

東シナ海陸棚縁辺部の黒潮に貫入する低塩分水層

松野, 健

九州大学大学院総合理工学研究科大気海洋環境システム学専攻

柳尾, 茂文

九州大学大学院総合理工学研究科大気海洋環境システム学専攻

清水, 学

九州大学大学院総合理工学研究科大気海洋環境システム学専攻

秋重, 祐章

長崎大学水産学部

他

<https://doi.org/10.15017/16644>

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 23 (3), pp.311-317, 2001-12. 九州大学大学院総合理工学府

バージョン :

権利関係 :

東シナ海陸棚縁辺部の黒潮に貫入する低塩分水層

松野 健*1†・柳尾茂文*2・清水 学*1・秋重祐章*3・吉村 浩*3・高木保昌*3

(平成13年10月31日 受理)

Low Salinity Water Intruded into the Kuroshio around the Shelf Break in the East China Sea

Takeshi MATSUNO, Shigefumi YANAO, Manabu SHIMIZU,
Yusho AKISHIGE, Hiroshi YOSHIMURA, Yasuaki TAKAKI

† E-mail of corresponding author: matsuno@riam.kyushu-u.ac.jp

Two kinds of salinity minimum waters are detected from the data along PN section by Nagasaki Marine Observatory and those obtained just around the shelf break by the training vessels of Nagasaki University in the frontal area of the Kuroshio in the East China Sea. One of the salinity minimum is detected in surface layer, which would be subducted from the surface along the Kuroshio front. The sigma-t value of the salinity minimum is usually revealed from 23 to 24, and the subduction layer is slightly inclined against the isopycnals. The other one is detected in deeper layer around 200m with sigma-t value from 24 to 25. This deeper salinity minimum has a density similar to that observed in the bottom layer on the shelf.

Key words: *salinity minimum, subduction, intrusion, T-S diagram, PN-line, Kuroshio, East China Sea*

1. 緒 言

縁辺海は大陸と大洋とが接するところに位置し、両者の緩衝域として様々な役割を果たしている。また各縁辺海が多様な特徴を持っていることも知られている。東シナ海はそうした縁辺海のひとつで、広い大陸棚と、その大陸棚斜面に沿って流れる黒潮で特徴づけられる。大陸棚縁辺部では黒潮と陸起源水の影響を受けた陸棚水とが接しており、物質輸送の観点からは、陸起源水が黒潮に取り込まれる過程を明らかにする上で注目される^{1), 2)}。

東シナ海大陸棚縁辺部における黒潮の境界域付近では、陸棚水のひとつの特徴である低塩分の水と、高温・高塩分の黒潮水とが相互に入り組んだ構造を示すことがある。大陸棚縁辺部で観測された塩分の鉛直分布には、しばしば明瞭な塩分極小層を見ることができる³⁾。

黒潮自体、水深150m付近で塩分34.8程度の塩分極大、および水深600mから700m付近で34.3程度の塩分極小層（北太平洋中層水）を持っている。これらは北太平洋亜熱帯循環の一部である黒潮の特徴であり、それらの層は厚く、短い時間で変動するものではない。

それに対して、ここで注目するのは、変動の少ない

黒潮の水温・塩分構造の中にしばしば観測される、比較的層厚が薄く、時間的にも変動の大きい、陸棚上に起源を持つと考えられる低塩分水による塩分極小層である。

比較的顕著な塩分極小層は、黒潮の前線付近でしばしば観測され、その物理特性はまだ十分に解明されていないが、陸棚上の表層に分布する低塩分水が前線に沿って沈降したものと解釈される。

ところが、黒潮中に見られる低塩分水は、必ずしも上述のように陸棚側の表層から直接沈降したものととは考えられないものもしばしば観測される。海面下300m以浅で、少なくとも2種類の塩分極小層の存在が示唆される。本論文では、典型的な黒潮水の示すT-S分布に対して低塩分側に塩分偏差を示す2種類の塩分極小層について、その特徴と起源について考察する。

2. データ

2.1 PN線（長崎海洋気象台）

長崎海洋気象台の観測船長風丸による1987年から1994年までのデータを解析に用いた。長崎海洋気象台では、各季節（概ね4月、7月、10月、1月）に定期的に東シナ海を中心とする海域で海洋観測を行っている。ここでは各季節とも欠測なく観測が継続されている同気象台の代表的な定線PN線を取り上げ、特に大陸棚縁

*1 大気海洋環境システム学専攻

*2 大気海洋環境システム学専攻博士後期課程

*3 長崎大学水産学部

辺部の測点3 (あるいは b') から4 (Fig.1参照) の間の測点の塩分構造に注目した (測点番号は長崎海洋気象台が使用しているものをそのまま用いる) .

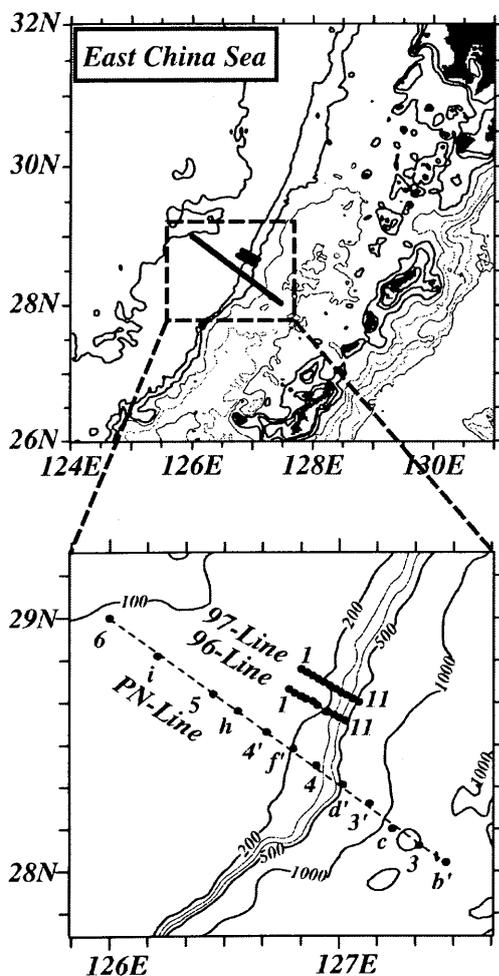


Fig.1 CTD sections observed in 1996 and 1997 along with PN-line used in this paper

測点間隔は不規則であるが、測点3から4の間の各測点間の間隔は10~12kmである。

黒潮中層に見られる低塩分水を区別するために以下のような整理を行った。

①基準となる黒潮の T-S 曲線の設定

黒潮は一般的な T-S ダイアグラム上で逆 S 字曲線を描く特徴をもっている (Fig.2a). この T-S 曲線は中層以浅で季節変動があり、同じ季節でも観測された年によってばらつきがある。そこで、観測断面ごとに基準となる黒潮 T-S 曲線を設定した。

大陸棚縁部から斜面域の PN-4~3 のうち、陸棚寄りの 4, d' は相対的に低塩分の陸棚水の影響を大きく受けることが多い (Fig.2b,c). そこで最も沖側に位置している PN-3 を低塩分水を定義する際の基準となる黒潮の T-S 曲線とした。ただし PN-3 においても中層

において低塩分側にずれるなどの変動がある場合は、隣接する観測点 PN-c と PN-b' と比較し、低塩分水の出現の少ないほうを基準とした。いずれの測点でも基準となるスムーズな T-S 曲線が得られない場合は、PN-3 における T-S 曲線から、低塩分側にずれている部分を削除してその間を線形補間した。

このようにして選び出した T-S 曲線を 100m 以深について 0.1°C 毎に塩分を平均して、これを基準となる黒潮の T-S 曲線とした。

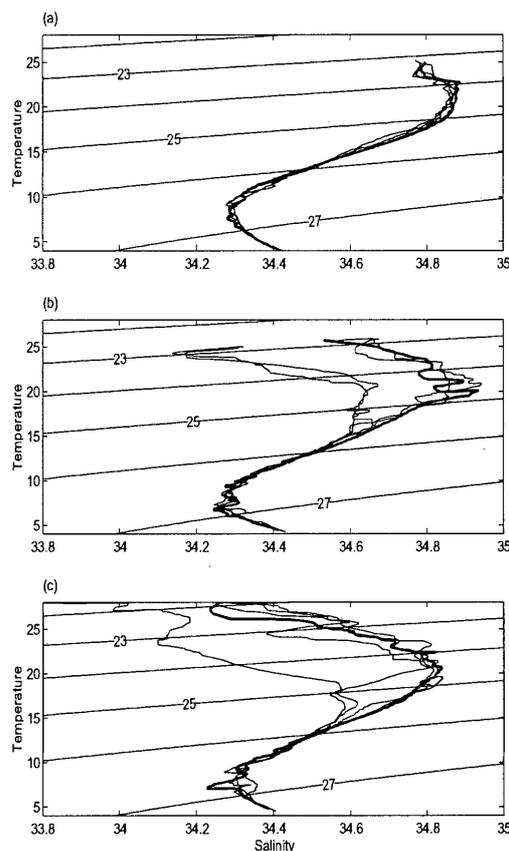


Fig.2 Examples for T-S diagram along PN section observed in (a) April 1993, (b) October 1990 and (c) July 1989. Thick lines show T-S curves of the Kuroshio. Local salinity minimum can be seen at $\sigma_t=23$ and 25 in the lowest panel.

②低塩分層の定義

T-S ダイアグラム上において①で定義した黒潮の基準の T-S 曲線に対する塩分差 (塩分偏差) を求め、塩分偏差が 0.03psu 以上ある層に注目して解析を行った。そして、塩分極小値がその上下の塩分極大値から 0.02 以上の塩分差で明確に区別されるとき、これを低塩分水層と定義した。

黒潮域と考えられる PN-4~b' について、低塩分水層の存在状況やこれらの特性について調べた。

2.2 1996, 97年の観測

上述のPN線のデータでは, Fig.2b,cに示したように100m以浅(σ_t で概ね24以下)についても, 低塩分水層は認められる. しかし, 表層では塩分の変動が大きく, 測点間隔が10km以上のPN線では, その特性を十分に見ることができない. そこで, より短い測点間隔で実施された長崎大学水産学部の練習船長崎丸と鶴洋丸による観測結果を用いる.

長崎丸による観測は1996年11月9日と10日, 鶴洋丸による観測は1997年5月27日から29日にそれぞれFig.1に示すように東シナ海大陸棚縁辺部の狭い海域に限定して行われた. それぞれ1日2測線の観測を行い, 96年11月には2日間, 97年5月には3日間(ただし3日目は測線をずらせた)繰り返した. 測点間隔は約3kmであった.

3. 結果

上述のように黒潮は比較的安定した水温・塩分関係を持っている. 季節による変化はあるが, T-Sダイアグラム上で逆S字カーブを描く. 一方, Fig.2bに示すように, 陸棚縁辺部から大陸棚上にかけて, 特に表層近くでは黒潮のT-S曲線から低塩分側にずれるのが一般的である. さらに, 陸棚縁辺部ではFig.2cに示すように, 黒潮の垂表層に塩分極小層が観測されることが珍しくない. Fig.2cでは表層($\sigma_t=23$ 付近)と, より深い層($\sigma_t=25$ 付近)の2カ所に塩分極小層が見られる. これらはそれぞれ異なった密度であることから, 別の起源を持つ水であることが示唆される. 3.1節では, まず深い方の塩分極小層, そして3.2節では表層に近いところで見られる極小層について記述する.

3.1 黒潮中層への低塩分水の貫入

水深100m以深で観測される塩分極小層について, 1987年から1994年のPN線のデータを用いて議論する. 上述の方法で低塩分水層を選び出し, その出現頻度をTable 1に, また, 低塩分水層の出現頻度を水深および密度別に整理したものをFig.3と4に示す.

陸棚に近い方の測点で低塩分水層の出現頻度は高く, 黒潮側で低くなっている. これは低塩分水層の起源が陸棚側にあることを考慮するとともに結果である. Tableに示した測点のうちもっとも陸棚側の測点d'は水深およそ600mであり, 陸棚側といっても大陸棚斜面上に位置し, 黒潮の流軸に近い場所である. 測点3', c, 3は水深1000m前後で, 一般的には黒潮域と考えられる. 従って, 低塩分水層は黒潮の中心部においても頻繁に見られる現象であることがわかる.

また, 季節による相違はあまり明瞭でないが, 夏季と秋季により沖合の方まで低塩分水層が進入していく

Table 1 Frequency of appearance of low salinity layer at several stations along PN section in each season

| | d' | 3' | c | 3 |
|--------|------|-----|-----|-----|
| spring | 100% | 63% | 50% | 13% |
| summer | 83% | 63% | 38% | 25% |
| autumn | 80% | 57% | 57% | 29% |
| winter | 100% | 86% | 43% | 14% |

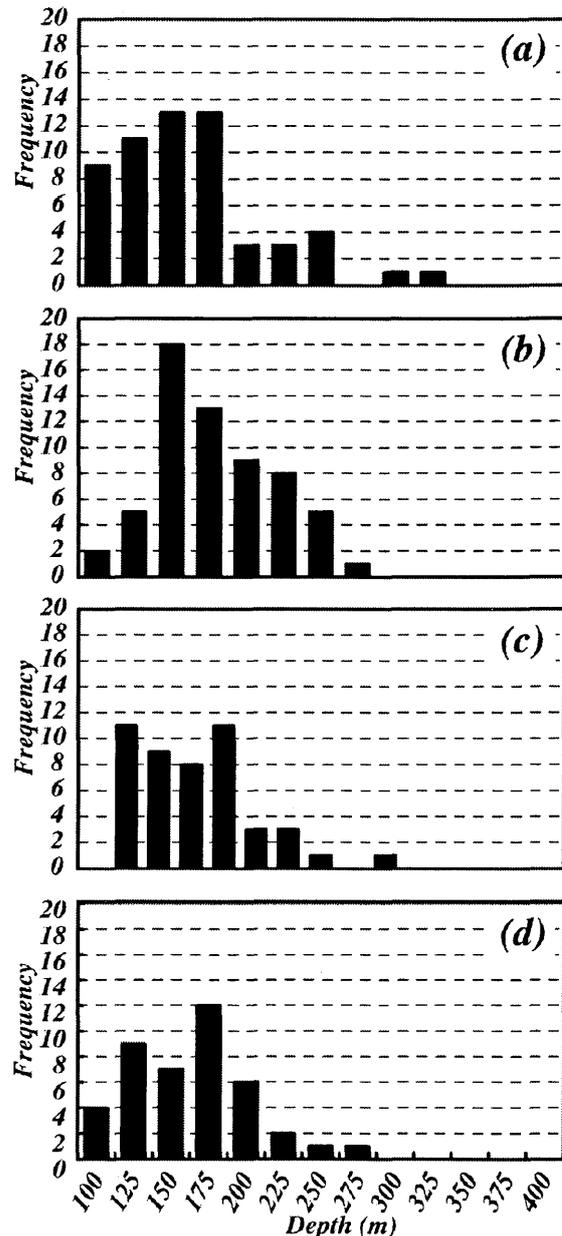


Fig.3 Frequency of salinity minimum layer for each water level in (a)spring, (b)summer, (c)autumn and (d)winter.

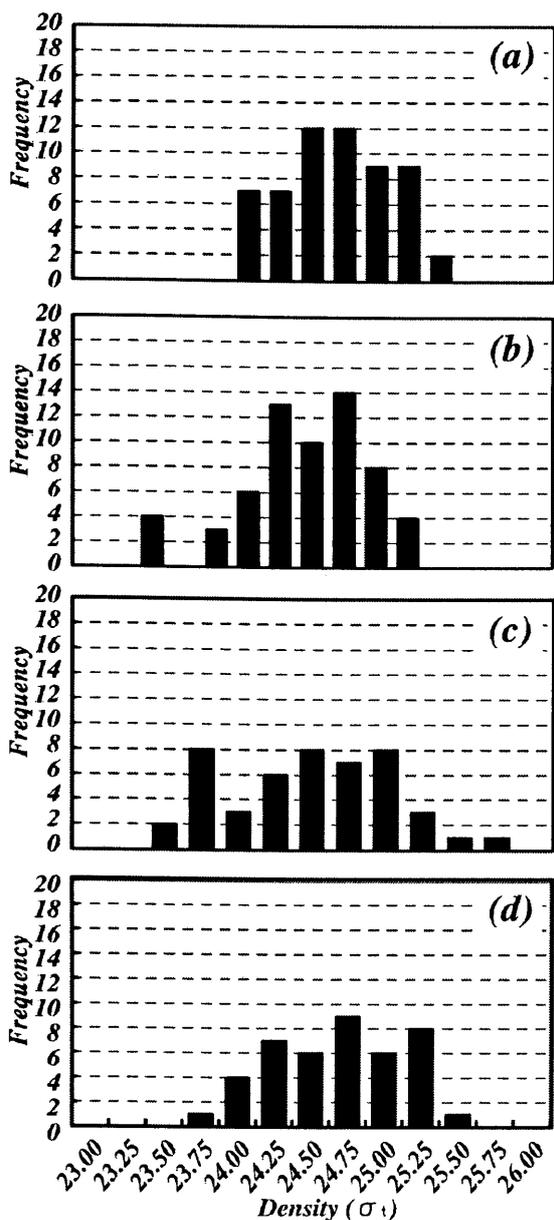


Fig.4 Frequency of salinity minimum layer for each density level in (a) spring, (b) summer, (c) autumn and (d) winter.

傾向にあることが示唆される。

低塩分水層の出現する水深は150から225m付近に集中しており、この水深は大陸棚の縁部の水深と概ね一致する。ここで示した頻度は、大陸棚縁部から斜面域に位置する5測点で観測された低塩分水層の数を季節毎に積算したものである。季節変化に関しては、夏季(7月)に150から175mのところに明瞭なピークが見られ、他の季節に比べて、低塩分水層の深さが若干浅くなる傾向が見られる。また、秋季には150m以下にも低塩分水層が出現する頻度が高い。

低塩分水層の密度による頻度分布からは、ここで注目している低塩分水層が $\sigma_t=24.5$ 付近を中心に $\sigma_t=24.0$ から25.5の範囲で頻繁に出現していることがわ

かる。季節による変化はあまり明瞭でないが、低塩分水層が比較的浅い層にも見られる秋季には、それを反映して密度の低いところにも低塩分水層が見られている。

この $\sigma_t=24.0$ から25.5の範囲に頻繁に出現する低塩分水層の密度は大陸棚縁部に近い陸棚上の海底付近の密度と近い値を持つことが多い。Fig.5は上で定義した低塩分水層(塩分極小層)を密度分布の上に重ねた1例である。この例では低塩分水層は概ね $\sigma_t=24.0$ から25.0の間に分布しており、その密度の水は大陸棚上の底層につながっていることがわかる。

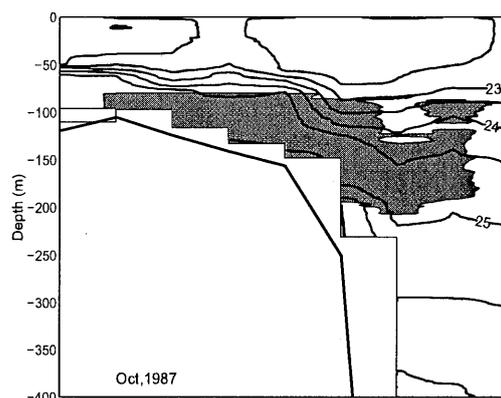


Fig.5 An example for low salinity water intruded into the Kuroshio from the bottom of the shelf superimposed on the sigma-t map. Shaded area shows low salinity water 0.1 psu less than the Kuroshio. Salinity anomaly was shown for the area deeper than 80m.

この図は、黒潮中層で見られた低塩分水の密度がそのとき陸棚上の底層の密度と類似していることが明瞭であった例であるが、Fig.4でも示されたように、ここで注目している低塩分水の密度には、あまり大きな変化はなく、それは陸棚上の底層水の密度と近い場合が多い。従って、ここで注目している塩分極小層は大陸棚の底層付近の水と密接なつながりのあることが推測される。ただし、黒潮中に貫入した低塩分水は当然黒潮によって下流方向に移流されるので、等深線を横切るある断面内の陸棚上で観測された水が、同じ断面内の黒潮中で観測された低塩分水の直接の起源であるとは言えないことに注意する必要がある。

3.2 黒潮フロントに沿った低塩分水の貫入

前にも述べたように、塩分極小層は前節で見た $\sigma_t=25$ 付近と比較して明らかに密度の小さい層でもしばしば観測される。表層の低塩分水層の特徴を1996年11月および1997年5月に行われた水平方向に解像度の高い観測の結果を用いて明らかにする。

Fig.6はそれぞれの観測期間中、各断面で測定されたT-S曲線を重ねたものである。各測点で塩分極小を

示す密度は若干の相違があるが、1996年11月の例では $\sigma_t=23$ から 24 の間に、また1997年5月の例ではそれより若干密度の大きいところに塩分極小層が現れていることがわかる。黒潮のT-Sと比較すると、後者では1 psu近く、また前者でも0.5以上の塩分偏差を示してい

る。これは、前節で述べた $\sigma_t=25$ 付近で見られた塩分極小層の塩分偏差に比べて非常に大きい。

この時の水温、塩分、密度の鉛直断面分布をFig.7に示す。1996年11月の例では陸棚側で水深50m付近から沖合では100mまで、塩分極小層が徐々に深くなりながら黒潮の垂表層に貫入している様子が明瞭に認められる。また、1997年5月の例では陸棚側では低塩分水は明らかに表面に接しており、その低塩分水が表層の水温躍層に沿って黒潮側に潜り込んでいる。Stn.3-4付近の表層に顕著な塩分フロントが見られるが、これは水温および密度フロントとも一致し、陸棚上の表層に分布する低温で低塩分の水が黒潮フロントに沿って潜り込んでいると考えられる。塩分極小層が黒潮の垂表層に潜り込んでいる距離は5月27日の場合でおよそ25kmである。

Fig.6のT-S曲線が示すように、この低塩分水は測点毎に徐々に密度が変化している。そこで、この低塩分

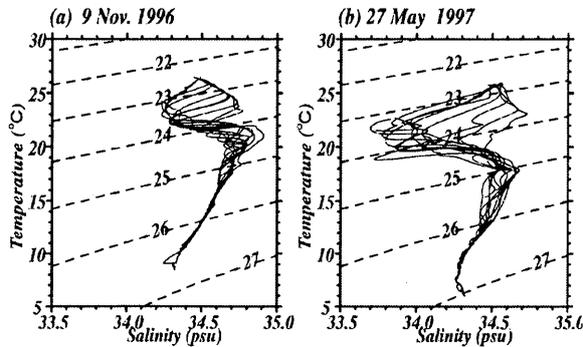


Fig.6 T-S diagram obtained at stations along a cross-isobath section on (a) 9 Nov. 1996 and (b) 27 May 1997.

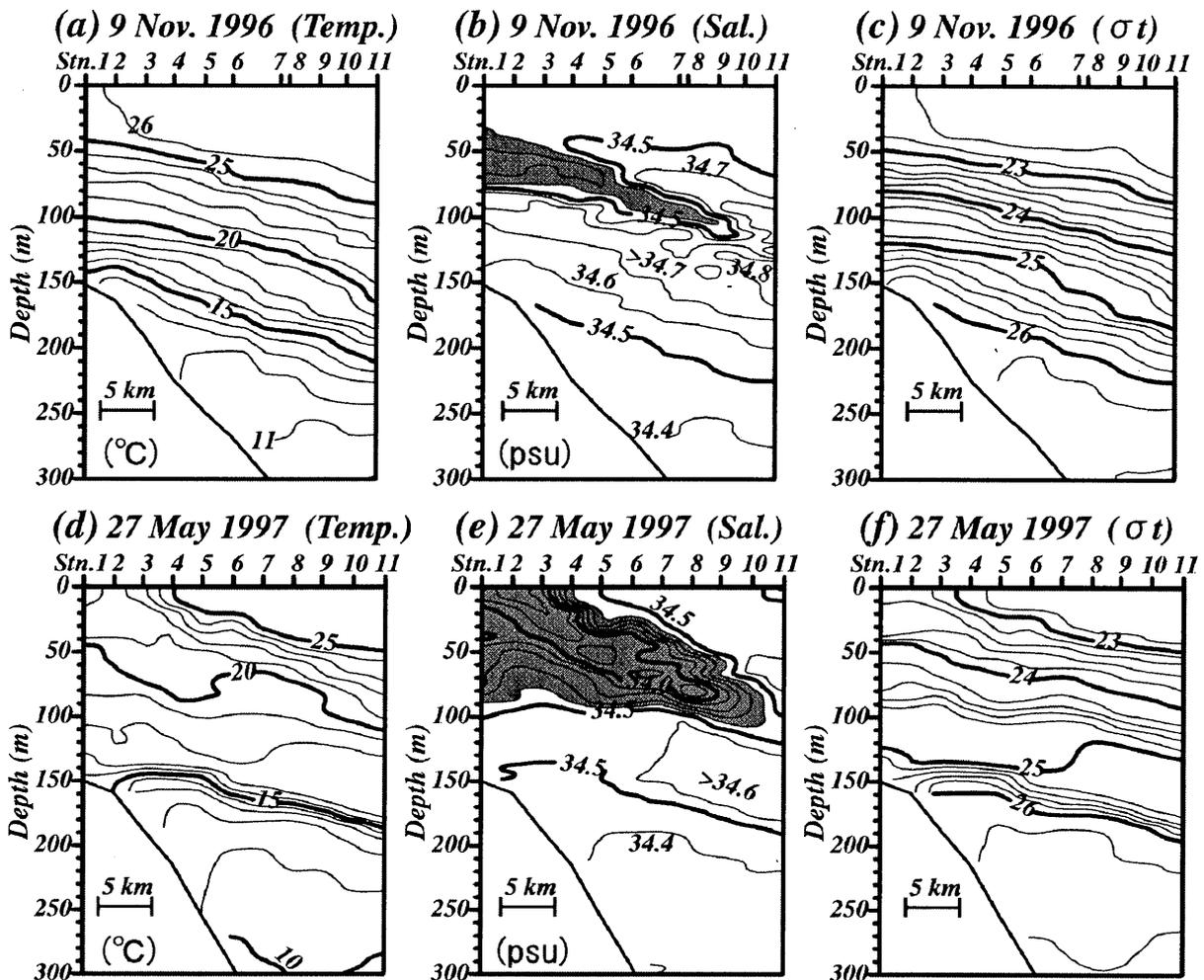


Fig.7 Vertical distributions of (a) temperature, (b) salinity and (c) σ_t obtained on 9 Nov. 1996 and those of (d) temperature, (e) salinity and (f) σ_t on 27 May 1997. Shaded area in salinity maps shows low salinity water less than 34.4.

水の潜り込みについて、塩分と密度との関係を調べるため、縦軸に密度をとった水温・塩分図をFig.8に示す。1996年11月のケースではStn.3付近までは低塩分水はほぼ等密度線に沿って貫入しているが、そこから沖に向かって貫入するにつれて密度が増大しているのがわかる。また、1997年5月のケースでは、塩分極小値を示す層はやはり沖に向かって徐々に高密度になっている。これらの塩分極小層は周囲に比べて低温になっていることを意味している。

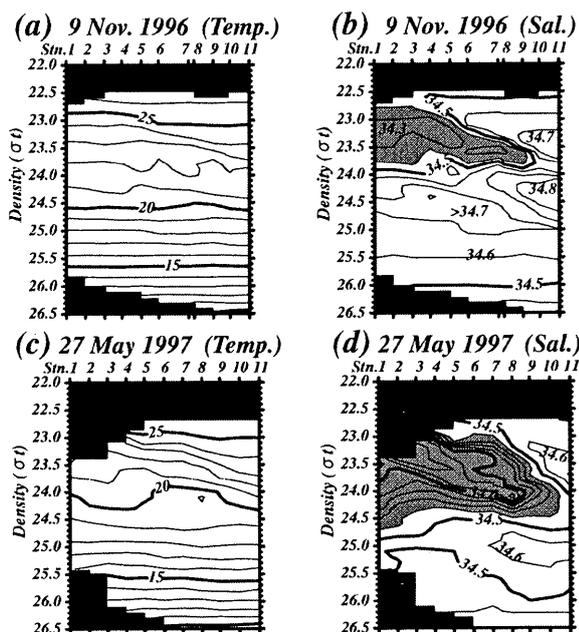


Fig.8 Temperature (left) and salinity (right) maps with sigma-t axis. Shaded area in salinity maps shows low salinity water less than 34.4.

4. 考 察

黒潮と亜表層あるいは中層に陸棚上に分布する低塩分水が貫入する現象について、2種類のタイプがあることを示した。

ひとつは水深100mより浅く、 $\sigma_t=23$ から24程度の密度の層に塩分極小層が見られる場合で、これは黒潮と陸棚水との境界に形成される黒潮フロントに沿って、陸棚側の表層から直接潜り込んだものと解釈できる。ただ、この低塩分水層は必ずしも等密度線に沿って分布する形状にはなっていないことが多く、潜り込みながら徐々に高密度（低温）になっている。

これとは別に、より高密度の深い層にも塩分極小層がしばしば見られ、黒潮の中層に貫入している形が認められた。これは、その密度を考慮すると、陸棚の底層付近にその起源があることが示唆された。低塩分であることから、陸起源の淡水の影響を受けたものである可能性が高いが、上述の表層付近の低塩分水層とは

異なり、河川水の影響を受けた表層水が混合等で陸棚の海底付近まで運ばれる過程を経た水であると推察される。これは、例えば2001年10月に観測された200m付近での低塩分水層(Fig.9)がその上下の水に比べて低酸素であったことから、この低塩分水が表層から沈降して時間が経過したものであることが示唆される。

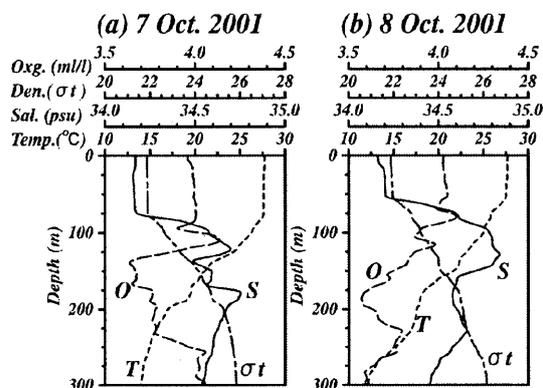


Fig.9 Example for vertical profiles of temperature, salinity, density and dissolved oxygen obtained around the shelf break in the East China Sea in October 2001.

表層の密度フロントに沿って、低塩分水が潜り込む現象は、Gulf Stream域でFord Water⁴⁾のsubductionとして知られている。例えば、Lillibridge et al.⁵⁾はGulf Streamのフロント域に沿って実施された集中観測のデータを用いてFord Waterの特性について論じている。Ford Waterの塩分極小値はGulf Streamの塩分に比較して1 psu程度低く、本論文で示した表層から潜り込んだ低塩分水の場合と類似している。また、Gulf Streamに接しているFord Waterの上部では、finger typeの二重拡散対流が起こるセンスにあることが示されており、XCP(投下式流速プロファイラー)のデータと併せて見積もったリチャードソン数があまり小さな値にはなっていないことから、ここではKH不安定よりむしろ二重拡散による混合が卓越しているのではないかと推察されている。

本論文で対象とした黒潮に潜り込む低塩分水も、塩分と水温の関係はGulf Streamの場合と同様であるから、二重拡散による混合の可能性は考えられる。Fig.10は1997年5月27日の結果についてターナーアングルを計算したものである。ここで用いたターナーアングルは水温と塩分の密度への寄与率の比を、角度で表現したもので、以下のように定義され、45度から90度の間でfinger typeの二重拡散が起こりうる関係にあり、その中でもおよそ70度以上で強い二重拡散が生じる可能性がある。

$$T_u = \tan^{-1}(-R_\rho) - 45^\circ$$

$$R_\rho = \alpha \theta_z / \beta S_z$$

ここで T_u はターナーアングル, α, β はそれぞれ, 水温, 塩分の膨張係数, θ_z, S_z はそれぞれ, 水温, 塩分の鉛直勾配である.

図では $\sigma_t=23.5$ 付近で60度を越える値が見られ, 黒潮に潜り込む低塩分水の上部で finger type の二重拡散が海水の混合に寄与している可能性が考えられる. しかし, シアー不安定による乱流混合と比較して, どちらが卓越しているかについては流れの鉛直分布が得られていないので, 判断することはできない.

黒潮に貫入する2種類の低塩分水の特徴について見

てきたが, 今後の課題として, 表層に潜り込む低塩分水については, 黒潮との間にどのような混合過程が生じているのか, 流れの鉛直分布の測定や, 微細構造の測定による乱流エネルギー逸散率の見積もりから, 乱流拡散の強さを評価して, 二重拡散との関係を明らかにする必要がある. 下層の低塩分水層については, 大陸棚底層から来ていることが示唆されたが, さらに, 溶存酸素, 塩分, 水温相互の関係を詳しく調べることによって, それがどこに起源を持つものであるかを明らかにする必要がある.

謝 辞

CTD 観測の貴重なデータを快く提供していただいた長崎海洋気象台の関係者に深く感謝します.

参 考 文 献

- 1) Iseki, K.: Role of continental margins in the global biogeochemical cycles: MASFLEX East China Sea project, 航水研ノート"空と海", 14, 99-103 (1994).
- 2) 柳 哲雄: 東シナ海の流動・物質輸送・物質収支・生態モデル, 沿岸海洋研究, 36, 59-68 (1998).
- 3) Matsuno, T. and S. Ohsaki: Subduction of low salinity water into the intermediate layer of the Kuroshio in the East China Sea, Proc. CREAMS '99 International Symp., 64-67 (1999).
- 4) Ford, W.L., J.R. Longard and R.E. Banks: On the nature, occurrence and origin of cold low salinity water along the edge of the Gulf Stream, J. Mar. Res., 11(3), 281-293 (1952).
- 5) Lillibridge, J.L., Hitchcock, G., Rossby, T., Lessard, E., Mork, M. and Golmen L.: "Entrainment and Mixing of Shelf/Slope Waters in the Near-Surface Gulf Stream.", J. Geophys. Res. 85(C8), 13,065-13,087 (1990).

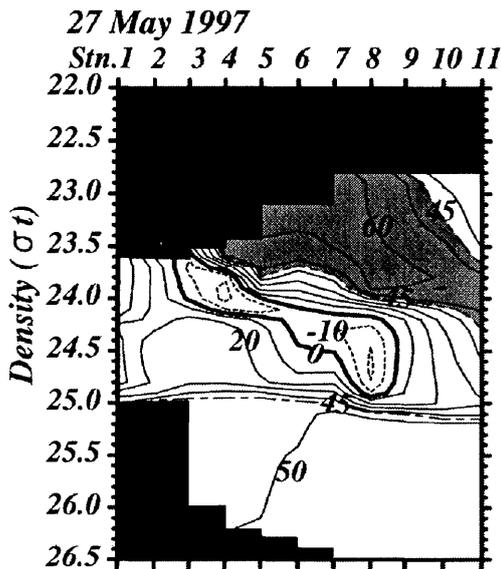


Fig. 10 Turner angle calculated from temperature and salinity on 27 May 1997. Shaded area shows finger regime