

直接測定による四国沖の黒潮流速の変動特性

馬谷, 紳一郎
九州大学応用力学研究所

鹿島, 基彦
九州大学大学院総合理工学研究科

今脇, 資郎
九州大学応用力学研究所

市川, 洋
鹿児島大学水産学部

他

<https://doi.org/10.15017/6768408>

出版情報 : 九州大学応用力学研究所所報. 121, pp.87-94, 2001-09. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



直接測定による四国沖の黒潮流速の変動特性

馬谷 紳一郎*¹ 鹿島 基彦*² 今脇 資郎*¹ 市川 洋*³ 深澤 理郎*⁴

(2001年6月30日受理)

Structures and Variability of the Kuroshio off Shikoku, Japan Revealed by Direct Current Measurements

Shin-ichiro UMATANI, Motohiko KASHIMA, Shiro IMAWAKI,
Hiroshi ICHIKAWA and Masao FUKASAWA

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

Abstract

Direct current measurements were carried out along ASUKA (Affiliated Surveys of the Kuroshio off cape Ashizuri) line crossing the Kuroshio from Shikoku coast, Japan to 25°N, during 1993-1995. The temporally averaged views of the Kuroshio show that most strongly flowing part, the Kuroshio flow axis, at about 700 m depth is located around 32°N and it spreads down to about 2000 m depth. Weak countercurrents are detected just above the continental slope and strong countercurrents are also detected near the deepest end of the continental slope. At a reference depth of 650 m, the Kuroshio flow axis coincides with 7°C isotherm. The Kuroshio takes two distinct paths: a near-coast path and a far offshore path. For each case, a horizontal velocity profile at 650 m depth is estimated on a stream coordinate that denotes the component parallel to the velocity at the Kuroshio flow axis.

Key words: Kuroshio, ASUKA, direct measurement, velocity, temperature, stream coordinate

1. はじめに

地球環境の維持や変動のメカニズムを解明するためには、未だ数多くの解決しなければならない課題がある。その中でも熱の南北輸送を定量的に求めることは最優先課題の一つである。海洋による南北熱輸送は気候による熱輸送と同程度と考えられており^{1),2)}、さらに北半球中緯度域では、太平洋の寄与は大西洋と同程度であることが指摘されている^{2),3)}。したがって、海洋循環による熱輸送量を定量的に把握するために、北太平洋の亜熱帯循環の西岸境界流である黒潮を詳しく調べる重要な意味を持っている。

黒潮の熱流量の評価には、流量の評価とともに黒潮の流速構造を知ることが必要である。これに関しては今までも数多くの研究が行なわれてきたが、数少ない例外^{4),5),6)}を除けばその多くは無流面の仮定に基づくものであり、いわゆる順圧成分の役割は考慮されていない。この効果を考慮した、黒潮および黒潮再循環流を含む広範囲かつ長期間の観測は実施されていなかった。

無流面を仮定しないで、黒潮と黒潮再循環流の絶対流

速場の構造を求め、その絶対流量と熱流量を評価することを目的として1993～1995年の約2年間にわたってASUKA協同観測 (Affiliated SURveys of the Kuroshio off cape Ashizuri) の集中観測^{7),8)}が実施された。ASUKA協同観測は、WOCE (世界海洋循環実験) の、北太平洋中緯度での西岸境界流域の係留観測、PCM5として実施され、係留流速計のみならず、IES (倒立音響測深器)、係留 ADCP (音響ドップラー流速分布計)、曳航 ADCP、CTD/XBT などによる観測を統合した総合的海洋観測である。さらにこの観測は、人工衛星 TOPEX/POSEIDON の海面高度計データの利用を前提として計画された。観測の詳細については別論文⁹⁾を参照されたい。

本論文は ASUKA 集中観測で得られた、係留流速計による黒潮および黒潮再循環流の直接測定データを解析したものである。

2. 観測

ASUKA 協同観測の集中観測は Fig. 1 に示す測線に沿って、1993年10月～1994年9月(I期)および1994年9月～1995年11月(II期)の連続する二期間にわたって実施され、その二期間の間で係留系の入れ替えが行なわれた。この測線は平均的な黒潮の流路にほぼ直交し、また人工衛

*1 九州大学応用力学研究所

*2 九州大学大学院総合理工学研究科

*3 鹿児島大学水産学部

*4 海洋科学技術センター

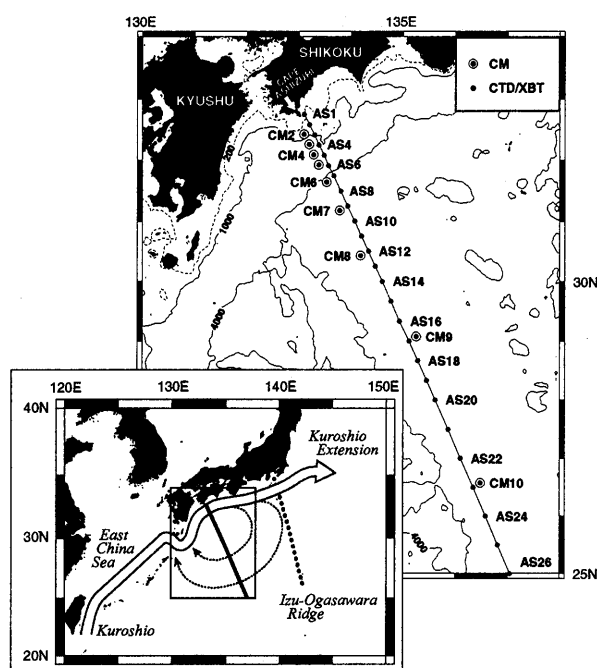


Fig. 1. ASUKA observation line and locations of stations. Double circles indicate moored current meter stations and solid circles indicate CTD/XBT stations. Isobaths of 200, 1000 and 4000 m are also shown.

星 TOPEX/POSEIDON の軌道の一つと合わせられている。CTD/XBT の測点として AS1-AS26 で示されている 26 点の標準測点が黒丸で、流速計係留点として CM2-CM10 の 9 測点が二重丸で示されている。いずれの測点も黒潮強流域では密に、黒潮再循環流域では粗に配置されている。係留方法は海底からの立上げ式である。係留流速計は 9 測点の、それぞれ名目深度、700, 1500, 3000 m と陸棚斜面上の海底近くに合計で 33 台設置された。すべてアーンデラ (Aanderaa) 流速計であり、記録間隔は 1 時間である。

Fig. 2 の鉛直断面図に、測線に沿った流速計の配置が示されている。CTD/XBT 観測データに基づき、最浅層の 700 m での流速に準拠して絶対地衡流速を求めることが重要な課題である。そこでこの層には全測点において、上下に 20 m の間隔を置き 2 台の流速計を設置した。実際の解析においては 2 台の流速計の測定値やその分散を考慮しながら、互いの欠測期間や異常値を補い合っこの層での時系列データを得た。最浅部がこの深度に計画されたのは、係留系への漁業などによる障害を避けるためや、黒潮強流による係留系の大きな動揺を避けるためである。

流速計は Fig. 2 の黒丸と白丸の位置に設置されたが、白丸は流速データが得られなかったことを示している。II 期の測点 CM8 の白丸は係留系が回収できなかったためであり、その他の白丸はデータ不良のため解析に使えなかったことを意味する。

3. データ

流速計により計測したのは流向、流速、水温、圧力である。ただし圧力計はすべての流速計には装着しておらず、また水温データも一部不良があった。解析に先立ち、潮汐や内部波の影響を除去する目的でローパスフィルターの一つ、ゴディン・フィルター¹⁰⁾を適用した。

係留系は海底からの立上げ式であるため、系の傾きにより計測する深さは常に変化する。特に、流速が大きくなった時にはこの効果が大きくなる。海洋上層部では水温や流速の鉛直変化が比較的大きく、この深さ変化は時には大きな問題となることがある。ところが、流速計の圧力計は相対的な変化に対しては信頼性が高いが、その絶対値に関してはかなりのバイアスを示すことがある。このバイアスを見積るために CTD 観測との比較校正を行なった。圧力値に比べ信頼性の高い流速計の水温値と CTD の水温値を基準にして、CTD の圧力値から流速計の圧力計バイアスを見積った。また圧力計が装着されていない流速計については CTD データを参考にすると共に、流速計の流速データを基に、係留系の三次元モーメントバランスの仮定を用いて、系の傾きと計測深度の推定を行なった。この補正の詳細に関しては別の報告を準備中である。

700 m 層に設置された流速計の平均深度を Fig. 3 に示す。各期間、各測点でかなりの差異が見られる。さらに各時刻でも計測深度は常に変化している。前に述べたように海洋上層部では水温や流速の鉛直変化が比較的大きい。このままでは黒潮の水温と流速の基本構造や時間変動の解析が難しくなるので、標準層における時系列として補正を行なう必要がある。ここでは黒潮強流域を重視し、深さ 650 m を標準層とする補正を行なった。水温躍層の深さは黒潮強流域では 200-500 m、黒潮再循環流域では 400-700 m である。

水温時系列の補正は CTD/XBT 観測により得られた、水温鉛直分布の相似性を利用して行なった。また流速の補正についてはいくつかの方法^{11),12)}があり、本研究でもそれらの利用を試みたが思わしい結果は得られなかった。これは水温躍層を上下に挟む流速計データがないのに加え、後で述べるように東進する小蛇行^{13),14)}に伴い黒潮の流路がたびたび南北に大きく偏移していたことが原因と考えられる。このため流速については一部の解析を除き深度補正は行なわれていない。今後 IES データ等を併用した補正が必要となる。

4. 観測結果

四国沖では黒潮は平均的には Fig. 1 に示された ASUKA 観測線に直交して流れている。この観測線は南北方向から約 25° 傾いている。そこで以後の解析では、観測線に沿う沖向き方向を x 軸、直交する東向き方向 (黒潮下流方向) を y 軸とし、それぞれ対応する流速成分を、u, v と

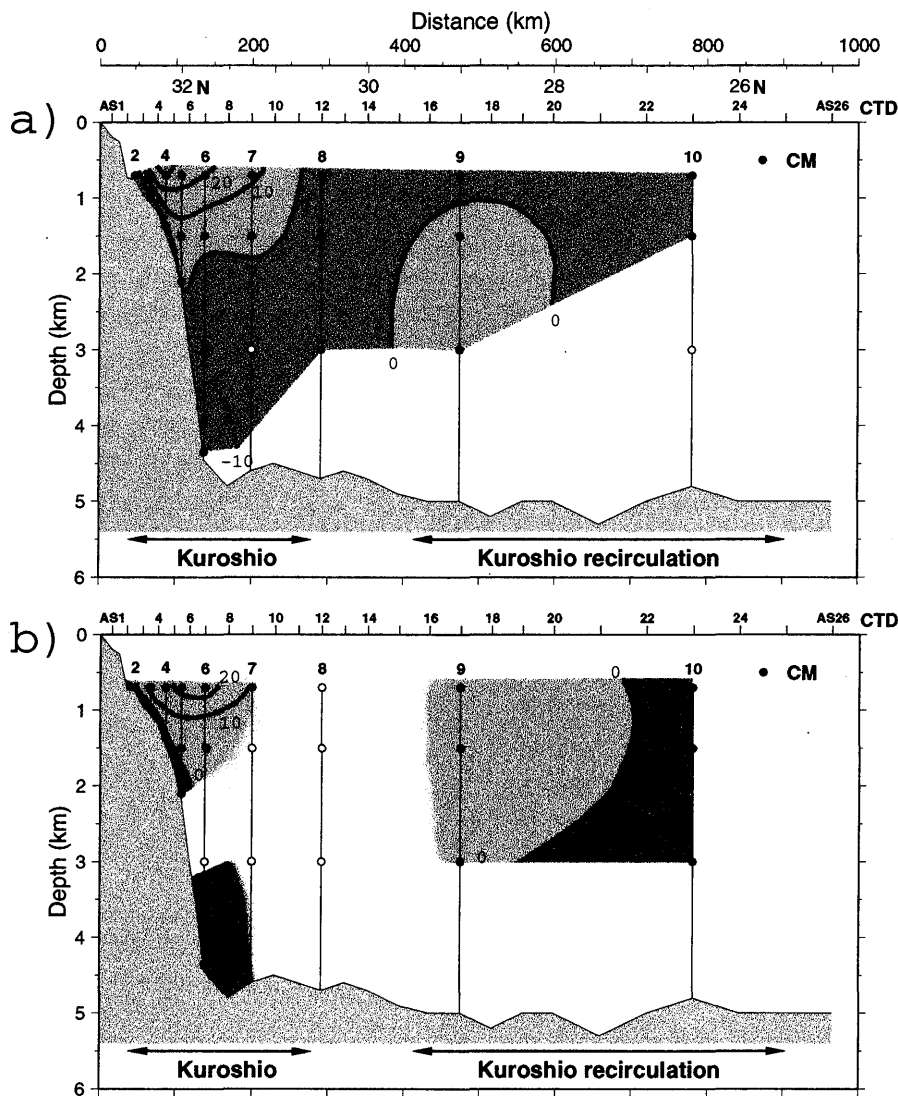


Fig. 2. Current meter arrangements on the vertical section with temporally averaged velocities normal to ASUKA line (positive, east-northeastward). a) is for the first period and b) is for the second period. Solid (open) circles indicate the current meters with (without) available current data. Light (dark) shaded area indicate positive (negative) values. Contour interval is 10 cm/s.

する。また流速 v 成分を簡単に東向流と表現することもある。

流速平均構造

黒潮および黒潮再循環流域での、ASUKA 測線に垂直な流速成分 v の鉛直断面分布を Fig. 2 に示す。I 期と II 期で使用可能なデータに違いがあることや、平均値の安定性を見るために各期(約 1 年間)ごとに平均操作を行なった。

黒潮に相当する 10 cm/s の流速は深さ 1000 m 程度まで達しており、東向流(正值)は深さ 2000 m 付近まで認められる。また深さ 700 m において、10 cm/s の流速は 31°N, 東向流の南側は 30.5°N 付近まで広がっている。ただし、これは約 1 年間の時間平均値(オイラー平均値)であり実際の黒潮の幅を示している訳ではないことに注意すべきである。

黒潮の沿岸側には弱い反流が存在し、さらに 2000 m 以深にも陸棚斜面に沿って反流が存在する。陸棚斜面最深部の測点(CM6)では最大で 30 cm/s(平均 15 cm/s)に達する強い深層流が観測された。これは四国海盆北縁で観測されている深層流の一部¹⁵⁾と考えられる。黒潮再循環流は一般的な反流ではなく、測点 CM9 付近に一部弱い東向流が認められた。中・深層での黒潮再循環流についてはさらに検討する必要がある。I 期と II 期の結果を比較すると、若干の相違はあるが基本的な構造には違いがないといえる。しかしここでの観測期間は黒潮の非大蛇行期間であり、大蛇行期間との比較が待たれる。

Fig. 4 は 700 m 層における、I 期と II 期のそれぞれの期間で平均した流速ベクトルの測線に沿った分布である。最

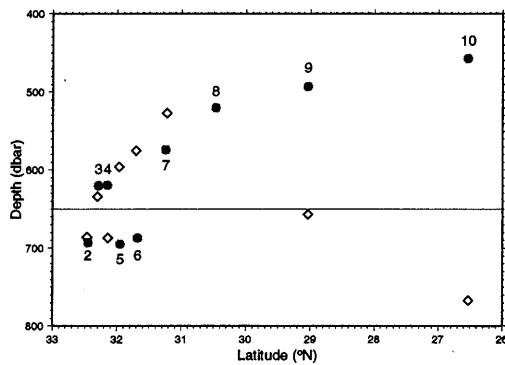


Fig. 3. Temporally averaged depths of current meters deployed in shallowest layers. Solid circle (open diamonds) show the latitudes and depths of the current meters for the first (second) period. Numbers of 2 to 10 indicate CM station numbers.

大平均流速の位置は、I 期では測点 CM4 に、II 期では CM5 にあり、その値は約 30 cm/s と 28 cm/s である。いずれも平均的には黒潮はほぼ測線に直交して流れ、また沿岸側の測点 CM2 に反流が認められる。この層の黒潮強流域で流速が最も大きな部分を黒潮流軸と考えると、黒潮の沖側部分では流軸に向かって収束する傾向があり、岸側部分での、流軸とほぼ平行な流れとは異なった様相を呈している。ただし、ここでは I 期と II 期での流速計設置深度の違いや期間中の深さ変化に対する補正は行なっていないので、その影響の程度を今後見積る必要がある。

流速ベクトル時系列

Fig. 5 は 700 m 層, 3000 m 層, および深さ 4500–4600 m (海底上 100–120 m) の測点 CM6 での、流速ベクトルの時系列である。ただし 3000 m 層の CM5 は深さ 2300–2400 m (海底上 100–120 m) に設置されている。1500 m 層での結果はここには示されていないが、700 m 層と良く似た変動を示している(ただし振幅はかなり小さい)。

700 m 層(Fig. 5a)での黒潮強流部は測点 CM3–CM5 付近にあり、この 3 測点ではほぼ同位相の変化が見られる。ただし時間変化が極めて大きく 1994 年の 5–6 月頃、1995 年の 2–3 月頃と 5–6 月頃にはこれらの測点では反流となっている。これはこの時期に黒潮の小蛇行が測線を西から東に通過したためであることが[海洋速報](海上保安庁水路部)等を参照することにより明らかである。この反流と対応して黒潮の強流部が測点 CM7 付近まで南下していることがわかる。この時、測点 CM6 にははっきりとした反流は見られず、沿岸側の反流はここまでは達していなかったことがわかる。測点 CM8–CM10 では変動成分が平均値より大きく、平均的な流向を確定するのは難しい。最も沿岸よりの測点 CM2 では他の測点と異なり、流向の変化はほとんどなく等深線に沿った往復流(平均では反流)がほとんどである。この流速計が陸棚斜面上約 130 m に設置されていたことを考慮すると、海底地形の影響を強く受けた、どちらかという局所的な流れであると考えられる。

流速変動成分については詳しくは述べないが、特に興味ある結果として、近慣性振動周期では負の回転成分が卓越し、その運動エネルギーは沖側ほど大きくなる特徴的な

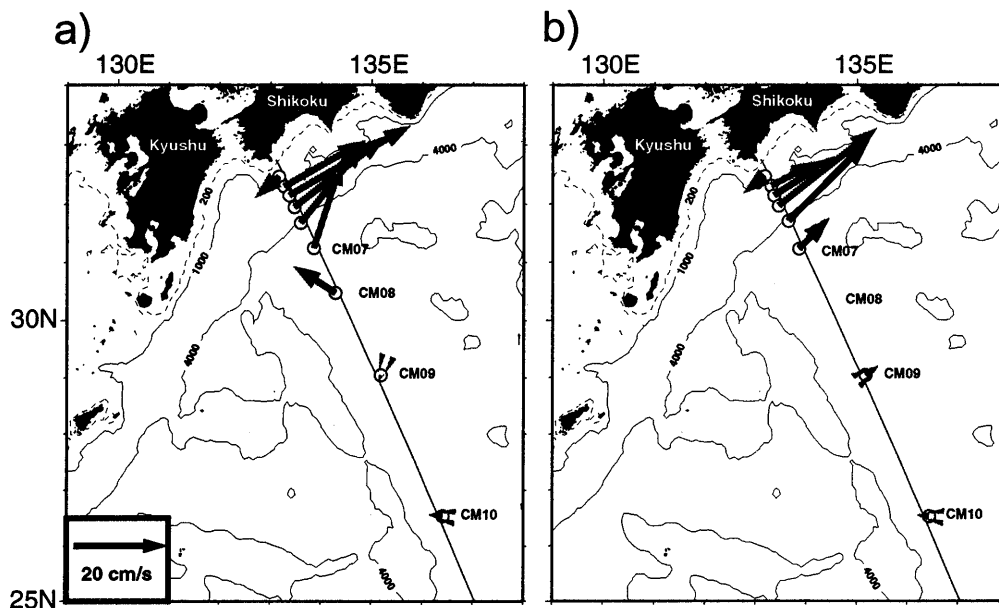


Fig. 4. Temporally averaged current vectors at about 700 m depth. a) is for the first period and b) is for the second period.

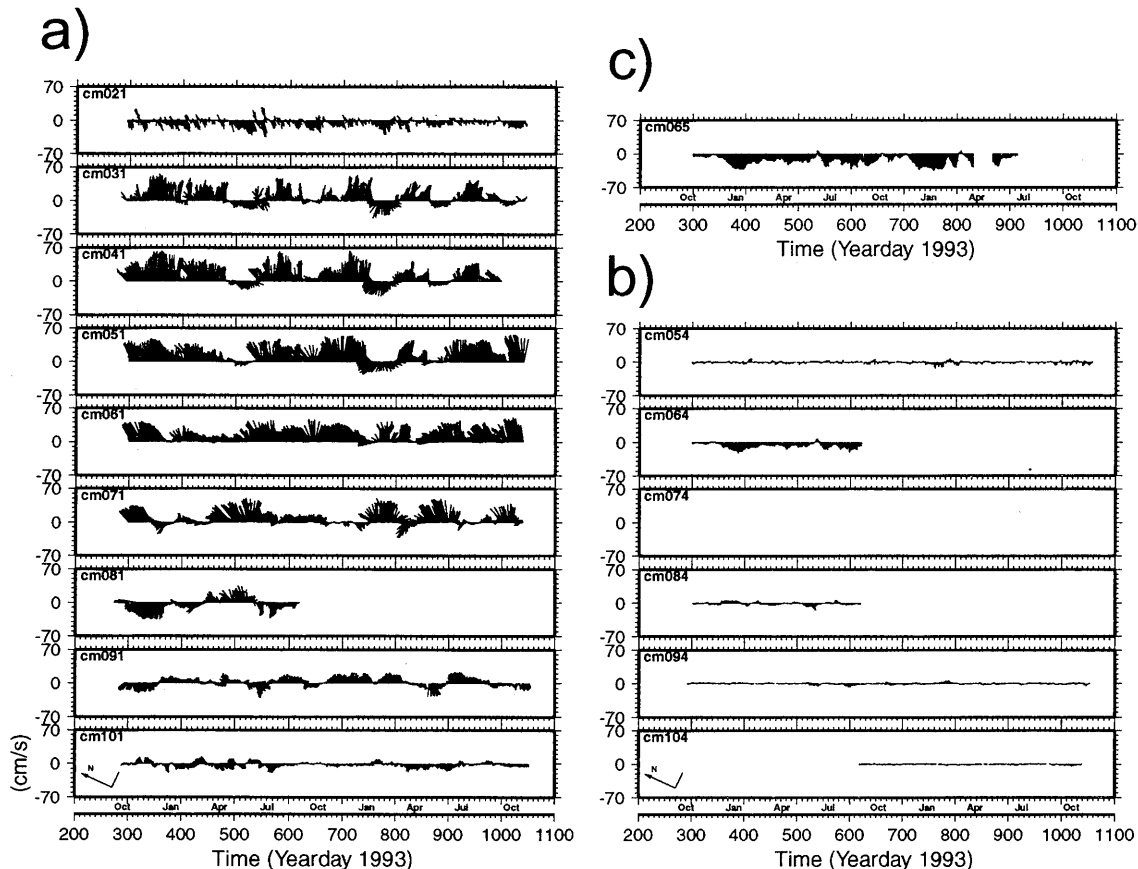


Fig. 5. Time series of current vector stick diagram. Upward indicates the downstream direction of the mean Kuroshio, normal to ASUKA line. a) 9 panels (CM2-CM10) show the results at 700 m depth layer, b) 6 panels (CM5-CM10) show those at 3000m depth layer (CM5 is deployed near the bottom), and c) the panel (CM6) shows that from the deepest level (near the bottom).

分布を示す¹⁶⁾ことが報告されている。

3000 m 層 (Fig. 5b) では流れの変動は 700 m 層のそれとほとんど関連がないように見える。さらに流速の大きさも、測点 CM6 を除けば小さい。測点 CM6 では流速は比較的大きく (最大で約 20 cm/s)、さらにこの測点の海底付近 (Fig. 5c) での変動と位相がよく合っている。流速は深い方が大きく、また流向が等深線に沿った方向であることから、この流れが海底に拘束された深層流であることがわかる。そこには季節変動の存在が窺われるが、観測期間 (約 2 年間) が十分に長くはないことを考慮すると明確とは言い難い。

流路変動

黒潮の流路は時々大きく南に偏移している。この移動は衛星海面高度計データの解析等から黒潮の小蛇行の通過を反映していると考えられる。黒潮流路の偏移は ASUKA 集中観測期間中にしばしば起こっており、黒潮の基本構造や時間変動を解析する際に大きな問題となる。さらに主に表層の黒潮で観測される、このような流路の移動が下層でも同様に起こっているのか、あるいはこの流路の移動が黒潮流量

の変動と関連するのかわかる問題もある。ここでは、温度躍層付近の基準深度で、黒潮流路の時間変動と共に変化する、いわゆる流路座標系¹⁵⁾を導入して黒潮流速場の基本構造を解析する。

Fig. 6 に、深さ 650 m における水温と流速 (絶対) 値の空間-時間図を示す。時間軸は 1993 年 1 月 1 日を基点とする YearDay (YD) で表示されている。水温は 3 節で述べた深度補正を行ない、流速については可能な限り 700 m 層と 1500 m 層の値を内挿して補正している。いずれも 5 日の移動平均を施したものである。I 期、II 期ともに 5-6 月に顕著な離岸流路をとっているが、ここではその季節変動については触れない。水温が 7-8 °C の付近が水温の水平勾配が最も大きく、この深さでの黒潮の流軸と一致していると考えられる。Fig. 6b に 7 °C の等温線を重ねているが、流速値が最大の位置とほぼ一致している。ただし注意すべきは、II 期には係留系 CM8 が回収できなかったために、後半の測点 CM7 と測点 CM9 の間は、前半に比べて分解能が悪くなっていることである。そのため 7 °C の等温線より沖側に位置する 8 °C の位置は後半には不明確になっている。

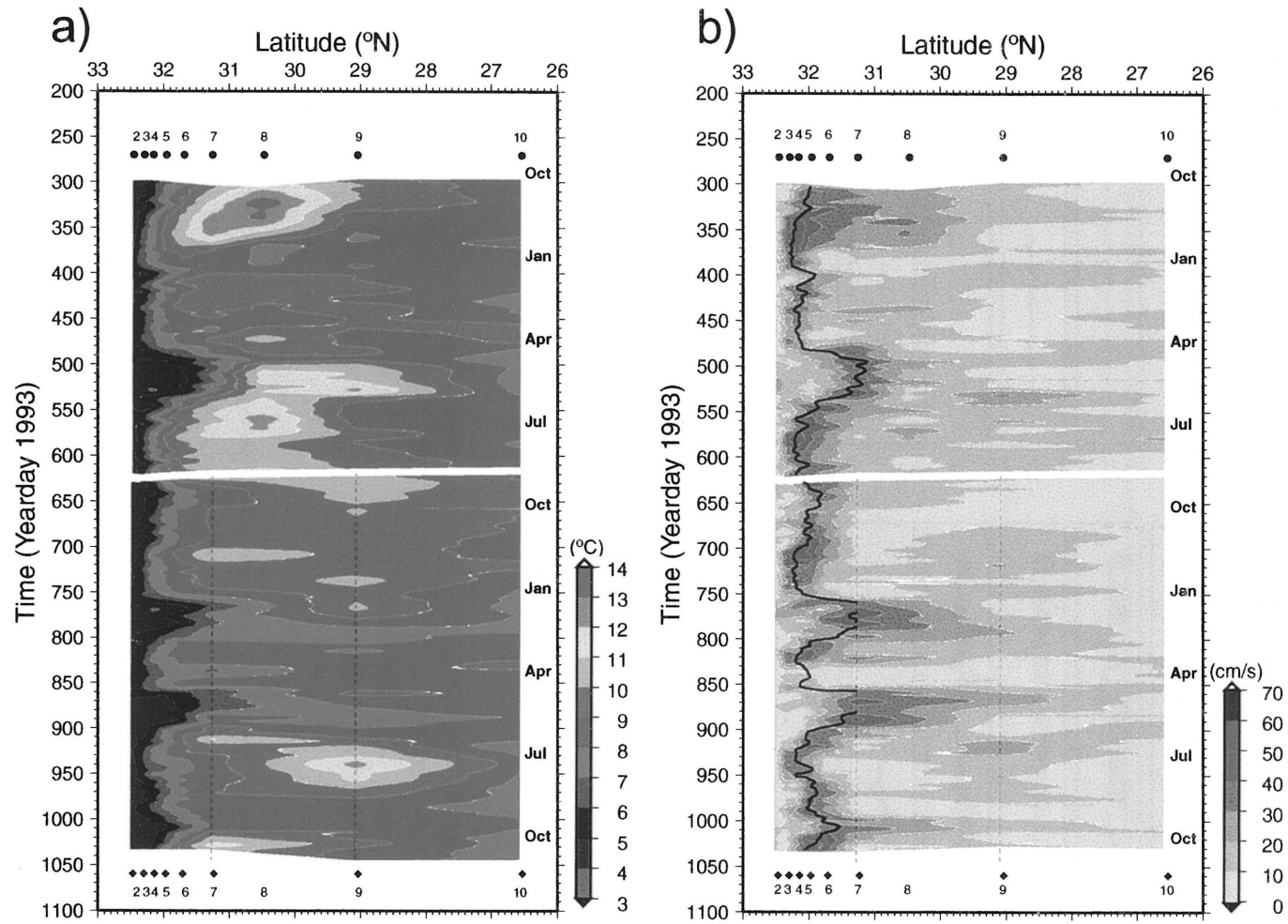


Fig. 6. Time-latitude plots of temperature and current speed at 650 m depth. Both of a) temperature and b) current speed are estimated every 5 days. 7°C isotherm is drawn in the right panel as a blue line for comparison with locations of maximum speed.

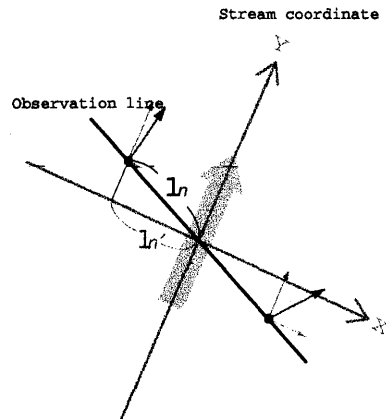


Fig. 7. Schematic diagram of stream coordinate system. The origin of the stream coordinate is the location of 7°C at 650 m depth on the observation line. Direction of Y-axis coincides with that of the averaged current vector at the two adjacent stations.

黒潮には、表層だけではなく 650 m 層でも、岸の近くを通る接岸流路と、大きく南に偏移する離岸流路があることが示された。以降の解析のために、接岸流路の期間と典型的な離岸流路の期間を次のように設定する。ここでは接岸流路の期間は YD で、305-470, 570-615, 650-750, 930-990, 離岸流路の期間は YD で、480-540(1994 年 5-6 月頃), 760-810(1995 年 2-3 月頃), 860-920(1995 年 5-6 月頃), とした。

この層での黒潮流軸の大きな位置変化を考慮し、流路座標系¹⁷⁾を導入して解析を行なった。その方法を Fig. 7 で模式的に説明する。ここで導入した流路座標系では、測線上の深さ 650 m での水温 7°C の位置に原点をおき、その位

置を挟む両側の測点の水深 650 m での流速ベクトルから、内挿により原点での流向を推定し、その方向に Y 軸を設定する。さらに X 軸を Y 軸と直交するように設定し、各測点の X 座標を黒潮流軸から各測点までの距離としている。正值は測点が黒潮の下流に向かって右側(沖側)にあることを示している。この座標系を用いることにより、黒潮流速場の基本構造を解析する際、黒潮流路の移動や黒潮の流向変化の影響を軽減することができる。

黒潮流軸の位置変化は Fig. 6 に見られるように 100 km を超え、また流向の変化の幅は、図は示さないが 150° を超えている。流路座標系は厳密には原点の近傍でしか有効ではないが、このように黒潮の幾何学的な時間変化が大きいため、その導入の意義があると考えられる。Fig. 8 に、流路座標系で見た深さ 650 m での流速の空間分布を、接岸期と離岸期に分けて示す。ここで V は、各位置での流速の黒潮流軸方向成分であり、横軸は黒潮流軸からの距離を表す。

黒潮の幅を V が 0 となる位置で評価すると、接岸期には、流速の最大値は約 60 cm/s、黒潮の幅は約 120 km であるのに対し、離岸期にはそれぞれ、約 50 cm/s、約 170 km となり、離岸期にはやや最大値が小さく、また幅が広がる傾向がある。またどちらの期間も沿岸側のほうが沖側に比べて流速の水平シアーが大きい。ここで黒潮を正の V を持つ部分と規定し、その単位深さ当たりの流量を試算すると、接岸期には約 36 Sv/km である。離岸期には約 43 Sv/km であるが、岸側の反流約 7 Sv/km を差し引くと約 36 Sv/km となり、接岸期の流量とほぼ等しくなる。またこの幅は、時間平均(オイラー平均)で見積られた東向流の幅(Fig. 2)よりもかなり小さい。ここでは示さないが、黒潮流軸と直交する流速成分(U)

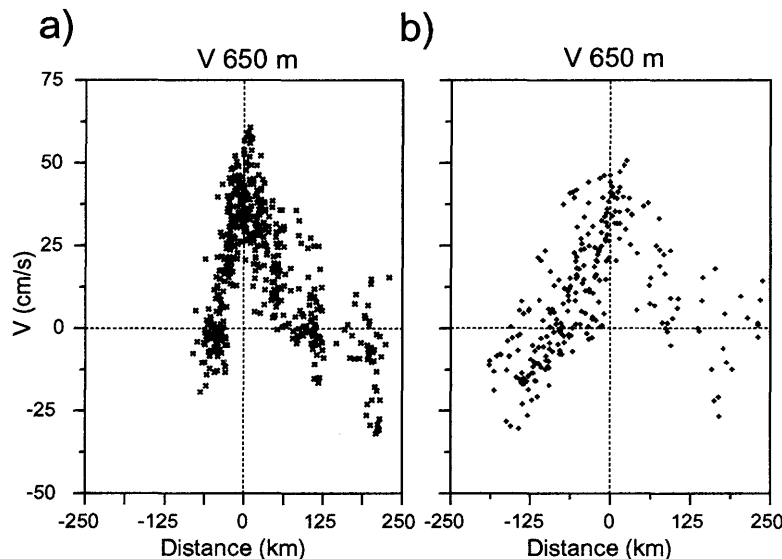


Fig. 8. Horizontal distributions of V component at 650 m depth on stream coordinate. a) is for a near coast path period; maximum speed is about 60 cm/s, and the width is about 120 km. b) is for an offshore path period; maximum speed is about 50 cm/s, and the width is about 170 km. Currents flowing in opposite direction are found on the onshore side.

に関しては、沿岸側ではその正負に明確な差がないのに対し、沖側では負の成分、すなわち流軸に向かう傾向が見られた。この結果は、700 m 層での時間平均した流速ベクトルの水平分布の結果 (Fig. 4) と一致している。

5. ま と め

ASUKA の集中観測で得られた、係留流速計のデータを解析した。観測期間は約2年間であり、前半と後半の各々約1年間での流速平均構造を求めた。基本的な構造については両者に違いはなかった。平均的な黒潮流軸は深さ 700 m 付近では、四国足摺岬沖の 32°N 付近に位置する。黒潮の東向流は深さ 2000 m 程度まで達している。陸棚斜面上には弱い反流が存在し、陸棚斜面の最深部では強い深層流が観測された。黒潮は時に大きく離岸し、31°N 付近まで南下することがある。この離岸には九州南東で発生する小蛇行の東進が関与している。黒潮の流軸は接岸時、離岸時ともに深さ 650 m では 7°C の等温線の位置とほぼ一致する。流路座標系の導入により、離岸時には黒潮の幅は若干広がり、最大流速は小さくなることが示された。

ここで得られた黒潮流速構造に基づき、黒潮流量の見積りが試みられているが、今後は IES 等の観測結果を統合して、より詳細な解析を行なう必要がある。

謝 辞

ASUKA の集中観測期間中に、九州大学、鹿児島大学、東海大学によって実施された係留観測のデータを用いた。現場協同観測に参加された ASUKA グループの方々、および各機関の観測船や調査船の船長はじめ乗組員の方々に深く感謝します。CTD/XBT データの整理・解析をされた海洋科学技術センターの内田裕博士、流速計のデータ解析に協力頂いた橋部雄志氏に感謝いたします。また図の一部は安倍大介氏に作成していただきました。この研究の一部は文部省の海洋観測国際協同計画 (GOOS) および科学技術振興事業団の戦略的基礎研究、研究課題「黒潮変動予測実験」(代表、今脇資郎) の一環として行なわれた。

参 考 文 献

- 1) Vonder Haar, T. H. and A. H. Oort: New estimation of annual poleward energy transport by northern hemisphere oceans, *J. Phys. Oceanogr.*, **3**, 169-172, 1973.
- 2) Hastenrath, S.: On meridional heat transports in the world ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, **12**, 922-927, 1982.
- 3) MacDonald, A. M. and C. Wunsch: An estimate of global ocean circulation and heat fluxes, *Nature*, **382**, 436-439.
- 4) Taft, B. A.: Structure of Kuroshio south of Japan, *J. Mar. Res.*, **36**, 77-117, 1978.
- 5) Takematsu, M., K. Kawatate, W. Koterayama, T. Suhara and H. Mitsuyasu: Moored instrument observation in the Kuroshio south of Kyushu, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **42**, 201-211, 1986.
- 6) 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.
- 7) Imawaki, S., H. Uchida, H. Ichikawa, M. Fukasawa, S. Umatani and ASUKA Group: Time series of the Kuroshio transport derived from field observations and altimetry data, *Int. WOCE Newsletter*, **25**, 15-18, 1997.
- 8) Imawaki, S., H. Uchida, H. Ichikawa, M. Fukasawa, S. Umatani and ASUKA Group: Satellite altimeter monitoring the Kuroshio transport south of Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 17-20, 2001.
- 9) 今脇 資郎, 馬谷 紳一郎, 内田 裕, 市川 洋, 深澤 理郎, ASUKAグループ: 四国沖の黒潮の流量の評価, 九州大学応用力学研究所所報, **82**, 97-112, 1997.
- 10) Godin, G.: *The Analysis of Tides*, Liverpool University Press, 246pp, 1972.
- 11) Hall, M. M.: Horizontal and Vertical Structure of the Gulf Stream velocity field at 68°W, *J. Phys. Oceanogr.*, **16**, 1814-1828, 1986.
- 12) Hogg, N. G.: On the Correction of Temperature and Velocity Time Series for Mooring Motion, *J. Atmos. Oceanic Tech.*, **3**, 204-214, 1986.
- 13) Kawabe, M.: Variations of current path, velocity, and volume transport of the Kuroshio in relation with the large meander, *J. Phys. Oceanogr.*, **25**, 3103-3117, 1995.
- 14) Endoh, T. and T. Hibiya: Numerical Study of the Generation and Propagation of Trigger Meanders of the Kuroshio South of Japan, *J. Oceanogr.*, **56**, 409-418, 2000.
- 15) Fukasawa, M., T. Teramoto and K. Taira: Abyssal current along the northern periphery of Shikoku Basin, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **42**, 459-472, 1986.
- 16) 鹿島 基彦, 馬谷 紳一郎, 今脇 資郎, 市川 洋, 深澤 理郎: 日本南方黒潮域における慣性周期近傍の流速変動, 九州大学応用力学研究所所報, **117**, 71-77, 1999.
- 17) Johns, W. E., T. J. Shay, J. M. Bane and D. R. Watts: Gulf Stream structure, transport, and recirculation near 68°W, *J. Geophys. Res.*, **100** (C1), 817-838, 1995.