

電磁波探査（CSAMT法）

解 説 書

平成15年1月

有限会社 ネオサイエンス 作成
（一部加筆 (株)アスカソイルコ - ナ - ）

目 次

	頁
§ 1 . 概 要 -----	(1)
§ 2 . 調査方法 (C S A M T 探査方法)	
2 - 1 . 測定原理 -----	(2)
2 - 2 . 測定方法 -----	(7)
2 - 3 . データ処理と解析方法 -----	(10)
2 - 4 . C S A M T 探査成果 -----	(13)

§ 1 . 概 要

本調査手法は、山岳・台地・平野部深層の比抵抗値の特性から、地山の地層区分・基盤岩深度や断層位置などを推定することを主な目的とし、活断層調査や深井戸候補地を選定することに用いられている。

ただし、当手法による測定値からのみで詳細な地質構成や帯水層を把握することは通常困難であり、既往の地形地質資料（既設ボ - リング調査結果・井戸台帳など）や地質踏査等の成果を合わせて総合的な解析結果をとりまとめねばならない。

電気探査手法には本手法以外に垂直探査、比抵抗 2 次元探査（高密度電気探査）などがあるが、本手法の適用性は概略下記のように示される。

(1) 適用深度：数百m ~ 2 千m規模での実例が多い。

(2) 探査深度：測定周波数による 通常2.5, 10, 13.8, 20, 27.7, 40, 55.5, 80, 111, 160, 222, 320, 444, 640, 888, 1280, 1777, 2560, 3555, 5120Hz 以上 2 1 種

(3) 地形条件：特に制約なし

電場測定の電極間隔約 2 0 m

(4) 解析手法：1 次元解析（最小自乗法）

2 次元解析（有限要素法）

§ 2 . 調査方法 (C S A M T 調査方法)

C S A M T 法は、(Controlled Source Audio-frequency MagnetoTelluric) を略したものであり、人工的に発生した可聴周波数帯 (数Hz ~ 数kHz) の電波を用いた電磁探査法である。

今回、C S A M T 探査で測定するのは地下数十m ~ 数1000m までの地下深部の比抵抗値 (電気抵抗値) である。地下深部の比抵抗値は地盤中の地質状況 (割れ目、断層、地層状況)、そして地下水、地熱状況 (地下水貯留層、熱水変質帯の分布) を推定するための資料となり得る。

2 - 1 . 測定原理

(1) 測定値

C S A M T 探査では、送信源から放射された電磁波の電場と磁場とを測定する。また、これら電場と磁場とから見かけ比抵抗と位相角を求める。

[見かけ比抵抗]

1 m × 1 m × 1 m の物体 (断面積 1 m²、長さ 1 m の物体) の抵抗値を比抵抗と呼ぶ。また、見かけ比抵抗とは幾種類かの比抵抗の物体が混合した状態で示す比抵抗、すなわち不均質な物体の比抵抗を見かけ比抵抗と呼ぶ。

なお、C S A M T 探査では、解析前の生データを見かけ比抵抗と、解析後得られた各層の値を比抵抗と呼ぶ。

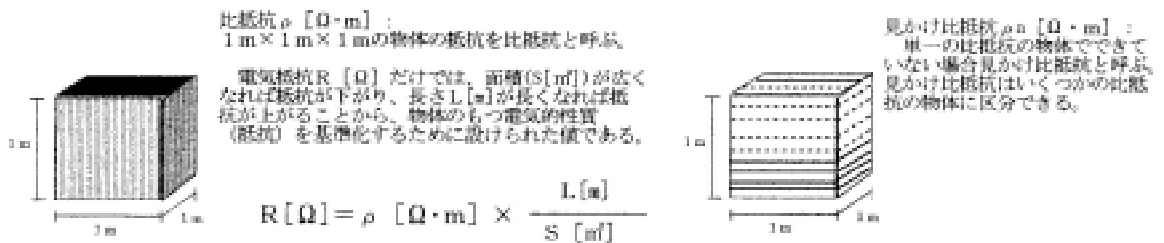


図 2 - 1 . 比抵抗と見かけ比抵抗

[位相角]

C S A M T 探査で測定された電場と磁場との位相ずれの値である。本来両者は、波形で測定され、受信される両者の波形の間には地下構造に由来するずれが生じている。このずれの量を角度で表したのが位相角である。一般に均質な地面の場合 45° を、ニアフィールド領域では 0° を示す。

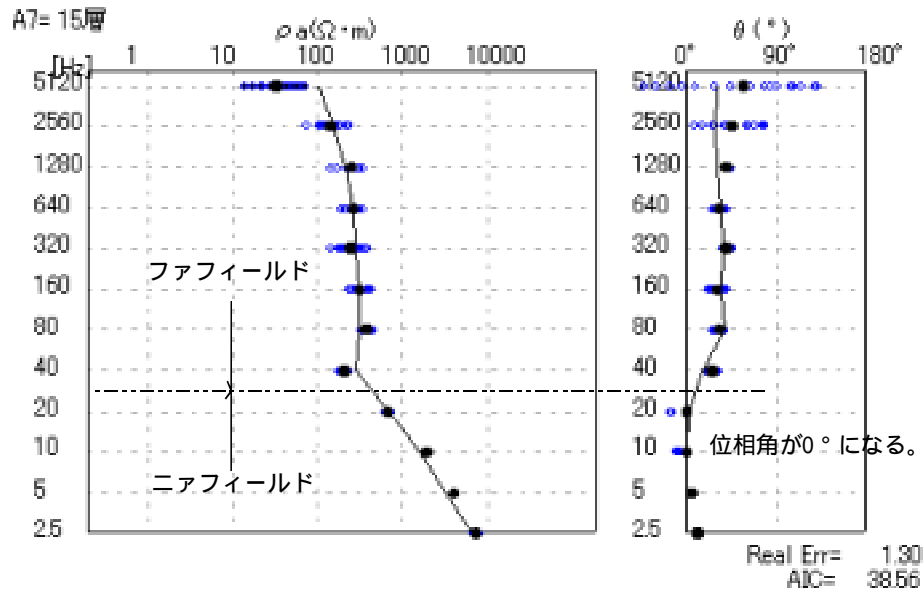


図 2 - 2 . ニアフィールドと位相角 (°)

(2) 比抵抗の計算

地盤に電流を流すと、その電流は地盤と空間中に電場 (E) と磁場 (H) を発生する。その磁場 (H) と地盤に誘導された電場 (E) との強度比 (インピ - ダンス) は、地盤の電気抵抗 (比抵抗) により変わることが知られている。なお、送信源から十分遠く離れた位置での地盤の見かけ比抵抗は、その位置で測定されたインピ - ダンス ($Z = E / H$) を次式に代入することにより求められる。

$$a = \frac{1}{2 f \mu_0} \left| \frac{E}{H} \right|^2 \quad \text{----- (2 . 1)}$$

- a : 地盤の見かけ比抵抗 ($\cdot m$) H: 磁場強度 (A/m)
- μ_0 : 真空の透磁率 (H/m) = $4 \cdot 10^{-7}$
- E : 電場の強度 (V/m) f: 周波数 (Hz)

図 2 - 3、図 2 - 4 は計算機での模擬実験による電場と磁場の平面的分布状況である。地盤は 100 [$\cdot m$] の均質地盤と仮定されている。図 2 - 3 から、送信源から放射された電場と磁場とは互いに直交した関係で空間に広がることが理解できる。また、図 2 - 4 は計算機での模擬実験による電場と磁場との値を (2 . 1) 式に入力し、地盤の比抵抗 [a] を計算した結果である。y 軸方向に 3 以上離れた地区での見かけ比抵抗は 1 割程度の誤差で 100 [$\cdot m$] の地盤の比抵抗を再現していることが読み取れる。ここで (2 . 2) 式で得られる。

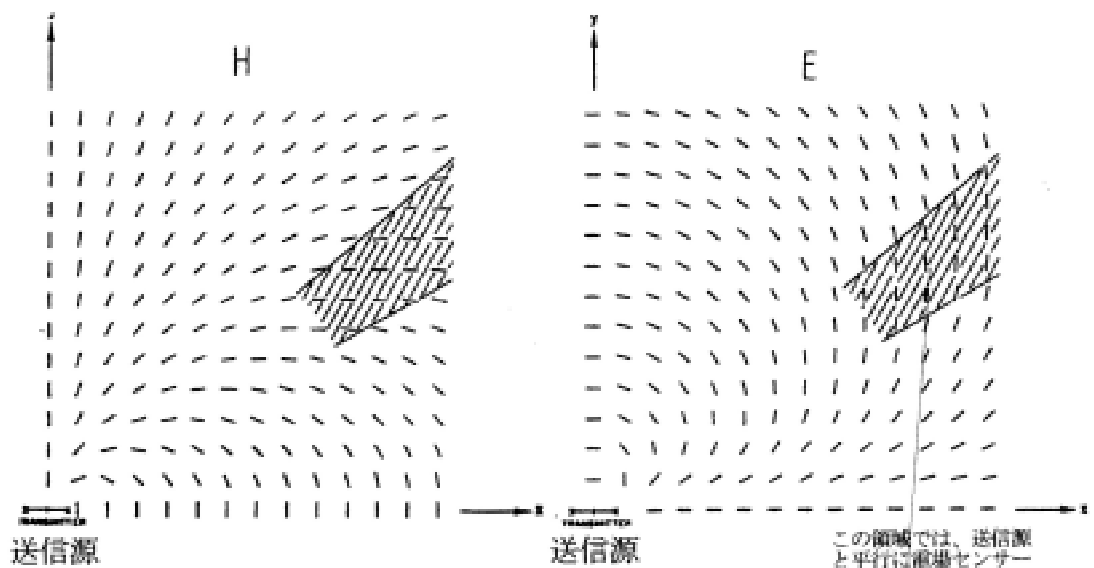


図 2 - 3. 磁場 (H) と電場 (E) の変動方向

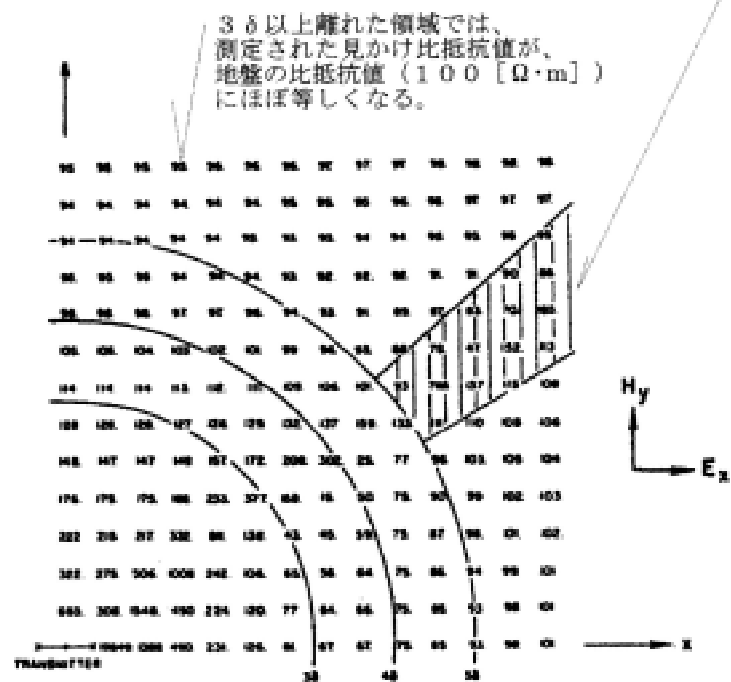


図 2 - 4. 計算で求められた見かけ比抵抗値

(1982, Stewart K. Sandberg, Gerald W. Hohmann より引用)

$$= 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad \text{----- (2 . 2)}$$

:表皮深度(m) f:周波数(Hz) ρ=地盤の比抵抗(Ω・m)

このような理由から、一般にCSAMT探査は送信源から十分に離れた位置で測定することにより、地盤の比抵抗を測定する探査方法である。この時、3以内の近傍をニアフィールドと呼び、それ以遠をファフィールドと呼ぶ。ニアフィールドのデータには、いくつかの補正方法が考えられている。

一次元逆解析では送信源を含めた解析方法を用いる事で対処する。

(3) 探査深度

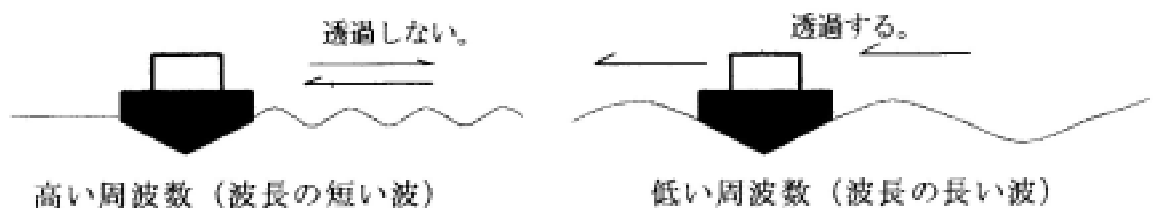
一般に波は波長が長いと透過が良く、逆に短いと悪い。電磁波についても同じことが言える。

CSAMT探査は、このような波の性質を利用することにより、探査深度を変えている。

したがって、この原理を利用し、複数の波長の波で測定することにより、ある測定点でのいろいろな深度までの見かけ比抵抗を測定できる。次に、各深度までの見かけ比抵抗から、各々の深度での比抵抗を解析によって求める。実際には波長を変える代わりに波の周波数を変えて測定を行う。探査深度の1つの目安としては地表で1の電磁波強度が、ある均質地盤の中で1/e(=1/2.71828...)まで減衰する深度を一つの便宜上の目安として(2.2)式が与えられている。ここで ρ は一般に表皮深度と呼ばれている。ただし、実際の探査深度は一次元逆解析で求められる。

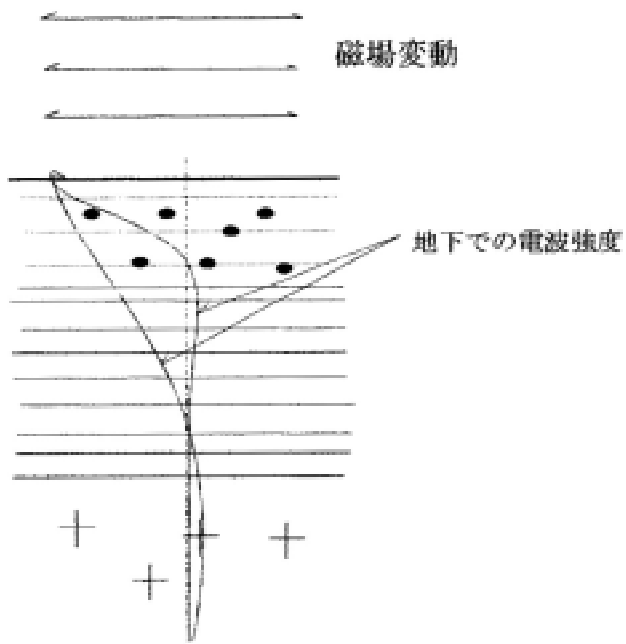
ここで探査深度の目安となる(2.2)式からわかるように、探査深度は地盤の比抵抗の関数である。したがって、探査深度は周波数のみならず地盤の比抵抗によっても変化する。

例えば、低い比抵抗の地盤では、同じ周波数を用いているにもかかわらず探査深度は浅くなる。



電磁波も同様の性質がある。

図 2 - 5 . 波の周波数と透過性



低い周波数は透過性に優れ、
深くまで、一方、高い周波数の
波は地下浅くで減衰してしまう。

図 2 - 6 . 電磁波の地盤内での減衰

2 - 2 . 測定方法

2 - 2 - 1 . 測定機器仕様

表 2 - 1 . に C S A M T 探査装置の機器仕様を図 2 - 7 ~ 9 に各装置の写真に掲載する。

表 2 - 1 . 機 器 仕 様

内容	項目	仕様
送信機 (トランスミッター)	最大出力	5kw
	最大電圧	1000V
	最大電流	10A
	送信周波数	最大21種 [5120 ~ 2.5Hz]
発電機	最大出力	4.5kw
	電圧	200V
	周波数	60Hz
受信機	受信周波数	最大21種 [5120 ~ 2.5Hz]
	チャンネル数	4 ch
	増幅率	40 ~ 100dB[10dBピッチ]
	波形処理	フーリエ変換
	測定値	見かけ比抵抗、位相角



図 2 - 7 . 送信機(トランスミッター)



図 2 - 8 . 受信機本体



図 2 - 9 . 受信センサー

2 - 2 - 2 . 送信源と受信測点位置

送信源及び受信測点位置を巻頭の調査案内図に示す。

(1) 送信サイト

[設置]

調査位置（受信点）との十分な距離(約 8 km)を隔てた位置に送信ケーブルを設置する。

送信ケーブルの両端には、接地抵抗を下げるため片側、数十本程度の電極を地盤に埋設し、塩水などを加え、接地抵抗をできる限り低減させる。

送信ケーブルを、トランスミッターと呼ばれる送信機に接続する。

[送信]

送信は先に決めた時刻表をもとに決められた時間に決められた周波数を送信する。

なお、この時刻表は受信側と共通の物である。

1 時間で5120 ~ 2.5Hzまでの21種の周波数を送信する。

送信信号が受信点に届いている事を確認するため、各周波数の送信時間の中に数分の送信しない時間を設け、受信信号が届いている事を確認しながら測定する。

(2) 受信サイト

[設置]

測定点では、送信ケーブルの両端の電極群をつないだラインに対して平行（調査位置図その 1 内の送信源のラインに平行 [N16 ° W] ）に、受信側の電場をとらえるための電極（電場センサー）を設置する。

磁場を捕えるコイルは、測定点もしくは、その近傍にて 2 本の電極を結ぶ方向と直行した方向（電場センサーに直行した方向）で、かつ、水平に設置する。

なお、測点は地面に誘導された電位を測定している電場センサーの位置となる。

[受信]

受信は一对の電極と一本のコイルにて測定を行う。

受信は送信と同一の時刻表をもとに、各周波数の測定を行う。

測定は送信時と、そうでない時の両方で行い受信が確実に行われている事を確認しながら測定を進める。

各測点の測定が終了した時点で、 a - f 、 - f 曲線を計算機内のグラフィックで確認し、測定が正常であるか否かを確認しながら測定作業を進める。

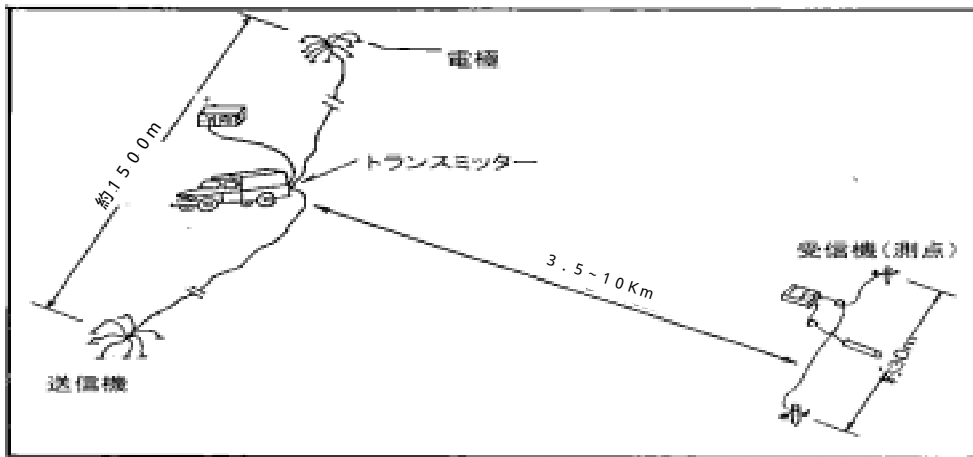


図2-10. 探査模式図

2 - 3 . データ処理と解析方法

(1) 現場データ処理

フィルタ処理

C S A M T 法は特定の周波数についてのサンプリングを行うので、受信機本体の中でバンドパスフィルタ、ノッチフィルタ処理を施した後、フーリエ変換処理により、波形を実部と虚部とに分解した後、計算機に送り出している。

スタッキング

スタッキング波形数は測定時間の関係で高周波数(5120Hz)ほど多くの波形を、低周波数(2.5Hz)では、その数が少なくなる。その数の最大は5120Hzで400,000波形以上、2.5Hzで200波形程度の測定を行う。

棄却検定

得られた測定データを棄却検定し、雑音の多いデータを除去した後に、見かけ比抵抗を計算する。

(2) 一次元逆解析と各図の作成

比抵抗探査の解は、ある測定値に対して等価な解がいくつか存在することが知られている。このため、解を一義的に決定することに困難があることが知られている。その打開策の一つとして、一つの測点のデータに対して、いくつもの層構造モデルに対する解を求める。

次に、それらの平均値としての深度毎の比抵抗分布(地下構造モデル)を得ることにより、各測点の地下構造を決定する。

[解析手順]

送信源と測点位置の座標を読み込む。

送信源を考慮した一次元逆解析を行うために、送信源と測点位置の座標を読み込む。

データ補間

測定データの中にはノイズにより解析に使用できない周波数のデータが存在する場合がある。

このようなデータについては、一次元逆解析に先だって、除去し、スプライン補間でその周波数のデータを補う。

一次元逆解析

水平多層構造の仮定の基に、信号源を考慮した式を解き、測定データと解析データとが整合するようなモデルを計算機で求める(図2 - 11 . 一次元逆解析フロー)。

比抵抗解釈曲線

解析は7層から21層の15種類の層区分モデルで解析を行う。その結果、測点1点につき15本の抵抗柱状図が得られ、また、各柱状図に対する測定値と解析値との誤差(残差)が得られる。

比抵抗解釈曲線は、誤差の大きなモデルを捨てた後、残りのモデル(比抵抗柱状図)で整理する。

この際、各比抵抗柱状図の誤差の逆数を重みとして、深度毎の平均比抵抗を求める(図2 - 12)。

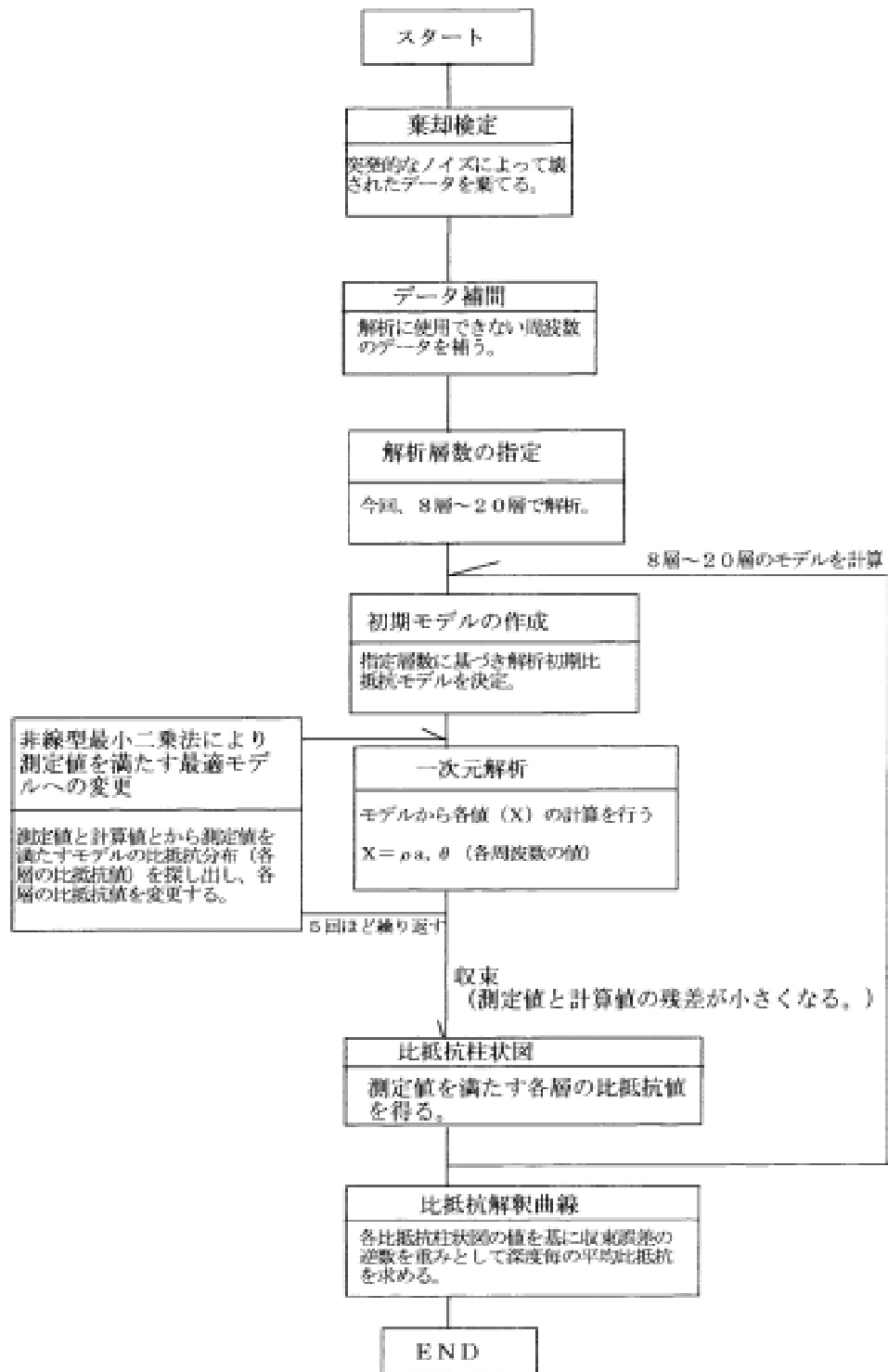
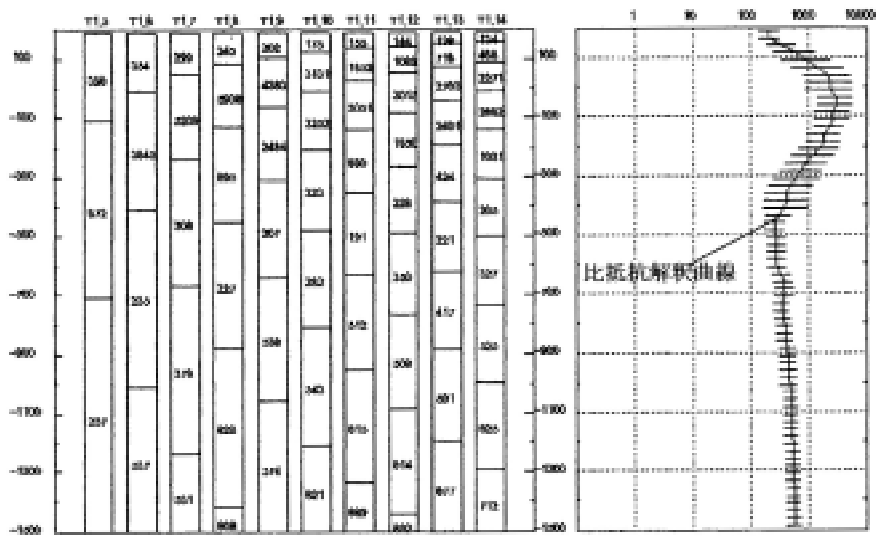


図 2 - 1 1 . 一次元逆解析フロ -



一箇所の測点のデータを、数種類の層構造で解析することで、数種類の比抵抗柱状図が得られる。これらを収束性の良し悪しを重みとして、ある深度毎で平均することで比抵抗解釈曲線を得る。比抵抗解釈曲線の横バーは標準偏差を示す。

図 2 - 1 2 . 比抵抗柱状図と比抵抗解釈曲線例

比抵抗断面

比抵抗解釈曲線を基に，比抵抗断面図をカラーコンターで作成する。

2 - 4 . C S A M T 探査成果

表 2 - 4 - 1 に、解析結果事例を一覧表として示す。

この解析結果は、深度約1000mまで数 . m ~ 千 . m の範囲の見かけ比抵抗値を示している。

表 2 - 4 - 1 には、その地域に分布する地質状況を考慮して、比抵抗値 a の範囲と地層との対比を示している。図 2 - 4 - 1 は比抵抗断面図であり、踏査や地質資料も加えて地質構成の概略を示したものである。

参考までに以下に一般的な地質と比抵抗の関係を記す。

地盤の比抵抗は、地質と、その中に含まれる水のイオン濃度の状況に左右される。それ以外にも鉱物、例えば黄鉄鉱などの金属鉱物は比抵抗を低下させる。

一般に地質に関しては、含水量と比抵抗の相関があり、粘土質のような含水率の高い地質では比抵抗が低く、硬質、緻密な岩石では高くなる傾向にある。

今、塩水など特殊な地下水の場合を除いて大きく見ると、以下のような傾向が認められる。

1 ~ 数 10 [. m] : 粘土、軟質頁岩、シルト

数 10 ~ 数 1000 [. m] : 硬質頁岩、砂層、砂岩、礫岩、凝灰岩

数 1000 [. m] ~ : 新鮮な花崗岩など硬質緻密な岩

* 注) 含水状況および各岩の風化状況などによっても比抵抗は大きく左右される。

表 2 - 4 - 2 . 比抵抗と地質 (物理探査用語辞典などのデータからまとめ)

地 質 [. m]	[. m]			
	1	10	100	1000
粘土	—————			
シルト岩	—————			
軟質頁岩	—————			
砂層 (比抵抗の低い地下水)	—————			
硬質頁岩	—————			
砂層 (真水)	—————			
砂岩	—————			
礫岩	—————			
凝灰岩	—————			
新鮮な花崗岩など硬質緻密な岩	—————			
地表水	—————			

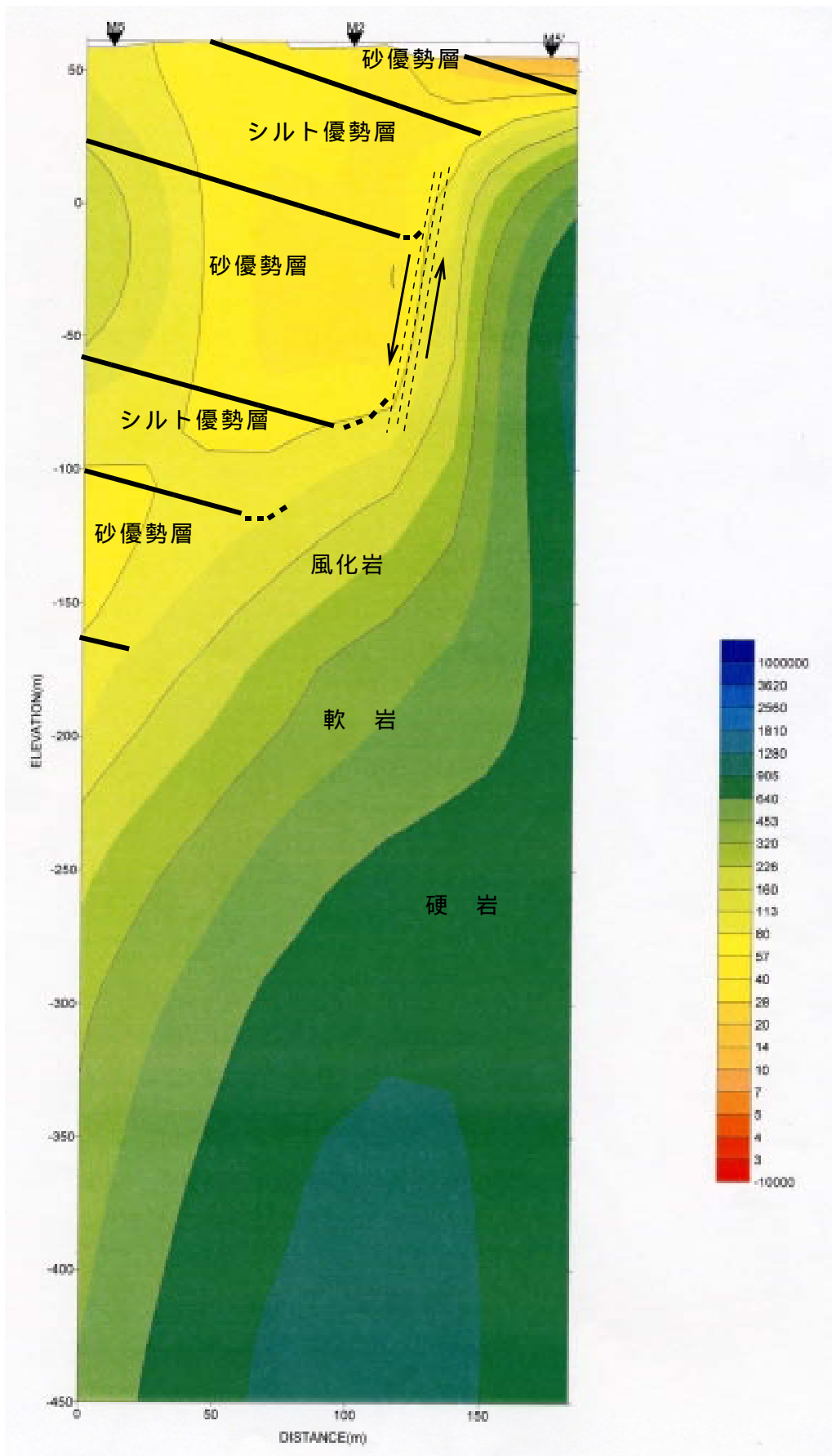


图 2 - 4 - 1 . 比抵抗断面图