

曳航式ADCPによる黒潮流動場の可視化：海洋における広域データの計測法に関する開発研究：第8報

金子, 新
九州大学応用力学研究所：助教授

小寺山, 亘
九州大学応用力学研究所：教授

本地, 弘之
九州大学応用力学研究所：教授

川建, 和雄
九州大学応用力学研究所：教授

他

<https://doi.org/10.15017/4743887>

出版情報：応用力学研究所所報. 68, pp.101-121, 1989-10. 九州大学応用力学研究所
バージョン：
権利関係：

曳航式 ADCP による黒潮流動場の可視化

— 海洋における広域データの計測法に関する開発研究 (第8報) —

金 子	新*	小寺山	亘†
本 地	弘之†	川 建	和 雄†
光 易	恒†	水 野	信二郎*
橋 本	良 夫‡	蒲 地	政 文§
中 村	昌 彦§	堀	勉§
田 代	昭 正〃	石 橋	道 芳〃
細山田	得 三¶		

概 要

超音波ドップラー流速プロファイラー (ADCP) を固定翼型曳航体 (EIKO) に装備し、これまでに、沖縄西方、四国南方、遠州灘南方の黒潮流動場を可視化することに成功した。異なる場所で得られたこれらの黒潮データを比較することにより、黒潮の流動特性 (断面流速構造や流量など) が周辺の地形や緯度によって変化する様子が明らかとなった。

Key words: Fish-Mounted ADCP, The Kuroshio, Remote Sensing, Flow Visualization

1. 序 論

近年の地球科学の発展にともない、大気・海洋を通した赤道域から極域への熱の輸送過程に占める海洋の役割がこれまで以上に重要視されるようになってきた¹⁾。特に、黒潮やメキシコ湾流で代表される西岸境界流 (western boundary current) の分担する熱量は、海洋の運ぶ熱量の主要部分を占めるためにその実態の解明が強く望まれている。

これまで、西岸境界流の流速構造の計測は、主として以下に述べる方法で行われてきた。

* 九州大学助教授, 応用力学研究所

† 九州大学教授, 応用力学研究所

‡ 九州大学講師, 応用力学研究所

§ 九州大学助手, 応用力学研究所

〃 文部技官, 九州大学応用力学研究所

¶ 九州大学大学院工学研究科 博士課程

- ①CTD により海中密度場を計測し，地衡流方程式を用いて流速場を推算する。
- ②接触型流速計（プロベラ流速計や電磁流速計など）を取り付けた係留線を海中に敷設する。
- ③海中を自由落下もしくは自由に浮上するフロートの位置の変化を音響トランスポンダーで追尾する。
- ④ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)により海流の鉛直プロファイルのリモートセンシングする。

①については，西岸境界流も概ね地衡流平衡 (geostrophic balance) を満たすため有用な手段であるが²⁾，基準層 (reference layer) における流速値を他の方法で求めることが必要となる。最近の研究によれば，西岸境界流の深部には無視できない程度の流れが存在することが知られており³⁾，深層に無流面 (level of no motion) を仮定するこれまでの地衡流計算法は改善を要する。②については，西岸境界流の表層強流域中に係留線を固定することの技術的困難さと，多数の係留線を広域にわたって配置することの経済的負担のため，詳細な断面流速構造を得るための手法としては適さない⁵⁾⁶⁾。③については，自由落下するフロートを船上から吊り下げた音響トランスポンダー⁷⁾または海底に設置したトランスポンダー⁸⁾⁹⁾で追尾する方法と，一定の時間間隔で海底から浮上するフロートを海底に設置したハイドロフォンで追尾する方法¹⁰⁾が知られている。海底にトランスポンダーを設置した方が流速の測定精度は良いが，この方法で海流の断面分布を求めるには，多数のトランスポンダーを海底に設置することが必要となる。また，どちらの方法でもフロートやトランスポンダーを海中に投入，回収する繁雑さが伴う。④については，未だ研究段階にある測器であるが，海流の詳細な鉛直プロファイルのリモートセンシングできる新世代の流速計として近年特に注目されるようになった。西岸境界流の勢力が弱くなる深部に ADCP を係留し，上向きに音波を発射する方式¹¹⁾と，観測船の船底¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾もしくは水中曳航体¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾に ADCP を取り付け移動しながら下向きに音波を発射する方式とがある。後者の方式を用いれば音波の到達深度までの海流の詳細な断面構造を得ることができるが，船底方式よりも曳航方式の方が荒天時にも精度良い観測ができる，色んな観測船に持ち込んで使用できるなどの利点をもつ。

本研究の目的は，応用力学研究所で開発した固定翼型曳航体 (EIKO) に装備した ADCP によってこれまで得られた黒潮の横断計測結果をまとめて示すことにより，黒潮の流速構造や流量などの流動特性を明らかにすることである。

2. 計測海域と計測方法

図1に，黒潮の横断計測が行われた測線位置を示している。このうち沖縄西方の F-line は，長崎海洋気象台が定期的に CTD 観測を行っている測線であり，また過去の海上保安庁水路部の GEK (geoelectric kinematograph) データの統計解析により，東シナ海陸棚斜面に沿って北上する黒潮の流路変動幅は，この海域で最も小さいことが知られている¹⁸⁾。トカラ海峡を抜けて東シナ海から太平洋に出た黒潮は，九州東方，四国南方の陸棚斜面に沿って流れた後，紀伊半島の沖から蛇行路と非蛇行路に大別できる2種類の流路をとることが知られている¹⁹⁾。四国南方の S-line は，黒潮が蛇行する直前の海域にあたり，E-line は，遠州灘に形成された大冷水塊を南から迂回する黒潮を横切る様に決められている。

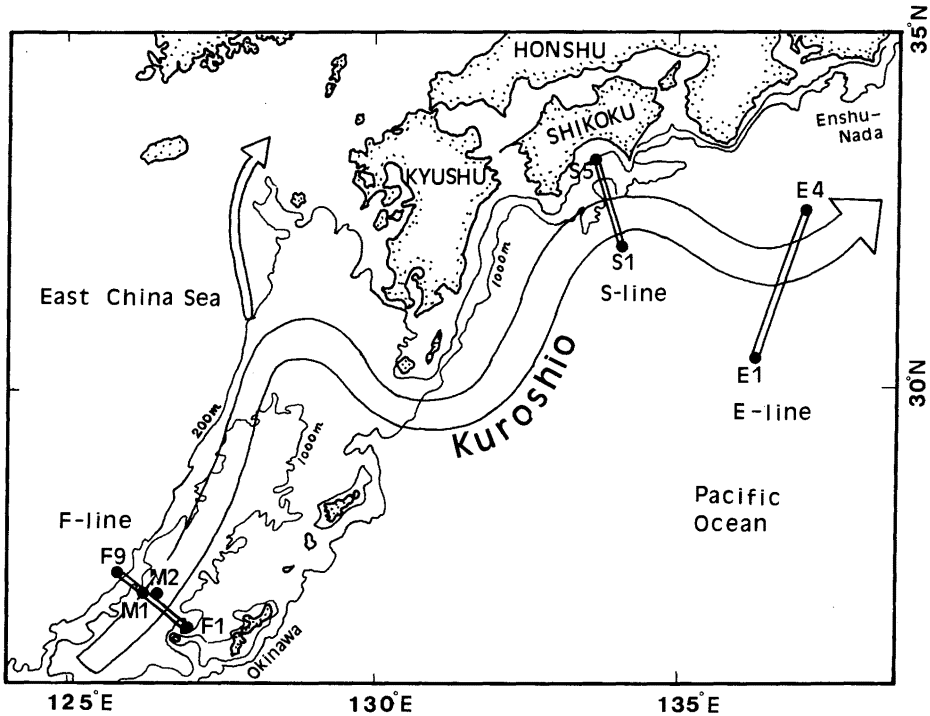


図1 計測海域の等深図と計測位置

F-line 上の計測は、1987年10月29日と30日の両日に、広汽船株式会社所属タグボート「ひろかい」(415 t) を使用して行われ、S-line と E-line 上の計測は、それぞれ1988年4月25日と5月8~9日に東京大学海洋研究所研究船「白鳳丸」(3100 t) を使用して行われた²⁰⁾。海上保安庁水路部発行の海洋速報によれば、前述のいずれの観測においても、黒潮は蛇行路をとっていたことがわかる。表1に、ADCP 観測の日時、条件をまとめて示している。

図2に、曳航式 ADCP システムの模式図を示している。システムの詳細な説明については、文献15)~17)を参照されたい。ADCP の計測条件は、計測精度を考慮して1分間のアンサンブル平均の後、深度間隔8 m で流速プロファイルを得るように設定した。すべての流速データは、時間幅10分、深度幅16 m の矩形フィルターを通すことにより平滑化する。また、黒潮に重なった内部波などの短周期流速変動を分離する場合には、さらに2時間の移動平均操作を施す。ADCP の測定流速は、曳航体に相対的な値として求まるので、海底に対する値に変換するには曳航体速度を別に求めることが必要となる。観測海域の水深が480 m より小さい場合には、ADCP は、海底から反射してくる音波を利用して自動的に曳航体速度を求めることができる。水深が480 m より大きい場合には、観測船上に装備されたロラン-Cにより曳航体速度を推定する。船速の測定精度を向上させるため、1分毎に得られるロラン-C データに30分の移動平均を施した後、30分間隔で平均船速を求める。本システムでは、ADCP 付属のサーミスタによ

表1 ADCP観測の日時・条件

観測場所	沖縄西方	四国南方	遠州灘南方
測線名	F-line	S-line	E-line
観測日時	1987年10月29日 20時51分～30日 9時2分	1988年4月25日 10時19分～18時30分	1988年5月8日 19時19分～9日 13時30分
観測船	広汽船株式会社 「ひろかい」 415 t	東大海洋研 「白鳳丸」 3100 t	東大海洋研 「白鳳丸」 3100 t
測線長	148 km	118 km	245 km
観測始点	Stn. F9	Stn. S1	Stn. E1
観測終点	Stn. F1	Stn. S5	Stn. E4
曳航ロープ長	50 m	60 m	60 m
曳航体没水深度 (推定)	8 m	6 m	6 m

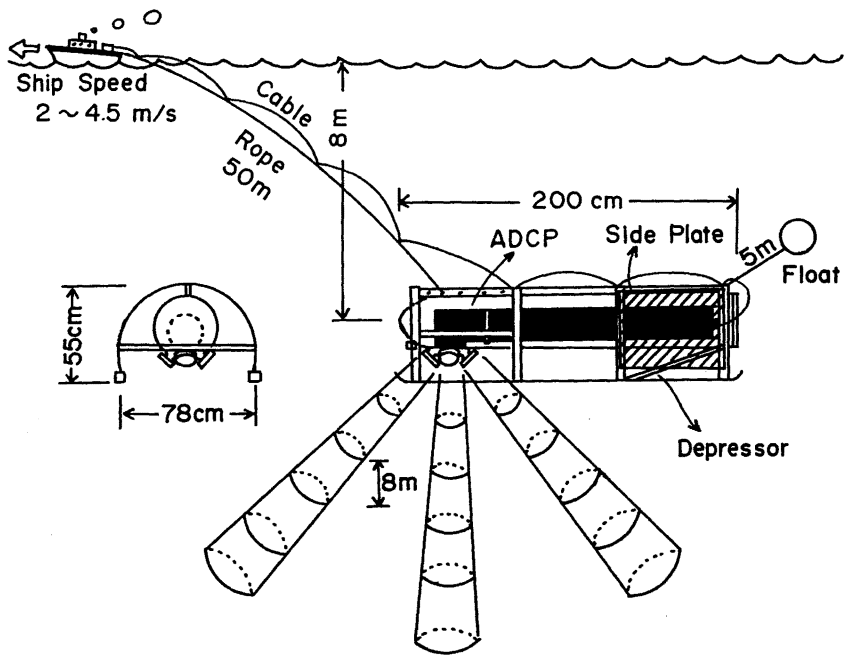


図2 曳航式 ADCP システムの模式図

り曳航体の没水深度の水温も同時に計測することができる。F-line 上では、Stn. F1 から F7 までの各点で CTD 計測を行った。Stn. M1 と M2 には係留式流速計を敷設した。本研究では、係留式流速計データは、ADCP データとの比較と計測海域の潮流・深層流を評価するためにのみ使用する。係留システムの詳細については、文献 21) を参照されたい。S-line 上では、Stn. S1 から S5 までの各点で XBT 計

測を, Stn. S3 のすぐ近くで CTD 計測を行った。表 2 に, 各測点の位置をまとめて示している。ここに, F-line 上の Stn. B は, ADCP 計測において海底からの音波の反射を利用できる限界位置 (水深 480 m) として定義されている。

3. 観測結果と考察

3.1 沖縄西方 (F-line)

3.1.1 計測条件と精度

図 3 に, 流速データの得られた計測点の断面内の位置を示している。Stn. F9 から B までは, 海底近くにデータが得られなかった層が存在するが, これは ADCP の測定原理上の制約からくるものである。Stn. B から F1 までの間にもデータの欠測している箇所があるが, これは RS-422 serial link にノイズが混入したために発生したものである。この欠測箇所のデータは, 周囲データの線形補間によりつくられる。図 3 には, 係留式流速計が敷設されたおおよその位置を M1, M2 として示している。図 4 に, 観測期間の曳航体の航跡, 船速, 船首, ロール角, ピッチ角の変化を示している。航跡は, ロラン-C により求めたものであるが, 観測期間中, 2 時間程度の欠測部分が存在する。この欠測区間の船位は, 区間前後のデータの線形補間により求められる。Stn. F9 と B の間で, 船速と船首が他の区間における値より大きく変動しているが, これは, 陸棚周辺の流れが潮流や地形効果のため複雑となり, 観測船の安定な航走が困難であったことによる。表 3 に, 観測期間中の曳航体の走行特性を平均値と標準偏差に分け

表 2 観測点の位置

	N	E
Stn. F1	26°39.6′	126°58.6′
2	45.4	49.9
3	51.2	41.1
4	57.0	32.3
5	27° 2.8	23.5
6	8.7	14.7
7	14.5	6.0
8	20.3	125°57.2
9	26.1	48.4
B	27°17.1	126° 2.0
M1	27°13	126° 7
M2	10	28
Stn. S1	31°57.3	134° 5.6
2	32°16.9	0.3
3	36.2	133°53.6
4	55.6	46.5
5	33°10.8	42.2
Stn. E1	30°25.0	136°18.2
2	31° 6.9	34.5
3	41.8	48.1
4	32°30.0	137° 6.9

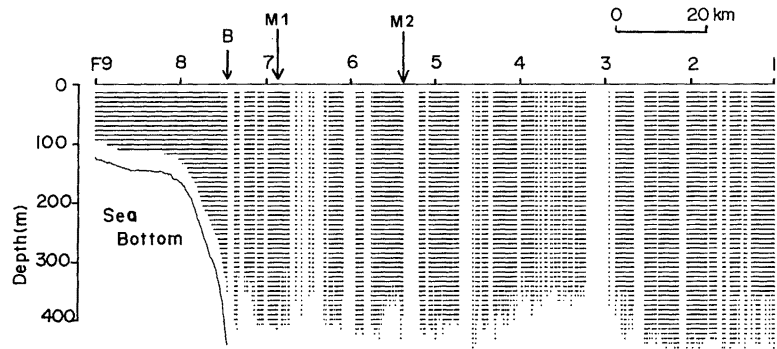


図3 流速データを得た計測点位置 (F-line).
M1とM2は、係留線のおおよその敷設位置を示す。

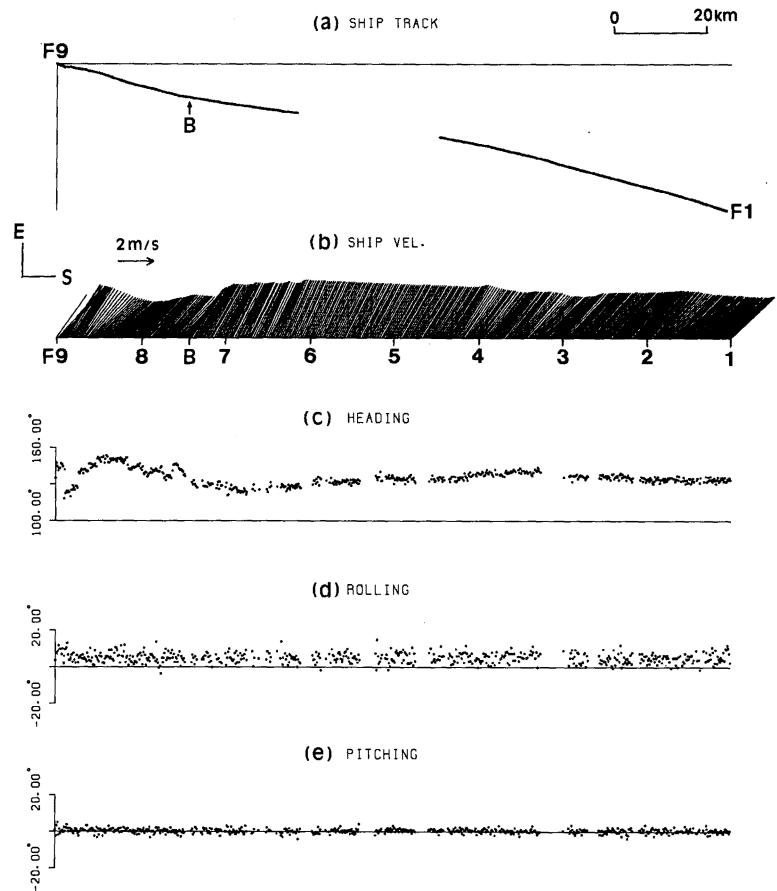


図4 曳航体の走行特性 (F-line)
(a) 航跡 (b) 船速 (c) 船首
(d) ロール角 (e) ピッチ角

表3 曳航体の走行特性 (F-line)

走行特性	平均値	標準偏差
Fish Speed (cm/s)	321.6 ±	11.3
Fish Heading (°)	131.6 ±	5.1
Roll Angle (°)	5.1 ±	2.7
Pitch Angle (°)	0.3 ±	1.3

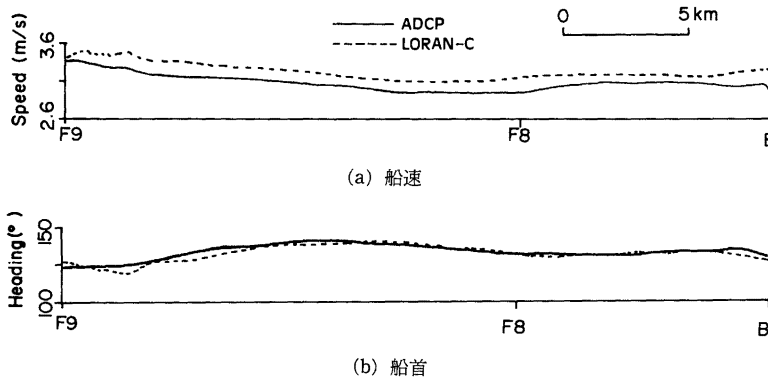


図5 ADCP と LORAN-C で求めた曳航体速度の比較 (Stn. F9~B)

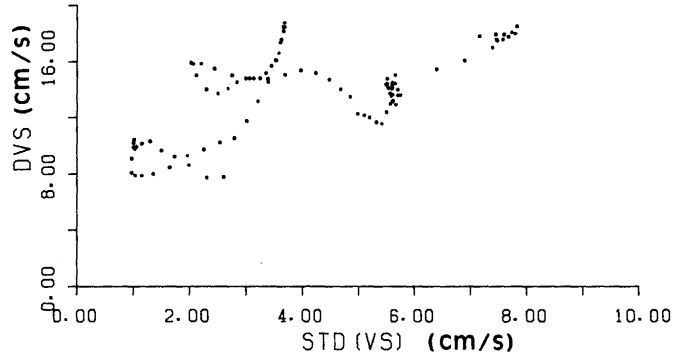
て示している。Stn. F9 と Bの間では、ADCP とロラン-Cの双方より曳航体速度が求まっているので、図5に両者を比較して示している。船首は両者でほとんど差はないものの、速度はロラン-Cで求めたものがADCPで求めたものより平均で13.8 cm/s大きい。ロラン-Cによる平均船速は30分毎に求めているので、30分の間で曳航体の走行特性が大幅に変化すると船速の推定精度が悪化することが予想される。ここで、ロラン-CとADCPで求めた船速の差を

$$DVS = VS(LORAN) - VS(ADCP)$$

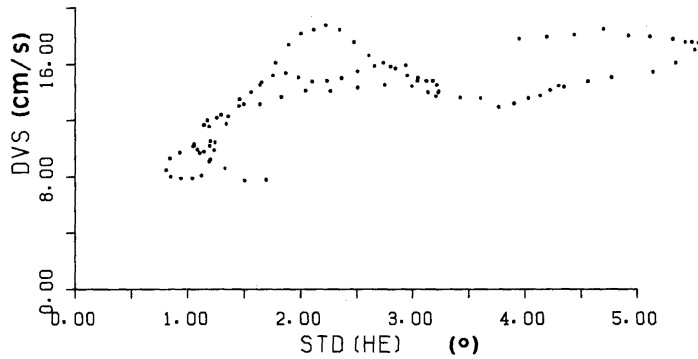
と定義する。図6に、Stn. F9 と Bの間で得られたDVSを、30分間の船速および船首変動の標準偏差STD (VS) およびSTD (HE) に対してプロットしている。データはかなりバラついているが、DVSがSTD (VS) とSTD (HE) の双方に比例する傾向が認められる。一方、観測船の走行状態が良くなったStn. B と F1の間で、30分毎に求めたSTD (VS) とSTD (HE) の平均値を求めれば、それぞれ1.1 cm/s および0.8°となる。このことから、Stn. B と F1の間で大幅に計測精度が改善されたことがわかる。STD (VS), STD (HE) が十分に小さい場合にも8 cm/s程度の船速差 (DVS) が存在するが、この原因については未だ良くわからない。ロラン-Cよりも船位の測定精度に勝るGPS (Global Positioning System) を使用すれば、この点は改善されるものと考えられる。

3.1.2 断面構造

図7に、時間幅10分(水平距離1.9 kmに相当)、深度幅16 mの矩形フィルターを通した後の流速デー



(a) 30 分間の船速変動の標準偏差 STD (VS) に対するプロット



(b) 30 分間の船首変動の標準偏差 STD (HE) に対するプロット

図 6 ADCP と LORAN-C によって求めた曳航体速度の差 DVS (Stn. F9 ~B).

タに対するスティック図を示す。同図の上部には、ADCP 付属のサーミスタによって求めた曳航体の没水深度 (8 m) における水温の水平プロファイルも同時に示している。Stn. F9 から B まで一様であった水温は、Stn. B から F2 まで連続的に増加し、Stn. F2 から F1 までは逆に減少する。黒潮の主流部は Stn. B と F2 の間に存在し、Stn. F2 と F1 の間には流向が黒潮と逆になる反流 (countercurrent) が存在するなど、流速と水温の水平分布とは良く対応している。Stn. F9 と B の間では、流速・水温とも水平方向にほとんど一様であるが、流速には大きな鉛直勾配が存在する。図 8 に、係留式流速計により得られたデータと、ほぼ同時刻に同一場所で得られた ADCP データとを比較して示している。M2 点の最上層のデータに 20 cm/s を越える差異が存在するが、他の 2 点 (M1 点の最上層と M2 点の第 2 層) のデータは両者で良く一致している。M1 点では、600 m 深度の流速は 9 cm/s で、それ以深にはほとんど流れは存在しないが、M2 点では 900 m 深度にも 10 cm/s 程度の流速が依然と存在する。図 9 に、F-line に直交する流速成分に対する等流速線 (isotach) 図を示す。全般的に、流速分布は非常に複雑なものとなっているが、最大流速 112 cm/s の黒潮中心 (Kuroshio center) は、Stn. F6 の近くの水面下 90 m 位置に

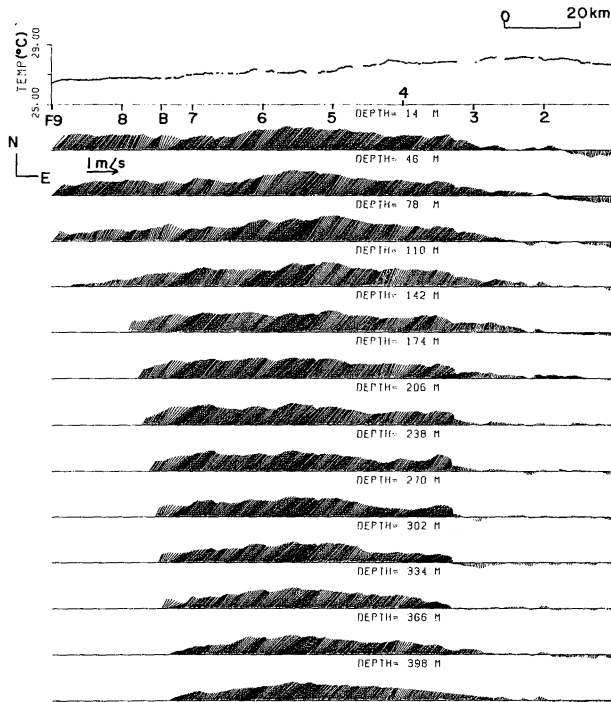
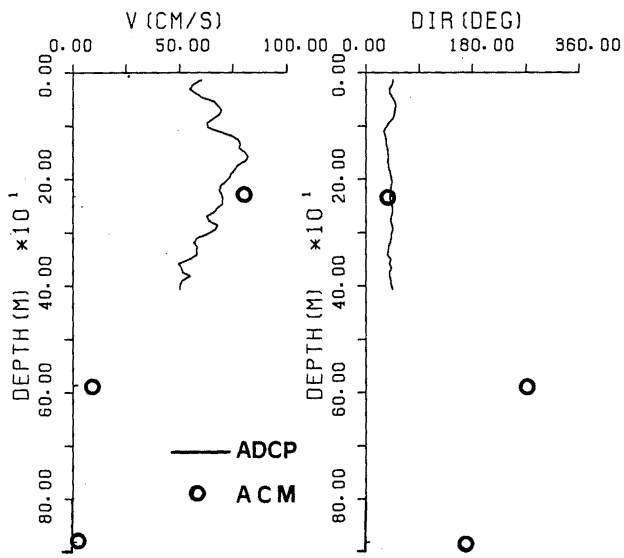


図 7 10分×16mの矩形フィルターを通した後の流速データに対するスティック図(F-line)。最上部に、サーミスタで得られた8m深度の水温度分布を示す。

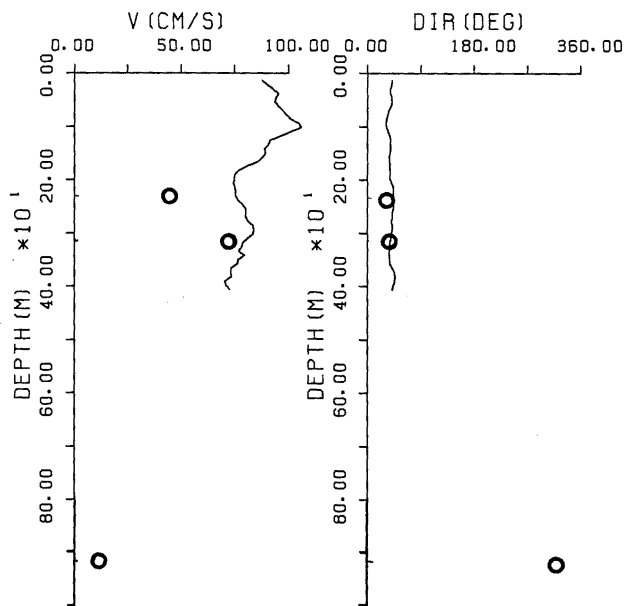
あること、Stn. F7の200m深度には80 cm/sを越える高流速のコアが陸棚斜面に向って侵入しているなどの特徴が認められる。黒潮中心の下方では、400m深度でも80 cm/sの流速が依然存在する。この位置での流速の鉛直勾配を見積れば $9 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ となる。なお、測定断面内の流速分布をカラー表示したものを付録に示す。図10(a)に、CTDによって求めた σ_t の等密度線(isopycnal)分布を示している。等密度線は、全般的には黒潮に対応した右下りの分布を示すが、2,3の大きな起伏も存在する。Stn. F6の200m以浅に存在する盛り上がりや、Stn. F2とF1の間で右上りになっていることなどである。図10(b)に、14m深度のADCPデータを基準にとって求めた地衡流分布を示している。黒潮中心のような細かい特徴は図10(b)で再現されていないものの、Stn. F7の200m深度にある高流速のコアやStn. F2とF1の間の反流域などの大きな特徴は良く再現されている。

3.1.3 流 量

表4に、Stn. M1とM2の係留式流速計で得られた潮流楕円(tidal ellipse)の長軸の半径を主要4分潮に対して示している。表より、黒潮主流部のADCPデータには最大で $\pm 10 \text{ cm/s}$ 程度の潮流成分が含まれる可能性があるが、各分潮の位相が異なるため、実際の潮流の影響はそれより小さくなる。F-lineの



a



b

図8 ADCP データと ACM データの比較 (F-line).
(a) Stn. M1 (b) Stn. M2

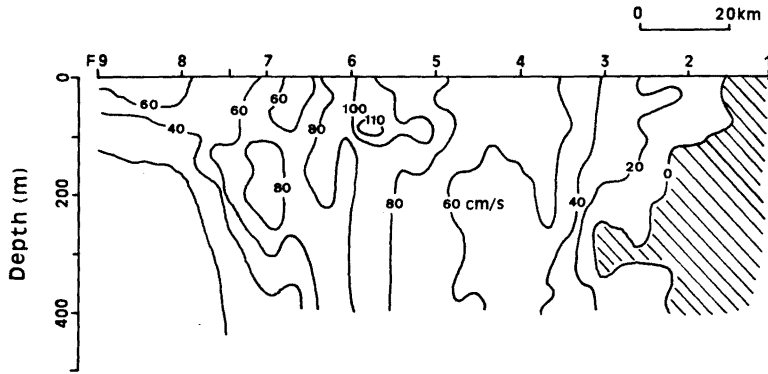
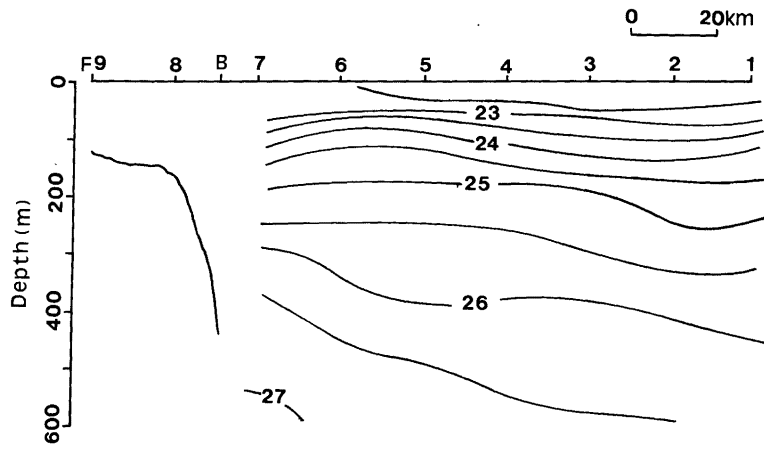
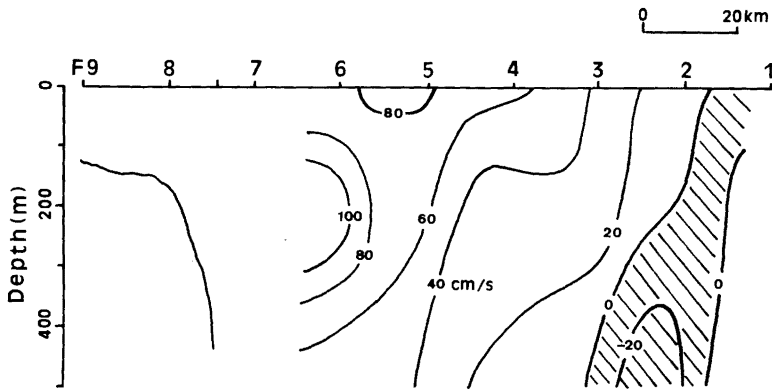


図9 2時間の移動平均操作を施すことにより求めた計測線に直交する流速成分に対する等流速線図 (F-line)。反流域を斜線部で示している。



(a) σ_t の等値線図



(b) 地衡流の等流速線図。反流域を斜線部で示している。

図10 CTD データの解析結果 (F-line)

表4 係留式流速計によって得られた定常流と潮流楕円の長軸半径

測点	深度(m)	定常流		潮流楕円の長軸半径(cm/s)				
		流速(cm/s)	流向(°)	S2	M2	K1	O1	計
M1	240	61.8	37.1	1.26	4.99	2.83	2.48	11.56
	590	2.8	26.5	1.29	1.12	4.74	2.51	9.66
	890	3.1	260.0	1.74	3.32	3.17	2.21	10.44
M2	240	61.1	36.5	1.13	4.15	1.58	0.95	7.81
	320	63.3	36.3	0.92	2.42	3.12	2.41	8.87
	920	6.3	38.6	1.61	4.65	5.03	1.98	13.27

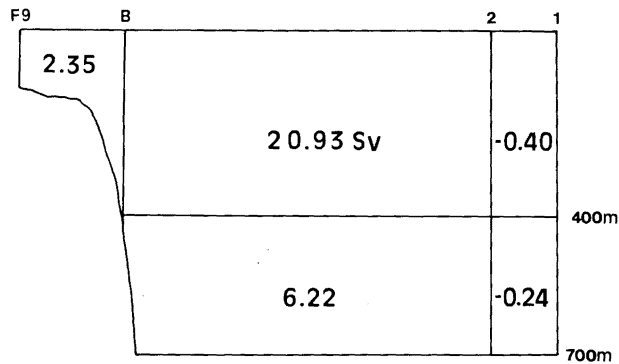


図11 ADCP データをもとに推算した流量値 (F-line)

横断計測には約12時間を要したため、流量の算定においては半日周潮成分は概ねキャンセルすると考えてよい。表4には、定常流成分も同時に示しているが、M2点の920m深度には、黒潮とほぼ同じ方向の6.3cm/sの深層流が存在することがわかる。図11に、ADCPにより求めた各測定断面を通過する流量値を示している。ここで、400mから700m層までの流量は、700mを無流面として線形補間法を適用することにより求めた。市川ら²²⁾は、F-lineの近くで、係留式流速計により潮流を観測し、陸棚上の強勢な潮流が陸棚斜面上で水深の増加につれ急減することを報告している。潮流の影響が小さく反流の存在しないStn. BとF2の間の流量を黒潮流量の目安とすれば27.1Sv (1Sv=10⁶m³/s)を得る。

藤原²³⁾は、長崎海洋気象台がF-lineの近くのPN-lineで1972年から1980年まで季節毎に観測したCTDデータを用いて、700dbを無流面とする地衡流計算により黒潮流量を求めた。その結果によれば、黒潮流量は平均値として、表5に示すように春に最大となり秋に最小となるような弱い季節変化を示す。表5には、ADCPで求めた黒潮流量も示しているが、地衡流計算で得られた値より4割近く大きくなっている。700dbに無流面をとる地衡流計算の問題点としては、当海域では、表4で議論したように900m深度でも無視できない流れが存在することが第1に指摘できる。また、杉本ら²⁴⁾が指摘したように、当海域の黒潮が頻りに蛇行することが、地衡流平衡に影響しているのかもしれない。なお、Takematsu et al.⁵⁾は、トカラ海峡の太平洋側出口の黒潮流量を直接測流結果をもとに推定し、約25Svの値を得てい

表5 沖縄西方 (F-line, PN-line) における黒潮流量の推定値

ADCP 1987年10月 (F-line)	藤原 1972年~1980年(PN-line)			
	春	夏	秋	冬
27.1 Sv	24.5	23.9	19.8	22.4

表6 曳航体の走行特性 (S-line)

走行特性	平均値	標準偏差
Fish Speed (cm/s)	400.6 ±	10.1
Fish Heading (°)	344.6 ±	3.0
Roll Angle (°)	-3.1 ±	2.7
Pitch Angle (°)	-7.0 ±	2.7
STD (VS) (cm/s)	2.5 ±	1.5
STD (HE) (°)	1.0 ±	0.9

ることを参考のために記す。

3.2 四国南方 (S-line)

表6に、S-lineの計測中に得られた曳航体の走行特性を示す。ピッチ角、ロール角とも変動幅は小さく走行状態は良好であったことがわかる。観測期間中の曳航体速度の標準偏差が10.1 cm/sと多少大きくなっているが、STD (VS) でみると平均値で2.5 cm/sとなり特に問題はない。図12に、10分×16mの矩形フィルターを通した後の流速データに対するスティック図を示している。同図の上部には、サーミスタによって求めた6m深度の水温の水平分布も同時に示している。Stn. S1からS4の近くまでほぼ一様であった水温は、Stn. S4の近くで急減しておりこの位置に水温フロントが存在することがわかる。Stn. S2とS3の間で最大流速をもつ黒潮は、水温フロントの近くで消滅し、フロントの近くでは代りに短周期流速変動が卓越する。これは、黒潮により陸棚斜面上のフロントに誘起された内部長波と考えられるが、詳しくは文献25)を参照されたい。図13に、2時間の移動平均操作を施すことにより内部長波を除去した後の計測線に直交する流速成分に対する等流速線図を示している。最大流速121 cm/sの黒潮中心は、Stn. S2とS3の中間の60m深度に存在する。黒潮中心から、フロントの海面位置までの水平距離は約40 kmである。黒潮中心と各深度における最大流速点を結ぶことにより得られる黒潮軸(Kuroshio axis)の深度は、約1/70の勾配で右側(四国からみて沖側)に向って大きくなっている。フロント近くの等流速線も黒潮軸と平行して傾斜していることがわかる。黒潮中心の左側(陸側)と右側(沖側)の流速の水平勾配は、それぞれ $2.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ と $1.4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ となり、左側の方が右側より2倍程度大きい。フロントの左側の200m以深には、深くなるにつれ強化される黒潮逆流が存在する。S-lineは、黒潮流路を完全に横断できていないので黒潮流量を求めることはできないが、参考のために、100 cm/sを越える流速値をもつ測定断面を通過する流量および全測定断面を通過する流量を求めれば、それぞれ6.4 Svおよび25 Svとなる。表7に、S-lineで得られた黒潮の特性値をまとめて示す。

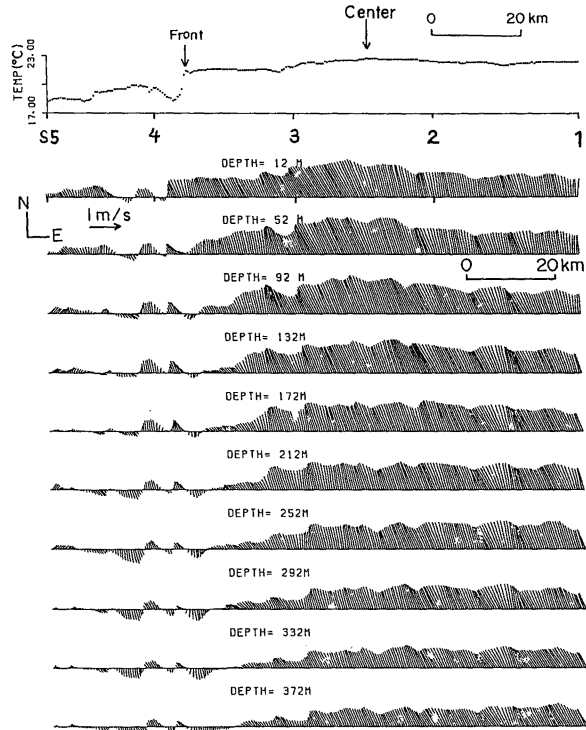


図 12 10分×16mの矩形フィルターを通した後の流速データに対するスティック図(S-line)。最上部に、サーミスタで得られた6m深度の水温度分布を示す。

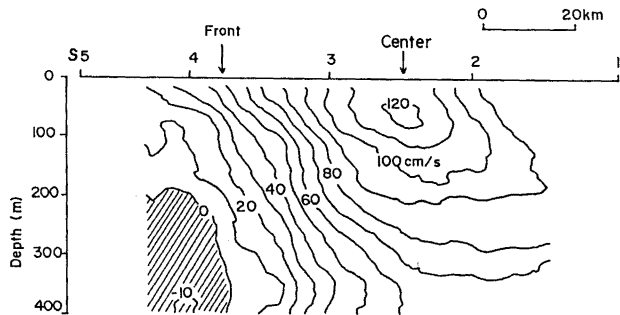
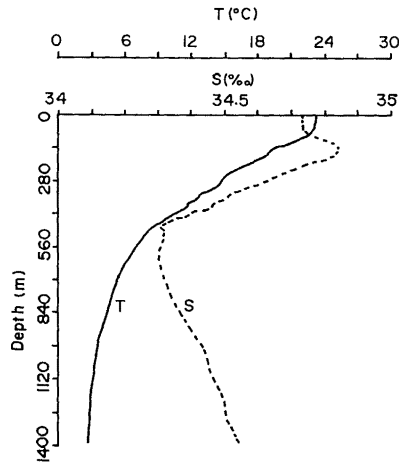


図 13 2時間の移動平均操作を施すことにより求めた計測線に直交する流速成分に対する等流速線図(S-line)。反流域を斜線部で示している。

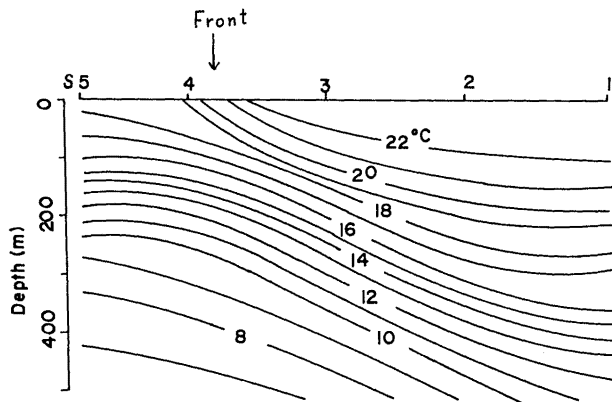
図 14(a)に, Stn. S3のすぐ近くで得られた水温と塩分の鉛直プロファイルを示す。海面から100m深度までは水温・塩分とも一様で海面混合層 (surface-mixed layer) が形成されていることがわかる。100mから500m深度までは水温・塩分とも同様に低下し, 黒潮主流部がこの層を流れていることを伺わせ

表 7 黒潮中心周辺の黒潮特性値 (S-line)

黒潮中心		水平流速勾配		鉛直流速勾配 (s^{-1})	流 量	
流速 (cm/s)	深度 (m)	陸側 (s^{-1})	沖側 (s^{-1})		100cm/sを越 える断面(SV)	全測定断面 (SV)
121	60	2.3×10^{-5}	1.4×10^{-5}	2.0×10^{-3}	6.4	25



(a) Stn. S3 の近くで得られた CTD 結果



(b) 等水温線図 (XBT 結果)

図 14 水温・塩分の測定結果 (S-line).

る。500 m 以深では、水温は深さと共に減少するのに対して塩分は逆に増加しており、黒潮水と異なる水塊の存在を示唆する。図 14(b)に、XBT により求めた測定断面内の等温線 (isothermal) 図を示す。20 から 22°C までの等温線は、Stn. S4 の近くで海面に露出しており、XBT 結果からも水温フロントの存在を確認できる。また、20 から 22°C までの等温線が下に凸の曲線を描いているのに対し、他の等温線は上

に凸となっており注目される。全般的には、すべての等温線は黒潮に対応して右下りとなっている。CTD結果を用い、等温線上で塩分が一定となることを仮定して測定断面内の密度を求める。そして、深度12 mの ADCP 結果を基準値として地衡流計算を行えば、図15に示すような結果となる。図13と比較する時、流速分布の全体特徴は図15で良く再現されているが、黒潮中心の位置や反流域の深度などに細かな相異点が認められる。

この海域の黒潮軸が沖側に傾斜していることは、地衡流解析の結果をもとにして Masuzawa and Nakai²⁶⁾によっても指摘されている。今脇²⁷⁾は、地衡流解析の結果より、四国南方の陸棚斜面上に黒潮反流が存在することを報告した。Fukasawa et al.⁴⁾は、近くの四国海盆北縁の深層流の測流結果から5~10 cm/s程度の西向流の存在を報告した。Fukasawa et al.の指摘するように、この西向流は、陸棚斜面上で黒潮反流と接続しながら反時計回りの循環流を形成しているのかもしれない。

3.3 遠州灘南方 (E-line)

表8に、E-lineを計測中に得られた曳航体の走行特性を示す。計測期間を通し曳航体の速度変動がかなり大きかったが、30分間の変動STD (VS)とSTD (HE)の平均値でみれば特に大きいわけではなく、計測精度上の問題はない。図16に、10分×16mの矩形フィルターを通した後の流速データに対するス

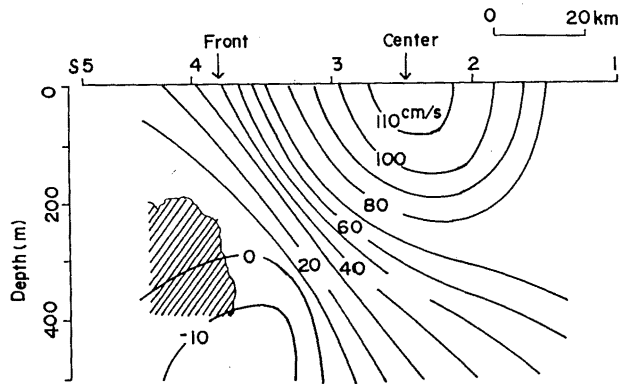


図15 地衡流計算により求めた等流速線図(S-line)、ADCPにより求めた反流域を比較のために斜線部で示している。

表8 曳航体の走行特性 (E-line)

走行特性	平均値	標準偏差
Fish Speed (cm)	374.5 ±	40.6
Fish Heading (°)	18.3 ±	2.1
Roll Angle (°)	-5.8 ±	4.2
Pitch Angle (°)	-3.7 ±	3.4
STD (VS) (cm/s)	3.9 ±	3.0
STD (HE) (°)	0.5 ±	0.4

るスティック図を示している。同図の上部には、ADCP 付属のサーミスタによって求めた深度 6 m の水温の水平分布を示している。Stn. E4 から E3 まで一様に増加した後、水温は Stn. E3 を境に急減し、Stn. E2 で急増するといった複雑な変化を示す。この水温変化に対応した傾向は、流速にも認められる。即ち、Stn. E4 から E3 までは黒潮の主流部に対応し、Stn. E3 と E2 では、これらの測点を境に海面近くの流速

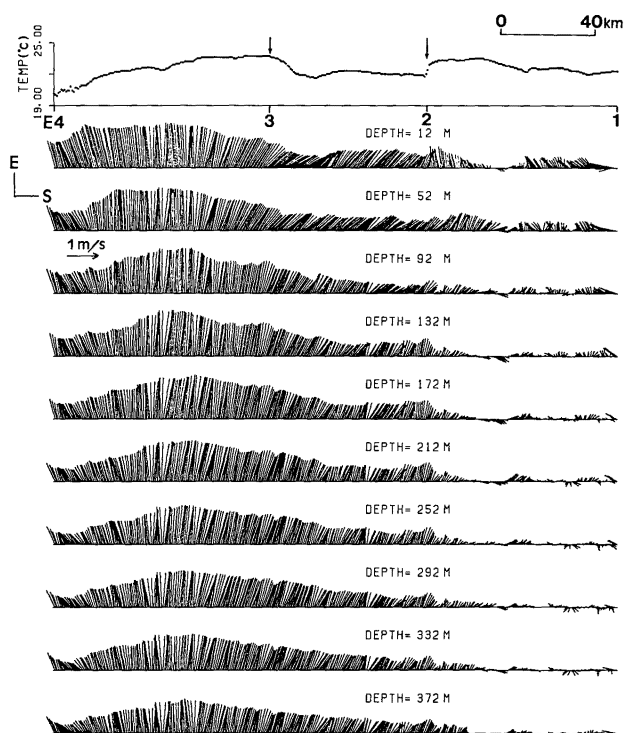


図 16 10 分×16 m の矩形フィルターを通した後の流速データに対するスティック図(E-line)。最上部に、サーミスタで得られた 6 m 深度の水温分布を示す。

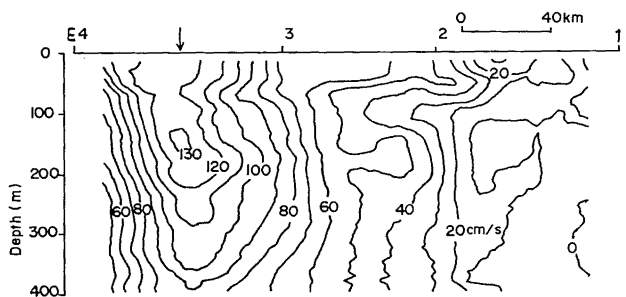


図 17 2 時間の移動平均操作を施すことにより求めた計測線に直交する流速成分に対する等流速線図 (E-line)。

表9 黒潮中心周辺の黒潮特性値 (E-line)

黒潮中心		水平流速勾配		鉛直流速勾配 (s^{-1})	流 量		
流速 (cm/s)	深度 (m)	陸側 (s^{-1})	沖側 (s^{-1})		100cm/sを越 える断面(SV)	400m以浅 (SV)	800m以浅 (SV)
132	150	2.0×10^{-5}	1.2×10^{-5}	1.8×10^{-3}	18.8	53	74

が急変している。特に、Stn. E2 と E1 の間では、全測定深度にわたって流速は非常に弱くなっている。黒潮の主流部の流速の水平分布は、最大流速点の左側(陸側)が右側(沖側)より勾配が急な非対称ジェット流のような分布をしている。図 17 に、2 時間の移動平均操作により短周期変動を除去した後の、計測線に直交する流速成分に対する等流速線図を示している。最大流速 132 cm/s の黒潮中心は、Stn. E4 と E3 の間の海面下 150 m 位置にあることがわかる。黒潮軸の右下りの傾斜は約 1/20 で、S-line に対する値よりかなり大きく鉛直に近い。黒潮中心のまわりの流速勾配は、S-line の場合と比べて大差はないが、黒潮中心の流速と深度が大きくなっていることがわかる。Stn. E3 と E1 の間では、等流速の水塊が水平方向に貫入したような複雑な流速分布となっている。100 cm/s を越える流速値をもつ断面を通過する流量を求めれば、18.8 SV となる。400 m 深度までの流速値を測定断面内で積分することにより流量を求めれば 53 SV となる。800 m 深度を無流面として、400 m から 800 m 深度層の流速を線形内そう法 (linear interpolation method) を適用して 800 m 深度までの流量を求めれば 74 SV となる。この流量値は、冷水渦を構成する流量を含むかもしれないが、概ね黒潮流量を示すものと考えられる。表 9 に、これらの黒潮特性値をまとめて示している。

黒潮が、四国南方から遠州灘南方へと東進するにつれ発達することは、Taft²⁸⁾ が、海上保安庁水路部および気象庁が収集した GEK および CTD データにもとづいて指摘している。また、Taft によれば、E-line の周辺海域を通過する黒潮の平均流量は約 50 SV となる。佐伯²⁹⁾ は、気象庁の 1954 年から 1984 年の間の CTD データを使用して、E-line の近くの 137°E 線を通過する黒潮流量を 1000 db を無流面にとって推算した。その結果、大蛇行期と非蛇行期の平均流量として、それぞれ 44.7 SV および 52.1 SV を得た。F-line の場合と同様に、ADCP で求めた黒潮流量は、これまでの地衡流計算で求めた値より 4 割程度大きくなっていることがわかる。参考のために、S-line とほぼ同緯度の Cape Hatteras 沖のメキシコ湾流の流量が約 90 SV と見積られていることを記す³⁰⁾。

4. 結 論

本研究の結果、曳航式 ADCP により、400 m 深度までの黒潮の詳細な断面流速構造を計測できることがわかった。ADCP で求めた断面流速構造は、海面近くの ADCP データを基準として求めた地衡流計算の結果とも概ね一致し、黒潮は地衡流平衡を近似的に満たしていることがわかった。しかしながら、ADCP によって推算された黒潮流量は、黒潮深部に無流面を仮定する地衡流計算の結果に比べて 4 割程度大きくなった。このような差異を生じた第 1 の原因として、順圧流 (または、深層流) の存在のため無流面の仮定が破綻していることが考えられる。吹送流の影響を受けない深度 (200~300 m) の ADCP

データと深層に達する CTD データを組み合わせた、新しい黒潮流量推定法を提案する。

謝 辞

白鳳丸 KH-88-2 次研究航海 (OMLET 航海) におきまして、S-line および E-line 上の ADCP 計測のために種々の便宜を提供して下さいました東京大学海洋研究所浅井富雄教授並びに東北大学理学部鳥羽良明教授に心からお礼申し上げます。実海域実験を直接御支援下さいました東京大学海洋研究所研究船「白鳳丸」および広汽船株式会社所属タグボート「ひろかい」の船長ならびに乗組員の皆様に深く感謝致します。沖縄西方の F-line の計測で、技術的な面での御支援を頂いた本研究所長浜智基助手および篠崎高茂技官にお礼申し上げます。本研究は、文部省特別事業「海洋における広域データの計測法に関する開発研究」において得られた成果であることを記し、合わせて関係者各位に謝意を表します。データ解析は、本研究所汎用計算機 FACOM M760/8 を使用して行われたことを付記する。

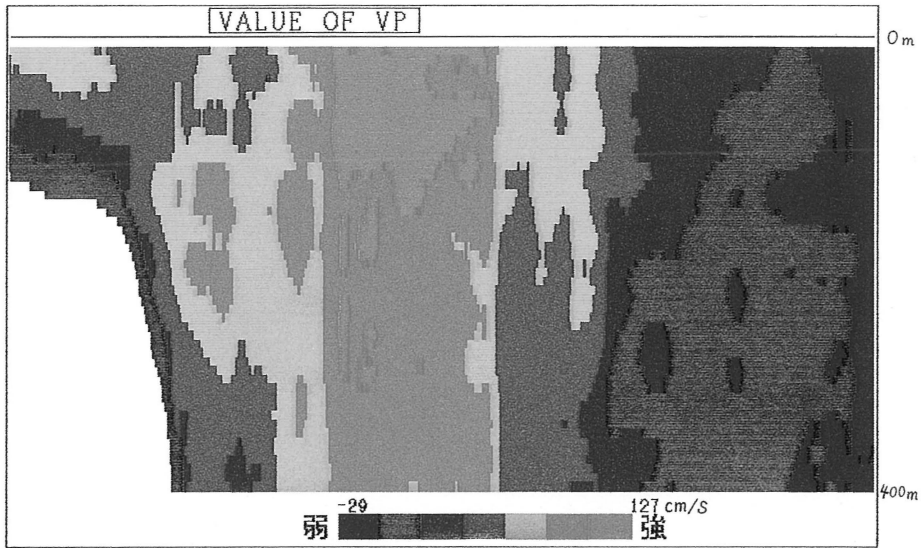
参 考 文 献

- 1) Woods, J. D.: The World Ocean Circulation Experiment, *Nature* **314** (1985) 501-511.
- 2) Johns, E., D. R. Watts and H. T. Rossby: A Test of Geostrophy in the Gulf Stream, *J. Geophys. Res.* **94** (1989) 3211-3222.
- 3) Fofonoff, N. P.: The Gulf Stream System, In: *Evol. Phys. Oceanogr.*, B. R. Warren and C. Wunsch, eds. (MIT Press, Cambridge, 1981) 112-139.
- 4) Fukasawa, M., T. Teramoto and K. Taira: Abyssal Current along the Northern Periphery of Shikoku Basin, *J. Oceanogr. Soc. Jpn.* **43** (1987) 459-472.
- 5) Takematsu, M., K. Kawatate, W. Koterayama, T. Suhara and H. Mitsuyasu: Moored Instrument Observations in the Kuroshio South of Kyushu, *J. Oceanogr. Soc. Jpn.* **42** (1986) 201-211.
- 6) Schott, F. A., T. N. Lee and R. Zantopp: Variability of Structure and Transport of the Florida Current in the Period Range of Days to Seasonal, *J. Phys. Oceanogr.* **18** (1988) 1209-1230.
- 7) Richardson, W. S., W. J. Schmitz and P. P. Niiler: The Velocity Structure of the Florida Current from the Straits of Florida to Cape Fear, *Deep-Sea Res.* **16** (1969) 225-234.
- 8) Spain, P. F., D. L. Dorson and H. T. Rossby: PEGASUS: A Simple, Acoustically Tracked, Velocity Profiler, *Deep-Sea Res.* **28** (1981) 1553-1567.
- 9) Leaman, K. D., E. Johns and H. T. Rossby: The Average Distribution of Volume Transport and Potential Vorticity with Temperature at Three Sections across the Gulf Stream, *J. Phys. Oceanogr.* **19** (1989) 36-51.
- 10) Voorhis, A. and A. M. Bradley: POPUP: A Prototype Bottom-Moored Long-Term Current Profiler, *Atmospheric and Oceanic Technology* **1** (1984) 166-175.
- 11) Schott, F.: Medium-Range Vertical Acoustic Doppler Current Profiling from Submerged Buoys, *Deep-Sea Res.* **33** (1986) 1279-1292.
- 12) Joyce, T. M., D. S. Bitterman, JR. and K. E. Prada: Shipboard Acoustic Profiling of Upper Ocean Currents, *Deep-Sea Res.* **29** (1982) 903-913.

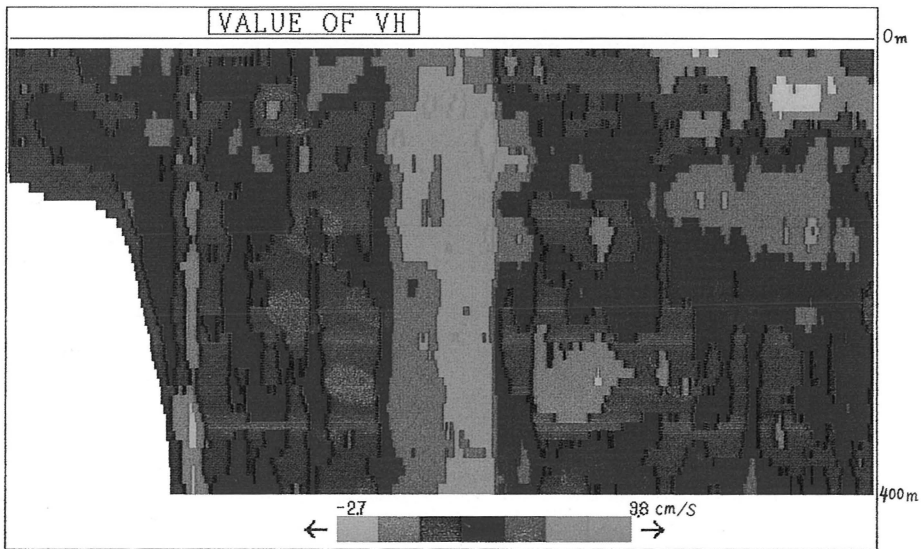
- 13) Regier, L.: Mesoscale Current Fields Observed with a Shipboard Profiling Acoustic Current Meter, *J. Phys. Oceanogr.* **12** (1982) 880-886.
- 14) Crocker, T. R.: Near-Surface Doppler Sonar Measurements in the Indian Ocean, *Deep-Sea Res.* **30** (1983) 449-467.
- 15) Kaneko, A. and W. Koterayama: ADCP Measurements from a Towed Fish, *EOS Transaction AGU.* **69** (1988) 643-644.
- 16) 堀 勉, 中村昌彦, 小寺山亘, 本地弘之, 高橋 実: 曳航式音響ドップラー流速計の為の中曳航体の開発, *西部造船学会会報* 第 **76** 号 (1988) 97-112.
- 17) 金子 新, 橋本良夫, 石橋道芳, 田代昭正: 超音波ドップラー流速プロファイラー—新世代の海流計測器—, *九州大学応用力学研究所所報* 第 **66** 号 (1988) 47-76.
- 18) 前田明夫: 測流計画のための東シナ海黒潮とその周辺の海況, *海洋科学* **13** (1981) 247-254.
- 19) Shoji, D.: Time Variation of the Kuroshio South of Japan, In: *Kuroshio- Its Physical Aspects*, H. Stommel and K. Yoshida, eds. (Univ. Tokyo Press, 1972) Chap. 7.
- 20) Preliminary Report of the Hakuho Maru Cruise KH-88-2 (Ocean Research Institute, University of Tokyo, 1988) 98 pp.
- 21) 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: 東シナ海における黒潮の直接測流結果 (1)—海洋における広域データの計測法に関する開発研究 (第 3 報)—, *九州大学応用力学研究所所報* 第 **67** 号 (1989) 39-47.
- 22) 市川 洋, 高橋淳雄, 前田明夫: 陸棚縁辺部の海洋構造, *水産海洋研究会報* **43** (1983) 21-26.
- 23) 藤原伊佐美: 東シナ海の海況—水温・塩分・溶存酸素量の平年値 (1951-1980)—, *海洋科学* **13** (1981) 264-270.
- 24) Sugimoto, T., S. Kimura and K. Miyaji: Meander of the Kuroshio Front and Current Variability in the East China Sea, *J. Oceanogr. Soc. Jpn.* **44** (1988) 125-135.
- 25) 金子 新: 黒潮により陸棚斜面上に誘起されるフロントと内部波, *海岸工学論文集* 第 **36** 卷 (1989) (印刷中).
- 26) Masuzawa, J. and T. Nakai: Notes on the Cross-Current Structure of the Kuroshio (Currents and Water Masses of the Kuroshio System V), *Rec. Oceanogr. Wks. Jpn.* **2** (1955) 96-101.
- 27) 今脇資郎: 蛇行時の黒潮の観測, *海洋科学* **8** (1976) 229-233.
- 28) Taft, B.: Characteristics of the Flow of the Kuroshio South of Japan, In: *Kuroshio-Its Physical Aspects*, H. Stommel and K. Yoshida, eds. (Univ. Tokyo Press, 1972) Chap. 6.
- 29) 佐伯理郎: 黒潮の流量, *海洋科学* **17** (1985) 267-273.
- 30) Halkin, D. and T. Rossby: The Structure and Transport of the Gulf Stream at 73°W, *J. Phys. Oceanogr.* **15** (1985) 1439-1452.

(平成元年 5 月 29 日 受理)

付録 測定断面内流速分布のカラー表示 (F-line)



(a) 計測線に垂直な方向の流速成分。
最下部に流速のカラーコードを示す。



(b) 計測線に平行な方向の流速成分。
最下部に流速のカラーコードを示す。