

四国西部での広帯域MT観測

Wideband Magnetotelluric Measurements in the Western Part of Shikoku Island

吉村令慧・山崎健一・小川康雄⁽¹⁾・中川潤・川崎慎吾・小松信太郎・米田格
大内悠平⁽²⁾・岡崎智久⁽²⁾・鈴木惇史⁽³⁾・齋藤全史郎⁽³⁾・寺石眞弘

Ryokei YOSHIMURA, Ken'ichi YAMAZAKI, Yasuo OGAWA⁽¹⁾, Jun NAKAGAWA,
Shingo NAKAGAWA, Shintaro KOMATSU, Itaru YONEDA, Yuhei OUCHI⁽²⁾,
Tomohisa OKAZAKI⁽²⁾, Atsushi SUZUKI⁽³⁾, Zenshiro SAITO⁽³⁾ and Masahiro TERAISHI

- (1) 東京工業大学火山流体研究センター
(2) 京都大学大学院理学研究科
(3) 東京工業大学理学研究科

- (1) Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology, Japan
(2) Graduate School of Science, Kyoto University, Japan
(3) Graduate School of Science, Tokyo Institute of Technology, Japan

Synopsis

Recent geodetic observations detect recurrent slow slip events (SSE), which occurred beneath the Bungo Channel and southwest Shikoku Island, with interval of approximately 6 years (e.g. GSI, 2010). In order to reveal a three-dimensional resistivity structure around SSE region, we are carrying out wideband magnetotelluric (MT) surveys. We also plan to establish a permanent long-term MT monitoring network that aims to detect temporal changes of resistivity structure during SSE cycle.

As of June, 2016, MT surveys were performed at 31 sites by using Phoenix wideband MT instruments. In the most of sites, high quality MT responses were obtained using the BIRRP code (Chave and Thomson, 2004) for the period range 0.01 to 10,000 sec. The spatial distributions of the phase tensor ellipses and the induction vectors suggest that resistivity contrasts are located around SSEs.

キーワード: 広帯域MT観測, 四国西部, 豊後水道, スロー地震

Keywords: Wideband MT Surveys, Western Part of Shikoku Island, Bungo Channel, Slow Slip Events

1. はじめに

西南日本に沈み込むフィリピン海プレート沿いでは、絶大な被害をもたらす断層すべりに比較して短い周期で再来する地球科学的な現象が知られている（例えば、Obara, 2011）。その一つに、豊後水道にて発生するスロースリップイベント（SSE）が挙げら

れるが近年では、1997年、2003年、2010年とほぼ場所を一にして約6年間隔で発生が検出されている（国土地理院, 2010；Fig. 1）。SSEはプレート境界面上で巨大地震の震源域となる高速破壊域の周辺部に発生しており、その発生場の状態把握は、メカニズムやプレート間カップリングの多様性を理解する上で重要かつ基本的な課題である。SSEの発生には“水”

の関与が議論されているが、構造モデルとして決定的に実証されているわけではない。そこで我々は、豊後水道 SSE 発生域周辺の三次元比抵抗構造を明らかにすることを目的に、四国西部域において31点の広帯域 Magnetotelluric (MT) 観測を計画・実施した。比抵抗は、流体の存在に敏感で、SSE 発生域周辺の構造的特徴を記述するために有用な物理量であると考えられる。

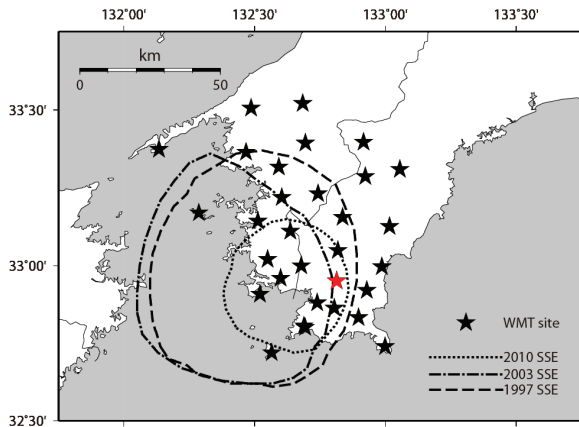


Fig. 1 Locations of wideband MT sites are indicated as stars. Red star represents location of a MT site close to Sukumo observatory (SKM) of DPRI, Kyoto University. Three broken lines show main slip regions of 1997, 2003 and 2010 SSEs reported by GSI (2010), respectively.

2. 広帯域MT観測の概要

豊後水道に点在する島を含めて、四国西部の陸域（高知県、愛媛県）において2014年度、2015年度、2016年度にそれぞれ6点、22点、3点の計31点にて広帯域 MT 観測を実施した (Fig. 1)．観測点の位置情報ならびにそれぞれの観測点におけるデータ収録期間を Table 1 に示す。WSKK-002 は、後述する時系列解析において周辺環境に相应しない低品位の MT 応答であったため、北東に約 700 m 離れた WSKK-402 で再計測を行った。

観測にはカナダ Phoenix Geophysics 社製 MTU5/5A システムを用い、電場2成分、磁場3成分の電磁場変動を測定した。電場測定には鉛-塩化鉛電極を、磁場測定にはインダクションコイルセンサー (MTC-50H および MTC-80H) を使用している。MTC-80H は、MTC-50H と比較して長周期側の可測帯域が若干狭くなるが、センサー長が短く設置が容易であるため、一部の測点 (WSKK-002, 003, 004, 005, 006, 105, 107, 108, 201, 202, 204, 303, 305, 306, 401, 402, 403) において鉛直磁場の計測に用いている。電

磁場変動の計測は、2,400 Hz および150 Hz サンプリングの離散的な収録と、15 Hz サンプリングの連続的な収録の3つのバンドで行った。

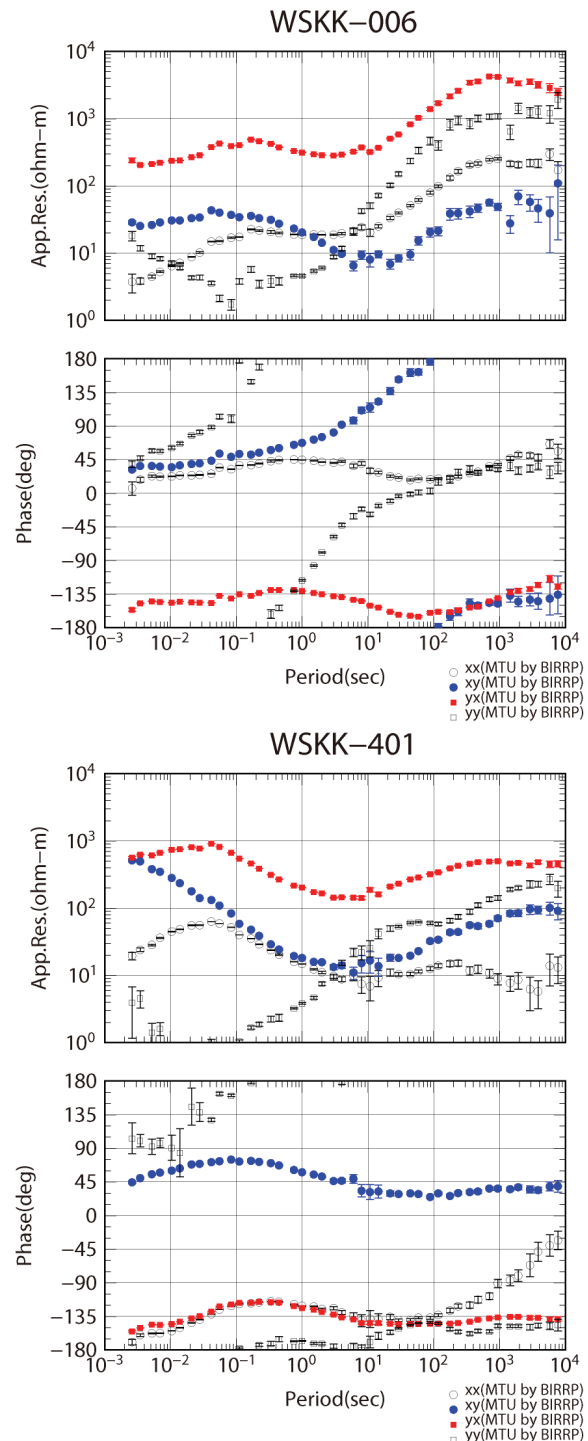


Fig. 2 Sounding Curves of obtained MT responses at sites WSKK-006 and WSKK-401. Components of XY and YX, namely off-diagonal terms, are shown by colored solid dots.

Table 1 Measurement site locations (WGS84) and recording periods.

Site ID	Latitude (dd:mm:ss.s)	Longitude (ddd:mm:ss.s)	Height (m)	Date of Observation (yyyy/mm/dd)
WSKK-001	N32:44:21.6	E132:59:54.2	304	2014/12/17 - 2014/12/27
WSKK-002	N32:48:08.0	E132:41:32.5	79	2014/12/17 - 2015/01/02
WSKK-003	N32:49:59.0	E132:53:50.8	77	2014/12/18 - 2015/01/03
WSKK-004	N32:57:03.0	E132:48:47.3	37	2014/12/18 - 2014/12/26
WSKK-005	N32:59:48.7	E132:59:09.7	54	2015/01/24 - 2015/02/08
WSKK-006	N32:59:59.1	E132:40:40.3	99	2015/01/24 - 2015/02/07
WSKK-101	N32:51:49.9	E132:48:14.6	194	2015/05/14 - 2015/05/28
WSKK-102	N32:52:52.2	E132:44:18.3	19	2015/05/14 - 2015/05/29
WSKK-103	N32:55:15.5	E132:55:42.1	69	2015/05/12 - 2015/05/28
WSKK-104	N32:57:35.5	E132:35:56.8	58	2015/05/13 - 2015/05/27
WSKK-105	N33:01:16.1	E132:32:59.2	289	2015/05/13 - 2015/05/31
WSKK-106	N33:02:56.3	E132:49:05.0	23	2015/05/14 - 2015/05/28
WSKK-107	N33:06:38.3	E132:38:11.0	295	2015/05/13 - 2015/05/28
WSKK-108	N33:08:35.5	E132:30:43.6	39	2015/05/13 - 2015/05/30
WSKK-109	N33:09:22.0	E132:50:09.3	281	2015/05/14 - 2015/05/28
WSKK-110	N33:13:54.3	E132:44:30.7	119	2015/05/13 - 2015/05/30
WSKK-201	N32:54:29.6	E132:31:10.6	73	2015/09/16 - 2015/09/28
WSKK-202	N33:07:36.0	E133:00:55.6	172	2015/09/17 - 2015/09/28
WSKK-203	N33:18:35.2	E133:03:16.1	341	2015/09/17 - 2015/09/28
WSKK-204	N33:23:36.8	E132:41:36.6	203	2015/09/16 - 2015/09/29
WSKK-205	N33:22:24.5	E132:08:02.6	193	2015/09/15 - 2015/09/24
WSKK-206	N33:30:20.7	E132:29:08.9	186	2015/09/15 - 2015/09/29
WSKK-301	N33:13:10.7	E132:36:12.4	431	2015/10/01 - 2015/10/14
WSKK-302	N33:17:10.8	E132:55:24.2	593	2015/09/29 - 2015/10/13
WSKK-303	N33:19:01.1	E132:35:30.3	221	2015/10/01 - 2015/10/14
WSKK-304	N33:21:51.5	E132:27:59.9	468	2015/09/30 - 2015/10/14
WSKK-305	N33:23:49.2	E132:54:57.5	518	2015/09/29 - 2015/10/13
WSKK-306	N33:31:13.7	E132:41:01.3	94	2015/09/30 - 2015/10/14
WSKK-401	N32:43:10.2	E132:33:54.4	249	2016/05/11 - 2016/05/31
WSKK-402	N32:48:25.0	E132:41:16.3	65	2016/05/10 - 2016/05/19
WSKK-403	N33:10:10.4	E132:17:08.7	90	2016/05/12 - 2016/05/31
SWA	N39:34:34.6	E140:49:39.9	474	Reference site for 001-006
KAG	N31:55:29.0	E130:47:31.6	745	Reference site for 101-403

3. 時系列処理および解析

多くの MT 法探査の時系列処理では、MT 応答を推定する際、人工ノイズの要因となる人間活動が低下する時間帯の電磁場変動を選択的に使用して S/N 比を向上させることが行われる（たとえば、吉村ら、2005）。しかしながら、本調査地域で取得された電磁場変動データには人工ノイズの混入が非常に少なかったため、可能な限り長周期の MT 応答を求める

べく昼夜を問わず取得データを最大限に使用した。ただし、2,400 Hz および 150 Hz サンプリングの2つのバンドについては、データ量が非常に多くなり時系列処理に時間を要するため、各測定日の夜間5時間（UTC 15:00-20:00）のみ使用して応答の推定を行った。

MT 応答の推定には、リモートリファレンス処理（Gamble et al., 1979）を施し、BIRRP アルゴリズム（Chave and Thomson, 2003, 2004）を用いた。磁場参

照信号として、2014年度実施の測点には岩手県沢内、2015年度・2016年度実施の測点には鹿児島県霧島で連続運用されている広帯域 MT 観測データを使用した。ただし、2014年度実施の測点の時系列処理では、商用周波数帯周辺の帯域において推定される応答のばらつきが見られた。これは異なるノッチフィルターの使用が原因と考えられるため、2,400 Hz および 150 Hz サンプリングの2つのバンドに対しては、調査域内で同時にデータを収録していた他観測点を用いて相互参照を行った。WSKK-108 観測点においては、機器の不調により、水平磁場変動の測定が行えなかったため、応答の推定には近傍のWSKK-107 の水平磁場データを代用した。時系列処理の結果として、大部分の観測点において Fig. 2 に例示したように 400 Hz ~ 0.0001 Hz の帯域において非常に良質な MT 応答が推定できた。

得られた MT 応答の空間分布を概観するために、式 (1) で定義される determinant average impedance (たとえば, Simpson and Bahr, 2005) から求められる見かけ比抵抗および位相を Fig. 3 の上段および

中段に示す。

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

図示した見かけ比抵抗および位相の分布は、特定周波数毎の擬似平面であるため、各測点下の等深度の様相を反映しているわけではない。また、determinant average impedance は座標回転に対しての不変量であるため、主にデータの持つ一次元的特長を抽出している。しかしながら、特に見かけ比抵抗分布において、SSE 滑り域を取り囲むように MT 応答のコントラストが目立ち、SSE の滑り分布に関連する構造不均質の存在を示唆している。

次に、位相テンソル解析 (Caldwell et al., 2004) を行った。位相テンソル楕円をインダクションベクトル (実部) とともに Fig. 3 の下段に示す。SSE の滑り域縁辺部において、位相テンソル楕円の形状や長軸の向きに変化が見られる。また、インダクションベクトルの大きさ・向きについても、滑り域の内外で異なる様子が確認できる。これらは、見かけ比抵

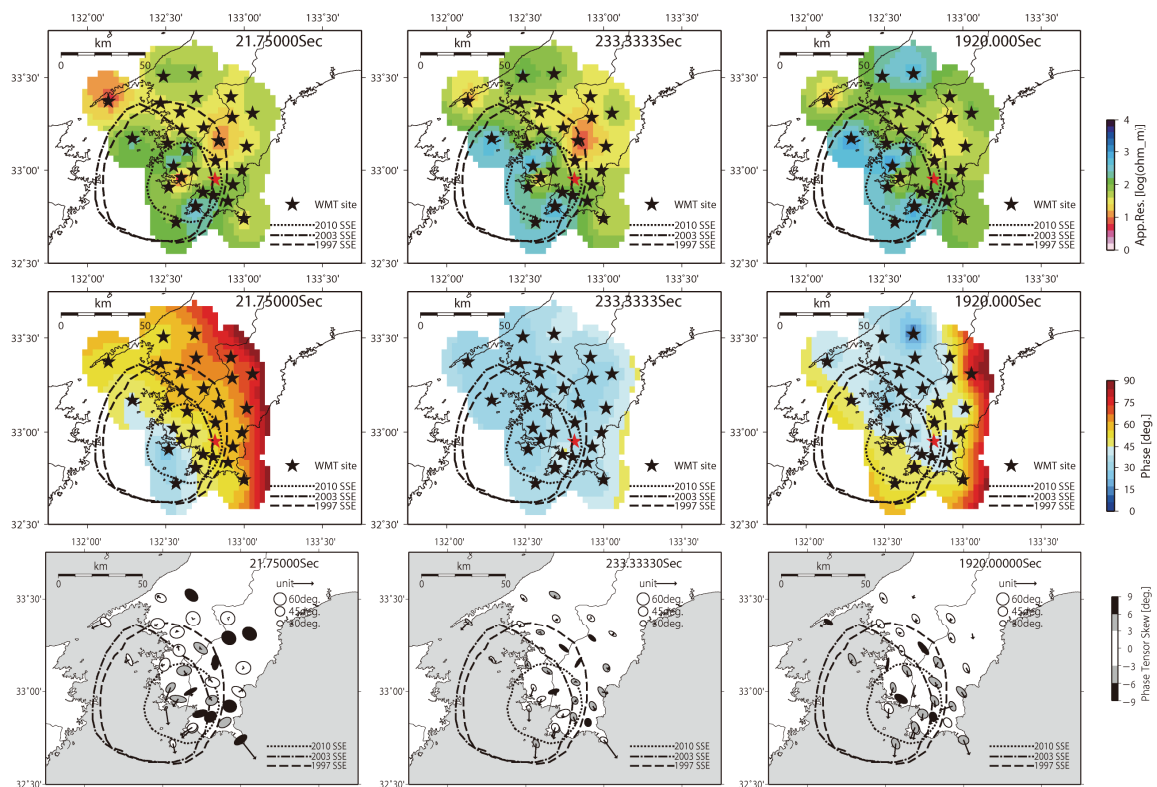


Fig. 3 Spatial distributions of the apparent resistivity (upper panels) and the phase (middle panels) calculated from the determinant average impedances (Z_{det}), and the real induction vectors and the phase tensor ellipses (lower panels) for period bands of 22, 233 and 1,920 sec are shown. The induction vectors are drawn by the Parkinson convention.

抗・位相の分布とも調和的である。

構造の三次元性の有無を意味する位相テンソルの β 角は、Fig. 3 に図示した帯域以外でも3度を超える値を持つ観測点が多く確認された。また、Fig. 2 に例示した WSKK-006 のように、通常観測される $0^\circ \sim 90^\circ$ の位相の範囲を超えた異常位相を示す観測点が3点確認された (WSKK-006, 102, 403)。地下の特異な三次元構造が異常位相検出の要因であるという報告もなされており (たとえば, Ichihara and Mogi, 2009), 三次元逆解析による構造の推定が必要であると考えられる。

4. おわりに

豊後水道で周期的に発生する SSE に関して、その発生メカニズムや構造的特徴を議論するために、四国西部の陸域で計31点の広帯域 MT 観測を実施した。取得した電磁場データから、大部分の観測点において 400 Hz $\sim$ 0.0001 Hz の帯域で非常に良質な MT 応答を推定できた。見かけ比抵抗・位相、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、SSE の主滑り域の縁辺部に、比抵抗コントラストの存在が示唆されることが分かった。今後は三次元逆解析を実施し、比抵抗構造と SSE 滑り域の対応関係を議論する予定である。

加えて、豊後水道 SSE の発生サイクルにおける MT 応答の時間変化の検出を目的に、2015年1月より京都大学防災研究所宿毛観測室 (SKM: Fig. 1 中の赤星印位置) で長周期 MT 連続観測を開始しているが、比抵抗構造モデルを用いて、時間変動モニタリングの実現可能性の評価に繋げたい。

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・関係官庁の関係各位には、多大なご協力・ご配慮をいただいた。調査では、京都大学防災研究所および東京工業大学火山流体研究センター所有の器材を使用した。参照磁場として、日鉄鉱コンサルタント株式会社より岩手県沢内・鹿児島県霧島

の広帯域 MT データを提供していただいた。本研究は日本学術振興会 (JSPS) 科研費基盤研究 (C) JP26400455 の助成を受けている。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 国土地理院 (2010) : 豊後水道周辺でプレート間のゆっくり滑り (スロースリップ) 現象を検出, 報道発表資料, 2010年3月5日付発表.
- 吉村令慧・宇都智史・大志万直人 (2005) : 花折・琵琶湖西岸断層系周辺の電気比抵抗構造 (序報), 京都大学防災研究所年報, 第48号B, pp. 143-148.
- Caldwell, T. G., Bibby, H. M. and Brown, C. (2004): The magnetotelluric phase tensor, *Geophysical Journal International*, Vol. 158, pp 457-469.
- Chave, A.D. and Thomson, D.J. (2003): A bounded influence regression estimator based on the statistics of the hat matrix, *Journal of the Royal Statistical Society, Series C (Applied Statistics)*, Vol. 52, pp. 307-322.
- Chave, A.D. and Thomson, D.J. (2004): Bounded influence estimation of magnetotelluric response functions, *Geophysical Journal International*, Vol. 157, pp. 988-1006.
- Gamble, T. D., Goubau, W. M. and Clarke, J. (1979): Magnetotellurics with a remote magnetic reference, *Geophysics*, Vol. 44, pp. 53-68.
- Ichihara, H. and Mogi, T. (2009): A realistic 3-D resistivity model explaining anomalous large magnetotelluric phases: the L-shaped conductor model, *Geophysical Journal International*, Vol. 179, pp. 14-17.
- Obara, K. (2011): Characteristics and interactions between non-volcanic tremor and related slow earthquakes in the Nankai subduction zone, southwest Japan, *Journal of Geodynamics*, Vol. 52, pp. 229-248.
- Simpson, F. and Bahr, K. (2005): *Practical Magnetotellurics*, Cambridge University Press, 254 pp.

(論文受理日 : 2016年6月13日)