

— 論 文 —

## アルゴ データの圧力バイアス問題とその影響 \*

小林 大洋 † ‡ ・ 中村 知朗 † \*\* ・ 湊 信也 † † ・ 四竈 信行 † †

### 要 旨

アルゴによる全球海洋観測網の整備が進み、海洋の貯熱量変化やそれに伴う海面上昇の精密な議論が可能となった。その結果、一部のアルゴ フロートで観測された圧力データにバイアスが含まれること、あるいはその可能性が指摘されている。海洋研究開発機構は、気象庁と協力し、率先してこの問題に取り組んできた。国際アルゴでの調査の結果、この圧力バイアスはハードウェアとソフトウェアの様々な要因が複合的に作用した結果であり、特に地上局でのデータ処理過程で生じる人為的な要因が予想以上に深刻であることが明らかとなってきた。本稿は 2009 年 3 月末現在における、既知の圧力バイアスの詳細とその発生原因を解説するとともに、国際アルゴにおけるこの問題への対応や、データ補正作業の現状を説明する。また、アルゴ以前のフロート データに含まれる圧力バイアスにも触れる。海洋貯熱量変化や海面上昇に関する研究結果をふまえると、フロートによる圧力観測は、系統誤差を取り除くことを第一とし、その上でランダムな観測誤差を  $\pm 5$  dbar の範囲に収めることを当面の目標とすべきである。これにより、全球海洋貯熱量は約  $\pm 0.5 \times 10^{22}$  J, Steric Height は約  $\pm 3$  mm の精度で推定できることになる。現在、アルゴ データを含む海洋観測データから推定される Steric Height の上昇量と衛星観測によって推定される海面高度の上昇量の時空間的な不一致が指摘されているが、これはアルゴ データの圧力バイアスの補正を適切に行うことにより減少する傾向にあり、今後の詳細な検討が待たれる。

キーワード：アルゴ、圧力センサー、海洋貯熱量、海面上昇、温暖化

### 1. はじめに

2000 年に開始されたアルゴ計画 (以下ではアルゴと略す) は、多数のプロファイリング フロート (以下ではフロートと記す) を用いて全球海洋の即時監視システムを構築しようとする画期的な海洋観測計画である

(Argo Science Team (AST), 2001)。その後、フロート観測網の整備は順調に進み、2007 年 11 月には 3,000 機のフロートによる空間的な偏りのない全球海洋観測網を構築することに成功し (Argo Project Office, 2007a; Showstack, 2007 ほか)、現在では海洋観測の重要な基盤の一つとして維持されている。

アルゴで用いられるフロートは、数年間無保守のまま海洋観測を続け、運用が終了しても、そのほとんどは回収されない。従って、それまでの船舶による海洋観測において可能であった電気伝導度・水温・深度 (Conductivity-Temperature-Depth, CTD) センサーの事後検定などによる直接的・ハードウェア的な品質管理

\* 2009 年 2 月 9 日受領; 2009 年 8 月 14 日受理

著作権: 日本海洋学会, 2009

† 海洋研究開発機構 地球環境観測研究センター

〒 237-0061 横須賀市夏島町 2-15

‡ (現) 海洋研究開発機構 地球環境変動領域

主著者 e-mail address : taiyok@jamstec.go.jp

\*\* (現) 気象庁 地球環境・海洋部 海洋気象課

〒 100-8122 東京都千代田区大手町 1-3-4

†† 気象庁 地球環境・海洋部 海洋気象課

処理を、フロートによる観測データに対して施すことはできない。そのため、アルゴでは、その計画段階から間接的・ソフトウェア的な品質管理を重視し (AST, 2001), 目標とする観測精度 (圧力  $\pm 5$  dbar, 水温  $\pm 0.005^\circ\text{C}$ , 塩分  $\pm 0.01$ ; AST, 2000) を達成すべく努力が払われてきた。中でも塩分は、電気伝導度センサーに生物が付着するなどの理由により、水温や圧力と比べてその計測値が経時変化しやすいことが知られていた (例えば Freeland, 1997)。そのため、補正スキームの開発 (Wong *et al.*, 2003; Böhme and Send, 2005; Owens and Wong, 2009) や基準データセットの整備 (小林, 2004; Kobayashi and Minato, 2005a; Kobayashi and Suga, 2006; Argo Data Management Team, 2007; 2008a) などに多大な努力が払われ、現在では塩分精度の目標はほぼ達成されていると考えられている (Kobayashi and Minato, 2005b; Owens and Wong, 2009)。しかし、圧力や水温について同様の努力がなされたかといえば、必ずしもそうではない。その必要性は認識されていたものの、実海域におけるフロート用 CTD センサーの性能試験 (高槻ら, 2003; 小林ら, 2004b) や、回収されたフロートのセンサーの検定結果の解析 (Oka and Ando, 2004; Oka, 2005; Janzen *et al.*, 2008) などのごく少数の例外を除けば、つい最近まではほとんど手つかずのままであったと言える。その理由はいくつか挙げられるが、アルゴ開始当時の技術水準でこれらの観測目標精度は達成できていると推測されていた (AST, 2000) ことに加え、水温や圧力の計測値には、塩分に見られるような経時変化が発見されていなかったこと、これらのデータを組織的に検査・補正する品質管理手法を見いだせなかったこと、塩分データの品質管理に人的資源のほとんどが注ぎ込まれたこと、の三つないし四つに集約できるという良いだろう。

しかし、近年になって、(一部の)フロートの圧力データにバイアスが含まれている、もしくはその可能性があることを示す報告がなされるようになった (例えば Lombard *et al.*, 2007; Willis *et al.*, 2007; 2009; Uchida and Imawaki, 2008; Dickey *et al.*, 2008)。ただし、後述するように、現在その原因が特定されている圧力バイアスの大きさは、一部の例外を除いて  $\pm 5$  dbar の範囲内にあり、当初設定のアルゴの圧力観測の目標精度

はほぼ達成されたと言える。つまり、上の研究で指摘されたアルゴデータの圧力バイアス問題は、アルゴの進展により大量の海洋データが取得・蓄積され、これと同時に衛星観測の多様化・高精度化に起因して検証可能なデータの整備が進んだことにより、全球海洋の貯熱量変化や海面上昇に関する研究 (例えば Willis *et al.*, 2004; Levitus *et al.*, 2005; Lyman *et al.*, 2006; Ishii *et al.*, 2006; Lombard *et al.*, 2007) が実行可能となり、それらの精緻な研究の成果として顕在化した問題であるとも言える。この圧力バイアス問題のうち、いくつかについてはフロートの開発者や運用責任者、データ管理者、センサーやフロートのメーカーなどの協力によって、バイアスの存在とその原因が特定され、必要に応じた処置が施されつつある。しかし、圧力バイアス問題自体が完全に解決された訳ではない。

アルゴフロートの圧力データにバイアスが存在する (もしくは、その疑念が払拭できない) ことは、大量の海洋観測データを得ることを目的とするアルゴそのものにとって非常に深刻な問題である。そればかりか、アルゴによって構築されたフロート観測網により、かつてなく大量の水温・塩分データが全球海洋から集積されていることを考えれば、この問題は前述の全球海洋監視に関する研究に限らず、海洋学全体にとっても非常に深刻であると言わざるを得ない。現在までに、圧力バイアスに関して複数の異なる問題が存在することが確認されており、それぞれの問題は、フロートに搭載された圧力センサーの機種の違いや、フロート内部でのデータ処理の違い、地上局におけるデータ処理の誤りや不徹底などの、異なる要因が複合的に関係することによって生じている。これらの詳細は、国際アルゴ運営チーム (Argo Steering Team, AST) や国際アルゴデータ管理チーム (Argo Data Management Team, ADMT) の定例会合の議事録や、国際ワークショップの報告書などの形で公開されているものの、一般の目には触れにくい。さらに、この問題を理解するためには、フロートやセンサーのハードウェアや、アルゴデータの書式やデータ処理の詳細などに関する広範な知識を必要とするため、一般のデータ利用者にはなじみが薄く、理解しにくいものである。そのためか、この問題はその深刻さに比べて、理解が十分でないよう

に思われる。

海洋研究開発機構 (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, JAMSTEC) は、圧力バイアス問題の存在について早くから指摘し (湊・小林, 2003, ADMT, 2003; 2004), 日本のアルゴ データ センター (Data Assembly Center, DAC) を運用する気象庁と協力して、その解決に向けて国際的な努力を続けてきた。本稿は、2009年3月末現在までに指摘されている、もしくはその存在を疑われている圧力バイアスについて、その発生原因などの詳細を整理・解説するとともに、同時点における国際アルゴにおける対応状況について説明することを主たる目的とする。さらには、現在公には指摘されていないものの、圧力バイアスの存在が危惧されるアルゴ以前に展開されたフロートのデータについても触れる。また、最近の全球海洋監視に関する研究結果をふまえて、今後のアルゴによる全球海洋観測網が目指すべき圧力観測の精度についても述べる。

## 2. アルゴ フロートによる海洋観測とアルゴにおけるデータ処理の概要

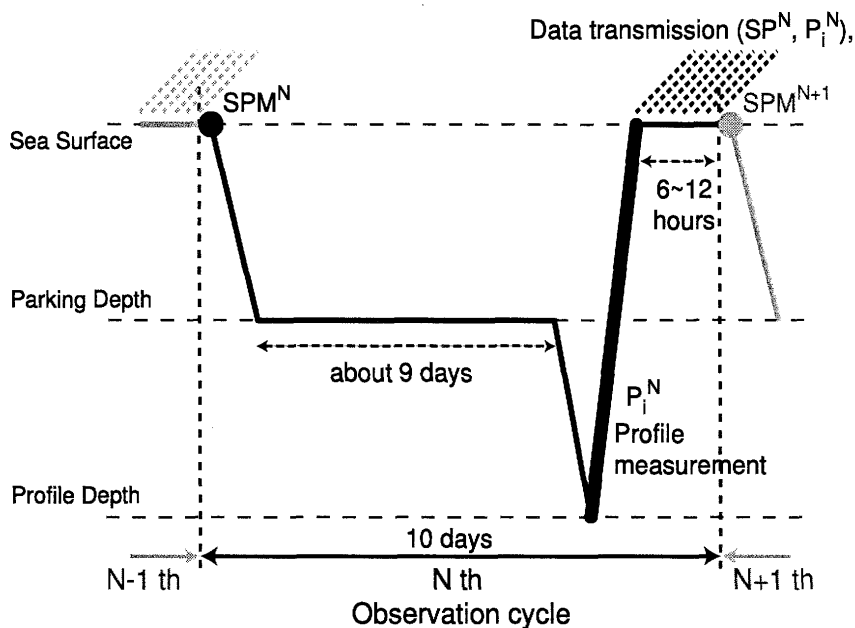
### 2.1. アルゴ フロートの観測サイクルと海面漂流時の圧力計測

アルゴ フロートは、自身の浮沈やプロファイル観測、データ発信などを、通常 10 日の周期で繰り返している。この一連の周期的な行動を、本論文では観測サイクルと呼ぶ。Fig. 1 にその模式図を示した。標準的なアルゴ フロートの場合、1 観測サイクルのうち約 9 日間、フロートは Parking depth (「漂流深度」と訳されることが多い。標準的な設定の場合は、1000 dbar) を漂っている。その後、一旦 Profile depth (観測を行う最大深度。「最大観測深度」と訳されることが多い。通常は 2,000 dbar) へ沈降して、そこから海面に向けて浮上しながらプロファイル観測を行う。その後、海面を漂流する間に観測データ等を衛星に向けて電送する。この海面を漂流する時間は、通常フロートでは 6~12 時間程度である (中島ら, 2005; Kobayashi and Nakajima, 2008)。なお、この一つの観測サイクルで得られたプロファイル観測データは、この観測サイクルの番号 (例えば Fig. 1 の場合は  $N$  番目) をとって第  $N$  プロファイル

と呼ばれる (ADMT, 2008b)。

この観測サイクルにおいて、フロートが最初に行うことは、圧力センサーを起動させて大気圧下において圧力計測を行うことであり、その後、漂流深度へ向けて沈降していく (Fig. 1; ADMT, 2008b)。この圧力計測は、圧力センサーの経時変化 (劣化) の検知において非常に重要な役割を果たす。フロートに用いられている圧力センサーは、1 気圧下で示度が 0 dbar となるように、センサー メーカーによって専用の装置を用いた事前調整がなされている (例えば Sea-Bird Electronics (SBE), 2008)。しかし、フロートに搭載されて海洋中で運用される間には、圧力センサーに経時変化が生じて、何らかのバイアスが生じる可能性がある。そこで、APEX (Autonomous Profiling Explorer) 型、Provor 型、SOLO (Sounding Oceanographic Lagrangian Observer) 型フロートなどのアルゴで用いられている主要なフロートは、各観測サイクルの初めにこの圧力計測を行うことにより、圧力センサーの経時変化を検知している (Kobayashi and Johnson, 2007; ADMT, 2009)。この計測値 (単位は dbar) を、以下では Surface Pressure Measurement (SPM) と呼ぶ。圧力センサーに経時変化がなく、フロートが正常に海面に浮上して大気圧が 1 気圧であれば、SPM は 0 dbar である (付録 A も参照)。SPM はフロートに搭載されている圧力センサーのバイアスの大きさを示す値として扱われる (ADMT, 2009)。

この SPM はフロート内部で所定の処理を施され、次回浮上時にプロファイル観測データ等とともに衛星を介して地上局へと電送される。この「所定の処理」の具体的内容は、フロートのタイプや世代によって異なっている。この電送されたデータは Surface Pressure (SP: 単位は dbar) と呼ばれ、圧力センサーのバイアスに関して我々がフロートから直接知ることのできる唯一の情報である。SP と SPM との関係は前述のフロート内部の処理に依存するため、これもまたフロートのタイプや世代によって異なる。これらについては付録 A で説明する。



**Fig. 1.** Schematic of an  $N$ -th observation cycle for an Argo float under the standard operation. Surface pressure measurement at the observation cycle ( $SPM^N$ , marked by solid circle) is conducted just before the float starts to dive to the parking depth and the data is transmitted as Surface Pressure ( $SP^N$ ) with CTD profile data ( $P_i^N$ , marked by thick solid line) during the next surface drifting. A single observation cycle starts at the implementation of SPM and ends at the end of data transmission on the sea surface.

## 2.2. アルゴにおけるデータ処理および流通システムの概要

アルゴでは、フロートによって得られた観測データの処理(品質管理)や流通・公開を、国際的に合意された手続きに従って行っている(例えば AST, 2001; ADMT, 2008b; 2009)。ここでは、本稿を理解するのに必要となる、アルゴデータの品質管理や流通システムの概要を述べる。国際アルゴにおけるデータ処理の詳細は Argo Quality Control Manual (ADMT, 2009) にまとめられ、その要点は Gould (2005a) で解説されている。また、日本国内におけるアルゴデータの流通や品質管理の実状については、吉田(2002; 2003; 2005; 2007)や湊・小林(2003)、湊(2005)、中村(2007)に詳しいので参考にしたい。

アルゴフロートによって得られたプロファイル観測データの品質管理は、大きく2段階に分かれて行われ、それぞれ「即時(Real-Time)品質管理」と「遅延(Delayed-Mode)品質管理」と呼ばれる(例えば AST,

2001; ADMT, 2009)。即時品質管理は、気象予報などの現業的な用途に対してアルゴフロートのプロファイル観測データを供給することを目的としているため、データはその取得後、原則として24時間以内にDACにて品質管理を施されて一般の利用が可能となる。この即時品質管理で行われるデータ処理は、時間の制約から自動化が可能なものに限られており、国際アルゴで合意された10以上の項目に対して、全てのDACで同一のチェックが施され、その結果に応じた品質フラグがデータに付与される。このデータ処理の際、圧力および塩分に対して簡単な補正が行われる場合もある(ADMT, 2009; 圧力に対する補正については付録B.1を参照)。即時品質管理を施されたプロファイル観測データは、「即時プロファイルデータ(即時データ)」としてGlobal Data Assembly Center (GDAC)からインターネットにて公開される。これと同時に全球気象通信システム(Global Telecommunication System, GTS)へ送られ、各国の気象機関等で利用されている。

これに対し、遅延品質管理では、データ取得後半年から1年をめどに、人の目を介する高度なデータ処理が行われる。処理内容は塩分データの検査や補正 (Wong *et al.*, 2003; Owens and Wong, 2009) が主なものであるが、品質管理に必要な情報を入手するのに時間を要したり、自動処理化が難しかったりするものは遅延品質管理にて行われる。遅延品質管理を施されたプロファイル観測データは改めて GDAC へ送付され、「遅延プロファイル データ (遅延データ)」として公開される。この遅延品質管理は複数回行われることもあり、遅延データはその都度更新される。この遅延品質管理は、原則的にフロートの運用責任者 (Principal Investigator, PI) によって行われるが、彼らの依頼を受けた DAC によって実施される場合もある。

GDAC から公開されているプロファイル データは、そのファイル名の頭文字が R の場合は即時データ、D の場合は遅延データであることを表しており、データの内容を確認しなくても両者は区別できるようになっている。一つのプロファイル観測データには即時データか遅延データの片方しか存在しない。そのため、あるプロファイル観測データに対して、遅延品質管理の施されたデータが GDAC に送付された場合、即時データが存在する場合には即時データが削除され、それ以前に処理されていた遅延データが存在する場合には更新される。なお、アルゴのプロファイル データには、フロートから電送されたデータ (生データ) が「観測値カラム」に記載されている他に、品質管理や補正などを施されてその時点において最も正確なデータが「補正值カラム」に記載されている (ADMT, 2008b; 2009)。品質の劣る生データを保持しているのは、将来、フロート データに何らかの問題が発見された際に、必要に応じて生データに遡り、原因の追及が可能なようにとの趣旨に基づいている。

1機のフロートによって得られたデータは、このプロファイル データの他に、「メタ データ」、「トラジェクトリー データ」、「テクニカル データ」の合計四つのデータ ファイルに格納されている。これらのデータ ファイルはそれぞれ異なる種類の情報を格納しており、その全てが GDAC から公開されている。メタ データには、フロート タイプや搭載されたセンサーの種類、観測パ

ラメータの設定に関する情報、その観測プロジェクト名や PI、フロート投入点に関する情報などが記載されている。このデータはフロートの PI (もしくは PI から情報提供を受けた DAC) によって作成されている。また、テクニカル データには、SP (2.1 節および付録 A を参照) を初めとする、運用中のフロートのハードウェアの状態などの技術情報が、トラジェクトリー データには、フロートの位置や時刻に関する情報が、それぞれまとめられており、これらは即時データ処理の際に DAC にて作成されている。

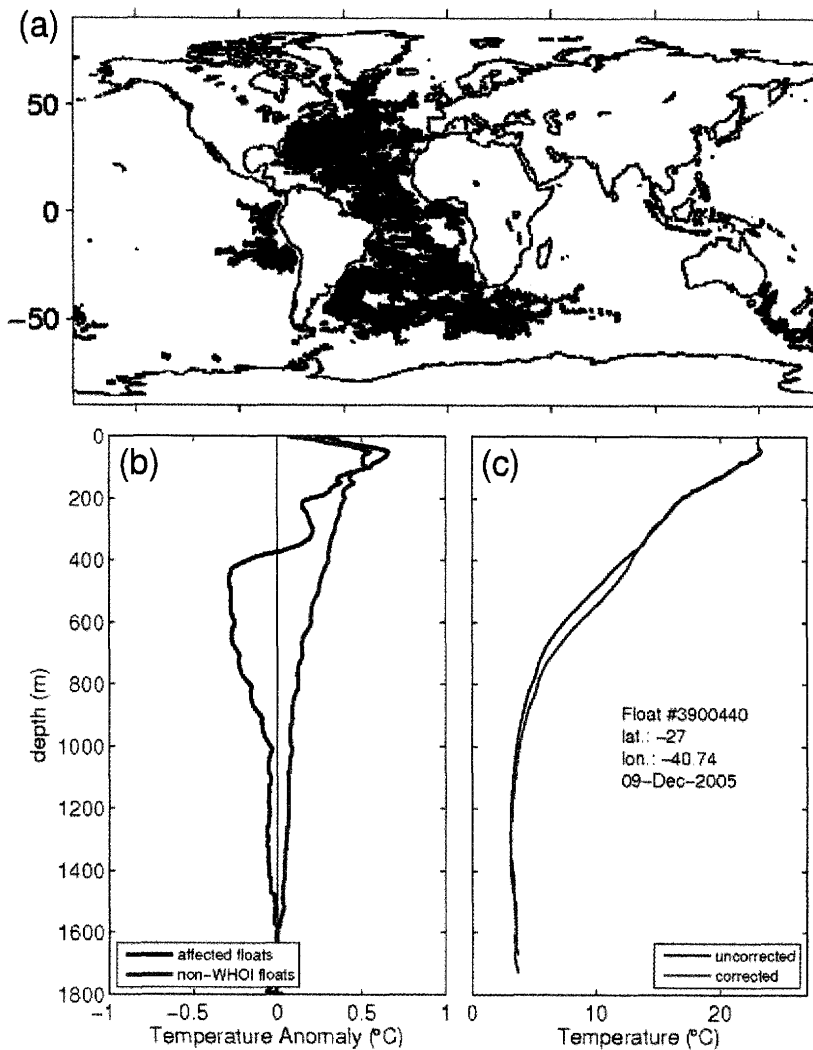
日本では日本の PI が展開した全てのアルゴ フロートに対して、即時データ処理を気象庁が、遅延データ処理を JAMSTEC がそれぞれ担当している。

### 3. WHOI-SOLO 型フロートに発生した圧力バイアス

ウッズホール海洋研究所 (Woods Hole Oceanographic Institution, WHOI, 米国) が展開・運用している SOLO 型フロートのデータに圧力バイアスが発見されたことは、それまでほぼ順調に進展してきたアルゴにとって大変な打撃であった。本節では、その発見の過程や発生原因、現在のデータ補正などの進展状況について説明する。なお、 Scripps 海洋研究所 (Scripps Institution of Oceanography, SIO, 米国) でも SOLO 型フロートを運用しているが、フロート内部で異なるデータ処理基板を採用していたため、同種の問題は発生しなかった。本研究ではこの二つの SOLO 型フロートを区別するために、WHOI が運用している SOLO 型フロートを WHOI-SOLO 型フロートと明記する。

#### 3.1. WHOI-SOLO 型フロートの圧力バイアスの発見過程

Lyman *et al.* (2006) は、アルゴ データを含む使用可能な全ての海洋観測データを用いて 1993 年から 2005 年における全球海洋の貯熱量の変化を推定し、2003 年以前では海洋貯熱量はほぼ単調に増加していたのに対し、2003–2005 年にかけて急速に低下した (海洋が寒冷化した) との結果を得た。ただし、この「海洋寒冷化」は、アルゴ データを解析に用いた場合は大きく、用い



**Fig. 2.** (a) Distribution of profiles with incorrect pressure measured by WHOI-SOLO floats during 1 January 2003 through 30 June 2007. (b) Averaged temperature anomaly from a climatology in the Atlantic between 50°N and 50°S. WHOI-SOLO floats with incorrect pressure values (blue line) and non-WHOI-SOLO floats from the same region (red line). (c) Effect of the correction for a single WHOI-SOLO float with FSI sensor in the South Atlantic. From Figures 1 and 2 of Willis *et al.* (2009).

ない場合は非常に小さい(ただし推定誤差は大きくなる)ことも示されていた。2003–2005年は、地球の平均気温が最近100年間で最も高い時期として社会的注目を集めていたため、この結果はNature誌でも取り上げられた(Schiermeier, 2006)。この記事では、このような短期間での海洋寒冷化は十分に起こりうるとした上で、関連する研究者から寄せられた様々なコメント(観測データ分布の偏りに起因した誤差の可能性や、海洋循環の変化や雲量の増加にその原因を求めるもの、海

洋から大気、宇宙空間へと熱が移動したとするものなど)を載せており、気候システムに対する人類の理解は未だ十分でないとは結ばれていた。

その後もLymanらはこの「海洋寒冷化」の原因を探るべく研究を続け、この寒冷化は大西洋で際だって大きいこと、大西洋に展開されているフロートのうち、米国Falmouth Scientific, Inc. (FSI)社で製造されたCTDセンサーを搭載したSOLO型フロート(大西洋の40°S以北に展開されているSOLO型フロートは全て

WHOI 製) で観測されたデータにのみ、気候値に比べて大きな水温の負バイアスが現れること (Fig. 2) を明らかにし、自らが見出した「海洋寒冷化」のほとんどは、一部のアルゴ データの不備によるものであることを報告した (Willis *et al.*, 2007; 2009; Dickey *et al.*, 2008)。

### 3.2. WHOI-SOLO 型フロートの圧力バイアスの原因とその後の対応

この報告を受けて、WHOI-SOLO 型フロートの PI である B. W. Owens (WHOI) らは、FSI 製センサー搭載の WHOI-SOLO 型フロートのデータの配信を停止するとともに、新規のフロートの展開を中止し、問題の解決に当たった。

FSI 製センサーを搭載した WHOI-SOLO 型フロートでは、あらかじめ設定されている層で平均した水温・塩分をプロファイル観測データとして送信している。しかし、圧力値そのものは送信データに含まれず、層番号から換算している (これによりデータ通信の負荷を軽減できる)。調査の結果、この層番号と深度の対応が設計仕様と実際とで異なっていたために、送信されてきた水温・塩分データが実際よりも浅い深度のデータとして認識されていた (つまり「負の深度 (圧力) バイアス」が生じた) ことが明らかとなった (AST, 2007)。なお、その当時、WHOI がデータの遅延品質管理 (2.2 節を参照) を全く行っていないことは記しておく必要がある (中村, 2007)。

さらにこの圧力バイアスの原因究明の過程において、米国 SBE 社で製造された CTD センサーを搭載した WHOI-SOLO 型フロートで正の圧力バイアスが発生している (層中央で観測された水温・塩分を、層下端における観測値と誤って認識していたため) ことが明らかとなった。ただし、こちらは FSI 製センサーを搭載したものに発生した圧力バイアスよりも小さい (ADMT, 2007; Willis *et al.*, 2009)。

これらの原因解明を受けて、WHOI および米国の DAC である Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory (AOML) は、現在までに以下の対応を施している。

- 1) 自動処理による圧力データの補正が可能なフロート (SBE 製センサーを搭載した WHOI-SOLO 型フロート全部と、FSI 製センサーを搭載した WHOI-SOLO 型フロートの約 1/3 が該当) に対しては、即時データ処理を行う際に圧力データを補正し、補正済みデータを通常の経路で流通させる。
- 2) 圧力データの補正に熟練者による解析を必要とするフロート (FSI 製センサーを搭載した WHOI-SOLO 型フロート全体の約 2/3 が該当) は、グレイリスト (Grey List; ADMT, 2008b; 2009) に載せ、データは GTS へは流通させない。GDAC からの公開は行いが、全データの品質フラグを 3 (Bad data that are potentially correctable) とし、データに問題があることを明示する。後日、準備が整い次第、データ補正を行う。

また、国際アルゴの議長 (D. Roemmich と H. Freeland) 名で、「即時データは簡易な自動品質管理を行っているに過ぎず、研究には高品質な遅延データを用いるように」との、アルゴ データの使用に関して注意を促す声明が出された (AST, 2007; Argo Project Office, 2007b)。

なお、この問題の認知を契機として、準即時のデータ監視体制の強化が国際アルゴ全体で図られたことを付け加えておく。もし現在、FSI 製センサーを搭載した WHOI-SOLO 型フロートと同程度 (1,000 dbar よりも深層で  $\pm 25$  dbar 程度以上) の圧力バイアスを示すフロートが存在した場合、それが報告してくる恒常的に高温または低温な偏差を示すデータは、「異常」データとして検知されるシステムが構築された (ADMT, 2007)。その情報は、該当するフロートの PI や DAC に連絡され、より詳細な検討を加えるように指示される。

## 4. APEX 型フロートに生じる圧力バイアス

アルゴでは前出の SOLO 型の他に、APEX 型 (米国 Webb 社製) および Provor 型 (フランス Mertec 社製) の 3 種類のフロートが広く用いられている。中でも APEX 型は現在展開されているフロートの約 6 割を占めており、日本だけでなく世界中の多くの研究機関で使用さ

れている。そして、最も深刻で複雑な圧力バイアス問題は、この APEX 型で生じている。本節では、APEX 型フロートに見られる圧力バイアスについて解説する。

#### 4.1. SP の経時変化

2.1 節で説明したように、フロートは漂流深度へ向けて沈降を開始する直前に圧力センサーを起動して SPM を計測、それを SP として次回浮上時に地上局へ電送している。Provor 型および SOLO 型フロートは、フロート内部においてプロファイル観測データに含まれている圧力バイアスを、SPM を用いて補正しているが、APEX 型はそうではない(フロート別のデータ処理の詳細は付録 A を参照)。そのため、もし APEX 型フロートの SPM に経時変化が認められるならば、アルゴデータの均一性を確保するためにも、地上局にて圧力データを補正する必要がある。

Fig. 3 は、JAMSTEC で監視している、APF-7 以前もしくは APF-8 前期型のデータ処理基板(以降、これを「旧式データ基板」と呼ぶ)を搭載した APEX 型フロートから電送されてきた SP を、圧力センサーの機種別に示したものである。ただし、フロートが電送してきた SP の値から「オフセット」の 5 dbar を減じている(付録 A.1 を参照)。APEX 型に搭載されている CTD センサーは、そのほとんどが SBE 製の SBE-41 型(もしくは SBE-41CP 型)であるが、そこに用いられている圧力センサーは Paine 社、Ametek 社、Druck 社で製造された三つの異なるタイプが存在している。これらの圧力センサーの初期精度はいずれも 2.4 dbar である(SBE, 2000)。SBE 社によると、SBE-41 型(および SBE-41CP 型)に搭載された圧力センサーの種類とその出荷時期は、Paine 製が 1998 年 8 月から 2000 年 5 月まで、その後 2002 年 8 月までは Ametek 製、それ以降は全て Druck 製のセンサーである(Larson, 私信, 2009)。

Fig. 3 から明らかなおとおり、APEX 型フロートに搭載された Paine 製および Ametek 製の圧力センサーは、時間の経過とともに SP の値が増加している。Ametek 製センサーの場合、最初の数回の観測サイクル(標準的なアルゴフロートの場合では海洋に投入後数日)の

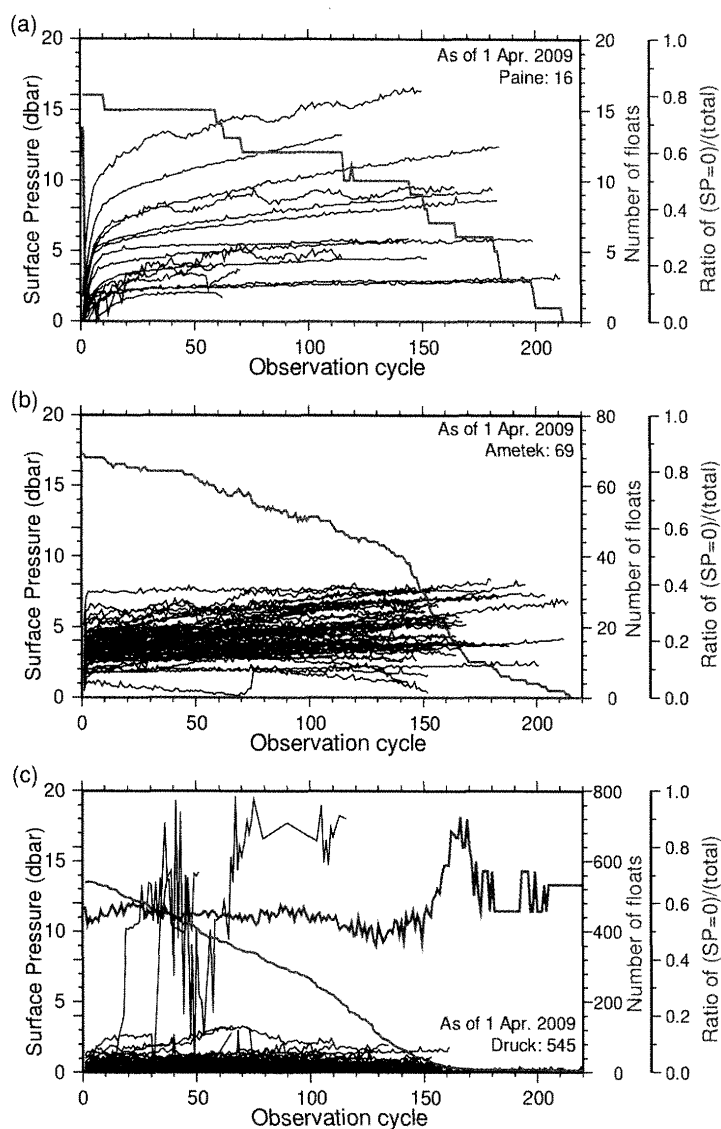
間に SP は急激に増加して 3-5 dbar 程度の値を示す。その後は、変動幅 1 dbar 以下のノイズ状の変動を別にすれば、比較的安定した値を示している。一方 Paine 製の圧力センサーでは、最初の約 10 観測サイクルで大きく SP 値を増加させた後も、ゆっくりと増加し続け、15 dbar を越えた値を示すものも存在する。これに対し、Druck 製の圧力センサーでは、SP の値は 0-0.5 dbar の範囲にほとんど集中しており、1 dbar よりも大きな値を示すものは稀である(Fig. 4)。そのため、Druck 製の圧力センサーは他のセンサーに比べて非常に安定していると言える(湊・小林, 2003; Riser and Wijffels, 2005; Kobayashi and Johnson, 2007)。ここで、Paine 製および Ametek 製センサーを搭載したフロートではほぼ例外なく SP が正となるのに対して、Druck 製の圧力センサーを搭載したものは、全体の約 55% で SP が 0 dbar を示していることに注意してほしい(Fig. 3 および Fig. 4)。この点については、4.3 節でさらに詳しく述べる。

Paine 製や Ametek 製の圧力センサーで顕著に認められた SP、つまり SPM の経時変化が、フロートの観測サイクルのどの段階で発生しているのかは特定されていない(SP と SPM の関係については付録 A を参照)。しかし、フロートがその観測サイクルの大部分を過ごしている海中の高圧環境下では、圧力センサーに大きな負荷がかかり続けていることから、フロートの深層滞在時に圧力センサーの経時変化が生じているものと考えられている(Wong and King, 2008; ADMT, 2009)。いずれにしても、SP、つまり SPM は経時変化が認められ、フロートに搭載された圧力センサーにはバイアスが存在することが明らかとなった。つまり APEX 型フロートで得られた圧力データは補正を必要とする。

#### 4.2. SP を用いた正の圧力バイアス補正とその不完全な実施によって生じた圧力バイアス問題

Fig. 3 で見たように、SP には経時変化が存在しており、特に Paine 製の圧力センサーでは 10 dbar を越える大きな値を示す場合がある。JAMSTEC ではこの SP の経時変化を 2003 年に発見して以来、気象庁と協力して、日本の PI が投入した全ての APEX 型フロートの圧



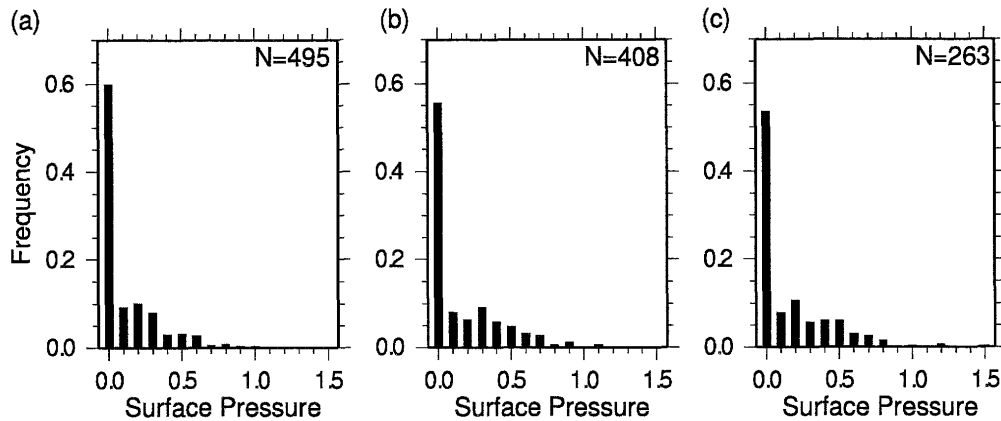


**Fig. 3.** Surface Pressure (SP) reported by APEX floats (with APF-7 or the earlier APF-8 type circuit board) equipped with (a) Paine, (b) Ametek and (c) Druck pressure sensor, respectively. Each of black line shows temporal change of SP of a float and +5 dbar offset is subtracted from the original value (see also Appendix A.1). Blue and red line in each Panel represents the number of floats and the ratio of those with SP=0 dbar to the total at the observation cycle. One observation cycle is equivalent to duration of 10 days for the standard Argo floats.

力データ補正を、即時・遅延データ処理の両方において行ってきた(湊・小林, 2003; ADMT, 2003, 2004; 補正方法については付録Bを参照)。さらに、国際アルゴに対しても、APEX型フロートで得られた圧力データの補正を提案し、合意を取り付けている(ADMT, 2005; 2006)。ただし、2006年11月以前におけるこの圧力データを補正するか否かの判断は、それぞれのDACに任

された上、2006年11月以降もSPが圧力観測の目標精度である5 dbarを越える場合のデータ補正が義務づけられたにとどまる(King and Joseph, 2006; ADMT, 2006)。

その後、5 dbar以内であっても、バイアスを放置している以上、フロート機種間の圧力データの不整合は解消されないこと、5 dbarの圧力バイアスによって引き



**Fig. 4.** Frequency of SP (unit is dbar) reported by APEX floats (with APF-7 or the earlier APF-8 type circuit board) equipped with Druck pressure sensor for every 0.1 dbar at (a) the 20-th, (b) the 50-th, and (c) the 100-th observation cycle, respectively. +5 dbar offset is subtracted from the original SP value. The number of data with larger SP than 1.5 dbar is 3, 4, and 3 for the 20-th, 50-th and 100-th observation cycle, respectively, and they are omitted.

起こされる「見かけの海洋貯熱量の増加」は、最近 50 年間における海洋温暖化(海洋貯熱量の増加量)の 1/2 から同程度に相当すること(付録 C.2 を参照)などの懸念が示され(Kobayashi and Johnson, 2007), 2007 年 3 月の第 8 回 AST 会合において, APEX 型フロートは, Druck 製センサー搭載型を除き, SP から計算される SPM を用いてプロファイル観測データの圧力を補正することが合意された(AST, 2007; 付録 A.1 を参照)。この原則は提案者の名前を取って「Kobayashi-Johnson 勧告」と呼ばれる。

しかし, その後の調査により, この合意された圧力データの補正が, 十分に実施されていないことが明らかとなった。Wijffels and Barker (2008a) は GDAC の全アルゴデータを調査し, 2008 年 9 月の時点において APEX 型フロートの圧力データを補正している DAC は少数であり, さらに一部の DAC では SP の解釈を誤っていることを明らかにした(Table 1; 2008 年 9 月現在)。彼らはその後も解析を進め, 圧力バイアス未補正のフロート データは, 北東大西洋・北東太平洋およびインド洋に集中的に分布し(アルゴ参加各国は, それぞれ特定の海域にフロートを展開しているため), 同海域のアルゴ データ セットには平均で数 dbar の正の圧力バイアスが存在すること, この影響は全球平均

で 2003 年頃に最大で, 2006 年の中頃まで継続していることを示した(Wijffels and Barker, 2008b)。そのため, Kobayashi-Johnson 勧告の原則に沿って APEX 型フロートの圧力データを補正するよう, 改めて勧告がなされた(ADMT, 2008a)。

現在は, この勧告に沿って各 DAC にて作業が進められている。2008 年 10 月の第 9 回 ADMT 会合にて合意されたスケジュールによれば, 各 DAC における即時データ処理スキームの修正と, 既に GDAC に存在している即時データに対する圧力補正は 2009 年 3 月までに完了する予定である(ADMT, 2008a)。また, 遅延データに対する圧力データの補正については, 処理プロセスが合意され(ADMT, 2009), 現在は各 DAC により修正作業が進められている(処理内容については付録 B を参照)。

#### 4.3. Druck 製圧力センサーと旧式データ基板を搭載した APEX 型フロートに現れる負の圧力バイアス

##### 4.3.1. 2009 年 3 月現在における負の圧力バイアス問題の状況とその原因

Fig. 3c および Fig. 4 で見たように, Druck 製圧力センサーの SP の値はおおよそ 1 dbar 以下と小さく,

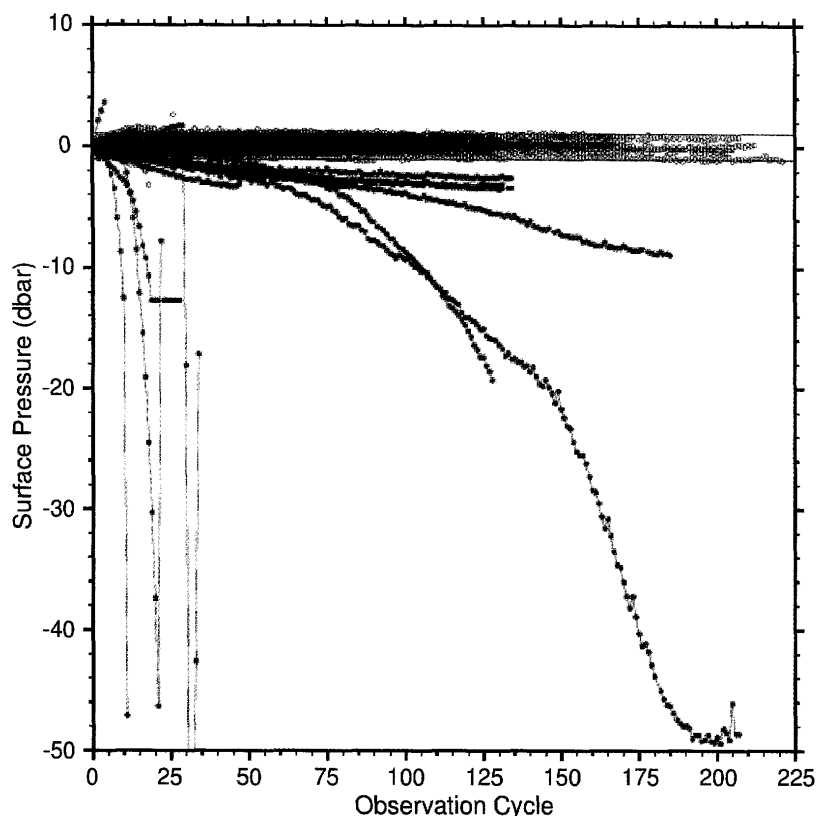
**Table 1.** Status of pressure correction by DAC (as of 9th meeting of ADMT in October 2008). Modified from Table of Wijffels and Barker (2008b). PMEL: Pacific Marine Environmental Laboratory. RT and DM: Real-Time and Delayed-Mode data procedures, respectively. N, S, NE, NW: North, South, Northeast, and Northwest, respectively. Pac., Atl., and Ind.: the Pacific, Atlantic and Indian Ocean, respectively. There are two DACs (KMA and KORDI) in Korea and Colioris operates data procedure for the floats deployed by many of European countries, mainly France and Germany.

DAC	Country	Adjustment		Note (status of major PIs)	Main areas of APEX deployment
		RT	DM		
AOML	USA	No	Partially done	PMEL: Done Univ. Washington: Partially done Hawaii Univ.: No U.S.Navy: No	Bering Sea, Tropical Pac. NE Pac., S Pac., S Ind. NW Pac. NW Pac., Arabian Sea
BODC	UK	No	No		S Atl., S Ind.
Colioris	France	No	No	France Germany	NE Atl. NE Atl., Weddell Sea
CSIO	China	No	No		NW Pac.
CSIRO	Australia	Done	Done		Around Australia
INCOIS	India	No	No	Needs improvement of description of SP.	N Ind.
JMA	Japan	Done	Done	Adjusted P is sometimes found as raw P.	N Pac.
KMA	Korea	No	No		Japan Sea, NW Pac.
KORDI	Korea	No	No		Japan Sea, S Atl.
MEDS	Canada	No	No		NE Pac., NW Atl.

約 55%では 0 dbar を示していた。これは、他に比べてこの圧力センサーの経時変化が少なく再現性が高いことの証左であり、4.2 節で解説した圧力バイアス問題はハードウェア的には解決されたものと考えられてきた (Riser and Wijffels, 2005)。しかし、これは Druck 製圧力センサーの経時変化の特性と、APEX 型フロートの内部で行われているデータ処理とが互いに干渉した結果、問題が表面化しなかったためであることが明らかとなった。

Fig. 5 は、APF-8 後期型および APF-9 型以降のデータ処理基板 (以降、これを「新式データ基板」と呼ぶ) を搭載する APEX 型フロートから送信された、Druck 製

圧力センサーの SP の時間変化を示している。新式データ基板を搭載した APEX 型フロートでは SP と SPM は同一の値をとるので、SPM が負となった場合でも地上局にてそれを把握できる (フロート内部でのデータ処理については付録 A.1 を参照のこと)。SBE 社がワシントン大学と協力して、新式データ基板搭載の APEX 型フロートを調査したところ、Druck 製圧力センサーのおおよそ半数で SP が負の値を示すことが明らかとなった (Wong and King, 2008)。大多数の Druck 製センサーは、SP が正負に振れても  $\pm 1$  dbar の (正常な) 範囲に安定的にとどまっている。しかし、Fig. 5 の赤で示したフロートのように、SP がその範囲から外れて大きく経

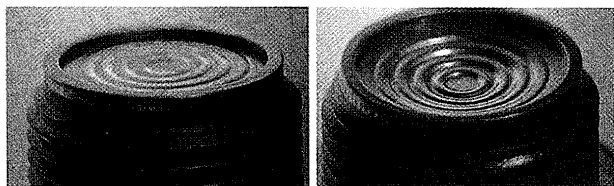


**Fig. 5.** SP reported by APEX floats with a Druck pressure sensor and an APF-9 circuit board. The floats reporting abnormal SP (beyond  $\pm 1$  dbar) are expressed by red. Courtesy of N. Larson (Sea-Bird Electronics, USA) and D. Swift (Univ. Washington, USA).

時変化するものが、フロート全体の約5%に見られ、これらの多くは負のSPを示す。極端な例ではあるが、SPが $-50$  dbarに達するものも確認されている。このような大きな負の圧力バイアスの原因は、Druck製圧力センサー内部の油が高圧環境下で僅かずつ漏れ、センサーの形状が変形する (Fig. 6) ことにあると考えられており、このような圧力センサーの異常は“microleak”と呼ばれている (Wong and King, 2008)。前述のSBE社とワシントン大学の解析結果によれば、microleakを疑われているフロートを除いた場合、Druck製センサーを搭載したAPEX型フロート全体では、SPの平均および標準偏差はそれぞれ $0.2$  dbarおよび $0.5$  dbar程度であることが示されている (Wong and King, 2008; Riser *et al.*, 2009)。その後、ワシントン大学の研究グループは、新式データ基板を搭載したDruck製センサー搭載型APEXを展開・運用している各国の研究所と協力

して、このmicroleakに関する国際的な調査を行った。そして、2006年後半以降に展開されたAPEX型フロートのmicroleakの発生率は15%程度と推定され、それ以前のものに比べて高くなっている可能性が高いこと (Riser *et al.*, 2009; AST, 2009)、2007年秋以降に製造されたDruck製センサーのうち、特定の製造ロットでmicroleakが頻発するような傾向が認められること (Swift, 私信, 2009)、を報告している。

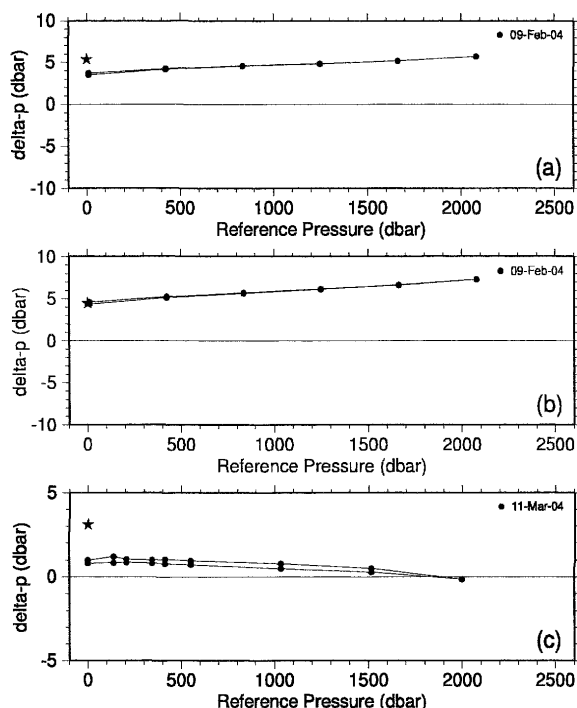
4.1節では、旧式データ基板とDruck製圧力センサーを搭載したAPEX型フロートのうち、約55%でSPが $0$  dbarであったと述べた (Fig. 3c および Fig. 4)。旧式データ基板では、SPMが負であってもSPは $0$ となる (オフセットの $5$  dbarを減じた場合; 付録A.1を参照) から、この55%のAPEX型フロートでは、SPMの値は不明であったと言える。このような状態にあるAPEX型フロートを、「負の圧力バイアスが打ち切られた



**Fig. 6.** (a) The normal appearance of the corrugate diaphragm in a nondirective Druck pressure sensor. (b) The depressed appearance of the diaphragm in a Druck sensor that has suffered “microleak” of oil from inside the sensor. Courtesy of N. Larson (Sea-Bird Electronics, USA) and D. Swift (Univ. Washington, USA).

APEX 型フロート」(truncated negative pressure drift (TNPD) APEX; Wijffels and Barker, 2008b; ADMT, 2008a) と呼ぶ場合がある。前述した SBE 社の調査結果によれば、Druck 製圧力センサーの SPM は正負がほぼ半分ずつであった (Fig. 5, Wong and King, 2008)。圧力センサーの経時変化の特性はデータ処理基板 (つまりデータ処理) の違いに影響されないから、Fig. 3c で示した、負の SPM が打ち切り処理された可能性のある APEX 型フロート (フロート全体の約 55%) のうち、その 9 割程度 (全体の半数程度) では SPM が負、つまり負の圧力バイアスを示していると考えられる。さらに、microleak の発生率を約 5% (Wong and King, 2008) とすれば、Fig. 3c の解析に用いた JAMSTEC で運用中の APEX 型フロート 545 本の中の約 25–30 本に相当するが、仮にこの発生率が 5% よりも高ければ、より多くのフロートで SPM が  $-1$  dbar を越えている可能性がある。さらに、SPM が  $-10$  dbar を越えるような、大きな負の圧力バイアスを持つフロートが存在する可能性もある。

Wijffels and Barker (2008b) は、GDAC にある全てのアルゴ データのうち、負の圧力バイアスの打ち切られた APEX 型フロートは、アルゴ フロート全体の 15.8%、プロフィール数の 16% を占めるとの調査結果を示している (2008 年 10 月現在)。さらに、これらの負



**Fig. 7.** The results of pressure sensor calibrations of the recovered float of (a) WMO ID 29045, (b) 2900056, and (c) 29051, respectively. All pressure sensors are made by Ametek. Delta-p (vertical axis) represents pressure difference of the recovered sensor reading from the reference. Two calibration data are obtained at each preset reference pressure in compression and decompression phase except for the largest pressure. Stars at 0 dbar represent SPM at the observation cycle of the float recovery and the SPM is obtained by subtraction of  $+5$  dbar offset from SP reported by the float. Reconstruction of Figures 4c, 5c, and 6c of Oka (2005).

の圧力バイアスを特定できないプロフィール観測データの水温値が、時空間的に近傍で得られた圧力バイアスのないプロフィール観測データ (補正済みのものを含む) と比べて、 $0.02$ – $0.03^{\circ}\text{C}$  程度 (圧力 200 dbar で最大  $0.07^{\circ}\text{C}$ ) 低いこと、および仮にその水温差が全て圧力バイアスに起因すると仮定した場合、平均で約 3 dbar のほぼ鉛直様な負の圧力バイアスであることを示している (Wijffels and Barker, 2008b)。

#### 4.3.2. 国際アルゴにおける負の圧力バイアス問題への対応状況 (2009年3月現在)

この負の圧力バイアス問題の存在が指摘されたのを受けて、2008年3月の第9回AST会合において国際アルゴがS. Wijffels (オーストラリア連邦科学産業研究機構 (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, CSIRO)) を座長とする圧力データ作業部会 (日本からのメンバーとして小林が参加) を組織し、これら負の圧力バイアスの検出や特定方法について検討がなされた (AST, 2008a; ADMT, 2008a)。負の圧力バイアスが打ち切られたフロートデータにおけるSPMの値を特定する方法は現在も見つかっていない。ADMTでは、遅延品質管理の際に *microleak* によって大きな負の圧力バイアスが生じているフロートを発見することを目的として、そのようなフロートの観測データに現れやすい特徴を五つの項目にまとめ、DACで実際の品質管理作業に当たる作業員への指針として公開した (ADMT, 2008a; Johnson and McTaggart, 2008)。また、大きな負の圧力バイアスが生じ、それが約  $-10$  dbar を越える場合、そのようなフロートは衛星海面高度とフロートのプロファイル観測データから推定した Steric Height との比較を用いた品質管理手法 (Guinehut *et al.*, 2009) によって発見が可能であると考えられる (ADMT, 2008a)。

これと並行して、当該フロートが、負の圧力バイアスがあった場合にそれを明示できる仕様のものか否か (つまり、旧式・新式データ基板のいずれを搭載しているか) が明確となるように、SPを格納しているテクニカルデータのパラメータ名の整理と記載の統一がなされ (AST, 2008a; ADMT, 2008a)、それぞれのデータ基板で処理されたSPは以下のパラメータ名で格納されることになった (ADMT, 2009)。

PRES\_SurfaceOffsetTruncatedPlus5dbar\_dBAR  
(旧式データ基板の場合)

PRES\_SurfaceOffsetNotTruncated\_dBAR  
(新式データ基板の場合)

これにより、データ利用者自らが、負の圧力バイアスを含んでいる可能性のあるデータを特定することが可能となる。現在、各DACにおいてこのテクニカルデー

タの修正作業が進められており、修正の済んだテクニカルデータは準備が整い次第、GDACより公開される予定である。

また、APEX型フロートのハードウェア開発・改良を行っている米国ワシントン大学のD. SwiftおよびAPEX型フロートに搭載されるCTDセンサーを製造しているSBE社には、このDruck製センサーの特性について研究を進め、結果を報告することが依頼されている (ADMT, 2008a)。APEX型フロートを製造するWebb社に対しても、フロートに搭載するのは新式データ処理基板に限る旨の要請がなされた (AST, 2008a)。その結果、2008年後半以降にWebb社から出荷された全てのAPEX型フロートが新式データ基板を搭載するに至った。

原因の特定やデータ修正などの作業と並行して、この負の圧力バイアス問題をアルゴデータ利用者に広く周知するため、AST名でデータ使用に関して注意を促す声明が改めて出された (AST, 2008b)。

## 5. 残された問題

### 5.1. 圧力バイアスの圧力依存性

現在、国際アルゴで行われている圧力データ補正は、フロート内部で自動的に処理されるものも含めて、プロファイル観測データの圧力からSPMを一様に減じるというものである (付録AおよびBを参照)。しかしながら、この補正方法の妥当性については、検討の余地がある。なぜなら、SPMが表しているのは、大気圧下におけるフロート搭載圧力センサーのバイアスに過ぎず、海中 (例えば  $1,000$  dbar) における同センサーのバイアスを示したものでは必ずしもないからである。そのため、圧力バイアスの圧力依存性、つまりフロート観測が行われる  $0-2,000$  dbar の範囲で、圧力センサーのバイアスを一定と見なすことができ、その値をSPMが代表できるかどうかについて検討を加える必要がある。

Table 2およびFig. 7は、この疑問に対して検討を加えた数少ない研究例の一つで、正常運用中に回収された旧式データ基板搭載のAPEX型フロートの圧力センサーを、専用の装置を用いて検定した結果である (Oka,

**Table 2.** Status of recovered floats. WMO ID is a World Meteorological Organization identifier. Modified from Table 1 of Oka (2005).

WMO ID	29045	2900056	29051
Float type	APEX	APEX	APEX
Sensor	SBE-41	SBE-41	SBE-41
Pressure sensor	Ametek	Ametek	Ametek
Parking/Profile depth (dbar)	2,000	2,000	2,000
Date of float deployment	16 Feb 2001	14 Jun 2001	17 Feb 2001
Date of float recovery	6 Jun 2003	14 Jun 2003	6 Aug 2003
Number of ascent	84	73	90
Operation period (days)	840	730	900
Date of P sensor calibration	9 Feb 2004	9 Feb 2004	11 Mar 2004

2005)。圧力センサーは全て Ametek 製である。この検定によって確認された圧力センサーの圧力 0 dbar における圧力バイアスは、一例を除いて、フロートが計測した SPM (電送された SP からオフセットの 5 dbar を減じた) とほぼ一致していた。しかし、3 ケースともこの圧力バイアスの大きさが圧力に依存することが確認された。この圧力依存性は、圧力に対してほぼ線形であり、傾きはそれぞれ 1.0, 1.4,  $-0.6$  [dbar/1000 dbar] と求められた。つまり、フロートが観測を行う 0–2,000 dbar の範囲では、圧力バイアスがそれほど大きく変化することはなく、圧力 0 dbar と 2,000 dbar における圧力バイアスの差の絶対値は、最大で約 3 dbar であった (Fig. 7b)。Ametek 製の圧力センサーの場合、海面における圧力バイアスは正で、その大きさは平均で約 3–5 dbar 程度であった (4.1 節および Fig. 3b を参照) から、アルゴで現在用いられている補正法によって、このバイアスのかなりの部分を取り除くことができると言える。このことは、現在の圧力データの補正方法 (付録 A および B を参照) の妥当性を示唆する根拠の一つとなっている。しかし同時に、この検定結果からは、Ametek 製圧力センサーによって計測されたアルゴ圧力データには、補正を施した後でも、大きさが最大で数 dbar 程度の、正または負の圧力バイアスが含まれている可能性がある

ことが示唆される。

通常、フロートが大気圧下にあるのは、海面を漂流してデータ電送を行う間に限られ、1 観測サイクルあたり 6–12 時間程度である (中島ら, 2005; Kobayashi and Nakajima, 2008)。それ以外のほとんどの時間は、漂流深度などの高圧下 (例えば 1,000 dbar) にとどまっている (Fig. 1 を参照)。しかし、Oka (2005) が示したのは、フロート回収から 8 か月以上 (Table 2 参照) 経過した後に行われたセンサー検定によって得られた結果であり、フロートは回収されて以来ずっと大気圧下に置かれていた。高圧下から長期間完全に解放されるという状況は、フロートの運用中に圧力センサーが置かれている状況とは全く異なるので、その間に何らかの理由によって圧力センサーのバイアスが解消された、またはバイアスの特性が変化してしまった可能性がある。そのため、Fig. 7 に示した検定の結果が運用中のフロートやセンサーの状況を反映したものか、検討の余地がある。また 3 例中 1 例で、フロートが最後に計測した SPM (Fig. 中の★印) とセンサー検定で得られた 0 dbar における圧力バイアスとが大きく乖離していることも、この疑念を深める。Paine 製や、現在主流となっている Druck 製センサーの圧力バイアスの圧力依存性については、このような検証結果が公開されていないため、

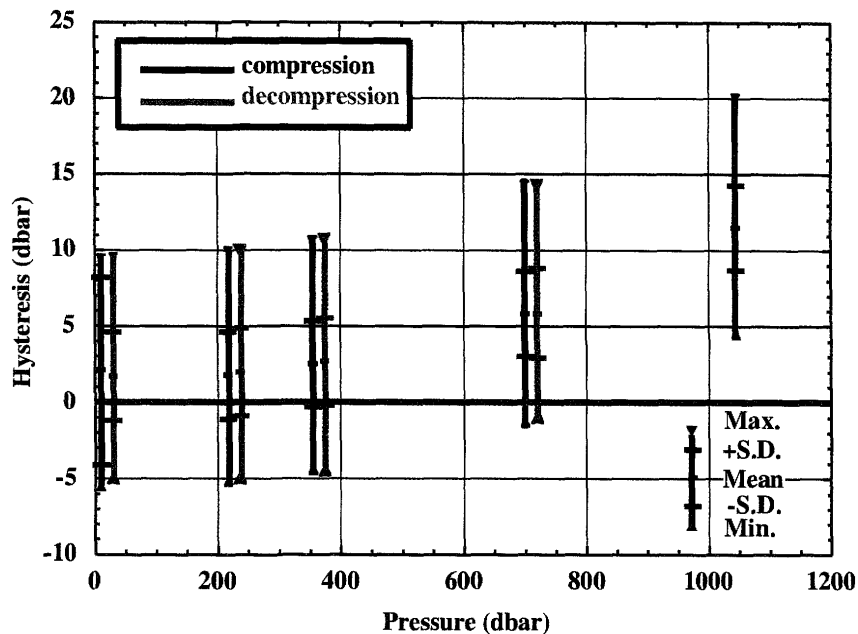


Fig. 8. The results of pressure calibrations for SBE-37 IM equipped with TRITON buoys after recovery. All pressure sensors are made by Druck. The black and red indicates the statistics for compression and decompression phase, respectively. From Fig. 7 of Ueki and Nagahama (2005).

明らかでない。

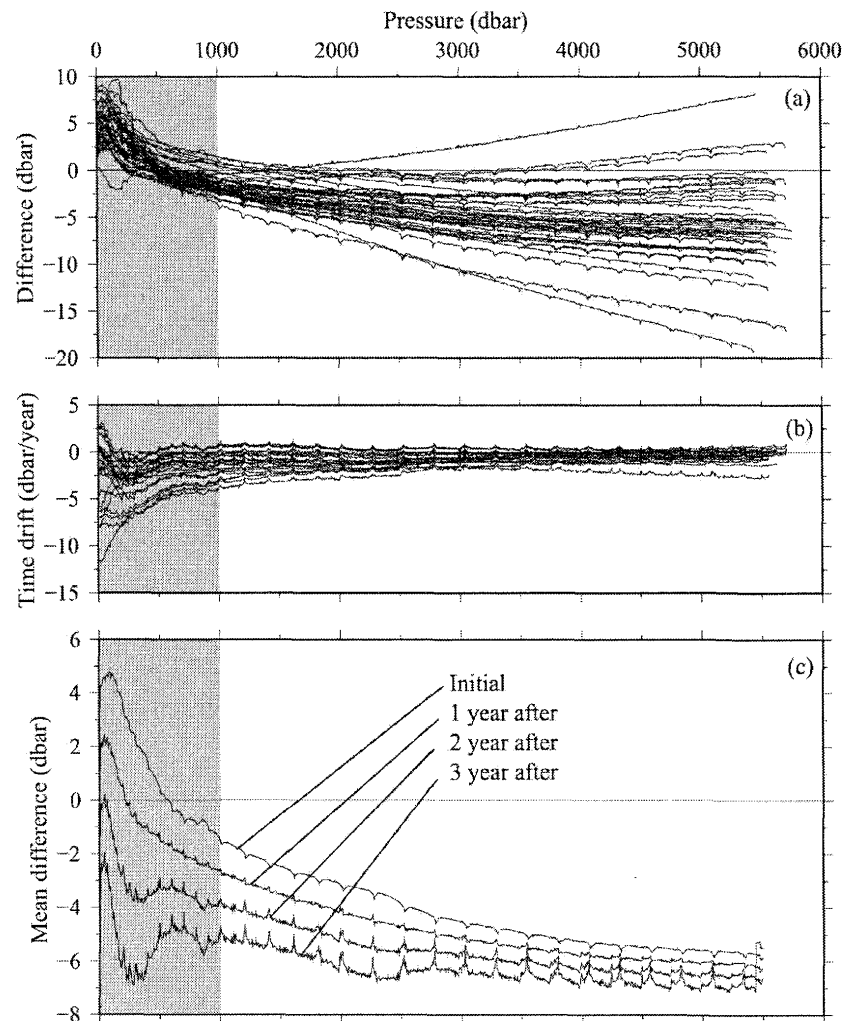
同じ自動海洋観測システムであっても、システム全体が回収される繫留系では、回収後のセンサー検定に関する知見が豊富に得られている。加えて、繫留系用のセンサーは、それを構成する部品の多くがフロート用のセンサーと同一品、または同等品であるなど、フロート搭載のものと同様であり、それが運用される状況も、海中の高圧下に長期間おかれ続けるなど、フロート観測と比較的似ている。そのため、繫留系センサーの検定で得られた結果は、直ちにアルゴデータに適用できるものではないにせよ、圧力バイアス問題の解明に大きく資すると期待される。そこで、以下では繫留系などで得られた圧力センサーのバイアスに関する知見を紹介する。

Fig. 8 はトライトン (TRITON, Triangle Trans-Ocean Buoy Network; 黒田・網谷, 2001) ブイに用いられている SBE-37IM (1997年に SBE 社より購入; 植木, 私信, 2009) の圧力センサー (Druck 製) を、繫留終了後に検定した結果をまとめたものである (Ueki and Nagahama, 2005)。繫留期間は約 1 年で、トライトン

ブイを回収してからおよそ 1 か月後に JAMSTEC むつ研究所にてセンサー検定が行われた。検定で測定された圧力バイアスは、大気圧下では平均 2–3 dbar であるが、圧力が高くなるに従って急速に増大し、約 1,000 dbar では平均で 10 dbar を越えている。この結果は回収されたフロートの検定結果 (Fig. 7) とは大きく異なっている。

また、別の深層繫留系で用いられていた CTD センサー (SBE-37SM) の圧力センサー (Druck 製) を、繫留の直前と直後に船舶観測用の高精度 CTD センサーと比較し、その差を示したのが Fig. 9 である (Uchida *et al.*, 2008)。ただし、up-cast で得られたデータを用いての比較であるため、採水のための CTD の停止に起因した棘状の構造が、1,000 dbar よりも深層では約 200–250 dbar ごとに認められる。繫留直前でも圧力バイアスは存在しており、約 500 dbar より深層では高圧下ほど負の圧力バイアスが增大する傾向にある。表層で見られる正の圧力バイアスは、繫留用に設計された応答の遅い CTD センサーが、温度躍層を通過する際の急激な温度変化に対応できずに発生したもので、応





**Fig. 9.** Characteristics of the SBE-37 SM pressure sensors (made by Druck) for the up-casts of the in situ calibration. (a) Initial differences between 42 SBE-37s and the shipboard CTD, (b) time drifts (per year) of pressure biases for 22 SBE-37s during mooring, and (c) mean initial differences and mean differences after 1, 2, and 3 years from the initial comparison as estimated using the mean time drift rate. From Fig. A2 of Uchida *et al.* (2008).

答の速いフロート搭載型の CTD センサーでは生じない、と SBE 社は指摘している (Larson, 私信, 2008)。また、圧力センサーの経時変化も検討されており、全ての深度で負のバイアスが時間的に増大する傾向にあることを示している。これらの結果は、フロートで得られている Druck 製圧力センサーの圧力バイアスに関する知見 (microleak により 0 dbar 下での負の圧力バイアスは時間とともに増大する傾向を示すこと、および、1,000 dbar より深層でも負バイアスが存在している可能性があること等; 4.3 節を参照) と整合する。な

お、Uchida and Imawaki (2008) はアルゴ データが負の圧力バイアスを含んでいる可能性を示す根拠の一つとして、この結果を挙げている。

以上のように、圧力バイアスの圧力依存性については現在でも不明な点が多く、現在アルゴで行われている圧力データの補正方法には、さらなる検証、特にフロート回収後のセンサー検定が必要であると言える。国際アルゴでは、このセンサー検定は、圧力バイアス問題の解明のみならず、アルゴ データの品質向上にとって非常に重要であると認識しており、各国の研究者や

フロートのPIに対して運用中のフロートの回収を積極的にを行うように呼びかけている (ADMT, 2008a)。

## 5.2. アルゴ以前のフロート観測データに圧力バイアスが含まれる可能性

アルゴは、World Ocean Circulation Experiment (WOCE) で行われたフロートによる海洋観測の成功をふまえて、その規模を大きくして計画・実行された海洋観測計画であると言える (例えば Gould, 2005b; Davis, 2006)。WOCE では、現在アルゴで用いられているタイプのフロートの使用は一部に限られ、その前世代機である PALACE 型 (Profiling - Autonomous Lagrangian Circulation Explorer; Davis *et al.*, 2001), R1 型, Marvor 型フロート等が主に使用された (Boyer *et al.*, 2006b)。フロートは、その登場以来その形状や基本的な機能をほぼ維持しているため、現行のフロートは前世代のフロートが有していた特徴 (例えば深度制御スキームや、フロート内部でのデータ処理プロセスなど) の多くを継承していると考えられる。そのため、WOCE で展開されたフロートによって得られたデータにも、これまで述べてきたような圧力バイアスが含まれている可能性がある。

4 節で述べたように、フロートから電送される SP は、SPM へ遡ることによってプロフィール観測データの圧力バイアスの補正に必要なだけでなく、圧力バイアスの有無やその特徴について検討する際にも重要な情報を与えている。しかし、公開されている WOCE のフロート データ (Diggs *et al.*, 2002; データ形式はアルゴに準じている) には、SP は含まれていない。SP はテクニカル データに記載される (ADMT, 2008b; 2.2 節を参照) が、WOCE のフロート データにはテクニカル データそのものが存在しないためである。後述するように、少なくとも一部の WOCE フロートは SPM を計測し、それを (所定のデータ処理を施した後に) SP として地上局へ電送していたことが確認されている。つまり、WOCE フロートの SP に関する情報は、当該フロートの PI に渡っていたが、その後のデータ編集で消失したことになる。このため、WOCE で得られたフロート観測データの圧力バイアスの有無やデータ補正の可能性

についての検証、さらには圧力バイアスの補正は、そのフロートの SP データを保持している (はずの) PI 以外には難しい。

筆者は、日本でアルゴが開始される前 (2000 年 3 月以前; Iwasaka *et al.*, 2003) に投入・展開された日本のフロート (PALACE 型, R1 型, APEX 型; Table 3) の SP について、フロートから電送されたデータに遡って検討した (Fig. 10)。これらのタイプのフロートは全て Webb 社で製造されており、WOCE でも数多く用いられていた。このうち、一部のフロート タイプでは、フロート内部でのデータ処理を記したマニュアルを確認することができた (Webb Research Corporation, 1997; 1998a; 1998b; 1998c; 1998d; 1998e; 1999a; 1999b; 2000; Table 3 を参照)。なお、フロート タイプは、当該フロートのメタ データの記載、つまり PI による申告内容に従って分類している。搭載された圧力センサーの機種などは、メタ データに記載がないために、一部を除いて不明である (メタ データの記載内容については 2.2 節を参照)。

現在アルゴで用いられている APEX 型フロートに最も近い APEX-SBE 型 (Fig. 10c) の場合、SP の経時変化の特徴は、そのフロートが展開された時期によって異なる。2000 年に展開されたフロートでは、SP の経時変化は Paine 製圧力センサーに見られる特徴とよく似ている (Fig. 3a を参照)。これは前述した SBE 社における SBE-41 型センサーの出荷状況 (4.1 節を参照) とも合致する。これに対し、1999 年に展開されたものは 0~2 dbar の SP を示し続ける。ただし、SP が負値を示していないため、SPM が負になった場合の打ち切り処理が行われている可能性がある (付録 A.1. を参照)。FSI 製 CTD センサーを搭載した APEX 型フロートでも、得られた SP の値は、スパイク状の「異常値」を除けば 0~0.5 dbar の範囲を連続的に変化している。こちらも SP は常に非負であった。これに対し、水温と圧力のみを観測する APEX-TD Profiler 型 (Table 3 を参照) では、負の SP を連続して示している (スパイク状の「異常値」を除く)。ただし、-2 dbar よりも低くなることはなかった。このフロートは電気伝導度センサーの計測セルの汚染の心配がないため、SPM が負になる場合の打ち切り処理を行わずに SP を送信しているので

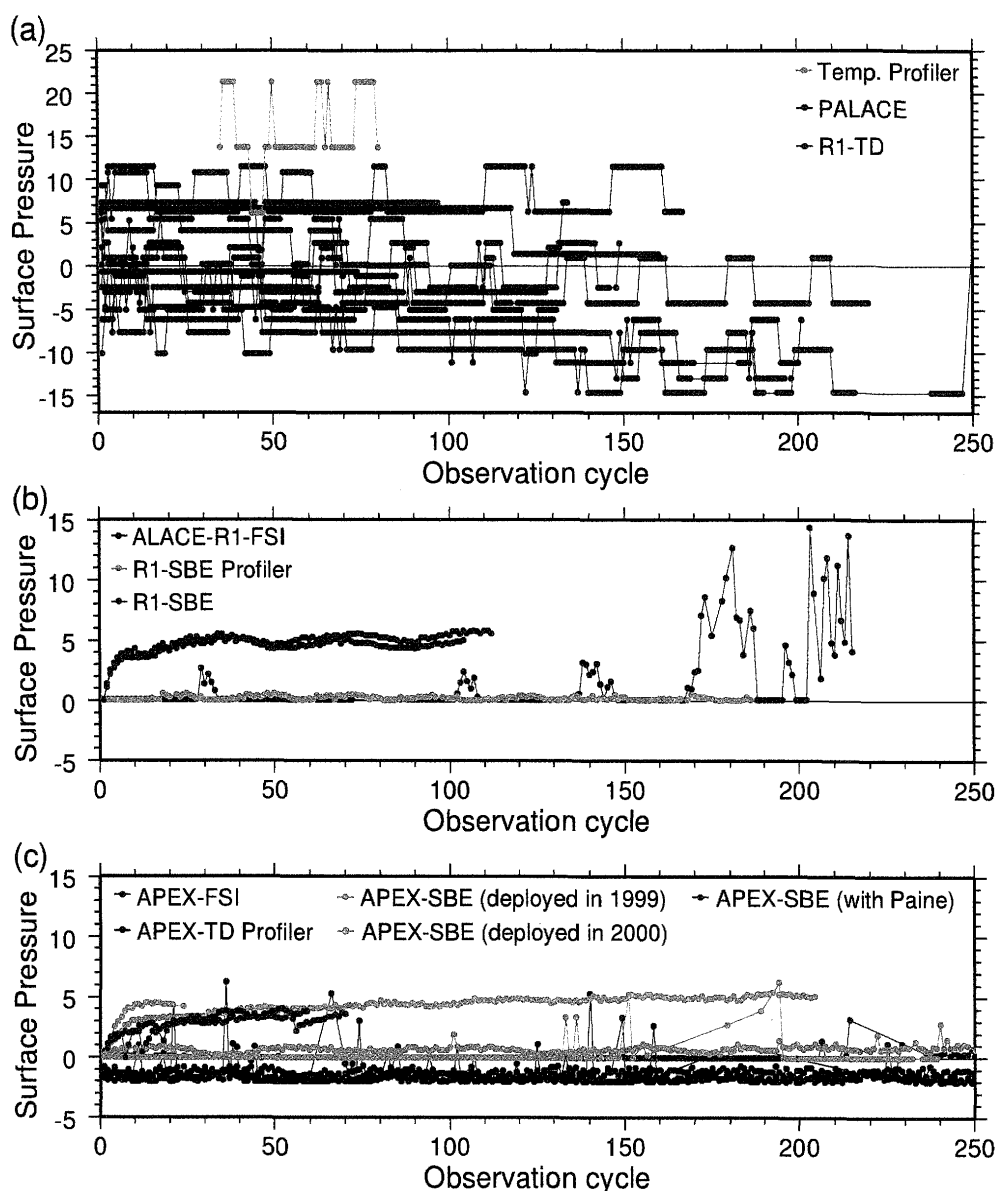


Fig. 10. Temporal changes of SP reported by profiling floats which were deployed by Japanese PIs before the beginning of Japan-Argo (before March 2000). PALACE and R1 are predecessor types of APEX and all are produced by Webb Research Corporation in USA. In Panels (b) and (c), +3 dbar or +5 dbar offset is subtracted from the original value except for ALACE-R1-FSI type floats (see also Table 3).

はないかとも考えられる (付録 A.1.2. を参照) が、現存するマニュアル (Webb Research Corporation, 1999b) にはデータ処理の詳細は記述されていない。

これに対し、さらに古い型である PALACE 型および R1 型のフロートに見られる SP の経時変化には、APEX 型とは大きく異なるものも認められる。SBE 製の CTD センサーを搭載した R1 型フロートのうち、1999 年に展

開された R1-SBE 型は、2000 年に展開された APEX-SBE 型とよく似た SP の経時変化を示しており、1998 年に展開された R1-SBE Profiler 型の圧力バイアスの経時変化は、1999 年に展開された APEX-SBE 型とよく似ている (Fig. 10b と Table 3)。FSI 製 CTD センサーを搭載した R1 型フロート (ALACE-R1-FSI 型) の SP は、時折、数 dbar の値を示し、観測サイクルが 160 回

**Table 3.** Status of Japanese floats deployed before the beginning of Japan-Argo (before March 2000).

Float type <sup>(a)</sup>	Param. ( <sup>b</sup> )	Deployed date <sup>(c)</sup>	WMO IDs	PI	Decode ( <sup>e</sup> )	Manual	Offset ( <sup>g</sup> )
Temp. Profiler	P/T	3 Jul 1997	2900360	T. Watanabe	T4	WRC <sup>(f)</sup> (1997)	0
PALACE	P/T	7 Jun 1998	21850, 21900	ORI <sup>(d)</sup>	T1	—	0
		13 Oct 1999	29000545, 2900546	ORI	T2	—	0
R1-TD	P/T	4 May 1998	29001, 29002, 29003, 29004	N. Shikama	T1	WRC(1998c)	0
		21 Nov 1998	29005, 29006, 29007, 29008, 29009	N. Shikama	T2	WRC(1998d)	0
ALACE-R1-FS1	P/T/S	4 May 1998	21851, 21852	K. Ishikawa	M0	WRC(1998a)	0
R1-SBE-Profiler	P/T/S	7 May 1998	29000	K. Ishikawa	M1	WRC(1998b)	+3
R1-SBE	P/T/S	3 May 1999	29010, 29011	K. Ishikawa	A0	WRC(1998e)	+5
APEX-FS1	P/T/S	27 Sep 1999	29013, 29014	N. Shikama	A1	—	+5
APEX-TD Profiler	P/T	21 Nov 1999	29026, 29027, 29028, 29029	N. Shikama	T3	WRC(1999b)	+5
APEX-SBE	P/T/S	14 Jul 1999	29012, 29025	N. Shikama	A1	WRC(1999a)	+5
		30 Jan 2000	29030, 29031	K. Ishikawa	A1	—	+5
		21 Mar 2000	29032, 29033 (with Paine P sensor)	K. Takeuchi	A1	WRC(2000)	+5

(a) Float type is identified by the description on its meta-data. (b) Param. means parameters measured by the float(s) and P, T, and S mean pressure, temperature, and salinity, respectively. (c) The date when the first float of the category is deployed in ocean. (d) ORI represents Ocean Research Institute, University of Tokyo. (e) Decode represents type of decode software used for float(s) of the category at Japan Meteorological Agency operationally. (f) WRC means Webb Research Corporation. (g) Offset means the value which is added to SPM automatically in the data procedure of the float(s). Unit is dbar. The offset value is subtracted from the original value of SP to make plots of Figure 10.

を越えてからは最大で約 15 dbar の大きな値を示すことがあったが、それらを除けばほぼ連続して 0 dbar であった。これも常に非負であったため、負の SPM の打ち切り処理がなされている可能性がある。これに対し、WOCE の当時、主流であった水温と圧力のみを観測するタイプのフロート (Fig. 10a; PALACE 型, R1-TD 型および Temp. Profiler 型) では、SP が約 5 dbar 刻みの離散的な値に限定されている。この SP は、正負両側に振れており、フロートごとのばらつきも大きい。全体的には時間と共に負の値が増大していく傾向が認められる。

現存する Temp. Profiler 型および R1-TD 型フロートのマニュアル (Table 3; Webb Research Corporation, 1997; 1998c; 1998d) によれば、SP は「前回の沈降開始

直前に計測された海面圧力」と記述されており、 $SP = SPM$  であることが分かる (Fig. 1 を参照)。しかし、これらのフロートから電送されるのはカウンタ値であり、地上局においてこの値を圧力に変換している。この 1 カウンタはどちらのフロートでも約 5 dbar に相当するため、Fig. 10a のような離散的な分布となる。つまり、Temp. Profiler 型や R1-TD 型フロート (および SP の特徴がこれらとほぼ同じ PALACE 型フロート) では、SP や、これから遡って得られる SPM の分解能は低い。つまり、現在のフロートと比較して、これらのフロートでは圧力センサーのバイアスについて精度の低い情報しか得られていないことを示す。

つまり、WOCE で用いられたフロートの一部、特に APEX 型フロートでは、フロートが電送してきたデー

たに遡って SP を復元することができれば、現在のアルゴ データと同程度の圧力データの補正が可能であると予想される。ただし、一部のフロート、特に CTD センサーを搭載したフロートの初期の型では、4.3 節で述べた負の SPM の打ち切りと同様の問題が発生している可能性があり、その場合は圧力データの正確な補正は原理的に難しい。それ以外のフロート、特に SP の値が離散的なもの (Fig. 10a) では、SP に基づいた圧力バイアスの補正は可能であるが、その補正の精度は、現在のアルゴデータの場合と比べて劣ると言える。

WOCE フロートのプロファイル観測データに含まれている可能性のある圧力バイアスについてまとめると次のようになる。WOCE では、PALACE 型や R1 型フロートが多く用いられ、そのほとんどが圧力と水温のみを観測していた (Boyer *et al.*, 2006b)。これらのフロートでは、SP の分解能が低いために個々の観測プロファイルの圧力バイアスを正確に特定することは難しいが、全体としては負の圧力バイアスを示す傾向にあったと考えられる。その後登場した CTD センサー搭載のフロートのうち、その初期のものでは、SP の値は (オフセットを減ずると) 非負であり、さらに 0 dbar 近傍に集中している。このことは、これらのフロートでは負の SPM に対して打ち切り処理が行われていた可能性があることを示唆し、よってその圧力データには負のバイアスが含まれている可能性がある。その後、現在のアルゴで用いられているものに近いフロートが展開され始め、これらの観測データに正の圧力バイアスが含まれている可能性が高い。しかし、これが用いられ始めたのはアルゴが開始される直前であり、WOCE の期間中に用いられたものは少数にとどまると考えられる。つまり、現在公開されている WOCE のフロートデータセット (Diggs *et al.*, 2002) には、全体として負の圧力バイアスが含まれている可能性が高い。

Gouretski and Koltermann (2007) は、1995–1998 年にフロートで観測された水温が、同深度の船舶観測水温 (採水および CTD データ) に比べて 0.1–0.2°C 程度低いことを明らかにしている。このことは、WOCE フロートのプロファイル観測データに負の圧力バイアスが存在する可能性があることを示唆する。水温観測が正確とするならば、Druck 製センサーの負の圧力バイ

アスの推定結果 (4.3 節を参照) から類推して、WOCE で得られたフロート データには平均して約 15–20 dbar の負の圧力バイアスが存在することになる。これは、上で述べた結果と矛盾しない。

## 6. 議論

### 6.1. 圧力バイアス問題の発生要因、特に人為的な要因について

本論文で述べた圧力バイアスの発生原因は、以下の三つに大別することができる。

- 1) 圧力センサーの経時変化
- 2) フロート本体でのデータ処理の誤り、もしくは不具合
- 3) DAC や PI による不適切・不完全なデータ処理

データの品質管理に関して、アルゴが当初想定していたのは 1) のセンサー特性に関するもののみであった。2) のフロート本体に起因する問題は、本来は起こってはならないことであるが、WHOI-SOLO 型フロートの問題 (3 節を参照) の形で現れ、アルゴ全体の進展に遅れを生じさせた。このような問題の場合、その原因追及やデータ補正に必要な情報は、必ずしも一般に公開されるものではなく、それらに接することができるのはフロート開発者やそれに近い者に限られることが多い。そのため、フロートを運用する側の責任は極めて大きいと同時に、彼らがデータ修正を終えるまで、該当するフロート データの利用は待たされることになる。その意味でも、この問題は深刻である。

しかし、多くのデータ使用者にとり、最も広範な影響が及んでいるものは、人為的な問題に起因する 3) である。Wijffels and Barker (2008b) は、正の圧力バイアス問題 (4.2 節) に関して、Kobayashi-Johnson 報告に従って圧力データ補正を行っている DAC は少数であり、一部の DAC は不適切なデータ処理を行っていること (Table 1 を参照) を明らかにしたが、更に、データの記載漏れなどの情報不足のために圧力データの補正を行うことができないものが、アルゴフロートのうちの 8% (全て APEX 型フロート)、プロファイル数の

7%に上ると報告している(2008年10月現在, ADMT, 2008a)。

アルゴは国際観測プログラムの体裁をとっているものの、その実体は参加国(もしくは参加機関)の個別の海洋観測プロジェクト/プログラムの集合体である。そのため、ASTやADMTの定例会合やデータの品質管理に関する技術ワークショップなどで合意された事項であっても、それに必ずしも参加各国が対応しているとは限らない(それ以前に、これらの会合への参加も任意である)。各機関(主にDAC)の技術レベルも必ずしも一定ではなく、高い技術を必要とするデータ処理には対応することができないところもある。さらに、データ処理を行おうにも、どのDACも人的資源の不足は深刻である(JAMSTECや気象庁も例外ではない)から、本報告で述べている圧力バイアス問題に限らず、データ処理上の問題が存在することは認識しているが早急な対応は困難であるとするDACもある(Wong and King, 2008; ADMT, 2008a)。また、データ変更を行う権限は当該フロートのPI(およびデータ処理作業を代行しているDAC)にあるため、他のDACが問題の存在に気づいていたとしても、それを補正することはできないし、PIから十分な情報を受け取っていない場合には当該DACでの処理すらも難しい。これらの問題のために、人為的要素を主因とする圧力バイアス問題が完全に解決するには、その原因や解決方法が明らかになっているものであっても、当初の想定以上に長い時間を要するのではないかと筆者は予想している。

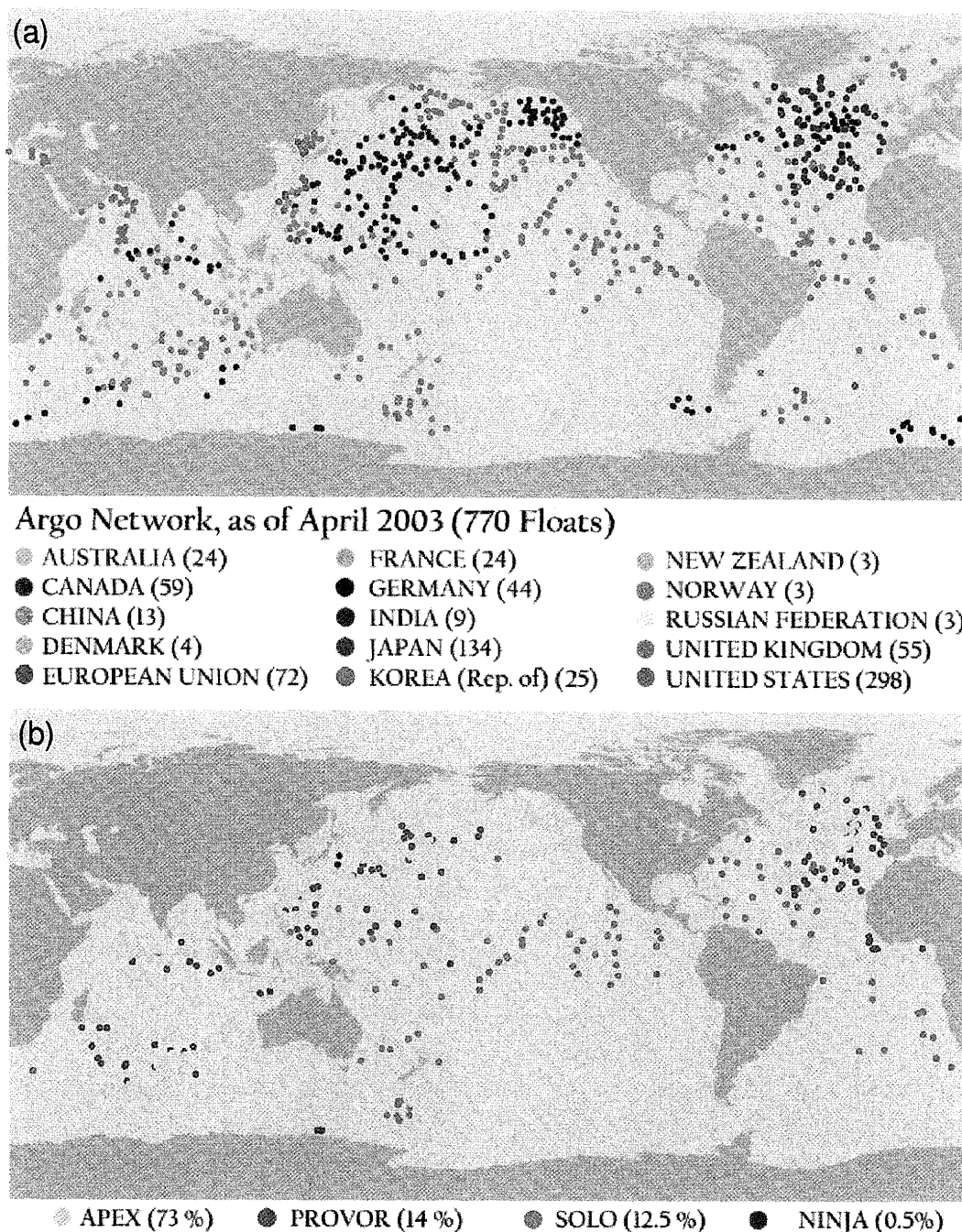
## 6.2. 圧力バイアスの「時空間分布」とそれが海洋貯熱量およびSteric Heightの評価に及ぼす影響

本研究で述べた圧力バイアス問題は、その一つが海洋貯熱量の経年変化を推定する研究の過程(Lyman *et al.*, 2006; Willis *et al.*, 2007; 2009)において発見されたことから明らかなように、積分量である海洋の貯熱量やSteric Height(または海面力学高度)に大きな影響を与える(付録C.2を参照)。本論文で説明した三つの圧力バイアス問題は、該当するフロートの展開場所や運用時期がそれぞれ異なっていることから、「アルゴ『データセット』の圧力バイアス」は時空間的な分

布を持つと考えられる。ここではその概略を示し、それと現在までに行われた海洋貯熱量や海面高度の時間変化の推定結果との整合性について考える。ただし、3節で説明したWHOI-SOLO型フロートの問題は、その影響の大きさが既に評価されていること(Willis *et al.*, 2007; 2009ほか)や、データ補正への対応がほぼ終了していることから、4節で述べたようなAPEX型フロートに生じた二つの問題に話を限定する。

アルゴが2000年に開始されてから2003年の前半までは、投入されたAPEX型フロートが搭載する圧力センサーはほとんどPaine製とAmetek製であった。この二つは正の圧力バイアスを生じさせるため、その補正が不十分であれば、それらによる観測データを用いて推定される海洋貯熱量やSteric Heightには正のバイアスが載ることになる。この時期は、北半球にはほぼ全域にわたってフロートが展開されていたが、南太平洋や南大西洋にはまだ少数のフロートが展開されたに過ぎなかった(Fig. 11aとFig. 11b)。一方、2003年後半以降に展開されたAPEX型フロートは、そのほとんどがDruck製圧力センサーを搭載しており、これらには(平均すれば)負の圧力バイアスが含まれている可能性が高い。また、フロートの展開域は南太平洋などにも広がり、2004年末頃にはフロート観測の空白域はほぼ消滅している。同時に、古いフロートは寿命が尽き(標準的なAPEX型フロートの運用寿命は平均で3.7年; Kobayashi *et al.*, 2009)、新しいものと置き換わる(Fig. 11cとFig. 11d)に従って、海洋貯熱量やSteric Heightのバイアスは北半球では正から負へと変化し、南太平洋などでは負のバイアスが新たに発生すると推測される。Paine製およびAmetek製を搭載したAPEX型フロートのほとんどがその運用寿命を終えてしまう2008年以降には、一定の負バイアスに落ち着くことが予想される。

現在までに行われた研究(WHOI-SOLO型フロートで得られたデータを解析対象から外す、もしくはその圧力バイアスを補正したもの)によれば、海洋貯熱量は1995年以降ほぼ一定の割合で増加して、2003年にピークとなり、その後はほぼ横這いか、やや減少する傾向を示している(Lyman *et al.*, 2006; Willis *et al.*, 2009; Ishii and Kimoto, 2009; Levitus *et al.*, 2009)。海面は、



**Fig. 11.** Float distributions in April 2003 (Panels a and b) and in December 2007 (Panels c and d). Panels (a) and (c) represent the distributions sorted by country of PI, and Panels (b) and (d) represent those by float type. From Argo Information Centre (<http://wo.jcommops.org/cgi-bin/WebObjects/Argo>).

海洋の温暖化に伴う海水の膨張によって上昇するが、衛星観測データから推定された海面高度は、2003年以降も年周期の変動を伴いつつ、それ以前とほぼ同じ割合で上昇し続けている (例えば Lombard *et al.*, 2007)。

特に2002年の後半からは、海水の増加による海面上昇分が衛星観測によって推定されており、この効果を考慮しても海水の膨張 (海洋温暖化) はそれ以前と同様に進んでいると推定されている (Lombard *et al.*, 2007;



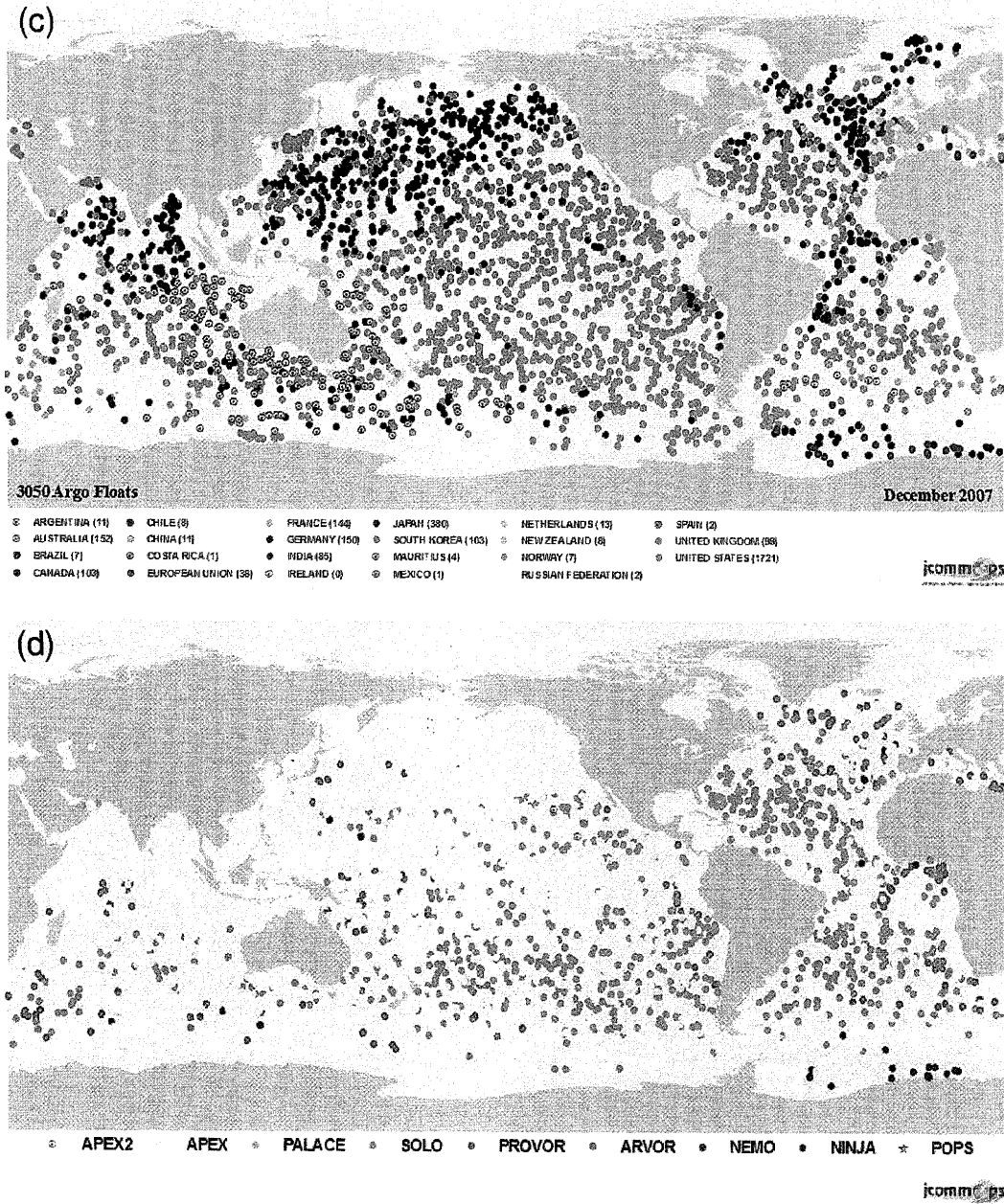


Fig. 11. Continued.

Willis *et al.*, 2008)。Willis *et al.* (2008) によれば、この推定値と Steric Height (900 m 深を基準) の不一致は、2007 年半頃の全球平均でおおよそ 10 mm であり、これは約 4-5 dbar の負の圧力バイアスが存在した場合と考えるとほぼ説明できる (付録 C.2. および Fig. 13 を参照)。2002 年後半の Steric Height の推定値には、既に数 dbar の正の圧力バイアス (Wijffels and Barker, 2008b;

4.2 節を参照) に起因する正バイアスが含まれている可能性を考慮すれば、この 4-5 dbar の負の圧力バイアスは Wijffels and Barker (2008b) で推定された Druck 製センサーに生じる負の圧力バイアス (平均で 3 dbar) と整合的であると言える。また、2003 年以降、衛星観測では海面の上昇トレンドが顕著に認められるのに、海洋観測データではそれが見られない海域として、Willis



*et al.* (2008) は南インド洋、太平洋および大西洋の周極流の北部、北大西洋を挙げている。これらの海域にはカナダ、イギリス、ドイツ、フランス、アメリカ (ワシントン大学) が APEX 型フロートを集中的に展開しており、それらが同海域に分布するフロートの半分近くかそれ以上を占め、それらの圧力データの補正は不十分である (Fig. 11 および Table 1 参照) こととも合致している。さらにインド洋北部でも海面上昇のトレンドと Steric Height のトレンドとの乖離が大きいが、この海域でもインドによって集中的に展開された APEX 型フロートが支配的である。

2003 年以降の海洋貯熱量の減少について、Willis *et al.* (2009) は投棄式水温水深計 (expendable bathythermograph, XBT) データに含まれる正の深度バイアスが原因で生じた「見かけの貯熱量増加」が、フロート観測網の充実に伴って緩和されたためであると説明している。これに対し Ishii and Kimoto (2009) は、XBT などの深度補正を行っても、2003 年以降の海洋貯熱量は緩やかながら減少しており、それが増加に転じたのは 2006 年以降であるとしている。さらに、全てのアルゴ データを解析から除外した場合には、観測データ数が少なく計算結果の信頼性は高くないものの、海洋貯熱量は 2003-2004 年にかけて一時的に減少するだけで、全体として 1993 年以降はほぼ一定の割合で海洋温暖化が進行しているとの結果を得て、アルゴ データに何らかの問題 (負の圧力バイアス) がある可能性を示唆している (石井, 私信, 2009)。

今後の詳細な検討が待たれるが、いずれにしても、アルゴ データを含む海洋観測データから推定される Steric Height の上昇量と、衛星観測によって推定される海面高度の上昇量の時空間的な不一致は、アルゴ データの圧力バイアスの補正を適切に行うことによって減少する傾向にあると言える。

### 6.3. 全球フロート観測網に求められる圧力データの観測精度

アルゴ では、その開始当初から観測要素ごとに目標精度を設定し、圧力に対しては  $\pm 5$  dbar を目標とした (AST, 2000)。これは、WOCE の高精度船舶 CTD 観

測に要求された観測精度  $\pm 3$  dbar (Joyce, 1988) より、やや低いだけである。WOCE 以降、海洋観測技術は大きく進展した。例えば、船舶観測用の高精度 CTD センサー (SBE-911plus) の圧力計測の初期精度は、フルスケールの 0.015% (SBE, 2009; つまりフルスケールが 6,000 dbar の場合には初期精度は 0.9 dbar) とされているし、現在多くのフロートに搭載されている CTD センサー (SBE-41/41CP) でも圧力計測の初期精度は 2.4 dbar である (SBE, 2000)。しかしながら、安価で、回収を前提とせず無保守運用を行う自動測器に対し、その約 4 年にわたる運用期間を通じて要求される観測精度としては、やはり高い水準であると言える。

本論文で取り上げた圧力バイアス問題は、大量の海洋観測データを得ることを目的とするアルゴにとって深刻な問題であることは疑いがない。しかし、一部の例外 (3 節の WHOI-SOLO 型フロートの問題、4.2 節の Paine 製/Ametek 製センサーで生じる正の圧力バイアスの一部、4.3 節の Druck 製センサーで生じる負の圧力バイアスの一部) を除けば、アルゴが当初目標とした圧力の観測精度 ( $\pm 5$  dbar) の範囲には収まっており、アルゴが開始当初に掲げた目標はほぼ達成していると言える。この点は強調しておく必要がある。つまり、本論文で述べている問題の大半は、フロートによる全球海洋観測網 (アルゴ) によって、全球を網羅する均質で大量の水温・塩分データが蓄積され、それによって新たに可能となってきた海洋監視的な研究に対して、アルゴがより高水準の精度要求を満たしていないが故の問題と言える。また、同時期に、多様で高精度な衛星観測データの整備が進み、海洋観測データで得られた結果を検証することが可能となったことも、大きな要素の一つである。

しかし、本論文で述べている圧力バイアス問題が、海洋貯熱量の経年変化や海面上昇の速度を推定するなどの海洋監視的な研究を進める際に大きな障害となっているのは事実である。アルゴが計画当初より、このような海洋監視的な研究を遂行するのに質・量ともに十分なデータを供給することを主要な目的の一つとしていた (例えば AST, 2001; Roemmich *et al.*, 2004) 点を踏まえると、現在の状態はアルゴ本来の目的にとって好ましいものとは言えない。このような皮肉とも言え

る事態が生じてしまった原因は、アルゴが開始される以前には、海洋観測データの量的な不足やその分布の偏りなどの制約のため、Levitus *et al.* (2000) などの数例を除けばこのような海洋監視的な研究はほとんど行われておらず、アルゴの圧力観測の目標精度の設定に際して、指針を与えるに十分な知見の蓄積がなかったことにあるだろう。そのため、アルゴ開始時の目標精度設定が、センサーに関する技術的な背景(実現の可能性といっても良い)に基づいてなされた(AST, 2000)にすぎない。つまり設定された目標それ自体が、今日のような高次の利用にとっては不十分であったと言える。

これらの海洋監視的な研究が要求している精度を満足する観測データを供給することが、アルゴが今後目指すべき目標となる。では、今後のフロートによる全球海洋観測網が目標とする圧力の観測精度は、どのようなものであるべきなのだろうか?以下では、このような研究を代表する、海洋貯熱量の変化や海面上昇に関する研究に基づいて、アルゴが当面、目標とすべき圧力の観測精度について考察する。

Uchida and Imawaki (2008) では、XBT や投棄式CTD (expendable CTD, XCTD) のデータから推定された Steric Height の推定値の方が、アルゴ データから推定する場合よりも、船舶 CTD 観測と良い一致を示した。この結果は非常に興味深い。XBT のような投棄式自動測器では、あらかじめ定められた落下速度式を用いて着水後の経過時間から深度を求める。そのため、器差や観測環境の影響などによって、得られる深度データは誤差を持ちうる。これらの個々の観測値の真値からのズレ、つまり深度誤差は、メーカー公称値で深度の2% (最小は5 m) の範囲に収まるとされている(例えば Kizu *et al.*, 2005) が、このばらつきは決して小さなものではない。しかしながら、この落下速度式は、真値からのズレが系統的なものにならないよう(つまり「系統誤差」が生じないように)、多数のデータから統計的に定められている。この改良は現在も続けられており(例えば Hanawa *et al.*, 1995; Johnson, 1995; Mizuno and Watanabe, 1998; Kizu *et al.*, 2005; 2008), 十分な検証が行われた種類の測器については深度データの系統誤差はかなり小さいものとなっている(Ishii and Kimoto, 2009)。Uchida and Imawaki (2008)

でも、XBT/XCTD の観測深度は、それぞれの機種に最適な落下速度式を用いて推定されている。海洋監視的な研究からの要求に対して、アルゴが現在以上に満足に応えるためには、圧力データに系統誤差を生じさせないという目標の達成を最優先にする必要がある。

次に、個々の圧力データに含まれるランダムな観測誤差の許容量について、Steric Height や海洋貯熱量に関する研究で示されている推定誤差をふまえて考察する。衛星観測による海面高度と海水量の増減に伴う水位変動の推定誤差は、全球平均でそれぞれ約 $\pm 2$  mm である(Lombard *et al.*, 2007; Willis *et al.*, 2008; ただし、時間方向の60日の平滑化を行った場合。10日ごとに得られるスナップショットの全球平均の推定誤差は $\pm 5$  mm。)。そのため、この両者から推定された海水膨張による海面上昇には、約 $\pm 3$  mm の誤差が含まれていることになる。1993–2003年における海面上昇速度は平均で $1.6 \pm 0.5$  mm/年(0–3,000 m; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007) と推定されているから、この推定誤差は約2年分の上昇に相当する。Steric Height を $\pm 3$  mm の精度で求めるために許される圧力データの誤差は、 $\pm 1$  dbar となる(付録C.2. および Fig. 13を参照)。

全球海洋の上層0–700 m の海洋貯熱量の推定では、観測データの水平内挿に起因する誤差として約 $\pm 1 \times 10^{22}$  J が示されている(Levitus *et al.*, 2005; Ishii *et al.*, 2006; Willis *et al.*, 2009)。また、Lyman and Johnson (2008) では、アルゴが目標とする時空間的な密度(10日ごとに $3^\circ \times 3^\circ$  四方に1点)で観測データが得られたならば、その推定誤差は約 $\pm 0.5 \times 10^{22}$  J となることが示されている。海洋貯熱量の増加速度(1993年～)は約 $0.6 \times 10^{22}$  J/年(Ishii and Kimoto, 2009) ないし約 $0.7 \times 10^{22}$  J/年(例えば Levitus *et al.*, 2005) と推定されているから、この $0.5 \times 10^{22}$  J の推定誤差はその約1年分に相当する。圧力データの誤差に起因する推定誤差を、これと同程度に納めるためには、フロート観測網で得られる圧力データに許容される誤差は $\pm 0.3$  dbar となる(付録C.2. および Table 4を参照)。

全球海洋の貯熱量や Steric Height の推定を行う場合には、個々の海洋観測データに最適内挿法(例えば Roemmich, 1983; Meyers *et al.*, 1991; 水野, 1995; 細

田・湊, 2003; Hosoda *et al.*, 2008)などを適用して格子化された水温・塩分場を構築する必要がある。その際、空間方向の無相関スケール (decorrelation scale) として東西で十数度、南北は 7-8 度程度の値が用いられることが多く (例えば Willis *et al.*, 2008), 海洋内部で卓越する中規模渦をノイズとして扱うことになる。これは、中規模渦がこの空間スケールよりも狭い空間内で熱や淡水を再配分しているに過ぎず、海洋貯熱量などを、この空間スケールよりも大きな領域について評価する場合はノイズとして扱って構わないと考えているためである。この空間スケールの範囲内では、アルゴにより平均で 1 か月に 30 点程度の観測データが期待できる。また、Steric Height は短い場合でも 1 か月程度の期間における平均として、また、長期の変動を解析の対象とする場合の海洋貯熱量は 1 年の平均として推定されることが多い。それらの場合、1 点の格子化データの推定に用いることが可能なアルゴ データの数は、Steric Height の推定には少なくとも約 30、貯熱量の場合には 300 程度となる。格子化データに許される圧力の誤差が  $\pm 1$  dbar と  $\pm 0.3$  dbar であるならば、個々の圧力観測データに許される誤差として、使用データ数 (30 および 300) の平方根を乗じることにより  $\pm 5.5$  dbar と  $\pm 5.2$  dbar が得られる。

つまり、最近の海洋貯熱量や海面上昇量の推定に関する研究成果を考慮した結果、アルゴが当面、目標とすべき圧力の観測精度は  $\pm 5$  dbar となり、これにより全球の海洋貯熱量は約  $\pm 0.5 \times 10^{22}$  J、Steric Height は約  $\pm 3$  mm の誤差で推定できることになる。 $\pm 5$  dbar という値は現在と同じであるが、観測誤差がランダムでなければならない (系統誤差は解消しなければならない) 点が大きく異なる。すなわち今後は圧力の系統誤差を取り除くことに向けて最大限の努力を払うことが必要となろう。実際、国際アルゴでもこの系統誤差の解消を、早急に解決すべき第一の課題に挙げている (ADMT, 2008a)。

## 7. まとめ

アルゴの進展により、大量の海洋観測データが季節・海域を問わずに得られるようになった。しかし、最近に

なって、このアルゴ データに圧力バイアスが存在すること、あるいはその可能性が指摘され、それが全球規模の海洋貯熱量や海面高度の推定結果を大きく歪めていることが明らかとなってきた (例えば Lyman *et al.*, 2006; Lombard *et al.*, 2007; Uchida and Imawaki, 2008; Willis *et al.*, 2007; 2008; 2009)。この圧力バイアスは、フロートに搭載された圧力センサーの経時変化だけでなく、フロート本体の不具合や、DAC などの地上局でのデータ処理の問題などが複雑に絡み合って発生しており、一般のデータ利用者には理解しにくい。そのためか、圧力バイアス問題は深刻に影響範囲が広範な割に、その理解は必ずしも十分ではない。そこで、本稿では 2009 年 3 月末現在で明らかとなっている圧力バイアスの種類と各々の発生要因やその把握の現状、国際アルゴにおける圧力データの補正への取り組みなどを、途中経過も含めて報告した。

現在、アルゴ データを含む海洋観測データから推定される Steric Height の上昇量と、衛星観測によって推定される海面高度の上昇量の時空間的な不一致が、いくつかの研究によって指摘されているが、これはアルゴ データの圧力バイアスの補正を適切に行うことによって減少する傾向にあり、今後の詳細な検討が期待される。また、近年になって行われるようになってきた、海面上昇や海洋貯熱量に関する研究成果に鑑みて、今後アルゴで当面の目標とすべき圧力の観測精度として  $\pm 5$  dbar を提案する。これにより、この二つの量をそれぞれ  $\pm 3$  mm と  $\pm 0.5 \times 10^{22}$  J の誤差で推定することが可能となる。ただし、個々の圧力データに許される観測誤差はランダムでなければならない、系統誤差の解消を第一の目標に据える必要がある。

現在、国際アルゴでは、本研究の 3 節および 4 節で述べた圧力バイアス問題の解決を最優先の課題として、各国の DAC により即時および遅延データ処理プロセスの改良と、既存の圧力データの補正作業が進められている。補正が完了したデータは、GDAC 上の既存のデータを更新することにより順次公開される。さらに、各国 DAC からの有志による作業部会を組織して、未解決の問題に対して対応策を検討している。さらに、フロートやセンサーのメーカーに情報提供やハードウェア・ソフトウェアの改良を求めたり、関連する研究者に解析を

依頼したりするなど、様々な方面からこの圧力バイアス問題の解決に取り組んでいる (AST, 2008a; ADMT, 2008a)。JAMSTECでも気象庁と協力して、日本のPIが展開したフロートによって得られたプロファイル観測データの圧力の補正作業を進めるとともに、データ処理プロセスの改良を行っている。また JAMSTECでは、従来から行ってきたフロートの回収やその圧力センサーの検定を精力的に進めるだけでなく、フロート搭載型圧力センサーのヒステリシス特性について調べるための室内実験を計画しているなど、ソフトウェア・ハードウェアの両面から、国内外のアルゴの関係機関と協力してこの圧力バイアス問題に取り組んでいる。

本論文で説明した圧力バイアスには、その補正が困難なものも存在する。そのようなデータに対しては、可能な限りの補正処理を行った上で、バイアスを含む可能性があることを明記して公開することになっている。そのため、海洋貯熱量や Steric Height 等の、鉛直積分量の精密な解析を行う場合には、バイアスの懸念のあるフロート データを必要に応じて除外するなど、データ使用者側での対処をお願いしたい。

現在までに確認されている圧力バイアスのいくつかについてはその要因が特定された。フロートやセンサーのハードウェアに起因する問題もあるが、中でも取り扱いが難しいのは DAC などの地上局におけるデータ処理が不適切・不完全であることから生じる、人為的なものである。従来からの船舶観測に比べて、フロート観測はデータを得るのは簡単であるが、そのデータが正常か否かを検討・判断することが一層困難になるため、データの品質管理の重要性は増大する。一方、その作業に当たる地上局、その中心となる各国 DAC は、技術レベルも相互に異なる上、いずれも人的資源が不足している。日本 (気象庁および JAMSTEC) が責任を持っているアルゴ データの補正処理は、比較的早く終了するものと予想されるが、全ての DAC において正確な処理が迅速に行われることは必ずしも期待できない。圧力バイアス問題については、国際アルゴとしても可能な限りの手を尽くしてはいるが、上記のような事情もあることを理解していただくと共に、アルゴ データの更なる品質向上に向けてご協力をお願いする次第である。

## 謝 辞

本稿で記した事項のうちのいくつかは、(独) 海洋研究開発機構 地球環境観測研究センター Argo グループ (現在は地球環境変動領域 戦略的海洋監視研究チーム) の各員および業務的なデータ監視およびデータ処理を行っている (株) マリン・ワーク・ジャパンの各員からの指摘により発見されました。特に荻田 尚子、中島 宏幸、大平 剛、松尾 典幸の各氏には非常に有益な指摘を受けました。また、圧力データに対する補正は、気象庁と協力して 2003 年より行っております。その即時データ処理に関する実作業には気象庁の吉田 隆、星本 みずほ、菅野 能明の各氏が、遅延データ処理には前述の 4 氏 (JAMSTEC および (株) マリン・ワーク・ジャパン) が当たっております。また、同機構 地球環境観測研究センター (現在は地球環境変動領域) の内田 裕博士と植木 巖博士には、それぞれ深層繫留系とトライトン プイで使用される圧力センサーの圧力バイアスについての助言を頂きました。同機構 地球環境フロンティア研究センター (現在は地球環境変動領域) の石井 正好博士には海洋貯熱量変化や海面上昇に関する最近の研究について助言を頂きました。気象庁の星本 みずほさんには、アルゴ計画開始以前に日本で投入されたプロファイリング フロートのマニュアルを提供して頂くとともに、即時データ処理の詳細について助言を頂きました。米国 SBE 社の N. Larson 博士と米国ワシントン大学の D. Swift 博士には、Fig. 5 および Fig. 6 の使用を快く許して頂きました。また、改訂に当たり 2 名の査読者には、丁寧な査読を行ってもらうと共に非常に有益なコメントを頂きました。ここに記して謝意を表します。本稿では国際アルゴ計画およびそれに参加する各国の観測プロジェクトで収集されたデータを用いており、これらは自由に使用することができます (<http://www.argo.ucsd.edu>, <http://argo.jcommops.org>)。アルゴ計画は全球海洋観測システム (Global Ocean Observing System) のパイロット プロジェクトです。

## 付録 A. フロート内部における圧力データ処理

アルゴで用いられている主要なフロートは、沈降を開始する直前に大気圧下での圧力を計測し、圧力センサーの経時変化を検知している (Fig. 1 および 2.1 節を

参照)。本論文ではこの計測値を Surface Pressure Measurement (SPM) と呼ぶ。圧力センサーは 1 気圧下で示度が 0 dbar となるように、センサー メーカーによって事前に調整されているので、圧力センサーに経時変化がなく、フロートが正常に海面に浮上し、大気圧が 1 気圧であれば、SPM は 0 dbar となる。実際には、大気圧は変動しており厳密には 1 気圧でないから、SPM はその変動の影響を受けてしまう。そのため、圧力バイアス等がなくても、SPM は原理的に最大で約 1 dbar (100 hPa) の範囲で変動しうる (Kobayashi and Johnson, 2007)。また、何らかの理由でフロートが海面まで浮上できなかつたり、波などにたたかれて計測時に海中に没していたりした場合は、SPM は大きな正の値をとることになる。

主要フロートのうち、Provor 型や SOLO 型フロートは、この SPM を用いてプロファイル観測データの圧力に含まれるバイアスをフロート内部で自動的に補正し、補正された圧力データを地上局へ向けて電送する。しかし APEX 型フロートではそのような補正処理は行われない (ADMT, 2009)。

SPM はフロート内部にてデータ処理され、次回浮上時に地上局へ向けて電送される。この電送されるデータは Surface Pressure (SP: 単位は dbar) と呼ばれる。なお、SP と SPM は、同一の場合もあれば、そうでない場合もあり、これはフロート固有の処理手順による。これらのプロファイル観測データの圧力の補正と、SP と SPM の関係についてのフロート固有のデータ処理をまとめると、以下ようになる (Kobayashi and Johnson, 2007)。

#### A.1. APEX 型フロート

##### A.1.1. SP と SPM の関係

APEX 型フロートの場合、そのフロートが搭載するデータ処理基板によって、SPM のデータ処理内容も電送される SP の意味も全く異なっている。

##### I. 旧式データ基板 (APF-7 以前または APF-8 前期型のデータ処理基板) を搭載するフロート

以下のように、SPM に 5 [dbar] を加え、その値が 5 より小さい場合は 5 として、この値を SP として送信する。

$$SP = \max ( SPM + 5, 5 )$$

つまり、地上局で得られた SP が 5 [dbar] であった場合、SPM は 0 または負であることが分かるに過ぎず、SPM の値を復元することはできない。この状態を「負の圧力バイアスが打ち切られた (truncated negative pressure drift, TNPD)」, その処理のことを「負の圧力バイアスの打ち切り処理」と呼ぶことがある (Wijffels and Barker, 2008b; ADMT, 2008a, 2009)。また、このデータ処理で加えられる一定の値 (5 dbar) のことを「オフセット」と呼び (Webb Research Corporation, 2000), アルゴが開始される前に海洋に展開された古い型のフロートでは、異なる値も用いられていたことが分かっている (例えば Webb Research Corporation, 1998b; Table 3 を参照)。この方法の導入の経緯は、A.1.2. 章で説明する。

##### II. 新式データ基板 (APF-8 後期または APF-9 以降のデータ処理基板) を搭載するフロート

SPM を SP として送信する。つまり

$$SP = SPM$$

ただし、いずれの場合であっても、フロート内部では SPM を用いた圧力データの補正は行われない。従って、SPM が 0 でない場合、フロートから電送されるプロファイル観測データの圧力 (および塩分; 付録 C.1. を参照) は、圧力バイアスの影響を受けている。SP データの分解能は通常 0.1 dbar である。

新式データ基板 (APF-9) は 2003 年にワシントン大学によって開発された (AST, 2004; Riser and Wijffels, 2005)。APF-9 型のデータ処理基板は、その後もしばらくはワシントン大学によって展開される APEX 型フロートのみ用いられ、Webb 社を通じて一般に供給されるようになったのは 2007 年頃からである。

APF-8 型のデータ処理基板では、上の I および II の処理スキームの両方が用いられている。ただし、新式データ基板に分類される APF-8 後期型のデータ処理基板を用いている APEX 型フロートは、世界的にも少数であり (ADMT, 2008a), 日本の PI によって運用されているものはない。第 9 回 AST 会合 (2008 年 3 月; AST, 2008a) において、APEX 型のデータ処理はスキーム II

に限るように AST から Webb 社に対して要請がなされた結果、2008 年後半以降に Webb 社が出荷した全ての APEX 型フロートには APF-9 以降の型のデータ処理基板が搭載されている。ただし、これ以前にも、この新式データ基板を搭載したフロートも一部では出荷されていた。

また、このスキーム I および II のデータ処理を明確に区分するために、SP を格納しているテクニカルデータのパラメータ名の整理と記載の統一がなされた (ADMT, 2008a)。2009 年 3 月現在では各 DAC においてこのテクニカルデータの修正作業が進められている。この修正されたテクニカルデータは、準備が整い次第、GDAC より順次公開される予定である (4.3 節を参照)。

### A.1.2. データ処理スキーム I の導入の経緯

旧式データ基板で用いられているデータ処理スキーム I は一見奇妙である。これは、電極式の電気伝導度センサー (SBE-41/41CP 等) の劣化を防ぐことを目的として、海面付近における CTD センサーの制御を精密に行うために導入された。APEX 型フロートは、プロファイル観測を行うべき圧力の一覧表に記載されている圧力をセンサーで検知すると、CTD センサーに搭載された水流ポンプを起動して外部の水をセンサー内部に取り込み、水温および電気伝導度 (塩分) を観測する (Webb Research Corporation, 2000)。しかし、海面近くで CTD 観測を行った場合には、海面を漂う油がセンサー内部に流入して電気伝導度センサーの計測セルが汚染され、その計測値に経時変化が生じる (小林ら, 2004a) ことが考えられる。そのため、APEX 型フロートでは、この観測圧力の一覧表に載せる最も浅い観測層を 4 dbar とすることで、海面近くでは CTD 観測を行わないようにしている。しかし、圧力センサーに経時変化が生じた場合には、CTD センサーを本来意図したとおりに制御できるとは限らない。これは、圧力センサーに正のバイアスが生じた (圧力センサーが検知するよりも、フロート自体が浅いところにいる) 場合には大きな問題となるが、負のバイアスの場合はそうではない。

そこで、圧力センサーの検知する値が、圧力の一覧表

に記された最も浅い観測層 (4 dbar) となる、もしくは処理スキーム I で得られた SP を示す、のいずれかとなった場合、APEX 型フロートは CTD 観測を行い、それをもってプロファイル観測を終了させる (Webb Research Corporation, 2000)。この処理によって、圧力センサーに経時変化が生じた場合でも、海面付近における不用意な CTD 観測を避けることができる。

### A.2. Provor 型フロート

Provor 型フロートは、SPM を各観測層の圧力データから一様に減じることにより、プロファイル観測データの圧力を自動的に補正している (Metoccean Data Systems Limited, 2001; 2004)。塩分は、この補正済みの圧力データを用いて計算される。つまり、第  $N$  観測サイクルで得られた第  $i$  観測層の圧力・塩分に対して行われる、フロート内部におけるデータ処理は以下のようなものである。

$$SP^N = SPM^N$$

$$P_i^N{}_{adjust} = P_i^N{}_{raw} - SPM^N$$

$$S_i^N{}_{adjust} = \text{sal}(C_i^N{}_{raw}, T_i^N{}_{raw}, P_i^N{}_{adjust})$$

ここで、 $P$ 、 $T$ 、 $S$ 、 $C$  はそれぞれ圧力、水温、塩分、電気伝導度であり、関数  $\text{sal}$  は塩分の計算式 (UNESCO, 1983)、添え字の  $\text{raw}$  と  $\text{adjust}$  はそれぞれ生データおよび補正済みデータを示す。 $SP^N$ 、 $P_i^N{}_{adjust}$  および  $S_i^N{}_{adjust}$  がフロートから電送される。ただし、SPM の分解能が 0.1 dbar であるのに対し、SP は通常 1 dbar の分解能しか持たない (Kobayashi and Johnson, 2007)。そのため、地上局で受信できる SP の値から、SPM の正確な値を知ることはできず、フロートが実際に行った圧力データの補正值は不明である。なお JAMSTEC では、SP の分解能が 0.1 dbar の Provor 型フロートを特注し、運用していたことがある。

### A.3. SOLO 型フロート

SOLO 型フロートは、観測サイクルごとに、SPM の計測を行うと同時に大気圧下で圧力センサーが 0 dbar を示すように圧力センサーの調整 (ゼロ リセット) を行っている。これにより、Provor 型フロート内部で行われているプロファイル観測データの圧力および塩分に対する圧力バイアスの補正 (付録 A.2. を参照) と同様の処理が行われたことになる。そのため、SOLO 型フ

ロートではゼロ リセット以外の特別な圧力データの補正処理は行われていない。

SOLO 型フロートによって観測サイクルごとに得られる SPM は、前観測サイクルで行われたゼロ リセット以降に生じた圧力センサーの経時変化を示すことになる。APEX 型や Provor 型フロートが示す SPM は、センサー メーカーで行われた事前調整からの経時変化を表しているから、SOLO 型の SPM はこれらとは意味する内容が異なる。また、この SPM は SP としてフロートから電送される。SP の分解能は SIO-SOLO 型フロートでは 0.5 dbar、WHOI-SOLO 型フロートは 0.1 dbar である (Kobayashi and Johnson, 2007)。

## 付録 B. DAC の即時および遅延データ処理スキームにおける圧力データの補正

### B.1. 即時データ処理スキームにおける APEX 型フロートの圧力データの補正

APEX 型フロートに対する即時データ処理における圧力データの補正は、他の型フロート内部におけるデータ処理との整合性を保つように行われる。まず、フロートから電送された SP から SPM を求め、これを各層の圧力観測値から減じることで圧力バイアスを補正する。さらに、この補正された圧力データを用いて塩分を再計算する (付録 C.1. を参照)。付録 A で用いたのと同様の表記を用いると、第  $N$  観測サイクルで得られた第  $i$  観測層の圧力と塩分に対する、即時データ処理スキームにおける圧力バイアスの補正は以下ようになる。

$$SPM^N = SP^N - 5$$

(旧式データ基板の場合)

$$\text{または } SPM^N = SP^N$$

(新式データ基板の場合)

$$P_{i,R.adjust}^N = P_{i,raw}^N - SPM^N$$

$$C_{i,raw}^N = \text{cond}(S_{i,raw}^N, T_{i,raw}^N, P_{i,raw}^N)$$

$$S_{i,R.adjust}^N = \text{sal}(C_{i,raw}^N, T_{i,raw}^N, P_{i,R.adjust}^N)$$

ここで、補正されたデータは添え字 R.adjust で表し、関数 cond は電気伝導度への計算式 (UNESCO, 1983) である。プロファイル データには、生データが「観測値カラム」に、補正済みデータが「補正值カラム」に格納される (ADMT, 2008a; 2008b; 2009)。なお、アル

ゴにおけるデータ処理システムについては、2.2 節も参照のこと。

旧式データ基板を持つフロートで  $SP = 5$  [dbar] の場合、 $SPM = 0$  となるが、負の SPM が打ち切り処理されている、つまりプロファイル観測データには負の圧力バイアスが含まれている可能性がある (付録 A.1 を参照)。しかし、この場合でも上の処理を適用する。結果的に  $P_{i,R.adjust}^N = P_{i,raw}^N$  および  $S_{i,R.adjust}^N = S_{i,raw}^N$  となり、圧力および塩分データともに、得られる補正值はフロートが電送してきた観測値と一致する。従って、この処理によってデータ品質が下がってしまうことはない。

### B.2. 遅延データ処理スキームにおける APEX 型フロートの圧力データの補正

即時データ処理スキームにおいて、第  $N$  プロファイルの圧力データの補正に用いられる  $SPM^N$  は、前回の沈降開始直前に計測されたものである。その計測は、標準的な設定のアルゴフロートの場合には、第  $N$  プロファイルが観測される約 10 日前に行われている (Fig. 1 を参照)。フロートの沈降後、圧力センサーは海中の高圧環境下におかれており、この間に経時変化が生じている可能性が高い (Kobayashi and Johnson, 2007; Wong and King, 2008)。これに対し、次の観測サイクルで得られる  $SPM^{N+1}$  は、第  $N$  プロファイル観測が終了した後、6 時間から遅くても 1 日以内に得られているから、こちらの方が時間的にも近い。また、フロートが最大観測深度に到達した後、プロファイル観測を開始してからは、センサーにかかる圧力は減じる方向にあるため、圧力センサーの経時変化がプロファイル観測を行っている間に大きく進行する可能性も低い。そのため、第  $N$  プロファイルの圧力データの補正值としては、 $SPM^N$  よりも  $SPM^{N+1}$  の方が適当であると考えられる (ADMT, 2009)。そのため、遅延データ処理スキームにおける圧力補正は以下ようになる。

$$SPM^{N+1} = SP^{N+1} - 5$$

(旧式データ基板の場合)

$$\text{または } SPM^{N+1} = SP^{N+1}$$

(新式データ基板の場合)

$$P_{i,D.adjust}^N = P_{i,raw}^N - SPM^{N+1}$$

$$C_{i\text{ raw}}^N = \text{cond}(S_{i\text{ raw}}^N, T_{i\text{ raw}}^N, P_{i\text{ raw}}^N)$$

$$S_{i\text{ D.adjust}}^N = \text{sal}(C_{i\text{ raw}}^N, T_{i\text{ raw}}^N, P_{i\text{ D.adjust}}^N)$$

遅延データ処理スキームで補正された圧力および塩分データ(添え字は D.adjust)は補正值カラムに上書きされる。この処理の後に塩分データの品質管理(例えば Wong *et al.*, 2003; Owens and Wong, 2009)が行われ、作業が終了したもののから順次 GDAC から公開される。Fig. 3 から分かるように、SP にはノイズ状の変動が認められる。これは、圧力バイアスを正確に反映したというよりも、ランダムな計測誤差であると考えられる意見もある。また、フロートとの通信不良などにより次の観測サイクルの SP が得られない場合など、時間方向に補間するなどの方法によりその値を推定する必要がある。そのため、SP を時間的に平滑化することで得られる第  $N+1$  観測サイクルの値を用いて、圧力データのバイアス補正を行うことが ADMT によって合意され (ADMT, 2009)、現在は各 DAC においてデータの修正作業が進められている。

### B.3. 遅延データ処理スキームにおける Provor 型および SOLO 型フロートに対する圧力データの補正

Provor 型や SOLO 型フロートでは、第  $N$  プロファイルの圧力データのバイアス補正に  $SPM^N$  が用いられ、補正された圧力および塩分データが地上局へ電送されている。しかし、付録 B.2. 節で述べたように、第  $N$  プロファイルの圧力バイアスの補正には、次の観測サイクルで得られる  $SPM^{N+1}$  を用いた方がより正確であると言える。しかし、Provor 型や SOLO 型では、SP の分解能が悪くて地上局では適切な補正を行うことが難しいためか、遅延データ処理スキームでの圧力バイアスの補正に関する議論は、現在まで行われていない。

なお、JAMSTEC では、SP の分解能が 0.1 dbar である Provor 型フロートに対し、遅延データ処理スキームで圧力および塩分データのバイアス補正を、APEX 型フロートに対する処理と同じように行っている。付録 B.2. に倣うと、以下のようになる。

$$SPM^N = SP^N$$

$$SPM^{N+1} = SP^{N+1}$$

$$P_{i\text{ D.adjust}}^N = P_{i\text{ adjust}}^N + SPM^N - SPM^{N+1}$$

$$C_{i\text{ raw}}^N = \text{cond}(S_{i\text{ adjust}}^N, T_{i\text{ raw}}^N, P_{i\text{ adjust}}^N)$$

$$S_{i\text{ D.adjust}}^N = \text{sal}(C_{i\text{ raw}}^N, T_{i\text{ raw}}^N, P_{i\text{ D.adjust}}^N)$$

ただし、添え字の adjust および D.adjust は、この Provor 型フロートが電送してきた(自動補正済みの)観測データおよび遅延データ処理スキームで補正されたデータである(湊・小林, 2003)。

## 付録 C. 圧力バイアスによって生じる「見かけ」の変化

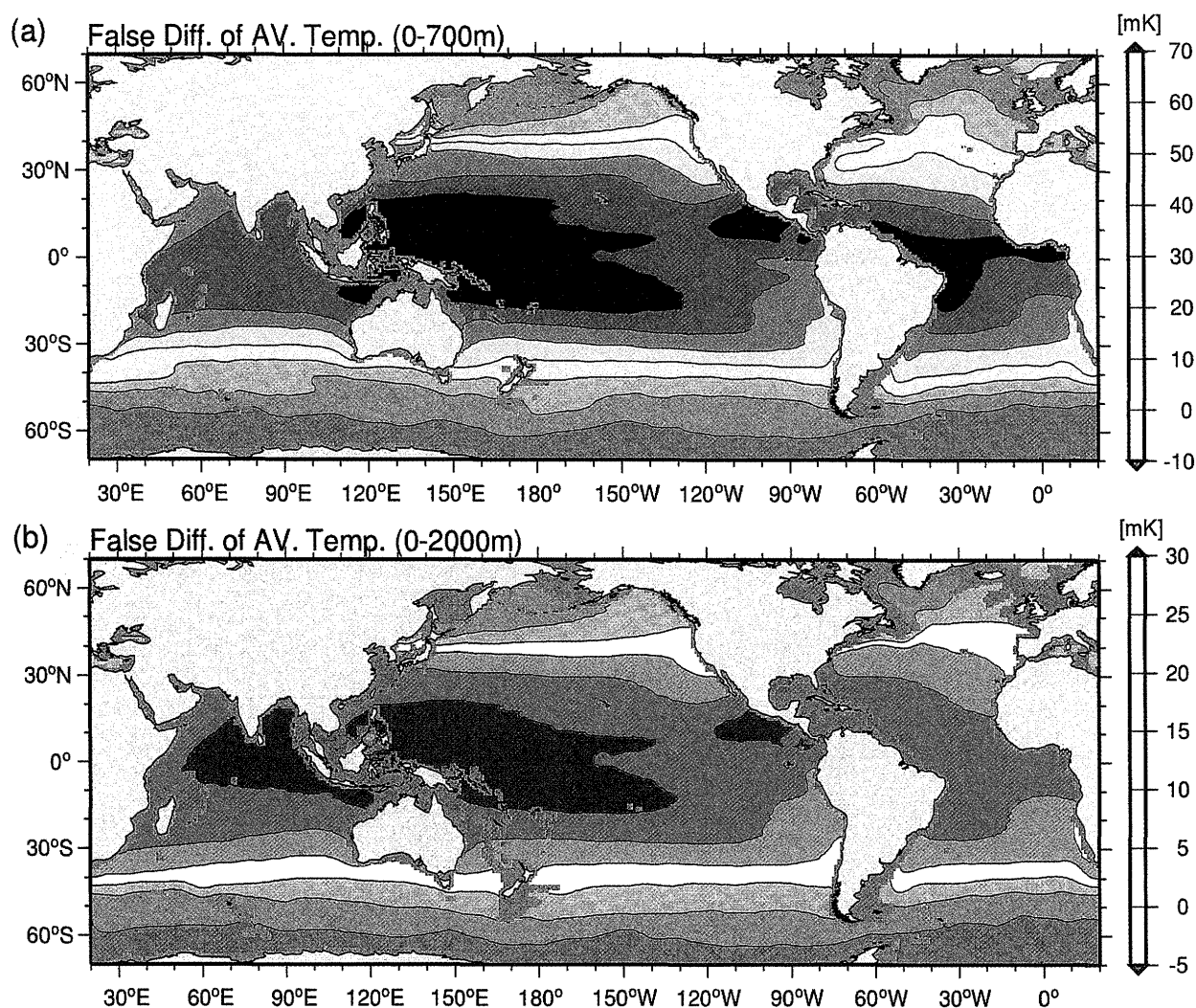
### C.1. 圧力以外の物理パラメータへの影響

CTD センサーなどのフロート搭載センサーは、電氣的に得られた計測値を海洋の物理パラメータに変換する。この時に圧力データが用いられるので、本論文で説明する圧力バイアスは、圧力だけでなく、塩分などの他の観測要素に対しても影響する。

塩分は、電気伝導度、水温および圧力の関数であるから、圧力バイアスが存在した場合、他のセンサーには問題が無くても、フロートから報告される値はバイアスが載ったものとなる。その大きさは、+10 dbar の圧力バイアスに対しておよそ -0.005 である (UNESCO, 1983)。フロートで用いられる電気伝導度センサーの測定精度は塩分に換算して  $\pm 0.003$  (SBE-41/41CP の場合)、アルゴにおける塩分観測の目標精度が  $\pm 0.01$  であることを考慮すれば、非常に大きな圧力バイアスが生じていない限り、塩分に対する影響はそれほど深刻とはならない。ポテンシャル水温、密度やそれに関連するパラメータに対する影響も限定的であり、非常に大きな圧力バイアスでなければ、その影響を無視しても事実上問題にはならない。

CTD センサーが計測する電気伝導度は、センサー出力値(例えば SBE-41/41CP の場合には周波数 [Hz]; SBE, 2008)をあらかじめ定められたセンサーに固有の多項式で変換することによって得られるが、この多項式には計測された圧力による補正項が含まれている (SBE, 2008)。そのため、厳密には CTD センサーで得られた電気伝導度も圧力バイアスの影響を受けてことになる。しかし、現在確認されている圧力バイアスの範囲においては、補正項の大きさはセンサーの分解能よりも小さいため、事実上影響はない。また、水温の計測には圧力バイアスの影響は及ばない(ただし





**Fig. 12.** Geographical distributions of false change of averaged temperature of (a) 0–700 m and (b) 0–2,000 m water column caused by vertically uniform bias of +2 dbar in pressure. Unit is mK ( $10^{-3}$  K). Temperature field of WOA05 is used for the analysis.

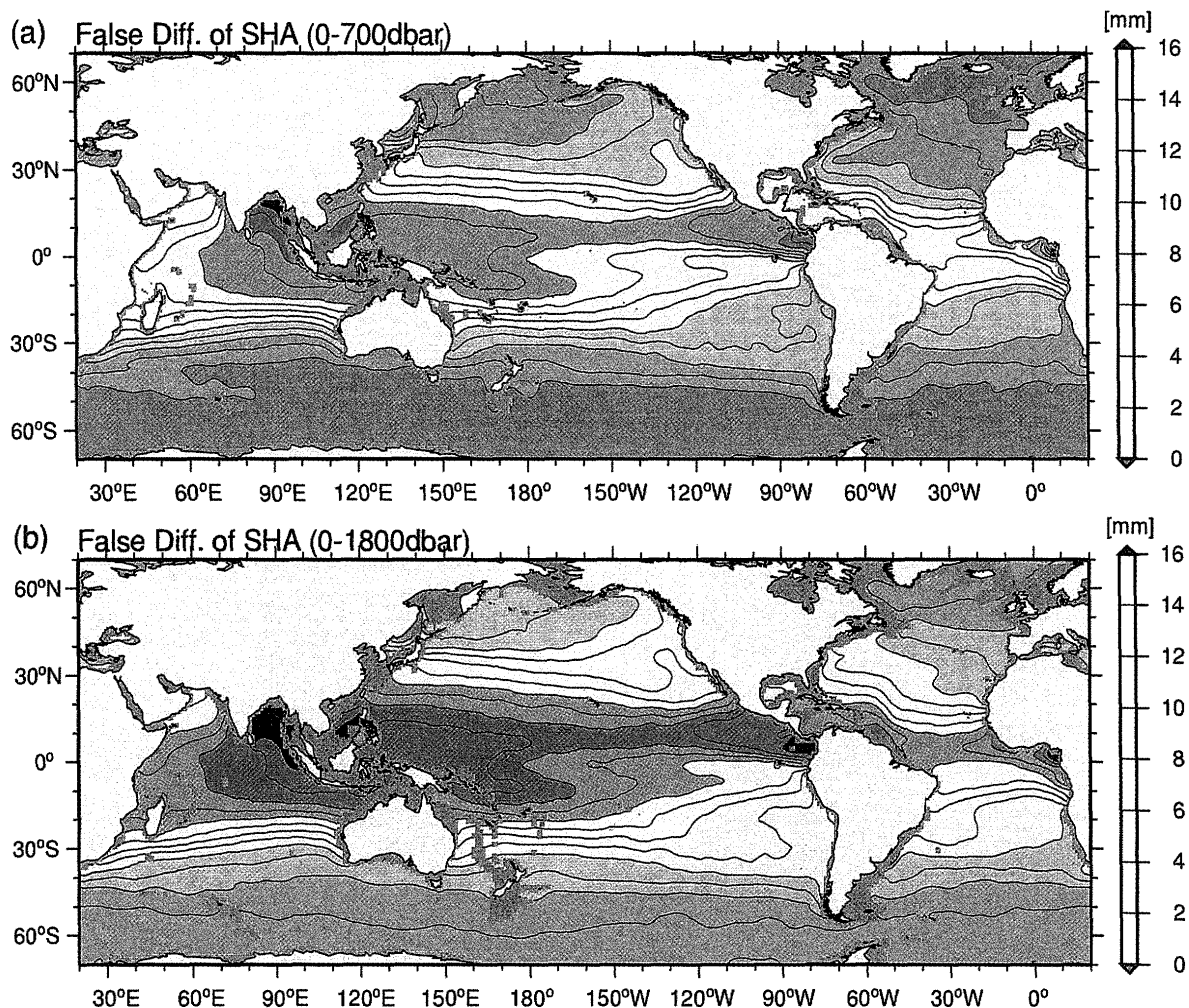
SBE-41/41CP の場合; SBE, 2008)。

### C.2. 海洋貯熱量および Steric Height に対する影響

付録 C.1. で示したように、フロートが観測している圧力以外の物理量に対する圧力バイアスの影響は限定的である。しかし、この圧力バイアスは観測されたプロファイル全体に載るため、鉛直積分量である Steric Height (または海面力学高度) や海洋貯熱量などに対しては無視できない影響を及ぼす。

Fig. 12 は鉛直一様な +2 dbar の圧力バイアスが存在した場合に、0–700 m および 0–2,000 m の水柱の平均

水温に生じる「見かけの変化」を示したものである。水温場として World Ocean Atlas 2005 (WOA05) の年平均値 (Boyer *et al.*, 2006a) を用い、仮定した圧力バイアスは UNESCO (1983) の圧力深度変換式に従って深度のバイアスに変換している。正の圧力バイアスは、等温面の深度を実際よりも深く見せるため、水柱の平均水温は真の値に比べて高くなる。これは水柱の上下端の温度差が大きい亜熱帯や熱帯域で顕著であり、亜寒帯では小さく、極域では逆に水柱の平均水温が低下する海域が一部に見られる。海洋貯熱量にも見かけ上の変化が生じており、Fig. 12 に示した南北緯 70° 以内、縁辺



**Fig. 13.** Geographical distributions of false change of steric height anomaly (SHA) at 0 dbar referred to (a) 700 dbar and (b) 1,800 dbar caused by vertically uniform bias of +2 dbar in pressure. Unit is mm. Salinity change due to the pressure bias is also considered. Temperature and salinity fields of WOA05 are used for the analysis. Average of the SHA change for the area between 70°S and 70°N including marginal seas is 5.83 mm (0–700 dbar) and 7.75 mm (0–1,800 dbar), respectively.

海を含む海域全体では  $3.6 \times 10^{22}$  J (0–700 m) および  $4.4 \times 10^{22}$  J (0–2,000 m) となる。Levitus *et al.* (2005) によれば、Fig. 12 と同一の海域における、最近 50 年間の海洋貯熱量の増加は、 $11.2 \times 10^{22}$  J (0–700 m, 1955–2003 年) および  $14.5 \times 10^{22}$  J (0–3,000 m, 1955–1998 年) と推定されているから、この約 30% に相当する「見かけの貯熱量増加」が僅か +2 dbar の圧力バイアスによって生じることになる。特に太平洋は、大西洋に比べて観測された海洋温暖化の程度は小さいのに、海洋

貯熱量に与える圧力バイアスの影響は大きい (Table 4 を参照)。そのため、データに含まれる圧力バイアスが僅かであっても、同海域の海洋貯熱量の変化の検出は困難になることが予想される。

Fig. 13 に、同じく鉛直一様な +2 dbar の圧力バイアスによって生じる 700 dbar および 1,800 dbar 基準の海面における Steric Height の見かけの変化の空間分布を示した。水温・塩分場には WOA05 の年平均値 (Boyer *et al.*, 2006a) を用いている。正の圧力バイアスによ

**Table 4.** False changes of oceanic heat content ( $10^{22}$  J) and mean temperature of water column ( $^{\circ}\text{C}$ ) caused by pressure bias of +2 dbar constantly over 0 to 2,000 dbar and the observed oceanic warming in the later half of 20th century (from Table T2 in the auxiliary material of Levitus *et al.*, 2005). All values are estimated for the area between  $70^{\circ}\text{S}$  and  $70^{\circ}\text{N}$  including marginal seas.

	False warming due to pressure bias Case of +2 dbar uniformly				Observed oceanic warming Levitus <i>et al.</i> (2005)			
	0–700 m		0–2,000 m		0–700 m		0–3,000 m	
	Heat	Mean temp.	Heat	Mean temp.	Heat	Mean temp.	Heat	Mean temp.
World Ocean	3.582	0.0376	4.424	0.0166	11.192	0.118	14.473	0.037
Atlantic	0.834	0.0339	1.008	0.0149	5.656	0.221	7.683	0.075
Pacific	2.085	0.0417	2.501	0.0179	3.558	0.073	3.344	0.017
Indian	0.663	0.0311	0.915	0.0154	1.987	0.098	3.457	0.041

り、密度躍層が見かけ上深くなるのに加え、海水の塩分（つまり海水密度）が低下する（付録 C.1. を参照）ため、Steric Height は真値よりも高くなる。その影響は熱帯域で大きく高緯度域では比較的小さい。Fig. 13 の海域全体における平均（南北緯  $70^{\circ}$  以内、縁辺海を含み、海域の面積を考慮）では 5.83 mm (700 dbar 基準) および 7.75 mm (1,800 dbar 基準) の見かけの海面上昇となる。圧力バイアスが引き起こす躍層面の深化と海水密度の減少とを比べると、前者による影響の方が大きく、表層に高温の水が厚く存在する熱帯域や、同じ緯度帯のなかでも表層の塩分が低いベンガル湾やアラスカ湾などの方が Steric Height の見かけの上昇量は大きくなる。海面の上昇速度は 1993–2003 年間の全球平均 (0–700 m) で  $3.1 \pm 0.7$  mm/年、このうち海水膨張に起因する部分が  $1.6 \pm 0.5$  mm/年と推定されている（例えば Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007）から、この圧力バイアスによって生じる推定誤差は無視することができない。

本研究では圧力バイアスが鉛直一様な +2 dbar の場合のみを示したが、圧力バイアスが鉛直一様で小さい（例えば  $\pm 10$  dbar の範囲にある）場合には、海洋貯熱量や Steric Height の見かけの変化は、バイアスの大きさにほぼ比例する。

## References

- Argo Data Management Team (2003): *4th Argo Data Management Meeting Report*. 5–7 November 2003, Monterey, California, USA. (available from web site of Argo Project Office, <http://www.argo.ucsd.edu/>)
- Argo Data Management Team (2004): *5th Argo Data Management Meeting Report*. 29 September – 1 October 2004, Southampton, U. K. (available from web site of Argo Project Office, <http://www.argo.ucsd.edu/>)
- Argo Data Management Team (2005): *6th Argo Data Management Meeting Report*. 8–10 November 2005, Tokyo, Japan. (available from web site of Argo Project Office, <http://www.argo.ucsd.edu/>)
- Argo Data Management Team (2006): *7th Argo Data Management Meeting Report*. 1–3 November 2006, Tianjin, China. (available from web site of Argo Project Office, <http://www.argo.ucsd.edu/>)
- Argo Data Management Team (2007): *8th Argo Data Management Meeting Report*. 14–16 November 2007, Hobart, Tasmania, Australia. (available from web site of Argo Project Office, <http://www.argo.ucsd.edu/>)
- Argo Data Management Team (2008a): *9th Argo Data Management Meeting Report*. 29–31 October 2008, Honolulu, Hawaii, USA. (available from web site of Argo Project Office, <http://www.argo.ucsd.edu/>)

- Argo Data Management Team (2008b): *Argo User's Manual version 2.1*. Argo Data Management Team, 61 pp. (available from web site of Argo Project Office, <http://www.argo.ucsd.edu/>)
- Argo Data Management Team (2009): *Argo Quality Control Manual version 2.4*. Argo Data Management Team, 35pp. (available from web site of Argo Project Office, <http://www.argo.ucsd.edu/>)
- Argo Project Office (2007a): Argo achieves 3000 float goal! *Argonautics, Newsletter of the international Argo Project*, **9**, 1–6. (available from web site of Argo Project Office, <http://www.argo.ucsd.edu/>)
- Argo Project Office (2007b): Pressure offset errors found in WHOI Argo floats. *Argonautics, Newsletter of the international Argo Project*, **9**, 7. (available from web site of Argo Project Office, <http://www.argo.ucsd.edu/>)
- Argo Science Team (2000): *Report of the Argo Science Team 2nd Meeting*. 7–9 March 2000, Southampton Oceanography Centre, Southampton, U.K. (available from web site of Argo Project Office, <http://www.argo.ucsd.edu/>)
- Argo Science Team: Roemmich, D., O. Boebel, Y. Desaubies, H. Freeland, K. Kim, B. King, P.-Y. LeTraon, R. Molinari, W. B. Owens, S. Riser, U. Send, K. Takeuchi, and S. Wijffels (2001): Argo: the global array of profiling floats, p. 248–258. In *Observing the Oceans in the 21st Century*, ed. by C. J. Koblinsky and N. R. Smith, Godae Project Office, Bureau of Meteorology, Melbourne, Australia.
- Argo Science Team (2004): *6th Meeting of the International Argo Science Team Report*. 9–11 March 2004, Brest, France. (available from web site of Argo Project Office, <http://www.argo.ucsd.edu/>)
- Argo Steering Team (2007): *8th Meeting of the International Argo Steering Team Report*. 6–9 March 2007, Paris, France. (available from web site of Argo Project Office, <http://www.argo.ucsd.edu/>)
- Argo Steering Team (2008a): *9th Meeting of the International Argo Steering Team Report*. 18–20 March 2008, Exeter, U.K. (available from web site of Argo Project Office, <http://www.argo.ucsd.edu/>)
- Argo Steering Team (2008b): *Important notice to Argo users (Pressure drift in APEX floats)*. on Web-site of Argo Project Office. (available from web site of Argo Project Office, <http://www.argo.ucsd.edu/>)
- Argo Steering Team (2009): *10th Meeting of the International Argo Steering Team Report*. 22–23 March 2009, Hangzhou, China. (available from web site of Argo Project Office, <http://www.argo.ucsd.edu/>)
- Böhme, L., and U. Send (2005): Objective analyses of hydrographic data for referencing profiling float salinities in highly variable environments. *Deep-Sea Res. Part II*, **52**, 651–664. doi:10.1016/j.dsr2.2004.12.014.
- Boyer, T. P., J. I. Antonov, H. Garcia, D. R. Johnson, R. A. Locarnini, A. V. Mishonov, M. T. Pitcher, O. K. Baranova, and I. Smolyar (2006a): *World Ocean Database 2005, Chapter 1: Introduction*. edited by S. Levitus, NOAA Atlas NESDIS, 60, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 182 pp., DVDs.
- Boyer, T., J. I. Antonov, R. A. Locarnini, A. V. Mishonov, H. E. Garcia, D.R. Johnson, M. T. Pitcher, O. K. Baranova, I. V. Smolyar (2006b): Chapter 6: Profiling Floats Data (PFL), p. 88–99. In *World Ocean Database 2005*, edited by S. Levitus, NOAA Atlas NESDIS 60, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., DVDs.
- Davis, R. E. (2006): Chapter 4, Contributions to global ocean observations, p. 45–66. In *Physical Oceanography: Developments Since 1950*, edited by M. Jochum and R. Murtugudde, Springer, Berlin, Germany.
- Davis, R. E., J. T. Sherman, and J. Dufour (2001): Profiling ALACEs and other advances in autonomous subsurface floats. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, **18**, 982–993.
- Dickey, J. O., S. L. Marcus, and J. K. Willis (2008): Ocean cooling: Constraints from changes in Earth's dynamic oblateness (J2) and altimetry. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L18608, doi:10.1029/2008GL035115.
- Diggs, S., J. Kappa, D. Kinkade, and J. Swift (2002): *WOCE Version 3.0*. Scripps Inst. Oceanogr., Univ. California, San Diego, USA.
- Freeland, H. (1997): Calibration of the conductivity cells on P-ALACE floats. *U.S. WOCE Implementation Rep.*, **9**, 37–38.

- Gould, W. J. (2005a): *A beginners' guide to accessing Argo data*. Argo Project Office, 8 pp. (available from web site of Coriolis, [http://www.coriolis.eu.org/cdc/argo\\_rfc.htm](http://www.coriolis.eu.org/cdc/argo_rfc.htm))
- Gould, W. J. (2005b): From Swallow floats to Argo – the development of neutrally buoyant floats. *Deep-Sea Res. Part II*, **52**, 529–543.
- Gouretski, V., and K. P. Koltermann (2007): How much is the ocean really warming? *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L01610, doi:10.1029/2006GL027834.
- Guinehut, S., C. Coatanoan, A.-L. Dhomps, P.-Y. Le Traon, and G. Larnicol (2009): On the use of satellite altimeter data in Argo quality control. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, **26**, 395–402, DOI: 10.1175/2008JTECHO648.1
- Hanawa, K., P. Rual, R. Bailey, A. Sy, and M. Szabados (1995): A new depth-time equation for Sippican or TSK T-7, T-6 and T-4 expendable bathythermographs (XBT). *Deep-Sea Res. Part I*, **42**, 1,423–1,451.
- 細田 滋毅, 湊 信也 (2003): アルゴフロート・トライトンブイデータを用いた太平洋の水温・塩分客観解析. 海洋科技セ試研報, **48**, 67–83.
- Hosoda, S., T. Ohira, and T. Nakamura (2008): A monthly mean dataset of global oceanic temperature and salinity derived from Argo float observations. *JAMSTEC Rep. Res. Dev.*, **8**, 47–59.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2007): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Ishii, M., and M. Kimoto (2009): Reevaluation of historical ocean heat content variations with time-varying XBT and MBT depth bias corrections. *J. Oceanogr.*, **65**, 287–299.
- Ishii, M., M. Kimoto, K. Sakamoto, and S. Iwasaki (2006): Steric sea level changes estimated from historical ocean subsurface temperature and salinity analyses. *J. Oceanogr.*, **62**, 155–170.
- Iwasaka, N., T. Suga, K. Takeuchi, K. Mizuno, Y. Takatsuki, K. Ando, T. Kobayashi, E. Oka, Y. Ichikawa, M. Miyazaki, H. Matsuura, K. Izawa, C. S. Yang, N. Shikama, and M. Aoshima (2003): Pre-Japan-ARGO: Experimental observation of upper and middle layers south of the Kuroshio Extension region using profiling floats. *J. Oceanogr.*, **59**, 119–127.
- Janzen, C., N. Larson, R. Beed, K. Anson, and Sea-Bird Electronics, Inc. (2008): *Accuracy and Stability of Argo SBE 41 and SBE 41CP CTD Conductivity and Temperature Sensors*. Sea-Bird Electronics, Inc., Preliminary summary of SBE 41 and 41CP sensor performance on Argo profiling floats, December 2008, 2 pp. (available from web site of Sea-Bird Electronics, <http://www.seabird.com>)
- Johnson, G. C. (1995): Revised XCTD fall-rate equation coefficients from CTD data. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, **12**, 1,367–1,373.
- Johnson, G. C., and K. E. McTaggart (2008): *Detecting Druck pressure sensor microleaks in floats that neither report nor correct for negative surface pressures*. A document circulated among Argo Data Management Team, November 2008, 5 pp.
- Joyce, T. M. (1988): The WOCE Hydrographic Program. *Eos Trans. AGU*, **69**, 68–70.
- King, B. A., and S. Joseph (2006): *Report on second Argo delayed-mode QC workshop*. 4–7 October 2006, Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, Massachusetts, USA.
- Kizu, S., H. Yoritaka, and K. Hanawa (2005): A new fall-rate equation for T-5 expendable bathythermograph (XBT) by TSK. *J. Oceanogr.*, **61**, 115–121.
- Kizu, S., H. Onishi, T. Suga, K. Hanawa, T. Watanabe, and H. Iwamiya (2008): Evaluation of the fall rates of the present and developmental XCTDs. *Deep-Sea Res. Part I*, **55**, 571–586, doi:10.1016/j.dsr.2007.12.011.
- 小林 大洋 (2004): アルゴデータ遅延品質管理用歴史的データセット: Selected Hydrographic Dataset (SeHyD). 海洋科技セ試研報, **49**, 51–72.
- Kobayashi, T., and G. C. Johnson (2007): Argo float pressure offset adjustment recommendations, 19 pp. In *Supporting documents for the 8th meeting of the International Argo Steering Team*, 6–9 March 2007, Paris, France. (available from web site of Argo Project Office, <http://www.argo.ucsd.edu/>).

- Kobayashi, T., and S. Minato (2005a): Importance of reference dataset improvements for Argo delayed-mode quality control. *J. Oceanogr.*, **61**, 995–1,009.
- Kobayashi, T., and S. Minato (2005b): What observation scheme should we use for profiling floats to achieve the Argo goal for salinity measurement accuracy? Suggestions from software calibration. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, **22**, 1,588–1,601, DOI: 10.1175/JTECH1798.1.
- Kobayashi, T., and H. Nakajima (2008): Variations of the surface arrival time of Park and Profile APEX floats due to their depth control scheme. *JAMSTEC Rep. Res. Dev.*, **8**, 5–11.
- Kobayashi, T., and T. Suga (2006): The Indian Ocean HydroBase: A high-quality climatological dataset for the Indian Ocean. *Prog. Oceanogr.*, **68**, 75–114, doi:10.1016/j.pocean.2005.07.001.
- 小林 大洋, 伊澤 堅志, 井上 亜沙子, 四竈 信行, 安藤 健太郎, 高槻 靖, 中島 宏幸, 岡 英太郎, 細田 滋毅, 宮崎 基, 岩坂 直人, 須賀 利雄, 水野 恵介, 竹内 謙介, JAMSTEC/FORSGC アルゴ グループ (2004a): PROVOR 型フロートに発生した塩分オフセット問題とその解決. 海洋科技セ試研報, **49**, 107–120.
- 小林 大洋, 宮崎 基, 伊澤 堅志, 安藤 健太郎, 井上 亜沙子, 四竈 信行, 竹内 謙介, 水野 恵介 (2004b): プロファイリングフロート用 CTD センサーの長期係留実験. 海洋科技セ試研報, **49**, 121–130.
- Kobayashi, T., B. A. King, and N. Shikama (2009): An estimation of the average lifetime of the latest model of APEX floats. *J. Oceanogr.*, **65**, 81–89.
- 黒田 芳史, 網谷 泰孝 (2001): トライトン: ENSO 現象解明を目指す新しい海洋-気象観測ブイネットワーク. 海の研究, **10**, 157–172.
- Levitus, S., J. I. Antonov, T. P. Boyer, and C. Stephens (2000): Warming of the world ocean. *Science*, **287**, 2,225–2,229.
- Levitus, S., J. Antonov, and T. Boyer (2005): Warming of the world ocean, 1955–2003. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L02604, doi:10.1029/2004GL021592.
- Levitus, S., J. I. Antonov, T. P. Boyer, R. A. Locarnini, H. E. Garcia, and A. V. Mishonov (2009): Global ocean heat content 1955–2008 in light of recently revealed instrumentation problems. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L07608, doi:10.1029/2008GL037155.
- Lombard, A., D. Gracia, G. Ramillien, A. Cazenave, R. Bincale, J. M. Lemoine, F. Felchtner, R. Schmidt, and M. Ishii (2007): Estimation of steric sea level variations from combined GRACE and Jason-1 data. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, **254**, 194–202.
- Lyman, J. M., and G. C. Johnson (2008): Estimating global upper ocean heat content despite irregular sampling. *J. Clim.*, **21**, 5,629–5,641, doi:10.1175/2008JCLI2259.1.
- Lyman, J. M., J. K. Willis, and G. C. Johnson (2006): Recent cooling of the upper ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L18604, doi:10.1029/2006/GL027033.
- Metoccean Data Systems Limited (2001): *METOCCEAN PROVOR User's Manual Version 1.1*. Metoccean Data Systems Limited, Release: 20 November 2001, 36 pp. (unpublished manuscript)
- Metoccean Data Systems Limited (2004): *METOCCEAN PROVOR User's Manual Version 1.7*. Metoccean Data Systems Limited, Release: 22 April 2004, 21 pp. (unpublished manuscript)
- Meyers, G., H. Phillips, N. Smith, and J. Sprintall (1991): Space and time scales for optimal interpolation of temperature –Tropical Pacific Ocean–. *Prog. Oceanogr.*, **28**, 189–218.
- 湊 信也 (2005): 遅延品質管理の目的と実際—何処までできたのか—. 月刊海洋, **37**, 720–725.
- 湊 信也, 小林 大洋 (2003): Argo データの品質管理 —0.01 への挑戦—. 月刊海洋, **35**, 866–872.
- 水野 恵介 (1995): 大規模の海況解析と最適内挿法. 海の研究, **4**, 187–208.
- Mizuno, K., and T. Watanabe (1998): Preliminary results of in-situ XCTD/CTD comparison test. *J. Oceanogr.*, **54**, 373–380.
- 中島 宏幸, 小林 大洋, 四竈 信行, 竹内 謙介 (2005): プロファイリングフロートの適切な海面漂流時間—欠損のない観測プロファイルを得るために—. 海の研究, **14**, 631–643.
- 中村 知朗 (2007): Argo 高品質データ. 月刊海洋, **39**, 434–439.
- Oka, E. (2005): Long-term sensor drift found in recovered Argo profiling floats. *J. Oceanogr.*, **61**, 775–781.
- Oka, E., and K. Ando (2004): Stability of temperature and conductivity sensors of Argo profiling floats. *J. Oceanogr.*, **60**, 253–258.

- Owens, W. B., and A. P. S. Wong (2009): An improved calibration method for the drift of the conductivity sensor on autonomous CTD profiling floats by  $\theta$ -S climatology. *Deep-Sea Res. Part I*, **56**, 450–457, doi:10.1016/j.dsr.2008.09.008
- Riser, S. C., and S. Wijffels (2005): *Report from the 1st Argo technical workshop*. 19–21 September, University of Washington, Seattle, USA, 28 pp. (available from web site of Argo Project Office, <http://www.argo.ucsd.edu/>)
- Riser, S. C., D. Swift, and A. P. S. Wong (2009): Pressure sensor problems on Argo floats. 10th Argo Steering Team Meeting, 22–23 March 2009, Hangzhou, China.
- Roemmich, D. (1983): Optimal estimation of hydrographic section data and derived fields. *J. Phys. Oceanogr.*, **13**, 1,544–1,549.
- Roemmich, D., S. Riser, R. Davis, and Y. Desaubies (2004): Autonomous profiling floats: Workhorse for broad-scale ocean observations. *Mar. Tech. Soc. J.*, **38**, 21–29.
- Schiermeier, Q. (2006): Oceans cool off in hottest years. *Nature*, **442**, 854–855, doi:10.1038/442854a.
- Sea-Bird Electronics (2000): *CTD module for ALACE*. On web site of Sea-Bird Electronics, Inc. (available from web site of Sea-Bird Electronics, <http://www.seabird.com>).
- Sea-Bird Electronics (2008): *SBE 41 Instrument Configuration; CTD Serial Number 41-4221*. Sea-Bird Electronics, Inc., 5 pp. (unpublished document).
- Sea-Bird Electronics (2009): *SBE 9plus CTD User's Manual*. Sea-Bird Electronics, Inc., 66 pp. (available from web site of Sea-Bird Electronics, <http://www.seabird.com>)
- Showstack, R. (2007): In Brief: Profiling floats fully deployed. *Eos Trans. AGU*, **88(45)**, doi:10.1029/2007EO450002.
- 高槻 靖, 宮崎 基, 井上 亜沙子, 安藤 健太郎, 伊澤 堅志 (2003): プロファイリング フロート用 CTD センサーの現場比較. 海洋科技セ試研報, **48**, 85–94.
- Uchida, H., and S. Imawaki (2008): Estimation of the sea level trend south of Japan by combining satellite altimeter data with in situ hydrographic data. *J. Geophys. Res.*, **113**, C09035, doi:10.1029/2008JC004796.
- Uchida, H., T. Kawano, and M. Fukasawa (2008): In situ calibration of moored CTDs used for monitoring abyssal water. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, **25**, 1,695–1,702, doi: 10.1175/2008JTECHO581.1.
- Ueki, I., and T., Nagahama (2005): Evaluation of property change of pressure sensor installed on TRITON buoys. *JAMSTEC Rep. Res. Dev.*, **1**, 51–55.
- UNESCO (1983): Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. *Tech. Pap. Mar. Sci.*, **44**, 53 pp.
- Webb Research Corporation (1997): *Temperature Profiler – Manual*. Webb Research Corporation, Rev Date 2/19/97, 18 pp. (unpublished manuscript)
- Webb Research Corporation (1998a): *User Manual – ALACE R1-FSI Profiler*. Webb Research Corporation, Rev Date 2/13/98, 9 pp. (unpublished manuscript)
- Webb Research Corporation (1998b): *User Manual – R1-SBE Profiler #134*. Webb Research Corporation, Rev Date 3/7/98, 12 pp. (unpublished manuscript)
- Webb Research Corporation (1998c): *User Manual – Temperature Profiler*. Webb Research Corporation, Rev Date 3/8/98, 12 pp. (unpublished manuscript)
- Webb Research Corporation (1998d): *User Manual – Temperature Profiler*. Webb Research Corporation, Rev Date 9/23/98, 13 pp. (unpublished manuscript)
- Webb Research Corporation (1998e): *User Manual – SBE-R1 Profiler*. Webb Research Corporation, Rev Date 11/16/98, 10 pp. (unpublished manuscript)
- Webb Research Corporation (1999a): *User Manual – APEX-SBE Profiler*. Webb Research Corporation, Rev Date 7/1/99, 9 pp. (unpublished manuscript)
- Webb Research Corporation (1999b): *User Manual – APEX-TD Profiler*. Webb Research Corporation, Rev Date 9/22/99, 9 pp. (unpublished manuscript)
- Webb Research Corporation (2000): *User manual – APEX-SBE Profiler*. Webb Research Corporation, Rev Date 1/20/00, 12 pp. (unpublished manuscript)
- Wijffels, S., and P. Barker (2008a): *Summary of Argo APEX pressure issues: Progress report*. 12 pp, A document circulated in Argo Pressure Working Group, September 2008.

- Wijffels, S., and P. Barker (2008b): Errors in Argo APEX pressures. 9th Argo Data Management Meeting, 29–31 October 2008, Hawaii Univ., Honolulu, Hawaii, USA.
- Willis, J. K., D. Roemmich, and B. Cornuelle (2004): Interannual variability in upper ocean heat content, temperature, and thermosteric expansion on global scales. *J. Geophys. Res.*, **109**, C12036, doi:10.1029/2003JC002260.
- Willis, J. K., J. M. Lyman, G. C. Johnson, and J. Gilson (2007): Correction to “Recent cooling of the upper ocean”. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L16601, doi:10.1029/2007GL030323.
- Willis, J. K., D. P. Chambers, and R. S. Nerem (2008): Assessing the globally averaged sea level budget on seasonal to interannual timescales. *J. Geophys. Res.*, **113**, C06015, doi:10.1029/2007JC004517.
- Willis, J. K., J. M. Lyman, G. C. Johnson, and J. Gilson (2009): In situ data biases and recent ocean heat content variability. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, **26**, 846–852, doi: 10.1175/2008JTECHO608.1.
- Wong A. P. S., and B. A. King (2008): *Report on third Argo delayed-mode QC workshop*. 10–12 September 2008, University of Washington, Seattle, USA.
- Wong, A. P. S., G. C. Johnson, and W. B. Owens (2003): Delayed-mode calibration of autonomous CTD profiling float salinity data by  $\theta$ -S climatology. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, **20**, 308–318.
- 吉田 隆 (2002): アルゴ データ システム. 測候時報, **69**, 特別号, S21–S31.
- 吉田 隆 (2003): アルゴのデータ フローの現状. 月刊海洋, **35**, 860–865.
- 吉田 隆 (2005): Argo データ管理システム. 月刊海洋, **37**, 716–719.
- 吉田 隆 (2007): Argo データ管理システム. 月刊海洋, **39**, 429–433.



## Identified and Potential Pressure Biases in Argo Dataset and their Influences on Ocean Monitoring

Taiyo Kobayashi <sup>†‡</sup>, Tomoaki Nakamura <sup>†\*\*</sup>, Shinya Minato <sup>†‡</sup>, and Nobuyuki Shikama <sup>†</sup>

### Abstract

Argo, the global observing network of numerous profiling floats, provides a lot of hydrographic data, which have enabled to quantify the ocean warming and the sea level rise more precisely than ever. Some previous studies suggested that (a part of) Argo data might contain pressure biases. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology has tackled the issue since 2003 in corporation with Japan Meteorological Agency. Investigations by the International Argo have clarified that the pressure biases are caused by many factors; degradation of pressure sensors, defects of a type of float, and inconsistencies between float/sensor hardware and data processing procedures in floats. Especially, artificial inconsistencies in data processing at Argo data centers are more serious than expected. Here, we explain the details of the previously-identified pressure biases and the present status of their correction in Argo (as of March 2009). We also discuss potential pressure biases in pre-Argo float data. In order to meet requirements by recent studies on the changes of oceanic heat content and steric height due to the global warming, elimination of systematic pressure biases is the most important and a random error of  $\pm 5$  dbar should be a future target that Argo should attain in pressure measurement, which enables us to estimate the upper ocean heat content and the sea level with the accuracy of  $\pm 0.5 \times 10^{22}$  J and  $\pm 3$  mm, respectively. The inconsistency between sea level trend derived by satellites and that by hydrographic measurements since 2003 is likely to be reduced by corrections of the pressure biases in Argo dataset.

**Key words:** Argo, pressure bias, oceanic heat content, sea level rise, global warming

(Corresponding author's e-mail address: taiyok@jamstec.go.jp)

(Received 9 February 2009; accepted 14 August 2009)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2009)

---

<sup>†</sup> Institute of Observational Research for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology  
2-15 Natsushima-cho, Yokosuka, 237-0061, Japan

<sup>‡</sup> (Present) Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth and Technology

<sup>\*\*</sup> (Present) Global Environment and Marine Department, Japan Meteorological Agency  
1-3-4 Otemachi, Chiyoda-ku, Tokyo, 100-8122, Japan

<sup>††</sup> Global Environment and Marine Department, Japan Meteorological Agency