

# 手形山トンネルの物理探査

西谷 忠師\*

(平成9年2月22日受理)

## Geophysical prospecting of Tegatayama tunnel

Tadashi NISHITANI\*

### (Abstract)

It is very important to know the underground structure of 20 to 30 meters below the surface. However these depths are difficult to know, for they are intermediate region in geophysical prospecting. Several methods were applied to the man-made tunnel (Tegatayama tunnel, Akita City) to know the effect of high resistivity structure in 20 to 30 meters. Only one point electric survey cannot reveal the existence of a tunnel. It is possible to know the influence of a tunnel if we use several electric survey data obtained in different positions. The VLF magnetotelluric survey is effective to reveal the structure of a tunnel at a depth of 20 to 30 meters. The magnetic component of VLF signal is available to know the underground structure.

### 1. はじめに

物理探査では地下レーダーのような地表付近の構造物探査から、重力による基盤構造、あるいは大規模な地震探査による深部数10kmまでの構造を明らかにする事が可能である。しかし、我々の生活に密接に関連する20mから30mの深度の構造を知る事は意外に難しい。なぜなら各種探査手法には得意な探査深度があり、20mから30mは浅い部分と深い部分の遷移区間にあたるためである。比較的浅いからといって、必ずしも容易に構造が把握できる訳ではない。この深度の構造を高い分解能で得るための

手法は残念ながらまだ確立されていない。

本論文では、20mから30mの深度で構造のわかっている部分をターゲットにして何種類かの物理探査を行い、どの手法が構造を把握するのに有効かを明らかにすることを目的とする。探査の対象としたのは秋田市北東部の丘陵地に位置する手形山トンネルである。手形山トンネルは詳しい位置、大きさが正確にわかっている。従って、どの物理探査の手法が有効かを確かめる事が可能である。

### 2. 手形山トンネルの概要

手形山トンネル周辺の地形は標高60m~70mの河

(平成9年2月22日受付, 平成9年2月28日受理)

\*秋田大学鉱山学部 資源・素材工学科 応用地球科学教室。

Institute of Applied Earth Sciences, Mining Engineering and Materials Processing, Mining College, Akita University.

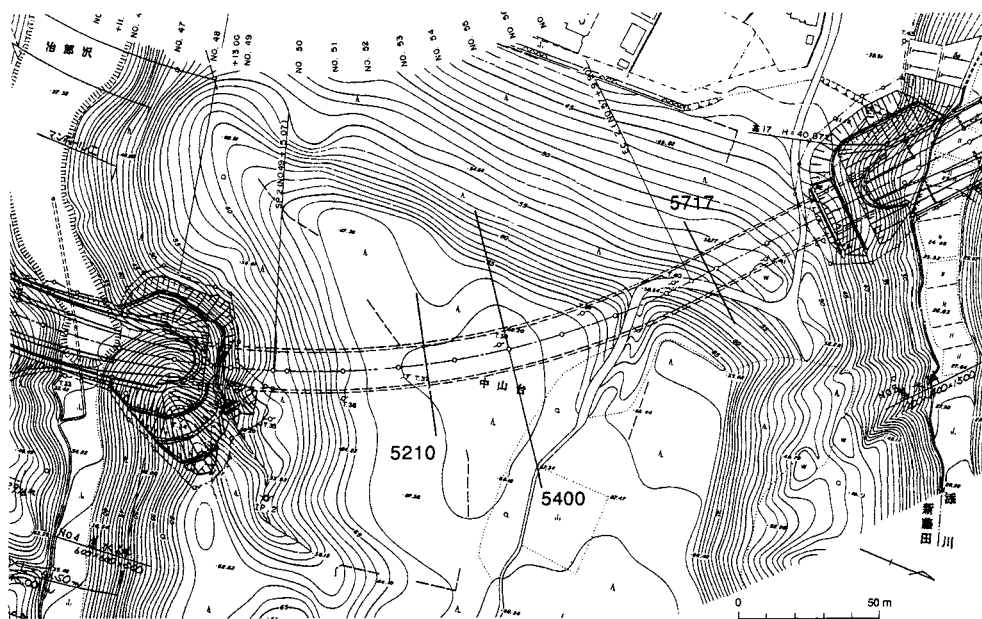


Fig. 1 Tegatayama tunnel located in Akita city. The length of it is 276m. Three measuring lines, 5210, 5400 and 5717 are shown.

岸段丘の平坦面であり、手形山配水場に利用されている。また、標高30m~40mの段丘平坦面は高梨台団地や中台団地などの住宅地に広く利用されている(秋田県秋田土木事務所, 1990a)。現在工事中の主要地方道秋田・昭和線はこの地域をほぼ南北に通過し、秋田市手形山から手形山配水場を經由して境内川原へ伸びている。手形山トンネルはこの道路の途中、中山台付近にある。

トンネルの大きさは、全長276m、幅7.5m、高さ4.7mで1995年3月に完成している(Fig. 1)。しかし、まだ道路は接続されていない。トンネルの断面図をFig. 2に示す。この図では縦軸のスケールは5倍に拡大してある。トンネルから地表までの距離は山頂付近で約28mである。この手形山トンネル付近には高压線などの電力線はなく、人工的な擾乱作用があまりないと予想されることから、物理探査の場所としては望ましい場所である。

トンネルを掘る前にボーリング調査が行われ、概略の地質状況が明らかになっている(秋田県秋田土

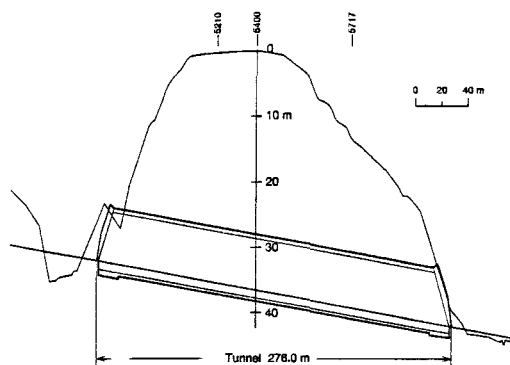


Fig. 2 Cross section of Tegatayama tunnel. Horizontal scale is extended 5 times.

木事務所, 1990a)。また、地質、地盤調査のため弾塑性波探査、土質試験が行われている。その結果、トンネル付近では、表層60cm程度は表土で、泥岩の軟質礫を含む粘性土である事、深度8m程度までは段丘堆積物、そして深度8mより深い部分は泥岩であることがわかっている(秋田県秋田土木事務所, 1990b)。

### 3. 測線

トンネルの位置は地形図上で確認でき、地表には工事の時に設定された杭が残っている。現場と地形図との対応は地表に残っている杭を利用する。杭は20mごとにあり、道路の進行方向に垂直に2本、道路の中心から左右に12.5mの地点に設定してある。それぞれナンバーとL=12.5あるいはR=12.5の表示がある。この2本の杭を直線で結べば道路の進行方向と直角、すなわち、トンネルと直交する測線を設定することが可能である。

基準にした杭は、No.52, 54, 57で、測線はすべてトンネルと直交する方向に設定した。各杭から10m, 0m, 17m北西側に移動して測線を設定した。移動した距離を杭の番号に付加して、測線名をそれぞれ5210, 5400, 5717と名付ける。

### 4. 電気探査

#### 4.1 垂直探査

測線5400上で電気探査の垂直探査を行なった。用いた手法は等間隔四極法（ウェンナー法）で、両端の電極から電流を流し、真ん中の二本の電極で電位差を測定する方法である。測定点は測線5400上で、トンネル直上、トンネルの中心から左右に10m移動した点、中心から東に20m移動した点である。測定時の電極を伸ばす方向は主としてトンネルに平行の方向とした。これは理論計算を行なう場合、水平成層構造を仮定した一次元モデルを用いることを想定していたためである。電極の展開方向による違いを見るため、トンネルの中心位置および、東に20m移動した点では、地表面でトンネルに垂直な方向にも電極を展開して測定を行なった。

Fig. 3はトンネルから20m離れた地点での垂直探査の結果である。測定値の下には一次元水平成層構造を仮定した場合のモデル構造を示してある。この地点では電極を伸ばす方向をトンネルと垂直方向に設定して測定を行なっている。しかし、電極を伸ばす方向にかかわらず、測定値はほとんど同じで異なった傾向は見られなかった。

#### 4.2 一次元モデル計算

電気探査の構造解析では地下に空洞があると思って処理を行なうこととする。実用性および計算時間を考えて、モデル計算はすべて一次元で水平成層構造を仮定した。

まず、トンネル直上での測定値を再現する一次元の最適モデルを求めた。このモデルでは7.6m以深

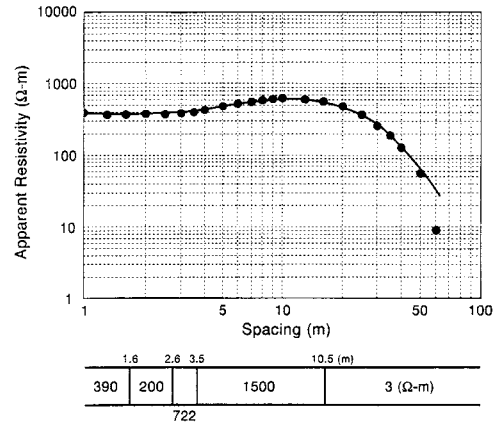


Fig. 3 Electric survey at the point of 20m apart from the center of tunnel. Solid line indicates the theoretical curve using the model structure shown below.

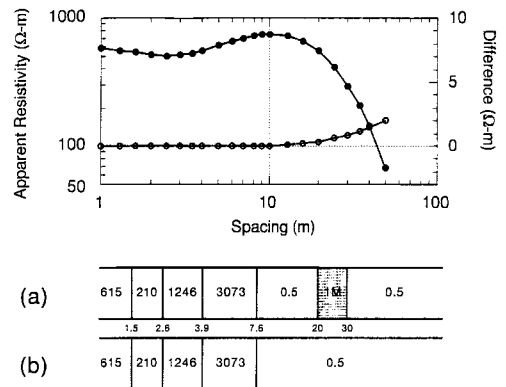


Fig. 4 Solid circles are the theoretical apparent resistivity values using the model structure of (a). Solid line indicates the best fit model (b) of the electric survey at the top of the tunnel. Open circles show the difference of apparent resistivity obtained by the model (a) and (b).

では $0.5\Omega\text{m}$ で一様な比抵抗となっている (Fig. 4). このモデルに高比抵抗の層を付加する. トンネル部分に相当する $20\text{--}30\text{m}$ に $1000\text{k}\Omega\text{m}$ の層を付け加えてモデル計算を行なう. Fig. 4で実線がモデル(b)のもの, 黒丸は新たに $1000\text{k}\Omega\text{m}$ の層を付加したモデル(a)による理論値である. 両者はほぼ一致しておりその差は電極間隔が $50\text{m}$ でも $2\Omega\text{m}$ 程度と極めて小さい. 従って, トンネル直上の単一測定データからトンネル位置を推定することは難しい.

### 4.3 三層モデルによる検討

単純な三層構造モデルを仮定して地下の高比抵抗

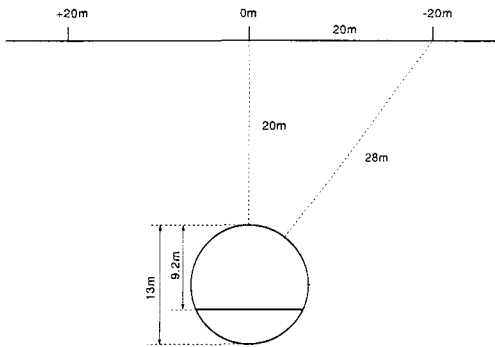


Fig. 5 Cross section of simplified tunnel model.

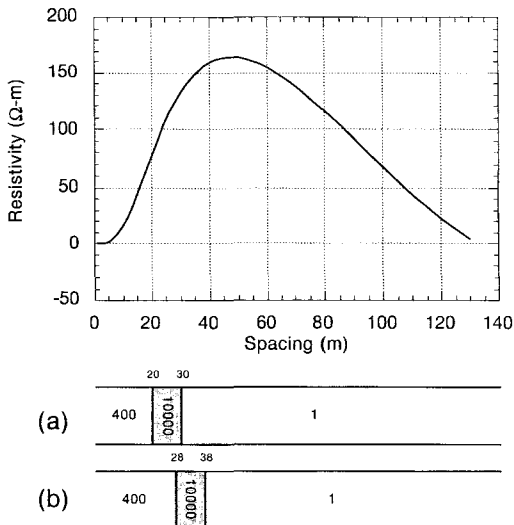


Fig. 6 Difference of apparent resistivity between the model (a) and (b).

構造の検出を試みる. Fig. 5のようにトンネルを垂直に横切る断面を考える. トンネルの天井部が地表下 $20\text{m}$ にある時, 中心から横方向に $20\text{m}$ 移動した地点からトンネルまでの距離は $28\text{m}$ となる. すなわち, 中心から $20\text{m}$ 離れた点では見掛け上地下 $28\text{m}$ にトンネルが存在することになる. 一層目が $400\Omega\text{m}$ , 二層目が $10\text{k}\Omega\text{m}$ , 三層目が $1\Omega\text{m}$ の層構造を考える. 二層目の深度が $20\text{--}30\text{m}$ の場合と $28\text{--}38\text{m}$ にある場合の予想される実測値の差を示したものが Fig. 6である. 電極間隔が $40\text{--}50\text{m}$ 付近にピークが現われており, トンネルの高比抵抗の影響を見出すことができる. これまで見てきたように, 一点だけの垂直探査データだけでは見えなかった $20\text{--}30\text{m}$ 程度の深度の高比抵抗構造は測定点を変えたデータの差を取ることによって明確に示すことが可能であることがわかる.

実際に測定した垂直探査データの引き算を実行する. Fig. 7が $5400$ 測線上でトンネル直上およびそこから $20\text{m}$ 離れた場所での実測値の差である. 図には $40\text{m}$ 付近からピークが現われており, 理論的に導いた傾向とほぼ同じ結果を示すことがわかる. 従って, 観測値にはトンネルの影響が確かに含まれており, 離れた距離での実測値の差をとればトンネルの効果を見る事が可能であることが明らかである.

ここでわかった事は一地点の垂直探査データからトンネルの影響を見つける事は難しいが, 異なった

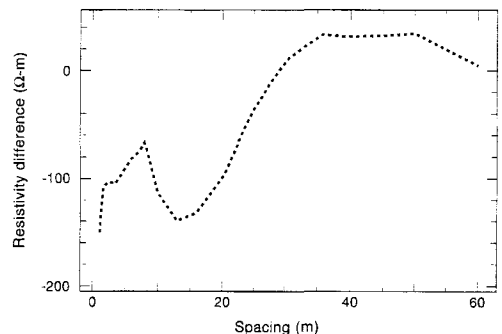


Fig. 7 Apparent resistivity difference between the measured value at the top of the tunnel and that obtained  $20\text{m}$  apart from the center of the tunnel.

距離で測定したデータを用いればトンネルの影響を見る事が可能である、という点である。

## 5. VLF 探査

### 5.1 地磁気地電流法

VLF 帯の電場・磁場を用いた地磁気地電流法 (MT 法) を手形山トンネルに適用した。特に注目するのは周波数22.2kHzの電場・磁場成分である。22.2kHzの信号は潜水艦通信用として使われており、九州えびの高原から大電力で発信されている。

測定方法はまず発信局方向を特定し、この方向に電場用電極を設置する。電極間隔は10mとする。次に電場成分とこれに直交する磁場成分を同時に観測する。こうして観測された電場成分と磁場成分から見掛け比抵抗と電場と磁場の位相差を得る事ができる (Cagniard, 1953)。実際の測定では5210, 5400, 5717各測線を1m間隔で探査を行なった。

測定値をそのままプロットすると極大をもつ特徴的な傾向が得られる。また直線的に測定値が増加する大きなトレンドが含まれている。このままでも検討する事は可能であるが、トレンドを除去してから考察したほうがわかりやすいと判断した。トレンドを除去する方法は、全データを直線で近似し、各測定点から近似した直線の値を差し引く処理を行なう。トレンドを除去した後のデータからは明確にトンネルの影響を見る事ができる (Fig. 8)。他の測線でも同様に、トレンドを除去すればトンネルの位置で比抵抗が高くなり、位相角が減少する傾向が見られる (Fig. 9, Fig. 10)。比抵抗が高く、位相角が減少する傾向は、表層に比べて深い部分に比抵抗の高い構造があることを示している。

トンネルの直上で全て比抵抗が高く、位相角が低くなっている訳ではなく、トンネルの位置とはややずれた位置でピークが現われている。これはトンネルが湾曲しているためであろう。

これら複数の測線でほとんど処理を加えることなく、トンネルの位置が明確になることがわかった。VLF 帯の電場・磁場を用いた地磁気地電流法は20–30m 深度の比抵抗異常を見つけ出す非常に有効な手段であると言えるだろう。

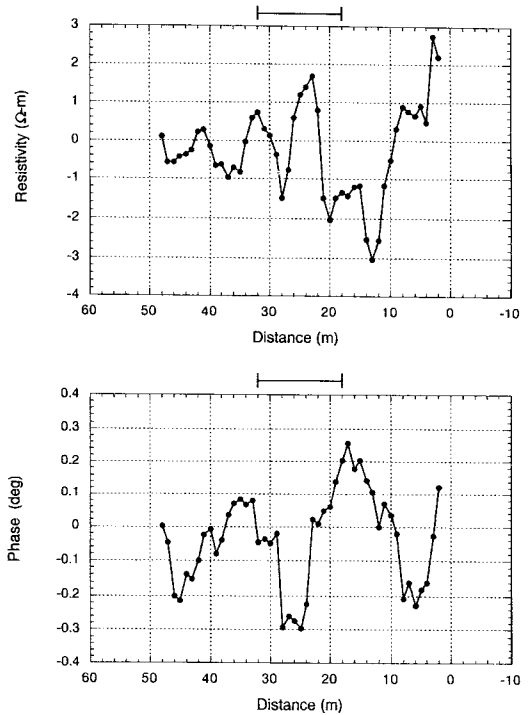


Fig. 8 VLF-MT survey along the line of 5210. Large trend is subtracted from the observed values.

### 5.2 EM16による探査

先ほどと同じくVLF帯の信号を用いる探査手法がある。22.2kHzの信号を用いる事は同じであるが、磁場成分だけ用いる方法である。その一つとしてEM16 (Geonics社製) を用いて探査を行なった。

EM16で得られる測定値は2つある。一つは発信されている22.2kHzと同位相の同相 (inphase) 成分、もう一つは90°位相のずれた (quadrature) 成分である。同相および90°位相のずれた成分の測定値にはかなりのノイズが含まれている。ノイズの影響を少なくするために移動平均をとる。その結果をFig. 11に示す。わずかではあるがトンネルの位置に対応した変動が見える。

### 5.3 WADIによる探査

EM16と同じ原理を用いているWADI (ABEAM

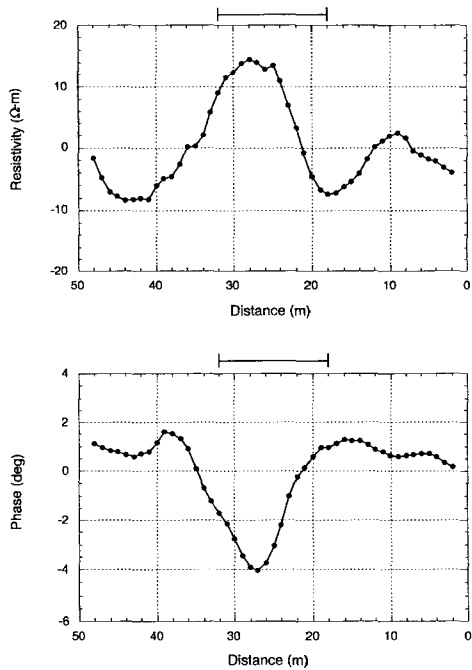


Fig. 9 VLF-MT survey along the line of 5400.

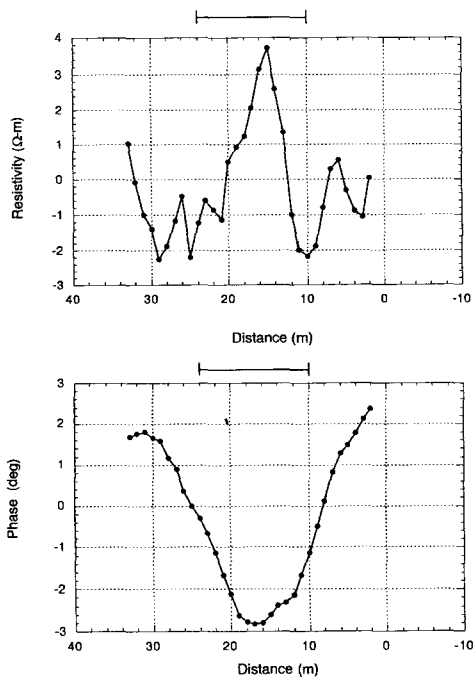


Fig. 10 VLF-MT survey along the line of 5717.

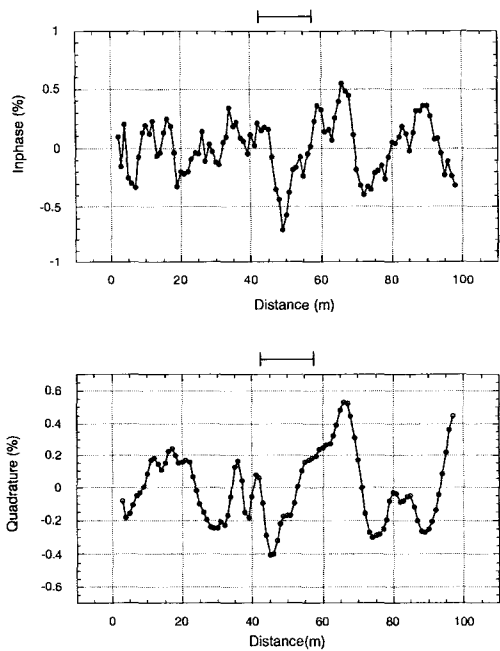


Fig. 11 VLF survey along the line of 5400 using EM16.

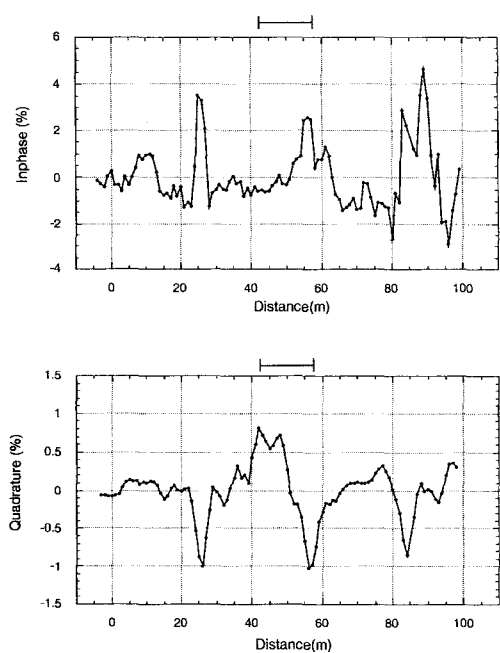


Fig. 12 VLF survey along the line of 5400 using WADI.

社製)を用いて探査を行なった。WADIでも同様に22.2kHzの磁場成分を用い、同位相の成分、 $90^\circ$ 位相のずれた成分の測定を行なう。先ほどと同じように移動平均を行なってトンネルの影響を見る。Fig. 12にその結果を示す。この場合でもEM16と同様、トンネルに対応したわずかな変化が見える。

以上のことから、20-30m深度の比抵抗異常を調べる場合、磁場成分だけを用いる探査手法は、電場・磁場成分を同時に使う手法に比べて検出能力が小さいと言えるだろう。

## 6. まとめ

手形山トンネルをターゲットにして、地下20mから30mの構造を明らかにすべくいくつかの方法で探査を行なった。測定および解析の結果、次のような結論を導く事ができた。

まず、1点だけの電気探査による垂直探査だけでは、トンネルの存在を明確に示す事は難しい。しかし、異なった位置で測定を行ない、測定値の差を取ればトンネルの影響を見る事が可能であることが判明した。

次にVLF帯の信号を用いる探査では、地磁気地電流法と呼ばれる電場と磁場を用いて比抵抗を求め

る方法が極めてよくトンネルの特徴を捕らえることができた。磁場成分だけを用いる探査ではトンネルの影響をわずかだけ捕らえる事ができた

以上のことから深度20-30mの探査では電場・磁場を利用するVLF帯の地磁気地電流法が最も有効であると言えるだろう。

## 謝 辞

この論文をまとめるにあたり、ボーリング資料などで便宜を図っていただいた秋田土木事務所道路課道路建設第一担当の高橋悟氏、フィールド調査で手伝ってもらった応用地球物理学研究室の学生諸君に感謝する。

## 文 献

- 秋田県秋田土木事務所(1990a):平成2年度 K225-Y2 地方道改良工事地質調査業務委託報告書, 1-50.
- 秋田県秋田土木事務所(1990b):K225-Y2 地方道改良工事地盤調査業務委託報告書, 1-49.
- Cagniard, L. (1953): Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting, *Geophysics*, 18, 605-635.