資源環境システム設計における地下情報可視化と擬似効果*

菅野 強**, 宮垣 博道***, 野村 智之****

Subsurface Visualization and Pseudo-effects for Earth Resources and Environmental System Design

Tsuyoshi SUGANO, Hiromichi MIYAGAKI and Tomoyuki NOMURA

ABSTRACT

Recently geoelectrical monitoring by subsurface visualization has become to contribute to the earth environmental resources problems such as groundwater resource cycling delineation, earth and water contamination, detection of rock fractures in active geothermal energy extraction system, mining with faults and groundwater effects, nuclear waste disposal, and environment/ground improvement by In-Situ Vitrification (ISV) technology. In this paper, a simple model study on resistivity monitoring for the effective utilization of earth resources and environmental system design has been investigated by the subsurface visualization pseudo-effects which are sometimes very useful as same as the high accuracy inverted resistivity solutions by the finite element 2 D-3 D algorithm.

Key words: Subsurface visualized information, Inhomogeneous monitoring, Earth resources and Environmental system design, Environmental geophysical engineering, Pseudo-effects.

1. 緒 言

本研究は、私達がこれから生存していくために最も重要な資源や環境をシステム設計という新しい考え方で捉えた論文の一つである。健全な人間活動、一人一人かけがえのない生命の維持、そして人類全体の持続的発展には、言うまでもなく地球資源・環境問題は重要な課題であり、地球環境と調和のとれた資源エネルギーの安定供給が不可欠である。地球環境との調和を念頭にした資源開発利用と資源環境問題の解決からなる、有限地球資源有効利用と複雑にならない高度化技術に関する特色ある資源関連技術が、資源の新しい保全的利用とその評価のために新しく再認識されている。資源地球システムの解明をはじめ、解決機能要素の形成、複雑にならない高度化支援ツール、水・地殻熱・鉱産物等の資源循環システムや多様な有限資源の静的及び循環等動的対象の把握とモデル化ならびにシミュレーション、地球資源回収・再生処理技術やこれらリサイクル、電気化学特性、高度化物質特性、資源環境システム及びその設計、環境に及ぼす影響等のモニタリングと言った時代の要請を踏まえた

先端的、萌芽的な基礎的研究がますます必要となっている。その支援要素技術としては、あらゆる面からの不断の努力が肝要であるが、とくに資源開発及びその有効利用、そして資源環境システムとその工学的設計のための技術要素は重点的に検討されるべきである。わが国における資源技術の課題は、資源の枯渇、低品位鉱への依存の限界、資源エネルギー政策との関連、と言った一端にも現れている。やはり資源環境システムを十二分に認識した高度技術への期待をはじめ、未利用資源・限界領域や資源利用サイクルの見直し、資源生産国、発展途上国に対する技術協力、より深部・複雑な地質環境での高精度化調査技術、今後発見した地下資源の効率的かつ地球環境に優しい地下資源回収技術・再利用技術、防災保安・環境保全の確保のための技術、地下情報データベースの構築や情報統合化及び活用等からなる資源情報システム工学が、地道に検討され今日に至っている。具体的な例題として、鉱物資源調査、資源循環・回収プロセスのモニタリング把握及び地熱抽出システムはじめエネルギー資源開発のための調査、揚水発電システムのような水資源循環によるエネルギー施設の建設基礎工事、石油資源備蓄等地下空間やトンネルも含む地下構造物施工・維持管理上での地盤・岩盤調査やモニタリング、そして地下水賦存調査・流動や汚染調査、防災保安はじめ、資源は自然から取り出すものという枠を超えて、人工的な廃棄

* 原稿受付 1996 年 7 月 22 日

** 正会員 京都大学大学院工学研究科 資源工学教室(専攻)

*** 京都大学大学院修士課程資源工学専攻(現・大阪大学医学部)

**** 京都大学工学部資源工学科(現・株式会社クボタ)

Table 1 Recycling of resources from waste and effective utilization methods.

primary stage	treatment methods	process category	utilization and recovery
collection/ discretion	non hazardous	reclamation	use of reclamation site
		keeping	nuclear waste disposal, keeping
		solid	construction, secondary materials
	stabilization		metal recovery(Fe, Al, S, heavy metals)
			glass recovery
			reproduction of acid/alkali
	reduction	reuse	material from dust
			recovery of pulp
			incineration thermal energy
	material/ energy recovery	exchange	use of gas type
			use of compost type

物からも資源を取り出すことも念頭に、Table 1のような廃棄物のリサイクルと有効利用の手法に見る廃棄物処分地の管理の位置づけ、地層処分モニタリング、環境保全のための地盤改良、あるいは土壌資源及び土の環境圏、環境地球分野からの地圏工学、さらには宇宙からのリモートセンシング衛星画像技術に至る、広い分野で一つの地道な支援を行っている地球物理学アクティビティの活用も資源環境システムとその設計の主要な一要素として参考になる。本論文は、資源有効利用と地球資源環境との調和という観点から、水・地殻熱・鉱産資源等の資源循環を踏まえた資源環境システム設計の考え方を導入している。まず、世界的な地球物理学アクティビティにも触れた。つぎに、具体的な実際問題の資源開発環境モニタリングの設計モデルの例題を示した。すなわち、地下水資源循環（流体移動）モニタリング、能動的な地熱抽出資源開発システムにおける深部亀裂モニタリング、品質管理からの岩盤地盤改良効果モニタリング、そしてさらに廃棄物汚染資源環境モニタリングの設計モデルとして、放射性廃棄物地層処分モニタリング及び原位置廃棄物地中ガラス固化(ISV)モニタリングを取り上げてその支援要素技術の検討を可視化擬似効果を中心に行った。地下の可視化情報の有効利用は、今後の新しい地下資源、資源地殻システムを取り扱う地球資源環境情報システム工学の必須の一つの要素となると思われる。

2. 資源環境システム設計における電気モニタリング可視化情報と擬似効果

2.1 資源環境システム設計と地球物理学アクティビティ

Table 2は世界における地球物理学アクティビティの概要を示すもので、(a)対象別の経費統計、及び(b)環境に関する地球物理学アクティビティの方法別経費統計である。世界で投下される地球物理探査経費のうち、概ね96%が石油資源であることは私達の現在の石油文明から予想のつくことである。後の4%弱を各種鉱物資源、環境・土木、地熱、地下水、海洋、研究等に振り分けて

Table 2 Total worldwide expenditures in a year (Society of Exploration Geophysics, 1993).

- (a) By the earth resources/environmental geophysical objective in US\$ (thousands),
(b) By methods in the environmental geophysical activity.

(a)		(b)	
Objective	Expenditure (1,000 US\$)	Methods	Total US\$3,383,997(100%) Expenditures in US\$(%)
Petroleum	2,167,901 (96.33%)	Seismic reflection	880,400(26.02%)
Minerals	28,729 (1.28%)	Gravity & Magnetic	394,116(11.65%)
Environmental & Engineering	37,807 (1.68%)	Resistivity	223,300(6.78%)
Geothermal	427 (0.02%)	Self potential	3,300(0.10%)
Groundwater	2,378 (0.11%)	Electromagnetic	422,559(12.49%)
Oceanography	2,863 (0.13%)	Time-domain EM	246,000(7.27%)
Research	10,236 (0.45%)	VLF	29,886(0.88%)
Total	2,250,341(100.00%)	EM & Magnetic	495,717(14.65%)
		Induced Polarization	1,000(0.03%)
		Magnetotelluric & CS/MT	84,454(2.78%)
		Radiometric	106,385(3.14%)
		Remote sensing	2,900(0.09%)
		Geothermal	800(0.02%)
		VSP	30,000(0.89%)
		Other	447,200(13.22%)

Fig. 1 A concept of design-execute-evaluation for the earth resources/environmental system design and the interaction between theory and applications.
(a) Conceptual illustration of design-execute-evaluation,
(b) Interaction link in electrical monitoring theory and applications.

用いられている。ただし、日本の特徴は世界全体の趨勢とはかなり異なる。

Fig. 1(a)は資源環境システム設計における概念形成、詳細設計、実行、現位置改善、達成度評価の大局的な流れを示す。対象としての資源環境システムは時空間的にも幅が広いのが特徴であるが、Fig. 1(a)は一般的対象についても同様である。したがって、資源環境システムにおいても他の分野と同じく設計段階は詳細な設計・計画と概念的な設計骨組みのいずれも含み、その良否が影響する度合はしばしば緩慢であるが極めて重要な支援要素となる。実行段階では、設計を実施に移す実用的な過程を採用する。評価は二つの目的を持っている。すなわち、持続的改善ができる現位置における質的点検、そして今

後の設計方針のためのフィードバックである。とくに、最近の計算機能の進展による複雑なシステム設計の効果は Fig. 1(a)に示す流れ全体に大きく寄与する。Fig. 1(b)は、資源開発環境モニタリングとその有効利用のために、数式的に取り組み易いラプラスやポアソン、ヘルムホルツ、マックスウェル方程式、あるいはルジャンドルやベッセル関数によるモデリング、フォワード及びインバース問題、フーリエ変換を用いた有限要素法 2D-3D、ネットワーク 3D シミュレーションアルゴリズム、感度解析、標準曲線、擬似効果、観測パターン、配列システム、可

Table 3 A basic activity for the effective utilization of earth resources/ environmental system design and electrical monitoring (Sugano, 1996).

new problems of system design	new research activity by T.SUGANO	tools/ points
Investigation of Earth Resources Environments Systems	Grant-in-Scientific Research Aid(D)(Head Investigator,006881096) http://www.kogaku.kyoto-u.ac.jp/koken/home.html (Engineering Research)	Effective Utilization of Resources, Subsurface Information, Resources Environmental Monitoring
Resources,Civil,Disaster, Environmental Geophysical Activity	Energy and Resources, Mining, Improvement Geotech.Symp.(Author), Disaster Sci. Res. Inst. Tunnel Investigation Res.Association(I) (Chairman)	Resources, Civil, Environmental Geophysical Activity, Global Information GeosExploration Engineering
Groundwater Reserves Prediction Survey, Water Resources Cycling Electrical Monitoring	Visualization(Author) Soil Environments (Co-author)	Various Kind of Array Data, High Density Resistivity Image
Spontaneous Potential Monitoring of Groundwater Flow	Exploration Geophysics for Civil/Disaster Prevention(Co-author)	Electro- Chemical, Negative Center SP Phenomenon
Forced Extraction System of Geothermal Energy/Fracture and Fluid Monitoring	Ministry of ESSC Energy Important Research(B04, partially study)	USCP Fracture Resistivity, Anisotropy, CPP Array
Subsurface Image Monitoring for Enhanced Oil Recovery	Mining(Author) Soil Environments (Co-author)	Cross-Hole Array System, EM Tomography
Ore Geology, Faults, Groundwater Distribution Injection/Production Wells Resources/Environmental Monitoring	Yamahara Mines Tunnel (Site Investigation) Soil Environments (Co-author)	Resistivity, VES,MT,IP, Mise-a-la-Masse
Geological Structure on Construction Disaster Prevention, Fault Prediction	Seikan & Rokko Tunnels in Tunnel, Surface-to-Tunnel(Computer Analysis)	Side-Wall, Excavation Front Prediction Solid Array
Urban Disaster Prevention Active Fault Survey, Subsurface Fluid Monitoring	Kansoore Active Fault (Survey Seeing Member), Fault under Weathering Layer (Simulation)	Surface Array Potential Data, Inhomogeneous Effects
Foundation Rock/Soil Grout Improvement Electrical Monitoring	Yahagi Dam Site (Computer Analysis)	Curtain Grout-Boreholes Measurements, Resistivity Changes Data
Electric Power Recycle System Tunnel Rock Improvement Monitoring	Kisenyama Electric Generation Plant Water Tunnel (Site Investigation)	Rock Resistivity Changes Before/After Grouting, Four Electrode Array System
Slope Disaster,Landslide, Prediction Monitoring	Kyoto Prefecture Ohno Dam Site (Resistivity Analysis)	Long Range Ground Electrical Monitoring Porosity
Weak Ground Disaster Prevention, Ground Improvement Grout-Effects Monitoring	Urban Weak Ground (Site Investigation)	Borehole Subsurface Potential Changes
Groundwater Resources/ Environmental Contamination Electrical Monitoring	Resources/Materials (Author) Soil Environments (Co-author)	Low Resistivity, Induced Polarization
Waste Final Disposal Site Geomembrance-Lined Leak Detection Monitoring	Atlas of Visualization CRC Press(USA)(Author)	Electric Field Method, CPP Solid Array Data
Nuclear Waste Disposal Inhomogeneous Monitoring	Soil Environments (Co-author)	Deep Resistivity Information, Surface-to-Hole Solid Array Data
Gasoline-Contaminated Site Steam Injection	Internat.Congress on Envir.Geotech. (Author)	Resistivity Tomography, FEM 2D-3D Algorithm
Monitoring of Melting/Solidification Process of In-Situ Vitrification (ISV)	Internat.Congress on Envir.Geotech. (Author)	Resistivity of Melted/Solid Materials, Electrical Subsurface Visualization

視化地下情報、解釈等の支援単元の相互の位置づけを示したものである。つぎに、Table 3 は、資源環境システム設計とモニタリング基礎項目の概要をその支援単元の検討アクティビティの例題によって示す。地球資源循環及び省資源的考え方は無論のこと、鉱物資源のみならず水・土、地殻・地熱や環境も大切な資源と捉える環境保全的地球資源の開発利用、資源地殻に関する地下情報システム工学、資源環境システム設計等をキーワードに、極めて基礎的であるが第一著者が関係する新しい課題とその支援単元のシンプルな検討事項が示されている。

2.2 電気モニタリング可視化情報における擬似効果

2.2.1 擬似効果とその地下情報における意義

効果とは、ある事象が他の事象に与える影響であり、擬似とは真なる効果があり、それをモデル化あるいは近似した場合のことである。電気探査と言う特殊な分野における地下の情報としての見掛け比抵抗に関しては、真の比抵抗と媒質が均質な場合にのみ一致し、見掛け比抵抗分布は不均質の場合には比抵抗擬似分布となる。さらに、観測データ（見掛け比抵抗分布）から所要の比抵抗逆解析過程を経て、真に近い解析比抵抗値を求める訳であるが、真に一致しない限り偽像を伴う等、高レベルの見掛け比抵抗分布とも言える。このような比抵抗擬似断面を有効利用することによって真の地下構造を推定しようとするものであるが、その場合見掛け比抵抗と言っても真の地下構造の推定に役立つことがしばしばである。

2.2.2 電気モニタリング可視化情報における擬似効果

Fig. 2 及び Fig. 3 は、資源開発環境モニタリング水槽実験のモデル概略と媒質の不均質環境モニタリングのための有限要素法 2D-3D アルゴリズムによる、水槽実験データの地表電極配列データ解析結果である。Fig. 2 に示す通り、x 方向の測線と 45 度の角度で交わり比抵抗 $\rho_1 = 40 [\Omega \cdot m]$ の水中に水平に存在する良導体 (Cu) 比抵抗 $\rho_2 = 0 [\Omega \cdot m]$ (20 cm × 20 cm 断面, 80 cm 長さ) の場合で、現実には水槽の壁や底、さらに物体を支える台の影響があり、それらのノイズも包含した実験データを尊重している。Fig. 3 は、(a)水槽実験の測線下の垂直断面、(b)ウェンナー (CPPC) 法地表電極配列データの比抵抗擬似断面図、及び(c)有限要素法 2D-3D アルゴリズムによる比抵抗逆解析結果である。ここで、比抵抗逆解析過程を経る前段階の(b)図のデータ分布の利用を擬似効果と言っている。最終解析構造(c)図が望ましいが、現地モニタリングの状況によっては、常に必ずしも(c)図が所要される訳ではなく、(b)図の擬似効果も実際の何かの情報をもたらすものと捉える考え方もできる。また、現在のところ、大型計算機を常に用いる方式ではなく、使い勝手のよいワークステーションでの結果画像出力でもリアルタイムと言うわけではない。ちなみに、通常の地下不均質媒質における電位に関する 3 次元のラプラス方程式

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

Fig. 2 Water tank experiment for the earth resources/environmental system design.

- (a) Outline illustration of water tank and monitoring model,
- (b) Perspective view of monitoring target (Cu),
- (c) Vertical section view of target inhomogeneity.

Fig. 3 Resistivity pseudo-section and the inverted result of monitoring water tank model study on the earth resources/environmental system design.

- (a) Apparent resistivity distribution by Wenner (CPPC) surface electrode configuration,
- (b) The inverted resistivity distribution by the finite element 2D-3D algorithm,
- (c) Practical resistivity model for monitoring.

Fig. 5 Wenner and Dipole-dipole multi-point plotting resistivity monitoring sections.

- (a) Wenner's apparent resistivity distribution in the case of very low resistivity ($\rho_1 = \rho_2 = 2 \Omega \cdot m$) plural target modeled conductive fluid mass surrounded by the host medium ($\rho_0 = 100 \Omega \cdot m$) simulated sand formation,
- (b) Wenner's apparent resistivity distribution in the case of resistivity structure ρ_1 fixed, and conductive fluid target inhomogeneity ρ_2 moved in the horizontal direction 8 meters from the case of (a) in the host medium,
- (c) Wenner's apparent resistivity distribution in the case of resistivity structure ρ_1 fixed, and conductive target inhomogeneity ρ_2 moved in the perpendicular direction 4 meters from the case of (a) in the host medium,
- (d) Dipole-dipole's apparent resistivity distribution for the case shown in Fig. 5(a),
- (e) Dipole-dipole's apparent resistivity distribution for the case shown in Fig. 5(b),
- (f) Dipole-dipole's apparent resistivity distribution for the case shown in Fig. 5(c).

Fig. 4 Resistivity pseudo-sections by one point and multi-point plotting methods for electrical monitoring.

- (a) Apparent resistivity distribution by one point Q plotting for the single current source C (in the borehole DH-1) and potential electrode P (on the surface), i. e., pole-pole array,
 (b) Apparent resistivity distribution by multi-point Qm plotting as shown in the equation (6).

をフーリエ変換

$$V_\lambda(x, \lambda, z) = \int_{-\infty}^{\infty} V(x, y, z) e^{-iy} dy \quad (2)$$

を用いて2次元ヘルムホルツ方程式とし、適当な空間周波数 λ を選定して

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial V_\lambda}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial V_\lambda}{\partial z} \right) - \lambda^2 \frac{1}{\rho} V_\lambda = 0 \quad (3)$$

(2)式を2次元有限要素法によって計算すれば λ 空間の電位分布 V_λ が得られる。ここでフーリエ逆変換

$$V(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} V_\lambda(x, \lambda, z) e^{iy} d\lambda \quad (4)$$

を用いて所要の3次元空間の電位 V を得ることができる。このときに開発した有限要素法は2D-3Dアルゴリズムであり、実際の不均質環境モデリングのための電流源は点(3次元)、構造は y 方向に変化しないプリズム構造(2次元)を再現するツールとなる。ここでさらに比抵抗擬似断面作成に一点法と多点法があるので説明する。すなわち、一点法とはある電極配列による見掛け比抵抗を特定の一点 Q に表示して作成するもので、1950年代にMITの研究者によって始められたものでかなりの歴史(当時は地表電極配列データの表示)がある。Fig. 4に完全導体球を電気映像法で計算し(a)一点表示と(b)新しく求めた多点表示について示す。電極配列は近年比抵抗トモグラフィでかなり用いられているポール・ポール2極法で一本のボーリング孔(DH-1)に直流電流源を置き、地表面で発生した電位データを利用するものである。

多点表示比抵抗擬似断面作成の原理は、以下の通りである。すなわち、座標系 (x, z) において、電流電極 $C(I)$ の座標がボーリング孔DH-1内の座標 $(0, i)$ 、電位電極 $P(V)$ の座標が地表の座標 $(j, 0)$ にあるときに得られる見掛け比抵抗データを $\rho_a(j, i)$ とすれば、表示点 Q の座標 (l, k) における、まず、一点表示の比抵抗擬似断面の値 ρ_s は、プロッ

ト値は、もちろんこの見掛け比抵抗のままであり($l=j, k=i$),

$$\rho_s(l, k) = \rho_a(j, i) \quad (5)$$

となる。さらに、 $C(I)$ がDH-1内の座標 $(0, i)$ 、 $P(V)$ が地表の座標 $(j, 0)$ の位置にあるときの表示点 $Q_m(l, k)$ での当該電極配列の感度を $S(j, i; l, k)$ とすれば、多点表示比抵抗擬似断面を形成するプロット値 $\rho_s(l, k)$ は、つぎのように求められる。

$$\rho_s(l, k) = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m [\rho_a(j, i) \cdot H\{S_0 - S(j, i; l, k)\}]}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m H\{S_0 - S(j, i; l, k)\}} \quad (6)$$

ただし、 i : 電流電極 C の z 座標($i=u, 2u, \dots, mu$)、 j : 電位電極 P の x 座標($j=u, 2u, \dots, nu$)、 k : 比抵抗擬似断面上での表示点 Q_m の z 座標($k=u, 2u, \dots, (m-1)u$)、 l : Q_m の x 座標($l=u, 2u, \dots, (n-1)u$)であり、 $H(x-\lambda)$: ヘビサイドのステップ関数で、 $H\{S_0 - S(j, i; l, k)\}$ として設定感度 S_0 より高感度な点に見掛け比抵抗値をプロットする。

さらに、(6)式の見掛け比抵抗を別途 $R\beta$ (β 番目の探索領域断面内の微小体積(セル)の位置での比抵抗擬似断面の値)と置くと、測点番号 q における感度分布を $Sq\beta$ として、

$$Sq\beta = (\rho_a\beta - \rho_{a0}) / \rho_{a0} \quad (7)$$

$$R_\beta = \frac{\sum_q \{Sq\beta(\rho_{av} - \rho_{aq})\}}{\sum_q |Sq\beta|} + \rho_{av} \quad (8)$$

によっても、観測のためにある電極配列での移動した全ての電極配置による見掛け比抵抗の期待値を計算することで得られる。ここに、 $\rho_a\beta$ 、 ρ_{a0} 、 ρ_{av} 、及び ρ_{aq} は、それぞれセル β に対する見掛け比抵抗、セルが均質媒質の場合の見掛け比抵抗、観測見掛け比抵抗の平均、及び測点番号 q における観測見掛け比抵抗とすればよい。

3. 資源開発環境モニタリングによるシステム設計モデルの例題

3.1 地下水資源循環モニタリング

地下水循環は、砂地盤と岩盤とはその流体移動時間が大きく異なる(例えば、亀裂がなくて 10^{-6} [cm/sec]の透水係数をもつ花崗岩地層では余りにも単純であるが透水係数のみでみて、1mの流体移動に概ね3年)ので、電気モニタリングも短期、長期変動を前もって予測して測定する必要がある。竹内らは透水係数 $3.17 \sim 3.45 \times 10^{-3}$ [cm/sec]すなわち、1mの流体移動に概ね10時間かかる砂層地質における水資源循環をモニタリングした現地例として、地表涵養水路に塩水 7 m^3 を投入し、70時間後

に定常的に(函養強度約 $0.6 \text{ [m}^3/\text{min}]$) 河川水を函養すると、塩水投入後約 98 時間(塩水塊が深度概ね -10 m に流下, 水平移動概ね 4 m)と 146 時間後(塩水塊が深度概ね -12 m に流下, 水平移動概ね 8 m)のモニタリング情報を比抵抗擬似断面で可視化して, 地下水流速 $3.17 \times 10^{-3} \text{ [cm/sec]}$ (食塩トレーサーによる $3.45 \times 10^{-3} \text{ [cm/sec]}$ に相当する)を推定する等の成果を挙げている報告をしている(竹内・長江, 1990)。地表電極配列を用いてモニタリングしている点が特徴的であり簡便にして実用性に優れている。この研究では, 地表からの電気モニタリングの電極システムとして, 一般に多用されている Wenner 地表電極配列と, ある程度深部の検出に強いとされる Dipole-Dipole 地表電極配列を取り上げた。また, 単純なモデルとして, 砂層地層比抵抗 ρ_0 が $100 \text{ [}\Omega \cdot \text{m]}$ 中に比抵抗 ρ_1, ρ_2 が $2 \text{ [}\Omega \cdot \text{m]}$ の複数の導電性構造の場合(海水は通常 $0.3 \text{ [}\Omega \cdot \text{m]}$ (電気伝導度すなわち導電率 $33,000 \text{ [}\mu\text{mho/cm}]$) 程度であるが地層水により電気伝導度 $5,000 \text{ [}\mu\text{mho/cm}]$ 程度に希釈される)を想定した。そして ρ_1 を移動しない低比抵抗構造(導電体), ρ_2 を $\rho_0 = 100 \text{ [}\Omega \cdot \text{m]}$ の砂層地層中を移動する導電体(塩水塊)とし, 導電体 ρ_2 が水平に 8 m 流体移動した場合, 及び導電体 ρ_2 が垂直に 4 m 流下移動した場合について, 比抵抗可視化情報の擬似効果を調べた。

Fig. 5 (a), (b)及び(c)は, Wenner 地表電極配列による多点表示比抵抗擬似断面で, (d), (e)及び(f)はそれぞれの Dipole-Dipole 地表電極配列による多点表示比抵抗擬似断面である。水平移動 (8 m) では, Fig. 5 (a)と(b), Fig. 5 (d)と(e)から分かるように, Wenner 方式は 2 個の低比抵抗構造を一つの大きな水平構造として捉えており, 8 m の移動を検知する分解能はない, しかるに, Dipole-Dipole 方式は浅部地層において明瞭に分離能力があり, 流体移動を的確に把握できることを示している。つぎに, 塩水塊 ρ_2 の流下(垂直移動 4 m)では, Fig. 5 (a)と(c), Fig. 5 (d)と(f)から分かるように, Wenner 方式は 2 個の低比抵抗構造の位置関係の変化については, (a)に比べて(c)の非対称性が大きくなっていることから推論するに, その変化をかなり捉えており, 4 m の流下を検知する分解能が示されている, また, Dipole-Dipole 方式でも浅部地層における比抵抗情報の変化から流体移動に対する分解能があることを示している。

3.2 能動的な地熱抽出資源開発システムにおける深部亀裂モニタリング

地下温度については, 一般に 100 m 深くなると $1 \text{ [}^\circ\text{C]}$ 上昇するので, 地表で $20 \text{ [}^\circ\text{C]}$ として深度 3000 m で $50 \text{ [}^\circ\text{C]}$, 10 km 深度では概ね $120 \text{ [}^\circ\text{C]}$ 以上の温度と計算される単純な推定よりも, 実際の掘削データとしての, ロシア(コラ)での $12,000 \text{ m}$ で $200 \text{ [}^\circ\text{C]}$, ドイツ(KTB)での $9,100 \text{ m}$ で $260 \text{ [}^\circ\text{C]}$, 日本(石油試錐井)での $6,300 \text{ m}$ で $225 \text{ [}^\circ\text{C]}$ や日本(葛根田, 高温岩体)での $3,500 \text{ m}$ で $500 \text{ [}^\circ\text{C]}$ 等がより参考となる。さて, 人工的に地熱貯

溜層を形成し, 地表から注水(注水井), フラクチャー面で熱交換して, 能動的に蒸気を取り出す(生産井)地熱熱資源開発技術は, 高温岩体(火成岩が卓越する岩盤での高温乾燥)の利用でその資源量も多い。発電に利用した後の熱水を再利用して地下に注入する水循環システムは, 環境汚染のないクリーンエネルギー資源開発として期待される。日本の花崗岩体は, 天然亀裂が発達しているので当初予測や設計外の人工破砕帯の伸展や流体循環における多量逸水が地熱エネルギーの有効抽出に障害を及ぼす。天然の亀裂・断層のオーダーは, 数 mm ~数千 Km までの広い範囲を持つが, 地下人工亀裂システム設計のためには, 深部 $1,800 \sim 3,000 \text{ m}$ にある亀裂分布測定等モニタリングが一つの支援要素になる。地表から注入された水の循環による熱水・蒸気回収率の向上のために, その亀裂分布の性状のより正確な把握は必須事項である。Fig. 6 は, 地下深度 $1,010 \sim 1,010.8 \text{ m}$ にある導電性亀裂帯(厚さ $D_2 = 0.01 \text{ m}$, 比抵抗 $\rho_2 = 500 \text{ [}\Omega \cdot \text{m}]$)と周辺岩盤(比抵抗 $\rho_1 = 800 \text{ [}\Omega \cdot \text{m}]$, $\rho_3 = 600 \text{ [}\Omega \cdot \text{m}]$)のポール・ダイポール CPP 3 極法電極配列(電極間隔 $a = 0.05 \text{ m}$)による 3 次元モデルのシミュレーションで, (a)観測結果の見掛け比抵抗曲線, 及び(b)塩水による導電性流体を亀裂に人工的に圧入して, $D_2 = 0.01 \text{ m}$ 厚の比抵抗 $\rho_2 = 500 \text{ [}\Omega \cdot \text{m}]$ の亀裂帯を塩水注入後 $100 \text{ [}\Omega \cdot \text{m}]$, すなわち, もとの $1/5$ に低下させ, その周辺の岩盤の比抵抗 $\rho_1 = 800 \text{ [}\Omega \cdot \text{m}]$, $\rho_3 = 600 \text{ [}\Omega \cdot \text{m}]$ は変化しない状態で, 同じく観測した結果である。各図中の角度 θ は注入井と亀裂帯のなす角 $^\circ$ である。(a)図では余り亀裂帯の検出が明瞭に識別しがたいが, 塩水注入により

Fig. 6 Electrical monitoring data of geothermal fractured zone.

- (a) Simulated observation resistivity data of target inhomogeneity in the depth of $1,010 \sim 1,010.8$ meters,
- (b) Simulated monitoring resistivity data after the salt water (very low resistivity) injection.

(b)図にみるように亀裂角度が -30° になっても明瞭に把握できており、モデル設計から塩水注入による比抵抗擬似効果が極めて大きいことが明らかになった。

3.3 採鉱計画(二次鉱床資源開発的)の鉱床・断層・地下水資源環境モニタリング

Fig. 7 は、硫化鉄鉱鉱床内にダイク状の花崗斑岩、石英斑岩があり、一部けい長石も挟んでいる地質で、鉱床内断層としての断層FBの右側は角れき岩、輝緑岩、粘板岩からなる岩盤と岩盤内断層としての断層FAが想定され、断層FB、FAの連続性やそれぞれの性状、さらに過去に断層湧水を確認した地下深部なので地下水分布との関係が問題となり、自然電位、強制分極周波数効果、比抵抗等の現地データを取得し鉱床、岩盤、断層の識別を行った。(a)ウェンナー法坑内電極配列データによる比抵抗擬似断面と(12月)、(b)調査時期(a)から半年後(6月)の比抵抗擬似断面から、まず鉱床(極めて低い比抵抗領域)内断層FB、岩盤(高比抵抗領域)内断層FAに対しては、その傾きに対応する比抵抗擬似断面を示し、FB、FA間の高比抵抗の特徴も現れている。6ヵ月後のモニタリングでは巨視的にはパターンは2回とも類似しており鉱床・岩盤の採鉱・掘削が行われていなく鉱床・岩盤に極めて異常な変化は考えられない。一方、断層FB位置や他の局所的な位置で時間的変動がでていいる。鉱床内断層FB位置深部では比抵抗が高くなり含水断層帯の比抵抗が鉱石のそれより高いことを勘案すると、この領域における半年間の変化と関係していると考えられる。FA位置や他の位置では局所的な変化が現れているが余りまとまった変化ではない。FB、FAが地下水分布の挙動から

Fig. 7 Monitoring resistivity data for mining, geological faults and groundwater movement.

- (a) Winter resistivity measurements in the tunnel of mine,
- (b) Summer resistivity measurements as an aid to investigate groundwater movement with the faults.

みて連がっているか否かについては、この調査範囲ではFBが独自に変動していると解釈される。

3.4 品質管理をふまえた基礎岩盤改良効果(岩盤資源開発的)モニタリング

地下空間や構造物基礎を形成する地盤・岩盤が良好でない場合、数多くのボーリング孔を掘削しセメントミルクを注入、自然地山の亀裂・破碎帯等、地盤・岩盤の間に地下水が100[%]存在している場合が多く、地下水の代わりにあるいは地下水と混合して入ったセメントミルクの硬化によって岩盤改良される。この岩盤改良効果をより正確にモニタリングすることができれば、注入前の地質状況及び注入後の地質状況から、ダム基礎工事全般にわたって所要の岩盤改良を支援することができる。すなわち、投入される大量の注入セメント量と工事関連の注入不足の領域を修正し計画的なグラウト施工・品質管理を支援することができる。Fig. 8 は、地質からは断層も多く、前第三紀の花崗岩に亀裂も多く粘土化・軟弱化も著しい岩質の領域において、6本のボーリング孔を掘削し、各孔において電極間隔 $a=0.5\text{ m}$ の等間隔CPPC ウェンナー電極配列によって、(a)グラウト注入前に測定した見掛比抵抗分布、(b)概ね20~130 [Kg/m]のグラウト量の注入後の注入前に対する見掛比抵抗変化割合[%]を示す。(a)図において高見掛比抵抗領域は岩盤も良好であり、この比抵抗擬似情報から低見掛比抵抗領域の改良が必要であることが予測できるとともに、(b)図から絶対値40 [%]以上の変化が把握されているが、グラウト注入によりどの程度の岩盤比抵抗変化が得られるか見掛比抵抗によってモニタリングできる。

Fig. 8 Monitoring of grouting effects in the earth-engineering.

- (a) Resistivity monitoring static data before grouting by the five grouting boreholes and an observation borehole with Wenner electrode array system (spacing $a = 0.5\text{ m}$),
- (b) Resistivity change obtained by monitoring data before/after groutings.

3.5 放射性廃棄物地層処分モニタリング(単純計算モデル)

核燃料再処理施設から廃棄される高レベル放射性廃棄物は、陸地下の数百 m から約千 m の深部地層中に処分する方式によって、地表浅部環境に流出しないように留意されている。Fig. 9(a)は、核廃棄物格納領域(比抵抗 $100 [\Omega \cdot \text{m}]$)が地層(比抵抗 $50 [\Omega \cdot \text{m}]$)深部に存在するときの廃棄システム設計のための Asch のモデル(Asch and Morrison, 1989)を示している。格納領域を掘削するときに岩盤の水分が減少して周辺岩盤の比抵抗 $50 [\Omega \cdot \text{m}]$ が高比抵抗になる。現地での予測は主として局所的な地下水挙動に注目することが Asch モデルの要点である。深部地層の格納領域を掘削した後、その空間は大気圧になり地下水は格納領域に排水されることになる。Fig. 9(b)では、ボーリング孔の電流電極 C_1C_2 で電流を印加し、地表面の電位電極 P_1P_2 によって見掛け比抵抗を観測する CC (地下) PP (地表) 立体電極配列方式によるモニタリングを行い、観測された見掛け比抵抗を图中的 Q 点に表示して比抵抗擬似断面を作成する。Fig. 9(b)は、この CC (ボーリング孔) PP (地表) 立体電極配列方式が有する探査感度特性を比抵抗擬似断面によって概念的に検討した単純計算モデルである。有限要素法 2D-3D アルゴリズムによってモデリングしたもので、ボーリング孔近傍で見掛け比抵抗は全くのノイズとなって現れるが、目的構造に対する信号としては図中右下部分に斜め「ハ」の字をした典型的な比抵抗擬似効果が現れており、比抵抗モニタリング情報となり得る可能性を示している。ここでは全く単純な FEM 比抵抗モデルのみを示した。

3.6 原位置廃棄物地中ガラス固化 (ISV) モニタリング

土壤汚染問題の解決手段の一つとして、原位置で電気的に加熱することによって無機物及び有害有機物を地中で溶融し固化ガラス状態にする技術 ISV (In-Situ Vitrification) が現在実用化が進められている。例えば平均 $220 [\text{KW}]$ で 5 日間以上、概ね $28 [\text{MW}, \text{h}]$ の電力をグラファイト電極に与え、廃棄物を土壌とともに地中で溶融状態にするが、電気加熱を止めた後、13 時間にわたって $1,500 [^{\circ}\text{C}]$ から $1,150 [^{\circ}\text{C}]$ に溶融した温度は下がっていく。Fig. 10 は Spies のモデルである。図は ISV 技術の概念で(a)汚染土壌、(b)電気加熱による溶融領域、及び(c)地中ガラス固化体の各プロセスを示している。溶融中心から放射状方向に 3 m までの温度と比抵抗の関係では、溶融部(高温 $1,000 [^{\circ}\text{C}]$ 以上) - 地層 ($100 [^{\circ}\text{C}]$ 程度)の境界(約 1.7 m 程度)で急激な比抵抗変化があり、導電性溶融領域(極めて低い比抵抗 $0.1 [\Omega \cdot \text{m}]$ 程度)が極めて高い比抵抗 ($10,000 [\Omega \cdot \text{m}]$ 近く)の脱水乾燥状態の薄い殻によってカプセル化されている機構になる(Spies and Ellis, 1995)。このモニタリングには、ボーリング孔利用の立体電極配列による観測が有効で、Fig. 11 は、ボーリング孔と地表を利用する CC (地表、

Fig. 9 Monitoring of nuclear waste disposal in the subsurface deep environments.

- (a) Nuclear waste disposal resistivity model (Asch and Morrison, 1989),
- (b) Resistivity pseudo-section monitoring using FEM 2D-3D algorithm.

Fig. 10 A conceptual sketch of in-situ vitrification (ISV) operating sequence of Spie's model (Spies and Ellis, 1995).

- (a) Contaminated soil, (b) Melting zone,
- (c) Vitrified body.

電極間隔 10 m) PP (ボーリング孔 1, 電極間隔 10 m) データ数 100 個及び 2 本のボーリング孔を利用する CC (ボーリング孔 1, 電極間隔 10 m) PP (ボーリング孔 2, 電極間隔 10 m) データ数 100 個のダイポール・ダイポール電極配列によって画像化したもので、(a)図は比抵抗 $10,000 [\Omega \cdot \text{m}]$ の地中ガラス固化体を、絶縁物質の球状体で想定しモデル化 (Fig. 10(c)で地中 $x = 30 \text{ m}$, $y = 20 \text{ m}$, $z = 40 \text{ m}$ で溶融化後ガラス固化したものを、 $y = 0 \text{ m}$ の xz 2次元断面における立体電極配列移動の 200 個のデータを取得、かつ、 $y = 0 \text{ m}$ の xz 2次元断面にお

Fig. 11 Conceptual three-dimensional monitoring the in-situ vitrification (ISV) as shown in Fig. 10 (c).

- (a) Multi-point plotting resistivity pseudo-section in the vertical section outside the center of vitrified body model simulated by insulating sphere,
- (b) Resistivity pseudo-section in the vertical section with the center of vitrified spherical body model.

ける 200 個の感度分布 $Sq\beta$ を用いて解析) して, (1) 式の原理によって求めた $y = 0$ m の xz 2 次元断面 (この断面には絶縁球は存在しない) における比抵抗擬似断面, そして (b) 図は (a) と同一ガラス固化体を $y = 0$ m の xz 2 次元断面における立体電極配列移動の 200 個のデータを取得し, $y = 20$ m の xz 2 次元断面における 200 個の感度分布 $Sq\beta$ を用いて解析して求めた $y = 20$ m の xz 2 次元断面 (この断面には絶縁球は存在する) における比抵抗擬似断面を示す。2 次元データによる 3 次元解析が容易に行えることを示すとともに, 無論, 当該絶縁物質の中心をとる xz 2 次元断面の感度分布を用いた (b) 図の方が (a) 図より可視化精度が向上している。ガラス固化体モニタリングにおける比抵抗擬似効果は, 絶縁性構造によって予測できると思われる。

4. 結 言

私達がこれからも安心して生存していくために最も重要な資源や環境をどのように捉えるべきか, 英知をしぼって色々の努力がなされているが, 本論文は, この重要な資源や環境をシステム設計及び地下情報有効利用という新しい考え方で捉えた支援要素の一つとなっている。今日, 公知の通り World Wide Web (W3) によっても, 世界的な資源・エンジニアリング・環境地球物理学アクティビティに関する教育・研究情報が容易に得られるようになった。環境も大切な資源の一つとしてとらえる環境と調和した種々の有限地球資源の有効利用の立場からの, 資源環境システム設計の考え方は一つの新しい視点である。本論文では, 資源開発環境モニタリングの例題として, 地下水資源循環モニタリング, 能動的地熱抽出システムにおける深部亀裂モニタリング, 採鉱計画における鉱床・岩盤・断層把握と地層地下水変化モニタリング, 省資源を踏まえた, あるいは合理的なグラウト注入の環境地盤改良効果モニタリング, 放射性廃棄物地層処分モニタリング及び原位置廃棄物地中ガラス固化 (ISV) モニタリングの極めて概念的で現実的にはすぐ役に立たないが, その基礎的なモデルによるモニタリング検討を行い, 可視化情報やその擬似効果に焦点を絞り検討した。

その結果,

- (1) 比抵抗変化の抽出には電極配列と一点表示にとどまらず多点表示方式の導入等, その組合せの工夫が極めて重要である,
- (2) 観測データから逆解析構造を求めるまでの比抵抗擬似曲線, 擬似断面は, 古い技術の再認識でもあるが実に簡便でかなりの現地情報を与える, 理論的根拠としては, Laplace の方程式が成立するポテンシャル場での逆解析手法は平滑化を促進し, 現実の地質の不連続性の検出から離れる傾向にあり, 高密度情報としての擬似効果が逆に正しい地下情報を残しているとも言えることが実績上で再認識されてきた。
- (3) 地下情報の有効利用からは, 合理的で高精度なモニタリングデータ逆解析及び極めてシンプルな比抵抗高密度管理による擬似効果の両面からの検討が有用である,

等の新しい知見を得た。

以上, 本論文は針穴からの一端であるが, 本分野における新しい支援要素技術の現状を認識する意味で, 極めて電気探査専門の一事項である擬似効果による可視化を適用して, その普遍的な有用性を示した。今後の資源地殻の開発利用と資源環境問題の解決における資源環境システム設計並びに資源情報システム工学とその有効利用上での基礎的検討を行う上で少しでも役立てばと思っている。

謝辞 本研究の一部は、平成6・7年度文部省科学研究費補助金（一般研究(C), 菅野強研究代表, 研究課題番号06651096）による補助を受けた。本文をまとめるにあたり、EEGS (Environmental and Engineering Geophysical Society, 米国), SEG (Society of Exploration Geophysicists, 米国), EAEG (European Association of Geoscientists/Engineers, オランダ) からの懇切な permissions と協力を得た。ここに記して、深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 可視化情報学会編: 流れの可視化 今・昔, 地殻内計測における電気可視化情報 (菅野分担執筆), 384, 1993.
- 2) 菅野: 電気探査による地下情報可視化とその評価, 可視化情報, 11, 1991.
- 3) …: 地殻内計測における3次元電気画像化とその評価, 可視化情報, 13, 1993.
- 4) …: 地殻内計測における電気可視化情報の高信頼化, 可視化情報, 13 S, 1993.
- 5) 菅野・片山: 電界強度法による地下情報可視化計測に関する研究, 可視化情報, 15, 1995.
- 6) Sugano, T.; Electric Field Visualization for Earth Resource and Environmental System Predictive Design, Atlas of Visualization, Vol. 3, in press, 1997.
- 7) 文部省科研費補助金研究成果報告書; 地殻内計測における電気探査可視化情報とその評価に関する研究, 一般研究(C), 課題番号 06651096 (菅野研究代表), 127, 1996.
- 8) 菅野: 環境保全における電気探査による地盤情報計測, 材料, 44-505, 1995.
- 9) …: 環境保全における地球物理学アクティビティと地下情報, 地盤改良シンポジウム論文集, 33-40, 1994.
- 10) …: 資源環境システム予測設計における地球物理学アクティビティ, エネルギー・資源学会講演論文集, 1-6, 1996.
- 11) 竹内・長江: 電気探査による地下水流動モニター法の研究, 応用地質, 31, 1990.
- 12) 菅野・岸田: 比抵抗地盤計測結果再構成における電極配列効果, 応用地質, 36, 1996.
- 13) 菅野・荒井・佐々: 立体電極配列法による多点表示比抵抗擬似断面, 物理探査学会講演論文集, 47, 226-231, 1991.
- 14) 芦田・菅野・佐々: ボーリング孔を利用する反射法地震探査と電気探査による高精度地下探査, 文部省エネルギー重点領域研究, 能動的地熱抽出システムに関するシンポジウム, B 04, 1992.
- 15) 菅野; 鉱山評価また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 7-11, 1972.
- 16) 土木学会関西支部共同研究グループトンネル地盤調査: 特に高密度電気探査に関する研究委員会編; 新しい電気探査とその基礎知識 (I) (II), ワークショップテキスト (菅野基調解説), 5・23, 1994・1995.
- 17) 佐々他: 京都花折測線2電位データ, 京都市周辺での物理探査による断層調査, 応用地質(特編), 1995.
- 18) 文部省科研費補助金研究成果報告書; 廃棄物による地盤環境災害の防止技術に関する調査研究, 一般研究(B), 課題番号 05452240 (京都大学嘉門雅史教授研究代表), 270, 1996.
- 19) 地球環境工学ハンドブック編集委員会 (茅 編); 地球環境工学ハンドブック, オーム社, 1372, 1991.
- 20) 鹿園; 地球システム科学入門, 東京大学出版会, 1994.
- 21) 菅野; 地下水資源環境汚染監視への電気探査の利用について, 日本鉱業会誌 (現・資源と素材), 摘録, 102-1181, 1986.
- 22) …: 地下遮水処分環境における漏洩電気探査のモデル研究, 資源と素材, 摘録, 105-6, 1989.
- 23) …: 危険廃棄物の地球物理学, カナダの核燃料廃棄物管理プログラムのための地球物理学的方法論, 資源と素材, 摘録, 107, 1991.
- 24) Asch, T. H. and Morrison, H. F.; Mapping and Monitoring Electrical Resistivity with Surface and Subsurface Electrode Arrays, Geophysics, 54-2, 235-244, 1989.
- 25) Spies, B. R. and Ellis, R. G.; Cross-borehole Resistivity Tomography of a Pilot-Scale, In-Situ Vitrification Test, Geophysics, 60-3, 886-898, 1995.
- 26) Romig, P.; Inventing Geophysical Engineering, Journal of Environmental & Engineering Geophysics, 0, 2, 137-143, 1996.
- 27) 佐々・芦田・菅野共著: 建設・防災技術者のための物理探査, 森北出版, 第3刷, 1996.
- 28) 菅野; 電気探査地下計測—地球資源有効利用, 地下情報, 資源環境モニタリング, 土の環境圏 (菅野分担執筆), (株)フジテクノシステム, 1997, 印刷中.
- 29) Sugano, T.; Predictive Design for Environmental Electrical Monitoring International Congress on Environmental Geotechnics (ISO), A. A. Balkema (Rotterdam), 159, 1996.
- 30) Sugano, T.; The Author's Research Activity in World Wide Web <http://www.kogaku.kyoto-u.ac.jp/koken/home.html>, 1996.
- 31) SEG: The Leading EDGE, World Wide web <http://seppwww.stanford.edu/seg/>, Vol. 15, No. 1, 1996.