

東シナ海陸棚縁辺域における海洋構造の時空的・空間的変動

万田 敦昌, 磯辺 篤彦^{*1}, 松野 健^{*2}, 韓 仁盛^{*3},
 神尾光一郎^{*4}, 柳 哲雄^{*2}, 西田 英明, 森井 康宏,
 山脇 信博, 吉村 浩, 兼原 壽生, 青島 隆

Temporal and spatial variations of the oceanic condition around the shelf edge of the East China Sea

Atsuyoshi MANDA, Atsuhiko ISOBE^{*1}, Takeshi MATSUNO^{*2}, In-Seong HAN^{*3},
 Kouichiro KAMIO^{*4}, Tetsuo YANAGI^{*2}, Hideaki NISHIDA, Yasuhiro MORII,
 Nobuhiro YAMAWAKI, Hirhoshi YOSHIMURA, Hisao KANEHARA
 and Takeshi AOSHIMA

In order to clarify the temporal and spatial variations of the oceanic condition around the shelf edge of the East China Sea, intensive surveys using acoustic Doppler current profiler and conductivity-temperature-depth profiler were carried out during the periods from 10 to 12 May 1998, from 22 to 26 May 1998, and from 24 to 28 May 1999. A Kuroshio frontal eddy, which was caused by disturbances of the Kuroshio front, was observed during the period from 22 to 26 May 1998 and accompanying strong upwelling appeared to occur. Since shoreward motion predominated in this period, it was considered that upwelled bottom water could be transported from the shelf break to the shelf.

Key Words: 東シナ海 East China Sea, 黒潮 Kuroshio, 前線渦 Frontal eddy

1. 緒 言

東シナ海陸棚縁辺域では、黒潮起源の外洋性の水と東シナ海陸棚水起源の沿岸性の水が常に混合しており、これに伴う物質輸送は陸棚域の基礎生産に重要な役割を果たしていると考えられている。Yanagi *et al.*¹⁾は、Kuroshio frontal eddy と呼ばれる黒潮前線上の擾乱の伝播に伴い、陸棚斜面の底層水が陸棚縁まで湧昇していることを示した。またこの湧昇によって陸棚上に大量の栄養塩が供給されていることを示唆している。Matsuno and Ohsaki²⁾は、CTD (conductivity-temperature-depth profiler) による観測結果より、等密度線に沿って陸棚起源の低塩分水が外洋側に貫入していることを示した。このような黒潮と陸棚水との海水混合に関わる物理過程は、低塩分水の貫入のような短いもので慣性周期以下³⁾、またKuroshio frontal eddyに伴う湧昇のような長いものでも数日程度¹⁾という、比較的短い時間スケールの範囲内で発生するものと考えられている。

東シナ海陸棚域は底引き網を使用した漁業活動が非常に活

発に行われている海域であり、係留系による長期間の連続観測を行うのは難しい状況にある。衛星赤外画像による海表面水温の観測等も観測手段の一つとして考えられるが、上空で雲が発生するとデータが欠損してしまうことから、広範囲の画像を連続的に得ることは非常に難しい。また、衛星赤外画像はあくまで海洋表層のみの情報であり、海洋内部の水塊構造や流動場に関する情報を得ることは出来ない。これらの理由から本海域における観測は、現状では船舶によるものが中心となっている。しかしながら、限られた観測期間の中で、比較的短い時間スケールでイベント的に発生する前述のような物理過程を捉えられるかどうかは偶然に大きく左右され、その観測は極めて困難な状況にある。現在我々は、数日間の連続したADCP (acoustic Doppler current profiler) 及びCTD観測を繰り返し行うことにより、上述のような現象に伴う黒潮前線周辺の詳細な水塊構造、及び流動構造の時空間変動を捉えることを試みている。今回はその第一報として、1998年5月、及び1999年5月の観測結果について報告する。

*1 九州大学大学院総合理工学研究院 (Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University)

*2 九州大学応用力学研究所 (Research institute for Applied Mechanics, Kyushu University)

*3 地球観測フロンティア研究システム (Frontier Observational Research System for Global Change)

*4 東京久栄 (Tokyo Kyuei Co., Ltd.)

2. 観測

Fig. 1 に示すように東シナ海の陸棚域から陸棚斜面にかけて等深線に直交する方向に観測測線AA 及びBB を設け、曳航式ADCP⁴⁾を用いて流速の鉛直分布を測定した。また、それと同時にFig. 1 の黒丸で示した点においてCTDによる水温と塩分の測定を行った。CTDの測点の間隔は約5マイルとなっている。これらの観測は、測線AA を長崎大学練習

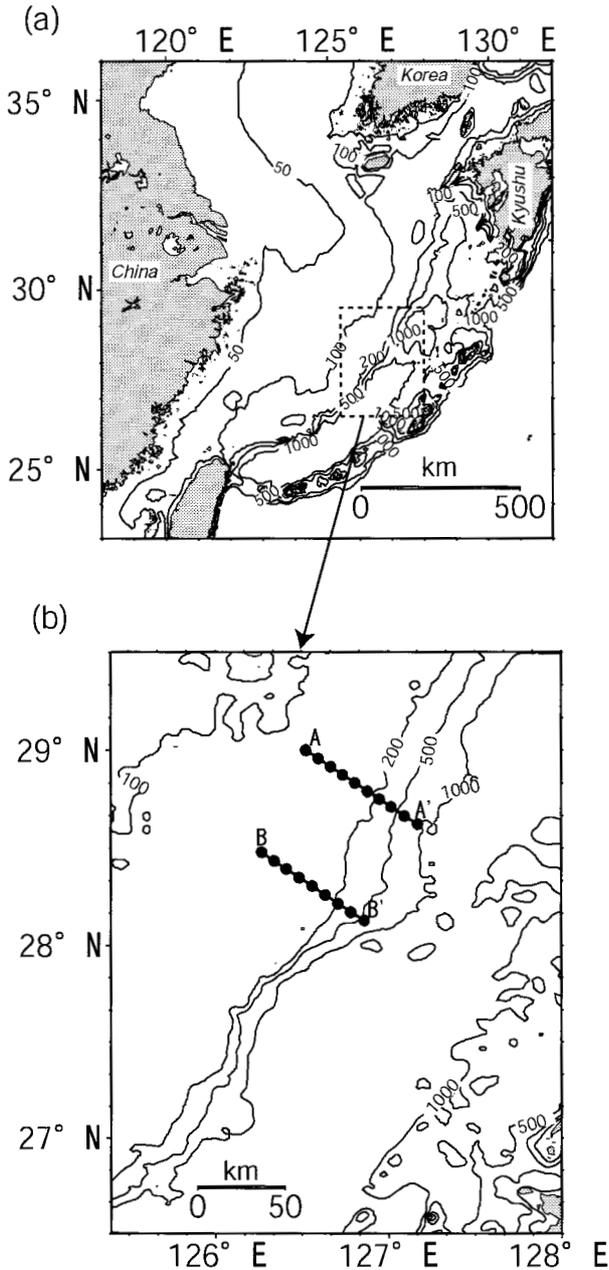


Fig. 1 (a) Map of the East China Sea. (b) Observation areas. Thick solid lines and closed circles show ADCP-data tracks and observation sites of CTD in this study, respectively. Isobaths are shown as thin solid contours in meters in each panel.

船長崎丸にて1998年5月10日から12日までの3日間、また同大学練習船鶴洋丸にて、測線AA を1998年5月22日から26日までの5日間、及び測線BB を1999年5月24日から28日までの5日間かけて行った。以降、1998年5月10日から12日までの観測期間を1998年Leg 1、1998年5月22日から26日までの観測期間を1998年Leg 2、1999年5月24日から28日までの観測期間を1999年と略記する。1日当たりのADCPによる観測回数は日中片道1回、夜間2回の計3回である。CTD観測については日中1回の観測をADCPの観測と並行して行った。

3. 結果と考察

3.1 水塊構造

水温・塩分の水平構造

Fig. 2 は1998年Leg 2の観測の初日にあたる1998年5月22日にNOAA-14号によって得られた衛星赤外画像である。図中の実線は1998年Leg 2の観測測線を示している。図を概観すると、およそ28°20'N, 125°40'Eから29°20'N, 127°30'Eを結ぶ直線の周辺に水温のコントラストが存在しているのが分かる。これはおそらく黒潮系の暖水と陸棚系の冷水とのフロントを示しているものと思われる。フロントの細部に注目すると、図中実線で示した測線の西側には、28°35'N, 126°40'Eを中心として水温21 以下の冷水塊が細長い帯状になって存在しているのが分かる。また、一部冷水によって切れてはいるが、その冷水塊を囲むように水温23 程度の暖水塊が舌状に西側に伸びているのが分かる。このような形状は、Gulf Stream

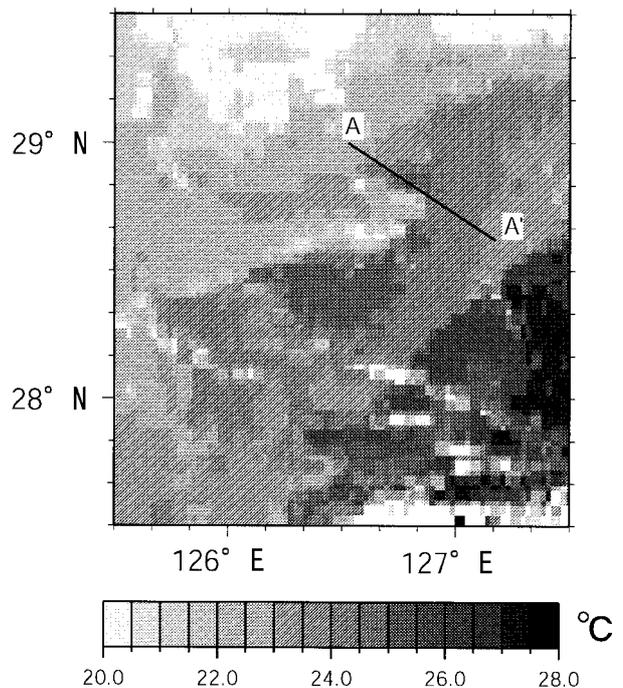


Fig. 2 The NOAA-14 infrared image taken at 3:18 JST on 22 May 1998. Solid line shows the observation line in 1998.

frontal eddy⁵⁾に見られるbackward breaking patternに非常に良く似た構造となっている。

Fig. 3は、Fig. 1に示した測線AA'及びBB'上で行われたCTD観測によって得られた、水深25mにおける水温のspace-time diagramを示している。図中、横軸は最も陸棚側のCTD測点から測った測線方向の距離、縦軸は日付けを表しており、また、影をつけた部分は水温が23℃以下の部分を示している。1998年Leg 1 (Fig. 3 (a)) 及び、1998年Leg 2 (Fig. 3 (b)) では測線AA'上で、1999年 (Fig. 3 (c)) は測線BB'上で観測を行っている。塩分についても同様のspace-

time diagramを作成し、Fig. 4にその結果を示した。今回の観測は最長で5日間であったが、その程度の時間内では前線の空間的構造が大きく変わらないと仮定すれば、この図は黒潮前線の空間的構造を近似的に表しているとみなすこともできる。このような仮定を置くことによって、Yanagi *et al.*¹⁾は、黒潮前線部におけるADCP測流データからドリフターの軌跡を再現することに成功した。そして、5日間程度の時間スケールならば、黒潮前線の空間的構造はfrozen patternとして黒潮の上流部から下流部へと伝播していくとみなすことが出来ると述べている。1998年Leg 2では、水温23.5℃以上の比較

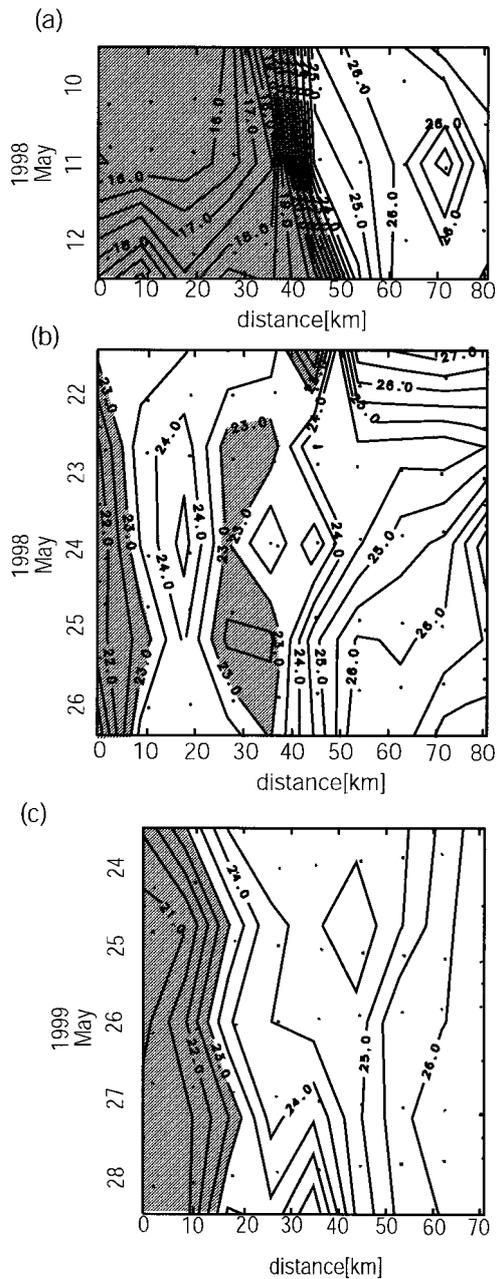


Fig. 3 Space-time diagrams of water temperature (°C) in Leg 1 of 1998 (a), Leg 2 of 1999 (b), and 1999 (c) at a depth of 25m. Shaded areas indicate the regions where temperature is lesser than 23°C.

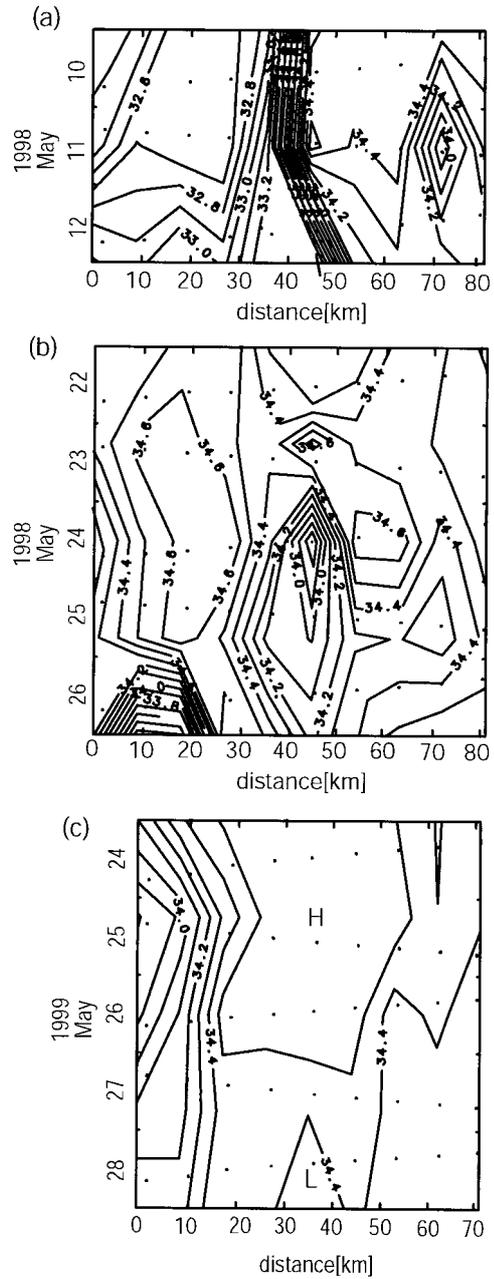


Fig. 4 Space-time diagrams of salinity (S) in Leg 1 of 1998 (a), Leg 2 of 1998 (b), and 1999 (c) at a depth of 25m.

的高温な水塊が、測線方向の距離が10~25kmの部分にフィラメント状になって存在している。それを挟むように、測線方向の距離が0~10kmの範囲と外洋側の測線方向の距離が25~35kmの範囲に冷水塊が存在している。また、同時期の水深25mにおける塩分のspace-time diagram (Fig. 4 (b)) をみると、この暖水のフィラメントに対応する位置に、周囲と比較して高塩分の水塊が存在しているのが分かる。これらの結果からこの暖水のフィラメントは陸棚系の水塊ではなく、黒潮起源の水塊であることが示唆される。東シナ海陸棚縁域において、Gulf Stream frontal eddyと類似した構造をもつKuroshio frontal eddyと呼ばれる黒潮前線上の擾乱がYanagi *et al.*¹⁾によって観測されている。ここに示したspace-time diagramとFig. 2に示した衛星赤外画像の結果から考えるに、1998年Leg 2で観測されたこのような水温場の構造は、Yanagi *et al.*¹⁾の言うようなKuroshio frontal eddyと同種の擾乱を示すものと考えられる。そこで、この1998年Leg 2において観測された黒潮前線上の擾乱を、これ以降便宜的にKuroshio frontal eddyと称することとする。

一方、それに対して1998年Leg 1では、Fig. 3 (a)に示すように、水温の分布がLeg 2のような複雑な形状を示すことはなかった。この期間では測線方向の距離が40~50kmの位置に、測線に直交する方向に対して直線状にフロントが形成され、外洋側に暖水、陸棚側に冷水が分布している。また、このフロントは、約10kmの範囲で水温が5℃変化する強いものとなっている。塩分について見てみると (Fig. 4 (a)), 水温に対応して測線方向の距離が40~50kmの位置に強いフロントが存在し、外洋側に高塩分の水、陸棚側に低塩分の水が存在している。1998年Leg 1とLeg 2の結果から、同一測線上での観測でも観測時期によってフロントの形状、及びその強度が著しく変化することが分かる。

1999年における水温のspace-time diagram (Fig. 3 (c)) を見ると、この時期についても1998年Leg 1と同様に、水温のフロントは比較的測線に直交する方向に直線状に形成され、フロントの外洋側に高温の水、陸棚側に低温の水が存在していることが分かる。但し、その位置は、1998年Leg 1よりも陸棚側の測線方向の距離が0~20kmの範囲に存在し、測線方向の温度勾配も1998年Leg 1程強いものではない。また、同時期の塩分のspace-time diagram (Fig. 4 (c)) を見ると、水温のフロントに対応して測線方向の距離が0~20kmの範囲にフロントが存在し、外洋側に高塩分の水、陸棚側に低塩分の水が存在している。但し、フロントよりも外洋側では、水温に比べ塩分はほとんど変化していない。

密度場の鉛直構造

Fig. 5~7に、それぞれ1998年Leg 1, 1998年Leg 2, 1999年における密度場の鉛直分布を示す。1998年Leg 1 (Fig. 5) では、測線方向の距離が40kmの位置より陸棚側で、水深20mから40m付近に強い密度躍層が3日間に渡って存在していることが分かる。また、測線方向の距離が40kmの位置より外洋側では、等密度線はその間隔を広げながら水深の深い方向へと傾いていることが分かる。前述の陸棚上に存在

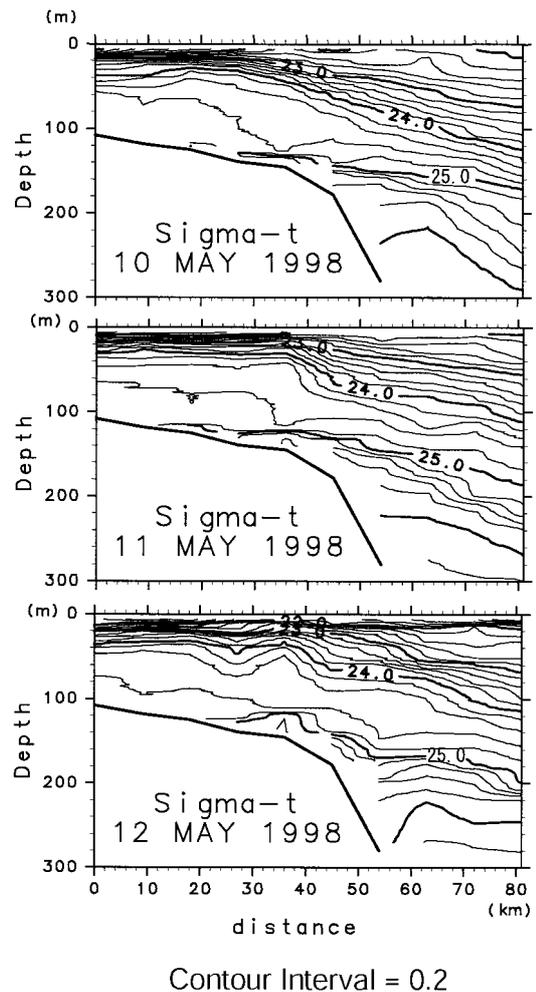


Fig. 5 Vertical distributions of density in Leg 1 of 1998.

する密度躍層の下は、混合層が海底付近まで広がっている。この混合層は、5月10日から徐々に外洋側へと伸びていき、5月12日には陸棚斜面上の水深120~140m、測線方向の距離が65kmの地点まで達している。また、陸棚縁近傍から外洋側には、水深140~200m付近にもう一つの密度躍層が存在しているのが分かる。

1998年Leg 2 (Fig. 6) はLeg 1とは密度構造が大きく異なっている。海面から水深20~40m付近までは混合層が発達しており、その混合層の下部には密度躍層が存在している。水深40m以深ではLeg 1のような混合層は存在せず、比較的連続的に密度が変化している。また、5月23日から25日の期間においては、測線方向の距離が20~35kmの範囲に、表層から水深40m程度まで達する密度のドーム構造が見られる (図中矢印で示した部分)。このドーム構造は、その位置から見て、Fig. 3 (b)に示した暖水フィラメントに囲まれた冷水塊に対応している。Lee *et al.*⁵⁾によるとGulf Stream frontal eddyの鉛直スケールはおおよそ20~30mと考えられているが、このドーム構造の鉛直スケールから、今回観測されたKuroshio frontal eddyもそれと同程度のごく薄い鉛直スケールを有するものと考えられる。

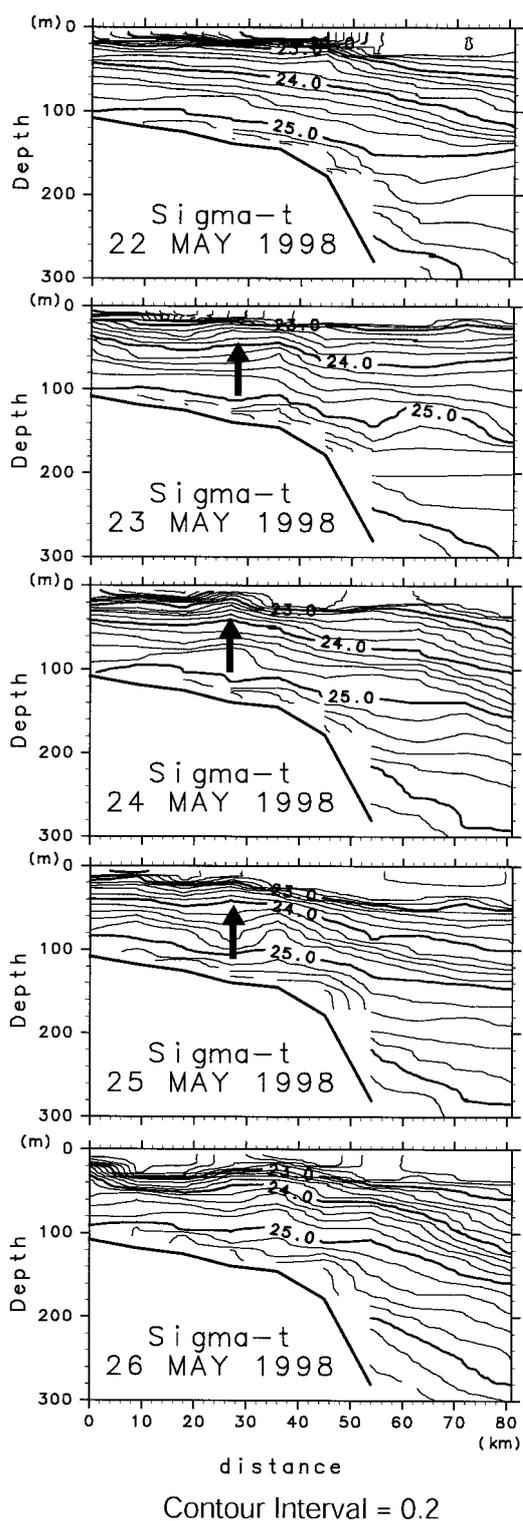


Fig. 6 Same as Fig.5 except for Leg 2 of 1998.

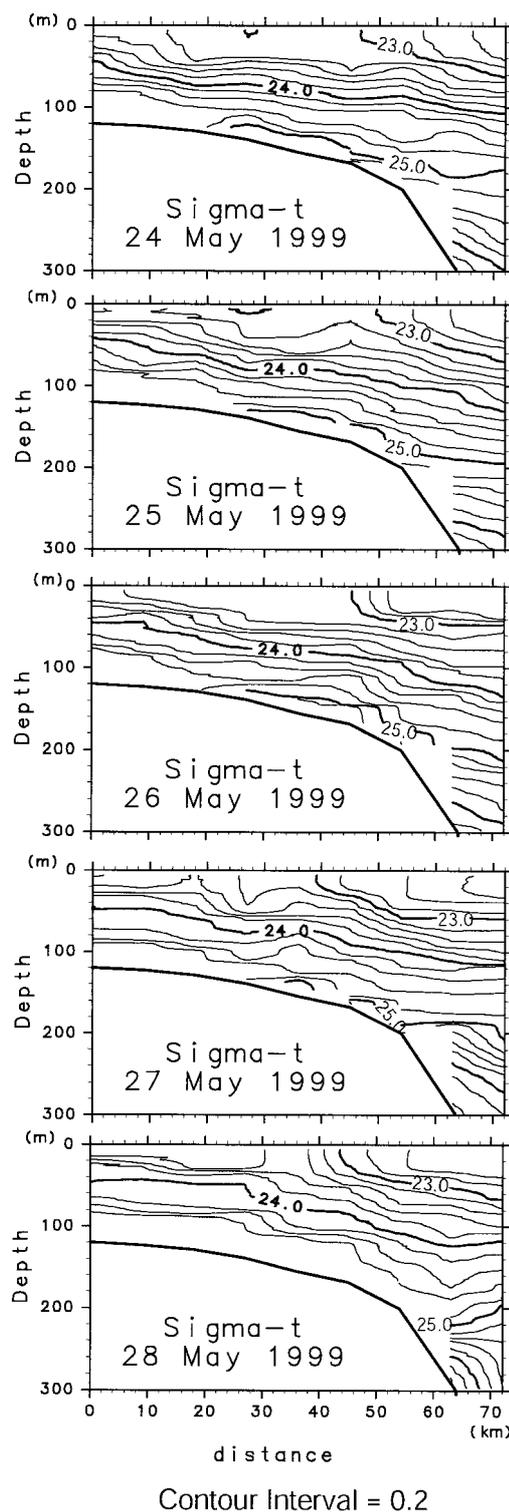


Fig. 7 Same as Fig.5 except for 1999.

1999年は、1998年Leg 2と同様に海面近くで比較的良好な混合層が発達している。しかし、1998年Leg 2に比べ混合層下部の密度の鉛直勾配は小さい。また、海面付近には密度の水平勾配が存在する。陸棚域の海底付近を見ると、5月24日に測線方向の距離が0~20kmの位置の水深80m以深に存在していた混合層が、徐々に陸棚縁の方向に伸びて行き、5月28

日には測線方向の距離が50kmの陸棚縁近傍まで達していることが分かる。また、5月27~28日には、この海底付近の混合層の上部の水深約80mの位置に密度躍層が形成され、さらにその上部水深約40~60mの位置に比較薄層の混合層が発達しているのが見て取れる。

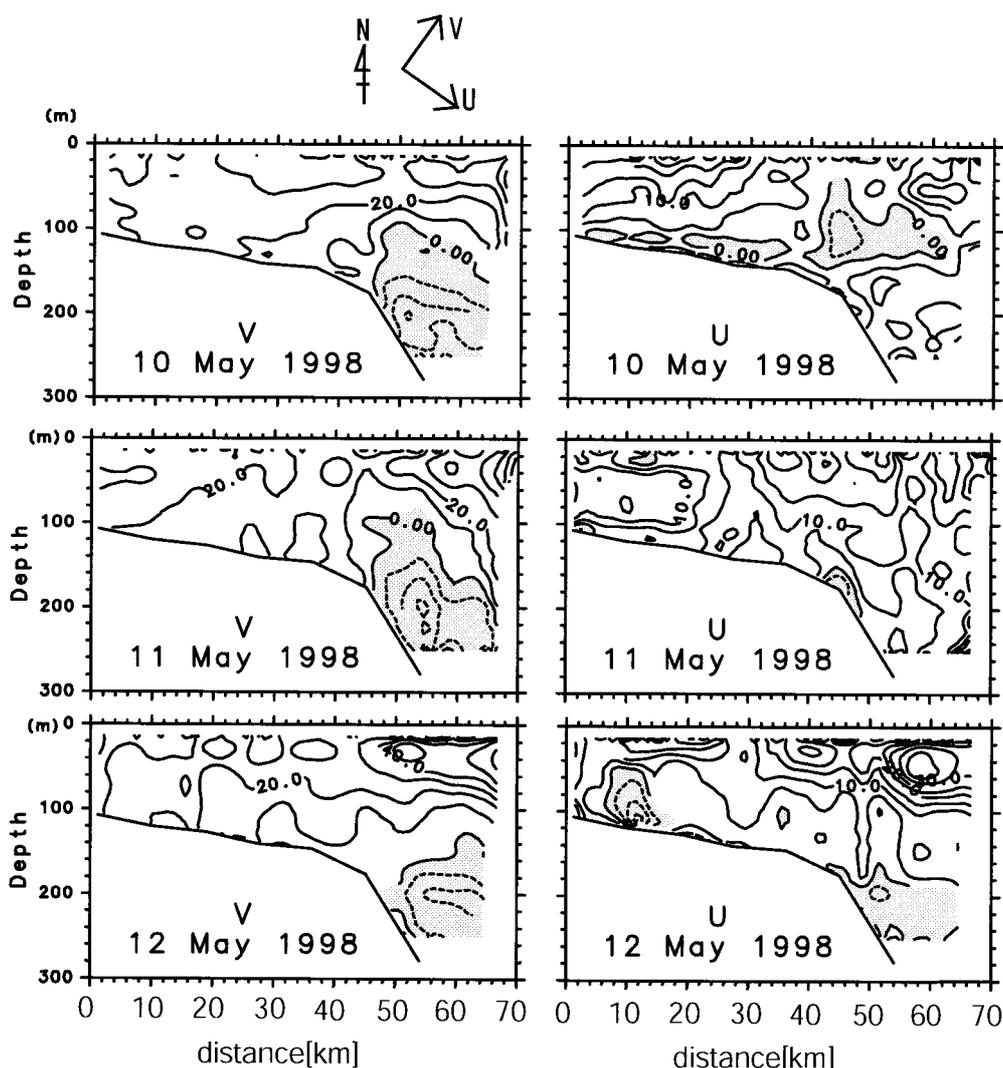


Fig. 8 Vertical distributions of residual currents in Leg 1 of 1998. Left and right panels show along-shelf (northeastward) and across-shelf (southeastward) components, respectively. In left panels, contour intervals are 10 cm/s and shaded regions indicate countercurrent. In right panels, contour intervals are 5 cm/s and shaded regions indicate shoreward motion.

3.2 流動構造

ADCPの生の観測データから、潮流成分を差し引くことによって残差流成分を求めた。潮流成分は、調和定数を空間座標について2次関数を用い、また時間座標について正弦関数を用いて関数の当てはめを行う、Candela *et al.*⁶⁾の方法を用いた。推算方法の詳細およびその結果については万田ほか⁷⁾に述べられている。Fig. 8~10はそれぞれ、1998年Leg 1、1998年Leg 2、1999年の残差流の鉛直分布を示している。これらの図中、左半分に示した鉛直分布は、等深線に沿って黒潮の流下方向の流速成分 (V) を示し、右半分に示した鉛直分布は、Vに直交し陸棚側から黒潮側を見た方向の流速成分 (U) を示している。以降、UとVが正の値をとる方向を、それぞれacross-shelf方向及びalong-shelf方向と称する。Vの鉛直分布においてハッチをつけた部分は、Vが負の値、すなわち反流の形成されている部分を示している。また、Uの鉛直分布においてハッチをつけた部分はUが負の部分、即ち

黒潮側から陸棚側に流入する流速成分の存在する部分を示している。まず、Vの分布について見てみる。1998年Leg 1のVの分布 (Fig. 8の左半分) を見ると、陸棚斜面上水深100m以深の部分に流速10cm/s程度の反流域が見られる。1998年Leg 2 (Fig. 9) にも同様の結果が見て取れるが、反流の存在する水深はこれよりも深い水深200m以下の部分となっている。またFig. 8~9では、Vの最大値は約40~60cm/sであるが、Fig.10においては1m/sとなっている。このことより、1998年Leg 1、及びLeg 2においては、黒潮の主流部は1999年の観測時よりも外洋側に存在していたと考えられる。次にUの分布について見てみる。1998年Leg 1 (Fig. 8の右半分)、及び1999年 (Fig.10の右半分) においては、Uが正の部分 (陸棚側から黒潮側に流出する成分) が卓越しているのに対し、1998年Leg 2 (Fig. 9の右半分) ではUが負の部分 (黒潮側から陸棚側へ流入する成分) が卓越していたことが分かる。

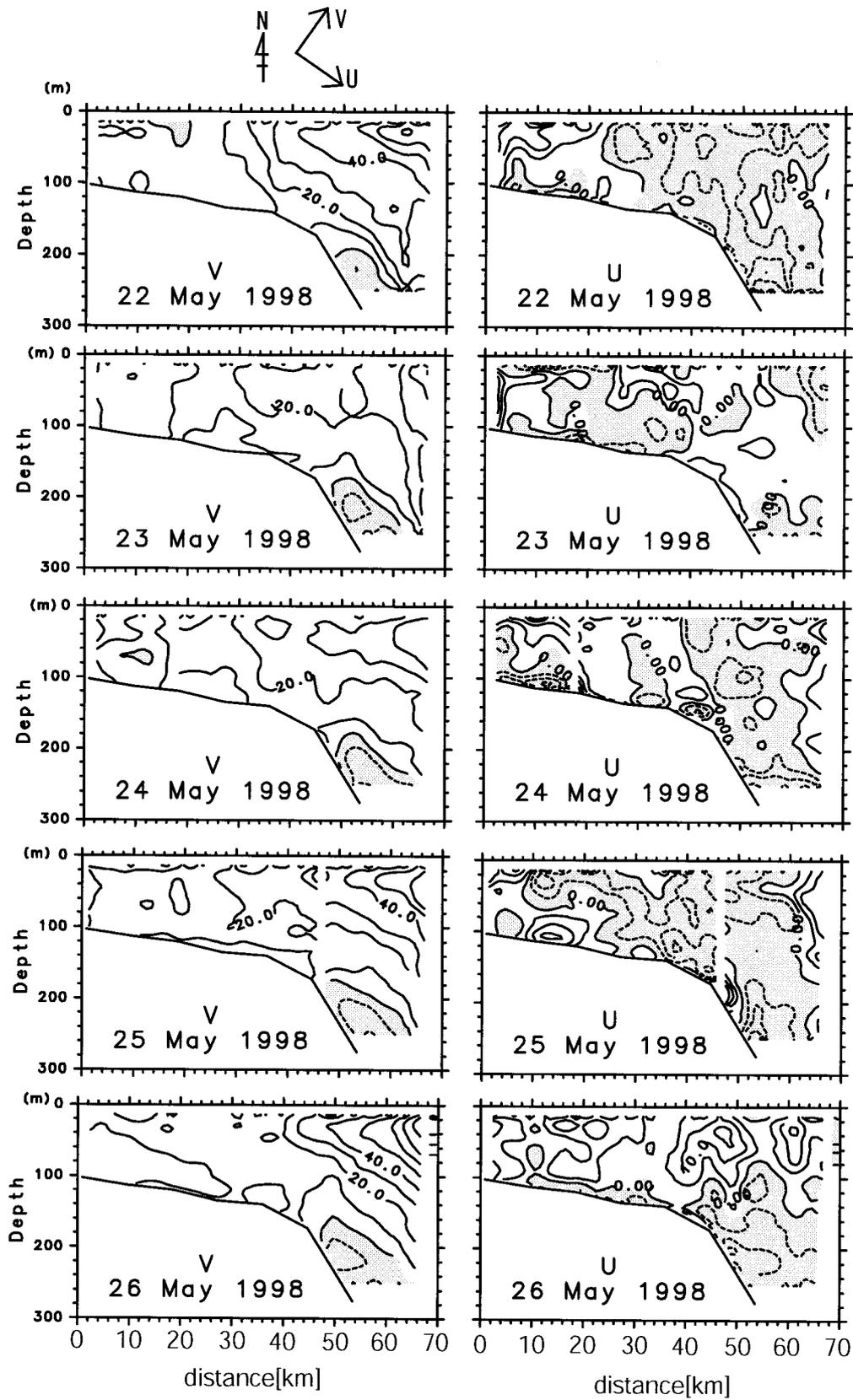


Fig. 9 Same as Fig. 8 except for Leg 2 of 1998.

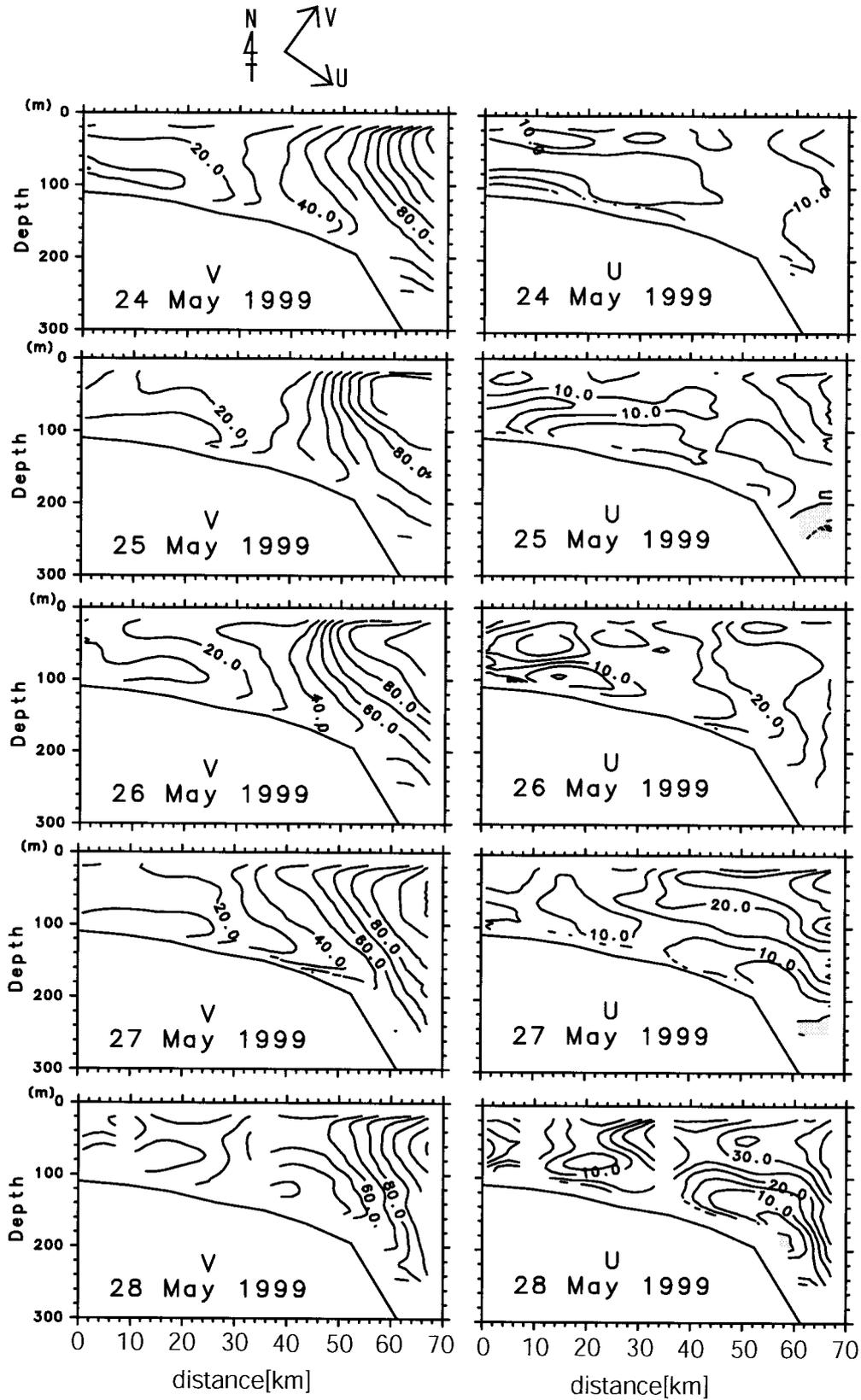


Fig. 10 Same as Fig. 8 except for 1999.

3.3 水温場の鉛直構造

今回行った3回の観測のうち、1998年Leg 2では、Kuroshio frontal eddyが測線上を通過し、一般的に陸棚向きの流れが卓越していた。また、Kuroshio frontal eddyの鉛直スケールは40m程度であることが分かった。一方1998年Leg 1及び1999年では、Kuroshio frontal eddyが測線上を通過することは無かった。

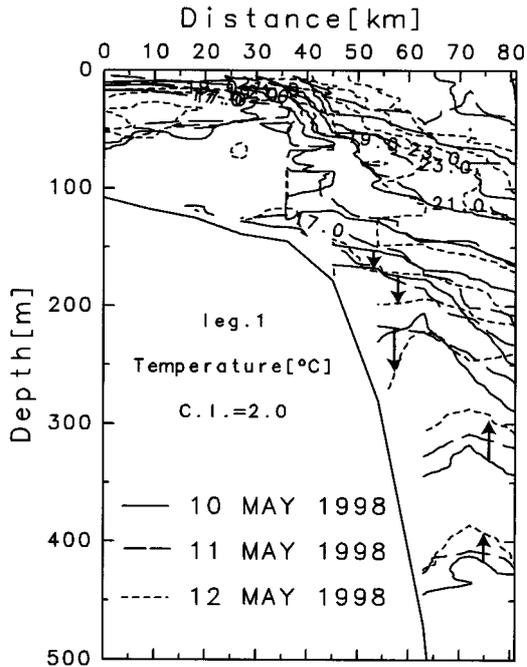


Fig. 11 Vertical distributions of water temperature () in Leg 1 of 1998.

また、これらの観測期間では、一般的に外洋向きの流れが卓越するとともに、陸棚部の海底付近に混合層が発達し、それが陸棚縁に向って伸びているのが観測された。

1998年Leg 2に見られるようなfrontal eddyは湧昇域を伴うことが知られている⁵⁾。東シナ海においても、Yanagi *et al.*¹⁾はKuroshio frontal eddyの通過に伴い陸棚斜面上の栄養塩を豊富に含む冷水が湧昇し、陸棚に大量の栄養塩が供給されていることを示唆した。そこで、今回の観測でもこの様な湧昇が見られたかどうかを考察してみる。

Fig.11~13は、それぞれ1998年Leg 1、1998年Leg 2、1999年の水温の鉛直断面図を示している。Fig.12より、1998年Leg 2においては観測期間中連続して、陸棚斜面に沿って等温線が1日当たり10~40m程度上昇し続けていたことが分かる。このことから1998年Leg 2の期間には陸棚斜面に沿ってかなり強い湧昇が発生していることが示唆される。等温線の変位から見積もった鉛直流速はおよそ、 10^{-2} cm/sのオーダーとなっている。Yanagi *et al.*¹⁾が述べた様な陸棚斜面上から陸棚域への栄養塩の輸送過程が、1998年Leg 2の観測時においても、Fig. 9に示すような陸棚向きの流れとFig.12に示唆される湧昇との組み合わせによって成立していたものと考えられる。

1998年Leg 2に対して1998年Leg 1では、陸棚斜面の水深300m以下の領域においてのみ等温線の上昇が見られるが、それ以浅では等温線は下降しており、陸棚縁近くでは下降流が卓越していると考えられる。また、1999年も陸棚斜面では等温線は下降する傾向が強く、このことから下降流が卓越していたものと考えられる。

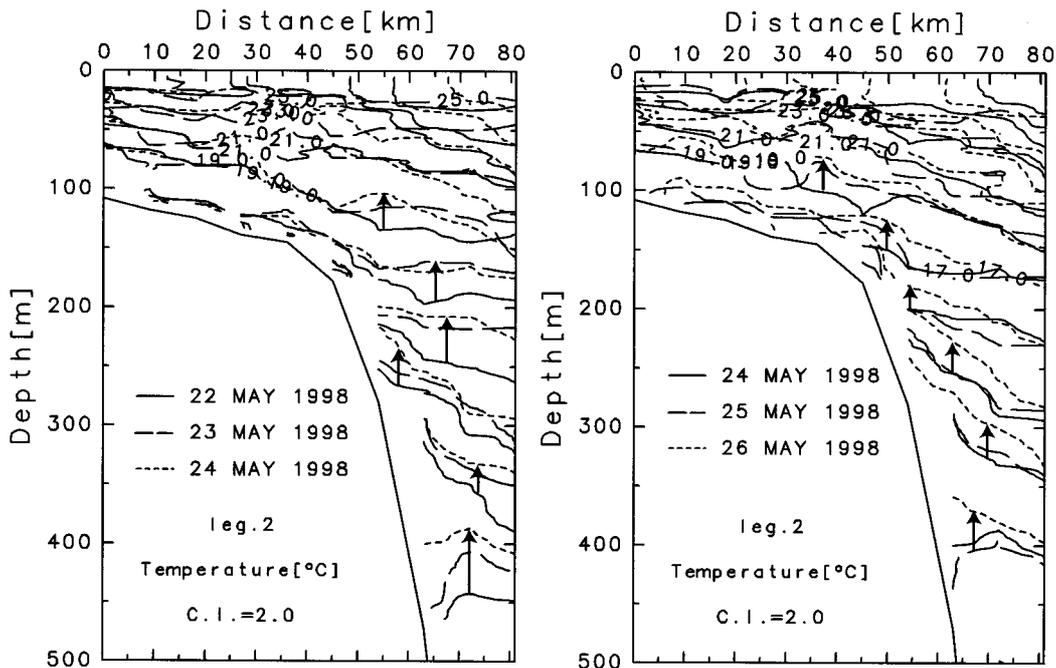


Fig. 12 Same as Fig.11 except for Leg 2 of 1998.

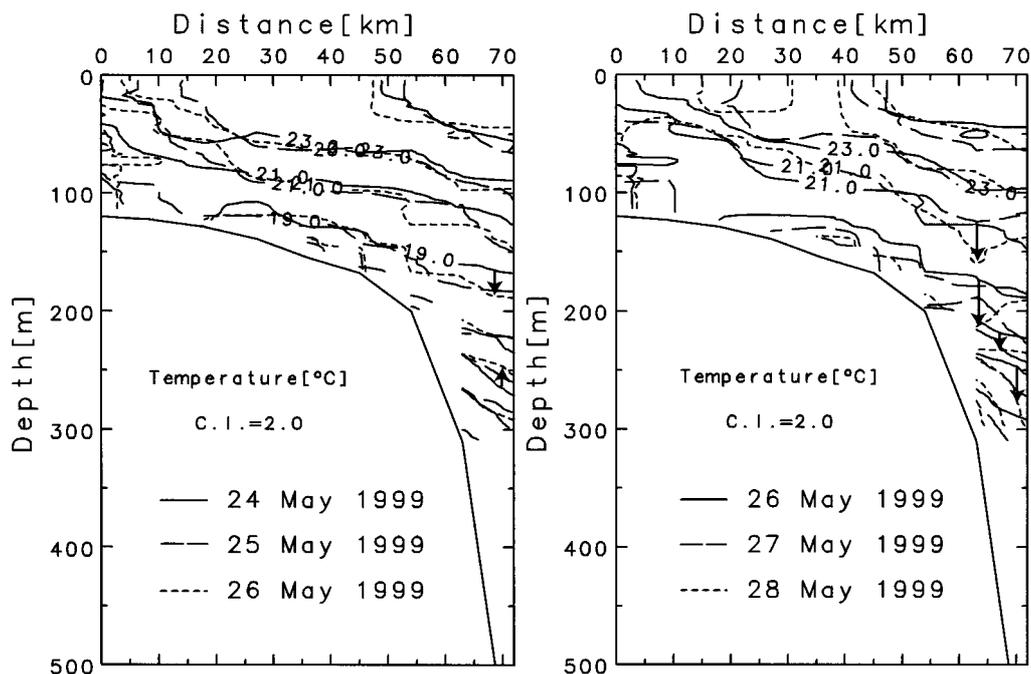


Fig. 13 Same as Fig. 11 except for 1999.

4. 結 言

東シナ海の基礎生産量を推定する上で、陸棚斜面の底層水の湧昇に伴う栄養塩の供給量を算定することは極めて重要な問題である。また、湧昇した底層水が基礎生産にすぐさま利用されるかどうかは、湧昇した底層水が陸棚上で有光層以浅まで達することが出来るかどうかによる。これらの問題を考える上では水平流速のみならず、鉛直流速の正確な推定が必要不可欠なものとなるであろう。しかしながら、今回行った観測においてはADCPの測定精度の問題から鉛直流速についての情報を得ることは出来なかった。現在、我々は今回の観測時における鉛直流速の算定を目的とし、数値モデルへのADCP及びCTDのデータの同化実験を行っている。この結果については近い将来別報にて公表する予定である。

5. 謝 辞

2名の査読者の方々より数多くの貴重な助言を頂きました。厚く御礼申し上げます。作図には地球流体電脳ライブラリー、並びにGeneric Mapping Toolsを使用いたしました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) T. Yanagi, T. Shimizu, H.-J. Lie: Detailed structure of the Kuroshio frontal eddy along the shelf edge of the East China Sea, *Cont. Shelf Res.*, **18**, 1039-1056 (1998).
- 2) Matsuno, T. and S. Ohsaki: Subduction of low salinity water into the intermediate layer of the Kuroshio in the East China Sea. Proceedings of the CREAMS '99 international symposium, Fukuoka (1999), pp64-67.
- 3) 松野健：大陸棚縁辺部における乱流混合と陸棚水の輸送過程に関する研究。平成9年度～平成10年度科学研究費補助金(基盤研究(C)(2))研究成果報告書(1999), pp 13-21.
- 4) Kaneko, A., W. Koterayama, H. Honji, S. Mizuno, K. Kawatate, and R. L. Gordon: Cross-stream survey of the upper 400m of the Kuroshio by an ADCP on a towed fish, *Deep-Sea Res.*, **37**, 875-889 (1990).
- 5) T. N. Lee, L. P. Atkinson, and R. Legeckis: Observations of a Gulf Stream frontal eddy on the Georgia continental shelf, April 1977, *Deep-Sea Res.*, **28A**, 347-378 (1981).
- 6) J. R. Candela, C. Beardsley, and R. Limeburner: Separation of tidal and subtidal currents in ship-mounted acoustic Doppler current profiler observations, *J. Geophys. Res.*, **97**, 769-788 (1992).
- 7) 万田敦昌・磯辺篤彦・松野健・柳哲雄・韓仁盛・神尾光一郎・西田英明・久野俊行・森井康宏・山脇信博・吉村浩・兼原壽生・青島隆：東シナ海黒潮前線におけるADCP観測結果とそれに適用した潮流分離手法について、九州大学総合理工学研究科報告, **21**, 343-348, (2000).