

霧島火山の深部比抵抗構造 (I)

歌田久司¹⁾・鍵山恒臣¹⁾・霧島火山電磁気研究グループ²⁾

¹⁾東京大学地震研究所

²⁾参加者および所属機関

西田泰典(北海道大学理学部) 三品正明(東北大学理学部)

上嶋 誠・山口 勝・増谷文雄・神田 径・井上智広(東京大学地震研究所)

山田功夫(名古屋大学理学部) 大志万直人(京都大学防災研究所)

田中良和・橋本武志(京都大学理学部) 塩崎一郎(鳥取大学教養部)

村上英記(高知大学理学部) 市来雅啓(鹿児島大学理学部)

(1994年9月29日受理)

Deep Resistivity Structure of Kirishima Volcano (I)

Hisashi UTADA¹⁾, Tsuneomi KAGIYAMA¹⁾
and EM Research Group for Kirishima Volcano²⁾

¹⁾Earthquake Research Institute, University of Tokyo

²⁾Hokkaido Univ., Tohoku Univ., Nagoya Univ., Kyoto Univ., Tottori Univ.,
Kochi Univ. and Kagoshima Univ.

(Received September 29, 1994)

Abstract

Kirishima is a volcano complex at the central part of southern Kyushu, southwest Japan, which consists of about 20 individual volcanos. Each of more than ten of these volcanoes has been active in the past 22,000 years, and three of them are presently active. This means that each individual volcano is active in the same geological time scale, suggesting that the volcano might have complex system of magma supply, different from volcanoes with a single active vent.

Each volcano tends to align in the NW-SE direction. The presently active three volcanoes, Iwo-yama, Shinmoe-dake and Ohachi are also along this lineament. This trend almost coincides with the direction of tensile axis of the regional stress field. This may indicate that the volcanism in this region is controlled by regional tension rather than compression like volcanism in the eastern part of Japan arc.

Previous studies do not have reached a consensus about the deep magma supply system of Kirishima volcano. For example seismic studies indicated the possible existence of a magma reservoir below Kakuto caldera, north of Kirishima Volcano, on the basis of seismic activity increase relating to the volcanic activity in the Kirishima region. On the other hand some of the geological and petrological studies have shown that the spatial variation in the magma types between the volcanoes is rather difficult to

be accounted for by a differentiation from a single source magma. From other kinds of research, evidence is not enough to give a solid answer to a question about the magma supply system of Kirishima Volcano.

Japanese Volcano Research Group recently started incorporated investigation to study the deep structure of Kirishima Volcano, including seismic, electromagnetic, gravimetric, and other techniques in order to reveal the volcanological problems given above. EM group in this program tries to apply conventional MT survey on the volcanic edifice and the Network-MT method to study more regional structure. MT experiments have so far been conducted several times by using 10 identical sets of portable MT instrument. Simultaneous magnetic and electric field variations were recorded in 3.5 inches floppy disk with a sampling interval of 1 second.

The time series records were transformed to the frequency domain and tensor impedance estimates were obtained. In order to make rough interpretation in terms of subsurface resistivity distribution, 1-D inversion was carried out using determinant averaged apparent resistivity and phase in the ULF band, together with those at Schumann resonance frequencies in the ELF band. MT responses at most of the sites were found to be expressed by a simple four layer structure; relatively resistive overburden, very conducting second layer at the depth of a few hundred meters, resistive basement, and deep conductor. The deep conductor appears at about 10 km below the surface in average, but tends to become shallower beneath the presently active vent of Iwo-Yama or Shinmoe-Dake up to several km depth. It is interesting that earthquake swarm activity was observed at these depths when a small eruption occurred on Shinmoe-Dake in 1991. Beneath these areas the second layer is unusually conducting, possibly reflecting shallow hydrothermal activity.

On the other hand, Ohachi is characterized by rather resistive structure. Although observation is not enough particularly in Ohachi region, the locality of resistivity structure thus obtained may be relating to the difference in the magma supply system.

1. はじめに

霧島火山は、Fig.1 に示すように南九州中央部に位置する火山群で、20 以上の火山体から成り立っている。これらの火山のうち 10 以上の火山は、過去 22,000 年間に活動しており、そのうち御鉢・硫黄山・新燃岳の 3 火山は歴史時代以降に噴火している (Fig. 2)。火山活動のもととなるマグマがどこで発生しどのような経路・時間経過をへて地表に噴出するのかを明らかにするということは、火山学の最も基本的な問題の一つである。当然のことながら、地表に現われた地形や噴火様式は個々の火山によって異なる。そこで、そのような多様性を支配している要因のは何なのかをとき明かすことが、この問題を解く手がかりとなる。

さて、山体の形状および噴火様式の違いのかなりの部分は、おおまかには火山を含む地域の広域的応力場や、火山深部の状態の違いにその原因を求めると考えられる。霧島火山についていえば、多数の火山が地質学的年代スケールではほぼ同時に活動しているが、この活動を支えるマグマの供給システムにはどのような特徴があるのだろうか。鍵山 (1994a, c, d) に詳しく述べられているように、1968 年に霧島の北側に隣接する加久藤カルデラで発生したえびの地震 (M6.1) とその前後に活発化した霧

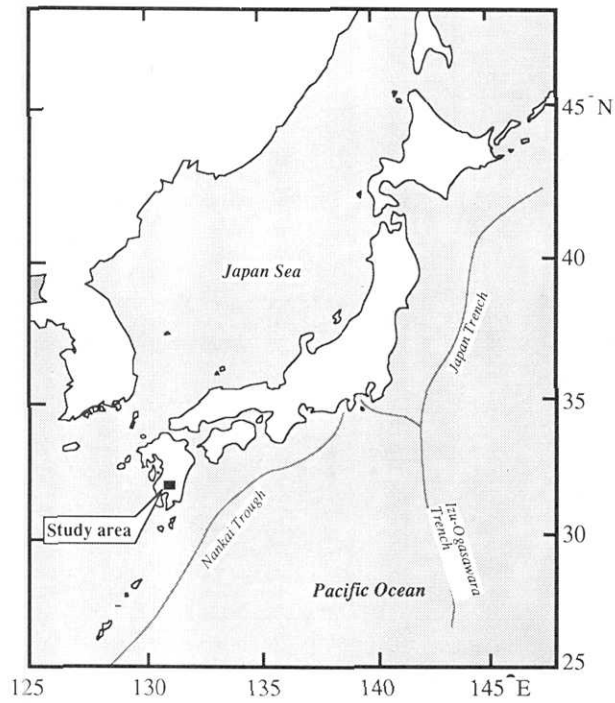


Fig. 1 Location of the present study area.

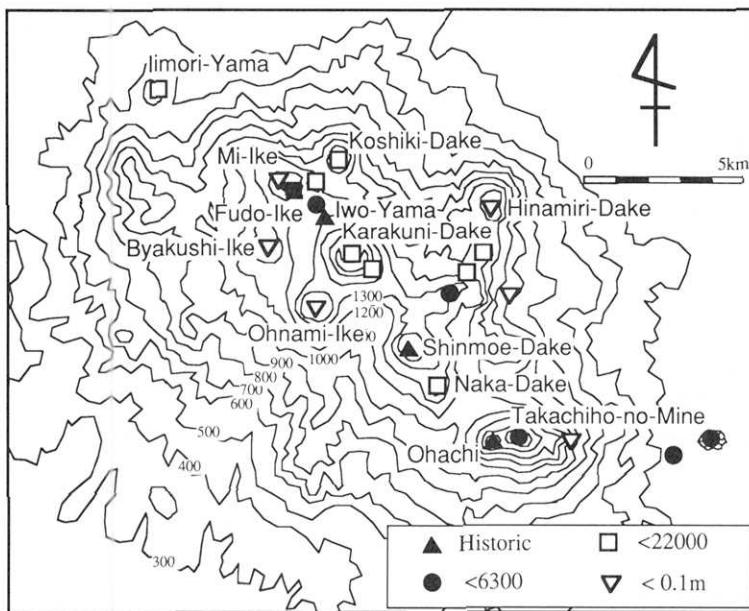


Fig. 2 Location and age of each individual volcano (modified after Kobayasi and Kagiya (1988)).

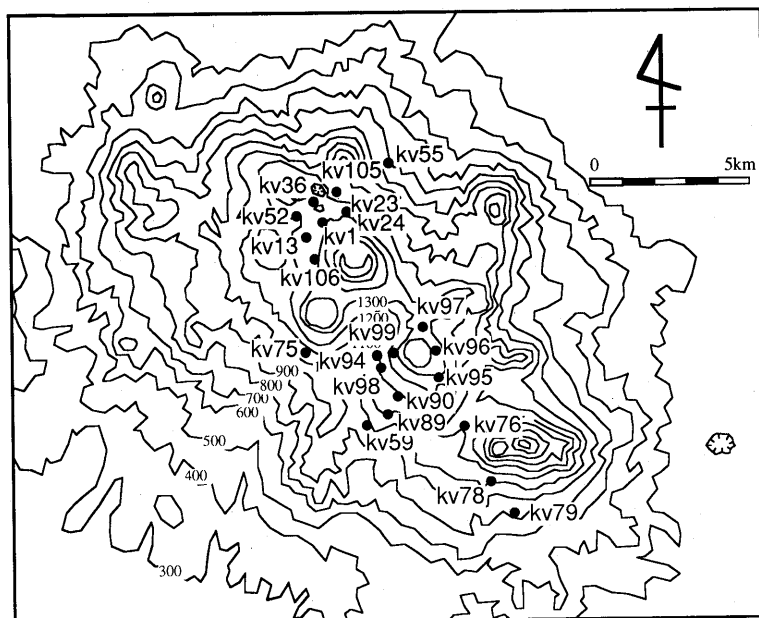


Fig. 3 Distribution of observation sites.

島地域の火山性地震活動との関連などから (Minakami, et al., 1970), 霧島火山群の主要マグマだまりは加久藤カルデラの地下深部にあるのではないかという, 漠然とした考え方もあった。しかしながら, この考え方は岩石学的研究からは否定的にとらえられており, 結局のところ地球物理学的観測からマグマ溜まりの存在やそこからの上昇経路を示唆するような直接的な情報はほとんどないというのが現状であった。

地球物理学的観測がもたらす重要な情報のひとつに地下構造をあげることができる。本研究では, 霧島火山の深部の状態を調べるために, マグネトテルリク (MT) 法による電気比抵抗構造探査を実施した。岩石の電気比抵抗は, 温度と含水率に対する依存性が高いことから, これまでもしばしば火山の構造探査に用いられてきた。特に噴火形態に重要な影響をもつと見られる帯水層分布など, 地下数 km 程度までの比較的浅い構造の探査に有効とされてきた (たとえば, Utada and Shimomura, 1990)。霧島火山においても, ELF (8Hz 数 10Hz) や VLF (17.4kHz) の MT 観測によって, 浅部の比抵抗分布が鍵山他 (1994) によって詳細に調べられている。本研究は, ULF (0.1Hz 以下) の周波数帯域の MT 観測によって, 数 km から数 10km までの深さの比抵抗構造を解明することを目的とする。さらに他の手法による情報と総合して, 霧島火山のマグマ供給システムを明らかにすることが最終的な目標である。

2. 観測および解析

ULF-MT 法の観測は, これまでに Fig.3 に示すような観測点で実施してきた。1994 年 5 月および 9 月には, それぞれ 7 か所・13 か所における同時観測を実施した。使用した装置である, U36 (テラテクニカ製) の性能を Table 1 にまとめる。この装置は, MT 観測および TDEM 観測を行うために, わが国の地球電磁気研究者が協力して開発

Table 1. Specification of the magnetotelluric equipment U36 used in the present study.

Magnetic sensor	Three component fluxgate
Noise level of magnetic components	60 pT (typical)
Resolution of magnetic components	1 pT
Electrode	Pb-PbCl ₂ or Cu-CuSO ₄
Noise level of telluric components	0.1 μ V
Resolution of telluric components	0.1 μ V
Cable length for telluric measurement	100 m
Sampling rate	32Hz~1/60 Hz (variable)
Recording device	3.5' floppy disk (DOS compatible)
Power supply	12 V DC
Power consumption	5 VA (typical)

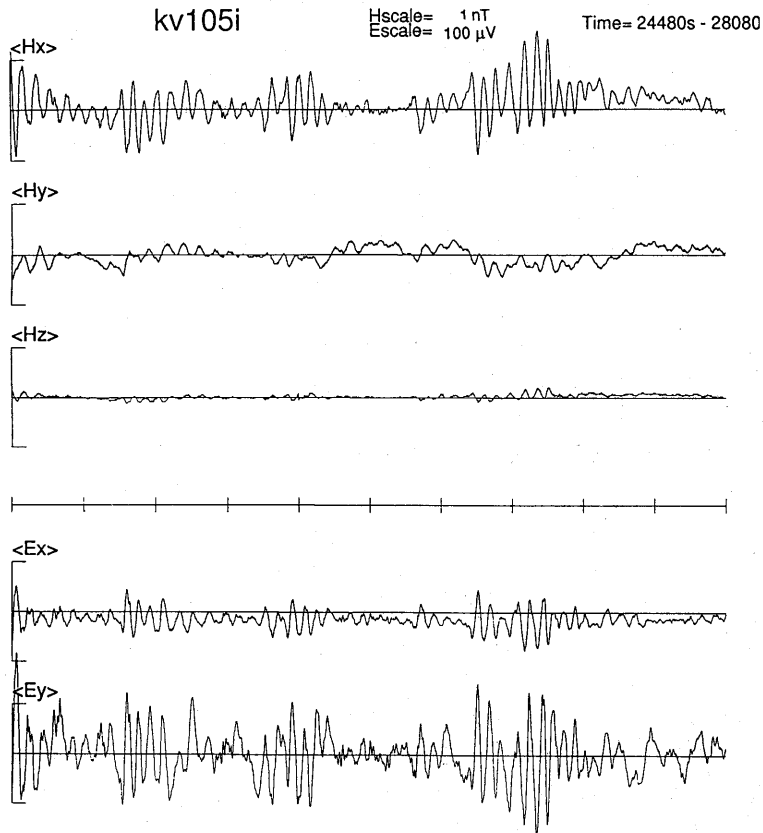


Fig. 4 Example of data recorded at site kv105. Magnetic and electric field data are plotted with scale of 1 nT and 100 μ V, respectively. Electrode spacing for E-field measurement is about 100 m.

したもので、高感度・高速の携帯用地磁気地電位差測定装置である。一部の観測では、サンプリング間隔が1秒でデータ収録がメモリーになされる以外はU36と同等

の U30 という装置も用いた。

U36 は、32Hz のサンプリング速度までが可能であるが、本研究では 1Hz で行った。Fig.4 は測点 kv105 における観測記録から、数十秒周期の地磁気擾乱を含む 1 時間分をプロットしたものである。この例を見ても、磁場変化で 0.1nT 以下、電場変化で $1\mu\text{V}/\text{m}$ 以下の振幅であっても、十分に解析可能な記録が得られていることから、この装置が極めて高感度であることがわかる。

もし地球が水平方向に完全に一樣な媒質でできているなら、地表で測定される変動する電場と磁場は互いに直交し、相直交する電磁場の振幅比は等しくなることが Maxwell 方程式から期待される。Fig.4 の記録を見ると、磁場の南北 (X) 成分と電場の東西 (Y) 成分、磁場の Y 成分と電場の X 成分にそれぞれよい相関が見られ、第 1 近似的には電磁場の直交性が成り立っているといつてよい。しかしながら、詳しくはあとで示すがそれぞれの振幅比には違いが見られ、水平方向の不均質を反映しているものと推察される。一方、磁場変化の鉛直 (Z) 成分の振幅が極めて小さいことも特徴的である。Z 成分磁場の振幅が小さいことは、不均質の性質はコントラストがそれほど大きくない、あるいは不均質が 2 次元的ではないことを示している。

MT 法で測定される電磁場の間の関係は、周波数領域で一般に以下の式によって記述される。

$$E_x(f) = Z_{xx}(f) H_x(f) + Z_{xy}(f) H_y(f) \quad (1)$$

$$E_y(f) = Z_{yx}(f) H_x(f) + Z_{yy}(f) H_y(f) \quad (2)$$

$$Z(f) = A(f) H_x(f) + B(f) H_y(f) \quad (3)$$

(1)式および(2)式の $Z_{ij}(f)$ は周波数 f における電場の i 成分と磁場の j 成分の振幅比を表わし、インピーダンステンソルと呼ばれる。(3)式の $A(f)$ および $B(f)$ は磁場変化の Z 成分の特性を表わし地磁気変換関数 (Geomagnetic transfer function) とよばれる。この関数は、前述したように水平方向の比抵抗コントラストを反映するが、霧島火山周辺でのデータを見ると多くの観測点で Z 成分の振幅が小さいことから今回の解析では取り扱わないことにする。さて、インピーダンスは地下構造を反映した観測量で、通常は見かけ比抵抗 ρ_{ij} と位相 ϕ_{ij} によって表わす (i または j は x または y)。ただし、 $\rho_{ij} \cdot \phi_{ij}$ と Z_{ij} との間には

$$\rho_{ij}(f) = (Z_{ij}(f))^2 / i\omega\mu \quad (4)$$

$$\phi_{ij}(f) = \arg(Z_{ij}(f)) \quad (5)$$

なる関係がある。

Fig.5(a) から Fig.5(f) に、硫黄山周辺の各観測点で得られた記録から求められた見かけ比抵抗と位相を示す。これらの観測結果には、以下の様な特徴が見られる。

(1) 短周期では非対角成分の見かけ比抵抗が対角成分に比べて大きい長周期ではほぼ同じ程度の大きさになる観測点が多い。

(2) 見かけ比抵抗 xy と yx とが長周期 (低周波) 側にゆくにしがって値が離れる。 xy の減少が急激なのが特徴である。

(3) xy の位相は長周期ほど大きくなる傾向があるが、 yx はほとんど一定である。現実の 3 次元構造では、4 つのインピーダンス成分の全てに構造に関する情報が含まれている。したがって、最終的にはこれらの全ての観測値を説明できるような 3 次元モデルを求めることが必要になるが、現状では計算機容量などの限界によりこのようなモデ

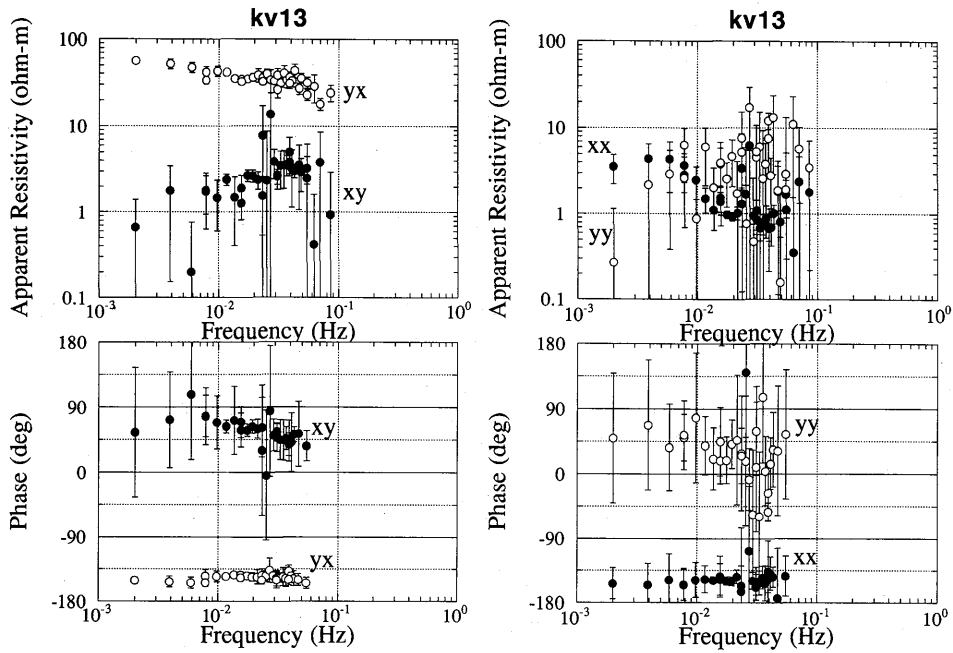


Fig. 5 (a) Apparent resistivity and phase for the periods longer than 10 seconds at site kv13. Shown are the off-diagonal (left) and the diagonal (right) elements of the impedance tensor as a function of frequency. Error bar denotes two standard error of the mean.

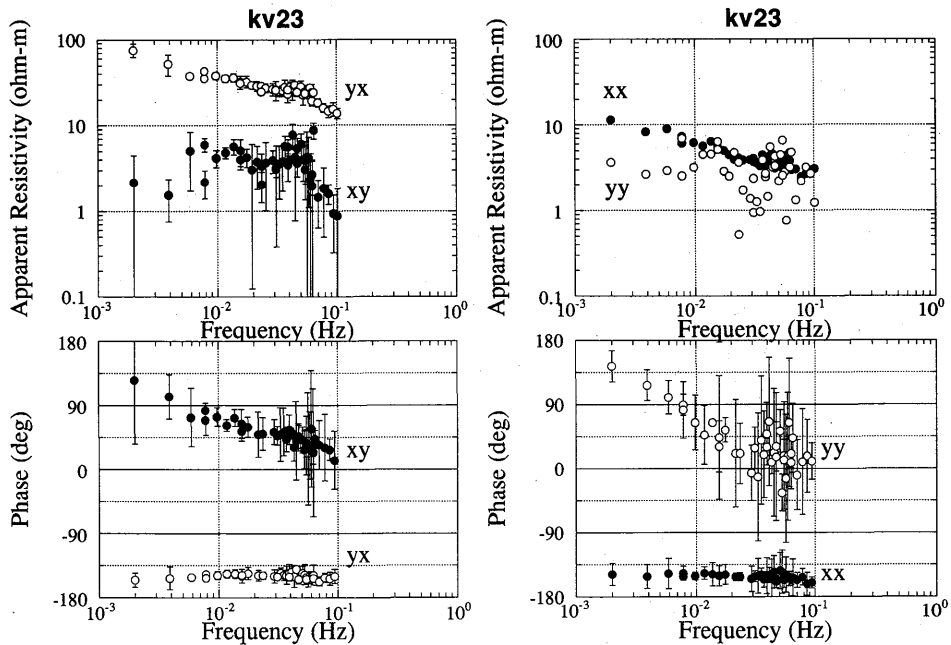


Fig. 5 (b) MT response at site kv23.

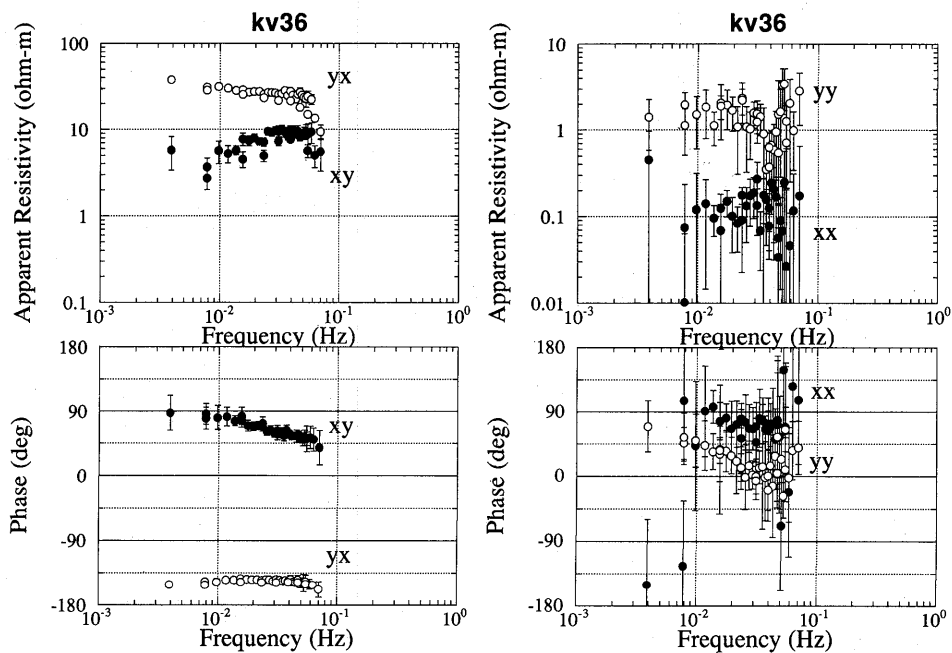


Fig. 5 (c) MT response at site kv36.

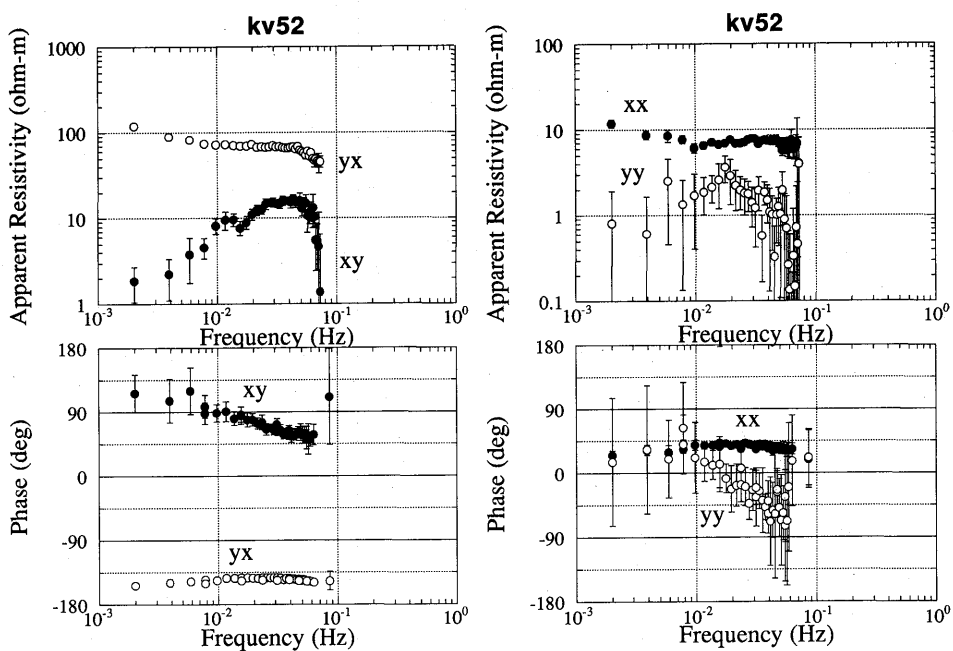


Fig. 5 (d) MT response at site kv52.

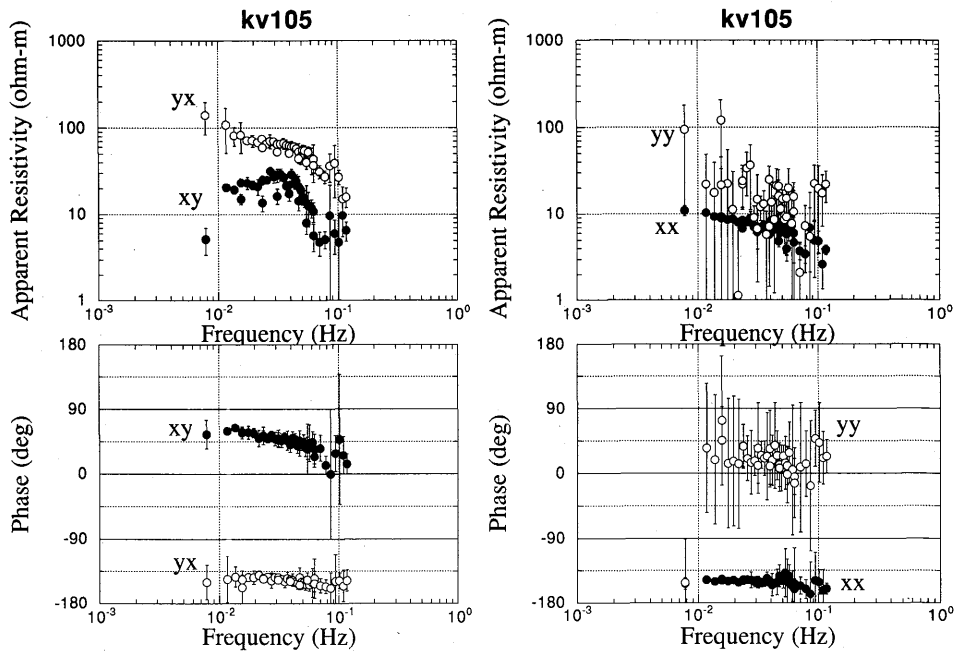


Fig. 5 (e) MT response at site kv105.

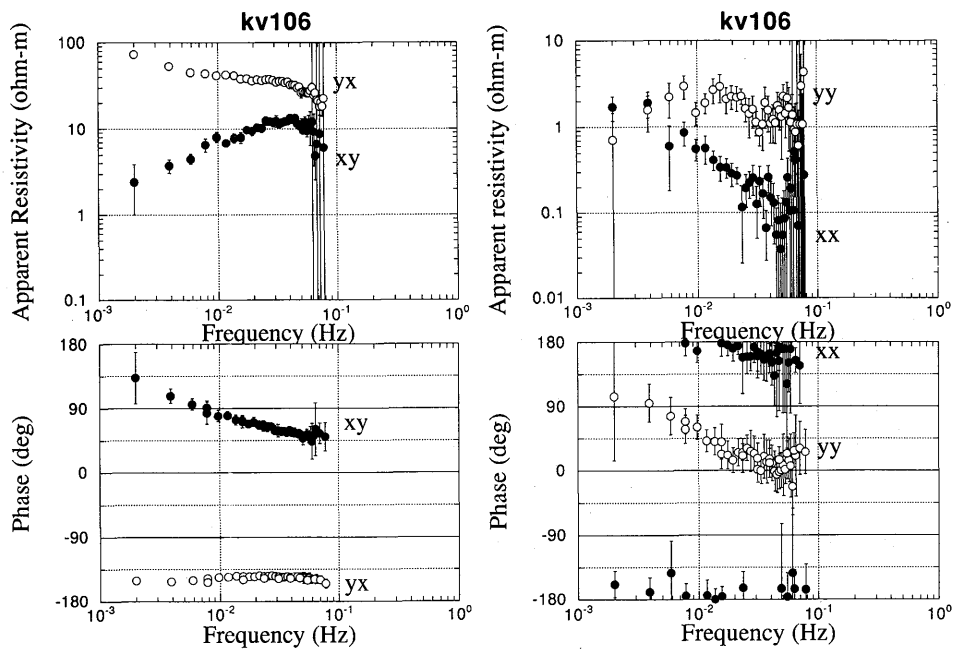


Fig. 5 (f) MT response at site kv106.

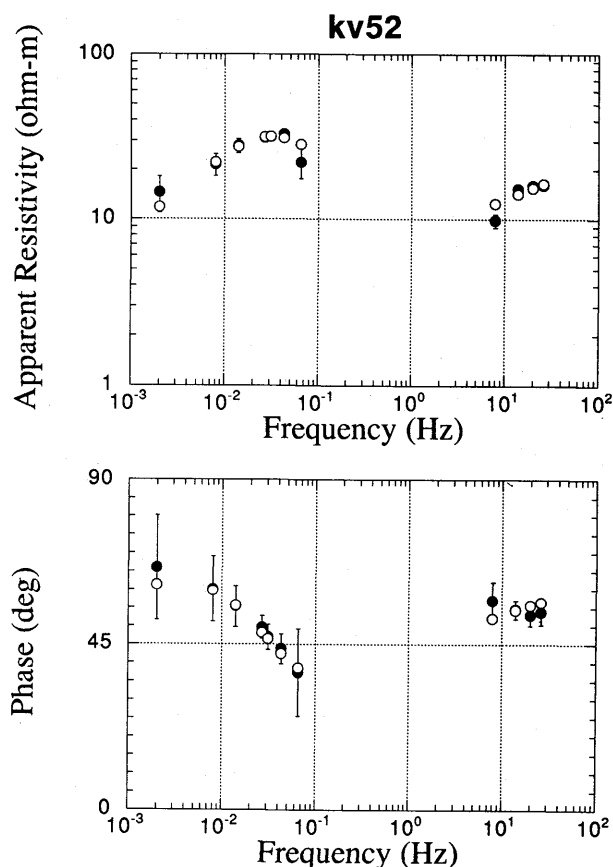


Fig. 6 (a) One dimensional inversion of the determinant averaged MT responses at site kv52. Closed circle with error bar and open circle denote observed and calculated responses, respectively.

リングは達成されていない。ここでは、Utada and Shimomura (1990)で行ったように、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、

$$\rho_{\text{eff}}(f) = \det(Z(f)) / i\omega\mu \quad (6)$$

$$\phi_{\text{eff}}(f) = \arg(\det(Z(f))^{1/2}) \quad (7)$$

により、各観測点における水平成層構造を求めた。

3. 結果および考察

水平成層構造を求める際には、鍵山他 (1994) による ELF・VLF-MT 法の結果を参照してインバージョンを行った。また、Fig.5(a) から Fig.5(f) に示した測定値すべてを入力にすると、ULF のデータに大きなウェイトがかかるので、周波数 1 桁あたりの測定値の数が 6 以下になるようにリサンプリングした。全ての観測点について最適解を求めたところ、ほとんどの結果が 4 層モデルで説明できることがわかった。Fig.6(a) および Fig.6(b) はそれぞれ観測点 kv52 および kv106 の観測値と計算値の適合の様子を示している。いずれの場合にも、ほぼ計算値 (白丸) が観測値 (黒丸) の誤差範囲 (測

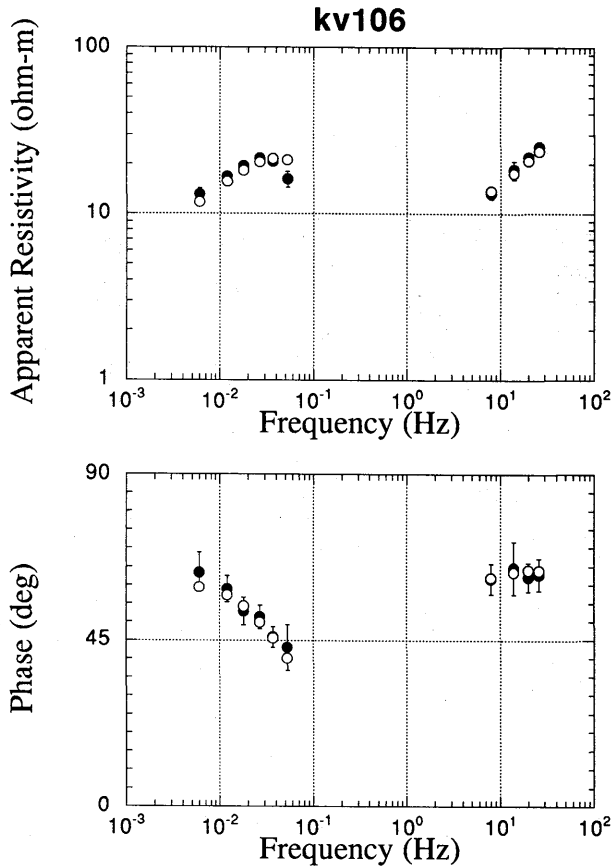


Fig. 6 (b) One dimensional inversion of the determinant averaged MT responses at site kv106.

定値の95%の信頼区間)の中に入っており、層構造モデルで測定値がよく説明できていることがわかる。

以下では、これまでに行った観測結果を現在の活動火口をもつ3火山周辺、すなわち硫黄山周辺・新燃岳周辺・御鉢周辺にわけて議論することにする。また、地表に近い低比抵抗層の分布に関しては、鍵山他(1994)に詳しい議論があるので、ここでは深部の構造に注目することにする。Fig.7(a)は、硫黄山周辺の観測点で得られた層構造モデルを柱状図に示したものである。前述したように、ほとんどの結果が4層モデルで説明することができ、表層はやや高比抵抗、第2層が低比抵抗となり、やや高比抵抗の第3層の下に再び低比抵抗層が現われるという特徴が、多くの観測点に共通して見ることができる。最下層は硫黄山周辺の観測点では10km程度の深さから硫黄山付近で3~4kmにまで浅くなる傾向が見られる。

同様の傾向は新燃岳周辺においても見ることができる(Fig.7(b))。山麓のkv98およびkv94では、低比抵抗層は10km程度の深さであるのに対して、火口周辺のkv95およびkv99などでは、その深さが2~3kmにまで浅くなっている。さらに注目されるのは、1991年11月末に、新燃岳の火山活動がやや活発化したが、その際に発生した火山性地

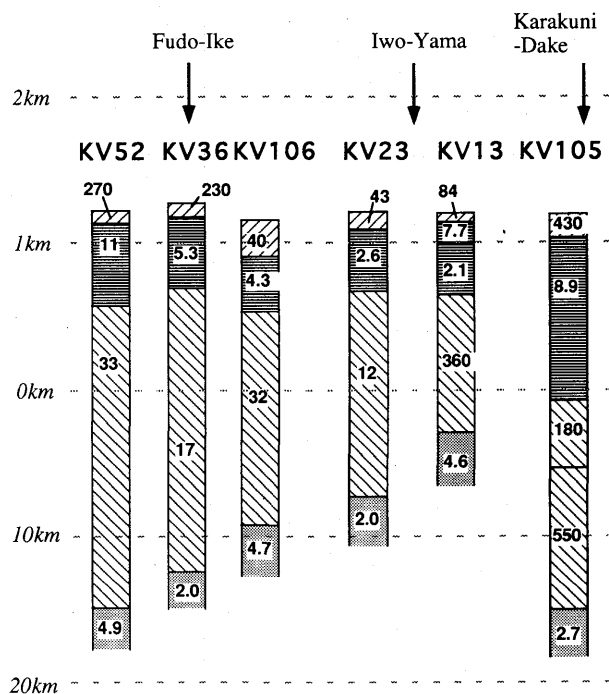


Fig. 7 (a) Results of 1-D inversion for Iwo-yama area.

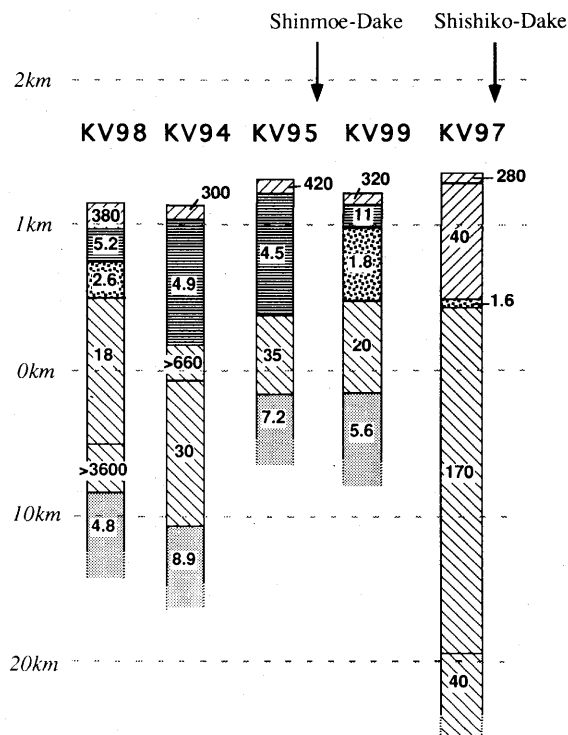


Fig. 7 (b) Results of 1-D inversion for Shinmoe-dake area.

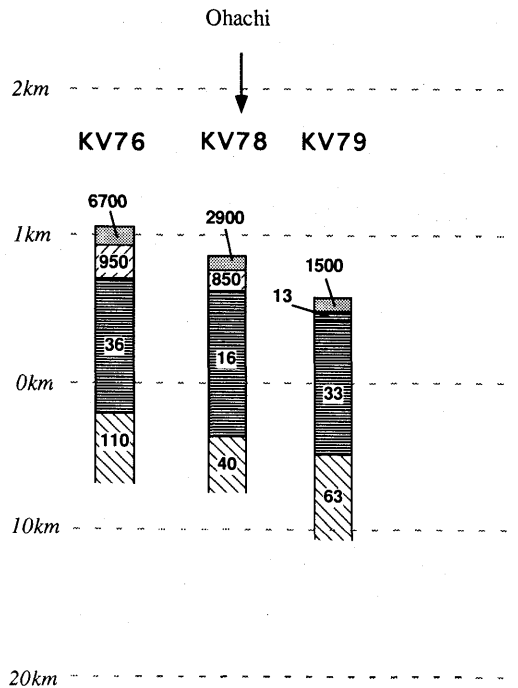


Fig. 7 (c) Results of 1-D inversion for Ohachi area.

震の震源が、火口直下の約 2km の深さに分布していた事実がある（鍵山他，1992）。また、この活動後に実施した水準測量では、山頂下がりの水準変動が見い出され、茂木モデルをあてはめると収縮中心がやはりこの深さに求められた（鍵山他，1992）。現在の活動的の火口直下には、深さ約 10km にあるマグマ溜まりからマグマないしは高温の火山ガスが数 km の深さにまで上昇してきており、これが地下浅部の熱水活動や地震活動を発生させているのかも知れない。一方、獅子戸岳に近い kv97 の結果は、これまでに見てきたものとは明らかに異なる傾向を示し、概して高比抵抗である。インバージョンの結果には、 $1.6\Omega \cdot m$ のきわめて薄い層があるが、パラメータの信頼性が低いので計算上現われただけと考えたほうがよい。比較的高比抵抗であることは、獅子戸岳の活動年代が新燃岳などに比べきわめて古いことに対応しているとも解釈することができるが、より詳しい議論のためにはさらに観測を行う必要がある。

これまでに、御鉢火口周辺の観測は 3 ヶ所で行っている。その結果には、硫黄山および新燃岳周辺とは異なって、深部の低比抵抗層を見ることができない。浅部の低比抵抗層の値も、 $10 \sim 30\Omega \cdot m$ とやや高めである。浅部の低比抵抗層は、帯水層に対応するとある考えられており、新燃岳や硫黄山の火口直下でこの層の比抵抗値が数 $\Omega \cdot m$ であるのは、浅部の活発な熱水活動のためであると考えられる（鍵山他，1994）。この解釈を御鉢周辺の結果にも適用すれば、ここには地下深部から浅部への熱の供給がほとんどないという解釈が成り立つ。また、MT 法の結果に深部低比抵抗が見られないことは、マグマの存在する深さが御鉢ではより深くなっており、そのことが浅部熱水活

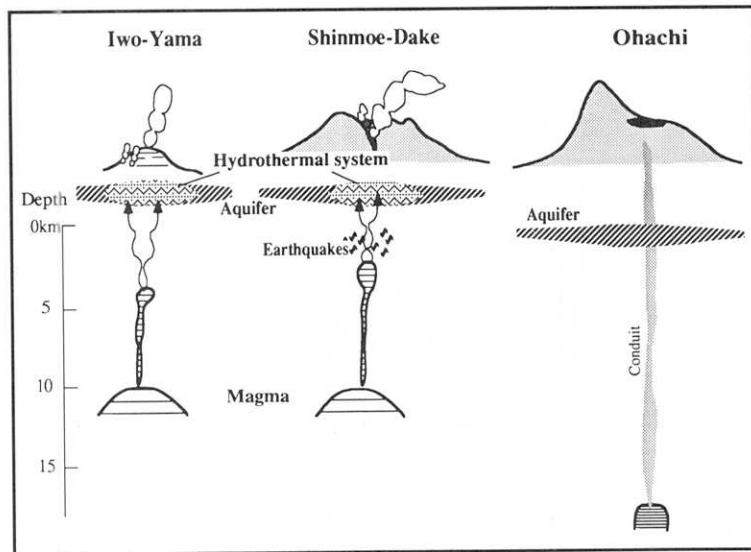


Fig. 8 Volcanological interpretation of the MT result. Highly conducting layer is usually found at about 10 km depth, indicating the presence of source magma below the major part of Kirishima volcano. Conducting layer becomes shallower just beneath Iwo-yama and Shinmoe-dake, which may suggest the existence of shallow magma chamber there. At the small eruption in 1991, there was a swarm earthquake activity a few km below Shinmoe-dake. On the other hand the depth of source magma seems to be much greater below Ohachi volcano. This idea does not conflict the petrological model that the volcanic rocks of Ohachi is of more primitive magma origin, or in other words, of deeper magma origin.

動が活発ではないことの原因と考えることも可能である。

4. まとめ

霧島火山における ULF-MT 観測の結果を 1 次元モデル解析で解釈を行った。結果を、Fig.8 に模式的に表わしたが、主要な点は以下のようにまとめることができる。

(1) 硫黄山および新燃岳の下、10km の深さに $10\Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗層があり、深部のマグマ溜まりに対応する可能性がある。活動的な火口の直下では、マグマないしは火山ガスが地下数 km まで上昇しており、火山性の地震などを発生させている。

(2) ここから硫黄山および新燃岳直下の浅部には熱の供給があって、現在の熱水活動を維持しており、発達した浅部低比抵抗層となって表われている。

(3) これに比べ、御鉢にはより深部からマグマが供給されている可能性が示唆される。このため、御鉢直下の熱水活動は活発ではない。

以上の結果は、いうまでもなく層構造という仮定の上に成り立っているものであり、今後は 2 次元あるいは 3 次元モデリングを行って、より厳密な議論を行う必要がある。そのためには、さらに良質のデータを多くの観測点で取得する必要がある。今後の課題である。

謝 辞

鳥取大学の今井健元氏, 高知大学の阿部剛氏, 東京大学の元木智広氏には, 観測の際に補助をお願いした。本研究の一部は, 文部省科学研究費重点領域研究 (I) 「マグマ」公募研究(課題番号 05231210)によって行った。

参考文献

- 鍵山常臣, 1994a, 霧島火山群における構造研究の意義—新しい火山学の構築のために—, 地震研究所集報, 本号。
鍵山恒臣, 1994b, 加久藤カルデラにおける電磁気構造探査の意義, CA 研究会講演論文集, 129-133。
鍵山恒臣, 1994c, 霧島火山—やや張力的な応力場に生成された火山群—, 地学雑誌, 103, 133-144。
鍵山恒臣, 歌田久司, 増谷文雄, 山口勝, 笹井洋一, 1992, 霧島火山群・新燃岳 1991-1992 年微噴火と電磁気観測, CA 研究会講演論文集, 279-296。
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, 地震研究所集報, 本号。
KOBAYASHI, T. and KAGIYAMA, T., 1988, Kirishima volcano, in Guide Book of Post-conference Scientific Excursions, Kagoshima International Conference on Volcanoes, 1-11。
MINAKAMI, T., HIRAGA, M., YAMAGUCHI, M., KOYAMA, E. and HIRAI, K., 1970, The Ebino Earthquake Swarm and the seismic activity in the Kirishima Volcanoes, in 1968-1969, part 4, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **48**, 205-233。
UTADA, H. and SHIMOMURA, T., 1990, Resistivity structure of Izu-Oshima Volcano revealed by ELF VLF-MT method, *J. Geomag. Geoelectr.*, **42**, 169-194。

要 旨

霧島火山の深部構造を調べる目的で, MT 観測を行った結果について報告する。深さにして数 km~数 10km までに対応する霧島火山の電気比抵抗構造は, おおよそ 4 層構造で表わすことができることがわかった。表層は概して高比抵抗であるが, 深さ 100~数 100m には $10\Omega \cdot m$ から場所によっては数 $\Omega \cdot m$ という低比抵抗層が広く分布している。

最近の活動火口をもつ硫黄山・新燃岳・御鉢の 3 火山で比べたところ, 前 2 者と後者との間に深部比抵抗構造に違いが見られた。すなわち, 硫黄山および新燃岳周辺の地下では, 浅部低比抵抗層の下はやや高比抵抗となり, 最深部に再び低比抵抗層が見られた。その深さはおよそ 10km であるが, 火口直下では数 km の深さにあるものと推定された。この深部低比抵抗層はマグマの存在を示唆する。一方御鉢火山では, 探査結果に深部低比抵抗層が見られず, 硫黄山・新燃岳の 2 火山とは明らかに異なることがわかった。このことは, 現在の地熱活動の違いにも表われていると考えることができる。