

研究報告

秋田市手形山における電気探査

坂中伸也**・西谷忠師**・筒井智樹**

Electric Soundings at Tegata-Yama

Shin'ya Sakanaka**, Tadashi Nishitani** and Tomoki Tsutsui**

Abstract

Electric soundings have been carried out annually at Tegata-Yama, Akita city, northeast of Japan. They are part of the class 'Experiment of Applied Geophysics I' opened in Akita University for third year students of geology and geophysics course, Department of Earth Science and Technology, Faculty of Engineering and Resource Science. We have carried out vertical soundings using the Wenner electrode distribution at several sites these years. We assign students a report including construction of one-dimensional resistivity structure using the curve matching method based on the data acquired themselves. But we do not have comprehensive image of subsurface resistivity structure in consideration of the data acquired over years. We examine the data obtained recent years and show several representative results of the electric soundings around the top of Tegata-Yama hill in this manuscript. We intend to use this summary of the results in order to help the progressive understanding of the subsurface structure of Tegata-Yama area in the future.

1. はじめに

電気探査（比抵抗法）による地下探査は建設や土木工事のための地質・土質の調査だけでなく、地すべり地帯や活断層、活火山などで防災目的にも利用されている。他にも水資源や地熱開発、遺跡探査など、電気探査の応用範囲は広い。

この稿で取り扱う探査法は一般には比抵抗法（resistivity method）とも呼ばれているものであるが、ここでは「電気探査」という用語で統一して用いることとする。この方法は、ステンレスや真鍮などの金属棒を電極として使い、電流電極から電流を流し、電位電極で地点間の電位差を測定するものである。複数の地点の電位差を測定し、電流量と電位差から地下の比抵抗（電気伝導度）構造を推定するものである。電気探査では人工的に地下に流す電流は直流の交代電流もしくは交流を用い、電流量は数十 mA であることが多い。

最近の電気探査は、多くの電極を探査地域に設置し、プログラム制御により、電流電極、電位電極をさまざまな組みあわせで切り替えながら効率的にデータを取得する多電極電気探査が主流である。この方法をもとに、2次元もしくは3次元構造解析が行われている。

秋田大学では、地球資源学科応用地球科学教室の3年次用の授業「地球物理学実験Ⅰ」の一環として、毎年、電気探査の実習を行っている。例年、大学から比較的近距离にある手形山公園を実験フィールドとして使用している。

この稿では、電気探査について数年分のデータから明らかになっていることをまとめておく。年度ごとによく似た観測点（測線）で実験を行っているが、年によって少しずつ違う場所に観測点を設置する場がある。実験で得られたデータはデータシートにまとめて毎年保存しているが、複数年度にわたるデータを同時に用いて地下構造を総合解釈することがなかった。これまでに得られているデータから、手形山の地下構造についての概要を頭に入れておけば、次年度以降、さらに詳細な地下構造を得るための観測点を選定することが可能となる。

2006年9月12日受理

**秋田大学工学資源学部地球資源学科,
Department of Earth Science and Technology,
Faculty of Engineering and Resource Science,
Akita University.

2. ウェンナー法, カーブマッチング法について

近年の電気探査法の主流はプログラム制御による多電極電気探査であるが, 地下構造の解析もふくめ, ブラックボックスの部分が多く, 電気探査法の基礎を学ぶための入門には適さない。

「地球物理学実験Ⅰ」では, ある電極配置に対して, 1 個のデータを取得する方法を用いている。すなわち, 電極を設置し直してはデータを取るということを繰り返す。実習で用いている測定機材は, (株)応用地質の McOHM Model-2115, (株)横河電機製作所の大地比抵抗測定器 3244 形, (株)横河電機製作所の L-10 型大地比抵抗測定器の 3 種である。前記の 2 つは 12V の外部直流電源で駆動するもので, L-10 型はハンドルを手動で回して大地に流す電流を発電するタイプである。

電流電極と電位電極の配置にはさまざまなものが提唱されているが, 手形山での学生実験では四極法の一つであるウェンナー法電極配置⁽¹⁾を用いている。この電極配置は電流電極 2 本, 電位電極 2 本の計 4 本の電極を用い, 外側に電流電極, 内側に電位電極を一直線に, しかも等間隔に配するものである。

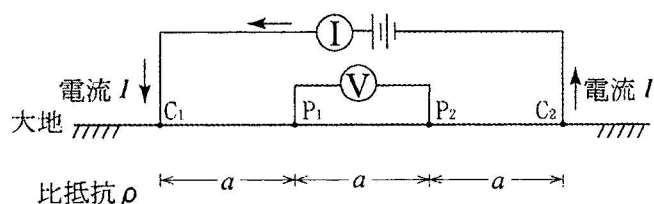


図1 ウェンナー法電極配置. 4 本の電極を等間隔 (a m) で直線状に並べる。

ウェンナー法電極配置は単純でわかりやすいのが特徴で, 電極間隔を小さくすれば浅い部分の構造, 大きくすれば深い部分の構造をさぐることができる。ウェンナー法による探査深度は電極間隔の半分程度である。ウェンナー法における見掛比抵抗 ρ_a の算出式は以下のように与えられる⁽²⁾。

$$\rho_a = 4\pi a \frac{\Delta V}{I} = 4\pi a R \quad (1)$$

ここで, a は電極間隔, ΔV は電位電極間の電位差, I は大地に流した電流である。

また, ウェンナー法などの四極法で, 電極の中心をある地点に固定し, さまざまな電極間隔でデータを取得する方法を垂直探査という。垂直探査では電極中心直下の地下構造を浅い部分から深い部分まで調べるときに用いる。また, 電極間隔をある長さ

固定し, 電極中心を水平方向に移動させながらデータを取得する方法を水平探査という。学生実習では垂直探査, 水平探査ともに行っているが, この稿では垂直探査のみについて触れるにとどめる。

複数の電極間隔で垂直探査を行うと, 水平成層構造を仮定して地下の比抵抗構造解析ができる。横軸に電極間隔, 縦軸に見掛比抵抗をとったときの二層構造に対する種々の標準曲線(理論曲線)を用意し, 得られたデータに最もよく合う曲線を見つける方法が伝統的に用いられてきた。この実測データを両対数のトレーシングペーパー上に描き, 標準曲線に重ね合わせながら解析する方法をカーブマッチング法と呼んでいる。三層構造以上の解析に対しては, 等価層の原理をもとに, 補助曲線を用いて解析する。

学生実習は 3 年次の学生が対象であるため, 計算機による複雑な計算を課するのは難しく, このカーブマッチング法による構造解析をレポートとして課している。

本来両対数トレーシングペーパーに実測データを写し取って解析するのがカーブマッチング法であるが, カーブマッチング法を Visual Basic 上で行うプログラムを作成した⁽³⁾。この稿のデータ解析にもこのカーブマッチング法自動化プログラムを用いている。

なお, 水平成層構造の解析は現在ではリニアフィルター法⁽⁴⁾が主流で, この方法を用いると迅速かつ正確に計算を行うことができる^{(5),(6)}。

3. 観測の概要

手形山は秋田市街の東側にあり, 標高 100m ほどの山頂付近には遊歩道を通じ, 自然豊かな公園として利用されている。図 2 に手形山山頂付近の地図と, 代表的な観測点を示す。なお, 図 2 中の南西部にある三角点の位置は北緯 $39^\circ 44' 25.62''$, 東経 $140^\circ 08' 26.19''$ (WGS84 座標系, ハンディ GPS による) である。

図 2 には代表的な観測点として 6 地点を選んだ。図 2 の範囲外で測定を行った年もあるが, ここでは手形山山頂付近の観測点のみを示す。毎年, 同じような場所で測定を行うので, 2004 年～2006 年の観測点はこの 6 つに集約することができる。観測点は垂直探査を行った場所を示すが, 垂直探査の中心点を黒丸で, 電極配置の延長方向を太い実線で示した。中心点付近に示した「411」, 「61S」などの記号は, 観測点の名前を示す。3 つの数字のうち, 最初のもは観測した年を示す, 4 であれば, 2004 年, 6 で

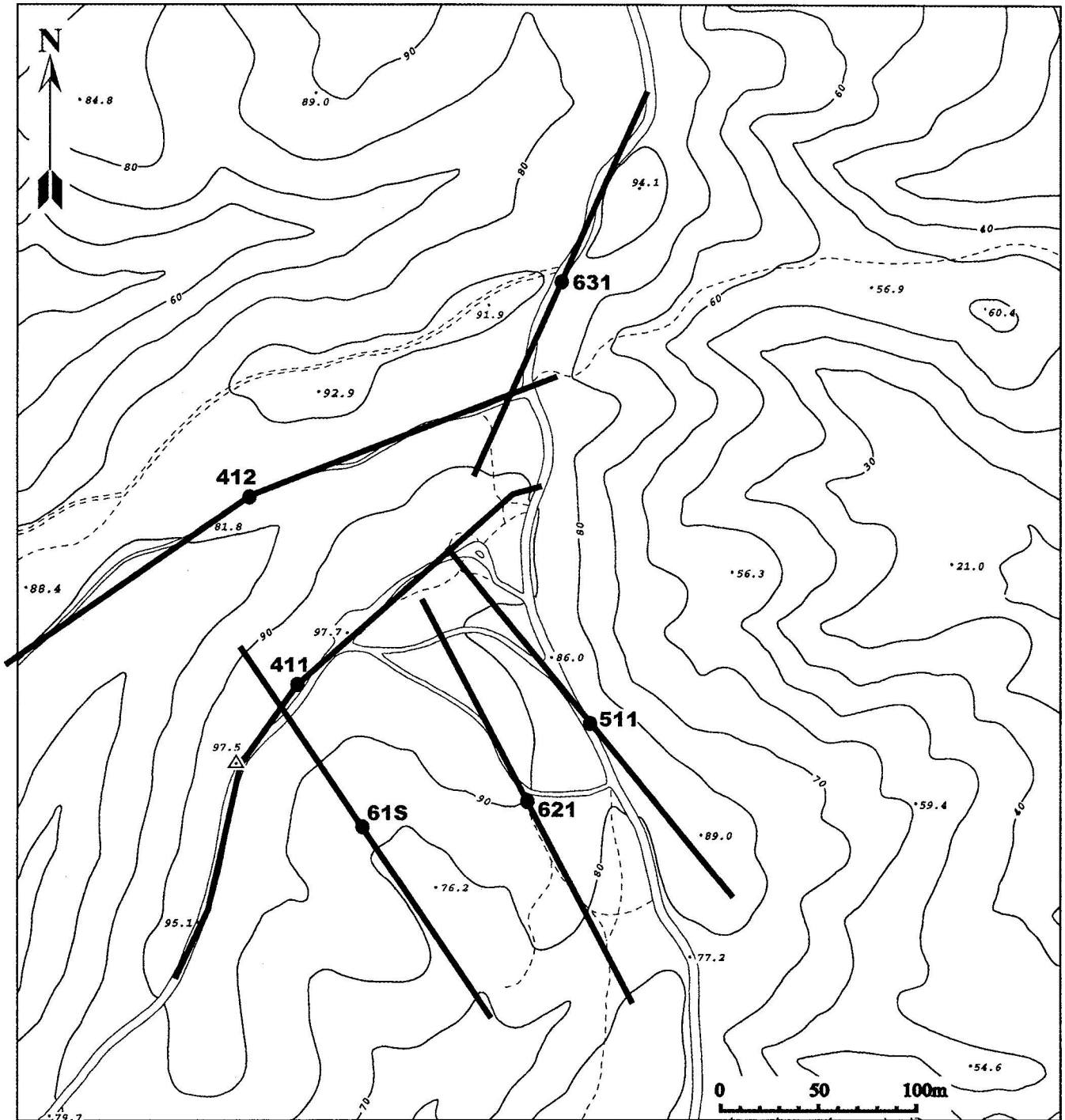


図2 手形山山頂付近の地図と代表的な電気探査の観測点。垂直探査の中心を黒丸で、電極配置の延長方向を実線で示した。

応用地球物理学実験 I		電気探査 (垂直探査)				
測定日時	2006年6月6日(火)	天候	晴れ	測定場所	手形山	
班名	3	測線名	3-1垂直	電極配置	ウェンナー法	
開始時刻/終了時刻	9:40 ~ 12:00	記録者	佐々木 洋治			
測定機器	McOHM Model-2115	STACK	4 回			
備考:						($\pi=3.14159$)
電位電極(内)位置 OP ₁ or OP ₂ (m)	電流電極(外)位置 OC ₁ or OC ₂ (m)	電極間隔 a (m)	電流値 I (mA)	電位差 V (mV)	抵抗値 R (Ω)	見掛け抵抗 $\rho_a = 2\pi a R$ (Ωm)
0.10	0.30	0.20	1.00	149	149.4	187.7414
0.15	0.45	0.30	1.00	123	123.5	232.7918
0.25	0.75	0.50	1.00	72.9	72.76	228.5821
0.35	1.05	0.70	1.00	57.0	57.03	250.8308
0.50	1.50	1.00	1.00	38.5	38.57	242.3423
0.75	2.25	1.50	1.00	22.6	22.64	213.3767
1.00	3.00	2.00	1.00	14.6	14.66	184.2228
1.50	4.50	3.00	1.00	6.21	6.214	117.1310
2.00	6.00	4.00	1.00	3.64	3.639	91.4531
2.50	7.50	5.00	1.00	2.20	2.204	69.2406
3.50	10.50	7.00	1.00	1.06	1.064	46.7531
4.50	13.50	9.00	1.00	0.62	0.624	35.2863
5.00	15.00	10.00	1.00	0.52	0.522	32.7982
6.00	18.00	12.00	1.00	0.39	0.392	29.5561
7.50	22.50	15.00	1.00	0.26	0.262	24.6969
9.00	27.00	18.00	1.00	0.15	0.194	21.9409
10.00	30.00	20.00	1.00	0.15	0.157	19.7291
12.50	37.50	25.00	1.00	0.09	0.097	15.2367
15.00	45.00	30.00	1.00	0.05	0.082	15.4566
16.00	48.00	32.00	1.00	0.07	0.069	13.8733
17.50	52.50	35.00	1.00	0.12	0.122	26.8292
20.00	60.00	40.00	1.00	0.25	0.254	63.8371
22.50	67.50	45.00	1.00	0.05	0.049	13.8544
25.00	75.00	50.00	1.00	0.03	0.032	10.0531

不採用

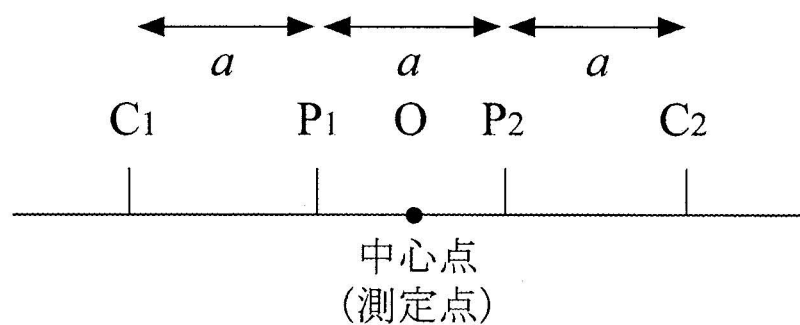


図3 垂直探査のデータシートの一例。電極間隔，電流値，電位差，見掛け抵抗の値を記入する。下方の図はウェンナー電極配置の略図。

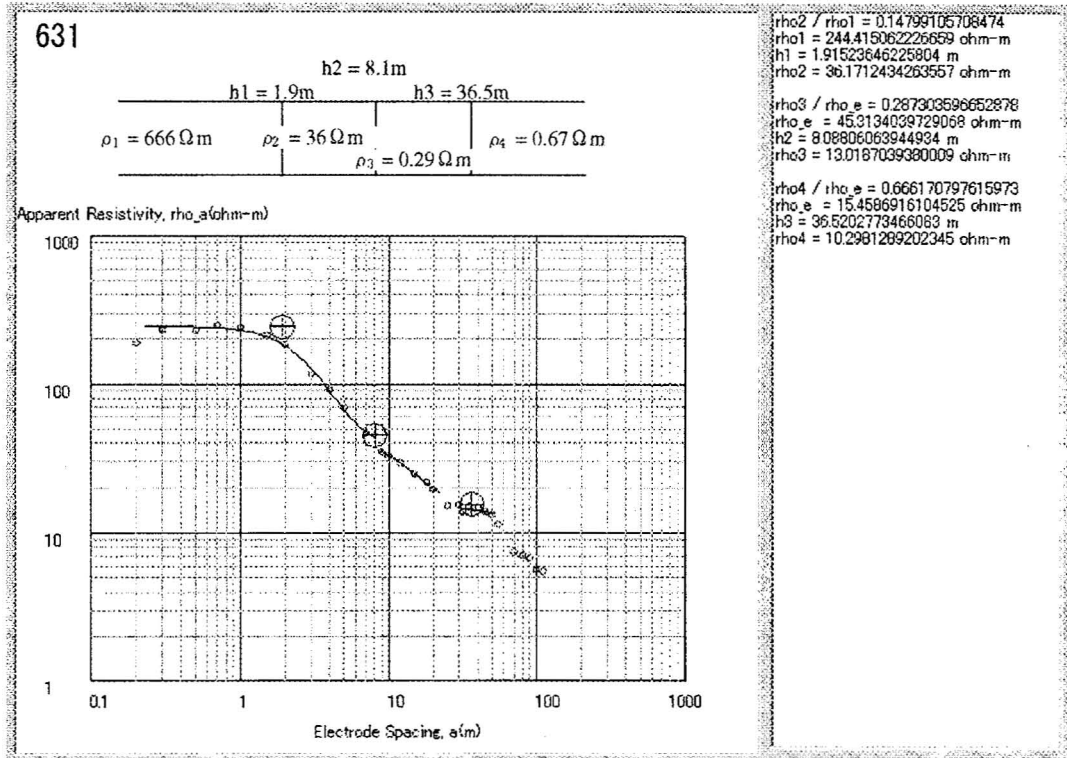


図4 観測点 631 の解析結果.

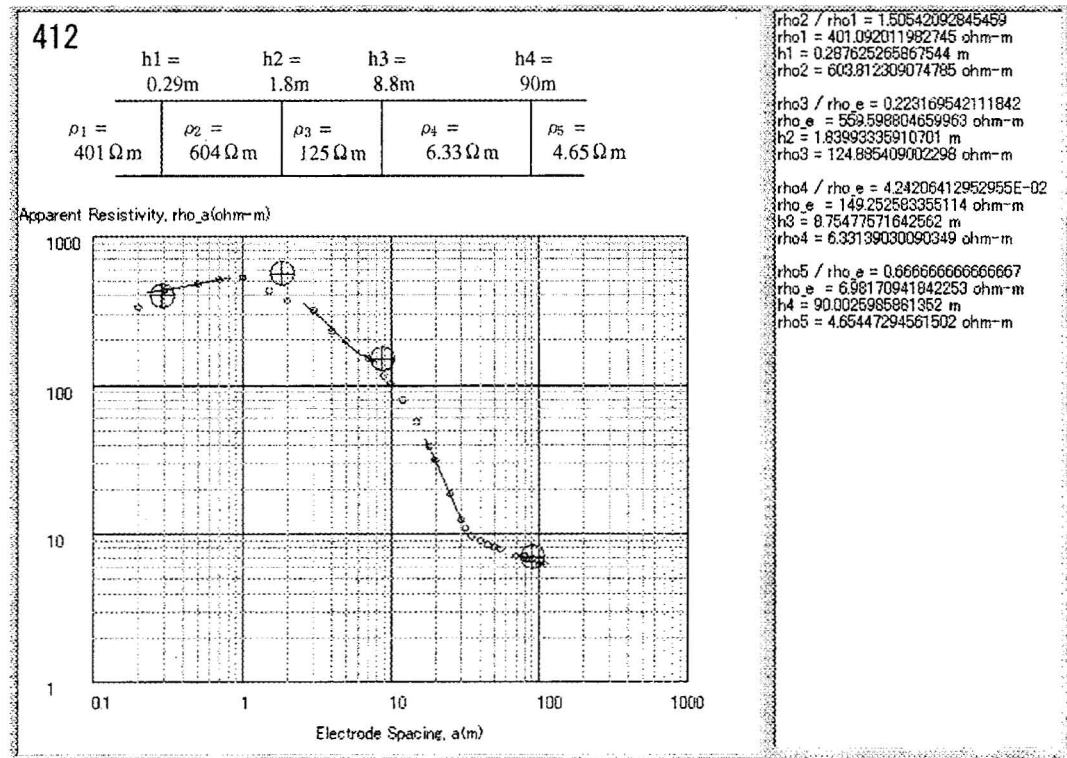


図5 観測点 412 の解析結果.

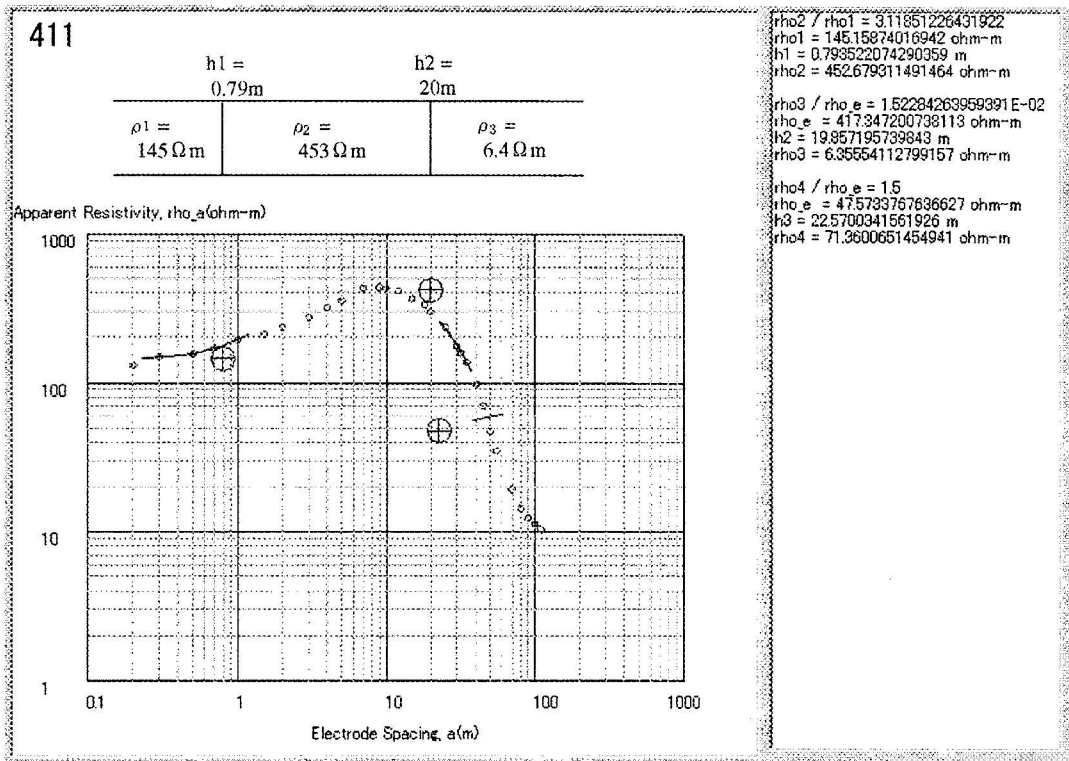


図 6 観測点 411 の解析結果.

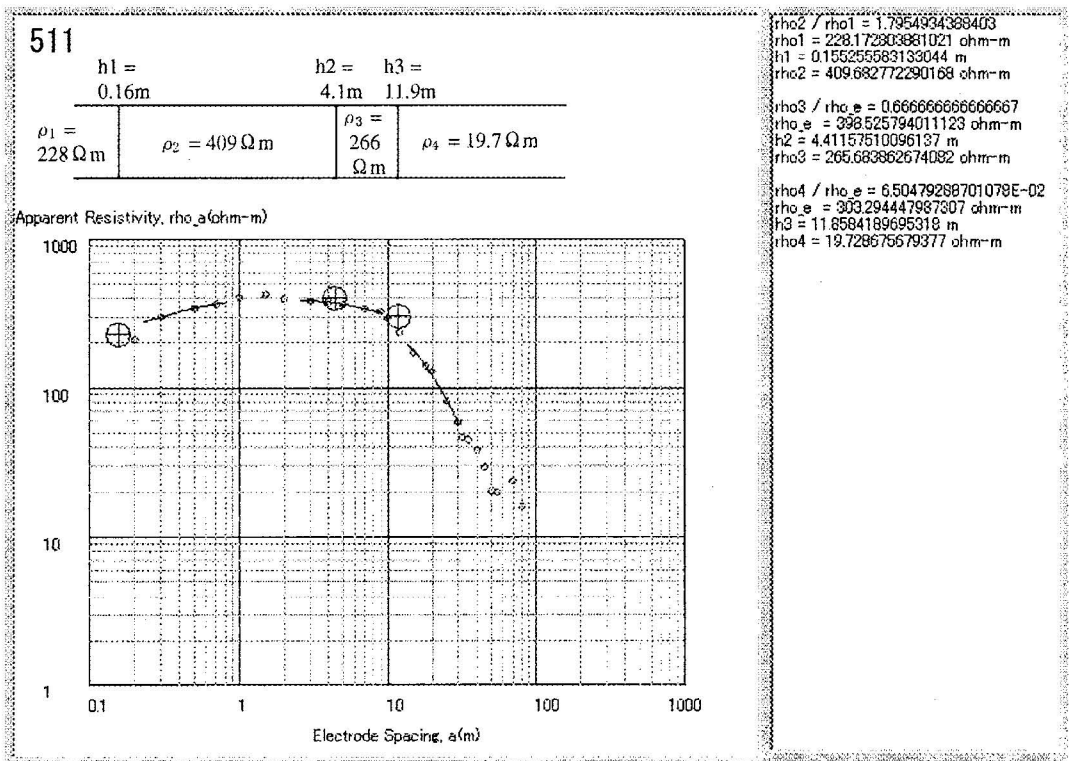


図 7 観測点 511 の解析結果.

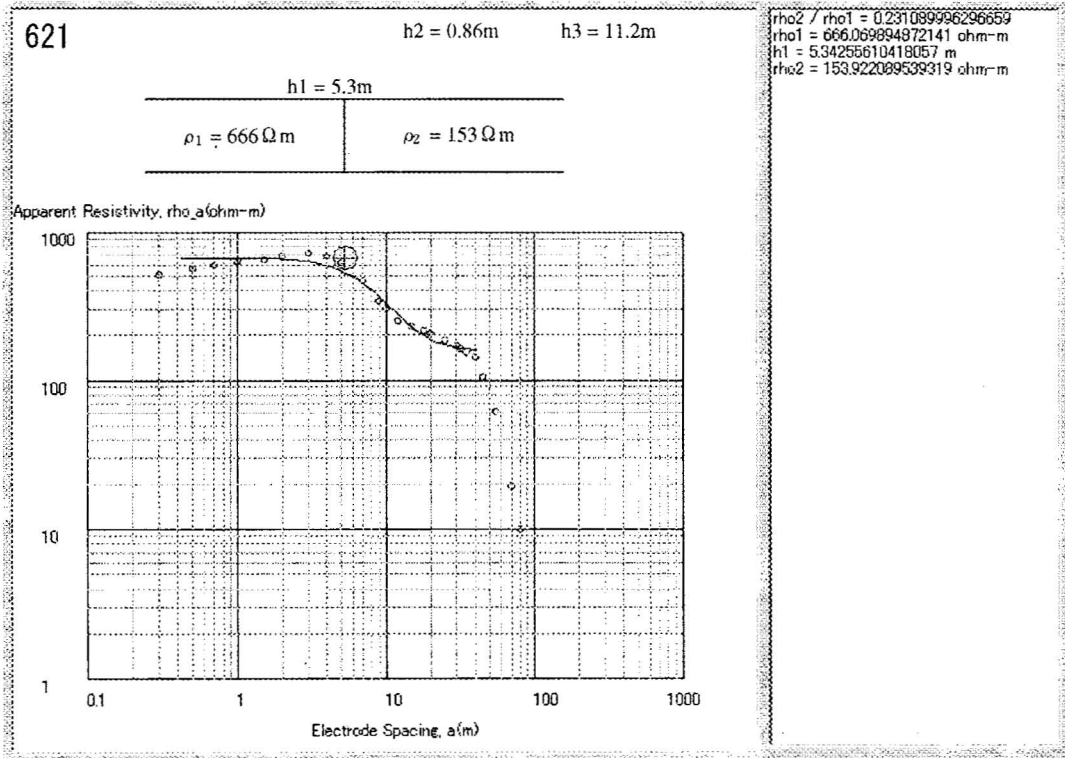


図8 観測点 621 の解析結果.

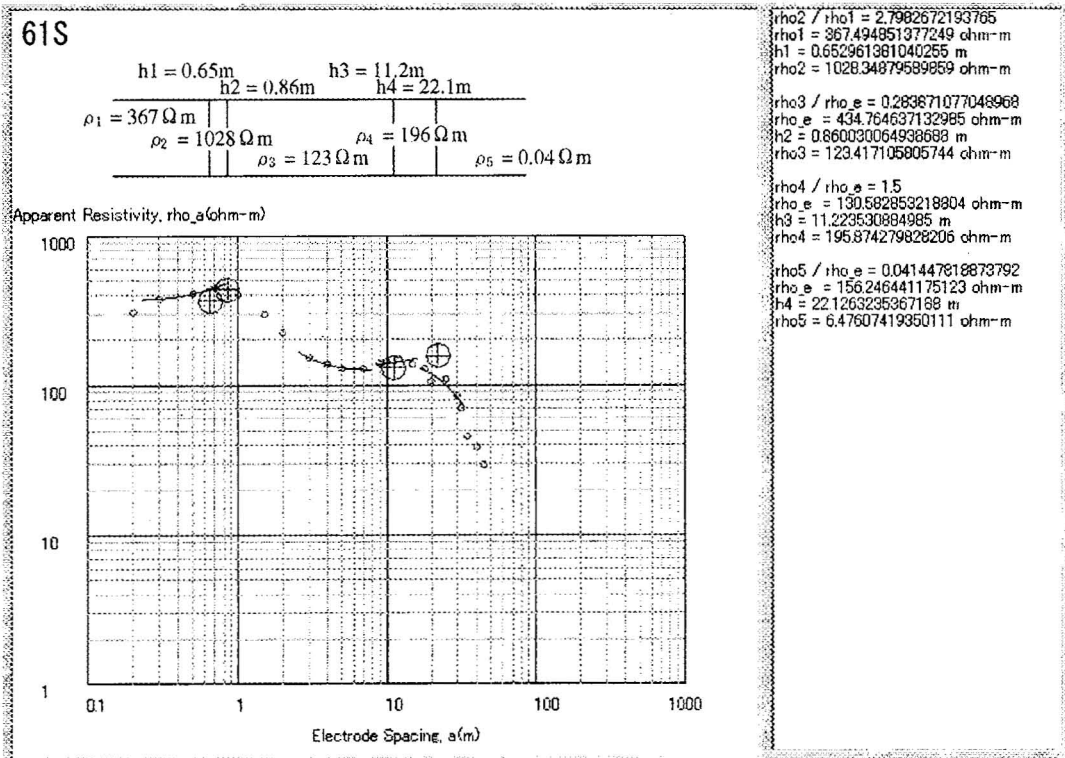


図9 観測点 61S の解析結果.

あれば 2006 年である。例年、25 人ほどの学生を 3 つの班に分けて実習を行うが、観測点の名前の 2 番目の数字は、1 班、2 班、3 班などと分かれた班の番号を示す。観測点名の最後の数字（文字）はその年のその班の垂直探査の番号である。S というのは各班共通の測線という意味で付した。例えば、「631」という観測点であれば、2006 年の 3 班の 1 番目の垂直探査測点ということになる。

実習で実際に用いているデータシートとその記入例を図 3 に示した。実験に関するメモと、電極間隔、電流値、電位差、ウェンナー法による見掛比抵抗の値を現場で書き込んでゆく。また、両対数グラフに実測値を記入し、実測曲線がなめらかにつながっているかどうか確認しながら作業を進める。図 3 下方の説明図は図 3 の表の列タイトルの意味を理解する助けになるものである。

4. これまでの結果の概要と展望

手形山の表層は礫・砂・泥よりなる更新世の堆積物及び段丘堆積物からなる⁽⁷⁾。表層の堆積物の他に、手形山山頂付近の遊歩道に敷かれた砂利や、以前スキー場があったために人工的に表層に土砂を入れたことによる影響もあるかもしれない。

ここでは結果を詳しく論じるよりも、結果を記すことに重点をおくことにし、将来のデータ蓄積を待つこととする。

手形山山頂付近では概して、表層付近より深くなるにつれて比抵抗の値が小さくなる傾向がある。どの点でも電極間隔が長くなると見掛比抵抗が $10\Omega\text{m}$ もしくはそれ以下になる。やや深いところでは土砂が圧力により緻密になり、粒子同士の接触の度合いが良くなるのかもしれない。しかし、電極間隔が長くなると電流が拡散してしまい、電位電極で測定できるレベルぎりぎりになっているのも確かで、電極間隔が長いところでは見掛比抵抗が見かけ上、低くなっている可能性もある。実際、観測点 412 を除き、電極間隔が長い部分について、見掛比抵抗が余りに小さく、標準曲線をあてはめることが不可能であった（図 4～9）。すなわち、最深部の比抵抗が $0\Omega\text{m}$ の標準曲線が示す理論見掛比抵抗値よりも、観測見掛比抵抗値の方が低くなってしまふ。これは実際の地下構造が水平成層構造では説明できないせいかもしれない。

個々の観測点での結果をよく見れば、それぞれ個性があるが、観測点 61S の点のみやや実測曲線の形が違う。電極間隔の短い方から長い方に（横軸の右

方向）向かって、まず見掛比抵抗が上がり、いったん下がってまた上がっている。この地点は地形が急勾配であるので、地面が水平でないことも影響している可能性がある。観測点 61S に近い 411 も他の 4 つの観測点における実測曲線とはやや異なり、電極間隔 10m 付近で見掛比抵抗の極大がある。観測点 411 から 61S にかけて漸移的に構造が変化しているようにも見える。

以上、これまで得られている手形山山頂付近の代表的な電気探査による結果の概要を図示した。これらの結果を踏まえ、手形山付近のさらに詳細な比抵抗構造を得るための観測点を考慮することができる。ここでは最近 3 年間のデータのみを対象としたが、さらに過去に遡ってデータを吟味することが可能であるし、将来、さらにデータが蓄積されれば、2 次元、3 次元解析も可能になる可能性がある。少なくとも、注意深く観測点を選べば、水平成層構造からさらに進んだ解析をすることができると期待している。

謝辞

執筆者の原稿提出が遅れたのにもかかわらず、本稿の掲載にこぎつけることができました。学部研究報告委員会の方々、短期間で閲読をしていただいた方に篤く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) Wenner, F. (1915): A method of measuring earth resistivity, *Bulletin of the Bureau of Standards*, Vol.12, pp.469-478.
- (2) 佐々宏一・芦田譲・菅野強 (1993): 建設・防災技術者のための物理探査, 森北出版, 219 頁.
- (3) 坂中伸也 (2002): カーブマッチング法による水平成層比抵抗構造解析の自動化, 秋田大学工学資源学部研究報告, 第 23 号, 1-11 頁.
- (4) Koefoed, O. (1979): *Geosounding principles 1 — Resistivity sounding measurements*, Elsevier Scientific Publishing Company, p.276.
- (5) 牛島恵輔・水永秀樹・加藤昭彦 (1987): パソコンによる電気探査データの解析, 物理探査, 第 40 巻第 6 号, 423-435 頁.
- (6) 高野華澄 (1998): フィルター処理を用いた電気探査比抵抗法の解析, 秋田大学大学院鉱山学研究科平成 9 年度修士論文, 117 頁.
- (7) 藤岡一男・大沢稔・高安泰助・池辺穰 (1977): 秋田地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 75 頁.