

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

Behavior of Pumped-up Deep Seawater and Fertilization Effects :
Feasibility Study of Free-drifting Buoy
and a CTD/Chlorophyll Vertical Profiling Vehicle

水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所

井関 和夫

Kazuo ISEKI

Abstract

In order to evaluate a behavior and fertilization effects of pumped-up deep seawater into an euphotic zone, free-drifting buoy experiments on tracking a naturally-occurring upwelling and an artificially pumped-up deep seawater were reviewed. Preliminary experiments of an autonomous profiling vehicle having CTD/Chl sensors was also conducted at a shallow coastal sea.

Key Words: Deep sea water, dynamic behavior, fertilization, drifting-buoy, autonomous profiling vehicle

要　旨

有光層内に汲み上げた海洋深層水の挙動把握と深層水による海域肥沃化効果（植物プランクトンの増殖等）の同時判定を行う目的で、漂流ブイを用いた湧昇水塊及び散布深層水の追跡実験に関する研究レビューを行うとともに、自己自動昇降型 CTD・クロロフィル計の性能試験を実施した。これらの知見により、深層水の挙動把握・肥沃化効果判定としての多項目センサー搭載型漂流ブイシステムの有効性と技術的問題点を検討した。

キーワード：海洋深層水、挙動把握、肥沃化効果、漂流ブイ、自動昇降型センサー

1. はじめに

近年、世界の漁獲高は頭打ち状況にあり、今後の人口増から見て深刻な食糧不足が予測されている。そのため、漁業資源の増大、持続的生産を図ることは、人類にとって急務であり、とりわけ、世界最大の水産物輸入国である我が国が世界に先駆けて取り

組むべき課題である。

こうした社会的背景の中で、海洋深層水の特性の一つである富栄養性を利用した植物プランクトンや海藻の培養実験は着実な成果をあげ、さらに浅海域の藻場造成（渡辺等, 2000）から洋上肥沃化による漁場造成の可能性（Iseki *et al.*, 1994；井関, 2000；高橋・井関, 2000）が実証段階へと向かい

¹水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所 (〒739-0452 広島県佐伯郡大野町丸石2丁目17-5)

つつある。深層水の洋上肥沃化は、数百メートルの深さから取水管を通して海洋深層水を有光層に汲み上げ放流（散布）し、植物プランクトンの光合成活性を高めて一次生産の増大、ひいては漁業生産量の増大を意図しているため、自然海洋に人工湧昇流をつくり、海域肥沃化を図る試みといえる。

マリノフォーラム21では「深層水活用型漁場造成技術開発」（水産庁予算：マリノフォーラム21実施主体）の一環として、相模湾中央部において2003年より海域肥沃化実験を予定している（畔田、2002）。ここでは、海域実験において散布深層水の挙動把握と肥沃化効果の判定を同時に行うために、多項目センサーを装着した漂流ブイシステムの有効性について事前検討を行ったので、その結果について報告する。

2. 湧昇海域における肥沃化現象と湧昇水塊の追跡実験

世界有数の湧昇海域であるペルー沖、カリフォルニア沖、西部アフリカ沖における表層の栄養塩濃度は、非湧昇域の北太平洋旋流域、北大西洋中央部などと比較して際だって高く、基礎生産量、漁業生産量が大きいことは古くから知られている（Walsh, 1974；図1）。わが国周辺には、これら大規模湧昇海域は存在しないが、伊豆諸島および伊豆半島周辺に、短期間であるが局地性湧昇による海域肥沃化（植物プランクトン、動物プランクトン、海藻の増加など）が観測されている（Takahashi and Kishi, 1984; Toda, 1989；中島・豊田, 1989）。これらのことから、自然海洋の湧昇流に匹敵する規模で深層水を洋上に汲み上げれば、海域肥沃化、漁業生産量の増大が図られることが期待される。

そこで、自然海洋の湧昇水塊中における生物・化学的プロセス（肥沃化を含む）の解明を目的として実施された、漂流ブイによる湧昇水塊の追跡実験の例を以下に示す。Menzel (1967) は、ペルー沖に生まれた新しい湧昇水塊中に漂流ブイ（水深10mにパラシュート・ドローグを装着）を投入して、5日間にわたって植物プランクトン濃度の時間変動を調べている（図2の測点573から587における

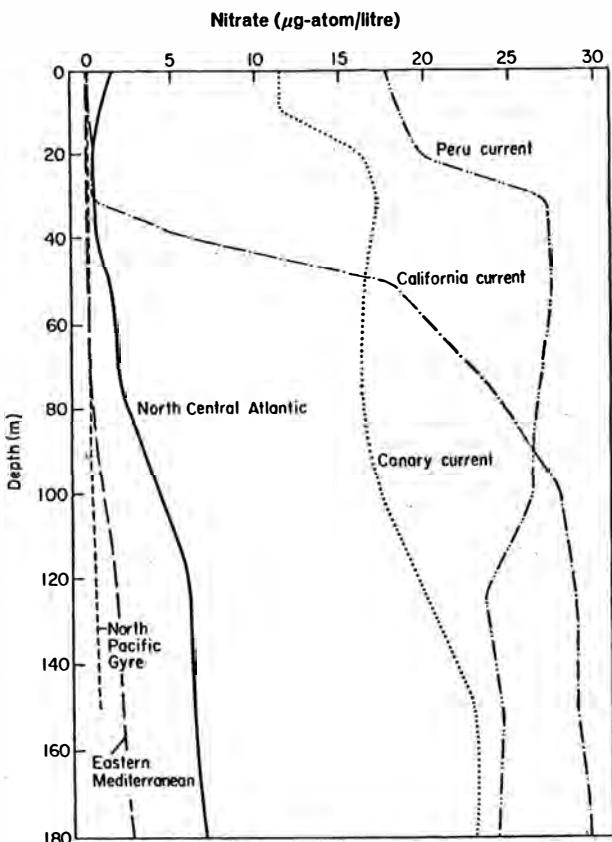


図-1 湧昇域（ペルー沖、カリフォルニア沖、西部アフリカ沖）と非湧昇域（北大西洋中央部、北太平洋旋流域、東部地中海）における硝酸塩濃度の鉛直分布（Walsh, 1974 より）。

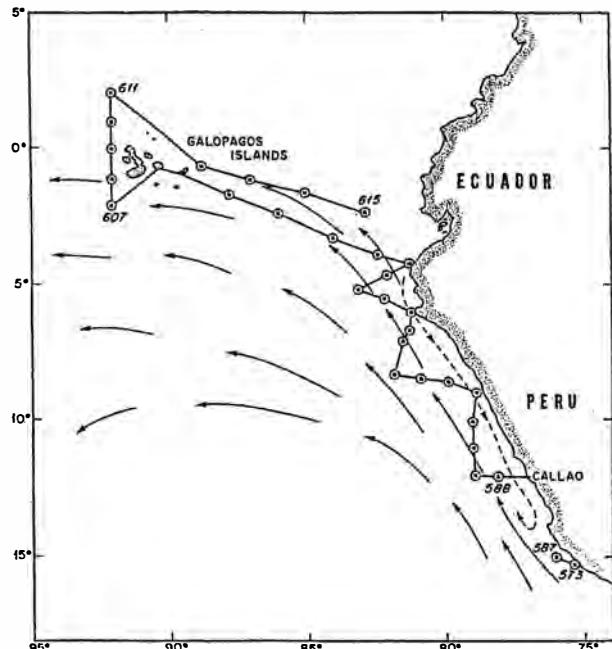


図-2 ペルー沖における湧昇水塊の漂流ブイによる追跡実験での観測点（573から587）とペルー沖からガラバコス島に至る調査船の観測点（588から615）および表層流のパターン（Menzel, 1967 より）。

観測)。

論文中には詳細なデータは示されていないが、漂流ブイ追跡実験中に観測された水温、塩分データから、5日間にわたって同一水塊（即ち、湧昇水塊）が追跡されたものと著者は判断している。なお、残念ながら、この実験では粒状有機炭素以外のデータ（例えば、栄養塩類、クロロフィル濃度、動物プランクトン、魚類等）が示されてなく、植物プランクトン濃度の増加分を粒状有機炭素濃度の増加分で表している。

図3に示すように、表層0-75mにおける粒状有機炭素濃度の値（積分値）は、実験開始の1日後から2日後にかけて急激に増加して開始時（4.5 gC/m²）より1桁高い値（35 gC/m²）に達し、その後5日目まで減少している。この間、表層直下の75-150m層における粒状有機炭素濃度はほぼ一定であり、表層の変動（イベント）との対応は認められていない。自然海洋において湧昇流による肥沃化効果を漂流ブイ追跡実験により立証した初めての試みであろう。なお、ペルー沖からガラバコス島に至るジグザグ状の観測点（589から615）での調査結果から、湧昇流起源と考えられる粒状有機炭素の高濃度域がいくつか認められている（図4）。

湧昇流は時空間的に大きな変動幅を有するが、Nixon and Thomas (2001) はペルー沖においてクロロフィル濃度が 1 mg/m³ を超える海域を湧昇海

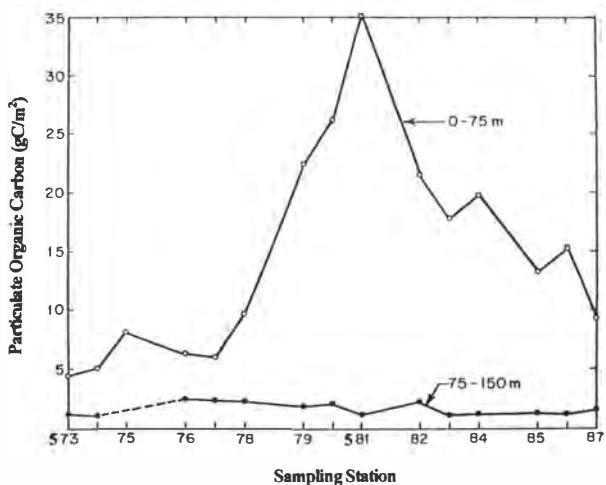


図-3 ペルー沖における湧昇水塊の漂流ブイによる追跡実験中に観測された粒状有機炭素の（0-75 m および 75-150 m 積分値）時間変化 (Menzel, 1967 より)。

域として、その規模を $35 \times 10^3 \text{ km}^2 \sim 307 \times 10^3 \text{ km}^2$ と見積もっている。瀬戸内海の面積が $22 \times 10^3 \text{ km}^2$ であることとくらべてその規模の大きさが理解される。このように、ペルー沖では広範囲にわたって海域全体が湧昇するために漂流ブイ実験で湧昇流を追跡しやすく、結果として生物・化学・物理的プロセスが把握しやすいものと考えられる。

次に、ペルー沖湧昇流と比べてその規模が3桁程度以下と想定される地域湧昇流での実験例を紹介する。Kiørboe *et al.* (1998) は、1995年2月20日に南アフリカ西部海岸のセントヘレナ湾（面積 900 km² 程度）で発生した珪藻ブルームに漂流ブイを投入し、調査船で7日間にわたってブイを追跡しながら（漂流距離： $\sim 15 \text{ km}$ ）ブイ周辺で、CTD+クロロフィル計、栄養塩、植物プランクトン、基礎生産量、セディメントトラップによる粒子フラックスなどの観測を行い、同一水塊内における各観測項目の時間変動及び生物・化学・物理プロセスを把握することに成功している。

このように、自然湧昇流の肥沃化評価として、漂流ブイ追跡実験の有効性が認められている。そこで、多項目センサー搭載型測器、セディメントトラップなどを装着した漂流ブイを用いて深層水取水・散布装置による人工湧昇流の肥沃化効果の検証を試みた例を以下に示す。

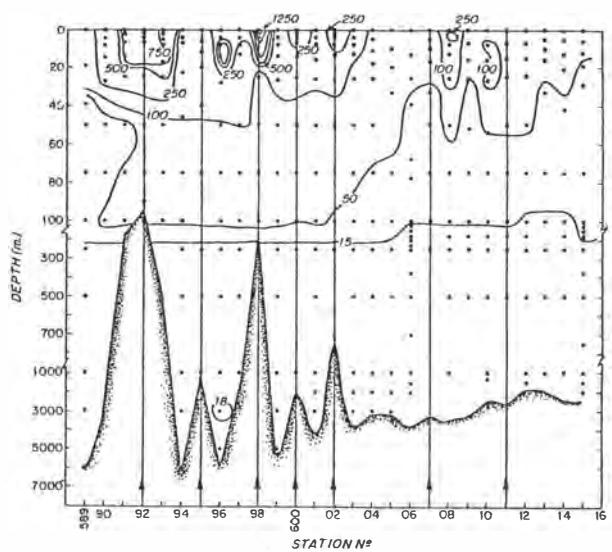


図-4 ペルー沖の観測点 589 から 615 における粒状有機炭素濃度の鉛直断面図 (Menzel, 1967 より)。

3. 散布深層水による洋上肥沃化：漂流ブイ追跡実験

世界初の深層水による洋上肥沃化実験は、科学技術庁の科学技術振興調整費総合研究として日本海区水産研究所を中心とする研究グループにより、1989年と1990年の夏季に富山湾水見沖において実施された。洋上型深層水取水装置「豊洋」により(木谷・長田, 1989), 水深220mの海水から0.3トン/秒(日量26,000トン)で取水し、表層水と混合後に(深層水:表層水=1:2)海表面に散布した。調査船により散布点の周辺においてグリッド観測を繰り返し行った結果、散布点から数百m以内で水温の低下、塩分の増加がわずかながら認められるケースがあったが、栄養塩、クロロフィルの顕著な変動は確認できなかった(木谷ら, 1991)。また、Furuya *et al.* (1993)は、深層水取水装置の周辺で珪藻プランクトンの活発な増殖を認めたが、水温、

塩分、栄養塩などの分布との関連性が無く、このため散布深層水による肥沃化効果であると評価するには至らなかった。

そこで、散布水中での肥沃化効果を確認するため、パラシュート・ドローグに加えて、水温、水深、クロロフィル自動計測機(アクアシステム)，時間分画式セディメント・トラップをとりつけた漂流ブイを散布点近くから放流し、追跡実験を数回実施した(図5a; Iseki *et al.*, 1994)。1990年8月上旬の実験(実験Ⅲ)では、3日間にわたる漂流ブイの追跡中(図5b)，アクアシステム(設置水深:約33m)で観測された水温、クロロフィル濃度の変動はともに小さくて($23.5 \pm 0.02^{\circ}\text{C}$, $0.2 \pm 0.03 \mu\text{g Chl/l}$)、散布深層水の影響を確認するにはいたらなかった(図5c)。また、漂流ブイの追跡期間中に水温、塩分、栄養塩、クロロフィル、植物プランクトン細胞数の鉛直分布、および動物プランクトン量の船上調査を実施したが、散布深層水の挙動、肥沃化効果を

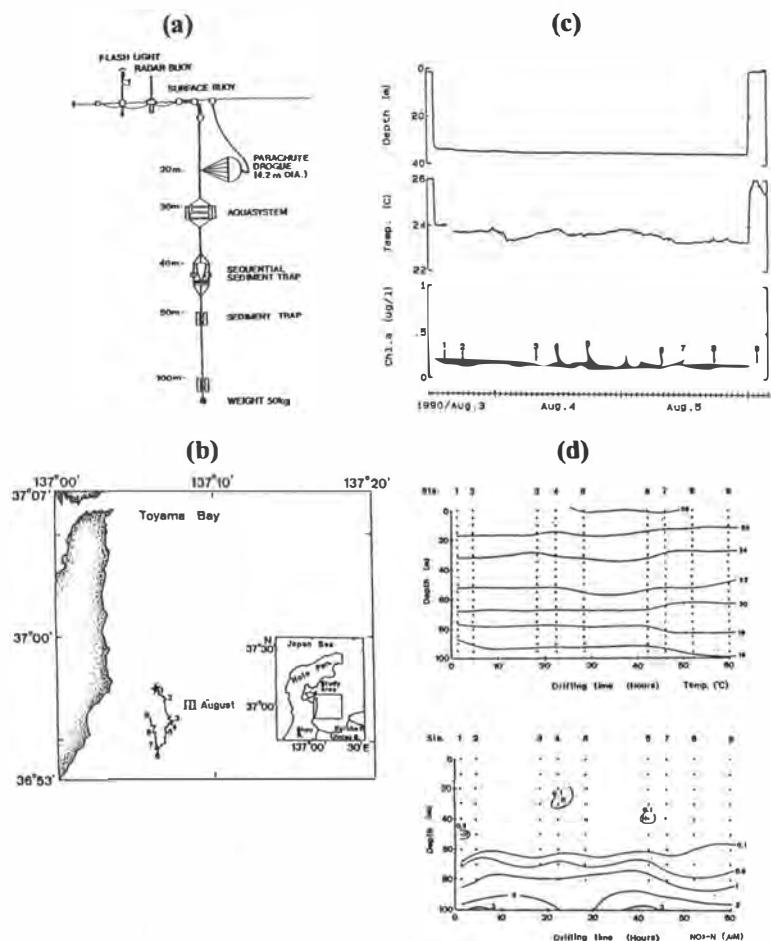


図-5 富山湾において散布深層水の追跡に用いられた(a)漂流ブイ観測システム、(b)実験Ⅲにおける漂流ブイの軌跡、(c)アクアシステムで得られた水深、水温、クロロフィルの時間変動および(d)ブイ追跡期間中に漂流ブイの周辺で得られた水温と硝酸塩濃度の時間変動(Iseki *et al.*, 1994より)。

示す顕著な変動は認められなかった。ここでは、水温、硝酸塩濃度の観測結果を図5dに示す。

一方、深層水と表層水の混合水を室内天然光で培養すると培養開始後の2~3日の間に、栄養塩濃度が急減するとともに、クロロフィル濃度、粒状有機炭素濃度、基礎生産量が急増し、深層水自体は肥沃化ポテンシャルを有する結果が得られた(Iseki *et al.*, 1994)。さらに、これら表・深層混合水の調査船デッキ上における培養実験においても、同様の結果が得られ、深層水の肥沃化ポテンシャルが確認されている(Furuya *et al.*, 1993)。

以上の実験を通して、(1)天然湧昇流と較べて富山湾における深層水散布量の規模が極めて小さいために、散布深層水のブルームも小さく、かつ急速に拡散希釈していること、および(2)散布水の密度が表層水より大きいために表層水中への滞留時間が短く、深層へと沈降している可能性があることなどにより海域実験では肥沃化効果を十分に確認できなかったものと推察された。

4. 自動昇降型 CTD・クロロフィル計のテスト

前述の実験結果から、散布深層水の挙動として沈降、等密度面への滞留、拡散があり内部波などの影響も受けるため、ある任意水深にのみセンサーを設置した場合には、散布深層水の挙動・肥沃化効果を正確に評価するのは困難である。そこで、自動昇降型多項目センサーを用いることで、鉛直方向の生物・物理パラメターについて連続データを取得することで、少なくとも鉛直方向に関しては正確な散布深層水の挙動把握と肥沃化評価が達成できると考えられる。

2003年度から予定されている相模湾における海域肥沃化実験では日量10万トンの深層水を取水管で連続的に汲み上げて散布するため、天然湧昇流と較べると汲み上げ量・散布面積ともに小さい(井関, 2000; 畑田, 2002)。一方、海域肥沃化実験が計画されている相模湾中央部には反時計回りの還流が発達しやすく(Iwata and Matsuyama, 1989)、また、密度流拡散装置により深層水を表層の密度躍層内に放水する計画であるため(大内, 2002)、深

層水の拡散希釈がかなり抑制され(特に、鉛直方向)、結果として肥沃化効果が実現されやすいものと期待されている。

しかし、天然湧昇流と比べると規模が小さいため、小型・軽量・安価な自動昇降型多項目センサーの使用を考えて、Ocean Sensors社製の自己自動昇降型 CTD(OS500APV; McCoy, 1996)にオプションセンサーとしてクロロフィル蛍光光度計(ECO-AFL, WET Labs社製)を装着した測器を選択した。本機種のサイズは直径12cm×長さ100cm、空中重量10kgと小型・軽量であるため船上作業で扱いやすく、沿岸用としては使用水深レンジも300mまであり、高精度の水温・塩分センサーを内蔵している(表1)。筐体下部のピストンを伸縮させることで浮力を変えて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み、回収後にコンピュータに接続してハードディスクに転送することができる。なお、自動昇降の水深、サンプリング・インターバルの設定は本機の水中投入前にコンピュータと接続して行う。

本機種は自己自動昇降型であるため、係留用のロープ無しに単独で自動昇降が可能であるが(McCoy, 1996)、相模湾の海域実験では表層ブイ、ドローグなどと併用して表層ブイシステムとして使用する予定である。このため、ポリエチレン製のスライダーに本機種を固定して、ビニール製被覆のワイヤーを伝って自動昇降するようにして、その性能試験を瀬戸内海区水産研究所の調査船用桟橋で2002年2月15日から17日にかけて行った(図6)。

本性能試験では、水深0.3mと4.8mの間を10分間隔で自動昇降し、0.5秒毎に水温、塩分、水深および蛍光強度の読み取りが行えるように予めプログラムを設定し、2日間にわたる連続観測を行った。

表-1 本実験に用いた自動昇降型 CTD・クロロフィル計の技術仕様

測定項目	測定レンジ	精度
水深	0~300 m	±0.50%
水温	-2~35°C	±0.01°C
塩分	2~45 psu	±0.03 psu
クロロフィル	0~50 µg/l	±0.15 µg/l*

*クロロフィル濃度20µg/lにおける精度

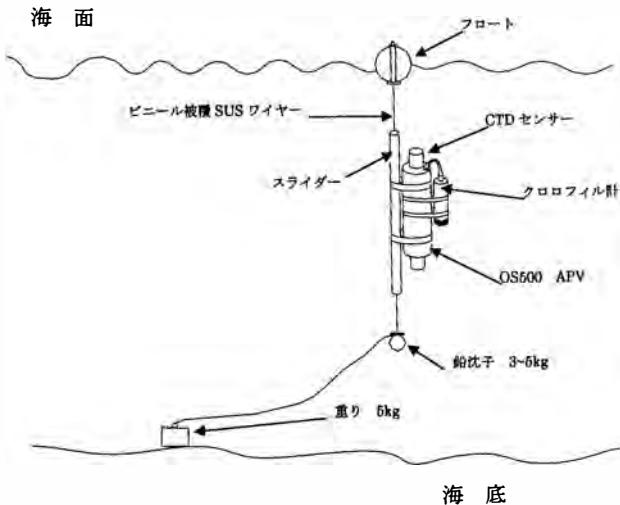


図-6 自動昇降型 CTD・クロロフィル計の係留概要

なお、実験期間中における本機種の上昇及び下降速度は、ほぼ 10~11 cm sec⁻¹ の範囲内にあり、センサーが筐体の上端に位置しているため上昇時の測定値をデータ解析に使用した。

例として、満潮時、下げ潮時、及び干潮時の観測結果を図 7 に示した。観測場所がごく浅い表層で、かつ冬季冷却による鉛直混合が活発であったため、水温、塩分、クロロフィル濃度共に鉛直的に均一な傾向であったが、潮汐周期に起因すると考えられる変動が各項目で観測された。図 7 から判断されるように、作動状態は極めて良好で 2 日間にわたる 10 分間隔での高頻度観測においてもバッテリー容量は充分であった。

5. 現場海域での肥沃化実験にむけての今後の検討課題

前述の計測器は外洋域で使用される大型の自動昇降型計測システムと比較すると、小型・軽量・安価であり、静穏な内海域の性能試験では優れた結果を示した。しかし、肥沃化実験が実施される相模湾は太平洋に面した開放系の湾であるため、波浪の影響を大きく受け、海域実験における自動昇降の水深レンジも 0~50 m 程度と大きくなる点を考慮すると、本実験前に、漂流ブイにとりつけて現場海域（相模湾）において性能試験を行うことが不可欠である。

さらに、漂流ブイが流れをどの程度補足しているかを知るために、漂流ブイに流速計をとりつけて、

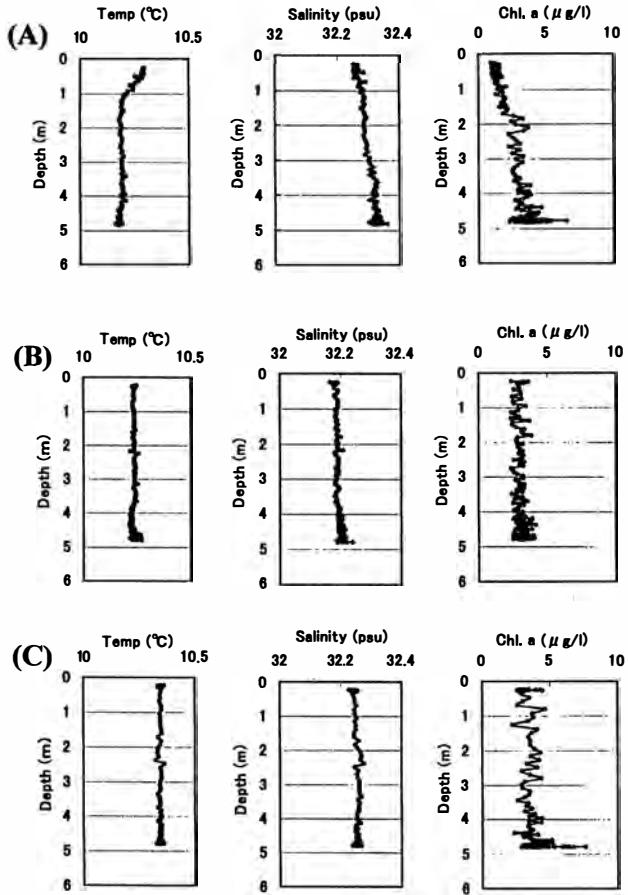


図-7 濱戸内海区水産研究所の調査船桟橋付近において自動昇降型 CTD・クロロフィル計で得られた水温、塩分およびクロロフィル a の鉛直分布。観測例として (A) 2002 年 2 月 15 日 11 時 58~59 分 (満潮), (B) 2002 年 2 月 15 日 14 時 50~51 分 (下げ潮) と (C) 2 月 15 日 17 時 42~43 分 (干潮) の記録を示す。

流速計自体に記録される相対流速がゼロに近いことを確認する必要もある。Iseki et al. (1990) は、図 5 とほぼ同様な漂流ブイシステムの性能試験を富山湾で実施し、漂流ブイシステムの漂流速度とブイシステムにとりついたアンデーラ流速計の流速を比較している。その結果、漂流ブイが 29~39 cm/sec の速度で南方向に漂流したときに、流速計の相対速度は北向きの 3 cm/sec 以下であり、完全ではないものの流れを 90% 近く補足していることを確認している (図 8)。

一方、カリフォルニア沖で Broenkow (1982) が実施した表層から水深 2000 m までのラインからなる漂流ブイでは、表層流の補足率は 50% 程度以下であった。これは表・中・深層の流れの大きさが相異なり、一般に水深の増加にともない流速は減少し方向も変化するため、表層一深層間で “Slippage”

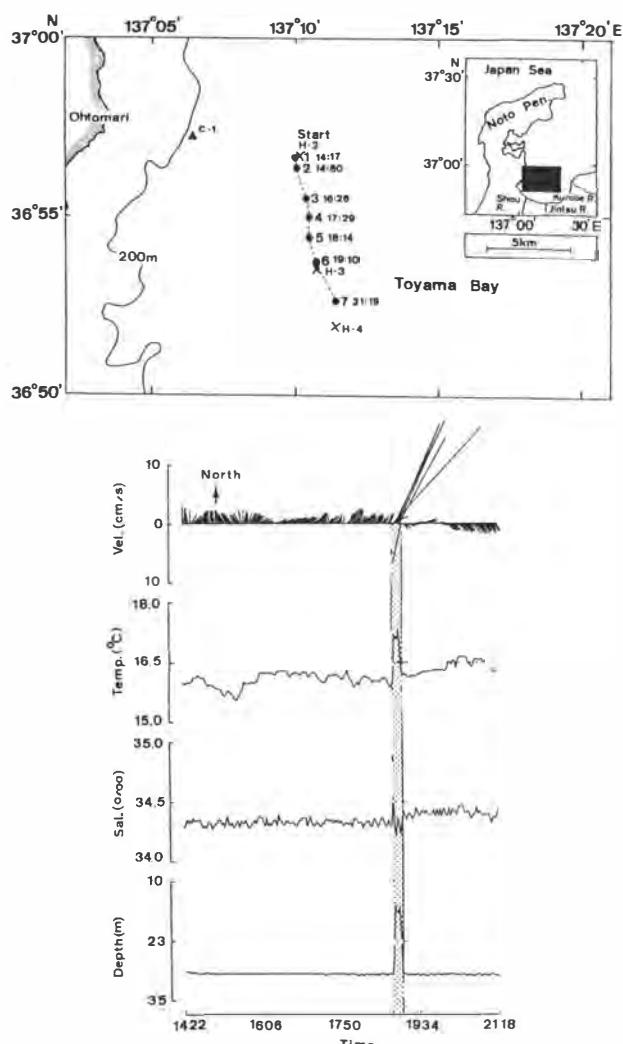


図-8 富山湾における漂流ブイの性能試験期間中（1989年6月16日14:17～21:19）に得られた漂流ブイの航跡と漂流ブイの30 mにとりつけたアンデーラ流速計（水温、塩分、水深センサー内蔵型）で得られた流速、水温、塩分、および水深のデータ（Iseki *et al.*, 1990より）。注：18:58～19:12にえられた流速、水温などの異常値は、漁業用表面ブイとの衝突回避のため漂流ブイを一時的に牽引したことによる。

現象がおき流れの補足率を悪くしているものと考えられる。また、Fortier and Leggett (1985)によるセントローレンス河口における実験では（ドローグ、水温・塩分センサーつきアンデーラ流速計を装着）、5.6日間におけるブイの追跡期間中に7つの水塊を通過したことがT-Sダイアグラムおよび生物パラメターの解析から確認されている。

このように、実験に使用する漂流ブイのデザイン、実験海域の海況（流速、風速、波浪、渦など）により、漂流ブイによる水塊の補足率が大きく影響を受けるので、現場海域において漂流ブイの水塊追跡能

力を把握するための事前性能試験は不可欠と考える。今後、相模湾で自動昇降型CTD・クロロフィル計を搭載した漂流ブイの性能試験を行い、その結果を踏まえて2003年度から海域肥沃化の実証試験を行う予定である。

謝 辞

本研究を行うにあたり、（株）マリノフォーラム21の畔田正格氏、松原茂樹氏他関係職員の皆様、CT & C社の柏俊行氏、熊田純子氏には多大の協力をいただきましたことをお礼申し上げます。本研究は、「深層水活用型漁場造成技術開発」事業（水産庁予算：マリノフォーラム21実施主体）の一環として実施した。

文 献

- 畔田正格（2002）：人口湧昇漁場へのチャレンジ。JADOWA NEWS, 6, 11-12.
- Broenckow, 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.
- Furuya, K., H. Tsuzuki, K. Iseki and A. Kawamura (1993): Growth response of natural phytoplankton assemblages in artificially induced upwelling in Toyama Bay, Japan. Bull. Plankton Soc. Japan, 40, 109-125.
- 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。月刊海洋／号外, 22, 170-178.
- 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.
- Kiørboe, 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.
- 木谷浩三・長田宏 (1989)：人工湧昇システム. 月刊海洋, 21, 612–617.
- 木谷浩三・長田宏・片桐久子・乗木新一郎・皆川昌幸・新子谷悦宏・尻引武彦・角皆静男 (1991)：汲み上げ深層水の挙動把握に関する研究. 科学技術振興調整費「海洋深層資源の有効利用技術の開発に関する研究」(第Ⅱ期平成元年～2年度) 成果報告書, 科学技術庁開発局, pp. 50–71.
- McCoy, K.O. (1996): Autonomous profiling vehicles. *Sea Technology*, 37, 15–18.
- 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.
- 中島敏光・豊田孝義 (1989)：深層水人工湧昇－海洋生物生産への応用－. 月刊海洋, 21, 618–625.
- 大内一之 (20002)：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.
- Takahashi, M. and M.J. Kishi (1984): Phytoplankton growth response to wind induced regional upwelling occurring around the Izu Island off Japan. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 40, 221–229.
- 高橋正征・井関和夫 (2000)：総論：21世紀の資源としての海洋深層水. 月刊海洋／号外22, 5–10.
- Toda, H. (1989): Surface distribution of copepods in relation to regional upwellings around the Izu Islands in summer of 1988. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 45, 251–257.
- 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.
- Walsh, J.J. (1974): Primary production in the sea. Proc. 1 st. Int. Congr. Ecol. Pudoc., Netherlands, 150–154.

(2002. 8. 19 受付, 2002. 10. 28 受理)