

霧島火山群・硫黄山周辺の VLF, ELF-MT 測定

鍵山恒臣・山口勝・増谷文雄・歌田久司

東京大学地震研究所

(1994年9月16日受理)

VLF, ELF-MT survey around Iwo-Yama, Kirishima Volcanoes

Tsuneomi KAGIYAMA Masaru YAMAGUCHI, Fumio MASUTANI
and Hisashi UTADA

Earthquake Research Institute, University of Tokyo

(Received September 16, 1994)

Abstract

The volcanoes of Kirishima, located in southern Kyusyu, are a group of more than 20 volcanoes. At least three volcanoes have historic records of eruptions, and more than 10 volcanoes have been active within the past 22,000 years. This indicates that Kirishima is a multi-active volcanic group. According to seismological investigations, the Kirishima area is subject to NW-SE extensional stress; slight extensional stress is favorable for a fault system that allows magma to ascend at various points. For this reason, a multi-active volcanic group was generated in this area instead of a large stratovolcano. Therefore, it is interesting to reveal the structure and the magma supply system of the Kirishima volcanoes. From these aspects, a VLF and ELF magnetotelluric survey was carried out to clarify the electrical resistivity structure around Iwo-Yama, which is the newest volcano and has the most active geothermal area in Kirishima.

According to the VLF, ELF-MT survey, a low resistivity layer ($< 30 \Omega \cdot m$) is found throughout the Kirishima area beneath the more resistive surface layer, which is about 100 m thick. This low resistivity layer is interpreted as a water saturated porous layer with wide distribution around Kirishima. The resistivity of the saturated layer is found to have resistivity is higher than $10 \Omega \cdot m$ in the thermally normal area apart from Iwo-Yama, while it is less than $3 \Omega \cdot m$ on and around Iwo-Yama. The summit zone, which shows 2 or $3 \Omega \cdot m$, is enclosed by an extremely low resistive ($1 \Omega \cdot m$) zone. These zones correspond to the high temperature fumarolic zone at the summit, and the low temperature steaming ground around the summit, respectively. These evidences suggest the following geothermal model; an extremely low resistive and acid hydrothermal zone is created just around the summit by the interaction of water in the saturated layer and high temperature volcanic gas supplied from beneath Iwo-Yama. The depth of the heat and gas source is estimated to be about 10 km from another investigation by ULF-MT presented in this issue.

1. はじめに

霧島火山群は、加久藤カルデラの南東部に噴出した多数の火山の集合体である。これらの火山の多くは、数10年から数1000年という地学的にはほぼ同時と言える短い時間間隔において活動しており、これらの火山へのマグマの供給がどのように行われているかは興味ある問題である（鍵山，1994a, b）。硫黄山は、霧島火山群の中央部、韓国岳の北西に位置し、1768年の噴火で誕生した霧島火山群で最も新しい火山である。また熱的に最も活発な火山で、山頂およびその周辺には活発な地熱地帯が分布している。これらの熱エネルギーの源がどこに存在し、どのようにして地表に放出されているかは大変興味のあるところである。この地域の地表における熱分布は詳しく調べられており（鍵山他，1979, 1987），地下の状況が明らかにされれば、地表における地熱活動の分布がどのような地下構造に対応しているかも明らかになるであろう。MT法による電気抵抗構造調査は、近年、伊豆大島や三宅島などの火山に適用され、帶水層や熱水に対応すると思われる低比抵抗域の分布状況が明らかにされており（UTADA *et al.*, 1989; 歌田他, 1987），この種の目的に有力な研究手法であることが実証されている。霧島においても、PAREJA *et al.* (1987, 1988a, b) により、VLF, ELF-MTによる調査が行われ、霧島火山群の広範囲に低比抵抗域が広がっている事が確かめられた。しかし、この調査に使用された ELF-MT 装置では、霧島のような低比抵抗域で必要とされる微弱な電位差をノイズの中から正確に観測する手法が確立されていなかったので、構造を議論するに十分な精度のデータは得られなかった。この調査の後、歌田他 (1990) により、高精度の可搬型 ELF-MT 装置が開発され、同装置による硫黄山周辺の電気抵抗構造の高精度の探査を行ったので、その結果を報告する。

2. 硫黄山の概要

Photo 1 に、北西上空から見た硫黄山を、Fig. 1 に、IMURA (1992) による霧島の地質図から硫黄山周辺を拡大した図を示す。硫黄山を特徴付ける地形として、韓国岳の北西側に爆裂火口があり、その周辺には、韓国岳山体の崩壊堆積物がある。また、この爆裂火口と北西の白鳥山との間には不動池、六觀音池、白紫池などの火山が並び、硫黄山は韓国岳爆裂火口と不動池との間に生成されている。山頂には直径100m程度の火口があり、北側に300m程度の短い溶岩流を流している。山頂の南東方向には小規模な火口と思われる凹地が点在し、その延長には韓国岳爆裂火口がある。また、硫黄山の北東側および西側には上記の韓国岳の山体崩壊堆積物がひろがっており、この一帯はえびの高原と呼ばれている。この地域では、これまでにも熱分布を中心に研究が行われており（鍵山他，1979, 1987），Fig. 2 のような結果が得られている。それによると、150°C以上の高温の噴気孔は山頂部に限られ、水の沸点程度の低温の噴気地帯が硫黄山の西側、および北東側に分布している。これらの噴気地を囲むように3°C以上の地中温度異常が広がり、さらに1~2°Cの地中温度異常がえびの高原の西側へ伸びている。えびの高原西部には、かつて噴気地が広がっていたが（MINAKAMI *et al.*, 1968），現在は全く異常が見られない。硫黄山山頂部の噴気による熱エネルギー放出率はPlume rise法により61MW（鍵山他, 1979），その周辺の地熱地域からの熱エネルギー放出率は、赤外映像装置による地表面温度分布および地中温度分布調査から4MW程度と推定されている（鍵山他, 1987）。

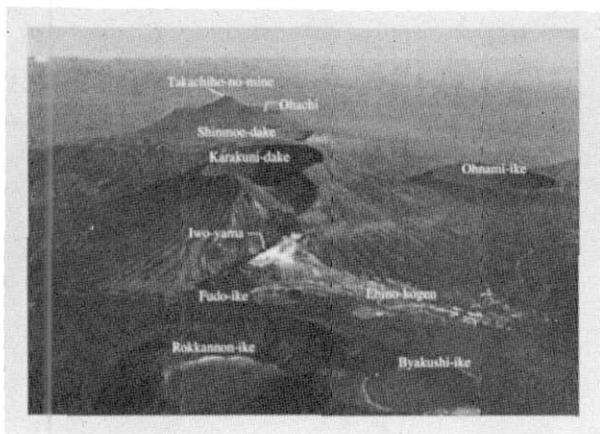


Photo. 1 Aerial view of Iwo-Yama and other volcanoes in Kirishima from northwest.

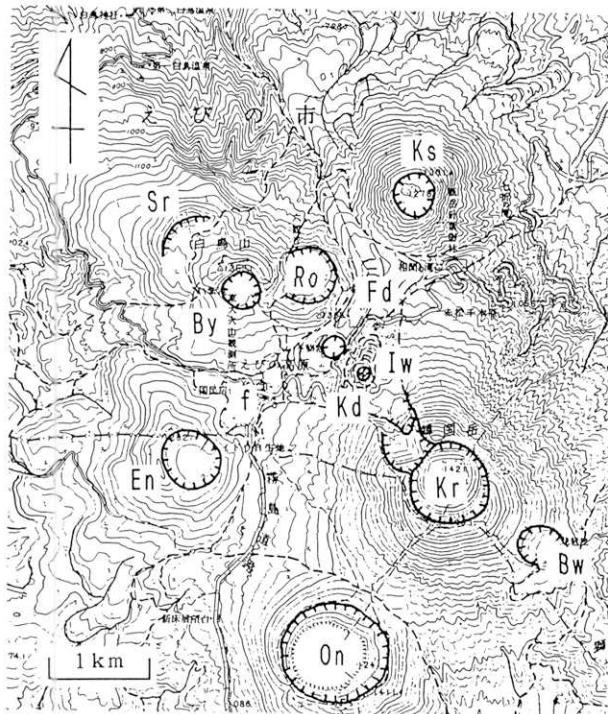


Fig. 1 Geological map around Iwo-Yama (Imura, 1992). Sr:Shiratori-Yama By:
Byakushi-Ike Ro:Rokkannon-Ike Fd:Fudo-Ike Iw:Iwo-Yama Ks:Koshiki-Dake
En:Ebino-Dake Kr:Karakuni-Dake Bw:Biwa-Ike On:Onami-Ike Kd:Karakuni-
Dake debri avalanche f:Fan deposit

3. VLF, ELF-MT の観測結果

VLF, ELF-MT の観測にはテラテクニカ社の VL-101, EL-529 を使用した。以下にそれぞれの結果を示す。

3-1. VLF-MT の結果

霧島全体の VLF-MT による比抵抗分布 (PAREJA *et al.*, 1987) によれば、硫黄山周

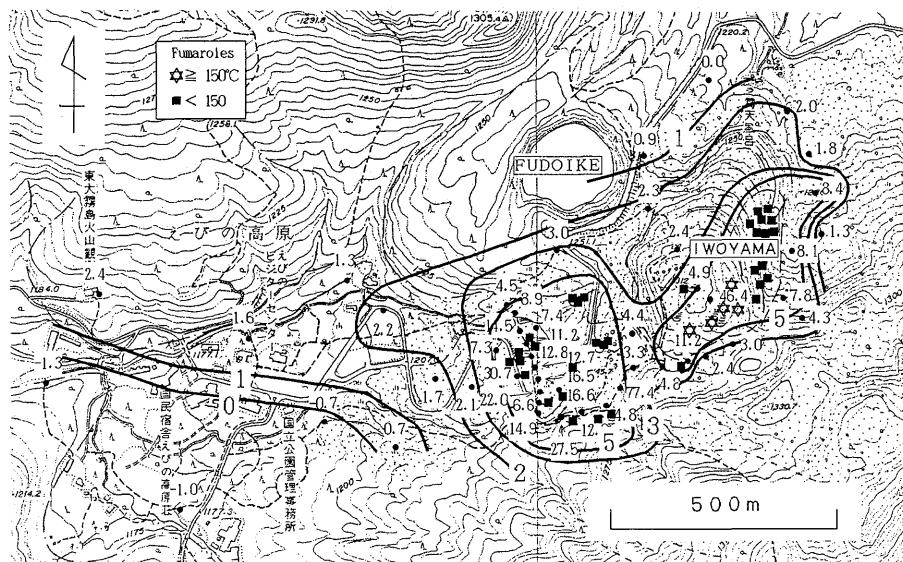


Fig. 2 Distribution of ground temperature anomaly at 1m depth in degree. Solid square and star represent major fumaroles around Iwo-Yama.

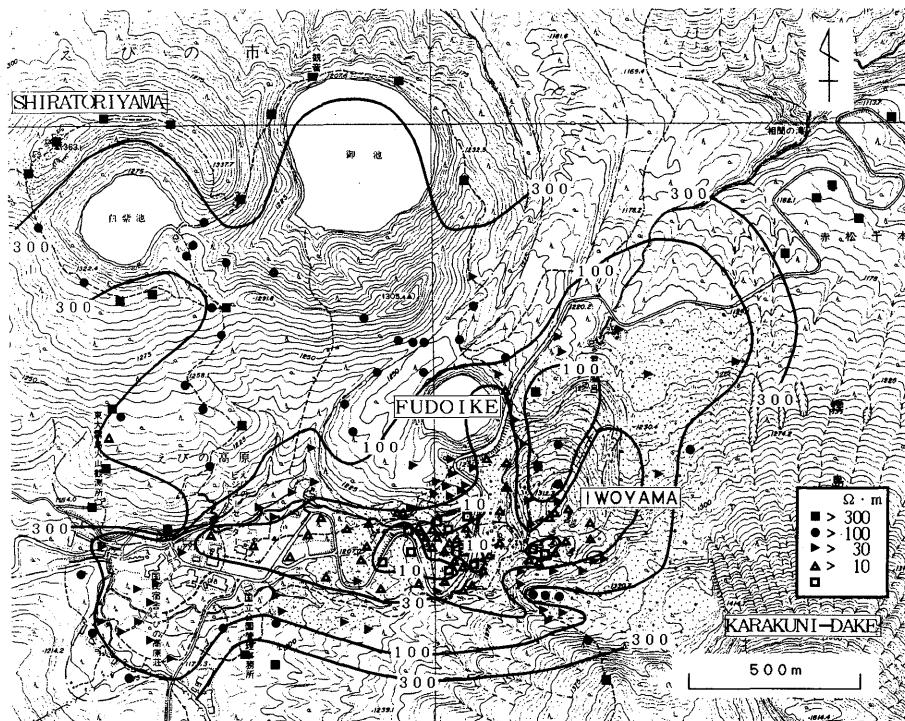


Fig. 3 Distribution of apparent electrical resistivity by VLF-MT.

辺は、 $300\Omega \cdot \text{m}$ 以下の低比抵抗域となっている。硫黄山周辺のより詳細な分布を、Fig. 3に示す。これらの測定値は、後に示す ELF-MT の測定点においては、おおむね

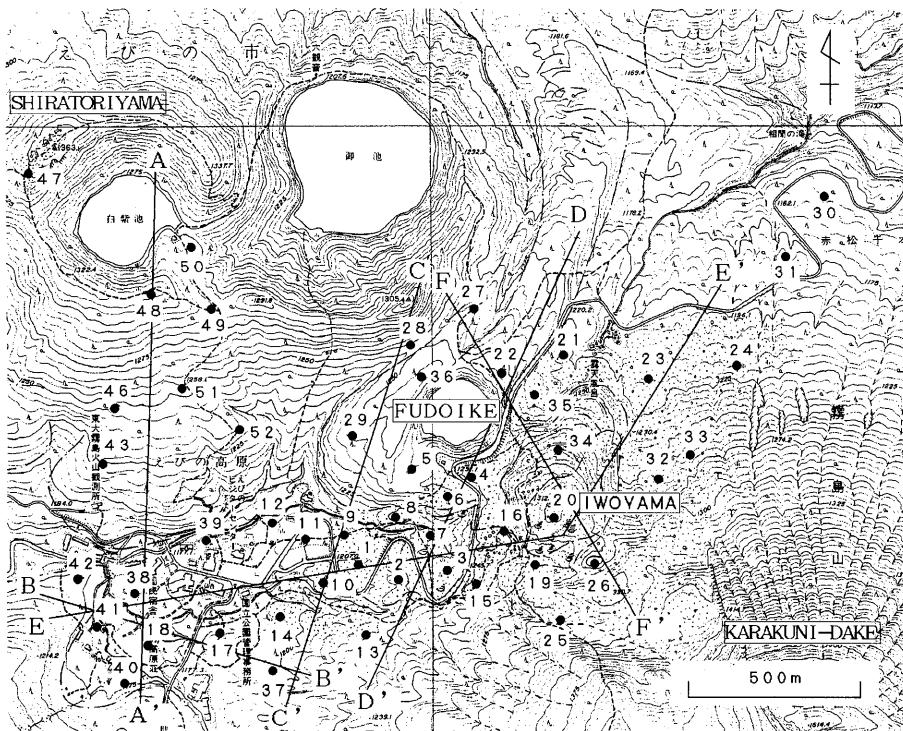


Fig. 4 Observation sites of ELF-MT around Iwo-Yama. Numerals indicate site No.

The lines, A-A', B-B' and others indicate the cross section of the resistivity structure presented later.

半径30m以内の3点の測定結果の平均値、それ以外の点においては1点の測定値である。この地域の大部分が $300\Omega \cdot m$ 以下を示すが、硫黄山の西および北東方向に $100\Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗域が延び、特に硫黄山西側の噴気地帯において $10\Omega \cdot m$ 以下のきわめて低い比抵抗値が観測された。一方、硫黄山北側の溶岩流に覆われた部分では $100\Omega \cdot m$ 以上と相対的に高い比抵抗値を示している。また、不動池より北西側の山体では比抵抗値は高くなっている。こうした分布の特徴は、Fig. 2 の地中温度分布ともよく対応し、温度異常のない部分では $100\Omega \cdot m$ 以上、温度異常のある部分ではそれ以下を示す。その中でも、硫黄山の西側などの熱変質を受けた堆積物に覆われた部分では、 $30\Omega \cdot m$ 以下と、特に比抵抗値が低くなり、溶岩の隙間から高温の噴気が噴出している山頂部では、相対的により高い値を示している。

3-2. ELF-MTの結果

ELF-MTは、Fig. 4に示す50点において測定を行った。データは歌田他(1987, 1994)に示される過程で処理を行い、文末のTable 1に示す結果を得た。1990年11月以降の観測では、それまでの8, 14, 20Hzに加え、26ないし27Hzの結果も得られるようになったため表に示している(26, 27Hzはその時の電磁場の状況からより精度のよい結果を採用している)。8Hzにおける見かけ抵抗の分布をFig. 5に示す。硫黄山および不動池、えびの高原の一帯は、その周囲の白鳥山、六觀音池や韓国岳と比較して、 $10\Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗域となり、地形的により低い硫黄山の西側および北東側に延び

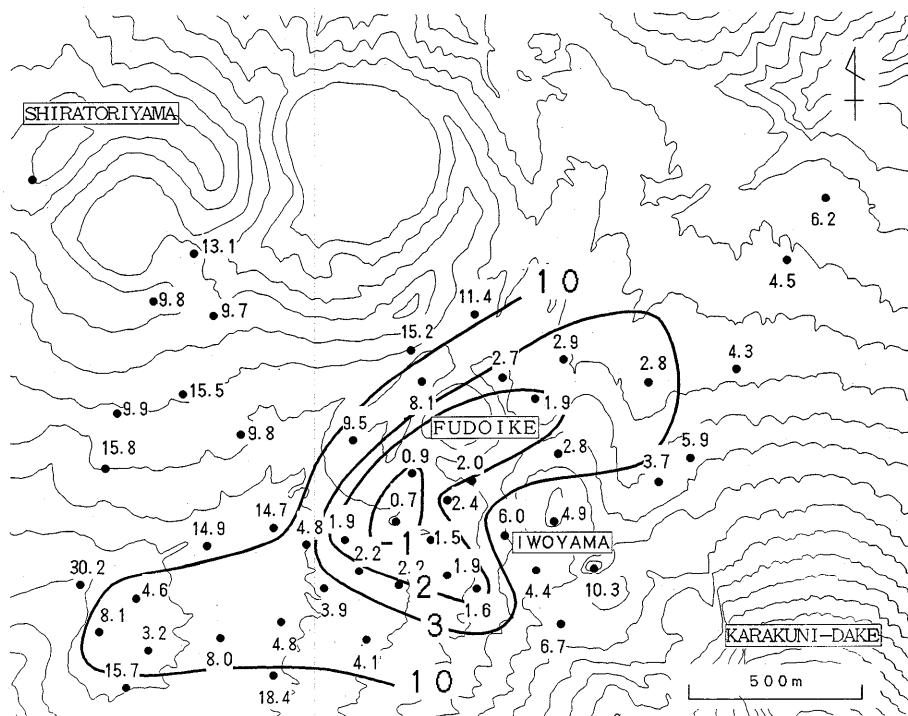


Fig. 5 Distribution of apparent electrical resistivity in 8 Hz by ELF-MT. Unit in $\Omega \cdot m$.

る形状を示している。この低比抵抗域の中でも硫黄山の山頂火口部そのものは、4~ $5\Omega \cdot m$ とやや高い比抵抗値を示し、その周囲を $3\Omega \cdot m$ 以下のきわめて低い比抵抗域が囲んでいる。特に不動池の南では $1\Omega \cdot m$ と最小の値を示す。

3-3. VLF, ELF-MT により推定される電気比抵抗構造

ELF-MT の結果に VLF-MT の結果を加え、歌田他 (1987, 1994) に示す方法で 3 層モデルによる 1 次元の電気比抵抗構造を推定した。計算結果は文末の Table 2 にまとめて示す。表中の比抵抗および層の厚さに続く括弧内の数字はそれぞれの信頼限界を示し、Error の項は、モデルと観測値との差の自乗和を示している。以下に特徴的な地域ごとに結果を説明する。

a) 硫黄山西麓の噴気地

KV01, 02, 03, 07, 09, 15 は、硫黄山西麓の平坦地にあり、韓国岳の崩壊堆積物に覆われている。付近一帯には水の沸点程度の噴気が点在し、地中温度も高い。1 次元の構造 (Fig. 6) を見ると、厚さ数 m の第 1 層は $20\sim50\Omega \cdot m$ と地表の状況に応じてばらついているが、その下は全点でほぼ同じ傾向を示し、 $5\Omega \cdot m$ 、厚さ 100m 程度の第 2 層の下に、 $1\Omega \cdot m$ と、きわめて抵抗の低い第 3 層が存在する。噴気のごく近傍に位置する KV03 では、第 1 層、第 2 層とも $5\Omega \cdot m$ を示し、実質的には $5\Omega \cdot m$ の第 2 層が地表に現れている事を示している。

b) 不動池の南側

KV04, 05, 06, 08 は、不動池の溶岩流の上にある。Fig. 7 に示すように、全点が海拔 1200m 付近に層の境界を持ち、KV04, 05, 06 では、数 $10\sim100\Omega \cdot m$ 、厚さ数 m の第

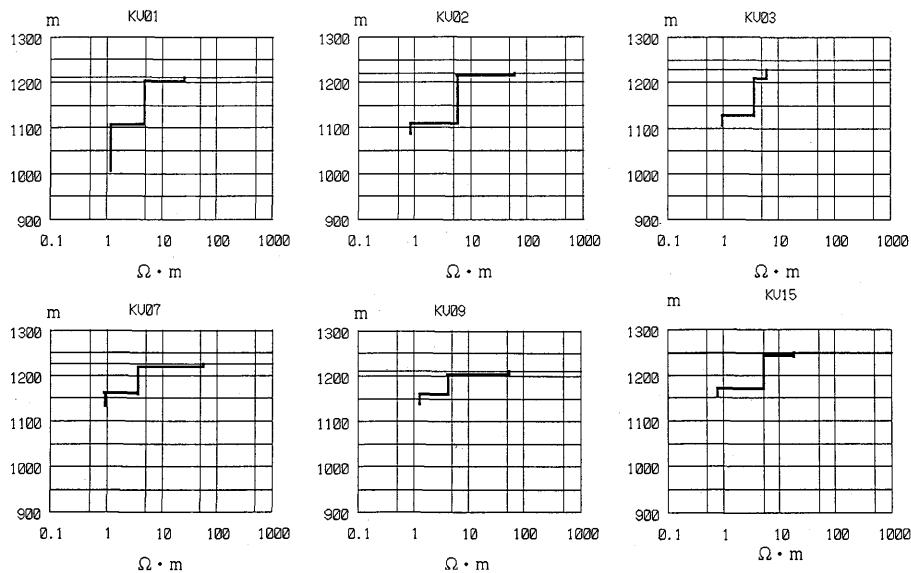


Fig. 6 Resistivity structure at KV01, KV02, KV03, KV07, KV09 and KV15; around the steaming ground at the western foot of Iwo-Yama. Vertical axis indicates relative height to the sea level.

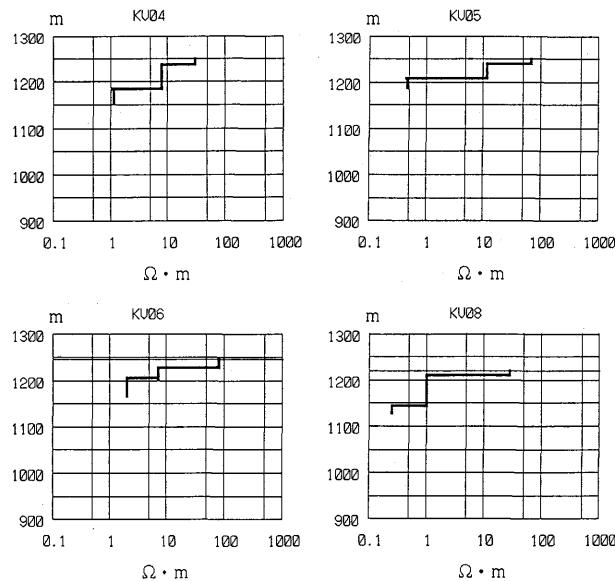


Fig. 7 Resistivity structure at KV04, KV05, KV06 and KV08; southern side of Fudo-Ike.

1層の下に $10\Omega \cdot m$ の第2層が続き、海拔 1200m より下に $1\Omega \cdot m$ 程度の第3層が見られる。KV08では、 $30\Omega \cdot m$ の第1層が他の点の第1, 第2層を平均した層に相当し、海拔 1200m より下に他の点の第2層に対応する $1\Omega \cdot m$ 層、その下に $0.3\Omega \cdot m$ の低比抵抗層が続く結果となっている。硫黄山西麓に比べると $1\Omega \cdot m$ の層がより浅くなっている。

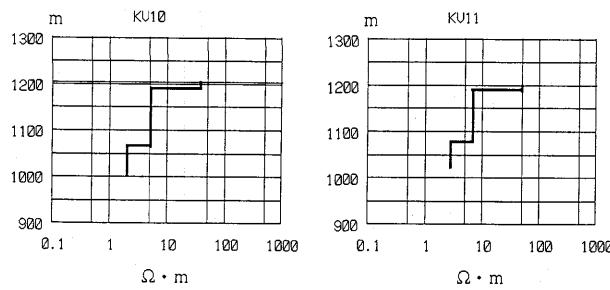


Fig. 8 Resistivity structure at KV10 and KV11; western margin of the steaming ground at the western foot of Iwo-Yama.

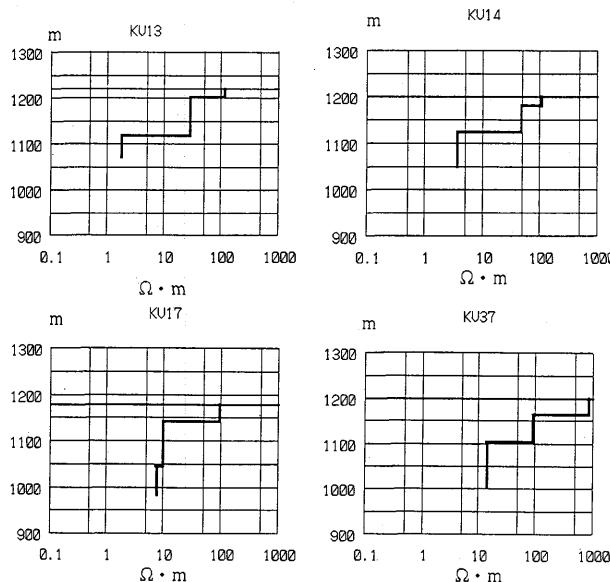


Fig. 9 Resistivity structure at KV13, KV14, KV17 and KV37; southern margin of the steaming ground at the western foot of Iwo-Yama.

c) 硫黄山西麓噴気地の西縁部

KV10, 11は、a)に示した硫黄山西麓の噴気地の西縁部であり、韓国岳の崩壊堆積物に覆われている。地中温度分布でも硫黄山西麓の高温部のはずれにある。Fig. 8に示すように、 $50\Omega \cdot m$ 、厚さ数mの第1層の下に硫黄山西麓の噴気地と同じ $5\Omega \cdot m$ の第2層が続き、その下に $2\sim 3\Omega \cdot m$ の第3層が見られる。構造の特徴はa)に示した硫黄山西麓の構造と似ているが、第3層の抵抗がやや高くなっている。

d) えびの高原南縁部

KV13, 14, 17, 37は、えびの高原の南縁にあり、韓国岳の噴出物に覆われている。地中温度異常は見られない。Fig. 9に示すように、より熱異常域に近いKV13, 14では $100\Omega \cdot m$ 、厚さ10数mの第1層、 $30\sim 50\Omega \cdot m$ 、厚さ数10mの第2層の下に数 $\Omega \cdot m$ の第3層が見られ、熱異常域からより離れたKV17では、 $100\Omega \cdot m$ の第1層の下に $10\Omega \cdot m$ の第2、第3層が続き、更に離れたKV37では、KV17の第1層の上に $1k\Omega \cdot m$ の高比抵抗層がのった構造となっている。

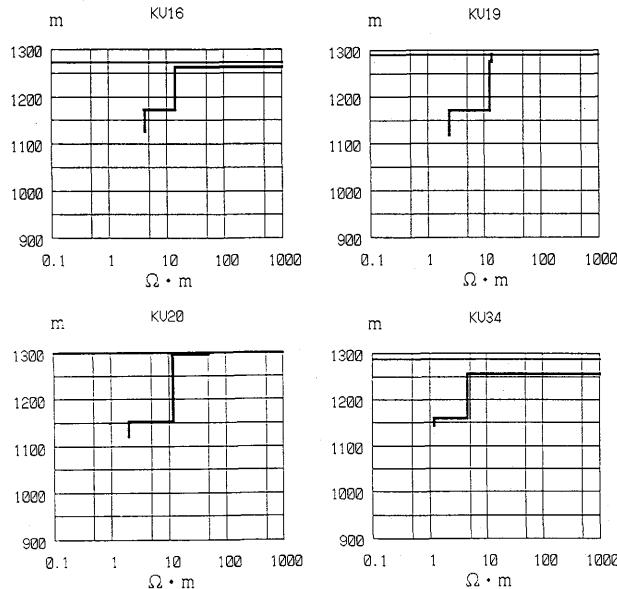


Fig. 10 Resistivity structure at KV16, KV19, KV20 and KV34; the summit of Iwo-Yama.

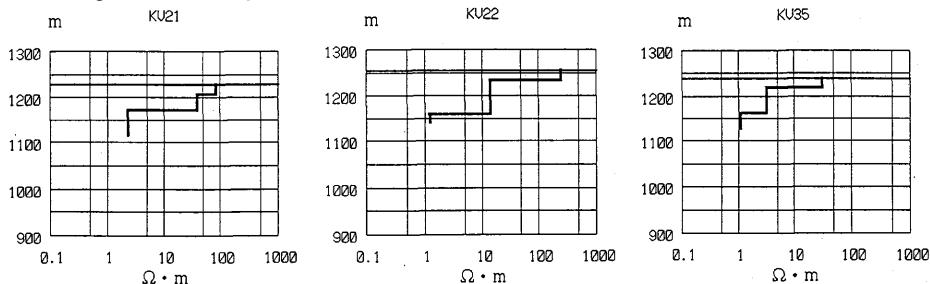


Fig. 11 Resistivity structure at KV21, KV22 and KV35; northern part of Iwo-Yama and Fudo-Ike.

e) 硫黄山の山頂部

硫黄山は全体が溶岩のブロックで覆われ、隙間から高温の噴気を噴出している。KV20は、山頂火口内の平坦地、KV19は、火口南側の凹地にあり、いずれも表面は熱変質を受けた堆積物に覆われている。KV34は、北側火口縁の溶岩の上、KV16は硫山西側斜面にあり、堆積物はほとんどない。Fig. 10に示すように、空隙の多い溶岩に覆われたKV16, 34の第1層は、数 $k\Omega \cdot m$ 以上、熱変質を受けた堆積物に覆われたKV19, 20の第1層は、 $10\Omega \cdot m$ と地表の状況でばらついているが、その下の第2層は $5\sim10\Omega \cdot m$ 、第3層は、 $1\sim5\Omega \cdot m$ とほぼ同じ構造を示している。

f) 硫黄山北西麓（不動池の北側）

KV21, 35は、硫黄山の北西麓にあり、硫黄山の溶岩流と不動池の溶岩流に挟まれた低地にある。地中温度に異常は見られない。Fig. 11に示すように、KV21の第1層、第2層、KV35の第1層がともに数 $10\Omega \cdot m$ を示し、その下に $1\sim3\Omega \cdot m$ の層が続いている。KV22は、不動池の北側の溶岩流の上にある。付近一帯は松林で、地中温度異常はない。数 $100\Omega \cdot m$ の第1層の下に $10\Omega \cdot m$ の第2層、 $1\Omega \cdot m$ の第3層が見られ、不動池南のKV04と同じ構造を示している。

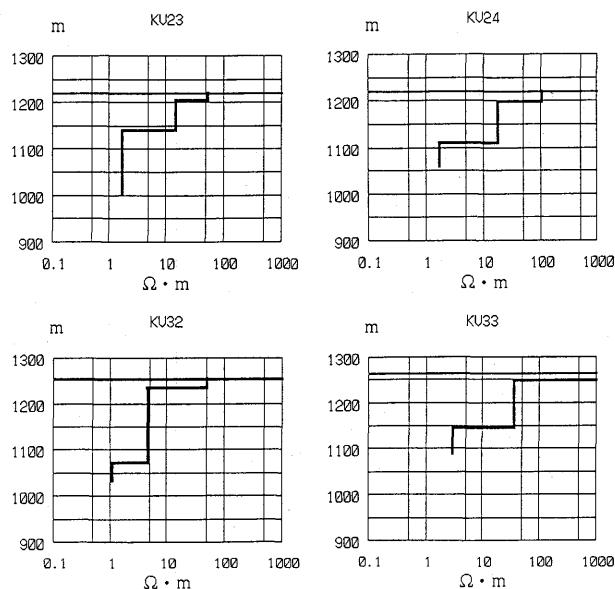


Fig. 12 Resistivity structure at KV23, KV24, KV32 and KV33; geothermal area at the northeastern foot of Iwo-Yama.

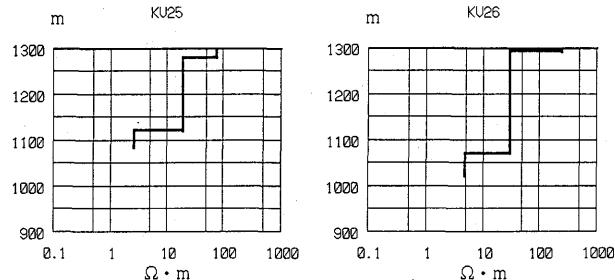


Fig. 13 Resistivity structure at KV25 and KV26; southeastern margin of Iwo-Yama.

g) 硫黄山北東麓の地熱異常地

KV23, 24, 32 は、硫黄山の北東麓にあり、韓国岳の山体崩壊堆積物に覆われている。付近一帯は熱変質をうけ、地中温度異常も見られる。また、KV32付近では温泉の湧出も見られる。温泉などの熱異常からやや離れた KV23, 24 では、Fig. 12 に示すように $50\sim100\Omega\cdot m$ の第1層の下に $10\text{数}\Omega\cdot m$ の第2層、 $1\sim2\Omega\cdot m$ の第3層が続いている。熱異常により近い KV32 では、 $50\Omega\cdot m$ の第1層の下に、 $5\Omega\cdot m$ の第2層、 $1\Omega\cdot m$ の第3層とより低い抵抗を示している。これらの点より東にある KV33 は、韓国岳の山体斜面にあり、数 $k\Omega\cdot m$ の第1層、 $35\Omega\cdot m$ の第2層、 $3\Omega\cdot m$ の第3層といずれも高い比抵抗値を示している。

h) 硫黄山南東部

KV25, 26 は、硫黄山の南東部で韓国岳山体との境界部にあたる。韓国岳北西部から硫黄山にかけては爆裂火口が並び、KV26 は雨期には池となる小火口内にある。地中温度異常は見られない。Fig. 13 に示すように、数 $10\sim$ 数 $100\Omega\cdot m$ の第1層の下に、 $20\sim30\Omega\cdot m$ の第2層、海拔 $1100m$ 以下には $3\sim5\Omega\cdot m$ の第3層が続いている。

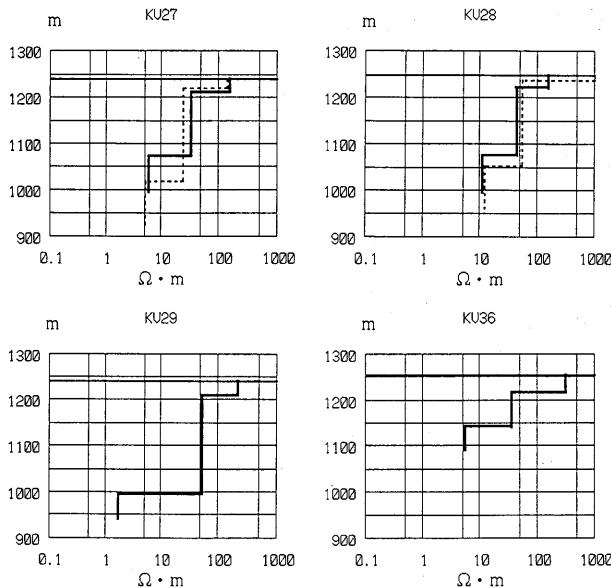


Fig. 14 Resistivity structure at KV27, KV28, KV29 and KV36; western part of Fudo-Ike.

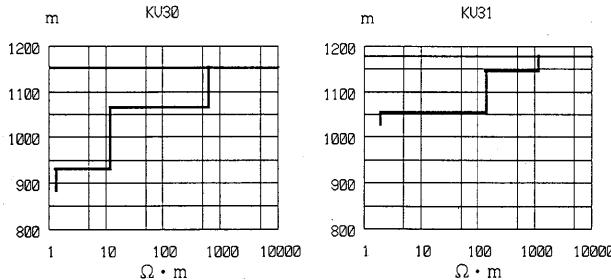


Fig. 15 Resistivity structure at KV30 and KV31; northeastern foot of Iwo-Yama.

i) 不動池西部

KV27, 28, 29, 36 は、不動池の西側にあり、不動池溶岩流の上にある。付近一帯は松林で、地中温度異常はない。Fig. 14 に示すように、KV27, 28 は、 $150\Omega \cdot m$ の第 1 層の下に、 $30\sim50\Omega \cdot m$ の第 2 層、 $5\sim10\Omega \cdot m$ の第 3 層となっている。なお、この 2 点は 1989 年 12 月と 1990 年 5 月の 2 回測定を行っているが、いずれもほぼ同じ結果を示している。池により近い KV29, 36 は第 1, 第 2 層は同じ傾向を示すが、第 3 層は、 $2\sim5\Omega \cdot m$ と、より低い比抵抗値を示している。

j) 硫黄山北東麓（赤松千本原）

KV30, 31 は、硫黄山から北東に約 1km 離れた地点で、韓国岳の北斜面にある。Fig. 15 に示すように、KV31 は、 $1k\Omega \cdot m$ と $100\Omega \cdot m$ の高比抵抗の第 1, 第 2 層の下に $1\Omega \cdot m$ の第 3 層が見られるのに対し、KV30 では $600\Omega \cdot m$ の第 1 層の下に $10\Omega \cdot m$ の第 2 層をはさみ、 $1\Omega \cdot m$ の第 3 層に続いている。KV30 の近くには冬期にのみ確認できる低温の噴気が見られ、第 2 層の比抵抗が低い事と関係しているかもしれない。

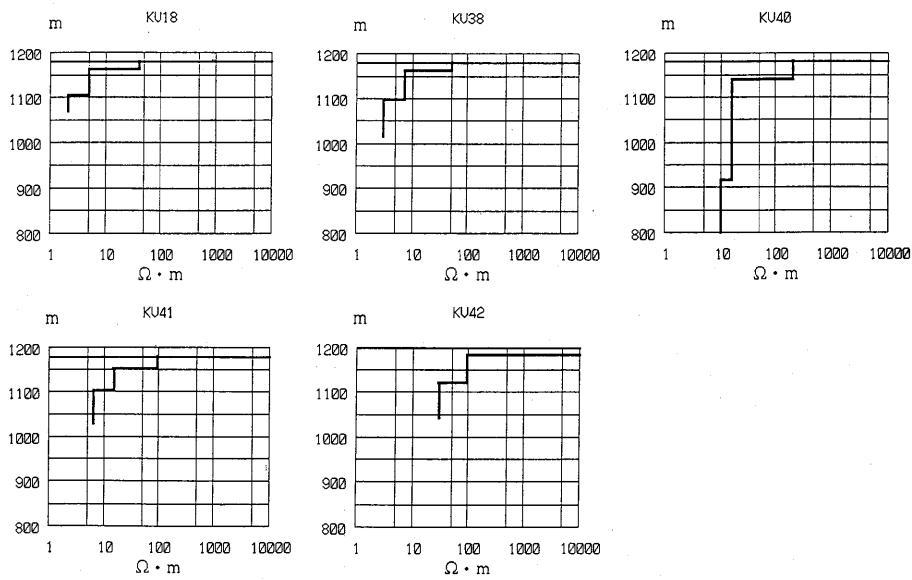


Fig. 16 Resistivity structure at KV18, KV38, KV40, KV41 and KV42; western margin of Ebino-Kogen.

k) えびの高原西部

KV18, 38, 40, 41, 42 は、えびの高原の西部にあり、えびの岳から水が流れる扇状堆積地となっている。北側一帯は 20 年程前までは噴気地であったが現在は地中温度分布からも特に異常は見られない。国民宿舎、ホテルの温泉井がある。KV18, 38 はこの地域の中でも中央に位置しており、Fig. 16 に示すように $50\Omega \cdot m$ 、厚さ約 20m の第 1 層の下に、 $5\sim 7\Omega \cdot m$ の第 2 層、 $2\sim 3\Omega \cdot m$ の第 3 層が続いている。KV40, 41 は扇状堆積地の周辺部に位置し、地下の浅い部分でえびの岳の山体にかかっていると思われ、得られた結果も、 $100\sim 200\Omega \cdot m$ の第 1 层の下に $10\Omega \cdot m$ 程度の第 2, 第 3 層と、より高比抵抗になっている。KV42 は、えびの岳の山体部にあり、数 $k\Omega \cdot m$ 以上の第 1 層、 $100\Omega \cdot m$ の第 2 層、 $30\Omega \cdot m$ の第 3 層と、更に高い比抵抗値を示している。

l) 白鳥山山体部

KV43, 46, 48, 49, 50, 51, 52 は、白鳥山の南斜面にあり、白紫池溶岩および白鳥山溶岩の上にある。付近一帯は松林で、地中温度異常もない。Fig. 17 に示すように、溶岩流に対応すると思われる厚さ $50\sim 150$ m、数 $100\Omega \cdot m$ の高比抵抗の第 1 層、第 2 層 (KV50, 51 では第 1 層) があり、その下は $10\Omega \cdot m$ 前後の層となっている。

m) えびの高原北縁部

KV12, 39 は、えびの高原と白鳥山との境界部に位置している。付近に送電線があるため、他の点よりデータの質が悪く、細かい議論はできないが、他の点とはやや異なる構造を示している。KV12 は、Fig. 18 に示すように $30\Omega \cdot m$ の第 1, 第 2 層が厚く続き、第 3 層は $10\Omega \cdot m$ 程度となっている。KV39 は、3 層モデルでは図の実線のような結果となるが、誤差が大きく、4 層モデルで解析すると、図の破線のように、 $700\Omega \cdot m$ のごく薄い第 1 層と $5\Omega \cdot m$ の第 2 層の下に、KV12 と同じように $40\Omega \cdot m$ の第 3 層、 $10\Omega \cdot m$ の第 4 層が続く結果が得られている。KV39 はえびの高原ホテルの温泉井のごく近くに位置し、薄い熱変質帶が表層近くに存在する事を示しているのであろう。

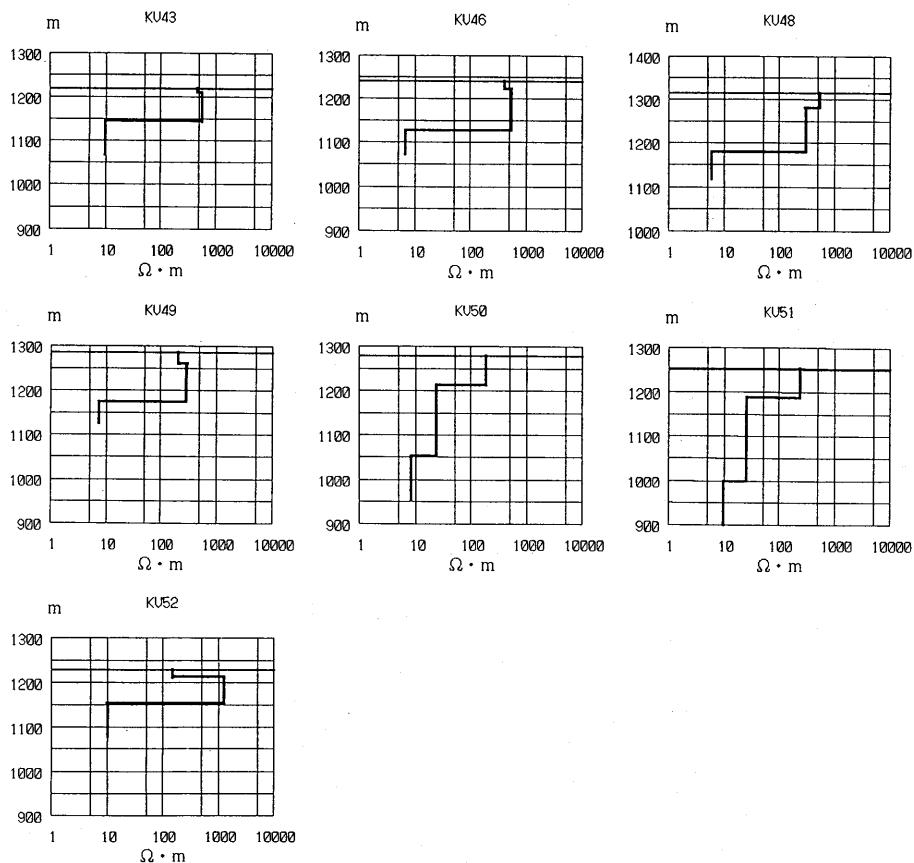


Fig. 17 Resistivity structure at KV43, KV46, KV48, KV49, KV50, KV51 and KV52; southern flank of Shiratori-Yama.

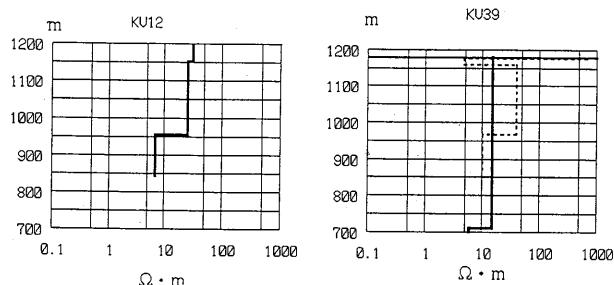


Fig. 18 Resistivity structure at KV12 and KV39; the boundary zone of Shiratori-Yama and Ebino-Kogen geothermal area.

4. 電気比抵抗構造と地熱活動

以上得られた結果から硫黄山周辺の電気抵抗構造の特徴を明らかにし、地熱活動との関連を検討してみよう。以下に Fig. 4 に示す断面について、1次元インバージョンの結果をつないだ模式的な構造を示す。なお、断面を作成するにあたり、比抵抗の値を、 $100\Omega \cdot \text{m}$ 以上、 $30 \sim 100\Omega \cdot \text{m}$ 、 $10 \sim 30\Omega \cdot \text{m}$ 、 $3 \sim 10\Omega \cdot \text{m}$ 、 $3\Omega \cdot \text{m}$ 以下に分けて表現すると、特徴がよく表される事が経験的にわかったので、以下ではそのように分けて表現

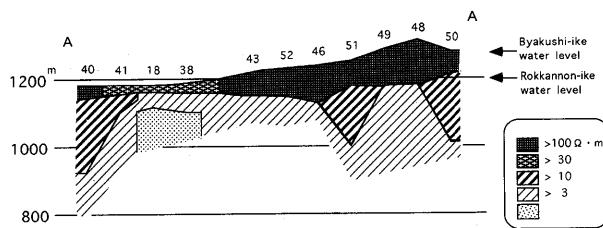


Fig. 19 Cross section of the resistivity structure along the line, A-A' in Fig. 4.

する。それぞれの比抵抗値の層は、その分布状況から判断して、おおよそ以下のように対応すると考えられる。 $100\Omega \cdot m$ 以上の層は、地表付近の溶岩や火碎流で溶結した層に対応していると見られる。 $30\sim 100\Omega \cdot m$ の層は、地表近くの地熱異常のない堆積層や硫黄山の地熱活動域から離れた場所の数 $10\sim 100m$ の深さにある層に多く見られる事から、熱変質を受けていない通常の堆積層に対応すると思われる。 $10\sim 30\Omega \cdot m$ の層は、硫黄山の地熱活動から離れた場所の $100m$ 以深の層や硫黄山山体に見られ、前者は、水を比較的多く含む層、後者は地熱活動を伴う溶岩の層と思われる。 $3\sim 10\Omega \cdot m$ の層は熱変質を受けた堆積層、 $3\Omega \cdot m$ 以下の層は熱変質を強く受け、熱水を含む層に対応すると思われる。

Fig. 19 は、白鳥山からえびの高原西部に至る南北の断面である。KV43 から KV50 の白鳥山には $100\Omega \cdot m$ 以上の高比抵抗層が厚く見られ、溶岩の層に対応していると思われる。同様の高比抵抗層は、KV40 にも見られ、えびの岳の溶岩であろう。KV41 から KV38 にかけての表層には、 $30\sim 100\Omega \cdot m$ の比較的高い比抵抗層が見られる。ここには、地熱兆候はなく、熱変質も見られないことから、通常の堆積物の標準的な比抵抗値を表すと考えられる。これらの高比抵抗層の下には、えびの岳や白鳥山の下の一部など図の中央からはずれた所に $10\sim 30\Omega \cdot m$ の層があるのを除き、 $3\sim 10\Omega \cdot m$ の低比抵抗層が広く分布している。こうした構造は、霧島火山群の広い範囲に共通して見られ、水を多く含む層と考えられている。特に、KV18, KV38 の下では、 $3\Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗層が存在する。KV38 の付近には国民宿舎の温泉井があり、特殊ボーリング工業(1988)による完了報告書によれば、Fig. 20 に示すように、深さ $7.6m$ まで表土・転石、 $51.9m$ まで硬い安山岩と記載されており高比抵抗であることが予想される。その下の $89.2m$ までは転石交じり粘土、 $105.2m$ までは硬い安山岩、 $220.8m$ までは転石交じり粘土で、低一高一低の比抵抗層が予想されるが、中間の高比抵抗層は比較的薄いためインバージョンでは再現されていないのであろう。また、その下の $400.5m$ までの硬い安山岩と記載される層には探査が及んでいない。この間、深さ $100m$ (海拔 $1100m$)から $220m$ の間で温度の上昇が見られ、温泉はこの層から採られている。したがって、 $3\Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗層は温泉の帶水層を含む熱変質層に対応している事がわかる。

Fig. 21 は、Fig. 19 と同じえびの高原西部の東西断面である。KV42, KV14, KV17 の表層に $100\Omega \cdot m$ 以上の高比抵抗層が見られるが、これは、えびの岳の溶岩、韓国岳の噴出物であろう。この地域全体には、 $30\sim 100\Omega \cdot m$ の比較的高比抵抗の層が覆い、その下に、 $30\Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗層が見られる。上記の温泉に対応する $3\Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗域から周辺に向かうにつれて比抵抗はしだいに高くなる傾向を示している。

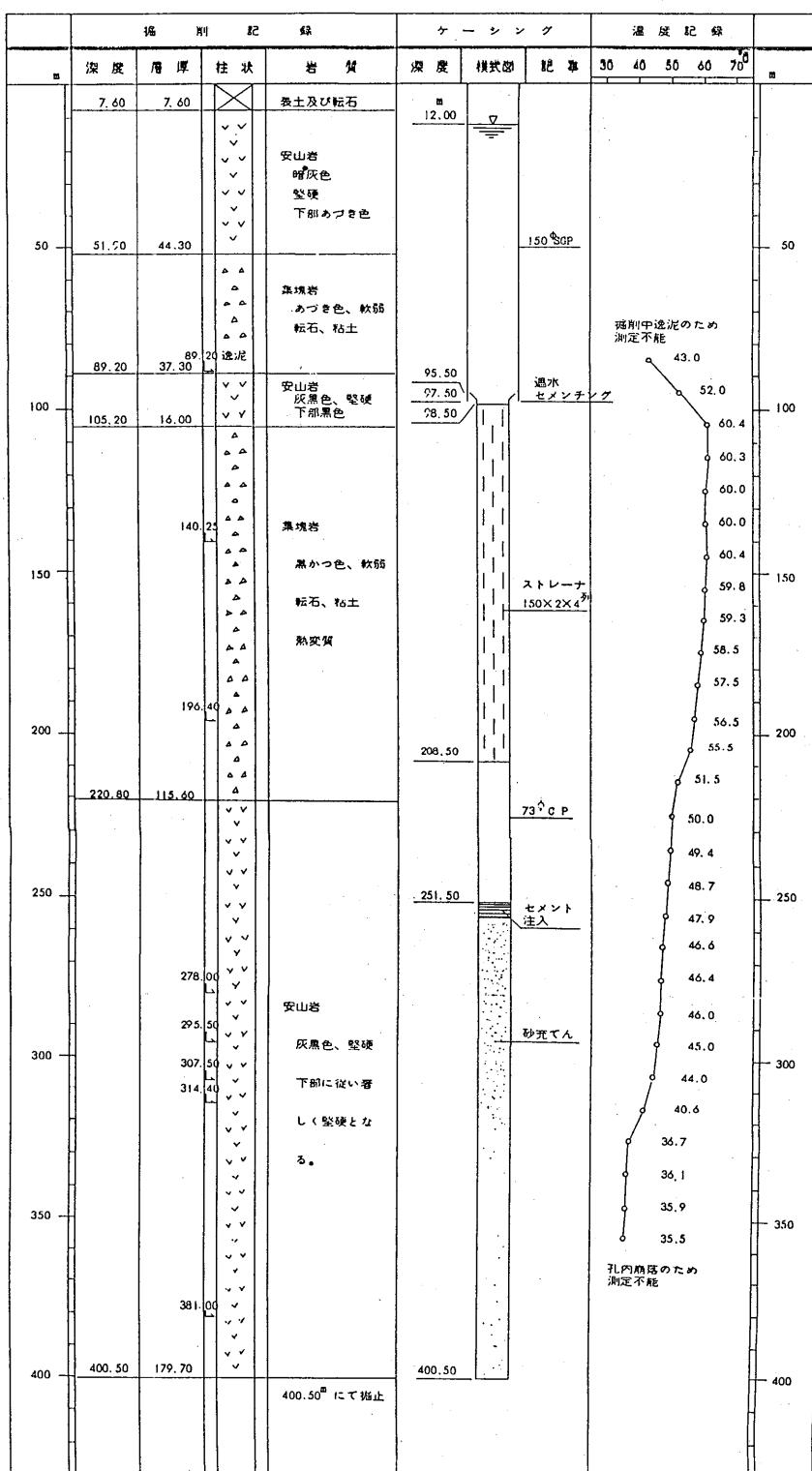


Fig. 20 Vertical geological section and the temperature profile at the boring site near from KV38.

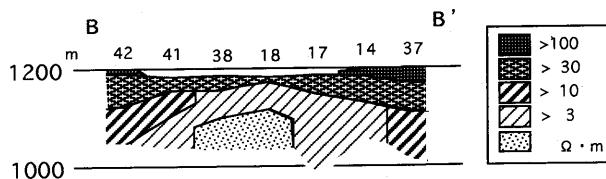


Fig. 21 Cross section of the resistivity structure along the line, B-B' in Fig. 4.

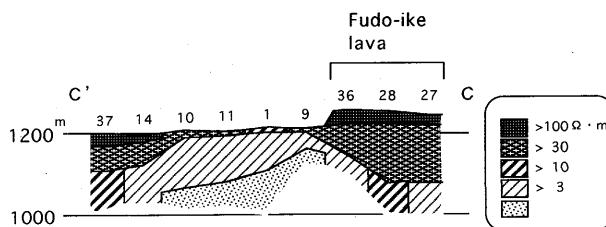


Fig. 22 Cross section of the resistivity structure along the line, C-C' in Fig. 4.

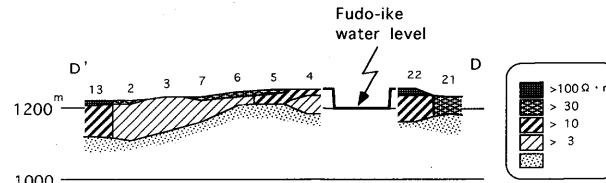


Fig. 23 Cross section of the resistivity structure along the line, D-D' in Fig. 4.

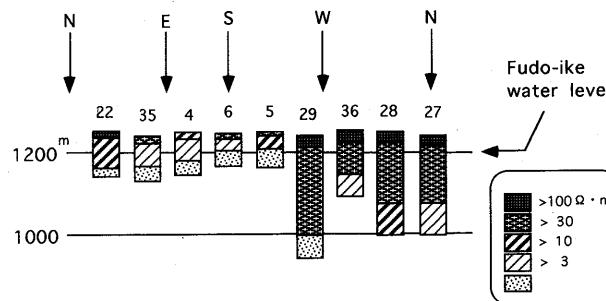


Fig. 24 Comparison of the resistivity structure around the Fudo-Ike. The vertical sections are presented clockwise from the north.

Fig. 22 は、不動池の西側をほぼ南北にとおる断面図である。図の両側では、 $100\Omega \cdot m$ 以上、 $30\sim100\Omega \cdot m$ の高比抵抗層の下に、 $30\Omega \cdot m$ 以下（図の中央部では $10\Omega \cdot m$ 以下）の比較的低比抵抗の層が見られる。図の中央には、熱水層と思われる $3\Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗域があり、その範囲は、Fig. 19, Fig. 21 に示したえびの高原西部よりも広くなっている。また、その上面が北側ほど浅くなっている事や、周辺部の比抵抗が低くなっている様子がわかる。

Fig. 23 は、不動池をほぼ南北に横切る断面で、硫黄山周辺地域で最も比抵抗の低い領域を横切っている。北側の KV21 を除く全ての点で $30\Omega \cdot m$ 以上の層はごく薄くなり、 $3\sim10\Omega \cdot m$ の層が地表付近を広く覆っている。これは熱変質を受けた堆積物であろう。その下に、 $3\Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗層が見られるが、上記の断面よりもその範囲は更に広がり、全ての地点で見られる。また、その上面の高さが、不動池の南側では、

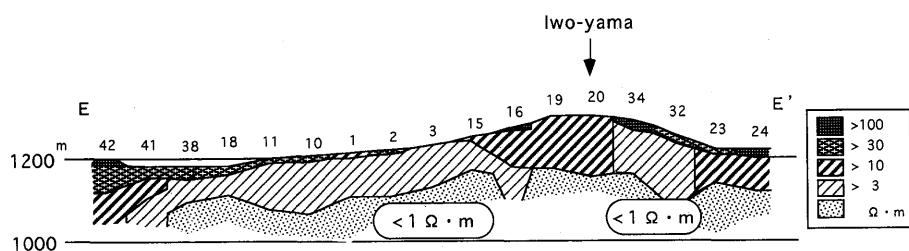


Fig. 25 Cross section of the resistivity structure along the line, E-E' in Fig. 4.

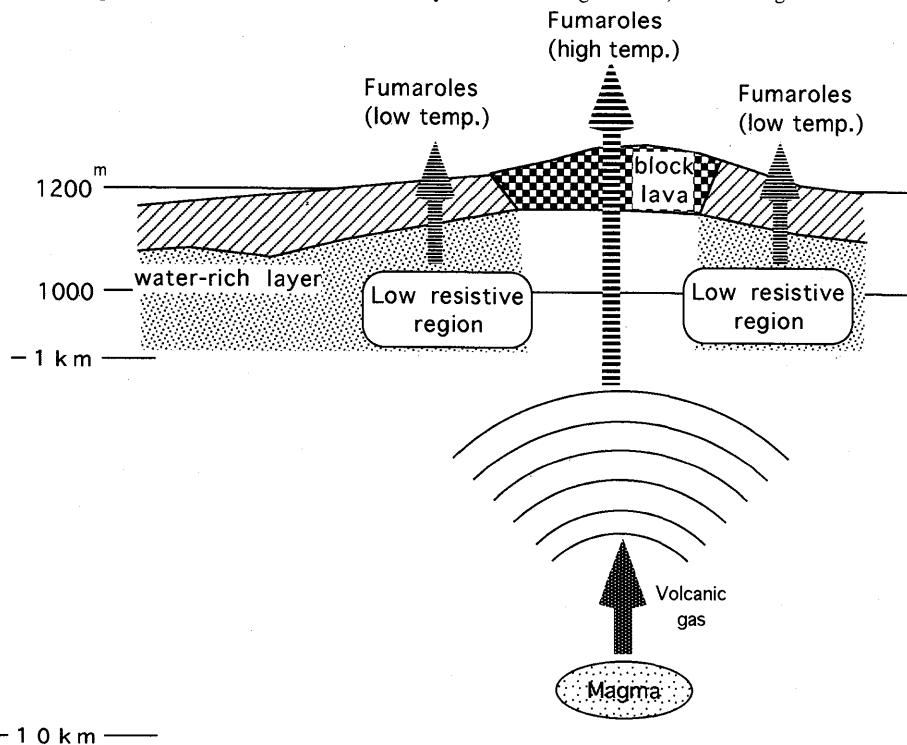


Fig. 26 Schematic structure of Iwo-Yama and the geothermal activity.

池の水面の高さとほぼ一致している。この事は、この付近の熱水層の水が不動池の水と圧力的に平衡になっている事を示している。不動池の水と電気抵抗との関係を見るために、Fig. 24に不動池を囲む測点の結果を北からの方位の順に示す。不動池の全ての方角に対して、不動池の水位と同じ高さに低比抵抗層が見られるわけではなく、KV22からKV5までの不動池の東側で比抵抗が低く、また、 $3\Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗層の上面の高さが不動池の水面の高さとほぼ等しくなっているのに対して、KV29からKV27までの不動池の西側では、ほぼ同じ高さでわずかに比抵抗が低くなるものの、高い値を示している。これらの事実は、この付近の低比抵抗層の原因が不動池の水のみによるものではなく、硫黄山の方向から供給される火山ガスとの両者に規定されている事を示している。

Fig. 25は、えびの高原西部から硫黄山を経て硫黄山北東麓に至る断面である。地表を覆う $30\Omega \cdot m$ 以上の高比抵抗層は、えびの高原西部から硫黄山に近づくにつれて薄

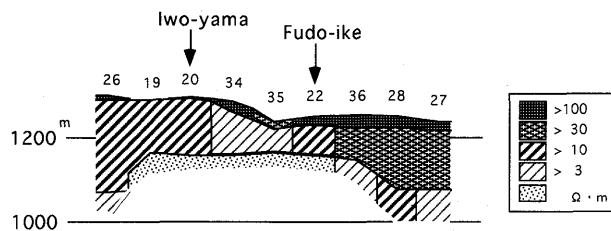


Fig. 27 Cross section of the resistivity structure along the line, F-F' in Fig. 4.

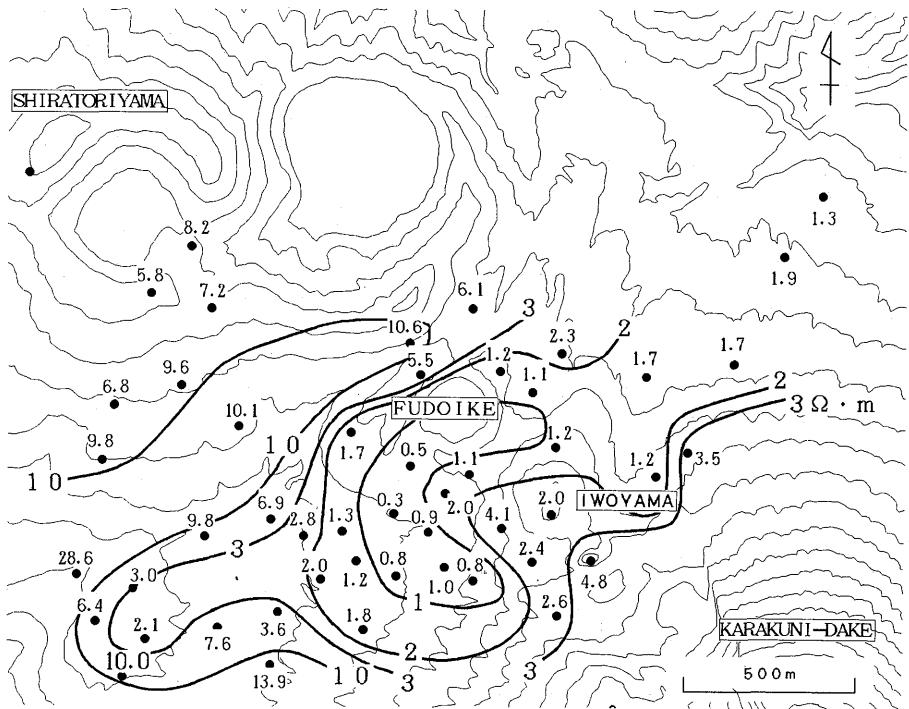


Fig. 28 Distribution of the resistivity of the 3rd. layer.

くなり、山体部ではほとんど見られない。北東斜面で再び薄い高比抵抗層が確認される。その下には KV38 から KV15 の硫黃山西麓の平坦部では、 $3\text{--}10\Omega \cdot \text{m}$ の低比抵抗層が広く分布し、KV16 から KV34 の硫黃山山体では、それよりやや高い $10\text{--}30\Omega \cdot \text{m}$ の層となっている。硫黃山西麓の平坦部には熱変質を受けた堆積物が多いのに対し、硫黃山山体部は、溶岩の隙間から高温の噴気を噴出している状態であるため、山体全体の平均的な比抵抗値はやや高くなっているのであろう。その下の海拔 1100m 以深には、 $3\Omega \cdot \text{m}$ 以下の低比抵抗層が広く分布し、硫黃山直下でやや浅くなる傾向を示している。この層は、Fig. 23 で示した層と同じく、熱水層を含む熱変質を強く受けた堆積層であろう。この $3\Omega \cdot \text{m}$ 以下の層の中でも、KV01 から KV15 の下と KV34, KV32 の下では、 $1\Omega \cdot \text{m}$ 以下の極端に低い比抵抗値を示す。この結果は、Fig. 5 の硫黃山直下よりも硫黃山を囲む部分で見かけ抵抗が低いという結果や、Fig. 2 の噴気温度の分布とあわせて考えると、Fig. 26 に概念的に示すように、硫黃山山体部では、地下深部から供給される高温の火山ガスがそのまま溶岩の隙間から噴出しているためにやや高い比抵抗値

を示しているのに対して、硫黄山の周囲では、この地域に分布する帶水層の水（たとえば不動池起源）との混合により比抵抗の低い領域が形成され、水の沸点程度の噴気や温泉の源となっている事を示すと考えられる。これより深い部分の構造を知るには、ULF-MT 観測が必要であり、その結果は歌田他 (1994) によりまとめられている。それによると、深さ 1km までは上記の $3\Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗層が続き、その下は $10 \sim 50\Omega \cdot m$ 程度と一旦高くなり、硫黄山の周辺ではおよそ 10km の深さ、硫黄山直下ではやや浅い数 km の深さで再び $1\Omega \cdot m$ の低比抵抗層となる。こうした事から、硫黄山の地熱活動を支える熱源は深さ 10km 付近にあり、その一部は数 km の深さまで上昇していると思われる。そこから供給される火山ガスと地表付近の帶水層との相互作用により上記のような比抵抗分布や地熱活動分布が形成されると考えられる。

Fig. 27 は、硫黄山と不動池を結ぶ北西-南東方向の断面である。表層に $100\Omega \cdot m$ 以上の高比抵抗層が薄く広がり、その下に、不動池より北西側では、 $30 \sim 100\Omega \cdot m$ の層、硫黄山では $10 \sim 30\Omega \cdot m$ の層が見られるが、硫黄山と不動池の間では比抵抗が低くなっている。その下には、KV34, KV35を中心として硫黄山・不動池の下で $3\Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗層があり、そこから離れた場所では、 $10\Omega \cdot m$ 前後の層が出ている。この断面では、不動池より北西の部分の構造は、硫黄山の地熱活動に影響されない霧島の一般的な構造が現れていると思われるが、南東の韓国岳方向は、硫黄山から十分に離れた点のデータがないため、現段階では、硫黄山から韓国岳にかけて地下構造がどのように変化するかは明らかではない。

以上示してきた結果から、 $3\Omega \cdot m$ 以下の領域が熱水の分布状況をよく表している事が期待されるので、Fig. 28 に第 3 層の比抵抗分布を示す。Fig. 5 に示した 8Hz における見かけ抵抗分布とほぼ同じ傾向を示し、硫黄山・不動池を中心に西側および北東側に $3\Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗域が広がっている。その中でも、硫黄山直下は $2 \sim 3\Omega \cdot m$ と比較的高い比抵抗値を示し、南東側を除く硫黄山の周囲を $2\Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗域が囲んでいる。特に不動池近傍では $1\Omega \cdot m$ 以下のきわめて低い比抵抗値となっている。こうした分布の特徴は、先に示した硫黄山深部から供給される火山ガスと主として不動池から供給される帶水層の水によって熱水が形成されている事を支持している。 $3\Omega \cdot m$ 以下の領域が硫黄山の西および北東方向へ延び、南東の韓国岳や北西の白鳥山方向には延びていないのは、地形的により低い方向へ熱水が流下している事を示し、えびの高原西部の温泉などの泉源になっているものと思われる。

5. まとめ

霧島火山群・硫黄山周辺において MT 法による電気抵抗構造の調査を行った。硫黄山から離れた地熱異常のない所では、厚さ数 $10 \sim 100m$ 程度で $100\Omega \cdot m$ 以上、所によっては $30\Omega \cdot m$ 以上の高比抵抗層の下に $10\Omega \cdot m$ 前後の低比抵抗層が見られる。この低比抵抗層は、霧島火山群の広い範囲に見られる特徴で（鍵山他, 1992），水を多く含む層と考えられる。硫黄山の地熱活動域に近づくにつれ、熱変質のため比抵抗は低くなり、 $3 \sim 10\Omega \cdot m$ の層の下に、熱水を多く含む $3\Omega \cdot m$ 以下の層が見られるようになる。この層は、硫黄山・不動池を中心に西側のえびの高原西部および北東側の赤松千本原付近まで広く分布している。地熱活動は硫黄山山体部で最も高温で、周辺に水の沸点程度の噴気地帯があるのに対して、比抵抗の分布は、硫黄山直下では $2 \sim 3\Omega \cdot m$ と比較的

高く、硫黄山を囲むように、 $1\Omega \cdot m$ 程度の著しく低い比抵抗域が存在する。こうした分布の特徴は、硫黄山山体部では、地下数 km から 10km の深部から供給される高温の火山ガスがそのまま溶岩の隙間から噴出しているためにやや高い比抵抗値を示しているのに対して、硫黄山の周囲では、この地域に分布する帶水層の水との混合により比抵抗の低い領域が形成され、水の沸点程度の噴気や温泉の源となっている事を示すと考えられる。

謝 辞

えびの高原のボーリングデータを提供していただいた、宮崎県えびの高原莊関係者に謝意を表します。査読者にはいくつかの不備を指摘していただいた。あわせて感謝いたします。

文 献

- IMURA, R., 1992, Eruptive history of the Kirishima Volcano during the past 22, 000 years. *Geographical Rep. Tokyo Metropolitan Univ.*, **27**, 71-89.
- 鍵山恒臣・宇平幸一・渡部暉彦・増谷文雄・山口勝, 1979, 霧島火山の地熱調査. 震研彙報, **54**, 187-210.
- 鍵山恒臣・山口勝・増谷文雄, 1987, 霧島火山硫黄山周辺の熱的調査. 火山学会 1987 年秋季大会講演予稿集, 100.
- 鍵山恒臣・歌田久司・増谷文雄・山口勝・笹井洋一・田中良和・橋本武志, 1992, 霧島火山群・新燃岳 1991-92 年微噴火と電磁気観測. CA 研究会 1992 年論文集, 279-296.
- 鍵山恒臣, 1994a, 霧島一やや張力的応力場に生成した火山群. 地学雑誌, **103**, 133-144.
- 鍵山恒臣, 1994b, 霧島火山群の構造調査の意義. 震研彙報, 本号.
- MINAKAMI, T., D. SHIMOZURU, T. MIYAZAKI, S. HIRAGA and M. YAMAGUCHI, 1968, The eruption of Shinmoe-dake and the 1961 Iimori-yama earthquake swarm. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **46**, 965-992.
- PAREJA, J. S., T. KAGIYAMA, M. YAMAGUCHI and F. MASUTANI, 1987, VLF resistivity survey at Kirishima volcanic area. *Bull. Volcanol. Soc. Jpn.*, **32**, 360.
- PAREJA, J. S., Y. SASAI, T. KAGIYAMA, M. YAMAGUCHI and F. MASUTANI, 1988a, Distribution of electrical resistivity in the Kirishima volcanic area and its geothermal significance. *Proc. Kagoshima International Conference on Volcanoes*, 164-167.
- PAREJA, J. S., Y. SASAI, T. KAGIYAMA, M. YAMAGUCHI and F. MASUTANI, 1988b, The geoelectric structure of Ebino Kogen plain and its relation with geothermal processes. *Bull. Volcanol. Soc. Jpn.*, **33**, 342-343.
- 特殊ボーリング工業, 1988, えびの高原莊温泉ボーリング工事完了報告書.
- 歌田久司・笹井洋一・下村高史・行武毅・山本哲也, 1987, 三宅島における 1983 年噴火後 2 年間の電気比抵抗変化. 第 2 回三宅島集中総合観測報告書, 35-46.
- UTADA, H. and T. SHIMOMURA, 1989, Resistivity structure of Izu-oshima Volcano revealed by the ELF-VLF magneto-telluric method. *Jour. Geomag. Geoelectr.*, **42**, 169-194.
- 歌田久司・大西信人, 1990, 火山観測に適した ELF 測定装置の開発. 火山学会 1990 年春期大会予稿集, 59.
- 歌田久司・鍵山恒臣・霧島火山 MT 研究グループ, 1994, 霧島火山の深部比抵抗構造. 震研彙報, 本号.

要 旨

霧島火山群・硫黄山周辺において MT 法による電気抵抗構造調査を行った。その結果、硫黄山を含む霧島の広い範囲において、水を多く含む層と考えられる低比抵抗層が、地下およそ 100m 以深に見られる事がわかった。また、硫黄山周辺は、低比抵抗域となっており、特に、硫黄山火口直下では $2\sim3\Omega \cdot m$ であるのに対して、硫黄山を囲むように、 $1\Omega \cdot m$ 程度の著し

く低い比抵抗域が存在している事がわかった。熱的調査によれば、硫黄山山体には、高温の噴気が点在し、周辺には水の沸点程度の噴気地や温泉が見られる。こうした分布の特徴は、地下深部から供給される高温の火山ガスが、硫黄山山体部ではそのまま溶岩の隙間から噴出しているためにやや高い抵抗を示しているのに対して、硫黄山の周囲では、この地域に分布する帶水層の水との混合により低比抵抗領域が形成され、水の沸点程度の噴気や温泉の源となっている事を示すと考えられる。

Table 1 Results of ELF measurement.

No.	f	ρ_{xx}	ϕ_{xx}	r	ρ_{xy}	ϕ_{xy}	r	ρ_{yx}	ϕ_{yx}	r	ρ_{yy}	ϕ_{yy}	r	ρ_{av}	ϕ_{av}	r	date
1	8	0.13	-144.0	25.7	1.37	68.1	9.2	4.00	-126.8	9.9	0.15	75.2	61.4	2.20	61.0	9.5	JUN.20,1989
14	0.19	-137.4	18.6	1.56	65.8	7.2	4.87	-126.9	6.7	0.24	72.1	44.9	2.55	59.6	7.0		
20	0.15	-139.8	35.5	1.95	61.5	8.3	4.35	-128.5	10.6	0.17	56.7	32.2	2.76	57.0	9.4		
2	8	0.04	-150.0	78.0	1.36	62.0	10.8	3.70	-123.2	5.2	0.03	96.4	79.8	2.21	59.3	8.0	JUN.20,1989
14	0.06	-143.5	26.2	1.96	60.8	7.2	4.60	-124.4	4.3	0.08	80.8	32.9	2.93	58.2	5.8		
20	0.08	-145.8	31.6	1.99	59.6	5.5	4.38	-125.8	5.0	0.14	64.4	21.2	2.85	57.2	5.3		
3	8	0.01	87.6	67.0	1.17	60.0	5.9	2.93	-122.1	6.8	0.01	136.0	151.1	1.85	59.0	6.4	JUN.20,1989
14	0.02	74.4	26.3	1.72	59.3	4.0	4.13	-124.0	4.0	0.01	169.4	60.2	2.66	57.8	4.0		
20	0.02	64.6	32.2	1.98	56.9	3.7	4.09	-127.9	5.0	0.01	144.9	80.2	2.84	54.6	4.4		
4	8	0.64	-134.8	10.8	0.69	58.0	10.6	7.09	-128.0	7.8	0.12	25.8	63.7	2.00	57.5	9.2	JUN.21,1989
14	0.59	-135.9	8.4	0.72	57.0	8.2	8.53	-128.7	4.6	0.11	-7.0	52.9	2.40	57.1	6.4		
20	0.73	-134.4	7.5	0.94	55.4	9.1	8.62	-128.6	5.4	0.26	4.2	29.7	2.64	57.3	7.2		
5	8	0.01	89.1	44.2	0.39	71.9	8.3	1.80	-123.7	5.2	0.15	53.3	23.9	0.88	64.5	6.8	JUN.21,1989
14	0.01	88.0	47.1	0.48	67.1	6.2	2.14	-123.0	3.0	0.22	36.6	18.6	1.06	62.1	4.6		
20	0.004	91.1	76.6	0.55	64.2	8.5	2.21	-124.4	6.6	0.18	35.4	20.1	1.13	60.0	7.6		
6	8	0.03	-140.5	46.1	1.40	59.2	14.0	4.34	-129.5	5.4	0.10	59.4	39.7	2.41	55.0	9.7	JUN.21,1989
14	0.04	-159.3	54.0	1.68	53.9	28.4	4.97	-131.5	3.6	0.13	34.3	43.4	2.84	51.7	16.0		
20	0.04	-147.9	45.2	1.95	57.0	10.2	5.43	-134.4	4.7	0.15	27.0	31.9	3.20	51.8	7.5		
7	8	0.07	69.1	31.3	0.76	61.5	8.5	2.49	-124.9	7.4	0.21	63.8	32.8	1.48	58.9	7.9	JUN.26,1989
14	0.08	57.2	19.8	1.08	62.3	5.2	2.51	-129.3	5.7	0.09	53.7	31.7	1.73	56.4	5.4		
20	0.07	49.9	19.1	1.36	61.1	3.3	2.77	-130.1	6.9	0.05	58.5	66.2	2.00	55.5	5.1		
8	8	0.01	-141.6	83.4	0.33	69.9	15.3	1.50	-126.1	4.4	0.04	50.1	38.4	0.68	62.5	9.9	JUN.26,1989
14	0.01	-146.8	70.6	0.61	68.6	11.7	1.70	-129.2	3.1	0.06	38.9	22.4	1.00	60.2	7.4		
20	0.01	-98.9	102.5	0.63	61.2	15.9	1.66	-132.2	1.8	0.06	21.2	16.2	1.00	54.6	8.8		
9	8	0.12	-119.7	53.1	1.18	66.4	47.7	3.77	-132.0	6.2	0.26	57.9	20.2	1.94	57.0	27.0	JUN.26,1989
14	0.13	-142.7	25.5	1.21	63.5	6.3	4.00	-134.8	5.2	0.24	53.0	17.5	2.03	55.1	5.7		
20	0.07	-153.3	26.6	1.35	64.6	6.0	3.75	-138.1	6.2	0.27	43.0	17.8	2.14	54.3	6.1		
10	8	0.10	-151.5	24.6	2.38	70.2	8.4	6.32	-129.1	6.8	0.07	-151.1	98.6	3.92	59.9	7.6	JUN.27,1989
14	0.09	-155.4	32.3	2.72	66.8	9.9	6.76	-132.5	5.3	0.01	-153.0	186.9	4.31	56.9	7.6		
20	0.11	-159.0	33.1	3.42	60.7	7.6	5.91	-137.9	5.2	0.02	-134.9	116.8	4.53	51.2	6.4		

f:frequency (Hz) ρ :apparent resistivity ($\Omega \cdot m$) ϕ :phase (degree) r:error (%)
(to be continued)

Table 1 (Continued)

No.	f	ρ_{xx}	ϕ_{xx}	r	ρ_{xy}	ϕ_{xy}	r	ρ_{yx}	ϕ_{yx}	r	ρ_{yy}	ϕ_{yy}	r	ρ_{av}	ϕ_{av}	r	date
11	8	0.002	168.5	552.8	1.68	69.9	29.0	13.6	-137.0	8.5	0.14	153.6	70.1	4.76	56.4	18.7	JUN.27, 1989
14	0.02	119.2	94.3	1.76	68.2	8.2	14.7	-140.0	7.4	0.07	134.6	89.7	5.06	54.2	7.8		
20	0.02	117.8	112.9	2.04	67.6	7.4	14.0	-145.4	11.5	0.06	142.4	85.9	5.31	51.1	9.4		
12B	8	0.42	27.3	28.1	4.88	65.5	14.9	46.3	-126.6	11.2	1.45	-152.9	69.0	14.7	60.8	13.1	DEC.07, 1989
14	0.40	16.2	26.4	5.83	62.9	8.5	45.1	-129.8	7.6	1.58	-138.3	39.9	15.8	57.7	8.0		
20	0.46	-1.1	26.6	7.61	58.5	10.3	44.3	-132.2	15.2	0.83	-151.9	106.5	18.3	54.1	12.7		
12C	8	0.37	31.1	18.2	3.34	62.9	8.0	43.9	-131.2	7.3	1.64	-149.7	80.5	11.6	57.3	7.7	MAY 16, 1990
14	0.22	17.9	17.2	4.40	55.1	7.3	30.8	-139.7	13.6	3.73	-166.4	57.0	11.3	49.8	10.4		
20	0.12	-9.6	35.0	3.53	52.1	8.5	23.1	-141.4	16.7	1.85	139.0	121.2	9.41	46.3	12.5		
13	8	0.17	55.9	51.5	4.41	62.0	15.4	4.25	-118.7	12.1	0.41	-124.7	51.9	4.07	62.1	13.7	JUL.18, 1989
14	0.23	75.2	29.8	5.31	65.4	13.8	5.21	-118.2	12.7	0.61	-145.6	51.6	4.91	64.2	13.3		
20	0.46	83.1	101.6	5.99	67.6	31.2	5.49	-115.2	18.8	0.23	-122.7	189.2	5.41	66.0	25.0		
14	8	0.56	55.8	41.0	1.45	69.0	31.8	19.0	-127.5	8.7	0.40	-112.4	89.6	4.78	60.7	20.2	
14	0.49	46.5	31.4	2.58	61.1	16.5	18.5	-133.3	7.9	0.29	-144.5	80.8	6.58	54.6	12.2		
20	0.86	55.5	24.0	2.59	66.8	25.1	19.3	-134.5	10.6	0.37	-139.5	98.6	6.56	56.8	17.9		
15	8	0.003	115.3	142.1	0.94	63.6	8.1	2.86	-117.9	5.9	0.04	-169.2	48.3	1.63	62.8	7.0	JUL.24, 1989
14	0.005	109.7	85.1	1.26	65.1	4.9	3.79	-121.5	4.3	0.06	171.6	24.6	2.17	61.9	4.6		
20	0.006	130.0	97.8	1.31	62.9	8.4	4.23	-122.5	4.0	0.03	172.4	59.6	2.34	60.2	6.2		
16	8	0.05	-158.5	70.0	5.87	58.0	5.8	6.62	-126.0	5.7	1.41	62.8	13.3	5.99	56.6	5.7	JUL.24, 1989
14	0.08	-167.5	39.3	6.04	57.6	7.8	7.69	-126.0	4.8	1.65	66.5	11.9	6.51	56.7	6.3		
20	0.03	177.7	103.1	7.75	54.7	6.9	8.58	-128.1	3.7	2.09	54.3	7.4	8.02	54.0	5.3		
17	8	1.60	56.6	10.9	3.21	58.7	15.9	23.5	-134.8	4.7	0.51	-174.0	51.5	8.03	54.1	10.3	DEC.04, 1989
14	1.66	46.1	16.9	5.47	59.3	10.5	24.9	-140.0	4.6	0.32	-148.5	51.3	11.0	50.4	7.6		
20	1.36	41.6	25.2	5.88	55.0	11.8	22.3	-140.6	7.9	0.22	155.3	95.6	11.3	48.5	9.9		
18	8	0.09	80.8	70.0	1.16	62.2	11.2	9.06	-130.9	5.6	0.08	138.9	90.2	3.21	56.4	8.4	DEC.04, 1989
14	0.07	58.9	46.6	1.06	60.8	10.9	9.64	-131.6	5.2	0.14	62.7	43.7	3.30	54.8	8.0		
20	0.08	69.9	26.6	1.25	63.1	12.4	8.95	-133.4	4.9	0.19	54.5	46.3	3.47	55.1	8.6		
19	8	0.11	85.0	29.1	2.41	63.3	10.2	8.56	-121.6	3.9	0.16	-168.4	41.2	4.43	61.2	7.0	DEC.04, 1989
14	0.04	77.6	35.0	3.30	62.5	4.8	10.1	-124.5	4.6	0.13	-168.1	44.7	5.71	59.2	4.7		
20	0.02	67.9	59.5	3.34	60.5	5.1	10.2	-125.8	5.7	0.06	162.4	69.5	5.82	57.5	5.4		

f:frequency (Hz) ρ :apparent resistivity ($\Omega \cdot m$) ϕ :phase (degree) r:error (%)
 (to be continued)

Table I (Continued)

No.	f	ρ_{XX}	ϕ_{XX}	r	ρ_{XY}	ϕ_{XY}	r	ρ_{YY}	ϕ_{YY}	r	ρ_{AV}	ϕ_{AV}	r	date		
20	8	0.20	-147.1	28.5	3.91	62.8	7.8	5.06	-119.3	12.7	0.15	-78.1	134.9	4.62	DEC. 06, 1989	
14	0.11	-133.9	41.6	5.56	60.2	5.3	6.96	-121.6	6.7	0.15	-118.5	61.2	6.35	59.2	6.0	
20	0.17	-154.2	48.8	5.53	58.9	6.2	7.67	-124.2	8.6	0.25	-141.4	51.9	6.65	56.7	7.4	
21	8	0.23	-146.8	16.4	3.21	61.3	6.9	2.72	-123.4	4.3	0.02	64.5	83.2	2.89	59.2	5.6
14	0.14	-144.0	30.8	4.87	60.9	5.0	3.18	-121.6	5.8	0.03	37.1	75.8	3.89	60.0	5.4	
20	0.26	-142.5	33.7	4.99	59.4	6.9	3.39	-123.1	6.8	0.004	59.4	219.9	4.08	58.2	6.9	
22	8	0.48	75.6	10.1	3.64	61.4	6.1	3.17	-116.2	3.9	1.05	-125.3	11.6	2.69	62.0	5.0
14	0.53	68.2	9.0	4.92	59.0	3.8	4.12	-115.7	3.5	1.49	-124.0	7.0	3.62	61.5	3.6	
20	0.51	74.0	16.7	5.51	60.2	5.2	4.11	-115.1	5.5	1.63	-125.0	7.1	3.85	62.1	5.4	
23	8	0.34	-137.0	9.4	2.12	63.9	9.2	4.41	-127.1	3.0	0.24	80.4	26.0	2.77	58.1	6.1
14	0.41	-139.2	11.8	2.99	62.8	5.7	5.37	-126.4	3.1	0.30	60.0	25.6	3.67	59.0	4.4	
20	0.52	-140.8	17.3	3.57	63.2	5.7	5.17	-126.1	5.6	0.34	56.9	23.2	3.91	59.7	5.7	
24	8	0.02	143.6	137.8	3.27	63.9	11.8	5.78	-121.3	3.5	0.03	-174.4	79.5	4.33	61.2	7.6
14	0.02	68.0	83.8	3.23	67.1	8.7	7.49	-120.5	2.9	0.04	-142.6	46.0	4.89	63.3	5.8	
20	0.02	164.2	91.4	3.56	68.8	6.5	7.48	-119.7	4.2	0.005	-104.7	219.1	5.16	64.5	5.4	
25	8	0.14	-166.0	85.7	6.30	70.3	17.9	7.02	-115.7	4.6	0.38	-139.7	22.8	6.69	66.3	11.3
14	0.21	-113.7	29.6	8.61	63.1	5.7	9.20	-116.9	3.6	0.40	-138.1	17.9	9.18	62.8	4.7	
20	0.36	-128.8	40.0	8.93	64.4	6.9	9.06	-118.3	4.0	0.23	-148.5	23.4	9.20	62.4	5.4	
26	8	0.28	178.4	92.9	14.3	60.7	12.4	7.82	-121.8	4.4	0.74	66.6	20.9	10.3	60.4	8.4
14	0.08	172.5	59.1	22.6	59.5	4.3	10.5	-120.6	3.1	0.99	47.4	14.6	15.3	59.9	3.7	
20	0.16	-157.5	70.4	23.8	58.8	3.5	10.9	-124.2	4.4	1.24	59.7	11.5	15.7	57.8	3.9	
27A	8	1.84	58.6	14.8	13.4	58.1	11.0	10.6	-119.1	8.0	0.28	-156.3	65.1	11.4	60.6	9.5
14	1.85	47.1	16.0	20.1	58.6	5.2	10.9	-122.6	5.8	0.58	-146.7	17.9	14.0	59.3	5.5	
20	1.06	62.8	29.0	23.9	58.5	4.9	9.09	-122.4	9.6	0.94	-151.1	18.6	13.8	58.9	7.2	
27B	8	0.51	50.9	23.5	11.8	59.7	7.1	10.8	-123.3	3.0	1.06	-136.0	18.5	10.6	58.9	5.1
14	0.58	48.3	19.8	16.2	61.9	4.7	13.9	-122.6	2.7	1.39	-126.3	12.3	14.2	60.2	3.7	
20	0.32	43.2	19.5	17.2	58.6	5.9	13.5	-122.0	5.6	1.12	-145.5	28.1	14.8	59.0	5.7	
28A	8	4.54	53.2	13.1	14.3	54.9	9.1	23.8	-126.2	5.0	2.43	-139.3	22.8	15.2	55.9	7.0
14	5.09	46.4	18.4	23.0	57.2	7.9	27.1	-127.5	6.1	3.51	-135.2	15.0	21.0	56.7	7.0	
20	2.65	51.3	25.6	24.1	54.6	6.4	23.0	-127.0	9.6	4.71	-140.9	14.5	20.2	55.3	8.0	

f:frequency (Hz) ρ :apparent resistivity ($\Omega \cdot m$) ϕ :phase (degree) r: error (%)

(to be continued)

Table I (Continued)

No.	f	ρ_{xx}	ϕ_{xx}	r	ρ_{xy}	ϕ_{xy}	r	ρ_{yx}	ϕ_{yx}	r	ρ_{yy}	ϕ_{yy}	r	ρ_{av}	ϕ_{av}	r	date
28B	8	3.24	43.4	8.7	18.5	58.1	7.3	22.9	-126.6	2.9	1.94	-138.5	16.4	18.4	57.5	5.1	MAY 09, 1990
14	3.34	43.2	5.5	23.2	57.2	6.1	26.8	-125.7	2.5	1.81	-130.0	15.4	22.6	56.7	4.3		
20	2.44	39.8	11.7	23.5	56.3	6.2	27.1	-127.9	3.2	1.85	-143.7	16.1	23.5	55.6	4.7	DEC. 07, 1989	
29	8	0.69	49.9	41.6	9.84	70.6	14.2	8.77	-108.4	17.5	0.20	40.7	170.7	9.53	70.3	15.9	
14	0.14	65.6	139.9	11.1	67.2	11.7	9.59	-101.7	21.3	0.74	31.9	63.9	10.6	72.1	16.5		
20	0.05	80.2	434.8	14.9	67.5	14.9	17.6	-96.8	29.5	0.90	-16.3	103.8	16.2	74.9	22.2		
30	8	0.56	-135.8	50.7	4.31	69.8	15.9	9.47	-116.5	5.3	0.05	76.7	98.7	6.23	66.8	10.6	APR. 17, 1990
14	0.70	-119.7	20.0	7.99	68.9	11.0	13.4	-113.5	4.3	0.39	53.7	34.5	9.86	68.3	7.6		
20	1.56	-145.0	47.1	7.60	68.2	22.1	14.0	-112.1	9.3	0.48	51.3	47.5	9.76	70.0	15.7		
31	8	0.04	125.1	47.7	5.89	68.8	7.5	3.39	-114.8	5.9	0.003	-37.7	191.7	4.48	66.9	6.7	APR. 17, 1990
14	0.08	91.9	92.8	8.97	67.6	4.8	5.16	-112.0	4.8	0.01	-170.3	143.2	6.77	67.9	4.8		
20	0.04	-164.8	202.1	8.25	69.9	17.7	4.02	-111.8	8.5	0.11	74.8	76.6	5.71	69.3	13.1		
32	8	0.12	-140.1	15.9	2.66	65.0	6.4	5.27	-123.4	3.6	0.02	143.7	94.8	3.72	60.5	5.0	APR. 26, 1990
14	0.12	-134.0	20.9	3.38	61.7	5.9	6.37	-123.8	2.4	0.01	168.0	110.0	4.64	58.7	4.1		
20	0.25	-130.6	19.0	3.60	60.9	7.7	6.01	-125.0	4.5	0.03	91.1	77.4	4.58	57.8	6.1		
33	8	0.12	80.4	43.2	3.65	65.6	8.1	10.1	-120.1	5.1	0.22	-127.6	36.3	5.90	62.7	6.6	APR. 26, 1990
14	0.07	81.4	48.2	5.26	62.7	6.2	11.4	-118.7	5.1	0.39	-132.9	30.4	7.59	62.0	5.6		
20	0.02	131.0	211.5	4.53	66.4	13.8	10.1	-120.2	8.9	0.04	-142.7	78.9	6.72	63.0	11.3		
34	8	0.25	-131.9	26.2	1.44	72.5	13.3	6.01	-124.4	5.1	0.04	76.9	68.9	2.84	64.1	9.2	APR. 26, 1990
14	0.35	-124.2	33.7	2.32	70.1	13.8	6.40	-126.5	7.4	0.10	68.8	53.5	3.66	61.8	10.6		
20	0.14	-138.8	64.1	3.27	69.8	12.0	5.57	-128.4	7.3	0.16	63.0	36.9	4.12	61.0	9.7		
35	8	0.07	-159.1	27.1	1.79	59.9	5.0	2.17	-124.8	4.6	0.09	55.7	32.1	1.91	58.3	4.8	APR. 26, 1990
14	0.05	-153.2	26.3	2.48	57.1	6.0	2.72	-123.7	4.8	0.14	43.8	23.4	2.54	57.3	5.4		
20	0.05	-156.5	48.7	2.56	56.0	6.5	2.13	-121.7	11.5	0.24	43.9	34.0	2.26	58.1	9.0		
36	8	0.22	-108.3	35.0	18.8	61.3	6.5	3.70	-120.8	3.2	0.39	82.4	22.0	8.11	59.7	4.9	MAY 09, 1990
14	0.26	-99.0	22.1	24.8	60.3	4.8	4.68	-121.6	2.8	0.41	68.1	16.0	10.5	58.9	3.8		
20	0.90	-108.0	20.0	25.0	57.3	8.0	5.23	-121.6	2.7	0.46	64.3	17.3	10.8	57.2	5.3		
37	8	3.48	-137.2	5.8	8.14	68.6	6.8	40.0	-128.8	4.2	0.42	-176.6	63.6	18.4	58.1	5.5	MAY 16, 1990
14	4.52	-144.4	9.6	8.45	62.8	13.9	42.9	-131.0	3.0	0.29	131.7	75.3	18.4	54.4	8.5		
20	3.67	-139.5	21.3	10.4	58.5	16.5	33.6	-133.0	8.0	0.36	107.5	109.0	17.8	51.5	12.3		

f:frequency (Hz) ρ :apparent resistivity ($\Omega \cdot m$) ϕ :phase (degree) r:error (%) (to be continued)

Table 1 (Continued)

No.	f	ρ_{xx}	ϕ_{xx}	r	ρ_{xy}	ϕ_{xy}	r	ρ_{yx}	ϕ_{yx}	r	ρ_{yy}	ϕ_{yy}	r	ρ_{av}	ϕ_{av}	r	date
38	8	0.03	128.7	61.7	1.89	65.9	8.2	11.3	-133.1	5.4	0.64	65.6	24.8	4.63	57.2	6.8	MAY 16, 1990
39	8	0.26	-104.2	40.4	6.62	62.3	13.0	31.7	-133.5	6.7	1.17	176.5	39.5	14.9	53.8	9.8	MAY 16, 1990
40	8	1.62	-132.7	7.3	17.7	57.3	10.7	43.0	-130.1	5.1	8.70	56.9	9.9	15.7	54.8	7.9	JUN. 06, 1990
41	8	1.16	-135.9	8.8	20.5	54.2	10.0	48.4	-131.2	6.4	9.14	50.5	13.5	19.2	54.2	8.2	
42	8	4.56	57.5	23.6	24.8	54.6	6.2	39.9	-135.6	7.6	12.6	51.3	7.6	18.5	51.9	6.9	JUN. 06, 1990
43	8	2.10	-99.2	50.9	19.7	60.5	8.0	12.7	-135.7	5.8	0.23	65.5	53.7	8.08	56.2	6.9	JUN. 06, 1990
44	8	0.54	-137.1	74.0	11.6	61.0	12.0	37.0	-128.7	5.9	2.04	-134.9	23.8	30.2	52.6	6.6	JUN. 06, 1990
45	8	0.91	-139.5	54.1	8.98	57.7	18.1	44.7	-133.3	4.8	2.41	-140.0	25.3	39.1	49.0	7.5	
46	8	0.38	-109.9	34.0	8.28	65.5	24.2	11.3	-136.1	6.3	2.34	-145.2	24.6	34.2	45.1	7.4	
47	8	0.62	-112.4	95.2	10.7	60.0	15.9	16.8	-125.6	6.0	0.09	119.7	84.6	15.8	56.6	7.0	JUN. 06, 1990
48	8	0.16	-94.3	55.0	5.45	61.0	12.5	15.6	-129.8	5.0	0.07	121.0	97.1	13.6	55.3	8.5	
49	8	0.27	-117.7	30.7	7.51	63.0	8.4	21.9	-121.1	7.4	0.61	-151.9	43.7	13.5	58.9	9.9	
50	8	0.43	-121.8	33.4	7.65	61.9	9.5	21.9	-118.1	9.0	0.45	-149.3	49.9	13.3	61.4	9.2	
51	8	0.29	-117.3	47.0	7.92	64.0	11.2	14.9	-118.3	7.3	0.75	167.3	80.9	11.0	61.7	9.2	

f:frequency (Hz) ρ :apparent resistivity ($\Omega \cdot m$) ϕ :phase (degree) r:error (%)
 (to be continued)

Table 1 (Continued)

No.	f	ρ_{xx}	ϕ_{xx}	r	ρ_{xy}	ϕ_{xy}	r	ρ_{yx}	ϕ_{yx}	r	ρ_{yy}	ϕ_{yy}	r	ρ_{av}	ϕ_{av}	r	date
49	8	0.92	48.7	17.2	5.13	55.4	9.4	26.0	-122.8	7.3	4.40	-139.4	18.7	9.74	58.6	8.4	NOV.15,1990
14	0.96	44.8	18.9	7.47	57.5	6.6	30.8	-121.6	6.0	5.47	-138.8	15.3	13.2	60.4	6.3		
20	0.56	46.3	39.4	8.00	57.0	8.4	32.2	-122.3	6.2	4.32	-135.2	19.4	14.6	58.6	7.3		
27	0.57	55.3	37.8	7.57	57.9	13.6	34.6	-124.7	7.4	3.70	-143.0	18.8	14.8	57.6	10.5		
50	8	0.04	77.7	253.8	13.1	65.4	15.9	12.6	-121.9	7.5	1.64	72.1	29.5	13.1	62.0	11.7	NOV.15,1990
14	0.04	-29.0	246.4	17.9	61.0	6.0	17.1	-122.3	6.3	0.95	67.6	29.7	17.6	59.1	6.1		
20	0.11	-101.6	80.1	24.3	56.1	11.0	18.2	-122.0	7.3	1.62	68.1	25.9	20.7	56.8	9.2		
26	0.27	-143.6	79.7	25.1	57.9	8.3	18.9	-125.3	7.8	2.26	58.3	24.1	21.1	56.6	8.0		
51	8	0.08	35.6	137.0	17.4	61.6	14.5	13.9	-125.1	4.6	0.41	-170.4	49.6	15.5	58.6	9.6	NOV.15,1990
14	0.30	58.4	76.5	25.2	60.1	7.9	18.6	-124.3	5.6	0.85	-149.1	21.1	21.2	58.3	6.7		
20	0.004	159.9	811.8	31.5	58.0	18.8	20.2	-124.2	4.4	0.50	-145.4	41.7	25.2	56.9	11.6		
26	0.02	-149.9	340.2	30.6	59.2	8.5	19.5	-128.4	6.9	0.48	-138.9	59.8	24.5	55.4	7.7		
52	8	0.23	63.8	52.1	7.22	58.9	12.7	13.9	-127.0	5.9	0.64	169.5	34.1	9.84	56.9	9.3	NOV.15,1990
14	0.25	13.7	43.2	12.8	58.7	5.3	18.4	-131.4	3.5	0.79	-152.3	26.3	15.2	54.5	4.4		
20	0.18	-4.4	42.1	14.3	56.4	5.2	18.2	-131.6	4.6	0.70	-141.2	29.6	16.0	53.0	4.9		
27	0.10	-40.6	64.4	13.1	56.4	9.0	21.1	-129.1	2.9	0.37	-137.0	32.6	16.7	53.9	5.9		

f:frequency (Hz) ρ :apparent resistivity ($\Omega \cdot m$) ϕ :phase (degree) r:error (%)

Table 2 Resistivity structure estimated from VLF, ELF-MT.

No.	1st. layer		2nd. layer		3rd. layer		Error*
	Resistivity ($\Omega \cdot m$)	Thickness (m)	Resistivity ($\Omega \cdot m$)	Thickness (m)	Resistivity ($\Omega \cdot m$)		
1	26 (3- 260)	9 (1-89)	5 (1- 49)	93 (9-930)	1.2 (0.1-12.)	0.29	
2	61 (6- 610)	4 (2- 6)	6 (4- 7)	105 (96-114)	0.8 (0.7- 1.2)	0.71	
3	6 (4- 12)	21 (2-40)	4 (3- 6)	81 (68-100)	1.0 (0.8- 1.3)	0.75	
4	30 (29- 34)	13 (12-14)	8 (6- 11)	52 (49- 54)	1.1 (1.1- 1.2)	0.16	
5	70 (61- 150)	12 (11-13)	12 (8- 16)	30 (28- 32)	0.5 (0.4- 0.5)	0.31	
6	81 (73- 140)	16 (16-17)	7 (5- 11)	24 (11- 32)	2.0 (2.0- 2.1)	0.24	
7	56 (5- 560)	5 (4- 5)	4 (3- 4)	59 (56- 62)	0.9 (0.9- 1.0)	0.20	
8	28 (13- 350)	9 (8-10)	1 (1- 1)	68 (65- 76)	0.3 (0.2- 0.3)	0.36	
9	56 (25- 150)	6 (6- 6)	4 (4- 5)	44 (42- 46)	1.3 (1.3- 1.3)	0.10	
10	37 (36- 40)	13 (13-13)	5 (5- 6)	130 (110-160)	2.0 (1.7- 2.4)	0.15	
11	51 (45- 110)	10 (9-11)	7 (7- 8)	110 (100-130)	2.8 (2.7- 3.0)	0.19	
12B	31 (30- 34)	45 (14-86)	26 (24- 37)	200 (190-220)	6.9 (6.4- 7.7)	0.27	
12C	30 (28- 37)	11 (9-18)	11 (10- 11)	380 (370-560)	2.0 (1.6- 6.9)	0.52	
13	110 (110- 140)	17 (17-18)	28 (25- 31)	84 (82- 86)	1.8 (1.8- 1.9)	0.12	
14	110 (100- 160)	19 (13-28)	48 (32- 77)	57 (46- 64)	3.6 (3.4- 3.8)	0.40	
15	18 (16- 27)	8 (7-10)	5 (5- 7)	72 (71- 74)	0.8 (0.8- 0.8)	0.16	
16	14K (1K-140K)	12 (5-15)	14 (12- 22)	90 (79-100)	4.1 (3.9- 4.4)	0.39	
17	96 (88- 120)	37 (33-49)	10 (9- 14)	98 (17-230)	7.6 (7.1- 8.6)	0.47	
18	40 (39- 43)	18 (18-19)	5 (5- 6)	58 (50- 64)	2.1 (2.0- 2.1)	0.12	
19	14 (9- 24)	14 (1-79)	13 (11- 26)	104 (97-112)	2.4 (2.2- 2.6)	0.43	
20	53 (7- 530)	5 (2- 8)	12 (11- 14)	142 (138-150)	2.0 (1.9- 2.3)	0.32	
21	87 (83- 100)	22 (16-30)	39 (21- 71)	34 (27- 42)	2.3 (2.1- 2.4)	0.39	
22	250 (41-2500)	22 (20-25)	14 (6- 45)	71 (68- 74)	1.2 (1.2- 1.3)	0.28	
23	54 (53- 57)	14 (14-14)	15 (14- 17)	65 (63- 66)	1.7 (1.6- 1.7)	0.08	
24	110 (100- 140)	21 (20-22)	18 (16- 28)	89 (87- 91)	1.7 (1.7- 1.8)	0.14	
25	78 (62- 170)	20 (15-29)	20 (18- 30)	158 (154-164)	2.6 (2.4- 2.9)	0.29	

():Confidential limit of each parameter

(to be continued)

* :Normalized squared residuals

Table 2 (Continued)

No.	1st. layer		2nd. layer		3rd. layer		Error*
	Resistivity (Ω · m)	Thickness (m)	Resistivity (Ω · m)	Thickness (m)	Resistivity (Ω · m)		
26	250 (20-2500)	8 (1-11)	30 (26- 36)	220 (210-230)	4.8 (4.3- 5.7)	0.44	
27A	160 (150- 210)	28 (26-32)	34 (31- 50)	138 (133-143)	6.1 (6.0- 6.4)	0.18	
27B	140 (120- 460)	19 (18-22)	24 (23- 26)	199 (197-202)	5.1 (5.0- 5.2)	0.08	
28A	160 (160- 190)	28 (27-39)	43 (40-100)	147 (134-158)	10.6 (10.3-11.1)	0.27	
28B	1000 (67-9900)	11 (9-12)	54 (52- 59)	186 (181-191)	11.5 (11.4-11.8)	0.12	
29	220 (200- 310)	31 (27-36)	53 (39- 91)	214 (211-218)	1.7 (1.5- 2.0)	0.27	
30	640 (590-1200)	90 (87-95)	12 (5- 23)	133 (122-145)	1.3 (1.1- 2.1)	0.50	
31	1200 (190- 12K)	34 (30-38)	140 (80-200)	91 (85- 96)	1.9 (1.7- 2.1)	0.48	
32	50 (48- 62)	20 (19-22)	5 (5- 5)	163 (162-168)	1.2 (1.1- 1.3)	0.09	
33	6500 (250- 65K)	16 (14-18)	35 (26- 59)	103 (98-108)	2.9 (2.8- 3.1)	0.35	
34	120K (2K-1200K)	35 (34-36)	4 (4- 6)	85 (80- 90)	1.2 (1.2- 1.3)	0.21	
35	31 (29- 43)	20 (18-23)	3 (3- 5)	56 (49- 64)	1.1 (1.1- 1.2)	0.26	
36	320 (220- 1K)	37 (33-42)	35 (20-110)	75 (66- 83)	5.5 (5.3- 5.7)	0.28	
37	850 (140-8500)	35 (24-53)	94 (36-340)	63 (22-110)	13.9 (13.0-15.1)	0.80	
38	51 (43- 100)	17 (15-24)	7 (5- 17)	65 (23-110)	3.0 (2.7- 3.5)	0.77	
39	15 (15- 16)	470 (440-700)	6 (2-490)	180 (60-1800)	2.1 (0.04-19.4)	0.47	
39**	680 (13-6800)	3 (0.4-7)	5 (4- 7)	17 (11- 27)			
			39 (32- 66)	190 (160-210)	9.8 (9.0-11.0)	0.49	
40	200 (200- 240)	39 (38-45)	16 (16- 17)	230 (220-330)	10.0 (9.9-10.3)	0.21	
41	96 (44- 590)	27 (14-41)	15 (9- 69)	48 (11- 86)	6.4 (6.2- 6.9)	0.50	
42	48K (760-480K)	17 (14-20)	95 (81-130)	60 (28-140)	28.6 (27.6-30.9)	0.56	
43	460 (62-4500)	9 (1-170)	570 (150- 6K)	68 (51-100)	9.8 (8.6-11.9)	1.88	
46	410 (350- 710)	18 (3-36)	530 (410-800)	95 (90-101)	6.8 (6.6- 7.2)	0.35	
47	no solusion						
48	550 (530- 640)	34 (28-39)	300 (270-340)	100 (98-103)	5.8 (5.7- 5.9)	0.13	
49	200 (160- 350)	25 (8-42)	290 (92-900)	85 (77- 91)	7.2 (7.0- 7.6)	0.36	
50	180 (150- 260)	66 (56-79)	23 (20- 35)	160 (120-200)	8.2 (7.3- 9.5)	0.51	
51	230 (210- 300)	66 (60-76)	25 (24- 32)	190 (160-230)	9.6 (9.0-10.9)	0.33	
52	150 (130- 250)	17 (9-27)	1200 (200-12K)	58 (49- 68)	10.1 (9.8-10.8)	0.54	

():Confidential limit of each parameter

*:Normalized squared residuals

**:4 layer model