

地下水流動に伴う海底自然電位異常検出の試み

後藤 忠徳^{*1} 笠谷 貴史^{*1} 木下 正高^{*1}
三ヶ田 均^{*1} 嶋田 純^{*2} 佐藤 壮^{*2}

海底下の地下水流動に伴って発生する自然電位異常の検出を目的として、2つの基礎的な実験を実施した。まず、調査船「かいよう」KY03-07 航海において、深海曳航時の自然電位測定ノイズレベルの調査を実施した。この結果、曳航体のフレームなどが海水中で腐食する際に発生すると思われる電位が測定時の大きなバイアスノイズやドリフトとなることがわかった。またうねりに伴う水流によって、電極近傍に短周期ノイズが発生することがわかった。次に、浅海(有明海)における海底湧水地域周辺での自然電位観測を実施した。海底に設置する電極のキャリブレーションを観測中も頻繁に実施したことにより、海底湧水に伴うと思われる自然電位異常を検出することができた。これらの実験に基づいて、深海底で地下水流動に伴う自然電位変動を測定するための改良点についてまとめた。

キーワード：地下水流動, 自然電位, ディープトウ, 有明海

Fundamental Experiments for detecting subsurface fluid flow by using marine Self-Potential measurement

Tada-nori GOTO^{*3} Takafumi KASAYA^{*3} Masataka KINOSHITA^{*3}
Hitoshi MIKADA^{*3} Jun SHIMADA^{*4} Sou SATOU^{*4}

Two fundamental experiments related to detection of fluid flow below the ocean bottom by using self-potential mapping were conducted. First, the self-potential measurements by using the JAMSTEC Deep-Tow system were carried out in the KY03-07 cruise of R/V Kaiyo to obtain the noise level at the mapping. Secondary, self-potential mapping at the shallow water area of the Ariake Sea was conducted to detect the self-potential anomaly related to coastal groundwater seepage at the seafloor. The deep-tow experiment shows us a large bias noise and drift possibly generated by electrolytic corrosion of the towed metallic frame and the pressure cases. Also, oscillating noise with period of about 10 seconds was found, possibly generated by water current near the electrodes. The shallow water experiment shows a self-potential anomaly near the seepage area. In addition, frequent calibrations of the electrodes are quite important if we want to measure such a small self-potential anomaly related to subsurface fluid flow. On the basis of these experiments, new designs for ocean bottom self-potential mapping system are proposed.

Keywords : Fluid Flow, Self-Potential measurement, Deep-Tow system, Ariake Sea

* 1 海洋科学技術センター深海研究部

* 2 熊本大学理学部地球科学科水文学研究室

* 3 Deep Sea Reserch Department, Japan Marine Science and Technology Center

* 4 Hydrology Laboratory. Department of Earth Science, Kumamoto University

1. はじめに

地殻内の流体移動の流速や空間スケールを調べることは、熱水地域の地下水流動と生命活動との関係や、海底活断層近傍の地下水流動と地殻活動の関連を議論する際に必要となる。海底下の地下水の流動を捉える手法としては、流量・流体圧・地下水成分などの直接的測定と、熱流量・ガンマ線などの間接的測定を組み合わせる実施することが一般的である。流量・流体圧の直接測定は、海底湧水口や海底掘削孔内などで実施され、地下水流動を議論する際に強い制約条件になる。しかしながら、これらの直接測定を行う場合は、湧水口などになんらかの「蓋」を取り付けて計測を実施するため、「蓋」そのものが地下水流動を妨げないか、また「蓋」と海底面や孔壁のカップリングに問題がないかを十分に吟味する必要がある。それでも海底湧水口や掘削孔の数は極めて限られるために、流量等の直接測定のみを用いて地下水流動の空間的広がりを議論することは難しい。これらの欠点を補うために、地下水移動に伴う温度分布異常の検出を目的として、アレイ状温度プローブを用いた熱流量測定が実施されている。また岩石の割れ目などから放出されるガンマ線異常を測定することもなされている。

しかしながら、これらの間接的手法には空間的に連続したデータを取りにくいという欠点がある。熱流量測定を行うためには、船上からウインチを用いて、あるいはROVや潜水艇を用いて温度プローブを海底に突き刺す必要があり、1点につき最低10分以上の計測時間が必要である。ガンマ線測定についても、センサーを搭載したROVや潜水艇を着底させる必要がある。従ってこれらの手法では空間的に連続したデータをとることは難しい。

一方、自然電位分布異常の測定は、特に活火山周辺や地熱井周辺の地下水流動の情報を得る手法として一般化しつつある。地殻内部で流体が移動すると、界面動電現象によって電場が発生し、結果として観測可能な大きさの自然電位を作り出すことが知られている (Ishido and Mizutani, 1981)。この特性に基づいて、火山周辺では自然電位測定を行い火山体内部の流体流動のモニタリング (例えば Hashimoto and Tanaka, 1995) およびその数値モデル化 (Ishido and Pritchett, 1999) が試みられている。従って海底でも自然電位分布を測定することにより、海底下の地下水流動の情報を取得できる可能性がある。この場合は海水中で自然電位測定を実施すればよいため、ROV・潜水艇・曳航体などに海底電位差計を搭載して曳航調査を実施することで、自然電位分布の空間的なマッピングを実施できると思われる。このため、自然電位分布測定は熱流量測定やガンマ線測定に比べてはるかに高密度かつ広域で地下水流動に関連する情報を得る手法となりうる。

海底下の地下水流動に伴って発生する自然電位の大きさについては、Segawa and Toh (1992) や Jouniaux et al. (1999)、後藤ほか (2003) によって数値解析がなされており、海底下の地下水流動によって観測可能な海底自然電位異常が発生しうることが示されている。一例として、沈み込み帯前縁部での地下水流動とこれに伴って発生する自然電位の数値計算結果例 (後藤ほか, 2003) を図1, 2に示した。後藤ほか (2003) では水深4000mの海底下の地下構造について、図1の灰色部分に透水係数 10^{-15} m^2 ・比抵抗値 $0.9 \Omega \text{ m}$ を与え、それ以外の部分では透水係数 10^{-17} m^2 ・比抵抗値 $0.6 \Omega \text{ m}$ と仮定した。また深さ4800m、水平位置0mの地点での流速が右向きに 10^{-9} m/s になるように圧力源をおき、地下

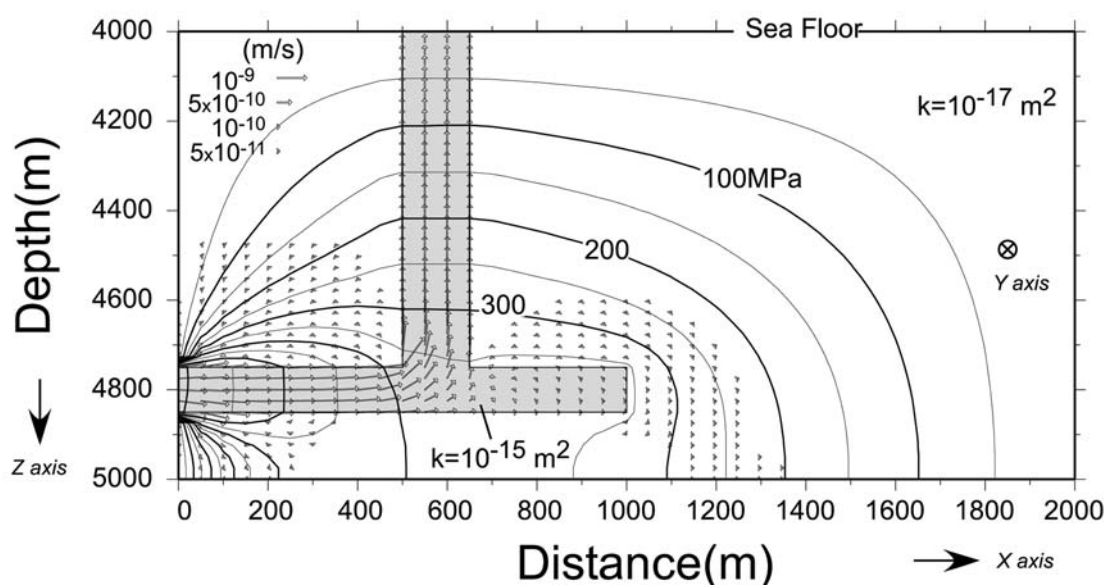


図1 不均質な透水係数構造を持つ場合の地下水の流速 (矢印) と流体圧 (等圧線) 分布 (後藤ほか, 2003による)。白い部分と灰色の部分では透水係数および比抵抗値が異なる。

Fig. 1 Distribution of subsurface fluid velocity (arrows) and pressure (contours) in the assumed permeability model by Goto et al. (2003). The background (white area) and conduit (gray zone) have different permeability as shown.

水流動(図1)および自然電位分布(図2)を計算した。注目すべき点は地下水の流体圧の分布パターンと自然電位の分布パターンが類似しており、圧力源に近い地域ほど負の電位を示すことである。従って海底面や掘削孔(Hole A, B, C)などで自然電位を測定した場合、流体圧の高い場所ほど負の電位を示すことが期待されるため、自然電位の測定から地下水の圧力分布を推定できる可能性が示唆される。

海底での自然電位観測そのものは1970年代頃から行われているが、海底下の地下水流動を目的とした観測例は数少ない。潜水艇を用いた観測例としては、Von Herzen et al. (1996)が挙げられる。またHeinson et al. (1999)は曳航体を用いた自然電位測定を実施している。しかしながら、これらはいずれも2測線程度で実施されたごく試験的な観測であり、地下水流動と自然電位分布の対比にはいたっていない。またHeinson et al. (1999)ではうねりに伴う自然電位測定ノイズが報告されているが、その原因については多くは議論されていない。そこで本研究では、地下水流動に伴う海底自然電位測定の基礎実験として、深海底での自然電位測定時のノイズレベルおよびその原因の解明を行った。また浅海底での地下水流動に伴う海底自然電位測定を実施した。本研究ではこれらの実験の速報的結果を報告し、今後深海底での自然電位測定に必要とおもわれる事項を提案する。

2. 海底自然電位測定時のノイズレベル調査

ROVや曳航体などを用いて自然電位測定を行う場合、どのようなノイズが発生するのか、またそのノイズの原因は何であるのかを事前に知ることは、海底下の地下水流動を調査可能な自然電位分布観測システムの設計および運用にとって必要不可欠なことである。我々は海洋科学技術セン

ター海洋調査船「かいよう」KY03-07航海(2003年7月21日～7月27日)において、7月24日に伊豆小笠原海域(30°50'N, 140°47'E, 水深2520m)で、海底自然電位測定時のノイズレベル調査を実施した。当日の天候は晴れ、海況は風速約5m, 流速約1knt, 波高約2m(午前11時時点)であった。

本実験では、自己浮上式として開発を行った海底電位差計(写真1中央)および銀-塩化銀非分極電極(写真2)を使用した。海底電位差計(クローバーテック製)は直径17インチの6000m耐圧ガラス球に収められており、4chの増幅器および記録計からなる。電源のOn/Offやサンプリングレート、スタート時刻などはガラス球外部から設定可能である。本実験では海洋科学技術センター所有の6000m級ディープトウ(深海曳航体)に海底電位差計および電極4本を取り付けて(写真3)、GNDとCh1(電極間隔4m)、Ch2(電極間隔3m)、Ch3(電極間隔2m)の電位差の毎秒値を記録した。

KY03-07航海では自然電位ノイズレベル調査のため、以下の3回のディープトウのダイブを実施した。DT-6CなどはKY03-07航海でのダイブ番号を示す。

- 1) DT-6C: 水深500mで定点保持時の自然電位ノイズレベル測定
- 2) DT-7C: 水深500mで定点保持時の自然電位ノイズレベル測定(CTDなどの電源OFF状態で計測)
- 3) DT-8C: 水深1000mで曳航時の自然電位ノイズレベル測定

各ダイブの詳細については表1を参照いただきたい。これらのダイブはDT-8Cの後半を除いて、海底からは1500m以上の高度を保ち、海底での地下水流動により発生する自然電位の影響の及ばない環境で実施した。従ってここで記録される電位差は地下水流動に伴う自然電位とは無関係

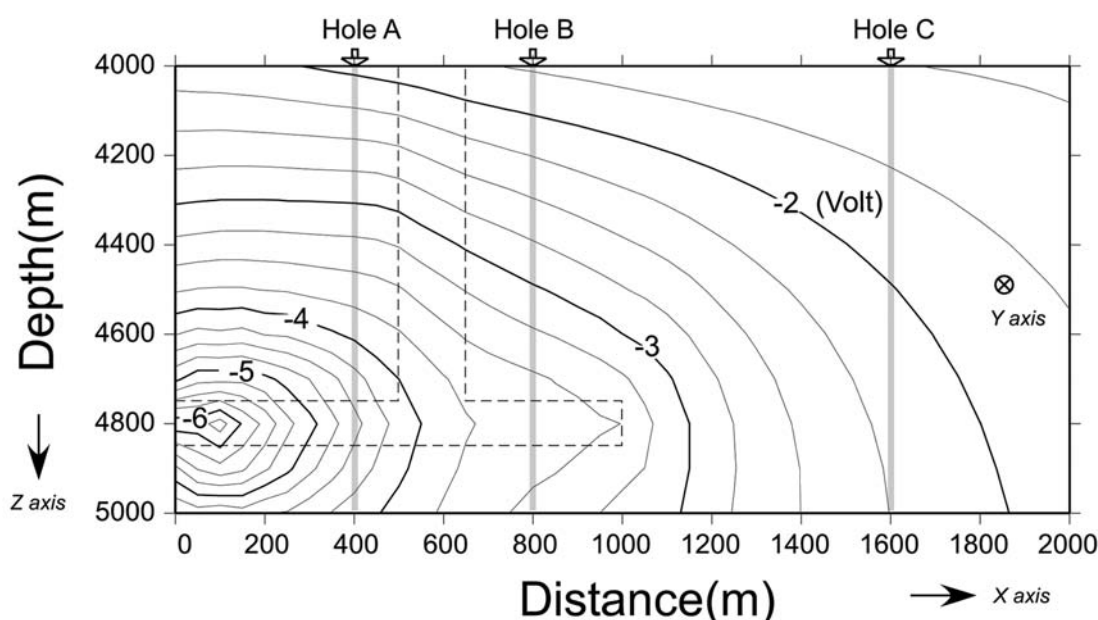


図2 図1の流体圧分布によって発生する自然電位分布(後藤ほか, 2003)。点線は透水係数の高い地域を示す。

Fig. 2 Self-potential distribution generated by pressure distribution in Fig. 1 (unit in volt; Goto et al., 2003). A dashed line shows the high permeability region as shown in Fig.1.



写真1 海底電位差計(中央)を用いた電極安定試験の様子
Photo 1 Ocean bottom Electrometer (or voltmeter: center) at the stability test for electrodes.

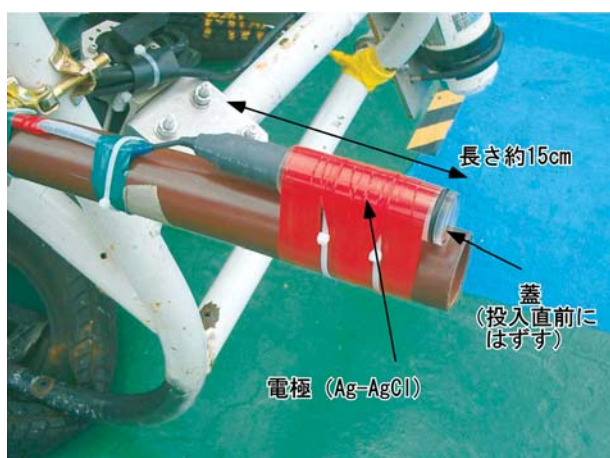


写真2 銀-塩化銀非分極電極
Photo 2 Ag-AgCl electrode

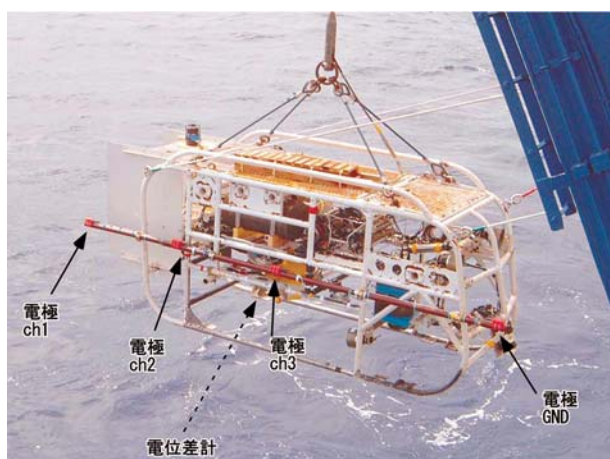


写真3 海底電位差計および電極を装備した6000m級ディープトウ (DT-6C)
Photo 3 The 6000 m-class deep-tow system with the ocean bottom electrometer and the electrodes

表1 KY03-07航海におけるDT-6C～DT-8Cのダイブログ

Table 1 Dive log at DT-6C, 7C and 8C in the KY03-07 cruise

7/24	09:00LT	DT-6C着水 (自然電位測定試験：定点保持)
	09:17	水深500mでウィンチ停止、15分間定点保持
	09:33	巻き上げ開始
	09:50	DT-6C揚収
		データの吸い上げ、チェック
	11:00	DT-7C着水 (自然電位測定試験：定点保持)
	11:18	水深500mでウィンチ停止、定点保持開始
	11:33	ディープトウの電源 (カメラ・CTDなど) をOff
	12:30	ディープトウの電源をOn。巻き上げ開始
	12:50	DT-7C揚収
		データの吸い上げ、チェック
	13:33	DT-8C着水 (自然電位測定試験：曳航試験)
	14:02	水深1000mでウィンチ停止
	14:17	曳航開始。船速0.5knt (対地) まで上げる 南から北へ約30分曳航
	14:49	180度回頭開始
	15:07	180度回頭終了 北から南へほぼ同一測線を約30分間、再び曳航
	15:41	定点保持開始。ウィンチ繰り出し
	16:22	海底視認 (水深2500m)
	16:49	高度10m程で定点保持
	17:00	巻き上げ開始
	18:05	DT-8C揚収

であるため、これらの実験で得られる電位差データからディープトウ曳航時に発生する自然電位測定時のノイズの大きさを知ることが可能である。

銀-塩化銀非分極電極は、海水に対する接触電位差に個体差がないように設計されているものの、実際には数十 μ V～数mVの電極間電位差を生じる。このため、DT-8C終了後は電極を海水入りバケツに浸して約2日間電位差測定を実施した。本来は電位差のない環境であるため、このときの測定値を電極間電位差のキャリブレーション値と考えることとした。またKY03-07航海では、水流に対する電極の安定性を調べる実験(写真1)を甲板上で行った。まず長さ約1mの細長いパイプに海水を満たしておき、その中に2本の電極を浸した。次に片方の電極をパイプ中で1m/秒程度の速度で上下させて、電極間の電位差を海底電位差計で記録した。

3. 浅海域での海底自然電位測定

次に海底電位差計を用いて地下水流動に伴う自然電位異常を検出可能かどうかの実海域試験を実施した。本研究では、海底湧水が認められており、耐圧容器や大型の調査船が不要な浅海域で試験を行うこととし、熊本県不知火町永尾地区沖の有明海(水深1.5～3m)を調査海域に選んだ。本地域では現在、山体基盤岩地下水流動の実態解明

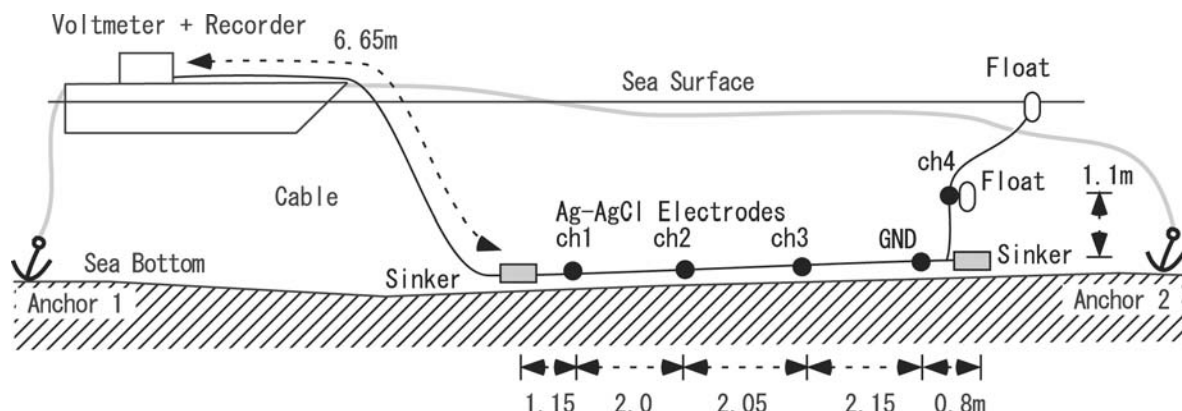


図3 有明海における海底自然電位観測の模式図

Fig. 3 Schematic drawing of marine self-potential measurement at the shallow water depth in the Ariake Sea.

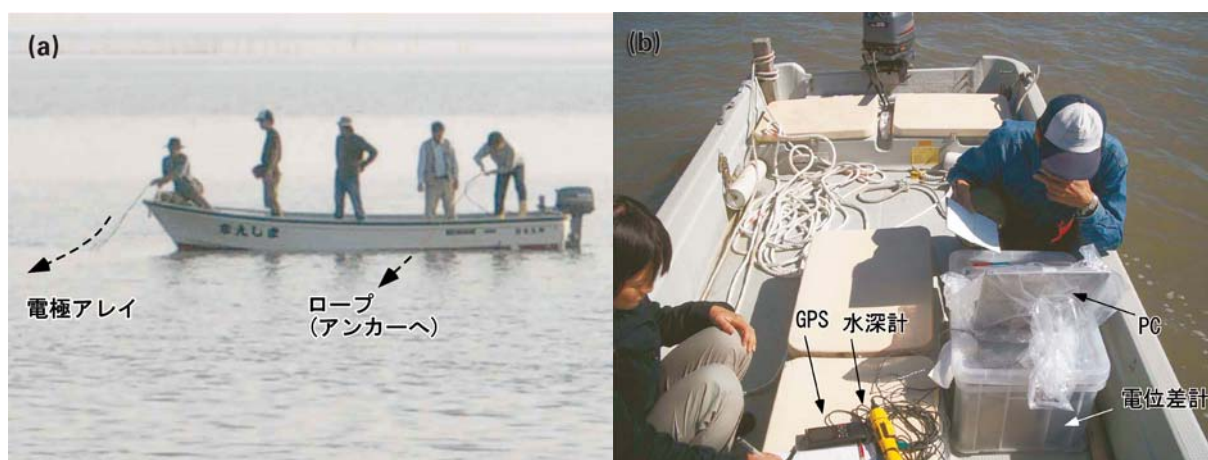


写真4 有明海での海底自然電位観測の様子。(a) 小船による観測の様子, (b) 船上の様子。

Photo 4 Marine self-potential measurement in the Ariake Sea. (a) a ship used for this experiment and (b) instruments aboard.

を目指して陸域~海域にかけて水文学的手法や地球物理学的手法などを用いた地下水流動の観測・解析がなされている(嶋田ほか, 2003)。このうち海域においては、高密度の繰り返し電気探査の結果、潮の干満に伴う海底下の比抵抗構造の時間変化が検出されており、陸水起源の淡水が海底(満潮時の海岸線から約100m沖)で湧出していることが示唆されている(Shimada et al., 2003)。またボーリング調査、シーページメータ、海水pH・温度のマッピングなどによってもこの海底湧水は確認されている(嶋田ほか, 2003)。

海底自然電位観測は海底電位差計(テラテクニカ製)および銀-塩化銀非分極電極を用いて実施された(図3)。測定前にまずアンカー1および2を海底に設置して船体を安定させた後に、船首から電極とケーブル(以後、電極アレイと呼ぶ)を海中に投入しつつ、船を後進させた(写真4a)。これによりできるだけ真っ直ぐに電極アレイを敷設した。測定時は電極アレイを海底に固定させて、GND電極と各電極間の電位差(図3; 水平3ch+鉛直1chの合計4ch)を8Hzサンプリングで測定し、海底電位差計内部のメモリーカードに記録した。同時にPCで測定値をモニターして、値の安定性を

チェックした。また2章と同様に電極間電位差をキャリブレーションするために、船上に海水を入れたプラスチックケースを用意して、測定前後の電極アレイをケースに浸して電位差を継続測定した。このときの電位差は本来ゼロになるはずであるので、この値を電極間電位差のキャリブレーション値とした。電極アレイ投入前と設置後には、小型のGPS受信機を用いて船の位置を記録した(写真4b)。また水深計を用いて船の直下水深を測定した。このほかに船首から電極アレイの伸びる方向をクリノメータで測定した。これらから電極アレイの位置を求めることとした。

野外観測は2003年10月22日~24日に実施された。観測には熊本大学沿岸域環境科学教育研究センター所有の小型ボートを使用した(写真4a)。自然電位分布測定を行う前に、10月22日には同海域で、23日には同沿岸で自然電位測定システムの動作試験を実施した。23日には波打ち際において、同じ場所で電極の設置・回収を数回繰り返して電位差測定を行い、測定値の差が0.2mV以下であり再現性のあることを確認している。またこのとき、高圧線からの誘導電流と思われる微弱で規則的な電位差変動(振幅5μV以下)

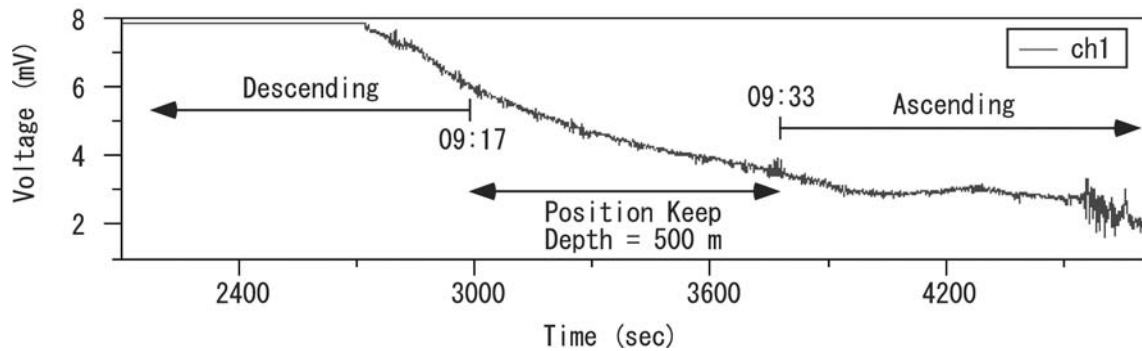


図4 DT-6Cで得られた電位差記録。横軸は記録開始時からの時刻(秒)。図中にはディープトウの下降・上昇などの状態も記した。

Fig. 4 Time series of self-potential value recorded at the DT-6C deep-tow dive. The x-axis means the progress after starting the record. The descending and ascending status of the deep-tow were also indicated.

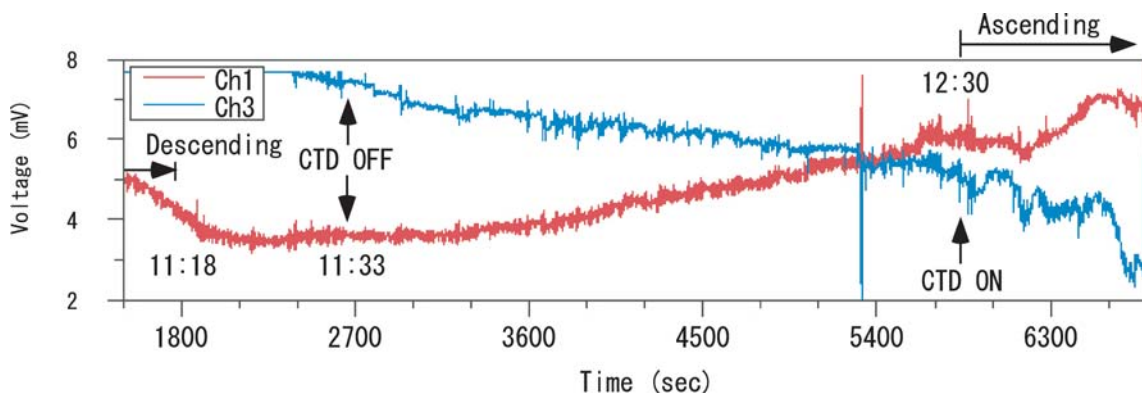


図5 DT-7Cで得られた電位差記録。CTDなどのディープトウシステムの電源のOn・Off時も記した。

Fig. 5 Time series of self-potential values recorded at the DT-7C deep-tow dive. Timing at the turning on / off of the deep-tow system including CTD power was also indicated.

を記録していることを確認できた。測定システムの動作を確認した後に、10月24日に合計21地点で海底自然電位測定を実施した。天候は晴れ、海況は穏やかで波はほとんどなかった。当日は大潮であり、干潮時(13時~17時)に海底自然電位測定を実施した。14時頃までは西向き、15時30分以降は東向きの速い潮流が認められており、ほとんどの測定では電極アレイは潮流に平行方向に設置された。海底湧水地域は干潮に伴って陸化しており、海底自然電位測定は湧水地域近傍の岸辺付近~数百m沖の範囲で実施された。本論文では測定結果の一例を紹介し、湧水に伴うともわれる自然電位異常について報告する。

4. 結果

4.1. 海底自然電位測定時のノイズレベル調査

ディープトウダイブDT-6C時の電位差記録を図4に示した。横軸は記録開始からの秒である。随所に記述した時刻はLocal Timeである(表1を参照)。Ch1の記録のみを示しているが、Ch2、Ch3については測定レンジを越えてしまっている。またCh1の記録も、前半(ディープトウ下降時)

はオーバーレンジしている。得られた電位差については、ディープトウの上昇・高度保持・下降によらず、測定値全体にドリフトが認められる。また短周期(周期10秒程度)の細かいノイズが認められる。この振幅は一定ではなく、およそ100 μ V~数百 μ Vで変動している。またこのノイズはディープトウの上昇時に大きくなる傾向が認められる(図4、時刻3800秒付近や4600秒付近)。

次にDT-7C時の電位差記録を図5に示した。横軸は図4と同じく、記録開始からの秒である。今回はCh1とCh3の電位差を記録することができたが、Ch2はオーバーレンジしている。DT-7CでもDT-6Cと同様に測定値のドリフトと短周期ノイズが認められる。Ch1、Ch3に現れる短周期ノイズを比べると、Ch1、Ch3同時に出るものが多いことと、同相(Ch1、Ch3とも同じセンス)で出るときと逆相(Ch1とCh3が逆のセンス)で出ることがあることがわかった。またDT-7Cでもディープトウ上昇時のほうが短周期ノイズの振幅が大きくなることがわかった(図5、時刻6000秒付近)。DT-7Cではディープトウ全体の電源を切り、ディープトウに取り付けた電子機器(カメラ・ライト・CTD・伝送システム)の自然電位測定に与える影

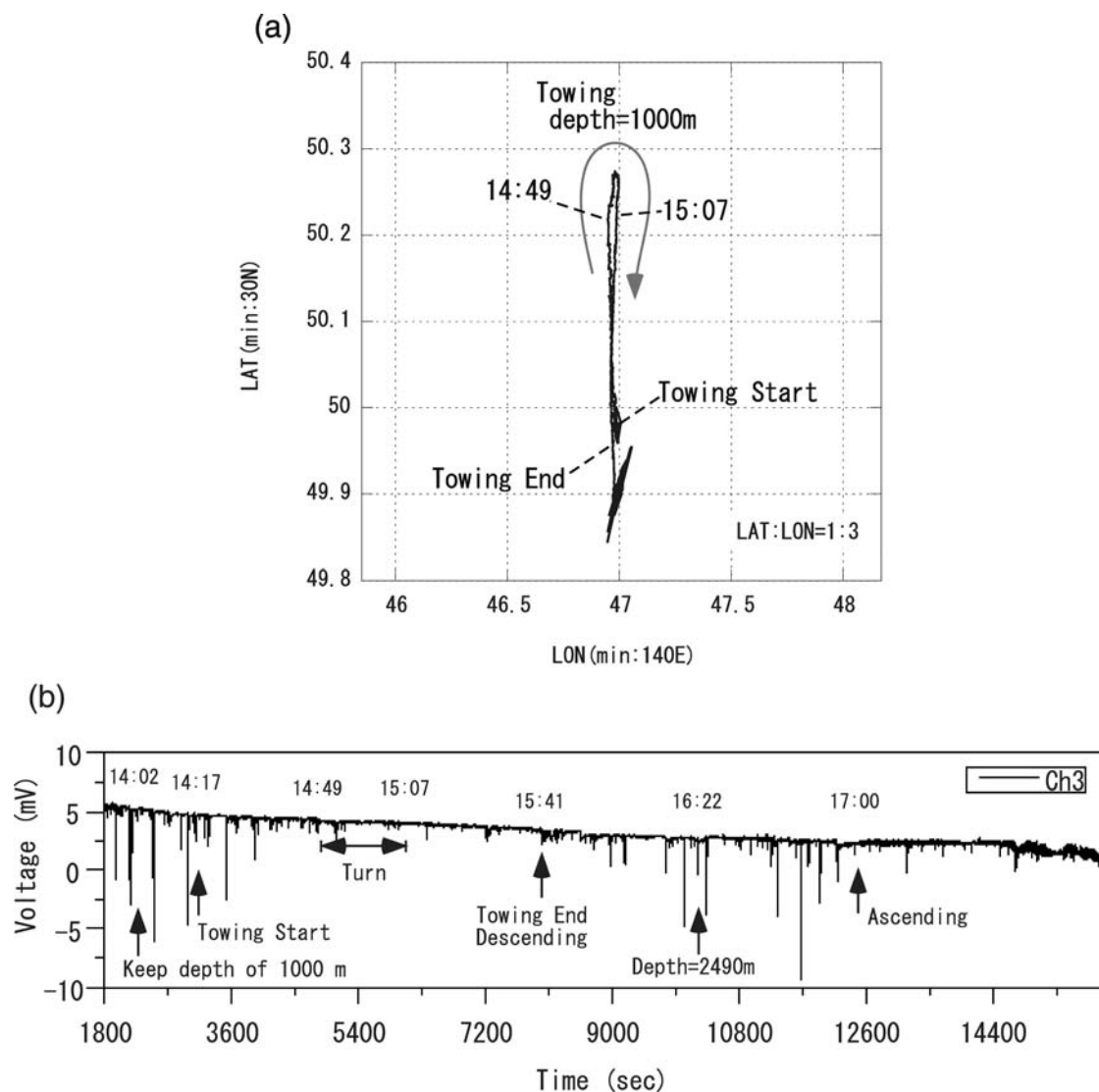


図6 (a) DT-8C時のディープトウシステムの航跡図。SSBL測位による。(b) DT-8Cで得られた電位差記録。ディープトウの下降・上昇などの状態も記した。

Fig. 6 (a) Track of the deep-tow at DT-8C obtained by the ship's SSBL acoustic navigation system. (b) Time series of self-potential value recorded at the DT-8C deep-tow dive. The descending, ascending status and so on of the deep-tow were also indicated.

響を調べた。特にCTDは海水中に電流を流して海水の電気伝導度を連続的に継続しているため、電位差測定値の短周期ノイズの原因となる可能性が考えられた。しかしながら、ディープトウ全体の電源のOn・Offに伴って、ノイズレベルの顕著な変化は認められなかった(図5)。

DT-8Cで実施した曳航時のディープトウの航跡およびそのときに記録された電位差を図6に示す。DT-8CではCh3のみ記録可能であり、Ch1、Ch2の電位差はオーバーレンジしている。航跡図(図6a)に示されたように、ディープトウはほぼ同一測線を往復している。このとき記録された電位差には、DT-6C、DT-7Cと同様にドリフトが認められており、ドリフトの様子はディープトウの回頭に伴って変化しなかった。また短周期ノイズも認められているが、DT-8Cでは片方向

(マイナス方向)のスパイク状ノイズが目立つ。この振幅は最大数mVにも及んだ。

DT-8C終了後に、電極間電位差のキャリブレーションを実施した。その結果、電極間電位差は0.25~0.5mV程度であり、周期2000秒程度、振幅10 μ V程度の周期的な変動を示したが周期10秒程度の短周期ノイズは認められなかった。また水流に伴う電極間電位差の変化の実験結果を図7に示した。図中に黒矢印で示した部分は1m/s程度の速度で電極を上下させている。また破線の矢印で示した部分では、1m/sで電極を引き上げた(または下ろした)後に30秒間電極を保持している。図7から明らかなように、電極に1m/sの水流を1秒程度与えると25 μ V程度の振幅のノイズが発生することがわかる。

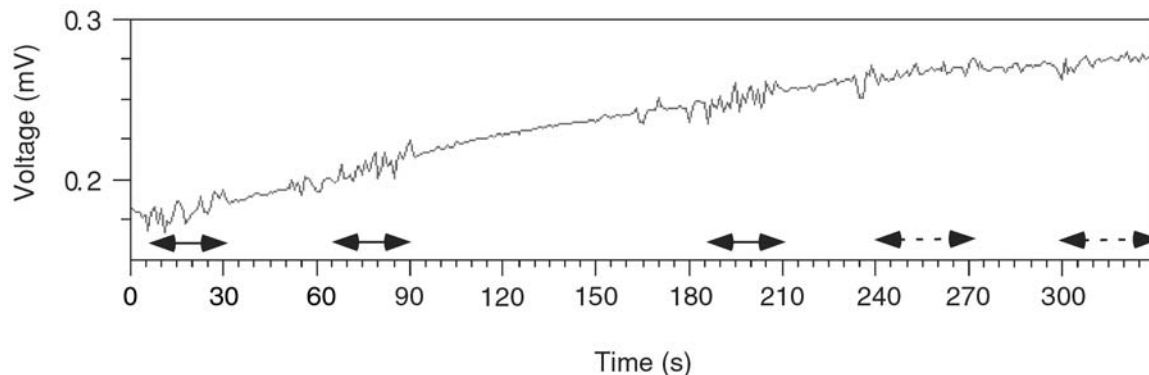


図7 水流に対する電極の安定性試験。黒矢印部分ではパイプ中で電極を上下に振動させており、破線矢印部分では電極を上あるいは下方向に移動させたのちに停止させている。

Fig. 7 Stability test of the electrodes against water current. Electrodes are vibrated in the pipe at periods with solid arrows, and eventually moved at periods with dashed arrows.

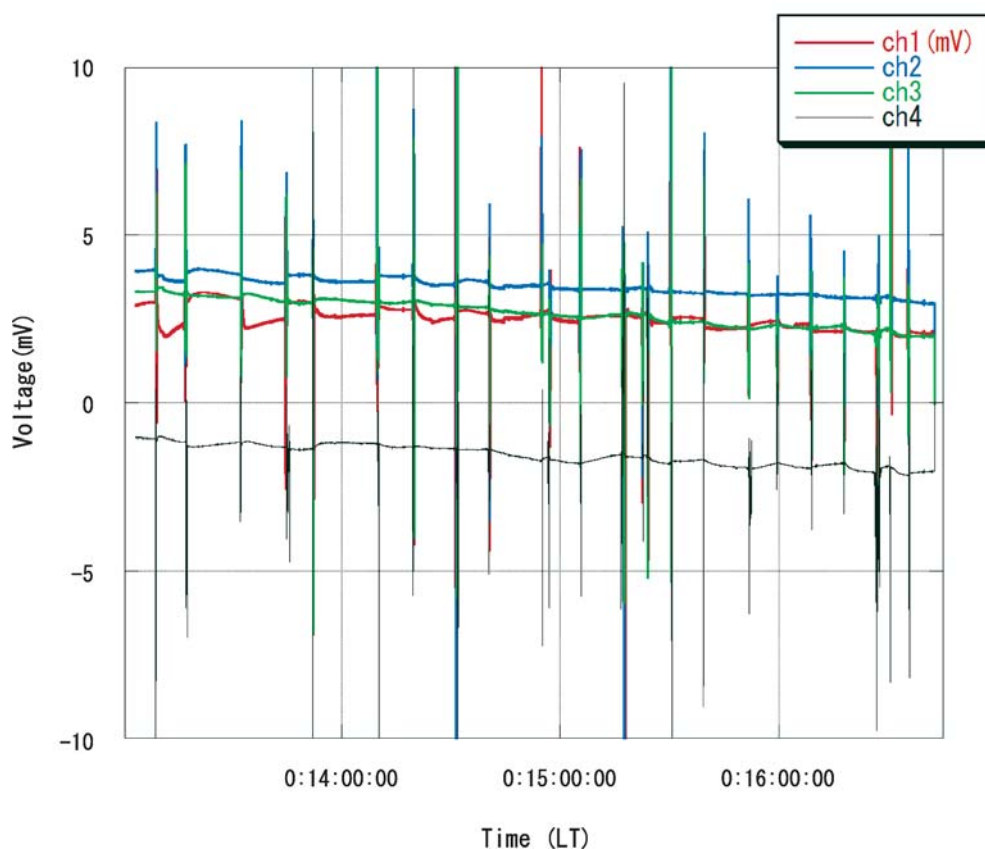


図8 有明海での海底自然電位観測の全時系列。Ch1～4までの全記録を示した。

Fig. 8 Whole time series of the marine self-potential data obtained at the shallow water depth in the Ariake Sea.

4.2. 浅海域での海底自然電位測定

有明海での海底自然電位の全測定値(10月24日午後に実施)を図8に示した。図中でスパイク状の電位変動が認められるが、これは電極アレイの設置・回収時に、電極が空中に出ている際に発生したものである。記録全体を見ると、どの電位差値も時間がたつにつれて少しずつドリフトしていることがわかる。

次に図8を拡大して、海底湧水地域に近い場所から遠ざかる際に得られた電位差記録(Ch1, 2, 3)を図9に示した。図9では海底に電極を設置している期間にSite番号を示した。測定点Site 1が海底湧水地域(干潮時のため陸化している)に最も近く、Site 2, 3, 6へ行くに従い約30-50mずつ沖へと遠くなっていく。Site3～5へは電極アレイを船上に回収せず海底を引きずりつつ海岸線に沿って移動したので、

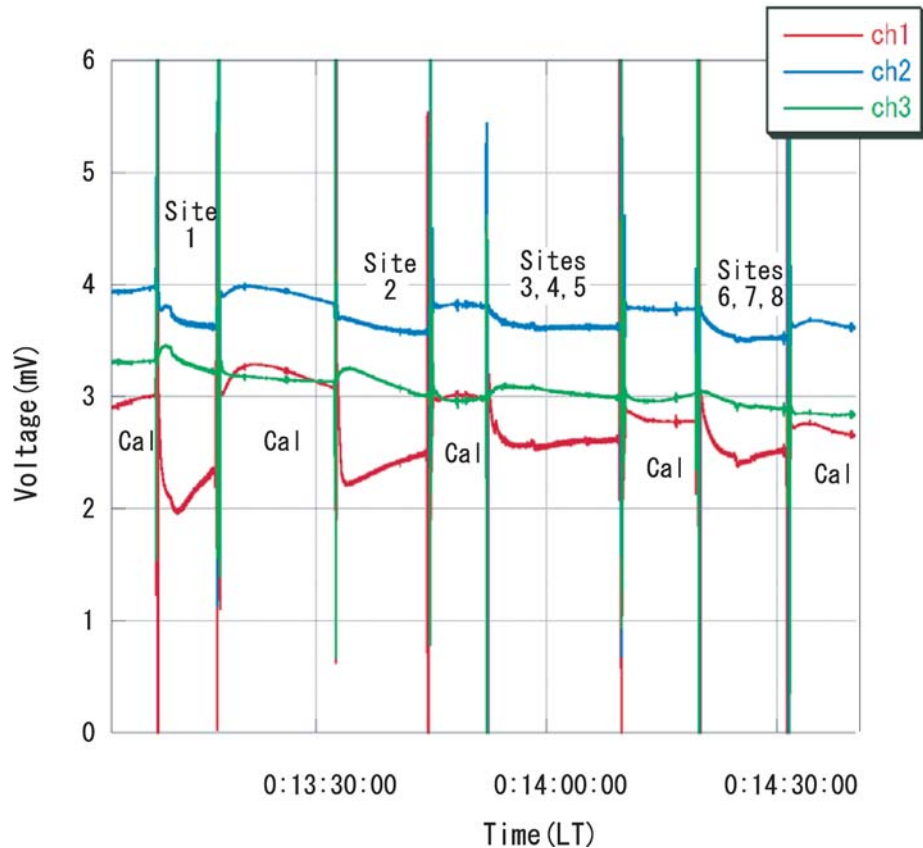


図9 有明海での海底自然電位観測データの拡大図。Ch1～3までを示した。Site番号：海底での自然電位測定時の記録，Cal：船上での電極キャリブレーション時の記録。Site 1が湧水地域に最も近い。

Fig. 9 Time series of the marine self-potential data obtained in the Ariake Sea. Site number: values at the seafloor, Cal: calibration of the electrodes on the ship. Location of site 1 is closest to the seepage area.

Site 3～5と湧水地域の距離は変わらない。またこのときの測定電位差には大きな変化は見られない。Site 6, 7, 8についても同様である。一方、Calと記した期間では電極アレイを船上のプラスチックケース内に収めた状態で船を移動させている。従って、この値は電極間電位差であると考えられる。図9では、電極を海底に設置した際や電極を回収した際に電位差が急変し、その後漸近する特徴を見ることができる。またSite 1で顕著であるが、電極の設置時とその前後のCalの間に電位差のギャップがあり、これはCh1で最も大きく、ついでCh2、Ch3と小さくなっていく。またこの電位差のギャップはSite2, 3, 6へ行くに従って、顕著ではなくなっていく傾向がある。

5. 議 論

ディープトウを用いた自然電位測定時のノイズに関しては、バイアスノイズ、ドリフト、短周期ノイズの3つをあげることができる。各々についてその原因を議論する。

全ダイブで見られた測定電位差のオーバーレンジや大きなドリフトは、測定システム近傍の大きなバイアスノイズ (DC ノイズ) の影響と考えられる。なぜなら、DT-8Cで実施したようにディープトウの曳航方向を180度反転した場合、地下水流動によって発生する自然電位や、潮流により発生する電位

(motional induction:たとえばLarsen and Stanford, 1985)は測定電位差の符号が反転するためである。図6bに示したように、ディープトウの180度反転に伴って測定電位差には顕著な変化がない。さらにDT-8Cの後半で見られるように、海底付近までディープトウを降下させても電位差には大きな変化は見られない。従って、測定電位差のオーバーレンジは、測定システム近傍に付随するバイアスノイズによるものと考えられる。このうち、電極間電位差は室内の測定ではあるが0.2～0.5mV程度であり、また従来から行われている海底電位差磁力計 (OBEM) を用いた電場観測でもこのような大きなバイアスノイズは認められないため、このバイアスノイズは電極に起因するとは考えにくい。従ってバイアスノイズはディープトウ本体から発生している可能性が高い。DT-7Cで実験を行ったように、ディープトウの電源系統からはバイアスノイズは発生していないため (図5)、このバイアスノイズはディープトウの金属製フレームや金属製耐圧容器が海水中で腐食することにより発生する電位である可能性が最も高い。ダイブごとにオーバーレンジを起こすChが変わるが、これはダイブごとにフレームの腐食の様子が少しずつ違うことを示すのかもしれない。また測定値のドリフトは、浅海域での自然電位測定時 (図8) と比べると大きい。これもディープトウのフレームの腐食の時間変化に伴う

ものである可能性が考えられる。

短周期ノイズは、ディーブトウの電源On/Offによっては変化しなかった。またノイズの周期は約10秒程度であるが、「かいよう」の波高計の記録(11:05)によれば1/3有義波高は2.2m, 周期は11.3秒であった。これらから、短周期ノイズはうねりに関連して発生していると考えられる。またDT-6C, DT-7C(図4, 5)では、ディーブトウの上昇時に振幅のおおきな短周期ノイズが現れ、またDT-8C(図6b)の曳航時には定点保持時に比べて短周期ノイズの振幅が大きくなっている。これらから短周期ノイズはうねりによりディーブトウが上下する、あるいはウィンチ操作や曳航に伴ってディーブトウが移動した際に発生すると考えられる。さらにDT-7CではCh1とCh3の短周期ノイズには同相と逆相の両ケースが見られていることから、短周期ノイズは測定システム近傍に原因があると考えられる。バイアスノイズと同じく、短周期ノイズもディーブトウフレームの腐食に伴うものである可能性もあるが、腐食が正負の交流的な電位差変動を規則的に生み出すことは考えにくい。一方で、水流に対する電極間電位差の安定性実験(図7)から、電極に水流があたれば、数十 μV の交流的なノイズを発生することが確認された。調査当日のうねりは約2mであり、ディーブトウ周辺の水流は図7の実験よりも激しかったことが予想される。このことから、短周期ノイズは電極近傍の水流が作り出している可能性が最も高いと考えられる。水流が電極に及ぼす直接的影響は不明であるが、水流に伴って電極内部のイオン濃度が微弱に変化しているためではないかと推測される。

浅海域での自然電位測定(図8)では、測定値全体にドリフトが認められた。電極アレイを船上のプラケースに浸している状態(キャリブレーション)の電位差だけを見ても時間と共にドリフトしていることから、これは電極間電位差のドリフトであると考えられる。電極間電位差のドリフトの原因としては、気温や水温の変化が考えられる。また電極は保管・運搬時には塩水に浸されているが、この塩分濃度と有明海の海水の塩分濃度が異なったため、電極内部と海水中でのイオンのやり取りが発生し、これがドリフトの要因となった可能性もある。また1回の測定毎(たとえば図9のSite1やSite2の部分)を見ても、短時間(数分)に指数関数的に測定値が変化する場合がある。これは空気中に取り出された電極に海水が再びしみこむために発生しているのではないかと考えられる。

海底湧水域にもっとも近いSite1では、キャリブレーション時(図9, Cal)と測定時(図9, Site1)ではCh1の電位差に1mV程度のギャップがあり、この差はCh2, Ch3の順に小さくなる。電極間距離はCh1-GND間で6.2m, Ch2-GND間で4.2m, Ch3-GND間で2.15mであることを考えると、このギャップはChによらず約0.2mV/m程度の電場によりもたらされていると考えられる。つまり、この測定電位差のギャップは電極間電位差に起因するものではなく、海中に発生している自然電位に起因するものであると考えられる。またこのギャップはSite2以降では徐々に小さくなる。もしもこのギャップが潮流によるmotional inductionであるならば、より

水深が深く流速も速いSite 6付近で大きな値を示すはずである。またそもそも電極アレイは潮流に平行に(ほぼ東西方向)設置しているため、motional inductionの影響は少ない。従って、Site 1でのギャップ(約0.2mV/m)は海底湧水に起因するものである可能性が高いと思われる。

有明海での実験からは、海底自然電位観測時のキャリブレーションの重要性が示唆される。仮に海底での測定値だけが得られている場合(つまり図9のSite1, Site2などの部分のみを得たとして)、電極間電位差のドリフトと、海底自然電位の空間変化を分離することは困難であるからである。陸上自然電位観測と同じことではあるが、海底自然電位観測の場合も観測の始めと終わりはもちろんのこと、海底での観測中もキャリブレーションを実施できるようにする必要があると思われる。

6. まとめ

海底下の地下水流動に伴って発生する自然電位異常の検出を目的とした基礎実験として、深海曳航時の自然電位測定ノイズレベルの調査および浅海域の海底湧水地域周辺での自然電位観測を実施した。ディーブトウを用いた曳航試験の結果、ディーブトウのフレームなどの海水中での腐食に伴う電位が測定時のバイアスノイズやドリフトとなること、水流に伴って電極近傍にローカルに発生する短周期ノイズが大きいことが示された。また有明海での自然電位観測から、海底電位差計によって海底湧水に伴うと思われる自然電位異常を検出可能であることと、電極間電位差のキャリブレーションの重要性が示された。

これらの実験結果から、深海底で地下水流動に伴う自然電位異常を検出するためにはどのような点に留意すべきであろうか？まず金属部分の腐食によるバイアスノイズをさけるため、耐腐食性の高いチタンなどのフレームからなる曳航体を新たに作成することが望ましい。また有明海での自然電位測定で示されたように、電極そのもののキャリブレーションを海底で実施する必要がある。これにはアメリカなどで使用されているチョッパー式電位差計(Filloux, 1987)を利用することが有効である。チョッパーはパイプ・電極・弁から成り、測定時の電極の正負をごく短時間で入れ替える装置である。電極入れ替えの前後の電位差の平均値から電極間電位差を知ることが可能である。このようなチタン製ディーブトウにチョッパー式電位差計を搭載した曳航システムを用いて海底自然電位分布のマッピングを行うことが効果的であると考えられる(図10a)。

別のアイデアとして、既存のROVや潜水艇を用いて自然電位分布のマッピングを実施し、バイアスノイズや電極間電位差を補正する方法が考えられる(図10b)。ROVや潜水艇の本体に電極を取り付けて艇を180度回頭させると、その前後の電位差の平均値からフレームから発生するバイアスノイズと電極間電位差の合計値を求めることができる。ROVや潜水艇は曳航体とは異なりすばやく180度回頭できるため、随所で180度回頭を行ってバイアスノイズと電極間電位差を求めて測定電位差を補正することができる。この

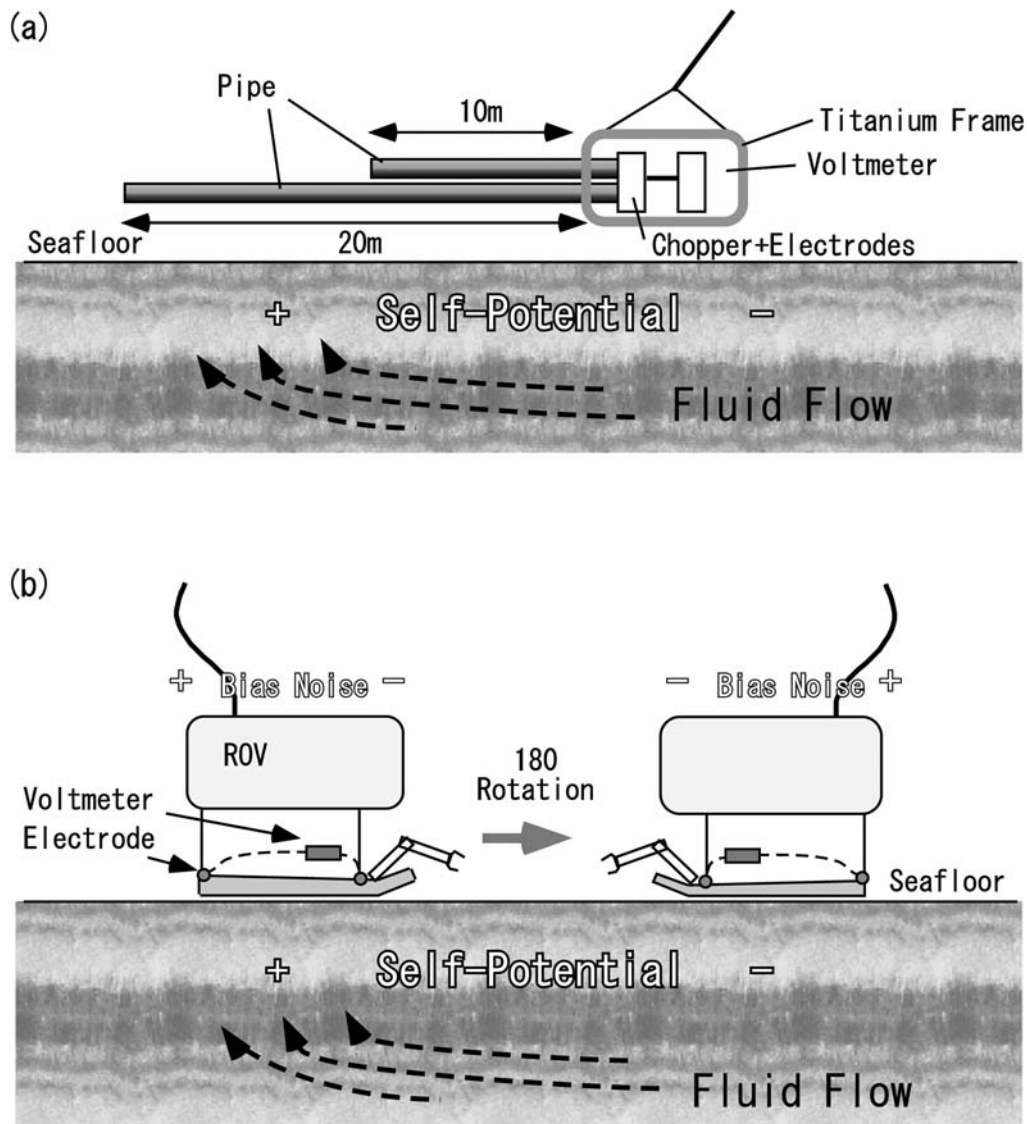


図10 海底自然電位測定システム案。(a) 曳航体を用いた場合, (b) ROVや潜水艇を用いた場合
 Fig. 10 New designs for marine self-potential measuring system with (a) a deep-tow system and (b) with a ROV or a submersible (b), respectively.

場合, 自然電位測定だけではなく熱流量測定なども同時に実施できる点は曳航体を用いた方式に勝る点である。ただしROVなどを用いるときは, オーバーレンジを避ける工夫が必要である(ダイナミックレンジを広くする, DCキャンセルをかけるなど)。また電極間隔はROVなどのフレームサイズに制約されるという欠点もある。

水流によると思われる電極の短周期ノイズを削減するためには, 電極構造の改良が必要である。現在は電極内部の塩化銀部分はセラミックカバーに包まれているが, 電極外部からセラミックカバー部までは海水が自由に流れ込むことができる。このため電極の開口部に透水性が低く導電性の高い蓋のようなものを取り付けることが効果的であると考えられる。このような蓋は, 海底の砂や泥が電極内部に入ること防ぐ意味でも必要である。

今後はこれらの点に留意しつつ, 実海域で地下水流動に伴う自然電位異常の検出を目指す。この際, 熱流量測定と組み合わせることが効果的であると思われる。下降流域では地温が海水と同じ値を示す傾向があるため, 熱流量測定からは下降流の流速の定量化は難しい。しかしながら自然電位測定はそれには影響されない。一方, 自然電位測定からは相対的な電位差が得られるが, 電位の絶対値を議論できない場合がある。つまり自然電位測定のみからは相対的な流体流動の議論は可能だが, 絶対的な議論が難しい場合がある。従って自然電位測定と熱流量測定は互いの欠点を相補できる特性を持つといえる。すでに地下水流動・熱輸送・自然電位発生を同時に数値計算することが可能となっており(後藤ほか, 2003), より現実的な地下水流動モデルを構築できるとと思われる。

本研究では、有明海での海底自然電位観測により、海底湧水に伴うような自然電位異常を報告したが、本海域の海底自然電位の空間分布を議論するには、測定値全体の長期ドリフトおよび各測定時の短時間の電位差変動を取り除く必要がある。また本地域では海域以外でも多くの自然電位データを取得している。陸域では海域の観測と同時に、銅-硫酸銅電極を用いて干潮時の湧水地域内の自然電位分布測定を実施した。さらに海底電位差計1台をリファレンスとして設置した(満潮時には水没)。これらの海底および陸域の自然電位分布に関しては現在解析中であるが、リファレンスデータからは、潮の干満に伴う自然電位変動が記録されている。今後解析を進め、海底湧水域周辺の自然電位分布の詳細について報告をおこなう予定である。

謝辞

海洋科学技術センター海洋調査船「かいよう」KY03-07航海での実験に際しては、講蔵栄孝船長、宮田利伸一等航海士ほか日本海洋事業の方々にご支援頂いた。またディープトウシステム運用に当たっては、宗輝氏ほかマリワークジャパンの観測支援員にご支援頂いた。熊本大学沿岸域環境科学教育研究センターの島崎英行技官および熊本大学理学部水文学研究室には、有明海での海域試験にご協力頂いた。本研究の一部は、文部科学省科学研究費基盤(A)平成14-17年度(代表:嶋田純)によるものである。

References

- 1) Filloux, J. H., Instrumentation and experimental methods for oceanic studies, in Geomagnetism, edited by J. A. Jacobs, pp. 143-248, Academic, San Diego, Calif., 1987.
- 2) 後藤忠徳・笠谷貴史・三ヶ田均・木下正高・末廣 潔・木村俊則・芦田 譲・渡辺俊樹・山根一修, 電磁気学的な流体の分布と移動の解明 -南海トラフを例として-, 物理探査, 印刷中, 2003.
- 3) Hashimoto, T. and Tanaka Y., Self-potential observations on Unzen volcano, Shimabara peninsula, Kyushu island,

- Japan, Geophys. Res. Lett., 22-3, 191-194, 1995.
- 4) Heinson, G., A. White, S. Constable, and K. Key, Marine self potential exploration, Explor. Geophys., 30, 1-4, 1999.
- 5) Ishido, T. and J.W. Pritchett, Numerical simulation of electrokinetic potentials associated with subsurface fluid flow, J. Geophys. Res., 104, 15247-15259, 1999.
- 6) Ishido, T. and Mizutani, H., Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics, J. Geophys. Res., 86, 1763-1775, 1981.
- 7) Jouniaux L., Pozzi J-P., Berthier, J. and Masse, P., Detection of fluid flow variations at the Nankai Trough by electric and magnetic measurements in boreholes or at the sea floor, J Geophys. Res., 104, 12, 29293-29309, 1999.
- 8) Larsen, J. C. and T. B. Sanford, Florida Current volume transport from voltage measurements. Science, 227, 302-304, 1985.
- 9) Segawa, J. and Toh, H, Detecting fluid circulation by electric field variations at the Nankai Trough, Earth and Planetary Science Letters, 109, 469-476, 1992.
- 10) 嶋田 純・長谷義隆・松田博貴・辻村真貴・恩田裕一・田中 正・登坂博行・徳永朋祥・谷口真人・小野寺真一・宮岡邦任・後藤忠徳, 流域規模での山体基盤岩地下水流動の実態解明, 水文科学会2003年秋季大会, 2003.
- 11) Shimada, J., Watanabe, K., Taniguchi, M., Miyaoka, K., Onodera, S., Tidal fluctuation of the coastal groundwater seepage revealed by intensive electric resistivity survey, Abstract of IUGG/IAHS Sapporo, A137, 2003.
- 12) Von Herzen, R. P., Kirklin, J., Becker, K., Geoelectrical measurements at the TAG hydrothermal mound Geophys. Res. Lett. 23, 3451-3454, 1996.

(原稿受理:平成15年12月5日)