

— 原著論文 —

## 2017年8月に発生した黒潮大蛇行の 黒潮流路と日本南岸の潮位変動\*

吉田 久美<sup>1†</sup>, 碓氷 典久<sup>2</sup>, 井上 博敬<sup>1</sup>

### 要 旨

2017年8月に発生した黒潮大蛇行について、大蛇行に伴う日本南岸の潮位変動と、その黒潮流路との関係を調べた。海況による潮位変化は、観測潮位偏差から気象要因の変化量を差し引いて求めた。大蛇行流路が安定した2018年以降、東海地方の沿岸地点では海況による潮位の上昇が見られた。大蛇行期間の2018~2023年と非大蛇行期間の2011~2016年の6年平均の差は、浦神~内浦の8地点で大蛇行期間の方が3~5 cm高かった。コンジット解析やEOF解析の結果から、大蛇行期間中に潮位が上昇する海域は東海沖の黒潮流路によって異なることが分かり、3つのパターンを確認できた。①黒潮が伊豆半島から房総半島に接近している場合は東海以西で潮位が上昇しやすい。②東海沖で黒潮から分かれた西向きの流れが見られる場合は浦神以東の東海沿岸で潮位が上昇しやすい。③黒潮が紀伊半島の東側に接近して東海沖でS字型の流路をとる場合は尾鷲以西で潮位が上昇しやすい。②と③のパターンは、黒潮大蛇行時でも紀伊半島の東西で潮位変動に違いが見られる要因となる。

キーワード：黒潮大蛇行, 潮位変動, 黒潮流路, 海面水位

### 1. はじめに

黒潮は、東シナ海を北上してトカラ海峡から太平洋に入り、日本の南岸に沿って流れ、房総半島沖を東に流れる海流である。黒潮の日本南岸の流路には、大きく分け

て2種類のパターンがあることが知られている(吉田, 1964; Taft, 1972)。一方は紀伊半島や遠州灘の沖合で南方に蛇行して流れる「大蛇行流路」、他方は四国・本州南岸を直線的に流れる「非大蛇行流路」である。非大蛇行流路は日本南岸全域で岸近くを流れる「非大蛇行接岸流路」と伊豆海嶺周辺で小さく蛇行して流れる「非大蛇行離岸流路」に分けられ、黒潮の流路変動は「大蛇行流路」、「非大蛇行接岸流路」、「非大蛇行離岸流路」の3つの代表的な流路とそれらの間の遷移で理解されている(Kawabe, 1985, 1986, 1995)。黒潮が一旦大蛇行流路となると多くの場合は1年以上持続する。

大蛇行流路については、吉田ほか(2006)が(1)潮

\* 2024年3月26日受領 2025年2月26日受理  
著作権：日本海洋学会, 2025年

1 気象庁大気海洋部  
〒105-8431 東京都港区虎ノ門3-6-9

2 気象研究所全球大気海洋研究部  
〒305-0052 茨城県つくば市長峰1-1

† 連絡著者：吉田 久美  
e-mail : kyoshita@met.kishou.go.jp

岬で黒潮が離岸している（串本と浦神の潮位差が小さい値に安定していることで判定）、(2) 東海沖（東経 136～140 度）での黒潮流路の最南下点が北緯 32 度より安定して南に位置している、の二つの条件を満たすことを黒潮大蛇行の判定基準とした。気象庁（2024）では、この吉田ほか（2006）の基準を採用して黒潮大蛇行を判定している。その結果、1965 年以降で黒潮大蛇行は 6 回発生している。1970 年代後半から 1990 年代初めまでは黒潮大蛇行が頻繁に発生しており、1975 年 8 月に発生した大蛇行は 4 年 8 か月継続した。1990 年代半ば以降は 2004 年 7 月～2005 年 8 月を除いて、非大蛇行の状態が続いていたが、2017 年 8 月に 12 年ぶりに黒潮大蛇行が発生した。この大蛇行は、2024 年 12 月時点でも継続しており、継続期間は 7 年 4 か月と 1965 年以降で過去最長となっている。

黒潮大蛇行が発生すると海流や水温の分布が変化する。蛇行の内側で冷水渦が発達し、蛇行の内側で水温が低くなる一方で、蛇行の東側から冷水渦を回り込むように西向きの黒潮から分かれた流れ（黒潮分枝流）が生じることがあり、この流れは東海沿岸に暖水をもたらす（松本、1985；関根ほか、1991；Sekine and Fujita, 1999；杉本・吉田、2005；Sugimoto *et al.*, 2020 など）。このため、黒潮大蛇行は海上交通に加えて水産業にも大きな影響を与える（日下ほか、2021）。

また、黒潮大蛇行の日本の気象現象への影響についても複数の研究が行われている。Nakamura *et al.* (2012) は黒潮流路と南岸低気圧の移動経路の関係を調べ、黒潮大蛇行時には東京で降雪が起りやすいことを報告した。また、Sugimoto *et al.* (2021) は夏の関東地方に及ぼす黒潮大蛇行の影響を分析している。そのほか、日本における降雨や台風の発達と黒潮大蛇行との関連も報告されている（Tochimoto *et al.*, 2022；Oka *et al.*, 2023 など）。

さらに、黒潮大蛇行は日本南岸の潮位に影響を与えることが知られている（Kawabe, 1980, 1995；Sekine and Fujita 1999；Zhang and Ichikawa, 2005；杉本・吉田、2005 など）。Kawabe (1980) は、1975 年の黒潮大蛇行発生に伴い、日本南岸の油津～御前崎の潮位が上昇したこと、また、非大蛇行時に見られる潮岬の東側と西側の潮位変動の違いは大蛇行期間に小さくなったことを指摘している。Sekine and Fujita (1999) は、1985～1993 年の水温・塩分の現

場観測データから、串本と浦神の潮位差の非大蛇行時と大蛇行時の違いは黒潮暖水の分布の違いであると指摘した。彼らの結果によれば、非大蛇行時には黒潮暖水が室戸岬沖から紀伊半島の西に接近する一方で、大蛇行時には紀伊半島の東から御前崎にかけて接近する。

日本沿岸の潮位の EOF 解析を行った Senjyu *et al.* (1999) と Usui and Ogawa (2022) は、黒潮大蛇行による変動が第 2 モードとして抽出されたことを報告している。Usui and Ogawa (2022) は、1993～2010 年の潮位観測データと 1982～2016 年の FORA-WNP30 の海洋再解析データを利用して日本沿岸の潮位の EOF 解析を行い、黒潮大蛇行時に東海沖で見られる西向きの黒潮分枝流による伊豆半島～紀伊半島の潮位上昇が第 2 モードに対応すると指摘した。彼らは、伊豆海嶺付近で黒潮が接岸する場合に励起される沿岸捕捉波が時計回りに日本海沿岸まで伝播して生じる日本沿岸の広い範囲の潮位上昇が第 1 モードに対応すると報告している。一方、Nagano and Kawabe (2004) の 1961～1995 年の潮位観測データを用いた周波数別経験的直交関数 (FDEOF) 解析の結果では、沿岸捕捉波と考えられる西向きの伝播は 10 日以下の周期で見られるものの、10 日より長い周期では見られなかった。

2017 年に発生した黒潮大蛇行による潮位変動については、Nagano *et al.* (2019) が 2018 年半ばまでの潮位観測データから串本と浦神の潮位差が安定して小さくなっていったことを報告している。その後、黒潮大蛇行は現在まで 7 年以上継続しているが、この長期間の日本南岸の潮位変動は明らかになっていない。長期間にわたる黒潮大蛇行が日本南岸の潮位にどのように影響したかをまとめておくことは沿岸防災の観点からも重要である。2019 年 10 月には、黒潮大蛇行の影響で潮位が上昇しているところに令和元年東日本台風による潮位上昇が重なったため、東海沿岸の一部の観測地点で過去最高潮位を記録し、高潮による浸水被害が発生した（気象庁、2019；気象庁・海上保安庁、2022）。しかしながら、黒潮が大蛇行している時は常に東海沿岸で潮位が上昇するとは限らず、黒潮がどのような流路をとる時に潮位が上昇しやすいのかは現在も明らかになっていない。4 年以上の長期にわたって継続した黒潮大蛇行には、2017 年以前では 1975 年に発生した大蛇行があるが、当時は

衛星観測がなく、現在のような数値モデルを使った解析もなかったため、調査に利用できるデータは限られていた。また、2017年に発生した黒潮大蛇行の八丈島と三宅島の潮位変化などから分かる流路の特徴や形成過程が1975年に発生した黒潮大蛇行とは異なるとの指摘もある (Nagano *et al.*, 2019, 2021)。以上から、黒潮大蛇行の日本沿岸の潮位への影響を把握するためには、2017年に発生した黒潮大蛇行で2018年以降も含めた長期間の潮位変化と黒潮流路との関係を確認しておく必要がある。そこで、本調査では、2017年8月に発生した黒潮大蛇行について、2023年までの観測データに加えて海洋データ同化システムなどのデータも利用して、黒潮大蛇行時の日本南岸の潮位変動と黒潮流路の変化の関係を調べた。

以下、第2節では解析で使用したデータについて述べ、黒潮大蛇行に伴う潮位変動を議論するために海況要因による潮位変化として用いた「OMH (Observation Minus Hindcast)」の計算方法を説明する。第3節では、黒潮大蛇行期間の2018~2023年のOMHについて、非大蛇行期間との比較やEOF解析の結果などから黒潮流路との関係を示す。第4節で、黒潮大蛇行期間における日本南岸の潮位変化と黒潮流路との関係について考察し、第5節で結果をまとめる。

## 2. データと解析手法

解析では、気象庁の日本沿岸潮位観測地点における2010~2023年の日平均潮位偏差データを使用した。解析に使用した主な地点をFig. 1に示す。観測潮位偏差には、気圧降下による海面の吸い上げ効果と風による海水の吹き寄せ効果による潮位変化が含まれている。可能な限り海況要因の潮位変化のみに注目するため、気象庁で現業的に計算している高潮モデル (Japan Meteorological Agency, 2024) のハインドキャストの日平均値を観測潮位偏差から差し引いた。以下、この観測潮位偏差とハインドキャストによって計算された吸い上げ効果と吹き寄せ効果による潮位変化量の差を「OMH (Observation Minus Hindcast)」と呼び、主に海況による潮位偏差と考える。高潮モデルでは、Navier-Stokesの運動方程式と非圧縮性流体の連続の式をそれぞれ鉛直方向に積分した2次元の浅水長波方程式を用いている。気象庁のメソ数値予報モデル (MSM) (Japan Meteorological Agency, 2024) による風と気圧の解析値を外力として与えた計算から、吸い上げと吹き寄せの2つの効果による潮位偏差が得られる。これらの値を観測潮位偏差から除去したOMHは、厳密には、海況による潮位変化だけでなく、波浪による潮位上昇も含む。さらに、

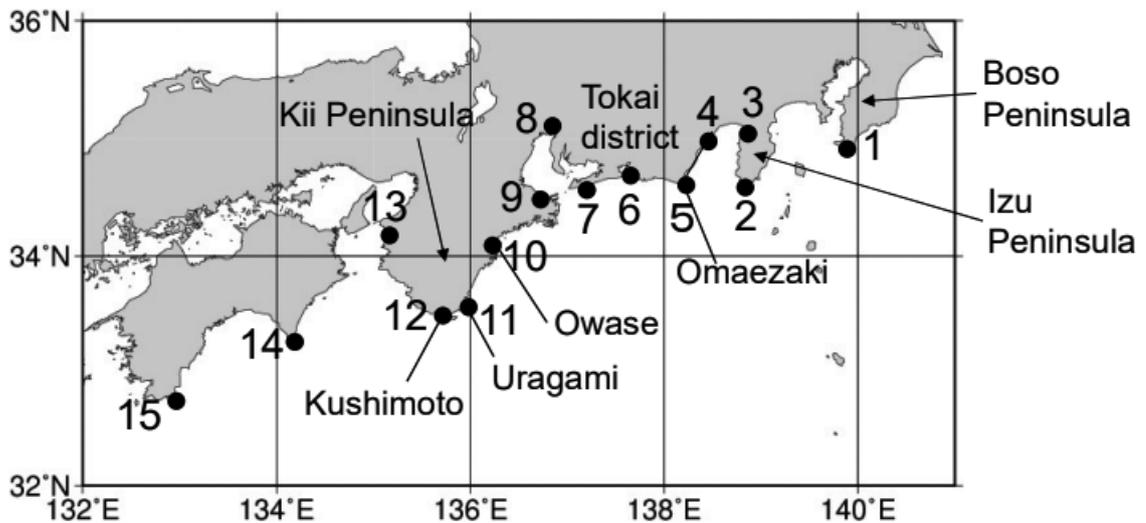


Fig. 1 Locations of tide gauge stations along the south coast of Japan: 1) Mera, 2) Irozaki, 3) Uchiura, 4) Shimizuko, 5) Omazaki, 6) Maisaka, 7) Akabane, 8) Nagoya, 9) Toba, 10) Owase, 11) Uragami, 12) Kushimoto, 13) Wakayama, 14) Murotomisaki, 15) Tosashimizu. The Tokai district corresponds to Stations 2-10.

海況による潮位変化は、黒潮の影響によるものだけでなく、気象場によってはエクマン輸送によって沿岸の潮位が上昇・下降する場合もある。これらの黒潮以外による影響を小さくし、時間スケールが10日以上黒潮の変動による潮位変動を抽出するため、OMHの旬平均値を解析に用いた。

黒潮流路は、気象庁で現業的に旬ごとに解析し、気象庁HPの海洋の健康診断表「日本近海の海流（月概況）」

([https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/data/shindan/c\\_1/jpn\\_monthly/jpn\\_monthly\\_cur.html](https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/data/shindan/c_1/jpn_monthly/jpn_monthly_cur.html))で流軸図を公開している黒潮流軸のデータを用いた。これは、海洋データ同化システムの解析値や海面水温画像、観測船による海流観測データから総合的に黒潮流軸を解析した結果である。2010～2023年の黒潮流軸図をFig. 2に示す。2017年8月に黒潮大蛇行が発生した後、2017年後半は黒潮が八丈島の南を流れて典型的な大蛇行流路で

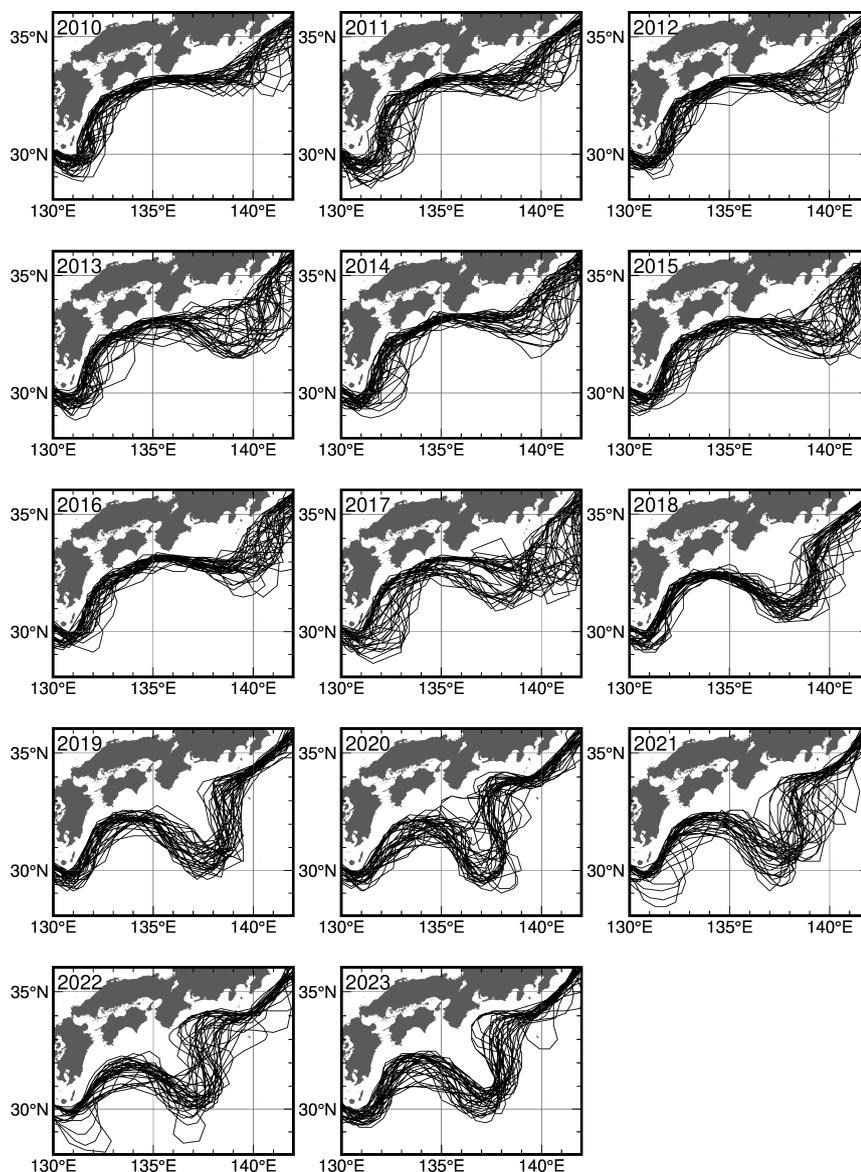


Fig. 2 Yearly Kuroshio paths plotted every 10 days from 2010 to 2023, based on Japan Meteorological Agency analysis.

はない時があった (Nagano *et al.*, 2019; Ito *et al.*, 2024)。そのため、今回の調査では大蛇行期間として 2018~2023 年の 6 年間を対象とした。

2010 年以降の水温・海流・海面高度の分布については、気象庁で現業的に運用している海洋データ同化システム NPR-4DVAR の解析値を使用した。NPR-4DVAR は北太平洋を対象海域とした解析システムであり、同化手法として 4 次元変分法を採用している。モデルの解像度は日本近海で約 10km である。NPR-4DVAR の詳細は Hirose

*et al.* (2019) や Japan Meteorological Agency (2024) を参照されたい。

### 3. 解析結果

#### 3.1. 大蛇行期間と非大蛇行期間の OMH の比較

2010~2023 年の関東~四国沿岸の各地点の OMH の時系列図を Fig. 3 に示す。全地点に共通する特徴とし

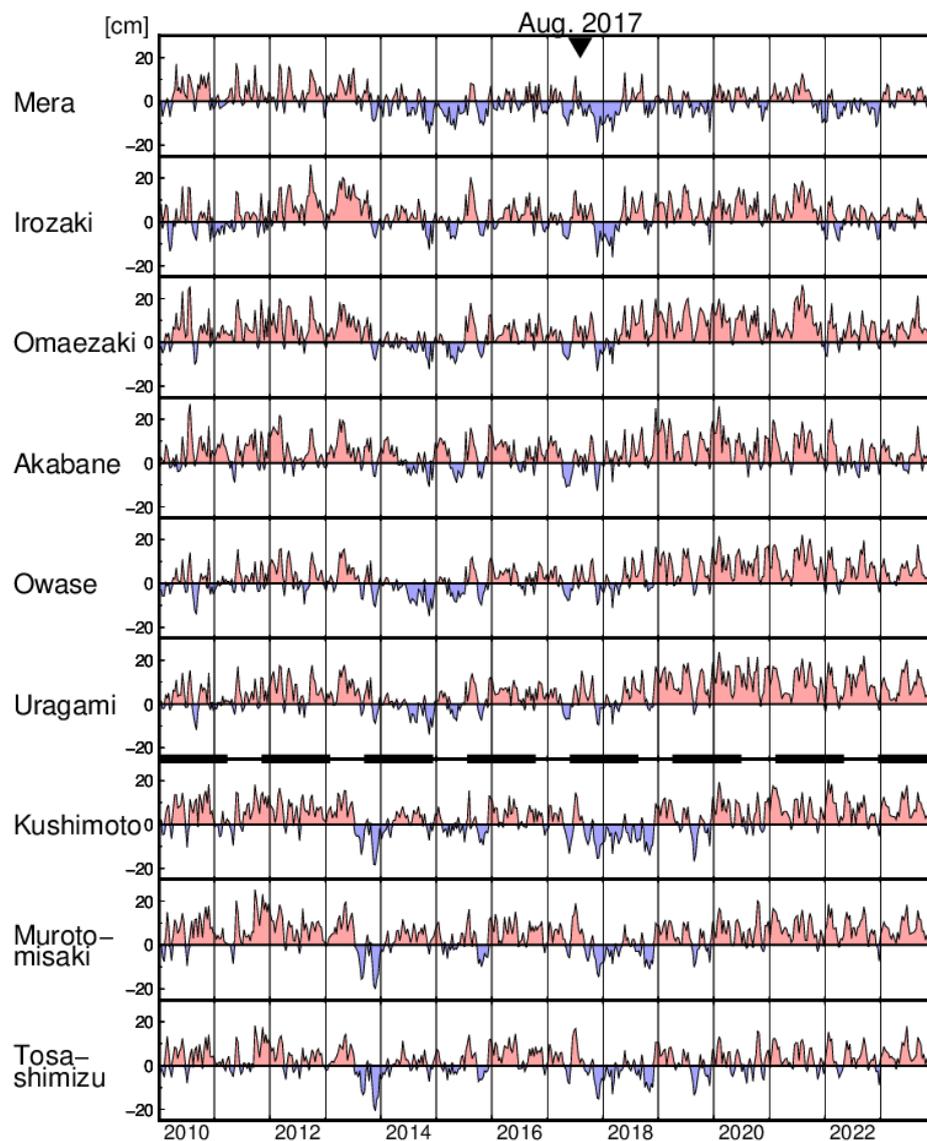


Fig. 3 Time series of OMHs along the south coast of Japan from 2010 to 2023, with positive and negative anomalies shaded in red and blue, respectively.

て、2010～2013年と2020以降に正偏差が多かった。黒潮大蛇行発生前後に注目すると、黒潮大蛇行発生直後の2017年後半から2018年初めは多くの地点で負偏差であったが、2018年3月以降は東海沿岸で+10 cm以上の正偏差となることが多かった。特に2019～2021年は東海沿岸で顕著な正偏差が見られ、御前崎では2021年8月上旬に対象期間の最大値である+26 cmとなった。一方、串本以西では黒潮大蛇行発生直後から2018年にかけて負偏差となることが多かった。また、関東沿岸の布良では、2018年3月以降の正偏差は東海沿岸の地点に比べて小さかった。

各地点におけるOMHの黒潮大蛇行期間と非大蛇行期間の平均的な差を確認するために、大蛇行期間の2018～2023年と非大蛇行期間の2011～2016年の6年平均の差をFig. 4に示す。浦神以東の多くの地点では、大蛇行期間の方が大きくなっていった。赤羽根を除く浦神～内浦の各地点の大蛇行期間と非大蛇行期間の差は3～5 cmで、一対の標本による平均の検定でも有意水準5%で有意となっていた。東海沿岸の正偏差が顕著だった2020～2022年（大蛇行期間）と2014～2016年（非

大蛇行期間）の3年平均を比較すると、その差は約8 cmとなった（Fig. 4の×印）。

### 3.2. 黒潮大蛇行と紀伊半島の東西のOMHの変動の違い

3.1.節で示した浦神以東と串本以西のOMHの変動の違いを確認するため、浦神以東で2021年を中心に正偏差が大きかった静岡県の御前崎と串本のOMHについて、日本沿岸の各地点のOMHとの相関を計算した（Fig. 5）。2010～2023年の全期間における相関は、御前崎と浦神以東の地点、串本と串本以西の地点で相関が高く（Fig. 5 (a) (c)）、浦神以東と串本以西で変動の違いが見られるとする過去の研究の結果（Kawabe, 1980など）と一致する。さらに、大蛇行期間の2018～2023年でも同じ特徴が見られ、御前崎と浦神以東の地点、串本と串本以西の地点で相関が高い（Fig. 5 (b) (d)）。2018～2023年の石廊崎～浦神と串本～土佐清水のOMHの時系列を重ねたFig. 6でも、浦神以東と串本以西の各地点の変動が概ね一致している。ただし、大蛇行期間中の尾鷲と浦神は、全期間よりも御前崎との相関が低くなり、串本との相関が高くなった。浦神と串本の相

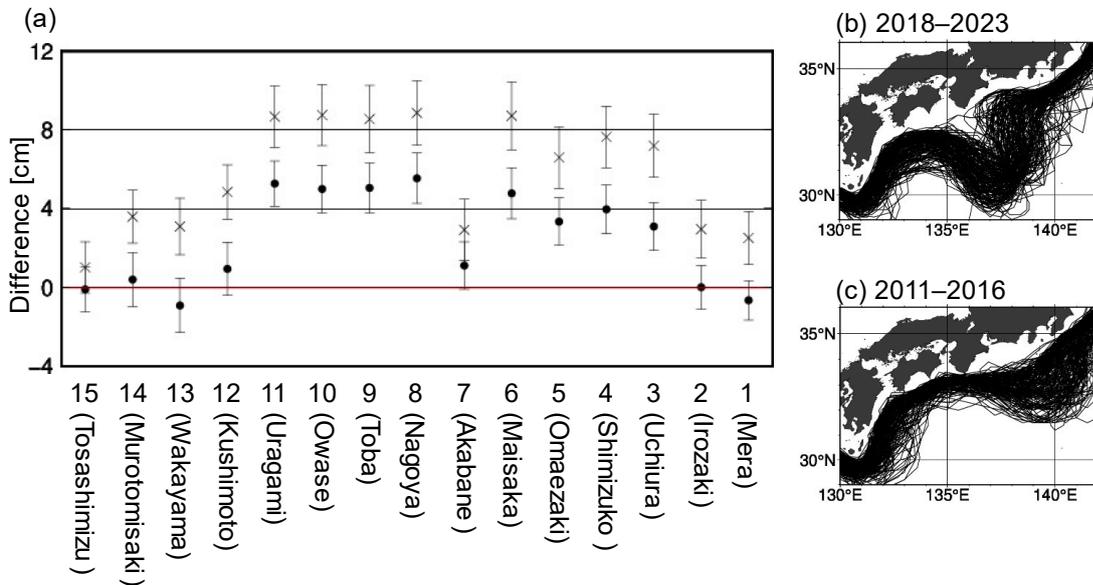


Fig. 4 (a) Differences in mean OMHs on the south coast of Japan between the Kuroshio LM and non-LM periods. Filled circles (crosses) represent the differences in 6-year (3-year) mean OMHs between the periods 2018-2023 and 2011-2016 (2020-2022 and 2014-2016). Error bars indicate 95% confidence intervals. Kuroshio paths for the periods (b) 2018-2023 and (c) 2011-2016.

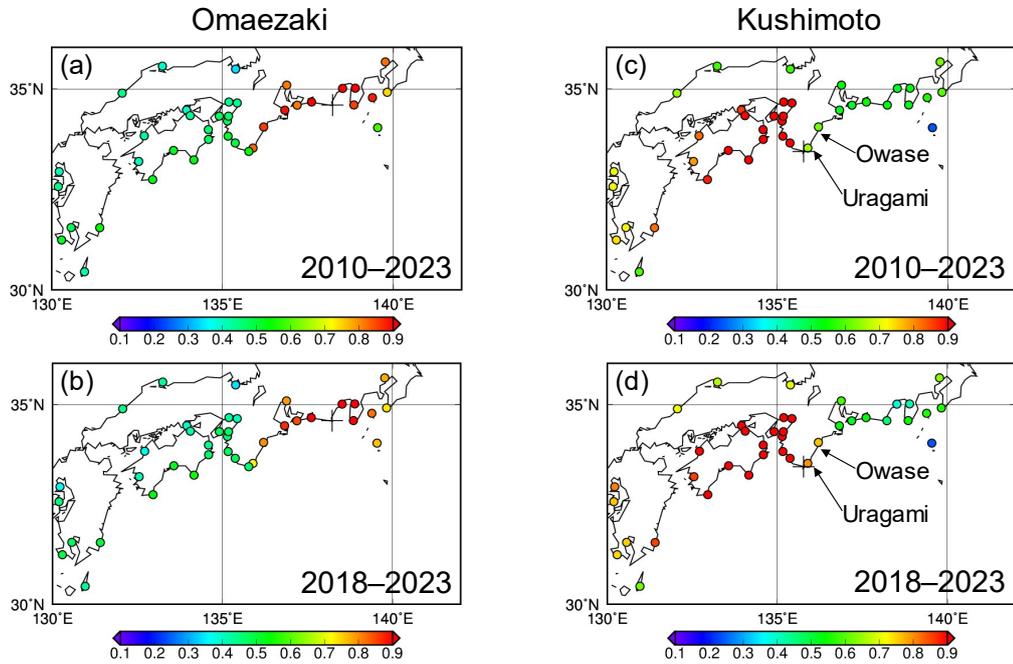


Fig. 5 Correlation coefficients of the OMH at each station in Japan with (a, b)  $OMH_{Omaezaki}$  and (c, d)  $OMH_{Kushimoto}$  for the periods (a, c) 2010-2013 and (b, d) 2018-2013.

関は全期間で0.65，大蛇行期間で0.8程度であった。各地点のOMHの時系列図 (Fig. 6) では，2022年半ばや2023年6月の尾鷲と浦神の正偏差が浦神以東の他の地点よりも大きく，串本以西の各地点と同じ変化になっていることが分かる。

### 3.3. 大蛇行期間のOMHと黒潮流路の関係

大蛇行期間のOMHの変動 (Fig. 6) は，大蛇行期間でもOMHにばらつきがあることを示す。この大蛇行期間中のOMHの変動と黒潮流路の関係を確認するため，御前崎と串本のOMHが大きい時と小さい時の黒潮流路を確認した。2018～2023年で両地点のOMH偏差が $+1\sigma$  ( $\sigma$ :標準偏差)を上回る高偏差旬と $-1\sigma$ を下回る低偏差旬の黒潮流路をFig. 7に示す。御前崎のOMHの高偏差旬は黒潮が138.5°E付近を北上することが多い。一方で，低偏差旬は138.5°Eより西の137°E付近を北上する場合と139°Eを北上して伊豆半島から離れて流れる2通りに分かれている。また，東海沖でS字型の流路となる場合もある。串本のOMH高偏差旬は，御前崎の高偏差旬と同様に黒潮が138.5°E付近を北上する場合のほか，

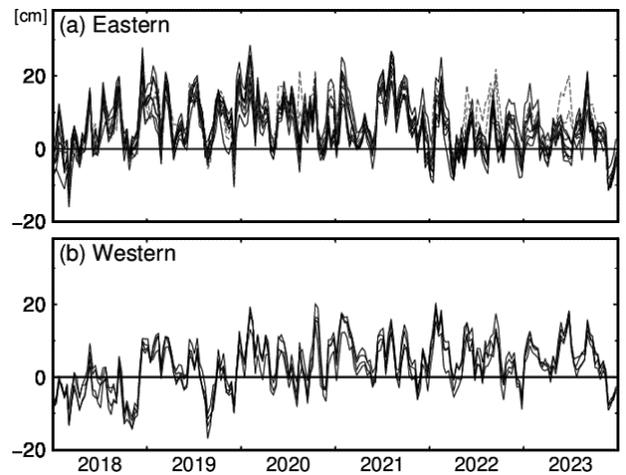


Fig. 6 Time series of OMHs along the south coast of Japan during the 2018-2023 Kuroshio LM period: (a) Eastern stations (2-11: Irozaki, Uchiura, Shimizuko, Omaezaki, Maisaka, Akabane, Nagoya, Toba, Owase, and Urugami); (b) Western stations (12-15: Kushimoto, Wakayama, Murotomisaki, and Tosashimizu). The gray dashed lines in (a) indicate the OMH variations at Owase and Urugami.

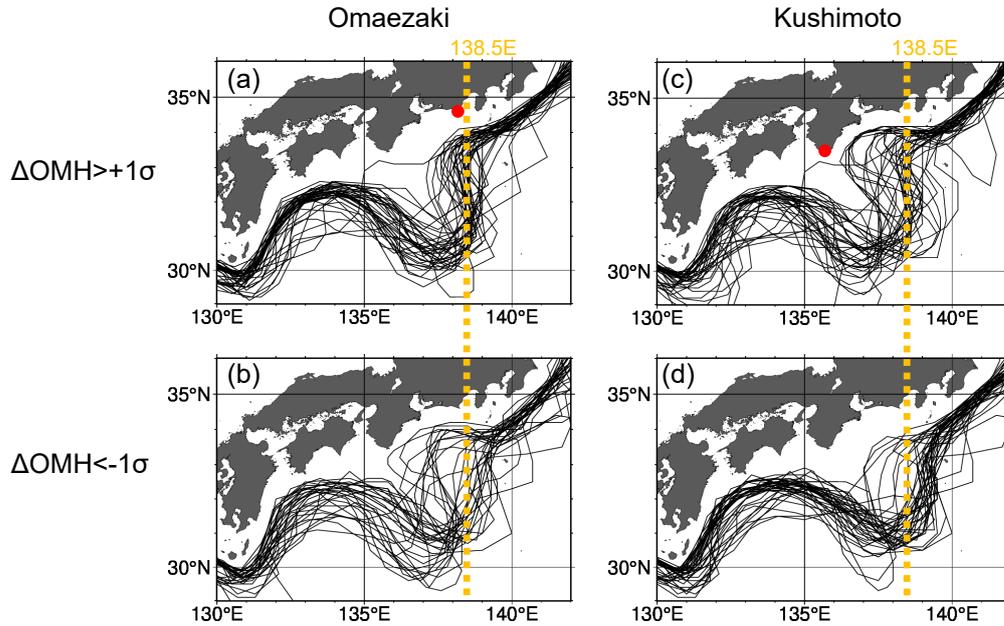


Fig. 7 Superposition of Kuroshio paths for (a)  $\Delta\text{OMH}_{\text{Omaezaki}} > +1\sigma$ , (b)  $\Delta\text{OMH}_{\text{Omaezaki}} < -1\sigma$ , (c)  $\Delta\text{OMH}_{\text{Kushimoto}} > +1\sigma$ , and (d)  $\Delta\text{OMH}_{\text{Kushimoto}} < -1\sigma$ . The yellow dashed lines correspond to 138.5°E. The red circles show the locations at Omaezaki in (a) and Kushimoto in (c).

御前崎の低偏差旬と同様に東海沖でS字型流路をとって紀伊半島に接近する場合がある。一方、串本のOMH低偏差旬は、黒潮が139~139.5°E付近を北上することが多く、御前崎の低偏差旬と同様に伊豆半島から離れて流れる場合もあった。

OMHと黒潮流路の関係を詳細に調べるため、NPR-4DVARの海流データを用いてOMHの高偏差旬と低偏差旬を比較した。御前崎及び串本のOMH高偏差旬と低偏差旬の50m深海流合成図をFig. 8に示す。黒潮流軸の解析結果(Fig. 7)と同様に、OMH高偏差旬と低偏差旬で黒潮北上位置の違いが見られる。御前崎のOMHが大きい時は138.5°E付近で北向きの流れが強い一方、139.5°E付近で北向きの流れが強い場合は串本のOMHが小さい。また、両方の地点のOMH高偏差旬で伊豆半島沿岸での流速が大きくなっている(Fig. 8(a)(c)破線楕円)。個々の事例を確認すると、伊豆半島沿岸で流速が大きい場合は黒潮が伊豆半島に接近していた時に対応していた。一方、両方の地点のOMH低偏差旬では、高偏差旬に比べて139°E付近における流速が大きい位置が南にずれ、三宅島付近で流れが強くなっていた

(Fig. 8(b)(d)破線楕円)。

御前崎と串本のOMH高偏差旬の50m深海流合成図(Fig. 8(a)(c))において東海沖の黒潮から分かれて紀伊半島に向かう西向きの流れに注目すると、御前崎の高偏差旬は串本の高偏差旬に比べて西向きの流れが北側で強く、東海沿岸に接近していた。一方、御前崎の低偏差旬の合成図では、Fig. 7(b)の黒潮流軸に見られるS字型の紀伊半島に接近する流路に対応して志摩半島の東に流速の大きい場所が見られた(Fig. 8(b))。また、串本の高偏差旬の合成図でも志摩半島の東に流速の大きい場所が見られる(Fig. 8(c))。個々の事例を確認するとS字型流路の場合は黒潮が志摩半島の東から東海沿岸を東に流れることが多かった。

#### 3.4. 大蛇行期間のOMHのEOF解析

3.2.節と3.3.節で示した2017年からの大蛇行期間のOMHの変動やその黒潮流路との関係をさらに詳しく調べるため、2018~2023年のOMHのEOF解析を行った。Usui and Ogawa (2022)のEOF解析の結果では第1モードの沿岸捕捉波による潮位変化が関東沿岸から日本

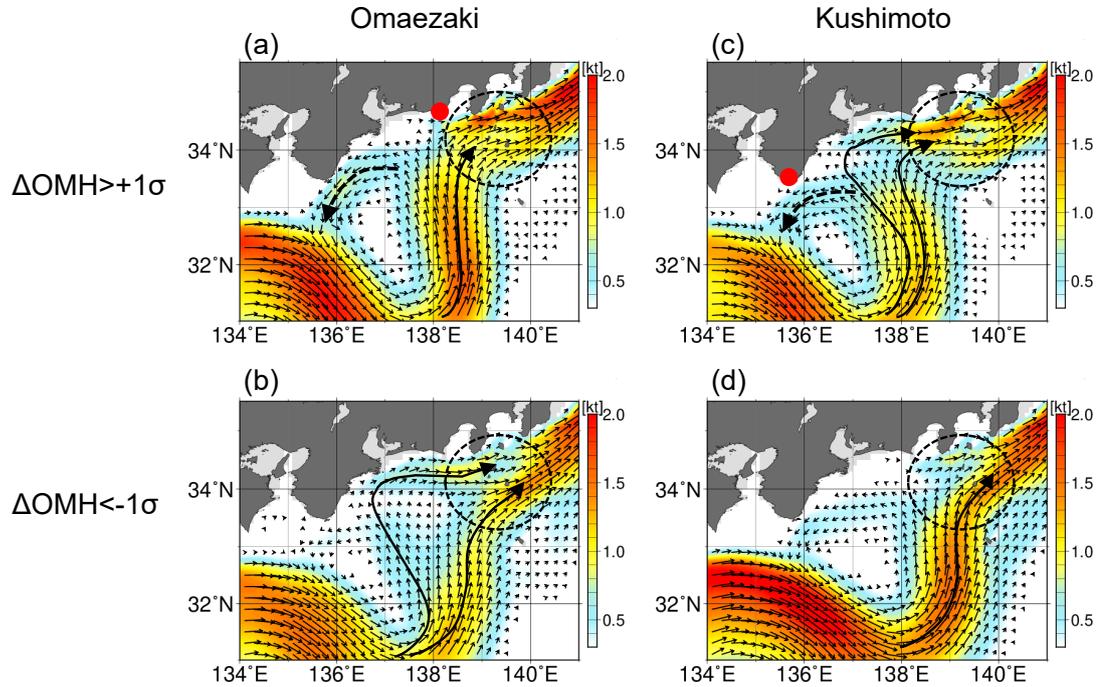


Fig. 8 Composite maps of the 50-m-depth ocean current for (a)  $\Delta\text{OMH}_{\text{Omaezaki}} > +1\sigma$  (b)  $\Delta\text{OMH}_{\text{Omaezaki}} < -1\sigma$ , (c)  $\Delta\text{OMH}_{\text{Kushimoto}} > +1\sigma$ , and (d)  $\Delta\text{OMH}_{\text{Kushimoto}} < -1\sigma$ . Dashed ellipses indicate the areas where the Kuroshio flows near the Izu Peninsula. Dashed arrows in (a) and (c) indicate the westward Kuroshio bifurcation. Solid arrows indicate the Kuroshio paths estimated from the ocean current maps.

海沿岸まで広がっていたことから、EOF 解析の対象範囲を関東沿岸から日本海南部沿岸とし、対象期間の全期間でデータがある地点を解析に用いた。第 1 モードと第 2 モードの空間パターンと時係数（以下、PC1、PC2）を Fig. 9 に示す。寄与率は第 1 モードが 76.2%、第 2 モードが 11.1%と第 1 モードと第 2 モードで変動の 85%以上を説明できる。得られた空間パターンは Usui and Ogawa (2022) と同様の結果となり、第 1 モードは全域が同符号で変化するパターン、第 2 モードは浦神以東と串本以西の変動の違いを示すパターンとなった。全域で OMH が小さかった 2018 年前半は PC1、PC2 とともに負となっていた。

各モードの時係数 PC1、PC2 が 1 を上回る場合と -1 を下回る場合の NPR-4DVAR の海面高度偏差合成図と 50 m 深海流合成図を Fig. 10 と Fig. 11 に示す。海面高度偏差は、NPR-4DVAR の海面高度の 2018~2023 年の 6 年平均からの偏差である。PC1 > 1 と PC1 < -1 の海面高度偏差の合成図 (Fig. 10 (a)(b)) では、日本沿岸でほぼ一様に正偏差 (PC1 > 1) または負偏差 (PC1

< -1) になっており、EOF 解析による第 1 モードの空間パターンと一致する。PC2 > 1 と PC2 < -1 (Fig. 10 (c)(d)) では東海沖から紀伊半島の西にかけてそれぞれ顕著な正偏差と負偏差が見られ、紀伊半島の東西で符号が異なる第 2 モードの空間パターンに対応している。50m 深海流合成図では、PC1 > 1 では黒潮が伊豆半島に接近している一方で、PC1 < -1 では伊豆半島から離れており、伊豆半島から黒潮までの距離に違いがある (Fig. 11 (a)(b))。御前崎の OMH 低偏差句と串本の OMH 高偏差句の黒潮流軸図 (Fig. 7 (b)(c)) で見られた東海沖の S 字型流路は、PC2 < -1 の 50 m 深海流合成図で明瞭であった (Fig. 11 (d))。

## 4. 考察

### 4.1. 大蛇行期間と非大蛇行期間の OMH の差

3.1. 節では、東海沿岸の赤羽根を除く浦神~内浦の地

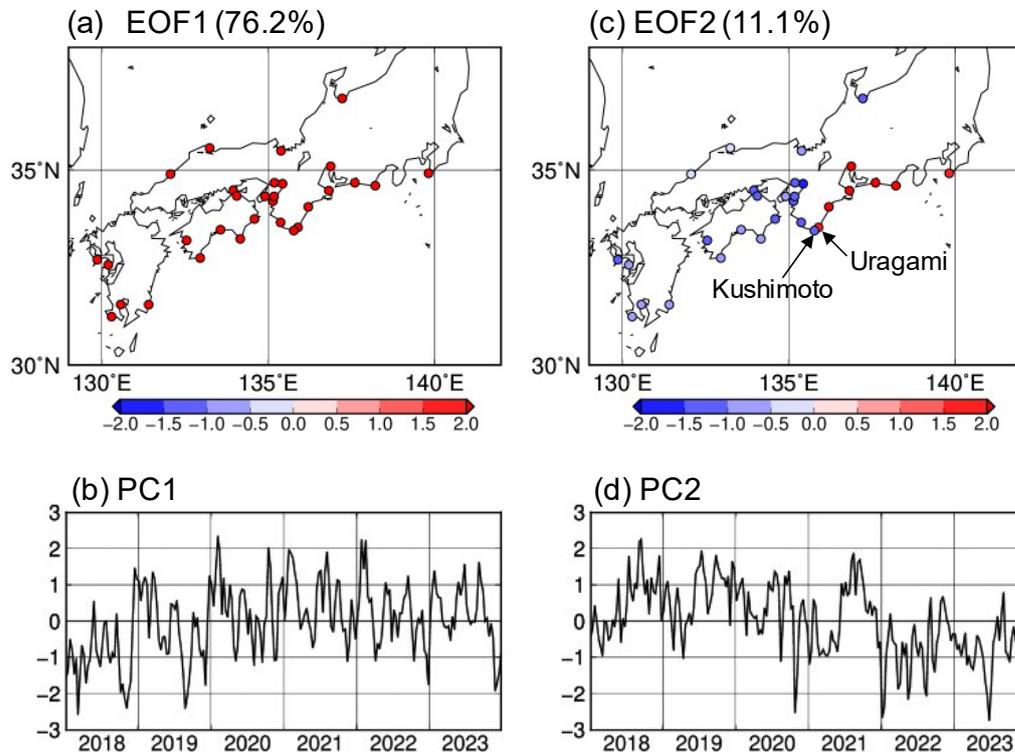


Fig. 9 Spatial patterns and corresponding principal components for the (a, b) first and (c, d) second EOF modes. The percentage of total variance explained by each mode is shown in parentheses.

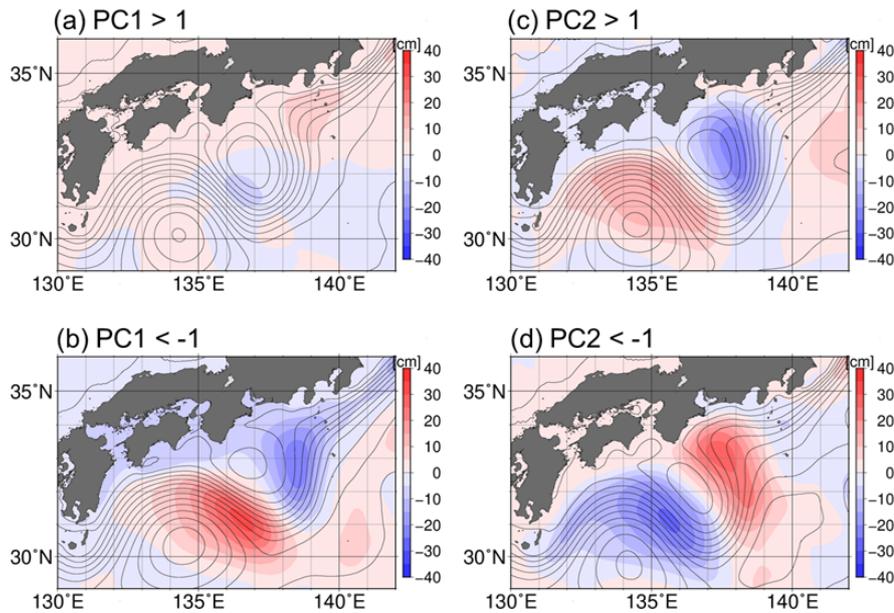


Fig. 10 Colors represent composite maps of sea surface height deviations from mean values during the 2018–2023 LM period for (a)  $PC1 > 1$ , (b)  $PC1 < -1$ , (c)  $PC2 > 1$ , and (d)  $PC2 < -1$ . The contours indicate the sea surface height distribution.

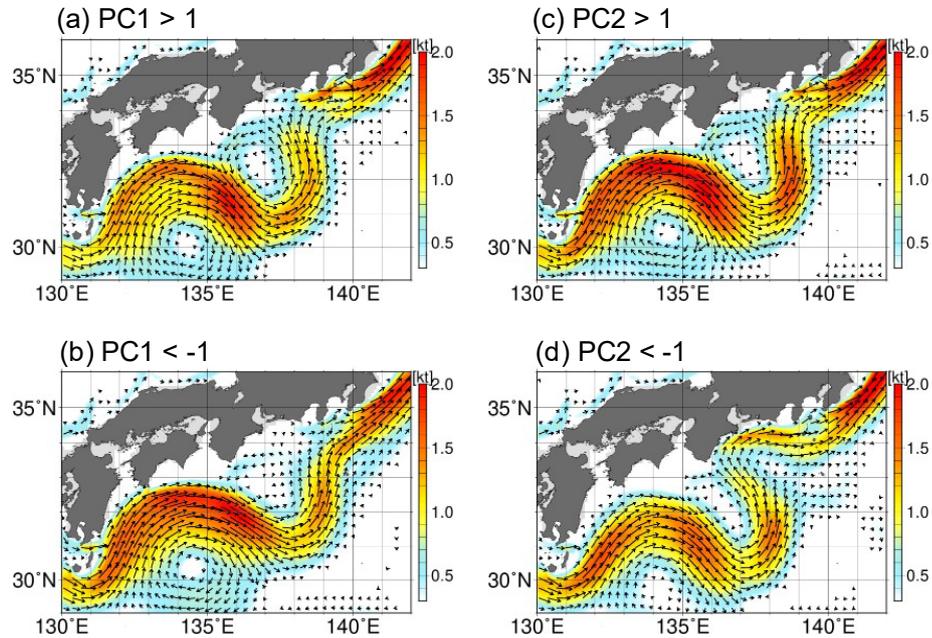


Fig. 11 Composite maps of the 50-m-depth ocean current for (a)  $PC1 > 1$ , (b)  $PC1 < -1$ , (c)  $PC2 > 1$ , and (d)  $PC2 < -1$ .

点で大蛇行期間の2018～2023年と非大蛇行期間の2011～2016年のOMHの6年平均に有意な差があることを示した。大蛇行期間と非大蛇行期間のOMHの差は、2018～2023年と2011～2016年の6年平均の比較で約4 cm、東海沿岸の正偏差が顕著だった2020～2022年と2014～2016年の3年平均の比較では約8 cmとなった。

日本沿岸の平均海面水位は長期的な上昇傾向にある(気象庁, 2020)。今回の大蛇行期間と非大蛇行期間の差は、長期的な上昇傾向による平均海面水位の上昇を含んでいる可能性がある。日本沿岸の平均海面水位の2006～2015年までの期間の1年あたりの上昇率4.1 mm(気象庁, 2020)から海面水位の長期的な上昇分を見積もると、6年間で約2.5 cm、3年間で約1.2 cmである。今回の解析では、観測潮位から天文潮位を差し引いた値である潮位偏差を用いている。各年の天文潮位は前々年までの5年間の平均潮位を考慮しているため、観測潮位から天文潮位を差し引いた結果である観測潮位偏差では長期的な上昇傾向が一部除去されていることになる。このため、今回求めた大蛇行期間と非大蛇行期間のOMHの差に含まれている長期的な上昇分は、平均的には2006

～2015年の日本沿岸の平均海面水位の上昇率から見積もった値より小さいと考えられる。

東海沿岸の地点の中で、赤羽根では大蛇行期間と非大蛇行期間のOMHの差が小さかった。赤羽根では大蛇行期間のOMHの大きさは他の地点と同程度であったが、非大蛇行期間の2011～2016年のOMHがほかの地点と比べて大きかった。赤羽根のOMHの時系列図(Fig. 3)を見ると、2011～2016年は近くの舞阪や尾鷲に比べて冬季のOMHが大きいことが分かる。赤羽根の検潮所における局所的な海況変化の特徴である可能性があるが、その原因は分からなかった。

各地点のOMHの時系列図(Fig. 3)から、2012～2013年を中心に非大蛇行期間でもOMHが大きくなる場合があることが分かる。Usui and Ogawa (2022)は、2013年に黒潮大蛇行期間と同じ潮位偏差のパターンが見られたことを報告しており、黒潮の東海沖の最南位置が北緯32度より南になることがあったためとしている。この2013年の東海沖の蛇行は、潮岬で安定して離岸した状態が続かなかつたため、黒潮大蛇行と判定されなかった(気象庁, 2014)。以上から、東海沿岸では、黒潮大蛇行時に潮位偏差が大きくなりやすいが、非大蛇

行時でも潮位偏差が大きくなる場合があると言える。

#### 4.2. 大蛇行期間の黒潮流路と日本南岸の潮位変動の関係

3.3. 節では、伊豆半島付近に黒潮が接近した場合は御前崎と串本の両地点で OMH が大きい傾向があることを示した。また、3.4. 節では、EOF 解析の第 1 モードとして日本南岸全域で同位相の潮位変化が抽出され、 $PC1 > 1$  で正偏差、 $PC1 < -1$  で負偏差となることを示した。 $PC1 > 1$  と  $PC1 < -1$  の 50 m 深海流合成図では、伊豆半島から黒潮までの距離に違いがあり、 $PC1 > 1$  では黒潮が伊豆半島に接近し、 $PC1 < -1$  では伊豆半島から離れていた (Fig. 11 (a)(b))。この距離の違いは、Fig. 10 (a)(b) で伊豆半島沖での海面高度偏差の  $PC1 > 1$  の正偏差と  $PC1 < -1$  の負偏差としても確認でき、Usui and Ogawa (2022) の結果と一致している。Usui and Ogawa (2022) はこの EOF 解析の第 1 モードで抽出された日本沿岸全域の潮位変化は伊豆海嶺付近で黒潮が接岸している場合に励起される沿岸捕捉波の伝播によって生じると考察した。Usui *et al.* (2021) は、沿岸捕捉波が日本南岸の黒潮流路の短期変動によって生じると考察しているが、この場合、発生した沿岸捕捉波は岸に沿って西に伝播するに従って減衰すると考えられ、基本的には黒潮が接近する位置に近い地点で潮位変化が大きく、OMH が大きくなりやすい。これは、御前崎の OMH 高偏差句の黒潮流軸は串本の高偏差句よりも東海沖の黒潮北上位置が東になる傾向があることと対応する (Fig. 7 (a)(c))。御前崎の OMH 高偏差句の 50 m 深海流合成図では、御前崎周辺で岸に垂直に黒潮が接近する流れとなっている (Fig. 8 (a))。黒潮が岸に垂直に接近する場合は、黒潮流速の変動が沿岸捕捉波を引き起こしやすく、潮位が上昇しやすい可能性がある。一方、御前崎の OMH 低偏差句で東海沿岸に流速が大ききところが見られるが (Fig. 8 (b))、東向きで岸に平行な流れとなっている。黒潮が岸に平行に流れる場合は、黒潮が岸に近い場所を流れていても沿岸に黒潮暖水が流れ込みにくく、潮位が上昇しにくいと考えられる。この暖水の流れ込みの違いは、御前崎の OMH の高偏差句と低偏差句の各句の水温分布図からも確認できた (図略)。

1961~1995 年の潮位観測データを用いて FDEOF 解析を行った Nagano and Kawabe (2004) は、沿岸捕捉波と考えられる西向きの伝播が 10 日以下の周期で見ら

れることを報告している。Nagano and Kawabe (2005) で報告されている沿岸捕捉波の位相速度は、Usui *et al.* (2021) が 2011 年 9 月の事例で求めた第 1, 第 2 傾圧ケルビン波の位相速度とほぼ一致している。黒潮によって励起された沿岸捕捉波の伝播によって、長い時間スケールで日本南岸全域の潮位が変動する可能性は Sasaki *et al.* (2014) など過去の研究でも指摘されている。黒潮の流路変動によって励起され、沿岸捕捉波として西に伝播する潮位の上昇が、10 日より長い周期の日本南岸の潮位変動にも影響している可能性がある。一方で、過去の研究では黒潮流路の変動は周期によって特徴が異なることが分かっている (Kawabe, 1987; Nagano and Kawabe, 2004)。Nagano and Kawabe (2004) で大蛇行時や 10 日より長い周期では西向きの伝播が見られなかったのは、大蛇行時の流路変動が影響している可能性がある。なお、今回行ったコンボジット解析では周期による違いは分からない。EOF 解析の第 1 モードで抽出される日本南岸全域で同時に生じる潮位変化の詳細なメカニズムの解明は今後の課題である。

EOF 解析の第 2 モードは、浦神以東と串本以西で逆位相となるパターンが抽出され、過去の研究と一致した (Senjyu *et al.*, 1999; Usui and Ogawa, 2022)。浦神以東で正、串本以西で負となる  $PC2 > 1$  では、50 m 深海流合成図で東海沖に西向きの黒潮分枝流が見られる (Fig. 11 (c))。これは、Sekine and Fujita (1999) が黒潮大蛇行時には紀伊半島の東から御前崎にかけて黒潮暖水が接近するため串本と浦神の潮位差が非大蛇行時と異なると指摘したことと一致する。また、 $PC1 > 1$  と  $PC2 > 1$  の海面高度偏差合成図 (Fig. 10 (a)(c)) を比較すると、 $PC2 > 1$  では  $138^{\circ}\text{E}$  付近に海面高度の負偏差が見られ、等値線で確認できる大蛇行内側の冷水渦の中心は  $PC1 > 1$  に比べて東にずれて蛇行が東寄りになっていることが分かる。さらに、 $PC1 < -1$  の海面高度偏差合成図 (Fig. 10 (b)) では  $138.5^{\circ}\text{E}$  付近に負偏差が見られ、 $PC2 > 1$  (Fig. 10 (c)) に比べて冷水渦付近の海面高度の等値線の勾配が小さく、冷水渦の中心もやや北にある。これらは、黒潮の伊豆半島付近での流路や東海沖における西向きの黒潮分枝流の発生が冷水渦の位置や強さと関係することを示唆する。

$PC2 < -1$  の 50 m 深海流合成図 (Fig. 11 (d)) では

東海沖のS字型流路が明瞭である。3.3.節で示したとおり、黒潮が紀伊半島の東側に接近してS字型の流路をとる時は御前崎でOMHが小さく、串本で大きくなりやすい (Fig. 7 (b)(c))。PC2<-1の海面高度偏差合成図では、紀伊半島の東側に顕著な正偏差が存在し、串本以西の正偏差につながっている (Fig. 10 (d))。これは、黒潮が接近した場所における潮位の上昇が沿岸捕捉波として西に伝播している可能性を示唆する。Usui and Ogawa (2022) は、EOF解析の第2モードが大蛇行時の西向き黒潮分枝流による東海沿岸の潮位上昇に対応すると指摘しているが、S字型流路については言及していない。彼らの解析期間は2016年までで、黒潮が東海沖でS字型流路をとることがあった2020年と2022~2023年 (Fig. 2) は含まれていない。彼らの解析期間に含まれている2004~2005年の黒潮大蛇行時の黒潮流軸を確認したところ、S字型流路は見られなかった (図略)。2018~2023年の大蛇行期間の第2モードは、西向き黒潮分枝流による東海沿岸の潮位上昇に加えて、逆向きのシグナルとしてS字型流路をとる場合の串本以西の潮位上昇を含むことを示しており、黒潮が紀伊半島の東側に接近するS字型流路は2017年8月に発生した黒潮大蛇行の特徴と言える。S字型流路は、2004年より前の黒潮大蛇行でも確認されている。1975年に発生した黒潮大蛇行は、海上保安庁が発行した海洋速報 (海上保安庁, 1977, 1978) で1977年12月から1978年4月にかけてS字型流路が確認できる。また、1959年に発生した黒潮大蛇行でもS字型の流路が報告されている (Shoji, 1972)。どちらも数年以上継続した黒潮大蛇行である。

3.4.節で述べたように、Fig. 10に示した海面高度偏差は、大蛇行期間の2018~2023年の平均からの差であり、大蛇行期間内での変化を示している。非大蛇行時も含めた平均水温からの差として2010~2023年の14年平均からの差として計算した水温偏差を確認すると、PC1>1, PC2>1, PC2<-1では冷水渦の北側の水温が高くなっている (Fig. 12 (a)(c)(d))。PC1>1では日本南岸で正偏差、PC2>1では東海沿岸で正偏差となっている。一方、S字型流路が特徴となるPC2<-1では、PC1>1やPC2>1に比べて東海沖の正偏差のピークがやや南に位置し、正偏差が紀伊半島の南端に向

かって伸びている。また、串本以西の沿岸でも水温が正偏差となっている。これらは、S字型流路では黒潮に伴う暖水が紀伊半島の東側から接近することに対応する。

S字型流路に対応するPC2<-1では串本以西と同様に黒潮が接近する紀伊半島の東側でも水温が正偏差となるが (Fig. 12 (d)), EOF解析の第2モードの空間パターンの正負の境界は浦神と串本の間にある (Fig. 9 (c))。PC2>1の水温偏差合成図でも、正負の境界は紀伊半島の南端に見られる (Fig. 12 (c))。PC2>1とPC2<-1の海面高度偏差合成図 (Fig. 10 (c)(d)) では、沿岸の偏差が小さく、境界の確認が難しい。東海~四国沿岸の潮位観測地点のPC2>1のOMHの平均を比較すると、浦神以東と串本以西で明瞭な違いが見られる (Fig. 13 (a))。一方、PC2<-1のOMHの平均は浦神と串本以西で同程度となり、尾鷲以東で徐々に小さくなっていった (Fig. 13 (b))。PC2<-1のS字型流路では、黒潮が接近する位置によって潮位が上昇する地点が変わっていると考えられる。3.2.節で大蛇行期間の尾鷲・浦神と串本の相関が全期間に比べて高くなったのは (Fig. 5 (c)(d)), 尾鷲付近に黒潮が接近した場合には尾鷲以西で潮位が上昇しやすいためと推察される。一方、S字型流路の時は、東海沿岸では黒潮が岸に平行に流れ、沿岸に黒潮暖水が流れ込みにくい。このため、S字型流路時の東海沿岸では、黒潮が接近するにも関わらず潮位が上昇しにくいと考えられる。これらから、EOF解析の第2モードは、PC2>1で確認できる黒潮から分かれた西向きの流れによる浦神以東の潮位の上昇と、PC2<-1で確認できるS字型流路による尾鷲以西の潮位の上昇の両方による紀伊半島の東西での潮位変動の違いが抽出されていると結論できる。第2モードの空間パターンの正負の境界は、PC2>1のOMHの分布 (Fig. 13 (a)) で示される浦神以東と串本以西の大きな潮位差の影響を受けていると考えられる。

今回の解析結果から、黒潮大蛇行時の日本南岸の潮位の上昇と黒潮流路の関係について3つのパターンを確認できる (Fig. 14 (a)~(c))。パターン (a) が現れるのは、黒潮が伊豆半島から房総半島に接近している場合で、東海以西で潮位が上昇しやすい。パターン (b) では、東海沖で黒潮から分かれた西向きの流れがある時に東海沿岸を中心に潮位が上昇しやすい。パターン (c)

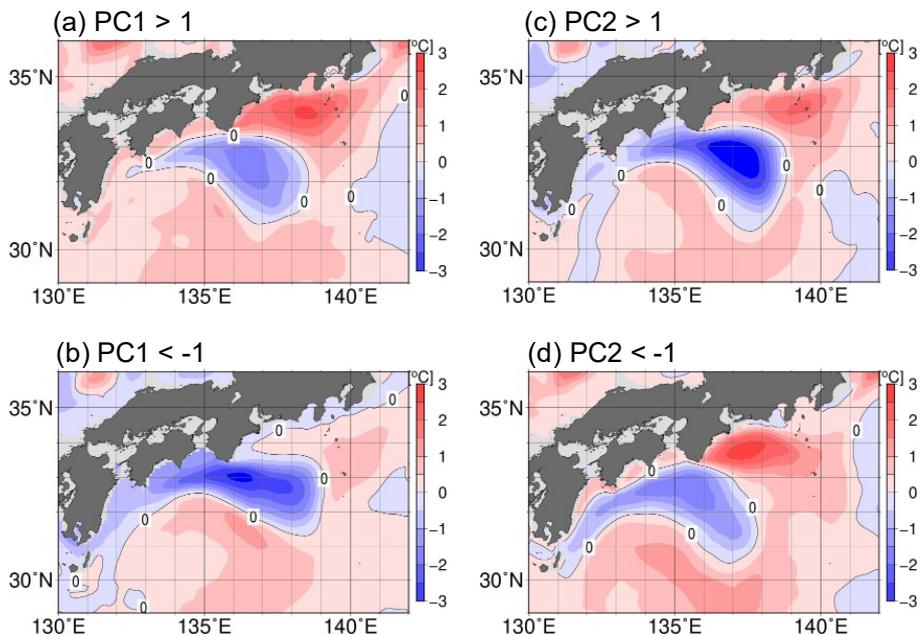


Fig. 12 Composite maps of the 100-m-depth temperature deviations from mean temperatures of 2010–2023 for (a)  $PC1 > 1$ , (b)  $PC1 < -1$ , (c)  $PC2 > 1$ , and (d)  $PC2 < -1$ .

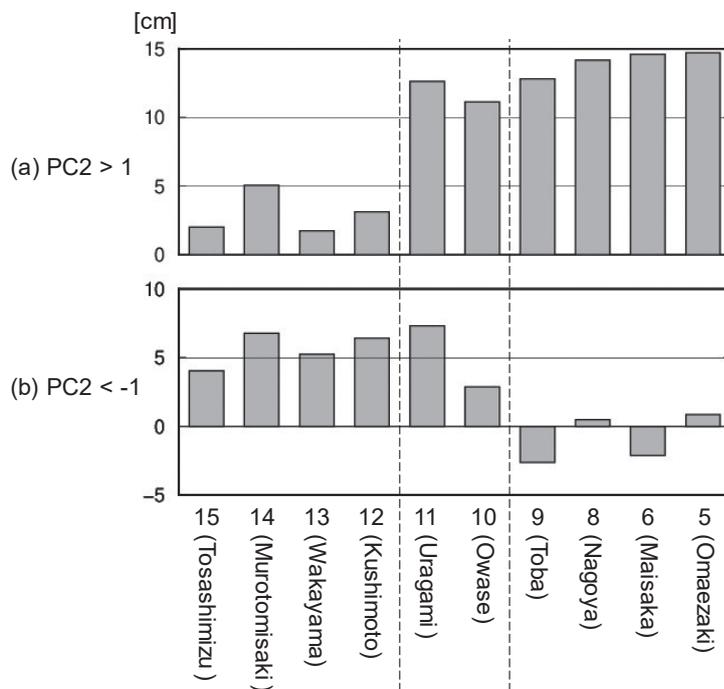


Fig. 13 Distribution of average OMHs for (a)  $PC2 > 1$  and (b)  $PC2 < -1$  at tide stations along the south coast of Japan.

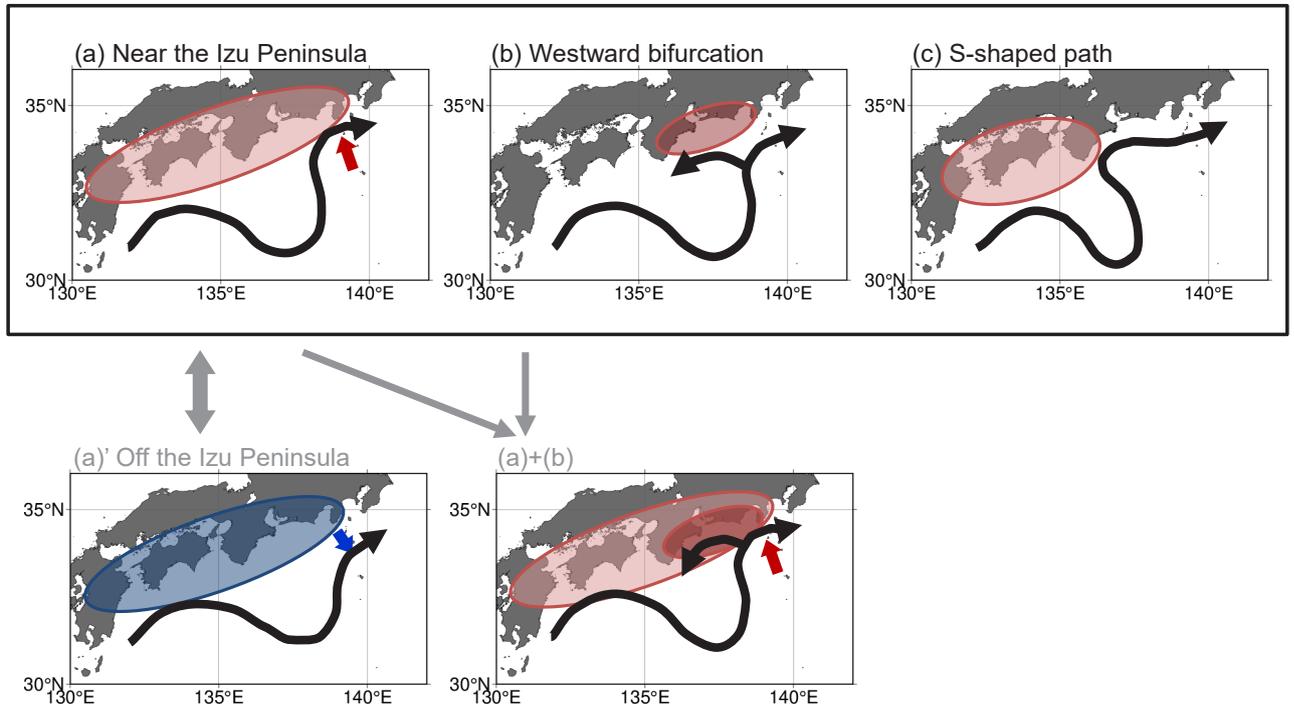


Fig. 14 Schematics illustrating the relationships between sea-level changes and Kuroshio paths during the LM period. Positive sea-level anomalies are observed (a) west of the Tokai district when the Kuroshio flows close to the Izu Peninsula, (b) along the Tokai district due to the westward bifurcation, and (c) west of Kushimoto by the S-shaped path. In the case of (a)+(b), the sea level rise is more pronounced along the Tokai district. (a)' shows the opposite pattern of (a), corresponding to negative sea-level anomalies west of the Tokai district when the Kuroshio flows off the Izu Peninsula.

では、東海沖でS字型流路をとる時に尾鷲以西で潮位が上昇しやすい。紀伊半島の東西で潮位の変化に違いが生じるのはパターン (b) と (c) である。また、パターン (a) とは逆に黒潮が伊豆半島から離れている場合は東海以西で潮位が低下しやすい (パターン (a)')。パターン (a) と (a)' は黒潮の伊豆半島付近からの距離が異なり、日本南岸の広い範囲で逆符号の潮位変化が生じる。さらに、パターン (a)~(c) の3つのパターンは独立に起こるとは限らず、同時に起こる場合もある。パターン (a) と (b) が同時に起こった場合は、東海沿岸で潮位が顕著に上昇する。2021年8月の御前崎のOMHの顕著な正偏差は、パターン (a) と (b) が同時に起こった例と考えられる。なお、パターン (a)~(c) と (a)' の4つのパターンはEOF解析で得られた時係数PC1, PC2が1を上回る場合と-1を下回る場合の合成図で示されるが、第2モードの合成図 (Fig. 10 (c)

(d), Fig. 11 (c) (d), Fig. 12 (c) (d), Fig. 13 (a) (b)) には寄与率が高い第1モードの影響が含まれている可能性があることに注意する必要がある。

最後に、PC2<-1の50m深海流合成図 (Fig. 11 (d)) では、東海沖のS字型の蛇行や四国沖の暖水渦を回り込む蛇行の東西方向の波長が短い。このような短い波長の蛇行は、Usui *et al.* (2013) の長期風応力場を変えた海洋モデルの感度実験で黒潮域のスベルドラップ流量が小さい時に見られている。彼らの黒潮域のスベルドラップ流量が小さい時に黒潮大蛇行の継続期間が長くなるとの指摘は、2017年の黒潮大蛇行が1965年以降で過去最長となっていることと一致する。一方、2017年の大蛇行の長期化については、Qiu *et al.* (2023) が黒潮統流の安定した状態を要因として挙げている。黒潮域のスベルドラップ流量と黒潮統流の力学的状態の変化にはどちらも北太平洋の気候循環場が重要な役割を果たす。大気と海洋がど

のように相互作用して黒潮大蛇行を長期化させているのか、数値モデル等を利用した今後の研究の進展が期待される。

## 5. まとめ

黒潮大蛇行が継続していた 2018～2023 年について、日本南岸の海況による潮位変動を調べ、2018 年以降に東海沿岸で潮位が上昇していたことを確認した。コンポジット解析や EOF 解析の結果から、東海沖の黒潮の流路によって、日本南岸の潮位が上昇しやすい海域に違いが見られることが分かった。また、過去の研究で報告されている紀伊半島の東西の潮位変動の違いは大蛇行期間でも確認された。黒潮大蛇行時の日本南岸の潮位の上昇と黒潮流路の関係について、今回の解析で確認できた 3 つのパターンをまとめた。黒潮が伊豆半島から房総半島に接近している場合は東海以西で潮位が上昇しやすい。東海沖の沿岸近くで黒潮から分かれた西向きの流れが見られる場合は浦神以東の東海沿岸で潮位が上昇しやすい。黒潮が紀伊半島の東側に接近して東海沖で S 字型流路をとる場合は尾鷲以西で潮位が上昇しやすい。本調査で明らかになった黒潮大蛇行期間の黒潮流路と日本南岸の潮位変動の関係をいれば、黒潮流路を監視することによって大蛇行時に潮位が上昇しやすい海域を予測することができると思われる。

## 謝 辞

本調査を実施するにあたり、気象庁大気海洋部環境・海洋気象課海洋気象情報室の皆様に解析・描画ツールの利用方法や潮位データなどについて多くの助言をいただきました。本稿改訂にあたり、2 名の査読者から貴重なコメントをいただきました。また、久保川厚編集委員長と小橋史明編集委員にお世話になりました。ここに記して心より感謝申し上げます。そして、この調査をまとめる動機を与えてくださった中野俊也氏と水野孝則氏に心より感謝いたします。

本研究は JSPS 科研費 JP19H05701, JP24H02227 の助成を受けたものです。

## References

- Hirose, N., N. Usui, K. Sakamoto, H. Tsujino, G. Yamanaka, H. Nakano, S. Urakawa, T. Toyoda, Y. Fujii, and N. Kohno (2019): Development of a new operational system for monitoring and forecasting coastal and open-ocean states around Japan. *Ocean Dyn.*, **69**, 1333-1357.
- Ito, D., Y. Shimizu, T. Setou, A. Kusaka, D. Ambe, Y. Hiroe, K. Hidaka, S. Sogawa, and T. Yamaguchi (2024): Temporal variation of the 2017 Kuroshio large meander based on repeated surveys along 138°E. *J. Oceanogr.*, **80**, 197-217.
- Japan Meteorological Agency (2024): Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency. <https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline-2024-nwp/index.htm> (最終アクセス: 2024/12/21)
- 海上保安庁 (1977, 1978): 海洋速報 & 海流推測図バックナンバー (1977 年海洋速報第 24 号～1978 年海洋速報第 8 号). <https://www.1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/KAIYO/qboc/backnumber.html> (最終アクセス: 2024/12/21)
- Kawabe, M. (1980): Sea level variations along the south coast of Japan and the large meander in the Kuroshio. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, **36**, 97-104.
- Kawabe, M. (1985): Sea level variations at the Izu Islands and typical stable paths of the Kuroshio. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, **41**, 307-326.
- Kawabe, M. (1986): Transition processes between the three typical paths of the Kuroshio. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, **42**, 174-191.
- Kawabe, M. (1987): Spectral properties of sea level and time scales of Kuroshio path variations. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, **43**, 111-123.
- Kawabe, M. (1995): Variations of current path, velocity, and volume transport of the Kuroshio in relation with the large meander. *J. Phys. Oceanogr.*, **25**, 3103-3117.
- 気象庁 (2014): 気象庁 HP 海洋の健康診断表「黒潮の数か月から十年規模の変動(流路)」。 [https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/data/db/kaiyo/archive/b\\_2/kuroshio\\_stream/2013/kuroshio\\_stream.html](https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/data/db/kaiyo/archive/b_2/kuroshio_stream/2013/kuroshio_stream.html) (最終アクセス: 2024/12/21)
- 気象庁 (2019): 令和元年東日本台風(台風第 19 号)による大雨、暴風等令和元年(2019 年)10 月 10 日～10 月 13 日(速報)。 <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2019/20191012/20191012.html> (最終アクセス: 2024/12/21)
- 気象庁 (2020): 日本沿岸の平均海面水位は、1980 年以降、上昇傾向にある。日本の気候変動 2020 (本編), p. 29.
- 気象庁・海上保安庁 (2022): 報道発表「黒潮大蛇行の継続期間が過去最長に」。 [https://www.jma.go.jp/jma/press/2205/25a/20220525\\_kuroshio\\_daidakou.pdf](https://www.jma.go.jp/jma/press/2205/25a/20220525_kuroshio_daidakou.pdf) (最終アクセス: 2024/12/21)
- 気象庁 (2024): 気象庁 HP 海洋の健康診断表「黒潮の数か月から十年規模の変動(流路)」。 [https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/data/shindan/b\\_2/kuroshio\\_stream/kuroshio\\_stream.html](https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/data/shindan/b_2/kuroshio_stream/kuroshio_stream.html) (最終アクセス: 2024/12/21)
- 日下彰・櫻井正輝・山田和也・竹尻浩平・後藤直登・伊與田慎右・石川陽子・陶山公彦・丸山拓也・中野哲規・上原陽平・岸香緒里・東元俊光・今泉洋介・大畑聡・大森健策・瀬藤聡 (2021): 黒潮大蛇行に伴う海況変化が本州太平洋沿岸域の水産業へ及ぼす影響。黒潮の資源海洋研究, **22**, 1-5.
- 松本孝治 (1985): 黒潮流路の蛇行状態と黒潮内側逆流。水産海洋研究会報, **49**, 52-54.

- Nagano, A., and M. Kawabe (2004): Monitoring of generation and propagation of the Kuroshio small meander using sea level data along the southern coast of Japan. *J. Oceanogr.*, **60**, 879-892.
- Nagano, A., and M. Kawabe (2005): Coastal disturbance in sea level propagating along the south coast of Japan and its impact on the Kuroshio. *J. Oceanogr.*, **61**, 885-903.
- Nagano, A., Y. Yamashita, and T. Hasegawa (2019): Characteristics of an atypical large-meander path of the Kuroshio current south of Japan formed in September 2017. *Mar. Geophys. Res.*, **40**, 525-539.
- Nagano, A., Y. Yamashita, K. Ariyoshi, T. Hasegawa, H. Matsumoto, and M. Shinohara (2021): Seafloor pressure change excited at the northwest corner of the Shikoku Basin by the formation of the Kuroshio large-meander in September 2017. *Front. Earth Sci.*, **8**, 583481.
- Nakamura, H., A. Nishina, and S. Minobe (2012): Response of storm tracks to bimodal Kuroshio path states south of Japan. *J. Climate*, **25**, 7772-7779.
- Oka, E., S. Sugimoto, F. Kobashi, H. Nishikawa, S. Kanada, T. Nasuno, R. Kawamura, and M. Nonaka (2023): Subtropical Mode Water south of Japan impacts typhoon intensity. *Sci. Adv.*, **9**, eadi2793.
- Qiu, B., S. Chen, and E. Oka (2023): Why did the 2017 Kuroshio large meander event become the longest in the past 70 years? *Geophys. Res. Lett.* **50**, e2023GL103548.
- Sasaki, Y.N., S. Minobe, and Y. Miura (2014): Decadal sea-level variability along the coast of Japan in response to ocean circulation changes. *J. Geophys. Res.*, **119**, 266-275.
- Senjyu, T., M. Matsuyama, and N. Matsubara (1999): Interannual and decadal sea-level variations along the Japanese coast. *J. Oceanogr.*, **55**, 619-633.
- 杉本悟史・吉田久美 (2005) : 日本近海における表層水温の長期変動—海面水位と長期変動の関係—. 測候時報, **72**, 特別号, S17-S26.
- 関根義彦・伊藤徹・藤田弘一 (1991) : 紀伊半島東部域への暖水の接近について. 沿岸海洋研究ノート, **28**, 174-182.
- Sekine, Y., and K. Fujita (1999): Why does the sea level difference between Kushimoto and Uragami show periods of large meander and non-large meander paths of the Kuroshio south of Japan? *J. Oceanogr.*, **55**, 43-51.
- Shoji, D. (1972): Time variation of the Kuroshio south of Japan. In: Yoshida K, Stommel H (eds) *Kuroshio-Its physical aspects*, University of Tokyo Press, Tokyo, pp 217-234.
- Sugimoto, S., B. Qiu, and A. Kojima (2020): Marked coastal warming off Tokai attributable to Kuroshio large meander. *J. Oceanogr.*, **76**, 141-154.
- Sugimoto, S., B. Qiu, and N. Schneider (2021): Local atmospheric response to the Kuroshio Large Meander path in summer and its remote influence on the climate of Japan. *J. Climate*, **34**, 3571-3589.
- Taft, B. (1972): Characteristics of the flow of the Kuroshio south of Japan. In: Yoshida K, Stommel H (eds) *Kuroshio-Its Physical Aspects*, University of Tokyo Press, Tokyo, pp 165-216.
- Tochimoto, E., and S. Iizuka (2022): Impact of warm sea surface temperature over a Kuroshio large meander on extreme heavy rainfall caused by an extratropical cyclone. *Atmos. Sci. Lett.*, **24**, e1135.
- Usui, N., H. Tsujino, H. Nakano, and S. Matsumoto (2013): Long-term variability of the Kuroshio path south of Japan. *J. Oceanogr.*, **69**, 647-670.
- Usui N., K. Ogawa, K. Sakamoto, H. Tsujino, G. Yamanaka, T. Kuragano, and M. Kamachi (2021): Unusually high sea level at the south coast of Japan in September 2011 induced by the Kuroshio. *J. Oceanogr.*, **77**, 447-461.
- Usui, N., and K. Ogawa (2022): Sea level variability along the Japanese coast forced by the Kuroshio and its extension. *J. Oceanogr.*, **78**, 515-527.
- 吉田昭三 (1964) : 近年における黒潮について. 水産研究会報, **5**, 66-69.
- 吉田隆・下平保直・林王弘道・横内克巳・秋山秀樹 (2006) : 黒潮の流路情報をもとに黒潮大蛇行を判定する基準. 海の研究, **15**, 499-507.
- Zhang, Z., and K. Ichikawa (2005): Influence of the Kuroshio fluctuations on sea level variations along the south coast of Japan. *J. Oceanogr.*, **61**, 979-985.

# Sea-level variability on the south coast of Japan and the Kuroshio path during the 2017 Kuroshio large meander

Kumi Yoshita<sup>1†</sup>, Norihisa Usui<sup>2</sup> and Hiroyuki Inoue<sup>1</sup>

## Abstract

This study investigates sea-level variability along the south coast of Japan during the 2017 Kuroshio large meander (LM), focusing specifically on the Kuroshio path. To estimate sea-level changes associated with variations in the Kuroshio path, we utilize Observation Minus Hindcast (OMH) data obtained by subtracting meteorological sea-level changes from observed sea-level anomalies. Sea levels rose by 3–5 cm at eight stations along the Tokai district during the LM period of 2018–2023 as compared to the 2011–2016 non-LM period. During the LM period, high sea-level regions shifted depending on the Kuroshio path off the Tokai district. This variability can be categorized into three patterns based on composite and empirical orthogonal function (EOF) analyses: (1) when the Kuroshio flows close to the Izu and Boso Peninsulas, sea levels tend to rise along the coast west of the Tokai district; (2) when the westward flow bifurcates from the Kuroshio off the Tokai district, sea levels tend to rise throughout the Tokai district; (3) when the Kuroshio adopts an S-shaped path and flows near the eastern side of the Kii Peninsula, sea levels tend to rise west of Owase. Consequently, sea-level variability differs between the eastern and western areas of the Kii Peninsula during the LM period.

**Key words:** Kuroshio, large meander, sea-level variability, Kuroshio path

(Corresponding author's e-mail address: kyoshita@met.kishou.go.jp)

(Received 26 March 2024; accepted 26 February 2025)

(doi: 10.5928/kaiyou.34.3\_81)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2025)

---

<sup>1</sup> Atmosphere and Ocean Department, Japan Meteorological Agency, 3-6-9 Toranomon Minato-ku, Tokyo 105-8431, Japan

<sup>2</sup> Department of Atmosphere, Ocean and Earth System Modeling Research, Meteorological Research Institute, 1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052, Japan

† Corresponding author: Kumi Yoshita  
e-mail: kyoshita@met.kishou.go.jp