

電気探査の自動化とデータ解析の一検討

Implementation of Automatic Electric Sounding and Evaluation of Data Analysis

○村上 武^{*}、工藤博司^{**}、吉田等明^{*}、恒川佳隆^{*}、三浦 守^{*}

○Takeshi Murakami^{*}, Hiroshi Kudo^{**}, Hitoaki Yoshida^{*}, Yoshitaka Tsunekawa^{*}, Mamoru Miura^{*}

^{*}岩手大学、^{**}桜小路電機

^{*}Iwate University, ^{**}Sakura Kohji Electric Ltd.

キーワード：遺跡(historic ruins)、電気探査(electric sounding)、垂直探査(vertical sounding)、
ウェンナ法(Wenner array)、比抵抗法 (resistivity survey)

連絡先：〒020-01 盛岡市上田 4 丁目 3 - 5 岩手大学工学部情報工学科

三浦 守、Tel. 0196-21-6471, Fax. 0196-21-6471, E-mail: mamoru@cis.iwate-u.ac.jp

1. はじめに

電気探査とは、地中を掘らずにそれを調べるための手段の一つである。探査対象には鉱脈、水脈などのように形状として比較的大きな場合もあるが、本研究では、比較的小さい部類にはいる地下埋蔵物（遺跡）を探査対象としている。

従来、遺跡探査のための電気探査法は時間と人手がかかる作業であり、またその場で直ちに解析することは行われていなかった。

本稿では、電気探査システムをハードウェア・ソフトウェア両面から自動化し、データを実時間で観測できるシステムを構築したので報告する。データ解析では、探査終了後すぐ解析できるように、比較的簡単な処理で全

体像を見いだせるようにした。また、実際に本システムを用いて明らかになったデータの信頼性についても検討を行っている。

2. 従来の電気探査法

2.1 電気探査法とは

地面に電流を流すと、土の持つ性質の違いにより電流の流れ方が異なり、土中に配置した電極間の電圧の大きさも場所により異なって現れる。そこでこの電極配置における抵抗値（比抵抗値）を求め周囲との測定値と比較して相対的な抵抗値の違いから土壌を区別したり、目的の対象物を見いだそうとする方法である。乾いた土は抵抗が高いであろうし、湿った土は抵抗が低いことは理解できる。こ

のような特徴を利用して、見出すことが可能となる¹⁾。

他の地中探査法としては地中レーダーを用いた探査が有名であるが、これは地中に水分が多く含まれていると正しいデータを得ることができない。しかし電気探査では地中の水分が多いほど良いデータを得ることができる。このように、条件に応じて様々な探査法を使い分けることが確実な探査データを得ることにつながる。

2.2 電極配置

電気探査法の一つである比抵抗法においては、一対の電流電極の間に電流 I を流し、他の一対の電位電極間の電位差 E を測定する。良く用いられるウェンナ法と呼ばれる電極配置を図 2.1 に示す。これは一直線上に電極が等間隔に並ぶ配置である。

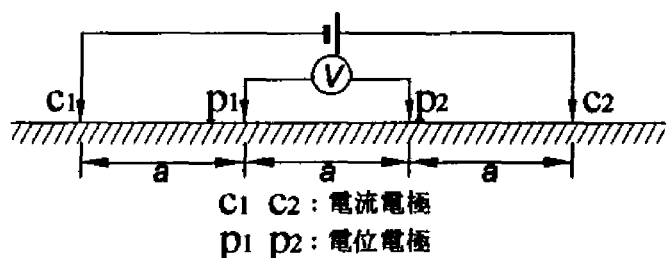


図 2.1 ウェンナ法における電極配置

2.3 従来の測定システムの欠点

従来のシステムは、一測線の探査において、垂直探査および水平探査を同時にできると及び様々な電極配置で測定できる点については優れている。しかし、探査時間がかかること、電極を切り替える作業と記録する作業など手数を要すること及びデータ解析が測定終

了後となりデータの確認が遅れることなどが問題となっていた。

3. 新しい電気探査システム

3.1 システムの構成

新しいシステムの構成を図 3.1 に示す。破線の範囲内が新しく開発した部分である。

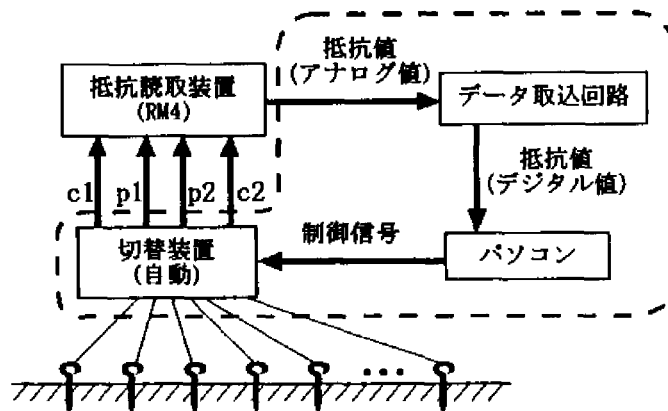


図 3.1 新しい電気探査システムの構成

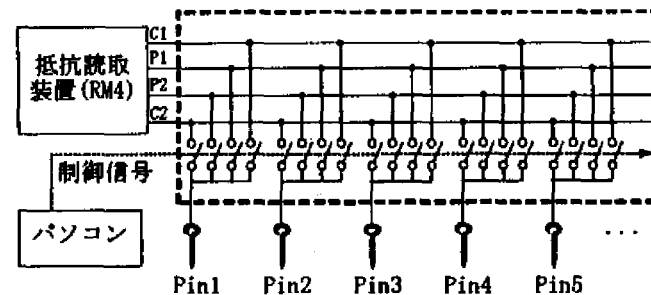


図 3.2 切替装置基本概念図

このシステムの特徴として、切替装置の自動化による探査時間の短縮及び測定データを直ちに自動的にパソコンに読み込み、実時間でデータを視覚化できることが挙げられる。

3.2 ハードウェア構成

3.2.1 動作の概要

本装置は、4極法による見掛け比抵抗測定において、予め大地に打ち込まれている48本の測定ピンの内、任意の4本のピンに測定器の電流電極、電位電極を接続して測定を行い、測定データをパソコンに入力する装置である。

48本のピンはリレーによって測定器の電流電極端子(C1, C2)および電位電極端子(P1, P2)の何れかに接続されるようになっている。図3.2のようにパソコンからの制御信号によって、適切な4つのスイッチを閉じることによって接続される。

本装置は大きく分けて、電極接続の制御回路と、抵抗読取装置(RM4)からのデータを取込む回路からなる。それぞれについて以下に述べる。

3.2.2 電極接続制御回路

制御回路の構成は概ね図3.3の様になっている。切替回路は、図3.4に示すとおり、SN74373(latch)、SN74688(comparator)、DIPスイッチ、リレーからなっており、1つの単位回路で8つのリレーを制御している。8つのリレーは各々、電極ピンのC1, C2, P1, P2への接続に対応しており、1つの単位回路で2本の測定ピンを制御している。

例えば、測定電極ピンの1番と2番をそれぞれ、C1とP1に接続する場合、このピンを制御する回路にDIPスイッチで設定されているアドレス信号をI/Oポートから出力する。SN74688は自らが接続されているDIPスイッ

チのビットパターンと同じ信号がアドレス線に出力された場合にSN74373のENABLE端子への出力を変化させ、SN74373の出力信号の変更を許可する。SN74373は出力信号の変更を許可されている間だけI/Oポートから送られてくるデータ線の信号を出力側に伝え、変更の許可が取り消された時点でその値をラッチする。すなわち、この場合はSN74688に入力されるアドレス指定信号がDIPスイッチの設定と違うものになった時点で、その直前にI/Oポートからデータ線に出力されていた信号をラッチする。SN74373の出力はリレーをON/OFFするトランジスタ2SC1815のベースに接続されており、指定されたリレーだけが動作する。

この場合、SN74373の出力の1Qと5Q、2Qと6Q、3Qと7Q、4Qと8Qがそれぞれ測定電極の1番と2番のC1, C2, P1, P2に対応していた場合、データ線には2進数で10000010が出力されていれば、1番ピンにC1, 2番ピンにP1が接続される。

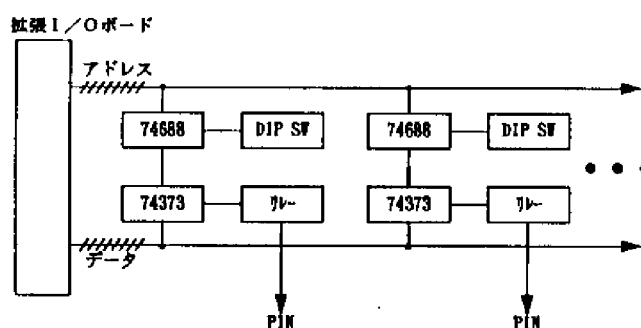


図3.3 切替装置ブロック図

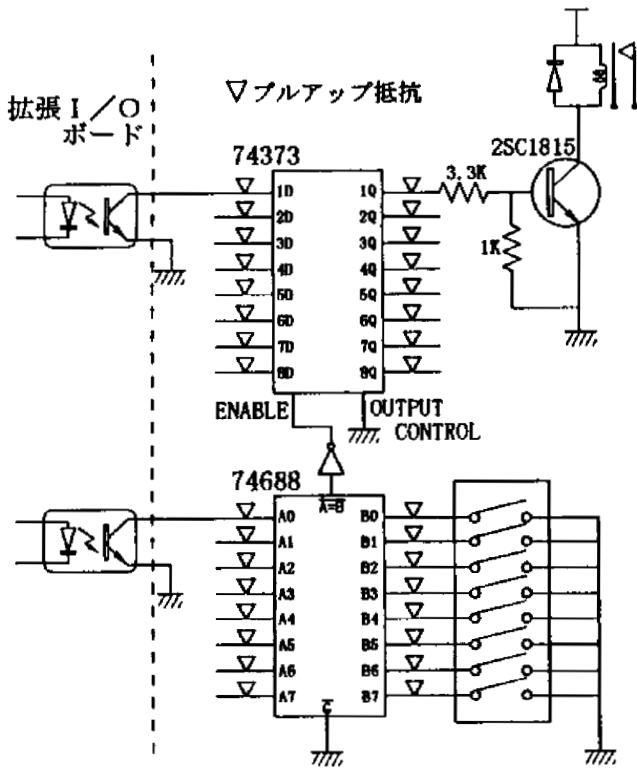


図 3.4 切替装置基本回路

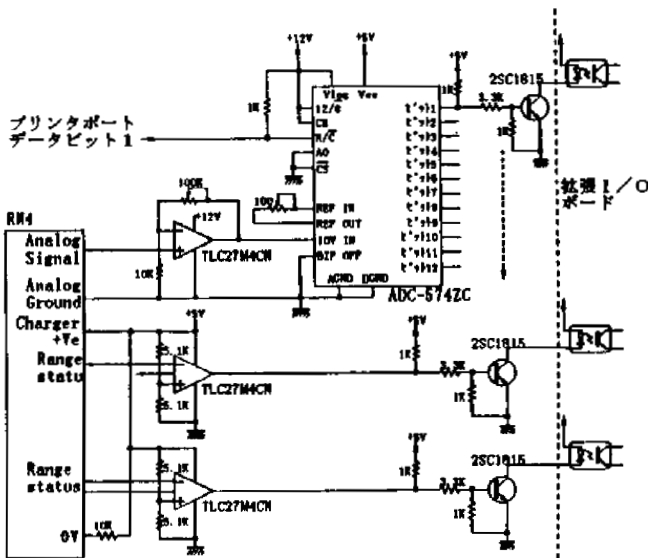


図 3.5 データ入力回路

3.2.3 データ入力回路

データ入力回路を図 3.5 に示す。抵抗読取装置 RM4 からは抵抗値のデータが 0 ~ 2 V のアナログ信号で、測定レンジのデータが 2 ビットのデジタルデータで出力される。本回路はこれらのデータを変換して、I/O ポートに送り、パソコンはこの 2 種のデータから測定データの抵抗値を算出する。

(1) アナログデータ変換

抵抗値のアナログデータを 12 ビットのデジタル信号に変換する。A/D 変換には ADC574ZC を用いているが、この IC のユニポーラ入力フルスケールが 0 ~ 10 V であるため、オペアンプによって増幅を行っている。パソコンからの A/D 変換開始指示は、I/O ポートの出力がすべて測定ピンの制御に使用されているため、プリンターポートを使用している。また、本回路では、A/D 変換 IC の終了信号検出を行っていないため、変換開始信号の送付から 25 μ sec 以上の遅延時間をおいてからデジタル信号の読み込みを行う必要がある。

12 ビットデジタル信号に変換された抵抗値データは 2SC1815 によってレベルコンバートされ、I/O ポートに出力される。

(2) 測定レンジデータ

測定レンジのデータは、2 ビットのデジタルデータとして抵抗読取装置 RM4 から出力されるが信号のレベルが TTL レベルではないために、そのまま利用することができない。また、RM4 の内部回路の特性が原因で、RM4 のデジタルグランドを本回路に引き込んで利用することができないため、RM4 のバッテリーチャージャの端子電圧とレンジ信号のレベルをコンパレータによって比較し、TTL レベルに変換して I/O ポートに出力している。

4. データ解析

1 測線の測定が終了後または測定中にでも解析できるように、できるだけ簡単な解析方法の検討を行う。

4.1 原理と前提条件

4.1.1 2層構造

まず、探査の対象となる地下の構造を、埋蔵物からなる層（以下遺跡層）と、その上の堆積層の2層構造（図4.1）と仮定する。

実際にこの仮定を満たすために以下の条件が必要である。

条件1：堆積層及び遺跡層における比抵抗のばらつきが、それぞれの比抵抗の差より十分小さい

この条件により、堆積層及び遺跡層の比抵抗を一様とみなすことができる。

条件2：見掛け比抵抗の垂直変化を遺跡層より下の第3層の影響が十分小さいほどのピン間隔までにとどめる。

ただし垂直変化とは、ピン配置の中心を変えずにピン間隔を変えたときの値である。

4.1.2 2層構造の標準曲線²⁾

理想的な2層構造を仮定したときの見掛け比抵抗の垂直変化を示す曲線(=標準曲線)を図4.2に示す。また、実際の測定データにおける垂直変化の例を図4.3に示す。この例では4.1.1で述べた条件2を満たすために、ピン間隔をおよそ1.5mまでにとどめる必要がある。

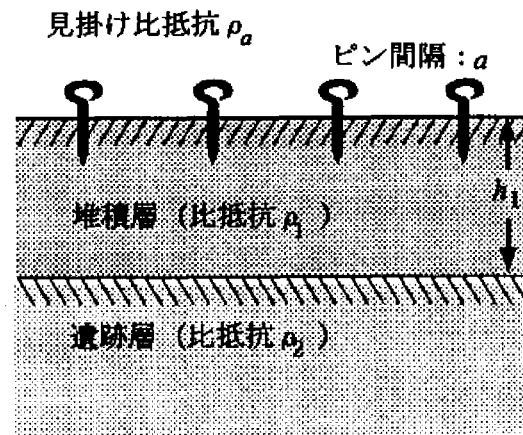


図4.1 2層構造

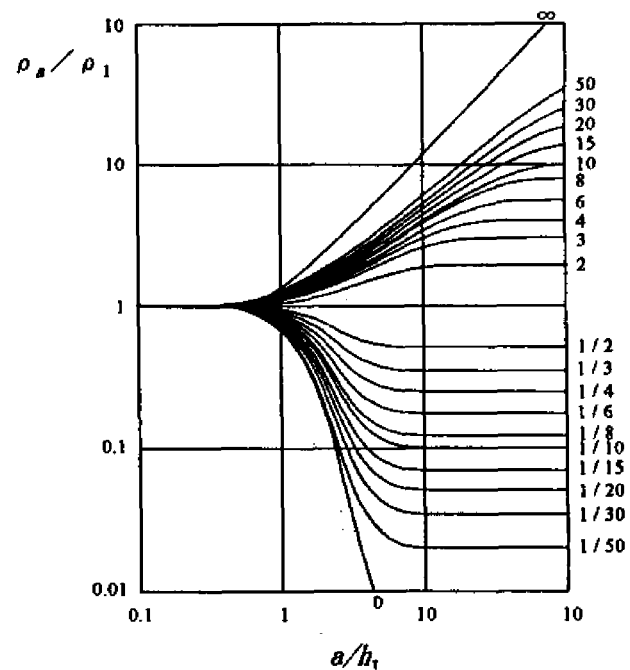


図4.2 2層構造の標準曲線

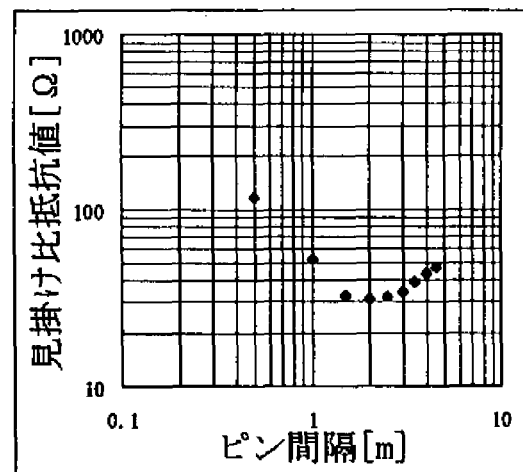


図4.3 実際の垂直変化

4.1.3 堆積層と遺跡層の比抵抗

一測線における堆積層と遺跡層の比抵抗値 ρ_1, ρ_2 を以下のように設定する。

・深いほど比抵抗が大きいとき；

$$\rho_1 = (\text{最小ピン間隔のデータの最小値})$$

$$\rho_2 = (\text{最大ピン間隔のデータの最大値})$$

・深いほど比抵抗が小さいとき；

$$\rho_1 = (\text{最小ピン間隔のデータの最大値})$$

$$\rho_2 = (\text{最大ピン間隔のデータの最小値})$$

当然正確な値とはいえないが、一定値を用いるという目的で、測定データの中で最も近いと思われる値を設定した。

4.1.4 標準曲線の直線近似

計算の簡単化のため、標準曲線の直線近似を行う。横軸 x が小さくなると、縦軸の値は $\log_{10} l = 0$ に収束していることから、簡単化の際、標準曲線の収束点をある一点に定め、その点を $(k, 0)$ とする (ここでは $k = -0.3$ とした)。そして第1層および第2層の比抵抗の比を

$$l = \log_{10}(\rho_2/\rho_1)$$

としたとき、以下の式で近似直線 $f(x)$ を表す。

(i) $l \geq 0$ のとき

$$a = l/(l+1-k)$$

$$b = -kl/(l+1-k)$$

$$f(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq k) \\ ax + b & (k < x \leq l+1) \\ l & (x > l+1) \end{cases}$$

(ii) $l < 0$ のとき

$$a = l/(1-k)$$

$$b = -kl/(1-k)$$

$$f(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq k) \\ ax + b & (k < x \leq 1) \\ l & (x > 1) \end{cases}$$

このようにして求めた標準曲線の近似直線を図4.4に示す。

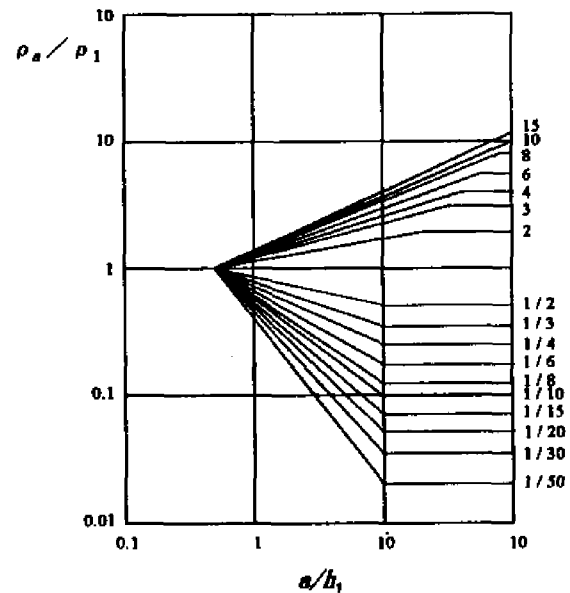


図4.4 標準曲線の近似直線

4.2 解析手順

4.1 で検討した原理、仮定及び簡単化を利用して次の手順で解析を行い、一測線の予測深度を求める。

<手順>

ある一測線の測定データがあるとき、4.1.3の方法で堆積層と遺跡層の比抵抗値 ρ_1, ρ_2 を求める。それにより標準曲線の近似直線 f が1本決まる。

遺跡層の予測深度 h を求めるには、 x_i をピン間隔、 y_i を見掛け比抵抗値としたとき、垂

直変化データ (x_i, y_i) と、標準曲線を近似した直線 f との誤差の合計

$$S = \sum_i \{f(\log_{10}(x_i/h)) - \log_{10}(y_i/\rho_1)\}^2 \quad (1)$$

が、最小になるように h を設定してやればよい。実際は、 S が最小となった h (h_{old}) をもう一度式(1)に代入して新しい h (h_{now}) を求め、 $|h_{now} - h_{old}|$ をある誤差以下まで繰り返す必要がある。

具体的には次のようになる。簡単のため $l \geq 0$ つまり $\rho_2 > \rho_1$ のときに限定して考える手法) $l \geq 0$ のとき

$$a = \frac{l}{l+1-k}, \quad b = \frac{-kl}{l+1-k},$$

$$X_i = \log_{10}(x_i/h_{m-1}), \quad Y_i = \log_{10}(y_i/\rho_1),$$

$$H_m = \log_{10}(h_m)$$

$$h_m = r_m h_{m-1}, \quad R_m = \log_{10}(r_m)$$

とする。ただし m は誤差を減らすために繰り返す回数 $\{m=1, 2, \dots\}$ であり、 h_0 として 0 より大きく、かつ十分小さい値を設定しておく。このとき、標準曲線を近似した直線 f と、測定された垂直変化データ (X_i, Y_i) の誤差は次の式で表される。

$$S_m = \sum_{X_i \leq k} Y_i^2 + \sum_{k < X_i \leq l+1} \{f(X_i - R_m) - Y_i\}^2 + \sum_{X_i > l+1} \{l - Y_i\}^2 \quad (2)$$

式(2)を R_m でまとめると、

$$S_m = \alpha R_m^2 + \beta R_m + \gamma$$

となる。ただし、

$n: k < X_i \leq l+1$ となるような要素の数

$$\alpha = na^2$$

$$\beta = -2a(nb + a \sum_{k < X_i \leq l+1} X_i - \sum_{k < X_i \leq l+1} Y_i)$$

$$\gamma = nb^2 + 2ab \sum_{k < X_i \leq l+1} X_i + a^2 \sum_{k < X_i \leq l+1} X_i^2 - 2b \sum_{k < X_i \leq l+1} Y_i - 2a \sum_{k < X_i \leq l+1} X_i Y_i + \sum_{k < X_i \leq l+1} Y_i^2 + \sum_{X_i \leq k} Y_i^2 + \sum_{X_i > l+1} \{l - Y_i\}^2$$

である。

$\rho_2/\rho_1 \neq 1$ とすると、 $\alpha > 0$ であるから、 S_m

は $R_m = -\frac{\beta}{2\alpha}$ のとき最小値をとる。

このとき予測深度 $h_m = 10^{H_{m-1} + R_m}$ となる。

$|h_m - h_{m-1}| \geq \varepsilon$ の場合は h_m を S_{m+1} に代入して繰り返し計算を行う。

4.3 解析結果

この解析方法における結果を示す。解析に用いたデータは、宮城県の夷森遺跡 (図 4.5) の第 1、2 測線から得られたものである。

両測線とも傾向として真ん中が低くなっているのが見てとれる。円墳の周りに放射状に測線を取っているため、円墳の周りに堀が存在していたという伝説とよく符合するものである。

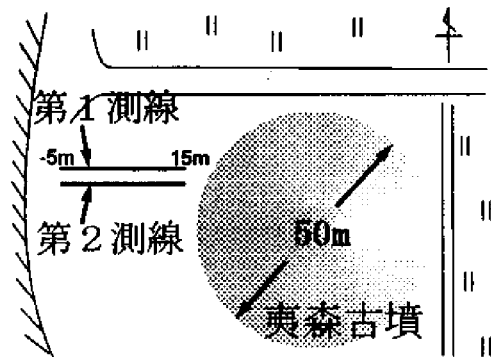


図 4.5 夷森古墳周辺の略図

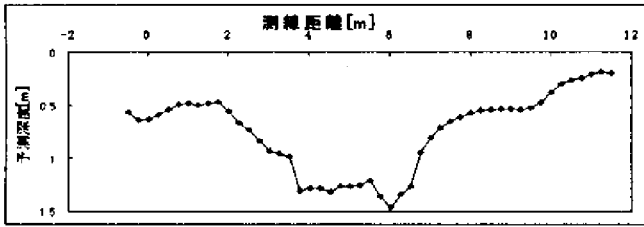


図 4.6 夷森遺跡第 1 測線の予測深度

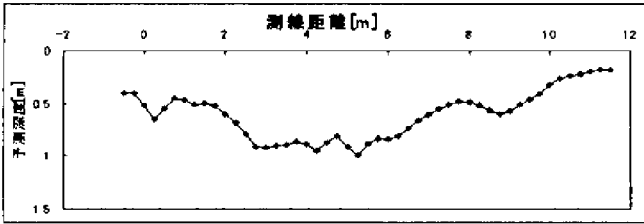


図 4.7 夷森遺跡第 2 測線の予測深度

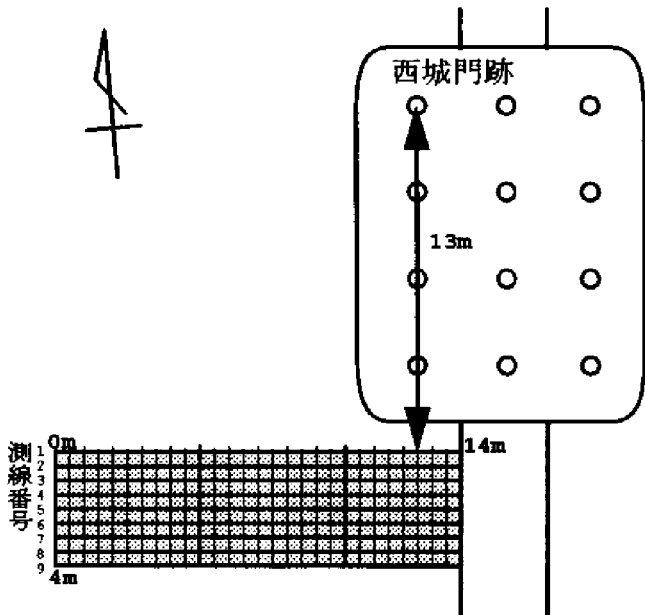


図 5.1 徳丹城跡における測定場所の周辺図

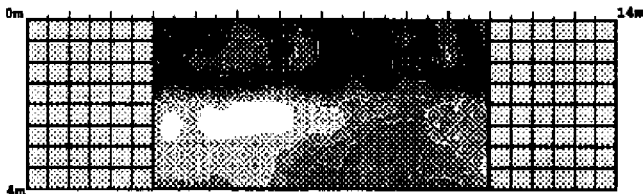


図 5.2 解析結果

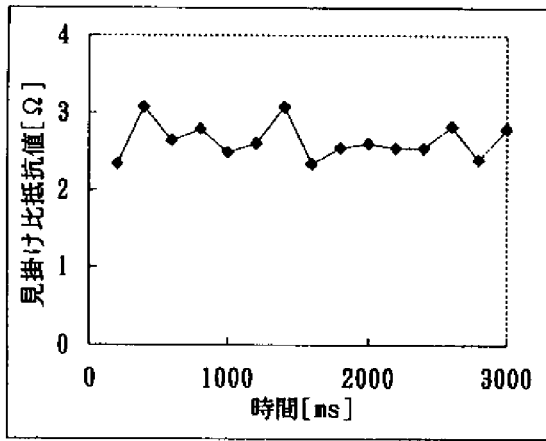
5. データの信頼性に関する検討

徳丹城跡（図 5.1）における探査データをもとにデータの信頼性に関する検討を行う。まずは解析結果を図 5.2 に示す。これは測線ごとの解析結果をまとめて表示したものである。

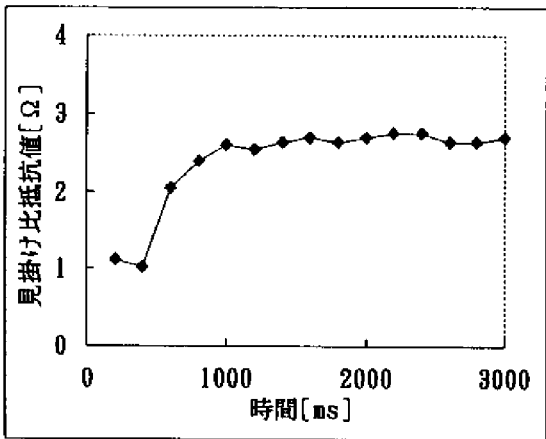
結果を見てみると第 4、5 測線を境として北側と南側では傾向に大きな違いがみられる。経験的に南側のような比較的緩やかな変化を示すのが一般的であり、北側のように極大・極小のまとまりが多く存在することは、何らかの異なる探査条件が含まれていたことを予想させるものである。図 5.2 のように全測線を統合して一つの傾向を示すためには、当然測線全体で条件が同じである必要があり、その様な変化が起こる前に何らかの形で判断する必要がある。

ところで、電気探査では電流を流してから電圧が安定するまで数秒の時間がかかる。本システムでは単に見掛け比抵抗値を得るだけでなく、数秒の待ち時間の間に変化する見掛け比抵抗値データも取得できる。ここでは第 1 測線と第 9 測線におけるピン間隔 2.0m の最初の測点について図 5.3 に示す。

図 5.3 (b) では時間とともに約 2.6[Ω]位に落ち着いているのが分かるが、図 5.3 (a) では一定値に安定しているとは言えない。ここには示さないが、第 5 測線以北と第 6 測線以南でそれぞれ図 5.3 (a), (b) と同様の傾向が見られた。ここには示さないが、第 5 測線以北では (a) と、第 6 測線以南では (b) と同様の傾向が見られた。

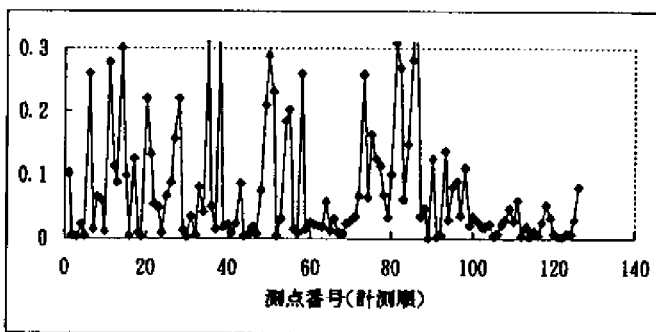


(a) 第1測線

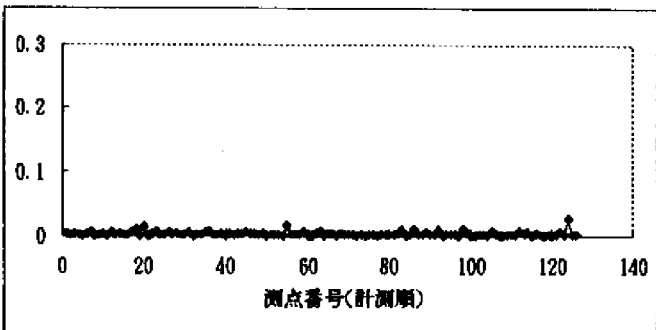


(b) 第9測線

図 5.3 見かけ比抵抗値の変化



(a) 第1測線



(b) 第9測線

図 5.4 測線の全測点における見掛け比抵抗値の分散値

次に第1測線及び第9測線の全てのデータについて、電流を流してから2秒から3秒までの見掛け比抵抗値の分散を図5.4に示す。

図5.4で明らかに第1測線では第9測線と比して値が大きくばらついていることが分かる。第6測線以南では、ほぼ全測点において分散が0.1以内に収まっているが、第5測線以北では分散値が0.1以上のデータの割合は表5.1のようにになっている。これから、データの信頼性をある程度知ることができる。

表 5.1 分散が0.1以上のデータの割合

測線番号				
1	2	3	4	5
41.7%	44.7%	87.1%	88.6%	47.7%

この傾向は、測定後のデータ解析によって明らかになったものであるが、測定中に明らかになれば、その原因を追究したり最測定を行うことができ、信頼性に欠けるデータに対しては、直ちに最測定が可能となる。今後、本システムにこの機能を組み込み、確認を行いたい。

6. まとめ

従来の電気探査の欠点を補うべく、新しい電気探査システムの開発を行い、電極ピンの切替及びデータ取得を自動化することにより、探査時間の短縮、作業効率の向上及び実時間でのデータ表示が可能となった。また、データ解析においては、比較的簡単に地下の傾向を観測でき、データの信頼性を見積もることができた。

今後の課題としては、信頼性に問題のあるデータがでてきても、そこを隣り合うデータで補間することが考えられる。実際、補間を行い解析したが、補間した結果を確かめる手段がなかったため、その結果については省略した。

謝辞

本システムの全体構成及びハードウェア設計は、森 正人さん（岩手大学教育学部）が行ったものです。ここで深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 西村 康：発掘しないで遺跡を知る、106、朝日新聞社(1989)
- 2) 図解物理探査, 192 / 198, 物理探査学会(1989)

協力機関 矢巾町教育委員会