

北極海のXCTDデータの塩分補正

伊東 素代^{*1} 島田 浩二^{*1}

2002年北極海のXCTD観測の塩分補正を行なった。カナダ海盆の水深700～1000m, 水温0.3～0.0℃では, ある水温での塩分値は, 空間的にはほぼ一定である。そこで, XCTDとCTDのデータを比較することで, 塩分補正を試みた。その結果, カナダ海盆においては, この塩分補正方法が有効であることが示され, XCTDの塩分精度は ± 0.04 psuから ± 0.01 psuに向上した。

キーワード: 北極海, XCTD, 塩分補正

XCTD Salinity calibration in the Arctic Ocean

Motoyo ITOH^{*2} Koji SHIMADA^{*2}

We examine a new salinity calibration method for XCTD in the Arctic Ocean. With the depth range of 700–1000m in the Canada Basin, horizontal distribution of salinity on the isothermal surfaces is nearly homogeneous. We statistically compare the XCTD and CTD profiles and calibrate XCTD data. Accuracies in salinity of corrected XCTD is ± 0.01 psu, that is much better than the manufacturer's specified accuracies of ± 0.04 psu.

Keywords : Arctic Ocean, XCTD, Salinity Calibration

*1 海洋科学技術センター 海洋観測研究部

*2 Japan Marine Science and Technology Center

1. はじめに

XCTD (投下式伝導度水温深度センサー eXpendable Conductivity Temperature Depth)は、航行中の船から投下し、1000mまでの水温、塩分測定ができる。しかし、CTD (伝導度水温深度センサー Conductivity Temperature Depth)と比較すると、塩分の測定精度は1~2桁低い。鶴見精機のMK130システムのXCTDの場合、精度は、温度 $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$ 、電気伝導度 $\pm 0.03\text{mS/cm}$ 、深度5m又は指示値の $\pm 2\%$ の大きい方と提示されている。この電気伝導度の精度は、北極海の主密度躍層以深の代表として 0°C 、1000dbar、 29.4mS/cm を用いて塩分に換算すると、 $\pm 0.0394\text{psu}$ になる。

北極海で我々が注目している現象の一つに、主密度躍層直下に存在する大西洋水の水温変動がある。北極海では、海水の密度はほぼ塩分で決まっており、大西洋の水塊を同定し、水温変動を議論するためには、 $\pm 0.01\text{psu}$ 程度の塩分精度が必要である。これは、メーカーより提示されているXCTDの塩分精度 $\pm 0.04\text{psu}$ を超えており、その議論にそのままXCTDデータを用いるのは、現状では困難である。そこで、この論文では、XCTD とCTDの水温、塩分データを比較し、XCTDの塩分誤差の特徴を調べ、塩分の補正を行ない、塩分精度を $\pm 0.01\text{psu}$ まで向上させることを目的とする。

2. データ

2002年8~10月に、北極海で、海洋地球研究船「みらい」とカナダ沿岸警備隊砕氷船「ルイサンローラン」で、約190点のCTD、約120点のXCTD観測を行なった。図1は、観測点の位置を示す。「みらい」では、CTDはSea Bird社のSBE9plusを用い、ニスキン採水器で塩分検定用の採水を行なった。採水したサンプルは、Guildline社のオートサルで塩分を測定した。そのデータを用いてCTDの塩分補正を行なった結果、「みらい」のCTDの塩分精度は、300dbar以浅で $\pm 0.0016\text{psu}$ 、300dbar以深で $\pm 0.0009\text{psu}$ になった。「ルイサンローラン」でも、塩分検定用の採水を行ない、同様の方法で塩分補正を行なった結果、CTDの塩分精度は、1000dbar以浅で $\pm 0.0007\text{psu}$ 、1000dbar以深で $\pm 0.0006\text{psu}$ になった。XCTDは鶴見精機のMK130システムを用いた。

3. 結果

図2は、2002年の航海のCTD、XCTDデータを用いた、T-Sダイアグラムである。図2(b)の黒丸、エラーバーは、水温 0.3 、 0.2 、 0.1 、 0.0°C でのCTD観測点の塩分の平均、標準偏差で、標準偏差は非常に小さい。これは、今回の観測海域では、水温 $0.3\sim 0.0^{\circ}\text{C}$ の範囲では、水温が分かれば、塩分はある程度

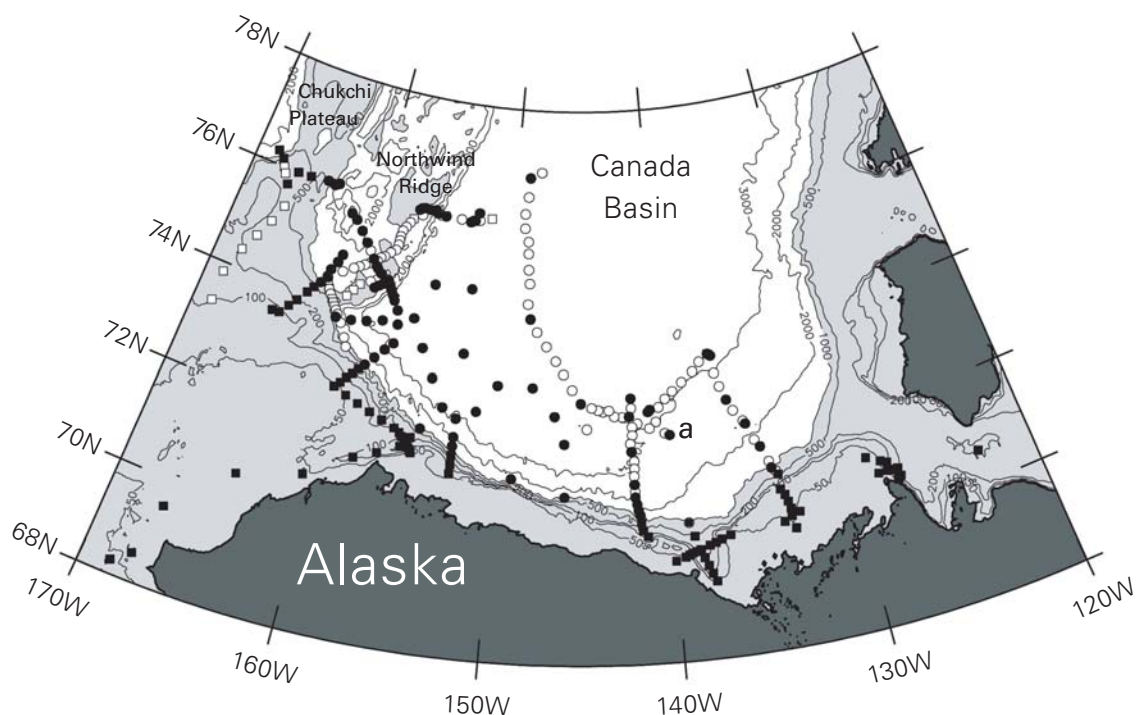


図1 2002年北極海カナダ海盆の観測点の分布。黒丸と黒四角はCTD、白丸と白四角はXCTDの観測点。黒四角と白四角は観測水深が浅く、塩分補正に使用しなかった点。aの印をつけた点は、図4、5で示したCTD、XCTD観測点。海底地形はInternational Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO)のデータを用いた。薄いシェードは1000m以浅の領域。

Fig. 1 Locations of CTD and XCTD stations in 2002. The solid circles and solid squares indicate the CTD stations. The open circles and open squares indicate the XCTD stations. The solid squares and open squares indicate the station that is not used for XCTD calibration. The labeled circles a indicate the locations of the CTD and XCTD stations shown in Figures 4 and 5. Bottom topography from International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO). The area shallower than 1000m is lightly shaded.

予想可能であることを意味する。一方、XCTDデータは、水温0.3~0.0℃の塩分値を比較すると、CTDより0.2psu高い値を示し、標準偏差も大きいことが分かる。これは、XCTDの塩分誤差によるものである。図3は、CTD、XCTDデータから、水温0.1, 0.3℃面での塩分の空間分布を示したものである。この図からも、CTDの塩分値は、各水温面で±0.01psuに収まっているのに対し、XCTDはかなりばらついていることが分かる。

この論文では、カナダ海盆の主密度躍層以深、水深700~1000m、水温0.3~0.0℃では、ある水温での塩分値は、空間的にほぼ一定であるという特徴を利用して、2002年のXCTDデータの塩分補正を試みる。まず、補正を行なう前提として、
(1) XCTDの水温、深度データは正しい。
(2) XCTDの塩分データは、プローブ毎に、それぞれ深さに依存しない一定のバイアスを持つ。
と仮定する。

例として、あるCTDと、その近くのXCTD点の結果を図4, 5に示す。図4(a)では、両者の差は見分けが付きませんが、拡大した図4(b)では、CTDよりXCTDの塩分が高く、深さによらずほぼ一定のずれを持ち、さらに±0.01psuのノイズがある事が分かる。0.0, 0.1, 0.2, 0.3℃面上での、CTDの塩分値(SCTD 0.3, SCTD 0.2, SCTD 0.1, SCTD 0.0), XCTDの塩分値(SXCTD 0.3, SXCTD 0.2, SXCTD 0.1, SXCTD 0.0)の差を平均し、これをXCTDの塩分バイアス ΔS と呼ぶ。

$$\Delta S = \{(SXCTD\ 0.3 - SCTD\ 0.3) + (SXCTD\ 0.2 - SCTD\ 0.2) + (SXCTD\ 0.1 - SCTD\ 0.1) + (SXCTD\ 0.0 - SCTD\ 0.0)\} / 4$$

CTDとXCTDの塩分の差は、XCTDの塩分の誤差であると仮定すると、XCTDの塩分値から、 ΔS を引いたものが、真の塩分値となる。このXCTD点の塩分バイアスを算出すると、 $\Delta S = 0.0333\text{psu}$ である。XCTDの塩分値から ΔS を引き、さらにノイズの減らすために10mの移動平均をかけた結果が、図5である。図5(a), (b)から、塩分補正済みXCTDは鉛直的に見てもCTDに良くあっている事が分かる。

次に、同様の方法で、図1に示したカナダ海盆内の全ての観測点で補正を行なう。図4で用いたXCTD点のように、すぐ近くでCTDの観測が行なわれている場合は良いが、近くにCTDの観測が無いXCTD点もある。しかし図3から、この水温では、塩分は、空間的にほぼ一定で、多少離れたCTD観測点でもXCTDの塩分補正を行なうのに十分であることが分かる。図6は、各XCTDとその点に最も近いCTD点との塩分バイアス ΔS を示した図である。この図から、XCTDの塩分は、高い方にずれているものが多く、全体の15%の観測点では、そのずれは鶴見精機の示す塩分精度 $\pm 0.04\text{psu}$ よりも大きい。図7, 8は、CTDデータと、塩分補正済みのXCTDデータから、T-Sダイアグラム、水温0.1, 0.3℃面での塩分の空間分布をプロットしたものである。図2(b)と図7(b)を比較すると、図7(b)ではXCTDはCTDとほぼ同じ値を示し、標準偏差も小さくなっていることが分かる。また、図8から、2つの水温面ともXCTDはCTDの分布に良くあっており、おおよそ±0.01psu程度の精度でXCTDの塩分補正ができたと予想される。

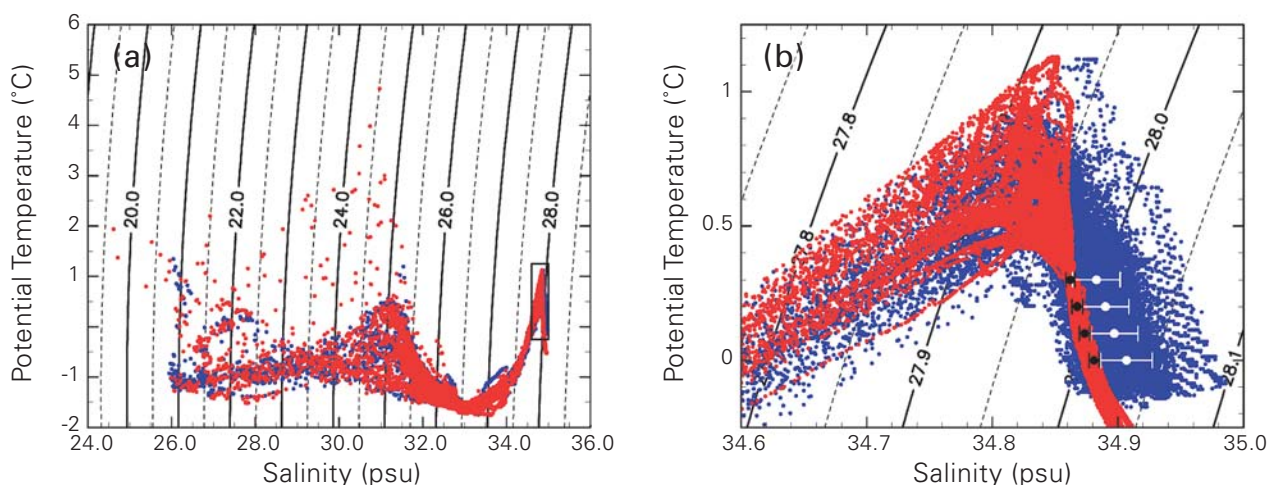


図2 図1の黒丸、白丸の観測点の温度 - 塩分(T - S)ダイアグラム。横軸は塩分(psu)、縦軸はポテンシャル水温(℃)。赤はCTD、青は塩分未補正のXCTD。コンターは、ポテンシャル密度を示す。(b)は(a)の四角の範囲を拡大した図。(b)の黒丸とエラーバーは、ポテンシャル水温 0.3 ± 0.05 , 0.2 ± 0.05 , 0.1 ± 0.05 , 0.0 ± 0.05 ℃でのCTD観測点の塩分の平均値と標準偏差。白丸とエラーバーは、XCTD観測点のデータで同様に計算した塩分の平均値と標準偏差。平均値と標準偏差の値は表1に示す。

Fig. 2 Temperature (°C) - Salinity (psu) diagram in the Canada Basin from CTD (red dots) and uncorrected XCTD (blue dots) data in 2002. The solid circles and open circles shown in Figure 1 indicate locations of CTD and XCTD stations. The data enclosed by the solid line in Figure 2 (a) is shown in Figure 2 (b). Contour lines indicate potential density. Black dots and error bar in Figure 2 (b) indicate the average and standard deviation of salinity (psu) on 0.3 ± 0.05 , 0.2 ± 0.05 , 0.1 ± 0.05 , 0.0 ± 0.05 °C isothermal surfaces of CTD stations. White dots and error bar indicate that of uncorrected XCTD stations. Values of average and standard deviation of salinity is listed in Table 1.

表1 (a) CTD, (b) 塩分未補正XCTD, (c) 塩分補正済みXCTDの, ポテンシャル水温 0.3 ± 0.05 , 0.2 ± 0.05 , 0.1 ± 0.05 , 0.0 ± 0.05 °Cの塩分の平均値と標準偏差。

Table 1 Values of salinity (psu) on the 0.3 ± 0.05 , 0.2 ± 0.05 , 0.1 ± 0.05 , 0.0 ± 0.05 °C isothermal surfaces of (a) CTD, (b) uncorrected XCTD and (c) corrected XCTD. Errors are the standard deviation.

	(a) CTD (psu)	(b) XCTD (psu)	(c) Calibrated XCTD (psu)
0.3 ± 0.05 °C	34.8620 ± 0.0035	34.8829 ± 0.0188	34.8626 ± 0.0043
0.2 ± 0.05 °C	34.8675 ± 0.0042	34.8900 ± 0.0185	34.8685 ± 0.0047
0.1 ± 0.05 °C	34.8734 ± 0.0042	34.8970 ± 0.0188	34.8785 ± 0.0045
0.0 ± 0.05 °C	34.8810 ± 0.0040	34.9068 ± 0.0205	34.8817 ± 0.0042

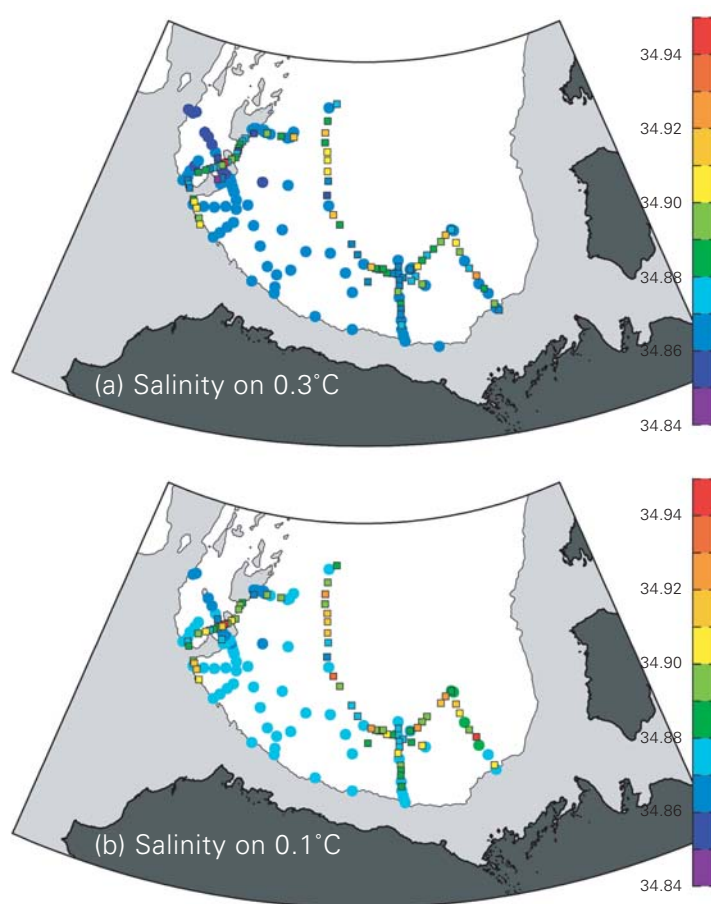


図3 ポテンシャル水温 (a) 0.3 ± 0.05 °C, (b) 0.1 ± 0.05 °Cでの塩分 (psu) の水平分布。丸がCTD, 四角が塩分未補正のXCTD。

Fig. 3 Horizontal distribution of salinity (psu) on potential temperature (a) 0.3 ± 0.05 °C and (b) 0.1 ± 0.05 °C. Solid circles indicate CTD stations. Solid squares indicate uncorrected XCTD stations.

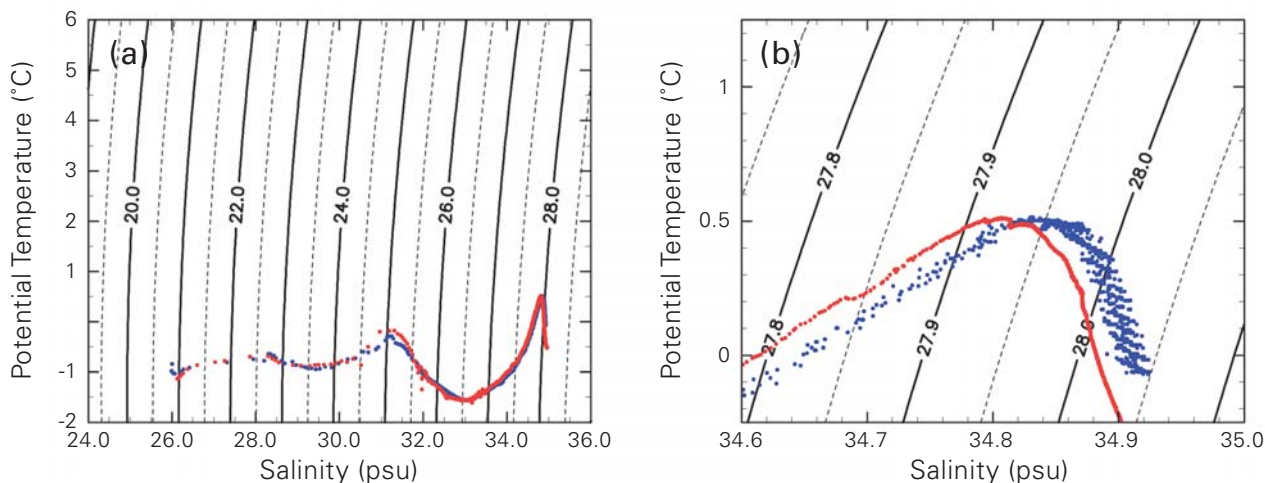


図4 図1の観測点aの温度-塩分(T-S)ダイアグラム。横軸は塩分(psu), 縦軸はポテンシャル水温(°C)。赤はCTD, 青は塩分未補正のXCTD。

Fig. 4 Typical example of comparison of XCTD and uncorrected CTD data. Temperature (°C) - Salinity (psu) diagram at a shown in Figure 1 from CTD (red dots) and uncorrected XCTD (blue dots) data.

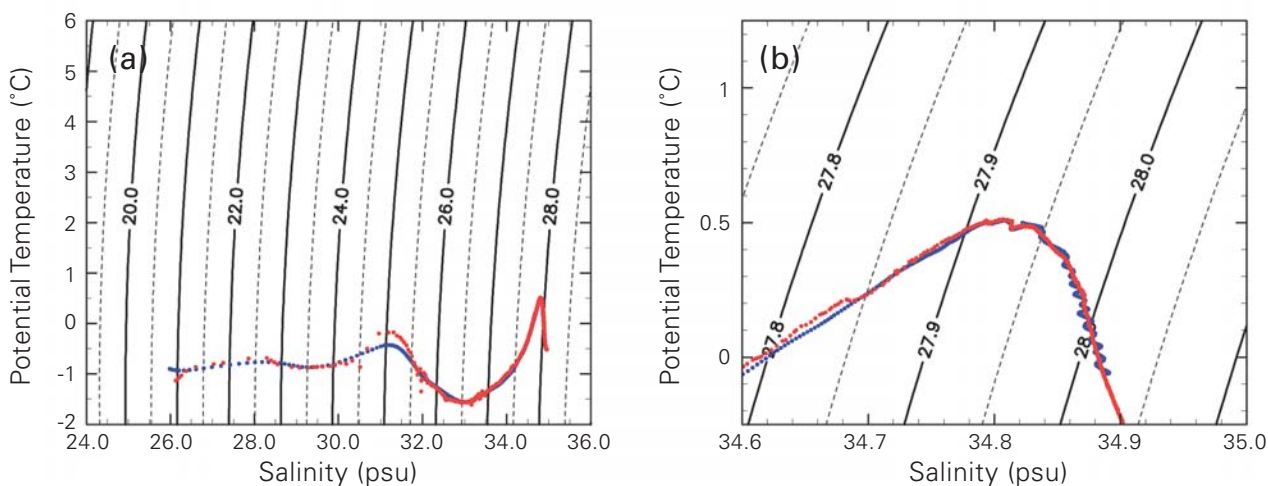


図5 図4と同様の図で, XCTDは塩分補正済みデータを用いたもの。

Fig. 5 Typical example of comparison of XCTD and corrected CTD data. Temperature (°C) - Salinity (psu) diagram at a shown in Figure 1 from CTD (red dots) and corrected XCTD (blue dots) data.

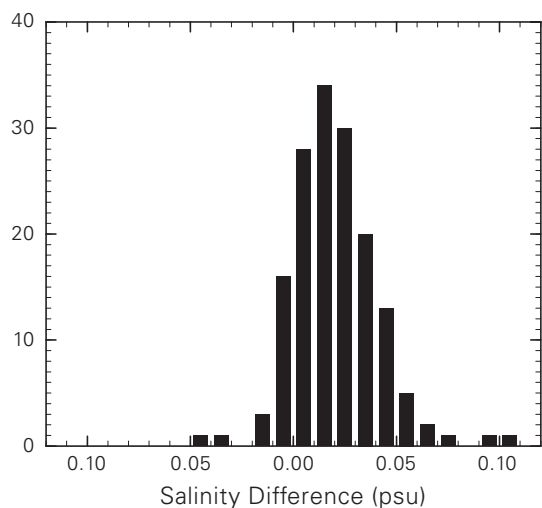


図6 XCTDと最も近いCTD点の塩分差(psu), ΔS の分布。塩分差は, ポテンシャル水温 0.3 ± 0.05 , 0.2 ± 0.05 , 0.1 ± 0.05 , 0.0 ± 0.05 °Cでの値を平均した。

Fig. 6 Histogram of the salinity difference between CTD and XCTD data, ΔS . ΔS is values of salinity difference that is averaged over 0.3 ± 0.05 , 0.2 ± 0.05 , 0.1 ± 0.05 and 0.0 ± 0.05 °C isothermal surfaces.

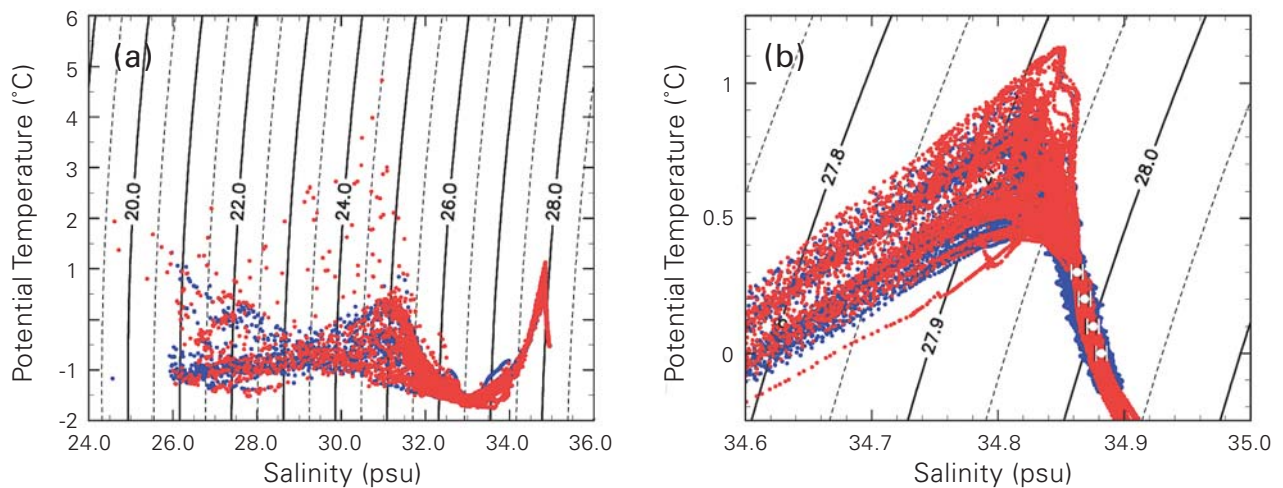


図7 図2と同様の図で、XCTDは塩分補正済みデータを用いたもの。赤はCTD、青は塩分補正済みのXCTD。コンターは、ポテンシャル密度を示す。(b)の黒丸とエラーバーは、ポテンシャル水温 0.3 ± 0.05 , 0.2 ± 0.05 , 0.1 ± 0.05 , 0.0 ± 0.05 °CでのCTD観測点の塩分の平均値と標準偏差。白丸とエラーバーは、XCTD観測点の塩分補正済みデータで同様に計算した塩分の平均値と標準偏差。平均値と標準偏差の値は表1に示す。

Fig. 7 Temperature (°C) - Salinity (psu) diagram in the Canada Basin from CTD (red dots) and corrected XCTD (blue dots) data in 2002. The solid circles and open circles shown in Figure 1 indicate locations of CTD and XCTD stations. Contour lines indicate potential density. Black dots and error bar in Figure 7 (b) indicate the average and standard deviation of salinity (psu) on 0.3 ± 0.05 , 0.2 ± 0.05 , 0.1 ± 0.05 , 0.0 ± 0.05 °C isothermal surfaces of CTD stations. White dots and error bar indicate that of corrected XCTD stations. Values of average and standard deviation of salinity is listed in Table 1.

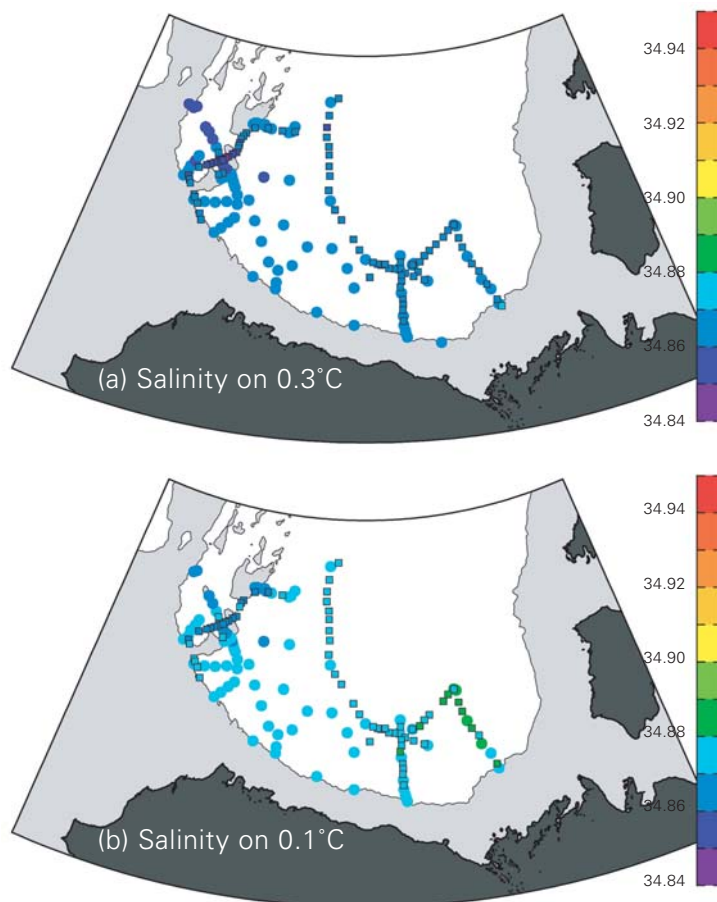


図8 図3と同様の図で、XCTDは塩分補正済みデータを用いたもの。

Fig. 8 Horizontal distribution of salinity (psu) on potential temperature (a) 0.3 ± 0.05 °C and (b) 0.1 ± 0.05 °C. Solid circles indicate CTD stations. Solid squares indicate corrected XCTD stations.

4. まとめ

2002年北極海で行なったXCTD観測の塩分補正を試みた。カナダ海盆の水深700～1000m, 水温0.3～0.0℃では, ある水温での塩分値は, 空間的にほぼ一定である。そこで, XCTDと, 最も近くのCTD観測点の塩分の比較を行ない, 塩分補正を試みた。この結果から, カナダ海盆において, 今回用いたXCTDの塩分補正方法が有効であり, 塩分補正を行なったXCTDの塩分精度は, おおよそ ± 0.01 psu程度であると示された。

しかし, 今回用いた方法は, 1000m以浅で, ある水温での塩分値のばらつきが, 空間的に非常に小さい海域のみに

有効で, 応用できる海域は限られているだろう。やはり, XCTDの測器自体の電気伝導度の分解能と精度が, 今後さらに向上することを期待する。

謝辞

海洋地球研究船「みらい」とカナダ沿岸警備隊砕氷船「ルイサンローラン」の船長はじめ乗組員方々に感謝します。XCTD観測は, 海洋科学技術センターの西野茂人さん, 須股浩さん, 宇野弘勝さん, (株)グローバル・オーシャン・デベロップメントの奥村智さん, 末吉惣一郎さん, 長浜則夫さんに協力して頂きました。感謝します。

(原稿受理: 2003年8月5日)