

太田断層における広帯域MT観測

坂中伸也・西谷忠師

秋田大学工学資源学部地球資源学科応用地球科学教室

Wide-band Magnetotelluric survey at the Ota fault, Northeast of Japan

S. Sakanaka and T. Nishitani

*Institute of Applied Earth Sciences,
Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University, Japan*

1. はじめに

近年の地殻活動域における比抵抗構造探査により、比抵抗構造の境界部に地震が発生することが一つの典型パターンとして認識されつつある。低比抵抗の値は地殻内流体、特に水の存在を示すと考えられ、その水が周辺部へ移動することに伴って微小地震が起こる、と解釈することもできる。

千屋断層付近の比抵抗構造を明らかにするために、CA (Conductivity Anomaly) 研究グループによる広帯域 MT 法 (Broad-band Magnetotelluric Method) による共同観測が 1998 年から 1999 年にかけて行われた。延長約 90km にわたる東西測線に沿って、計 34 測点で広帯域 MT 観測がなされ、40km 程度の深さまでの比抵抗構造が求められた (Ogawa *et al.*, 2001; 高橋, 2000)。この地域でも、比抵抗構造の境界部で微小地震が発生することがほぼ確認された。

さらに詳細な比抵抗構造を把握し、地震発生と比抵抗構造の関係を明らかにする目的で、秋田大学では引き続き周辺地域で広帯域 MT 法による観測を行っている。観測、構造解析とともに継続中であるが、現段階における成果を報告する。

2. 横手盆地東縁断層帯

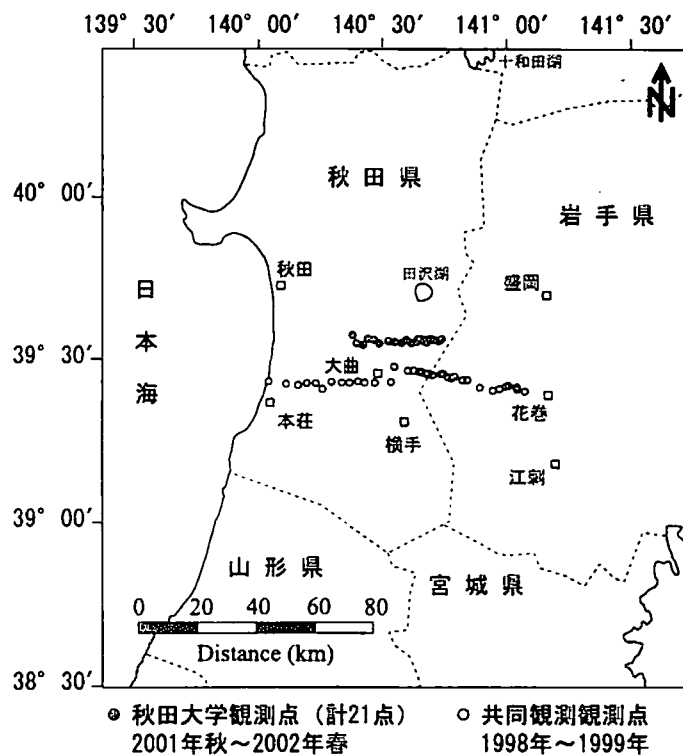
秋田県南西部にある横手盆地と奥羽山脈の境界には、横手盆地東縁断層帯が発達している。これらの活断層はいずれも南北方向から北北東—南南西方向の走行をもつ低角逆断層である。1896 (明治 29) 年の陸羽地震の際、横手盆地東縁の北部に、地震断層として千屋断層、太田断層、白岩断層、生保内断層が現れた (松田ほか, 1980)。奥羽山脈の西側に現れた地震断層を一括して千屋断層とも、また、奥羽山脈の西側に分布する断層群を総称して千屋断層系とも呼ばれている。

3. 観測概要

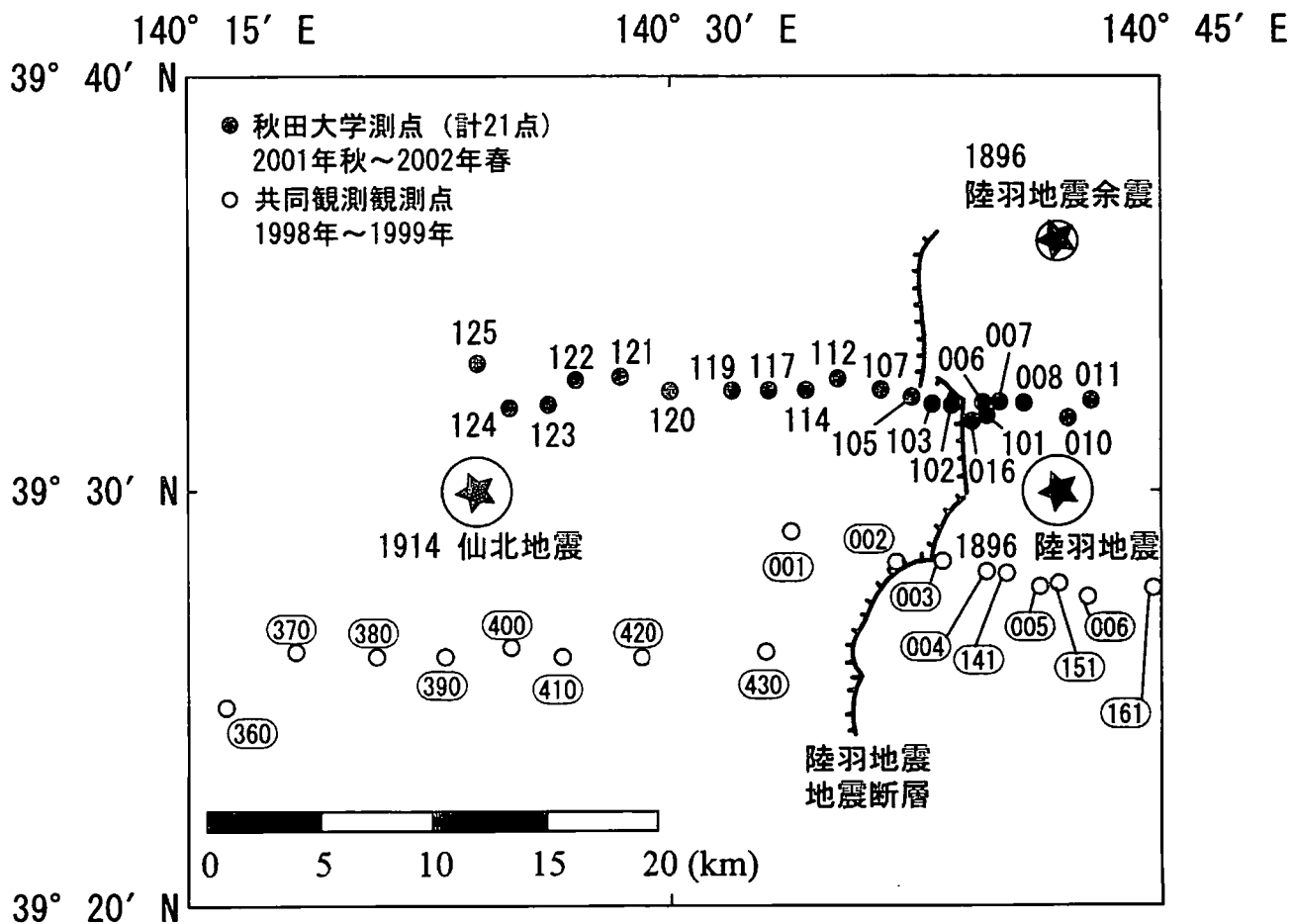
今回の広帯域 MT の観測点及び 1998, 1999 年に行われた CA グループによる共同観測の観測点を第 1 図に示す。2001 年秋から 2002 年春にかけて行われた秋田大学の観測点を黒丸印で、共同観測による観測点を白丸印で示した。今回の観測では、共同観測の測線とほぼ平行な東西測線を、数 km 北に設定し、ごく表層の比抵抗の影響を考慮に入れることができるように、それぞれの観測点間隔を密 (2km 程度) にした。

観測点周辺の拡大図を第 2 図に示す。計 21 点の今回の観測点と、図の領域内にある共同観測点を観測点名 (観測点番号) とともに示した。今回の観測点名と、共同観測の観測点名が同じものもあるので、区別するため共同観測の観測点番号を線で囲んである。今回の観測点のうち、観測点 011, 010, 008, 007, 006, 016 の 6 観測点では 2001 年 10 月に、残りの観測点では 2002 年 4 月から 5 月にかけてデータを取得した。

共同観測の測線は千屋断層を、今回の観測の測線は太田断層をそれぞれ横切るが、千屋断層と太田断層の境界はほぼ北緯 39° 30' にあたる。太田断層はほぼ斉内川と川口川にはさまれた長さ約 3km の部分を指し、南方延長に千屋断層、北方延長に白岩断層がある。第 2 図には 1896 年の陸羽地震のときに変位したこれらの低角逆断層の位置も示した。また、観測点の周辺で起こった大地震の震央を星印で示した。それぞれの地震の推定マグニチュードは、陸羽地震 M7.2 (1896.8.31)、陸羽地震余震 M6.4 (1896.8.31)、仙北地震 (強首地震) M7.1 (1914.3.15) である。地震断層、大地震の震央については新編日本の活断層 (活断層研究会, 1991) を参考にした。



第1図 広帯域 MT 観測点。



第2図 広帯域 MT 観測点周辺の拡大図。

4. サウンディングカーブと比抵抗モデル

2001年秋、2002年春の広帯域 MT 観測には、Phoenix 社の MTU-5 システムを用い、磁場をインダクションコイル、電場を鉛-塩化鉛電極を用いてデータを取得した。一つの観測点につき、夕方の 6 時から翌朝の 9 時まで、最低 4 ~ 5 日間、SN 比が比較的良好なデータがとれるまで観測を行った。リモートリファレンスは測線内の観測点のデータを用いて行った。2002 年秋の観測については、観測期間を通じて観測点 101 でデータをとり続けたため、リモートリファレンスに 101 のデータを用いている。

観測地域から直線距離にして南東に 6, 70km に位置する国土地理院水沢観測所の水沢、江刺の広帯域 MT のデータを取り寄せて、いくつかの観測点に対してリモートリファレンス処理を行ってみた。全ての観測点に対してこの処理を行ったわけではないが、測線内の観測点を用いたときに比べて、必ずしもよい結果が得られるとは限らないようだ。ともかくここでは同一測線内のデータのみでリモートリファレンスを行った結果を用いた。

一つの観測点で数日間取得したデータのうち、最も SN 比が良さそうなデータを選び出してモデル計算に用いた。ノイズが多い時間帯のデータを除去するエディティング処理までは行っていないが、特に奥羽山脈側のデータはノイズが少なく、全体的にきれいなサウンディングカーブが得られた。

今回の観測でこのようにして得られた各周波数での見掛け比抵抗と電場と磁場の位相差を用いて、比抵抗モデルの初期バージョンを作成した。SN 比を改善しきれていない観測点のデータを除いた 17 観測点のデータを用い、ABIC (Akaike's Bayesian Information Criterion) をもとにしたインバージョンコード (Uchida, 1993) でスムーズな二次元比抵抗構造を計算した。このプログラムコードは、表層の比抵抗の不均質により生ずるスタティックシフトがガウス分布するというところをも考慮に入れている (Ogawa and Uchida, 1996)。

MTU-5 システムは 5.493×10^{-4} Hz から、 3.200×10^2 Hz までの 40 周波数のデータを取得することができるが、ここではデータを間引き、 5.493×10^{-4} Hz から、 2.400×10^2 Hz までの 20 周波数について、TM モードのみを用いてインバージョンを行った。ここでの場合の TM モードとは、磁北を基準にしたときの東西電場、南北磁場の組を用いたものである。

計算に用いた観測点のうち、代表的なサウンディングカーブを第 3 図に示す。ここでは、観測点 124, 120, 112, 105, 102, 010 についての TM モードによる見掛け比抵抗と位相差について示した。黒丸はモデルに用いた観測値、実線は得られたモデルから予想される計算値である。

今回の観測における測線上の観測点は、そのサウンディングカーブの特徴から、A, B, C, D, E の 5 つのグループに大別することができる。グループ A は、観測点 125, 124, 123, 122、グループ B は 121, 120, 119, 117, 114, 112、グループ C は 107, 105、グループ D は 102, 016, 006, 007, 008、グループ E は 010, 011 の各観測点が含まれる。見掛け比抵抗曲線は、スタティックシフトの影響で上下に平行移動するが、カーブの形状はそれぞれのグループ内で似通っている。第 3 図には、それぞれのグループから少なくとも一つは例を示した。

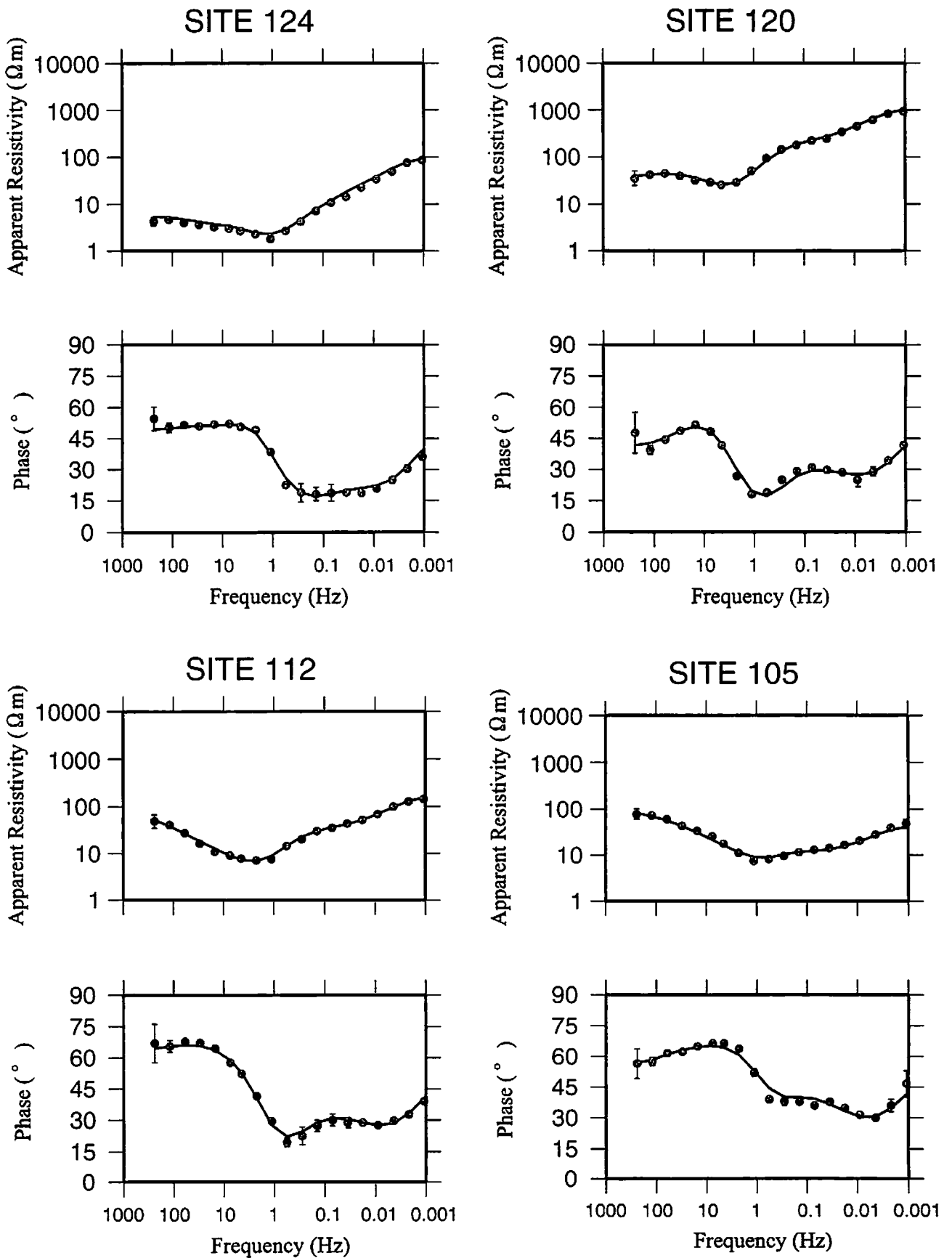
今回得られた比抵抗構造モデルを第 4 図に示す。太田断層を横切る東西断面を、深さ 30km、東西 45km に渡って図示したものである。比抵抗値を $0.1\Omega\text{m}$ から $30000\Omega\text{m}$ までグレースケールで示した。また、モデル計算に用いた観測点の位置を、細長い白抜き逆三角印でその位置を示してある。太田断層の露頭は、観測点 102 と 016 の間に位置する。

1896 年の陸羽地震で活動した千屋断層や太田断層の断層面は、露頭の観察や発掘調査から、地表付近では $15 \sim 45^\circ$ の東傾斜 (松田ほか, 1980; 千屋断層研究グループ, 1986; 宮内ほか, 1997) をもつことが知られている。千屋断層における人工地震探査の結果によれば、その深部は奥羽山脈の下でさらに緩傾斜になり、ほぼ水平に近くなるらしい (佐藤・平田, 1998)。断層面に関するこれらの情報より、第 4 図の東端の地表付近の高比抵抗は断層の上盤に相当することが予想できる。また、特に東端の観測点 010, 011 の付近は、地表に緻密なデイサイトなどの貫入岩が分布していることから、このような岩石が高比抵抗の原因である可能性がある。

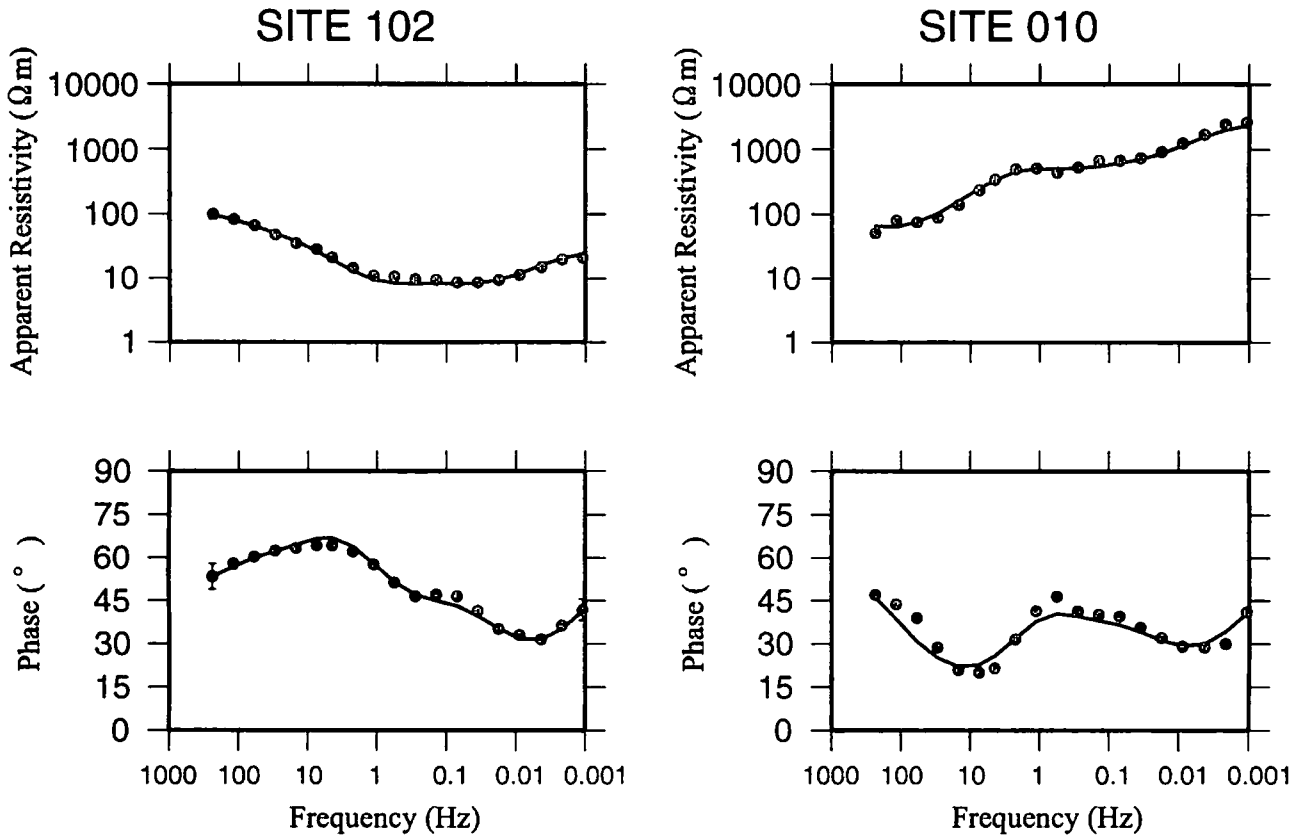
太田断層の露頭付近の深部は低比抵抗であるが、そこから西に約 10km 付近の深さ 5 ~ 10km 付近に高比抵抗体が見られる。これらの比抵抗構造の特徴は、共同観測で得られた比抵抗断面 ((Ogawa *et al.*, 2001; 高橋, 2000)) と似通った傾向を示している。

5. 微小地震の発生域と比抵抗の関係

次に、得られた比抵抗構造に微小地震の震源をプロットしたものを第 5 図に示す。第 6 図にその震源を水平面にプロットしたものを示した。第 5 図と第 6 図の東西方向の範囲は一致させてある。微小地震の震源は 1995 年から 2001



第3図 代表的な見掛比抵抗と位相差の観測値（黒丸）とモデルに基づく計算値（実線）。



第3図(続き)

年9月までのものを示した。1995年から1997年までについては、気象庁の地震年報のCD-ROMに収録されている震源データ、1998年以降は、東北大学の地震観測点網で再決定された震源データ(岡田・長谷川, 2000)を用いた。震源の南北の範囲は北緯39度20分から北緯39度40分、東西の範囲は東経140度18分24.4秒から東経140度49分48.8秒である。第6図には30kmよりも深い震源は図示していない。

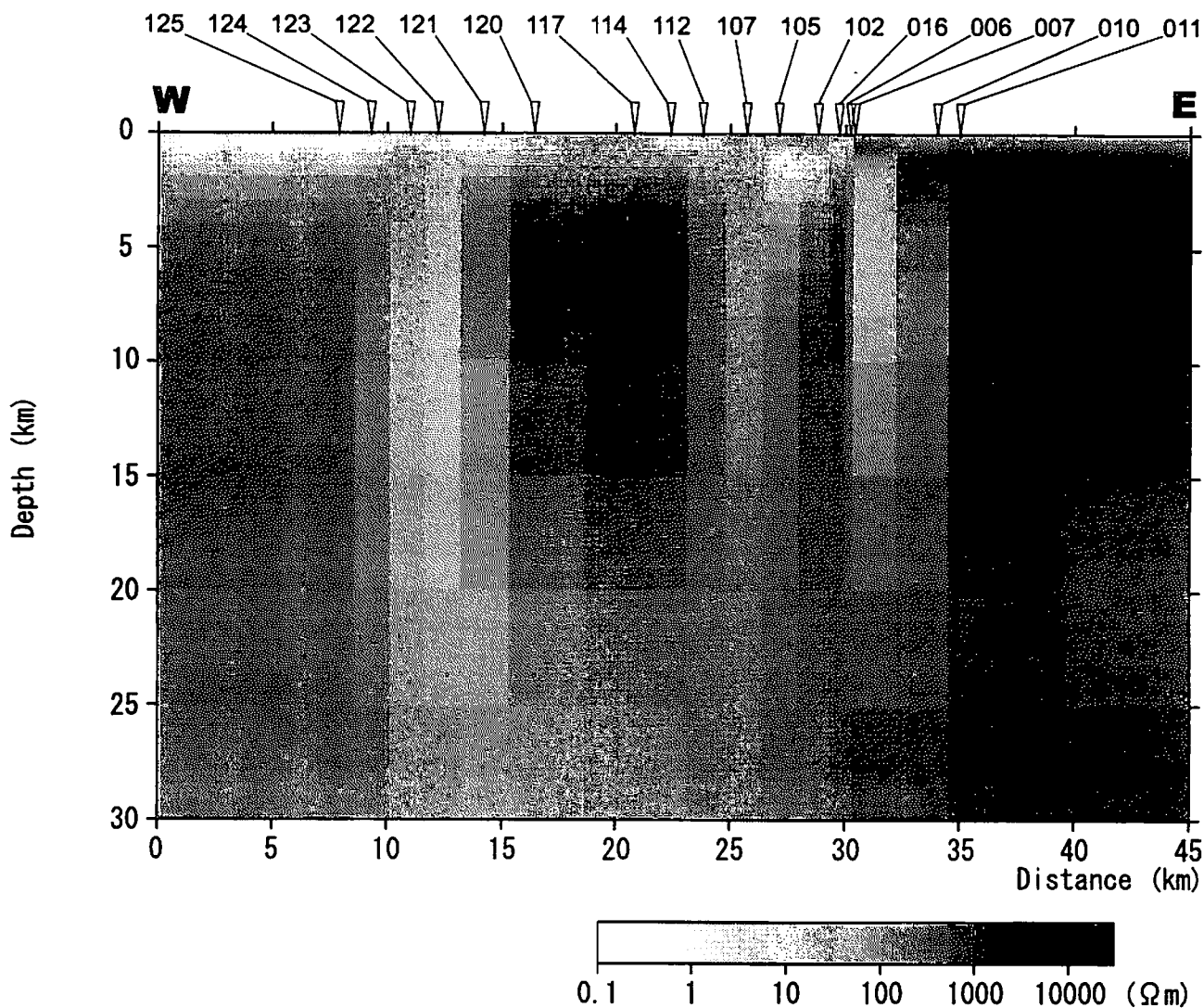
第5図より、いくつかの震源の集中域が認められ、「比抵抗の境界部で地震が起こる」ということと矛盾はみられない。また第6図からは、過去に大地震が起こったところの周辺で現在も微小地震が起こっているものと解釈できる。

6. 展望

太田断層を横切る今回の測線のデータについては、さらなるノイズ処理作業が必要である。具体的には、①測線内の観測点、国土地理院水沢観測所のデータのうち、すべての利用可能な組み合わせでリモートファレンスを行い、最も望ましいサウンディングカーブを選び出す、②数日間のデータを足し合わせたサウンディングカーブを計算し、よりよい結果が得られるかどうかを確認する、③ノイズが多い時間帯の時系列を除去(エディティング)することである。このような処理を行い、今回解析に用いなかった観測点のデータも含めて比抵抗構造を再解析すればよい。

また、共同観測で得られた広帯域MTデータについては、TM、TEモードを合わせて比抵抗構造が決定されており(Ogawa *et al.*, 2001)、今回の測線上の比抵抗構造との比較をさらに詳細に行うためにはTMモードのみではなく、TEモードも合わせたジョイントインバージョンを行う必要がある。現在の段階では、太田断層を横切る比抵抗構造と共同観測による千屋断層を横切る比抵抗構造は全体的な傾向としては似通っているが、それぞれのサウンディングカーブの形を見る限り、若干の違いが認められる。周波数の低い部分でも両測線間でサウンディングカーブに違いが認められるのは、断層から西に10km程度の高比抵抗体上の観測点(前節で述べたグループB)においてであるが、次の段階でこの違いの詳細な検討を行いたい。この地域の比抵抗構造は基本的には二次元であると考えられるが、その中に含まれる三次元的な部分を検出している可能性がある。

共同観測で得られたデータを用いたTM、TEモードのジョイントインバージョンには、1Hzより高い周波数につい



第4図 太田断層を横切る東西断面の比抵抗モデル。モデル計算に用いた観測点の位置を細長い白抜き逆三角印で示した。

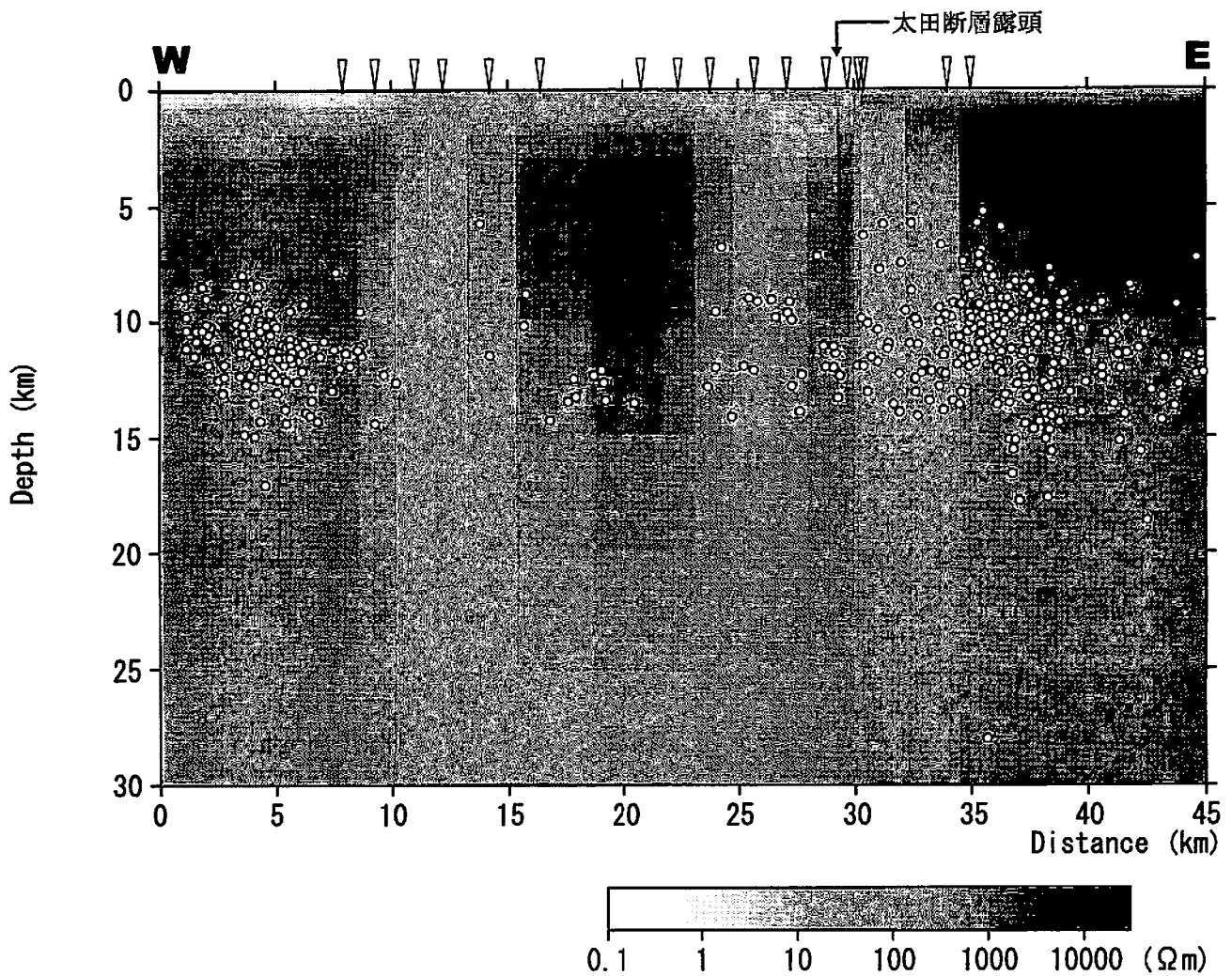
ては考慮されていない (Ogawa *et al.*, 2001)。高周波数成分は、地表付近の三次元的な不均質構造や局地的に流れる電流の影響を受けるために、二次元モデルに組み入れることが難しいのがその理由であると考えられる。今回得られた太田断層を横切る測線については、観測点間隔がより密であるので、表層の影響をより詳細に検討し、高周波成分も考慮に入れたモデルを構築できる可能性がある。

比抵抗構造と地震発生域の関係については、比抵抗構造の境界部に地震が発生するという一つのパターンが認識されつつあり、いくつかの地域でこの傾向が認められつつある。比抵抗構造もしくは地殻内流体と地震の発生メカニズムとの関連性を解明するという意味では、比抵抗構造を震源位置と比べるだけでなく、 V_p/V_s 構造や Q 値などの他の地震に関連するパラメータの分布との比較検討の段階に移りつつあるだろう。

謝辞

秋田大学は広帯域 MT 法のための観測機材を所有していない。そのため、Phoenix 社の広帯域 MT 観測機材 MTU-5 を、2001 年秋の観測のおりには北海道大学より 2 セット、2002 年春の観測のおりには東京工業大学より 4 セット借用した。

観測点として、山林、河川敷、牧草地、空地等を使用した。土地の所有者、管理者の方々に、快く協力していただいた。国有林に関しては、秋田森林管理署の畠山達業務第一課長、河川敷に関しては、秋田県仙北建設事務所河川管



第5図 太田断層を横切る比抵抗構造東西断面と微小地震の震源分布（1995年1月1日～2001年9月21日）。微小地震の震源は白抜き丸印で示した。震源の情報は、1995年～1997年は気象庁の地震年報による震源カタログ、1998年以降は東北大学（岡田・長谷川，2000）による。

理班の皆様，町有地に関しては秋田県仙北郡太田町の鷹野均民生課長（前）・大信田俊郎民生課長（現），同中仙町の茂木喜代志建設課長補佐，同西仙北町建設課・農林課の皆様にお世話になった。その他の土地所有・管理者で，中仙町大神成フカウジの高貝三二氏，太田町金井伝の藤原敏雄氏（養蜂業），西仙北町杉沢の藤原正昭氏，西仙北町小杉山の佐々木周悦氏，西仙北町辰の口の小木田猛氏，中仙町長野のつるや建材の皆様にもお世話になった。

観測機材の設置・移設・撤収については，我々の研究室の筒井智樹助教授，研究室の学生の小林勝幸，今野美貴子，村上直也，草薙智浩，古川勇也諸氏に手伝っていただいた。

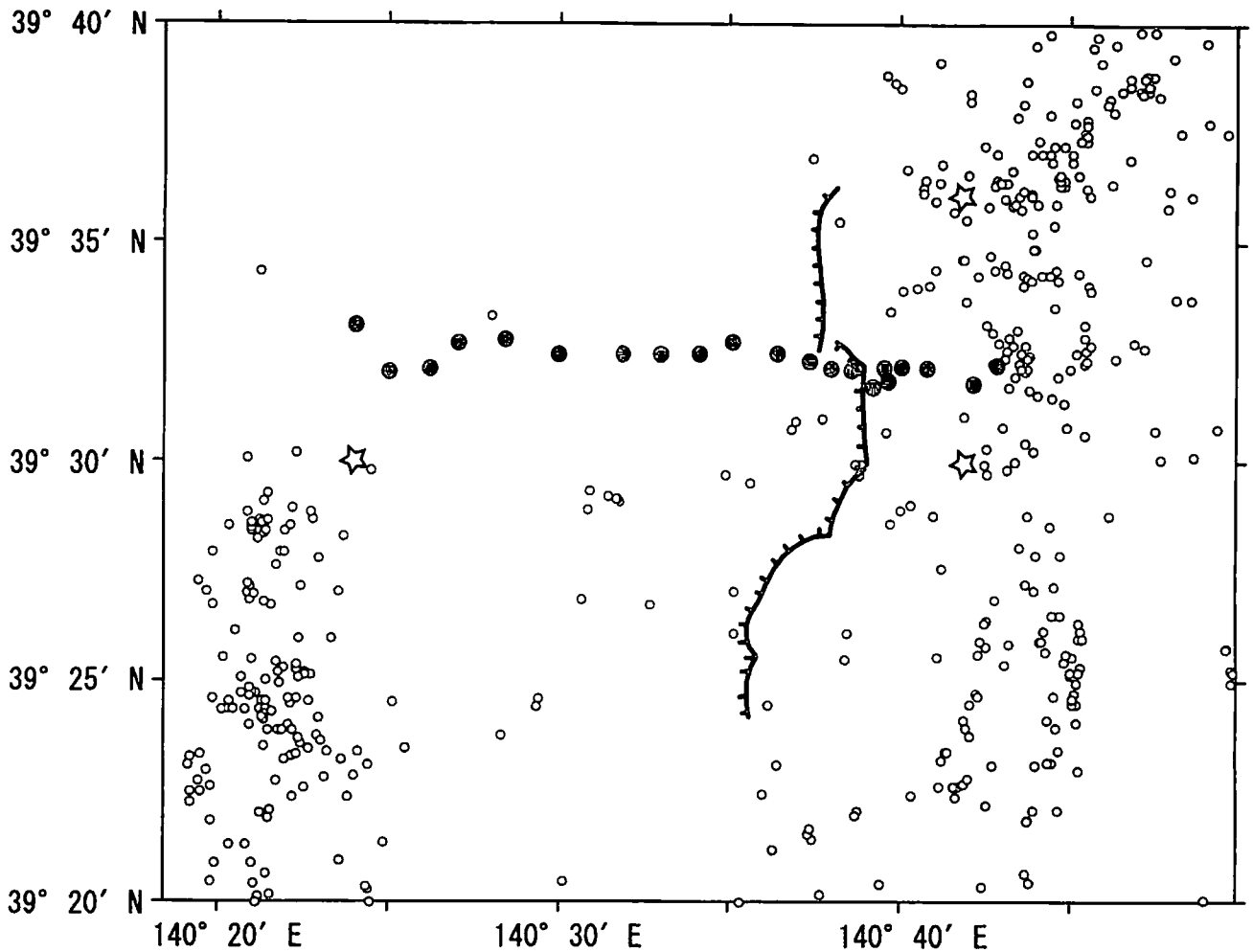
比抵抗構造の解析プログラムに関しては，京都大学防災研究所地震予知研究センターの大学院生・相澤広記氏にその使い方を教わった。

以上の方々に合わせて感謝の意を表したい。

参考文献

岡田知己・長谷川昭，東北地方地殻深部に発生する低周波微小地震の活動とモーメントテンソル解，火山，第45巻第2号，47-63，2000。

活断層研究会 編，新編日本の活断層，東京大学出版会，437p，1991。



第6図 広帯域MT測線周辺の微小地震の震央分布。白抜き丸印(○)が震央位置。用いた震源データ及び図の東西範囲は第5図と同一である。白抜き星印(☆)はM6以上の大地震の震央。1896年の陸羽地震の際に生じた千屋断層、太田断層、白岩断層の地表トレースを示した。黒丸印(●)は今回の広帯域MTの観測点。

佐藤比呂志・平田直, 活断層の深部構造と日本列島の成立, 科学, 68, 63-71, 1998.

千屋断層研究グループ, 千屋断層(秋田県)の完新世の活動と断層先端部の形態—千畑町小森での発掘調査—, 地震研究所彙報, 61, 339-402, 1986.

高橋幸恵, MT法を用いた千屋断層深部比抵抗構造, 秋田大学大学院鉱山学研究科博士前期課程資源・素材工学専攻平成11年度修士論文, 2000.

松田時彦・山崎晴雄・中田高・今泉俊文, 1896年陸羽地震の地震断層, 地震研究所彙報, 55, 795-855, 1980.

宮内崇裕・今泉俊文・原口強・阿部真郎・八木浩司・稲庭智子, 1896年陸羽地震断層中部(太田断層)の露頭とその3次元表現, 活断層研究, 16, 1-6, 1997.

Ogawa, Y. and T. Uchida, A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift, *Geophys. J. Int.*, 126, 69-76, 1996.

Ogawa, Y., M. Mishina, T. Goto, H. Satoh, N. Oshiman, T. Kasaya, Y. Takahashi, T. Nishitani, S. Sakanaka, M. Uyeshima, Y. Takahashi, Y. Honkura, and M. Matsushima, Magnetotelluric imaging of fluids in intraplate earthquake zones, NE Japan back arc, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3741-3744, 2001.

Uchida, T., Smooth 2-D inversion for magnetotelluric data based on statistical criterion ABIC, *J. Geomag. Geoelectr.*, 45, 841-858, 1993.