

# 磁場電場分離MT法を用いた比抵抗構造解析の特性

後藤忠徳（愛知教育大・地球環境科学）

## Characteristics of conductivity structures obtained by using EM separated MT soundings

Tadanori Goto

Dept. Environmental Earth Sci., Aichi Univ. Educ.

### Abstract

Recently, magnetotelluric (MT) sounding by using a magnetic site and separated electric sites are carried out. Such method is very convenient because of light and low-power instruments. However, the magnetic field is not homogeneous on the ground and the "EM separated" MT sounding can lead erroneous structures. In this study, synthetic calculations are carried out by using two-dimensional forward and inversion codes and effects on estimation of conductivity structure by using EM separated MT soundings are discussed. It is concluded that erroneous structures are led when a magnetic site is located on a low resistive zone.

### 1. はじめに

近年、GPSクロックの普及により同期時刻精度が向上したため、野外において多点での電磁場同時観測が可能になってきた（岸本他, 1998）。特に、電場と磁場を異なる地点で取得し、これにMT法を適用して地下比抵抗構造をもとめるという、いわゆる”磁場電場分離型MT法”が最近はおこなわれるようになってきた。東北地方千屋断層周辺での1998年度電磁気共同観測（地殻比抵抗研究グループ, 1999）においても、従来の電場磁場5成分を記録するMT測定装置（Phoenix社V5-16システム）以外に、電場のみの測定が可能な装置（Phoenix社MTU2E）が9観測点で使用されている。電場と磁場を分けて測定する最大のメリットは、測定装置の軽量小型化、小電力化にある。この結果、電場に比べて空間的に均質と思われる磁場の観測点を少数もうけ、同時に電場を多点で測定することで、従来より高密度のmagnetotelluric (MT) 観測が期待される。特に3次元的な地下比抵抗構造を求める場合、地下構造モデリングの苦勞もさることながら、どのように多点での電磁気観測をするかが問題となっているが、電場と磁場を分離測定することはその解決法の一つである。これらから考えて、磁場電場分離型MT法は今後さまざまなfieldで利用されて行くであろう。

しかし、電場ほどではないとはいえ、磁場も空間的に均質でなく、その影響が地下構造解析の際に深刻かどうかをみつめることは重要である。つまり、ある地点で電場を測定し、離れた地点の磁場をもちいて見かけ比抵抗値や位相差を求めた場合、その値は電場と同地点の磁場を用いた場合とは異なっており、この違いを無視して従来の手法で地下構造モデリングを行った場合、得られる地下比抵抗構造は本来もとめるべきものから大きくゆがむ可能性がある。また実際の観測では（1998年度電磁気共同観測が現にそうであるが）磁場観測点を複数設置しており、どの磁場観測点と電場観測点のペアでMT解析をするのがよいかは、はっきりとはしていない。

そこで本研究では、数値実験によって、磁場の不均質さが磁場電場分離型MT法に及ぼす影響をみつ

もった。具体的には、ある2次元的な地下構造を考え、2次元forward計算により、構造の走向方向の電場とそれに直行する磁場の分布を計算する。次に、ある1地点の磁場と別の地点の電場から、TEモードの見かけ比抵抗値と位相差を計算する。この計算値に3%の誤差をつけくわえた物をもとに、2次元inversionをおこなって地下構造をもとめる。この構造がはじめの2次元構造からどの程度ずれるかによって、問題としている磁場電場分離MT法を用いた比抵抗構造解析の特性について考える。2次元forward計算には歌田(1987)による有限要素法に基づくプログラムを用いた。また Uchida and Ogawa(1993)による2次元inversionプログラムを用いた。forward計算は、0.002~100Hzの周波数帯の、計11周波数について行った。またinversionについて、今回の数値実験では10回以内のiterationで解は収束し、残差は与えた誤差に対して十分小さい。

地下構造モデルとして、ここでは3種類考えた。それぞれ断層モデル (Fig.1)、堆積盆モデル (Fig. 2)、埋没モデル (Fig.5 左上)と名付けるが、いずれも1000  $\Omega$  mと10  $\Omega$  mの2つのブロックからなるシンプルな構造である。これらの3つのモデル上に12の観測点を各々設けることとした。まず従来のMT法のように、12点全点で電場と磁場を両方測定し、得られた見かけ比抵抗値・位相差を用いてinversionをおこなって得られたモデルを、Fig. 3 左上, Fig. 4 左上およびFig. 5 左下にしめす。仮定した3種類のモデルとも、inversionにより良く再現されていることが分かる。

## 2. 数値実験と結果

断層モデル (Fig. 1) について、低比抵抗帯から約4km離れた1観測点でのみ磁場を測定し、この磁

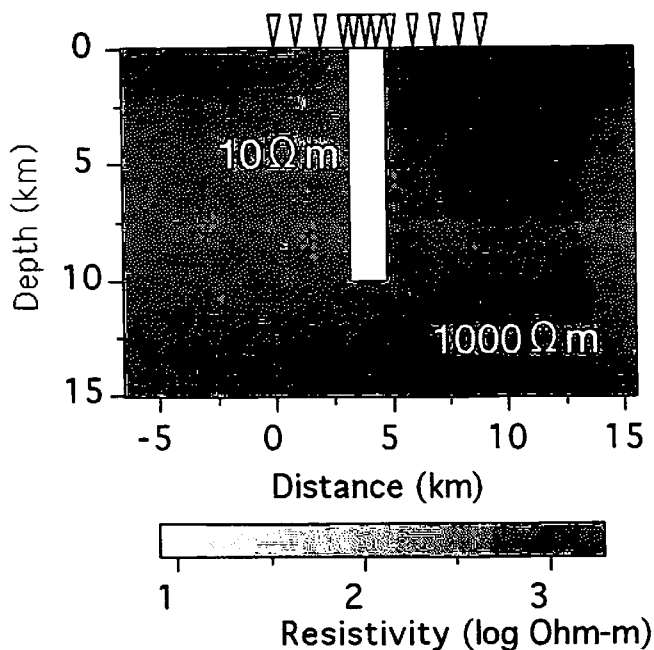


Fig. 1. A resistivity structure called 'Fault Model'. Open triangles denote locations of MT sites.

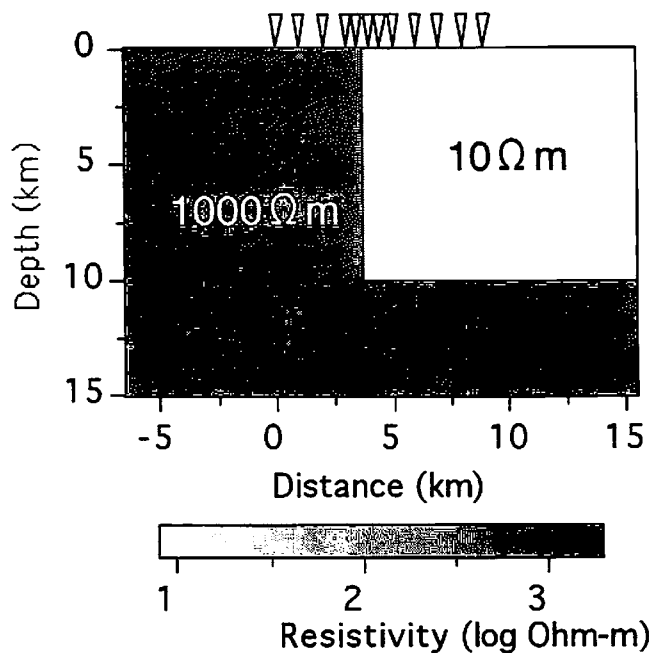


Fig. 2. A resistivity structure called 'Basin Model'. Open triangles denote locations of MT sites.

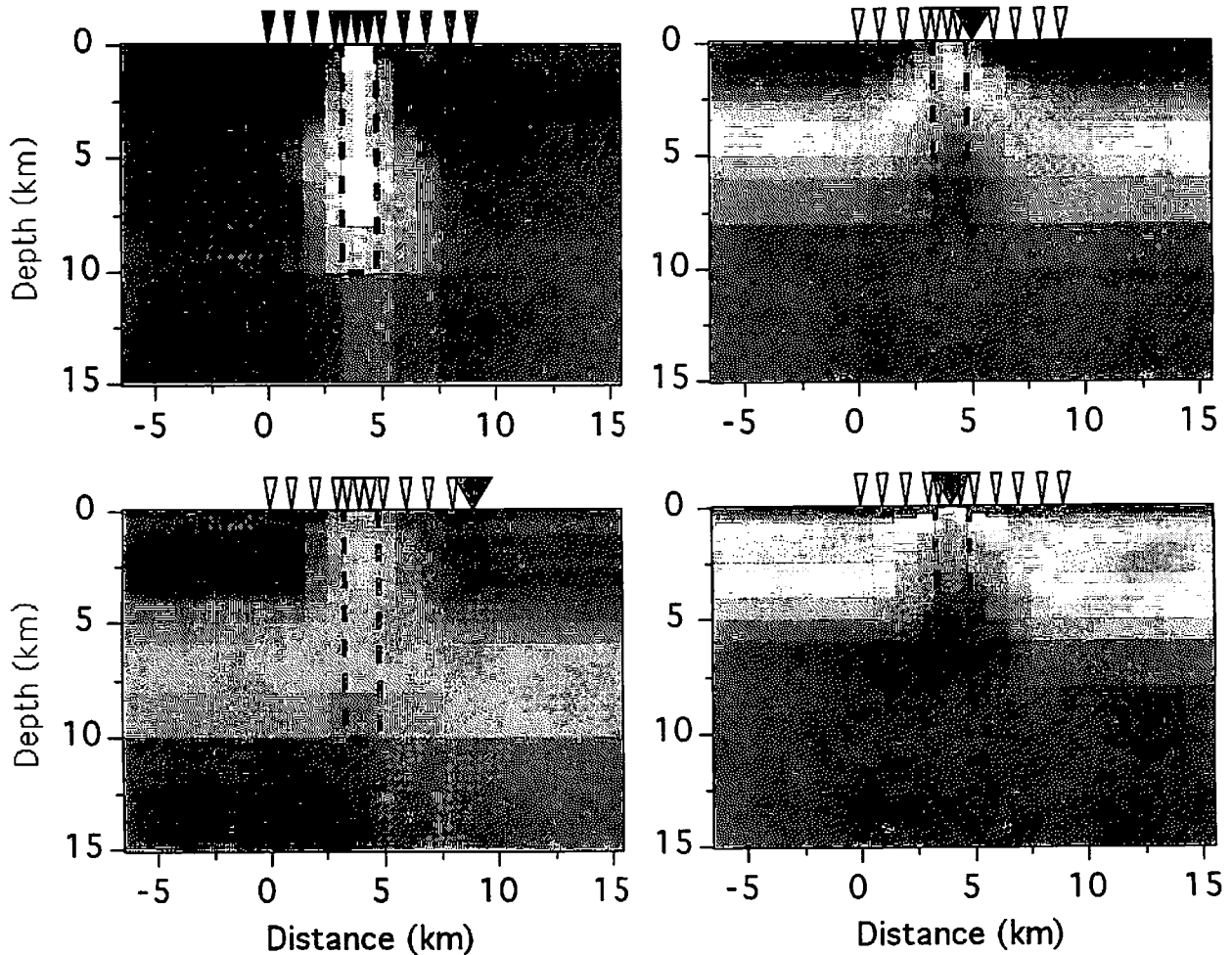


Fig. 3. Resistivity models obtained by inversion. All triangles denote sites for measuring electric fields. Solid triangles denote magnetic observatories used for the inversion. Dash lines indicate the conductive zone in 'Fault Model'.

場と各観測点の電場のデータに基づいて見かけ比抵抗値・位相差を計算し、inversionを行った。inversionの結果 (Fig. 3 左下) には、断層モデルにある垂直に立った低比抵抗帯は確認できるが、その値は約100  $\Omega\text{m}$ であり、もとの10  $\Omega\text{m}$ とは隔たりがある。また、深さ7km付近に水平方向に分布する低比抵抗層もみられるが、これは元の断層モデルにはない。次に、同じ断層モデルをもちいて、低比抵抗帯近傍で磁場を測定した場合と、低比抵抗帯中央で磁場を測定したそれぞれの場合に、同様にinversionをおこなった。これらのinversionによって得られたモデル (Fig. 3 右上, 右下) では、垂直に立った低比抵抗帯はみとめられず、むしろ本来低比抵抗ともとまるべき部分が、周りよりも高比抵抗としてもとまっているところもある。

次に堆積盆モデル (Fig. 2) について、基盤に相当する高抵抗側、比抵抗境界付近、堆積層に相当する低比抵抗側にそれぞれ磁場観測点を1点だけ設けたときのinversionの結果を、Fig. 4にそれぞれしめした。高抵抗側に磁場観測点をおいたときは、値そのものはさておき、低比抵抗層の形状は表現されている (Fig. 4 左下)。一方、比抵抗境界付近や低比抵抗層上に磁場観測点をおいた場合は、低比抵抗層の厚

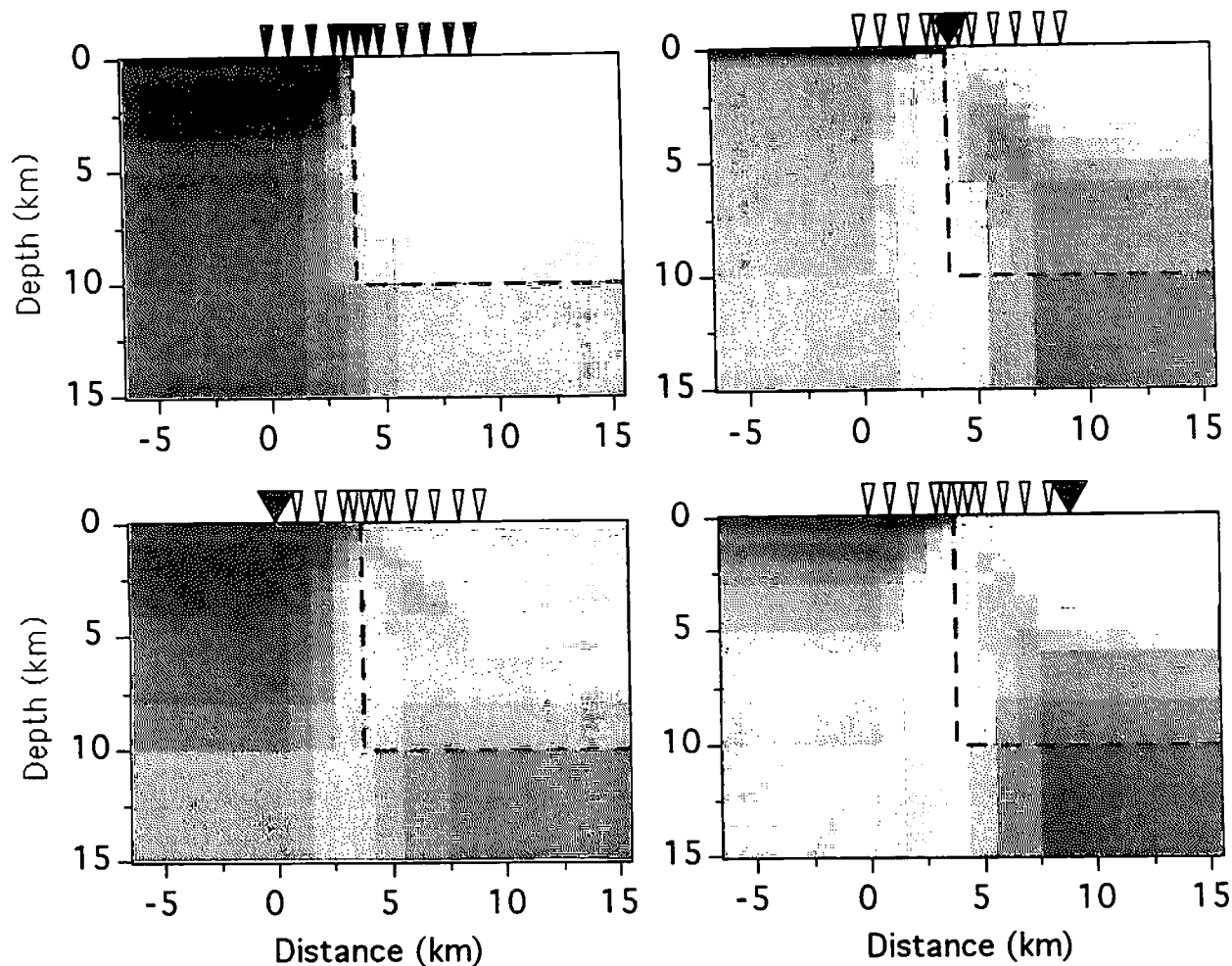


Fig. 4. Resistivity models obtained by inversion. All triangles denote sites for measuring electric fields. Solid triangles denote magnetic observatories used for the inversion. Dash lines indicate the conductive zone in 'Basin Model'.

さがもとのモデルよりも薄くなり、そのかわりに比抵抗境界付近に本来ないはずの低比抵抗帯が新たに出現することが分かる (Fig. 4 右上, 右下)。

埋没モデルについても、堆積盆モデルと同様に高比抵抗側と比抵抗境界付近に磁場観測点をそれぞれ1つ設けて、見かけ比抵抗などを計算しinversionを行った。得られたモデル (Fig. 5 右上, 右下) については、高比抵抗側に観測点を置いた場合は比抵抗値がすこし高く求まっているが、どちらの場合も概ね、埋没低比抵抗体の位置、形状を表現することが出来た。

### 3. 考察、まとめ

数値実験の結果をまとめると以下のようなものである。

- ・高比抵抗層の上に磁場観測点を選び、他の地点で電場のみを測った場合、これらのデータに基づいてinversionをおこなうと、比抵抗値が少し高めにもとまるものの、比抵抗境界については一応もとめることができる。

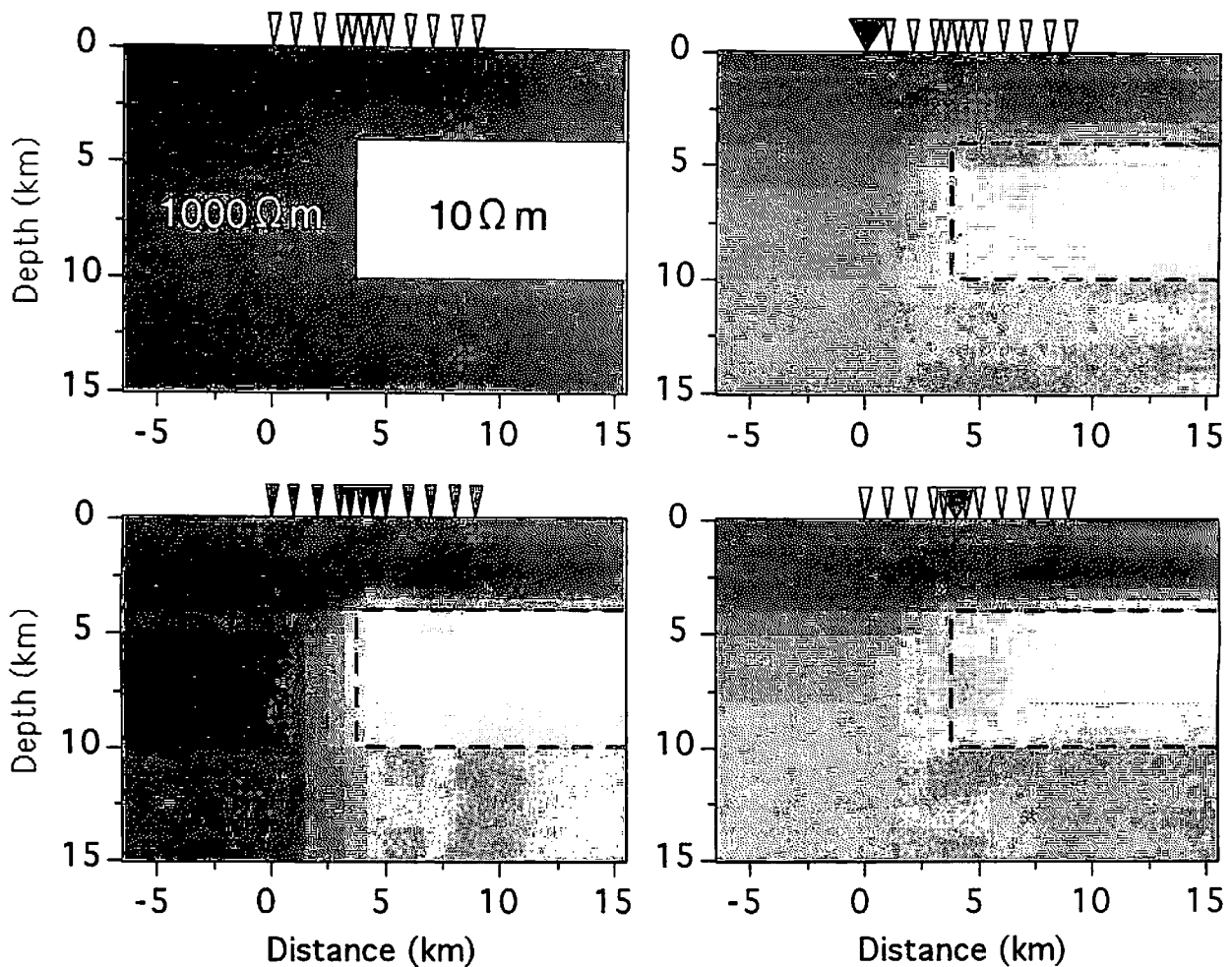


Fig. 5. Resistivity models called 'Buried Conductor Model' (up-left) and obtained by inversion (others), respectively. All triangles on the resistivity model denote sites for measuring electric fields. Solid triangles denote magnetic observatories used for the inversion. Dash lines indicate the conductive zone in 'Buried Conductor Model'.

- ・低比抵抗層の上や近傍に磁場観測点を選び、他の地点で電場のみを測った場合、これらのデータから inversionした結果には、本来ないはずの高比抵抗体や低比抵抗体（つまり偽像）があらわれる。
- ・低比抵抗層が地下深くに埋没している場合は、どこに磁場観測点を選ぼうともその影響はちいさく、比較的ただし地下構造がもとめられる。

つまり磁場観測点の表層付近に低比抵抗体が分布している場合は、得られる地下構造は大きくゆがむということが分かる。これは予想された結果である。なぜならば、従来からいわれるように、低抵抗体を流れる誘導電流による2次磁場の影響により、低比抵抗体上の磁場の水平変動は強められるからである。事実、断層モデルについて、低比抵抗帯の中央部での周波数0.018Hzの水平磁場強度は、高比抵抗層上の観測点と比べて約1.6倍大きい。同様に周波数36Hzについては、約2.0倍である。つまり断層モデルの場合、低比抵抗帯直上の磁場をもちいて、ある電場観測点の見かけ比抵抗値を計算した場合は、電場

観測点と同じ場所の磁場を用いる場合に比べて数倍ほどズレが生じることとなる。さらに今回の数値実験によって、水平磁場の位相の空間的不均質が、inversionによってえられる構造のゆがみに大きく影響することが分かった。たとえば、断層モデルの場合、低比抵抗帯中央部と高比抵抗層上では、0.018 Hzの水平磁場変動の位相に最大11度の差があった。この位相差は36Hzの場合は約22度に至る。水平磁場変動の地点間の位相差は、そのまま大地インピーダンスの位相差に反映されるので、先程の見かけ比抵抗への影響以上に、位相差への影響は深刻である。また低比抵抗帯が地下深部に埋没している場合は、得られる地下構造はゆがみが小さいが、この場合は低比抵抗帯が地表からはなれているため、地表では磁場の空間的な不均質が小さいためであると考えられる。

以上の結果から、1998年度電磁気共同観測のように、電場と磁場を分離観測し、従来のようなMT解析を行うためには、(1) 高比抵抗と思われる場所（たとえば山地など）の電場データを解析する際、磁場観測点には地表付近が低比抵抗と思われる地点（堆積層上など）のものを選ばない、(2) 電場観測点が堆積層地域など、低抵抗層が分布しているような地域の電場データの解析ではできるだけ近い観測点の磁場を使用する、などの注意は必要である。しかし、実際には電場観測点が高比抵抗層上にあるのか低比抵抗層上にあるのか知るのは困難であるので、電場と磁場を別々に測った場合のデータについても2次元inversionを行えるようなコードを開発することが必要である。歌田(1987)やUchida and Ogawa (1993)では、電場と磁場を同じ場所で測ったとしてinversionをおこなっているが、これらをもとに磁場電場分離型MT法用inversionを作成するのは可能である。これについてまだ試作の段階ではあるが、断層モデルについて、Fig. 3 右下の例の場合でも、ほぼ低比抵抗帯を再現できそうである。

今後は、1998年度電磁気共同観測でえられたデータの解析と並行して、様々な数値実験を継続する予定である。たとえば、低比抵抗帯が磁場電場分離型MT法に与える影響についてより定量化する予定である。本研究では、各数値実験で磁場観測点を1点しかおこななかったが、より多くの磁場観測点をおかけば、inversionによって得られる地下構造のゆがみは小さくなるのか？ 断層モデルの低比抵抗帯の上面や下面を変化させ、低比抵抗帯の規模を小さくすると、得られる地下構造のゆがみはどう減少していくか？などについて数値実験を重ねる予定である。さらに、地下構造が2次元の場合、地表での磁場が空間的に均質と考えられるTMモードについても、磁場の不均質さが電場磁場分離型MT法に及ぼす影響をみつめる予定である。すでにMackie et al. (1993) の手法を用いて、走向方向に有限な長さを持つ2次元構造の周辺に1次元構造を考えた、簡単な3次元比抵抗モデルをもちいた計算を行っている。このモデルでえられる電場・磁場の計算値から、前述のTEモードの場合と同様に、TMモードのMT応答関数を作り、2次元inversionを行った結果、TEモードに比べると、TMモードによって解析される地下構造は真の地下構造に近いことが分かった。現在進められつつある1998年度電磁気共同観測の解析によると、磁場観測点の選び方によって求められたMT応答関数は変化するが、TEモードの方がTMモードよりその影響が大きいようである（高橋@東工大、私信）。これは、千屋断層周辺の地下構造が2次元であるからか、あるいは上記の計算結果のように、3次元であったとしてもTMモードがTEモードに比べてロバストであるからかもしれない。今後磁場電場分離型MT法が3次元比抵抗構造解析に適用されていく（Network-MTはすでにこれにあたる）だろうことを考えると、より複雑な3次元構造上でも、数値実験

をおこなう予定である。これらの結果にあわせて、千屋断層などでの観測結果との比較を行っていき、最終的には少ないゆがみでより多くの地下情報の抽出をめざしたい。

通産省工業技術院地質調査所の小川康雄博士、Phoenix Geophysics社のMitsuru Yamashita氏には様々なご意見を頂いた。また地質調査所の内田利弘博士、小川康雄博士による2次元inversion codeを使用させていただいた。東京大学地震研究所の歌田久司助教授、上嶋誠博士には2次元forward codeを使用させていただいた。東京大学海洋研究所の篠浩明博士には磁場分離型MT用2次元inversion codeの開発でご意見を頂いた。

### <参考文献>

地殻比抵抗研究グループ, 1998年電磁気共同観測の概要, CA研究会1999年論文集, (本論文集) .

岸本宗丸・笠置敏郎・出口知敬・横井浩一, 第98回物理探査学会学術講演会予稿集, 1998.

Mackie, R. L., T. R. Madden and P. E. Wannamaker, Three-dimensional magnetotelluric modeling using difference equations - theory and comparisons to integral equation solutions, *Geophys.*, 58, 215 - 226, 1993.

Uchida, T. and Y. Ogawa, Development of FORTRAN code for two-dimensional magnetotelluric inversion with smoothness constraint, *Geological Survey of Japan Open-File Reports*, No. 205, 115 PP., 1993.

Utada, H., A direct inversion method for two-dimensional modeling in the geomagnetic induction problem, *Doctral thesis*, University of Tokyo, 409 PP., 1987.