

ループループ法による浅部比抵抗構造

古川勇也・西谷忠師・坂中伸也

秋田大学工学資源学部地球資源学科応用地球科学教室

Shallow resistivity structure by the loop-loop electromagnetic induction method

Y. Furukawa, T. Nishitani and S. Sakanaka

Institute of Applied Earth Science,

Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University, Japan

1. はじめに

電磁探査法は、物理探査の分野の一つである。これは、電磁誘導現象を利用し地下の比抵抗構造を推定する手法である。ループループ法は、電磁探査法の一つで別名スリングラム法（斎藤, 1998）とも呼ばれる。

ループループ法は、Conklin (1917) がループ状コイルを用いて、コイル内に交流を流し地下にある鉱体に誘導される電流が作る二次的な磁場を検出しようとしたことが始まりとされる。この手法を発展させ、小さなダイポールソースを用いて比較的浅部を対象にするのが現在のループループ法である。高電気伝導度な構造、特に鉱床を探査することを目的として開発された。

ループループ法の基礎理論については、McNeill (1980) と Keller and Frischknecht (1966) に述べられている。しかし、日本においては装置が普及し始めたのが近年で研究史が浅く、フィールドにおいて構造を求めた論文は見当たらない。そこで、本研究は、ループループ法により浅部比抵抗構造を明らかにすることを目的とした。

ループループ法の利点は、①電気探査、MT法などのように電極を必要としない、②乾電池のみの電源で探査可能である、③一般に装置が軽量で持ち運びやすい、④観測点の間隔によっては一日に数 km の測線の探査が可能である、⑤VLF-MT法に比べ、地下構造の詳細なモデル化が期待できるということである。

2. ループループ法の理論

ループループ法概念から述べる。地面に送信ループコイル (Transmitter coil) を置き、間隔 s (m) 離して受信ループコイル (Receiver coil) を置く (第1図)。送信ループコイルに交流電流 (I_1) を流す。交流電流を流すことによりコイルを貫く一次磁場 (H_p , Primary magnetic field) が生じる。この一次磁場は、地中に誘導電流 (I_2) を誘起する。この誘導電流 (I_2) がさらに二次磁場 (H_s , Primary magnetic field) を生じる。以降、次々に電磁誘導作用が繰り返されるが、二次磁場より高次の誘導磁場の振幅は非常に小さく無視される。誘導電流 (I_2) は地下の電気伝導度 (比抵抗の逆数) に比例することから、受信ループコイルで得られる二次磁場 (H_s) を測定すれば地下の構造を調べることが出来る。

インダクションナンバー (induction number) B は

$$B = \frac{s}{\delta} \quad (s: \text{コイル間隔}, \delta: \text{表皮深度}) \quad \text{————— (1)}$$

で定義されるが、ループループ法は B が 1 より非常に小さい ($B \ll 1$) という条件、つまり、 s は δ に比べて非

常に小さい ($s \ll \delta$) という条件下での探査法である。低インダクションナンバー (low induction number) での操作理論 (McNeill, 1980) によると、この条件を満たすために観測角周波数は、

$$\omega \ll \frac{2}{\mu_0 \sigma s^2} \quad \text{----- (2)}$$

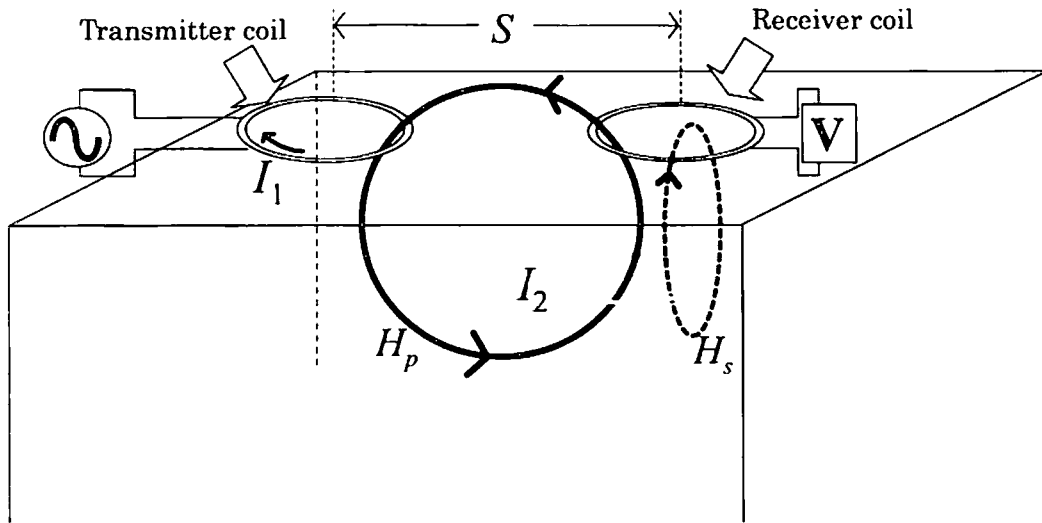
の式を常に満たすように選ばなければならない。ここで μ_0 は真空中の透磁率である。

以上の条件を満たした上で、受信ループコイルを貫く一次磁場と二次磁場の振幅比 (H_s/H_p) より、見掛電気伝導度 σ_a は

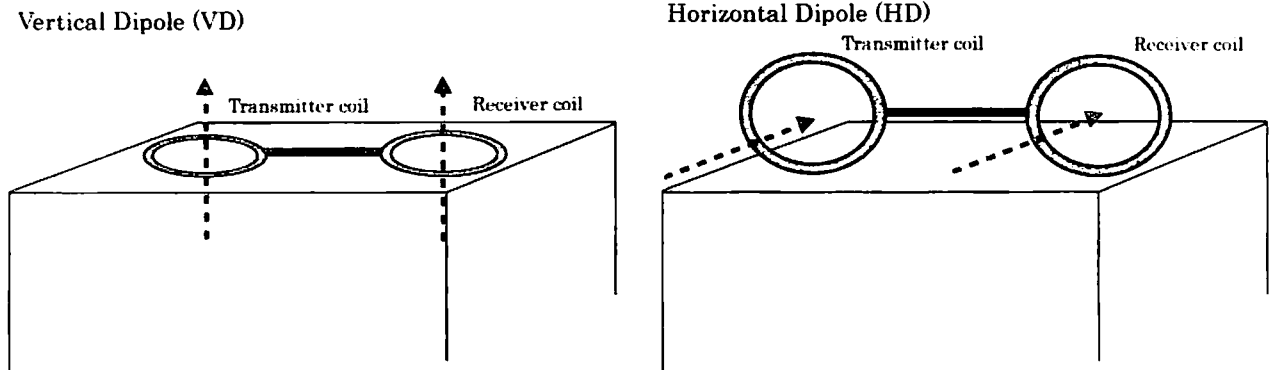
$$\sigma = \frac{4}{\omega \mu_0 s^2} \left(\frac{H_s}{H_p} \right) \quad \text{----- (3)}$$

で表される (McNeill, 1980)。

コイル配置については、Vertical Dipole (以下 VD と略す) と Horizontal Dipole (以下 HD と略す) の代表的な二種類がある (第2図)。VD は地表に対しコイルの面を水平にする配置で、HD は地面に対しコイルの面が垂直で、かつ両コイルの向きが同一方向である配置である。測定される見掛電気伝導度は VD, HD ともに (3) 式で表される。



第1図 ループループ法の概念図



第2図 コイル配置の概念図

3. 装置について

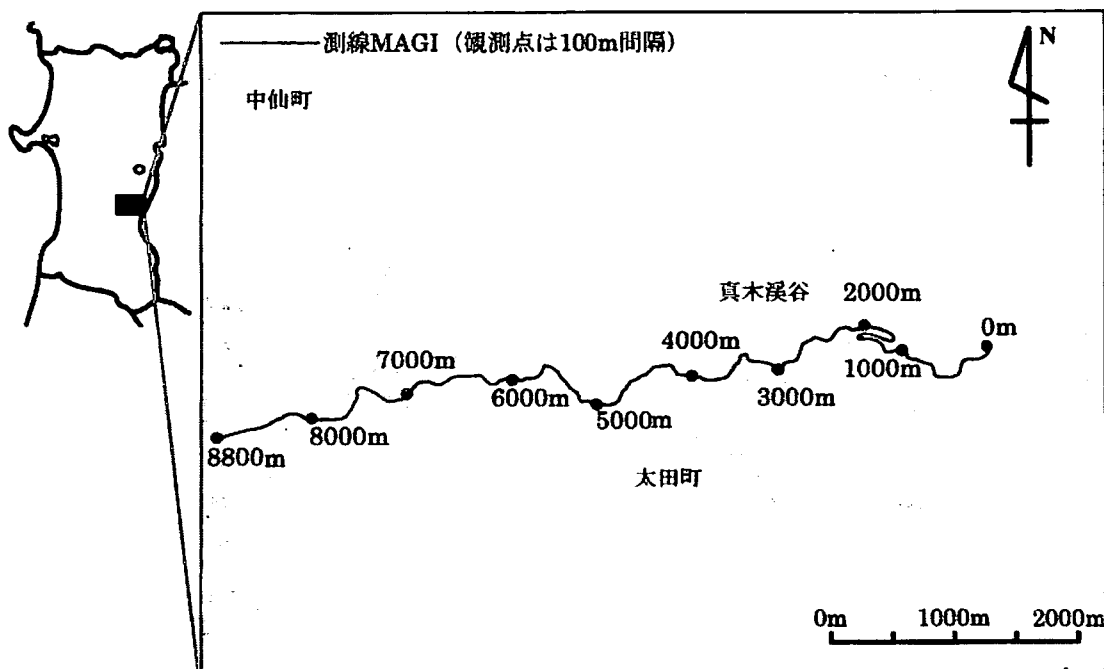
本研究において探査に使用した装置は、Geonics 社 (カナダ) 製の EM34-3 である。以下にこの装置の概要、観測周波数、探査深度について述べる。

EM34-3 は、送信器(Transmitter Console)、受信器(Receiver Console)、送信器側短ケーブル(Tx short cable)、受信器側短ケーブル(Rx short cable)、リファレンスケーブル(Reference cable)、受信ループコイル(Receiver coil)、送信ループコイル(Transmitter coil)から成る。両コイルの直径は 63cm である。コイル間隔は、10m、20m、40m の三種類から選択できる。この装置で測定値として表示される見掛電気伝導度の単位は、mS/m である。また、受信器に付属のデータロガー Polycorder600 を接続させることにより測定データを記録することが出来る。観測周波数は、コイル間隔 10m のとき 6.4kHz、20m のとき 1.6kHz、40m のとき 0.4kHz である。探査深度は、コイル間隔 10m において HD が 7.5m、VD が 15m、コイル間隔 20m において HD が 15m、VD が 30m、コイル間隔 40m において HD が 30m、VD が 60m である。

4. 探査概要

本研究における調査地域は、秋田県仙北郡太田町にある真木溪谷である。本調査地域には、東西に斉内川が流れている。臼田ほか (1979) によると真木溪谷周辺に分布する地層は、下位より八滝沢層、信倉沢安山岩部層、真昼川層、内沢川層、真木層、小屋森安山岩部層、栗沢層、田沢層、第四紀層である。調査地域の東部には NE-SW 系断層の斉内川断層があり、中央よりやや西部には入角沢背斜があり、背斜軸周辺に NE-SW 系推定断層 (長さ 2km) と NW-SE 系推定断層 (長さ 3km) が存在する。西部には、内沢川層中を通る小屋森向斜、1896 年の陸羽地震で生じた東西圧縮の低角逆断層である太田断層が存在する。

第 3 図中の実線で示される部分を測線 MAGI とする。0~8800m まで 100m 間隔で合計 89 の観測点がある。探査は、2002 年の 5/18、6/2、7/13、8/1、8/2 の 5 日間をかけて行った。

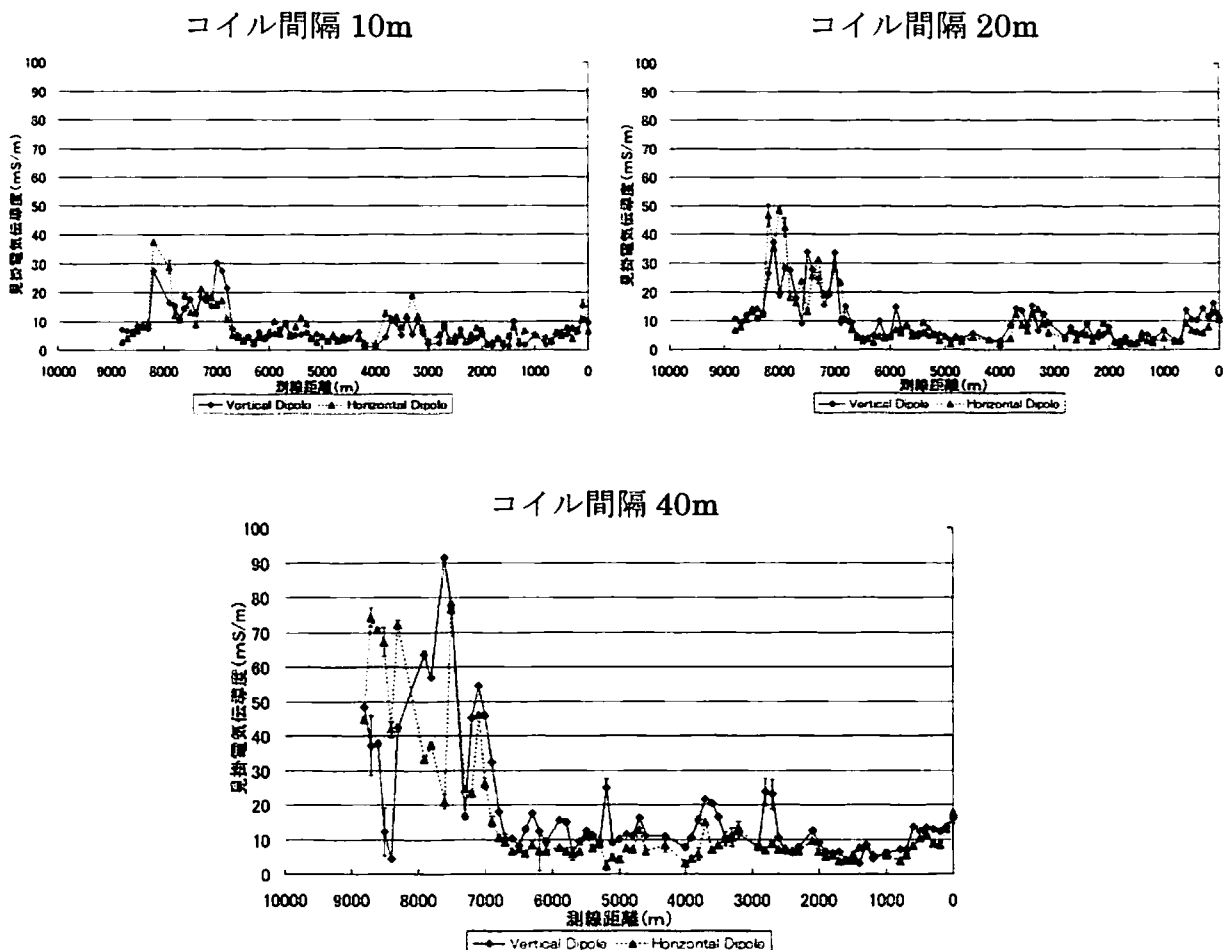


第 3 図 調査地域と測線の位置図

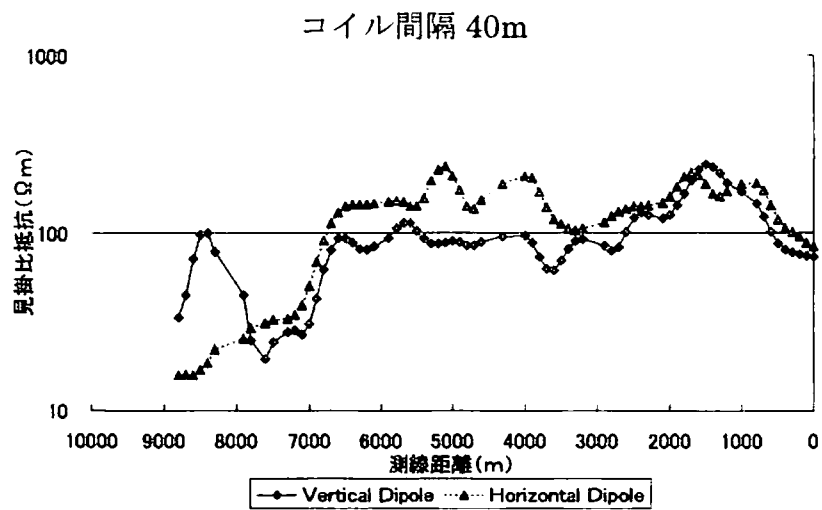
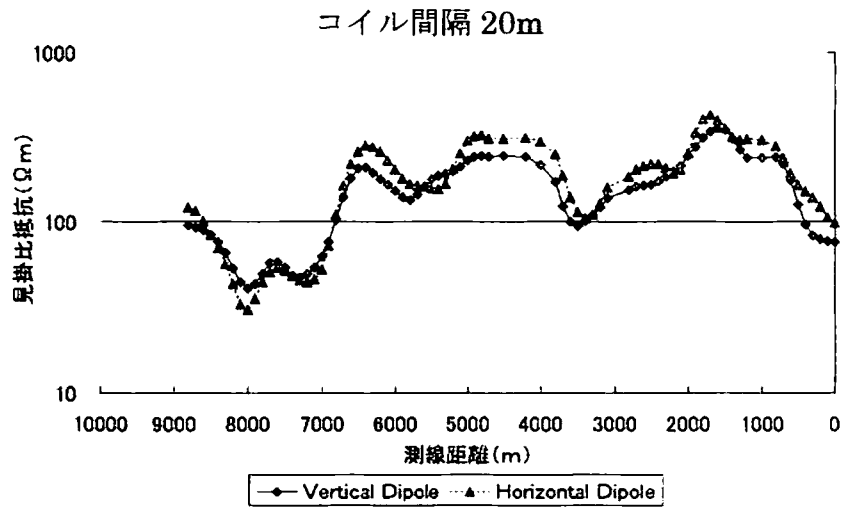
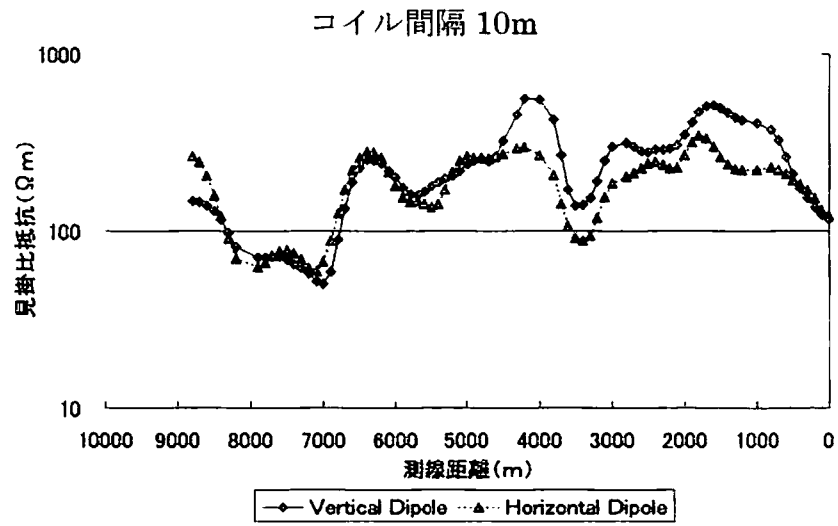
5. 取得データの検討とスムージング

測線 MAGI において各観測点でそれぞれコイル間隔 10m, 20m, 40m の時の VD, HD について平均 5 回測定を行い、この平均値を測定値とした。さらに、人工的な高電気伝導度物体によりノイズを受けたと考えられるデータ（測定値が周りの値と比べても非常に大きな値、又はマイナスを示した値）を取り除いたのが第 4 図である。ただし、測線距離 6800~8800m までのデータは、送電線の影響を受けて可能性があるがその影響を取り除くには至っていない。コイル間隔 10m のデータのばらつきについては、VD, HD ともに標準偏差は多少大きい値でも 1~3mS/m の範囲内にある。コイル間隔 20m については、VD のデータは最大で 1~2mS/m, HD のデータは最大 3~4mS/m の標準偏差を示す。40m については、10m, 20m に比べるとややばらつきがあるように見える。VD, HD のデータともに標準偏差が大きい観測点では 4~6mS/m である。全体的に、測定値の絶対値に比べると標準偏差は十分に小さいので精度は良いと言えるだろう。

ノイズ処理したデータを空間的なばらつきが少なくなるようにスムージング（三回の三点移動平均）を行い見掛け抵抗値 (Ωm) に換算した。この結果を第 5 図に示す。



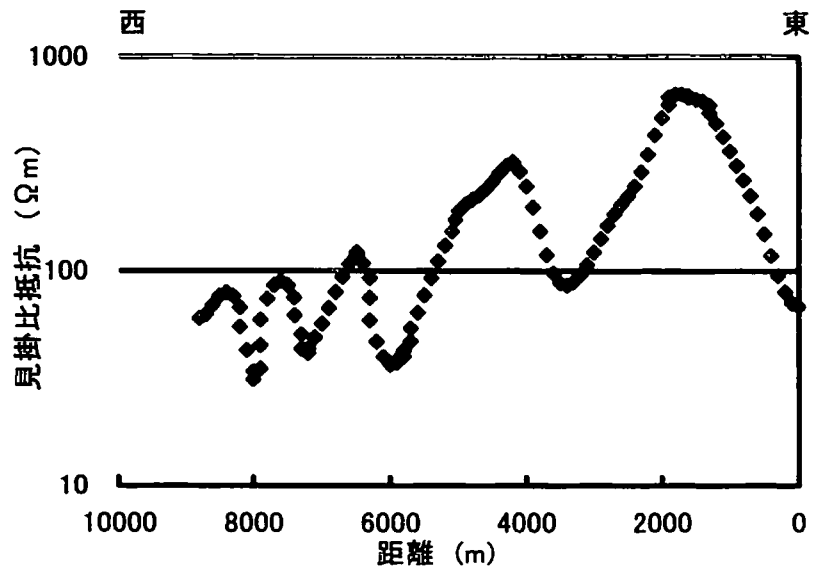
第 4 図 ノイズ処理を行った後の測定データ



第5図 測定値をスムージングし、比抵抗値に換算した結果

6. VLF-MT法のデータとの比較

2001年11月9日に同測線で行われたVLF-MT法で得られたデータをスムージング(10回の三点移動平均)した結果を第6図に示す。ループループ法のデータとVLF-MT法のデータを比較すると、コイル間隔10m, 20mのデータにおける高比抵抗なピークとVLF-MT法のデータにおけるそれが、測線距離1000m~2000m, 4000m~5000m, 6000m~7000mの間にあり一致している。このことから、ループループ法はVLF-MT法と比較しても十分な解能があるということが分かる。



第6図 VLF-MT法のデータをスムージングした結果

7. 地下浅部を水平成層と仮定したモデルの見掛電気伝導度の計算式

地下が水平に層を成すと仮定するモデルが水平成層モデルであるが、水平三層モデルについての見掛電気伝導度の理論計算式を示す。第一層目の電気伝導度を σ_1 、第二層目の電気伝導度を σ_2 、第三層目の電気伝導度を σ_3 、第一層目の層厚を h_1 、第二層目までの深さを h_2 としたときの見掛電気伝導度 σ_a の理論式は、McNeill (1980) より

$$\sigma_a = \sigma_1 [1 - R(Z_1)] + \sigma_2 [R(Z_1) - R(Z_2)] + \sigma_3 R(Z_2) \quad (4)$$

ここで、 $R(Z_1)$ 、 $R(Z_2)$ は累積感度関数である。また、 $Z_1 = h_1/s$ 、 $Z_2 = h_2/s$ (s :コイル間隔)である。

8. インバージョンについて

測線MAGIで得られた測定データから浅部比抵抗構造のモデルを求めるためにコイル間隔10mのVD・HD、20mのVD・HD、40mのVD・HDの計6個の全ての測定値(見掛電気伝導度)を用いて5個の未知パラメータ σ_1 、 σ_2 、 σ_3 、 h_1 、 h_2 を求めるインバージョン計算プログラムを開発した。プログラムに用いたアルゴリズムは、総当りグリッドサーチ法である。この方法では、未知パラメータを少しずつ変更しながら総当りに残差二乗和の最小値を計算するので確実に最小の残差二乗和及び5個の未知パラメータの値を決定できる。しかし、未知パラメータの取りうる値の範囲を広くすると値の組み合わせも比例して増えるのでコンピュータの計算に時間が掛かってしまうという問題もある。

9. 三層比抵抗モデルと地質図との比較

本研究で作製したインバージョン計算プログラムを用いて、測線MAGIのデータの解析を行い、比抵抗値に換算してモデル化を行った(第7図)。横軸は測線MAGIに沿った距離、縦軸は100mまでの深さ(線形表示)である。第7図に示したモデルにおいて、第一層目の層厚は最も薄い所で0.1m、最も厚い所(測線距離5300m)で23.2mであり、第二層目の層厚は最も薄い所(測線距離0m)で5.7m、最も厚い所(測線距離

6400m) で 215.4m である。

以下に、測線 MAGI における三層比抵抗モデルと地質図との比較に関する考察を述べる。モデルにおいて、測線距離 2500m~3200m の間に厚さが最大 100m 以上で 1000 Ω m の柱状の高比抵抗体があり、地質図におけるデイサイト貫入岩と考えられる。また、測線距離 3600m~4900m の比較的広範囲にも厚さが最大 100m 以上で 1000 Ω m の高比抵抗体があり、粗粒玄武岩・斑状安山岩の貫入岩を反映していると考えられる。さらに、地質図では貫入岩が存在していない測線距離 6200m~6400m の間でも厚さが最大 100m 以上で柱状の 1000 Ω m の高比抵抗体があり、貫入岩の存在を示唆しているものと考えられる。

測線距離 3200m~3600m では、モデルにおいて二層目が 400~500 Ω m、三層目が 30~100 Ω m と深くなるにつれて低比抵抗となるが、この部分は地質図でいう真昼川層のかんらん石玄武岩及び同質火山砕屑岩に相当する。測線距離 5500m~6100m では、二層目が 300~550 Ω m、三層目が 30~70 Ω m とこの範囲でも深くなるにつれて低比抵抗となり、この部分は地質図では真昼川層のデイサイト又は凝灰岩類に相当する。

測線距離 5500~6100m の間では、モデルにおいて背斜構造が見られるが、これは地質図の入角沢背斜に相当すると考えられる。さらに、7000m~8500m の間は送電線の影響を受けているためフィッティングが悪く信頼性はあまり高くはないが、向斜構造を認めることができ、これは小屋森向斜に相当すると考えられる。また、測線距離 2500m~3000m にかけて斉内川断層の存在を認めることができ、測線距離 8000m~8500m にかけては太田断層の存在を示唆できる。

10. 結論

本研究では、ループループ法での浅部比抵抗構造のモデル化に成功した。ループループ法を用いることによって明らかにした点を以下に示す。

- (1) 岩質の違いを示すことができた。
- (2) 断層の存在を捉えることができた。
- (3) 向斜構造、背斜構造に対応した比抵抗構造を認めた。

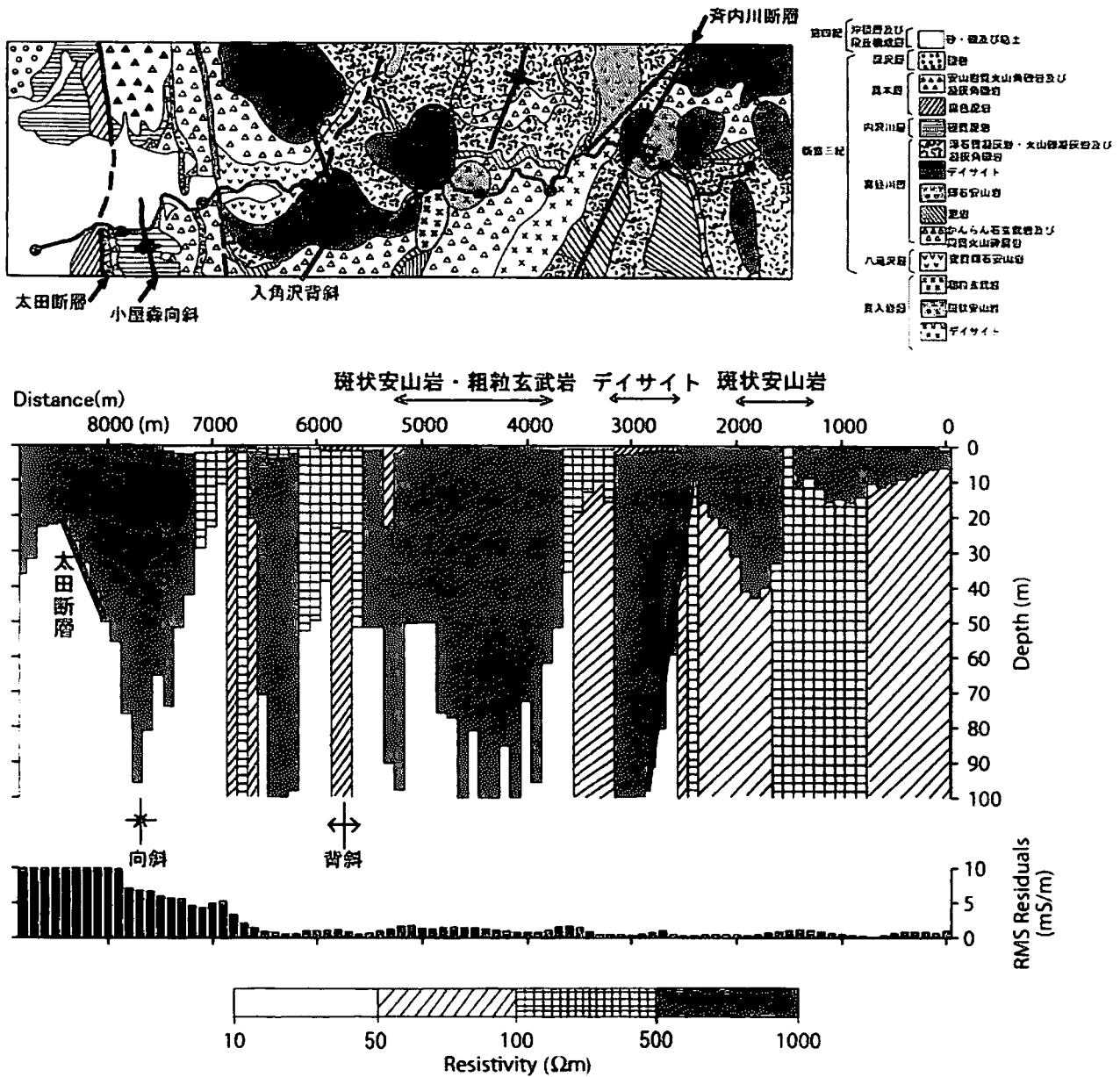
以上の点からループループ法は浅部比抵抗構造を捉えるのに十分に有効な探査法であると言える。

11. 展望

ループループ法は操作の軽便さとその比抵抗構造の分解能により、今後注目される探査法になると思われる。直流比抵抗法（電気探査）のデータとループループ法のデータを用いた同時インバージョンによりさらに精度の高い比抵抗構造を得ることもできる (Gómez-Treviño et al., 2002)。このような他の探査方法のデータをも考慮に入れて総合的な地下構造を構築する方法を追求すること、及びより実用的なインバージョン解析法追求が今後の課題となる。

謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方々のご協力があった論文を作成することが出来た。中でも著者の所属する研究室の筒井智樹助教授には有益な御助言をいただいた。また、観測などにご協力いただいた小林勝幸氏、今野美貴子氏、浦野光周氏、村上直也氏、草薙智浩氏にも深く感謝の意を表したい。



第7図 地質図とモデルの比較 (地質図は臼井ほか(1979)より)

参考文献

臼田雅朗・村上進・白石建雄・高安泰助・乗富一雄, 秋田県総合地質図幅「角館」, 秋田県, 86p, 1979.
 斎藤章, 「物理探査ハンドブック」手法編 第6章 電磁探査, 物理探査学会, 297-398, 1998.
 Conklin, H. R., Prospecting with electricity, *Engineering and Mining Journal*, 104-8, 1917.
 Gómez-Treviño, E., Esparza, F. J., and Méndez-Delgado, S., New theoretical and practical aspects of electromagnetic soundings at low induction numbers, *Geophysics*, 67, 1441-1451, 2002.
 Keller, G. V., and Frischknecht, F. C., *Electrical methods in geophysical prospecting*, Pergamon Press, 1966.
 McNeill, J. D., Electromagnetic terrain conductivity measurements at low induction numbers, *Technical Note TN-6, Geonics Ltd., Mississauga, Ontario*, 1-15, 1980.