

四国沖の黒潮の流量の評価

今脇, 資郎
九州大学応用力学研究所 : 教授

馬谷, 紳一郎
九州大学応用力学研究所 : 助手

内田, 裕
九州大学大学院総合理工学研究科 : 博士課程

市川, 洋
鹿児島大学水産学部 : 助教授

他

<https://doi.org/10.15017/4744030>

出版情報 : 応用力学研究所所報. 82, pp.97-112, 1997-11. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



四国沖の黒潮の流量の評価

今 協 資 郎^{*1} 馬 谷 紳一郎^{*2}
内 田 裕^{*3} 市 川 洋^{*4}
深 澤 理 郎^{*5} ASUKA グループ^{*6}

概 要

日本南岸での黒潮の絶対流量と熱流量を評価するために、四国の足摺岬から南南東に延びる観測線 ASUKA を設け、その測線上で集中した協同海洋観測を行った。1993～1995 年の 2 年間の集中観測のうちの最初の 1 年間の係留流速計の記録と、その間に繰り返し行った測線沿いの CTD/XBT 観測のデータを組み合わせて、黒潮の絶対的な地衡流断面を求め、その面積積分から絶対流量を求めた。それによって、黒潮の流量と水位差の間に非常に高い相関があることが分かった。この関係を使って、人工衛星 TOPEX/POSEIDON 海面高度計データから、黒潮の絶対流量の約 3 年間にわたる時系列を得た。得られた流量の時系列には、はっきりとした季節変化は見られなかった。

Key words: Kuroshio, transport, direct current measurements, satellite altimeter

1. は じ め に

海洋は全球的な熱の南北輸送において重要な役割を果たしている。北太平洋での熱の南北輸送は、亜熱帯循環を含む主として表層の循環によってほぼ規定されていると考えられている¹⁾。したがって、これらの海洋循環による輸送量、特に亜熱帯循環の西岸境界流である黒潮などの流量を正確に知ることは極めて重要である。しかしながら、黒潮の流量はまだ正確には測定されていない。その理由は、黒潮域での長期にわたる流速の直接測定が難しいからである。これまでの黒潮の流量に関する情報のほとんどは、

^{*1}九州大学教授，応用力学研究所

^{*2}九州大学助手，応用力学研究所

^{*3}九州大学大学院総合理工学研究科博士後期課程 3 年

^{*4}鹿児島大学助教授，水産学部

^{*5}東海大学教授，海洋学部

^{*6}足摺岬沖黒潮協同観測グループ

深層での流れがないと仮定した地衡流計算によるものであり、そのようにして求められた流量は、順圧成分を除いた相対的な流量である。数少ない先駆的な研究²⁾⁻⁶⁾では黒潮の絶対的な流量を求めるために流速の直接測定が行われた。しかしながら、長期間にわたる黒潮の絶対的な流量の変化はまだ求められていない。

日本南岸での黒潮および黒潮再循環流の絶対流量と熱流量を評価するために、四国の足摺岬から南南東に延びる観測線を設け、その測線上で集中した協同海洋観測を行った。測線は、海面高度計を搭載した人工衛星 TOPEX/POSEIDON の軌道の一つに沿い、平均的な黒潮流路にほぼ直交するものを選んだ。その測線上で、係留流速・水温計、IES (倒立音響測深器)、係留 ADCP (音響ドブラー流速分布計)、曳航 ADCP、CTD/XBT (電気伝導度水温水深計および投棄式水温水深計) などによる海洋観測を 1993~1995 年の約 2 年間にわたって行った。ここでは、この集中した海洋観測で得られたデータを総合的に解析することにより、黒潮および黒潮再循環流の流量をなるべく正確に評価することを目指した。

この黒潮集中観測は、WOCE (世界海洋循環実験) の北太平洋中緯度の西岸境界流の係留観測である

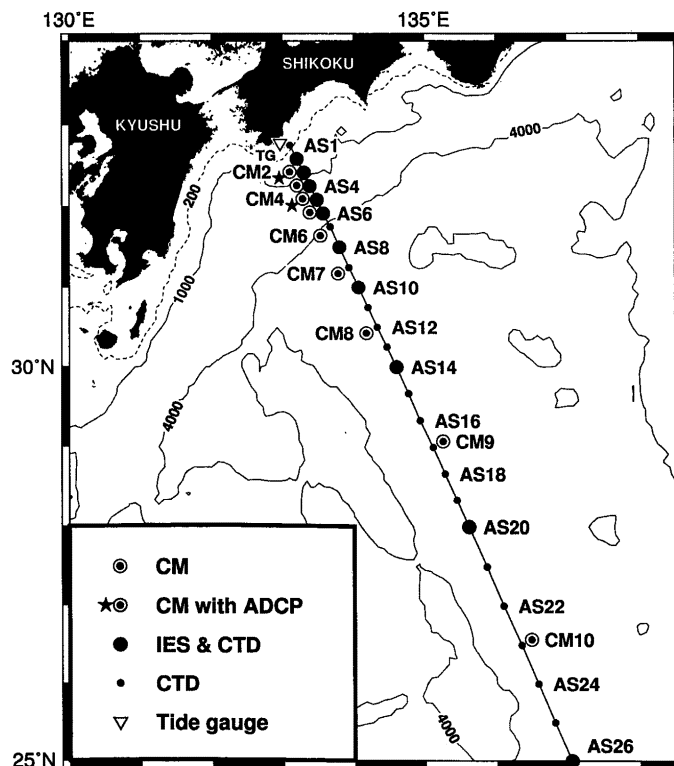


図1 ASUKA 測線と各種の測点および検潮所の位置。図の記号の説明で、CM は流速計係留点、ADCP は音響ドブラー流速分布計、IES は倒立音響測深器の測点、CTD はCTD/XBT の標準測点を示す。

PCM5として実施された。この結果を、30°Nで北太平洋を横断する海洋測線観測データと組み合わせ、中緯度での海洋の熱の南北輸送量を推定する。また、この観測は、海洋観測国際協同研究計画(GOOS)の一環としても位置付けられる。多くの研究者の協力を得て、ASUKA (Affiliated Surveys of the Kuroshio off Cape Ashizuri; 足摺岬沖黒潮協同観測) と呼ばれるグループの共同作業として行われた。

2. 観 測

図1にASUKA協同観測の測線の位置を示す。この測線は、海面高度計を搭載した人工衛星 TOPEX/POSEIDON の軌道の一つに合わせて取られており、四国南岸での黒潮の平均的な流路にほぼ直交している。また、測線の近くでの海底地形の変化は、大陸棚斜面を除いて、小さい。この測線上に26点の標準的なCTD/XBT観測点を選んだ。その内の10観測点をIESの測点に選んだ。さらに、9点の係留流速計の測点を選んだ。その際、隣り合った二つのIES測点の間が係留測点になるように配置した。いずれも、黒潮域では密に、黒潮再循環流域では疎に配置されている。CTD観測中にCTDケーブルが係留系に絡むことがないように、係留測点をCTD測点の上流側に設定した(平均的な黒潮や黒潮再循環流を想定して)。

図2に、測線に沿ってどのように測器を配置したかを鉛直断面図で示す。係留流速計の最浅層は700 mとした。この層の測定流速値に準拠してCTD/XBT観測データから地衡流を求めることが、この観測計画での最も重要な課題であると考え、この層を係留流速観測の最重要層とした。そのためこの層には全

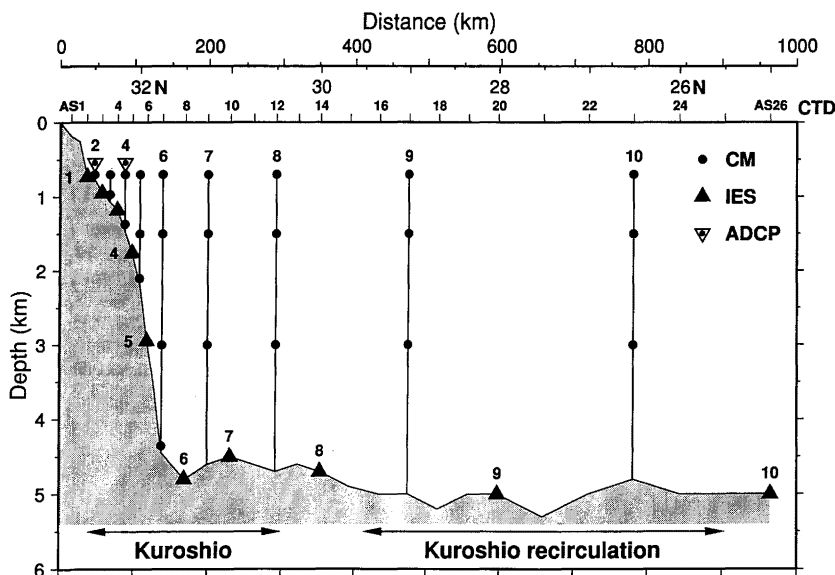


図2 ASUKA 測線の鉛直断面内での測器の配置。CM はアーンデラ流速計、IES は倒立音響測深器、ADCP は上向きの係留型音響ドブラー流速分布計、CTD は繰返し CTD/XBT 観測の標準測点を示す。

測点において、2台の流速計を設置した(上下に20mの間隔を置いて)。中層と深層の流速を測るために1500m層と3000m層に流速計を設置した。そのほかに、大陸棚斜面の海底近くの流速を測定するために、海底上100~120mに流速計を設置した。黒潮の最強流層の流速を測定するために、沿岸寄りの測点CM02とCM04の係留系の最上部に係留型の上向きADCPを設置した。このADCPは係留中の測器の深さから250~300m上方まで流速の鉛直分布を測定する。海底に設置された10台のIESは、海面から海底までの音波の往復伝播時間の時間的な変化を記録し、その場所での水温躍層の上下動を、したがって最終的には深層のある層に準拠した海面の力学高度の時間変化を推定するために使われる。

これらの係留した測器によっては、黒潮や黒潮再循環流の表層の強流部分の情報が十分には得られない。そこでこの不足を補うために次のような観測を計画した。まず、観測船によるCTD/XBT観測をこの測線に沿ってなるべく頻繁に実施し、測線沿いの水温・塩分場の時間変化をなるべく詳しく記述することを目指した。全体の測線を二つに分け、黒潮域に関する部分(足摺岬から30°Nまで)を測線Iとし、黒潮再循環流域に関する部分(30°~25°N)を測線IIとした。測線Iの観測を最優先とした。2年間の集中観測期間中に少なくとも1回は測線全体にわたる海面から海底までの詳しいCTD観測を行うことを目指した。また、表層の直接流速測定として、観測船からの曳航式のADCP観測を、測線沿いになるべく頻繁に行った。この観測によって海面から深さ250~300mまでの流速の断面分布が得られる。さらに、海面高度計衛星TOPEX/POSEIDONのデータを最大限に活用し、測線に沿った海面での力学高度や地衡流速の変動を、比較的高い時間分解能(10日毎)で把握することを計画した。

黒潮と黒潮再循環流の集中協同観測は、1993年10月から1995年11月までの約2年間にわたって実施された。

表1に係留流速観測の実施のようすを示す。1993年10月に敬天丸(鹿児島大学水産学部)により、9地点に33台のアーネンデラ流速計と2台の上向きADCPを設置した。1994年9月に白鳳丸(東京大学海洋研究所)により、これらすべてをいったん回収し、同時に同様の測器を再設置した。1995年11月に敬天丸により、これらをすべて回収した(ただし、測点CM08の係留系は系のトラブルのために回収できなかった)。1年目に係留したアーネンデラ流速計は、一部を除いて良好な記録をもたらした。2年目に係留したアーネンデラ流速計も、ほぼ良好な記録をもたらした(表1b)。

表2にCTD/XBTによる繰返し測線観測の実施のようすを示す。この繰返し観測は、全体が一つのプロジェクトとして行われたのではなく、この共通の測線に沿って、協同観測期間中に各機関の個別のプロジェクトで行われた観測を総合したものである。1993年10月からの集中協同観測の開始以前に6回の測線観測が行われた。約2年間の集中観測期間中に合計42回の測線観測が行われた。これは平均すると1ヶ月に1.7回の観測を行ったことに相当する。繰返し測線観測の多くは足摺岬沖から30°Nまでの測線I(図2)について行われた。また、測線観測の多くは海面から深さ1000~1500m(XBTの場合は深さ800m)までのものであり、海底までは達していない。しかし、この繰返し横断観測によって、黒潮の中・長期的な時間変動を記述するにはほぼ十分な情報が得られたものと考えられる。都合でCTD観測ができなかった航海や測点では、代りにXBT観測を行い、水温場を記述した。

人工衛星TOPEX/POSEIDONによる海面高度の観測は、アメリカのNASA(航空宇宙局)とフラン

表1 係留流速観測の一覧。(a)は係留番号, 位置, 設置・回収の年月日, 係留期間, (b)は係留番号, 水深, 流速計の設置深度などを示す。日付は世界標準時。

(a) Mooring summary

Mooring #	Lat.(N)	Long.(E)	Deploy. date	Recov. date	Duration
CM02-1	32-27.8	133-09.5	Oct.20,1993	Sept.18,1994	333 days
CM03-1	32-17.9	133-15.9	Oct.20,1993	Sept.19,1994	334
CM04-1	32-08.8	133-21.7	Oct.20,1993	Sept.18,1994	333
CM05-1	31-56.7	133-27.9	Oct.25,1993	Sept.17,1994	327
CM06-1	31-40.7	133-35.6	Oct.26,1993	Sept.16,1994	325
CM07-1	31-14.8	133-51.1	Oct.26,1993	Sept.15,1994	324
CM08-1	30-28.4	134-16.9	Oct.27,1993	Sept.14,1994	322
CM09-1	29-02.3	135-11.0	Oct.19,1993	Sept.12,1994	328
CM10-1	26-32.2	136-25.0	Oct.18,1993	Sept.10,1994	327
CM02-2	32-28.0	133-10.6	Sept.18,1994	Nov.24,1995	432
CM03-2	32-18.2	133-16.5	Sept.19,1994	Nov.25,1995	432
CM04-2	32-08.4	133-21.4	Sept.18,1994	Nov.25,1995	433
CM05-2	31-58.2	133-27.1	Sept.17,1994	Nov.25,1995	434
CM06-2	31-42.5	133-38.6	Sept.16,1994	Nov.26,1995	436
CM07-2	31-13.9	133-51.4	Sept.15,1994	Nov.22,1995	433
CM08-2	30-27.4	134-14.7	Sept.14,1994	not recovered	—
CM09-2	29-02.2	135-10.4	Sept.12,1994	Nov.21,1995	435
CM10-2	26-31.9	136-26.2	Sept.10,1994	Nov.20,1995	436

(b) Current meter summary

Mooring #	Depth	Current meter depths				Note
CM02-1	819m	692m	715m			ADCP at 553m
CM03-1	1160	605	628***	1036*		
CM04-1	1543	588	611	1419		ADCP at 500m
CM05-1	2527	671	692*	1497	2402*	
CM06-1	4720	659	680*	1485	2990	4595
CM07-1	4494	535	556	1361	2866(a)	(a): no direction data
CM08-1	4470	506	529	1336	2843	
CM09-1	4856	492	515**	1322	2829	
CM10-1	4821	457	480**	1287**	2794***	
CM02-2	811	683	706**			ADCP at 546m
CM03-2	1162	626	646	1057		
CM04-2	1592	676	699	1487		ADCP at 586m
CM05-2	2392	555	576	1381*	2286	
CM06-2	4637	526	547	1352	2857***	4531**
CM07-2	4422	483	504**	1309***	2813***	
CM08-2	4550	660(b)	680(b)	1490(b)	2990(b)	(b): not recovered
CM09-2	4844	649*	672***	1479	2986	
CM10-2	4936	763	786***	1593	3098	

*with short data gaps; **partial record; and, ***no usable data, for velocity records

表2 繰返しCTD/XBT測線観測の一覧

Month	Vessels				
1992					
November	Shoyo				
1993					
May	Shumpu-maru				
July	Kaiyo	Shoyo	Shumpu-maru		
September	Shumpu-maru				
<START of intensive surveys>					
October	Keiten-maru				
November	Tenyo-maru				
December					
1994					
January	Kaiyo-maru	Shoyo	Tansei-maru		
February	Shumpu-maru	Hakuho-maru			
March					
April					
May	Bosei-maru	Shumpu-maru	Shoyo	Toyoshio-maru	
June					
July	Seisui-maru	Shoyo	Shumpu-maru	Shirafuji-maru	
August	Keiten-maru				
September	Hakuho-maru	Kaiyo	Shumpu-maru		
October	Bosei-maru				
November	Shoyo				
December	Keiten-maru				
1995					
January	Shoyo	Tansei-maru			
February					
March	Keiten-maru				
April	Kaiyo				
May	Shumpu-maru	Hakuho-maru			
June	Toyoshio-maru	Bosei-maru			
July	Seisui-maru	Shumpu-maru	Shoyo	Shirafuji-maru	Kaiyo
August	Keiten-maru				
September	Shumpu-maru	Shirafuji-maru			
October	Kaiyo-maru	Shumpu-maru			
November	Tenyo-maru	Keiten-maru			
<END of intensive surveys>					

スのCNES(宇宙研究センター)によって、1992年9月末以来順調に続けられている。1995年秋に、予定されていた3年間のミッションを無事終了し、現在は延長された後半の3年間の観測を続けている。予定通り1998年秋まで順調に観測し続けられれば、最終的に6年間にわたる記録が得られることになる。

なお、IES観測と曳航ADCP観測の詳細は、別の機会に報告される予定である。

3. 観測結果

以下にこれらの観測のうち、主として最初の1年間の観測で得られた結果の一部を示す。

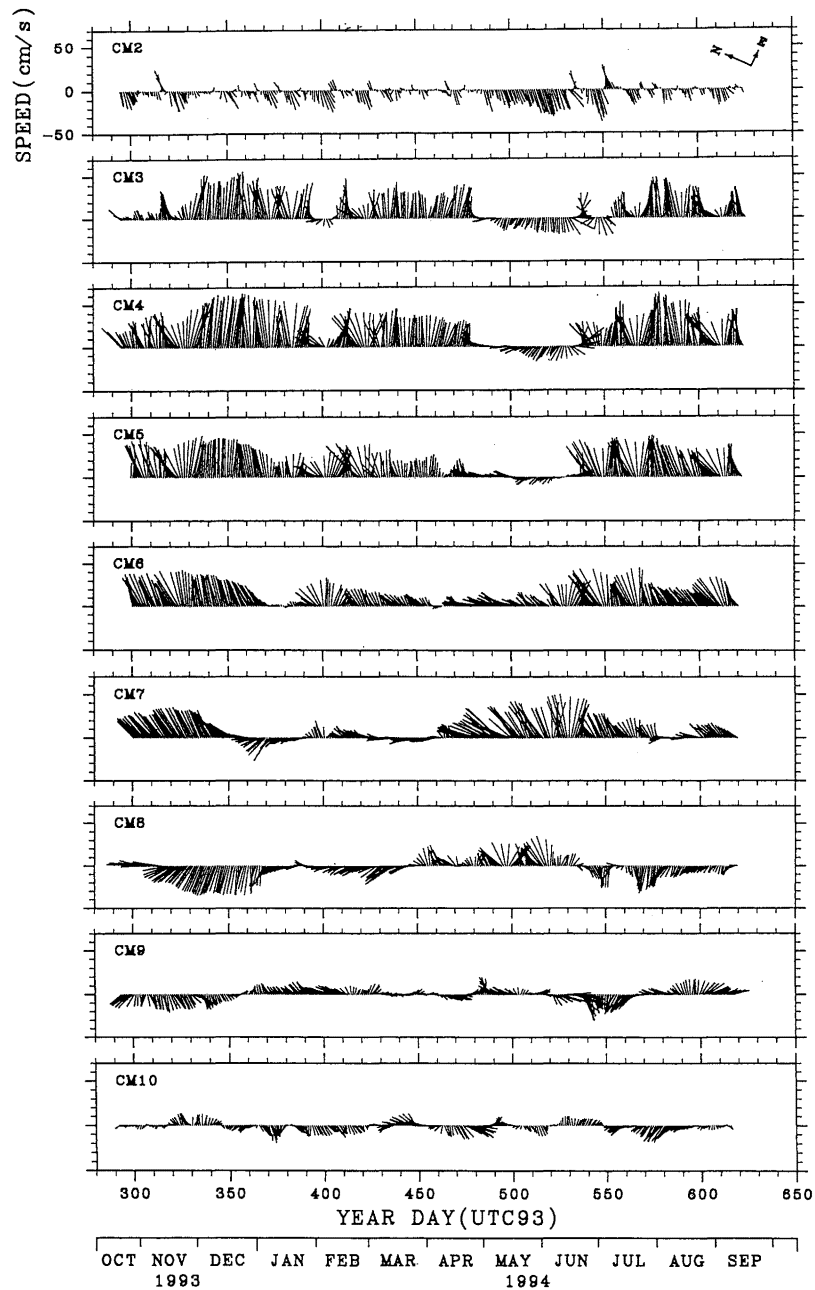


図3 測点CM02からCM10までの9地点での700m層の係留流速計の記録(最初の1年間)。低周波濾過フィルターを施した後、1日毎に流速ベクトルを線分で示した。上方が測線に垂直な東北東向き、時間軸は1993年1月1日を起点とした年日(以下の図でも同じ)。

図3は最初の1年間に700 m 層に係留した流速計の記録である。各測点の700 m 層に係留した2台の流速計のうち、上層の流速計の記録に低周波濾過フィルター⁷⁾を施し、1日毎に取り出して示した。測器の正確な設置深度は測点毎に異なり、深さ460~690 m であると推定される(表1)。この層での黒潮の最強流部は測点CM03からCM05の付近にあり、測点CM06付近までがこの強流部とほぼ同じ位相で変化している。時間変化が極めて大きく、特に1994年の5~6月には反流になっている。これは、この時期、九州南東に発生した黒潮の小蛇行がこの測線を西から東に通過したために起ったもので(海上保安庁水路部が発行している「海洋速報」を参照)、この時の黒潮の最強流部は測点CM07付近まで南下している。測点CM08からCM10では、変動成分の方が平均値よりも大きい、平均的には黒潮再循環流(西南西向き)の中に位置していた(図5参照)。最も沿岸寄りの測点CM02では、流速変動の様式が全く異なる。すなわち、流れはほぼ等深線に沿う方向の往復流である。これは、この流速計が大陸棚斜面の海底から130 mの深さに設置されていたことを考慮すると、海底地形に強く拘束された局所的な流れを表しているものと考えられる。ただし、同じ係留系の上方に設置した上向きADCPの記録では、上層

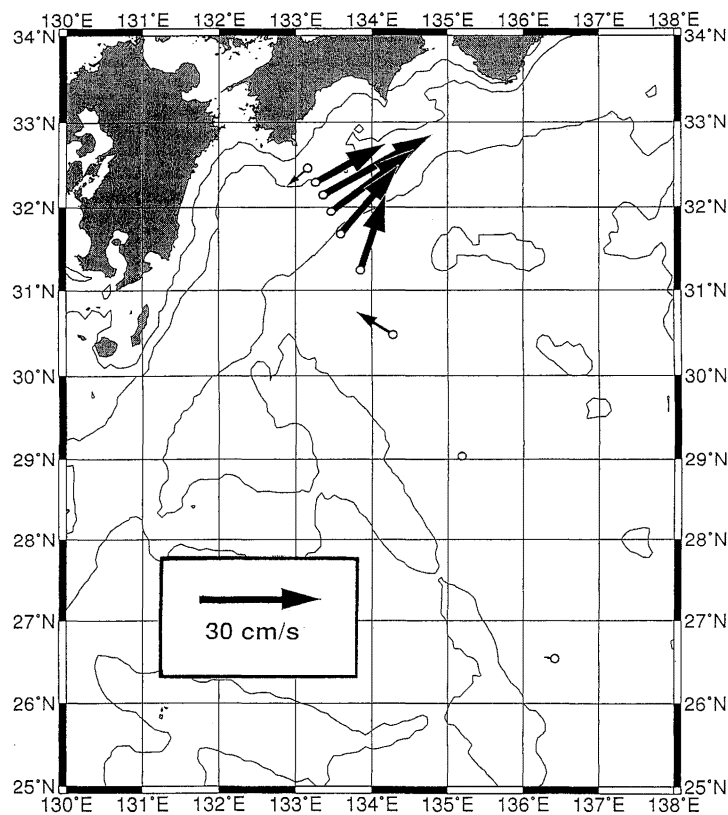


図4 黒潮および黒潮再循環流域の700m層での流速ベクトル。1993年10月から1994年9月までの約1年間の係留流速計データの平均値を示す。

(深さ 270 m) に, 180 cm/sec にも達する極めて強い東北東向きの流れが示されており, 黒潮の浅層での強流部がこの付近にあったことが推定される。

図 4 は, 700 m 層における, この 1 年間の平均の流速ベクトルの水平分布を示す。最も速度が大きかった測点 CM04 で, 約 30 cm/sec であった。その流向は, ほぼこの ASUKA 測線に垂直であり, 平均的に見ると, この測線が黒潮にほぼ直交していたことが分かる。この層のこの測線沿いだけで見ると, 黒潮は流軸に向かって収束しているように見える。ただしここでは測定期間中の流速計の深さ変化による速度補正は施していない。これは強流期間中ほど係留線が傾斜するため測器が深くなることの補正であるが, 今回の場合で深さ変化は 100 m 程度である。

図 5 は, この 1 年間の平均流速の, ASUKA 測線に垂直な流速成分の鉛直断面分布を示す。黒潮の流向はほぼこの測線に垂直なので, これが黒潮の流速の鉛直断面と考えてよい。10 cm/sec の等値線が深さ 1000 m 付近まで, 0 cm/sec の等値線が深さ 2000 m 付近まで達している。ただし, 測点 CM07 の 1500 m 層の流速データが得られなかったので, 0 cm/sec の等値線が沖合でどの深さまで達しているのかは, はっきりとは分からない。黒潮の沿岸側には弱い反流が存在している。とくに興味深いのは, この反流も含めて, 大陸棚斜面に沿って (海底から 100~120 m の深さ), 流速がほとんど 0 か, 弱い反流が存在することである。このことは, これまで行われてきた, 大陸棚斜面上で海底を無流面とした地衡流計算に

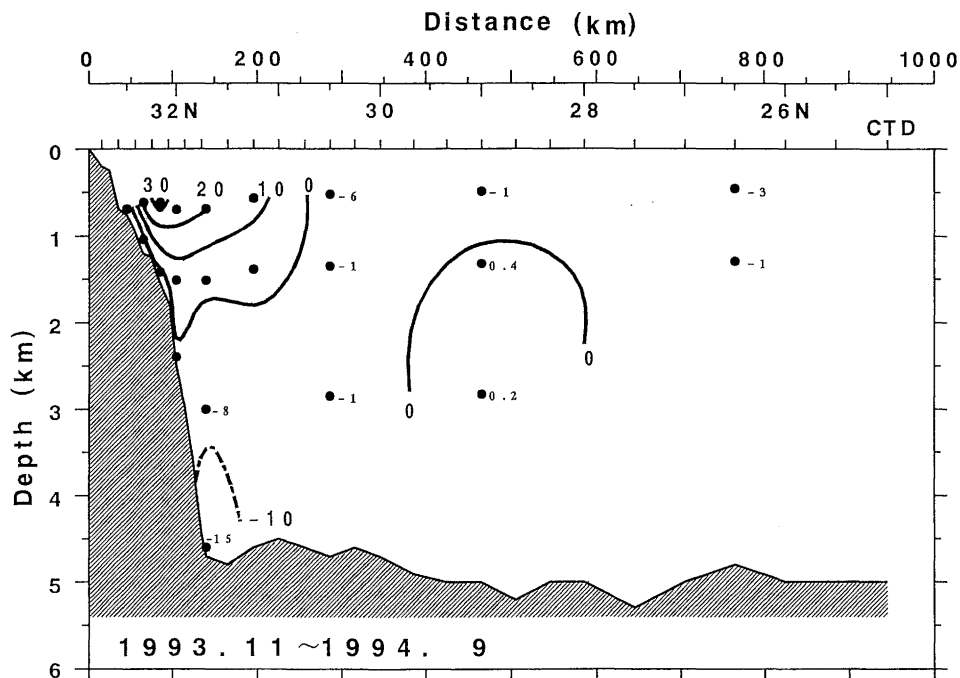


図 5 黒潮および黒潮再循環流域の流速断面 (cm/sec). 1993 年 10 月から 1994 年 9 月までの約 1 年間の係留流速計データの平均値の, ASUKA 測線に垂直な流速成分を示す。

一定の根拠を与えるものである(ただし, 年平均流速についてではあるが), 測点 CM06 の海底付近では, 最大で 30 cm/sec (平均 15 cm/sec) に達する西南西向きの強い深層流が観測された。これはフィリピン海での深層循環と考えられる四国海盆北縁の深層流に関するこれまでの観測結果⁸⁾⁹⁾と合致している。

4. 黒潮の流量

これまでに求められている黒潮の流量のほとんどは, 深層でのある基準面に相対的な地衡流を鉛直断面で積分した, いわゆる地衡流量である。今回は, 700 m 層の流速が直接測定されているので, それに準拠した地衡流を求めることによって絶対流速の断面を得ることができ, それを鉛直積分することによって絶対流量を推定することができる。図 6 に黒潮の地衡流速断面の例を示す。700 m 層の測流値に準拠した絶対的な地衡流である。従来の 1000 dbar 準拠の地衡流と比較すると, 1000 m 層で最大 20 cm/sec 程

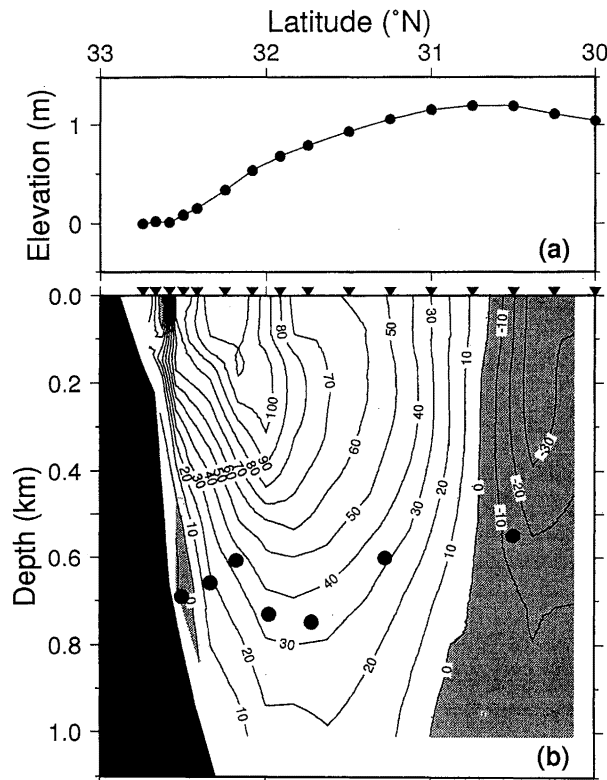


図 6 1993年11月の黒潮の海面力学高度(m)の水平分布と絶対的な地衡流 (cm/sec) の断面図の例。図中の三角印の場所での海洋観測データから, 黒丸印の所で得られた実測流速値に準拠して, 地衡流計算によって流速を求めた。負の値に影をつけた。海面力学高度の分布は, そのようにして求めた海面での地衡流から求めた。

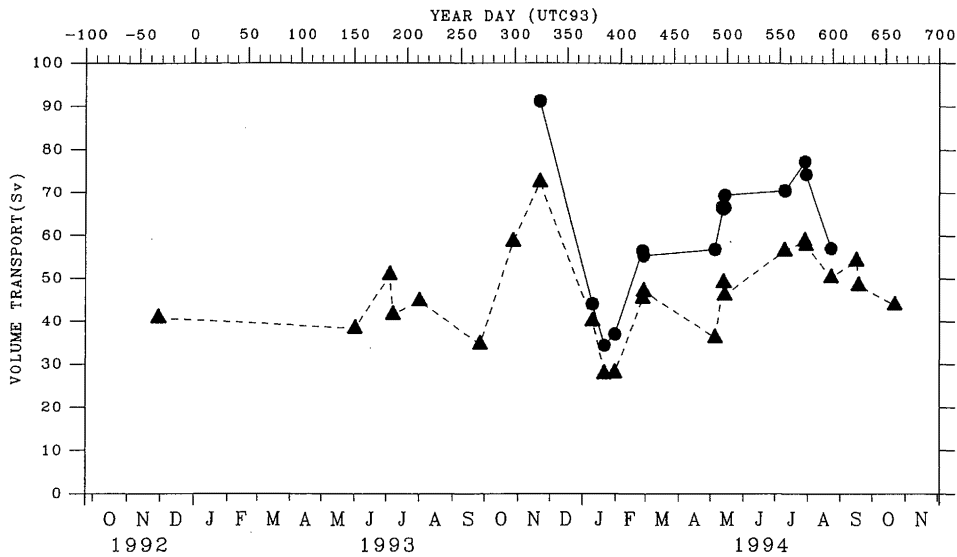


図7 黒潮の1000m以浅の地衡流量(▲)と絶対流量(●)の時間変化。単位はSv。地衡流量は、1000dbarに準拠した地衡流を断面積分して、また絶対流量は、700m層の係留流速計データに準拠した地衡流(絶対流速)を断面積分して求めた。

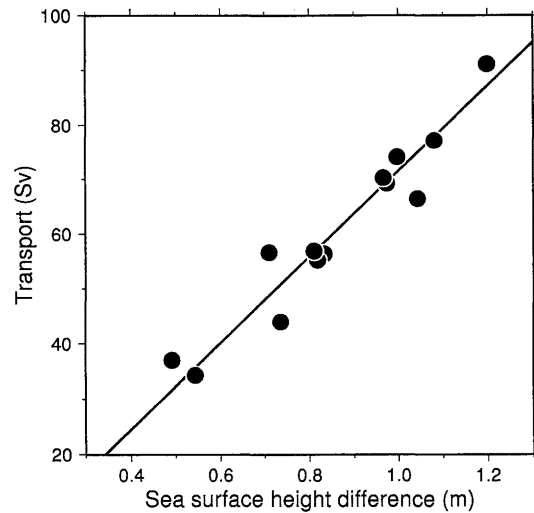


図8 黒潮の1000m以浅の流量(Sv)と黒潮を挟む水位差(m)の関係。流量は図7の絶対流量に同じ。水位差は図6で例を示した海面の力学高度の、黒潮の沖合側と沿岸側での値の差である。13回の観測結果を示す。流量と水位差の相関係数は0.96、回帰直線(実線)からのずれのrmsは4.3Svである。

度の差がある。ここでは、黒潮に相当する東向流の部分海面から深さ 1000 m まで積分したものを黒潮の流量とする。1000 dbar 準拠の地衡流量は 72 Sv (1 Sv は $10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$) であるが、ここで求めた絶対的な地衡流量(絶対流量と呼ぶ)は 91 Sv である。図 7 は 1992 年 11 月以来の地衡流量と 1993 年 11 月以来の絶対流量の時間変化である。地衡流量は 28~72 Sv の範囲で、また絶対流量は 34~91 Sv の範囲で大きく変化している。

図 8 はこの黒潮の絶対流量と黒潮の両端での海面力学高度の差(ここでは簡単に水位差と呼ぶ)の関係を示す。ここで、黒潮域の海面力学高度は、上で求めた海面での絶対流速の分布から、地衡流を仮定して海面の力学的な高さの分布を求めたものである。黒潮の絶対流量と黒潮両端の水位差は極めて高い相関(0.96)をもっており、両者の関係を一次式で表した場合のデータのずれの rms(root-mean-square)

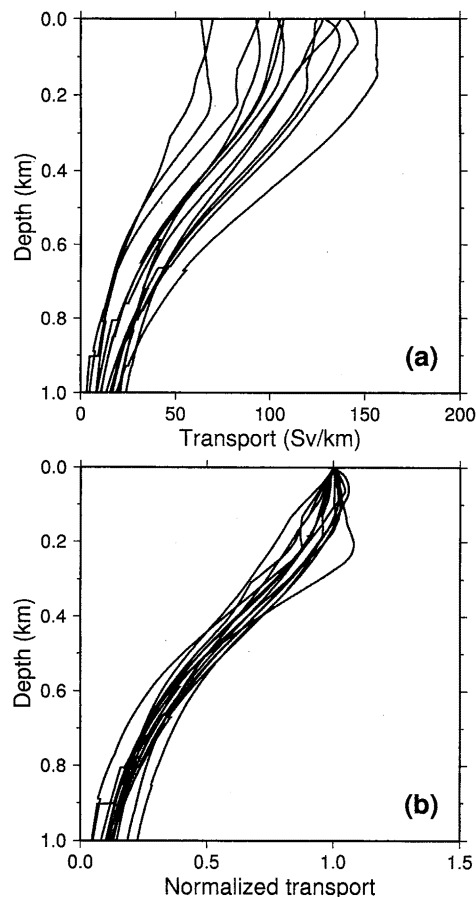


図 9 黒潮の単位深さ当りの流量の鉛直分布。(a)は流量そのもの、(b)は海面での値で規格化したもの。13回のケースを示す。

は 4.3 Sv である。同じような線型的な関係は、数値モデルで表現された、台湾東方を北上して東シナ海へ流入する黒潮の流量とその両端の水位差の間にも認められている¹⁰⁾。

この高い相関の内容を理解するために、次のような解析を行った。上記の黒潮域での地衡流断面から、黒潮の単位深さ当りの流量の鉛直分布を求めた(図 9 a)。得られた 13 回の個々の鉛直分布は時間的にかなり大きく変化している。しかし、それを海面での値で規格化すると(図 9 b)、すべての鉛直分布が、ほぼ同一のものになる。この規格化された、単位深さ当りの流量の鉛直分布を、深さ方向に積分して、黒潮の規格化された全流量を求めると、ほぼ一定の値になるので、黒潮の全流量が海面での単位深さ当りの流量に比例することになる。さらに、地衡流を仮定すると海面での流量は黒潮両端での水位の差に比例するので、黒潮の流量が黒潮を挟む水位差に比例するということになる。このことは、黒潮全体の流量変化が、特定の層の流量変化によってもたらされるのではなく、全部の層の流量が同じ割合で増減することによって生じていることを示している。

さて、この関係を用いて、黒潮を挟む水位差の測定から、黒潮の絶対流量を簡便に推定することが考えられる。ASUKA 測線に沿っては、人工衛星 TOPEX/POSEIDON が 1992 年 9 月末から約 10 日おきに海面高度を測定している。実際に衛星によって観測された海面高度では、ジオイド面(海が静止している時にとる海面の形)の凹凸が卓越しており、地衡流を求めるためには、それからの小さなずれである海面力学高度を求めなければならない。しかし現在知られているジオイドの形状は精度が十分でない¹¹⁾。ここでは、衛星海面高度計データからは、海面高度の時間変動成分のみを利用し、それを、地衡流を仮定して上で求めた測線沿いの絶対的な海面力学高度(700 m 層の係留流速計データと繰返し CTD/XBT データによる)と組み合わせることによって絶対値を求めた¹²⁾。海面高度計は、沿岸のごく近くでは欠測になることが多いので、それを補強するために、沿岸の検潮所での潮位記録がどの程度利用できるかを調べた。足摺岬の土佐清水での検潮記録と、近くで取られた TOPEX/POSEIDON 海面高度計データを比較した結果、検潮記録を海面高度計データと組み合わせると十分利用できることが分かった¹³⁾。

この TOPEX/POSEIDON による海面高度分布と土佐清水の検潮記録から、黒潮(東向流)に相当する部分の海面高度差を求め、上で得られた黒潮の絶対流量と黒潮を挟む水位差との関係を用いて、黒潮の絶対流量の時系列を約 10 日ごとに求めると、図 10 のようになる。参考のために、CTD/XBT 観測と係留流速計観測のデータを組み合わせて求めた絶対流量を丸印で示す。上記の海面高度計データで求めた流量が、これとよく一致していることが分かる。このようにして求めた黒潮の絶対流量は、時間的に非常に激しく変化している。年周期変化(季節変化)はあまり顕著ではなく、むしろ半年程度の周期の変化の方が顕著である。流量の約 3 年間の平均値は 63 Sv、変動の標準偏差は 13 Sv である。

ただし、ここで求めた東向流としての黒潮の南半分は、黒潮の南側に恒常的に存在する高気圧性暖水渦に伴う局所的な循環の北半分(東向流)に相当する。また黒潮域には移動性の高気圧性渦(暖水渦)や低気圧性渦(冷水渦)が常に存在する。したがって、黒潮の正味の通過流の流量を求めるためには、このような局所的な循環の流量を正しく求めて、黒潮の流量から差し引く必要がある。そこで予備的な解析として、黒潮の南縁から 26°N までの間の流量(通常は西向流)を、黒潮域でのそれと同様の方法で

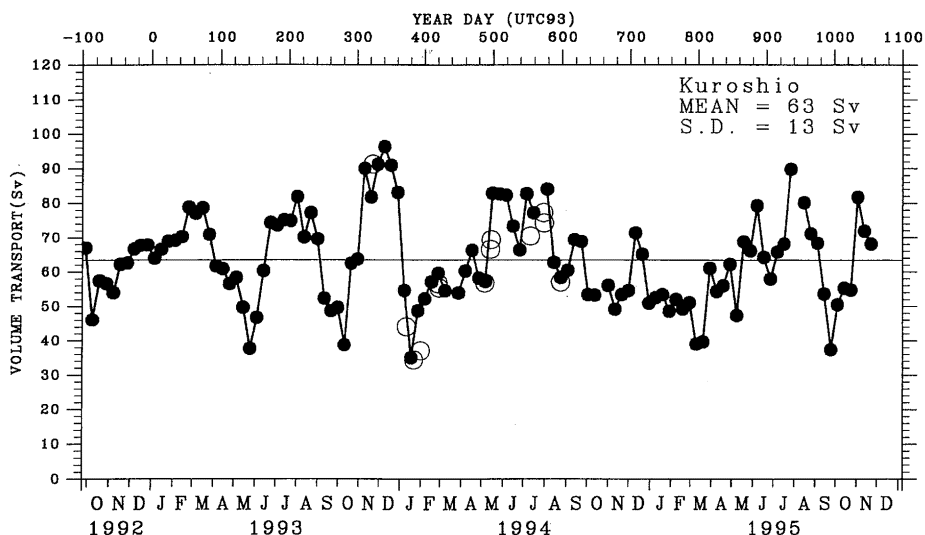


図10 黒潮の1000m以浅の流量(Sv)の3年間にわたる時系列(黒丸を実線で結んだ)。人工衛星(TOPEX/POSEIDON)の海面高度計の約10日毎のデータと潮位計データから、黒潮の流量と水位差の関係(図8)を用いて求めた。白丸は現場観測データから求めた同様の流量。全期間の平均値は63Sv、標準偏差は13Svである。

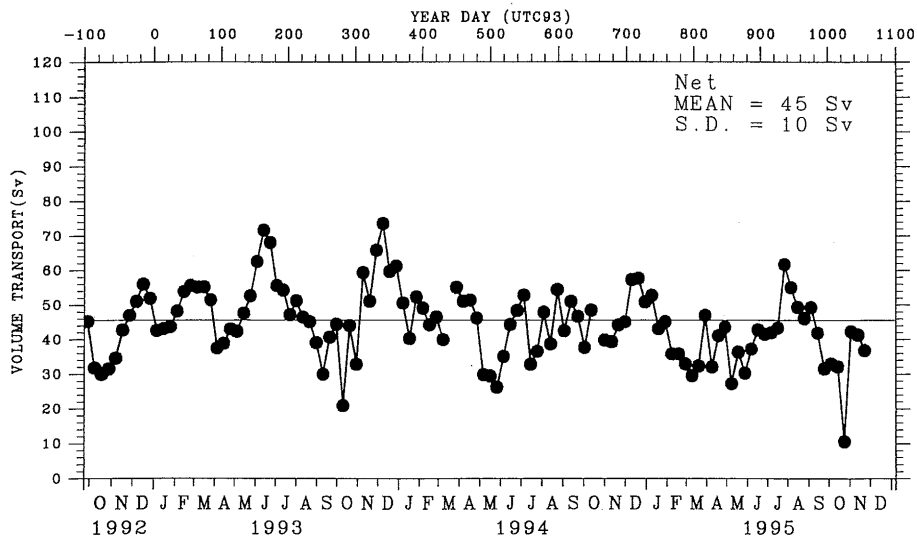


図11 通過流としての黒潮の流量(Sv)の3年間にわたる時系列。黒潮の流量の時系列(図10)から、黒潮の南側の黒潮再循環流の流量を差し引いて求めた。平均値は45Sv、標準偏差は10Sv。ただし、これは予備的な結果である。

求め、上記の黒潮流量から差し引いて、通過流としての黒潮の流量の時系列を求めると、図 11 のようになる。東向流としての黒潮の流量の時系列（図 10）で見られた、流量の急激な変化はほぼなくなり、時間変化の振幅はかなり小さくなる。流量の約 3 年間の平均値は 45 Sv、変動の標準偏差は 10 Sv である。この時系列でも、はっきりとした季節変化は見られない。

6. お わ り に

日本南岸での黒潮および黒潮再循環流の絶対流量と熱流量を評価するために、四国の足摺岬から南南東に延びる観測線 ASUKA を設け、その測線上で集中した協同海洋観測を行った。1993～1995 年の 2 年間の集中観測のうちの最初の 1 年間の係留流速計の記録と、その間に繰り返し行った測線沿いの CTD/XBT 観測のデータを組み合わせて、黒潮の絶対的な地衡流断面を求め、その面積積分から絶対流量を求めた。それによって、黒潮の流量と水位差の間に非常に高い相関があることが分かった。これは、黒潮の流量変化が、特定の層の流量変化によってもたらされるのではなく、全部の層の流量が同じ割合で変化することによって生じていることによる。この関係を使って、人工衛星 TOPEX/POSEIDON 海面高度計データから、黒潮の絶対流量の約 3 年間にわたる時系列を得た。得られた流量の時系列には、はっきりとした季節変化は見られなかった。この、海面高度計データから黒潮の流量が推定できるということは、黒潮の流量変動の長期にわたるモニターに道を開くものである。

今後、2 年目の係留流速計のデータを加えて、ここに述べた解析をさらに進める。同時に、黒潮の流軸位置や流速断面の時間変化に関する解析も進める必要がある。今回は使えなかったが、海底に設置した IES の 2 年間のデータから、黒潮流量の傾圧的な変動に関する情報が得られるので、これらを海面高度計データなどと組み合わせると、さらに精度の高い流量の推定ができるはずである。

謝 辞

この研究は、国内外の大学や官庁その他の多くの機関の研究者の協力のもとで行われた。係留流速観測は、九州大学応用力学研究所、鹿児島大学水産学部、東海大学海洋学部などの協力によって実施された。CTD/XBT の繰り返し観測は、鹿児島大学水産学部、九州大学応用力学研究所、水産庁南西海区水産研究所、広島大学工学部、気象庁神戸海洋気象台、三重大学生物資源学部、東海大学海洋学部、海洋科学技術センター、水産庁中央水産研究所、東京大学海洋研究所、海上保安庁水路部などの協力によって実施された。これらの現場協同観測は各機関の観測船や調査船などによって実施された。各船の船長はじめ乗組員の方々に深甚なる謝意を表したい。係留流速計データの処理や解析では、橋部雄志さんと山田勝久さん（当時、九州大学）に協力していただいた。人工衛星 TOPEX/POSEIDON の海面高度計データは、アメリカのジェット推進研究所 (JPL) の Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC) から提供された。

参 考 文 献

- 1) Bryden, H. L., D. H. Roemmich and J. A. Church: Ocean heat transport across 24°N in the

- Pacific, *Deep-Sea Res.*, **38**, 297-324, 1991.
- 2) Worthington, L. V. and H. Kawai : Comparison between deep sections across the Kuroshio and the Florida Current and Gulf Stream, p. 371-385, in *Kuroshio-Its Physical Aspects*, edited by H. Stommel and K. Yoshida, University of Tokyo Press, 1972.
 - 3) Taft, B. A. : Structure of Kuroshio south of Japan, *J. Mar. Res.*, **36**, 77-117, 1978.
 - 4) Takematsu, M., K. Kawatate, W. Koterayama, T. Suhara and H. Mitsuyasu : Moored instrument observations in the Kuroshio south of Kyushu, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **42**, 201-211, 1986.
 - 5) 水野信二郎, 川建和雄, 金子 新, 長浜智基 : 東シナ海における黒潮の直接測流結果(III), 九州大学応用力学研究所所報, **71**, 1-18, 1991.
 - 6) Kaneko, A., S. Mizuno, W. Koterayama and R. L. Gordon : Cross-stream velocity structures and their downstream variation of the Kuroshio around Japan, *Deep-Sea Res.*, **39**, 1583-1594, 1992.
 - 7) Godin, G. : *The Analysis of Tides*. Liverpool University Press, 246pp, 1972.
 - 8) Fukasawa, M., T. Teramoto and K. Taira : Abyssal current along the northern periphery of Shikoku Basin, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **42**, 459-472, 1986.
 - 9) Chaen, M., M. Fukasawa, A. Maeda, M. Sakurai and M. Takematsu : Abyssal boundary current along the northwestern perimeter of the Philippine Basin, p. 51-67, in *Deep Ocean Circulation : Physical and Chemical Aspects*, edited by T. Teramoto, Elsevier, Amsterdam, 1993.
 - 10) Johns, W. E., T. N. Lee, C.-T. Liu and D. Zhang : PCM-1 array monitoros Kuroshio transport, *WOCE Notes*, Vol. 7, No. 3, 10-13, 1995.
 - 11) 今脇資郎 : 衛星アルティメター, 海の研究, **4**, 487-508, 1995.
 - 12) 今脇資郎, 内田 裕 : 海面高度計による黒潮横断水位分布の検出, 京都大学防災研究所年報, **38B**-2, 655-662, 1995.
 - 13) 内田 裕, 今脇資郎 : 衛星海面高度計と潮位計による四国沖の水位変化の比較, 九州大学応用力学研究所所報, **80**, 71-85, 1996.

(平成9年6月30日 受理)