

MT法による阿武隈地域の深部比抵抗構造解析

内田利弘¹

Toshihiro Uchida (2004) Interpretation of deep resistivity structure by magnetotelluric data in the Abukuma area, northeastern Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 55(11/12), p. 417 - 422, 5 figs.

Abstract: Magnetotelluric (MT) data obtained in the Abukuma area, eastern Japan, has been interpreted using a two-dimensional (2D) inversion scheme. The survey line, approximately 50 km long, spanned from Motomiya Town in central Fukushima Prefecture in the west to Namie Town near Pacific Ocean in the east. The survey area is mostly underlain by granitic plutons in Mesozoic time. The estimated 2D resistivity model exhibits highly resistive formations beneath the entire survey line, with resistivity of 1000 - 10000 ohm-m. There is a low-resistivity shallow layer at the eastern end of the survey line, which corresponds to Tertiary and Quaternary sedimentary formations. At depths greater than approximately 15 km, which correspond to the lower crust, there is a relatively low resistivity zone of several hundreds ohm-m. However, this resistivity is much higher than the low-resistivity lower crust which has been found in other Outer Volcanic Front region in northeastern Honshu Island, such as northern Miyagi Prefecture. This indicates that the thermal or hydrothermal activity in the Abukuma area is weak in the lower crust as compared with other areas in northeastern Honshu Island.

Keywords: magnetotelluric method, resistivity, deep structure, Abukuma area

要 旨

福島県阿武隈地域で取得された地磁気地電流法(MT法)データについて2次元インバージョンによる解析を行った。MT法測線はほぼ東西方向であり、測線長は約50 km、福島県中央部の本宮町付近から太平洋岸の浪江町付近に及ぶ。測線の大部分は中生代の花崗岩地域に位置している。2次元解析によって得られた比抵抗構造モデルによると、測線の全域にわたり、1,000~10,000 ohm-mの高比抵抗の地層が卓越することがわかる。測線の東端の浅部には、第三紀及び第四紀の堆積岩に相当する低比抵抗層が得られた。下部地殻に相当する深さ約15 km以上は数百ohm-mの比較的に低比抵抗な地層になっている。しかし、東北地方の火山フロント外帯のうち、宮城県北部等で得られている深部地殻の非常に低比抵抗な地層に比べると、阿武隈地域の深部地殻はかなり比抵抗が高く、熱や熱水活動の影響を余り受けていないものと考えられる。

1. はじめに

地磁気地電流法(MT法)は地熱、石油等の資源探査や、テクトニクス研究における深部地殻構造の調査などのために広く用いられている。MT法は微弱な自然信号を測定するため、電磁ノイズのある環境下での測定は非常に難しい。しかし、近年の測定装置の性能向上により、日本のように、産業化が進んで人工的電磁

ノイズの強い国でも、再現性のある高品質の測定データを得ることができるようになった。

地熱、石油等の探査では熱水、粘土変質帯などによる低比抵抗域が解釈において重要な役割を果たす(例えば、内田(1990)、高倉ほか(1997))。活断層地域においても破碎帯には粘土を伴うことが多く、それが比抵抗異常を形成することがある(例えば、内田(1984)、Unsworth *et al.* (1999))。このようにMT法は熱や地下流体の影響を受けた地質構造を解明するために有効な手法であるといえる。火山フロント外帯においても、深部からの熱異常を受ける地域では、比抵抗構造を用いてその評価を行える可能性がある。

深部地殻構造や断層の深部構造を調査するためには、MT法の測線を走向にほぼ直交する方向に設定し、その上に測点を配置する方式がとられる。本報告では、地質調査所(現産業技術総合研究所)が2000年度に福島県の阿武隈地域において取得したMT法データの再解析を行い深部地殻構造の解釈を行うとともに、東北日本においてこれまでに取得されたMT法データの解析結果と比較して、東北日本の火山フロント外帯の一地域である阿武隈地域の構造の特徴を述べる。

2. 阿武隈地域MT法データ

2.1 測定

調査地域は中生代の花崗岩が卓越する阿武隈地域である。MT法測線は阿武隈地域をほぼ北緯37度30分で

¹地圏資源環境研究部門 (Institute for Geo-Resources and Environment, GSJ)

東西に横断する形で設定した(第1図)。測線の西端は郡山盆地の本宮町、東端は太平洋岸の浪江町である。測点数は24、測線長は約50 kmである。各測点で電場2成分及び磁場3成分の測定を行った。また、鉄道、送電線、風等による局所的なノイズを除去するため、約200 km離れた地点(秋田県内)に磁場参照点を設置し、リモートリファレンス処理を行った。当該地域は全般的に高比抵抗であるためノイズレベルが高いが、リモートリファレンス処理により、100 Hz周辺や0.1 Hz周辺の周波数のデータにかなりの品質改善が見られた。それでも、測線東部では地形の制約のため適切な測点を選べないケースもあり、品質の良くない測点も数ヶ所見られる。

4つの周波数におけるインダクション・ベクトルの分布を第2図に示す。比抵抗が水平方向に変化する場合には、ベクトルは低比抵抗体の存在する方向を指すように示してある。高周波数(例えば、8 Hz)では、測線の西側の測点においてベクトルが西を向く傾向があり、西側に低比抵抗域が存在することを示唆している。低周波数(例えば、0.01 Hz)では、測線の東側の測点で東を向く傾向があるので、東側に低比抵抗域があることがわかり、それは太平洋の海水によるものと推定できる。

2.2 2次元解析

測定されたMT法データに対して2次元インバージョン解析(Uchida, 1993)を行った。地質構造の大局的な走向は南北方向であると想定されること、及び、東半分の測点では低周波数(0.01 Hz付近)におけるインダクション・ベクトルが東を向くことから、東西方向の測線における2次元解析は妥当であると考えた。ただ、中間の周波数(例えば、0.3 Hz)で測線西から中央にかけてのベクトルが絶対値は小さいものの北を向く傾向があることから、得られる比抵抗モデルに影響を与えることも考えられる。

インピーダンスを測線方向に回転させ、TMモード及びTEモードの両方のデータを用いて2次元解析を行った。周波数は0.023 Hz～320 Hzの範囲で29通りである。本地域は比抵抗が高いため、これらの周波数帯のデータによって深度数十 kmまでの解析が可能である。解析には見掛比抵抗と位相を測定値として用いた。TMモードだけを用いる場合と、TMモード・TEモードの両方を用いる場合の2通りを試みた。しかし、一般的にTEモードの見掛比抵抗測定値を説明できる2次元モデルを求めることは難しいので、ここでは後者の場合、TEモードは位相のみを用いることにした。海水(太平洋)の影響は考慮していない。各データに重みを与えよときの測定誤差の最低閾値を3%とし、それより小さい測定誤差となっているデータについては3%

の誤差があるものとした。

インバージョン解析結果を第3図及び第4図に示す。また、TMモードの測定データとインバージョンによるモデル計算値を第5図に示す。測線が長く、測線全体について2次元性を仮定することは無理があるらしいので、反復修正によって残差が改善されない場合があった。図には反復4回目のモデルを示した。残差もそれぞれ4.7及び5.6で比較的大きい。それでも、測定データとのマッチングは視覚的には十分であるといえる(第5図)。今後プログラムの改善によって収束を更に安定させる必要がある。

2.3 比抵抗モデルの解釈

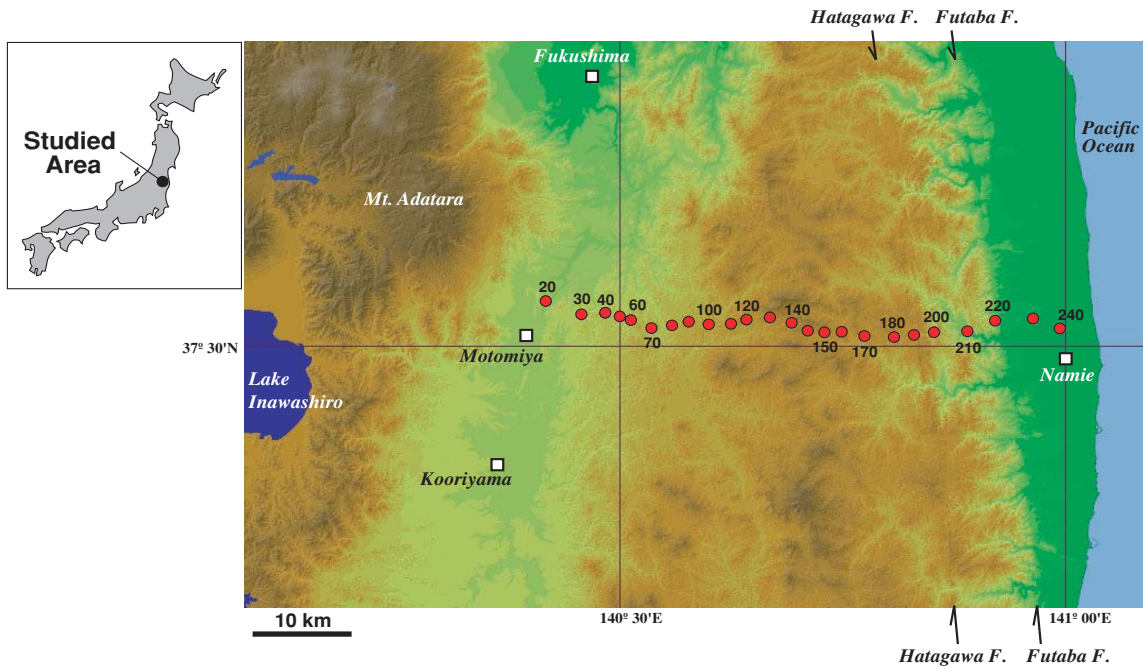
本地域は花崗岩が卓越するが、測線の東端を南北に走る双葉断層(測点220付近)の東側では第三紀、第四紀の堆積岩(堆積層)が浅部を覆っている。また、双葉断層の西には平行して畑川断層(測点200付近)が通り、花崗岩地層を切っている。測線の中央は阿武隈山地の中央部に相当し、測線の西端は郡山盆地及びその東に広がるなだらかな丘陵地となっている。

TMモードの比抵抗モデル(第3図)と両モードの比抵抗モデル(第4図)は基本的に似かよった比抵抗構造を示す。10 kmより浅い部分に着目すると、花崗岩地域のほとんどは1,000 ohm-m以上の高比抵抗を示し、特に10,000 ohm-m近くになる部分が大半を占める。

詳細に見ると、測線中央から西半分では比抵抗分布は水平方向には変化が少なく比較的1次元構造的である。測線中央部では地表から数千 ohm-mの高比抵抗になっている。測点20～100の範囲では、浅部に1,000 ohm-m前後の比較的比抵抗な層(C1)があり、測点60、70付近で約2 kmの厚さとなる。この部分は、郡山盆地の東のなだらかな丘陵地に相当する。それより深い部分では深度10 kmまで10,000 ohm-m程度の高比抵抗を示す。これらは2つの比抵抗モデルに共通する特徴である。

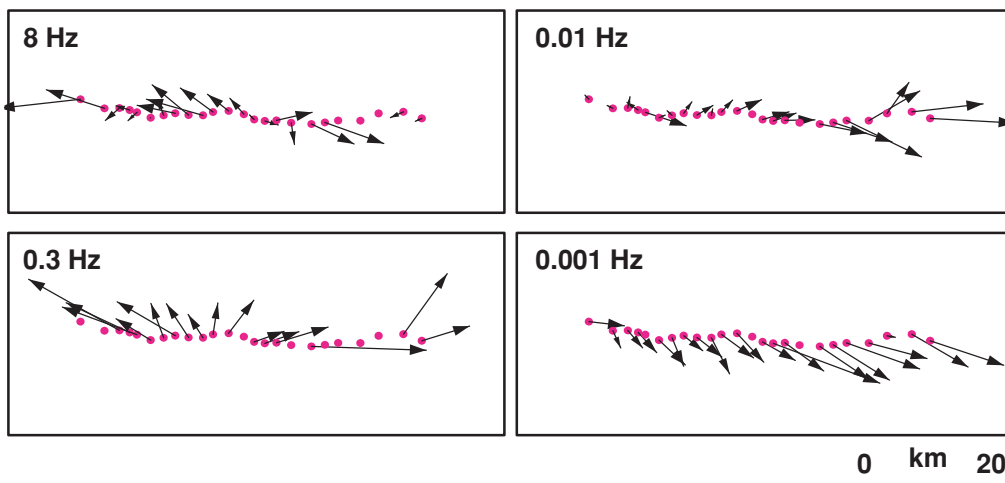
それに対し、測線の東半分(測点170以東)の比抵抗構造は比較的变化に富んでいる。双葉断層の西側の花崗岩地域では、深度10 kmまでは全般に10,000 ohm-m程度の高比抵抗を示し、これは花崗岩の比抵抗を反映しているものと思われる。しかし、測点170～180と210～220には低比抵抗異常(C2)が見られ、水平方向の変化も大きい。この付近は地形の変化が激しく、MT法データに地形の効果も含まれていると考えられるが、地質的にも変化があるものと推測される。双葉断層の東側では、浅部は新期の堆積層が分布するために低比抵抗(C3、数10～100 ohm-m)である。それでも2 km以上の深度では比抵抗は10,000 ohm-m程度まで高くなり、断層の西側と同程度になる。更に深部に着目すると、測線全体にわたり、深度15 kmを越える

阿武隈地域の比抵抗構造(内田)



第1図 阿武隈地域におけるMT法調査測線。丸印はMT法測点を表す。背景図には国土地理院の数値地図50mメッシュ(標高)を使用した。

Fig. 1 The survey line of the magnetotelluric measurements in the Abukuma area. Circles are MT stations. The background map is based on the 50 m DEM data published by the Geographical Survey Institute.



第2図 4つの周波数におけるインダクション・ベクトルの分布。ノイズに相当すると思われる異常値は除いた。ベクトルの単位長さは20kmに相当する。

Fig. 2 Induction vectors at four frequencies. Extremely noisy data were eliminated. A unit length of the vector corresponds to a distance of 20 km.

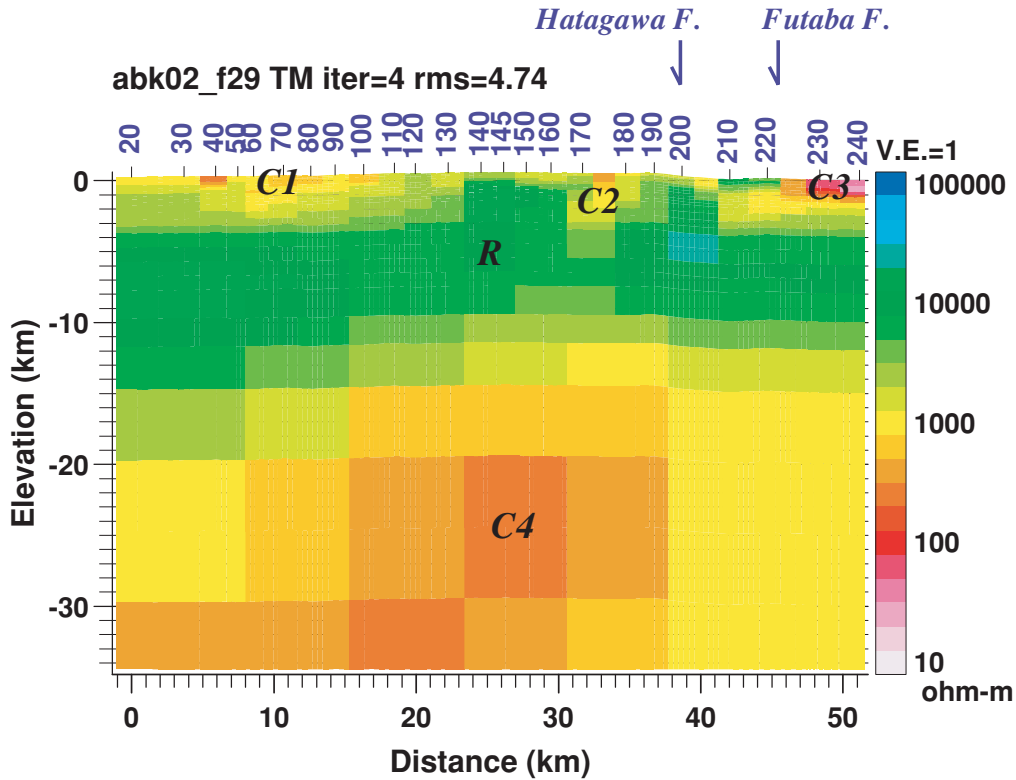
地殻内部は低比抵抗(C4, 数100 ohm-m)になっていると推定される。

3. 他地域のMT法データとの比較

東北地方ではこれまでに石油・地熱資源探査、深部地殻構造調査、活断層調査等のために多くのMT法調

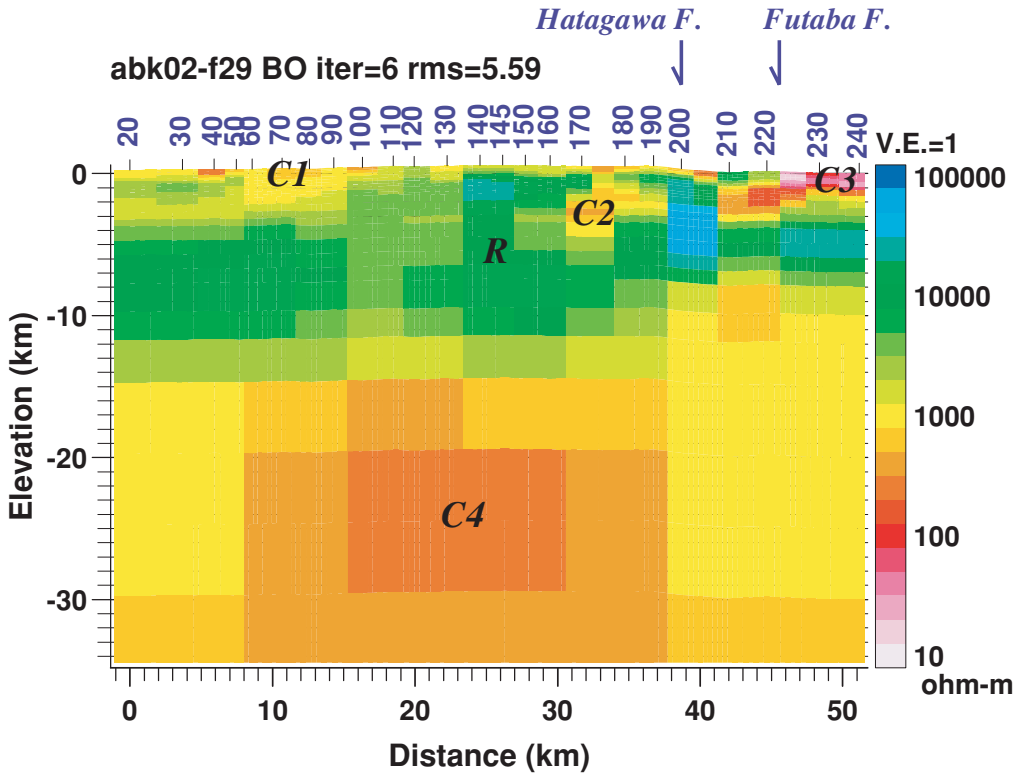
査が実施されている(例えば, Mitsuhashi *et al.*, 2001; Ogawa *et al.*, 2001; 核燃料サイクル開発機構, 2004)。ここでは、宮城県北部地域における内陸地震の研究に関連する調査結果例を示す。

1962年の宮城県北部地震の震源地域において、地震発生部の比抵抗構造を調べる目的でMT法調査が行われた(Mitsuhashi *et al.*, 2001)。調査地は宮城県の北端に位置し、伊豆沼・長沼などの沼沢を含む北上平野を



第3図 TMモードのデータをインバージョンして得られた阿武隈地域の2次元比抵抗モデル。代表的な比抵抗異常をC（低比抵抗）及びR（高比抵抗）で示す。

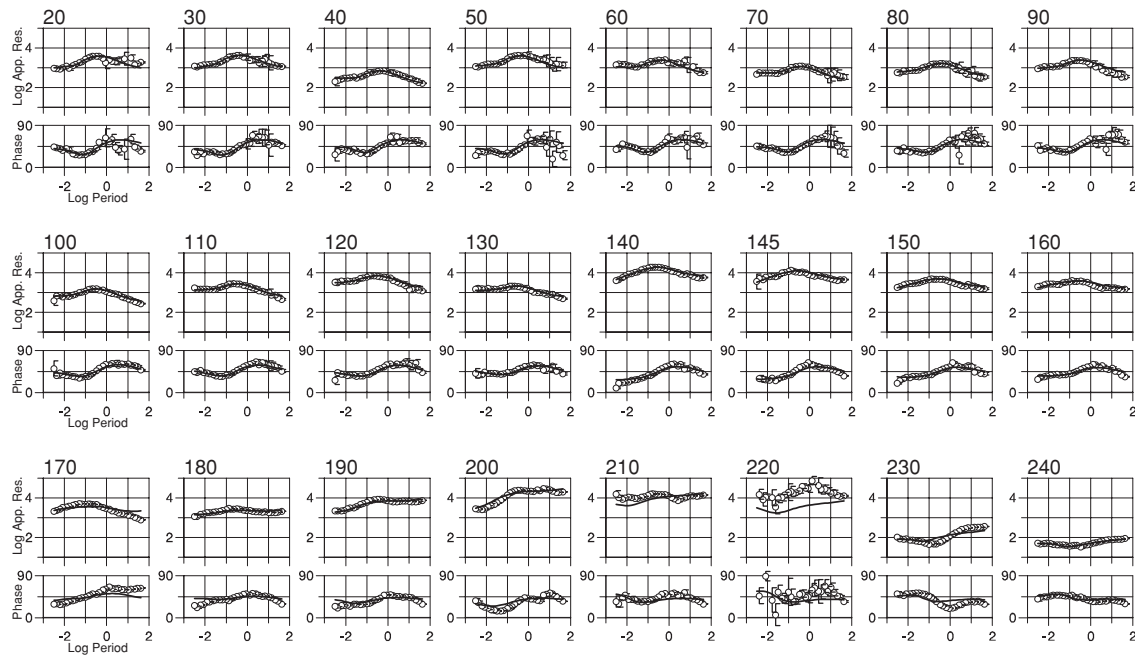
Fig. 3 Resistivity model of the Abukuma area obtained by 2D inversion using the TM-mode data. Typical low and high resistivity anomalies are indicated by C and R, respectively.



第4図 TMモードとTEモードの両方のデータをインバージョンして得られた阿武隈地域の2次元比抵抗モデル。TEモードは位相のみを使用した。

Fig. 4 Resistivity model of the Abukuma area obtained by 2D inversion using the TM and TE mode data. Only phase data were used from the TE-mode data.

abk02_f29_tm TM



第5図 TMモードの見掛け比抵抗と位相。白丸は測定値，実線は第3図に示すモデルによる計算値。

Fig. 5 TM-mode apparent resistivity and phase data. Open circles are observed values and solid lines are computed ones from the model in Fig. 3.

北東-南西に横切る測線が設定された。測線長は約40 kmである。TMモード・データを用いた解析によって得られた比抵抗モデルは、浅部の堆積層に相当する低比抵抗層、その下位の高比抵抗層、及び、深部の低比抵抗異常の3層で特徴づけられる。そのうち、高比抵抗層は、磁気異常データから推定される北上山地の花崗岩体の延長部 (Finn, 1994) に相当すると考えられている。1997年から1999年にかけての微小地震の発生域はこの高比抵抗層の領域に対応している。自然地震を利用した3次元速度構造トモグラフィ解析 (Nakajima and Hasegawa, 2003) によると、高比抵抗層は地震波の高速度異常域に、深部の低比抵抗異常は低速度域、特にS波の低速度域によく対応する。このことは花崗岩体が地殻深部からの熱の供給や間隙水の増加により延性を増し、低速度化、低比抵抗化したものと推定されている。微小地震は低温で塑性を有する花崗岩体 (高比抵抗異常) の内部及びその下限部で発生している。同様の比抵抗モデルと微小地震分布の関係は、宮城県北西部の脊梁部におけるMT法調査結果 (核燃料サイクル開発機構, 2004) でも得られている。

宮城県北部のモデルにおいて花崗岩体と推定される地層の比抵抗は100~1,000 ohm-m、深部の低比抵抗異常は1 ohm-mあるいはそれ以下と解析されている。宮城県北部地域は火山フロントの外側に位置し、北上山地から続く花崗岩が地下に分布するものと推定され

ているが、深部地殻からの熱・流体供給により低比抵抗異常が形成されているものと思われる。それに対し、阿武隈地域の花崗岩体は大部分が1,000 ohm-mを越え、場所によっては数万 ohm-mの顕著な高比抵抗を示し、それが広範囲にわたって一様であるという特徴を有する。また、地殻中深部の低比抵抗層は他地域ほど低比抵抗ではなく、100~1,000 ohm-mの範囲であることも特徴的である。阿武隈地域の花崗岩体中にはほとんど微小地震が観測されていない (楠瀬ほか, 2004) ことから、地殻深部からの熱や流体の移動はそれほど活発でないものと推定される。

4. 結論

阿武隈地域におけるMT法データの解析を行って深部地殻比抵抗構造を求めるとともに、東北地方において実施されたMT法調査の解析結果との比較を行った。火山フロント外帯に位置する地域でも、宮城県北部地域のように地殻中深部に低比抵抗異常を有する場所と、阿武隈地域のように顕著な低比抵抗異常のない場所が存在する。これらから、地殻中深部の非火山性熱異常の存在を比抵抗構造から推定できる可能性が示唆される。

阿武隈地域の2次元インバージョン解析はまだ完全なものではなく、測定データとのフィッティングを更

に向上させる必要がある。また、当該地域の花崗岩体は必ずしも一様ではなく、塩基性岩体が所々に露頭として確認されている。比抵抗モデルの精緻化によって、高比抵抗層の詳細な識別が必要であると思われる。東北日本では多くのMT法調査が実施されており、それらを含めた総合的な検討を行い、火山フロント外部の深部比抵抗異常の存在について解釈を行うことが望まれる。

文 献

- Finn, C. (1994) Aeromagnetic evidence for a buried Early Cretaceous magmatic arc, northeast Japan, *J. Geophys. Res.*, **99**, 22165-22185.
- 核燃料サイクル開発機構 (2004) 「地磁気・地電流の観測によって活火山の地下に存在するマグマ・高温流体を検出」について、核燃料サイクル開発機構ホームページ www.jnc.go.jp.
- 楠瀬勤一郎・川方裕則・竹内淳一 (2004) 震源データを用いた深部構造解析手法の検討—東北日本の例—, 地質調査研究報告, **55**, 423-429 (本号) .
- Mitsuhashi, Y., Ogawa Y., Mishina, M., Kono, T., Yokokura, T., and Uchida, T. (2001) Electromagnetic heterogeneity of the seismogenic region of 1962 M6.5 Northern Miyagi Earthquake, northeastern Japan, *Geophysical Research Letters*, **28**, 4371-4374.
- Nakajima, J., and Hasegawa, A. (2003) Tomographic imaging of seismic velocity structure in and around the Onikobe volcanic area, northeastern Japan: implication for fluid distribution, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **127**, 1-18.
- Ogawa, Y., Mishina, M., Goto, T., Satoh, H., Oshiman, N., Kasaya, T., Takahashi, Y., Nishitani, T., Sakanaka, S., Uyeshima, M., Takahashi, Y., Honkura, Y., and Matsushima, M. (2001) Magnetotelluric imaging of fluids in intraplate earthquake zones, NE Japan back arc, *Geophysical Research Letters*, **28**, 3741-3744.
- 高倉伸一・中神康一・光畑裕司・村山隆平 (1997) 新潟県東頸城地域の比抵抗構造の石油地質学的解釈—MT法と基礎試錐のデータに基づいて—, 石油技術協会誌, **62**, 59-68.
- 内田利弘 (1984) 断層調査のための電磁法の現状, 物理探鉱, **37**, 287-301.
- 内田利弘 (1990) 比抵抗構造から解釈される地熱貯留層構造について—仙岩地熱地域を例にして—, 日本地熱学会誌, **12**, 1-21.
- Uchida, T. (1993) Smooth 2-D inversion for magnetotelluric data based on statistical criterion ABIC, *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, **45**, 841-858.
- Unsworth, M., Egbert, G., and Booker, J. (1999) High-resolution electromagnetic imaging of the San Andreas fault in Central California, *J. Geophys. Res.*, **104**, B1, 1131-1150.

(受付：2004年11月22日；受理：2004年12月16日)