

令和 2 年 9 月 13 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K17793

研究課題名(和文) 海陸電磁気データ統合解析による巨大地震発生帯の流体挙動の解明

研究課題名(英文) Integrated analyses of marine and land magnetotelluric data for investigations of fluid distribution in megathrust earthquake zones

研究代表者

市原 寛 (Ichihara, Hiroshi)

名古屋大学・環境学研究科・助教

研究者番号：90553074

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：沈み込み帯における比抵抗構造全貌の解明に必要となる、海陸に跨る Magnetotelluric法データの統合解析における問題を解決することを目的として、本研究では以下の研究成果を得た。(1)これまでデータの取得が行われなかった沈み込み帯の海陸境界付近において海底電磁気データを取得し、海底地形によるMTインピーダンスへの影響を評価した。(2)これらの影響は、適切な設定を行えば、既存の三次元フォワード・インバージョンコードによって再現ができ、三次元比抵抗モデリングが可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は複雑な海底地形を示す領域でも三次元比抵抗構造解析が可能であることを示した世界初の例であり、今後は世界の沈み込み帯において比抵抗構造の解明が進むことが期待される。特に、本研究で観測点を設置した南海トラフ西端部に位置する日向灘・高知県西方沖は、近年スロー地震が発生する地域として注目されており、さまざまなプロジェクトにより観測が進行中である。本研究による検討がこれらの研究に活用されると同時に、取得したデータについても活用可能であることから、今後は南海トラフ西端部において比抵抗構造、さらには流体分布の解明がこれまでにない精度で解明されることが期待される。

研究成果の概要(英文)：Integrated analyses of marine and land magnetotelluric data are important to understand fluid distribution in subduction zones. However, "coastal effect" due to 3-D seawater distribution is essential problem for this purpose. In this study, we firstly obtained ocean bottom magnetotelluric data in the shallow sea areas where long term observation had not been carried out. The estimated MT impedances showed the coastal effect especially at the period between 100-1000 second. Then we investigated the applicability of the 3-D forward/inversion code for magnetotelluric data. The results showed that the code explained coastal effect and 3-D resistivity modeling was feasible.

研究分野：地球物理学

キーワード：海陸統合解析 Magnetotelluric 比抵抗構造 巨大地震発生帯 沈み込み帯

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

流体の存在は、岩石の破壊強度やプレート間カップリングを大きく変動させ、海溝型巨大地震の発生を支配すると考えられている。申請者らはこれまで、主にマグネトテッリック法(以下 MT 法)観測を実施し、流体の存在に敏感な電気比抵抗分布を解析する事によって地震発生帯における流体の分布を解明してきた(e.g. Ichihara et al., 2011)。例えば、2011年東北沖地震震源域においては、従来アスペリティと考えられていた領域では比抵抗が高く(≒低間隙水率)、最大滑りの起きた最浅部では比抵抗が低い(≒高間隙水率)事を明らかにした。このような電気伝導度イメージングを、様々なテクトニックセッティングの巨大地震発生帯において実施する事により、巨大地震発生の理解が大きく進展すると期待される。

南海トラフは海溝型巨大地震が発生する可能性の高い重要研究地域であり、解明の進んでいる東北日本弧とは異なる付加体型の沈み込み帯である。また、巨大地震発生域は海陸に跨っている。過去の熊野灘—紀伊半島において実施された研究によると、海底電磁気観測によって低比抵抗帯が地震を引き起こすプレート境界および分岐断層に分布する事が報告されている(Kasaya et al., 2005)。一方、陸上 MT 法探査からは低比抵抗領域はプレート境界より上盤側に限定され、全体としては海域より高い比抵抗分布が報告されている(Yamaguchi et al., 2009)。

しかしながら、これらの海底観測による比抵抗構造と陸上観測による比抵抗構造は海陸境界部において整合しない。すなわち、海底観測では低比抵抗領域がプレート境界の下盤まで達するのに対し、陸上観測では達しておらず(図1)、プレート境界面における流体分布の議論に大きな弊害となっている。この原因の一つに海陸境界部(特に浅海域)に観測点が存在しないため、比抵抗構造の信頼性が低い事が挙げられる。また、海陸境界付近において MT データは複雑な海陸境界の形状に起因する異常電流によって歪められているため(例えば Key and Constable, 2011)、既存研究の解析で適用した二次元インバージョン手法では正確な構造の解析が困難である事も原因として挙げられる。これらの問題を解決し、流体分布の解明等、地震発生の理解に貢献する比抵抗構造を得る必要がある。

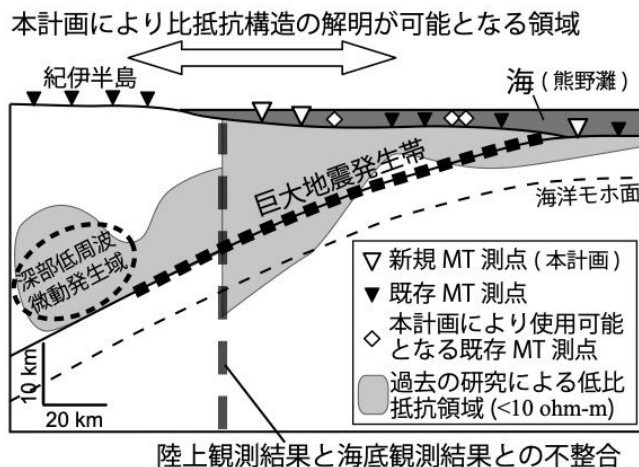


図1 研究開始当初における本研究により比抵抗構造の解明が可能になる領域の概念図。

2. 研究の目的

本研究は、沈み込み帯における比抵抗構造全貌の解明に必要となる、海陸境界域における MT 法探査における問題を解決することを目的とする。具体的には、まず観測がほとんど行われていない沈み込み帯の沿岸部近くに海底電位磁力計(Ocean bottom electro-magnetometer、以下 OBEM)を設置し、MT インピーダンスを求めることにより、海底地形効果による歪みの影響を実データから検証することを目的とした。研究対象地域はスロー地震の発生などが知られ、学術的価値の高い日向灘(南海トラフ西端)とする。次に、海底 MT データに対応したフォワード・インバージョンコードを用い、三次元比抵抗モデリングにおける問題点の洗い出しとその解決を行うことを目的とした。これらの目的が達成できれば、将来的に観測データの取得によって海陸境界を含む沈み込み帯の比抵抗構造の解明が可能となる。

なお、当初の計画では、先行研究によって海底および陸上データの得られている熊野灘において追加観測を実施し、海陸の既存データと本研究による統合して比抵抗構造を解明する予定であった。しかしながら、観測のために必要な航海が熊野灘において確保できない問題が生じたため、航海の確保が比較的容易な日向灘に研究対象地域を変更した。この地域では利用可能な既存データがなく、本研究による観測データのみでは比抵抗構造の解明は不十分である。しかしながら、新学術領域研究「スロー地震学」をはじめとするプロジェクトにより、近年海陸において精力的に MT 観測が進められていることから、将来的にこれまでになく精度で比抵抗構造が解明されることが期待される。

3. 研究の方法

(1) 海底 MT 観測

神戸大学大学院海事科学研究科による「平成 28 年度春季深江丸研究航海」、「平成 29 年度夏季深江丸研究航海」、「平成 30 年度夏季深江丸研究航海」、「平成 30 年度春季深江丸研究航海」および「令和元年度夏季深江丸研究航海」により、OBEM を 4 箇所に設置し、その全てを回収した(図 2)。観測点は、様々な条件における海底地形効果をとらえるため、四国寄りの大陸斜面(NU5)、九州寄りの大陸斜面(NU3)、およびその間の盆地状の領域(EM3, EM4)をカバーするように配置した。なお、水深 600m 以下の浅海域は、漁業関係者との協議により実施していない。OBEM は京都大学および海洋研究開発機構が所有するテラテクニカ JM100 型(Kasaya and Goto, 2009)を用いた。本 OBEM は Ag-AgCl 電極による水平電場(2 成分)、およびフラックスゲート磁場計による磁場 3 成分を計測可能であり、姿勢補正のための傾斜計も装備している。また、連続観測と間欠サンプリングを切り替えることが可能で、これにより広帯域(10~100000s)の MT/GDS レスポンスの解明が可能である。各観測点あたりのデータ収録期間は、連続サンプリングで 3-4 週間、間欠サンプリング(60 秒間隔)で 4-9 ヶ月である。

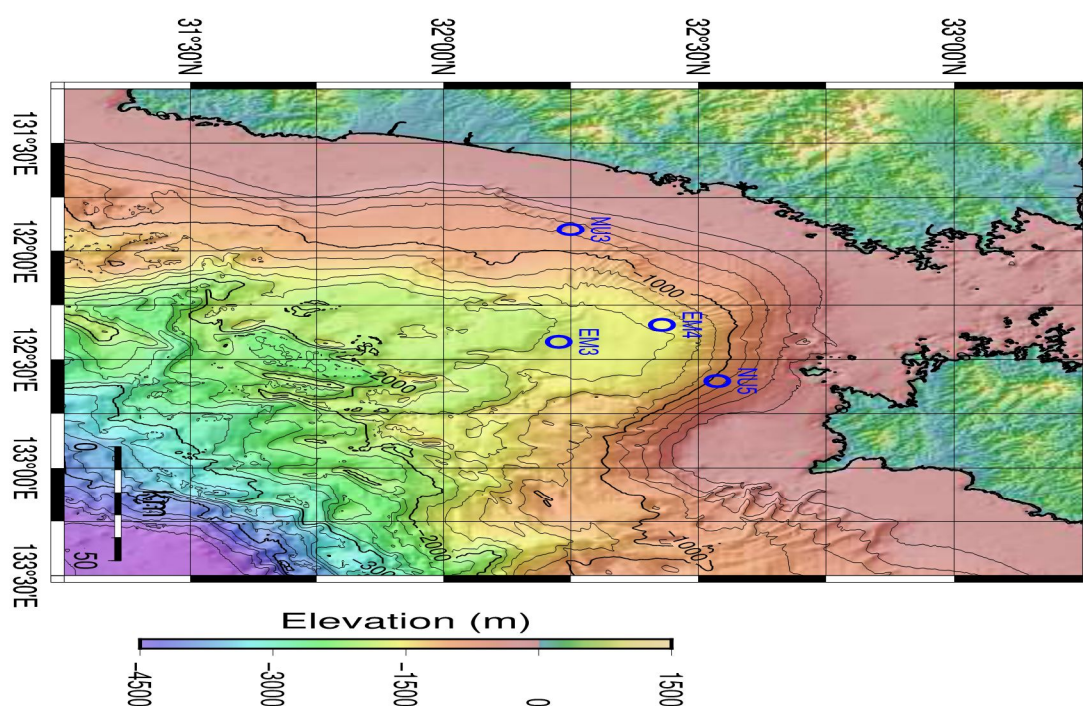


図 2 日向灘の海底地形図および OBEM 観測点分布。青丸は本研究で設置した OBEM の設置位置を示す。

(2) MT インピーダンスの推定

得られた電磁場データについて、スパイクノイズの除去、傾斜補正、磁北方向の推定と真北を基準とした座標系への変換、および時刻校正を実施した。この補正を施した電磁場データを基に、BIRRP コード(Chave and Thomson, 2004)を用いて MT インピーダンスを推定した。Remote reference データとして、気象庁柿岡地磁気観測所の水平磁場データを使用した。推定したインピーダンスの周期は約 30~30000 秒である。

(3) 三次元比抵抗モデリングのための検証

既存の海底 MT データに対応した三次元比抵抗構造のフォワードおよびインバージョンコード(Tada et al., 2012)において、海底地形の影響を正しく評価できるか検証を実施した。一般に、細かいメッシュデザインを採用するほど計算される MT インピーダンスは正確な値を示すが、メッシュ数を増大させると計算に要する時間が増えるというトレードオフ問題が存在する。そこで、実際の日向灘における海底地形を表現する複数の異なるメッシュサイズをもつモデルを作成し、どこまでモデルを細かくすればレスポンスが変化しなくなるか検証した。次に、観測によって得られた MT インピーダンスが海底地形効果によってどれだけ説明可能かを検証した。ただし、海底地形効果は地下の比抵抗値に大きく依存することから、今回は地下の比抵抗構造が表層の低比抵抗層(第 1 層、3 ohm-m で固定)と、その下の一様な比抵抗を持つ媒体(第 2 層)から成ると仮定し、第 1 層の層厚(h)と第 2 層の比抵抗値(ρ_2)を変化させながら MT インピーダンスを計算し、観測値を最も説明する h と ρ_2 を求めた(フォワードモデリング)。

4. 研究成果

(1) MT インピーダンスの特徴

推定された各観測点における MT インピーダンスを見かけ比抵抗および位相に変換し、図 3 にサウンディングカーブとして示した。サウンディングカーブによると、浅海部に設置した観測点 NU3 および NU5 において数千秒以上の帯域の推定精度が低いが、これは浅海部において海洋潮汐の影響がより大きかったためと推測される。なお、これらは独立成分分析手法を採用した新しい MT インピーダンスの推定法 (Sato et al., in rev) 等を採用することにより、将来的に改善が可能であると期待される。見かけ比抵抗はいずれの観測点も低周波側で低く、長周期側で高いという特徴を示す。これらは、先行研究による多くの海底 MT データのサウンディングカーブに見られる特徴であり、海底下の表層に分布する抵抗の低い堆積層を反映していると考えられる。また、周期 100 秒から 1000 秒の帯域において、xy または yx 成分のいずれかの見かけ比抵抗が高くなり、位相が低くなる特徴を示す。これらは海陸境界付近における MT インピーダンスの特徴を反映していると考えられる (e.g. Key and Constable, 2011)。また、観測点 NU5 では見かけ比抵抗値が周期に関して急変する特徴を示す。NU5 は他の観測点に比べても傾斜の急な海域に設置しているため、観測点近傍局所的な海底地形効果を反映している可能性が高い。

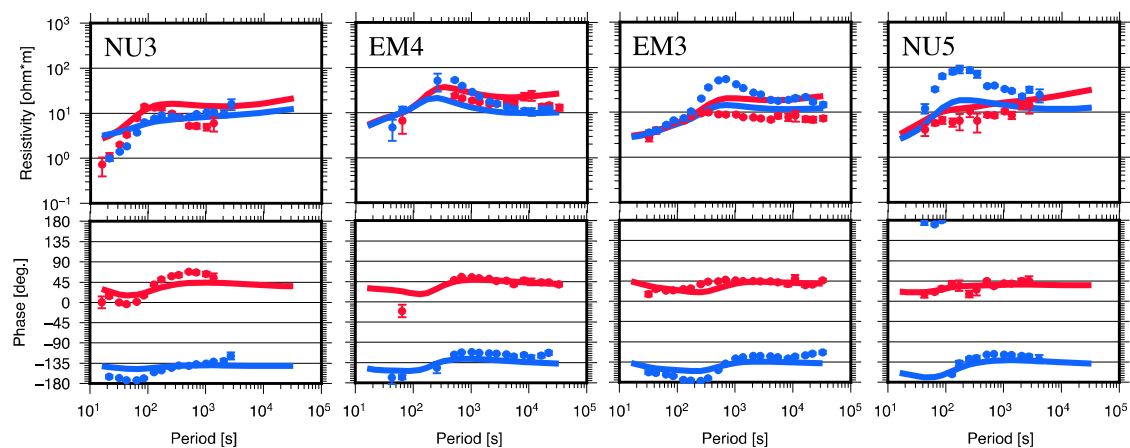


図 3 見かけ比抵抗および位相のサウンディングカーブ。丸印は観測データ、実線はフォワードモデリングによる計算値を示す。赤色は xy 成分、青色は yx 成分を示す。推定誤差の大きいレスポンスは省略している。

(2) 三次元比抵抗モデリングのための検証

まず、フォワード計算において、メッシュをどこまで細かくすれば、必要な MT インピーダンスの計算精度を担保できるか検証を行った。具体的に、本研究領域については、観測点近傍の水平メッシュ間隔を 8 km よりも小さくした場合、解析対象の周期帯におけるレスポンスに差異が認められなくなる。この値でメッシュデザインを定義すればフォワードモデリングの信頼性に支障はなく、汎用の計算サーバーでも現実的な時間で解析が可能であることも確認できた。なお、陸上観測データに関しては、同コードを用いて地形取り入れ構造の解明を行うことが可能であることが、研究代表者らの研究により既に示されている (Ichihara et al., 2018)。したがって、海陸データが揃い次第、統合データの三次元解析を行う体制が整っている。

フォワードモデリングの結果、 $h=2-8$ (km) (北部の EM4、NU5 を含む地域で $h=2$ (km)、NU3、EM3 を含む地域で $h=4$ (km)、さらに南方で $h=8$ (km))、 $\rho = 50$ (ohm-m) とした場合に、検討したモデルの中では最もデータを説明した。これによって得られた計算 MT インピーダンスは、大局的に観測による MT インピーダンスを説明している (図 3)。特に、観測点 EM3、EM4 に見られる 1000 秒における yx 成分の見かけ比抵抗の高まりは、海底地形効果によるものと考えられるが、モデルレスポンスはこの特徴を再現している。一方で、NU5 においては周期 100-200 秒においてこの特徴見られるが、モデルレスポンスはこの特徴を再現していない。一方で、2 層目の比抵抗値 ($\rho = 2$) を 100 ohm-m としたモデルでは、この特徴を再現している。これらのことは、本フォワード・インバージョンコードが三次元比抵抗構造の解明に適用可能であることを示すと同時に、地下の比抵抗構造が複雑であることも示唆している。

(3) 今後の展望および謝辞

本研究によって、日向灘などの複雑な海底地形を示す海域 (特に海岸近く) において、MT impedance は海底地形の影響を大きく受けることが示されたものの、既存の三次元コードを適切な設定を行って用いることによりその影響を再現でき、比抵抗構造の解明が可能であることが示された。今後は、新学術領域「スロー地震学」等のプロジェクトによって進められている観測結果も使用することによって、南海トラフ西方における海陸に跨る範囲の比抵抗構造が解明され、沈み込み帯における流体等の挙動の解明が進むことが期待される。なお、本結果は複雑な

海底地形を示す領域でも三次元比抵抗構造解析が可能であることを示した世界初の例でもあり、本結果を参照することによってヒクラギ沈み込み帯などをはじめとする世界の主要地域において比抵抗構造の解明が進むことが期待される。

なお、神戸大学大学院海事科学研究科附属練習船深江丸の船長・船員・および運航関係者の方にはOBEM観測に関し多大なる貢献を頂いた。宮崎県の漁業関係者には海底観測について協力頂いた。京都大学の後藤忠徳准教授（観測当時）および佐藤真也氏をはじめとする学生諸氏、海洋研究開発機構の多田訓子博士、および神戸大学の松野哲男博士には観測機材の提供を受け、観測に参加頂いた。また、多田博士には三次元比抵抗モデリングコードを提供頂いた。OBEMデータからのMTレスポンス推定および海底地形効果の評価は名古屋大学理学部生（当時）の中村捷人氏が卒業研究の一部として担った。記して感謝する。

< 引用文献 >

- Chave AD, Thomson DJ (2004) Bounded influence magnetotelluric response function estimation. *Geophys J Int* 157 (3):988-1006. doi: 10.1111/J.1365-246x.2004.02203.X
- Ichihara H, Kanehiro J, Mogi T, Yamaoka K, Tada N, Bertrand EA, Adachi M (2018) A 3D electrical resistivity model around the focal zone of the 2017 southern Nagano Prefecture earthquake (M-JMA 5.6): implications for relationship between seismicity and crustal heterogeneity. *Earth Planets Space* 70. doi:10.1186/s40623-018-0950-1
- Ichihara H, Uyeshima M, Sakanaka S, Ogawa T, Mishina M, Ogawa Y, Nishitani T, Yamaya Y, Watanabe A, Morita Y, Yoshimura R, Usui Y (2011) A fault-zone conductor beneath a compressional inversion zone, northeastern Honshu, Japan. *Geophys Res Lett* 38. doi:10.1029/2011gl047382
- Kasaya T, Goto T (2009) A small ocean bottom electromagnetometer and ocean bottom electrometer system with an arm-folding mechanism. *Explor Geophys* 40 (1):41-48. doi: 10.1071/Eg08118
- Kasaya T, Goto TN, Mikada H, Baba K, Suyehiro K, Utada H (2005) Resistivity image of the Philippine Sea Plate around the 1944 Tonankai earthquake zone deduced by Marine and Land MT surveys. *Earth Planets Space* 57 (3):209-213
- Key K, Constable S (2011) Coast effect distortion of marine magnetotelluric data: Insights from a pilot study offshore northeastern Japan. *Phys Earth Planet In* 184 (3-4):194-207. doi:10.1016/j.pepi.2010.11.008
- Tada N, Baba K, Siripunvaraporn W, Uyeshima M, Utada H (2012) Approximate treatment of seafloor topographic effects in three-dimensional marine magnetotelluric inversion. *Earth Planets Space* 64 (11):1005-1021. doi: 10.5047/Eps.2012.04.005
- Yamaguchi S, Uyeshima M, Murakami H, Sutoh S, Tanigawa D, Ogawa T, Oshiman N, Yoshimura R, Aizawa K, Shiozaki I, Kasaya T (2009) Modification of the Network-MT method and its first application in imaging the deep conductivity structure beneath the Kii Peninsula, southwestern Japan. *Earth Planets Space* 61 (8):957-971

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 市原寛, 多田訓子	4. 巻 -
2. 論文標題 議論：海陸の3次元比抵抗モデリングにおけるメッシュデザインについて	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 2018年 Conductivity Anomaly研究会論文集	6. 最初と最後の頁 102-104
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 市原寛, 後藤忠徳, 松野哲男, 多田 訓子, 佐藤 真也
2. 発表標題 Marine electromagnetic observations around a slow earthquake region in the western Nankai trough
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi ICHIHARA, Noriko TADA, Toru MOGI
2. 発表標題 Three-Dimensional Resistivity Modeling Incorporating Topography for Appropriate Mesh Designs in Land and Marine Magnetotelluric Inversions
3. 学会等名 AOGS 15th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 市原寛, 多田訓子
2. 発表標題 議論：海陸の3次元比抵抗モデリングにおけるメッシュデザインについて
3. 学会等名 平成29年度 Conductivity Anomaly 研究会 (SGEPSS分科会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Ichihara, Toru Mogi
2. 発表標題 Fluid distribtuion and its contribution to inland earthquakes in the Hidaka collision zone, Northern Japan bsd on magnetotelluric measurements
3. 学会等名 International Symposium Crustal Dynamics 2016: Unified Understanding of Geodynamic Processes at Different Time and Length Scales (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 市原 寛, 茂木 透, 内田 利弘, 山谷 祐介, 多田 訓子
2. 発表標題 北海道北部の地震発生境界域における三次元比抵抗構造解析
3. 学会等名 第140回 地球電磁気・地球惑星圏学会 総会・講演会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	後藤 忠徳 (Goto Tada-nori)	兵庫県立大学	
研究協力者	多田 訓子 (Tada Noriko)	海洋研究開発機構	
研究協力者	松野 哲男 (Matsuno Tetsuo)	神戸大学	