



Title	有珠山自然電位観測2006
Author(s)	長谷, 英彰; HASE, Hideaki; 橋本, 武志 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 70, 43-52
Issue Date	2007-03-15
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.70.43
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/20434
Type	departmental bulletin paper
File Information	70-5.pdf



有珠山自然電位観測 2006

長谷 英彰・橋本 武志・西田 泰典

北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

宇津木 充・井上 寛之

京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設火山研究センター

佐波 瑞恵

室蘭工業大学機械システム工学科

(2006年12月19日受理)

Self-potential Survey on Usu Volcano, 2006 Campaign

Hideaki HASE, Takeshi HASHIMOTO, Yasunori NISHIDA

Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University

Mitsuru UTSUGI, Hiroyuki INOUE

Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University

and

Mizue SABA

Department of Mechanical Systems Engineering, Muroran Institute of Technology

(Received December 19, 2006)

We conducted self-potential (SP) surveys on Usu volcano since July to December 2006. The compiled SP map reveals positive anomalies around Ko-Usu lava dome and at the foot of the volcano, and a negative anomaly on the top of O-Usu lava dome. The SP profile on the summit caldera shows the same pattern of 1985's. However, the peak-to-peak variation of the SP value is different: the 1985's of that shows 1000 mV while the 2006's shows 1400 mV. Topographic effect is clearly shown along the southwestern foot of the volcano, in which coefficient is about -2.5 mV/m. The SP profile corrected of the topographic effect reveals a large and extensive positive anomaly over +600mV and several local positive anomalies over +1000 mV on the summit caldera. The corrected SP also reveals that a positive anomaly at the south part of Ko-Usu lava dome and a negative anomaly at the O-Usu lava dome do not exist. The revealed positive SP anomalies are likely to be affected by an extensive altered layer, located beneath the summit caldera. The largest positive anomaly is shown on the ridge of Usu-Shinzan cryptodome after topographic correction. This anomaly is not regarded to be formed by hydrothermal upwelling, because any indications of fumarolic and geothermal activities have not been observed on the ridge of the volcano. The SP anomaly may be affected by intruded material into the volcano. The SP amplitude in the

northwestern part of Nishiyama is very small in spite of rugged topography. An extensive low resistivity layer ($< 10 \text{ ohm-m}$) located in the shallow part in the northwestern of Nishiyama probably shields the SP variation.

I. はじめに

これまで多くの活動的火山や地熱地域で自然電位調査が行なわれ、特徴的な自然電位異常が観測されている (e.g. Kilauea: Zablocki, 1976; 雲仙: Hashimoto and Tanaka, 1995; 三宅島: Sasai et al., 1997; 阿蘇山: Hase et al., 2005). これらの自然電位異常の発生メカニズムは、地下水流動に伴って発生する流動電位が最も寄与していると考えられている (e.g. Ishido and Mizutani, 1981). 通常、流動電位は地下水流動に伴いプラスの電荷が運ばれることにより発生するため、例えば火山の山頂付近でポジティブな自然電位異常が観測された場合、地下に上昇流が存在していると解釈される. このように地表で観測される自然電位から地下水流動を推定することが可能であるため、火山内部に存在する熱水系やその駆動源となっている浅部熱源の推定に広く用いられるようになり、自然電位は火山活動度を評価する上でも有効な手段のひとつとなっている.

有珠山では 1983, 1985, 1987, 1994 年に山頂カルデラ周辺で自然電位(SP)測定が行われており、カルデラ内で 400mV のポジティブな電位異常が観測されている (Nishida and Tomiya, 1987; Matsushima et al., 1990; Nishida et al., 1996). その後 2000 年の噴火以降は、西山火口域を中心に局所的な繰り返しの SP 測定が行われ、数十 mV の電位異常とその時間変化が観測されている (佐波ほか, 2004).

これらの電位異常は何れも火山活動に伴う地下の熱水活動が原因であると考えられている. しかし 2000 年の噴火以降、山頂カルデラを含む広域的な SP 調査が行われていないため、噴火後の山頂カルデラ周辺の SP 分布がどうなっているのか、また西山火口周辺と山頂カルデラ周辺の熱水活動の関係について明確にされていなかった. 本報告ではこのような問題を解決するために 2006 年に有珠山広域で行った SP 調査の結果について報告する.

II. 観 測

2006 年 7 月 9 日から 12 月 2 日にかけて有珠山で自然電位測定を行った. 自然電位の測定方法には、ある特定の長さの電線を用いて測定の度に基準電極を移動して測定する「蛙飛び法」と呼ばれる方法と、基準電極からある程度の長さまで電線を伸ばしながら測定する「基準電極法」がある. 蛙飛び法では長い電線が必要でないメリットがあるものの、測定毎に誤差が蓄積する可能性があり、測定には少なくとも 2 人以上必要である. それに比べて基準電極法では、電線を延ばしきった終測点まで理論的に蓄積誤差はなく、最低 1 人で測定が可能である. これまで有珠山で行われてきた自然電位観測は基本的に蛙飛び法であったが、本研究では測定誤差と測定効率の間

題から基準電極法を用いて測定を行った。

測定ケーブルは1巻 1.5~2km のものを使用し、測定間隔は地熱兆候が見られる地域で 50m, 山麓の SP 変化が期待できない地域で 200m, その他の地域は 100m 間隔で行い、測定総数は 794 点であった。電極はセラミック製の銅-硫酸銅電極を用いた。また測定時の接地を考慮して電極と大地との間に粘土鉱物であるベントナイトを使用した。測定に用いた電位計は入力インピーダンスが $1000\text{M}\Omega$ のデジタルテスター (RD700, SANWA 製) を使用した。自然電位を複数測線で面的に測定を行った場合、通常は結合点でループ誤差が発生する。本研究の測定に於いても数多くの結合点が存在しており、各結合点でループ誤差が観測されたが、最大のループ誤差で 19.5mV であった。

Ⅲ. 結 果

1. 測定データ

測定の結果、北東部と東部の山麓地域と小有珠周辺で $-200\sim+50\text{mV}$ 、2000 年新山を含む北西地域の広範囲で $0\sim130\text{mV}$ であり、相対的に高電位であった。逆に南麓地域と西山周辺では $-200\sim-500\text{mV}$ 、大有珠周辺地域では -1200mV 以下の低電位を示していた (Fig.1)。

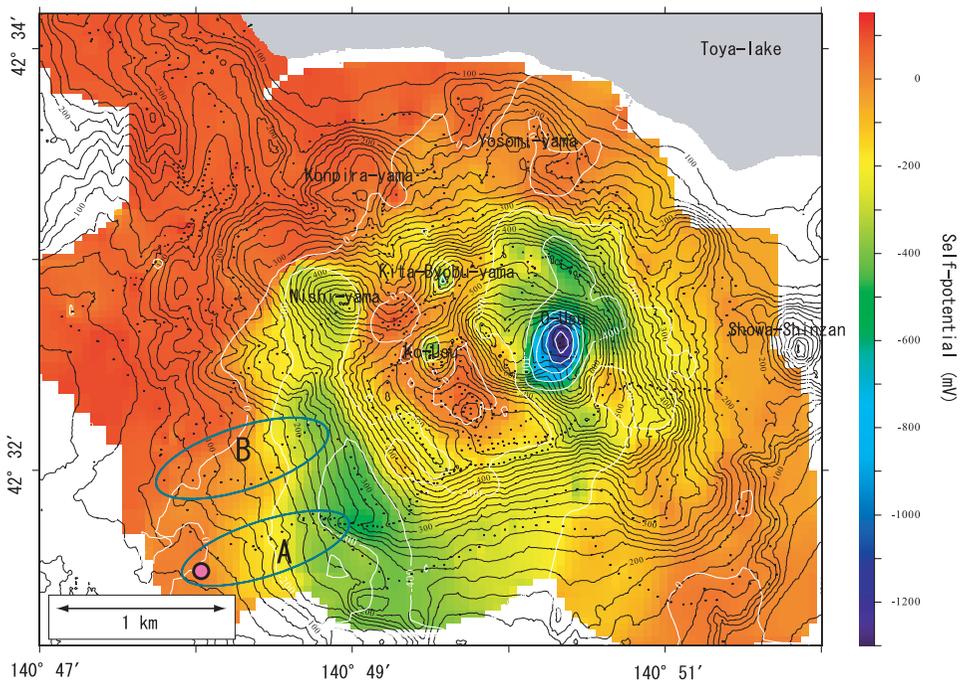


Fig. 1. Raw SP distribution with color contours. Black dots show survey points. White and black contours indicate SP value and elevation, respectively. A pink circle shows the reference point. Areas enclosed lines A and B are used to estimate the gradient of topographic effect (shown in Fig.2).

火山地域で自然電位調査を行った場合、単純な重力ポテンシャルに伴い下降する地下水流動によって形成される地形効果が無視できないほど大きい場合が一般的である。地下水流動によって発生する流動電位は、多くの場合液体側に分離したプラス電荷が地下水流動とともに運ばれることにより発生するため、地形効果は相対的に山頂付近でマイナス、山麓付近でプラスの自然電位を形成することが一般的である。測定された自然電位をみると、大有珠周辺では相対的に山頂付近でマイナス、山麓付近でプラスの自然電位プロファイルを示しており、この地域の自然電位は地形効果が支配的である可能性が高い。逆に 2000 年新山を含む有珠山北西地域では標高差にかかわらず自然電位はおおよそ 0~130mV であり、この地域では明瞭な地形効果がみられない。

また山頂付近で熱水上昇に伴うプラスの自然電位異常を形成している場合、山体を横切るような測線においては地形地効果と重なって自然電位は特徴的な「W 型」のプロファイルを示すことがしばしば報告されている (e.g. Hase et al., 2005; Sasai et al., 1997)。Fig.1 を見ると、小有珠周辺を南西-北東に横切る自然電位は、山麓と山頂付近で電位が高く、山体中腹部において電位が低くなっており、ちょうど南西-北東方向に「W 型」の自然電位プロファイルを形成している。このことから、山頂カルデラの中心部では熱水上昇に伴うポジティブな自然電位異常が存在している可能性が高い。

2. 地形補正

これまで多くの火山で行われてきた自然電位観測から、一般的に地形効果は標高に対して線形に表れることが知られている (e.g. Sasai et al., 1997; Zlotnicki and Nishida, 2003; Hase et al., 2005)。有珠山では山頂地域で高電位異常が存在し熱水上昇に伴う流動電位が形成されている可能性が高いが、地形効果による流動電位がオーバーラップして地表の自然電位を形成している可能性が高く、観測された自然電位異常の振幅や広がりをもそのまま熱水上昇と結びつけて議論することが難しい場合が多い。西山南部地域は地形効果が明瞭であり、係数を見積るとおおよそ -2.5mV/m であった (Fig.2)。本研究では測定地域全域で地形効果が存在すると仮定し、この係数を用いて有珠山全体の生データの補正を行った。

Figure 3 は -2.5mV/m の係数を用いて地形補正した自然電位分布図である。地形補正により重力ポテンシャルに伴う地下水流動の電位効果が除去された結果、標高の低い山麓地域の高電位分布や大有珠で見られ

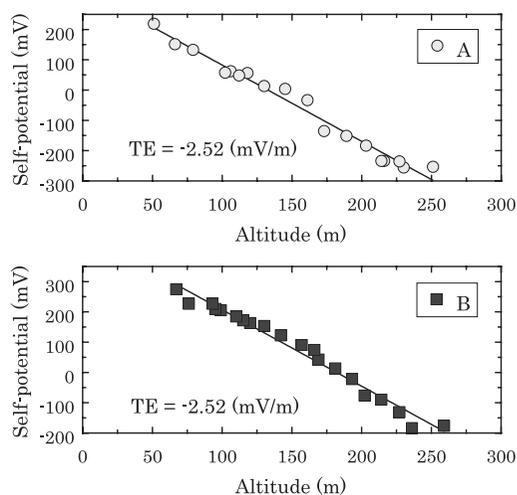


Fig. 2. SP profiles along the traces that are indicated as A and B in Fig. 1. 'TE' in each panel indicates the SP gradient per unit topographic effect.

た低電位異常が補正された。その結果、山頂カルデラの内側に存在する高電位異常(麓からおよそ+600mV以上)が明確になり、さらに噴気活動が見られる小有珠南側、大有珠南東地域、北屏風山南西地域では+1000mV以上の高電位異常であることが明らかとなった。また有珠新山山頂付近では山体形状に沿って最も大きな電位異常が明確になり、麓から+1200mV以上になることが示された。

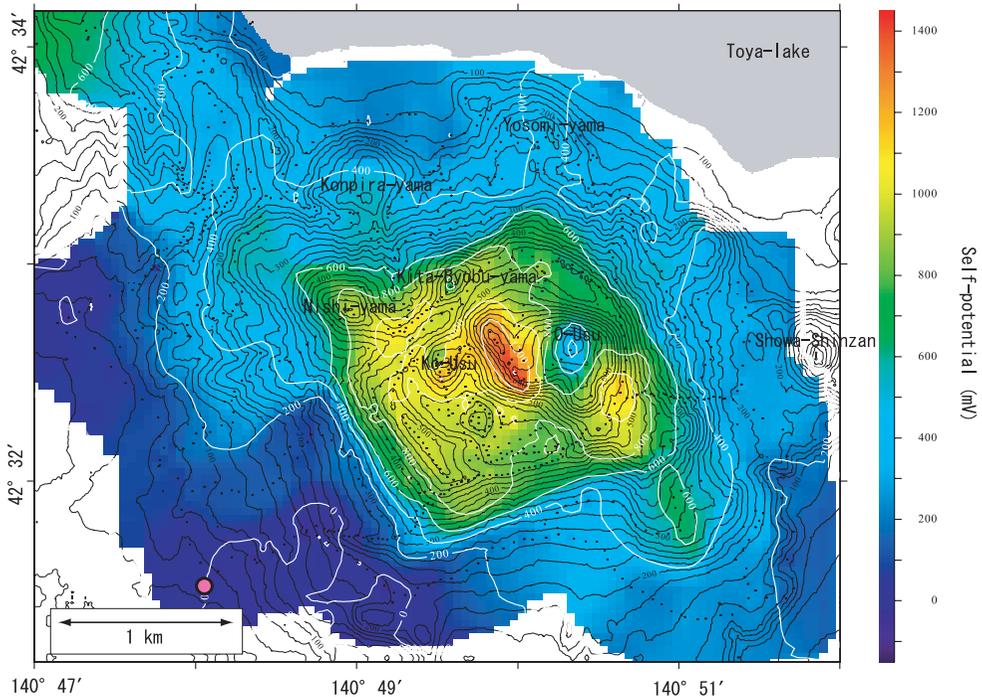


Fig. 3. Topography-corrected SP map with color contours derived from Fig. 1.

Ⅲ. 議 論

1. 1985年データとの比較

Figure 4(a) は地形補正を施していない1985年の自然電位分布を示しており、小有珠の山頂を除く周辺と金比羅山周辺で電位が高く、大有珠山頂で電位がかなり低くなっている (Nishida et al., 1996). 本研究で測定した2006年の結果でも傾向は同じであり、自然電位のパターンは1985年からほとんど変化していないことが明らかとなった (Fig.4(b)). このような火山における自然電位パターンの安定性は三宅島など他の火山でも観測されており (Sasai et al., 1997), 火山の安定期における典型的な自然電位の傾向であると推察される。しかし1985年と2006年の地形補正を施していない自然電位の電位フルスケールを比べると、1985年がおよそ1000mVであるのに対して2006年は1400mVであり、自然電位のコントラストは1985年に比べて2006年のほうが約1.4倍大きくなっている (Fig.4).

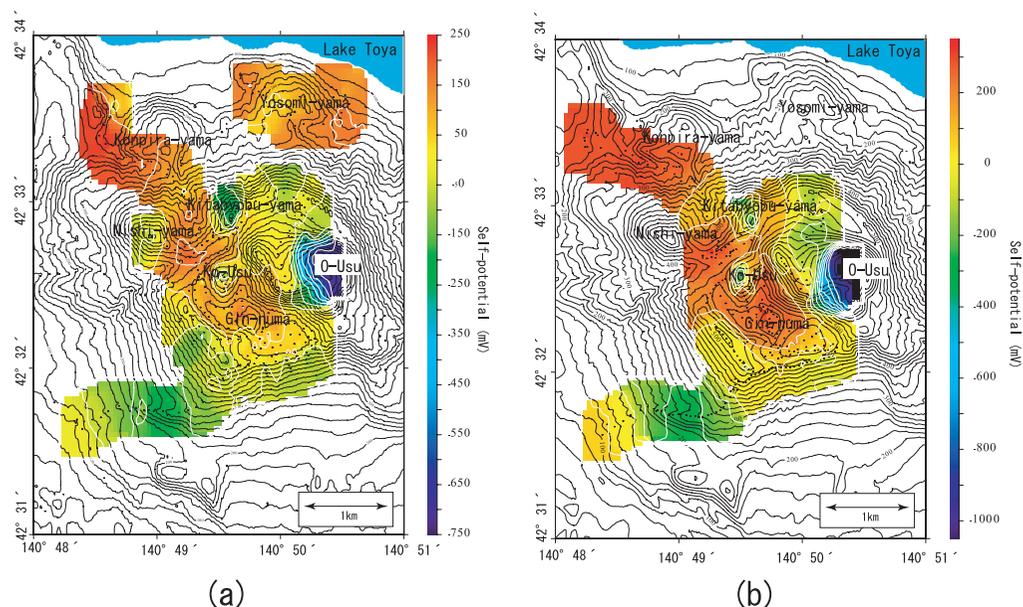


Fig. 4. Raw SP distribution around summit caldera with color contours. (a) 1985's SP map [data from *Nishida and Tomiya (1987)*]. (b) 2006's SP map.

1985年に自然電位が測定されてから本研究の測定まで20年以上も経過していることを考慮すると、この間に山頂カルデラに存在する熱水活動の状態が変化し、それに伴い地表の自然電位も変化した可能性がある。また1985年は「蛙飛び法」と呼ばれる基準電極を測定毎に動かして測定する手法で測定しており、測定毎の誤差蓄積が大きかった可能性が大きいことや、電位計の入力インピーダンスがあまり大きくなかったため、高比抵抗地域での自然電位値を正しく測定できていない可能性も指摘される。

大有珠周辺の自然電位異常はFig.3で示されたように地形補正後にほとんどなくなっており、この周辺は地形効果による自然電位が卓越していると解釈できる。しかしFig.4で大有珠周辺の自然電位を比べると1985年に対して2006年の自然電位は約360mVも低くなっている。この地形効果は重力ポテンシャルに伴う地下水流動によって形成される自然電位であり、地形の変化や極端な降水量の変化がない限り基本的に変化しないと考えられる。このことを考慮すると1985年から2006年にかけて大有珠周辺の地形効果が変化したと考えることは難しい。また小有珠周辺や金比羅山周辺の高電位異常の地域も1985年のデータに比べ2006年のデータで約50~100mV電位が高くなっており、全体的に電位コントラストが大きくなったように見える。このような状況を考慮すると、1985年の測定に用いられた電位計の入力インピーダンスが低かったために測定値に誤差が生じて、自然電位を正確に測定することができなかった可能性は高い。もしそうであるならば、1985年から2006年の自然電位コントラストは自然現象としての変化ではないと推察される。

2. 山頂カルデラ内の熱水活動に伴う高電位異常

これまで行われてきた有珠山の自然電位測定では、山頂カルデラ内で約 400mV の高電位異常の存在が報告されており、熱水対流系の存在を定性的に推定している (Nishida et al., 1996). 本研究で測定した自然電位と過去に測定された自然電位の間では電位パターンがほぼ同じであることから、生データにみられる火口原の高電位が Nishida et al.(1996) の高電位異常に対応したものであると考えられる。しかしこの自然電位異常には地形効果が含まれていると考えられ、実際に Nishida et al. (1996) では具体的な熱水系の分布や規模の推定には至っていない。

本研究では地形効果の係数を測定値から見積もり地形補正を行った結果、山頂カルデラでは広域に高電位異常が分布することが明らかとなり、+600mV の等電位線は山頂カルデラの形状に合わせるように四角い形状で分布している(Fig.3). さらに噴気活動が活発な小有珠南麓や西側、北屏風山の西部地域、大有珠の南東部地域では+1000mV を越える高電位異常となっている。このようなことから、この地域の高電位異常は熱水活動に伴うものである可能性が高い。このような自然電位分布から地下の熱水系の分布を定性的に推定すると、山頂カルデラ内に広域的に熱水活動があり、噴気活動が見られる場所では熱水上昇が浅部まで達していると考えられる。またカルデラ形状と一致するような高電位異常の分布を考えると、カルデラ内の比較的浅部に低比抵抗層が存在し、そのことが高電位異常の広がりを規制している可能性も考えられる。

大熊ほか(2002)は有珠山を含む東西 8km×南北 7km の領域で空中電磁探査を行い、有珠山広域の表層の見かけ比抵抗分布を推定した。その結果によると小有珠の山頂を除く周辺地域で 65 Ωm 以下の低比抵抗層が分布している。西田ほか (1996) は山頂カルデラを含む 15 地点において MT 観測を行い、1 次元モデル解析から有珠山の比抵抗構造を推定した。その結果によると山頂カルデラ表層では 500~5.6kΩm の高比抵抗層が分布しているが、その下部に 10 Ωm 以下の低比抵抗層が存在することを推定している。渡辺ほか (1984) は山頂カルデラ南西から北東方向の測線でダイポール・ダイポール法の電気探査を行い、南火口原浅部ならびに有珠新山直下約 1km 以深に低比抵抗層の存在を推定している。茂木・橋本 (2005) は山頂カルデラ西部の断層帯で高密度電気探査を行い、ごく表層の深度 10m 程度までの高比抵抗層 (数百~数千 Ωm) と、その下位の熱水変質に伴うと思われる 100 Ωm 以下の低比抵抗層の存在を推定している。

このような低抵抗探査の結果を考慮すると、広域的な低比抵抗層が山頂カルデラ内部に広く存在し、その影響で熱水上昇に伴う高電位異常が山頂カルデラ地形に対応して広がっていると解釈することが可能である。

3. 2000 年新山周辺の自然電位

2000 年の噴火があった西山の北西地域では潜在溶岩ドームの形成に伴う最大約 70m の隆起が確認されている (宇井ほか, 2002). 現在力学的な変動は収まっているものの、NB 火口で噴気活動が現在でも活発であることや、NB 火口北西域では地熱地帯が広がりを続けており、潜在溶岩ドーム形成に関与したマグマの熱は依然として保持されていると考えられる (江原ほか, 2002). このような地域では一般的に熱水系が広く発達していると考えられ、2000 年新山周辺や噴気活動

の見える火口周辺で自然電位異常の存在が期待される。

しかし自然電位の測定結果(生データ)は、西山北西地域の広範囲に渡って0~130mV程度の小さな振幅を示しており、2000年新山周辺や西山・金比羅火口周辺で極端な自然電位異常は見出せなかった(Fig.1)。またこの地域の自然電位分布は標高の変化に対応した電位変化がほとんどなく、地形効果がみられないのも特徴である。

大熊ほか(2002)の空中電磁探査の結果では、西山北西地域の表層に100Ωm以下の低比抵抗層が広範囲に分布していることが示されている。また佐波ほか(2004)は2000年12月から2002年5月にかけて西山北西地域において4回電気探査を行い、最大で地下20mの深さまで10Ωm以下の低比抵抗層の存在を明らかにし、その低比抵抗層が時間の経過とともに広がっていることを示した。このような比抵抗探査の結果を考慮すると、2000年新山周辺域では表層に存在する広域的な低比抵抗層が電位シールド的な役割を担い、地形効果や熱水活動に伴う自然電位異常が地表にあらわれ難くなっていると推察される。

4. 有珠新山の自然電位異常

有珠新山は地形補正後の自然電位データで最も大きな高電位異常を示しており、麓からおよそ1200mV以上になっている(Fig.3)。有珠新山は1977年からの噴火で形成された火山であり、有珠山の中では比較的新しい火山である。そのため有珠新山でみられる自然電位異常は、通常ならば火山体内部の熱による熱水上昇によって形成されたものであると解釈されやすい。しかし電位異常が存在する山頂近傍で地熱兆候が見られないことや、電位異常分布が山体に沿って局所的に存在していることを考えると、有珠新山の山頂付近まで熱水上昇が存在している可能性は低いと考えられる。

熱水上昇以外に有珠新山の自然電位異常の原因として考えられるものは、(i)有珠新山の山体が比較的新しいため地形効果を形成する流動電位が発生していない、(ii)低比抵抗層が有珠新山山頂浅部まで存在し、それが高電位異常地域と繋がっている、(iii)有珠新山を形成している岩石のゼータ電位が他の地域の値と異なりゼロに近い或いはプラスである、の3つが挙げられる。

(i)が有珠新山の自然電位異常の原因である場合、有珠新山内部では地下水系がまだ発達途中であるため、山体内部の比抵抗は比較的高抵抗であると推察される。(ii)の場合は逆に山体内部は低抵抗であり、伊豆大島の自然電位異常の解釈に用いられている(Ishido, 2004)。Ogawa et al. (1998)は有珠新山を北東~南西に横切る断面についてAMT(Audio-magnetotelluric)法による比抵抗構造を求めており、表層溶岩の高抵抗層とその下部に存在する低抵抗の第三紀層の分布を推定している。また大熊ほか(2002)の空中電磁探査の結果では有珠新山の表層におよそ300Ωm層の分布を推定している。しかしOgawa et al. (1998)の結果は有珠新山を横切る断面の結果であるため、有珠新山の比抵抗を詳細に評価するにはやや測定間隔が粗く、また大熊ほか(2002)の結果は表層の比抵抗に限られるため、本研究の自然電位異常の原因を評価する材料としては不十分であると考えられる。

(iii)が自然電位異常の原因の場合、比抵抗構造は関係がないがゼータ電位は岩石組成の違いが

影響すると考えられており、シリカに乏しくマフィックな組成になるほど岩石のゼータ電位はプラスになる傾向であることが示されている (Hase et al., 2003). そのため有珠新山の自然電位異常をゼータ電位の違いで説明する場合、有珠新山が他の山体と比べ特異的に岩石組成が違っている必要がある。山頂カルデラ内に形成された各ドームは形成年代が新しいほどシリカに乏しくなり、有珠新山形成時の噴出物が最もマフィックな組成を示している (中川ほか, 2002). しかし何れもデイサイトの組成範囲内であり、その範囲内の組成の違いがゼータ電位の値を大きく変化させる要因になっているか定かではない。

これらを考慮すると、有珠新山の自然電位異常の原因を突き止めるには、有珠新山で高密度電気探査などの比抵抗調査を行うとともに、岩石サンプルを採取して岩石ゼータ電位の測定が必要であると考えられる。

IV. まとめ

2006年7月から12月にかけて有珠山で広域的に自然電位測定を行った。山頂カルデラの自然電位は1985年に測定した結果と電位パターンはほぼ同じであったが、本研究で行った測定結果は全体的に電位コントラストが1.4倍大きくなっていった。この変化の原因は現在のところはっきりとはわからないが、1985年の測定では入力インピーダンスの小さな電位計を使用していたことにより、高比抵抗地域で測定誤差が生じていた可能性があることが推察された。そのため低入力インピーダンスの電位計を用いた再測定を行って検証する必要があるだろう。

有珠山南西地域は地形効果が明瞭であり、自然電位と標高が約 -2.5mV/m の相関を示していた。この地形効果の係数を用いて有珠山全体を地形補正した結果、山頂カルデラ内部に $+600\text{mV}$ 以上の高電位が存在することが明らかとなった。さらに噴気活動が見られる小有珠南麓や北屏風山南西部、大有珠南東部では $+1000\text{mV}$ 以上の高電位を示していた。これらの高電位異常は、山頂カルデラ内部に局在する熱水上昇と広域的に分布する低比抵抗層の存在によって形成されたと推定された。また有珠新山山頂域では $+1200\text{mV}$ の最も大きな高電位異常の存在を示していたが、この高電位異常は熱水上昇ではなく、山体内部の貫入物質の影響による見かけの電位異常である可能性を示唆した。

本報告では自然電位の観測結果と自然電位異常の定性的な解釈が主な内容であった。今後は有珠新山における詳細な比抵抗探査や自然電位の数値シミュレーションを行うことにより、より定量的な自然電位の解釈を進め有珠山全体の熱水系の解明を目指したい。

謝辞 今回の SP 測定を行うにあたり、産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門地圏球体ダイナミクス研究グループより SP リールをお借りしました。ここに記して感謝申し上げます。

文 献

- 江原幸雄・藤光康宏・西島潤・福岡晃一郎・工藤貴久・柴田寛・川口昌宏・ダニエラゲロウスカ・韓湘君, 2002. 噴火活動衰退期における水蒸気噴出活動の変動 —2000年有珠火山噴火—, 北海道大学地球物理学研究報告, **65**, 199-211.
- 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**, doi:10.1029/2003GL018694.
- Hase, H., T. Hashimoto, S. 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.
- Ishido, T., 2004. Electrokinetic mechanism for the “W”-shaped self-potential profile on volcanoes, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, doi:10.1029/2004GL020409.
- Matsushima, N., M. Michiwaki, N. Okazaki, R. Ichikawa, A. Takagi and Y. Nishida, 1990. Self-potential studies in volcanic areas (2) —Usu, Hokkaido Komaga-take and Me-akan—, *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ. Ser. 7*, **8**, 465-477.
- 茂木透・橋本武志, 2005. 有珠山頂カルデラ西部での電気探査—2000年有珠火山噴火に伴ってカルデラ内にてきた断層群周辺の地下構造—, **68**, 北海道大学地球物理学研究報告, 233-241.
- 中川光弘・石塚吉浩・吉本充宏・工藤崇・相澤幸治・北川淳一・平賀正人・松本亜希子・戸狩英紀・高橋良・石井英一・江草匡倫・清野寛子・安間一宮坂瑞穂・和田恵治・新井田清信, 2002. 有珠 2000 年噴火の噴出物: 構成物とその時間変化, 火山, **47**, 279-288.
- Nishida, Y. and H. Tomiya, 1987. Self-potential studies in volcanic areas (1)—Usu volcano—, *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ. Ser. 7*, **8**, 173-190.
- Nishida, Y., N. Matsushima, A. Goto, Y. Nakayama, A. Oyamada, M. Ustugi and H. Oshima, 1996. Self-potential studies in volcanic areas (3) —Miyake-jima, Esan and Usu—, *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ. Ser. 7*, **10**, 63-77.
- 西田泰典・宇津木充・大島弘光・鍵山恒臣・井上智広・森田祐一・茂原論・前川徳光, 1996. マグネトテレルリック観測から推定される有珠火山の比抵抗構造, 北海道大学地球物理学研究報告, **59**, 151-162.
- Ogawa, Y., N. Matsushima, H. Oshima, S. Takakura, M. Utsugi, K. Hirano, M. Igarashi and T. Doi, 1998. A resistivity cross-section of Usu volcano, Hokkaido Japan, by audiomagnetotellurics soundings, *Earth Planets and Space*, **50**, 339-346.
- 大熊茂雄・中塚正・高倉伸一・森尻理恵, 2002. 有珠火山地域における空中電磁・磁気探査—有珠 2000 年噴火に関連して—, 火山, **47**, 533-546.
- 佐波瑞恵・西田泰典・高倉伸一・松島善雄・茂木透・鈴木敦生, 2004. 2000年有珠山噴火に伴う地熱拡大域における地温, 比抵抗, 自然電位の繰り返し観測, 北海道大学地球物理学研究報告, **67**, 25-38.
- Sasai, Y., J. Zlotnicki, Y. Nishida, P. Yvetot, P. Morat, H. Murakami, Y. Tanaka, Y. Ishikawa, S. Koyama, and W. Sekiguchi, 1997. Electromagnetic monitoring of Miyake-jima volcano, Izu-bonin arc, Japan: A preliminary report, *J. Geomag. Geoelectr.*, **49**, 1293-1316.
- 宇井忠英・中川光弘・稲葉千秋・吉本充宏・総合観測班地質グループ, 2002. 有珠山 2000 年噴火の推移, 火山, **47**, 105-117.
- 渡辺秀文・山下済・前川徳光, 1984. 有珠火山の電気探査, 北海道大学地球物理学研究報告, **43**, 31-40.
- Zablocki, C. J., 1976. Mapping thermal anomalies on an active volcano by the self potential method, Kilauea, Hawaii, *Proc. 2nd U.N. Symp. On the Development and Use of Geothermal Resources*, **2**, 1299-1309.
- Zlotnicki, J. and Y. Nishida, 2003. Review on morphological insights of self-potential anomalies on volcanoes, *Surv. Geophys.*, **24**, 291-338.