

STD の水温・塩分の補正

吉 岡 洋・芹 澤 重 厚

CORRECTION OF DATA OBSERVED WITH STD

By Hiroshi YOSHIOKA and Shigeatsu SERIZAWA

Synopsis

A method of correction for the data observed with STD is presented by considering time constants of sensors. By this correction, irregular maximum or minimum salinity layers and unstable distributions of density are eliminated.

1. ま え が き

STD とは、Salinity-Temperature-Depth recorder の略称である。電気的な方法で、塩分・水温・深さを同時に連続的に自記する測器で、これを海中に吊下げて、水温・塩分の鉛直分布を速やかに測定するのに用いられる。STD が広く使用され始めたのは1960年代末期であり、それまでは、水温・塩分の鉛直分布は、ナンセン採水器と転倒温度計による各層観測によって得られてきた。それは測定精度は高いけれど、時間と労力を要し、採水深度が 10 m 以上の間隔なので、微細な構造が観測できなかった。STD は観測時間の短縮と労力の節約をもたらしたうえ、測定精度はやや劣るものの、連続的な鉛直分布が求まるので、鉛直スケールで 10 m 以下の微細構造の観測を可能にした。沿岸海域は、時間的にも空間的にも変化が激しいので、できるだけ細かい観測網を配置して、短時間のうちに観測を遂行しなければならない。そのかわり、陸水の影響が強いので、水温・塩分の変動巾は大きく、測定精度は、外洋海域の観測程、必要としない。以上のことは、沿岸海域の観測における STD の有効性を示唆するものである。

しかし STD で海洋微細構造を究明する場合、記録をそのまま信用すれば、塩分に不自然な分布が存在し、顕著な密度不安定を生じてしまうので、なんらかの補正が必要であると言われてきた。すでに欧米の文献¹⁾²⁾では、補正方法が実用化されて、STD データは系統的に補正処理されていると紹介されている。しかし我々が使用している国産の旧式の STD の記録に、そのまま適応できるのか疑問であった。

我々の使用している STD は、鶴見精機の TS-STD-Model 3 型の旧型と新型である。STD 本体の中にカセットテープレコーダーが内蔵されていて、塩分・水温・深さの値は周波数信号に変換されてテープに録音される。観測終了後、本体からテープを取り出し、テープレコーダーで再生して、XY レコーダーにより、深度に対する塩分・水温のグラフを得ることができる。しかし時間おくりのレコーダーで再生記録すれば、水温・塩分・深さの時間変化の記録が得られるのである。

白浜海象観測所では、田辺湾から紀伊水道にかけての海域で STD 観測を数多く実行して、興味深い微細構造の記録を蓄積してきた。Fig. 1 にその一例を掲げる。S5, S6 とは1971年の冬に紀伊水道のオーシニックフロントの外洋側で観測した記録である。表層から 150 m の深さまでは、冬季冷却による対流で、水温・塩分が一樣となっているが、160 m～180 m の深さに顕著な塩分極小層と水温の急降下層が、STD の降下の記録に発見された。これがもし実在する分布であるならば、沿岸水が冷却して沈降して、密度安定層に沿って、外洋に貫入していることになり、沿岸一外洋の海水交流の極めて重要な機構を示唆していること

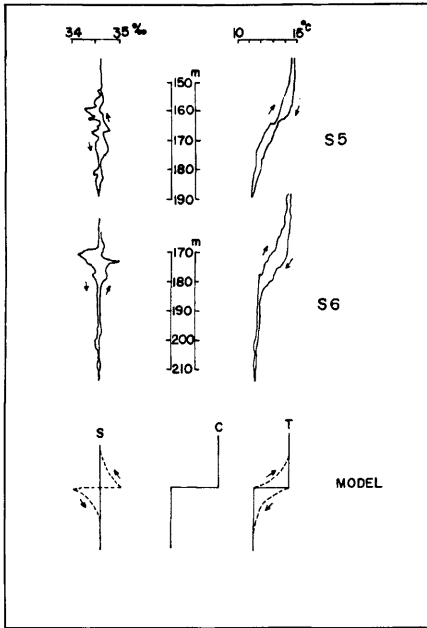


Fig. 1 Strange profile of salinity observed with STD. Salinity minimum layers appeared at STD descending and disappeared at STD ascending.

スター, または白金抵抗), 水圧を測る圧力センサーの四種類である。実際は, 温度補償を精密にするために, 温度補償用温度センサーを二個以上使用したり, 塩分を求めるのに圧力補償まで考慮して, 圧力センサーを追加したりしているが, 大筋は Fig. 2 に示したプロセスで, 水温・塩分・深さが測定表示される。その関係を以下に定量的に近似してみよう。

現場水温 T_r (real water temperature) と, 表示用温度センサーで測定表示された表示水温 T_i (indicated water temperature) との関係は, (1) 式で近似されると仮定する。

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{T_r - T_i}{\alpha} \quad \dots\dots\dots (1)$$

α は表示用温度センサーの時定数で, 普通 1 秒以上である。

現場水温 T_r と, 補償用温度センサーで測定されて温度補償回路に入力される 補償水温 T_c (compensation water temperature) との関係は (2) 式で近似されると仮定する。

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{T_r - T_c}{\beta} \quad \dots\dots\dots (2)$$

β は温度補償用温度センサーの時定数で, 普通 0.5~1.0 秒である。

現場電気伝導度 C_r (real electric conductivity) と, 電磁誘導セルで測定されて温度補償回路に入力される被補償電気伝導度 C_m (measured electric conductivity) との関係式は (3) 式で近似されると仮定する。

になる。ところが, おりかえて上昇していく時の, STD の記録には, 塩分極小層は存在せず, むしろ極大層が存在していた。一般に STD の記録は, 降下の時の方が上昇の時の記録よりも信用できるといわれているので, 上昇時の記録は無視して降下の記録のみ採用して, 塩分極小層が実在するとみなすのか, それとも, 降下時と上昇時で分布が変わることは, 記録のノイズであるとして, 塩分極小層の存在を否定するのが問題となり, 定量的なノイズの分析が必要となった。そこで, STD の測定システムをモデル化して, 定量的な関係をつくり, ノイズや誤差の原因を吟味して, そのシステムにのっとって, 合理的な補正方法を考案してみた。

2. STD の測定原理

STD は, 水温・塩分・深さを測定表示する測器であるが, 実際に測定しているのは, 海水の温度・電気伝導度・圧力である。塩分は電気伝導度を温度補償して求めて表示される。深さは圧力に比例するものとして圧力値が表示される。従って, STD のセンサーは, 本質的には, 水温表示用温度センサー (普通は白金抵抗), 電気伝導度を測る電磁誘導セル, 温度補償用温度センサー (普通はサーミ

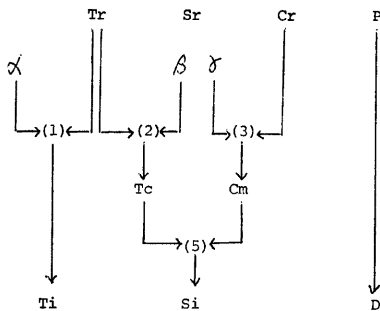


Fig. 2 Flow chart of the measuring system of STD.

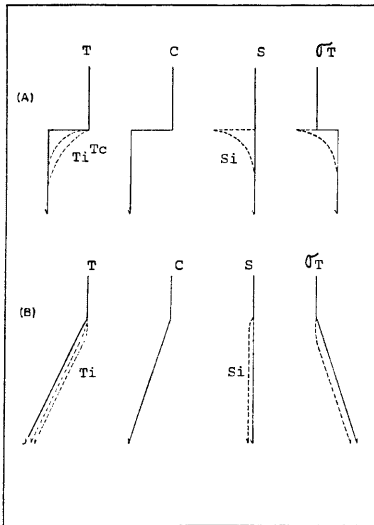


Fig. 3 Model of salinity spike (A) and the shifts of salinity and temperature profiles (B).

(b) (c) に帰因する誤差やノイズが、それ以外のものより大きいと考えられる。

(a) 時定数に帰因する誤差

水温表示用温度センサーの時定数 α は 1 秒以上もあるので、現場水温の急激な変化がある場合、それに追従できず、より変化に乏しい、なめらかな記録を表示する。

又、セルの時定数 γ は、ほとんど 0 にちかひのに、温度補償用温度センサーの時定数 β は 1 秒程度もある。そこで、現場水温 T_r や現場電気伝導度 C_r が急に变化している場合、被補償電気伝導度 C_m はほとんど現場電気伝導度 C_r と一致して变化するが、補償水温 T_c は現場水温 T_r に追従できない。従って、

$$\frac{dC_m}{dt} = \frac{C_r - C_m}{\gamma} \quad \dots\dots\dots (3)$$

γ はセルの時定数で、ほとんど 0 に近い。

温度補償回路は、水温 T と電気伝導度 C が入力されると、塩分 S が出力されるように設計されており、その関係を (4) 式で近似する。

$$S = F(T, C) = 30 + \frac{(C - 4171.3) - \{88.6 + 0.28(T - 20)\}(T - 20)}{123.4 + 2.52(T - 20)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$S(\text{‰}), T(^{\circ}\text{C}), C(10^{-5}\text{ohm}^{-1}\text{cm}^{-1})$

(4) 式は温度補償回路の特性に従って、Weyl の実験値³⁾を近似したものである。

この回路に、補償水温 T_c と被補償電気伝導度 C_m が入力されて、表示塩分 S_i (indicated salinity) が出力されるので、(5) 式が成立する。

$$S_i = F(T_c, C_m) \quad \dots\dots\dots (5)$$

もちろん、この回路に、現場水温 T_r に等しい補償水温と、現場電気伝導度 C_r に等しい被補償電気伝導度が入力されれば、現場塩分 S_r に等しい表示塩分が出力されるはずである。従って (6) 式が成立する。

$$S_r = F(T_r, C_r) \quad \dots\dots\dots (6)$$

現場圧力 P と表示深度 D との関係も、(1) や (2) と同様なスタイルが考えられるが、今回は水温と塩分の補正だけを考え、深度記録の吟味は省略する。

3. STD の記録の誤差やノイズの原因

STD の記録に含まれている誤差やノイズの要因としては、(a) センサーの時定数、(b) 測器による海水の乱れ、(c) 電気伝導度が測定されている海水と、水温が測定されている海水とが異なること、(d) センサーの熱容量によるまわりの海水の温度変化、(e) その他 (記録が再生表示される過程で入りこむ雑音やひずみ、読み取り誤差等) が考えられる。その中でも (a)

表示塩分 $S_i (=F(T_i, C_m))$ は現場塩分 $S_r (=F(T_r, C_r))$ と異なっている。

例えば Fig. 3 (A) のように、現場水温 T_r が瞬間的に変化して、現場塩分 S_r は一定の場合、現場電気伝導度 C_r は現場水温 T_r の変化に対応して瞬間的に変化している。その時、表示水温 T_i と補償水温 T_c は指数関数的に変化し、被補償電気伝導度 C_m は現場電気伝導度 C_r と一致するので、表示塩分 S_i は、スパイク状の変動を示す。

また、Fig. 3 (B) のように、現場水温 T_r が一定の割合で急変している場合、表示水温 T_i と補償水温 T_c は現場水温 T_r から一定の値だけずれた値を示し、表示塩分も現場塩分 S_r から一定の値だけずれた値となる。

いずれにせよ、もし現場水温が急降下する場合には、表示水温と補償水温は現場水温より高温となり、表示塩分は現場塩分より低塩分となるので、表示水温と表示塩分から求めた密度は、現場水温と現場塩分から求まる現場密度よりも小さくなる。現場水温が急上昇する場合は逆となる。

Fig. 3 (A) のようなスパイク状の表示塩分の分布は、表示水温の急変と照合して、誤差かどうか判別しやすいが、Fig. 3 (B) のように、一定のずれが存在している場合は、目立たないので誤差のあることが見のがされやすい。しかし地衡流計算のように、鉛直方向に密度を積分する場合には、後者による誤差の方が影響が大きい。

(b) 測器による海水の乱れに帰因する誤差

STD を海中で上げ下ろしする時、STD 本体やセンサーは海水をかきまぜて、渦を作るので、水温・塩分の鉛直分布を乱してしまう。下降時に、比較的、乱されない状態で海水がセンサーを通過するように、センサーは STD 本体の下部に取付けてある。したがって上昇時は、本体によってかき乱された状態の海水がセンサーを通過する。それどころか本体によって生じた渦の中の水は、外の水と混りにくい傾向があり、上昇中の STD センサーは、本体の渦に取込まれた下層の水に浸っている場合がある。従って普通は STD の記録は下降中のものしか取り扱わない。しかし下降中の記録でも、船のゆれや、ウインチ操作のぎこちなさのために、STD がスムーズに降らずに、急降下と急停止、ときには急上昇を伴ないながら、(おそらく左右にも揺れながら) 下降していると、鉛直分布をかき乱しながら測定していることになる。乱れの効果は単にかきまぜて分布を平均するだけでなく、次の (c) の効果と組みあわさって複雑なノイズを生ずる原因となる。

(c) 電気伝導度が測定されている海水と、水温が測定されている海水とが異なることに帰因する誤差

新型の STD では、各センサーに海水がよどみなく同時に通過するように、本体から水平に離して、同じ高さに取付けてあるが、旧型の STD では、本体の真下に水温計とセルが上下に離れて取付けてあり、セルによってかきまぜられたり、セルと本体の間に取込まれたりした海水を、水温計が少し遅れたタイミングで計測している傾向がある。新型といえども、(b) で指摘したような渦や乱れの影響が顕著な時、セルと水温計が常に同一の海水を同時に計測しているとはかぎらない。海水の電気伝導度を別の海水の温度で温度補償して得られる塩分値は、当然、どちらの水の塩分値とも異なる可能性がある。

ただし、比較的、みだれが小さい時には、水温計はセルを通過した水を、あるタイム・ラグを持って、計測していると考えられ、系統的な補正ができる可能性がある。

(d) センサーの熱容量によるまわりの水の温度変化に帰因する誤差

躍層を STD が降下する時、センサーを通過する水は常にセンサーより低温であり、その温度差はセンサーの熱容量と降下速度と、躍層の温度勾配に比例する。センサーを通過する水は暖められて昇温するかもしれないが、速やかに通過する場合は微小である。ところが躍層の中で STD が急停止すると、熱容量の大きなセルのまわりの水は、セルを冷しながら自分自身暖められていき、電気伝導度は増加する。温度センサーの熱容量はセル程大きくないので、まわりの水はそれ程昇温しない。それで結局表示塩分が増加する。STD が躍層中で停止した時に、スパイク状の塩分極大層が表示されたような例は、この種の誤差によるものかもしれない²⁾。STD が停止した時の記録を除去することにすれば、この要因の誤差は考慮しなくても

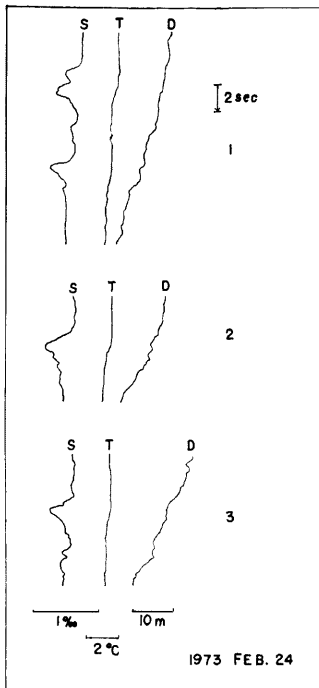


Fig. 4 Examples of actual salinity 'spikes' when STD stopped and swung in the thermocline.

している時は、水がセンサーをよどみなく通過して、乱れや渦の影響が小さいので、セルと水温センサーとの水が異なる場合でも、電気伝導度の測定と水温の測定のタイミングに一定のタイムラグがあるだけとみなせるだろう。

そこで、まず、全ての塩分・水温・深さの時間おくりのデータに、時定数に帰因する誤差の補正と、タイミングのずれに帰因する誤差の補正をほどこして、最後に、STD が停止したり、一時上昇したりしている時の水温・塩分の記録値を除去して、乱れや渦に帰因するノイズを取除くことにした。

4. 1 時定数に帰因する誤差の補正

センサーの時定数に帰因するものは、以下に述べる方法で系統的に補正できるはずである。すなわち Fig. 1 にあげた信号の流れを逆に追跡して、 T_i と S_i から T_r と C_r を求めれば S_r は (6) 式から求まる。STD 観測で得られるデータは T_i と S_i である。実験で STD のセンサーの時定数 $\alpha \cdot \beta \cdot \gamma$ が求まれば Fig. 5 に示す手順で補正できる。

まず関係式 (1) から、 T_r を求める (7) 式が導かれる。

$$T_r = T_i + \alpha \frac{dT_i}{dt} \dots\dots\dots (7)$$

よいであろう。

実際の STD のデータには以上の要因が相互に関係して複雑な誤差やノイズを含んでいる。Fig. 4 は旧式の STD で得られた記録を時間おくりで再生したもので、塩分 (S)、水温 (T)、深さ (D) の時間変化を示している。スパイク状の塩分極小層が存在しているが、それらは必ず水温の急降下を伴っているので (a) の時定数に帰因する誤差の可能性はある。しかもその時、深さの記録では、STD の降下が停止・動揺していることから、(b) の海水の乱れに帰因するノイズも存在するであろうし、くわしく調べると、塩分の急変と水温の急変にタイムラグが存在していることがわかり、(c) のセルの水と水温センサーの水とが異なることに帰因するものも含まれているであろう。おそらく、STD がスムーズに降されなかったで、躍層の所で、(a) (b) (c) (d) の作用が同時に効いて、大きな塩分のスパイク状の分布が表れたのであろう。

4. 補正の原理

STD 記録の誤差のうちで (a) センサーの時定数に帰因するものは、系統的に補正できるが、(b) 測器による海水の乱れと (c) セルの水と水温計の水が異なることが組みあわさって生じたノイズは、その時の観測環境によって様々な状態が生じるので、系統的に補正することはむずかしい。そのようなノイズは、STD が停止したり、一時的に上昇したりする時に顕著に発生すると考えられる。一方、STD がスムーズに下降

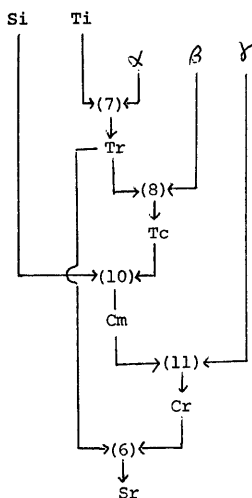


Fig. 5 Flow chart of the correction process of STD data.

また, T_r と β と T_c の関係式 (2) は, T_c を未知数とすれば, 線型一階微分方程式であり, 初期条件として $T_r(0)=T_c(0)$ ならばその解は次の (8) 式で与えられる。

$$T_c(t) = \exp\left(-\frac{t}{\beta}\right) \left\{ T_r(0) + \frac{1}{\beta} \int_0^t T_r(x) \exp\left(\frac{x}{\beta}\right) dx \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

次に, 水温と電気伝導度と塩分の関係式 (4) から (9) 式が導かれる

$$C = G(S, T) = \{123.4 + 2.52(T-20)\}(S-30) + \{88.6 + 0.28(T-20)\}(T-20) + 4171.3 \quad \dots\dots\dots (9)$$

この式に S_i と T_c を代入して, C_m を求める (10) 式が得られる。

$$C_m = G(S_i, T_c) \quad \dots\dots\dots (10)$$

さらに関係式 (3) によって, C_m から C_r を求める (11) 式が導かれる。

$$C_r = C_m + \gamma \frac{dC_m}{dt} \quad \dots\dots\dots (11)$$

結局補正の手順は次のようになる。まず T_i と α から (7) 式を使って T_r を求める。ついでその T_r と

β から (8) 式を使って T_c を求め, T_c と S_i から (10) 式によって C_m を求め, さらに C_m と γ から (11) 式を使って C_r を求める。最後にこの C_r と T_r から (6) 式によって S_r を求める。

4. 2 電気伝導度と水温の測定のタイミングのずれに帰因する誤差の補正

セルを通過して電気伝導度を測定された水が, 水温センサーに達して水温を測定されるのに δ のタイムラグがある場合, セルを通過した時刻を基準にすると, $C_r(t)$ と $S_r(t)$ に対応する現場水温は $T_r(t+\delta)$ である。それで 4.1 で述べたプロセスの最終段階において (6) 式は (12) 式に改められなければならない。

$$S_r(t) = F(T_r(t+\delta), C_r(t)) \quad \dots\dots\dots (12)$$

5. 実際の補正計算プログラム

STD データの補正を電子計算機で処理する場合には, 時間の連続関数 $T_i(t)$, $S_i(t)$ 等を細かい時間間隔 Δ で読み取って, 次のように離散化した時系列になおす。

$$T_i(t) = T_i((N-1)\Delta) = X(N)$$

$$S_i(t) = S_i((N-1)\Delta) = Y(N)$$

$$T_r(t) = T_r((N-1)\Delta) = T(N)$$

$$S_r(t) = S_r((N-1)\Delta) = S(N)$$

$$T_c(t) = T_c((N-1)\Delta) = TT(N)$$

$$C_m(t) = C_m((N-1)\Delta) = CC(N)$$

$$C_r(t) = C_r((N-1)\Delta) = C(N)$$

$$\exp\left(-\frac{1}{\beta}t\right) = \exp\left(-\frac{\Delta}{\beta}(N-1)\right) = E(N)$$

そこで, 関係式 (7) (8) (10) (11) (12) を (7)* (8)* (10)* (11)* (12)* の形に表わす。

$$T(N) = X(N) + \frac{\alpha}{2d}(X(N+1) - X(N-1)) \quad \dots\dots\dots (7)^*$$

$$TT(2N-1) = T(1)E(2N-1) + \frac{d}{3\beta} \left[T(2N-1) - T(1)E(2N-1) \right. \\ \left. + \sum_{j=1}^{N-1} \{ 2T(2(N-j)) - 1 \} E(2j+1) + 4T(2(N-j))E(2j) \} \right] \quad \dots\dots\dots (8)^*$$

$$CC(N) = G(Y(N), TT(N)) \quad \dots\dots\dots (10)^*$$

$$C(N) = CC(N) + \frac{\gamma}{2d}(CC(N+1) - CC(N-1)) \quad \dots\dots\dots (11)^*$$

$$S(N) = F(T(N + NSHIFT), C(N)) \quad \dots\dots\dots (12)^*$$

$$NSHIFT = \frac{\delta}{d}$$

データにはセンサー周辺の海水の乱れや、記録を再生表示するまでに入りこむ雑音、離散化する際のひずみ等に帰因する、センサーの時定数より短周期のノイズが含まれている。ところが (7)* (11)* 式は短周期変動程大きく増巾するので、そのままでは T や S の変動より、増巾された雑音変動の方が顕著に表現される。そこであらかじめ、短周期変動を充分除去するフィルターを通す必要がある。単純移動平均では不十分であり、以下に述べるようなフィルター特性を持つ加重移動平均を X と Y にほどこし、 X から求めた T にもほどこした。

$X(N)$ を加重移動平均したものを $\overline{X(N)}$ とすると (13) 式の関係がある。

$$\overline{X(N)} = \frac{\sum_{K=-M}^M A(K) X(N+K)}{\sum_{K=-M}^M A(K)} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$A(K)=1$ ならば単純移動平均である。今回使用した加重移動平均の特性は (14) 式である。

$$A(K) = 1 + \cos\left(\frac{\pi K}{M+1}\right) \quad \dots\dots\dots (14)$$

これによって $(M+1)d$ 以下の短周期変動は充分除去される。以下では T_0 秒のフィルターをかけるという表現を用いるが、これは、 $T_0 = (M+1)d$ の関係をもつ (13) (14) の加重移動平均をほどこすという意味である。

(8)* 式は (8) 式の積分をシンプソンの公式で近似しているので、 d が β より充分小さくないと誤差が無視できない。 d が $\beta/5$ より大きい時は、 $TT(N)$ の計算の時だけ、 $T(N)$ を補間して時間きざみを小さくして (8)* を使用し、求まった $TT(N)$ を元の時間きざみにもどす必要がある。

6. 時定数の決定

信頼できる補正を行なうためには正確な時定数を求めなければならない。電磁誘導セルの時定数 γ がほとんど 0 に近いことは、次のような実験で確認した。セルの穴に海水の電気伝導度に対応する抵抗線を通してリンクさせて、その抵抗値を瞬間的に変えてやって、表示塩分の出力変動を調べると、変化は非常に速やかで、記録計の追従の限界を超えていた。したがって (11)* 式は $\gamma=0$ とみなして $C(N)=CC(N)$ が常に成立するとした。

α に関しては、STD が空中から水中に降された時のデータを利用して求めた。 T は気温から水温にほとんど瞬間的に変化していると考えられる。 T は指数関数的に変化していて、およそ 1.5 秒の時定数であった。

β は次の様にして求めた。電磁誘導セルには海水に対応する抵抗線リンクを通しておき、温度補償用温度計センサーだけを空中から、コップの湯の中に急に浸すと、表示塩分 S_i が指数関数的に変化して、およそ 0.5 秒の時定数を示した。

以上の方法によって時定数を求めて補正計算を行なってみると、 β がもう少し大きい方が、より良好な補正結果を得ることができるようである。ここで補正の良好さとは、補正した水温、塩分から求めた密度分布が、生のデータから求めた密度分布に較べて、不自然な不安定分布がどのくらい解消されるかで判断した。

温度センサーの時定数は三種類考えられる。1. センサー素子の公称時定数、2. 塗料や保護カバーをつけられた状態での時定数（我々が β を求めた方法で測られるもの）、3. STD にとりつけられて実際に海中に降ろされて水温分布を計測する時の時定数。補正計算に必要な時定数は最後の種類の値であり、それは公称時定数より一桁大きいことは経験や実験によって指適されている⁴⁾⁵⁾。

7. 補正の実例

Fig. 6 は、1972年1月、紀伊水道で測られた STD の記録を時間送りで再生して補正したものである。太実線の X , Y , $\sigma_T(X, Y)$ が、未補正の表示された水温、塩分と、それから求めた密度である。記録を

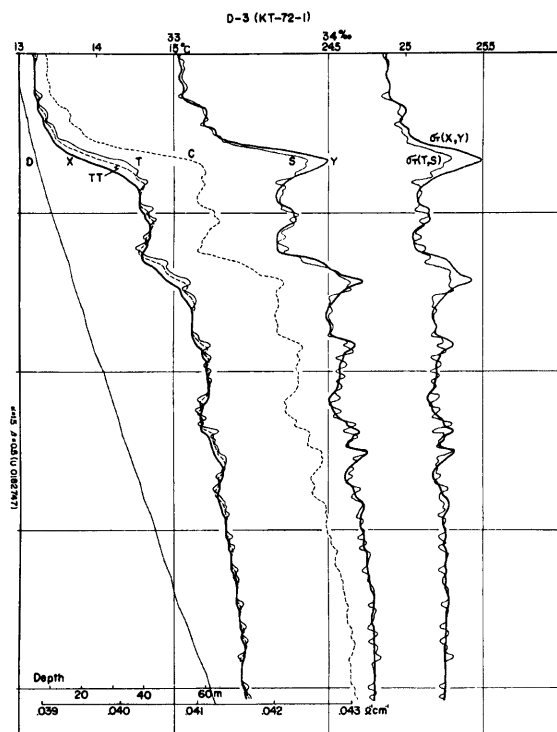


Fig. 6 Uncorrected profiles (thick lines) and corrected profiles (thin lines) of salinity, temperature and density. STD data is playbacked in a time sequence format and processed by a low-passed filter (0.5sec) and corrected with the time constants of $\alpha=1.5$ sec, $\beta=0.5$ sec and $\tau=0$ sec.

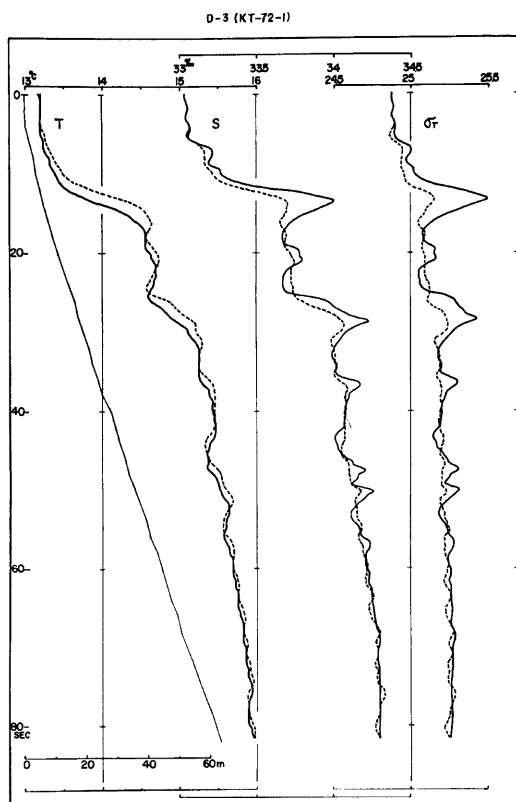


Fig. 7 Uncorrected profiles (solid lines) and corrected profiles (dotted lines) of salinity, temperature and density. STD data is common with Fig. 6 and processed by a low-pass filter (1.0sec) and corrected with the time constants of $\alpha=1.6$ sec, $\beta=0.9$ sec and $\tau=0$ sec.

そのまま信用すると、顕著な塩分極大層が存在し、しかも顕著な密度不安定を伴っている。読み取り間隔 Δ は 0.2 秒である。時定数はまず実験で求めた値を使い、 α を 1.5 秒、 β を 0.5 秒にした。0.5 秒のフィルターをかけて補正したのが、細実線の水温 (T)、塩分 (S) およびそれらから計算した密度 ($\sigma_T(T, S)$) である。塩分極大層や密度不安定は小さくなるが、解消するところまではいかない。しかも短周期変動が逆に目立ってきている。そこで α を 1.6 秒、 β を 0.9 秒にして、1 秒のフィルターをかけて補正したのが Fig. 7 である。実線が未補正、破線が補正された水温・塩分・密度である。塩分極大層や密度不安定層がほとんど解消されている。

使用した STD は旧型で、セルと水温センサーは、10 cm 程離れており、STD の降下速度が 80 cm/秒程だから、0.1 秒程のタイミングのずれがあると考えられる。そこで (12)* 式の NSHIFT を 0 から 3 まで変えて補正計算を行なった結果、NSHIFT が 1 の時、すなわち 0.2 秒のタイムラグの時、最も良好な補正が得られた。Fig. 6 および Fig. 7 に示された補正值は NSHIFT を 1 として求められたものである。

Fig. 8 は XY レコーダーによる再生記録、すなわち水温・塩分が深さの関数で表示されたデータしか手に入らなかった場合、STD の等速度降下を仮定して時間の関数とみなして補正を行なった例である。深さ

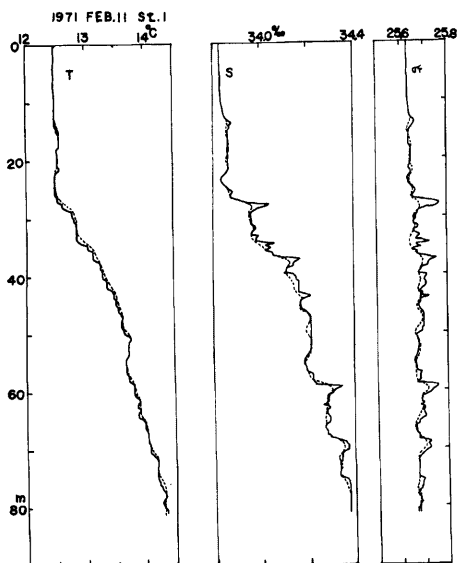


Fig. 8 Uncorrected profiles (solid lines) and corrected profiles (dotted lines) of temperature, salinity and density. Supposing the constant lowering speed of STD, the data is treated as a time sequence format. By correction, salinity 'spikes' and unstable density profiles are eliminated.

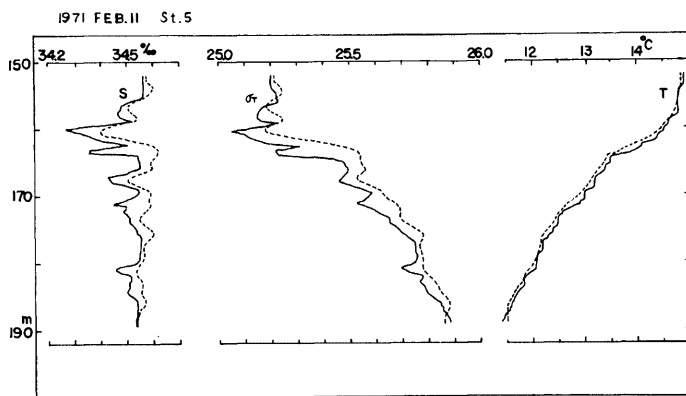


Fig. 9 Uncorrected profiles (solid lines) and corrected profiles (dotted lines) of salinity, temperature and density. Supposing the constant lowering speed of STD, the data is treated as a time sequences format. By correction, the shifts of salinity, temperature and density are adjusted.

にして 0.4 m 刻みで読み取り, 平均降下速度を 0.4 m/秒とした。実線が未補正の, 点線が補正した水温・塩分・密度の分布である。スパイク状の塩分極大と密度不安定が解消されてしまった。

しかし降下速度にむらがあると, XY レコーダーの記録をそのまま使うことは無理である。Fig. 9 は Fig.

1 の S5 の降下の記録を補正したものである。補正した後でも、塩分極小層や密度不安定が存在しているが、これはそこでは降下速度が大きく変化して乱れやよどみが大きく効いたのであろう。従って、スパイク状の塩分極小層や密度不安定を完全に補正することはできなかったが、Fig. 3(B) で予想した、STD が躍層中を降下する時に生ずる水温、塩分のずれは、補正できているようだ。

8. 他の文献の補正方法との比較

筆者が入手した STD 補正方法の文献は Scarlet²⁾ と Dantzer¹⁾ の二つである。両者はほとんど同じであり、Scarlet の文献の中の補正式を、この論文の式のスタイルで書けば、(15) および (16) 式である。

$$S_r = S_i + \beta \left(\frac{\partial F}{\partial T} \right) \left(\frac{\partial T_i}{\partial t} \right) \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\left(\frac{\partial F}{\partial T} \right) = -\frac{S}{0.9} (0.028 - 0.00032T) \quad \dots\dots\dots (16)$$

我々の方法と異なっているのは、まず温度センサーの時定数を一定 ($\alpha = \beta$) にしたこと、従って $T_c = T_i$ が成立し、複雑な (8) 式を計算する必要がないことである。使用されている Plessey の STD が、そのように都合よくできているからであろうか。我々の国産の STD では、 $\alpha = \beta$ とみなすのはむずかしい。

次に S_r を求めるのに C_r を求める必要がないことで、(15) 式により、 T_i と S_i から直接求めていることである。(15) 式は以下のように、(6) 式 および (5) 式から、途中に近似を認めれば導きだされる。

すなわち (5) 式および (6) 式から (17) 式が展開される。

$$\begin{aligned} S_r - S_i &= \frac{\partial F}{\partial T} (T_r - T_c) + \frac{\partial F}{\partial T} (C_r - C_c) = \frac{\partial F}{\partial T} \beta \frac{\partial T_c}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial C} \gamma \frac{\partial C_c}{\partial t} \\ &= \frac{\partial F}{\partial T} (\beta - \gamma) \frac{\partial T_c}{\partial t} + \gamma \left(\frac{\partial F}{\partial T} \frac{\partial T_c}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial C} \frac{\partial C_c}{\partial t} \right) = \frac{\partial F}{\partial T} (\beta - \gamma) \frac{\partial T_c}{\partial t} + \gamma \frac{\partial S_i}{\partial t} = \beta \frac{\partial F}{\partial T} \frac{\partial T_c}{\partial t} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (17)$$

そこで、 $T_c = T_i$ が仮定されれば (17) 式から (15) 式が求められる。

(15) 式の中の $\partial F / \partial T$ として (16) 式が Plessey の STD のマニュアルから引用されているが、その根拠は不明である。しかし (4) 式を T で微分すれば (18) 式が求まり、それは (16) 式とスタイルは異なるが、実際に T, S を代入してみると両者に大差はない。

$$\frac{\partial F}{\partial T} = -\frac{S + 0.22T + 0.71}{T + 30} \quad \dots\dots\dots (18)$$

結局、我々の方法でも、 $\alpha = \beta$ 、 $\gamma = 0$ を仮定すれば、(7)、(8)、(9)、(10)、(11) 式のプロセスは (15) および (18) 式に近似されるのである。しかし (15) 式では (12) 式のような、セルと温度計のタイミングのずれの補正をほどこすことはできない。従って、そのまま我々の STD の記録の補正に適用すると、特に旧型の STD の場合には、誤差を解消しきれないと思われる。

9. あとがき

海洋観測は、実験と異なって、同じ状態で同じものをくりかえし計測することは不可能である。従って過去の古い測器で測られた記録は貴重であり、旧式の STD で測られた誤差の大きな記録も、適当な補正をほどこして、興味ある海洋微細構造の究明に役立てるべきである。新型の STD とでも、セルと水温センサーに水がよどみなく、同時に通過するように改良されているものの、温度センサーの時定数は、ほとんど旧型と同じで 1 秒位あって、しかも不ぞろいであり、観測記録は、今回提出したような補正が必要である。

この研究を通じて、信頼できる STD 記録を得るためには、観測において、できるだけ STD を等速度で降下させなければならないことを痛感した。さらにこれから STD を改良すべき点として、できるだけ温度センサーの時定数を小さく、かつ統一すべきこと、および、水がよどみなく同時に全てのセンサーを通

過するように設計すべきことがうきばりにされた。又、測器の構造は、できるだけシンプルなものにして、精密な調整は、電子計算機で処理する方が、故障も少なくてよいと感ずる。そういう意味で、STD よりも CTD (Conductivity-Temperature-Depth recorder) の方が将来有望になるかもしれない。

おわりにこの研究を御指導いただいた京都大学理学部の国司秀明教授と、京都大学理学部地球物理学教授海洋研究室の皆様と防災研究所附属白浜海象観測所の技術補佐員の片山富晴氏の御協力に感謝するしだいである。

参 考 文 献

- 1) Dantzer H.L., Jr.: Dynamic salinity calibrations of continuous salinity/temperature/depth data, Deep-Sea Research, Vol. 21, No. 8, 1974, pp. 675-682.
- 2) Scarlet R.I.: A data processing method for salinity, temperature, depth profiles, Deep-Sea Research, Vol. 22, No. 7, 1975, pp. 509-515.
- 3) Weyl, P.K.: On the change in electrical conductance of sea water with temperature, Limnology and Oceanography, Vol. 9, No. 1, 1960, pp. 75-78.
- 4) Pingree, R.D.: Regularly used instrumental temperature and salinity structure, Deep-Sea Research, Vol. 18, No. 8, 1971, pp. 841-844.
- 5) Goulet J.R., Jr. and Culverhouse, Jr.: STD thermometer time constant, J. Geophysical Research, Vol. 77, No. 24, 1972, pp. 4548-4589.