

中央構造線断層帯（和泉山脈南縁）における稠密AMT観測の概要

Dense AMT Observations Across the Japan Median Tectonic Line Izumi Fault Zone

大内悠平⁽¹⁾・吉村令慧・田中大資・米田格・山崎友也

Yuhei OUCHI⁽¹⁾, Ryokei YOSHIMURA, Daisuke TANAKA, Itaru YONEDA and Tomoya YAMAZAKI

(1) 京都大学大学院理学研究科

(1) Graduate School of Science, Kyoto University

Synopsis

The Japan Median Tectonic Line Fault Zone (MTL) is a fault system that extends for about 360km and locates along the geological boundary between the Ryoke and the Sanbagawa belts. Izumi segment fault zone of MTL consists of Gojyodani and Shobudani faults, etc. Wideband MT soundings were carried out across these faults (DPRI, Kyoto Univ., 2014). The obtained resistivity model was characterized by a contrast around MTL. However, the shallow resistivity structure was not so clear.

In order to delineate fine subsurface electrical structure of the fault, we carried out audio-frequency magnetotellurics (AMT) measurements at 38 sites along a 5km profile across the Gojyodani and Shobudani faults in November 2014. As the result of remote reference processing using local and far remote sites, we obtained superior quality MT responses at almost all of the AMT sites. Pseudo-sections of responses, phase tensor ellipses and induction vectors indicate that there are several characteristic features beneath faults.

キーワード: 中央構造線断層帯（和泉山脈南縁），AMT観測，ダメージゾーン

Keywords: Japan Median Tectonic Line Izumi fault zone, AMT observations, Damage zone

1. はじめに

中央構造線断層帯は、近畿地方の金剛山地東縁から瀬戸内海西部の伊予灘にかけて約360kmにわたってのびる領家帯と三波川帯の地質境界に位置する活断層帯である。地震調査推進本部（2011）では、この断層帯を東から順に金剛山地東縁・和泉山脈南縁・紀淡海峡一鳴門海峡・讃岐山脈南縁一石鎚山脈北縁東部・石鎚山脈北縁・石鎚山脈北縁西部一伊予灘の6つのセグメントに区分している。中央構造線断層帯（和泉山脈南縁）では、京都大学防災研究所（2014）によって広帯域Magnetotelluric (MT) 観測が行われ、

地下数10kmを対象とする比抵抗構造の推定がなされている。推定された比抵抗構造では、断層帯を境に比抵抗コントラストが確認できるが、測点間隔が数kmであるため地下浅部の解像度は十分とは言えない。この測線は五条谷断層と菖蒲谷断層とともに横切る設定となっている。五条谷断層は右横ずれ型の活断層で、菖蒲谷断層は第四紀中～後期まで活動していた逆断層である（岡田，1986）。菖蒲谷断層は地質的意味での中央構造線の境界で、断層の北側は領家帯、南側は三波川帯になっている。活断層周辺での比抵抗構造に関するこれまでの研究によれば、断層のダメージゾーンに沿って顕著な低比抵抗領域

が存在することが報告されている。Unsworth *et al.* (1997) は、サンアンドレアス断層において電場の計測をシームレスに行う EMAP 方式の測定で高密度の探査を実現し、断層に沿った明瞭な破碎構造を検出している。一方国内では、例えば Yamaguchi *et al.* (2010) による山崎断層での調査において、ダメージゾーンに関連すると思われる浅部低抵抗異常の存在が報告されている。国内の調査では、地勢的な制約により、前者のようなEMAP方式による測定は非常に困難であるために、推定される構造の解像度は、測点密度に大きく依存する。五条谷断層と菖蒲谷断層は最新活動時期が異なるため、断層の回復過程の進行度の差異がダメージゾーンの幅に現れることが考えられるが、高密度な観測が実現できれば、このような断層の活動時期の違いによる低抵抗構造を検出できる可能性があると考えた。そこで我々は、先行研究よりも詳細な断層周辺の浅部構造を推定するため、また、断層の活動時期の違いによる構造の差異が存在するかを検証するために、稠密な Audio-frequency MT (AMT) 観測を計画・実施した。AMT観測では、10400-0.35Hzの周波数帯のMT応答を取得できるが、広帯域MT (380Hz-2,000sec) に比べて、その探査深度は浅部に限られるものの、機動的な観測が行え、多点でのデータ取得が容易であるという利点がある。

2. 観測概要

我々は、2014年11月9日～16日の期間に和歌山県高野町周辺においてAMT観測を実施した。五条谷断層と菖蒲谷断層を横切るように、38観測点で構成される南北方向約5kmの測線を設定した結果、測点間距離が平均140mの高密度探査を実現することができた。なお、断層周辺の詳細な構造を明らかにする目的で、断層付近では測点間隔が相対的にさらに密になるように測点を設定している (Fig. 1)。各測点の位置情報・データ取得期間・磁場参照点はTable 1にまとめており、測点番号はFig. 1で示した測点において北から南に昇順に割り振っている。測定には、Phoenix Geophysics社 (カナダ) 製のMTU-5Aを用い、電場2成分および磁場3成分の測定を行った。昼間よりも夜間に測定を行う方が人工ノイズの少ない良質なデータを得られるが、多くの点で電磁場データを測定するため昼間にも観測を行った。38観測点の内、14点は昼間の数時間分のデータを、残りの24点は昼間から翌朝にかけてのデータを収録した。昼間に測定を行った点では、数10Hzから長周期のデータに人工ノイズ、特に直流電流からの漏洩電流の影響が出ると考えられる。

3. 時系列処理

昼間の観測点は複数の観測点で測定時間の重複する時間帯を、夜間の観測点はノイズレベルの低下する4時間 (JST 01:00-05:00) のデータを切り出し、MT応答関数を算出した。各観測点では、相対的にノイズの少ない観測点を用い、リモートリファレンス処理 (Gamble *et al.*, 1979) を行っている。リファレンス距離は少なくとも500m以上離れている測点を選択した。吉村他 (2009) は、AMT観測において調査域内の相互リファレンス処理を行うと、10Hzより長周期に同一のノイズが混入するため、遠地の磁場を参照する必要があると指摘している。本研究でも同様の方法を採用し、33Hzより長周期側の周波数帯で、岩手県の国土地理院江刺観測場のMT連続観測データを参照点として処理を行った。その結果、夜間の8Hzより長周期側において見かけ低抵抗と位相の両者に改善が確認できた (Fig. 2)。ところが、昼間のデータにおいては、このような改善は確認できなかった。これは、この帯域においてデータのS/N比が小さいからだと考えられる。したがって、昼間のデータでは8Hzより長周期側のデータを使用しないこととした。加えて、特定の周波数に見られる明らかなノイズは目視により除去している。

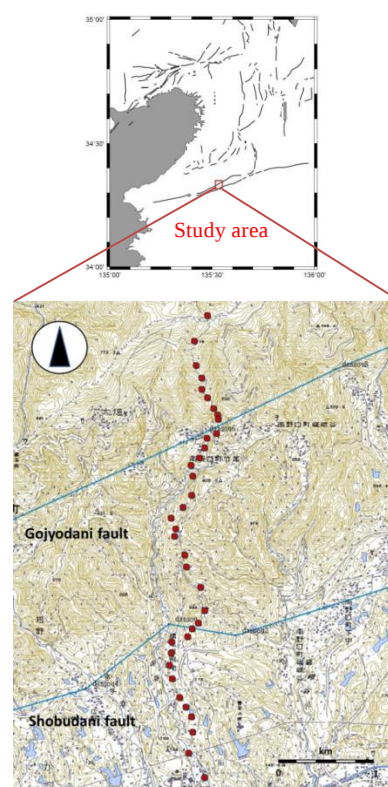


Fig. 1 Locations of AMT observation sites. Red circles denote observation sites. Blue lines show surface traces of the Gojyodani and the Shobudani faults. An index map is shown at top with faults.

Table 1 Summary of the remote site number, the measurement date and locations of the AMT sites.

Site No.	Latitude	Longitude	Start date of Observation	End date of Observation	Remote site
1	N34° 21' 06.60"	E135° 31' 55.95"	2014/11/9 14:28	2014/11/10 9:10	22
2	N34° 20' 57.62"	E135° 31' 52.16"	2014/11/10 10:39	2014/11/11 8:38	11
3	N34° 20' 51.29"	E135° 31' 51.05"	2014/11/11 10:28	2014/11/12 9:08	8
4	N34° 20' 44.88"	E135° 31' 54.63"	2014/11/12 10:53	2014/11/13 8:49	9
5	N34° 20' 40.86"	E135° 31' 54.92"	2014/11/13 10:06	2014/11/14 8:54	15
6	N34° 20' 38.19"	E135° 31' 57.35"	2014/11/14 10:18	2014/11/15 9:27	13
7	N34° 20' 35.23"	E135° 31' 58.72"	2014/11/15 10:54	2014/11/16 8:30	29
8	N34° 20' 32.43"	E135° 32' 00.20"	2014/11/11 14:48	2014/11/12 12:17	3
9	N34° 20' 30.12"	E135° 31' 59.14"	2014/11/12 13:11	2014/11/12 15:03	4
10	N34° 20' 27.60"	E135° 31' 59.14"	2014/11/12 16:04	2014/11/13 10:24	4
11	N34° 20' 25.42"	E135° 31' 56.40"	2014/11/10 15:46	2014/11/11 11:23	2
12	N34° 20' 22.12"	E135° 31' 54.80"	2014/11/10 12:15	2014/11/10 14:51	2
13	N34° 20' 17.30"	E135° 31' 54.16"	2014/11/14 16:16	2014/11/15 8:28	6
14	N34° 20' 16.48"	E135° 31' 50.51"	2014/11/14 12:10	2014/11/14 15:10	6
15	N34° 20' 12.74"	E135° 31' 50.84"	2014/11/13 15:30	2014/11/14 11:00	5
16	N34° 20' 06.33"	E135° 31' 50.85"	2014/11/13 11:57	2014/11/13 14:19	5
17	N34° 20' 02.23"	E135° 31' 48.14"	2014/11/11 9:52	2014/11/11 13:07	3
18	N34° 19' 59.87"	E135° 31' 44.31"	2014/11/12 15:02	2014/11/13 10:28	4
19	N34° 19' 54.68"	E135° 31' 45.45"	2014/11/13 16:38	2014/11/14 8:25	5
20	N34° 19' 53.07"	E135° 31' 44.26"	2014/11/13 11:58	2014/11/13 15:43	5
21	N34° 19' 46.86"	E135° 31' 48.27"	2014/11/10 12:39	2014/11/10 15:33	2
22	N34° 19' 43.19"	E135° 31' 49.06"	2014/11/9 17:04	2014/11/10 10:33	1
23	N34° 19' 35.80"	E135° 31' 54.00"	2014/11/10 15:21	2014/11/11 10:03	2
24	N34° 19' 28.42"	E135° 31' 54.48"	2014/11/13 10:08	2014/11/13 14:16	5
25	N34° 19' 24.60"	E135° 31' 52.49"	2014/11/13 16:04	2014/11/14 10:14	5
26	N34° 19' 22.53"	E135° 31' 50.36"	2014/11/12 11:38	2014/11/12 15:23	4
27	N34° 19' 20.20"	E135° 31' 49.50"	2014/11/14 10:00	2014/11/14 14:29	6
28	N34° 19' 17.75"	E135° 31' 43.69"	2014/11/15 11:20	2014/11/15 15:09	7
29	N34° 19' 13.63"	E135° 31' 43.77"	2014/11/15 16:19	2014/11/16 8:57	7
30	N34° 19' 07.96"	E135° 31' 44.59"	2014/11/14 16:11	2014/11/13 8:21	6
31	N34° 19' 05.70"	E135° 31' 45.76"	2014/11/15 9:54	2014/11/16 9:32	7
32	N34° 19' 00.34"	E135° 31' 46.53"	2014/11/12 16:57	2014/11/13 8:11	4
33	N34° 18' 56.54"	E135° 31' 48.80"	2014/11/10 16:50	2014/11/11 8:07	2
34	N34° 18' 51.68"	E135° 31' 50.40"	2014/11/15 12:56	2014/11/16 8:18	7
35	N34° 18' 48.26"	E135° 31' 51.52"	2014/11/11 11:31	2014/11/11 15:25	3
36	N34° 18' 41.39"	E135° 31' 49.88"	2014/11/10 10:18	2014/11/10 13:56	2
37	N34° 18' 33.98"	E135° 31' 54.90"	2014/11/12 10:15	2014/11/12 13:11	4
38	N34° 18' 26.92"	E135° 31' 57.43"	2014/11/11 16:31	2014/11/12 8:26	3

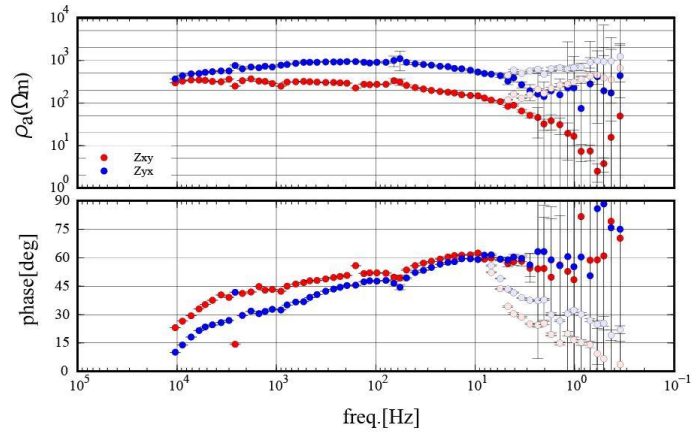


Fig. 2 Sounding curves of obtained MT responses at site 1. Components of XY and YX are shown by blue and red dots, respectively. As a remote reference site, blue and red respnses (>8Hz) use magnetic data of local site 22. White responses use local site 22 and are removed. Blue and Red dots (<8Hz) use a far remote reference site.

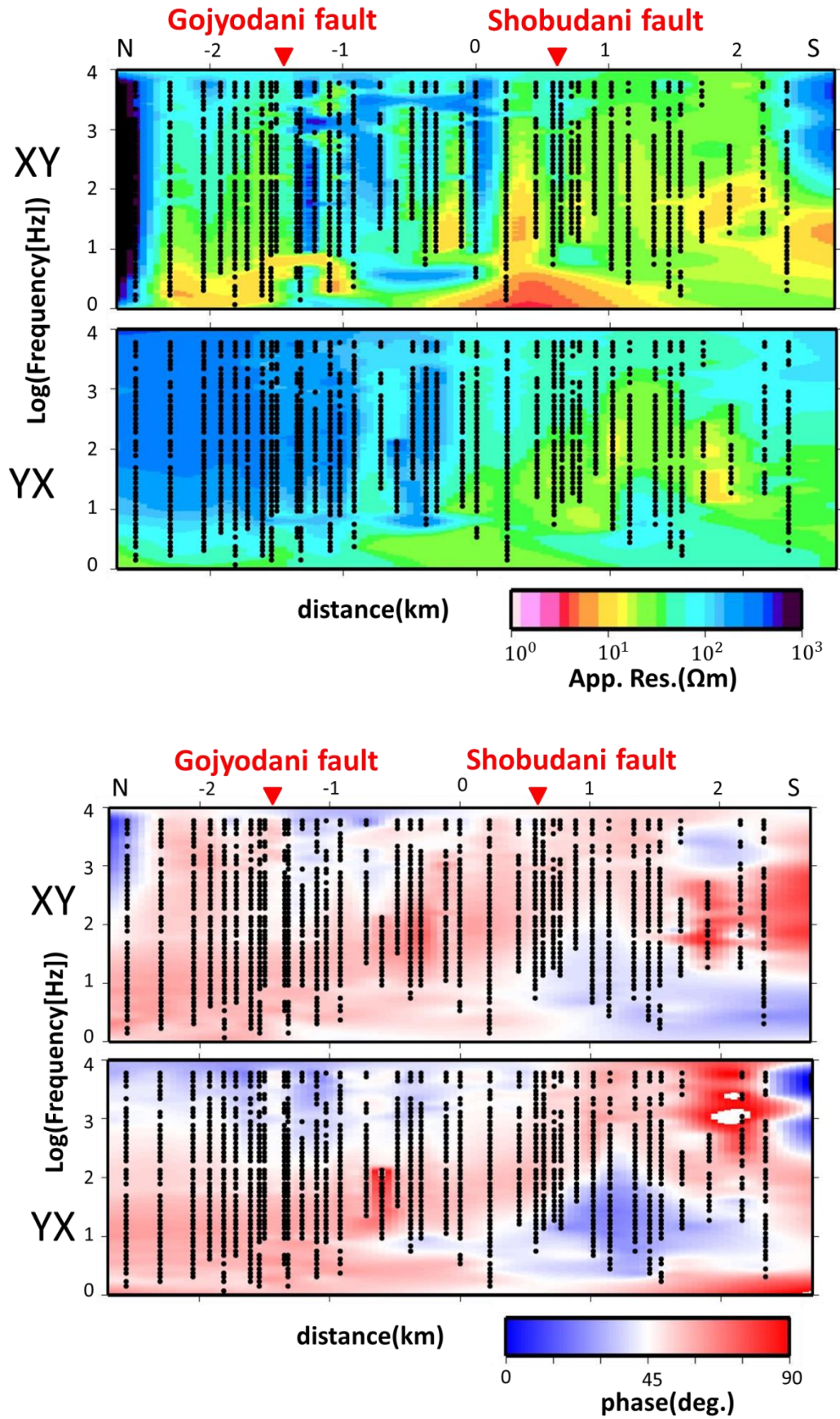


Fig. 3 Pseudo-sections for the observed data. The data obtained at each station are denoted by the dots. From upper to lower: apparent resistivity(X-Y), apparent resistivity(Y-X), phase(X-Y), phase(Y-X).

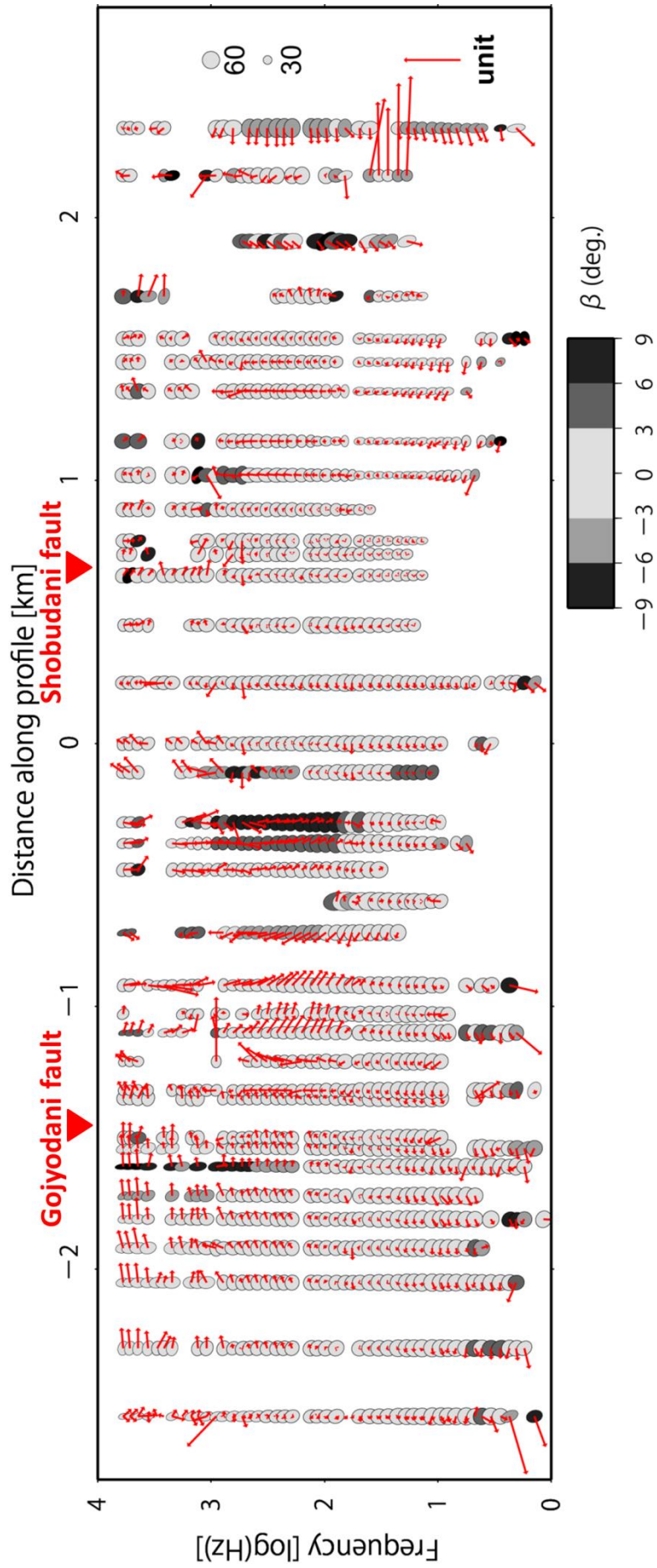


Fig. 4 Distribution of the Induction vectors and Phase tensor ellipses. The left side is the north direction.

4. MT応答関数について

得られたMT応答の疑似断面をFig. 3に示す。XY成分の見かけ比抵抗断面を見ると、五条谷断層ならびに菖蒲谷断層近傍の測点の1-10Hzに低比抵抗領域が広がっている。しかし、YX成分の見かけ比抵抗断面では、五条谷断層近傍の測点の1-10Hzに明瞭な低比抵抗領域が見られない。位相差の断面では、XY成分、YX成分ともに、測線の北側では高周波数で位相差が小さく低周波数で位相差が大きくなっている。これは深くなるにつれ比抵抗値が低くなることを示唆している。また、菖蒲谷断層下には、位相差の大きい領域が北に傾斜している様相が確認できる。菖蒲谷断層の傾斜が40-50° N（松田，1986）であることから、この位相差の大きい領域は断層のダメージゾーンに関連する低比抵抗体の存在を示している可能性がある。

次に、Phase tensor ellipse（Caldwell *et al.*, 2004）とInduction vector（Rikitake and Yokoyama, 1955）を用い、比抵抗構造の次元解析と走向解析を行った。Fig. 4に各観測点における1-10000HzのPhase tensor ellipseとInduction vectorを示す。Phase tensor ellipseにおいて、skew angle β が各観測点の多くの周波数帯で3°以下を示していることから、測線周辺では1次元ないし2次元的存在であることが推測される。菖蒲谷断層下では、10-100HzでPhase tensor ellipseが小さくなっていることが分かる。これは高比抵抗領域の存在を示しており、疑似断面（Fig. 3）とも整合的である。

100Hzより短周期のInduction vectorでは、中央から北に1kmのところを境に北側では南向きに、南側では北向きに方向が逆転している。この境界に低比抵抗領域があることが推定される。それに対し、100Hzよりも長周期のinduction vectorでは、全体的に北側を指す傾向がある。深部では北側にいくほど低比抵抗領域が広がっていることが考えられる。

5. おわりに

中央構造線断層帯（和泉山脈南縁）において2014年11月にAMT観測を実施した。参照磁場を適切に選択した結果、良質なMT応答関数が得られた。疑似断面を見ると、菖蒲谷断層下から位相差が大きい領域が北に傾斜していることが確認できた。Phase tensor ellipseは、1次元ないし2次元的存在傾向を示しており、疑似断面と調和的な特徴を有していることが分かった。

今後は、得られたMT応答関数から適切な周波数帯を選択しインバージョン解析を行うことで、詳細な2

次元解析につなげたい。

謝 辞

観測を実施するにあたり、土地所有者に快く土地使用の許可を頂いた。長周期帯のリファレンス処理に際して、国土地理院江刺観測場のMTデータを使用させて頂いた。また、本研究は京都大学地震予知研究センター・地震防災研究部門の独立研究経費の助成を受けて実施された。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 岡田篤正（1986）：和歌山県高野口町田原における中央構造線の断層露頭，活断層研究，2，pp. 43-50.
- 地震調査推進本部（2011）：中央構造線断層帯（金剛山地東縁－伊予灘）の長期評価（一部改訂）について，
http://jishin.go.jp/main/chousa/11feb_chuokozo/index.htm.
- 文部科学省研究開発局・国立大学法人京都大学防災研究所（2014）：中央構造線断層帯（金剛山地東縁－和泉山脈南縁）における重点的な調査観測平成25年度 成果報告書。
- 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（2009）：1984年長野県西部地震震源域周辺でのAMT観測，京都大学防災研究所年報，52（B），pp. 249-254.
- Caldwell, T. G., Bibby, H. M. and Brown, C.(2004): The magnetotelluric phase tensor Geophys, 158, 457-469.
- Gamble, T. D., Goubau, W. M. and Clarke, J. (1979):Magnetotellurics with a remotemagnetic reference, Geophysics, 44, pp. 53-68.
- Rikitake, T. and Yokoyama, I.(1955): Volcanic activity and changes in geomagnetism,J.Geophys. Res., 60, pp. 165-172.
- Unsworth, j. M., Malin, E. P., Egbert, D. G. and Booker, R. S.(1997): Internal structure of the San Andreas fault at Parkfield, California, 25(4), pp. 359-362.
- Yamaguchi, S., Ogawa, Y., Fujita, K., Ujihara, N., Inokuchi, H. and Oshiman N. (2010): Audio-frequency magnetotelluric imaging of the Hijima fault,Yamasaki fault system, southwest Japan, Earth Planets Space, 62, pp. 401-11.

（論文受理日：2015年6月11日）