

八代海干潟での VLF-MT 探査による湧水検出

笠谷 貴史*・後藤 忠徳*・佐藤 壮**・嶋田 純*³

要 旨

熊本県西部の宇土半島宇城市不知火町の海岸域は国内有数の潮汐変動の大きな地域で、干潮時には最大で 200 m も海岸線が後退して広い干潟が現れる。淡水の湧水がみられる八代海海底および沿岸域での VLF-MT 調査を実施し、得られた見掛け比抵抗と位相差の空間分布から湧水と比抵抗構造との関連を調べた。観測された見掛け比抵抗と位相の分布は、表層の地質分布と良い対応を示したが、非常に限られた 2 つの領域でのみ高比抵抗・低位相の周囲と異なる異常域を検出した。この空間変化は見掛け比抵抗などの時間変化に比べて十分に大きく、観測された空間変化が有意であることが分かる。異常域近傍では常に淡水湧水のある水場やシーページメーターの観測により淡水湧水の存在が確認されている。潮の干満によって地下の構造が大きく変化していることから、地下の淡水の存在が示唆される。よって、VLF-MT 観測で得られたスポット状の高比抵抗・低位相の領域は、淡水の湧水域を捉えたと考えられる。

キーワード：VLF-MT・淡水湧水・比抵抗・八代海

1. はじめに

一般的に淡水と海水との比抵抗値は大きく異なり、海水が 0.25~0.33 Ωm の比抵抗値を持つのに対し、淡水は 50~100 Ωm 程度の比抵抗値を持つことが多い。電磁気学に基づいた探査法は、地盤の電気の通りやすさを調べる探査法である。そのため、淡水と海水の比抵抗値の差を検出することが可能であり、電磁気的手法を用いた沿岸域における土壌への塩水侵入に関する研究が盛んに行われている。例えば、比抵抗法を用いた沿岸域での農地への塩水影響評価（中里ほか、2004）や廃棄物地層処分サイト安定性評価に対する塩水と淡水の挙動把握（光畑他、2003；光畑他、2004）などの研究が挙げられる。光畑他（2004）では海岸近傍の陸域において、AMT 法、Time-domain EM (TEM) 法、電磁プロファイリング法など様々な電磁法による塩淡境界把握に関する研究を行っている。しかしながら、これらの探査はある測線沿いの断面（2次元構造）による評価が多く、3次元的な形状把握は孔井を用いる手法（例えば丸井・林、2001；Hwang et al., 2004）が主である。

熊本県西部の宇土半島宇城市不知火町の海岸域は、国内有数の潮汐変動の大きな地域である。大潮の期間は干

満の差が約 4-5 m に達するため、干潮時の海岸線は海岸より約 200 m 以上も後退し、Fig. 1 の海域のほとんどが干潟として姿を現す。この地域の海岸線近傍の海底では、多くの淡水湧水が見られる。海岸近傍の湧水点（Fig. 1 の Well）では、満潮時に海水下に埋没するにもかかわらず常に淡水の流出が認められる。また、海岸から 100 m 離れたボーリング井戸（Fig. 1 の MP）近傍では、海底から湧出する流体の流出量とその電気伝導度を測定するシーページメーター（例えば谷口ほか、2001）による観測が実施されており、淡水と考えられる低電気伝導度物質の上昇が確認されている（Taniguchi et al., 2006）。

八代地域でみられる様な海底湧水は、世界各地でその存在が確認されており（丸井、1997）、その湧水位置も海岸線に近い浅い海のみならず、海岸線から遠く離れた深海底での湧水の報告もある（Manheim and Paull, 1981；丸井・安原、1999）。海底湧水に関する近年の成果を含めたレビューについては Gallardo and Marui (2006) に詳しい。湧出している淡水は、上流域で涵養された地下水が流下し、それが海岸域で湧出した陸水起源のものとする。陸起源の淡水は海域側の塩水と塩淡境界を形成し、その塩淡境界の地表の先端部が陸域の地

2006年5月12日原稿受付；2006年9月6日受理

* 海洋研究開発機構地球内部変動研究センター
〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町 2-15

** 熊本大学大学院自然科学研究科（現所属 株式会社地圏環境テクノロジー）

〒860-8555 熊本県熊本市黒髪 2-39-1

*³ 熊本大学大学院自然科学研究科

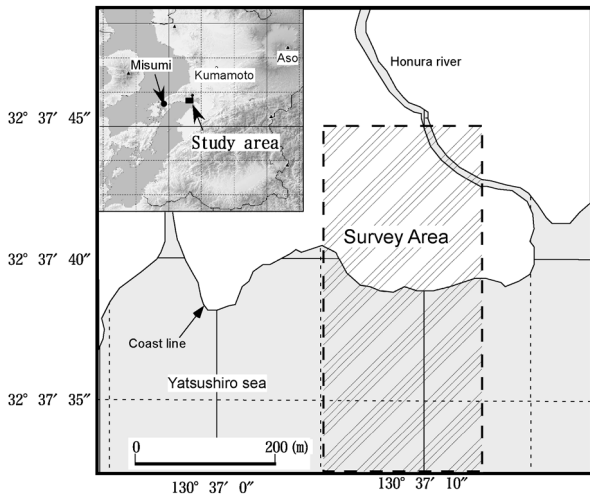


Fig. 1 Study area in Yatsushiro sea. A hatched region shows VLF-MT survey area on land and tidal flat.

下水面と後背地の地下水ポテンシャルの影響を受けて変動しているため、塩淡水境界は海側と押し出されている。これらの塩淡水境界部でおこる現象は Ghyben-Herzberg の法則やそれを応用した Glover の法則により議論されている (Glover, 1964; 丸井・林, 2001; 丸井ほか, 2004)。この海側へ押し出された淡水地下水帯水層から海底湧水が起こると考えられている。しかしながら、海底にある淡水帯水層全面からの湧出に加え、地下構造等に起因すると思われる非常に限定された狭い領域での活発な湧水現象の存在も知られている (例えば Zektzer et al., 1973; 丸井・林, 2001)。したがって、高い観測点密度で面的に電磁探査を行って、淡水性地下水の湧水に伴う比抵抗構造の検出が可能であれば、淡水性地下水の海域への湧出量の推定や水理モデル構築に制約条件を与えることが出来る。

これらの現象は地下の海水・淡水の分布と関係があり、地下の比抵抗構造を明らかにすることは有益である。Figure 2 に示した測線で実施された 2 次元電気探査の結果 (Fig. 3) によると、比較的浅部 (数 m 以深) から淡水と考えられる高比抵抗層が存在し、潮汐変化に伴って比抵抗構造が変化することがわかっている (嶋田ほか, 2003; Shimada et al., 2003; Taniguchi et al., 2006)。しかしながら、淡水と推定される高比抵抗層の水平方向の広がりや、一部で見られる淡水湧水に伴う構造は捉える事が出来ていない。一方で、後述する VLF-MT 法による高密度の水平探査からは海底淡水湧水域周辺における表層付近の空間的な比抵抗構造把握が可能であるので、本稿では淡水湧水と比抵抗構造との対比を VLF-MT 法による観測に基づいて議論する。

2. VLF-MT 探査

本調査の目的は海底湧水と比抵抗分布との関係を調べることであるが、潮汐に伴って塩水と淡水の分布が変化

した結果、比抵抗構造の時間変化が生じる可能性がある。比抵抗分布の空間的広がりを出来る限り短期間に把握するために、VLF-MT 法による電磁探査を実施した。VLF-MT 探査は VLF 送信局からの人工信号源を利用した MT 法の一つであり、人工信号源を利用しているために信号が安定しており、また測定も簡便なため短時間で効率の良い調査を実施する事が出来る (物理探査学会, 1998)。本調査で用いたのはテラテクニカ社製の VL-101 である。この機器は、最小分解能が磁場で 0.3 pT、電場で 1 μ V の性能を有している。測定データはデジタルデータとして内蔵メモリに記録可能で、設定した回数 of 繰り返し測定が可能である。また、メモリ内のデータは RS-232C ケーブルを介して、コンピュータへ転送することが出来る。本装置で信号として用いるのは、宮崎県えびの市に位置する VLF 局から送信されており、周波数は 22.2 kHz である。なお、本調査では電極スパン長を 10 m とした。

VLF-MT は 1 周波数に対する見掛比抵抗と位相差しか分からないが、適当な仮定を与えることで比抵抗構造を定性的にはあるが推定することが可能である。観測は最も干満の差が大きく干潟の面積が最大となる大潮期間 (2004年 7月 29日-2004年 8月 4日) のうちの 3 日間で行われた。干満に伴う比抵抗構造の時間変化が VLF-MT の測定値に及ぼす影響を出来るだけ軽減するため、三角検潮所の潮位変化予測を基に、最干潮時の前後約 1 時間に集中して観測を実施した。1 点の観測にかかる時間は移動も含めて 2~5 分程度である。総観測点数は海域 (干潟) で 101 点、陸域で 22 点に及んだ。加えて、干満に伴う比抵抗変化の量を見積もるために、陸域と干潟域の 3 カ所でそれぞれ数時間の連続測定を実施した。

3. VLF-MT による観測結果

3.1 海域 (干潟) での VLF-MT 観測

観測された見掛比抵抗と位相の分布を Fig. 2 に示す。全体的に見掛比抵抗値が非常に低く、最も低い観測点で約 2 Ω m であった。観測電場の値が最も小さい時でも 80 μ V 程度であり、測器の観測限界より十分大きな値として観測されているので、この低い見掛比抵抗値は有意であると言える。観測領域西側を除くと、このような低い見掛比抵抗値 (10 Ω m 以下) で、かつ位相が 25 度を下回る観測点が広く分布している。このことは、浅部の比抵抗値が著しく低く、深部ほどより高い比抵抗値を持つ層が存在することを示唆する。表層で見られるのは貝殻や風化の度合いの高い粗粒の砂礫がほとんどである。一方で、観測領域の南西部は 30 Ω m 以上の相対的に高い見掛比抵抗値を示すが位相は 45 度に近い値を示す領域となっている。この高い見掛比抵抗領域における表層の岩相は大きな礫が点在し、一部では固結度の高い岩体の露出が見られるなど、観測領域の大部分を占める

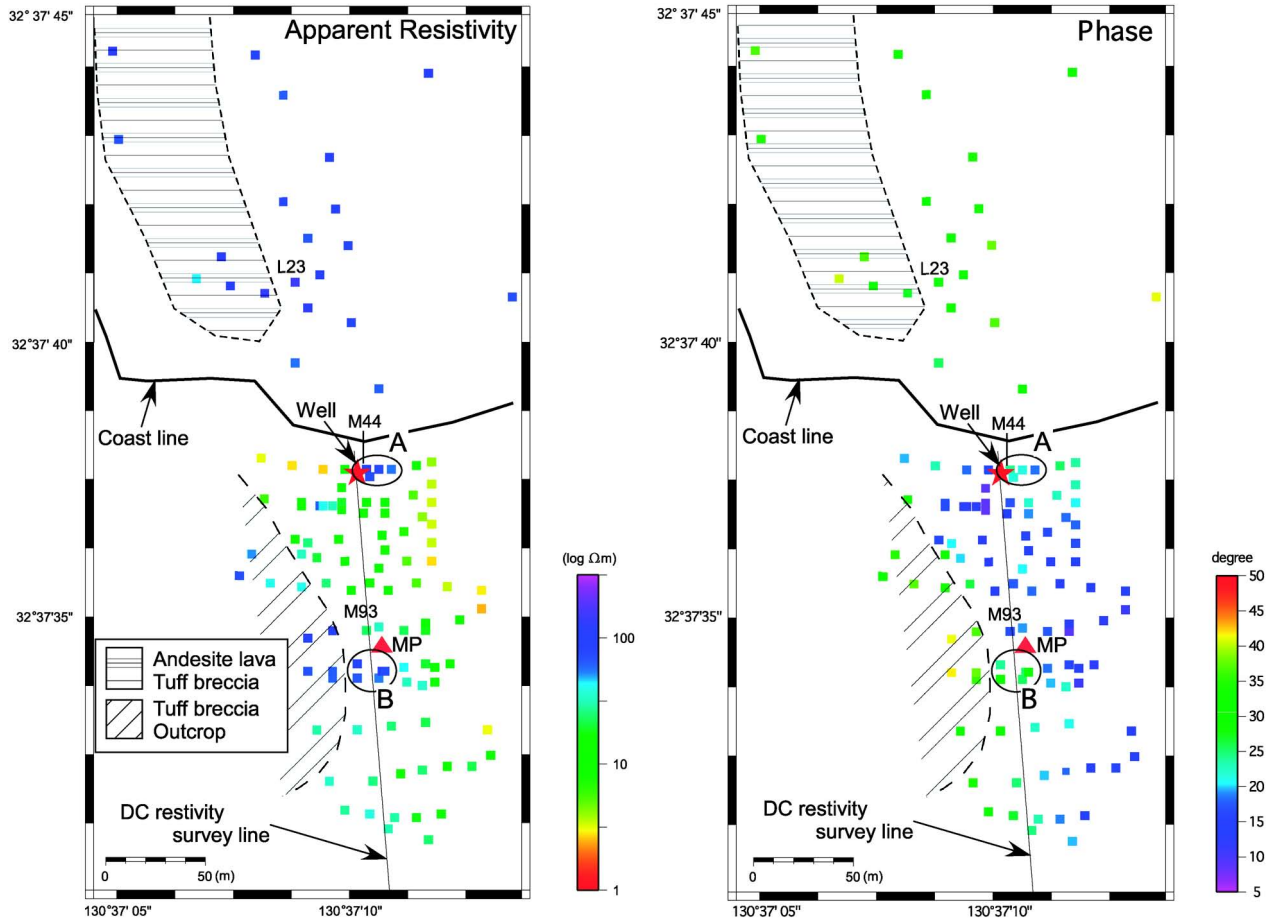


Fig. 2 Apparent resistivity (left panel) and phase (right panel) distribution observed on land and on tidal flat of Yatsushiro sea. Each small color square shows obtained data at each observation point. Observed data in the region A and B indicate anomalous values compared with surrounding area. Red triangle and star show a well with visible fresh water discharge and a borehole respectively.

低い見掛比抵抗領域とは異なっている。

観測領域の大きな見掛比抵抗分布は、上述のように表層の岩相の分布と良い一致を示すが、それらと異なる傾向を示す領域がスポット状に2カ所存在する。一つ目はFig. 2中の領域Aで、局所的に高い見掛比抵抗値(60~90 Ωm)かつ低位相(20~30度)を示す。この付近では淡水が自噴しており、かつては生活用水として使われていた水場が存在する(Fig. 2のWell)。この淡水湧水は満潮時に海面下に没しても、淡水を湧出し続けている。一方、領域Bでも領域Aと同様に高い見掛比抵抗かつ低位相を示し、見掛比抵抗値は50~90 Ωm、位相は25~30度を示した。また、Fig. 2に示した測線において電気探査が実施されている(嶋田ほか, 2003; Shimada et al., 2003; Taniguchi et al., 2005)。

3.2 陸域でのVLF-MT観測

前節の観測域北側の陸域(Fig. 1)において、同様のVLF-MT観測を行った。その結果もFig. 2にあわせて示されている。海域と異なり全体的に空間変化の小さい見掛比抵抗・位相分布である。見掛比抵抗値は海域に比

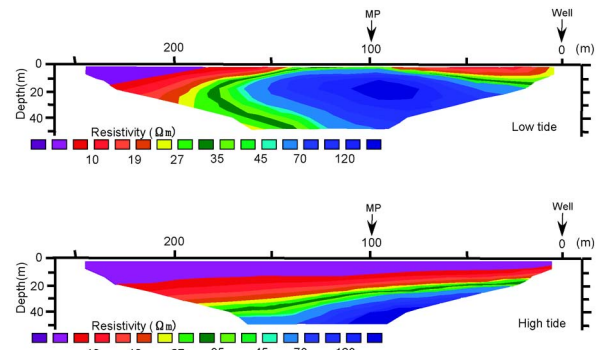


Fig. 3 Resistivity structure deduced by DC resistivity survey (after Shimada et al., 2003). Upper panel shows resistivity image at low tide, and lower panel shows resistivity image at high tide.

べると高く、多くの観測点で50~100 Ωmを示した。位相差は領域全体にわたって30~40度程度を示した。次節に示す連続観測点L23付近でやや高めの見掛比抵抗値(100~150 Ωm)を示す領域があるが、位相の変化は顕著ではない。

3.3 VLF-MT による時間変化の検出

潮汐による比抵抗変化がどの程度あるかを知ること、測定された観測値の空間分布が有意であるかどうかを確認するために重要である。我々は、陸域 (Fig. 2 の L23) および海域 (Fig. 2 の M44 と M93) の観測点において数時間、10分毎にくりかえし測定を行った。それぞれの時刻の測定値は25回測定した平均値とした。これらの観測は8/3に実施され、満潮時にL23で観測を開始し、潮が引くに従いM44, M93と順次移動して観測を行った。Figure 4はそれぞれの観測点での見掛比抵抗と位相差の観測値の時間変化を、熊本県三角検潮所での潮位と共に示している。

L23の測定は満潮時に開始し、測定終了時には防波堤から10m程度離れた所まで潮が引いた状態であった。Fig. 4-1はL23での測定結果で、見掛比抵抗、位相差とも値が上昇傾向を示した。特に見掛比抵抗値は測定開始時から4Ωm上昇しているのが特徴的で、13:00頃に頭打ちになっている様に見える。一方で、位相差の変動は小さい(最大0.6度)。M44での測定開始時は波打ち際が測定点から海側31mの地点にあり、測定終了時には100m(ボーリング井戸M93付近)まで達していた(Fig. 4-2)。見掛比抵抗は2Ωmの増大を示している

が、この時間的変化は見掛比抵抗の空間的な変化よりも小さかった。また、位相は1度弱の減少を示しており、位相の変化の様子はL23と逆センスであった。ボーリング井戸近傍の観測点(M93)での見掛比抵抗と位相差の変化をFig. 4-3に示す。この測定は、観測点から10m海側に波打ち際が位置する状態から最干潮を経て、再び観測点から潮が満ちて波打ち際が観測点から31.5m地点に到達するまで観測を行った。三角検潮所での干潮時刻は17:30頃であるが、観測地点での潮の動きは17時頃から18時過ぎまで、ほとんど停滞していた。見掛比抵抗の変化は緩やかで、最干潮に向かってやや見掛比抵抗値が上昇し、潮が満ちるに伴って徐々に値が小さくなる傾向が見られる。しかしながら、その変動幅は2Ωm以下と小さい。一方で位相差は引き潮時には大きな変化が見られないが、三角検潮所での最干潮後に急に1度の上昇が見られ、潮が満ちてくるのが明らかに目視可能になった18:15過ぎから微減している。本地域での最干潮が17時から18時の間とすると、最干潮の前後で非対称の変化をしていることも特徴的である。

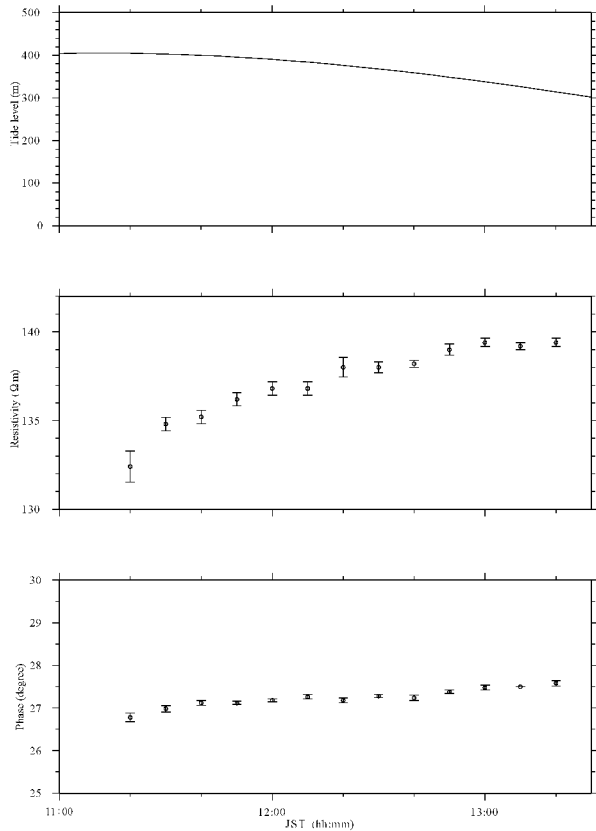


Fig. 4-1 Upper panel shows tide level at Misumi. Middle and lower panel show temporal variation of the apparent resistivity and phase observed on the shore site L23, respectively.

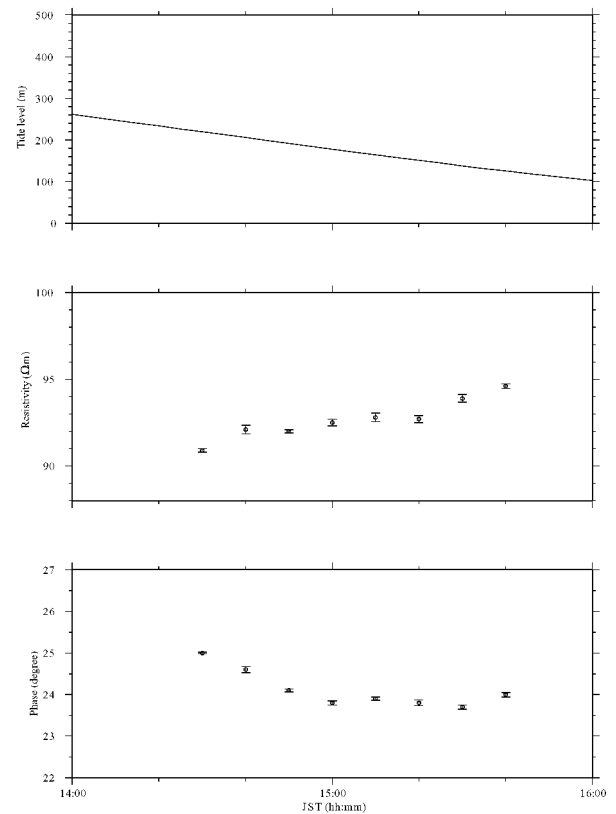


Fig. 4-2 Upper panel shows tide level at Misumi. Middle and lower panel show temporal variation of the apparent resistivity and phase observed on the shore site M44, respectively.

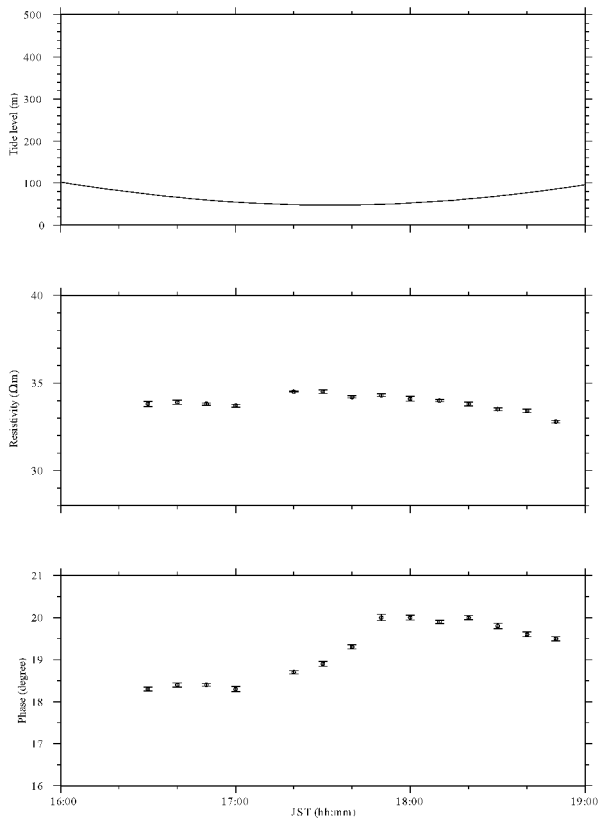


Fig. 4-3 Upper panel shows tide level at Misumi. Middle and lower panel show temporal variation of the apparent resistivity and phase observed on the shore site M93, respectively.

4. 議論・考察

VLF-MT 観測により、観測領域全域での見掛比抵抗・位相分布が明らかになった。まず、海域（干潟）での結果について検討する。海域のほとんどの領域では低比抵抗値が $10 \Omega\text{m}$ 以下で、かつ位相が 25 度を下回る観測点が広く分布しているのが特徴である。比抵抗値が非常に低く、VLF-MT の周波数から計算される表皮深度は $5 \sim 10 \text{ m}$ 程度と浅い。海底に見られるのは貝殻や風化の度合いの高い粗粒の砂礫がほとんどであった。Fig. 2 の MP における 50 m ボーリング調査で得られたコアの分析によると、表層から深さ 60 cm までは貝殻の混じった砂礫層で、それより以深は風化の度合いの異なる安山岩質の凝灰角礫岩層しかみられない（熊本大学・株式会社アバンス、2003）。この砂礫層が干潮時にも海水を多く含み、それが低い見掛比抵抗の要因となっていると考えられる。一方で、観測領域の南西部は $30 \Omega\text{m}$ 以上の相対的に高い見掛比抵抗値を示し、位相は 40 度前後の値を示す領域となっている。この領域には大きな礫岩が点在するか岩体の露出が見られる（図 2 の Tuff breccia outcrop）。この領域で見られる岩体の露出は、ボーリング調査で表層の砂礫層の下位に認められた安山岩質の凝灰角礫岩層と考えられる。この分布は高見掛比

抵抗・高位相領域と良く一致しており、位相が 40 度前後であることから、この領域の構造は同じ層序がより深い部位まで一様に続く構造と推定され、ボーリング調査の結果とも調和的である。これらの事から、観測領域の大まかな見掛比抵抗と位相分布は、表層の岩相と良い一致を示すことが分かる。

ところが、それらと異なる傾向を示す領域がスポット状に 2カ所存在する。一つ目は Fig. 2 中の領域 A で、局所的に高い見掛比抵抗値（ $60 \sim 90 \Omega\text{m}$ ）かつ低位相（ $20 \sim 30$ 度）を示す。この付近では淡水が自噴しており、かつて生活用水として使われていた水場が存在する（Fig. 2 の Well）。この淡水湧水は海水に水没しても淡水を湧出し続けている。次は Fig. 2 の領域 B で、領域 A と同様に高比抵抗かつ低位相で、比抵抗値は $50 \sim 90 \Omega\text{m}$ 、位相は $25 \sim 30$ 度を示した。この異常域は非常に限られた領域のみに存在し、周囲に比べて比抵抗値が 5 倍から 20 倍程度も大きくなっている。観測期間中に繰り返して測定をしたが、ほとんど同じ観測値を示した。また、M44 での連続測定（Fig. 4-2）でも空間変化に比べて時間変化は十分小さく、観測された空間変化が有意であることは明らかである。領域 B の見掛比抵抗値だけを見ると基盤の露出域に近いが、基盤露出域の位相差が 35 度以上なのに対して $25 \sim 30$ 度と明らかに小さかった。いずれの領域とも観測点付近の表層の底質には周囲に比べて大きな差は見られなかった。

このような異常域を形成する要因は何なのであろうか。位相が 45 度以下であるので、定性的には低比抵抗である浅部に対して深部の方が高比抵抗となる構造が推定される。高比抵抗の要因として、表層堆積物下の高比抵抗層の起伏、海水に比べて高比抵抗な淡水が考えられる。前者で異常域の観測値を説明する場合、表層堆積物下の高比抵抗層は観測領域西部に露出している凝灰角礫岩と考えられる。しかしながら、Fig. 3 の嶋田ほか（2003）などによる電気探査の結果によると、干潮時に存在する高比抵抗域が、満潮時には数十 m より深い位置からしか検出されず、逆に表層から深さ 20 m までが $10 \Omega\text{m}$ 以下の低比抵抗領域となる。高比抵抗の要因が凝灰角礫岩のみに依存しているのであれば、高比抵抗部の形状が潮の干満に伴って大きく変化することはないはずである。よって、異常域の観測値を構造の起伏のみで説明するのは難しいと考えられる。

後者の淡水の場合はどうであろうか。Taniguchi et al.（2006）でのシーページメーターによる観測では異常域 B の近傍の観測点でのみ湧水中の淡水寄与率が高い事が確認された。一方で周囲の他の観測点では、淡水の寄与率は顕著ではなく、ほぼ海水と同程度の比抵抗を持つ流体の湧水しかとらえられていない。また、異常域 A の西側にはかつての生活用水であった水場（Fig. 2 の Well）があり、常に淡水をたたえている。海水中に没している時にも、これらの湧水では淡水の湧水があるこ

とが確認されている。つまり、干満にかかわらず淡水の上昇が常にあることを意味する。また、Figure 3の様な干満に伴う短時間での大きな地下構造の変化を説明する場合でも、淡水の流動が比抵抗構造を変化させているとするのが最も考えやすい。これらのことから、表層下に存在する淡水で満たされた層からスポット状の湧水が生じ、高い見掛比抵抗かつ低い位相を示す異常域を作り出していると推察される。

一方、陸域の観測で得られた平均的な沿岸陸域の見掛比抵抗は60-100 Ωm 、位相が30-35度程度であった。連続観測点L23付近の見掛比抵抗が周囲に比べてやや高い程度で、全体的に空間変化は小さい。全ての観測点で位相が45度を上回らないことから、深くなるに従い高比抵抗になることが推測される。また、L23近傍にある井戸水は淡水である。よって、この観測領域内では光畑ほか(2004)や中里ほか(2004)で検出されているような陸域への顕著な海水の侵入はないと考えられる。

観測値の時間変化量は空間変化に比べて十分小さいものであったが、いずれの点でも異なる傾向の変化が見られた。特に興味深い変化を示したのが、M93での干潮前後の記録である(Fig. 4-3)。17:30頃が最干潮であるが、潮の引く時と満ちる時での変化が非対称性を示している事が分かる。この非対称性は、他の測定結果でも検出されている。電気探査では干潮前後の高比抵抗体の形状が異なって見える(嶋田ほか, 2003; Shimada et al., 2003)。また、シーページメーターによる湧出する水の電気伝導度変化にも非対称性が見られる(Taniguchi et al., 2006)。どちらの変化がよりVLF-MTの観測値に多く影響を及ぼしているのかは明確ではないが、観測地域の比抵抗構造が地下の淡水と海水と言う比抵抗の異なる水の影響を大きく受けていることを示唆すると言える。

5. まとめ

淡水湧水がみられる八代海海底および沿岸域でのVLF-MT調査を実施し、見掛比抵抗と位相差の空間分布を明らかにした。観測の結果は表層の地質分布と良い対応を示したが、非常に限られた2つの領域でのみ高比抵抗・低位相の領域を検出した。この空間変化は見掛比抵抗などの時間変化に比べて十分に大きく、観測された空間変化が有意であることは明らかである。異常域近傍では淡水湧水のある水場やシーページメーターの観測により淡水湧水の存在が確認されている。潮の干満によって地下の構造が大きく変化していることから、地下の淡水の存在が示唆される。よって、VLF-MT観測で得られたスポット状の高比抵抗・低位相の領域は、淡水の湧水域(現象)を捉えたと考えられる。

従来の水文学的な調査の中での物理探査法としては、複数測線での2次元電気探査が主に利用されているが、面的な広がり捉える物理探査は行われていなかっ

た。このため、局所的な湧水に伴う構造を捉えることが出来ていなかった。今回のVLF-MT法による観測で局所的な湧水現象に伴うと考えられる異常域の存在を空間的に捉えることに成功した。電磁気的調査が湧水現象の調査に有効であることを示しただけではなく、局所的な湧水等の現象を捉えるためには高密度かつ面的な観測が不可欠であることを示したと言える。このような物理探査により局所的な異常域を絞り込む事ができれば、湧出量や化学的な観測にとって効率の良い観測計画の立案が可能となると考える。

今回の測定は機材の制約から干潮時のみであったが、海中でも3次元探査が実施可能な探査装置を用いることで満潮から干潮に掛けての湧水現象の変動を捉えることが出来るであろう。また、船舶を用いた海底観測が実施出来れば、より沖合の海底湧水の観測も可能になり、水の流れの全体像を推測する上で重要な情報を与えることが期待される。

謝辞

本研究は、科研費基盤研究(A)(課題番号14208064研究代表者:嶋田純)の一部を用いて行われた。匿名の査読者からは、本稿の改善にあたって多くの有益なご指摘をいただいた。総合地球環境学研究所の谷口真人助教授と石飛智稔技術補佐員には、本論文作成にあたって貴重なご意見をいただいた。観測には熊本大学の学生諸氏の多大なる協力をいただいた。神戸大学の山口覚講師には、本観測に対してVLF-MT計をご提供いただいた。

引用文献

- 物理探査学会(1998):物理探査ハンドブック。
 Gallardo, A. H. and A. Marui (2006): Submarine groundwater discharge: an outlook of recent advances and current knowledge, *Geo-Mar lett.*, **25**, 102-113, doi 10.1007/s00367-006-0021-7.
 Glover, R. E. (1964): The pattern of fresh-water flow in a coastal aquifer. In *Sea Water in Coastal Aquifers, U.S.G.S. Water Supply Paper 1613-C*, 32-35.
 Hwang, S., J. Shin, I. Park, S. Lee (2004): Assessment of seawater intrusion using geophysical well logging and electrical soundings in a coastal aquifer, Youngkwang-gun, Korea, *Butsuri-tansa*, **57**, 99-104.
 熊本大学・株式会社アバンス(2003):平成15年度不知火町永尾地区地下水調査業務報告書。
 Manheim, T. T. and C. K. Paull (1981): Patterns of groundwater salinity changes in a deep continental-oceanic transect off the southeastern Atrantian coast of the USA, *Journal of Hydrology*, **54**, 95-105.
 丸井敦尚(1997):海底湧出地下水—新たな水資源としての可能性—, *ハイドロロジー*, **27**, 85-94.
 丸井敦尚・安原正也(1999):塩水—淡水境界に関わる地下水流動研究, *ハイドロロジー*, **27**, 1-12.
 丸井敦尚・林 武司(2001):塩淡境界面の三次元的形状把握に関する研究, *資源と素材*, **117**, 816-821.
 丸井敦尚・楠瀬勤一郎・林 武司(2004):沿岸域の塩淡境界面と地下水流動, *物理探査*, **57**, 351-357.

- 光畑裕司・内田利弘・岸本宗丸・大里和己・丸井敦尚・楠瀬勤一郎 (2003) : 電磁探査法による沿岸周辺地域における地下水帯水層への塩水進入領域調査—その 1—, 物理探査学会第108回学術講演会論文集, 197-200.
- 光畑裕司・内田利弘・松尾公一・大里和己・丸井敦尚・楠瀬勤一郎 (2004) : 沿岸域地下水帯水層における塩水進入領域調査のための電磁探査法の適応実験, 物理探査学会第111回学術講演会論文集, 225-228.
- 中里裕臣・黒田清一郎・竹内睦雄・汪 振洋・轟木良則・樺元淳一 (2004) : 比抵抗モニタリングでとらえられた潮位変動, 物理探査学会第111回学術講演会論文集, 149-152.
- 嶋田 純・渡辺啓介・谷口真人・宮岡邦任・小野寺真一 (2003) : 高密度比抵抗法を利用した海岸付近における潮汐変化に伴う塩淡水境界面の変動の実態把握, 日本地下水学会2003年春季講演会予稿集, 78-81.
- Shimada, J., K. Watanabe, M. Taniguchi, K. Miyaoka, S. Onodera (2003) : Tidal fluctuation of the coastal groundwater seepage revealed by intensive electric resistivity survey, *IUGG2003 abstract*, A. 137-138.
- 谷口真人・石川浩照 (2001) : Measurements of submarine groundwater discharge rates by a continuous heat-type automated seepage meter in Osaka Bay, Japan., 地下水学会誌, **43**, 271-277.
- Taniguchi M., T. Ishitobi and J. Shimada (2006) : Dynamics of submarine groundwater discharge and freshwater-seawater interface, *J. Geophys. Res.*, **111**, doi: 10.1029/2005JC002924.
- Zektzer, I. S., V. A. Ivanov and A. V. Meskheteli (1973) : The problem of direct groundwater discharge to the seas, *Journal of Hydrology*, **20**, 1-36.

Seepage detection using VLF-MT survey on tidal flat of Yatsushiro Sea

Takafumi Kasaya*, Tada-nori Goto*, Sou Sato** and Jun Shimada*³

ABSTRACT

Yatsushiro Sea is one of the high tidal fluctuation areas in Japan, and the water's edge retreats about 200 meters at the low tide. Also there are some submarine fresh groundwater discharge points on the tidal flat of Yatsushiro Sea. VLF-MT survey was carried out to detect some freshwater seepage point on the shore side and the tidal flat of Yatsushiro Sea. In the tidal flat, a lot of observed apparent resistivity and phase values are very low except in the western side. This feature suggests that the deeper part has higher resistivity. The low phase may be caused by fresh water zone. In the western area, observed data show high resistivity, and high phase of more than 35 degrees. Because the basement (tuff breccia) crops out, this characteristic may be caused by this basement. The observed time changes are smaller than detected spatial variation. In addition, two anomalous areas showing high resistivity and low phase are detected in the tidal flat. An anomalous area near the shore side exists on the east side of a well with visible freshwater discharge. Around another 100 m offshore anomalous area, a fresh water discharge was observed by the seepage meter. Therefore, these anomalies are considered to relate to the local fresh water discharges.

Key words: VLF-MT, Freshwater seepage, Resistivity, Yatsushiro sea

Manuscript received May 12, 2006; Accepted September 6, 2006.

* Institute for Research on Earth Evolution, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
2-15, Natsushima, Yokosuka, Kanagawa 237-0061, Japan

©2006 SEGJ

** Graduate School of Science & Technology, Kumamoto University.

now at Geosphere Environmental Technology Corp.

*³ Graduate School of Science & Technology, Kumamoto University
2-39-1, Kurokami, Kumamoto-shi, Kumamoto 860-8555, Japan