

広帯域MT法による千屋断層深部比抵抗構造調査（序報）

地殻比抵抗研究グループ

要旨

1998年に地殻比抵抗研究グループは、東北地方脊梁山地を横切る測線上で広帯域MT観測を行い、下部地殻に至る比抵抗構造を解明した。横手盆地から花巻に至る東西45kmの測線上に、15点の測点を配置した。この測線は、西部では千屋断層を、東部では北上低地西縁断層帯を横切る。2次元解析の結果、千屋断層の破碎帯と思われる低比抵抗異常が深度7~8kmまで続いていること、北上低地西縁断層についても深度5~6kmまで傾斜する低比抵抗異常がみられることがわかった。また地殻深部には、測線中央部で低比抵抗層が盛り上がっている。これは、下部地殻がdelaminationを起こし、めくれあがっている構造を示している可能性がある。この盛り上がった低比抵抗構造の延長に千屋断層があり、地殻深部の構造と地表の活断層とが関係していることを示すものと考えられる。

キーワード：断層、広帯域MT法、比抵抗構造

1. はじめに

地震予知計画に基づく内陸地震発生機構研究の一環として、地震断層や活断層とその周辺部の構造調査が幾つかの地域において実施されている。地震予知事業に参加する各大学と、全国の大学・研究機関の電磁気研究者によって構成される地殻比抵抗研究グループはこの事業に配慮しながら、電磁気共同観測を実施している。これまでにえびの群発地震震源域、野島断層、長野県西部地震震源域などにおいて、広帯域MTによる比抵抗構造調査を中心として、各種の調査を実施してきた。1998年度調査は、1896年陸羽地震(M7.2)の地震断層（千屋断層）の深部構造調査を中心課題として実施された。

千屋断層を中心とした脊梁山地周辺では、微小地震活動をはじめ自然地震・人工地震を使った屈折法・反射法地震探査、重力探査などによる構造調査、GPS網密観測網による地殻変動観測など各種の観測が実施されていて、地殻活動の静的・動的な特徴が解明されようとしている（長谷川，1997；岩崎ら，1997；三浦，1997）。広

帯域(周期0.01~1000秒)MT法から得られる比抵抗構造は、地震学的な構造とは独立な情報であり、かつ地殻深部の流体の分布を反映するもので、造構運動を理解する上で大変に有益である。

この地域の電磁気的な調査では、1980年に、科学研究費(自然災害特別研究、代表者乗富一雄)の交付を受け、千屋断層とその周辺において比抵抗探査(直流法、ELF-MT法、VLF-MT法)、自然電位(SP)分布調査、地磁気変化異常調査、全磁力異常調査など、各種の調査が実施され、断層特有の電磁気現象・電磁気構造が見出されている(乗富，1982)。しかし、この調査に用いられた手法・器材の制約から、得られた結果は千屋断層ごく浅部の構造を反映するものだけであった。そこで、1998年度の観測に際しては、千屋断層の深部構造探査に焦点を絞り、脊梁山地を含むその周辺部の比抵抗構造を明らかにすることによって、この地域の地殻活動・造構運動における千屋断層の役割を調べ、地震発生機構理解の一助としたいと考えた。また、あわせ

て千屋断層周辺での自然電位分布を詳しく調査し、断層と自然電位分布の関係をより一層明確にすることを試みた。観測は1998年9月21日から10月5日にわたり実施された。

この報告では、広帯域MT法を用いた千屋断層深部比抵抗構造の調査について、得られたデータとその速報的解析結果について報告する。

2. 千屋断層と脊梁山地周辺の地殻活動

東北地方は島弧－海溝系構造の典型として知られている。脊梁山地は東西圧縮場の東北日本弧の中央部にあって、その東西両翼にある逆断層型の活断層の活動により現在も標高を高めつつあると考えられている。活断層研究会 (1991) によれば、観測地域付近では東の北上低地西縁断層帯と、西の横手盆地東縁断層帯がその断層にあたる。また、これらふたつの活断層帯の間に雫石盆地西縁－真昼山地東縁断層帯があり、やはり活断層としての活動が見られる。近年の活動では、陸羽地震の際に千屋断層と同時に活動した川舟断層や、1998年9月の雫石付近の地震(M6.1)はこの雫石盆地西縁－真昼山地東縁断

層帯の活動である。また、1970年秋田県南東部の地震(M6.2)もこの断層帯の南への延長上での地震活動である。

東北日本弧の内陸浅発地震の震源は、モホ面近傍に発生する例外的な地震を除いてほとんど地殻上部にある(長谷川ら, 1991)。さらに最近の研究ではこの地域の地震活動の下限は400℃の等温面に相当するともいわれている(山本・長谷川, 1997)。これまでの研究では、東北大学微小地震観測網による定常観測の成果が用いられているが、この観測網では、活断層や地震断層の位置と比較したり、地殻構造との詳細な関係を見るには精度が不十分である。現在行われている東北脊梁山地合同地震観測の稠密地震観測網による高精度の震源決定が進められているので(例えば、松原ら, 1998)、その結果がまとまれば地殻構造との関係がより正確に把握されることと思われる。また、この合同地震観測には、屈折法・反射法地震探査も含まれているので、これまでの成果に較べて格段に高精度の地震波速度構造が得られている(岩崎ら, 1998; 佐藤・平田, 1998)。さらに、人工地震

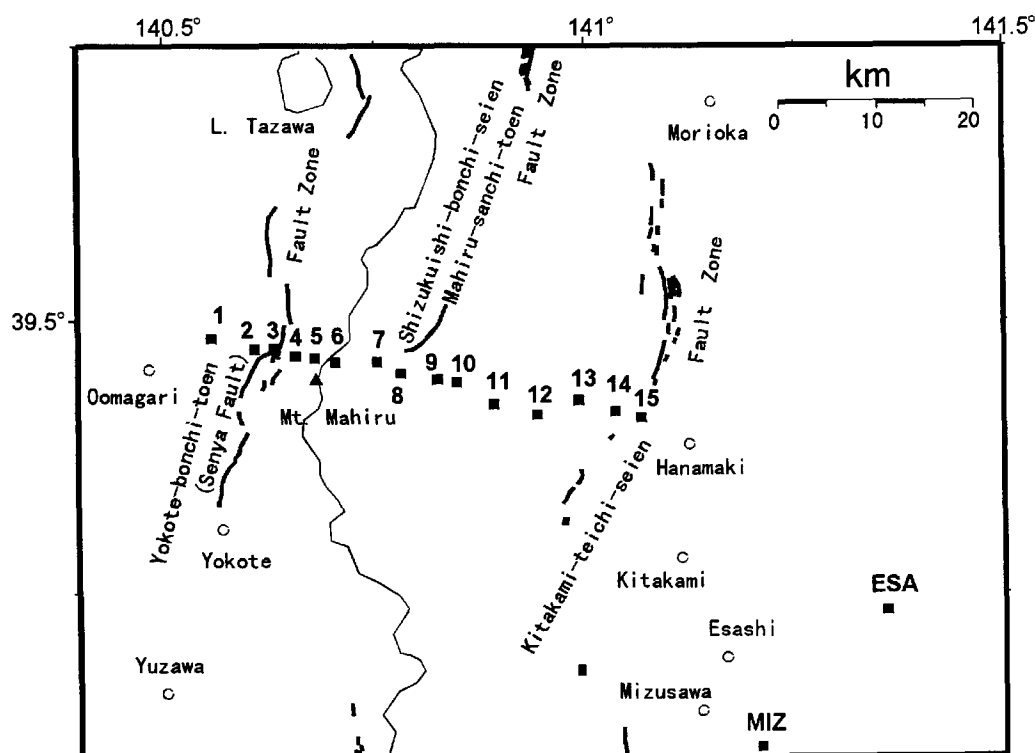


Fig. 1 Location of wide-band magnetotelluric sounding and fault zones. Closed squares marked ESA and MIZ are permanent sites operated by the Geographical Survey Institute.

や自然地震を利用した地震波散乱体のイメージングや反射法地震探査では、千屋断層や北上低地西縁断層の断層面付近や、下部地殻内に地震波を散乱させたり、反射する構造があることが指摘されている（浅野ら，1998，浅野ら，1998；佐藤，1998）。この散乱体が地殻内の水やマグマのような液相の分布を意味するものかどうかについては、地震観測だけでは決めることができない。地震観測から得られたこのような構造的特徴は、比抵抗構造と対比することで一段と理解が進むものと期待される。

3. MTデータの取得

測線は、東西方向に45kmで、横手盆地から脊梁山地を横断し、花巻にいたる。測点はほぼ均等

に15測点配置した（Fig. 1）。測定には、GPS時計で同期した10台の広帯域MT法測定装置を用いた。これらのうち5台は、磁場3成分および電場2成分を測定するユニット（Phoenix V5 4台とPhoenix MTU5 1台）である。残り5台は電場2成分のみ測定するユニット（Phoenix MTU2E）である。

これらは周期0.03秒から1800秒までをカバーする。測定は約2週間にわたって行われた。電磁場5成分を取得した測点同士では、相互にリモート・レファレンス処理が行われた。また、電場のみの測定点では、磁場データとして、最も近い地点の5成分観測点の磁場を使用し、さらにより遠方測点の磁場データを用いることによって、リモート・レファレンス処理をした。各観測点

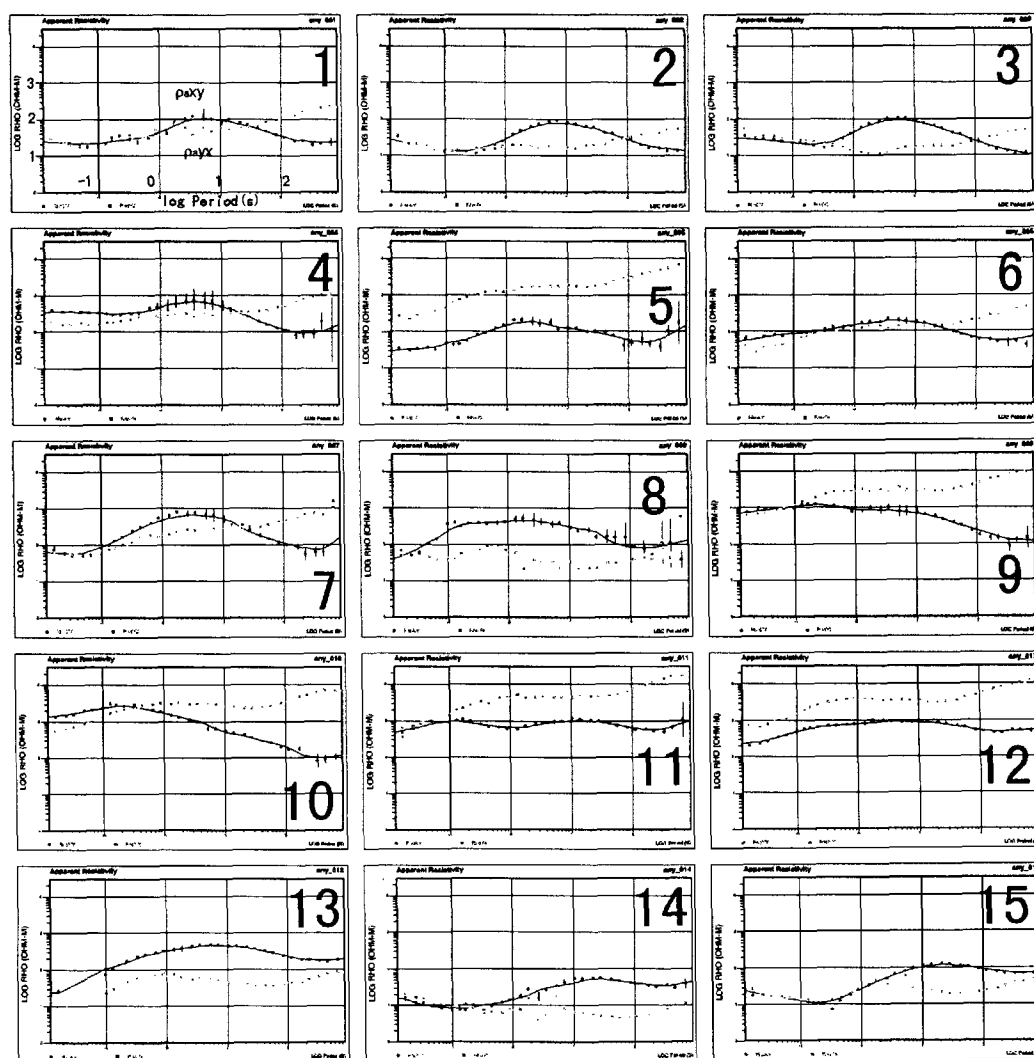


Fig. 2 Curves of observed apparent resistivity at each site. Principal axes(x,y) are oriented to the north and to the east, respectively. Error bars show standard deviation ($\pm \sigma$) of data.

において、数日間のデータが得られているが、それらを足し合わせたうえで、さらにデータを編集した。主軸（x軸）を南北方向に回転させた場合の見掛け抵抗および位相を、各観測点ごとにそれぞれ、Fig. 2およびFig. 3に示した。データの品質は、ほとんどの測点で周期0.01～1000秒までの範囲で良好である。ただし、測点8のデータが周期1秒以上でややエラー・バーが大きい。また測点7および8では、長周期になると、一方のモードの位相が90度を超え、ガルバニック・ディストーション(Groom and Bailey, 1989)が効いていると思われる。

4. 2次元性の検討

取得されたデータを解析する前に、データが

2次元構造の仮定を許すかどうかを検討した。

Fig. 4は、インダクション・ベクトルの実部を3つの周期について、図化したものである。（磁場を測定した測点は5測点に限られることに注意。）インダクション・ベクトルは、周期1秒付近で最も大きく、その向きはそれぞれ測線中央から離れるように分布している。測線の外側にある横手盆地（測線の西端）と北上低地（測線の東端）の低比抵抗の堆積層が影響していると考えられる。周期100秒では、インダクション・ベクトルの大きさがほとんどゼロとなる。東北地方の北部で見られる、津軽海峡の影響で北向き成分が大きくなる傾向（Ogawa, 1987）は、ここまでは及んでいない。これらのインダクション・ベクトルは、ほぼ南北走向の2次元構造があ

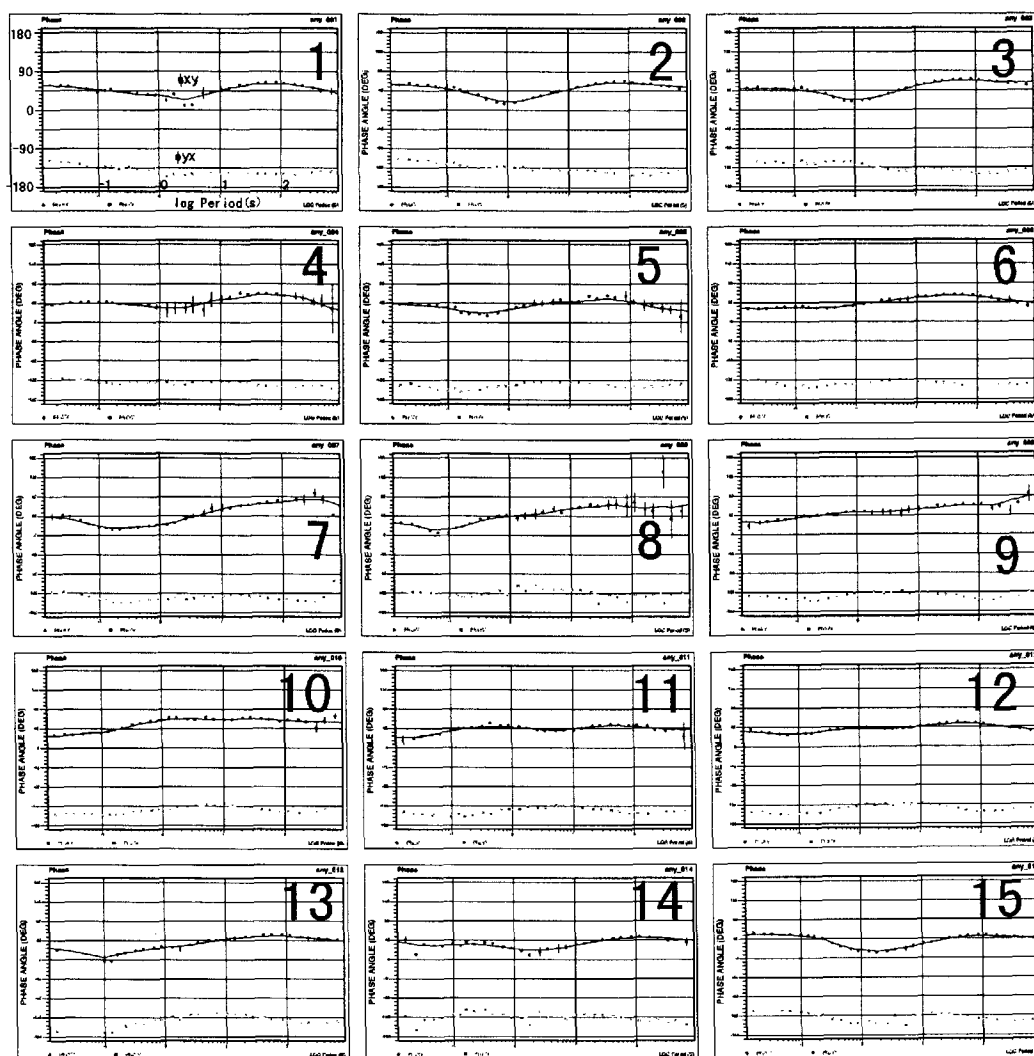


Fig. 3 Curves of observed phase response at each site for the same principal axes as Fig. 2.

ることを示唆する。

次に、インピーダンスから走向を検討するために、Groom and Bailey (1989) のテンソル分解を、各観測点ごと、各周期ごとに行った。Fig. 5に各観測点（測点1から15）ごと、各周期帯ごとにヒストグラムを作成したもの示す。周期10秒よりも長い周期で、広域的に走向方向がそろってくる。Fig. 5の右端のコラムには、全15観測点のヒストグラムの和を示したが、周期10秒以上では、2次元走向はN0~20° Eと推定される。

5. 2次元解析

以上のように、インダクション・ベクトルおよびインピーダンス・テンソルはともに、周期1秒以上ではほぼ南北走向の2次元性を示唆している。プレリミナリーな解析のために、南北方向に走向を取り、インピーダンス・テンソルを回転させた。2次元解析には、Ogawa and Uchida (1996) の方法を用い、2次元構造とスタティック・シフトを同時に解析した。

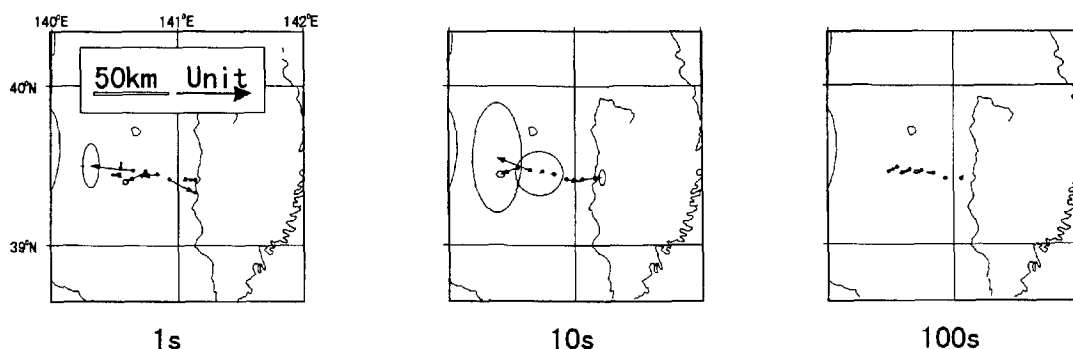


Fig. 4 Distribution of in-phase induction arrows at 5 sites where magnetic field were observed. Estimation errors are shown by ellipsoid at the end point of arrow.

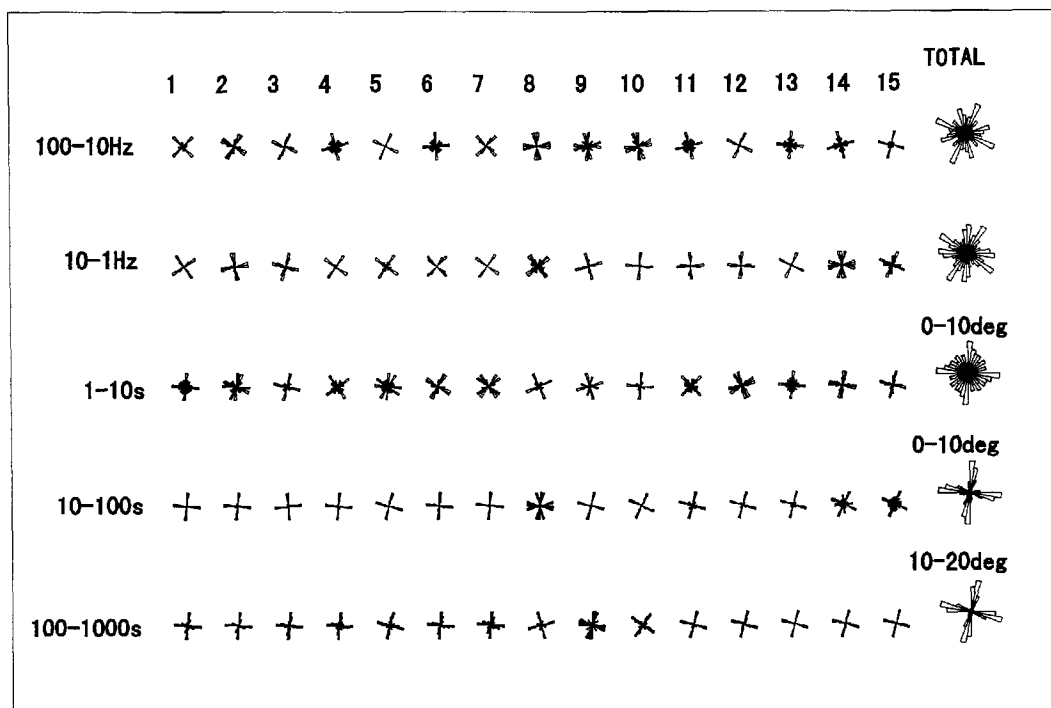


Fig. 5 Rose diagram of the estimated strikes after decomposition. Each row and column represents a decade of frequencies and observation site, respectively. A sum total of all sites is shown at the column of TOTAL. The most frequent direction at each frequency band is described in figures. For each rose, upper direction denotes the north, and the size is normalized. The ambiguity of direction by $\pi/2$ is also shown.

ここでは、TMモードの見掛け抵抗と位相とを観測データとして、インバージョンを行った。インバージョンでは、 $100\Omega\text{m}$ の一様大地を初期モデルとし、構造が最も単純になるような制約条件を付けている。極端に誤差の小さなデータによって解析結果が歪まないようにするため、また計算誤差を考慮するため、見掛け抵抗のerror floorとして10%を仮定した。すなわち10%以下の誤差を持つデータは、強制的に10%の誤差を持つものとした。位相のerror floorも見掛け抵抗の誤差と等価なものを仮定した。10回の反復計算の後、rms errorが1.5まで減少した。見掛け抵抗のerror floorが10%であるから、見掛け抵抗に換算して誤差15%以内でモデル計算値が観測値を説明できていることになる。得られたモデルをFig. 6に示し、フィットをFig. 7に示す。

6. 結果と考察

得られたモデルのうち、5km以浅の比抵抗分布で顕著なのは、測点1~3付近、測点8付近および測点13~15付近での低比抵抗である。この低比抵抗層の分布は屈折法地震探査結果(岩崎ら, 1998)と調和的で、横手盆地、北上低地および沢内盆地地表層にある低速度堆積層が低比抵抗層として現れている。また、測点5, 6付近および測点10~12付近では高比抵抗層が見られる。この高比抵抗層は速度構造との関係は明瞭ではないが、重力異常は高異常域になっている(地質調査所, 1990)。真昼山や四枚平山・八方山な

ど高密度の基盤岩が浅部にあることと対応している。注目すべきことは、千屋断層の深部延長が深度7~8kmまで低比抵抗異常として見られることである。これは断層破碎帯であると思われる。また、北上低地西縁断層帯についても深度5~6kmまで傾斜する低比抵抗異常がみられる。このような断層の深部に至る低比抵抗異常は、少なくとも日本では初めて見いだされた。

プレリミナリーな結果ではあるが、深さ10km付近の構造は、測線中央部で低比抵抗層が盛り上がっている。これは、下部地殻が、めくれあがっている構造を示している可能性がある。この盛り上がった低比抵抗構造の延長部に、千屋断層があり、地殻深部の構造と地表の活断層とが関係していることを示すものと考えられ、興味深い。

7. おわりに

測線の東端(測点15)の南東30kmおよび南南東35kmには国土地理院水沢測地観測所による広帯域MT連続観測点がある。Fig. 1にESA(江刺)およびMIZ(水沢)で示されたふたつの観測所である。これらの観測値を参照データとするリモート・レファレンス処理が現在進められている。また、1998年度の観測でデータ品質が良くなかった測点での再測を含めて、補充観測が計画されている。これらの結果を含め、TEモードをも合わせた解析が実施されれば、この地域の地殻深部の比抵抗構造について、この報告以上

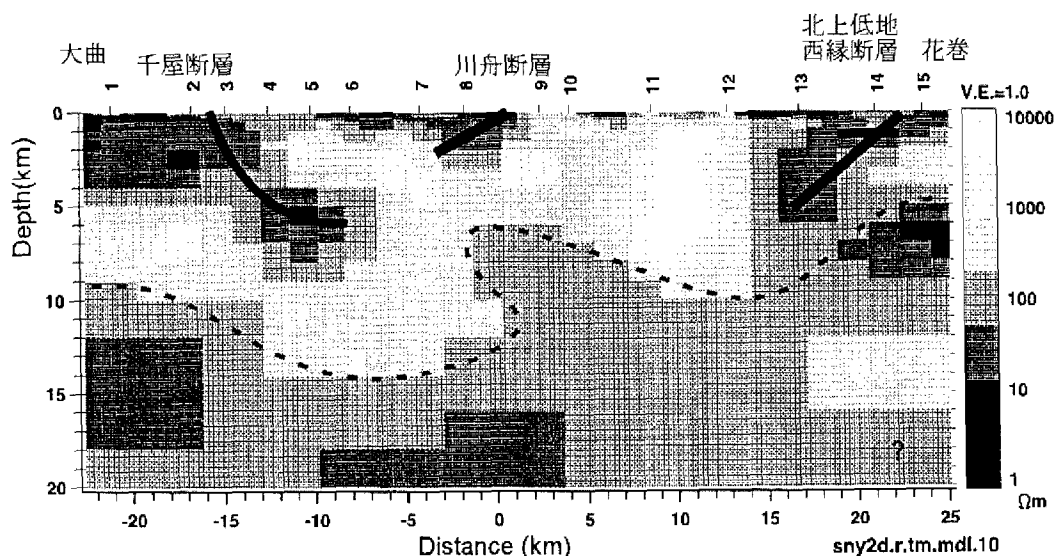


Fig. 6 The two-dimensional resistivity structure obtained by inversion from the TM mode data.

に種々のことが解明されるものと期待される。

謝辞および実験参加者

この観測に際して、下記の機関のご協力をいただきました。ここに記して深く感謝いたします。花巻営林署、湯田営林署、大曲営林署、国土地理院水沢測地観測所、奥羽山荘（太田町）、カナダ国フェニックス社。また、観測に当たっては京都大学防災研究所の断層解剖計画の員等旅費、および東京大学地震研究所の第7次地震予

知計画経費のうち海・プレート境界域のダイナミクスに関する観測研究経費のそれぞれ一部を使用させていただきました。

なお、今回の共同観測（広帯域MT）参加者およびその分担は、次のとおりである。所属機関は観測当時とする。

研究総括：住友則彦（京都大学）

観測点予備調査・交渉：三品正明（東北大学）、
上嶋誠（東京大学）

記録整理解析（1998年電磁気共同観測MTデー

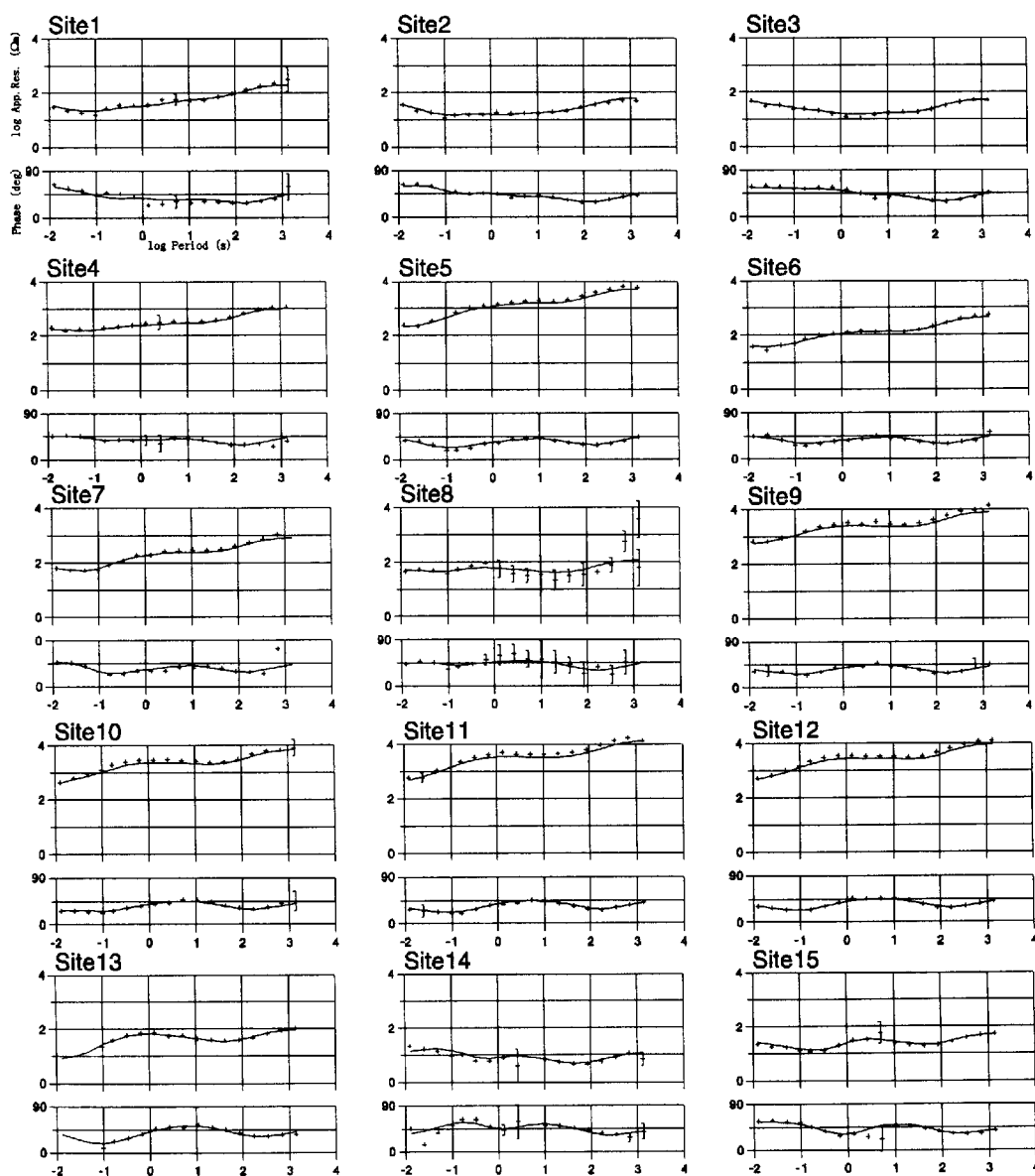


Fig. 7 Calculated apparent resistivity and phase response for TM-mode using modeled structure by inversion.

タ整理委員会)：小川康雄(地質調査所)，後藤忠徳(愛知教育大学)，上嶋誠(東京大学)，笠谷貴史，市來雅啓，大志万直人，坂中伸也(以上京都大学)，高橋幸恵，西谷忠師(以上秋田大学)，高橋優志，本蔵義守(以上東京工業大学)，佐藤秀幸(北海道大学)，村上英記(高知大学)，三品正明(東北大学)

本報告執筆：三品正明(東北大学)，後藤忠徳(愛知教育大学)，小川康雄(地質調査所)
観測：西田泰典，佐藤秀幸(以上北海道大学)，小菅正裕，佐鯉教央，千田良道(以上弘前大学)，西谷忠師，高橋幸恵(以上秋田大学)，三品正明，立花憲司，橋本恵一，長尾栄広，有吉慶介(以上東北大学)，北村保夫，村山賢持(以上東北工業大学)，小川康雄(地質調査所)，笹井洋一，上嶋誠，歌田久司，清水久芳，小河勉，小山崇夫(以上東京大学)，本蔵義守(東京工業大学)，富澤一郎，石井直人(以上電気通信大学)，後藤忠徳(愛知教育大学)，領木邦浩(大阪職業能力開発短期大学校)，住友則彦，大志万直人，中川瀝，矢部征，市來雅啓，笠谷貴史，村上貴久，山崎健一，松村史樹，網田和宏，坂中伸也(以上京都大学)，塩崎一郎，福本隆史(以上鳥取大学)，村上英記(高知大学)

参考文献

浅野陽一・海野徳仁・岡田知己・佐藤俊也・堀修一郎・河野俊夫・伊藤喜宏・中村綾子・小菅正裕・長谷見晶子・長谷川昭(1998)：DATアレイ地震観測による散乱体分布のイメージング—'98東北合同観測—，日本地震学会講演予稿集 1998年度秋季大会，p. 168.
浅野陽一・仁田交市・堀修一郎・海野徳仁・長谷川昭(1998)：97東北脊梁山地合同地震観測で得られたS波反射面，地球惑星科学関連学会 1998年合同大会予稿集，SL-p005.
岩崎貴哉・平田直・佐藤比呂志・吉井敏尅(1997)：97東北脊梁山地合同地震観測—島弧地殻の変形過程と内陸地震テクトニクス解明を目指して—，2。1997東北日本地震探査，日本地震学会ニュースレター，vol. 9，no. 3，pp. 13-15.
岩崎貴哉・加藤亘・武田哲也・関根秀太郎・森谷武男・海野徳仁・岡田知己・長谷見晶子・宮下芳・溝上智子・田代勝也・松島健・宮町宏樹(1998)：屈折法地震探査による東北日本

弧の地殻構造—東北脊梁山地の浅部構造—，日本地震学会講演予稿集 1998年度秋季大会，P163.

活断層研究会(編)(1991)：新編日本の活断層，東京大学出版会，437pp.

佐藤比呂志(1998)：活断層の深部形状を探索，日本地震学会ニュースレター，vol. 10，no. 4，pp. 3-5.

佐藤比呂志・平田直(1998)：活断層の深部構造と日本列島の成立，科学，第68巻，no. 1，pp. 63-71.

地質調査所(1990)：秋田地域重力図(ブーゲー異常)。

乗富一雄(編)(1982)：地球電磁気学的手法による断層活動度の研究4。千屋断層における研究，自然災害特別研究研究成果 No. A-56-2，107pp.

長谷川昭(1997)：97東北脊梁山地合同地震観測—島弧地殻の変形過程と内陸地震テクトニクス解明を目指して—，1。97東北脊梁山地合同地震観測，日本地震学会ニュースレター，vol. 9，no. 3，pp. 12-13.

長谷川昭・趙大鵬・山本明・堀内茂木(1991)：地震波からみた東北日本の火山の深部構造と内陸地震の発生機構，火山，36，pp. 197-210.

松原誠・平田直・酒井慎一・井出哲・山中佳子・久保篤規・羽田敏夫・荻野泉・酒井要・小林勝・橋本信一・井上義弘・三浦勝美・田上貴代子・三浦禮子・李西林・橋田幸治・功刀卓・上村彩・中川茂樹・永井理子(1998)：1998年東北合同観測—北上・千屋断層系微小地震観測—，日本地震学会講演予稿集 1998年度秋季大会，p. 165D.

三浦哲(1997)：97東北脊梁山地合同地震観測—島弧地殻の変形過程と内陸地震テクトニクス解明を目指して—，3。GPS観測，日本地震学会ニュースレター，vol. 9，no. 3，pp. 15-16.

山本明・長谷川昭(1997)：東北地方内陸部の浅発地震の深さ分布，地球惑星科学関連学会 1997年合同大会予稿集，B31-11.

Groom, R. W. and R. C. Bailey(1989)：Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three dimensional galvanic distortions, J. Geophys. Res., 94, 1,913-1,925.

Ogawa, Y.(1987)：Preliminary interpretation on detailed magnetovariational profilings in the

northern Tohoku district, J.Geomag.Geolectr., 39,
559-569.

magnetotelluric inversion assuming Gaussian static
shift, Geophy.J.Int., 126, 69-76.

Ogawa, Y. and T. Uchida(1996): A two dimensional

PRELIMINARY RESULTS OF WIDE-BAND MAGNETOTELLURIC SOUNDING IN SENYA-FAULT AREA, NORTHEASTERN JAPAN

Research Group for Crustal Resistivity Structure, Japan

Synopsis

Research Group for Crustal Resistivity Structure, Japan conducted a wide-band magnetotelluric observations across the backbone ranges in Tohoku district, Northeastern Japan. The number of observation sites is 15. The sites are aligned on a 45km long profile running from Oomagari city (Akita) to Hanamaki city (Iwate). The profile goes across the Senya fault in the west and the western margin of the Kitakami lowland fault zone in the east.

A two dimensional inversion revealed the following features.

- (1) Low resistivity anomaly extends from the surface to a depth about 7-8km, implying a fracture zone of Senya fault.
- (2) Similar dipping conductor exists corresponding to the western margin of the Kitakami lowland fault zone.
- (3) In the central part of the profile, the top of the conductor is elevated possibly implying a delaminated lower crust.