電気探査による地下情報の抽出・強調

菅野 強*

1. はじめに

鉱物・エネルギー資源のみならず、水資源なども含めた資源探査およびそれらの評価・開発から、建設・エンジニアリング、防災・自然災害のためや、地下空間利用のための地盤・岩盤評価、自然環境認識や放射性物質の地層処分、地下水環境汚染など多種多様の地下環境保全、さらに産業分野における非破壊検査においても、探査技術が果たす役割は今後とも少なくはない。とりわけ、多くの地下探査において、探査対象物の情報をいかに効果的に抽出するかは、共通した重要な課題の1つである(菅野, 1982, Sugano and Sassa, 1989, 物理探査学会, 1989)。電流、電磁界などを地下に送り込む電気探査における探査対象物は、探査目的などによって千差万別であるが、その適用に際しては、対象物と周辺構造との間の電気的性質の差異(比抵抗コントラストやIP異常など)が十分であれば効果的な結果が得られることは言うまでもない。しかしながら、一般に探査対象物は、半無限均質媒質内に存在するとは限らない。むしろ不連続・不均質な媒質内に存在する場合が多く、探査対象物としても比抵抗コントラストがそれ程大きくない場合や、小規模、その複合、あるいは深部といった場合もあり、それ程単純ではない。したがって、多様な不均質媒質内に存在する種々の探査対象物の情報を抽出・強調する方法についても、色々な角度からの検討が必要となっている。計測方式・データ処理・解析方式などの段階で、いかに地下深部の情報を高精度に抽出するかの工

夫・検討が、今後の電気探査技術全体の精度向上に役立つと考えられる。例えば、計測過程の段階では、同期加算による測定ノイズの軽減や、探査対象物に適した電極配列の選定がその後に続くデータ処理・解析の高精度化につながっている。つぎに、データ処理・解析過程の段階ではノイズ構造や地形など探査対象物の周辺環境に起因するノイズの正規化処理による軽減などが、より高い精度の解析・解釈に寄与している。また、このようなノイズ構造・浅層・地形などの影響を除外するための周辺環境正規化処理の考え方(菅野・佐々, 1987)は、深部地下利用のための情報抽出のみならず、探査対象物自体の自然あるいは人工的変動による応答特性の把握などへと、応用範囲も広い。さらに、探査対象物の比抵抗情報のみならず、構造の方向性、異方性あるいは周波数特性(IP効果)など地下構造物性についても、それらの地下情報の抽出・強調の検討が可能である(菅野, 1982, Acworth and Griffiths, 1985)。

とくに、ノイズの問題については、探査対象物の応答以外は全てノイズである。風化層など表土層や断層をはじめ周辺環境による情報の抽出が目的ではない。勿論、断層探査では断層による応答が信号である。この他、計測過程の段階での各種測定ノイズの混入も大きな障害の一つである。しかしながら、いろいろのノイズは、探査対象物の応答とは異なる特有の性質を有しているから、現象に適した計測技術やデータ処理・解析技術によりその軽減・除去が計られる。したがって、深部はじめ小規模の対象物の情報の抽出・強調には、より精度の高いノイズ対策が必至となる。

表面が水平な半無限均質媒質における地下情報

*京都大学工学部

が、不均質媒質における地下情報と一致しているならば、無論、均質媒質における地下情報を不均質な場合にもそのまま適用しても差しつかえない。しかし、地形やノイズ構造のみならず用いる探査方式および適用範囲などによって、その影響の性質が異なると考えられる。したがって、地形の影響や周辺地質の構造ノイズによる不均質の効果の特性を定量的に把握することによって、どの程度の探査対象物の情報抽出・強調が行えるかを前以て評価しておくことは、モデルによる現地予測や探査方式の変更など制御につながり、大変意義がある。3Dネットワークや2D-3DFEMアルゴリズムなどによるモデルシミュレーションがますます手軽になるにつれて、これらの評価が一層容易になるであろう。また、既述の通り、電気探査技術が取り扱う情報は、静的な地下構造の情報のみであるとは限らず、制御信号源あるいは地下の状態の時間的変動による状態変化に関する周辺環境の情報をも捉えようとする応用分野も広い。なお、近年シミュレーションを特徴付けるものとして解析結果のみならずその過程の可視化(Visualization)も大きなウェイトを占めつつある。

本文では、近年の新しい電気探査技術の1つとなりつつある第1表のような立体電極配列法に関する研究開発アクティビティにも留意しながら、現在進めている応用開発要素研究のなかから、3次元空間でのシミュレーション解析とその過程や高密度モデリングの効果的な活用に関する基礎的研究の結果の1部を例にとり説明する。

2. 電気探査3Dネットワーク, 2D-3DFEMアルゴリズム形成とフォワードモデリング

2・1 フォワードモデリング

予測されるモデルを与えてその応答のシミュレーションを実行することは、一般には順解析(あ

るいはフォワードモデリング, Forward Modeling)と言われ、解析・解釈過程のなかでかなり重要な情報知識を与えてくれるものである。一方、未知の地下構造を計測して得られたデータから、その構造を推論することを逆解析(あるいはインバージョン, Inversion)と呼んでいる。無論、フォワードモデリングも繰り返し構造修正を行うシミュレーション逆解析過程を形成する要素であり、広義に言う解析に含まれるものである。

近年、コンピュータの計算容量の増大、計算時間の短縮化および周辺機器の発達などにより、地下モデルの詳細化をはじめ、高密度の視覚化モデリングなどに時間および空間的制限が除外され、かなり手軽になっている。とりわけ、実際に探査を実施する前にシミュレーションを行うことによって、探査対象物の構成条件に合致した効率のよい探査方式に関する予測情報を与えるモデル予測と、その結果による測定方式の再検討・制御も可能となりつつある。

2・2 3Dネットワークおよび2D-3DFEMアルゴリズム形成

電気探査におけるポテンシャル問題は、探査対象領域において

$$\nabla \cdot (1/\rho) \nabla V = 0 \quad (1)$$

が成立することであり、境界面上で

$$-(1/\rho) \partial V / \partial n = i \quad (2)$$

が成立することによって、解が求められる。3次元空間の電位 $V(x, y, z)$ 、および n 方向の電流密度 i の関係を色々な手法により解こうとする訳である。解析理論による厳密解 (Analytical Solution)、積分方程式による近似解 (Integral Solution)、境界要素法 (Boundary Element Solution)、有限差分法 (Finite Difference Solution)、Transmission

電気探査による地下情報の抽出・強調

第1表 海外における新しい電気探査要素、立体電極配列法に関する研究開発アクティビティ.

探 査 対 象	研 究 例	要 点 ・ 電 極 配 列
1 地質構造・ 鉱床	Daniels(1983), Daniels and Dyck(1984)(USGS & GSC) Holcombe and Jiracek(1 984) (サンジエゴ州立大学) Eloranta(1986) (ヘルシンキ工科大学) Le Masne and Poirmeur(1988) Poirmeur and Vasseur(1988) (BRGM)	テストサイト (ネバダ)、 Mise-à-la-Masse、C (ボーリ 孔) P P (地表) 電極配列 テストサイト (ニューメキシ コ)、地形の影響、C (地 下) P P (地表) 電極配列 垂直断層の影響、C (鉱体) P (地表) 電極配列 鉱体推定、C (地下) P (地表) 及び C (地下) P P (地表)、C (ボー リング孔 1) P (孔 2) 電極配列
2 岩盤・亀裂 断層・破碎帯	Yang and Ward(1985), Zhao, Rijo and Ward(1986)(ユタ 大学) — Beasley and Ward(1986) (ユタ大学)	深部、薄層検出、C (地表) P P (ボーリング孔) (回転) C (地下) P (地下)、C C (地下) P P (地下) 孔間電 極配列 地熱システム、亀裂帯検出 (KGRA)、C (地下) P (地表) 電極配列
3 地下遮水処分 環境	Parra and Owen(1988) (supported by USEPA)	リーク孔検出、C (地下) P P (地表あるいは地下) 電極配列
4 放射性廃棄物 地層処分	Jämtlid et al.(1984) (SGAB) Asch and Morrison(1989)(カリフォ ルニア大学)	断層調査、Mise-à-la-Masse、 C (地下) P (地表) 電極配 列 モニタリング、C C (ボーリ ング孔) P P (地表) 電極 配列
5 旧坑道・ 地下空洞	Daniels and Dyck(1984) (USGS & GSC) Owen(1983) (テキサス サウスウェスト研究所)	鉱山旧坑道位置確認、C (ボー リング孔 1) P P (孔 2) 電極配列 空洞検出、C (地下) P P (地下または地表)、C C (地下) P P (地下または 地表) 電極配列

Surfaceおよび抵抗網法 (Network Solution), 有限要素法 (Finite Element Solution) など多様な解法がある。モデルの設定としても, 2次元 (線) (2D) 電流源で2次元 (2D) 構造, 3次元 (点) (3D) 電流源で2次元 (2D) 構造, 3次元 (点) (3D) 電流源で3次元 (3D) 構造の区別がある。しかしながら, 地下探査のように複雑な条件下における解析に対して, これらの手法を適用するにあたり留意すべき点がいくつか挙げられる。例えば, 3次元空間でその一般性を発揮した解析を行うことは, 空間の離散化に伴う計算機の記憶容量の不足などを理由とする困難を伴うことである。したがって, このような困難を避けるため, 直接大規模な行列を必要とする系全体の方程式を解くよりは, 電気探査特有の有限領域での関係に着目し, 逐次的に計算を繰り返す手法などの工夫が用いられる。ここではそれらのなかの1例として3Dネットワーク法を説明する。(1)式に示すように, 3次元空間における定常電流下の電気ポテンシャル問題の支配方程式は, Laplace方程式である。第1図(a)に示すような抵抗素子から成る3次元格子網では, (1)式はつぎのような節点方程式で定式化される。

$$V_0 = \frac{\frac{V_1+V_2}{R_x} + \frac{V_3+V_4}{R_y} + \frac{V_5+V_6}{R_z}}{2 \left(\frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} + \frac{1}{R_z} \right)} \quad (3)$$

ここで, R_x, R_y および R_z はそれぞれ x, y および z 方向の抵抗素子で, 媒質の比抵抗を $\rho_x, \rho_y,$ および ρ_z とすれば,

$$\begin{aligned} R_x &= \rho_x \frac{\Delta x}{\Delta y \cdot \Delta z} & R_y &= \rho_y \frac{\Delta y}{\Delta x \cdot \Delta z} \\ R_z &= \rho_z \frac{\Delta z}{\Delta x \cdot \Delta y} \end{aligned} \quad (4)$$

である。(3)式の数値計算の場合には, 各接点毎に電位の関係を満たす多元連立方程式を解く問題に帰着される。この場合, 過剰緩和法 (SOR : Successive Over Relaxation) を用いることにより計算能率が上げられる。緩和係数 ω ($1 \leq \omega < 2$) は計算対象に適した値をとる。また, 格子網の大きさや境界条件には電気探査問題に対応した工夫が必要となる。

つぎに, 有限要素法も多くの工学分野の順解析および逆解析においてかなり利用されている有力

第1図 3次元空間における比抵抗探査シミュレーションのモデル
(a) 3Dネットワーク, (b) 2D-3D FEMアルゴリズム

な手法の1つである。とくに、複雑な境界形状や媒質分布のもとでの探査特性の解法にフレキシビリティを有している。(1)式に示した3次元空間における Laplace方程式の電位 $V(x, y, z)$ および比抵抗 $\rho(x, y, z)$ について y -方向に一樣な2次元構造で3次元(点)電流源(第1図(b)参照)を考えると、

$$V(x, \lambda, z) = \int_{-\infty}^{\infty} V(x, y, z) e^{-i\lambda y} dy \quad (5)$$

なるフーリエ変換により、(1)式は2次元 Helmholtz 方程式になり、次元を下げるができる。このようにして λ -領域での計算を所要回数繰り返し逆フーリエ変換を行えば、3次元空間のシミュレーション結果としての電位や見掛け比抵抗の分布、さらには感度分布などが得られる。

第2図は簡単な3次元空間電極配列の場合のモデル計算例で、表土層と断層がバックグラウンドで導電性垂直構造を検出する問題である。第3図(a), (b)および(c)は、電流源 $C(I)$ を含む

断面、200m離れた断面および400m離れた断面のそれぞれの地下見掛け比抵抗分布出力例である。

3. 電気探査における地下情報の抽出・強調のための支援要素

近年、計算機の発達に伴って、物理現象の研究において計算機が広く利用されるようになり、実験、理論につぐ第3の研究過程として重要性が認識され、その地位を高めつつある。地下探査においては、利用される物理現象の基礎方程式が分かっているにもかかわらず、不均質で不連続な媒質全体と任意の測定系から成る関係方程式は、理論的には事実上解くことはできない。ある程度の問題の簡単化によって定性的な検討を試みるが、特別な場合を除いて、有効な解を得ることは難しい。色々な近似的な理論による解決に加えて、数値的に解析する計算機実験(シミュレーション)の果たす役割は極めて大きい。地下情報抽出・強調のための要素技術の研究としても、これまで精度良くかつ効率・

第2図 簡単な地下電気探査3次元空間モデリングの例

第3図 断層および部分的水平層構造がバックグラウンドで、導電性垂直構造を目的とする異常体の電気探査3次元空間モデリング結果。(a)電流源C(I)が存在するxz断面、(b)電流源C(I)から200m離れたxz断面および(c)電流源C(I)から400m離れたxz断面の孔間見掛比抵抗分布

系統的に検討が加えられていなかった部分も少なくなく、計算の詳細化、高密度化、高次元化、高速化などの達成によって、これまでの未検討の問題の解決を容易としている。この章では、電気探査による地下情報の抽出・強調のためのいくつかの要素をとり挙げる。すなわち、深部、小規模、比抵抗コントラストの小さい探査対象物の信号（情報）をより強く抽出する立体電極配列要素、目的鉱床を胚胎する母岩などの探査対象物を取りまく種々の周辺環境の影響を抑える構造ノイズ軽減要素、そして探査対象物の真の情報を含む見掛け比抵抗などの測定量を効果的に表示する可視化表示要素および解析過程の評価要素などについて説明する。

3・1 坑井間および地表－坑井間など立体的電極配列要素

いかなる探査電極配列でも、その特性を容易に明らかにすることができるようになる（例えば菅野,1982,Sugano and Sassa,1989）以前は、地表面に規則的に配列されたWenner法やSchlumberger法などを1例とする地表電極配列や、ボーリング孔内でのノルマル法やラテラル法などの検層電極配列が、主として利用されていた。しかるに、シミュレーション技法の進歩は、探査特性を明確化する感度分布情報（菅野,1968, 日本鉱業会編,1974,物理探鉱技術協会編,1978,Sugano and Sassa,1989,物理探査学会編,1989）をより活用する方向に導き、水平探査技術の垂直方向への展開など、立体電極配列(Subsurface Solid Electrode Array Resistivity)の効果の評価を可能としつつある。とりわけ、第1表に示したように、ボーリング孔を利用する3次元比抵抗探査やその高密度モデリング（例えば、菅野,1982, Daniels and Dyck,1984, Le Masne and Poirmeur,1988,Poirmeur and Vasseur,1988, Sugano and Sassa,1989）などは、今後、高精度の予想される電気探査トモグラフィ技術の支援要素として意義がある。鉱物資源探査技術の1

つとして、既にParasnis(1960)が先導的な役割を果たした流電電位法(Charged Potential Method)におけるC（地下）P（地表）地表孔間立体電極配列がある。当初、鉱体に直接電極を設置して流電(Mise-à-la-Masse)する方式が主であったが、近年になり試錐孔が鉱体を外れた(Near-Miss)方式（例えばBeasley and Ward,1985, LeMasne and Poirmeur,1988, Poirmeur and Vasseur,1988）に、C（地下）P P（地表）地表孔間立体電極配列も加えて、深部岩盤亀裂・断層検出などへと適用分野も広がっている。さらに、流電電位情報のみでなくより地下情報を反映するMMA R見掛け比抵抗情報の利用も進んできた（例えば Pridmore,1978, 菅野・佐々,1987）ことは、比抵抗トモグラフィ処理への入力情報とも密接に関連し、いわゆる従来の伝統的手法と新しい探査技術の接合点ともなっている。放射性廃棄物地下処分に関係する断層破砕帯の調査（例えばJämltmit and Ollsson,1985）の好例も見られる。また、立体電極配列SSARとしても、坑井間あるいは地表－坑井間を利用するPole-Pole方式,Pole-Dipole方式さらにはDipole-Dipole方式と、より探査対象物の信号をより感度良く把握する電極配列の選定にも留意がされるようになっている。導電性薄層検出や塊状鉱体探査(Zhao,Rijo and Ward,1986,菅野・佐々,1988),核廃棄物地下処分の監視(Asch and Morrison,1989)などにおけるCC（地下）PP（地下）孔間およびCC（地下）PP（地表）地表孔間立体電極配列の利用は、1つの方向を示すもので評価できる。

3・2 測定ノイズの軽減要素

地下構造を測定して必要な情報（データ）を取得する際に、混入するノイズとしては、探査対象物を取りまく周辺環境や地形・媒質境界条件による構造ノイズの他に、計測機器、測定作業に伴う人為的なものも含め、あらゆる計測条件による測定ノイズも多く含まれる。このような場合、1つとして同一測定値を繰り返し測定し、スタッキン

グ (Stacking) 処理してランダムなノイズを平均化し必要な信号 (情報) を抽出する方法が採用される。初歩的には、大局的な見方から、かなり経験的な要素も加味した平滑化 (Smoothing) 処理が行われることもある。さらに、測定量の集合から異常成分のみを除外する周波数分析処理をはじめ、現地での計測誤差をふまえた種々の工夫がされる。あくまでも、目的とする探査対象物からの応答 (信号) を忠実に検出するに、各種フィルタ、重合処理などデータ処理が施される。技術の研究開発上、華やかでないが極めて重要な要素でもある。

3・3 構造ノイズの軽減要素

地下情報抽出・強調と言っても、探査対象物以外の周辺環境の影響はあくまでもノイズ (雑音) であり、目的とする地下情報ではなく、探査対象物からの信号のみが抽出すべき情報とされる。シミュレーションの進歩は、複雑な境界形状・比抵抗分布などの周辺構造ノイズの影響を精度良く計算することを可能としている。したがって、実際に電気探査を実施する前に、モデルシミュレーションで地下構造における物理現象を再現して大規模あるいは困難な現地でのロスや危険性の回避、さらにはより合理的な方式の検討などを十二分に行うことができる。このように、シミュレーションによる物理現象の工学的見地からの検討は、探査実施における大幅な資金と時間の節約に寄与し、今後の研究開発の高精度化や効率化のために、必要不可欠な手段となる。

既述の通り、鉱体や亀裂・断層破碎帯など探査対象物が、全く均質様な媒質に存在するとは限らず、むしろ複雑な不連続・不均質かつ地形を伴う媒質に存在していると考えの方が普通である。しかるに、このような場合の地下情報抽出・強調に、水平な地表面の半無限均質媒質に対する解析技術のみでは、物理現象に忠実な解析結果が得られない。不均質媒質に対する体系的な探査理論・解析技術の確立 (例えば菅野, 1982, 菅野・佐々, 1987, Sugano

and Sassa, 1989) が目指される所以となっている。近年、新しい要素技術の1つとして、不均質媒質における感度分布を次のように定義した。すなわち、不均質媒質の比抵抗 ρ_N と探査対象物の比抵抗 ρ_k とから形成される系全体の見掛け比抵抗を ρ_{aKN} とするとき、不均質媒質のみの見掛け比抵抗を ρ_{aN} として、

$$S_{kN/N} = \frac{\rho_{aKN} - \rho_{aN}}{\rho_{aN}} \quad (5)$$

なる $S_{kN/N}$ を不均質媒質における感度と定義する。一方、均質媒質における感度分布は、

$$S_k = \frac{\rho_{ak} - \rho_{a0}}{\rho_{a0}} \quad (6)$$

で与えられる (菅野, 1968, 物理探鉱技術協会編, 1978)。ここに、見掛け比抵抗 ρ_{ak} および ρ_{a0} は、比抵抗 ρ_0 の均質媒質および比抵抗 ρ_k の探査対象物が存在する場合の測定値である。

ここで、新しく感度差 (Sensitivity Difference) ΔS_k を定義すれば (菅野・佐々, 1988)

$$\Delta S_k = S_{kN/N} - S_k \quad (7)$$

となり、(5)、(6) および (7) 式より

$$\rho_{ak} = \left(\frac{\rho_{aKN}}{\rho_{aN}} \right) \cdot \rho_{a0} - \Delta S_k \cdot \rho_{a0} \quad (8)$$

と表現できる。

したがって、(7) 式の右辺の第2項が第1項に比べて無視できるものならば、

$$\rho_{ak} = \left(\frac{\rho_{aKN}}{\rho_{aN}} \right) \cdot \rho_{a0} \quad (9)$$

となり、新しく周辺構造ノイズによって正規化された見掛け比抵抗 ρ_{ak}^n (Normalized Apparent resistivity) が得られる。

3・4 シミュレーションの解析過程可視化要素

実際に存在する探査対象物の応答特性を、高精度に計算機上に再現できるようになりつつある状態に鑑み、そのシミュレーションによって得られる3次元空間の膨大なデータに対する適切な可視化表示が重要な役割を受け持つようになった。すなわち、高密度シミュレーションを特徴づけるものとして解析結果のみならずその過程の視覚化が位置するようになっていく。無論、この背景には、CG画像など計算機処理技術の進歩が大きく寄与している。3次元空間のシミュレーションが盛んになればなる程、その解析過程における大量のデータの可視化による評価手法の工夫がされる。従来では到底迫ることの難しかった、複雑な地下構造亀裂モデルや周辺環境のモデルなどがかなり自由に再現され、画像化など視覚化情報として提供されるようになった。

3・5 計算機による地下情報の可視化要素

シミュレーション解析過程における可視化を支える計算機技術は、また、現地探査結果である地下情報をCG画像などによって、わかりやすく可視化し、探査対象物を浮き彫りにさせる。近年、医療技術で育ったCT技術が、地下探査分野でジオトモグラフィとしても1つの効果的なツールとなりつつあるのは周知の通りである。電気探査においても、坑井間および地表-坑井間探査における探査対象物の応答の抽出・強調に、計算機による比抵抗断面画像形成が1つの要素となり、それに関する基礎的研究開発が独自に進みつつある。比抵抗画像（あるいは映像）(Image) 形成は、真の比抵抗分布を抽出することが究極の目標であるが、実際には偽像（ゴースト）などが現われ正確な意味では擬似断面情報を与えている場合も少な

くなく、今後、より真の地下情報抽出への要素技術研究開発とそのインテグレイテッド化が重要視されよう。

4. 地下情報抽出・強調に関するシミュレーション解析

4・1 立体電極配列法電気探査モデリングとその評価

第4図は、かなり複雑な地下構造を想定したモデルの説明図で、目的とする探査対象物は比抵抗 ρ_3 が $10\Omega\cdot m$ の導電性垂直構造である。すなわち、探査対象物の周辺に表土層・部分的水平構造・垂直断層、浅部局部異常および電流源近傍の局部構造などが構造ノイズとして存在している。

測定方式は孔井（あるいはボーリング孔）内に電流電極 C_1 を置き、地表面電位電極 P_1 により地表面の電位を計測するC（地下）P（地表）地表孔間立体電極配列によるものである。一般には、残りの電流電極 C_2 と電位電極 P_2 は、ある程度離れた無限遠点に設置しておく。第5図は、地下構造モデル5272WLN（第2図において、比抵抗 $\rho_1=700\Omega\cdot m$, $\rho_2=200\Omega\cdot m$, $\rho_3=10\Omega\cdot m$, $\rho_4=200\Omega\cdot m$, $\rho_5=1000\Omega\cdot m$, $\rho_6=100\Omega\cdot m$, $\rho_7=50\Omega\cdot m$, $\rho_8=20\Omega\cdot m$ および $\rho_9=700\Omega\cdot m$ の場合）のシミュレーション結果の2次元等高線表示である。正規乱数により人為的な測定ノイズ（最大5.8%、平均1.55%）を加えた例となっている。電流源 C_1 (I) (700, 1100, -200) (単位m) の上部付近を注意深く見ると僅かに高比抵抗傾向があり、垂直断層の右側 (C_1 極と反対側) に低比抵抗部分が攪乱されて存在している様に見える。ランダムな測定ノイズがいかにかに地下情報を不明瞭にしているか一目瞭然である。第6図は、第5図の2次元等高線表示を3次元鳥瞰図表示で見たものである。コンピュータグラフィックス(CG)の活用は、煩わしい複雑なデータ的大量高密度処理（人力では到底及ばない処理など）

第4図 解析モデル図

単一の導電性垂直構造を探索対象物と想定し、垂直断層、表土層、部分的水平構造、深部水平構造および電流源近傍の局部異常をノイズ構造とした複合モデルの例

第5図 複合モデル5272WLN（第2図における比抵抗が $\rho_1=700\Omega\cdot m$ 、 $\rho_2=200\Omega\cdot m$ 、 $\rho_3=10\Omega\cdot m$ 、 $\rho_4=200\Omega\cdot m$ 、 $\rho_5=1000\Omega\cdot m$ 、 $\rho_6=100\Omega\cdot m$ 、 $\rho_7=500\Omega\cdot m$ 、 $\rho_8=20\Omega\cdot m$ および $\rho_9=700\Omega\cdot m$ の場合）に対する立体電極配列3次元空間電気探査シミュレーション結果で、最大5.8%・平均1.55%の測定ノイズがある場合の地表見掛け比抵抗分布

第6図 第5図に対する地表見掛比抵抗鳥瞰図

第7図 測定ノイズのない場合の複合構造モデルの立体電極配列
3次元空間電気探査シミュレーション結果
(a) モデル5272WLN (第5図と同一の構造)
(b) モデル5272WLC((a) 図と $\rho_1=20\Omega\cdot m$ のみが異なる構造)

に対して、例えば、ここでのランダムなノイズを含む地下情報の全容が鳥瞰できるように、極めて高速に簡単に情報を視覚化する。ちなみに、3Dグラフィックスなどの効用の説明がかなり見受けられるようになったのは、単に探査技術の分野のみではない。新しい計算機環境に支援されている広い分野でこの傾向が顕著となっている。学術的ではないが、検討過程において膨大なデータ処理を結果解釈グラフィックシステムで実行する際に、最終結果出力図では気づかない特徴をビジュアルに識別できる可能性があることも、よく知られているところである。つぎに、第7図(a)は、第5図と同一のモデル5272WLNのシミュレーション結果で、測定ノイズがない場合である。電流源上部付近に見掛比抵抗の極大値が明瞭に現れ、垂直断層の右側(C₁極と反対側)に極小値が明瞭に現れている。2次元等高線表示を補足する鳥瞰図表示に如実にみることが出来る。第7図(b)は、地下構造モデル5272WLC(第4図に示したモデルの比抵抗が $\rho_9=20\Omega\cdot m$ となり、他は全て第7図(a)に示したモデル5272WLNと同一の場合)のシミュレーション結果である。電流源C₁上部付近の見掛比抵抗の分布状態は、第7図(a)とは全く異なる様相を示している。電流源C₁近傍の局部構造 ρ_9 の存在がいかに大きく地表孔間比抵抗探査の結果に影響するかを示す好例である。また、2次元等高線表示の対比で得られる理解と、3次元鳥瞰図表示の対比で得られる理解との長短もよく示されている。とくに、重要な計算機解析過程の表示と評価では、コンピュータグラフィックス画像の活用など、より視覚的な情報処理方式も1つの有効な要素である。第8図(a)および(b)は、第7図(a)および(b)の地下構造モデル5272WLNおよび5272WLCの見掛比抵抗分布を、探査対象物(比抵抗 ρ_3 の垂直構造)以外の周辺構造(第4図における比抵抗 $\rho_1=\rho_3=700\Omega\cdot m$, $\rho_2=\rho_4=200\Omega\cdot m$, $\rho_5=1000\Omega\cdot m$, $\rho_6=100\Omega\cdot m$, $\rho_7=50\Omega\cdot m$, $\rho_8=20\Omega\cdot m$ および $\rho_9=700\Omega\cdot m$ からなるノイズ構造モデル72WLNと、

比抵抗 $\rho_9=20\Omega\cdot m$ のみが異なり他はモデル72WLNと全く同一のノイズ構造モデル72WLC)による構造ノイズ正規化処理結果である。(8)式に示したように正規化処理結果は $\Delta S_k\cdot\rho_{90}$ だけの差を有して、第8図(c)に示す均質媒質中に単一の垂直構造のみが存在する場合の見掛比抵抗分布に対応する。第7図(a)および(b)のみでは、探査対象物の存在の推論がかなり難しく、このデータの逆解析過程への入力は、必ずしも効果的な地下構造抽出につながらない。しかるに、構造ノイズ処理によって探査対象物の応答を抽出・強調した第8図(a)および(b)は、ほぼこの段階の解析過程で、かなりの程度で単一の導電性垂直構造を推論するに足る情報を与えている。付言すれば、第8図(a)および(b)は、探査対象物の存在が周辺構造によって、第8図(c)に示すような探査対象物の存在だけよりも強調された結果を示していることは興味深い。地形の存在および媒質の境界条件や地下構造の人工的・時間的変動、印加されるエネルギーや物質の違いによる応答の変化(例えば鉱物IP探査をはじめとする)など、この構造ノイズ処理の考え方の応用分野は広い。

ちなみに、海外での立体電極配列比抵抗探査技術の応用開発例としては、地下岩盤亀裂・薄層検出の Zhao and Ward(1986)や放射性地層処分モニタリングの Asch and Morrison(1989)などの研究が、本研究と同じような考え方で展開されており、注目される。我が国では本格的な研究開発は余り進んでなく、その体系化が望まれる(菅野, 1982, Sugano and Sassa, 1989)。

4・2 計算機による立体電極配列比抵抗断面解析

膨大な3次元空間の電気探査データを解析する近年の計算機データ処理技術の進展では、コンピュータグラフィックス画像化も大きく寄与している。計算機トモグラフィ技術などはその好例と言える。データ処理および解析過程のすみやかな表

第8図 第7図の探查結果に対する地下構造情報抽出・強調のシミュレーション解析過程の例

(a) 第7図 (a) モデル5272LNの地表見掛け比抵抗分布から周辺ノイズ構造モデル72WLN(第5図における比抵抗が $\rho_1 = 700 \Omega \cdot m$, $\rho_2 = 200 \Omega \cdot m$, $\rho_3 = 700 \Omega \cdot m$, $\rho_4 = 200 \Omega \cdot m$, $\rho_5 = 1000 \Omega \cdot m$, $\rho_6 = 100 \Omega \cdot m$, $\rho_7 = 500 \Omega \cdot m$, $\rho_8 = 20 \Omega \cdot m$ および $\rho_9 = 700 \Omega \cdot m$ の場合) による構造ノイズ処理を行い, 探查対象物の地下情報を抽出した結果

(b) 第7図 (b) モデル5272WLCの地表見掛け比抵抗分布から周辺ノイズ構造モデル72WLC(第5図における比抵抗が $\rho_1 = 700 \Omega \cdot m$, $\rho_2 = 200 \Omega \cdot m$, $\rho_3 = 700 \Omega \cdot m$, $\rho_4 = 200 \Omega \cdot m$, $\rho_5 = 1000 \Omega \cdot m$, $\rho_6 = 100 \Omega \cdot m$, $\rho_7 = 500 \Omega \cdot m$, $\rho_8 = 20 \Omega \cdot m$ および $\rho_9 = 20 \Omega \cdot m$ の場合) による構造ノイズ処理を行い, 探查対象物の地下情報を抽出した結果

(c) 比抵抗 $100 \Omega \cdot m$ の均質媒質内に, 探查対象物 $\rho_3 = 10 \Omega \cdot m$ の単一の導電性垂直構造のみが存在する場合

示と評価はこれまで未開拓であった新しい電極配列電気探査技術の検討も容易としている。坑井間および地表-坑井間などの立体電極配列探査法も1つの新しい部門を形成しつつある(第1表参照)。

Lawrence Livermore研究所のDaily and Yorkey (1988)は、単一の導電性プリズム構造を探査対象物として比抵抗トモグラフィ映像を形成している。Yorkeyら(1987)は、既に生体医学の分野で、比抵抗断面画像形成技術を研究開発しており、その手法を地球物理学の問題へ適用したもので今後の成果も期待される。日本においては、これらに関する研究開発は要素技術の確立が必至であり、適用性の高い手法へのその高精度化のためには、ジオトモグラフィとしてかなり研究が進んでいる弾性波トモグラフィとは別の角度から独自にその発展を計る必要がある。また、その技術目標の設定やその適用性についても際限のない可能性に過剰に期待することなく、適正な利用が望まれる。

4・2・1 感度分布法とは(菅野, 1968, 物理探査技術協会, 1978, 物理探査学会, 1989, Sugano and Sassa, 1989)

3・3節でその定義を説明した感度分布(Sensitivity Distribution Sections)を坑井間あるいは地表-坑井間の電極配列は無論のこと、任意の電極配列について作成することによって、目的とする探査対象物の応答を効果的に捉え、また、取得されたデータが如何なる領域に存在する探査対象物の応答によって構成されているかを解くことが容易となる。とくに、地下構造を構成する要素を設定して、その単位構造が電極系へ応答する度合をシミュレーションによって解析する方法を導入(菅野, 1968)してから、均質媒質のみならず不均質な媒質においても探査対象物の応答特性を高精度にシミュレーション解析する段階に至るまで、その理論と応用はかなりの実際的な問題を解決しつつある。また、膨大なトモグラフィはじめ任意の電極配列によるデータの処理や、最適な探査方

式の検討、さらには解析結果のみならず解析過程の評価などに対しても、強力な支援要素技術の1つとなる。

4・2・2 計算機比抵抗断面形成過程の評価

本論文では、2本のボーリング孔(あるいは坑井)利用およびトンネルと地表を利用する立体電極配列法の例題を示す。第9図(a)は、40m間隔において掘削された2本のボーリング孔DH-1およびDH-2間のCC(地下垂直)PP(地下垂直)立体電極配列の感度分布の1例である。DH-1内深度30mと40mに電流電極 C_1, C_2 を置き、DH-2内深度40mと50mに電位電極 P_1, P_2 を置いたDipole-Dipole方式の場合である。電流電極 C_1, C_2 間と、電位電極 P_1, P_2 間を帯状の順感度領域で結び、その周辺を逆感度領域で取り囲む典型的なCC(地下)PP(地下)感度分布のパターンとなる。第9図(b)は、地下50mに掘削されているトンネルと地表を利用するCC(地表)PP(地下水平)立体電極配列の1例である。やはり帯状の順感度の領域とそれを取り囲む逆感度領域の特徴的なパターンを示す。

第10図は、(a)CC(ボーリング孔DH-1内)PP(ボーリング孔DH-2内)坑井間立体電極配列方式による、(b)計算機による比抵抗断面形成過程の出力例である。ボーリング孔DH-1内では深度60mまで電極間隔10mの電流電極 C_1, C_2 を5m毎に移動し、ボーリング孔DH-2内では電位電極 P_1, P_2 を移動する(取得データ100個)場合となっている。探査対象物は比抵抗 $100\Omega \cdot m$ の岩盤の中に存在する導電性塊状構造(比抵抗 $0\Omega \cdot m$)である。有望(あるいは異常出現)度合を確率(Probability)($0 \leq p \leq 100$)で表示している。

第11図はトンネル切羽前方の断層破碎帯や異常帯の予知を目的とする探査法で、(a)CC(地表)PP(トンネルTL-1内)立体電極配列方式の場合の、(b)計算機による比抵抗断面形成過程の出力例である。掘削されてる切羽前方の異常帯の応

第9図 坑井（あるいはボーリング孔）間や地表－トンネル間を利用する

3次元空間電気探査立体電極配列の感度分布の例

(a) CC（ボーリング孔1内）PP（ボーリング孔2内）立体電極配列

(b) CC（地表）PP（トンネル内）立体電極配列

第10図 2本の坑井（あるいはボーリング孔）を利用する立体電極配列電気探査
（a）CC（地下）PP（地下）計算機による比抵抗断面形成過程

第11図 地表とトンネルを利用する立体電極配列電気探査
(a) CC (地表) PP (地下) 立体電極配列
(b) 計算機による比抵抗断面形成過程

電気探査による地下情報の抽出・強調

答をどの程度抽出・強調できるかが要点となる。

トモグラフィ処理では、効果的な立体電極配列の選定、坑井間および地表－坑井間など観測条件の効果的な利用、地下情報の抽出・強調への複合要素、ノイズ問題など、適用にあたって留意すべき点もかなり多い。

4・3 立体電極配列比抵抗擬似断面の定義と形成

計算機による比抵抗断面形成技術について簡単に触れたが、この手法によって得られる結果が真の比抵抗断面に一致しない限り、ある意味では比抵抗擬似断面形成段階と言える。したがって、きわめて高度なデータ処理を行って計算時間（CPU）に比して得られる結果は、それなりの信頼性の高いものであることが期待されるが、必ずしも、良い結果が得られる保証は、現在のところ未だないように思える。また、解析結果のみならず解析過程の評価と適切な表示についても未検討な部分が

少なくない。

坑井間および地表－坑井間探査技術として立体電極配列法がより本格的に研究され始めた背景には、1つとして既述の通り、任意の電極配列の探査特性が感度分布法（菅野, 1968）の導入によって、より簡単かつ詳細に明確にされるようになったことが挙げられる。また、より複雑な観測条件でより探査対象物を詳細に探査することが望まれる（例えば菅野, 1974, 菅野, 1982, Daniels and Dyck, 1984, 菅野・佐々, 1989）ことや、近年の計算機トモグラフィ技術が立体電極配列を支援要素としていることも挙げられる。

擬似断面表示法については、歴史的には当時MITの Hallof (1957) らが地表電極配列の Dipole-Dipole 法において導入して以来、広く活用されてきている。きわめて容易でパターン認識的に大変便利な表示法であることを特徴としてきた (Sheriff, 1984, 物理探査学会, 1989)。

しかるに、坑井間や地表－坑井間などを利用す

第12図 1本のボーリング孔と地表を利用する立体電極配列電気探査
C（地下）P（地表）坑井－地表間方式の例

る立体電極配列については、その探査特性を明確にする系統的な研究が十分でなかったこと、電気探査シミュレーションが今日程手軽でなかったこと、モデル予測制御の考え方が不十分であったなどのために、その定義はされていなかった。また、補足的であるが、一般には、トモグラフィ技術の登場以前には立体電極配列方式の探査能力にはあまり留意していなかった。近年になり、その能力の可能性を見直し、基礎的研究と応用開発に関する検討の意義とその新しい展開が認識され、海外を含め1つの注目されるアクティビティが見られるようになった (Zhao and Ward, 1986, Le Masne and Poirmeur, 1988, Poirmeur and Vasseur, 1988, Beasley and Ward, 1988, Daily and Yorkey, 1988, Sugano and Sassa, 1989, Asch and Morrison, 1989)。さらに、立体電極配列方式では擬似断面表示は無理であるとの見解も見られた。感度分布を容易に求められることをふまえば、立体電極配列擬似断面表示法を新しく考察することは、意味を持ったことになる。新しい計算機環境も加味して、その有用性の検討が可能となり、今後魅力的な活用も期待できる。現地において簡単にデータの視覚化ができパソコン化による独自の利用やトモグラフィ処理過程などにおいて解析・評価支援手段になることなどである。

4・3・1 地表-坑井間立体電極配列比抵抗擬似断面形成

第12図は、1本のボーリング孔（あるいは坑井）と地表を利用するC（ボーリング孔DH-1内）P（ボーリング孔DH-2内）地表孔間方式による立体電極配列比抵抗探査を示す。FEM2D-3Dアルゴリズム (Coggon, 1971, Lijo, 1977, Sugano and Sassa, 1989など) によって計算した1例で、ボーリング孔DH-1内に9極、地表面20mから160mまで15極の電極を置き、合計135個のデータを取得するC（地下）P（地表）Pole-Pole方式立体電極配列の組合せの場合となっている。第13図

(a), (b)は、今回新しく定義した坑井間立体電極配列擬似断面表示法による比抵抗擬似断面で、単一の導電性プリズム構造（比抵抗 $100\Omega\cdot\text{m}$ の媒質内に $10\Omega\cdot\text{m}$ の探査対象物が存在する場合）に対する結果である。新しく定義した地表-坑井間C（地下）P（地表）立体電極配列の擬似断面表示点Qは、この場合、DH-1内の深度30mにC₁電極を置き、地表の70mにP₁電極を置いた電極配置の場合が示されている。まず、第13図(a)の単一の導電性垂直構造に対する立体電極配列比抵抗擬似断面では、 $86\Omega\cdot\text{m}$ 程度の低比抵抗部分が探査対象物の右側上部付近に現れている。ボーリング孔DH-1の浅部になるにつれて、均質媒質の比抵抗 $100\Omega\cdot\text{m}$ に近づいている。つぎに、第13図(b)の水平構造の場合では、 $88\Omega\cdot\text{m}$ 程度の低比抵抗部分が探査対象物の左側下部付近にアノマリーとして現れている。ボーリング孔DH-1の浅部に、均質媒質の比抵抗 $100\Omega\cdot\text{m}$ に近づく特徴を示すのは、第13図(a)の垂直構造の場合と同様である。第13図(a)と(b)の対比でわかるように、構造の方向性に対して擬似断面のパターンが大きく異なることも含めて、大変有用な地下情報を提供している。

4・3・2 坑井間立体電極配列比抵抗擬似断面形成

第14図は、2本のボーリング孔（あるいは坑井）を利用するC（ボーリング孔DH-1内）P（ボーリング孔DH-2内）孔間方式による立体電極配列比抵抗擬似断面を、FEM2D-3Dアルゴリズムによって形成した1例の、ボーリング孔DH-1内に9極、ボーリング孔DH-2内に9極の電極を置き、合計81個のデータを取得するC（地下）P（地下）Pole-Pole方式立体電極配列の組合せの場合となっている。第15図は、今回新しく定義した坑井間立体電極配列擬似断面表示法による比抵抗擬似断面で、4・3・1の例題と同じ単一の導電性プリズム構造（比抵抗 $100\Omega\cdot\text{m}$ の媒質内に $10\Omega\cdot\text{m}$ の探査対象物が存在する場合）に対する

電気探査による地下情報の抽出・強調

第13図 立体電極配列比抵抗擬似断面

- (a) C (地下) P (地表) 坑井-地表間方式による単一の導電性垂直構造の探査
- (b) 単一の導電性水平構造の探査

結果である。新しく定義した坑井間菱形表示の擬似断面表示点Qは、この場合、DH-1内の深度20mにC₁電極を置き、DH-2内の深度50mにP₁電極を置いた電極配置のときが示されている。すなわち、菱形表示領域の上部の頂点が、C₁(DH-1内深度0m) P₁(DH-2内の深度0m)電極配列の擬似断面表示点となり、DH-1およびDH-2内電極が坑井内を深部に移動することによって、坑井間深部まで擬似断面表示点群が構成される。データ取得の立体電極配列の組合せによっては、坑井間外領域にも菱形表示領域が形成される場合もある(第15図(a)(b)参照)。さて、この単一の導電性垂直構造に対するC(ボーリング孔DH-1内) P(ボーリング孔DH-2内)立体電極配列比抵抗擬似断面では、86Ω・m程度の低比抵抗部分が探査対象物の上部に現われている。2本のボーリング孔付近および坑井間外では均質媒質の100Ω・mに近づく特徴を示している。つぎ

に、第15図(b)は、導電性垂直構造(第15図(a)の垂直構造と同一の比抵抗コントラスト)に対する立体電極配列比抵抗擬似断面である。この場合には、探査対象物の応答を捉えるアノマリーとしては、108Ω・m程度の高比抵抗部分が水平構造の左半分に左斜めのパターンで現われている。本文では1例しか取り上げていないが、探査対象物の応答を簡単なパターン情報で捉え、垂直構造と水平構造と言った方向性の特徴も識別でき、1つの有用な地下情報抽出・強調の方法として、立体電極配列擬似断面法が成立している。地表浅部の風化層はじめ、表土層や地形、さらには、種々のノイズ構造の影響を含んだ地表電極配列法に比べて、より深部あるいはより小規模の地下構造あるいは地下空間環境の情報抽出・強調に立体電極配列擬似断面法がより効果的であることは当然であるが、解析過程の適切な評価手段としての利用や、専門家独自の判断情報(ノウハウに近いような)とし

第14図 2本のボーリング孔を利用する立体電極配列電気探査
C(地下) P(地下)坑井間方式の例

でも、その程度に見合った活用が今後かなり見込まれる。

5. おわりに

一般地質探査はもとより鉱物・エネルギー・水資源探査をはじめ、土木建設・基礎岩盤・防災環境地質評価、さらには材料媒質に至るまで、かなり広い分野において、有用な地下構造・媒質情報を提供している探査・評価技術における近年の研究開発アクティビティに、第1表のような分野のみを概観しても時代の反映が見受けられ、かなりの活性も認められる。資源評価や開発 (Resources Assessment & Development) そして環境保全 (Environmental Conservation) という分野との関わりにおいても、探査技術は独自の分野を形成しており、あくまでもその役割が支援と呼ぶにふさわしいハード・ソフト (知識ウェアを含む) の多くのツール・システム集積からなる大規模高密度情報知識型テクノロジーと言える。

時代の流れは、物理探査の現象の研究においても計算機が大変大規模かつ手軽に用いられるようになり、実験、理論の次の第3の探査技術の形成が目指されるようになった。以前は、探査専門家のアイデアの段階であったものが、今日では、容易に計算機実験できるようになっている。地下情報の効果的な抽出や強調など、実際に探査を行う前にモデルによって予測をし、探査方式を再検討・制御しようとするシミュレーションの実行と、その解析過程が評価できることなどは、この新しい第3の探査技術を大きく支援する典型的な要素である。

今後、より複雑な不連続かつ不均質な媒質における3次元地下空間での膨大なデータ解析・解釈過程により多くの注意が払われるようになるにつれ、その監視・評価さらには技術を有効に利用する技術の検討もますます重要になると思われる。

なお、本文の説明に用いた1部は、文部省科学研究費試験研究(2)の補助を受けた。また、計算機処理には、京都大学大型計算機センター FACOM M 780/30 システムを利用した。

おわりに、京都大学工学部教授佐々宏先生には、草稿を読んでいただき直接の御教示と、有益な御助言を賜った。心より深く感謝の意を表します。

参考文献

- Acworth, R.I. and Griffiths, D.H. (1985) Simple data processing of tripotential apparent resistivity measurements as an aid to the interpretation of subsurface structures, *Geophysical Prospecting*, 33, 6, 861-887.
- Asch, T.H. and Morrison, H.F. (1989) Mapping and monitoring electrical resistivity with surface and subsurface electrode arrays, *Geophysics*, 54, 2, 235-244.
- Barker, R. D. (1979) Signal contribution sections and their use in resistivity studies, *Geophysical Jour. of the Royal Astronomical Society*, 59, 123-129.
- Bazinet, R. and Bérubé, P. (1988) Lateral pole-pole: A "new" array for increasing induced-polarization survey performance, presented at the 58th Ann. Internat. Mtg., SEG, Anaheim, 246-248.
- Beard, L.P. (1987) Assessing 2-D resistivity structure using 1-D inversion, presented at the 57th Ann. Internat. Mtg., SEG, New Orleans, 911-913.
- 物理探鉱技術協会 (現・物理探査学会) 編 (1978) 感度分布 Sensitivity distribution, 物理探査用語辞典, 30周年記念出版, 63-64.
- 物理探査学会編 (1989) 電気探査 (手法編・理論編),

- 地下を探索先端技術, 図解物理探査, 40周年記念出版, 53-62・192-201.
- Daily, W. and Yorkey, T.J. (1988) Evaluation of cross-hole resistivity tomography, presented at the 58th Ann. Internat. Mtg. SEG, Anaheim, 201-203.
- Daniels, J.J. and Dyck, A.V. (1984) Borehole resistivity and electromagnetic methods applied to mineral exploration, IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, GE-22, 80-87.
- Gómez-Treviño, E. (1987) Nonlinear integral equations for electromagnetic inverse problems, 52, 9, 1297-1302.
- Hallof, P.G. (1957) On the interpretation of resistivity and induced polarization field measurements, Ph.D. thesis MIT, 25-154.
- Hohmann, G.W. (1988) Numerical modeling for electromagnetic methods of geophysics, in Nabighian, M.N., Ed., Electromagnetic methods in applied geophysics, 1, SEG, Invest. in geophys., 3, 313-363.
- Le Masne, D. and Poirmeur, C. (1988) Three-dimensional model results for an electrical hole-to-surface method: Application to the interpretation of field survey, Geophysics, 53, 85-103.
- 日本鉱業会(現・資源・素材学会)編(1978)電極配置の感度分布の研究, 岩石・鉱物の物性と物理探査データ処理, 168-174.
- Oritega, J. M. and Rheinbolt, W. C. (1970) Intrative solutions of nonlinear equations for electromagnetic inverse problems, 52, 9, 1297-1302.
- Parra, J.O. and Owen, T.E. (1988) Model studies of electrical leak detection surveys in geomembrance-lined impoundments, Geophysics, 53, 11, 1453-1458.
- Poirmeur, C. and Vasseur, G. (1988) Three-dimensional modeling of a hole-to-hole electrical method: Application to the interpretation of field survey, Geophysics, 53, 3, 402-414.
- Pridmore, D.F. (1978) Three dimensional modeling of electric and electromagnetic data using the finite element method, Ph.D. dissertation, Univ. of Utah, 144-185.
- Rijo, L. (1977) Modeling of electric and electromagnetic data, Ph.D. dissertation, Univ. of Utah, 1-242.
- Roy, A. and Apparao, A. (1971) Depth of investigation in direct current methods, Geophysics, 36, 943-959.
- Sheriff, R.E. (1984) Pseudosection, Enclopedic dictionary of exploration geophysics, Society of Exploration Geophysicists, 2nd ed., 192-193.
- Smith, N. C. and Vozoff, K. (1984) Two-dimensional DC resistivity inversion for dipole-dipole data, IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, GE-22, 1, 21-28
- 菅野 強(1968)結果解釈法の基礎的研究, 京都大学大学院工学研究科修士論文, 1-143.
- 菅野 強(1974)ボーリング孔利用先進探査, 青函トンネル物理探査研究委員会報告書, 49-3, 22-23.
- 菅野 強(1982)新しい鉱山評価あるいは採鉱計画への電気探査の利用について, 日本鉱業会(現・資源・素材学会), A-3, 7-11.
- 菅野 強(1985)新・資源探査支援ツール, 月刊地球, 海洋出版, 78, 729-738.
- 菅野 強・佐々宏一(1987)比抵抗探査における構造ノイズ処理について, 日本非破壊検査協会, 特別講演, ND I-3881, 43-50.
- 菅野 強・佐々宏一(1988)比抵抗探査における解析過程の表示と評価, 物理探査, 41, 116-132.
- 菅野 強・佐々宏一(1989)電気探査の適用性—坑

井間および地表－坑井間の探査における探査対象物の抽出・強調について－, ジオトモグラフィの岩盤工学への応用, 資源・素材学会, E-3, 印刷中.

Sugano, T. and Sassa, K. (1989) Evaluation of extraction and enhancement due to target

inhomogeneities for resistivity interpretation, Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyoto Univ., 51, 10-38.

Vogel, A. (1986) Model optimization in exploration geophysics, 1, Friedr. Vieweg & Sohn.

Extraction and Enhancement of Signal due to Subsurface Target Inhomogeneities by Using New Electrical Prospecting Method

SUGANO, Tsuyoshi

Department of Mineral Science & Technology, Faculty of Engineering,
Kyoto University, Yosidahonmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606, Japan

A B S T R A C T

The future effectiveness of resistivity method depends upon its ability to interpret field data obtained under more complex geological structure environments, such as weathered overburden layers, vertical contacts, faults, fracture zones, deep bed rocks or host rocks, near-surface lateral or local inhomogeneities and various topographies.

New electrical prospecting methods utilizing the large three-dimensional data and subsurface electrodes have become important exploration tools increasingly for detecting deeply located mineral or low mineralized deposit, energy and groundwater reservoirs, and geological faults or fractures.

First of all, this paper begins with a brief review of the three-dimensional space electrical simulation techniques, such as the 3D network and 2D-3D finite element methods. Second, a result of solid resistivity array simulation with random noises has been chosen to illustrate the range of applications to practical problems. Third, a successful extraction and enhancement of response due to target in complicated nontarget inhomogeneities is shown of hole-to-surface resistivity interpretation process. Consequently, the computerized section obtained by using the sensitivity distribution method and the solid electrical array pseudo-section construction newly developed have been introduced as an aid to interpret the three-dimensional hole-to-surface or cross-hole resistivity data.