

プロファイリングフロート用CTDセンサーの現場比較

高槻 靖^{*1} 宮崎 基^{*2} 井上亜沙子^{*3} 安藤健太郎^{*4} 伊澤 堅志^{*5}

2000年より開始したARGO計画は、中層プロファイリングフロートによって、全世界の海洋に3000台程の表層観測網を構築することを目標としている。フロートによって計測される項目は、水温および塩分であり、ユーザーに供給する最終データセットの段階で、水温および塩分データの精度をそれぞれ0.005℃および塩分0.01とすることを目標としている。この目標を達成するためには、フロート搭載が想定されるセンサーを陸上で検査・検定するだけでなく、実海域での浮上時に周囲の温度などが刻々と変化する実際の場において、信頼できるセンサーと比較を行い、その動的特性を評価することも必要である。今回、我々はこの評価のために、専用のプロファイル装置を製作し、陸上で浮上テストを行った。そして、その結果に基づいて実海域において有索式および無索式のプロファイル装置による既存のフロート用センサーの比較実験を行った。その結果、中層フロートのセンサーとして搭載される、今回テストした全てのメーカーの水温センサーは、動的特性という観点でARGO計画の仕様を満たしていることが示された。一方、塩分(電気伝導度)センサーに関しては、SBE社およびFSI社製のセンサーのみが動的特性という観点で必要な精度を満たしていることがわかった。また、FSI社製のセンサーによる塩分データには小さなノイズが見られた。このノイズは、水温センサーと電気伝導度センサーの応答特性が適合していないために生じたものと考えられる。

キーワード：ARGO計画, 計測技術, 塩分

Field experiment to evaluate the performance of CTD sensors for the profiling float

Yasushi TAKATSUKI^{*6} Motoki MIYAZAKI^{*7} Asako INOUE^{*8}
Kentarō ANDO^{*9} Kenji IZAWA^{*10}

The international Argo program started in 2000 to build the global profiling array for improving dramatically the ability of climate prediction for the global scale. The accuracy of profiling data of temperature and salinity were aimed to be within 0.005K and 0.01 in practical salinity, respectively. To achieve this quality level in temperature and salinity, we evaluated the dynamic response of three different models of temperature and conductivity sensors for profiling float in the tropical Pacific using the specially designed profiler for comparing the three sensors with the high precision SBE9plus CTD profiler. The float usually samples temperature and salinity data during ascending, and due to the different time response of sensors between temperature and conductivity, the salinity data sometimes indicates unrealistic value ascending in thermocline.

*1 海洋観測研究部(現在所属:気象庁気候・海洋気象部)

*2 地球観測フロンティア研究システム

*3 (株)マリンワークジャパン 海洋科学部

*4 海洋観測研究部

*5 海洋観測研究部(現在所属:(株)鶴見精機)

*6 Ocean Observation and Research Department (Present affiliation: Climate and Marine Department, Japan Meteorological Agency)

*7 Frontier Observational Research System for Global Change

*8 Department of Marine Science, Marine Works Japan, LTD.

*9 Ocean Observation and Research Department

*10 Ocean Observation and Research Department (Present affiliation: The Tsurumi Seiki Co., Ltd.)

The comparison results indicate that the temperature sensors were all within the data quality requirement of Argo in all depth ranges in these experiments (0-500 m). However, only the salinity sensors of SBE and FSI could achieve the requirement. The salinity data from FSI seemed to have small salinity noise resulted from the mismatched time response between temperature sensor and conductivity sensor.

Keywords : ARGO project, measurement technique in the field, salinity

1. はじめに

2000年度に始まった国際プロジェクトであるArgo計画(Roemmich and Owens, 2000; 水野, 2000など)では、海面から2000m深までの水温/塩分の鉛直プロファイル測定する中層フロート(プロファイリングフロート)が観測手段として用いられる。計画通りにフロートが展開されると、約3000本のフロートが緯度・経度3度×3度(10000平方km)の海域に1台の割合で10日毎に浮上を繰り返して水温/塩分の観測を行なう。この計画だけで、年間約10万点に及ぶデータが得られ、従来の方法で得られてきたデータ量を遥かにしのぐ量をリアルタイムで得ることができる事になる。フロートによって得られる水温・塩分データの精度はそれぞれ0.01℃、塩分0.01が目標として掲げられており、これにより、気候変動予測の精度向上に大きく貢献できることになる。しかし、フロートは一度投入されると、無保守で運用されるため、これらのデータの品質はセンサーの初期性能及び投入前の校正と、運用開始後のセンサーの安定性にかかっているといえる。このため、投入後のセンサー精度評価を行う目的で、歴史的観測データや時空間的近傍における信頼性の高いデータとの比較が行われてきており(Freeland, 1997, Bacon et al., 2001, Riser and Swift, 2001など)、また補正手法の検討がなされている(小林ら, 2001, Wong et al., 2003など)。

日本では国際的なArgo計画に対応してミレニアム・プロジェクトの一つである「高度海洋監視システム(ARGO計画)の構築」が2000年度より開始され、海洋科学技術センター海洋観測研究部及び地球観測フロンティア研究システムは、このプロジェクトの課題「フロート展開の準備、計画、実施」において、前述の取得データの品質管理を行うと同時に、フロート用センサーの精度向上のための性能評価も行っている。この中で、センサーの静的な特性については大型校正パスを導入して運用し、センサー精度を保守管理している(井上ら, 2001)。しかしながら、実海域での運用においては、水温センサーと電気伝導度センサーの応答特性が大きく異なっていると、電気伝導度が水温と塩分に依存しているために、水温と電気伝導度から計算される塩分データに現実にはないスパイクが生じる(Giles and McDougall, 1986)。このため、一般のCTDでは、この塩分スパイクを取り除くようにデータを処理したり、センサー自体に工夫をしたりしている。例えば、SeaBird Electronics (SBE) 社製のSBE9plus CTDの場合には、水温センサーと電気伝導度センサーをTCダクトと呼ばれる管で結び、ポンプを用いて海水を一定流量で流すことにより、同一の水を一定の時間差で計測し、水温と電気伝導度データから塩分を計算する際に、ダク

トを通過する時間だけデータをずらすことによって、塩分スパイクを出しにくくしている。しかしながら、フロートのセンサーにおいてはこれに関する実験が行われておらず、実海域におけるセンサー精度を評価するには水温・塩分が変化している場における動的な特性についても把握することが望まれる。

本報告で述べるプロファイル実験を実施する前に、事前に実海域センサー比較実験を実施した。実海域で複数のセンサーを比較するには、同時に同じ海水を測定する事が望ましい。そこで、センサーを既存のCTD枠に固定して同時にデータを取得することを「かいう」KY00-06航海中に試みた。この実験では、一定速度で枠を吊るしたケーブルを巻き上げたにもかかわらず、船体が動揺することによるCTD枠の動揺の影響により浮上速度を一定に保つ事が困難であり、上昇速度に±10cm/s程度の変動が観測され、実際のフロートの動きを十分再現したとはいえなかった。この事前実験の結果を受けて、安定した速度のもとでの動的な特性を調査するために、フロート用に開発された複数のセンサーを基準となるCTDセンサーと同架して自由浮上させる本格的な比較実験を行ったので、その結果をここに報告する。

2. プロファイル装置の設計

フロートは、安定した速度で上昇しながら水温と電気伝導度を計測する。従って、通常のCTD観測などで見られるワイヤー吊り下げ方式では、船体の動揺などによって上昇速度が変動してしまうため、本実験の目的を達成することができなかった。そこで、比較実験用に浮力を持った専用の枠を設計・製作して、いくつかのフロート用センサーと基準となるCTDセンサーを同架させることとした。浮力体、センサー等を取り付けた枠全体をプロファイル装置と呼ぶことにする。

基準となるセンサーには観測船で多く用いられているSBE社製SBE9plus CTD(水温センサーはSBE3, 電気伝導度センサーはSBE4である)を用い、データロガーとしてSBE17plusを接続してデータを記録することとした。比較対象となるフロート用のセンサーは電極式伝導度センサーを使用しているSBE社製SBE41CP(本報告では、以下SBEセンサーと呼ぶ)、誘導式伝導度センサーを使用しているFalmous Scientific Inc. (FSI) 社製EXCELL CTD(以下、FSIセンサー)及び株式会社鶴見精機がフロート用に開発中であり、誘導式伝導度センサーを使用しているCTDセンサー(以下、TSKセンサー)の三種類である。比較実験に用いた各センサーの仕様を表1に示す。SBE社製のSBE9及びSBE41CPはともにポンプを用いてセンサーに海水を送って

表1 比較実験に用いたセンサーの仕様一覧
サンプリング間隔の括弧内の値は実測による値を示す。

Table 1 List of the sensors used for the field experiments.

Figures in parenthesis for sampling interval are represented the actual values in these experiments.

Manufacturer	Model	Sampling Interval (sec)		Sensor type	Accuracy	Resolution	Stability (/month)
SBE	SBE9plus + SBE17	1/24	T	Thermister	$\pm 0.001^{\circ}\text{C}$	0.0002°C	$\pm 0.0002^{\circ}\text{C}$
			C	Platinum electrode	$\pm 0.003\text{mS/cm}$	0.0004mS/cm	$\pm 0.003\text{mS/cm}$
			P	Digiquartz	$\pm 0.015\%$ FS	0.001% FS	$\pm 0.0015\%$ FS
SBE	SBE41CP	1 (1.295)	T	Thermister	$\pm 0.002^{\circ}\text{C}$	0.0002°C	$\pm 0.0002^{\circ}\text{C}$
			C	Platinum electrode	$\pm 0.003\text{mS/cm}$	0.0004mS/cm	$\pm 0.003\text{mS/cm}$
			P	Semiconductor strain gauge	$\pm 2.4\text{dbar}$		
FSI	EXCELL	1/2.8 (1/2.751)	T	Platinum resistance	$\pm 0.005^{\circ}\text{C}$	0.0001°C	$\pm 0.0002^{\circ}\text{C}$
			C	Inductive type	$\pm 0.005\text{mS/cm}$	0.0001mS/cm	$\pm 0.001\text{mS/cm}$
			P	Semiconductor strain gauge	$\pm 0.05\%$ FS	0.001% FS	$\pm 0.005\%$ FS
TSK	Prototype sensor for profile experiment	2.0 [Internal 0.5]	T	Thermister	$\pm 0.005^{\circ}\text{C}$	0.001°C	
			C	Inductive type	$\pm 0.005\text{mS/cm}$	0.001mS/cm	
			P	Semiconductor strain gauge	$\pm 2.4\text{dbar}$	0.5dbar	

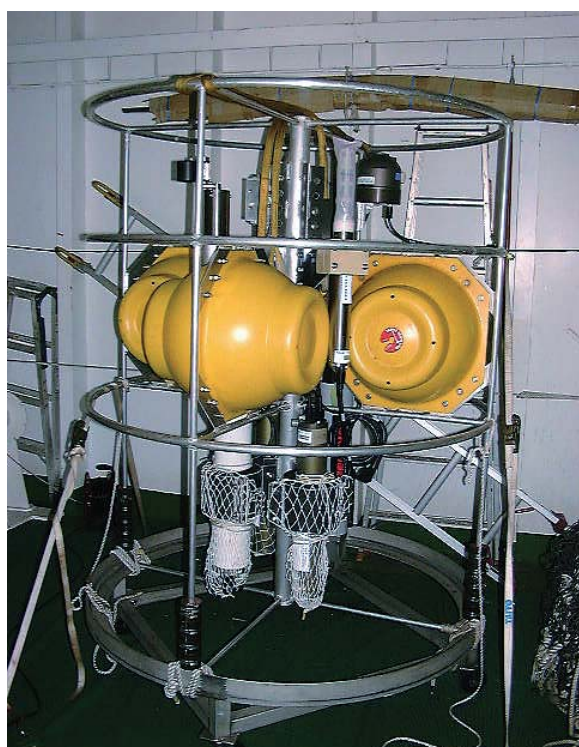


写真1 プロファイル試験装置

Photo 1 Appearance of the profiling system for sensor response field experiment.

いる。このため、各センサーを装置に取り付ける際には、SBE社製のセンサーそれぞれの海水取り入れ口とその他のセンサーの電磁誘導セルが同じ高さになるように取り付けた。また、FSIセンサーとTSKセンサーの電磁誘導セルが周囲の構造物の影響を受けないように、枠から離れる向きに固定した。作成した装置を写真1に示す。

プロファイリングフロートは通常浮上時にデータを取得するので、できるだけ実際のデータ取得時と同じ条件で比較を行うことを目指した。そこで、水中でプロファイル装置が浮

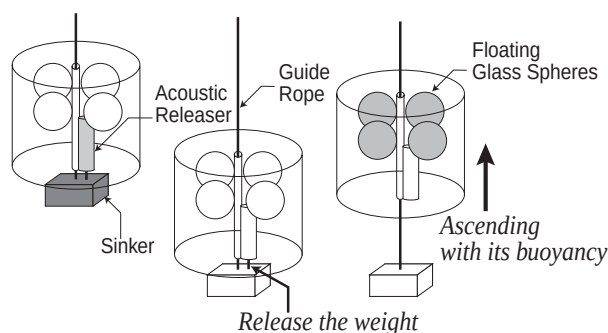


図1 プロファイル試験装置の模式図

Fig. 1 Schematic drawing of the profiling system for sensor response field experiment.

上するように、浮力を重量によって調整した。降下用索の先端に沈降用の錘を取り付け、プロファイル装置に組み込んだ音響切離し装置を錘につないだ。索をプロファイル装置の中央のパイプを通す事によって落失を避ける事とした。この状態で水中に降ろし、ある深度に達したところで音響切り離し装置によって錘と切り離す事によって、プロファイル装置はそれ自身の浮力によって浮上する(図1)。これを有索式と呼ぶ。プロファイル装置が浮上を始めると、装置には周囲の流体(海水)によって速度に応じた抗力が生じ、正味の浮力(流体を押しのけた事によって生じる浮力から装置に加わるかかる重力を差し引いたもの)と釣り合う速度で浮上を続ける。このときの浮上速度を v 、抗力係数を C_D 、正味の浮力(抗力)を F 、流体の密度を ρ 、装置の移動方向に垂直な面に対するプロファイル装置の投影面積を A とすると、

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho A v^2$$

となる。ここで装置の移動速度は10cm/s程度であるので、海水は非圧縮流体であるとみなすことができ、抗力係数 C_D はプロファイル装置の形状とレイノルズ数で決まる。プロ

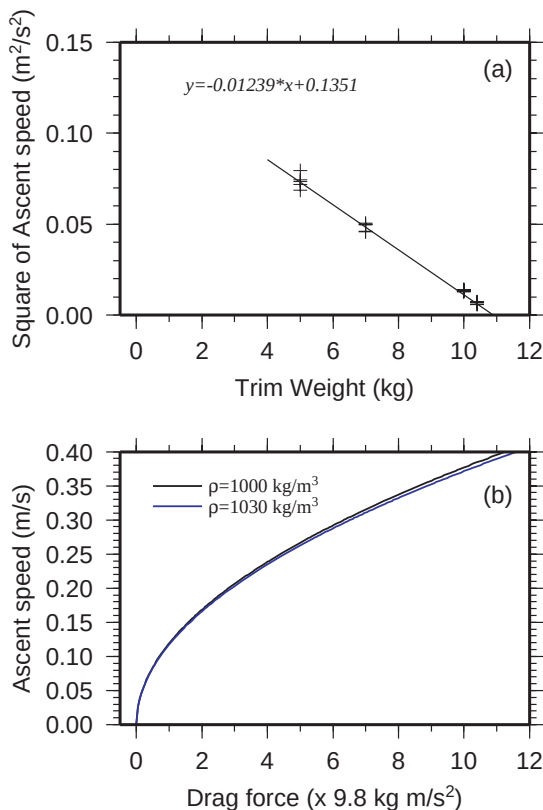


図2 フレーム1 (MR01-K01時に使用)の錘の重量と浮上速度の関係
Fig. 2 Relationship of ascending speed in water to additional weights to the Frame 1, which used during the R/V Mirai MR01-K01 cruise.

ファイル装置の個々の部材であるパイプの直径は約2cm, プロファイル装置に組み込まれた浮体の直径は約40cmであり, 20℃における水の運動粘性率を $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ とすると, 速度10~30cm/sの時の個々の部材のレイノルズ数は $2 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5$ 程度である。この範囲のレイノルズ数のとき, 球及び円柱の C_D はそれぞれほぼ一定であるので, プロファイル装置全体の C_D もこの速度範囲ではほとんど変わらないと考えられ, v^2 と F の関係は線形であるとみなせる。

そこで, 陸上において v^2 と F の関係を求めるために, 9mの深さがある超音波水槽を用い, プロファイル装置に付加する錘の重量を変えて水槽内で浮上させ, それぞれの重量における浮上速度を測定した。その結果を図2及び図3に示す。付加した錘は鉄製なのでその密度は 7850 kg/m^3 であり, 密度 1000 kg/m^3 の水中において錘1kgを増やす毎に正味の浮力は $1 \times (1 - 1000/7850) \times 9.8 \text{ kg m/s}^2$ ずつ減少する。これらの実験の結果より, $C_D \times A$ はフレーム1 (MR01-K01用)で 1.38 m^2 , フレーム2 (MR01-K05用)で 1.65 m^2 と見積もられた。

陸上実験では通常の水を用いたが, 実海域では周囲の流体は海水となる。実海域では, 陸上実験よりも周囲の流体の密度が大きくなるために速度と抗力の関係が変わるだけでなく, 装置自体の浮力も増加するため, 枠全体が同じ質量のままでは浮上速度が早くなる。海水の密度は水の密度より2~3%大きくなるので, 同じ抗力となる速度は1~2%程度小さくなるが大きな差とはならない。従って,

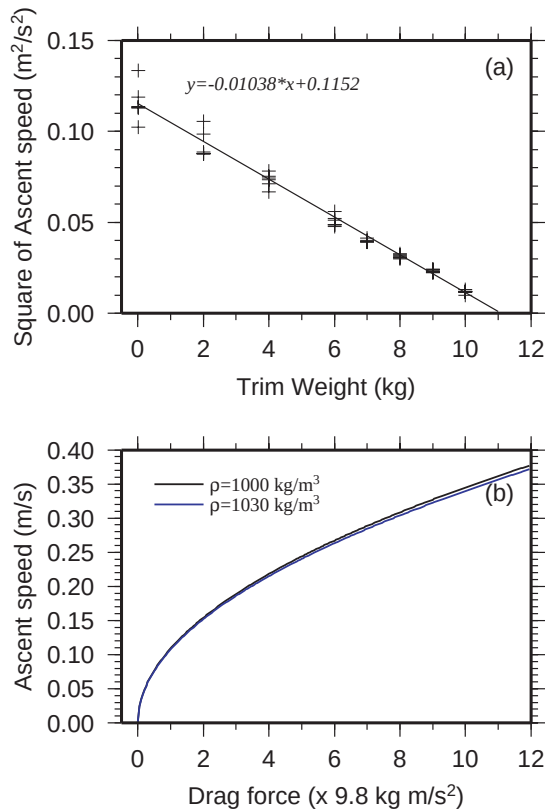


図3 フレーム2 (MR01-K05時に使用)の錘の重量と浮上速度の関係
Fig. 3 Same as Figure 2 but for the Frame 2, which used during the R/V Mirai MR01-K05 cruise.

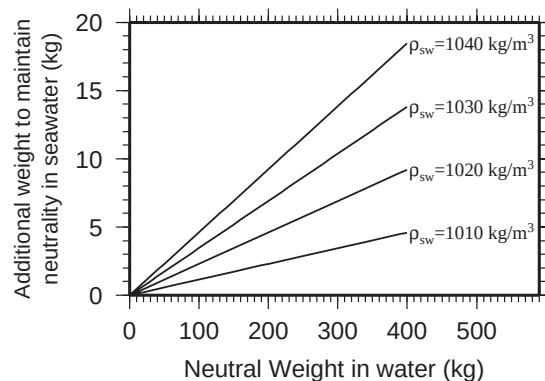


図4 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ の水の中で中立となったシステムを海水中で中立させるため付加する錘の重量

Fig. 4 Relationship between neutral weight in water and additional weight to maintain neutrally in sea water for some sea water density.

陸上実験と実海域との浮上釣り合い速度が異なる理由のほとんどは, 周囲の流体の密度の差による浮力の変化によることになる。密度 ρ_{water} の水の中で中立となるように調整した装置の質量を w とすると, 密度 ρ_{sw} の海水中で中立するために付加する密度 ρ_{weight} の錘の質量は, $w(\rho_{\text{sw}}/\rho_{\text{water}} - 1)/(1 - \rho_{\text{sw}}/\rho_{\text{weight}})$ となる。錘は鉄製なので $\rho_{\text{weight}} = 7850 \text{ kg/m}^3$ であり, いくつかの ρ_{sw} に対する装置の質量と中立させるのに必要な錘の質量の関係を求めた。その結果を図4に示す。この図を参考に実海域で付加する錘の質量を決定した。

3. 実海域比較実験

3.1. データの処理

比較実験に使用した各センサーは表1に示したようにデータのサンプリング間隔が異なるため、データの間隔が揃うようにデータ間隔毎に時間平均してから比較することとした。ここでは、最もサンプリング間隔の広いTSKセンサーに揃えることとし、全て2秒間毎のデータに変換した。なお、SBEセンサー(SBE41CP)とFSIセンサーの公称サンプリング間隔はそれぞれ1秒、1/2.8秒であるが、実際に得られたデータにおける着水／浮上時刻を用いて今回使用したセンサーのサンプリング間隔を検討したところ、それぞれ1.295秒、1/2.751秒とすると最も妥当であることが分かったため、公称値は使わずにこれらの値を用いた。以下の比較ではこれらの2秒毎に整列させたデータを用いた。

3.2. 有索浮上実験

2001年2月から3月の海洋地球観測船「みらい」MR01-K01航海において、実海域での比較実験を実施した。実験は航海中に7回行った。それぞれの比較実験の位置、日時、最大深度、付加した錘の重量、同架したセンサーとそのシリアル番号を表2に示す。先端に錘をつけた索を枠の中央のパイプに通し、索の先端と装置を装置内の音響切離装置で固定して降下させた。必要な水深に達したところで音

響切離装置で装置を索の先端から切離すことによって、装置の持つ浮力によって浮上させた。写真2に開始時の吊り下げ状態のプロファイル装置を示す。装置は「みらい」搭載のクリーン採水用ウインチを利用して吊り上げている。これを海中の指定深度までウインチで降下させ、音響切離装置により索の先端から切り離し、索をガイドとして浮上させた。海面浮上後のプロファイル装置を写真3に示す。浮上後、ウインチに索を巻き込み、切り離した錘によりプロファイル装置を引っかける形で持ち上げて船上に揚収した。



写真2 実験開始時の装置

Photo 2 The profiling system at the beginning of the experiment.

表2 「みらい」MR01-K01航海における比較実験一覧

Table 2 List of the experiments during the MR01-K01 cruise of the R/V Mirai.

Experiment	Position	Date and Time (UTC)	Maximum Depth (m)	Trim weight (kg)	Installed sensor	S/N
1-1	1-23N, 155-58E	Feb. 27 04:36-04:54	60	19.0	SBE41CP FSI EXCELL TSK-CTD	54 1324 06656
1-2	0-01N, 156-13E	Feb. 28 00:05-01:27	100	24.5	SBE41CP FSI EXCELL TSK-CTD	54 1324 06656
1-3	1-30S, 155-56E	Mar. 3 21:58-23:37	300	24.5	SBE41CP FSI EXCELL TSK-CTD	54 1324 06656
1-4	1-30S, 155-56E	Mar. 4 03:27-05:08	400	24.5	SBE41CP FSI EXCELL TSK-CTD	54 1324 06656
1-5	5-00S, 156-24E	Mar. 7 03:40-05:18	500	24.5	SBE41CP FSI EXCELL TSK-CTD	54 1324 06656
1-6	4-57S, 156-24E	Mar. 8 03:04-04:38	500	24.5	SBE41CP FSI EXCELL TSK-CTD	54 1324 06656
1-7	4-57S, 156-24E	Mar. 8 22:32-Mar. 9 01:30	1000	22.8	SBE41CP SBE41CP FSI EXCELL TSK-CTD	53 54 1324 06656

Reference sensor:

SBE9plus S/N 240
Pressure Sensor S/N 43435
SBE3 S/N 1207
SBE4 S/N 0960

Calibrated on Nov. 18, 2000
Calibrated on Nov. 21, 2000

MR01-K01航海の測点1-1では浮上速度が約30cm/sと、実際のフロートの速度よりも早かったため、測点1-2からは錘を5.5kg付加して浮上速度を15cm/s程度に遅くした。測点1-7ではSBEセンサーを2つに増やしたため、錘を1.7kg減らした。その結果、500m以深では20cm/s程度の浮上速度

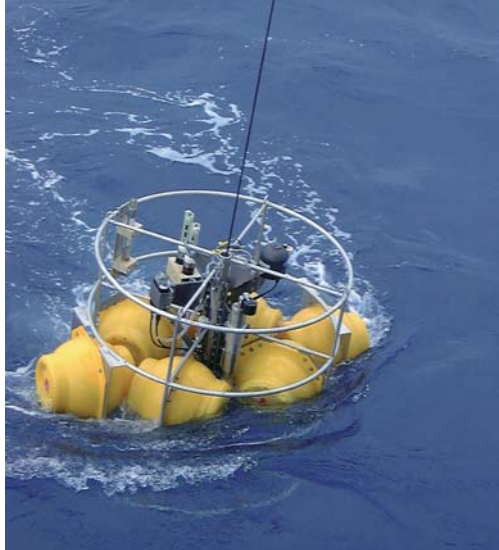


写真3 実験終了後海面に浮上した装置
Photo 3 The profiling system at the end of the experiment.

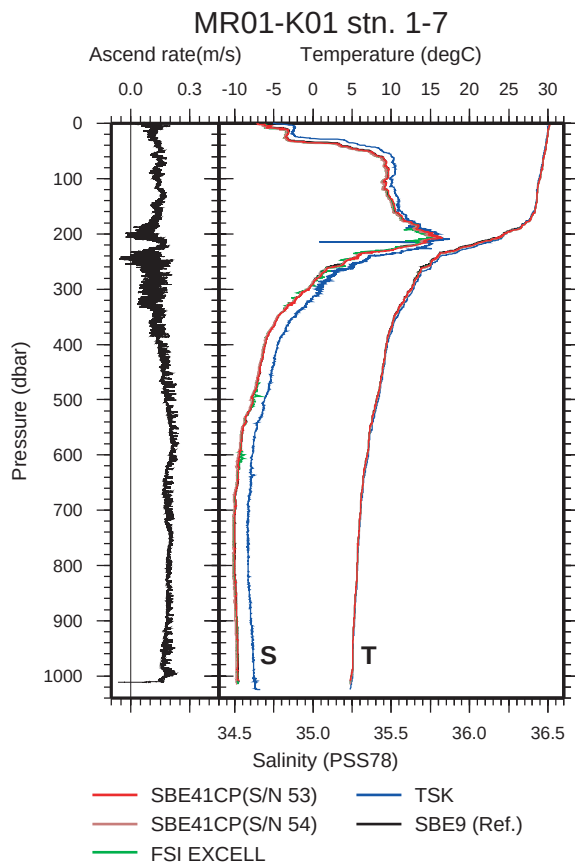


図5 有索実験における水温、塩分、浮上速度の鉛直分布図
測点1-7における結果
Fig. 5 Vertical profiles of temperature, salinity and ascend rate at station 1-7.

となった。どの測点においても水温躍層のある200～300m深付近では浮上速度が一定とならず、速度変動が大きかった。これは躍層の付近で流れが強く、そのために索が傾いて索を通してパイプと擦れたためと考えられる。

浮上速度が最も安定した状態でデータが取得できた、測点1-7における上昇時の水温、塩分、上昇速度の鉛直分布を図5に示す。400dbar以深では16-20cm/sの上昇速度で安定して上昇していたが、340-180dbarでは上昇速度の変動が大きく、240dbar付近と200dbar付近では、ほとんど停止してしまうこともあった。上昇速度の変化の大きかった深度では、塩分にスパイク状のデータも多く見られる。各センサーのリ

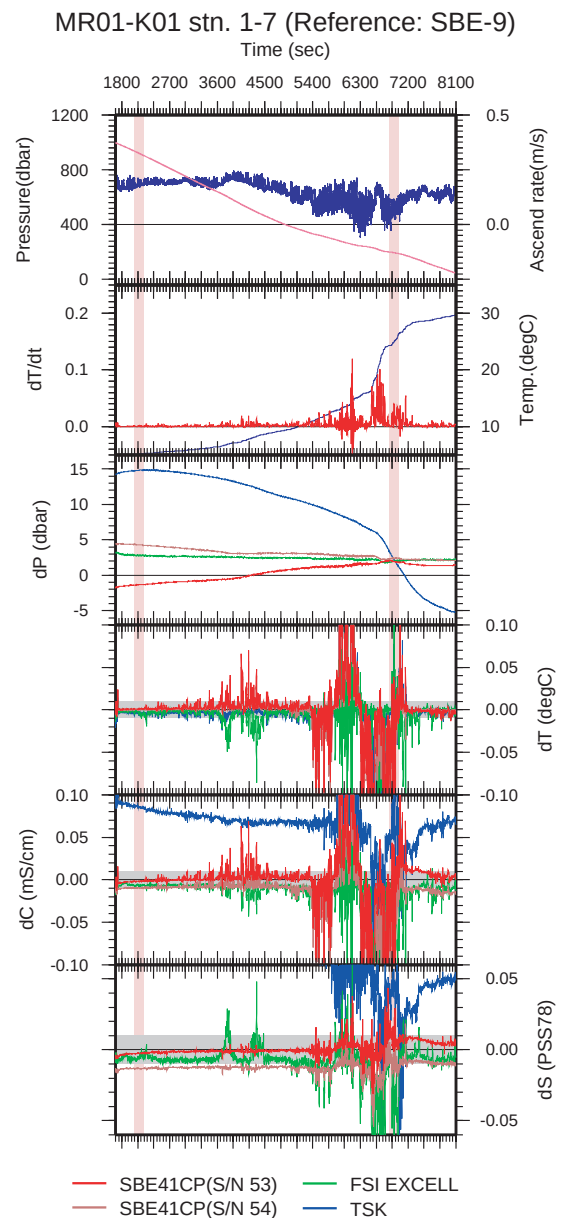


図6 有索実験における各センサーのリファレンスセンサーとの差
測点1-7における結果
Fig. 6 Differences of temperature, pressure, conductivity and salinity from the reference sensor at station 1-7. Pressure, ascend rate, temperature change in unit time are also shown.

ファレンスセンサーとの差の時間変化を図6に示す。浮上速度が安定しており、温度の鉛直勾配も少ない400dbar以深の深層、および100 m以浅の表層ではどのセンサーもリファレンスセンサーと比較して0.01℃あるいは塩分0.01以下の差に収まっていた。しかし、浮上速度の変化の大きい180-340 dbar付近では全てのセンサーでリファレンスセンサーとの差が大きくなった。図6中の赤い陰影で示した、180秒間の水温、塩分と上昇速度を図7に示す。図7(b)に見られるSBEセンサーの不自然な水温の変動は、上昇速度の変動とほぼ同期している。SBEセンサーはポンプを使用して海水をセンサーに取り込んでいるが、消費電力を抑えるためにその流量を抑えている。ここで見られた水温の変動は、上昇速度が大きく変動したために、ポンプが周囲の海水を正しく取

り込むことができなかったか、システムの枠によってかき乱された海水を測定してしまったためと考えられる。リファレンスセンサーにはこのような変動は見られないため、前者の可能性が高い。また、FSIセンサーは水温センサーに白金抵抗温度計を使用しているためにその時定数が約0.4秒と電気伝導度センサーと比べてやや遅く、このために水温躍層付近で塩分にスパイク状の誤差を生じていると思われる。また、電気伝導度センサーの時定数が速度によって異なるために、スパイク状の誤差を生じている可能性もある。TSKセンサーは、開発途上であることも考慮する必要があるが、当該実験で使用した電気伝導度センサーは他の二種類のセンサーに比べてかなり差が大きく、この段階では実用機に利用できるとはいえない。

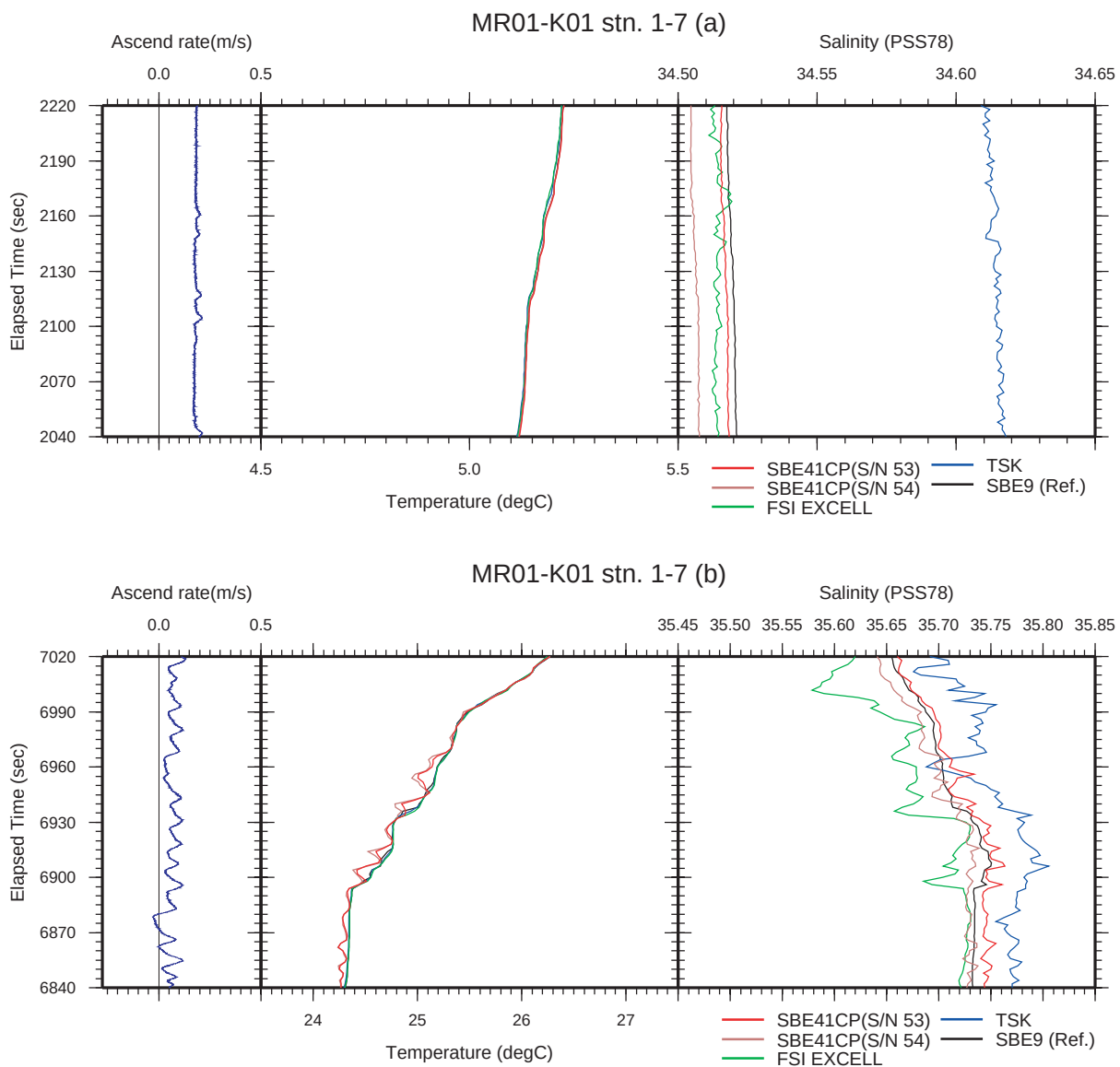


図7 有索実験である測点1-7における水温、塩分、浮上速度の時間変化
それぞれの時間帯は図6に赤い陰影で示している。

(a) 深層 (経過時間2040-2220秒) (b) 躍層 (経過時間6840-7020秒)

Fig. 7 Time series of temperature, salinity of each sensor and ascend rate at station 1-7.

(a) at deep layer (elapsed time: 2040-2220 seconds) (b) at thermocline (elapsed time: 6840-7020 seconds)

3.3. 無索浮上実験

MR01-K01航海での実験では、水温躍層付近においてプロファイル装置の中心のパイプを通した索の影響のために浮上速度が安定しなかったため、装置を索から離して浮上させる「無索浮上実験」を「みらい」MR01-K05航海において実施した。実施した比較実験の一覧を表3に示す。測点2-2のみが無索浮上実験である。無索実験では、図8に示すように、音響切離装置を2台追加し、はじめに船上のウインチによって指定深度まで降下させ、プロファイル装置から浮上するための錘を切り離し、ほぼ同時にウインチの索からも切り離す。これにより、無索で自由浮上させるプロファイル実験を行う。ただし、無索とした場合、浮力が足りずにプロファイル装置が浮上しない場合も起こりうるため、非常用錘(約30kg)を追加している。

測点2-2における各センサーとリファレンスセンサーとの差を図9に示す。また、図7と同様に図9中の赤い陰影で示した、180秒間の水温、塩分と上昇速度を図10に示す。浮上速度は平均40cm/sであり、フロートの浮上速度に比べて早かったが、上昇速度は非常に安定していた。FSIセンサーおよびSBEセンサーの水温センサーは、温度変化が

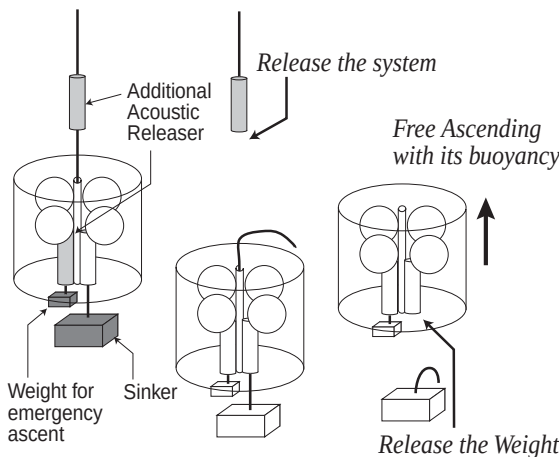


図8 無索実験用フレームの模式図

Fig. 8 Schematic drawing of the profiling system for free rise experiments.

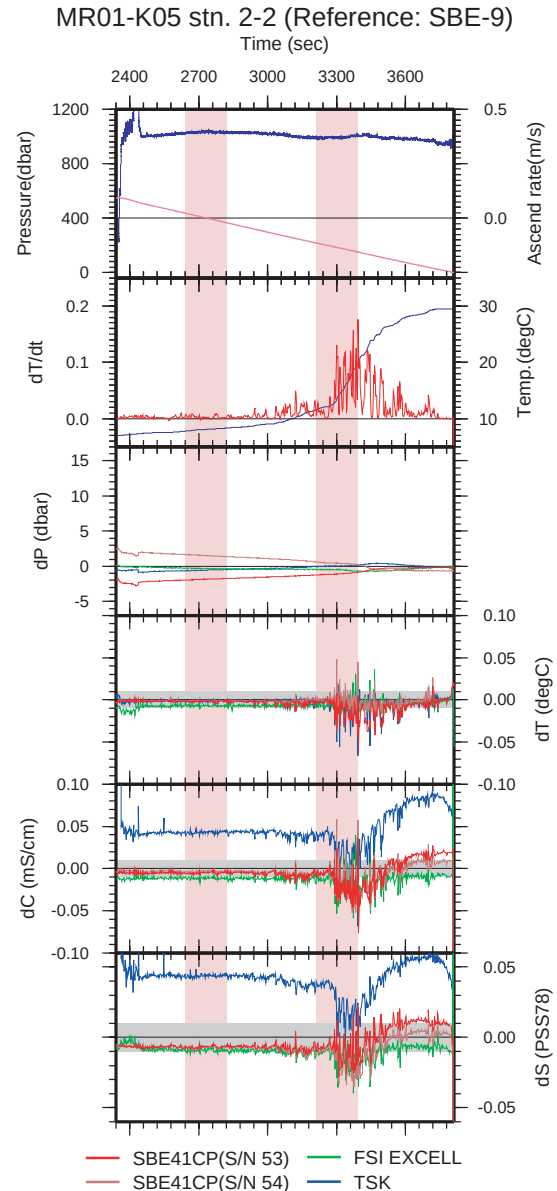


図9 無索実験における各センサーのリファレンスセンサーとの差
測点2-2における結果

Fig. 9 Same as Fig.6 but for station 2-2 of free rise experiments.

表3 「みらい」MR01-K05航海における比較実験一覧

Table 3 List of the experiments during the MR01-K05 cruise of the R/V Mirai.

Experiment	Position	Date and Time (UTC)	Maximum Depth (m)	Trim weight (kg)	Installed sensor	S/N
2-1	5-08N, 130-08E	Oct. 7 23:02-Oct. 8 00:38	120	10.0	SBE41CP SBE41CP FSI EXCELL TSK-CTD	53 54 1324 06655
2-2	5-12N, 130-00E	Oct. 8 01:05-02:48	500 *	10.0	SBE41CP SBE41CP FSI EXCELL TSK-CTD	53 54 1324 06655

* The system rose without cable guide.

Reference sensor:

SBE9plus S/N 240
Pressure Sensor S/N 43435
SBE3 S/N 1207
SBE4 S/N 0960

Calibrated on Nov. 18, 2000
Calibrated on Nov. 21, 2000

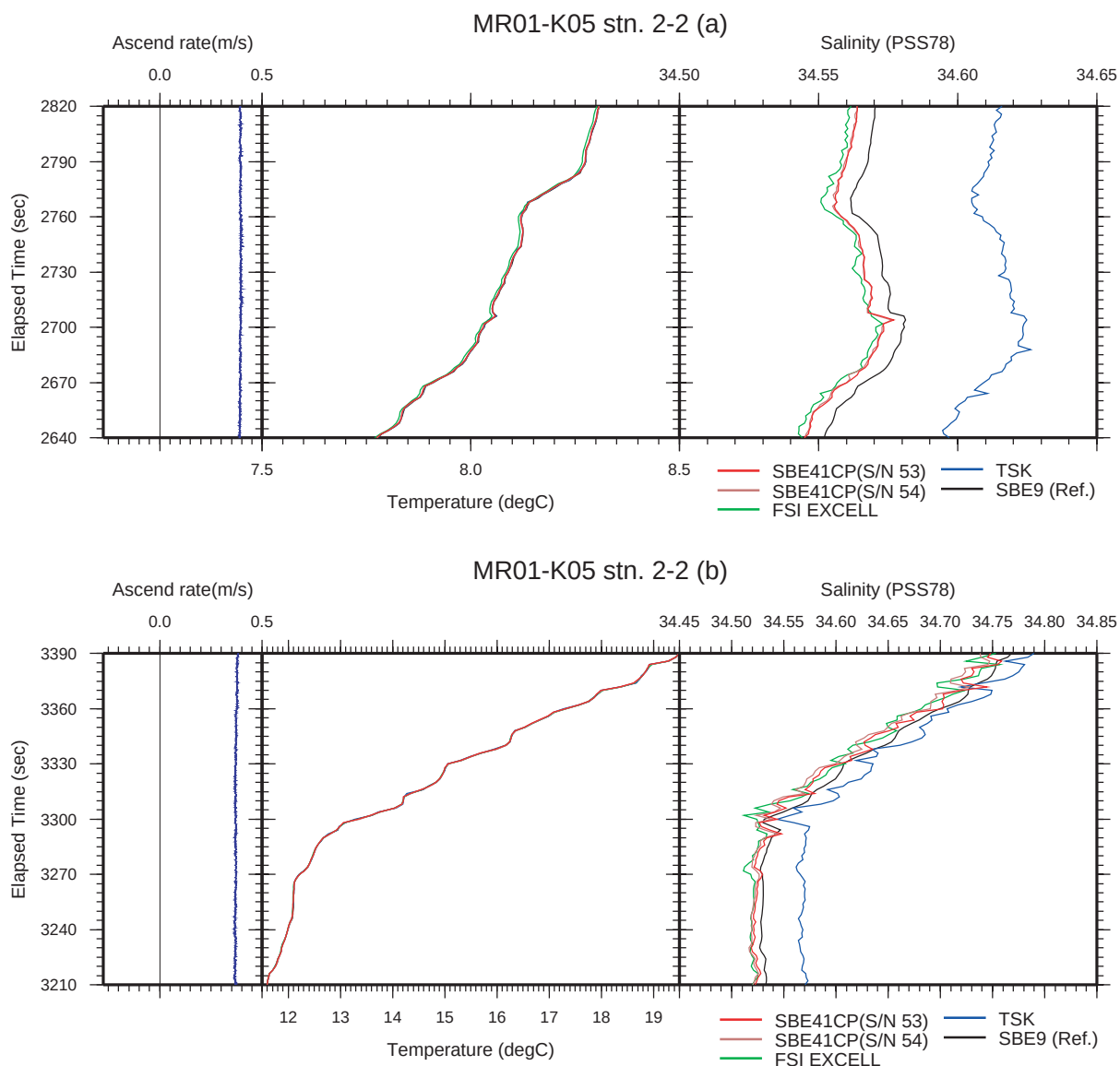


図10 無索実験である測点2-2における水温、塩分、浮上速度の時間変化
それぞれの時間帯は図9に赤い陰影で示している。
(a) 深層(経過時間2640-2820秒) (b) 躍層(経過時間3210-3390秒)

Fig.10 Same as Fig. 7 but for station 2-2 of free rise experiments.

(a) at deep layer (elapsed time: 2640-2820 seconds) (b) at thermocline (elapsed time: 3210-3390 seconds)

0.05°C/秒以下の場合にはほぼ0.01°C以内の差におさまっていた。また、FSIセンサーおよびSBEセンサーの電気伝導度センサーも、温度変化の大きな部分を除いてほぼ0.01におさまっていた。水温躍層中では、FSIセンサーおよびSBEセンサーの両方が、電気伝導度センサーと温度センサーでリファレンスセンサーに比べて低めに計測されている。これは、上昇速度が実際に想定されている速度よりも速く、そのためにセンサーが実際の計測に追い付かないために生じている可能性がある。一方、躍層より上層である表層混合層では、SBEセンサーの電気伝導度がリファレンスセンサーよりも高めに計測されている。この理由については今のところ明らかではない。これらの実験において、FSIセンサー、SBEセンサーとも水温変動が0.05°C/秒以下の状況におい

てはリファレンスセンサーとの差が小さく、良好な結果が得られていたことから、実際のフロートの浮上速度である10cm/s程度で浮上したと仮定すると、水温の変化が鉛直方向で10cmあたり0.05°Cの変化におさまっていればフロート搭載のセンサーに求められている精度を満たしていると考えて良いだろう。10cmあたり0.05°Cは、すなわち、10mで5°Cの変化であり、このように大きく変化する海域は非常に限られているため、ほとんどの海域で必要な精度を満たす観測ができることが期待できる。TSKセンサーに関しては、前述のように開発途上のセンサーを比較実験に使用したわけであるが、温度センサーに関してはその他のセンサーと良い一致を示していた。しかし、電気伝導度センサーに関しては、一定のオフセット(塩分値で0.05程度)が存在し、表

層混合層内での電気伝導度のオフセットは深層よりもさらに大きくなっている点も指摘しておく。水温躍層内での応答については、SBEセンサーやFSIセンサーと同等といえる。TSKセンサーについても、プロファイル装置の上昇速度を抑えることができれば、上述のようにリファレンスセンサーの値に近くなると思われる。

これらの一連の実験において、SBEセンサーおよびFSIセンサーの水温センサーおよび電気伝導度センサーについては、水温・塩分構造が安定している深層から、温度が大きく変化する水温躍層および表層混合層にいたるまで、ほぼArgoの要求精度を満たすことが示された。しかしながら、図9の圧力センサー値の差に見られるように、SBEセンサーについては、2台とも500dbarで2dbar(すなわち0.4%)の差があり、それらが互いに逆になぜかずれている。このことは、2000dbarにおいては8dbar程度の誤差となりうることを示唆している。これは塩分値に換算して0.004程度となり、深層での安定したT-S関係を利用して塩分データを修正するためには、より高精度な圧力センサーによる計測が望ましいことを示唆するものである。

4. まとめ

ミレニアム・プロジェクトの一つである「高度海洋監視システム(ARGO計画)の構築」における中層フロート展開の準備、計画、実施の小課題「センサーの精度向上のための性能評価」の一環として、センサーの実海域における動的特性を評価するために、フロート用に開発された複数のセンサーを基準となるCTDセンサーと同架して浮上させる比較実験を行った。

比較実験を行ったSBE, FSI, 鶴見精機各社のフロート用センサーについて、フロートの浮上速度(10cm/s程度)では水温センサーは求められている精度をほぼ満たしている事が確認できた。しかし、塩分については、SBEセンサーおよびFSIセンサーはほぼArgo計画が求めている精度を満たしていたが、開発途上のTSKセンサーについては、塩分0.05程度のオフセットがあることが示された。また、現在もっとも良く利用されているSBEセンサーに用いられている圧力センサーの誤差は500dbarで2dbar程度と比較的大きく、より深層で塩分の精度に影響を与えうることが示された。

Argo計画によって得られるデータの精度を高めるには、本報告のようなプロファイラーを用いた実験に加え、実際に

投入したフロートによるデータを用いて、現場における各センサーの経時変化の程度も評価することが必要である。

謝辞

Sea Bird Electronics, Inc.のNorge Larson氏にはSBE41CPセンサーを特別に製作し、また借用いただき、また実験後にセンサーの検定をして頂いた。また、鶴見精機の関本氏より、開発中のフロート用センサーを借用しました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Roemmich, D. and W. B. Owens, "The Argo project: global ocean observations for understanding and prediction of climate variability", *Oceanography*, 13, 45-50 (2000)
- 2) 水野恵介, "高度海洋監視システム(ARGO計画)について", *日本造船学会誌*, 854, 485-490 (2000).
- 3) Freeland, H., "Calibration of the Conductivity Cells on P-ALACE Floats", 1997 U.S. WOCE Report, 37-38 (1997).
- 4) Bacon, S., L. R. Centurioni and W. J. Gould, "The Evaluation of Salinity Measurements from PALACE Floats", *J. Atm. and Oceanic Technol.*, 18(7), 1258-1266 (2001).
- 5) Riser, S. C. and D. D. Swift, "Long-term Measurement of Salinity from Profiling Floats", *J. Atm. and Oceanic Technol.*, (2001, submitted).
- 6) 小林大洋, 市川泰子, 高槻靖, 須賀利雄, 岩坂直人, 安藤健太郎, 水野恵介, 四竈信行, 竹内謙介, "高品質気候学データセット(HydroBase)を用いたアルゴデータの品質管理I", *海洋科学技術センター試験研究報告*, 44, 101-114 (2001).
- 7) Wong, A. P. S., G. C. Johnson and W. B. Owens, "Delayed-mode Calibration of Autonomous CTD Profiling Float Salinity Data by θ -S Climatology", *J. Atm. and Oceanic Technol.*, 20(2), 308-318 (2003).
- 8) 井上亜沙子, 宮崎基, 伊澤堅志, 安藤健太郎, 高槻靖, 水野恵介, "中層フロート温度・電気伝導度センサー用校正バスの温度特性及び校正試験結果", *海洋科学技術センター試験研究報告*, 44, 1-8 (2001).
- 9) Giles, A. B. and T. J. McDougall, "Two methods for the reduction of salinity spiking of CTDs", *Deep-Sea Res.*, 33, 1253-1274 (1986).

(原稿受理: 2003年8月12日)