

歪集中帯周辺での広帯域 MT 観測による深部比抵抗構造探査

－観測の概要と解析結果の序報－

Wide-band MT measurements around the Niigata-Kobe strained belt in Japan

--- Outline of the MT measurements and preliminary report on the data analysis ---

大志万直人・歪集中帯比抵抗研究グループ

Naoto Oshiman

and

Research Group for Crustal Resistivity around the Niigata-Kobe Tectonic Zone

The Niigata-Kobe strained belt pointed out by Sagiya *et al.*(2000), where crustal deformation is concentrated, becomes one of important target areas in “*the 2nd new Program of Research and Observation for Earthquake Prediction*” in Japan (*e.g.* Hirata, 2004). A multidisciplinary research for five years on the strained belt using dense GPS and seismological observations and investigation of crustal resistivity structure was started from 2004. In this paper, we will report outline of the MT measurements made in 2004 along a profile across the Atotsugawa fault, which is situated in the Niigata-Kobe strained belt, and also describe preliminary results on the data analysis. Obtained preliminary inversion result shows inhomogeneity in the crustal resistivity structure at depths from 7km to 18km around the Atotsugawa fault.

1. はじめに

1995年1月に発生した兵庫県南部地震（神戸地震）以後、急速に整備されたGPS観測の基盤観測網であるGEONETのデータをもとに、Sagiya *et al.*(2000)は、水平変位速度の急変する境界として新潟－神戸歪集中帯の存在を指摘した。平成16年度からスタートした「地震予知のための新たな観測研究計画（第2次）」では、Sagiya *et al.*(2000)が指摘した、日本で最も大規模な歪集中帯である新潟－神戸歪集中帯が研究のターゲットとして取り上げられ、そのほぼ中央に位置する跡津川断層周辺において、高密度の地震・GPS観測および比抵抗構造調査を合同観測により5ヶ年計画で実施する予定となっている。当研究グループは、この内の比抵抗構造探査に関する観測計画を立案し、2004年10月4日～10月30日の期間に広帯域MT観測を実施した。ここでは、実施した観測計画の目的と、得られつつある比抵抗構造の概要に関して報告する。

2. 地殻下部の不均質性の把握

内陸地震発生に関する研究では、プレート内で発生する地震の震源断層周辺への応力集中機構を理解することが重要研究課題になってきている。そのためには、まずさまざまな手法による地殻の不均質構造の精密把握が重要になってくる。内陸地震発生域の不均質構造と歪・応力集中機構に関しては、これまでの観測成果などに基づき、さまざまなモデルが提案され始めている。たとえば、沈み込みに伴って上部マントルからメルトが下部地殻に供給され、メルトとその固結に伴って放出される水が下部地殻を軟化させて上部地殻における応力集中を生み出し、それによって内陸の大地震が発生するというモデルなどである。提案されているいずれのモデルでも、下部地殻での不均質構造の解明が重要なキーポイント

トになっている。

電気比抵抗構造に関する研究を振り返ってみると、80年代に入り、海底での電磁気観測手法の発展により、Utada (1987)により中部日本と東北日本で広域の2次元電気伝導度構造が求められた。その特徴のひとつに、沈み込むプレート上面に存在する低比抵抗層と日本列島下の地殻下部に存在する低比抵抗領域がある。そして、この地殻下部に分布する低比抵抗領域が、上部地殻での地震発生に深くかかわっているのではないかと注目されてきた。そしてこの低比抵抗領域の北西側の境界は、Sagiya *et al.*(2000)が指摘した新潟-神戸歪集中帯付近に位置している。従って、Utada (1987)が見出した日本列島下の地殻下部に存在する低比抵抗領域をさらに精密に把握することは、内陸地震の発生機構に関して重要な意味を持っている。

一方、地震発生領域に直接関連した比抵抗構造の研究は、70年代後半から、主に、活断層の浅部構造の探査として実施されてきた。そして、断層破碎帯が低比抵抗帯として認識できることが明らかにされ、興味は徐々に地震発生領域周辺の比抵抗コントラストへと移ってきた。水の存在が低比抵抗領域を作り、かつ地震の発生を促進するであろうと想像されたからである。

跡津川断層周辺では、後藤他(1995)、後藤他(1997)およびGoto *et al.* (2005)により94-95年に広帯域MT観測による比抵抗構造探査が実施されている。簡単にその成果をまとめると次のようになる。広帯域MT観測の測線は2本(測線AA'とBB')あり、これらの測線はそれぞれサイスミシティが高い地域とそうでない地域で断層走行に直交している。サイスミシティが低い地域の測線での構造は、高比抵抗領域が断層をまたぐように深さ10km付近まで分布し、その下部は比抵抗が低くなっている。一方、サイスミシティが高い地域では断層を境にして比抵抗コントラストが見られる。つまり、断層の北側には高比抵抗領域が存在し、断層を挟んで南側では比較的比抵抗となっていて、南側の下部にはさらに低比抵抗領域が存在しているように見える。このことから、サイスミシティが低い個所は、高比抵抗として見られる領域であり、断層がロックされている箇所であると考えるのが妥当である。それに対応して地震活動の観測されない領域が存在していることになり整合的である。しかし、この地域は測地学的な観測によりクリープしている可能性を指摘されている(国土地理院、1997)。

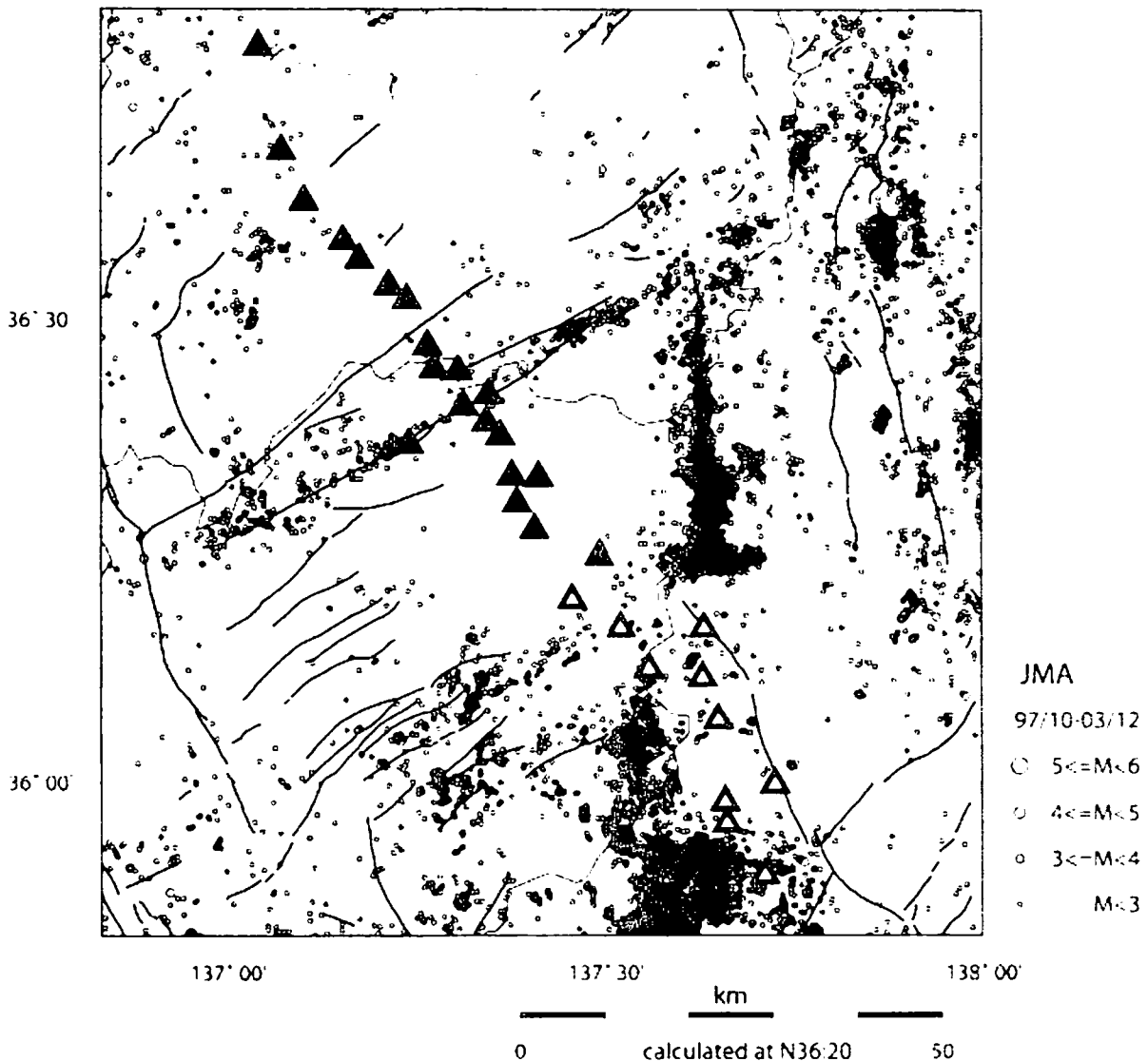
一方、第2節で述べたように、内陸地震発生の解明のためには下部地殻の不均質性把握が重要であるが、Goto *et al.* (2005)で明らかにされた構造は、下部地殻の不均質性を明らかにするだけの十分な解像度が得られておらず、今後の課題となっていた。そこで今回は、歪集中帯のほぼ中央部に位置する跡津川断層周辺での比抵抗構造の解明としては、以下のような3点に留意して観測を立案した。

- (1) 大規模比抵抗構造から見える中部日本での地殻下部の低比抵抗領域の精密化
- (2) 跡津川断層南側の深部での低比抵抗領域の精密な把握と上記の大構造のつながりの解明
- (3) 跡津川断層に沿った比抵抗構造の不均質性

3. 観測概要と解析結果の序報

最初に述べたように、歪集中帯の機構解明のためには、特に下部地殻の不均質構造の把握が重要であるが、Goto *et al.* (2005)の成果では、分解能の比較的良い構造が得られているのは比較的浅部に限られるため、下部地殻の不均質性の把握という点では十分な解像度がまだ得られておらず、今後の課題となっていて、今回の広帯域MT観測の成果が重要になってくる。下部地殻を解像度良く把握するためには、多くの観測点で、できるだけ長周期側でSN比の良いデータを取得することが必須となる。そのため、今回の観測計画では、以下の3点に留意して観測の実施計画を立てた。

- (1) 十分な事前のノイズ調査を実施し、できるだけノイズの小さな観測点を選ぶ。
- (2) 観測期間を、地磁気擾乱予想をもとに設定する。また、できるだけ長期間の観測期間を設定し、大きな擾乱時にデータを取得する可能性をあげる。
- (3) ファーリモート点での磁場参照観測を実施しノイズ処理を行う（鹿児島県での磁場参照観測）。



第1図：2004年10月4日～10月30日の期間に実施した広帯域MT観測の観測点分布。図中の黒丸は1997年10月から2003年12月の期間の地震活動を示す。また、実線は活断層などの構造線を示す。

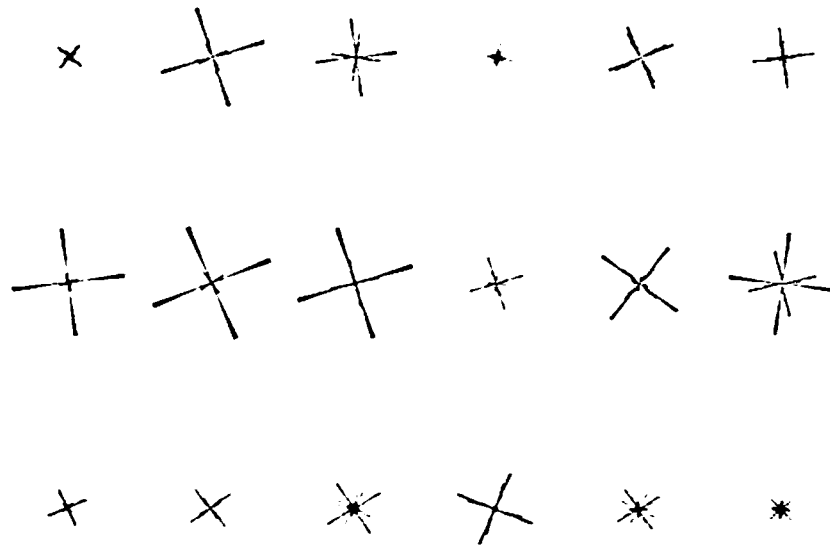
Fig.1: Location of the MT survey area in the central part of Japan. Triangles show the MT measurement sites. The solid lines show the major tectonic lines, such as active faults. In this region, the Atotsugawa fault is situated on the Niigata-Kobe strained belt. Distribution of small earthquakes during the period from October, 1997 to the December, 2003 is also shown in the figure.

図1に2004年10月4日～10月30日の期間に実施した広帯域MT観測の観測点分布を示す。観測点総数は30点であり、測線長は120kmに及ぶ。今回の測線は、Goto *et al.* (2005)で観測を実施した2本の測線の内、BB'測線をさらに延長しかつ跡津川断層周辺での観測点密度を上げた観測点分布となっている。

測線上で安房峠を境にして南側では多くの観測点で、中央線からの漏洩電流によると思われるノイズが見られたこともあり、観測期間中の観測機材の移設は行わなかった。一方、安房峠より北側では、富山市や高岡市に近い、測線北側に位置する数点以外は、比較的良好な観測環境にあり、ある程度十分なS/N比の探査曲線が得られたと判断した場合には、観測器材の移設を行い跡津川断層周辺での観測点密度を増やした。

データ解析は現在進行中であるので、現時点までの解析状況に関して以下に簡潔に報告する。比較的良好なデータが得られた測線北側(図1中の黒三角で示した測点のデータのみを用いての解析。総数は18観測点)では、各点少なくとも5日間のデータをスタックし、見掛け比抵抗曲線と位相曲線を求めた。2次元モデルによる構造解析を行うが、2次元構造の走向を確認するためインピーダンステンソルの主方向を測点ごとに求めた。その結果を図2に示す。Goto *et al.*(2005)の解析では、2次元走向はN60°Eとしているが、今回の観測でも図2に示される通り、走向としてN60°Eを採用しても問題はないと考えられる。そこでN60°Eの方向にインピーダンステンソルを回転させたうえでTMモードの見掛け比抵抗・位相曲線をもとにして、Ogawa and Uchida(1996)の開発したインバージョンコードを用いて比抵抗構造を求めた。

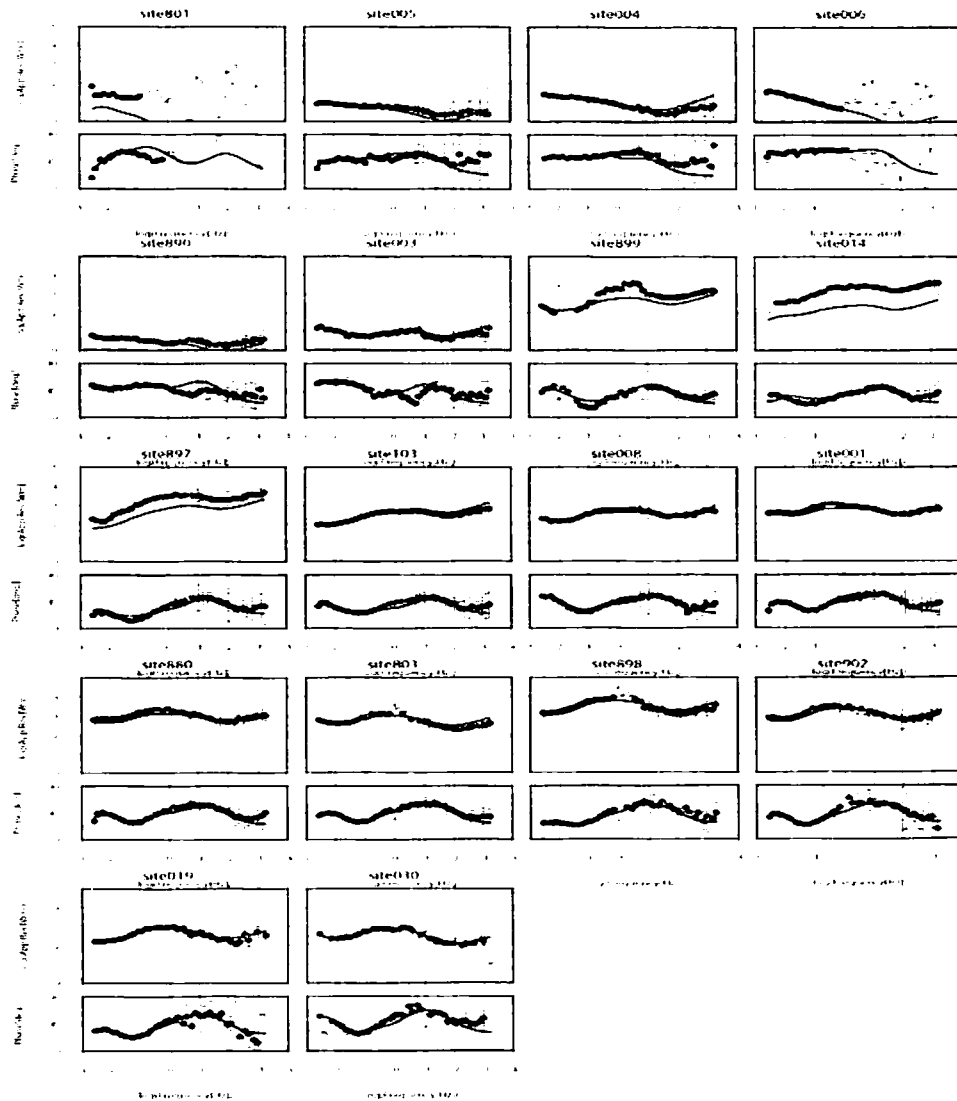
Principal Axes



第2図：インピーダンステンソルの主軸方向をローズダイアグラムとして示す。左上が最も北側の測点のものを示し、図の右に向かって順次南下した観測点のものを示す。

Fig.2: Rose diagrams showing the histograms of the principal axes of impedance tensor at each site.

得られた TM モードの見掛け比抵抗・位相曲線を図 3 に示す。図中、灰色で示すものが時系列解析により得られたデータを示し、黒色でインバージョンに使用したデータを示している。また、図中の実線は図 4 に示される比抵抗構造（暫定版）から計算された見掛け比抵抗曲線と位相曲線を示す（ただし、スタティックシフトだけずれてプロットされているものもある）。見掛け比抵抗・位相曲線を求めるための時系列解析では、基本的には、ノイズの振幅が小さくなる夜間(14:00-21:00UT)のデータのみを使用し、少なくとも 5 日間のデータをスタッキングした。

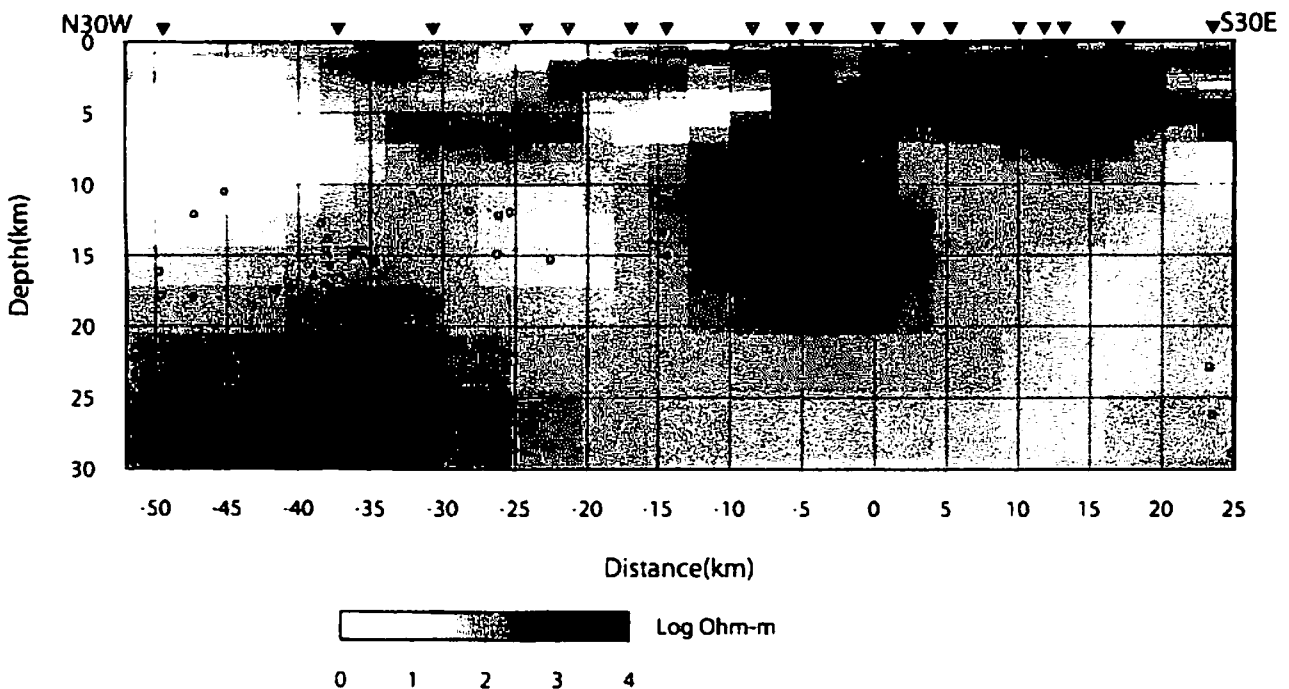


第 3 図：観測で得られた見掛け比抵抗と位相曲線（TM モードのみ示す）。ここに示す見掛け比抵抗・位相曲線は、時系列解析が進んでいる、図 1 中の黒三角の測点でのものである。黒丸で比抵抗構造を求めるインバージョンに使用したデータを示し、灰色でデータの質が悪かったためインバージョンには使用しなかったデータを示している。また、図中の実線は図 4 に示される比抵抗構造（暫定版）から計算された見掛け比抵抗曲線と位相曲線を示す。

Fig.3: The TM-mode responses observed at sites denoted by black triangles in Fig.1 are shown together with error bars of 1σ . Only data denoted by black dots are for the inversion. Calculated apparent resistivity and impedance phases (lines) from the best-fit models in Fig. 4 are also shown in the figure.

インバージョンでは、2~3km 間隔程度のサンプリングでのラフな地形は考慮した。ただし、北西側の延長部に存在する海に関してはモデルには取り込んでいない。また、比抵抗構造の初期モデルは 100 Ωm の一様な構造を採用した。以上のようなインバージョンにより、暫定版ではあるが、得られた比抵抗構造を第4図に示す。また、図中の小丸印は地震の震源分布を示す。跡津川断層は、横軸の 0km の位置に対応している。

構造図の北側に広範な低比抵抗領域が見られるが、これは測線の最北になる高岡観測点でのデータの問題があり虚像であると考えられる。一方、跡津川断層周辺に着目すると、深さ 7km までは比較的高比抵抗領域となっている。そして、跡津川断層北側では深部（20km 程度）まで高比抵抗となっているが、断層の南側では、約 7km を境にして深くなるほど抵抗値が下がる傾向がある。地震の分布は断層北側の高比抵抗領域に対応している。このように、跡津川断層を境にして見られる 7km 以深での構造の不均質性が、この周辺での歪集中帯を形成する原因となっている可能性があり今後の詳細な解析に期待したい。



第4図：2次元インバージョンにより得られた比抵抗構造図（暫定版）。

Fig.4: Preliminary two-dimensional resistivity structure derived from the TM mode data set. Inversed triangles indicate the observation sites. The fault trace of Atotsugawa fault corresponds to 0km on the horizontal axis. Dots indicate microearthquakes beneath the profile occurred during the period from October, 1997 to the December, 2003.

4. まとめ

詳細な議論は、今後の時系列データの解析処理の結果を末必要があるが、現時点までの解析から、暫定的な構造として跡津川断層周辺での比抵抗構造の不均質性が見えてきた。跡津川断層の南側では、北

側と異なり、約 7km を境にして深度が深くなるほど抵抗値が下がる傾向がある。この不均質性の検討が、なぜ歪集中帯として見えるのかという謎への回答を与えてくれることを期待したい。また、今回は触れなかったが、Goto *et al.* (2005)が観測を実施した BB'測線（今回の測線とほぼ同じ位置）から、AA'測線上で Goto *et al.* (2005)が求めた構造への遷移の様子を明らかにする目的から、跡津川断層に沿った 3 観測点でも広帯域 MT 観測を実施した。これにより、Goto *et al.* (2005)が指摘した、比抵抗構造の違いと跡津川断層沿いの地震活動度の違いの相関に関しても、更なる情報が得られるものと期待される。

歪集中帯比抵抗研究グループ参加者一覧（所属機関ごとにまとめてあるが順位不同）：

藤浩明、兼崎弘憲、松浦友紀、森谷辰輝、笠見弘昌(富山大学)； 西谷忠師(秋田大学)； 塩崎一郎、望戸裕司、桑波吉紘、田中嘉一(鳥取大学)； 畑真紀(立命館大学)； 大志万直人、吉村令慧、和田安男、中尾節郎、藤田安良、宇都智史(京大防災)； 茂木 透、山谷祐介(北海道大学)； 坂中伸也(秋田大学)； 三品正明(東北大学)； 後藤忠徳、笠谷貴史(海洋研究開発機構)； 佐藤秀幸(産総研)； 小川康雄、本蔵義守、氏原直人(東工大)； 原田誠(東海大学)； 山口覚、長野雄大(神戸大学)； 村上英記(高知大学)； 上嶋誠、小山茂、相澤広記(東大震研)

謝辞

観測実施に当たっては、多くの観測点の土地所有者の方々から土地使用の許可を快く頂いた。その暖かい協力に対して謝意を表明したい。

参考文献

- 国土地理院、中部・北陸地方の地殻変動、地震予知連絡会会報、57, 520-524, 1997.
- 後藤 忠徳・坂中 伸也・堀 友紀・大志万 直人・和田 安男・住友 則彦, 跡津川断層周辺の地下電気伝導度構造(序報), 京都大学防災研究所年報, 第 38 号, B-1, 1-10, 1995.
- 後藤 忠徳・大志万 直人・和田 安男・住友 則彦, 跡津川断層周辺の地下比抵抗構造解析(2), 1997 年地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, J42-09, 1997.
- Goto, T., Y. Wada, N. Oshiman and N. Sumitomo, Resistivity structure of a seismic gap along the Atotsugawa Fault, Japan, *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, **148**, (Issue 1), 55-72, doi:10.1016/j.pepi.2004.08.007, 2005.
- Hirata, N., Past, current and future of Japanese national program for earthquake prediction research, *Earth Planets and Space*, **56**, xliii-1, 2004.
- Ogawa, Y. and T. Uchida, A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift, *Geophys. J. Int.*, **126**, 69-76, 1996.
- Sagiya, T., S. Miyazaki and T. Tada, Continuous GPS array present-day crustal deformation of Japan, *Pure Appl. Geophys.*, **157**, 2303-2322, 2000.
- Utada, H., A direct inversion method for two-dimensional modeling in the geomagnetic induction problem, *PhD. Thesis, the University of Tokyo*, 409pp., 1987.