

## 東シナ海黒潮前線におけるADCP連続観測結果とそれに適用した潮流分離手法について

万田, 敦昌  
熊本県立大学環境共生学部

磯辺, 篤彦  
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

松野, 健

柳, 哲雄  
九州大学応用力学研究所

他

<https://doi.org/10.15017/16577>

---

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 21 (4), pp.343-348, 2000-03. Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

## 東シナ海黒潮前線における ADCP 連続観測結果と それに適用した潮流分離手法について

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†††

(1999年11月22日 受理)

### The results of the intensive ADCP observations of the Kuroshio front in the East China Sea and the detiding procedure

Atsuyoshi MANDA\*, Atsuhiko ISOBE\*\*, Takeshi MATSUNO\*\*\*, Tetsuo YANAGI†,  
Han In-seong\*\*\*, Kouichiro KAMIO\*\*\*, Hideaki NISHIDA††, Toshiyuki KUNO††,  
Yasuhiro MORII††, Nobuhiro YAMAWAKI††, Hiroshi YOSHIMURA†††,  
Hisao KANEHARA††† and Takashi AOSHIMA†††

In order to clarify the current structure in the Kuroshio front region, intensive ADCP (acoustic Doppler current profiler) surveys were carried out in the shelf and the shelf break region of the East China Sea in May 1998 and May 1999. To obtain residual currents excluding tidal period fluctuations, harmonic constants were estimated using the observed ADCP data. Then the variation of the structure of residual currents in the Kuroshio front region is carefully discussed.

#### 1. 緒 言

沿岸海域から外洋域への物質輸送は、地球規模の物質循環、なかでも地球温暖化に関わる炭素循環に大きな役割を果たす可能性が考えられている(柳<sup>1)</sup>)。沿岸海域から外洋域への物質輸送を定量的に評価するためには、沿岸海域と外洋域の境界である陸棚縁での物質交換を支配する物理過程をまず明らかにしておく必要がある。

東シナ海における黒潮と陸棚水との境界である黒潮前線は複雑な変動を示し、そこでの様々な物理過程が沿岸域と外洋域との物質交換に重要な役割を果たしていると考えられている。そのような物理過程の例として、Kuroshio Frontal Eddy (Yanagi et al.<sup>2)</sup>) と呼ばれる黒潮前線上に存在する擾乱や、陸棚水の中層貫入 (Matsuno and Ohsaki<sup>3)</sup>) などがあげられる。このような

種々の物理現象が絡み合い、黒潮前線域における沿岸水と黒潮水との混合過程は複雑な様相を呈している。

このような複雑な混合過程を詳細に検討しようとすれば、まず最初に流速の詳細な時空間変動を把握しておく必要があるだろう。Kaneko et al.<sup>4)</sup>や Ito et al.<sup>5)</sup>は、曳航型 ADCP (acoustic Doppler current profiler) を用いて黒潮前線域から主流部にかけて流速の詳細な鉛直断面分布を測定している。しかしながら、これら既往の研究においては、1測線をわずか1日1回、もしくは1往復のみの観測を行うのみに留まっている。この海域の海水混合に非常に重要な役割を果たしていると考えられている黒潮前線の変動は、おおよそ数日から20数日程度の周期を持っており (Sugimoto et al.<sup>6)</sup>, Qiu et al.<sup>7)</sup>, James et al.<sup>8)</sup>)、このような変動を観測する見地に立った場合、前述の観測結果はあくまでスナップショットとしての情報を提供しているに過ぎず、時間変動に関する情報を十分に与えているとは言いがたい。また、比較的水深の浅い陸棚域から陸棚斜面にかけては潮流成分が卓越していると考えられ、1日以上 の時間スケールの変動に着目する場合には往復流である潮流を得られた観測結果から除去しておく必要があるが、1回もしくは1往復のみの観測である前出の

\*大気海洋環境システム学専攻博士後期過程  
(現熊本県立大学環境共生学部)

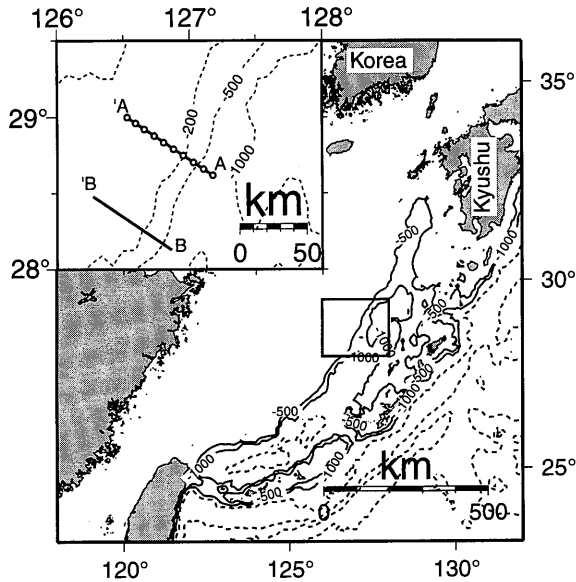
\*\*大気海洋環境システム学専攻

\*\*\*長崎大学水産学部

†九州大学応用力学研究所

††長崎大学練習船長崎丸

†††長崎大学練習船鶴洋丸



**Fig. 1** Map of the East China Sea. The 500-m and 1000-m isobaths are shown as solid contours; dashed contours (unlabelled) are at 1000-m intervals. Inset figure shows a close up of observation area with open circles representing observation sites of CTD and the lines representing the ADCP-data tracks in 1988(A-A') and 1999(B-B').

Kaneko et al.<sup>4)</sup>や Ito et al.<sup>5)</sup>の結果にはそのような潮流成分がかなりの割合で含まれていることが考えられ、これらの結果は実際の物質輸送に寄与する残差流成分を正確に評価したものでない可能性がある。

今回、我々は黒潮前線域の海水混合過程を考える上で基礎的な情報である、残差流の流速場の比較的長期間の時空間変動を把握することを目的とし、東シナ海陸棚縁における ADCP の連続観測を行った。本報では、陸棚及び陸棚斜面における ADCP 実測データからの潮流成分除去の手法を紹介し、その結果について報告すると共に、得られた残差流の流速場から黒潮前線域の流速変動について議論する。

## 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 ADCP (Kaneko et al.<sup>4)</sup>) を用いて流速の鉛直分布を 1 日 3 回 (1 日 1 往復半) 測定した。観測は、長崎大学練習船長崎丸にて 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、1998 年 5 月 22 日から 26 日までの 5 日間、及び 1999 年 5 月 24 日から 28 日までの 5 日間にかけて行われた。観測の詳細については **Table 1** に示す通りである。

## 3. 手 法

ADCP 観測データからの潮流成分の計算法は、Candela et al.<sup>9)</sup>による方法を用いた。以下、その計算法を

**Table 1** ADCP Plying surveys from 1998 to 1999.

Period	Transect	Plying Times
May 10-12, 1998	A	9
May 22-26, 1998	A	15
May 24-28, 1999	B	13

説明する。今回の観測は最長で 5 日間であることから、4 大分潮 ( $M_2, S_2, K_1, O_1$  潮) への分解は原理的に不可能であるため、日周潮 ( $M_1$  潮) 及び半日周潮 ( $M_2$  潮) に分解する。  $x, z, t$  をそれぞれ測線に沿う方向に計った距離、水深、及び時間とすれば、観測された流速場  $u(x, z, t)$  は日平均流・ $M_1$  潮・ $M_2$  潮の和として、

$$u(x, z, t) = a_0 + a_1 \cos \sigma_{M1} t + a_2 \sin \sigma_{M1} t + a_3 \cos \sigma_{M2} t + a_4 \sin \sigma_{M2} t \quad (1)$$

のように表すことができる。ここで、 $a_0$  は日平均流、 $a_1, a_2$  は日周潮流の調和定数、 $a_3, a_4$  は半日周潮流の調和定数である。また  $\sigma_{M1}, \sigma_{M2}$  はそれぞれ日周潮流および半日周潮流の角速度である。ここで、未知数は  $a_i (i = 0, 4)$  の 5 つであるので、同一点で観測されたデータが 5 個以上あれば、(1) 式に最小二乗法を適用することによりこれらの未知数を決定することができる。しかし、今回は 1 日あたり 1 往復半の観測しか行われていないことから、同一点の観測データは 1 日あたり最大で 3 個しか存在しない。そこで、今回は Candela et al.<sup>9)</sup> に従い、 $a_i$  を (2) 式に示すような  $x, z$  に関する  $N$  次の多項式で表すこととする。

$$a_i = \sum_{j=0}^N \sum_{k=0}^N \alpha_{j-k,k} x^{j-k} z^k \quad (2)$$

今回は磯辺<sup>10)</sup>と同様に  $N=2$  とした。実測されたデータ  $u(x, z, t)$  を用いて未知数  $\alpha_{j-k,k}$  を最小二乗法によって求める。この方法で  $N=2$  とした場合に未知数の数は、各  $a_i$  につき 6 個の未知数が必要となることから計 30 個となるが、(2) 式のように調和定数を空間座標  $(x, z)$  の関数として表現することにより、ADCP 観測によって得られた全ての点のデータを最小二乗法に用いることができるようになる。同一点での観測値のみを用いる方法 (Simpson et al.<sup>11)</sup>) と比べ、この方法は、未知数の数に比べて大量のデータを与えられることから精度良く調和定数を求められることが期待でき、また欠測の多いデータにも適用可能であることなどの利点もある。この手法を用いる上で、データの性質によっては最小二乗法で未知数を決定する際の相関係数が低くなることも考えられるが、その場合

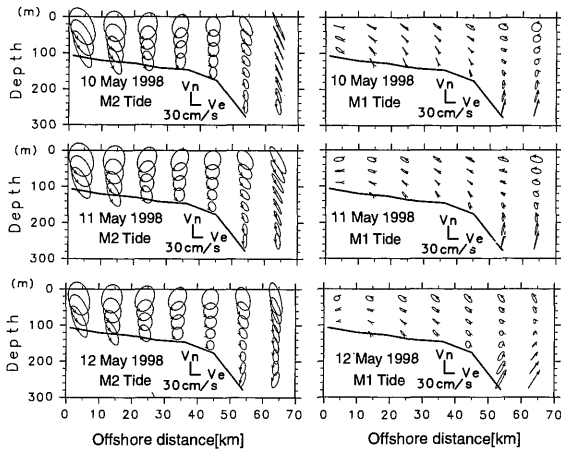


Fig. 2 Tidal ellipses of M1 and M2 tidal current components from 10 to 12 in May 1998.

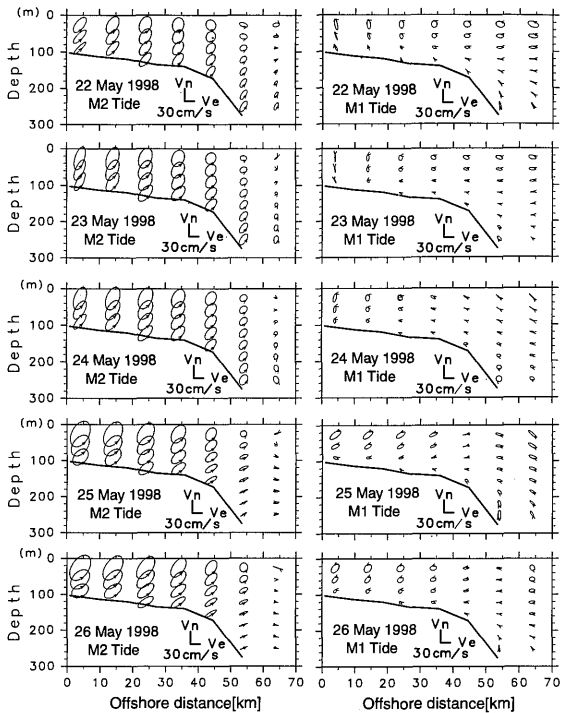


Fig. 3 Tidal ellipses of M1 and M2 tidal current components from 22 to 26 in May 1998.

には(2)式の変数の次数を上げる,  $a_i$  を近似する関数を多項式以外の与えられたデータの性質に合ったものに変える, などの方法で対処すれば良い。

#### 4. 結 果

前述の手法を用いて推算された, 1998年5月10日~12日, 1998年5月22~26日, 1999年5月24~28日における M1・M2 潮の潮流楕円の鉛直分布をそれぞれ Fig. 2~4 に示す。全般的に, M1 潮に比べ M2 潮の振幅が大きく, 本海域においては半日周潮の卓越していることが分かる。M2 潮は陸棚側から外洋側に行く

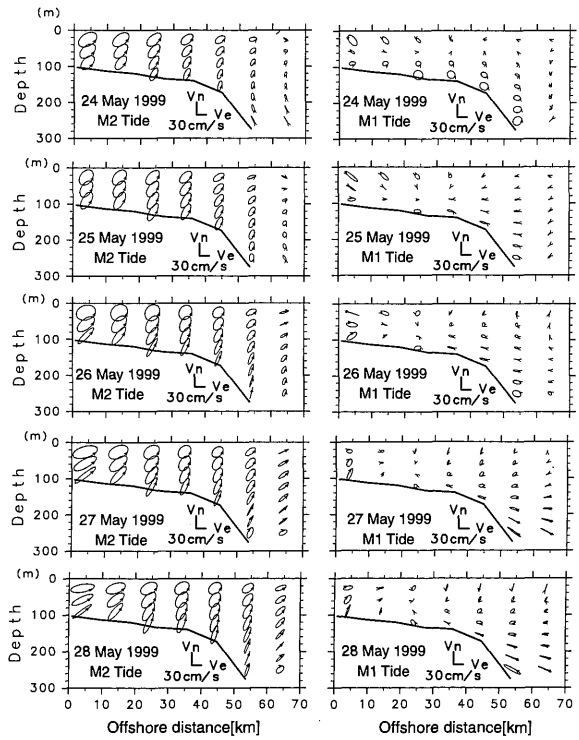
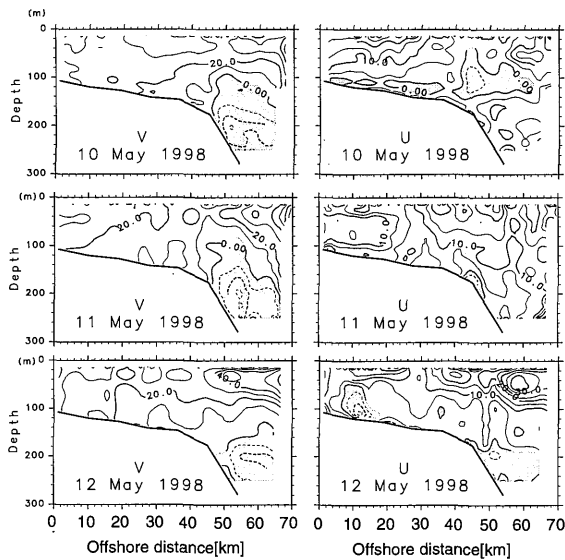


Fig. 4 Tidal ellipses of M1 and M2 tidal current components from 24 to 28 in May 1999.

Table 2 Multiple correlation coefficients of eastward ( $V_e$ ) and northward ( $V_n$ ) components of current velocity.

Date	Multiple correlation coefficient	
	$V_e$	$V_n$
May 10, 1998	0.81	0.88
May 11, 1998	0.81	0.87
May 12, 1998	0.81	0.93
May 22, 1998	0.74	0.72
May 23, 1998	0.80	0.73
May 24, 1998	0.83	0.74
May 25, 1998	0.94	0.78
May 26, 1998	0.88	0.78
May 24, 1999	0.89	0.92
May 25, 1999	0.90	0.92
May 26, 1999	0.91	0.91
May 27, 1999	0.91	0.92
May 28, 1999	0.91	0.94

に従い流速の振幅が小さくなるのに対し, M1 潮は一部を除き比較的一様な振幅の分布となっている。1998年5月10~12日のデータでは M2 潮の潮流楕円の方角はおおよそ北北西から北の方角を向いているのに対して, 1998年5月22~26日, 及び, 1999年5月24~28日のデータでは若干異なり北東から東北東の方角を向い



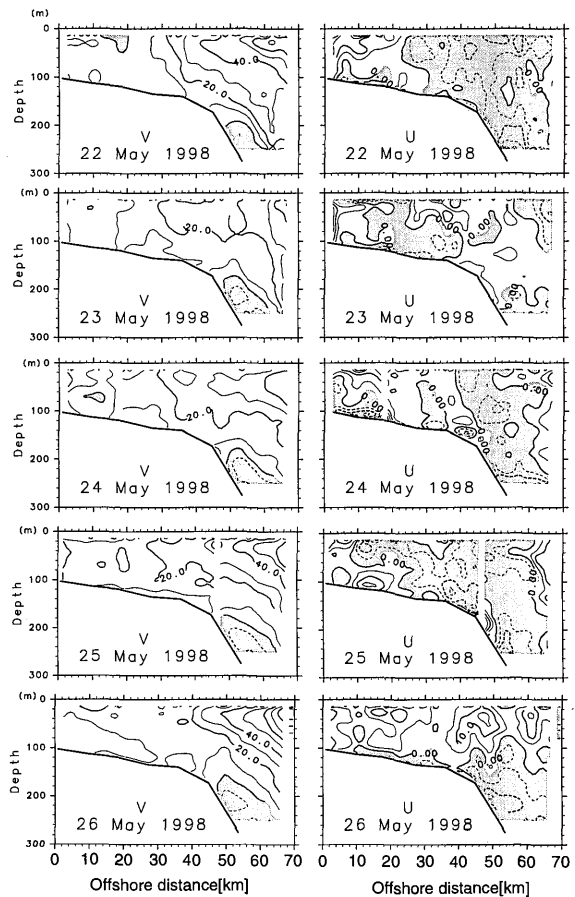
**Fig. 5** Vertical distributions of velocity components of residual currents from 10 to 12 in May 1998. Left and right panels show along-shelf (northeastward) and cross-shelf (southeastward) components, respectively. Contour intervals of left and right panels are 10 and 5cm/s, respectively. Shaded regions in left and panels indicate countercurrent and onshore motion, respectively.

ている。これは今回の観測結果を基に求められた調和定数が、15昼夜以上の連続観測によって得られた調和定数とは異なり、観測時の月齢と月の赤緯によって変化することによるものであると考えられる。

**Fig. 2~4** に示した結果の妥当性を検討するため、最小二乗法の計算における重相関係数を求め、その結果を **Table 2** に示した。ここで  $V_e$ ,  $V_n$  はそれぞれ、流速の東方成分、北方成分を示している。重相関係数は0.72~0.94と比較的高い値となっている。日周潮・半日周潮以外の時間変動成分を一切考慮していないことを考慮すると、この結果は、実測された流速場が(1)式で表されるような日平均流・日周潮流・半日周潮流の和によって十分高い精度で近似出来ていることを示しており、また、このことから潮流成分についても精度良く推定が行われているものと考えられる。

### 5. 考 察

ADCP の生の観測データから、前節で得られた潮流成分を差し引くことによって得られた残差流成分の鉛直分布を、**Fig. 5~7** に示す。横軸は、最も陸棚側の観測点から計った測線に沿う方向の距離を示し、縦軸は水深を示している。また、これらの図中で、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を見た方向の流速成分 ( $V$ ) 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。 $V$  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



**Fig. 6** Vertical distributions of velocity components of residual currents from 22 to 26 in May 1998. Left and right panels show along-shelf (northeastward) and cross-shelf (southeastward) components, respectively. Contour intervals of left and right panels are 10 and 5cm/s, respectively. Shaded regions in left and panels indicate countercurrent and onshore motion, respectively.

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5月10~12日の  $V$  の分布 (**Fig. 5** 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程度の反流域の存在が見取れる。1998年5月22~26日の期間 (**Fig. 6**) にも同様の結果が見取れるが、反流の存在する水深はこれよりも深い水深160~200m以下の部分となっている。このような反流の存在は、水野ら<sup>12)</sup>の他、前出の Kaneko et al.<sup>4)</sup>, Ito et al.<sup>5)</sup>, Sugimoto et al.<sup>6)</sup>でも指摘されているが、これらの結果は陸棚斜面上水深300m以深の深い部分で観測されたものであり、**Fig. 5** に見られるような陸棚極近傍の水深100m程度の浅海部における逆流の観測例は今回が初めてのものである。また **Fig. 5-6** では、 $V$  の最大値は約40~60cm/sであるが、**Fig. 7** においては1m/s程度となっている。このことより、1998

年5月10~12日, 及び1998年5月22日~26日においては, 黒潮の主流部は1999年5月24日~5月28日の期間よりも外洋側に存在していたと考えられる. このような変動は恐らく黒潮の蛇行に起因するものであろう. 次に  $U$  の分布について見てみる. 1998年5月10~12日の期間 (Fig. 5 の右半分), 及び1999年5月24~28日の期間 (Fig. 7 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5月22~26日の期間 (Fig. 6 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. この結果と同時期に観測された水温の観測結果とを比較してみる. Fig. 8 は, Fig. 1 に示した測線 AA' 上で行われた CTD (conductivity-temperature-depth probe) 観測によって得た, 5月22~26日の期間の水深25mにおける水温の  $X-T$  プロットを示している. 横軸は, 最も陸棚側の観測点から計った測線に沿う方向の距離を示し, 縦軸は観測日を示している. ハッチをつけた部分

は水温が23°C以下の部分を示している. 横軸に示した Offshore distance が10~25kmの部分に存在する水深23.5°C以上の比較的高温な箇所を挟んで, 陸棚側に帯状に広がる低温の領域と外洋側にそれと同じぐらいの水温の冷水塊とが存在していることが分かる. これは, 冷水塊と暖水のフィラメントによって構成される Gulf Stream frontal eddy (Lee et al.<sup>13)</sup>) に非常に良く似た構造となっている. 東シナ海において, この 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.<sup>2)</sup>によって観測されているが, Fig. 8 の結果もそれと同種の擾乱を観測したものと思われる. Fig. 9 は, Fig. 8 と同様に測線 AA' 上で行われた CTD 観測によって得た5月22~26日の水温の鉛直断面図を示す.

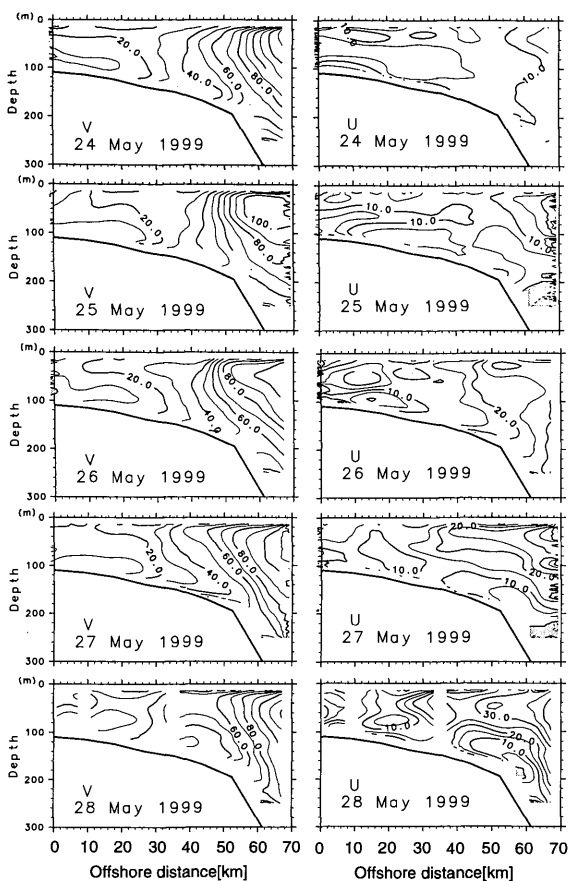


Fig. 7 Vertical distributions of velocity components of residual currents from 24 to 28 in May 1999. Left and right panels show along-shelf (northeastward) and cross-shelf (southeastward) components, respectively. Contour intervals of left and right panels are 10 and 5cm/s, respectively. Shaded regions in left and panels indicate countercurrent and onshore motion, respectively.

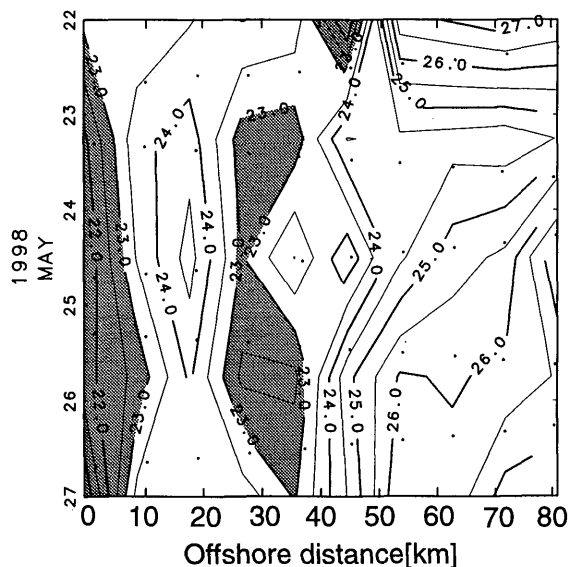


Fig. 8  $X-T$  diagram of water temperature at a depth of 25m from 22 to 26 in May 1998. Shaded region indicates the area where the temperature is lesser than 23 degree celsius.

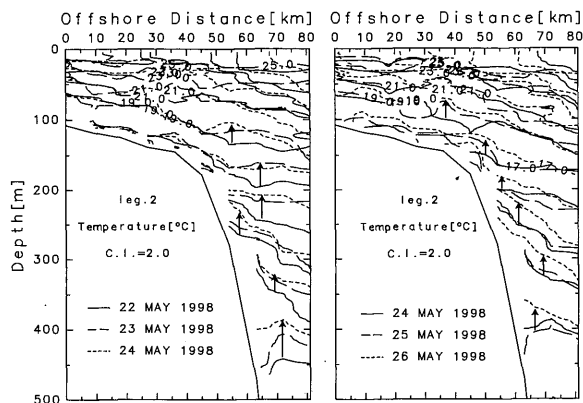


Fig. 9 Vertical distributions of water temperature from 22 to 24 (left panel) and from 24 to 26 (right panel) in May 1998. Arrows upward displacement of isotherms.

図中矢印で示した部分では、等温線が1日あたり20～50m程度上昇しており、このことから5月22～26日の期間には陸棚斜面にそってかなり強い湧昇が発生していることが示唆される。Yanagi et al.<sup>2)</sup>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ているが、今回の観測時においても、Fig. 6 に示すような陸棚向きの流れと Fig. 9 に示唆される湧昇によって、このようなプロセスが発生していたものと考えられる。

## 6. 結 言

陸棚域における ADCP 観測結果に含まれる潮流成分の振幅はかなり大きなものであると考えられるが、今回紹介した方法を用いることによって精度良く潮流成分を推定できることが分かった。東シナ海陸棚域において、黒潮の陸棚域への接近・離岸に伴いその流速構造は大きく変化する。また、今回観測された黒潮前線の変動に伴う陸棚斜面下部に存在する冷水の湧昇のような現象の他にも、陸棚水と外洋水の海水交換に関する物理過程には様々なものが存在すると考えられ、それらを明らかにするためにも今後同様の観測を継続して行い、流速場の詳細なデータを蓄積していく必要がある。

観測に御協力いただいた長崎大学練習船長崎丸・鶴洋丸の乗組員各氏、長崎大学水産学部の学生各氏に深く感謝する。

## 参 考 文 献

- 1) 柳哲雄(1996): 陸棚縁の物質交換に関わる物理素過程。海の研究, **5**, 25-34.
- 2) Yanagi, T., T. Shimizu, H-J, Lie (1998): Detailed structure of the Kuroshio frontal eddy along the shelf edge of the East China Sea. *Cont. Shelf Res.*, **18**, 1039-1056.
- 3) Matsuno, T., and S. Ohsaki (1999): 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*, 64-67.
- 4) Kaneko, A., W. Koterayama, H. Honji, S. Mizuno, K. Kawatate, and R. L. Gordon (1990): Cross-stream survey of the upper 400m of the Kuroshio by an ADCP on a towed fish. *Deep-Sea Res.*, **37**, 875-889.
- 5) Ito, T., A. Kaneko, H. Furukawa, N. Gohda, and W. Koteyama (1995): A structure of the Kuroshio and its related upwelling on the East China Sea Shelf Slope. *J. Oceanogr.*, **51**, 267-278.
- 6) Sugimoto, T., S. Kimura, and K. Miyaji (1988): Meander of the Kuroshio front and current variability in the East China Sea. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **44**, 125-135.
- 7) Bo Qiu, T. Toda, and N. Imasato (1990): On Kuroshio front fluctuations in the East China Sea using satellite and in situ observational data. *J. Geophys. Res.*, **95**, C10, 18191-18204.
- 8) James, C., M. Wimbush, and H. Ichikawa (1999): Kuroshio meanders in the East China Sea. *J. Phys. Oceanogr.*, **29**, 259-272.
- 9) Candela, J., R. C. Beardsley, and R. Limeburner (1992): Separation of tidal and subtidal currents in shi-mounted acoustic Doppler current profiler observations. *J. Geophys. Res.*, **97**, C1, 769-788.
- 10) 磯辺篤彦(1992): ADCP 観測資料からの潮流成分の除去について。水産大学校研究報告, **40**, 59-68.
- 11) Simpson, J. H., E. G. Mitchelson-Jacob, and A. E. Hill (1990): Flow structure in a channel from an acoustic Doppler current profiler, *Cont. Shelf Res.*, **10**, 589-603.
- 12) 水野信二郎, 川建和雄, 長浜智基, 篠崎高茂, 田代昭正, 石橋道芳, 安部哲二, 金子新 (1998): 東シナ海における黒潮の直接測流結果(Ⅱ)—海洋における広域データの計測法に関する開発研究(第6報) —。九州大学応用力学研究所報, **68**, 73-85.
- 13) Lee, T. N., L. P. Atkinson, and R. Legeckis (1981): Observations of a Gulf Stream frontal eddy on the Georgia continental shelf, April 1977. *Deep-Sea Res.*, **28A**, 347-378.