

宮城県北部におけるCSAMT法による 浅部比抵抗構造の調査

気象庁地磁気観測所 山本哲也, 田口陽介

CSAMT Resistivity Survey in the Northern Part of Miyagi Prefecture

Tetsuya Yamamoto and Yosuke Taguchi
Kakioka Magnetic Observatory, JMA

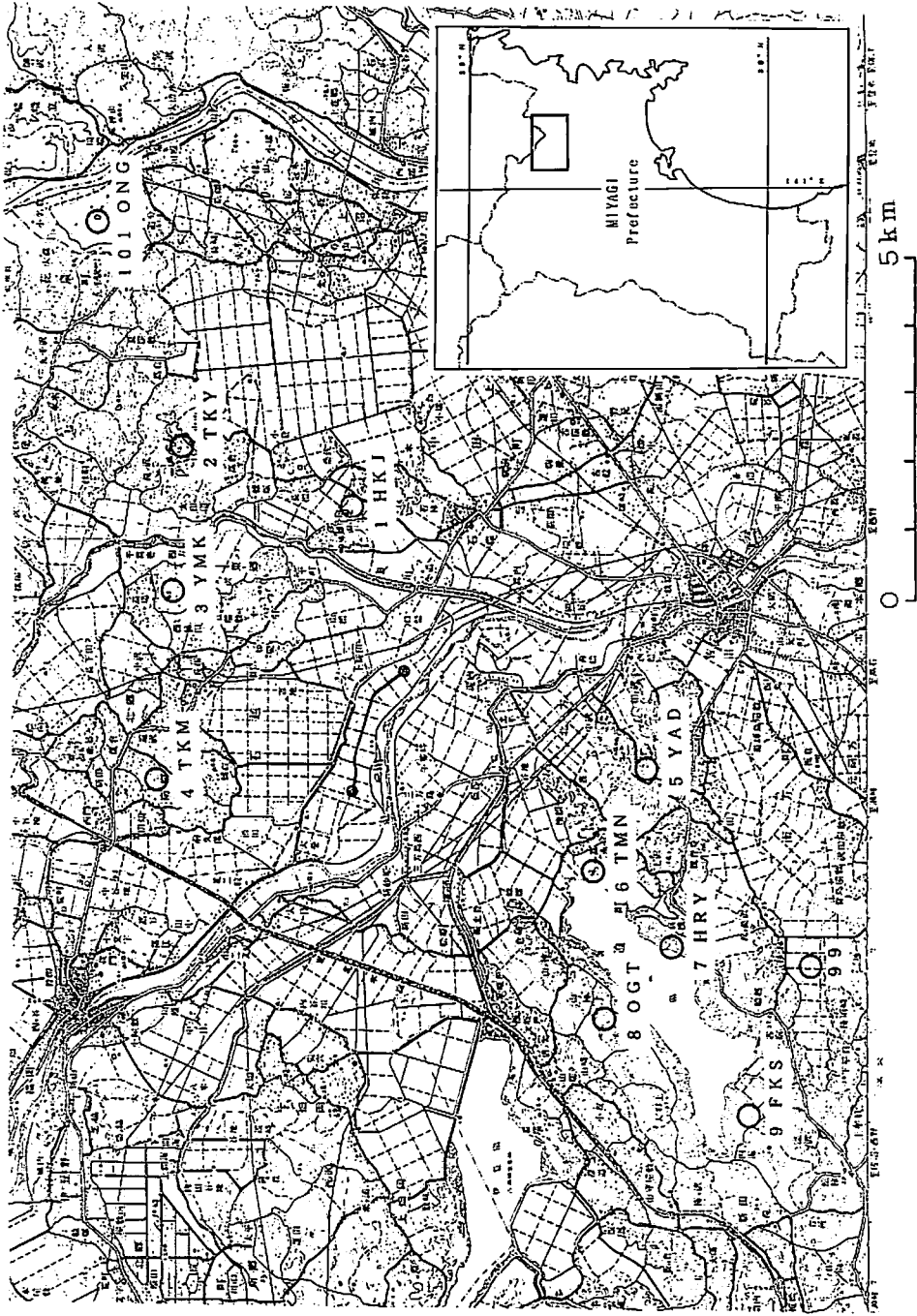
1. はじめに

日本周辺の地殻内部では多数の地震が発生している。その震源分布は一様なものではなく、特定の場所に偏在しており、地震の発生が広域応力場のみに支配されていないことは明白である。地殻内の地震発生について理解を深めるためには、まず、地震発生と地殻の物性、震源分布と地殻構造の関係を明らかにする必要がある。今日、電磁氣的構造（主として比抵抗構造）の調査は、これらを解明するための有力な手段とみなされている。

1993年11月に実施された宮城県北部電磁気共同観測では、1962年宮城県北部地震（M6.5）の震源域とその周辺で電磁氣的手法を用いた集中的な調査を行った。この地域の地震は深さ2 kmから16 kmに分布しており¹⁾、調査では、この深さをカバーする電磁氣的構造を求めることがひとつの目標であった。このような深さの比抵抗構造調査のためにTDEM法やULF-MT法が行われた。これらの方法は、目標とする深さを探査する十分な能力をもっている。しかし、地殻の浅い部分の構造については分解能が高いとはいえない。浅い部分に極端な比抵抗構造がある場合には、これらの方法で求められた深い部分の比抵抗構造は精度が落ちることになる。深い部分の比抵抗構造を精度よくもとめるためには、別の手法を用いて浅部の比抵抗構造を把握することが必要である。

今回の共同観測では、浅部比抵抗構造をえるためにCSAMT法の観測を行った。CSAMT法（Controlled Source Audiofrequency Magnetotellurics）^{2), 3)}は、0.1 Hzから10 kHz程度の人工信号源を利用したMT法で、時間領域での信号のスタッキングを利用することなどで、短時間で高精度の見かけ比抵抗、位相差の測定を行うことができる。その一方で、近地効果によって探査深度が制限される。すなわち信号源からの距離が近い場合には、通常のMT法で仮定されている平面電磁波の垂直入射の近似がなりたたなくなるため、周波数が低くなるにつれて測定される見かけ比抵抗が急速に大きくなり、同時に位相差が0に近づく現象がみられる。このような場所（領域）はニア・フィールド（near field）と呼ばれ、この現象は近地効果（near field effect）と呼ばれている。信号周波数が低いほど、ニア・フィールドの範囲は広くなる。近地効果があるため、CSAMT法の探査深度は信号源から観測点までの距離の1/3から1/5とされている。

以下では、宮城県北部電磁気共同観測で実施したCSAMT法の観測と、えられた浅部比



第1図. 観測点および信号源の位置. 白丸が観測点, 黒丸および太い実線が信号源を表わす.

抵抗構造について述べる。

2. 観測

観測点および信号源の配置を第1図に示す。

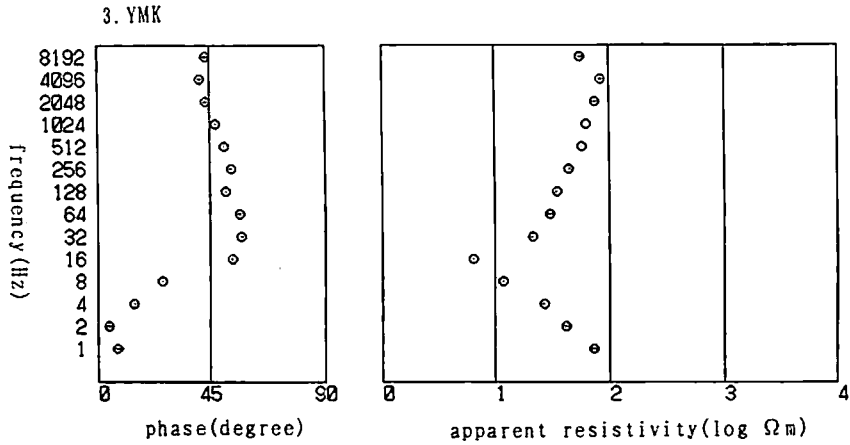
信号源としては両端を接地した長さ約2 kmのケーブル、すなわち接地双極子型のものを用いた。信号周波数は1 - 8 1 9 2 Hzの14周波数とし、ケーブルに流した最大電流は20 - 25 Aだった。

観測は、多くの電磁気共同観測参加者によって1993年11月5日に実施された。観測地域に選ばれたのは、宮城県北部地震の震源域の中でも微小地震の震源分布が最も浅くなる地域である。観測は計11点でおこなわれたが、このうち2点、99と101(ONG)は計画にはなかった臨時の観測点である。当初から予定されていた残りの9点は、CSAMT法の観測の他に、電磁場測定器U36によるTDEM、ULF-MTの観測等も行なわれた。ほとんどの観測点は、平野から小高くもりあがった丘の上に位置しているが、99だけは、平野(田んぼ)に位置している。観測には、Zonge社製GDP-16を3台(地磁気観測所2台、地質調査所1台)用い、それぞれの装置で3点から4点の観測を行った。測定したのは、N120°E方向の電場とN30°E方向の磁場で、一周波数について数回またはそれ以上の測定を行った。測定した電磁場から、それぞれの周波数のみかけ比抵抗と位相差を求めた。

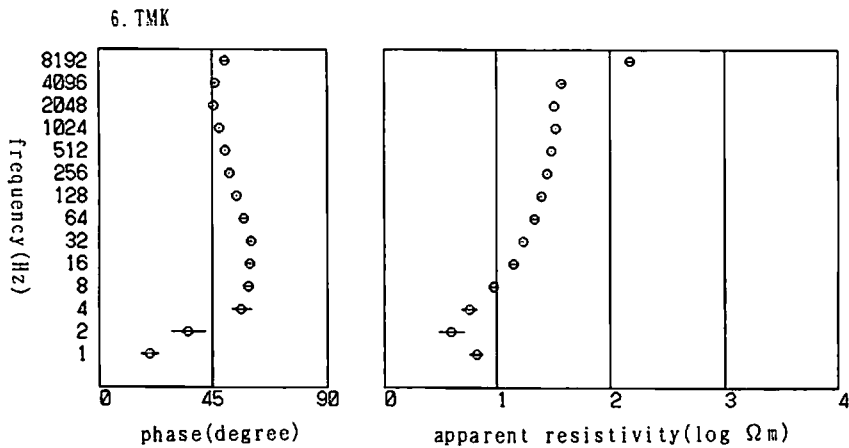
3. 結果

いずれの観測点でも、同一周波数で測定した観測値(みかけ比抵抗、位相差)のばらつきは、それほど大きくなかった。観測値をインピーダンス(電場と磁場の比)に換算すると、ほとんどの場合、標準偏差が絶対値の5%以下になり、1%を下回る場合もかなりあった。測定環境の電磁雑音のレベルは全般的に低かったとみられる。

観測点のうち1(HKJ)と101(ONG)のデータは、各周波数のデータのばらつきが小さいにもかかわらず、測定周波数全体でみると不連続がみられた。ふつう、見かけ比抵抗、位相差は周波数の変化にともなって連続的に変化する。多くの場合、データが不連続になるのは雑音の影響が大きいためであるが、データのばらつきはあまり大きくないことを考えると、この2点にはあてはまらない。むしろ、信号源からの角度、すなわち信号源の双極子の方向と観測点の方向が約45°(135°)になっているためではないかと思われる。このような角度では、信号源の双極子によって作られる電磁場のベクトルが、測定する方向とほぼ直交してしまう。そのため、測定する方向の成分が小さくなり、また、局所的な構造によるディストーションの影響が顕著にあらわれるようになる。極端な場合、位相差が180°ずれてしまったり、見かけ比抵抗が0になったり逆に発散したりすることもありえる。観測点1,101では、このような理由で、データの不連続が生じたと思われる。信号源からの方向に関しては、4(TKM)も問題があり、後述するようにモデルはあまりよく決まらなかった。



第2図. 3 (YMK) の観測値. みかけ比抵抗 (右) と位相差 (左).



第3図. 6 (TMN) の観測値. みかけ比抵抗 (右) と位相差 (左).

観測点の配置は、CSAMTの観測を意図して決められたわけではないため、このようなことがおこるのはいたしかたがない。あらかじめ地図上の位置から卓越する電磁場の方向を予想し、観測点によっては通常と直交する方向の電磁場を測定すれば、より有意義な結果をえられるだろう。

第2図に3 (YMK) (信号源の北側, 距離約 3.5 km) の結果を示す。周波数 32 Hz 以上では周波数が大きくなるにつれて見かけ比抵抗が 20 Ωm から 100 Ωm にゆるやかに増加しており、位相差は、50° 前後となっている。周波数 16 Hz 以下では、周波数が小さくなるにつれて、みかけ比抵抗は急激に増加し、位相差は 0° にちかづいている。低周波

側（16 Hz以下）の振舞いは、典型的な近地効果とみられる。

第3図に6（TMN）（信号源の南側、距離約3.7km）の結果を示す。周波数4 Hz以上では周波数が大きくなるにつれて見かけ比抵抗が数Ω mから40 Ω mにゆるやかに増加しており、位相差は、60°から45°くらいとなっている。周波数2 Hz以下は近地効果の影響を受けているとみられる。

他の観測点でも、ここで例示したものと類似した結果がえられた。どの観測点でも、観測されたみかけ比抵抗は10 - 100 Ω m程度である。各点で観測された結果の共通点として、みかけ比抵抗が高周波側で大きくなる傾向をあげることができる。また、位相差は、45 - 60°のものがほとんどだった。近地効果は、信号源の北側の観測点（2, 3, 4）では、16 Hz以下でみられたのに対して、同程度の距離にある南側の観測点（5, 6, 7, 8）では2 Hz以下でしかみられなかった。近地効果のみられる周波数が、信号源の北側の観測点では南側よりも明らかに高い。

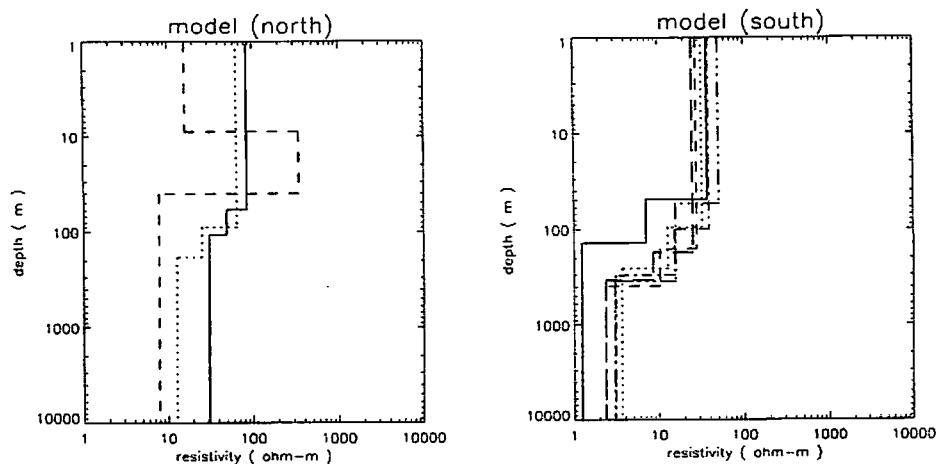
ちなみにボスティック法（Bostick inversion）で求められた深さは、3（YMK）の4196 Hzが約50 m、32 Hzが約300 m、6（TMN）の4196 Hzが約30 m、4 Hzが約400 mであった。この値は観測でどの程度の深さの比抵抗の情報がえられたかの目安になる。

4. 解析

各点のデータから近地効果を受けているものや、質の悪いものを除いて、1次元3層構造モデルで観測結果を解釈した。第1表に、各点のモデルの層の深さと比抵抗値をまとめた。前節で述べたように観測点1（HKJ）、101（ONG）ではデータに問題があり、データを解釈できるようなモデルをえることができなかった。また、4（TKM）では観測値と計算値

第1表. 各観測点でもとめられた3層モデル. 各層の比抵抗 (ρ_1, ρ_2, ρ_3) と各層の下面の深さ (d_1, d_2).

no.	site	$\rho_1(\Omega m)$	$d_1(m)$	$\rho_2(\Omega m)$	$d_2(m)$	$\rho_3(\Omega m)$
1	HKJ					
2	TKY	85.0	58.7	49.4	106	31.0
3	YMK	64.7	88.6	25.3	183	12.8
4	TKM	16.1	8.9	343	39.8	7.9
5	YAD	37.5	49.2	7.0	139	1.2
6	TMN	32.5	96.0	12.7	257	3.6
7	HRY	27.8	160	10.3	390	2.4
8	OGT	39.0	101	15.4	302	3.1
9	FKS	50.7	54.8	15.8	349	3.0
99		25.0	175	8.5	339	2.6
101	ONG					



第4図・ 信号源の北側の観測点の3層モデル(左)と南側の観測点の3層モデル(右)。

の一致はあまりよくなかった。

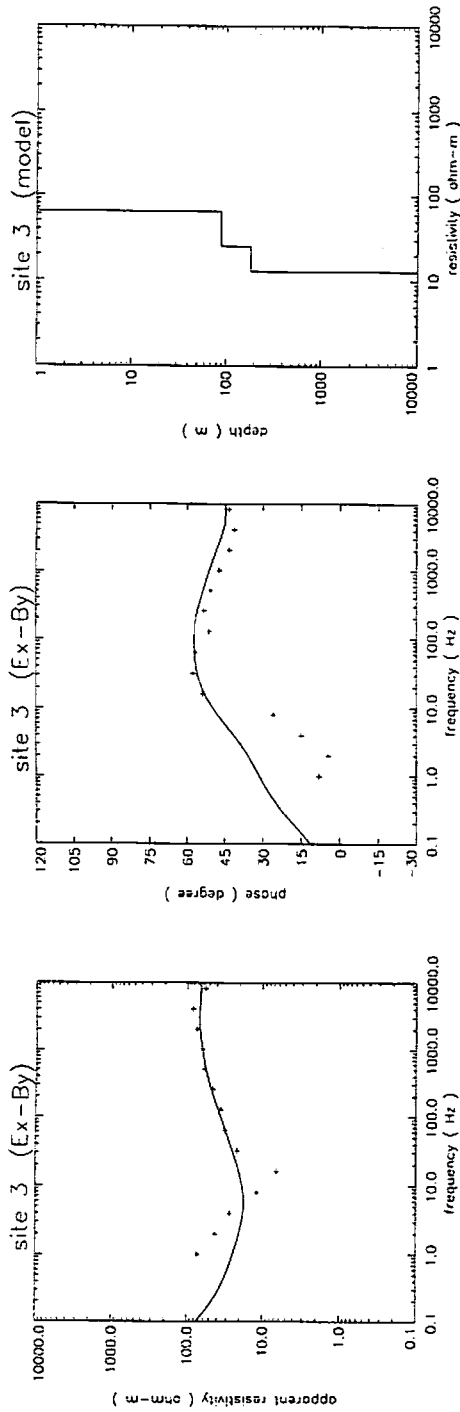
これらのモデルを、信号源北側の観測点(2, 3, 4)と南側の観測点(5, 6, 7, 8, 9, 99)にわけて、第4図に示す。

北側の1点を除いて、いずれの点でも3つの層は深くなるにつれ比抵抗が低くなっている(例外の1点は4(TKM))。第1層は数10Ωm(25-85Ωm)で深さは100mくらいまで、第2層は、上下の層の中間の抵抗をもって、第3層は深さ100-300m以下になっている。第3層の比抵抗は、北側の点では10Ωm以上(10-30Ωm)であるのに対して、南側の点では数Ωm以下(1-4Ωm)となっている。第3層は、北側でも南側でも低比抵抗であるが、特に南側では比抵抗が低い。これが、前節でふれたように、北側と南側とでは近地効果のあらわれる周波数がちがう原因となっているらしい。

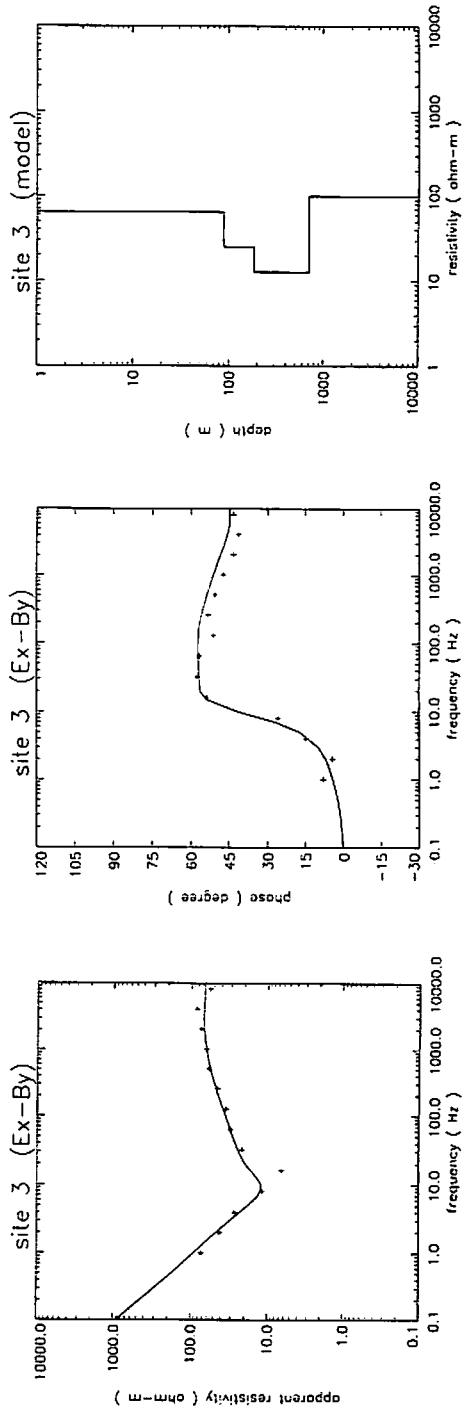
南側の点は、どの点でもよく似た構造が求められた。99は他の観測点とはことなり、ただ1点だけ平野(田んぼ)にある観測点であるが、えられた構造をみるかぎり他の点と大きな差異は認められない。

次に、このようにしてえられた3層構造について、信号源の接地双極子が観測点で作る電磁場を計算し、見かけ比抵抗、位相差を求め、低周波側の近地効果のみられるデータも含めて比較した。計算にはGoldstein and Strangway²⁾によって示された方法を多層構造に一般化して用いている。この方法では、信号源を無限小の電気双極子で近似している。実際の観測と比較するには、無限小の電気双極子による解を約2kmの信号ケーブルの経路ぞいに線積分することが望ましいが、計算に要する時間を短縮するために、ここでは省略している。線積分を省略した影響は、観測点までの距離を考えるとそれほど大きくはないだろうと予想している。

第5図が3(YMK)の例である。3層モデルを求めるのに用いた周波数32Hz以上については、計算値と観測値がよく一致している。もし、平面電磁波の垂直入射の仮定がなり



第5図. 地表におかれた電気双極子が作る電磁場から求められた3 (YMK) のみかけ比抵抗 (左), 位相差 (中) および計算に用いた3層モデル (右). +印が観測値, 実線が計算値を表わす.



第6図. 地表におかれた電気双極子が作る電磁場から求められた3 (YMK) のみかけ比抵抗 (左), 位相差 (中) および計算に用いた4層モデル (右). +印が観測値, 実線が計算値を表わす.

たてば、低周波側ではみかけ比抵抗が最下層（第3層）の比抵抗に収束し、位相差は 45° に近づかずである。CSAMTの場合、低周波側でこの仮定はなりたたない。計算値は低周波側で、みかけ比抵抗が周波数の低下とともにおおきくなり、位相差が 0° に近づいている。これは、近地効果の特徴であり計算でも近地効果が確認されたことを意味する。しかし、この低周波側の観測値と計算値の振舞いは、定性的にみれば同じともいえるが、定量的にみると決して満足できる一致がえられているわけではない。これは第3層が地下深くまで続くとしたモデルが妥当ではないことを意味する。

そこで、第3層まではそのまま用いることにして、新たに第4層をモデルに導入した。第4層のパラメータをかえて、数例の計算を行った。計算値と観測値の最もよい一致がえられた例を第6図に示す。このモデルでは第4層として700mより深いところを $100\Omega\text{m}$ にした。第4層を導入すると、低周波側の近地効果のみられるデータまで含めて、計算と観測がよく一致することがわかる。低比抵抗な第3層の下には、第3層よりは比抵抗の高い第4層があると推定される。

3(YMK)以外の点も、近地効果のみられる点については同様の方法で検討を行った。その結果、すべての点について、モデルに第4層を導入して500-1000mよりも深いところを第3層よりも高い比抵抗($30-150\Omega\text{m}$)にすると、計算値と観測値がよりよく一致することがわかった。比抵抗の高い第4層は観測地域全体に広がっているらしい。

5. まとめ

宮城県北部電磁気共同観測で行われたCSAMT法の観測でえられた結果をまとめると次のようになる。

- 1) 各観測点では、ほぼ共通の構造がみられる。
- 2) 表層は、 $25-85\Omega\text{m}$ くらいである。
- 3) 深さ100-300m以下に、低比抵抗層が存在する。
- 4) 低比抵抗層の比抵抗は、信号源の北側では $10-30\Omega\text{m}$ くらい、南側では $1-4\Omega\text{m}$ くらいである。
- 5) 信号源を含めた解析では、500m-1kmよりも深いところでは比抵抗が高くなる($30-150\Omega\text{m}$)と推定される。

ここでえられた浅部比抵抗構造のモデルを利用することで、TDEM、ULF-MTによってえられるより深い部分の比抵抗構造の精度改善が期待される。また、見いだされた低比抵抗層の深さはたかだか1km程度までであると推定されるため、ULF帯やもっと長周期の電磁波をとりあつかう場合は、この周辺の比抵抗構造は薄層の良導体をのせた大地のモデルで近似することができるだろう。良導体の分布によってはインダクション・アローの局地的な分布をひきおこすことも予想される。

参 考 文 献

- 1) 河野俊夫・仁田交市・松本聡・堀内茂木・岡田知己・開原貴美・長谷川昭・堀修一郎・海野徳仁・鈴木将之, 1962年宮城県北部地震 (M6.5) 震源域における微小地震活動, 地震, 46, 85-93, 1993.
- 2) Goldstein, M. A., and Strangway, D. W., Audio-frequency magnetotellurics with a grounded electric dipole source, Geophysics, 52, 665-677, 1975.
- 3) 内田利弘, C S A M T法の基礎と適用, C A研究会1989年論文集, 1-17, 1989.