

水塊特性に季節変化が見られる密度レンジについて

小林 大洋^{*1} 市川 泰子^{*1} 高槻 靖^{*2} 須賀 利雄^{*1}
水野 恵介^{*2} 岩坂 直人^{*1} 四竈 信行^{*1} 竹内 謙介^{*1}

アルゴデータの品質管理を行うにあたり、海洋表層の水塊特性の季節変化をも考慮すれば、精度のより高い品質管理が可能となる。しかし、データ数が減少するため、基準自体が歪む可能性も否定できない。そこで、季節変化の存在する密度層にのみ季節別の品質管理を行えば、このような問題は回避できると考えられる。そこで、統計学的手法を用いて、水塊構造の季節変化がどの密度レンジまで及ぶのかを調べた。しかし、予想に反して多くの海域で深層にまで季節変化が存在するとの結果となった。これは海洋観測データの次のような特徴に起因すると考えられ、実際に季節変化が存在するかどうかは不明である。

1. 季節変化の有無を調べるのに必要な精度に比べ、塩分データの精度(分解能)が低い。
2. 標本数が少ない場合、観測時期、観測者、観測海域などに偏りが生じやすい。

キーワード：アルゴ計画, 品質管理, 季節変化

Study of density range with seasonal variation in the water-mass structure

Taiyo KOBAYASHI^{*3} Yasuko ICHIKAWA^{*3} Yasushi TAKATSUKI^{*4} Toshio SUGA^{*3}
Keisuke MIZUNO^{*4} Naoto IWASAKA^{*3} Nobuyuki SHIKAMA^{*3} and Kensuke TAKEUCHI^{*3}

Considering the seasonal variability in the sea surface layer, we can check the Argo data with much higher quality. By using statistic methods, we examined the density ranges with seasonal variation in the water-mass structure. Against our expectations, many regions have seasonal variations even in the deep layers. It is probably caused by the characters of the oceanographic data as the following:

1. Comparing the accuracy of the statistic tests, most salinity data has lower resolution.
2. Oceanographic data is apt to be biased for the limited surveyors, periods, and regions in the observations, especially in the case of small observations.

Keywords : Argo project, Quality Control, Seasonal variability

*1 地球観測フロンティア研究システム 気候変動観測研究領域

*2 海洋科学技術センター 海洋観測研究部

*3 Frontier Observational Research System for Global Change, Climate Variations Observational Research Program

*4 Japan Marine Science and Technology Center, Ocean Research Developmen

1. はじめに

夏季の加熱や冬季の冷却などの影響を受け、海洋表層の水塊構造は季節的に変化すると考えられる。アルゴデータの品質管理を行うにあたり、海洋中の水塊特性の季節変化をも考慮した品質管理基準データを用意することができれば、精度のより高い品質管理(詳細は小林ら(2001)を参照のこと)を行うことが可能になると予想される。しかし、観測が少ない海域が広がっている状況(図1)を考えると、数少ない観測データを更に季節別に分割することにより、得られる季節別の品質管理基準の精度が下がったり、さらには基準そのものが歪んだりする危険性がある。

一般に、日射や大気状態の季節変化の影響を直接受ける海表面では、水塊特性の季節変化が最も顕著であると考えて良い。そして、深くなるに従ってその変動量は小さくなり、ある深さからはそれ以外の理由で生じる変動成分との区別が付かなくなるものと考えられる。そこで、季節変化の影響がどの程度の深さ(もしくは密度)まで及んでいるのかをあらかじめ調べておき、その深さより表層では季節毎の品質管理基準を、それより深層では気候学(通年)的な品質管理基準を適用することにすれば、前述のような危険性を避けつつ、精度の良い品質管理を行うことが可能となると考えられる。

そこで、統計的な手法を用いて、HydroBase (Macdonald et al., 2001)の品質管理済データを元に水塊構造に季節変化の存在する密度レンジについて検討した。以下では、その結果について報告する。

2. 検定方針

HydroBaseデータを季節ごとに分け、この季節別データが正規分布であると仮定した上で、任意の2つの季節を選んで、それらの季節別データが同じ正規分布を母集団として持つかどうかの検定を行う。検定の結果、その2つの季節別データが同じ母集団からの標本である(正しくは、2つの季節別データが異なる母集団からの標本であるとする根拠はない)ことが判れば、その2つの季節別データをまとめて扱っても良い(その2つの季節を区分する理由はない)と判断することができる。

検定は次のような手順に従って行う。

1. 適当な小海域を設定し、その海域に存在するHydroBase品質管理済データを次のように季節別データに分割する。
 - Winter(1-3月分データ)
 - Spring(4-6月分データ)
 - Summer(7-9月分データ)
 - Autumn(10-12月分データ)
2. 各小海域・各季節について、すべての観測プロファイルにおける $22.5\text{--}27.8\sigma_\theta$ における水温・塩分を $0.1\sigma_\theta$ 間隔で求める。これら等密度面上における水温・塩分の季節別データが正規分布であると仮定し、次の6通り(Winter-Spring, Winter-Summer, Winter-Autumn, Spring-Summer, Spring-Autumn, Summer-Autumn)の組み合わせについて、以下の検定を行う。
3. ある特定の密度面上における、2つの季節別塩分(もしくは水温)データ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_{nx}$), ($y_1, y_2, y_3, \dots, y_{ny}$) が、2

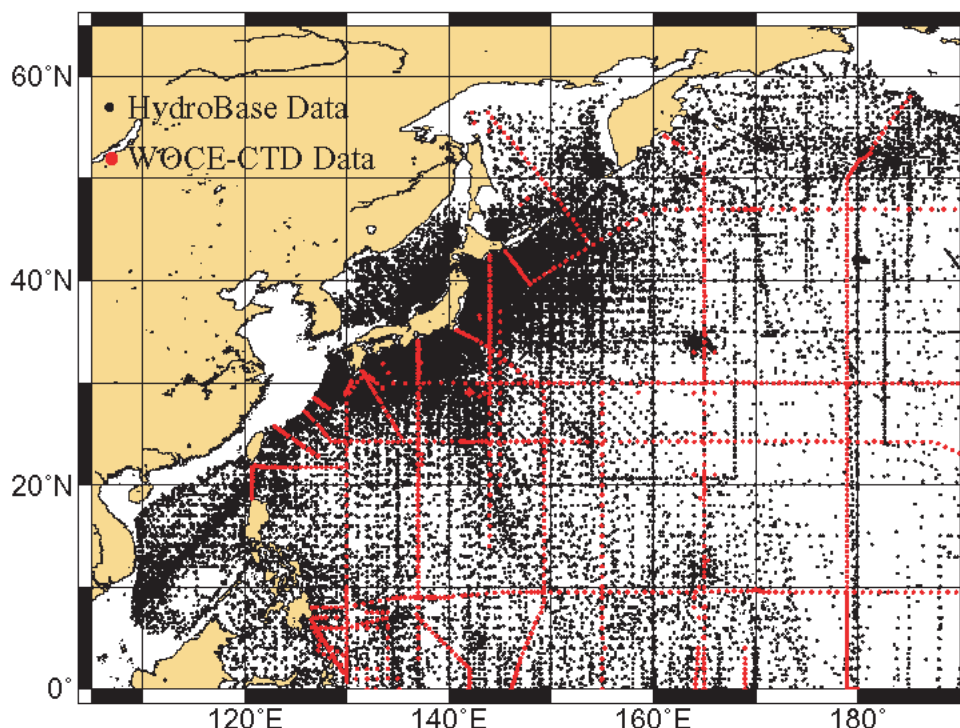


Fig. 1 Distribution of the climatological data in the western North Pacific.

図1 西部北太平洋における気候学データの分布。

つの正規母集団 $N(\mu_x, \sigma_x^2)$, $N(\mu_y, \sigma_y^2)$ からの標本であると考え、この2つの正規母集団の母分散が等しい(仮説 $H_0: \sigma_x^2 = \sigma_y^2$)ことを次の手順で有意水準5%で(F-)検定する(国沢編, 1966)。

① 標本分散 $S_x^2 = \sum(x_i - \bar{x})^2/n_x$, $S_y^2 = \sum(y_i - \bar{y})^2/n_y$ より、不偏分散 $n_x S_x^2/(n_x - 1)$, $n_y S_y^2/(n_y - 1)$ を求める。ここで、 $n_x S_x^2/(n_x - 1) > n_y S_y^2/(n_y - 1)$ であるとき、不偏分散比 $F_0 = \{n_x S_x^2/(n_x - 1)\} / \{n_y S_y^2/(n_y - 1)\}$ を求める。

② $F_0 > F_{\phi_2}^{\phi_1}(0.05/2)$ の場合、仮説 H_0 は有意水準5%で棄却され、2つの正規母集団の母分散は等しくないと結論される。ここで、 $F_{\phi_2}^{\phi_1}(0.05/2)$ は、自由度(ϕ_1 , ϕ_2) = $(n_x - 1, n_y - 1)$ のF-分布の0.05/2の点である。

4. 3.において仮説 H_0 が棄却されなかった場合、2つの正規母集団の母平均が等しい(仮説 $H_0: \mu_x = \mu_y$)ことを有意水準5%で(t-)検定する。

$t_{(x,y)} = \{ (n_x S_x^2 + n_y S_y^2) / (1/n_x + 1/n_y) / (n_x + n_y - 2) \}^{1/2}$ としたとき、 $|\bar{x} - \bar{y}| > t_{\phi}(0.05/2) \times t_{(x,y)}$ の場合、 H_0 は有意水準5%で棄却され、2つの正規母集団の母平均は等しくないと結論される。ここで、 $t_{\phi}(0.05/2)$ は自由度 $\phi = n_x + n_y - 2$ の t-分布の0.05/2の点である。

5. 4.において仮説 H_0 が棄却されなかった場合、2つの季節別データが異なる正規母集団からの標本と判断するだけの根拠はないことが示される。その結果、この2つの季節

別データを区別する必要はない(この2つの季節間に季節変化が存在しないと考えても許される)と判断できる。これに対し、3.または4.において、仮説 H_0 もしくは H_0^2 が棄却された場合は、それぞれの母分散もしくは母平均に違いがあるので、同一の正規母集団からの標本であるとは言えない。つまり、この2つの季節の間には季節変化が存在することになる。なお、以上の検定を行うためには、選んだ2つの季節別データには2以上の標本が必要である。

3. 結果

3.1. 検定対象海域

北太平洋全域に適用する前に、北西太平洋の各海域を代表すると見られる次の海域で、塩分構造に季節変化が見られるかどうかを検討した(図1参照)。

1. 亜熱帯域 20-30°N, 135-150°E (図2)
2. 混乱水域 32.5-42.5°N, 142.5-152.5°E (図3)
3. 亜寒帯域 45-55°N, 145-155°E

これらの海域を2.5°×2.5°の格子状海域に分割し、それぞれの小海域毎に検定を行っている。以下では、比較的多くの観測がなされている、亜熱帯域および混乱水域についての解析結果を示す。なお、水温構造の季節変化についても調べているが、結果は塩分の場合とほとんど変わらない。

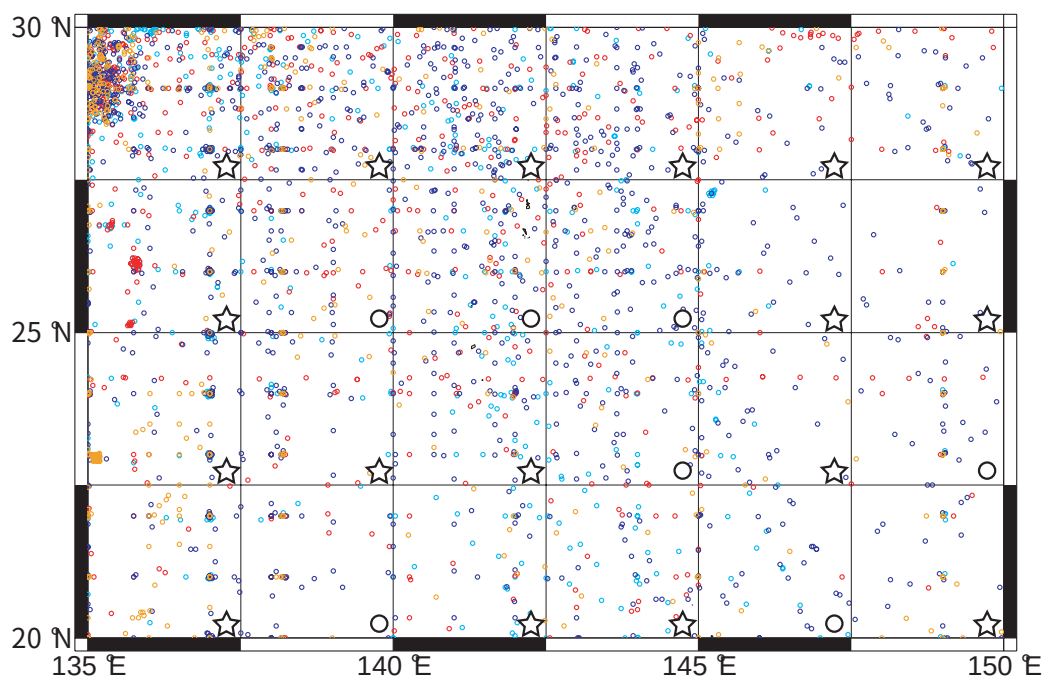


図2 亜熱帯領域における季節別データ分布。青、赤、濃青、黄はそれぞれ冬、春、夏、秋に観測されたデータ。各格子の右下の星および丸は、その海域で深層に季節変化が認められるか否かを示す。

Fig. 2 Distribution of the seasonal data in the studied subtropical region. The blue, red, dark-blue, and yellow circles represent the data observed in winter, spring, summer, and autumn, respectively. The stars and circles at the lower left corners show the regions where the seasonal variations exist in deep layers or not, respectively.

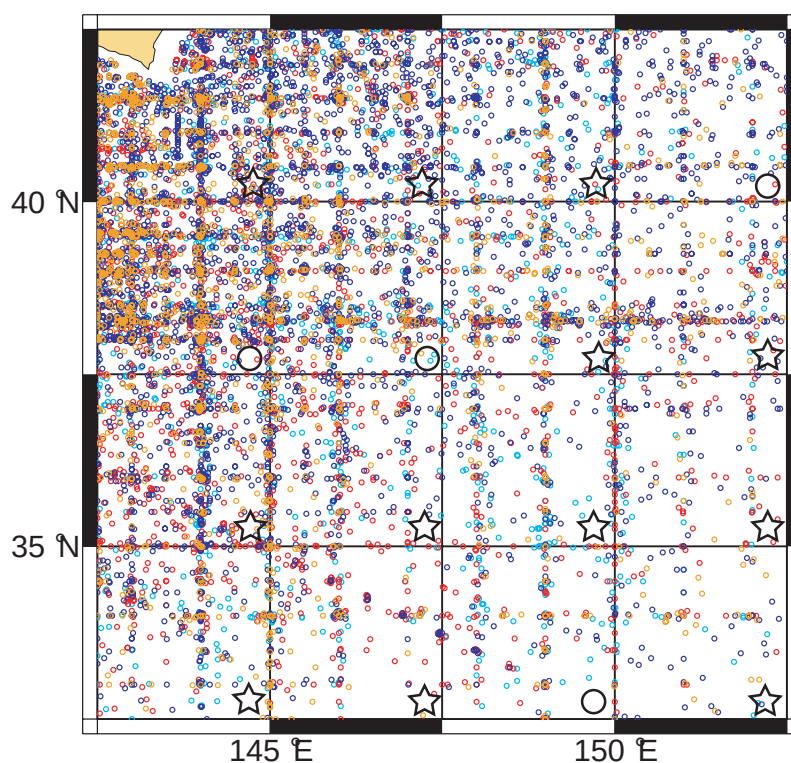


図3 混乱水域におけるデータ分布。図2に同じ。
Fig. 3 Same as Fig. 2 but for the Mixed Water Region.

3.2. 亜熱帯海域

図4は亜熱帯海域の1214_8h海域(25-27.5 °N, 140-142.5 °E)領域において、塩分に季節変化が認められるか否かを、密度毎に調べた結果である。図中央に、密度毎の平均塩分値を結んだ季節別平均塩分プロファイルを示し、各点からのびた横棒はそれぞれの密度における塩分の標準偏差を示している。また、平均及び標準偏差を計算する際に使用したプロファイル数(標本数)を右の欄外に示している。前節で説明した手順に従って季節毎に差異が見られるか否かを検定した結果は、図の左に記号で表した。色はどの季節の組についての検定結果であるかを示し、その組み合わせは下に書かれている。★は仮説 H_0^1 が棄却されたことを、▼は仮説 H_0^2 が棄却されたことを示しており、いずれの記号も2つの季節には差異が存在するとの結果を示す。なお、+記号は標本数が足りずに、検定を行うことができなかったことを示す。

この海域では、 $24.8\sigma_0$ よりも表層では、ほぼ全ての季節間で差異が認められることが分かる。図5に、冬季(1-3月)の表層25 m深における密度分布を示した。これは冬季混合層の密度を表していると考えられる。1214_8h海域における冬季表層密度は $24.7\sigma_0$ 程度なので、表層部分の季節変化は冬季混合層よりも軽い密度レンジに限られると考えて良い。

それよりも深層では、 $26-26.5\sigma_0$ 付近に冬とそれ以外の季節の間に差異が認められるものの、おおよそ季節変化は存

在しないという検定結果が得られている。つまり、この海域では、冬季海面混合層の底部(約 $24.8-25.0\sigma_0$)よりも重い密度レンジでは、水塊構造に季節変化は存在しないものと考えて扱うことができる。

一方、1213_6h海域(22.5-25 °N, 135-137.5 °E: 冬季海面密度は約 $24\sigma_0$)での検定結果を示すと図6のようになる。両海域は地理的にも近く、塩分プロファイルなどから考えても水塊の特徴が大きく変わるとは考えにくい。しかし1214_8h海域とは違い、ほぼ全ての密度レンジにおいて、季節の組み合わせを問わず、季節的な差異が存在するとの検定結果が得られた。

調査した亜寒帯海域について、検定結果を上で述べた2つに大きく分類した結果を図2の記号で示す。多くの海域で深層まで季節変化が存在するとの結果が得られており、また一見する限り両者には地理的な関係は認められない。

3.3. 混乱水域

図7および8は、それぞれ混乱水域の1314_Eh海域(37.5-40 °N, 145-147.5 °E: 冬季海面密度は約 $26.3\sigma_0$)、1314_Bh海域(35-37.5 °N, 147.5-150 °E: 冬季海面密度は約 $25.8\sigma_0$)における検定結果である。1314_Eh海域では、冬季混合層の底よりも重い密度層では(秋のデータは平均値が一致しないという例外が見られるが)季節変化がほとんど存在しない(図7)のに対し、1314_Bh海域では冬季混合層の下でも広範な密度レンジにわたり季節を問わず差異認められる(図8)。

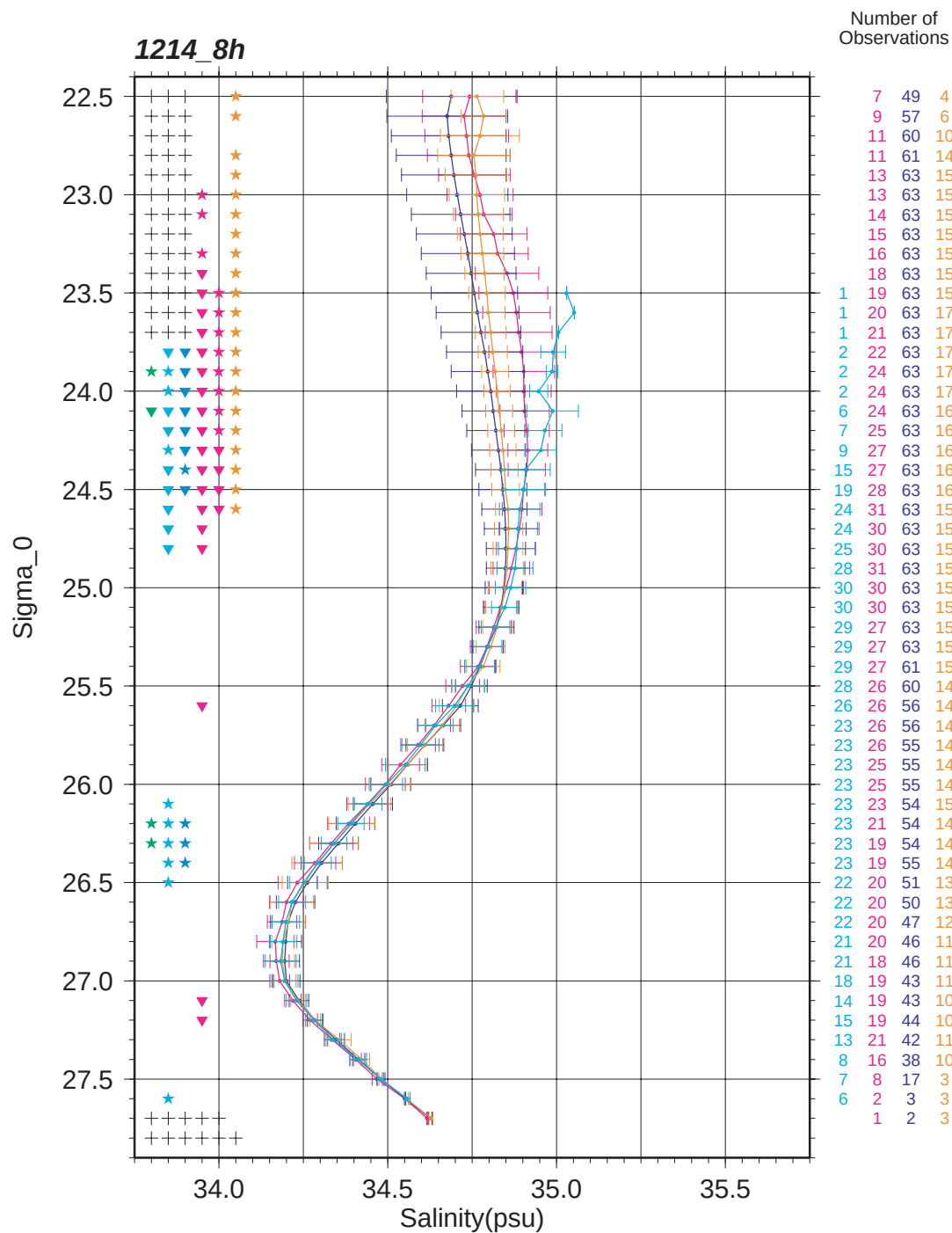


図4 海域1214_8hにおける検定結果。詳細は本文を参照。
 Fig. 4 Results of the statistic test for 1214_8h region. See text for the details.

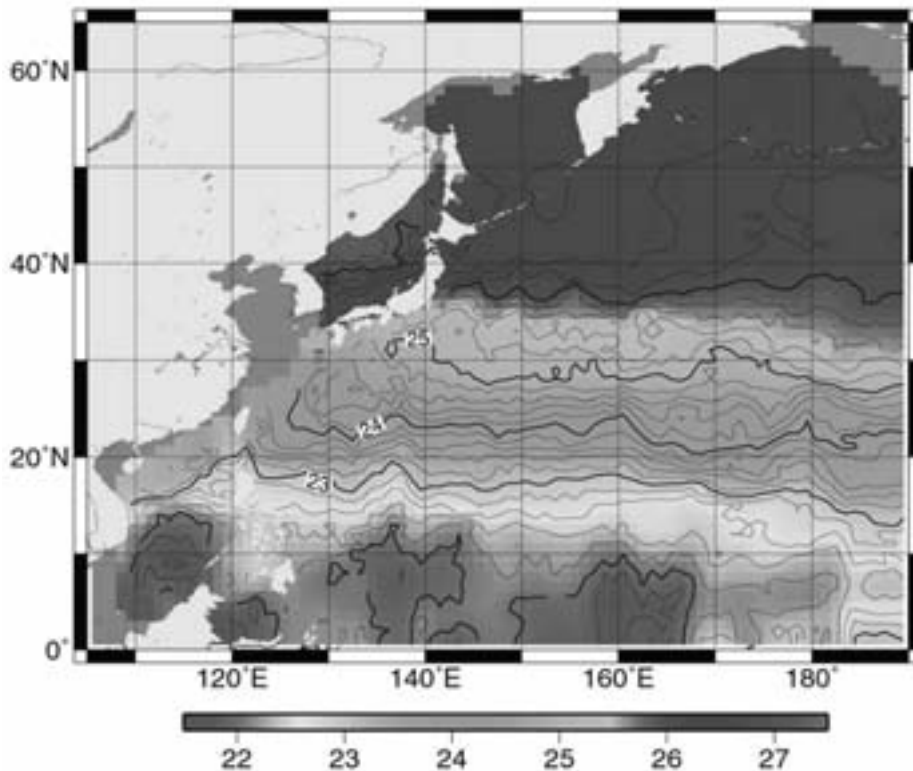


図5 冬季の25 m深におけるポテンシャル密度分布。

Fig. 5 Horizontal distribution of the potential density at 25 m depth in winter.

亜熱帯領域と同じく、深層部分における季節変化の有無によって検定結果を分類した結果を図3に示している。亜熱帯域と同じように、混乱水域でも深層まで季節変化が存在する海域が非常に多く、また季節変化が冬季混合層の底までに限られる海域との間に空間的な関係を認めることができない。

ここでは2海域の検定結果を説明したが、亜寒帯域でも次の3点は共通であった。

1. 冬季混合層の底部よりも重い密度層で、季節変化がほとんど存在しない海域と、季節によらずほとんど全ての密度層で差異が存在する海域の、大きく2つに分類できる。
2. 前者に比べて後者の海域の方がはるかに多い。
3. 両者の間に空間的な関係を見つけることができない。

4. 考察

4.1. 検定について

ここでは本研究で行われた検定には、どの程度の基準が設定されている(言い換えれば検定はどの程度厳しい)のか、最初に考えてみる。そこで、実際に用いられている値を参考にして、次のような簡単な場合を想定する。

- 2つの季節別データが存在し、両者とも塩分の分散(S_x^2 , S_y^2)は約0.0025 ($= 0.05^2$)、データ数は約60である。

このとき、仮説 H^1_0 (正規母分散の検定)や H^2_0 (正規母平均の検定)が棄却されない場合の最大値(許容量)を概算する。

4.1.1. 母分散の検定

検定に用いる $F_{\Phi_2}^{\Phi_1}(0.025)$ の値($\Phi_1=\Phi_2=60$ とする)は1.667である。標本数が大きいので、それぞれのデータセットの不偏分散は標本分散と等しいものとすれば、標準偏差に許される値の範囲は、次のようになる。

$$(1.667)^{-\frac{1}{2}} \times S_y \leq S_x \leq (1.667)^{\frac{1}{2}} \times S_y$$

$$\therefore 0.7746 \times S_y \leq S_x \leq 1.291 \times S_y$$

つまり、仮説 H^1_0 が棄却されないためには塩分の標準偏差が0.038-0.065 psu程度の範囲内に収まっていなければならない。なお、この範囲はデータ数が多くなるほど狭くなり、それぞれのデータセットのデータ数が120程度の時は0.042-0.060 psu, 500程度の時は0.045-0.055 psu程度となる。

4.1.2. 母平均の検定

検定に用いる $t_{\Phi}(0.025)$ ($\Phi=120$ とする)の値は1.980である。近似的に、

$$t_{(x,y)} = \left\{ (n_x S_x^2 + n_y S_y^2) (1/n_x + 1/n_y) / (n_x + n_y - 2) \right\}^{\frac{1}{2}} \\ \sim S_x^2 \times 2/n_x \times \frac{1}{2} = 0.05 \times 0.183$$

とおけるので、仮説 H^2_0 が棄却されないためには2つのデータセットの平均値に許される差が

$$|\bar{x} - \bar{y}| < 1.98 \times 0.183 \times 0.05 = 0.018 (\text{psu})$$

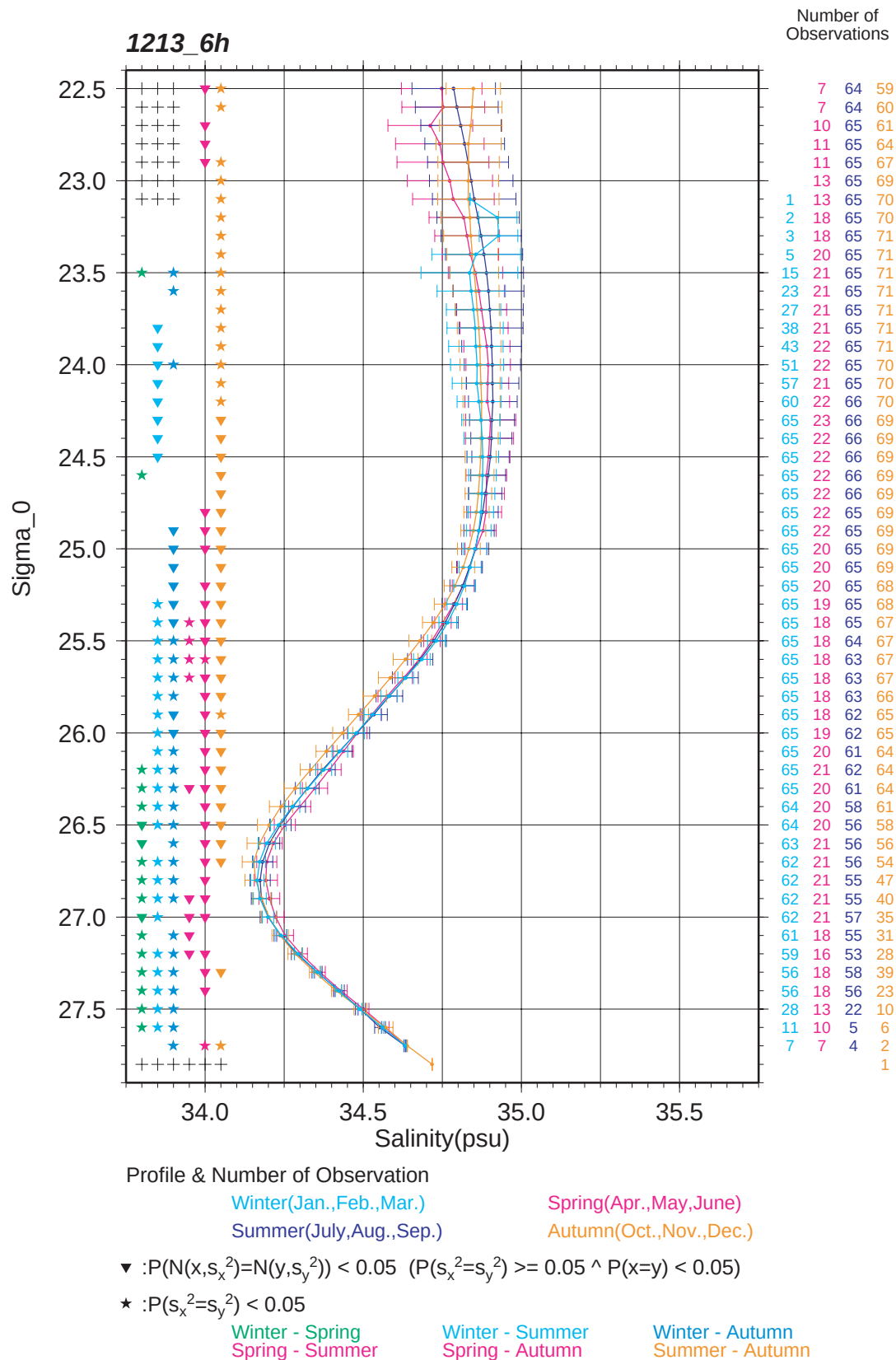


図6 海域1213_6hにおける検定結果。
Fig. 6 Same as Fig. 4 but for 1213_6h.

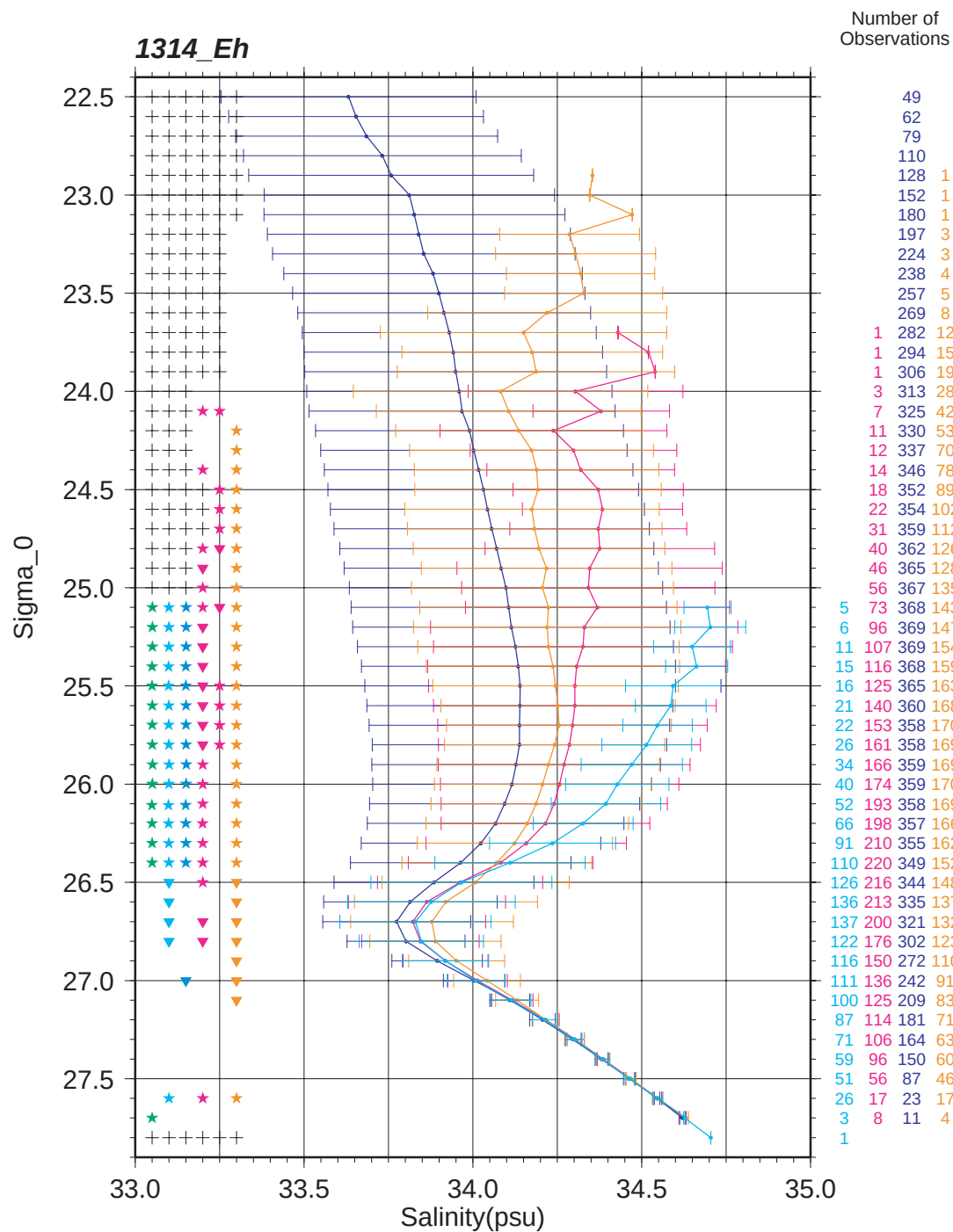


図7 海域1314_Ehにおける検定結果。

Fig. 7 Same as Fig. 4 but for 1314_Eh.

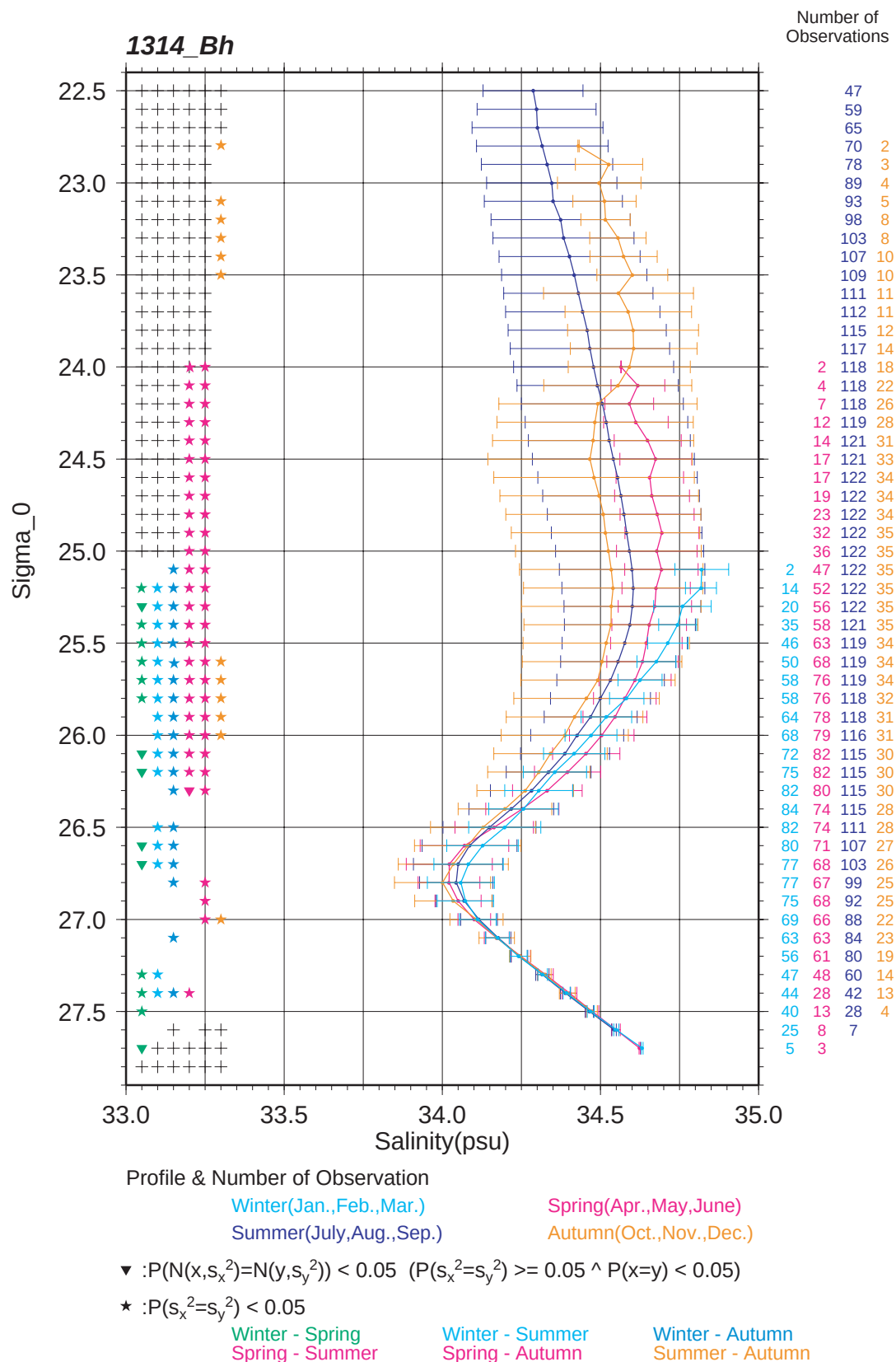


図8 海域1314_Bhにおける検定結果。
Fig. 8 Same as Fig. 4 but for 1314_Bh.

以内でなければならない。この値もデータ数が多くなるほど厳しくなり、データ数が120程度の時は0.013 psu, 500程度の時は0.005 psu程度となる。

4.2. 海域毎の調査

4.2.1. 1213_6h海域

図9は深層まで季節変化が認められた1213_6h海域における季節別の観測点の分布を示している。

一見して、秋季に23°N 135°E付近で集中的に観測が行われていることが分かる。この集中観測はソビエト連邦の観測船Priboy号(NODC ship# 90PY)が1980年10月に行ったもので、この海域全体における秋季の観測数が71であるのに対し、1980年10月のPriboy号の観測は51、特に23°N 135°E付近の集中観測のデータは38を占めている。また、一時的な変動を反映してか、他の観測と比較してPriboy号のデータは低塩分となっている(図10)。そのため、図6では秋のデータが密度躍層(25-26.5 σ_θ)部分を中心に低塩側に振れ、3.2節の検定では仮説 H_0^2 (正規母平均が等しい)が棄却され、季節変化が存在するとの結果が得られている。

また、冬と夏に137°E線に沿って多くの観測が行われている。これは凌風丸(NODC ship# 49RY)によって行われている、年2回の気象庁の定線観測である。このデータは、両季節で得られたデータの大部分を占めており、特に冬では全65回中、55回のデータが凌風丸によるものである。凌風丸によって得られたデータを他の船舶のデータと比較すると、凌風丸の観測結果はばらつきも小さく、非常に精度良く行われていることが分かる(図11)。この高い精度のデータを含むため、特に冬では非常にデータのばらつきが小さくなり、他の季節との検定では仮説 H_0^1 (正規母分散が等しい)

が棄却され、季節変化が存在するとの結果になる(図6)。

つまり、観測データが比較的少ない海域では、その海域における気候学的な統計量が、限られた船舶によって限られた期間に行われた(ある特徴を持った)観測データに、大きく左右される場合がある。

4.2.2. 1314_Bh海域

図12は、1314_Bh海域における季節別の観測点の分布を示した。この海域も深層まで季節変化が存在するとの検定結果が得られている。観測は比較的多く、また空間的にもランダムに行われており、前述の特定データによる統計値の偏りのようなものは認められない。

しかし、塩分の測定値に注目すると、ほとんどのデータは0.01 psuの分解能しか持っていないことが分かる。一例として、1314海域における塩分データをその分解能で分類し、それぞれのデータ数を時系列で示したものが図13である。これから明らかなように、1960年代前半までに行われた観測データのほとんどは分解能0.01 psuであり、分解能0.001 psuのデータが支配的になったのは1980年以降である。1314海域に限らずHydroBaseに格納されている最近のデータは数が少ないので、HydroBaseに格納されている塩分データの大半は分解能が0.01 psuであるといえる。

一般に観測データの精度は分解能以下である。従って分解能が $O(10^{-2})$ 程度の気候学塩分データから求められる平均値や標準偏差(分散)などの統計値は、 $O(10^{-3})$ 程度までは意味をもつと考えられるものの、それより高い精度の情報は持っていないといえる。しかし、ここで行っている検定は、全てのデータが無限の精度を持っている状態を想定している。また、4.1節で見たように、検定も非常に厳しい精度で行

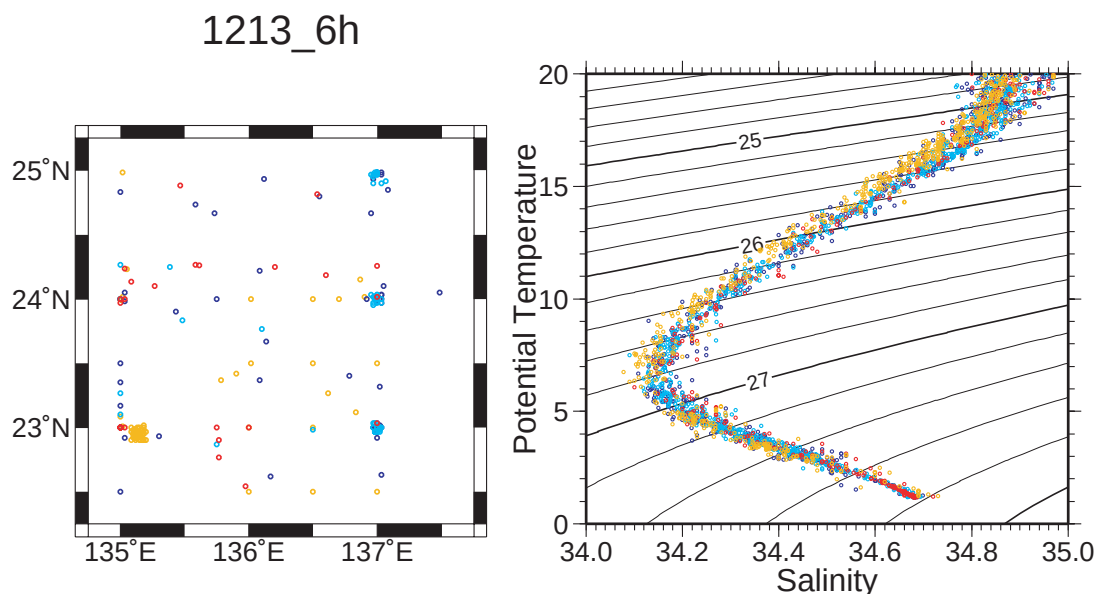


図9 1213_6h領域における季節データの分布とT-S図。青、赤、濃青、黄は冬、春、夏、秋の観測データ。

Fig. 9 Horizontal distribution and T-S diagram of the seasonal data in 1213_6h area. The blue, red, dark-blue, and yellow circles represent the data observed in winter, spring, summer, and autumn, respectively.

1213_6h Autumn

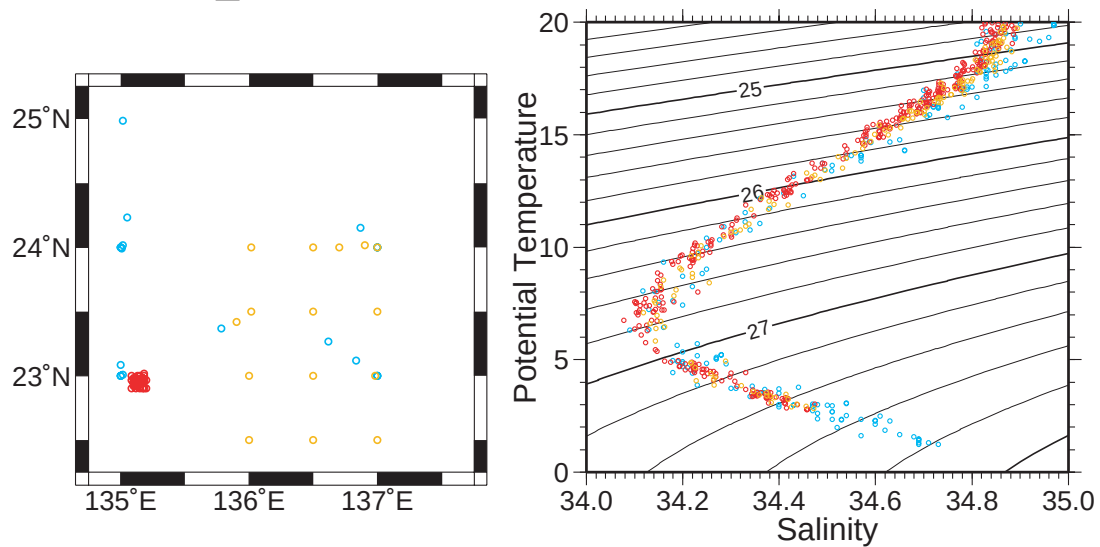


図10 1213_6h領域における秋季データの分布とT-S図。赤および黄は観測船Priboy号(ソビエト連邦)による1980年10月の観測。青はそれ以外の秋季観測データ。

Fig.10 Horizontal distribution and T-S diagram of the autumn data in 1213_6h area. The red and orange represent the data observed by R/V Priboy (USSR) in Oct. 1980. The blue represents the other autumn data.

1213_6h Winter/Summer

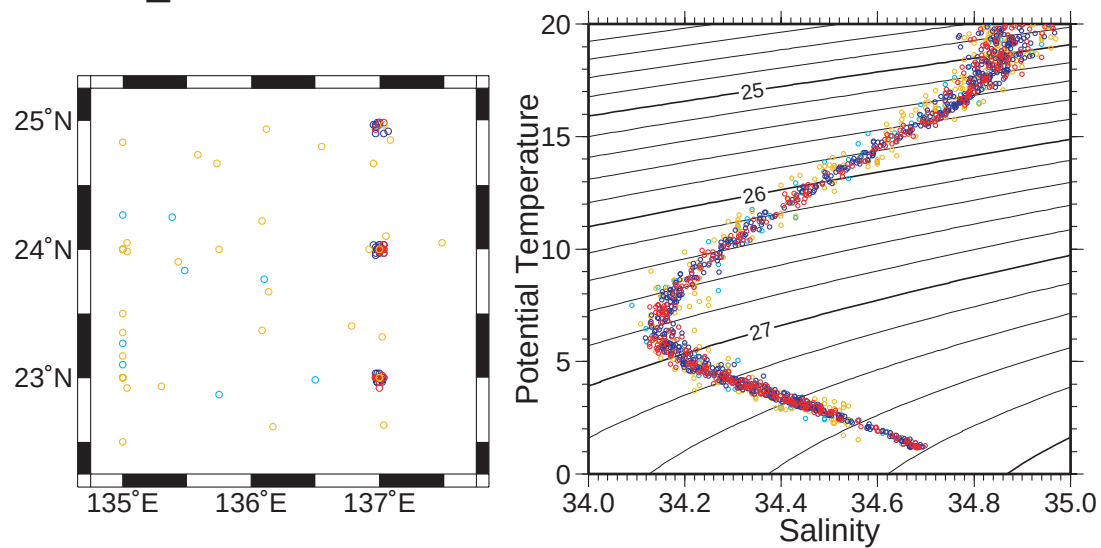


図11 1213_6h領域における冬季/夏季データの分布とT-S図。赤および黄は夏季の、青および濃青は冬季のデータを示す。また、濃青および赤は気象庁の観測船凌風丸による観測データ。

Fig.11 Horizontal distribution and T-S diagram of the winter/summer data in 1213_6h area. Blue and dark-blue represent the winter data, and red and orange represent the summer data. The dark-blue and red is the observation by R/V Ryofu (JMA).

われ,おそらく統計値の精度ぎりぎりのところ(もしくは範囲外)で季節変化の有無が判定されている。つまり, 深層部分で見られる「季節変化」は, 多くの場合, 観測データの精度の悪さに起因していると考えられ, それ自体が意味を持っているとは考えにくい。

つまり, 観測が少ない領域では, 「限られた観測船により, 限られた時期に行われた」観測データの影響を受けやすく,

観測データは統計学でいうところの標本としての性質を必ずしも満足していない。また, データの分解能が低いため, 計算された統計量が厳しい検定に耐えるだけの精度を持っていない。そのため, 本稿で行った方法では季節変化の有無を判定することは難しく, 季節変化の存在する密度レンジを押さえることはできない。

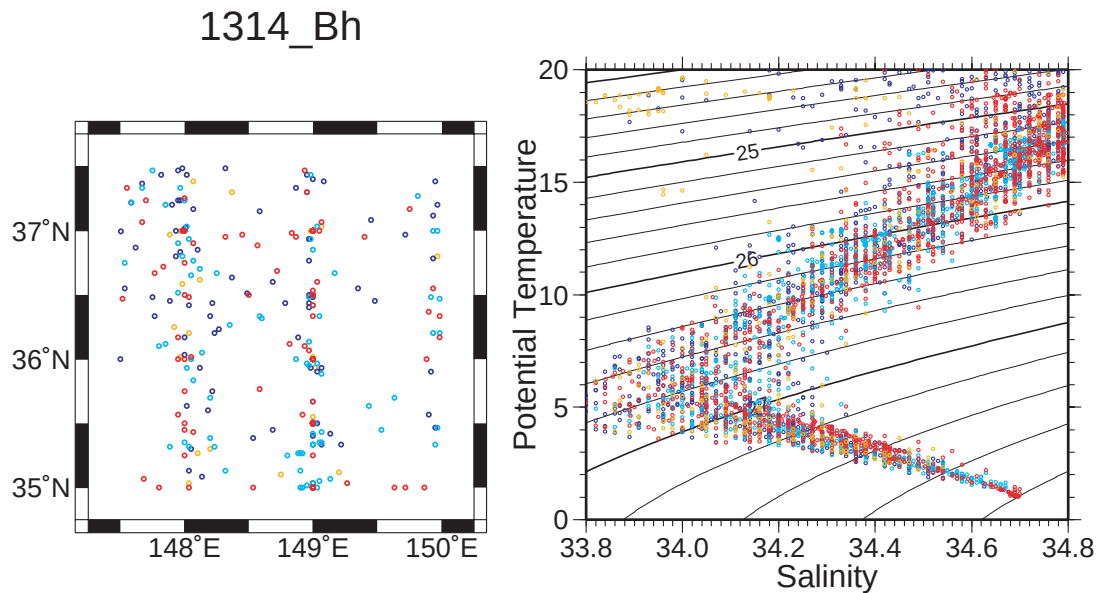


図12 1314_Bh領域における季節データの分布とT-S図。青, 赤, 濃青, 黄は冬, 春, 夏, 秋の観測データ。
Fig.12 Same as Fig. 9 but for 1314_Bh area.

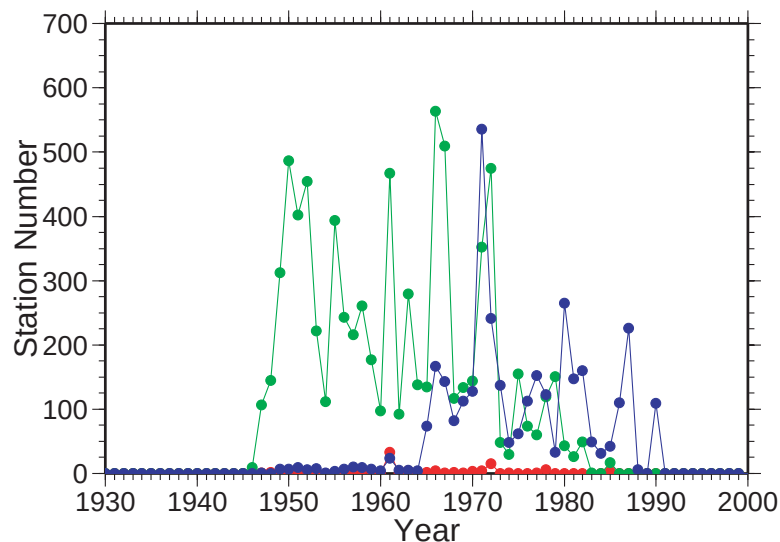


図13 1314海域における塩分データ数の変化。赤, 緑, 青は分解能が0.1, 0.01, 0.001 psuのデータ。
Fig.13 Time-series of the number of salinity data in 1314 area. The red, green, and blue represent the data whose resolution are 0.1, 0.01, and 0.001 psu, respectively.

5. まとめ

夏季の加熱や冬季の冷却などの影響を受け、海洋表層の水塊構造は季節的に変化すると考えられる。アルゴデータの品質管理を行うにあたり、水塊特性の季節変化を考慮した品質管理基準データを用意することができれば、精度のより高い品質管理を行うことが可能と考えられる。しかし、その場合は数少ない観測データを季節別に分割することになるため、品質管理基準が甘くなる、さらには基準そのものが歪んでしまうという危険性もある。この危険性は、季節変化が存在する密度層では季節別の基準を、その影響のない深層は年平均的な基準を適用することによって、ある程度回避されることが考えられる。

本研究では、統計学的手法を用いて、水塊構造の季節変化がどの程度の深度(密度層)まで及んでいるかを調べた。しかし、予想に反して非常に多くの海域で深層にまで季節変化が生じるとの結果が得られた。これは歴史的な海洋観測データの次のような特徴に起因すると考えられ、実際に季節変化が存在するかどうかは不明である。

1. 季節変化の有無を調べるのに必要な精度に比べ、塩分データの精度(分解能)が低い。
2. 標本数が少ない場合、観測時期、観測者、観測海域などに偏りが生じやすい。

参考文献

- 1) 小林大洋, 市川泰子, 高槻靖, 須賀利雄, 岩坂直人, 安藤健太郎, 水野恵介, 四竈信行, 竹内謙介, "高品質気候学データセット(HydroBase)を用いたアルゴデータの品質管理 I", 海洋科学技術センター試験研究報告, 44, 101-114(2001).
- 2) 国沢清典編, "確率統計演習2 統計", (培風館, 東京都千代田区, p.292, 1966).
- 3) Macdonald, A. M., T. Suga, and R. G. Curry, "An isopycnally averaged North Pacific Climatology", J. Atmosph. and Oceanic Tech., 18(3), 394-420 (2001).

(原稿受理: 2001年7月31日)