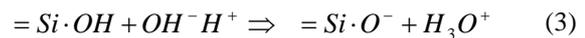
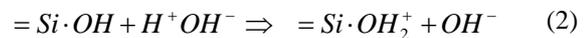
$$\Delta\Phi = \frac{\varepsilon\zeta}{\sigma\mu} \Delta P \quad (1)$$

$\varepsilon$ : 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  $\cdot$  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; i.e.p.) が存在するが、その値は酸化物の酸性度によって異なる (北原他, 1995)。

## 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・猿葉山で、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 (Fig. 1)。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, 猿葉山 8 の合計 48 である。実験条件は長谷・他(2002)で行った阿蘇山サンプルと同じく、温度 30°C, 溶液の電解質濃度  $10^{-3} \text{mol/l}$  KCl, pH: 4~10 とした。



Fig. 2 A map of sampling areas

Table 1  $\zeta$ -potential of rock samples in Kuju volcanic area

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

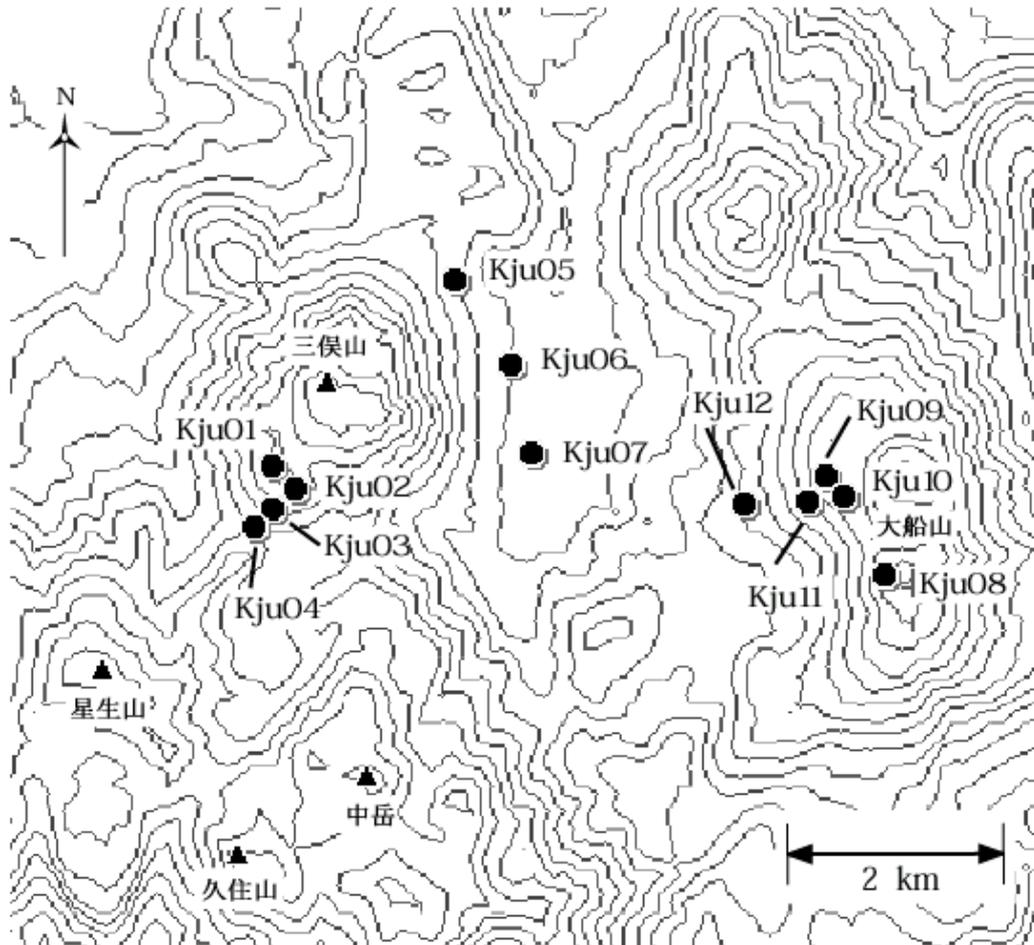


Fig. 3 Sampling points (solid circles) of rocks in Kuju volcanic area.

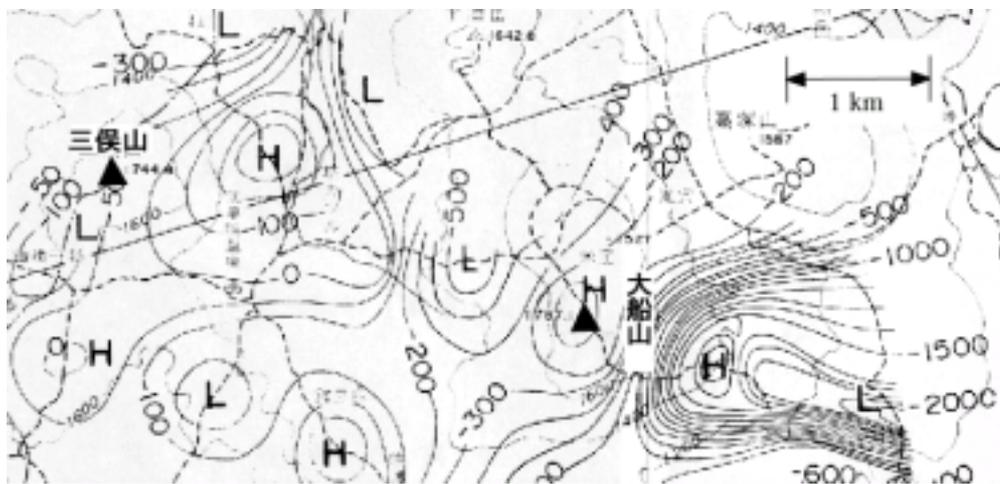


Fig. 4 Self-potential (SP) profile (solid thick lines) around Mt. Mimata and Daisen (data from NEDO[1985]).

### 3.1 九重火山 (三侯山・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を起こしており、現在でも活発な火山地域である。この地域は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (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侯山や大船山周辺で SP の高電位異常が観測されている。本研究ではこうした地域を中心として Kju01~Kju12 の 13 サンプルの採取を行った (Fig. 3)。

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 (Table 1)。特に三侯山の南麓付近の 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。

この地域は三侯山南東部に法華院温泉があるものの、三侯山や大船山周辺で噴気等の地熱兆候はみられない。そのため流動電位を形成するような局所的

な流体上昇流が存在する可能性は低いと考えられる。さらにゼータ電位の値は大部分の場所で正であるので、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(長谷・他, 2002)が支配的であると思われる。そういった観点から新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1985) の SP 結果 (Fig. 3) と本研究の岩石ゼータ電位の測定結果を比べると、大船山付近では SP が山頂付近で正、麓で負になっており逆地形効果を仮定すれば調和的である。しかしながら三侯山周辺ではこのような関係になっておらず、必ずしも逆センスの地形効果が存在しているとは言い難い結果となっている。新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1985)が行った SP は、測定間隔が粗く(500 m)、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。

### 3.2 開闢岳

開闢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

Table 2 ζ-potential of rock samples in Kaimondake

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

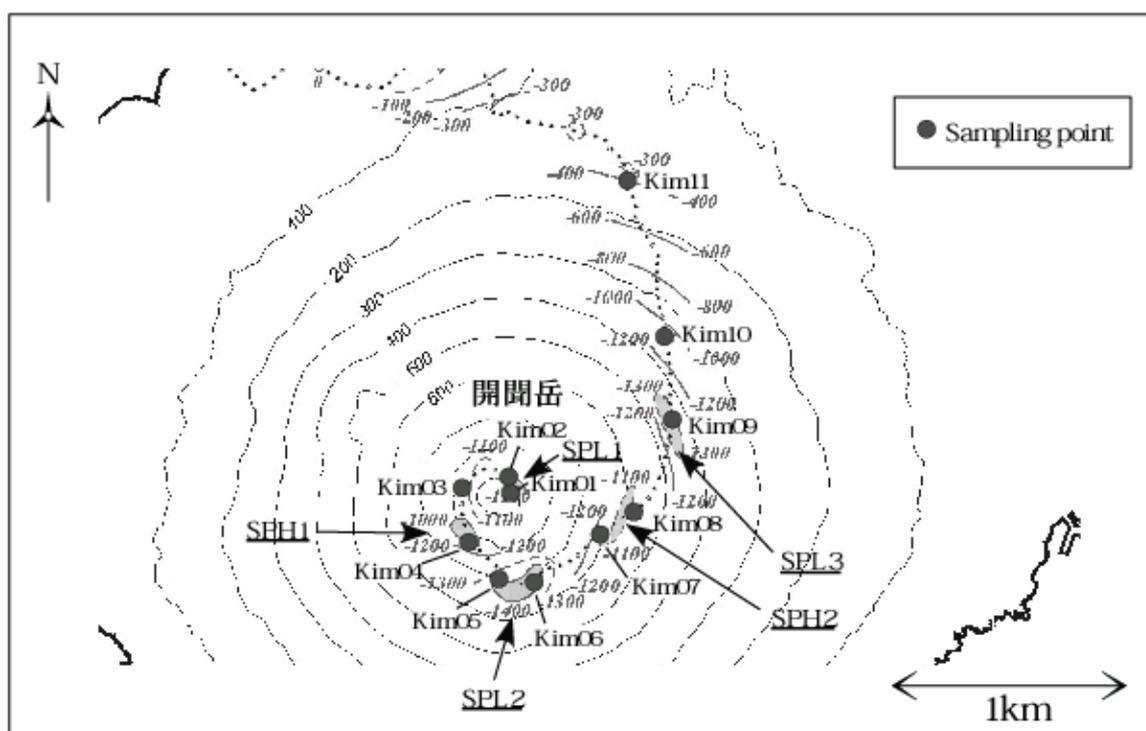


Fig. 5 Sampling points (solid circles) of rocks in Kaimondake with Self-potential (SP) results. Italic numbers indicate SP. Shaded gray color (SPL<sub>x</sub>, SPH<sub>x</sub>) indicates the SP anomalous area.

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かれているため、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 Kim01~kim11 の 11 サンプルを採取した (Fig. 5)。岩石のゼータ電位は、測定結果すべてのサンプルで値が負であった (Table 2)。

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 Fig. 5 に示しているが、Kim03, Kim10, Kim11 以外のサンプルは、正または負の電位の電位異常地域に接している。今、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強く反映していると考えられる。つまり岩石のゼータ電位の違いに伴ってそこで発生する流動電位も異なるため、その結果地形効果の割合が場所ごとに変化していると推察される。

### 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

Table 3  $\zeta$ -potential of rock samples in Unzen volcanic area

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

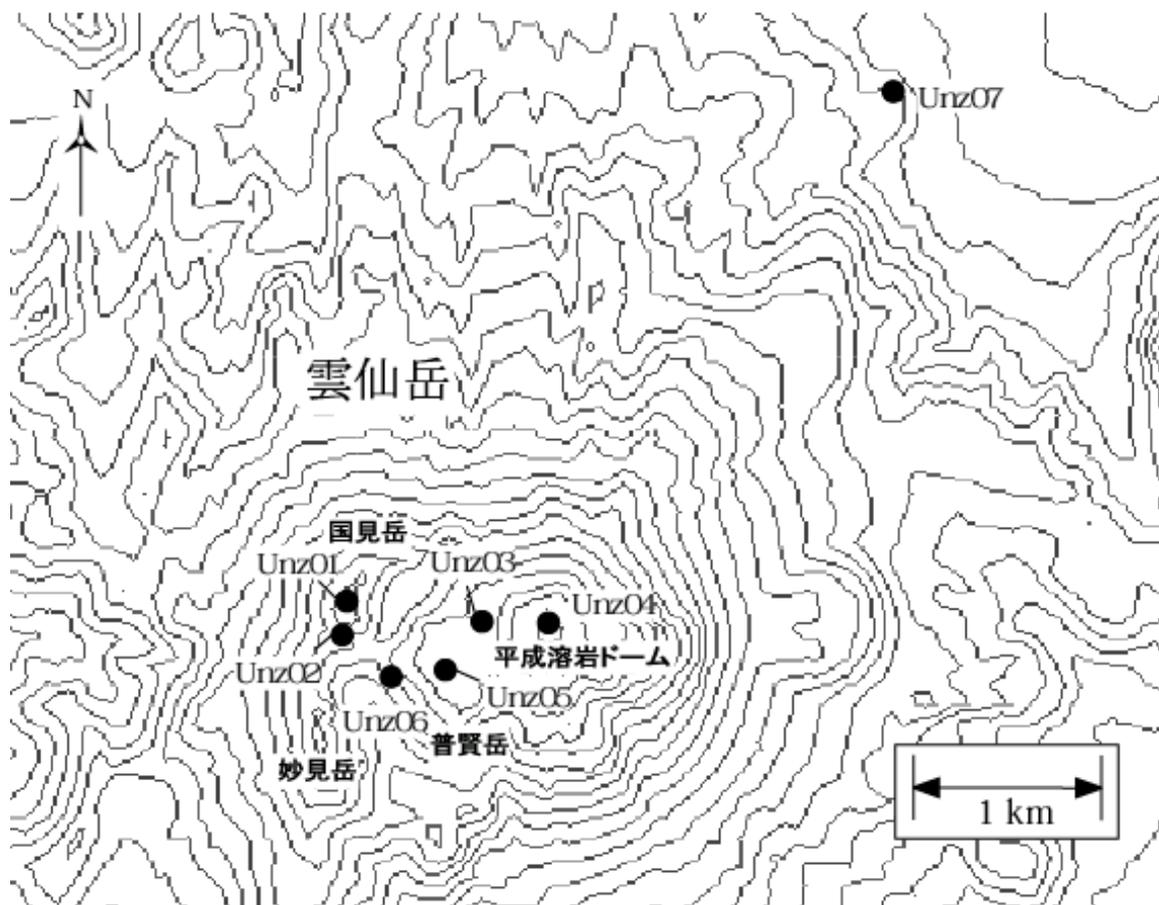


Fig. 6 Sampling points (solid circles) of rocks in Unzen volcanic area.

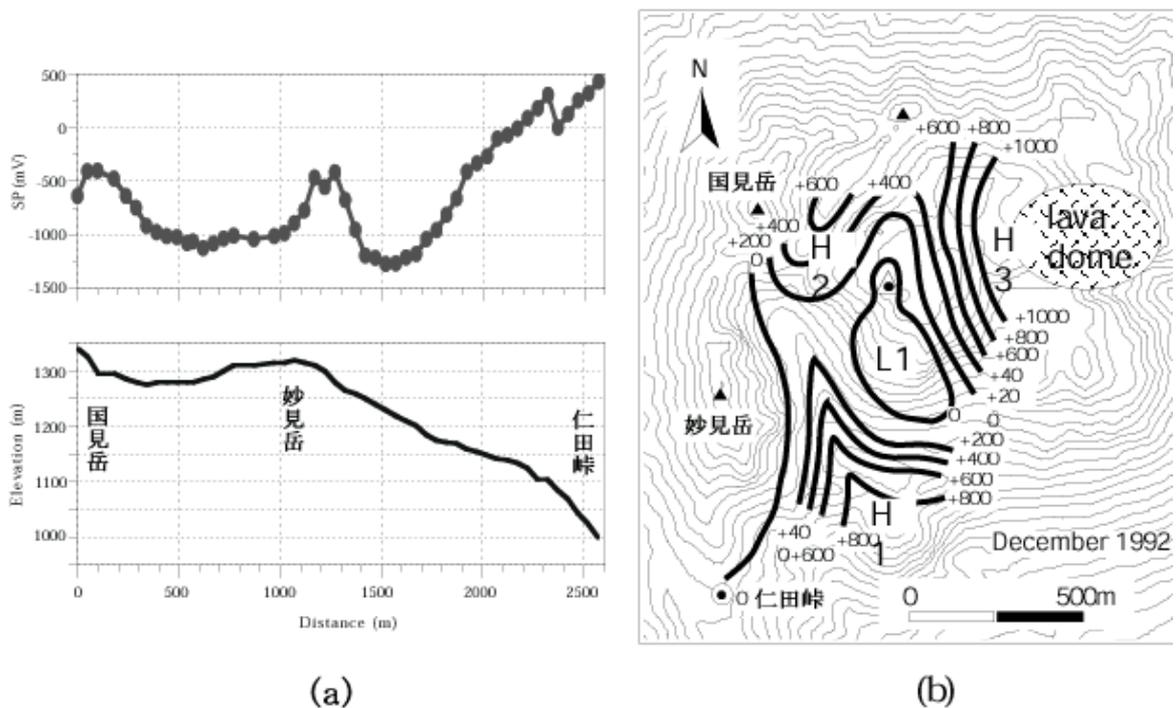


Fig. 7 Self-potential (SP) distribution around Unzen volcanic area. The (a) shows a SP profile (solid circles in above graph) and topography (a solid line in below graph) along a path between Nita-pass and Kunimidake. The (b) shows whole SP profiles in 1992 (data from Hashimoto and Tanaka [1995]).

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、Unz01～Unz07 の 7 サンプルを採取した (Fig. 6)。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 (Table 3)。

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相対的に高い山頂部で SP の値が高く、麓で値が低い結果となっている (Fig. 7(a))。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。

この地域では Hashimoto and Tanaka (1995) などによって SP 測定が行われており、平成溶岩ドーム周辺ではドーム形成後に非常に大きな正の電位異常が観測されている (Fig. 7 (b))。この時期は溶岩ドームが出現したことに伴い、地熱供給が急激に高まったため、活発な熱水上昇を形成されたと考えられる。このような過程が SP の大きな正電位異常を形成した主要因であることは間違いないと考えられる。しかし平成溶岩ドームの岩石のゼータ電位が負に大きいことを考慮すると、溶岩ドーム周辺では岩石ゼータ電位の性質上、元々大きな電位異常を形成しやすい地域であるといえる。

### 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～Srb08 の 8 サンプルを採取した (Fig. 8)。ゼータ電位の測定結果は Srb05 でゼータ

Table 4  $\zeta$ -potential of rock samples in Mt. Saruba

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

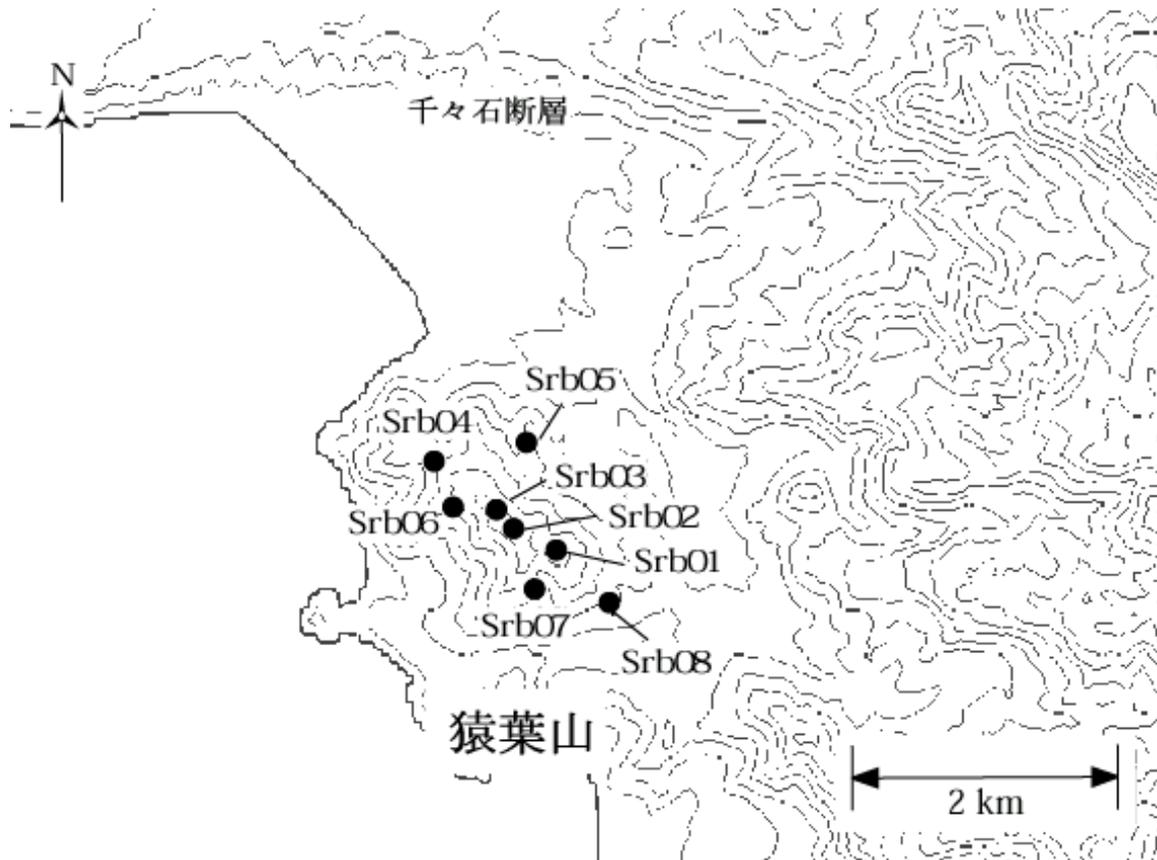


Fig. 8 Sampling points (solid circles) of rocks in Mt. Saruba.

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 (Table 4)。猿葉山のゼータ電位の特徴としては、大まかにみて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。

この地域の SP をみると、猿葉山北西で正の電位異常、南東で負の電位異常が存在している。猿葉山は古期雲仙火山に属しているため、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。このことから猿葉山においてもゼータ電位の値の違いに伴った SP 分布を形成している可能性が高い。

## 6. 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り、この現象は他の多くの火山でもみられる現象であると考えられる。

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明瞭の違いがあれば、熱水上昇のような特殊な流体の流れを考える必要なく、地形効果だけで SP の電位異常を形成することが可能であることが示唆された。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。

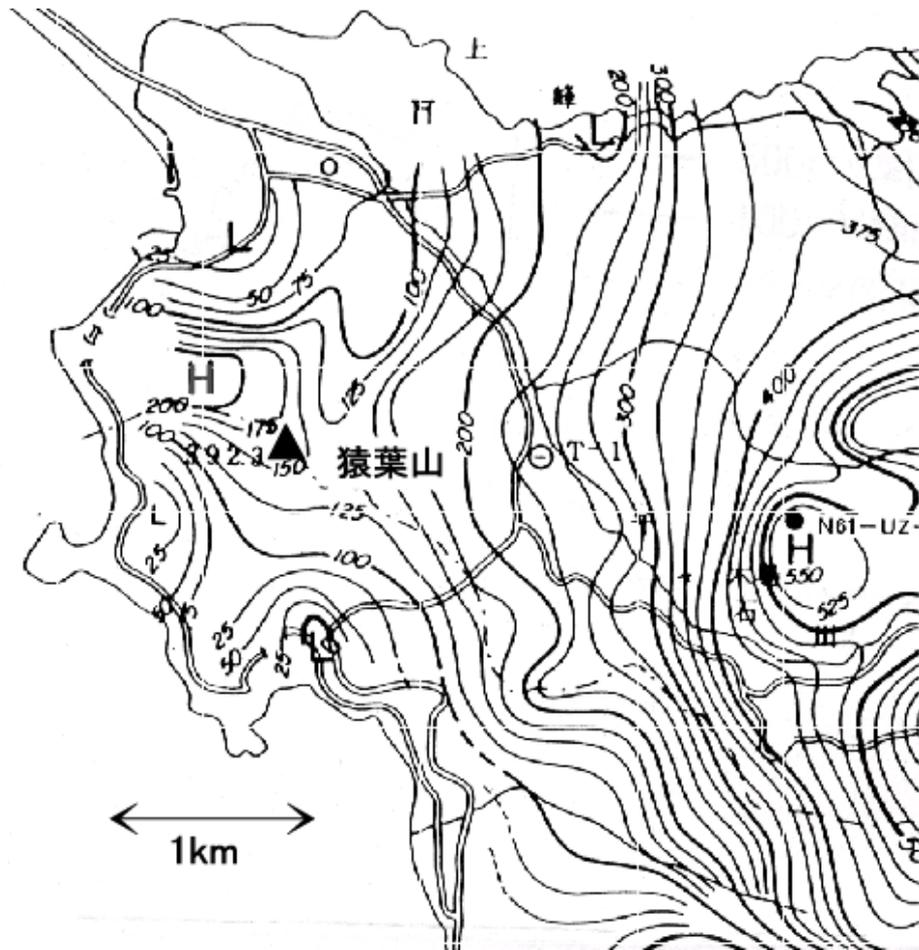


Fig. 8 Self-potential distribution (solid contour lines) around Mt. Saruba (data from NEDO[1986]).

### 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, サイエンス  
社, pp. 1-180.  
倉沢一・高橋清 (1965) : 九州雲仙火山岩の岩石  
学の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.

長谷英彰・高倉伸一・石戸経士。佐藤佳子・橋  
本武志・田中良和・大倉敬宏 (2002) : 阿蘇山  
における岩石のゼータ電位測定, 京都大学防  
災研究所年報, Vol. 45, B, pp.645-656.

松本徂夫 (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.
- 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., Toshi, 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.

### **Zeta-Potential experiments of rocks in Kyushu various volcanoes**

Hideaki HASE\*, Tsuneo ISHIDO\*\*, Takeshi HASHIMOTO\*, Wataru KANDA and Keiko SATO\*\*\*,

\*Graduate School of Science, Kyoto University

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

\*\*\*Institute for Frontier Research on Earth Evolution, JAMSTEC

### **Synopsis**

We measured zeta potentials 48 rock samples in Kyushu volcanoes (Kuju:12, Kaimon:11, Unzen:7, Saruba:8). We obtained positive zeta potentials in almost samples of the Kuju and a few samples of Unzen and Saruba. We considered that it can be commonly measure the positive zeta-potential of rocks at many volcanoes. Additionally we found out the correlation between zeta-potential of rocks and Self-potential at each sample area.

**Keywords:** zeta potential, streaming potential, self-potential, electrokinetic phenomena, Kyushu volcano