



Title	マグネトテルリック観測から推定される有珠火山の比抵抗構造
Author(s)	西田, 泰典; NISHIDA, Yasunori; 宇津木, 充 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 59, 151-162
Issue Date	1996-03-25
DOI	<a href="https://doi.org/10.14943/gbhu.59.151">https://doi.org/10.14943/gbhu.59.151</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/14237">https://hdl.handle.net/2115/14237</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	59_p151-162.pdf



## マグネトテルリック観測から推定される有珠火山の比抵抗構造

西田 泰典・宇津木 充・大島 弘光

北海道大学理学部地球物理学教室

鍵山 恒臣・井上 智広

東京大学地震研究所

森田 裕一・茂原 論

東北大学理学部地震予知・噴火予知観測センター

前川 徳光

北海道大学理学部有珠火山観測所

(1996年1月16日受理)

## Resistivity Structure of Usu Volcano as Revealed by the Magnetotelluric Measurements

Yasunori NISHIDA, Mitsuru UTSUGI, Hiromitsu OSHIMA

Department of Geophysics, Faculty of Science, Hokkaido University

Tsuneomi KAGIYAMA, Tomohiro INOUE

Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Yuichi MORITA, Satoshi SHIGEHARA

Observation Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions,

Faculty of Science, Tohoku University

Tokumitsu MAEKAWA

Usu Volcano Observatory, Faculty of Science, Hokkaido University

(Received January 16, 1996)

We made ELF-ULF magnetotelluric measurement on Usu volcano on November, 1994. Low resistive (below  $10 \Omega\text{m}$ ) layer underlies the surface resistive ( $500\sim 5600 \Omega\text{m}$ ) layer which is composed of the basaltic somma lava and the hot avalanche deposits. The depth to the upper surface of the low resistivity layer tends to be shallow at the southern part of the crater floor (several tens meter) where is high ground temperature zone. The large and positive self-potential anomaly (about  $400 \text{ mV}$ ) develops at the same place, especially at the southwestern part of the crater floor. As the electrokinetic coupling effect due to intensive hydrothermal convection is the most probable origin of the self-potential anomaly, it can be concluded that the low resistive thermal water comes up to the southwestern crater floor.

## I. ま え が き

1977年8月の噴火に伴って北西-南東走向の有珠新山断層群が発達し、その北東側は約180m隆起して潜在溶岩円頂丘(有珠新山)が形成された(Fig. 2のFrとCr)。断層の南西側の火口原には地熱地帯が発達し、そこからの噴気やI-火口からの噴煙によって放出される熱エネルギーは噴火2年後の1979年にはそのピークに達した( $1 \times 10^3$  MW)。その後、両エネルギーの和は指数関数的に減少し(1990年: $1.4 \times 10^2$  MW)今日に至っている(松島, 1992)。この間、貫入マグマを含む山体構造や熱水系の消長を探る目的で多くの地球電磁気学的観測, 研究が行われてきた。

Nishida and Miyajima (1984)はプロトン磁力計による磁気測量を行い、火山地質学的研究から推定されていた山体構造、特に現在ではその後の活動による堆積物で隠されて見ることができない、過去の火口縁の存在を確かめている。渡辺他(1984)は1982年にガイポール法による電気探査の結果、火口原の直下に低比抵抗帯の存在を見だし、それが1977年噴火に伴う貫入岩体である可能性を論じている。Ballestracci and Nishida (1987)やNishida (1988)は火口原内のマグネトテルリック(MT)観測から、低比抵抗の山体中、断層に沿った高比抵抗帯を見出した。断層沿いに上昇する高温ガスが周囲の岩石を乾燥させたために高比抵抗になったと結論づけている。大島他(1994)は1993年にシュランベルジャー法を用いた電気探査を行い、渡辺他(1984)の測定結果と比較することによって浅部熱水系の消長を論じている。それによると、南西火口原の見かけ比抵抗は1982年当時より高くなっており、南西火口原の地温異常域や噴気地を維持した熱水系による低比抵抗層の比抵抗値が、表面熱活動の低下とともに高くなったためと解釈している。さらにNishida and Tomiya (1987), Matsushima et al. (1990)そしてNishida et al. (1996)は自然電位(SP)の面的測定を行った結果、有珠新山断層群に平行し、かつ小有珠周辺の地熱地帯をピークとした約400 mVにのぼる正の電位異常を観測している。この異常は地熱地帯の下に推定される熱水対流の上昇に伴う流動電位に起因すると考えられるため、熱水対流系の消長の指標とみなされる。しかし、この約10年間に4回の繰り返し測定を行ったところ、噴気やI-火口からの噴煙によって放出される熱エネルギーの減少にもかかわらず、SP異常の振幅および空間波長はほとんど変化していないことがわかった。この矛盾はかなり深刻であるが、現在のところNishida et al. (1996)は、表層の火山堆積物が熱水変質していわゆる目詰まりを起こし、それ以深に存在する活発な熱水対流層から地表への放熱が妨げられてきているのではないかと解釈している。

以上の研究成果をふまえ、さらに深部の山体比抵抗構造を推定する目的で、著者等は1994年11月にELF帯およびULF帯のMT観測を行った。構造解析に当たっては、火口原内の表層部分は、大島他(1994)の電気探査で得られた比抵抗構造で固定し、それ以深をインバージョンで求める、いわゆるジョイントインバージョンを行った。電気探査が行なわれていない外輪山では、Nishida (1988)によるVLF帯(17.4 kHz)のMT観測結果を併用して、通常のインバージョンを行った。

## II. 観測および解析

有珠火山の地形図およびMT観測点分布をFig. 1に示す。測点番号1~15においてELF帯の、またそのうち1~4の測点ではULF帯の観測も行っている。データはELF帯で128 Hz, ULF帯では1 Hzでサンプリングされている。なお図中のアルファベットのついた短い直線は大島他(1994)によるシュランベルジャー測線を示している。

MT法は電場(E)と磁場(H)の変動を同時に測定し、両者の直交成分の比から地下比抵抗構造を推

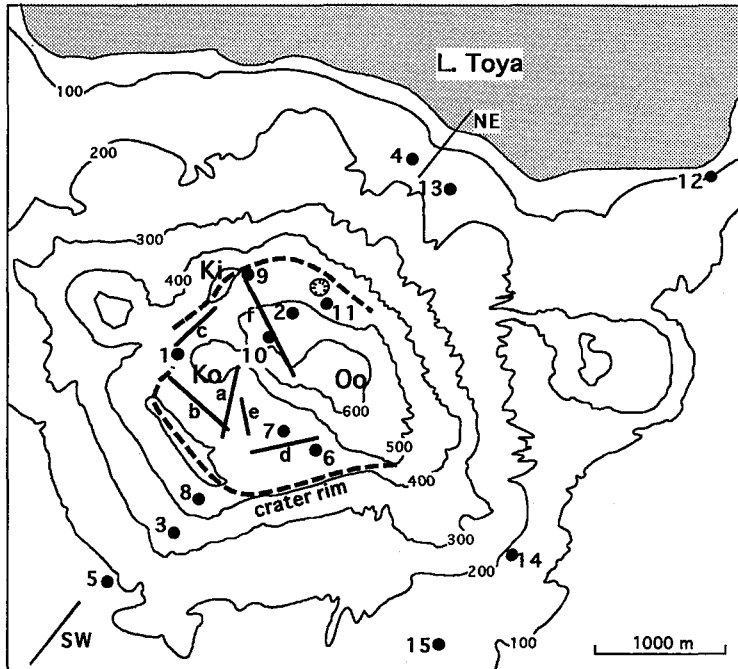


Fig. 1. The MT observation points (solid circles with number) are plotted on topographical map of Usu volcano (contour interval is 100 m). Solid lines with alphabet are the measurement lines of Schlumberger electrical soundings by Oshima et al. (1994). Ko : Ko-usu lava dome ; Oo : Oo-usu lava dome ; Ki : Kitabyobu-yama hill.

定する電磁探査法である。両者の関係は周波数( $f$ )領域で一般に、

$$\begin{pmatrix} E_x(f) \\ E_y(f) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx}(f) & Z_{xy}(f) \\ Z_{yx}(f) & Z_{yy}(f) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x(f) \\ H_y(f) \end{pmatrix}$$

で与えられる。 $Z_{ij}(f)$ はインピーダンステンソルと呼ばれ、地下比抵抗構造を反映した量で、見かけ比抵抗  $\rho_{ij}(f)$  と位相  $\phi_{ij}(f)$  との間には、

$$\begin{aligned} \rho_{ij}(f) &= (Z_{ij}(f))^2 / i\omega\mu \\ \phi^{ij}(f) &= \arg(Z_{ij}(f)) \end{aligned}$$

なる関係がある ( $i$  または  $j$  は,  $x$  または  $y$  に対応する)。これらの関係式を用いれば、観測された電場  $E_x(f)$ ,  $E_y(f)$ , と磁場  $H_x(f)$ ,  $H_y(f)$  から 2次元, 3次元の比抵抗構造を求めることが可能であるが、本稿では簡単のために、Utada and Shimomura (1990) や歌田他 (1994) が行ったように、インピーダンステンソルの行列式から求めた回転不変量、

$$\begin{aligned} \rho_{eff}(f) &= \det(Z(f)) / i\omega\mu \\ \phi_{eff}(f) &= \arg(\det(Z(f))^{1/2}) \end{aligned}$$

を求め、これらを満足するように各観測点ごとの1次元水平多層構造を推定した。

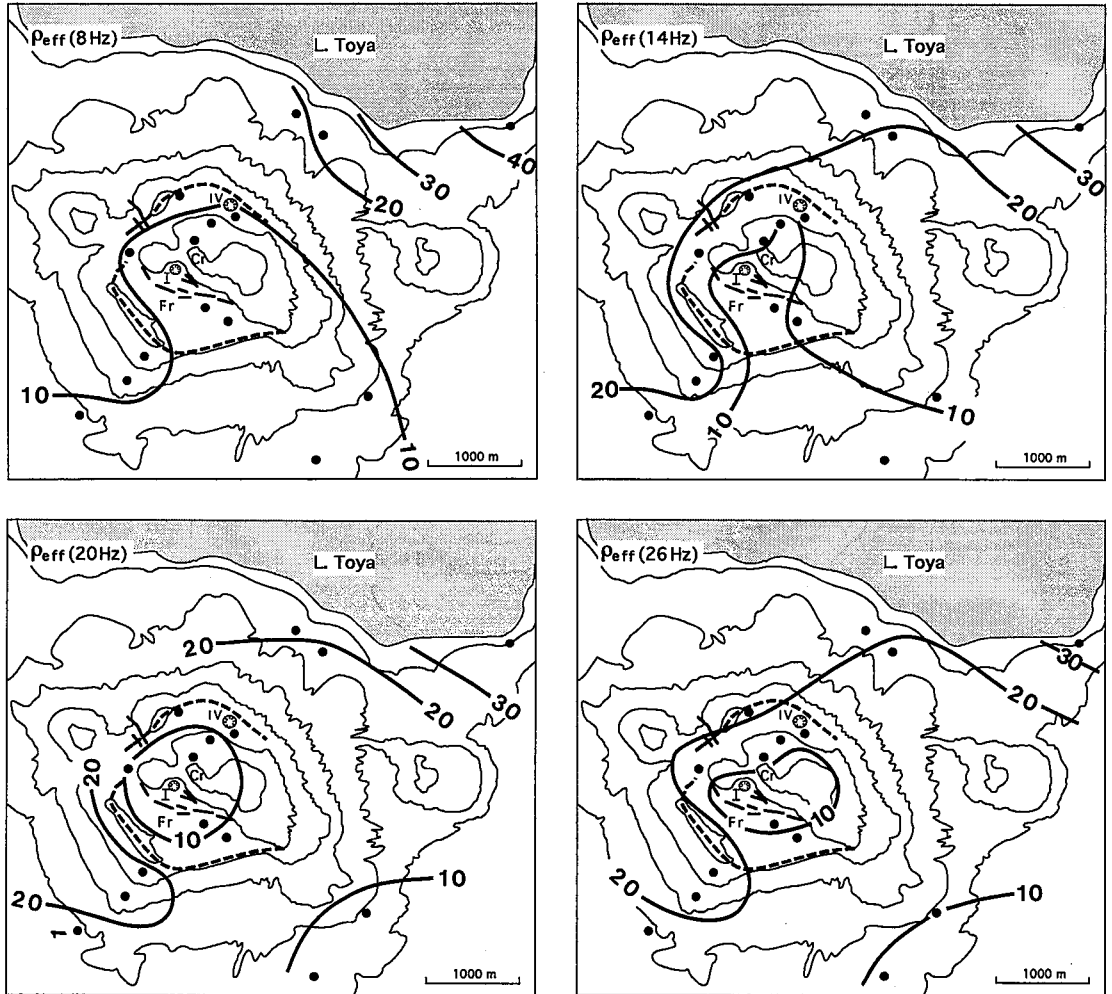


Fig. 2. Distribution of apparent electrical resistivity ( $\rho_{eff}$ ) at 8, 14, 20 and 26 Hz. Unit is  $\Omega m$ .  
 I : I- crater ; IV : No. 4- crater ; Fr : Usu-shinzan fault group ; Cr : Usu-shinzan cryptodome.

Table 1 に、各観測点における  $\rho_{ij}$ ,  $\phi_{ij}$ ,  $\rho_{eff}$ ,  $\phi_{eff}$  および誤差  $r$  を周波数 ( $f$ ) 毎に示す。また Fig. 2 および 3 に ELF 帯の 8, 14, 20 および 26 Hz (S/N 比によっては 27 Hz) における  $\rho_{eff}$  と  $\phi_{eff}$  の分布を示す。それを見ると、火口原や南～南東外輪山の下では 10  $\Omega m$  かそれ以下の見かけ比抵抗を示すのに対し、北外輪山ではそれより高い値を示しているのが特徴的である。

構造解析は第 1 章に述べたように、火口原内については表層約 100 m を大島他 (1994) の電気探査で得られた比抵抗構造で固定し、それ以深の構造をインバージョンで求めた (測点 1 は測線 c を、測点 2, 9, 10, 11 は測線 f を、測点 6, 7 は測線 d を参照した)。それ以外の測点では、測点 3, 4, 5, 13 は Nishida (1988) による VLF 帯の MT 観測結果を併用したインバージョンを行った。測点 8, 12, 14 は人工雑音の混入が甚だしいため、構造解析を行っていない。また測点 15 は有珠山本体からやや離れているので、本稿では議論の対象にしない。Fig. 4 に構造解析結果を柱状図で示す。結果は火口原を通る一番長い NE-SW 測線 (Fig. 1 参照) に投影されている。

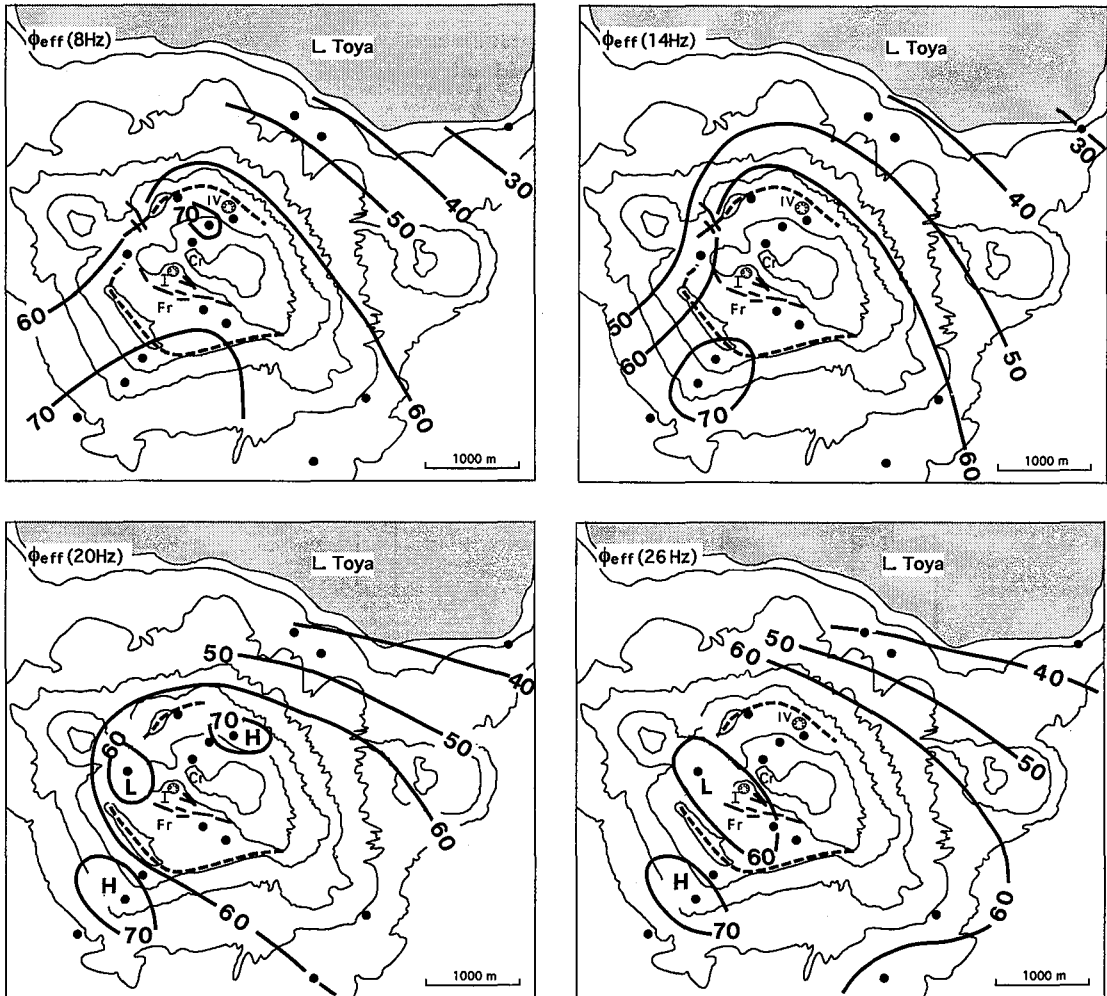


Fig. 3. Distribution of phase ( $\phi_{eff}$ ) at 8, 14, 20 and 26 Hz. Unit is degree.

### III. 解析結果および考察

Fig. 4 の柱状図をみると、いずれの測点でも地表面から数 10~100 m 深までは 500~5,600  $\Omega\text{m}$  の高比抵抗となっている。火口原内のそれは第 4 火口内に露出する、1822 年のいわゆる文政熱雲堆積物の上部に対比される(大島, 私信)。その他の測点 5, 3, 4 に見られる高比抵抗層は玄武岩質外輪山溶岩に由来することは、火山地質学的研究(例えば, Oba, 1966)や磁気測量の結果(Nishida and Miyajima, 1984)から明らかである。それ以深の中間的比抵抗値層に続き、どの場所でも約 10  $\Omega\text{m}$  以下の極端な低比抵抗層が分布する(図中、網目の部分)。Fig. 5 にその低比抵抗層の上面の海拔高度分布を示す。ULF 帯の測定がある測点 1, 2, 3, 4 では低比抵抗層の下に約 20~50  $\Omega\text{m}$  の層が分布している。

表層の高比抵抗層の下に 10  $\Omega\text{m}$  以下の極端な低比抵抗層が存在することは、活動的火山、例えば伊豆大島(Utada and Shimomura, 1989)、三宅島(歌田他, 1984)、霧島火山群の硫黄山や新燃岳(鍵山他, 1994; 歌田他, 1994)で共通して見られる。火山、地熱地域のこのような低比抵抗層は、イオ

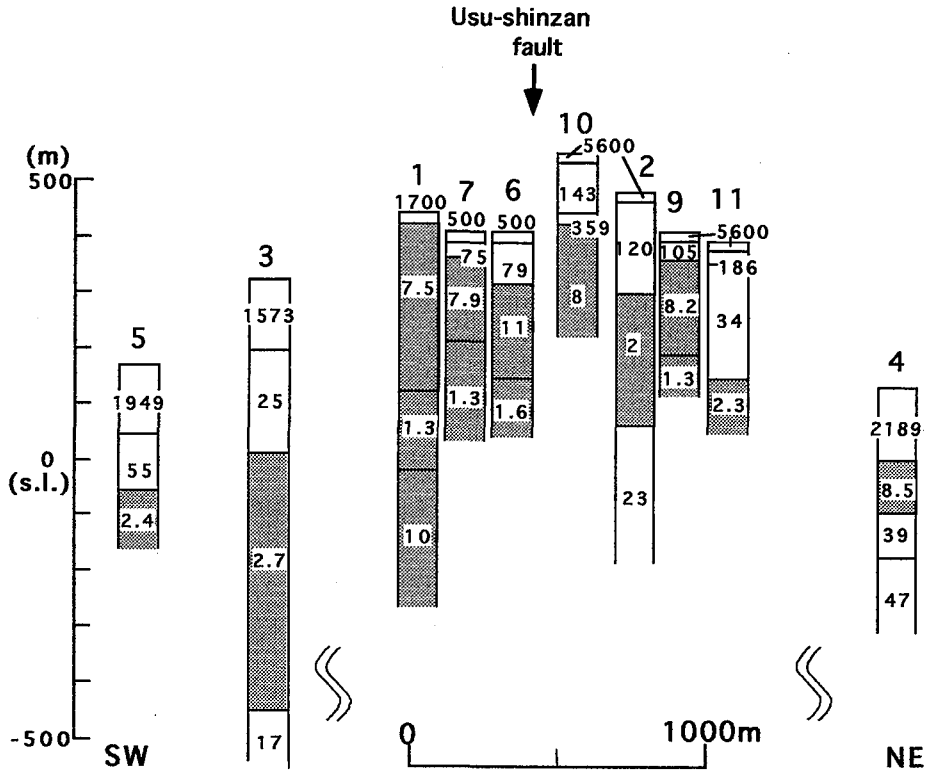


Fig. 4. Results of 1-D inversion along the NE-SW line.

ン濃度の高い熱水や熱水変質に伴い導電性の高い鉱物が生じることに起因する事が多い。

有珠山においては、1977年噴火以後小有珠周辺の火口原や、北屏風山付近に多くの亀裂(有珠新山断層群)が発生し、高地温の噴気地が急速に発達した(Katsui et al., 1985; 松島, 1992)。また測点6, 7が分布する火口原南部には、小有珠周辺ほど顕著な亀裂や噴気地が発達しなかったものの、小有珠周辺の延長として高地温異常が分布している(松島, 1992)。一方、有珠新山断層群をはさんだ北火口原では、1977年8月9日の第4火口の単発的な噴火と潜在溶岩円頂丘の形成があつたにもかかわらず、目立った表面熱活動は見られない。Fig. 4をみると、亀裂や噴気地の発達した測点1, 9で低比抵抗層の上面深度が20~40mと極めて浅くなっており、顕著な熱水活動の存在を物語っている。前述のとおり、顕著な噴気活動はあまり見られなかった南火口原の測点7でも低比抵抗層の上面深度は40mと浅い。熱水系は南火口原浅部にも分布しているものの、あまり多くの亀裂が地表まで発達するに至らなかったために、地表面の噴気活動が顕著に現われなかったのであろう。同じ火口原でも、測点9を除いて有珠新山断層群の北側ではこの低比抵抗層の上面深度は130~240mと深くなっている(測点10, 2, 11)。しかし、これは有珠新山潜在溶岩円頂丘の形成により地表面が隆起しているためであり、Fig. 5をみると、低比抵抗層の上面は表面地形にかかわらず、小有珠や断層を含んだ火口原の西部から南西部にかけて盛り上がる形になっている。ULF帯の測定が4点しかないため確定的なことは云えないが、低比抵抗層の層厚は有珠新山断層群の南側で厚く(測点3で約500m)、北側で薄い(測点2で約200m; 測点4で約100m)傾向にある。

上で述べてきた低比抵抗層の実体は、噴気地の発達や温度異常分布を考えると、イオン濃度の高い熱水や熱水変質鉱物の存在に帰せられることはほぼ間違いない。しかし比抵抗構造から、その熱水が

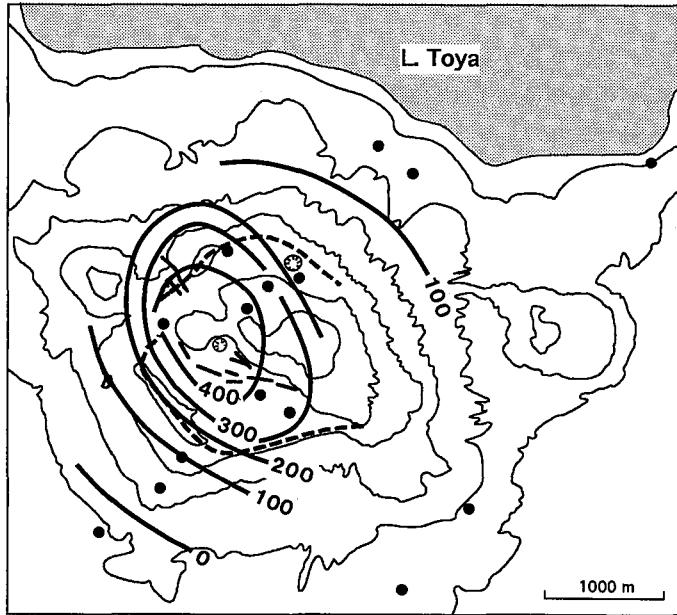


Fig. 5. Distribution of altitude of the upper surface of the low resistive layer. Unit is meter.

流動しているかどうかを知ることは本質的にできない。そこで自然電位 (SP) の測定結果を併せて考えることにする。火山・地熱地域でしばしば観測される数 100 mV にものぼる SP 異常は、現在のところ界面動電効果 (流動電位) によるとする解釈が最も有力である。界面動電効果とは、固体と液体の界面に生ずる電気二重層のために、液体内のイオン分布に偏りが生じ地下の圧力勾配に比例して岩石中の水が流動するとき、水の流れにカップルして電流が流れ、電位差が発生する現象を云う。この現象にもとづけば、熱水上昇域に数 100 mV を越す正の SP 異常が観測され得ることが、理論、実験、観測などにより確かめられている (例えば、Nourbehecht, 1963; Zablocki, 1975; Ishido and Mizutani, 1981)。従って、約 400 mV の SP 正異常が火口原西部から南西部にかけての噴気地を中心に、しかも有珠新山断層群に平行して分布していることは、まさにそこが熱水対流の上昇域にあたることを示唆している。以上、顕著な低比抵抗層が熱水流動層であり、その熱水は断層に規定されて、低比抵抗層が盛り上がった西～南西火口原で上昇していると考えれば、比抵抗構造、地熱分布、SP 異常分布が整合的に解釈されることになる。しかしながら、MT の測定点の数も不十分である上に、より深部の情報を持つ ULF 帯の測定点が限られているため、今後それらのデータの蓄積を待って、より確かなモデルを構築して行く必要があることは云うまでもない。

#### IV. ま と め

有珠山における MT 観測データを説明する 1 次元モデル解析を行って比抵抗構造を求めるとともに、火山熱学的調査結果および自然電位分布を参考にして、山体下の熱水系に関する考察を行った。

(1) 地表面付近の高比抵抗層 (主に、玄武岩質外輪山溶岩または熱雲堆積物で構成されている) の下部に、10  $\Omega$ m 以下の極端な低比抵抗層が分布している。この低比抵抗層の上面深度は南西火口原で極めて浅く、数 10 m 以下となっている。これにたいし、北火口原や南北輪山では、百数 10～300 m

となっている。

(2) 噴気地の発達や高地温異常が見られる南西火口原で、低比抵抗層が持ち上がっていることを考えると、この低比抵抗層の実体は、イオン濃度の高い熱水や熱水変質鉱物の存在に帰せられることはほぼ間違いない。正の SP 異常のピークがやはり南西火口原に位置することから、ここは熱水対流の上昇域にあたと推定される。

今後は、より詳細な比抵抗構造を確立するために、測点密度を増やすと同時に、低比抵抗層の下面深度分布を明らかにするために、ULF 帯の測定を充実させる必要がある。このような MT 観測の充実には、1977 年噴火に伴って形成された、潜在溶岩円頂丘 (有珠新山) の浅部に想定される残存マグマの探査にも資するものである。以上の目的のためには、今後 2 次元、3 次元のモデリングのもとに、より厳密な議論を行う必要がある。

**謝辞** 本観測を実施するにあたり、北海道大学理学部有珠火山観測所の岡田弘所長には多大なる便宜をはかって頂いた。記して謝意を表します。なお、本観測は 1994 年度有珠火山集中観測の一環として行われた。

## 文 献

- Ballestracci, R. and Y. Nishida, 1987. Fracturing associated with the 1977–1978 eruption of Usu volcano, north Japan, as revealed by geophysical measurements. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **34**, 107–121.
- Ishido, T. and H. Mizutani, 1981. Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics. *J. Geophys. Res.*, **86**, 1763–1775.
- 鍵山恒臣・山口 勝・増谷文雄・歌田久司, 1994. 霧島火山群・硫黄山周辺の VLF, ELF-MT 測定. 地震研究所彙報, **69**, 211–239.
- Katsui, Y., H. Komuro and T. Uda, 1985. Development of faults and growth of Usu-shinzan cryptodome in 1977–1982 at Usu volcano, north Japan. *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ., Ser. 4*, **21**, 339–362.
- 松島喜雄, 1992. 活動的火山における熱学的研究 —1977 年有珠山噴火にともなう放熱過程—. 北海道大学博士論文, 83 pp.
- Matsushima, N., M. Michiwaki, N. Okazaki, R. Ichikawa, A. Takagi, Y. Nishida and H. Mori, 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.
- Nishida, Y., 1988. Subsurface structure of Usu volcano as inferred from geomagnetic, audiofrequency magnetotelluric and self-potential studies. Proc. Kagoshima International Conference on Volcanoes, 350–353.
- Nishida, Y. and E. Miyajima, 1984. Subsurface structure of Usu volcano, Japan as revealed by detailed magnetic survey. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **22**, 271–285.
- 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. Utsugi 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.
- Nourbehecht, B., 1963. Irreversible thermodynamic effects in inhomogeneous media and their applications in certain geoelectric problems. PhD Thesis, Mass. Inst. Technol., Cambridge.
- Oba, Y., 1986. Geology and petrology of Usu volcano, Hokkaido, Japan. *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ., Ser. 4*, **13**, 185–236.
- 大島弘光・前川徳光・松島喜雄, 1994. 有珠火口原内での電気探査. 地球惑星科学関連学会 1994 年合同大会講演予稿集, 372.

- 歌田久司・笹井洋一・中川一郎・小山 茂・石川良宣・浜野洋三, 1984. 1983年三宅島の噴火に関連した電気比抵抗変化. 火山, 第2集, **29**, S 113-S 124.
- Utada, H. and T. Shimomura, 1990. Resistivity structure of Izu-Oshima Volcano revealed by ELF VLF-MT method. *J. Geomag. Geoelectr.*, **42**, 169-194.
- 歌田久司・鍵山恒臣・霧島火山電磁気研究グループ, 1994. 霧島火山の深部比抵抗構造(I). 地震研究所彙報, **69**, 241-255.
- 渡辺秀文・山下 斉・前川徳光, 1984. 有珠火山の電気探査. 北大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. Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, 1975, **2**, 1299-1309.

**Table 1.** Results of ELF and ULF measurements.  $f$  : frequency (Hz) ;  $\rho$  : apparent resistivity ( $\Omega\text{m}$ ) ;  $\phi$  : phase (degree) ;  $r$  : error (%).

No.	$f$	$\rho_{xx}$	$\phi_{xx}$	$r$	$\rho_{xy}$	$\phi_{xy}$	$r$	$\rho_{yx}$	$\phi_{yx}$	$r$	$\rho_{yy}$	$\phi_{yy}$	$r$	$\rho_{\text{eff}}$	$\phi_{\text{eff}}$	$r$
1	8E-3													6.40	50.6	23.7
	14E-3													9.30	50.2	14.1
	25E-3													9.60	45.5	10.5
	37E-3													10.00	42.9	5.1
	49E-3													10.30	41.0	4.8
	8	0.68	-107.5	31.8	8.99	-122.3	11.7	6.89	60.6	5.5	1.23	18.6	29.0	7.06	60.9	8.6
	14	0.24	-123.7	32.3	13.59	-124.1	8.6	8.46	57.1	6.6	0.60	18.0	34.8	10.43	57.1	7.6
	20	0.08	0.7	83.5	14.67	-124.4	7.4	6.90	60.4	9.6	0.66	-14.8	26.2	9.91	57.4	8.5
	26	0.11	-141.3	69.5	14.82	-124.5	8.4	8.29	54.3	8.3	0.57	-6.7	27.3	11.04	55.5	8.3
2	14E-3													7.80	49.1	25.6
	20E-3													11.10	49.8	18.3
	25E-3													9.70	47.8	16.1
	29E-3													8.80	45.3	12.8
	35E-3													10.50	46.1	11.4
	43E-3													10.40	45.2	8.3
	8	0.11	-95.4	98.1	9.16	-105.6	17.2	5.65	66.7	9.4	1.33	-95.0	16.9	7.53	71.2	13.3
	14	0.08	21.3	88.0	14.18	-111.5	7.9	7.56	64.2	11.3	2.22	-106.4	18.5	10.03	67.1	9.6
	20	0.18	37.7	77.7	16.49	-111.3	7.6	6.16	67.2	17.8	1.22	-116.5	51.4	9.70	68.7	12.7
26	0.07	108.2	167.3	17.35	-115.7	9.2	7.30	69.4	15.7	2.98	-126.7	39.1	10.86	66.3	12.4	
3	14E-3													13.00	47.3	35.5
	23E-3													13.00	46.1	27.5
	47E-3													12.30	33.9	27.7
	55E-3													11.70	38.8	19.4
	8	2.57	96.9	20.4	11.91	69.8	9.9	16.8	-106.9	5.7	0.33	-172.1	50.0	13.46	72.7	7.8
	14	4.75	71.9	14.0	19.14	72.7	6.4	28.4	-109.3	3.8	0.01	-136.1	238.6	23.13	71.8	5.1
	20	4.76	72.7	20.5	22.92	75.1	7.8	26.7	-108.1	8.2	0.07	51.6	114.3	25.27	73.3	7.8
	26	3.14	80.6	96.6	22.51	74.1	18.8	28.3	-106.6	11.1	0.00	109.0	1087.2	25.33	73.8	14.9

(to be continued)

Table 1. (continued)

No.	f	$\rho_{xx}$	$\phi_{xx}$	$\Gamma$	$\rho_{xy}$	$\phi_{xy}$	$\Gamma$	$\rho_{yx}$	$\phi_{yx}$	$\Gamma$	$\rho_{yy}$	$\phi_{yy}$	$\Gamma$	$\rho_{eff}$	$\phi_{eff}$	$\Gamma$
4	8E-3													25.00	54.5	28.7
	14E-3													33.40	53.5	14.9
	20E-3													28.10	50.8	10.4
	25E-3													36.60	51.8	12.3
	33E-3													36.50	47.0	13.5
	39E-3													22.40	44.3	19.0
	8	2.03	-152.7	39.1	27.28	-127.2	11.9	25.61	37.1	5.8	6.05	34.6	24.2	23.40	47.0	8.9
	14	1.65	-139.4	31.4	38.25	-137.4	8.8	27.48	41.4	6.1	9.34	21.0	14.3	28.83	43.5	7.4
	20	3.31	-132.7	19.8	38.79	-138.4	7.9	30.32	40.0	6.9	8.48	25.6	16.8	29.07	41.6	7.4
	27	4.31	-142.2	17.4	37.20	-140.6	8.2	29.74	38.2	7.7	8.66	25.3	14.9	27.23	40.6	7.9
5	8	0.54	98.4	54.4	9.31	63.4	13.3	8.90	-102.2	8.8	2.11	-123.8	21.4	8.07	69.7	11.1
	14	0.98	81.2	21.8	12.44	67.9	8.6	14.75	-109.7	6.3	3.88	-117.2	11.8	11.61	68.6	7.5
	20	0.01	8.9	—	11.45	59.6	—	16.20	-109.4	9.3	2.67	-117.1	23.2	13.54	65.4	—
	27	0.27	93.9	—	15.12	65.3	14.3	18.99	-109.2	7.8	3.86	-112.8	18.6	15.97	67.3	11.0
6	8	0.91	-132.5	39.2	4.28	73.9	10.4	12.89	-111.5	6.9	0.21	-172.7	78.8	7.46	69.5	8.7
	14	1.50	-121.7	11.8	6.45	71.3	6.0	18.32	-114.5	5.8	0.17	159.0	58.9	10.80	67.1	5.9
	20	2.56	-124.3	11.6	6.97	71.1	7.4	19.09	-113.6	7.9	0.24	125.3	52.6	10.98	67.4	7.7
	27	1.78	-120.6	14.8	7.42	67.6	12.0	25.80	-112.1	5.2	0.26	-145.5	74.6	14.35	66.8	8.6
7	8	0.23	110.2	24.2	2.72	75.1	8.6	7.96	-112.7	5.7	0.48	-161.0	33.0	4.33	71.7	7.1
	14	0.16	108.4	46.2	4.65	62.6	10.3	11.58	-115.8	5.7	0.22	-156.5	52.4	7.16	63.3	8.0
	20	0.06	130.1	102.2	4.47	61.8	7.9	12.28	-115.0	4.1	0.06	-178.5	92.9	7.35	63.4	6.0
	27	0.18	97.1	21.1	5.90	61.0	13.5	15.41	-119.2	5.7	0.48	-126.1	39.2	9.28	60.5	9.6
9	8	0.10	-50.6	157.7	9.24	-113.8	23.7	15.59	69.0	25.1	1.22	-29.9	79.2	11.73	68.1	24.4
	14	0.18	46.0	72.8	14.44	-114.6	9.2	21.46	67.7	7.5	0.89	-47.8	72.0	17.28	66.1	8.3
	20	0.48	41.2	42.5	16.73	-113.9	20.0	23.19	61.1	14.5	2.08	-63.2	55.7	18.85	62.8	17.3
	26	0.74	62.8	86.1	17.20	-117.9	10.2	26.50	65.8	14.7	1.03	-93.1	12.2	20.54	63.5	12.5

(to be continued)

マグネトテリリック観測から推定される有珠火山の比抵抗構造

Table 1. (continued)

No.	f	$\rho_{xx}$	$\phi_{xx}$	$\Gamma$	$\rho_{xy}$	$\phi_{xy}$	$\Gamma$	$\rho_{yx}$	$\phi_{yx}$	$\Gamma$	$\rho_{yy}$	$\phi_{yy}$	$\Gamma$	$\rho_{eff}$	$\phi_{eff}$	$\Gamma$
10	8	0.10	-116.0	160.7	4.18	-120.9	38.5	10.37	65.6	12.4	0.06	-37.7	315.3	6.60	62.7	25.4
	14	0.05	29.6	107.4	6.45	-110.2	10.9	14.61	68.2	11.8	0.75	-68.5	47.2	9.51	69.0	11.3
	20	0.11	66.9	95.5	5.85	-110.4	12.6	16.84	70.8	14.1	0.31	5.4	459.4	10.00	69.7	13.3
	27	0.04	81.7	135.6	7.83	-115.4	10.6	20.00	67.7	16.6	0.56	-16.0	122.9	12.58	65.8	13.6
11	8	0.02	-99.4	344.0	14.86	-120.9	14.9	5.96	67.0	10.5	0.86	38.4	35.2	9.27	63.1	12.7
	14	0.07	-61.6	124.0	17.75	-113.4	10.2	9.18	67.7	9.1	0.58	61.5	50.3	12.62	66.8	9.6
	20	0.08	5.5	126.2	18.85	-113.3	12.8	11.38	74.3	13.3	0.73	48.5	232.9	14.66	70.0	13.0
	27	0.12	-42.1	146.9	28.00	-118.6	10.4	10.75	67.2	16.7	1.21	46.8	40.2	17.14	63.7	13.5
12	8	10.60	-153.6	38.2	75.08	21.9	19.5	16.60	-144.2	11.1	3.86	-161.0	29.7	41.57	27.9	15.3
	14	9.56	-151.7	29.2	40.87	26.7	18.1	21.71	-145.9	6.2	5.14	-144.9	19.2	36.79	30.6	12.2
	20	10.16	-138.7	21.3	54.66	33.8	11.1	19.40	-143.1	5.4	3.32	-155.9	20.6	38.36	35.0	8.3
	26	5.45	-142.6	41.0	41.44	34.1	7.7	17.18	-138.2	6.0	3.20	-139.2	22.2	30.85	38.1	6.9
13	8	3.56	29.5	17.3	15.74	37.0	13.4	23.30	-138.3	7.2	10.98	-151.1	16.3	13.47	44.0	10.3
	14	3.74	29.5	16.3	20.95	37.6	7.5	27.69	-136.3	8.2	11.40	-154.6	13.7	18.47	45.2	7.9
	20	3.35	29.2	17.4	15.33	39.5	8.0	27.37	-133.1	7.9	5.00	-158.1	18.6	17.31	47.1	7.9
	26	3.49	30.5	16.7	17.30	36.8	7.7	26.46	-132.6	7.6	8.51	-158.2	15.1	17.02	47.0	7.7
15	8	0.52	48.0	38.3	6.94	-113.1	19.8	6.91	64.7	9.0	0.62	-74.1	37.0	6.40	64.8	14.4
	14	1.35	54.6	29.5	9.29	-113.8	14.3	8.81	61.2	8.1	0.27	-42.7	57.2	8.80	62.0	11.2
	20	1.95	40.0	21.9	10.10	-116.7	12.2	7.21	56.5	16.0	0.87	-102.9	54.7	7.23	60.1	14.1
	27	2.23	44.3	22.3	10.25	-120.0	8.8	8.53	55.8	10.6	0.41	-105.5	55.3	8.39	57.8	9.7