



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	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
Author(s)	佐波, 瑞恵; SABA, Mizue; 西田, 泰典 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 67, 25-37
Issue Date	2004-03-15
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.67.25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14331
Type	departmental bulletin paper
File Information	67_p25-37.pdf



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

佐波 瑞恵・西田 泰典

北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

高倉 伸一・松島 喜雄

産業技術総合研究所

茂木 透・鈴木 敦生

北海道大学大学院理学研究科付属地震火山研究観測センター

(2004年1月8日受理)

Monitoring of Ground Temperature, Resistivity, and Self-potential Variations in Geothermal Field of Nishiyama, Usu Volcano

Mizue SABA, Yasunori NISHIDA

Division of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, Hokkaido University

Shin-ichi TAKAKURA, Nobuo MATSUSHIMA

The Geological Survey of Japan, The National Institute of Advanced Industrial Science
and Technology

Tohru MOGI and Atsuo SUZUKI

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

(Received January 8, 2004)

In order to clarify the mechanism of development of the geothermal field which has been formed on the main fracture zone after the 2000 eruptions of Usu volcano, NE Japan, we made repeated measurements of ground temperature, electrical resistivity, and self-potential. Based on the observed results, we concluded the process of the hydrothermal circulation as follows: (1) hot dry vapor goes up along the main fracture (relatively high resistivity of about 100 Ωm beneath the main fracture zone), (2) the vapor is cooled to be liquid phase at shallow depth (low resistivity of nearly 10 Ωm at the surface of the main fracture zone; positive SP anomaly; maximum ground temperature of about 100°C), (3) the liquid flows horizontally (low resistivity at the shallow depth of the surrounding region of the main fracture), (4) the liquid cools down further to form downward flow along the subfracture (low resistive zone penetrates vertically at the subfracture situates one hundred and several tens meter apart from the main fracture). Therefore, the scale of hydrothermal circulation is well controlled

by the distribution of the fractures.

I. はじめに

火山活動に伴う種々のエネルギー放出過程のうち、最も大きなものは熱エネルギー放出であり、主に噴煙と噴気、伝導の過程がある（例えば伊豆大島三原山；Yokoyama, 1957, シベルーチ火山；Tokarev, 1967）。そのなかでも、噴火時においては噴煙による放熱が卓越するが、噴火後は急速に減衰し、代わって噴気地における放熱が優勢となり、長時間積分すると結局、噴気地からの放熱エネルギーが最も卓越することが有珠山 1977-78 年噴火の際実証されている（松島, 1992；Matsushima, 2003）。従って、噴気地の形成過程を研究することは火山熱学のうえで重要である。噴気地の熱エネルギー輸送は主に地下水や蒸気の移動によっている。一方、比抵抗などの電気的な物理量はほかの物理量に比べて最も水の影響を受けやすい。従って噴気地の形成過程を研究する上で、電気的手法を用いることが有力となる。

2000 年 3 月 31 日に始まった一連の有珠山山麓噴火で形成された西山火口及びその周辺部は、噴火以前には地熱兆候のなかった場所である。我々は、そのような場所に新たに形成された噴気地において、地温測定と同時に電気探査、自然電位の繰り返し測定を行った。本報では、それらの観測結果を報告すると同時に、定性的な噴気地の形成モデルを提出する。

II. 有珠山の 2000 年噴火の経緯

有珠山は、噴火湾の北辺、洞爺カルデラの南縁に位置する二重火山である（Fig. 1）。南に開いた馬蹄形の外輪山の頂部には直径 1.6 km×1.8 km の火口があり、内部には溶岩円頂丘（図中 O-Usu と Ko-Usu）と 1977-78 年噴火の際マグマの貫入によって隆起した潜在円頂丘と断層群が存在する。有珠山の噴火は 1663 年以降 2000 年までに 8 回の活動が記録されており、これらの活動

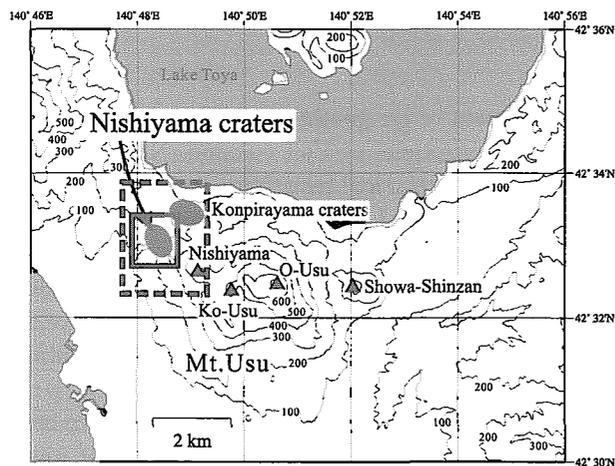


Fig. 1. Topographic map in and around Usu volcano. Contour interval is 100m. Solid triangles represent lava domes formed in the past activities. The 2000 eruptions of Usu occurred within the dashed square. The present study is made within the solid square region.

は一貫して、珪長質マグマの噴出や溶岩円頂丘・潜在円頂丘の形成で特徴づけられる（横山ほか、1973）。

2000年噴火に伴う様々な現象は、主として Fig. 2 で示される領域で起こり、時間的な変遷はその特徴から3つの段階に分けられている（例えば、宇井ほか、2002；三浦・新井田、2002）。

噴火前兆期：1977-78年の山頂噴火以後約23年を経た2000年3月27日、有珠山直下に活発な地震活動が起こり始め、山頂火口原や山麓においては所々地表に割れ目が形成された。最大地震（MJMA 4.6）の有感半径は220 kmにも達している。

噴火期：火山性地震発生の約3日後の3月31日に噴火を開始した。噴火はマグマ水蒸気爆発で、主に西山の西北西及び北側の山麓で多くの小噴火口を形成しながら継続し、それぞれは西山火口群・金毘羅山火口群と命名された（Fig. 1）。活動は最終的に西山火口群はNB火口、金毘羅火口はKA・KB火口に収斂されていった。噴火活動に伴って地割れ群、断層群が2カ所（西山断層群、西山～金毘羅山断層群）で発生した

（Fig. 2）。同時にNE-SWに長軸を持つ楕円形の領域で、最大約70 mの隆起を伴う潜在ドームが形成された（Fig. 2）。この一連の噴火活動は2000年8月頃には衰退期を迎え、隆起活動も鈍化、停止に至った。

地熱域拡大期：噴火衰退とともに西山火口域では西山断層群を中心に次第に地熱活動が活発化し、その面積を拡大しつつ今日に至っている。

噴火及び地熱活動の熱源であるマグマの形状と位置について、三浦・新井田（2002）、岡崎ほか（2002）は、地殻変動を説明するようなモデル計算を行い、シート状のマグマが比較的垂直に地下浅部（約100 m）まで到達したという解析結果を得ている。これらの解析では、応力-変位場の関係を求めるにあたり地下媒体を弾性体と仮定している。このような仮定は地下浅部においては必ずしも妥当ではないが、マグマは地下のかなり浅いところまで到達し、地下水に触れてマグマ水蒸気爆発を起こしたことは違いない。

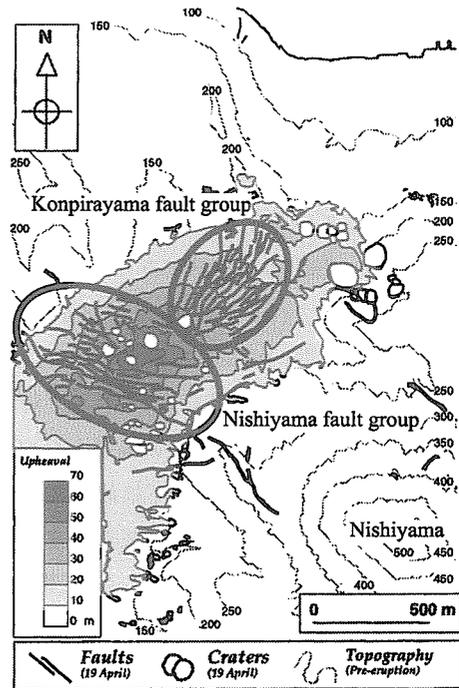


Fig. 2. Distribution of craters, faults, and surface tumescence (cryptodome). The upheaval data were measured at 26 April, 2000 (after unpublished data of Public Works Research Institute). Distribution of the faults and craters are that at 19 April, 2000 (Modified after Miura and Niida, 2000).

III. 地 温 測 定

新たに形成された地熱系の広がりやその温度分布を知る目的で、西山火口群一帯において 1 m 深地温を実施した。測定期間は 2000 年 10 月から 11 月であり、測点数は 131 点であった (Fig. 3 a)。その結果、本測定領域内の北側の、地殻の隆起が最も大きい地域で、沸点を示す約 100°C の高温域が広がっていることがわかった (Fig. 3 a の黒色四角)。また、西山西麓の火口群及び NB 火口周辺では 40~70°C の中温域がみられた (Fig. 3 a の灰色四角)。それらの領域の周辺部では顕著な温度異常は観測されなかった (Fig. 3 a の白色四角)。

地熱活動の時間的消長を把握するために、2002 年 3 月に上記 131 点のうち 11 点で再測を行った。Fig. 3 b に前回との差を、Table 1 に両者の値を示す。断層周辺の高温域は断層沿いに北北西方向に拡大し、最高で約 61°C の温度上昇がみられる。その一方、西山西麓の火口群周辺では顕著な温度低下がみられ、最大低下は約 38°C にも及んでいる。

以上の広域測定に加え、地熱系が発達している西山断層群周辺を精査する目的で、断層の走向方向に直交する測線 A-B を設け、5 m 間隔で 67 cm 深地温の繰り返し測定を行った。Fig. 3 a にその測線を、Fig. 4 a にその測定結果を示す。断層を中心に、横軸の 170 m から 250 m に相当する部分で約 100°C の高温が維持されている。また、350 m 付近でも高温域がみられる。Fig. 4 b に 2001 年 10 月と 2000 年 12 月の差を示すが 150 m 付近及び 320 m から 350 m 付近で温度上昇がみられる。従って高温域は断層沿い北北西方向のみならず、その直交方向にも拡大していったことがわかる。Fig. 4 b には 2002 年 3 月と 2000 年 12 月の差も示してあるが、その値は 2001 年 10 月と 2000 年 12 月の差とほとんど変化していないため、高温域拡大は 2001 年 10 月頃にはすでにピークを迎えていることが示唆される。仮に 2000 年 3 月末の噴火を噴気地形成の出発点とみると、そのピークまで約 1 年半を要したことになる。1977 年有珠山噴火の際の噴気地の時間発展もほぼ同じであり興味深い (松島, 1992 ; Matsushima, 2003)。

IV. 比 抵 抗

1. 高密度電気探査

地下浅部の岩石は主に鉱物や孔隙水で構成され、それらの比抵抗は含水量や温度に強く依存する。従って、比抵抗探査は火山、地熱地帯における地下の水環境を知る上で有力な手段となる。本研究でも、地熱域の時間発展のメカニズムを推定する目的で電気探査を繰り返した。その際、詳細な比抵抗構造を求めするため、電極間隔を最短 5 m と高密度にとった。測線は、III 章の 67 cm 深地温測定測線 A

Table 1. Temporal variation of ground temperature. Site numbers correspond with those shown in Fig. 3(b).

Site Num.	2000/Oct.(°C)	2002/Mar.(°C)
0	13.0	5.0
1	42.0	62.8
2	33.7	94.6
3	50.4	83.1
4	65.0	97.6
5	87.9	97.6
6	30.7	43.7
7	44.3	15.3
8	41.4	12.7
9	52.1	14.3
10	48.8	13.2

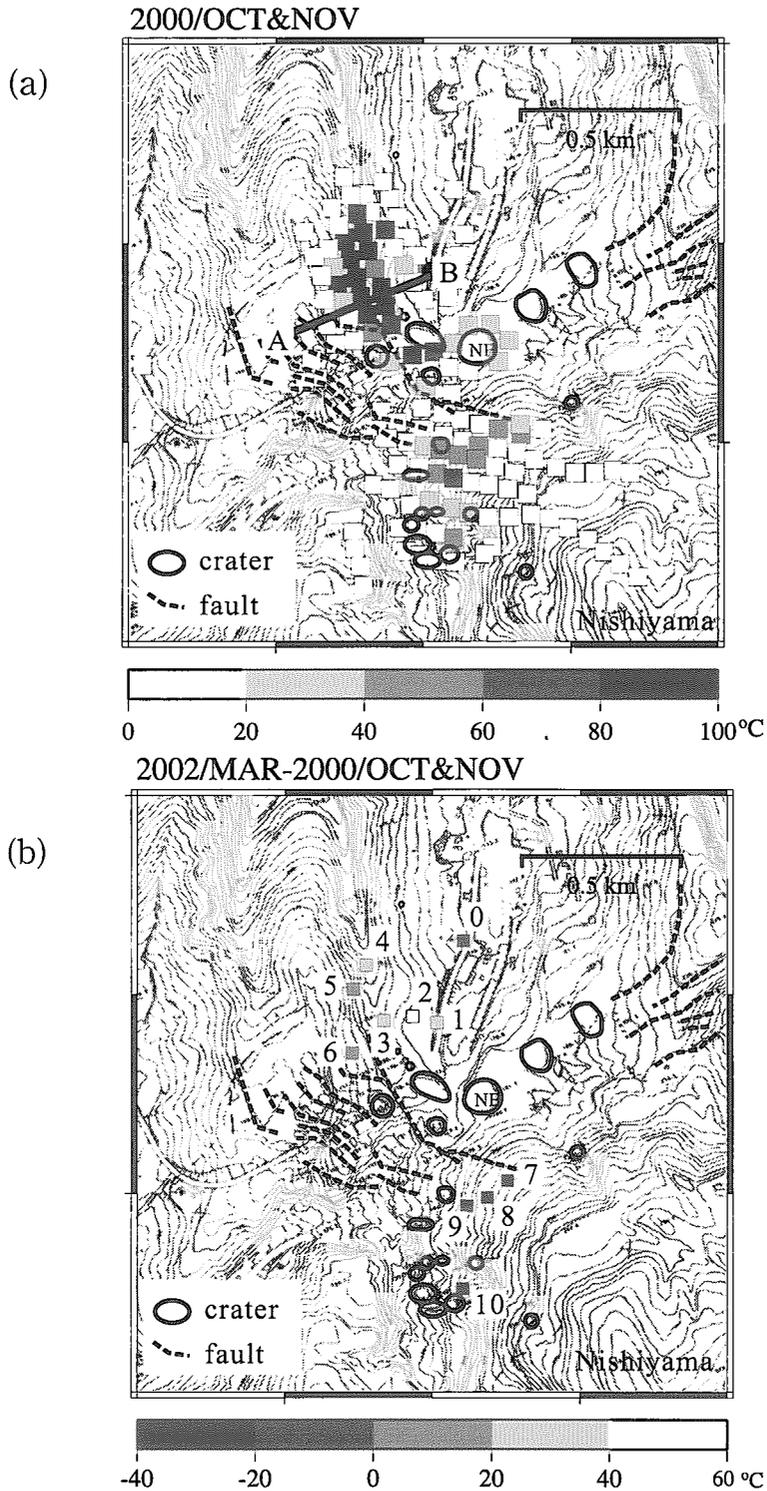


Fig. 3. (a) Ground temperature distribution at a depth of 1m (October-November, 2000).
 (b) Time difference of the ground temperature between March, 2002 and Oct.-Nov., 2000.

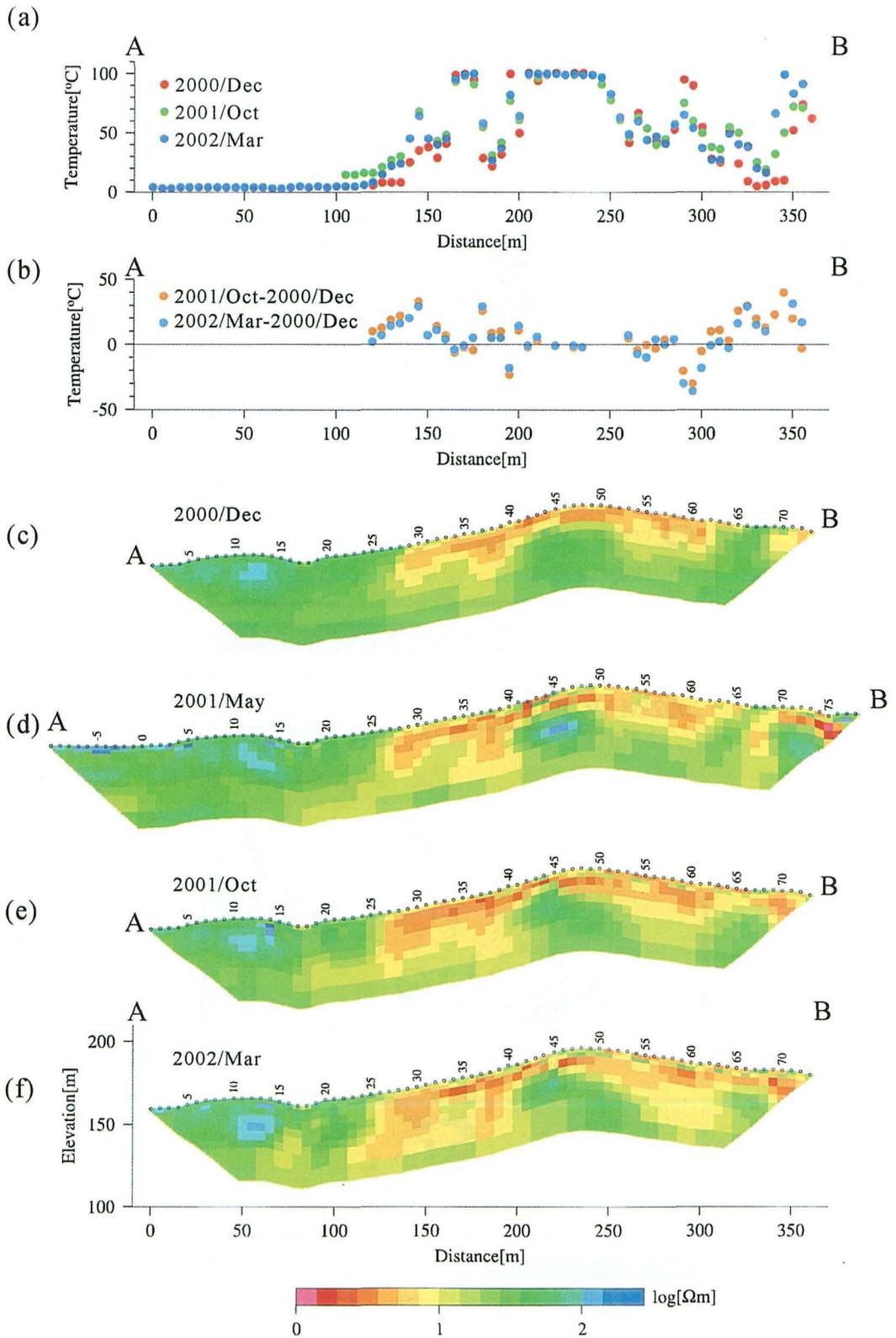


Fig. 4. (a) Ground temperature at a depth of 67 cm along the measurement line A-B shown in Fig. 3 (a). (b) Temporal variation of ground temperature along the A-B line. (c), (d), (e) and (f) show the temporal variation of the resistivity structure along the A-B line. Horizontal scale and position are common to all figures.

-Bと同一である。測定システムは多数の電極、多芯ケーブル、電流・電圧測定装置で構成されており、信号を1つのスイッチボックスに集めることによって、電流電極と電位電極の組み合わせを容易に集中制御できるように工夫されている。2000年12月、2001年10月および2002年3月の3回の測定はDipole-Dipole法およびWenner法を併用した。測線長は360mである。また2001年5月には、同じ測線でEltran法とWenner法を併用した測定を行った。この時の測線長は440mである。これらの電気探査の測定要領はTable 2に示されている。このなかでデータ数とは、次に示すデータ解析に用いられた見掛け比抵抗の組み合わせの数である。

測線の直交方向に一様な構造を仮定した2次元解析を行うこととし、内田(1993)による平滑拘束インバージョン法を応用した。計算に必要な初期構造を一様に10Ωmとし、Dipole-Dipole法、Wenner法、Eltran法による様々な電極組み合わせから得られる全ての見掛け比抵抗値を満足するように構造を変えて、10回の反復計算の結果、地下比抵抗構造が推定された。

2. 比抵抗構造とその解釈

Fig. 4の(c), (d), (e), (f)は、4回の測定で得られた比抵抗構造を時間順に並べたものである。まず噴火半年後の2000年12月の比抵抗構造(Fig. 4c)の特徴を概観すると、(1)表層において、電極番号28-66、71-73付近に、最大地下約20m深まで10Ωm以下の低比抵抗域が分布している。この分布は同時期の高地温域(Fig. 4a)と極めて良く対応している。また電極番号30および38前後2カ所で、低比抵抗域が地下深部の方向に貫入しているように見えるのも特徴的である。この傾向は、2001年5月(Fig. 4d)の結果でさらに顕著になっている。(2)上記高地温-低比抵抗域の下部に、100Ωm近い相対的高比抵抗域が地下約15mまで盛り上がっている(電極番号40-52)。(3)電極番号1-25付近に数10-100Ωmの領域が分布する。この領域には顕著な温度異常が見られないことから、噴火や地熱活動にあまり影響されない元々の比抵抗値を示していると思われる。(4)測線全域の約50m以深には、数10Ωm程度の層が分布している。

その後の比抵抗構造の時間変化は極めて顕著であり、地熱系の時間発展の経過とよく対応して

Table 2. Specifications of electrical prospecting.

date	measurement length[m]	electrode arrangement	electrode spacing[m]	number of data	Figure No.
2000/Dec.	360	Dipole-Dipole	5,10,20,30,40,60,80	588	Fig. 4(c)
		Wenner	5,10,20,30,40,60,80	143	
2001/May	440	Eltran	5,10,15.....,95	1005	Fig. 4(d)
		Wenner	5,10,15.....,95	1005	
2001/Oct.	360	Dipole-Dipole	5,10,15,20,30,40,60,80	690	Fig. 4(e)
		Wenner	5,10,15,20,30,40,60,80	174	
2002/Mar.	360	Dipole-Dipole	5,10,15,20,30,40,60,80	690	Fig. 4(f)
		Wenner	5,10,15,20,30,40,60,80	174	

いる。先に述べたように、高地温域は2001年10月にかけて断層の直交方向にも拡大した(Fig. 4 b)。それに対応して Fig. 4 d,e,f で示すように、低比抵抗域が電極番号30および70付近から次第に上記(3)の平温域に進出している。同時に、2カ所の低比抵抗の深部への貫入がさらに進行し、かつ水平方向へも拡大していることが特徴的である。前述(2)の高比抵抗域の盛り上がりは、2002年3月にかけて次第にその境界が曖昧になり、比抵抗値も低くなる傾向にある。

比抵抗構造の空間的、時間的変化をもとに、地熱域の発展過程を推定すると以下の通りになる。2000年3月の噴火の際貫入したマグマによって地下水が過熱蒸気化し、周囲を暖めながら断層に沿って地表近くまで上昇したと考えられる。高比抵抗域の盛り上がりは、それにより形成された過熱蒸気溜まりと見なされる。我々は2000年10月の温度測定の際、高温域の一部で100℃を越す噴気を観測したが、このことは地下に過熱蒸気溜まりが存在する直接的証拠と見なされる。1977-78年有珠山噴火の際にも、マグネトテルリック法により、山頂火口原の断層直下に高比抵抗域が存在することが確認されている(Ballestracci and Nishida, 1987)。これは断層沿いに上昇してきた高温の火山ガスによって火口原堆積物が乾燥し、いわば日干し煉瓦ようになった為と解釈されている。

過熱蒸気はその浮力によって上昇し、一部は大気中に放出され、また大部分は地表付近の水と混合すると同時に、低温の天水の浸透、大気による冷却のため熱水を形成したと考えられる。そしてその熱水が地形の斜面に沿って流下した結果、表層付近の高地温、低比抵抗層が形成されたと解釈される。電極番号30および38前後に見られる低比抵抗層の下部への貫入は、透水性の良い断層が伏在し、それを伝って熱水が下降していることを示唆する。それらの様子を概念的に示したものが Fig. 5 である。下降流は時間とともに周辺に浸透・拡散し、電極番号25-40の間の比

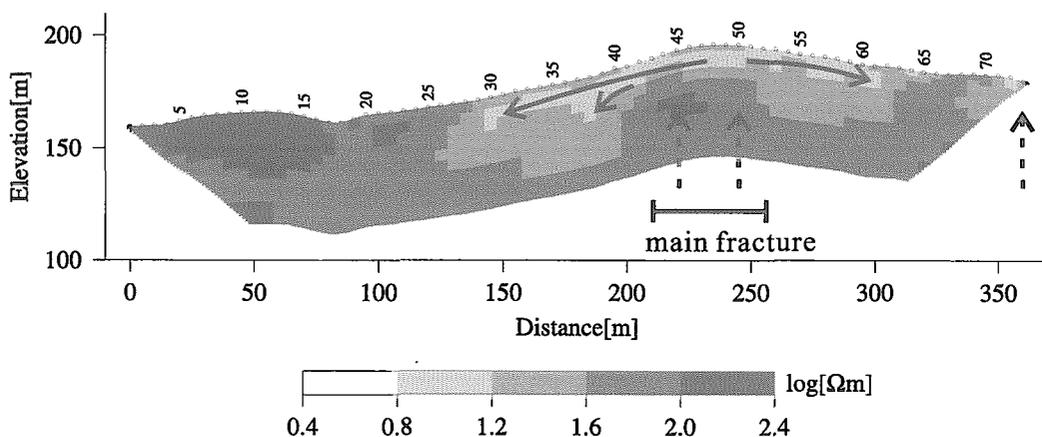


Fig. 5. Schematic flow pattern is superimposed on the resistivity structure in December, 2000 (Fig. 4 (c)). Dashed arrows show the super-heated vapour flow, while solid arrows show the liquid phase water flow.

較的深部の低比抵抗域の拡大に寄与したものと推定される。

過熱蒸気溜まりと推定される高比抵抗域は、マグマの冷却に伴い高温ガスの供給が先細ったため、温度低下および蒸気圧の低下をもたらし、周辺からの地下水の侵入を許したのであろう。そのため、高比抵抗域の輪郭が曖昧になると同時に、比抵抗値が低下したものと推定される。以上述べた熱水対流系のスケールは水平方向に高々百数十メートルであるが、そのスケールは断層の空間分布に極めて強く依存しているものと思われる。

V. 自然電位

自然電位法は前章の比抵抗探査が用いられる以前、最古の電気探査法として20世紀中頃まで鉱床探査に用いられていた。しかし、自然電位の発生機構は鉱床における電気化学効果のほかに、界面導電効果、熱起電力効果など多様であり、測定結果の解釈が困難であることに加え、地震、重力、電磁探査法などほかの探査法が発展したため資源探査法として用いられることが少なくなった。しかしながら界面導電効果を基礎におけば、自然電位は地下水の流動過程に関係することから、近年火山、地熱地帯での熱水活動や放熱過程を推定したり、その時間変動をモニターするための有効な手段として復活してきた。地球内部現象に適應した界面導電効果(又は流動電位)とは、多孔質媒質である岩石中の固・液境界に電気二重層が形成され、一般には液体側に拡散する正の電荷が、圧力勾配に従って流動する液体とともに移動する結果、地表に電位分布を生じせしめることを云う(例えば、Nourbehecht, 1963)。この効果のため、自然電位は地下水流動の指標になり得ることがわかってきたのが復活の原因である。石戸(1981)はモデル計算で熱水上昇域に100 mV オーダーの電位異常が生じることを示し、観測ではハワイ(Zablocki, 1976)、有珠火山(Nishida and Tomiya, 1987)、三宅島(西田ほか, 1996; Sasai et al., 1997)、雲仙普賢岳(Hashimoto and Tanaka, 1995)、レユニオン島のピトン・ドゥ・ラ・フルネイズ火山(Zlotnicki et al., 1994)などでは数百 mV を越す正異常が観測されることがその好例である。

本地域においても、地熱系発達の要因となる地下熱水対流系の消長を知る目的で、銅-硫酸銅(Cu-CuSO_4)電極および高インピーダンス電位計を用いた自然電位の繰り返し測定を面的に行った(Fig. 6)。値は地熱徴候のみられないG点を仮の基準とし、それからの相対値の形で示されている。測定範囲の南東部は西山の山麓部にあたり、幅広い振幅の負の異常が分布している。Fig. 7に示すように、この異常は測点高度が増すにつれ電位が減少する(約 -2.5 mV/m)典型的な地形効果(例えば、Ishido, 1988; Zlotnicki and Nishida, 2003)を示しており、地熱活動とは無関係と認定される。従ってFig. 6では一括して白抜きの四角で示すこととし、本論文では議論の対象としない。

多くの火山で見られる数100 mVの異常に比べ、本測定領域の異常はさほど顕著ではないが、西山断層群で地熱活動に伴う正の電位異常が測定されており、その場所が熱水上昇域であることを示している。すなわち、断層の北北西に見られる数10 mVの異常がそれである。この領域の最大値は、2000年10-11月には約25 mV (Fig. 6 a)であったが、2001年6月には42 mV (Fig. 6 b),

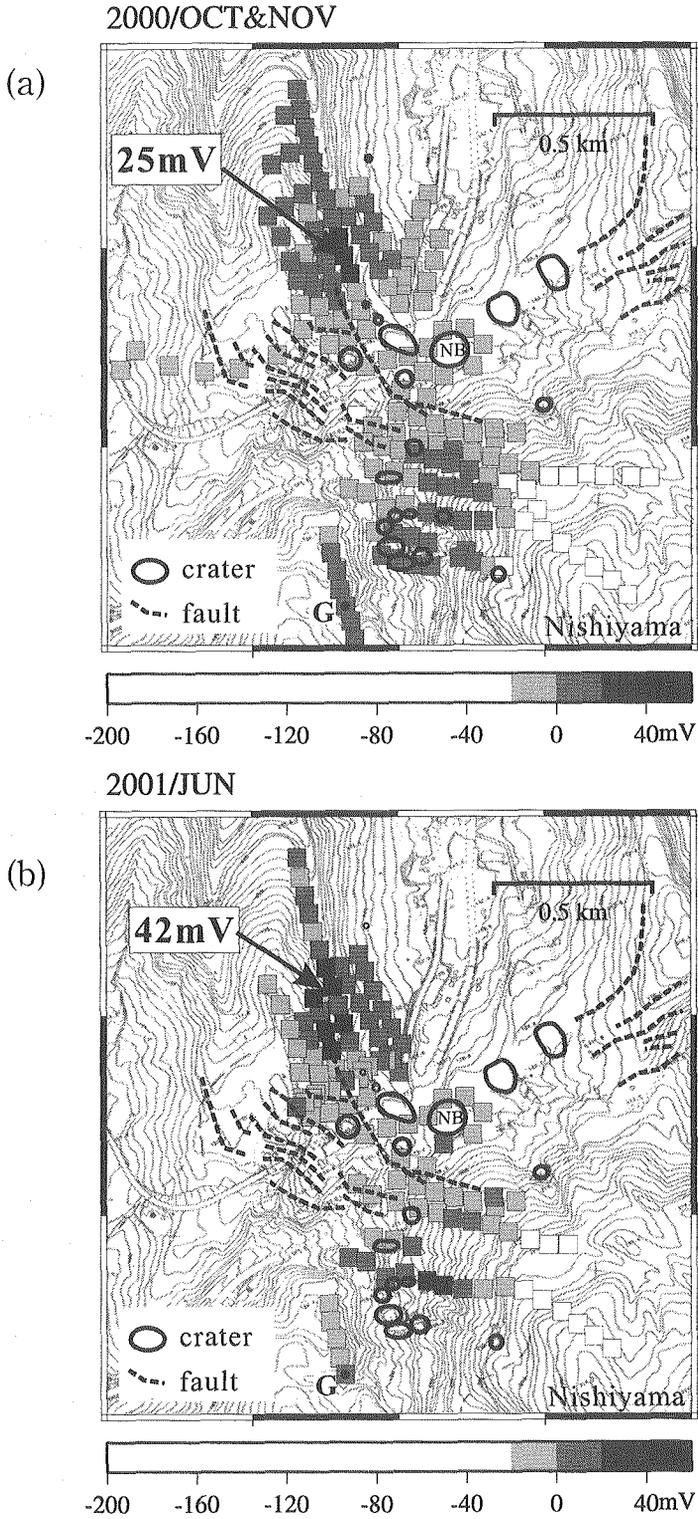


Fig. 6. Temporal variation of self-potential anomalies relative to the reference station G. (a) October-November, 2000, (b) June, 2001, (c) March, 2002.

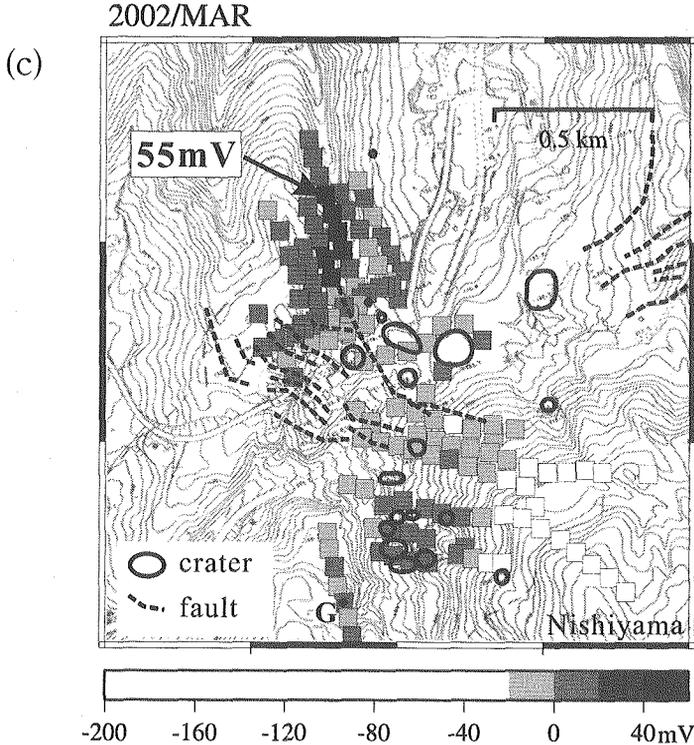


Fig. 6. (continued)

2002年3月には55 mV (Fig. 6 c)と、振幅を増しながら異常域が北北西に百数十メートル移動していている。この傾向はIII章で示した高地温域の拡大傾向と極めてよい一致を示している。

一方、2000年噴火時の西山火口群やNB火口では、予想に反して顕著な自然電位異常は観測されない。このことは先に述べた西山火口群およびNB火口付近の地温低下に対応しているように見える。自然電位測定開始が噴火後半年以上後であったため確定的なことは云えないが、マグマの冷却により放出された高温火山ガスは断層沿いに北北西方向に有効に伝搬する一方、直上の火口は自らの噴出物に覆われて地表への熱の伝搬が妨げられたため、表面熱活動が急速に衰退するとともに熱水対流を駆動する能力を失った結果、自然電位異常も認められなくなったのではないかと推定される。

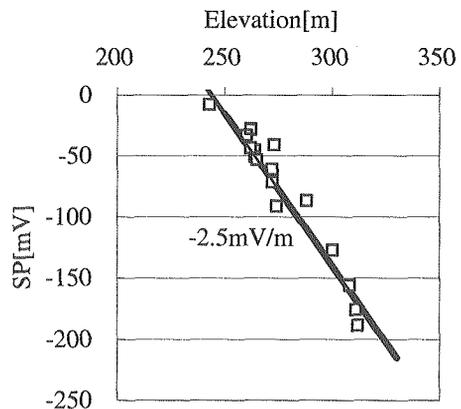


Fig. 7. Self-potential values are plotted against ground elevation along the foot of Mt. Nishiyama.

VI. ま と め

2000年有珠山噴火によって形成された西山火口域における熱活動の実体とその推移を捉えるために、2000年10月から2002年3月にかけて、地温、高密度電気探査、自然電位の繰り返し測定を行った。その結果以下のことが明らかになった。

(1)西山火口群やNB火口付近の地温は測定初期に比較して急速に低下している。このことは付近に顕著な自然電位異常が認められないことと対応している。

(2)西山断層の約15m直下に、高比抵抗で特徴づけられる過熱蒸気溜りの存在が確認された。

(3)断層付近の表層には広く高地温-低比抵抗層が存在するが、(2)で示した蒸気溜りから上昇した水蒸気が地表付近で冷却されて液化し、水平方向に流動拡散した結果生じたものと推定される。この水平方向への流動は、断層から百数十メートル離れた場所に伏在すると思われる断層沿いに、下降流として地下へ浸透していることが比抵抗分布から推定された。

(4)地熱活動は、西山断層に沿って北北西方向へ進行し現在も活発であることが、自然電位、地温測定結果から判明した。しかし高比抵抗で象徴される蒸気溜りの境界が不明瞭化すると同時にその比抵抗値が低下する傾向にあるので、その最盛期は過ぎて周辺の地下水の侵入を許し、低温化しつつあると考えられる。

本報における熱的過程に関する解釈は定性的なものであり、かつ一部にはかなりのスペキュレーションを含んでいる。今後はさらに観測を加えてこのことを確かめると同時に、熱水対流系のシミュレーションなどを通して、定量的な吟味に耐えられる解釈を行う必要がある。

謝辞 本論文中の図中に引用されている地形コンターは、総合観測班地質グループ・北海道室蘭土木現業所によるものである。観測に際し、北海道大学地震火山研究観測センターの大島弘光助教授には貴重な助言をいただいた。また、谷元健剛、田村 慎、杉崎康弘、大前幹夫、野口科子および渡辺友浩の各位には観測における労力をたまわった。深く感謝します。

文 献

- Ballestracci, R. and Y. Nishida, 1987. Fracturing associated with 1977-1978 eruption of Usu volcano, north Japan, as revealed by geophysical measurements, *J. Volc. Geotherm. Res.*, **34**, 107-121.
- Hashimoto, T. and Tanaka, Y., 1995. A large self-potential anomaly on Unzen volcano, Shimabara peninsula, Kyushu island, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 191-194.
- 石戸経士, 1981. 地熱水対流に伴う流動電位-地熱地域における自然電位異常の1つのメカニズムとして-、日本地熱学会誌, **3**, 87-100.
- Ishido, T., 1988. Self-potential generation by subsurface water flow through electrokinetic coupling, *in Detection of Subsurface Flow Phenomena, ed. by Merkle, G. P. et al.*, Springer-Verlag, Lecture Notes in Earth Sciences, **27**, 121-131.
- 松島喜雄, 1992. 活動的火山における熱学的研究, 北海道大学博士論文, 88 pp.
- Matsushima, N., 2003. Mathematical simulation of magma-hydrothermal activity associated with the 1977 eruption of Usu volcano, *Earth Planets Space*, **55**, 559-568.

- 三浦大輔・新井田清信, 2002. 有珠火山 2000 年噴火における岩脈貫入過程と潜在ドームの形成メカニズム, 火山, 第 2 集, **47**, 119-130.
- 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.
- 西田泰典・佐藤秀幸・宇津木 充・村上英記・網田和宏・田中秀文・J. Zlotnicki・P. Yvetot・P. Morat・笹井洋一・石川良宣, 1996. 三宅島火山の自然電位分布 (序報), Conductivity Anomaly 研究会 1996 年 論文集, 248-253.
- Nourbehecht, B. 1963. Irreversible thermodynamic effects in inhomogeneous media and their applications in certain geoelectric problems, Ph.D Thesis, Mass. Inst. Technol., 121pp.
- 岡崎紀俊・高橋浩晃・笠原 稔・石丸 聡・森 濟・北川貞之・藤原健治・中禮正明, 2002. 高密度 GPS 観測による 2000 年有珠山噴火の地殻変動, 火山, 第 2 集, **47**, 547-557.
- Sasai, Y., J. Zlotnicki, Y. Nishida, P. Yvetot, P. Morat, H. Murakami, Y. Tanaka, Y. Ishikawa, S. Koyama and W. Sekiguchi, 1977. Electromagnetic monitoring of Miyake-jima Volcano, Izu-Bonin arc, Japan : A preliminary report, *J. Geomag. Geoelectr.*, **49**, 1293-1316.
- Tokarev, P. I., 1967. The giant eruption of the Shevluch on November 12, 1914 and its forerunners, *Izv., Earth Physics*, **9**, 572-579.
- 内田利弘, 1993. ABIC 最小化法による最適平滑化拘束の比抵抗法 2 次元インバージョン, 物理探査, **46**, 105-119.
- 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, 第 2 集, **47**, 105-117.
- Yokoyama, I., 1957. Energetics in active volcanoes, 2nd paper, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **35**, 75-97.
- 横山 泉・勝井義雄・大場与志男・江原幸雄, 1973. 有珠山: 火山地質・噴火史・活動の現況および防災対策, 北海道防災会議編, 254 pp.
- 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*, San Francisco, **2**, 1299-1309.
- Zlotnicki, J., S. Michel and C. Annen, 1994. Self-potential anomalies and convective systems on la Fournaise volcano (Reunion island, France), *C.R. Acad. Sci. Paris*, **318** (2), 1325-1331 (in French with extended English abstract).
- Zlotnicki, J. and Y. Nishida, 2003. Review on morphological insights of self-potential anomalies on volcanoes, *Surv. Geophys.*, **24**, 291-338.