

海底電磁法探査による伏在断層や地下水理情報の 取得可能性について

吉村 公孝* 大久保 秀一** 山根 一修**

A Feasibility Study for Characterizing Subsurface Faults and Hydrogeological Information with Marine Electromagnetic Prospecting

Kimitaka YOSHIMURA*, Shuichi OKUBO** and Kazunobu YAMANE**

Abstract

This paper discusses characterizing and validating potential sites for high level radioactive waste disposal along the coastal areas using newly developed geophysical prospecting tools. The specific objective of this paper is to develop an electromagnetic (EM) technology for investigating the subsurface to the depths of 1,000 m below the seafloor in the near-shore environment. The depth to the sea floor is up to 200 m. Characterization and validation of a site for high level radioactive waste disposal require a detailed knowledge of both the geological structures and the groundwater characteristics. The commercial as well as research-based marine controlled-source and natural-source EM technologies are available, however, there has been little work done in shallow water depths environment using such technologies. Here, we report the state-of-the-art EM method with applications to coastal areas with shallow water depths environment. Marine EM instrument developed is appropriate for investigating shallow water environment near coastal area. The interpretational technology for EM data is focused on 3-D magnetotelluric (MT) and 2.5-D controlled-source electromagnetics (CSEM). This paper demonstrates the performance of the new type of instrument and software, and the field experiment that was carried out in the Monterey Bay of California, USA, in 2003 and 2004. Additionally, we demonstrate interpretation techniques applied to characterizing groundwater using MT3-D result of Horonobe, Hokkaido.

Key words : geological disposal, coastal area, fault, underground water

キーワード : 地層処分, 沿岸域, 断層, 地下水

* 財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター

** 地熱技術開発株式会社

* 現所属 : 東電設計株式会社

* Radioactive Waste Management Funding and Research Center

** Geothermal Energy Research and Development Co., Ltd.

* Present address : Tokyo Electric Power Service Co., Ltd.

I. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分事業（以下、HLW 地層処分）における最終処分場は、内陸域から沿岸域までの広い範囲の中から選定されることが考えられるため、（原子力発電環境整備機構、2004）わが国の多様な地形地質に適応しつつ、地質環境特性を把握することができる信頼度の高い調査技術が求められている。このような背景の中、（財）原子力環境整備促進・資金管理センター（以下、RWMC）は、経済産業省からの委託事業として HLW 地層処分の候補地選定段階で適用される物理探査技術の高度化開発を実施してきた。この内、電磁法探査技術の高度化開発では、従来技術で調査が困難とされる沿岸域、特に結晶質岩分布域での断層をはじめとする地質構造調査の探査能力向上が重要と考え、浅海用海底電磁法の機器開発並びに解析技術の整備を進めてきた（吉村ほか、2004a, b）。また併せて沿岸域も含めた幅広い調査地域において、地下構造を信頼性高く把握できる 3 次元電磁法探査の解析技術の整備も進めてきた。

本小論では、沿岸部での調査の必要性を踏まえ、はじめに沿岸域で適用できる計測技術および解析技術の開発内容について述べ、次に、開発した各技術の信頼性を確認するために実施したフィールド試験について述べる。このフィールド試験は、米国カリフォルニア州沿岸域において、既往調査によって陸域から海域まで延長していると推定されている断層を対象にして実施したものである。我々は試験を通じて、開発した浅海用海底電磁法の計測機器の作動確認を行うとともに、取得したデータから浅海域における断層の位置・形状把握や、岩盤の広がり・健全性の推定に対する海底電磁法探査の有効性などについて検討した。最後に、新たに開発した解析技術のうち MT（マグネテルリック）法 3 次元ソフトウェアを用いて、北海道幌延町で取得した 3 次元 MT 法データの解析を試みた結果を述べる。ここでは、3 次元解析から得られた比抵抗値と地下水の塩濃度との間に良い相関が見られたことから、3 次元

MT 法により得られた比抵抗分布から、水質が異なる地下水の分布状況を推定する試みについて述べる。

II. 電磁法調査技術の高度化検討

1) 計測機器の開発

海水は良導体であるため、短周期成分の減衰が激しい。そのため、既存技術による海底電磁法での測定は長周期成分に限定されていた。長周期成分のデータが反映する地下構造は海底下数 10 km 以深であり、海底下数 km までの浅部構造に対応する短周期成分のデータ取得は既存技術では困難であった。一方、近年の電子機器の発展にともない微弱な電磁場を測定できる装置が開発され（Constable *et al.*, 2000）数 10 Hz 程度の高周波数まで観測可能な MT 法装置を用いて、海底下数 km 程度の石油・天然ガスの探鉱に利用されるようになってきている。海底で使用する既存の MT 法装置の特徴は、水深数 100 ~ 数 1,000 m での適用を考慮した記録部（アルミニウム製耐圧容器の採用、大規模データ量に対応したハードディスク記憶録装置など）深海に適した設置・回収方法（音響信号によるシンカー切り離し・フロートによる自己浮上式）を用いている点である（図 1）。

RWMC は、機器開発を進めるに当たり、浅海域は波浪の影響や社会活動による電磁波等の高ノイズ環境が予想されること、港湾施設、船舶航行や漁業等に関連する調査の制約があることなどを考慮し、浅海域における調査環境に適応するために表 1 に示す改良点を抽出し、プロトタイプの測定機器を設計・製作した（吉村ほか、2002a, 2003a, 2004a, b）。製作した浅海用測定機器は、水深 10 m から 200 m 程度の海域に適用する低床式スタンドアローン型と、さらに水深の浅い波打ち際での測定に使用するケーブル型の 2 種類である（図 2, 3）。前者は電場と磁場の両方を取得する機能を有する。一方、波打ち際は、強い波浪によってインダクションコイルを使う磁場観測が、ほとんど不可能であったこと、また波打ち際での測定の場合、磁場データは海岸域で測定し

たものをほぼ代用できる見通しがあることから、ケーブル型は電場のみの測定装置とした。

浅海用測定機器の特に波浪の影響に関する改良効果を確認する目的で、平成 15 年 4 月にカリフォルニア州サンディゴ市沿岸域で、既存 MT

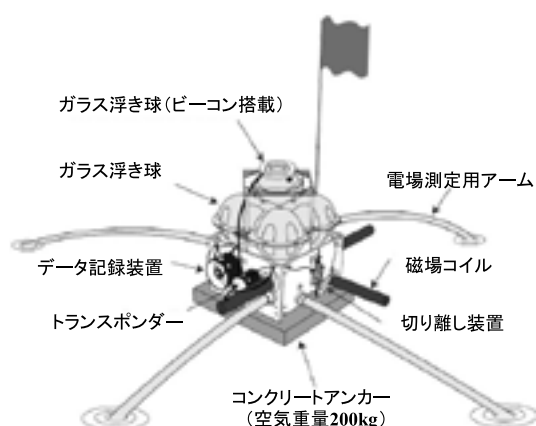


図 1 既存の海洋 MT 法装置の外観 (http://mahi.ucsd.edu/SEMC/SlideShow/index.html より転載)。

Fig. 1 Outline of the conventional marine magnetotelluric instrument (http://mahi.ucsd.edu/SEMC/SlideShow/index.html)。

装置と本研究で新たに製作した低床式スタンドアローン装置を用いた浅海試験を実施した。この試験内容の詳細は、吉村ほか (2004d) に述べているため、ここでは、その概略のみを紹介する。試験地域位置を図 4 に示す。機器を投入した海域の水深は、平均 18 m である。図 5 に両装置から得られたデータから算出した試験海域の見掛け比抵抗曲線を示す。横軸が周期 (秒)、縦軸が見掛け比抵抗値 ($\Omega \cdot m$) である。図 5 から、既存の MT 装置では、1 秒から 10 秒間のデータ品質が不良であること、一方で低床式スタンドアローン装置のデータから処理された見掛け比抵抗曲線は、全周期に渡って良好な結果が得られていることがわかる。

この試験結果から、新たに開発した測定装置による波浪への有効性を確認することができた。

2) 解析技術の開発

浅海域で取得したデータは陸上データと統合して解析することで、沿岸域において連続した比抵抗構造を求めることができる。そこで、海水、大地及び空気層という極めて比抵抗コントラストの大きな媒質が隣接する沿岸域においても十分な精度で解析できる電磁法ソフトウェアを開発した

表 1 開発した浅海用 MT 法装置の特徴。

Table 1 Characteristics of the developed magnetotelluric instrument for near-shore environment.

項 目	既往技術	開発内容	得られた効果
A/D コンバータ	16 ビット	24 ビット	・量子化ノイズに汚染された信号成分の抽出 ・S/N 比の向上
サンプリング周波数	最大 31.25 Hz/ch	1,000 Hz/ch	・浅部領域の解析精度の向上 ・比抵抗構造分解能の向上
データ記録	ハードディスク	大容量フラッシュメモリー (1 ~ 4 GB)	・電磁ノイズの削減 ・将来的に大容量に拡張可能 ・機械駆動無く、衝撃に高信頼性
耐圧容器	アルミ製 (水深 6 km)	非磁性体材質： 硬質塩化ビニール	・高周波数帯測定の品質向上
設置・回収	自己浮上	アンカードブイ方式 / ケーブル方式	・フロート廃止 / 低床化：波浪影響の低減 ・小型 / 軽量化：操作性の向上

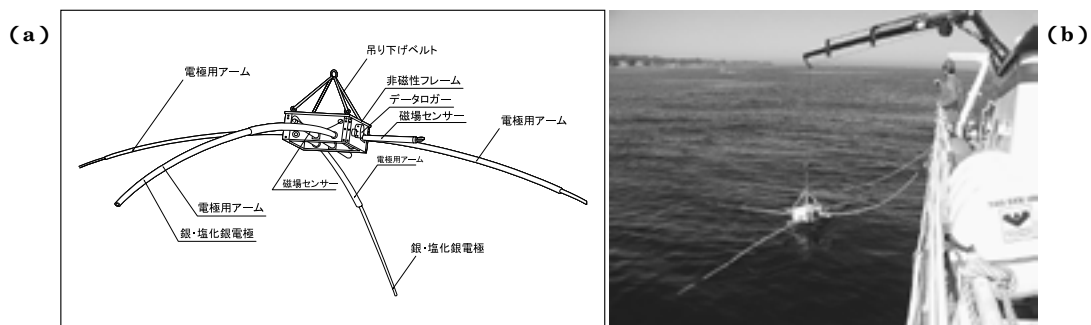


図 2 (a) 開発した浅海用電磁法受信器 (スタンドアローン型).
(b) 海底設置時の様子.

Fig. 2 (a) Developed electromagnetic receiver for near-shore environment (stand-alone type).
(b) A setting of the instrument to the bottom of the sea.

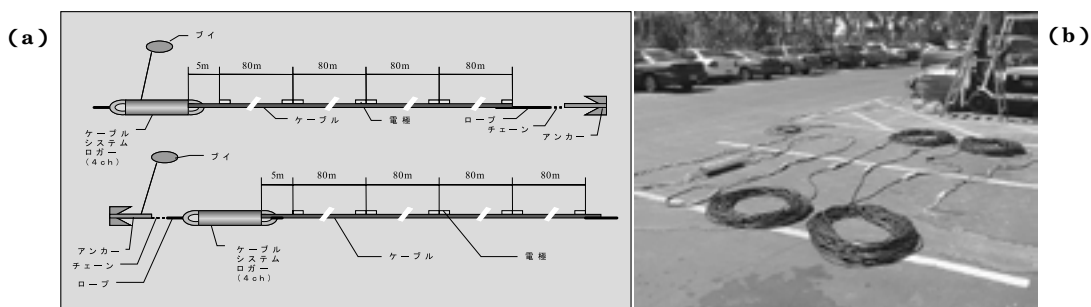


図 3 (a) 開発した浅海用電磁法受信器 (ケーブル型).
(b) ケーブル型受信器の写真.

Fig. 3 (a) Developed electromagnetic receiver for near-shore environment (cable type).
(b) The photograph of cable type electromagnetic receiver.



図 4 カリフォルニア州サンディエゴ市沿岸における機器性能比較試験位置図.

Fig. 4 Location of the instrument tests for comparison at the coast of San Diego, California.

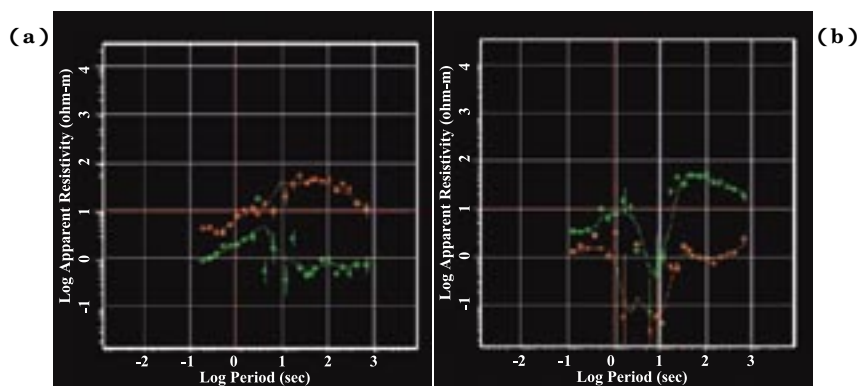


図 5



図 6

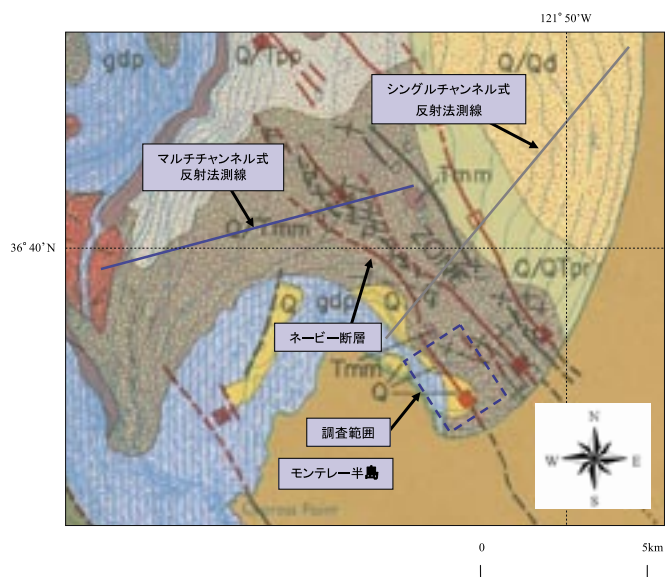


図 7

(吉村ほか, 2002b, 2003b, 2004c)。開発したソフトウェアは、人工信号源を用いる電磁法の 2.5 次元解析ソフトウェアと、太陽風などによる自然界の電磁場を利用する MT 法の 3 次元解析ソフトウェアの 2 種類である。人工送信源電磁法は、自然信号を用いたものと比べて安定した信号を利用するため、ノイズが卓越する地域での適用が効果的である。また、送受信形態として電場もしくは磁場の選択が比較的自由に行える利点があるため、現場測定におけるロジステックスへの制約が少ない。一方で MT 法は、信号源が遠方にあるため入力波の平面波仮定が成り立ち、データ解析が人工送信源電磁法に比べて容易である利点がある。

今回開発したソフトウェアでは、大規模行列計算の計算速度と精度を向上させるために、相反定理(送信点と受信点の位置を仮想的に交換して計算量を削減する)による計算時間の軽減を図った。

III. 沿岸域の伏在断層での開発技術現地試験

浅海用電磁法計測機器の性能確認と 2.5 次元解析コード(吉村ほか, 2004d)の妥当性の確認を

目的として、既往の地質情報により断層の存在が知られている沿岸海域を対象とした現地試験を米国カリフォルニア州モンテレー湾で実施した。既存資料に基づき、以下に当該地域の地質概要を述べる。

1) 試験対象となった断層の既往地質情報

現地試験を実施したモンテレー湾は、北米太平洋岸のサンフランシスコから約 100 km 南方に位置する南北約 40 km, 東西 10 ~ 15 km の西に開いた湾である。モンテレー湾での調査範囲を図 6 に示す。また、既存の反射法の測線と簡略化した地質図を図 7 に示す(Greene and Kennedy, 1989; Greene and Hicks, 1990)。図 7 によると、湾南西方のモンテレー半島及びその周辺海域下には、中生代白亜紀の花崗閃緑岩が広く分布し、この岩体の上位及び周辺には海成のシルト岩と砂岩からなる新第三系堆積岩類が分布する。そして、これら花崗閃緑岩と新第三系堆積岩を覆って第四紀の堆積物が分布している。

当該地域周辺の断層構造としては、モンテレー半島の北東側に卓越するモンテレー断層帯(Mon-

図 5 (a) 低床式スタンドアロン受信器と(b)既存型海洋 MT 法装置による見掛け抵抗値の比較。機器形状の低床化の効果により、周期 10 秒を中心に、データ品質の向上が認められる。(緑線: x 方向の電場と y 方向の磁場から算出; 橙色: y 方向の電場と x 方向の磁場から算出)。

Fig. 5 Comparison of apparent resistivity data obtained from the stand-alone type (a) with the conventional type (b). Data quality becomes better at around a period of 10 seconds with the stand-alone type (green dots are calculated from electric field along x-axis and magnetic field along y-axis, while orange dots are calculated from electric field along y-axis and magnetic field along x-axis).

図 6 モンテレー湾における調査地域位置図。

Fig. 6 Location map of the studied area.

図 7 地質図及び反射法測線位置図(Greene and Kennedy, 1989; Greene and Hicks, 1990 より転載および加筆)。Q: 第四紀未固結堆積物, Q/Qd: 三角洲堆積物, Q/QTpr: 鮮新世及び更新世未固結堆積物(層厚 3 m 以上), Q/Tpp: 鮮新世の砂岩・シルト岩, Tmm: 中新世の砂岩・泥岩, Q/Tmm: 中新世の砂岩・泥岩(層厚 3 m 以上), gdp: 花崗閃緑岩, 赤線: 第四紀層を切る断層, 赤破線: 同推定部, 黒線: 第三紀層かそれ以前の地層を切る断層, 黒破線: 同推定部。

Fig. 7 Location map and simplified geological map of the marine seismic surveys (modified after Greene and Kennedy, 1989 & Greene and Hicks, 1990).

Q: Quaternary unconsolidated deposits, Q/Qd: Deltaic deposits, Q/QTpr: Pliocene and Pleistocene unconsolidated deposits (greater than 3 m), Q/Tpp: Pliocene sandstone and siltstone, Tmm: Miocene sandstone and mudstone, Q/Tmm: Miocene sandstone and mudstone (greater than 3 m), gdp: granodiorite, red and black line: Faults (Red line indicates the fault cutting Quaternary strata. The black indicates the fault cutting Tertiary or older strata. The solid line means well-defined fault and dashed line inferred).

terey fault zone) があげられる。断層の多くは北西 - 南東方向の走向を有し、これらはカリフォルニア州西部を 1,200 km 以上に渡って通過するサンアンドレアス断層と同系である。モンテレー断層帯の一部は海域部にも及ぶと考えられており、このうち最もモンテレー半島寄りに位置し、連続性の高いものが、今回の現地試験で調査対象としたネービー断層である。なお、断層の分布位置の信頼度に関して、図 7 では、信頼度の高いものが実線、信頼度の低い部分が破線で表現されており、ネービー断層の最も信頼度の高い箇所はモンテレー半島北方の海域部であり、試験地を含む海岸付近の陸域・浅海域は信頼性が低い破線で表現されていることがわかる。

海域における断層分布位置は、主に音波探査に基づいて推定されており、このうち信頼性が高いとされる半島北方ではマルチチャンネル式音波探査が実施されていて(図 7, 8) その解析断面では、南西の花崗閃緑岩分布域側が隆起し、北東側が沈降する断層が確認されている(Greene and Hicks, 1990)。

一方で、モンテレー半島北東側の湾奥部では、陸域が近く水深が浅いことや、水棲動物保護などの制約によりマルチチャンネル式音波探査が実施されておらず、シングルチャンネル式音波探査が半島から湾に沿うように南西 - 北東方向の測線で実施されている(図 7)。

その探査結果によると、新第三紀層が北東方向に厚く発達する傾向は読み取れるものの、正確に断層を特定できるほどには至っておらず、反射法地震探査の解析断面図では信頼度の低い点線の表現となっている(図 9)。陸域における断層分布位置に関しては、内陸の丘陵部において断層を示唆する地形が判読でき、地質編纂図では比較的信頼度の高い破線で表現されるが、海岸部～平野部においては海浜性の堆積物などに覆われていることから信頼性は低い。

試験地周辺のその他既存地質資料としては、海域を対象とする空中磁気探査の解析結果がある(Greene, 1977)。磁気異常図によると、磁気異常の走向は NW-SE 系が卓越し、推定される断層

系と方向性が一致するものの、この情報のみでは正確な断層位置の特定は困難である(図 10)。

2) 海底電磁法の適用

上述のように、既存資料から想定される沿岸部のネービー断層位置の詳細については不確実な部分があり、また、断層の地下への分布延長も不明である。そこで、これらを探査の対象として平成 15 年 10 月、平成 16 年 1 月、10 月にモンテレー湾内において電磁法の適用試験を実施した。

測線位置を図 11 に示す。各測線は、海岸線にほぼ平行である。低床式スタンドアローン型受信器では、水平電場 2 成分(E_x, E_y)及び水平磁場 2 成分(H_x, H_y)を取得し、ケーブル型受信器では、水平電場 1 成分(E_x)のデータを取得した。サンプリング周波数は、何れも 1 kHz である。また、平成 15 年度 10 月の試験では、既存の海底電磁法装置を合わせて投入し、低床式スタンドアローン型受信器と比較した。2.5 次元解析のための適用試験では、人工送信源を用いた観測に加えて、自然信号の観測を合わせて実施した。人工送信源として海岸にほぼ平行に約 350 m の電場パイポールを展開した。送信周波数は、 2^8 Hz から 2^{-4} Hz までの、各 2 のべき乗の矩形波である。

3) 電磁法解析結果の考察

各測線から取得されたデータの 2 次元解析を行った。観測データの例および解析結果を図 12 に示す。インバージョン解析による観測値と計算値との RMS 誤差は、各測線とも 0.1 以下である。また、図 12 に示した Line-C の比抵抗断面図から解釈を行った結果を図 13 に示す。なお、解析周波数は 250 Hz から 0.1 Hz までである。

2 次元解析によって海底下 700 m 程度までの比抵抗構造を得た。ここから、調査地南西側には、海底近傍から数 100 ~ 1,000 $\Omega \cdot m$ 以上の高比抵抗領域が分布すること、北東側では、浅層で 1 ~ 2 $\Omega \cdot m$ 、中深部でも 10 数 $\Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗の領域が拡がるのが分かった。また、この低比抵抗域の下位に、150 ~ 1,000 $\Omega \cdot m$ 程度と比較的高比抵抗の領域が分布するのが見られる。南西部の高比抵抗領域と北東部の低比抵抗領域との間には、150 $\Omega \cdot m$ 前後で比抵抗値が不連

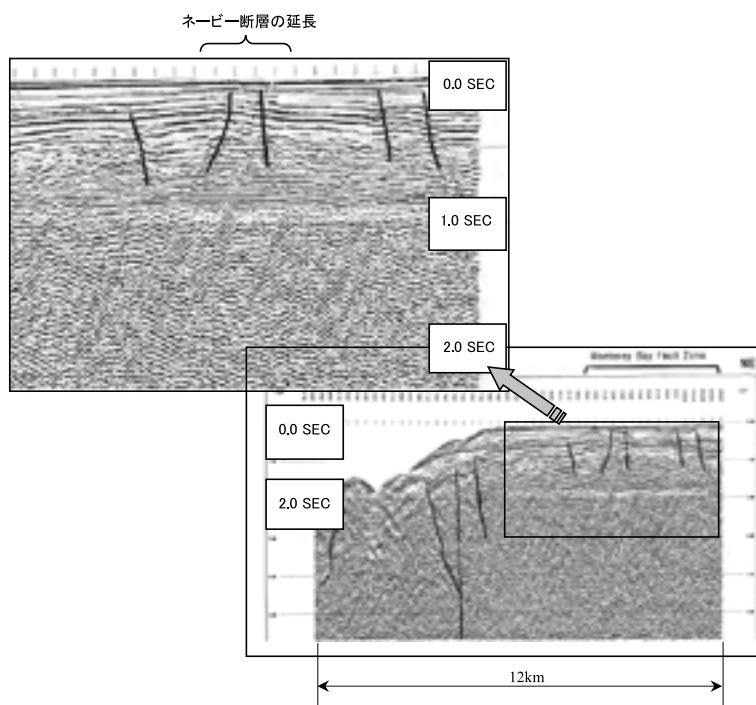


図 8 マルチチャンネル式反射法解析断面 (Greene and Hicks, 1990 より転載および加筆).

Fig. 8 Seismic cross-section of the multi channel survey (modified after Greene and Hicks, 1990).

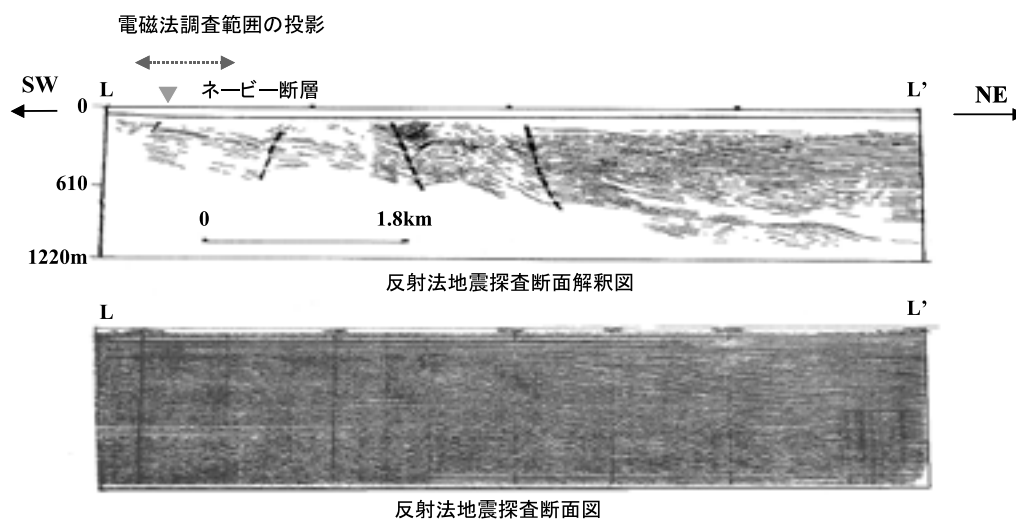


図 9 シングルチャンネル式反射法解析断面 (Greene, 1977 より転載および加筆).

Fig. 9 Seismic cross-section of the single channel survey (modified after Greene, 1977).

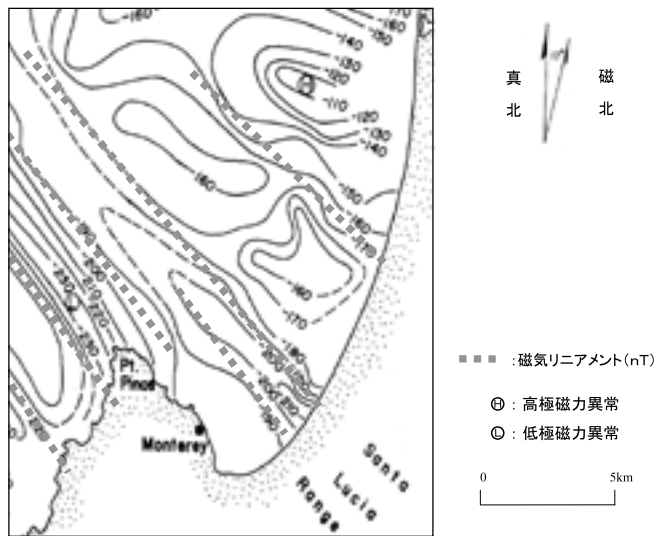


図 10 磁気異常図(全磁力異常(nT), Greene, 1977 より転載および加筆).

Fig. 10 Geomagnetic anomaly map (Geomagnetic total force (nT), modified after Greene, 1977).

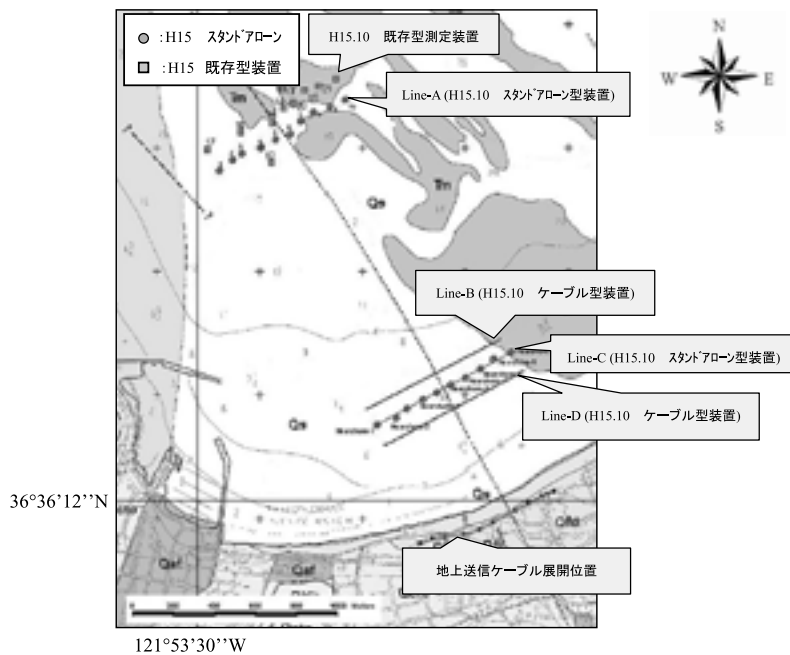


図 11 電磁法測点位置図 .

Tm : 中新世堆積岩, Qs : 第四紀未固結砂岩, Qfd : 第四紀チャネル性堆積物, Qaf : 人工地盤 .

Fig. 11 Locations of the marine electromagnetic surveys.

Tm : Miocene sedimentary rocks, Qs : Quaternary soft sandstone, Qfd : Quaternary channel sediment, Qaf : Artificial fill.

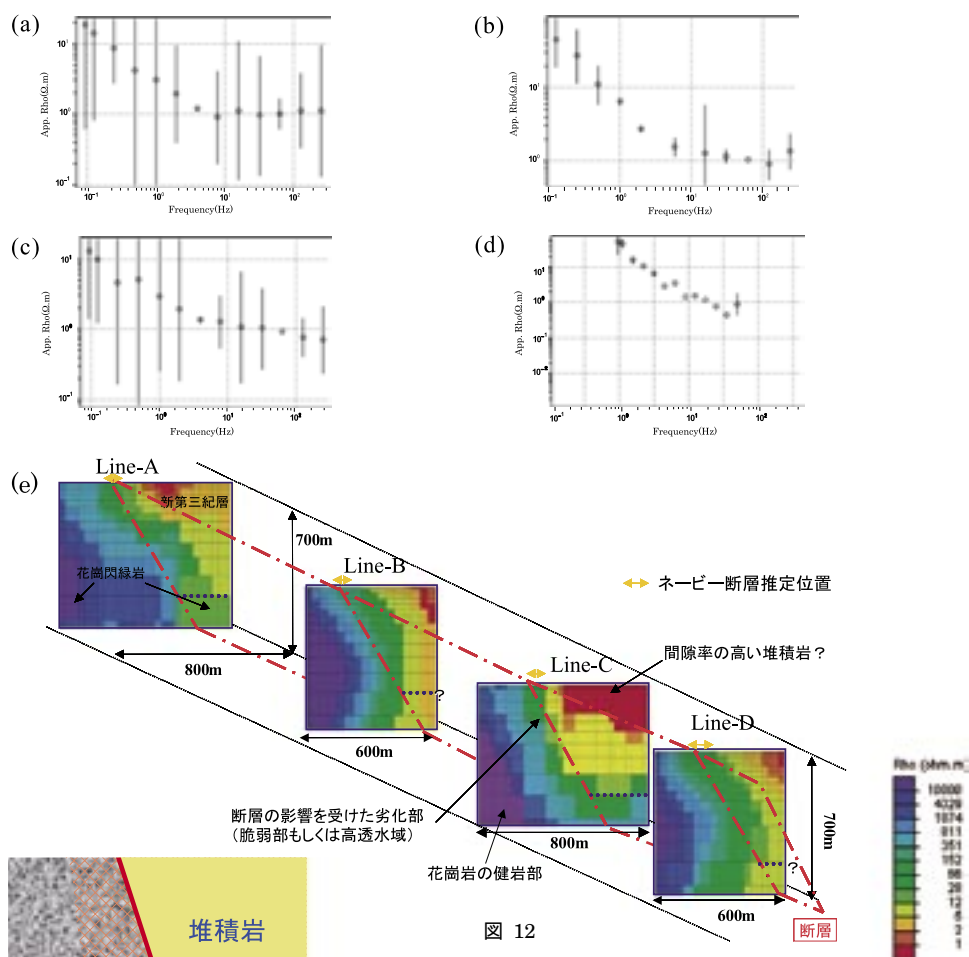


図 12

図 12 電磁法解析結果 . 断層付近の見掛け比抵抗曲線の例 (a) Line-A, (b) Line-B, (c) Line-C, (d) Line-D, 及び (e) 2次元解析結果断面図 . 人工および自然信号を利用した .

Fig. 12 Representation of apparent resistivity section. (a) Line-A, (b) Line-B, (c) Line-C, (d) Line-D, and (e) 2D cross-section. Apparent resistivity representation along Navy fault used artificial and natural electromagnetic signal.

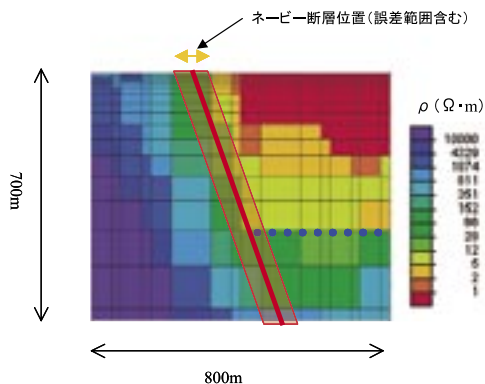


図 13

図 13 電磁法解析結果の解釈 . 150 $\Omega \cdot m$ 付近を境に、比抵抗構造が変化しており、これは堆積岩と花崗岩類への岩相変化に対応するものと解釈される .

Fig. 13 Interpretation of geological structure by electromagnetic method. Resistivity representation describes faces change between sedimentary rocks and granites.

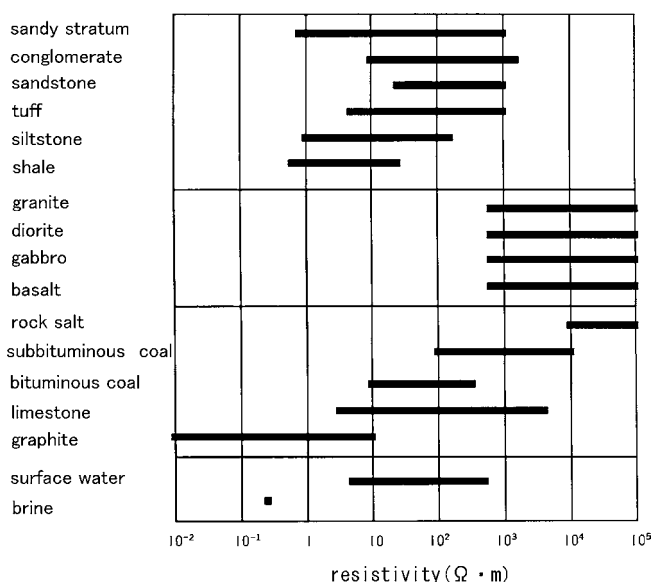


図 14 岩石の比抵抗 (物理探査学会, 1989 より引用)。

Fig. 14 Varieties of rocks resistivity (Society of Exploration Geophysicists of Japan, 1989).

続となる領域が高角度で分布するが、この不連続な領域は各解析断面において同様に現れ、ほぼ同一面上に繋がる (図 12)。

岩石・地盤の比抵抗は、間隙率、水飽和度、間隙水の電気伝導度、鉱物の有する導電性などによって支配されるが (例えば, Archie, 1942; Katsube and Hume, 1983 など) 健全な花崗岩の場合、図 14 に示すように数 100 ~ 数 1,000 $\Omega \cdot m$ 以上の比抵抗になることが一般的なことから (物理探査学会, 1989) 上述の南西部の高比抵抗領域や北東部深部の高比抵抗の領域は、花崗閃緑岩分布域に相当するものと解釈した。一方で、北東部浅部 ~ 中深部の低比抵抗領域は、間隙率の大きな新第三系堆積岩類や第四系被覆層に相当すると思われる。両者を画する 150 $\Omega \cdot m$ 前後の比抵抗不連続の領域は、断層に伴う破碎帯や亀裂質な領域、もしくは断層によって画された花崗閃緑岩 / 堆積岩境界に対応するものと推定され、基本的には断層の地下深部への分布延長を反映しているものと考えられる。そしてこれらの解釈に従うと、断層北東側の堆積岩類の層厚は、概ね数

100 m 程度と見積もられる。また、花崗閃緑岩側は、その中心部は 1,000 $\Omega \cdot m$ 以上の高比抵抗となっており健全な岩盤と考えられること、岩体縁辺部では、風化・変質もしくは亀裂質な岩盤となっていることなどが推定できる (図 13)。

以上のように、海域における電磁法の適用により、

- ・断層の分布位置
- ・断層の地下深部への延長
- ・岩盤の健全度 / 劣化状況

といった当該地域の地質環境の理解に対して、既存資料のみからでは入手困難な有用情報を提供することが可能になった。

IV．地下水の水質情報取得に向けた適用可能性検討

HLW 地層処分事業における地質環境調査では、上述の検討で取り扱ったような断層の位置や性状に関する情報が重要であるほか、特に沿岸域では、塩水と淡水の空間分布に関する情報が重要である。一般的な水質調査では、既存の湧水や井戸、トンネル、調査ボーリング等からの採水及び

水質分析に基づき地下水の水質が検討される。HLW 地層処分事業における地質環境調査では、将来の天然バリアとして期待する岩盤の性能を確保するために、設置できる調査ボーリングに限りのあること、利用できる湧水や井戸の存在は地域依存性が高いことなどから、水質に関しては散在的な情報となることが想定され、数 km² 以上に及び検討対象領域を評価する上で、より多くの情報を取得することは重要な課題である。

既述のように、岩石・地盤の比抵抗を決める要因の 1 つは、間隙水の電気伝導度である。すなわち比抵抗情報の中には地下水の塩濃度に関する情報が含まれている。ここでは、電磁法などによる地下の比抵抗情報に基づき、地下水の塩濃度を評価する手法の可能性について検討する。

1) 既往研究報告に基づくフィージビリティ検討

Archie (1942) によれば、岩石の比抵抗は、基本的に間隙率、水飽和度、間隙を埋めている水の比抵抗に支配され、間隙率を ϕ 、水飽和度を S 、間隙水の比抵抗を ρ_W とすれば、岩石の比抵抗 ρ_R は、

$$\rho_R = a \cdot \phi^{-m} \cdot S^{-n} \cdot \rho_W \quad (1)$$

で表される。ここで、 a 、 m 、 n は岩石の性質に依存する定数であり、 a は迂回係数、 m は膠結係数、 n は飽和係数と呼ばれ、砂岩では $a = 0.5 \sim 2.5$ 、 $m = 1.3 \sim 2.5$ 、 $n = 2$ が適用されることが多い (物理探査学会, 2005)。また、水飽和率が 100% ($S = 1$) のとき、

$$F = \rho_R / \rho_W = a \cdot \phi^{-m} \quad (2)$$

となり、 F を地層比抵抗係数と呼ぶ。地層比抵抗係数は迂回係数と間隙率の関数であり、岩石の間隙の大きさや形状およびその分布状態を反映すると考えられる。

この他にも、石油を胚胎する多孔質な地層を対象として、液相と粘土鉱物のような導電性粒子が並列回路をなすモデルなどが提案されており (例えば Patnode and Wyllie, 1950; Bussian, 1983)、粘土鉱物を含まない岩石や地盤にも、液相との並列回路として固相・液相の境界に形成される表面

伝導現象を考慮した電気比抵抗モデルが提案されている (Katsube and Hume, 1983)。

Katsube and Hume (1983) によると、岩石の比抵抗は、

$$1/\rho_R = 1/F \rho_W + 1/\rho_C \quad (3)$$

$$\rho_C = d \rho_S F \quad (4)$$

$$F = a \phi^{-m} \quad (5)$$

[ここで、 ρ_C : 表面容積比抵抗 (媒質の比抵抗) F : 真の地層比抵抗係数、 d : 間隙の幅、 ρ_S : 表面比抵抗]

となる。

鈴木 (2003) は、わが国の火成岩類や堆積岩類の試料を用いて、間隙水を様々な濃度の KCl 溶液で置き換えた比抵抗測定を実施し、Archie (1942)、Katsube and Hume (1983) の関係の成立する範囲の確認を行っている (図 15)。これによると、火成岩類および堆積岩類に共通して、下記が成立するとしている。

- ・各種岩石の試験を通して得られる測定結果は、Katsube and Hume モデルに基づく岩石試料比抵抗の実験式と整合的である。

- ・岩石試料比抵抗は、間隙水が淡水の領域になると、その比抵抗に関係なく一定となり、表面容積比抵抗の効果が確認された。

- ・間隙水の比抵抗が $1 \Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗の場合、岩石試料比抵抗と間隙水比抵抗の関係は比例関係にあり、この範囲であれば Archie の式が成立する。

2) 電磁法の現地適用試験に基づく可能性検討

上記、既往の研究報告を踏まえ、実際のフィールドにおいて電磁法の適用試験を実施し、地下水の塩濃度を推定する手法を検討した。対象としたフィールドは、北海道幌延町に位置する (独) 日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センター (以下、JAEA) 周辺の地域である。当該地域は、新第三紀の声問層、稚内層といういずれも均質な泥質岩からなる地層が分布する地域であり、地下深部に塩濃度の高い地下水の存在が知られている (核燃料サイクル開発機構, 2005)。現地試験には

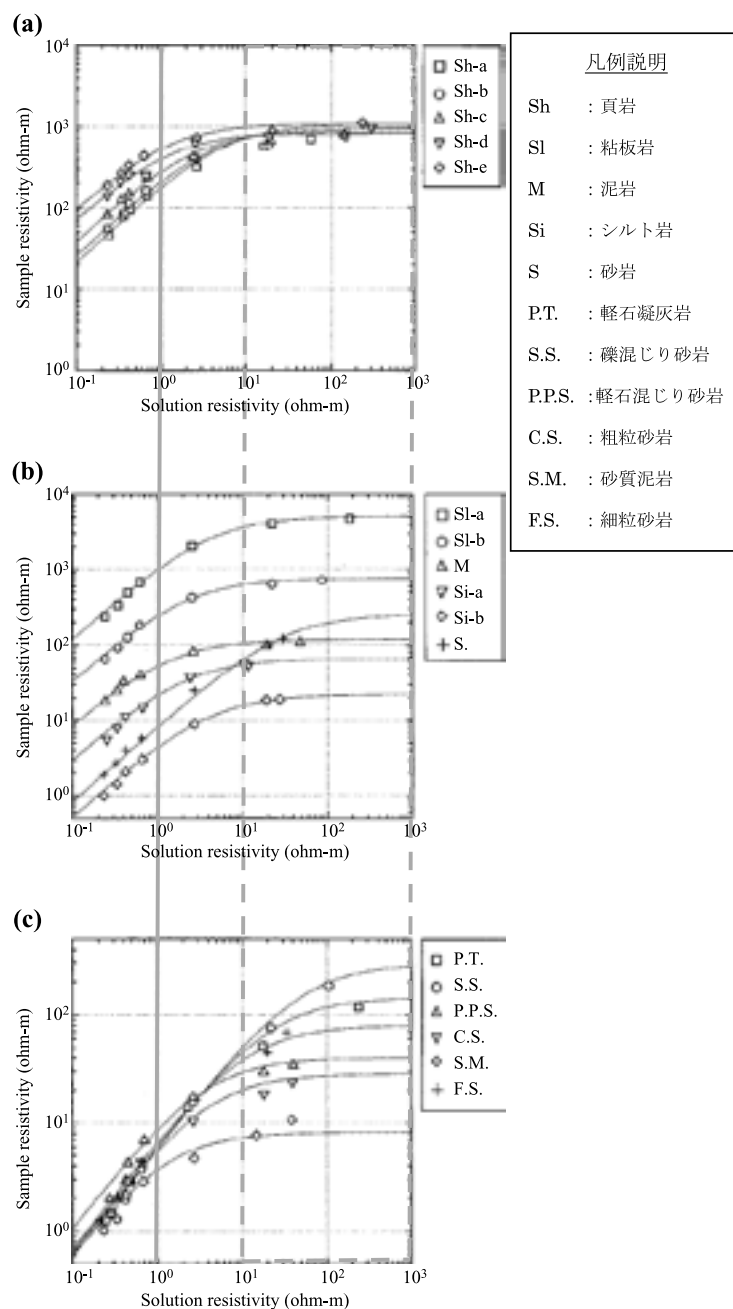


図 15 岩石比抵抗 間隙水比抵抗の関係（鈴木，2003 より引用）．堆積岩の例．図中の実線は，間隙水 $1 \Omega \cdot m$ を示す．それ以下では，Archie (1942) の関係が成立し，岩石比抵抗値と間隙水比抵抗値が比例する．図中の破線は，間隙水 $10 \sim 100 \Omega \cdot m$ の範囲を示す．この領域では，間隙水比抵抗値 (ρ_w) に関係なく，岩石比抵抗値が，ほぼ一定の値を示すようになる．

Fig. 15 Relation between resistivity of rock and that of pore water (after Suzuki, 2003). A solid gray line indicates pore water resistivity of $1 \Omega \cdot m$. This figure shows that resistivity of rock is proportional to that of pore water when pore water resistivity is lower than $1 \Omega \cdot m$, suggesting that the Archie's law is applicable. Broken lines indicate the pore water resistivity of $10 \Omega \cdot m$ and $100 \Omega \cdot m$. In this range of pore water resistivity, resistivity of rock is not sensitive to that of pore water.

電磁法（AMT法）を適用し、「電磁法高度化」の一環として開発した3次元解析コードを用い解析を行った。本解析コードは、解析の3次元化により、断層などの縦型構造をはじめとする地質構造の検出能力を向上させたものであり、地形効果補正などの機能を備えている。なお、本試験は、RWMC-JAEA共同研究の一環として実施しているものであり、解析結果およびその解釈については、妥当性を含めて現在検討中であり、別の機会にて詳述したいと考える。

ここでは、電磁法（AMT法）3次元解析結果から得られた解析グリッドの比抵抗値から、Archieの式に基づいて当該グリッドの間隙水（地下水）の比抵抗値（塩濃度）を推定し、ボーリング孔における地下水サンプルの水質分析（塩濃度）や孔内水電気伝導度検層などの計測に基づく地下水比抵抗と比較することによって、調査技術としての信頼性を検討した。

なお、地下水位以下を検討の対象とし、水飽和度は1とした。また、迂回係数 a に関しては、測定データが得られておらず、当該地域が岩相変化の少ない泥岩分布域であることを考慮し、一律に $a = 0.5, 1.0, 2.0, 2.5$ の値で試算してみた。その結果、 $a = 2.5$ とした場合に推定値と計測値の対応が最もよいことが明らかとなった。迂回係数が比較的大きな値となる理由としては、泥岩の異方性が高く、断層や褶曲構造などの地質構造が影響している可能性などが考えられる。膠結係数 m は、既往ボーリングにおいて地下水の水質変化が少ないと考えられる区間において実施された電気検層結果を岩石の比抵抗 ρ_R 、中性子検層結果等を間隙率 ϕ として推定した。Katsube and Hume（1983）の提唱している表面容積比抵抗に関しては、これを見積もるデータが得られていないことから、今回の検討では考慮に入れないこととした。

電磁法解析結果に基づく推定値と地下水サンプル及び孔内電気伝導度検層結果による測定値の対比を図16に示す。同図から次のことが読み取れる。

i) 間隙水（地下水）比抵抗値 $1\ \Omega \cdot m$ 以下、すなわち塩濃度の高い領域では、電磁法結果に基づく算出値と地下水サンプル・孔内電気伝導度検層結果による測定値とは良好な相関をなす。

ii) 間隙水（地下水）比抵抗値が $1\ \Omega \cdot m$ 以上、すなわち塩濃度の低い領域では、算出値と測定値のバラツキが大きく、概して測定値よりも算出値は低く見積もられる傾向にある。

すなわち、塩濃度の高い領域では、Archie（1942）の式に基づき、電磁法によって得られる比抵抗値から地下水の塩濃度の推定が可能なが示される。また、塩濃度の低い領域で地盤比抵抗からの算出値が低い傾向にあるということは、間隙水比抵抗の影響が小さくなり、代わって表面容積比抵抗の効果が強くなるというKatsube and Humeモデルが成立することが示唆される。地盤比抵抗から塩濃度を推定するためには、別途表面伝導現象に係るパラメータを見積もる必要があるものと考えられる。

以上の検討から、地下水の塩濃度を推定するためには、間隙水比抵抗 $1\ \Omega \cdot m$ 以下の領域では、地盤の比抵抗、地層比抵抗係数、水飽和度が求められれば、地下水の塩濃度が推定できる可能性があると考えられる。このことは、一般的な海水の比抵抗が $0.3\ \Omega \cdot m$ 程度であることから、淡水・汽水領域の下位に存在する海水や古海水、化石海水などを対象とする場合には、電磁法の適用と地層比抵抗係数を推定する他の手法とを併用することで、塩水領域の塩濃度分布や塩水・淡水境界の空間形状が推測できる可能性が示される。迂回係数や間隙率は、一般に岩石種や岩石密度、弾性波速度などとの相関が強い物理パラメータであることから、ボーリングコアに基づく地質区分や岩石試験、検層データ、弾性波探査、トモグラフィなどの調査手法との組み合わせにより推定できる可能性があると考えられる。ただし、これらの手法の合理的な適用方法については、今後の検討課題である。

なお、これまでの検討結果について、電磁法の地質環境調査への適用性という点で整理すると、以下のようにまとめることができる。

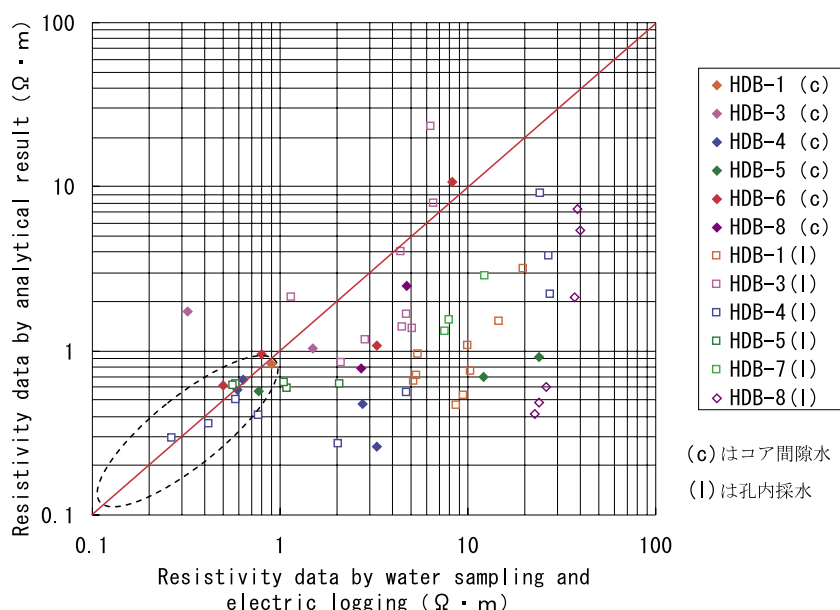


図 16 3次元電磁法解析結果に基づく地下水比抵抗値（推定値）と実測地下水比抵抗値との対比（迂回係数を2.5と仮定）。

Fig. 16 Comparison of resistivity data between electric logging and water sampling in boreholes, based on the analytical results of 3D electromagnetic (The tortuosity was assumed to be 2.5).

i) 淡水の地下水領域では、地盤比抵抗を決める大きな要因は、間隙率や表面容積比抵抗といった地質構成に起因するパラメータであるので、電磁法は、地質分布や地質構造の調査技術として適性が高い。

ii) 塩水の地下水領域では、地質に応じて間隙率が変化する場合でないと地質構造の把握は難しくなる反面、地下水塩濃度を推測したり、塩水分布形状を可視化する調査技術として利用できる可能性がある。

V. まとめ

本研究では、信頼性の高い断層把握手法の開発や地下水理情報の取得を目指し、地質環境調査技術としての電磁法探査技術の高度化を図った上で、米国カリフォルニア州モンテレー湾において断層調査の目的で海底電磁法を適用するとともに、北海道幌延町において地下水水質分布調査へ

の適用に関する検討を行った。

その結果、海底電磁法の適用により、既往調査では周辺の情報からの推定にとどまっていたエリアにおいて、ネービー断層分布の地下への延長、複数箇所での測定による断層の連続性を確認することができた。また、地下深部の岩相分布を推定することが可能になった。さらに電磁法解析結果から得られる比抵抗分布の特徴は、岩盤の硬軟や割れ目発達度、変質の程度、あるいは間隙率や透水性の分布などに関連する情報をもたらす可能性が示唆された。海底電磁法探査の適用結果は、断層の位置情報に関しては沖合のマルチチャンネル式音波探査に比べると精度的に劣るものであるが、音波探査の適用困難な環境（沿岸・結晶質岩域）への適用が可能であり、本手法は、既存調査技術の短所を補う技術として位置づけられる。また、同時に岩盤の性状（例えば、亀裂密度など）に関連する情報が得られるのは、本手法の特徴で

あり、地質環境調査における本手法の適用性の高さを示すものとする。今後は、多様な地質環境への適用試験により実績を蓄積し、本技術の特性、技術的課題を明確にし、地質調査技術としての信頼性を向上することが重要と考えている。

一方、地下水の水質評価への適用に関する検討では、実際のフィールドにおいても、塩濃度分布の高い領域を対象とした水質分布調査の可能性が示されており、引き続き間隙率分布調査などとの合理的な調査技術組み合わせを検討していくことで、有効な技術基盤整備が図れるものと期待される。

謝 辞

本報告は経済産業省からの委託による「地層処分技術調査等」の成果の一部である。また、海底電磁法の機器製作及び試験に関しては、米国スクリプス海洋研究所の Steven Constable 教授には技術協力を得た。現地調査に関しては、AOA Geophysics Inc. の Arnold Orange 氏に協力して頂いた。

本研究開発を進める上で、高精度物理探査技術高度化調査物理探査技術信頼性確認試験検討委員会の主査である京都大学大西有三教授を初めとする委員の方々には貴重なご意見を頂いた。また、匿名査読者からは本稿の改善に有益なコメントを頂いた。ここに記して、以上の方々に感謝いたします。

文 献

- Archie, G.E. (1942) The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Trans. AIME.*, **146**, 56-67.
- Bussian, A.E. (1983) Electrical conductance in a porous medium. *Geophysics*, **48**, 1258-1268.
- 物理探査学会 (1989) 図解物理探査, 239p.
- 物理探査学会 (2005) 新版物理探査用語辞典, 4-5.
- Constable, S., Orange, A.S., Hoversten, M. and Morrison, F. (2000) Marine magnetotellurics for petroleum exploration Part1. *Geophysics*, **63**, 816-825.
- 原子力発電環境整備機構 (2004) 処分場の概要, 高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域の公募関係, 資料-2, 46p.
- Greene, H.G. (1977) Geology of the Monterey Bay Region, U.S. Geological Survey Open File Report 77-718, 347.
- Greene, H.G. and Kennedy, M.P. (1989) *Geology of the Central California Continental Margin*. U.S. Geological Survey.
- Greene, H.G. and Hicks, K.R. (1990) Ascension-Monterey canyon system: History and development. in *Geology and Tectonics of the Central California Coastal Region, San Francisco to Monterey. Am. Assoc. Pet. Geol., Volume and Guidebook*, 229-250.
- 核燃料サイクル開発機構 (2005) 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成17年取りまとめ—JNC TN1400 2005-014, —分冊1 深地層の科学的研究—, 415p.
- Katsube, T.J. and Hume, J.P. (1983) Electrical resistivities of rocks from Chalk River. *Proc. Ws. Geophys. Geosci. Chalk River*, 105-114.
- Patnode, G.E. and Wyllie, M.R.J. (1950) The presence of conductive solids in reservoir rocks as a factor in electric log interpretation. *Trans. AIME*, **89**, 47-52.
- 鈴木浩一 (2003) 結晶質岩および堆積岩試料の比抵抗特性に関する研究—間隙水比抵抗と表面伝導減少が岩石比抵抗に及ぼす影響について—. *物理探査*, **56**, 107-116.
- 吉村公孝・石橋勝彦・中田晴弥・山根一修・吉田裕一 (2002a) 地層処分における海底電磁法の適用. *物理探査学会第107回 (平成14年度秋季) 学術講演会講演論文集*, 102-105.
- 吉村公孝・石橋勝彦・中田晴弥・山根一修・吉田裕一 (2002b) 地層処分における電磁法解析技術の開発. *物理探査学会第107回 (平成14年度秋季) 学術講演会講演論文集*, 106-109.
- 吉村公孝・大久保秀一・中田晴弥・山根一修・吉田裕一 (2003a) 地層処分における海底電磁法機器の製作. *物理探査学会第108回 (平成15年度春季) 学術講演会講演論文集*, 201-204.
- 吉村公孝・大久保秀一・中田晴弥・山根一修・吉田裕一 (2003b) 地層処分における電磁法解析技術の開発 (その2). *物理探査学会第108回 (平成15年度春季) 学術講演会講演論文集*, 205-208.
- 吉村公孝・大久保秀一・林 俊夫・中田晴弥・大里和己・山根一修・中嶋 智 (2004a) 地層処分における海底電磁法機器の製作 (その2). *物理探査学会第110回 (平成16年度春季) 学術講演会講演論文集*, 137-140.
- 吉村公孝・大久保秀一・林 俊夫・中田晴弥・大里和己・山根一修・中嶋 智 (2004b) 地層処分における海底電磁法機器の製作 (その3). *物理探査学会第111回 (平成16年度秋季) 学術講演会講演論文集*, 191-194.
- 吉村公孝・大久保秀一・林 俊夫・山根一修 (2004c) 地層処分における電磁法解析技術の開発 (その3). *物理探査学会第110回 (平成16年度春季) 学術講演会講演論文集*, 141-144.
- 吉村公孝・山根一修・Constable, S.・Orange, A. (2004d) 浅海域での電磁法調査の問題点と対策試案. *物理探査*, **57**, 383-394.

(2006年5月23日受付, 2006年9月22日受理)