九十九里浜沿岸地域における陸上－海底横断電気探査法の適用

上原大二郎*・菊池 晃**・田中篤史**

勝田 充*3・永川 誠*4・大熊 勝*5・渡辺京志*5・光畑裕司*6

要 旨

千葉県九十九里浜沿岸地域において海底電気探査の適用実験を行い、その有効性を検証するとともに、地質構造、地下水構造の把握を試みた。

小型船舶を用いて海底に比抵抗トモグラフィ用ケーブルを敷設し、陸上から連続する測線を設けて 2 極法による高密度電気探査を行った結果、海底測線でも送受信電極間隔 100m 程度まで信頼し得る電位データを取得することができた。このデータを用いて深度 40m までの比抵抗構造を解析した。海底下の比抵抗は深度が増すにつれて高くなり、間隙率の違いを反映しているものと考えられる。局所的に比抵抗が高い箇所があり、淡水性地下水の湧出を示唆する。陸上地表下の比抵抗は深度が増すにつれて低くなる。このことから、地表付近には淡水性地下水、深部には塩水性地下水が存在しているものと推定される。塩水性地下水の起源として現世の海水の浸入と堆積時に取り込まれた化石海水が考えられる。

敷設式の高密度電気探査では基本電極間隔の狭いケーブルを使用することにより空間分解能も向上させることができ、沿岸域の地質・地下水構造調査に極めて有効な手法である。

キーワード：沿岸域・塩水性地下水・敷設式海底電気探査・陸上－海底横断測線

1. はじめに

沿岸域（ここでは、海岸線をはさんだ陸域および浅海域を指す）では塩水性地下水と淡水性地下水が複雑に分布し、近年ではこれを詳細に把握することの重要性が高まっている（Fig.1）。例えば、沿岸域海底では淡水性地下水の湧出が確認されて（例えば、丸井ほか，1999b；徳永ほか，2003）水資源としての利用価値が指摘されている。これと表裏一体の現象として、沿岸域陸側では帯

水層への塩水楔や過剰揚水による地下水の塩水化が 1960～1970 年代に国内で大きな問題となり（例えば村下，1982），近年では地球温暖化による海面上昇が地下水の塩水化をもたらすとして世界各地で問題視されている。また、高レベル放射性廃棄物の地層処分サイトの選定や安定性の評価では地下水による汚染物質の移動の可能性が指摘されていて、「地下水シナリオ」（原子力発電環境整備機構，2003）と呼ばれている。

2007 年 8 月 29 日原稿受付；2008 年 1 月 28 日受理

* 住鉱コンサルタント株式会社
（現）住友金属鉱山株式会社
〒105-8716 東京都港区新橋 5-11-3

** 住鉱コンサルタント株式会社
〒110-0008 東京都台東区池之端 2-9-7

*3 有限会社 シェルパ
〒895-2708 鹿児島県伊佐郡菱刈町川北 2110-1

*4 サン地質株式会社

〒173-0004 東京都板橋区板橋 1-44-13

*5 有限会社 ジャパンアウトドアプロデュース
〒157-0064 東京都世田谷区給田 3-34-1

*6 独立行政法人 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門
〒305-8567 つくば市東 1-1-1 中央第 7

日本地球惑星科学連合 2007 年大会にて一部を発表

Fig.1. Schematic section of the topography and the hydrogeological structure of coastal area, modified from Ookubo and Fujita (1999) and Marui et al. (2001).

Fig.2. Survey line of the marine electrical exploration at the Kujukuri coastal area. BH1 : Observation borehole, W1 : Soil test borehole. The basemap is a 1:25,000 topographic map published by the Geographical Survey Institute.

言うまでもなく、沿岸域の地下水流動は陸域から海域にかけて連続する現象であり、これらの諸問題を議論するためには沿岸域の地下浅部から深部、陸域から海域、という広い範囲で塩水性／淡水性地下水の分布を把握し、

(A)

(B)

Fig.3. (A) Geological map and location of EM sites. S1 – S22 : AMT sites ; S1 – S10 : TEM sites ; G1 : EM profile ; BH1 : Observation borehole. Geological legend --- 1: Beach ridge and dune deposits ; 2 : Back marsh deposits ; 3 : Narita formation ; 4 : Jizodo and Yabu formations ; 5 : Kasamori formation (after AIST-GSJ, 2004) . (B) Resistivity sections obtained by EM profiling (upper), TEM (middle) , AMT (lower) . The upper color scale is for both sections of EM and TEM. The lower color scale is for the section of AMT (Mitsuhashi, 2006). Rectangle in the TEM profiling denotes the range of this study showed in the Fig.9.

その流動を評価することが求められるが、これまでの沿岸域での物理探査事例は陸域（例えば光畑，2006；Mitsuhata et al., 2006）または船舶を使用せずに調査ができる干潟（例えば Taniguchi et al., 2006）に限定されているものが多いようである。そこで本研究は、陸上から海底にかけて連続する横断測線によって同一手法、同一仕様、同一時の物理探査（高密度電気探査）を実施し、その適用性を評価することを第一義とし、さらに、陸域から海域に至る連続断面の中で地質構造と地下水分布を把握することを試みた

沿岸域の海底（Fig.1）にはパー（砂州）やトラフ（深み）が発達し、海底地形は刻々と変化する。また、沿岸流や砕波帯（海岸に沿って波頭が砕けるところ）があって船の速度や方向・姿勢を保つことが困難である。従来行われている曳航式の海底電気探査（例えば井上，2005；高木ほか，2006）では比較的大きな船舶を使用することから汀線付近や水深 10m 以下の極浅海での作業は困難であり、汀線をまたぐ連続データを取得することができない。このことは電気探査によって沿岸域の地下水構造を把握する上では大きな障壁となる。ケーブル敷設方式の海底電気探査は千葉ほか（1998）によって内海で行われた事例が報告されているが、本研究では波浪が高い外海でも適用できるように、小型船舶を測線近傍の浜から直接進水させることによって汀線付近を含む極浅海に安定してケーブルを敷設する方法を考案し、陸上―海底横断測線による高密度電気探査を実現することができた。

2. 調査地域概要

調査位置は千葉県山武市の九十九里浜蓮沼南浜沿岸域（Fig.2）である。九十九里浜平野は縄文海進の最盛期以後、基盤である上総層群の上に、海浜―外浜システムが約 9km 前進することによって形成された（増田ほか，2001）。産業技術総合研究所では、塩淡水境界の形状や境界面上の地下水流動を把握することを目的として本調査地域における調査・研究を行ってきた。丸井ほか（1999a）は深度 200m の観測井（Fig.2 の“BH1”）を掘削し、地質の観察、各種物理検層を行った。その結果、地表から深度 22.1m までは現世の砂丘砂層で、その下位は孔底まで上総層群国本層（更新統）と考えられる粘土・シルト層であった。木山・丸井（1999）は観測井のコアを用いて間隙水の電気伝導度を測定し、深度 30m 付近と深度 165m 以深の間隙水の電気伝導度が高いことを示し、海水が浸入していると推定した。丸井ほか（1999b）は海底の砂中にセンサーを差し込む方法で温度と電気伝導度を計測し、沖合 200m 付近に低温・低電気伝導度となる箇所を見出し、淡水性地下水が湧出している可能性が高いと推定した。

光畑ほか（2006）が実施した土質試験ボーリング（Fig.2 の“W1”）では地表から深度 23.25m までは砂丘砂層、その下位が国本層の泥岩であった。電気検層の結果、深度 15m 以浅は比抵抗 $20 \sim 100 \Omega \cdot m$ 程度の高比抵抗層、深度 20m 以深は比抵抗 $2 \sim 3 \Omega \cdot m$ 程度の低比抵抗層、中間深度は比抵抗が漸移する層であった。

陸上では AMT 法、TEM 法、電磁プロファイリング法が行われている（Fig.3：光畑，2006；Mitsuhata et al., 2006）。地表から深度 20m 付近まではやや比抵抗が高く（ $10 \sim 100 \Omega \cdot m$ 程度）、その下位の深度 20～40m 付近に著しい低比抵抗層（ $1 \sim 2 \Omega \cdot m$ 程度）があることが確認されている。

海上保安庁水路部（2000）の地形・地質調査（音波探査）では、本調査の高密度電気探査測線の沖合、距岸 1.2km 付近で海面から基盤（上総層群）までの深度が 30m 程度、沖積層の厚さが 20m 程度である。ただし、これより海岸寄りの情報は得られていない。

3. 調査方法

3.1 遠電極

本調査では 2 極法による高密度電気探査を行うため、電流用と電位用の遠電極を設けた。土地使用の制約があったため、測線中央から電流用遠電極までの距離は 3.8km、電位用遠電極までは 1.0km であった（Fig.2）。

3.2 測線設定

高密度電気探査測線は陸上測線 360m、海底測線 520m からなり、汀線を挟んで連続している（Fig.2）。基本電極間隔は 20m で、電極番号 1～18 は陸上、19 はほぼ汀線、20～45 は海底にある（Fig.2, Fig.8）。

陸上測線は、ポケットコンパスによる簡易測量を行い、20m 間隔で電極を設けた。各電極位置に長さ 60cm の銅製棒状（S 字型断面）の電極を 4 本挿し、これを銅製網線で互いに結線して 1 つの電極とした（Fig.4(A)）。電極から測定機までは多芯ケーブルによって結線した。

海底測線には（有）アスクシステム製比抵抗トモグラフィ用多芯ケーブル（Table 1）を使用した。このケーブルは補強索付き 30 芯ケーブルを加工したもので、表面に 20m 間隔で長さ 10cm の銅製スプリング状電極（Fig.4(B)）が取り付けられている。1 芯あたりの断面積は 0.3 mm^2 、抵抗は $54 \Omega / \text{km}$ であり、全体の直径は 1.2cm、重さは 250 kg/km である。

安全かつ確実にケーブルを敷設するため、小型船舶（約 2.5 トン；Fig.4(C)）を用いて以下の手順で作業を行った。

- 1) 砂浜の安全な場所にケーブルドラムを据え、金属製の杭で固定する。
- 2) 十分な長さのロープを船に積み、一端を陸上で保持

Fig.4. Photographs of the field work. (A) An electrode point composed of four copper ground rods for the ground surface measurement, (B) a spring-type electrode for the seafloor measurement, (C) a workboat for the cable lying, and (D) laying the cable on the calm sea.

する。ロープを投下しながら船を沖に進める。ロープを使用するのは、直接ケーブルを引っ張ったり、船上にケーブルドラムを置いたりすると、砕波帯で船の姿勢が安定しないときにケーブルが切れたり、ドラムが転倒するなどの事態が懸念されるためである。

3) 予め計算した測線端に向かって、GPS で方向を確認しながら進む。必ずしも測線上を真っ直ぐに進む必要はない。

4) 測線の延長上で錨を投入し、船を停泊させる。

5) 陸上でロープとケーブルを繋ぎ、船上でロープおよびケーブルを巻揚げる (Fig.4(D))。

6) 予定した長さのケーブルが出たことを陸上で確認し、船上に連絡して巻揚げを止める。

7) 船上でロープを切断し、ケーブルの先端に重石を取りつけて投下する。

8) ダイバーが海底のケーブルに重石を取りつけて完成。

海底測線の電極位置は、ケーブル先端の投下位置とケーブルドラムの位置を GPS で計測し、これから内挿して求めた。ケーブル敷設作業と同時に船上から水深を測定 (本多電子 (株) 製測深器 “PS-7FL” を使用) した。また、重石取り付け時に、ダイバーが 60m 間隔で海底付近の海水をポリビンに採取し、電気伝導度を測定 (東亜電波工業 (株) 製電気伝導度計 “CM-21P” を使用) した。

Table1. Specification of the measurement equipments

Transmitter “L-5204”

Made by Yokohama Electric Laboratory
Output voltage : DC40 – 800V
Output current : 0.02 – 4A
Power supply : AC100V, 50/60Hz

Receiver “VM5-105”

Made by Sumiko Consultants Co., Ltd.
Input channel : 105ch
Max. Input voltage : 10V
Resolution : 9.537 μ V
Input impedance : 5M Ω
A/D : 16bit
Filter : Notch filter, Low pass filter
Gain : 1,2,4,8,16,32,64
Power supply : AC100V, 50/60Hz

Cable of sea floor survey line

Made by Ask system Co., Ltd.
30 multi-core cable
Section area of each line : 0.3mm²
Resistance : 54 Ω /km
Withstand voltage : 1,000V
Outer diameter : 1.2cm
Weight : 250kg/km

3.3 保安対策

海上保安庁、漁協等の指導により、以下の保安対策を講じた。

- ・ 船上および汀線付近での作業時にはライフジャケットを着用する。
- ・ ダイバーの安全確保と作業補助のため、ライフセーバーと水上バイクを待機させる。
- ・ 海底ケーブルの敷設位置を警告するため、照明付きのブイを約 200m 間隔で設置する。
- ・ 陸上作業班と船上作業班の連絡のために無線を使用する。
- ・ 陸上部の電極およびケーブルは完全に埋設し、カラーコーンを設置して歩行者および車両に注意を促す。

3.4 測定方法

高密度電気探査の測定は平成 19 年 1 月 16 日に実施した。2 極法電極配置で行い、データ取得には住鉱コンサルタント(株)製高密度電気探査測定装置 (Table 1) を使用した。測定中は送受信波形のチェック、電位の距離減衰のチェックを行ってデータ品質を確認した。矩形波を送信する際、電流の立ち上がり際には過剰な電流が流れることがあるため、送信中期の波形が安定した状態で電位を計測した。横浜電子製電気探査送信機 (Table 1) により印加電圧 200~400V、電流 1~2A 程度 (周期 1 秒, オン: オフ=1:1 の交替直流) を送信し、受信電位は 0.5~100mV 程度であった。総電極数 45 で、全ての電極組み合わせ (45×44) の測定に要した時間は約 1 時間であった。

3.5 解析方法

解析は佐々木 (1988, 1996) の 2 次元インバージョン解析コードを使用して、海水部分をモデルに組み込んで実施した。電気探査測定時は小潮~中潮の満潮前後で、所要時間が約 1 時間であったことから、測定中の潮位変化 (気象庁ホームページ) は 10cm 以下であった。これは電極間隔に対して十分に小さく、補正等はない。また、海底付近で採取した海水の電気伝導率は 5.2S/m でほぼ一様であったことから、インバージョン解析では海水部分を $0.2\Omega\cdot\text{m}$ に固定して解析を行った。

4. 調査結果

4.1 データの品質

本調査地域のような砂浜海岸付近では地盤の比抵抗が低く、観測される電位も非常に小さいことから、S/N の高いデータを取得することは容易ではない。本調査の遠電極と測線の配置では 2 極法電位がマイナスになったり、距離減衰が逆転したりする可能性は低いことから、送受信電極間隔が広い場合にこのような現象が生じているものは S/N が低く信頼できないものとみなした。本調査では陸上測線で $n=9$ 以下 (電極間隔 180m 以下) 程度、海底測線で $n=5$ 以下 (同 100m 以下) 程度が信頼し得るデータが取得できた範囲であった (Fig.5)。これにより期待できる探査深度は海底測線下で 50m 以下程度である。

Fig.5. Samples of the observed potential decay due to the distance. The horizontal axis represents the potential electrode number. The vertical axis represents the observed potential which is normalized by the injected current value. Solid circles and crosses denote meaningful data and negligible data, respectively. Solid inverted triangles in each graph denote the location of shoreline.

Fig.6. Apparent resistivity profiles. The horizontal axis represents the distance of the mid point of current and potential electrodes along the survey line. The vertical axis represents the apparent resistivity value.

Fig.7. Apparent resistivity pseudo sections from the observed data (upper) and the calculated data (lower).

4.2 見掛比抵抗

見掛比抵抗の計算では海水層の影響の除去・補正等は行わず、遠電極も含めた4電極の水平座標で算出した。Fig.6に見掛比抵抗のプロファイル(横軸は送受信電極の中間点、縦軸は見掛比抵抗)、Fig.7上段に見掛比抵抗疑似断面図を示す。

陸上測線では電極間隔が広くなるにつれて見掛比抵抗が低下する。海底測線では逆に電極間隔が広くなると見掛比抵抗が大きくなる傾向にある。これらの特徴は、海水の影響を強く受けていると思われる。すなわち、陸上測線では電極間隔が広がると側方にある海水層の影響が大きくなり見掛比抵抗が小さくなり、海底測線では電極間隔が大きくなるにつれて海水層の影響が相対的に

小さくなり見掛比抵抗が大きくなるものと解釈できる。沿岸域の電気探査では(測線が陸上のみであったとしても)海水層による見掛比抵抗への影響が大きく、比抵抗構造を正確に把握するためには海底地形を取り入れた2次元インバージョン解析を適用する必要があることが分かる。ただし、陸上測線では汀線からの距離に拘らずほぼ同じ変化を示すことから(海水の影響は汀線から離れるにしたがって小さくなるはずである)、鉛直方向の比抵抗変化を捉えたものであるかもしれない。海底測線でも横方向に不均質性があることから海底下の地盤の比抵抗を捉えているものと考えられる。

4.3 2次元インバージョン解析結果

2次元解析で得られた比抵抗モデルを Fig.8 に示す。RMS 平均残差 (佐々木, 1996: 対数見掛け比抵抗の残差の自乗和を観測値数で除して平方根を取ったもの) は 0.06 であった。この解析比抵抗モデルから得られる見掛け比抵抗計算値の擬似断面図を Fig.7 下段に示す。計算値と観測値は調和的であり, 解析結果は見掛け比抵抗観測値を大局的に説明できていると言えるであろう。

Fig.8 上段は陸上の測量結果と, 海底ケーブル敷設時に実測し潮位補正を施した水深による地形断面である。海底の地形は測線距離 520~600m 付近と 770~780m 付近で階段状に深くなっていることがわかる。

Fig.8 中段と下段は共に 2 次元解析比抵抗断面であるが, 下段の図は鉛直方向に 5 倍強調してある。

陸上測線下の比抵抗構造はほぼ水平な層構造である。地表下約 5m 以浅が $100\Omega\cdot\text{m}$ 以上の高比抵抗で, それ以深は急激に比抵抗が低くなって, 標高-40m では $1.5\Omega\cdot\text{m}$ 程度である。

海底測線下の比抵抗構造は電極 28~30 付近を境にして汀線側と沖合側で構造が異なっている。汀線側では海底直下は比抵抗が極めて低く, その下位の中間深度 (海底下 5~15m 付近) にやや比抵抗が高い部分が層状に分布する。その下位は再び比抵抗が低くなる。これに対し

て沖合側では海底直下から深部に向かってほぼ単調に比抵抗が高くなる。 $1\Omega\cdot\text{m}$ のコンターに着目すると凹凸を持ちながら沖合に向かって傾斜するように見える。

5. 考 察

5.1 地質・地下水構造

本調査で得られた陸上－海底横断比抵抗モデルと既往試錐調査結果との比較によって本調査地域の地質・地下水構造についての考察を行う。Fig.9 には観測井 (BH1) の間隙水電気伝導度 (木山・丸井, 1999) から推定した地盤の比抵抗のプロファイルと土質試験ボーリング (W1) の電気検層 (光畑ほか, 2006) のプロファイルを解析比抵抗断面に重ね, さらに両孔で確認された現世砂丘砂層と上総層群国本層との境界 (以下, D-K 境界) を矢印で示した。この図も鉛直方向に 5 倍強調している。光畑 (2006) は本調査地域において TEM 法で推定した地盤の比抵抗を用い, 地盤の間隙率, 迂回係数, 膠結係数を一定とみなし, Archie の式により間隙水の電気伝導度を推定し, これに温度補正を施すと深度 10~50m の範囲では実測された間隙水電気伝導度と良く一致することを示している。本研究ではこれと逆の手順で, 観測井で得られた間隙水の電気伝導度から地盤の比抵抗

Fig.8. The 2-D inversion results (B) and (C) shown with a topographic section (A). (A) and (C) are enlarged vertically five times. Solid circles in (B) and (C) denote the locations of electrodes.

Fig.9. An interpretation on the 2-D resistivity structure. This section is enlarged vertically five times. Profiles of resistivity estimated from pore water conductivity of observation borehole “BH1” and electrical logging of soil test borehole “W1” are projected. Black triangles on profiles : confirmed boundaries of dune deposit and Kokumoto formation (D-K boundary) ; Dashed line : estimated D-K boundary ; Dot-dashed line : estimated boundary of ground water ; White and orange colored arrows : estimated flow of seawater and fresh water

を推定した。

大局的には両孔のプロファイルは3層から成っていると見ることができる。すなわち、地下浅部の高比抵抗層、深部の低比抵抗層、その間の比抵抗漸移層である。観測井では地表下25m以深で低比抵抗の間隙水が確認され、土質試験ボーリングの電気検層では地表下20m以深で電気検層の比抵抗が極めて低くなる。大局的傾向としては解析比抵抗断面の $6\Omega\cdot\text{m}$ 以下の領域がほぼプロファイルの低比抵抗層に相当している。プロファイルではこの上位に漸移層があり、さらに上位に高比抵抗層がある。本調査の解析比抵抗断面ではそれぞれ $6\sim 15\Omega\cdot\text{m}$ 、 $15\Omega\cdot\text{m}$ 以上の領域がほぼこれに相当する。一方、木山・丸井(1999)は観測井の深度30m付近で間隙水電気伝導度が極大となり、深度50m付近まで電気伝導度が低下する傾向にあることから淡水性地下水の存在を指摘したが、本調査結果では深度30m以深も比抵抗はゆるやかに低下している点で相違がある。これは、電気伝導度から推定される地盤の比抵抗が $0.6\sim 1.0\Omega\cdot\text{m}$ 程度で変化幅が小さいことと、電気探査の空間分解能が足りていないことが原因と考えられる。

間隙水の電気伝導度や電気検層値、高密度電気探査から得られる地盤の比抵抗は地下水中の塩分濃度に強く依存しているものと考えられる。すなわち、高比抵抗層は淡水性地下水層、低比抵抗層は塩水性地下水層、これらの間は漸移帯(木山・丸井, 1999)という地下水構造が推定される。推定した地下水境界をFig.9に一点鎖線で示した。比抵抗構造からは、汀線付近を除く陸域の地下水構造はほぼ水平であると推定される。汀線付近では海側に向かって急激に浅くなり、汀線よりも内陸側で地表まで達している。ここはいわゆる“後浜”に相当し、異常高潮や暴浪の際に海水に浸されることから、塩分が残留して低比抵抗化しているものと考えられる。ここから

内陸側約100m程度の間に見られるやや急傾斜する低比抵抗部は、現海水の楔状の浸入を反映したものと推定される。“楔”の上面は観測井ではD-K境界よりも下位にあり、土質試験ボーリングではD-K境界よりも上位にある。かつての侵食面(ラビーンメント)であるD-K境界は海側に緩く傾斜していると推定される(Fig.9中の破線)のに対して、汀線付近の地下水構造は楔状に内陸側に傾斜し、地質境界と斜交しているものと推定される。

この楔状浸入部を除けば陸上測線下の塩水性地下水層はそのほとんどが基盤である国本層中に分布すると推定される。内陸側に広がる塩水性地下水の起源が現海水であるか、化石海水(堆積当時に取り込まれた地層水)であるかを比抵抗構造のみから判断することは困難である。ただし、現在の国本層の透水係数は低い($6\times 10^{-6}\sim 4\times 10^{-5}\text{darcy}$: 丸井ほか, 1999a・木山ほか, 2002)ということ、既往のTEM法の結果では本調査で捉えた低比抵抗層と同一と考えられる低比抵抗層が海岸線から2km以上内陸まで連続して捉えられていて塩水性地下水の存在が示唆されること(Fig.3(B)中段: 光畑, 2006; Mitsuhashi et al., 2006)から、現海水の浸入のみで塩水性地下水の分布を全て説明することは困難と思われる。一方、本調査で得られた海底下の比抵抗構造を見ると堆積時に国本層中に大量の海水が含まれていたことは想像に難くないことから、特に内陸側では化石海水が残留している可能性が考えられる。今後、地下水中の溶存イオン成分や水素・酸素同位体比を用いた地化学的手法(例えば馬原ほか, 2006)によってその起源を検討する必要がある。

海底測線沖合側の比抵抗は海底直下が最も低比抵抗で、海底から深くなると比抵抗がやや大きくなる。比抵抗のコンターは緩く沖合に向かって傾斜しているように見える。陸域では観測井“BH-1”で砂丘砂層と国本層の

間に間隙率の差は認められないが（丸井ほか，1999a），陸化したことがない海底下の沖積層が砂丘砂層や数十万年前に堆積した国本層と同じ状態であるとは考えにくい。実際に本調査地域の極浅海の沖積層は，「漂流砂の変動が最も激しいため，地形の形状は常時変動」（海上保安庁，2000）し，「水深 4～5m 以浅ではバー，トラフ地形の発生，消滅が時系列で見られる」（同）ほど流動的である。従って大局的な比抵抗変化は間隙率の違いを反映したものである可能性が考えられ，海底直下は間隙率が高く現海水を大量に含んだ状態で，海底下深くなるにつれてやや締まって間隙率が低くなってくることを示唆するものと考えられる。

これに対して海底測線汀線側の中間深度（海底下 5～15m 付近）にはやや比抵抗が高い部分が層状に分布する。中でも電極 20，電極 23，電極 27 付近はそれぞれ相対的に比抵抗が高く，このうち電極 27 付近は丸井ほか（1999b）が水温と電気伝導度の測定によって指摘した淡水性地下水の湧出箇所と調和的であることから，淡水性地下水の影響で比抵抗が高くなっている可能性が考えられる。逆に電極 25 付近や電極 29 付近は海水が海底下に浸入する経路のようにも見える。ただし，観測井の間隙水電気伝導度と本調査で得られた比抵抗構造の対比で述べたように上総層群中の塩水性地下水と淡水性地下水による地盤の比抵抗の差が極めて小さいと予想されること，陸域の砂丘砂層と海域の沖積層では間隙率や間隙水の比抵抗が大きく異なると予想されるがこれに関する直接的な情報が乏しいこと，海底下の地下水構造に関する直接的資料がないことなどにより比抵抗構造の解釈は非常に難しい。また，丸井ほか（2001）は 3 回の調査の結果として，淡水性地下水の湧出箇所が時期によって移動している可能性と観測ラインの位置によるばらつきを指摘している。今後，試錐や海底において電気伝導度や水温を計測する直接的手法と陸上－海底連続測線による電気探査を同時に，同一測線で繰り返し実施することにより地下水構造の時間的・空間的变化に明らかにしなければ詳細な議論ができない。

5.2 沿岸域における電気探査の適用性

本調査では基本電極間隔 20m の比抵抗トモグラフィ用多芯ケーブルを利用して海底測線を設けた。その結果，海底測線で送受信電極間隔 100m 程度までは信頼性の高い電位データを取得することができた。基本電極間隔が 20m よりも狭いケーブルを使用すれば探査深度を損ねることなく空間分解能を高くすることが可能である。本調査地域のように淡水性地下水の湧出が想定される場合，湧出位置や海底下での分布をより精度良く推定することも可能であると考えられる。陸上における淡水性地下水と塩水性地下水の分布についても，より詳細な議論が可能になる。既述のような繰り返し測定を行う場合には，

精度良く潮位補正をする手法を確立する必要がある。一方で，沿岸域では比抵抗が低いことから S/N の高い電位データを取得することは難しく，本調査の探査深度は 40～50m 程度であった。探査深度を大きくするためには印加電圧を大きくして，大電流を流して S/N 比を高くすることが必要であるが，環境への影響や保安上の問題，ケーブルの耐電圧性等の制約について，より詳しい研究が必要である。

本調査によって得られた比抵抗モデルと既往の試錐調査の結果を比較すると，土質ボーリングの電気検層と本研究の比抵抗モデルは良く一致するが，観測井の間隙水電気伝導度から推定した地盤の比抵抗と本調査の比抵抗モデルでは大局的な変化傾向は一致するものの，本調査の結果の方が数倍，比抵抗が大きい（Fig.9）。これに対して，光畑（2006）は観測井の間隙水電気伝導度と TEM 法の結果から推定される間隙水の電気伝導度が良く一致することを示している。つまり，本研究の電気探査の結果が TEM 法よりも数倍大きな比抵抗を示している。実施時期や潮位の違い，電気探査と電磁探査の本質的な違いもあることから，現時点では原因を特定することは困難であるが，一つの可能性としては本調査の基本電極間隔 20m に対し，調査地域の比抵抗構造は地表付近（ $100\Omega \cdot \text{m}$ 以上）から 10m ごとに 1 桁ずつ程度比抵抗が低下するというギャップの大きな構造であり，空間分解能が足りていない（地表付近の薄層を評価できていない）という点が考えられる。この点は基本電極間隔を狭くすることによって改善が期待される。

6. まとめ

千葉県九十九里浜沿岸地域において海底電気探査の適用実験を行い，その有効性を評価するとともに地質・地下水構造の把握を試みた。

小型船舶を用いて海底測線を敷設し，地上から海底まで連続横断する測線で高密度電気探査を実施した。これにより送受信電極間隔 100m 程度まで信頼し得る電位データを取得することができた。2 次元解析の結果，海底下にも比抵抗の不均質性があることを確認した。これは間隙率の違いや淡水性地下水の湧出を反映したものである可能性が考えられる。陸上地表下では浅部が高比抵抗を示す淡水性地下水層，深部が低比抵抗を示す塩水性地下水層，その間は漸移帯であると推定される。

陸上－海底横断測線による高密度電気探査は同一手法，同一仕様，同一時の比抵抗モデルが得られることから沿岸域の調査に有効であり，基本電極間隔を狭くすることによって空間分解能をさらに高くすることもできる。また，本研究で考案した手法の特徴の一つは海底測線のケーブルを敷設すれば，従来の高密度電気探査と全く同じ機器，手法によって調査が可能であることから，今後

の適用拡大が期待される。ただし、本研究では基本電極間隔が20mであったため空間分解能が低いこと、汀線を挟んだ（特に海底下の）地下水構造に関する資料が乏しいこと、沿岸域の地下水構造が場所や時期によって変化することなどにより、地質構造および地下水構造に関する詳細な議論は今後の課題である。海底作業による直接的調査手法と陸上ー海底電気探査を同時に、同測線で、繰り返し実施することにより地下水構造の時空的变化を明らかにする必要がある。

一方で地下水の流動や起源に関しては比抵抗構造からは厳密な議論はできない。地化学的手法やシーケンス層序解析などとともに関係的な調査を実施することによって沿岸域の地質・地下水構造が解明されるであろう。

謝 辞

本調査の実施にあたって千葉県山武地域整備センター、千葉県北部林業事務所、千葉県山武市役所、山武市蓮沼商工会、蓮沼漁協、銚子海上保安部、千葉県レクリエーション都市開発株式会社ならびに地元住民の皆様にご協力をいただいた。ここに記して厚く謝意を表す。また、匿名の査読者からは本報告の改善にあたり有益なご教示を頂いた。ここに記して厚く謝意を表す。

本調査は資源エネルギー庁からの受託研究「塩淡水界面形状把握調査」の下で産業技術総合研究所が実施したものである。

参 考 文 献

- 千葉 昭彦・吉田 秀隆・森内 博之・佐々木 裕 (1998): 浅海底電気探査実験, 物理探査学会 第98回学術講演会講演論文集, 177-181.
- 井上 誠 (2005): 海底電気探査システムの開発と適用事例, 物理探査, **58**, 241-250.
- 海上保安庁水路部 (2000): 海底地質構造図・調査報告「九十九里浜」, 沿岸海の基本図 (5万分の1), 第636号5-S.
- 気象庁, 潮位観測資料, <http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/tide/genbo/index.php>.
- 木山 保・丸井 敦尚 (1999): 千葉県蓮沼海浜公園における地下水流動と塩水・淡水境界に関する研究 その2; 1号観測井コアサンプルによる塩淡水境界深度の確認, 地質ニュース, **539**, 47-54.
- 木山 保・佐々木 勝司・松崎 達二・丸井 敦尚 (2002): 上総層群国本層泥岩の室内試験による透水性特性, 平成14年度資源・素材関係学協会合同秋季大会, 45-48.
- 馬原 保典・中田 英二・大山 隆弘・宮川 公雄・五十嵐 敏文・市原 義久・松本 裕之 (2006): 化石海水の同定法の提案ー太平洋炭鉱における地下水水質・同位体分布と地下水年代評価ー, 地下水学会誌, **48**, 17-33.
- 丸井 敦尚・石井 武政・内田 洋平・林 武司 (1999a): 千

葉県蓮沼海浜公園における地下水流動と塩水・淡水境界に関する研究 その1; 研究方針と1号観測井の掘削状況, 地質ニュース, **539**, 47-54.

- 丸井 敦尚・林 武司・内田 洋平 (1999b): 千葉県蓮沼海浜公園における地下水流動と塩水・淡水境界に関する研究 その3; 海底湧出地下水調査, 地質ニュース, **540**, 45-48.
- 丸井 敦尚・今村 杉夫・林 武司 (2001): 浅海部の海底湧出地下水と塩淡水境界形状の関係に基づく地下水流動研究, 地球, **23**, 867-873.

増田 富士雄・藤原 治・酒井 哲弥・荒井 忠・田村 亨・鎌滝 孝信 (2001): 千葉県九十九里浜平野の完新統の発達過程, 第四紀研究, **40**, 223-233.

光畑 裕司 (2006): 電磁探査法による海岸平野における高塩分地下水調査ー九十九里浜平野における例ー, 地学雑誌, **115**, 416-424.

光畑 裕司・青野 泰大・今里 武彦・神宮司 元治・内田 利弘 (2006): 物理探査電磁法による沿岸浅帯水層における高塩分領域調査, 日本地下水学会 2006年秋季講演会講演要旨, 132-137.

Mitsuhata, Y., Uchida, T., Matsuo, K., Marui, A. and Kusunose, K. (2006): Various-scale electromagnetic investigations of high-salinity zones in a coastal plain, *Geophysics*, **71**, B167-B173.

村下 敏夫 (1982): 本邦における地下水の塩水化, 地質調査所月報, **33**, 479-530.

大久保 雅弘・藤田 至則 (1999): 地学ハンドブック(第6版), 築地書館.

産業技術総合研究所地質調査総合センター (2004): 20 万分の1 数値地質図幅集「関東甲信越及び伊豆小笠原諸島」, CD-ROM.

佐々木 裕 (1988): 比抵抗法2次元インバージョンの改良, 物理探査, **41**, 111-115.

佐々木 裕 (1996): 比抵抗法およびCSAMT法2次元探査の分解能と精度, 応用地質, **37**, 19-28.

高木 亮・後藤 忠徳・笠谷 貴史・渡辺 俊樹・岡本 拓・真田 佳典・三ヶ田 均・島 伸和 (2006): 海底電気探査を用いた新潟沖メタンハイドレートの浅部イメージング, 物理探査学会 第114回学術講演会講演論文集, 20-22.

Taniguchi, M., Ishitobi, T. and Shimada, J. (2006): Dynamics of submarine groundwater discharge and freshwater-seawater interface, *J. Geophys. Res.*, **111**, C01008, doi:10.1029/2005JC002924.

徳永 朋祥, 中田 智浩, 茂木 勝郎, 渡辺 正晴, 嶋田 純, 張 勁, 蒲生 俊敬, 谷口 真人, 浅井 和見, 三枝 博光 (2003): 沿岸海底から湧出する淡水性地下水の探査および陸地地下水との関連に関する検討ー黒部川扇状地沖合での例ー, 地下水学会誌, **45**, 133-144.

Application of electrical resistivity measurements along a land-seafloor continuously crossing line in the Kujukuri coastal area, Japan

Daijiro Uehara *, Akira Kikuchi **, Atsushi Tanaka **, Mitsuru Katsuda *³
Makoto Nagakawa *⁴, Masaru Okuma *⁵, Keishi Watanabe *⁵ and Yuji Mitsuhashi *⁶

ABSTRACT

Electrical resistivity measurements crossing a shoreline have been tested in the Kujukuri coastal area in order to estimate geological and hydrogeological structure related to a freshwater discharge and a seawater intrusion. We laid down a multi-core cable equipped with spring-type electrodes for the seafloor measurements and set up a land-seafloor continuous measurement line. The high density pole-pole array was adopted for the data acquisition. The 2-D inversion of the obtained data revealed a resistivity structure transecting the coast at depths up to 40m. The resistivities under the seafloor increase gradually with the depth, and some heterogeneous resistive zones are recognized. They imply a gradual decrease of porosity in the vertical direction and the existence of discharge zones of freshwater, respectively. The resistivities under the ground decrease gradually with the depth, which implies the existence of shallow freshwater aquifer and deep saline water aquifer. It is deemed that the saline water consists of intrusive seawater and trapped fossil seawater. The high density resistivity measurements crossing a shoreline is effective for the estimation of geological and hydrogeological structure in a coastal area. The spatial resolution must be improved by arranging a denser electrode array.

Keywords: coastal area, saline water, laid down cable method, land-seafloor continuously crossing line

Manuscript received August 29, 2007; Accepted January 28, 2008.

* Sumiko Consultants Co., Ltd.
Now at Sumitomo Metal Mining Co., Ltd.
5-11-5, Shimbashi, Minato-ku, Tokyo 105-8716, Japan

** Sumiko Consultants Co., Ltd.
2-9-7, Ikenohata, Taito-ku, Tokyo 110-0008, Japan

*³ Sherpa Co., Ltd.
2110-1, Kawakita, Hishikari, Kagoshima 895-2708, Japan

*⁴ San Geology Co., Ltd.
1-44-13, Itabashi, Itabashi-ku, Tokyo 173-0004, Japan

*⁵ Japan Outdoor Produce Co., Ltd.
3-34-1, Kyuden, Setagaya-ku, Tokyo 157-0064, Japan

*⁶ Institute for Geo-Resources and Environment, National
Institute of Advanced Industrial Science and Technology
Site 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan

A part of this paper was presented at the Japan Geoscience
Union Meeting 2007.