

岩石物性測定と数値シミュレーションによる 火山の自然電位解釈

長谷英彰¹⁾

1. はじめに

火山地域では火山体内部構造や火山活動の推移を調査する目的で多くの物理探査が行われている。自然電位は流体の検出に優れている物理探査法であり、地下水の位置・規模・流動方向などの推定に広く用いられている。特に火山地域では、火山体内部の熱水系調査に自然電位が用いられることが多く、現在では世界の活火山で調査が行われるようになってきた。

自然電位とは大地に存在する自発的な電位のことを指し、その発生源は、酸化還元電位、拡散電位、熱電気効果、流動電位などいくつか考えられる。火山地域ではしばしば数100mVに達する自然電位アンマリーが観測されるが、その電位形成を説明できるのは、これらの発生源の中でも流動電位だけである。例えば岩石などの多孔質中に地下水が存在している場合、その固液界面では電荷分離が発生し電気二重層が形成される。電気二重層の電荷は界面から離れるに従って密度が小さくなり、液体側では電荷の自由度も大きくなる。そこに液体流動が発生した場合、界面からある程度離れた電荷は液体流動とともに移動することになる。つまり、地下水が岩石中を流動すると電気二重層内の電荷も一緒に運ばれ電流が発生し、その結果として電位を形成する。それが流動電位である。地下水流動に伴い運ばれる電荷は、多くの場合符号は“正”であるため、火山地形に沿うような地下水流動が存在する場合、火山の麓付近ではポジティブ、山頂付近ではネガティブとなる自然電位プロファイルが期待される。すなわちポジティブな自然電位アンマリーが存在する場所は、地下水流動の流動先端方向を示していると解釈することができる。逆に火山の山頂付近でポジティブな自然電位アンマリーが観

測された場合、一般的にその地下では熱水上昇流が存在していると推定される (e.g. Zlotnicki *et al.*, 1998; Zlotnicki and Nishida, 2003)。これまで行われてきた自然電位研究では、このような自然電位アンマリーの分布から地下水の流動方向を定性的に推定するだけに止まるものが多くみられたが、近年では数値シミュレーションによる定量的な自然電位解釈が行われるようになり、具体的な地下の流体流動分布やフラックスの推定が行われ、火山では熱水活動を維持している熱源の大きさも推定されるようになってきた (e.g. Yasukawa *et al.*, 1993; Ishido and Pritchett, 1999; 長谷ほか, 2009)。

本稿では、近年著者が進めてきた流動電位に関する岩石物性(ゼータ電位)測定の結果から得られた、新たな自然電位解釈についてご紹介する。

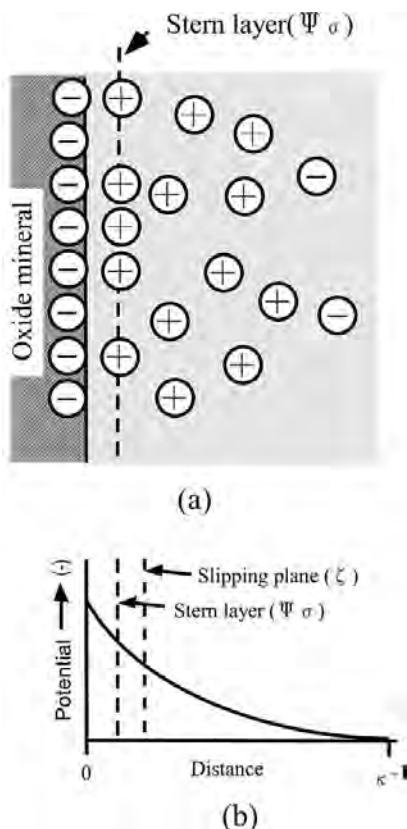
2. 流動電位とゼータ電位

固液界面の電気二重層の分布を考える場合、例えば岩石中に多く存在しているSiO₂を例に挙げると、通常は界面の固体側に負イオンが、また液体側には正イオンが集まり、全体として中性が保たれているような電荷分布を形成している(第1図)。電気二重層内の界面近傍にある電荷は、正負電荷の結び付きが強いため、自由度が小さく移動できない。しかし界面から離れるに従って電荷は自由度が大きくなり、移動できるようになる。その電荷が移動可能になる場所をすべり面(Slipping plane)、特にその面の電位はゼータ電位と呼ばれている。ゼータ電位は実験で測定可能な電位であり、電気二重層の電荷分離の状態を知るための重要な要素であるため、電気二重層を議論する際によく用いられている。

電気二重層の電荷を含む液体が移動することによ

キーワード: 自然電位, 流動電位, ゼータ電位

1) 東京大学 地震研究所
113-0032 東京都文京区弥生1-1-1



第1図 電気二重層界面の概念図と電位。

り流動電位が発生するが、その流動電位 (V) は液体の圧力 (P) に比例して大きくなる。一般的な式で表すと以下ようになる。

$$C_s = \frac{\Delta V}{\Delta P} = \frac{\epsilon \zeta}{\sigma_{eff} \mu} \quad (1)$$

ここで、 ζ : ゼータ電位 (V)、 ϵ : 水の誘電率 (F/m)、 σ_{eff} : 水の有効電気伝導度 (S/m)、 μ : 水の粘性率 (Pa · s) である。Cs は流動電位カップリング係数と呼ばれるものであり、流動電位を議論する際によく用いられる。流動電位の要素の中で、水の有効電気伝導度とゼータ電位は値のバリエーションが大きく、特にゼータ電位は符号を跨ぐ大きな変化をすることがある。符号を跨ぐ変化をするのは、これらの要素の中でゼータ電位だけであるため、例えば流動電位の符号が変わるような現象があるとするれば、それはゼータ電位の変化に起因していると考えられる。

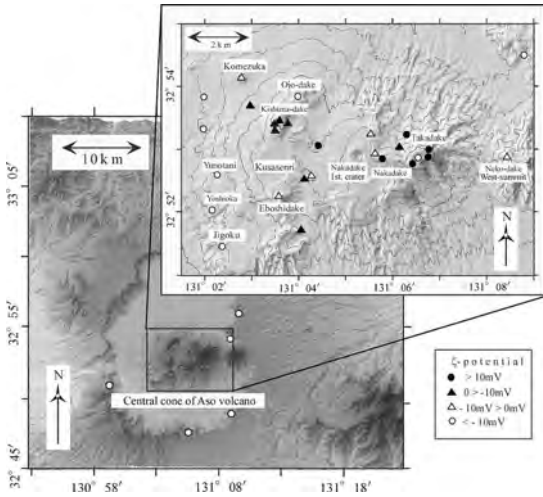
3. 岩石のゼータ電位

岩石と地下水界面におけるゼータ電位を考える場合、影響を与える主な要素は、地下水の pH ・ 温度 ・ 塩分濃度であろう。火山で観測される自然電位の発生原因が流動電位であるとすれば、自然電位を解釈する上でゼータ電位に影響を与えるこれらの要素を把握することが、より正確な解釈につながると考えられる。前章で述べたようにゼータ電位は符号を跨ぐ変化をするが、それは界面のイオン吸着の状態が pH の変化に敏感に反応して電気二重層の電荷分布が変化するためである。これらの要素とゼータ電位の関係については、岩石の室内実験から考察が進められている (e.g. Ishido and Mizutani, 1981 ; Revil et al., 1999 ; Jouniaux et al., 2000 ; Tosha et al., 2003)。

このように流動電位に関わる各種要素とその環境により、ゼータ電位や流動電位が変化することは明らかであるが、観測された自然電位データの解釈において、実際に岩石のゼータ電位を測定し、その結果とともに議論されることは稀である。多くの場合、フィールド岩石のゼータ電位等の岩石物性測定は行われず、SiO₂ を主体とした石英や花崗岩などの結果 (例えば Ishido and Mizutani, 1981) を参照して自然電位解釈を行うことが一般的である。その理由は、一般的に岩石は SiO₂ を 50 パーセント以上含んでいるため、石英や花崗岩の実験結果と実際のフィールド岩石のゼータ電位の違いはみられないと思われてきたためである。それらの実験結果から極端に pH が低い状態では (例えば石英などでは pH が 2 以下)、フィールド岩石のゼータ電位は負であることが示唆されてきたため、通常のフィールドでは岩石ゼータ電位の符号はいつも “負” として扱われてきた。

ところが Hase et al. (2003) が阿蘇山の岩石サンプルでゼータ電位を測定した結果をみると、値にかなりのバリエーションがあり、一般的なフィールドの pH コンディションにおいても符号が正のゼータ電位を示す岩石が多数あることが明らかとなった。

第2図は阿蘇山の岩石サンプル分布とゼータ電位の測定結果である。阿蘇山中央火口丘の西側山麓の地域では、ゼータ電位がいずれも -10mV 以下であるものの、比較的標高が高い地域では正のゼータ電位を示すサンプルが多く、特に高岳周辺ではゼータ電位が +10mV 以上の岩石サンプルが 5 つも存在する。



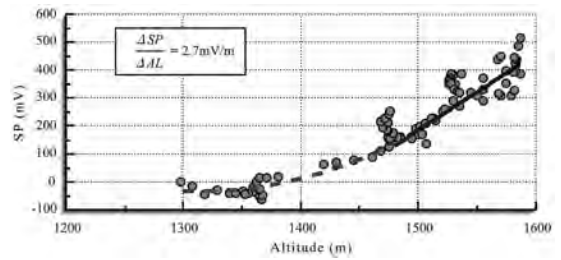
第2図 阿蘇山の岩石ゼータ電位 (Hase et al., 2003).

4. 正のゼータ電位が自然電位に及ぼす影響

阿蘇山の岩石ゼータ電位はバリエーションに富んでおり、場所により正のゼータ電位を示すことが明らかとなったが、その岩石が位置する地域の自然電位はどのような分布になっているのであろうか。

通常想定される負のゼータ電位の場合、重力ポテンシャルに伴う地下水流動があると仮定すると、流動電位は正の電荷が地下水とともに運ばれることにより形成される。その結果、標高の低い地域に正の電荷が集まる形となり、標高が低くなるに従い自然電位は上昇する分布を示す。これは自然電位の地形効果と呼ばれるもので、自然電位は標高に対して負の線形相関を示すことが多い。ところがゼータ電位が正の場合、この関係が逆転することになるため、自然電位は標高に対して正の線形相関が期待されることになる。

第3図は阿蘇山の高岳周辺の自然電位分布図である。阿蘇山では中岳火口を中心とした熱水活動に起因していると思われるポジティブアノマリーが存在している (Hase et al., 2005)。近接している高岳周辺もこの電位アノマリーの中に位置しているが、第3図はこの熱水活動に関する電位アノマリーを取り除いた自然電位になっている。この図の自然電位は横軸を標高にしてプロットしているが、地形効果が存在している場合、標高が上がるに従い自然電位値は下降することが期待される。しかし図に示したように標高が上がるに従い自然電位も上昇していることがわかる。こ



第3図 阿蘇高岳周辺の自然電位分布図 (data from Hase et al., 2003).

の地域は前章でも述べたとおり、+10mV以上の正のゼータ電位を示す岩石が存在している地域であるため、この岩石の影響により、相関が通常と逆センスになったと考えられている (Hase et al., 2003)。

通常このような自然電位プロファイルが得られたときは、その地域の地下に熱水上昇が存在していると解釈するのが通例である。そのため、ゼータ電位の実験結果がなければ完全に誤った解釈をしてしまう可能性が高く、この研究結果は自然電位解釈において大変意義のある成果と言えるだろう。

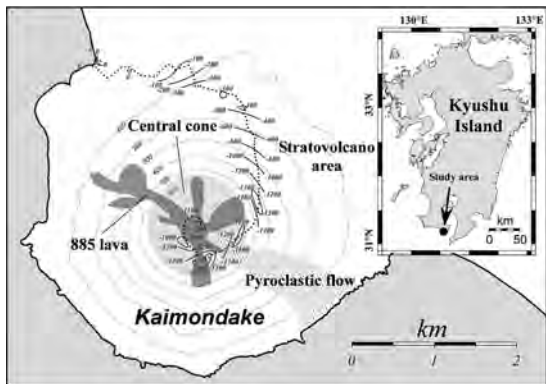
その後の研究で阿蘇山以外の火山でも正のゼータ電位を示す岩石がいくつかの火山で見つかっており (Hase et al., 2006; Aizawa, 2008)、岩石ゼータ電位の重要性が認識されるようになってきている。

5. 火山体内部構造と自然電位

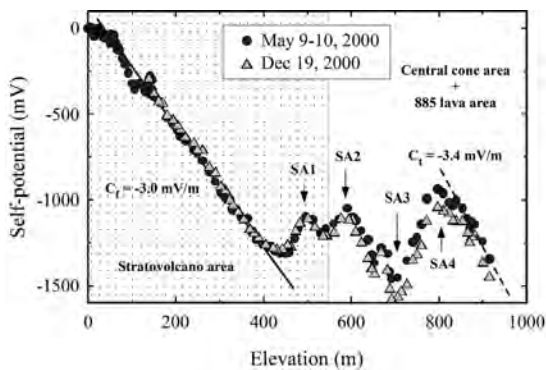
ゼータ電位が岩石によって異なる理由のひとつに、岩石組成の違いが指摘されている (Hase et al., 2003)。岩石の組成の違いによってゼータ電位が変化するのであれば、地表で観測される自然電位から、逆に地下の岩石ユニットの空間分布を推定することはできないであろうか。

長谷ほか (2008) では、九州南部に位置する開聞岳において自然電位測定・岩石のゼータ電位測定・VLF比抵抗探査を行い、観測された自然電位を岩石ゼータ電位のバリエーションで解釈可能であるか検証を行っている。

開聞岳の自然電位は、およそ標高450mまで標高が上がると共に電位が下降する明瞭な地形効果がみられるものの、それより上部では地形効果が破綻し局所的な自然電位アノマリーがいくつか存在する(第4



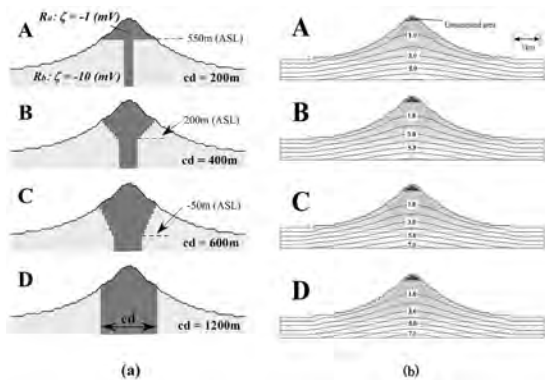
第4図 開聞岳の位置と自然電位観測点(黒点). コンターは自然電位を示す.(長谷ほか, 2008).



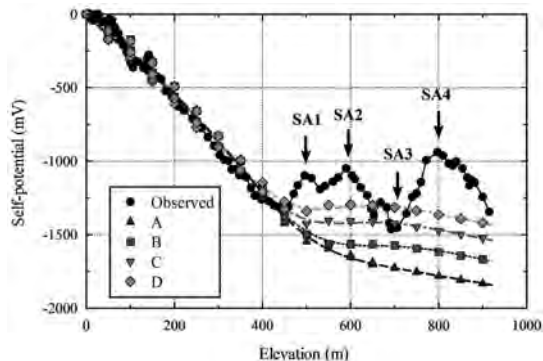
第5図 開聞岳の自然電位分布図(長谷ほか, 2008).

図, 第5図). 前章でも指摘したが, このような自然電位分布が観測されると, 地下に存在する熱水活動の影響により自然電位アノマリーが形成されていると解釈されることが多い. しかし開聞岳では地熱兆候が全く存在しないため, 安易に熱水活動による電位アノマリーであると結論づけるのは危険である.

開聞岳は大局的に上部の中央火口丘と下部の成層火山に分けられており, 各地質ユニットのゼータ電位は, 中央火口丘が約 -1mV , 山麓成層火山が約 -10mV と見積もられている. この研究では, まず中央火口丘と山麓成層火山の岩石ユニットのゼータ電位を用い, 中央火口丘の潜在部分の体積変化と自然電位分布について数値シミュレーションを行っている(数値シミュレーションの計算手法については, Ishido and Pritchett (1999), 當舎ほか (2001)などを参照されたい) (第6図).



第6図 (a) 数値シミュレーションモデル. Raは中央火口丘, Rbは山麓成層火山体を示し, ゼータ電位はそれぞれ -1mV , -10mV に設定. (b)シミュレーションから得られた流体流動分布. コンターは流体圧($\times 10^6\text{Pa}$) (長谷ほか, 2008).



第7図 第6図の流体流動分布を用いた自然電位シミュレーション結果. SA1~SA4は局所的な自然電位アノマリーを示す.(長谷ほか, 2008).

結果はAからDのいずれのモデルにおいても標高約400mまでは明瞭な地形効果を現しているものの, それより上部では地形効果が標高に対してあまり変化しなくなり, その変化率は中央火口丘の潜在部分が大きくなると顕著であることが示されている(第7図). 結果から得られた自然電位プロファイルは, 実際に開聞岳の観測された自然電位プロファイルと大局的に一致している. つまり, 開聞岳の火山体内部構造が大局的に上記の二層構造のゼータ電位の影響を受けて形成されていると仮定すれば, 電位プロファイルとの数値シミュレーションのマッチングから, 中央火口丘の潜在部分の形状を推定することが可能である

ことを意味している。

さらにこの研究では、ゼータ電位が -1mV の広域媒体の中にゼータ電位が -20mV の局所的柱状ブロックが存在するモデルを用いて、中央火口丘と山頂溶岩流の関係をモデル化し、自然電位に対する山頂溶岩流の影響について検証を行っている。このモデルでは柱状ブロックの下方境界近傍で $+100\text{mV}$ を上回る大きなポジティブアノマリーを形成することが示されており、局所的な溶岩流の存在によって自然電位はポジティブアノマリーを形成することを示唆している。つまり、山頂付近に存在するポジティブアノマリーが構造起因であると仮定すれば、先のモデル計算と同様にモデルマッチングを行うことにより、溶岩流の潜在部分の空間分布を推定することが可能であることを示唆している。

この研究結果の特筆すべき点としては、岩石ユニットのゼータ電位がいずれも負であったとしても、岩石ゼータ電位値に局所的なコントラストがある場合、重力に影響された単純な地下水流動だけでポジティブアノマリーを形成することが可能であるということである。これまで火山で観測された自然電位解釈では、山頂近傍のポジティブアノマリーは岩石ゼータ電位が正の場合を除き、疑うことなく熱水活動等の火山活動に結び付けて解釈されることが多かった。しかし火山体内部構造に局所的なコントラストがある場合には、構造起因の自然電位アノマリーも形成される場合があるため、火山の自然電位は火山体内部構造を含めた解釈が必要であることを示唆している。

6. まとめ

本稿ではこれまで著者が行った岩石物性(ゼータ電位)測定の結果を用いて、これまでと異なる自然電位の解釈例について述べさせて頂いた。

前半では正のゼータ電位を示す岩石がフィールドに存在し、かつそのフィールド周辺の自然電位プロファイルに影響を及ぼしている結果について述べた。この結果は大変重要であり、単に自然電位アノマリーのセンスだけでは定性的にも流体流動の方向を議論できないことを示唆している。しかもその後の研究でいくつかの火山で正のゼータ電位を示す岩石が複数発見されており、正のゼータ電位がフィールドに存在することは必ずしも特異的なものではないことを示して

いる。つまり自然電位の解釈を定性的な範囲に止めておくとしても、流動電位を決定付けているゼータ電位の情報が必要であることを意味している。

後半ではゼータ電位が正でなくても複数の岩石ユニット間でゼータ電位にコントラストがあれば、単純な下降地下水流動による流動電位によって正の自然電位アノマリーを形成することを示唆しており、逆にその特徴を利用して自然電位から岩石ユニットの構造を推定することを提案している。自然電位は電線・電極・テスターがあれば測定できるため、容易かつ低コストで観測を行うことができる。そのため他の物理探査手法では測定困難な山頂や急峻な山岳地帯においても測定することが可能であり、アクセスできる測定範囲は他の手法に比べて広いと言える。本稿で紹介したように、自然電位から火山体内部の構造を推定することができれば、これまでロケーションから測定が困難であった場所の構造推定を行うことが可能になるかもしれない。また、自然電位から推定される構造は実質的にゼータ電位のコントラストを反映したものである。その構造は間接的に岩石組成のコントラストを示していると考えられ、他の電気探査法や電磁気探査法で得られた比抵抗構造とは根本的に異なっている。そのため、他の手法で得られた構造と自然電位から得られた構造を合わせて解析を行うことができれば、より精度の高い構造解析が可能になるかもしれない。

自然電位は古くから行われていた物理探査法のひとつであるが、その解釈に関しては古典的かつ定性的な観点のみで行うことが多く、観測データに関してあまり深く議論されていないことが多かった。その理由のひとつには、データ取得は容易であるが解釈が容易でない点が挙げられる。そのため、他の物理探査法と比べて積極的に用いられてきたとは言い難い。しかし近年、数値シミュレーターの開発が進むことで自然電位から流体流動の推定が容易になり、定量的な解釈が行えるようになってきた。さらに本稿で述べたように岩石物性を考慮した解釈を用いることにより、地下の流体流動に関する理解が深まると共に、構造探査法としても適応できる可能性が示唆されてきた。このように近年では自然電位の理解に大きな進展がみられており、物理探査法としてもっと多くの研究者に自然電位を活用して頂きたい。

謝辞：本稿をまとめる機会を与えてくださったミニシンポジウム「貯留層変動探査法のめざしたこと」の関係者の皆様に感謝申し上げます。数値シミュレーションコードSTARならびにEKPポストプロセッサの使用に際しては、産業技術総合研究所の石戸経士氏に便宜を図って頂きました。ここに記して感謝申し上げます。

文 献

- Aizawa, K., M. Uyeshima and K. Nogami (2008) : Zeta potential estimation of volcanic rocks on 11 island arc-type volcanoes in Japan: Implication for the generation of local self-potential anomalies, *J. Geophys. Res.* 113, B02201, doi:10.1029/2007JB005058.
- Hase, H., T. Ishido, S. Takakura, T. Hashimoto, K. Sato and Y. Tanaka (2003) : ζ potential measurement of volcanic rocks from Aso caldera, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 2210, doi: 10.1029/2003GL018694.
- Hase, H., T. Hashimoto, T. Sakanaka, W. Kanda and Y. Tanaka (2005) : Hydrothermal system beneath Aso volcano as inferred from self-potential mapping and resistivity structure, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 143, 259–277.
- Hase, H., T. Ishido and T. Nagao (2006) : Zeta potential measurements for quantitative interpretation of self-potential profiles, *Bull. Inst. Oceanic Res. & Develop., Tokai Univ.*, 27, 9–23.
- 長谷英彰・石戸経士・神田 径・森 真陽 (2008) : ゼータ電位を考慮した開聞岳の自然電位解釈, *物理探査*, 61, 301–312.
- 長谷英彰・橋本武志・西田泰典・宇津木 充・井上寛之・佐波瑞恵 (2009) : 自然電位から推定される有珠火山の熱水系, 31, 27–37.
- Ishido, T. and Mizutani, H. (1981) : Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics, *J. Geophys. Res.*, 86, 1763–1775.
- Ishido, T. and Pritchett, P. W. (1999) : Numerical simulation of electrokinetic potentials associated with subsurface fluid flow, *J. Geophys. Res.*, 104, 15, 247–15, 259.
- Jouniaux, L., M. L. Bernard, M. Zamora and J. P. Pozzi (2000) : Streaming potential in volcanic rocks from Mount Pelee, *J. Geophys. Res.*, 105, 8391–8401.
- Revil, A., P. A. Pezard and P. W. J. Glover (1999) : Streaming potential in porous media, 1. Theory of the zeta potential, *J. Geophys. Res.*, 104, 20,021–20,031.
- 當舎利行・石戸経士・中西繁隆・横井浩一 (2001) : 地熱地域における貯留層診断技術-熱水シミュレーションと組み合わせた解析方法, *物理探査*, 54, 433–454.
- Tosha, T., N. Matsushima and T. Ishido (2003) : Zeta potential measured for an intact granite sample at temperatures, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1295, doi:10.1029/2002GL016608.
- Yasukawa, K., G. S. Bodvarsson and M. J. Vilt (1993) : A coupled self-potential and mass-heat flow code for geothermal applications, *in Geotherm. Resour. Coun. Trans.*, 17, 203–207.
- Zlotnicki, J., G. Boudon, J. P. Void, J. F. Delarue, A. Mille and F. Bruere (1998) : Hydrothermal circulation beneath Mount Pelee inferred by self-potential surveying: Structural and tectonic implications, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 84, 73–91.
- Zlotnicki, J. and Y. Nishida (2003) : Review on morphological insights of self-potential anomalies on volcanoes, *Surv. Geophys.*, 24, 291–338.
- HASE Hideaki (2010) : Self-potential interpretation on volcanoes inferred from rock property measurements and numerical simulations.

< 受付 : 2010年7月27日 >