

地質構造把握のための電気探査法
の適用性試験及び評価

1990年8月

応用地質株式会社

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団
技術協力部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technical Evaluation and Patent Office, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

地質構造把握のための電気探査法
の適用性試験及び評価

1990年8月

応用地質株式会社

地質構造調査のための 電気探査法の適用性試験及び評価

小黒譲司* 吉村正義**

寺田幸次*** 松波万一郎***

要 旨

今回、貯蔵工学センター候補地（北海道幌延町）において、電気探査の地質構造調査への適用性を把握するため、新しい手法である比抵抗映像法を実施した。探査規模は、測線長900mの1測線で、測定最大深度は900mである。現地では用地上の制約があり、測線や遠電極を理想的な配置に設けられなかったが、成果は同手法の適用性を評価する上で、満足のいく結果が得られた。すなわち、今回の探査結果を既往の地質調査資料と対比しつぎのような評価を得た。

①地表付近では、細かな層相の変化を識別できる。

②深度が深くなると細かい識別はできないが更別層や勇知層といった大局的な地層ないし物性境界を把握することができる。

この他、既往の電気検層結果と矛盾のないことや、ケーシングの影響に対する知見とか精度に関する知見などについても得ることができた。最後に、今回の成果をふまえ深部探査に適用しうる電気探査法について、いくつかの手法を提案した。

本報告書は、応用地質株式会社が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：010D220

事業団担当部課および担当者：環境技術開発推進本部地層科学研究グループ（川濱隆司）

*: 応用地質株式会社 東京事業本部、**: 同 本社物理計測部、***: 同 地盤工学研究所

AUGUST, 1990

An Experiment and Evaluation of Electrical Survey
to Study the Geological Structure

Joji Oguro*, Masayoshi Yoshimura**

Koji Terada***, Man-ichiro Matsunami***

Abstract

At Horonobe site in Hokkaido, we carried out a new electrical exploration called "Resistivity Image Profiling". The purpose of this project is to evaluate the applicability of this method to the exploration of geological structure. The length of a measuring line was 900 meter, therefore the maximum measuring depth is 900 meter.

Owing to "No Admittance" area, we could not make the measuring line straight, and we could not have enough distance for "far-electrodes".

In spite of above restriction, the result of Resistivity Image Profiling was agree with the result of electrical logging.

Our evaluation for this method are as follows.

- 1) In the shallow depth, this method gives high resolution result. We can detect the facies of sand and clay (of 10 meter thick).
- 2) In the deep area, the resolution of this method is not so high. But we can detect the boundary of "Sarabetsu-So" and "Yuchi-So" at depth of 350 meter.

Futhermore ,we could get the knowledge about the effect of steel casing to the exploration result, and about accuracy of this method. Finally, in this report we recommend some other electrical methods which are applicable to deep structure.

Work performed by OYO corporation under construct with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

PNC Liaison:Geosciences Reseach Program Radio Active Waste Management Project (Takashi Kawahama)

*:Tokyo branch office,OYO corp., **:Head office,OYO corp., ***:Geotechnical reseach institute, OYO corp.

目 次	ページ
1. まえがき	1
2. 電気探査	3
2-1 電気探査（比抵抗映像法）の概要	3
2-2 測線配置	4
2-3 測定方法	4
2-4 解析方法	9
2-5 解析結果	11
3. 考 察	13
3-1 地質状況についての新たな知見	13
3-2 今後の実施上の課題	14
3-3 地質構造調査への適用	16
4. あとがき	19
巻 末 電気探査（比抵抗映像法）測定データ一覧	3葉
見掛け比抵抗分布図（10mピッチ、50mピッチ）	1葉
主な現場写真（3枚）	1葉

図 表 一 覧

図-1 調査地案内図	2
図-2 比抵抗映像法の実施例	3
図-3 測線配置図	5
図-4 比抵抗映像法の測定方法	6
図-5 解析手順流れ図	10
図-6 比抵抗分布断面図（電極間隔10mピッチ）	12
図-7 比抵抗分布断面図（電極間隔50mピッチ）	12
図-8 地質断面図（既往調査資料）	17
図-9 ケーシング影響の検討図	18
表-1 測点の座標・標高一覧	7
表-2 使用機器一覧	8

1. まえがき

本調査は、動力炉・核燃料開発事業団のご依頼で応用地質株式会社が実施した。ここに、その成果をとりまとめてご報告する。以下に調査の概要を示す。

調査地-----北海道天塩郡幌延町開進（図-1参照）

調査目的-----貯蔵工学センター候補地である幌延サイト内の地質構造を把握するために電気探査比抵抗映像法を実施し、同地域における電気探査法の適用性と限界を検証すること、さらに、今後の研究を進める上で望ましい調査手法の在り方を検討することにある。

調査内容-----電気探査比抵抗映像法（2極法）

○電極間隔10mピッチ・最大電極間隔200 m・測定区間長900 m

○電極間隔50mピッチ・最大電極間隔900 m・測定区間長900 m

調査期間-----自 平成2年4月6日

至 平成2年8月31日

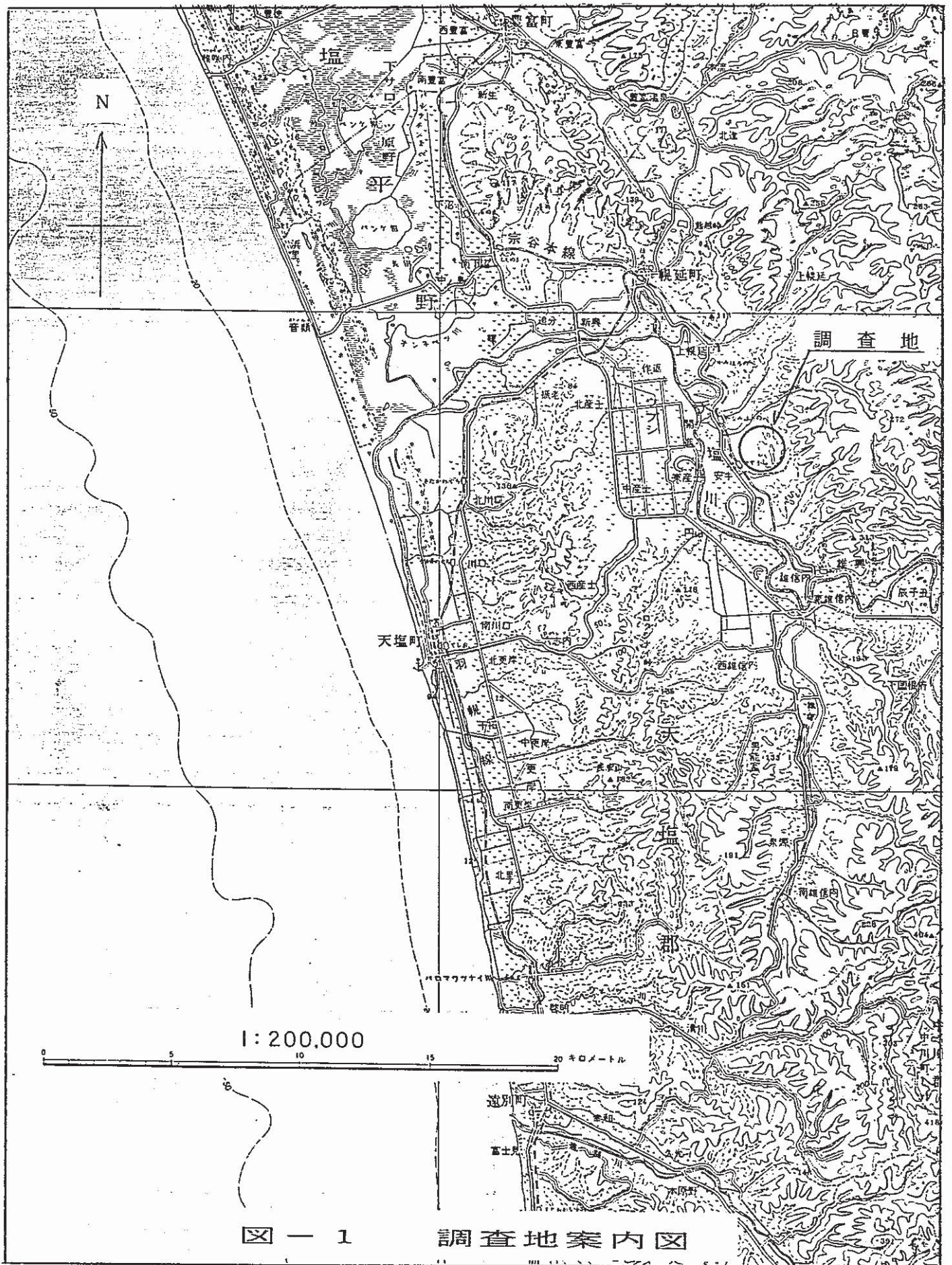
調査関係者-----総 括 小黒譲司、吉村正義

技術指導 土井和巳

測 定 松波万一郎、坂下 晋、市川義盛、外3名

解 析 坂下 晋、松尾 淳、寺田幸次

報告書作成 寺田幸次、松波万一郎



図一 1 調査地案内図

2. 電気探査

2-1 電気探査（比抵抗映像法）の概要

比抵抗映像法は、2極法電極配置により測定したデータをコンピュータで自動解析し地下の比抵抗構造を求め、結果をカラー断面表示する方法である。

従来から見掛け比抵抗を断面図に表現し、地下の比抵抗構造を大まかに把握しようとする目的の、擬似断面法という一種の表示上の方法がある。これによる場合、真の比抵抗分布と大きく異なった結果となることもしばしばである。これに対し、比抵抗映像法は、新しい解析手法により真の比抵抗分布を求めることができ、地質構造をより容易に解釈することができる。

図-2に実例を示す。上段が擬似断面図（見掛けの比抵抗分布）で、中段が比抵抗映像法による真の比抵抗分布を表わす。下段は踏査やボーリング結果をもとに作成した地質断面図である。比抵抗映像法の比抵抗分布から、擬似断面図では読みとれない溶岩の分布をよく判読できることが理解できよう。

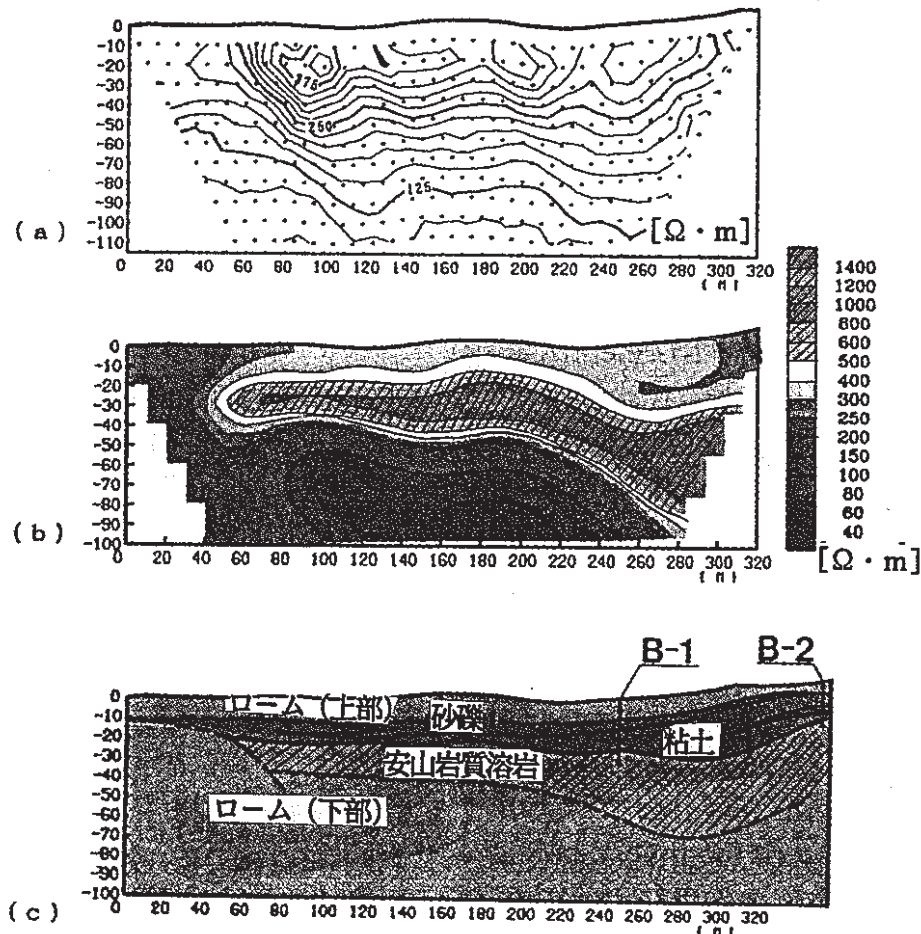


図-2 比抵抗映像法の実施例

2-2 測線配置

電気探査の測線配置を図-3に示す。測線は、現道を利用することや牧草地の端部を利用すること等の制約から、くの字形に設置した。ただし、測点は、測線の両端部を結んだ方向の線上で水平距離10m間隔となるような位置に設けた。また、遠電極（ C_2 、 P_2 ）は指定された用地内で図-3中に印した位置に設置した。

電気探査測点（遠電極を含む）の座標・標高一覧を表-1に示す。

2-3 測定方法

測定は、図-4に示すように遠電極（固定電極）の C_2 と P_2 を測線から十分離して設置し、移動電極の C_1 と P_1^j を測線上の所定の位置に配置する。まず、測線始点の電極を C_1 とし、これに続く電極を P_1^1 、 P_1^2 、・・・とする。そして、 C_1 と C_2 間に電流を流し、 P_1^j と P_2 間の電位を順次測定する。次に C_1 を2番目の電極に移動し同様に電位を測定する。そして、最後のひとつ手前の電極が、 C_1 となるまでこの操作を繰り返す。今回の測定では、測線の始点と終点を結ぶ線上に投影された C_1 と P_1^j の間隔が10m、20m、30m、・・・、190m、200mとした場合（10mピッチ）と、その間隔が50m、100m、・・・、850m、900mとした場合（50mピッチ）の2通りの測定を実施した。前者は深度200mまでの比較的深度の浅い部分の比抵抗分布をやや詳細に把握すること、後者は深度900mまでの比抵抗分布の概要を把握することを目的としている。

なお、測定装置としては深度1000m以上の探査が可能な SYSCAL-R2 装置一式を用いた。

表-2に使用機器の一覧を示す。

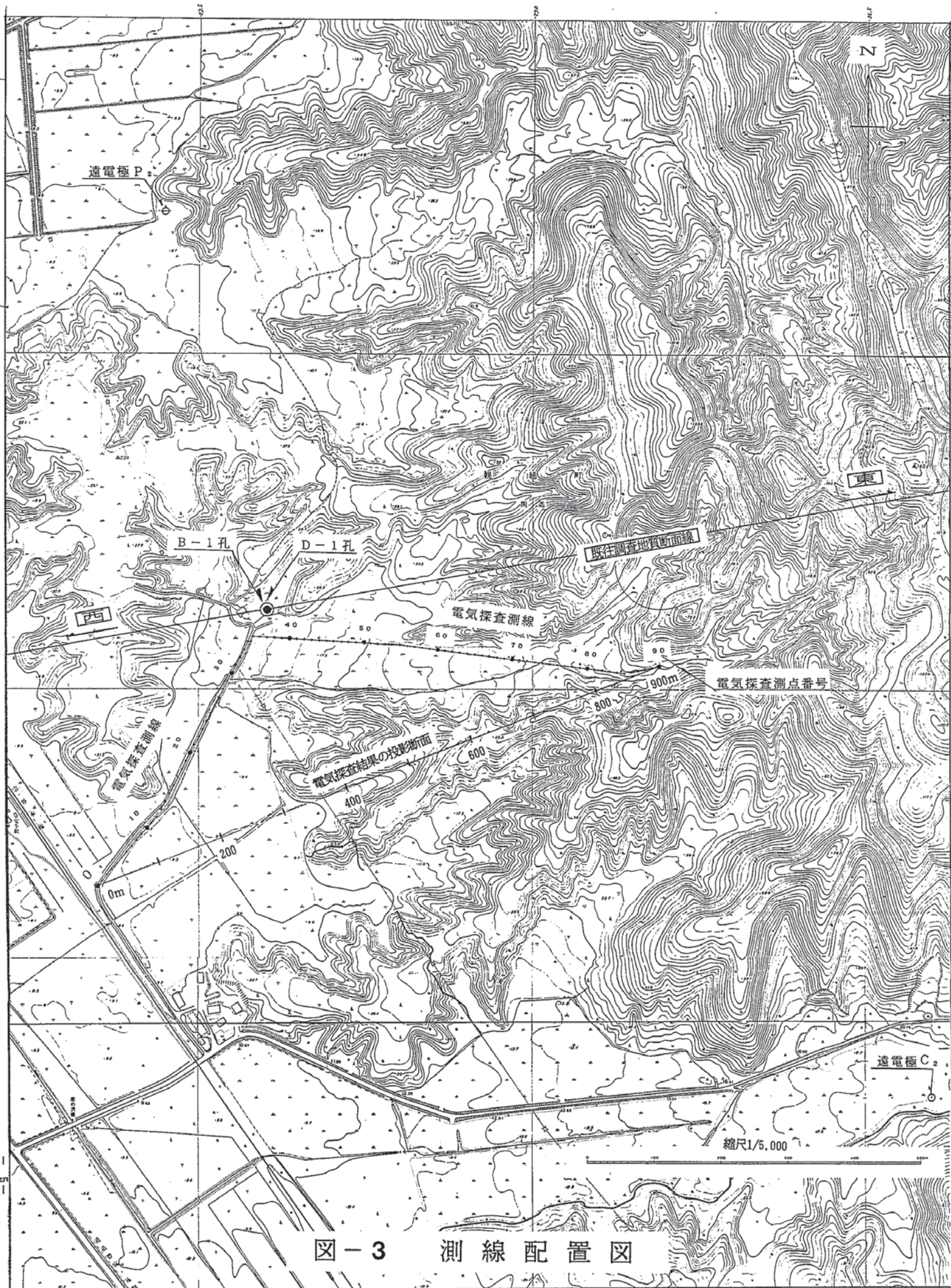


図-3 測線配置図

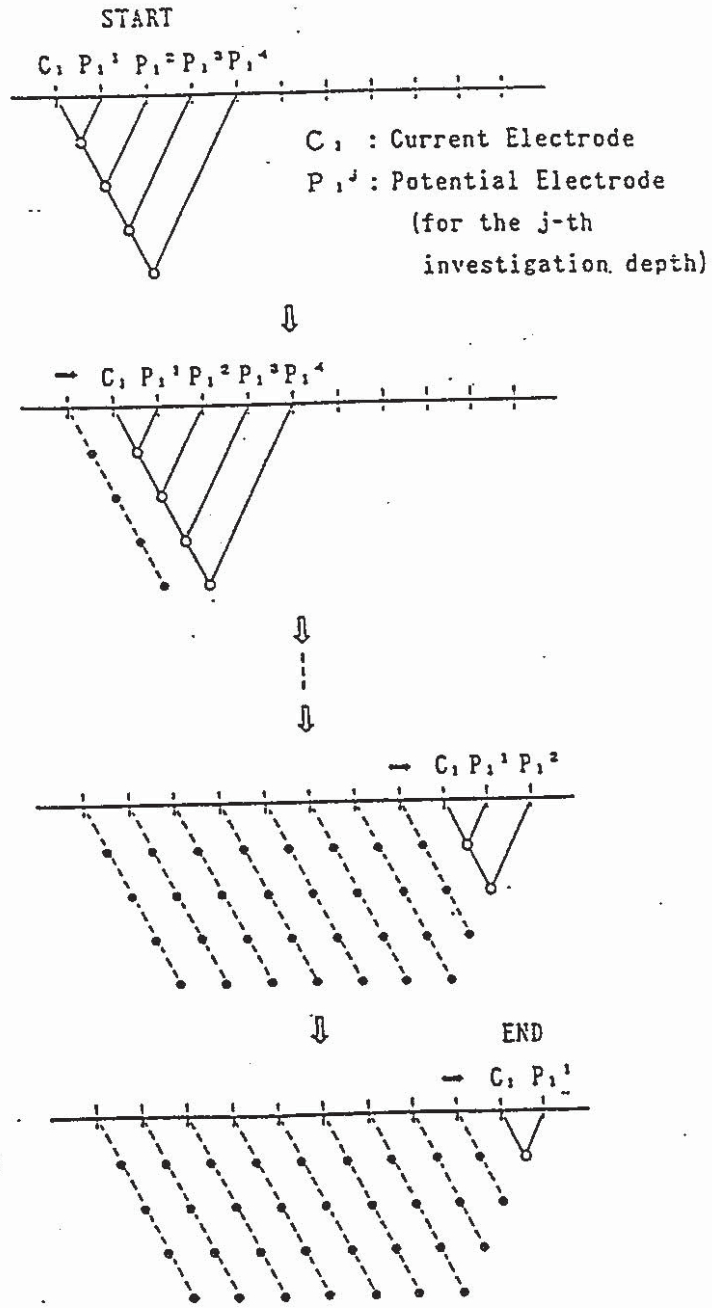


図-4 比抵抗映像法の測定方法

表 - 1 測点の座標・標高一覧

測点 NO	緯距 (X)	経距 (Y)	標高 (m)	測点 NO	緯距 (X)	経距 (Y)	標高 (m)
0	105.2087	-27.6513	9.00	46	105.5717	-27.2978	18.26
1	105.2174	-27.6439	8.91	47	105.5711	-27.2869	18.72
2	105.2260	-27.6365	8.84	48	105.5704	-27.2759	18.90
3	105.2346	-27.6292	8.87	49	105.5697	-27.2649	19.33
4	105.2433	-27.6218	9.01	50	105.5691	-27.2540	19.94
5	105.2520	-27.6143	9.06	51	105.5684	-27.2430	20.80
6	105.2606	-27.6069	9.08	52	105.5677	-27.2321	21.63
7	105.2693	-27.5995	9.20	53	105.5670	-27.2211	22.30
8	105.2779	-27.5922	9.05	54	105.5664	-27.2101	22.85
9	105.2866	-27.5848	9.01	55	105.5655	-27.1990	23.45
10	105.2952	-27.5774	9.00	56	105.5641	-27.1878	23.84
11	105.3039	-27.5700	8.99	57	105.5627	-27.1765	24.41
12	105.3125	-27.5627	9.01	58	105.5614	-27.1653	25.04
13	105.3219	-27.5555	8.99	59	105.5600	-27.1541	25.24
14	105.3338	-27.5493	8.96	60	105.5587	-27.1438	25.46
15	105.3456	-27.5432	8.81	61	105.5572	-27.1315	25.86
16	105.3575	-27.5370	9.05	62	105.5558	-27.1203	26.72
17	105.3693	-27.5309	9.19	63	105.5545	-27.1091	27.13
18	105.3812	-27.5247	9.29	64	105.5531	-27.0979	27.57
19	105.3930	-27.5185	9.18	65	105.5517	-27.0866	28.15
20	105.4049	-27.5123	9.27	66	105.5503	-27.0753	28.37
21	105.4167	-27.5062	9.29	67	105.5489	-27.0641	29.17
22	105.4286	-27.5000	9.28	68	105.5476	-27.0529	29.40
23	105.4404	-27.4939	9.32	69	105.5462	-27.0416	29.61
24	105.4522	-27.4877	9.41	70	105.5448	-27.0304	29.86
25	105.4640	-27.4816	9.52	71	105.5443	-27.0190	30.15
26	105.4759	-27.4754	9.40	72	105.5420	-27.0078	30.63
27	105.4877	-27.4692	9.66	73	105.5406	-26.9965	30.72
28	105.4996	-27.4630	9.99	74	105.5393	-26.9853	31.80
29	105.5114	-27.4569	10.51	75	105.5379	-26.9741	32.63
30	105.5233	-27.4507	10.92	76	105.5365	-26.9628	31.93
31	105.5351	-27.4446	10.92	77	105.5351	-26.9516	32.20
32	105.5470	-27.4384	11.29	78	105.5337	-26.9403	34.32
33	105.5588	-27.4322	11.32	79	105.5323	-26.9291	34.28
34	105.5707	-27.4260	11.51	80	105.5310	-26.9179	34.93
35	105.5791	-27.4185	12.56	81	105.5296	-26.9066	36.71
36	105.5784	-27.4075	13.22	82	105.5282	-26.8953	38.23
37	105.5778	-27.3965	13.74	83	105.5269	-26.8841	38.68
38	105.5771	-27.3856	14.18	84	105.5255	-26.8729	39.62
39	105.5764	-27.3746	14.76	85	105.5241	-26.8615	40.18
40	105.5758	-27.3637	15.44	86	105.5253	-26.8513	39.54
41	105.5751	-27.3527	15.73	87	105.5275	-26.8414	39.22
42	105.5744	-27.3417	16.22	88	105.5298	-26.8316	39.78
43	105.5738	-27.3308	16.74	89	105.5321	-26.8218	37.48
44	105.5731	-27.3198	17.07	90	105.5344	-26.8119	38.03
45	105.5724	-27.3088	17.47				
遠置極G2	104.8830	-26.4000	18.0	遠置極P2	106.2130	-27.5500	9.0

表-2 使用機器一覧

名称	型番	仕様	数量	製作会社
電気 探査器	SYSCAL -R2	トランスミッタ部 通電電圧 : 外部電源による 通電電流 : 最大 1.5A 電流値測定精度 : 0.3% 分解能 : 0.1 mA 通電周期 : 800msec ~40sec	1台	B.R.G.M.社 (フランス)
		レシーバ部 電位差測定精度 : 0.3% 分解能 : 0mV~8mV では 10 μ V 8mV~4V では 100 μ V 自然電位補償 : 最大 1V 入力インピーダンス : 1M Ω		
		スタッキング回数 : 3~99回		
昇圧器	1000W DC-DCコンバータ	通電電流 : 最大 1.5A 通電電圧 : 50, 100, 200, 400, 700V 最大出力 : 1000W	1台	B.R.G.M.社 (フランス)
	250W DC-DCコンバータ	通電電圧 : 110, 220, 330, 440, 550, 660V 最大出力 : 250W	1台	B.R.G.M.社 (フランス)
コネク タボックス		成分数 : 104ch 入力 : 26chコネクタ×4 出力 : 1ch端子×104	1台	応用地質株式会社
テークアウト ケーブル		成分数 : 24ch 電極間隔 : 5mピッチ	2本	応用地質株式会社
中継 ケーブル		成分数 : 26ch		応用地質株式会社
電極		形状 : 直径10mm、長さ500mm 材質 : ステンレス製	40本	応用地質株式会社
遠電極		電極部形状 : 直径25mm、長さ750mm ×5本 ケーブル長 : 2000m	2式	応用地質株式会社
その他	12Vバッテリー (120AH, 24AH) 数台等			

2-4 解析方法

電気探査（比抵抗法）において、通電電流 I （アンペア）と電位差 V （ボルト）は、媒質の比抵抗 ρ （ $\Omega \cdot m = \text{オーム} \cdot \text{メートル}$ ）との間に次の関係がある。

$$V = \frac{I}{2\pi} \cdot \left\{ \frac{\rho_{11}}{C_1P_1} + \frac{\rho_{22}}{C_2P_2} - \frac{\rho_{12}}{C_1P_2} - \frac{\rho_{21}}{C_2P_1} \right\} \text{----- (1)}$$

ここで、 C_1P_1 、 C_2P_2 、 C_1P_2 、 C_2P_1 は各々の電極間の距離を表わし、 ρ_{11} 、 ρ_{22} 、……は、それぞれの電極間での比抵抗を表わす。通常、2極法配置では上式右辺の { } 内の第2項～第4項は分母が無限大とみなせるので省略できて、次のような簡単な式で比抵抗を表わすことができる。

$$\rho = 2\pi \cdot C_1P_1 \cdot \frac{V}{I} \text{----- (2)}$$

この式によって得られる比抵抗 ρ は、電極間の距離に相当する地下の広がりにおける平均的な値で、見掛け比抵抗と呼ばれている。

比抵抗映像法の解析では図-5に示すように、真の比抵抗分布図を得るために二次元自動解析を行なう。はじめに地形補正をおこなうが、本調査地の場合は、ほぼ平坦地形であり地形の凹凸による影響はないため、地形補正は省略した。解析では、まず測定データに感度補正フィルタと称する一種の空間フィルタをかけ、2極法電極配置特有の感度を補正する。この操作によって、地表付近の局所的アノマリーを除去し、データの質の改善をはかる。この基本処理の後、見掛け比抵抗分布を比抵抗構造の初期モデルとして与える。次に、このモデル構造から理論的に計算される見掛け比抵抗値を求め、測定値と理論値との差を用いてモデル構造を修正する。そして、その差が小さくなるまで繰り返し計算を行ない、真の比抵抗分布図を得る。

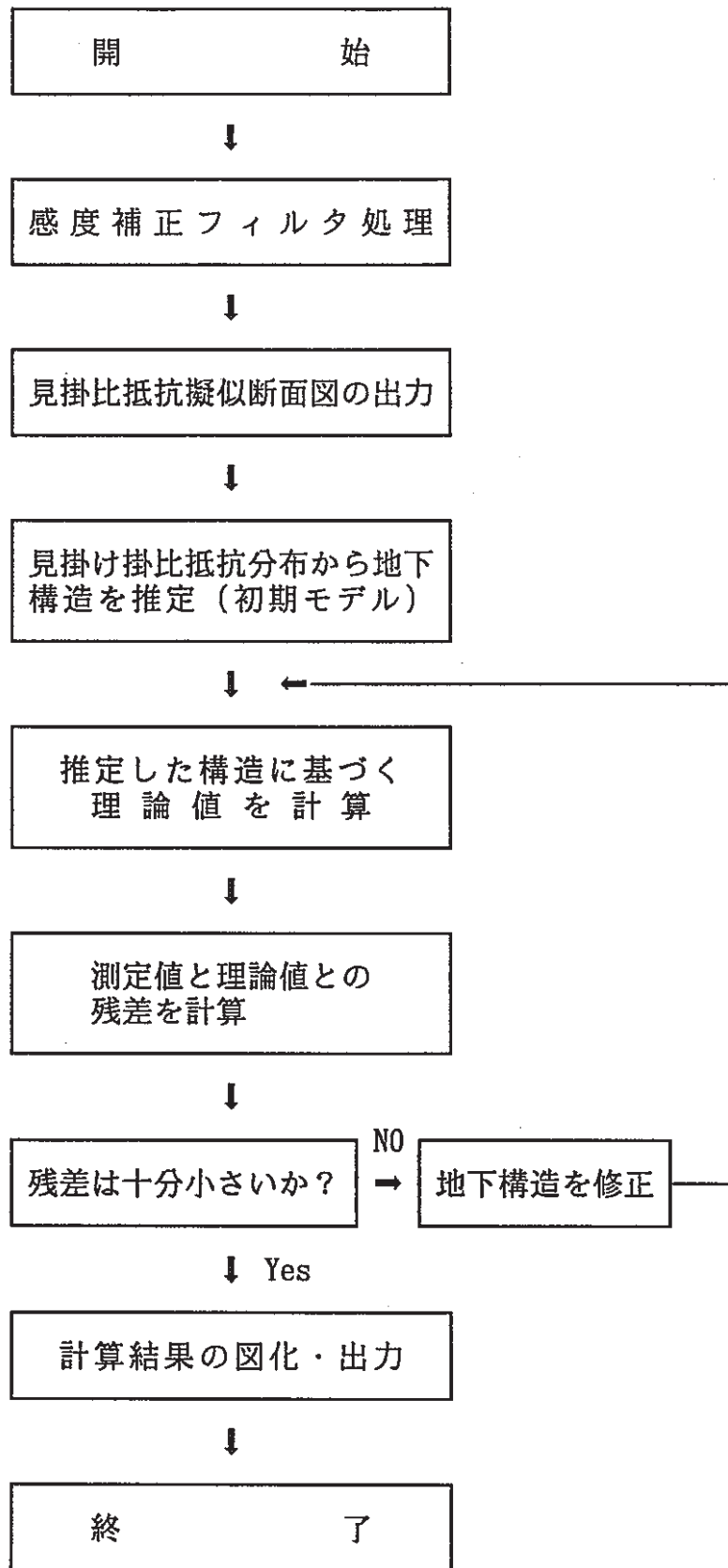


図-5 解析手順流れ図

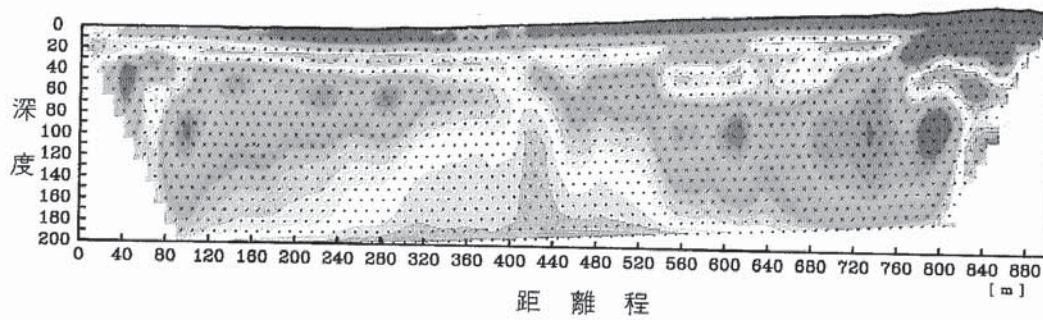
2-5・解析結果

解析の結果を比抵抗分布断面図として図-6、図-7に示す。図-6は電極間隔を10mピッチとし深度200mまで測定したデータを解析したものである。図-7は電極間隔を50mピッチとし深度900mまで測定したデータを解析したものである。なお、今回の測線は「くの字」状となっているため、測線の始点と終点を直線で結んだ断面線上に比抵抗分布を投影し、表現した。

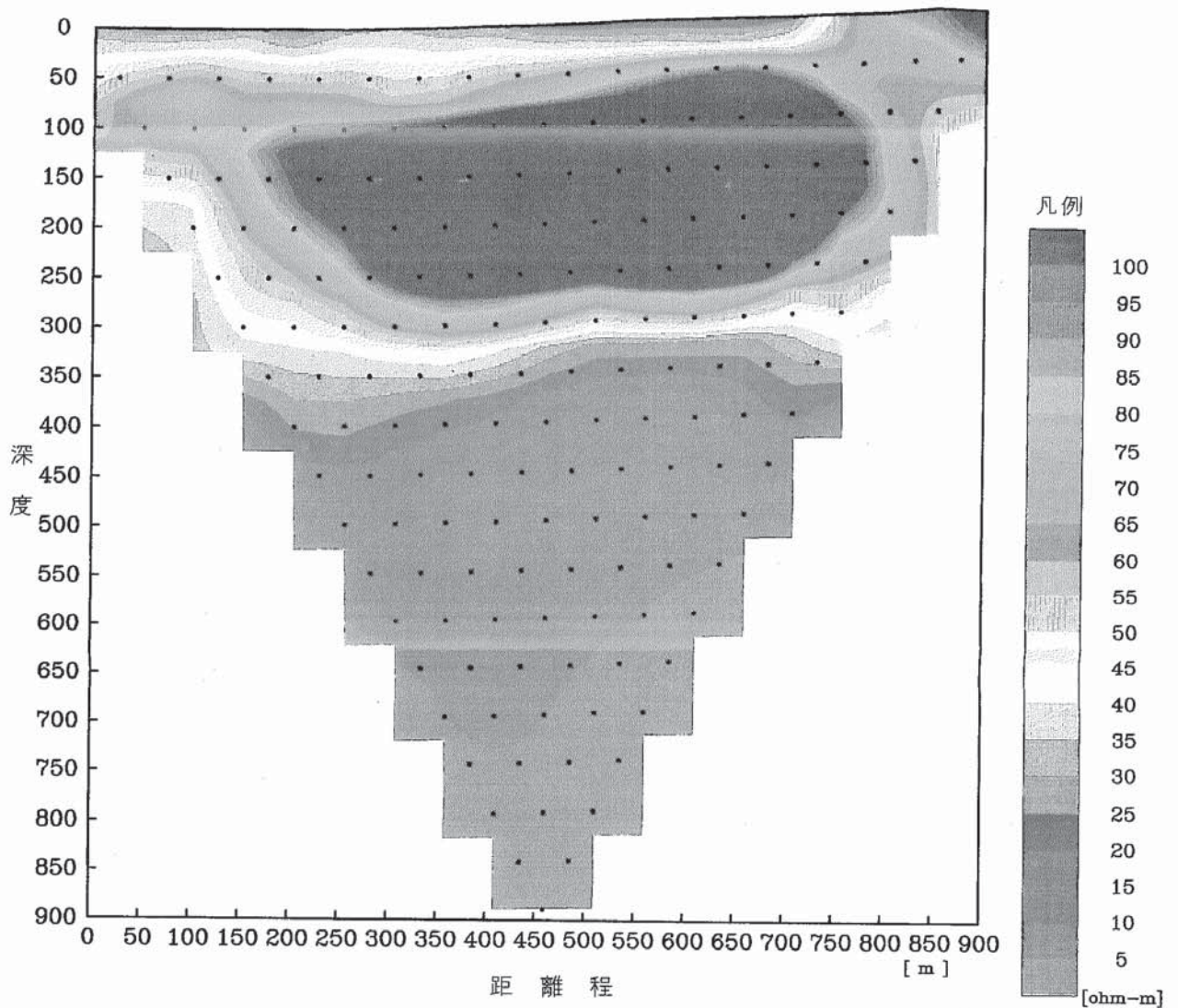
図-6と図-7を比較すると、一見、別な測線における結果のような印象をもつが、考察で述べるように、現地の状況をよく反映した当然の結果となっている。ここでは、自動解析という性格上、解析過程で解析者の経験的判断を加味する余地が全くないために生ずる解析上の傾向を述べてから、その点を留意しながら調査地の比抵抗構造について述べる。

図-6をみると、測点80（距離程800m）の深度70~80m付近に $30\Omega\cdot m$ 前後の低比抵抗部が存在する。これは、電極近傍の局所的なアノマリーが測線の端部でデータが少ないために強調され、それによって地層本来の情報がマスクされてしまった、と考えられる。これは、やや極端に強調されたケースであるが、後述するように、一般論としても断面図上の周辺部は、中心部に比べ信頼度がやや落ちる。このような予備知識をもって図-6、図-7をみると本調査地の比抵抗構造は次のような層構成をなしているとみることができる。

深 度	比 抵 抗	備 考
0m~ 10m	$100\Omega\cdot m$	図-6の深度50m以深はケーシング
10m~ 50m	$40\Omega\cdot m$	の影響を受け、低比抵抗部が未広がり
50m~ 350m	$100\Omega\cdot m$	に分布する。深度50m未満は図-6
350m~ 900m	$10\sim 20\Omega\cdot m$	を、深度50m以深は図-7を参照。



図一六 比抵抗分布断面図 (電極間隔10mピッチ)



図一七 比抵抗分布断面図 (電極間隔50mピッチ)

3. 考 察

3-1 地質状況についての新たな知見

①2-5で述べた解析結果と既存の地質資料(図-8)を比較すると、次のような対応が見られる。

深度 0~10 m	100 $\Omega \cdot m$	氾濫原堆積物
深度 10~50 m	40 $\Omega \cdot m$	泥岩主体の更別層
深度 50~350 m	100 $\Omega \cdot m$	砂岩・泥岩が10~30 mの間隔で互層をなす更別層
深度 350~900 m	10~20 $\Omega \cdot m$	砂岩が主体をなす勇知層

これをみると、層相の変化とよく対応している。ただし、深度10~50 mに分布する比抵抗層は、図-6を見るかぎりあまり単調ではない。すなわち、距離程0~540 m間は、詳細には上部20 mに低比抵抗、下部20 mに高比抵抗が分布する。一方、距離程540~720 m間は、部分的的に低比抵抗、高比抵抗が不規則に分布する。これらは、泥岩が主体をなす地層中において、砂分が優勢な部分に比抵抗が敏感に反応したためと考えられる。また、更別層下部の互層部分については、個々の層を識別できていないが、これは3-3②で述べるように地表で行なう電気探査(比抵抗法)がもつ探査原理上の分解能のためと考えられる。

また、一般に比抵抗分布から地下水位の状況を知ることができるが、測線付近の地下水位はB-1孔で深度1.8 mであり、最小の電極間隔である10 mより浅いことから、ここでは、地下水位の位置は検出できていない。

②図-8をみると、D-1孔地点(測点37)では更別層と勇知層の境界は、比抵抗が100 $\Omega \cdot m$ から20 $\Omega \cdot m$ に変化する急変点となっている。この急変点の位置は、図-7によると東から西に向かってゆるく傾斜(下り勾配)している。この傾向は、図-8にみられるように、これまでの地層境界の推定を支持するものである。なお、この急変点は測点20付近では西に向って、上り勾配となっている。これは、この付近の測定データがケーシングに最も近い測点35に電位電極をおいて測定したデータであり、そのため、ケーシングの影響が若干働いていることと、さらに断面図中の縁辺部に位置するデータ(3-2①参照)であることにより、見掛け上現われたものとみられる。

③図-8をみると分るように、今回の探査結果は、D-1孔の電気検層の見掛け比抵抗曲線の細かな凹凸をならした平均的な傾向とよく一致する。絶対値についてもよく一致しているが、電気検層は泥水の影響、今回の電気探査の場合は後述するような遠電極の影響を考慮すると、あまり厳密な議論はできない。なお、深度300m~400m間は検層結果とやや傾向を異にする。これは、遠電極の設置場所も含めた調査地全体の立体的な比抵抗構造に起因するものと考えられる。

3-2 今後の実施上の課題

①比抵抗映像法の場合、コンピュータをもちいた解析によって自動的に比抵抗分布を画像表示するが、表示された分布図の縁辺部すなわち最大測定深度付近、および測線の端部付近は、その外側にデータがないため解析で得られた比抵抗は、見掛け比抵抗の値からあまり逸脱しない。そのため、真の比抵抗という意味では信頼度が落ちる。これらの効果の具体的な指摘は、2-5で述べた。こうした縁辺部の効果がどの程度の範囲におよぶのかは、地下の比抵抗分布によっても変わるので、一般的な記述はなかなか難しい。ちなみに、今回の探査結果をふまえ、目安として把えるならば、測定深度は探査深度の2倍程度（従来の比抵抗法の電気探査では3~6倍）、測線長は探査したい範囲に探査深度相当の長さを加えた長さ、とすることができよう。

②遠電極の影響は、遠電極を測線から無限遠と見なせない場所に設置する場合に発生する。実用上の目安としては、許容できる誤差を10%程度（3-3①でのべるように地層の比抵抗は5桁の範囲におよび、この程度の誤差は地層評価に影響を与えない）とすると、2-4の(1)式から探査深度の10倍程度は測線から離して設置する必要がある。今回は用地上の制約から遠電極を充分遠方におくことができなかつた。遠電極の影響はたいていの場合、比抵抗を実際より小さくしてしまうが相対的な関係にはあまり影響を与えない。また、遠電極の影響は、(1)式から分かるとおり測定値にプラスに働く項とマイナスに働く項がある。今回の測定データは、D-1孔の電気検層結果と比較して分かるとおり遠電極の影響はあまり受けていないが、これはたまたまプラス項とマイナス項が相殺されるような位置に遠電極を設置したためと考えられる。すなわち、遠電極C₂とP₂間（距離は1780m）の比抵抗は、探査領域の大半を更別層の砂岩優勢部が占めていることから $\rho_{22}=40\Omega\cdot m$ と推定できる。一方、C₁極とP₂極間（C₁を

測線の始点とすれば距離は1020m) およびP₁ 極とC₂ 極間 (P₁ を測線の終点とすれば距離は 780m) の比抵抗は更別層の泥岩優勢部に強く支配されるので $\rho_{12} = \rho_{21} = 10 \Omega \cdot m$ と推定される。これらの数値を(1)式に代入すると、補正項はゼロと見なし得る。この試算は、仮定の数値に基づくのでこれ以上議論しても意味はないが、今回遠電極の位置が近かったにもかかわらず、その影響を極端に受けなかった理由の定量的な説明として理解することができる。今回は、恐らくこうした理由で遠電極の影響が顕著に現われなかったが、一般には測定精度を現地の地質条件に頼るわけにもいかず、今後、測定計画をたてる際は原則として遠電極は充分遠方に置く必要がある。

③鉄製ケーシングの影響は、電極がケーシングに接近すれば当然あり得る。しかし、過去にどの程度ケーシングを離せばよいか言及した実験的研究は調べる限りなかった。一方、理論的検討はケーシングと地盤の密着度(接触抵抗)やケーシング自体の抵抗など入力データに未知な部分が多いこと、3次元のシミュレーションになることなどの理由で現状ではできない。

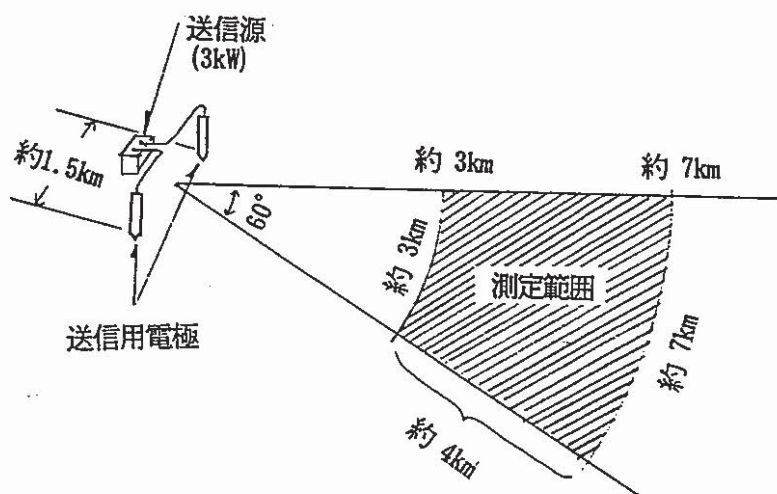
今回は、2通りの電極間隔で電気探査を行なったが、それらの解析結果(図-6、図-7)から、電極間隔を10mピッチとして測定した場合にケーシングの影響が現われた。この考察では、さらに詳細な検討をするため、2通りの測定によって得たデータから、それぞれひとつおきに間引いて作成したデータセット、すなわち、電極間隔が20mピッチ、および100mピッチの場合についても解析した。もとの測定データの解析結果と併わせて図-9にそれら4通りの解析結果を示す。図-9をみると、電極間隔が50mピッチの場合と100mピッチの場合と同様の結果が得られ、これらのデータセットにはケーシングの影響はほとんどないとみることができる。50mピッチの場合には、ケーシングに最も接近する測点35に電極を設置し測定したデータに、ケーシングの影響があると考えられるが(3-1②参照)、この場合には、電極近傍の局所的アノマリーとして感度補正フィルタによって除去することができる。一方、電極間隔が10mピッチと20mピッチの解析結果にはケーシングの影響がみられる。10mピッチの場合にはケーシングの位置を中心に下方に末広がり状に影響が現われている。20mピッチの場合には、ケーシングの影響が直接的でなく、深度100m付近に分布する100 $\Omega \cdot m$ の層が、実際より薄い形で解析されている。これは、解析の際にデータセット中に深度200m以深のデータ(ケーシングの影響のない50mピッチ測定のデータ)を付け加えたため、ケーシングの影響が多少緩和されたことによる。いずれにせよ、以上の検討から、今回と同程度の探査規模においてケーシングの影響を避けるには、ケーシングから50m以上の距離をとって測線を設ける必要が分かった。

3-3 地質構造調査への適用性

①地層の比抵抗は、一般に数 $\Omega \cdot m$ から数十 $k\Omega \cdot m$ まで広い範囲にわたり、また地層の状態を支配する種々の要因によっても大きく変化する。電気探査（比抵抗法）で扱う物理量は地下に半球面状にひろがる電流と電位であり、解析の結果得られる比抵抗断面図を解釈する際には、測線下の構造以外に側方の構造も考慮する必要がある。このように比抵抗は地下の多くの情報を含むがゆえに、その断面図が直接調査の目的に必要な情報を示す図面にならない場合もあるが、地質構造や地質状況（変質、断層等）の考察に多くの情報を提供する貴重な判断資料であると位置づけることができる。

②すでに述べたように、地下に半球面状にひろがる物理量を測定対象とするため、深度方向の分解能は深くなる程荒くなる。これを考慮して、電極間隔のピッチについて2通り以上の測定をし、Bケース（図-9参照）のようにデータを結合し解析すれば、効果的な探査を行うことができる。しかし、こうした解析によっても3-1①で述べたような限界はある。今後、こうした地表からの探査の限界をカバーするため、ボーリング孔を利用したトモグラフィ技術の適用が期待される。

③比抵抗映像法は、3-2①よび②で述べた事柄が実施上の制約となり、あまり深い深度への適用は現実的でない。せいぜい100m~500mであろう。これ以上深い場合には最近地熱調査や鉱物資源探査において成果をあげているCSAMT法がよいと考えられる。この手法は比較的比抵抗領域を得意とし、あまり場所をとらずに深度方向の分解能（周囲・側方の影響が少ない）がよいとされている。



[CSAMT法の測定範囲を示す概念図]

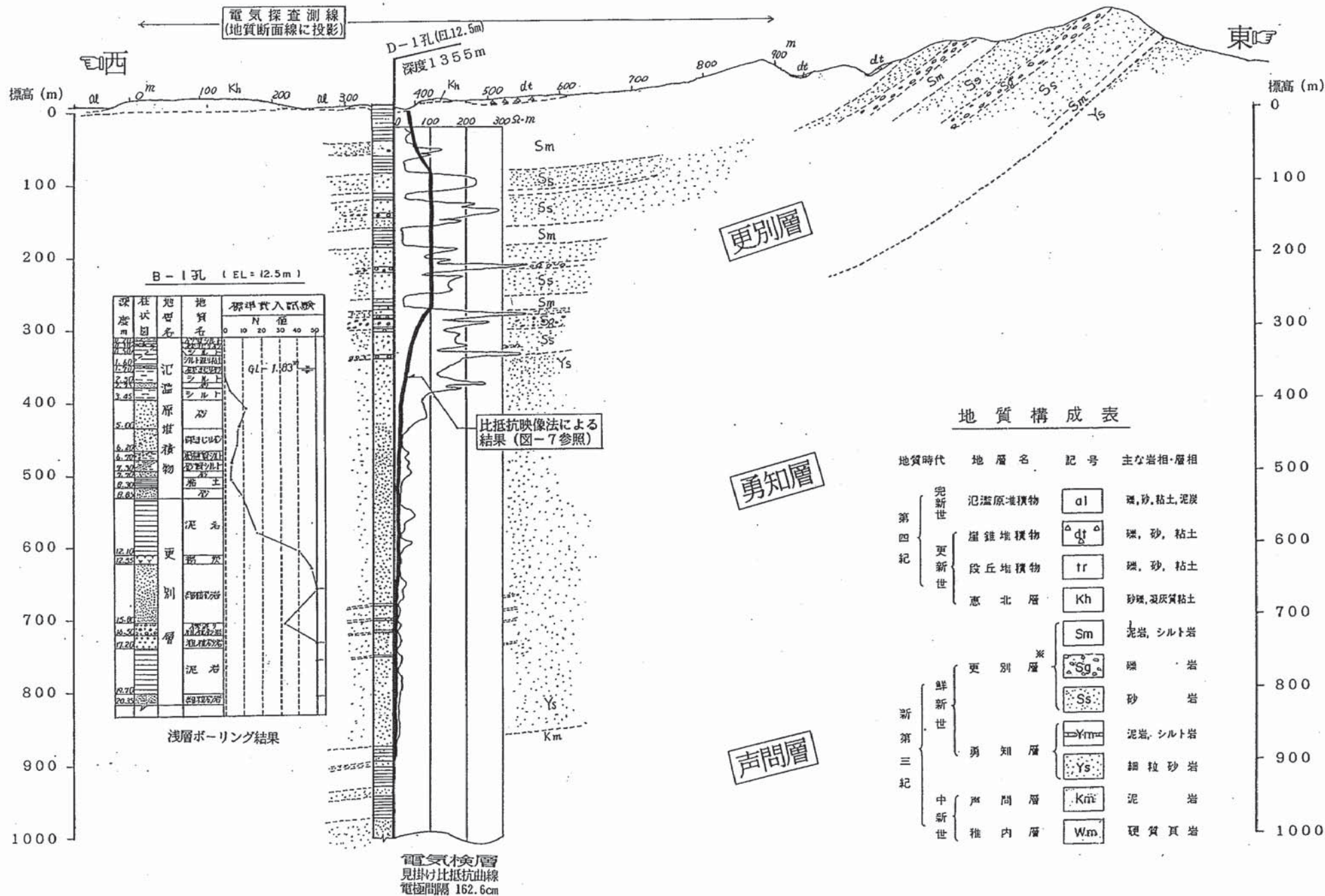
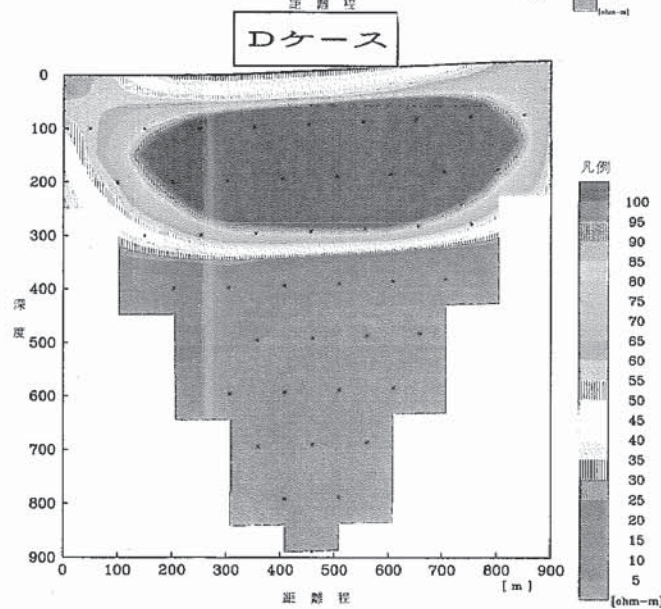
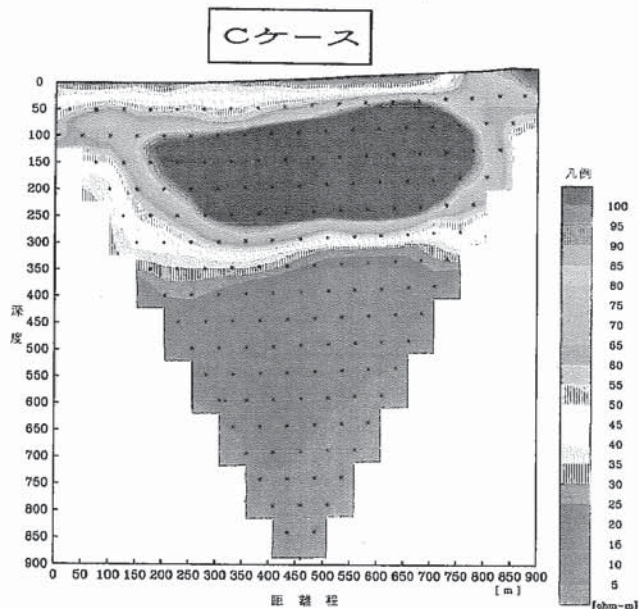
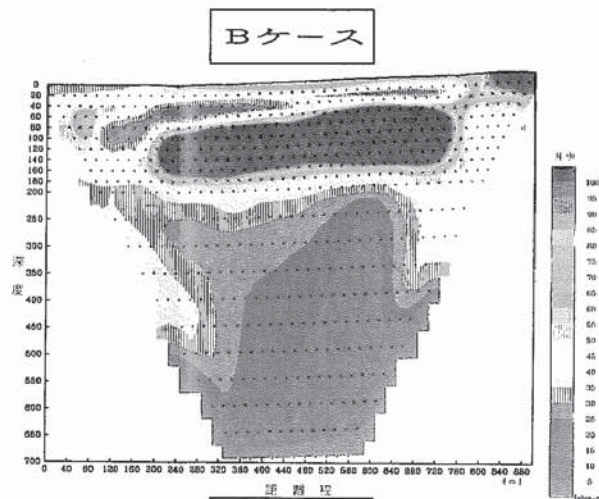
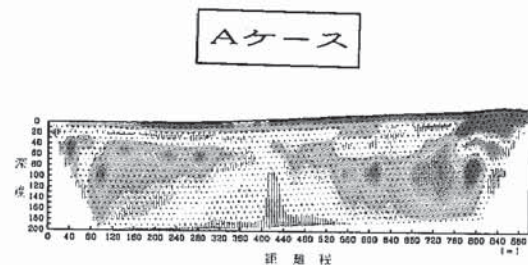


図8 地質断面図
(縮尺 1 : 5,000)



①ケーシング (D-1孔) の位置
距離程 370m にて
始点を背に左 43m.

②検討のため実行した解析ケース

解析 ケース	測定データの個数 注)				解析 深度
	10m	20m	50m	100m	
A	20				200m
B		10	10		700m
C			18		900m
D				9	900m

注) 10m, 20m, 50m, 100mは解析に使用したデータの測定深度の間隔を示す。

③解析結果の説明

解析 ケース	ケーシング 影響	記 事
A	有	距離程370mを中心にして 末広がり影響ゾーンが 広がる。
B	有	ケーシング影響のない50m 間 隔のデータが加味されて いるため、影響が間接的 に現われている。
C	無	Dケースとほぼ同じ結果 だが、距離程200m付近に 若干影響がみられる。
D	無	比抵抗分布は地層状況と よく対応し、ケーシング の影響はみられない。

④ケーシングの影響範囲

本調査地の場合、ケーシングの影響はボーリング孔
から50m程度まで及んでいる、と考えられる。

図 9
ケーシング影響の検討図

4. あとがき

今回、電気探査の地質構造調査への適用性を把握するため、新しい手法である比抵抗映像法を実施した。現地では用地上の制約があり測線や遠電極を理想的な配置に設けられなかったが、成果は同手法の適用性を評価する上で満足のいく結果が得られた。すなわち、今回の探査結果を既往の地質調査資料と対比しつぎのような評価を得た。

①地表付近では、細かな層相の変化を識別できる。

②深度が深くなると細かい識別はできないが更別層や勇知層といった大局的な地層ないし物性境界を把握することができる。

この他、既往の電気検層結果と矛盾のないことや、ケーシングの影響に対する知見とか精度に関する知見などについても得ることができた。また、考察では今回の成果をふまえ深部探査に適用しうる電気探査法について、いくつかの手法を提案した。

調査の実施にあっては、動力炉・核燃料開発事業団の関係者の方々からご助力や貴重なご助言をいただいた。ここに記して謝意を表します。

巻 末

電気探査(比抵抗映像法)測定データ	3葉
見掛け比抵抗分布(10mピッチ、50mピッチ)	1葉
主な現場写真(3枚)	1葉

電気探査 (比抵抗映像法) 測定データ一覧 (1)

測定深度間隔: 10m、測定深度: 200m、測線長: 900m、数値の単位: $\Omega \cdot m$ 、測定者: 坂下 晋

測点	P ₁ 極 (C ₁ 極の測点番号に表示の番号を加えた数値が測点の位置を示す)																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	18	20
0	33.4	35.6	38.6	40.4	41.9	43.6	46.0	44.7	45.4	46.0	47.6	47.5	48.0	47.8	47.3	45.3	44.1	42.9	41.8	41.0
1	36.0	34.8	38.1	39.7	41.7	43.6	43.4	44.4	45.3	45.7	46.3	47.0	46.8	46.4	44.7	43.7	42.5	41.5	40.7	39.6
2	34.9	35.7	37.2	39.7	41.9	41.9	42.9	43.8	44.8	44.8	46.2	45.9	45.5	44.2	43.6	42.4	41.5	40.7	39.7	38.6
3	41.2	36.9	39.0	41.3	40.9	42.0	43.2	44.2	44.9	45.9	45.8	45.4	44.4	43.7	42.6	41.6	40.9	39.9	38.8	37.5
4	38.9	38.6	41.2	40.0	41.2	42.5	43.7	44.4	45.6	45.4	45.3	44.4	43.8	42.7	41.8	41.2	40.1	39.0	37.7	36.4
5	40.4	41.9	39.0	40.0	41.7	42.7	44.0	44.8	45.2	45.1	44.2	43.7	42.7	41.9	41.2	40.2	39.0	37.8	36.6	35.4
6	47.5	37.0	37.9	39.9	41.7	35.6	44.2	44.5	44.2	43.8	43.5	42.6	41.8	41.2	40.2	39.1	37.9	36.7	35.6	34.4
7	42.1	36.1	37.8	40.0	41.4	43.1	43.2	43.4	43.1	43.0	42.2	41.4	41.0	39.9	39.0	37.8	36.7	35.4	34.3	33.2
8	47.7	38.2	40.0	41.3	43.3	43.2	43.4	43.4	43.4	42.8	42.0	41.5	40.6	39.6	38.4	37.1	36.1	34.8	33.9	32.5
9	44.4	38.6	39.7	42.1	42.1	42.5	42.7	43.0	42.5	41.8	41.3	40.5	39.4	38.3	37.1	36.1	35.0	33.8	32.5	31.4
10	40.6	37.7	40.2	40.3	41.0	41.6	42.1	41.7	41.2	41.1	40.3	39.2	38.1	37.1	35.9	34.9	33.9	32.6	31.4	30.6
11	38.2	38.3	38.1	39.1	40.2	41.0	40.7	40.4	40.4	39.7	38.8	37.7	36.8	35.7	34.7	33.7	32.5	31.4	30.6	29.4
12	37.0	35.2	36.6	38.2	39.5	39.6	39.7	39.5	39.1	38.3	37.2	36.4	35.4	34.5	33.5	32.3	31.3	30.5	29.4	28.1
13	33.2	32.9	35.0	36.9	37.4	37.7	38.2	37.9	37.3	36.5	35.6	34.7	34.0	33.2	32.0	31.0	30.2	29.1	27.9	26.3
14	37.1	34.5	36.3	36.7	37.1	37.8	37.5	37.1	36.3	35.6	34.8	34.0	33.2	32.1	31.2	30.5	29.5	28.2	26.6	25.0
15	40.9	37.3	36.6	36.9	37.7	37.6	37.2	36.4	35.7	34.9	34.3	33.3	32.3	31.4	30.8	29.7	28.5	27.0	25.4	24.3
16	49.4	38.7	37.6	38.3	38.1	37.5	36.6	36.0	35.3	34.8	33.8	32.7	31.9	31.3	30.2	29.0	27.5	25.8	24.8	25.2
17	46.0	38.6	39.1	38.5	37.9	36.9	36.0	35.3	34.9	34.0	32.9	32.1	31.5	30.5	29.2	27.7	26.1	25.1	25.3	26.0
18	47.5	43.1	41.2	39.6	38.1	36.9	36.1	35.5	34.5	33.4	32.6	32.1	31.0	29.8	28.1	26.5	25.4	26.1	26.6	27.4
19	49.1	44.9	42.3	39.8	37.9	36.8	36.1	35.0	33.8	33.0	32.6	31.4	30.2	28.6	27.0	25.9	26.5	27.2	27.6	28.0
C ₁ 20	49.5	45.4	41.8	39.2	37.4	36.6	35.2	34.0	33.3	32.8	31.8	30.5	29.0	27.4	26.3	27.0	27.6	28.2	28.9	29.2
21	53.5	46.9	42.7	39.6	38.1	36.2	34.7	33.7	33.4	32.4	31.1	29.5	27.8	26.8	27.6	28.4	29.1	29.5	29.9	30.5
22	54.1	47.7	43.1	40.5	37.6	35.5	34.4	34.0	33.1	31.6	30.1	28.3	27.4	28.3	29.1	29.7	30.3	30.8	31.4	32.1
23	56.2	49.2	44.8	40.0	36.9	35.2	34.9	33.9	32.5	30.9	29.0	28.0	29.1	30.0	30.9	31.4	31.9	32.6	33.3	33.2
24	56.0	50.7	44.4	38.5	36.2	35.6	34.5	33.1	31.3	29.6	28.5	29.8	30.8	31.7	32.4	32.9	33.6	34.1	34.2	34.6
25	50.0	48.6	40.9	37.4	36.3	35.1	33.6	31.8	30.0	29.2	30.5	31.6	32.6	33.3	33.8	34.6	35.0	35.0	35.2	35.4
26	53.0	43.8	38.7	37.1	35.6	33.8	32.0	30.2	29.3	31.0	32.5	33.5	34.3	34.7	35.4	35.8	35.9	36.2	36.2	35.3
極 27	50.0	42.7	40.0	37.4	35.1	33.0	30.9	30.0	32.0	33.4	34.4	34.9	35.5	36.3	34.1	36.6	36.7	36.2	35.6	35.1
28	50.6	45.8	41.3	37.4	34.5	31.9	31.0	33.2	34.7	36.0	36.6	37.0	37.6	37.7	37.9	38.0	37.1	36.5	36.1	35.8
29	54.2	47.6	41.2	36.8	33.1	32.0	34.6	36.4	37.5	38.1	38.3	38.7	38.9	38.7	38.6	38.2	37.4	36.6	36.2	35.6
30	54.0	45.8	39.8	34.4	32.9	36.2	38.1	39.1	39.4	39.5	39.4	39.5	39.1	38.9	38.3	37.3	37.0	36.3	35.6	35.2
31	51.2	45.3	37.6	35.1	39.3	41.3	41.8	41.4	40.9	40.9	40.4	39.8	39.3	38.7	37.6	37.0	36.3	35.7	35.2	34.1
32	51.4	42.5	38.6	44.7	46.4	45.8	44.1	42.5	41.9	41.1	39.9	39.3	38.3	37.3	36.6	36.0	35.3	34.9	33.8	33.3
33	47.1	44.3	52.0	52.3	49.5	45.8	49.3	41.7	40.4	39.1	38.3	37.3	36.3	35.4	34.9	34.2	33.6	32.8	32.1	31.4
34	51.0	58.9	55.6	50.1	44.7	41.9	39.7	38.2	36.9	35.9	35.1	34.0	33.2	32.9	32.3	31.8	30.9	30.5	29.7	29.0
35	50.7	50.9	46.6	41.5	39.0	37.3	35.8	34.6	33.9	33.2	32.2	31.7	31.2	30.7	30.3	29.7	29.2	28.5	27.8	27.2
36	62.4	58.0	49.5	44.9	41.8	39.4	37.5	36.3	35.5	34.4	33.7	33.2	32.7	32.2	31.6	31.2	30.4	29.7	29.1	28.3
37	62.3	54.8	49.3	45.1	41.8	39.4	37.9	36.8	35.7	35.0	34.3	34.1	33.5	32.8	32.4	31.6	31.2	30.5	29.6	29.1
38	59.3	55.2	49.6	45.0	41.6	39.6	38.3	36.8	36.1	35.7	35.3	35.1	34.3	33.9	33.2	32.5	31.9	31.2	30.4	29.6
39	66.6	58.8	51.6	46.1	42.9	40.8	38.9	37.9	37.3	36.9	36.5	35.8	35.4	34.6	34.2	33.3	32.7	31.9	31.3	30.6
40	65.4	57.6	50.3	45.9	43.0	40.3	39.1	38.4	37.9	37.6	36.9	36.5	35.9	35.5	34.5	34.1	33.2	32.7	32.0	31.1
41	66.2	57.0	50.8	46.2	42.3	40.7	39.7	39.1	38.7	38.1	37.9	37.3	36.5	35.7	35.3	34.5	33.9	33.2	32.7	31.8
42	68.8	59.5	52.4	46.0	42.9	41.5	40.6	40.2	39.4	39.2	38.4	38.1	37.4	36.7	35.9	35.2	34.8	34.1	33.5	32.9
43	73.3	62.8	52.1	46.8	44.1	42.6	41.8	41.1	40.7	40.1	39.5	38.9	38.1	37.3	36.7	36.0	35.5	34.8	34.4	34.0
44	75.1	60.0	51.6	47.1	44.8	43.7	42.5	42.1	41.3	40.6	39.8	39.3	38.6	37.8	37.2	36.7	36.0	35.4	35.4	35.0
45	70.7	58.5	51.0	47.2	45.5	43.8	43.3	42.4	41.7	41.2	40.4	39.5	39.0	38.2	37.7	37.2	36.8	36.5	36.0	36.1
46	75.9	60.3	52.6	49.1	46.5	45.5	44.3	43.2	42.6	41.8	40.8	40.1	39.4	38.8	38.2	38.0	37.6	37.4	37.4	37.3
47	75.4	60.1	53.7	49.1	47.5	45.9	44.6	43.8	42.8	41.7	40.9	40.3	39.6	39.2	38.9	38.6	38.5	38.4	38.5	38.4
48	71.1	60.5	52.6	49.8	47.4	45.7	44.6	43.6	42.4	41.7	40.9	40.3	39.8	39.5	39.3	39.3	39.4	39.2	39.4	39.2
49	74.9	59.9	54.1	49.9	47.3	45.8	44.4	42.9	42.1	41.6	40.9	40.3	39.9	39.9	39.8	39.9	40.0	40.1	40.1	39.8

電気探査 (比抵抗映像法) 測定データ一覧 (2)

測定深度間隔: 10m、測定深度: 200m、測線長: 900m、数値の単位: $\Omega \cdot m$ 、測定者: 坂下 晋

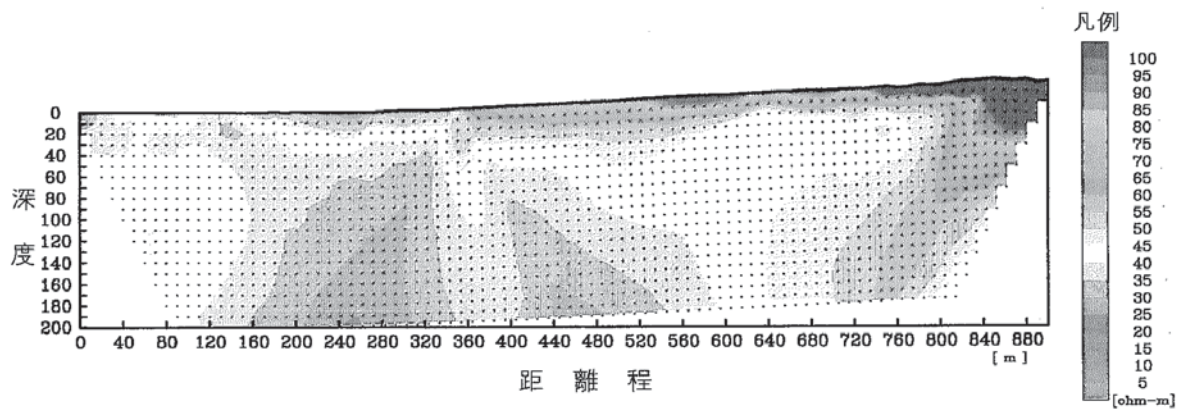
測点	P ₁ 極 (C ₁ 極の測点番号に表示の番号を加えた数値が測点の位置を示す)																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	18	20
50	71.0	61.2	54.1	49.7	47.4	45.4	43.6	42.6	42.0	41.4	40.7	40.5	40.5	40.4	40.7	40.7	40.9	41.0	40.9	40.9
51	75.1	62.8	54.8	50.4	47.3	44.7	43.4	42.5	41.8	41.3	41.0	41.0	41.0	41.3	41.4	41.5	41.7	41.7	41.8	41.7
52	72.9	62.0	54.3	49.3	45.5	43.8	42.7	41.9	40.1	41.2	41.1	41.2	41.5	41.8	42.0	42.2	42.3	42.4	42.4	42.9
53	83.2	66.4	55.3	48.0	45.0	43.4	42.4	41.7	41.4	41.3	41.5	42.0	42.2	42.7	42.9	43.1	43.2	43.2	43.9	44.1
54	88.7	68.0	52.8	47.0	44.3	42.7	41.7	41.4	41.2	41.5	42.1	42.5	42.9	43.2	43.4	43.6	43.7	44.5	44.9	45.0
55	93.6	62.4	50.4	45.5	43.2	41.9	41.4	41.2	41.5	42.1	42.5	43.0	43.6	43.8	44.1	44.4	45.1	45.6	45.8	45.3
56	90.8	60.1	48.9	44.4	42.1	41.3	40.9	41.2	41.9	42.5	43.1	43.8	44.0	44.4	44.7	45.7	46.3	46.5	46.0	45.9
57	95.0	59.7	48.1	43.5	41.7	41.0	41.1	41.9	42.4	43.2	44.1	44.4	44.9	45.1	46.3	46.9	47.2	46.8	47.1	47.0
58	91.8	57.6	46.4	42.5	40.9	40.8	41.7	42.3	43.1	43.8	44.3	44.9	45.4	46.6	47.5	47.8	47.3	47.4	47.7	48.1
59	86.0	55.4	44.9	41.3	40.6	41.4	42.0	42.9	43.6	44.2	44.8	45.3	46.6	47.5	48.0	47.8	47.7	48.2	48.7	49.2
C ₁ 60	85.5	53.4	42.8	40.7	41.2	41.6	42.5	43.2	44.0	44.6	45.2	46.6	47.7	48.2	48.2	48.4	48.7	49.4	49.8	50.4
61	81.7	47.6	41.4	41.3	41.4	42.1	42.9	43.5	44.3	44.9	46.6	47.8	48.5	48.2	48.8	49.2	50.2	50.7	51.2	51.8
62	65.5	42.6	41.2	40.6	41.3	42.0	42.7	43.5	44.2	46.0	47.2	48.1	48.1	48.6	49.2	50.1	50.8	51.5	52.9	53.0
63	54.7	43.3	40.7	40.7	41.2	41.7	42.5	43.2	45.2	46.7	47.5	47.6	48.2	49.0	49.9	51.1	52.0	52.5	53.7	54.5
64	64.1	46.3	42.6	41.4	41.1	41.9	42.2	44.3	45.9	47.0	47.1	47.7	48.7	50.0	51.1	52.0	52.9	54.2	55.4	55.8
65	66.5	48.5	43.2	41.0	41.0	41.1	43.3	45.0	46.1	46.2	46.9	48.0	49.4	50.7	51.8	53.1	54.5	55.6	56.3	56.2
66	74.9	53.0	44.1	41.4	40.1	42.3	44.0	45.2	45.2	46.3	47.5	49.1	50.5	51.8	53.1	54.7	55.9	56.9	57.0	53.9
67	80.1	52.5	44.0	39.7	41.4	43.2	44.1	44.2	45.3	46.6	48.3	50.1	51.5	52.9	54.6	56.3	57.2	57.4	54.4	50.8
68	79.2	54.1	41.2	41.3	42.6	43.2	43.1	44.1	45.7	47.6	49.2	51.2	52.7	54.7	56.6	57.5	58.0	55.4	51.2	48.5
69	85.7	48.7	43.7	43.5	43.2	42.5	43.2	44.7	46.8	48.8	51.0	52.4	54.9	56.9	58.1	58.9	55.9	51.8	49.4	46.8
70	66.5	49.4	46.3	44.0	41.6	42.1	43.4	45.8	48.0	50.3	52.4	54.8	57.1	58.5	59.4	56.6	52.7	50.3	47.2	42.8
71	68.6	54.3	47.9	42.3	41.3	42.1	44.6	47.0	49.5	52.0	54.9	57.6	59.1	60.4	57.3	53.3	51.1	48.2	43.5	
72	62.7	51.0	41.8	39.4	39.6	42.2	44.8	47.5	50.1	53.3	56.3	58.3	59.6	57.0	53.1	50.9	48.0	43.4		
73	71.1	48.4	40.6	38.6	40.6	43.2	46.2	49.0	52.7	56.0	58.2	59.9	57.3	53.2	51.2	48.4	43.7			
74	90.6	53.7	41.9	41.2	42.7	45.6	48.5	52.6	56.5	53.1	61.1	58.6	54.6	52.5	49.5	44.5				
極 75	103	56.5	46.6	44.9	46.8	49.5	54.0	58.3	61.5	63.9	61.4	57.2	55.0	51.8	46.4					
76	84.1	54.3	46.5	46.6	48.8	54.1	58.9	62.8	65.8	63.5	59.0	56.8	53.4	47.4						
77	88.1	54.3	47.9	48.0	53.5	59.2	63.9	67.7	65.4	60.8	58.6	55.0	48.6							
78	110	61.1	49.8	54.2	60.7	66.6	71.6	69.3	64.1	61.6	57.5	50.2								
79	114	59.8	57.9	63.8	71.5	78.0	75.8	69.6	66.9	61.8	53.2									
80	84.6	63.8	63.2	72.8	81.6	80.1	73.5	70.8	65.1	55.5										
81	115	70.4	76.9	90.0	89.1	81.7	78.5	71.6	59.9											
82	167	73.1	92.0	93.9	86.3	82.2	76.3	63.0												
83	86.0	96.8	104	96.4	94.6	86.0	69.5													
84	141	119	112	111	102	80.7														
85	125	121	125	118	92.7															
86	194	200	188	142																
87	230	242	187																	
88	252	209																		
89	201																			

電気探査（比抵抗映像法）測定データ一覧（3）

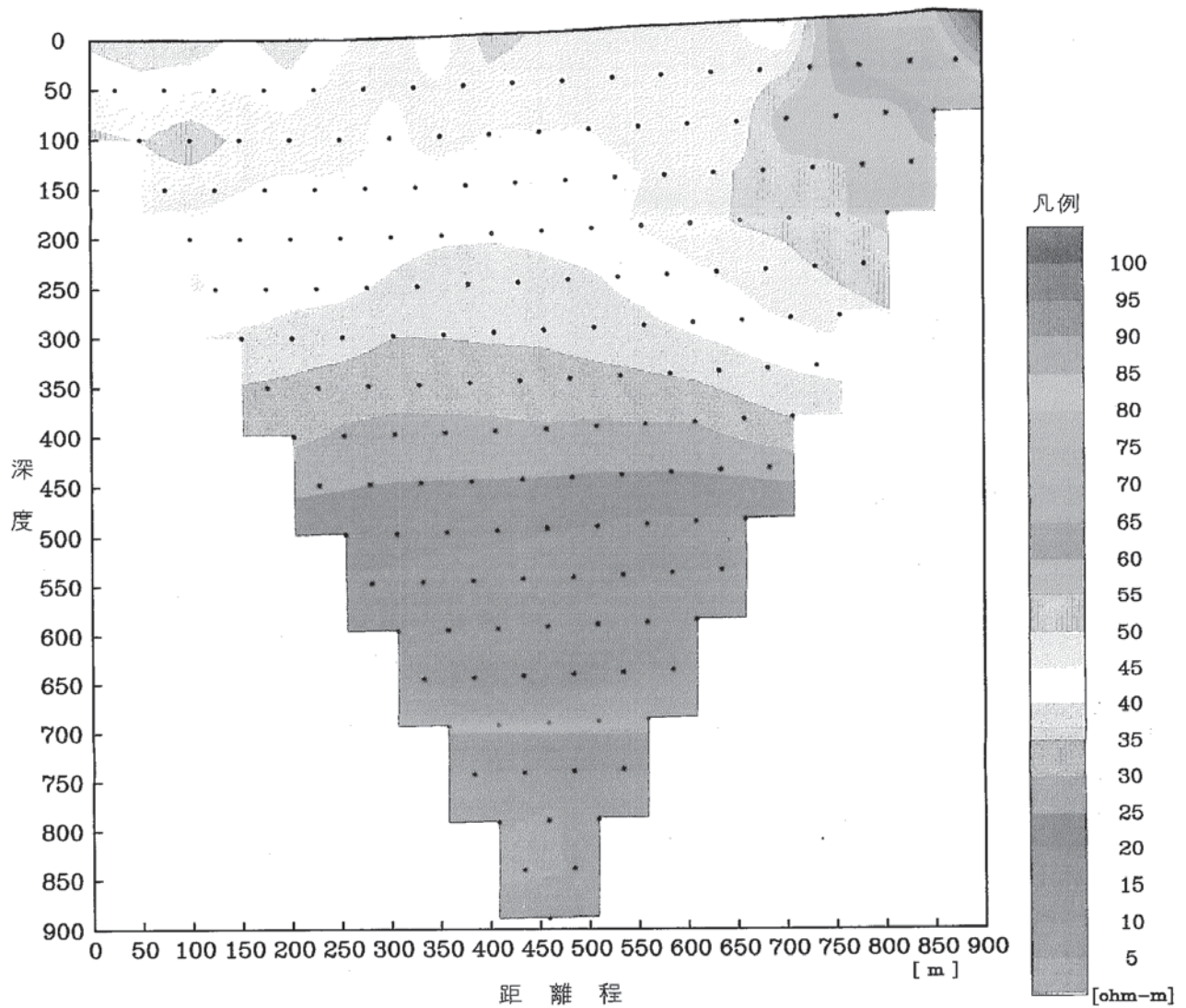
測定深度間隔：50m、測定深度：900m、測線長：900m、数値の単位： $\Omega \cdot m$ 、測定者：坂下 晋

測点 P₁ 極 (C₁ 極の測点番号に表示の番号を加えた数値が測点の位置を示す)

測点	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	
	0	42.2	46.1	47.3	40.9	34.6	28.6	21.0	20.8	21.2	20.3	18.6	16.3	13.7	11.0	8.6	5.0	4.0	4.1
	5	42.0	45.1	41.4	35.4	29.7	22.3	22.3	23.0	22.0	21.0	18.1	15.6	13.0	10.3	6.7	2.2	10.3	
	10	41.0	40.9	35.8	30.6	23.5	24.2	25.3	24.6	23.1	20.7	18.1	15.5	12.8	9.2	4.6	8.0		
	15	37.6	34.9	31.0	24.3	26.3	18.7	27.6	26.2	23.6	21.1	18.5	15.8	12.2	7.6	5.9			
	20	37.3	32.8	26.3	29.2	31.1	30.1	28.2	25.1	22.2	19.3	16.3	12.4	7.7	6.0				
C ₁	25	36.8	29.1	34.3	35.8	33.9	31.1	27.4	24.1	21.0	17.6	13.5	8.6	5.5					
	30	32.4	39.1	38.4	35.2	31.8	27.5	24.2	20.9	17.3	13.2	8.4	5.6						
	35	38.9	33.1	30.3	27.2	23.5	20.5	17.6	13.8	10.0	5.3	7.6							
	40	42.9	37.5	34.7	31.2	28.8	26.6	23.5	20.2	16.2	2.5								
	45	45.5	41.1	37.7	36.1	34.9	32.8	30.1	26.9	12.1									
極	50	47.3	41.3	40.7	40.8	40.1	38.5	36.1	21.0										
	55	43.2	42.1	44.2	45.2	45.3	44.4	28.3											
	60	41.1	44.6	48.0	50.6	51.7	35.2												
	65	40.9	46.2	51.9	56.2	39.7													
	70	41.3	50.1	59.3	43.0														
	75	47.0	64.0	46.5															
	80	81.6	55.9																
	85	93.8																	



見掛け比抵抗分布図 (電極間隔 10mピッチ)
 (解析結果は、本文中の図-6に示す)



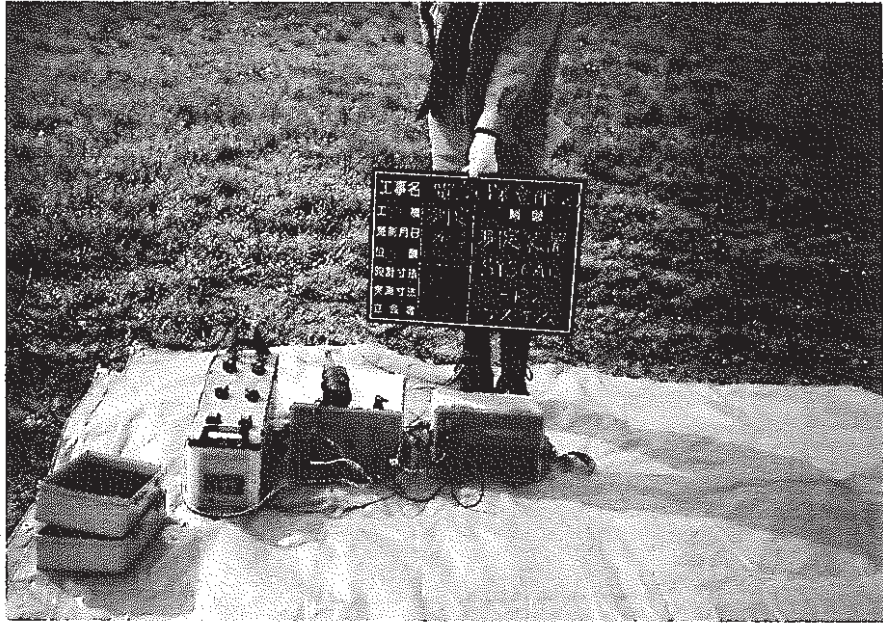
見掛け比抵抗分布図 (電極間隔 50mピッチ)
 (解析結果は、本文中の図-7に示す)

これらの分布図は、測定データを投影断面 (測線配置図を参照) に投影し、感度補正フィルタ処理後の値を示す。

主な現場写真

測定装置

左からバッテリー、
昇圧器、電気探査器



測定風景



遠電極設置状況

接地抵抗を小さく
するため、5本の
電極を打設した。

