

阿蘇山における岩石のゼータ電位測定

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*

* 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

阿蘇山周辺のさまざまな場所における岩石のゼータ電位を測定した。pH 未調整で測定した場合、ゼータ電位の符号が正である岩石が杵島・高岳周辺に存在することが分かった。XRF 分析の結果、岩石組成がゼータ電位に影響することが示唆された。高岳周辺の自然電位データを解析した結果、地形効果が通常とは逆の相関を示していることが判り、高岳周辺の岩石の特異なゼータ電位が自然電位分布に大きく影響し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, 阿蘇山

1. はじめに

自然電位(SP)法は Zablocki (1976) などが流動電位を考慮した解釈を行うようになってから、活動的な火山や地熱地域で盛んに行われるようになった。流動電位とは電気二重層を伴った固-液界面に外部から流動を与えることにより、電気二重層間に相対的な滑り運動発生した結果得られる電位のことであり、界面動電現象の一つである。そしてその界面の電位がゼータ電位である。

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ており (e.g. Ishido and Mizutani, 1981), 通常岩石のゼータ電位も符号が負になることが期待される。このような場合、大地の間隙中を水が流れるとそれに伴う流動電位は、相対的に流れの元で負、流れの先で正に分極することになる。通常、水は標高の高いところから低いところへ流れるため、標高差のある山体では地形高所で負、低所で正となる SP 異常が観測されることが多い。

このような電位効果は地形効果と呼ばれている。また活動的な火山や地熱地域では、しばしば地下で熱水上昇域が形成されているが、このような場合、その地表では正の SP 異常が期待できる。

ゼータ電位は、岩石と水との関係の場合、構成している元素の種類や量・pH・水に含まれる電解質濃度によって大きく影響されると考えられており (e.g. 北原他, 1995), SP データにもそれらの違いによる効果が反映されと考えられるが、野外における SP 分布と、その地域の岩石のゼータ電位をあわせて測定した例はほとんどない。本研究ではこのような点に注目し、阿蘇山周辺のさまざまな場所における岩石のゼータ電位を測定することにより、既にこの地域で行われた SP 測定の結果と対比させてその特徴について考察する。

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 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。電気二重層における対イオンの広がり の程度は Debye パラメーター (κ) で表され、電気二重層の厚さは κ^{-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 (ψ_o) 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 (ζ) は、これよりさらに外側の滑り面での電位である (fig. 1)。

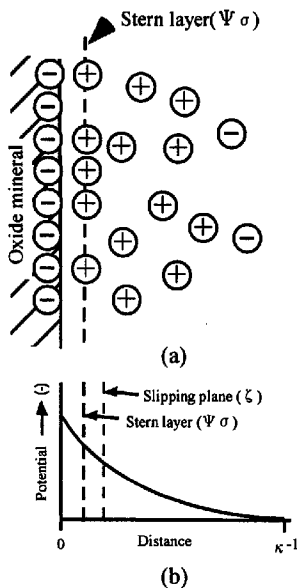


Fig. 1 (a) The Stern model of the electrical double layer. (b) Potential variation across the double layer.

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 (Φ) とゼータ電位 (ζ) の一般的な関係式は次のようになる。

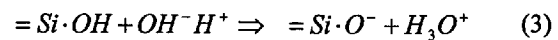
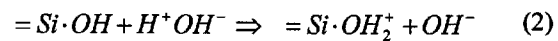
$$\Delta\Phi = \frac{\epsilon\zeta}{\sigma\mu} \Delta P \quad (1)$$

ϵ : 水の誘電率 (F/m), σ : 水の電気伝導度 ($\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$), μ : 水の粘性率 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$), 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 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. 測定概要

3.1 岩石試料

測定した岩石サンプルの採取は、既に観測された自然電位データと対比するために、局所的に高電位異常が見られた高岳周辺や杵島岳周辺をはじめとして、温泉湧出地域の湯ノ谷・吉岡・地獄・垂玉地域や、岩石の形成年代が古いと考えられている外輪山や根子岳など、岩石組成や風化度合いなど存在状態に違いがみられると思われる場所を選んで採取した。その結果サンプル数は、阿蘇山中央火口丘で 29 ケ所、カルデラ外輪で 5 ケ所の合計 34 ケ所である。

3.2 ゼータ電位測定方法

ゼータ電位の測定方法はいろいろと考案されている。例えば電解溶液中の試料コロイド粒子に電場を作用させ、コロイド粒子の移動速度を利用する電気

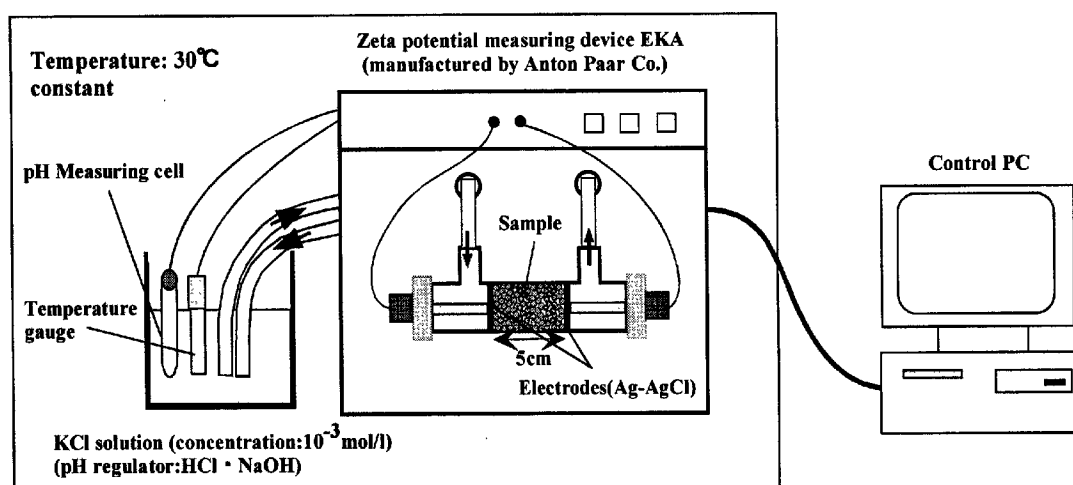


Fig. 2 A schematic diagram of the measuring device for the zeta potential.

泳動法や、試料の入った電解質溶液を流動させて流動電位から求める流動電位法、また試料の粒子を超音波で強制的に振動させ Debye 効果によって得られる電位差を用いる超音波法などがある。本研究では実際に野外で起こっている過程と調和的な流動電位法を用いて測定を行った。サンプルは採取した全 34 サンプルのうち測定可能な 32 サンプルについて測定を行なった。測定装置は産業技術総合研究所地質調査センターの EKA (Anton Paar 社製) を使用した。

EKA の測定セルはガラス製で直径 2 センチの円筒状になっており、長さ約 5cm の間にサンプルを充填する仕様になっている (fig. 2)。本研究ではサンプルを直径約 0.5mm の粒径に粉碎したものを使用した。溶液は KCl (10⁻³ mol/l) を用い、溶液温度 30°C 一定の状態ですべての測定セルに圧力 (dP) をかけて循環させ、そしてサンプル両端に設置した電極 (Ag-AgCl) で流動電位を測定することにより、Fairbrother-Mastin の式を用いてゼータ電位 (ζ) を求めた。

Fairbrother-Mastin の式は

$$\zeta = \frac{dV}{dP} \cdot \frac{\eta}{\epsilon \cdot \epsilon_0} \cdot \kappa \quad (4)$$

であらわされる。 dV : 流動電位 (mV), dP : 圧力 (mbar), η : 溶液の粘性率 (mPa · s), κ : 溶液の電気伝導度 (mS/m), ϵ : 溶液の比誘電率, ϵ_0 : 真空中の誘電率 (F/m) である。

上記の式ではサンプルキャピラリー内の溶液の電解質濃度は、バルクと同じであると仮定している。しかしキャピラリー表面が帯電していると、キャピラリー内の電解質濃度はバルクの濃度よりも高くなるため、電気抵抗は溶液の電解質濃度のみを考慮し

たときよりも小さくなってしまふ。この効果は表面伝導と呼ばれている。表面伝導による電気抵抗効果の見積もりは、サンプルを充填した測定セル内に濃い電解質溶液を満たして電気抵抗値を測定し、それを用いることで補正することができる。本研究では流動電位測定に KCl 溶液 (10⁻³ mol/l), 表面伝導補正用の溶液として KCl 溶液 (0.1 mol/l) を用いた。式は以下ようになる。

$$\zeta = \frac{dV}{dP} \cdot \frac{\eta}{\epsilon \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{\kappa_{KCl0.1} \cdot R_{KCl0.1}}{R_{KCl10^{-3}}} \quad (5)$$

$\kappa_{KCl0.1}$: (0.1 mol/l) 溶液の電気伝導度 (mS/m), $R_{KCl0.1}$: KCl (0.1 mol/l) 溶液の時のセル抵抗 (Ω), $R_{KCl10^{-3}}$: KCl (10⁻³ mol/l) 溶液の時のセル抵抗 (Ω) である。本研究ではすべてのゼータ電位測定に於いて表面伝導補正を行った。実際の補正量はサンプルによって異なるが、補正の前後でゼータ電位の値に最大で約 2 倍の違いが生じた。

3.3 測定モード

ゼータ電位測定装置 EKA の測定方式は、測定しながら圧力を変化させるランプモードと、圧力を一定にして測定するコンスタントモードがある。EKA の測定可能圧力範囲は 0 ~ 500 mbar であるが、本研究では低圧力測定時にみられる電極オフセットの影響を考慮して、コンスタントモードでの測定を選択し、比較的高圧力の範囲 (200 ~ 500 mbar) で 100 mbar ごとに測定を行った。測定はまず pH 調整剤などを使って強制的に pH を調整せずに、サンプルと平衡状態になった pH (pH 未調整) での測定を行い、その後 pH 調整液を使って pH=4, 7, 10 に調整してそれぞれの状態について測定を行った。

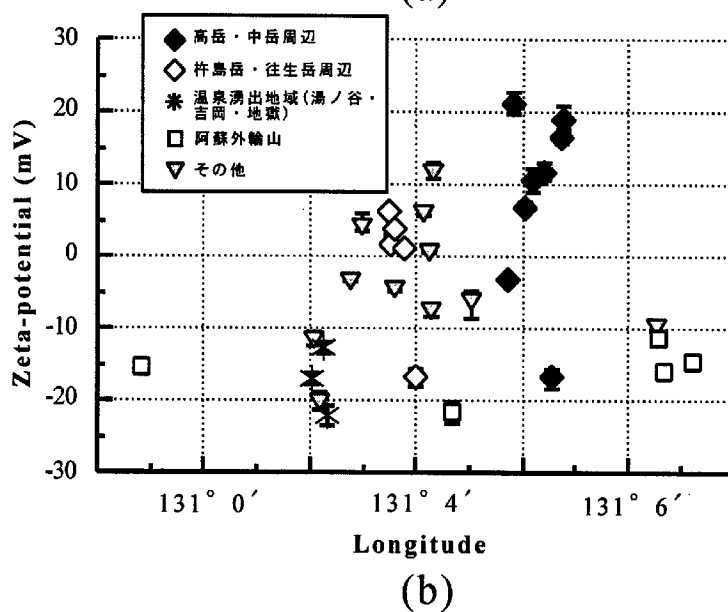
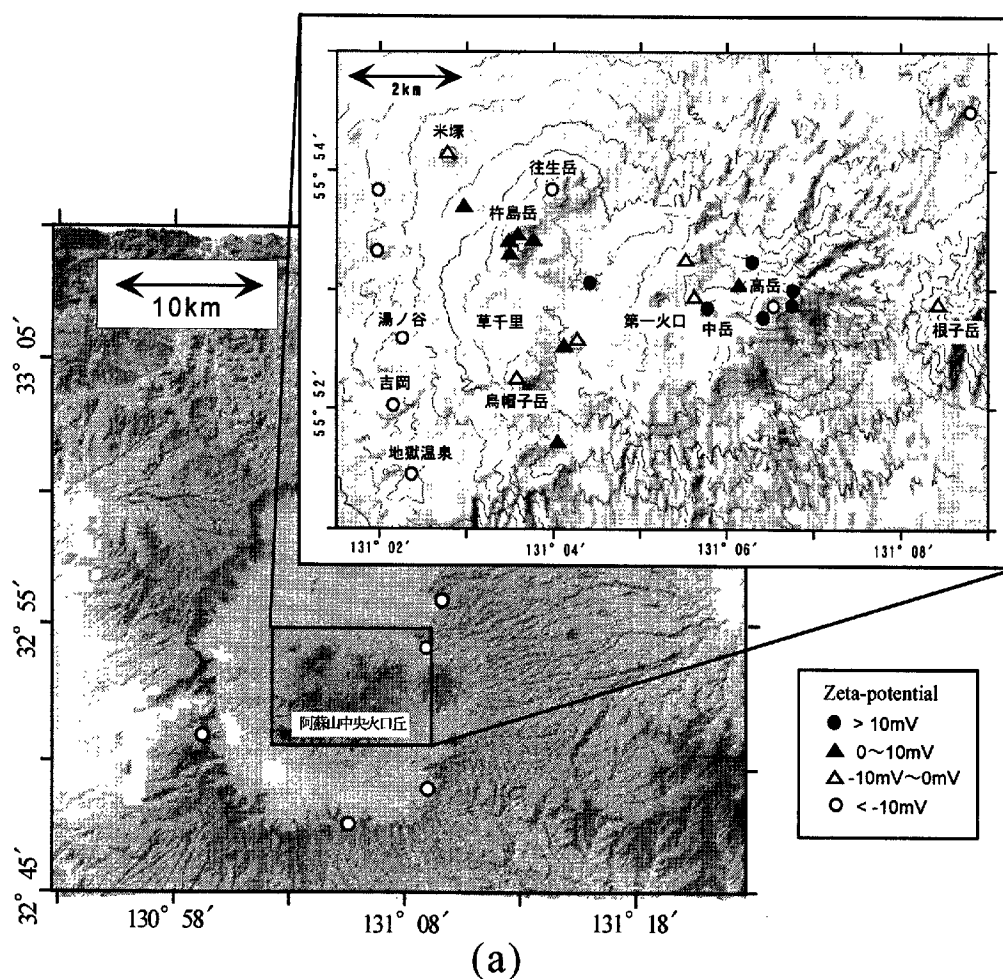


Fig. 3 (a) Sampling points of the rocks used for zeta potential (ζ) measurements. Symbols indicate the ranges of ζ without pH-control. Solid circles, solid triangles, open triangles and open circles show $\zeta > 10\text{mV}$, $0\text{mV} < \zeta \leq 10\text{mV}$, $-10\text{mV} < \zeta \leq 0\text{mV}$ and $\zeta < -10\text{mV}$, respectively. (b) ζ values without pH-control versus longitudinal position of sampling points. Error bars show the maximum and minimum values measured under various pressure conditions. Symbols indicate the sampling areas. Solid diamonds, open diamonds, stars, squares and triangles show results of Takadae and Nakadake area, Kishimadake and Ohjohdake area, hot spring area (Yunosetani, Yoshioka, Jigoku), somma area and others, respectively.

4. 測定結果

4.1 ゼータ電位測定結果 1 — pH 未調整 —

サンプル採取地点の自然状態を反映したゼータ電位を得るために、はじめに pH 未調整でゼータ電位測定を行った。興味深い結果として高岳周辺と杵島岳周辺でゼータ電位の符号が正であるサンプルが多く分布していることが挙げられる (fig. 3)。特に高岳周辺ではゼータ電位が+10mV 以上の場所が 4 ヶ所も集中しており、その傾向が顕著である。また湯ノ谷、吉岡、地獄温泉など、温泉湧出地域ではゼータ電位が-10mV 以下で符号が負の傾向が強いことが明らかとなった。

測定時の pH 状態について述べると、はじめに測定装置にセットしたときの溶液 ($\text{KCl } 10^{-3}\text{mol/l}$) の pH はほぼ一定 (pH=5.8 付近) であったが、溶液と岩石サンプルの界面が安定したときの溶液 pH はサンプルごとに違いがあった (fig. 4)。これは岩石組成の違いにより固体-液体の二相間の安定場が異なるので、平衡状態を実現すべく岩石側から特定成分の溶解があるためではないかと考えられる。これについては次章で詳しく述べる。

4.2 ゼータ電位測定結果 2 — pH=4, 7, 10 と i.e.p. —

pH 未調整でゼータ電位を測定した後、pH 調整液 (HCl, NaOH) を使用して、溶液 pH を 4, 7, 10 付近に調整した測定を行なった。各 pH 環境についてゼータ電位を測定した結果、pH の値が低くなるにつれゼータ電位が正の方向にシフトし、逆に pH の値が高くなるにつれてゼータ電位の値が負の方向にシフトしていく傾向が見られた。Fig. 5 は中岳のサンプルの 1 つを示しているが、同様の傾向はすべてのサンプルについてみられる。これは 2 章 2 節のゼータ電位と pH の関係で示した内容に調和的な結果である。

溶液の pH を変化させていくと、ゼータ電位がゼロになる点 (i.e.p.) が存在することが知られている (e.g. Parks, 1965)。i.e.p. はゼータ電位の符号を分ける境界点であり、この種の実験ではしばしば代表的なパラメーターとして用いられる。この点を境として流動電位や SP データの解釈に大きな違いが生じるため、重要な指標である。本研究では pH 未調整結果を含めたすべての pH におけるゼータ電位測定結果を 3 次曲線でフィットさせ、その曲線が $\zeta=0$ となる pH を i.e.p. とした。

i.e.p. と pH 未調整のゼータ電位測定結果の関係について調べてみると、正の相関があることが判明し

た (fig. 6)。

4.3 isoelectric point (i.e.p.) と岩石の主要構成元素

本研究では i.e.p. と岩石成分との関係を調べるために、採取したサンプルの全部について蛍光 X 線 (XRF) 分析を行った。ここでは煩雑になるので詳述しないが、元素の価数とイオン半径からなるパラメーターを用いてゼータ電位の測定結果を整理すると、サンプルは 2 つのグループに分けられることが明らかとなった。各元素ごとの重量比と i.e.p. の関係においてこのグループ分けに着目すると、(i) TiO と (j) P_2O_5 を除いたすべての主要構成元素で i.e.p. と相関がみられた (fig. 7)。正の相関は (a) Al_2O_3 , (b) Fe_2O_3 , (c) CaO , (d) MgO , (e) MnO でみられ、負の相関は (f) SiO_2 , (g) K_2O , (h) Na_2O でみられた ((h) については、XRF の測定誤差が 5% 以上のデータを相関データとして扱わなかった)。

5. 議論

5.1 ゼータ電位に影響する要素

(1) 岩石ゼータ電位の解釈

岩石の組成は多くの場合 SiO_2 が 50% 以上存在し、主要構成成分の中でも SiO_2 は支配的である。Ishido and Mizutani (1981) は、 SiO_2 を主体とした石英などは i.e.p. の値が低く、強酸性環境下 (pH < 2) でない限りゼータ電位の符号は負であることを示している。Parks (1965) や James and Healy (1972) も上記の結果と調和的である。

今までの自然電位データの解釈では、岩石のゼータ電位は主要構成成分である SiO_2 の値を代表させて考えることが通説であった為に、ほとんどの場合ゼータ電位の符号は負として扱われてきた。しかし本研究のサンプル採取地点の自然状態を反映していると思われる pH 未調整の測定結果 (fig. 3) から判断すると、阿蘇の岩石は約 -20mV から +20mV まで符号を跨いだ幅広いゼータ電位の値を有していることが判明した為、上記のような見解では不十分であることは明らかである。

阿蘇地域の岩石のゼータ電位が場所によって異なる理由として、考えられる要素には pH、温度、溶液の電解質濃度、岩石組成などの違いが挙げられる。本研究では温度と溶液の電解質濃度は一定であるため、これらの値の変化については議論できないが、pH と岩石組成の違いについては議論することができる。以下に pH および岩石組成と、ゼータ電位の関係について考察する。

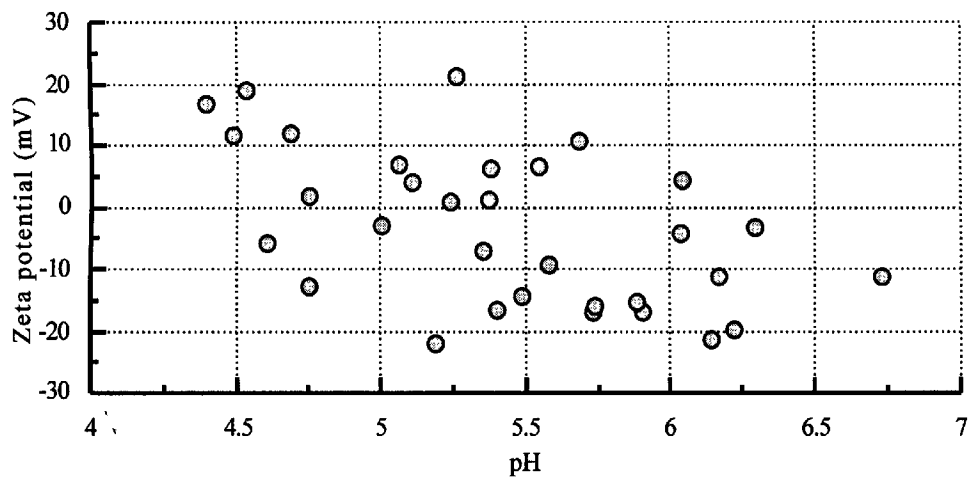


Fig. 4 Relation between zeta potential without pH-control and pH of the solution at equilibrium.

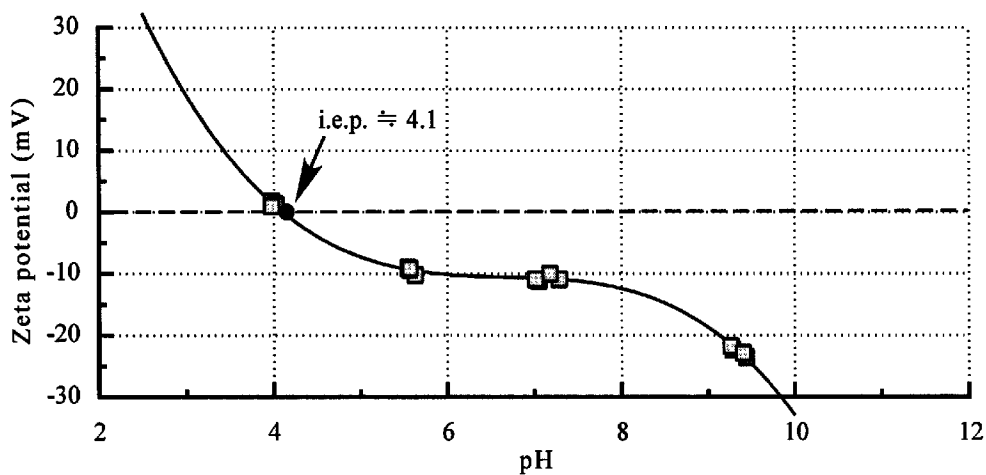


Fig. 5 An example of zeta potential (ζ) versus various pH (A sample from Nekodake). The solid line indicates a fitting curve of $\zeta = \alpha (\text{pH})^3 + \beta (\text{pH})^2 + \gamma (\text{pH}) + \delta$ ($\alpha = -76.50$, $\beta = 11.41$, $\gamma = -0.57$, $\delta = 161.12$). The solid circle shows i.e.p..

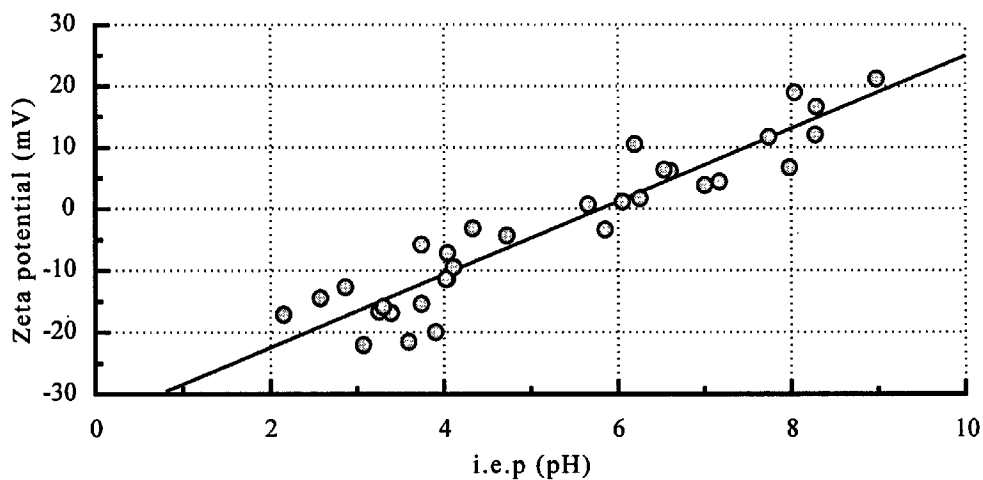


Fig. 6 Relation between zeta potential without pH-control condition and i.e.p.. The solid line shows a regression line.

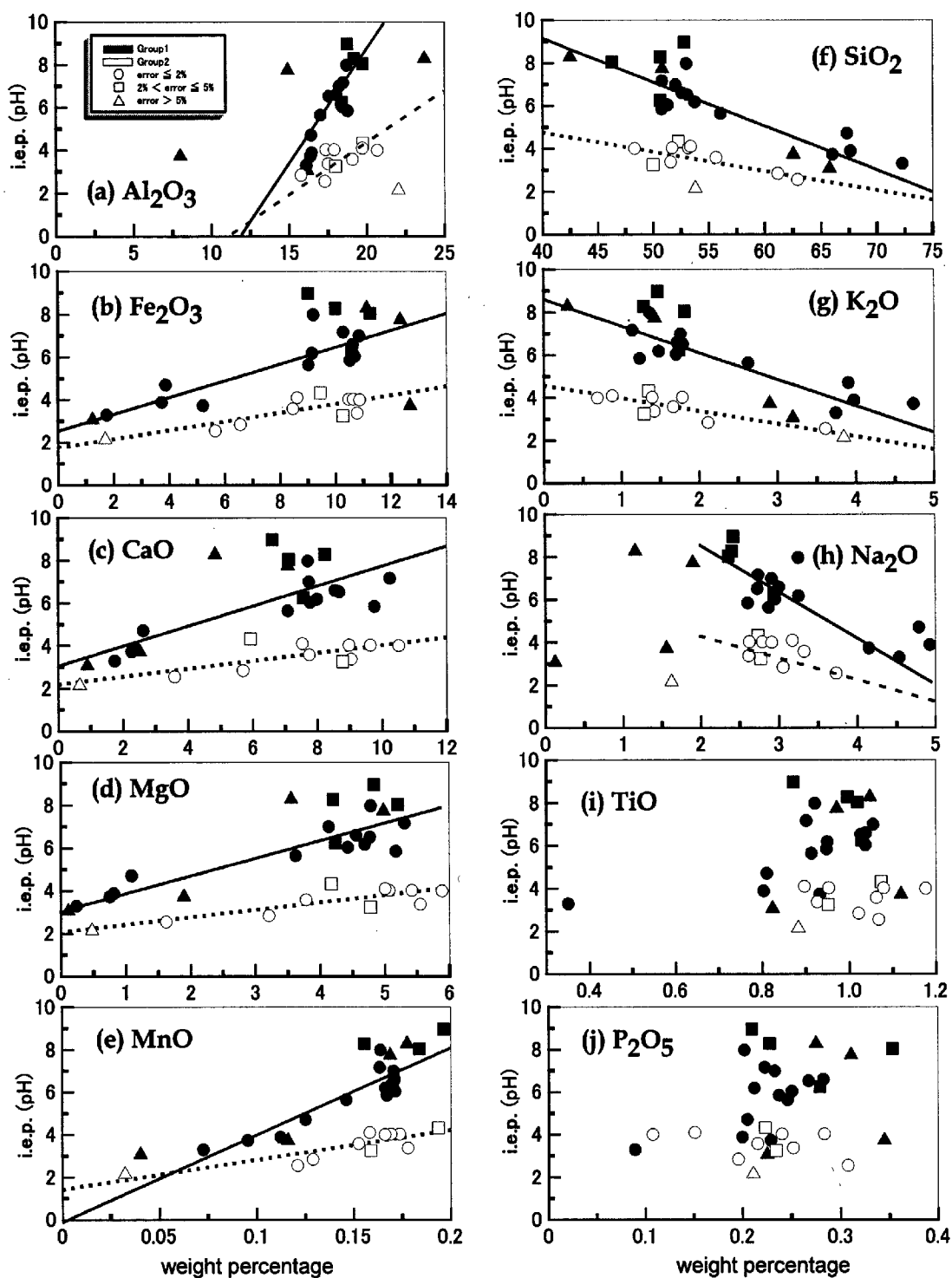


Fig. 7 Relationships between i.e.p. and wt% of major elements for Aso volcanics. Symbols show the total percentage errors of XRF measurements. Circles, squares and triangles show $2\% \leq \text{error}$, $2\% < \text{error} \leq 5\%$, $5\% > \text{error}$, respectively. Solid and open symbols indicate the two groups (solid: group1, open: group2) classified by a parameter using valencies and ion radii (not shown in this paper). Solid lines show correlations between group1 data and i.e.p. and broken lines show correlations between group2 data and i.e.p..

(2) pH

4章1節で述べたように、pH未調整のゼータ電位測定に於いて界面が安定したときの溶液pHは、サンプル毎に大きく異なっており、およそ4.5~6.5の間でばらつきがあった (fig. 4を参照)。ここではまず、こうしたpHのシフトがなぜ起こるのかについて考察する。pHシフトは、サンプルに含まれる成分が循環溶液中に溶解することによって発生しているはずだが、その原因物質としては、(a)岩石サンプルに含まれる酸性ガス等の付着物、(b)岩石中の鉱物そのもの、の2つの可能性が考えられる。中岳第1火口の噴気には二酸化硫黄が多量に含まれているので、これが降雨等により火口近傍の土壤に浸透することによって、岩石サンプルが後天的に酸性を帯びる可能性がある。しかし、我々の実験結果は中岳火口との位置関係に明瞭な関係がみられない。それに加えて、本実験ではゼータ電位測定の前に、粉体にしたサンプルを十分に洗浄している上、ひとつのサンプルについて循環溶液を数回取り替えて測定を行っているにも関わらず、平衡状態でのpHは例外なく初期値からシフトして同様の値に収束してしまう。従って、酸性ガス等の後天的混入はpHシフトの原因ではなく、岩石中の鉱物そのものが溶解することでpHがシフトするのだと考えざるを得ない。

では、次の問題として、平衡状態におけるゼータ電位がサンプル毎に異なっているのは、こうした鉱物の溶解に伴うpHシフトが原因なのであろうか。確かに、個々のサンプルについてみると、ゼータ電位にはfig. 5に示したようなpH依存性があるので、pH値の増大とともにゼータ電位が減少する傾向にあることは間違いない。実際、さまざまなサンプルについてプロットしたfig. 4にも弱いながらこうした負の相関が認められる。しかしながら、ゼータ電位がpHにのみ強く規定されているのだとすれば、fig. 4にみられるゼータ電位の極端なばらつきは不自然である。特に、pHが5~6におけるゼータ電位には符号まで含めて相当のばらつきがある。このことは、サンプルのゼータ電位を規定しているのはpHよりもむしろ別の要因の影響が大きいことを示唆している。

(3) 岩石組成

上述のように、溶液pHの差は、サンプル毎のゼータ電位にバラエティを生じさせる決定的な要因ではないようである。我々の実験では温度や溶液の電解質濃度は一定である為、ゼータ電位の値がサンプル毎に異なる最大の原因として残されたものは、岩

石組成の違いしかない。このことは、i.e.p.とゼータ電位の関係からも次のように理解される。Fig. 6はi.e.p.と平衡状態のゼータ電位の関係を示したものであるが、両者の間には極めて高い相関が認められる。i.e.p.はその定義からpHとは無関係な量であり、温度と電解質濃度一定の条件下では、固相側の物質が何であるかによってのみ決定される。従って、i.e.p.と平衡状態のゼータ電位の間に高い相関がみられるという事実は、平衡状態のゼータ電位が、主に岩石組成によって支配されていることを意味している。

本研究で得られたi.e.p.とXRFの測定結果を比較してみると、(a)Al₂O₃、(b)Fe₂O₃、(c)CaO、(d)MgO、(e)MnOで正の相関、(f)SiO₂、(g)K₂O、(h)Na₂Oで負の相関がみられた (fig. 7参照)。

i.e.p.が大きいほど、ゼータ電位の符号が正であるpH環境が広くなることを意味している。そのためfig. 7で正の相関がある主要構成元素は、含有率増加と共にi.e.p.が増加する傾向を示しているの、ゼータ電位の符号を正にさせる傾向があると考えられる。逆に負の相関のあるものはゼータ電位の符号を負にする傾向があると考えられる。

Parks (1965) は各種鉱物のi.e.p.についてまとめており、 α -Al₂O₃: 9.1~9.2, Fe(OH)₂: 12.0, Mg(OH)₂: 12.4, Mn(OH)₂: 12.0, SiO₂: 1.8~2.5, TiO₂: 4.8~6.7 というi.e.p.の結果を報告している。Robinson et al. (1964) はAl₂O₃とMgOのゼータ電位の測定を行いAl₂O₃: 9.4, MgO: 12.5±0.5 というi.e.p.の測定結果を示している。またIshido and Mizutani (1981)もSiO₂のゼータ電位の測定を行っており、i.e.p.が2.0という測定結果を示している。

上記をまとめると、Al, Fe, Mg, Mnなどの酸化物でi.e.p.の値が大きく、Siの酸化物でi.e.p.の値が小さいという結果になっている。これらの測定結果は単体の鉱物のi.e.p.であるが、各種鉱物が混在している岩石の主要構成元素とi.e.p.の比較研究した本研究の結果も、これらの結果に調和的であり、i.e.p.に作用するそれぞれの構成元素の割合が岩石のi.e.p.に大きく影響していることが示唆される。

本研究ではTiOの重量比とi.e.p.の間に相関がみられなかったが、Parks (1965)の結果(TiO: i.e.p. = 4.8~6.7)を考慮するとi.e.p.が他の鉱物に対して中間的な値を示しており、しかも値に幅があるためにi.e.p.と元素の重量パーセントとの間に明瞭な相関が現れにくい可能性が考えられる。

5.2 自然電位(SP)データと岩石のゼータ電位

阿蘇山中央火口丘では長谷他 (2000) によってSP分布の調査が行われてきた。ここではゼータ電

位が+10mV 以上のサンプルが多数存在していた高岳周辺について SP 分布と岩石のゼータ電位の関係について考察する。

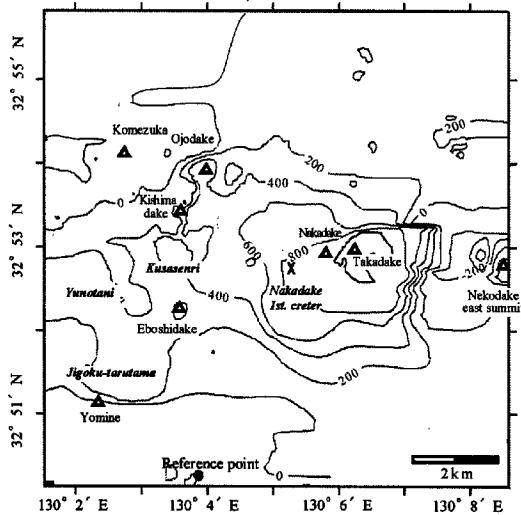


Fig. 8 Distribution of self-potential (SP) on the central cones of Aso Volcano. Contours show SP values (100mV interval). A solid circle shows the reference point. "X" indicates Nakadake 1st. crater. Open triangles show the locations of the mountain summits.

Fig. 8 は阿蘇山中央火口丘の SP (-1.0mV/m 地形補正後) を示している。長谷他 (2000) は、中岳第 1 火口近傍を中心とした高電位異常 (N.A.) があることを見出し、この地域で熱水が上昇していることを推定した。その後の測定の結果、上記の電位異常とは別の高電位異常 (T.A.) が高岳周辺地域にみられることが明らかとなった (fig. 9)。

Fig. 8 と fig. 9 は一様な地形補正を施した後の SP 分布であるが、ゼータ電位の符号は負であるという仮定の下で、標高に対し線形に補正を施したものである。しかし本研究により高岳周辺地域のゼータ電位の符号は正であることが明らかとなり、地形に対する電位勾配のセンスも逆と考えられる。そのため T.A. は地形補正の誤りによって、見かけ上高電位異常に見えた可能性が強く、地形補正を見直す必要性がある。

この地域は N.A. 中心部に近接しているため、高岳周辺地域特有の SP 分布を考察する為には、N.A. の影響を取り除く必要がある。Fig. 10 は高岳周辺の未補正 SP データから長谷他 (2000) が求めた N.A. のモデルを差し引いたもので、主に「逆センス地形効果」が反映されているデータと考えられる。

SP の地形効果は多くの火山などで標高に対して

電位が線形的な相関を示していることが報告されている (e.g. 橋本他, 1999; Hashimoto et al., 1994; Ishido et al., 1997; Nishida et al., 1996)。また Ishido (1989) は均質媒質において地形効果が線形になり得ることを単純なモデルで説明している。Fig. 10 では標高が 1500m 付近より高い地域で線形的な相関が見られ、その係数は約+2.7mV/m であった。Ishido (1989) によれば、これまで各地のフィールドで観測された地形効果は-1mV/m ~ -10mV/m の範囲にある。ゼータ電位の符号が正であることを考慮すると、高岳周辺にみられる+2.7mV/m という値は地形効果として妥当である。以上のことから高岳周辺地域は、岩石のゼータ電位が正の符号である為に、通常とは逆センスの地形効果が存在し、特異な SP 電位分布を形成していると考えられる。

Fig. 11 は、上記の考えに基づいて高岳周辺地域の地形効果を見直し、補正した結果である。補正の結果、高岳周辺のデータは N.A. のトレンドに添う形に分布し、高岳周辺以外のデータと調和的な傾向を示している。

6. まとめ

現在までに多くの火山や地熱地帯において自然電位観測が行われ、その起源が流動電位であるとする解釈の下に測定結果が議論されてきた。流動電位は界面のゼータ電位に大きく左右され、SP データの解釈にも大きく影響するものである。これまでに Parks (1965), Robinson et al. (1964), Ishido and Mizutani (1981) などにより、主要な鉱物や火成岩のゼータ電位測定は行われてきたものの、野外で測定された自然電位分布を解釈するためにその地域のゼータ電位を測定した例はなかったと言ってよい。

本研究では阿蘇山周辺のさまざまな場所における岩石のゼータ電位を測定し、pH 未調整のゼータ電位測定の結果、約-20mV から+20mV までの幅広いゼータ電位の値を得た。また岩石の蛍光 X 線(XRF)分析を行いゼータ電位との関係を検討したところ、ゼータ電位が岩石組成に強く影響を受けていることが示唆された。さらに高岳周辺の SP 分布とゼータ電位との関連を調べた結果、岩石のゼータ電位が正の符号であった為、逆センスの地形効果が存在し見かけ上の高電位異常となっていたことが示された。

以上の結果から岩石のゼータ電位にはサンプルによってかなりの違いがあることが明らかとなり、岩石のゼータ電位測定が SP データを解釈する上で非常に重要であることが示唆された。

今後は高岳周辺地域以外のゼータ電位と SP 分布

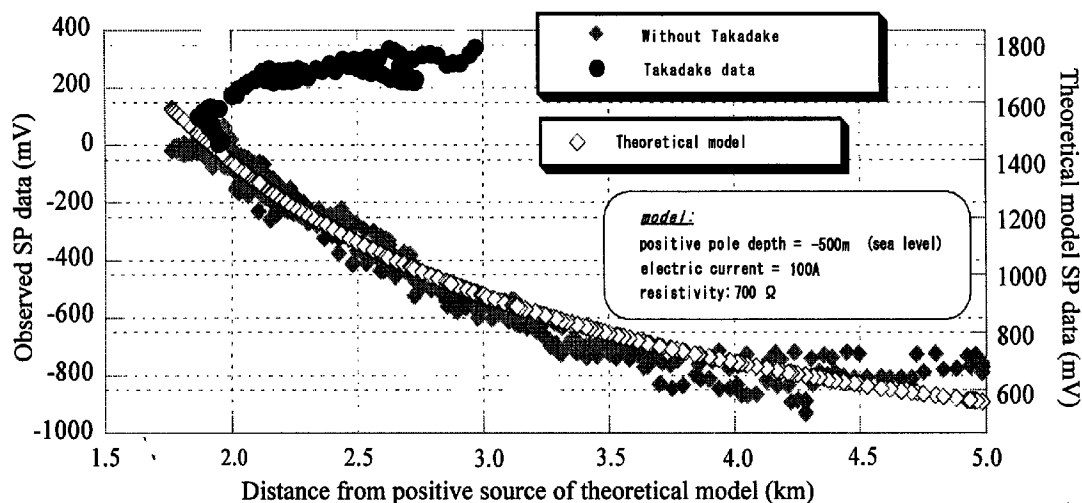


Fig. 9 Observed and theoretical SP profiles around Nakadake crater (topographic effect removed (-1.0mV/m)). Circles, solid diamonds and open diamonds correspond to Takadake anomaly (T.A.), regional Nakadake anomaly (N.A.) and theoretical model, respectively.

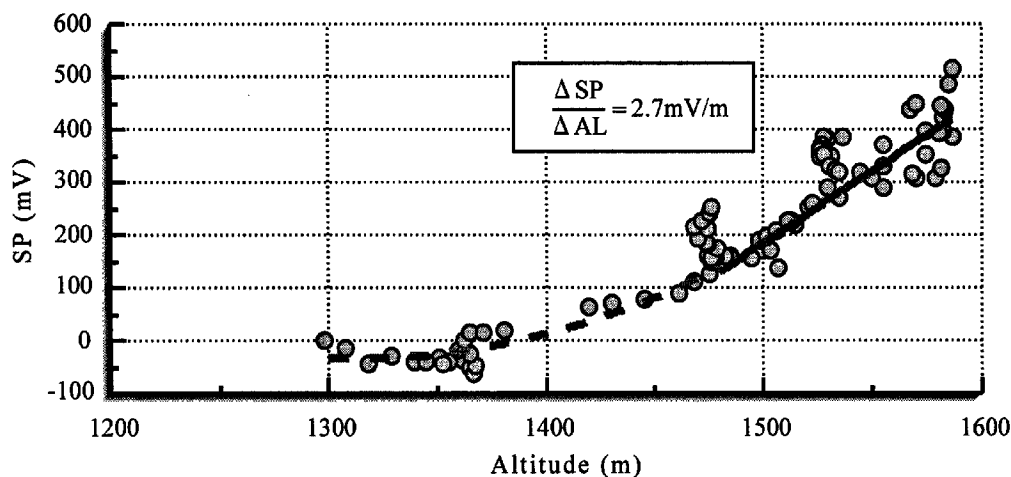


Fig. 10 Correlation between Self-Potential (SP) and altitude around Takadake area (after reduction of Nakadake regional anomaly (N.A.)). Solid and broken lines show regression curves above and below 1500m, respectively. $\Delta SP / \Delta AL$ indicates a gradient of regression line above 1500m (topographic effect value).

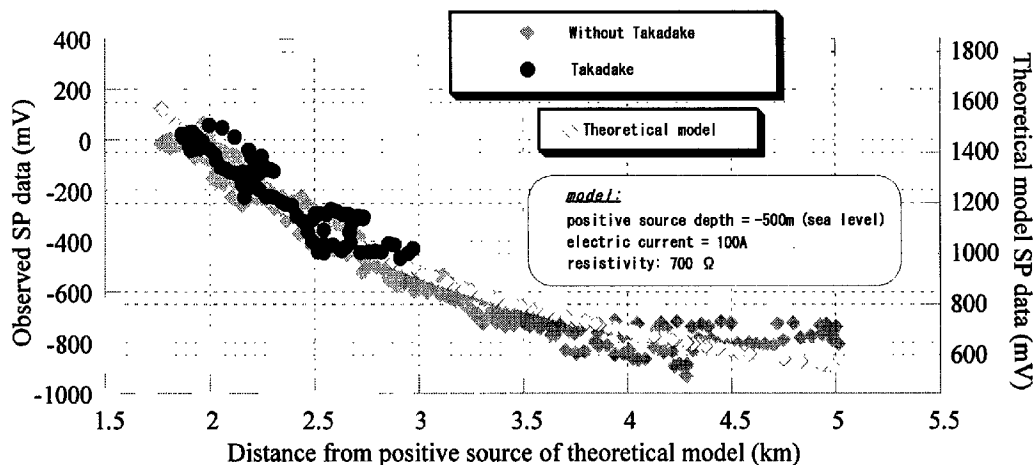


Fig. 11 Observed and theoretical SP profiles around Nakadake crater (inverse topographic effect of T.A. considered). Meanings of symbols are the same as those in fig. 9.

の関係について検討すると共に、定量的な考察をしていく必要がある。また岩石の構成元素と i.e.p. の相関関係に於いて実験結果が2つのグループに分かれる理由が未解決であり、XRD 分析などにより鉱物特定を行う必要があると考えている。そして阿蘇以外の火山地域についても岩石のゼータ電位と SP 分布との比較検討を行い、本研究で得られたような逆センスの SP 地形効果が他でも存在するか確かめる必要がある。

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小笠原正継氏、松島喜雄氏、高田亮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、大沢信二氏には測定に関してご指導頂いた。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
- 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
- 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.
- 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. (1989) : Self-potential generation by subsurface waterflow 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.
- James, R. O., and T. W. Healy (1972) : Adsorption of hydrolyzable metal ions at the oxide-water interface, I, II, III, J. Colloid Interface Sci., Vol. 40, pp. 42-81.
- 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
- Parks, G. A. (1965) : The isoelectric points of solid oxides, solid hydroxides, and aqueous hysroxo complex systems, Chem. Rev., Vol. 65, pp. 177-198.
- Robinson, M., J. A. Pask, and D. W. Fuerstenau (1964) : Surface charge of alumina and magnesia in aqueous media, J. Am. Ceram. Soc., Vol. 47, pp. 516-520.
- Zablocki, C. J. (1976) : Mapping thermal anomalies on an active volcano by the self-potential method, Kirauea, Hawaii, Proc. 2nd U. N. Sympos. on The Development and Use of Geothermal Resource, San Francisco CA. U. S. Govt. Printing Office, Washinton, D. C., Vol. 2, pp. 1299-1309.

Measurements of zeta-potential in various rock samples of Aso Volcano

Hideaki HASE*, Shin'ichi TAKAKURA**, Tsuneo ISHIDO**, Keiko SATO***,
Takeshi HASHIMOTO*, Yoshikazu TANAKA* and Takahiro OHKURA*

*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 in 32 rock samples from various places of Aso caldera. We obtained positive zeta potentials in 14 samples and negative ones in other 18 samples without pH-control during measurements. The samples with positive zeta potential are distributed over Mt.Takadake and Mt.Kishima areas where we detected local positive SP anomalies. Then we propose that those positive SPs are not indicating the subsurface upflow of hydrothermal fluid but due to 'inverse topographic effect' caused by positive zeta potential. Zeta potential of rocks has been mostly treated as negative in the past. However, our result suggests that it is sometimes not the case and that we have to be careful with its variation.

Keywords: zeta potential, streaming potential, self-potential, electrokinetic phenomena, Aso volcano