

歪集中帯周辺（跡津川断層）での広帯域MT観測による深部比抵抗構造 （序報）

大志万直人・吉村令慧・上嶋誠¹⁾・藤浩明²⁾・兼崎弘憲²⁾・望戸裕司³⁾
中尾節郎・小山茂¹⁾・相澤広記¹⁾・西谷忠師⁴⁾・宇都智史・桑波吉紘³⁾
田中嘉一³⁾・和田安男・藤田安良・坂中伸也⁴⁾・小川康雄⁵⁾・本蔵義守⁵⁾
氏原直人⁵⁾・三品正明⁶⁾・後藤忠徳⁷⁾・笠谷貴史⁷⁾・佐藤秀幸⁸⁾・山口寛⁹⁾
長野雄大⁹⁾・村上英記¹⁰⁾・塩崎一郎³⁾・茂木透¹¹⁾・山谷祐介¹¹⁾・原田誠¹²⁾
松浦友紀²⁾・森谷辰輝²⁾・笠見弘昌²⁾・畑真紀¹³⁾

- 1) 東京大学地震研究所
- 2) 富山大学理学部
- 3) 鳥取大学工学部
- 4) 秋田大学工学資源学部
- 5) 東京工業大学大学院理工学研究科
- 6) 東北大学大学院理学研究科
- 7) 海洋研究開発機構
- 8) 産業技術総合研究所地質調査総合センター
- 9) 神戸大学理学部
- 10) 高知大学理学部
- 11) 北海道大学大学院理学研究科
- 12) 東海大学地震予知研究センター
- 13) 立命館大学理工学部

要 旨

新潟―神戸歪集中帯は、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）」で重点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。本論文では、2004年10月4日～10月30日の期間に実施された歪集中帯周辺での比抵抗構造探索のための広帯域MT観測の概要と、これまでに得られている解析結果の概要に関して報告する。これまでの解析から得られた跡津川断層周辺での比抵抗構造は、深さ7kmまでは断層をはさんで比較的高比抵抗領域となっている。さらに、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と良い対応が見られる。

キーワード：比抵抗構造，新潟―神戸歪集中帯，地殻不均質構造，跡津川断層

1. はじめに

プレート内で発生する、いわゆる内陸地震発生機構の解明のためには、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。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（例えば、長谷川他，2004）や、Weak zone model と呼ばれるようなものである（Iio et al., 2002）。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になっている。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。

一方、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 観測のため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。

地殻及びマントル上部の不均質構造を電気比抵抗構造として探るこれまでの日本国内での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。これらの成果は、いまでも中部日本及び東北日本での典型的な電気伝導度構造（島弧での大規模電気伝導度構造の標準モデル）と位置づけられているが、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（例えば、笹井, 1994）。上に述べた Sagiya et al.(2000)が指摘した新潟―神戸歪集中帯は、この低比抵抗領域の北西側境界付近にほぼ位置している（例えば、Iio et al., 2002）。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、解像度を上げて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と言える。

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。

本報告では、この 5 年計画に従って 2004 年 10 月 4 日～10 月 30 日の期間に実施された歪集中帯周辺での比抵抗構造探査のための広帯域 MT 観測の概要と、これまでに得られている解析結果の概要に関して報告する。

2. 観測の概要

すでに、観測概要に関しては、大志万直人・歪集中帯比抵抗研究グループ(2005)で概説したが、本報告でも、以下に簡潔に述べておく。

最初に述べたように、歪集中帯の機構解明のためには、下部地殻の不均質性把握が重要であるが、跡津川断層周辺では、すでに Goto et al. (2005)により実施された広帯域 MT 観測により、跡津川断層近傍での比抵抗構造が明らかにされている。しかし、Goto et al. (2005)の成果では、分解能の比較的良好な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、以下のようないくつかの点を目的として観測を立案している。

- （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

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）ファーマーポイント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）。

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図 1 に示す。測線長は 120 km に及び、観測点総数は 30 点である。今回の測線は、Goto et al. (2005) が観測を実施した 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。

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、ある程度充分な S/N 比の探査曲線が得ら

Site895：図 5 参照)。一方、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。データ解析は現在進行中であるが、本報告では、主に安房峠より北側の観測点のデータを用いた解析結果に関して、つまり、跡津川断層周辺に関しての現時点までの解析結果を報告する。

3. データ解析

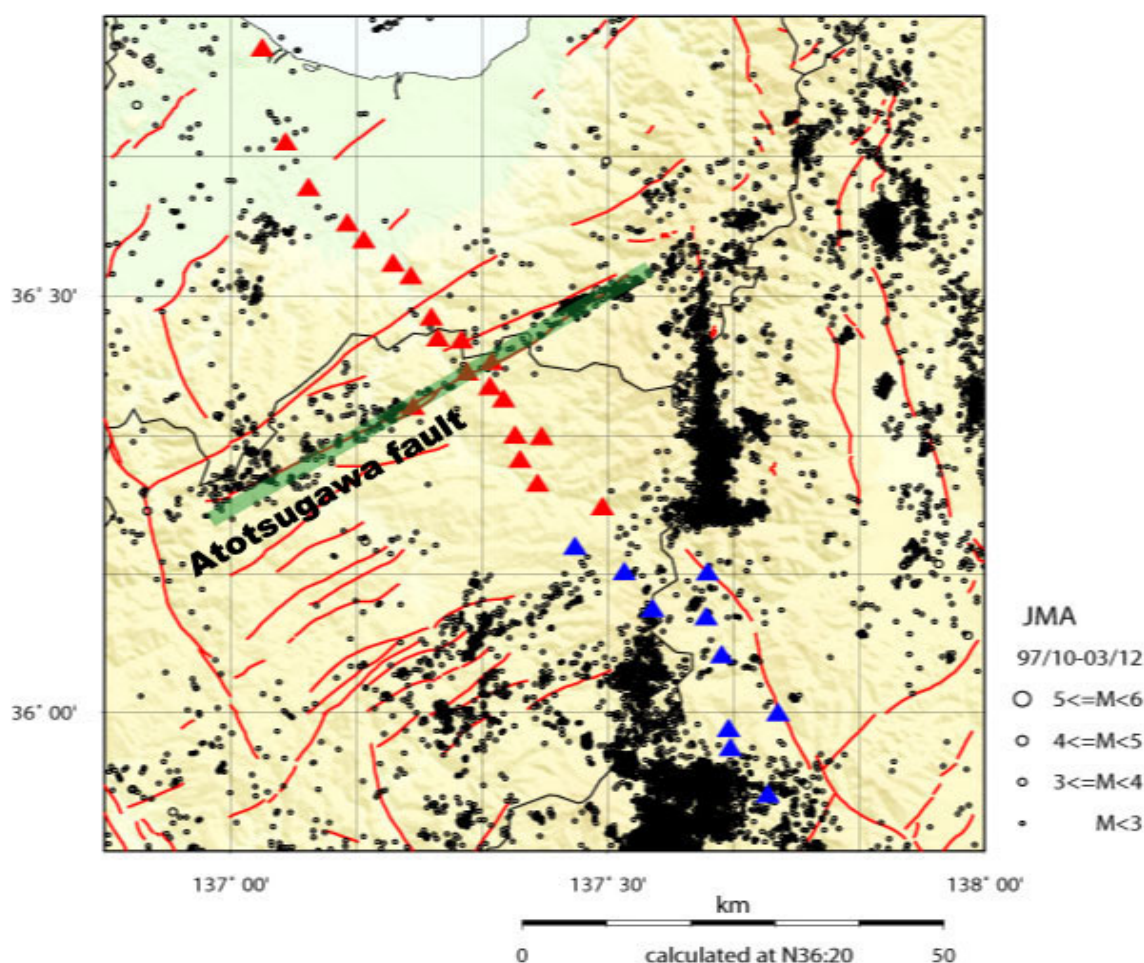


Fig.1 Location of the MT survey area in the central part of Japan. Triangles show the MT measurement sites. The red solid lines show the major tectonic lines, such as active faults. In this region, the Atotsugawa fault is situated on the Niigata-Kobe strained belt. Distribution of small earthquakes during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

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。また、Goto et al. (2005) で見られた 2 測線での構造に違いの遷移状況を明らかにする目的で、3 観測点を跡津川断層沿いに配置した (Site008, Site891, および、

比較的良好のデータが得られた測線北側 (図 1 中の赤三角で示した測点のデータのみ用いての解析。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の際の 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図2に示す。Goto et al.(2005)の解析では、2次元走向は $N60^{\circ}E$ 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 $N60^{\circ}E$ を採用しても問題はないと考えられる。

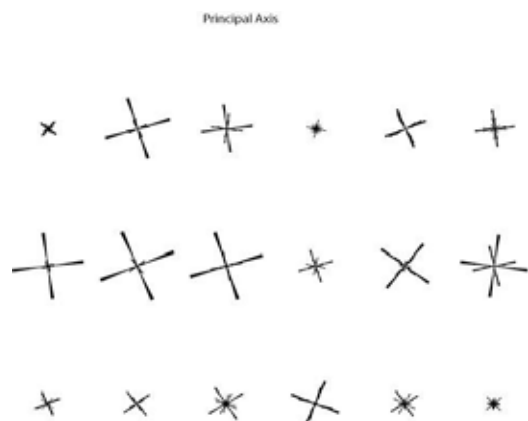


Fig.2 Rose diagrams showing the histograms of the principal axes of impedance tensor at each site.

そこで $N60^{\circ}E$ 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・位相曲線のみ用いて、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。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、黒色で比抵抗構造を求めるための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分だけ、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。

4. 解析結果と跡津川断層周辺の比抵抗構造の特徴

跡津川断層は ENE-WSW の走向を持ち長さ約 60km におよぶが、この跡津川断層にその周辺に平行して存在する茂住祐延断層、弥陀原断層、および天狗平断層などを加え跡津川断層帯と呼ばれており、北西側で隆起成分を伴う右横ずれを主体とする断層帯である（活断層研究会編, 1980; 1991）。また、この断層帯周辺での地震活動は、Ito and Wada(2002)によれば、微小地震の震央分布がそれぞれの断層の地表トレースと非常に良い一致が見られるが、その分

布は一樣ではなく、跡津川断層のほぼ中央部にサイスミシティが相対的に低い領域が見られる。また、震源の深度分布も跡津川断層の断層面に沿って一定ではなく、サイスミシティの低い領域で最も深く分布し、その両側では地震活動が活発であるが地震発生の cutoff の深さは徐々に浅くなっている。さらに、サイスミシティが低調でありかつ最も深くまで地震活動が見られる領域の浅部では、地震の発生していない領域が深さ約 7km まで断層面に沿って存在している。この地震の発生が見られない浅部領域が存在する断層セグメントでは、測地学的な観測によりクリープしている可能性が指摘されている（国土地理院, 1997）。

跡津川断層周辺ではすでに紹介したように、後藤他(1995)、後藤(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。Goto et al. (2005)により得られた成果を簡単にまとめると、以下のようになる。

広帯域 MT 観測の測線は 2 本（測線 AA' と BB'）あり、それぞれの測線は、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箇所は、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。この地域は上に述べたようにクリープしている可能性が指摘されている領域であるが、比抵抗構造を見る限り非常に浅部に限定された現象と見るべきであろう。

今回の比抵抗構造を求める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が、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 $100\Omega m$ のような構造を採用した。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。図中で跡津川断層は、横軸の 0km の位置に対応している。

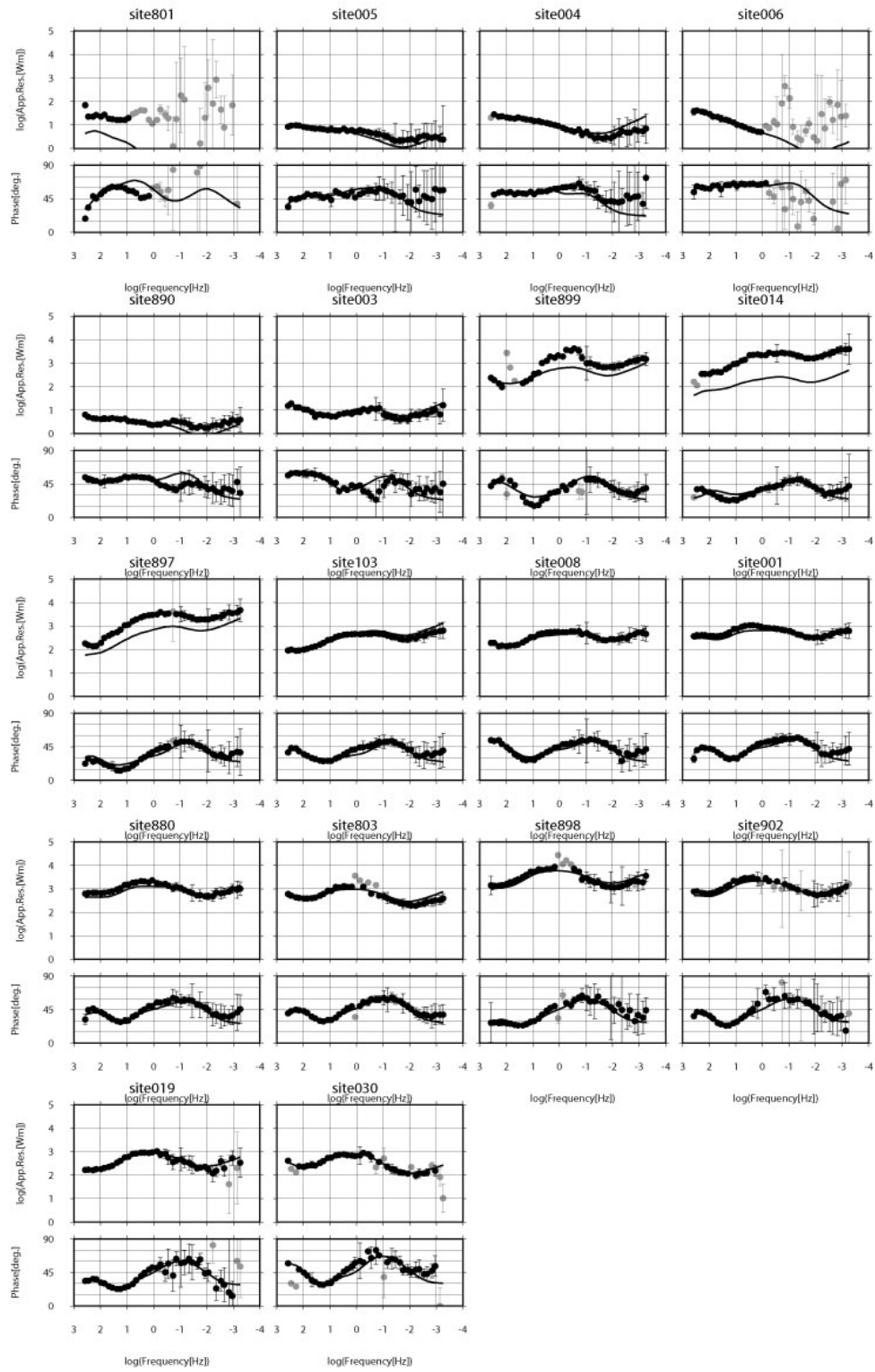


Fig.3 The TM-mode responses observed at sites denoted by black triangles in Fig.1 are shown together with error bars of 1σ . Only data denoted by black dots are for the inversion. Calculated apparent resistivity and impedance phases (lines) from the best-fit models in Fig. 4 are also shown in the figure.

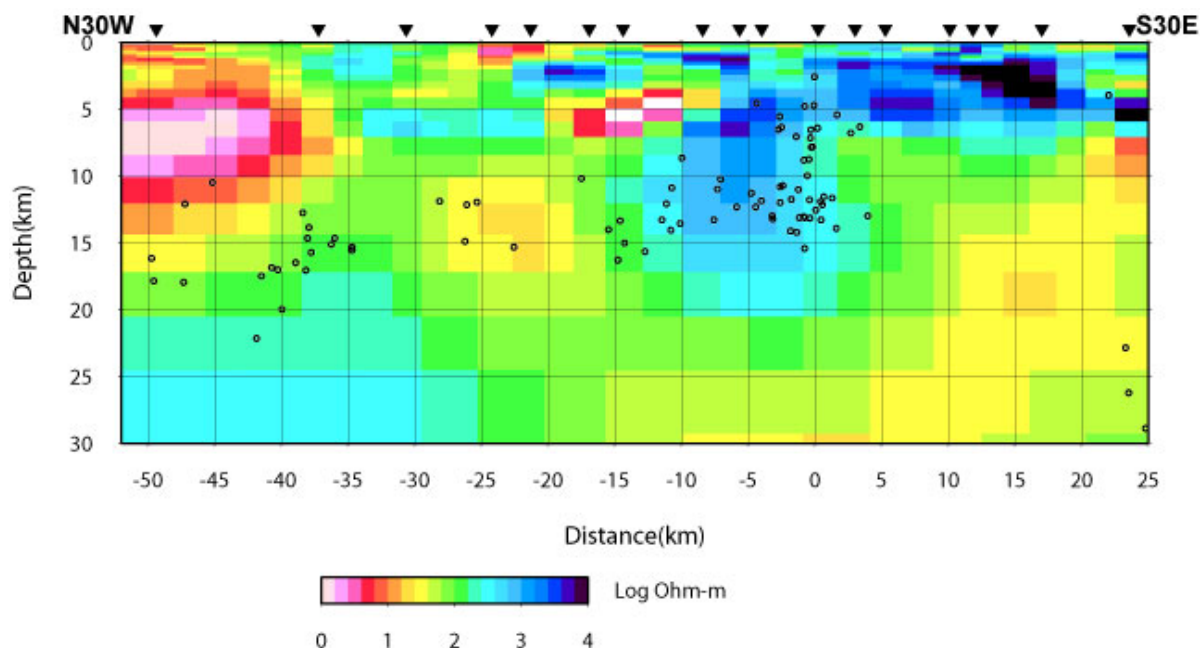


Fig.4 Preliminary two-dimensional resistivity structure derived from the TM mode data set. Inversed triangles indicate the observation sites. The fault trace of Atotsugawa fault corresponds to 0km on the horizontal axis. Dots indicate microearthquakes beneath the profile occurred during the period from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

構造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質の問題があり虚像であると考えらるべきである。一方、跡津川断層近傍に着目すると、断層の両側の深さ7kmまでは比較的高比抵抗領域となっている。この構造は Goto et al. (2005)によって求められた構造を基本的に矛盾は無いようである。また、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。そして図4に示されるように、地震の分布は断層北側の高比抵抗領域と良い対応が見られる。

次に、第5図に跡津川断層に沿った3観測点での見掛け比抵抗と位相曲線を示す。観測点番号008が、観測点中最も北東に位置し、観測点番号891が最も南西に位置する。Goto et al. (2005)が求めたBB'測線上の観測点14での見掛け比抵抗と位相曲線(Goto et al. (2005)中の図7を参照)と、今回の観測点008での探索曲線は、同じ傾向を示しており整合的である。また、895と008の観測点での探索曲線の傾向に違いはほとんど見られないが、895での見掛け比抵抗曲線が多少、右肩上がりの傾向があるように見える。

一方、891ではノイズの影響があるが他の2観測点での傾向との違いが見える。この観測点は、跡津川断層で浅部での微小地震の発生が見られない領域

(Goto et al. (2005)では、CAFと表現した跡津川断層のセグメントに対応)の南西側境界付近に位置している。そして、Goto et al. (2005)の測線AA'上の観測点2が、跡津川断層に沿って891観測点のさらに南西7kmに位置していることになる。

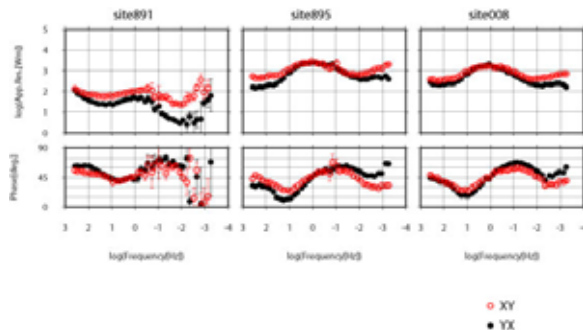


Fig.5 MT responses observed at sites along the trace of the Atotsugawa fault. Sites 008 and 891 are northwesternmost and southwesternmost sites along the fault, respectively.

5. まとめ

現在さらに詳細な解析を継続中であり、比抵抗構造に関する細かい議論は、今後の時系列データの解析処理の結果を待つ必要があるが、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、Goto et al. (2005)が求めた BB'測線（今回の測線とほぼ同じ位置）上の構造から AA'測線上での比抵抗構造へと、どのように遷移するのか、跡津川断層に沿った 3 観測点で実施した今回の広帯域 MT 観測の結果から、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。

謝 辞

本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。また、特に跡津川断層周辺での観測点の選定に当たっては、八尾町役場、細入村役場、飛騨市役所、古川市役所に大変お世話になった。ここに深くお礼申し上げます。

参考文献

- 大志万直人・歪集中帯比抵抗研究グループ (2005): 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―, 2005 年 Conductivity Anomaly 研究会論文集, 印刷中
- 活断層研究会編 (1980): 日本の活断層―分布図と資料―, 東京大学出版会, p.363.
- 活断層研究会編 (1991): 新編日本の活断層―分布図と資料―, 東京大学出版会, p.437.
- 国土地理院 (1997): 中部・北陸地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, **57**, 520-524.
- 後藤忠徳・坂中伸也・堀友紀・大志万直人・和田安男・住友則彦 (1995): 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.
- 後藤忠徳・大志万直人・和田安男・住友則彦 (1997): 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.
- 長谷川昭・中島淳一・海野徳仁・三浦哲・諏訪謡子 (2004): 東北日本弧の地殻の変形と内陸地震の発生様式, 京都大学防災研究所共同利用研究集会 (一般:15K-04)「地殻のレオロジーと地震発生の関係―歪集中と深部低周波微動のメカニズム―」報告書 (小菅正裕編集), 143-172.
- 笹井洋一 (1994): 松代群発地震の発生機構 ―自然発生的大規模水圧破砕―, 1994 年 Conductivity Anomaly 研究会論文集, 181-195.
- Goto, T., Y. Wada, N. Oshiman and N. Sumitomo (2005): 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.
- Hirata, N. (2004): Past, current and future of Japanese national program for earthquake prediction research, *Earth Planets and Space*, **56**, xliii-l.
- Iio, Y., T. Sagiya, Y. Kobayashi and I. Shiozaki (2002): Water-weakened lower crust and its role in the concentrated deformation in the Japanese Islands, *Earth and Planetary Science Lett.*, **203**, 245-253.
- Ito, K. and H. Wada (2002): Observation of microearthquakes in the Atotsugawa fault region, central Honshu, Japan –Seismicity in the creeping section of the fault–, In H. Ogasawara, T. Yanagidani and M. Ando, ed. *Seismogenic Process Monitoring*, Balkema Publishers, Netherlands, 229-243.
- Ogawa, Y. and T. Uchida (1996): A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift, *Geophys. J. Int.*, **126**, 69-76.
- Sagiya, T., S. Miyazaki and T. Tada (2000): Continuous GPS array present-day crustal deformation of Japan, *Pure Appl. Geophys.*, **157**, 2303-2322.
- Utada, H. (1987): A direct inversion method for two-dimensional modeling in the geomagnetic induction problem, PhD. Thesis, the University of Tokyo, 409pp.

Preliminary Report on Deep Resistivity Structure Deduced from Wide-band MT Measurements around the Niigata-Kobe Strained Belt (the Atotsugawa Fault) in Japan

Naoto OSHIMAN, Ryokei YOSHIMURA, Makoto UYESHIMA¹⁾, Hiroaki TOH²⁾, Hironori. KANEZAKI²⁾, Yuji MOCHIDO³⁾, Setsuro NAKAO, Shigeru KOYAMA¹⁾, Koki AIZAWA¹⁾, Tadashi NISHITANI⁴⁾, Tomohumi UTO, Yoshihiro KUWABA³⁾, Yoshikazu TANAKA³⁾, Yasuo WADA, Yasuyoshi FUJITA, Shinya SAKANAKA⁴⁾, Yasuo Ogawa⁵⁾, Yoshimori HONKURA⁵⁾, Naoto UJIHARA⁵⁾, Masaaki MISHINA⁶⁾, Tadanori GOTO⁷⁾, Takafumi KASAYA⁷⁾, Hideyuki SATOH⁸⁾, Satoru YAMAGUCHI⁹⁾, Takehiro NAGANO⁹⁾, Hideki MURAKAMI¹⁰⁾, Ichiro SHIOZAKI³⁾, Toru MOGI¹¹⁾, Yusuke YAMAYA¹¹⁾, Makoto HARADA¹²⁾, Yuki MATSUURA²⁾, Shinki MORITANI²⁾, Hiroaki KASAMI²⁾, and Maki HATA¹³⁾

- 1) Earthquake Research Institute, University of Tokyo
- 2) Faculty of Science, Toyama University
- 3) Faculty of Engineering, Tottori University
- 4) Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University
- 5) Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology
- 6) Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University
- 7) Independent Administrative Institution, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
- 8) Institute of Geoscience, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
- 9) Department of Earth and Planetary Sciences, Kobe University
- 10) Department of Natural Environmental Science, Kochi University
- 11) Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University
- 12) Research Center for Earthquake Prediction, Tokai University
- 13) Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

Synopsis

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.

Keywords: Atotsugawa fault, resistivity structure, the Niigata-Kobe strained belt, crustal structure