

2001年鳥取県西部地震震源域周辺での深部比抵抗構造探査の概要

2001年地殻比抵抗研究グループ

要旨

鳥取県西部地震震源域直下の深部比抵抗構造を調べる目的で、2001年に震源域周辺で集中的に広帯域MT観測を行った。観測期間中に大きな地磁気擾乱が発生しこの地域としては比較的S/N比の良い時系列データを取得することができた。その結果いくつかの観測点で周期10秒程度までの探査曲線を推定することができた。得られた12観測点の探査曲線を用いたMモードの位相に関する擬似断面を描くと、震央周辺の観測点で10Hz～1秒付近でいったん位相が45度よりも小さくなるのに対し、1秒より長い周期帯では位相が大きくなる傾向が見てとれる。これは、比較的深部に低抵抗領域が存在している可能性を示している。さらにこの傾向が横方向に分布しているため、この低抵抗領域は、ある程度の横方向の広がりを持っていると推測できる。

キーワード：広帯域MT法、比抵抗構造、地殻の構造、2000年鳥取県西部地震

1. はじめに

日本各地で稠密な地震集中観測により地殻の詳細なVp/Vs(例えば, Zhao and Negishil, 1998; 前田, 2002), コーダQや異方性に関する構造, および散乱体構造(例えば, 松本他, 2000; 浅野他, 1999)などが明らかにされつつある。さらに, 最近各地で低周波地震・微動が観測され(大見他, 2001; 小原 2002), 深部地殻内流体(水)の存在が地震発生機構にとって重要な要素であると考えられるようになってきている。したがって地殻内流体の存在に対し非常に敏感であると考えられる比抵抗構造情報が重要である。

地殻の比抵抗構造調査は, 日本では70年代後半から活断層を対象として精力的に行われてきた(例えば, Yukutake, 1985)。こういった活断層周辺や震源域周辺での比抵抗構造探査は80年代後半までは比較的浅部の探査に限られてきた。一方, 90年代に入り, インバージョン手法の発達と広帯域MT観測機材の充実により, 下部地殻を含めた深部までの高分解能の比抵抗構造がかなり精密に明らかになりつつある(例えば, Goto *et al.*, 1997; Ogawa *et al.*, 2001; Mitsuhashi *et al.*, 2001; Satoh *et al.*, 2001; Kasaya *et al.*, 2002; Oshiman *et al.*,

2002や地殻比抵抗研究グループ, 1999など)。その結果, 例えば, 地震発生領域は高比抵抗領域及びその境界領域に対応し, 地震波の反射面が低比抵抗領域およびその境界に対応しているらしいことが明らかにされてきている(Mitsuhashi *et al.*, 2001; Kasaya *et al.*, 2002)。流体の存在に対して敏感である比抵抗構造情報は, 地震発生機構と地殻流体のかかわりに関する研究にとって, 地震観測による各種の構造とともに重要であるといえる。

塩崎他(1999a)や塩崎・大志万(2000)は, 1998年から吉岡・鹿野断層を含む鳥取県東部地域で南北の測線に沿って広帯域MT観測を実施し, 鳥取県内で海岸線にほぼ平行に分布する微小地震分布に対応して, その地震発生域直下に低比抵抗領域が存在するらしいことを明らかにした。吉岡・鹿野断層を境にして南側では比較的浅部まで低比抵抗領域が盛り上がっているらしいということは, すでにMiyakoshi and Suzuki (1978)により, 地磁気変化を用いた比抵抗調査により指摘されていた。

このような地震発生域直下の低比抵抗領域の存在は, その上部領域の地震発生機構にとり決定的に重要な役割を担っているものと推測できる。

こういった観点から、塩崎他(2001)は、2000年鳥取県西部地震(M7.3)震源域内で広帯域MT観測を実施し、本震の震源直下にも低比抵抗領域の存在するらしいことを見出した。このことを受け、あらためて鳥取県西部地震震源域周辺で深部比抵抗構造を調査するために広帯域MT観測を2001年の秋に実施した。現在まだデータの解析途中であるが、ここでは、2001年に実施した広帯域MT観測の概要とこれまでの解析結果を報告する。

2. 観測域の状況

鳥取県西部地域では、1989年、1990年、および1997年に群発的な活動が見られた。鳥取県西部地震の本震及びその余震の震央分布は、これら群発的活動の震央分布すべてをカバーするように発生している(波谷他, 2001; 梅田他, 2001a,b)。さらに、1997年から本震発生までの3年間に、本震震央の8km西側の位置する深さ30kmの場所で合計4個の低周波地震が発生していたことが、大見他(2001)により明らかにされている。また、本震後から2001年3月末までにも散発的に深部低周波地震の発生が確認されている。この低周波地震は、地震波の低速度領域でしかも V_p/V_s 比の高いところと低いところの境界付近で発生しているらし

いことが前田(2002)の研究で指摘されている。こういった状況から、塩崎他(2001)の指摘する地震発生域直下の低比抵抗領域の存在が注目されることになった。

塩崎他(2001)では、2000年10月6日鳥取県西部地震が発生直後から震源域周辺での比抵抗構造調査のため広帯域MT観測が実施された。地震直後はJR伯備線が土砂崩れにより不通となり、対象地域内での漏洩電流によるノイズの影響を抑えられると思われたが、不通箇所がJR庄山駅より米子側のみであったこと、対象地域内に中国電力日野変電所があって、この地域への送電線が密集している事などにより、MT観測条件としては良好とはいえなかった。

結局、2000年には、塩崎他(2001)にあるように、鳥取県西部地震の震源域内では7観測点で順次観測を実施したが、深部までの探査に使用できる長周期帯までの比較的良好なデータが得られたのは、かろうじて震央付近の2点であった。その1次元解析の結果として、(1)地震発生域である深さ十数kmまでの上部地殻は全般的に高比抵抗であるのに対して、(2)本震の震央直南では地殻下部に低比抵抗領域が存在しているらしい事がわかった。

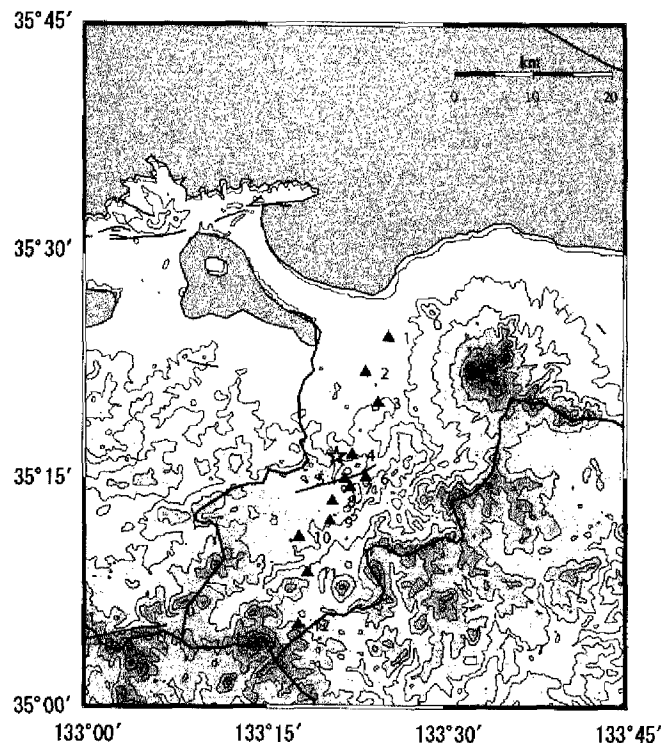


Fig. 1 Localities of the 2001 wide-band magnetotelluric sounding survey in and around the focal area of the 2000 Tottori-ken Seibu earthquake, Japan

3. 2001年広帯域MT観測の概要

鳥取県西部地震の震源域周辺での深部比抵抗構造の詳細を明らかにする目的で実施された2001年の広帯域MT観測は、10月28日～11月10日の期間に実施された。観測には11台のPhoenix社のMTU5システムを使用して、内1台はリファレンス観測のため鳥取県東部に設置し、残り10台を震源域周辺にほぼ南北方向の測線に沿って配置した。

Fig.1に観測点配置を示す。図中の星印は鳥取県西部地震の震央を示す。また、震央近くの実線は、鎌倉山南方断層を示す。2000年に実施された塩崎他(2001)の測線はほぼ北西—南東の方向であったのに対し、今回の測点は、ほぼ北北東—南南西の方向に分布している。これは、できるだけJR伯備線の影響を避けた測点配置にするためである。また、測線が大まかに言って南北方向になるように設定したのは、この地域は地質構造がほぼ東西方向の走行をもっていること、および、塩崎他(1999a)や塩崎・大志万(2000)によって得られている鳥取県東部での比抵抗構造が東西方向の走行

総観測点数は12点であるが、そのうち2観測点は、後述の磁気擾乱後に移設したもので、観測期間が地磁気静穏日にあたり、長周期側でのデータの質は、他の観測点と比較してそれほど良好ではない。

観測の基本方針としては、設置した10台の装置を大きな地磁気擾乱の発生まで移動しないこととした。上述したノイズのため、観測期間中に大きな地磁気擾乱をとらえてS/N比を稼がないと精度の良い探査曲線を得られないためである。また、観測点の選定にあたっては、4月から綿密な電場ノイズ調査を行い、対象地域内のできるだけノイズの少ない地点での観測ができるように努めた。幸い、11月5日と6日に水平分力の最大振幅が約320nTにも達するような、非常に大きな地磁気擾乱が発生した。

4. 観測結果の概要

地磁気静穏日に観測されたデータを用い解析処理を行うと、すでに前の節で述べたように伯備線の漏洩電流等の影響が強く、正しく探査曲線が求まらない。

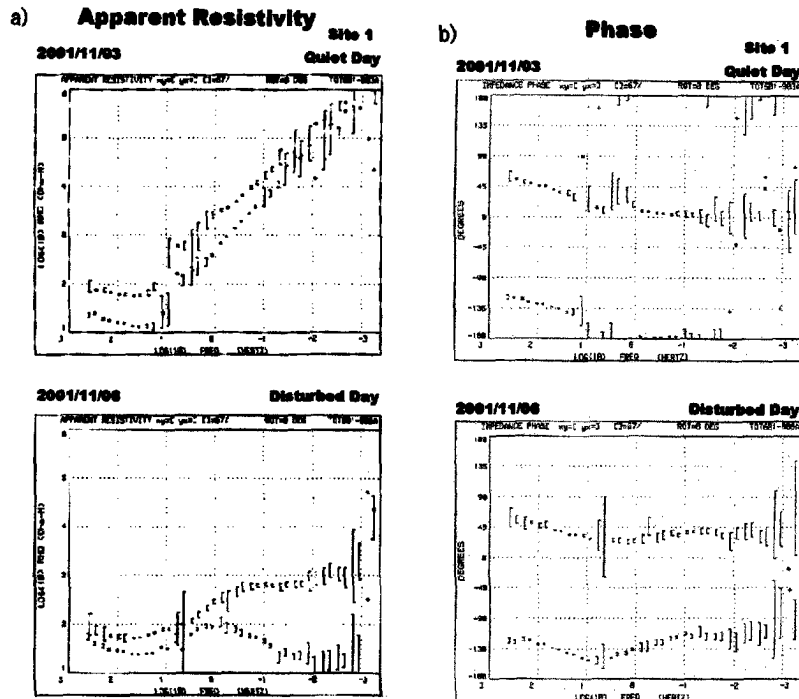


Fig. 2 (a) Apparent resistivity curves obtained at Site 1 on geomagnetically quiet (upper panel) and disturbed (lower panel) days, respectively. (b) Phase curves at Site 1. Principal axes (x, y) are oriented to the north and to the east, respectively. Error bars show standard deviation ($\pm \sigma$) of data.

を持っていると推定されたためである。したがって、鳥取県西部地震の断層の走行に対して少し斜交した測線分布となっている。測線の総延長は約30kmである。

Fig.2に、地磁気擾乱日と静穏日に観測された時系列データを用いたそれぞれの場合の見かけ比抵抗曲線と位相曲線の違いの例を示す。図中の[印はx成分の電

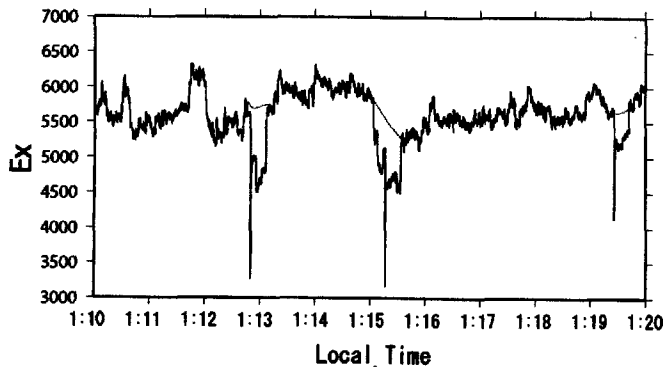


Fig. 3 An example of time series data of the electric field during 01:10 to 01:20 (LT). Spike-like noises due to an electric train are seen in the time series. In the time series analyses for obtaining the apparent resistivity and phase, such transient noises were subtracted from the original data sets using Kalman filtering.

場と y 成分の磁場を用いた見かけ比抵抗曲線と位相曲線(ここではこのモードを TM モードと呼ぶ)を示し、]印は y 成分の電場と x 成分の磁場を用いて得られたもの (TE モードと呼ぶ) を示している。ともに、鳥取県東部に設置したリファレンス点のデータを用い Gamble *et al.*(1979)のリモート・レファレンス処理を行った結果である。このような処理を行っても、静穏日には位相が長周期側で 0 度に落ち込み、見かけ比抵抗曲線でも、ほぼ 45 度の傾きを持つ直線状に見かけ比抵抗が上昇する傾向が著しい、これはインダクションの効果よりも、漏洩電流によるノイズとその電流系が直接作り出す磁場の影響が強いためである。一方、擾乱日にはそのような傾向は見られない。なお、地磁気擾乱のあった 5 日と 6 日の時系列データに単純にリモート・レファレンス処理を行い探査曲線を求めると擾乱の強かった 6 日のデータ (現実的には 7 日午前の夜間のデータ) の方が、得られた探査曲線が漏洩電流によるノイズの影響を強く受ける結果となった。これは、6 日の降雨の影響のため、線路の接地ポイントの接地抵抗が下がり漏洩電流が増えてしまったものと考えられる。

電場時系列に入る漏洩電流のノイズの例を Fig. 3 に示す。電車のノッチを入れた時に出るスパイク状のノイズが間欠的に見られる。このノイズは全観測点で同時に観測される。探査曲線を求める時系列解析にはこの部分を除去しデータを内挿(図中灰色で示される曲線)した上で解析を行った。また、各観測点で観測された磁場 3 成分のデータをそれぞれの観測点での解析に使用するよりも、観測点 6 の磁場 3 成分データを他の観測点でも磁場データとして用いて解析したほうが長周期側で探査曲線が比較的良好に求まったので、今回はそのような解析結果を示している。これは、他の観測点よりも観測点 6 での磁場データのノイズが少ない

ためと考えられる。なお、鳥取県東部の観測点でのデータを用い Gamble *et al.*(1979)のリモート・レファレンス処理を用いた時系列解析を行っている。このようにして求められた各観測点での見かけ比抵抗曲線と位相曲線を Fig. 4 に示す。なお、この結果は 11 月 6 日午前の夜間の時系列データのみを用いた解析結果である。また、ここで TM モードと呼んでいるのは、すでに上で述べたように、電場の南北成分と磁場の東西成分を基に算出した見かけ比抵抗と位相曲線を意味し、TE モードとは電場の東西成分と磁場の南北成分を基に算出した見かけ比抵抗と位相曲線であることを意味する。大きな地磁気擾乱により S/N 比が改善され比較的良好な探査曲線が得られたとはいえ、10 秒より長い周期帯での探査曲線がうまく得られていない観測点が多い。

長周期側の探査曲線が十分な精度でまだ推定できていないため、今回はまだ 2 次元構造解析までいたらなかったが、深部での比抵抗構造のようすの概要を見るために Fig. 5 に見かけ比抵抗による擬似断面図と位相による擬似断面図を示す。Fig. 4 と同じく 11 月 6 日午前の夜間の時系列データのみを用いた結果である。各図の左端が測線の北側を、右端が測線の南側を示している。

位相の擬似断面では、寒色系で位相が 45 度よりも小さい領域を、また、暖色系で位相が 45 度よりも大きくなる領域を示している。ただし図で白抜きになっていたり黒で塗りつぶされている部分はデータの質が悪いため欠測扱いになっている部分である。2 次元構造に対して比較的良好な指標を与える TM モードの位相に注目して擬似断面を見ると、震央直下の深部情報を持つ周期帯の位相が、ノイズのためあまり良く決まっていなくてなんともいえない部分もあるが、10Hz ~ 1 秒付近でいったん位相が 45 度よりも小さくなる (つまり比抵抗が高くなることに対応) のに対し、1

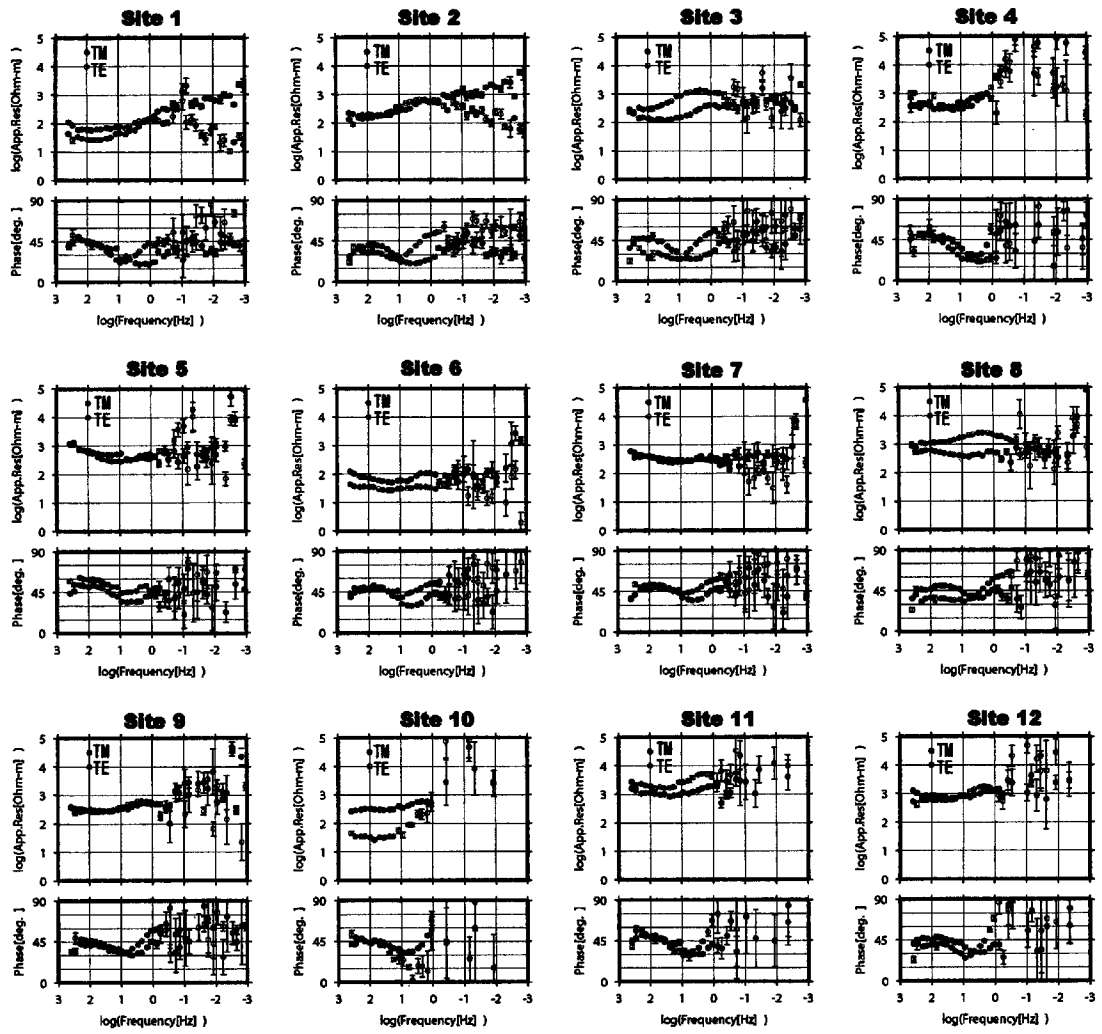


Fig. 4 Curves of obtained apparent resistivity and phase curves at each site. Principal axes (x, y) are oriented to the north and to the east, respectively. TM means that the electric field is perpendicular to the north in this case, whereas the magnetic field is parallel with the east. Error bars show standard deviation ($\pm \sigma$) of data. Data sets observed during night time on Nov. 6, 2001 were used in the analyses.

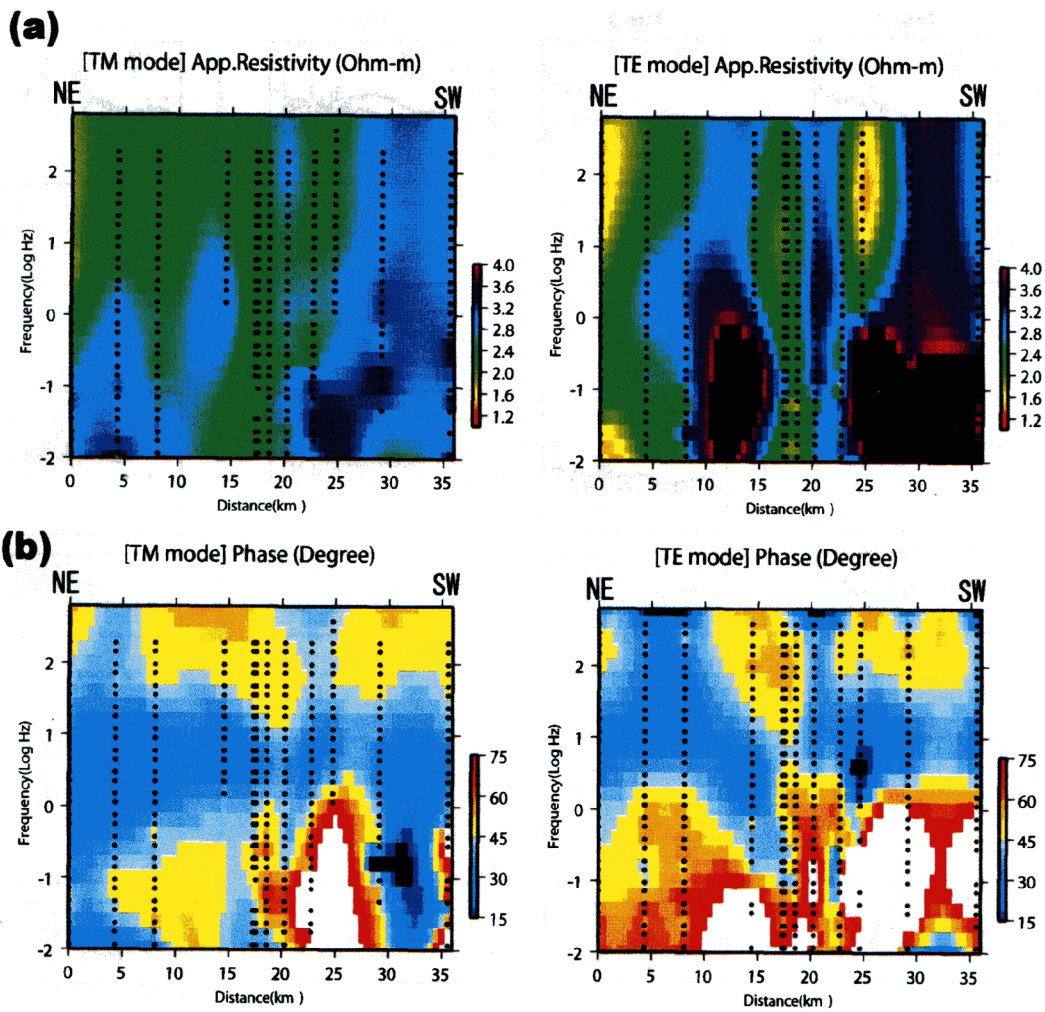


Fig. 5 The pseudosections of apparent resistivity and phase for TM (the electric field is perpendicular to the north in this case, whereas the magnetic field is parallel with the east) and TE modes. Data sets observed during night time on Nov. 6, 2001 were used in the analyses.

秒より長い周期帯では位相が大きくなる（さらに深い深いところでは逆に比抵抗が低くなることに対応）傾向が見てとれる（ただし図で白抜きになっている部分周辺はデータの質が悪く見掛けの傾向である）。これは、比較的深部に低抵抗領域が存在している可能性を示している。さらに、横方向の分布が見て取れるため、この低比抵抗領域は、ある程度の横方向の広がりを持っていると推測できる。

5. おわりに

現時点では、TMモードの位相情報を見る限り、深部に低比抵抗領域が存在する可能性があるといえる。今後もう少しノイズ処理を工夫するとともに、擾乱の大きかった5・6日両日のデータ解析の結果をすべて利用し、2次元構造解析を行う予定である。さらに深部の比抵抗構造をモデル化するために、今回の研究対象領域をカバーする観測網は限られているが、山陰地域で実施されたNetwork-MTの観測結果（例えば、塩崎他, 1998, 1999b）を合わせたインバージョン解析も考慮したい。

謝辞および観測研究参加者

この観測に実施にあたっては、鳥取県米子市、会見町、西伯町、日南町、岡山県神郷町で観測点として土地使用を許可いただいた方々、および、緑水園（西伯町）のご協力をいただきました。

今回の観測の実施は、平成13年度「地震予知のための新たな観測研究計画」に関する事業費、平成13年度防災研究所特別事業費「鳥取県西部地震震源域における地殻深部比抵抗構造の不均質性に関する研究」（研究代表者：大志万直人）、および、平成13年度防災研究所共同利用一般研究13G-03「鳥取県西部地震震源域と隣接する島根県東部地震空白域の地殻深部比抵抗構造とその対比に関する研究」（研究代表者：塩崎一郎）により実施された。

なお、今回の共同観測の参加者及びその分担は、次のとおりである。所属機関は観測当時とする。

研究統括：塩崎一郎（鳥取大学）・大志万直人（京都大学）

本報告執筆：大志万直人（京都大学）

観測点予備調査・交渉：塩崎一郎（鳥取大学）・大志万直人（京都大学）・中尾節郎（京都大学）・矢部征（京都大学）・笠谷貴史（京都大学）・宇都智史（鳥取大学）
データ処理・解析：相澤広記（京都大学）・笠谷貴史（京

都大学）・宇都智史（鳥取大学）・吉田賢一（鳥取大学）・佐藤秀幸（北海道大学）

観測：塩崎一郎・宇都智史・吉田賢一（以上鳥取大学）・大志万直人・笠谷貴史・相澤広記・橋本武志・中尾節郎・矢部征・藤田安良・近藤和男・中川渥・E.Chandrasekhar（以上京都大学）・佐藤秀幸（北海道大学）・上嶋誠・石川良宣（以上東京大学）・S.B.Tank（東京工業大学）・山口覚・武本和広（以上神戸大学）・村上英記・高木典子・野口和典（以上高知大学）
以上を総称して「2001年地殻比抵抗研究グループ」とした。

参考文献

- 浅野陽一・海野徳仁・中村綾子・岡田知己・堀修一郎・河野俊夫・仁田交市・佐藤俊也・長谷川昭・小菅正裕・長谷見晶子（1999）：DAT アレイ地震観測による奥羽脊梁山地およびその周辺地域における地震波散乱体分布の推定，地震第2号，52，379-394.
- 梅田康弘・中尾節郎・伊藤潔・西田良平・森健彦（1994）：鳥取・島根県境付近の地震活動と反射波，1994年地球惑星科学関連学会合同大会予稿集，274-274.
- 梅田康弘・松村一男・渋谷拓郎・大見士朗・片尾浩・伊藤潔・渡辺邦彦・大志万直人・橋本学・岩田知孝（2001a）：2000年鳥取県西部地震の概要と地震発生の環境場，2001年地球惑星科学関連学会合同大会予稿集，S3-001.
- 梅田康弘・松村一男・渋谷拓郎・大見士朗・片尾浩（2001b）：2000年鳥取県西部地震一前駆的群発地震・本震・余震一，自然災害科学，19-4，501-512.
- 大見士朗・渡辺邦彦・渋谷拓郎・中尾節郎・平野憲雄・中尾愛子・竹内晴子・竹内文朗・三和佐知栄・志藤あずさ・金亜伊・B. Enescu（2001）：平成12年鳥取西部地震一微小地震定常観測網による本震と余震活動一，京都大学防災研究所年報，44，B-1，273-282.
- 小原一成（2002）：西日本で発見された深部微動，科学，72，No.2，229-232.
- 塩崎一郎・西垣俊宏・山口高広・村上英記・大志万直人・上嶋誠・山口覚・歌田久司・西田良平・住友則彦（1998）：中国地方におけるネットワークMT法観測，東京大学地震研究所彙報，73，3/4，319-344.
- 塩崎一郎・大志万直人・藤原茂樹・福本隆史・西垣俊宏・矢部征・住友則彦（1999a）：MT法を用いた山陰地方東部の深部比抵抗構造探査の概要，京都大学防災研究所年報，42，B-1，189-201.
- 塩崎一郎・西垣俊宏・大志万直人・村上英記・上嶋誠・山口覚・歌田久司・住友則彦（1999b）：ネットワ

- ク MT 法観測から得られた中国地方東部の電気比抵抗構造(序報), 鳥取大学工学部研究報告, 30, 1, 49-60.
- 塩崎一郎・大志万直人(2000): 山陰地方東部の深部比抵抗構造探査の意義, 月刊地球, 22, No.1, 22-28.
- 塩崎一郎・大志万直人・足立英二・宇都智史・平井理華子・前田和彦・吉村令慧・村上英記・山口寛・西山浩史・松山和彦・野口竜也・矢部征(2001): 広帯域 MT 法を用いた 2000 年鳥取県西部地震震源域の深部比抵抗構造探査(序報), 京都大学防災研究所年報, 44, B-1, 293-303.
- 澁谷拓郎・中尾節郎・西田良平・竹内文朗・渡辺邦彦・梅田康弘(2001): 鳥取県西部地震(2000年10月6日, M7.3)に先行して発生した1989年, 1990年及び1997年の群発的地震活動。地震予知連絡会会報, 第65巻, 576-578.
- 地殻比抵抗研究グループ(1999): 広帯域 MT 法による千屋断層深部比抵抗構造調査, 京都大学防災研究所年報, 第42号, B-1, 203-211.
- 前田好晃(2002): 2000年鳥取県西部地震震源域(を含むより高域な)周辺の三次元地震波速度構造, 京都大学大学院理学研究科修士論文, p.55.
- 松本聡・植平賢司・松島健・松尾のり道・清水洋(2000): 熊本県中部日奈久断層周辺に見られる地殻内地震波反射面, 日本地震学会講演予稿集(2000年度秋季大会), A37.
- Asano, Y., N. Umino, A. Nakamura et al. (2000): Spatial distribution of seismic scatters beneath the Ou Backbone range, northeastern Japan, estimated by seismic array observations, *EOS*, 81, WP127.
- Gamble, T.D., W.M. Goubau, and J. Clarke (1979): Magnetotellurics with a remote magnetic reference, *Geophys.*, 44, 53-68.
- Goto, T., N. Oshiman, and N. Sumitomo (1997): The resistivity structure around the hypocentral area of the Ebino earthquake swarm in Kyushu district, Japan, *J. Geomag. Geoelectr.*, 49, 1279-1291.
- Kasaya, T., N. Oshiman, N. Sumitomo, M. Uyeshima, Y. Iio and D. Uehara (2002): Resistivity structure around the hypocentral area of the 1984 Western Nagano Prefecture earthquake in the central Japan. *Earth, Planets and Space*, 54, 107-118.
- Mitsuhata, Y., Ogawa, Y., Mishina, M., Kono, T., Yokokura and T.Uchida (2001): Electromagnetic heterogeneity of the seismogenic region of 1962 Northern Miyagi Earthquake, northeastern Japan, *Geophys. Res. Lett.*, .
- Miyakoshi, J. and A. Suzuki (1978): Geomagnetic induction study of the seismically active fault along the southwestern coast of the Sea of Japan, *J. Geomag. Geoelectr.*, 30, 549-560.
- 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 (2001): Magnetotelluric imaging of fluids in intraplate earthquake zones, NE Japan back arc, *Geophysical Research Letters*, 28, No.19, 3741-3744.
- Oshiman, N., R. Yoshimura, T. Kasaya, Y. Honkura, M. Matsushima, S. Baris, C. Celik, M.K. Tuncer, and A.M. Isikara (2002): Deep resistivity structure around the fault associated with the 1999 Kocaeli earthquake, Turkey, *In Seismotectonics at the Convergent (Eds. Y. Fujinawa and A. Yoshida)*, Terra Science Publishing Company, Tokyo, 293-303.
- Satoh, H., Y. Nishida, Y. Ogawa, M. Takada, and M. Uyeshima (2001): Crust and upper mantle resistivity structure in the southwestern end of the Kuril Arc as revealed by the joint analysis of conventional MT and Network MT data, *Earth Planets and Space*, 53, 829-842.
- Yukutake, T. (1985): A review of studies on the electrical resistivity structure of the crust in Japan, *Earthq. Predict. Res.*, 3, 345-364.
- Zhao, D. and H. Negishi (1998): The 1995 Kobe earthquake: Seismic image of the source zone and its implications for the rupture nucleation, *J. Geophys. Res.*, 103, 9967-9986.

Preliminary Report on the 2001 Wide-band Magnetotelluric Sounding of Deep Crustal Resistivity Structure in and around the Focal area of the 2000 Tottori-ken Seibu Earthquake, Japan

The 2001 Research Group for Crustal Resistivity Structure, Japan

Synopsis

Wide-band magnetotelluric (MT) sounding survey was conducted in and around the focal area of the 2000 Tottori-ken Seibu earthquake, Japan, during the period from Oct. 28 to Nov. 10, 2001. The total number of observation sites is 12. An electric railway runs around the target area and, hence, the noise due to the leakage currents is rather strong. However, since a very large magnetic storm occurred from Nov. 5 to 6, we obtained data sets of relatively high S/N ratio through the MT survey. Therefore, the apparent resistivity and phase were estimated to the period range of 10 sec. at several sites. According to the pseudosection of the phase for TM (the electric field is perpendicular to the north in this case, whereas the magnetic field is parallel with the east), low resistive region seems to exist beneath the focal region of the 2000 Tottori-ken Seibu earthquake.

Keywords: wide-band MT; electrical resistivity structure; crustal structure; the 2000 Tottori-ken Seibu earthquake