

海陸境界の地下構造が MT 応答関数に与える影響

Effect on Magnetotelluric Response Functions
by Local Structures near Land-Sea Boundary

後藤忠徳・笠谷貴史 (海洋研究開発機構)
藤浩明 (富山大学理学部)

Tada-nori Goto, Takafumi Kasaya,
(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

Hiroaki Toh
(Faculty of Science, Toyama University)

Abstract

Near-coast magnetotelluric (MT) surveys are necessary to elucidate the crustal and mantle structures around the land-sea boundary region. However, the land MT data are usually affected by local structures below the seafloor, and the marine MT data are also affected by those below the land surface. In this study, we carry out numerical simulations and demonstrate effects on MT response functions by sea water, conductive sediments below the seafloor, and a subducting plate. Synthetic MT responses were computed for various models that were variants of a resistivity structure by Kasaya et al. (2005) derived from both land and marine MT data. As a result, the local structures turned out to severely affect near-coast land MT responses and marine MT responses. This implies that to obtain a reliable structure around the land-sea boundary, it is important to conduct simultaneous or combined MT observation on land and at the seafloor.

1. はじめに

日本列島の海陸境界域付近には、地震発生や島弧形成を議論する際に重要な鍵となると考えられる地殻・マントル構造が分布する。例えば、沈み込む海洋地殻や海洋マントル、島弧地殻下部の低周波微動域、島弧下のマントルウェッジなどである。陸域や海域での精力的な MT 調査の結果、海陸境界域に特徴的な比抵抗構造が見つかり、先に述べた島弧での諸現象と密接な関係にあると考えられている (最近の例: 海洋プレート上面の低比抵抗層 = Yamaguchi et al., 1999、後藤他, 2003、Kasaya et al., 2005; 低周波微動域 = 笠谷他, 2003、山口他, 2005; マントルウェッジ = Ichiki et al., 1999、Baba et al., 2004)。しかしながら、これらの観測は陸域あるいは海域のみの電磁気観測データを用いているものが多い (Baba et al., 2004; Kasaya et al., 2005 を除く)。一般には、海岸線効果が海域 MT データに影響を及ぼす範囲 (adjustment distance; Cox, 1980) の方が、counter coast effect の及ぶ範囲よりずっと広いとされているが、陸域 MT 解析の場合にも観測点のない領域にある比抵抗異常が構造解析の結果をゆがめる可能性が指摘されている (高倉他, 1995; Ogawa, 2002)。従って、日本列島周辺に限らず陸域データのみを用いて地下構造を求める場合には、低比抵抗である海水層や海底下の堆積層が陸域の構造調査の結果をゆがめてしまう可能性に注意しなければならないし、逆に海域データのみを用いる場合には、強い海岸線効果以外にも陸域の複雑な上部地殻構造や下部地殻・上部マントルの低比抵抗層、あるいは陸域下に沈みこむ海洋プレート上面の低比抵抗層が海底下の構造解析に与える影響を考慮する必要があると思われる。そこで本研究では、西南日本を例にとり、陸域や海域の構造が MT 応答関数にどのような影響をもたらすのかを定量的に見積もった。具体的には、数種類の模式的な比抵抗構造モデルを用いてフォワード計算を行い、各モデルの MT 応答関数 (見掛け比抵抗値及び位相) の空間分布を比較した。

2. 数値モデル

合成比抵抗構造モデルは、Kasaya et al. (2005)で海陸双方の MT データを用いて求められた南海トラフ熊野灘～紀伊半島下の広域の地殻・マントル比抵抗構造 (Fig. 1) に基づいて作成した。Kasaya et al. (2005)の比抵抗構造では、沈み込む海洋プレートのマントルは $100\Omega\text{m}$ 程度の比抵抗値を示す一方、海洋地殻を含む海洋プレート上面は $10\Omega\text{m}$ 程度の低い比抵抗値を示す (ただし 1944 年東南海地震の高速破壊域付近では高めの比抵抗値を示す)。特にプレート上面深度が 20km より深いところでは海洋地殻だけではなく上部マントルの一部も低比抵抗を示している。一方、沈み込むプレートの先端部分では、海洋プレート上面だけでなく前弧地殻も低比抵抗を示しており、これは付加堆積物に相当するものと考えられる。陸域の浅部 (深さ 20km より浅い部分) は $10\Omega\text{m}$ 程度の低比抵抗値を示しているが、Fuji-ta et al. (1997)では紀伊半島の地殻の比抵抗値は $10\sim 10000\Omega\text{m}$ と幅広い値を示すことが報告されている。Kasaya et al. (2005)では陸上のデータについては 500 秒以上の長周期しか用いていないため、地殻構造については Fuji-ta et al. (1997)の結果のほうが信頼度が高いと考えられる。

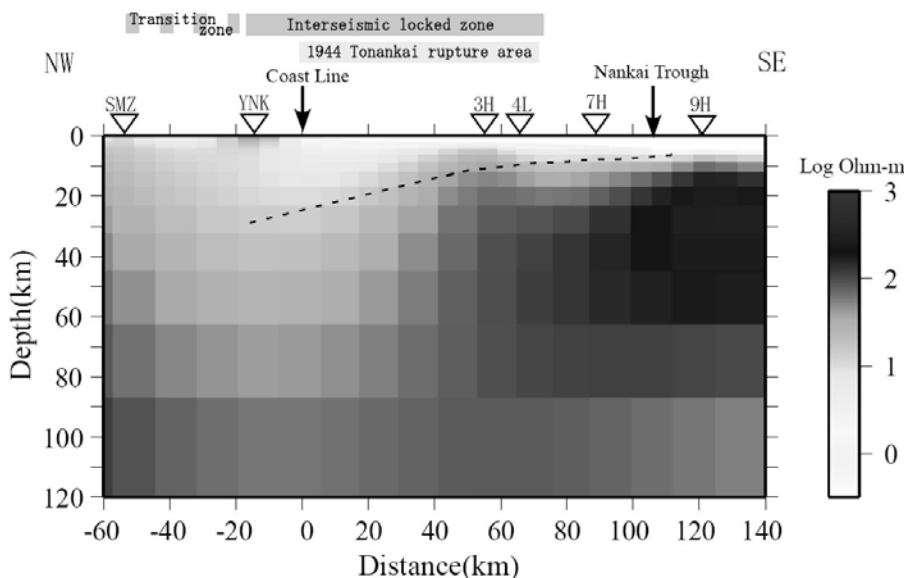


Fig. 1. Regional resistivity model across the Nankai Trough and Kii Peninsula (Kasaya et al., 2005). Inverted triangles indicate locations of observation sites used for the Kasaya et al's (2005) inversion. A dashed line shows the plate boundary estimated by Nakanishi et al. (2002).

Fig. 1 の広域比抵抗構造を簡略化して、ここでは Figs. 2, 3, 4, 5 に示すような 4 種類のモデルを考えた。地殻・マントルの比抵抗値標準値を $100\Omega\text{m}$ とし、海底堆積層 (付加堆積物を含む) 及び海洋プレート上面の低比抵抗層を $10\Omega\text{m}$ 、また海水層の比抵抗値は $0.25\Omega\text{m}$ であると仮定した。4 種類のモデルの特徴は以下の通りである。

- ・ モデル A (Fig.2a): 海水層 + 地殻・マントル層 ($100\Omega\text{m}$) のみ
- ・ モデル B (Fig.3a): モデル A + 海底堆積層 + 海洋プレート上面の低比抵抗層 (海側のみ)
- ・ モデル C (Fig.4a): モデル A + 海底堆積層 + 海洋プレート上面の低比抵抗層 (海～陸域)
- ・ モデル D (Fig.5a): モデル A + 海洋プレート上面の低比抵抗層 (陸域下のみ)

数値計算に際しては、Uchida and Ogawa (1993)に基づいて、地表および海底での MT 応答関数を計算できるように変更した順計算コードを使用した。各 2 次元モデル中の海底地形は、Kasaya et al. (2005) の測線沿いの水深データに基づき、矩形ブロックとして表現されている。水平位置については、海岸線を 0km 地点として海側方向を正に、陸側を負にとった。計算周期には $100\sim 10000$ 秒から 7 周期を選び、各モデルの地表及び海底での TM モード MT 応答関数を求めた。Kasaya et al. (2005)でも議論されているように、3 次元的な比抵抗構造の影響を軽減するために、TM モードの MT 応答関数の観測値が構造解析に使用されることが多いためである。TE モードについては別論文において議論したい。

3. 結果

まず基本となるモデル A (Fig. 2a) の MT 応答関数分布 (Figs. 2a, 2b) について、その特徴をまとめる。Fig. 2b に TM モードの見掛け比抵抗値分布を擬似断面として示した。これを見ると、海岸線付近 (-25km ~ 50km) では水平方向に見掛け比抵抗値の急変が認められる。また海底地形の傾斜変化が認められる水平位置 75 ~ 125km 付近でも見掛け比抵抗値の変化が現れている。位相の空間分布 (Fig. 2c) にも、海岸線付近及び水平位置 100km 付近で大きな変化が認められる。

次に他のモデルの特徴を述べる。海底堆積層を加えたモデル B (Fig. 3a) から計算される MT 応答関数分布 (Figs. 3b, 3c) では、モデル A で見られた海岸線及び水平位置 100km 付近での見掛け比抵抗値・位相の空間変化は小さくなっている。さらに海洋プレート上面の低比抵抗層を加えたモデル C (Figs. 4a, 4b) では、海岸線付近の見掛け比抵抗値の空間変化は更に小さくなっている。一方、海洋プレート上面の低比抵抗層が陸域下のみ存在し、海底下には低比抵抗層が存在しないモデル D では、モデル A と同様に海岸線付近と水平位置 100km 付近に MT 応答関数の大きな空間変化が認められる (Figs. 5b, 5c)。

陸域での MT 応答関数に対する海底下の比抵抗構造の影響に着目して、計算された MT 応答関数のより詳細な比較を行う。モデル B はモデル A の海底下に低比抵抗層を加えたものであるが、陸域の見掛け比抵抗値を比べると (Figs. 2b, 3b) 海岸線から水平位置 -30km 付近の地域内ではモデル B の方が小さい値を示しており (最も小さい所で数百分の 1 程度) さらにモデル A・B 間で最も高い見掛け比抵抗値を示す場所が異なっている。一方、陸域の位相については、見掛け比抵抗ほどは違いが認められない (Figs. 2c, 3c)。モデル C と D の違いも海底下の低比抵抗層の有無であるが、2 つのモデルの陸域の見掛け比抵抗値 (Figs. 4b, 5b) は海岸線から水平位置 -30km 付近の地域内で違いが認められる。これはモデル A・B の比較で見られた傾向と同様である。また海岸線付近では、モデル D の短周期 (数百秒以下) の位相はモデル C よりも小さく、その差は最大で 20 度程度である (Figs. 4c, 5c)。これはモデル A・B の比較では見られない傾向である。

一方、海域での MT 応答関数に対する陸域深部の低比抵抗層の影響は上述の陸域の場合ほど大きくはないが、陸域の場合よりも海岸線から離れた遠方まで達することが分かった。モデル D はモデル A の陸域深部に低比抵抗な海洋プレートを加えたものであるが、モデル D の長周期 (1000 秒以上) の見掛け比抵抗値 (Fig. 5b) は、海域 (80 ~ 120km 地点周辺) ではモデル A の値 (Fig. 2b) よりもやや高い (最大で数倍程度)。またモデル D の短周期 (1000 秒以下) の位相についても、海域 (80 ~ 120km 地点周辺) ではモデル A よりも若干小さい値を示す (その差は最大で 10 度程度: Fig. 2c, 5c)。モデル B と C の違いも陸域下の低比抵抗層の有無であるが、2 つのモデルの海域の見掛け比抵抗値 (Figs. 3b, 4b) は 80 ~ 120km 地点付近で数倍程度の違いがある。モデル C の短周期 (数百秒以下) の位相についてもモデル B と概ね似ているが、海域 80-125km 地点ではモデル B より最大で 10 度程度小さい値を示している。

4. 議論・まとめ

海底下の低比抵抗な堆積層 (付加堆積物を含む) や海域から陸域へ連続する低比抵抗な海洋プレート等の有無によって、陸域や海域で見掛け比抵抗値や位相の空間分布は大きく左右されることが今回の数値計算で明らかになった。特にモデル A・B・C の比較から明らかなように、海岸付近の比抵抗構造が横方向にスムーズになるほど、見掛け比抵抗値などの空間変化は小さくなる。従って、陸域のみ或いは海域のみのデータを用いて比抵抗構造を議論する際に、堆積層のように海水層と地殻の中間的な比抵抗値を持つものが海陸境界付近に位置していたり、あるいは海陸境界を広域に跨ぐ比抵抗構造があると思われる場合は、これらのある程度モデルに取り込むなどして構造解析の結果が歪められな

いようにする必要がありと考えられる。

陸上の沿岸域で取得したデータを用いて比抵抗構造解析を行う場合は、海底下の比抵抗構造の影響を加味して解析する必要があることも、今回の研究で明らかとなった。数値計算の結果からは、海岸線からの距離が 30km 程度の地域内では海底下の低比抵抗層は見掛け比抵抗を小さくする傾向があるため、この地域で取得された陸域観測データを用いて比抵抗構造解析を行うと島弧地殻や海洋プレートが実際よりも低比抵抗に求められる可能性がある。特に海域～陸域にかけて低比抵抗層が連続する場合は（モデル C）、海岸線付近の陸域の位相にも海底下の構造の影響が現れるため（Fig. 4c）この傾向は強くなる。従って、海底下の構造の情報を陸域のデータを用いた構造解析に取り入れることは重要である。本研究の結果では海岸線から 30km 程度離れると海底下の構造の影響は小さくなるので、ある程度内陸であれば海底下の構造情報を加えなくても、陸域データのみによる地殻比抵抗構造解析は可能である。しかし、地殻全体の比抵抗値が本研究で用いた 100Ωm よりずっと高い場合は、海陸境界での比抵抗コントラストも大きくなるため、より内陸でも海底下の構造の影響が現れる可能性がある。また本研究では計算を行わなかったが、内陸でも 10000 秒より長周期側の MT 応答関数は海底下の構造の影響を受ける可能性はあるため、陸側の長周期データのみを用いた深部構造解析の際には本研究と同様の数値実験を行い、海域構造による影響の有無を確認するべきである、と考えられる。

一方、海域では海岸線から 100km 程度離れた地域でも、陸域深部の比抵抗構造の影響を受けうることが明らかとなった。海底での電磁場データ解析の際に、陸域の影響を考慮する必要があるという指摘は従来からもなされているが（Cox, 1980; Heinson and Constable, 1992）、本研究で改めてその必要性が示されたと言える。本研究の結果によれば、陸域深部の低比抵抗層は 1000 秒より長周期の見掛け比抵抗値を高くする傾向があり、それに対応するように 1000 秒より短周期の位相は小さくなる。このため海域データだけを用いて求めた比抵抗構造では、海洋プレートの比抵抗値が実際より高めに求められる可能性がある。従って、海溝域周辺で海底 MT 調査を実施して海底下の比抵抗構造を求める場合は、陸側の比抵抗構造をモデル解析の際に取り入れる必要がある。

結論としては、陸域の沿岸域や海底での地下比抵抗構造調査においては、海陸双方でデータを取ることが望ましい。これによって Kasaya et al. (2005) で実施されたように、海陸に跨る広域地下比抵抗構造を精度よく得ることが可能となり、いままで以上に詳細な議論が可能となると思われる。例えば、地震波反射面の分布や震源分布・微動源分布との対比が可能となり、また地震波速度異方性や温度構造などとの比較による地殻・マントル物性の把握が進むと考えられる。加えて著者らは、海陸同時の電磁場観測を提案したい。例えば海陸で同時に磁場を測定した場合は、VGS 法（陸上と海底の地磁気変動の比から MT 法のように地下比抵抗構造の情報を得る手法）を適用することができ、海域から陸域に亘る比抵抗構造に関する情報を増やすことが可能となる。近年、VGS 法による観測データにインバージョンを適用して比抵抗構造解析を行う試みがなされており、伊豆小笠原島弧や東北日本～日本海の比抵抗構造が報告されつつある（Toh, 2002; 藤ほか., 2004）。VGS 法と MT 法の両方の観測データに対してインバージョンを適用すれば、海陸境界域の構造に対してより高い精度で比抵抗構造を求めることができるであろう。同時に、異方性を含む構造解析や 3 次元的な構造解析を行うためには、地下構造情報をより多く取得する必要があるため、この場合も多面的な海陸同時観測が有効な手段と考えられる。

謝辞

本研究で用いた MT 法 2 次元フォワード計算コードは、産業技術総合研究所の内田利弘博士および東京工業大学の小川康雄博士により開発されたものを、2 次元海底地形を含められる様に変更して用いた。両氏のご協力に対し、厚く御礼申し上げます。神戸大学理学部の藤田清士博士には紀伊半島の地殻構造に関するデータを提供頂き、有益なコメントを頂いた。

参考文献

- Baba, K., H. Toh, M. Ichiki, T. Motobayashi, Y. Ogawa, M. Mishina, I. Takahashi, and H. Utada, Electrical structure beneath the eastern margin of Japan Sea, Program & Abstracts of 17th Int. Workshop on EM Induction in the Earth, 2004.
- Cox, C. S., Electromagnetic induction in the oceans and inferences on the constitution of the earth, *Geophysical Surveys*, 4, 137-156, 1980.
- Fuji-ta, K., Y. Ogawa, S. Yamaguchi, and K. Yaskawa, Magnetotelluric imaging of the SW Japan forearc, -a lost paleoland revealed?-, *Phys. Earth Planet Inter.*, 102, 231-238, 1997.
- 後藤忠徳・笠谷貴史・三ヶ田均・木下正高・末廣潔・木村俊則・芦田譲・渡辺俊樹・山根一修, 電磁気学的な流体の分布と移動の解明 -南海トラフを例として-, *物理探査*, 56, 439-451, 2003.
- Heinson, G., and S. C. Constable, The electrical conductivity of the oceanic upper mantle, *Geophys. J. Int.*, 110, 159-179, 1992.
- Ichiki, M., N. Sumitomo and T. Kagiya, Resistivity structure of high-angle subduction zone in the southern Kyushu district, southwestern Japan, *Earth Planets Space*, 52, 539-548, 2000.
- Kasaya, T., T. Goto, H. Mikada, K. Baba, K. Suyehiro, and H. Utada, Resistivity image of the Philippine Sea Plate around the 1944 Tonankai earthquake deduced by Marine and Land MT surveys, *Earth Planets and Space*, 57, 209-213, 2005.
- 笠谷貴史・山口覚・後藤忠徳・上嶋誠・歌田久司・鍵山恒臣・三ヶ田均・末広潔, 紀伊半島における深部比抵抗構造探査, *物理探査*, 56, 427-437, 2003.
- Nakanishi, A., N. Takahashi, J. O. Park, S. Miura, S. Kodaira, Y. Kaneda, N. Hirata, T. Iwasaki, and Masao Nakamura, Crustal structure across the coseismic rupture zone of the 1944 Tonankai earthquake, the central Nankai Trough seismogenic zone, *J. Geophys. Res.*, 107, 10.129/2001JB000424, 2002.
- Ogawa Y., On two-dimensional modeling of magnetotelluric field data, *Surveys in Geophysics*, 23, 251-273, 2002.
- 高倉伸一・松尾公一・岸本宗丸, アレイ式MT法の国内石油探鉱への適用 - 新潟県上越地域における実験例 -, *物理探査*, 48, 356-371, 1995.
- Toh, H., Two-dimensional electrical conductivity structure of the northern Izu-Bonin arc revealed by seafloor geomagnetic observations, Abstracts for NSF-IFREE MARGINS Workshop on the Izu-Bonin-Mariana Subduction System, 62, 2002.
- 藤浩明・本林勉・馬場聖至・市來雅啓・小川康雄・三品正明・高橋一郎・歌田久司, 地磁気鉛直勾配法を用いた東北日本背弧の上部マントル電気伝導度構造, 第115回地球電磁気・地球惑星圏学会講演予稿集, 2004.
- Uchida, T. and T. Ogawa, Development of fortran code for twodimensional magnetotelluric inversion with smoothness constraint, *Geological Survey of Japan Open-File Report*, 205, 115 pp., 1993.
- Yamaguchi, S., Y. Kobayashi, N. Oshiman, K. Tanimoto, H. Murakami, I. Shiozaki, M. Uyeshima, H. Utada, and N. Sumitomo, Preliminary report on regional resistivity variation inferred from the Network MT investigation in the Shikoku District, Southwestern Japan, *Earth, Planets Space*, 51, 193-203, 1999.
- 山口覚・上嶋誠・谷川大致・小河勉・村上英記・大志万直人・塩崎一郎, 紀伊半島の広域的な地下電気伝導度分布, 地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会予稿集, E011P-003, 2005.

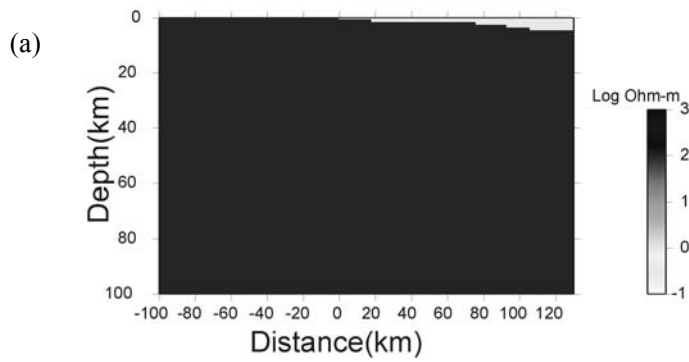


Fig. 2. Model A (a) and the TM-mode MT Response (b, c). Apparent resistivity is shown as logarithmic value.

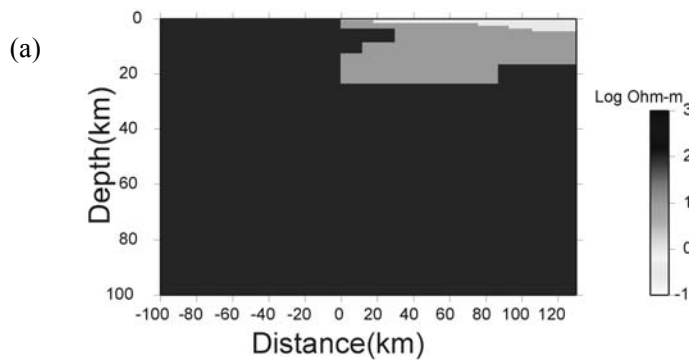
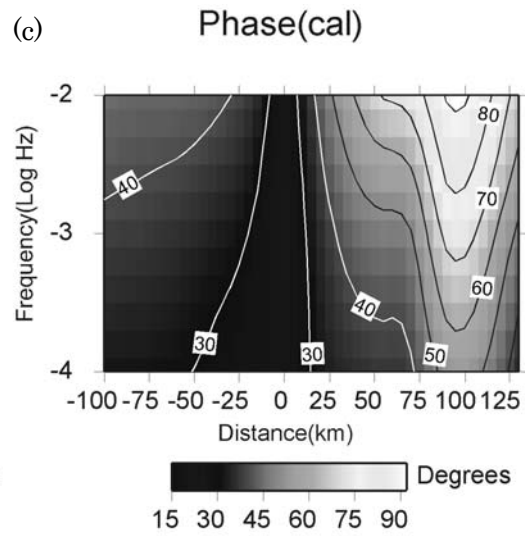
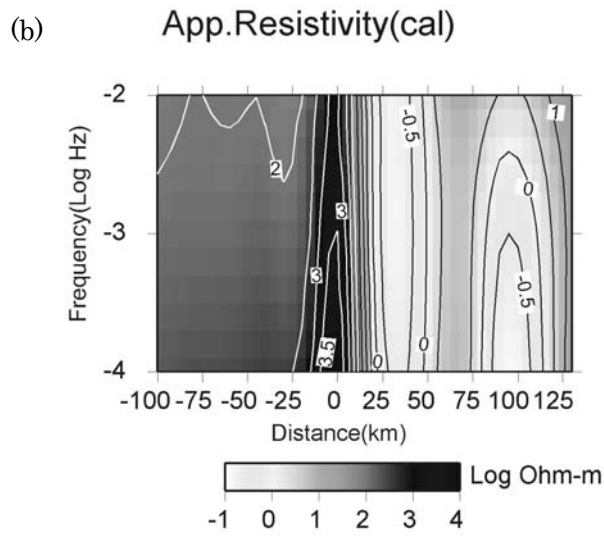
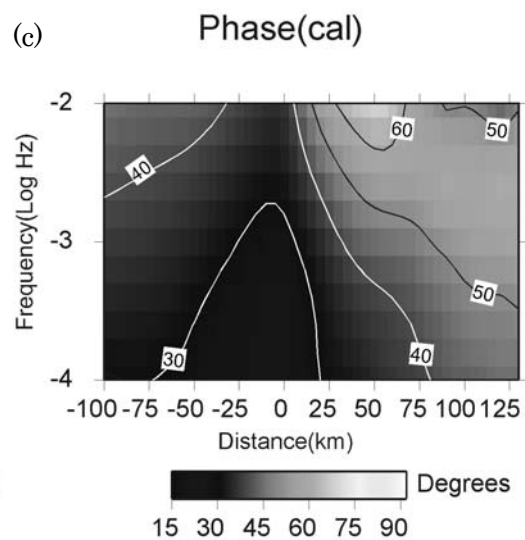
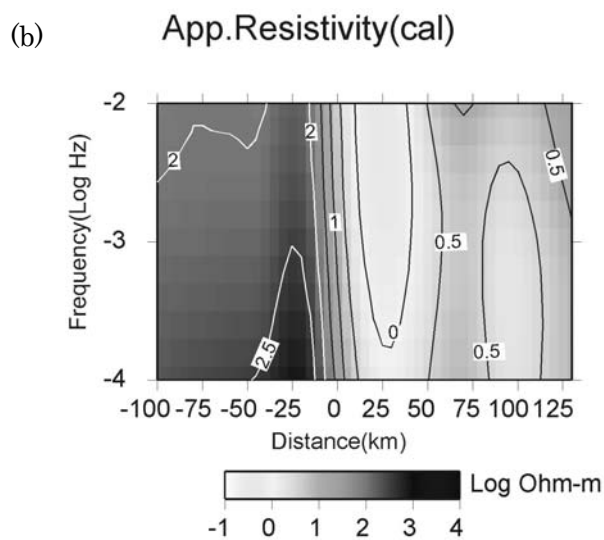


Fig. 3. Model B (a) and the TM-mode MT Response (b, c). Apparent resistivity is shown as logarithmic value.



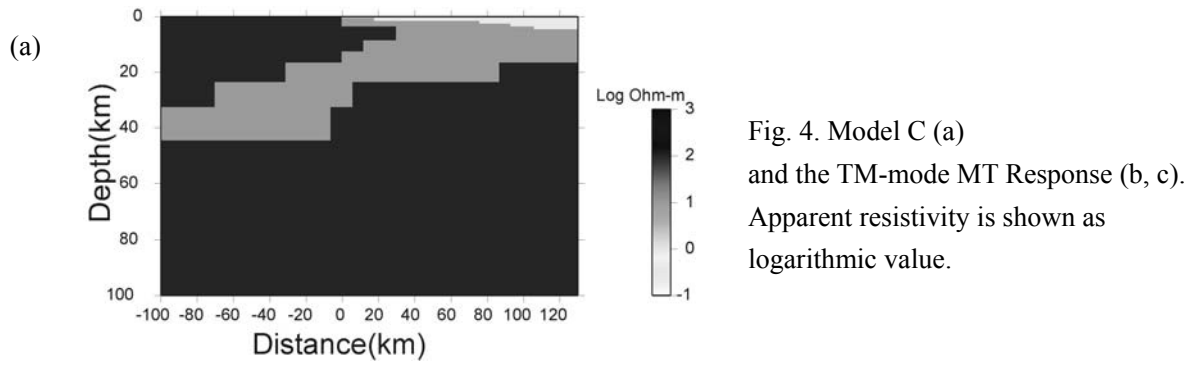


Fig. 4. Model C (a) and the TM-mode MT Response (b, c). Apparent resistivity is shown as logarithmic value.

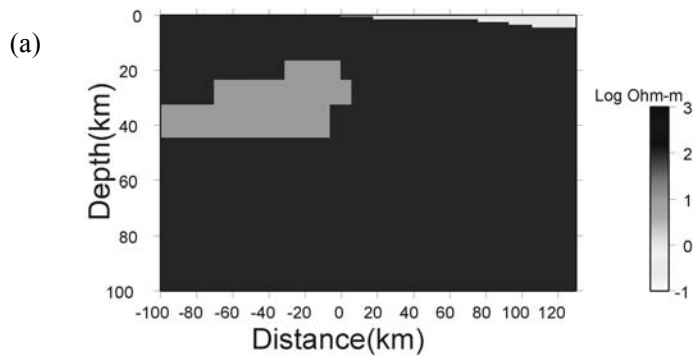
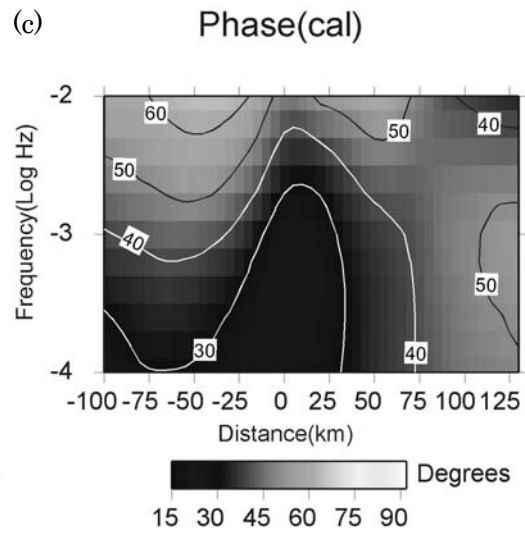
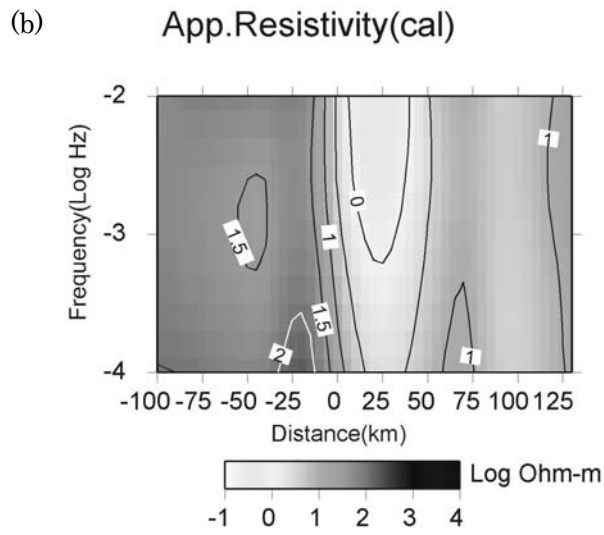


Fig. 5. Model D (a) and the TM-mode MT Response (b, c). Apparent resistivity is shown as logarithmic value.

