



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	北星丸STDシステムによる水温および塩分の鉛直分布の測定
Author(s)	三宅, 秀男; MIYAKE, Hideo; 鈴木, 正明 他
Citation	北海道大學水産學部研究彙報, 32(2), 152-160
Issue Date	1981-06
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/23751
Type	departmental bulletin paper
File Information	32(2)_P152-160.pdf



北星丸 STD システムによる水温および塩分の鉛直分布の測定*

三宅 秀男** · 鈴木 正明** · 佐々木成二***
山本 昭一*** · 石井 清彦*** · 目黒 敏美***

Measurements of the Vertical Temperature and Salinity
Profile with the STD System of Hokusei Maru*

Hideo MIYAKE**, Masaaki SUZUKI**, Seiji SASAKI***, Shoichi YAMAMOTO***,
Kiyohiko ISHII*** and Toshimi MEGURO***

Abstract

The vertical temperature and salinity profiles were measured with STD system in the Okhotsk Sea. Raw data of the 2 m intervals obtained with the STD system were corrected by means of Scarlet's (1975) method and were compared with the values obtained by the Nansen cast. STD values which were corrected with the time lag of 2.0 sec and smoothed by the weighted running mean show the reasonable vertical profiles of the salinity and density, and indicate a good agreement with those of Nansen cast. A little differences between them may be due to the errors of two kinds of sensors since they are nearly constant within wide ranges of temperature, salinity and depth. The coarse filters cutting the remarkable noise are still needed in the presence of a large vertical temperature gradient.

はじめに

北海道周辺海域あるいは東北沖海域における海洋構造上の特徴の一つは、水温および塩分の著しく異なる水塊が接触し、混合する海域が見られることである。例えば、北海道沿岸のオホーツク海では、宗谷暖流水とオホーツク中冷水とが接触し、極めて特徴ある海洋構造を示し、また渡島半島東岸沖では、津軽暖流水の流入に伴って、沿岸水との間に熱塩前線が形成されたり、逆転温度差が10mで3°Cにも及ぶ鉛直規模の貫入層が見られたりする。

この様な熱塩構造は、異種水塊が接触し混合する海域では普通に見られ、混合拡散過程を示していると思われるが、その物理的機構はもちろんのこと、構造自体もまだ良くわかっていないのが現状のようである。この主な理由は、その名前の示す様に、水温と同時に塩分の詳細な測定値が必要不可欠であるが、これまでの観測がナンセン採水器による鉛直距離10m以上の各層観測に依存してきたためであろう。

* 北海道大学水産学部北洋水産研究施設業績 第120号
(Contribution No. 120 from the Research Institute of North Pacific Fisheries, Faculty of Fisheries, Hokkaido University)

** 北海道大学水産学部北洋水産研究施設
(Research Institute of North Pacific Fisheries, Faculty of Fisheries, Hokkaido University)

*** 北海道大学水産学部練習船北星丸
(Training ship "Hokusei Maru" Faculty of Fisheries, Hokkaido University)

センサーの一回の降下によって、連続的な水温、塩分、従って密度の鉛直分布が測定できる STD (塩分-温度-深度記録計) は、まさに上述した現象の把握、解明には好都合な測器で、多少精度に難点があるとしても、これによって多くの貴重な資料が得られるものと期待できる。加えて現場での作業面からは、労働を著しく軽減するという望ましい側面をも合せ持っている。一方測器自体が高価であることや複雑な補正を必要とすること等の理由から、これまで十分に利用されているとは言い難い。

幸にも本学部練習船“北星丸”には、代船建造にあたり STD が設置され、その後関係者の様々の努力によって少しずつ資料の蓄積がなされてきた。著者らは、1980 年北星丸第 12-2 次オホーツク航海において、不十分ながらも今後の STD の実用化に向けて一歩を進めるデータを得ることができた。本報告は、北星丸 STD システムから得られたデータを基にして、補正処理し、各層観測値と比較、検討した結果、塩分差の十分ある海域では、実用上さしつかえない程度で塩分値も利用できることを述べるものである。

北星丸 STD システムと生データ

STD は Plessey 社製で、センサー Model 9041, シグナルプロセッサー Model 8700, ディスプレイ Model 8500, ウィンチ Model 7030 等から成っており、デジタル記録出力としてアイ電子社製 AICOM-C5 計算機に接続されている。あらかじめ読み込まれているプログラムによって、各種のデータが印字され、必要に応じて紙テープにパンチされる。この様に現在の北星丸のシステムでは、演算と並行して出力するために、おのずとデータのサンプリング間隔が制約される。例えば STD の最小繰出し速度の毎分 22 m (毎秒約 0.37 m) の場合、印字とパンチを同時に行って得られる最小の鉛直サンプリング間隔は 2 m である。今回は、この状態で得られた値を生データ (Raw data) として、後述する補正に用いた。

測定は 0 m での値を出力させ、深度補正をしたのち、毎分 22 m の一定速度でセンサー部を降下させ、水深 6 m から 200 または 500 m までの 2 m 毎の出力値を記録した。船体の動揺等によりセンサー部が海面上に露出することのないように、2, 4 m 深の値を取り出さなかった。巻き上げ速度はおおよそ毎分 68 m で、記録はしていない。またグラフィックディスプレイの故障のため、モニターの水温、塩分の鉛直分布からの考察は加えていない。この STD 観測は、ナンセン採水器による 1000 m までの通常観測を終えた後に行ったため、両観測の間にはおおよそ 1 時間半の時間差がある。両観測値を比較する場合、この点にも考慮を要する。

マニュアルによれば、STD の二つのセンサーの時定数、すなわち温度および電気伝導度センサーの時定数はそれぞれ 0.35, 0.01 秒であり、補正は水温については温度センサーの時定数、降下速度、水温の鉛直勾配等から、また塩分についても水温および塩分に関する二つの係数、水温の鉛直勾配、降下速度、温度と伝導度のセンサーの時定数の差等から算出できるとしている。これは次に述べる時定数と水温の鉛直勾配とによって補正する方法と同じである。

補正処理

1. 補正の必要性和補正法

Plessey を始めこれまでの STD のデータには種々の誤差やノイズが含まれている。このうち特に大きいものは、温度センサーの時定数によるもので、これが大きいと現場水温に追従するのに時間がかかり、水温が深さとともに低下するときには実際よりも高く、逆に水温が上昇する場合には低目に表示される。また温度と伝導度のセンサーの時定数の間に差があると、異なった深さの水温と伝導度を測定することになり、スパイクやあるいは水温勾配に引張られたずれによって、不自然な塩分分布や密度逆転が生じることになる。

補正の必要性はこの様な事情によるもので、センサーの性能の検定とともに、これまでに測定値の補正法がいくつか試みられている。DANTZLER¹⁾は主躍層中を降下速度を変えて試験し、そのときの塩分のずれの平均値、見積られた時定数、水温と塩分に関する係数とから補正する方法を考えた。SCARLET²⁾は一連の補正の手順を計算機で処理しやすい形に書き改め、時定数を変えることによって最も無理のない分布を得ている。一方吉岡・芹澤³⁾はSTDの測定および補正の原理について理論的に考察し、国産のSTDについて時定数による誤差および水温の測定と伝導度の測定のタイミングのずれによる誤差の補正法を考案し、実際に良好な結果を得ている。

これらの補正法に対して最近 HORNE and TOOLE⁴⁾は、補正の関係式が線型系のインパルス応答になっていることを応用して、周波数領域で補正し、フーリエ変換によって実際的水温および塩分を求める方法を提案した。従来の補正法では、数メートルの鉛直分解能が限界であると言われているが、この方法によれば1m以下の水温、塩分の構造の特徴も検出可能であろうと述べており注目される。

2. 補正の手順

時定数と水温勾配とによって補正する方法は、基本的にはどれも同じである。ここでは生データの性質、計算処理の便利さを考え、標準的なSCARLETの方法に準拠して補正する。そのおおよその手順は次の通りである。

濾波 (Filter): 生データに現われる不自然なノイズやスパイクをあらかじめ除く。これはノイズを除去するために用いるが、意味のあるスパイクを消す恐れもあるから、結果を十分吟味する必要がある。オホーツク海の水塊の特性を考慮して、測定間隔2mで水温および塩分値がそれぞれ0.5°C, 0.2‰以上飛躍するときには、その値を除いた前後の値の平均値をその深さの値とした。一つだけ飛び出した値は完全に除去されるが、同じ向きに変化する場合にはさほど影響されない。

補正 (Correct): 時定数に原因する誤差を正す。PlesseyのSTDでは、水温、塩分についてそれぞれ次式が近似的に用いられる。

$$T_R(t_n) = T_I(t_n) + \tau \frac{\partial T_I(t_n)}{\partial t} \quad (1)$$

$$S_R(t_n) = S_I(t_n) + \frac{\partial S}{\partial T}(T, S) \times \tau \frac{\partial T_I(t_n)}{\partial t} \quad (2)$$

ただし、

$$\frac{\partial S}{\partial T}(T, S) = -\frac{S}{0.9} (0.028 - 0.00032 T) \quad (3)$$

ここで、 T_R , S_R は実際の海水の温度、塩分を、 T_I , S_I はSTDで測定されたそれらを時系列データとして表わしたもので、 τ (Tau)は温度センサーの時定数である。(3)式は水温と電気伝導度とから塩分を算出する近似式と関係したものであるが、この辺の理論的説明は吉岡・芹澤³⁾が詳しく述べている。なお(1)、(2)式の時間微分項を鉛直方向の空間差分形に直す際に、サンプリング間隔と降下速度とが関係してくる。従ってこれらを変えたとしても、差分形の係数のみを変えるだけで良いことになる。

平滑 (Smooth): 補正して得られた値をさらに次の加重移動平均操作によって平滑化する。

$$T(t_n) = 0.5T_R(t_n) + 0.25\{T_R(t_{n-1}) + T_R(t_{n+1})\} \quad (4)$$

$$S(t_n) = 0.5S_R(t_n) + 0.25\{S_R(t_{n-1}) + S_R(t_{n+1})\} \quad (5)$$

この値を補正が完了した最終値として密度計算に用いる。

補正の結果

1. 補正の時定数

さて実際に得られたデータを以上の方法によって補正してみよう。補正の良否は本来現場の水温、

三宅ら：北星丸 STD による水温・塩分の鉛直分布の測定

塩分に一致しているか否かで判断すべきである。しかしロゼットサンブラでもない限り、STD の値と現場での値とを正確に比較することは極めて難しい。何故ならば水温、塩分の時空間変動は大きく、特に補正項が最も効いてくる水温変化の大きいところでは、再現性が著しく悪く、通常の各層観測値との比較は意味がない。そのためロゼット採水を併用していない場合には、第一に経験的に塩分や密度の鉛直分布の自然さや滑らかさを一つの基準とする。次にもう一つは比較的再現性の良いと考えられる海域において、各層観測値と比較することで適正であるかを判定することにする。

図1はオホーツク中冷水と宗谷暖流水とが混合する海域における典型的な鉛直分布を補正した一例である。およそ表面から20mまでは低塩、20mから70mまで高塩、さらに70mから120mまでは低温低塩、そして再び高温高塩に転ずる様相がわかる。しかし、生データには水温の急変層の約20, 70, 110, 140m深に一致して、数多くの塩分のずれやスパイクが生じ、この結果密度分布にも不自然なスパイクや逆転が現われている。

これをマニュアル通りの $\tau=0.35$ 秒で補正しても、スパイクは除かれるが、ほぼもとのデータを平滑化した程度であり、塩分のずれや密度逆転はほとんど解消されていない。また後述するように鉛直水温勾配の大きい50m以浅では、各層観測値と大きく異なったり、塩分や密度分布に極端な極小値が出現する結果になる。これらの事柄は、もっと大きな時定数で補正しなければならないことを示唆している。実際これまでも補正に有効な時定数として、マニュアルの値よりも一桁大きい値の方がより確からしい分布が得られることが、いくつか報告されている^{3,5,6)}。このことは補正に必要な時定数が、システム全体の時定数であると考えることによって理解できる。

そこで時定数を変化させて鉛直分布を調べた例が図2、図3である。生データ、 $\tau=1.0, 2.0, 3.0$ 秒で補正した分布、各層観測値とを合わせて示した。時定数が大きくなるに従って、徐々に補正が強められていく過程がわかる。図2から、 $\tau=1.0$ では、まだ塩分のずれや密度逆転が十分に解消されず、

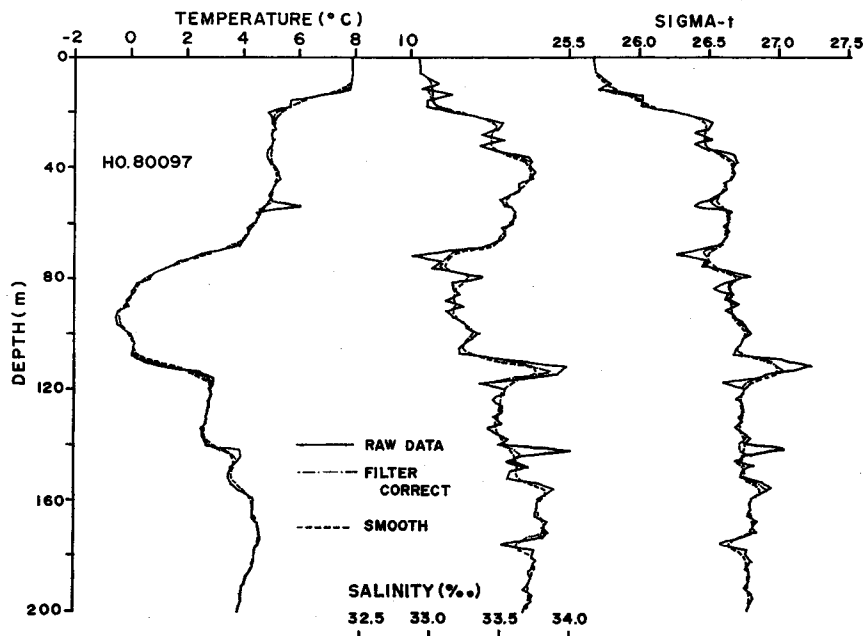


Fig. 1. Raw data, corrected and smoothed profiles of temperature, salinity and sigma-t for $\tau=0.35$ s.

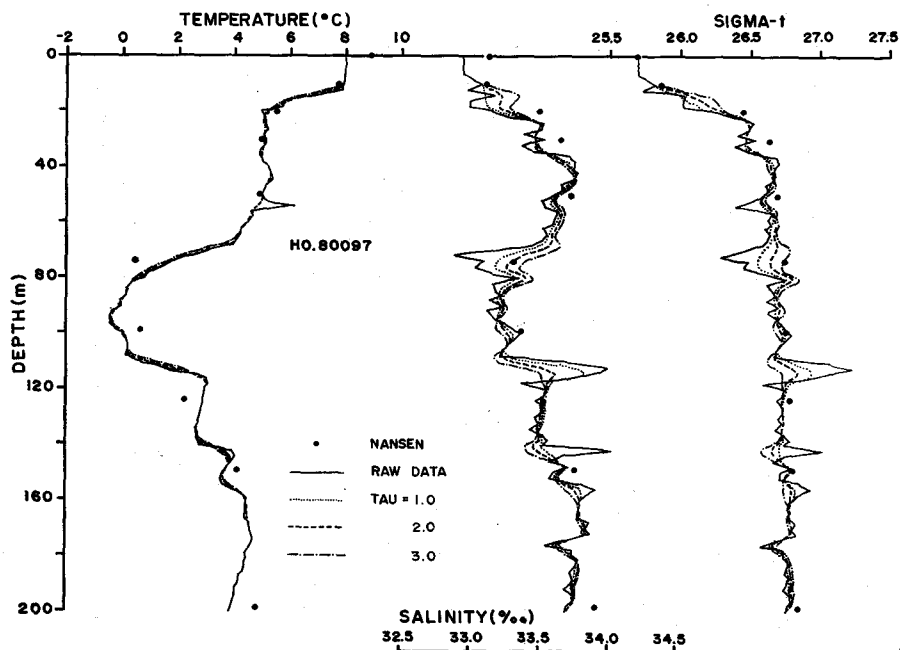


Fig. 2. Raw data and corrected profiles of temperature, salinity and sigma-t for tau=1.0, 2.0 and 3.0 s. Solid circles show the values obtained from the Nansen cast.

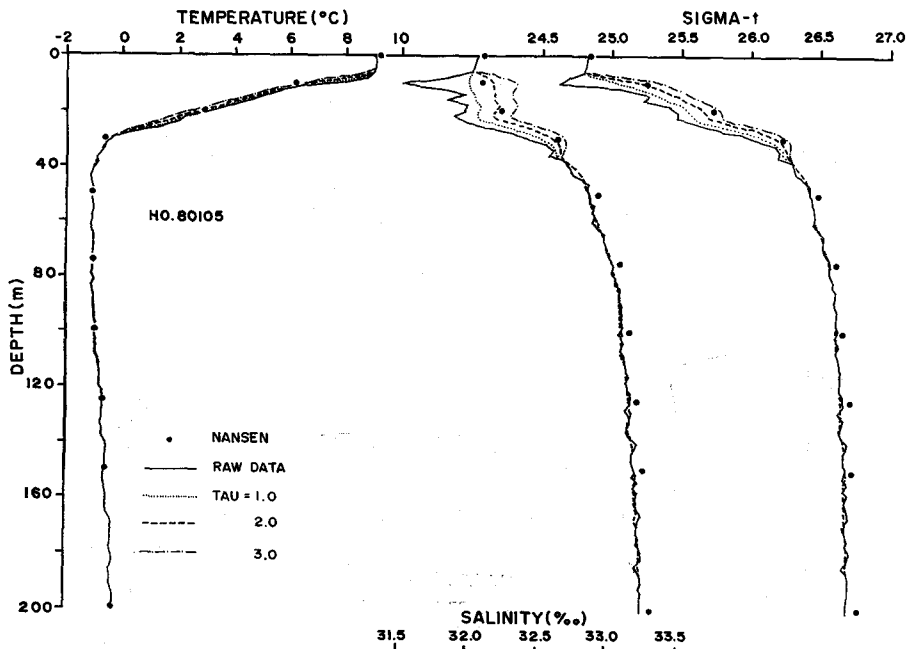


Fig. 3. Same as Fig. 2 except for HO. 80105.

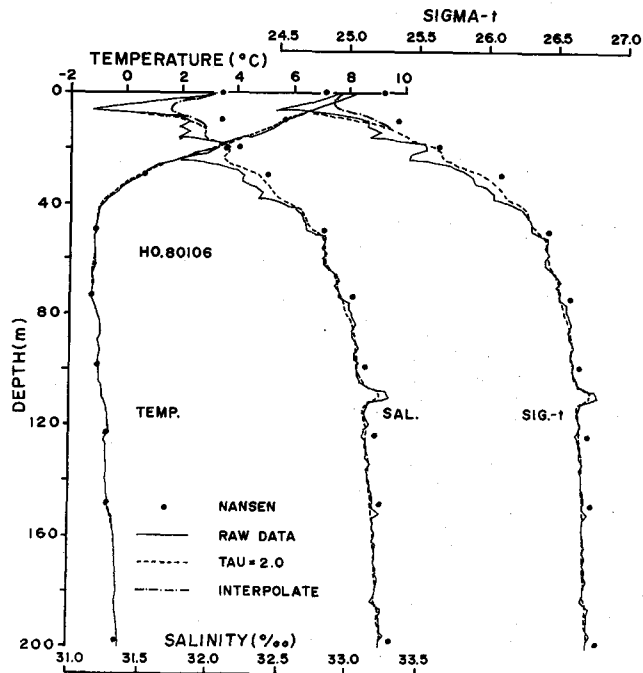


Fig. 4. Raw data, corrected and interpolated profiles of temperature, salinity and sigma-t for tau=2.0 s. Solid circles show the values obtained from the Nansen cast.

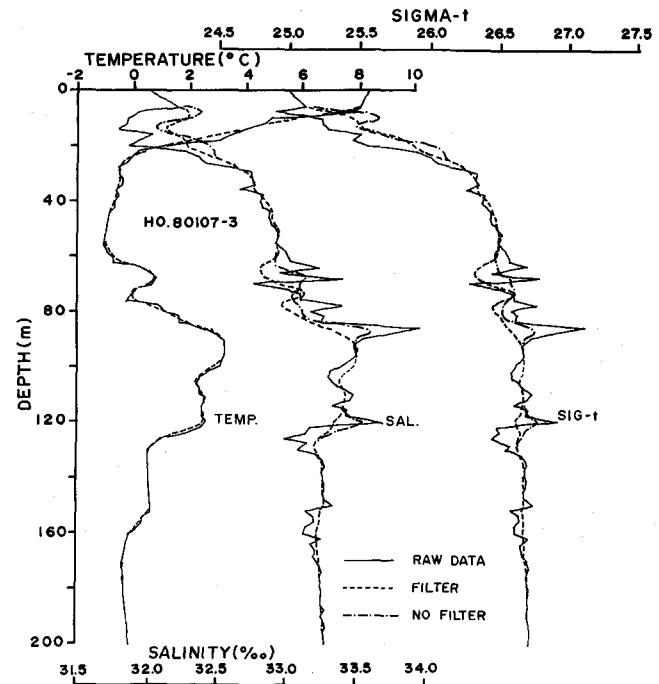


Fig. 5. Raw data, filtered and nofiltered profiles of temperature, salinity and sigma-t for tau=2.0 s.

三宅ら：北星丸 STD による水温・塩分の鉛直分布の測定

$\tau=3.0$ では逆に反対の方向にずれ始めて、返って逆転を強める結果になり、過補正の状態であることがわかる。これに対して $\tau=2.0$ での補正値は、10~20, 70~80, 110~120, 140~160 m 層にみられるように、おおむね塩分の水温勾配によるずれを正しており、滑らかで自然な鉛直分布である。密度分布もこのとき最も変動が小さく、逆転を最小限に抑えており、分布の滑らかさは生データに比べて格段に良くなっている。

80, 140, 176 m 深には、なお規模は小さいけれども密度不安定が残っている。これは濾波によっても取除けないものである。なお、この様な激しい時空間変動のある海域では、STD 値と各層観測値とは十分良く一致はしないが、補正によって両者の差が小さくなる傾向がわかる。

もう一つの代表的な例は図3のオホーツク中冷水域での分布である。ここでは表層から 40 m 深にかけての水温の急低下に対応して、塩分と密度に大きなずれが生じているが、その他には目立ったノイズは全く現われていない。 $\tau=2.0$ での補正の結果はこれらのずれを十分に補正し、各層観測値と良く一致している。今回のデータでは、8 m 深から補正計算を実行するために、表面から 6 m 深にかけての水温変化が大きいつきには、やはり塩分、密度に異常な分布が現われる。この場合には、2, 4 m 深の値を内挿し再計算すればよい。図4はこの方法で再補正したもので、塩分のずれは大部分、密度逆転はほとんど解消される。この点はプログラムの改良によってさらに精度良く補正できる。

この様に調べると、 $\tau=2.0$ または 2.5 のときの補正値が、最も塩分、密度の鉛直分布に無理がなく、密度の逆転を最小にする結果が得られる。しかもこのときの値は各層観測値に最も近づいている。図3, 図4から、比較的安定な水塊である 50 m 以深では、塩分はほぼ一定値だけずれていることに気付く。そこで、もともと各層観測値と STD 値との間にこの程度の差があると考えて、温度変化の大きい深さでの各層観測値との一致にこだわらなければ、 $\tau=2.0$ の補正の方が良いかも知れない。

2. 濾波

生データのスパイクが全て STD システムの系統的な誤差によるものであるならば、濾波回路は不必要である。しかし実際のデータには、例えば図1の 54 m の水温値、図4の 110 m 附近の塩分値のように、明らかにノイズと思われるものも含まれている。また水温急変層の塩分値にも、あからさまには現われないが、この様なノイズが当然混入していると予想される。この点から濾波を通した場合と直接補正した場合とを比較すると、大体において濾波をかけた方が滑らかな分布が得られる。このことは図5の 6~30, 115~130 m 層の塩分、密度の鉛直分布を比較すればわかる。

ところが図5の 62 m から 92 m 深にかけての、のこぎり歯状に変化するような場合には、始めの濾波のかかり方によって下限値または上限値に沿った値を取ることであり、適正な補正ができない。この場合は濾波を通さない方が自然であり、密度逆転も小さくなる。こうした例はまれであるが、起り得ることであり、現在のところいちいち結果をみながら処理するしかない。サンプリング間隔が大きいことは、スパイクを強める原因ともなるから、今後はより細かいデータが得られるように出力方式を改良していきたい。

各層観測値との比較

以上の補正を経た値が各層観測値とどの程度一致するかを調べる。観測海域には、沿岸に宗谷暖流水が、沖合にはオホーツク中冷水がそれぞれ安定して分布し、その間は混合海域である。この海域では、時空間変動が大きく、両観測法による水温、塩分は、図2に示したようにそれ程良くは一致しない。そこで比較のための測点として、暖流水域の2点 (HO. 80-100, 103), 中冷水域の4点 (HO. 80-099, 105, 106, 107) を用いた⁷⁾。

これらの測点の塩分について、 $\tau=2.5$ で補正した STD 値に対し各層観測値 (Auto Lab. サリノメーターによる) を対比させたものが図6である。全体として図中に破線で示した各層観測値よりも

三宅ら：北星丸 STD による水温・塩分の鉛直分布の測定

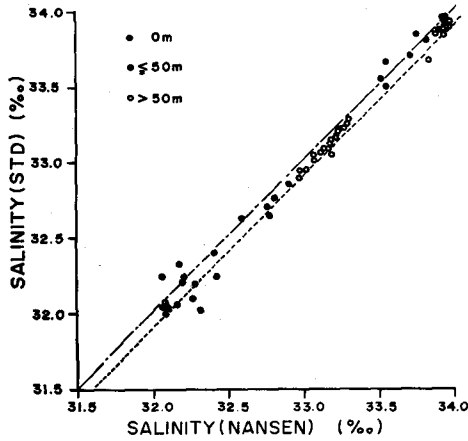


Fig. 6. Salinity distributions of STD against those of the Nansen cast.

0.1‰ 低い範囲内にほとんどが納まっている。特に 50m 以深のデータの散らばりが少ない。分散の大きい 32.0 から 32.5‰ にかけては、沖合中冷水域での表層から 50m 深に至る、水温勾配の強い層での値であって、測定点や深度のわずかな違いによって生じたものであろう。33.5 から 34.0‰ にかけても、やや分散がみられるが、これらは暖流水域での躍層における値であり、やはり同じ理由によると思われる。 $\tau=1.0, 3.0$ での補正では、これらの値の分散が、はるかに大きくなることは言うまでもない。

以上のことはさらに水温データを加えることにより一層明白となる。すなわち、塩分の偏差に対して水温の偏差を比べてみると(図7)、塩分差の大きいものは水温差も大きく、測定

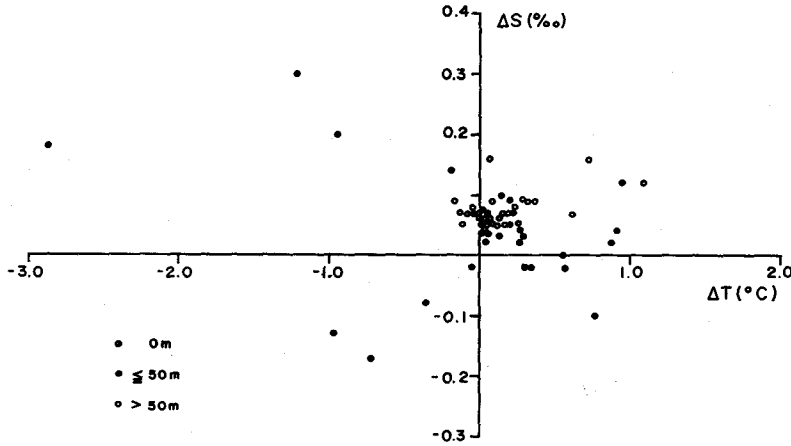


Fig. 7. Salinity and temperature differences between the STD and Nansen cast.

された水自体が異なっていることを強く示唆している。これらを除けば、概略 STD の塩分値はナンセン観測値よりも 0.05‰ 程低いところに分布の中心があるように見える。両観測の時間差、水温および塩分の時空間変動、船の漂流、深度の誤差等にもかかわらず、広範囲な水温、塩分、深度に対して常にほぼ一定の塩分偏差を生じる傾向があることから、器差とも考えられるが、今後より安定な海域で試験することによって、その原因を明らかにし、より良好な補正ができる可能性が十分ある。

要 約

北星丸 STD システムによって水温および塩分の鉛直分布を測定し、補正処理した後に各層観測値と比較した。その結果は次のように要約される。

- 1) 2m 毎の出力値を水温勾配と時定数で補正した結果、時定数が 2.0 または 2.5 秒のときに経験

上最も自然と思われる塩分、密度の鉛直分布が得られ、STD システムから生じたと考えられる密度逆転をほぼ解消できた。

- 2) このとき塩分、密度はナンセン観測による測定値に最も良く一致する。しかし塩分はおよそ 0.05% 程低い値を示す傾向がある。この差は器差によるものとも考えられる。
- 3) 記録方式をより細かいデータが得られるように改良することによって、鉛直分解能の向上とより精度の高い補正が可能であることを示した。

謝 辞

本報告に際して、適切な御指導と原稿の御校閲をいただいた福岡二郎教授、梶原昌弘助教授に厚く感謝します。また STD の補正について資料を提供していただいた秋葉芳雄助教授、貴重な御助言をいただいた京大防災研吉岡洋氏、観測に際して御協力をいただいた北星丸乗組員、漁業学科四年目学生、同乗された研究員の御一同に深く感謝します。なお計算は北海道大学大型計算機センター HITA C-M200H によった。

文 献

- 1) Dantzer, H.L., Jr. (1974). Dynamic salinity calibrations of continuous salinity/temperature/depth data. *Deep-Sea Res.*, **21**, 675-682.
- 2) Scarlet, R.I. (1975). A data processing method for salinity, temperature, depth profiles. *Deep-Sea Res.*, **22**, 509-515.
- 3) 吉岡 洋・芹澤重厚 (1979). STD の水温・塩分の補正. 京大防災研年報, **22-B**, 631-642.
- 4) Horne, E.P.W. and Toole, J.M. (1980). Sensor response mismatches and lag correction techniques for temperature-salinity profilers. *J. Phys. Oceanogr.*, **10**, 1122-1130.
- 5) Pingree, R.D. (1971). Regularly spaced instrumental temperature and salinity structures. *Deep-Sea Res.*, **18**, 841-844.
- 6) Goulet, J.R., Jr. and Culverhouse, B.J., Jr. (1972). Thermometer time constant. *J. Geophys. Res.*, **77**, 4588-4589.
- 7) 北大水産学部. 海洋調査漁業試験要報, **24**, (印刷中).