

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 —

Resistivity Structure of Hokkaido Komagatake Volcano using Wide Band MT Method — The Result of 1D Inversion and the Estimation of Influences of the Ocean —

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)

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)

1 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年に火砕流をとも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次元の解析から、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。そこで我々は、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。2001年、2002年の調査による1次元解析結果は、既に前報(山谷・他、2003)に述べた通りであるが、2003年6月にこれまで良好なデータが得られなかった測点での再調査、および新規測点での調査を行った。本報では、これらの測点を含む1次元解析結果、および海水の低比抵抗が探査曲線に及ぼす影響について述べる。

2 観測の概要

北海道駒ヶ岳における2003年度の広帯域MT観測は、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四方の範囲内に設置した(第1図)。このうち9点は再測定点、5点が新たに設けた測定点である。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。

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。

3 1 次元構造解析

3.1 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間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。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。

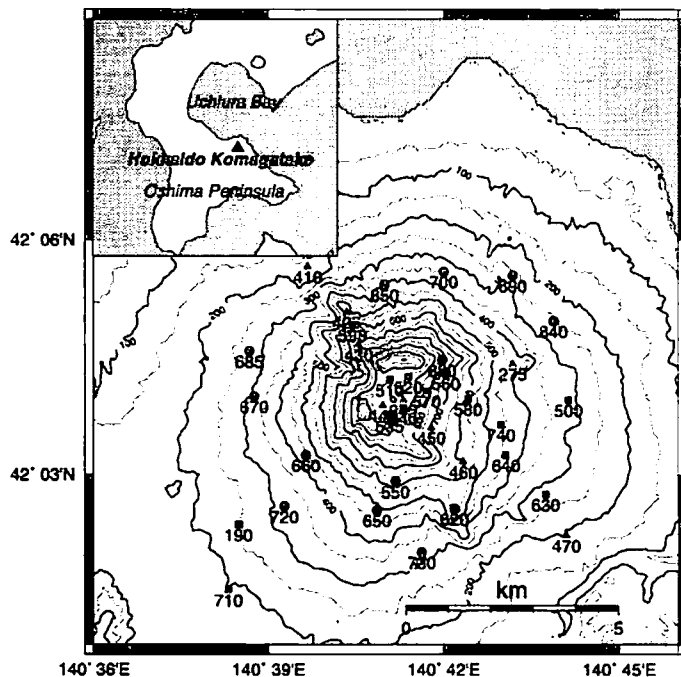
すべての測点における見かけ比抵抗と位相差の探索曲線はすでに山谷・他 (2004) に示されているが、これらのうち代表的な 6 点の探索曲線を第 3 に示す。ほとんどの測点において、見かけ比抵抗が高周波側から周波数 1 Hz 付近までは単調に減少し、1 Hz 以下では逆に見かけ比抵抗がしだいに高くなっていく傾向が見られる。また、1 Hz 付近を境にして高周波数側では xy, yx 成分がほぼ一致するのに対して、おもに山頂の東側の測点において低周波数側で両成分が分離している。ここで、x および y は、それぞれ北および東向き成分である。このことから、本観測地域においては比較的浅部では比抵抗構造の 1 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

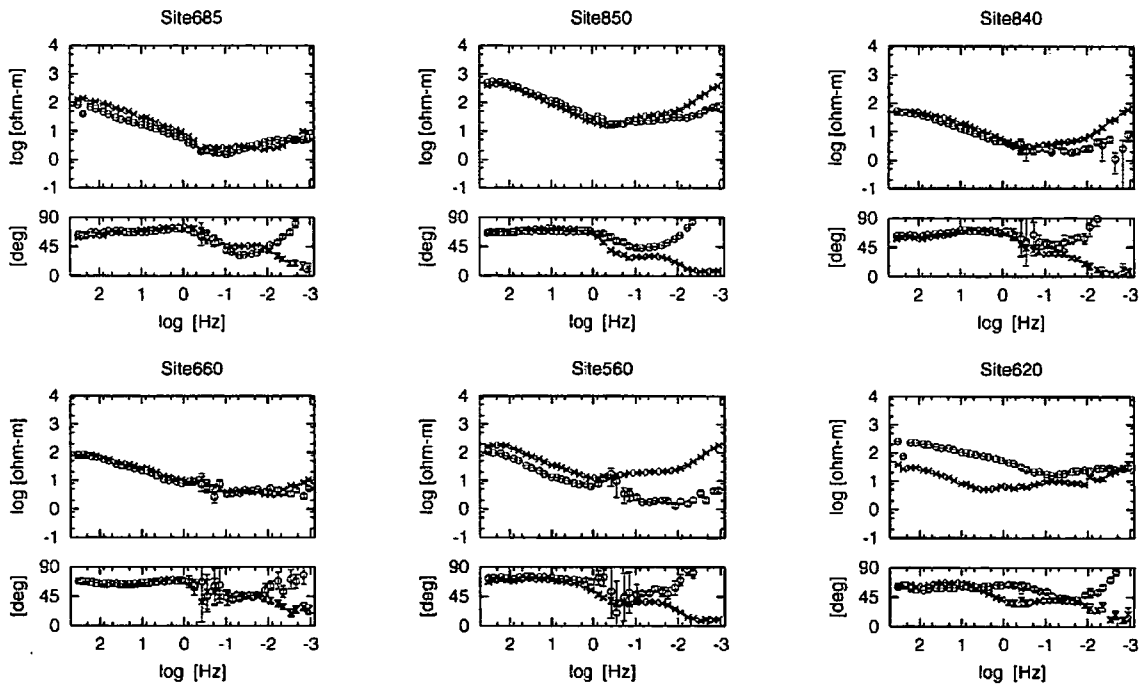
$$Z_d = \sqrt{Z_{xx}Z_{yy} - Z_{yx}Z_{xy}} \quad (1)$$

(Ingham, 1988) を計算した。この Z_d より、

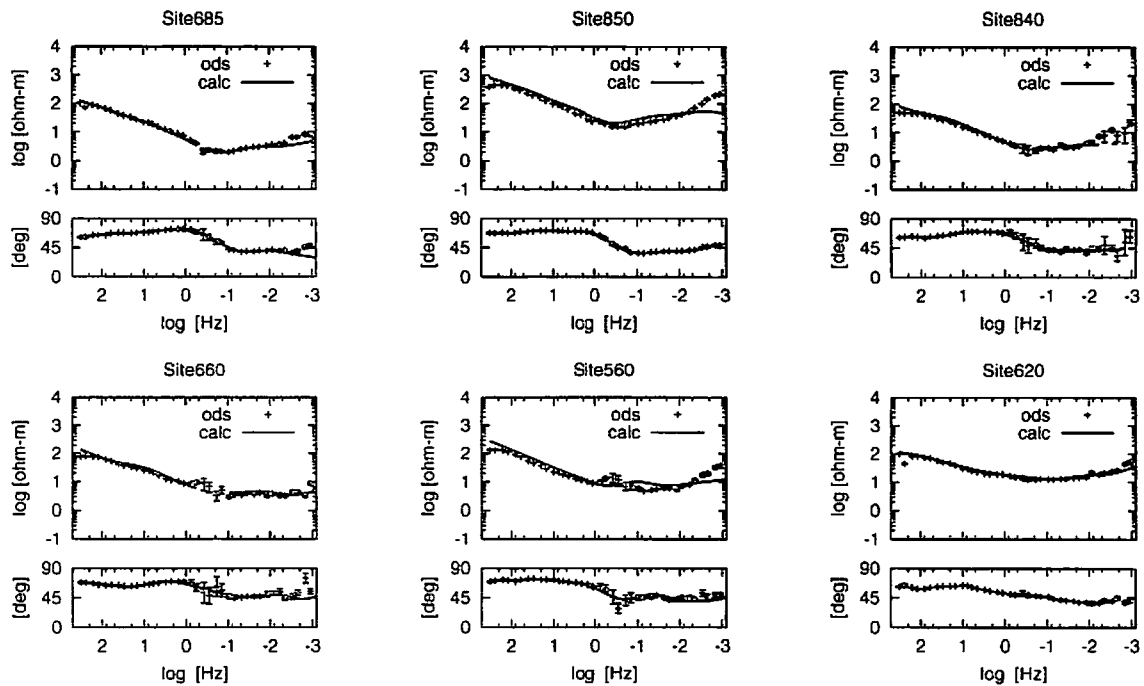
$$\rho_d = \frac{1}{5f} |Z_d|^2, \phi_d = \arg(Z_d) \quad (2)$$



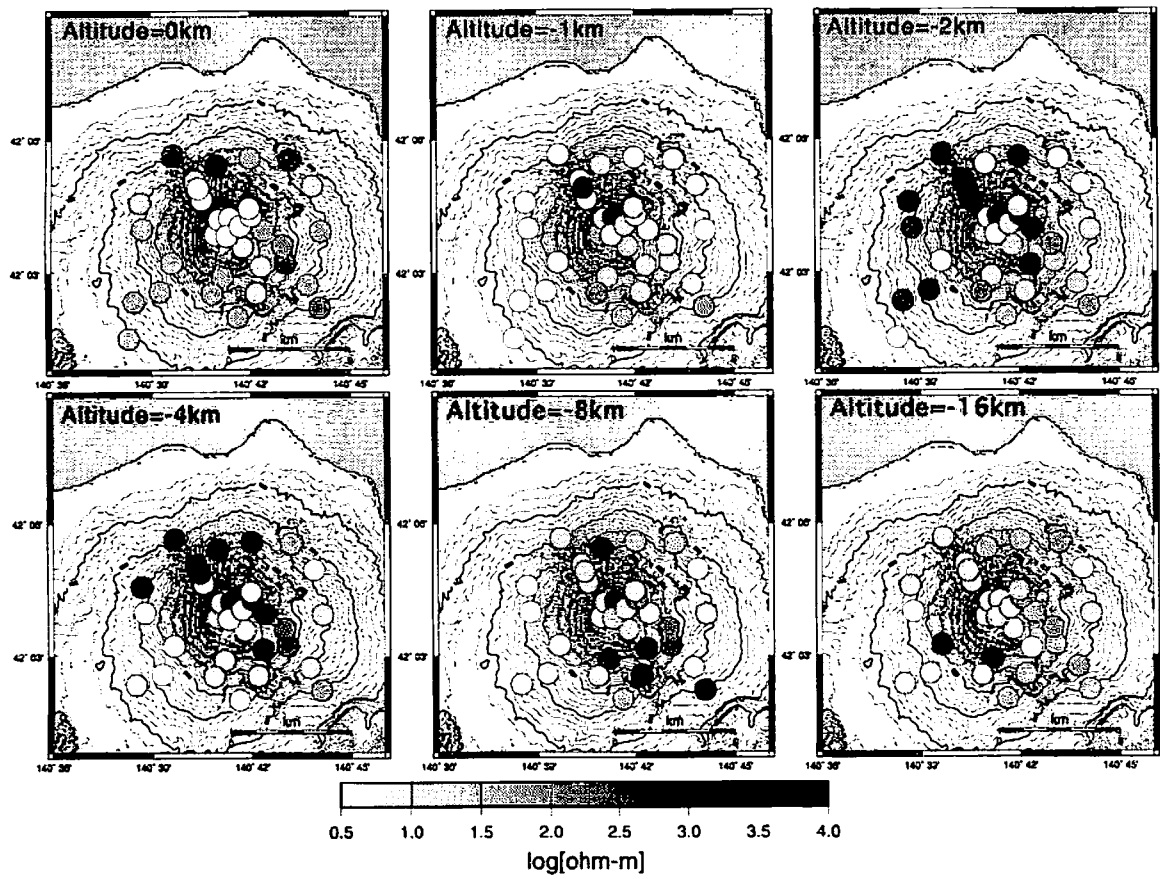
第 1 図: 北海道駒ヶ岳の位置と広帯域 MT 法探査の測点図。解析に使用した 35 の測点を表示した。▲, ■, および●はそれぞれ 2001 年 (谷元・他, 2001), 2002 年, および 2003 年の測点を示す。



第 2 図: 代表的な測点の見かけ比抵抗と位相差. ○は xy 成分, ×は yx 成分を示す.



第 3 図: 代表的な測点における Z_t を用いた見かけ比抵抗と位相差の観測値と計算値. +は観測値, 実線は計算値を示す.



第4図: 1次元インバージョン解析による各比抵抗の分布. 標高0 km, -1 km, -2 km, -4 km, -8 km, および-16 km について示した.

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 IPI2win_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を行った。第3図に代表的な測点での観測値と解析によって求められたモデルの探索曲線を示す。ほとんどの測点で観測値と計算値は見かけ比抵抗、位相ともにおおむね一致する。

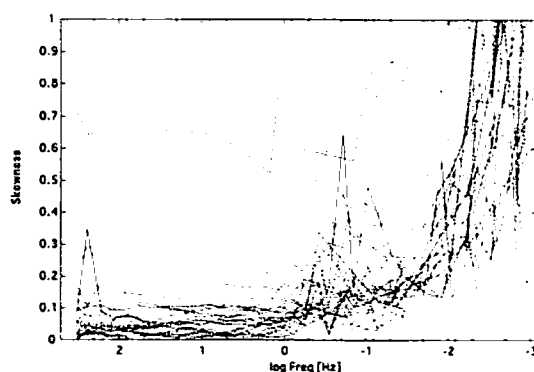
3.2 比抵抗解析結果とその特徴

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第4図である。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も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。したがって、この高比抵抗帯は先第三系の基盤岩を反映していると考えるのが解釈の一つである。しかし、山頂から南南東約6 km の位置にある温泉ボーリング井の比抵抗検層では、先第三系基盤は100-300 Ωm の比抵抗を持つと測定されている(北海道立地下資源調査所, 1995)。これを考慮すると、1000 Ωm 程度の高比抵抗帯はこの地域の先第三系基盤としては高過ぎ、ここではこの高比抵抗帯を第三系基盤とは断定することはできない。

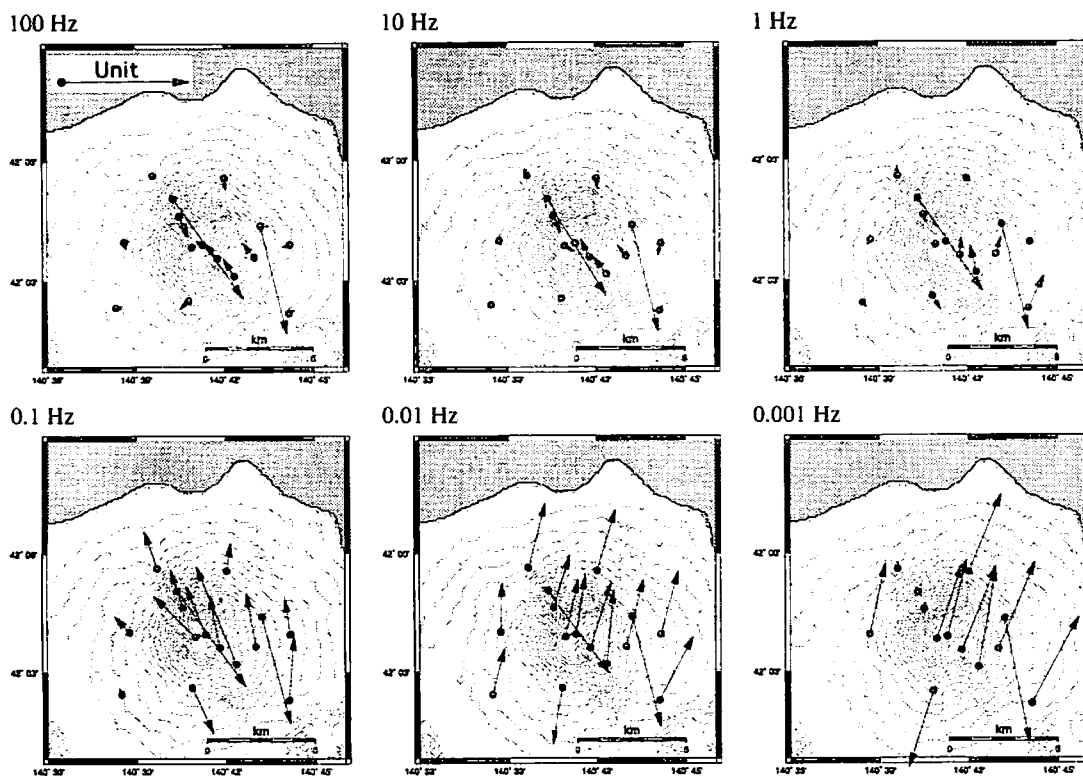
4 海水が与える影響

全測点について Skewness (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(第3.2図)。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分布する比抵抗の低い(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インダクションベクトル(第6図)は、100 Hz から1 Hz では山頂の火口原の方向を示している点が多いが、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り、磁場に海の影響を示唆している。



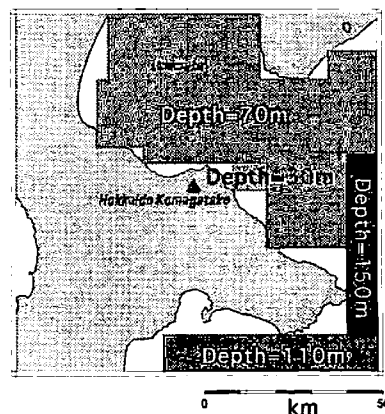
第5図: 全測点における Skewness.



第6図: 磁場観測点におけるインダクションベクトル。周波数 100, 10, 1, 0.1, 0.01, および 0.001 Hz について示した。

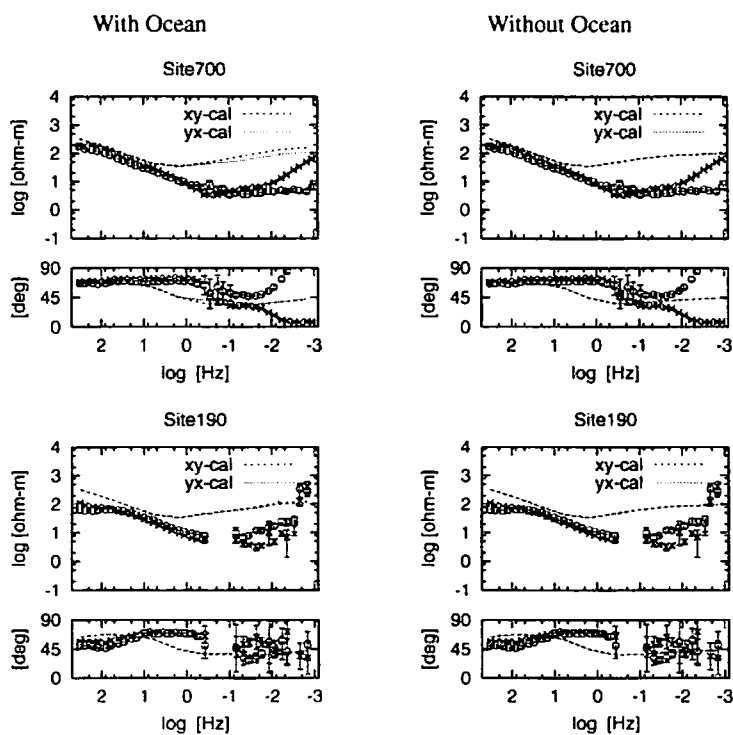
海洋の影響を評価するために、3次元フォワード計算によって簡単な海の構造を仮定した場合と、海を考慮しない水平多層構造を持つ大地との場合で、探査曲線にどのような違いが生じるかを計算した。コードは Fomenko and Mogi(2002) によるスタッガード格子を用いた3次元差分法を使用した。計算の範囲は水平方向は駒ヶ岳を中心とした100 km 四方、深さ方向は50 kmとした。簡略化した海洋の分布と深さは第7図のように仮定し、海水の比抵抗を $0.25 \Omega\text{m}$ とした。また陸域の平均的な構造を水平多層構造で近似し、深さ0-200 mを $1000 \Omega\text{m}$, 200-500 mを $100 \Omega\text{m}$, 500-1000 mを $50 \Omega\text{m}$, 1-50 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第8図に示す。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 Site700 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いて顕著であった。一方、海岸から約10 km離れた Site190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 Site700に比べて小さくなっている。よって、海水による低比抵抗層の分布は、探査曲線の1 Hz以下の周波数帯に、わずかながらも影響を及ぼしていると言える。



第7図: 3次元解析に用いた北海道駒ヶ岳周辺の簡略化した海の深さ分布。

しかし、観測値から求められる見かけ比抵抗の探査曲線では、低周波数において xy 成分が低くなり、 yx 成分が高くなる傾向を示す測点が多いのに対し、海を考慮したモデルから計算された結果は逆に xy 成分が高くなり yx 成分が低くなる。また、成分間の分離の傾向は観測地域の東側において顕著であり、本計算で得られたように海岸近くで著しいわけではない。さらに、成分間の分離の程度は観測値に比べるとかなり小さい。この原因には、(1) 駒ヶ岳が主に面している内浦湾は水深が 100 m 以浅と平均的な海域の水深に比べると浅く、結果としてコンダクタンスがあまり大きくないこと、(2) 駒ヶ岳およびその周辺の浅部（深さ 0–1 km 程度）には数–数十 Ωm の低比抵抗層が卓越し、海洋の比抵抗 ($0.25 \Omega\text{m}$) とのコントラストが小さいことが挙げられる。本計算では駒ヶ岳を中心とした 100 km を計算領域としたが、この領域をさらに広げると太平洋側は水深がより深くなり、西側の日本海も計算領域に含まれるようになる。したがって (1) は計算領域を広げることによって結果が変化する、つまり海洋の影響がより強く示される可能性もある。よって、計算範囲を広げて海の影響をより詳細に検討する必要があるが、現時点では、探査曲線の長周期における成分間の分離は、海の低比抵抗が及ぼす影響よりも、山体およびその周辺の比抵抗構造による影響が大きいと考えられる。



第 8 図: 見かけ比抵抗と位相差の観測値 (○および×) とモデルに基づく計算値 (点線および破線)。左側が海を仮定した場合、右側が海をのぞいた場合を示す。

5 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において、山体北側および西側で顕著である高比抵抗帯は、先第三系基盤を反映していると見るのが解釈の一つである。しかし、ボーリング井の比抵抗検層の結

果と比較すると断定することはできない。また、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。これは、海岸に近い測点で顕著であり、周波数1 Hz 以下でインダクションベクトルが海の方角を示すことと一致する。しかし、探査曲線の低周波数帯における xy , yx 成分の分離は海洋の影響だけでは説明できないことから、駒ヶ岳地域においては海洋の低比抵抗よりも山体およびその周囲の比抵抗構造が探査曲線に強く現れていることが推察された。

これまで、3次元モデルの構築のための初期解析として1次元インバージョンによる構造解析を行ったが、Skewness が示す通り、この地域の比抵抗構造の推定には単純な1次元解析は適さないことは明らかである。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（北海道大学理学部地球科学科）の各位に感謝します。

文献

- Bobatchev, A., IPI2win.MT-1D magneto-telluric and frequency sounding curves interpretation, <http://geophys.geol.msu.ru/ipi.mts/ipi.mts.htm>, 2002.
- Fomenko, E. and T. Mogi, A new computation method for a staggered grid of 3D EM field conservative modeling, *Earth Planets Space*, **54**, 499-509, 2002.
- Hermance, J. F. and R. E. Thayer, The telluric-magnetotelluric method, *Geophysics*, **40**, 664-668, 1975.
- 北海道立地下資源調査所, 北海道市町村の地熱・温泉ポーリングー地域エネルギー開発利用施設整備事業一, 68, 1995.
- Ingham, M., The use of invariant impedances in magnetotelluric interpretation, *Geophysical Journal International*, **92**, 165-169, 1988.
- 勝井義雄・鈴木武雄・曾屋龍典・吉久康樹, 北海道駒ヶ岳火山地質図, 地質調査所, 1989.
- 松波武雄・岡崎紀俊・秋田藤夫・若浜洋, 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, 1995.
- 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, 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, 1995.
- 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, 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-, CA 研究会 1999 年論文集, 57-64, 1999.
- 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, 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-, CA 研究会 2000 年論文集, 113-119, 2000.
- 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, 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, 2001.
- 山谷祐介・谷元健剛・西田泰典・茂木透・宮原昌一・吉田邦一・佐波瑞恵・Nagendra Pratap Singh・高橋幸祐・新屋雅之・菊池晃太郎・大前幹夫・渡辺友浩, 北海道駒ヶ岳における MT 探査, CA 研究会 2003 年論文集, 32-39, 2003.
- 山谷祐介・谷元健剛・西田泰典・佐波瑞恵・宮原昌一・吉田邦一・茂木透・橋本武志, 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-, 北海道大学地球物理学研究報告, **67**, 39-51, 2004.