

海陸境界における二次元FEMモデリングにおける三角形要素と四角形要素の比較

南 拓人 [1]; 藤 浩明 [2]; 笠谷 貴史 [3]; 下泉 政志 [4]; 大志万 直人 [5]

[1] 京大・理・地物; [2] 京都大学・大学院・理学・地磁気センター; [3] JAMSTEC・IFREE; [4] 九州能開大; [5] 京大・防災研

On the comparison between rectangular and triangular elements in 2-D FEM modeling along land-sea arrays

Takuto Minami[1]; Hiroaki Toh[2]; Takafumi Kasaya[3]; Masashi Shimoizumi[4]; Naoto Oshiman[5]

[1] Geophysics, Kyoto Univ.; [2] DACGSM, Kyoto Univ.; [3] IFREE, JAMSTEC; [4] KPC; [5] DPRI, Kyoto Univ.

The San-in region is classified as an area of high seismicity/volcanic activity, and thus many magnetotelluric (MT) and seismic observations have been conducted. However, the observations are limited only on land so far. Our group, therefore, started seafloor electromagnetic (EM) observations off the San-in region in 2006. As a result, we have obtained seafloor EM data at 10 sites in total.

The purpose of this study is to appreciate the causes of the volcanic and seismic activities around the San-in region by estimating the electrical conductivity structure beneath this region using both seafloor and land EM data.

Inferring subsurface electrical structures is usually done by solving inversion problems. However, there are few 2-D inversion codes available for land-sea arrays at this moment because there have been few seafloor EM observations in shallow seas. In regions with coast lines, the way how currents flow in the sea depends strongly on the bathymetry as well as topography. This means that accuracy of forward modeling depends on how the bathymetry is expressed numerically. There are many methods to model electrical conductivity structures, such as the finite difference method (FDM), the finite element method (FEM) and so on. In the case that EM response functions are calculated along arbitrary boundaries between conductive media, FEM is known to be most useful. However, if the forward code of the FEM in concern adopts rectangular elements, it is needed to have very fine numerical grids when the bathymetry has steep inclinations.

In this study, we compared the accuracy of EM responses calculated by different two-dimensional (2-D) FEM codes using triangular and rectangular elements. We used Ogawa and Uchida's (1996) code for rectangular elements and Utada's (1987) code for triangular ones. We worked on a bathymetry with a uniform inclination between the land-sea boundary whose horizontal-to-vertical ratio is 25 up to 4km deep. On both sides of the inclination, there are land with 0m height and sea with the 4km depth. Using this bathymetry, we conducted 2-D transverse magnetic (TM) forward modeling for both elements and compared the apparent resistivities and phases of MT impedance.

As for triangular elements, it was found better to keep all triangles' shapes as uniform as possible regardless of their aspect ratios rather than to change the shapes of particular elements to make the aspect ratios smaller. The results suggest that it is important to force both sizes and shapes of the triangular elements change as smoothly as possible.

On the other hand, as for rectangular elements, theoretical MT responses calculated along the seafloor were not smooth enough and appeared to be oscillating. It is due to the vertical boundaries crossing the inclination, which are inevitable in the case of rectangular elements. When we calculate the MT responses along the locally horizontal seafloor, the effects of side edges are opposite, which resulted in the oscillating responses. The opposite edge effects may be caused by charge accumulation near the vertical boundaries between the resistive land and the conductive sea water. However, if we use the response at the center of the horizontal seafloor alone, the oscillation can be minimized.

From the above results, it can be concluded that the theoretical responses should be calculated at nodes as far as possible from the corners of the vertical inside boundaries when using rectangular elements. On the contrary, it is possible for the triangular elements to achieve the accuracy of 2-D FEM modeling in regions including land-sea boundaries.

In the presentation, we will further present progress in 2-D FEM inversion using triangular elements as well as real data, in addition to the report on numerical experiments of triangular vs. rectangular elements.

西南日本背弧域は、浅部にフィリピン海プレートが、深部に太平洋プレートが沈み込んでおり、火山学・地震学的に特異な地域である。この地域ではこれまで、地震学・電磁気学的手法による陸域観測が広く行われてきたが、技術的な困難から海域での観測は近年まで行われていなかった。しかし、本研究グループは2006年から山陰沖における海底電磁気観測を開始し、現在までに計10点の海域観測点において、海底電磁場データを取得している。本研究では、海域で得られた電磁場データを陸域データと併せて用いることで、この地域における地下比抵抗構造を推定し、大山付近の地震・火山メカニズムを明らかにすることを目的としている。

地下比抵抗構造の推定は一般に電磁場データを用いたインバージョンにより行われるが、浅海における海底電磁場観測はこれまで行われた例が少ないこともあり、海陸境界領域において使用可能な2次元インバージョンコードは現在も少ない。海陸境界では、抵抗の大きな陸部と導体である海水が水平方向に境界を持つため、海水中の誘導電流の流れ方は海陸境界の海底地形に大きく依存する。そのため海底地形をどれほど精度よく表現できるかがモデリングの精度を大きく左右する。モデリング手法には有限差分法、有限要素法、境界要素法など様々な手法が存在するが、任意形状の境界に沿った応答関数を得たい場合には有限要素法が適している。しかし、フォワード計算に四角形要素を採用している場合には、海陸境界における複雑な海底地形を滑らかに表現するためには、非常に細かい四角形要素を作成することが必要となる。

本研究では、西南日本背弧域における精度の高い2次元インバージョンを目的とし、海陸境界領域を対象とした2次元有限要素モデリングにおける、三角形要素と四角形要素を用いた場合の計算精度の比較を行った。四角形要素のフォワードコードにはOgawa and Uchida(1996)コードに含まれるものを、三角形要素にはUtada(1987)コードに含まれるものを用いた。海陸境界の地形としては、水平方向25mに対し鉛直方向1mの比で海水面から水深4kmまで一様に下る傾斜地形を設定し、傾斜地形の両側には海拔0mの陸域と水深4kmの海域を、それぞれ水平一様な地形として与えた。この海陸境界地形において、三角形要素と四角形要素を用いた2次元有限要素モデリングを行い、得られた見掛け比抵抗と位相を比較した。その結果、斜面に沿って計算される応答関数は、三角形要素と四角形要素の場合で大きく異なることが明らかとなった。

三角形要素では、長方形をベースとして要素分割を行ったが、地形線に沿った三角形要素を作成するために長方形を大きく変形した場合、斜面に沿って滑らかな応答関数は得られなかった。一方で長方形の縦横比を気にせず、地形線と長方形の対角線が一致するように格子を設定した場合には、斜面に沿って滑らかな応答関数が得られる結果となった。この結果は、三角形要素を用いた場合、ベースとなる長方形の縦横比よりも、三角形の形とサイズが連続的に変化することが重要であることを示唆している。

一方四角形要素では、海底地形の斜面に沿って計算される応答関数は滑らかに変化せず、振動する形となった。これは、四角形要素で斜面を表現した場合に、斜面の途中に小さな水平面が存在してしまうことが原因である。一つの水平面で得られる応答関数の値は水平面両端で大きく異なり、一つの水平面に複数の観測点を置いた場合、傾斜に沿った変化と水平面に沿った増減が逆センスとなるのである。水平面内における逆センス変化の原因は、海陸境界の崖部分でおこるチャージアップであると考えられる。各水平面において水平面中央の値のみ用いれば、斜面に沿って滑らかな応答関数は得られるが、傾斜が一様でない場合に水平面内のどの位置で応答関数を計算するのかには注意が必要である。

以上の結果より、四角形要素を用いて傾斜に沿った応答関数を計算する場合、崖に相当する四角形要素の角の影響が出ない位置で、応答関数を計算する必要があることが明らかとなった。また、海陸境界におけるモデリングにおいては、少ない要素数で地形が正確に表現できる三角形要素を用いることで、モデリング精度が上がる可能性があることも確かめられた。

発表では、三角形要素と四角形要素のモデリングによる実験結果の報告に加え、海陸境界で使用可能な、三角形要素を用いた2次元インバージョンコード開発の経過を報告する。