

天鷹丸CTDの塩分・溶在酸素データの更正について

千手智晴^{*1}・武田靖昭^{*2}・実藤 了^{*2}・巽 重夫^{*2}・
鎌野 忠^{*2}・富賀見清彦^{*2}

Calibration of salinity and dissolved oxygen data for T/V Ten'yo-Maru CTD system

Tomoharu Senju^{*1}, Yasuaki Takeda^{*2}, Satoru Sanetou^{*2}, Shigeo Tatsumi^{*2},
Tadashi Kamano^{*2}, and Kiyohiko Fukami^{*2}

Salinity and dissolved oxygen sensors on T/V Ten'yo-Maru CTD system are examined on the basis of hydrographic data obtained during its 66th cruise in 1995. For salinity, a good correlation between CTD data and water sample salinities determined by salinometer is confirmed. Two calibration methods, direct regressions between CTD and the sample salinities and the cell-factor calibration method, are applied for the sake of comparison. The CTD data can be corrected with 0.004 psu of root mean square by both methods, though the cell-factor method is more sensitive to error detection. Dissolved oxygen contents measured by CTD always showed much higher values than oxygen values determined by the Winkler method; the oxygen sensor was in an unusual condition. However, the relative values are considered to be acceptable because profiles of dissolved oxygen measured by CTD show characteristic features of oxygen distribution deduced from historical data. Linear regressions are applied between oxygen contents measured by CTD and determined by the Winkler method. As a result, CTD oxygen data can be corrected with less than 1.0 ml l⁻¹ of root mean square. Some erroneous operations of rosette sampler were detected by careful comparison CTD data with sample data. To obtain high quality data, water sampling is necessary to check the rosette sampler operation as well as the calibration of salinity and dissolved oxygen data.

1. はじめに

最近、気候変動などのグローバルな現象に、海洋が大きく関与していることが、改めて指摘されるようになった。そして、海洋で起こっている現象を把握するための、海洋観測の重要性がますます認識されるとともに、観測

の質の向上が求められるようになっている。

海洋観測資料の中でも、水温と塩分は古くから測定されてきた項目である。水温や塩分は、その分布から水塊の比較や混合の程度が評価できるだけでなく、密度分布や力学計算を通して流れの情報を与えるという点で、最も基本的な資料の一つと考えられる。水温、塩分ほどで

水産大学校研究業績 第1530号, 1995年10月20日受付

Contribution from National Fisheries University, No.1530. Received Oct, 20, 1995

*1 水産大学校漁業学科漁場学講座 (Laboratory of Fisheries biology and Oceanography, Department of Fishery Science and Technology, National Fisheries University)

*2 水産大学校練習船 天鷹丸(Training vessel, National Fisheries University)

はないが、やはり古くから測定されてきた項目に、海水中に溶在している酸素の濃度がある。溶在酸素濃度は海中での化学的、生物学的な環境を評価する上で重要な指標となるばかりでなく、深層での海水循環や水塊形成の研究にも欠かせない資料となっている。水産学的にも、漁海況予測や漁場環境の保全を行う上で、溶在酸素は不可欠な資料と考えられている。

CTD (Conductivity-Temperature-Depth profiler) は水温、塩分、(溶在酸素濃度) を鉛直方向に連続的に測定する観測機器である。従来のナンセンボトルによる観測に比べて、鉛直方向に飛躍的に細かい分解能で計測できるため (Fig. 1)、詳細な海洋構造が把握できるだけでなく、特性量の鉛直微分の精度が上がるので、

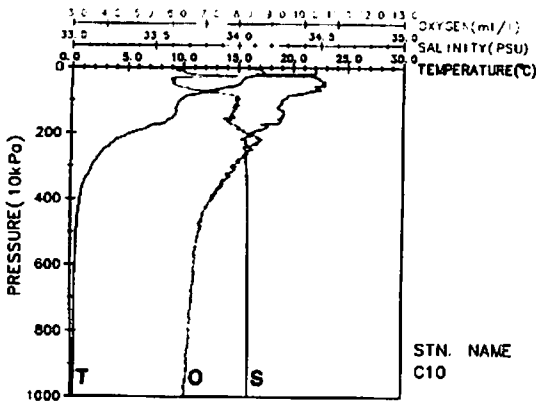


Fig.1: An example of CTD observation result. Vertical distributions of temperature (T), salinity (S) and dissolved oxygen (O) are displayed.

拡散や浮力振動数、ポテンシャル渦度などの評価を精度良く行うことができる。また、観測時間がナンセン方式に比べて短くてすむため、一航海あたりの測点数を増やすことができ、さらに、水平方向にも細かい間隔で観測できる。CTDはこの10年間で日本でも広く使用されるようになり、本学でも耕洋丸、天鷹丸の両船に搭載され、海洋観測に利用されている。

CTDは確かに優れた観測機器ではあるが、CTDを海中に降ろすだけで高精度なデータが得られるというものではない。精度の高い良質なデータを得るためには、観測時のみならず、観測後の機器のメンテナンスや、下船後に行うデータの更正にも細心の注意を払う必要がある。データに求められる精度は、何を研究対象とするの

かによって異なるため一概にはいえないが、一つの目安として国際研究プロジェクトWOCE (World Ocean Circulation Experiment) で求められている精度を挙げることができる。このプロジェクトでは、圧力3 db, 水温0.002 °C, 塩分0.002 psuの精度が要求されている。本学所有のCTDは、圧力については0.05 db, 水温については0.001 °C, 伝導度については0.0005 mmho (塩分に換算して約0.001 psu) の分解能をもっており、測定精度を分解能と同じくらいまで高めることができれば、この要求を十分に満たすことができる。そのためには、データの更正は欠かすことができない作業である。

幸いにして、CTDの圧力と水温のセンサーは安定性が良く、陸上での更正が可能である。これに対して塩分と溶在酸素のセンサーは、観測時のセンサーの状態に敏感で、ドリフト (電氣的不安定) しやすいため、航海ごと、あるいは航海中にこまめに更正を行う必要がある。それに関わらず、これまで本学のCTDについては、どの程度の更正が必要なのかといった議論はあまりなされてこなかったようである。そこで本研究では、1995年度天鷹丸第66次航海で得たCTD観測資料を用いて、天鷹丸に搭載されているCTDの塩分、溶在酸素センサーに、現時点でどの程度の誤差があるのかを検討し、補正係数を算出することを試みた。

2. 観測およびサンプルの取得方法

1995年9月7~9日に、Fig. 2に示す10測点で、1500 db深までのCTD観測を行った。用いたCTDはNeil Brown社製Mark3B型CTDである。各測点とも、CTDプローブを所定の深度まで毎秒1.0~1.5 mの速度で降下させ、圧力、水温、塩分、溶在酸素量のデータを取得した。これらの測点のうち、Sta. C03~10の8測点では、CTD回収時にプローブを所定の深度 (1500, 1200, 1000, 800, 600, 500, 400, 300, 200, 150, 100, 50 db) で一旦停止し、ロゼットマルチサンプラーによる採水を行った。ただし、ロゼットマルチサンプラーの不調のため、実際に採水できたサンプルは65層分であった。塩分については、65層すべてについてサンプリングを実施したが、溶在酸素については、Sta. C07~10の4測点 (41層分) のみのサンプリングを行った。

採水したサンプルは、溶在酸素については、24時間以内に船内でWinkler法による滴定を行い、濃度を決定した。塩分については、下船後、研究室でサリノメータ

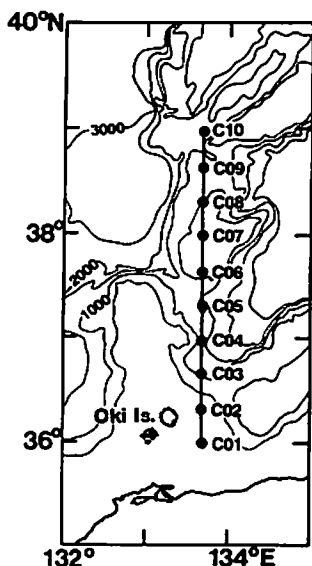


Fig.2: Bottom topography and location of CTD casts taken during the period of 7-9 September, 1995 by T/V Ten'yo-Maru. Depth contours are shown in 500 m interval.

(YEO-KAL社製 Model 601MK-IV)を用いて検定した。

3. 塩分データの更正

3.1 測定原理

海水中の塩分は、水温、電気伝導度、圧力の関数として与えられる。そこで、CTDシステムでは、プローブに搭載された伝導度セルにより海水の電気伝導度を測定し、水温、圧力のデータとともに塩分を算出している。しかし実際には、水温センサー（白金抵抗体）と塩分センサーの応答にはわずかな時間的なズレが存在するため（このズレを時定数と呼ぶ）、水温、塩分が鉛直方向に急激に変化するような場合には、塩分データにノイズが生じることが知られている（長崎海洋気象台¹⁾；川辺・川崎²⁾）。そこでNeil Brown Mark3B型CTDでは、白金抵抗体の他に応答速度の速いサーミスタを装備し、サーミスタの応答の微分値を白金抵抗体の応答に加えることによって、水温センサーの応答を伝導度センサーと同じくらい速くしようという工夫がなされている。しかし現実には、白金抵抗体の時定数が製品により大きくばらついていること、伝導度セルの時定数がCTDの降下速度によって異なることなどのために、時定数について

の満足のいく更正法は未だに得られていないのが現状である。（長崎海洋気象台¹⁾や川辺・川崎²⁾では、再帰型の数値フィルターをかけることによってノイズを取り除く方法が紹介されているが、選択された時定数が真の値であるという保証はない。）

天鷹丸のCTDの塩分センサーには、電極間の電位差変化を検出できる4電極式の伝導度セルが用いられている。4電極式を採用することによって、電解分極によるセンサーの不安定を避けることができるが、何度も観測を行っていくうちに、セラミック製のセルや電極の表面が油膜や生物起源の有機物の付着、あるいは炭酸カルシウムや炭酸マグネシウムの凝結などにより汚染されるため、ドリフトを生ずる（Neil Brown³⁾）。このため、正確な塩分値を得るためには、適当な間隔で（例えば航海ごとに）補正係数を求める必要がある。

3.2 塩分どうしの比較による更正

今回の観測で得られた資料の一覧をTable 1に示す。

Table 1 Salinity data used in this study

B.-No.	Press.	Lab.-Sal.	CTD-Sal.	DIFF.
C10-01	1200.5	34.070	34.079	-.009
C10-02	798.5	34.113	34.071	.042
C10-03	599.6	34.073	34.071	.002
C10-04	501.0	34.072	34.071	.001
C10-05	399.4	34.147	34.073	.074
C10-06	298.7	34.093	34.071	.022
C10-07	200.3	34.129	34.118	.011
C10-08	149.6	34.277	34.281	-.004
C10-09	99.3	34.287	34.283	.004
C10-10	49.6	34.487	34.493	-.006
C09-01	1321.6	34.070	34.078	-.008
C09-02	1191.8	34.071	34.078	-.007
C09-03	1000.1	34.076	34.078	-.002
C09-04	800.2	34.072	34.079	-.007
C09-05	598.7	34.076	34.079	-.003
C09-06	500.1	34.100	34.079	.021
C09-07	399.6	34.083	34.079	.004
C09-08	299.4	34.057	34.069	-.012
C09-09	199.7	34.134	34.132	.002
C09-10	150.7	34.299	34.299	.000
C09-11	100.4	34.367	34.333	.034
C09-12	49.3	34.549	34.557	-.008
C08-01	1011.2	34.079	34.076	.003
C08-02	800.7	34.070	34.077	-.007
C08-03	599.7	34.077	34.079	-.002
C08-04	500.4	34.074	34.079	-.005
C08-05	399.8	34.071	34.079	-.008
C08-06	300.0	34.082	34.076	.006
C08-07	200.2	34.076	34.072	.004

C08-08	150.0	34.160	34.154	.006
C08-09	100.2	34.423	34.427	-.004
C08-10	49.9	34.525	34.529	-.004
C07-01	752.8	34.074	34.076	-.002
C07-02	599.5	34.073	34.077	-.004
C07-03	499.2	34.073	34.077	-.004
C07-04	399.4	34.074	34.077	-.003
C07-05	300.3	34.074	34.069	.005
C07-06	199.4	34.099	34.096	.003
C07-07	149.9	34.234	34.211	.023
C07-08	99.9	34.504	34.503	.001
C07-09	50.2	34.512	34.516	-.004
C06-01	500.0	34.075	34.075	.000
C06-02	400.0	34.074	34.077	-.003
C06-03	300.6	34.074	34.073	.001
C06-04	199.7	34.074	34.133	-.059
C06-05	149.5	34.134	34.355	-.221
C06-06	100.6	34.348	34.556	-.208
C06-07	50.0	34.547	34.420	.127
C05-01	1511.2	34.075	34.077	-.002
C05-02	1200.4	34.070	34.079	-.009
C05-03	1000.0	34.071	34.079	-.008
C05-04	800.9	34.131	34.079	.052
C05-05	599.6	34.077	34.081	-.004
C05-06	499.1	34.073	34.080	-.007
C05-07	400.8	34.072	34.068	.004
C05-08	300.6	34.129	34.132	-.003
C05-09	200.1	34.209	34.214	-.005
C05-09	200.1	34.209	34.214	-.005
C05-10	49.9	34.168	34.172	-.004
C04-01	1282.1	34.073	34.075	-.002
C04-02	1000.5	34.073	34.077	-.004
C04-03	600.4	34.072	34.080	-.008
C03-01	1108.4	34.075	34.075	.000
C03-02	999.9	34.076	34.076	.000
C03-03	799.3	34.073	34.077	-.004
C03-04	22.5	33.983	33.993	-.010

Table 1には左から、測点と採水器の番号 (B.-No.)、サンプリングを行った圧力 (Press.)、下船後サリノメータによって検定したサンプルの塩分値 (Lab.-Sal.)、採水時にCTDが記録した塩分値 (CTD-Sal.)、および両塩分値の差 (DIFF.) が示されている。

塩分値の差のr.m.s.(root mean square)は0.043 psuとかなり大きな値を示すが、これはC06-05やC06-06のように大きな誤差を示す資料が含まれていることによる。大きな誤差を生ずる原因としては、採水器から塩検ビンへ採水するときの不手際、伝導度セルの一時的な汚染(プランクトンなどの懸濁粒子が伝導度セル内を通過した場合など)、サリノメータ測定時のミスなどが考えられるが、最も大きな原因と考えられるのはロゼットサン

プラーの誤作動である。Table 1のC06のボトルに注目すると、04, 05, 06, 07と連続して大きな誤差を示している。しかし、Lab.-Sal.とCTD-Sal.の値を一層づつずらして比較した場合、例えば、C06-04のCTD-Sal.とC06-05のLab.-Sal.とを比較すると、両者の差は0.001 psuとかなり小さくなる。同様のことはC06-06, 07のボトルについてもいえる。このことから、Sta. C06では、500~300 dbの間で同時に2本の採水器が閉じた可能性が強い。

塩分値の差の圧力方向の分布を見てみると (Fig. 3)、

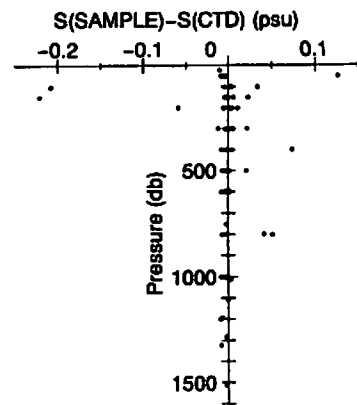


Fig.3: Vertical distribution of differences between sample salinity and CTD salinity.

大きな誤差を示すデータの半分以上が300 db以浅に分布していることがわかる。このことから、誤差の原因として、採水層とセンサーによる測定層の深度の不一致も無視できないと考えられる。天鷹丸のCTDでは、ロゼットサンプラーは各センサーの上方約1 mにセットされており、さらに、信号を送ってもすぐには採水されず、その間にもCTDの深度が変化するので、躍層のように鉛直方向に大きく塩分が変化する深度では、この影響は大きいものと考えられる。

CTD-Sal.を横軸に、Lab.-Sal.を縦軸にとり、両者の関係を示したのがFig. 4aである。相関係数は $r=0.954$ と高い値を示しているが、上で述べたように、明らかにエラーと考えられるデータが混在している。そこで、Lab.-Sal.の回帰直線からの偏差が $\pm r.m.s.$ 以上を示すデータを削除して、再び回帰計算を行った結果がFig.

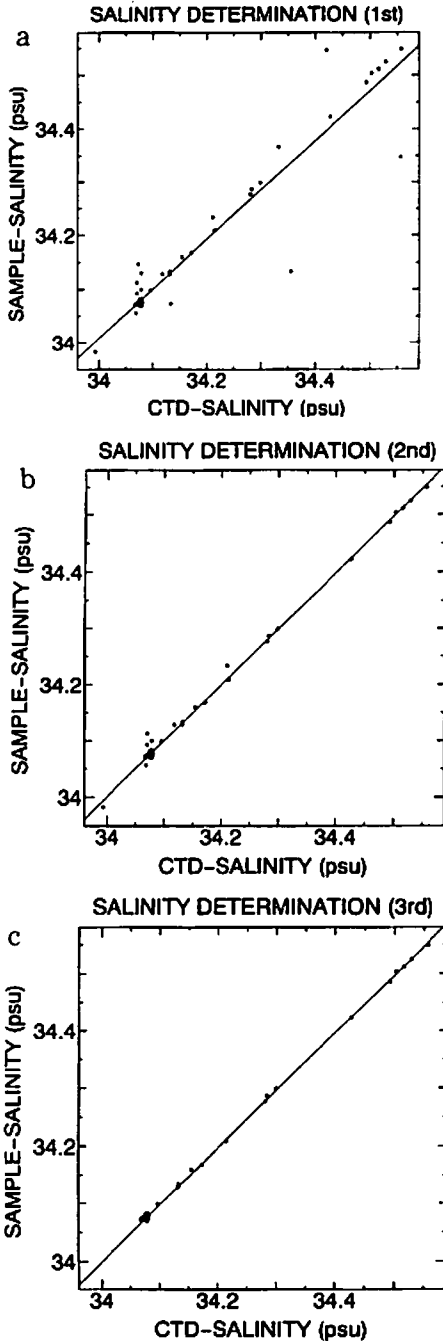


Fig.4: Correlation diagram between sample and CTD salinities. The line in figures shows results of the first (a), the second (b) and the third times (c) regression.

4bである。両者の間には、高い相関 ($r=0.997$) が認められるが、r.m.s.は0.0090 psuと検定を行ったサリノメータの精度 (0.003 psu) の3倍もある。そこで、r.m.s.が0.003 psu程度に落ち着くまで同様の操作を繰り返し、得られた結果がFig. 4cである。今回の資料については、3回目の操作でr.m.s.の値がほぼ一定 (0.0042 psu) となった。最終的に求められた塩分の補正式は、

$$\text{塩分} = 0.9967 \times (\text{CTD-Sal.}) + 0.1111$$

である。CTD-Sal.とLab.-Sal.の間の相関係数は、 $r=0.9996$ であることから、1次式による近似で十分と判断される。

3. 3 セルファクター C_i による更正

CTDは、現在では大学、官公庁のほとんどの観測船に装備され、観測に供されているが、データの更正については各機関が目的にあった方法で独自に行っている。しかし最近、川辺・川崎²⁾は更正方法の統一を提唱し、一つの手法を提案した。この方法は、サリノメータによって決定された塩分と現場での水温、圧力から、現場における電気伝導度 ($C(\text{Samp.})$) を逆算し、CTDによる現場での電気伝導度 ($C(\text{CTD})$) との比 (セルファクター $C_i = C(\text{Samp.})/C(\text{CTD})$) を求め、補正を行うというものである。伝導度セルの特性はその表面状態に敏感で、数時間から数日で変化してしまうという報告もある (SCOR Working Group⁴⁾)。このような変化に対して、各CTDに固有のセルファクターを測点ごと (あるいは航海ごと) に求めて履歴を記録しておくことは大切で、例えば、採水を行わなかった測点についても内挿によって塩分を更正することが可能となる。

今回の資料について、セルファクターの圧力方向の分布を示したのがFig. 5aである。セルファクターは圧力によっても変化するため、川辺・川崎²⁾ではセルファクターを圧力の5次関数に展開して更正を行っている。しかし、本研究では、用いたデータが1500 dbまでと浅いので、単純に圧力の1次式で近似している (川辺・川崎²⁾では6000 db以深までのデータを用いている)。ほとんどの資料が $C_i=0.9995\sim 1.0005$ の範囲に収まっているが、この範囲から大きくはずれた、明らかにエラーと考えられるデータが認められる。そこで、塩分どうしの比較による更正の場合と同様に、回帰式からの偏差が $\pm r.m.s.$ 以上を示すデータを削除してゆくという方法で

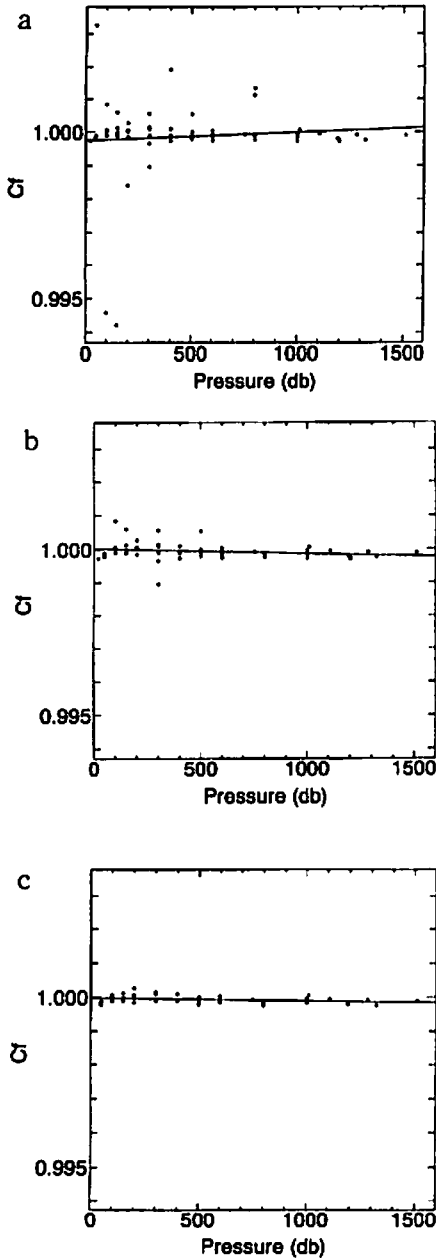


Fig.5: Vertical distribution of CTD conductivity cell-factors (C_t). The line in figures is C_t as a function of pressure calculated by the first (a), the second (b) and the third times (c) regression.

近似式を求めた。Fig. 5a-cは、1回目から3回目までの、この操作の過程を示している。1回目の回帰では、200 db以浅の異常に小さな値に引きずられて深層ほどセルフファクターが大きくなるような回帰直線となっているが、2回目以降では傾きが逆になっている。3回目の操作で近似を打ち切ったのは、4回目以降の操作ではデータの半分以上が削除されてしまうためである。こうして求めたセルフファクターと圧力の関係式は、

$$C_t = -0.800361 \times 10^{-7} \times (\text{Press.}) + 0.999981$$

である (r.m.s.=0.00012)。この式から、各深度におけるセルフファクターを求めて塩分を計算し、サンプルの塩分との間で比較を行った。r.m.s.を求めると0.0041 psu となり、塩分どうしを直接比較して更正を行った場合と、ほぼ同じ結果を得た。

3. 4 考察

塩分どうしを比較する方法によって除かれたデータの一覧をTable 2に、セルフファクターを用いる方法によ

Table 2 Salinity data removed by salinity - salinity regressions

3-TIMES REGRESSION
CUTOFF : R.M.S. \times 1.0

B.-No.	Press.	Lab.-Sal.	CTD-Sal.
C10-02	798.5	34.113	34.071
C10-05	399.4	34.147	34.073
C10-06	298.7	34.093	34.071
C10-07	200.3	34.129	34.118
C09-06	500.1	34.100	34.079
C09-08	299.4	34.057	34.069
C09-11	100.4	34.367	34.333
C07-07	149.9	34.234	34.211
C06-04	199.7	34.074	34.133
C06-05	149.5	34.134	34.355
C06-06	100.6	34.348	34.556
C06-07	50.0	34.547	34.420
C05-04	800.9	34.131	34.079
C03-04	22.5	33.983	33.993

R.M.S. = 0.0042
SLOPE = 0.996679
OFFSET = 0.111087

Table 3 Salinity data removed by cell-factor method

3-TIMES REGRESSION
CUTOFF : R.M.S. \times 1.0

B.-No.	Press.	C(Samp.)	C(CTD)	Cf
C10-01	1200.5	29.002	29.009	.99975
C10-02	798.5	28.957	28.925	1.00111
C10-05	399.4	29.285	29.229	1.00192
C10-06	298.7	30.060	30.043	1.00056
C09-06	500.1	29.031	29.015	1.00054
C09-08	299.4	29.751	29.761	.99966
C09-11	100.4	38.073	38.041	1.00084
C08-05	399.8	29.042	29.050	.99974
C07-07	149.9	34.733	34.712	1.00060
C06-03	300.6	29.447	29.477	.99897
C06-04	199.7	31.998	32.049	.99841
C06-05	149.5	36.961	37.176	.99422
C06-06	100.6	41.799	42.027	.99459
C06-07	50.0	44.988	44.842	1.00326
C05-02	1200.4	29.001	29.009	.99972
C05-03	1000.0	28.948	28.956	.99974
C05-04	800.9	28.957	28.918	1.00134
C04-03	600.4	29.007	29.014	.99975
C03-04	22.5	50.237	50.251	.99973

R.M.S. = 0.00012
SLOPE = -0.800361×10^{-7}
OFFSET = 0.999981

て削除されたデータの一覧をTable 3に示す。同程度のr.m.s.を得るのに、塩分どうしを比較する方法では14個、セルフファクターを用いる方法では19個の資料を削除している。このことは、セルフファクターを用いる方法の方がエラーの検出感度が高いことを示している。削除されたデータの内容を比較すると、塩分どうしを比較する方法で除かれたデータのほとんどが、セルフファクター法でも削除されていることがわかる。唯一の例外がC10-07であるが、セルフファクター法では4回目の操作で取り除かれている。3.2節で述べたSta. C06でのロゼットサンプラーの誤作動については、セルフファクター法では、300 dbのC06-03のデータが削除されており、このことからこの測点では、500 dbあるいは400 dbの段階で採水器が2本同時に閉じたと推測される。これに対して、塩分どうしを比較する方法では、4回目の操作でもC06-03の異常は検出されていない。一般に海洋では、深層ほど塩分の鉛直的な変化が小さくなる。特に今回観測を行った日本海の場合、主温度躍層下には日本海固有水と呼ば

れる、世界の海洋の中でも特に均質な水塊が分布している。このため塩分値どうしを比較する方法では、ロゼットサンプラーの誤作動を検出できなかったものと考えられる。セルフファクターを用いる方法は、特に深層でのデータの更正に威力を発揮するものといえる。

セルフファクターを用いる方法は、確かに精度良く塩分を更正できるが、塩分どうしを比較する方法もエラーデータを注意深く取り除くことによって（少なくとも今回の観測結果については）同程度の精度で補正できることがわかった。塩分どうしを比較する方法は、セルフファクターを用いる方法に比べて簡便であることから、航海中にある程度の結果を出さなければならない場合などには有効であろう。

4. 溶在酸素データの更正

4.1 測定原理

天鷹丸のCTDの酸素センサーには、ポーラログラフ型センサーが使われている。センサー内部には、塩化カリウムの電解溶液に浸された一組の電極（カソードとアノード）があり、酸素透過性のテフロン薄膜によって海水と隔てられている。このテフロン薄膜は、電極が汚染されるのを防ぐとともに、CTDプローブの降下速度の影響をやわらげるのに役立っている。海水中の酸素分子は、テフロン薄膜を通して電解液内を拡散し、カソードの表面に到達して還元される。このとき、カソードに流れる還元電流は、海水中の酸素濃度に比例する。そこで、カソードの電位を規制して還元電流を測定することにより、海水中の酸素濃度を求めることができる。酸素分子がテフロン薄膜を透過する割合は、圧力と温度に敏感であるため、水温、水圧の他にセンサー内部の温度も測定する必要がある。天鷹丸のCTDシステムでは、カソード電流 (oxyc) とセンサー内部の温度 (T_0) から溶在酸素濃度 (CTD-Oxy.) への換算には、

$$\text{CTD-Oxy.} = (\text{oxyc} \times \text{aa} + \text{bb}) \times \text{Osat} \\ \times \exp(T + e \times (T_0 - T)) + \text{cc} \times p$$

が使われている。ここにaaは酸素電流のスロープ、bbは酸素電流のバイアス、OsatはWeissの式（日本海洋学会⁵⁾）から計算される飽和酸素量、Tは水温、pは圧力で、eとccはテフロン薄膜の酸素透過率に関する水温と圧力の係数である。この式はOwens and Millard⁶⁾の式を改変したものと思われるが、詳細は不明である。

ポーラログラフ型の酸素センサーは、テフロン薄膜の酸素透過率に大きく影響を受ける。そこで観測に際しては、酸素透過率を安定させるためにセンサーを清浄に保ち、常に湿った状態にしておく必要がある。

4. 2 酸素量どうしの比較による更正

今回の観測で得られた、溶在酸素データの一覧をTable 4に示す。CTDの測定値(CTD-Oxy.)の方が、

Table 4 Dissolved oxygen data used in this study

B.-No.	Press.	Lab.-Oxy.	CTD-Oxy.	DIFF.
C10-01	1200.5	4.83	6.09	-1.26
C10-02	798.5	5.29	6.34	-1.05
C10-03	599.6	5.18	6.42	-1.24
C10-04	501.0	5.29	6.46	-1.17
C10-05	399.4	5.29	6.57	-1.28
C10-06	298.7	5.82	7.01	-1.19
C10-07	200.3	6.42	7.65	-1.23
C10-08	149.6	6.09	7.17	-1.08
C10-09	99.3	6.16	7.28	-1.12
C10-10	49.6	4.30	5.42	-1.12
C09-01	1321.6	5.13	5.92	-.79
C09-02	1191.8	5.32	6.07	-.75
C09-03	1000.1	5.30	6.28	-.98
C09-04	800.2	5.34	6.42	-1.08
C09-05	598.7	5.46	6.44	-.98
C09-06	500.1	5.09	6.38	-1.29
C09-07	399.6	5.31	6.57	-1.26
C09-08	299.4	6.39	7.57	-1.18
C09-09	199.7	5.95	7.52	-1.57
C09-10	150.7	5.56	7.26	-1.70
C09-11	100.4	6.04	7.30	-1.26
C09-12	49.3	4.71	5.71	-1.00
C08-01	1011.2	5.03	6.13	-1.10
C08-02	800.7	5.18	6.34	-1.16
C08-03	599.7	5.22	6.44	-1.22
C08-04	500.4	5.21	6.40	-1.19
C08-05	399.8	5.32	6.55	-1.23
C08-06	300.0	4.06	6.80	-2.74
C08-07	200.2	3.79	7.75	-3.96
C08-08	150.0	6.20	7.53	-1.33
C08-09	100.2	5.86	7.03	-1.17
C08-10	49.9	4.53	5.53	-1.00
C07-01	752.8	4.99	6.48	-1.49
C07-02	599.5	5.22	6.48	-1.26
C07-03	499.2	5.35	6.55	-1.20
C07-04	399.4	5.22	6.63	-1.41
C07-05	300.3	5.41	6.86	-1.45
C07-06	199.4	5.77	7.05	-1.28
C07-07	149.9	5.96	6.94	-.98
C07-08	99.9	5.48	6.34	-.86
C07-09	50.2	4.96	5.71	-.75

滴定によって求めた値(Lab.-Oxy.)よりも常に大きな値を示しているため、両者の差(DIFF.)がすべて負となっていることがわかる。実際、CTDによって測定された300 db以下での酸素濃度は、Weissの式から計算される飽和酸素量よりも大きな値となっており、明らかに異常と考えられる。しかし、CTD降下時に測定された溶在酸素の分布(Fig. 1)をみると、不連続な点認められず、なおかつ、これまで日本海で観測されてきた酸素分布の特徴を示している(例えば酸素極大層の深度や、酸素極大層が塩分極小層と一致している等)。このことは、CTDは、絶対値としては信頼性に欠けるが、相対値としては正しい値を出力しているものと考えられ、適切な補正を施すことによって十分に耐えうるデータが得られることを示している。

滴定によって決定した酸素量と、CTDの値との差の鉛直分布をFig. 6に示す。2.0 ml l⁻¹以上の差を示す、

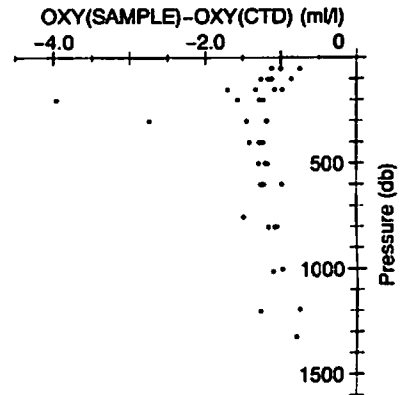


Fig. 6: Vertical distribution of differences between sample oxygen and CTD oxygen.

明らかにエラーと考えられる資料が200 db深と300 db深にみられるが(C08-06とC08-07)、これらは採水器から酸素ビンへ採水するときの不手際、あるいはWinkler法による滴定時のエラーが原因と考えられる。これらのデータを無視して誤差の分布をみると、150~300 db深に極大が存在しているようにみえる。この深度は酸素極大層を挟む躍層に相当していることから、3.2節で議論したように、採水層とセンサーの測定層との深度の不一致が影響していると考えられる。CTDの更正を目的とする限り、躍層や極大、極小層など、特性量の鉛直変化の大きい深度での採水は避けたほうがよいと考えられる。

CTD-Oxy. と Lab.-Oxy. の相関図を Fig. 7a に示す。

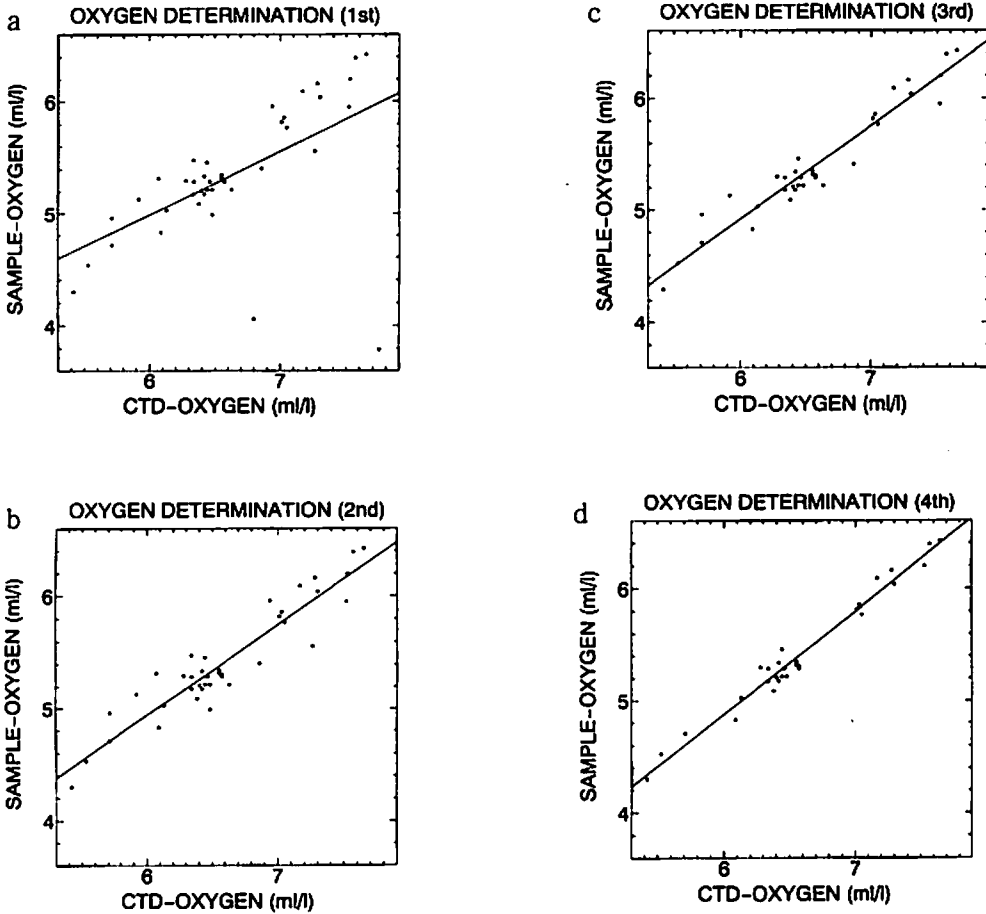


Fig. 7: Correlation diagram between sample and CTD oxygens.
The line in figures is results of the first (a), the second (b), the third (c) and the fourth times (d) regression.

両者の間には、直線的な関係が認められる ($r=0.575$)。また、明らかにエラーと考えられる、C08-06とC08-07の二つの資料を除くと、両者のレンジもほぼ同じであることがわかる。エラーデータを削除し、精度の良い補正式を求めるために、塩分と同様の手法で更正を行った結果が Fig. 7a-d である。ただし今回は、回帰直線からの偏差が r.m.s. の ± 1.5 倍以上を示す資料を削除している。これは資料のばらつきが塩分に比べて大きかったためであるが、CTDの酸素センサーの安定性、Winkler法による終点判定を目視で行ったこと等を考慮すると、この

程度のばらつきは止むを得ないと考えられる。溶在酸素については、 0.1 ml l^{-1} の精度が保証されていれば十分と考えられるので、r.m.s. が 0.1 ml l^{-1} 以下に落ち着くまで回帰操作を繰り返した。今回の資料については、4回目の操作で r.m.s. が 0.089 ml l^{-1} となり、5回目以降の回帰操作でも大きな変化がみられなかったため、4回目までの結果を採用することとした。最終的に得られた溶在酸素の補正式は、

$$\text{溶在酸素} = 0.922 \times (\text{CTD-Oxy.}) - 0.655$$

である。

5. まとめ

1995年度天鷹丸第66次航海で得られた海洋観測資料に基づいて、天鷹丸に搭載されているCTDの塩分、溶在酸素センサーの測定精度を調べた。

塩分については、CTDによって測定された値と、サンプルの塩分値との間に高い相関がみられた。そこで塩分値どうしを直接比較する方法と、セルファクターを用いて更正する方法の二種類について検討を行った。その結果、どちらの方法でも約0.004 psuのr.m.sで補正できるが、セルファクターを用いる方法の方が、エラーの検出感度が高いことがわかった。

溶在酸素量については、CTDによって測定された値は、滴定によって求められた酸素量よりも常に大きな値を示しており、明らかに異常と考えられた。しかしながら、CTD降下時に得られた酸素のプロファイルには不連続な点が認められず、また既往観測資料から推測される酸素分布の特徴とも一致していた。このことは、CTDによる観測値は、絶対値としては信頼性に欠けるが、相対値としては有効であることを示している。そこでWinkler法によって決定された値と、CTDの測定値との間で帰帰・更正を行った結果、 1.0 ml l^{-1} 以下のr.m.s.で更正を行うことができた。

CTDデータとサンプルデータを詳細に比較することによって、ロゼットサンプラーの誤作動を検出することができた。ロゼットサンプラーの誤作動が起こると、比較すべきサンプルとCTDの深度がずれてしまうだけでなく、栄養塩やクロロフィル等のCTDでは測定できない成分をサンプリングする場合に致命的となる。このような誤作動をチェックする方法としては、なるべく多くの採水器に転倒温度計をとりつけ、温度測深によって採水器が閉じた深度をモニターすることが考えられる。しかし転倒温度計は高価であり、用意できる本数にも限度がある。またロゼットサンプラーの構造上、すべてのボトルに温度計をとりつけることは不可能である。現状ではなるべく多くの水深で採水を行い、塩分と溶在酸素の分布から採水深度を推測するしかないようである。

更正を行う上でもう一つ大事なことは、サンプルの塩分や溶在酸素を精度良く測定することである。今回行った更正では、サンプルの値が正しいことを前提条件とした。正確な測定を行うためには、船上での採水の方法や採ったサンプルの処置にも注意を払い、サリノメータや

滴定器具の保守に努めなくてはならない。

本研究で求めた天鷹丸のCTDの塩分、溶在酸素センサーの補正式は、あくまでもテンポラリーなものである。はじめに述べたように、CTDの塩分、溶在酸素センサーは観測時のセンサーの状態に敏感で、ドリフトしやすいものである。ノイズの少ない、高精度なデータを継続的に取得して行くためには、観測ごとに更正を行い、センサーの状態を常にモニターしてゆく必要がある。

謝 辞

資料の取得に際してご協力頂いた水産大学校漁業学科の杉原滋彦教授、並びに天鷹丸乗組員の皆様に感謝いたします。また漁業学科研究科生の吉永 聡、卒論生の平田貴文、松原奈穂の諸氏には、観測に協力していただくとともに、有意義な議論をしていただきました。

文 献

- 1) 長崎海洋气象台：測候時報, 56, 3, 91-114 (1989)
- 2) 川辺正樹・川崎 清：CTDデータ更正の手引き、日本海洋情報センター (JODC), 東京, P.69 (1993)
- 3) Neil Brown: Oceanus, 34, 61-66 (1991)
- 4) SCOR Working Group: UNESCO technical papers in marine science, 54, (1988)
- 5) 日本海洋学会：海洋観測指針 (気象庁編), 東京, P.450 (1990)
- 6) B. Owens and R. Millard: J. Phys. Oceanogr., 15, 621-631 (1985)