

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

小林 大洋^{*1} 伊澤 堅志^{*2} 井上亜沙子^{*3} 四竈 信行^{*1} 安藤健太郎^{*2}
高槻 靖^{*2} 中島 宏幸^{*3} 岡 英太郎^{*1} 細田 滋毅^{*2} 宮崎 基^{*1}
岩坂 直人^{*1} 須賀 利雄^{*1} 水野 恵介^{*2} 竹内 謙介^{*1}
JAMSTEC/FORSGCアルゴグループ^{*1, 2, 3}

2001年度に納入されたPROVOR型フロートに、計測塩分が0.02-0.06psu程度低塩側にずれる現象(塩分オフセット)が認められた。JAMSTEC/FORSGCアルゴグループでは、フロートメーカーやセンサーメーカーと共同して原因究明を進め、海面近くで計測用ポンプが作動していたために油などの汚染物質がセンサーに付着することが主な原因であることを突き止めた。その後PROVORは改修され、正常な塩分データが得られている。また、すでに実海域に展開されてしまった塩分オフセットPROVORのデータについても、遅延品質管理により修正が可能であることが明らかになっている。本稿は、塩分オフセット問題の解決に至る過程を記録したものである。

キーワード：アルゴ計画, PROVOR, 塩分オフセット, 塩分センサー

Solution of salinity-offset problem occurred in PROVOR type profiling float

Taiyo KOBAYASHI^{*4} Kenji IZAWA^{*5} Asako INOUE^{*6} Nobuyuki SHIKAMA^{*4}
Kentaro ANDO^{*5} Yasushi TAKATSUKI^{*5} Hiroyuki NAKAJIMA^{*6}
Eitarou OKA^{*4} Shigeki HOSODA^{*5} Motoki MIYAZAKI^{*4} Naoto IWASAKA^{*4}
Toshio SUGA^{*4} Keisuke MIZUNO^{*5} Kensuke TAKEUCHI^{*4}
all members of JAMSTEC/FORSGC Argo Team^{*4, 5, 6}

We noted a salinity offset ranging from -0.02psu to -0.06psu in the profile data of 34 PROVOR/MetOcean floats which we deployed between October 2001 and February 2002. After making an intensive effort to investigate the cause of salinity offset in cooperation with MetOcean, the float maker and SeaBird Electronics, the CTD sensor maker, we concluded that it was due to contamination of the conductivity cell mainly with oil slick on the sea surface and partly with the impurities contained in bio-fouling material attached to the cell. We improved the conductivity cell pump not to run near the sea surface and replaced the bio-fouling material with normal one for all the remained PROVOR floats. The improved PROVOR floats did not show any salinity offset when deployed. We showed that the salinity data observed by the unimproved PROVOR floats is corrected with the procedure of delayed-mode quality control for Argo floats.

Keywords : Argo Project, PROVOR, salinity offset, salinity sensor

* 1 地球観測フロンティア研究システム 気候変動観測研究領域

* 2 海洋科学技術センター 海洋観測研究部

* 3 マリン・ワーク・ジャパン(株)

* 4 Climate Variations Observational Research Program, Frontier Observational Research System for Global Change

* 5 Ocean Observation Research Department, Japan Marine Science and Technology Center

* 6 Marine Works Japan Ltd.

1. はじめに

2000年に開始されたアルゴ計画により、プロファイル(アルゴ)フロートを用いた海洋表・中層のリアルタイム観測網が構築されつつある(たとえば水野2000)。海洋科学技術センター(JAMSTEC)と地球観測フロンティア研究システム(FORSGC)では、共同してアルゴフロートの展開を行っている。用いるフロートは、毎年数社による入札によって決まる。2001年度にはPROVOR型フロートが用いられ、2001年10月以降に実海域に展開された。しかし、このPROVOR型フロートで観測された塩分プロファイルには、低塩側にほぼ一定量(0.02-0.06psu程度)のズレ(低塩オフセット)が認められ、その原因究明が進められた。この問題は、フロート本体やセンサーメーカーとの協力により、その原因が明らかにされ、現在は改修も終わっている。本稿は、この問題の一部始終をまとめたものである。

2. フロートの選定

日本アルゴ計画では、海洋観測網の構築に必要なフロートは、独自に開発したものを調達するのではなく、完成品を購入することになっている。JAMSTEC/FORSGCでは、アルゴ計画で使用するフロートとして、運用実績の良好なAPEX型を想定し、そのための準備を進めていた(たとえば伊澤ら2001)。しかし、2001年度のプロートを購入するにあたり、フロートの本数が70本程度に達することなどから、入札を実施することとなった。入札にはAPEXを製造している米国のWebb社とカナダのMetOcean社が応札した。

フランスをはじめとする欧州諸国では、フランスMartec社製のPROVORが比較的多く用いられており、良好な運用実績を挙げていた。そのため、この実績に基づきMartec社の子会社であるMetOcean社(カナダ)が応札したものである。

良好な実績を上げているとされたPROVOR(Martec社製)であるが、製作経験のあるものは全て、電磁誘導式の(FSI製)電気伝導度センサーを搭載した型であった。そのため、

MetOcean社のみならずMartec社にもSBE製の電極式電気伝導度センサーを扱った経験はなく、後で問題になるようなセンサー制御に関する技術的な蓄積もなかった。

また、既存のPROVORでは、取得するデータに関しても、その解像度が低く、観測層固定法(レベル観測)とは異なる観測スキーム(Chords法:特異点の最大数を決めておき、全データを取得した後に特異点で表現できるプロファイルと実際のプロファイルの差が全体に小さくなるように特異点を決めていく方法)を用いていた。

3. 投入されたPROVORの塩分オフセットの状況

以下では、PROVORで得られた塩分データの状況について、フロート投入直後に行われる品質管理の結果を基に、順を追って説明する(表2は2001年度に投入されたPROVORの一覧)。なお、フロート投入日は多少前後しているが、これはフロート制御用ROMの開発状況や、実験実施日、観測船の出航日・荷物搬入日や航海日程などによって制約が生じるためである。陸上班におけるフロートデータの検討は、おおむねこの順に従って進められた。また、フロートのデータが得られるのはおおむね投入後10日以降、比較の基準となるCTD観測データの入手はさらに遅くなることに注意。また、PROVORの型については表1を参照のこと。また、参考までに2000年度に展開されたAPEX型フロートによって得られた塩分データを、船舶観測と比較した結果を図1に示す。

図2: PROVOR試作機の動作試験の結果(2001年7月下旬、カリブ海ケイマン諸島付近)。フロートデータは、同海域の歴史的プロファイルとほぼ一致しており、(見当はずれな値をだしている訳ではないと言う意味で)問題はないものと判断される。

図3: JAMSTECの観測船「かいよう」のKY01-08航海で投入されたP1型PROVORの加速試験(観測周期を通常の10日より短縮(この場合は3日周期)することにより、短期間

表1 PROVORに搭載されたROMの一覧表。2001年度当時に用いられていた名前と本稿で定義したPROVORの型番。なお、型番はデコードソフトの番号に対応させており、P2.0とP2.1はデータ処理上同一のソフト(P2)が使われている。ESは緊急浮上(Emergency surfacing)を示す。

Table 1 List of ROM used for PROVOR. The "names" of ROM which were used in FY2001 and the corresponding type of PROVOR used in this report. The names of PROVOR types originate from the types of decode soft: the P2 type soft is used for the data decoding of P2.0 and P2.1 type float messages. ES means emergency surfacing.

"Name" of ROM	Type of PROVOR	Method of data sampling	Resolution of data	Data sampling at parking	Critical depth of ES	After ES	Pump operation near surface	Reset of pressure offset
Old ROM (旧ROM)	P1	Chords	0.01	Yes	Double 2100dbar	Surface drifting	Operation	No
New ROM (新ROM)	Not used	Level	0.001	No	(2200dbar)	Surface drifting	Operation	No
New New ROM (新新ROM)	P2.0	Level	0.001	Yes	2200dbar	Surface Drifting	Operation	No
New New New ROM (新新新ROM)	P2.1	Level	0.001	Yes	2200dbar	Sink to parking depth	Operation	No
New New New New ROM (新新新新ROM)	P3	Level	0.001	Yes	2200dbar	Sink to parking depth	Stop above 8dbar depth	Yes

表2 2001年度にJAMSTEC/FORSGCで投入したPROVOR型フロートの一覧表。WMO番号が斜字体のものは、3日周期の加速試験を実施。Referenceは塩分オフセット量の算出に用いた基準。Independent CTDは投入時に行ったCTD観測を意味し、斜字体のものは採水による塩分補正がなされていないこと示す。Status欄で、死亡の日付は最後にプロファイル観測を行った年月を示し、斜字体のものはこのあと海面漂流を続けたことを示す。また、WMO 2900315は2001年11月に海面漂流を始め、その後2002年3月にJAMSTEC観測船「みらい」により回収された。

Table 2 List of all PROVOR floats deployed by JAMSTEC/FORSGC in financial year of 2001. The floats with WMO IDs written by italic figures were used for acceleration test with 3 days observation cycle. Column of "Reference" shows the type of data used to evaluate salinity offset. "Independent CTD" represents shipboard CTD measurement at the float deployment, italic figure of which shows no bottle sampling for the CTD measurement calibration. Date of "dead" in the column of "Status" represents the date of the last profile measurement of the float, italic figure of which shows the float which drifted at sea surface after emergency surfacing before its death. It is noted that the float of WMO 2900315 began surface drifting in Nov. 2001 and then recovered by R/V Mirai of JAMSTEC in March 2002.

WMO ID	Date and location at deployment	Name of ship and cruise	Profile depth	Parking depth	Type	Serial Number	Reference	Degree of salinity offset	Status (as of Nov. 2003)
2900315	2001/10/12 34.00°N 144.00°E	Kaiyo KY01-08	2000	1900	P1	MT007	<i>Independent CTD</i>	0.02	<i>Recovered in Mar. 2002</i>
2900314	2001/10/12 34.00°N 143.99°E	Kaiyo KY01-08	2000	1500	P1	MT006	<i>Independent CTD</i>	0.02	Dead in Jun. 2002
5900146	2001/10/24 4.99°S 91.00°E	Mirai MR01-K05	2000	1500	P1	MT010	Independent CTD	0.02	<i>Dead in Dec. 2001</i>
5900145	2001/10/24 4.99°S 93.00°E	Mirai MR01-K05	2000	1500	P1	MT009	Independent CTD	0.02	Observing at sea
5900147	2001/10/26 4.97°S 94.98°E	Mirai MR01-K05	2000	1500	P1	MT011	Independent CTD	0.02	<i>Dead in Apr. 2002</i>
5900450	2001/12/02 23.84°N 150.07°E	Kaiyo KY01-11	2000	2000	P2.0	MT012	<i>Independent CTD</i>	0.02	<i>Dead in Dec. 2001</i>
5900449	2001/12/02 23.85°N 150.07°E	Kaiyo KY01-11	2000	2000	P2.0	MT008	<i>Independent CTD</i>	0.02	Dead in Aug. 2002
5900151	2001/12/04 15.50°N 176.00°W	Hakuho KH01-3	1900	1900	P1	MT014	Independent CTD	0.02	Observing at sea
5900150	2001/12/05 12.65°N 173.00°W	Hakuho KH01-3	1900	1900	P1	MT013	Local climatology	0.02-0.03	Observing at sea
5900153	2001/12/06 9.76°N 170.00°W	Hakuho KH01-3	1900	1900	P1	MT016	Local climatology	0.02-0.03	Observing at sea
5900152	2002/01/09 33.25°N 152.01°E	Mirai MR02-K01 leg1	2000	2000	P2.1	MT015	Nearby APEX float	0.02	Observing at sea
2900190	2002/01/09 33.12°N 155.01°E	Mirai MR02-K01 leg1	2000	2000	P2.1	MT018	Local climatology	0.02	Dead in Jul. 2003
5900156	2002/01/10 32.77°N 161.01°E	Mirai MR02-K01 leg1	2000	2000	P2.1	MT033	Nearby APEX float	0.02	Observing at sea
5900157	2002/01/10 32.38°N 164.01°E	Mirai MR02-K01 leg1	2000	2000	P2.1	MT034	Local climatology	0.02	Dead in Jun. 2003
2900183	2002/01/11 32.01°N 167.01°E	Mirai MR02-K01 leg1	2000	2000	P2.1	MT050	Local climatology	0.02	Dead in Jun. 2003
2900178	2002/01/11 31.63°N 170.04°E	Mirai MR02-K01 leg1	2000	2000	P2.1	MT029	<i>Independent CTD</i>	0.03	Dead in Jan. 2003
2900175	2002/01/12 31.00°N 174.01°E	Mirai MR02-K01 leg1	2000	2000	P2.1	MT025	Local climatology	0.02-0.03	Dead in Oct. 2003
2900176	2002/01/12 30.51°N 177.01°E	Mirai MR02-K01 leg1	2000	2000	P2.1	MT026	Local climatology	0.01-0.02	Dead in Mar. 2003
2900179	2002/01/13 30.00°N 179.99°E	Mirai MR02-K01 leg1	2000	2000	P2.1	MT030	Local climatology	0.01-0.02	Observing at sea
5900154	2002/01/24 0.01°N 160.00°W	Mirai MR02-K01 leg2	2000	2000	P2.1	MT031	Independent CTD	0.06	Dead in Jul. 2002
5900160	2002/01/25 0.01°S 163.52°W	Mirai MR02-K01 leg2	2000	2000	P2.1	MT037	Local climatology	0.05	Dead in May 2002
2900191	2002/01/27 0.04°S 170.08°W	Mirai MR02-K01 leg2	2000	2000	P2.1	MT019	Independent CTD	0.03	Observing at sea
5900158	2002/01/28 0.00°S 174.79°W	Mirai MR02-K01 leg2	2000	2000	P2.1	MT035	Local climatology	0.02-0.03	Dead in May 2002
5900451	2002/01/29 0.02°N 179.12°E	Mirai MR02-K01 leg2	2000	2000	P2.1	MT032	Local climatology	0.04	Observing at sea
5900162	2002/01/25 19.99°N 164.99°E	Keifu KS02-01	2000	2000	P2.1	MT040	Independent CTD	0.03-0.04	Dead in Feb. 2002
5900161	2002/01/26 16.97°N 164.97°E	Keifu KS02-01	2000	2000	P2.1	MT039	Independent CTD	0.01-0.02	Dead in Dec. 2002
2900180	2002/01/26 14.94°N 164.95°E	Keifu KS02-01	2000	2000	P2.1	MT047	Independent CTD	0.01-0.02	Dead in Oct. 2002
5900164	2002/01/27 12.97°N 164.96°E	Keifu KS02-01	2000	2000	P2.1	MT042	Independent CTD	0.02-0.03	Dead in Apr. 2003
5900163	2002/01/28 10.96°N 163.95°E	Keifu KS02-01	2000	2000	P2.1	MT041	Independent CTD	0.05	Dead in Oct. 2002
2900181	2002/01/29 7.96°N 163.96°E	Keifu KS02-01	2000	2000	P2.1	MT048	Independent CTD	0.01-0.02	Observing at sea
5900170	2002/01/29 29.94°N 137.06°E	Ryofu RF02-01	2000	2000	P2.1	MT052	Independent CTD	0.01-0.02	Dead in Jan. 2003
2900186	2002/01/29 29.94°N 137.07°E	Ryofu RF02-01	2000	2000	P2.1	MT060	Independent CTD	0.01-0.02	Recovered in Jun. 2002
5900171	2002/01/31 22.99°N 136.99°E	Ryofu RF02-01	2000	2000	P2.1	MT053	Independent CTD	0.03	Observing at sea
5900175	2002/01/31 22.99°N 136.99°E	Ryofu RF02-01	2000	2000	P2.1	MT057	Independent CTD	0.05	Observing at sea
5900173	2002/02/01 21.00°N 137.00°E	Ryofu RF02-01	2000	2000	P2.1	MT055	Independent CTD	0.03	Observing at sea
5900172	2002/02/02 18.98°N 136.97°E	Ryofu RF02-01	2000	2000	P2.1	MT054	Independent CTD	0.02	Dead in Jul. 2002
2900184	2002/02/02 17.01°N 137.00°E	Ryofu RF02-01	2000	2000	P2.1	MT058	Independent CTD	0.02-0.03	Observing at sea
2900185	2002/02/03 14.99°N 137.00°E	Ryofu RF02-01	2000	2000	P2.1	MT059	Independent CTD	0.02-0.03	Observing at sea
2900319	2002/03/28 32.07°N 140.96°E	Mirai MR02-K02	2000	2000	P3	MT049	Independent CTD	--	Dead in Dec. 2002
2900318	2002/03/28 32.07°N 140.96°E	Mirai MR02-K02	2000	2000	P3	MT044	Independent CTD	--	Dead in Nov. 2002
2900317	2002/03/28 32.07°N 140.95°E	Mirai MR02-K02	2000	2000	P3	MT017	Independent CTD	0.01	Dead in Apr. 2002
2900316	2002/03/28 32.07°N 140.95°E	Mirai MR02-K02	2000	2000	P3	MT051	Independent CTD	<0.01	Dead in Dec. 2002

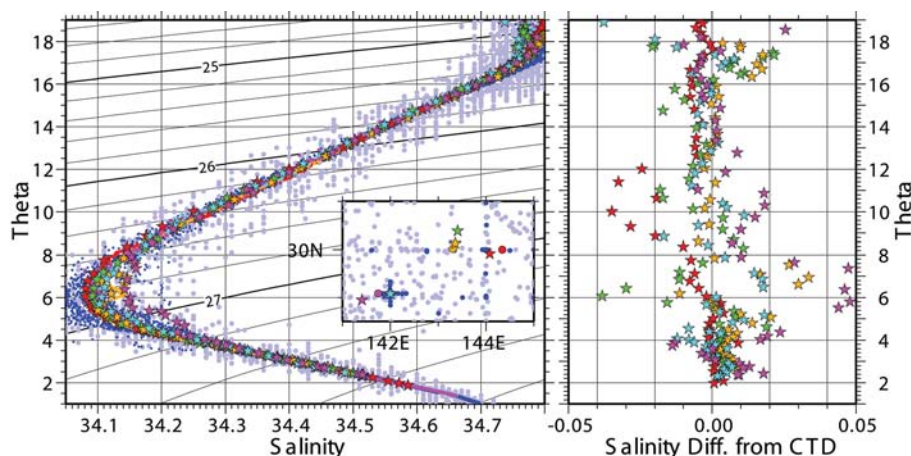


図1 2000年度に展開のAPEX型フロートで得られた塩分データと船舶CTD観測の比較。星印はフロートによる観測データを、丸印は基準となる船舶観測データ(フロート投入時のCTD観測および検証観測)を示し、同色のもの同士を比較する。薄青および紺の点は、図中に示した海域における品質管理済気候学データ(HydroBaseおよびWOCE-CTD)を示す。WMO 29032は緑および青、29033は黄色および紫、29034は赤で示す。

Fig. 1 The results of salinity data comparison with nearby shipboard CTD measurements and APEX type floats deployed in FY2000. The float of WMO ID 29032 is shown by green and blue, WMO 29033 is by yellow and purple, WMO 29034 is by red. The stars represent float data and the same colored circles represent the corresponding reference of the nearby shipboard CTD data, which are obtained mostly at the float deployments. The light-blue and dark-blue dots show the quality-controlled historical data originated from HydroBase and WOCE-CTD in the shown region, respectively.

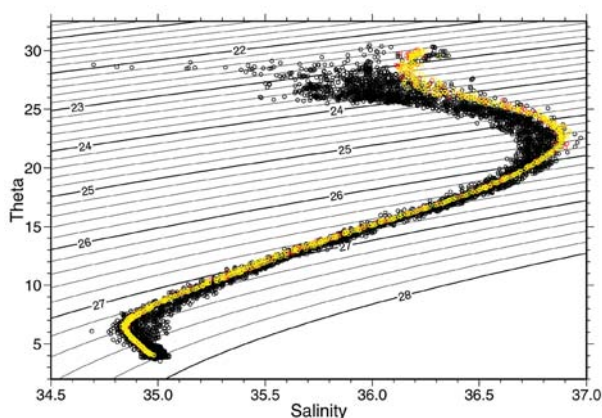


図2 PROVOR試作機の動作試験で得られたデータ。赤および黄色は沈降時および浮上時に測定されたデータ。黒は試験海域(18-20° N, 60-86° W)における品質管理済気候学データ。

Fig. 2 Data measured by the prototype of PROVOR in the field test around Cayman Islands. Red and yellow show the data measured in decent and ascent of the float, respectively. The black circles represent the quality-controlled historical data in the test field (18-20° N, 60-86° W).

で多くのプロファイルを得て、問題を洗い出そうとする実験的フロート展開を指す)の結果(2001年10月12日投入, 日本東方沖)。投入時のCTD観測結果(塩分検定なし)と比較して、0.02-0.03psu程度低塩であるが、両者ともほぼ同程度ずれているためCTDデータに問題がある可能性もある。また、MetOcean社での耐圧試験の際にセンサーに付いた汚れが

原因でズレが生じている可能性もある。

図4: JAMSTECの海洋地球研究船「みらい」のMR01-K05航海で展開されたP1型PROVORの結果(2001年10月24~26日投入, 東部インド洋: 9月20日関根浜出航, 「かいよう」KY01-08航海での加速試験の結果をみて投入決定)。PROVORで計測された塩分は投入時のCTD観測(塩分検定済)と比べて0.02psu程度低塩である。しかし、同時に展開されたAPEX型フロートのデータも同じ程度のズレが認められるので、投入海域の時空間的な水塊変動が深層でも大きいことに起因するのではないかと判断される。積み込み時にすでにセンサーが汚れていた可能性もある。

図5: 東京大学海洋研究所の研究船「白鳳丸」のKH01-3航海で展開されたP1型PROVORの結果(2001年12月4~6日投入, 中部太平洋: 積み込み11月20日)。PROVORで計測された塩分はCTD観測(塩分検定なし速報値)と比較して0.02psu程度低塩である。水塊構造の空間変化が大きく、気候値から判断するのは難しいか。

図6: JAMSTECの観測船「かいよう」のKY01-11航海で投入されたP2.0型PROVORの加速試験(3日周期)の結果(2001年12月2日投入, 日本南東沖)。投入時のCTD観測データ(塩分検定なし)と比較して0.02psu程度低塩である。CTDデータにズレがある可能性もある。

図7および8: 「みらい」がMR02-K01航海(leg1)にて展開したP2.1型PROVORの結果(2002年1月9~13日投入, 中部太平洋: 荷物搬入1月6日)。投入時のCTD観測データ(塩分検定済)および投入フロートの近傍のAPEX型フロートデータと比較して、0.02-0.03psu程度の低塩が認められる。

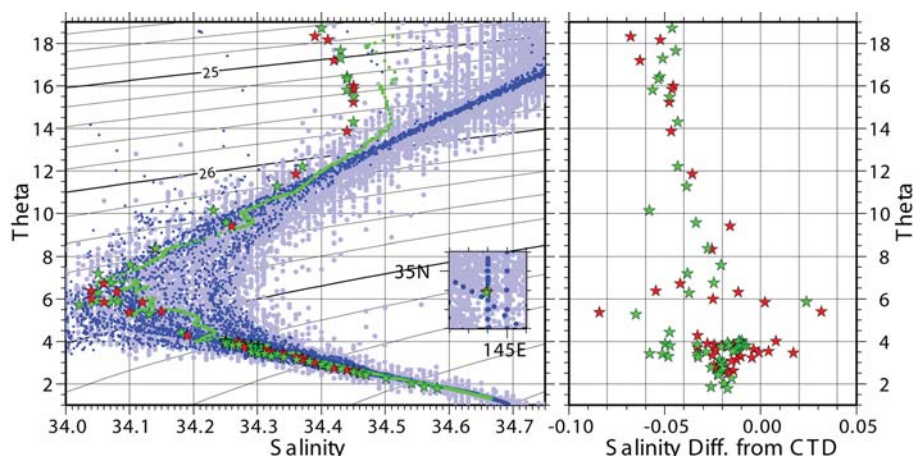


図3 「かいよう」KY01-08航海で投入されたP1型PROVORの加速試験の結果。WMO 2900315を赤、2900314を緑で示す。

Fig. 3 Comparison results of acceleration field test of P1 type PROVORs deployed by R/V Kaiyo KY01-08. WMO 2900315 and 2900314 are shown by red and green, respectively. Otherwise, as for Fig. 1.

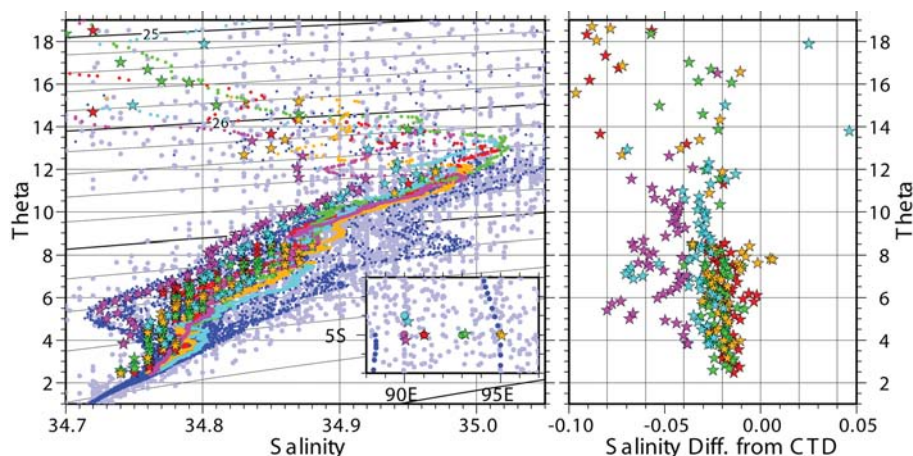


図4 「みらい」MR01-K05航海で展開されたP1型PROVORの結果。WMO 5900146を赤、5900145を緑、5900147を橙で示す。また同航海で展開されたAPEX型フロート(WMO 5900143および5900144)のデータを青および紫で示す。

Fig. 4 Comparison results of P1 type PROVORs deployed by R/V Mirai MR01-K05. WMO 5900146, 5900145 and 5900147 are shown by red, green, and orange, respectively. Blue and purple represent the data of APEX type floats, WMO 5900143 and 5900144, deployed in the same cruise. Otherwise, as for Fig. 1.

図9:「みらい」がMR02-K01航海 (leg2) にて展開したP2.1型PROVORの結果 (2002年1月25～29日投入, 中部赤道太平洋: 荷物搬入1月6日)。投入時のCTD観測データ (塩分検定済) と比較して, 最大で0.06psu程度の低塩が認められる。低温部分では東西方向の水塊変化が小さいため, 全てのフロートで塩分オフセットが生じていることが分かる。

図10: 気象庁観測船「啓風丸」がKS02-01航海にて展開したP2.1型PROVORの結果 (2002年1月25～29日, 165°E定線: 荷物搬入1月6日)。全てのフロートで0.01-0.02psu程度以上の塩分オフセットが生じており, その値は最大で0.05psuに達する。基準となるCTD観測データは全て塩分検定済み。

図11および12: 気象庁観測船「凌風丸」がRF02-01航海にて展開したP2.1型PROVORの結果 (2002年1月29日～2月3日, 137°E定線)。全てのフロートで0.01-0.02psu程度以上の塩分オフセットが生じており, その値は最大で0.06psuに達する。基準となるCTD観測データは全て塩分検定済み。

4. 塩分オフセット問題の発見が遅れた理由

塩分オフセットの発生原因を考えると, この問題はかなり以前から生じていたと考えられる。しかし, その発見が遅れたために問題のあるフロートを30機以上も展開してしまった。その原因は, 以下の事項が複合的に絡んでいたためと考えられる。

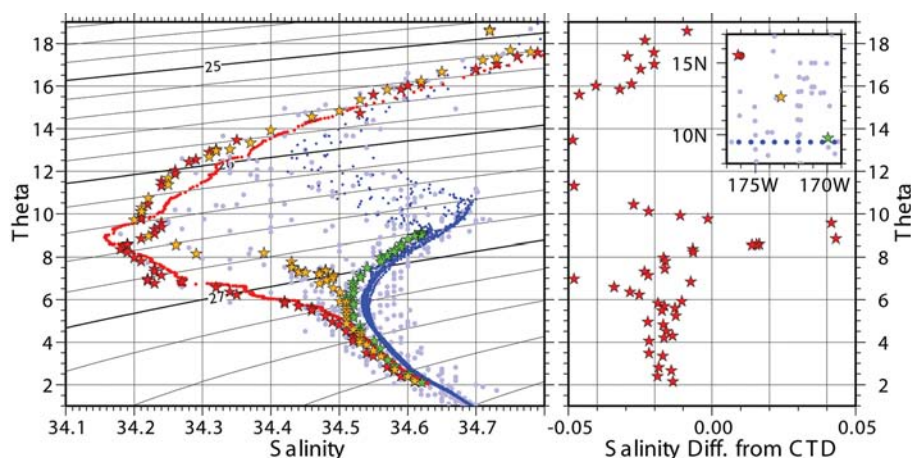


図5 「白鳳丸」KH01-3航海で展開されたP1型PROVORの結果。WMO 5900151を赤、5900150を橙、5900153を緑で示す。

Fig. 5 Comparison results of P1 type PROVORs deployed by R/V Hakuho-maru KH01-3. WMO 5900151, 5900150, and 5900153 are shown by red, orange, and green, respectively. Otherwise, as for Fig. 1.

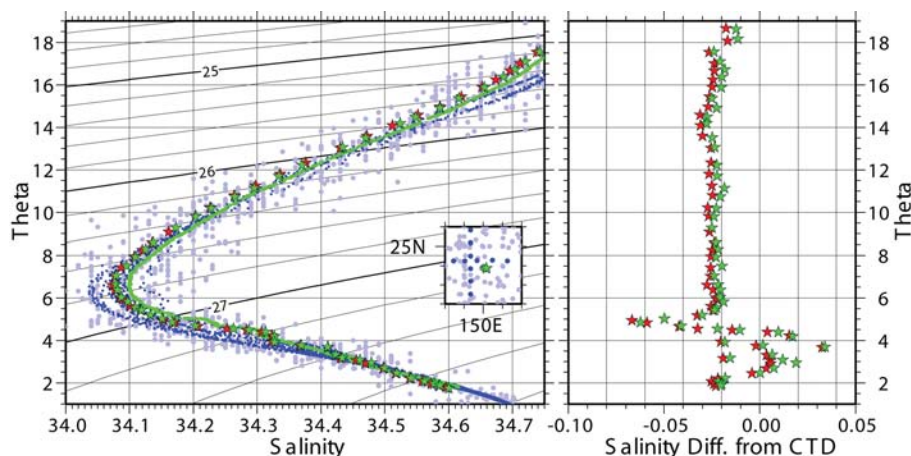


図6 「かいよう」KY01-11航海で投入されたP2.0型PROVORの加速試験の結果。WMO 5900449を赤、5900450を緑で示す。

Fig. 6 Comparison results of the acceleration field test of P2.0 type PROVORs deployed by R/V Kaiyo KY01-11. WMO 5900449 and 5900450 are shown by red and green, respectively. Otherwise, as for Fig. 1.

1. 初期型PROVOR(旧ROM搭載型:P1型)の塩分測定分解能が0.01psuであり、塩分オフセットの発生を十分な確度を持って認識するに至らなかった。
2. 初期型PROVORは観測にChords法を採用していた。そのため、初期の段階では、この手法を観測層固定法(レベル観測)に変更することに労力が割かれた。また、Chords法で得られるデータは、(鉛直変化の少ない)深層部分のデータ数が少なくなり、塩分オフセットの検証に必要なデータが十分にそろわなかった。
3. フロート納入後に行われたJAMSTEC/FORSGCによる電気伝導度センサー検定結果に異常が見られなかった。また、前年度(2000年度)より行われていた投入前センサー検定の経験から、SBE41型(PROVOR搭載の

SBE41CPはこの改良型)は良好な結果を示すことが知られていた(井上ら2001)。

4. フロート投入時に行ったCTD観測では、塩分検定がなされなかった(もしくは検定結果の入手が非常に遅れた)。そのため、CTD観測とフロート観測とに塩分差が見いだされたが、CTD側のズレも否定できず、確証を得るに至らなかった。
5. 2001年10月のインド洋でのフロート展開時には、補正済みのCTD観測データに比べてフロートデータが低塩であるとの認識を持つに至った。しかし、フロート展開域が水塊の時空間的な変動が大きい海域であることに加え、同時に展開されたAPEX型フロートのデータも同じようにずれていたため、(議論はなされたが)

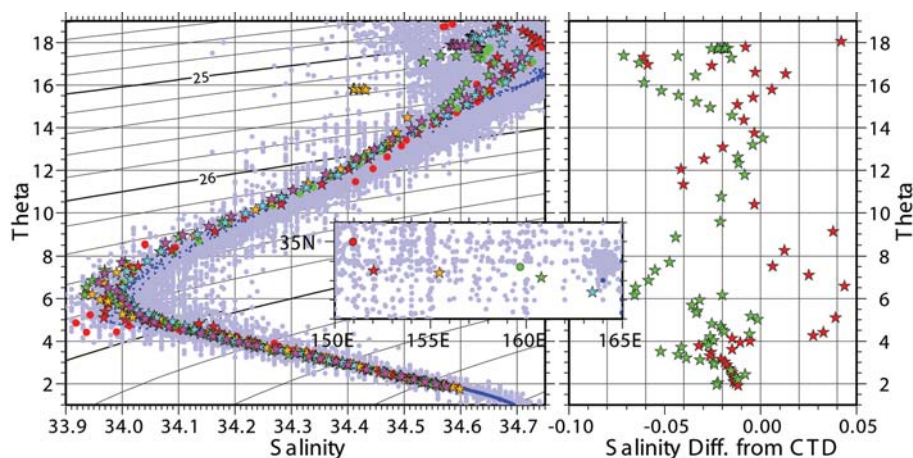


図7 「みらい」MR02-K01航海 (leg1) で展開されたP2.1型PROVORの結果。WMO 5900152を赤、2900190を橙、5900156を緑、5900157を青で示す。比較の基準は時空間的近傍のAPEX型フロートのデータで、赤丸はWMO 29049の31回目、緑丸は29043の34回目浮上時のデータ。

Fig. 7 Comparison results of P2.1 type PROVORs deployed by R/V Mirai MR02-K01 leg 1. WMO 5900152, 2900190, 5900156, and 5900157 are shown by red, orange, green, and blue, respectively. Reference data originate from the data measured by nearby APEX type floats, 31st profile of WMO 29049 (red) and 34th profile of WMO 29043 (green), respectively. Otherwise, as for Fig. 1.

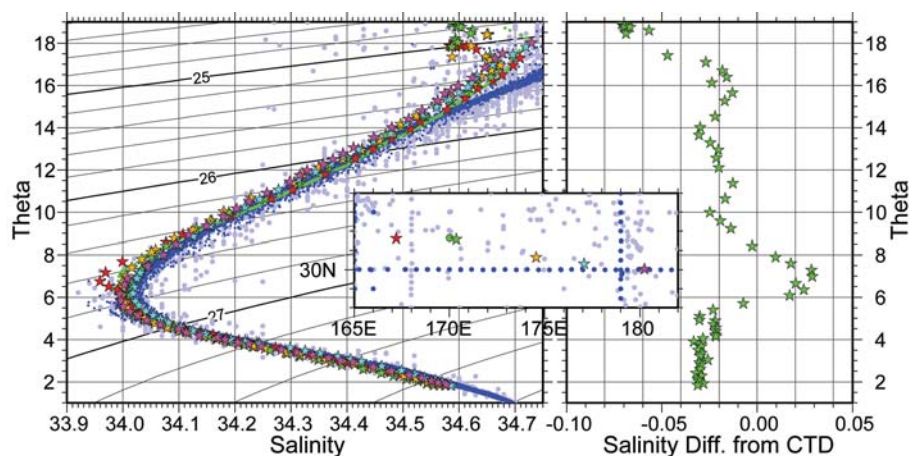


図8 「みらい」MR02-K01航海 (leg1) で展開されたP2.1型PROVORの結果。WMO 2900183を赤、2900178を緑、2900175を橙、2900176を青、2900179を紫で示す。

Fig. 8 Comparison results of P2.1 type PROVORs deployed by R/V Mirai MR02-K01 leg 1 (continued). WMO 2900183, 2900178, 2900175, 2900176, and 2900179 are shown by red, green, orange, blue, and purple, respectively. Otherwise, as for Fig. 1.

塩分オフセットが生じているとの確証を得ることができなかった。

6. 1および2の問題、および緊急浮上後の海面漂流に対処するために、フロートのROM交換が非常に頻繁に行われた(表1参照)。そのため、塩分オフセットの発生原因の特定に混乱が生じた。
7. PROVORに搭載されていた電極式CTDセンサーSBE41CPは、前年度以来使用していたSBE41の改良・高性能型であるとの認識はあった。しかし、データ取得のための制御方法として、全く異なる方法が新たに追加され、さらにPROVORにその方法が用いられ

ていることに気づかなかった。

SBE41 シリアル通信のみ

シリアル通信：信号受信後、測定を行い、電源を切る。3種類の入力信号があり、その違いによりポンプ回転の有無、測定項目を制御可能。

SBE41CP 複数の制御方法

シリアル通信：SBE41と同じ。

電圧信号：指定ピンに一定以上の電圧がかかっている間、ポンプを回転させ、データを連続取得 (P2.1型以前のPROVORはこの方式を採用)。

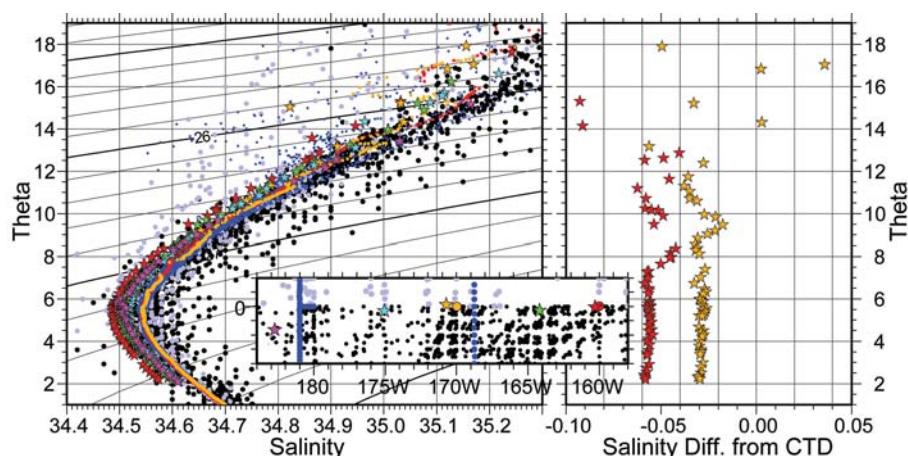


図9 「みらい」MR02-K01航海(leg2)にて展開されたP2.1型PROVORの結果。WMO 5900154を赤、5900160を緑、2900191を橙、5900158を青、5900451を紫で示す。黒は品質管理を施していない気候学的データ(WOD98v2)。

Fig. 9 Comparison results of P2.1 type PROVORs deployed by R/V Mirai MR02-K01 leg 2. WMO 5900154, 5900160, 2900191, 5900158, and 5900451 are shown by red, green, orange, blue, and purple, respectively. The black dots represent the raw historical data in WOD98v2. Otherwise, as for Fig. 1.

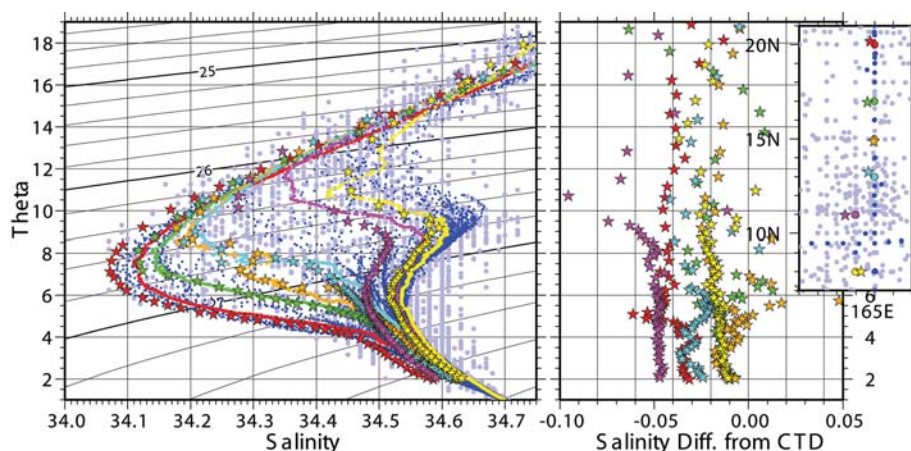


図10 「啓風丸」KS02-01航海にて展開されたP2.1型PROVORの結果。WMO 5900162を赤、5900161を緑、2900180を橙、5900164を青、5900163を赤紫、2900181を黄色で示す。

Fig.10 Comparison results of P2.1 type PROVORs deployed by R/V Keifu-maru KS02-01. WMO 5900162, 5900161, 2900180, 5900164, 5900163, and 2900181 are shown by red, green, orange, blue, purple, and yellow, respectively. Otherwise, as for Fig. 1.

5. 塩分オフセットの発生原因

MetOcean社およびSeaBird社との協力により、PROVOR型フロートに発生した塩分オフセットの原因は次の2点であることが明らかとなった。

- ・海面付近での水温・電気伝導度計測用ポンプの起動(主)
- ・高圧下での生物付着防止剤に含まれた不純物の漏れ(副)

以下ではそれぞれの原因について、その詳細および問題の解決法について述べる。

5.1. 海面付近での計測用ポンプの起動

当初より、PROVORは、海面漂流中に圧力を計測する設定になっていた。P2.1型以前のPROVORでは、搭載センサーSBE41CP(電極式)の制御方法として電圧信号方式を用いていたため、データ取得中は常に計測用のポンプが作動する仕組みであった。そのため、フロート投入直後の海面漂流中の圧力計測時に、海水とともに海面の汚濁物(油など)が計測用ポンプによってセンサー内部に送り込まれていた。その結果、電気伝導度センサーの計測セル内部が汚染され、塩分オフセットが生じてしまった。

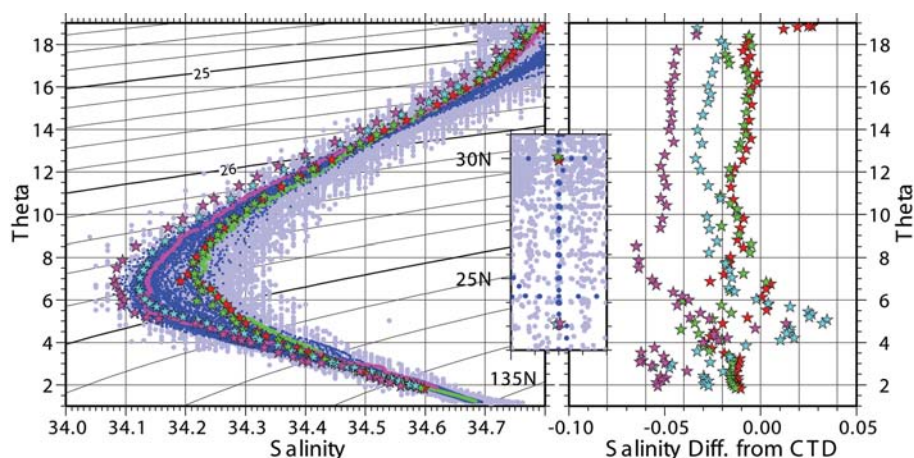


図11 「凌風丸」RF02-01航海にて展開されたP2.1型PROVORの結果。WMO 5900170を赤、2900186を緑、5900171を青、5900175を紫で示す。

Fig.11 Comparison results of P2.1 type PROVORs deployed by R/V Ryofu-maru RF02-01. WMO 5900170, 2900186, 5900171, and 5900175 are shown by red, green, blue, and purple, respectively. Otherwise, as for Fig. 1.

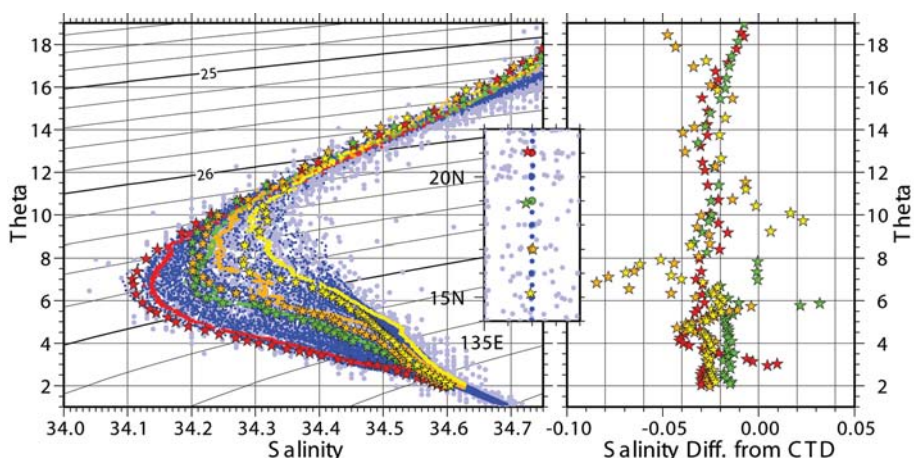


図12 「凌風丸」RF02-01航海にて展開されたP2.1型PROVORの結果。WMO 5900173を赤、5900172を緑、2900184を橙、2900185を黄色で示す。

Fig.12 Comparison results of P2.1 type PROVORs deployed by R/V Ryofu-maru RF02-01 (continued). WMO 5900173, 5900172, 2900184, and 2900185 are shown by red, green, orange, and yellow, respectively. Otherwise, as for Fig. 1.

そこで、圧力センサーが8dbar以浅を感知した時点で計測用ポンプを止めるように制御プログラムを変更する(P3型)ことにより、この問題を解決した。

5.2. 高圧下での生物付着防止剤に含まれた不純物の漏れ (ワシントン大からの情報)

電気伝導度センサーの測定精度劣化の原因として、センサー内部に生物が付着・成長することにより、センサー感度が変化することが考えられている。これを防止するため、電気伝導度センサーには少量の生物付着防止剤が使用されている。今回の場合、生物付着防止剤に含まれていた不純物が、フロートの滞在深度滞在時の高圧下(約200気圧)

において漏れ出し、センサー部分を汚染していることが考えられる。APEX型フロートの場合、投入前の重量調整により汚染が洗い落とされてしまうが、投入以前に高圧にさらされることのないPROVOR型では塩分オフセットが目立つのではないかと考えられている。

そのため、2002年6月に手元にある全てのPROVORのセンサーを、不純物を含まない生物付着防止剤を使用したものに交換することにより、この問題を回避した。なお、交換されたセンサーは、その後MetOcean社およびSBE社にて調査されたが、この不純物によるセンサー汚染の問題は確認することができなかった。そのため、大きな塩分オフセットが生じたフロートでは、この問題が関係していると推測される。

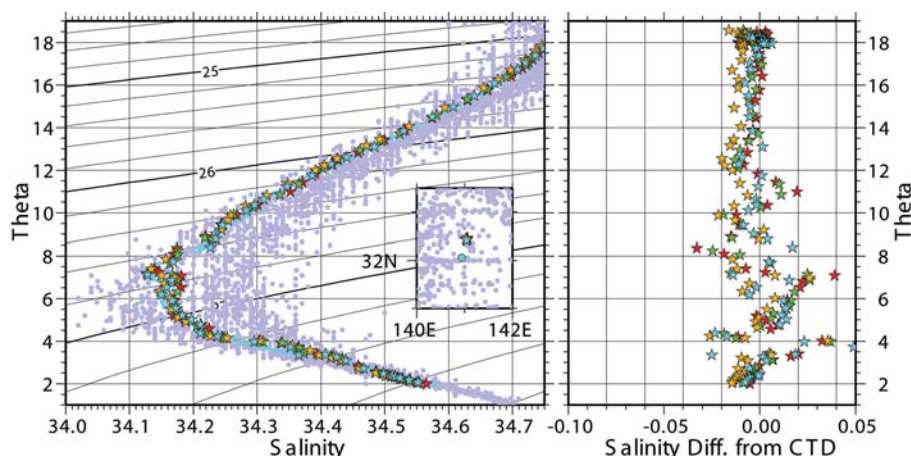


図13 「みらい」MR02-K02航海にて行われたP3型PROVORの加速試験の結果。WMO 2900319を赤, 2900318を緑, 2900317を橙, 2900316を青で示す。

Fig.13 Comparison results of acceleration field test of P3 type PROVORs deployed by R/V Mirai MR02-K02. WMO 2900319, 2900318, 2900317, and 2900316 are shown by red, green, orange, and blue, respectively. Otherwise, as for Fig. 1.

6. ハードウェア改良とその後の経過

フロートの制御ソフトを改良したP3型PROVORは、検証のための加速試験(3日周期)を早急に行うために、2002年3月に「みらい」の寄港地のグアムに空輸され、グアムからの帰途、日本南東沖に投入された(2002年3月28日)。投入されたPROVORは全4機である。また、比較のために、フロート投入時にCTD観測を行った。図13は投入時CTD観測結果(塩分検定済)と第1回目のフロート浮上時に測定された塩分データを比較したものである。CTD観測と比較してやや低塩気味ではあるが、その偏差は約0.01psu以内に収まっており、塩分オフセットは生じていないものと判断された。なお、これ以降、30機以上のPROVOR型フロートが展開されているが、塩分オフセット問題は生じていない。

7. 遅延品質管理による塩分オフセットデータの修正の可能性

フロートを改修したことにより、塩分オフセットを示す新たなフロートの展開はなくなった。しかし、塩分オフセットを示すデータは多数取得されているし、2003年11月末現在においても10機以上の改修前PROVORが観測を続けている。これらのデータを修正することができなければ、本当の意味での塩分オフセット問題の解決にはならない。

図14および15は、塩分オフセットが認められるP2.1型PROVORのデータ(啓風丸KS02-01航海および凌風丸RF02-01航海展開分)に、Wong et al. (2003)の手法による遅延品質管理を施し、塩分値を修正したものである。どちらの結果も、投入時に行われたCTD観測結果とほぼ0.01psu以内で一致しており、アルゴ計画の目標とする塩分精度0.01psuの範囲ではデータ修正が十分に可能である事を示す。

また、塩分オフセットの発生原因は、Wong et al. (2003)で想定されている電気伝導度センサー感度の劣化と、理論的にも整合しているため、ほぼ例外なく修正が可能である

と思われる。なお、ここで示している遅延品質管理(塩分修正)結果は、暫定的なものであり、今後パラメータなどの調整を進めることにより、さらに精度の高いデータが得られるものと期待される。

なお、遅延品質管理による塩分データの修正は、歴史的データに基づいて行われる。そのため、歴史的データの少ない海域では遅延品質管理は困難になり、その精度も低下する。塩分オフセットデータの修正が精度良く行えるのは、2001年度のPROVOR展開域が北太平洋および東部インド洋に限られていたことが幸いしている。従って、今後同様の問題が南大洋などの歴史的データが少ない海域で発生した場合、その修正は非常に難しいものになることが予想される。

8. まとめ

本稿でまとめた塩分オフセット問題は、短期的に見ればアルゴ計画(特に日本)の進展を妨げたといえる。実際に2001年度は、事前のフロート展開計画は大幅な修正を余儀なくされ、年間のフロート展開数は50機程度にとどまった。加えて、この問題の対処と解決に、時間と労力の大半をつぎ込まざるを得なかったと言っても過言ではない。

しかし、研究者とフロートおよびセンサー供給者が、国境を越えて密接に連絡を取り合うことにより、この問題の解決に協力した。それだけでなく、この情報を他の研究機関にも公開することにより、更なる問題の発生を未然に防いでいる。このことは、アルゴ計画における国際協力体制が健全であることを示す好例といえよう。加えて、アルゴ計画で築かれた国際的な連携・協力体制は、様々なトラブル(たとえば、今回報告の塩分オフセット問題、初期のAPEX型フロートの漏電問題、Druck社製圧力センサーの異常)に対応を続けるうちに、より強固なものになりつつある。また、アルゴ計画の目指す「世界海洋フロート観測網」の頑丈性を考えた

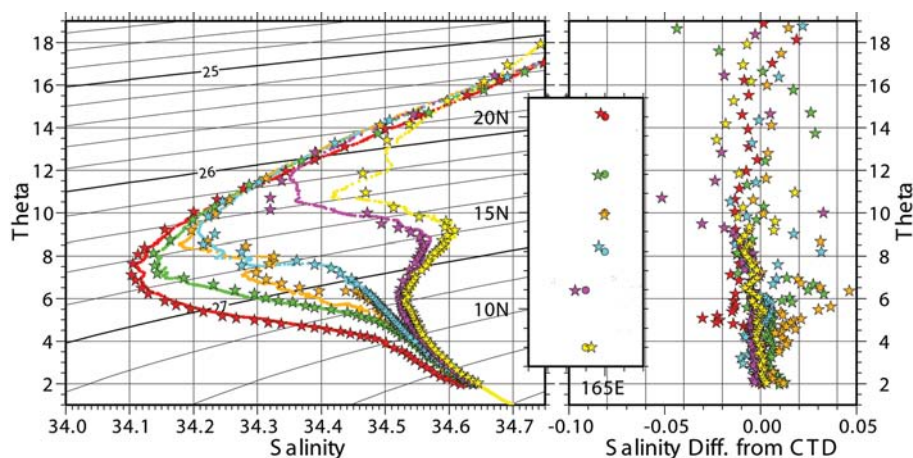


図14 遅延品質管理(暫定)を施した啓風丸KS02-01航海で展開されたP2.1型PROVORの塩分データ。色は図10に同じ。

Fig.14 Delayed-mode quality controlled salinity data of P2.1 type PROVORs deployed by R/V Keifumaru KS02-01 (provisional). The colors are similar as for Fig. 10.

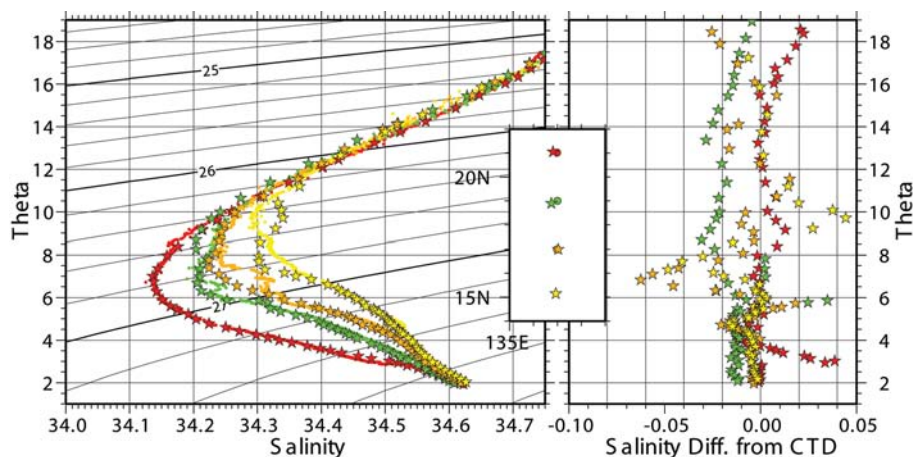


図15 遅延品質管理(暫定)を施した凌風丸RF02-01航海で展開されたP2.1型PROVORの塩分データ。色は図12に同じ。

Fig.15 Delayed-mode quality controlled salinity data of P2.1 type PROVORs deployed by R/V Ryofumaru RF02-01 (provisional). The colors are similar as for Fig. 12.

とき、複数の優秀なフロートメーカーが存在することは、計画の順調な発展には有利に働くだろう。つまり、アルゴ計画の長期的な発展を考えた場合、今回の問題の発生とその解決は、「雨降って地固まる」と言えるのではないだろうか。

また、本問題の原因を追及し、その原因を特定する上で、我々は国際的にも非常に重要な役割を果たした。これは、JAMSTEC/FORSGCのアルゴグループが、ハードウェアについても高い知見を持つフロート運用班と、得られたデータに検討を加えるデータ管理班の2つのサブ・グループを持っていること、その両者が高い次元で一体となって活動していること、の2つがあって初めて可能となったと言える。また、この問題の解決を通じて、JAMSTEC/FORSGCの実力の高さを世界的に示すことができた。そのことだけでも大きな収穫があったと言えるか。

謝辞

塩分オフセット問題の解決には、JAMSTEC/FORSGCアルゴグループ全員の協力が不可欠であった。また、Swinamer氏をはじめとするMetOcean社の技術陣や、原裕英氏など三興通商の方々、Larson氏らSeaBirdの技術陣の努力も欠かすことができない。さらに、フロートの回収に協力して頂いた、末広孝吉主任調査官をはじめとする海上保安庁海洋情報部の方々に感謝いたします。

付録 落札以降のJAMSTEC/FORSGCの活動状況およびフロートの開発状況

以下は、MetOcean社の落札(2001年5月上旬)以降、JAMSTEC/FORSGCにおけるPROVORに関係した活動のうち主なものを、時間を追って記録したものである。

2001年

- 5月上旬： 2001年度フロートの入札。MetOcean社が落札。
- 5月29日： MetOcean社との打ち合わせ。フロートの開発スケジュール等の説明がなされる(フロート運用班他が出席)。
MetOcean社による説明:(試作機で)2回観測を行う。FSI付きは故障したが出力あり, SBE付きは修理中。6月中に実験再開の予定。生産試作機5本のうち1本を日本へ。1本は実地試験。※当初PROVORはFSI搭載型のみで, SBE搭載型はJAMSTEC向け仕様。そのための設計変更と試験が必要。
- 5月30日： MetOcean社との打ち合わせ。フロートの技術的な問題点の改善を要求(四竈, 伊澤, 宮崎が出席)。
- 6月19日： カリブ海ケイマン島周辺にてMetOcean社がFSIセンサー搭載型とSBEセンサー搭載型のPROVOR試作品を投入。FSI型は良好。SBE型は失敗。
- 6月下旬： SBE搭載型PROVORの動作試験のため, 試作フロートの投入をFreeland博士(IOS, カナダ)に依頼(その後, 紆余曲折を経て船員のストライキのため中止:9月)。
- 7月23～29日： カリブ海ケイマン諸島周辺海域にてPROVOR試作機の実海域加速試験を実施(四竈立ち会い)。
- 7月30日～8月1日： PROVOR開発状況を視察するためMetOcean社を訪問(四竈, 伊澤)
- 8月28日： 第1回目15本の納品。全て旧ROM搭載のPROVOR(以下P1型)。
- 9月頃： ケイマン島周辺海域の試験結果でPROVORの内部時計の問題を指摘(高槻)。このほか, 浮上沈降速度が遅くなる, CTDデータが送られてこないなどのトラブルが生じる。
- 9月13日： ケイマン島周辺海域で試験中の試作機が海面漂流を始める。
- 10月13日： JAMSTECの観測船「かいよう」のKY01-08航海で, 2本のP1型PROVORを日本東方沖に投入(伊澤立ち会い)。3日周期の加速試験を実施。
- 10月24～26日： JAMSTECの海洋地球研究船「みらい」のMR01-K05航海においてインド洋にP1型PROVORを3本投入(「かいよう」KY01-08航海での結果をみて投入決定, 竹内, 水野, 宮崎立ち会い)。
- 11月2日頃： MetOcean社による制御プログラムの改良が行われる(新ROM)。深層漂流中のドリフトデータを取得しないことが判明し, 修正(新新ROMの開発)を要請。
- 11月上旬～： 納入済みPROVORのセンサー検定が行われる。センサーに塩分オフセットは認められず。
- 11月15日頃： 三興通商により納入済みフロートのROM交換が行われる(新ROM)。しかし, ROM交換後に通信エラーが生じたこと(その後回復), ドリフトデータを取得できないこと, 使用機会がないこと(白鳳丸での投入は可能だが, この時点ですでに新新

ROMへの換装が予定されており, 結果が生かされることはない)等の理由により, 元(旧ROM)に戻す。

- 11月20日： 東京大学海洋研究所の研究船「白鳳丸」KH01-3航海用のフロート(P1型PROVOR)の積み込み。
- 11月下旬： MetOcean社にて新新ROMが完成する。
- 11月27日： 第2回目15本の納品。納品直前に, むつ研にてMetOcean社の技術者により, 搭載ROMが新ROMから新新ROMへ交換され, P2.0型PROVORとして納品される。
- 12月2日： JAMSTECの観測船「かいよう」のKY01-11航海で, 2本のP2.0型PROVORを投入(高槻立ち会い)。3日周期の加速試験を実施。
- 12月4～6日： 東京大学海洋研究所の観測船「白鳳丸」のKH01-3航海で3本のP1型PROVORを中部太平洋へ展開(KY01-11航海でのP2.0型の加速試験の実施前(11月20日)に荷物の積み込みが行われたため)。
- 12月12日： 第3回目25本の納品。全てP2.0型PROVOR。
- 12月25日： WMO 5900450(P2.0型:KY01-11航海投入)が緊急浮上。その後沈降せず, 海面漂流を続ける。
- 12月27日： WMO 5900146(P1型:インド洋)が緊急浮上後, 海面漂流。
- 12月29日： MetOcean社に緊急浮上モードの改良(緊急浮上後に通常サイクルに戻る)および納入分PROVORのROM交換を指示。

2002年

- 1月4, 5日： 納入済みPROVOR 37台(「みらい」MR02-K01航海, 「啓風丸」KS02-01航海, 「凌風丸」RF02-01航海分)のROMを新新ROM(以下P2.1型PROVOR)に交換する。
- 1月上旬： 第4回目15本の納品。全てP2.1型PROVOR。
- 1月9～13日： JAMSTEC観測船「みらい」がMR02-K01航海(leg1)にてP2.1型PROVORを10本投入(岡立ち会い)。
- 1月16日： アルゴグループ合同会議での報告:「みらい」MR02-K01 leg1投入フロートのうち, 投入直後浮上, 後10日サイクルが3本, 10時間漂流後10日サイクルが3本, すぐに10日サイクルが4本。気候値との比較して0.01-0.02psu程度低塩か。
- 1月25日： 「みらい」のMR02-K01航海(leg1)で投入されたPROVORに0.02psu以上の塩分オフセットが認められる。圧力センサーが50dbar程度ずれている可能性(小林)。
- 1月24～29日： JAMSTEC観測船「みらい」がMR02-K01航海(leg2)にてP2.1型PROVORを5本投入。
- 1月25～29日： 気象庁観測船「啓風丸」がKS02-01航海にてP2.1型PROVORを6本投入。残り4本。
- 1月29日～2月3日： 気象庁観測船「凌風丸」がRF02-01航海にてP2.1型PROVORを全8本投入。
- 2月4日： 「啓風丸」KS02-01航海で投入のPROVOR(P2.1型)で観測された塩分データは, CTD速報値と比べ

て0.05psu以上低塩。水温はCTDとほぼ一致するため、圧力センサーもしくは圧力計算処理以外で問題が生じている可能性を指摘(小林)。

以下、電子メールにて議論が飛び交う。

プロファイル実験の結果(高槻ら2003)によれば、SBE41CP測定値の基準センサーからのズレは、圧力で5dbar以内、塩分で0.005psu程度。PROVORの塩分オフセットを説明するには小さい。(安藤・宮崎) 高圧下で影響が出るようだ。ハードとソフトの両方に問題があるのでは。(竹内)

投入の中止を検討すべきでは?(安藤, 岩坂)

2月5日: スクリプス海洋研究所開発のSOLO型フロートでも、同様の塩分オフセットが生じたとの情報が入る。原因は、圧力センサーのオフセットが5dbar以上に達するに、海面で計測用ポンプが動き、汚染物質を吸い込むため。(竹内)

2月7日午前: 塩分オフセット問題対策会議が行われる。(以下、当時のメモによる)

- ・ JAMSTECにおけるセンサーテストの結果
センサーの投入前検定・衛星を介したデータ送信テスト:問題なし
→ センサー単体で正しく運用した場合、問題は生じない。
- ・ 問題の可能性
 1. フロートに搭載した場合にのみ問題が発生。
 2. センサーの計測モードの違い(およびフロート側の処理)
 3. MetOcean社でのセンサーの汚染
 4. 海面での汚染物質の吸い込み
計測用ポンプを止める機能有り → 設定は不明
 5. 圧力センサーのドリフト SBE41CPの圧力測定精度
海面漂流時に観測するのをやめる必要
 6. 保管時の汚染 TRITONで例
 7. 生物付着防止剤 → 特に塩分オフセットが大きいものには可能性あり

同日午後: アルゴグループ合同会議において、今後のPROVORの展開(「啓風丸」KS02-01航海の残り4本、海上保安庁測量船「拓洋」WESTPAC航海、「みらい」MR02-K02航海)を一時中断し、原因の究明に全力を挙げることが決定。啓風丸へ投入中止を連絡。

2月21日: PROVORの塩分オフセットは、0.02(フロートの欠陥) + α (生物付着防止剤)では?(小林)

3月12, 13日: 納入済みPROVORのROMを新新新ROMに変更(以下P3型)。「みらい」にて加速試験を行う

ため、寄港地のグアムにP3型PROVORを発送する。

3月28日: JAMSTEC観測船「みらい」のMR02-K02航海にて、P3型PROVORを4本投入し、加速試験を実施。P3型PROVORには塩分オフセット見られない。

同日: JAMSTEC観測船「みらい」により日本南東沖を5ヶ月間海面漂流したP2.0型PROVOR(WMO 2900315)を回収。センサー検定(5月9, 11日)の結果、センサーはほぼ正常(Oka and Ando 2003: 低塩側に0.002-0.003psu程度のドリフトあり)。

6月9日: 海上保安庁測量船「拓洋」により日本南方にて運用中のP2.1型PROVOR(WMO 2900186)を回収。センサー検定(6月20, 21日)の結果、低塩側に0.02-0.03psuの塩分オフセットを確認する(Oka and Ando 2003)。

6月中: 手持ちのPROVORのセンサーを交換。交換されたセンサーはMetOcean社およびSBE社にて検査されたが、生物付着防止剤の漏れについては発見されなかった。

7月以降: 北海道大学水産学部観測船「おしよ丸」などでP3型PROVORの投入を再開。塩分オフセットは発生せず。

引用文献

- 1) 井上亜沙子, 宮崎 基, 伊澤堅志, 安藤健太郎, 高槻靖, 水野恵介, "中層フロート温度・電気伝導度センサー用校正バスの温度特性および校正試験結果", 海洋科学技術センター試験研究報告, 44, 1-8 (2001).
- 2) 伊澤堅志, 水野恵介, 宮崎 基, 井上亜沙子, 安藤健太郎, 高槻 靖, 小林大洋, 竹内謙介, "プロファイリングフロートの重量調整について", 海洋科学技術センター試験研究報告, 44, 181-196 (2001).
- 3) 水野恵介, "高度海洋監視システム(ARGO計画)構想について", 日本造船学会誌, 854, 485-490 (2000).
- 4) Oka, E. and K. Ando, "Stability of Temperature and Conductivity Sensors of Argo Profiling Floats", J. Oceanogr., (2003, in press).
- 5) 高槻 靖, 宮崎 基, 井上亜沙子, 安藤健太郎, 伊澤堅志, "プロファイリングフロート用CTDセンサーの現場比較", 海洋科学技術センター試験研究報告, 48, 85-94 (2003).
- 6) Wong, A. P. S., G. C. Johnson, and W. B. Owens, "Delayed-mode calibration of autonomous CTD profiling float salinity data by θ -S climatology", J. Atmosph. and Oceanic Tech., 20, 308-318 (2003).

(原稿受理:平成15年12月24日)