

トライトンの水温・塩分(電気伝導度)センサーの 経時変化と補正

松本 健寛*1 長濱 徹哉*1 安藤健太郎*2
植木 巖*2 黒田 芳史*2 高槻 靖*2

西部太平洋熱帯域に展開しているトライトンの水温および塩分データの精度を評価するために、水温・電気伝導度センサー(CTセンサー、型式SBE37)の事前事後の検定および現場のCTD観測との比較を行いその結果からセンサーの経時変化量を推定し、観測データの補正の必要性について検討した。係留前後の検定結果から見積った経時変化量は、水温センサーについては約1年間で3mK/年以内と小さく、熱帯域での研究目的に必要な観測精度を保っていた。一方電気伝導度センサーについては、250m以深では塩分換算値で0.0006psu/年(標準偏差0.006psu/年)と目的の精度を保っていたが、浅い深度(100m以浅)で使用したセンサーは塩分換算値にして平均で0.065psu/年(標準偏差0.033psu/年)の経時変化がみられた。また、CTD観測による現場比較の結果からも、浅い深度に取り付けた電気伝導度センサーについて同様の結果が示され、これらの結果から、検定結果を用いて塩分データを補正することが可能であると考え、事前事後の検定結果から回帰式を算出し、電気伝導度値を補正した。

キーワード：トライトンの、CTセンサー、経時変化、補正

The Time Drift of Temperature and Conductivity Sensors of TRITON Buoy and the Correction of Conductivity Data

Takeo MATSUMOTO*3 Tetsuya NAGAHAMA*3 Kentaro ANDO*4
Iwao UEKI*4 Yoshifumi KURODA*4 Yasushi TAKATSUKI*4

The Triangle Trans-Ocean Buoy Network (TRITON) buoys have been deployed in order to observe water temperature and salinity with CT (conductivity and temperature: SBE37) sensors in the western tropical Pacific Ocean. The drift with time of CT sensors were investigated by the calibrations in laboratory before deployment and after recovery of TRITON buoy, and also by the comparison with in-situ hydrographic cast data. The results of calibrations in laboratory, show that the drifts of temperature sensors are quite small (less than 3mK/year) for all sensors, however, the characteristics of drifts of conductivity sensors are different depending on the classified depth ranges. After one year mooring, the average drift of conductivity in the shallowest layer above 100 meters was 0.010 S/m/year (corresponding to 0.065psu/year with standard deviation of 0.005 S/m at 6 S/m). In the deeper layer below 250 meters, the average drift of conductivity was quite small and stable as it was less than 0.0001 S/m (0.0006psu) with standard deviation of 0.001 S/m. The results from in-situ comparison of TRITON salinity with shipboard CTD (SBE9/11 plus) salinity also supported the positive conductivity drift with time in the shallow layers. Finally, assuming the linear trend of conductivity drift with time, correction of conductivity data from the post calibration data was also made.

Keywords : TRITON buoy, conductivity and temperature sensors, drift, correction

*1 (株)マリン・ワーク・ジャパン 海洋科学部
*2 海洋観測研究部
*3 Department of Marine Science, Marine Works Japan LTD.
*4 Ocean Observation and Research Department

1. はじめに

トライトンブイは、エルニーニョ、アジアモンスーンおよび10年～数10年規模の大気・海洋変動の機構解明のために、西部熱帯太平洋域に設置されている。トライトンブイは、海上気象観測項目として風向・風速、気圧、気温、相対湿度、短波放射、雨量を、また海洋観測項目として海面から深度750mまでの12層の水温・塩分、深度10mの流向・流速を計測している(図1と図2, 黒田と網谷, 2001)¹⁾。

熱帯太平洋の西部は、1年間の降雨が地球上で最も多い場所の一つとして知られ、1年間の降水量は3,000mm前後で、降雨の変化に伴い表層での塩分も変化が大きい。熱帯域の表層の水温変動は1年を通じて小さいため、水温と塩分によって決まる海水の密度変動には塩分変動の影響が無視できない。海水の密度の変化は、成層構造を変化させ、また、海面力学高度をも変化させる。この海域では、表層での塩分による成層構造(バリエイヤー)の変化は、混合層中の水温(すなわち、海面水温)を決定するプロセスに影響を与えることが示唆されている(Lukas and Lindstrom, 1991²⁾, Sprintall and McPhaden, 1994³⁾, Ando and McPhaden, 1997⁴⁾)。このように表層塩分の変化が、海面水温を決定し大規模な大気の循環を決定する要因の一つと考えられるため、熱帯

表層における塩分計測は重要とされている。また、表層や亜表層の塩分変動は密度変動に寄与しているため、海面の力学高度場に影響を与え(Mae, 1998⁵⁾, Delcroix et al, 1998⁶⁾), 表層の流速場にも影響していると考えられている(Ando and Kuroda⁷⁾, submitted)。エルニーニョ予報モデルでは、海洋データとして水温データが初期値として用いられているが、今後、塩分データを加えることにより、より正確に海面高度等が再現され予報の精度向上に役立つことが期待される。

塩分の計測は、現在、UNESCO(1978)に従い海水の電気伝導度を測定することによって行われている(気象庁, 1999)⁸⁾。一般に、CTD(電気伝導度・温度・深度計)が海洋のある深さでの水温・塩分を計測する機器として定着しているが、塩分値は、CTDが計測した海水の電気伝導度とあらかじめ決めてある15℃・1気圧・塩分35における電気伝導度との比を計算し、それに水温および水圧の補正を計算で加えて塩分値を算出している。これまでは、電気伝導度センサーの経時変化が大きいため、あらかじめ陸上で検定するとともに、CTDの観測中に同時に採水を行い現場でセンサーを校正する手法が主であり、係留による観測には適さないと考えられていた。しかし、海洋学において塩分の変動についての情報・知識がこれまで以上に必要となってきたことから船舶による観

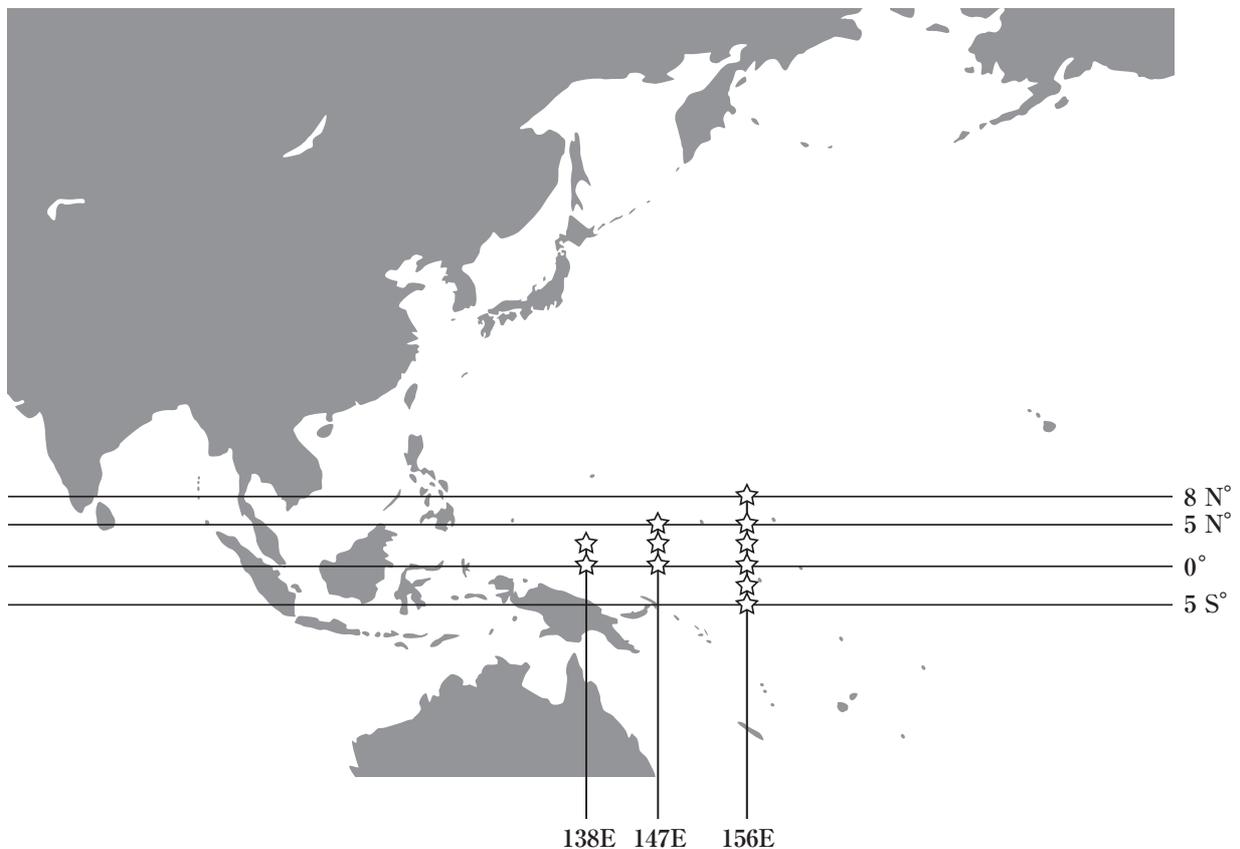


図1 使用したデータのトライトンブイ設置点

Fig. 1 TRITON buoy locations in July 2001. The data used in this paper are from these locations.

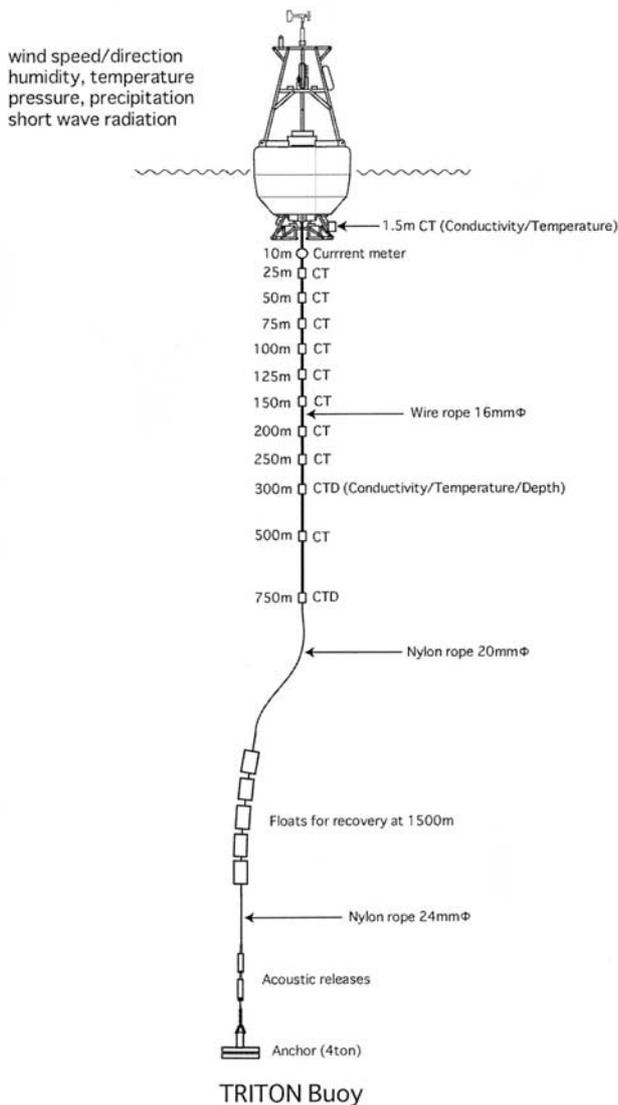


図2 トライトンブイ概念図
Fig. 2 Schematic diagram of TRITON buoy mooring system.

測にのみ頼ることなく、係留や漂流ブイなどの手段で塩分の変動を水温同様に観測する必要性が出てきた。

トライトンブイでは、米国シーバード社のSBE37という係留用CT(電気伝導度・温度計)およびCTDを使用している。この機器では、海中の電気伝導度を電極式(Electrode Conductive方式)といわれる方式で計測する。この方法では直径8mm程度ガラス管の内壁に電極が埋め込まれており、その間の電気伝導度(S/m, $S = \rho \sigma = 1/\Omega$ である)を計測する方式である。この方式の利点は、電気伝導度を計測する体積をガラス管の中の小さな体積に限ることができることであり、水温の関数でもある電気伝導度を正確に計測するために必要な計測体積内の水温をほぼ一定にし、より安定に保つことができる。これは、従来メーカーでしかできなかった検定作業をユーザーでもできる可能性があることを示しており、我々は、シーバード社製の検定用恒温水槽を整備し、自ら水温と電気伝導度の検定を実施している。

本稿では、第2節で水温・電気伝導度センサーの検定方法とその評価、第3節で実際にブイに取り付けられたセンサーの経時変化について記述する。そして第4節では現場で行った船舶によるCTD観測との比較について記述し、最後に第5節では、ここで適用した補正方法について記述する。

2. 水温・電気伝導度計の検定方法と検定精度

2.1. 検定方法

水温センサーおよび電気伝導度センサーの検定は、シーバード社の検定バス(水槽)を用いて行っている(図3)。バスの構造は、中の水温を一定に保つため、上下および周りを断熱材で覆い、バス本体は中の海水(100リットル)を均一に循環させるため円柱状の構造をしている。バスの中心に円筒を置き、その下部に攪拌用のスターラを付け、バスの底部に冷却用のコイル、中心部にヒーターが付けられている。海水は人工海塩を使用し、濃度を35psu付近に調整する。バスは、海水が中央の攪拌機により中央で海水が下降、円筒の外側で上昇し水温成層が形成されないような設計となっている。検定するブイ用センサー(SBE37)は、標準となる水温センサー(SBE3)および電気伝導度センサー(SBE4)と同心円上で同じ位置になるように配置し、水面からの深さも同じになるように配置する。これにより、バス内の温度分布の違いによる検定時のエラーを小さくできる。バスを導入した試験時に、SBE37を10台、配置位置を変えて5回、バスを稼働させた。同心円上での温度の差を測定したところ、2mK以内の差であったので、同心円上にセンサーを配置する限り、2mK以内で検定可能であると考えた。なお、写真1は、海洋科学技術センターむつ研究所の観測機材整備場内のウエットラボに設置されている検定バス(2台)を示し、写真2は、バス内に10台のCTセンサーをセットした状況を示す。

図4に検定方法のフローチャートを示す。塩分35psuの海水の水温を30℃から0℃付近まで変化させると、電気伝導度が6S/mから3S/m付近まで変化するので、ブイでの計測に必要な温度幅、電気伝導度幅をカバーでき、水温と電気伝導度の検定は同時に行うことができる。検定の際には、まずセンサーをバスにセットしたのち、温度を35℃付近まで上げる。水温を上げた状態で3時間程度放置することによって、バス内の海水に溶存している空気を追い出す。空気が十分に抜けない場合、電気伝導度セルに気泡が付着し検定が失敗することがあるためである。その後、30℃から1℃までの間で7点の水温をターゲットとして、バス内の温度を制御し検定を行う。1回の検定に要する時間は全体で14~15時間程度である。これは1つのターゲット温度で安定度を1mK以内に安定させるのに2時間程度必要となるためである。1つのターゲット温度での実際に比較データを取得する時間は10分程度である。

温度の検定は、標準となる水温センサー(SBE3)との比較を行うだけであり、手順は非常に簡単であるが、電気伝導度については、バスの温度が24℃のときにバスから水を採水し、オートサルで24℃での塩分値を決定している。24℃でのバス内の電気伝導度(真値)は、バス内の水温センサーによる水温を用いて計算される。この24℃での電気伝導度の真

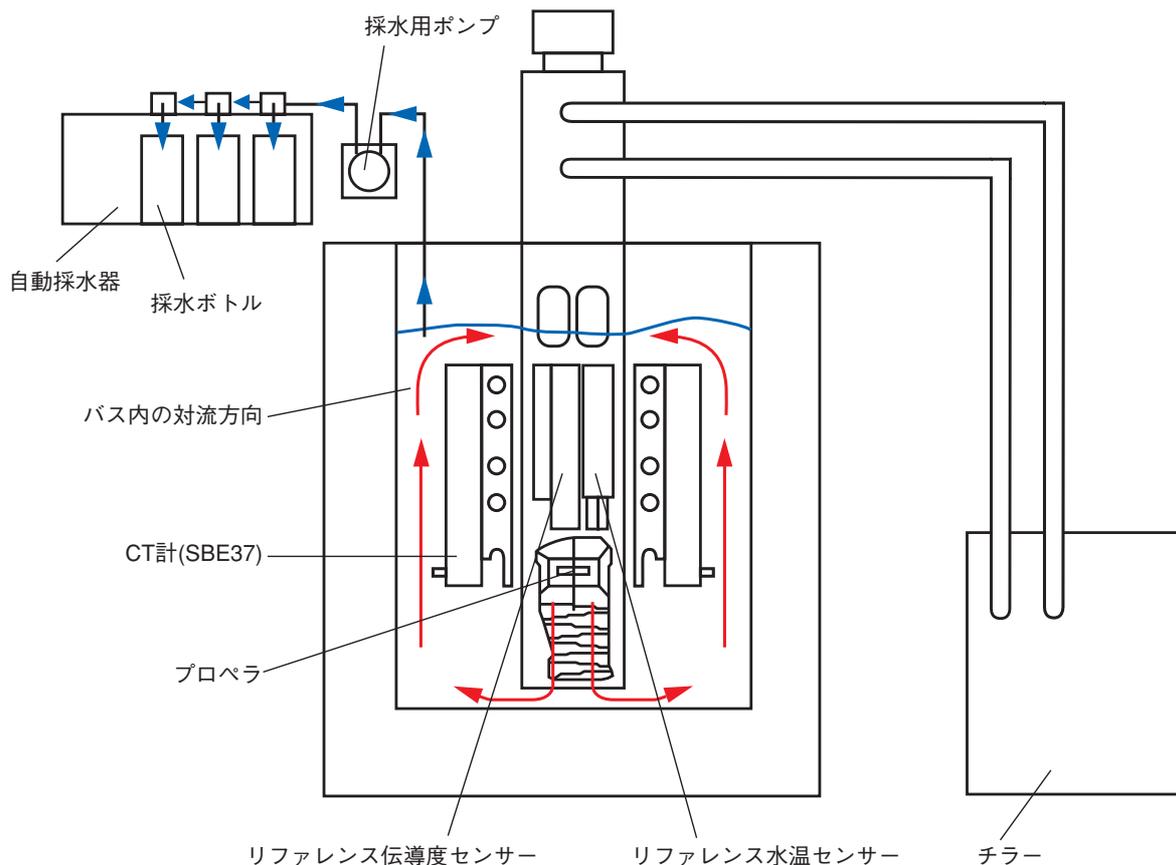


図3 水温および電気伝導度センサー(SBE37用)検定バスシステム概念図。冷却コイルは、バスの底に、ヒーターは中央部のチューブ内に設置されている。

Fig. 3 Schematic diagram of temperature and conductivity calibration system for SBE37. A cooling coil locates at the bottom of the bath, and a heater is installed inside of the tube at the center of the bath.

値とバス内の基準センサーの電気伝導度との比を用いて他の検定点における電気伝導度をスロープ補正する方法をとる。この複雑な手続きにより、電気伝導度の検定には、多くのエラーが入る可能性がある。図5は、このスロープ補正值(図中では、Cratioと表記)の検定毎の時間変化を示しているが、この値が1より大きくはずれれば電気伝導度の検定でエラーが大きくなる。

以上の操作を設置前(事前)検定と回収後(事後)検定のそれぞれで、各センサーに対して通常は2回行い、その2回の結果がほぼ一致する事を確認し、常に検定結果の確かさを確認することとしている。

2.2. 検定精度

図6に、水温30度でのバスのリファレンスセンサー(準器)であるSBE3の各検定ポイントでの検定中の標準偏差を示す。各温度帯で検定の水温がほぼ0.001K(1mK)以内で安定していることがわかる。このことから検定バスによる水温の安定度は0.001K(1mK)程度であるといえる。

図7は、112台のCTおよびCTDセンサーのメーカー(シーバー

ド社)による検定と、メーカーから海洋科学技術センターに納品された直後に行われた検定との差の頻度分布と平均および標準偏差を示す。計算に際し、標準偏差の3倍以上大きくはずれたセンサーを除去した後、再度、平均と標準偏差を計算している。除去したセンサーの数は、全体の1割程度であった。また、ここでの差は全て、水温30℃・電気伝導度6S/mの値での値とした。水温では、その差の平均は非常に小さく+0.8mKであり、標準偏差も非常に小さい(0.0006K)ことがわかる。水温の準器であるSBE3は1年に一度、メーカーに送り返し、検定を行っている。その結果、1年間の経時変化は0.001K(1mK)以内であることがわかっており、また検定バスの安定度が0.001K(1mK)である。これらは、メーカーと海洋科学技術センターの水温検定の差が0.002K(2mK)以内であることと矛盾しない。電気伝導度では、差の平均は非常に小さい(0.13mS/m)が、差の標準偏差が0.85mS/mであった。この値は、6S/mにおける塩分値換算でほぼ0.006psuに相当する。このように差の標準偏差が大きいことは、前述のように電気伝導度の検定手法が複雑であることによると考えられる。この標準偏差を我々は海洋科学技術センターにおける電気伝導度の検定誤差とした。

SBE37の検定

1. 人工海塩を溶かし、校正バスの塩分を35psu付近に調整する。
2. CT計(計10台)をセットし、35°Cに加熱。
3. 自動採水器に採水ボトル3本をセットし、検定を開始。
4. 32.5°C(約6S/m)、29°C(約5.7S/m)、24°C(約5S/m)、18.5°C(約4.6S/m)、15°C(約4.2S/m)、4.5°C(約3.2S/m)、1°C(約3S/m)の7点を高温側より、順々に検定バスの温度を変化させ、水温の標準偏差が1mK以内になった後、600秒間検定を行う。24°Cにおいて、3本の瓶に採水する。

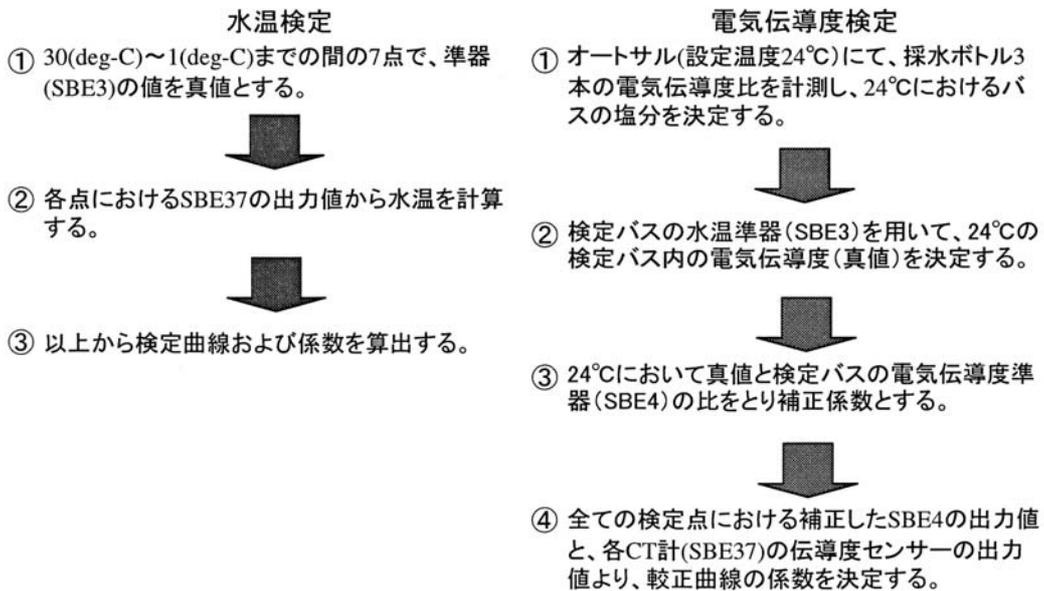


図4 水温および電気伝導度の検定手順フローチャート

Fig. 4 Flowchart of temperature and conductivity calibration



写真1 検定バスの外観

Photo 1 Overview of calibration bath system for TRITON CT sensors



写真2 検定バスを上側から見たところ(なお、検定中は蓋をする)。

Photo2 Inside view of calibration bath. Ten of TRITON CT sensors can be calibrated at one time.

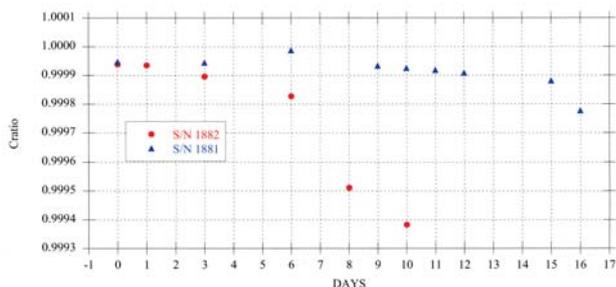


図5 設定温度24℃におけるオートサルで測定した塩分から計算されたバスの電気伝導度(真値)に対するバス内で準器(SBE4)により計測された電気伝導度の比。横軸は、検定日を示す。

Fig. 5 Example of daily change of the ratios (Cratio) of measured conductivity from the reference sensor (SBE4) to "true" conductivity calculated from Autosal salinity at 24deg-C. Sensor S/N 1881 was used from 12 Jan. 1999, and sensor S/N 1882 was from 18 Jan. 1999 in this experiment.

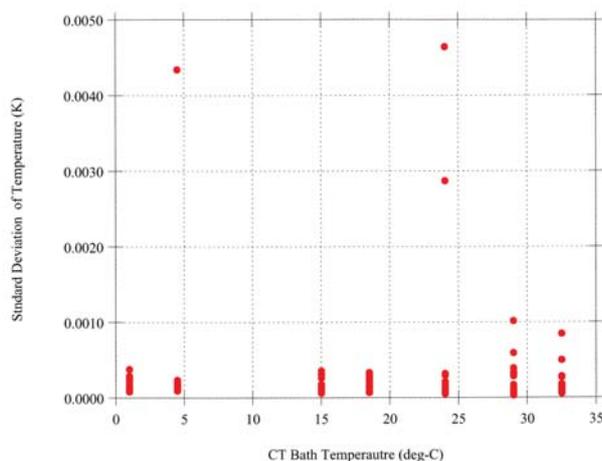


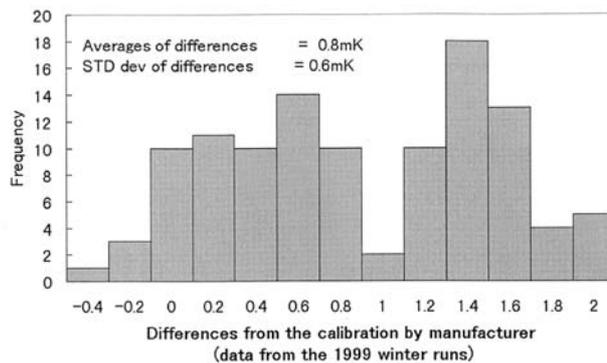
図6 検定時のリファレンス水温センサー(準器)の標準偏差
Fig. 6 Standard deviation of reference temperature sensors during calibrations.

3. 事前・事後検定によるセンサーの経時変化の評価

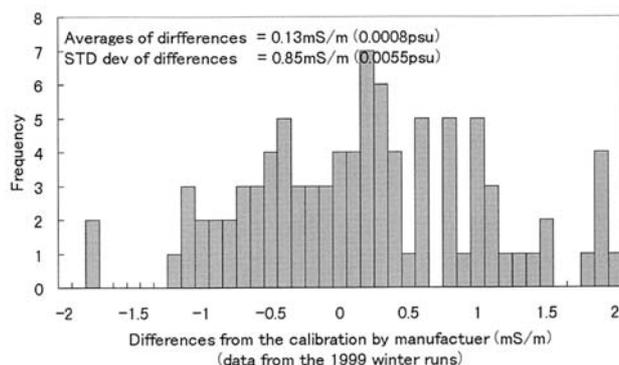
これまで電気伝導度センサーを係留に用いた例は少なく、その長期にわたる経時変化についてはほとんど情報がなかった。そこでセンター独自で設置前および回収後に検定を実施し、また、現場での比較により経時変化を押しえそれによりデータの質を把握することとした。ここでは、まず設置前および回収後に実施した検定の結果によるセンサーの経時変化について述べる。

3.1. 評価結果

今回使用したデータは、1998年に約3ヶ月係留されたセンサー群、1999年に約4ヶ月、約8ヶ月、約12ヶ月係留されたセンサー群の係留前の検定値と、係留後の検定値を用いた。図8に、水温センサーについて横軸に係留日をゼロとした係留日数、縦軸に係留前の検定係数を用いて計算された係



(a)



(b)

図7 SBE37のメーカー検定結果と海洋科学技術センターの検定結果による差の分布 (a)は水温検定、(b)電気伝導度は電気伝導度検定の差を示す。電気伝導度の塩分値換算(かっこ内の数字)は、水温30℃、電気伝導度6S/mにおいて計算した。

Fig. 7 Histogram of differences between manufacture's calibration and JAMSTEC's calibration. The difference of temperature calibrations is shown in (a) and that of conductivity calibration is in (b). The salinity values in parenthesis in (b), which correspond to average and standard deviation of differences of conductivity, were estimated at 30 degree-C and 6 S/m.

留後の検定時の経時変化を示した。この図には、全ての検定データが入っており、そのため、係留前に何度か行った係留前検定データもプロットされている。係留後のデータを見ると、水温計の変化量は2個のセンサーを除き、全て0.003K/年(3mK)以内に収まっていた。水温計の経時変化は設置深度によらなかった。

図9は、6S/m時の設定で電気伝導度センサーの経時変化量を係留期間毎に平均と標準偏差を計算し、係留期間を横軸にプロットしたものである。電気伝導度センサーについては設置深度によって経時変化に差がみられたので、深さ毎(0-100m, 125m-200m, 250-750m)に分けて、その平均と標準偏差を計算したものを示している。係留開始から90日のところで、マイナス方向への経時変化を示しているが、これらは1998年に3ヶ月係留されたセンサーである。このセンサーについては、回収後にハード部に問題があることがわ

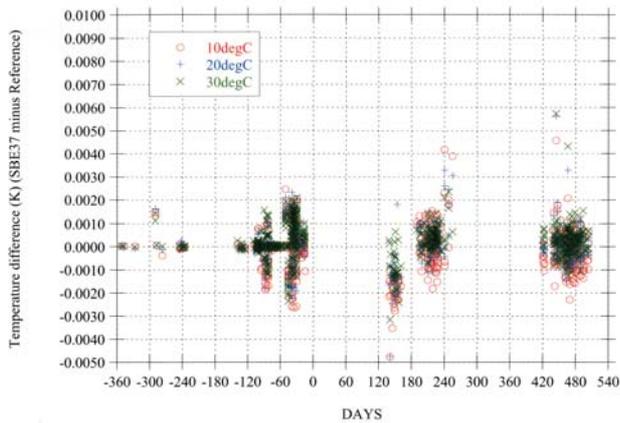


図8 検定結果による水温計の経時変化(係留開始日を0日としている)。経時変化を見るために、30℃における出荷時の温度検定からの差を示す。なお、この図には係留以前の投入前検定(事前検定)データも入っているため、0日以前にもプロットされている。事前検定のばらつきも、0日以降の事後検定のばらつきも同程度であり、係留した事による経時変化は認められない。

Fig. 8 Drift of temperature sensors estimated from post calibrations (calibration after recovery). The drift is estimated at 30 degree-C and shown by days beginning from deployed date. In this plot, the calibration data before deployments were also included. The temperature drift due to mooring is not evident.

かったもので、それと何らかの関係があると考えている。このことを考慮し、4ヶ月以降を見てみる(図9及び表1)と、250m以深に設置したセンサーには経時変化が少なく、12ヶ月後の検定結果からも係留前と比較して平均で経時変化はほとんどなく、標準偏差で1mS/m程度の変化量であった。それを30℃、6S/mにおいて塩分値に変換すると0.0065psu程度となる。この値は、前章の電気伝導度の検定精度と同程度であり、逆の言い方をすれば、経時変化は検出出来なかったこととなる。一方、浅い層に設置していたセンサーは経時変化も大きく、海面付近のセンサーは、経時変化は平均で12ヶ月後には10mS/mとなり、その標準偏差も5mS/mとなる。それを塩分値に換算すると平均値が0.065psu、標準偏差で0.033psuとなる。米国の海洋大気庁(NOAA)は、SBE37に使用されているものと同じ計測方式の水温センサーおよび電気伝導度センサーを備えているSEACAT(SBE16)を、TAO(Tropical Atmospheric and Ocean)プイの深度26mと100mに2台づつ1987年から1998年にかけて6~7ヶ月間係留した。その結果によると、事前事後の検定結果から水温センサーの経時変化量が0.003K以内、電気伝導度センサーの経時変化量が塩分換算値で0.015psu(1年換算で0.03psu)以下であったと報告されている(McPhaden et al.,1990)⁹⁾。その結果と比較すると、SBE社製電極式の電気伝導度セン

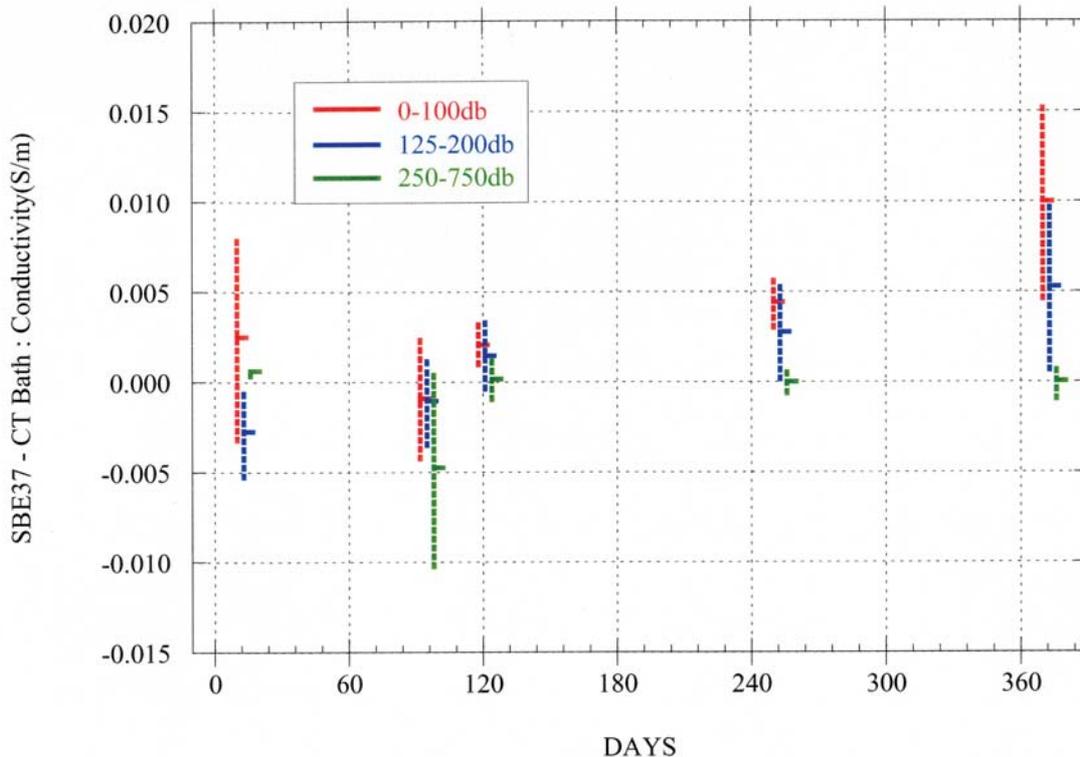


図9 検定結果による電気伝導度計の経時変化(係留開始日を0日とし、6S/mでの値を示す)。赤は、0-100mに係留されたセンサー、青は125-200mに係留されたセンサー、緑は、250-750mに係留されたセンサーの平均と標準偏差を示す。

Fig. 9 Drift of conductivity sensors estimated from the post calibrations. The drift is estimated at 6S/m, and shown by days beginning from deployed date. Red bars, blue bars and green bars indicate the average and standard deviation of drift in the depth ranges of 0-100m, 125-200m and 250-750m, respectively.

表1 トライトンプイのCTセンサーの事前・事後検定による経時変化

Table 1 Drifts of CT sensors for TRITON buoys calculated from the calibration data before deployment and after recovery.

Average period of moored in days	Surface layer (0-100m)			Subsurface layer (125-200m)			Deep layer (250-750m)		
	Average	Standard Dev.	No. of Data	Average	Standard Dev.	No. of Data	Average	Standard Dev.	No. of Data
13	2.50	5.73	5	-2.75	2.54	3	0.62	0.29	4
95	-0.92	3.36	17	-1.05	2.47	11	-4.75	5.50	15
121	2.06	1.11	18	1.45	1.85	12	0.16	1.14	15
253	4.41	1.44	9	2.75	2.63	6	-0.01	0.65	8
373	9.99	5.42	20	5.27	4.64	13	0.02	1.00	15

Unit in this table is mS/m, and 1mS/m corresponds to 0.0065psu at 6S/m and at 30 degree-C. Shadowed values are calculated with few numbers of data.

サーの場合、係留すると正の方向に経時変化し、係留期間が増加すると経時変化量も増すという傾向がみられる。これらの結果から、表層の塩分データを補正なしに使用した場合には、0.1psu程度の経時変化量を含んだデータがありうることを示しており、トライトンプイで観測される補正なしの塩分データ(リアルタイムで送信されているもの)の精度は表層で0.1psu程度であると評価される。

4. 現場での船舶によるCTD観測データとの比較

4.1. 比較方法

係留したトライトンプイの塩分データの実海域での比較のため、ブイから約1~2海里(1海里=1.85km)の距離で、「みらい」および「かいよう」によってCTD観測を行った。観測船のCTDシステムにはSBE 9Plus(電気伝導度センサーはSBE4、温度センサーはSBE3)を使用した。比較に用いたデータは、トライトンプイの設置直後および回収直前に行ったCTD観測データと、係留期間中にトライトンプイの点検作業前後に行ったCTD観測データである。これらのCTD観測データと同時刻のトライトンプイの回収データを比較した。対象とした期間は、1999年3月から2001年3月までのデータである。表2に観測船によるCTD観測データの取得時期とトライトンプイの係留地点および期間の関係を示す。トライトンプイに取り付け係留していたCTおよびCTDセンサー(SBE37)の事前事後の検定結果から、水温センサーの経時変化量が0.003K(3mK)以内と非常に小さいことが明らかになったので、現場比較では水温センサーの経時変化については考慮せず、SBE37の水温データと最も近い水温データを船舶で行ったCTD観測データから抽出し、その抽出した水温データと同じ圧力値の電気伝導度値と、SBE37の電気伝導度センサーの値をそれぞれのセンサーの水温値を利用して、塩分に換算した後比較することとした。図10は比較に使用したセンサー(SBE37)とCTD観測データ(約600個のデータ)との塩分値の差の分布を示す。ほとんどが、ゼロ付近に集中しているが、2psu以上違う場合もある。西部熱帯太平洋は降雨による海面付近での非常に強い塩分フロントの形成と、垂表層での北からの低塩分水と南からの高塩分水の移流によって水塊変動が激しい。そのた

表2 トライトンプイ係留期間と船舶によるCTD観測

Table 2 moored periods of TRITON buoys and periods of shipboard CTD casts.

Site No.	Long. Lat.	1999 Feb-Mar	1999 Oct-Nov	2000 Feb-Mar	2000 Oct-Nov	2001 Feb-Mar
1	156E 8N	○	○	●	○	●
2	156E 5N	○	○	●	○	●
3	156E 2N	○	●	●	○	●
4	156E 0N		○	●	○	●
5	156E 2S	○	○	●	○	●
6	156E 5S	○	○	●	○	●
7	147E 5N		○	○	○	○
9	147E 0N	○	●	○	○	○
12	138E 2N		○	○	○	○
13	138E 0N		○	○	○	○

○ : CTD cast by R/V "MIRAI" and "KAIYO"

● : moored periods of TRITON buoys

め、比較の際に見られる塩分差の大きな値はTRITONとCTD観測のわずかな時空間の違いにより、異なった水塊を比較した結果である可能性が考えられる。そこで、同一の水塊を比較するという目的の指標としてTRITONとCTD観測による水温の差が0.01K以内 という基準を用いて、その基準を満たす

データを対象に塩分の比較を行った。なお、第3章において、1999年2月から2000年3月までの期間に係留および回収されたセンサーを対象とした経時変化の解析を行ったので、現場比較においても同じ期間を対象とした。

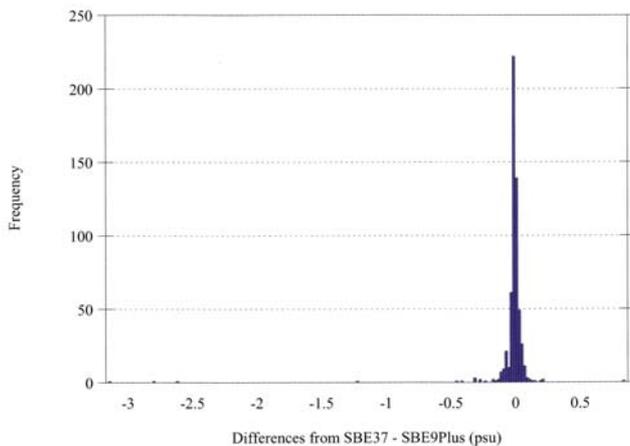


図10 SBE37とSBE9Plusとの塩分値の差の頻度分布。0.02psu刻みで、使用した全てのデータに対して行った。

Fig. 10 Histogram of salinity difference between SBE37(TRITON CT sensors) and SBE9Plus (shipboard CTD). The increment is 0.02psu.

4.2. 比較結果

CTセンサーと船舶によるCTD (SBE9Plus)センサーの塩分データとの差をとり、設置深度毎に差の平均と標準偏差を係留開始からの経過月毎に計算した。船舶によるCTDの塩分データの精度管理は、観測時に同時に採水した海水をオートサルで計測し、その比較により行っている。今回利用した現場比較の基準としたCTDによる塩分データは絶対値で-0.003psuから+0.003psuの差であり、標準偏差は最大で0.003psuにおさまっているため、0.01psuの違いは有意と言える。図11は経過月ごとに塩分の差を図にしたもので、設置深度毎の係留時間毎の平均と標準偏差を表している。ここでも、経時変化の傾向を把握するため、標準偏差の3倍以上に大きくはずれたデータを除去した後、再度平均と標準偏差を計算している。

係留期間が長くなるにつれ、陸上検定データの解析で見られたように200m以浅の層でばらつきはあるものの、時間とともに正の方向に経時変化の様子が見られ、特に、表層から亜表層(0-100mおよび125-200m)では、陸上検定結果の解析で見られるように、時間とともに経時変化が正の塩分の差として大きくなっていく様子が伺え、1年間の係留後には、最大で0.07psu程度の正への経時変化が見られた。ただし、表層(0-100m)での塩分の比較では、ばらつき(標準偏差)が大きく、実際の比較において塩分場がばらついていることが示唆された。一方、250から750m深のセンサーは係留時間が

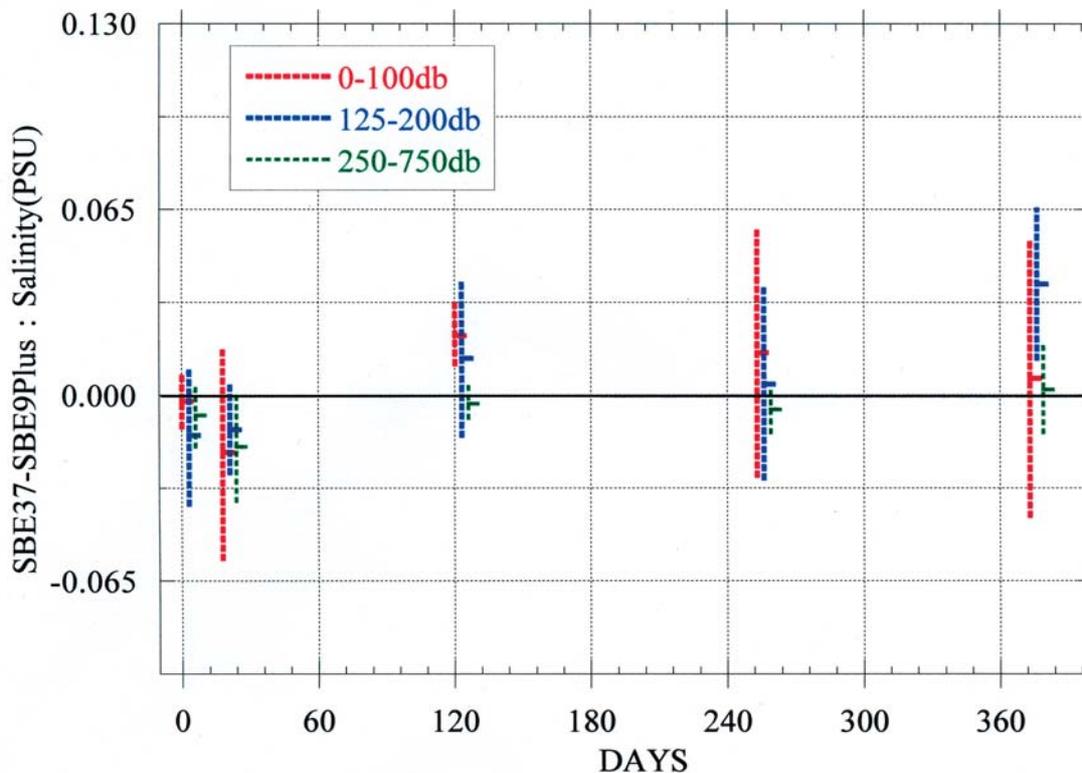


図11 1999年2月から2000年3月までの現場比較による塩分値の経時変化(係留開始日を0日としている)

Fig.11 Drift of salinity estimated from the in-situ comparison between TRITON CT sensor and shipboard CTD (SBE9Plus) from February 1999 to March 2000.

経過しても塩分差はそれほど大きくなっておらず、現場比較の結果からも深い層では電気伝導度センサーの経時変化が少ないことが推測される。

これらより、概ね陸上の事前・事後検定データの解析で推測されるように表層での電気伝導度センサーの経時変化は正の方向に時間とともに大きくなるのが現場比較からも確認された。よって、トライトンからの塩分データの精度向上には、センサーの経時変化を考慮した適切な補正が必要と考えられる。

5. 補正方法および補正結果

5.1. 補正方法

ここでは、経時変化が時間に対して線形であると仮定し、事前と事後の検定データを利用し、電気伝導度の補正を試みた。検定は事前事後ともに、実際に観測される値を想定した水温で30℃から0℃付近、電気伝導度で6S/mから3S/m付近までの範囲における7点ほどの離散点で行われているが、連続的な経時変化の特性を把握するためにはこの検定結果を用いて、水温あるいは電気伝導度と経時変化量との間の回帰式を決定することが必要となる。回帰式の決定の際には最尤推定法(坂元ら, 1983¹⁰⁾)を用いて赤池の情報量基準(AIC)を元に3次までの多項式の中から最適な次数を選択した。選択した回帰式はセンサーの回収後すなわち最終観測値に対するものであるが、実際には観測開始から観測終了までに経時変化量は時間変化しており、その変化傾向を考慮する必要がある。しかし係留中でのセンサーの検定は事実上不可能であり、正確な経時変化を知ることはできないので、今回はセンサーの経時変化は線形であると仮定し、時間方向には経時変化量を直線内挿して補正を行った。

なお、トライトンの水温および塩分データの目標精度は0.01℃(K)と0.01psuであるが、経時変化の補正の必要性は

検定で求めた経時変化量がこれらの基準値を越えるかどうかによって決まる。今回の場合、水温に関しては経時変化量が0.003K(3mK)以内であり、目標精度を越えるセンサーが無いので補正は不要であった。それに対して塩分は水温と電気伝導度の関数であるので、塩分の精度は温度と電気伝導度の両者の精度に依存する。図12は塩分変化に対する水温変化と電気伝導度変化の寄与の比を示した1例である。赤線は水温一定で電気伝導度を微小変化させた時の塩分変化 $[\partial S/\partial C]$ と電気伝導度一定で水温を微小変化させた時の塩分変化 $[\partial S/\partial t]$ の比をとり、各水温・電気伝導度値上にプロットしたものである。黒線は観測海域での塩分値(33-36psu)の領域を示しているが、この領域では水温の微小変化と電気伝導度の微小変化の塩分値の変化に対する寄与が比の値で9~11(K/(S/m))となり、電気伝導度の変化0.01S/mは水温の変化0.01Kの10倍程度の割合で塩分の変化に効くことがわかる。したがって、水温の検定結果から水温の精度を低めに見積もることとし、経時変化量の最大値を少し上回る0.003K(3mK)と検定精度0.002K(2mK)の和である0.005K(5mK)とすると、この水温の精度と等価になる電気伝導度の目標精度は0.0005S/m(0.5mS/m)となる。そこで、塩分に関する経時変化の補正は係留期間に係わらず、電気伝導度の経時変化量が0.5mS/mを越えるセンサーに対して行った。

5.2. 補正結果

結果として146台中109台のセンサーに対して補正を行ったが、使用した回帰式の次数別の事例数と残差2乗和の平均値ならびに最大・最小値を図13と表3に示す。結果をみると全109例中で3次の回帰式を用いた例が77例と全体の64%を占めている。残差2乗和に関しては全体の約97%が0.25(mS/m)²以下に収まっている。これは、残差に換算すると

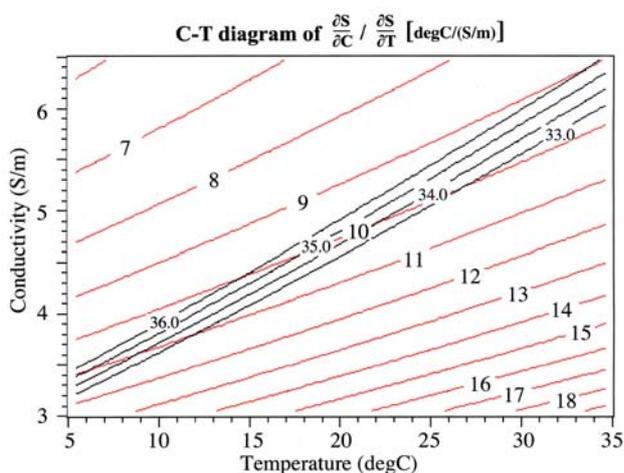


図12 塩分値に対する水温と電気伝導度の寄与の比。寄与の比を赤で示し、黒は塩分値を示す。

Fig.12 Ratio of contribution of conductivity and temperature to salinity. Red lines indicate the ratio, and black lines indicate the salinity values.

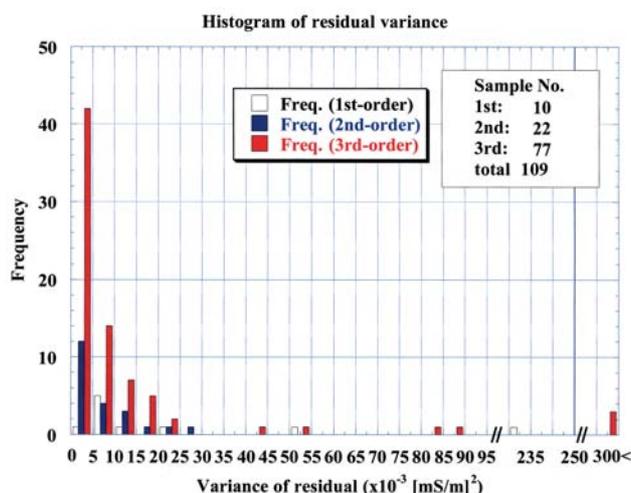


図13 回帰に対する残差分散の頻度分布。補正を行った全てのセンサーに対する頻度分布。

Fig.13 Histogram of residual variance for regressions for all data used for correction.

表3 回帰式に対する残差分散の平均値, 最大値および最小値

Table3 The mean, maximum and minimum value of residual variance for regressions.

Order	Number	Variance of residual ($\times 10^{-3}(\text{mS/m})^2$)		
		Ave.	Min.	Max.
1 st	10	36.70	3.97	235.00
2 nd	22	7.64	1.00	28.00
3 rd	77	52.30	0.14	2530.00
Total	109	41.90	0.14	2530.00

0.5mS/m となり, 平均の残差が目標精度以下に収まっていることを意味している。このように平均的には電気伝導度の目標精度を満たす補正がほぼできていることが見て取れるが, 実際には個々のセンサーに対する検討を行う必要がある。

ここで, 電気伝導度と経時変化量に対する最適な回帰関数決定の1例を示す。図14(a)は電気伝導度値に対する経時変化量の関係であり, 図14(b)は電気伝導度の回帰式より算出した経時変化量と検定による経時変化量との差の関係を示している。これらの図は1999年3月から約1年間5°S, 156°Eの深度50mに係留した経時変化量の比較的大きいセンサーの例であり, 6S/mにおける変化量が1年間で18mS/m程度であった。図14(a)は検定による変化量と1次から3次の回帰直線を示しているが, 表4にそれらの回帰式に対するAICと残差分散を示す。このセンサーの場合, 前述の手順で求めた最適な回帰式はAICが最小となる2次であったが, この図からは1次の直線に比べて2次と3次の曲線の方が検定時の変化量に近いことが確認できる。また, 図14(b)をみると, 1次のものよりも2次と3次のほうが推定された経時変化量と検定された経時変化量からの差が系統的に小さいことが示されており, 2次と3次の回帰式に関しては, 残差分散値と残差の分布がともに違いが小さいので, より低次である2次の回帰式の選択が妥当であると言える。なお, この時の残差の値が経時変化が直線的であるという仮定の下での誤差となるが, この例の場合は0.3mS/mの範囲に収まっており目標とした精度の0.5mS/mを十分に満たしている。

経時変化の補正に関して, 残る誤差要因は経時変化を直線に仮定した点である。前述のとおり経時変化を知ることが不可能であるが, 観測値の評価を行うひとつの手段として係留点付近で行っているCTD観測との比較が挙げられる。図15(a)は5°S, 156°Eにおいて全係留期間の2/3程度の時期に当たる1999年11月6日に行われたCTD観測データと経時変化補正の前後のトライトンデータのプロフィールである。この図を見ると, 200m深を除いて, 実線で示されたCTD観測データの値に対して補正前(×)よりも補正後(+)のほうがより近い値を示しており, それはより浅い深度で顕著であることが確認できる。200m深に関しては, 一見すると補正したことによって現実の値から遠のいたように見える

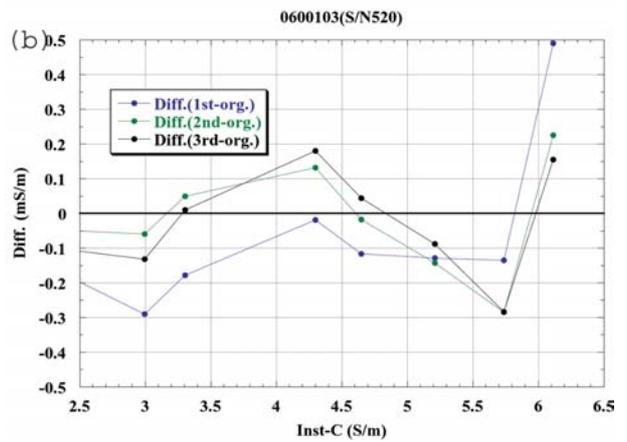
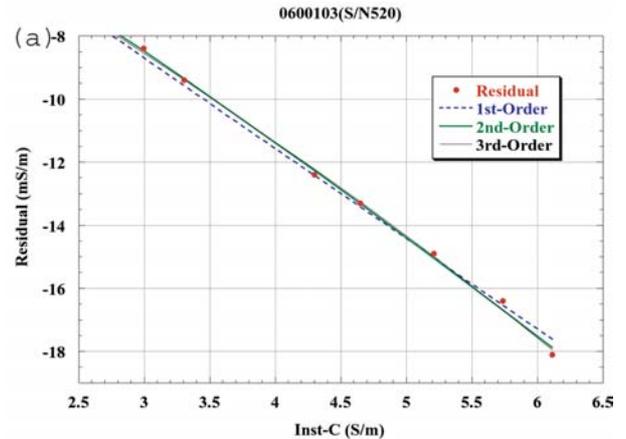


図14 (a)ポストキャリブレーションで得られた残差分散に対する1次から3次までの回帰の例と(b)1次から3次までの回帰式により補正された残差と実際の残差の例。データは, 5S156Eの50m深に係留されたセンサー(S/N520)の補正で得られた結果を示す。

Fig.14 (a) An example of regression curves of residuals (drift values) from post-calibration, which are fitted to 1st to 3rd order polynomial expressions, and (b) differences between corrected drifts from 1st to 3rd order polynomial expressions and drifts. The data is from the sensor (S/N 520) moored at 50 meters depth at 5S156E.

表4 回帰式に対するAICと残差分散

(S/N 520: 1999年3月~2000年3月5°S, 156°Eの50mのセンサー)

Table 4 AIC and residual variance for regressions of the S/N 520 sensor, which is moored at 50m depth from Mar. 1999 to Mar. 2000.

Order	AIC	Variance of residual ($\times 10^{-3}(\text{mS/m})^2$)
1 st	-103.98	62.7
2 nd	-109.64	24.1
3 rd	-108.58	21.4

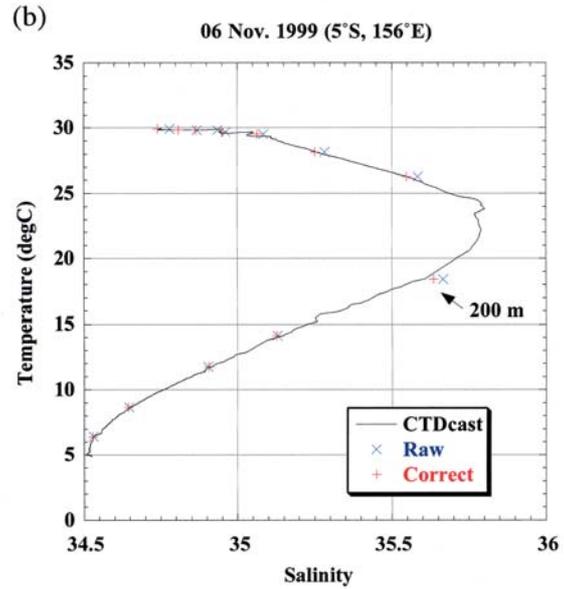
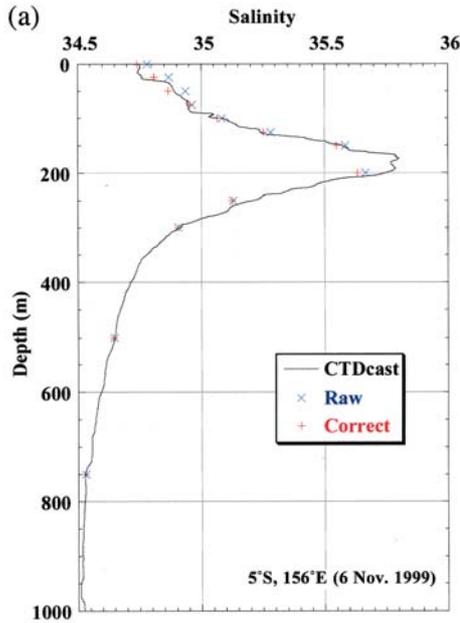


図15 1999年11月6日における南緯5度，東経156度での塩分の鉛直プロファイル (a)，1999年11月6日における南緯5度，東経156度でのT-Sダイアグラム (b)

Fig.15 (a)Vertical profile of salinity at 5S,156E on 6 Nov. 1999 and (b)T-S diagram at 5S,156E on 6 Nov. 1999.

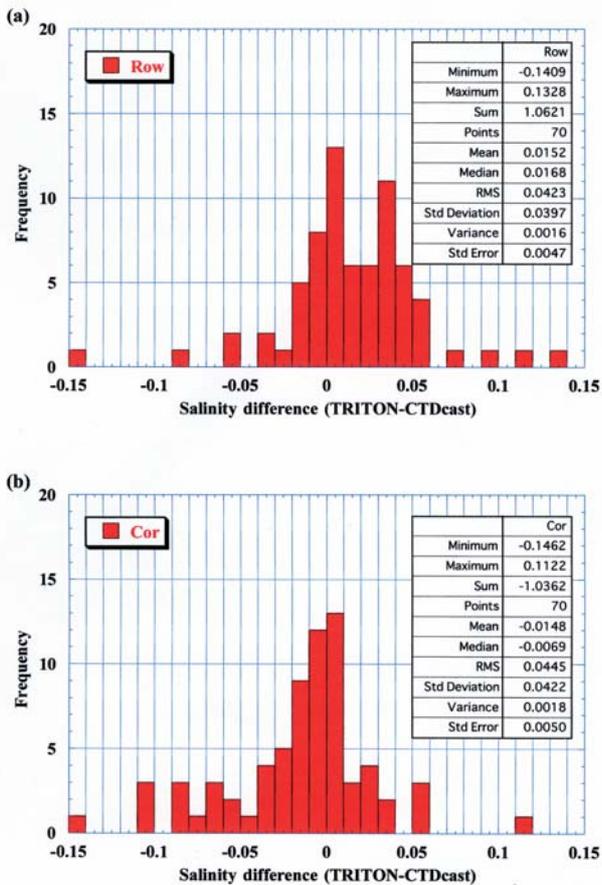


図16 トライトンによる塩分値と船舶によるCTD観測の塩分値との差の分布。(a)は補正前(b)は補正後を示す。

Fig.16 Histogram of difference of salinity between TRITON CT sensors and shipboard CTD for (a)raw data and (b) corrected data.

が、これはトライトンの200m深に圧力センサーがないために、実際の深度ではなく設定深度(200m)で塩分プロファイルを描いたことに起因していると考えられる。そこで、T-Sダイアグラム(図15(b))でみると、200m深においても他の深度同様に補正後の方が船舶によるCTD観測の値に近いことが確認できる。このことから、このケースにおいては、経時変化量を直線で仮定することの妥当性が支持される。

電気伝導度センサーの経時変化に対する補正の効果を検討するために156°E上の6測点(8°N, 5°N, 2°N, 赤道, 2°S, 5°S)における1999年3月から2000年3月までのTRITONデータとCTD観測データを用いて補正前後の比較を行った。CTD観測データの比較対象データの抽出は4章と同じ方法である。係留中と回収前のデータを用いた全70例のトライトンの塩分値からCTD観測データの塩分値を引いた差のヒストグラムを図16に示す。図全体を見ると、補正を行ったことにより頻度分布はゼロを中心とした山の形に近づき、さらに、統計的な数値を見ても、補正前の平均値0.015psu、標準偏差0.040psu、中央値0.017psuという値が、補正後で平均値-0.015psu、標準偏差0.042psu、中央値-0.007psuとなり、補正の前後で標準偏差の変化がほとんどなく、中央値が0に近づいているので補正によってCTD観測データとの差が改善されていることがわかる。しかし一方で、補正後には補正前にはみられなかった-0.05から-0.1psuの範囲で頻度が高くなっており、センサーによっては補正による差の増加が確認できる。

この範囲に相当するデータに注目すると、3つのカテゴリーに分類できる。一つ目は、全13例中5例あり、トライトン係留中と回収前のいずれにおいても補正により逆に差が大きくなっているものである。これらの例においてはセンサーの経時変化量が実際よりも大きく見積られてしまった可能性があり、こ

の原因としては、回収後から事後検定までにセンサーの特性が変化し、それにより、誤った補正が行われたことが考えられる。センサーの事後検定は、ほとんどの場合回収航海終了後2ヶ月以内で行っているが、これまで検定されたセンサーには、状況により、回収後数ヶ月かかってしまったセンサーも存在するため、回収後は速やかに検定することが必要である。なお、事後検定自体に関しては、通常、一つのセンサーに対し2度の検定を実施し、その差が小さいことを確認しているため、事後検定自体には問題はなかったと考える。

2つ目のカテゴリーは補正值に比べてトライトンとCTD観測データの差が大きい2例であり、これらは200mと300mという温度躍層に位置するセンサーのデータである。この2例においては、トライトンの水温とCTD観測値の水温の差が、0.05K程度と比較的大きく、比較した水塊が異なっている可能性がある。3つ目のカテゴリーに相当する残りの6例に関しては補正による差の増加の原因は今のところ特定できないが、その全てが、100 mよりも上層に限られるという共通性を持っている。

補正の結果、ほとんどのセンサーの経時変化は係留中に起こり、時間的に線形な補正によりデータの質は改善するが、同時に、むしろ差が増大するセンサーも見られることから、結果に対する十分な吟味が必要であることが示された。

6. まとめと議論

本研究の結果を以下に要約する。

- (1) トライトンブイに取り付け係留しているSBE37の水温センサーについては、陸上での事前事後の検定結果から経時変化はほとんどなく、熱帯域表層での変動を明らかにするために必要な精度0.01Kを十分に満たしていた。電気伝導度センサーの事前事後の検定結果からは6S/mでの塩分換算で表層のデータに約0.1psu/年程度の経時変化量が見られたが、250m以深のデータについては、0.01psu/年以内の経時変化量であり、センサーは非常に安定している。
- (2) 現場比較においても、電気伝導度センサーに陸上検定の解析と同等の経時変化を確認することができ、表層および垂表層(0-200m)のデータでは、経時変化量に相当する差が大きく正にシフトする傾向を示し、6S/mでの塩分換算で最大0.07psu程度であり、陸上検定による解析と同程度であった。これにより、事前・事後の陸上検定データを利用して補正することにより、トライトンブイの塩分データの改善が期待できた。
- (3) 電気伝導度の経時変化量の回帰計算による補正においては、主として3次の多項式を用いることにより誤差を抑えることができた。
- (4) 電気伝導度センサーの経時変化が時間に関して線形であると仮定し補正を行ったところ、現場のCTD観測データとの差が多くのケースで改善されたが、比較した例の2割弱のデータは逆に補正によって差が大きくなっていた。

本研究では、センサーの経時変化の特徴を把握し、現場での比較を行い、データの質の向上のための補正方法を検討したが、同時に、上記の(4)の問題も抽出できた。この間

題に関しては、運用において設置や回収時に可能な限り船舶からのCTD観測を実施し、トライトンブイのCTセンサーとの比較を行う必要がある。これにより、係留中に経時変化が起こったものかどうかを判定でき、補正を行う上で有益な情報となる。また、事前検定と事後検定は、設置や回収との期間をなるべく短くして、途中のセンサーの経時変化が起こらないように注意を払う必要がある。

7. 謝辞

トライトンブイの観測データを取得は、多くの人々の高い技術力によるところが大きい。設置、回収および点検等を行うにあたり、船の運航等については、「みらい」、「かいよう」の船長を始め乗組員の方々に、トライトンブイの整備および運用については、センター研究者および(株)マリン・ワーク・ジャパン観測技術員によって行われている。

8. 参考文献

- 1) 黒田芳史・網谷泰孝, "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(2), 157-172, (2001)
- 2) Lukas, R. and E. Lindstrom, "The mixed layer of the western equatorial Pacific Ocean", J. Geophys. Res., 96, 3,343-3,358, (1991)
- 3) Sprintall, J. and M. J. McPhaden, "Surface layer variations observed in multi-year time series measurements from the western equatorial Pacific", J. Geophys. Res., 99, 963-979, (1994)
- 4) Ando, K. and M. J. McPhaden, "Variability of surface layer hydrography in the tropical Pacific Ocean" J. Geophys. Res., 102, 23,063-23,078, (1997)
- 5) Mae, C. "Estimating the influence of salinity on sea level anomaly in the ocean", Geophys. Res. Letter. 25, 3,551-3,554, (1998)
- 6) Delcroix, T., L. Gourleau and C. Henin, "Sea surface salinity change along the Fiji-Japan shipping track during the 1996 La Nina and 1997 El Nino period" Geophys. Res. Letter. 25, 3,169-3,172, (1998)
- 7) Ando, K. and Y. Kuroda, "Two modes of salinity and temperature variation in the surface layer of the Pacific warm pool", Submitted to J. Oceanography.
- 8) 気象庁編, 海洋観測指針(第1部), (気象庁), 38-40, (1999)
- 9) McPhaden M. J., H. P. Freitag and A. J. Shepherd, "Moored Salinity Time Series Measurements at 0°, 140° W", J. Atmospheric and Oceanic Tech., 7, 568-575, (1990)
- 10) 坂元慶行, 石黒真木夫, 北川源四郎, "情報量統計学", 236pp, 共立出版, (1983)

(原稿受理: 2001年7月31日)