

海洋 MT 法による地殻比抵抗構造探査と 地形の 3 次元的影響の検討

坂田玄輝, 後藤忠徳 (京都大学), 笠谷貴史 (海洋研究開発機構),
尾西恭亮, 三ヶ田均 (京都大学)

Estimating the effect of three-dimensional topography in Marine magnetotelluric survey of the crustal structure

Genki Sakata, Tada-nori Goto (Kyoto University), Takafumi Kasaya (JAMSTEC),
Kyosuke Onishi, Hitoshi Mikada (Kyoto University)

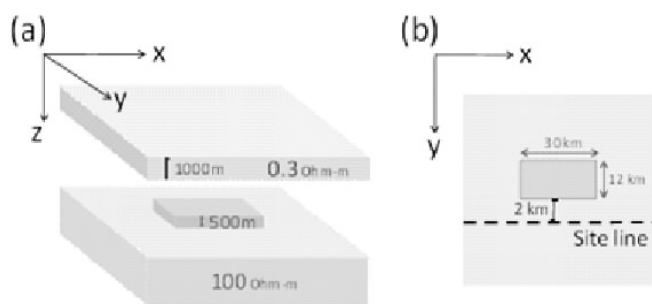
Abstract: Subsurface resistivity structures in the vicinity of subduction zones are key information not only for hazard mitigation of great earthquakes but also for exploration of natural energy resources such as gas hydrate. Recent developments of seafloor instruments allow us to apply the marine magnetotelluric survey for evaluating shallow resistivity structure near a coastline. However, the MT data can be distorted by the three dimensionality of seafloor topography and/or complicated coast lines. In this study, we carried out a forward calculation of MT responses with a three-dimensional topography, and demonstrate how suitable TE-mode is for two-dimensional (2-D) analysis. Then, in a case study, the resistivity structure across the eastern Nankai trough by 2-D inversion with TE-mode data in field is estimated, showing a reasonable crustal image along the subduction boundary.

1. はじめに

海底 MT(Magnetotelluric)探査は、地下流体分布に関する情報である比抵抗構造の可視化ができるため、防災・資源開発などの面で重要な物理探査法の一つである。しかし、沿岸域では、海底地形の影響を受けた海底 MT データが取得されるケースがあり、地下構造の推定が困難な場合が考えられる。この場合は、3 次元的な海底 MT 探査や 3 次元構造解析が必要であるがコストの面から現実的とは言い難い。そこで本研究では、沿岸域の海底 MT データを用いて精度のよい 2 次元解析を行うことを目的として、3 次元的海底地形が MT レスポンスに与える影響について、3 次元フォワードモデリングを行って明らかにする。次に得られた知見に基づいて、東海沖で取得された 3 次元性を強く示す海底 MT の実データに対して 2 次元解析を行い、地殻比抵抗構造を推定する。得られる地下構造と、地質構造や地震波探査の結果そして東南海沖における海洋 MT 探査結果とを比較し、解析の妥当性を検討する。

2. 調査概要

海域では観測点の上方を覆う海水に誘導電流が流れるために、陸域と海域とでは 2 次元地形が MT レスポンスに与える影響が大きく異なることが知られている (Schwalenberg and Edwards, 2004)。陸域では大きく取り上げられない 3 次元地形の影響も、海域では大きく観測データを歪める要因になると考えられるが、特に地殻の比抵抗構造の推定といった浅部探査においては、海底地形の 3 次元的な影響に関する研究がなされていない。本研究では、2 次元解析において Maxwell の方程式を TM モードと TE モードとに分けて 2 次元解析する MT 法の特性に着目した。3 次元的影響による誤った比抵抗構造の推定を回避するために、TM モードと TE モード両者の MT レスポンスにおいて、地形影響の現れ方を 3 次元フォワードコードによって確認し、地形影響が比較的少ないモードを判定した。

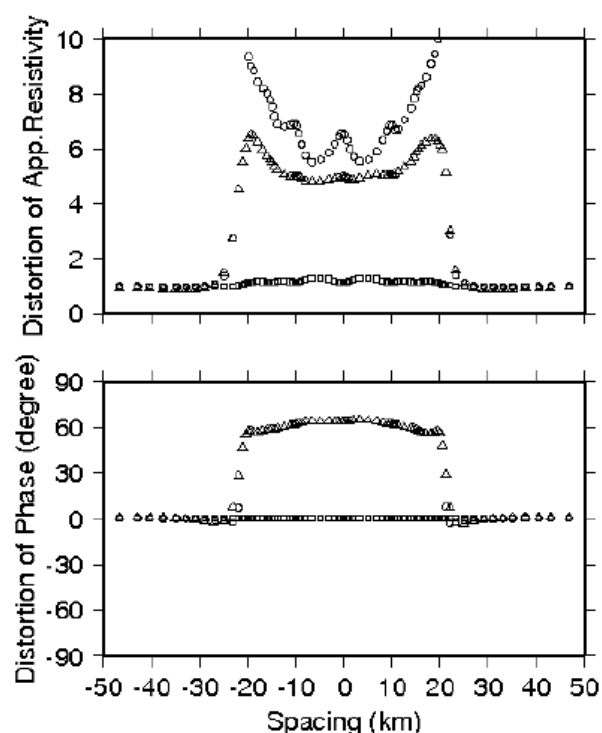


第1図 (a)フォワード計算に用いた3次元モデル。(b)モデル平面図

Fig. 1. (a) Three dimensional model for the calculation ; (b) the rough sketch of the model.

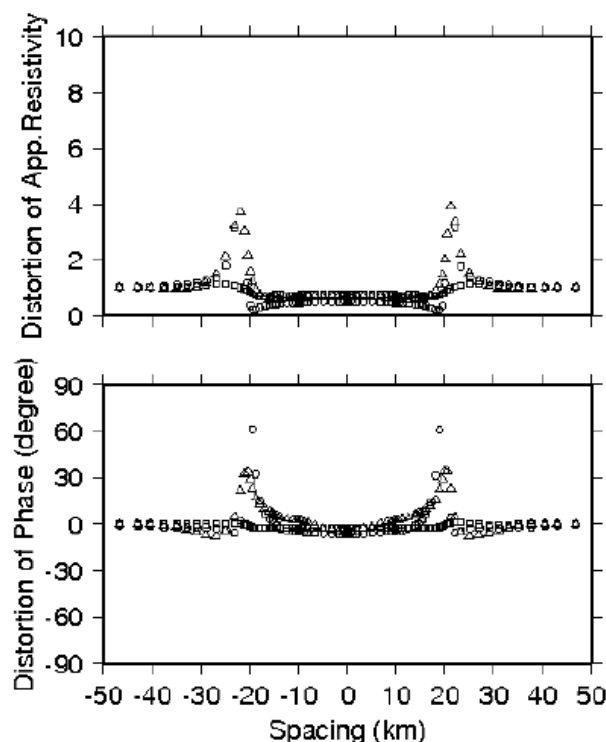
図1に示す3次元モデルについて計算周期10秒、100秒、1000秒でTMモードとTEモードのMTレスポンスの挙動を確認した。計算には有限差分法によって3次元モデル内の電磁場強度を計算するフォワードコード(Mackie et al., 1993)を、海水が考慮でき任意の地点でMTレスポンスを算出できるように再編したものを使用した。3次元構造によるMTレスポンスの歪みを示すために、2次元構造で得られるMTレスポンスを用いて3次元構造で得られるMTレスポンスを下式により正規化した(図2、図3)。

$$D_{\rho_a} = \rho_a^{3D} / \rho_a^{2D}, \quad D_{\phi} = \phi^{3D} - \phi^{2D}$$



第2図 3次元構造体によるTMモードMTレスポンスの歪み。周期：○=10秒、△=100秒、□=1000秒。周期10秒の位相角の歪みは距離-20km～+20km地点では90度を超えている。

Fig. 2. The effect of the three-dimensional structure at TM-mode's MT response.



第3図 3次元構造体によるTEモードMTレスポンスの歪み。

Fig. 3. The effect of the three-dimensional structure at TE-mode's MT response.

TM モードの MT レスポンス (図 2) では、計算周期 10 秒と 100 秒において 3 次元構造体が存在することで、見掛け比抵抗が 5 倍以上に歪められている。また位相をみると周期 10 秒では 90 度以上、周期 100 秒で 60 度程歪められている。一方 TE モードの MT レスポンス(図 3)では、3 次元構造体の両端付近で歪む以外は、2 次元構造と変わらないレスポンスを示している。これより測線方向に 3 次元構造体が存在する場合、測線に垂直に変動する電場と測線に沿う磁場とで算出した MT レスポンス(ここでは TE モード)で 2 次元解析を実施することが望ましいことがいえる。

3. 東海沖における地殻比抵抗構造調査

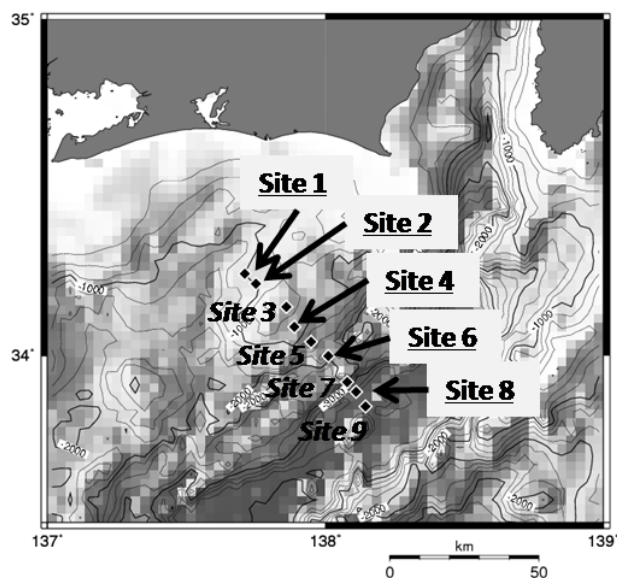
3.1. 調査概要

次に現場データを用いて比抵抗構造を推定し、TE モードでの 2 次元解析が妥当性を議論する。本研究では、地震発生域であるプレート境界周辺の地殻～マントル構造といった幅広い範囲を探索対象として実施された、東海沖沈み込み帯における海洋 MT 調査のデータを使用した。調査海域と測点配置を図 4 に示す。

海底の磁場変動および電場変動を計測するため、電場・磁場の各水平成分を記録できる OBEM のべ 5 台 (Site1,2,4,6,8)、水平電場成分を記録できる OBE のべ 4 台 (Site 3,5,7,9) を海底に設置し、設置から 2~3 カ月後に回収した。測線方向はフィリピン海プレートの沈み込みを考慮して、約 N43W とした。調査海域の磁場の偏角は 6.6 度西偏とし、磁力計の水平 2 成分から磁力計の真北からの方位を推定した。

3.2. 時系列データ処理と MT レスポンス

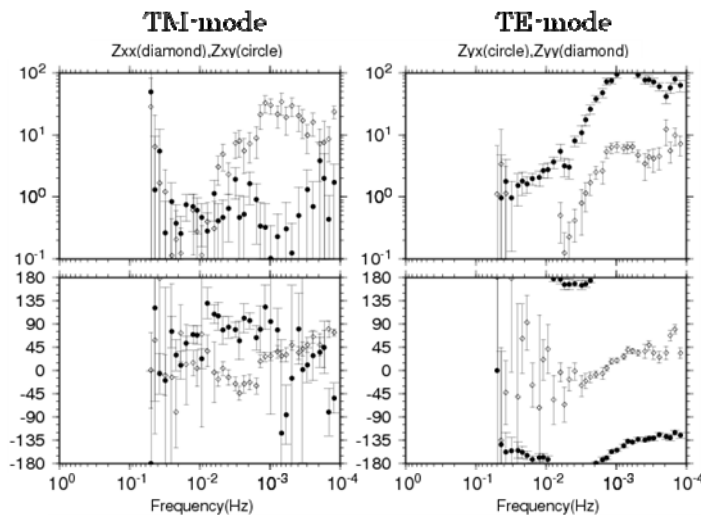
インダクションベクトルの観測値は度の観測点でも南西方向を向くため、調査地域の地下構造を 2 次元的と仮定して 2 次元解析を実施した。解析には OBEM が設置された 5 つの観測点で取得されたデータを用いた。時刻ずれ補正、スパイクノイズ除去や解析に用いるデータ選択などの時系列データ処理は木村ほか(2005)に従った。観測点固有の局所的な電場・磁場変動がなく、観測点間にも相関性のある時系列データ選択を行った後、MT レスポンスを算出した。ここでは、TM モードの MT レスポンスは、測線方向に沿って変動する電場とそれに垂直な磁場を用いて算出した MT レスポンスであり、TE モードは、測線方向に垂直に変動する電場とそれに測線に沿う磁場を用いて算出した MT レスポンスである。各モードにおける MT レスポンスを算出した結果、全てのサイトで、TE モードは比較的誤差が小さいのに対し、TM モードでは、誤差が大きい結果となった。一例として Site 1 における MT レスポンスを図 5 に示す。TM モードをみると対角成分である Z_{xx} のほうが非対角成分である Z_{xy} よりも大きく、電場と磁場の直交性が崩れていることが推定される。また Skew 値についても見積もって見たところ、一般に 3 次元性が高いとされる 0.3 をほぼ全



第 4 図 東海沖調査海域

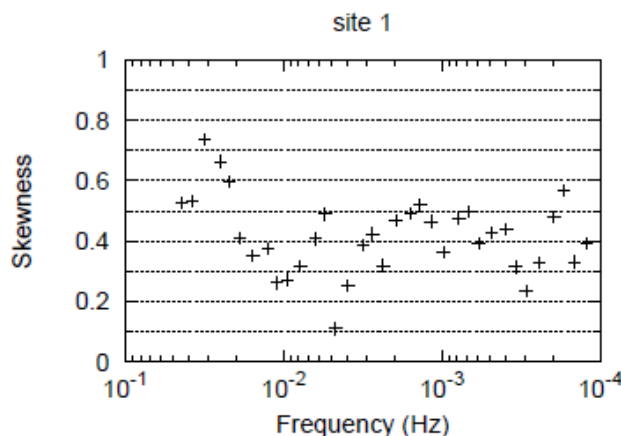
Fig. 4. Survey area map off the Tokai region, Japan, and locations for OBEMs (Ocean Bottom Electro- Magnetometer) and OBEs (Ocean bottom electrometer).

ての周期で上回っていた（図 6）。これより、電場・磁場の直交性が崩れる原因としては、インダクションベクトルの結果も加味して考えれば、地域的な地下構造の 3 次元性というよりも、むしろ局所的な海底地形の影響と考えられる。前章での 3 次元モデルによる数値計算結果に見られるように、TM モードの MT レスポンスには海底地形の影響が強く現れていると可能性が高いため、本研究では TE モードの MT レスポンスのみを用いて 2 次元インバージョンを実施した。



第 5 図 Site1 での MT レスポンス。黒い点は Zxy もしくは Zyx、白い点は Zxx もしくは Zyy。

Fig. 5. MT response at the site 1. In left panels, black dots and diamonds indicate Zxy and Zxx. In right panels, black dots and diamonds indicate Zyx and Zyy.



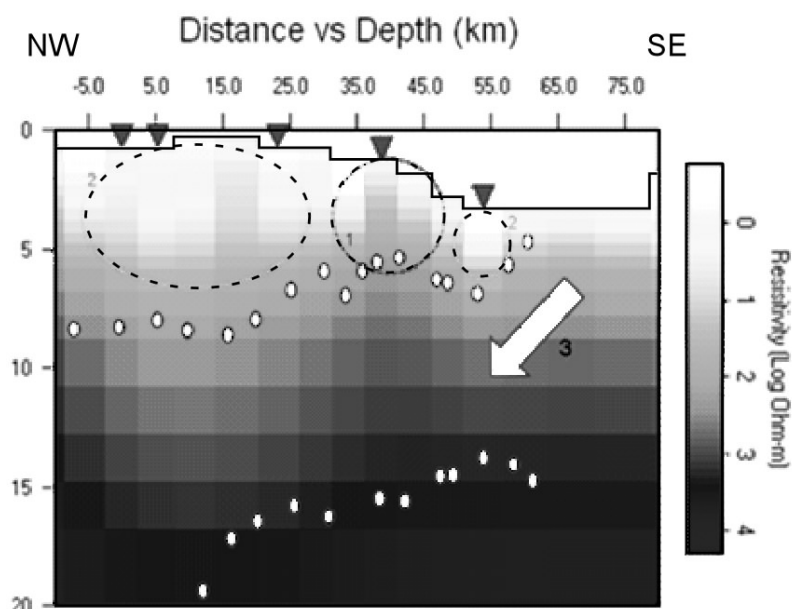
第 6 図 Site1 のスキュー値
Fig. 6. Skewness at the site 1.

3.3. 2D インバージョン結果

TE モードの MT レスポンスの中でコヒーレンシーが 0.5 以上のものでデータのばらつきが少ないものを選び出し、海底地形を考慮できるよう改変した ABIC 最適化法による平滑化制約付き 2 次元インバージョンを実施した (Uchida, 1993; Uchida and Ogawa, 1993 を改変)。得られた比抵抗構造を図 7 に、各 Site での観測値と計算値のフィッティングを図 8 に示す。図 7 には同時に、この地域の地震波反射面 (Kodaira et al., 2005) を記した。なお、横軸は Site 1 からの南東方向への距離であり、トラフ軸は 55km 地点に位置する。図上部の白抜きの部分は海水層であり、インバージョン中は $0.3 \Omega \text{m}$ 固定としている。

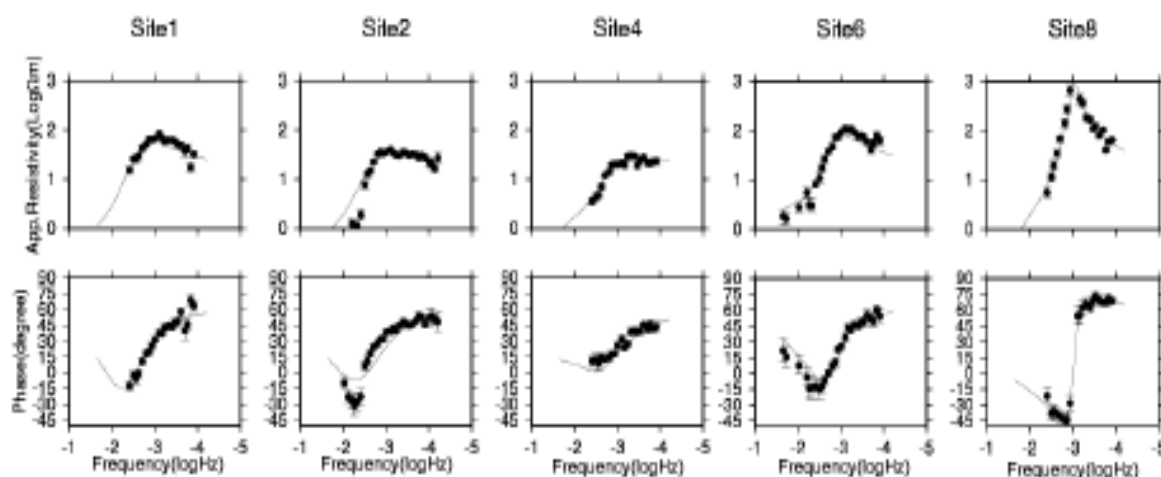
解析では主に、周期 100 秒付近の観測値を用いたが、浅い部分の比抵抗構造まで得ることができた。また、地震波反射面とよく類似した結果となっている。プレート境界より浅

いところで高比抵抗の盛り上がり(図 7 中の 1)や低比抵抗のかたまり(図 7 中の 2)といった東海沖の比抵抗構造の特徴が検出された。また、沈み込みに伴い高比抵抗になること(図 7 中の 3)、沖合の比抵抗構造変化など、東南海地域で示唆された特徴(木村ほか, 2005)が東海沖でも確認された。これらの特徴はフォワード計算による感度チェックの結果、信頼度の高いものといえる。



第 7 図 2 次元逆解析による東海沖地殻比抵抗構造。TE モードのみを使用した。○は Kodaira et al.(2005)による地震波反射面。

Fig. 7. The 2D inversion result (TE-mode).



第 8 図 5 地点での TE モードの見掛け比抵抗値と位相差。

細い線は第 7 図のモデルからの計算値

Fig. 8. Apparent resistivity and impedance phase at the site 1, 2, 4, 6 and 8.

4. まとめ

3 次元数値計算によって海底地形の配置や形状と TM モード・TE モードへの影響の度合を示すことで、どちらのモードが 3 次元地形の影響が小さく精度良い解析に適するかを検

討した。その結果、TM モードの MT レスポンスは、測線から離れた 3 次元地形の影響を強く受けることが示された。この結果は陸上の MT 探査で従来から知られている関係、すなわち TE モードのほうが 3 次元的な構造の影響を受けやすい(例: Wannamaker et al., 1984)。この海陸の違いは、観測点より上に海水層があるかないかによるものと考えられる。すなわち、図 1 のような海底地形の盛り上がり側部に誘導電流が集中し、結果として TM モードの磁場(測線直交方向)が大きく歪んでいることが今回の数値計算から確認されている。このような海水中の磁場の歪みが陸上とは異なる 3 次元地形の MT レスポンスへの影響を作り出しているものと思われる。

本研究では、実際に東海沖で取得された海底 MT データに対して 2 次元解析を実施した。TE モードでは電場と磁場の直交性は保たれていたが、TM モードでは電場と磁場の直交性が崩れた MT レスポンスとなった。インダクションベクトル、Skew 値そして 3 次元数値計算の結果から、海底地形の 3 次元的影響が TM モードに大きく現れており、TE モードでは比較的海底地形の影響を受けずに地下構造を反映した MT レスポンスが精度よく求められていると判断し、TE モードの MT レスポンスを用いて比抵抗構造推定を実施した。

TE モードによる解析により得られた地下構造は、そこからの計算値が観測値をよく再現している。また今回得られた結果は、同海域で実施された反射法地震波探査による結果や東南海沖の地下比抵抗構造とも整合的であった。従って、測線近傍に海底地形が発達する場合、TM モードの MT レスポンスは地形影響を強く受けて歪むのに対して TE モードは地形影響を受けにくく、TE モードの MT レスポンスを用いれば比較的適正な地下構造を得ることが可能であることが示されたと言える。今後、計算機や観測装置の進歩に伴って 3 次元観測、3 次元解析が主流になって行く時代になったとしても、ここに述べたような TE モードのみを用いた海底 MT データの 2 次元解析は(地下構造がほぼ 2 次元的であるならば) 3 次元解析の初期モデルなどを与えるために重要と言える。

参考文献

- 木村俊則・芦田譲・後藤忠徳・笠谷貴史・三ヶ田均・真田佳典・渡辺俊樹・山根一修, 南海トラフ沈み込み帯の地殻比抵抗構造 (2005): 南海トラフ沈み込み帯の地殻比抵抗構造, 物理探査, 58 251-262.
- Kodaira et al.,(2005): Onshore-offshore seismic transect from the eastern Nankai Trough to central Japan crossing a zone of the Tokai slow slip event, Earth Planet. Space., 57, 943-959
- Mackie R.L., Madden T.R., and Wannamaker P.E., (1993): Three-dimensional magnetotelluric modeling using difference equations-Theory and comparisons to integral equation solutions, Geophysics, 58. 215-226.
- Schwalenberg, K. and R. N. Edwards (2004): The effect of sea floor topography: An analytic formulation for the magnetotelluric fields in the presence of a harmonic interface, Geophysical J. Int., 159, 607-621.
- Uchida, T. (1993): Smooth 2-D inversion for magnetotelluric data based on statistical criterion ABIC, J. Geomag. Geoelectr., 45, 841-858.
- Uchida, T., and Y. Ogawa (1993): Development of Fortran code for two-dimensional magnetotelluric inversion with smoothness constraint, Geological Survey of Japan Open-File Report, 205, 115pp.
- Wannamaker, P. E., Hohmann, G. W., Ward, S. H. (1984): Magnetotelluric responses of three-dimensional bodies in layered earths, Geophysics, 49, 1517-1533.