

IP 映像法の開発

—比抵抗と充電率を用いた 2次元インバージョン—

伊 関 伸 一

Development of IP Image Profiling

—Two-Dimensional Inversion of Resistivity and Chargeability Data—

Shin-ichi ISEKI

Abstract

Recently, two-dimensional resistivity inversion techniques have been widely used for mineral resource exploration, ground water exploration, and civil engineering purposes. On the other hand, induced polarization (IP) method has been used mainly for the metal resource exploration. Chargeability obtained by the IP method corresponds to the polarization or charging phenomenon of underground which usually caused by metal ores or clay minerals. The IP method is considered effective to explore clayish fracture zone for the civil engineering purposes. Joint inversion of resistivity and chargeability data is also expected to have better accuracy than conventional inversion of only resistivity.

The dipole-dipole array, which is usually used to avoid the effects of electromagnetic coupling, often gives insufficiently small potential value in observation when a large electrode separation index (e.g. more than 10) is used. However, to keep an enough data density, larger electrode separation indices are necessary. Therefore, to obtain bigger potential value the pole-dipole array is more practical than the dipole-dipole array. Chargeability value obtained by time domain measurement is used as the IP effect. A 3 kW transmitter (VIP3000) and a 6-channel synchronized time domain IP receiver (ELREC-6) were used. Both are products of IRIS Instruments in France.

Sensitivity analysis was conducted to investigate the characteristics of pole-dipole array. The sensitivity distribution shows asymmetrical shape for current electrode and potential dipole.

The electrical potential of each dipole is calculated by the 2.5-dimensional finite element method. Apparent chargeability is computed by the Seigel's equation. Joint inversion of resistivity and chargeability is carried out using above forward calculations. As the inversion algorithm, we use Powell's hybrid nonlinear least squares method. The partial derivatives used in the inversion scheme are also used in the calculation of the apparent chargeability.

I conducted a standard resistivity inversion technique and the IP image profiling proposed

here for locating a fault and geological structure survey.

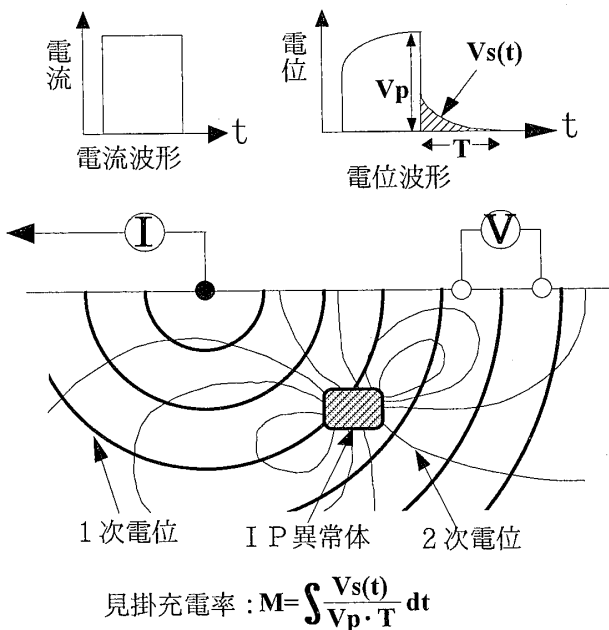
The IP image profiling can promise more accurate image and more information of underground. The IP image profiling can be applicable to civil engineering purposes.

1 はじめに

比抵抗映像法は、地盤の二次元比抵抗分布を探索するための実用的な測定・解析方法として、島(1992)によって提案されたものである。これは、二極法を用いて測定され、マルチレイヤー解析やアルファセクター法によって、インバージョンの技術を用いて自動解析され、解析結果は、カラーの比抵抗断面図として画像化される。土木分野への適用例としては、トンネルルートやダムサイトに関する地質構造の調査などがあり、また、地下水調査や温泉ボーリングの位置選定のための調査など、多数の報告がなされている。

一方、IP法は主に鉱床探査に用いられてきた方法であり、これによって得られる充電率や周波数効果は、地盤の分極や充電現象に起因すると考えられている。粘土や石墨などもIP効果を示すが、鉱床探査においては、それらの物質に経済的価値がないため、ノイズ源と考えられてきた(物理探査学会, 1989)。しかし、筆者は、土木の分野では、断層によって粘土化した破碎帯の探査などにIP法が利用できると考え、IP法と比抵抗映像法とを組み合わせることを試みた。

比抵抗映像法で測定される比抵抗のデータに加えて、



$$\text{見掛充電率} : M = \int \frac{V_s(t)}{V_p \cdot T} dt$$

図-1 IP法の原理

Fig. 1 Principle of IP method

IP法による充電率を求め、これらの二種類のデータを同時に解析することによって、解析精度の向上が期待でき、さらに、比抵抗と充電率の2つの解析断面を得ることができるために、より詳細な地質構造の解釈ができると考えられる。筆者は、充電率と比抵抗の両方を用いた2次元探査技術を「IP映像法」と名付け、解析精度・解釈の適性の高い二次元電気探査を目指した。

IP法は、測定された見掛充電率をそのまま疑似断面に表示することが主流であったが、IP映像法では、比抵抗映像法と同様に、逆解析の手法を用いて地盤の比抵抗と充電率の真の分布を求めている。また、最終結果の出力は、比抵抗映像法の場合と同様に、わかりやすいカラーコンター表示の映像出力とした。

この論文においては、第2章でIP法の原理について簡単に述べ、第3章では、基礎的な検討として、IP映像法で用いる電極配置の感度分布について述べる。第4章で、IP映像法の測定方法を、第5章では見掛比抵抗/見掛充電率の疑似断面図の性質を調べ、第6章でIP映像法の解析手法について説明している。第7章では数値実験による検討結果を報告し、実地盤に対して適用した実験例を第8章で紹介する。

2 IP法の原理

IP法は、主に鉱床探査に用いられてきた方法で、大地の電気的な分極効果を測定する探査法である。たとえば、金属鉱物を含む岩石に電流を流すと、鉱物の表面と周囲の間隙水との間に電位差が生じ電荷が蓄えられる。加えた電流を切ると、蓄えられた電荷は徐々に放出されるが、蓄えられる電荷の量や放出に要する時間は、鉱物の種類によって異なる。電流切断後に放出された電荷に起因する電位を2次電位(V_s)と呼ぶ。IP法では、図-1に示すように、地盤に電流を流し、ある距離離れたところで電位を観測する。電流切断から次の電流印加までの間の2次電位の変化を時間で積分して、電流を流している間の電位(1次電位: V_p)と観測時間(T)で除したものを充電率(M)と呼び、単位を mV/V で表わしている。地表で測定される充電率は、電極を設置した付近の影響を広範に反映しており、これを見掛充電率と呼ぶ。1次電位は、比抵抗映像法の場合と同じように、

表一1 代表的な岩の比抵抗と充電率
Table 1 Resistivity and chargeability of typical rocks

岩石名	比抵抗 (Ωm)	充電率 (mV/V)
凝灰岩	112	6.2
砂岩	79	7.3
石灰岩	30000	1.8
頁岩	1100	83.7
標準砂	63	0.3
複雲母花崗岩	1460	11.4
石英安山岩	3000	10.0
流紋岩	8600	7.4
カンシ玄武岩	1400	6.2
緑泥片岩	10000	13.5
角閃石片麻岩	4700	8.6

見掛比抵抗に換算できるので、データの表示方法としては、見掛比抵抗断面図と見掛充電率断面図の2種類の断面図が得られる。最終結果としては、比抵抗映像法によって得られるような比抵抗断面図とIP法による充電率断面図の2つの断面図を得ることができる。

金属鉱物以外に、粘土鉱物なども高い充電率を示すことが知られている。金属鉱床探査の分野では、経済的に価値がない粘土などはノイズ源とされてきた。しかし、土木の分野では、断層によって粘土化した破碎帯の位置を推定したり、通常の比抵抗法では分解能の上からいような低比抵抗地域の地質構造の探査などに、IP法は有効であると考えられる。

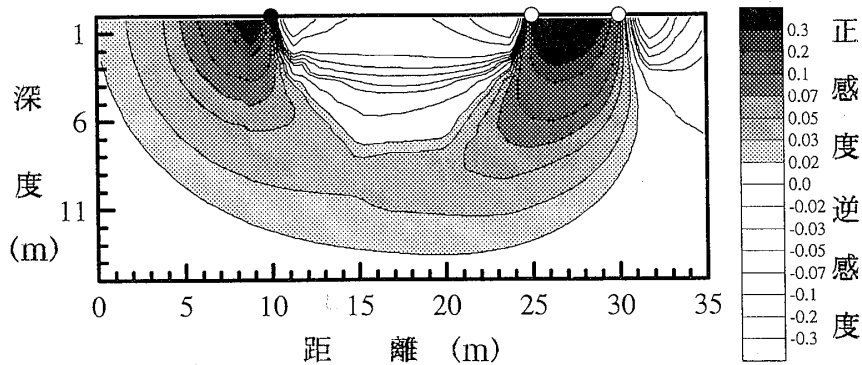
一般的な岩石の充電率については、まだ良くわかっていない。これまでに、金属鉱物を含む岩石については数多く実施されていたが、粘土鉱物やその他の岩石についてのサンプル測定は、ほとんど実施されていない。そこ

で、筆者は、IP映像法の定量的な解釈を行うために、これまでに、若干のサンプルについて、充電率の測定を実施した(数量的には不十分である)。そのうちの代表的な岩石の比抵抗と充電率を表一1に示す。すべて100Ωmの水で湿潤させたときの値である。これによれば、粘土鉱物が固結した頁岩の充電率が非常に大きな値を示していることがわかる。

3 IP映像法の電極配置と感度分布

比抵抗映像法の測定では、二極法電極配置が用いられる。二極法電極配置は測定時の操作性が良く、測定電位が比較的大きいという特徴がある(Shima, 1989)。一方、IP法の測定では、電磁カップリングの影響を除くために、ダイポール・ダイポール法電極配置やポール・ダイポール法電極配置を用いることが多い。IP法の土木物探への適用を考えると、比抵抗映像法と同じ程度の分解能は保持したい。そのためには、比抵抗映像法と同じように、電極隔離係数を10から15くらいまでは確保する必要がある。ダイポール・ダイポール法電極配置を利用しようとする場合、単一の電極間隔では、電極隔離係数を上記のように大きくすると、測定される電位が極端に小さくなり、測定不能となる。また、電極間隔を適宜変更しながら測定するのでは作業が煩雑になる。そこで、IP映像法の測定には、測定される電位が比較的大きい、ポール・ダイポール法電極配置を用いることにする。

ポール・ダイポール法電極配置の特徴を調べるために感度分布を計算した。感度は、単位体積のブロックに分割した場合の単位体積比抵抗の変化による見掛比抵抗の変化の割合によって示される。ここでは、感度として見掛比抵抗の単位体積比抵抗による偏微分係数を用いる。図一2に電極隔離係数n=3の場合の感度分布を示す。



図一2 ポール・ダイポール法の感度分布
Fig. 2 Sensitivity distribution of pole-dipole electrode array

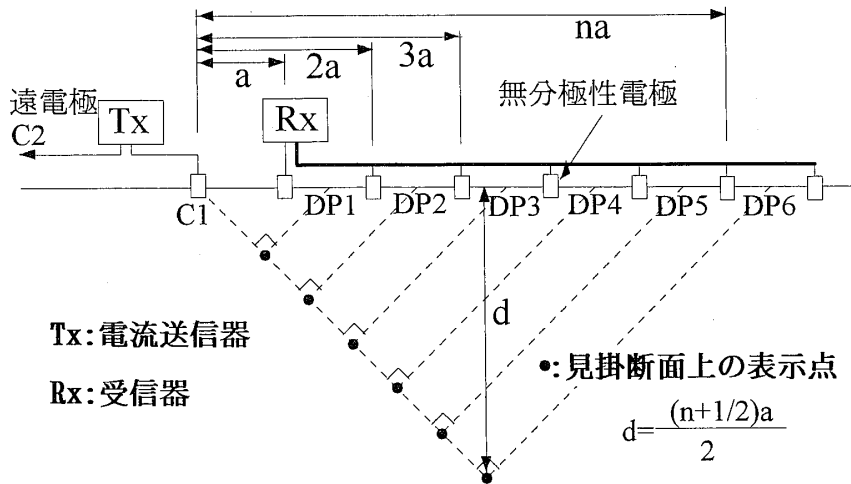


図-3 IP映像法の測定方法

Fig. 3 Schematic diagram of measurement system

表-2 測定機器の主な仕様

Table 2 Specification of transmitter(VIP-3000) and IP receiver(ELREC-6)

(a) 電流送信機 (VIP-3000)

項目	仕様
出力電力	最大3000VA
出力電圧	最大3000
出力電流	50mA~5A
ダイポール数	8(パルス幅で選択)
通電周期(パルス幅)	0.25秒~8秒
電流精度	1%
大きさ	410H×320W×240D mm
重さ	16 kg

(b) IP受信機 (ELREC-6)

項目	仕様
入力電圧	最大
チャンネル数	6チャンネル
電圧減衰測定ウインドウ数	10ウインドウ
入力インピーダンス	10MΩ
サンプリングレート	10ms
アンプゲイン	自動設定
付加機能	スタッキング 自動SPキャンセル
1次電位分解能	1μV
充電率分解能	0.1mV/V
メモリー容量	1800測定分
大きさ	240H×300W×200D mm
重さ	7.5 kg

この図から、電流極と電位ダイポールとの間に逆感度が現れ、電位ダイポールの間には強い正感度が現れることが分かる。さらに、二極法やダイポール・ダイポール法では、電流極(ダイポール)と電位極(ダイポール)の中線に対して対称な感度分布を示すが、ポール・ダイポール法では非対称で、電位ダイポール側に感度の高い部分が片寄った形を示すことが分かる。

4 測定方法

IP法で測定する2次電位は、通常の比抵抗法で測定する1次電位に比べて著しく小さいために、ノイズの影響を受けやすい。そこで、測定電極配置には、比抵抗映像法で用いられている二極法の代わりに、ノイズとなる電磁カップリングの影響が少ないポール・ダイポール法を用いる。二極法では、電流極と電位極に、それぞれ、遠電極を設けるが、図-3に示すように、ポール・ダイポール法では、電流極にだけ遠電極を設置して、測線上の2つの電極間で電位差を測定する。電極には、電極自身の分極を避けるために、棒状の金属電極ではなく、より精確な電位の測定ができる鉛と塩化鉛を組み合わせた無分極性電極を用いる。無分極性電極には、この他に、銅-硫酸銅電極、銀-塩化銀電極などがある。

電流送信装置には、観測される電位を大きくするために、1~4Aの大電流を流すことのできる送信機としてIRIS社製のVIP-3000を用いた。また、IP受信装置には、電圧分解能が1μV以上で、IP現象を測定できる受信機としてIRIS社製のELREC-6を用いた。表-2にVIP-3000とELREC-6の仕様を示す。

測定上の留意点としては、比抵抗映像法の場合と同様に、電気的なノイズ源から遠ざけることはもちろんであるが、電流ケーブルや電位測定ケーブルをコイル状にしないこと、電流ケーブルと電位ケーブルとを近づけないこと、電極の接地抵抗を下げるなどがあげられる。これらはいずれも、電磁カップリングの影響を避けるためである。

5 見掛比抵抗/充電率疑似断面表示

ポール・ダイポール法の測定値の表示位置は、様々な表示法が提案されているが、ここではもっとも一般的な表示法を採用する。すなわち、図-3に示すように、測定値の表示位置を、電流極と電位ダイポールの中点を結んだ線を底辺とする直角二等辺三角形の頂点とする。こ

の場合、この疑似断面のデータ表示位置が、そのまま探査深度となる。ちなみに、二極法では、電流電極と電位電極の最大電極間隔が探査深度となるが、ポール・ダイポール法では、電極間隔と最大電極隔離係数の積の約半分となる。すなわち、同じ電極間隔であっても、I P 映像法の探査深度は比抵抗映像法の約半分となる。

単純な異常に対して、ポール・ダイポール法の見掛比抵抗/充電率疑似断面が、どのような応答を示すかを調べるためにシュミレーションを行った。図-4 (a) に示すように、100Ωmで1mV/Vの地盤に、距離程9~10m、深さ2~3mの部分に10Ωmで、50mV/Vの低比抵抗・高充電率の異常体がある場合を仮定した。この場合に得られる見掛比抵抗疑似断面図を図-4 (b) に、見掛充電率疑似断面図を図-4 (c) に示す。この例では、電流極を図の左側(距離程の小さい側)に配置して

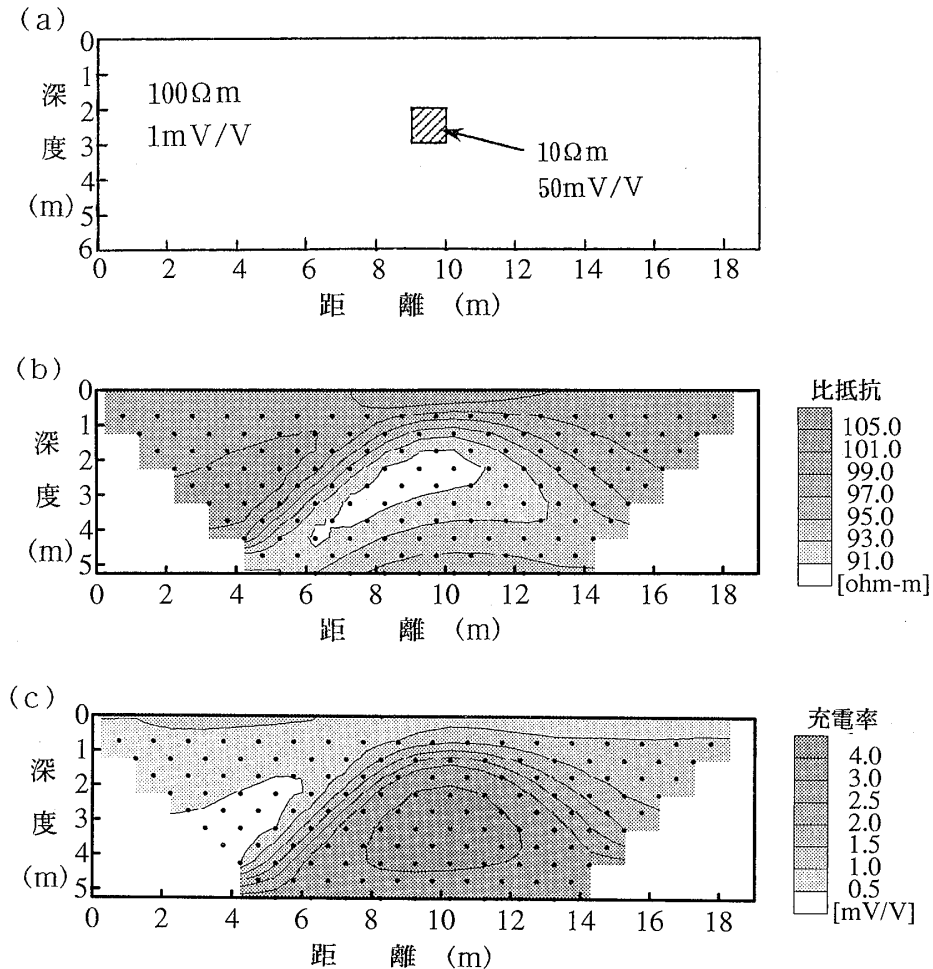


図-4 見掛比抵抗/充電率疑似断面表示

(a)低比抵抗・高充電率異常モデル. (b)見掛比抵抗疑似断面. (c)見掛充電率疑似断面

Fig. 4 Apparent resistivity and apparent chargeability pseudo-sections

(a) A model of low resistivity and high chargeability prism in homogeneous earth

(b) Apparent resistivity pseudo-section calculated from the model(a)

(c) Apparent chargeability pseudo-section calculated from the model(a)

測定した場合を示している。感度分布が非対称であることから、図-4 (b) および図-4 (c) に示すように、見掛断面図においても異常を示す部分が電流極側に伸びたような形を示していることが分かる。このことから、右落ちの断層構造の理論計算を行ってみると、左落ちの断層であるかのような疑似断面が得られることがあるということがわかった。

6 解析方法

図-3 に示した測定法にしたがって作成される見掛疑似断面図は、地下の比抵抗あるいは充電率の分布概要を示したものであり、真の比抵抗あるいは充電率の分布を正しく示しているわけではない。

地盤の見掛比抵抗あるいは見掛充電率から、真の比抵抗あるいは充電率の分布に近いモデルを求めるためには、逆解析を実施する必要がある。

図-5 に逆解析の流れを示す。IP 映像法の解析においては、測定された見掛比抵抗値および見掛充電率をデータとして用いる。また、探査領域を適当な大きさのブロックに分割し、それぞれのブロックの比抵抗と充電率の値をパラメータとして与えて、理論的な見掛比抵抗と見掛充電率を計算する。

IP 映像法では、比抵抗と充電率とを同時にインバージョン解析を行う。フォワード計算には、2.5次元有限要素法と Seigel の式 (Seigel, 1959) を用いる。2.5次元有限要素法とは2次元的な構造に対して、点電流源による

3次元電位分布を計算する方法である (Coggon, 1971)。見掛充電率は下記に示すような Seigel の式を用いて計算する。

$$m_a = \sum \frac{\partial \log \rho_a}{\partial \log \rho_i} \cdot m_i$$

ここで、 m_a は見掛充電率、 m_i は充電率であり、 ρ_a は見掛比抵抗、 ρ_i は比抵抗である。

これらのフォワード計算を用いて、比抵抗と充電率の同時解析 (ジョイントインバージョン) を行う。データと理論値の残差が小さくなるように、非線形最小二乗法を用いてモデルを繰り返し修正する。残差が充分小さくなり、収束したと判断できれば解析を終了する。このインバージョンアルゴリズムには、Powell のハイブリッド非線形最小二乗法を用いる (Powell, 1970)。これはガウス-ニュートン法と最急降下法とを組み合わせたものである。Seigel の式に使われる偏微分係数は、インバージョンの中でヤコビアン行列として計算されるものと同じものであり、再度計算する必要はない (Sasaki, 1982)。

このようにして地盤の二次元的な比抵抗分布と充電率分布が求められる。そして、最終結果として、カラー表示の比抵抗断面図と充電率断面図の2種類の断面図が出力される。

7 数値実験

この方法の有効性を確かめるために、図-6 (a) に示すように、断層に伴って粘土化した低比抵抗・高充電率の破碎帯が、右側に45°の角度で落ちているモデルを用いて数値実験を行った。この断層は、200Ωmの層に10mの段差を設け、比抵抗10Ωmの幅10mの破碎帯を伴うとし、全体が比抵抗100Ωmの表層で覆われているとした。破碎帯の充電率は20mV/Vで、破碎帯以外の所の充電率は1mV/Vとした。

電極間隔1m、総電極数2.5、最大電極隔離係数 $n=10$ とし、ポール・ダイポール法によって測定したとした。データ数は、見掛比抵抗および見掛充電率の両者とも、185個となった。測定は、電流極を図の左側(距離程の小さい側)に配置して行った。その結果求められた見掛比抵抗疑似断面図および見掛充電率疑似断面図を、それぞれ、図-6 (b) および図-6 (c) に示す。これらの図では、断層が右落ちであるにも関わらず、左落ちであるかのようなパターンを示している。これは、前述したように、感度分布の非対称性による影響である。

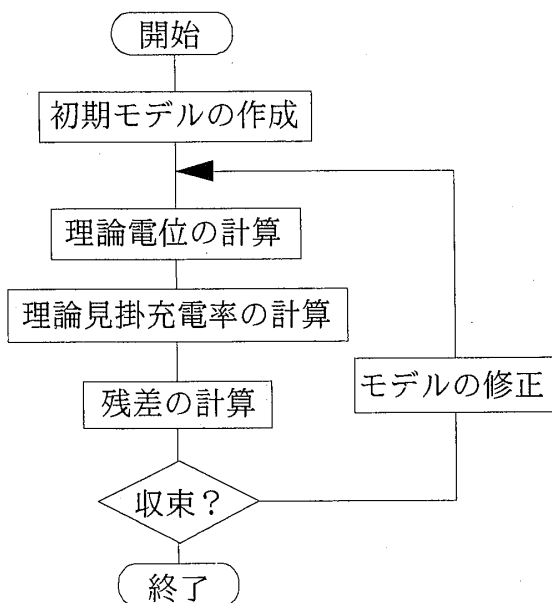
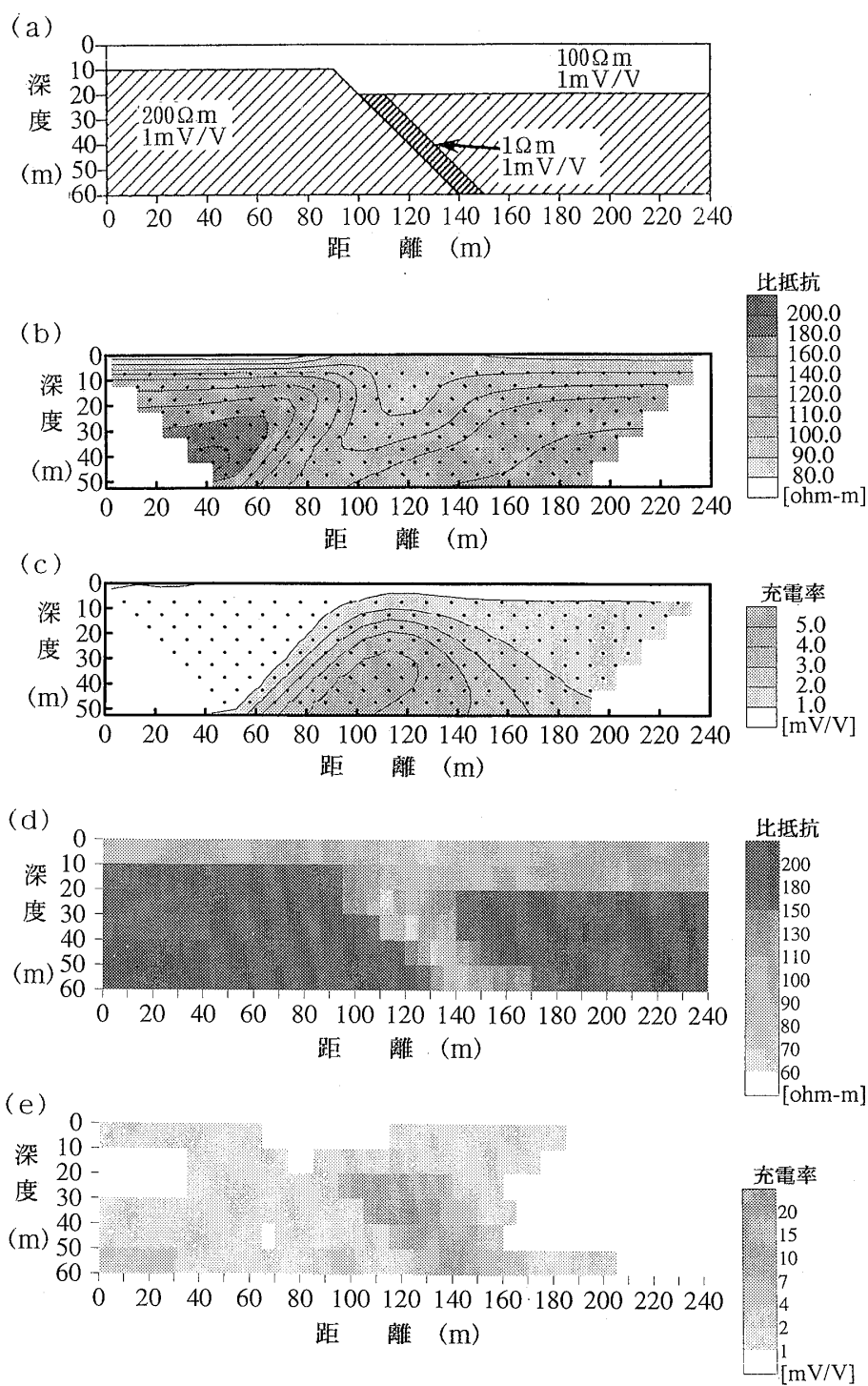


図-5 IP 映像法の解析の流れ
Fig. 5 Flow chart of analysis procedure

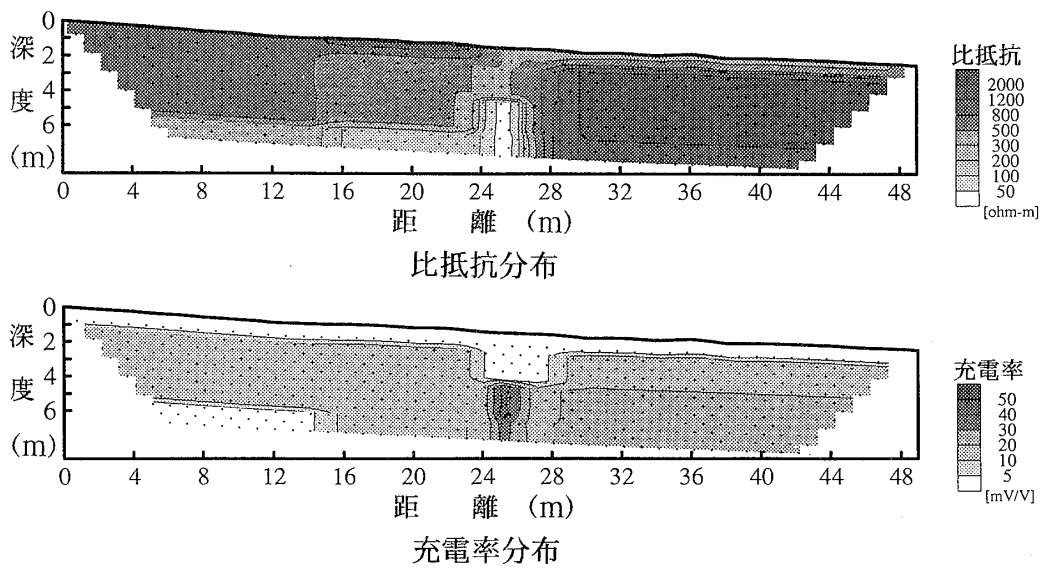


図一6 I P 映像法の数値実験

- (a) 数値実験に使用した断層モデル。
- (b) モデル(a)から計算した見掛け比抵抗擬似断面。
- (c) モデル(a)から計算した見掛け比抵抗擬似断面。
- (d) 解析結果：比抵抗分布。
- (e) 解析結果：充電率分布。

Fig. 6 Numerical experiment of fault model.

- (a) A fault model using the numerical experiment
- (b) Apparent resistivity pseudo-section calculated from the model(a)
- (c) Apparent chargeability pseudo-section calculated from the model(a)
- (d) Resistivity distribution of analysis result
- (e) Chargeability distribution of analysis result



図一七 粘土化した破砕帯でのIP映像法解析結果例
 Fig. 7 Analysis result of IP image profiling on a fault including clay

比抵抗と充電率の同時解析の結果を、図一六 (d) および図一六 (e) に示す。比抵抗の初期値には、比抵抗映像法を用いて解析した比抵抗分布を用いた。また、充電率の初期値はすべて 1 mV/V として解析を行った。解析に使用したブロック分割は、1つのブロックを深度方向を10m、水平方向を20mの大きさの長方形とし、解析領域を深度方向に6分割、水平方向に11分割し、計66個のブロックについて解析した。そして、ブロック境界を5mづつずらした4つのモデルについて解析し、それらを平均することによって、最終的な解析断面図とした。モデルでは、 45° の斜めの構造を与えたが、解析時には一様な矩形ブロックとして解析せざるを得ない。したがって、ブロック境界を少しずつシフトして、数種類の解析を行ない、最後にそれらを合成することによって現実的な解を得ることが可能となる。

比抵抗解析結果断面図および充電率解析結果断面図はともに、与えた数値計算モデルに良く対応しており、この解析方法の妥当性を示している。

数値実験で使用したモデルから計算されたデータによれば、2Aの電流を流したときの一次電位の最小値は、約34mVであり、その場合の二次電位の平均値は約180 μV であった。現在の測定技術から考えて、これらの値は充分測定可能であると考えられ、実際の現場に対しての適用性に問題はないと判断した。

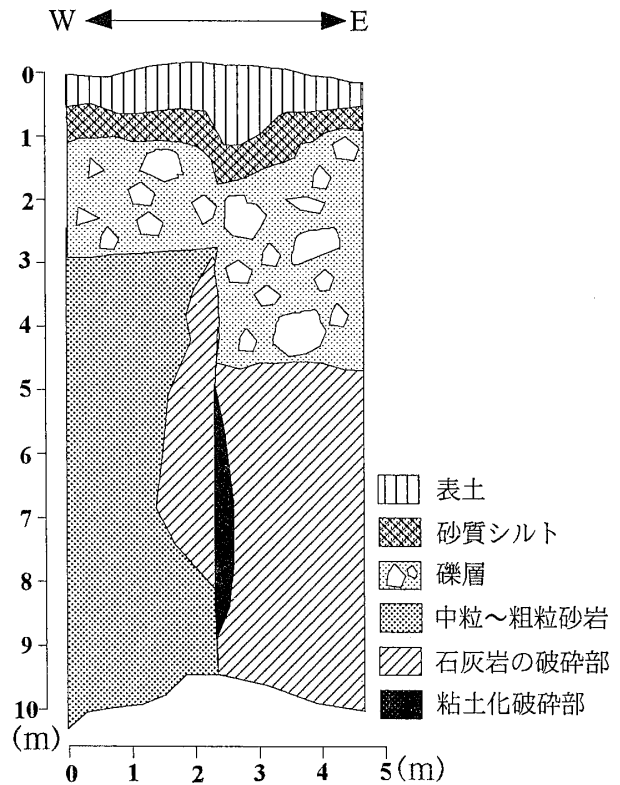
8 実験例

これまで、実験的に幾つかの現場で使用してきたが、

ここでは、粘土化した破砕帯での適用例と地質構造調査において適用した例について述べる。

8・1 粘土化した破砕帯での適用例

断層破砕帯の正確な位置を調べるために、IP映像法を試験的に実施した。電極間隔は1mで、12深度までの



図一八 露頭スケッチの模式図
 Fig. 8 Sketch of outcrop around the fault

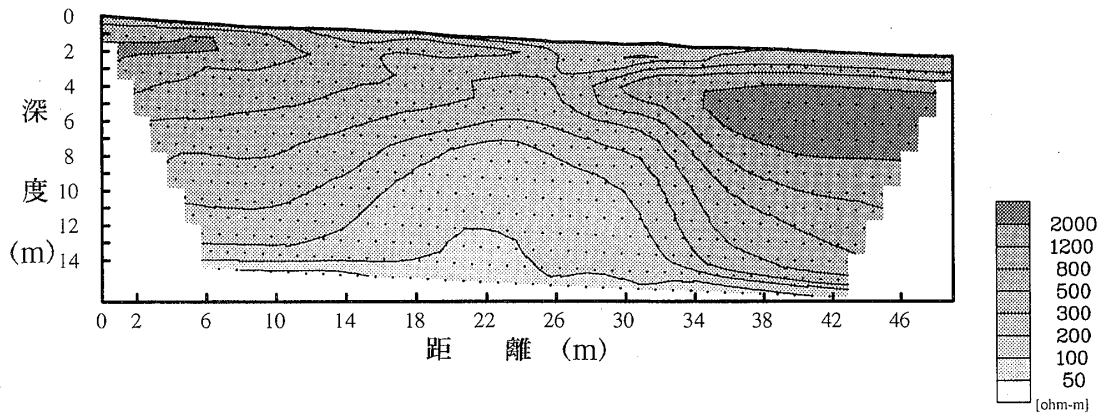


図-9 粘土化した破砕帯 (図-7と同じサイト) での比抵抗映像法解析結果例
 Fig. 9 Resistivity image profiling analysis result at the same site of Fig. 7

測定を行った。I P 映像法の解析結果断面図を図-7に示す。距離程25m付近の幅約2 mの部分、比抵抗断面では低比抵抗、充電率断面では高充電率を示しており、この部分が粘土化した破砕帯であると解釈した。このことは、この破砕帯の延長部と考えられる近くにある断層の露頭によっても確認された。この露頭は、図-8に示すように、断層は、鉛直方向に、約1.3m東落ちの変位を礫層基底面に与えており、破砕部には、断層に沿って黒く変色した粘土を挟在していた。この箇所で行った比抵抗映像法の解析結果を、図-9に示す。比抵抗映像法では、最大電極間隔がそのまま探査深度となるため、同じ電極間隔であっても、比抵抗映像法の探査深度

は、I P 映像法の探査深度の約2倍である。この例が示しているように、幅の小さい断層は、比抵抗映像法ではその形状がぼやけているが、I P 映像法では明瞭な解析結果が得られている。

8・2 地質構造調査での適用例

花崗斑岩と砂岩頁岩互層の地質境界を把握することを目的として、I P 映像法を実施した。電極間隔は20mで12深度までの測定を行った。解析断面図を図-10に、また、同時に行われた比抵抗映像法の解析結果を図-11に示す。この地域では、地質踏査によって、距離程500m以遠には、砂岩頁岩互層が分布していることが推定されて

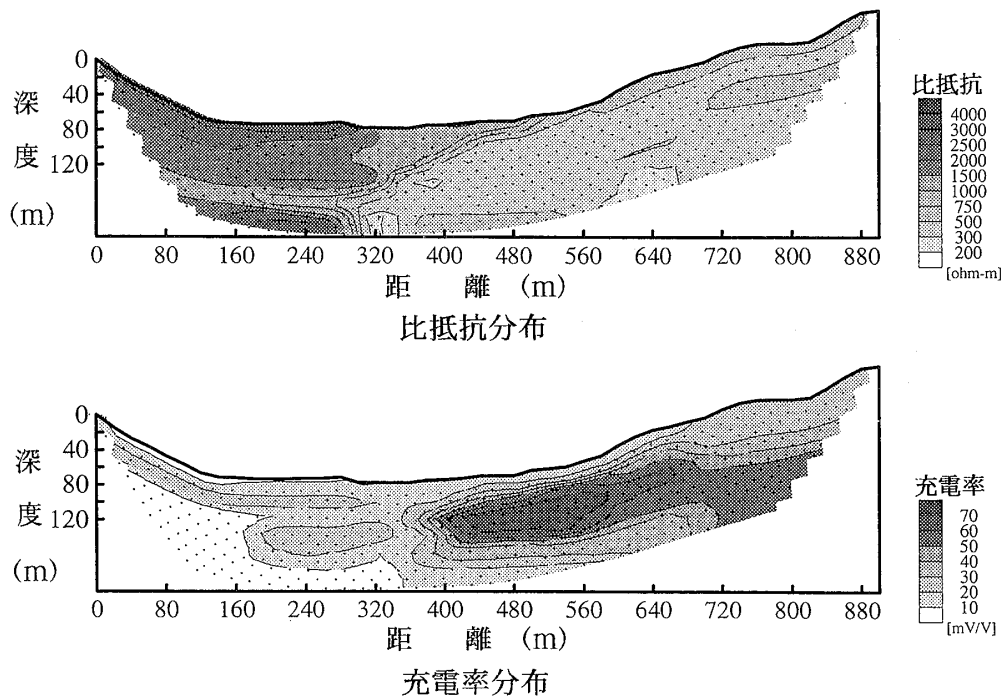


図-10 地質構造調査での I P 映像法解析結果例
 Fig. 10 Analysis result of I P image profiling on a geological structure investigation

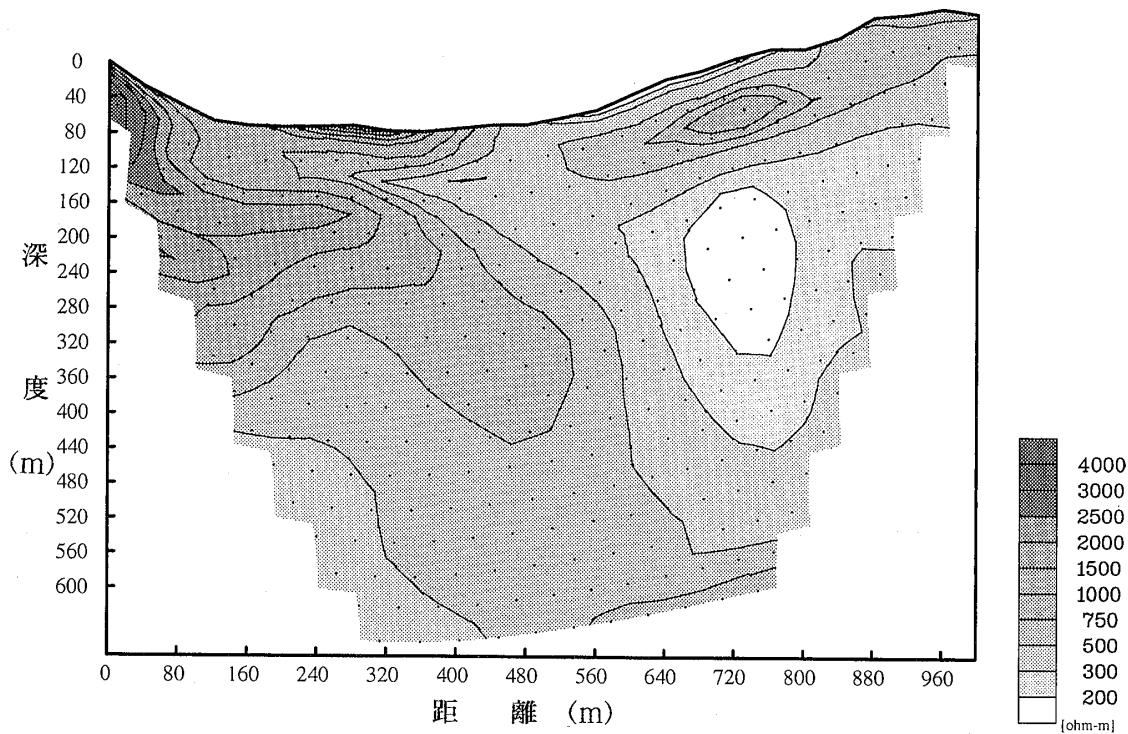


図-11 地質構造調査 (図-10と同じサイト) での比抵抗映像法解析結果例

Fig. 11 Resistivity image profiling analysis result at the same site of Fig. 10

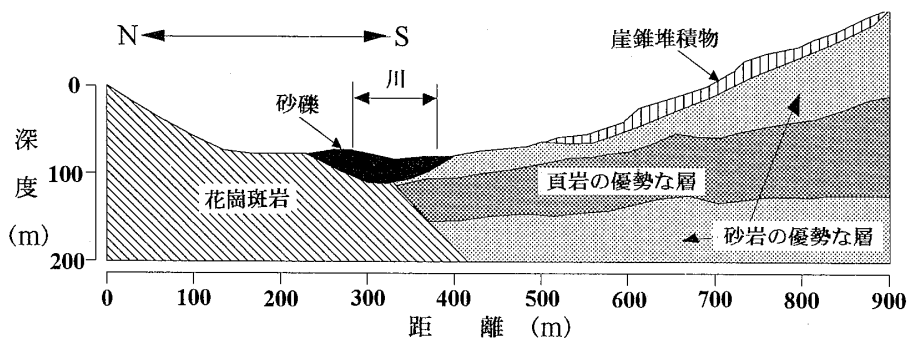


図-12 IP映像法・比抵抗映像法の地質解釈断面図

Fig. 12 interpreted section of IP image profiling and resistivity image profiling

いた。図-10の比抵抗分布図からは、花崗斑岩は高比抵抗であり、砂岩頁岩互層は低比抵抗で、その境界は、南落ちとなっていると解釈された。また、充電率分布図においては、比抵抗分布図の低比抵抗の部分、高充電率と低充電率の部分に分けることができ、その高充電率の部分は頁岩が優勢に分布していると解釈された。これらの結果と図-11の比抵抗映像法の結果を合せて考えると、図-12のような解釈断面図を作ることができた。

9 おわりに

比抵抗映像法の改良を目指して、比抵抗と充電率の両方を用いた2次元探査法の開発を行った。この手法を、

IP映像法と名付けることにした。電極配置には、ポール・ダイポール法を用いる。ポール・ダイポール法においては、感度分布が電流極と電位ダイポールの中線に対して非対称であり、1つの比抵抗/充電率異常に対して見掛比抵抗/充電率を疑似断面表示した場合、電流極側に片寄った形を示すことが分かった。IP映像法は、比抵抗映像法の精度を向上させ、また、充電率の情報が加わることによって、同程度の比抵抗であっても岩石の種類の違いが推定できることなど、より詳細な解釈ができることがわかった。また、逆解析の手法を用いて地盤の真の充電率分布を求めることによって、従来のIP法に比べると、その位置や充電率の値をより正確に知ることができる。

I P 映像法は、現在は、比抵抗映像法に比べて、測定に約2倍の時間を要し、解析には約3倍の時間が必要である。したがって、これらの時間をいかに短縮できるかという問題は、これからの課題である。測定時間に関しては、比抵抗映像法で使用されている McOHM-21 や Profiler-14 のように、自動電極切替や多成分同時測定ができるような装置を開発することにより解決できると考えている。また、解析時間に関しても、解析の自動化による省力化を検討している。

また、この方法の信頼性を向上させるためには、岩石サンプルの充電率を測定し、その成果を蓄積することが大切であると考えている。そのためには、サンプルの比抵抗、充電率、比表面積、化学組成などの試験設備の設置を計画している。

参 考 文 献

- Coggon, J.H.(1971): Electromagnetic and electrical modeling by the finite element method. *Geophysics*, 36, pp.132-155.
- Iseki, S. and Shima, H.(1992); A cross-hole imaging technique by a combined use of chargeability and resistivity. The second S E G J/ S E G International Symposium on Geotomography. Volume 2, Soc. Expl. Geophys. Japan, pp.281-292.
- Powell, M.J.D.(1970): A hybrid method for non-linear equations. *Numerical method for non-linear algebraic equations*, P. Rabinowitz, ed., Gordon and Breach, pp.87-114.
- Sasaki, Y.(1982): Automatic interpretation of induced polarization data over two-dimensional structures. *The memories of the faculty of engineering, Kyushu university*, Vol.42, No.1.
- Seigel, H.O.(1959): Mathematical formulation and type curves for induced-polarization. *Geophysics*, Vol.24, pp.547-565.
- Shima, H.(1989): The effect on reconstructed images of surrounding resistivity structures in resistivity tomography. 59th Annual-Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys, Expanded Abstracts, pp.385-389.
- 島 裕雅 (1992) : 二極法電極配置を用いた実用的な二次元比抵抗自動解析法—比抵抗映像法の解析法と適用例—, *物理探査*, Vol.45, pp.204-223.
- 物理探査学会 (1989) : 図解 物理探査

