

— 論文 —

九州南方での水温前線の北上に伴う水温・流速変動*

斉藤 勉^{†‡}・秋山 秀樹[†]・今脇 資郎^{**}・市川 香^{** ††}・
奥野 章[†]・瀬藤 聡[†]・馬谷 紳一郎^{**}・田中 耕治^{‡‡}

要 旨

九州南方において黒潮に伴う水温前線が20日程度の周期で繰り返し北上する現象を、はじめて三次元的かつ時間発展的に記述することを試みた。2000～2003年に実施した計6回の三次元的で密な観測で得た水温・流速のデータおよび中之島での水位データを、観測時の前線位置を指標として並べ替え、その妥当性を他の期間に連続して得られた衛星海面水温画像の時系列および中之島での水位データによって検証した上で、現象の三次元的な時間発展を調べた。その結果、水温前線の北上は、薩摩半島南方の大陸棚斜面上に形成された300 m深に及ぶ構造をもつ高気圧性の黒潮前線渦(暖水舌)が、北東方向に移動して消滅する過程の一側面であることが分かった。

キーワード：水温前線，暖水舌，黒潮前線渦，水温場，流速場

1. はじめに

黒潮北縁の水温前線は黒潮前線と呼ばれ、そこにしばしば形成される高・低気圧性渦は黒潮前線渦と呼ばれる。東シナ海陸棚縁辺から九州南方の黒潮前線周辺域にはマイワシやマアジなどの水産資源の産卵場が形成されることから、これらの黒潮前線渦は、卵・仔稚魚輸送との関連で調査研究の対象となってきた。例えば、宮地(1989)は、東シナ海陸棚縁辺から九州南西方における高気圧性の黒潮前線渦の形成過程とそれに伴う水塊輸送を調べ、マイワシの資源量増大期の九州南方

における産卵場形成にこの渦が果たす役割について考察した。本研究においては、マアジの仔稚魚輸送に対する興味から、九州南方に形成される黒潮前線渦に着目した。この海域は、マアジの主産卵場である東シナ海から、その仔稚魚が日本南岸の沿岸域へ海流により輸送される際の通過点となる。そのため、この海域の黒潮前線渦に伴う水温・流速場の変動は、日本南岸でのマアジの資源量変動に対して直接的に何らかの影響を及ぼしている可能性がある。

本研究の調査対象海域の海底地形(Fig. 1)の特徴は以下の通りである。調査対象海域の東側にあたる大隅半島から種子島(TN)、屋久島(YK)周辺に、九州東岸(日向灘)から連続する大陸棚(200 m以浅の領域)が分布する。この大陸棚上の、佐多岬(ST)と種子島の間には水深100 m程度の水路(大隅海峡)がある。また、屋久島南方のトカラ海峡に屋久新曾根(YS)が存在する。屋久新曾根の最浅部は水深140 m程度であり、屋久島と屋久新曾根の間は水深400 m程度の水路となっている。

* 2007年8月30日受領；2007年11月14日受理
著作権：日本海洋学会，2008

† 水産総合研究センター中央水産研究所
〒236-8648 横浜市金沢区福浦2-12-4

‡ 九州大学大学院総合理工学府
〒816-8580 春日市春日公園6-1

主著者 e-mail address : tsaito@fra.affrc.go.jp

** 九州大学応用力学研究所 〒816-8580 春日市春日公園6-1

†† 海洋研究開発機構 〒237-0061 横須賀市夏島町2-15

‡‡ 鹿児島県水産技術開発センター
〒891-0315 指宿市岩本字高田上160-10

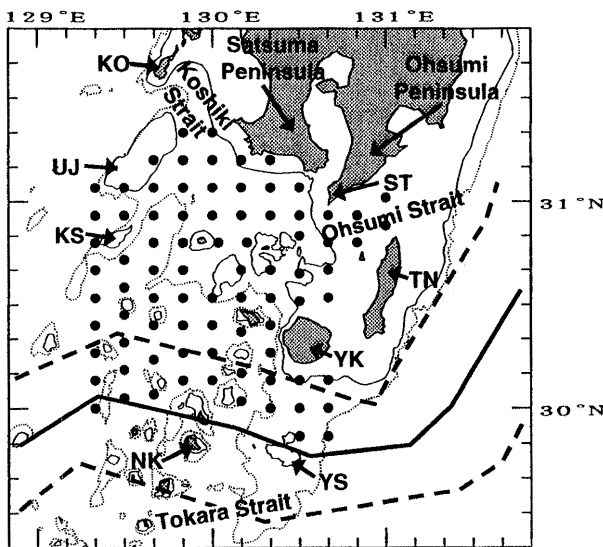


Fig. 1. Bottom topography south of Kyushu and locations of stations of CTD/LADCP observations. Depth contours of 200 m are shown by thin solid lines, and those of 500 m are shown by thin dotted lines. The mean position of the Kuroshio axis (the thick solid line) and its standard deviation range (between two thick dashed lines) are shown, following Yamashiro and Kawabe (2002). See Table 1 for abbreviations.

Table 1. Abbreviations of geographical names.

Abbreviation	Geographical name
KG	Kagoshima
KO	Koshikijima-rettou (Islands)
KS	Kusagaki-guntou (Islands)
NK	Nakanoshima (Island)
NZ	Naze
ST	Satamisaki (Cape)
TN	Tanegashima (Island)
UJ	Uji-guntou (Islands)
YK	Yakushima (Island)
YS	Yakushin-sonne (Rise)

調査対象海域の西側には、九州西岸から甌島列島 (KO) にかけて分布する大陸棚の南西に、水深 300 m 程度の水路 (甌海峡) を挟んで宇治群島 (UJ) 周辺の大陸棚が

分布する。さらに、その南に草垣群島 (KS) がある。東西二つの大陸棚地形に挟まれた薩摩半島南岸には発達した大陸棚は見られず、南西方向に緩やかに傾斜した大陸棚斜面 (水深 200 m から 600 m 程度まで) が存在する。また、調査対象海域の南側に中之島 (NK) がある。

調査対象海域と黒潮流軸との関係を見るために、Fig. 1 には、Yamashiro and Kawabe (2002) が 1961~1995 年の観測データを使用して推定した黒潮流軸の平均位置と標準偏差範囲が示されている。中之島と屋久新曾根は、この平均的な黒潮流軸付近にある。本研究の観測が行われた 2000~2003 年の黒潮流軸の位置も、ほぼこれと同じであったことが、衛星海面高度計データと漂流ブイデータを基にして Ambe *et al.* (2004) の方法によって求められた平均海面流速場 (安倍大介, 私信) から確認された。一方、黒潮前線は、後述するフェリー航走水温データによると、平均的には屋久島の南岸付近に位置する。

九州南方の黒潮前線周辺域の水温・流速場および水位の変動には、いくつかの卓越周期が存在することが報告されている (例えば、Nagata and Takeshita, 1985; Yamashiro and Kawabe, 1996)。最近では、これらの周期のうちおよそ 30 日より短い周期の変動が、黒潮前線の変動に伴うものであるとの見方が一般的である (Feng *et al.*, 2000; Nakamura *et al.*, 2003)。

九州南方の黒潮前線周辺域において 20 日程度の周期で起こる現象として、いくつかの興味深い事実が報告されている。Nagata and Takeshita (1985) は、鹿児島-名瀬間のフェリー航路周辺で水温前線が中之島付近から佐多岬へと北上する現象が存在することを報告した。黒潮前線が北西方向に舌状に張り出すように形成される表層の高温域は、暖水舌と呼ばれる。秋山・飴矢 (1991) は、衛星 SST (Sea Surface Temperature) 画像の解析から、水温前線の北上はこの暖水舌が北東方向へ移動することに伴う現象であると考察した。秋山ら (1992) は、この水温前線の北上中に中之島の水位が極大となることを示した。また、Nagata and Takeshita (1985) は、水温前線が佐多岬付近にあるとき、大隅分枝流と呼ばれる東向流が大隅海峡に現れることを報告した。最近では、Nakamura *et al.* (2003) が、2000 年 6 月の船底 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)

による観測結果と衛星 SST 画像から、トカラ海峡西方において、高気圧性渦あるいは低気圧性渦に伴う黒潮北縁部の蛇行が 20 日程度の周期で交互に発達すると考察した。

九州南方で 20 日程度の周期で起こると報告されたこれらの黒潮前線付近の現象は、相互に関連して起こっていると思われる。しかし、これらの現象を同時に観測し、その時間発展について記述した研究はこれまではなく、断片的な描像が得られているに過ぎない。また、これまでの個々の現象に関する記述も表層に限られ、深さ方向を含む三次元的な水温・流動構造についての観測的知見は得られていない。

そこで本研究では、水温前線の北上に着目し、対象海域の水温・流速場の変化を、三次元的かつ時間発展的に記述することを試みる。水温・流速場の変動を段階的に追うために、複数回実施した空間的に密な CTD (Conductivity Temperature Depth recorder) と LADCP (Lowered ADCP) による観測の結果および中之島の水位データを、鹿児島—名瀬間のフェリー航走水温データから検出した観測時の前線の位置を指標として並べ替える。並替えて得られたデータセットに見られる暖水舌や水位変動の振舞を、他の期間に連続して得られた衛星 SST 画像および水位の時系列と比較し、その妥当性を検証する。そして、この並べ替えたデータセットを解析し、九州南方での水温前線の北上に関わる三次元的な水温・流速場の変動について調べる。

本論文の構成は以下の通りである。まず、2 節で、蒼鷹丸により実施した CTD および LADCP による観測の概要、使用したフェリー航走水温データ、中之島の水位データ、および衛星 SST 画像に関する説明とそのデータ処理方法について述べる。3 節では、6 回の観測結果の並替えとその妥当性について述べる。4 節では、それを基にして、水温前線の北上に伴う水温・流速場の変動について述べる。5 節で、得られた結果を考察し、6 節でまとめを行う。

Table 2. Periods of CTD/LADCP observations by the RV Soyo-maru.

Observation	Period of CTD/LADCP observation
A	15–20 June 2000
B	9–14 March 2001
C	17–22 June 2001
D	9–13 March 2002
E	21–25 June 2002
F	8–12 March 2003

2. 観測と資料

2.1. CTD/LADCP 観測

九州南方の黒潮前線周辺域に格子状に配置した 82 測点 (Fig. 1) において、水産総合研究センター所属の調査船、蒼鷹丸 (892 トン) による計 6 回の調査航海 (Table 2) で、海面から海底近くまでの CTD/LADCP 観測を実施した。観測対象海域の水深は全域にわたり 1,000 m 以下であった。

測点間隔は約 15 km で、黒潮前線に形成される暖水舌など、対象とする現象の空間スケール (30 km 程度以上) を考慮して決定した。また、本研究においては、各観測結果を 20 日程度の周期変動の位相の異なる準スナップショットとして取り扱うため、6 回の航海すべてにおいて各測点での観測を同じ順序で行った。各航海において、全測点の観測には 5 日程度を要した。

CTD は蒼鷹丸に装備されている SBE 911 plus 24 Hz CTD を、ADCP は RDI Workhorse 300 kHz ADCP をトランスデューサーを下向きにして CTD フレームに取り付けて使用した。観測手法およびデータ処理の詳細については斉藤 (2008) を参照されたい。

2.2. フェリー航走水温データ

鹿児島県水産技術開発センターは、鹿児島—那覇航路 (名瀬を経由) の定期フェリー「なみのうえ」(6,586 トン) に水温計を設置して表層水温観測を実施してい

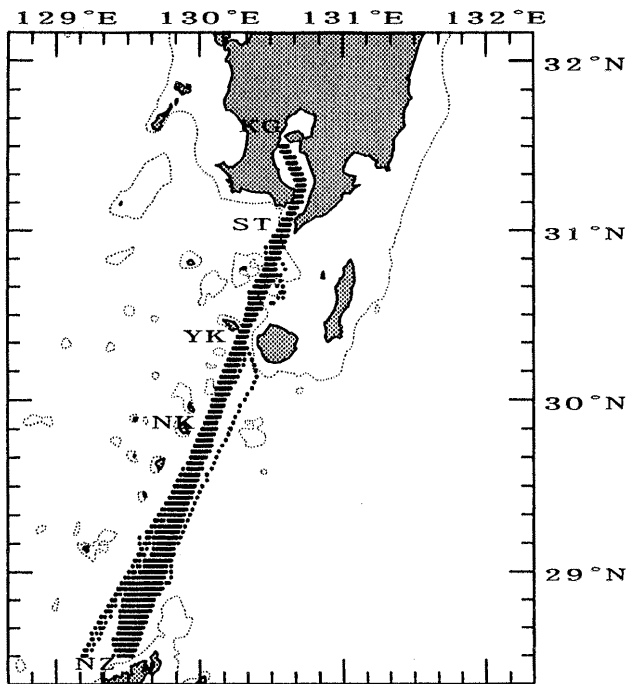


Fig. 2. Positions of sea surface temperature data obtained by a ferry boat. See Table 1 for abbreviations. Depth contours of 200 m are shown by dotted lines.

る。その観測データを、6回のCTD/LADCP観測の前後128日間について処理した。鹿児島(KG)―名瀬(NZ)間の往復路において、時間5分ごとに記録されていたデータを内挿して、緯度2分ごとのデータに変換し解析に使用した。海況により航路を大きく外れて航行したときのデータを除外した結果、使用データの総数(航跡数)は327となった(Fig. 2)。このフェリーは、鹿児島-那覇を4日ごとに1往復し、片道の航行には11~12時間を要した。また、この区間における運行時刻は往復路とも夜間に当たり、その間隔はおおむね2日であった。厳密には往復路のデータ間の時間間隔は緯度によって異なるが、今回は各緯度のデータをそのまま一律に2日間隔として扱った。このデータを使用する目的が時間スケール10~20日程度の水温前線の北上の抽出であることから、この処理方法で問題はないと考えられる。

2.3. 中之島の水位

黒潮流軸の平均位置付近に位置する中之島の水位を、黒潮北縁部の位置の変動の指標として利用した。

日本海洋データセンター(JODC)のJ-DOSS(JODC Data On-line Service System)から提供を受けた2000~2003年の中之島の毎時水位データ(海上保安庁観測)を以下の手順①~④で処理した。

- ① 48時間タイドキラフィルター(花輪・三寺, 1985)により毎時水位データから潮汐成分を除去した。
- ② 日平均データを作成した。
- ③ 農林水産省の農学情報資源システムのWebサイトから入手した屋久島の日平均海面気圧データ(気象庁観測)を使用して、1013 hPaを基準に $[-1 \text{ cm}/+1 \text{ hPa}]$ として気圧補正を行った。都合により中之島のデータが使えなかったが、両者の気圧差は小さく、今回の解析結果にはほとんど影響がないと考えられる。
- ④ フェリー航走水温データと同様に、6回のCTD/LADCP観測の前後128日間のデータを抽出し、各期間平均からの偏差を算出した。

さらに、20日程度の周期変動について検討するために、上記128日間の処理データから周波数解析により14~26日の周期帯の成分を抽出した。具体的には、128日間の水位データを高速フーリエ変換法によりフーリエ成分に変換し、その中の波数5~9の成分のみを逆変換することにより14~26日の周期帯成分の128日間の時系列を再構成した。

2.4. NOAA衛星SST画像

農林水産省の農学情報資源システムのWebサイトから入手した、日合成NOAA(National Oceanic & Atmospheric Administration)衛星SST画像を使用した。この画像は、1日に4~6回程度受信された画像データを合成して作成されている。2000年4月29日~5月14日の期間中、対象海域にほとんど雲のない日合成画像が、3日間隔で得られたのでこれを使用した。

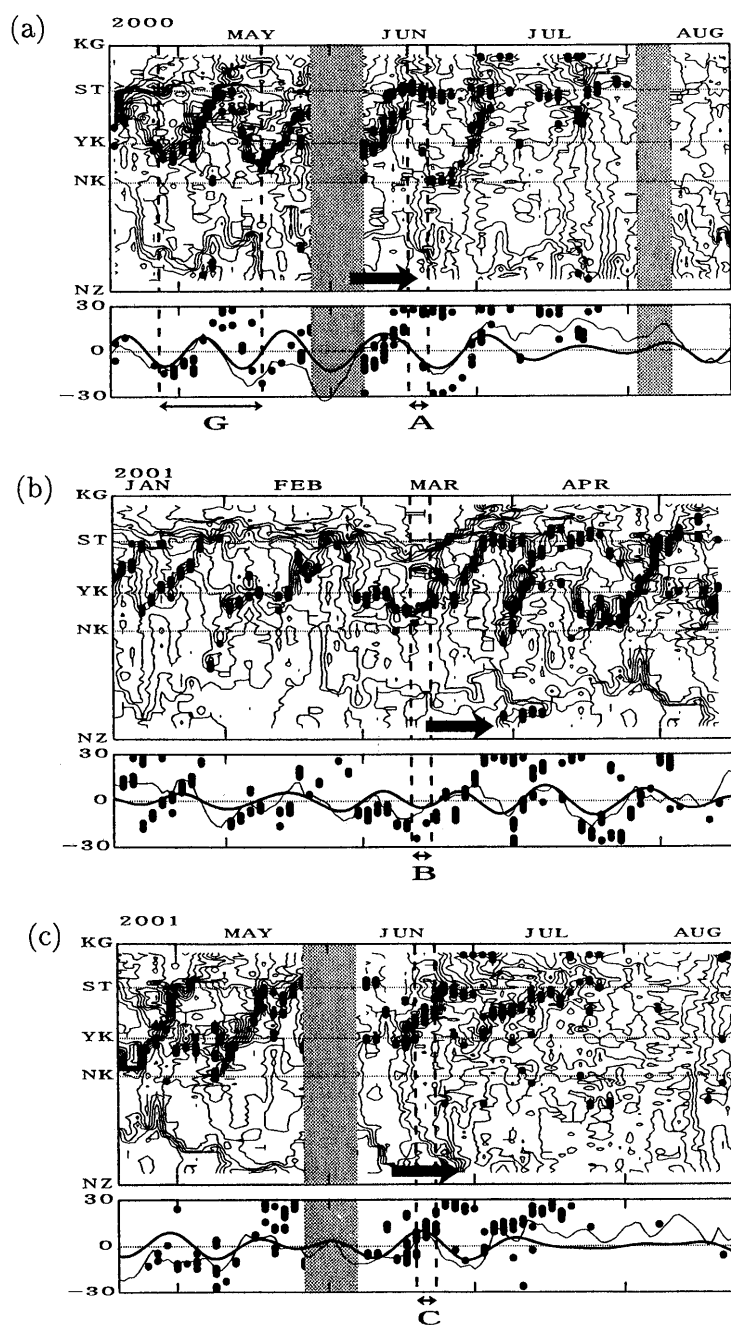


Fig. 3. Time-latitude diagrams of the surface temperature observed by a ferry-boat between Kagoshima (KG) and Naze (NZ) (upper panel) and time series of the sea level anomaly (in cm) at Nakanoshima (NK) (lower panel) during 128 days around CTD/LADCP observations of A to F (panels (a) to (f)). In upper panels, temperature is shown by isotherms with contour intervals of 0.5°C . Dots indicate positions of surface temperature fronts. The block arrow shows the period of northward migration of the temperature front. Shadow shows lack of ferry-boat data during 5 days or more. In lower panels, the thin line shows the original data, thick line shows the component of 14–26 day period, and dots show the front positions between Nakanoshima (NK) and Satamisaki (ST), which are copied from upper panels. The period G shown in panel (a) is expanded in Fig. 4 and should be compared with Fig. 5.

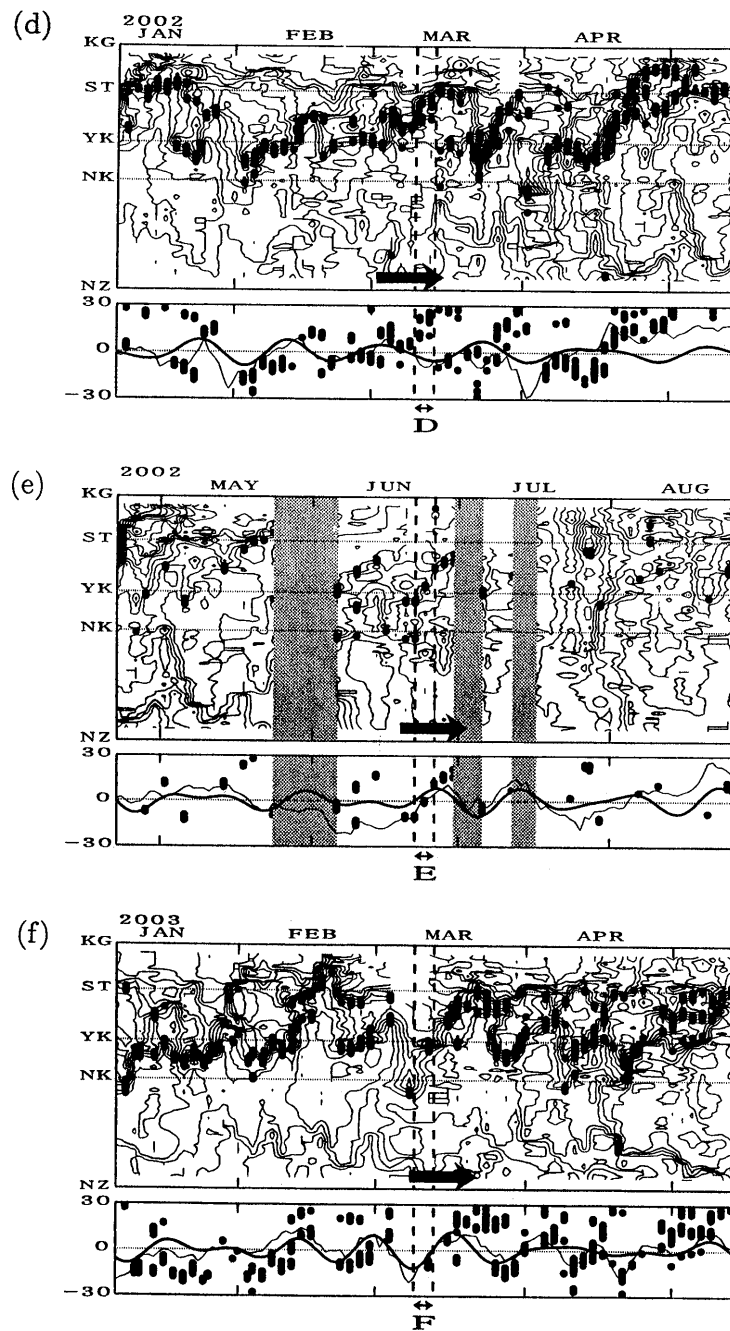


Fig. 3. Continued.

3. 観測結果の並べ替え

3.1. 表層水温と中之島水位の変動の関係

Fig. 3(a)~(f)の上段に6回のCTD/LADCP観測の前後128日間の鹿児島(KG)―名瀬(NZ)間のフェリー航走水温の時間変化を示す。各航走について水温前線

の位置を示すため、各図における128日間の水温データの佐多岬(ST)―中之島(NK)間での平均値(m)と標準偏差(σ)を算出し、水温が $m \pm 1.5\sigma$ の範囲に入る領域で南向きの水温勾配(緯度8分間のデータから算出)が $0.07^\circ\text{C}/\text{km}$ 以上となる場所に黒丸を表示した。Fig. 3の中央の2本の太い破線で挟まれた期間A~F

は、6回のLADCP観測期間を示す。6回の観測期間すべてにおいて、14日程度の時間スケールで屋久島(YK)の南から佐多岬(ST)方向への水温前線の北上が起こっていた。それらの期間をFig. 3にブロック矢印(長さは14日とした)で示す。

Fig. 3の下段に同じ128日間の中之島の水位偏差の時系列を示す。6回の観測期間A~Fに起こっていた水温前線の北上と対照すると、秋山ら(1992)の報告どおり水温前線の北上中に中之島の水位にピークが現れている。さらに詳細に見ると、これらの前線の北上およびその前後に見られた前線の北上のいずれにおいても、前線が屋久島と佐多岬の間にあるときに中之島の水位の14~26日周期帯成分が極大となっている。このことは、水温前線の北上が20日程度の周期で起こっていたことを示している。ただし、前線の北上自体は14日程度で屋久島の南から佐多岬にまで達している。

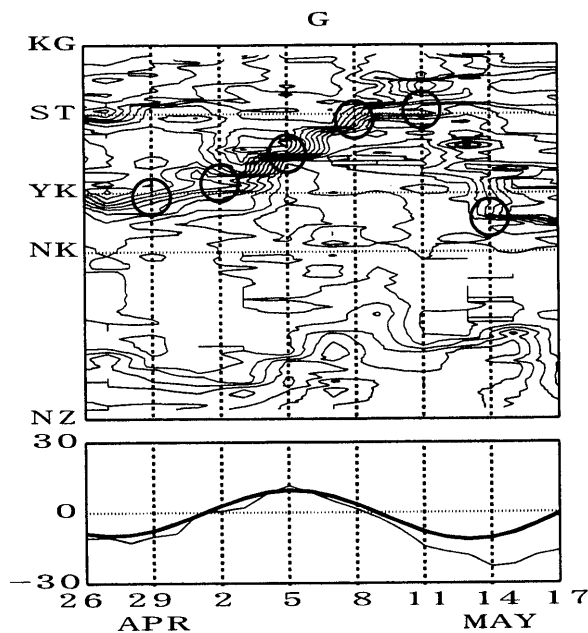


Fig. 4. Same as Fig. 3 but for the period G shown in Fig. 3 (a). Circles indicate positions of the temperature front derived from the ferry-boat surface temperature data.

次に、フェリー航走水温データで検出された水温前線の北上の一つの例を、同時に得られた連続した衛星SST画像と対照する。Fig. 3(a)の期間G(2000年4月

26日~5月17日)の部分を拡大してFig. 4に示す。この期間に起こった屋久島の南から佐多岬方向への水温前線の北上は、15日程度の時間スケールを持つ(4月27日~5月12日に北上)。その間の中之島の水位は16日程度の周期で正弦関数的に変化し、北上中の水温前線が屋久島と佐多岬の間にあるとき(5月5日)に極大となっている。この期間中に3日間隔で連続した6枚のNOAA衛星SST画像が得られていた。それらをFig. 5に示す。黒潮前線における暖水舌(矢印)の形成とその北東方向への移動が見られ、それに伴って水温前線が北上している。これは、秋山・飴矢(1991)の考察と符合する(ただし、彼らは連続した衛星SST画像は示していない)。

3.2. 並替えとその妥当性

水温前線の北上に伴う三次元的な水温・流速場の変動を段階的に追い、時間発展的に記述するために、6回のCTD/LADCP観測結果を、観測時のフェリー航路上の水温前線の南北位置を指標として並べ替え、その妥当性を検証する。

Fig. 3の期間A~Fの部分を拡大して、フェリー航路上の水温前線が南にあるものから順にB→F→E→C→D→Aと並べ替えるとFig. 6のようになる。Fig. 6において、水温前線は屋久島の南から佐多岬まで北上し、その間の中之島の水位は、各観測期間での平均値や変動の振幅の違いに起因すると考えられるばらつきが見られるものの、ほぼ正弦関数的で連続的な変化を示している。この変動パターンは、水温前線が屋久島と佐多岬の間にあるとき(期間C)に、中之島の水位の14~26日周期変動が極大となるという点も含め、期間G(Fig. 4)で水温前線の北上が見られた15日間(2000年4月27日~5月12日)の変動パターンとよく似ている。そこで今後、この並びをphase 1から6と呼ぶ。

次に、6回の観測で得られた5 m, 30 m, および200 m深の水温・流速分布を上記と同じ順に並べるとFig. 7のようになる。各観測の実施年月が異なることから、季節・経年変動などの長周期成分の影響を取り除くため、Fig. 7の水温場の表示では、各観測について82測点の

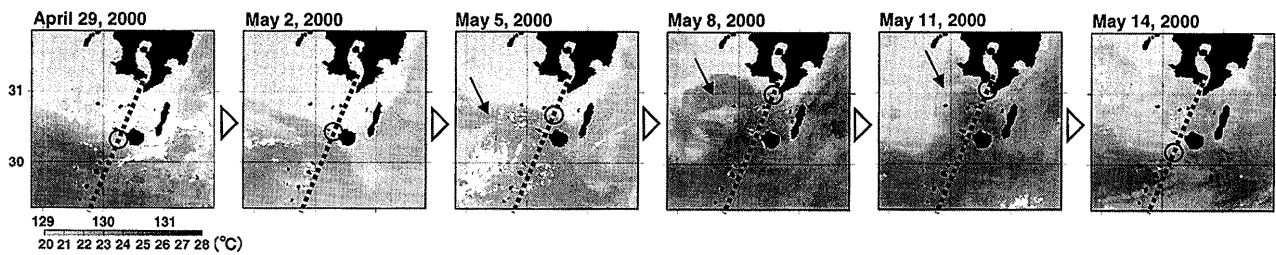


Fig. 5. The sequence of satellite images of sea surface temperature obtained at three day intervals during the period G (Fig. 4). The dotted line shows the ferry-boat route and the circle shows the position of temperature front as shown in Fig. 4. Arrows indicate the warm tongue-like structure.

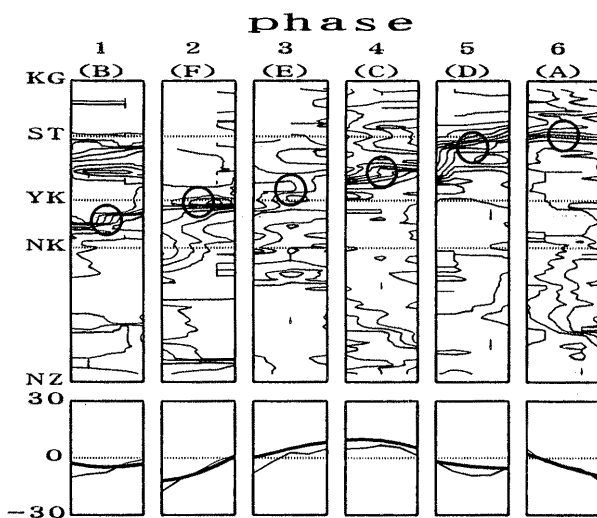


Fig. 6. Same as Fig. 3 but for the sequence of observations of A to F. Rearrangement has been made in the order of observations B, F, E, C, D and A, following the north-south position of temperature front, which is shown by the circle.

平均値 (m) と標準偏差 (σ) を求め、 $m \pm 2\sigma$ の範囲で水温レンジを設定した。各観測時のフェリー航路上の水温前線の位置 (Fig. 6) は、5 m 深における水温前線の位置とよく一致している。また、5 m 深の水温場の黒潮前線を見ると、phase 4~6 において暖水舌が形成され、北東方向に移動するパターンを示している。その暖水舌の規模と位置の変化は、期間 G に連続して得られた衛星 SST 画像の時系列 (Fig. 5) の 3~5 枚目 (2000 年 5 月 5 日~5 月 11 日) に見られるものとよく一致している。

さらに、フェリー航路上の水温前線の位置は、30 m および 200 m 深の水温場における水温前線の位置ともよく一致している。そして、phase 4~6 において、5 m 深と同様に、舌状の高温域が形成され、北東方向へ移動するパターンを示している。これらの結果は、フェリー航路上で見られる水温前線および暖水舌が、海面から少なくとも 200 m 深に及ぶ構造をもっていたことを示している。今後この論文では、表層だけではなく中層にも及ぶ舌状の高温域を、暖水舌と呼ぶこととする。

ところで、200 m 深の水温場の並びにおいて、黒潮北縁部の蛇行の峰に対応する高温域 (phase 4~6 では暖水舌の根元部分と明確には区別できない) が、phase 1 から phase 6 の順に西から東へと移動するのが分かる。この高温域では、黒潮北縁部の主水温躍層が深くなっており、上層の暖水が厚くて海面水位が高い。中之島の水位 (Fig. 6) は、この高温域が西から近づく phase 1~3 で上昇し、その位置が中之島のほぼ真北となる phase 4 でもっとも高く、東へ遠ざかる phase 5~6 で下降している。つまり、phase 1~6 の 200 m 深の水温場の並びは、中之島の水位変動と整合的である。

以上のように、この phase 1~6 の観測結果の並びは、他の期間に連続して得られた衛星 SST 画像の時系列および中之島の水位変動と対照した結果、暖水舌の形成および北東方向への移動に伴って水温前線が北上することや、水温前線の北上中に中之島の水位が極大となることなど、多くの共通点がある。さらに、200 m 深の水温場における黒潮北縁部の高温部の位置の変化も連続的であり、中之島の水位の 20 日程度の周期変動を

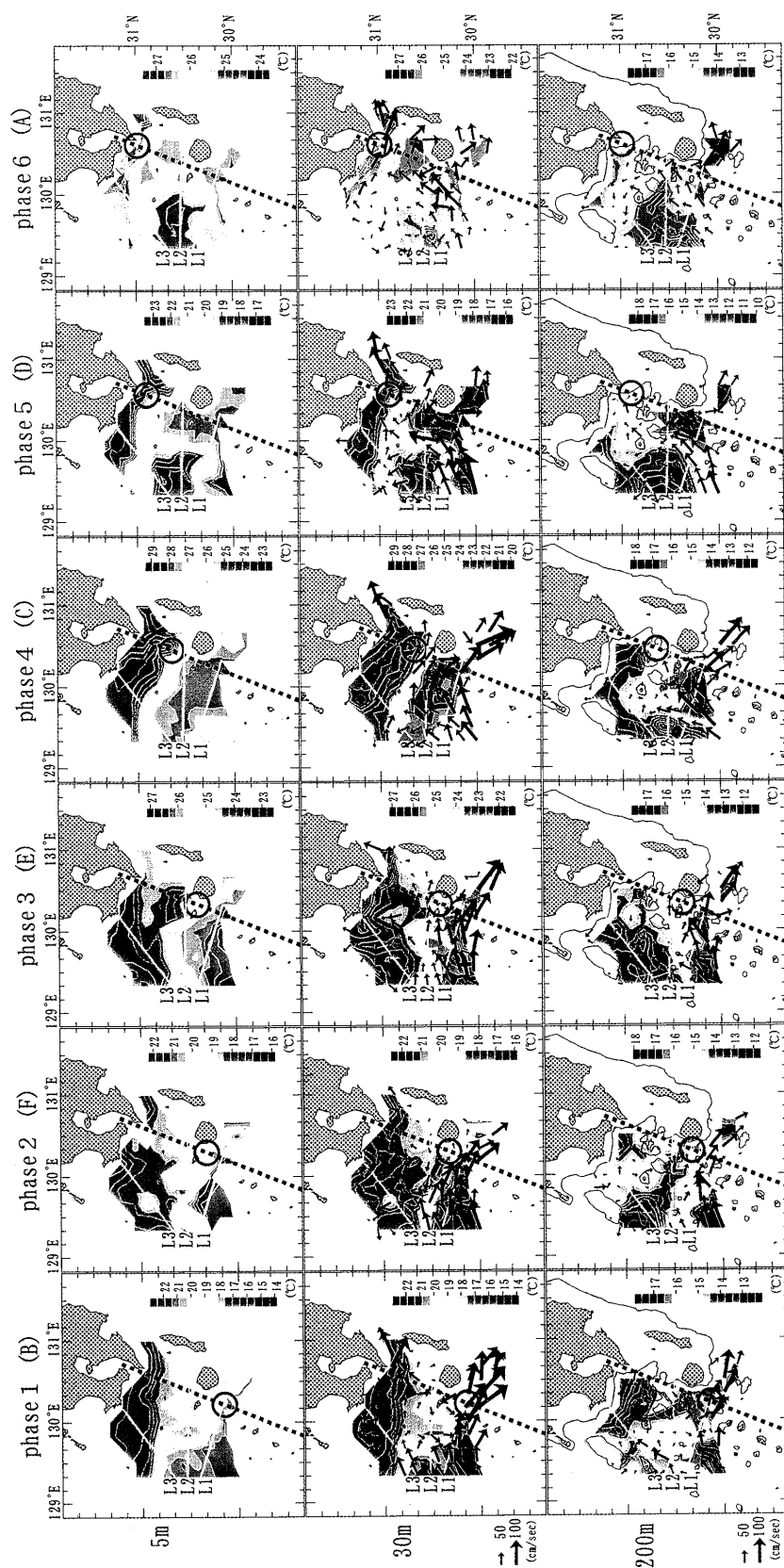


Fig. 7. The sequence of horizontal distributions of temperature and velocity at three selected depths, after the rearrangement shown in Fig. 6. Upper panels show temperature at 5 m depth, middle panels show temperature and velocity at 30 m, and lower panels show temperature and velocity at 200 m together with depth contours of 200 m. Temperature is shown in color, with color bars different among panels. Velocity is shown by arrows, whose scale is displayed in the left margin. The dotted line shows the ferry-boat route and the circle shows the position of temperature front shown in Fig. 6. White lines show locations of three vertical sections (L1, L2, and L3) shown in Fig. 8.

よく説明している。従って、この並替えで得られた水温・流速場のデータセットが、現象の時間的发展を十分に捉えていると判断することができる。

4. 並べ替えられた水温・流速場の変動

並替えで得られたデータセットを基にして、九州南方での水温前線の北上に伴う三次元的な水温・流速場の変動について調べる。そのため、前述の水温・流速場の平面図の並べ替え (Fig. 7) の他に、3本の測線 L1, L2, L3 の断面図に関する並べ替えを行い Fig. 8 に示す。ここで、測線 L1 は、Yamashiro and Kawabe (2002) の黒潮流軸の平均位置と平行に黒潮北縁部に、L2 は、phase 4~6 の暖水舌の中心付近を横切る方向に、L3 は、その暖水舌の先端近くを横切る方向に配置してある。また、Fig. 9 に、30 m 深の流速分布を並べ替えた結果 (Fig. 7) を模式化した図を示す。

4.1. 黒潮北縁部の変動

最初に黒潮北縁部 (K) の水温・流速場の変動について調べる。

黒潮北縁部は、Fig. 7 の 200 m 深の流速分布でおおむね 50 cm s^{-1} 以上の流れがある部分に相当する。K の 30 m 深における流速は、屋久島の西で $80 \sim 120 \text{ cm s}^{-1}$ 程度である。K は phase 1~6 の 30 m および 200 m 深のいずれにおいても、観測領域内で蛇行して峰を形成し、屋久島-屋久新曾根間の水路を通過し太平洋側へと延びている。この K の蛇行の峰は、3.2 節で述べたように、200 m 深の水温場において高温域となっており、phase 1~3 で西から中之島に近づき (中之島の水位が上昇)、phase 4 で中之島のほぼ真北となり (中之島の水位が極大)、phase 5~6 で中之島から東へ遠ざかっている (中之島の水位が下降)。この間の水温前線は、phase 1~3 に屋久島 (YK) まで北上し、phase 4~6 に屋久島から佐多岬 (ST) まで北上している (Fig. 6)。

K の蛇行の北向流領域 (正の流速成分) の鉛直構造を、L1 の流速断面 (Fig. 8(b)) で見ると、 20 cm s^{-1} 以上の流速を示す範囲が海面から 400 m 深にまで達している。水温の等値線の傾きからこの流れの鉛直スケールを判断すると、500 m 深まで及んでいることが分かる。

4.2. 水温前線の北上

次に、水温前線が屋久島から佐多岬まで北上する過程に対応する phase 3~6 の水温・流速場の変動について調べる。

phase 4~6 には、3.2 節で述べた暖水舌が、黒潮北縁部 (K) の蛇行の峰に対応する高温部から北西方向 (薩摩半島南方の大陸棚斜面上) に形成されている。また、phase 3 には、その暖水舌の発生段階と見られる暖水域が、K の蛇行の峰に対応する高温部から北に張り出して形成されている。phase 3~6 の 30 m 深の流速分布 (Fig. 7) に見られるように、これら暖水舌のまわりに

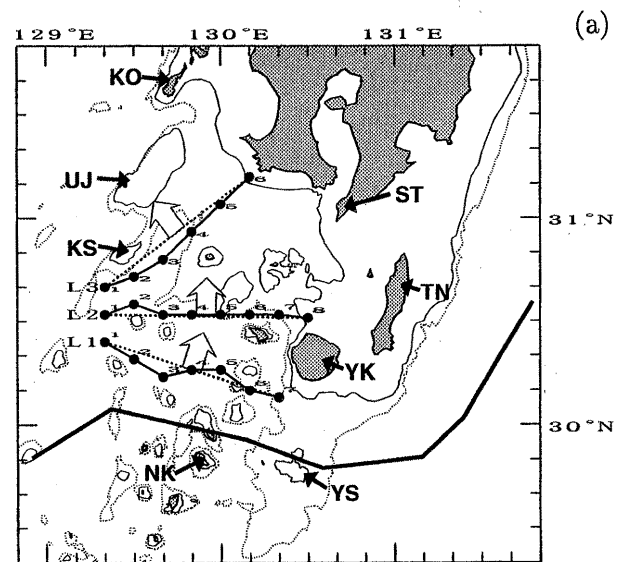


Fig. 8. The sequence of vertical sections (L1, L2, and L3) of temperature and velocity. Panel (a) shows locations of stations used for the sections, together with bottom topography. (b) upper, middle, and lower panels show vertical sections along L3, L2, and L1, respectively. Temperature is shown by isotherms with contour intervals of 2°C . The velocity component normal to the section is shown in color; red shows positive ($\geq 10 \text{ cm s}^{-1}$) and blue shows negative ($\leq -10 \text{ cm s}^{-1}$), where positive is the direction of the block arrow shown in panel (a).

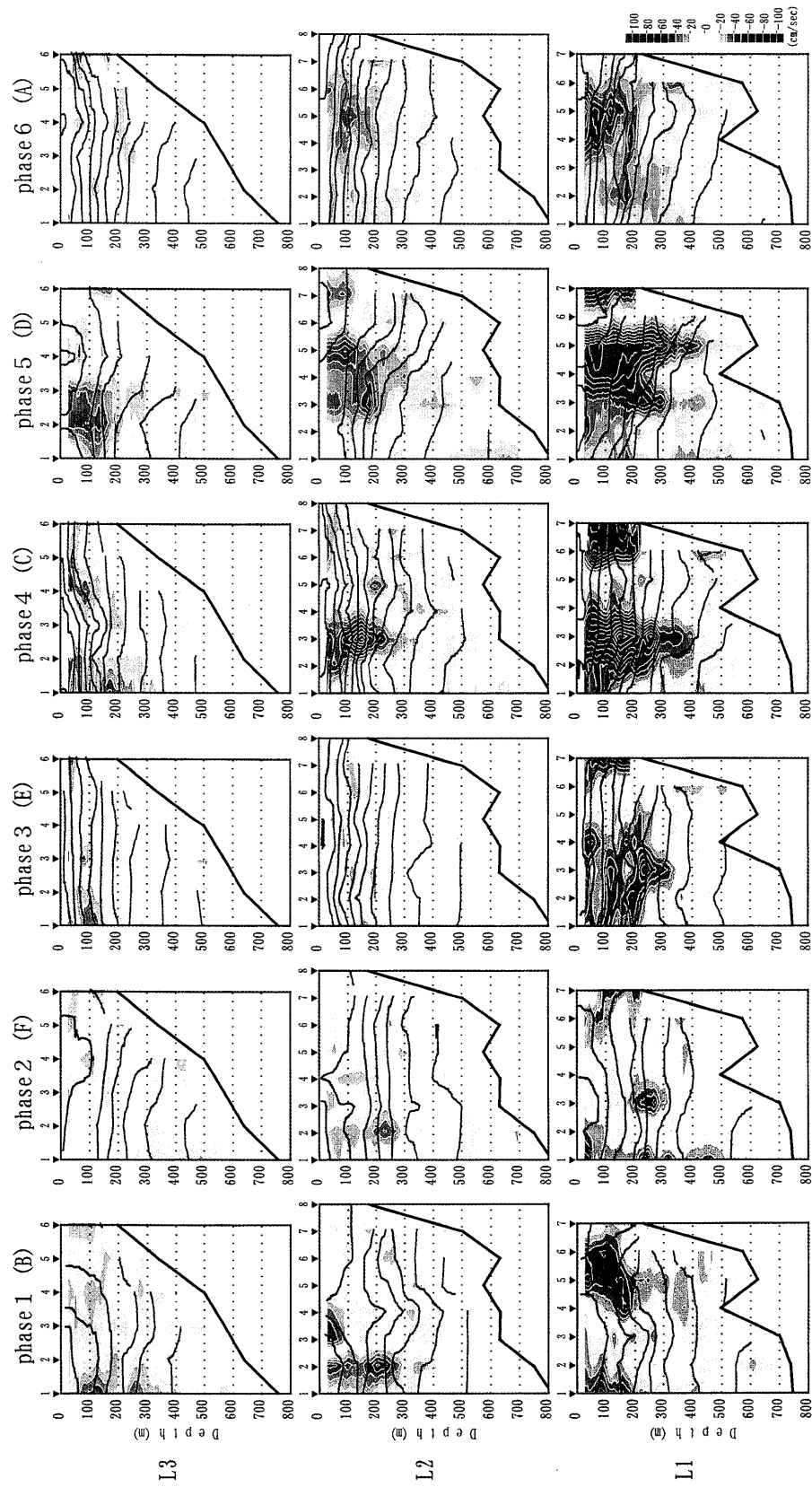


Fig. 8. Continued.

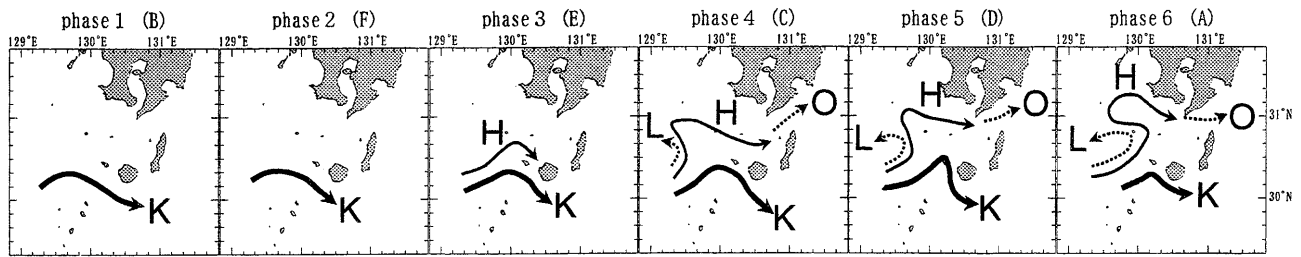


Fig. 9. Schematic diagram of velocity fields at 30 m depth shown in Fig. 7. The arrow labeled K shows the Kuroshio north edge, H, the flow around the warm tongue (anticyclonic frontal eddy), L, the cyclonic eddy, and O, the eastward current in the Ohsumi Strait.

は、時計回りの流れ (H) が形成されている。phase 4~5 の H の流速は、K よりも小さく $40\sim 80\text{ cm s}^{-1}$ 程度である。200 m 深における H も、K ($50\sim 120\text{ cm s}^{-1}$ 程度) と比較すると流速が小さく $20\sim 50\text{ cm s}^{-1}$ 程度である。また、この H は、流向から判断すると、K の蛇行の北向流領域付近から発して、最後は種子島・大隅海峡方向へと流去する。なお、phase 3 と phase 6 での H は 30 m 深で $20\sim 60\text{ cm s}^{-1}$ 程度の流速であり、phase 4~5 と比較して明らかに小さい。phase 3 を暖水舌の発生期、phase 4~5 を発達期、phase 6 を終焉期と見ることができる。

H の鉛直構造を、phase 4~6 の L2 における北向きの流れ (正の流速) および L3 における北西向きの流れ (正の流速) で見ると (Fig. 8), 20 cm s^{-1} 以上の流速を示す範囲が海面から 300 m 深に及んでいる。K の蛇行の北向流領域よりは若干浅いものの、暖水舌は鉛直方向に深い構造を持っていたことが分かる。また、水温断面における等値線の傾きから判断すると、K の蛇行の北向流領域と同様に、暖水舌は 500 m 深に及ぶ鉛直スケールを持っていたと言える。

このように、H と、K の蛇行の峰は、同様な鉛直スケールをもち、移動の位相も同期していた。従って、H を高気圧性の黒潮前線渦と見なすのが適切と考えられる。

ところで、phase 4 の 30 m と 200 m 深の水温場 (Fig. 7) を比較すると、この高気圧性の黒潮前線渦に傾圧的な構造 (高気圧性前線渦の高温域についての 2 層間の空間的なずれ) が明瞭に見られる。すなわち、黒潮北縁部 (L1 付近) では、30 m 深の高温域は 200 m 深より東側に分布するのに対し、高気圧性渦 (L2 および L3 付

近) では、その逆となっている。この水温場の特徴は、Fig. 8 の水温断面でも見られる。さらに、phase 4~5 の高気圧性渦の流速断面 (Fig. 8 の L2) を見ると、200~400 m 深における前線渦の渦軸が上層に向かって東方向 (図の右方向) に傾いている。ただし、これらの傾きは 200~400 m 深の間で 1 測点間隔 (約 15 km) 程度のため、詳細な構造については議論できない。

また、phase 4~6 の 200 m 深の水温場 (Fig. 7) において、暖水舌の西側または南西側に、低気圧性渦 (L) の存在を示すと考えられる相対的な低温域が見られる (この低温域の西側が観測範囲外であったため、これが低気圧性渦であるとは断定できない)。この低温域は、暖水舌の北東方向への移動に伴い東へ移動しているように見える。

さらに、phase 4~6 の九州沿岸の流れに着目すると、30 m 深の流速分布 (Fig. 7) において、大隅海峡の全域に東向流 (O) が形成されている。O は、30 m 深においては 100 cm s^{-1} 以上の流速をもっている。また、O は、流向から見ると高気圧性渦北縁の東向流 (H) と連続しているように見えるが、O の流速は H の流速 (phase 4~5 で $40\sim 80\text{ cm s}^{-1}$ 程度) よりも明らかに大きい。さらに、H と O は水温分布においても不連続であり、O は低温となっている。

5. 議論

今回の並替えて得られたデータセットでは、中之島の水位変動 (Fig. 6) を厳密に見ると、期間 D と期間 A の位相が逆転しているようにも見える。その理由とし

て、期間 D に 20 日程度の周期の変動以外の変動が重なっていたことが考えられる。Fig. 3 を詳細に見ると、期間 D に起こっていた水温前線の北上では、他と比較して、前線の北上開始位置が北に偏っている。それに伴い、前線の北上開始直後に水位が極大となっており、前線の北上と中之島の水位変動との位相関係が他とは若干異なっている。同様の状況は、Nakamura (2005) の数値実験にも見られる。

水温前線の北上過程の phase 4~6 において見られた暖水舌は、東に移動する黒潮北縁部の蛇行の峰の北西方向にあたる薩摩半島南方の大陸棚斜面上に形成されていた。また、暖水舌のまわりには、時計回りの流れが形成されていた。この時計回りの流れと黒潮北縁部の蛇行の峰は、水温・流速場で見ると同様な鉛直スケールをもち、移動における位相も同期していたことから、この暖水舌まわりの流れを高気圧性の黒潮前線渦と見なすのが適当である。

この高気圧性の黒潮前線渦の発達期と考えられる phase 4~5 では、傾圧的な構造が見られた。最近のいくつかの研究 (例えば、増田・奥野, 2002; Isobe *et al.*, 2004; Koketsu *et al.*, 2005) は、黒潮前線渦の発生・発達過程を傾圧不安定波の時間発展として議論している。また、Nakamura (2005) の数値実験では、東シナ海大陸棚縁辺とトカラ海峡の間で形成された黒潮前線渦が傾圧不安定の様相を呈していた。本研究での黒潮前線渦の発生・発達過程も、傾圧不安定による擾乱の成長の可能性があるが、九州南方は地形が複雑であることから、他の力学過程も重要であると思われる。今後、個々の観測データをさらに詳細に解析する必要がある。

高気圧性の黒潮前線渦の終焉期と考えられる phase 6 の観測 (2000 年 6 月 15~20 日) の直前 (2000 年 6 月 12~15 日) に、同じ海域において Nakamura *et al.* (2003) による観測が行われていた。彼らの観測した暖水舌の規模や形成位置は、本研究の phase 5 の結果とよく似ている。さらに、彼らの観測では、暖水舌の南西側に、同様な空間スケールの低気圧性渦が存在していた。この低気圧性渦は、phase 5 における低温域と矛盾しない。また、彼らが観測した暖水舌まわりの流速は、本研究の phase 5 と同程度であり、phase 6 と比較して大きかった。これらのことは、phase 6 を黒潮前線渦の終

焉期と見なしたことを支持している。

phase 4~6 に大隅海峡全域に形成されていた 100 cm s^{-1} 以上の流速をもつ東向流は、Nagata and Takeshita (1985) が報告した大隅分枝流の特徴と一致する。この流れは、暖水舌北縁の東向流と連続しているように見えるが、流速の大きさと水温が不連続であった。斉藤ら (2004) が 2000 年 6 月 21~22 日 (phase 6 の直後) に曳航式 ADCP により測定した大隅海峡とその西側の薩摩半島-屋久島間を通過する流れの流量はほぼ同じであった。また、彼らの水温断面を見ると、大隅海峡で東向流に対応した等温線の傾きが大きくなり、低温水が海峡の北側で海面近くに分布する様相となっていた。水温の不連続はこの構造による可能性がある。大隅海峡の東向流が当海域における 20 日程度の周期を持つ流速変動の一部であるとすると、この流速変動によって、九州南西方の沿岸域から太平洋沿岸域 (日向灘) への東シナ海系水の輸送が助長されると考えられる。実際に、斉藤ら (2004) は、本研究で使用した CTD/LADCP 観測データを用いて九州南方の水塊分布を調べ、phase 4~6 に大隅海峡で見られた東向流が、東シナ海系水を輸送していることを示した。これらの東シナ海系水にマアジの仔稚魚が分布する場合、この流速変動の強弱が、仔稚魚の太平洋側への輸送量に影響を及ぼしている可能性があり興味深い。

ところで、phase 1 では、黒潮前線付近に phase 4~6 の暖水舌とは異なる高気圧性渦が、また甌海峡に南下流が見られる。これらについては、ここで対象とした水温前線の北上との関係が不明であるため、これまで取り上げなかった。phase 1 の高気圧性渦は、本研究の調査対象海域の西方の東シナ海の陸棚縁辺から九州南西方にかけての海域で形成された高気圧性の黒潮前線渦 (宮地, 1989) が、黒潮北縁部の蛇行の峰とともに東へ移動してきた可能性がある。宮地 (1989) は、それに伴い九州西方から九州南方へ東シナ海系水が輸送されることを示した。上記の甌海峡の南下流との関連が注目される。

本研究での九州南方における水温・流速場の変動に関する解析結果は、実際に連続して得られたのではない観測結果を、過去の知見などを基に他の時系列データを利用して、仮想的な連続データに並べ替えたもの

である。各観測時の水温・流速場は、20日程度の周期の変動以外の変動が重なっていることが考えられる(例えば、期間Dの中之島の水位変動)。水温前線の北上に関わる一連の現象を、より定量的な時間発展として議論していくためには、数値実験や、係留系観測による実際の時系列データの取得が必要である。その際、本研究で得られた結果は、数値実験結果の検証および係留系の設置場所の検討材料として非常に有効なものになると考える。

6. まとめ

九州南方の黒潮前線周辺域は、マアジの主産卵場である東シナ海から、仔稚魚が日本南岸の沿岸域へ海流により輸送される際の通過点となる。本研究においては、その仔稚魚輸送に関する興味から、九州南方での水温・流速場の変動に着目した。

この海域で起こる現象として、鹿児島—名瀬間のフェリー航路周辺において20日程度の周期で水温前線が繰り返し北上することが知られている。また、暖水舌の形成とその北東方向への移動、中之島の水位の周期的な変動、および大隅海峡における東向流の形成が報告されている。さらに、同海域の黒潮北縁部において、高気圧性渦および低気圧性渦を伴った蛇行が20日程度の周期で交互に発達することが報告されている。これらの現象は相互に関連して起こっていると考えられるが、これまでは、個々の現象についての主として表層に関する断片的な描像しか得られていなかった。

そこで本研究では、九州南方での水温前線の北上に伴う水温・流速場の変動を、はじめて三次元的かつ時間発展的に記述することを試みた。フェリー航路周辺の82測点(15 km 間隔で格子状に配置)において、海面から海底付近までのCTD/LADCP観測を2000~2003年に計6回実施した。いずれの観測時にも20日程度の周期で水温前線の北上が起こっていた。水温・流速場の変動を時間発展的に追うために、それらの結果をフェリー航路上での水温前線の南北位置を指標として並べ替えた。並替えて得られた水温・流速場のデータセットは、これまでに得られている表層の断片的な描像と整合的であった。

並べ替えられた水温・流速場のデータセットから、水温前線の北上に伴う水温・流速変動の実体は以下のとおりであることが分かった。黒潮北縁部の蛇行の峰が西から東に移動して、屋久島の西方に近づくのに伴い、水温前線は屋久島近くまで北上する。黒潮北縁部の蛇行の峰がさらに屋久島に近づくと、蛇行の峰の北側に高気圧性渦が発生し、暖水域が形成される。この高気圧性渦は薩摩半島南方の大陸棚斜面上で発達し、蛇行の峰から北西方向に伸びる暖水舌が形成される。この暖水舌(高気圧性渦)は300 m 深に及ぶ構造をもち、高気圧性の黒潮前線渦と考えられる。この黒潮前線渦(暖水舌)が北東方向に移動するのに伴い、フェリー航路付近での水温前線は屋久島から佐多岬まで北上する。黒潮前線渦は最終的に薩摩半島近くまで達して消滅する。その間に、黒潮北縁部の蛇行の峰は屋久島の南まで移動する。また、この高気圧性渦に伴い、その西・南西側に低気圧性渦が、また大隅海峡に 100 cm s^{-1} 以上の流速をもつ東向流が形成される。なお、上記の黒潮北縁部の蛇行の峰の西から東への移動に伴い、中之島の水位は前半上昇し後半下降する。このように、九州南方での水温前線の北上は、薩摩半島南方の大陸棚斜面上に形成された高気圧性の黒潮前線渦(暖水舌)が、北東方向に移動して消滅する過程の側面であることが分かった。

水温前線が屋久島から佐多岬まで北上する過程に見られた大隅海峡の東向流の強化が、当海域における20日程度の周期での流速変動の一部であるとする、この流速変動に伴って、九州南西方の沿岸域から太平洋沿岸域(日向灘)への東シナ海系水の輸送が増加し、その強弱が、東シナ海を主産卵場とするマアジの仔稚魚の太平洋側への輸送量に影響を及ぼすことが考えられる。

謝辞

本研究を行う際に、多大な助言を頂いた九州大学応用力学研究所海洋渦動力学分野の皆様にご心からお礼申し上げます。衛星SST画像の処理でお世話になった水産総合研究センター中央水産研究所の清水 学博士、最近の九州南方における黒潮流軸位置に関する情報を提供していただいた水産総合研究センター中央水産研究

所の安倍 大介博士, 6回の九州南方黒潮前線域における観測で多大なご協力をいただいた歴代の蒼鷹丸船長はじめ乗組員の皆様にも心から感謝申し上げます。本研究は農林水産技術会議フロンティア研究「海洋生物資源の変動要因の解明と高精度変動予測技術の開発」の一部として行われた。

References

- 秋山 秀樹・飴矢 智之 (1991): トカラ海峡周辺における黒潮フロントの変動. *海と空*, **67**, 113-132.
- 秋山 秀樹・大野 裕一・斉藤 誠一 (1992): トカラ海峡周辺を通過する黒潮暖水舌. *海と空*, **68**, 99-112.
- Ambe, D., S. Imawaki, H. Uchida, and K. Ichikawa (2004): Estimation the Kuroshio axis south of Japan using combination of satellite altimetry and drifting buoys. *J. Oceanogr.*, **60**, 375-382.
- Feng, M., H. Mitsudera, and Y. Yoshikawa (2000): Structure and variability of the Kuroshio current in Tokara Strait. *J. Phys. Oceanogr.*, **30**, 2,257-2,276.
- 花輪 公雄・三寺 史夫 (1985): 海洋資料における日平均値の作成について. *沿岸海洋研究ノート*, **23**, 79-87.
- Isobe, A., E. Fujiwara, P.-H. Chang, K. Sugimatsu, M. Shimizu, T. Matsuno, and A. Manda (2004): Intrusion of the less saline shelf water into the Kuroshio subsurface layer in the East China Sea. *J. Oceanogr.*, **60**, 853-863.
- Kouketsu, S., I. Yasuda, and Y. Hiroe (2005): Observation of frontal waves and associated salinity minimum formation along the Kuroshio Extension. *J. Geophys. Res.*, **110**, C08011, doi:10.1029/2004JC002862.
- 増田 章・奥野 章 (2002): 黒潮前線渦の傾圧不安定としての側面. *九大応力研所報*, **122**, 25-36.
- 宮地 邦明 (1989): 薩南海域におけるマイワシ産卵場の形成にかかわる海洋環境. *沿岸海洋研究ノート*, **27**, 57-66.
- Nagata, Y. and K. Takeshita (1985): Variation of the sea surface temperature distribution across the Kuroshio in the Tokara Strait. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **41**, 244-258.
- Nakamura, H. (2005): Numerical study on the Kuroshio path states in the northern Okinawa Trough of the East China Sea. *J. Geophys. Res.*, **110**, C04003, doi:10.1029/2004JC002656.
- Nakamura, H., H. Ichikawa, A. Nishina, and H.-J. Lie (2003): Kuroshio path meander between the continental slope and the Tokara Strait in the East China Sea. *J. Geophys. Res.*, **108** (C11), 3360, doi:10.1029/2002JC001450.
- 斉藤 勉 (2008): ボトムトラッキングを用いた簡素なLADCPデータ処理方法. *水産総研セ研報*, **23**, 1-9.
- 斉藤 勉・秋山 秀樹・瀬藤 聡 (2004): 九州南部における海洋構造の変動, p. 52-68. In *マアジの産卵と加入機構-東シナ海から日本沿岸へ-*, 原 一郎・東海 正 編, 恒星社厚生閣, 東京.
- Yamashiro, T. and M. Kawabe (1996): Monitoring of position of the Kuroshio axis in the Tokara Strait using sea level data. *J. Oceanogr.*, **52**, 675-687.
- Yamashiro, T. and M. Kawabe (2002): Variations of the Kuroshio axis south of Kyushu in relation to the large meander of the Kuroshio. *J. Oceanogr.*, **58**, 487-503.

Variation of Temperature and Velocity associated with Northward Migration of the Temperature Front South of Kyushu, Japan

Tsutomu Saito ^{*} [†], Hideki Akiyama ^{*}, Shiro Imawaki [‡], Kaoru Ichikawa [‡] [§],
Akira Okuno ^{*}, Takashi Setou ^{*}, Shin-ichiro Umatani [‡], and Koji Tanaka [¶]

Abstract

The surface temperature front off the southern coast of Kyushu is known to migrate northward repeatedly, having about 20 day cycles. Its features, however, are known only fragmentarily. We try to describe the time evolution of the front in the three-dimensional way. We carried out three-dimensional dense observations about temperature and velocity six times in 2000–2003. The observations are rearranged to give a sequence of temperature and velocity fields which describes the evolution of the front, by using the north-south position of the front as an index. The rearrangement is justified by comparing with successive satellite images of sea surface temperature obtained in a different period. The sequence of temperature and velocity fields shows that northward migration of the temperature front is an aspect of the formation, development and dissipation of an anticyclonic Kuroshio frontal eddy on the continental slope south of Satsuma Peninsula; the frontal eddy extends down to the 300 m depth.

Key words: temperature front, warm tongue, Kuroshio frontal eddy,
temperature field, velocity field

(Corresponding author's e-mail address: tsaito@fra.affrc.go.jp)

(Received 30 August 2007; accepted 14 November 2008)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2008)

^{*} National Research Institute of Fisheries Science, Fisheries Research Agency;
2-12-4, Fukuura, Kanazawa-ku, Yokohama 236-8648, Japan

[†] Interdisciplinary Graduate School of Engineering Science, Kyushu University; Kasuga 816-8580, Japan

[‡] Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University; Kasuga 816-8580, Japan

[§] Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology; Yokosuka 237-0061, Japan

[¶] Kagoshima Prefectural Fisheries Technology and Development Center; Ibusuki, Kagashima 891-0315, Japan