

— 論文 —

## 黒潮の非大蛇行離岸流路期における相模湾の 50–70 日周期の流速変動\*

高橋大介<sup>a†</sup>, 森本昭彦<sup>a</sup>, 中村哲也<sup>b</sup>, 保坂拓志<sup>c</sup>, 三野義尚<sup>a</sup>, 才野敏郎<sup>d</sup>

### 要 旨

相模湾において、2008年に水中設置自動昇降ブイシステムによる係留観測を行い、湾内の流速変動について調べた。日本南岸海域の黒潮流路は、6月3日付近に非大蛇行接岸流路から離岸流路へ遷移し、それとともなって湾内の流動構造が一変した。6月3日以降、黒潮は比較的安定した非大蛇行離岸流路を取り、その間、湾中央部では水深200m付近に最大振幅を持つ50–70日周期の流速変動が卓越した。この流速変動は湾北部の高気圧性の循環の形成に起因し、高気圧性の循環の消長は房総半島沖の黒潮流軸の変動と対応していた。この高気圧性の循環は、 $26.2-26.6\sigma_\theta$ 層のレンズ構造の内部に形成され、湾北部でこの循環が形成されるとき、水深200m以浅では下層水の湧昇が生じた。一方、房総半島沖の黒潮流軸の変動は、約60日周期で生じるS字の蛇行によって特徴づけられ、この蛇行が解消されるとき、湾北部で高気圧性の循環が形成された。この黒潮流軸の変動は、遠州灘から東進して来る擾乱と関連し、擾乱が相模湾沖に到達するとき、黒潮流軸の蛇行も解消された。以上のことから、非大蛇行離岸流路期には、遠州灘を起源とする擾乱によって房総半島沖で黒潮流軸が変動し、それに付随するように、湾北部では高気圧性の循環が形成されることが明らかになった。さらに、この高気圧性の循環の形成が、湾内に50–70日周期の流速変動を引き起こし、この変動は非大蛇行離岸流路期に生じる典型的なものであると考えられる。

キーワード：流速変動，黒潮流軸の変動，非大蛇行離岸流路，水中設置自動昇降ブイシステム，相模湾

\* 2010年12月15日受理；2011年6月2日受理

著作権：日本海洋学会，2011

† 連絡先

現所属 水産総合研究センター 中央水産研究所 海洋・生態系研究センター

〒236-8648 神奈川県横浜市金沢区福浦2-12-4

e-mail address: dtakahashi@affrc.go.jp

045-788-7698

a 名古屋大学 地球水循環研究センター

〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町

b 日油技研工業株式会社

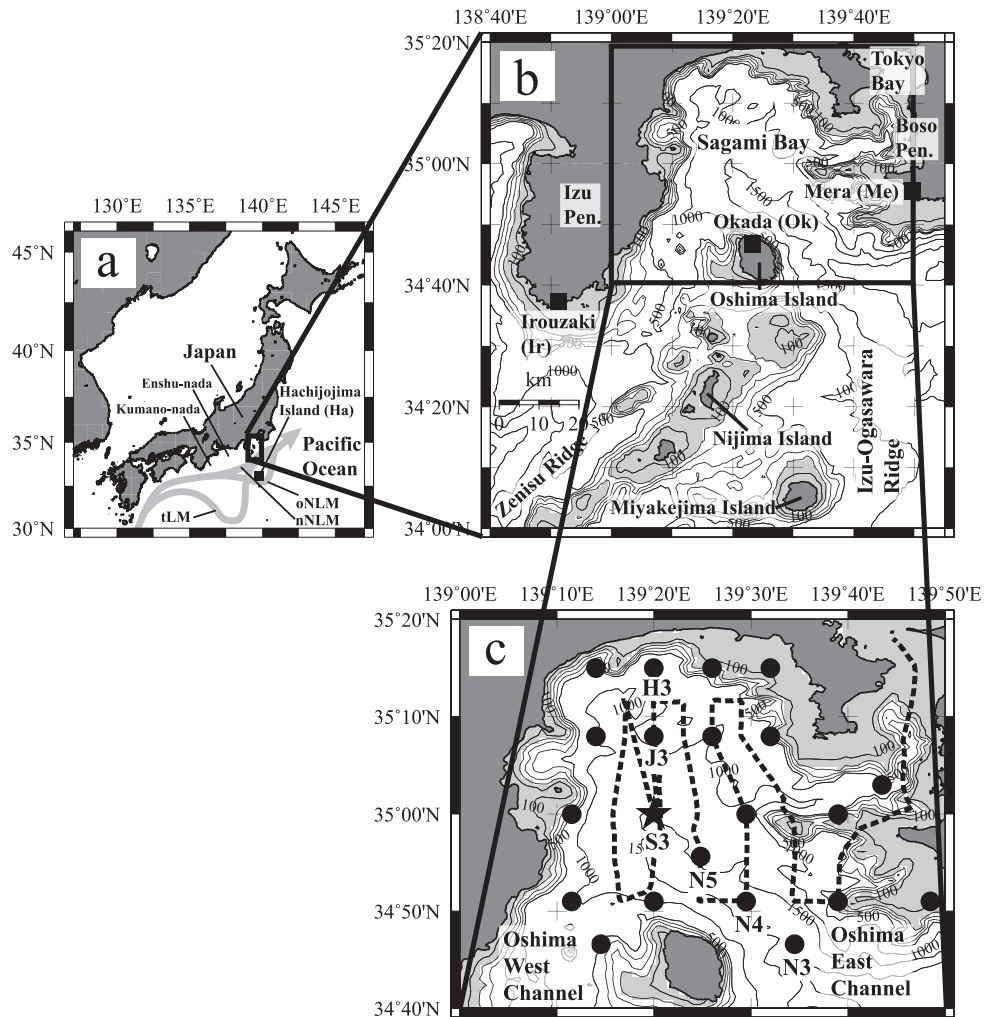
〒350-1107 埼玉県川越市の場新町21-2

c 東京海洋大学 海洋観測支援センター

〒108-8477 東京都港区南4-5-7

d 独立行政法人 海洋研究開発機構 横須賀本部

〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2番地15



**Fig. 1** Location (a) and bathymetry maps (b and c) of Sagami Bay, Japan, showing positions of tidal stations (solid squares) of Irouzaki (Ir), Okada (Ok), Mera (Me), and Hachijojima Island (Ha) in (a and b) and showing station positions on CTD casts (solid circles) and on the mooring position (solid star) and shipboard ADCP observation lines on July 9–10, 2008 (broken lines) in (c). Shaded arrows in (a) represent the typical three types of the Kuroshio path referred to Kawabe (1985), and “tLM”, “nNLM”, and “oNLM” indicate the typical large-meander path, nearshore non-large meander path, and offshore non-large meander path, respectively. Contour intervals for the bottom topography in (b and c) are 100 m and 500 m in the regions shallower than 500 m and deeper than 1000 m, respectively. Light shaded areas in (b and c) represent bottom topography shallower than 200 m.

## 1. はじめに

本州南岸に位置する相模湾は、南北約 50 km、東西約 60 km のほぼ正方形型をしており、南部に湾口を持つ開放性の湾である。湾口中央部には、伊豆-小笠原海嶺の

北端の大島があり、その西側は大島西水道（水深約 600 m）、東側は大島東水道（水深約 1500 m）とそれぞれ呼ばれ、これらを通して北太平洋と繋がっている。湾の海底地形は、急な海底斜面（水深 200–500 m）と、中央部から東水道を通して湾外へ伸びる水深約 1500 m の深いトラフによって特徴づけられる (Fig. 1)。

相模湾は南部に湾口を持つため、湾内の海洋構造は日本南岸海域の黒潮の影響を強く受ける。日本南岸海域において黒潮は代表的な二つの流路を取り、それらは大蛇行流路 (tLM) と非大蛇行流路 (NLM) と呼ばれる。非大蛇行流路はさらに二つに分類され、それぞれ非大蛇行接岸流路 (nNLM) と非大蛇行離岸流路 (oNLM) と呼ばれる (Kawabe, 1985; Fig. 1a 参照)。大蛇行流路は約 20 年周期で発生し、非大蛇行流路への遷移には数ヶ月を要する (Kawabe, 1987)。これに対して、非大蛇行流路期には接岸流路と離岸流路が数ヶ月~1.6 年程度の周期で発生し、それらの遷移には約一ヶ月を要する (Kawabe, 1986; 1987)。

Kawabe and Yoneno (1987) は、大蛇行流路・非大蛇行接岸流路・非大蛇行離岸流路の間の遷移にもなって相模湾内の海洋構造が経年的に変化することを示した。これによると、黒潮が大蛇行流路を取るとき、湾内全域で水深 100 m の水温が上昇し、大島周辺に高気圧性の旋回流、湾北部に低気圧性の循環が形成される。さらに、非大蛇行接岸流路から離岸流路への遷移期には水温が上昇し、逆に非大蛇行離岸流路から接岸流路への遷移期には水温が下降する (Kawabe and Yoneno, 1987)。

このような経年的な変化に加えて、数ヶ月程度の時間スケールで生じる黒潮流路・流軸の変動に起因する湾内の海洋構造の変化も報告されている。大蛇行流路期には、相模湾沖の黒潮流軸の変動にもなって大島西水道から黒潮系暖水が流入し、湾北部では低気圧性の循環が強化され、非大蛇行流路期には、黒潮小蛇行を連想させるような、伊豆半島沖の冷水塊に関連した流速変動が大島西水道で生じる (Taira and Teramoto, 1986; Iwata and Matsuyama, 1989)。非大蛇行接岸流路から離岸流路への遷移期には、大島西水道から黒潮系暖水が流入し、この暖水は沿岸密度流として岸を右手に見るように湾内を反時計回りに移動する。湾内の沿岸域では、この暖水の通過にもなって  $50 \text{ cm s}^{-1}$  に及ぶ強い流れと  $2-3 \text{ }^{\circ}\text{C}$  程度の急な水温上昇が生じる。この現象は“急潮”と呼ばれ、定置網の破損や流失を引き起こすものとして古くから知られている (Matsuyama *et al.*, 1999)。石戸谷ら (2006) は、急潮と黒潮流軸の変動の関係について調べ、非大蛇行流路期に生じる黒潮小蛇行の東進にもなって急潮が生じることを示した。さらに、Takahashi *et*

*al.* (2011) は、非大蛇行接岸流路期に黒潮小蛇行の東進が頻繁 (20-30 日程度の周期) に生じることを示した。さらに、彼らは小蛇行の東進にもなって黒潮系水が大島西水道から流入し、湾北部の表層では低気圧性の循環が形成、もしくは強化されるとともに、亜表層では下層水の湧昇が生じることも示した。

これらに加えて、より短い時間スケールの海洋構造の変化についても報告されている。Kimura *et al.* (1994) は、大蛇行流路期に湾内で係留観測を行い、大島西水道からの黒潮分岐流にもなって大島の島影 (大島北東部) でカルマン渦が発生することを示した。さらに、彼らは、分岐流の強弱によってその発生周期が変化し、湾内で 2-4 日と 6-8 日周期の流速変動が生じることも示した。Hinata *et al.* (2005) は、海洋レーダを用いて非大蛇行接岸流路期の湾内の表層流変動について調べた。彼らは、湾周辺の風場によって引き起こされる 8-11 日周期の黒潮流軸の変動にもなって、大島西水道から黒潮系暖水が流入し、湾北部で低気圧性の循環が強化されることを示した。また、日向ら (2003) は、この現象を数値実験によって再現し、低気圧性の循環の内部では湧昇が生じることを指摘している。

以上のように、相模湾の海洋構造の変化は黒潮の影響を強く受け、その時間スケールは黒潮流路・流軸の変動にほぼ依存している。その一方で、急潮や湾北部の低気圧性の循環に代表されるような現象は、時間スケールが異なっているにも関わらず、空間スケールは一致していることから、湾内の海洋構造の変化の空間スケールは、湾の形状や局所的な地形に強く依存していると考えられる。しかし、先行研究は、黒潮の大蛇行流路期と非大蛇行接岸流路期、もしくは大蛇行流路・非大蛇行接岸流路・非大蛇行離岸流路の間の遷移期に生じる湾内の海洋構造の変化について調べたものが大部分を占めており、上記のような現象が非大蛇行離岸流路期にも生じているのかについては不明である。

我々の研究グループでは、海洋に設置した自動昇降ブイに搭載した光学的なセンサー類によって海洋の基礎生産を自動的に計測し、実時間的にデータ転送を行うことによって人工衛星水色データから推定した基礎生産を実時間で検証するための計測システムを開発することを目的として、水中設置自動昇降ブイシステムの開発、及び

各種光学的センサーから基礎生産を推定するためのアルゴリズムの開発を行ってきた(才野, 2007)。この研究プロジェクトは、Project on Ocean Productivity Profiling System (POPPS) と呼ばれ、科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業 (CREST)、及び同発展継続事業 (SORST) の支援のもと、1999年から2009年までの10年間にわたって行われた。POPPSでは、相模湾を実験海域とし、湾中央部 S3 (Fig. 1c の星印) で水中設置自動昇降ブイシステム (以下、POPPS ブイシステムと呼ぶ) による係留観測を行ってきた。2008年には、7ヶ月に及ぶ長期間の係留観測に成功し、この間、黒潮は比較的安定した非大蛇行離岸流路を取っていた (Fig. 4 参照)。先行研究では、非大蛇行離岸流路期の相模湾において、これほど長期間にわたる係留観測に成功した事例が無い。そのため、この観測資料を調べることは、非大蛇行離岸流路期の湾内の海洋構造や、その変化の時空間スケールの把握という海洋物理学的な興味だけでなく、湾内の基礎生産の時空間変動に関する研究への海況情報の提供という点においても極めて重要である。そこで、本研究では2008年に得られた観測資料を解析し、非大蛇行離岸流路期の相模湾の海洋構造とその変化の時空間スケールを明らかにした。

## 2. 観測及び解析資料

### 2.1 POPPS ブイシステムによる係留観測

本研究では、湾中央部 S3 (35°00'N 139°20'E; Fig. 1c の星印) に POPPS ブイシステムを設置し、2008年4月5日から11月6日までの約7ヶ月間 (216日) にわたって係留観測を行った。但し、2008年7月6-10日の5日間と2008年9月22-28日の7日間は POPPS ブイシステムの回収と再設置のためにデータが欠損している。

POPPS ブイシステムは、日油技研工業製の水中ウインチシステムを改良した自動昇降式ブイシステムを使用しており、このシステムは水中ウインチユニットと計測ブイユニットから成る。Conductivity, temperature, and depth sensors (以下、単に CTD と呼ぶ; NXIC-CTD, Falmouth Science Inc.) を搭載した計測ブイが、

1日1回の割合で海面下150-200m深度から海面まで昇降し、その際に水温、塩分、そして圧力データを取得する(才野, 2007)。そのため、我々は係留観測期間の水深0-200mの水温、塩分、そして圧力の鉛直プロフィールデータを1日間隔で得ることができ、得られたデータの鉛直分解能は0.1-0.3m程度である。本来、計測ブイの上昇は非常に安定しており、長期間にわたって良質な鉛直プロフィールデータを取得することができる (Takahashi *et al.*, 2011)。しかし、今回は荒天回避装置の設定が鋭敏すぎたため、計測ブイの上昇が海況に左右され易く、時々海面まで上昇できないことがあった。そのため、鉛直プロフィールデータに欠損が生じたが、このような欠損部分に対しては補間を行わなかった。

POPPS ブイシステムによって得られた水温と塩分の鉛直プロフィールデータは、スパイク状のエラーを除去するために13点のメディアンフィルターを施し、微細構造を除去するため3点 (重みが0.25, 0.5, 0.25) のハンギングフィルターを20回施したあと、1m間隔で再サンプリングした。さらに、再サンプリングした鉛直プロフィールデータを用いて、水深0-200mまでの各水深における係留観測期間 (216日) のデータ取得率を求めた。その結果、水深139mのデータ取得率 (163個) が75%となり、水深0-200mの範囲 (計測ブイの測定範囲) では最も高いことから、水深139mの水温・塩分データは時系列としても解析に使用した。

これに加え、POPPS ブイシステムには、水深480mに acoustic Doppler current profiler (以下、単に ADCP と呼ぶ; RD Instruments; 76.8 kHz) が上向きに取り付けられており、測定間隔8m、測定層数72層、サンプリング間隔1時間で流向・流速の鉛直分布が観測される。ADCPによって得られた流れのデータは、percent good が80%よりも小さいものを除去し、水圧センサーをもとに深度補正を行い、水深1m毎に線形補間したあと、10m間隔で再サンプリングした。本研究で使用している ADCP の beam angle は20°であることから、水深30m以浅ではリングングの影響により良質なデータが取得できない。そのため、水深50m以浅の流れのデータは解析から除外した。再サンプリングされた各水深の流れのデータは、磁気方位を真方位に変換し、東西成分と南北成分のそれぞれに対して平均から3 $\sigma$

(標準偏差 $\sigma$ の3倍)以上離れたものをエラーとして除去し、欠損部分については時間方向に線形補間した。そして、各水深の1時間間隔の流れのデータに対して、81時間ハーフパワーポイントのガウシアンフィルターを施し、潮流や慣性振動などの短周期変動を除去した。そのあと、1日毎に0時のデータを再サンプリングし、1日間隔のデータとした。上述したように、2008年7月6–10日の5日間と2008年9月22–28日の7日間は、POPPSブイシステムの回収と再設置のためにデータが欠損している。この部分に対しては、各水深で時間方向に3次の自然スプライン補間を行った(Emery and Thomson, 2001)。

## 2.2 淡青丸による海洋観測

POPPSブイシステムの回収と再設置の際、独立行政法人海洋研究開発機構 学術研究船 淡青丸によって海洋観測を行った。海洋観測は、2008年7月6日13:00から7月10日5:00までと9月22日22:00から9月27日5:00までの2つの期間に、湾内の21点でCTD(Integrated CTD, Falmouth Science Inc.; Fig. 1cの星印と丸印)観測を行った。CTD観測は、H3–J3–S3–N5–N4–N3ライン(Fig. 1c)では海面から水深1500mまで(水深が1500mよりも浅い観測点では海底直上まで)、それ以外の観測点では海面から水深250mまで行った。本研究で示す水温の水平分布は、CTD観測によって得られた水温データを影響半径15kmのガウス関数で緯度・経度 $1' \times 1'$ の格子に補間して描いたものである。

CTD観測と同時に、船底設置型ADCP(Workhorse, RD Instrument; 76.8 kHz)による流れの観測も行った。船底設置型ADCPの鉛直分解能は、測定間隔16m、測定層数40層で、時間分解能は約4秒である。まず、得られた流れのデータを1分平均し、船舶が停止、もしくは航路を急に変えたときのデータを除去した。次に、percent goodが80%以下、誤差流速が $10 \text{ cm s}^{-1}$ 以上、鉛直流速が $20 \text{ cm s}^{-1}$ 以上のデータをエラーとして除去し、測定水深毎に流速値の平均値と標準偏差 $\sigma$ を求め、平均値から $3\sigma$ 以上離れているデータもエラーとして除去した。そのあと、Joyce(1989)の方法で、船底設置型ADCPとジャイロコンパスとの間の位置の不整合に

よる誤差を補正した。最後に、それらのデータを測定水深毎に影響半径15kmのガウス関数を用いて緯度・経度 $1' \times 1'$ の格子に補間し、グリッドデータとした。残念ながら、9月22–27日の海洋観測では、良質な流れのデータを取得できなかったため、解析には7月6–10日の流れのデータのみを使用した。本研究では、特に空間的に密な流れのデータを取得することができた7月9–10日(Fig. 1cの破線)の水深57, 201, 393mの流れのデータを使用した。これらは潮流が除去されていないため、本研究で示す流れの水平分布には潮流が含まれている。しかし、係留ADCPデータ(2.1節参照)から求めた7月9–10日の係留観測点S3における潮流( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $Q_1$ の6分潮から成る潮流)の大きさは、水深60, 200, 390mで、それぞれ4, 3,  $2 \text{ cm s}^{-1}$ 以下となり、これらは後述する本研究の注目現象の流速値( $> 5 \text{ cm s}^{-1}$ ; Fig. 8参照)よりも小さいことから、それに対する潮流の影響はそれほど大きくないと考えられる。

## 2.3 黒潮流軸データ

係留観測期間における日本南岸海域の黒潮流路・流軸の変動を調べるため、財団法人日本水路協会 海洋情報研究センターが提供している“黒潮流軸データ”を使用した。このデータの黒潮流軸位置は、表層水温、表層海流、水深200mの水温水平分布、遠州灘に発生する冷水渦の位置、そして衛星海面高度計データなどから総合的に判断されたものであり、黒潮北縁から南縁に向かって13マイルの位置を黒潮流軸と定義したものである(“黒潮流軸データ”の詳細については、<http://www.mirc.jha.jp/products/KCP/>を参照されたい)。

解析には、係留観測期間を含む2008年4月5日から11月12日までの期間の約1日毎の黒潮流軸データを使用した。Sugimatsu and Isobe(2010)を参考に、以下に示す方法で2008年4月5日から11月6日までの期間のデータを用いて黒潮流軸位置の相対頻度を求めた。まず、不等間隔で配置されている黒潮流軸データを緯度・経度 $0.001^\circ$ 毎に線形補間した。次に、緯度 $30.0\text{--}36.5^\circ\text{N}$ 、経度 $135\text{--}142^\circ\text{E}$ の領域を $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ のグリッドセルに分割し、対象期間にグリッドセル内に入った黒潮流軸

データの個数を数えた。最後に、各グリッドセル内で数えられた黒潮流軸データの個数を対象期間内の最大個数で除したあと、100を乗じることによって相対頻度(%)とした。

## 2.4 潮位・海面高度偏差データ

日本南岸海域の黒潮流路・流軸の変動と、それらの相模湾への影響を調べるために、潮位と海面高度偏差データを使用した。潮位データは、日本海洋データセンター(Japan Oceanographic Data Center)のウェブサイト([http://www.jodc.go.jp/index\\_j.html](http://www.jodc.go.jp/index_j.html))で提供されている1時間間隔のデータを使用した。解析には、2008年1月1日から12月31日までの期間の相模湾周辺に位置する石廊崎(Ir)、岡田(Ok)、布良(Me)、八丈島(Ha)の4地点のデータを使用した(Figs. 1aと1b参照)。まず、1時間間隔の潮位データは、静力学なInverted Barometer応答(1 hPaの海面気圧降下/上昇に対して潮位が1 cm 上昇/下降)を仮定し、潮位観測点に最も近い気象観測所の気圧データを用いて気圧補正を行った。次に、気圧補正後の潮位に対して最小二乗法による40分潮(Sa, Ssa, Mm, MSf, Mf, Q<sub>1</sub>, ρ<sub>1</sub>, O<sub>1</sub>, MP<sub>1</sub>, M<sub>1</sub>, π<sub>1</sub>, P<sub>1</sub>, S<sub>1</sub>, K<sub>1</sub>, φ<sub>1</sub>, φ<sub>1</sub>, J<sub>1</sub>, SO<sub>1</sub>, OO<sub>1</sub>, 2N<sub>2</sub>, μ<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, ν<sub>2</sub>, OP<sub>2</sub>, M<sub>2</sub>, λ<sub>2</sub>, L<sub>2</sub>, T<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>, R<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>, 2SM<sub>2</sub>, MO<sub>3</sub>, M<sub>3</sub>, MK<sub>3</sub>, SK<sub>3</sub>, M<sub>4</sub>, MS<sub>4</sub>, M<sub>6</sub>, 2MS<sub>6</sub>)の調和分解を行い、気圧補正後の潮位からそれらを差し引いた。そのあと、短周期成分を除去するため48時間タイドキラフィルター(花輪・三寺, 1985)を施し、1日毎に0時のデータを再サンプリングした。最後に、この1日間隔の潮位データを、気象庁が公開している潮位観測資料(<http://www.data.kishou.go.jp/db/tide/genbo/index.php>)を参考に、2003–2007年の平均潮位を基準とする値に補正した。本研究では、この補正後の潮位を水位と呼ぶことにする。

海面高度偏差データは、Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data (AVISO)のウェブサイト(<http://www.avis.oceano bs.com/en/home/index.html>)で提供されている時間間隔7日、緯度・経度0.25°×0.25°にグリッド化されたデータを使用した。本研究のように、水深の浅い沿岸海

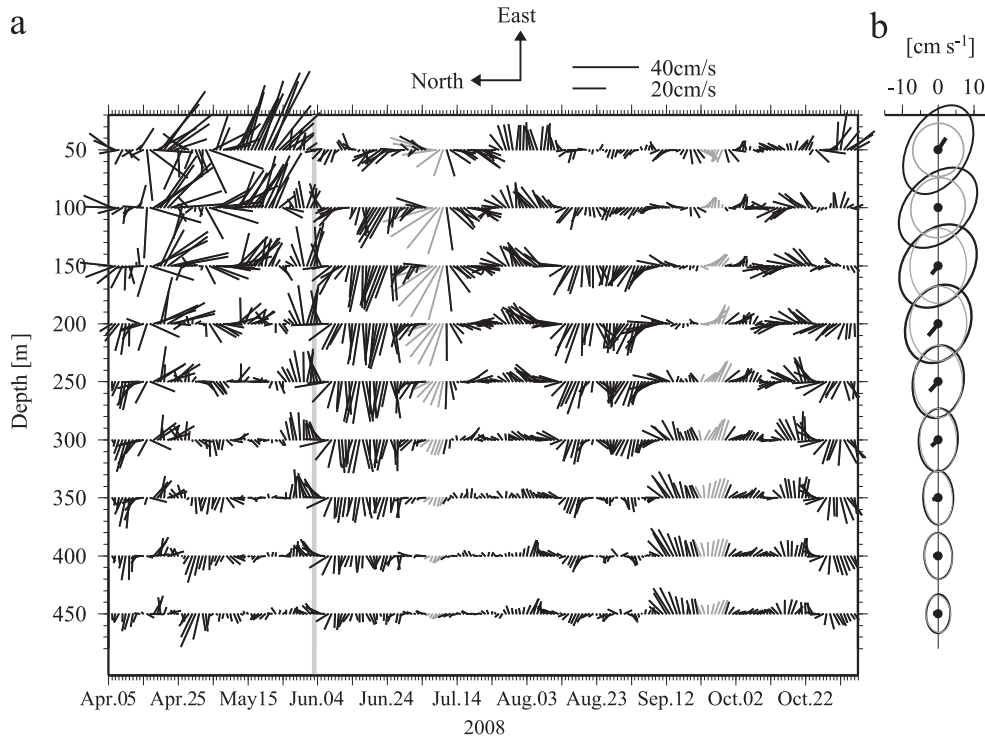
域で海面高度偏差データを使用する場合、潮汐の影響が懸念される。Morimoto (2009)は、アジア周辺海域におけるAVISO提供の海面高度偏差データの精度検証を行った。これによると、本研究で対象としている遠州灘から相模湾沖にかけての海域では、潮汐の影響が10 cm以下であった。本研究で注目している黒潮流路・流軸の変動にともなう海面高度偏差の変動は数十～百 cm程度であることから(Figs. 11と12参照)、それに対する潮汐の影響は小さい。

## 3 解析結果

### 3.1 係留観測期間の相模湾中央部の流速変動

係留観測期間の流速ベクトル時系列と流れの平均場・変動場をFig. 2に示す。ここで、Fig. 2bの黒い実線で描かれた分散楕円は全係留観測期間(4月6日から11月5日までの期間)の流れの変動場、灰色の実線で描かれたものは6月4日から11月5日までの期間の流れの変動場をそれぞれ示している。係留観測期間の流れの特徴としては、平均場( $< 4 \text{ cm s}^{-1}$ )よりも変動場の方が卓越し、水深150 m以浅では南東–北西方向、水深150 m以深では東西方向の流速変動が顕著である(Fig. 2b)。2つの期間の分散楕円の形状と、その主軸の方向が異なっていることから、6月3日以前とそれ以降で湾内の流動構造が変化していることがわかる。6月3日以前には、4月20日付近と5月13–23日の期間に水深150 m以浅で $40 \text{ cm s}^{-1}$ に及ぶ強い南東方向の流れが生じ、それ以降、このような流れは見られない。一方、水深150 m以深では、6月3日以降、6月9日–7月14日と8月13日–9月2日の2つの期間に $20 \text{ cm s}^{-1}$ を超える西方向の流れが生じ、これらは水深200 m付近に流速の極大を持っている(Fig. 2a)。このような流動構造の変化にともなって、6月3日以降の水深150 m以浅の流速変動の主軸の方向は、それ以前と比べて東西方向に沿うようになり、6月3日以降は全層で東西方向の流速変動が顕著である(Fig. 2b)。

係留観測期間の流速変動の時間スケールを調べるため、ウェーブレット解析を行った。水深50, 200, 450 mにおける流れの東西成分のウェーブレットパワーをFig. 3

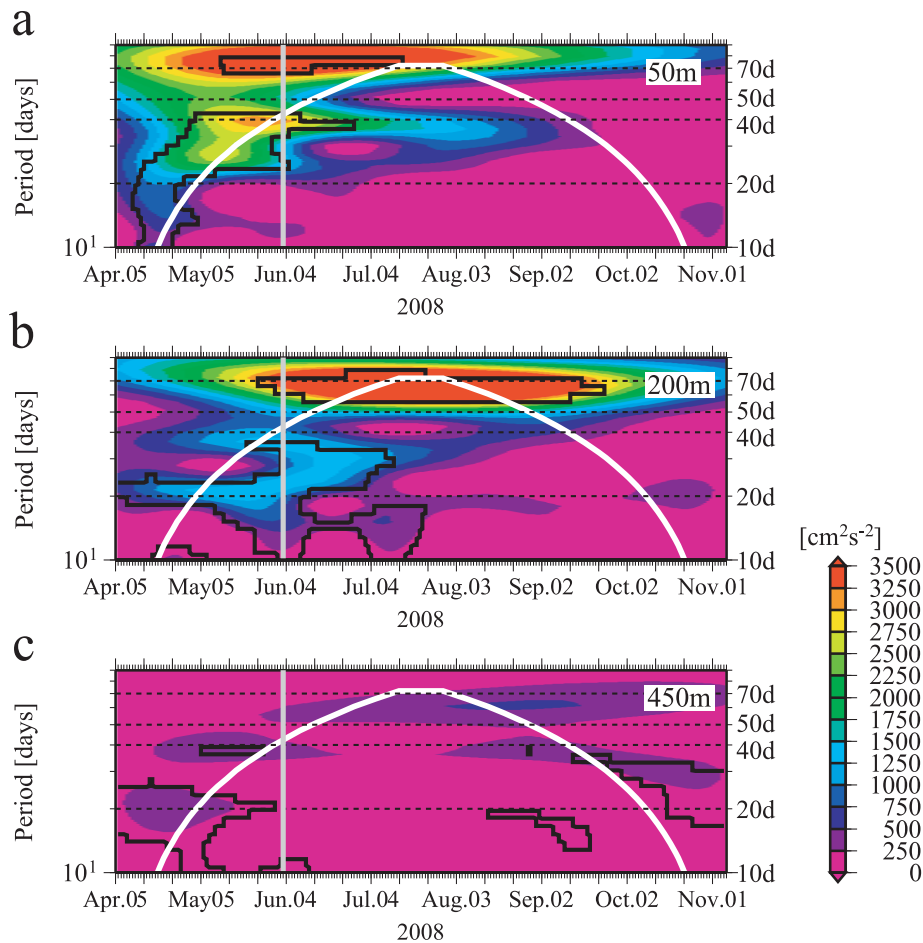


**Fig. 2** Vector stick plot of the daily current vectors at the central part of Sagami Bay (station S3; see Fig. 1c) (a) and mean current vectors and variance ellipses estimated from the daily currents (b) during the period of April 6–November 5, 2008. Gray arrows in (a) represent the current vectors temporally interpolated by natural cubic spline. The black and gray ellipses in (b) are estimated from the daily currents during the periods of April 6–November 5, 2008 and of June 4–November 5, 2008, respectively. Gray vertical line in (a) represents June 3, 2008. The daily current vectors, mean current vectors, and variance ellipses in (a and b) are plotted at 50 m intervals between depths of 50 and 450 m. The ellipses in (b) are plotted based on the standard deviation along the principal- and minor-axis directions.

に示す。ここで、ウェーブレットパワーは、流れの東西成分の時系列に対して Molet のウェーブレット変換を行うことによって求めた (Torrence and Compo, 1998)。水深 50 m では、6 月 3 日以前に 20–40 日の周期帯の流速変動が有意であるが、6 月 3 日以降、この周期帯の流速変動は徐々に小さくなっている。水深 200 m では、6 月 3 日以前に 20 日周期、もしくはそれ以下の周期帯の流速変動が有意であるが、それ以降は 20–40 日の周期帯の流速変動が一旦大きくなる程度で、全体的に 40 日以下の周期帯の流速変動は徐々に小さくなっている。それに対して、50–70 日の周期帯の流速変動は、6 月 3 日以降に大きくなり、そのエネルギー ( $> 3000 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ ) は、他の周期帯 ( $< 1500 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ ) に比べて大きく、有

意である。このとき、水深 50 m と 450 m では 50–70 日の周期帯の流速変動が有意ではないことから、この流速変動は水深 200 m 付近で特に顕著なものであると言える (Fig. 3)。ここでは詳しく示さないが、この 50–70 日周期の流速変動は、水深 150–350 m で有意であると同時にコヒーレントでもある。

6 月 3 日以前には、水深 150 m 以浅に強い南東方向の流れが 4 月 20 日付近と 5 月 13–23 日の期間 (約 1 ヶ月間隔) に生じ、6 月 3 日以降には、水深 200 m 付近に流速の極大を持つ西方向の流れが 6 月 9 日–7 月 14 日と 8 月 13 日–9 月 2 日の 2 つの期間 (約 2 ヶ月間隔) に生じていることから (Fig. 2)、6 月 3 日以前の 20–40 日周期の流速変動は、水深 150 m 以浅の南東方向の流れ



**Fig. 3** Wavelet power spectra of eastward components of the daily currents at depths of 50, 200, and 450 m at the central part of Sagami Bay (station S3; see Fig. 1c). Thick contours in (a-c) enclose regions of greater than 90% confidence for a red-noise process with a lag-1 coefficient of 0.87, 0.93, and 0.90, respectively, and gray vertical lines represent June 3, 2008. Symbols of 70d, 50d, 40d, 20d, and 10d in (a-c) represent periods of 70, 50, 40, 20, and 10 days, respectively.

に、6月3日以降の50–70日周期の流速変動は、水深200 m付近の西方向の流れに、それぞれ関連したものである。

次に、係留観測期間の黒潮流軸位置の相対頻度の水平分布をFig. 4に示す。ここで、相対頻度は、6月3日以前(4月6日から6月3日までの期間)と、それ以降(6月4日から11月5日までの期間)の2つの期間で求めた。6月3日以前は、それ以降と比べて、黒潮流軸が日本南岸に沿うように分布しているが、相模湾沖では32–34°Nの範囲で南北方向に幅広く分布している。6月3日以降は、相模湾から房総半島沖の海域で黒潮流軸が全

体的に南へ移動し、5%以上の相対頻度が31°Nにまで及ぶとともに、房総半島沖では20%以上の相対頻度がS字に分布している(Fig. 4)。このことは、日本南岸海域で6月3日付近に黒潮流路が非大蛇行接岸流路から離岸流路へ遷移したことを示している。したがって、湾内の流動場が一変した6月3日付近は、黒潮の非大蛇行接岸流路から離岸流路への遷移期に相当し、それ以降、黒潮は比較的安定した非大蛇行離岸流路を取っている。



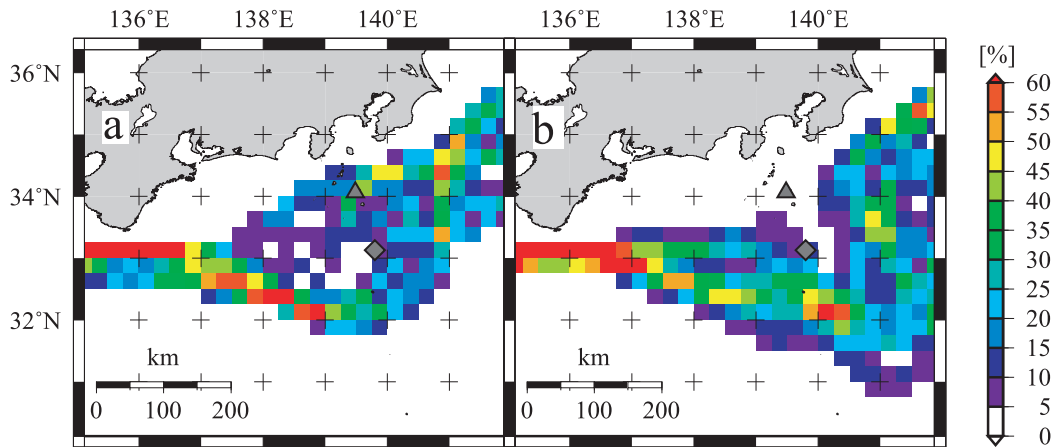


Fig. 4 Horizontal distributions of relative frequency of the Kuroshio axial position in each grid-cell during the period of April 6–June 3, 2008 (a) and of June 4–November 5, 2008 (b), respectively. Colored regions indicate the values greater than 5%. Solid triangle and diamond in each figure represent the positions of the Miyakejima Island and Hachijojima Island, respectively.

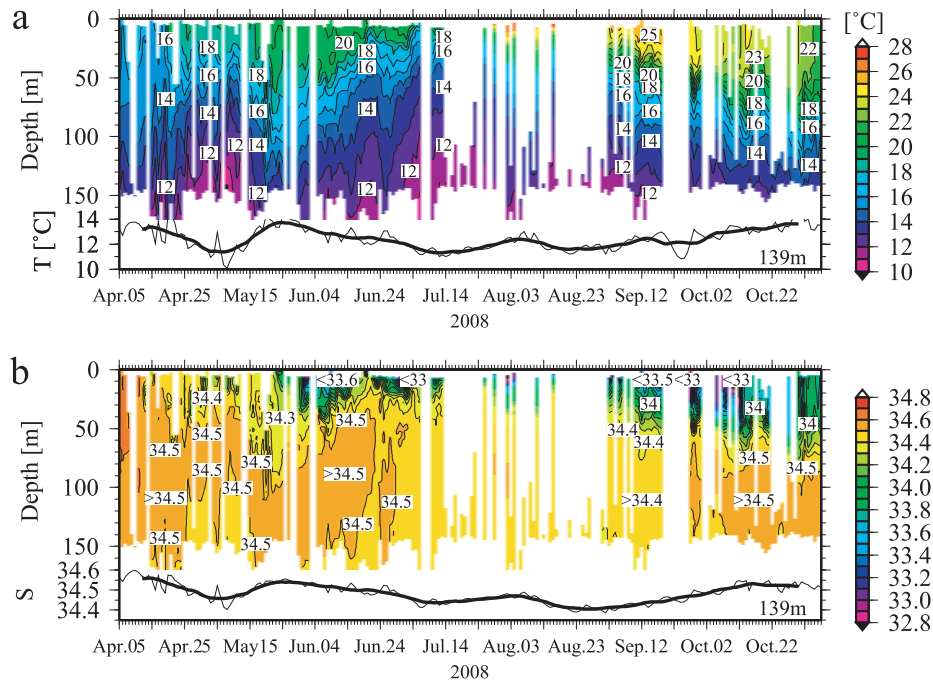
### 3.2 係留観測期間の相模湾中央部の水温と塩分の変動

係留観測期間の水温と塩分のイソプレットを Fig. 5 に示す。各図の上段の白い部分は、データの欠損部分であり、各図の下段には、データの欠損が最も少なかった水深 139 m の水温と塩分の時系列を示した (2.1 節参照)。この水深 139 m の水温・塩分データは、欠損部分に対して 3 次の自然スプライン補間 (図中の細線) を行い (Emery and Thomson, 2001), 短周期変動を除去するために 15 日移動平均 (図中の太線) を施した。

係留観測期間の水深 50 m 以浅の水温変動には、夏季の海面加熱による季節的な変動に加えて、数ヶ月の時間スケールで生じる水温変動が重なっている。水深 50 m 以浅では、4 月 20 日–7 月 4 日の期間に、16 °C 以上の暖水が出現し、特に 5 月 15 日–6 月 14 日の期間には、この暖水の影響が水深 100 m にまで及んでいる。一方、水深 50 m 以深では、6 月から 9 月上旬にかけてのゆっくりとした水温下降に加えて、4 月 20 日–5 月 20 日、6 月 4 日–7 月 20 日、そして 8 月 13 日–9 月 7 日の 3 つの期間に、水深 100 m 以深で冷水 ( $T < 12$  °C) の出現によって比較的短い時間スケールで水温下降が生じ、この際、塩分も下降している (Fig. 5)。6 月から 9 月上旬にかけて水深 50 m 以深で生じるゆっくりとした水温下降については、先行研究でも数多く報告されており、

夏季に熊野灘から相模湾周辺の海域で生じる典型的な現象である (宇野木・海野, 1983; Kawabe and Yoneno, 1987)。

次に、係留観測期間の水温変動と流速変動の比較を行う。水深 50 m 以浅で水温上昇が生じた 4 月 20 日–7 月 4 日の期間には、水深 150 m 以浅で強い南東方向の流れが頻繁に形成され、水深 50 m 以深では 4 月 20 日–5 月 20 日の期間に水温下降も生じている。一方、水深 50 m 以深で水温下降が生じた 6 月 4 日–7 月 20 日と 8 月 13 日–9 月 7 日の 2 つの期間には、水深 150–350 m で西方向の流れが形成されている (Figs. 2 と 5)。これらのことは、6 月 3 日以前の水温変動が水深 150 m 以浅の 20–40 日周期の流速変動に、6 月 3 日以降の水温変動が水深 150–350 m の 50–70 日周期の流速変動に、それぞれ関連したものであることを示唆している。ここでは詳しく示さないが、先行研究も参考にすると、6 月 3 日以前の水温変動と流速変動は、非大蛇行接岸流路期の黒潮小蛇行の東進と、非大蛇行接岸流路から離岸流路への遷移に関連したものである (Kawabe, 1986; Iwata and Matsuyama, 1989; 石戸谷ら, 2006; Takahashi *et al.*, 2011)。



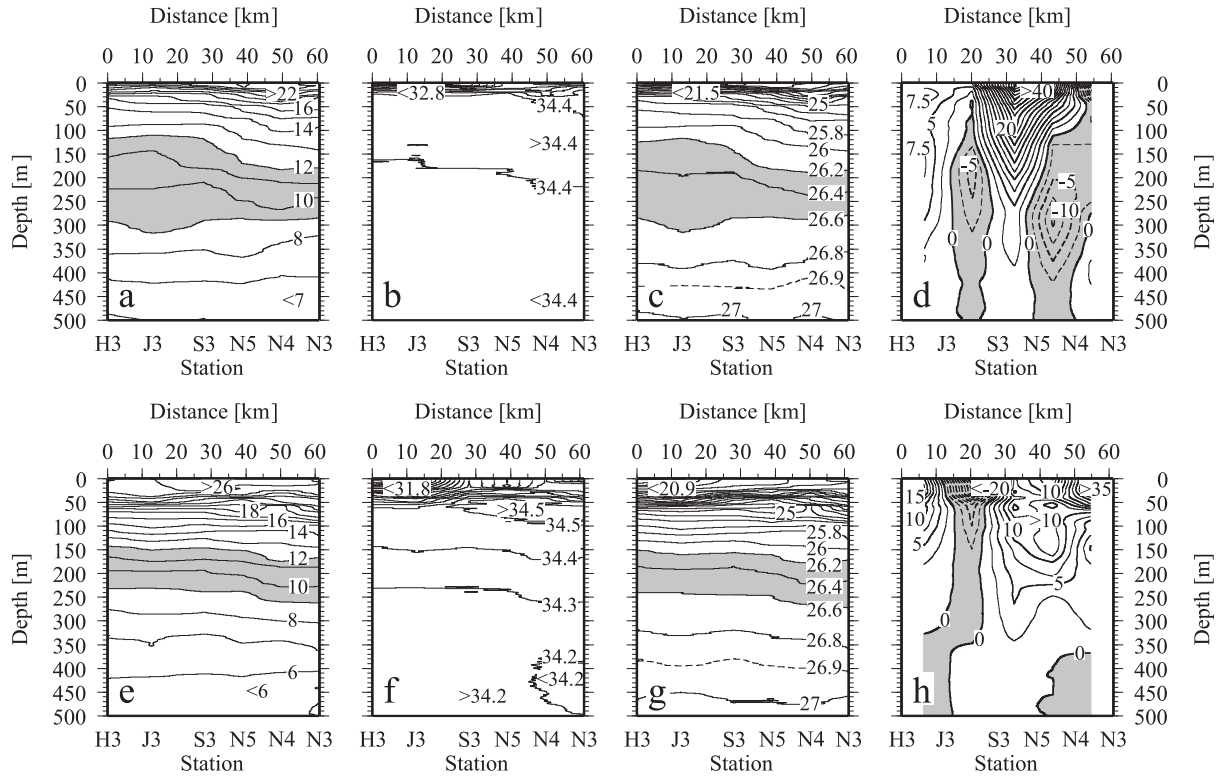
**Fig. 5** Depth-time diagrams of water temperature (a) and salinity (b) between depths of 0 and 160 m at the central part of Sagami Bay (station S3; see Fig. 1c) during the period of April 5–November 6, 2008. In lower part of panels (a and b), thin lines represent time series of the water temperature and salinity at a depth of 139 m which are interpolated by natural cubic spline, and thick lines represent time series of the interpolated water temperature and salinity which are smoothed by 15-days running mean. Contour intervals in upper part of panels (a and b) are 1 °C and 0.1, respectively.

### 3.3 非大蛇行離岸流路期の相模湾の海洋構造

7月7–9日と9月23–24日のH3–J3–S3–N5–N4–N3ラインにおける水深500 m以浅のポテンシャル水温、塩分、ポテンシャル密度 ( $\sigma_\theta$ )、傾圧地衡流の鉛直断面を Fig. 6 に示す。ここで、傾圧地衡流は水深500 mを無流面と仮定して見積り、正の値(負の値)はH3–S3の範囲で東方向の成分(西方向の成分)、S3–N3の範囲で北東方向の成分(南西方向の成分)をそれぞれ示している。Figs. 2と5から、7月7–9日には、水温下降をともなう西方向の流れの強化(以下、単にイベントと呼ぶ)が生じており、9月23–24日はこのイベントが生じていないと推定される。したがって、ここで示した7月7–9日と9月23–24日の鉛直断面は、イベント時と非イベント時の典型的なものということになる。また、3.2節で示したように、係留観測期間(ここでは、6

月3日以降のことを意味する)の水深50 m以深で生じる水温下降には、長い時間スケールのもの(6月から9月上旬にかけて生じるゆっくりとした水温下降)と、短い時間スケールのもの(6月4日–7月20日と8月13日–9月7日の2つの期間に生じる水温下降)があるため、ここで示した鉛直断面には、両方の影響が含まれていることになる。しかし、特に水深100 m以深では、冷水( $T < 12^\circ\text{C}$ )の出現による短い時間スケールの水温下降が顕著であったことから(Fig. 5a参照)、鉛直断面内の水深100 m以深の海洋構造は、それを強く反映していると考えられる。そのため、ここでは水深100 m以深の海洋構造に注目する。

H3–N5では、7月に水深200 m以浅で等ポテンシャル水温面が上に凸の構造をしており、 $12^\circ\text{C}$ 以下の冷水が湧昇している。この構造は、6月4日–7月20日の期間に、湾中央部の水深100 m以深で生じた冷水( $T <$

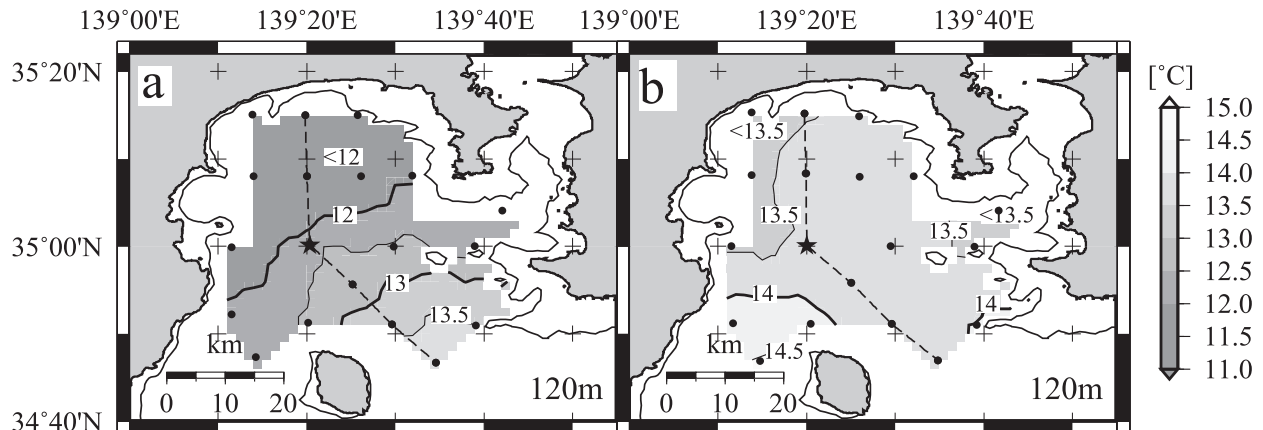


**Fig. 6** Vertical sections of potential water temperature, salinity, potential density ( $\sigma_\theta$ ) and geostrophic current along the transect H3-J3-S3-N5-N4-N3 (see Fig. 1c) on July 7-9 (a-d) and September 23-24, 2008 (e-h). Here, the geostrophic current was estimated relative to 500 m, and the positive (negative) value represents eastward (westward) current along the transect H3-S3 and northeastward (southwestward) current along the transect S3-N3. Shaded areas in (a and e) represent the potential water temperature with the values between 9 and 12 °C, shaded areas in (c and g) represent the potential density with values between 26.2 and 26.6  $\sigma_\theta$ , and shaded areas in (d and h) represent negative geostrophic current. Broken lines in (c and g) represent the isopycnal surface with value of 26.9  $\sigma_\theta$ . Contour intervals for the potential water temperature, salinity, potential density, and geostrophic current are 1.0 °C, 0.1, 0.2, and 2.5  $\text{cm s}^{-1}$ , respectively.

12 °C) の出現に対応している (Fig. 5a 参照)。それに対して、水深 200 m 以深では、等ポテンシャル水温面が下に凸の構造をしており、この構造は水深 350 m 付近にまで及んでいる。つまり、H3-N5 では、水深 120-320 m に等ポテンシャル水温面 (9-12 °C 層) のレンズ構造が形成され、その鉛直スケールは 200 m 程度である。密度場は水温場に強く依存しているため、同様なレンズ構造が形成されており、その密度帯は 26.2-26.6  $\sigma_\theta$  である。このような密度場にともない、傾圧地衡流場には、水深 200 m 付近 (レンズ構造の内部) に 5  $\text{cm s}^{-1}$  程度の流速の極大を持つ高気圧性の循環が存在して

いる (Figs. 6a-d)。一方、9 月になると、H3-N5 で 26.2-26.6  $\sigma_\theta$  層の厚みが 100 m 程度減少し、密度場 (水温場) のレンズ構造が消滅するとともに、大島東水道の N4 と N3 では、水深 400-450 m (26.9-27.0  $\sigma_\theta$  の密度帯) に、34.2 以下の低塩分水が出現している。さらに、このレンズ構造の消滅にともなって、傾圧地衡流場でも、7 月に H3-N5 に存在していた水深 200 m 付近の高気圧性の循環が消滅している (Figs. 6e-h)。

次に、7 月に水深 200 m 以浅で生じた冷水 ( $T < 12$  °C) の湧昇の水平スケールを調べるため、7 月 7-9 日と 9 月 23-24 日の水深 120 m の水温の水平分布を



**Fig. 7** Horizontal distributions of water temperature at a depth of 120 m as recorded on July 7–9, 2008 (a) and September 23–24, 2008 (b). Solid circles represent the station positions on CTD casts, solid stars represent the mooring position (station S3), and broken lines represent the transect for vertical sections in Fig. 6. Contour interval for the water temperature is  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 7に示す。ここで示した水深120 mは、ポテンシャル水温（ポテンシャル密度）のレンズ構造（Figs. 6aと6c参照）の上部に相当する水深である。7月と9月を比較すると、7月の方が湾全体で水温が $0.5\text{--}2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低く、特に湾北部では $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下の冷水が広く分布している。このことは、水温場（密度場）のレンズ構造と、それにともなう下層水の湧昇が、H3–J3–S3–N5–N4–N3ライン（Fig. 7の破線）上のみ限定されたものではなく、湾北部一帯に及ぶ水平スケール（ $\sim 30\text{--}40\text{ km}$ ）を持つことを示している。

### 3.4 非大蛇行離岸流路期の相模湾の流動構造

7月9–10日の水深57, 201, 392 mの流れの水平分布をFig. 8に示す。水深57 mでは、大島西水道から $20\text{ cm s}^{-1}$ を超える流入があり、これにともなって湾北部では低気圧性（ $< 15\text{ cm s}^{-1}$ ）、大島北東部では高気圧性の循環（ $< 20\text{ cm s}^{-1}$ ）がそれぞれ形成されている（Fig. 8a）。水深201 mでは、このような流動構造は見られず、 $5\text{--}10\text{ cm s}^{-1}$ の流れによって大島北西部で低気圧性の循環、湾北部で高気圧性の循環、大島北東部で高気圧性の循環がそれぞれ形成され、係留観測点S3（Fig. 8の星印）は、湾北部の高気圧性の循環と大島北西部の低気圧性の循環の境界付近に位置している。また、

この高気圧性の循環は、湾北部一帯に広がりを持っていると推定され、その水平スケールは水温場（密度場）のレンズ構造（Fig. 7a参照）のそれとよく一致している（Fig. 8b）。一方、水深393 mになると、湾内の流れは極端に弱く（湾内の大部分の流速は $5\text{ cm s}^{-1}$ 以下）、水深201 mのような流動構造は見られない（Fig. 8c）。これらのことは、実測流においても、傾圧地衡流場（Fig. 6d参照）で見られた高気圧性の循環が湾北部の水温場（密度場）のレンズ構造の内部に存在していることを示している。

ここで、傾圧地衡流（Fig. 6d）と実測流（Fig. 8）の比較を行う。この際、CTD観測の方が船底設置型ADCPによる流れの観測に比べて空間解像度が粗いため（Fig. 1c参照）、両者の詳細な空間構造（流れの位置など）については比較できないことに注意されたい。Fig. 8で示した実測流の主な特徴は、傾圧地衡流場でも確認することができる。すなわち、実測流に見られた水深57 mの大島西水道からの北東方向の流れ（ $> 20\text{ cm s}^{-1}$ ）と大島北東部の高気圧性の循環（ $< 20\text{ cm s}^{-1}$ ）、水深201 mの大島北西部の低気圧性の循環（ $\sim 5\text{--}10\text{ cm s}^{-1}$ ）と湾北部の高気圧性の循環（ $\sim 5\text{--}10\text{ cm s}^{-1}$ ）、水深393 mの $5\text{ cm s}^{-1}$ 以下の弱い流れが、位置に関して多少違いはあるものの、傾圧地衡流場でも確認でき、それらは定量的にもほぼ一致している（Figs. 6dと8）。

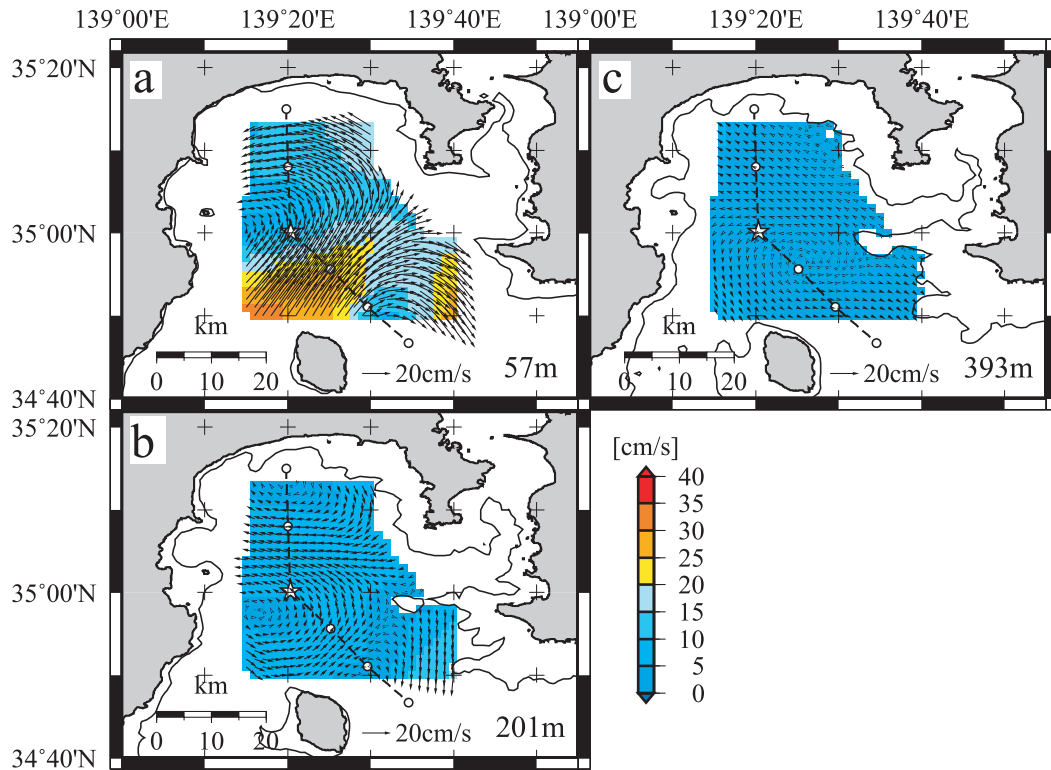


Fig. 8 Horizontal distributions of current vectors at depths of 57, 201, and 393 m as recorded on July 9–10, 2008. Open circles represent the station position on CTD casts, open stars represent the mooring position (station S3), and broken lines represent the transect for vertical sections in Fig. 6.

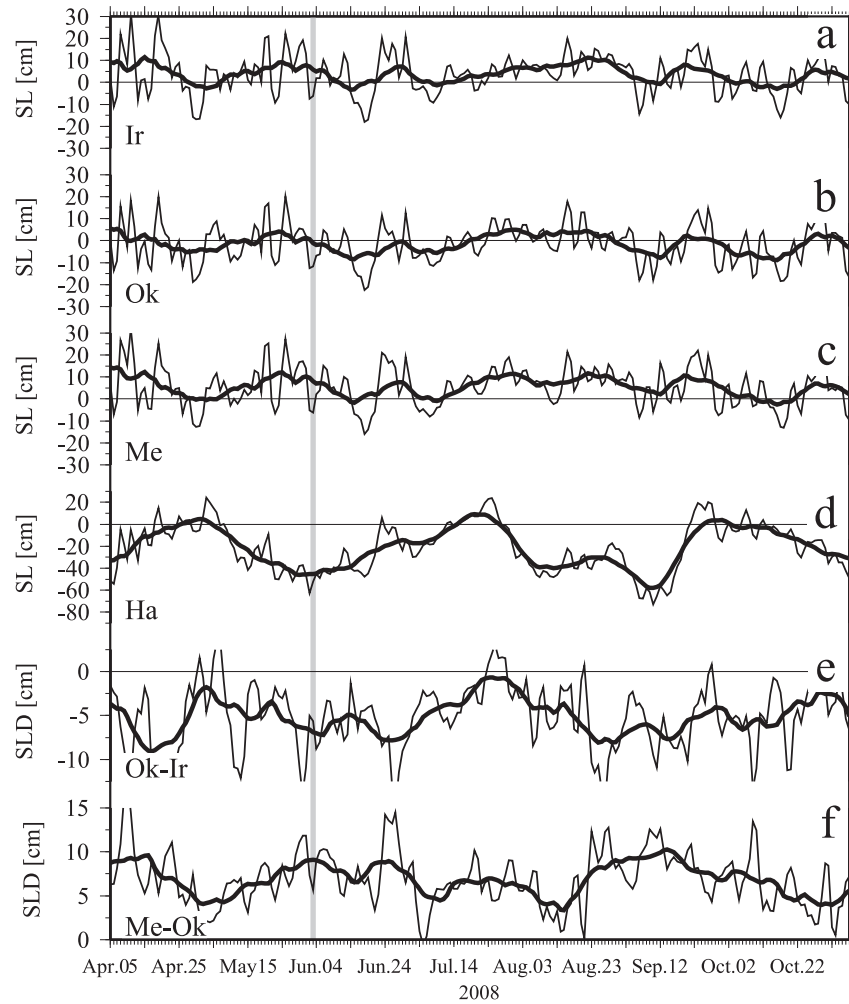
このことは、傾圧地衡流を見積る際に行った水深 500 m を無流面とする仮定が妥当であること、湾内の水深 500 m 以浅の流動場は第一次近似として地衡流平衡していることを示している。しかし、湾北部の水深 57 m における低気圧性の循環が傾圧地衡流場では見られないことから、湾北部の水深が浅い海域では、非地衡流的な流れが卓越していると考えられる (Figs. 6d と 8a)。

### 3.5 非大蛇行離岸流路期の相模湾周辺の水位・水位差の変動と湾中央部の流速変動

係留観測期間の湾周辺の水位 (SL) と湾口の水位差 (SLD) の時系列を Fig. 9 に示す。ここで、Figs. 9e と 9f は、岡田から石廊崎を差し引いた水位差、布良から岡田を差し引いた水位差をそれぞれ示し、Fig. 9 の細線は 1 日間隔の時系列、太線はそれに 15 日移動平均を施したものである。以下では、非大蛇行離岸流路期 (6 月

3 日以降) に注目し、15 日移動平均を施した水位と水位差の変動について調べる。

湾口の石廊崎 (Ir)、岡田 (Ok)、布良 (Me) の 3 地点の水位は、ほぼ同様に変動し (3 地点の水位変動の相関係数は 0.88–0.91 であり、これらは 99% 信頼限界で統計的に有意である)、その振幅は 3.7–4.0 cm である。それに対して、相模湾沖の八丈島 (Ha) の水位変動の振幅は 17.9 cm 程度であり、湾口に比べて大きい。特徴的なのは、5 月 15 日–6 月 24 日と 8 月 3 日–9 月 12 日の 2 つの期間に八丈島の水位が大きく下降し、それから数十日後の 6 月 24 日–7 月 14 日と 9 月 2 日–10 月 12 日の 2 つの期間に湾口の 3 地点 (石廊崎、岡田、布良) でも水位が下降している点である (Figs. 9a–d)。八丈島と湾口の 3 地点 (石廊崎、岡田、布良) の水位変動の相互相関係数を求めると、それらの間には、タイムラグ 31–33 日に 99% 信頼限界で統計的に有意な正の相関係数 ( $r=0.74-0.88$ ) があり、八丈島の水位変動の位相

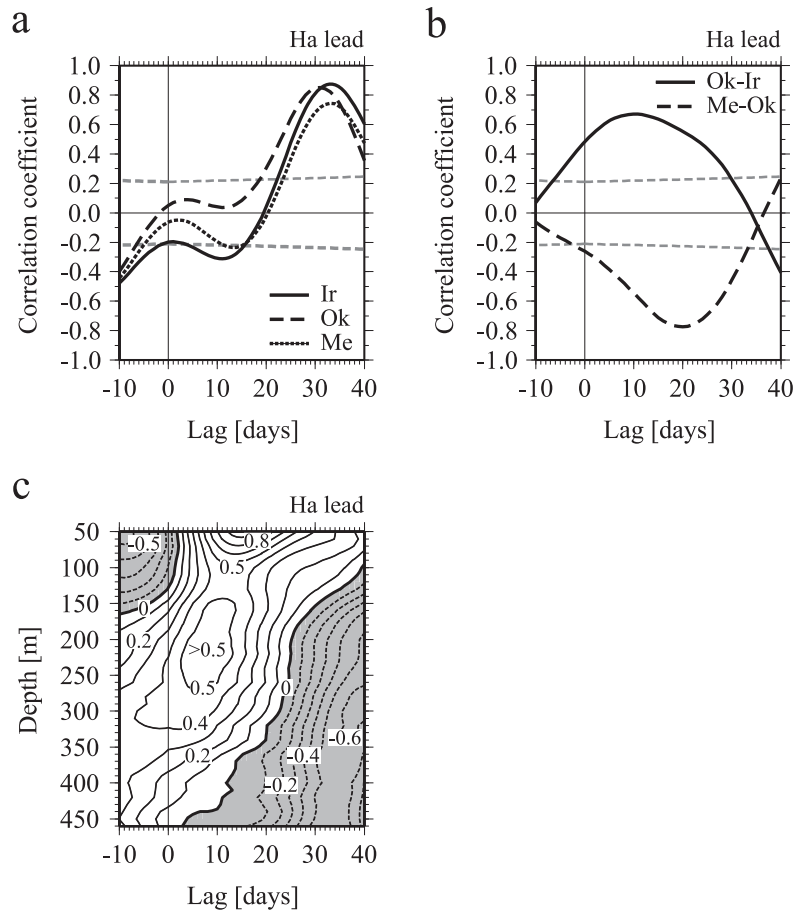


**Fig. 9** Time series of the daily sea level (SL) (a-d) and daily sea level difference (SLD) (e and f) during the period of April 5–November 6, 2008. Thin lines represent time series of the daily sea level at Irouzaki (Ir) (a), Okada (Ok) (b), Mera (Me) (c), and Hachijojima Island (Ha) (d) and of the daily sea level difference between Okada and Irouzaki (e) and between Mera and Okada (f). The locations of Irouzaki, Okada, Mera, and Hachijojima Island are shown in Figs. 1a and 1b. Thick lines represent time series of these sea level (a-d) and sea level difference (e and f) smoothed by 15-days running mean. Gray vertical line represents June 3, 2008.

が湾口に比べて30日程度先行している (Fig. 10a)。

一方、岡田–石廊崎と布良–岡田の水位差の時間平均と標準偏差は、それぞれ  $-5.1 \pm 1.9$  cm と  $7.0 \pm 1.7$  cm となり、両者の変動の間には99%信頼限界で統計的に有意な負の相関関係 ( $r = -0.62$ ) がある (Figs. 9e と 9f)。八丈島の水位変動と、岡田–石廊崎、布良–岡田の水位差の変動を比較すると、八丈島の水位が大きく下降した2つの期間 (5月15日–6月24日と8月3日–9

月12日の2つ期間) から数十日後の6月14日–7月4日と8月23日–10月2日の2つ期間に、岡田–石廊崎の水位差は下降し、逆に布良–岡田の水位差は上昇する傾向がある (Figs. 9d–f)。八丈島の水位と、岡田–石廊崎、布良–岡田の水位差の相互相関係数を求めると、それらの間には、それぞれタイムラグ10日に正の相関関係 ( $r = 0.67$ )、タイムラグ20日に負の相関関係 ( $r = -0.77$ ) があり、どちらも99%信頼限界で統計的に有



**Fig. 10** Cross-correlation coefficients between the sea level at Hachijojima Island (Ha) and that at Irouzaki (Ir) (thick line), Okada (Ok) (dashed line), and Mera (Me) (dotted line) (a), cross-correlation coefficients between the sea level at Hachijojima Island and the sea level difference between Okada and Irouzaki (thick line) and between Mera and Okada (dashed line) (b), and cross-correlation coefficients between the sea level at Hachijojima Island and the eastward component at each depth of 50–460 m (c). The sea level, sea level difference, and eastward component for estimating the cross-correlation coefficients are smoothed by 15-days running mean, and the cross-correlation coefficients are estimated during the period of June 4–October 29, 2008. Gray thin dashed lines of (a and b) indicate cross-correlation coefficient at 99% confidence, and cross-correlation coefficient at 99% confidence in (c) is 0.21–0.25. Contour intervals of (c) are 0.1 and shaded areas of (c) represent negative correlation.

意である (Fig. 10b)。したがって、八丈島の水位変動の位相は、湾口の水位差の変動よりも 10–20 日程度先行している。さらに、八丈島の水位変動の位相は、湾口よりも 30 日程度先行していたことから (Fig. 10a 参照)、湾口では水位差の変動の位相が水位変動より 10–20 日程度先行していることになる。

また、八丈島の水位変動と湾中央部の流速変動を比較すると、湾中央部では水深 200 m 付近に流速の極大を

持つ西方向の流れが、6月9日–7月14日と8月13日–9月2日の2つの期間に生じ (Fig. 2 参照)、八丈島の水位はこの2つの期間の数日–十数日前に大きく下降している (5月15日–6月24日と8月3日–9月12日の2つの期間; Fig. 9d)。八丈島の水位と湾中央部の流れの東西成分の相互相関係数を求めると、両者の間には、水深 150–300 m でタイムラグ 5–10 日に、水深 100 m 以浅でタイムラグ 10–20 日に、それぞれ 99% 信頼限界

で統計的に有意な正の相関関係 ( $r > 0.5$ ) がある (Fig. 10c)。このことは、八丈島の水位変動の位相が流速変動より 5–20 日程度先行していることを示し、八丈島の水位が下降してから、湾中央部の水深 150–300 m では 5–10 日後に、水深 100 m 以浅では 10–20 日後に西方向の流れが形成、もしくは強化されることを意味している。

### 3.6 非大蛇行離岸流路期の黒潮流軸の変動と相模湾中央部の流速変動

3.5 節で示した相模湾周辺の水位と水位差の変動と湾中央部の流速変動との間の相関関係は、相模湾沖で生じる水位変動が湾内と湾周辺の海洋構造に何らかの影響を及ぼしていることを示唆している。そこで、ここでは、非大蛇行離岸流路期の相模湾沖の海面高度偏差の変動に注目し、係留観測期間に黒潮が比較的安定した非大蛇行

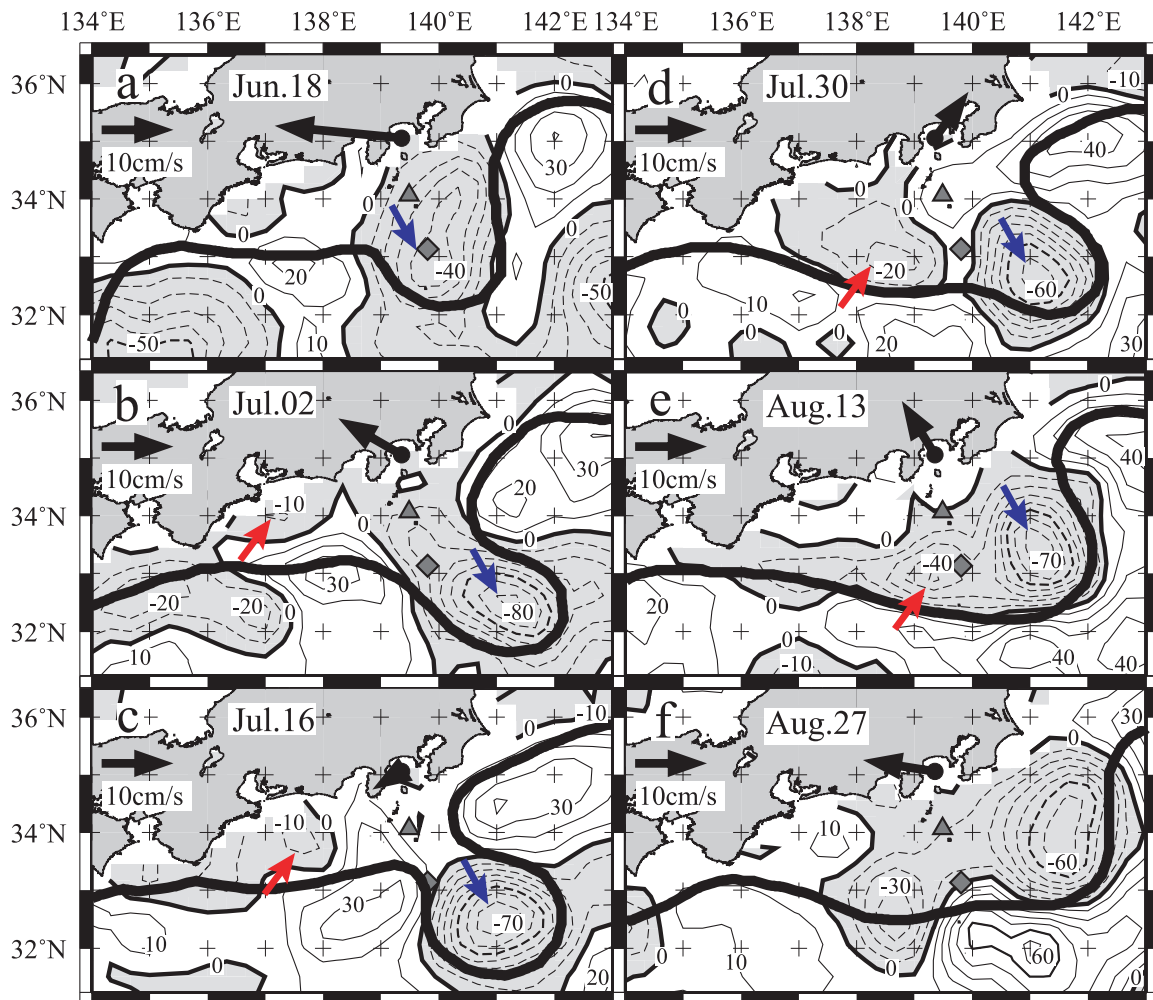


Fig. 11 Horizontal distributions of sea level anomaly (SLA) at 14 days interval during the periods from June 18 to August 27, 2008. Thick lines represent the Kuroshio axial position. Thick arrows represent vertical mean flow at station S3, and the vertical mean flow was estimated from vertically averaging the daily current smoothed by 15-days running mean between depths of 150 and 350 m. Solid triangle and diamond in each figure represent the positions of the Miyakejima Island and Hachijojima Island, respectively. Shaded regions indicate the negative SLA, and contour intervals for the SLA are 10 cm.



離岸流路を取っている6月3日以降の海面高度偏差と黒潮流軸の変動について詳しく調べる。まず、この期間の前半に相当する6月18日から8月27日までの期間の海面高度偏差と黒潮流軸位置の水平分布を Fig. 11 に示す。ここで示した流速ベクトルは、水深150-350 m の流れに15日移動平均を施し、それらを鉛直平均したものである。海面高度偏差については、2008年4月9日から11月12日までの期間の各グリッドで求めた時間平均か

らの偏差になっている。また、ここで示した前半の期間は、50-70日周期の流速変動が顕著であるとともに (Figs. 2 と 3 参照), この期間の長さは50-70日周期の流速変動に対して約1周期分に相当している。

湾内で強い西方向の流れが形成された6月18日には、黒潮流軸は八丈島の南を迂回し、房総半島へ向かって直線的に伸びている。しかし、7月2日になると、房総半島沖で黒潮流軸がS字に蛇行し、それは7月30日まで

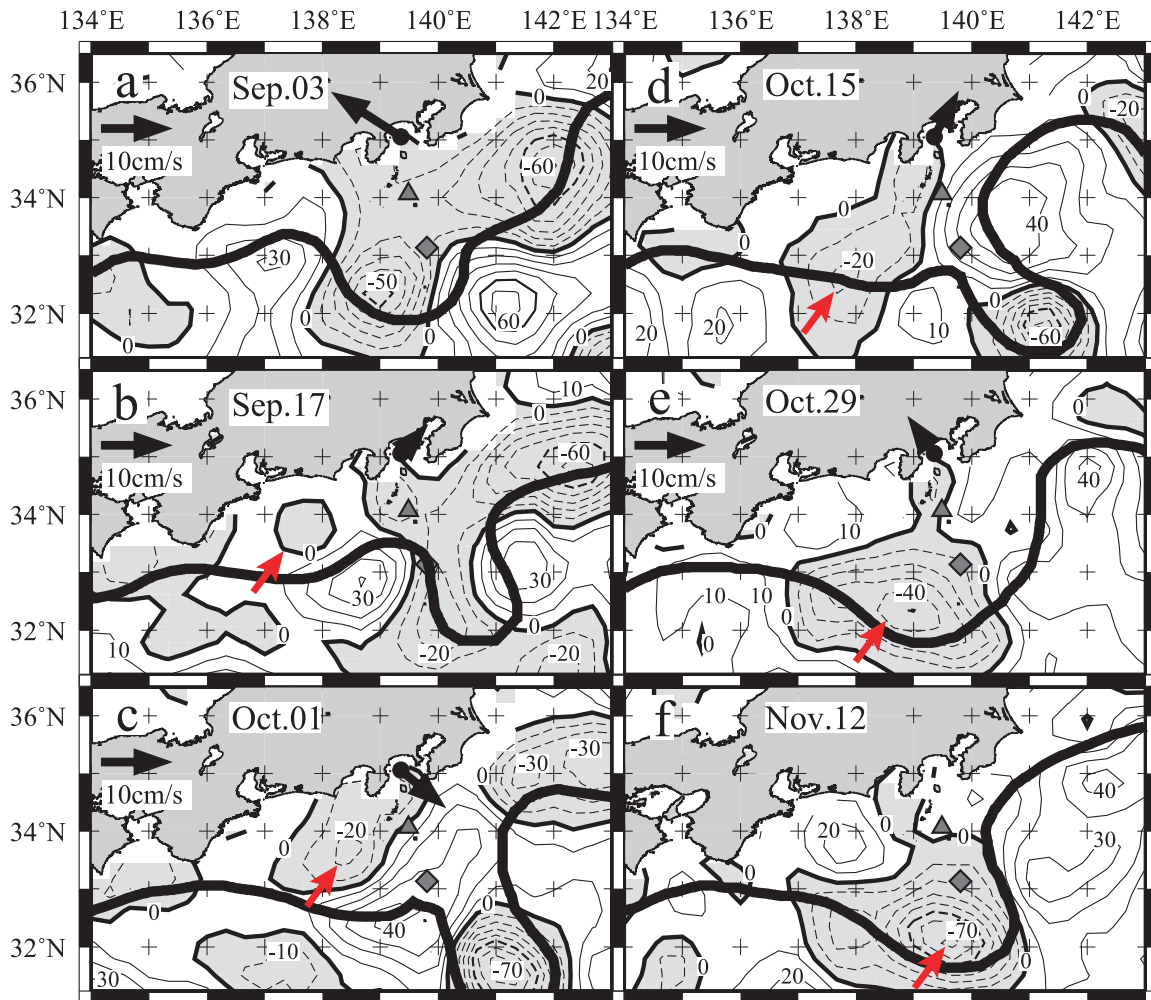
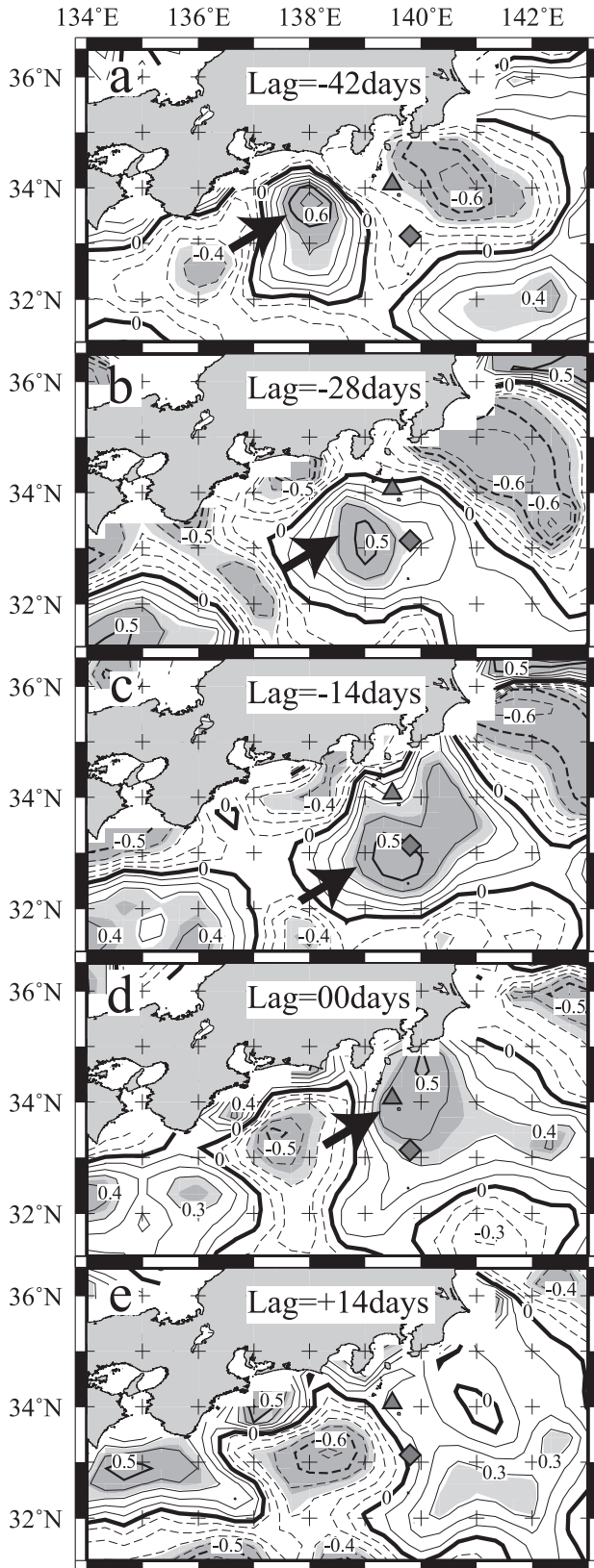


Fig. 12 Horizontal distributions of sea level anomaly (SLA) at 14 days interval during the periods from September 3 to November 12, 2008. Thick lines represent the Kuroshio axial position. Thick arrows represent vertical mean flow at station S3, and the vertical mean flow was estimated from vertically averaging the daily current smoothed by 15-days running mean between depths of 150 and 350 m. Solid triangle and diamond in each figure represent the positions of the Miyakejima Island and Hachijojima Island, respectively. Shaded regions indicate the negative SLA, and contour intervals for the SLA are 10 cm.



確認できる。このような黒潮流軸の変化に付随するように、湾内では流れが弱まり、流向が西から東方向へ変化している (Figs. 11a–d)。その後、房総半島沖で黒潮流軸が徐々に直線的になり、8月27日には蛇行がほぼ解消され、湾内では再び西方向の流れが強化されている (Figs. 11e と 11f)。この期間の海面高度偏差に注目すると、7月2日に遠州灘で負の海面高度偏差を持つ擾乱が発生し (Fig. 11b の赤い矢印)、その後、この擾乱は発達しながら東進している (Figs. 11c と 11d の赤い矢印)。発生から41日後の8月13日には、この擾乱が八丈島の付近に到達し (Fig. 11e の赤い矢印)、相模湾沖にそれ以前からあった負の海面高度偏差 (Figs. 11a–e の青い矢印) と合流している (Fig. 11e)。それから14日後の8月27日には、相模湾沖の負の海面高度偏差が10 cm程度増加するとともに、遠州灘から東進して来た擾乱が不明瞭になり、房総半島沖では黒潮流軸の蛇行が解消している (Fig. 11f)。

次に、上記の期間の後半に相当する9月3日から11月12日までの期間の海面高度偏差と黒潮流軸位置の水平分布を Fig. 12 に示す。ここで示した流速ベクトルと海面高度偏差は、Fig. 11 と同様な処理を施したものである。また、この期間は、Fig. 11 で示した前半の期間に比べると、50–70日周期の流速変動が不明瞭ではあるが (Figs. 2 と 3 参照)、黒潮は引き続き非大蛇行離岸流路を取り、湾内では上記と同様な黒潮流軸の変動にともなう流速変動を確認することができる。

**Fig. 13** Horizontal distributions of cross-correlation coefficients between the eastward component of vertical mean flow at the central part of Sagami Bay (station S3; see Fig. 1c) and the sea level anomaly (SLA) during the periods from April 16 to November 1, 2008. Here, the vertical mean flow was estimated from vertically averaging the daily current smoothed by 15-days running mean between depths of 150 and 350 m. Contour intervals for the cross-correlation coefficient are 0.1. Light and heavy shaded regions indicate cross-correlation coefficient at 90 and 95% confidence, respectively. Solid triangle and diamond in each figure represent the positions of the Miyakejima Island and Hachijojima Island, respectively.

8月27日に房総半島沖で直線的になっていた黒潮流軸が、9月17日-10月15日の期間にはS字に蛇行し、それとともに湾内の流れは東方向寄りへ変化している(Figs. 12a-d)。その後、この蛇行は解消され、10月29日と11月12日には房総半島沖で再び黒潮流軸が直線的になり、湾内では北西方向の流れが形成されている(Figs. 12eと12f)。特徴的なのは、ここで示した後半の期間において、房総半島沖で黒潮流軸の蛇行が確認された9月下旬から10月上旬までの期間が、前半の期間に同様な蛇行が確認された7月下旬から8月上旬までの期間の約60日後に相当している点である(Figs. 11c-e参照)。このことは、蛇行の形成(もしくは解消)には、60日程度の周期性があることを示唆している。また、海面高度偏差に注目すると、9月17日に遠州灘で発生した負の海面高度偏差を持つ擾乱が時間とともに東進し(Figs. 12bと12cの赤い矢印)、10月15日には黒潮流軸上で発生したと推定される新たな負の海面高度偏差を持つ擾乱と合流している(Fig. 12dの赤い矢印)。その後、この擾乱は海面高度偏差を減少させながら再び東進し、11月12日には伊豆-小笠原海嶺付近に到達している(Figs. 12eと12fの赤い矢印)。このとき、房総半島沖では再び黒潮流軸の蛇行が解消している(Fig. 12f)。

ここで、50-70日周期の流速変動と海面高度偏差の変動の対応関係を調べるため、鉛直平均流の東西成分と海面高度偏差の相互相関係数を求めた。4月16日から11月1日までの期間における鉛直平均流を基準とするタイムラグ-42日から+14日までの相互相関係数の水平分布をFig. 13に示す。ここで、負のタイムラグは、流速変動の位相より海面高度偏差の変動の位相の方が進んでいることを示している。タイムラグ0日では、湾内の鉛直平均流は、湾周辺の海面高度偏差と有意な正の相関関係がある。このことは、湾周辺の海面高度偏差が下降したとき、湾内では西方向の流れが形成されていることを示している(Fig. 13d)。タイムラグ-42日から0日では、この擾乱が遠州灘で発生したあと、5-10 km day<sup>-1</sup>で東進し、約42日かけて相模湾沖に到達している(Figs. 13a-cの黒い矢印)。この42日のタイムラグは、遠州灘で発生した負の海面高度偏差を持つ擾乱が相模湾沖へ到達し、湾内で西方向の流れが形成されるまでの時間とほぼ一致している(Fig. 11)。そして、タイムラグ

+14日になると、相模湾沖で有意な相関関係がなくなっている(Fig. 13e)。これは、上述した遠州灘を起源とする擾乱が伊豆-小笠原海嶺を越えた辺りから不明瞭になるという観測事実を反映したものであると考えられる(Figs. 11eと11f)。

## 4 考察

### 4.1 非大蛇行離岸流路期の相模湾中央部亜表層の50-70日周期の流速・水温変動

黒潮が非大蛇行離岸流路を取るとき、湾中央部では水深200 m付近に最大振幅を持つ50-70日周期の流速変動が卓越し(Figs. 2と3参照)、この流速変動にともなう西方向の流れが生じたとき、湾北部の水深200 m付近では高気圧性の循環が形成されていた(Fig. 8参照)。係留観測点S3がこの循環の縁に位置していることから、50-70日周期の流速変動は高気圧性の循環の一部を捉えたものであり、その形成に起因するものであると考えられる。しかし、7月9-10日に船底設置型ADCPによって得られた係留観測点付近の水深201 mの流れは、5-10 cm s<sup>-1</sup>の西北西方向の流れであったのに対し、係留観測によって得られた水深200 m付近の流れ(補間された流れ)は、20 cm s<sup>-1</sup>を超える西北西方向の流れであったことから(Figs. 2と8参照)、両者は流向に関してはよく一致していたが、流速に関しては違いがあった。この原因は、流れの時系列データに施した3次の自然スプライン補間にあり、補間された流れは流向に関しては実際の流れをよく再現しているが、流速に関しては過大評価していると考えられる。このような流速に関する問題はあるものの、流向に関しては実際の流れをよく再現していることから、西方向の流れは湾北部の高気圧性の循環の指標として用いることができる。このことから、6月9日-7月14日の期間だけでなく、8月13日-9月2日の期間にも湾北部で高気圧性の循環が形成されていたと推定され(Fig. 2参照)、係留観測期間には高気圧性の循環が2つの期間に形成されていたことになる。

一方、湾北部で高気圧性の循環が形成されていたと推定される6月9日-7月14日と8月13日-9月2日の2つの期間には、湾中央部の水深139 mで水温下降が生

じていた (Fig. 5 参照)。3.3 節で示したように、6 月 4 日-7 月 20 日の期間の水温下降は、レンズ構造 (26.2-26.6  $\sigma_\theta$  層) の形成にともなう下層水の湧昇によって生じていたことから、8 月 13 日-9 月 7 日の期間の水温下降もそれと同様な物理機構で生じており、この際も、レンズ構造の内部には高気圧性の循環が形成されていたと考えられる。また、高気圧性の循環は、第一次近似として地衡流平衡していたことから (3.4 節参照)、この循環、もしくは湧昇 (レンズ構造) の形成には地衡流調節が関係していると推定される。したがって、非大蛇行離岸流路期の相模湾では、流動場だけでなく、水温場も 50-70 日周期で変動し、この水温変動は水深 200 m 以浅で生じる下層水の湧昇に起因していると考えられる。

#### 4.2 非大蛇行離岸流路期の黒潮流軸の変動と相模湾北部亜表層の高気圧性の循環

非大蛇行離岸流路期に湾中央部で卓越する 50-70 日周期の流速変動は、房総半島沖の黒潮流軸の変動とよく対応しており、黒潮流軸が南北方向に直線的になるとき、西方向の流れが強化され、黒潮流軸が S 字に蛇行するとき、西方向の流れが弱化、もしくは東向きの流れが形成された。この黒潮流軸の変動は、遠州灘から相模湾沖へ東進して来る擾乱と関連しており、擾乱が相模湾沖に到達したとき、房総半島沖の黒潮流軸の蛇行が解消された (Figs. 11-13 参照)。

遠州灘を起源とする擾乱が八丈島付近に位置している 8 月 13 日と 11 月 12 日には (Figs. 11e と 12f 参照)、八丈島で水位が大きく下降していることから (Fig. 9d 参照)、3.5 節で示した非大蛇行離岸流路期の八丈島の水位変動は、主に遠州灘からの擾乱の東進によって生じたものであると言える。さらに、八丈島の水位変動の位相は、湾口の水位変動に対して 30 日程度、水位差の変動に対して 10-20 日程度先行し、湾中央部の流速変動に対しては、水深 150-300 m で 5-10 日程度、水深 100 m 以浅で 10-20 日程度先行していた (Fig. 10 参照)。これらのことから、水深 200 m 付近の流速変動の位相は、湾口の水位と水位差の変動や水深 100 m 以浅の流速変動の位相よりも 0-25 日程度先行していることになる。このことは、水深 200 m 付近の流速変動が遠州灘

を起源とする擾乱に関連している可能性はあるものの、それが湾口の水位と水位差の変動や水深 100 m 以浅の流速変動によって引き起こされたものではないことを示している。さらに、この水深 200 m 付近の流速変動は湾北部の高気圧性の循環の一部であったことから (4.1 節参照)、この擾乱は高気圧性の循環の形成 (もしくは強化) にも関わっている可能性がある。

ここで、“湾北部の高気圧性の循環が遠州灘を起源とする擾乱によって形成された”と仮定すると、上記の位相関係は、遠州灘を起源とする擾乱が水位や水位差の変動に現れ難い傾圧性の強い物理過程を経て湾内へ進入していることを示している。これに加えて、高気圧性の循環が消滅したとき、大島東水道の水深 400-450 m (26.9-27.0  $\sigma_\theta$  層) では、低塩分水 ( $S < 32.2$ ) が出現していた (Fig. 6 参照)。相模湾沖では、黒潮流軸が南へ移動するとき、もしくは黒潮が非大蛇行離岸流路を取るとき、26.8-26.9  $\sigma_\theta$  層で大島東水道から湾外の低塩分水が湾内へ流入することが知られている (Yang *et al.*, 1993a; 1993b; Senjyu *et al.*, 1998; Sekine and Uchiyama, 2002)。このことから、上記の低塩分水は、遠州灘を起源とする擾乱によって房総半島沖で黒潮流軸が変動したときに、大島東水道に出現したものであると考えられる。また、この低塩分水の出現が房総半島沖の黒潮流軸の変動に関連しているとする、それは擾乱の湾内への進入の一部を捉えたものである可能性がある。

以上のことから、“湾北部の水深 200 m 付近の高気圧性の循環が遠州灘を起源とする擾乱によって形成された”と仮定すると、擾乱の湾内への進入は、水位や水位差の変動をとまなわぬ傾圧的な物理過程を経ていると考えられる。この場合、遠州灘から伊豆-小笠原海嶺西部にかけては擾乱が海面に捕捉されていたことから (Figs. 11 と 12 参照)、この擾乱は伊豆-小笠原海嶺から相模湾沖で傾圧性を強め、湾内へ進入している可能性が高い。このように考えれば、上記のことは、遠州灘を起源とする擾乱が、伊豆-小笠原海嶺を越えた辺りから不明瞭になるという観測事実とも矛盾していない (Figs. 11e と 11f 参照)。

しかしながら、上記の議論は、“湾北部の高気圧性の循環が遠州灘を起源とする擾乱によって形成された”という仮定の下で行われたものであることに注意されたい。

また、本研究では、遠州灘を起源とする擾乱が相模湾沖へ到達する時期と、湾北部における高気圧性の循環の形成時期が一致していることを示しただけであり、両者の因果関係を説明する物理過程については、現段階ではよく分からない（現段階では、両者が全く無関係であり、偶々、到達時期と形成時期が一致しただけの可能性も否定できない）。この点に関しては、非大蛇行離岸流路期の湾口周辺での海洋観測が必要不可欠であるため、今後の課題としたい。

#### 4.3 非大蛇行離岸流路期の 60 日周期の黒潮流軸の変動

非大蛇行離岸流路期の黒潮流軸の変動は房総半島沖で顕著であり、この変動は S 字の蛇行によって特徴づけられるとともに、約 60 日程度の周期性を持っていた。さらに、この黒潮流軸の変動は、湾中央部の 50-70 日周期の流速変動とよく対応していた (Figs. 11-13 参照)。Kasai *et al.* (1993) は、海面水温データの解析から、非大蛇行離岸流路期に房総半島沖で黒潮流軸が S 字に蛇行し、それにとまって熊野灘から相模湾にかけての沿岸海域に黒潮系暖水が流入することと、このような流入が 50 日周期で生じることを示した。これと本研究で示した黒潮流軸の変動の時空間スケールがほぼ一致していることから、それらは同様な現象であると考えられる。

石戸谷ら (2006) や Takahashi *et al.* (2011) は、非大蛇行接岸流路期に遠州灘から黒潮小蛇行の東進が生じ、それにとまって 20-30 日周期で短期的に非大蛇行接岸流路から離岸流路への遷移が起こることを示した。このような非大蛇行接岸流路期に生じる 20-30 日周期の黒潮流軸の変動は、Kasai *et al.* (1993) でも確認されている。その他にも非大蛇行接岸流路期には、黒潮小蛇行、もしくは黒潮フロントの擾乱に関連した黒潮流軸の変動が 5-19 日周期で生じることも知られている (Kimura and Sugimoto, 1993)。一方、大蛇行流路期には、伊豆-小笠原海嶺西部で生じる 20-30 日周期の黒潮流軸の変動や、潮岬沖の黒潮内で生じる 2-10 日周期の流速変動が、これまでに報告されている (Taira and Teramoto, 1981; Fukasawa and Teramoto, 1986; Ramp *et al.*, 2008)。

以上のことから、本研究で示した房総半島沖の S 字

の蛇行によって特徴づけられる黒潮流軸の変動と、それにとまらう相模湾内の 50-70 日周期の流速変動は、非大蛇行離岸流路期にのみ生じるものであり、非大蛇行離岸流路期の典型的な現象であると考えられる。

#### 4.4 非大蛇行離岸流路期の相模湾湾口の水位差の変動と湾内表層の流動場

八丈島の水位変動に対して、湾中央部の流速変動は 5-20 日程度、湾口 (大島西水道と東水道) の水位差の変動は 10-20 日程度遅れていた。特に、水深 100 m 以浅の流速変動は、湾口の水位差の変動とほぼ同位相であり、八丈島の水位変動を基準とする相関関係から、岡田-石廊崎の水位差との間には正の相関関係、布良-岡田の水位差との間には負の相関関係がある (Fig. 10 参照)。地衡流平衡を仮定すると、非大蛇行離岸流路期 (6 月 3 日以降) には大島西水道と東水道で、それぞれ湾外への流出と湾内への流入が定常的に存在することになる (Fig. 9 と 3.5 節参照)。このことを考慮すると、上記の相関関係は、それぞれの水道で流出が弱まるとき、湾中央部の水深 100 m 以浅で東向きの流れが形成、もしくは強化されていることを示している。船底設置型 ADCP による流れの観測が行われた 7 月 9-10 日には、それぞれの水道の水位差は増加傾向と減少傾向にあり、湾中央部の水深 57 m では東向きの流れが形成されていた。さらに、この流れは大島西水道から流入、東水道から流出するような構造を持っていると推定される (Figs. 8a と 9 参照)。これらのことから、この東向きの流れは、上記の流速変動を捉えたものであり、両水道では非地衡流的な性質を持っていると考えられる。しかし、湾中央部では、この流れが第一次近似として地衡流平衡していたことから (3.4 節参照)、湾中央部の水深 100 m 以浅の流速変動は、湾口 (大島西水道と東水道) の水位差に関連したものであるが、その力学は湾口と湾中央部で異なっていると考えられる。しかしながら、この力学の詳細や、それと黒潮流軸の変動や湾内表層の流動場との関連については、現段階ではよく分からない。そのため、これらに関しては、今後の課題としたい。

## 5 まとめ

2008年の非大蛇行離岸流路期の相模湾において、POPSS プイシステムによる係留観測を行い、湾内の流速変動について調べた。湾中央部では、水深 200 m 付近に最大振幅を持つ 50–70 日周期の流速変動が卓越し、この流速変動は湾北部の高気圧性の循環の形成に起因していた。この循環は、26.2–26.6 $\sigma_\theta$ 層のレンズ構造の内部に形成され、その消長は房総半島沖の黒潮流軸の変動と対応していた。特に、房総半島沖で黒潮流軸の蛇行が解消されるとき、湾北部ではレンズ構造とともに高気圧性の循環が形成され、水深 200 m 以浅では下層水の湧昇が生じた。さらに、房総半島沖の黒潮流軸の変動は、遠州灘から東進して来る擾乱と関連しており、擾乱が相模湾沖に到達するとき、黒潮流軸の蛇行が解消された。以上のことから、非大蛇行離岸流路期の相模湾では、房総半島沖の黒潮流軸の変動に付随するように、亜表層で密度場のレンズ構造と高気圧性の循環が形成され、50–70 日周期の流速変動が生じることが明らかになった。

本研究では、湾北部の高気圧性の循環の形成には、湾外から湾内へ進入して来る擾乱が関わっている可能性が高いことを指摘した。しかしながら、本研究では、大島西水道と東水道における海洋観測を十分に行っていないため、このような擾乱の存在を直接的に証明することはできなかった。そのため、今後は非大蛇行離岸流路期の相模湾内と湾口（大島西水道と東水道）の両方で海洋観測を行うことによって、実際にそのような擾乱が存在するのかについて調べる必要がある。さらに、もしこのような擾乱が存在するなら、その物理的な実態や、湾内に進入した擾乱が湾北部で高気圧性の循環をどのように形成し、そして、どのように消滅させるのかについても解明する必要がある。

これに加えて、本研究では、房総半島沖の黒潮流軸の変動が、遠州灘から東進して来る擾乱に関連していることを指摘した。これに関しても、今後は非大蛇行離岸流路期に相模湾沖でも海洋観測を行い、房総半島沖の黒潮流軸の変動がどのように擾乱と関わっているのかについて調べる必要がある。また、その際の物理機構の解釈には、海洋観測に基づいた数値実験も有効な手段になると考え

られる。

最後に、本研究では、非大蛇行離岸流路期の房総半島沖の黒潮流軸の変動と湾内の流速・水温変動の間には、規則的な対応関係があることを示した。さらに、Takahashi *et al.* (2011) では、非大蛇行接岸流路期の相模湾沖の黒潮流軸の変動と湾内の流速・水温変動にも、規則的な対応関係があることを見出している。これらは、財団法人日本水路協会 海洋情報研究センターがほぼ毎日提供している“黒潮流軸データ”を用いて、非大蛇行期の相模湾内の海洋構造を、実時間的にある程度推定できることを示している。このような海況の推定に関する知見の蓄積は、今後、湾内の基礎生産の変動機構を解明する上で、極めて有益な海況情報の提供に繋がることが期待できる。

## 謝辞

相模湾における POPSS プイの設置と回収および海洋観測にあたって多大なご協力をいただいた独立行政法人 海洋研究開発機構 学術研究船 淡青丸の船長をはじめ乗組員の皆様方に、この場をお借りして深く感謝申し上げます。名古屋大学地球水循環研究センター旧海洋気候生物学研究室のスタッフと学生の皆様方には、海洋観測の際にご助力いただきました。これらの方々へ感謝の意を表します。また、有益なご指摘をいただいた2名の査読者と編集委員の方々に心より感謝いたします。なお本研究は、科学技術振興機構の発展継続事業 (SORST) の研究プロジェクト「Project on Ocean Productivity Profiling System (POPSS)」の一部であることを付記する。

## References

- Emery, W. J., R. E. Thomson (2001): Data analysis methods in physical oceanography: Second and revised edition. Elsevier Science B. V., Amsterdam 638pp.
- Fukasawa, M. T. Teramoto (1986): Characteristics of deep currents off Cape Shiono-misaki before and after formation of the large meander of the Kuroshio in 1981. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, **42**, 53–68.
- 花輪公雄, 三寺忠夫 (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** (1), 79–87.

- 日向博文, 柳哲雄, 川村宏 (2003): 相模湾への黒潮系暖水流入に与える海上風の影響について. 沿岸海洋研究, **41**, 83-95.
- Hinata, H., T. Yanagi, T. Takano, H. Kawamura (2005): Wind-induced Kuroshio warm water intrusion into Sagami Bay. *Journal of Geophysical Research*, **110** (C3), C03023, doi : 10.1029/2004JC002300.
- 石戸谷博範, 北出裕次郎, 松山優治, 岩田静夫, 石井光廣, 井桁庸介 (2006): 相模湾および東京湾湾口に発生した急潮. 海の研究, **15**, 235-247.
- Iwata, S., M. Matsuyama (1989): Surface circulation in Sagami Bay: the response to variations of the Kuroshio axis. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, **45**, 310-320.
- Joyce, T. M. (1989): On in situ "calibration" on shipboard ADCPs. *Journal of Atmospheric and Oceanographic Technology* **6**, 169-172.
- Kawabe, M. (1985): Sea level variations at the Izu islands and typical stable paths of the Kuroshio. *Journal of the Oceanographical Society of Japan* **41**, 307-326.
- Kawabe, M. (1986): Transition processes between the three typical paths of the Kuroshio. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, **42**, 174-191.
- Kawabe, M. (1987): Spectral properties of sea level and time scales of Kuroshio path variations. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, **43**, 111-123.
- Kawabe, M., M. Yoneno (1987): Water and flow variations in Sagami Bay under the influence of the Kuroshio path. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, **43**, 283-294.
- Kasai, A., S. Kimura, T. Sugimoto (1993): Warm water intrusion from the Kuroshio into the coastal areas south of Japan. *Journal of Oceanography*, **49**, 607-624.
- Kimura, S., T. Sugimoto (1993): Short-period fluctuations in meander of the Kuroshio's path off Cape Shiono Misaki. *Journal of Geophysical Research*, **98**, 2407-2418.
- Kimura, S., H. S. Choo, T. Sugimoto (1994): Characteristics of the eddy caused by Izu-Oshima island and the Kuroshio branch current in Sagami Bay, Japan. *Journal of Oceanography*, **50**, 373-389.
- Matsuyama, M., H. Ishidoya, S. Iwata, Y. Kitade (1999): Kyucho induced by intrusion of Kuroshio water in Sagami Bay, Japan. *Continental Shelf Research*, **19**, 1561-1575.
- Morimoto, A. (2009): Evaluation of tidal error in altimetry data in the Asian marginal seas. *Journal of Oceanography*, **65**, 477-485.
- Ramp, S. V., D. E. Barrick, T. Ito, M. S. Cook (2008): Variability of the Kuroshio current south of Sagami Bay as observed using long-range coastal HF radars. *Journal of Geophysical Research*, **110** (C3), C06024, doi : 10.1029/2007JC004132.
- 才野敏郎 (2007): 自動昇降式ブイシステムによる海洋基礎生産モニタリング. 沿岸海洋研究, **45** (1), 17-28.
- Sekine, Y., K. Uchiyama (2002): Outflow of the Intermediate Oyashio Water from Sagami Bay to the Shikoku Basin. *Journal of Oceanography*, **58**, 531-537.
- Senjyu, T., N. Asano, M. Matsuyama, T. Ishimaru (1998): Intrusion events of the Intermediate Oyashio Water into Sagami Bay, Japan. *Journal of Oceanography*, **54**, 29-44.
- Sugimatsu, K., A. Isobe (2010): Intrusion of Kuroshio-driven bottom cold water into Osaka Bay and its possible cause. *Journal of Oceanography*, **66**, 191-199.
- Taira, K., T. Teramoto (1981): Velocity fluctuations of the Kuroshio near the Izu Ridge and their relationship to current path. *Deep Sea Research*, **28**, 1187-1197.
- Taira, K., T. Teramoto (1986): Path and volume transport of the Kuroshio current in Sagami Bay and their relationship to cold water masses near Izu Peninsula. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, **42**, 221-223.
- Takahashi, D., A. Morimoto, T. Nakamura, T. Hosaka, Y. Mino, V. H. Dang., T. Saino (2011): Short-term flow and water temperature fluctuations in Sagami Bay, Japan, associated with variations of the Kuroshio surging the non-large-meander path. *Progress in Oceanography* (accepted).
- Terrence, C., G. P. Comp (1998): A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **79**, 61-78.
- 宇野木早苗, 海野裕 (1983): 東海・関東沿岸海域における暖候期の低温化現象. 水産海洋研究会報, **44**, 17-28.
- Yang, S.-K., Y. Nagata, K. Taira, M. Kawabe (1993a): Southward intrusion of the Intermediate Oyashio Water along the east coast of the Boso Peninsula, Japan I. Coastal salinity-minimum-layer water off the Boso Peninsula. *Journal of Oceanography*, **49**, 89-114.
- Yang, S.-K., Y. Nagata, K. Taira, M. Kawabe (1993b): Southward intrusion of the Intermediate Oyashio Water along the east coast of the Boso Peninsula, Japan II. Intrusion events into Sagami Bay. *Journal of Oceanography*, **49**, 173-191.

# Flow variability with periods of 50–70 days in Sagami Bay, Japan during the offshore non-large-meander path of the Kuroshio

Daisuke Takahashi<sup>a†</sup>, Akihiko Morimoto<sup>a</sup>, Tetsuya Nakamura<sup>b</sup>,  
Takuji Hosaka<sup>c</sup>, Yoshihisa Mino<sup>a</sup>, and Toshiro Saino<sup>d</sup>

## Abstract

Flow variability in Sagami Bay was examined using mooring data obtained by Project on Ocean Productivity Profiling System (POPPS) buoy during the offshore non-large-meander path (oNLM) of the Kuroshio in 2008. Transition from the nearshore non-large-meander path (nNLM) to oNLM occurred around June 3, 2008, and then the flow field dramatically changed in Sagami Bay. After June 3, 2008, the Kuroshio took the relatively stable oNLM, and the flow variability with periods of 50–70 days whose maximum of amplitude was near 200 m depth was dominated in Sagami Bay. This flow variability was caused by generation of an anticyclonic circulation at a depth of 200 m in the northern part of Sagami Bay, and this generation was associated with the Kuroshio axial variation, which was characterized by S-like shape meander, with periods of about 60 day off the Boso Peninsula. A lense-like structure of  $26.2–26.6\sigma_\theta$  isopycnal surfaces at depths of 120–320 m was accompanied by the generation of the anticyclonic circulation, resulting in upwelling of colder lower layer water at depths shallower than 200 m in the northern part of Sagami Bay. When the S-like shape meander vanished off the Boso Peninsula, the anticyclonic circulation inside the lense-like isopycnal structure was generated in the northern part of Sagami Bay. Additionally, this Kuroshio axial variation was associated with disturbance with negative sea level anomaly, which was generated around Enshu-nada and propagated eastward. The disturbance arrived off Sagami Bay, and then the S-like shape meander vanished off the Boso Peninsula. Therefore, the anticyclonic circulation in the northern part of Sagami Bay was caused by the Kuroshio axial variation off the Boso Peninsula occurring with the arrival of the disturbance off Sagami Bay, and the generation of the anticyclonic circulation caused the flow variability with periods of 50–70 days in Sagami Bay, which was a typical phenomenon during the oNLM.

**Key words:** flow variability, Kuroshio axial variation,  
offshore non-large-meander path, profiling buoy system, Sagami Bay

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

(Received 15 December 2010; accepted 2 June 2011)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2011)



---

† Corresponding author. Tel.: +81 457887698.

Present address: Research Center for Fisheries Oceanography and Marine Ecosystem, National Research Institute of Fisheries Science, Fisheries Research Agency, 2-12-4 Fukuura, Kanazawa-ku, Yokohama, Kanagawa 236-8648, Japan.

E-mail address: dtakahashi@affrc.go.jp (D. Takahashi)

a Hydrospheric Atmospheric Research Center, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan

b Nichiyu Giken Kogyo Co., Ltd., 21-2, Matobashin-machi, Kawagoe, Saitama 350-1107, Japan

c Oceanographic Observation Center, Tokyo University of Marine Science and Technology, 4-5-7, Minatominami, Minato-ku, Tokyo, 108-8477, Japan

d Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Yokosuka Headquarter, 2-15, Natsushima-cho, Yokosuka-city, Kanagawa 237-0061