



Title	広帯域MT法探査による北海道駒ヶ岳の比抵抗構造 : 1次元構造解析結果と海洋の影響の評価
Author(s)	山谷, 祐介; YAMAYA, Yusuke; 谷元, 健剛 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 67, 39-51
Issue Date	2004-03-15
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.67.39
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14332
Type	departmental bulletin paper
File Information	67_p39-51.pdf



広帯域 MT 法探査による北海道駒ヶ岳の比抵抗構造

—1次元構造解析結果と海洋の影響の評価—

山谷 祐介・谷元 健剛・西田 泰典・佐波 瑞恵・宮原 昌一・吉田 邦一

北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

茂木 透・橋本 武志

北海道大学大学院理学研究科付属地震火山研究観測センター

(2004年1月9日受理)

Resistivity Structure of Hokkaido Komagatake Volcano

using Wide Band MT Method

—The Result of 1D Inversion and the Estimation of Influences of the Ocean—

Yusuke YAMAYA, Kengo TANIMOTO, Yasunori NISHIDA, Mizue SABA

Masakazu MIYAHARA, Kunikazu YOSHIDA

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

Toru MOGI and Takeshi HASHIMOTO

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

(Received January 9, 2004)

We performed wide band MT(Magnetotelluric) surveys in and around Hokkaido Komagatake volcano from 2001 to 2003. Applying the remote reference method and manual editing process, we obtained the relatively high quality data from 35 sites. As the first step to establish the three dimensional resistivity structure of Hokkaido Komagatake, we made one-dimensional inversion analysis. The result was not necessarily in agreement with the structure deduced from the gravity anomalies in this region. The discrepancy may be caused by the three dimensionality of the structure. Furthermore, induction vectors at frequencies lower than 0.1 Hz tend to point to the neighboring ocean, suggesting that sounding curves are influenced by the high conductive ocean. To evaluate the influence of the ocean, we calculated response functions as a forward modeling assuming simple three-dimensional resistivity model structure including the ocean. As a result, the effect has been demonstrated that sounding curves below 1 Hz in apparent resistivity and near 0.1 Hz in phase are affected by the ocean. This tendency is remarkable at sites near the seashore. Therefore, the one-dimensional analysis is not suitable to estimate the subsurface structure of Hokkaido Komagatake volcano. In near future, the three-dimensional analysis including the detailed influence of the ocean is required.

I. はじめに

北海道駒ヶ岳(標高 1131 m)は渡島半島南東部に位置する第四紀に形成された成層火山である。歴史時代以降、1640年、1694年、1856年、1929年に火砕流をとまなう軽石噴火を繰り返しており、現在最も活動的な火山の一つとして認識されている(勝井・他, 1989)。

駒ヶ岳における地球電磁気学的研究には道脇・他(1995)、松波・他(1995)、谷元・他(1999, 2000)などがあり、電気探査、自然電位、全磁力、MT(Magnetotelluric)法の観測が行われている。MT法による地下の比抵抗構造の探査については、可聴周波数帯、VLF帯、ULF帯を用いた探査が行われ、それぞれ1次元あるいは2次元の解析がなされ、深さ1 km程度までの地下の比抵抗構造が求められている。しかしながらこれらの観測では、全山規模の面的な観測は行われておらず、また、深部の比抵抗構造を推定するには至っていない。火山における深さ1 km以深の比抵抗構造は、火山活動や基盤構造を把握する上で重要な要素となることから、我々はさらに深部までの3次元比抵抗構造を明らかにするために、広帯域MT法探査を展開した。

II. 観測の概要

北海道駒ヶ岳における広帯域MT観測は2001年8月5日から18日までの14日間(谷元・他, 2001)、2002年6月3日から11日までの9日間および2003年6月2日から16日までの15日間に行われた。測点は、火口原を中心とする約10 km四方の範囲内に38点設置した(Fig. 1)。測点の配置にあたっては可能な限り間隔が一定となるように配慮したが、測点間隔が大きく空いている箇所は、徒歩での到達が困難な地点である。また火口原内では、より詳細な比抵抗構造を調査するために、測点間隔をその外側よりも密になるように分布させた。

観測は、Phoenix Geophysics社製のMTU-5を7台、Pb-PbCl₂電極、インダクションコイルを使用し、320-0.00055 Hz間の40周波数について電場2成分、磁場3成分の測定を行った。2001年の観測では全測点で電場および磁場が観測されているが、2002年、2003年の観測では作業の効率化のために、Telluric-Magnetotelluric法(Hermance and Thayer, 1975)を採用し、電場の観測は全測点で行い、インダクションコイルを用いた磁場の観測は観測地域内に固定した2点で代表させた。測定はノイズの少ない夜間に行い、各測点で1-3日間の測定を行った。

III. 1次元構造解析

1. データ解析

各測点で得られたデータは本観測における磁場観測点どうしのリモートリファレンス処理をし、観測点固有の磁場ノイズを除去した。リモートリファレンス処理とは、2つの観測点における磁場変動は同一であるという仮定のもとに、磁場データ間での相関を求め、コヒーレントなデータのみをシグナルとみなしてインピーダンスを計算するという手法である。また、手動でエディット処理し、ノイズの多い時間帯のデータを使用しないこととした。さらに、数日間の測定を行っ

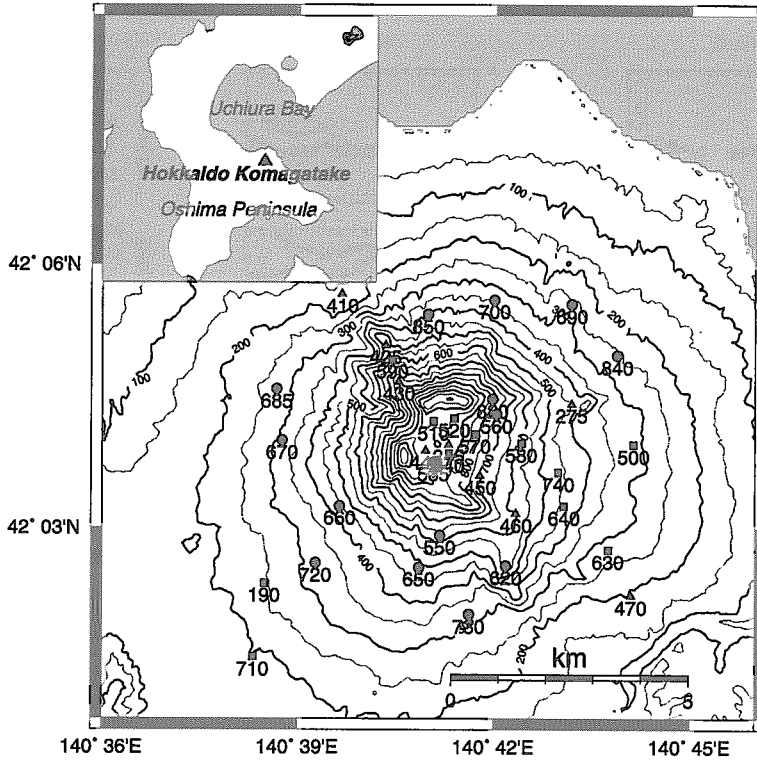


Fig. 1. Sites of the MT survey on Hokkaido Komagatake volcano. Noisy stations are excluded in this figure. ▲: 2001(Tanimoto *et al.*, 2001); ■: 2002; ●: 2003

た測点については、時系列データのスタッキングを行い、データの質の向上を図った。これらの処理により、最終的に 35 測点のデータを解析に使用した。

地表の電場の北向き、東向き成分 E_x, E_y は磁場の北向き、東向き成分 H_x, H_y との間に、

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (1)$$

という線形関係がある。 $Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy}$ はインピーダンステンソルと呼ばれる。測定した電場、磁場から 40 周波数について $Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy}$ を求め、

$$\rho_{xy} = \frac{1}{5f} |Z_{xy}|^2, \quad \rho_{yx} = \frac{1}{5f} |Z_{yx}|^2, \quad (2)$$

$$\phi_{xy} = \arg(Z_{xy}), \quad \phi_{yx} = \arg(Z_{yx}), \quad (3)$$

の関係式から各点の見かけ比抵抗 ρ_{xy}, ρ_{yx} および位相差 ϕ_{xy}, ϕ_{yx} の周波数特性を求めた (Fig. 2)。ここで、 f は周波数である。 Fig. 2 に示す探査曲線では、ほとんどの測点において、見かけ比抵抗が高周波側から周波数 1 Hz 付近までは単調に減少し、 1 Hz 以下では逆に見かけ比抵抗がしだいに高くなっていく傾向が見られる。また、 1 Hz 付近を境にして高周波数側では xy, yx 成分がほぼ

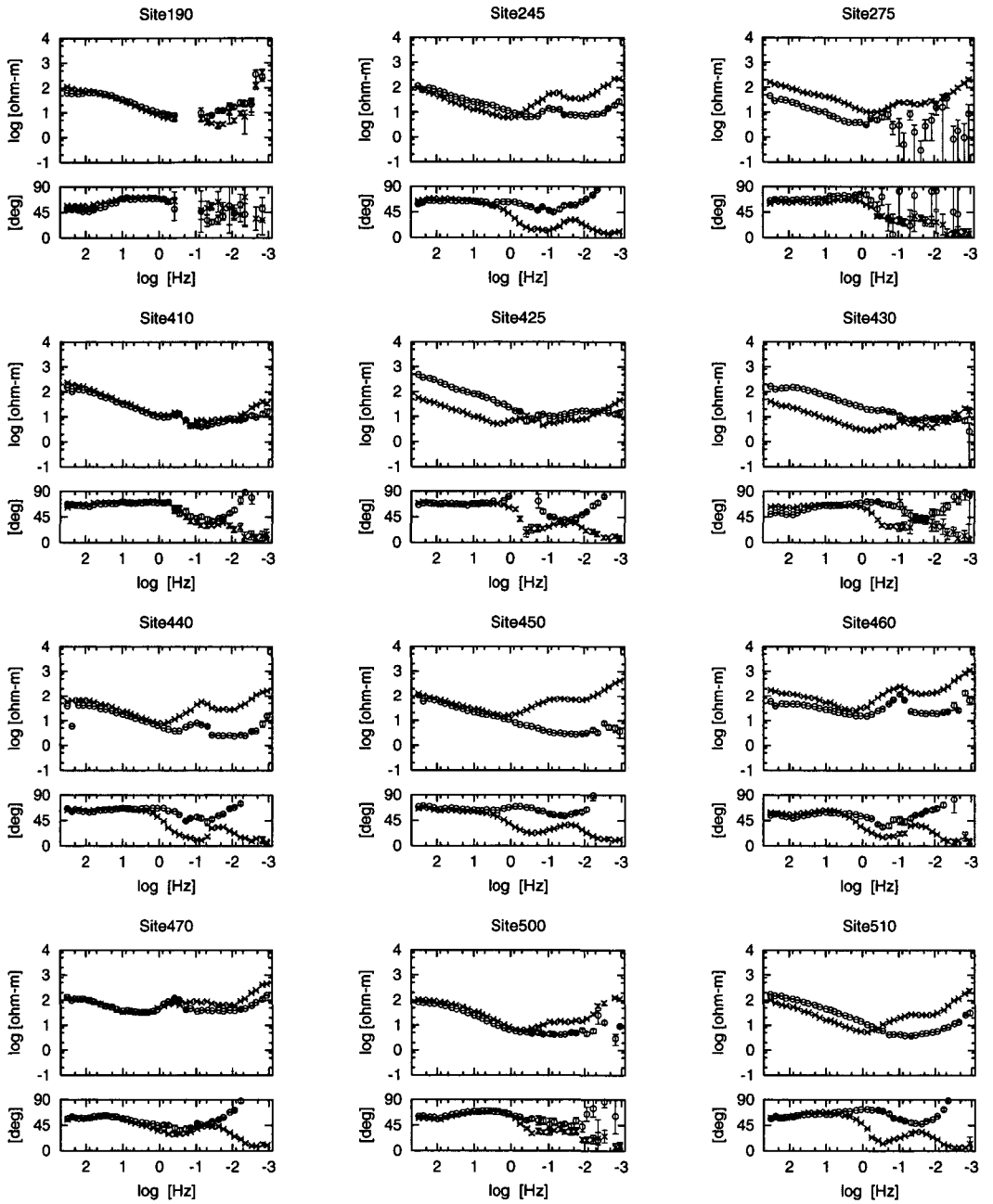


Fig. 2. Sounding curves of apparent resistivity and phase at all sites. \circ indicates the component of xy while \times indicates yx .

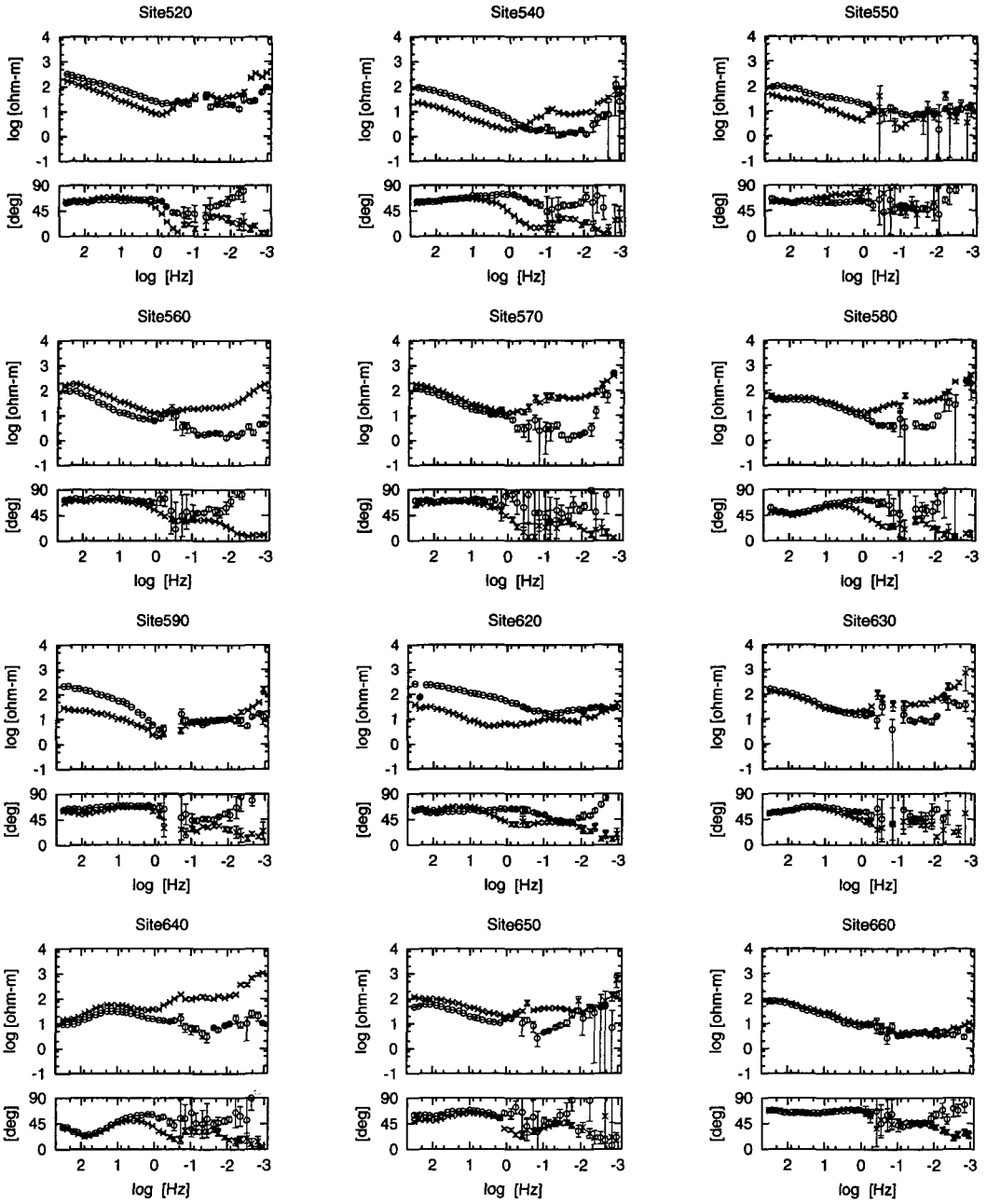


Fig. 2. (continued)

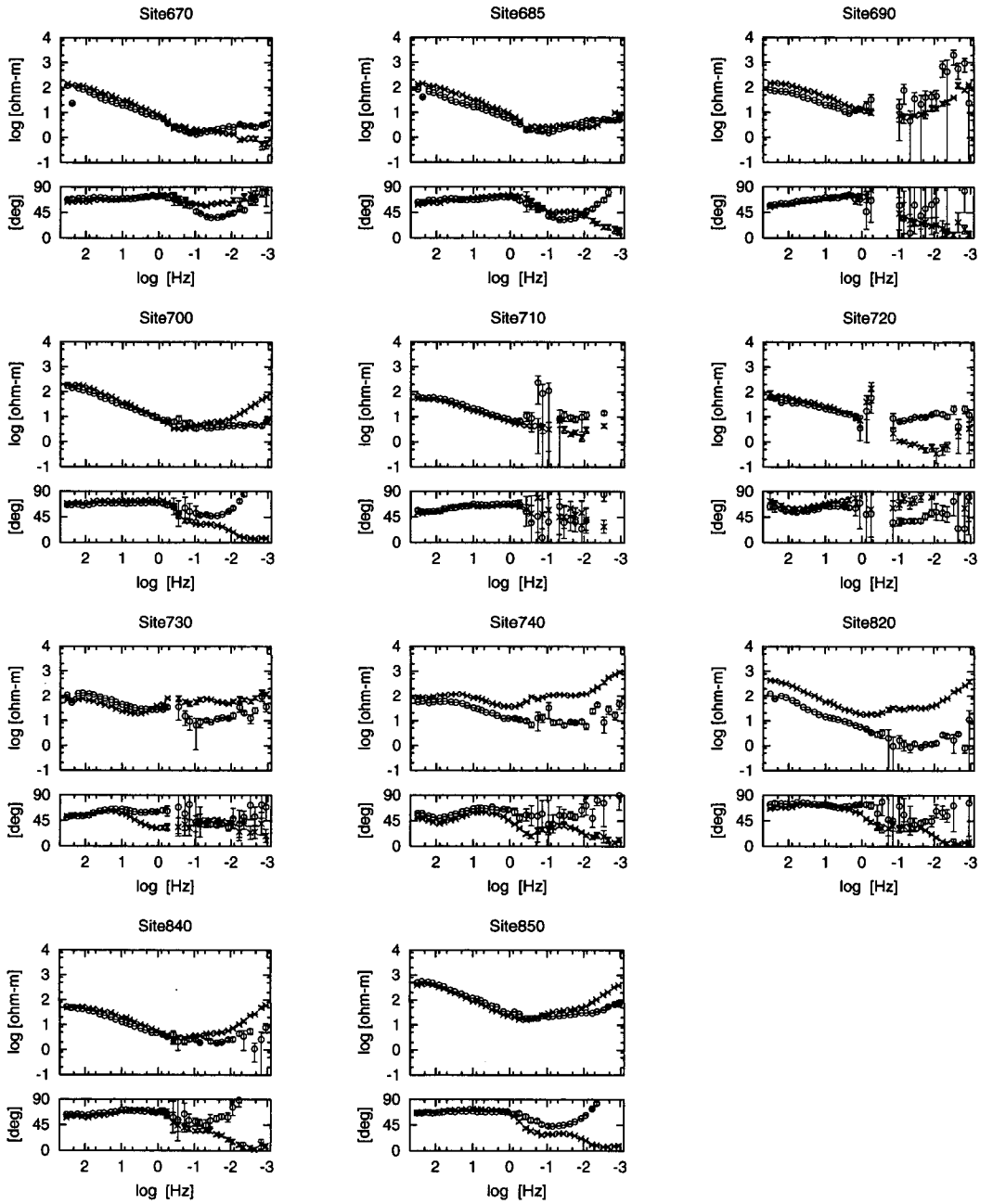


Fig. 2. (continued)

一致するのに対して、低周波数側では両成分が分離している測点が多い。このことから、本観測地域においては比較的浅部では比抵抗構造の1次元性が高く、深部では2次元性あるいは3次元性の構造を持つことが推察される。

比抵抗構造解析は3次元構造解析を行う前段階として、本報ではまず水平多層構造を仮定した1次元インバージョンを行うこととし、1次元解析に適している回転不変量

$$Z_d = \sqrt{Z_{xx}Z_{xy} - Z_{yx}Z_{yy}} \quad (4)$$

(Ingham, 1988)を計算した。この Z_d より、

$$\rho_d = \frac{1}{5f} |Z_d|^2 \quad (5)$$

$$\phi_d = \arg(Z_d) \quad (6)$$

として求めた見かけ比抵抗(ρ_d)と位相差(ϕ_d)の周波数特性を入力としてインバージョンによる構造推定を行った。インバージョンにはフリーソフトである IPI 2 win_MT (Bobatchev, 2002) を使用した。このとき、浅部の局所的な比抵抗異常あるいは急峻な地形の影響による「スタティック・シフト」を考慮する必要があるが、通常シフトは見かけ比抵抗曲線のみにもみられ、位相差曲線は変化しないことから、位相差に見かけ比抵抗の2倍の重みを与えて解析した。

2. 比抵抗解析結果とその特徴

インバージョンによって得られた1次元構造を標高でスライスして地図上に示したのが Fig. 3 である。概観を見ると、-1 km で数 Ωm の低比抵抗帯が見られる他は数十-数百 Ωm の比抵抗であり、ほぼ標高に平行している。-2 km では山頂を囲むように北から南西にかけて数千 Ωm の高比抵抗帯が存在する。この高比抵抗帯は-4 km では山頂の北側のみに見られるようになり、-8 km では周囲と同様に数百 Ωm になる。一方、-8 km では南東側に同じく数千 Ωm の高比抵抗帯が現れている。-16 km 以深になると、広範囲で顕著な高比抵抗帯は認められなくなる。日本では一般に低密度な堆積層、特に新第三紀層は地下水や化石海水、変質などの影響で低比抵抗で特徴付けられる一方、高密度岩体や地質基盤となる高密度堆積層は相対的に高比抵抗を示す特徴がある。

松波・他 (1995) による重力探査の結果 (Fig. 4) と比較すると、北から南西にかけての高比抵抗帯は位置的に一致するが、東側では高比抵抗帯は明瞭ではなく、一致していない。また重力は山頂の北側で低異常、南側で高異常となっているが、高比抵抗帯は北側で-4 km、南側で-8 km に表れ、両者の構造は深さ方向について逆の傾向を示している。このように深さ方向で一致しない原因としては、実際には2次元あるいは3次元の構造を持ち、1次元解析が適さない可能性、また、-1 km 付近の数 Ωm の低比抵抗層がより深部の比抵抗構造をシールドしている可能性が挙げられる。

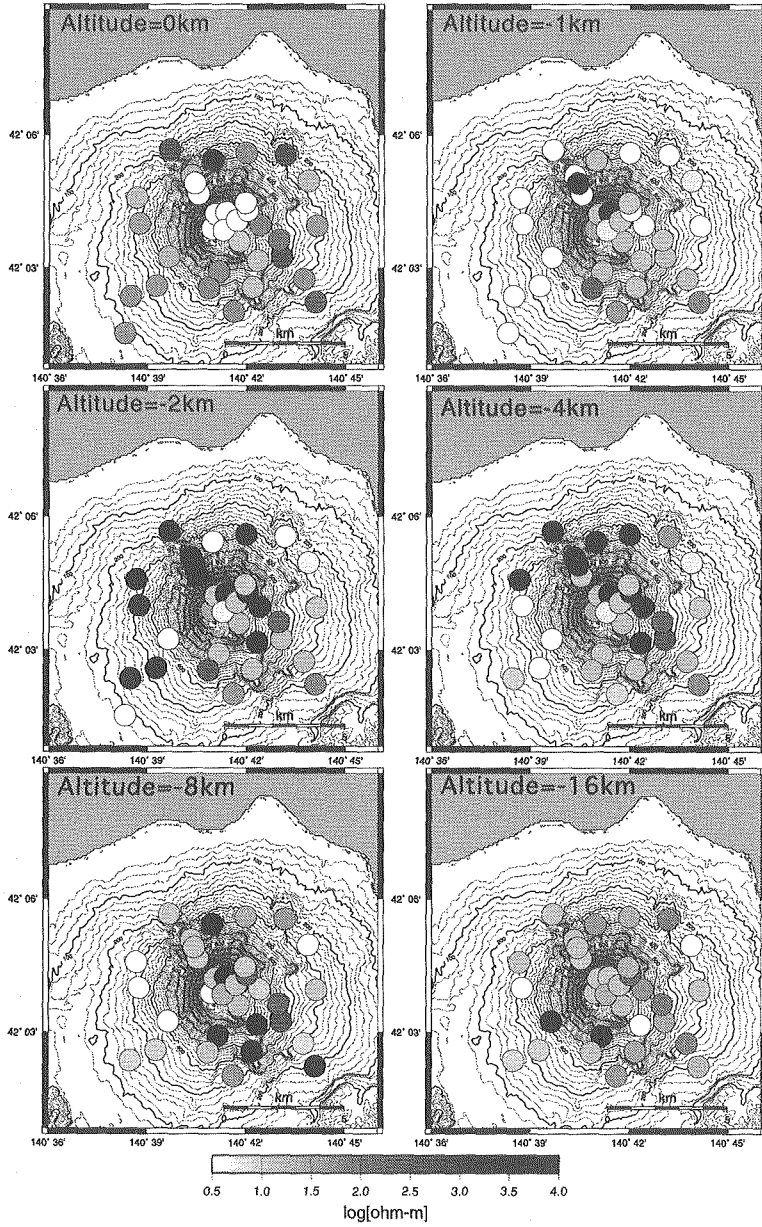


Fig. 3. Resistivity distribution calculated by the 1D inversion at altitudes of 0 km, -1 km, -2 km, -4 km, -8 km, and -16 km. The shade of gray circles shows the resistivity at each site.

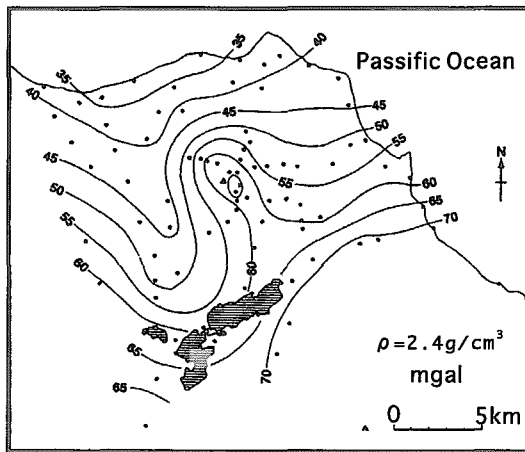


Fig. 4. Gravity anomaly in and around Hokkaido Komagatake Volcano (after Matsunami *et al.*, 1995).

IV. 海水が与える影響

一般的に Skewness (S) は

$$S = \frac{|Z_{xx} + Z_{yy}|}{|Z_{xy} - Z_{yx}|} \tag{7}$$

で与えられ、 S が0.1以下では1次元の構造性を示すのに対し、0.5より大きい場合は強い3次元性を示すと考えられている。全測点について S を計算すると、ほとんどの測点で周波数1 Hz以下から $S > 0.1$ となる (Fig. 5)。1 Hzにおいて比抵抗が10 Ωm であれば探査深度はおよそ1500 mであることから、約1500 m以深においては2次元あるいは3次元性の比抵抗構造を持つことが推定される。よって、1次元インバージョンから得られた比抵抗構造は約1500 m以深では深さ方向についての信頼性が低くなり、2次元あるいは3次元の解析が適切となる。

北海道駒ヶ岳下の構造の3次元性に加え、北側から東側にかけて比抵抗の低い(約0.25 Ωm)海に誘導される電流および、それから派生する磁場が、海岸に近い観測点での見かけ比抵抗に影響を及ぼす可能性がある。磁場観測点における各周波数の磁場3成分から求められるインダクションベクトル (Rikitake and Yokoyama, 1955) を計算すると、100 Hzから1 Hzでは山頂の火口原の方向を示しているが、0.1 Hz以下ではしだいに北西から北東(内浦湾)を向く傾向が強くなる (Fig. 6)。インダクションベクトルは一般に良導体の方向を示すが、

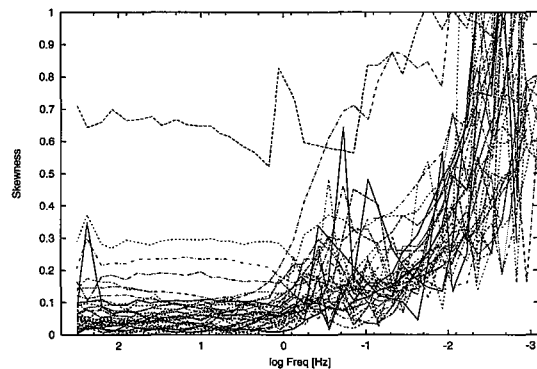


Fig. 5. Skewness at all sites are compiled against frequencies.

駒ヶ岳地域においては良導体である海洋を指し示していると推定される。

海洋の影響を評価するために、3次元フォワード計算によって簡単な海の構造を仮定したものと、海を考慮しない水平多層構造を持つ大地とを比較した。コードは Fomenko and Mogi (2002) によるスタッガード格子を用いた3次元差分法を使用した。計算の範囲は水平方向は駒ヶ岳を中心とした100 km 四方、深さ方向は50 km とした。簡略化した海洋の分布と深さは Fig. 7 のよう

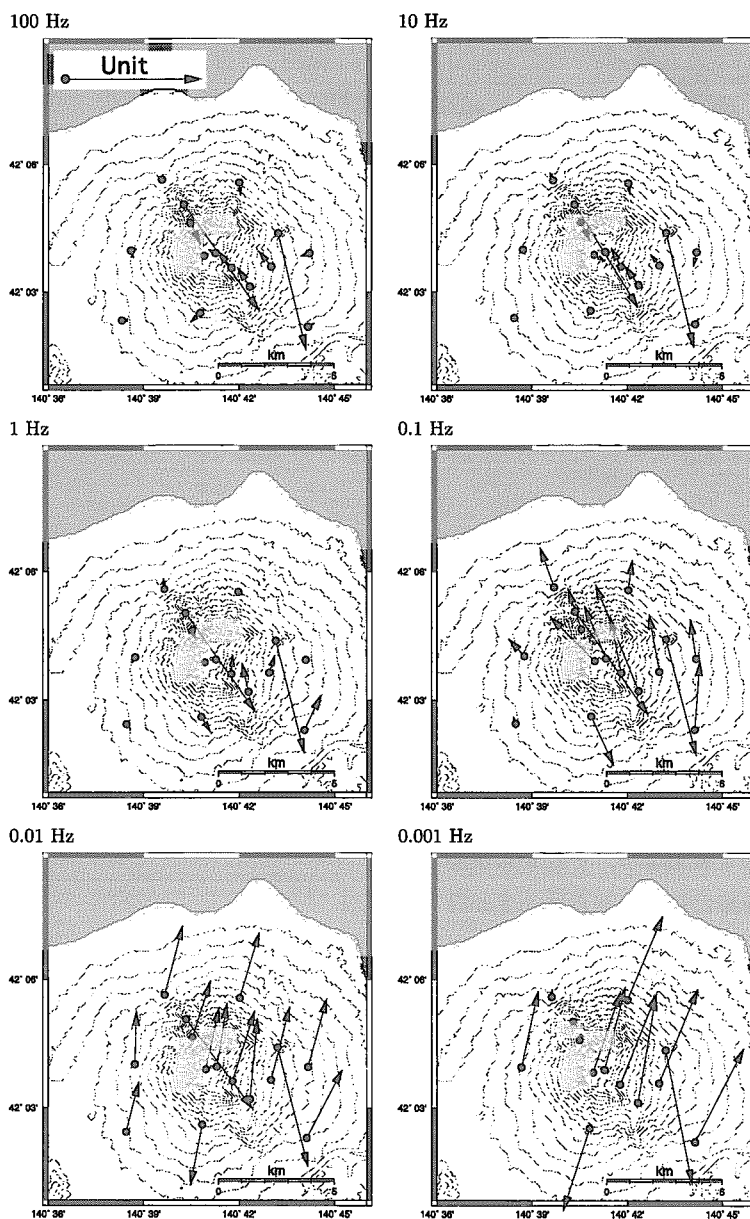


Fig. 6. Induction vectors for frequencies of 100, 10, 1, 0.1, 0.01, and 0.001 Hz.

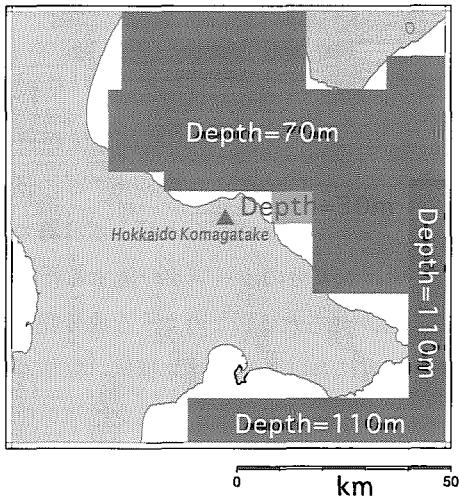


Fig. 7. Simplified ocean model around Hokkaido Komagatake volcano used for 3-D model calculations.

With Ocean

Without Ocean

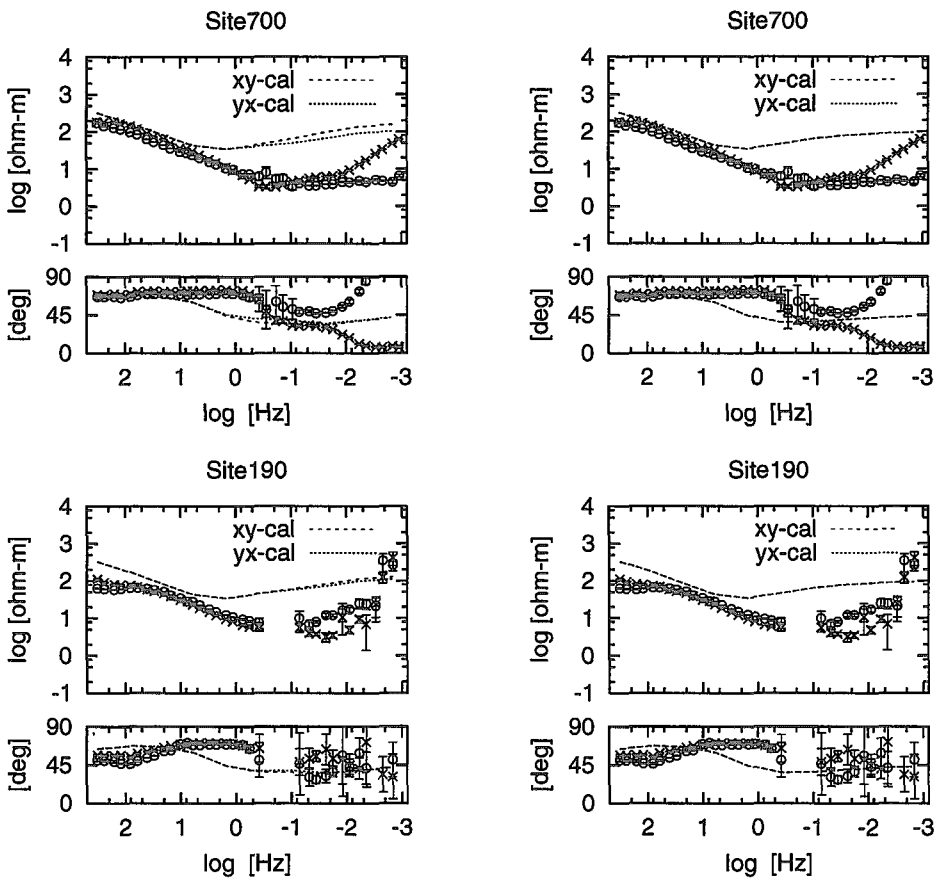


Fig. 8. The sounding curves of observed(○ and ×) and calculated(dotted and dashed curves) apparent resistivities and phases at Site700 and Site190. Left side shows the case considering the effect of ocean. Right side shows the case without ocean.

に仮定し、海水の比抵抗を $0.25 \Omega\text{m}$ とした。また陸域の平均的な構造を水平多層構造で近似し、深さ $0-200 \text{ m}$ を $1000 \Omega\text{m}$ 、 $200-500 \text{ m}$ を $100 \Omega\text{m}$ 、 $500-1000 \text{ m}$ を $50 \Omega\text{m}$ 、 $1-50 \text{ km}$ を $100 \Omega\text{m}$ と与えた。

フォワード計算から得られた、本観測地域内の2地点における見かけ比抵抗と位相差曲線を Fig. 8 に示す。海を考慮した計算において、海岸からの約 5 km の地点にある Site 700 の見かけ比抵抗は周波数 1 Hz 以上では xy 成分、 yx 成分はほとんど一致している。しかし、本計算ではまだ十分に観測値を説明できていないものの、 1 Hz 以下では両成分のカーブが分離する特徴が表現されている。また、位相差では 0.1 Hz 付近で同様な分離が見られる。このような成分間の分離の傾向はおおよそ山頂を境にして、北から東にかけての地点における見かけ比抵抗、位相差曲線で顕著である。一方、海岸から約 10 km 離れた Site 190 に相当する地点では、見かけ比抵抗および位相差の xy 、 yx 成分の分離は Site 700 に比べて小さくなっている。よって、海水の低比抵抗は、探査曲線において 1 Hz 以下の周波数帯に影響を及ぼしていると言える。しかし、分離の傾向は観測値に比べて小さく、また xy 、 yx 成分の上下関係が逆になっている。したがって、海の影響だけでは探査曲線の成分間の分離は十分に説明されていない。今後、海域での計算範囲を拡げるなどで、海の影響をより詳細に評価する必要がある。

V. ま と め

北海道駒ヶ岳における広帯域 MT 法観測は 2001 年から 2003 年にかけて行われた。取得されたデータは、リモートリファレンス処理、エディット処理が施され、解析には 35 測点のデータが利用可能となった。

インバージョンによる 1 次元比抵抗構造解析結果は、重力探査による構造とは必ずしも一致しないことが認められた。この不一致の原因には、 1500 m 以深では Skewness が大きくなり、1 次元構造解析が適さないという可能性が考えられた。さらに、インダクションベクトルの計算の結果は、 0.1 Hz 以下で北西～北東の方向を示し、良導体である海水の影響を受けていることが推定された。

3 次元フォワードモデリングにより、海洋の影響の簡単な評価を行った結果、見かけ比抵抗においては 1 Hz 以下で、位相差においては 0.1 Hz 前後で探査曲線に若干の影響を及ぼしていることが明らかになった。しかし、海洋の影響だけでは観測値による探査曲線の傾向を説明できていない。

以上のことから、北海道駒ヶ岳における広帯域 MT 法による比抵抗構造の推定には、単純な 1 次元構造解析は適さないことが明らかである。今後、海洋の影響も考慮した 3 次元解析を行い、比抵抗構造モデルを求める必要がある。

謝辞 本研究にあたり、東京工業大学および東北大学から観測機器を借用しました。北海道森林管理局函館分局渡島森林管理署には国有林への入林許可をいただきました。また、観測地の選

定について森町, 砂原町, 七飯町, 鹿部町には便宜を図っていただきました。記して深く感謝いたします。また, 著者らとともに観測に参加された伊藤拓・梶原崇憲・菊池晃太郎・佐々木康仁・新屋雅之, N. P. Singh の各位に感謝します。

文 献

- Bobatchev, A., 2002. IPI2win_MT-1 D magneto-telluric and frequency sounding curves interpretation, http://geophys.geol.msu.ru/ipi_mts/ipi_mts.htm.
- Fomenko, E. and T. Mogi, 2002. A new computation method for a staggered grid of 3D EM field conservative modeling, *Earth Planets Space*, **54**, 499–509.
- Hermance, J. F. and R. E. Thayer, 1975. The telluric-magnetotelluric method, *Geophysics*, **40**, 664–668.
- Ingham, M., 1988. The use of invariant impedances in magnetotelluric interpretation, *Geophys. J. Int.*, **92**, 165–169.
- 勝井義雄・鈴木武雄・曾屋龍典・吉久康樹, 1989. 北海道駒ヶ岳火山地質図, 地質調査所.
- 松波武雄・岡崎紀俊・秋田藤夫・若浜洋, 1995. 北海道駒ヶ岳地域の熱水系について, 地下資源調査所報告, **67**, 1–40.
- 道脇正則・松島喜雄・市川隆一・山口薫・西田泰典・大島弘光・森濟, 1995. 北海道駒ヶ岳における地球電磁気学的調査, 火山, **40**, 6, 367–374.
- Rikitake, T. and I. Yokoyama, 1955. The anomalous behaviour of geomagnetic variations of short period in Japan and its relation to the subterranean structures, The 6th report, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Univ. Tokyo, **33**, 297–331.
- 谷元健剛・西田泰典・松島喜雄・小川康雄・高倉伸一・大島弘光・佐藤秀幸・宇津木充・土井剛・加藤幸司・佐波瑞恵・杉崎康広・平山義人, 1999. 北海道駒ヶ岳における MT および SP 観測 (序報)–1998 年 10 月 25 日小噴火に前後して–, 1999 年 CA 研究会論文集, 57–64.
- 谷元健剛・西田泰典・佐藤秀幸・宇津木充・前田宜浩・佐波瑞恵・杉崎康広・平山義人, 2000. 北海道駒ヶ岳における火山電磁気学的研究 (第 2 報)–自然電位連続観測–, 2000 年 CA 研究会論文集, 113–119.
- 谷元健剛・西田泰典・高橋幸祐・大前幹夫・宮原昌一・山谷祐介・渡辺友浩, 2001. 北海道駒ヶ岳における火山電磁気学的研究–広帯域 MT 観測–, 第 110 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会講演予稿集.