

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400455

研究課題名(和文) モニタリングを目指したスロースリップ発生場の状態解明

研究課題名(英文) State imaging of electrical properties around the long-term Slow Slip Events for detection of temporal changes in resistivity structure

研究代表者

吉村 令慧 (Yoshimura, Ryohei)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：50346061

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：豊後水道スロースリップイベント(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面的に広帯域Magnetotelluric(MT)観測をした。得られたMT応答について、3次元逆解析を行い、主すべり域の中央部ならびに縁辺部に低抵抗領域を検出した。縁辺部の低抵抗領域は、沈み込むフィリピン海プレートの深部から地表付近まで連続していることが確認された。SSEの発生サイクル内での構造の時間変化検出も目的とした長周期MT連続観測について、2015年1月より京都大学防災研究所宿毛観測室において開始し、安定性の評価ならびに連続運用に関する課題を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Recent geodetic observations detect recurrent slow slip events (SSEs), which occurred beneath the Bungo Channel and southwest Shikoku Island, with interval of approximately 6 years. In order to reveal a large-scale three-dimensional resistivity structure around this SSEs region, we carried out wideband magnetotelluric (MT) surveys around the western part of Shikoku Island. Using obtained MT responses, we constructed a three-dimensional resistivity model around the eastern half of SSE region. We inverted the impedance tensor and the vertical magnetic transfer function. The main features of the three-dimensional model are moderate conductive zone in the central part of SSEs with surrounding conductor at the edge of SSEs along the upper boundary of the Philippine Sea slab, and a strong conductor beneath SSEs. We have also established a permanent long-term MT monitoring network that aims to detect temporal changes of resistivity structure during SSE cycle.

研究分野：地球内部電磁気学

キーワード：地球電磁気 地震 スロースリップ 比抵抗構造

1. 研究開始当初の背景

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）。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深部延長部に発生しており、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。

地下深部の“水”の存在に対しては、電気比抵抗は敏感なパラメータであり、近年さまざまな地域で調査が実施されている。SSE発生域の構造を、“水”の存在に鋭敏な比抵抗という視点で明らかにすることは、その発生メカニズムに迫るためには重要である。しかしながら本研究の対象である四国西部域では、数例の電磁場観測（例えば、塩崎[2012]、山下・小原[2010]）が実施されているが、ある測線に沿った観測であったため二次元解析にとどまっており、SSEの空間分布と比抵抗構造の対比を行うには十分な構造モデルが得られているとはいえない。

加えて、SSE発生に水が関与するならば、その分布およびそれを反映した比抵抗構造も、SSEの発生サイクル内で時間変化する可能性があると考えた。地下の比抵抗構造の時間変化検出は、地下に起因する現象の理解・推移把握のために重要なテーマであるものの、これまで検出された比抵抗構造の時間変化は、火山地域の表面現象等に対応する浅部に限られているのが現状である（例えば、Aizawa et al., 2011; 高倉他, 2004）。大深度（10 km～50 km）を対象とする場合、可探深度は扱う周期（電磁場データの長周期成分ほど深部の情報を含む）に依存するため、構造推定そのものも困難を伴う（長周期応答の推定は人工ノイズに影響を受け易い）。また、モニタリングの対象となる大深度で発生する地球科学的イベントの大部分は、再来間隔が長く、構造変化を議論するためには長期間安定的な観測の維持が必要となるため、モニタリングを指向した電磁気学的研究が進められなかった。それに対して四国西部域は、ノイズの主因となる直流電網が未発達なため、電磁場観測に対して西南日本において屈指の低ノイズ環境であり、また前述の通り、豊後水道SSEは発生間隔も約6年と他の現象（高速断層すべりなど）と比較して短く実現性が高いと考える。

2. 研究の目的

本研究の目的は、豊後水道 SSE 発生域周辺の 3 次元比抵抗構造を明らかにすること、ならびに大深度を対象とした比抵抗構造の時間変化モニタリングの実現可能性の評価、および連続観測点を新設し、モニタリングに必要な不可欠な事項についての知見を得ることである。

3. 研究の方法

申請時の計画では、研究対象地域にて取得されていた既存データを構造解析に使用することを念頭に、20 点程度の新規広帯域 Magnetotelluric (MT) 法観測を実施する予定であったが、既存データの収集・利用が困難となったため、実施計画を周辺の 3 次元構造解析を重視する方向に修正した。

2014 年度に 6 点、2015 年度に 22 点、2016 年度に 3 点の、計 31 観測点で電磁場データを新たに取得した。観測に際しては、カナダ・Phoenix Geophysics 社製 MTU5/MTU5A を使用し、電場 2 成分・磁場 3 成分の自然電磁場変動を各点 2 週間程度連続収録した。観測点の配置は、豊後水道で発生する SSE の主すべり域を可能な限りカバーするように、また、3 次元逆解析に有効となるようバランスの良い測点配置（図 1）を狙った。結果として、島嶼や海岸線近傍の測点が多くなったため、3 次元逆解析においては、海岸線や地形を精度良く表現可能な、非構造格子による有限要素法のインバージョンコード femtic (Usui, 2015) を使用する。

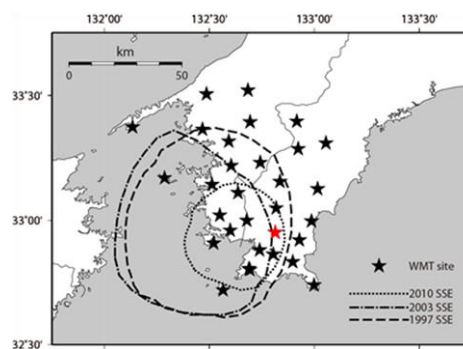


図 1：広帯域 MT 観測点分布 (★) および SSE の主すべり域(国土地理院, 2010)

モニタリングの実現可能性の評価のために、長周期 MT 観測装置を京都大学防災研究所宿毛観測室(図 1 中の赤★箇所)に設置し、連続運用試験を行った。当初計画では、安価なロガー・センサーの組み立て・加工を行う予定であったが、必要経費の再検討を行った結果、既存のテラテクニカ社製の長周期 MT 観測装置（フラックスゲート磁力計利用）を改造し使用するよう計画変更を行った。装

置の機能拡張は、ノイズ低減のためのセンサーケーブルの伸長や、ネットワーク通信機能の組み込みである。図2に連続点のレイアウトならびにフラックスゲート磁力計の埋設設置（80cm 深）の状況を示す。約2年間の長期運用試験を行い、データ収録の安定性など検討を行う。

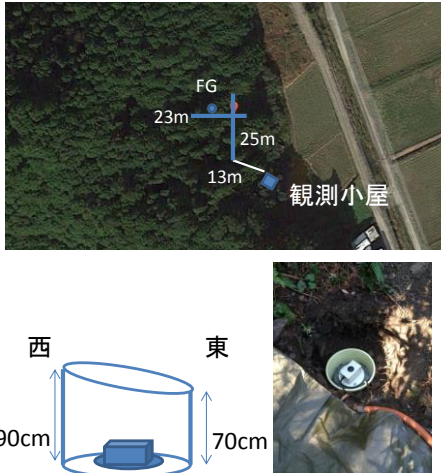


図 2：宿毛観測室における長周期 MT 観測装置の設置レイアウトおよびフラックスゲート (FG) 磁力計の埋設状況

4. 研究成果

(1) 豊後水道 SSE すべり域周辺の 3 次元比抵抗構造解析

本研究により、新たに取得した計 31 点での電磁場データについて、BIRRP (Chave&Thomson, 2003) プログラムを用いた時系列解析を行った結果、大部分の観測点において、周期 300Hz~10,000 秒の広帯域において良質な MT 応答が推定できた。インダクションベクトルや位相テンソル楕円 (Caldwell et al., 2004) から、SSE 主すべり域を取り囲むような比抵抗コントラストの存在が示唆された (図 3)。

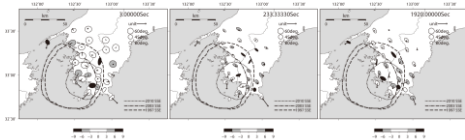


図 3: インダクションベクトルと位相テンソル楕円の空間分布、および SSE 主すべり域

推定された MT 応答より回転不変量 (determinant; Rung-Aruwan et al., 2016; Berdichevsky&Dimitriety, 2016) を算出し、各観測点下の 1 次元構造を推定し大局的な不均質構造を確認した (図

4)。1 次元逆解析には OCCAM (Constable et al., 1987) コードを用いた。主すべり域の中心および、縁辺部に良導体が存在する可能性が示唆された。

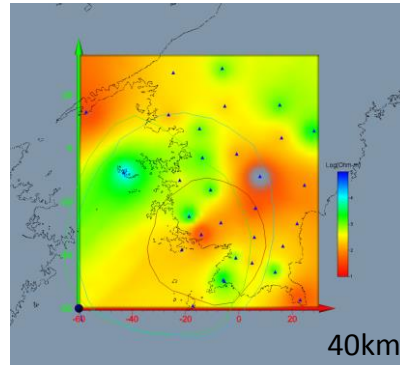


図 4：MT 応答の回転不変量 (determinant) より推定された 1 次元構造を逆距離加重法により空間補間した等深度断面 (深さ 40km)

より詳細に SSE すべり域と構造の不均質性の対比を行うために、3 次元逆解析を行った。四面体要素を用いた非構造格子の辺要素有限要素法逆解析コードである femtic (Usui, 2015) を使用し、MT インピーダンスならびに Tipper (磁場水平成分と鉛直成分の比) を入力データにした逆解析を行った。研究対象領域を中心とする 800km 四方を計算領域としている。また、計算コストを下げるために、入力データの周波数数を 10 周期に限り、Error Floor を 10 %に設定した。海岸線データは国土数値情報を、地形・水深データは岸本(2000)の 250m メッシュデータならびに ETOPO1 の 1 分グリッドデータを使用し、計算メッシュを作成した (図 5)。作成したメッシュは、約 15 万節点・約 100 万要素で構成され、海域を $0.25 \Omega \text{m}$ 、空気領域を $10^9 \Omega \text{m}$ に固定した。初期モデルとして、陸域を $100 \Omega \text{m}$ 一様にし、地下構造および観測点ごとの distortion tensor を推定している。20 回の反復計算中、インバージョンの目的関数の減少率が 1%未満となった 18 回目の結果を収束解とした。

得られた 3 次元比抵抗構造モデルでは、以下の特徴が確認できた。1) 沈み込む海洋プレートに沿った北西下がりの構造、2) 先行研究と調和的な低抵抗な大陸地殻、3) 沈み込むプレート面に存在する比抵抗コントラスト。プレートに沿った比抵抗コントラストは、1 次元解析の大局的な分布と同様、すべり域の中央部に低抵抗・縁辺部の低抵抗の存在が確認された。縁辺部の低抵抗域は、海洋プレート深部から地表に向かっての連続性も新たに確認された。

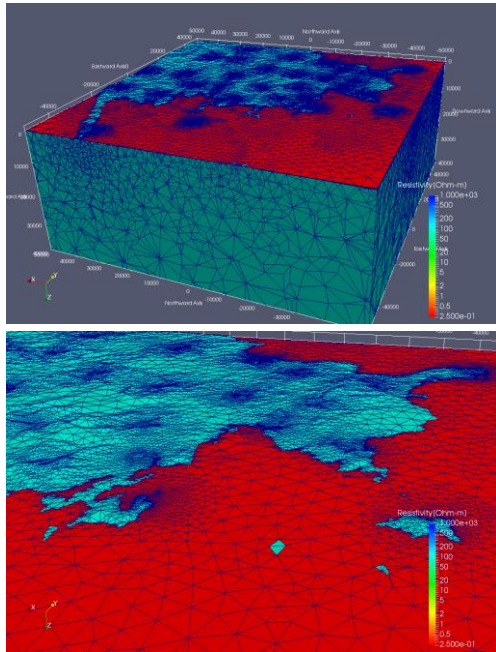


図 5：3次元逆解析に用いた格子設定

反面、プレートの深部延長の微動域には、顕著なコントラストは検出されなかったが、今後解析に使用する周期帯を長周期側に拡張し、その存在の有無を検討したい。

(2) モニタリングを目指した長周期 MT 連続観測の安定性について

モニタリングを目指した長周期 MT 連続観測について、その安定性・課題を見出すため、2015 年 1 月より京都大学防災研究所宿毛観測室（図 1 中の赤★箇所）で試験観測を開始し、現在まで運用を継続している。観測開始時から 2015 年 10 月までの収録状況を図 6 に示す。

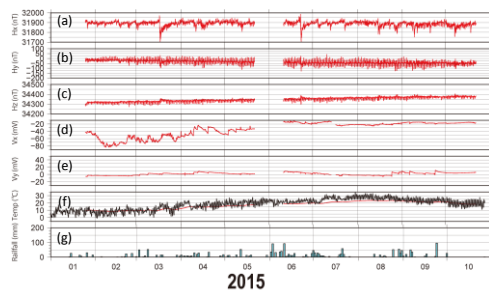


図 6：宿毛観測室における長周期 MT 連続観測装置の収録データ

連続運用試験により、以下の課題が明らかになった。1) 電極の劣化、2) 観測点近傍の人的環境変化への対応。今回の試験観測では、鉛-塩化鉛の非分極電極を使用して

いるが、通常の設定方法をとると、1年程度で劣化が進み、電位差データに不規則な飛びが生じることが分かった。現時点で、埋設電極の周辺の塩濃度など最適な設置方法を模索している。また、今回の試験期間中に観測点近傍に害獣対策の金属製柵の設置が行われた。この柵の設置により、誘導電流の流路が変わり、推定される MT 応答にオフセットが生じたため、このような環境変化への対応がモニタリングの実現にとって重大な課題であることが分かった。これらの電場計測に関する課題に比較して、磁場計測は非常に安定しており、当初懸念された温度変化の影響など低いことが分かった。

電極の劣化が見られなかった期間のデータを用いて、MT 応答の推定の安定性の評価も行った。MT 応答はデータのスタック数に比例して推定精度が向上する。時間変化をモニタリングするためには、応答の推定精度を担保しつつ、データ長を短くすることが重要となる。評価に際して、データ長を 5 日・10 日・20 日とした推定値の比較を行った（図 7）。

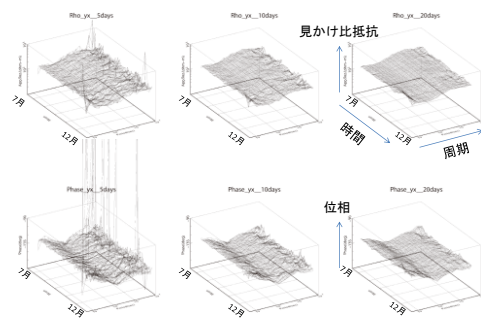


図 7: MT 応答推定に用いるデータ長による精度の比較 (YX 成分、上段：見かけ比抵抗、下段：位相差、左：5 日、中央：10 日、右：20 日)

データ長を 20 日に設定すると、1,000 秒以上の帯域まで安定した応答推定が行えることがわかった。ただ、1,000 秒以下の帯域に着目する場合は、10 日程度のデータ長でも十分に評価が可能である。構造の変化が期待される領域に感度のある帯域を検討し、データ長の選択を行うことが今後の課題である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

1. Hata, M., N. Oshiman, R. Yoshimura, Y. Tanaka and M. Uyeshima, Three-dimensional electromagnetic

- imaging of upwelling fluids in the Kyushu subduction zone, Japan, *Journal of Geophysical Research*, 120, 1-17, doi:10.1002/2014JB011336, 2015. (査読有)
2. Okazaki, T., N. Oshiman and R. Yoshimura, Analytical investigations of the magnetotelluric directionality estimation in 1-D anisotropic layered media, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 260, 25-31, doi:10.1016/j.pepi.2016.09.002, 2016. (査読有)
 3. 吉村令慧・山崎健一・小川康雄・中川潤・川崎慎吾・小松信太郎・米田格・大内悠平・岡崎智久・鈴木惇史・齋藤全史郎・寺石眞弘, 四国西部域での広帯域 MT 観測, 京都大学防災研究所年報, 第 59 号 B, 57-61, 2016. (査読なし)
 4. Aizawa, K., H. Asaue, K. Koike, S. Takakura, M. Utsugi, H. Inoue, R. Yoshimura, K. Yamazaki, S. Komatsu, M. Uyeshima, T. Koyama, W. Kanda, T. Shiotani, N. Matsushima, M. Hata, T. Yoshinaga, K. Uchida, Y. Tsukashima, A. Shito, S. Fujita, A. Wakabayashi, K. Tsukamoto, T. Matsushima, M. Miyazaki, K. Kondo, K. Takashima, T. Hashimoto, M. Tamura, S. Matsumoto, Y. Yamashita, M. Nakamoto and H. Shimizu, Seismicity controlled by resistivity structure: the 2016 Kumamoto earthquakes, *Kyushu Island, Japan, Earth Planets and Space*, 69:4, doi:10.1186/s40623-016-0590-2, 2017. (査読有)
 4. 吉村令慧・山崎健一・小川康雄・川崎慎吾・中川潤・小松信太郎・米田格・大内悠平・鈴木惇史・齋藤全史郎・寺石眞弘, 四国西部域の広域比抵抗構造, *Japan Geoscience Union Meeting 2016*, 2016 年 5 月, 千葉幕張(Poster).
 5. 吉村令慧・山崎健一・小川康雄・川崎慎吾・中川潤・小松信太郎・米田格・大内悠平・鈴木惇史・齋藤全史郎・白井嘉哉・寺石眞弘, 四国西部域の広域比抵抗構造, 日本地震学会 2016 年度秋季大会, 2016 年 10 月, 名古屋(Oral).
 6. 吉村令慧・山崎健一・小川康雄・川崎慎吾・中川潤・小松信太郎・米田格・大内悠平・鈴木惇史・齋藤全史郎・白井嘉哉・寺石眞弘, 豊後水道スロースリップ域周辺の広域比抵抗構造, 第 140 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会および講演会, 2016 年 11 月, 福岡(Oral).
 7. Yoshimura, R., K. Yamazaki, Y. Ogawa, J. Nakagawa, S. Kawasaki, S. Komatsu, I. Yoneda, Y. Ouchi, T. Okazaki, A. Suzuki, Z. Saito, Y. Usui and M. Teraishi, Large-scale electrical resistivity structure around the long-term Slow Slip Events beneath the Bungo Channel region, southwest Japan, *JpGU-AGU Joint Meeting 2017*, 2017 年 5 月, 千葉幕張(Poster).

〔その他〕
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉村 令慧 (YOSHIMURA Ryokei)
京都大学・防災研究所・准教授
研究者番号：5 0 3 4 6 0 6 1

(2) 研究分担者

小川 康雄 (OGAWA Yasuo)
東京工業大学・理学院・教授
研究者番号：1 0 3 3 4 5 2 5

山崎 健一 (YAMAZAKI Ken' ichi)
京都大学・防災研究所・助教
研究者番号：2 0 4 3 6 5 8 8

寺石 眞弘 (TERAISHI Masahiro)
京都大学・防災研究所・助教
研究者番号：5 0 1 0 9 0 7 1

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

()

〔学会発表〕(計 7 件)

1. 吉村令慧・山崎健一・小川康雄・川崎慎吾・中川潤・小松信太郎・米田格・大内悠平・鈴木惇史・齋藤全史郎・寺石眞弘, 構造変化モニタリングを目指した四国西部での長周期 MT 連続観測, 第 138 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会および講演会, 2015 年 10 月, 東京(Poster).
2. 吉村令慧・山崎健一・小川康雄・川崎慎吾・中川潤・小松信太郎・米田格・大内悠平・鈴木惇史・齋藤全史郎・寺石眞弘, 豊後水道スロースリップ発生場のイメージングを目指した四国西部域での広帯域 MT 観測, *Conductivity Anomaly 研究会*, 2016 年 1 月, 東京(Oral).
3. 吉村令慧・山崎健一・小川康雄・川崎慎吾・中川潤・小松信太郎・米田格・大内悠平・鈴木惇史・齋藤全史郎・寺石眞弘, 四国西部での広帯域 MT 観測, 京都大学防災研究所研究発表講演会, 2016 年 2 月, 京都(Poster).