差動感度分布法電気探査による地下内部構造の 比抵抗画像化に関する研究[†]

菅 野 強*

A Study on Computerized Image Reconstruction of Electrical Resistance in Earth by Extended Differential Sensitivity Distribution Method

by

Tsuyoshi SUGANO*

In order to improve the reliability of electrical prospecting methods, it is necessary to measure voltage more sensitively so as to reflect target inhomogeneity in complex field conditions, to design more effective solid resistivity array combinations and patterns, or to develop additional new tomographic information under more restricted practical conditions, based on applicable electrical methods.

In this study, a differential sensitivity distribution technique was newly developed and the computerized resistivity image section of the earth or material interior structure was constructed to examine the effectiveness of the new method. It was found that the pure differential sensitivity and the extended differential sensitivity distribution theorems could give very useful information and knowledge to improve the reliability of the conventional electrical tomography image reconstruction.

Key words : Improving the reliability of electrical prospecting, Computerized electrical image section, Differential sensitivity distribution method, Geophysical information measurement and evaluation

1 は じ め に

近年、地下情報計測の探査評価技術の進歩はかなり著しく、第3の探査技術といわれる計算機実験を核とする計算物理によって支援される領域での進展にいくつかの特徴が見受けられる。まず、方法別にみた研究開発アクティビティは、圧倒的に順解析 (Forward modeling) および逆解析 (Inversion) など結果解釈法 (Interpretation) についての理論、実験および応用研究が優勢である^{1)~7)}。これは、探査物性や測定技術がある程度安定した分野になっているに比して、解析・解釈・評価 (Evaluation) 技術にまだ不安定な部分が少なくないことに帰因している。元来、電気探査法の成立の条件は、内部構造に電気的性質の相違が存在することで、資源関係等では鉱物や岩石それ自身の電気的性質であり、エンジニアリング・地球工学や地下水関係等におけるそれは、地下構造およびその中に含まれる地下水の電気的性質に密接に関連することは周知の通りである。最近の電気探査の高精度化では、探査法を構成している種々の手法单元、すなわち要素技術の信頼性向上などいろいろな研究開発が盛んであり、いろいろな立体電極配置を利用する立体電極配列法電

気探査などはその典型的な一例と言える。その適用対象としても、深部鉱体、地熱抽出システムとしての岩盤き裂帯、地下遮水処分環境、放射性廃棄物処分地層、旧坑道、地下空洞、地下利用空間などを具体的に、資源安全保障、エンジニアリングや環境開発、地球調和利用に至る広い分野との係わりがあり、それぞれの例に時代の流れの反映の一端を見ることがもできる。最適化とともに、新しい実現性の検討も極めて大切で、より複雑な現地モデルの高精度シミュレーションや、大量の探査情報の高密度処理が今までより容易になってきたことから、実際に内部構造計測を行う前にフォワードモデリングやシミュレーションを行うことによって、探査対象の構成条件に合致した効率の良い方式に関する知識や結果解釈の予測知識を得ることができるようになった。とくに不均質媒質内部構造の複雑な系での精度高いシミュレーションと、そのシミュレーション解析過程の効果的な可視化技術の進展が著しい。可視化情報処理 (トモグラフィも含む)^{8)~14)}による電気探査の高信頼化もその好例の一つである。

以下、まず新しい研究開発アクティビティについて触れ、続いて新しい差動感度分布法の基礎概念とその

[†] 原稿受理 平成3年7月4日 Received July 4, 1991

* 正 会 員 京都大学工学部資源工学教室 〒606-01 京都市左京区吉田本町, Dept. of Min. Sci. & Tech., Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-01

意義について詳しく述べる。つぎに、在来の比抵抗トモグラフィ画像化における問題点の新しい解決法としての一つの革新的な方式「差動感度分布法」の応用開発研究とその検証について説明する。

2 内部構造情報計測における新しい研究開発 発アクティビティとその考察

電気探査だけでなく広く物理探査全般についても地下が不連続、不均質で複雑であるのに対し、いかに真に近い地下断面を描き出すかは主要な目標であり、果てしない研究開発が続いている。地殻構造から微視的な内部構造に至る、さまざまな不均質媒質における探査対象物の応答の解析については、今後とも数多くの手法単元の検討およびそれらの評価や統合化による高信頼化に関するアクティビティがより顕著になると思われる。

通常の地表電極配列方式では、従来のように数少ない離散的な測定点のインバージョン¹⁵⁾の羅列だけでなく、FEM 2D-3D アルゴリズム¹⁵⁾も利用した連続的高密度方式の CVES (Continuous vertical electrical sounding) や、離散的逆解析結果から電極配列法の電気探査感度解析に基づく地下比抵抗断面の形成

VESCT (Vertical electrical sounding computerized tomography) の研究開発が進展している。つぎに精密電気探査の強力なツールの一つとして期待される立体電極配列方式については、内部構造における局所的異常の検出や、地下深部情報の抽出に探査感度の良い電気探査観測パターンの設計と探査結果の画像化が可能となってきた。

Table I は、新しい電気探査法に関する研究開発アクティビティの例を示している。^{1)~7)} 利用される地下など内部構造の電気的性質の主力は比抵抗である。この他、地下など媒質内部構造の誘導分極による周波数特性 (スペクトル *IP* 特性なども含む) や、電磁波の伝ば (流電電磁、誘導電磁および電磁反射など) も有用な電気的性質である。なお、比抵抗や誘電率など物性の間接的情報を与える、直流電気ポテンシャル法における電位情報の利用も非破壊検査手法の一つとして有効に活用されている。Table I に見るように最近のアクティビティは、より複雑な探査対象の地下情報計測を可能とするように進展しており、その探査設計においても新しい考え方に基づく工夫がされている。それが特許出願 (海外) されている例も見受けられる。本研

Table I. New international activity on geophysical exploration and evaluation of target inhomogeneity.

	Inhomogeneity target	Research activity	Analysis of synthesis electrical prospecting design
1	Geological structure, mineral deposit	Daniels and Dyck (USGS & GSC) Holcombe and Jiracek (San Diego State Univ.) Eloranta (Helsinki Univ. of Tech.) Le Masne, Poirmeur and Vasseur (BRGM) Kaufman (Colorado School of Mines)	Test site (Nevada), Mise-à-la-Masse C (borehole) PP (surface) hole-to-surface array. Test site (New Mexico), topography effects, IP, C (sub-surface) PP (surface). Vertical fault effect, C (orebody) P (surface) charged potential array Mineral exploration, C (subsurface) P (surface), C (sub-surface) PP (surface), C (borehole 1) P (borehole 2) cross-hole array. Cased borehole, C (hole) P (hole) measuring formation resistivity.
2	Rock, fracture, fault	Yang and Ward, Zhao, Rijo and Ward (Univ. of Utah) Beasley and Ward (Univ. of Utah) LaBrecque and Ward (Missouri-Rolla Univ.)	Deep, thin layers, C (surface) PP (borehole) rotating array, C (subsurface) P (subsurface) and CC (subsurface) PP (subsurface) cross-hole arrays. Geothermal system, detecting fracture zone (KGRA), C (subsurface) P (surface) hole-to-surface array. Anisotropy, coal environment, C (subsurface) PP (surface) hole-to-surface array.
3	Groundwater reservoir environment	Parra and Owen (supported by USEPA) Bevc and Morrison (Univ. of California) Sill and Sjostrom (Montana College of Min. Sci. & Tech.)	Leak detection, C (subsurface) PP (surface or subsurface) array. Groundwater survey, salt water injection, C (subsurface) PP (surface) hole-to-surface array. Groundwater flow direction, borehole-to-surface electrical measurements.
4	Hazardous waste disposal environment	Jämtlid <i>et al.</i> (Sueriges Geologiska AB) Ash and Morrison (Univ. of California)	Geological fault, Mise-à-la-Masse C (subsurface) P (surface) hole-to-surface array. Monitoring, CC (subsurface) PP (surface) hole-to-surface array.
5	Tunnel, subsurface cave, space and etc.	Daniels and Dyck (USGS & GSC) Owen (Southwest Research Institute, Texas)	Location of old mine's tunnel, C (borehole 1) PP (hole 2) cross-hole array. Detection and mapping of tunnels and caves, C (subsurface) PP (subsurface or surface), CC (subsurface) PP (subsurface or surface) solid array.

究の差動感度分布法もこれまでにない新しい方式で、従来の電気探査法において不連続であった領域を無理なくカバーするものとなっている。

3 新しい差動感度分布法の定義と意義

3・1 新しい差動感度分布の定義

現在一般に用いられている電気探査比抵抗法では、Fig. 1(a)に示すような電極系の場合、その電極配置係数 G^{-1} (Reciprocal configuration factor) は、

$$G^{-1} = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{1}{C_1 P_1} + \frac{1}{C_2 P_2} - \frac{1}{C_1 P_2} - \frac{1}{C_2 P_1} + \frac{1}{C_1' P_1} + \frac{1}{C_2' P_2} - \frac{1}{C_1' P_2} - \frac{1}{C_2' P_1} \right) \quad (1)$$

となる。この G^{-1} を用いることにより通常、見掛け比抵抗 ρ_{ak} は

$$\left. \begin{aligned} \rho_{ak} &= G V_{ak} / I \\ V_{ak} &= V_1 - V_2 = \rho_{ak} I G^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

と定義されている。

ところが、式(1)を見るとわかるように $G^{-1}=0$ ($G=\pm\infty$) の場合が存在する。この $G^{-1}=0$ となる性質は電極系の不連続特性 (Geometric inference) と言ってよく、 $V_{ak}=V_{a0}=0$ になってしまう。したがって ρ_{ak} も ρ_{a0} も算出できない。一般的には、このような場合にはそれらのデータを回避、あるいは除外する方式に切替えて、逆解析などの処理が行われている。

このことは感度 S_k 、すなわち

$$\left. \begin{aligned} S_k &= (\rho_{ak} - \rho_{an}) / \rho_{an} \\ &= (V_{ak} - V_{an}) / V_{an} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

- (a) Subsurface four electrode configuration and target inhomogeneity.
- (b) CC (drillhole DH-1) PP (surface) hole-to-surface configuration.
- (c) CC (hole DH-1) PP (hole DH-2) cross-hole configuration.
- (d) CC (tunnel TL-1) PP (surface) tunnel-to-surface configuration.

Fig. 1. Illustration of arbitrary subsurface solid electrode array and examples of differential solid electrode arrays.

となる関係は適用できないことを意味する。

ここで C_1 (地下あるいは地表) P_1 (地下あるいは地表), $C_2 P_1$, $C_1 P_2$ および $C_2 P_2$ 電極配置とに分離し、それぞれによる見掛け比抵抗を ρ_{ak11} , ρ_{ak12} , ρ_{ak21} および ρ_{ak22} とする。この分離を用いて、 $C_1 C_2 P_1$ 電極系において、電極系感度の差として S_{k1}^E を導入し、

$$S_{k1}^E = S_{k11} - S_{k12} \quad (4)$$

とする。ただし、感度 S_{k11} および S_{k12} は、通常の2極法電極配置の感度で

$$\left. \begin{aligned} S_{k11} &= (\rho_{ak11} - \rho_{an}) / \rho_{an} \\ S_{k12} &= (\rho_{ak12} - \rho_{an}) / \rho_{an} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

同様に、 $C_1 C_2 P_2$ 電極系でも、電極系感度の差として S_{k2}^E を導入する。

$$S_{k2}^E = S_{k21} - S_{k22} \quad (6)$$

ただし、 S_{k21} および S_{k22} は、通常の感度で

$$\left. \begin{aligned} S_{k21} &= (\rho_{ak21} - \rho_{an}) / \rho_{an} \\ S_{k22} &= (\rho_{ak22} - \rho_{an}) / \rho_{an} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式(4)の $C_1 C_2 P_1$ 電極系における S_{k1}^E と、式(6)の $C_1 C_2 P_2$ 電極系における S_{k2}^E とから、新しく差動感度 (Differential sensitivity) S_k^E を定義し、

$$S_k^E = S_{k1}^E - S_{k2}^E \quad (8)$$

とする。この新しい物理量の定義によって、不連続条件 $G^{-1}=0$ を有する電極配列においても、連続した検討が可能となる。

例えば、Fig. 1(b), (c) および (d) は CC (地下垂直), PP (地表水平), C (地下) PP (地下垂直) および CC (地下水平) PP (地下水平) 方式の立体電極配列の例で、いずれも見掛け比抵抗データを取得できない差動法データ取得型である。

Fig. 2(a), (b) および (c) は、新しい式(8)によって求めた Fig. 1(b), (c) および (d) に対応する $G^{-1}=0$ となる不連続条件の発生する立体電極配列のそれぞれの差動感度分布である¹⁰⁾。なお、探査対象物の比抵抗 ρ_N に比べて、 $\rho_k \leq \rho_N$ で $S_k^E \leq 0$ となる場合を順差動感度、逆に $\rho_k \geq \rho_N$ で $S_k^E \geq 0$ となる場合を逆差動感度と、便宜上呼ぶことにする。まず、Fig. 2(a)の C_1 (坑井あるいはボーリング孔 DH-1 内, $z_{c1}=60$ m) C_2 (坑井 DH-1 内, $z_{c2}=80$ m) P_1 (地表, $x_{p1}=20$ m) P_2 (地表, $x_{p2}=60$ m) の坑井-地表間方式では、坑井 DH-1 位置からその左側の電位測定に用いる電極 P_1 (以下、電位電極 P_1 とする) までは逆差動感度領域が現われ、さらに P_1 の左側では順差動感度が広がる。また、坑井 DH-1 位置からその右側の電位電極 P_2 までは順差動感度領域となり、それを P_2 の右側の逆差動感度領域がとり囲む。坑井内の電極 $C_1 C_2$ 間は順、逆差動感度の極端な変化が現われる領域となる。つぎに Fig. 2(b)の C_1 (坑井 DH-1 内, $z_{c1}=-61$ m) C_2 (地表, 無限遠点) P_1 (坑井 DH-2 内, $z_{p1}=-14$ m) P_2 (坑

Fig. 2. Pure differential sensitivity distributions of solid electrode arrays. (a), (b) and (c) show the distributions in the cases of Fig. 1 (b), Fig. 1 (c) and Fig. 1 (d), respectively.

井 DH-2 内, $z_{p2} = -34$ m) の坑井間方式では, 坑井 DH-1 内の電流を印加するに用いる電極 C_1 (以下, 電流電極 C_1 とする) と坑井 DH-2 内の電位電極 P_1 を結ぶ線よりも下部の領域に順差動感度が広がり, その線より地表浅部に向って逆差動感度が現われる領域となる。また, 坑井 DH-2 の右側の感度では, 地表から垂直方向の変化は順差動感度から逆差動感度となる特徴を示す。つぎに Fig. 2 (c) の C_1 (深度 65 m のトンネル TL-1 内, $x_{c1} = 60$ m) C_2 (トンネル TL-1 内, $x_{c2} = 80$ m) P_1 (地表, $x_{p1} = 100$ m) P_2 (地表, $x_{p2} = 140$ m) のトンネル-地表間方式では, トンネル TL-1 内の電流電極 C_1 の左側の上部と, C_2 と地表電位電極 P_1P_2 の中央とを結ぶ線よりも右側に順差動感度が広がり, 電極系の中央部を逆差動感度領域がとり囲む特徴的な形態を示す。いずれの差動感度分布も, 差動方式立体電極配列特有の大変興味ある探索特性を

示す。

3・2 感度分布法と拡張差動感度分布法との対応関係

3・1 節で定義した差動感度分布法は, むろん差動方式電極配列に対して有効な指標を与える以外に, 通常の見掛け抵抗データ取得方式の場合へも拡張して, 当該電極系の V_{a0} が 0 でない場合でも式 (8) を適用する方法が考えられる。

見掛け抵抗データ取得方式においては, それぞれの構成 2 極法の均質電位 $V_{a0,11}$, $V_{a0,12}$, $V_{a0,21}$ および $V_{a0,22}$ と感度 S_k との間に, $V_{a0} \neq 0$ として

$$S_k = \frac{V_{a0,11}}{V_{a0}} S_{k11} + \frac{V_{a0,22}}{V_{a0}} S_{k22} - \frac{V_{a0,12}}{V_{a0}} S_{k12} - \frac{V_{a0,21}}{V_{a0}} S_{k21} \quad (9)$$

なる関係が成立する。ここに, 式 (9) のそれぞれの感度の係数を 1 とすれば

$$S_k^E = S_{k11} + S_{k22} - S_{k12} - S_{k21} \quad (10)$$

となる感度合成分離式が得られる。それぞれの 2 極法における感度の係数を k_{11} , k_{12} , k_{21} および k_{22} とすれば

$$\left. \begin{aligned} k_{11} &= V_{a0,11}/V_{a0}, & k_{12} &= V_{a0,12}/V_{a0} \\ k_{21} &= V_{a0,21}/V_{a0}, & k_{22} &= V_{a0,22}/V_{a0} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

の場合が見掛け抵抗データ取得方式で

(a) Extended differential sensitivity distribution of CC (hole DH-1) PP (surface) configuration.
(b) Sensitivity distribution of CC (hole DH-1) PP (surface) configuration.

Fig. 3. Extended differential sensitivity and sensitivity distribution of solid electrode array.

$$k_{11}=k_{12}=k_{21}=k_{22}=1 \quad (12)$$

の場合が差動的データ取得方式となり、一つの感度合成分離式で表現される。すなわち

$$S_k \text{ (あるいは } S_k^e) = \sum_{i,j} (-1)^{i+j} S_{kij} \quad (13)$$

で統一されることになる。

Fig. 3(a) および (b) は、Fig. 1(b) (Fig. 2(a) 参照) の差動方式に対して、地表電位電極 P_1P_2 を少し右側へ移動させた C_1 (坑井 DH-1 内, $z_{c1}=-60$ m) C_2 (坑井 DH-1 内, $z_{c2}=-80$ m) P_1 (地表, $x_{p1}=50$ m) P_2 (地表, $x_{p2}=70$ m) 坑井-地表間方式の場合で、いわば差動方式に近い見掛け比抵抗データ取得方式における (a) 拡張差動感度分布および (b) 在来の感度分布である。Fig. 3(b) の感度分布の形態は、Fig. 2(a) の差動感度分布と類似している。感度の値は差動感度に比べてかなり大きい値をとる。しかしながら、差動方式に近い見掛け比抵抗データ取得方式であるだけに、一次電位 V_{00} は小さく (G^{-1} 値が小さい)、見掛け比抵抗算出では信頼性が保障されない場合があることに注意を要する。Fig. 3(a) の拡張差動感度分布は、その形態が Fig. 3(b) の感度分布と類似しているが、地表電位電極 P_1 の左側で順差動感度領域が狭くなる特徴を有している。この典型的例題からも明らかなように、通常の見掛け比抵抗データ取得方式の立体電極配列の場合においても、差動感度分布法を拡張することにより、新しい拡張差動感度分布の作成が可能となる。

4 差動感度分布法による地下内部構造の比抵抗画像化の基礎概念

純粹の差動感度分布方式による内部構造比抵抗画像化の基礎概念の説明例は、電流電極 C_1C_2 (電極間隔 10 m) を坑井 DH-1 内に置き、深度 60 m まで 5 m 間隔で 10 回移動し、地表電位電極 P_1P_2 の電極間隔を坑井あるいはボーリング孔位置を中心として 10 m, 20 m, ..., 120 m と展開する差動法観測パターンの場合である。当該方式ではそれぞれの深度の電流電極 C_1C_2 に対して地表電位電極 P_1P_2 による電位差データ数が 12 個で合計 120 個の差動データが取得される。Fig. 4 に、その電極配列観測パターンを示す。探査対象物としては、均質な媒質 (比抵抗 $100 \Omega \cdot \text{m}$) 内に存在する比抵抗 $0 \Omega \cdot \text{m}$ の球状導電性構造の場合を取り上げる。球の中心 (x_s, z_s) (単位 m) が (40, -30) でその半径が 5 m の場合である。要点は在来の比抵抗法が全く成立しない、坑井位置を中心にした左右対称型の差動法データ取得方式が、坑井の右側に存在する探査対象物をどの程度検出するか、である。Fig. 5 は Fig. 4 に示す観測パターンによって取得された差動法データ 120 個を、差動感度分布法によって逆解析した結果である。解析に用いた差動感度分布は

Fig. 4. Basic design of electrode array combination for computerized electrical image section by CC (hole DH-1) PP (surface) differential hole-to-surface configuration system.

Fig. 2(a) にその一例が示してあるように、坑井 DH-1 の右側では順差動感度、逆差動感度の順に、坑井の左側では逆差動感度、順差動感度の順に変化する特性となっている。Fig. 5 の計算機比抵抗断面形成過程の画像出力は、探査対象物の有望 (あるいは異常出現) 度合 (Probability) ($0 \leq p \leq 100\%$) をコンター表示したものである。対象物の中心 (+印) 付近に 90% 以上の高確率を示しており、この解析方式の信頼性の高いことが分かる。なお、球座標系の Laplace の方程式の解より、有限比抵抗 ρ_k の球構造応答理論では、例

Fig. 5. Computerized electrical section reconstructed by pure differential sensitivity distribution technique in the case of Fig. 4.

えば点電流源 $C(I)$ による球外の点 P における電位 V は

$$V = \frac{\rho_0 I}{4\pi r} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I a \rho_0}{4\pi r_s r_c} \frac{\rho_k - \rho_0}{(n+1)\rho_k + n\rho_0} n \left(\frac{a^2}{r_s r_c} \right)^n P_n(\cos \theta) \quad (14)$$

と表わすことができる。式(14)より目的とする探査対象物が導電性構造であるか絶縁性構造であるかによって、おおむね2対1の比率で検出されやすいことが予想される。このことは電気探査画像出力における確率情報の評価にも密接に関連する。

5 拡張差動感度分布法による地下内部構造の比抵抗画像化

この章では、 $G^{-1}=0$ となる電極配置によるデータ回避の場合を含む立体電極配列法における地下断面画像化に関し、見掛け比抵抗データ取得方式では達成できないデータを含む拡張差動データ取得方式について述べる。まず、Fig. 6(a)は地下深度90 mに掘削されているトンネルを利用して、電流電極 $C_1 C_2$ (電極間隔15 m)を切羽(この例題では $x_T=30$ mの位置)から-120 mまでの区間に60 m間隔で10回移動し、地表電位電極 $P_1 P_2$ (電極間隔30 m)を $x=-40$ mから $x=105$ mまでの145 m区間で14回移動してデータ取得する電極配列観測パターンを示す。このような電極配列の移動方式で見掛け比抵抗データを取得すると、 $|G^{-1}| \leq 0.05 \times 10^{-3}$ の範囲にある21個のデータを除外して解析に用いることになる。この場合、利用できるデータ数は119個(合計140個のうち)となる。

Fig. 6(c)は、通常の見掛け比抵抗データ119個によって形成された探査画像である。想定した探査対象物はトンネル切羽前方の比抵抗 $0 \Omega \cdot \text{m}$ の導電性塊状構造である。実際の現地において対応する地下構造としては帯水破碎帯、軟弱あるいは粘土層などから成る断層(とりわけ湧水の懸念されるような場合も含む)などである。さて、このFig. 6(c)のような立体電極配列法の適用は坑井間あるいは坑井-地表間方式というよりも、坑井(ボーリング孔も含む)やトンネルなどの地下電極を利用した、より広い地下立体情報計測の領域に属する。すなわち、Fig. 6(a)の観測パターンに示すような電極配置の組み合わせ図から見れば、X線や弾性波トモグラフィなどのように、あたかも観測パターンがカバーしている領域(波線経路が満たす範囲)が解析領域のような印象を与えるが、決してそうではなく、坑井間外や坑井-地表間外の領域の探査もむろん可能となる。すなわち、ポテンシャル場の成立する領域の探査応答を抽出できる訳で、この例題のようなトンネル切羽前方に存在する異常体予知やボーリング孔先の構造の予知など先進探査による地下情報計

(a) Design of electrode array combination for CC (tunnel TL-1) PP (surface) tunnel-to-surface configuration system.
(b) Computerized electrical section reconstructed by extended differential sensitivity distribution method.
(c) Computerized electrical section reconstructed by sensitivity distribution method.

Fig. 6. Computerized electrical section reconstructed by extended differential sensitivity and sensitivity distribution techniques for solid array resistivity interpretation procedure.

測が行えることになる。

さて、Fig. 6(b)は、見掛け比抵抗データ取得方式に用いたトンネル内の電極16極と、地表の電極28極との同じ電極を用いて行った拡張差動データ取得方式による画像出力である。すなわち、トンネル TL-1 内での電流電極 $C_1 C_2$ の10回移動と地表における電位電極 $P_1 P_2$ の14回の移動ごとに、電極 $C_1 P_1$ 、 $C_1 P_2$ 、 $C_2 P_1$ および $C_2 P_2$ による電位を測定し、式(8)に対応する拡張差動データの140個を構成する。見掛け比抵抗データ取得方式では140個のうち、21個を除外したが、この場合は除外の問題は起きない。対応する拡張差動感度分布も140種類となる。90%以上の高確率ゾーンがトンネル切羽前方の導電性異常体をとらえて

おり、この方式による地下情報計測の信頼性の高いことが分かる。

6 む す び

本研究において従来の方法に新しく加えられた知見や、著者の新しい見解などを以下に列挙する。

(1) これまで算出できなかった、あるいは信頼性のないデータとして除外していたいわゆる見掛け比抵抗法不連続性の問題を解決する新しい指標を考案した。

(2) 新しい差動感度分布情報は、その特有の立体電極配列方式における不連続性の問題を解決するばかりでなく、地表電極配列方式やボーリング孔内検層電極配列方式に対してもフィードバックされ同じくその効果を上げることができる。

(3) とりわけ、電極配列法電気探査の感度解析に基づく適切な電極配列観測パターンの設計が極めて大切となる。

(4) 既知見との整合性と実用的有効性からは、通常の見掛け比抵抗方式の画像化に信頼性の高い複合情報を与えるのみならず、独自の特徴ある画像を提供する。

基礎的には、電極配列法電気探査における電極配置の合成分離効果の研究にもつながり、電気探査画像化の体系化の一要素として極めて有効となる。また、応用開発的には、在来の見掛け比抵抗方式画像化の不連続性を解消し、一つの実用的知識を付け加えた。

以上、本研究で得た知見は、今後の電気探査における結果解釈法の研究開発に大きく役立つと思われる、地下情報計測における信頼性向上をより進展させるものと思われる。

本稿をまとめるにあたり、有意義なご意見をいただいた京都大学教授佐々宏一先生に深謝の意を表します。

なお、本文の一部は、文部省科学研究費一般研究(C) (菅野 強研究代表、立体電極配列法電気探査による地下情報抽出の高信頼化に関する研究、課題番号：02805077) の補助を受けて実施したものである。

参 考 文 献

- 1) J. J. Daniels and A. V. Dyck, IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, GE-22, 80 (1984).
- 2) D. Le Masne and C. Poirmeur, Geophysics, **53**, 85 (1988).
- 3) F. W. Yang and S. H. Ward, Geophysics, **50**, 1173 (1985).
- 4) D. Bevc and H. F. Morrison, Geophysics, **56**, 769 (1991).
- 5) A. Jämtlid, K. A. Magnussen, O. Olsson and L. Stenberg, Geoexploration, **22**, 203 (1984).
- 6) T. E. Owen, Developments in Geophysical Exploration Methods, **5**, 161 (1983).
- 7) R. J. Lytle, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, GE-22, 493 (1982).
- 8) T. Sugano and K. Sassa, Memoirs of Faculty of Eng., Kyoto Univ., **52**, 10 (1989).
- 9) T. Sugano, Memoirs of Faculty of Eng., Kyoto Univ., **53**, 72 (1991).
- 10) 菅野 強, 物理探査, **43**, 123 (1990).
- 11) 菅野 強, 可視化情報, **11**, 103 (1991).
- 12) 菅野 強, 佐々宏一, 大杉達三, 北本貴宏, 筒井博司, 情報地質, **13**, 245 (1987).
- 13) 菅野 強, 佐々宏一, 水曜会誌, **21**, 253 (1989).
- 14) 菅野 強, 物理探査, 講座, **44**, 27 (1991).
- 15) ツィエンキーヴィッツ O. C., “基礎工学におけるマトリックス有限要素法” (吉織雅夫・山田嘉昭訳) (1975) 培風館