

# 霧島新燃岳火口湖の水上電位測定

京都大学理学部 橋本武志  
東京工業大学理学部 本蔵義守, 大谷冬彦

## Self-Potential Measurements on the Crater Lake of Shinmoe-Dake, Kirishima Volcanic Group

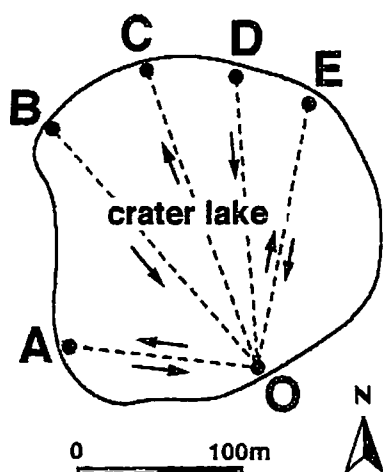
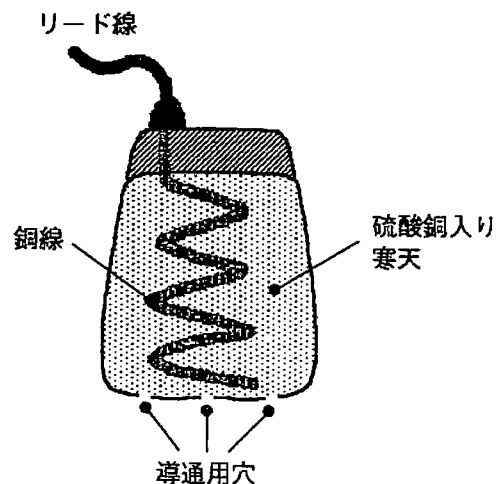
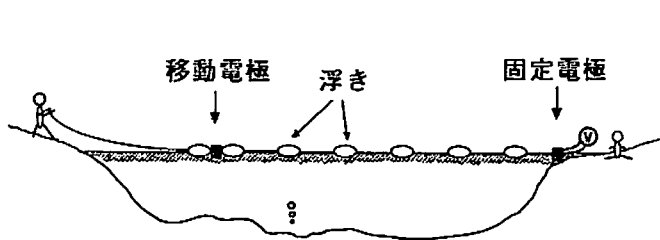
HASHIMOTO Takeshi (Faculty of Science, Kyoto University)  
HONKURA Yoshimori and OHTANI Fuyuhiko  
(Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology)

### 1. はじめに

活火山で自然電位を調査すると, しばしば火口付近に正の電位異常が認められることがある<sup>1),2),3),4)</sup>. これらの異常の多くは火口付近の地下に存在する熱水の上昇に伴う流動電位が原因であると考えられている. しかし, 活動的な火山であっても, 正の電位異常が見られない場合もある<sup>5)</sup>.

Hashimoto et. al<sup>6)</sup>は, 1991年から1993年にかけて霧島火山群の活火山の一つである新燃岳の火口周辺の自然電位分布を調査した. 霧島火山群に属する火山は大きなすり鉢状の火口を持つものが多いが, 新燃岳もその例に漏れず直径約750(m), 深さ約150(m)のすり鉢状火口を有している. 地質学的な研究<sup>7)</sup>により, その活動様式は, 水蒸気噴出から水蒸気爆発, マグマ水蒸気爆発へと進行する形態を繰り返していることが明らかになっている. 最近では1991年11月にS8噴気口が水蒸気と火山灰を出す微噴火をしている<sup>8)</sup>. これまでの調査で, 新燃岳では火口湖を中心とした同心円状の負の電位異常が顕著であり, 火口内では正の電位異常は噴気列に伴って小規模なものが存在するのみであることがわかっている. Hashimoto et. al<sup>6)</sup>は, 火口湖を中心とする負の電位異常の発生原因を, 湖水の浸透に伴う流動電位であると考え, 火口湖の水収支とすりあわせて量的な概算を試みている. しかし, 上記の論文には火口湖の電位分布のデータが含まれておらず, また, 湖水の比抵抗の実測値がない, 現実の火口湖は有限の大きさを持つにも関わらず一様な水平成層構造でモデル計算をしている, などの問題点があった. 今回の水上電位測定は, 負の電位異常の中心である火口湖表面のデータを取得して, より現実的なモデリングのための基礎資料とすることを目的としている.

水上あるいは水中での自然電位測定を行った過去の研究例としては, Corwinらによる硫黄鉱床の探査<sup>9)</sup>や, 湖岸近くの温泉に伴う電位異常の検出<sup>10)</sup>があげられる. また, Ogilvy et. al<sup>11)</sup>は, 貯水池の底で電位分布と流速分布の測定を行い, 漏水箇所の特定に成果をあげている. 彼らは, 漏水箇所に対応した負の電位異常は漏水にともなう流動電位がその原因であるとしている.



第1図(左上)：水上電位測定のご概念図。

第2図(右上)：使用した銅-硫酸銅電極の構造。

第3図(左下)：新燃岳火口湖の電位測線図。  
矢印は移動電極を動かした向きを示す。

## 2. 測定手順

水上あるいは水中の電位測定では、間隔を一定に保った電極対をボートなどで曳航することによって電位勾配を測定し、それを積分することによって測線に沿った電位分布を得る方式がとられることが多い。この方式は、広範囲の領域から局所的な電位異常を検出する目的に適しているが、ドリフトの大きな電極を使用すると積分した結果が必ずしも真の電位分布を表さないという欠点がある。従って、この種の測定には銀-塩化銀電極などの高精度の電極が多用される。今回の水上電位測定は、局所的な電位異常というよりは調査領域全体にわたる緩やかな電位分布が期待される新燃岳火口湖がその対象である。また、製作が容易であるが安定性で銀-塩化銀電極に劣る銅-硫酸銅電極(詳細は後述)を使用すること、火口湖が比較的小さいためボート等の水上移動体を用いる必要がないことなどの理由から、電位勾配を測定する方法を採らず、一方の電極を固定とし、もう一方を移動させて各点の電位そのものを測定する方式を採用した(第1図参照)。

「固定電極」には浮きを装着して湖岸近くの水中に浮かべて固定しておく、「移動電極」にも浮きを装着し、対岸からナイロン糸で牽引する。電位差計及びデータロガーは

固定電極側の岸に配置される。従って、「移動電極」と電位差計の間には電線が張られることになるが、この際、電線が自重で湖底に沈み水圧がかかることは、電気絶縁を保つ上で好ましくない。また、湖底に電線が絡まるなど測定遂行上の問題も想定される。従って、電線にもほぼ10(m)間隔で浮きを装着した。

先述の通り、電極には自作の銅-硫酸銅電極を使用した。その構造を第2図に示す。底面に直径1(mm)程度の小穴を数個開けたプラスチックケースにコイル状の銅線を入れ、硫酸銅水溶液を寒天で固めたものを充填してある。硫酸銅溶液を寒天で固化したのは、測定中に電極内部の硫酸銅溶液と外部の水が混合して電極電位が変化するのを抑制する為である。このように電解液を寒天質で固化した構造の電極は、地下水中での使用が想定される試錐孔の検層用にも使われていたことがある<sup>12)</sup>。

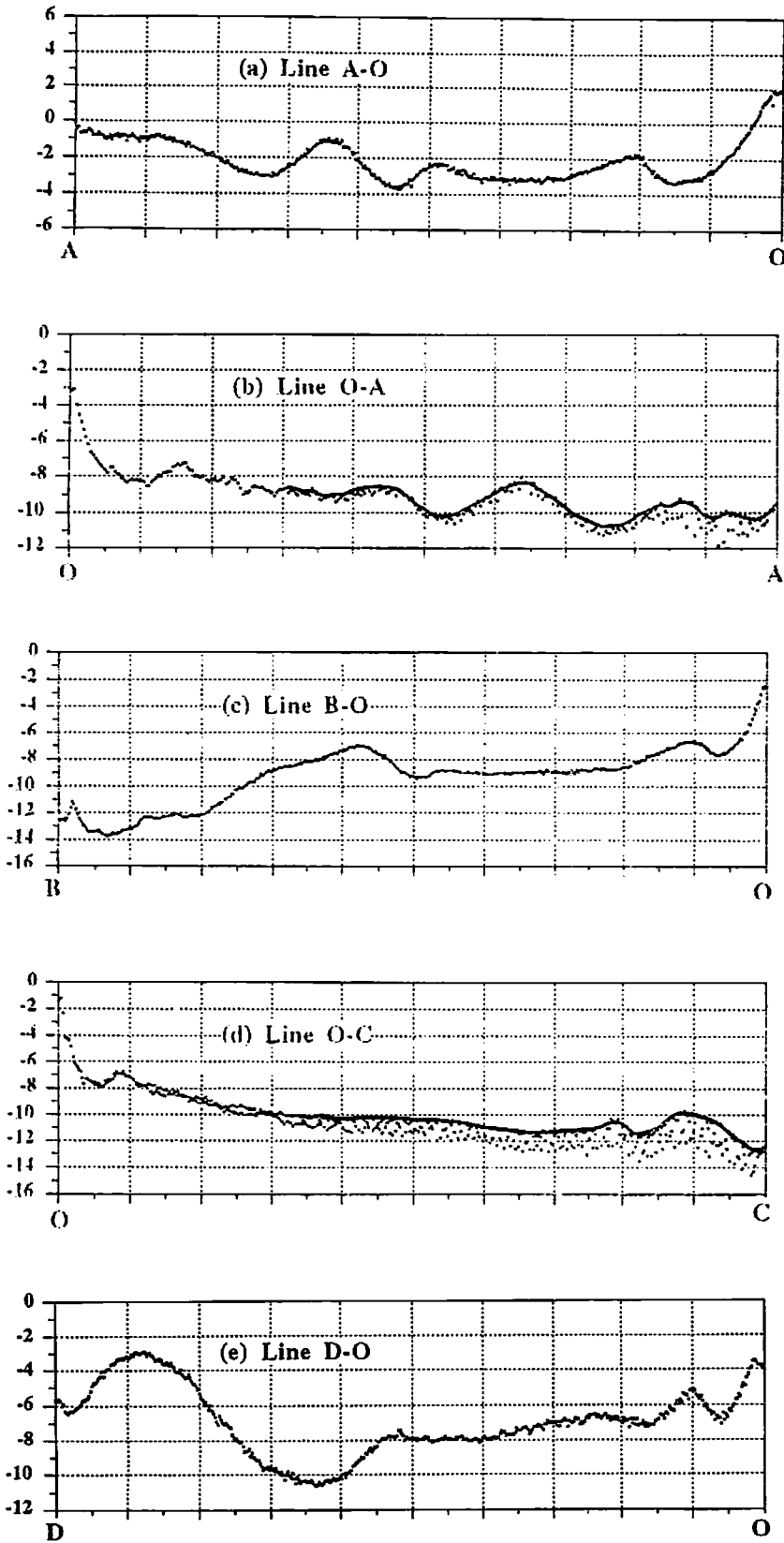
新燃岳の火口湖はすり鉢状火口の底に位置する閉塞湖である。測定当時の火口湖は直径約200(m)のほぼ円形であった。その西半分には深度数m程度の比較的浅い部分が広がっており、深度の深い領域はその東半分に集中している。湖水の比抵抗は、今回新燃岳に同行した京都大学防災研究所、小泉尚嗣氏らの測定により20(ohm-m) (25(°C)換算、岸辺の4カ所で採水、1995年11月5日測定)、pHは2.4程度であることが明らかにされている。色はやや緑がかった透明色で、測定当時の水温は12~17(°C)であった(同氏測定)。

火口湖の電位測定は1994年11月5日に、第3図に示した5本の測線で行われた。電極をおよそ0.3~0.5(m/sec)の速度で移動させながら両電極の電位差をデータロガーに記録した。データのサンプリングは1秒で、電位差の分解能は約0.03(mV)である。なお、湖面が見渡せる位置に人員を配置して電極位置と時刻を記録した。各測線の測定はそれぞれほぼ5分程度で終了している。

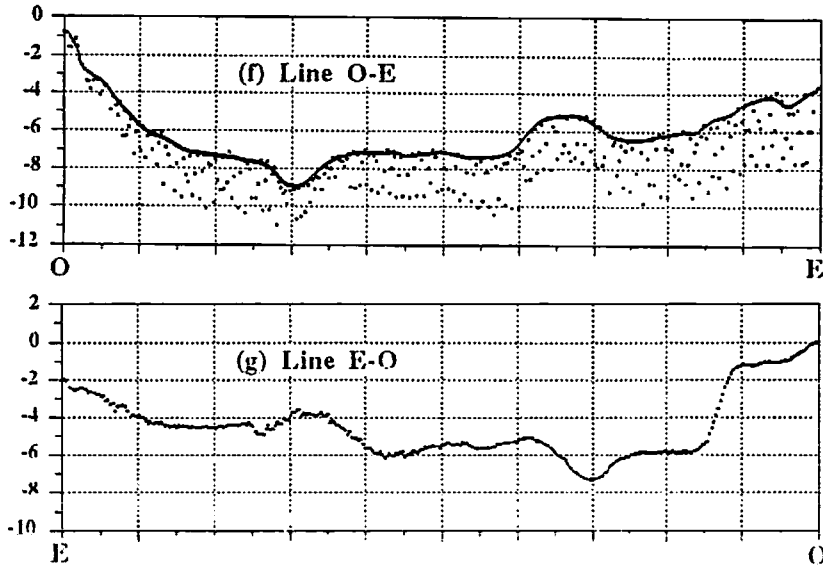
### 3. 測定結果

第4図に各測線の測定記録を示す。横軸は各測線に沿った位置、縦軸は固定電極を基準とした電位である。測線A及び測線Eについては往復の測定を行った。それ以外の測線は往あるいは復のいずれか片方のみ測定した。図の(b),(d),(f)には測定値に数mV程度のばらつきが顕著である。これらの測線では測定上の都合により電極を一定速度で牽引することができず、電極に多少間欠的な動きを与えた。このことが原因となってノイズが生じたものと思われる。詳細は後述するが、こうしたノイズは使用した電極の性質に起因するものであり、ばらつきの上限を真の電位と考えるのが妥当である。(b),(d),(f)中にはばらつきの上限に補助線を入れてある。測線Aおよび測線Eのそれぞれの往復の記録を比較すると位置に対して概ね再現性のある電位分布が得られていることがわかる。従って、測定された電位変化の大部分は空間的なものであり、地磁気の誘導等による時間変化ではないことは明らかである。

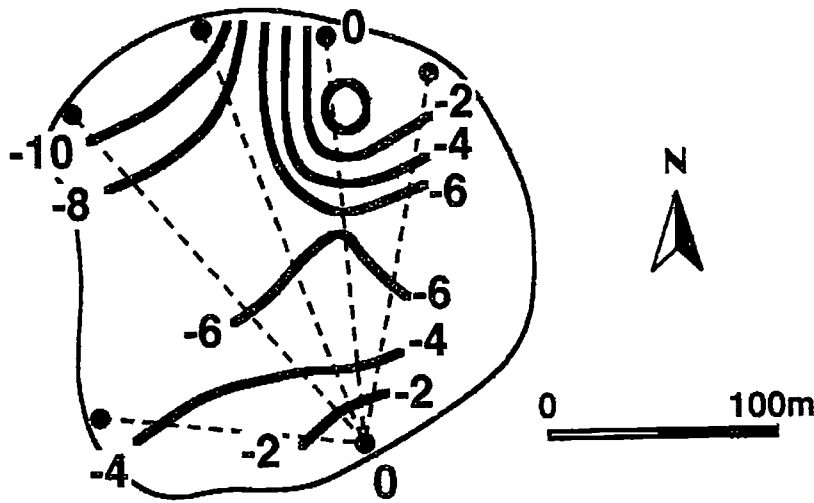
各測線の電位分布から両電極のオフセット電位差を除去し、火口湖表面での面的な電位分布を等電位線図で表した(第5図)。等値線の間隔は2(mV)であり、固定電極の位置を電位の基準にとっている。全体的な特徴として、火口湖の南東部から北西部に向かっ



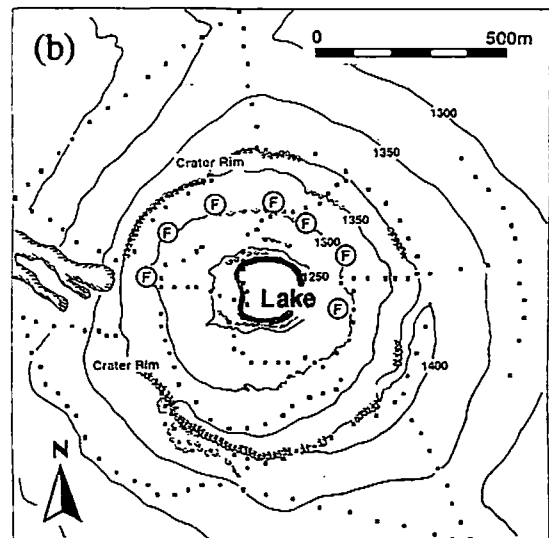
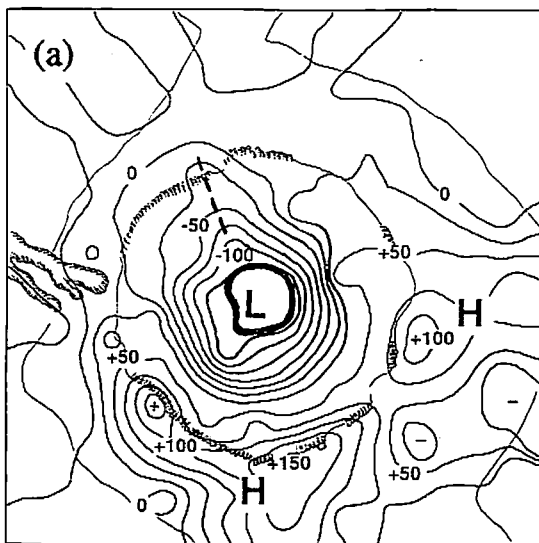
第4図：各測線の電位分布。横軸は測線に沿った位置。縦軸は固定電極を基準とした電位（単位mV）。(a)測線A O, (b)測線O A, (c)測線B O, (d)測線O C, (e)測線D O。



第4図(続き) : (f)測線OE  
(g)測線EO



第5図 : 水上測定から求めた火口湖の電位分布. 等電位線値の単位は(mV).



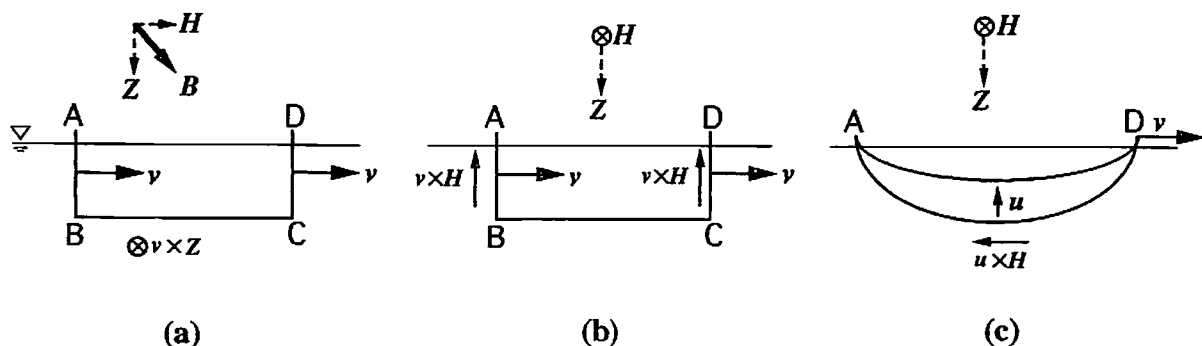
第6図 : (a)新燃岳火口周辺の自然電位分布. 等値線の単位は(mV). 火口湖のデータも考慮している. 破線で示した部分に電位の谷が見られる. (b)測点分布図. コンターは等高線(m). Fは噴気の位置を表す.

て電位が低くなる傾向が認められる。それに対して、火口湖の東部では測線の中心部付近で電位が低く、兩岸付近ではやや電位が高くなっている。測線Dの北岸付近で正の電位中心が見られるが、これは隣接する他の測線には見られないことから、局所的なものであることがわかる。しかし、その原因は不明である。

火口湖を除く自然電位の分布はHashimoto et al.<sup>6)</sup>により明らかにされている。火口湖が、周辺の電位分布中でどのような位置にあるのかを見るため、第6図に今回の火口湖のデータを加えた新燃岳火口の自然電位分布図(a)と、測点分布(b)を示す。周囲の電位勾配に比べ火口湖のそれは極端に小さいため、図中では火口湖の等電位線は描いていない。また、同図は、北斜面から推定した地形効果(-1.4(mV/m))を除去したものである。火口湖を中心として同心円状に負の異常があり、その大きさは半径250(m)、電位差120(mV)程度である。火口湖の北西方向にやや電位の低い部分(破線で示した)が伸びている。この電位の谷は火口湖のデータを組み込んでいない等電位線図でも確認されるのもので、火口湖北西端の低電位がデータ処理の問題で”滲み出し”で見えているわけではない。この電位の谷が、単に同心円状の電位異常のゆがみであるか、それとも別の原因によるものかは判別できないが、火口湖の電位が全体的に北西側に向かって低くなる傾向にあることは、この電位の谷の存在と関係があるものと思われる。また、火口湖の東部で測線の中心付近の電位が低いことは、負の電位異常が湖水の浸透に伴う流動電位によって生じているという考え方と調和的である。

#### 4. 議論

第4図(b),(d),(f)に見られる電位のばらつきについて若干の考察を加える。電極を対岸から牽引することは、導体(電線)を地球磁場中で運動させることになるので起電力を生じる恐れがある。これがどの程度の量になるのか簡単に見積りを行う。まず、第7図(a)に示した如く磁力線を含む面内で水平に電線を牽引した場合を考える。電線が水中に沈み込む効果も考慮して、電線には鉛直方向の部分(AB,CD)と水平方向の部分(BC)を想定する。この場合、磁場の鉛直成分のみが寄与するが、 $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ の起電力はどの部分でも電線に対して直交する方向に生じるため誘導電流は流れない。次に、磁力線に直交する方



第7図：電線を牽引方向と磁場との関係。(a)南北に牽引する場合、(b)東西に牽引する場合、(c)電線の弛み具合が変化する場合。

向で水平に電線を牽引した場合を考える（第7図(b)）。この場合、磁場の水平成分の寄与としてABとCDに起電力が生じるがこれらは互いに打ち消し合うためやはり電流は流れない。また、(a)の場合と同じ理由により、磁場の鉛直成分による電流も流れない。問題となるのは、(c)の如く電線が弛みをもっており、牽引によってその弛み具合が変化する場合である。この場合、牽引速度 $v$ に直交方向の速度成分 $u$ が生じるため電線に電流が流れる。この効果は鉛直面内の弛みに対しても水平面内の弛みに対しても現れる。今、速度 $u$ は牽引速度 $v$ の1割程度であると考えたとその大きさは $0.05(\text{m/sec})$ の程度である。起電力発生に寄与する磁場成分の大きさを $4 \times 10^{-5}(\text{T})$ とすると、生ずる起電力は $2 \times 10^{-6}(\text{V/m})$ となる。電線の長さは最大で $200(\text{m})$ であるから、電線の両端で観測されるべき電位差は $0.4(\text{mV})$ 程度である。従って、このような原理で実際に測定された数 $\text{mV}$ のデータのばらつきを説明することは難しいことがわかる。

一方、電極と外部の水の接触部分近傍の各種イオン濃度が変化すれば電極電位が変化することは論を待たない。使用した電極は寒天を用いているとはいえ、内部からの電解液の多少の漏洩はその構造上不可避である。電極を牽引することによって電極近傍のイオン濃度は変化する。牽引速度がある程度以上に大きくなればこれは電極間電位差となって現れ、また、牽引速度のばらつきは電位差のばらつきとなるはずである。電極を製作した段階での室内実験により、この効果は数 $\text{mV}$ に達し、しかも、擾乱を与えた側の電極電位が下がることがわかっている。従って、フィールドで測定された電位のばらつきは、電極近傍の状態が牽引によって擾乱を受けたためであると考えるところまで説明できる。また、このように考えると、ばらつきの上限を真の電位としたときに往復のデータの対応が良いことも説明できる。

水上の電位測定では、化学的な水質や水温の不均質も問題となる。火口湖の水質や水温が場所によって異なっていれば電位分布として現れる可能性はある。小泉氏らの測定によれば、新燃岳の場合、湖岸近くの4カ所の採水で電気電導度、 $\text{pH}$ 、水温に著しい相違は認められなかった。しかし、湖の中央部での測定値がないので火口湖全体で水質が一樣かどうかは不明である。従って、現在のデータだけからは、測定された電位分布が化学成分や水温を反映したものである可能性は完全に否定することはできない。

## 5. まとめ

今回の新燃岳火口湖における水上電位測定では、ごく簡便な方法によって効率的に良好なデータを得ることができた。新燃岳火口湖表面では最大 $10(\text{mV})$ 程度の電位差があることが明らかになった。測定から得られた火口湖の電位分布は、過去の測定で得られた火口湖外部の電位分布と矛盾するものではなく、また、湖水の浸透に伴う流動電位によって負の電位異常がつくられているという仮説とも矛盾しない。今後、定量的なモデリングを行うために必要な基礎データが得られたと考えている。

この種の測定で留意すべきいくつかの問題点についても検討した。使用する電極によっては、牽引速度を十分に小さくかつ一定にしないと数 $\text{mV}$ のノイズを発生する。また、電線の牽引方向に直交する向きに振動が加わると、電磁誘導による起電力が生じるため、

特に高速で牽引する場合や電極間隔を大きくとる場合には注意する必要がある。今回の測定ではこれらのノイズに比較して、シグナルである火口湖の電位異常が十分に大きかったため結果的に問題なく測定できたが、大きなシグナルが期待できない場合（例えば湖水の比抵抗が更に小さい場合）には今回の測定法は必ずしも有効とはいえない。

## 謝辞

今回の調査は、共同観測の日程中に全体の計画の中から時間を頂いて実施することができた。共同観測の主旨とは直接関係のないテーマであるにも関わらず、スケジュールを調整してくださった住友則彦先生、歌田久司先生をはじめとするCA研究グループの皆様には感謝いたします。

## 参考文献

- 1) Hashimoto, T. and Y. Tanaka, A large self-potential anomaly on Unzen volcano, Shimabara peninsula, Kyushu island, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 22-3, p.191-194, 1995.
- 2) 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, *CA研究会論文集*, p.86-93, 1991.
- 3) Nishida, Y. and H. Tomiya, Self-potential studies in Volcanic areas (1) -Usu volcano-, *Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser.VII (Geophysics)*, 8-2, p.173-190, 1987.
- 4) Zlotnicki, J., S. Michel, and C. Annen, Anomalies de polarisation spontanée et systèmes convectifs sur le volcan du Piton de la Fournaise (Ile de la Réunion, France), *C. R. Acad. Sci. Paris, t.318, série II*, p.1325-1331, 1994.
- 5) 西田泰典, 小山田敦史, 大島弘光, 宮村淳一, 松島喜雄, 活動的火山における自然電位比較観測, *日本火山学会1994年度秋期大会講演予稿集*, 1994.
- 6) Hashimoto, T., T. Kagiya, and H. Utada, Self-potential Measurements on Shinmoe-Dake, Kirishima Volcanic Group, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, 69, 1994, in printing.
- 7) 井村隆介, 小林哲夫, 霧島火山群新燃岳の最近300年間の噴火活動, *火山*, 36-2, p.135-148, 1991.
- 8) 鍵山恒臣, 山口勝, 増谷文雄, 井田嘉明, 霧島火山群・新燃岳の微噴火—活動の経過—, *地球惑星科学関連学会1992年度春期合同大会日本火山学会固有セッション講演予稿集*, p.2, 1992.
- 9) Corwin, R. F., Offshore Use of the Self-Potential Method, *Geophys. Prosp.*, 24-1, p.79-90, 1976b.
- 10) Corwin, R. F. and D. B. Hoover, The self-potential method in geothermal exploration, *Geophysics*, 44-2, p.226-245, 1979.
- 11) Ogilvy, A. A., M. A. Ayed, V. A. Bogoslovsky, Geophysical studies of water leakages from reservoirs, *Geophys. Prosp.*, 17-1, p.36-62.
- 12) 物理探鉱, 11-4, p.179, 1958.