

# 汲み上げ深層水の挙動把握手法： 相模湾における自動昇降 CTD と 流速計を搭載した漂流ブイの性能試験

Evaluation Method on Dynamic Behavior of Pumped-up Deep Seawater  
in Sagami Bay: Field Test of a Free-drifting Buoy equipped  
with a CTD Vertical Profiling Vehicle and a Current Meter

井関 和夫<sup>1</sup>・大村 寿明<sup>2</sup>

Kazuo ISEKI and Hisaaki OHMURA

## Abstract

In order to evaluate a behavior of pumped-up deep seawater into an euphotic zone, we conducted an field test of a free-drifting buoy equipped with an autonomous CTD vertical profiling vehicle, a current meter and a cruciform drag sail. The autonomous CTD profiling vehicle showed a good performance under favorable sea conditions although the upward movement was not smooth enough under high wave conditions (more than 1-1.5m), and the free-drifting buoy approximately followed in situ current. We also discussed the improvement method of the present free-drifting buoy.

**Key Words:** Deep Sea water, dynamic behavior, fertilization, drifting-buoy, autonomous profiling vehicle, current

## 要 旨

海洋深層水による海域肥沃化試験が行われる相模湾において、自動昇降 CTD、流速計および抵抗板を取り付けた漂流ブイシステムの現場海域試験を実施し、(1)自動昇降 CTD の作動状態と(2)漂流ブイの流れの追従性を評価した。その結果、波高 1 ~ 1.5 m 以上の荒天時には CTD の昇降に不安定さが認められたが、これ以下の波高では正常に作動し、また、ブイによる流れの追従性も概ね良好であった。併せて、今後、漂流ブイシステムの改良すべき点を検討した。

**キーワード：**海洋深層水、物理的挙動、海域肥沃化、自動昇降 CTD、漂流ブイ、流速

## 1. はじめに

海洋深層水による海域肥沃化の試みとしては、(1)人工海底マウンドを利用した深層水の真光層への供給による浅海域の肥沃化 (Suzuki, 1995)、(2)汲み上げ深層水の発電所やその他陸上施設における多目的・多段利用後の昇温深層水放水による浅海域肥沃

化 (渡辺等, 2000)、および(3)大陸棚以深の海域で揚水した深層水による洋上肥沃化があり (井関, 2000; 井関, 2002)、(1)は事業化の段階に入り、(2)と(3)は事業化に向けて現在活発に研究が行われている (高橋・井関, 2000; Takahashi and Ikeya, 2003)。洋上肥沃化実験は 1989 - 90 年に富山湾で実施され (井関, 2000)、それらの経験も活かして、

<sup>1</sup>広島大学大学院生物圏科学研究科 (〒739-8528 広島県東広島市鏡山 1-4-4)

<sup>2</sup>芙蓉海洋開発株式会社 (〒111-0051 東京都台東区蔵前 3-15-7)

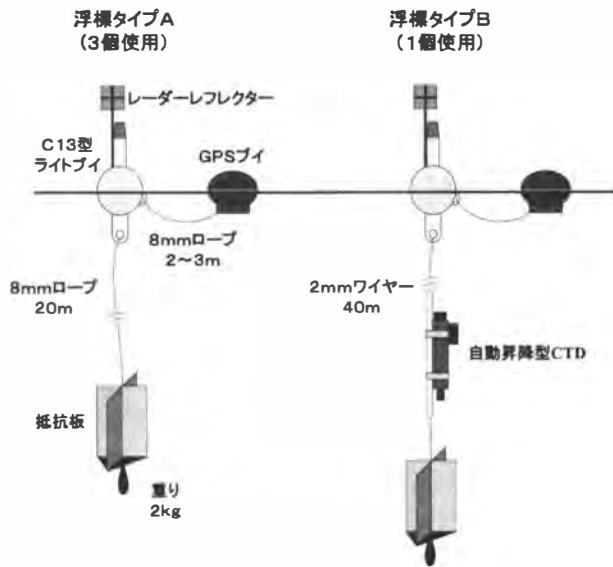


図1 相模湾における漂流ブイ実験1で使用された自動昇降CTDを搭載した漂流ブイ。浮標タイプAとBを示す。

2003年7月から相模湾で実施中である。両湾において、多項目センサー搭載型の漂流ブイやブイ周辺での調査船による海洋観測により、散布深層水の挙動把握と肥沃化効果の判定が行われ、その結果、漂流ブイシステムの一層の性能向上が求められている(井関, 2002)。

ペルー沖の大規模湧昇や沿岸の局地性湧昇水塊における生物・物理的变化は、湧昇直後の水塊を漂流ブイで1週間ほど追跡しながら、一定時間毎に海洋観測を実施する方法で調べられてきた(Menzel, 1967; Wilkerson and Dugdale, 1987; Kjørboe, 1998)。これらは自然海洋で生じる湧昇現象であり、湧昇水塊の規模が大きいため漂流ブイによる追跡は比較的容易である。一方、ポンプで深層水を真光層まで揚水し散布する“人工湧昇”は、自然湧昇と較べて(Nixon and Thomas, 2001)現時点ではその規模が遙かに小さいために、漂流ブイによる人工湧昇水塊の追跡は必ずしも容易ではなく、ブイの追跡や海水のサンプリング・分析に関する高度な技術と関連研究が必要とされる。

ポンプ揚水した深層水の漂流ブイによる追跡実験は、前述した富山湾で Iseki *et al.* (1994) により実施されたが、ブイから吊り下げたロープの一定水深に取り付けたCTD・クロロフィルセンサーやブイ周辺の海洋観測からは、散布深層水の挙動を明瞭

に把握するまでには至らなかった。なお、この実験で用いられた漂流ブイには口径4.2mのパラシュート・ドログが取り付けられ、現場海域の流れに対する追従性は90%程度であることが予備実験で確認されていた(Iseki *et al.*, 1990)。

散布深層水の挙動を把握できなかった理由として、(1)散布深層水の散布規模が小さく、拡散希釈のために、上述の観測機器では検出困難であったこと、(2)散布深層水の密度が表層水より大きく、急速な沈降と表層水とは別な密度面の滞留等が生じ、一定水深だけの観測では、散布深層水を検出できなかったこと、などが考えられた。

そこで、井関(2002)は、上述(2)の問題解決として鉛直連続データの取得を行うことを目的として、小型・軽量の自動昇降CTD・クロロフィル計を選択し、その性能試験(プログラム設定に応じた自動昇降、センサー類の感度・精度、バッテリー寿命等)を、波静かな瀬戸内海内湾で行い、良好な結果を得た。しかし、肥沃化実験が実施される相模湾は、太平洋の波浪を直接受ける海域であるため、自動昇降センサーを含めて漂流ブイシステム全体の性能試験を同湾で実施し、問題点の抽出と必要に応じた技術的改良を本実験前に行うことが不可欠と考えられた。本研究では、海域肥沃化実験装置「拓海」の設置予定海域である相模湾中央部の三浦海丘付近から、自動昇降CTDと流速計及び抵抗板を搭載した漂流ブイシステムを放流して、システム全体の性能試験を実施した。

## 2. 実験方法

**実験1:** 相模湾における肥沃化実験では、密度流拡散装置(大内, 2002)を使用して、205mから揚水した深層水と表層水とを約1:2の割合で混合し、その混合水を密度躍層内の20mに放水し拡散希釈を抑制する方法が用いられる。2002年9月10-11日に、図1に示すGPSブイ、レーザーレフレクター・夜間点滅ライト付きブイ、抵抗板からなる漂流ブイ(浮標タイプA)の性能試験を実施した。なお、抵抗板は40cm×70cmの2枚の塩

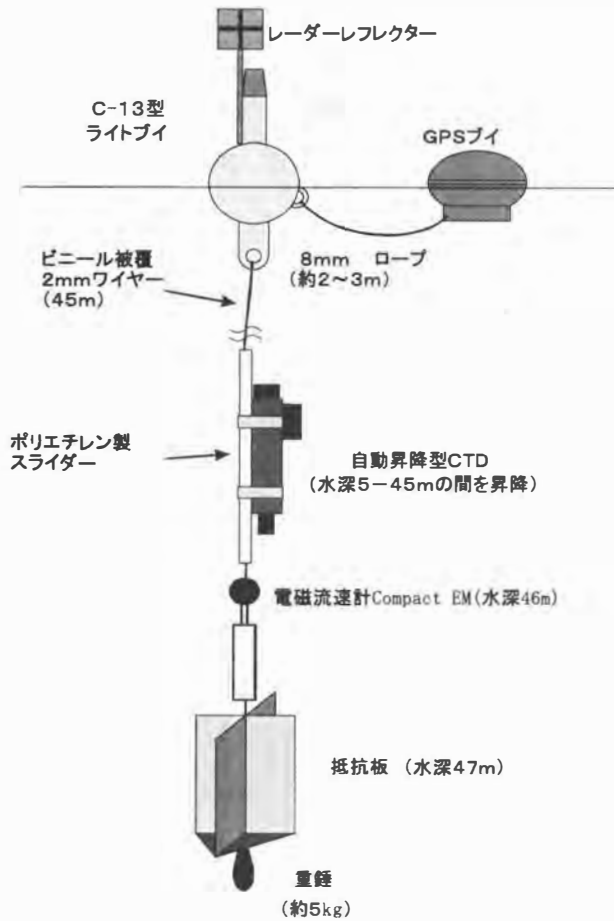


図2 相模湾における漂流ブイ実験2で使用された自動昇降CTDと流速計を搭載した漂流ブイ。

化ビニール板を十字架状に組み立てたもので、浮標タイプAでは水深20mに、また、浮標タイプBでは、自動昇降CTDの作動水深幅を確保するために、水深40mに取り付けた。

本研究で用いた自動昇降CTDは、Ocean Sensors社製OS500APVで、直径12cm×長さ100cm、空中重量10kg、使用水深レンジ300mである。水温及び塩分センサーの測定レンジと精度は、 $-2 \sim 35^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ )と $2 \sim 45$  psu ( $\pm 0.03$  psu)である。本機種は、筐体下部のピストンの伸縮による浮力調節で、自動的に水中を上昇下降しながら観測データを内部メモリーに読み込むことができる。実験開始前に、調査海域のCTDプロフィールから得られた海水密度を参考にして、自動昇降CTDの重量調整を重りを使って1g単位で行った。

相模湾中央部の三浦海丘付近から(図3)、水塊追跡の目印として浮標タイプAを3個投入し、引き続き自動昇降CTDを取り付けた浮標タイプB

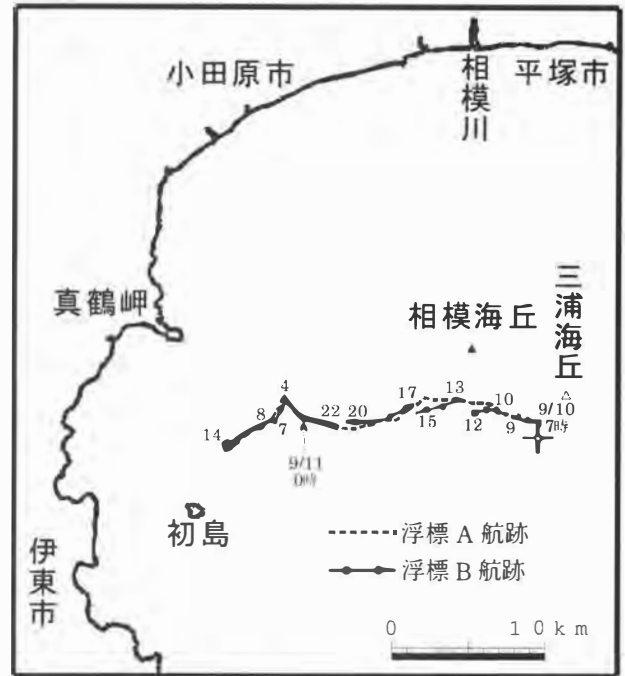


図3 漂流ブイ実験1における浮標タイプA及びBの航跡。

を、3個の浮標タイプAの中心付近に放流した。なお、自動昇降CTDは、ポリエチレン製のスライダを本機種に固定して、ビニール製被覆の $\phi 2$  mmワイヤーを伝って上下動できるようにした。プログラムは、10分間で10mから35mまで下降し35m水深で5分間待機した後、次の10分間で水深10mまで上昇し、10m水深で5分間待機する1サイクルに、また、1秒間当たり100個のデータを計測し、その平均値を1データとするサンプリングレートに設定した。従って、1サイクルのサンプリング時間は30分である。ブイの位置は一定時間毎にGPSブイによってモニターした。

**実験2**：2003年9月11日(実験2A)と12日(実験2B)の両日には、海域肥沃化装置「拓海」から深層水の放水が行われている時に、「拓海」近傍から自動昇降CTD漂流ブイ(図2)を放流した。なお、実験2では、漂流ブイによる現場海域の流れの追従能力を検証するため、電磁流速計(アレック電子製 Compact EM)を漂流ブイに取り付け、ブイの漂流速度と電磁流速計の速度を比較した。電磁流速計は、抵抗板の設置水深(47m)の1m直上(46m)に装着し、自動昇降CTDは深層水の

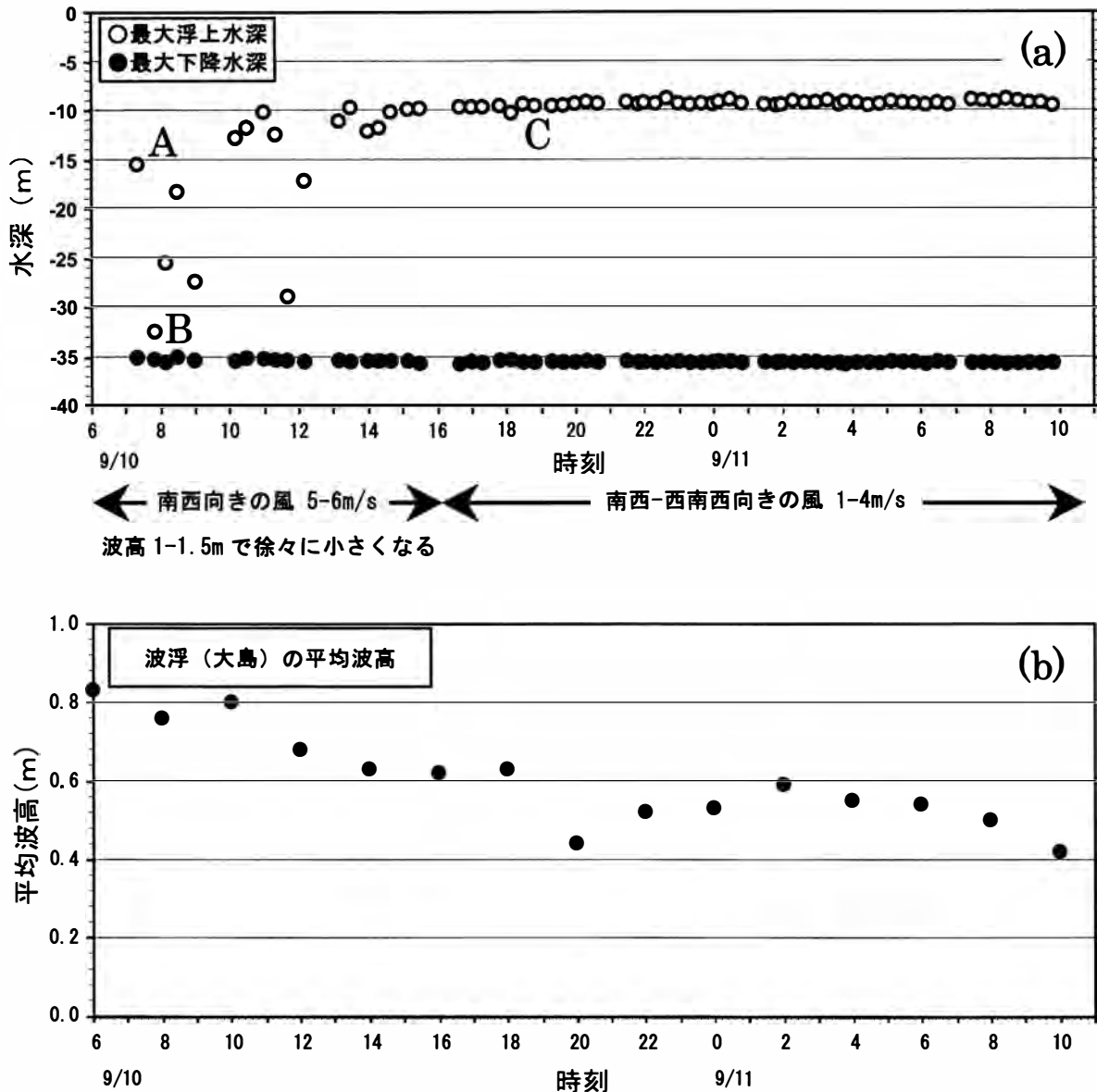


図4 漂流ブイ実験1における自動昇降CTDの作動状態。(a)自動昇降CTDの最大浮上及び最大下降水深と(b)波浮(大島)で観測された平均波高の時間変化(全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)のデータを使用)。図4a中の波高に関する記述は、漂流ブイ付近の目視観測による。

放流水深である20mを中心に水深5mから40mの間を30分毎に自動昇降するように予めプログラム設定を行い、ブイの位置は実験1と同様にGPSブイによってモニターした。また、「拓海」のデッキ上に配備された超音波式風向風速計と浮体側面の水深7.5mにセットされた超音波式流向流速計のデータも併せて検討した。

### 3. 結果と考察

#### 実験1：自動昇降CTDの作動状況

実験1における漂流ブイの航跡を図3に示す。

実験開始時の2002年9月10日7時以降、漂流ブイは西向きに流れ31時間後には初島の北北東4km付近まで到達し、実験想定範囲を越える状況になったので漂流ブイを回収して実験を終了した。なお、浮標Bが浮標Aと離れすぎる場合は、適宜回収を行い浮標A群の近くに再投入を行った。図3の航跡に見られる不連続箇所が、これに相当し実験中に4回の回収・再投入作業が繰り返し行われた。浮標AとBの抵抗版は、各々20m、40mに取り付けられ、浮標間に大きな水深差があったにもかかわらず、両者は西向きの似通った漂流パターンを示した。このことから、20-40mの水深帯の水塊は、

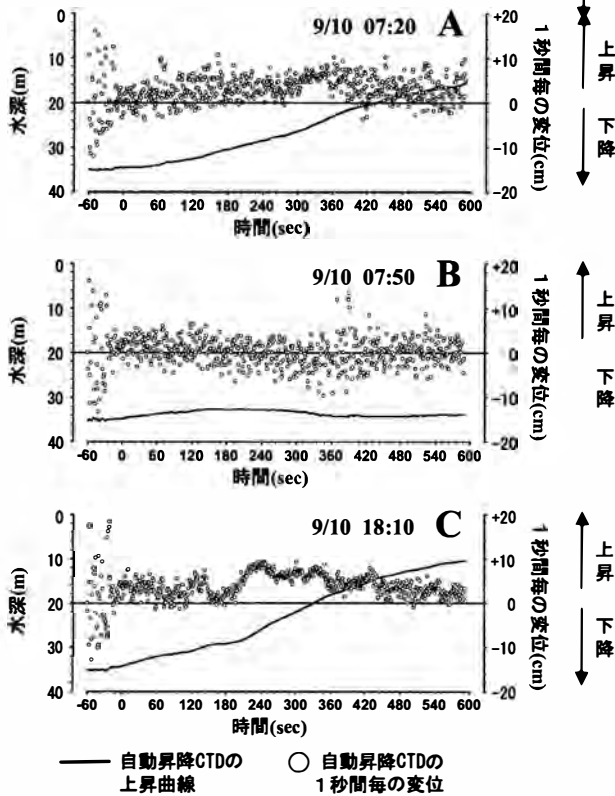


図5 自動昇降 CTD の上昇曲線（水深の変化）と上昇時の 1 分前（35 m 待機中）から上昇時間内における 1 秒間毎の変位（上昇を正の値，下降を負の値で示した）. 図中の(A), (B)は所定水深（10 m）まで上昇しなかった例，(C)は所定水深まで上昇した例を示す. 図中の実線は，自動昇降 CTD の水深（m）を，○印は，1 秒間毎の変位を示す.

ほぼ同一の挙動を呈していたものと考えられる.

浮標の平均移動速度は，浮標位置の時間変動から算出した結果，20 - 30 cm/sec 前後であった. 浮標の移動パターンから，実験 1 の期間中には，相模湾中央部周辺では還流（Iwata and Matsuyama, 1989）は発達していなかったか，或いは弱かったものと判断される.

図 4 に示すように，自動昇降 CTD の作動は，実験開始時の 9 月 10 日 7 時から同 15 時頃まで不安定状態が続き，最大下降水深は 35 m と一定であったが，最大浮上水深は 32 m から 10 m の間で大きく変動していた. 特に，10 日の 8 時と 12 時頃に作動状態は悪かったが，開始時から 15 時頃にかけて徐々に正常作動に近づき，15 時以降から実験終了時の 9 月 11 日 10 時までは，正常状態が継続された. この間，船上目視観測による各漂流点の有義波高は，9 月 10 日の実験開始から 16 時頃までは 1 -

1.5 m の範囲で，時間の経過と共に徐々に小さくなっていった. 参考のため，相模湾周辺の波浮（大島）で観測された風向・風速および平均波高を図 4b に示す（全国港湾海洋波浪情報網（NOWPHAS）より）. 実験開始時は南西向きの 5 - 6 m/s の風速と 0.6 - 0.8 m の波高であったが，時間の経過とともに，風速，波高共に徐々に弱まり，14 時以降は，風速 1 - 4 m/s，波高 0.4 - 0.6 m であった. 波高が時間の経過と共に徐々に弱くなる点では，大島波浮と漂流ブイ実験海域は同様であった. しかし，大島波浮の波浪データより漂流ブイ実験海域の波高値を推定するには，数値解析などが必要となるので，本稿では，船上目視観測の結果のみを考察の対象とする.

自動昇降の作動状態が極めて悪い時は，図 5 の B パターンに見られるように，最大下降水深の 35 m 付近で上下動を繰り返す，プログラム設定の 10 分間の上昇時間内では，ほとんど上昇しない場合があった. また，A パターンに見られるように，自動昇降 CTD は，全体として正の変位を維持しながら上昇するが，10 m 水深まで上昇できない場合があった. 海況が良くなると，C パターンのように，自動昇降 CTD は，正の変位を維持しながら上昇を続け，設定水深の 10 m まで上昇していた.

これらのことから，本漂流ブイシステムの自動昇降 CTD は，波高 1 - 1.5 m 以下の海況条件では自動昇降が正常に行われるが，それ以上の波高になると作動状態が悪くなることが確認された. 有義波高が 1.0 m 以上の海況になると，表面ブイと抵抗板（及び重り）の上下運動における周期性が乱れ，両者を連結するワイヤーにたるみが生じて，自動昇降 CTD のスライダーがスムーズに上昇しなくなるためと考えられる. ただし，波高が高いと想定されている時にも，自動昇降 CTD が水深 10 m 近くまで上昇している場合があり（9 月 10 日 11 時頃），この場合は波高分布の中で小さな波高時と一致している可能性がある. また，波高に加えて，波周期の影響が自動昇降 CTD の作動に大きく作用する可能性もあるが，現段階では関連データの不足等により詳細な検討は困難である.

今後，自動昇降 CTD の作動状態を改良するため

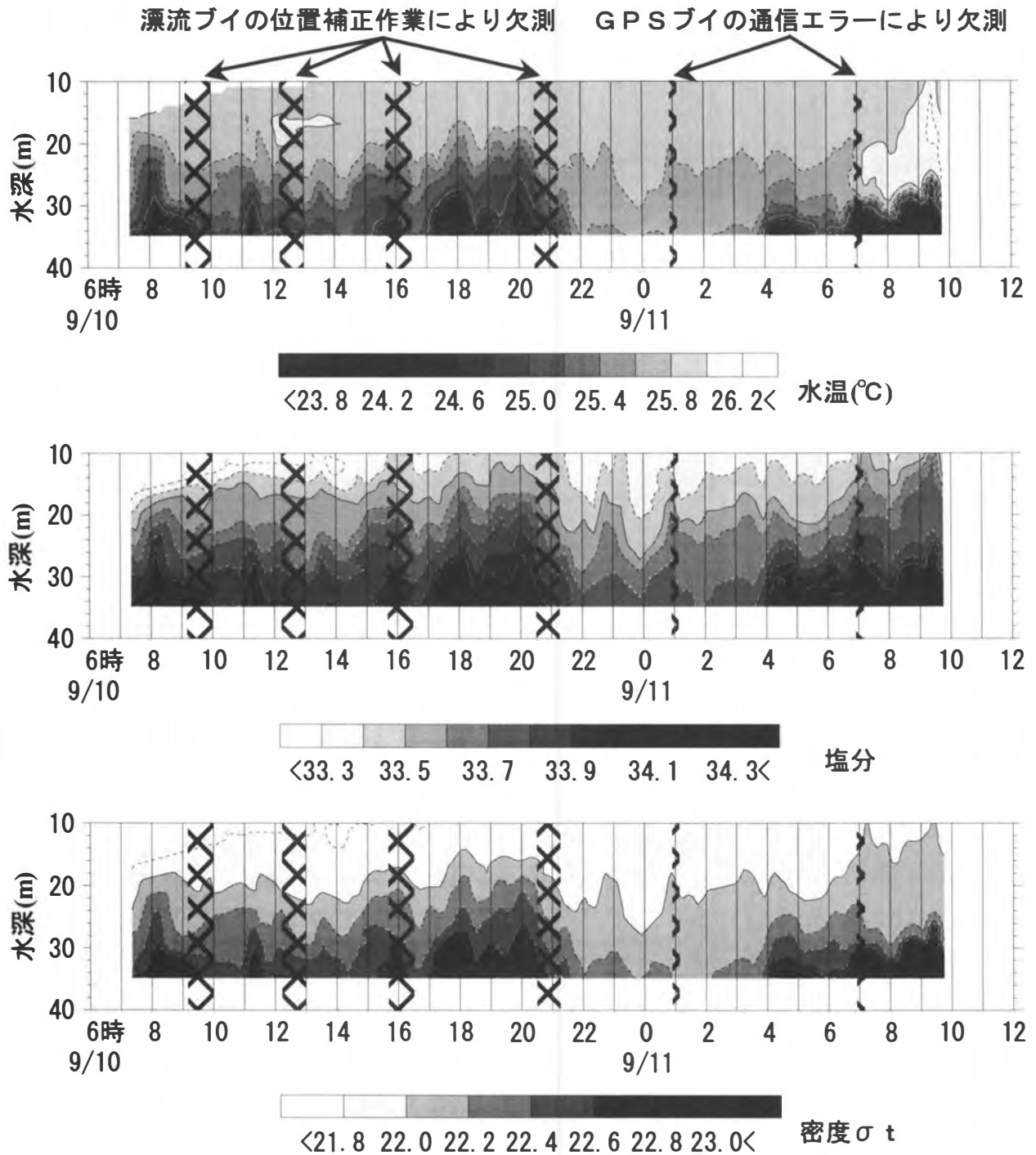


図6 漂流ブイ実験1において自動昇降CTDで計測された水温，塩分，密度の時間変動。

には，漂流ブイの重りを増やしてワイヤー張力を高めること，ワイヤー上端部を波浪の吸収できる材質のロープ（ゴム状のもの）に変えること（Kjørboe *et al.*, 1998），や表面積の小さい数珠状の表面ブイに変えて波浪の影響を抑えること，などが考えられる（Iseki *et al.*, 1994；1990）。また，自動昇降CTDのプログラム設定を変えて，上昇時間を長くすることも改良策の一つである。

実験1の期間中に自動昇降CTDで得られた水温，塩分，密度の鉛直断面図とT-Sダイアグラムを各々図6，7に示した。実験開始後の数時間内は，自動昇降CTDの不完全な上昇のため水深10-15m間のデータ欠損と浮標Bの回収・再投入時にデータ欠損が認められるが，全体的には追跡水塊の海洋構造を連続的に把握することに成功している。水温，塩分，および密度の鉛直断面図とT-Sダイアグラ

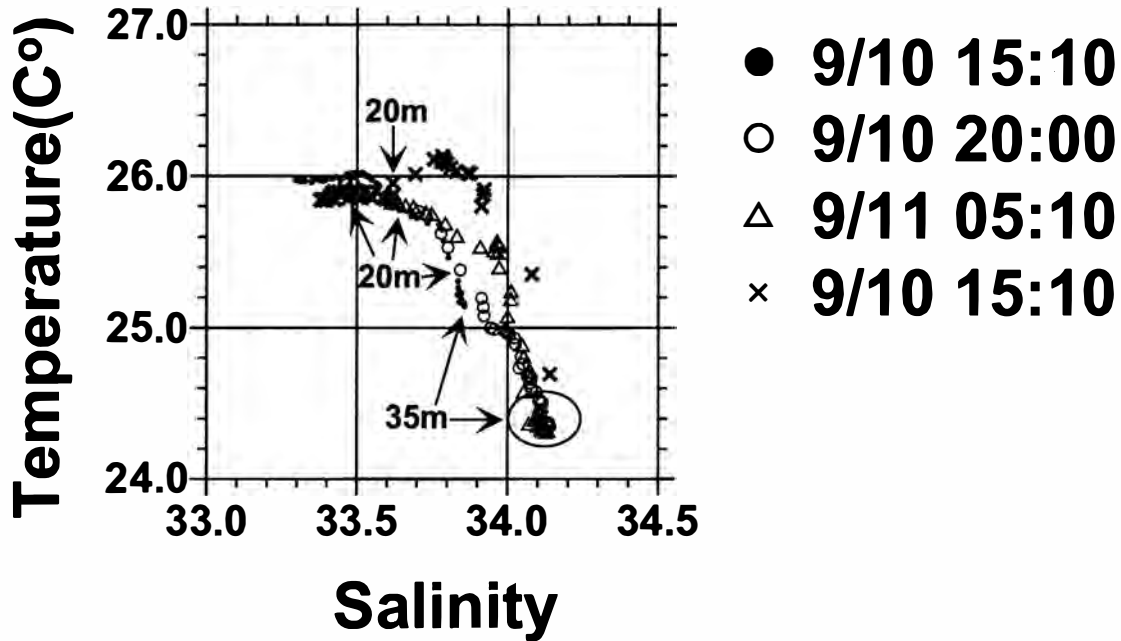


図7 漂流ブイ実験1において自動昇降CTDで得られたT-Sダイアグラム。比較のため、20 mと35 mのデータを図中に示した。

ムから、水温・塩分躍層が15-35 m付近に発達していることや、大別して3つの海洋構造（9月10日8-23時、9月10日23時-9月11日4時およびそれ以降の実験終了時まで）を持った海水が認められた。実験開始から9月11日午前4時頃までは、T-Sダイアグラムのパターンは類似していたが、9月10日23時-9月11日4時の夜間に、表層混合層と躍層深度の増加が認められ（図6）、同一水塊内における日周変化と考えられる。また、11日4時以降は、図7のT-Sダイアグラムと図3aの漂流ブイの航跡パターンから、別の海洋構造を有する水塊が示唆された。しかし、観測自体が表層10 mから35 mのわずか25 mの厚みを持った水柱に限定されているので、ここでは詳細な水塊判定は行わない。

#### 実験2：漂流ブイによる流れの追従性試験

深層水汲み上げ時の2003年9月には、自動昇降CTDに加えて流速計を漂流ブイに取り付けて、放流深層水の追跡を行った（図2）。この時の漂流ブイの航跡と水深46 mに取り付けた電磁流速計の計測値（流速）を図8に示した。また、漂流ブイの移動速度、電磁流速計の計測値、ブイと流速計速度のベクトル加算値、及び「拓海」の水深7.5 mで

の流速計の計測値を相互比較のため図9に一括して示した。

9月11日の実験2Aにおけるブイの移動速度は、実験当初の11時から13頃にかけて25-35 cm/sであったが、実験終了時の14頃には5 cm/s程度まで減少した。この間、移動方向は一貫してほぼ北北東であった。ブイの移動速度・方向とともに、「拓海」の7.5 mで観測された流速・流向に近似していた。一方、電磁流速計は、平均流速6-8 cm/s（変動幅2.1-14.1 cm/s）の西向きの流れを示した。また、この間の風速・風向は、1.5 cm/sの南東方向でほぼ無風状態であり、表層ブイに対する風の応力は無視できる状況であった。これら電磁流速計の計測値から、水深46 m付近には表層の流れとは異なる弱い西向きの成分が含まれていたことがわかる。抵抗板の設置水深が47 mであるため、ブイの移動は水深47 m付近の流れを概ね反映していたと仮定し、漂流ブイの移動速度と流速計の計測値をベクトル加算して、46-47 m付近の流れを推定した（図9）。その結果、9月11日の漂流ブイ実験2Aでは、ブイの移動速度、ベクトル加算した速度、及び「拓海」の計測値は似通ったパターンを示し（図9）、水深7.5 mから47 mまでの流れは大きく変わらず、漂流ブイは抵抗板付近の流れを良く捉え、追従性は

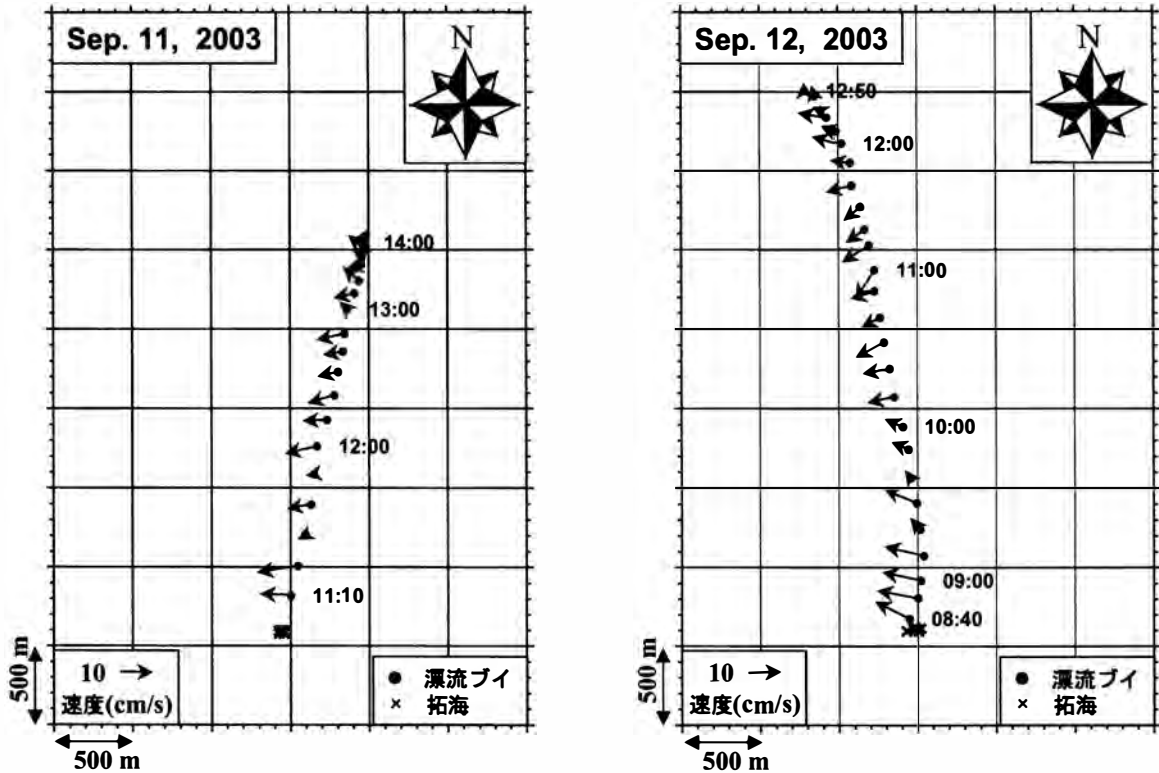


図8 漂流ブイ実験2A（2004年9月11日）及び2B（2004年9月12日）における漂流ブイの航跡と電磁流速計の計測値。

概ね良好と判断された。

9月12日の漂流ブイ実験2Bでは、ブイの移動速度・方向は実験当初から12時頃まで平均30 cm/s程度で北北東から北北西に変わり、実験終了の13時近くでは15 cm/sまで減少し北西方向に変わっていた。この時、「拓海」での流速・流向は、当初30 cm/s程度であったが実験後半には40-50 cm/sまで増加し、流向は全体として北東であった。風速は、前日と同様に2 cm/sと弱く、無風状態に近かった。一方、ブイの電磁流速計は、平均流速7.9 cm/s（変動幅1.9-13.3 cm/s）の西向き（南西から北西の変動はあるが）の流れを示した。9月11日と同様に、漂流ブイの移動速度と流速計の計測値をベクトル加算して、46-47 m付近の流れを推定した（図9）。「拓海」に固定された流速計がオイラー的であるのに対し、ブイの流速値はラグランジェ的手法に基づいていること、及び観測時間の経過と共に両者の測定位置が離れてくることから（実験終了時で3.5 km程度）、計測値に関する精度の良い直接比較は注意を要する。しかし、全体として見ると、前日の実験2Aと比べると表層（水深

7.5 m）と深層（ブイの抵抗板47 m）間での流れの違いは大きく、漂流ブイは47 m付近の流れをかなり補足していたものと推察される。

図8、9に示すように、漂流ブイの軌跡と水深46 mに設置された流速計の流向に大きな違いが認められる。漂流ブイの軌跡は、漂流ブイ全体に対する流れの応力の結果であるが（風の影響は無視）、抵抗板を設置している水深47 m付近の流れの影響を主に受けると考えられる。一方、電磁流速計は水深46 mにおける計測値であるが、水深46 m以浅の流れの漂流ブイへの応力も反映している。電磁流速計は西向きの流れを示しているので、47 m以浅にはその逆の東向きの成分を持った流れ（特に表層流）が示唆される。

一般に、水深の増加に伴い流速は減少し流向も変化するため、表層—深層間で“Slippage”現象が起き、特定水深における流れの補足率を悪くするので（Broenkow, 1982）、係留索の長さの設定にも注意が必要とされる。

以上の結果から、今回の実験2Aにおいては、漂流ブイは現場海域における抵抗板の設置水深の流れ



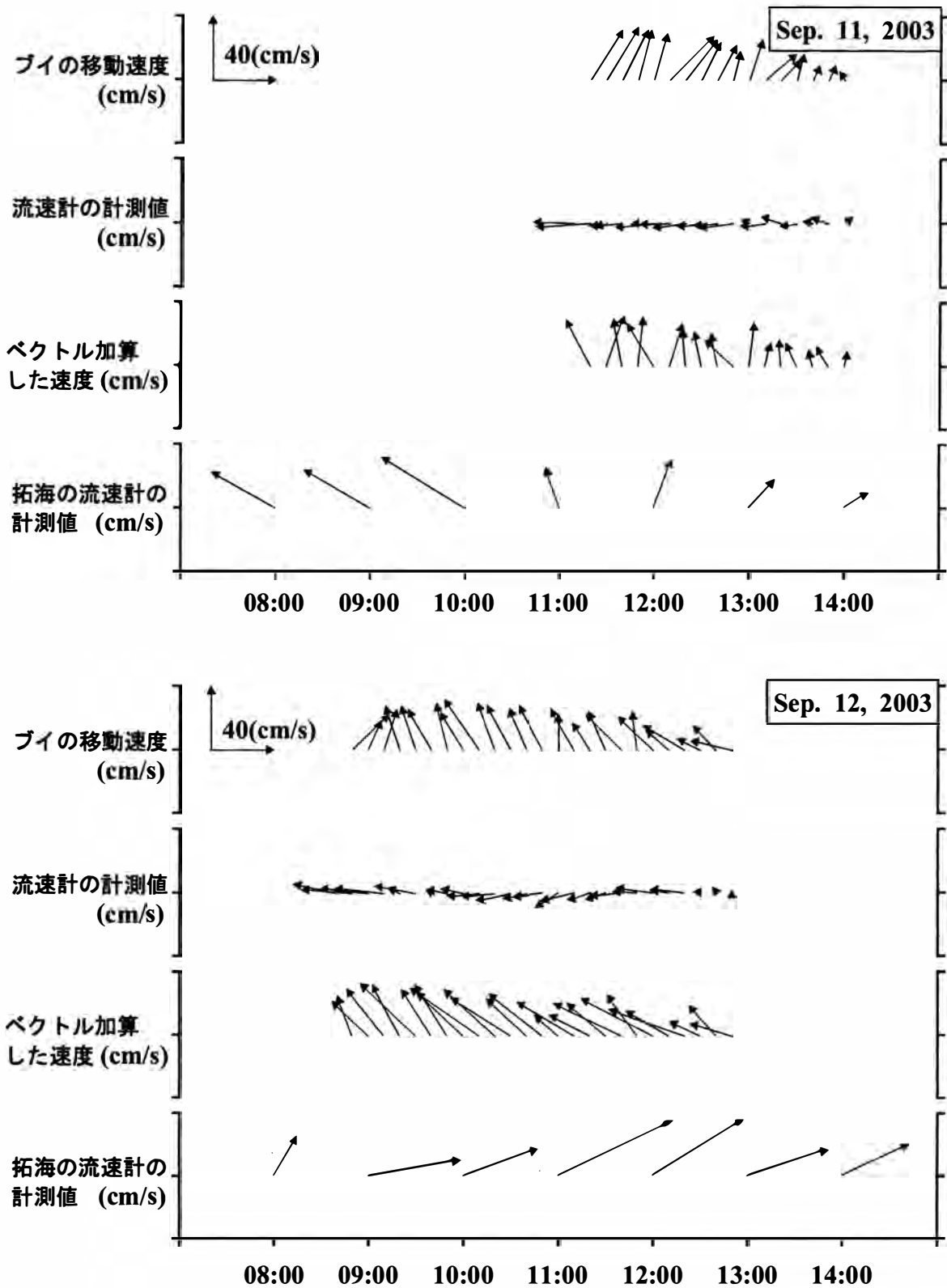


図9 漂流ブイ実験2における漂流ブイ移動速度、電磁流速計計測値、両者のベクトル加算値、及び「拓海」の水深7.5mにおける流速計計測値の時間変動

を十分に捕捉し、また実験2Bにおいても、ほぼ捕捉していたと判断される。今後は、より表面積の大きな抵抗板を深層水の放流水深である20mに取り付けて、放流深層水の追跡性能を向上させることが

必要である。また、密度躍層を中心に観測層の幅をより広げて(少なくとも0-50m)、放流深層水の挙動をより詳細に把握することも必要と考える。このため、(1)自動昇降CTDを2機使用して、抵抗板

の水深 20 m 以浅 (0 - 20 m) とそれ以深 (20 - 50 m またはそれ以上) の観測が同時に行えるように、漂流ブイを改良する方法や、また、(2)自動昇降 CTD 用の表面ブイと抵抗板を取り付けた表面ブイを別立てにして、両者をロープで連結した漂流ブイシステムに変える方法が考えられる。沿岸海域における漂流ブイ実験では (Fortier and Leggett, 1985; König and Schrum, 1997; Raabe *et al.*, 1997 など), こうした改良で漂流ブイの水塊追跡能力が向上し、同一水塊内における生物・環境変化の精度の高い観測が可能となるものと期待される。しかし、自然の湧昇と比べてその規模が遥かに小さい人工湧昇水塊の追跡は、ウラニン染料や SF<sub>6</sub> 等の化学トレーサーを投入して、予めトレーサーでラベルした放流深層水を漂流ブイで追跡しながら、ブイ周辺でこれらトレーサー濃度を測定すると共に、高感度の CTD センサーや、栄養塩センサー類等で同時に連続観測を行う必要がある。

本漂流実験前の 2003 年 6 月から実験期間中及びその後も継続して、「拓海」は水深 205 m から深層水を日量約 10 万トン揚水し、水深 5 m の表層水と混合後に、混合水を水深 20 m に放水していた。自動昇降 CTD の計測データは、「拓海」上流側の参照点での CTD 計測値と併せて T-S ダイアグラム上にプロットして、両者のパターンを比較することにより、放流深層水の検出に成功している。その結果、放流深層水は密度躍層付近を中心に広がり、「拓海」の 3 km 下流側でも十分に検出できることが確認された (大村・井関, 2004)。これら自動昇降 CTD の詳細なデータについては、別途報告する予定である。

## 謝 辞

本研究は、「深層水活用型漁場造成技術開発」(水産庁補助事業:「マリノフォーラム 21」実施主体)の一環として実施した。同事業推進委員長である東京大学の高橋正征教授はじめ各委員, (株)マリノフォーラム 21 の畔田正格氏, 松原茂樹氏他関係者各位, 及び CT & C 社の柏俊行氏, 熊田純子氏には、多大

な協力を頂きましたこととお礼申し上げます。

## 参考文献

- Broenkow, W. W. (1982): A comparison between geostrophic and current meter observations in a California Current eddy. *Deep-Sea Res.* 29, 1303-1311.
- Fortier, L. and W. C. Leggett (1985): A drift study of larval fish survival. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 25, 245-257.
- Iseki, K., H. Nagata and K. Kitani (1990): Free-drifting sediment trap array for tracking a water parcel. *Bull. Japan Sea Natl. Fish. Res. Inst.* 40, 227-232.
- Iseki, K., H. Nagata, K. Furuya, T. Odate and A. Kawamura (1994): Effect of artificial upwelling on primary production in Toyama Bay, Japan. *Proc. the 1994 Mie Internat. Forum and Symp. on Global Environment and Friendly Energy Technology*, Mie Academic Press. pp. 458-462.
- 井関和夫. 2000. 海洋深層水による洋上肥沃化-持続生産・環境保全型の海洋牧場構想. 月刊海洋, 号外, No. 22, 170-178.
- 井関和夫. 2002. 散布深層水の挙動把握と海域肥沃化に関する研究: 漂流ブイと自動昇降型 CTD・クロロフィル計の有効性について. 海洋深層水研究. 3: 83-90.
- Iwata, S. and M. Matsuyama (1989): Surface circulation in Sagami Bay-the response to variations of the Kuroshio Axis. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 45, 310-320.
- König, P. and C. Schrum (1997): Hydrographic observations and model results from PRISMA drift experiment. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 156, 255-261.
- Kjørboe, T., P. Teselius, B. Mitchell-Innes, J. L. S. Hansen, A. W. Visser, and X. Mari (1998): Intensive aggregate formation with low vertical flux during an upwelling-induced diatom bloom. *Limnol. Oceanogr.*, 43, 104-116.
- Menzel, D. W. (1967): Particulate organic carbon in the deep sea. *Deep-Sea Res.* 14, 229-238.
- Nixon, S. and A. Thomas (2001): On the size of the Peru upwelling ecosystem. *Deep-Sea Res.*, 48, 2521-2528.
- 大内一之(2002): 深層水を利用した海洋肥沃化装置の研究開発. 海洋開発ニュース, 30, 65-69.
- 大村寿明・井関和夫 (2004): 放流域の水塊分布から見た汲み上げ深層水の移動・拡散-I. 2004 年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, 164 頁.
- Raabe, T. U., UH. Brockman, C-D. Durselen, M. Krause, and H-J. Rick. 1997. Nutrient and plankton dynamics during a spring drift experiment in the German Bight. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 156, 275-

- 288.
- Suzuki, 1995. On the study of upwelling created by artificial seamount for the purpose of enhancing biological productivity. Doctor Thesis, Univ. of Tokyo, 207pp.
- 高橋正征・井関和夫. 2000. 21世紀の資源としての海洋深層水. 月刊海洋, 号外 22, 5-10.
- Takahashi, M. and T. Ikeya. 2003. Ocean fertilization using deep ocean water (DOW). *Deep Ocean Water Research*, 4, 73-87.
- 渡辺貢・谷口道子・池田知司・小松雅之・高月邦夫・金巻精一(2000): 海洋深層水による沿岸域の肥沃化. 月刊海洋/号外 22, 160-169.
- Wilkerson, F. P, and R. C. Dugdale (1987): The use of large shipboard barrels and drifters to study the effects of coastal upwelling on phytoplankton dynamics. *Limnol. Oceanogr.*, 32, 368-382.
- (2004. 7. 5 受付, 2004. 10. 12 受理)

