

箱根地震活動域周辺でのAMT観測 ―序報―

吉村令慧・小川康雄⁽¹⁾・行竹洋平⁽²⁾・山崎友也・加茂正人
神田径⁽¹⁾・小森省吾⁽³⁾・後藤忠徳⁽⁴⁾・本多亮⁽²⁾・原田昌武⁽²⁾
安田陽二郎⁽⁵⁾・谷昌憲⁽⁴⁾

(1) 東京工業大学火山流体研究センター

(2) 神奈川県温泉地学研究所

(3) 京都大学大学院理学研究科 (現, 中華民国中央研究院地球科学研究所)

(4) 京都大学大学院工学研究科

(5) 鳥取大学大学院工学研究科

要 旨

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震の発生を受けて、誘発的地震活動の活発化の見たれた箱根火山地域において、その発生域の構造的特徴を把握するために、2011年12月に計39観測点での Audio-frequency Magnetotelluric (AMT) 法探査を実施した。既存の広帯域MT法探査のデータも加え、位相テンソル楕円・インダクションベクトルを各周期で求めたところ、駒ヶ岳直下ならびに金時山南方に良導体の存在を示唆する結果が得られた。この領域は、東北地方太平洋沖地震に即時応答して活動度が高まった場所に対応する。

キーワード: 箱根, AMT観測, 地震活動

1. はじめに

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震の発生直後から、日本各地で誘発的な地震活動の活発化が見られた(例えば気象庁, 2011)。活発化した地域を大別すると(1)地震動が到達したとほぼ同時に活発化した地域(たとえば、箱根火山周辺・焼岳周辺など)と(2)その活発化に数週間～1か月程度のタイムラグが見られた地域(福島県いわき・栃木群馬県境付近・秋田県内陸など)に二分できる。さらにそれぞれの地域で、誘発的地震活動の消長を詳しく確認すると、活動域の時間変化が見られる。本研究の対象とする箱根火山地域の2011年3月1日から4月30日までの地震活動を Fig. 1 に示す。同地域における活動は、Yukutake et al. (2011) により詳しく報告されているが、その特徴は以下のものであった。

[1] 3月11日～13日に、 $M_{\text{JMA}}4.6$ の最大地震を含め、Fig. 1 中のA・B・C・Dの領域でクラスターの活動が見られた。

[2] B・Aの領域では、それぞれ3月20日、22日に地震活動が増加した。

[3] 3月21日、4月9日にE領域において、A・Bの間を埋めるように地震活動が活発化した。

今回の誘発的地震活動域の大部分は、同地域でたびたび観測される群発活動域(Yukutake et al., 2010)と重なっているが、これまで地震活動が低調であった丹那断層北端(Fig. 1 C領域)で前述の最大地震が発生しており、過去の群発活動と比較する際に注意が必要である。

このような箱根地域における誘発活動について、地下構造の不均質性と関係があるか否かを把握することは、今後の火山活動や箱根―丹那断層の評価を行う上で重要だと考えられる。誘発活動は、東北地方太平洋沖地震本震の表面波の到達に即時応答していることから、その活発化に流体の存在が大きく影響した可能性が想起される。そこで我々は、流体の存在・分布形態に感度の高い Magnetotelluric (MT) 法探査による比抵抗構造調査を計画した。

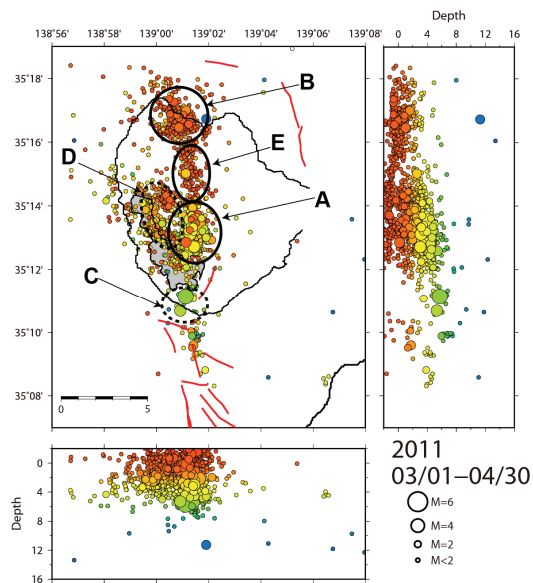


Fig. 1 Distribution of earthquake hypocenters occurred in the period from March 1 to April 30. These earthquakes were determined by Hot Springs Research Institute. Solid and dashed circles with labels show the remarkable regions in which the seismicity increased abruptly after the occurrence of the Tohoku Earthquake.

2. AMT観測の概要

箱根周辺では、2010年から2011年にかけて神縄・国府津一松田断層を対象とした広帯域MT観測（周波数帯域：320Hz～3,000sec）が実施されている（小川ら，2012）が、このデータを概観すると、箱根市街地の高ノイズ域であっても周期1秒までのMT応答が得られていることが分かる。周期1秒より長周期は、箱根火山周辺を走る直流電車起因のノイズが大きいため応答の推定が困難である。今回対象とする箱根地域では地震活動の下端深度が浅いことも考慮し、周波数帯域を可聴域（10,400～0.35Hz）に絞った Audio-frequency Magnetotelluric (AMT) 観測を計画・実施した。2011年12月に、箱根カルデラを包括する領域において、39観測点で夜間の電磁場データを取得した。3次元比抵抗構造を推定することを目的に、面的に観測点を配置している（Fig. 2）。観測点の位置情報ならびにデータ収録日を Table 1 に示す。観測にはカナダ Phoenix 社製 MTU5A システムを用いて、各観測点最大20時間（UTC 04:00-00:00）で電場2成分、磁場3成分のデータを測定した。

3. データ処理および解析

3.1 MT応答の推定

各観測点のデータ中、夜間4時間（UTC 15:00-19:00）を切り出し、MT応答の推定を行った。併せて、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。同日に測定したデータの内、良質な電磁場データが得られたサイトを2点選択し、調査領域内で相互参照を行った。Fig. 3 に得られた探索曲線の例を示す。全体的に各周期において、誤差の小さい応答が得られているが、長周期側（1Hz付近）で見かけ比抵抗が増加し、かつ位相差がゼロに漸近する典型的な人工ノイズの特徴が見られる。これは、調査領域全体にわたる広域共通ノイズが存在し、調査領域内の相互参照ではその影響を取り除けていない可能性を示唆している。吉村ら（2009）は、AMT観測においても遠距離相互参照が、1Hz付近の探索曲線の改善に有効であることを示している。岩手県において連続運用されている広帯域MT観測データを用いて、試験的に遠距離相互参照処理を行ったが劇的な改善は見られなかった。今後は、各観測点の時系列を精査し、ノイズの混入の少ない時間帯のみで推定を行うなど1Hz前後の応答の推定精度の向上を試みたい。観光・宿泊施設や送電線に近接する一部のサイトでは、限られた帯域でしか求まっていないが、大部分の観測点で、Fig. 3 で例示したように1.72Hzまで良質なMT応答が得られた。

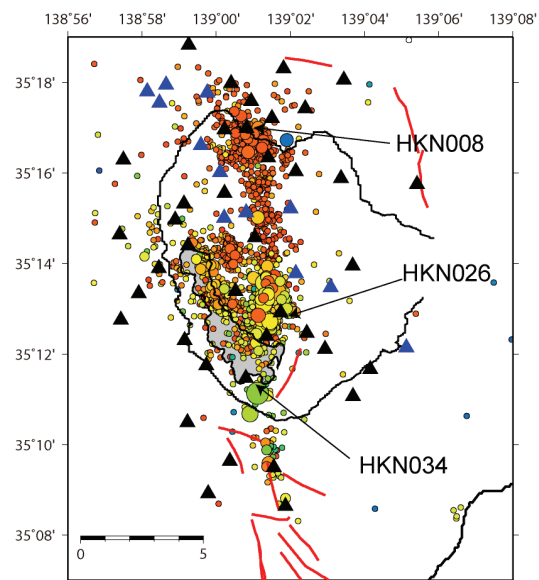


Fig. 2 Locations of AMT (this study) and previous wideband MT (Ogawa et al., 2012) sites are indicated as black and blue triangles, respectively.

Table 1 Summary of the measurement date and locations of the AMT sites.

Site ID	Latitude (dd:mm:ss.s)	Longitude (ddd:mm:ss.s)	Height (m)	Date of Observation (yyyy/mm/dd)
HKN001	N35:18:49.7	E138:59:15.7	473	2011/12/18
HKN002	N35:18:18.2	E139:01:49.0	588	2011/12/16
HKN003	N35:18:03.4	E139:03:26.3	600	2011/12/19
HKN004	N35:17:58.7	E139:00:24.1	931	2011/12/19
HKN005	N35:17:35.2	E139:00:56.6	715	2011/12/17
HKN006	N35:17:25.6	E139:02:24.1	822	2011/12/18
HKN007	N35:17:12.4	E139:01:30.2	802	2011/12/17
HKN008	N35:16:59.2	E139:00:49.0	849	2011/12/16
HKN009	N35:16:57.5	E139:00:13.3	780	2011/12/15
HKN010	N35:16:20.5	E139:01:23.9	741	2011/12/21
HKN011	N35:16:17.3	E138:57:29.9	757	2011/12/15
HKN012	N35:16:02.0	E139:02:08.6	735	2011/12/20
HKN014	N35:15:52.9	E139:03:21.9	676	2011/12/19
HKN015	N35:15:45.1	E139:05:24.7	372	2011/12/19, 20
HKN016	N35:15:33.3	E139:00:13.4	675	2011/12/20
HKN017	N35:14:57.8	E138:58:53.8	720	2011/12/20
HKN018	N35:14:34.6	E139:01:02.5	1012	2011/12/20
HKN019	N35:14:38.2	E138:57:23.9	598	2011/12/16
HKN020	N35:15:19.2	E138:59:08.0	692	2011/12/20
HKN021	N35:14:23.7	E138:59:14.6	731	2011/12/19
HKN022	N35:13:57.2	E139:03:40.8	769	2011/12/16
HKN023	N35:13:53.9	E138:58:27.4	835	2011/12/17
HKN024	N35:13:23.2	E139:00:31.5	929	2011/12/19
HKN025	N35:13:20.5	E138:57:54.9	636	2011/12/18
HKN026	N35:12:55.1	E139:01:44.5	961	2011/12/15
HKN027	N35:12:45.3	E138:57:25.9	522	2011/12/16, 17
HKN028	N35:12:28.0	E139:02:26.4	770	2011/12/18
HKN029	N35:12:23.6	E139:01:21.5	809	2011/12/17
HKN030	N35:12:18.4	E138:59:09.0	949	2011/12/15
HKN031	N35:12:06.6	E139:02:56.2	690	2011/12/19
HKN032	N35:11:44.9	E138:59:43.9	979	2011/12/16
HKN033	N35:11:40.0	E139:04:09.0	918	2011/12/16
HKN034	N35:11:28.3	E139:00:47.8	737	2011/12/18
HKN036	N35:11:04.1	E139:03:41.5	858	2011/12/15
HKN037	N35:10:29.6	E138:59:13.6	651	2011/12/17
HKN039	N35:09:38.0	E139:00:22.0	587	2011/12/21
HKN040	N35:09:29.6	E139:01:33.0	828	2011/12/17, 21
HKN041	N35:08:55.3	E138:59:47.2	358	2011/12/20
HKN042	N35:08:38.6	E139:01:52.1	779	2011/12/18, 21

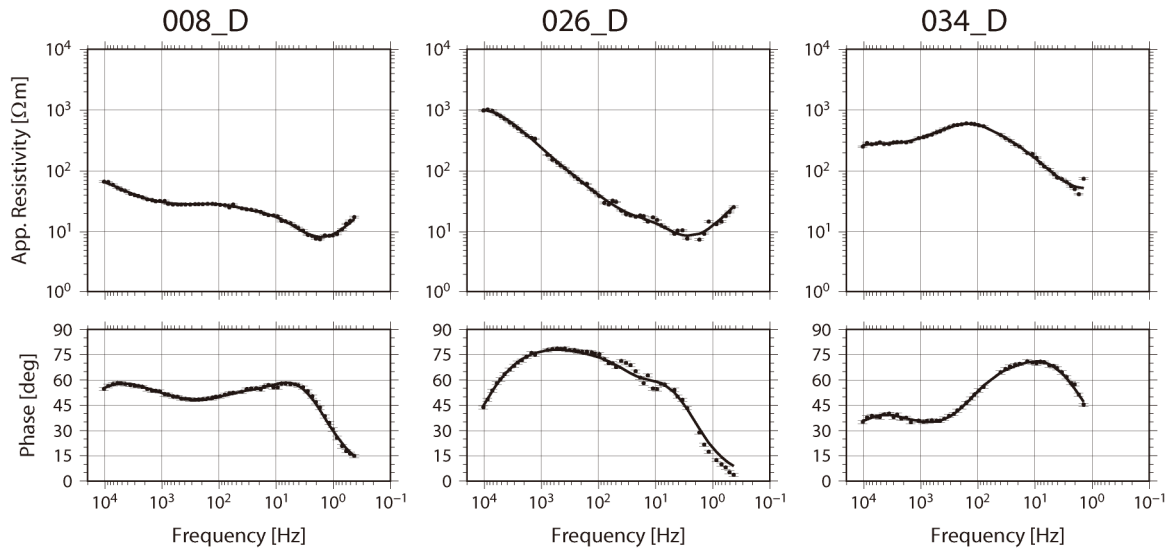


Fig. 3 Curves of obtained MT responses at sites HKN008, HKN026 and HKN034. These responses are calculated from the determinant average of the impedance tensor. Solid lines are the responses of one-dimensional models which are shown in Fig. 5.

3.2 位相テンソル楕円およびインダクションベクトル

MT応答の空間分布を把握するために、位相テンソル解析 (Caldwell et al., 2004) を行った。インダクションベクトル (IV) と併せて、位相テンソル楕円 (PTE) を代表的な3周期分について Fig. 4 に示す。比較的浅部の情報を含むと考えられる短周期側では、IV が誘発的地震活動領域A・B・Dを指し示す傾向が確認できる。周期が長くなるにつれ、IV の向きはA・B領域にローカライズするようになり、最終的には地震活動域の東部外縁に揃うように見える。同様

に、PTE は領域A・B近傍で径が大きく（良導体の存在を示唆）、地震活動域のすぐ外側で PTE の軸が傾く（構造境界の存在を示唆）傾向が確認できる。構造の3次元性の有無を意味する PTE の β 角は、それほど大きな値を示さないが、面的に PTE の大きさ・主軸の角度が変化していることから、3次元解析による構造の推定が必要であると考えられる。

3.3 1次元解析

前節で、3次元解析の必要性を指摘したが、PTE および IV の示す大局的な構造を予想的に確認するた

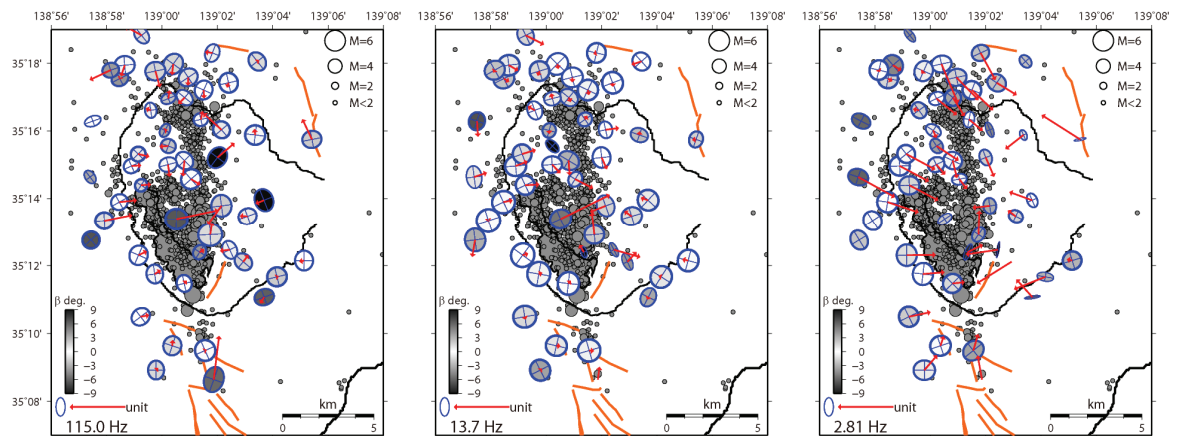


Fig. 4 Spatial distributions of the real induction vectors (red arrows) and the phase tensor ellipses for frequency bands of 115, 13.7 and 2.81 Hz are shown. The induction vectors point towards zones of conductors. Phase tensor ellipses are shown with their principal axes.

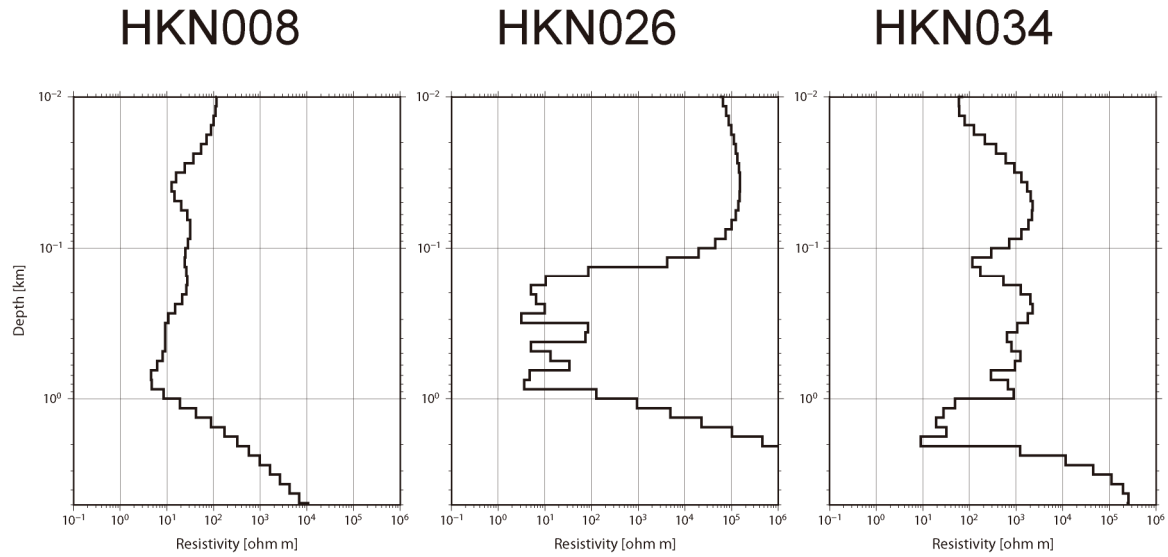


Fig. 5 One-dimensional models, which inverted from the determinant average of impedance tensor using Occam's inversion code, are shown for sites HKN008, HKN026 and HKN034. In Fig.3, model responses for these models are superimposed on the obtained responses as solid lines.

めに幾つかのサイトにおいて1次元解析を実施した。解析には、Constable et al. (1987) による OCCAM インバージョンコードを使用した。式 (1) で与えられる determinant average から求められる見かけ比抵抗・位相を入力に応答とした。インピーダンスの determinant は水平の座標回転に対して不変である (たとえば, Simpson and Bahr, 2005)。

$$Z_{det} = (Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx})^{1/2} \quad (1)$$

Fig. 2 に示した HKN008, HKN026, HKN034 の3点における1次元解析結果を Fig. 5 に示す。また求めた1次元構造モデルに対する理論応答は、Fig. 3 に実線で表しているが、観測値をよく説明するモデルが得られていることが分かる。しかしながら、3.1節でも指摘したように、1Hz前後の帯域には広域な人工ノイズの混入が疑われるため、モデルにおける下層 (各モデルで数km以深の層) の極端な高比抵抗層は信頼性が低いことに注意されたい。PTE 分布や IV に示唆される低比抵抗体の存在は、層厚を持った低比抵抗層として検出された。また、10Ωm程度の低比抵抗層の上面は、南部 (HKN034) で深くなる傾向も確認できる。Fig. 1 のNS方向の震源分布の深さ断面と対比すると、地震発生層の上面が南部ほど深くなる様相と調和的である。

1次元解析は、得られたMT応答から平均的な成層構造を推定するため、観測点下の大局構造を把握す

ることには有用であるものの、比抵抗の値や測点間の構造の違いを詳細に議論することには制限がある。特徴的な誘発活動域間での構造の差異を明らかにするために、今後の3次元解析・比抵抗構造モデルの構築に期待したい。

4. おわりに

箱根周辺における誘発的地震活動域の比抵抗構造を推定するために AMT観測を面的に実施した。取得されたAMTデータに加え既存の広帯域MTデータを統合して、位相テンソル楕円・インダクションベクトルの分布を概観したところ、(1) 即時的に誘発活動が活発化した領域下に、低比抵抗体の存在を示唆する傾向、(2) 地震活動域の外縁に比抵抗構造境界が位置する傾向が確認された。また、予察的な 1次元解析の結果、(3) 地震発生層上面が南下がりに傾斜する分布に調和的な低比抵抗層が検出された。

今後の課題として、(i) 低比抵抗領域の下限を把握するためにも、時系列の精査を進め1Hz前後の帯域でMT応答の推定精度を上げること、(ii) 比抵抗構造と特徴的な誘発活動域の対応関係を詳細に議論するために、3次元構造解析を進めることを挙げておきたい。

謝 辞

本観測の実施において、土地所有者の方々および周辺自治体（箱根町役場・南足柄市役所・小田原市役所・御殿場市役所・裾野市深良支所・函南町役場）の関係各位のご協力は欠かせないものであった。また、環境省箱根自然環境事務所・静岡県には、国立公園内での観測申請・実際の調査に関して、丁寧なご指導をいただいた。調査器材は共同研究機関の器材に加え、大阪市立大学より借用した。「神縄・国府津―松田断層帯における重点的な調査観測」により取得された広帯域MTデータの一部を提供いただいた。参照磁場として、日鉄鉱コンサルタントより岩手県沢内の広帯域MTデータを提供していただいた。本観測は、防災研究所所長裁量経費「東日本大震災に関する緊急調査」、防災研究所地震予知研究センター・地震防災研究部門「独立研究」の各研究経費によって実施された。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

小川康雄・神田径・吉村令慧・上嶋誠（2012）：神縄断層西方延長の比抵抗構造探査，神縄・国府津―松田断層帯における重点的な調査観測成果報告書，pp.118-124.
気象庁（2011）：平成23年3月地震・火山月報（防災編），321pp.
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，第52号B，pp. 249-254.

Caldwell, T. G., Bibby, H. M. and Brown, C. (2004): The magnetotelluric phase tensor, *Geophysical Journal International*, Vol. 158, pp 457-469.

Constable, S. C., Parker, R. L. and Constable, C. G. (1987): Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data, *Geophysics*, Vol. 52, pp. 289-300.

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

Simpson, F. and Bahr, K. (2005): *Practical Magnetotellurics*, Cambridge University Press, 254 pp.

Yukutake, Y., Honda, R., Harada, M., Aketagawa, T., Ito, H. and Yoshida, A. (2011): Remotely triggered seismicity in Hakone volcano following the 2011 OFF the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, Vol. 63, pp. 737-740.

Yukutake, Y., Tanada, T., Honda, R., Harada, M., Ito, H. and Yoshida, A. (2010): Fine fracture structures in the geothermal region of Hakone volcano, revealed by well-resolved earthquake hypocenters and focal mechanisms, *Tectonophysics*, Vol. 489, pp. 104-118.

（論文受理日：2012年6月8日）

AMT Observations over the Seismic Active Region in Hakone Volcano –Preliminary Results

Ryokei YOSHIMURA, Yasuo OGAWA⁽¹⁾, Yohei YUKUTAKE⁽²⁾, Tomoya YAMAZAKI,
Masato KAMO, Wataru KANDA⁽¹⁾, Shogo KOMORI⁽³⁾, Tada-nori GOTO⁽⁴⁾, Ryou HONDA⁽²⁾,
Masatake HARADA⁽²⁾, Yojiro YASUDA⁽⁵⁾ and Masanori TANI⁽⁴⁾

(1) Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

(2) Hot Springs Research Institute, Kanagawa

(3) Graduate School of Science, Kyoto University

Now at Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taiwan

(4) Graduate School of Engineering, Kyoto University

(5) Graduate School of Engineering, Tottori University

Synopsis

Seismicity around the Hakone volcano was activated just after the arrival of surface waves caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. Most of these triggered earthquakes had similar distribution to prior occasional swarm activities. In order to image electrical properties around such seismic events, we carried out audio-frequency magnetotelluric (AMT) measurements at 39 sites in December 2011. As the result of remote-reference processing using local sites, we obtained fair sounding curves at most sites for frequencies higher than 1Hz. The spatial distribution of the induction vectors and the phase tensor ellipses suggests that conductive bodies may lie beneath the remarkable regions in which the seismicity increased abruptly just after the occurrence of the Tohoku Earthquake.

Keywords: Hakone Volcano, AMT observations, seismic activity