電気探査による地下情報可視化とその評価*

菅 野 強**

Subsurface Visualization by Electrical Prospecting Methods and Evaluation of Computerized Geoelectric Section Reconstruction

Tsuyoshi SUGANO

ABSTRACT

An important objective of electrical prospecting methods including tomography techniques, is to maximize, extract and enhance the response due to the target inhomogeneities using various surface and subsurface electrode arrays in boreholes, tunnels and other underground spaces.

A future problem in improving the reliability is to measure voltages with more sensitive to target inhomogeneities, or to design the effective resistivity array combinations and patterns or to develop additional new tomography informations under more restricted field conditions based on practical geoelectrical method. Generally, the most effective subsurface visualization by electrical prospecting method has not been selected.

This study has newly developed a subsurface visualization for surface electrode system by combination of the digital linear filter and the vector area methods, and a technique for subsurface electrode system by using the differential sensitivity distribution method. The evaluation of each effective subsurface visualization procedure has been discussed by using field data or the computer models.

1. まえがき

地下構造や媒質の電気的特性を測定し、その内部構造情報を抽出する手法の一つに比抵抗電気探査技術がある。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、さらには流電電磁 MMR (Magnetometric Resistivity) 法などに関連している。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) のことを指している。直流とは言っても、交替直流を用い、その現象が電位 V に関するラプラスの方程式あるいはポアソン方程式の成立する定常電流界理論の範囲となっている。この電極配置 (Electrode Array Configurations) を利用する電気探査技術においては、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査法 (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査法 (Horizontal Profiling or Resistivity Mapping) の二つがあげられる。しかるに、広く

*原稿受付 1990年10月15日

**正会員 京都大学工学部資源工学教室

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。そこで電極配列の特性からの適用能力向上への検討も進められている。また、地表電極配列方式の次段階、あるいは独自の利用からもきわめて有用と期待されるものに坑井間および地表一坑井間の立体電極配列 (Subsurface Solid Electrode Array) 方式がある。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や電気ポテンシャル CT も含み、地下空間における深部内部情報、より小規模あるいはより低品位の探索対象物の情報抽出など、信頼性の高い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。

本論文では、まず本研究の位置づけを行うため、近年の電気探索の研究開発アクティビティを方法別・対象別に分析した。つぎに、電気探索による地下情報の抽出・強調がいかにより主要な課題でありどのような問題点と特徴があるかについて検討した。とくに、利用する電極配列の特性を分かりやすく表現するものとして感度分布が有効であることを示し、今後重要な課題となる不均質媒質における探索対象物の応答の抽出についてその考え方と解析法について示した。以上の基礎事項をふまえて、地表からの探索法にデジタルリアフィルタ法とベクトル面積法との組み合わせによる地下可視化法、試錐孔やトンネルなど地下観測条件も利用する立体的な探索法に差動感度分布法による地下可視化法のそれぞれ新しい手法を開発した。さらに、本研究で開発した電気探索による地下可視化手法とその過程に対して、実際の現地の不均質な地下構造データあるいは計算機モデルデータを用いて検証し、その特徴と精度、有効性などを明らかにした。

2. 電気探索における近年の研究開発アクティビティ

2.1 研究方法別

まず、国際的に見た電気探索技術の研究開発方向を展望し、一つの視点を得る。Fig. 1は、国際的研究論文 691 件について調査を行った結果であ

Fig. 1 New development activity of electrical prospecting methods based on papers in Geophysics (SEG) and Geophysical Prospecting (EAEG).

る。集積対象としたのは、Geophysics (SEG: Society of Exploration Geophysics, Tulsa) および Geophysical Prospecting (EAEG: European Association of Exploration Geophysicists, Hague) である。Palacký の方法をベースに考察したもので、電磁法を含む広く電気探索法全般に関するデータ集積である。圧倒的に、順解析 (Forward Modeling) および逆解析 (Inversion) など結果解釈法 (Interpretation) についてのソフトウェアに関するアクティビティが高い。これは、探索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) 技術に未だ不安定な要素が少なくないことに帰因している。とりわけ、電気探索だけでなく、広く物理探索全般についても、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や地質の断面を画像化 (Geotomographic Image Reconstruction) するかは究極の目標であり、果てしない研究開発が続く。今後の高信頼化アクティビティも、ほぼこのような傾向と深く関わっていくものと思われる。

2.2 対象別

Table 1 は、近年の海外における新しい電気

Table 1 New international activity in geoelectrical exploration and evaluation of target inhomogeneities.

Target	Research Activity	Examples, Electrode Array Design
1 Geological Structure, Mineral Deposit	Daniel(1983), Daniels and Dyck(1984)(USGS & GSC) Holcombe and Jiracek(1984)(San Diego State Univ.) Eloranta(1986)(Helsinki Univ. of Tech.) Le Masne and Poirmeur(1988), Poirmeur and Vasseur(1988)(BRGM) Kaufman(1990)(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(subsurface)PP(surface). Vertical fault effect, C(orebody)P(surface)charged potential array. Mineral exploration, C(subsurface)P(surface), C(subsurface)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(1985), Zhao, Rijo and Ward(1986)(Univ. of Utah) Beasley and Ward(1986)(Univ. of Utah) LaBrecque and Ward(1989)(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(1988)(supported by USEPA) Bevc and Morrison(1989)(Univ. of California) Sill and Sjostrom(1990)(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 et al.(1984)(Sueriges Geologiska AB) Ash and Morrison(1989)(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, Underground Cave, Space and etc.	Daniels and Dyck(1984)(USGS & GSC) Owen(1983)(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.

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。探査対象では、深部鉱体、地熱システム岩盤亀裂帯、地下遮水処分環境、放射性廃棄物地層処分、旧坑道（トンネル）、地下空洞などがあり、資源やエンジニアリング（土木・建設）をはじめ、環境に至る広い分野との関わりや、時代の流れの反映の一端をみることができる。また、要点、電極配列の項目からは、いかに適切な電極配列の選定、設計が重要であるかが認識させられる。なかには、それが特許出願されている例

も見受けられる。別途 SEG が毎年行っている調査統計からも、今後の地球物理学アクティビティには、全世界の応用地球物理学分野への資金投下の92%が石油関連とは言え（その大半を米国や産油国が占める）、日本などはむしろエンジニアリングおよび環境において世界最大のアクティビティを有するように、石油資源探査以外の多くの分野での盛んな研究開発アクティビティに関心が持たれている。工学としての環境地球物理学（Geotechnical and Environmental Geophysics）アクティビティの果たす役割も少なくない。

3. 電気探査による地下情報の特徴とその抽出

3.1 地下の電気的性質

電気探査法の成立の条件は、地下構造内における電気的性質の相違が存在することである。鉱物資源探査では、主として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（土木・建設）や環境の探査では、主として地下構造内に含まれる地下水の

電気的性質に密接に関連している。岩石の比抵抗も、同じ火成岩、変成岩、堆積岩および未固結堆積物と土壌でもかなり幅のある分布ヒストグラムを示す。含有水分についても、間隙や亀裂に含まれる水が多くなると比抵抗は減少する。地下水の比抵抗 ρ_w で割った値と間隙率 ϕ との間には、 $F = \rho / \rho_w = a\phi^{-m}$ （アーチーの式）などの実験式があり地層係数（F : Formation Factor）の大小によって、土や岩石の分類もできる。 m は膠結係数で 1.3—2.2, a はたとえば石灰岩層では

1.0 などの値をとる。粘土および砂では10前後、石灰岩、砂岩などでは70前後、深成岩および変成岩では100 前後の値となる。このほか、地下構造の誘導分極による周波数特性や地下構造内の電磁波の伝播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情報にまで至らなくても、直流電気ポテンシャル法における電位差情報の利用も非破壊検査手法の一つとしてあげられる。

3.2 地下情報計測における電極配列探査特性

規則的に電極を配列する伝統的な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が与える応答の特性を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あるいは地表—坑井（トンネル）間利用の電極配列の探査特性については、明確な検討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、直感的に優れた表示形態を示すものとして、著者により電極配置の感度分布が定義・作成された。初期の研究を経て、近年の画像化電気探査を支援するものとしても重要な要素となっている。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_N 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_{aN} 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 $S_k = (\rho_{ak} - \rho_{aN}) / \rho_{aN} \times 100(\%)$ と表示する。 $\rho_k \geq \rho_N$ のとき $S \leq 0$ となる感度を順感度、 $S \geq 0$ となる感度を逆感度、 $S=0$ を零感度と定義している。Fig. 2は、有限要素法解析アルゴリズムFEM2D-3Dによって、比抵抗 $100\Omega \cdot m$ の媒質内で比抵抗 $10\Omega \cdot m$ の正方形断面構造を断面の1辺の長さごとに移動させ求めた感度分布である。まず、Fig. 2は、比抵抗 $100\Omega \cdot m$ の媒質における(a)感度分布2次元表示と(b)感度分布3次元鳥瞰図表示である。Fig. 3は、(a)不均質媒質における構造モデル、

(b)比較的簡単な不均質媒質(I)における感度分布および(c)少し複雑な不均質媒質における感度分布である。いずれも、CC(坑井DH-1内)PP(坑井DH-2内)立体電極配列方式の場合である。Dipole-Dipole方式の典型的な特徴が見られるとともに、不均質媒質(I)や(II)によって、均質媒質における感度分布との差がかなり見受けられる。Fig. 4は、その感度差を示したもので、(a)が不均質媒質(I)と均質媒質における感度分布の差、(b)が不均質媒質(II)と均質媒質における感度の差である。より複雑と考えられる不均質媒質(II)の場合の方が、簡単で大きな不均質媒質(I)の場合よりも感度差の変化が小さくなっていることは、この例においても認められる。このことは、実際の現地地下構造が複雑な不均質媒質(ここでは、比抵抗 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ のパラメータが多いような場合を言う)における探査対象物の応答の抽出に対して、大局的な考察がかなり効果的であることを示すものである。また、他の物理探査や地質調査によって推測される周辺構造モデルをFEM 2D-3Dアルゴリズムなどによって予測シミュレーションしておいて、その周辺環境における探査対象物の応答の解析を精度良く行うためには、測定段階から解析・解釈さらにはフィー

(a): Sensitivity distribution by two-dimensional contour plot in the case of CC (subsurface) PP (subsurface) cross-hole solid electrode array configuration, (b): 3-D perspective plot of Figure 2 a.

Fig. 2 Sensitivity distributions due to resistivity target body of 10 ohm-m in homogeneous background of 100 ohm-m.

(a): CC (subsurface) PP (subsurface) cross-hole solid array electrode system and response due to target inhomogeneities, (b): Sensitivity distribution in the inhomogeneous background structure model (I) ($\rho_1=\rho_3=\rho_5=\rho_8=700$ ohm-m, $\rho_2=\rho_6=\rho_7=100$ ohm-m and $\rho_4=200$ ohm-m), (c): Sensitivity distribution in the inhomogeneous background structure model (II) ($\rho_1=700$ ohm-m, $\rho_2=\rho_4=200$ ohm-m, $\rho_3=1000$ ohm-m, $\rho_6=100$ ohm-m, $\rho_7=500$ ohm-m and $\rho_8=20$ ohm-m).

Fig. 3 Sensitivity distributions due to resistivity target body of 10 ohm-m in inhomogeneous background environments.

ドバック段階のそれぞれにおいて以上のような感度分布が有効に利用される。とくに、第3の探査技術という観点からは、より有効な探査設計が可能となり、全体としての探査効果に大きく寄与するものとなる。

3.3 不均質媒体中における探査対象物の応答とその抽出

電気探査における3次元空間の電位 $V(x, y, z)$

(a): Sensitivity difference distribution between the case I shown in Figure 3 b and the homogeneous case shown in Figure 2, (b): Sensitivity difference distribution between the case II shown in Figure 3 c and the homogeneous case shown in Figure 2.

Fig. 4 Sensitivity difference distributions of electrical configuration.

は、対象領域内で $\nabla \cdot (1/\rho) \nabla V = 0$ かつ境界上で $(1/\rho) \partial V / \partial n = \gamma$ (γ : 電束) となる関係を有している。通常、フーリエ変換

$$V(x, \lambda, z) = \int_{-\infty}^{\infty} V(x, y, z) e^{-iy\lambda} dy \quad (1)$$

を用いて、3次元ラプラス方程式を2次元ヘルムホルツ方程式に下げて、計算された λ 電位についてフーリエ逆変換

$$V(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} V(x, \lambda, z) e^{-iy\lambda} d\lambda \quad (2)$$

を行って所要の電位分布や見掛け抵抗分布、そして高精度電気探査に必要な感度分布および差動感度分布などを得る。

不均質媒質に対する見掛け抵抗 ρ_{aN} と探査対象物の応答 ρ_{ak} との間には、 ρ_{akN} および ρ_{ao} を通常の測定量および均質媒質における見掛け抵抗として、ここで新しく均質媒質と不均質媒質との感度差 ΔS_k を導入すると、

$$\rho_{ak} = \left(\frac{\rho_{akN}}{\rho_{aN}} \right) \cdot \rho_{ao} - \Delta S_k \cdot \rho_{ao} \quad (3)$$

なる関係が成立する。この式の右辺の第2項が第1項に比べて小さいときには

$$\rho_{ak} \approx \left(\frac{\rho_{akN}}{\rho_{aN}} \right) \cdot \rho_{ao} \quad (4)$$

(a) : An example of designing surface electrode combination pattern by use of CPPC (surface) Wenner array configurations, (b) : Computerized resistivity section construction for groundwater exploration.

Fig. 5 Designing electrode array combination pattern and computerized resistivity section construction procedure.

と表現される。この ρ_{ak}^n は、周辺環境構造ノイズによる正規化見掛け比抵抗と言われるもので、不均質媒質における探査対象物の応答の抽出・強調において、第1次情報となるものである。そして、その地下情報抽出の程度の評価として ΔS_k が有効な指標となる。

4. 電気探査による地下情報の可視化

4.1 地表電極配列方式におけるデジタルリニアフィルタ・ベクトル面積法による地下内部構造画像化

Fig. 5 (a)は、地表面に設けた 300 m の測線を用いて、Wenner 法電極配置 (C_1, P_1, P_2, C_2 を等間隔に配列する) によっておおむね地下深度 51 m までの状況を探査するための観測電極配列パター

(a) : Resistivity pseudosection for the field apparent resistivity data, (b) : Pseudosection constructed by the computerized model apparent resistivity data.

Fig. 6 Examples of evaluation of computerized resistivity section reconstruction procedure by use of pseudosections.

ンを設計したものである。これにより見掛け比抵抗データが 105 個取得できる。**Fig. 5 (b)**は、この 105 個のデータをリニアフィルタ法アルゴリズムによって地下の垂直方向の変化を逆解析し、垂直断面においてベクトル面積法によって仮想的地下構造を比抵抗画像として再構成したものである。構造修正結果は、すべて 30 回繰り返し行っている。**Fig. 6 (a)**および**(b)**は、現地見掛け比抵抗分布と**Fig. 5 (b)**の解析構造に対する計算機見掛け比抵抗分布とによるそれぞれの比抵抗疑似断面を示す。(a)と(b)の対応がきわめて良いことは、**Fig. 5 (b)**に示した逆解析結果の地下構造の信頼性が高いことを意味している。解析された画像は地下水資源環境

評価のための情報を与えている。

4.2 坑井（あるいはボーリング孔）間あるいはトンネル—地表間立体電極配列方式における差動感度分布法による地下内部構造画像化

岩盤や地盤に堀削されるボーリング孔や、堀削中のトンネルあるいは既設坑井など地下観測条件を活かして立体的に電極を配列することによって、より電気探査効果を発揮する計算機による比抵抗断面形成法（Computerized Geoelectric Section Reconstruction）では、現在、その高精度化と信頼性向上への研究開発が進展しつつある。とくに重点項目としては、(1)制約された観測条件を有効に利用する最適立体電極配列方式の設計、(2)合理的な初期値形成、(3)周辺環境構造ノイズ（不均質効果）の軽減・除去、(4)坑井間外や地表—トンネル間外の領域の探査、(5)比抵抗法が成立しない不連続特性の解決、(6)測定データのノイズの影響などがあげられ、信頼化支援要素の検討が必至となっている。さて、立体探査法のうち、二つのボーリング孔間の地下構造を探査し、画像化する坑井間方式については、C（地下）P（地下）Pole-Pole 電極配列、C（地下）PP（地下）Pole-Dipole 電極配列および CC（地下）PP（地下）Dipole-Dipole 電極配列など、その探査特性が十二分に解明された上で実施される必要があり、単に多電極データ処理を自動的に行うことで現状にそぐわない画像を形成してはならない。**Fig. 7** (a)は、掘進する地下深部 90 m のトンネルの前方領域の先進探査を解析した例で、CC（地表 $x_s = -40$ m から 105 m の区間で 14 回移動）PP（切羽 $x_T = 30$ m から -120 m の区間で 10 回移動）地表—トンネル間方式の立体電極配列観測パターンを設計したものである。**Fig. 7** (b)は、見掛け比抵抗方式のトモグラフィ処理では除外していた 21 個のデータを含めて解析できる新しい差動感度分布法による画像化で、切羽前方 40 m の異常体の予知を行った例題である。**Fig. 7** (c)は、トンネル堀削が進み異常体がさらに切羽前方 30 m へと近くなった場合の予知情報が強調された画像である。切羽前方 40 m 先の異常体の抽出よりも切羽 30 m 先の断面画像の方が、むしろより明瞭な予知地下可視化情報を提供する。

(a): An example of designing solid electrode combination pattern by use of CC (surface) PP (tunnel) surface-to-tunnel array configurations, (b): Computerized resistivity section construction by differential sensitivity distribution method for detecting conductive target body in the forward distance 40 m from the tunnel, (c): Computerized resistivity section image enhanced by tunnel excavation of 10 m for conductive target body in the forward distance 30 m from the tunnel.

Fig. 7 Designing electrode array combination pattern and computerized resistivity section construction procedure.

4.3 電気探査地下画像化における最適モデルの選択

電気探査による地下情報可視化においても、最適モデルの選択が大切である。逆解析へ入力するデータと計算機モデル解析データとの残差が最小となる画像モデルが最適かどうか常に必ずしも一律的には言えない。経験的に平滑化 (Smoothing) することによってある程度のトレンドに信頼性を

与えようとする向きも見られるが、さらに、観測パターンの電極配列探査特性、孔間あるいは複数立体電極配列比抵抗擬似断面法、等価性の原理や差動感度分布理論など電気探査特有の信頼化支援要素を多く開発し、統合化 (Integrated) することにより、より正しい地下可視化情報が提供されよう。AIC に関しても、比抵抗推定値の分散が小さくパラメータ数が少ないモデルを必ずしも最適と選ぶわけではなく、モデル設定のレベルをふまえた画像化への利用が肝要である。電気探査のエキスパートが体験的推論、評価に用いる好手段と用いている要素の組み込みも、より信頼性の高い地下情報可視化を促進し、その過程の評価に役立つ部分も少なくない。

5. おわりに

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、電気探査と地下可視化情報の分野においても例外ではない。今後、地下電気探査情報可視化は、鉱物・エネルギー資源のみならず、地下水資源や、地盤・岩盤・断層破碎帯・空洞などの探査といった静的な対象物の検出から、資源・環境や危険廃棄物地下処分、地下空間利用の環境監視といった、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地下立体可視化に至る、資源地球工学や環境地球工学などにおける問題解決など広い適用分野がある。時代の要請とともに、調和のとれた結果解釈や統合的評価のためには、より目的の明確さ、階層的問題点把握とその支援要素研究開発アクティビティのフィードバックもきわめて重要である。本論文における、地下水探査の現地測定結果のケースヒストリーではデジタルリニアフィルタ・ベクトル面積方式による地下情報可視化法、坑井間およびトンネル・地表間の異常体検出・予知のケースヒストリーでは差動感度分布方式による地下情報可視化法をそれぞれ新しく開発・検証した。在来の技術を支援する、さらに別途独自の高信頼化地下情報可視化技術を形成する多くの貴重な知見を得た。

謝 辞

本文を草するに際し、有益なご助言を賜った京都大学教授佐々宏一先生に深謝の意を表します。本研究の一部は、文部省科学研究費一般研究 (c) (研究代表者菅野 強、課題番号02805077、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) の補助を受けた。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。

参考文献

- 1) Daniels, J. J. and Dyck, A. V.: Borehole Resistivity Methods Applied to Mineral Exploration, IEEE, GE-22 (1984), 80.
- 2) Dines, K. A. and Lytle, R. J.: Analysis of Electrical Conductivity Imaging, Geophysics, 46 (1981), 1025
- 3) 菅野: 立体電極配列法電気探査の基礎概念——高信頼化と支援要素研究開発アクティビティ——, 物理探査, 講座, 44 (1991), 印刷中.
- 4) —: 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 (1974), 22
- 5) 物理探査学会 (編): 電気探査 (手法編・理論編), 図解物理探査 (1989), 53・192
- 6) Sugano, T. and Sassa, K.: Evaluation of Extraction and Enhancement of Response due to Target Inhomogeneity for Resistivity Interpretation, Mem. of the Fac. of Eng. Kyoto Univ., 51 (1989).
- 7) 菅野・佐々: 孔間および地表孔間比抵抗探査モデリング, 物理探査, 41-1 (1988), 1
- 8) —・—: 立体電極配列比抵抗擬似断面, 物理探査, 42-4 (1989), 253.
- 9) —・—: 電気探査の適用性, 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 (1989), 9
- 10) —・—: 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 NDI-3881 (1987), 43.
- 11) —・—: 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, 材料, 39-439 (1990), 449.
- 12) Sugano, T.: Evaluation of Solid Electrode Array Effects in Computerized Section Construction Procedure for Resistivity Interpretation, Mem. of the Fac. of Eng. Kyoto Univ., 52 (1990).
- 13) Yorkey, T. J., 他 2 名: Comparing Reconstruction Algorithms for Electrical Impedance Tomography, IEEE. Trans. Biomed. Eng., BME-34 (1987), 843.
- 14) Tripp, A. C., 他 2 名: Two-Dimensional Resistivity Inversion, Geophysics, 49 (1984), 1708.
- 15) Daily, W. and Yorkey, T. J.: Evaluation of Cross-Hole Resistivity Tomography, 58th Ann. Internat. Mtg., SEG, Anaheim (1988), 201.
- 16) 菅野: 立体電極配列法比抵抗探査の不連続特性の評価, 物理探査, 43-2 (1990), 123.
- 17) ツィエンキーヴィッツ, O. C. (吉織雅夫・山田嘉昭監訳): 基礎工学におけるマトリックス有限要素法 (1975) 培風館.