



Title	MT法による雌阿寒岳北麓の比抵抗構造探査：序報
Author(s)	井上, 智裕; INOUE, Tomohiro; 橋本, 武志 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 82, 25-38
Issue Date	2019-03-19
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.82.25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/73389
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/
Type	departmental bulletin paper
File Information	GBHU_82_p25-38.pdf



MT 法による雌阿寒岳北麓の比抵抗構造探査：序報

井上 智裕・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センター

(2019 年 2 月 18 日受理)

Magnetotelluric survey on the northern foot of Meakandake volcano (preliminary report)

Tomohiro INOUE and Takeshi HASHIMOTO

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

(Received February 18, 2019)

We performed a broadband MT survey in the northern part of Mt. Meakandake, one of the active volcanoes in eastern Hokkaido to clarify the relationship between the subsurface electrical structure and the volcanic activities of this area. On the northeastern foot of Meakandake, remarkable crustal deformation from late 2016 through 2017. We planned a magnetotelluric survey to investigate the electrical structure across the deformation source. In this study, we describe the features of our MT data and show the 1-D models as a preliminary modeling. In the inversion, we only used a frequency range between about 0.1 and 100 Hz, in which the responses showed approximately a 1-D feature. The inverted 1-D models exhibited distinct low resistivity layer ($1\text{--}10\ \Omega\text{m}$) at depths around a few hundred meters to 1 km at all sites. In addition, at the sites in the SE half of the survey line, another low resistivity layer of approximately $10\ \Omega\text{m}$ was associated at a depth around 2–3 km.

I. は じ め に

北海道東部，阿寒－知床火山列南西端の阿寒カルデラ内には雌阿寒岳や雄阿寒岳などの，後カルデラ火山が分布している（勝井，1958；佐藤，1965）．その中でも南西部に位置する雌阿寒岳は，完新世の活発な噴火履歴が明らかになっている活火山であり，現在も噴気活動を続けている（気象庁，2015）．近年は 1996 年，2008 年に水蒸気噴火を起こしている．

また，雌阿寒岳では GNSS 観測や InSAR 解析に基づいて，2016 年から 2017 年にかけて北東麓で顕著な地盤膨張が検出され，その後緩やかに変動が継続したことが報告されている（国土地理院，2018）．暫定モデルとして，この地盤膨張は，Fig. 1 に示したように雌阿寒岳東麓から雄



阿寒岳の南西麓にかけて伸びる、深さ約6 kmにおけるシル状クラックの開口で説明されている(国土地理院, 2018). この領域の地表面では、フレベツ岳－白湯山－阿寒湖温泉にかけてボッケ群が点在しており、もともと地熱活動が活発である. 上述の推定クラックは、長さ約11 km × 幅約2 kmとサイズが大きいため、もしこれがマグマや熱水に対応するものであるならば、MT法によって低比抵抗異常体としてイメージできる可能性がある. また、この地盤膨張が起きている領域の地下構造を知ることは、雌阿寒岳・雄阿寒岳の後カルデラ火山のマグマ供給系の議論につながると考えられる.

雌阿寒岳周辺で、過去に行われたMT探査として、NEDO(1992)が地熱開発促進調査(阿寒地域)の一部として雌阿寒岳の東麓域で行った探査や、雌阿寒岳の火山研究の一環として山頂を北東－南西方向に切る測線でTakahashi et al. (2018)によるAMT探査などがある(Fig. 1a). しかし、これらの探査で推定された構造は深さ2 km程度までに限られており、観測地点も上記の膨張源とはややずれているため、この膨張源の実体は現時点でよく分かっていない. 本研究では、比抵抗観測を通して、地盤膨張が発生している地域がどのような地下構造であるかを議論したいと考えた. 上記の膨張源に注目するためには、深さ2 kmより深部の比抵抗構造までを明らかにする必要がある. そこで、本研究では膨張源に直交する方向に測線を設定し広帯域MT探査を実施した. 本研究の観測点分布を、推定膨張源の位置、過去に行われたMT探査の観測点分布、主要なランドマークとともにFig. 1aに示す. 次章以下では、まず観測の概要を示し、得られた応答関数の特徴と、予想される大まかな地下構造について述べる. さらに、1次元インバージョンによる構造解析を行い、比抵抗構造と膨張源の関係について予察的に議論する.

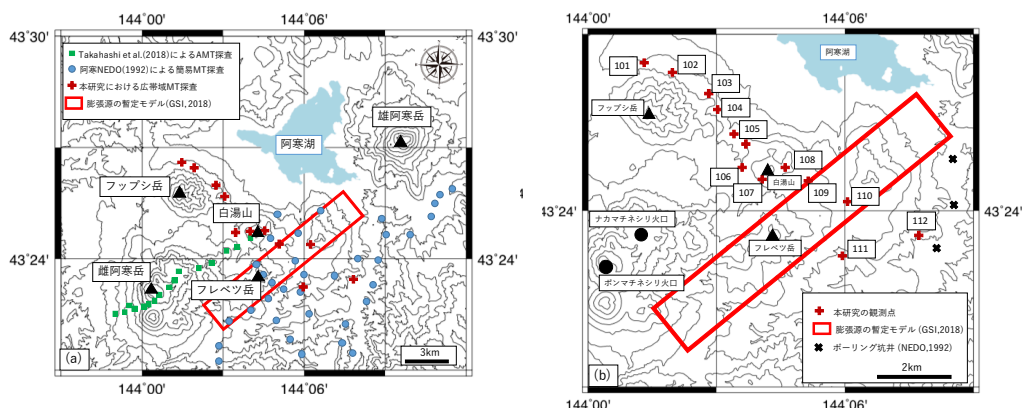


Fig. 1. Location map of the MT sites in this study and the previous studies.

II. 観 測 概 要

本研究では、Fig. 1b に示す計 12 地点において、広帯域 MT 法測定を 2018 年 8 月 22 日から 9 月 22 日までの約 1 ヶ月間かけて展開した。測線は雌阿寒岳北麓から東麓にかけての北西－南東方向とし、約 10 km の範囲に約 1 km 間隔で観測点を配置した。測定には Phoenix Geophysics 社製の MTU-5/5A システムを 4 台（うち、北海道大学所有 2 台、秋田大学 2 台）、Pb-PbCl₂ 電極、インダクションコイル（MTC-50, MTC-50H）を用い、電場 2 成分、磁場 3 成分を 1 観測点につき 3 日から 7 日間観測した。

III. 観 測 結 果

1. 見かけ比抵抗と位相差

観測した電場・磁場変動の時系列データは、Phoenix Geophysics 社の SSMT2000 を用いて 0.00034-320 Hz の 80 周波数のスペクトルデータに変換した。その際、観測領域のローカルなノイズを軽減するために、日鉄鉱コンサルタント株式会社が運用する岩手県沢内の磁場データを用いてリモートリファレンス処理（Gamble et al., 1978）を行った。

各測点における見かけ比抵抗と位相差曲線を Fig. 2 に示す。各成分の x および y はそれぞれ各地点における磁気的な北と東を正にとっており、添字の xy は電場を x 軸とする成分、 yx は電場を y 軸とする成分であることを表す。本稿では時系列プロットを示さないが、この地域の電磁ノイズは小さく、比較的道路に近い 101 地点と、高圧電線に近い 112 地点の一部の帯域を除いて、概ね良好なデータを得ることができた。これを反映して、周波数領域での連続性が高く、分散の小さな見かけ比抵抗および位相差曲線が得られている。

全測点に共通した特徴として、高周波数側から低周波数側に向かうにつれて、見かけ比抵抗が中－低－高と推移する傾向が見られる。位相差の傾向もこれに調和的である。ただし、北西側の 3 地点 101, 102, 103 では、0.1 Hz 以下の周波数帯域において、 ρ_{xy} と ρ_{yx} に乖離が見られる。一方、測線の南東側 104－112 にかけては、全周波数帯にわたって両モードはほぼ一致しており、水平成層的な構造が想像される。これらのことから、北西側と南東側では、0.1 Hz 以下の帯域より深部の構造が異なることが伺える。

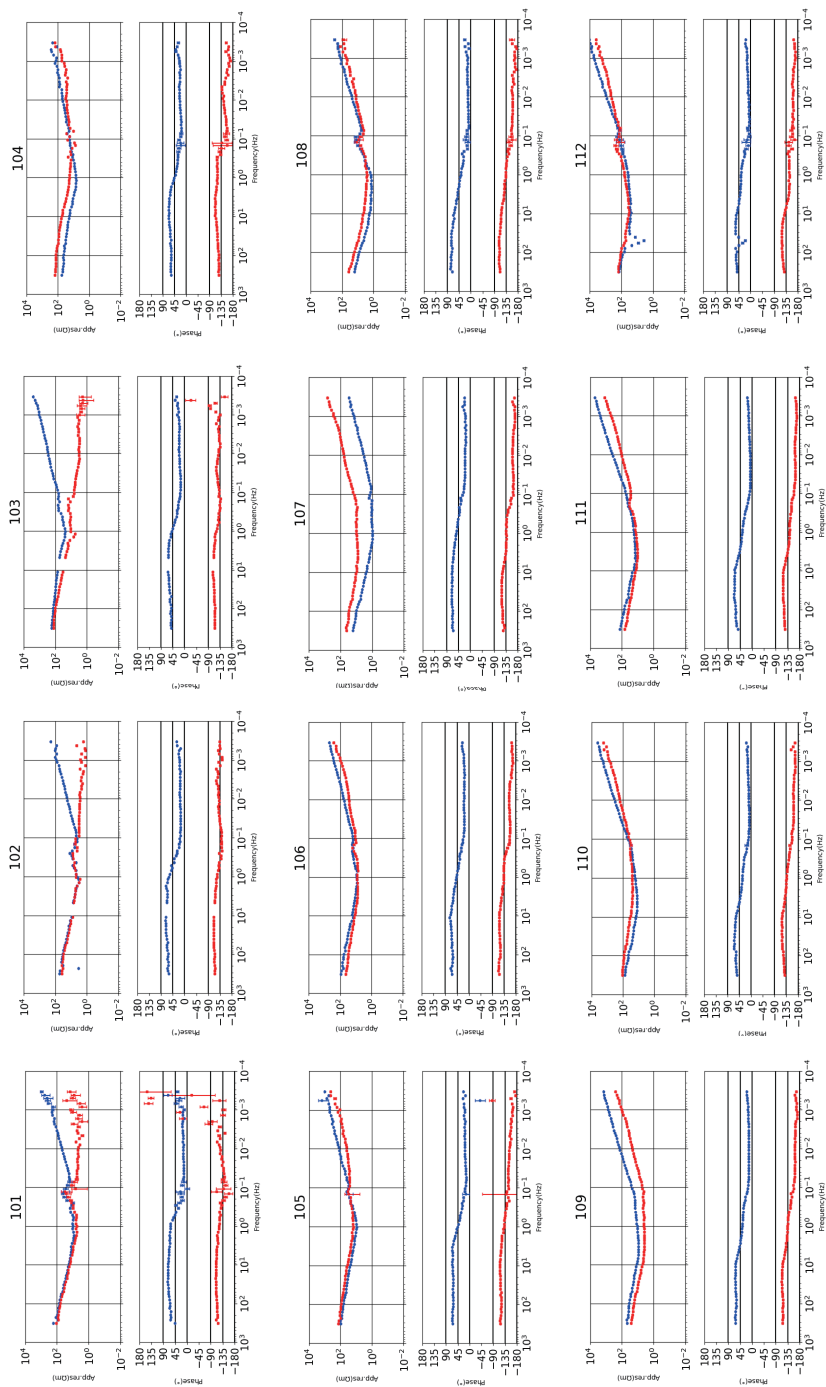


Fig. 2. Apparent resistivities and phases. Blue and red symbols correspond to xy (E-field northward) and yx (E-field eastward) components, respectively.

2. フェーズテンソルとインダクションベクトル

本研究では、当初 2 次元構造解析を念頭に置いて直線状に測点を配置した。一般的に、MT 法の 2 次元構造解析では、何らかの方法でリージョナルな電磁氣的走向方向を求めた上で、インピーダンステンソルを走向方向に回転し、2 つのモードに分けることが行われる。本研究では、観測データから導出したフェーズテンソル (Caldwell et al., 2004) (以下、PT) と、インダクションベクトル (Rikitake and Yokoyama, 1955) (以下、IV) に基づいて、電磁氣的な走向を推定する。周波数帯ごとの PT と IV を Fig. 3 に示す。以下に、これらの特徴について述べる。

まず、この地域の PT の特徴について述べる。1-100 Hz の帯域では、PT は概ね円に近い形状をしており、径は 1 より大きく、skew angle は小さい。径が 1 であることはインピーダンスの実部と虚部が等しいことを意味し、1 次元構造では位相 45° に対応する。一方、0.1 Hz よりも低周波の帯域においては、PT 楕円の扁平度は高く、径は 1 より顕著に小さい。また、skew angle の絶対値も高周波数帯と比べて大きい。以上のことから、0.1 Hz よりも低周波側の帯域では 2 次元または 3 次元的な構造による影響を受けていることが伺える。

次に、PT 楕円長軸方向の頻度分布を調べる。PT の長軸方向は、構造走向に平行、またはそれに直交することが知られている (Caldwell, 2004)。長軸方向のローズダイアグラム (Fig. 4) を見ると、10 Hz よりも高周波の帯域では E-W 方向が、10 Hz よりも低周波の帯域では NW-SE 方向が卓越する傾向が見られた。全周波数帯の総和で見ると、NW-SE 方向が卓越していることがより明瞭である。これらのことから、リージョナルな電磁氣的走向は $N60^\circ W$ もしくは $N30^\circ E$ であると考えられる。

さらに、IV について見ると、特に 0.01-0.1 Hz の帯域で南西方向が卓越していることが明瞭である。一般的に、IV は Lateral な比抵抗不均質境界に直交する方向を示すので、上記の事実は、前述の PT 長軸方向から推定される走向の 2 つの候補のうち、実際のリージョナルな電磁氣的走向は $N60^\circ W$ である可能性が高いことを意味している。ただし、0.01 Hz の IV 分布を詳しく見ると、北西側の測点 101, 102 で IV が北西方向を向いており、南東側との違いが認められる。また、10-100 Hz の帯域では、IV が測線の中央部 (測点 108) 付近に向かう成分を含んでいるように見える。測点 108 は白湯山 (Fig. 1b) の山頂から約 500 m 東に位置しており、この地点を含め白湯山の東側から南側にはボッケを含む地熱地帯が広がっている。これらのことから、IV は比較的浅部の比抵抗不均質にも影響されていると考えられる。

以上の PT と IV の特徴を総合すると、この地域のリージョナルな電磁氣的走向は $N60^\circ W$ と考えられ、本研究の測線とほぼ平行である可能性が高い。一方、浅部は概ね水平成層的であるが、小スケールの不均質を含んでいることが想像される。

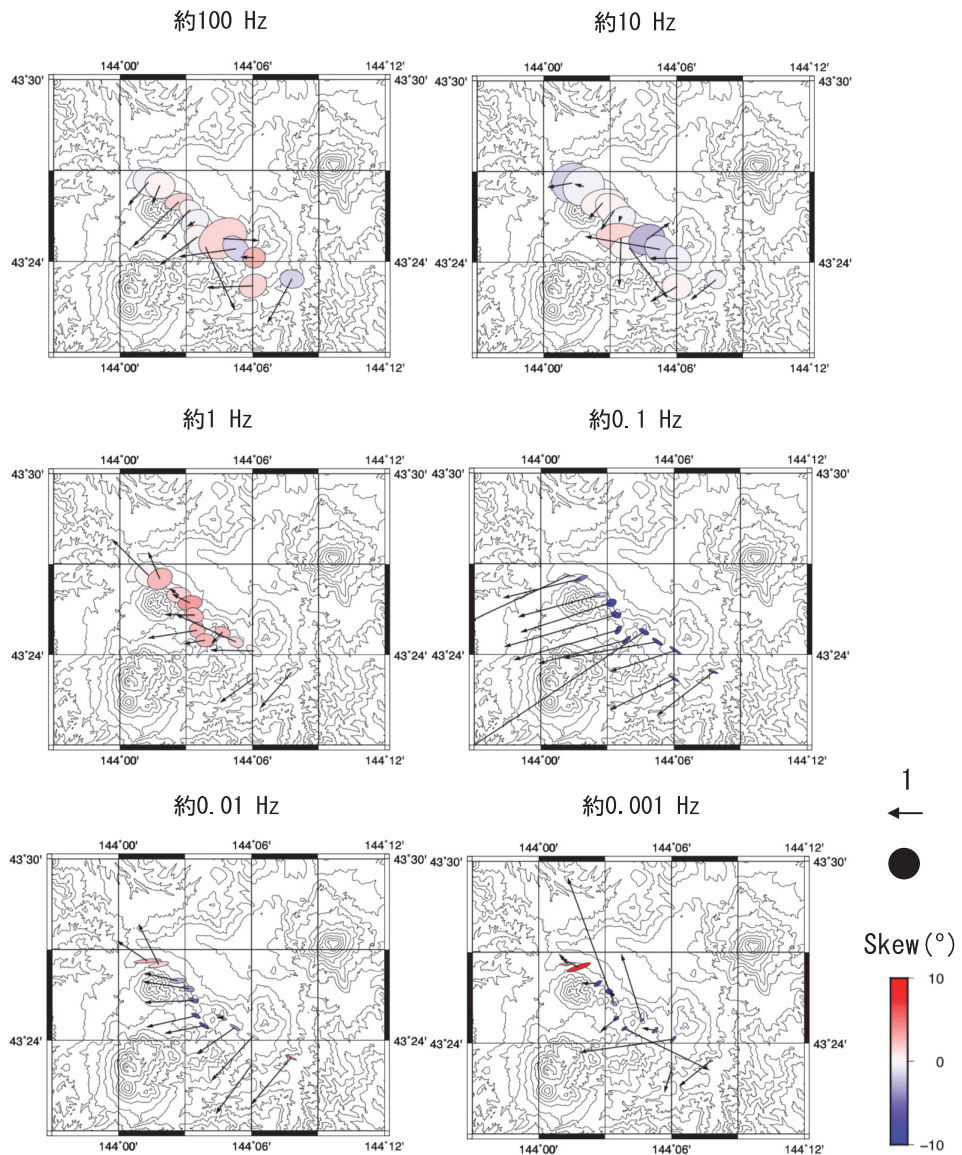


Fig. 3. Distribution of the induction arrows (Parkinson convection) and the phase tensor ellipses. Unit length of the IV arrow and the size of the magnitude of the PT=1.0 are shown in the right-bottom.

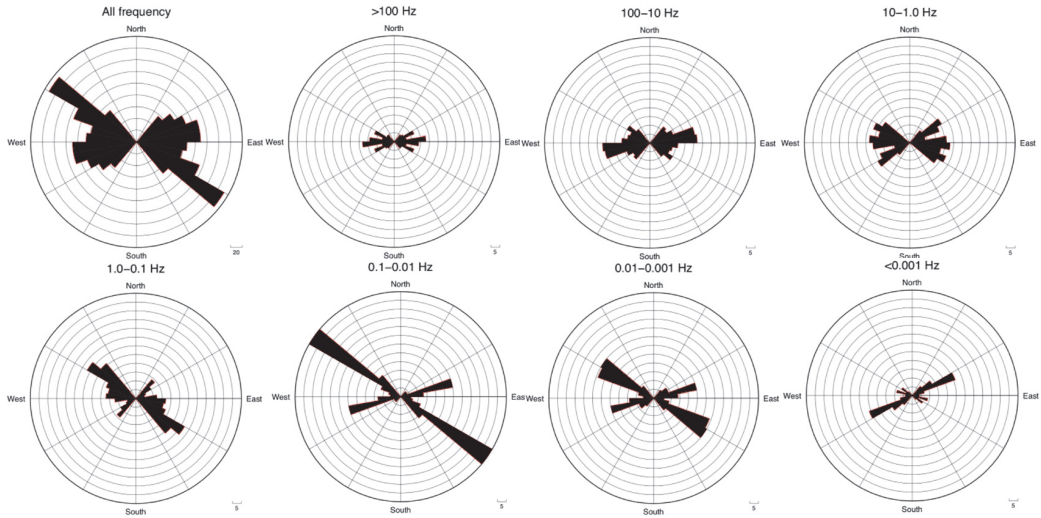


Fig. 4. Rose histograms of the principal direction of phase tensor in all and each frequency range.

IV. 1次元構造解析

前節までに述べた、見かけ比抵抗，位相差，PT および IV の特徴から，我々の MT 測線はリージョナルな電磁氣的走向とほぼ平行しており，現有のデータで 2 次元構造解析を行うことは適切ではないことがわかった．そこで，以下では，水平成層的な構造が想定される 100-0.1 Hz の帯域のみ（46 周波数）について，予察的に 1 次元構造解析を試みる．

本研究では，1 次元インバージョンに Constable et al. (1987) のコードを使用した．完全な水平成層構造の場合，インピーダンスの xy 成分と yx 成分は一致するので，どちらの成分でインバージョンしても同じ構造が得られるが，実際の観測データでは両成分は完全に一致しているわけではない．このため，いずれかの成分のみをそのまま使用するともう一方の成分に含まれる情報を無視することになる．そこで，対角成分も考慮した回転不変量である ssq インピーダンス (Szarka and Menvielle, 1997; Rung-Arunwan et al., 2016) を算出し，そのインピーダンスから求めた見かけ比抵抗と位相をインバージョンの入力データとして使用した．

モデル総数は 20 とし，各層の厚さは，深さ 100-1000 m の範囲で，表層から深部に向かって徐々に厚くなるように設定した．また，初期比抵抗値は 100 Ωm 一様とした．

MT 法のインバージョンでは，重み付けのために周波数ごとの入力データに対して誤差を与え

るが、観測データの分散をそのまま誤差として用いると、分散の小さなデータに強い重みがかかりすぎて、応答曲線の細かな揺らぎまでが有意なものとして評価され、インバージョンが収束しないという問題が起こる。この問題を回避するために、分散の小さな観測データに対しては、強制的にエラーフロアを与えて条件を緩和することが行われる。本研究では、観測データの見かけ比抵抗値の誤差が25%以下の成分については10%, 15%, 20%, 25%のいずれかのエラーフロアを設定した。与えるエラーフロア値は、観測点毎に一律としている。エラーフロア値の小さなものから順にインバージョンを試行し、RMSE=1.0の収束条件が達成されたものの中から、最小のエラーフロアを選択した。同様に、位相については、 1.0° , 2.0° , 3.0° のいずれかでエラーフロア値を設定した。

インバージョンで得られた各測点の1次元比抵抗モデルをFig. 5に示す。収束条件が満たされた時点で、反復計算を停止したので、最終モデルのRMSEはいずれも1.0である。また、ssqインピーダンスから求めた見かけ比抵抗と位相差の観測値およびモデル応答をFig. 6に示す。

インバージョンで得られた1次元構造モデルの特徴を以下に述べる。まず、全ての測点で深さ0.5-1 km付近に約1-10 Ωm の明瞭な低比抵抗層(C1)が見られる。さらに、膨張源付近の測点(106, 107, 109, 110, 111)では、それに加えて深さ2-4 kmの範囲にも約10 Ωm の低比抵抗層(C2)が解析されている。測点112ではC2の延長と考えられる低比抵抗層は3-5 kmとやや深く比抵抗値も約50 Ωm と相対的に高い。白湯山(Fig. 1b)の測点108では、C1とC2は分離しておらず、深さ数100 m付近で数 Ωm を示す単一の低比抵抗値が求められた。

Fig. 6から明らかなように、観測値とインバージョンによるモデルからの計算値とのフィッティングは良好である。しかし、構造の特徴として上述した2つの低比抵抗層(C1およびC2)がどれほどロバストな構造であるかは、最終モデルを見ただけでは判断できない。そのため本研究では以下の感度テストを行った。ここでは、C1とC2のそれぞれについて、上下の層の比抵抗値と同じ比抵抗値に設定したモデルを作り、そのモデルから得られる応答曲線を上述のエラーフロアを与えた観測値と比較した。C1をなくした場合の結果をFig. 7に示し、C2をなくした場合の結果をFig. 8に示す。Fig. 7から明らかなように、C1をなくした場合には、見かけ比抵抗、位相とともに、100 Hzから0.1 Hzにおいて観測値との乖離が顕著である。このことからC1はかなり確からしい構造であるといえる。深部の低比抵抗層C2をなくした場合(Fig. 8)では、測点106と109では明瞭な乖離は見られなかったが、測点107, 110, 111, 112において約10 Hz以下の低周波数帯での位相の食い違いは有意である。ただし、ここに示したのはあくまで1次元の予想的構造解析であるので、C2の確からしさについては、3次元モデリングで再度検討が必要である。

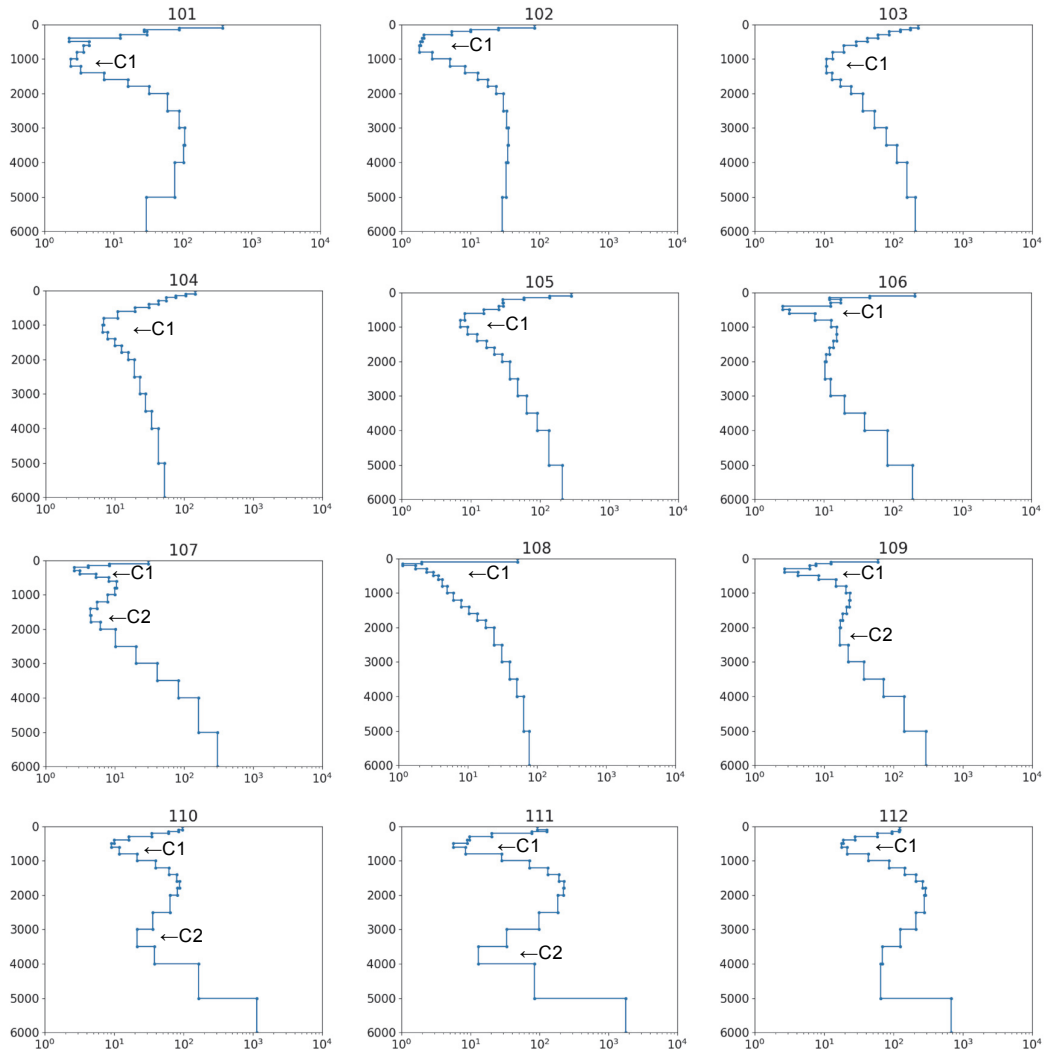


Fig. 5. 1-D resistivity structures at each observation sites. The horizontal and vertical axes correspond to the resistivity (Ωm) and depth (m), respectively.

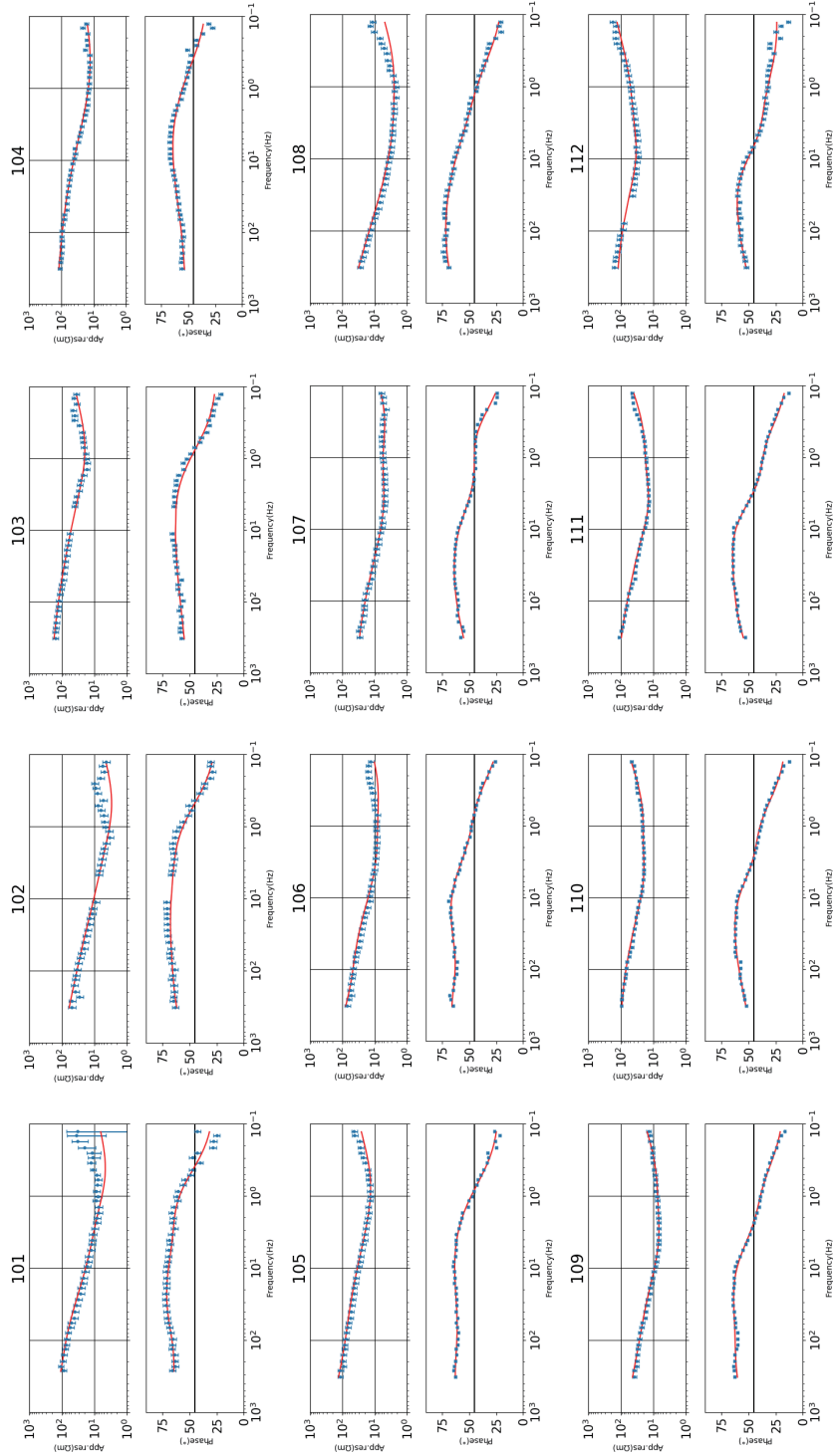


Fig. 6. Apparent resistivities and phases calculated from the Zssq. Blue symbols and red curves indicate the field data and responses from the inverted models, respectively. Solid line in phases is 45 degrees.

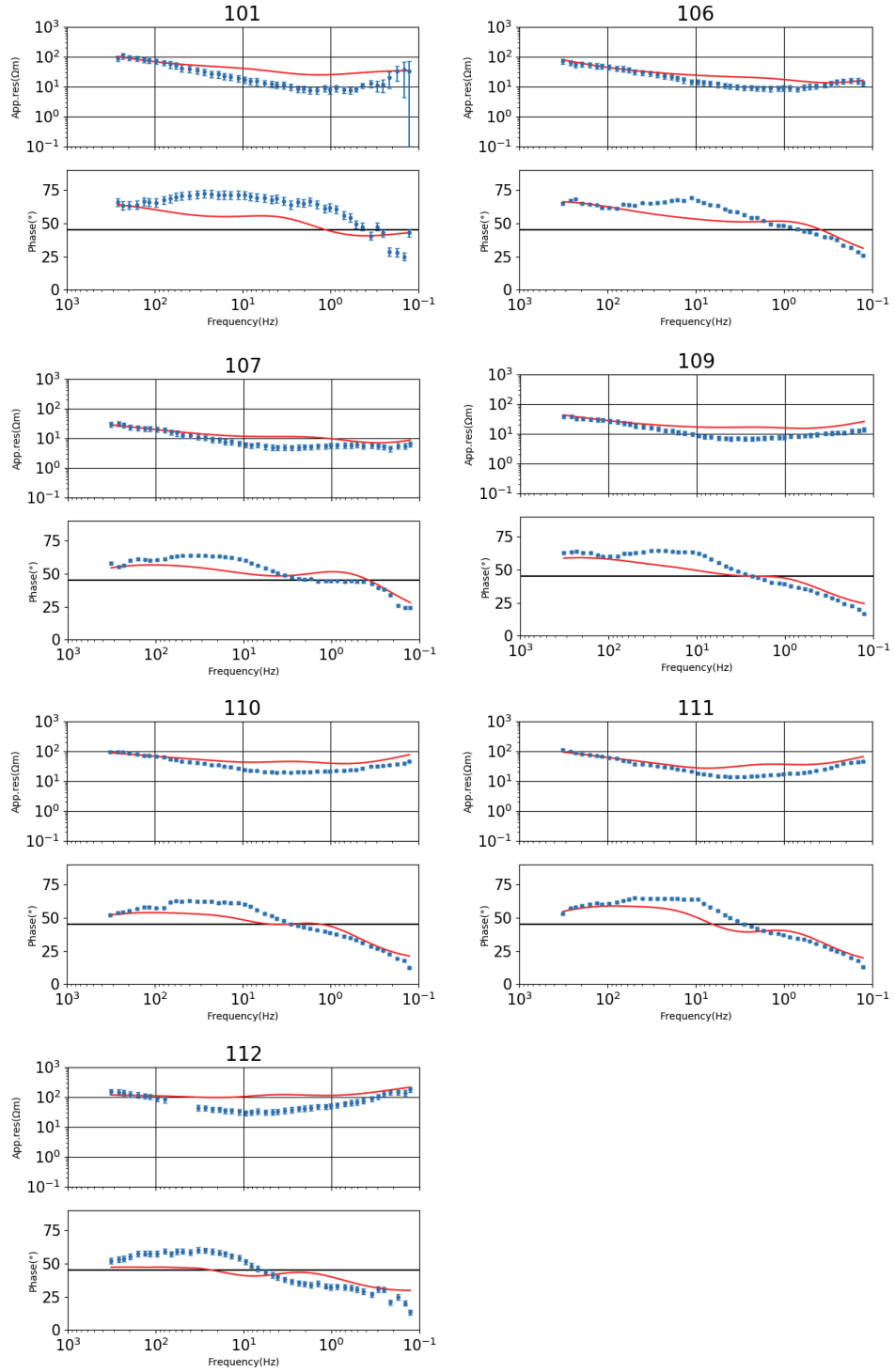


Fig. 7. Result of the sensitivity tests for the low resistivity layer (C1). Blue: Responses of the field data.
Red: Calculated responses from the modified models. Solid line in phases is 45 degrees.

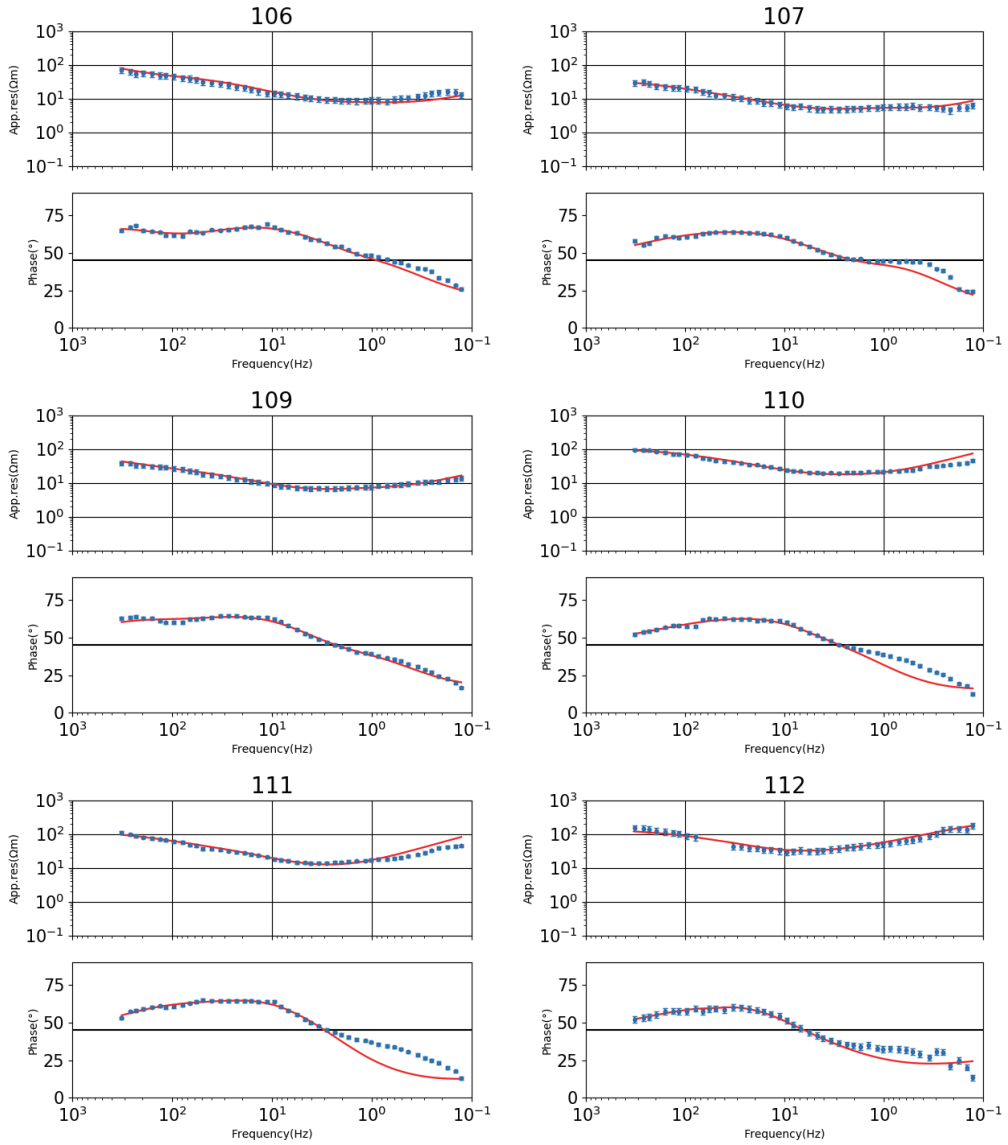


Fig. 8. Result of the sensitivity tests for the low resistivity layer (C2). Blue: Responses of the field data. Red: Calculated responses from the modified models. Solid line in phases is 45 degrees.

V. 考 察

本研究で行なった 1 次元インバージョンの結果, 12 地点の全てでほぼ同程度の深さ (0.5-1 km) に 1-10 Ωm 程度の低比抵抗層 C1 が見られた. C1 の比抵抗値が最も低い測点 108 では, 地表面にボッケ群のような地熱活動が見られるが, C1 は地熱活動があまり見られない北西側の測点にも見られる. また, NEDO (1992) の変質帯調査によれば, 明瞭な変質帯は雌阿寒岳登山道, 本研究の測点 106 付近より東側に発達していると記述がある. これらのことから C1 は現在の地表面の地熱活動の有無とは直接的な関係が無いように思われる.

NEDO (1992) の地熱開発促進調査では, 約 500-1500 m の試錐調査も行われている (Fig. 1b). 測点 112 から 3 km 離れた北東側に位置する孔井のコアでは, 深さ 335.0-503.50 m まで凝灰岩や凝灰質シルト岩, デイサイト, 安山岩が記載されている. また, 測点 112 に最も近い孔井では 230-400 m に凝灰角礫岩, 400-500 m に溶結凝灰岩が記載されている. ボーリングデータには, 粘土鉱物による変質分帯も記載されており, 測点 112 に最も近い孔井では表層付近から 400 m までモンモリロナイト帯, 400-500 m までは緑泥石帯と分類されている. 低比抵抗層 C1 は中新世の凝灰質の変質した岩石層に対応している可能性が高く, 雌阿寒岳の火山活動によるその後の熱水変質や地殻変動があったとしても, それらがどの程度この C1 層の特徴に影響しているかは現時点で不明である. なお, 1-10 Ωm という比抵抗値は, 変質帯では普通に見られる値で, 松島・他 (1994) が過去に雌阿寒岳で行なった VLF-MT 法探査でも, ポンマチネシリ火口や中マチネシリ火口 (Fig. 1b) など表層が変質している地点では, いずれも 10 Ωm 前後の見かけ比抵抗値が報告されている.

一方, 低比抵抗層 C2 は雌阿寒岳登山道よりも東側の測点 (106, 107, 119, 110, 111) のみで現れていた. また, C2 は測点 106 から 108 にかけて徐々に浅くなり, 108 から 111 にかけて徐々に深くなっている. このように C2 の深さが測点ごとに異なっているので, 北東麓の膨張源と何らかの関係がある可能性が指摘できる. しかし, 106 から 111 にかけて C2 は深さ約 2-4 km に見られるのに対して, 現在考えられている膨張源モデル (国土地理院, 2018) の深さは約 6 km であり, 両者は深さが異なっている.

VI. 結 論

近年に顕著な地盤膨張が観測されている雌阿寒岳の北麓域で, 2018 年に広帯域 MT 法による比抵抗探査を行った. 予想的な構造解析として, 見かけ比抵抗, 位相, PT, IV から 1 次元的な特徴が見られる帯域のみのデータを用いて 1 次元インバージョンを行った. その結果, 異なる深度に 2 つの低比抵抗層 C1 と C2 が解析された. C1 は本研究で展開した 12 測点の全てにおいて, ほぼ同程度の深さ (0.5-1 km) に見られる 1-10 Ωm 程度の低比抵抗層で, 中新世の変質凝灰岩に対応している可能性が高い. 一方, 低比抵抗層 C2 (深さ約 2-4 km, 約 10 Ωm) は, 測線の

南東側のみ認められ、近年報告されているシル状の膨張源付近で浅い。膨張源と C2 との間には何らかの関係が示唆されるものの、両者の深さは異なっている。

今後さらに MT データを追加した上で、3 次元解析を通じて、より確からしい比抵抗構造の推定を行う必要がある。

謝辞 本研究を行うにあたって、秋田大から観測機材を使用しました。ご対応下さった坂中伸也先生に感謝いたします。北大地震火山センターの田中良研究員・成田翔平氏には、現地観測での多大なるご協力や継続的なアドバイスに感謝いたします。また、北大工学研究院の茂木透教授からも本研究に対してアドバイスいただきました。ここに感謝を表明いたします。

文 献

- Caldwell T.G., H.M Bibby and C Brown., 2004. The magnetotelluric phase tensor, *Geophys. J. Int.*, **158**, 457-469.
- Constable, S.C., R.L. Parker and C.G. Constable, 1987. Occam's inversion-a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, **52**, 289-300.
- 気象庁, 2015. 雌阿寒岳, 日本火山総覧 (第 4 版), 83-110.
- 国土地理院, 2018. 火山噴火予知連絡会解報 (第 128 号) 雌阿寒岳周辺の地殻変動, 5-14.
- Gamble T.D., W. M. Goubau and J. Clarke, 1979. Magnetotellurics with a remote magnetic Reference, *Geophysics*, **44**, 53-68.
- 勝井義雄, 1958. 阿寒・屈斜路火山群, 地球科学, **39**, 19-29.
- 松島喜雄・岡崎紀俊・市川隆一・道脇政則・西田泰典, 1994. 雌阿寒岳における地球電磁気および地温調査, 北海道大学地球物理学研究報告, **57**, p.1-10.
- 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), 1992. 地熱開発促進調査報告書 No.26 阿寒地域, pp.1141.
- Rikitake T. and I. Yokoyama, 1955. Volcanic activity and changes in geomagnetism, *J. Geophys. Res.*, **60**, 165-172.
- Rung-Arunwan, T, W. Siripunvaraporn and H. Utada, 2016. On the Berdichevsky average, *Phys. Earth and Planet. Int.*, **253**, 1-4. 2016.
- 佐藤博之, 1965. 5 万分の 1 地質図幅説明書「阿寒湖」. 地質調査所, 82.
- Szarka L. and M. Menvielle, 1997. Analysis of rotational invariants of the magnetotelluric impedance tensor, *Geophys. J. Int.*, **129**, 133-142.
- Takahashi K., S. Takakura, N. Matsushima and I. Fujii, 2018. Relationship between volcanic activity and shallow hydrothermal system at Meakandake volcano, Japan, inferred from geomagnetic and audio-frequency magnetotelluric measurements, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **349**, 351-369.