

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

小林 大洋^{*1} 宮崎 基^{*1} 伊澤 堅志^{*2} 安藤健太郎^{*2}
井上亜沙子^{*3} 四竈 信行^{*1} 竹内 謙介^{*1} 水野 恵介^{*2}

海面での生物活動および深層の低温高圧に対する、フロート搭載用センサーの経時変化について調べるため、2種類の長期係留実験を行った。フロートの運用上、危惧されている生物付着については、フロートを通常運用する限りにおいて、SBE製センサーはほとんど問題が生じないものと考えられる。FSI製センサーは生物付着への耐性は実用に足ると思われるが、スパイク状の変動が頻発するため測定値そのものに問題があり、開発中の鶴見精機製センサーには生物付着以外の問題に起因すると思われるようなトレンドが生じていた。また、深層係留ではFSIセンサーからしかデータが得られなかったが、センサーの経時変化によって生じていると考えられる水温—塩分関係の低塩化が現れ、その大きさは11ヶ月で0.004psuに達していた。

キーワード：アルゴ計画, CTDセンサー, 長期係留, 生物付着

Sensitivity change of CTD sensor for profiling float under severe conditions of active biosphere near sea surface and low-temperature high-pressure of the depths

Taiyo KOBAYASHI^{*4} Motoki MIYAZAKI^{*4} Kenji IZAWA^{*5} Kentaro ANDO^{*5}
Asako INOUE^{*5} Nobuyuki SHIKAMA^{*4} Kensuke TAKEUCHI^{*4} Keisuke MIZUNO^{*5}

In order to investigate the change of the sensor sensitivity for profiling floats under severe conditions of active biosphere near sea surface and low-temperature high-pressure of the depths, two kinds of long-term mooring experiments were conducted. The sensor degrade due to biofouling, which is one of the most apprehensive issues on float operation, hardly occurs on SBE conductivity sensor, as long as floats are usually operated. Tolerance of biofouling of FSI sensor is considered to be sufficient for practical use; but it is difficult to use it for profiling floats because its measurements has low reliability due to frequent spike-like data, at least near sea surface. Prototype of Tsurumi Seiki conductivity sensor has some trend which may be generated from others than biofouling. In the deep mooring experiment, FSI sensor, from which we could obtain data only, shows a long-term change in the temperature-salinity relation toward low salinity (0.004psu in 11 months) probably due to change of sensor sensitivity.

Keywords : Argo Project, CTD sensor, mooring, biofouling

* 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））。しかし、船舶観測と異なり、フロートを用いた観測では、海中投入後の搭載センサーのメンテナンスはもとより、その状況を直接把握することすら難しい。そのため、プロファイルフロートに特有の現象に対するセンサー応答についての深い知見を有しておくことは、アルゴ計画を順調に進める上で極めて重要である。そのため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、現在までいくつかのセンサー精度評価実験を行ってきた（井上ら2001, 高槻ら2003）。

アルゴフロートは10日毎に海面に浮上し、ARGOS衛星を介して計測データを転送する。ARGOSシステムはデータ転送速度が非常に遅く、また通信可能な衛星の数も少ないため、全てのデータを欠損なく転送するためには、少なくとも半日は海面に滞在する必要がある。その間に水温・塩分センサーへの生物付着が生じて、測定精度を低下させる可能性が指摘されている。実際、Freeland (1997)は塩分に大きな経時変化が現れたPALACE型フロート（FSI社製電磁誘導型センサー搭載）を回収し、フロート本体および計測セルがフジツボの幼生やナメクジ状の生物で覆われていたことを報告している。

生物付着による塩分センサーの経時的劣化に関する研究として、TRITONブイに長期間係留されたセンサーを検定することにより、その精度を評価した研究（松本ら2001, Ando et al. 2003）が過去になされている。しかし、塩分センサー精度の経時的劣化を連続的に評価した研究はない。そこで、2001年の6月から9月にかけて、投入後のフロートが海面を漂流する状況を模した加速実験を行い、生物付着による塩分センサーの経時的劣化を調べた。

また、フロート搭載のセンサーは、数年もの長期間、その稼働期間のほとんどを高圧・低温の極めて過酷な条件下において、正確かつ安定に動作し続けることを要求される。そこで、2001年2月から約1年間、熱帯太平洋の深層にセンサーを係留し、その経時変化について調べた。

2. 生物付着評価実験

2.1. 実験概要

評価の対象とするセンサーは、米国FSI製フロート用CTD“EXCELL”と鶴見精機製フロート用試作CTD、米国SBE製係留用CTD“SBE37SM”の3種である（表1）。電気伝導度センサーの計測方式として、FSI製CTDおよび鶴見精機製CTDは電磁誘導式、SBE製CTDは電極式を採用している。SBE社のフロート用CTDはSBE41（もしくはその改良型のSBE41CP）であるが、SBE37SMはこれとほぼ同様の構造をもつ。そのため、生物付着に対してはほぼ同様の経時変化をするものと予想される。

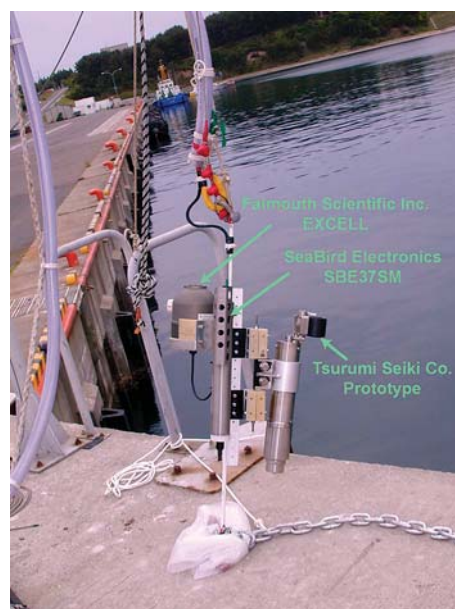


写真1 生物付着評価実験用のセンサーフレーム。フレームの左はFSI製EXCELL，中央はSBE製SBE37SM，右は鶴見精機製試作センサー。

Photo 1 Sensor frame for the experiment on tolerance of biofouling. Conductivity sensors of EXCELL, SBE37SM, and a prototype of Tsurumi Seiki are equipped on the left, middle, and right of the frame, respectively.

表1 生物付着評価実験に用いられた電気伝導度センサー一覧。

Table 1 List of conductivity sensors for the experiment on tolerance of biofouling.

Manufactures	Type	Measuring method	Notes
SeaBird Electronics (SBE)	SBE37SM	Electrode	Sensor for mooring
Falmouth Scientific Inc. (FSI)	EXCELL	Electromagnetic induction	
Tsurumi Seiki Co.		Electromagnetic induction	Prototype, Attachable for brush type mechanics for prevention of biofouling.

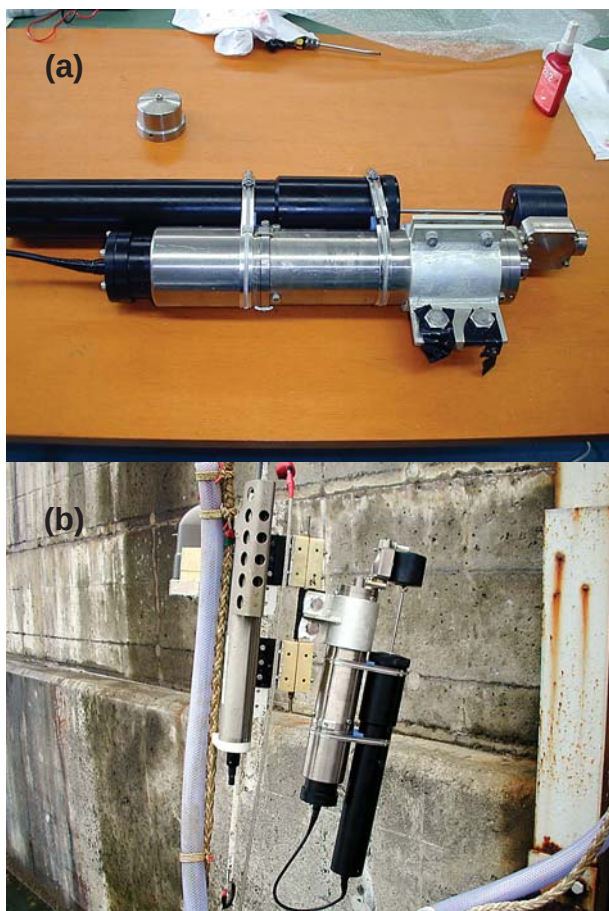


写真2 (a) ブラシ型生物付着防止装置を取り付けた鶴見精機製試作センサーと(b)再係留直前の係留装置。

Photo 2 (a) A brush type mechanics for prevention of biofouling, which is attached to a prototype of Tsurumi Seiki conductivity sensor. (b) The sensor frame just before mooring again (July 17, 2001).

実験場所は、機器の保守・点検や採水作業などの容易さを考えて、JAMSTECむつ研究所内の関根浜港岸壁とした。上記3つのCTDセンサーは、写真1のような配置でフレームに取り付けられる。この装置は、岸壁に設置されている足場からつり下げられる形で、干潮時でも水深約2mに位置するように設置された。また、波に装置があおられても、岸壁に衝突することのないように、鎖をアンカーとして用いた。なお、設置の際、電磁誘導式センサーにフレーム及び設置場所の影響が及ぶことのないように注意した。

係留期間は2001年6月19日から9月13日(なお、当初は8月中の回収を予定)であり、3種のセンサーとも1時間おきに計測を行う。基準となる塩分値(真値)を得るために、係留期間中に週2回、計測水深付近を北原式採水器を用いて採水して塩分検定を行った。なお、7月17日に一度引き上げて、鶴見精機製センサーにブラシ型の生物付着防止装置(写真2a)を取り付けた後、係留を継続した(写真2b)。今回利用したこのブラシ型の生物付着防止装置であるが、計測時以外は連続気泡製のスポンジを計測セル部分に密着するよう

に格納させることで、海面漂流中の生物付着を防ぐような仕組みになっている。計測開始直前には、このブラシが回転しながら基部方向に引き戻されることにより、計測セル部分に付着した汚れを落とす。

2.2. 観測結果

まず、実験途中で係留装置を引き上げた時(7月17日)および実験終了時(9月13日)の係留センサーの外観について述べておく。写真3および4は、係留1ヶ月後のSBE製センサーおよびFSI製センサーの状況である。比較的きれいな印象を受けるが、写真3bおよび4bに見られるように、何らかの生物らしきものが付着している。その約2ヶ月後の実験終了時には、コケ状の付着物がびっしりとセンサーおよび係留装置全体についており(写真5)、実験後半の実験環境の厳しさがうかがえる。

係留期間中に得られた全データをプロットしたものが図1である。実験開始から7月末頃までは、3種類のセンサーともほぼ同じような値を示すが、それ以降は個々のセンサーの事情により全く異なる時間変化を示している。採水結果と比較した場合、SBEセンサーで得られたデータが全期間を通じて最も近い。なお、理由については後述するが、採水データはセンサーの経時変化を評価する際の参考にはなるが、厳密な意味では基準にならないことが分かっている。

また、時折急激な塩分低下がみられるが、これは下北地方への降水(表2)とはほぼ一致している。たとえば、7月1, 17, 30日, 8月22, 27日には、雨に対応して低塩化が認められるし、9月11-12日の台風15号による記録的な大雨によって、塩分は約7psuも低下している。

SBE製センサーは、全期間を通じて33-34psu程度の比較的安定な数値が得られている。特に実験開始から8月上旬までは、採水塩分値との差も比較的小さい。しかし、それ以降は0.5psuを越える偏差を示す場合があり、また変動傾向も一致しているとは言い難い。この偏差は、主に採水データの不正確さ(後述)に起因するものと考えられるが、センサーに経時変化が生じた可能性を排除するものではない。

これに対し、FSI製センサーは、8月上旬から測定値が急激に低下し、8月18日頃には26psu程度という異常な値を示している。その後、測定塩分値は急激な上昇を示し、8月23日以降は32-33psu程度の比較的安定な値を再び示すようになる。しかし、この値は採水塩分値と比べても1psu程度低塩である。この大きな低塩偏差の原因は全く不明であるが、約1ヶ月をかけて低塩偏差が進行・回復したことから考えて、計測域へのゴミなどの移流とは考えにくく、何らかの生物による生態活動に起因した変化ではないかと推測する。また、スパイク状の変動が極めて頻繁に現れることもFSIセンサーの特徴といえる。

開発中の鶴見精機製センサーは、同様の測定方式をとるFSI製センサーと比べて、スパイク状の変動も少なく、比較的安定したデータが得られている。しかし、実験期間の前半では7月5日0時以降、電池切れのためにデータを連続的に得られなくなった。また期間後半も、ブラシ型の生物付

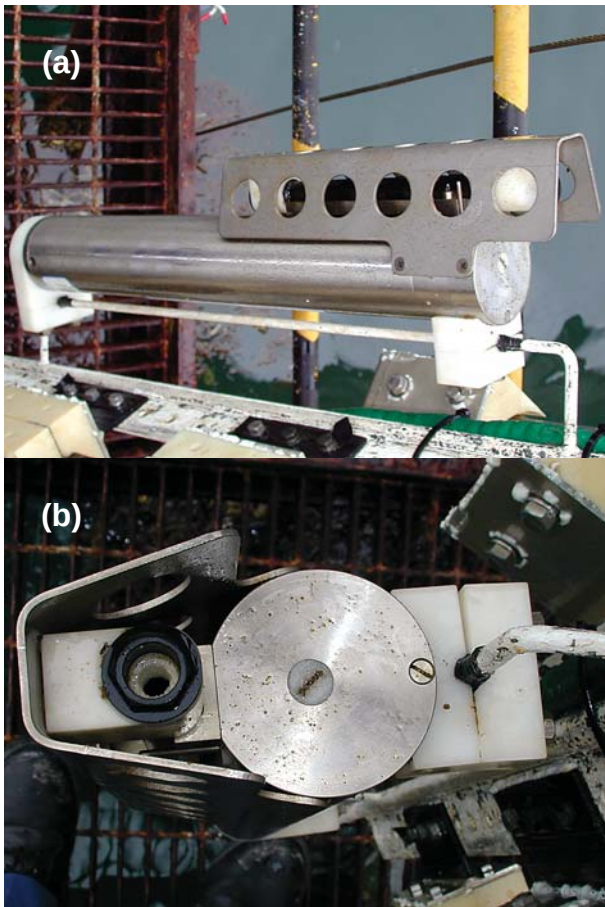


写真3 係留1ヶ月後(7月17日)のSBE製センサーの(a)全景および(b)取水部。

Photo 3 (a) SBE sensor and (b) hole for intake inflow after 1 month mooring (July 17, 2001).

着防止装置が故障して動かなくなったためか、7月26日17時以降は7-12psu程度の異常な値を連続して示し、8月19日21時以降は電池切れによりデータが得られていない。

そこで、3種類のセンサー全てで比較的安定なデータが得られた、実験開始から7月29日までの期間について、詳細に調べることにする(図2)。なお、生物付着に起因するセンサーの経時変化は、比較的ゆっくりであろうから、25時間のメジアンフィルターをかけてスパイク状の変動を取り除いた。

採水データと比べると、実験開始直後であるにもかかわらず、センサー間の差異に比べて採水データだけが0.1psu程度も大きくはずれることがある。この期間、全てのセンサーがほぼ同じ変動を示すことを考えると、採水データに問題があったと考えられる。外洋に比べて沿岸域は水塊構造の時空間的な変化が激しく、性質の大きく異なる海水がパッチ状に分布する可能性があるが、本実験でもセンサー群が計測しているものとは異なる性質の水を採水していたものと予想される。そのため、採水結果はセンサー測定値を評価する上で参考にはなるが、基準にはなり得ない。

センサー間の偏差を、全期間に渡って安定した値が得られているSBE製センサーを基準として示したものが図2bで

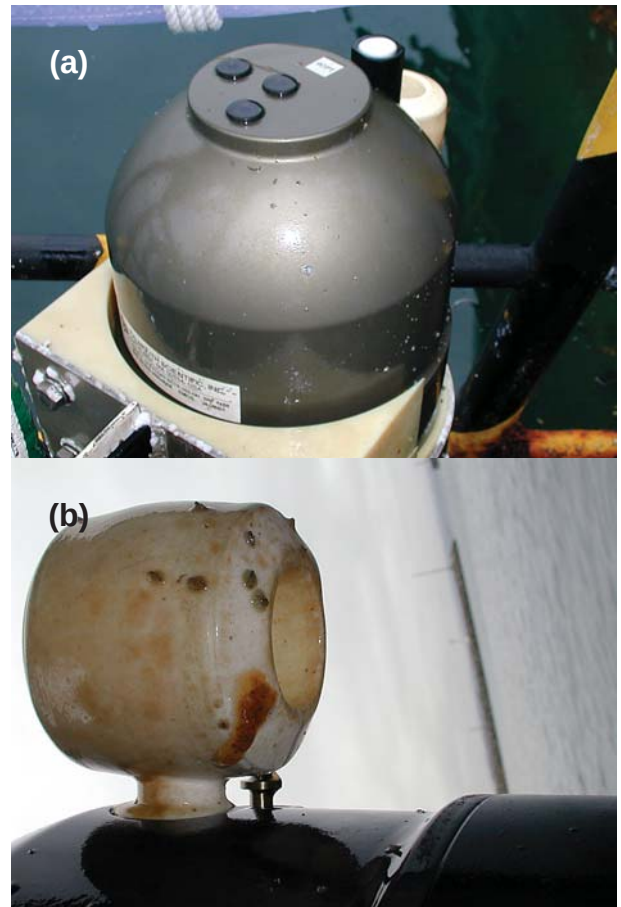


写真4 係留1ヶ月後(7月17日)のFSI製センサーの(a)全景および(b)センサー部。

Photo 4 (a) FSI sensor and (b) its measuring cell after 1 month mooring (July 17, 2001).

ある。FSI製センサーには、短い周期の変動があるものの、少なくとも7月22日までは、長期トレンドらしきものは認められない。なお、これ以降は徐々に低塩方向にずれていき、8月の大きな低塩偏差に至る。これに対し、鶴見精機製センサーは、データ取得期間が短すぎではっきりしない部分があるが、実験開始直後から高塩方向へのトレンドが生じているように見える。また、生物付着防止装置の取り付け(7月17日)以降では、その直後から0.1psu程度の高塩な値を示しており、さらに時間とともにそのズレが拡大する傾向を見せている。

2.3. 考察

まず、本実験がどの程度の「加速」試験に相当するかをあらかじめ調べておく。センサー部への生物付着は、フロートが海面を漂流する間に生じる。フロートが深層に沈降すれば、海面で付着した生物は深層では環境が異なるので成長できず、場合によっては死滅すると考えられる。本実験のようにセンサーを表層係留した場合、付着した生物は常に(植物であれば日中は)成長可能な状態にある。そのため、本実験は、フロート搭載センサーに付着した生物



写真5 実験終了時(9月13日)の係留装置。
Photo 5 Sensor frame at the end of the mooring
experiment (September 13, 2001).

表2 生物付着評価実験期間中のむつ特別地域気象観測所および
小田野沢・大間のアメダスにおける降水量の記録。単位は
mm/日。ただし、いずれかの観測により10mm/日以上記録の
あったもののみ抜粋(気象庁のホームページより)。

Table 2 Extract record of precipitation (unit is mm/day) in the period
of the mooring experiment at Mutsu (weather station),
Odanosawa (AMEDAS), and Ooma (AMEDAS), respective-
ly. The criterion for record extraction is precipitation exceed-
ing 10 mm/day at any station. This data is obtained from the
web site of Japan Meteorological Agency.

Date	Mutsu	Odanosawa	Ooma
June 19	15.0	23	5
June 20	18.5	32	7
June 26	1.5	6	12
July 1	58.0	69	38
July 11	0.0	0	28
July 16	6.0	8	10
July 17	59.0	55	37
July 19	15.0	20	16
July 30	65.0	85	75
August 1	16.0	19	1
August 10	15.5	24	3
August 22	39.5	54	16
August 27	65.0	75	27
September 7	10.0	11	21
September 11	158.0	216	85
September 12	15.5	20	28

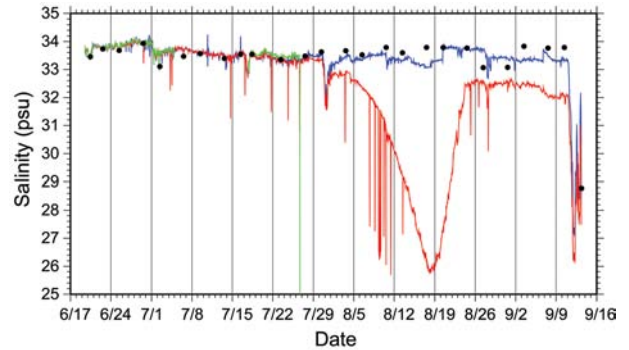


図1 生物付着評価実験で測定された塩分の時系列。青、赤、緑線
は、それぞれSBE製電気伝導度センサー"SBE37SM", FSI製
電気伝導度センサー"EXCELL", 鶴見精機製フロート用試作
電気伝導度センサーによって計測された値。また、黒丸は、週
2回行った採水・塩分検定によって得られたデータ。

Fig. 1 Time series of measured salinities in the experiment on toler-
ance of biofouling. The blue, red, and green lines represent the
salinities measured by conductivity sensors for profiling float
of SBE37SM (SeaBird Electronics), EXCELL (Falmouth
Scientific Inc.), and a prototype developed by Tsurumi Seiki,
respectively. The filled circles represent the salinity measured
by water sampling.

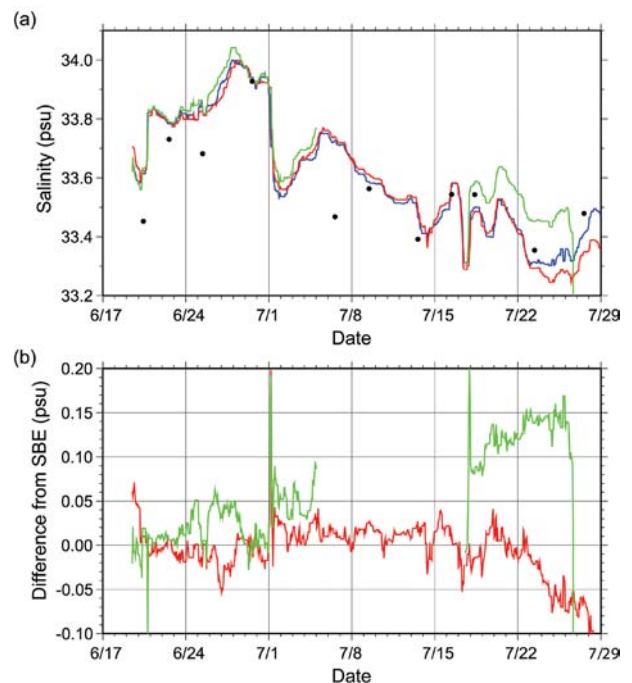


図2 実験開始から7月29日までの拡大図。(a) 塩分時系列。(b) SBE
製センサー測定値からの偏差。ただし、25時間のメジアンフ
ィルターを用いて、短周期変動を取り除いている。図1に同じ。

Fig. 2 Time series of (a) measured salinities and (b) differences from
values measured by SBE37SM during the beginning of experi-
ment to 29 July. The higher frequent variations are removed
by a median filter with 25hours window. Otherwise, as
described for Fig. 1.

が、深層において何ら変化せずに再浮上するという(最悪の)状況が連続して起こった場合を仮想的に再現していることになる。JAMSTEC/FORSGCで運用中のフロートは、浮上毎に海面に約8-12時間滞在する設定になっている。そのため、本実験における1ヶ月は、60-90サイクル分の海面滞在時間の積分時間、つまりフロートを通常運用(観測周期を10日)した場合には、約1年半から2年半に相当するといえる。また、実際に回収されたフロートの表面の状況(写真6)から推測する限り、通常運用しているフロートに対しては、9月の実験終了時のような極端な生物付着(写真5)は生じず、せいぜい7月の引き上げ時と同程度の付着状況写真3および4)であろうと推測する。なお、写真6aのフロートに搭載された塩分センサーを検定した結果、極めて良好(低塩方向への0.003psuの偏差が存在)な状態にあり、生物付着によるセンサーの経時変化は認められなかった(Oka and Ando 2003)。

本実験では、センサー測定値の基準として期待していた採水データがその役割を果たせなかった。そのため、それぞれのセンサーがどの程度ずれているのかは分からない。しかし、実験終了時のセンサーの状態(写真5)を考えると、実験期間を通じて安定し、採水結果から大きな乖離を示さなかったSBE製センサーは、生物付着に対してかなりの耐性をもっていると考えて良いだろう。

FSI製センサーは、実験開始から約1ヶ月間は、ほぼSBE製センサーとほぼ同じ値を示した。そのため、フロートを通常に運用する限り、生物付着に対しては大きな問題にならない程度の耐性があるものと考えられる。しかし、スパイク状のノイズが頻繁に現れることが問題である。つまり、個々の測定値そのものが信頼に足るとは言えず、生物付着を考える以前の問題としてフロート用センサーとして適当ではないと考えられる。この現象は、同じく電磁誘導式の計測方式を用いている鶴見精機製センサーの測定値にはほとんど現れていない。そのため、この現象は電磁誘導式に特有のものではなく、FSI製センサーに特有の現象である可能性が高い。また、FSI製センサーの計測域は鶴見精機製センサーの計測域よりも大きく、干潮時にその一部が海面から飛び出してしまうために大きなスパイクとなって現れたのかもしれない。

鶴見精機製センサーはデータを取得できた期間が短すぎるため、今回の実験結果だけから、他のセンサーと同程度にその生物付着に対する耐性を評価することは極めて困難である。その前提の上での議論ではあるが、鶴見精機製センサーの計測値には、実験開始直後から高塩方向への経時変化が現れているように見える。この経時変化の立ち上がりが早すぎるため、これが生物付着によって引き起こされているというよりも、むしろ、センサー自体が持っている経時変化のように思われてならない。

本実験ではSBE社およびFSI社のセンサーとともに、鶴見精機製の電気伝導度センサーの生物付着に対する耐性を評価した。残念ながらあるが、鶴見精機製センサーは、生物付着についての試験を行う段階にまで、完成しているとの認識に至らなかった。そのため、ブラシ型生物付着防止装

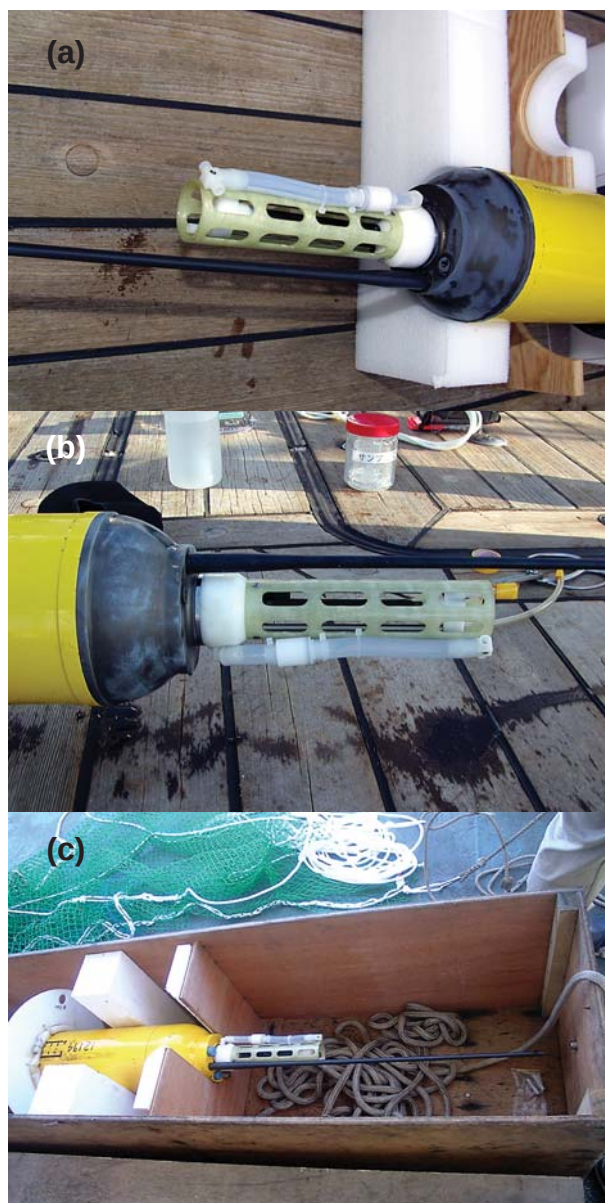


写真6 実海域で回収されたフロートの外観。(a) 2001年11月に東京大学海洋研究所の淡青丸で回収されたAPEX型フロート(9ヶ月間運用)。(b) 2003年6月に水産研究センターの照洋丸で回収されたAPEX型フロート(2年4ヶ月間運用)。(c) 2003年8月に海上保安庁の拓洋で回収されたNINJA型フロート(6ヶ月間運用)。

Photo 6 Argo floats recovered under normal operation. (a) APEX type float recovered by R/V Tansei-maru of Ocean Research Institute, University of Tokyo in November 2001 after 9 months operation. (b) APEX type float recovered by R/V Shoyo-maru of Fisheries Research Agency in June 2003 after 2 years 4 months operation. (c) NINJA type float recovered by R/V Takuyo of Japan Coast Guards in August 2003 after 6 months operation.

置本来の効果について評価を行うことはできない（故障した場合に、まともなデータの取得を阻害するという、センサーにとっての致命傷を負わせる可能性の高いことは明らかとなった）。以下は鶴見精機製センサーの改善を要する点について、その優先順位の高いものから挙げる。

1. センサー制御を工夫することにより、電池の消耗を抑え、長期間の実験に耐えられるようにする。
2. 生物付着の影響をほとんど受けない状況下において、長期係留実験を実行し、センサー自体に経時変化が生じないことを確認する。

生物付着による塩分データの精度低下に対する疑念が払拭された訳ではない。しかしながら、本実験や実海域に展開中のフロートのデータの経時変化を見る限り、それほど神経質になる必要もないことが明らかになりつつある。そのため、生物付着防止装置としては、機械式の大がかりなものではなく、センサー部に生物が付着しにくいような材質を用いるなどのより単純な仕組みのものに変更すべきと考える。

本実験では、センサーをあえて過酷な状況にさらし、意図的にセンサーを劣化させるというその性格上、時間変化を正しく評価するための基準となる採水データが非常に重要になる。しかしながら、採水の失敗により各センサーの経時変化について正確な評価を行うことができなかった。これを防止するためには、やや沖合の海域すること（岸壁よりも海水が一樣であることが期待できる）、浮力体からつり下げるように係留すること（潮汐によりセンサーおよびセンサー計測部が海面に露出するのを防ぐ）などの工夫が必要であろう。また、付着物の付き具合から係留期間は沿岸域では2ヶ月程度で十分であり、実験終了後にセンサーの事後検定を行うべきであろう。

2.4. まとめ

関根浜港岸壁で行った、長期表層係留による生物付着評価実験の結果、電極式のSBE製電気伝導度センサーが最も安定しており、生物付着に対して非常に高い耐性を示すことが明らかとなった。FSI製センサーは、生物付着に対して実用上問題のない程度の耐性を示すと考えられるが、スパイク状の変動が頻繁に見られるため、フロート用センサーとしては適性を欠く。この実験では、データ取得期間が短すぎたために開発中の鶴見精機製電気伝導度センサーの生物付着への耐性を評価することはできない。しか

し、機械式の生物付着防止装置は、故障によりデータ取得の妨げになる可能性があるため、取りやめるべきであろう。

3. 長期深層係留実験

3.1. 実験概要

評価の対象とするセンサーは、米国FSI製フロート用CTD“EXCELL”と鶴見精機製フロート用試作CTD、米国SBE製係留用CTD“SBE37SM”の3種である（表3）。なお、鶴見精機製CTDセンサーにはブラシ型生物付着防止装置は搭載されていない。JAMSTECの海洋地球観測船「みらい」のMR01-K01航海において、熱帯太平洋の156°E赤道上に係留されるADCPブイの1800m深付近に、この3種のセンサーを設置した（写真7：設置日2001年2月28日）。実験装置の回収は、「みらい」MR02-K02航海にてADCPブイの回収に併せて行われた（写真8：回収日2002年3月7日）。係留期間は約1年である。なお、回収後のセンサーの事後検定はなされていない。

3.2. 結果と考察

実験装置を回収したところ、鶴見精機製CTDは水密が不十分であったため浸水により故障していた。また、SBE製

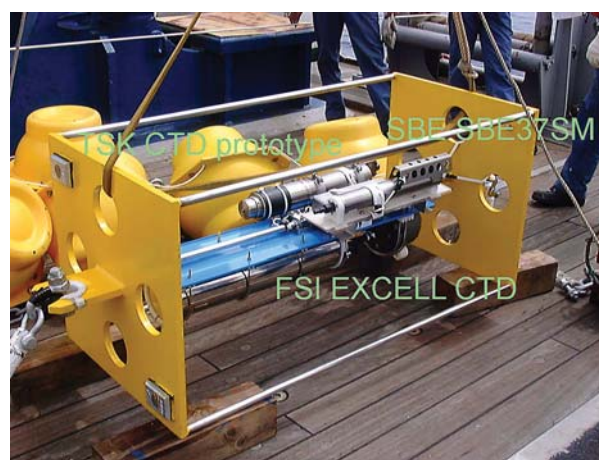


写真7 長期深層係留実験用のCTDフレーム。設置時（2001年2月28日）。

Photo 7 CTD frame for deep mooring experiment just before mooring (February 28, 2001). Three sensors of SBE37SM, EXCELL CTD, and Tsurumi Seiki CTD prototype are equipped around the center shaft.

表3 長期深層係留実験に用いられたCTDセンサー一覧。

Table 3 List of CTD sensors for the deep layer mooring.

Manufactures	Type	Measuring method	Notes
SeaBird Electronics	SBE37SM	Electrode	Sensor for mooring
Falmouth Scientific Inc.	EXCELL	Electromagnetic induction	
Tsurumi Seiki Co.		Electromagnetic induction	Prototype

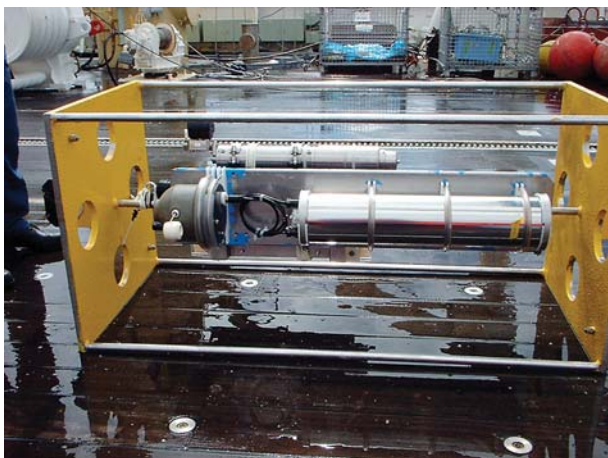


写真8 回収された直後の長期深層係留実験用のCTDフレーム
(2002年3月7日)。

Photo 8 The CTD frame at the end of mooring (March 7, 2002).

センサーは通信不良のため、データが記録されていなかった。そのため、データを取得できたFSI製センサーについてのみ解析する。

データが取得できた期間は2001年2月28日から2002年2月4日までの約11ヶ月間である。それ以降回収までの約1ヶ月間は、記憶装置の容量不足のため欠損となった。なお、FSIセンサーは係留期間中30分おきに10秒程度起動し、8回の計測を行う。本研究では、その8回のデータを平均して30分ごとの計測値とし、これを生データとする。なお、一回毎の観測値データの分解能は、水温・電気伝導度(塩分)で0.001, 圧力で0.1dbarである。

図3は本実験によってFSI製CTDセンサーから得られたデータの時間変化を示したものである。生データは短周期の変動が卓越しており、予想以上に変動が大きい。特に圧力には潮汐による時間変化が現れており、その振幅(約0.2~0.6dbar)は約半月周期で増減している。また、塩分にはスパイク状のノイズが現れており、その大きさは0.01psu近くに達することもある。

そこで、潮汐による影響を取り除くため、生データに25時間の移動平均を施したものが、図中の青線である。この処理により圧力の短周期変動はほとんど見られなくなったので、潮汐の影響は消えたと思われる。水温・塩分では、スパイク状のノイズはほぼ消えたものの、短周期の変動が残っている。そのため、これは潮汐に由来する変動とは異なるものであると考えられる。また、FSI製センサー自身が持つばらつきが現れただけということも考えられる。

FSIで得られたデータの水温-塩分関係の時間変化を示したものが図4である。データの色はデータ取得日を示しており、実験時間の経過とともに青から赤に変わる。データのバラつきが大きく、水温-塩分関係から大きくはずれたものを除いても、同一水温に対して約0.003psu程度の計測値の幅が見られる。また、時間の経過とともに得られたデータの水温-塩分関係が低塩側にずれてきているのが分かる。そこで、25時間の移動平均を施したデータを用いると、実

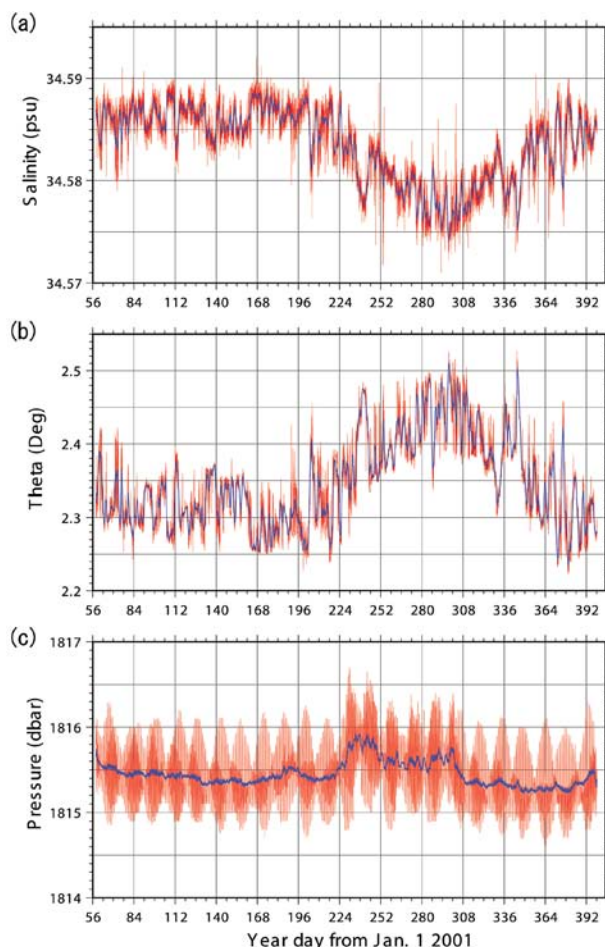


図3 深層に係留されたFSI製CTDセンサーによって得られた(a) 塩分, (b) ポテンシャル水温, (c) 圧力。赤は30分ごとの測定データを、青は25時間の移動平均をかけた値を示す。横軸は2001年1月1日からの日数を示し、実験開始日(2001年2月28日)は58となる。

Fig. 3 Time series of (a) salinity, (b) potential temperature, and (c) pressure measured by FSI CTD sensor moored in the deep layer. The red line represents the raw measurements every 30 minutes, and the blue line represents the values of 25hours running mean. The values for horizontal axis mean the number of day from January 1, 2001: the day of the beginning of experiment (February 28, 2001) is converted to 58.

験期間中(約11ヶ月)に低塩方向への偏差が生じており、その量は0.004psu程度である。

この変化が、センサー自身の経時変化によるものかは、センサーの事後検定を行っていないため、はっきりしない。そのため、海洋変動に起因する変化の可能性は残るが、WOCEのP1線(北太平洋47°N)を再観測した結果では、2000dbar付近において14年(1985年と1999年)間で最大で0.01psu程度の変化(等深面上)が生じていること、これと同時に水温-塩分関係を維持する方向に水温変化も生じていることが明らかにされている(深沢ら2000, 私信)。海域が異なるので一概には言えないが、この値と比べて今回の実験結果は明らかに変化量が大きく、また水温-塩分関係

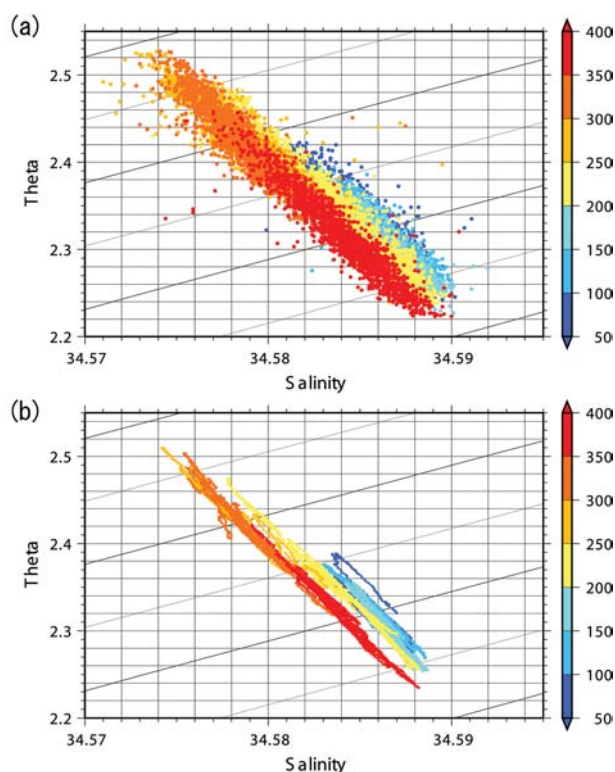


図4 深層に係留されたFSI製CTDセンサーによって得られた水温-塩分関係の時間変化。(a) 30分ごとに観測された値。(b) 25時間の移動平均をかけたもの。データの色は2001年1月1日からの日数を示し、実験開始日(2001年2月28日)は58となる。

Fig. 4 Changes of temperature-salinity relation measured by FSI CTD sensor moored in the deep layer. (a) Raw data measured every 30 minutes, and (b) values of 25 hours running mean. The colors represent the number of day from January 1, 2001: the day of the beginning of experiment (February 28, 2001) is converted to 58.

自体が変化していることから、センサーの経時変化の可能性が高いと考えられる。

長期係留実験についても、係留した3つのセンサーのうち2つからはデータが得られず、また回収後に事後検定を行っていないために、観測された変化が、海洋の変動なのか、センサーの経時変化なのか明らかにできないという、大変残念な結果に終わっている。現在JAMSTEC/FORSGCでは、フロート搭載用センサーとしてSBE製のSBE41およびSBE41CPを用いているが、これらのSBE製センサーについての評価を行う必要があるため、再実験を検討する必要があるだろう。

3.3. まとめ

熱帯域深層において、約1年間の長期係留を行い、高圧・低温下におけるセンサーの経時変化について調べた。残念ながら、係留した3種類のCTDセンサーのうち、FSI製センサーしかデータを得られなかった。FSI製センサーは、計測値にバラつきが生じやすく、同一水温に対して約0.003psu程度の幅がある。また、センサーの経時変化ではないかと推測される水温-塩分関係の変化が見られ、11ヶ月で約0.004psuの低塩化が認められた。

謝辞

採水を行って頂いた、むつ研究所のマリン・ワーク・ジャパン職員の方に感謝いたします。また、センサーメーカーにおいては、これらの意見を今後のセンサー設計に反映させて頂くことを期待します。

引用文献

- 1) Ando, K., T. Matsumoto, T. Nagahama, I. Ueki, Y. Takatsuki, and Y. Kuroda, "Time change of the characteristics of a moored conductivity-temperature sensor and correction of salinity data", J. Atmosph. and Oceanic Tech. (submitted) (2003).
- 2) Freeland, H., "Calibration of the conductivity cells on P-ALACE Floats", U.S. WOCE Implementation Report No. 9, U.S. WOCE Office, 37-38 (1997).
- 3) 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パ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).
- 4) 松本健寛, 長濱徹哉, 安藤健太郎, 植木 巖, 黒田芳史, 高槻 靖, "トライトンブイの水温・塩分(電気伝導度)センサーの経時変化と補正", 海洋科学技術センター試験研究報告, 44, 139-151 (2001).
- 5) 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).
- 6) Oka, E. and K. Ando, "Stability of Temperature and Conductivity Sensors of Argo Profiling Floats", J. Oceanogr., (2003, in press).
- 7) 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).

(原稿受理:平成15年12月26日)