

— 論 文 —

## プロファイリングフロートによる 溶存酸素濃度測定に見られる負バイアス\*

小林 大洋<sup>†</sup>・須賀 利雄<sup>†‡</sup>・四竈 信行<sup>†</sup>

### 要 旨

本論文において、海洋研究開発機構および東北大学が北太平洋に展開した溶存酸素 (DO) センサー搭載フロートによる DO 計測で明らかになった問題点を示した。フロート投入時に行なわれた採水観測結果に比べて、フロートの DO 計測値は低くなる傾向にある。このバイアスは深層では  $0\sim 10\ \mu\text{-mol kg}^{-1}$  であり、表層では最大で  $40\ \mu\text{-mol kg}^{-1}$  を越える値を示した。この傾向は AANDERAA・SBE 製センサーともほぼ同じであり、またバイアス量はメーカー公称精度を越えていた。この負 DO バイアスの発生原因は特定できていない。DO 消費速度が表層で  $10\sim 25\ \mu\text{-mol kg}^{-1}\ \text{y}^{-1}$ 、中層で  $2\sim 5\ \mu\text{-mol kg}^{-1}\ \text{y}^{-1}$  程度と推定されていることを考えると、現在用いられている DO センサー搭載型フロートによる DO 計測値を、船舶による採水観測データと同様に扱うことには問題がある。DO センサーの経時変化は、我々のフロートでは確認されなかったが、世界的には数例報告されていることから、DO センサーの改良と併せて、フロート展開後のデータ補正手法の開発が必要である。

キーワード：プロファイリングフロート、溶存酸素濃度、センサー、アルゴ計画

### 1. はじめに

2000 年に開始されたアルゴ計画によって、3,000 機のプロファイリングフロート (以下ではフロートと記す) による全球海洋の即時監視システムの構築が進められている (Argo Science Team, 2001)。アルゴ計画で用いられている標準的なフロートは、1,000 dbar 付近を漂流し、10 日に 1 度 2,000 dbar 以浅の圧力・水温・塩分を観測しつつ海面に浮上する。海面で観測データを送信した後、再び深層 1,000 dbar へと沈降する。アルゴ計画は順調に進展しており、2006 年 7 月現在では約

2,500 機のプロートが全球海洋に展開されるに至っている。フロートによる海洋観測網の完成は 2007 年初頭と予想されている。

アルゴ計画で用いているフロートは、2,000 dbar までの圧力・水温・塩分の自働観測を目的として、今日まで開発・運用が続けられている。しかし、フロートは、言うなれば圧力・水温・塩分センサーのプラットフォームである。つまり、小型・軽量で耐圧 2,000 dbar のセンサーによる長期の自働観測ができ、データの電送が可能であれば、どのような測定項目であれフロートを用いた観測を行なうことができ、究極的にはアルゴ計画のフロート観測網による全球海洋の即時監視が可能となる。

海洋中の溶存酸素濃度 (DO) は、海洋物理学のみならず、海洋化学・生物学・水産学にとって非常に重要な計測項目であり、電気的に計測する方法も確立されてい

\* 2006 年 5 月 2 日 受領; 2006 年 8 月 29 日 受理  
著作権: 日本海洋学会, 2006

<sup>†</sup> 海洋研究開発機構 地球環境観測研究センター  
〒 237-0061 神奈川県横須賀市夏島町 2-15

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

<sup>‡</sup> 東北大学 大学院理学研究科

〒 980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3

る(例えば, Clark *et al.*, 1959; Klimant *et al.*, 1995; Holst *et al.*, 1995)。近年, DO を精度良く計測できるセンサー開発が進み, そのセンサーを搭載したフロートの展開も始まっている。その数は2006年7月現在で60機を越えており, 今後も増えると考えられる。日本でも, 2005年以降, 東北大学が3機, 海洋研究開発機構 地球環境観測研究センター (JAMSTEC) が6機の合計9機を展開し, 現在まで運用を続けている。

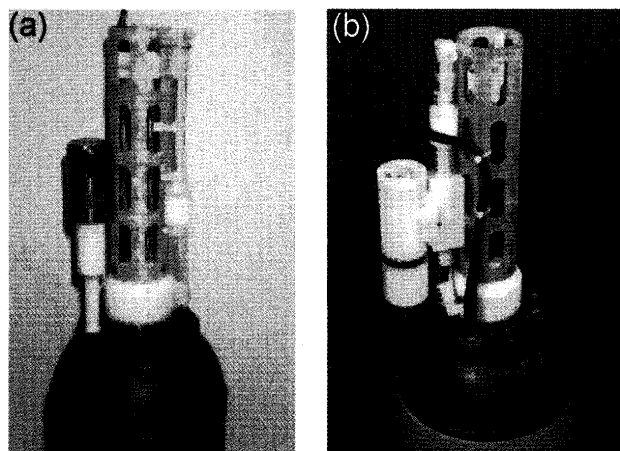
DOセンサーは, 水温や塩分(電気伝導度)センサーに比べて応答時間が長い。そのため, 船舶観測で使った場合にはCTD (Conductivity–Temperature–Depth) センサー等の観測機器の上昇・降下速度(おおよそ $1 \text{ m s}^{-1}$ )にDOセンサーの応答が追いつけず, 上昇時と下降時でDOの測定値が変わる, すなわち, ヒステリシスがある(履歴をひきずる)。フロートは上昇速度が遅い(おおよそ $10 \text{ cm s}^{-1}$ )ので, フロートに搭載して観測を行なうのであれば, 現在のDOセンサーでも良好な測定が行なわれるであろうと考えられている。

しかし, フロートによるDO観測の結果は, その有用性や新奇性にも拘わらず, 報告例はあまり多くない(例えば, Larson, 2003; Körtzinger *et al.*, 2004; Körtzinger *et al.*, 2005; Gillbert *et al.*, 2006)。このうち, Körtzinger *et al.* (2005) が最も詳細な報告を行なっているが, それらは大西洋ラブラドル海, つまりDO濃度が海面から深層までほとんど一定の深層水形成海域, に展開された2機のフロートから得られた知見にすぎない。このような特殊な海域で得られた知見を, 例えば北太平洋のように, 水塊構造の全く異なる他の海域に対しても同様にあてはめることが可能なのかどうか, 情報が不足しているとの感が拭えない。

本稿は, JAMSTECと東北大学が, 2005年から北太平洋にて展開しているDOセンサーを搭載したフロートによるDO観測(測定)の結果を報告するとともに, それから明らかになった問題点を整理したものである。

## 2. DOセンサー

2006年3月末現在において, フロートに搭載可能なDOセンサーは, 米国Sea Bird Electronics (SBE)社製のSBE43とノルウェーのAANDERAA社製のOxygen



**Fig. 1.** DO sensor of (a) Oxygen Optode 3830 manufactured by AANDERAA (Norway) and (b) SBE43 by Sea-Bird Electronics, Inc. (USA), which are attached to APEX type float (from Website of Webb Research Corporation, USA).

Optode 3830の2つである(Fig. 1)。前者は電気-化学的な測定方法(ポーラログラフィック隔膜法; Clark *et al.*, 1959), 後者は光学的な測定方法(Kautsky, 1939)のうち, 発光強度の減衰時間に基づく測定手法(Holst *et al.*, 1995)を採用している。それぞれの測定手法の詳細については, 各社から出ている資料を参照してほしい(例えば, Sea-Bird Electronics, 2001; AANDERAA, 2003; Tengberg *et al.*, 2006)。また, Fig. 1はAPEX型フロート(米国・Webb社製)に搭載した場合のものであるが, Optode 3830はPROVOR型フロート(フランス・Martec社製)にも搭載が可能である。

それぞれのDOセンサーの性能をまとめたものがTable 1である(詳細はSea-Bird Electronics (2001), AANDERAA (2003)などを参照のこと)。これらの値は全てメーカー公称値である。Optode 3830およびSBE43で出力されるDOの単位は, それぞれ $[\mu\text{-mol L}^{-1}]$ と $[\text{ml L}^{-1}]$ である。本稿では, これをアルゴ計画での標準単位である $[\mu\text{-mol kg}^{-1}]$ に変換して, 解析に使用している。付録Bには単位の変換式をまとめた。また, Optode 3830による計測値は, フロートによって得られる塩分および圧力データを利用した準即時補正(付録A.2を参照)を施した値を解析に用いた。なお, Optode

**Table 1.** Parameters of DO sensors to be available for profiling floats. Based on the manual or brochure published by manufactures (Sea-Bird Electronics, 2001; AANDERAA, 2003).

	SBE43	Oxygen Optode 3830 <sup>1)</sup>
Manufacture	Sea-Bird Electronics	AANDERAA
Country	USA	Norway
Measurement Range	120% of surface saturation	0~500 micro-M
Resolution	-	<1 micro-M
Accuracy	2% of saturation <sup>2)</sup>	<8 micro-M or 5% <sup>3)</sup>
Settling time	7~28 s <sup>4)</sup>	<25 s
Stability	2% per 1,000 h	(highly stable)
Weight	0.7 kg	230 g

1) Oxygen Optode 3830 can measure oxygen concentration in the air.

2) Initial accuracy. 3) Whichever is greater. 4) Dependence on temperature.

型 DO センサーは、単独で DO 計測が可能となるように水温センサーを内蔵している。

### 3. 展開されたフロート

JAMSTEC および東北大学が北太平洋に展開した DO センサーを搭載したフロートは、合計で 9 機、全て APEX 型である。これらの諸元をまとめたものを Table 2 に示している。JAMSTEC では、DO センサーの性能評価を行なうことも念頭に置き、2 機の SBE43 搭載型と、4 機の Optode 3830 搭載型を、北太平洋の東西 2 つの海域に展開している。東北大学で展開した WMO ID 2900616 のフロートの設定観測深度が 1,000 dbar なのは、同時に搭載されているクロロフィル・濁度センサー (米国・WETlabs 社製) の耐圧深度が 1,000 dbar のためである。また、WMO ID 4900905 では、フロート観測層数と海面漂流時間 (データ通信に要する時間) との兼ね合い (中島ら, 2005) の結果、プロファイル深度を 1,500 dbar としている。これにより、海面漂流時間を短くでき、等密度追従型フロートの特徴を生かしている。2006 年 7 月現在、これら 9 機全てのフロートは順調に稼働を続けている。

本稿で扱っている日本のフロートに限らず、アルゴ計画に関係するフロートで得られた DO データは、水温・塩分などと同様にリアルタイムで公開されており、

Global Data Assembly Center (GDAC) から入手することが可能である。2006 年 7 月現在、DO データの処理プロセスについての国際的な取り決めがなされていない。そのため、地上局における (準) 即時処理 (付録 A 参照) の程度は、フロートにより異なる。また、明らかに異常なデータ (付録 D を参照) が存在しても、それらを削除または品質フラグで明示等のデータ品質管理処理は施されていない (付録 E: ただし、観測責任者もしくは担当の National Data Assembly Center (NDAC, 日本の場合は気象庁) による独自の処理が施されている場合もある)。なお、アルゴ計画におけるデータ・ストリームの詳細については、吉田 (2002) 等を参照のこと。

### 4. フロートによる DO 測定結果と船舶による採水観測結果との比較

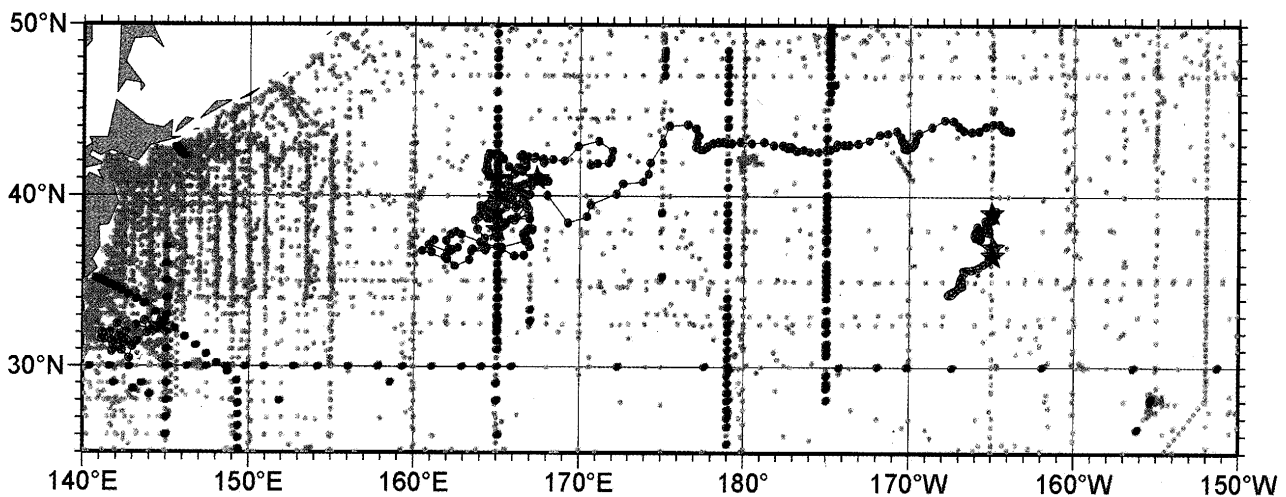
JAMSTEC および東北大学の 9 機の DO センサー搭載フロートの投入点と現在までのフロート観測点を示した (Fig. 2)。日本南東沖に展開された 1 機 (WMO ID 2900616) を除き、北太平洋亜熱帯・亜寒帯の境界付近に展開されている。これは、北太平洋中央モード水 (例えば, Oka and Suga, 2005) の形成メカニズムの解明を目的として、DO センサー搭載フロートを集中的に展開したためである。ほとんどのフロートは投入から 12 か月程度経過しているが、等密度追従型フロート (WMO

**Table 2.** Parameters of the profiling floats with DO sensor deployed by JAMSTEC and Tohoku University.

WMO ID	Deployment date and location		Sensor	Depth [dbar]		Levels	Cycle [day]	No.Prof.	Ship
	Date	Location		Paring	Profile				
Tohoku Univ.									
2900460 <sup>†</sup>	2005/2/23	41.006°N 167.410°E	A	26.35 $\sigma_\theta$	2,000	59	7	71	R/V Shoyo-maru
2900616 <sup>‡</sup>	2006/2/25	32.350°N 144.587°E	S	1,000	1,000	91	5	27	R/V Hakuho-maru
4900905 <sup>†</sup>	2006/7/8	36.511°N 164.972°W	A	26.1 $\sigma_\theta$	1,500	96	7	0	R/V Oshoro-maru
JAMSTEC									
2900514	2005/6/24	41.012°N 164.975°E	A	1,000	2,000	115	10	38	R/V Ryofu-maru
2900540	2005/6/24	40.013°N 165.032°E	S	1,000	2,000	115	10	38	R/V Ryofu-maru
2900541	2005/6/24	39.020°N 164.983°E	A	1,000	2,000	115	10	38	R/V Ryofu-maru
2900542	2005/6/25	38.002°N 165.007°E	A	1,000	2,000	115	10	37	R/V Ryofu-maru
4900651	2005/7/31	39.014°N 164.989°W	A	1,000	2,000	115	10	34	R/V Oshoro-maru
4900652	2005/8/1	36.998°N 164.941°W	S	1,000	2,000	115	10	34	R/V Oshoro-maru

<sup>†</sup>: Isopycnal type of APEX which drifts on the isopycnal surface of 26.35  $\sigma_\theta$  and 26.1  $\sigma_\theta$ , respectively.

<sup>‡</sup>: Chlorophyll and Nephelometric turbidity sensors manufactured by WETlabs (USA) are also equipped. A and S at sensor mean DO sensor manufactured by AANDERAA (Oxygen Optode 3830) and SBE (SBE43), respectively. The number of profiles represents the profiles measured by the corresponding float (as of July 12, 2006).



**Fig. 2.** Horizontal distributions of the locations of float deployments (stars) and their measurements (circles, as of July 12, 2006). The colors of red and green mean the profiling floats with DO sensor manufactured by AANDERAA and SBE, respectively. The light-blue and blue dots represent the historical DO observations by bottle sampling and CTD in World Ocean Database 2001 (WOD01) in the Pacific Ocean, respectively.

ID 2900460)を除くと、投入地点からの移動は比較的小さい。なお、フロート投入時には、採水によるDO観測 (Winkler, 1888; 気象庁, 1999)を行なっている。

Fig. 3は、2005年2月に水産庁の照洋丸で投入されたフロート (WMO ID 2900460)による1回目の浮上時に得られたデータを、投入域周辺の歴史的データ (World

Ocean Database 2001: WOD01) と比較したものである。フロートによる DO 計測結果は、おおよそ  $4^{\circ}\text{C}$  よりも高温の層 (以後、フロートによる DO 計測結果を記載する必要上、この温度範囲に相当する部分を「表層」、それ以深を「深層」と便宜的に呼称するが、一般的な定義とは必ずしも同一ではない: 詳しくは 6.2 章で述べる) では気候学的に予想される変動の範囲内に収まっているようである。しかし、深層では、フロートの DO 測定値は標準的な水温-DO 構造からやや低 DO 側にずれている。ただし、フロート展開域は水塊の時空間変化が激しいため、この結果だけから、フロートによる DO 測定値は低すぎると結論することはできない。

Fig. 4 には、気象庁の凌風丸によって ( $38\text{--}41^{\circ}\text{N}$ ,  $165^{\circ}\text{E}$ ) に投入された 4 機のフロートで測定された第 1 回目浮上時のデータと、投入時の船舶採水/CTD 観測結果を示している。この両者を比較し、その差からフロートの DO 計測値の精度評価を行なった。なお、フロート計測値の偏差は、船舶観測 DO データを圧力/温位空間上で線形に補間して求めた基準値からの差とする。フロート展開域は時空間的な変動が激しいために、フロートによる観測から時間にして 10 日、距離にして最大で 100 km 離れている船舶観測データを、フロート観測データの信頼性を測る基準とすることには多少の無理がある。しかし、投入時に行なわれた船舶観測データは、考えられるなかでは最も信頼のおける基準データであり、フロートの塩分測定精度の評価では実績を挙げている (小林ら, 2004; Kobayashi and Minato, 2005)。また、海洋深層にも内部潮汐と考えられる数日程度の周期を持つ変動が存在し (Minato *et al.*, 2006), 水柱全体が上下に移動する。そのために、等温位面での比較結果と等圧力面での結果は必ずしも一致していない。

最も南側のフロート (WMO ID 2900542) を除くと、表層ではフロート観測と船舶 CTD 観測でとらえられた水温-塩分 (水塊) 構造には、等温位面上においても塩分で 0.02 を越える差異が認められた。そのため、水温-塩分構造の変化が小さく、同一水塊をとらえていると考えられる深層 ( $4^{\circ}\text{C}$  より低温層; 500~700 dbar 以深) にのみ注目すると、等圧力面比較 (Fig. 4(d)) および等温位面比較 (Fig. 4(e)) の両方とも、いずれのフロート

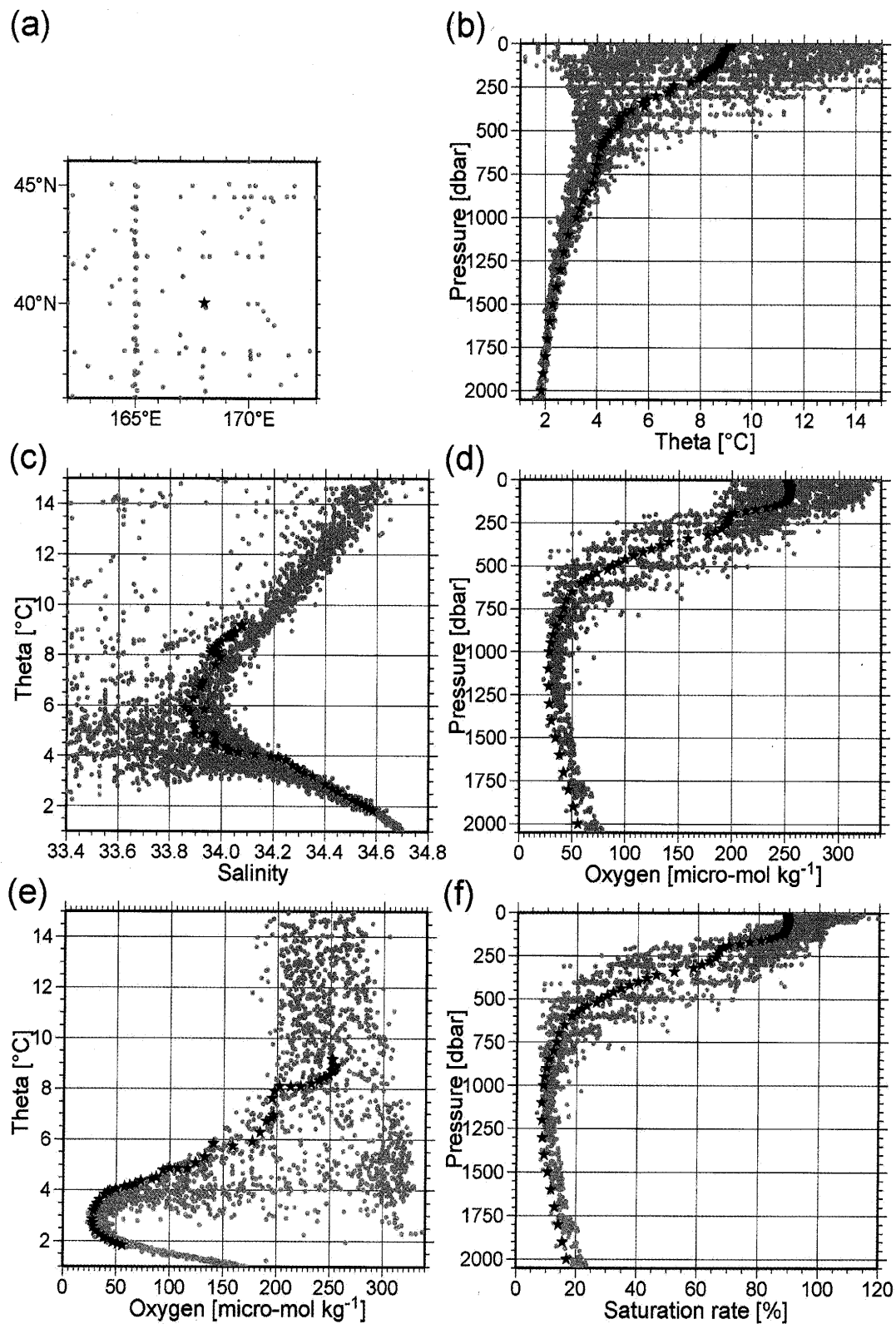
による DO 測定値も船舶 (採水) 観測結果に比べて  $0\sim 10\ \mu\text{-mol kg}^{-1}$  程度低いことが判明した。

フロート WMO ID 2900542 で観測された水塊構造は、船舶 CTD 観測結果と比較して水温  $4\sim 16^{\circ}\text{C}$  の表層 (おおよそ 70~900 dbar) でも等温位面上の塩分が約 0.01 の範囲で一致しており、この両者はほぼ同一の水塊構造をとらえていたと考えられる。この温度レンジはフロート観測時に認められる混合層 (約  $18.5^{\circ}\text{C}$ ) よりも下層であり、大気からの影響や、海面近くでの光合成などの生物活動の影響は小さいと考えられるが、フロートの DO 計測値は採水観測結果よりも低めの値を示していた。その大きさは高温部ほど拡大し、最大で  $40\ \mu\text{-mol kg}^{-1}$  以上のズレが生じていたことが分かる。

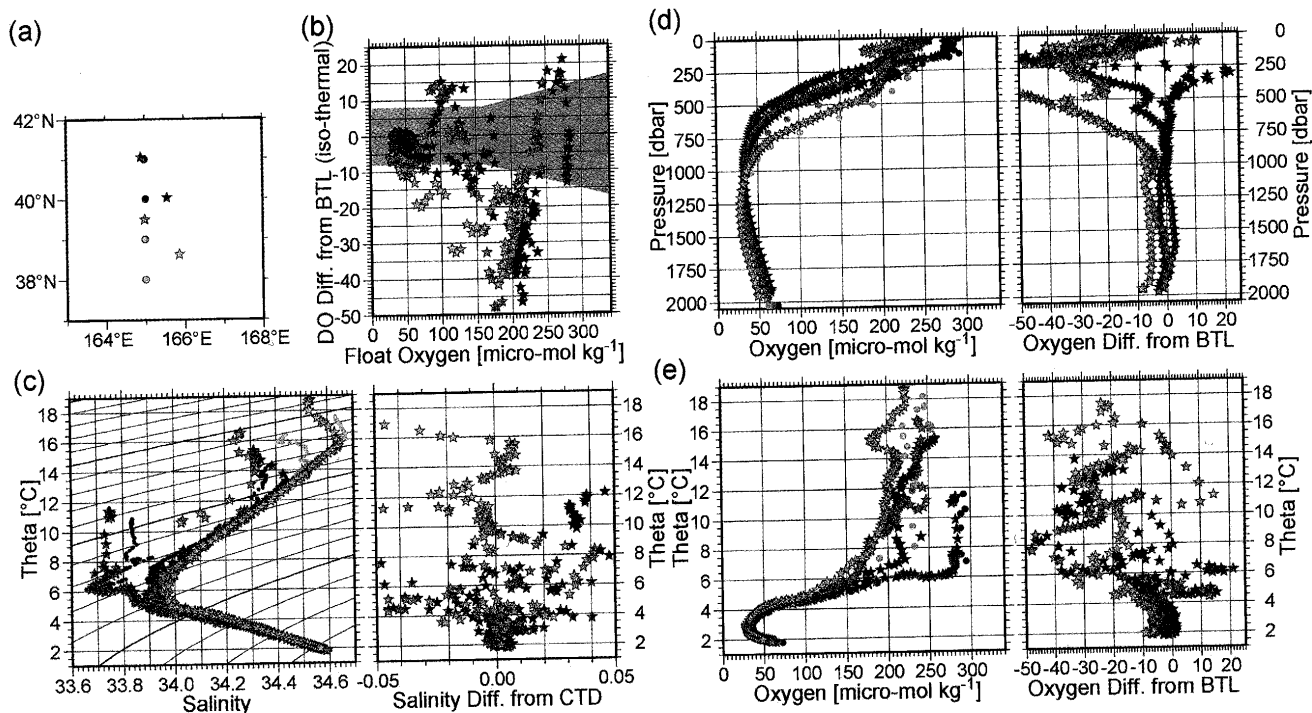
Fig. 5 は、おしよろ丸 (北海道大学) で  $165^{\circ}\text{W}$  に投入されたフロートを、投入時の採水観測結果と比較したものである。凌風丸の投入点よりも  $30^{\circ}$  東方であるためか、時空間的な変動は比較的小さく、フロートと採水観測では、表層でもほぼ同一の水塊をとらえていたことが分かる。フロートによる DO 測定結果は、採水観測結果と比較して、深層では  $0\sim 10\ \mu\text{-mol kg}^{-1}$ 、表層でも  $5\sim 25\ \mu\text{-mol kg}^{-1}$  程度低めである。表層では、高温 (上層) ほど大きな負 DO のバイアスを示しており、凌風丸で投入されたフロートによる計測結果と同様の傾向を示していた。

ここで、DO センサーの機種による違いについて検討する。Fig. 4 および Fig. 5 とともに、SBE43 を搭載しているフロート (WMO ID 2900540 と 4900652) のデータを緑、Optode 3830 搭載型はそれ以外の色で示しているが、両者の違いははっきりせず、上で示した傾向 (採水観測結果に比べてやや負の DO バイアスを持ち、表層ほどそのバイアスは拡大する) はほぼ同一であった。量的な差も、現在までの結果では確認できていない。

Fig. 4(b) および Fig. 5(b) は、DO のフロート計測値と採水観測値の等温位面上における差を、フロートによる DO 計測値を横軸として示したものである。Optode 3830 の測定誤差 (メーカー公称値: Table 1) に含まれる領域には影をつけた。SBE43 の初期精度 (メーカー公称値) は、飽和 DO 量の 2% (Table 1 を参照) であるから、本解析で扱っている海域 ( $2\sim 18^{\circ}\text{C}$ , 塩分 33~35 程度) であれば  $4\sim 7\ \mu\text{-mol kg}^{-1}$  程度となり、Optode



**Fig. 3.** Comparison of measurements at the first float profile of WMO ID 2900460 (red) and the historical bottle sampling observations in WOD01 (light-blue). (a) Horizontal distributions of the first float profile and historical data, and their profiles on the (b) pressure–potential temperature (theta), (c) theta–salinity, (d) pressure–DO, (e) theta–DO, and (f) pressure–saturation rate of DO, respectively.



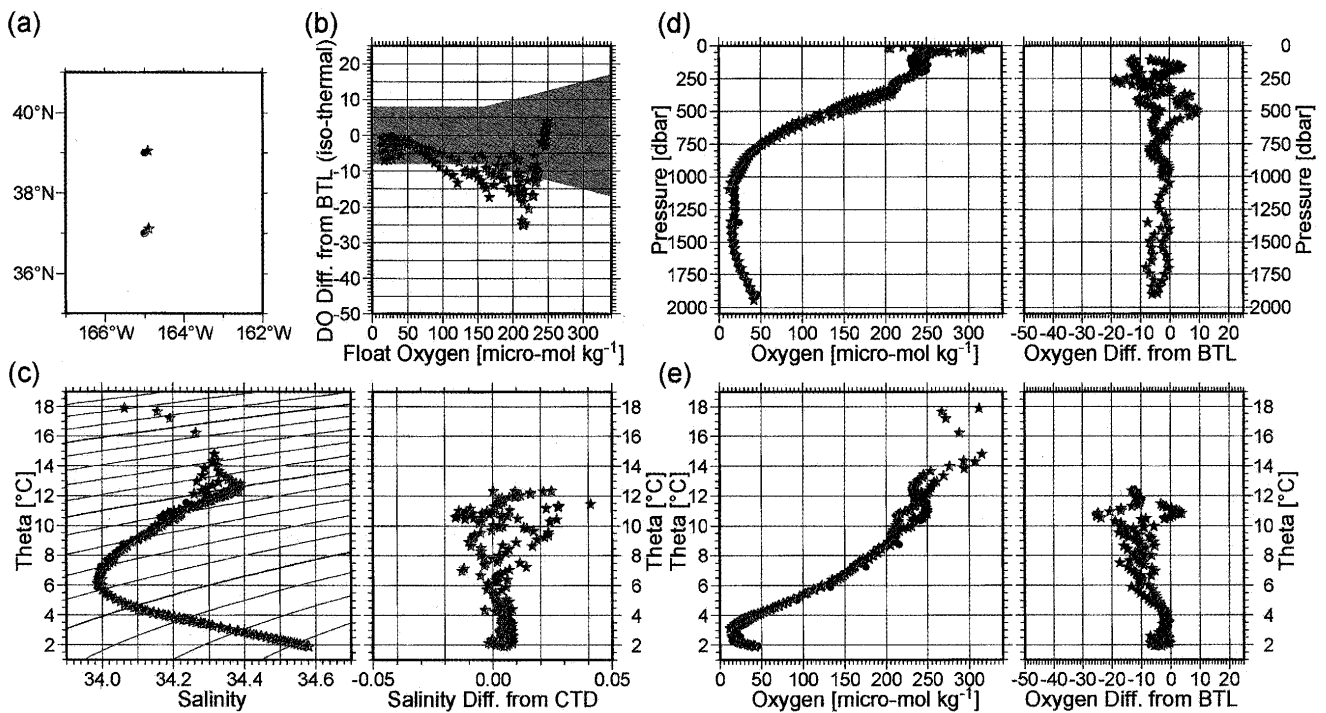
**Fig. 4.** Comparison of the first float profiles (stars) of WMO ID 2900514 (red), 2900540 (green), 2900541 (yellow), and 2900542 (cyan) and the shipboard observations (circles) at float deployments by R/V Ryofu-maru (Japan Meteorological Agency). (a) Their horizontal locations, and their profiles on the (c) theta-salinity, (d) pressure-DO, and (e) theta-DO, respectively. The right panels of (c), (d) and (e) show the differences between the float measurements and the shipboard observations at float deployments (float-shipboard) on isotherms for (c) and (e) and isobars for (d). Panel (b) represents the DO difference on the isothermal layer (float-shipboard: unit is  $\mu\text{-mol kg}^{-1}$ ) with the values of the float DO measurements for the horizontal axis. The first float measurements are about 10 days apart from the shipboard observations in time, and the DO sensor made by AANDERAA is equipped by all floats except for WMO ID 2900540 (green) with SBE43. The shade region in Panel (b) represents the error expected of the Optode DO sensor (based on AANDERAA, 2003, see Table 1).

3830 の公称観測精度よりも小さい。負 DO バイアスが最大になるのは DO フロートの計測値がおおよそ  $150 \sim 250 \mu\text{-mol kg}^{-1}$  の場合であり、その値は  $15 \mu\text{-mol kg}^{-1}$  以上、最大で  $40 \mu\text{-mol kg}^{-1}$  を越えている。本研究の Fig. 4(b) および Fig. 5(b) で示されるバイアスには、水塊の時空間変化による見かけ上のものを含んでいるものの、船舶観測とフロート観測とで、水柱全体でほぼ同一の水塊をとらえていると考えられる結果 (WMO ID 2900542, 4900651, 4900652) においても、メーカー公称誤差を超える大きなバイアスを示していることから、SBE43 型および Optode 3830 型ともに、メーカー公称値を上回る負バイアスが生じていると考えられる。

## 5. DO センサーの経時変化

フロートは、一度展開されてしまえば、海中をメンテナンスされることなく漂流する。フロートの寿命は電池容量に基づく理論値として約 4 年～5 年、運用実績に基づいた値として 3.5 年程度以上 (APEX 型の場合) と推定されている。したがって、フロート搭載の DO センサーによる計測は、長期間安定していることが望ましい。

Fig. 6 は、空間的に移動の少ない 6 機フロートについて、等温位面上における DO 計測値の経時変化を、第 1 回目の計測値からの偏差として表したものである。



**Fig. 5.** Comparison of the first float profiles (stars) of WMO ID 4900651 (with Optode 3830: red) and 4900652 (with SBE43: green) and the shipboard observations (circles) at float deployments by R/V Oshoro-maru, Hokkaido University (otherwise, as for Fig. 4).

これらのフロートは約12か月間海中を漂流していた。表層では、主に空間的な移動や季節変化などに起因する変化が存在していた。その振幅は  $20 \mu\text{mol kg}^{-1}$  を越える場合があり、DO センサーの経時変化を解明することは難しい。

これに対し、深層部分で生じた変化は  $5 \mu\text{mol kg}^{-1}$  程度以下に収まっており、また明瞭なトレンドのようなものは認められない。2機のフロート (WMO ID 2900542 と 4900652) は深層の DO 計測値が時間の進行とともにわずかに高くなる傾向を示している。両者ともやや南西方向に移動していることや、これらの海域の  $3^{\circ}\text{C}$  付近より下層では、気候学的には南西方向の DO 値がやや高めであることから考えて、フロートの移動に伴う変化であろうと考えられる。そのため、深層部分の DO 測定では、経時変化は確認されていないと見なすことができる。

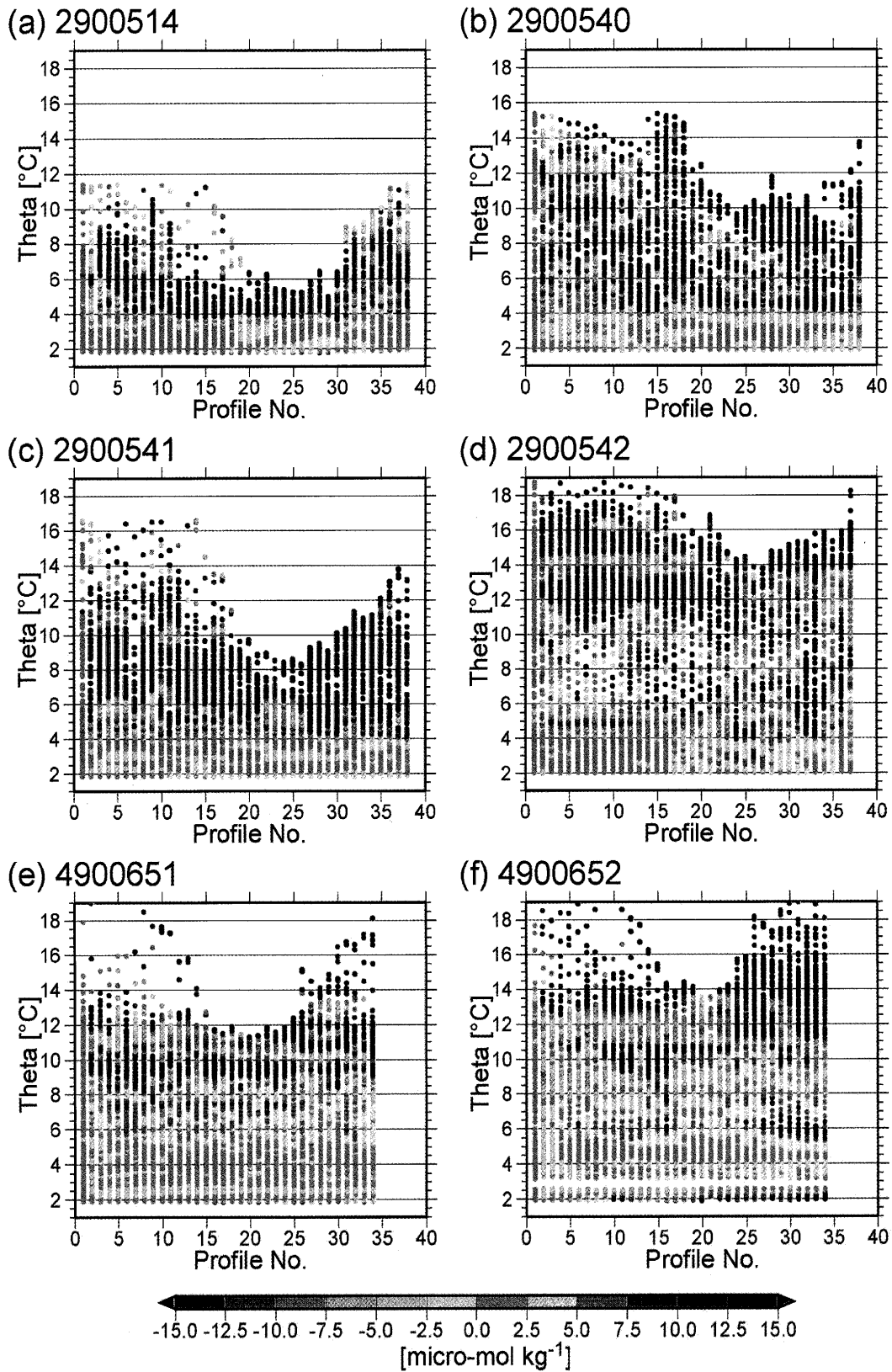
現在、Optode 3830 は SBE43 に比べて経時変化が少ない (Tengberg *et al.*, 2006) と考えられているが、少

なくともこれら6機のフロートによる DO 計測結果から判断する限り、両者に差は認められない。

## 6. 議論

JAMSTEC と東北大学で展開・運用している DO センサー搭載フロートによる DO 計測値と、船舶によるフロート投入時の採水観測結果を比較したところ、フロートによる DO 計測値は、船舶観測と比べて負 DO 側へのバイアスが存在していることが明らかとなった。このバイアスは、深層 (低温部) では  $0 \sim 10 \mu\text{mol kg}^{-1}$  程度であり、表層 (高温部) ほど拡大して、最大で  $25 \sim 45 \mu\text{mol kg}^{-1}$  程度に達している。表層における大きなバイアスは、Optode 3830 および SBE43 とともに、計測誤差のメーカー公称値を越える場合が存在する可能性が高い。





**Fig. 6.** Anomalies of DO measurements from the first profile for the float of WMO ID (a) 2900514, (b) 2900540, (c) 2900541, (d) 2900542, (e) 4900651, and (f) 4900652, respectively. Anomalies of DO are calculated from the values on isotherms.

### 6.1. 負 DO バイアスの評価について

海洋学にとって DO は重要な観測パラメータであるが、要求される観測精度は、目的によって大きく異なる。そのため、上で示した DO 計測値の負バイアスの問題の深刻さは、その立場によって異なるだろう。本稿では、水塊分析の立場から論ずることにした。

水塊分析を行なう際、DO は頻繁に用いられるトレーサーである。多くの場合、生物活動等によって、その濃度が時間とともに低下するという特徴が利用される。これは「見かけの酸素消費量」と呼ばれる量であり、この値を用いて海洋のベンチレーションの状態や、水塊の「年齢」や移動経路などが議論されている(例えば、Suga and Hanawa, 1989; Oka and Suga, 2005)。その目安となる、海洋中における DO の消費速度の推定値を Table 3 に示した。DO の消費速度は、その推定自体が困難な上に、生物活動等の大きさによって、海域毎に大きく変化すると考えられることなどから、一般的な値を示すことは難しい。しかし、Table 3 に挙げた研究はいずれも、DO の消費速度を表層 (0~100 m 深付近) で  $10\sim 25 \mu\text{-mol kg}^{-1} \text{y}^{-1}$ 、中層 (200~800 m 付近) では  $2\sim 5 \mu\text{-mol kg}^{-1} \text{y}^{-1}$  程度と推定している。この結果に基づけば、本研究で明らかになった DO センサーの負バイアスは、表層・中層においては年間の DO 消費量に匹敵、もしくはそれ以上に相当することになる。これは、現行の DO センサーによる計測値からでは、その海水がベンチレートされたのが今冬か昨冬か特定ができないことを意味している。つまり、水塊分析の観点において、現行の DO センサー搭載型フロートでは、現在の水塊分析に要求される水準を満足する DO データが得られていないことを示す。また、これは、フロートによる DO 計測値を水塊分析のトレーサーとして用いるためには、何らかの補正が必要であることを意味する。

フロート計測で生じているこの負 DO バイアスは、海洋構造の気候学的な理解にも深刻な問題を引き起こす。人類が現在までに行なった DO 観測は先進国の沿岸域を除けば非常に少なく、多いところでも  $10^\circ \times 10^\circ$  の海域内で 100 点程度である (Fig. 2 を参照)。これは、フロート 1 機がその生涯で計測するデータ量とほぼ同等

である。フロートを用いた観測は、船舶観測と比べて費用対効果に非常に優れることから、今後も数多くのフロートに DO センサーが搭載され、様々な海域に展開されるだろう。つまり、近い将来、海洋の DO データの大半はフロートによって得られたものになることが予想される。

World Ocean Atlas などの気候値の作製には、最適内挿法などの統計的な手法が用いられることが多い。この手法により、観測データに含まれる観測誤差や中規模渦による時空間変動など、より大規模な現象から見たときにランダムエラーと見なすことができるものだけを取り除くことが可能である(例えば、水野, 1995; ただし、中規模変動については異論(例えば、Oguma *et al.*, 2003)もあるが、ここでは議論しない)。つまり、バイアスを含んだデータが多数を占めるような状況で推定された「平均値」や「気候値」は、必然的にバイアスがかかったものとなり、もはや現実海洋の代表としての意味をなさない。

そのために、アルゴ計画における塩分データの補正(例えば、Wong *et al.*, 2003; Kobayashi and Minato, 2005)にならって、DO データにも遅延補正を行なう必要がある(その可能性については 6.4 章)。しかし、全てのデータを気候値に基づいて補正することは、経年変化の検出を困難(不可能)にすることを意味する。海洋中の DO 分布には数年から数 10 年スケールの変動が確認されている(例えば、Ono *et al.*, 2001; Watanabe *et al.*, 2001; Garcia *et al.*, 2005)から、それを検出するためには、気候値に基づくような遅延補正の手法を準備することとは別に、DO を正確に計測できるようなフロート観測技術の開発が不可欠である。

### 6.2. 負 DO バイアスの発生原因について

フロートの DO データに認められた負バイアスの発生原因について検討した。

まず、センサーメーカーにおける検定の問題が挙げられる。DO センサーの出力値は、海水中の DO だけでなく、水温や塩分によっても変化する。そのため、メーカーでは、事前に多くの(水温、塩分、DO)点で検定を行ない、正確な DO を計測できるようにキャリブレーション・パラメータを決定している(Sea-Bird Electronics,

**Table 3.** Estimations of DO consumption rate by year.

Study	Consumption rate by year		Note
	[ml L <sup>-1</sup> ]	[ $\mu$ -mol kg <sup>-1</sup> ]	
Jenkins (1982)	0.377	16.9	at 100 m in the North Atlantic
	0.115	5.1	at 500 m in the North Atlantic
Suga <i>et al.</i> (1989)	0.560	25.0	STMW in the North Pacific
Warner <i>et al.</i> (1996)	0.336	15.0	Surface layer at Pacific 47°N
	0.202	9.0	Surface layer at Pacific 24°N
Imasato <i>et al.</i> (2000)	0.200	9.0	at 100 m (Global average)
	0.044	2.0	at 150~800 m (Global average)
	0.013	0.6	at 800~3,000 m (Global average)
Feely <i>et al.</i> (2004)	0.047~0.103	2.1~4.6	around 200~1,000 m in the Pacific
Oka and Suga (2005)	0.560	25.0	CMW in the North Pacific

STMW: Subtropical Mode Water. CMW: Central Mode Water.

All estimations are based on hydrographic data except for Imasato *et al.* (2000), which used general circulation model with particle tracking.

2001; AANDERAA, 2003; Tengberg *et al.*, 2006)。多くの検定を行えば、補間値として計算される領域は少なくなるので、より正確な DO 計測が期待できるが、製造コストは増加する。したがって、許容できる計測誤差の基準を設定し、補間値であってもそれを満足できるように検定点の数を決定している。AANDERAA 社の場合、センサー検定で許容される誤差水準は  $2 \mu\text{-mol L}^{-1}$  とされており、SBE もほぼ同様の水準であると考えられる。さらに、補間によって生じる誤差は、必ず負のバイアスになって現れるような性質のものではない。そのため、本報告で示した負のバイアスが、DO センサーのキャリブレーション・パラメータの不十分さに起因するものとは考えにくい。もちろん、メーカーでの検定方法自体がバイアスを含むような設計になっているような場合 (Körtzinger *et al.*, 2005) は、その限りではない。

Optode 型 DO センサーの場合は、内蔵している水温センサーの誤差に起因する DO 計測値のズレが考えら

れる。しかし、付録 C に示すように、内蔵の水温センサーのズレは、負 DO バイアスを発生する方向に働くものの、その量は大きくても  $0.5 \mu\text{-mol kg}^{-1}$  程度であり、本稿で述べている負 DO バイアスの主要な発生源ではないと結論できる。

DO センサーは、応答速度が水温・塩分センサーなどと比べて遅いため、それを原因とするバイアスの発生が知られている (Larson, 2003; Gilbert *et al.*, 2006 など)。しかし、以下で述べるような理由により、これが負 DO バイアスの主原因とは考えにくい。

フロート展開域では、800~1,500 dbar 付近に DO 極小層が存在しており、これ以深では DO 濃度は深層に向けて高くなっていった。フロートは上昇時にのみ DO 計測を行なうので、DO センサーの反応速度の遅さが、何らかのバイアスを引き起こすのであれば、深層 1,500~2,000 dbar では船舶観測よりも高い DO 値、すなわち正のバイアスを示すはずである。

次に、DO センサーの実際の応答時間が、メーカー公

称値 (Table 1 を参照) よりもずっと長い、60 秒の場合を仮定してみる。フロートの上昇速度は  $10 \text{ cm s}^{-1}$  程度であるから、DO センサーが実際に計測したと考えられる深度と、フロートの圧力センサーで感知している深度のズレは 6 m となる。フロート展開域の DO の鉛直勾配は、最大でも  $0.6 \mu\text{-mol kg}^{-1} \text{ m}^{-1}$  程度 ( $140 \mu\text{-mol kg}^{-1} (250 \text{ m})^{-1}$ ) であるから、深度の計測誤差で生じる DO 計測値のズレは、最大でも  $4 \mu\text{-mol kg}^{-1}$  以下となり、本稿で示した DO 躍層部の負のバイアス (約  $15 \mu\text{-mol kg}^{-1}$  以上) よりも、かなり小さい。

APEX 型フロートは通常、上昇時であっても、圧力以外のセンサーは休眠状態にあり、計測すべき圧力を感知すると起動してデータ計測を始めるように設定されている。これは、フロートの電力消費をおさえるための処置である。水温・塩分センサーは、このような計測方法を用いても正確な計測が行なえることが確認されている。しかし DO センサーは、開発からまだ日も浅く、十分な検証が行なわれているとは言いがたい。

通常、電気回路が安定して動作するには、起動後しばらく時間が必要とされる。DO センサーは、精密な測定を目的とした回路であるから、起動直後に行なわれた測定の場合には、何らかの問題 (常に負のバイアスが生じる等) が生じていても不思議ではない。このような起動と計測の繰り返しに起因する問題は、フロートを使った計測に特有である。なぜなら、メーカーで行なわれるキャリブレーション・パラメータの決定を目的とするセンサー検定は、精密さを確保するために長時間かけて静的にデータを取得するような設計になっているし、船舶観測で用いられる場合には、CTD などと同じく連続計測を行なうことが前提となっているからである。そのため、この問題について DO センサー、フロートの各メーカーを交えての検討・議論が必要であり、場合によっては実海域における実証試験を行なう必要があるだろう。

なお、船舶観測における Optode 3830 の使用実績に基づき、この負 DO バイアスの原因として、センサー起動直後の電気回路の不安定さよりも、DO センサーの出力特性の変化に比べて検定点が少なく、キャリブレーション・パラメータの決定に偏りが生じるためではないかとの指摘がある。その場合でも、SBE43 に同

一の傾向を示す負 DO バイアスが発生する原因は明らかではない。

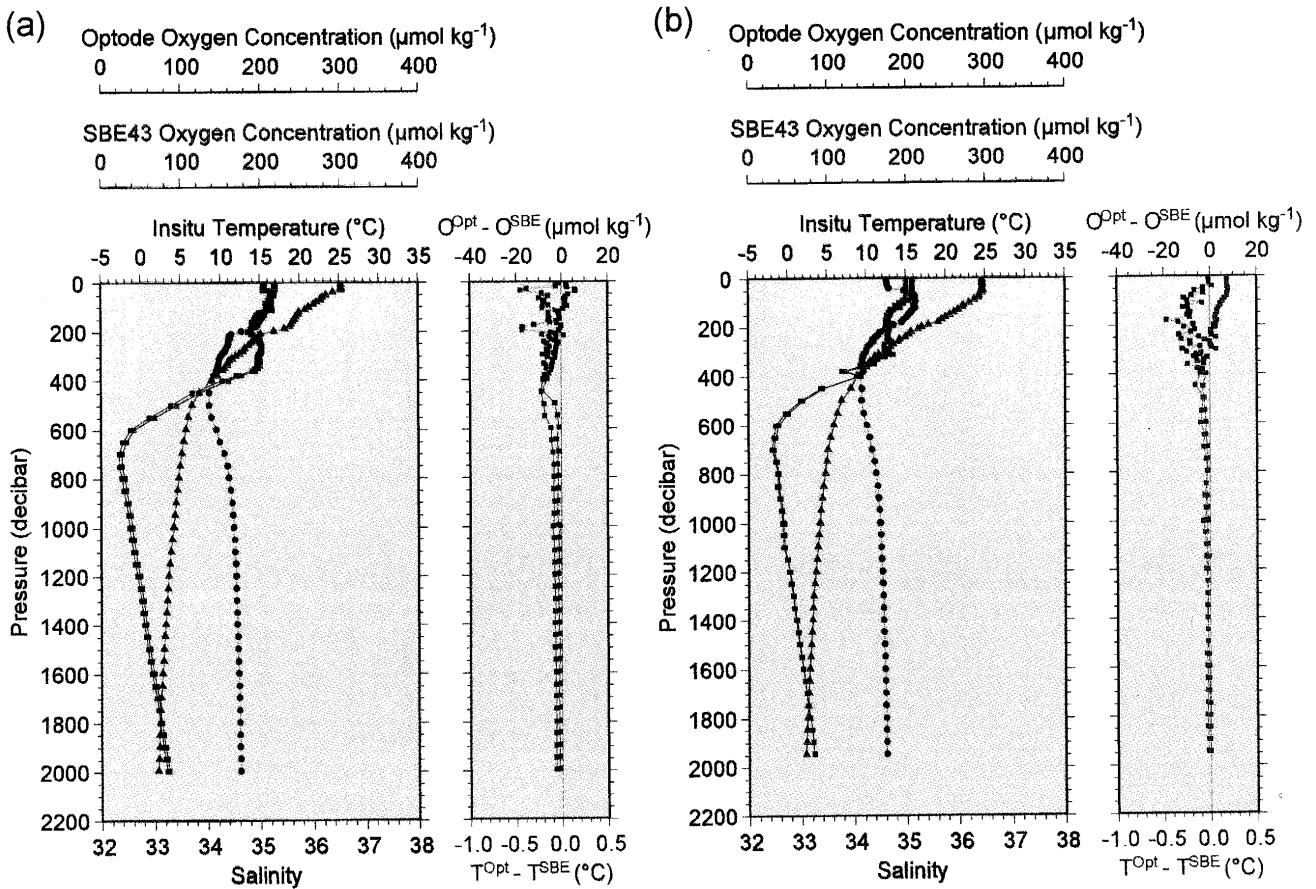
4 章では、本稿の「表層」と「深層」の表現について注意を促した。これは上の議論で明らかのように、本稿で報告した「表深層」の負 DO バイアスの特徴が、「低圧力」「高低温」「高低 DO」のいずれ (もしくは他の要素、もしくは複数の要素) に起因しているのかが明らかではないためである。したがって、北太平洋とは全く異なる水塊構造を持つ海域において、フロートによる DO 計測を行なった場合、その海域の「表層」および「深層」で見いだされる DO バイアスの特徴は、本研究で述べたものとは全く異なる可能性もある。このことは、一見すると Körtzinger *et al.* (2005) とは大きく異なっている本研究の結果であるが、単に、現在の DO センサーにとって、ラブラドル海では正確な DO 計測を可能とするような水塊構造 (特性) であり、北太平洋はそうではない、という可能性があることも示している。

### 6.3. DO センサーの経時変化について

5 章で述べたように、JAMSTEC および東北大学で投入した 9 機のフロートには、運用期間は最長で 17 か月であったものの、深層での DO 測定に限られるが、経時変化は確認されなかった。ただし、この結果から DO センサーの経時変化はない (もしくはかなり小さい) と直ちに結論づけることは難しい。

まず、表層における DO 計測の経時変化については、なんら明らかでない。4 章で示したように、表層では深層に比べて負 DO バイアスが大きく、その発生原因は明らかでない (6.2 章)。これは DO センサーのバイアスの主要な発生要因が、深層と表層では異なっている可能性も示唆する。また、5 章で述べたように、表層では、DO 計測結果に大きな変動が見られた。この DO 変動の大部分は、水塊の時空間変動の影響によると考えられるものの、船舶採水観測との比較等による検証によって明らかにされた訳ではない。したがって、可能性は低いものの、表層では DO 計測自体が安定でない (再現性がない) 可能性すら排除できていない。

本邦以外での DO フロート観測結果では、長期間のセンサーによる DO 計測の監視を続けた結果、明らか



**Fig. 7.** Change of performance for DO sensors equipped by the float of WMO ID 5900952 (from the website of University of Washington, USA). The profiles measured at (a) 4th surfacing (on 20 June 2005 at 22.17°N, 158.34°W) and (b) 56th surfacing (on 6 April 2006 at 20.96°N 161.60°W). The difference of DO measurements by the sensors (Optode–SBE) is shown by the gray line in the right panels.

な経時変化が発見された例がある。ここでは、それを紹介する。Fig. 7に示したのは、米国ワシントン大学がハワイ島周辺海域に展開しているフロート (WMO ID 5900952) で計測された DO データである。このフロートは、SBE43 と Optode 3830 の 2 つの DO センサーを搭載しており、センサー性能の相互比較には理想的な条件を備えている。観測サイクルは 5 日であり、通常は 1,000 dbar から、4 回毎に 2,000 dbar からの観測を行なう。フロート展開直後 (4 回目) の DO 計測値は、海面付近を除いて SBE 製センサーの方が AANDERAA 製よりもやや高めであったが、その差は時間とともに縮小している。56 回目の観測 (展開後約 8 か月) では、比較的大きな差の見られた中層部分でも偏差は小さく

なり、深層では両者の差はほぼなくなっている。このため、少なくとも一方には経時変化が存在することが分かる。また、内田ら (2005) は、2005 年の西部北太平洋の船舶観測結果に基づき、Optode 3830 は長期 (ただし数 10 日程度) にわたって極めて安定した計測が可能であるが、SBE43 には時間とともにその計測値が低下する傾向があると指摘している。船舶観測とフロート観測では、DO センサーのおかれる環境が全く異なるので、安易な応用には注意する必要があるが、ワシントン大学のフロートに認められる DO 測定 の経時変化は、船舶観測で得られている知見と矛盾してはいない。

いずれにせよ、フロート搭載型 DO センサーによる DO 計測は近年始まったばかりであり、その経時変化

を議論するためには、今後も多数のフロートに対して、より長期の注意深い監視を続けていく必要がある。

#### 6.4. DO データの遅延補正の可能性について

現在、海洋中に展開されている DO フロートの計測値に、負のバイアスが認められること、また DO センサーの経時変化の例が発見されていること (6.3 章を参照) から、DO センサーによる計測データの品質を確認する方法 (品質管理)、さらには補正を行なう手法についての研究・開発が必要である。

Körtzinger *et al.* (2005) は、Optode 型 DO センサーの運用実績を報告する中で、DO センサーの海面付近における測定値を用いることで、データ補正が可能であり、より正確な計測値が得られるであろうと述べている。しかしながら、Fig. 3(f) にあるように、歴史的データの海面付近における DO 飽和度は、90~110% 付近に散らばる。そのため、海面付近では常に DO が飽和であると仮定して、DO センサー測定値を補正するならば、25~35  $\mu\text{-mol kg}^{-1}$  程度の誤差を含むような処理を施すことになる。これはセンサーで得られたデータの品質を低下させるだけである。

また、大気中の酸素濃度は比較的安定であるから、その値を用いて補正する方法も考えられる。しかし、SBE43 では大気中の酸素濃度を測定できない (Table 1 参照)。Optode 型は同一センサーで大気中の酸素濃度の測定も可能であるが、そこで用いられている計算式は海水中のものとは異なる。そのため、この方法では海洋中の DO データの補正を行なえない。内田ら (2005) は、JAMSTEC の海洋地球研究船みらいによる西部北太平洋の P10 再観測において Optode 型 DO センサーと SBE43 を使用し、その計測結果を報告している。Fig. 8 は、それぞれの DO センサーによる測定値を採水観測結果と比較し、そのズレを調べたものである。深層 1,000 dbar 以深では、Optode 型 DO センサーに見られるバイアスは、採水観測結果 (真値) に対してほぼ線形であり、経時変化もほとんど見られない。そのため、彼らは、Optode 型 DO センサーは高い精度での DO 補正が可能であろう、と結論している。ただし、長い応答時間に起因するズレを小さくするため、DO センサーの計測時刻を 13 秒繰り上げるなどの前処理が施されて

いる。また、1,000 dbar 以浅の表層では、水温の変化に大きく依存するようになり、この線形関係から大きく外れる。

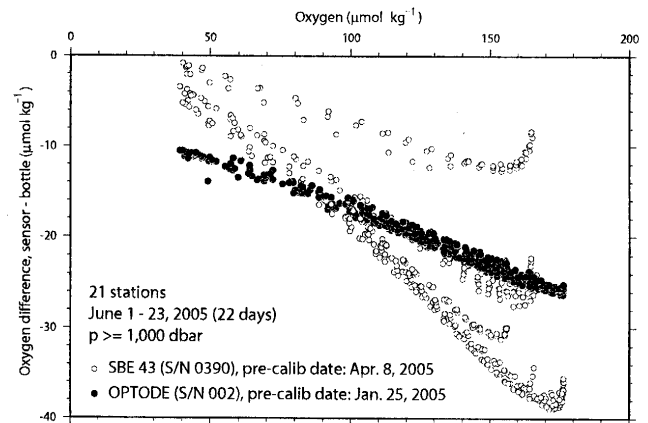


Fig. 8. DO differences between DO sensor and bottle water sampling (sensor-bottle) found in raw hydrographic data of WHP P10 revisit in 2005 (MR05-02 by R/V Mirai JAMSTEC). Horizontal axis shows DO values of bottle sampling. The solid and open circles represent the data obtained by Optode 3830 and SBE43, respectively, and only the data at the depth deeper than 1,000 dbar are plotted. From Uchida *et al.* (2005).

Fig. 4(b) および Fig. 5(b) は、Fig. 8 と同様の関係を示したものである。4 章で述べたように、DO フロートでの計測結果は、真値としている船舶採水観測と、時間にして 10 日、位置は最大で 100 km の差異があり、同一の水塊を観測したものとは言い難い場合もある。そのため、内田らの解析とは状況がやや異なるが、深層部分 (0~80  $\mu\text{-mol kg}^{-1}$ ) では同様の傾向は認められる。しかし、ばらつきが非常に大きいので、この結果からただちにデータ補正が可能とは結論できない。また、DO フロートを用いた観測は、大半が内田らの言う表層 (1,000 dbar 以浅) に相当するから、この部分でも十分な精度を持つ補正手法を開発する必要がある。

DO データの補正手法を開発するためには、センサーの応答についての深い知見が必要となる。我々が現在までに得た知見は、北太平洋に展開中の 9 機の DO セ

ンサー搭載フロートによる計測結果だけであり、ほぼ同じ水塊構造で得られるデータに基づく議論しかできていない。そのため、アルゴ計画のもとで国際的な協力を進めることにより、より一層の情報の共有・知見の集積を図り、フロートを用いた精度の高い DO 観測を目指したいと考える。

## 7. まとめ

JAMSTEC および東北大学が北太平洋に展開したフロートによる DO 計測の結果を紹介した。フロート投入時に行なわれた船舶による採水観測結果に比べて、フロートによる DO 計測値は、AANDERAA・SBE 製センサーともに、低くなる傾向にある。この負 DO バイアスは深層では  $0\sim 10\ \mu\text{-mol kg}^{-1}$  で、表層ほど大きくなり、最大では  $40\ \mu\text{-mol kg}^{-1}$  を越える値を示す。これは、メーカーの公称精度を越えている。

この DO 計測値の負バイアスの発生原因は、現在でも特定できていない。ただし、海洋中の DO の鉛直構造に関わらず現れるため、DO センサーの応答時間の長さによる原因があるとは考えにくい。フロートは通常電力消費をおさえるために、データ計測時以外ではセンサーの電源を落としている。そのため、起動してから計測までに十分な時間がとれず、DO センサーの電気回路が安定しないまま計測を行ってしまうことが問題なのかもしれない。

最長で 17 か月間の運用結果に基づく限り、DO センサーの計測には明瞭な経時変化は認められなかった。しかし、表層は大きな負 DO バイアスがあるにも関わらず、海洋変動自体も大きいので経時変化の検証が困難である。本邦以外では経時変化が生じた例が報告されているから、より多くのフロートについて、さらに長期にわたる監視が必要である。

また、多数の DO センサー搭載型フロートがすでに展開されているにもかかわらず、アルゴ計画では DO データの品質管理プロセスについて、何ら合意がなされていない。データは GDAC にて公開されているが、統一的な品質管理プロセスの合意とその施行も喫緊の

問題として挙げられるだろう。

## 謝 辞

本稿をまとめるに当たり、(株) マリン・ワーク・ジャパンの中島 宏幸氏にはデータ処理を行なっていただきました。(独) 海洋研究開発機構 地球環境観測研究センターの方々、特に村田 昌彦博士と内田 裕博士には、DO センサーを用いた船舶観測についての助言をいただきました。気象庁の星本 みずほさんには、アルゴ計画の日本の NDAC として気象庁で行なっている DO データのリアルタイム処理の現状について教えていただきました。また、A. Tengberg 博士および K. G. Froysoya 博士には、AANDERAA 社における DO センサー検定に関するコメントをいただきました。B. A. King 博士には英文要旨の手直しをしていただきました。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 (GOOS) のパイロットプロジェクトです。

## References

- AANDERAA (2003): *TD 218 Operating Manual Oxygen Optode 3830 and 3930*, AANDERAA, Bergen, Norway, 46 pp.
- Argo Data Management Team (2003): *4th Argo Data Management Meeting Report*, 5–7 November 2003, Monterey, California, U.S.A..
- Argo Data Management Team (2005): *Argo Quality Control Manual version 2.1*, Argo Data Management Team, 28 pp.
- Argo Data Management Team (2006): *Argo User's Manual version 2.1*, Argo Data Management Team, 56 pp.
- 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*, edited by C.J. Koblinsky and N. R. Smith, Godae Project Office, Bureau of Meteorology, Melbourne, Australia.

- Clark, L. C., R. Wolf, D. Granger, and Z. Taylor (1959): Continuous recording of blood oxygen tension by polarography. *J. Appl. Physiol.*, **6**, 189–193.
- Culbertson, C. H. (1991): Dissolved oxygen. In *WOCE Operations Manual*. WHP0 report No. 68/91, Woods Hole, U.S.A., 15 pp.
- Feely, R. A., C. L. Sabine, R. Schlitzer, J. L. Bullister, S. Mecking, and D. Greeley, (2004): Oxygen utilization and organic carbon remineralization in the upper water column of the Pacific Ocean. *J. Oceanogr.*, **60**, 45–52.
- Garcia, H. E., T. P. Boyer, S. Levitus, R. A. Locarnini, and J. Antonov (2005): On the variability of dissolved oxygen and apparent oxygen utilization content for the upper world ocean: 1955 to 1998. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L09604, doi:10.1029/2004GL022286.
- Gilbert, D., H. Freeland, and A. Tran (2006): Canadian oxygen measurements on Argo floats, 2nd Argo Science Workshop, 17–18 March 2006, Venice, Italy.
- Holst, G., M. Kühl, and I. Klimant (1995): A novel measuring system for oxygen microoptodes based on a phase modulation technique. *SPIE Proc.*, **2,508**, 387–398.
- Imasato, N., T. Kobayashi, and S. Fujio (2000): Study of water motion at the dissolved oxygen minimum layer and local oxygen consumption rate from the Lagrangian viewpoint. *J. Oceanogr.*, **56**, 361–377.
- Jenkins, W. J. (1982): Oxygen utilization rates in North Atlantic subtropical gyre and primary production in oligotrophic systems. *Nature*, **300**, 246–248.
- Kautsky, H. (1939): Quenching of luminescence by oxygen. *Transac. Faraday Soc.*, **35**, 216–219.
- 気象庁 (1999): 海洋観測指針 (第1部). 日本気象協会, 東京, 200 pp.
- Klimant, I., V. Meyer, and M. Kühl (1995): Fiber-optic oxygen microsensors, a new tool in aquatic biology. *Limnol. Oceanogr.*, **40**, 1,159–1,165.
- 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 (2004): 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. 海洋科学技術センター試験研究報告, **49**, 107–120.
- Kobayashi, T. and S. Minato (2005): Importance of reference dataset improvements for Argo delayed-mode quality control. *J. Oceanogr.*, **61**, 995–1,009.
- Körtzinger, A., J. Schimanski, and U. Send (2005): High quality oxygen measurements from profiling floats: A promising new technique. *J. Atmos. and Ocean. Tech.*, **22**, 302–308.
- Körtzinger, A., J. Schimanski, U. Send, and D. Wallace (2004): The ocean takes a deep breath. *Science*, **306**, 1,337.
- Larson, N. (2003): A year of oxygen measurements from Argo floats, 1st Argo Science Workshop, 12–14 November 2003, Tokyo, Japan.
- Minato, S., S. Hosoda, and N. Matsuo (2006): Observational error in Argo profiles and one-time shipboard CTD profiles, 2nd Argo Science Workshop, 17–18 March 2006, Venice, Italy.
- 水野 恵介 (1995): 大洋規模の海況解析と最適内挿法, 海の研究, **4**, 187–208.
- 中島 宏幸, 小林 大洋, 四竈 信行, 竹内 謙介 (2005): プロファイル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.
- Oguma, S., T. Suzuki, S. Levitus, and Y. Nagata (2003): Skewed occurrence frequency of water temperature and salinity in the subarctic areas. *J. Oceanogr.*, **59**, 921–929.
- Oka, E. and T. Suga (2005): Differential formation and circulation of North Pacific Central Mode Water. *J. Phys. Oceanogr.*, **35**, 1,997–2,011.
- Ono, T., T. Midorikawa, Y. W. Watanabe, K. Tadokoro, and T. Saino (2001): Temporal increases of phosphate and apparent oxygen utilization in the subsurface waters of western subarctic Pacific from 1968 to 1998. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 3,285–3,288, 10.1029/2001GL012948.
- Sea-Bird Electronics (2001): *Sea-Bird Dissolved Oxygen Sensor*. Sea-Bird Electronics, Washington, U.S.A., 2 pp.
- Suga, T., K. Hanawa, and Y. Toba (1989): Subtropical Mode Water in the 137° E section. *J. Phys. Oceanogr.*, **19**, 1,605–1,618.
- Tengberg, A., J. Hovdenes, H. J. Andersson, O. Brocandel, R. Diaz, D. Hebert, T. Arnerich, C. Huber, A. Körtzinger, A. Khripounoff, F. Rey, C. Rönning, J. Schimanski, S. Sommer, and A. Stagemayer (2006): Evaluation of a lifetime-based optode to measure oxygen in aquatic systems, *Limnol. Oceanogr. : Methods*, **4**, 7–17.
- 内田 裕, 金子 郁雄, 河野 健, 深澤 理郎 (2005): 高精度 CTD データの取得を目指して (III)—光学式溶存酸素センサー (OPTODE) の検討—. 2005 年度日本海洋学会秋季大会, 204, 2005 年 9 月 28 日–30 日, 仙台, 宮城県.
- UNESCO (1983): Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. *Unesco Tech. Rep. Pap. in Mar. Sci.*, **44**, Paris, France, 53 pp.
- Warner, M. J., J. L. Bullister, D. P. Wisegarver, R. H. Gammon, and R. F. Weiss (1996): Basin-wide distributions of chlorofluorocarbons CFC-11 and CFC-12 in the North Pacific: 1985–1989. *J. Geophys. Res.*, **101**, 20,525–20,542.



- Watanabe, Y. W., T. Ono, A. Shimamoto, T. Sugimoto, M. Wakita, and S. Watanabe (2001): Probability of a reduction in the formation rate of the subsurface water in the North Pacific during the 1980s and 1990s. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 3,289–3,292, 10.1029/2001GL013212.
- Winkler, L. W. (1888): The determination of dissolved oxygen. *Ber. Dtsch. Chem. Ges.*, **21**, 2,843–2,846.
- 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. and Ocean. 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.

## 付録 A DO センサー測定値の(準)即時補正

### A.1 SBE43 型

SBE 製 DO センサー搭載型のフロートから伝送されるデータは, DO センサーの出力値 (単位は [Hz]) そのものである。これを陸上局にて受信した後, センサー固有のキャリブレーション・パラメータによって DO 濃度 [ $\text{ml L}^{-1}$ ] に変換される。

### A.2 Optode 3830 型

Optode 型 DO センサーは, 水温センサーを内蔵し単体での DO 計測を可能とする設計になっている。しかし, Optode 型センサーの DO 計測は, 水温以外にも海水中の塩分や圧力に影響される。そのため, これらについて, より正確な情報が得られていれば, その値を用いて補正を行なうことが望ましい。フロートは, 同一観測層にて全観測パラメータを計測するので, 同時に観測された圧力および塩分のデータを用いて (陸上において準即時の)DO 補正を行なう。

JAMSTEC で行なっている即時補正は, AANDERAA 社のマニュアルに従っており, 補正值  $O_2 \text{ corrected}$  は DO センサーの出力値  $O_2 \text{ optode}$  から以下の式に従って得られる (AANDERAA, 2003)。

$$O_2 \text{ corrected} = O_2 \text{ optode} \times \frac{f(S = S_{\text{CTD}})}{f(S = 35)} \times \left(1 + \frac{0.04d}{1000}\right)$$

・塩分補正 ( $f(S = S_{\text{CTD}})/f(S = 35)$ )

Optode 型 DO センサーの出力値は, 塩分 35 を仮定した時の値である。そのため, フロートで観測された塩分 SCTD を用いて補正する。

・圧力補正

深度 1,000m に対して DO 濃度が 4% の増加するように, CTD の圧力から UNESCO (1983) に従って変換した深度  $d$  [m] の値を用いて補正する。

圧力補正に関して, Tengberg *et al.* (2006) は, 深度 1,000 m ではなく圧力 1,000 dbar に対して 4% と報告している。また, 船舶観測結果に基づく 1,000 dbar に対して 3% の補正が適当であり, AANDERAA 社のマニュアル (AANDERAA, 2003) では, 深度 [m] と圧力 [dbar] の区別が厳密ではないのではないかと指摘もある。

なお, 2006 年 7 月現在, GDAC から公開されている日本の Optode 型センサー搭載フロートの DO データには, この補正は施されていない。

## 付録 B 海洋中の DO の計測単位の変換

DO の単位には,  $\text{ml L}^{-1}$ ,  $\mu\text{-mol L}^{-1}$  ( $\mu\text{-M}$ ),  $\mu\text{-mol kg}^{-1}$  など, いくつか代表的なものが存在している。 $\text{ml L}^{-1}$  は WOD01 等の代表的なデータセットで DO データの単位として用いられているし,  $\mu\text{-mol kg}^{-1}$  は近年行なわれた WOCE (Culberson, 1991) 以降, 多くの観測データで統一的に用いられている。ここでは, これらの単位間での関係式を明らかにしておく。

$$O_2 [\text{ml L}^{-1}] = 22.392 \times 10^{-3} \times O_2 [\mu\text{-mol L}^{-1}]$$

$$O_2 [\mu\text{-mol L}^{-1}] = 44.660 \times O_2 [\text{ml L}^{-1}]$$

$$O_2 [\mu\text{-mol kg}^{-1}] = O_2 [\mu\text{-mol L}^{-1}] / \rho$$

ただし, 1 気圧  $0^\circ\text{C}$  における気体酸素 1 mol の体積は 22.392 [L] であり,  $\rho$  は海水の密度 [ $\text{kg L}^{-1}$ ] である。なお, 海水密度としてポテンシャル密度を用いる (Culberson, 1991; 気象庁, 1999)。

## 付録 C Optode 型 DO センサーに内蔵された水温センサー

### C.1 内蔵センサーによる計測結果とフロート観測水温との比較

Optode型 DO センサーは、単独での DO 測定を可能とするために、水温センサーを内蔵している。この水温センサーは DO センサーの耐圧容器内に格納されているため、センサー全体の熱容量のために応答が遅れる。この応答速度は 10 s (メーカー公称値) である。Körtzinger *et al.* (2005) は、この内蔵水温センサーによる水温計測値は、フロートの CTD による水温観測値より平均して  $0.03^{\circ}\text{C}$  低い (ただし 300 m 以深のみ) ことを指摘している。

Fig. 9 は、フロート WMO ID 4900651 で観測された CTD 水温値 (TCTD) と、DO センサー内蔵の水温センサーによる計測値 (TDO) を比較したものである。TDO の値は、TCTD に比べて深層でも  $0.02\sim 0.03^{\circ}\text{C}$  程度低く、その大きさは水温躍層では  $0.1^{\circ}\text{C}$  に達する場合がある。この水温のずれは、水温の鉛直勾配の大きさにほぼ比例している。Körtzinger *et al.* (2005) の報告に比べ、大きな水温差が認められるが、これはラブラドル海に比べ北太平洋の方が水温の鉛直勾配が大きいためである。実際、水温勾配が  $4^{\circ}\text{C} (100 \text{ dbar})^{-1}$  の時に予想される水温のズレは Körtzinger *et al.* (2005) では約  $-0.2^{\circ}\text{C}$  であるのに対し、本研究では  $-0.1^{\circ}\text{C}$  程度と、かなり小さい。

## C.2 フロートによる水温観測結果を用いた DO 計測値補正

また、Körtzinger *et al.* (2005) は、内蔵センサーによる水温値 ( $T_{\text{DO}}$ ) を CTD 観測値 ( $T_{\text{CTD}}$ ) で補正することにより、より正確な DO データが得られるだろうと述べているので、これを確認する。

DO センサーによる水温計測のズレを補正して求めた DO の値を、補正前と比較したものを Fig. 10 に示した。補正 DO 値は、補正前の値に比べて高めになるが、水温躍層よりも下層では  $0.1 \mu\text{-mol kg}^{-1}$  以下、躍層より浅い部分でも、海面付近を除けば、 $0.5 \mu\text{-mol kg}^{-1}$  を越えることはほとんどない。採水観測結果との比較で、深層でも  $5 \mu\text{-mol kg}^{-1}$  程度の負 DO バイアスが存在していたことを考えると、 $T_{\text{DO}}$  のズレは、DO の負バイアスの主要原因ではないと結論づけられる。

Optode型 DO センサー搭載フロートは、 $T_{\text{DO}}$  値を用いて DO を計算し、その結果のみを送信してくる。そのため、 $T_{\text{CTD}}$  を用いた補正を行なうには、DO センサーに固有のキャリブレーション・パラメータを用いた逆計算が必要となる。それを行なって得られる補正は、上記のように問題としている負バイアスに比べると無視できる程度の微小であるから、特に実施する必要性は乏しい。

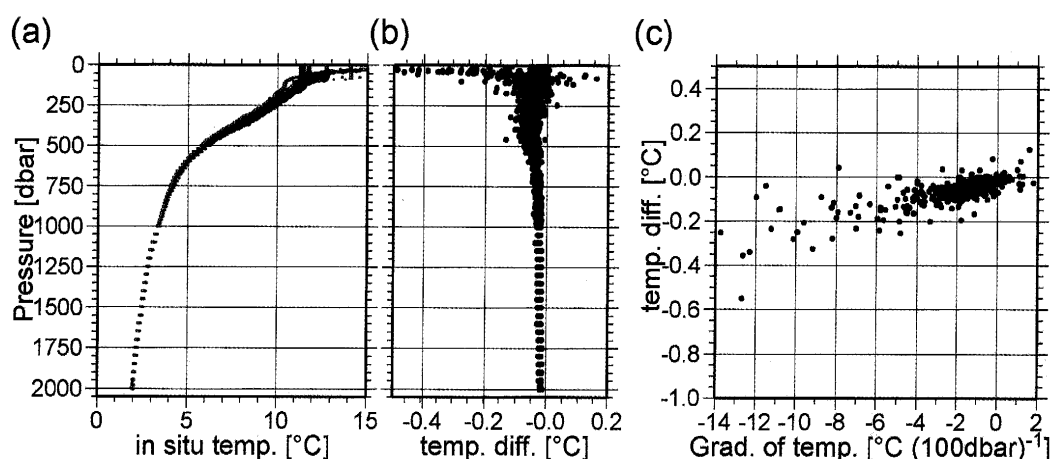
## 付録 D SBE 製 DO センサーに見られた低 DO 測定時の問題

SBE 製 DO センサーから伝送されるデータは、センサーの出力値 (単位は [Hz]) であり、陸上局にて DO に変換される (付録 A.1 を参照)。日本のフロートが展開されている領域 (DO が約  $20\sim 350 \mu\text{-mol kg}^{-1}$ ) では、このセンサー出力値は  $1,000\sim 6,000$  程度の値であり、DO 濃度におおよそ比例している。しかし、WMO ID 4900652 のフロートでは、この数値が 900 以下になるような極低 DO 環境 (DO に変換して約  $11.5 \mu\text{-mol L}^{-1}$  もしくは  $0.25 \text{ ml L}^{-1}$ ) を検出すると、10,000 を越えるような異常値 (例えば、63,652 Hz、DO 濃度に換算して  $7,000 \mu\text{-mol kg}^{-1}$ 、もしくは  $155 \text{ ml L}^{-1}$  など) を出力している。

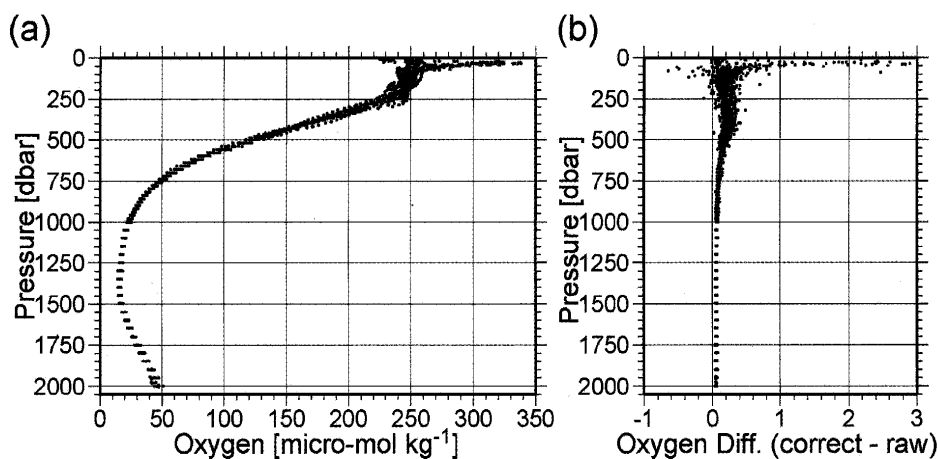
なお、SBE 製 DO センサーを搭載する他のフロートでは、このような低 DO を計測するような海域に展開されていないためか、この問題は発生していない。そのため、この問題が、SBE43 型センサーが極低 DO 環境にて引き起こす一般的な現象なのか、WMO ID 4900652 フロートに固有の問題なのかは明らかでない。

## 付録 E アルゴ計画における DO データの品質管理処理

DO センサーの出力値として、AANDERAA 社は  $\mu\text{-mol L}^{-1}$  ( $\mu\text{-M}$ )、SBE 社は  $\text{ml L}^{-1}$  を用いている。アルゴ計画では、DO の単位を  $\mu\text{-mol kg}^{-1}$  に統一するとの合意がなされている (Argo Data Management Team, 2003, 2006)。ただし、



**Fig. 9.** (a) Temperature measurements for the float of WMO ID 4900651 by CTD sensor ( $T_{CTD}$ , black) and temperature sensor built in Optode 3830 DO sensor ( $T_{DO}$ , red), (b) their difference ( $T_{DO} - T_{CTD}$ ), and (c) relation between their difference and vertical gradient of  $T_{CTD}$  [ $^{\circ}\text{C} (100 \text{ dbar})^{-1}$ ], respectively. Vertical axes of panels (a) and (b) are pressure.



**Fig. 10.** Correction of DO data for the float of WMO ID 4900651 by replacement from  $T_{DO}$  to  $T_{CTD}$ . (a) Raw DO data (red) and corrected DO data (black), and (b) their differences (Corrected DO - Raw DO, unit is [ $\mu\text{-mol kg}^{-1}$ ]).

GDACに格納されているデータの中には、DOセンサーの出力値 ( $\mu\text{-mol L}^{-1}$  等) がそのまま記載されているものも認められ、必ずしも統一されていない (2006年7月現在)。本研究では、明らかに異常と考えられるDOセンサー計測値 (付録D参照) を、欠損値として処理した後、全ての (準) 即時補正 (付録A参照) を行なった上で、解析に用いている。しかし、アルゴ計画においてDOデータの品質管理 (例えば、どのような即時補正を行ない、どのような品質チェックをかけるか、データ品質フラグをどのように設定する等) に関しては、現在まで国際的な取り決めがなされていない (Argo Data

Management Team, 2005)。そのため、GDACから取得可能なDOデータは、本報告で発見された (付録D参照) 以外の「異常」DO計測値についても、品質管理が施されないまま (つまりセンサー計測値のまま) のものである (2006年7月現在)。

なお2006年7月現在、日本で展開されたフロートのDOデータには、アルゴ計画における日本のNDAC (気象庁) により、独自のレンジチェックが施されている。そのため、付録Dに示した異常データの大半は欠損値として処理され、GDACから公開されている。

## Negative Bias of Dissolved Oxygen Measurements by Profiling Floats

Taiyo Kobayashi<sup>†</sup>, Toshio Suga<sup>†‡</sup>, and Nobuyuki Shikama<sup>†</sup>

### Abstract

We report the performance of dissolved oxygen (DO) measurements by profiling floats deployed in the North Pacific by Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology and Tohoku University. Compared with the shipboard bottle sampling observations at float deployments, DO measurements by floats have a negative bias, which is about 0–10  $\mu\text{-mol kg}^{-1}$  in the deep layer and exceeds 40  $\mu\text{-mol kg}^{-1}$  in the surface layer. These features are found in DO sensors made by both AANDERAA and Sea-Bird Electronics, and the bias is greater than their nominal measurement errors. Causes of the negative bias have not been determined yet (as of July 2006). DO consumption rate in the surface and intermediate layers is generally estimated at about 10–25  $\mu\text{-mol kg}^{-1} \text{y}^{-1}$  and 2–5  $\mu\text{-mol kg}^{-1} \text{y}^{-1}$  respectively; it is concluded that DO measurements by profiling floats with the current DO sensors should not be used for water mass analysis without further consideration of absolute accuracy. The DO sensors on our floats show little or no degradation in performance, but degradation has been reported elsewhere in the international Argo community. Thus, it is necessary to develop data correction procedures for DO data measured by profiling floats, and also to improve the DO sensor itself to enhance its measurement accuracy.

**Key words:** profiling float, dissolved oxygen measurements, sensor, Argo Project

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

(Received 2 May 2006; accepted 29 August 2006)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2006)

---

<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> Graduate School of Science, Tohoku University, 6-3 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8578, Japan