電気探査法と地下水観測による 沿岸域の塩淡水境界面の季節変動解明*

麻 植 久 史¹ 宮 越 昭 暢²
富 森 さ と し³ 丸 井 敦 尚⁴

Clarifying Seasonal Fluctuation of Salt and Fresh Water Boundary by Electrical Survey and Groundwater Observation

by Hisafumi ASAUE^a, Akinobu MIYAKOSHI^b, Satoshi TOMIMORI^c and Atsunao MARUI^b

a. Graduate School of Science & Technology Kumamoto University, Kurokami 2-39-1,
Kumamoto 860-8555, Japan (Corresponding author E-mail: asaue@kumamoto-u.ac.jp)

b. Geological Survey of Japan, AIST, Institute for Geo-Resources and Environment,
Groundwater Research Group

c. OYO Corporation

Water pollution and salt damage are caused by seawater intrusion into coast area. Salt and fresh water boundary fluctuation is a one of an index to detect seawater intrusion. In this research, electrical survey was applied to grasp the salt and fresh water boundary fluctuation. The measurement line was set at southeastern J-PARK in Tokai village, Ibaraki prefecture where is on coast area. The survey was carried out every one to three months during one year. Electrical survey machine was used in this survey so that enough current can flow coast area where is covered by sand layer. As a result, high resistivity zone fluctuates at the 35 m point of east to south in the depth of 12 to 15 m. This fluctuation is clear on dry and rainy seasons. Hence, seasonal resistivity fluctuation is clarified in the coast area. Comparing this fluctuation with precipitation, underground temperature and conductivity, salt and fresh water boundary is extracted from resistivity distributions. From this, underground structure and salt and water boundary model in rainy and dry seasons can be estimated in this site.

KEY WORDS: Resistivity, Electrical Survey, Seasonal Fluctuation, Coast Area, Salt and Fresh Water Boundary

1. は じ め に

沿岸域では海水による塩害や水質汚染が問題となっている。海水の塩分は鉄筋コンクリート構造物や配水管などの腐食、農作物の育成阻害、飲料水・工業農業用水の汚染の原因となる¹⁾。また、海水に多く含まれているフッ素は農作物や飲料水へ蓄積し、人間生命に悪影響を及ぼす。沿岸域に浸入した海水と地下水の境界である塩淡水境界は、陸側の地下水ポテンシャルに伴って変化することが知られているので²⁾、塩淡水境界の長期変動を把握する必要がある。一般に、塩淡水境界は孔内データのモニタリングによって捉えられる。しかし、この手法には多大な時間とコストを費やすので、大規模な調査・対策に限定される。そこで広域かつ深部に至る塩淡水境界調査を効率良く、低コストで実施するために電気探査法と地下温度測定等の地下水観測データに着目した。これらの2手法は互いの欠点を補い合うような特長をもつ。地下水観測データのような実測データは直接的な測定を行うのである程度の定量

的評価が可能であり、簡便であるので定期的な調査に適しているが、鉛直方向のスカラーデータであるため孔井間の連続性が不明瞭となる。一方、電気探査法は沿岸域における塩淡水境界面調査でも用いられており、水平方向の連続性を推定できるが³⁾、比抵抗値は様々な要因により変化するため定量的な評価が困難である。すなわち、電気探査法と地下水観測の併用によれば、水平方向に連続的な解釈できるデータに対し、深度方向に精度の高いデータの適用による解釈精度の向上が可能であり、塩淡水境界面のように季節的に変動する構造を、より詳細に推定できることが期待される。

電気探査法は、水平方向の詳細な比抵抗構造の推定を可能とする。可探深度は測線長や電極間隔、および隔離係数に依存し、精度とトレードオフの関係にある。また、この手法により求められる比抵抗値は、電気の流れやすさを示す指標であり、塩分濃度を良く反映する。この電気探査測線を、塩淡水境界形状面把握調査のための地下水観測井を2本横切るように設定し、得られた比抵抗構造と観測井による地下水観測データを比較する。また、この測定を1ヶ月から3ヶ月ごとに1年間に渡って行い、沿岸域の塩淡水境界面と地下構造を推定する。

本研究では、海水浸入の影響が懸念される茨城県那珂郡東海村を研究対象地域として選んだ。得られた電気探査による比抵抗構造と各種地下水観測データを比較検討し、地下構造や塩淡水境界面変動の影響を抽出する。

* 2008年9月24日受付 2009年4月9日受理

1. 普通会員 熊本大学大学院 自然科学研究科 助教

2. 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 地下水グループ

3. 応用地質(株)

4. 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 地下水グループ
グループ長

[著者連絡先] FAX: 096-342-3688

E-mail: asaue@kumamoto-u.ac.jp

キーワード: 比抵抗, 電気探査, 季節変動, 沿岸域, 塩淡水境界面

Fig.1 Location of study area and setting of a measurement line.

2. 測定地域と測線

測定地は、茨城県東海村（日本原子力研究所）の大強度陽子加速器（J-PARC）南東部（Fig. 1）である。この地域は、2003 年から大強度陽子加速器の建設が開始されており、調査当時も進行していたが、大規模な地下水揚水は終了している。測定地付近は、地下水観測により塩淡水境界面の存在が推定されている。この地域の地層は、上位から沖積砂層、見和層、多賀層に覆われている。見和層は第四系の地層で、上部層、中部層、および下部層と分けられている。砂礫層、砂層および泥質層で構成されており、層厚は上部層が 10 ～ 15 m、中部層が 10 ～ 30 m 程、下部層は最大 40 m と見積もられている。多賀層は、凝灰質シルト岩を主体とする層であり、新第三系に分類されている^{4,7)}。

測線は Fig. 1 のように地下水観測井を通過するように設定した。測定は同じ測線において、2006 年 8 月 24 日、2006 年 11 月 30 日、2006 年 12 月 20 日、2007 年 1 月 16 日、2007 年 3 月 27 日、2007 年 6 月 13 日の日程で、1 ヶ月から 3 ヶ月ごとに 1 年間に渡って行った。2006 年 8 月 24 日のみ測線長が 70m、その他は 130 m であり、90-100 m 地点で道路を横断する。地形は工事のため、ほぼ平坦に整地されている。地下水観測井は 0 m 地点（W06 と W07）と 80 m 地点（W08）に存在する（Fig. 1）⁸⁾。

3. 電気探査法

電気探査法は Schlumberger 兄弟らにより 1912 年に原理が確立された。また、これとは別に Wenner が 1915 年に、比抵抗測定法を考案し、1916 年にウェンナー法を発表した。計測機器については、1925 年に電気探査装置の原型となったギッシュ・ルーニー装置が完成され、1928 年に、これと並んで広く普及したメガー型装置が 1928 年に考案発表された⁹⁾。最近では、エレクトロニクスやコンピュータ技術の進歩により測定装置や解析技術も著しく発展した。これにより、精度と分解能の向上がなされた。電気探査は人工的に電流を流して大地の比抵抗を求める手法である。電気探査で最も重要となる物性が比抵抗あるいは導電率である。比抵抗は物質中の電流の流れにくさを示す固有の物性値であり、単位は $\Omega \cdot m$ である。導電率は比抵抗の逆数で、物質中の電流の流れやすさを示す物性値で、単位は S/m である。

Fig.2 Dipole-dipole electrode arrangement.

沿岸域に存在する本測線は砂層に覆われているため抵抗が高くなり、通常の電気探査装置で用いられる 250 W の電力では出力不足となる。この条件下で流すことの出来る数 mA の電流では、測定データの品質を保つのが困難であるため、1 kW の大電力を使用して、地下深部にまで到達する 200-500 mA の電流を流せるようにした。このために、Iris 社の ELREC 6（測定器）と VIP3000（トランスミッター）を用いた。電極は接地抵抗を下げるため長さ 30 cm で直径 1 cm 程の鉄棒を 1 測定点あたり 3 ～ 5 本使用し、接地抵抗が 10 $\Omega \cdot m$ 以下になるように留意した。電極配置は dipole-dipole 配置を適用した。この配置は Fig. 2 に示すように、一対の電流電極ともう一対の電位電極を離して配列する配置である。電流・電位電極間隔は、電流電極系と電位電極系の距離より小さくなり、ダイポール（双極子）とみなせる。ダイポールである $\overline{C_1 C_2}$, $\overline{P_2 P_1}$ の間隔を a 、 C_2 と P_2 の間隔を a の整数倍 na とすると、見掛け比抵抗 ρ_a は、次式で計算される。

$$\rho_a = n(n+1)(n+2)\pi aV/I \quad \dots\dots\dots (1)$$

V と I はダイポール間の電位差と電流値である。求められた ρ_a 測定値は測線の中心から $(n+1)a/2$ にプロットされる¹⁰⁾。

この電極配置により得られる信号レベルはあまり高くないが、dipole 間の分解能は他の電極配置より優れている。また、水平方向の分解能が高くなる手法であり、IP 法探査ではほとんどの場合この電極配置が用いられる¹¹⁾。沿岸域においては、短期間の変動調査は行われているが^{12,13)}、本研究のような長期間の変動調査は行われていない。

4. 解析結果

測定データを geotomo 社の Res2D によりインバージョン解析して得られた比抵抗断面図を Fig. 3 に示す。便宜上、2006 年 8 月 24 日、2006 年 11 月 30 日、2006 年 12 月 20 日、2007 年 1 月 16 日、2007 年 3 月 27 日、2007 年 6 月 13 日における測線をそれぞれ No. 1, 2, 3, 4, 5, および 6 と呼称する。比抵抗構造は、欠落がない層状構造である。また、比抵抗値は浅部と深部で実数値にして 10,000 倍程の差があり、値の範囲が大きい点の特徴である。No. 1 では、35 m と 55 m の地表面付近で比較的高い比抵抗が深度方向に伸びている。逆に、この上記の地点深部では、低比抵抗帯が浅部に向かって現れている。比抵抗は東側に向かって傾斜するように見える。No. 2 では、35 m 付近に深度方向に伸びる高比抵抗帯が見られる、45 m 付近の深度 12 ~ 15 m の範囲に低比抵抗帯が現れている。No. 3 では、全体的に滑らかな層状構造を示す。他測線と比べ、100 m 付近における波状構造の比抵抗帯が明瞭である。No. 4 では 35 m 付近で No. 1, 2 と同様な高比抵抗帯が現れており、45 m と 80 ~ 100 m の深度 15 m 付近で最も値の低い比抵抗値 $6.3 (0.8) \Omega \cdot m$ 以下のゾーンがみられる。括弧内は常用対数の値であり、以下同様に示す。No. 5 では、他測線と比べて変化の少ない層状構造であり、15 (1.2) $\Omega \cdot m$ 以下の比抵抗帯がほとんど見られなくなる。No. 6 では、地表面に現れている $6300 (3.8) \Omega \cdot m$ 以上の高比抵抗帯が厚く分布する。また、45 m 付近で高比抵抗帯が沈み込むような比抵抗構造が現れている。

5. 考察

本研究により、沿岸域における季節ごとの比抵抗変化を捉えられた。この比抵抗変化と地下水観測によるデータを比較し、塩淡

境界面形状の変化と地下構造を考察する。

この地域に最も近いアメダス気象観測地点である水戸の月別降水量¹³⁾を Fig. 4 に示す。1 月から 4 月まで、および 8 月が乾期で、7 月、9 月、10 月および 12 月が雨期にあたる。これを見ると、比抵抗分布は 12 月や 3 月の様な乾期や雨期の終わりに、水平方向にフラットな構造を示し、降水量が大きく変化する 8 月や 1 月には、波打つような構造を示す。また、8 月や 1 月には、深部で $2.5 (0.4) \Omega \cdot m$ 程度の低比抵抗帯も現れている。次に、日立地域における潮位の変動を Fig. 5 に示す。日立地域には、対象地域に最も近い潮位測点が存在する。降雨の変化量の少ない No. 2, No. 3, No. 4, No. 5, および No. 6 では深部の比抵抗値が潮位の影響を受けている。すなわち、No. 2 では大潮のため潮位が高く、海水の浸入により深部の比抵抗値が低い値を示す。No. 5 と No. 6 では小潮、中潮のため潮位が低く、海水の浸入が少なくなるため、深部の比抵抗値も高くなる。No. 3 は大潮であるが、測定時間帯が干潮で潮位が低いため、深部の比抵抗値が高くなる。これより、雨量の急激な変化が起ると地下水流動が定常から非定常に緩やか

Fig.4 Monthly precipitation in Mito City, Ibaraki pref. by Japan Meteorological Agency.

Fig.5 The water level table on the survey date in Hitachi (Horizontal line is average).

Fig.3 Temporal change of resistivity distributions during one year.

Fig.6 Underground temperature monitoring for a long period at W06 (AIST, 2006).

な変化があり、比抵抗分布も定常の時には、地下水の流動方向である水平方向に卓越した分布を示し、非定常の時には、潮位の変動が強く現れた分布を示すと考えられる。よって、降水量の急激な変化と潮位変動は比抵抗分布の変動に密接な関係があるといえる。

次に、2005年1月から2007年1月までW06で測定されていた深度ごとの温度変化¹¹⁾をFig. 6に示す。地下の温度は深度12～18mで大きく変化している。この深度における比抵抗は、この深度の最大温度直前である1月や最低温度直前である8月で

Fig.7 Electric conductivity profile at W07 (AIST, 2006).
(Number in the circle is same season date as number of the resistivity distribution)

大きく変化しており、温度が安定傾向にある3月や深度25-30mと同等の温度である13℃で安定している。このように地下温度と比抵抗は、温度の高低よりも温度の変動と関連性が深い。また、Fig. 7に示す同地点の電気伝導度⁸⁾でも同一の深度で値が大きく変動している。これより、12m付近は深度方向の塩淡水境界面であると考えられる。

この塩淡水境界面の対応深度における比抵抗分布の水平方向の連続性より、乾期・雨期の塩淡水境界面と地下構造をFig. 8のように推定した。図中の点線は推定塩淡水境界面である。表層の10,000 $\Omega\cdot m$ 以上の高比抵抗帯の存在する深度5m程までは、降雨の影響が少ない乾期の比抵抗分布が地質構造の境界を表すと推定できる。海水の比抵抗は低い値を示すことと、地下水観測データより、乾期に表れている深度12m以深における比抵抗の最低値である2.5 (0.4) $\Omega\cdot m$ は潮位変動に対応すると考えられる。深度12m以浅の比抵抗値は値もさほど小さくなく、変動も小さい。また、地下温度も大きく変動しないため、淡水を含んでいる地層と考えられる。また、東西85~95mの深部にある水平方向にやや広く分布する低比抵抗帯は、他の場所より透水係数の高い構造のため、海水が浸入しやすいと考えられる。これらの推定と地質との関係より、最上位層が沖積砂層にあたり、その下位は見和層であると考えられる。すなわち最上位、中位層がシルト層、最下位が砂礫層である。最下位層は、比抵抗の関係より、西側が東側より砂勝ちの礫層であると見積もられる。

東西45m地点で低比抵抗帯の隆起と、その東側で高比抵抗帯の沈み込みが見られる。また、東西65m地点でも低比抵抗帯が緩やかに隆起している。また、この地域は棚倉構造線の延長線上にあるため、この地点には海水が浸入しやすい断層が存在すると考えられる。東側の断層は、乾期と雨期で低比抵抗帯が上下するため上部層と連続していると考えられる。雨期には、Fig. 8に示すように、この断層を経由する淡水の浸透が推定できる。測定地近傍にある古期砂丘と思われる林からの淡水供給も降雨と共に増大すると考えられ、降雨とこの供給は、透水係数の低いシルト層の下部にある海水との塩淡水境界面を変動させると要因になると考えられる。一方、西側の断層は、乾期と雨期ともに、低比抵抗帯が上向きに分布するため、上部層とは不連続であり、その上部が

Geologic model

E (seaside)

W

Dry season

Rainy season

➡ : fresh water — : fault
 ➡ : sea water : salt and fresh water boundary

Fig.8 Conceptual model on salt and fresh water boundary and its relation to lithofacies.

地質構造の境界であると推定できる。

6. ま と め

本研究は、塩淡水境界面形状の季節変動を抽出するために、茨城県那珂郡東海村において、電気探査法調査を季節ごとに行い、同地点で観測されていた地下水データと比較した。得られた主な成果を以下に要約する。

- 1ヶ月から3ヶ月ごとに1年間に渡って行った電気探査法調査により、季節ごとの比抵抗分布が得られた。これを見ると、東西35m地点で地表から深度7m程にかけて高比抵抗帯が変動しており、45m付近の-12~-15mの範囲で低比抵抗帯が変動している。この変動は、乾期と雨期に大きな差異が表れており、比抵抗分布の季節変動が確認できた。
- 2) 季節ごとの比抵抗分布と地下水観測データと比較した。その結果、比抵抗分布は、雨量の急激な変化と相関性を示した。すなわち、地下水流動が定常の時には、地下水の流動方向である水平方向に卓越した分布であり、非定常の時には、地下構造の影響が強く現れた分布である。これは、地下温度の変動とも相関性を示す。また、地下温度と電気伝導度の変化より深度12m以深に表れる低比抵抗帯が海水に対応すると推定できた。
- 3) 本研究により、地質構造モデルと雨期・乾期の塩淡水境界面を推定できた。すなわち、最上位層が沖積砂層にあたり、その下位は見和層であるシルト層、砂礫層である。また、東西45mに上部層と連続する断層と、東西65m地点で上部層と連続しない断層の存在が推定できた。

謝辞 本研究を進めるにあたり、有益なご意見を頂いた(独)産業技術総合研究所の楠瀬勤一郎氏、調査に同行していただいた応用地質株式会社の中野大介氏に深甚の謝意を表したい。

References

- 1) Murashita, T.: Geol. Surv. Japan., **33** (1982), 479-53.
- 2) Marui, A. and Yasuhara, M.: Hydrology, **29** (1999), 1-12.
- 3) Ishitobi, T., Taniguchi, M., Shimada, J., Takamoto, N.: Proceedings of international symposium on "Interrelations between seawater and ground water in the coastal zone and their effect on the environmental nutrient load toward the sea" (2006), pp.86-91.
- 4) Naruse, H., Kitami, T., Ichimura, T., Kubo, T., Umezu, T., Yokota, K., Tomimori, S. and Marui, A.: Hydrology, **34** (2004), 7-14.
- 5) Sakamoto, T., Tanaka, K., Soya, T., Noma, T. and Matsuno, H.: Geology of the nakaminato district. Quadrangle series scale 1:50,000, Geol. Surv. Japan, 94p.
- 6) Omori, M., Hayama, Y. and Horiguchil, M.: Regional Geology of Japan Part 3 KANTO., (kyouritsu shuppan 1986), 335p.
- 7) Advanced Industrial Science and Technology: Salt and fresh water boundary form grasp investigation report (2005), 279p.
- 8) Advanced Industrial Science and Technology: Salt and fresh water boundary form grasp investigation report (2006), 194p.
- 9) Ishido, T., Katou, S., Kanno, T., Saitou, A., Takakura, S., Nakatsuka, K. and Noguchi, K.: *Geophysical prospecting Handbook*, Chapter 5 electrical prospecting. (The society of exploration geophysics of Japan. 1988), pp. 243-259.
- 10) YOSHIZUMI, E. and SUGANO, T.: BUTSURI-TANKO, **25** (1972), 27-33.
- 11) Tang, X., Ohtoshi, K., Fujiwara, T., ISHII, M. and Oka, T.: Journal of groundwater hydrology, **42** (2000), 223-233.
- 12) Taniguchi, M., Ishitobi, T. and Shimada, J.: Journal of geophysical research, **111** (2006), C01008, doi:10.1029/2005JC002924.
- 13) Japan Meteorological Agency: Meteorological Agency electronic reading room (<http://www.jma.go.jp/>)