

火山噴火に伴う自然電位変動
京都大学理学部 橋本武志

Self-Potential Changes Accompanying Volcanic Eruptions
Takeshi Hashimoto, Faculty of Science, Kyoto University

1. はじめに

自然電位は他の物理探査に較べて測定が比較的単純かつ容易である反面、発生原因が多様であるため、得られた結果の解釈や定量的なモデル化が難しいといわれる。しかしながら、活動中の火山のフィールドにおいては、測定の簡便さは特に重要であり、こうした簡便な方法から地下の状態について何らかの情報を引き出すことが出来れば有用であることはいままでもない。近年、自然電位の発生原因として有力視されている界面動電現象の性質が詳しく調べられたことから、地下の流体流動との関わりに着目した自然電位の研究が数多く行われるようになった。本稿では、活火山における自然電位、特に噴火活動に伴う自然電位変動を中心に過去の研究のレビューを行うとともに、今後解決されるべき問題点についてまとめる。

2. 火山における自然電位観測

金属鉱床において自然電位がしばしば負の異常を示すことはよく知られており、1950年代には、自然電位法は鉱床の物理探査法の一つとして盛んに利用されていた（例えば、佐藤, 1952¹⁾）。しかし、その後種々の比抵抗探査法が開発されたので、この分野で自然電位法が利用されることは少なくなっていたようである。近年では、地熱流体の流動を捉える手法として、自然電位法の火山地帯や地熱地帯への応用が増えている。

自然電位測定を含む系統的な物理探査によって火山地下の熱活動を推定する試みとして最初の成功をおさめたのは、Zablocki(1976)²⁾であろう。彼は、Kilauea火山で自然電位の空間分布を調査し、火孔群に対応した数百mVに及ぶ高電位異常を報告している。彼は、この高電位異常の原因として火道近傍に形成された地下の熱水上昇域に伴う流動電位を考えるとともに、VLF-MTや電気探査の結果とあわせて、傾いた高温ダイクモデルを提出している。また、この研究は、同一測線の繰り返し測定によって、1974年7月の割れ目噴火前後に顕著な自然電位変化をとらえている点で注目される。Zablocki(1976)²⁾以後、いくつかの火山で同様の試みがなされ、その多くで噴気地帯や噴火割れ目に対応する高電位異常が見いだされた（例えば、Stromboli火山(Ballestracci, 1982³⁾), Etna火山(Massenet and Pham, 1985⁴⁾)。これらの論文の多くは、高電位異常の原因としてやはり地下の熱水流動に伴う界面動電現象をあげている。また、最近では、Soufrier火山(Zlotnicki et al., 1994a⁵⁾)や Piton de la Fournaise火山(Zlotnicki et al., 1994b⁶⁾)で精力的な調査が行われ、大規模な高電位異常が見いだされている。

日本国内でも1980年代初頭から、北海道大学、地質調査所、京都大学、九州大学などによって多くの火山で自然電位の調査が行われてきた。これまでに、屈斜路カルデラ(石戸・菊地, 1981⁷⁾; Ishido, 1989⁸⁾), 秋田焼山(Ishido et al., 1989⁹⁾), 霧島(Ishido et al., 1990¹⁰⁾, Hashimoto et al., 1994¹¹⁾; 橋本他, 1995¹²⁾), 伊豆大島(石戸, 1991¹³⁾), 有珠山(Nishida and Tomiya, 1987¹⁴⁾; Matsushima et al., 1990¹⁵⁾), 北海道駒ヶ岳(Matsushima et al., 1990¹⁵⁾), 雌阿寒岳(Matsushima et al., 1990¹⁵⁾), 恵山(Nishida et al., 1996¹⁶⁾), アトサヌプリ(Oyamada et al., 1996¹⁷⁾), 三宅島(Nishida et al., 1996¹⁶⁾), 雲仙岳(Hashimoto and Tanaka, 1995¹⁸⁾), 九重硫黄山(川平他, 1994¹⁹⁾; 橋本他, 1996²⁰⁾)などの調査例がある。これ以外にも、NEDO(新エネルギー産業技術総合開発機構)がいくつかの地熱地帯で大規模な調査を行っている。

これらの火山の多くでは、先に引用した例と同じく、高電位異常が報告されており、例えば、有珠山における繰り返し測定の結果(Nishida et al., 1996¹⁶⁾)からは、1977年噴火後20年近くたってもなお、山頂部の高電位異常は比較的安定して存在していることが明らかにされている。ところが一方では、雌阿寒岳や恵山のように、活火山でありながら顕著な高電位異常が確認できない例が存在することもわかってきた(Matsushima et al., 1990¹⁵⁾; Nishida et al., 1996¹⁶⁾)。Nishida et al.(1996¹⁶⁾)は、いくつかの事例を比較することにより、火山における自然電位異常の発現を3つのタイプに分類して、地下浅部の含水層の存在と、熱源(マグマ)の深度が地表における自然電位分布を特徴づけると考えた。また、どの火山でも、噴火割れ目や旧火口には高電位異常がみられるという訳ではなく、三宅島の例では、山

頂火口の高電位異常に加えて、山腹の側火口や噴火割れ目付近、あるいは旧期カルデラに当たる場所にむしろ負電位と考えるべき異常が見つかっている。Nishida et al.(1996)¹⁰は、このような場所では、フラクチャーが発達して透水性が高くなっているために降水の下降流が生じて負の電位をもたらしているのではないかと推測している。

火山噴火との関連で自然電位の時間変動を扱ったものには、有珠山、伊豆大島、雲仙岳の例がある。このうち、雲仙岳では固定点の連続モニタリングと繰り返し測定によって、溶岩ドーム出現に伴って山頂側の電位が大きく上昇する現象がとらえられた(Hashimoto and Tanaka, 1995¹⁰)。また、雲仙岳では、ドーム貫入後、数年の時間スケールで正負の自然電位異常に消長が観測された。Hashimoto(1997)²¹はこうした一連の自然電位変動を、溶岩ドームの貫入後、地下浅部で熱水対流が励起される過程の表れであると考え、噴火に伴う定性的な地下熱水対流系の発達モデルを提示している。

火山における自然電位の異常から定量的な議論をしたものとして、石戸(1991)¹³や、Hashimoto et al.(1994)¹¹、Oyamada et al.(1996)¹⁷がある。石戸(1991)¹³は、界面動電現象を記述する基本式(Ishido and Mizutani, 1981²⁰)を基にして、伊豆大島の自然電位異常から、流体の流量や放熱量を見積もっている。このようなアプローチの場合、種々のパラメータを、室内実験の結果や他の方法から得られる先験的な情報に基づいて仮定する必要があるが、Oyamada et al.(1996)¹⁷は、逆に水理学的な情報がすでに明らかにされているフィールドで自然電位を測定することによって、界面動電現象のパラメータであるゼータ電位を推定した。また、Hashimoto et al.(1994)¹¹は、霧島新燃岳において火口湖を含む自然電位分布を調査し、火口湖を中心とした低電位異常が、湖水の浸透に伴う流動電位によって生じる可能性を水収支の観点から考察している。近年では、界面動電現象そのものについては、室内実験でその性質が詳しく調べられており、また、界面動電現象に伴う電場、磁場の理論的、数値的評価の方法も実用的な段階になっている(例えば、Fitterman, 1978²³; Fitterman, 1979²⁰; Murakami, 1989²⁵; 石戸, 1993²⁶; 石戸, 1995²⁷)。今後、フィールドへの応用や室内実験との整合性を調べるといってもこうした定量的な議論が多くなされるべきである。

3. 自然電位の発生原因について

はじめに述べたように、自然電位を発生させる機構は多様である。電荷分離を起こす機構としてよく知られているものには、界面動電現象、酸化還元電位、拡散電位、熱電気現象、電解質濃淡電池、などがある。個々の現象についての解説は他の文献に譲る(Corwin and Hoover, 1979²⁰; 石戸・菊池(1987)²⁹)。火山地帯でしばしば観測されるような大きな(数百mV以上)正の自然電位異常の原因として可能性のあるメカニズムは、界面動電現象と熱電気現象であり、その他のものは、あまり大きな電位差を作り出すことができないか、負の異常を作り出すとされている。熱電気現象については、かなり大きな温度差がなければ、検出可能な電位差が発生しないという推定もなされている(Corwin and Hoover, 1979²⁰)。現実の地殻環境に近い条件での実験はあまり行われていないようである。活動中の火山では、しばしば、地下に数百℃を越える高温の領域が存在することを考えると、熱電気効果については、もっと定量的な評価の基礎となる室内実験が行われるべきであろう。また、火山では、マグマから揮発した酸性のガスが局在することによって、酸化還元電位や拡散電位などが生じ得る環境にあることは注意すべきである。

ところで、上に述べたような機構によって地下で電荷分離が生じることと、地表で観測可能な電位差が発生することとは別の問題である。換言すれば、地表の電位異常の表出には地殻を構成する媒質の不均質性が重要な意味をもつとも言える。Ishido(1989)⁹は、特に流動電位について、電位発生メカニズムのタイプ分けを行い、媒質の不均質性や地表面の効果について理論的に考察している。Ishido(1989)⁹ではまた、標高差のある場所では、地下水の流動によっていわゆる「地形の効果」が生じることが理論的に示されている。これによれば、2点間の電位差は標高差に比例して大きくなり、高所がより低電位となる。自然電位の空間分布を調査したときによくみられるこうした傾向は、定性的にはIshido(1989)⁹の機構で説明できるものと思われるが、特に標高の高い岩山などでしばしばみられる強い負の電位異常については、これとは別の機構を考えるか、理論に改良が必要であると思われる。いわゆる「地形の効果」は、山体のかなり広い範囲にわたって影響を及ぼしていると考えられるので、この効果を如何に評価するかで、熱活動に伴う電場の定量的解釈が変わってくることになる。その意味で、「地形の効果」については、媒質の比抵抗や地下水に対する飽和/不飽和の違いなどを

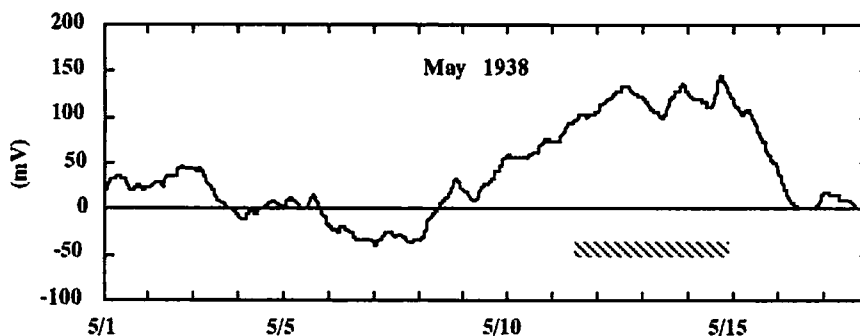
含め、さらなる実験的研究が望まれる。

4. 自然電位モニタリングと噴火活動の予測

Namba(1939)³⁰⁾によれば、1890年代には早くもVesuvius火山においてPalmieriが山頂と山麓の地電位差を連続観測し、火山活動との対応を議論している。従って、前世紀末には既に、自然電位による火山活動のモニタリングが行われていたことになる。Namba(1939)³⁰⁾は、地表からの人工的ノイズの影響が少ない鉛直方向の地電位差に着目し、阿蘇中岳第1火口の西壁を利用した鉛直方向の自然電位連続観測を行った。その結果、爆発的噴火が卓越する時期には、上位電極の電位が上昇することを見いだしている。第1図は、1938年5月の観測例であるが、他の爆発期にも同様の傾向が見られる。こうした記録は、活動火口の極めて近傍でとられたもので、相当の危険と労力を要している。現在、いくつかの火山で自然電位の連続観測が行われつつあるが、近年の優れた計測技術をもってしても、このように明瞭な結果が得られた例はほとんどないと言ってよい。

Namba(1939)³⁰⁾は、一連の爆発活動に伴って観測された自然電位変化の原因を流動電位に求めており、室内で土壌柱を使った水の浸透実験を試みたり、阿蘇外輪のカルデラ壁を利用した自然電位測定を行うなどして、鉛直方向の地電位の性質を明らかにしようとした。その結果、「正圧力源は負地電位源となる」と考えるに至り、火山爆発が卓越する時期には地下で圧力が高まるため圧力源により近い下位電極の電位が低下すると解釈している。しかしながら、この説明はやや短絡的である。前節でも述べたように、自然電位の空間分布には、媒質の不均質が大きく寄与するのであって、不均質の在り方によっては、観測されるべき電位の符号すら逆転する(例えば、Nourbehecht(1963)³¹⁾)。噴火時に自然電位の場がどのようなパターンで変化するかを議論するには、多点の観測が必要であろう。また、Namba(1939)³⁰⁾の観測は、火口壁を利用して行われているため、媒質境界である地表面が鉛直に切り立った状況下にある。こうした媒質の不均質や境界の効果が電位分布にどのような影響を与えているのかについても検討する必要がある。さらに、Namba(1939)³⁰⁾では議論されていないが、個々の爆発現象に伴う電位変化についても研究の余地がある。京都大学では、現在、上に述べたような観測から、Namba(1939)³⁰⁾の研究をさらに発展させるべく阿蘇中岳火口周辺に自然電位連続観測網を展開しつつある。一部は、地質調査所の協力を得て高速サンプリング(10Hz程度)の計測を始めている。

阿蘇火山における噴火活動のモニタリングには、従来よりプロトン磁力計による地磁気全磁力の観測が貢献を果たしてきた。Tanaka(1993)³²⁾によれば、阿蘇中岳火口の地下浅部では、地下水の存在によって速やかに熱の輸送が行われるため、熱伝導のみを考えるよりずっと短時間の内に熱消帯磁現象が進行する。それ故、阿蘇火山では地磁気を観測することによる地下浅部の蓄熱状態のモニタリングにある程度成功している。しかしながら、現在の地磁気モニタリングは、地下深部からの熱供給と、地表への熱放出の差として地下浅部に蓄積された熱による温度変化をとらえているのであって、熱エネルギーの流れについては情報を与えない。従って、地磁気データのみからでは、観測された変化が、深部からの熱供給の変化を意味しているのか、放熱量の変化を意味しているのかを判断することができない。噴火活動の短期的予測をするためには、熱エネルギーの流れを知ることが重要である。阿蘇火山のように、地下浅部に含水層が想定されている火山では、深部から供給された熱の一部は、一旦地下水を加熱して、熱水対流という形で浅部に拡散されると思われる。火口周辺で自然電位モニタリングを行うことで、こうした対流によるエネルギーを見積もることができよう。さらに、地表への熱放出量をプルームライズ法(Kagiyama, 1981)³³⁾など何らかの方法で押さえることができれば、深部からの熱供給を推定することが可能になり、短期的な活動予測はより確実なものとなるであろう。



第1図：阿蘇中岳第1火口壁における1938年5月の鉛直地電位変化（Namba（1939）から作成）。下位電極を電位の基準にとっている。爆発が活発であった時期（斜線部）には、上位電極の電位が100mV程度高くなっていることがわかる。

参考文献

- 1) 佐藤光之助, 自然電位と地質鉱床との関連についての2, 3の考察, 物理探鉱, 5, 184-186, 1952.
- 2) Zablocki, C. J., Mapping thermal anomalies on an active volcano by the self-potential method, Kilauea, Hawaii, Proc. 2nd U.N. Sympos. on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, CA., U.S. Govt. Printing Office, Washington, D.C., 2, 1299-1309, 1976.
- 3) Ballestracci, R., Self-potential Survey near the Craters of Stromboli Volcano (Italy). Inference for Internal Structure and Eruption Mechanism, Bull. Volcanol., 45, 349-365, 1982.
- 4) Massenet, F. and V. N. Pham, Mapping and Surveillance of Active Fissure Zones on a Volcano by the Self-potential Method, Etna, Sicily, J. Volcanol. Geotherm. Res., 24, 315-338, 1985.
- 5) Zlotnicki, J., S. Michel, and C. Annen., Anomalies de polarisation spontanee et systems convectifs sur le volcan du Piton de la Fournaise (Ile de la Reunion, France), C. R. Acad. Sci. Paris, 318, 1325-1331, 1994.
- 6) Zlotnicki, J., M. Feuillard, and G. Hammouya, Water Circulations on La Soufriere Volcano Inferred by Self-Potential Surveys (Guadeloupe, Lesser Antilles). Renew of Volcanic Activity?, J. Geomag. Geoelectr., 46, 797-813, 1994.
- 7) 石戸経士, 菊地恒夫, 流動電位法の研究 - 屈斜路カルデラにおける自然電位調査 -, 深部地熱探査技術に関する研究, 昭和55年度サンシャイン研究成果報告書, 1981.
- 8) Ishido, T., Self-Potential Generation by Subsurface Water Flow Through Electrokinetic Coupling in *Detection of Subsurface Flow Phenomena*, Lecture Notes in Earth Sciences, 27, 121-131, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1989.
- 9) Ishido, T., T. Kikuchi, and M. Sugihara, Mapping thermally driven upflows by the self-potential method, in *Hydrogeological regimes and their subsurface thermal effects*, Geophys. Monogr., 47-2, 151-158, IUGG, 1989.

- 10) Ishido, T., T. Kikuchi, Y. Yano, M. Sugihara, and S. Nakao, Hydrogeology inferred from the self-potential distribution, Kirishima geothermal field, Japan, Geothermal Resources Council Transactions, 14-2, 919-926, 1990.
- 11) Hashimoto, T., T. Kagiya, and F. Masutani, Self-potential Measurements on Shinmoe-Dake, Kirishima Volcanic Group, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, 69-257-266, 1994.
- 12) 橋本武志, 本蔵義守, 大谷冬彦, 霧島新燃岳火口湖の水上電位測定, C A 研究会論文集, 23-30, 1995.
- 13) 石戸経士, 自然電位から推定される火山地域の地下流体流動, C A 研究会論文集, 86-93, 1991.
- 14) Nishida, Y. and H. Tomiya, Self-Potential Studies in Volcanic Areas (1) -Usu volcano-, Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser.VII (Geophysics), 8-2, 173-190, 1987.
- 15) Matsushima, N., M. Michiwaki, N. Okazaki, R. Ichikawa, A. Takagi, and Y. Nishida, Self-Potential Studies in Volcanic Areas (2) -Usu, Hokkaido Komaga-take and Me-akan-, Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser.VII (Geophysics), 8-5, 465-477, 1990.
- 16) Nishida, Y., N. Matsushima, A. Goto, Y. Nakayama, A. Oyamada, M. Utsugi, and H. Oshima, Self-Potential Studies in Volcanic Areas (3) -Miyake-jima, Esan and Usu-, Jour. fac. Sci., Hokkaido Univ. Ser.VII (Geophysics), 10-63-77, 1996.
- 17) Oyamada, A., H. Oshima, Y. Nishida, A. Goto, and H. Furukawa, Self-Potential Studies in Volcanic Areas (4) -an attempt to estimate in-situ value of the electrokinetic coupling coefficient-, Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ. Ser.VII (Geophysics), 10-79-87, 1996.
- 18) Hashimoto, T. and Y. Tanaka, A large self-potential anomaly on Unzen volcano, Shimabara peninsula, Kyushu island, Japan, Geophys. Res. Lett., 22-3, 191-194, 1995.
- 19) 川平雅子, 江原幸雄, 茂木透, 九重硫黄山における自然電位測定による地下熱水流動の解明 (その1), 九大地熱研究報告, 3-166-174, 1994.
- 20) 橋本武志, 田中良和, 大羽成征, 茂木透, くじゅう連山の自然電位分布, 日本火山学会講演予稿集, 2-116, 1996.
- 21) Hashimoto, T., Self-Potential Changes and Subsurface Hydrothermal Activity Accompanying the 1990-1995 Eruption of Unzen Volcano, Jour. Geomag. Geoelectr., submitted, 1997.
- 22) Ishido, T. and H. Mizutani, Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics, J. Geophys. Res., 86-1763-1775, 1981.
- 23) Fitterman, D. V., Electrokinetic and Magnetic Anomalies Associated With Dilatant Regions in a Layered Earth, J. Geophys. Res., 83-5923-5928, 1978.
- 24) Fitterman, D. V., Calculations of self-potential anomalies near vertical contacts, Geophysics, 44-195-205, 1979.
- 25) Murakami, H., Geomagnetic Fields Produced by Electrokinetic Sources, J. Geomag. Geoelectr., 41-221-247, 1989.
- 26) 石戸経士, 蒸気ゾーン形成に伴う界面動電現象, C A 研究会論文集, 187-194, 1993.
- 27) 石戸経士, 沸騰に伴う界面動電現象 - 地震の電磁気的前兆現象のメカニズム -, C A 研究会論文集, 100-105, 1995.
- 28) Corwin, R. F. and D. B. Hoover, The self-potential method in geothermal exploration, Geophysics, 44-2, 226-245, 1979.
- 29) 石戸経士, 菊地恒夫, 自然電位法, 地熱エネルギー, 12-4, 47-65, 1987.
- 30) Namba, M., An investigation of the earth-current on the volcano Aso, Dr.Thesis, Kyoto univ., 1939.
- 31) Nourbehecht, B., Irreversible thermodynamic effects in inhomogeneous media and their applications in certain geoelectric problems, Ph. D. thesis, M.I.T., 1963.
- 32) Tanaka, Y., Eruption mechanism as inferred from geomagnetic changes with special attention to the 1989-1990 activity of Aso Volcano, J. Volcanol. Geotherm. Res., 56-319-338, 1993.
- 33) Kagiya, T., Evaluation methods of heat discharge and their applications to the major active volcanoes in Japan, J. Volcanol. Geotherm. Res., 9-87-97, 1981.