



Title	有珠2000年新山域の比抵抗構造
Author(s)	橋本, 武志; 小川, 康雄; 高倉, 伸一; 山谷, 祐介; 市原, 寛; 宇津木, 充; 井上, 寛之; 小池, 哲司; 長谷川, 浩; 茂木, 透
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 72, 79-105
Issue Date	2009-03-15
DOI	10.14943/gbhu.72.79
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/38146
Type	bulletin (article)
File Information	06_Hashimoto.pdf



[Instructions for use](#)

有珠 2000 年新山域の比抵抗構造

橋本 武志

北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

小川 康雄

東京工業大学火山流体研究センター

高倉 伸一

産業技術総合研究所

山谷 祐介・市原 寛*

北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

宇津木 充・井上 寛之

京都大学大学院理学研究科

小池 哲司・長谷川 浩

気象庁地震火山部

茂木 透

北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

(2009 年 1 月 6 日受理)

Resistivity structure beneath the doming zone of the Usu 2000 eruption

Takeshi HASHIMOTO

Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University

Yasuo OGAWA

Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

Shinichi TAKAKURA

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Yusuke YAMAYA, Hiroshi ICHIHARA*

Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University

Mitsuru UTSUGI, Hiroyuki INOUE

Graduate School of Science, Kyoto University

* 現所属：東京大学地震研究所

* Present affiliation: Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Tetsuji KOIKE, Hiroshi HASEGAWA

Seismology and volcanology Department, Japan Meteorological Agency

and

Tohru MOGI

Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University

(Received January 6, 2009)

In the 2000 eruption of Usu volcano, it is widely believed that magmatic intrusion has reached the shallow subsurface to produce significant ground deformation. We performed a magnetotelluric survey over this area aiming for prospecting the intruded magma. The resistivity section exhibits a High-Low-High three-layered structure. The surface layer with a resistivity around 100

m is likely to correspond with the lower Pleistocene andesite. The second layer is very conductive (0.1 to 1 m), thinning and shallowing in the middle. It is difficult to explain such a low resistivity by anything but the Neogene units containing conductive clay minerals with high salinity ground water. Below it the resistivity gradually increases. The top middle part of the third layer shows the resistivities around 10 m. It looks that this part is pushing the second layer upwards. We investigated whether this block is explainable by intruded magma or not from a viewpoint of the resistivity values. We at first calculated the resistivities of rhyolitic melt by using Gaillard (2004)'s model. The melt resistivities are in a range from 1 to 10 m for 800 to 600 . Secondly, we examined the partial melt by using the MBL model of Schilling et al. (1997). Given that the resistivities of melt and solid are 1 and 10,000 m, respectively, the melt fraction corresponding to the bulk resistivity of 10 m should be 15 vol%. Higher melt resistivity requires a larger melt fraction. The discussion above predicts that the bulk resistivity of the intruded magma will increase by some orders of magnitude in the course of cooling and solidification and that this process can be monitored by MT repeat measurements.

. はじめに

有珠山の2000年噴火では、地下浅所にマグマが貫入したことに伴い、いわゆる新山（潜在ドーム）が形成された。旧建設省土木研究所砂防部の航空レーザー測量による4月26日までの隆起量とその後の測角測量による上下変動（森・宇井, 2000）を加えると、新山の最大隆起量は約70 mであると推定される。噴火中・噴火後の各種物理観測から、貫入に関連する圧力源や熱源の推定はされているものの、未だ貫入マグマそのものの位置や形状を明瞭に描き出せてはいな

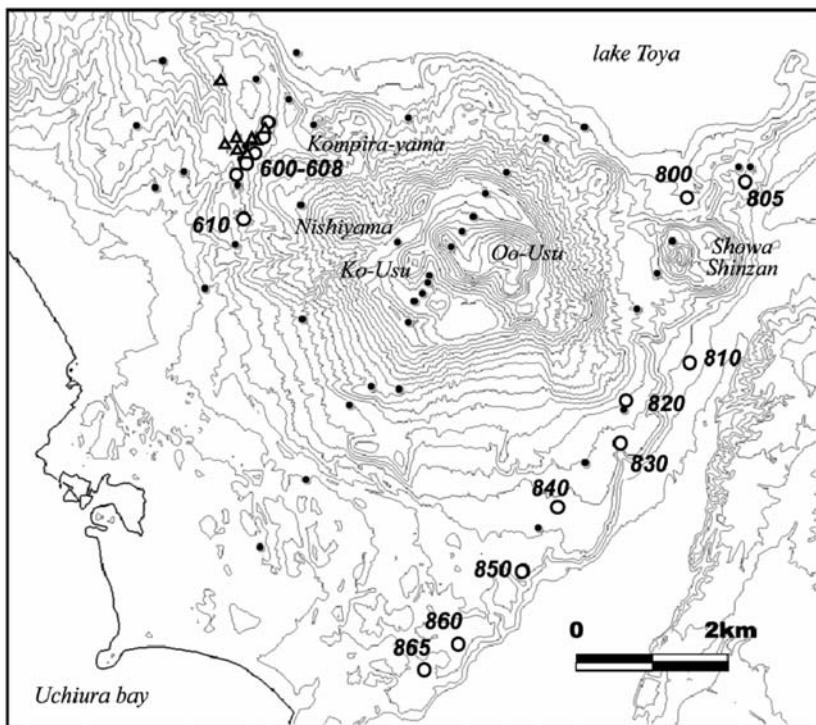


Fig. 1. Site distribution for the MT surveys. ● indicates the previous surveys. ○ and ▲ indicate the survey points in 2006 for MT and AMT, respectively. This study deals with the data set for the sites 600-610.

い。

2000 年新山地域では、温泉資源開発を目的とした MT/CSAMT 法探査が 2001 年に実施されている (秋田・柴田, 2003). この調査により、新山域の浅部には極めて低比抵抗の層 (本論で後述する第 2 層) があることが明らかになった. この低比抵抗層に対応する見掛け比抵抗は、およそ 1 Hz 付近で極小値をとっており、AMT 帯域のみではこの低比抵抗層の下面を拘束するのが難しい. 1 次元解析の結果によれば、この低比抵抗層は標高 0 ~ -500 m 程度に分布している. 新山の構造を把握するためには、いま少し深い部分の情報が必要である. そこで、今回は 2D 解析を指向した広帯域 MT 法探査を密に展開した (Fig.1 の 600 ~ 610). さらに、広帯域 MT の間を埋めるように AMT 帯域の測点を配置して、特に浅い部分の構造について解像度を上げることを目指した. また、すべての測点でインダクションベクトルを測定し、2 次元解析の妥当性をチェックするとともに、貫入構造に伴う異常比抵抗体の広がりについても検討する.

. MT 法比抵抗探査の概要

本報告の MT 法比抵抗探査は 2006 年 7 月 3 日から 12 日にかけて実施された. 使用した機器は Phoenix 社製 MTU-5 および MTU-5A で、北海道大学・東京工業大学・産業技術総合研究

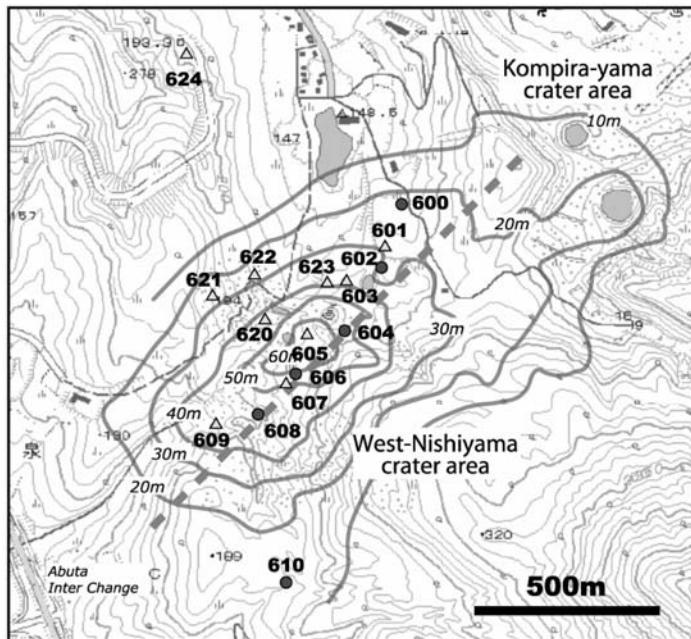


Fig. 2. Close-up view of the site distribution for 600-610. and indicate MT and AMT, respectively. Contour lines show the increase in height in meters in approximately the first month of the 2000 eruption (original data from Public Works Research Institute).

所所有の装置を持ち寄った。磁場センサーはインダクション・コイル、電場センサーは鉛 - 塩化鉛電極である。Fig.2 に測点配置を示す。これまでにこの有珠地域で推定されている regional strike (Ogawa et al., 1998; Matsushima et al., 2001) と同様に北西 - 南東の走向を仮定し、それにはほぼ直交する方向に測点を配置している。AMT 帯域の測点は、主測線の間を埋めるもの (601, 603, 623, 605, 607, 609) のほか、北西側に広がる地熱地帯に向かって 3 点 (620, 621, 622)，さらに地熱地帯を越えて北西側に 1 点 (624) を配置した。

. インダクションベクトル

インダクション・ベクトルの分布を Fig.3 に示す。97 Hz 以上の高周波帯域では測線の中央部にベクトルが集中する傾向がある。このことから、測線中央部に、相対的に低比抵抗の領域が示唆される。ベクトルが集中する位置は、測点 623 と 604 の間にるようにみえる。また、97 Hz のベクトル図において明瞭なように、測線西側の点 (620, 621, 622) のベクトルには東向き成分が卓越しており、隆起中心付近の直下に低比抵抗の領域があることが想像される。なお、これらの地点でインダクションベクトルが東を向くことは、地形効果とは逆センスである（隆起中心の方が地形的に低所）。3.4 Hz 以上 33 Hz 以下の帯域においても、ベクトルが測線の中央部

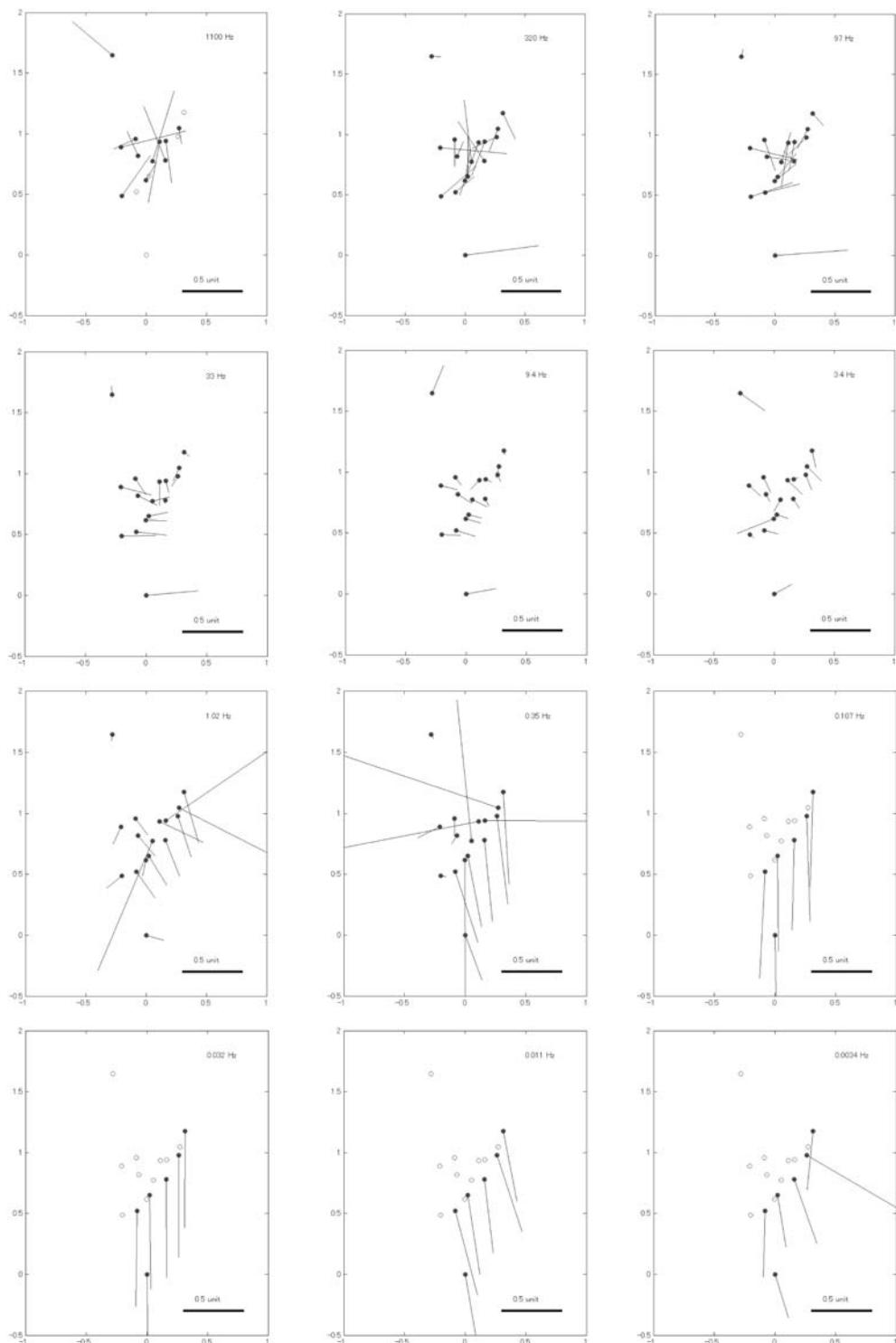


Fig. 3. Distribution of induction arrows. Top row: 1100, 320, 97 Hz. Second: 33, 9.4, 3.4 Hz. Third: 1.02, 0.35, 0.107 Hz. Bottom: 0.032, 0.011, 0.0034 Hz.

に収斂する傾向は認められるものの、全体に東～南東成分が支配的になる。このことは、隆起中心直下に示唆される低比抵抗の根が東斜め下方に伸びていることを想像させる。1 Hz 以下の低周波帯域では、ベクトルはほぼすべて南を向き、かつ絶対値も大きくなっている。低周波帯域で南向き成分が卓越するのは、海陸分布など広域構造の影響によるものと推測される。

以上のように、インダクションベクトルの分布からは、2000 年噴火の隆起中心直下に、周囲よりも低比抵抗の領域が示唆される。また、測線に直交する方向への低比抵抗域の広がりは、西へは隆起域の範囲と同程度、東へはやや深部に向かって伸びているものと思われる。本来は 3 次元構造としての取り扱いが必要であるが、高周波帯域については、インダクション・ベクトルが示唆する北西 - 南東の走向を仮定した 2 次元解析を行っても大きな問題はないものと判断した。測線は隆起域のほぼ中心を貫いているので、近似的に 2 次元と考えることは不当ではない。また、噴火に伴って西山火口群地域の地表に現れた地溝状の断層群がほぼ北西 - 南東走向となっていること（三浦・新井田、2002）も、この仮定が少なくとも表層付近については成り立っていることを支持している。ただし、有珠山北西麓の重力異常は、ほぼ東西走向を示しており（和田・他、1988）、やや広域的な構造は南傾斜である可能性も残されていることを附記しておく。

. 見掛け比抵抗および位相

Fig.2 に示した測線沿いの 13 箇所で測定された見掛け比抵抗および位相の応答曲線を、それ Fig.4 と Fig.5 に示す。先述の通り、本論文では構造走向を北西 - 南東と仮定して 2 次元解析を行う。Fig.4 および Fig.5 に示した応答曲線は、北西 - 南東の走向に対応して 45 度回転したインピーダンステンソルによるものである。従って、ここでの TM モードは北西 - 南東方向の磁場、TE モードは北東 - 南西方向の磁場に対応する。広帯域 MT データは、国土地理院の江差観測所のデータを用いてリモートリファレンス処理を施した。AMT データについてはリモートリファレンスは行っていない。

見掛け比抵抗曲線は、測線の北東側 (600, 601, 602, 603, 623) で両モードが分離する傾向が顕著であるが、南西側 (604, 605, 620, 606, 607, 608, 609, 610) ではほぼ一致している。ただし、南西側でも 0.01 Hz 以下の低周波帯域になると両モードは分離しており、この帯域での応答は広域構造の影響を受けている可能性が高い。位相についても同様の傾向がみられるが、低周波側でのモード分離は見掛け比抵抗よりもやや高周波側で起こり始める。このようにモードの分離した応答をフルに用いて火山体の深部までをモデリングするためには、広域を含めた 3 次元構造をも検討する必要がある。本論文では、2000 年噴火に伴う地表付近へのマグマ貫入に関連した数 km 以浅の構造に注目し、広域構造の影響が小さい高周波帯域のデータのみ（見掛け比抵抗で 0.01 Hz 以上、位相で 0.05 Hz 以上）を用いて構造解析を行う。2 つのモードが広い帯域で一致している測点 (604, 606, 608, 610) についてみると、高周波側から低周波側、すなわち表層から深部に向かって、相対的に高 - 低 - 高の 3 層比抵抗分布が示唆される。低比抵抗の極値は 1 Hz 付近に現れている。ただし、測点 605 や 620 など隆起中心に近い地点では、

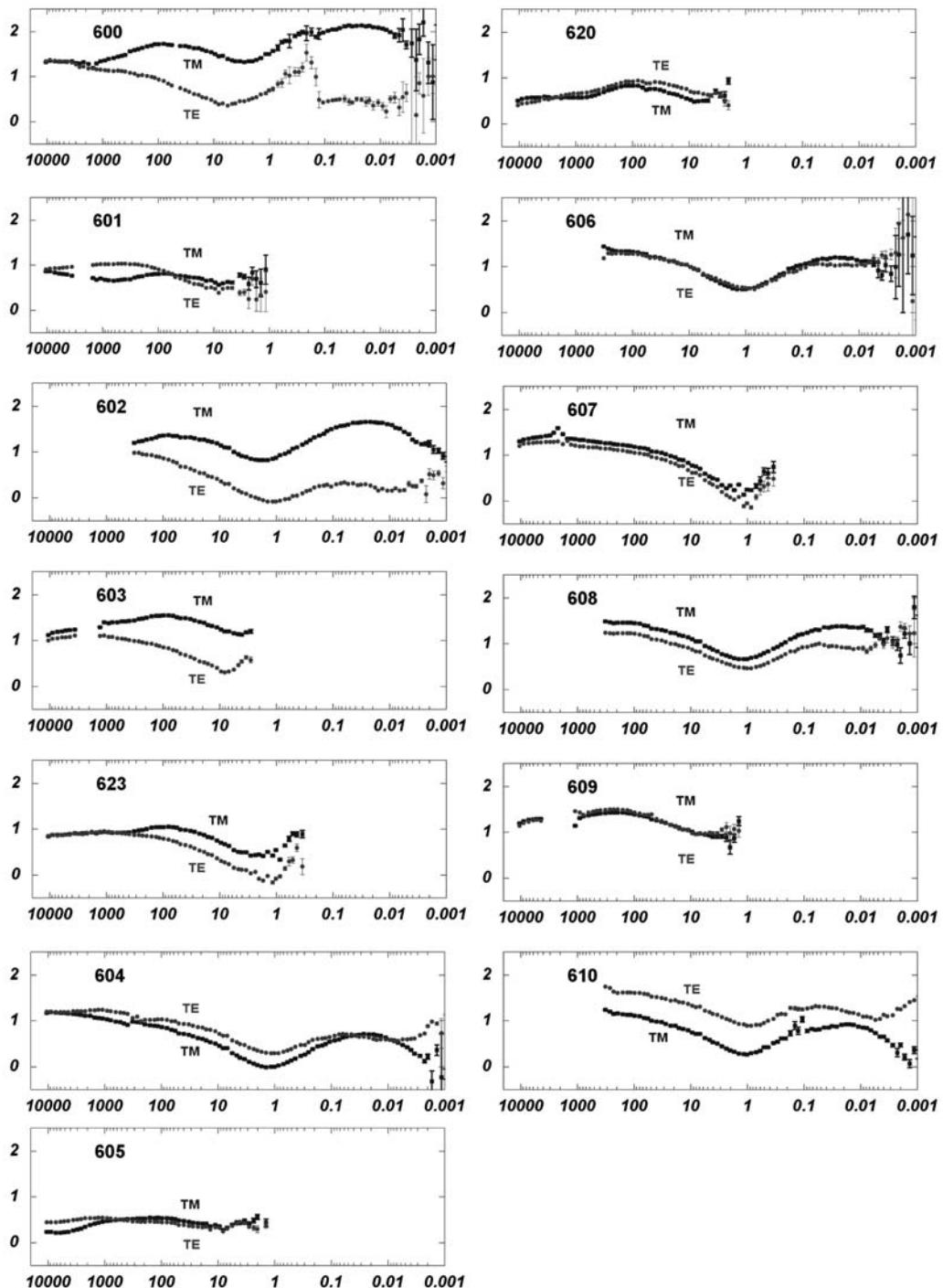


Fig. 4. Observed responses for the apparent resistivity. Horizontal and vertical axes indicate the frequency in Hz and log resistivity, respectively.

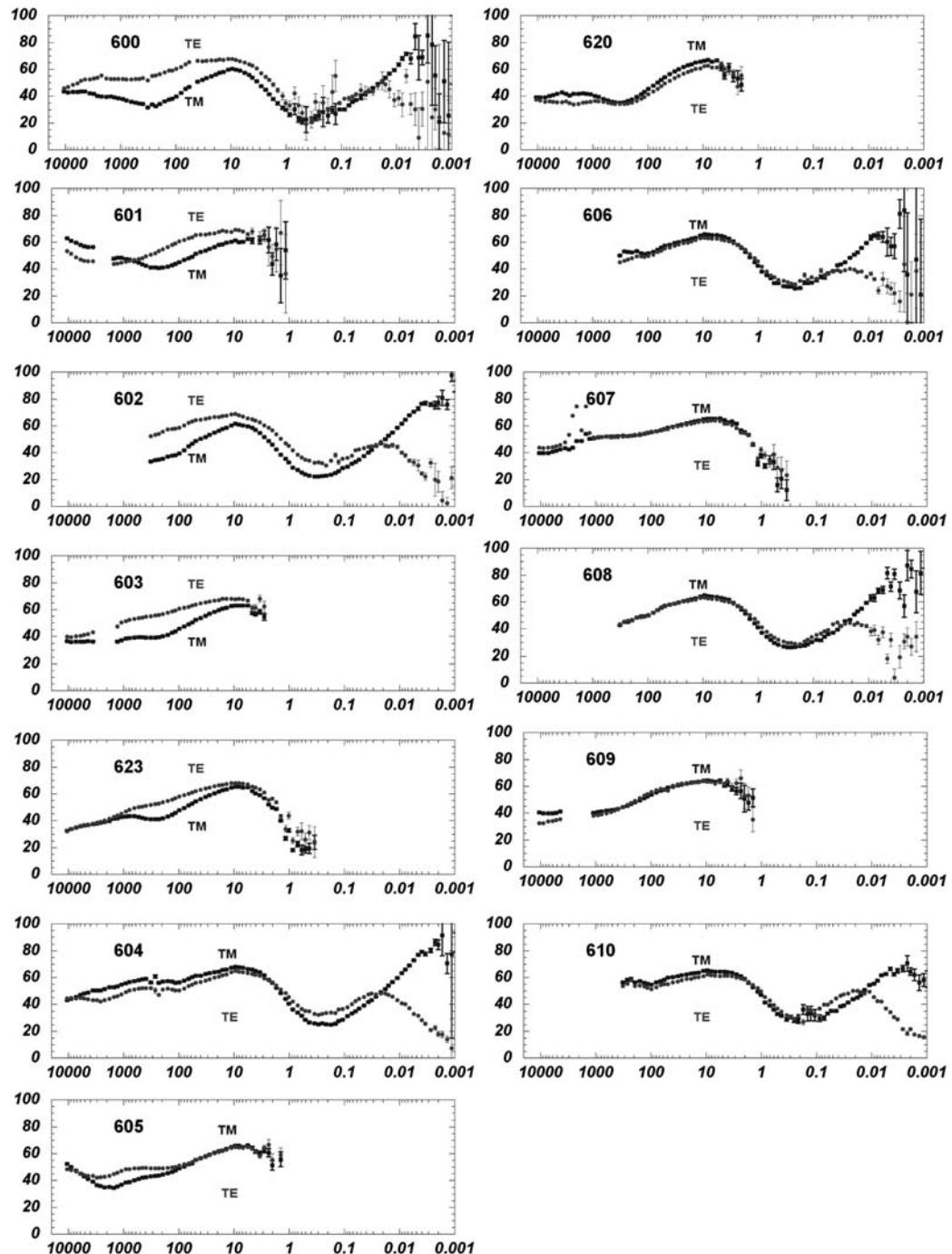


Fig. 5. Observed responses for the phase.

表層から見掛け比抵抗値が極めて低くなっている。応答曲線の形は異なっている。

. 1 次元構造解析

前節で述べたように、測線南西側の高周波帯域では TM, TE 両モードが一致していることから、水平成層に近い構造が示唆される。そこで、2 次元解析の前に、まず 1 次元解析によって地下構造の概略を把握する。ここでは、スタティックシフトの影響を小さくするために、位相のみを用いたインバージョンを行い、部分的にフォワードモデリングを併用した。この 1 次元解析により得られた比抵抗柱状図を簡略化して Fig.6 に示す。前節でも述べたように、表層から深部に向かって高 - 低 - 高の比抵抗分布がみられる。広帯域の測定点では、第 1 層の比抵抗値は 10-100 m, 第 2 層は 1-10 m, 第 3 層は 10-100 m を示す。ただし、隆起中心に近い測点 604 および 605 では、表層の比抵抗が低く、第 2 層は周辺よりもさらに 1 枝低い 0.1-1 m を示している。第 2 層の低比抵抗層の深度は、数 100 m から 1 km の範囲に分布しており、隆起中心付近で浅くなっているように見える。

AMT 帯域のみの測点についてみると、第 3 層の比抵抗値が第 2 層のそれより高いことは位相の情報から読み取ることができる。しかし、可探深度の不足から、第 3 層の比抵抗値の上限を決める事はできない。また、測点 601 では第 2 層の下面深度も決定できなかった。一方、広帯域 MT のデータからは、第 3 層の比抵抗値を拘束することができた。

なお、広帯域 MT のデータには、Fig.6 に示している 3 km よりも大深度の情報まで含まれてはいるが、今回の探査は測線の総延長が約 1 km であるので、周辺構造をとり入れない限り、あまり深い構造解析は意味を成さない。2000 年噴火の新山域の地下には、深さ 1 km よりも浅い

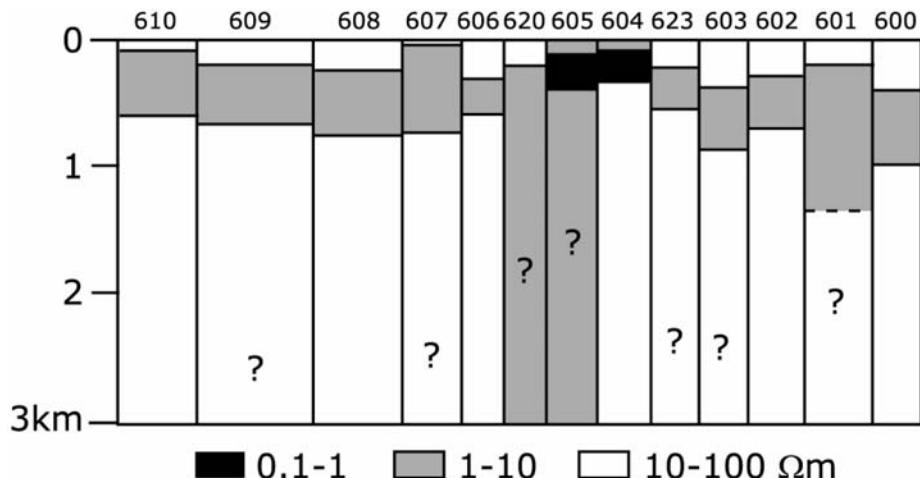


Fig. 6. Resistivity columns obtained from the 1-D inversions. Resistivities of the third layer are not well constrained at AMT sites because of the limitation of sounding depth (indicated by the symbol “? ”).

部分までマグマが貫入したと考えられるので、深さ 3 km 程度までの比抵抗構造を解析できれば、マグマの貫入に伴う地下構造の変形、あるいは貫入したマグマそのものを議論できるものと考えられる。1 次元解析からは、深さ数 100 m から 1 km に、0.1-10 m の低比抵抗層が分布していることがわかったので、以下の解析では、この低比抵抗層の深度分布に着目する。特に、新山の隆起中心付近でこの低比抵抗層が本当に浅くなっているかどうかについて、2 次元解析で検証する。

. 2 次元構造解析

Fig.4 および Fig.5 に示した応答曲線を、Ogawa and Uchida (1996) の 2 次元インバージョン手法によって解析する。ここでは、探査測線に直交方向の比抵抗異常の影響を受けにくいとされる TM モードのみを用いたインバージョンを行った。応答曲線の中で、広域構造の影響を強く受けていると思われる長周期のデータ（見掛け比抵抗については 0.01 Hz 以下、位相については 0.05 Hz 以下）と、エラーバーの大きな帯域についてはインバージョンの対象から外した。

探査測線の南西延長には内浦湾があるため、簡略化した海底地形に 0.25 m の海水を入れ、初期モデルに組み込んだ。内浦湾のモデルは、測線の南西端である 610 (Fig.7 の 0 km 地点) から見て 2~50 km の範囲にあり、平均的な深度を 100 m としている。インバージョンを安定させるため、海水直下の比抵抗値として 50 m 固定の層を挿入した (Fig.7)。実際の内浦湾は最大深度が 100 m 程度であり、平均的にはもっと浅いが、計算メッシュの制約からこのようにした。いずれの場合も、モデル計算の領域は、水平方向に ± 約 180 km、鉛直方向には深さ約 100 km である。

Fig.8a に 2 次元インバージョンの結果を示す。ここに示した図は、10 回の反復計算を経たモデルであり、RMS 残差は 0.86 であった。比較のために、内浦湾を固定構造として組み込まないインバージョン (Fig.8b) も行ってみたが、結果として内浦湾に相当する領域に低比抵抗がイメージされた。ここでは 14 回の反復計算の結果を示しており、このときの RMS 残差は 0.85 であった。応答曲線にどの程度海の影響が含まれているのかを確認するために、Fig.8a の比抵抗モデルから、海に相当する領域を 50 m に改変したモデルによってフォワード計算を行った。その結果、海の影響は、もっとも海に近い測点 610 の低周波帯域 (1 Hz 以下) でわずかに表れるに過ぎず、その他の測点では殆ど無視できることがわかった。このことから、内浦湾をモデルに組み込んだ方が観測値との一致は若干良くなるものの、その影響はごく僅かであること、および、観測された応答曲線の大部分は測線直下の構造を反映したものであることが確認された。

Fig.8a と b のモデルを較べると、測線の北東域 (601~604 付近) で顕著な低比抵抗があるかないかの違いがある。ただし、この違いは海の影響ではなく、インバージョンの過程で各測点に割り当てられたスタティックシフトの違いに起因している。ここで使用したインバージョン・コードでは、見掛け比抵抗のスタティックシフトは統計的にガウス分布するものとして、モデルパラメータの一部に組み込まれている。インバージョンで計算されたスタティックシフトが妥当かどうか

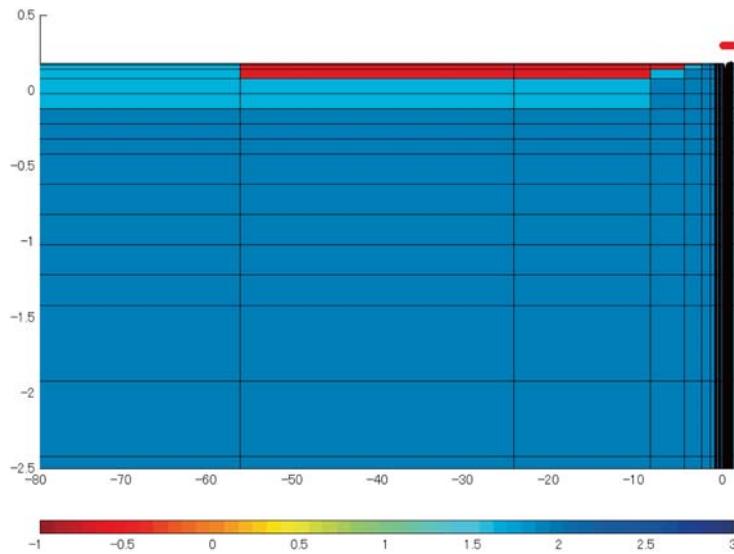


Fig. 7. Resistivity model of Uchiura bay included in the 2-D inversions. Axes units in km. Colors indicate the resistivity in log Ohm-m. Only the SW part of the calculation area is shown.

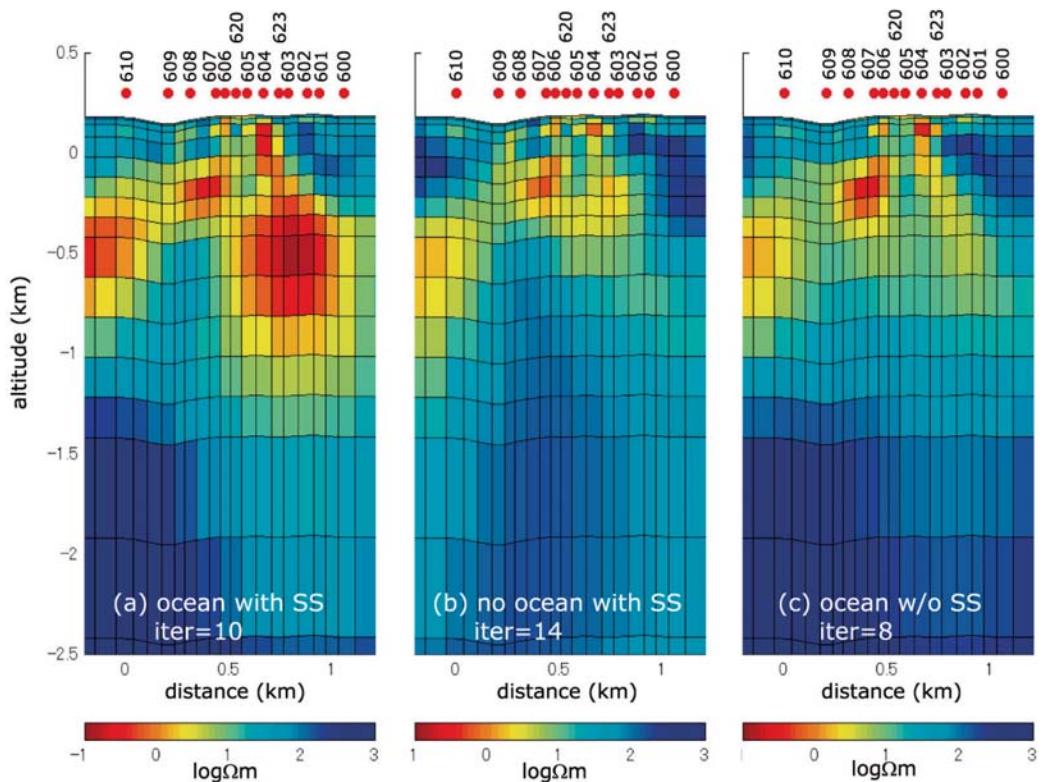


Fig. 8. Resistivity sections obtained from the 2-D inversions. (a) model with sea. (b) model without sea. Sections (a) and (b) are modeled with static shift. Section (c) is modeled without static shift.

うかを MT データのみから判断する根拠としては、RMS 残差と ABIC しかないが、a と b ではこれらの値に有意な差はない。従って、a にみられるような、測線の北東域の顕著な低比抵抗は断定的なものではない。観測データが、どの程度スタティックシフトを要求しているかを評価するために、スタティックシフトがないものと仮定した条件でもインバージョンを行った (Fig.8c)。この場合、8 回の反復計算でモデルは安定し、RMS 残差は 0.89 となった。北東域の低比抵抗部分は、a と b の中間的な特徴を示している。モデル c は、a や b よりも残差がやや大きい。つまり、ある程度のスタティックシフトを考慮した方が、観測データにより近い応答が得られることがわかるが、このモデルの劣性を決定づけるには十分ではない。従って、ここで逆解析されたモデルには、ある程度スタティックシフトによる任意性があるものとして解釈する必要がある。

2 次元インバージョンによって得られた比抵抗断面は、いずれも地表から深部に向かって、大まかに高 - 低 - 高比抵抗の 3 層構造になっている。第 2 層の低比抵抗部は、測線の中央部で浅くなっているように見える。Fig.6 と比較すると、これらの特徴は 1 次元解析の結果とも類似している。2 次元インバージョンで得られた比抵抗モデル a による見掛け比抵抗および位相の応答を、それぞれ Fig.9 と Fig.10 に示す。モデル応答と観測値は概ねよく一致している。1 次元解析では、AMT 測点の第 3 層比抵抗値および第 2 層の下面深度が拘束できなかったが、2 次元モデルで水平方向にある程度スムーズな構造を仮定しても、得られる応答特性は観測値と矛盾しないことが確認できた。

測線の中央部で構造が盛り上がるという特徴は、いずれのインバージョン断面でも共通して認めることができる。よって、この特徴はスタティックシフトに依存しない観測データ（すなわち位相）に表れているはずである。そこで、測点 600, 608, 610 の位相曲線を、モデル a の場合について Fig.11 で比較してみる。測点 600 では 500 Hz 付近に位相の極小がある。これが測線北東部の表層付近に高比抵抗を要求している。これに対して、測点 608 では、数百 Hz で位相が 45° を越えており、表層近くから比抵抗が下がる傾向にあることを意味する。従って、600 よりも 608 の方が第 2 層低比抵抗の上面は浅くなるべきである。610 では、同じ周波数でさらに高い位相を示している。表層から第 2 層に向かって比抵抗が下がり出す傾向は 608 と共にしているが、1 Hz 付近で再び位相が 45° を割り込むまでの帯域が 608 よりも広いので、より深部まで低比抵抗層が延長している。中央部で盛り上がった構造は、こうした位相の特徴を反映したものと考えられる。ただし、608 と 610 の差は僅かであることに加えて、610 は測線からやや離れていることから、測線南西域にみられる南西下がりの傾斜構造は断定的なものではない。

低比抵抗層内の微細な構造については、観測データに強い拘束力はなく有意なものとはいえない。例えば、測点 605 付近で低比抵抗層が分離しているが、この部分を連続させた構造を仮定してインバージョンを行っても、同程度の RMS 残差で、やはり測線の中央部で浅くなる低比抵抗層をもつた構造を得ることができる。

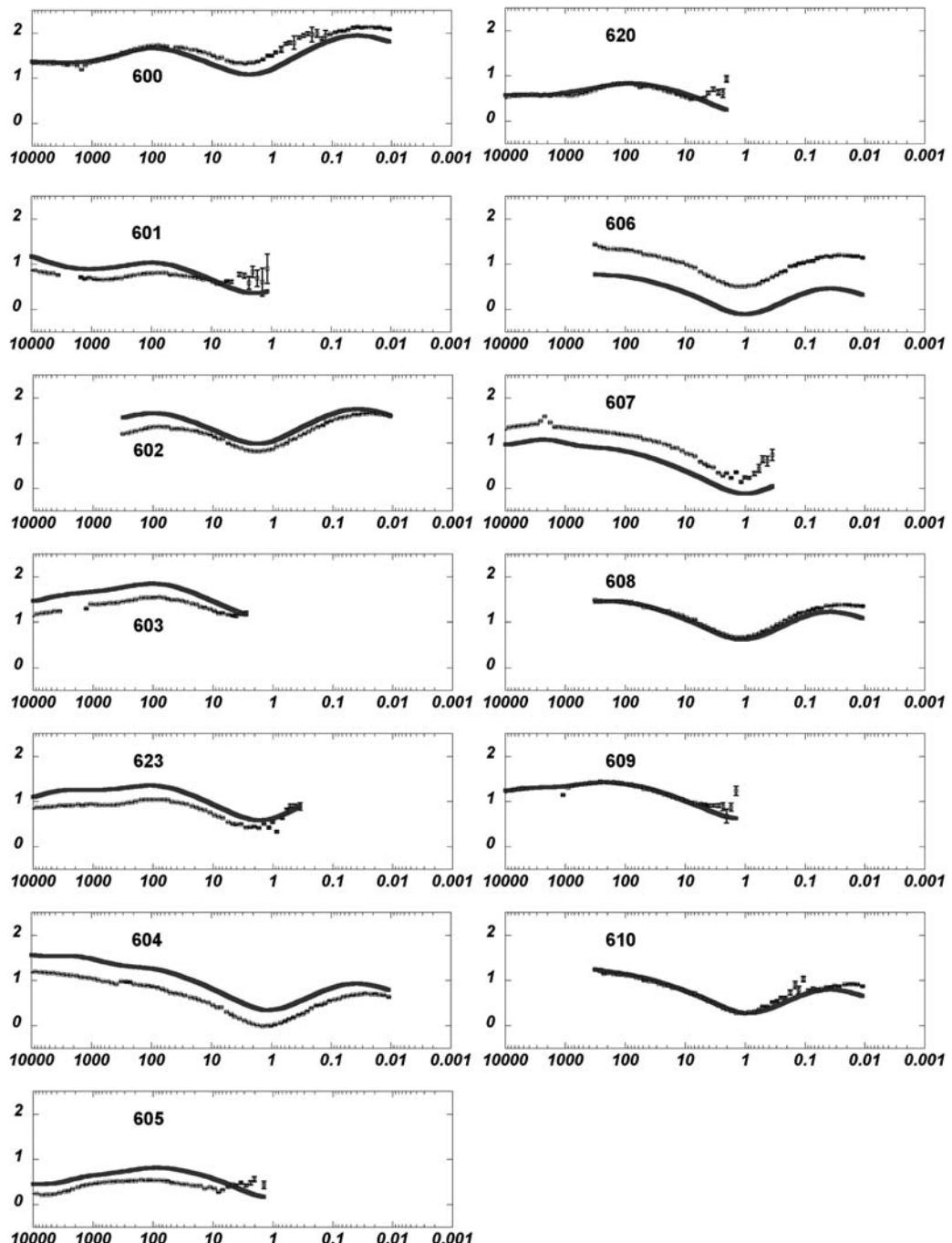


Fig. 9. Comparison of the 2-D model (solid curves) and field measurement (square symbols) for the apparent resistivity.

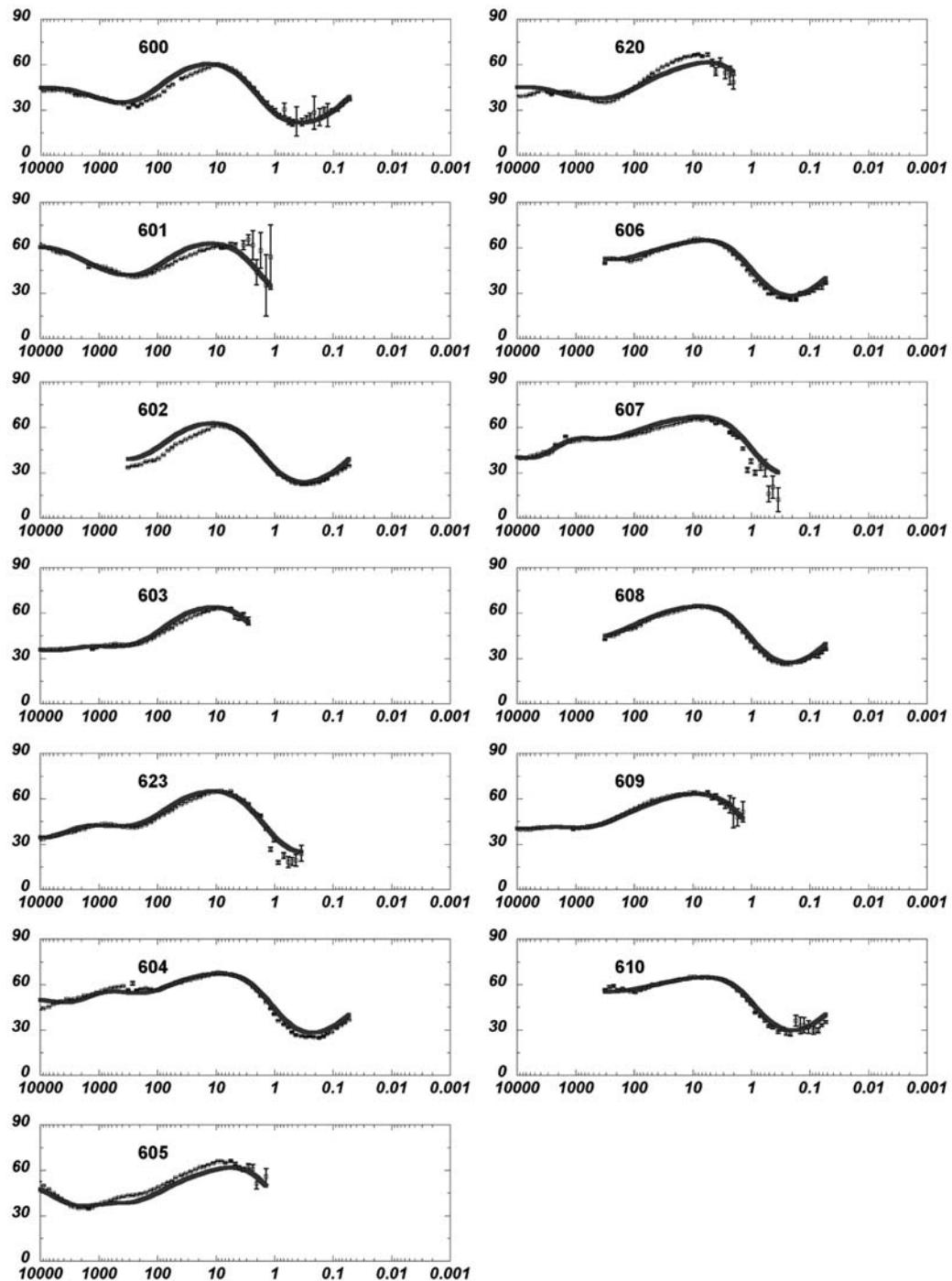


Fig. 10. Comparison of the 2-D model (solid curves) and field measurement (square symbols) for the phase.

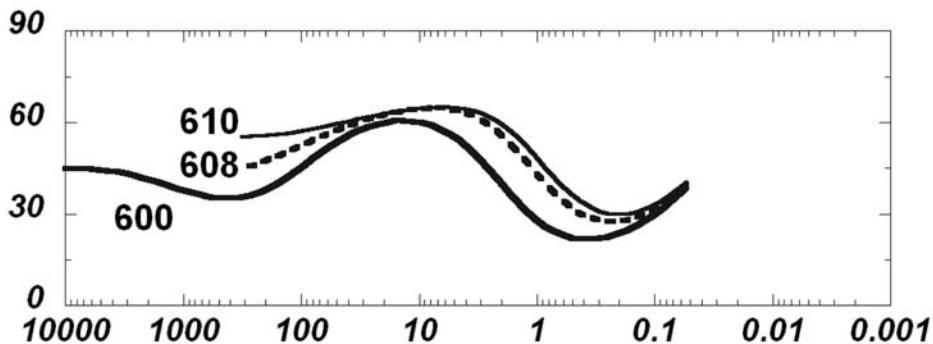


Fig. 11. Phase responses of the 2-D inverted model shown in Fig. 8a. Thick, dashed, and thin lines correspond to the sites 600, 608, and 610, respectively.

考 察

2 次元インバージョン比抵抗断面をもとに、2000 年新山の地下構造を考察する。第 VI 節で述べたように、Fig.8 のインバージョン断面にはスタティックシフトによる任意性があり、MT データのみからでは、どの断面が真の地下構造を正しく反映しているのか決めることができない。そこで以下では、必要に応じて MT データ以外の補足的な情報をも取り入れつつ解釈を試み、特に Fig.8a と c を対照しながら考察を進める。

変質層 2 次元インバージョンで得られた比抵抗断面の共通の特徴である 3 層構造が、どのような地質に対応しているかを考える。測線の北東域および南西域を覆う 10~100 m の表層 (2000 年噴火の噴出物で覆われている) は、火山地質図 (曾谷・他, 2007) との対応から、下部更新統の安山岩類であると考えられる。測線中央部は周辺と比較して低比抵抗であり、2000 年噴火の火口域および変質堆積物に対応する。当該地域周辺の孔井地質情報および 2000 年噴火の爆発噴出物に含まれる変質鉱物の解析から、噴火時の破碎深度を推定した八幡 (2002) によれば、下部更新統安山岩類の底部、柳原層および室蘭層では、スメクタイトに富む変質鉱物が同定されており、その下位にはスメクタイトに乏しく緑泥石やセリサイトに富む新第三系の莊珠内川層があると考えられる。

一般に、粘土鉱物が含まれる岩石は、そうでない岩石に較べて比抵抗が低い傾向がある。そこで、上述の粘土鉱物を含む層の比抵抗について簡単に検討しておく。高倉 (1995) は、粘土鉱物が岩石比抵抗に与える影響について考察した西川 (1992) の得た結果から、モンモリロナイト (スメクタイトの一種) は、数%の含有量で岩石の比抵抗を 1 衍程度低下させると指摘している。一方、粘土等の導電性鉱物を含まない岩石の比抵抗に ρ は、一般に孔隙水の比抵抗 ρ_w との間に Archie の経験式で表される関係がある。

$$\rho = a \cdot \phi^{-m} \cdot \rho_w \quad (1)$$

ここで、 ϕ は孔隙率、 a 、 m は媒質に依存する定数である。大島・松島（1999）のまとめた孔井検層データによれば、この地域の帶水層である柳原層で孔隙率は 29~59 とされている。柳原層は主に凝灰角礫岩や砂岩から成ることから、ここでは砂礫層などでよく使われる値と同じ $a = 1$ 、 $m = 2$ を仮定する。柳原層の孔隙水比抵抗を 100 m とすれば、バルクの比抵抗は 300~1100 m となる。この場合、スメクタイトの存在を考慮しても、この層の比抵抗は 30~100 m 程度にしかならない。しかし、孔隙水として 3 m 程度の温泉水を考えれば、この層に 1 m の比抵抗を与えることが可能である。以上のことから、MT 断面の第 2 層が示す 1 m 前後の低比抵抗は、溶存成分の多い水を含むスメクタイト帯の可能性がある。

室蘭層は、虻田地区の孔井にはみられるが、洞爺湖地区の孔井では見つかっておらず、北に向かって層厚を減じているものと推定されている（例えば八幡、2002）。2000 年新山域の直下に室蘭層が存在するかどうかは直接的には確認されていない。室蘭層が存在するならば、柳原層と莊珠内川層の間にあるはずだが、八幡（2002）の解析によれば、柳原層と同じく低比抵抗のスメクタイトを含むため、比抵抗断面では見分けることができないと思われる。

第 3 章でも触れたように、比抵抗断面の南西側にみられる構造の傾斜は断定的なものではないが、このような傾斜構造は他の情報からも支持される。この地域の新第三系は、室蘭半島から北西にのびる低重力域を堆積盆としており、上述の通り室蘭層は南西側で厚く、洞爺湖地区に向かって薄くなることが知られている（八幡、2002）。また、この傾斜は、重力異常が南から北に向かって増加すること（和田・他、1988）とも整合的である。

カルデラ縁 次に、測線の北東側にみられる北落ちの傾斜構造について考察する。この部分の表層は 2000 年噴火の噴出物に覆われているが、洞爺湖温泉地区の孔井地質（大島・松島、1999）を参考にすると、その下には、有珠火山の比較的新しい噴出物、有珠外輪山溶岩および下部更新統安山岩類が伏在しているものと推定される。有珠外輪山溶岩は、洞爺湖温泉の温泉水を胚胎する層のひとつとされており、孔隙率は 13~59 である。前節と同様に 3 m の温泉水を想定すると、バルクの比抵抗は 10~200 m と推定される。比抵抗断面では、この部分は 10~100 m を示しており、この見積もりがほぼ正しいことを裏付けている。なお、この部分は、すぐ南西側に隣接する低比抵抗域との間に高傾斜の明瞭な境界を認めることができる。前節での検討から、この低比抵抗域には粘土鉱物の存在が想定されるので、更新統安山岩類の下部もしくは柳原層の変質に対応する可能性がある。本稿では、この明瞭な比抵抗境界は洞爺カルデラのカルデラ壁、もしくはそれに付随する北落ちの正断層に対応するものと推定した。

貫入マグマ 以上の特徴は Fig.12 に示した 2 つの比抵抗断面に共通するものであるが、最後に、2000 年噴火の貫入マグマについて考える。2000 年噴火に伴う地殻変動の解析から、マグマは最終的に、地表から少なくとも数百 m の深さにまで到達したと考えられており（三浦・新井田、2002; Jousset et al., 2003），ここで示した比抵抗断面の範囲に含まれることになる。鈴木・中田（2002）は、2000 年噴火の本質物に含まれるマイクロパミスの石基組成から、マグマ溜まり

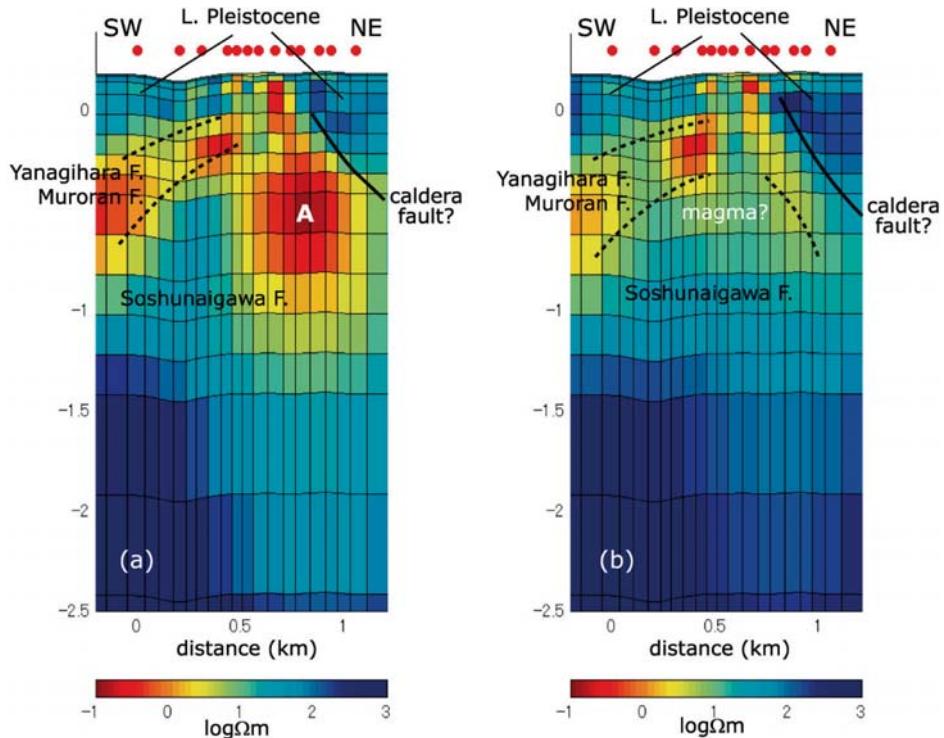


Fig. 12. Interpretation of the 2-D inverted resistivity sections. Left and right panels are for Fig. 8a and 8c, respectively.

からの上昇開始直前におけるメルトを流紋岩質であると推定している。そこで、流紋岩質メルトの電気伝導度として、Gaillard (2004) が黒曜石の室内実験に基づいて与えた次の計算式を用いる。

$$\sigma_m = \sigma_0 \exp [(-E_a + 2P)/RT] \quad (2)$$

ここで、 σ_m は電気伝導度、単位は S/m である。P は圧力 MPa、R は気体常数 (8.31 J/K/mol)、 σ_0 および E_a は以下のように与えられている。

$$\sigma_0 = -78.9 \ln [wt\% H_2O] + 754$$

$$E_a = -2925 \ln [wt\% H_2O] + 64132$$

Fig.13 に、 H_2O 含有量が 1, 2 および 6 wt % の場合について 600 ~ 1300 °C の範囲で計算した流紋岩質メルトの比抵抗を示す。ここでは、0.5 ~ 1 km 程度の深さを想定して、圧力は 15 MPa とした。比較のために、Murase (1963) が昭和新山溶岩について測定した結果 (常圧) も簡略化してプロットしている。観測時点でのマグマの温度については確実な情報がないが、東

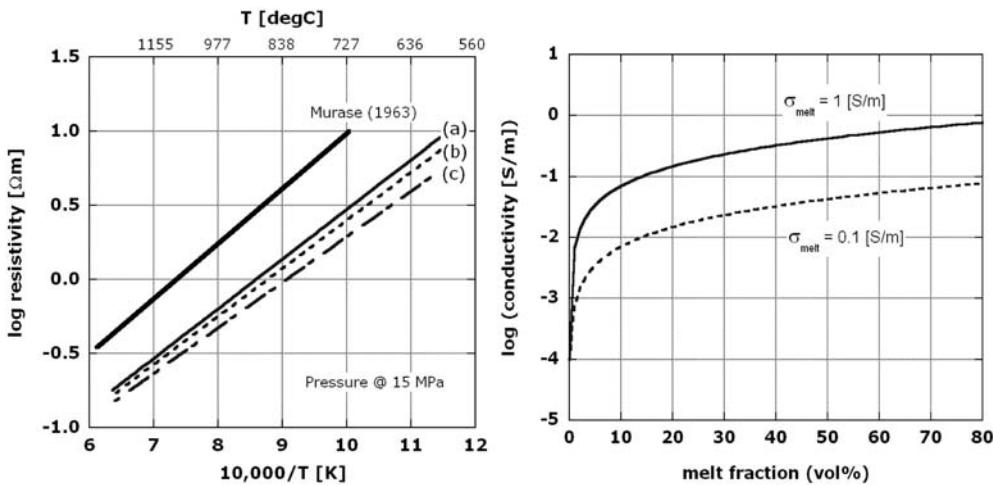


Fig. 13. (Left) Resistivity of rhyolitic melt calculated by using Gaillard (2004)'s formula. Lines (a), (b), and (c) indicate the melt H₂O content of 1, 3, and 6 wt%, respectively. Thick solid line shows the simplified curve from the Murase (1963)'s experiment for Showa-Shinzan lava at 1 atm. (Right) Bulk conductivity of magma as a function of melt fraction based on the MBL model by Schilling et al. (1997). Solid and dashed lines denote the cases for the melt conductivity of 1 and 0.1 S/m, respectively. Conductivity of the solid phase is assumed as 1×10^{-4} S/m for both cases.

宮・宮城 (2002) による本質物中の斜長石の分析によれば、噴火直前のマグマ温度は 950 度と考えられている。また、噴火後の地磁気観測 (Hashimoto et al., 2008) からは、2000 年新山域で顕著な帶磁傾向が捉えられており、貫入したマグマは部分的にキュリー点温度を下回っていると推定される。そこで、マグマの温度を 600-800 度とするとき、対応するメルトの比抵抗は、含水量の不確定さを考慮して 1~10 m 程度と考えてよいだろう。

実際に冷却途上にあるマグマでは、メルトそのものではなく、結晶とメルトが共存した部分熔融の状態を考える必要がある。そこで、Schilling et al. (1997) の modified-brick-layer (MBL) モデルによる計算式を援用して部分熔融体の電気伝導度を見積もってみる。メルトの比抵抗は 1 もしくは 10 m、固相の比抵抗は 10 k m とし、メルト体積分率 0~80% の範囲について。バルクの電気伝導度を Fig.14 に示した。当然のことながら、バルクの電気伝導度は、メルトが 0% の場合には固相のそれと一致し、メルトが 100% の場合にはメルトのそれと一致する。バルクの電気伝導度が、メルト分率 10% 以下の領域で急変するのは、この範囲でメルトの連結度が変わるためにある。マグマに気泡が含まれる場合には、これより比抵抗は大きくなるはずであるが、メルト分率による変化に較べるとその寄与は限定的であろう。

さて、これで考察の準備が整ったので、再度 2 次元インバージョンの比抵抗断面に戻る。比抵抗断面図 Fig.12a では、水平位置 0.7 km、深さ 0.7 km 付近を中心とし、直径 500 m 程度の低比抵抗体 (0.1~1 m) がイメージされている。貫入マグマではないかと考えたくなるが、上述した部分熔融体の考察から、この部分の比抵抗値は冷却途上のマグマにしては低すぎることがわかる。一方、断面図 Fig.12b をもとに解釈すると、測線の中央部 (すなわち新山の隆起中心)

において、第 2 層低比抵抗の直下（深さ 500~800 m 程度）にある 10 m 前後のブロックが、低比抵抗層を標高-400 m 程度まで押し上げているようにみえる。ドーム状の比抵抗構造は、新山の隆起範囲とも整合的である。Fig.14 を参照すると、メルトの比抵抗が 1 m の場合で 15 %、10 m の場合で 80% 以上の部分熔融を仮定すれば、MT 法による比抵抗値を説明することが可能である。ただし、後者はここで考えた温度範囲のうち、低温側の条件（600 °C）に対応しており、80% の部分熔融を考えるのは無理があると思われる。

以上の考察に基づいて、断面図 Fig.12b の中央部に位置する 10 m 前後のブロックを貫入マグマであると考えて比抵抗断面を再解釈すると、マグマは莊珠内川層の最上部から室蘭層付近で上位の柳原層との密度障壁に遭遇して定置し、その後、発泡と部分的な上昇に伴って徐々に地盤を押し上げたのではないかと考えられる。このブロックの下面については比抵抗分布からは明瞭に描き出せてはおらず、新山の隆起に関わった貫入体積を推定することは難しい。ただし、ここで貫入マグマと考えた部分は深部に向かって徐々に高比抵抗に遷移しており、標高-1 km 付近では 50 m 程度の値を示すようになる。それゆえ、新山域の直下では、貫入マグマの下限はさほど深くないと推測される。これは、地殻変動の観測等から推定されているように、噴火の最初期にマグマはまず有珠山の本体に向かい、その後やや深部から西に向かって斜めに上昇してきたとする考えとも矛盾しない。

先述の通り、いずれの比抵抗断面モデルが最も現実的であるかを判断するには、MT データのみでは困難で、隆起中心の位置やマグマの比抵抗値などの補足的な情報と矛盾のない比抵抗モデルを選択すべきである。このような立場から、本稿では Fig.12b の解釈断面を最適モデルと考える。

温度による粘土鉱物の変化 上述の考察で、第 2 層が高導電率の粘土鉱物を含む変質帯である可能性について述べた。高倉（1995）によれば、様々な粘土鉱物の中でも、とりわけモンモリロナイト（スメクタイト）の影響による岩石比抵抗の低下が顕著である。イライト、セリサイト、緑泥石などはモンモリロナイトに比べると、比抵抗を下げる効果が小さい。高レベル廃棄物貯留に関連した粘土層バリアの耐久性についてレビューした Wersin et al. (2007) によれば、スメクタイトは高温にさらされると、イライトや緑泥石などに不可逆的に変化することが知られており、この反応の進行は温度、時間、孔隙水の K⁺ 濃度に強く依存している。スメクタイトからイライトへの変化については、様々な条件での実験値や自然環境下の観察に基づくデータが出されているが、Pytte and Reynolds (1989) によれば、スメクタイトは 250 °C の環境下では数ヶ月から数年の時間スケールで変化してしまうとする例もある。

これを有珠山 2000 年噴火の貫入域にあてはめた場合、新第三系の変質帯に含まれていたスメクタイトの一部は、貫入マグマによって加熱され、数ヶ月から数年の間にイライトや緑泥石などの相対的に高比抵抗な粘土鉱物に変化してしまっている可能性がある。比抵抗断面にみられる第 2 層下面の盛り上がりは、貫入マグマの突き上げによる物理的変形ではなく、粘土鉱物の変化に対応する等温面を意味するものかもしれない。その場合、貫入マグマの上面はもう少し深い位置

にあると考えてもよい。

.まとめと今後の課題

2006年7月に実施したMT法比抵抗探査データに基づいて、2000年新山域の浅部地下構造を考察した。今回の解析では、広域構造の影響を避けるため、深さ数kmまでの構造に関与する高周波側の応答だけを用いて2次元でモデリングした。解析された比抵抗断面は、秋田・柴田(2003)のMT/CSMT法の1次元解析で報告されたものと整合的で、表層から深部に向かって高-低-高の3層構造を示している。表層から数100mにかけては、主に下部更新統安山岩類に対応する100m程度の層がある。第2層は0.1~1mと極めて比抵抗が低く、測線の中央部で浅くなっているように見える。この低比抵抗層は、高導電率の粘土鉱物を含む新第三系に温泉水が浸透した領域と考えられる。その下位は相対的に高比抵抗に漸移するが、測線中央部(新山の隆起中心付近)では10m前後の比抵抗値が第2層を突き上げているように見える。本稿では、この部分が貫入マグマである可能性について検討し、流紋岩質マグマの部分熔融を考えれば説明可能であるとの結論に至った。第2層下面の盛り上がりは、貫入マグマの突き上げによる物理的変形に対応する可能性もあるが、第2層に含まれる高導電性の粘土鉱物が高温環境に置かれることにより、相対的に導電性に乏しい別の粘土鉱物に遷移する等温面に対応している可能性もある。

今後の課題としては、(1)スタティックシフトの任意性を拘束するための表層比抵抗の決定(例えは高密度電気探査の実施)、(2)測線南西部のデータ追加による南西傾斜構造の再確認があげられる。また、2次元構造走向の仮定に起因するモデルの恣意性を排除するためには、3次元解析による検討が必要になる。それに付随して、広域構造の影響を取り入れた深部へのアプローチも課題として残っている。考察に述べた推論がもし正しいならば、貫入したマグマはまだ部分熔融の状態にあり、今後冷却に伴ってその比抵抗は2~3桁程度増大する可能性がある。MT法探査の繰り返しによって、この変化を捉えることは可能であろう。

謝辞 1次元解析には、Moscow State UniversityのIPI2Win(MT)を使用した。産業技術総合研究所の佐藤秀幸氏(現所属:大成基礎設計株式会社)には、過去の探査データに基づいて、今回の探査の企画に助言をいただいた。

文 献

- 秋田藤夫・柴田智郎, 2003. MT/CSAMT法による地下構造調査, 有珠山火山活動災害復興支援土地条件等調査報告, 北海道立地質研究所, 173-196.
- Gaillard, F., 2004. Laboratory measurements of electrical conductivity of hydrous and dry silicic melts under pressure, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 218, 215-228.

- Hashimoto, T., T. Hurst, A. Suzuki, T. Mogi, Y. Yamaya and M. Tamura, 2008. The role of Thermal Viscous Remanent Magnetisation (TVRM) in magnetic changes associated with volcanic eruptions: insights from the 2000 eruption of Mt Usu, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **176**, 610-616.
- Jousset, P., H. Mori and H. Okada, 2003. Elastic models for the magma intrusion associated with the 2000 eruption of Usu Volcano, Hokkaido, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **125**, 81-106.
- Matsushima, N., H. Oshima, Y. Ogawa, S. Takakura, H. Satoh, M. Utsugi and Y. Nishida, 2001. Magma prospecting in Usu volcano, Hokkaido, Japan, using magnetotelluric soundings, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **109**, 263-277.
- 三浦大助・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, **47**, 119-130.
- 森 渚・宇井忠英, 2000. 2000 年有珠山噴火の地殻変動と噴火活動について, 自然災害科学, **19**, 383-390.
- Murase, T., 1963. Viscosity and related properties of volcanic rocks at 800 to 1400 , *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII*, **1**, 487-584.
- 西川信康, 1992. 菱刈鉱山における変質鉱物と物性との関係, 平成 3 年度広域地質調査報告書, 構造解析総合調査, 通商産業省, 157-187.
- Ogawa, Y., N. Matsushima, H. Oshima, S. Takakura, M. Utsugi, K. Hirano, M. Igarashi and T. Doi, 1998. A resistivity cross-section of Usu volcano, Hokkaido, Japan, by audiomagnetotellurics soundings, *Earth Planets Space*, **50**, 339-346.
- Ogawa, Y. and T. Uchida, 1996. A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift, *Geophys. J. Int.*, **126**, 69-76.
- 大島弘光・松島喜雄, 1999. 有珠山浅部の水環境: 既存資料の解析, 北海道大学地球物理学研究報告, **62**, 79-97.
- Pytte, A. M. and Reynolds, R. C., 1989. The Thermal Transformation of Smectite to Illite. in: Nancy D. Naeser and Thane H. McCulloh (Eds), *Thermal history of Sedimentary Basins: Methods and Case Histories*, Springer-Verlag, New York, 319pp.
- Schilling, F. R., G. M. Parzsch, H. Brasse and G. Schwarz, 1997. Partial melting below the magmatic arc in the central Andes deduced from geoelectromagnetic field experiments and laboratory data, *Phys. Earth Planet. Int.*, **103**, 17-31.
- 曾屋龍典・勝井義雄・新井田清信・堺幾久子・東宮昭彦, 2007. 有珠火山地質図(第 2 版), 独立行政法人 産業技術総合研究所地質調査総合センター, つくば.
- 鈴木由希・中田節也, 2002. 気泡組織・サイズ分布から見た, 有珠山 2000 年噴火でのマグマ上昇と発泡プロセス, 火山, **47**, 675-688.
- 高倉伸一, 1995. 新潟および秋田油田地域の新第三系岩石の比抵抗, 物理探査, **48**, 161-175.
- 和田信彦・八幡正弘・大島弘光・横山英二・鈴木豊重, 1988. 西胆振地域の地質と地熱資源, 地下資源調査所調査研究報告, **19**, 93.
- Wersin, P., L. H. Johnson and I. G. McKinley, 2007. Performance of the bentonite barrier at temperatures beyond 100 : A critical review, *Phys. Chem. Earth*, **32**, 780-788.
- 八幡正弘, 2002. 有珠火山 2000 年噴火におけるマグマ水蒸気 - 水蒸気爆発による破碎深度とその時間的変化, 火山, **47**, 263-278.

Table 1. List of apparent resistivity and phase measured in the survey in 2006. Units are in m and degree.

f [Hz]	600								601								602									
	TM				TE				TM				TE				TM				TE					
	ρ	ϕ	Log-err	ϕ -err	ρ	ϕ	Log-err	ϕ -err	ρ	ϕ	Log-err	ϕ -err	ρ	ϕ	Log-err	ϕ -err	ρ	ϕ	Log-err	ϕ -err	ρ	ϕ	Log-err	ϕ -err		
4.31E+01	3.12	7.08E+01	46.8	4.37E+01	341.0	4.05E+01	26.7		3.12	7.08E+01	46.8	4.37E+01	341.0	4.05E+01	26.7	9.99E+00	99.9	9.99E+00	99.9	9.99E+00	99.9	9.99E+00	99.9	9.99E+00	99.9	
4.29E+01	3.12	7.08E+01	46.8	4.37E+01	341.0	4.05E+01	26.8		3.12	7.08E+01	46.8	4.37E+01	341.0	4.05E+01	26.8	2.66E+00	99.9	2.66E+00	99.9	3.03E+00	99.9	1.81E+00	99.9	1.81E+00	99.9	
5.00E+01	5.20E+01	10.8	7.08E+01	24.4	4.91E+01	312.5	1.18E+01	15.3		5.20E+01	10.8	7.08E+01	24.4	4.91E+01	312.5	1.18E+01	15.3	3.26E+00	74.9	2.44E+00	28.2	2.38E+00	15.7			
5.70E+01	3.09E+01	10.8	7.08E+01	24.4	4.91E+01	312.5	1.18E+01	15.7		2.43E+01	16.0						1.23E+01	32.6	7.36E+01	48.5	1.92E+00	337.5	1.23E+00	80.9		
6.50E+01	6.56E+00	74.6	7.52E+01	49.6	1.87E+01	408.0	5.39E+01	35.6		2.24E+01	16.0						9.74E+00	84.4	2.02E+01	13.3	3.03E+00	9.3	2.28E+01	15.1		
8.40E+01	1.92E+02	47.0	3.88E+01	25.6	1.33E+01	17.5	3.22E+01	21.3		2.24E+01	16.0						4.72E+00	32.6	7.25E+01	16.6	5.54E+00	29.9	2.12E+01	14.0		
9.90E+01	5.74E+01	74.5	3.89E+01	25.6	1.33E+01	17.5	3.22E+01	21.3		2.24E+01	16.0						7.01E+00	89.5	6.07E+02	4.0	4.32E+00	12.5	5.87E+02	3.9		
1.14E+02	3.20E+01	25.7	8.27E+01	54.6	1.01E+01	118.3	3.84E+01	25.3		2.24E+01	16.0						8.20E+00	27.0	6.91E+01	4.6	2.09E+00	21.4	1.23E+01	8.1		
1.37E+03	2.02E+01	50.9	4.64E+01	30.6	1.01E+01	12.8	4.16E+01	27.4		2.24E+01	16.0						1.07E+01	76.0	5.40E+02	3.6	3.43E+00	2.5	6.40E+02	4.2		
1.68E+03	1.62E+02	21.0	3.13E+01	20.6	3.75E+00	24.1	8.26E+01	54.5		2.24E+01	16.0						1.14E+01	80.9	8.60E+02	5.7	3.10E+00	4.6	9.84E+02	6.5		
1.98E+03	6.60E+01	55.5	1.91E+02	1.3	2.21E+01	38.6	8.35E+01	5.5		2.24E+01	16.0						1.52E+01	77.7	7.08E+02	4.3	3.31E+00	18.2	1.17E+01	7.7		
2.29E+03	5.52E+01	1.2	2.83E+01	4.0	1.4E+01	24.4	8.40E+01	38.9		2.24E+01	16.0						1.50E+01	34.4	2.12E+02	2.8	2.00E+00	18.0	1.87E+01	12.4		
2.75E+03	8.51E+01	3.09E+01	20.4	9.99E+00	3.40E+38	99.9				2.24E+01	16.0						1.68E+01	76.9	1.81E+02	1.2	1.78E+00	22.3	4.19E+01	1.5		
3.40E+03	5.06E+01	68.8	8.41E+02	5.6	4.34E+00	30.5	1.93E+01	12.7		2.24E+01	16.0						1.85E+01	76.7	6.89E+03	0.6	1.82E+00	24.5	1.89E+02	1.3		
4.00E+03	1.07E+02	68.6	2.50E+01	16.5	3.50E+00	9.1	3.41E+01	22.5		2.24E+01	16.0						2.45E+01	73.0	1.97E+02	1.3	2.04E+00	30.6	5.84E+02	3.9		
4.69E+03	2.87E+01	84.4	1.47E+02	9.7	2.08E+00	30.3	1.84E+01	12.2		2.24E+01	16.0						2.75E+01	70.8	1.13E+02	0.5	1.48E+00	32.9	3.38E+02	2.2		
5.50E+03	7.99E+01	68.1	6.01E+02	4.0	3.24E+00	34.2	1.18E+01	7.8		2.24E+01	16.0						3.20E+01	68.0	6.25E+02	0.4	1.43E+00	34.2	1.98E+02	1.3		
6.70E+03	9.59E+01	71.4	1.80E+02	1.2	3.17E+00	55.0	7.37E+02	4.9		2.24E+01	16.0						3.41E+01	80.9	8.60E+02	5.7	3.10E+00	4.6	9.84E+02	6.5		
7.90E+03	1.08E+02	68.0	1.82E+02	1.2	1.67E+00	33.7	1.31E+01	8.7		2.24E+01	16.0						3.92E+01	61.8	4.92E+00	0.3	1.43E+00	40.0	1.52E+02	1.5		
9.20E+03	1.30E+01	63.5	1.91E+02	1.3	2.21E+01	38.6	8.35E+01	5.5		2.24E+01	16.0						4.02E+01	70.9	5.40E+00	0.3	1.44E+00	2.3	2.35E+02	1.5		
1.11E+04	1.20E+02	59.4	1.91E+02	1.0	2.64E+01	37.2	7.64E+02	5.0		2.24E+01	16.0						4.23E+01	70.2	5.28E+00	0.3	1.44E+00	32.5	4.84E+02	3.2		
1.34E+04	1.02E+02	59.4	1.91E+02	0.9	3.06E+00	39.3	2.70E+01	1.8		2.24E+01	16.0						4.38E+01	70.0	3.00E+02	0.3	1.44E+00	44.9	2.05E+02	1.4		
1.59E+04	1.34E+02	53.6	1.46E+02	1.0	2.90E+00	48.6	7.79E+02	5.1		2.24E+01	16.0						4.47E+01	50.2	5.27E+02	0.4	1.69E+00	45.2	2.24E+02	1.5		
1.83E+04	1.31E+02	50.8	1.41E+02	0.9	2.76E+00	51.4	1.01E+01	6.7		2.24E+01	16.0						4.58E+01	47.1	2.94E+03	0.2	1.87E+00	48.0	1.26E+02	0.8		
2.20E+04	1.35E+02	49.0	6.00E+03	0.4	3.09E+00	47.6	4.19E+02	2.8		2.24E+01	16.0						4.51E+01	45.1	2.81E+02	0.2	1.96E+00	45.9	1.29E+02	0.9		
2.69E+04	1.34E+02	46.2	6.29E+03	0.4	3.20E+00	43.6	4.42E+02	2.9		2.24E+01	16.0						4.46E+01	40.2	3.29E+02	0.2	1.95E+00	44.8	1.17E+02	0.8		
3.20E+04	1.31E+02	43.4	7.42E+03	0.5	2.64E+00	44.3	3.40E+02	2.2		2.24E+01	16.0						4.32E+01	40.1	3.46E+02	0.2	1.90E+00	44.6	1.01E+02	0.7		
3.70E+04	1.36E+02	41.5	1.65E+02	1.1	2.78E+00	42.6	7.46E+02	4.9		2.24E+01	16.0						4.32E+01	37.6	2.77E+02	0.2	2.06E+00	43.4	8.98E+03	0.6		
4.40E+04	2.02E+01	39.5	2.87E+02	1.9	3.24E+00	44.4	6.98E+02	4.6		2.24E+01	16.0						3.99E+01	34.1	3.67E+02	0.2	2.04E+00	42.4	6.59E+03	0.4		
5.10E+04	1.19E+01	37.1	1.06E+02	0.7	3.14E+00	41.4	2.44E+01	1.6		2.24E+01	16.0						3.81E+01	33.1	3.00E+02	0.2	2.10E+00	42.0	8.09E+03	0.5		
5.80E+04	1.02E+01	35.9	1.06E+02	0.9	3.06E+00	39.3	2.70E+01	1.8		2.24E+01	16.0						3.62E+01	31.8	3.02E+02	0.3	2.07E+00	37.9	9.29E+03	0.5		
6.50E+04	1.02E+01	33.7	1.06E+02	0.9	3.06E+00	37.4	3.02E+01	2.0		2.24E+01	16.0						3.46E+01	29.7	3.76E+03	0.3	2.00E+00	36.3	4.75E+03	0.3		
7.20E+04	1.02E+01	31.5	1.06E+02	0.9	3.06E+00	35.5	3.32E+01	2.2		2.24E+01	16.0						3.12E+01	28.5	3.93E+03	0.3	1.78E+00	35.4	6.04E+03	0.4		
7.90E+04	9.73E+01	29.7	3.65E+02	2.4	9.75E+00	43.0	1.93E+01	11.7		2.24E+01	16.0						2.87E+01	26.1	7.58E+03	0.5	1.95E+00	33.1	2.80E+02	1.9		
8.60E+04	9.73E+01	25.5	8.55E+02	5.6	2.04E+01	29.7	1.34E+00	8.8		2.24E+01	16.0						2.29E+01	24.5	4.49E+02	0.3	1.80E+00	34.0	4.14E+02	1.0		
9.20E+04	2.02E+01	28.3	1.65E+01	10.9	3.40E+01	35.0	1.91E+01	12.6		2.24E+01	16.0						2.08E+01	22.9	2.81E+02	0.2	1.69E+00	30.7	1.03E+02	0.7		
9.80E+04	2.02E+01	25.4	4.02E+01	2.7	1.61E+01	28.5	1.04E+01	6.9		2.24E+01	16.0						2.18E+01	22.6	2.12E+02	0.1	1.48E+00	32.2	7.83E+03	0.5		
1.05E+05	1.65E+01	21.7	3.59E+02	2.4	1.14E+01	27.4	1.25E+01	5.4		2.24E+01	16.0						2.12E+01	20.9	3.10E+02	0.2	1.10E+00	35.0	6.64E+03	0.4		
1.12E+05	5.80E+01	22.8	3.43E+02	2.3	2.72E+00	32.4	0.91E+00	6.1		2.24E+01	16.0						2.05E+01	20.3	3.12E+02	0.2	9.00E+00	35.3	6.56E+03	0.6		
1.20E+05	1.04E+01	30.3	6.12E+02	0.3	4.30E+00	42.2	6.70E+02	4.4		2.24E+01	16.0						2.01E+01	19.6	3.07E+02	0.3	1.23E+00	60.5	1.17E+01	0.1		
1.27E+05	1.02E+01	51.0	3.46E+03	0.2	5.09E+00	5.5	5.07E+02	6.17		2.24E+01	16.0						2.01E+01	19.6	5.40E+02	0.2	1.23E+00	62.7	1.17E+01	0.1		
1.34E+05	1.02E+01	51.0	3.45E+03	0.2	5.09E+00	5.5	5.07E+02	6.17		2.24E+01	16.0						2.01E+01	19.6	5.40E+02	0.2	1.23E+00	62.7	1.17E+01	0.1		
1.41E+05	1.02E+01	51.0	3.45E+03	0.2	5.09E+00	5.5	5.07E+02	6.17		2.24E+01	16.0						2.01E+01	19.6	5.40E+02	0.2	1.23E+00	62.7	1.17E+01	0.1		
1.48E+05	1.02E+01	51.0	3.45E+03	0.2	5.09E+00	5.5	5.07E+02	6.17		2.24E+01	16.0						2.01E+01	19.6	5.40E+02	0.2	1.23E+00	62.7	1.17E+01	0.1		
1.55E+05	1.02E+01	51.0	3.45E+03	0.2	5.09E+00	5.																				

Table 1. continued

Table 1. continued

f [Hz]	607						608						609					
	TM			TE			TM			TE			TM			TE		
	ρ	ϕ	Logr-err	ρ	ϕ	Logr-err	ρ	ϕ	Logr-err	ρ	ϕ	Logr-err	ρ	ϕ	Logr-err	ρ	ϕ	Logr-err
3.40E-04				7.96E-01	-14.1	1.45E+00	59.8	6.05E+01	46.4	1.88E+00	123.9							
4.20E-04				8.79E-01	-14.6	7.44E+00	49.1	1.79E+02	326.2	6.95E+01	45.9							
5.00E-04				2.31E+01	98.7	9.10E+00	6.0	1.22E+02	341.2	4.69E+01	30.9							
5.70E-04				1.49E+00	75.6	2.00E+00	132.0	3.81E+01	353.2	6.22E+01	41.1							
6.40E-04				4.24E+00	15.3	3.00E+00	19.8	3.52E+01	15.9	8.20E+00	5.7							
7.00E-04				4.18E+00	3.3	3.02E+00	1.0	3.20E+01	32.9	5.54E+01	1.1							
7.90E-04				1.87E+01	108.2	3.49E+01	23.0	4.59E+01	9.5	1.24E+01	8.2							
1.14E-03				6.24E+01	81.7	2.43E+01	16.0	1.60E+00	317.7	5.11E+01	33.7							
1.37E-03				9.99E+00	67.5	2.36E+01	15.6	1.67E+01	34.3	1.69E+01	11.2							
1.68E-03				1.67E+01	84.6	1.02E+01	6.8	2.22E+01	26.9	9.11E+01	6.0							
1.98E-03				5.57E+00	87.2	1.70E+01	11.2	2.36E+01	34.1	1.02E+01	6.7							
2.29E-03				9.51E+00	57.1	1.24E+01	8.2	1.88E+01	30.6	8.26E+02	5.5							
2.75E-03				1.14E+01	68.7	9.41E+02	6.2	1.05E+01	19.4	1.23E+01	8.1							
3.40E-03				2.05E+01	80.8	5.68E+02	3.7	1.34E+01	4.2	1.01E+01	6.7							
4.00E-03				1.16E+01	5.6	5.36E+02	3.5	9.52E+01	31.8	7.30E+02	5.0							
4.40E-03				1.47E+01	81.2	6.81E+02	4.2	1.08E+01	18.2	2.31E+02	3.5							
5.50E-03				1.53E+01	69.0	4.08E+02	2.7	9.45E+01	37.4	5.90E+02	4.0							
6.70E-03				1.97E+01	68.3	3.16E+02	2.1	8.03E+01	31.9	5.04E+02	3.3							
7.90E-03				2.00E+01	63.0	3.90E+02	2.6	6.89E+01	39.1	5.84E+02	3.9							
9.20E-03				2.31E+01	63.1	3.47E+02	2.3	7.99E+01	38.0	4.82E+02	3.2							
1.10E-02				2.24E+01	59.2	1.36E+02	0.9	8.05E+00	42.0	1.99E+02	1.3							
1.34E-02				2.27E+01	55.0	8.05E+03	0.5	7.72E+00	42.2	1.23E+02	0.8							
1.59E-02				2.29E+01	53.0	7.24E+03	0.5	8.11E+01	44.3	1.00E+02	0.7							
1.83E-02				2.39E+01	50.7	6.68E+03	0.4	8.20E+00	43.1	8.52E+03	0.6							
2.20E-02				2.40E+01	46.9	4.24E+03	0.3	8.32E+00	44.4	4.79E+03	0.3							
2.69E-02				2.39E+01	45.9	3.50E+03	0.2	8.83E+00	43.8	5.03E+03	0.3							
3.24E-02				2.37E+01	42.9	3.83E+03	0.3	6.78E+00	42.5	5.30E+03	0.3							
3.70E-02				2.25E+01	41.4	1.51E+03	0.3	8.86E+00	44.7	3.83E+03	0.4							
4.40E-02				2.27E+01	37.3	4.49E+03	0.3	9.46E+00	43.6	8.13E+03	0.5							
5.40E-02				2.01E+01	36.3	9.66E+03	0.6	1.00E+01	39.3	1.19E+02	0.8							
6.30E-02				2.05E+01	34.1	1.16E+02	0.8	9.68E+00	38.2	1.71E+02	1.1							
7.30E-02				1.93E+01	31.5	1.49E+02	0.9	1.01E+00	36.6	1.85E+02	1.2							
8.80E-02				1.76E+01	31.8	9.62E+03	0.6	8.50E+00	35.6	9.45E+03	0.6							
1.07E-01				1.62E+01	30.2	8.77E+03	0.6	8.20E+00	33.8	1.20E+02	0.8							
1.27E-01				1.56E+01	28.6	1.13E+02	0.7	7.68E+00	31.7	1.49E+02	1.0							
1.46E-01				1.39E+01	27.7	1.03E+02	0.7	6.77E+00	30.7	1.28E+02	0.8							
1.76E-01				1.26E+01	27.4	7.11E+01	0.5	6.87E+00	28.6	8.47E+01	0.6							
2.12E-01				1.03E+01	26.1	1.08E+02	0.5	6.93E+00	29.4	1.14E+02	0.4							
2.54E-01				9.56E+00	25.0	2.90E+03	0.2	5.24E+00	27.7	5.45E+03	0.3							
2.93E-01				8.65E+00	26.2	2.38E+03	0.2	4.82E+00	29.6	3.76E+03	0.3							
3.50E+00	5.49E+00	12.2	1.20E+01	7.9	3.08E+00	23.2	1.62E+01	10.7	7.77E+00	26.9	2.08E+03	0.4	3.04E+00	3.7	9.09E+00	99.9	9.09E+00	99.9
4.30E+00	4.01E+00	20.5	1.10E+01	7.3	2.34E+00	26.9	1.53E+01	10.1	6.75E+00	28.1	1.99E+03	0.1	3.86E+00	31.7	2.73E+03	0.2	9.99E+00	99.9
5.10E+00	4.39E+00	16.0	7.83E+02	5.2	2.07E+00	29.0	1.17E+01	7.7	6.22E+00	29.5	2.43E+03	0.2	3.51E+00	33.5	2.64E+03	0.2	9.99E+00	99.9
5.90E+00	5.27E+00	33.3	8.57E+02	5.7	1.75E+00	38.9	1.11E+01	7.3	5.63E+00	31.8	1.91E+03	0.1	3.26E+00	35.2	2.38E+03	0.2	9.99E+00	99.9
7.00E+00	2.12E+00	34.6	4.68E+02	3.1	1.22E+00	33.6	6.09E+02	4.0	5.24E+00	34.3	1.17E+03	0.1	3.10E+00	37.9	1.39E+03	0.1	9.99E+00	99.9
8.60E+00	1.72E+00	30.1	3.44E+02	1.6	7.30E+00	35.5	3.24E+02	2.1	4.67E+00	41.3	1.08E+03	0.1	2.97E+00	44.7	1.17E+03	0.2	9.99E+00	99.9
1.02E+00	1.76E+00	37.6	2.40E+02	1.6	7.90E+00	35.5	3.24E+02	2.1	4.67E+00	44.6	9.98E+00	0.1	2.97E+00	44.7	1.17E+03	0.2	9.99E+00	99.9
1.17E+00	1.39E+00	31.8	2.45E+02	1.6	7.90E+00	35.5	3.24E+02	2.1	4.67E+00	44.6	9.98E+00	0.1	2.97E+00	44.7	1.17E+03	0.2	9.99E+00	99.9
1.41E+00	2.28E+00	46.0	1.33E+02	0.9	1.23E+00	46.7	1.74E+02	1.2	4.62E+00	47.5	6.51E+04	0.0	3.03E+00	50.4	6.94E+04	0.0	1.75E+01	51.4
1.78E+00	2.28E+00	46.0	1.33E+02	0.9	1.23E+00	46.7	1.74E+02	1.2	4.62E+00	47.5	6.51E+04	0.0	3.03E+00	50.4	6.94E+04	0.0	1.75E+01	51.4
2.16E+00	3.54E+00	35.3	9.50E+03	0.6	1.20E+00	54.7	1.24E+02	0.8	5.15E+00	54.4	6.04E+05	0.0	3.40E+00	55.6	6.04E+05	0.0	1.75E+01	57.8
2.34E+00	1.90E+00	56.6	9.11E+03	0.6	1.34E+00	55.0	1.09E+02	0.7	5.49E+00	56.9	6.08E+05	0.0	3.71E+00	57.2	6.08E+05	0.0	1.75E+01	57.8
2.81E+00	2.22E+00	61.8	1.85E+03	0.3	1.56E+00	58.5	6.25E+03	0.4	5.95E+00	59.3	3.91E+06	0.0	3.99E+00	58.6	4.34E+06	0.0	1.75E+01	61.0
3.40E+00	2.92E+00	63.2	4.19E+03	0.3	2.01E+00	60.8	5.09E+03	0.3	6.82E+00	61.7	3.91E+06	0.0	4.44E+00	60.1	6.31E+06	0.0	1.75E+01	63.2
4.10E+00	3.10E+00	62.6	3.24E+03	0.2	2.26E+00	61.8	6.14E+03	0.4	6.34E+00	62.4	3.47E+06	0.0	4.70E+00	60.6	6.34E+06	0.0	1.75E+01	63.2
4.70E+00	3.41E+00	65.8	1.47E+03	0.1	2.86E+00	63.5	6.15E+03	0.1	9.04E+00	63.7	6.86E+06	0.1	5.15E+00	62.0	6.86E+06	0.1	1.75E+01	63.2
5.60E+00	3.90E+00	65.8	1.47E+04	0.0	2.86E+00	63.5	6.15E+03	0.1	9.04E+00	63.7	6.86E+06	0.1	5.15E+00	62.0	6.86E+06	0.1	1.75E+01	63.2
6.30E+00	2.22E+01	59.2	8.69E+05	0.0	1.49E+00	52.0	5.70E+04	0.0	2.82E+01	50.1	1.21E+05	0.1	1.65E+01	50.3	1.34E+05	0.1	1.21E+01	50.1
7.80E+00	2.21E+01	55.3	5.23E+04	0.0	1.13E+01	55.8	2.06E+04	0.0	2.82E+01	50.1	1.21E+05	0.1	1.65E+01	50.3	1.34E+05	0.1	1.21E+01	50.1
1.15E+01	1.57E+01	57.4	2.17E+04	0.0	1.19E+01	50.9	4.57E+04	0.0	2.90E+01	49.3	1.34E+05	0.1	1.69E+01	48.9	1.82E+05	0.1	1.26E+01	51.1
1.32E+01	1.62E+01	54.1	5.13E+04	0.0	1.22E+01	54.5	2.17E+04	0.0	2.87E+01	48.3	1.34E+05	0.1	1.70E+01	48.4	1.56E+05	0.1	1.27E+01	51.1
1.59E+01	1.68E+01	53.5	1.74E+04	0.0	1.27E+01	57.1	2.17E+04	0.0	2.87E+01	48.3	1.34E+05	0.1	1.70E+01	48.4	1.56E+05	0.1	1.27E+01	51.1
1.94E+01	1.71E+01	53.0	1.30E+04	0.0	1.30E+01	54.3	1.74E+04	0.0	2.85E+01	46.3	1.91E+05	0.1	1.68E+01	46.7	2.30E+05	0.2	1.70E+01	48.0
2.29E+01	1.75E+01	52.6	1.30E+04	0.0	1.38E+01	52.5	1.74E+04	0.0	2.85E+01	45.2	4.11E+03	0.3	1.65E+01	46.2	5.61E+03	0.4	1.70E+01	48.0
2.65E+01	1.81E+01	52.6	1.30E+04	0.0	1.38E+01	52.5	1.74E+04	0.0	2.97E+01	45.2	8.21E+03	0.2	1.70E+01	45.3	9.39E+03	0.3	1.70E+01	48.0
3.20E+01	1.83E+01	52.6	1.30E+04	0.0	1.39E+01	52.0	1.30E+04	0.0	3.07E+01	42.7	3.07E+03	0.2	1.73E+01	42.7	4.19E+03	0.3	1.73E+01	48.0
3.90E+01	1.90E+01	52.6	1.30E+04	0.0														

Table 1. continued

f [Hz]	610						621						622					
	TM			TE			TM			TE			TM			TE		
	ρ	ϕ	Log-err	ρ	ϕ	Log-err	ρ	ϕ	Log-err	ρ	ϕ	Log-err	ρ	ϕ	Log-err	ρ	ϕ	Log-err
3.40E-04	3.05E-06	6.6	1.89E-01	7.8	4.81E+01	22.3	4.76E-02	3.1										
4.20E-04	2.16E-06	104.3	4.83E-01	31.9	7.23E-01	3.9	6.84E-02	4.5										
5.00E-04	3.93E-05	15.1	2.74E-01	18.1	7.23E-01	6.9	4.54E-02	3.0										
5.70E-04	4.04E-04	26.0	1.86E-01	12.3	3.86E+01	11.4	5.68E-02	3.8										
6.90E-04	4.49E-04	54.2	1.02E-01	6.7	4.30E+01	16.4	2.05E-02	1.4										
8.20E-04	1.02E-03	47.2	1.04E-01	10.2	4.84E+01	9.8	4.84E-02	3.5										
9.90E-04	6.70E-06	2.32E-02	6.2	2.09E+00	17.2	1.81E+01	1.0											
1.14E-03	2.31E-03	58.1	3.73E-02	1.9	2.81E+01	15.5	1.58E-02	1.2										
1.37E-03	1.17E-03	56.3	8.91E-02	5.9	2.56E+01	16.6	1.70E-02	1.1										
1.68E-03	1.62E-02	62.0	6.52E-02	4.3	2.09E+01	17.7	1.48E-02	1.0										
1.98E-03	2.98E-02	64.5	4.02E-02	2.7	1.79E+01	21.7	1.36E-02	0.9										
2.29E-03	2.02E-03	70.5	8.88E-02	5.9	1.84E+01	18.5	2.11E-02	1.4										
2.75E-03	2.98E-03	66.6	3.64E-02	2.4	1.33E+01	21.7	1.69E-02	1.1										
3.40E-03	3.74E-04	65.0	2.60E-02	1.7	1.27E+01	29.0	1.72E-02	1.1										
4.00E-03	4.54E-04	62.6	1.90E-02	1.3	1.36E+01	30.4	1.75E-02	1.2										
4.60E-03	4.53E-04	66.4	1.87E-02	1.3	1.11E+01	34.1	1.82E-02	1.2										
5.20E-03	5.45E-04	62.6	1.87E-02	1.3	1.05E+01	37.0	1.20E-02	0.9										
6.70E-03	6.97E-04	67.8	7.11E-03	1.3	1.05E+00	42.5	2.39E-03	0.5										
7.90E-03	6.97E-04	67.8	1.02E-02	0.7	1.22E+01	42.3	1.11E-02	0.9										
9.20E-03	7.11E-04	55.3	6.08E-03	0.4	1.23E+01	45.3	1.20E-02	0.8										
1.10E-02	7.39E-04	54.3	8.47E-03	0.6	1.38E+01	49.4	8.30E-03	0.6										
1.34E-02	8.24E-04	50.9	1.04E-02	0.7	1.48E+01	48.2	9.49E-03	0.6										
1.59E-02	8.35E-04	46.8	1.06E-02	0.7	1.51E+01	49.2	9.83E-03	0.7										
1.83E-02	8.33E-04	45.3	9.96E-03	0.7	1.59E+01	50.1	8.30E-03	0.6										
2.20E-02	8.10E-04	43.9	7.66E-03	0.5	1.69E+01	50.0	5.40E-03	0.4										
2.69E-02	7.45E-04	41.3	7.83E-03	0.5	1.86E+01	48.0	5.14E-03	0.3										
3.20E-02	7.59E-04	39.1	8.64E-03	0.6	1.91E+01	47.5	4.71E-03	0.3										
3.70E-02	7.15E-04	38.5	1.15E-02	0.8	1.94E+01	46.3	4.28E-03	0.3										
4.20E-02	7.00E-04	35.3	9.36E-03	0.6	1.94E+01	44.4	4.44E-03	0.3										
5.40E-02	6.44E-04	32.2	1.24E-02	0.8	2.04E+01	41.9	5.78E-03	0.4										
6.30E-02	6.34E-04	33.2	1.04E-02	0.9	2.08E+01	39.9	7.49E-03	0.5										
7.30E-02	6.67E-02	29.8	2.36E-02	1.6	1.97E+01	39.8	1.02E-02	0.7										
8.80E-02	5.97E-02	29.7	3.57E-02	2.4	1.87E+01	36.9	6.62E-02	1.1										
1.07E-01	1.08E-02	32.0	6.42E-02	4.2	1.78E+01	33.0	3.88E-02	2.6										
1.27E-01	6.12E-02	33.2	7.90E-02	5.2	1.80E+01	35.5	4.37E-02	2.9										
1.46E-01	7.90E-02	32.9	8.24E-02	5.4	1.86E+01	36.2	4.15E-02	2.7										
1.76E-01	5.40E-02	36.3	5.41E-02	3.6	1.92E+01	26.8	3.25E-02	2.1										
2.15E-01	4.10E-02	28.2	2.97E-02	2.0	1.40E+01	31.7	1.47E-02	1.0										
2.54E-01	4.10E-02	28.1	2.51E-02	1.7	1.43E+01	29.3	1.92E-02	1.3										
2.93E-01	3.49E-04	30.5	2.05E-02	1.4	1.37E+01	30.8	3.04E-02	1.0										
3.12E-01	1.87E-01	47.1	4.28E-03	0.3	1.97E+01	30.4	2.04E-01	1.0	6.50E+00	31.5	2.37E-01	4.0	5.04E-01	55.5	2.92E-01	4.4	1.03E-01	55.5
3.40E-01	2.64E-01	11.2	1.01E-01	0.7	1.01E+01	34.6	7.93E-03	0.5	1.96E+00	50.2	1.44E-01	6.0	3.04E+00	61.0	1.59E-01	4.4	3.03E+00	60.5
5.10E-01	2.64E-01	32.7	1.06E-02	0.7	8.99E+00	36.9	6.83E-03	0.5	6.53E+00	30.2	1.46E-01	1.1	9.39E+00	16.5	1.25E-01	2.9	1.15E-01	25.5
5.90E-01	2.24E-01	36.1	1.01E-02	0.7	8.19E+00	39.6	6.66E-03	0.4	9.17E+00	21.8	1.11E-01	2.7	7.09E+00	26.1	1.36E-01	3.0	1.06E+01	38.2
7.00E-01	2.08E-01	39.1	6.08E-03	0.4	8.14E+00	42.8	3.20E-02	0.3	2.35E+00	17.3	8.46E-02	2.4	5.74E+00	26.0	6.92E-02	2.1	6.27E-02	31.2
8.60E-01	1.99E-01	41.5	5.05E-03	0.5	7.79E+00	48.2	1.81E-02	0.3	2.58E+00	37.0	6.32E-02	2.0	3.63E+00	45.2	5.48E-02	1.9	3.94E+00	26.1
9.80E-01	1.87E-01	47.4	1.24E-01	0.3	7.90E+00	49.7	2.30E-03	0.2	2.30E+00	30.4	5.04E-02	1.8	4.24E+00	35.3	4.42E-02	1.7	3.07E+00	29.5
1.02E-01	1.87E-01	47.4	1.24E-01	0.3	7.90E+00	49.7	2.30E-03	0.2	2.30E+00	31.2	4.45E-02	1.7	4.24E+00	35.3	4.47E-02	1.7	4.07E+00	29.5
1.17E-01	1.91E-01	49.4	4.24E-01	0.3	8.34E+00	52.1	2.30E-03	0.2	2.94E+00	31.2	4.45E-02	1.7	4.35E+00	32.8	4.18E-02	1.7	4.07E+00	27.0
1.41E-01	1.94E-01	52.8	2.21E-02	0.2	8.66E+00	54.5	1.17E-01	0.1	3.78E+00	32.0	2.68E-02	1.3	4.95E+00	34.8	2.41E-02	1.3	3.90E+00	36.0
1.72E-01	5.17E-01	60.0	1.95E-01	0.3	9.47E+00	56.4	1.24E-01	0.3	4.23E+00	41.8	2.43E-02	1.3	3.94E+00	44.3	2.05E-02	1.2	2.77E+00	46.9
2.00E-01	2.30E-01	60.9	1.73E-02	0.3	9.15E+00	56.9	1.24E-01	0.3	4.23E+00	48.8	2.43E-02	1.3	4.77E+00	46.2	2.41E-02	1.2	1.47E+00	46.2
2.34E-01	2.06E-01	60.9	1.73E-02	0.3	9.15E+00	56.9	1.24E-01	0.3	4.23E+00	48.8	2.43E-02	1.3	4.77E+00	46.2	2.41E-02	1.2	1.47E+00	46.2
2.81E-01	2.77E-01	62.3	9.54E-04	0.1	1.21E+01	60.1	6.08E-04	0.0	1.20E+00	59.0	1.22E-02	0.9	3.64E+00	53.0	9.50E-03	0.4	2.63E+00	57.4
3.40E-01	1.99E-01	63.6	8.24E-04	0.1	1.35E+01	60.9	5.64E-04	0.0	2.43E+00	56.5	1.03E-02	0.8	3.88E+00	57.3	7.94E-03	0.7	3.08E+00	58.3
4.10E-01	3.47E-01	64.1	6.94E-04	0.1	1.43E+01	61.3	5.64E-04	0.0	2.23E+00	57.8	8.94E-03	0.7	3.97E+00	58.2	6.68E-03	0.7	4.10E+00	59.2
4.70E-01	3.83E-01	64.8	6.08E-04	0.1	1.55E+01	61.4	5.12E-04	0.0	2.12E+00	61.9	5.18E-03	0.6	3.68E+00	61.2	4.73E-03	0.6	4.07E+00	61.7
5.60E-01	4.23E-01	64.4	1.52E-01	0.1	1.67E+01	60.6	6.54E-05	0.0	1.21E+00	61.5	3.02E-03	0.4	2.72E+00	61.5	3.02E-03	0.4	2.72E+00	61.7
6.90E-01	5.21E-02	64.4	1.08E-01	0.1	2.01E+01	65.6	1.64E-02	0.3	1.29E+00	61.8	1.34E-02	0.3	2.91E+00	65.1	1.22E-02	0.3	2.91E+00	61.7
8.10E-01	6.86E-00	64.6	6.86E-01	0.1	1.98E+01	61.7	9.54E-04	0.1	1.26E+00	63.3	4.16E-02	0.3	2.91E+00	65.1	1.59E-03	0.1	6.46E+00	62.6
9.40E-01	5.61E-01	65.4	1.04E-03	0.3	2.14E+01	62.2	1.62E-03	0.1	2.17E+00	66.7	6.19E-03	0.2	4.62E-03	65.9	2.00E-03	0.1	5.10E-03	64.4
1.12E-01	6.25E-01	64.9	6.86E-01	0.1	2.36E+01	61.1	1.33E-01	0.3	1.24E+00	60.4	0.2	4.94E+00	61.4	6.79E-02	0.2	3.65E+00	62.1	
1.37E-01	6.73E-01	63.8	6.51E-01	0.1	2.52E+01	60.3	7.81E-02	0.3	1.05E+00	66.0	0.2	5.97E-02	65.3	4.55E-02	0.2	3.77E+00	65.3	
1.62E-01	7.50E-01	63.0	7.30E-01	0.1	2.78E+01	60.9	9.54E-04	0.1	1.63E-05	60.4	0.2	5.03E-02	65.5	3.03E-02	0.2	3.65E+00	65.5	
1.88E-01	7.65E-01	63.0	7.30E-01	0.1	2.78E+01	60.9	9.54E-04	0.1	1.63E-05	60.4	0.2	5.03E-02	65.5	3.03E-02	0.2	3.65E+00	65.5	
2.25E-01	7.85E-01	62.3	6.51E-04	0.1	2.78E+01	59.8	7.01E-04	0.1	3.94E+00	63.5	3.34E-05	0.1	6.14E-02	65.3	2.63E-05	0.1	4.47E+00	63.8
2.75E-01	8.64E-01	61.7	6.08E-04	0.1	3.02E+01	58.1	8.24E-04	0.1	4.31E+00	62.2	5.27E-05	0.1	6.6					

Table 1. continued

f [Hz]	624							
	TM				TE			
	ρ	ϕ	Logr-err	ϕ -err	ρ	ϕ	Logr-err	ϕ -err
3.40E-04								
4.20E-04								
5.00E-04								
5.70E-04								
6.50E-04								
8.40E-04								
9.90E-04								
1.14E-03								
1.37E-03								
1.68E-03								
1.98E-03								
2.29E-03								
2.75E-03								
3.40E-03								
4.00E-03								
4.69E-03								
5.50E-03								
6.70E-03								
7.90E-03								
9.20E-03								
1.10E-02								
1.34E-02								
1.59E-02								
1.83E-02								
2.20E-02								
2.69E-02								
3.20E-02								
3.70E-02								
4.40E-02								
5.40E-02								
6.30E-02								
7.30E-02								
8.80E-02								
1.07E-01								
1.27E-01								
1.46E-01								
1.76E-01								
2.15E-01								
2.54E-01								
2.93E-01								
3.50E-01	1.11E-02	55.9	1.25E-01	6.2	4.93E-04	148.8	4.00E-01	26.4
4.30E-01	2.73E-02	111.6	1.10E-01	7.2	7.70E-03	52.0	9.44E-02	6.2
5.10E-01	2.64E-03	-27.8	3.26E-01	21.5	3.61E-02	82.3	3.20E-02	2.1
5.90E-01	1.17E-02	2.55E-01	16.8	6.33E-02	76.9	5.67E-02	3.7	
7.00E-01	4.01E-01	68.5	9.71E-02	6.4	1.17E-01	1.6	8.65E-02	5.7
8.60E-01	4.85E-00	29.3	2.68E-02	1.8	7.97E-02	5.6	9.21E-02	6.1
1.02E-00	6.49E-00	28.4	2.73E-02	1.8	1.50E-01	-13.1	9.52E-02	6.3
1.17E-00	6.81E-00	8.4	2.11E-02	1.4	1.23E-01	-34.1	9.98E-02	6.6
1.41E-00	9.46E-00	19.8	1.29E-02	0.8	2.12E-01	-94.1	5.40E-02	3.6
1.72E-00	1.22E-01	30.6	8.23E-03	0.5	6.54E-01	-199.8	2.30E-02	1.5
2.03E-00	1.60E-01	33.6	1.06E-03	0.3	9.39E-01	-374.0	1.30E-02	1.2
2.34E-00	1.69E-01	55.9	6.68E-03	0.4	1.42E-00	-19.3	1.35E-02	0.9
2.81E-00	1.28E-01	41.8	3.88E-03	0.3	1.70E-00	-130.9	7.78E-03	0.5
3.40E-00	1.50E-01	43.7	3.46E-03	0.2	1.95E-00	-129.5	6.66E-03	0.4
4.10E-00	1.40E-01	45.5	3.63E-03	0.2	2.51E-00	-127.5	5.89E-03	0.4
4.70E-00	1.57E-01	49.1	2.70E-03	0.2	2.98E-00	-124.4	4.53E-03	0.3
5.60E-00	1.81E-01	53.9	1.93E-03	0.1	3.77E-00	-121.6	2.80E-03	0.2
6.90E-00	2.16E-01	56.0	1.23E-03	0.1	4.75E-00	-119.7	1.61E-03	0.1
8.10E-00	2.34E-01	58.5	1.06E-03	0.1	4.85E-00	-118.4	1.60E-03	0.1
9.40E-00	2.43E-01	60.0	1.95E-03	0.1	4.92E-00	-118.0	2.90E-03	0.2
1.12E-00	2.47E-01	61.3	1.04E-03	0.1	4.97E-00	-117.5	1.30E-03	0.1
1.37E-00	1.77E-01	55.3	3.65E-04	0.0	6.73E-00	-119.2	5.00E-04	0.0
1.62E-00	3.23E-01	62.9	4.17E-04	0.0	6.56E-01	-117.1	5.90E-04	0.0
1.88E-00	3.68E-01	63.3	3.37E-04	0.0	6.96E-00	-116.5	5.92E-04	0.0
2.25E-01	3.89E-01	63.4	2.42E-04	0.0	7.32E-00	-116.5	4.07E-04	0.0
2.75E-01	4.51E-01	63.6	2.05E-04	0.0	9.00E-00	-116.5	3.15E-04	0.0
3.30E-01	4.95E-01	63.7	1.82E-04	0.0	1.01E+01	-116.5	2.83E-04	0.0
4.00E-01	5.08E-01	64.2	1.10E-03	0.1	8.90E+00	-115.8	2.00E-03	0.1
4.90E-01	5.33E-01	64.3	1.24E-03	0.1	9.51E+00	-115.8	2.01E-03	0.1
5.70E-01	6.26E-01	64.3	1.06E-03	0.1	1.14E+01	-115.7	1.77E-03	0.1
6.60E-01	6.64E-01	64.1	1.06E-03	0.1	1.04E+01	-115.5	1.73E-03	0.1
7.50E-01	1.02E-01	55.3	3.63E-04	0.0	1.25E+01	-115.0	1.00E-03	0.1
9.70E-01	8.03E-01	64.7	5.39E-04	0.0	1.50E+01	-115.3	9.00E-04	0.1
1.15E-00	9.08E-01	64.6	4.45E-04	0.0	1.88E+01	-115.3	6.91E-04	0.0
1.32E-00	9.68E-01	64.6	4.53E-04	0.0	1.96E+01	-115.3	7.53E-04	0.0
1.59E-00	1.07E-02	64.3	3.34E-04	0.0	2.10E+01	-115.7	5.93E-04	0.0
1.94E-00	1.17E-02	63.8	3.03E-04	0.0	2.33E+01	-116.0	5.46E-04	0.0
2.29E-00	1.31E-02	63.4	2.60E-04	0.0	2.66E+01	-116.3	4.54E-04	0.0
2.65E-00	1.44E-02	62.7	2.45E-04	0.0	2.94E+01	-116.8	4.17E-04	0.0
3.20E-00	1.54E-02	61.8	1.76E-04	0.0	3.16E+01	-117.5	2.86E-04	0.0
3.93E-00	1.86E-02	61.8	1.04E-04	0.0	3.40E+01	-117.5	3.00E-04	0.0
4.60E-00	1.86E-02	59.0	2.49E-04	0.0	3.70E+01	-119.4	4.06E-04	0.0
5.30E-00	2.14E-02	57.7	2.80E-04	0.0	3.76E+01	-120.2	5.65E-04	0.0
6.40E-00	2.05E-02	55.9	2.13E-04	0.0	4.23E+01	-121.5	3.55E-04	0.0
7.80E-00	2.20E-02	53.8	2.47E-04	0.0	4.48E+01	-123.4	4.43E-04	0.0
9.00E-00	2.59E-02	45.6	8.42E-04	0.1	5.71E+01	-126.7	7.88E-04	0.1
1.10E-00	2.96E-02	44.2	9.77E-04	0.1	5.79E+01	-131.0	8.84E-04	0.1
1.30E-00	3.20E-02	34.1	1.37E-03	0.1	5.86E+01	-128.8	1.35E-03	0.1
1.50E-00	2.49E-02	36.0	2.09E-03	0.1	5.02E+01	-134.7	1.81E-03	0.1
1.80E-00	2.41E-02	37.9	8.34E-04	0.1	4.41E+01	-131.2	1.37E-03	0.1
2.20E-00	2.77E-02	35.7	4.43E-04	0.0	4.00E+01	-130.0	3.00E-03	0.1
2.60E-00	2.14E-02	34.7	7.74E-04	0.1	3.37E+01	-131.8	2.27E-03	0.1
3.00E-00	1.90E-02	33.4	8.53E-04	0.1	3.58E+01	-136.3	2.24E-03	0.1
3.60E-00	2.13E-02	34.0	1.36E-04	0.0	5.57E+01	-134.0	1.39E-04	0.0
4.40E-00	2.01E-02	31.5	1.03E-04	0.0	5.25E+01	-135.4	1.12E-04	0.0
5.20E-00	1.88E-02	29.7	7.00E-05	0.0	5.30E+01	-137.0	8.60E-05	0.0
6.00E-00	1.78E-02	28.4	7.87E-05	0.0	5.45E+01	-138.8	1.24E-04	0.0
7.20E-00	1.64E-02	26.8	8.10E-05	0.0	5.42E+01	-141.0	9.43E-05	0.0
8.80E-00	1.51E-02	25.2	9.30E-05	0.0	5.23E+01	-141.3	1.16E-04	0.0
1.04E-00	1.28E-02	23.9	1.14E-04	0.0	4.72E+01	-142.1	1.44E-04	0.0

Table 1. continued