

南極みずほ高原で得られたデータおよび比抵抗構造について

坂中伸也(秋田大学工学資源学部), 船木實(国立極地研究所),
佐藤高晴(広島大学大学院総合科学研究科), 山崎哲秀(アバンナット), 三宅八朗(関電工),
江川晋子(日本水路協会), 上村剛史(海城高校)

Magnetotelluric data acquired Mizuho Plateau, East Antarctica and its one-dimensional structure

Shin'ya Sakanaka (Department of Earth Science and Technology, Akita University),
Minoru Funaki (National Institute of Polar Research),
Takaharu Sato (Graduate School of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University),
Tetsuhide Yamasaki (AVANGNAQ), Hachiro Miyake (Kandenko Company, Limited),
Kuniko Egawa (Japan Hydrographic Association),
Takeshi Uemura (Kaijo Junior- and High-School, Tokyo, Japan)

1. はじめに

第 46 次日本南極地域観測隊(JARE46)に参加し, 昭和基地から大陸上のみずほ高原に旅行し MT 探査(広帯域電磁探査)を行った。それまで南極大陸でなされた MT 観測例としては西南極で Wannamaker et al. (1996), 南極点付近で Wannamaker et al. (2004), 東南極のリーセルラルセン地域で山崎(2002) [JARE42] などがある。山崎(2002)の観測は主に氷河堆積物上, 先の 2 つの例では大陸氷床上で行われた。大陸氷床上での探査では, 極めて高い比抵抗値(1 万 Ωm 以上)からなる大陸氷床の下に大陸地殻の比抵抗構造が示され, 直下の地殻形成史が論じられた。

観測地域である東南極のエンダービーランドには 38 億年前に形成されたとされるナピア岩体をはじめ, レイナー岩体, リュツォ・ホルム複合岩体などが存在するが, 厚い大陸氷床に阻まれ, 内陸部でのその境界は不明である。MT 探査により大陸氷床下の地殻比抵抗分布をモデル化し, この地域の大陸地殻の形成史を論じるのが最終的な目的である。

この稿では得られたデータと得られたサウンディングカーブを紹介し, 一次元解析から得られた地下構造についての例を示す。地殻構造の詳細を論じるのは更なる解析を行った後, 別稿に譲ることとする。

2. 観測点の概要

みずほ高原はしらせ氷河流域に対し, 日本の観測隊が名付けた地域名でありエンダービーランド西部とドロンピングモードランド東端にあたる。日本の南極地域観測隊の越冬基地である昭和基地(東経 39 度 35 分, 南緯 69 度 00 分付近)はしらせ氷河が流れ込むリュツォ・ホルム湾東部の東オングル島にある。

大部分のデータは 2005 年 9 月 20 日から 10 月 10 日までの約 3 週間の雪上車によるみずほ高原への内陸旅行で取得した。旅行経路を図 1 に示す。観測点はとつつき岬からみずほ基地へのルート上の北西-南東方向の測線と, それに斜交する北東-南西方向の測線上に配した。以下では北西-南東方向の測線を H 測線, 北東-南西方向の測線を HM 測線と呼ぶことにする。H 測線はみずほ基地へのルートであり, 近年氷床掘削が行われているドームふじ基地への旅行経路として頻繁に利用されている。HM 測線は JARE43 による人工地震探査で使用されたルート上にある。H 測線の測線長は約 210km(Tottsuki-Z24), HM 測線の測線長は約 110km(HM40-HM161)である。観測点 H176 は両測線の交差点上にある。なお, 大陸内陸部の氷床表面はおおむねなだらかで, 大部分の観測点は標高 1500m 付近に分布する。

3 週間の旅行中, 基本的には昼間に雪上車で移動し,

夕方から翌朝にかけて電場と磁場の時系列データを取得した。この旅行では計 14 点でデータをとることができた。観測点のうち、H68 はテスト観測を兼ねて 8 月下旬に、Totsuki (とつつき岬) は 11 月下旬に別に小旅行を行って観測を行った。

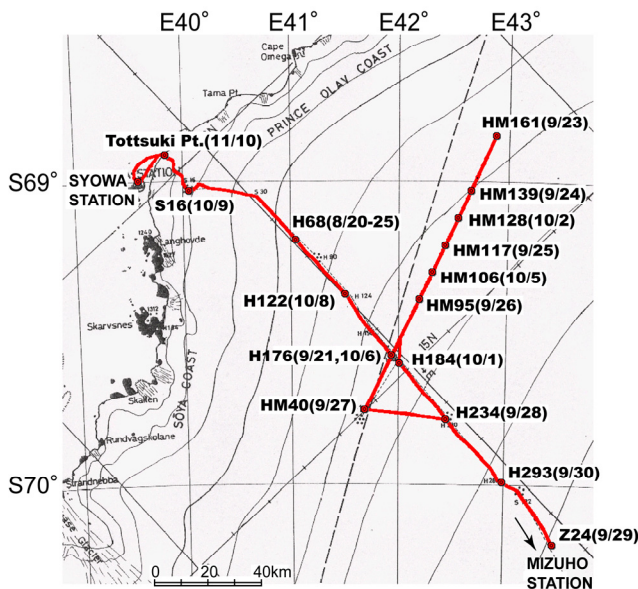


図 1 MT 観測の旅行経路と観測点。観測点名とデータ取得日の日付を示した。

3. 使用機材と低温による問題点について

測定機材は Phoenix Geophysics 社の MTU-5 の MT 観測セットを 2 台用いた。昭和基地のある東オングル島は人工的な電磁ノイズが多い環境ではあったが、1 台の MTU-5 を用いて昭和基地でリファレンス観測を行い、もう 1 台を使って大陸氷床上で観測を行った。昭和基地でのリファレンス点は地震計室と多目的アンテナのレドームとの間のスペースに置き、水平磁場 2 成分のみの時系列データを記録した。

水平磁場 2 成分はインダクションコイル MTC-50、鉛直磁場はエアーループコイル 7022 を用いて観測を行った。エアーループコイルは一辺約 6.2m の正方形になるように雪面に置いた。昭和基地やみずほ高原の偏角は 45° 西偏であるが、水平磁場南北成分 (Hx) 取得用のインダクションコイルの方向は地磁気の北に合わせた。

電場用の電極は、接地抵抗が非常に大きいと予想される雪の中に埋設するため、接地 (接雪) 面積の大きな電極

の方が有利である。今回は、一辺 60cm のチタン板を用い、Phoenix Geophysics 社によるプリアンプを併用した。旅行中、気温は氷点下摂氏 20°C から 50°C であったが、この範囲の温度では、雪にはほとんど湿り気がなく、あたかも乾いた砂利の中に電極を埋設している感があった。チタン板を埋めるために深さ 50cm 程度の穴を掘り、底を平らにならし、ベントナイトと塩水を入れてから、その上にチタン板を水平にして埋設、さらに塩水をかけるなどしてから埋設した。しかし、接地抵抗を期待していたほど下げることができず、1MΩ 程度であった。

また、通常よく使用されるビニル系のケーブルの被覆素材は低温では硬直し、柔軟性を失ってしまう。特に電極のプリアンプから電極本体であるチタン板をつなぐために用いたケーブルは、耐寒使用でなかったため、被覆素材がすぐに割れたり折れたりしたので、旅行中は毎日のように補修が必要であった。Phoenix Geophysics 社で準備された専用の磁場ケーブルや電場ケーブルは低温に強く、トラブルはなかった。

収録装置の電源にはシール型鉛蓄電池 (BTR 製 G70EP: 12V: 70Ah) を用いた。この型のバッテリーは低温での使用にもある程度の定評があり、現在リュツォ・ホルム湾沿岸の野外で自然地震のモニタリングでも使用されている。しかし、氷点下 40° を下回るような条件のもとでは電流を使い切って電圧が下がり始めると急激に電圧降下が起こるらしい。Phoenix 社の MTU-5 システムでは時系列データファイルの他に測定条件の種々の情報が書かれるテーブルファイルが生成されるが、バッテリーダウンが急激に起こる場合、このテーブルファイルが全く生成されないようである。それでも時系列データはファイルとして存在するが、Microsoft 社の Windows XP システム上で見ると隠しファイルになっており、一見時系列データファイルが存在しないように見える。MTU-5 システムでは時系列データのある時間ごとに区切ってファイルを生成することも可能であるが、測定した当時は観測の最初から終わりまで 1 つの時系列データを作る方法しか理解していなかった。MTU-5 システムには SSMT2000 と呼ばれる時系列に対して一次処理を行い、サウンディングカーブを描くためのデータを生成するソフトが用意されているが、データ記録開始時刻などが記されたテーブルファイルがないと全く

解析できない。このような急激なバッテリーダウンが起こったのは H176, H184, HM95, HM117 の 4 観測点であった。これらのデータについては、幸いにも測定条件が同じでデータ取得開始時刻が違うだけのテーブルファイルを使用し、データ取得開始時刻を書き換えると SSMT2000 で処理を行うことができた。テーブルファイルはバイナリ形式で書かれているが、ダンプ表示をするとデータ取得開始時刻が書かれている場所を類推することができる。

旅行中は雪上車 (SM100) に備え付けの電源からバッテリーを繰り返し充電したが、雪上車の中が十分に暖まっていないとバッテリーに十分な電流量をリチャージすることができないこともわかった。

4. データから得られたサウンディングカーブ

得られたデータのサウンディングカーブは、エラーバーが非常に小さいものもあれば、一見してサウンディングカーブの形がわからないほどエラーバーが大きいものもあり、データのクオリティのばらつきが大きかった。本報告書の末に付図 1~8 として一次処理されたサウンディングカーブの例をいくつか示す。各付図の上段は周波数に対する見掛比抵抗、下段は周波数に対する電場と磁場の位相差である。サウンディングカーブ中、緑の三角で表したものは電場の磁北成分 E_x とそれに直交する地磁気に対して東向きの磁場成分 H_y から得られた要素で、黄色の三角で表したものは磁場の磁北成分 H_x とそれに直交する地磁気に対して東向きの電場成分 E_y から得られた要素である。

付図 1~4 で示したサウンディングカーブはエラーバーも小さく、良好なデータが得られていると言って差し支えない。周波数が数 Hz~数百 Hz 付近では見掛比抵抗が 1 万 Ωm を超えるが、これは絶縁体に近い比抵抗を持つ氷床が存在するためである。周波数がそれより高い部分では急激に見掛比抵抗値が小さくなるが、これはインピーダンスが大きいために変位電流項 (誘電率の影響を受ける) が効いているもので、表層の見掛比抵抗が小さいわけではないものと考えられる。

付図 5, 6 はサウンディングカーブのエラーバーが大きく、付図 7, 8 はさらに深刻である。磁場と電場の時系列データを見ると、このばらつきの原因は磁場ではなく電場に

あるようだ。磁場の時系列データには周期が 10 数秒程度の波が卓越していることが多かったが、エラーバーの小さい良好なサウンディングカーブが得られる観測点では電場データにもその周期の波が見て取れる。しかしサウンディングカーブがうまく決まらない観測点の電場の時系列にはそれが見られない。クオリティのよくない観測点での電場記録は周期が数秒より短く、磁場とは無関係で振幅も大きいようである。

サウンディングカーブから各観測点のデータクオリティを ○ (良), △ (やや悪), × (悪) に分類し、地図上に記したのが図 2 である。

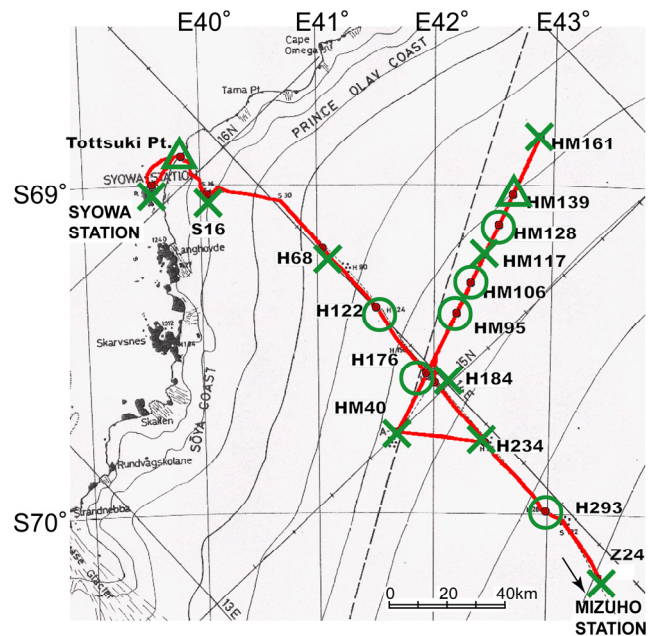


図 2 各観測点におけるサウンディングカーブのデータクオリティ; ○: 良, △: やや悪, ×: 悪

当初、データクオリティのよくない原因は帯電した雪の粒子による影響の可能性があったと考えていた。南極大陸上では天候の穏やかな日でも、雪面上で弱い地吹雪があることが多く、雪 (氷) の粉が観測点付近の空中を飛び交っている状態になっている場合が多い。雪の粒が帯電していたとすれば、観測データに影響を与えるものと考えられる。この場合は電場より磁場への影響が大きいと考えるのが自然であるが、時系列データを直接見る限り磁場データには問題無く、目下のところ、帯電した雪の影響はそれほど大きくないものと思われる。旅行中は毎日定時の

20 時(昭和基地時間:UT+3 時間)に昭和基地と HF 帯 (3024.5kHz, 4540kHz)の無線交信を行う関係で、少なくとも毎日 20 時の気温や天候の記録が残っている。吹雪など天候とデータクオリティとの関係をチェックしたが、特に関連性はないようである。

今回使用した電場用のプリアンプには埋設した電極を 1m 程度の短い導線で直結し、MTU-5 から 50m 長の専用の電場ケーブルを用いた。専用の電場ケーブルは MTU-5 本体から安定してプリアンプに電場を供給するためのものである。このような電場ケーブルを使用していることに加え、電場ケーブルとチタン板電極の間にプリアンプが接続されているため、電極間の接地抵抗を直接測定することができない。収録装置から東西南北の各電極まで 50m の専用ケーブルを延ばして使用しているため、南北成分(Ex)と東西成分(Ey)の電場のダイポール長は 100m である。別に 100m の導線を準備し、電極同士を直結させて接地抵抗を測定するのであるが、厳しい気温条件のもと、時には吹雪の中で作業する必要があるのではほとんどの観測点で接地抵抗をチェックするのを怠った。接地抵抗をたまたま測定した場所では接地抵抗(電極間の電気抵抗)の値は 1M Ω 程度であった。この場所ではデータクオリティは良かったが、目下のところデータクオリティの悪い場所は接地抵抗を下げきれなかった可能性があるものと考えている。しかしながら、クオリティの悪かった観測点においても目視したところ表面の雪の状態についてはクオリティの良かった観測点との違いは見られない。

第 42 次南極観測での山崎(2002)による MT 探査は南極の夏季にリーセルラルセン地域で行われたが、大部分の観測点はモレーン(氷河堆積物)上であった。しかし、湖面の氷上で観測された場合もあった。このときも同様なチタン電極を用いたが、接地抵抗を 100 Ω 以下に下げることができたらしい。このときは海からの塩分により氷の電気抵抗が小さかった可能性があることと、夏季であるのでこの地域では気温も氷点下摂氏 20 $^{\circ}$ は下回らなかったと考えられる。

Wannamaker et al. (1996) や Wannamaker et al. (2004) では大陸の内陸地域で観測を行ったが、観測された時期から推測すれば気温は氷点下摂氏 20 $^{\circ}$ 程度であったものと考えられる。

今回の観測ではほとんどの観測点で氷点下 30 $^{\circ}$ を下回り、時には氷点下 50 $^{\circ}$ 近くになった。実証実験を行ったわけではないが、現場での感覚としてこの気温の差が電極の接地抵抗に影響しているのではないかと考えている。もしデータクオリティに電極と雪面との接地抵抗が大きく効くのであれば、今後は接地抵抗をいかに下げるかのさらなる工夫が必要である。

広帯域 MT 観測装置 MTU-5 のうち 1 台を昭和基地内に設置し、この水平成分の磁場データを用いてリモートリファレンス処理を行った。しかしながら、どちらかと言えばリモートリファレンスを用いないローカル処理の方がサウンディングカーブが滑らかであり、エラーバーの大きさも小さい。昭和基地ではさまざまな大型観測機器が稼動しており、発電機をはじめ、電気を発生させたり使用したりする生活用の機器が密集しているせいでリモートリファレンス点の磁場データのクオリティがよくなかった。我々が旅行中に昭和基地で MTU-5 のバッテリー交換やデータ交換を手作業で行う必要があったが、昭和基地での作業人員の安全確保や作業効率の面を考慮し、基地から離れた電磁場ノイズの少ない場所でのリモートリファレンス観測を今回は断念した。しかしながら、基地内やその周辺のノイズ調査を行えば、もう少しクオリティのよいリファレンスデータを得ることができる可能性は残されている。

MT 法のような周波数領域で解析を行う手法では時系列データをいくつかのセクションに区切って周波数解析を行った後、(加重)平均操作を行いスペクトルを算出するのが普通である。ある時間帯のデータにノイズが多い場合、タイムセクションの取捨選択を行えば望ましい結果が得られることが多い。この作業をエディティングと呼んでいるが、エディティングを行えばサウンディングカーブをより滑らかにすることができた。

付図に示したサウンディングカーブ群はどれもリモートリファレンスを行わないローカル処理であり、エディティング処理後の結果である。

5. 1 次元の比抵抗構造の例

データクオリティの面である程度厳しい面があるが、MT 解析ソフト Geotools MT を用いて Occam インバージョンによる 1 次元解析を行った。みずほ高原内陸部の観測点は

どこでも表層に氷床が存在するということが共通で、観測点間隔もある程度離れているため、1次元解析でも妥当な構造が出ると期待できる。また、大陸内陸部の雪面にはサスツルギと呼ばれる風紋があるが、観測点の展開範囲では雪質は均質であると考えられるのでスタティックシフトの影響も小さいものと予想される。図3に観測点 H176、図4に H293 の1次元構造の例を示す。

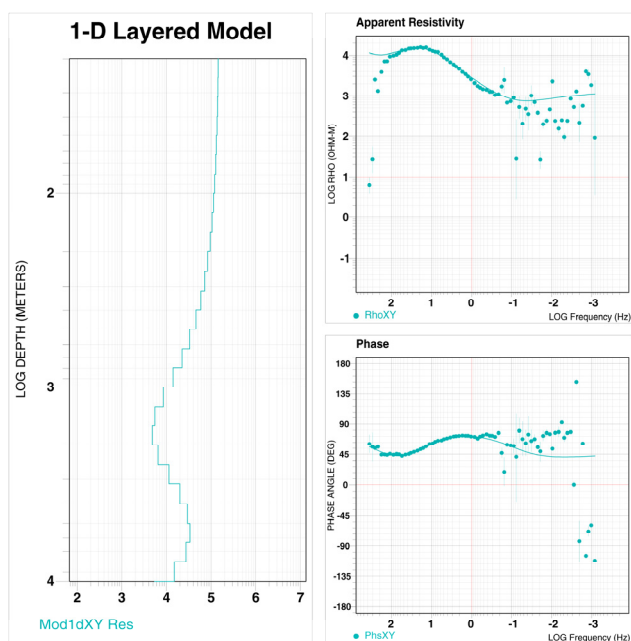


図3 観測点 H176 における1次元構造

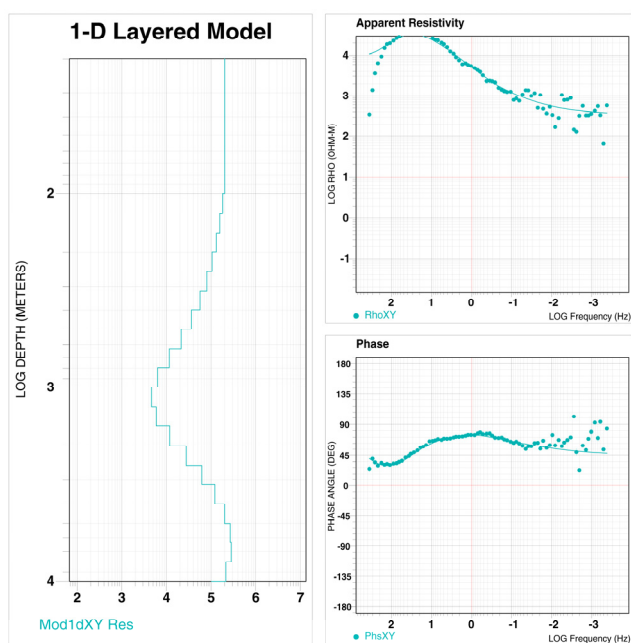


図4 観測点 H293 における1次元構造

図3、図4ともに Ex と Hy を用いたものである。稿末の付図のサウンディングカーブ群を見てもわかるように、2つのサウンディングカーブのスプリッティングが小さいため、片方の成分のみを使用した。見掛け比抵抗、位相差ともに観測値を塗りつぶした丸印で、モデルによる予想値を曲線で示した。前のセクションで言及したように、周波数の高い(数百 Hz 以上)の部分の急激な見掛け比抵抗の降下はモデルで再現する必要はない。

H176 観測点における図3、H293 における図4の両モデルとも、浅い部分は 10 万 Ωm の比抵抗値を示すが、この部分は大陸の厚い氷床と考えるとよい。両モデルとも、深さ 1km 付近で比抵抗値が最小になるが、この部分より深部が氷床下の地殻の比抵抗を反映していると考えられる。比抵抗の極めて高い氷床部分とその下にある地殻の比抵抗はその境界部で急激に比抵抗が変化すると考えてモデルを作ることも考えられるが、この稿ではこの比抵抗が滑らかに変化するモデルから類推できることを述べるにとどめる。

両モデルでスタティックシフトの影響がないと考えると、表層から 1~2km 付近への比抵抗の降下の度合いが微妙に違う。これは両地点で氷床の厚さの違いや氷床下部から氷床直下の地殻比抵抗の違いを反映している可能性が高い。データとモデルのフィッティングについてもさらに考慮する必要があるが、さらに深部の比抵抗構造も両モデルで違いが見られる。

これまで、みずほルート上では人工地震探査が行われ、最近では第 41 次~43 次の南極観測でも今回の MT 探査の測線である H 測線、HM 測線を含む人工地震探査が行われた。これらの人工地震探査の結果では H176 に近い H184 付近で氷床と地殻の境界の深さ(Tustsui et al., 2001 など)がアイスレーダーによる深さ(Fujita et al., 1999)とが一致しないという議論があった。残念ながら H184 における MT データはクオリティが悪いため使えないが、H176 のとその周囲で使用可能な MT データの解析により、この問題への電磁探査からの一石を投じることも頭に入りたい。

データクオリティのよくないデータも多い状況ではあるが、現状では更なる解析にも十分に耐えるデータが取得できている。残念ながら現在のところ十分な解析が進んで

いないが、筆者の手元の他の MT のデータをも含め、解析作業を進めてゆきたい。

また、極地域における電磁場ソースの MT 探査に与える影響 (Viljamnen et al., 1993 など) についての考察を加えたり、鉛直磁場データを用いて GDS (Geomagnetic Depth Sounding) 解析を行うなどの作業も残されている。

謝辞

第 46 次南極地域観測隊に参加し、3 週間に及ぶ旅行を含む本観測を遂行することができた。観測旅行に先立ち、渡邊研太郎越冬隊長をはじめ、総務担当の佐藤建さん、機械担当主任の周藤美津秋さんその他の方々には度々のミーティングにより観測計画の細部について検討していただいた。観測隊の調理担当の原田輝一さん、岸本栄二さんには旅行中の食料の予備を含めての調達に際し大変お世話になった。旅行中は通信担当の小林正幸さん、濱本初美さんには毎日定時の昭和基地への無線交信で様々なお願いを聞いていただいた。旅行開始直後はやや体調を崩す旅行隊員も現れたが無線通信を通じ長谷川恭久医師からは適切な助言をいただいた。旅行の出発時には古崎睦さんをはじめとするドームふじ方面への旅行隊から雪上車の燃料を補給していただいたりして大変お世話になった。国内からは HM ルートについての情報を鹿児島大学の宮町宏樹教授から情報やアドバイスをいただいた。以上に列挙しきれないの方々からいろいろと便宜を図っていただいたことをここに感謝したい。

参考文献

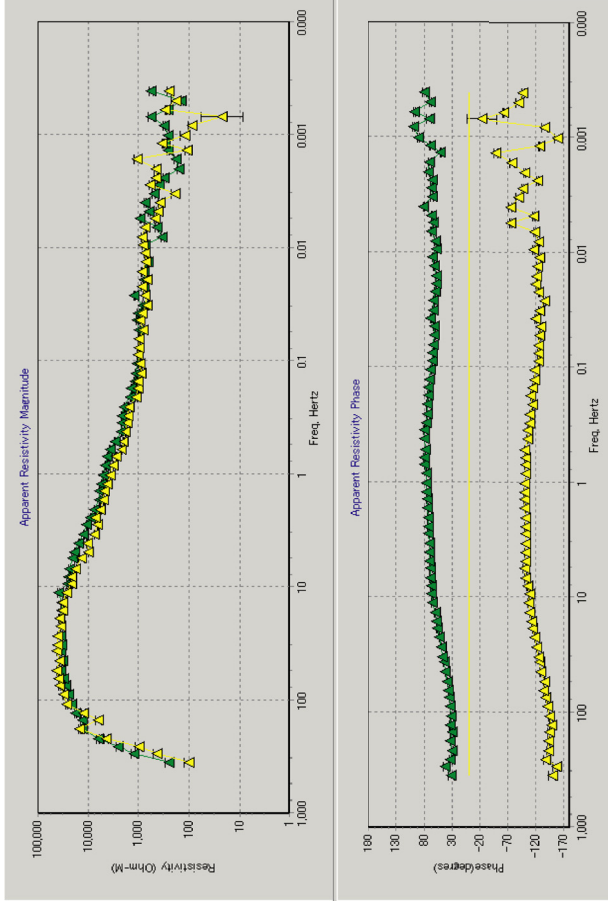
- Fujita, S., Maeno, H., Uratsuka, S., Furukawa, T., Mae, S., Fujii, Y. and Watanabe, O. (1999): Nature of radio echo layering in the Antarctic ice sheet detected by two-frequency experiment, *J. Geophys. Res.*, **104**, 13013-13024.
- Tsutsui, T., Murakami, H., Miyamachi, H., Toda, S. and Kanao, M. (2001): P-wave velocity structure of the ice sheet and the shallow crust beneath the Mizuho traverse route, East Antarctica, from seismic refraction analysis, *Polar Geosci.*, **14**, 195-211.
- Viljanen, A., Pirjola, R. and Hakkinen, H. (1993): An

attempt to reduce induction source effects at high latitudes, *J. Geomag. Geoelectr.*, **45**, 817-831.

Wannamaker, P. E., J. A. Stodt and Olsen, S. L. (1996): Dormant state of rifting below the Byrd Subglacial Basin, West Antarctica, implied by Magnetotelluric profiling, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 2983-2986.

Wannamaker, P. E., J., Stodt, A., Pellerin, L., Olsen, S. L. and Hall, D. B. (2004): Structure and thermal regime beneath South Pole region, East Antarctica, from magnetotelluric measurements, *Geophysical Journal International*, **157**, 36-54.

山崎明 (2002) : 東南極ナピア岩帯の比抵抗構造, 第 22 回南極地学シンポジウムプログラム・講演要旨.



付図 1 測点 H293 の周波数に対する見かけ比抵抗(上段)と位相差(下段)の曲線



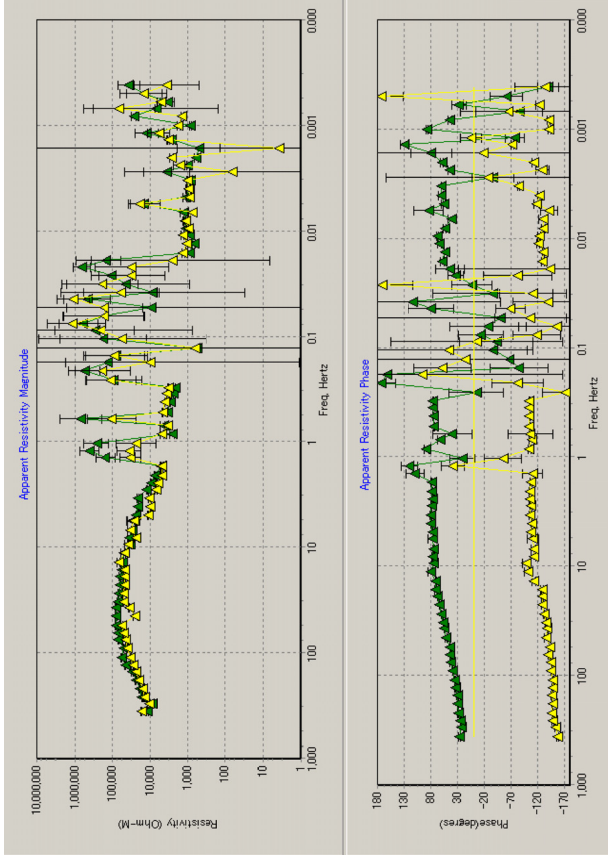
付図 3 測点 HM106 の周波数に対する見かけ比抵抗(上段)と位相差(下段)の曲線



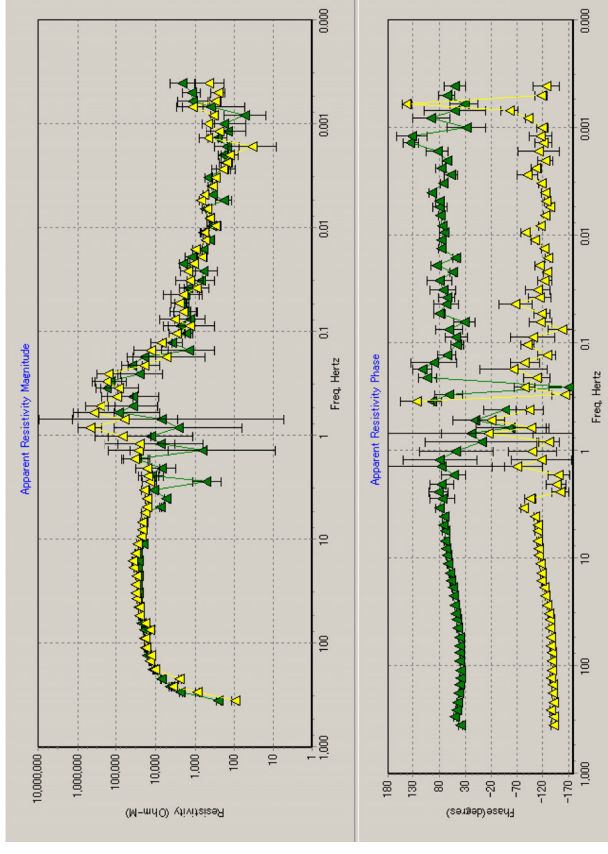
付図 2 測点 HM95 の周波数に対する見かけ比抵抗(上段)と位相差(下段)の曲線



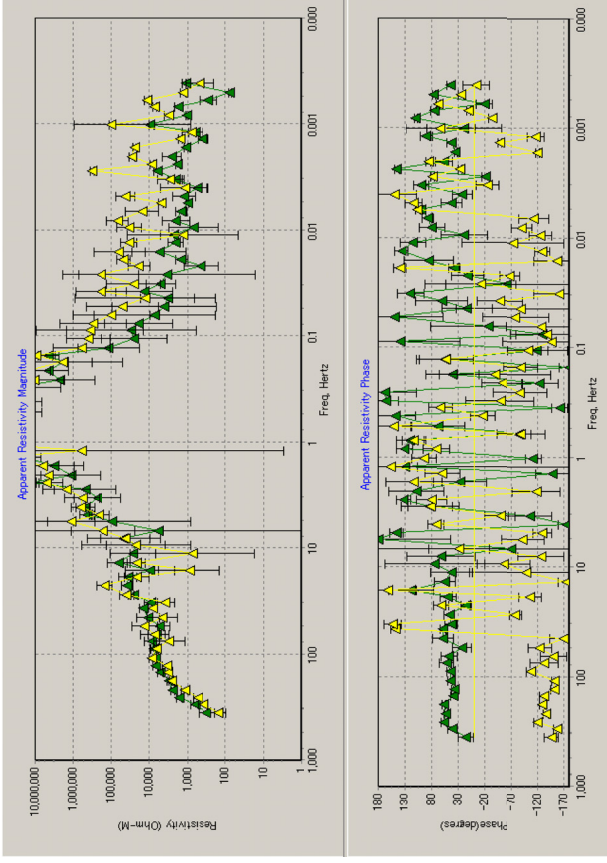
付図 4 測点 H176 の周波数に対する見かけ比抵抗(上段)と位相差(下段)の曲線



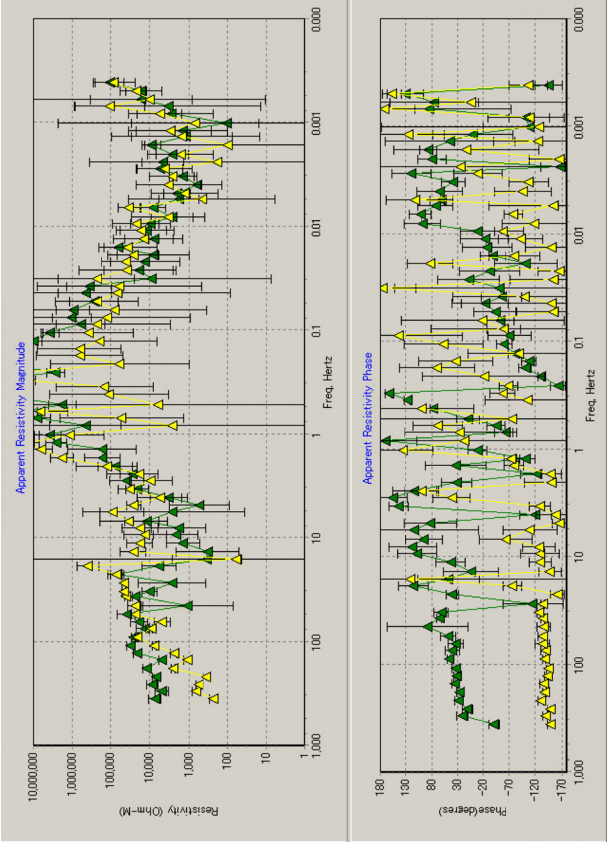
付図 5 測点 HM117 の周波数に対する見かけ比抵抗(上段)と位相差(下段)の曲線



付図 7 測点 H234 の周波数に対する見かけ比抵抗(上段)と位相差(下段)の曲線



付図 6 測点 H184 の周波数に対する見かけ比抵抗(上段)と位相差の曲線(下段)



付図 8 測点 Z24 の周波数に対する見かけ比抵抗(上段)と位相差の曲線(下段)