計算機による比抵抗断面形成過程における 立体電極配列効果の評価[†]

菅野 強* 佐々宏一*

Evaluation of Solid Electrode Array Effect as an Aid to Computerized Section Procedure in Electrical Prospecting Method

by

Tsuyoshi SUGANO* and Koichi SASSA*

The most important recent activities in the electrical measurement of the earth structure and its interpretation techniques include the use of large continuous data, high speed computer simulation with effective visualization, and setting of underground solid electrode arrays such as cross-hole (hole-to-hole) or hole-to-surface (surface-to-hole) electrode configurations. These developments including the computerized tomography technique would provide more powerful exploration tools for detecting deep or small mineral deposits, energy and groundwater reservoirs and fracture zones, and also for monitoring hazardous waste disposal environments, groundwater contamination and various changes of the earth structure given by the natural and artificial energies in the shallow and deep underground spaces.

In this paper a brief review of the solid electrode array technique is given first, which should be effective in order to extract the response (signal) due to the deep or small targets. Then, the sensitivity distributions of two different subsurface solid electrode configurations are presented to illustrate the effect of electrode element array on the characteristics of response (signal) due to the target inhomogeneities. Furthermore, helpful inversion elements in the resistivity interpretation and evaluation procedures are shown by taking the examples of the cross-hole and hole-to-surface computerized section constructions for the purpose of improving the electrical solid array system.

Key words : Electrical prospecting, Sensitivity distribution, Computerized section, Evaluation of solid electrode element array effects

1 はじめに

地下構造や媒質の電気的特性を測定し、その内部を探索する方法の1つである比抵抗電気探索技術は、広義には直流法のみならず、強制分極 (IP : Induced polarization) 法、誘導電磁 (EM : Electromagnetic) 法、地磁気地電流 (MT : Magnetotelluric) 法、さらには流電磁 MMR (Magnetometric resistivity) 法などと関連している。しかしながら、通常、比抵抗法と言っているのは、直流法 (Direct current resistivity method) のことを指している。直流とは言っても、交替直流を用い、その現象が、定常電流界理論の成立する範囲となっている。さて、電極配置 (Electrode array configurations) を利用する電気探索技術においては、ある測点について深さ方向の比抵抗の変化を調べる垂直探索法 (VES : Vertical electrical sounding) と、ある深さの比抵抗の水平方向の変化を調べる水平探索法 (Horizontal profiling or resistivity mapping) とに大別されている³⁾。しかるに、広く利用されている

このような地表電極配列 (Surface electrode array) 法には、地表利用のみという制約上、自ずから探索限界があることは言うまでもないが、なお、適用能力向上への努力が続けられている。

一方、地表電極配列方式の次段階、あるいは独自の利用からも極めて有用と期待されている坑井間および地表-坑井間の立体電極配列方式については、近年のコンピュータシミュレーション技術の進歩とも符合して、比抵抗トモグラフィ^{16), 18)}や電気ポテンシャル CT⁶⁾も含み、地下空間におけるより深部・より小規模あるいはより低品位の探索対象物の検出を目指して、高分解能電気探索技術の研究開発に新しいアクティビティが見られるようになった^{1), 8), 17)}。ジオトモグラフィの先導的研究を進めた Lytle (1982)⁷⁾ は、比抵抗電気探索においても球構造によって孔間比抵抗探索に関しての基礎的検討を実施している。Daniels and Dyck (1984)¹⁾ は、新しい鉱物資源探索への坑井利用電気探索技術のレビューによって1つの新しい方向を示唆した。その

† 原稿受理 平成元年3月27日 Received Mar. 27, 1989

* 正会員 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町, Faculty of Engineering, Kyoto University, Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto

Fig. 2. Resistivity pseudosection of C(subsurface) P(surface) hole-to-surface solid electrode array in the case of a horizontal conductive target inhomogeneity.

電極配列比抵抗擬似断面 (Cを含む水平面に下したPを通る垂線の交点に、測定によって得られた見掛け比抵抗を直接表示することにより形成する。)である。鉱体などの探査対象物に直接流電 (Mise-à-la-masse) する場合のみならず、探査対象物から外れて流電 (Near-miss) する場合も合せて広義のMMAR比抵抗擬似断面となっている。無論、このような比抵抗擬似断面は、測定値から構造を逆解析したものではなく、あくまでも比抵抗情報のパターン理解を与えるもので、従来、地表電極配列方式については、鉱物資源・地下水あるいは地質構造のIP探査¹⁹⁾などに広く活用されてきた。近年になって、Beard (1988)²⁰⁾らにより再評価と適用も行われている。立体電極配列方式に対する見掛け比抵抗の表示点に関しては、探査特性の検討が十分でなかったために、その定義が難しいとされていた。しかし、2・2に説明する感度分布法 (Sensitivity distribution theorem) によって、立体電極配列についてもその定義が可能となった。さて、Fig. 2のC(地下)P(地表)地表孔間立体電極配列による比抵抗擬似断面の例では、探査対象物の導電性水平構造の応答を構造左下端で $88 \Omega \cdot m$ 程度の低比抵抗異常として捉えており、このような立体的電極配列による測定によって地下深部の構造検出が可能であることを示している。なお、この立体電極配列比抵抗擬似断面は、FEM 2D-3D アルゴリズムによるモデリング (Forward modeling) 結果の1つで、x方向の大きさが1400 m、深さが800 mの領域の情報を示している。今後、立体電極配列比抵抗擬似断面はそれ自身独自の利用と、トモグラフィ処理過程などにおける構成修正の程度の評価などへの利用など新しく広い活用が期待される。

2・2 感度分布法による立体電極配列の探査特性の検討

規則的に電極を配列する地表電極配列を用いる探査においては、いわゆる指導曲線や標準曲線を求めておき、それを用いて探査対象物と与える応答の特性がある程度検討するという解析が行われている。しかし、詳細な探査特性、さらには不規則な地表配列、そして立体的に配列した坑井間および地表-坑井間利用の電極配列の探査特性については、一般に余り研究開発がなされていなかった。しかるに、いかなる任意の電極配列についても探査対象物の応答特性を知る上で、直感的にも優れた表示形態を提供するものとして、電極配置の感度分布が考案された^{21), 22)}。初期の研究を経て、近年、パーソナルコンピュータを利用する感度分布情報の活用¹⁵⁾も含み、Barker (1979)²³⁾ はじめ Bazinet and Bérubé (1988)²⁴⁾の研究や、MT法の感度分布の検討などと、電気探査の精度向上のためにその応用が広がりつつある。その定義は、探査対象物に対応する比抵抗 ρ_k の単位体積が、比抵抗 ρ_B の周辺媒質内に存在することによって、ある電極系に及ぼす電位差あるいは見掛け比抵抗の変化割合を感度とし、その値をその探査対象物の中心に表示して作画した分布図を感度分布とするものである。すなわち、見掛け比抵抗が均質媒質の場合の ρ_{ab} から探査対象物が存在するときの ρ_{ak} に変化するとき、感度 $S_k = (\rho_k - \rho_{ab}) / \rho_{ab} \times 100 (\%)$ と百分率で表す。 $\rho_k \leq \rho_B$ のとき $S \leq 0$ となる感度を順感度 (Normal sensitivity), $S \geq 0$ となる感度を逆感度 (Reverse sensitivity) と定義している^{4), 15), 17)}。

Fig. 3および4は、FEM 2D-3D アルゴリズム¹⁷⁾を用いて、比抵抗 $100 \Omega \cdot m$ の均質媒質内で、比抵抗 $10 \Omega \cdot m$ の正方形断面構造をその断面の1辺の長さごとに移動させ、その断面の中心に感度を表示して求めた感度分布の例である。

まず、Fig. 3は、2本の坑井を利用するC(地下)P(地表)孔間立体電極配列の場合の感度分布を示したものである。C₁, C₂ 電流電極とP₁, P₂ 電位電極のうち、それぞれC₂, P₂ が無限遠点に置かれている。この場合は、電極の座標C₁(x_c, z_c), P₁(x_p, z_p) (単位 m) が、C₁(700, -200) P₁(1200, -600)である孔間立体電極配列で、正方形断面構造 (比抵抗コントラスト $\rho_k / \rho_B = 1/10$) の応答特性を示している。図(a)はC₁とP₁を含む垂直断面上の感度分布の2次元等高線であり、図(b)は3次元鳥瞰図である。このPole-Pole立体方式は、近年、検討が進みつつある比抵抗トモグラフィの電極配列として活用されているものである。また、この電極配列は導電性の鉱体・断層破碎帯・地下水層、および絶縁性の岩盤や空洞などの3次元的な拡がりや規模を推定しようとする場合に用いら

対話的情報処理などによって、かなりの精度をもつ手法の基礎的研究が進展し始めている。例えば、コンピュータトモグラフィ手法などは、とくに数値計算だけでなく、視覚的にわかりやすい表示手段を取り入れているため、その要素技術の研究開発に新しいアクティビティが見られるのはよく知られているところである。

Fig. 5 の図 (a) は、1 本の坑井 DH-1 を利用した地表-坑井間探査の C (地下) P (地表), あるいは CC (地下) PP (地表) 地表孔間立体電極配列の組合せを示したものであり、図(b) は 2 本の坑井 DH-1 および DH-2 とさらに地表を利用した C (ボーリング孔 DH-1 内) P (地表), C (ボーリング孔 DH-2 内) P (地表) 地表孔間および C (ボーリング孔 DH-1 内) P (ボーリング孔 DH-2 内) 孔間立体電極配列, あるいは CC (ボーリング孔 DH-1 内) PP (地表), CC (ボーリング孔 DH-2 内) PP (地表) 地表孔間および CC (ボーリング孔 DH-1 内) PP (ボーリング孔 DH-2 内) 孔間立体電極配列の組合せを示したものである。例えば、図 (a) が C (地下) P (地表) 地表孔間方式の場合には、ボーリング孔 DH-1 内の電極 12 個と地表電極 12 個によって、C (ボーリング孔 DH-1 内) P (地表) 立体電極配列の 144 個の測定データが取得される。そして、144 通りの C (ボーリング孔 DH-1 内) P (地表) 立体電極配列の感度分布が計算されることによって、入力比抵抗データ 144 個が解析領域のそれぞれの位置で、当該感度分布を満たすか否かを処理すれば、探査対象物が存在するか否かの有望 (出現) 度合が逆解析され、所望の比抵抗断面が計算機により形成される。ちなみに、本報告における断面出力図は、電気映像法 (Electrical image method) によるもので、計算時間の短縮および手法の簡略化が

極めて容易である。

3・2 比抵抗断面形成過程における立体電極配列効果の評価

Fig. 6 (a) および (b) は、感度分布法を用いた計算機による比抵抗断面形成の例である。すなわち、144 通り (図 (a)) および 100 通り (図 (b)) の感度分布が計算され、144 個 (図 (a)) および 100 個 (図 (b)) の入力データを、解析領域のそれぞれの位置でそれぞれの感度分布を満たすか否かを逐一計算し処理することによって、得られた有望 (出現) 度合を確率 $p\%$ ($0 \leq p \leq 100$) で表示したものである。したがって、画面出力断面における濃淡表示の 80 から 100 は、 p の値であり、80 以下はプリンタ出力では黒、100 に近づくにつれて白となっている。本報告での例題は完全導体球を探査対象物としているので、 $p=100$ の部分は比抵抗 $0 \Omega \cdot m$ の物体の出現の確率が 100% となる。さて、Fig. 6 (a) および (b) は、比抵抗 $\rho_0=100 \Omega \cdot m$ の半無限等方性均質媒質のなかに、図 (a) の右下にその大きさを示した比抵抗 $\rho_1=0 \Omega \cdot m$ の導体球が未知の探査対象物として各図の + 印の位置に存在していると想定した場合の断面画像出力例で、C (地下) P (地表) Pole-Pole 方式および CC (地下) PP (地表) Dipole-Dipole 方式の立体電極配列による結果である。すなわち、図 (a) はボーリング孔 DH-1 内で電流電極 C_1 を深度 5 m から 60 m の範囲で 5 m 間隔で移動させ、地表の電位電極 P_1 をボーリング孔 DH-1 の右側 5 m から 60 m の範囲で 5 m 間隔で移動させて、144 個の見掛け比抵抗測定データを取得した場合 (Fig. 5 (a) 参照) の結果であり、図 (b) は、図 (a) と同じ電極数を用いて、ボーリング孔 DH-1 内で電流電極 C_1, C_2 (電極間隔 $a_c=10 m$) を深度 5 m から 60 m までの範囲で 5 m 間隔で 10 回移動させ、地表で電位電極 P_1, P_2 (電

Fig. 5. Examples of electrode combination patterns for electrical solid array measurement system. (a) Hole (DH-1)-to-surface array and (b) Hole (DH-1)-to-surface, hole(DH-1)-to-hole (DH-2) and hole (DH-2)-to-surface arrays.

Fig. 6. Computerized sections in electrical solid array interpretation procedure.

極間隔 $a_p=10$ m) をボーリング孔 DH-1 の右側 5 m から 60 m の範囲で 5 m 間隔で 10 回移動させて 100 個のデータを取得した場合である。電極位置と数を一致させて実施した Pole-Pole 方式と Dipole-Dipole 方式の優劣が示されている。

Fig. 7(a) および (b) は, Fig. 6 と同一の探査対象物に対して, CC (地下) PP (地下) 孔間方式と, CC (地下) PP (地表)・CC (地下) PP (地下) 複合方式との立体電極配列による結果である。すなわち, 図 (a) は 2 本のボーリング孔 DH-1 および DH-2 を用いて, 坑井内電極 C_1C_2 および P_1P_2 をそれぞれ深度 5 m から 60 m までの範囲で 10 回移動させることによって得られる 100 個のデータを用いた場合の結果であり, 図 (b) は 1 本のボーリング孔 DH-1 あるいは DH-2 と地表とを用いる CC (地下) PP (地表) 地表孔間方式 (DH-1 利用 (a) と DH-2 利用 (a) の左右反転と見なせる。) と 2 本のボーリング孔を用いる CC (地下) PP (地下) 孔間方式の複合化による 300 個のデータ (Fig. 5(b) 参照) についての, 300 通りの立体電極配置の感度分布情報による断面形成の例を示したものである。まず, Fig. 6(b) の地表孔間方式と Fig. 7(a) の孔間方式の結果から, 同じ Dipole-Dipole 方式であっても, 明瞭な電極配列効果が認識される。この例題の場合, 圧倒的な CC (地下) PP (地下)

Fig. 7. Computerized sections in electrical solid array interpretation procedure.

孔間立体電極配列の効果が注目される。つぎに, Fig. 6(b) とその左右反転そしてさらに Fig. 7(a) を加えた複合化による Fig. 7(b) からは, 探査対象物の検出により絞り込まれた断面形成における電極配列複合化効果を理解することができる。2・2 でも触れた感度分布による立体電極配列の探査特性の評価と, 本節での電極配列の評価とは, 調和的な結論を示している。例えば, 地表-坑井間あるいは坑井間に探査対象物が予測される場合, 余り感度がよくなく, かつ, 逆感度特性をもつ C (地下) P (地表あるいは地下) Pole-Pole 方式よりも, CC (地下) PP (地表あるいは地下) Dipole-Dipole 方式の方が, 計算機による断面形成過程へより良い電極配列効果を与えているなどである。これらのことから, より指向性の強い電極配列の検討の必要性が示唆され興味深い。Fig. 7 に示した例題は, とくに計算機による断面形成過程の成立を 1 つの方法を通して試験的に評価したもので, 最終的な断面を与えるというよりは, 解析過程で重要な役割を果たす合理的の初期値の形成への 1 つの支援情報を与えているものと見なすこともできる。形成される断面も厳密にはある特有の解析誤差をもつものであり, 全体的な高精度化のためには, 単に立体電極配列効果のみでなく, 感度分布法イメージング解析における個々の

支援要素についてあらゆる角度からの検討を進め、それらの解析情報の複合化を計る必要がある。さらに、探査対象物の構造の複合化・詳細化、制約された立体観測条件での電極配列効果の評価および複合情報を取り込むことや、現地データ取得・結果解釈の程度との調和など、断面解析の統合的な精度向上の検討が必要である。

4 おわりに

記憶容量、推論処理も含めた演算機能および計算機の空間的位置などの選択という3つの機能の進展による新しい計算機環境の充実に伴い、データの入力、データの加工・変換・判別の段階、解析結果の出力のそれぞれの段階において、これまで困難とされて十分なアプローチがなされていなかった問題がすみやかに解決され、高精度化のための支援要素技術の研究開発が行いやすくなっている。

そして広く受容される新しい応用技術開発のための情報知識の蓄積（データベース化）や支援要素の検討は、他の分野と同様、比抵抗探査という特定分野においても例外ではない。今後、電気探査は、鉱物・エネルギー資源のみならず、地下水資源や、地盤・岩盤・断層破砕帯・空洞などの探査といった静的な対象物の検査から、資源・環境や危険廃棄物地下処分・地下空間利用環境監視といった、ある部分の性質が時間や自然あるいは人工的エネルギーによってどう変化するかを把握する動的探査に至る、広い適用分野がある。^{4), 5), 9) - 17)}

新しい電気探査技術の応用開発例の1つとして、計算機による断面形成過程における電極配列効果の評価を行った。解析過程の個々の要素が調和していないことに起因する解析結果の信頼度への影響の検討も極めて重要である。そして広くは、在来技術のなかで既に示唆されていたことであるが、新技術開発あるいは技術の高精度化という観点から再度見直し・再評価すべき在来技術要素も多々あることと、新しい発想からの基礎的検討が望まれていることに主眼を置いたこのような計算機実験は、かなり重要と言える。電気探査トモグラフィ技術の適用方法の確立・システムの完全自動化におも未検討の点が少なくない現状において、より本質的な問題を深く考察しておくことが意義があると考えられ、今後さらに基礎的検討を進める予定である。

本研究の1部は、文部省科学研究費試験研究(2)（課題番号 62850116）の補助を受けた。記して、深甚の謝意を表する。

参考文献

- 1) J. J. Daniels and A. V. Dyck, IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, GE-22, 80 (1984).
- 2) 菅野 強, 青函トンネル物理探査研究委員会報告書, 49, 22 (1974).
- 3) 例えば物理探査学会編, “図解物理探査”, 電気探査(手法編・理論編), 40周年記念出版, 印刷中(1989).
- 4) 菅野 強, 日本鉱業会分科研究会資料, A3, 7 (1982).
- 5) 菅野 強, 佐々宏一, 日本非破壊検査協会, NDI 第3分科会資料, 3881, 43 (1987).
- 6) 大路清嗣, 久保司郎, 阪上隆英, 日本機械学会論文集, A-51, 1818 (1984).
- 7) K. A. Dines and R. J. Lytle, Proc. IEEE, 67, 7 (1979).
- 8) R. J. Lytle, IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, GE-20, 493 (1982).
- 9) F. W. Yang and S. H. Ward, Geophysics, 50, 1173 (1985).
- 10) D. Le Masne and C. Poirmeur, Geophysics, 53, 85 (1988).
- 11) C. Poirmeur and G. Vasseur, Geophysics, 53, 402 (1988).
- 12) J. O. Parra and T. E. Owen, Geophysics, 53, 1453 (1988).
- 13) A. Jämtlid, K. A. Magnusson, O. Olsson and L. Stenberg, Geoexploration, 22, 203 (1984).
- 14) C. W. Beasley and S. H. Ward, presented at the 58th Ann. Internat. Mtg., Soc. Explor. Geophys., 198 (1988).
- 15) 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 (1988).
- 16) W. Daily and T. J. Yorkey, presented at the 58th Ann. Internat. Mtg., Soc. Explor. Geophys., 201 (1988).
- 17) T. Sugano and K. Sassa, Memoirs of Faculty of Eng., Kyoto Univ., 51, in publication (1989).
- 18) A. C. Tripp, G. W. Hohmann and C. W. Swift, Jr., Geophysics, 49, 1708 (1984).
- 19) P. G. Hall of, Ph. D. dissertation, MIT (1957).
- 20) L. P. Beard, presented at the 57th Ann. Internat. Mtg., Soc. Explor. Geophys., 911 (1987).
- 21) 菅野 強, 大学院工学研究科修士論文, 京都大学 (1968).
- 22) 物理探査技術協会, “物理探査用語辞典”, 感度分布, 30周年記念出版, 63 (1978).
- 23) R. D. Barker, Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 59, 123 (1979).
- 24) R. Bazinet and P. Bérubé, presented at the 58th Ann. Internat. Mtg., Soc. Explor. Geophys., 246 (1988).
- 25) 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。