

1984年長野県西部地震震源域周辺でのAMT観測

吉村令慧・大志万直人・笠谷貴史*・飯尾能久・三浦勉・西村和浩
山崎友也・比嘉哲也**・広瀬成章**・平加奈子**

*海洋研究開発機構

**京都大学理学部

要 旨

1984年長野県西部地震(M6.8)の震源域周辺では、本震発生以後現在まで、活発な群発的地震活動が継続している。稠密地震観測網データを用いた地震波トモグラフィーでは、微小地震活動が面/線状に分布し、かつ、その直下に低速度異常域が位置することが報告されている。一方、MT法探査も実施されているが、詳細な3次元地震波速度構造と対比し、地殻流体と地震活動との関連性を議論するためには、浅部(5km以浅)の解像度・面的分布の理解が十分とは言えない。浅部比抵抗構造の詳細な3次元モデルの構築を目的として、2008年9月に本地域でAMT 観測を計34箇所において実施した。特徴的な低速度異常が推定されている領域での予想的2次元構造解析の結果、以下のような特徴を持つ比抵抗モデルが得られた。1) 震源断層面に沿って低比抵抗帯が推定され、2) その上方浅部に低比抵抗領域がパッチ状に枝分かれるように存在する。

キーワード: 1984年長野県西部地震, Audio-frequency MT 観測, 比抵抗構造, 群発地震

1. はじめに

御嶽山南東麓は、群発的地震活動が長期間継続している地域である。同地域周辺では、1976年に群発的地震活動が開始し、1984年には長野県西部地震(M_{JMA}6.8)が発生している。特に震源断層北東端付近では、近年M4クラスの中規模地震が頻発している(例えば、2002年M_{JMA}4.7, 2003年M_{JMA}4.9)。

Kimata et al. (2004) は、地震活動が活発な地域で1999年より繰り返し水準測量を実施し、地表面の隆起を検出を報告している。この隆起は2~3kmの深さに圧力源を考えることで説明可能であることが示されている。推定された圧力源の位置は、Kasaya et al. (2002) が広帯域MT (Magnetotelluric) 探査による2次元電気比抵抗構造解析から指摘した低比抵抗領域に調和的であった。これらの結果より、低比抵抗領域には流体が存在し、その供給・流動に伴い圧力変化が生じ、当該地域で地殻変動・地震活動を励起している可能性が推察される。

加えてこの地域では、長野県西部地震の発生過程および活発な微小地震活動のメカニズムの解明を目

指して、1995年より高精度地震観測網が整備・維持されている。この稠密地震観測網データを用いての地震波トモグラフィーにより、Noda et al. (2007) は詳細な速度構造を推定している。結果として、微小地震がクラスター化している領域では、低速度異常体を取り囲むように、震源が分布する様相が確認され、その発生メカニズムに対し流体の関与が強く示唆されている。

前述の通り、この地域ではいくつかのMT観測研究が実施されている(Fig. 1)。飯尾他(2000)やKasaya et al. (2002) では、広帯域MT観測による2次元解析が実施され、長野県西部地震の震源断層に対応する比抵抗コントラストの存在が指摘された。また、Kasaya and Oshiman (2004) では、既存の広帯域MTデータの一部を利用し、順解析による広域の3次元比抵抗モデルが提案されている。これらの2次元・3次元モデルは、限定的なMTデータの使用や解析対象の広さから、得られつつある詳細な速度構造と対比するには解像度が十分であるとは言えない。特に、5km以浅の浅部構造は、微小地震の発生深度を勘案すると非常に重要な知見となりうるにもかかわらず、既存データ

を最大限に活用したとしても、高精度化は困難である。浅部構造の高精度化には、観測データを高密度で取得することが必要不可欠である。

本研究では、長野県西部域の高地震活動域における3次元比抵抗モデルの高精度化を目的として、AMT (Audio-frequency MT) 観測を計画・実施した。

2. AMT観測の概要

AMT観測は、2008年9月3日～9日の期間に実施された。今回のAMT観測は、既存の広帯域MT観測の空間分解能を上げ、かつ、現在微小地震活動が活発に推移する1984年震源断層の北東端をカバーするように測点を設定している (Fig.1)。この観測では、カナダPhoenix社製MTU-5Aを4台使用し、昼間3時間程度・夜間15時間の電磁場5成分測定を合計34点で行った。観測点の詳細な情報は、Table 1 にまとめている。

AMT観測では、10,400Hz～0.35Hzの帯域でMT応答を推定できるが、広帯域MT (380Hz～2,000sec) に比較して、より浅部の探査に向いていると言える。

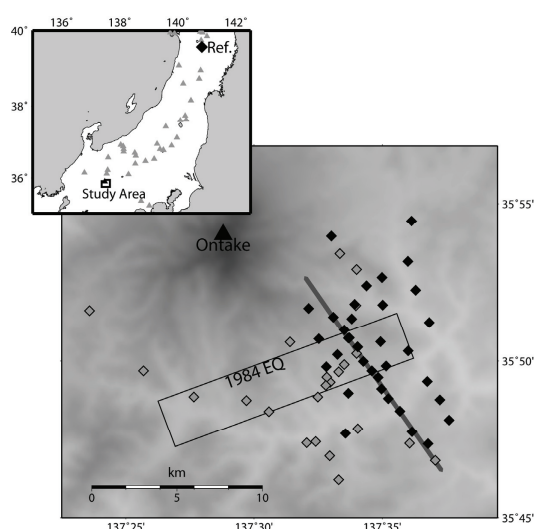


Fig. 1 Locations of 2008 AMT and previous wideband MT (Iio et al., 2000 and Kasaya et al., 2002) sites are indicated as black and gray diamonds, respectively. Rectangle denotes the fault plane of the 1984 earthquake estimated by Yoshida and Koketsu (1990). A two-dimensional inversion of the AMT data was implemented for the thick gray line. An index map is shown at top left with quaternary volcanoes. A black diamond indicates a far remote reference site.

3. データ解析

3.1 探査曲線の算出

周波数応答を推定する際、S/Nの向上のためリモトリファレンス処理 (Gamble et al., 1979) を行った。一般的にAMTデータの処理では、扱う周期が短周期寄りであることを理由に、探査領域内において同時に収録したデータを用いて相互リファレンス処理が行われる。しかしながら、探査領域全域に同調する人工ノイズが存在した場合 (例えば、直流電車からの漏洩電流)、その影響を見積もる必要がある。特に、長野県西部域では、漏洩電流の影響が大きいという報告がなされている (Kasaya et al., 2002)。

今回の解析では、岩手県において連続運用されている広帯域MT観測データを用いた遠地リファレンス処理を試みた。サンプリング周期がAMT観測とは異なるため、全帯域にわたる処理は行えないものの、同期処理可能な 33Hz～0.35Hz の帯域ではMT応答が得られた。Fig. 2 に観測点 WN008 における探査曲線を示す。

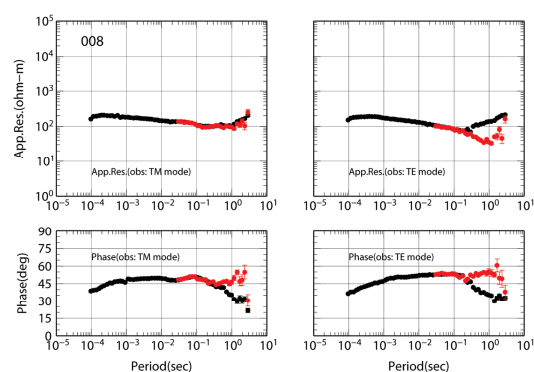


Fig. 2 Curves of obtained MT responses at site WN008. As a remote reference site, black and red responses use magnetic data of local site (WN010) and far site (see the index map of Fig. 1), respectively.

探査領域内の相互リファレンスとして WN010 を使用して得られた曲線を黒で、遠地の参照磁場を用いた探査曲線を赤で示している。相互リファレンスの結果は、推定誤差は小さいものの、数Hzから長周期にかけて、見掛け比抵抗の不自然なキックや、ゼロ位相への漸近が見られ、観測対象領域全域にわたる広域共通ノイズの影響が残存すると考えられる。一方、遠地参照磁場の結果では、これらの人工ノイズの特徴が解消されている。ただし、1Hz付近は元来MT信号の強度が低く、磁気擾乱の有無に左右されるため、測定時の状況によって探査曲線の質が悪くな

Table 1 Summary of the measurement date, time, and locations of the AMT sites. Indices in Date column represent daytime (D) or nighttime (N) observations.

Site ID	Latitude (dd:mm:ss.s)	Longitude (ddd:mm:ss.s)	Height (m)	Date of Observation (yyyy/mm/dd with index)
WN001	N35:47:32.4	E137:36:36.3	1,141	2009/09/08 N
WN002	N35:47:55.8	E137:35:59.0	1,223	2009/09/08 D
WN003	N35:48:35.5	E 137:35:30.6	914	2008/09/07 N
WN004	N35:48:59.5	E137:35:03.4	935	2008/09/07 D
WN005	N35:49:39.8	E137:34:39.7	1,093	2008/09/07 N
WN006	N35:49:52.3	E137:34:24.7	1,079	2008/09/08 N
WN007	N35:50:10.5	E137:34:05.0	1,146	2008/09/08 N
WN008	N35:50:55.1	E137:33:30.2	1,236	2008/09/06 N
WN009	N35:51:35.3	E137:32:54.6	1,377	2008/09/06 D
WN010	N35:51:51.7	E137:31:57.1	1,661	2008/09/06 N
WN050	N35:51:10.9	E137:33:20.4	1,322	2008/09/06 D
WN051	N35:50:38.2	E137:33:51.8	1,230	2008/09/07 N
WN052	N35:49:17.6	E137:34:47.7	1,000	2008/09/08 D
WN101	N35:49:09.6	E137:33:29.9	990	2008/09/04 N
WN102	N35:50:00.2	E137:32:38.3	1,130	2008/09/04 D, 2008/09/07 N
WN103	N35:50:53.6	E137:32:20.9	1,395	2008/09/05 D
WN150	N35:50:23.8	E137:33:04.4	1,330	2008/09/05 N
WN190	N35:47:52.3	E137:33:23.3	954	2008/09/07 D
WN201	N35:48:18.3	E137:37:25.5	986	2008/09/06 D
WN202	N35:48:56.8	E137:37:04.1	1,180	2008/09/07 D
WN203	N35:49:32.2	E137:36:34.5	877	2008/09/03 N
WN204	N35:50:01.6	E137:34:58.6	1,152	2008/09/06 N
WN205	N35:50:48.2	E137:34:45.2	1,334	2008/09/05 N
WN206	N35:51:31.8	E137:33:38.1	1,427	2008/09/04 N
WN240	N35:50:30.8	E137:35:49.9	1,152	2008/09/06 D
WN250	N35:51:59.8	E137:33:44.5	1,134	2008/09/04 D
WN301	N35:51:25.3	E137:36:38.9	887	2008/09/06 N
WN302	N35:51:58.3	E137:34:50.4	986	2008/09/04 N
WN303	N35:52:34.5	E137:34:12.2	1,153	2008/09/05 D
WN304	N35:52:50.5	E137:34:49.0	1,439	2008/09/03 N
WN305	N35:54:08.9	E137:32:50.3	1,428	2008/09/04 D, 2008/09/08 N
WN401	N35:52:26.5	E137:36:07.5	947	2008/09/05 N
WN402	N35:53:20.9	E137:35:49.4	1,081	2008/09/05 D
WN403	N35:54:38.0	E137:35:58.0	1,110	2008/09/04 N

る場合がある。以上のことより、今後の解析では、長周期帯は遠地参照磁場を用いたリファレンス処理結果を採用することとした。それ以外の帯域は、探査領域内の相互リファレンス処理によるが、Fig. 2より分かるように、10Hz以短では双方の違いは小さく帯域によって参照磁場を使い分けることに問題はないと考えられる。大部分の観測点において、良質な探査曲線が得られているが、前述の磁気擾乱の小

ささに起因する異常値、ならびに測点近傍のローカルノイズによると思われる異常値は、目視により除外し解析に用いる。

3.2 2次元解析

本研究の目的は、詳細な3次元比抵抗構造の推定であるが、稠密AMT観測の効果を確かめるために予察的に2次元解析を行った。2次元プロファイルは、Noda

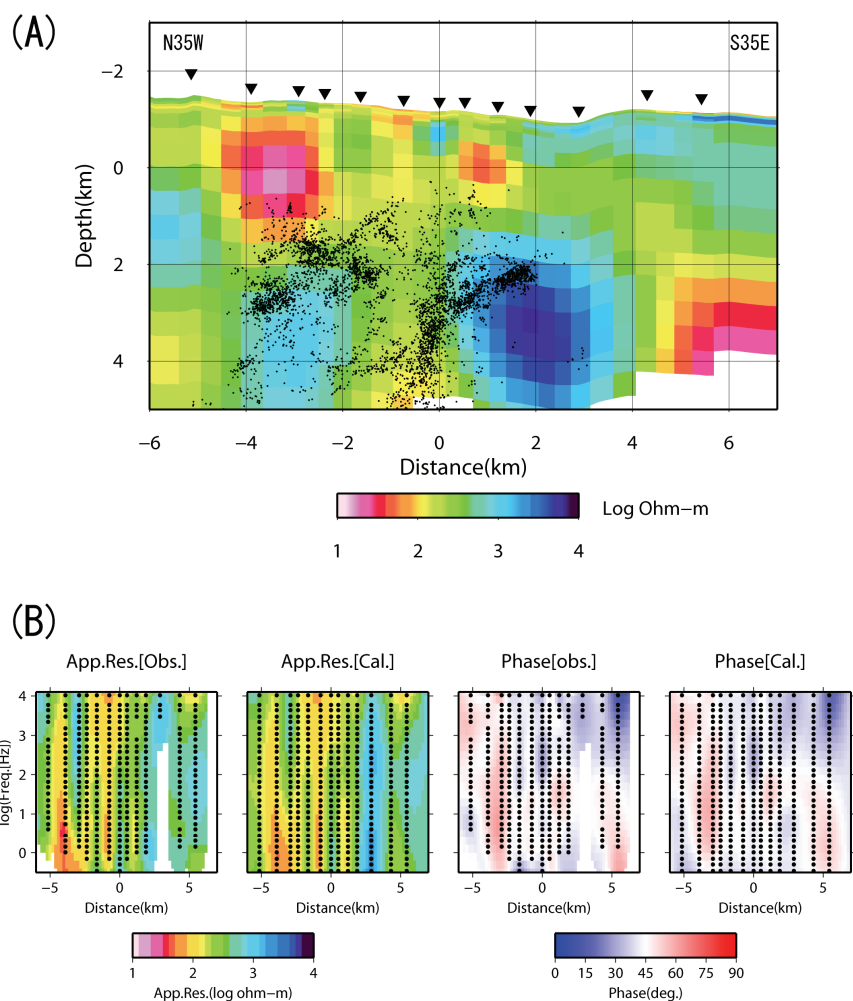


Fig. 3 (A) Two-dimensional resistivity model obtained by inversion from TM mode data. Inverted triangles indicate locations of MT sites projected to the analysis profile. The hypocenters in a 1km wide swath are also plotted as dots (after Noda et al., 2007). (B) Pseudo-sections for the observed and calculated TM mode data. From left to right: observed apparent resistivity, calculated apparent resistivity, observed phase, and calculated phase are shown. Dots denote the data used in inversion procedure.

et al. (2007) で顕著なP波の低速度異常の報告されている地域を通る樽沢測線に設定し (Fig. 1 において太線で示している), 測線近傍のAMT観測点13点を解析に用いて, 解析断面に対して並行な電場成分から算出されるTMモードのみのインバージョン解析を行った。TMモードのみを用いる場合, 3次元構造下の2次元解析においても, 大局的に妥当な比抵抗モデルが得られることが報告されている (例えば, Wannamaker et al., 1984)。インバージョン解析には, Ogawa and Uchida (1996) のコードを使用し, 地形を含む $100 \Omega\text{m}$ 一様の初期モデルから反復計算を行い, 観測データを良く説明するモデルを得た。

Fig. 3(A) に推定されたモデルを, 解析断面を含む 1km 幅に発生した微小地震とともに示す。解析されたモデル比抵抗の標準偏差が $10^{0.33}$ 以下と推定確度の高い範囲のみ図示している。Fig. 3(B) には, 観測データおよびモデルから計算されるデータの擬似断面を示す。見掛け比抵抗, 位相とも良くデータの特徴を再現できていることが見て取れる。

4. 結果と考察

得られた比抵抗モデルでは, 次のような特徴がイメージされている。

- [1] ごく浅部（標高0km付近）には、低比抵抗領域がパッチ状に分布する。
- [2] ごく浅部の低比抵抗領域は、微小地震活動の深部に向かって低比抵抗体が繋がるように延長する。

ごく浅部の低比抵抗の分布は、インバージョンにおける拘束条件・メッシュ構成を変更した解析結果や、REBOCC コード（Siripunvaraporn and Egbert, 2000）を用いたインバージョン解析においても同様な様相を示しており、推定位置に関してはかなりの確度を有しているものと考ええる。加えて、水平位置-3.5km 付近の低比抵抗領域直上には、単純二酸化炭素・鉄II冷鉱泉の泉源が位置している。冷泉サンプルの簡易電気伝導度測定を実施したところ、およそ0.07S/m の値を示し、比抵抗モデルの推定値と調和的であった。従って、浅部の低比抵抗体は、流体の存在を示していると考ええる。

浅部低比抵抗体の周辺に着目すると、その下限は深部に向かって伸長するようにイメージされている。この深部に連なる低比抵抗帯に沿って微小地震の発生域が垂れる傾向も見受けられるが、この深さ（3km 以深）において詳細な位置の対比に適うかどうかは、注意が必要である。2次元解析に使用したデータ近傍のMT応答を面的に概観すると、プロファイルに直交する方向にコントラストを有すようにも見えるため、今後の3次元解析の結果を元に検討を加えたい。

謝 辞

この観測の実施にあたり、観測点の土地所有者の方々には、快く器材の設置の許可を頂いた。また、長野県林務課、王滝村役場、木曽町役場三岳支所の方々には、観測の準備段階より多大なご助力を頂いた。長周期帯のリファレンス処理に際して、日鉄鉱コンサルタントより岩手県沢内の広帯域MTデータを提供して頂いた。また、京都大学大学院理学研究科付属地球熱学研究施設火山研究センターよりAMT観測器材を借用した。ここに記して、感謝の意を表す。本研究は科研費（19204043）の助成を受けたものである。

参考文献

飯尾能久・池田隆司・小村健太郎・松田陽一・汐川

雄一・武田祐啓・上原大二郎（2000）：長野県西部地域における地震発生域の電気伝導度構造，物理探査，第53巻，第1号，pp. 56-66.

Gamble, T. D., Goubau, W. M. and Clarke, J. (1979): Magnetotellurics with a remote magnetic reference, Geophysics, Vol. 44, pp. 53-68.

Kasaya, T., Oshiman, N., Sumitomo, N., Uyeshima, M., Iio, Y. and Uehara, D. (2002): Resistivity structure around the hypocentral area of the 1984 Western Nagano Prefecture earthquake in central Japan, Earth Planets Space, Vol. 54, pp. 107-118.

Kasaya, T. and Oshiman, N. (2004): Lateral inhomogeneity deduced from 3-D magnetotelluric modeling around the hypocentral area of the 1984 Western Nagano Prefecture earthquake, central Japan, Earth Planets Space, Vol. 56, pp. 547-552.

Kimata, F., Miyajima, R., Murase, M., Darwaman, D., Ito, T., Ohta, Y., Irwan, M., Takano, K., Ibrahim, F., Koyama, E., Tsuji, H., Takayama, T., Uchida, K., Okada, J., Solim, D. and Anderson, H. (2004): Ground uplift detected by precise leveling in the Ontake earthquake swarm area, central Japan in 2002-2004, Earth Planets Space, Vol. 56, pp. e45-e48.

Noda, S., Iio, Y., Sekiguchi, S., Horiuchi, S. (2007): Seismic velocity structure and hypocentral distribution in the Western Nagano prefecture by using the dense seismic network data, Eos Trans. AGU, 88(52), Fall Meet. Suppl., Abstract S31A-0200.

Ogawa, Y. and Uchida, T. (1996): A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift, Geophysical Journal International, Vol. 126, pp. 69-76.

Siripunvaraporn, W., and Egbert, G. (2000): REBOCC: An efficient data-subspace inversion for two-dimensional magnetotelluric data, Geophysics, 65, 791-803.

Yoshida, S. and Koketsu, K. (1990): Simultaneous Inversion of Waveform and Geodetic Data for the Rupture Process of the 1984 Naganoken-Seibu, Japan, Earthquake, Geophys. J. Int., Vol. 103, pp. 355-362.

Wannamaker, P. E., Ward, S. H. and Hohmann, G. W. (1984): Magnetotelluric responses of three-dimensional bodies in layered earth, Geophysics, Vol. 49, pp. 1517-1533.

AMT Observations Around the Focal Region of the 1984 Western Nagano Earthquake

Ryokei YOSHIMURA, Naoto OSHIMAN, Takafumi KASAYA*, Yoshihisa IIO,
Tsutomu MIURA, Kazuhiro NISHIMURA, Tomoya YAMAZAKI,
Tetsuya HIGA**, Nariaki HIROSE** and Kanako TAIRA**

* Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

** Faculty of Science, Kyoto University

Synopsis

Investigation of the electrical structure around a seismic active region is an important issue to discuss what control the seismicity. The southeastern flank of the Ontake volcano is one of the most interesting fields to be explored. In this area, earthquake swarms have been continuously observed since 1976. Additionally, a large earthquake (M6.8) occurred in 1984 in this region. Recently, seismic tomography by dense seismic network found out low velocity anomalies beneath earthquake clusters. In order to delineate the physical properties of the upper crust surrounding the seismogenic zone compared with fine velocity structure, we plan to image lateral heterogeneity of electrical structure. Here, we report on new audio-frequency magnetotelluric data acquired in 2008 at 34 sites. As a consequence of the preliminary 2D inversion, conductive zone was found along the fault plane of the 1984 Earthquake. Additionally, several patches of conductor were also revealed at shallower depths.

Keywords: the 1984 western Nagano Earthquake, audio-frequency magnetotelluric observations, resistivity structure, earthquake swarm