

沖合観測点における水温変動傾向と 近年の黒潮の離接岸について

馬場 康之¹

¹ 正会員 京都大学准教授 防災研究所 (〒649-2201 和歌山県西牟婁郡白浜町堅田 2500-106)

E-mail:baba@uh31.dpri.kyoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

本研究では、過去数年にわたり田辺湾湾口部で観測された水温データに基づき、黒潮の接岸、非接岸時期別に水温の変動傾向を比較した。黒潮接岸時期と離岸時期の水温データから、両方の時期において30日程度の水温変動が確認され、黒潮の離接岸の影響とは別の長周期の水温変動の存在がうかがえる。2017年～2019年冬期の水温データの比較から、黒潮接岸時期には10数日程度水温の高い状況が続くなど黒潮接岸に伴う影響が大きく、黒潮離岸時期においては、水温の高い領域の北上の際に水温が上昇するものの、継続時間は黒潮接岸時期よりも短いことが確認された。また、2018年の低水温状態発生時は、周辺海域の水温が低いこと、低い気温が継続したこと、さらに北側からの水温の低い水塊の流入が重なっていたことが確認された。

Key Words: Field observation, water temperature variation, Kuroshio (Black current), Tanabe bay

1. はじめに

和歌山県田辺湾は紀伊半島の南西部に位置する湾であり、湾口部に京都大学防災研究所白浜海象観測所・田辺中島高潮観測塔（位置は図-1参照、以下観測地点）が設置されている。観測塔では、気象、海象に関する基礎的なデータが24時間365日連続観測されている。

この観測点の位置は、紀伊半島の南西部の太平洋に面する位置にあり、瀬戸内海と太平洋を接続する紀伊水道の南側にある。外海側および内海への接続部に面していることから、外海側（例えば黒潮からの派流など）および内海側の影響を強く受ける領域に位置している。

外海側からの影響の代表的なものに、紀南分岐流（振り分け潮）がある。この紀南分岐流（振り分け潮）は、黒潮が非蛇行かつ接岸しているときに、黒潮の沿岸寄りの流れが紀伊半島南西沿岸の地形の影響を受けて、流れが東西に振り分けられて生じる流れのことを意味する。この紀南分岐流（振り分け潮）については、竹内¹⁾により詳細な検討が行われており、代表的な流れのパターンや各パターンの生起確率についても示されている。また、福田ら²⁾は海洋循環モデルを用いて紀南分岐流（振り分け潮）の再現計算を行っている。モデル内で振り分け潮の発生頻度が少なくなっているものの、振り分け潮が10日程度の寿命をもった現象であること、黒潮流軸の

変動が振り分け潮の発生の引き金であることを示している。

日向ら³⁾は、紀伊半島南西岸で行われた海洋レーダの観測結果に基づき、紀南分岐流（振り分け潮）の数日周期変動に与える海上風の影響を調べた。その結果、黒潮が接岸流路を取る際には、紀伊半島近傍における黒潮前線の小規模離接岸（短周期変動）に対して海上風による沿岸湧昇／沈降が影響を与えている可能性が高いこと、黒潮が接岸流路を取る場合には、紀伊水道陸棚斜面部の短周期の流速変動は、風成準地衡流により説明できる可能性が高いことを示している。

黒潮の蛇行、非蛇行は繰り返して発生しており、現在は2017年夏から始まった蛇行が継続している時期である。2017年～2018年の冬期には海水温が大きく低下し、観測地点付近の水温は1ヶ月以上にわたり15度を下回る結果となった。そのため、田辺湾周辺に存在していたサンゴ群集が大きな被害を受け、全体の80%以上が死ぬ結果となった⁴⁾。

2017年～2018年の冬期のように周辺海域の生物相に大きな影響をもたらすような規模の大きな水温変動は発生頻度は低いものの、ある程度の水温の上下動は一定以上の頻度で発生しており、周辺海域の物理的環境ならびに生態環境に少なからず影響を与えていることが予想される。ここでは、過去数年にわたる水温の連続観測結果を

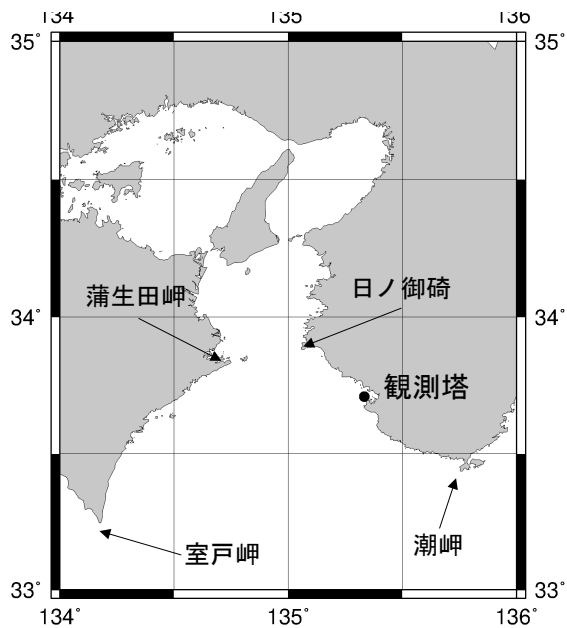


図-1 水温計測地点（田辺中島高潮観測塔）

基に、黒潮の接岸、離岸時期別に水温の変動傾向を比較した。また、冬期（1月～3月）の水温変動について、低温状態となった2018年と黒潮接岸時期の2017年、黒潮の離岸が継続中の2019年の3年間の観測結果について比較検討した。

2. 黒潮離岸前後の水温計測結果

図-2、図-3は、現在の黒潮蛇行が始まる前の接岸時期（図-2、2015/9/1～2017/9/30）と、黒潮が蛇行し離岸している時期（図-3、2017/12/1～2019/12/31）における、観測地点（水深10m）での水温データと室戸岬および潮岬から黒潮流軸までの距離（海上保安庁⁵⁾）を示したものである。

ここで使用している水温データは、毎日午前9時の観測値（9時00分から9時10分までの1Hzサンプリングデータ600個の平均値）である。長期間の水温変動を取

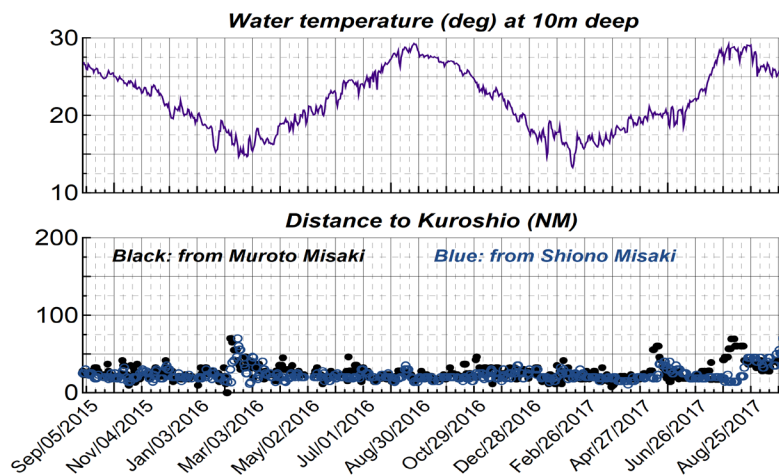


図-2 水温データ（水深10m）および室戸岬および潮岬から黒潮流軸までの距離（黒潮接岸時期）

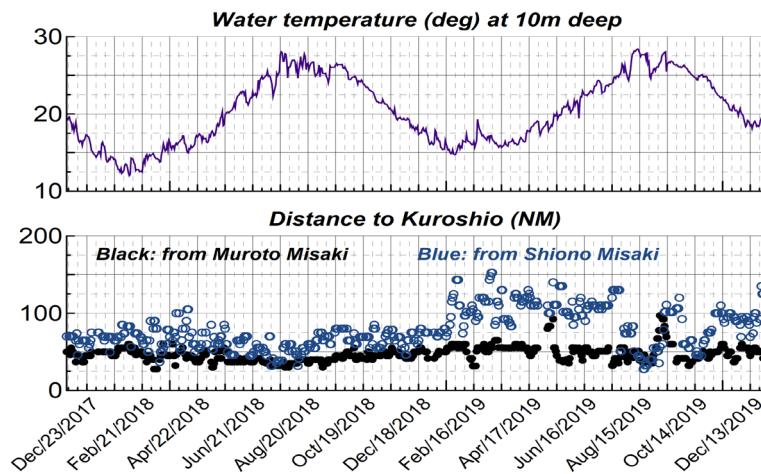


図-3 水温データ（水深10m）および室戸岬および潮岬から黒潮流軸までの距離（黒潮離岸時期）

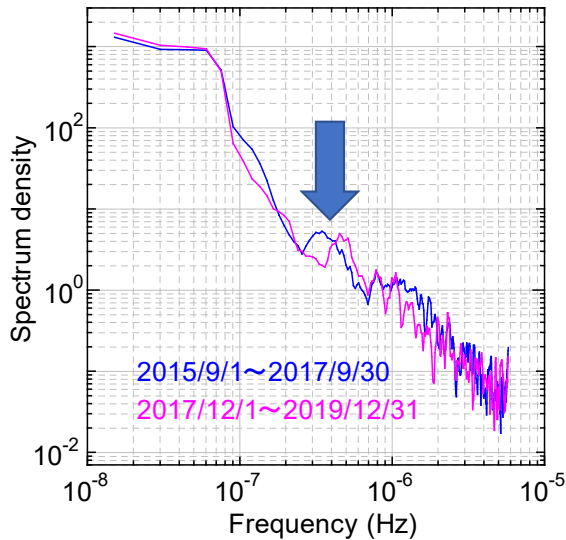


図-4 水温変動の周波数スペクトル

扱う場合には、日平均化された水温データを取り扱うことも多いが、日平均値を求める際にデータが1日分揃わない場合には欠測扱いとなり、欠測の数が多くなってしまうため、ここでは毎日午前9時の観測値を1日の代表値とした。また、図-2、図-3の期間は欠測の少ない時期を選んでいるが、少ないながら欠測を含む。当該期間中に含まれる欠測は全て1つ（複数連続しない）であり、ここでは欠測値は前後の値から線形補間の形で求めた。

水温変動については、図-2、図-3ともに季節変動が明瞭であり、季節変動の中により細かい周期の変動が多く含まれていることがわかる。

室戸岬および潮岬から黒潮までの距離は、公開されている方位と距離から南北方向の距離に変換した値を用いている。黒潮接岸時期の図-2 では、室戸岬および潮岬ともに黒潮流軸までの距離が 25 海里程度で安定した状

態が続いている。図-2 の期間の終わりに黒潮流軸までの距離が増加する傾向が見られるが、この時期から現在継続中の黒潮蛇行に伴う離岸時期へと移行する。室戸岬から黒潮流軸までの距離は、離岸時期でも約 50 海里で一部を除いて安定しているが、潮岬では 2019 年に入ってから離岸の傾向が一段と大きくなっており、その傾向は 2019 年の間も継続していることがわかる。

図-2、図-3に示した水温データについて、水温変動の周波数スペクトルを求めたものが図-4 である。周波数スペクトルは両者とも似た傾向を示しているが、図中青矢印付近に異なる傾向が見られる。図中青矢印付近は 30 日程度の周期に相当しており、接岸時期と離岸時期でややピーク位置が異なる。観測地点での水温変動に 30 日程度の変動周期が含まれる点は、接岸時期の 2013 年の観測結果に基づいて既報⁶⁾でも示されているが、図-4 に示すように黒潮の接岸時期、離岸時期の双方で確認されていることから、黒潮の離接岸とは別に 30 日程度の周期を持つ水温変動をもたらす要因のあることがうかがえる。

図-5 は、黒潮接岸時期の水温変動に対して、水温の変化度が大きい部分を示したものである。変化度は水温の時系列データから水温変動の大きい部分を異常値として取り出す方法として、ここでは特異スペクトル変換法を用いて求めた⁷⁾。特異スペクトル変換法は変化点を検知するもので、ある時点の過去側と現段階における時系列の特徴パターンを求めて、その両者の変化度の大きさから大きな変化がある場所（時点）を検知するというものである。特異スペクトル変換法は、関係する周波数が複数あって切り替わるような場合でも、変化点を検出可能であり、心電図のようなスパイク状のデータや、周波数変化データのようなデータでも、安定して妥当な変化

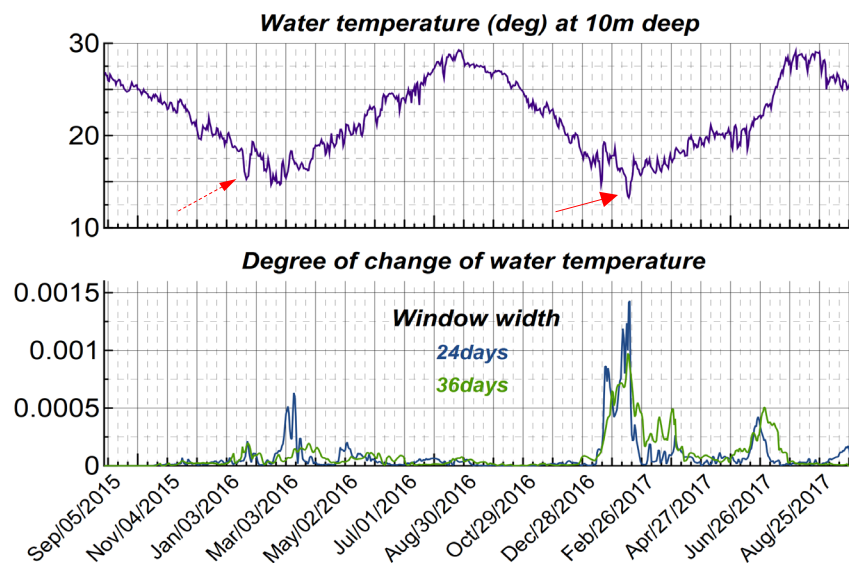


図-5 水温データ（水深 10m）および水温データの変化度（黒潮接岸時期）

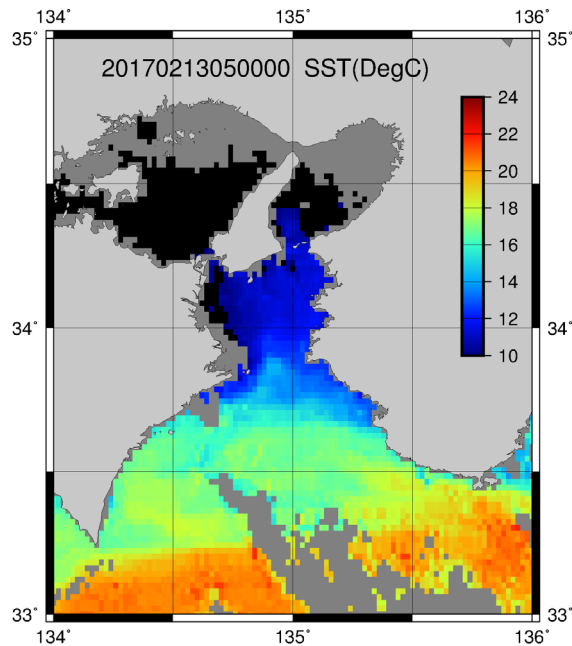


図-6 ひまわり 8 号で計測された海面水温（計測日時 2017 年 2 月 13 日 5 時（UTC），JAXA 分野横断型プロダクト提供サービス（P-Tree）のデータより加工）

度を計算できるという利点があり，ここでの変化度の計算に採用した．

図-5 にあるように，変化度を計算する際の窓の幅は図-2，図-3 に示された水温変動において季節変動に次ぐ変動周期が 30 日前後であったことから，24 日と 36 日の 2 種類とし，その他の設定は上記参考文献⁷⁾と同じとした．窓の幅を変えて求めた変化度において，2017 年の 1 月～2 月にかなり大きな変化度が検出された．変化度が大きい部分として捉えられた水温変動は，大きく水温が低下するイベントであり，変化度が大きい部分では，急激な水温低下が 2 回連続して現れている．図-5 内の 2016 年 1 月頃にも急激な水温低下が確認されているが，ここでの変化度は大きくないことから，急激な水温低下が単発ではなく，2 回連続して現れたことが大きな変化度として捉えられた要因と考えられる．

水温の変化度が高いとして抽出された 2017 年 2 月の大きな水温低下（図-5 内，赤矢印右）とほぼ同時期の海面温度（灰色部は欠測）を図-6 に示す．観測地点北側に位置する紀伊水道内の水温の低い水塊が，紀伊半島西岸沿いに南下し，観測地点（赤矢印）付近の水温を低下させていることが確認できる．ただし，2017 年の冬期は黒潮は接岸している時期なので，南岸に黒潮に対応する水温の高い領域，および四国と紀伊半島の間にも水温の高い領域が広がっており，水温の高い領域が北上（水温フロントが北上）すると観測地点付近の水温を一気に押し上げる結果となる．次章では，大きな水温変動や 2018

年に異常な低温が観測された冬期（1 月～3 月）の水温変動について，黒潮の接岸時期と離岸時期について比較検討する．

3. 冬期（1～3 月）の水温変動の比較

本章では，冬期（1～3 月）の水温変化について，2017 年（黒潮接岸時期），2018 年および 2019 年（黒潮離岸時期）の 3 カ年の観測結果の比較を行う．

図-7 は，2017 年，2018 年，2019 年の 1 月～3 月（90 日間）における水温（水深 10m），気温（7 日間移動平均値），および黒潮流軸までの距離（海上保安庁）を示したもので，2017 年と 2018 年，2018 年と 2019 年のデータを比較する形で示している．この期間はいずれの年も日平均データに欠測が無かったため，水温，気温ともに日平均データを使用している．

(1) 黒潮接岸時期（2017 年）と離岸時期（2018 年）の比較

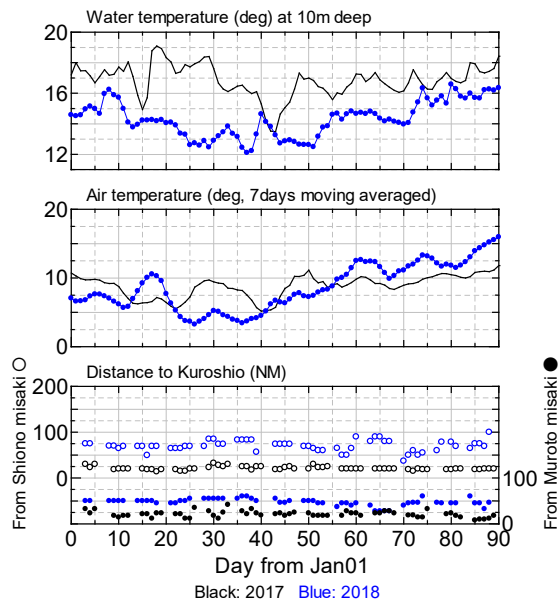
図-7(a)において，2018 年の水温がかなり低いことが確認できる．2017 年の 3 ヶ月間の平均水温は 16.8 度，2018 年の 3 ヶ月間の平均水温は 14.3 度である．

2017 年の冬期は黒潮蛇行が始まる前で，室戸岬から潮岬の沿岸に黒潮の高水温のエリアが常に存在し（ひまわり 8 号による，紙面の都合上省略），観測点付近にも黒潮から分派した水温の高い領域が紀伊半島西岸沿いを北上する様子が確認できる．このことが，2017 年冬期の平均水温が相対的に高いことに寄与している．

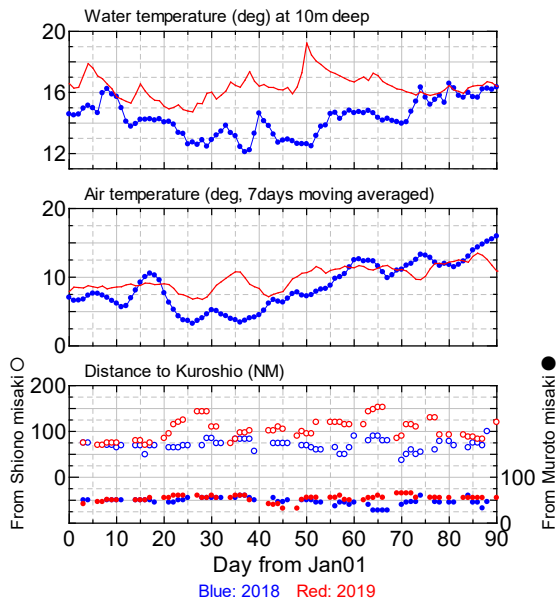
2017 年冬期の水温変化においては上記の平均水温が高いことの他に，図-7(a)の 10 日過ぎまでと 17 日頃～30 日頃に見られる 18 度程度の水温の継続と，15 日頃および 40 日過ぎに見られる水温の大きな低下が特徴的である．相対的に高い水温の継続は紀南分岐流（振り分け潮）による影響が大きい時期に相当していると考えられ，その期間は福田らの海洋循環モデルからの結果に示されている 10 数日程度と符合する．水温の低下は前章で示した北側の水域からの水温の低い水塊の流入によるものであるが，40 日過ぎの大きな水温低下の時期以外は 16 度以上の水温を維持している．

一方，2018 年の冬期は野村ら⁴⁾により報告されたサンゴの大量斃死が発生した年で，図-7(a)の 10 日頃～70 日頃まで水温が約 14 度以下という状態が続いている．特に低水温状態となったのは 25 日頃～35 日過ぎである．

この時期には水温 18 度の等温線はかなり南に離れた位置にあり，観測地点近くには水温 15 度の等温線がある（気象庁，日別海面水温⁸⁾）など，観測地点周辺の水温が低い状況であることが確認されている．このことは，2018 年の 1 月～3 月に観測された水温の平均値が 2017 年



(a) 2017年と2018年の比較



(b) 2018年と2019年の比較

図-7 2017年, 2018年, 2019年の1月～3月(90日間)における水温(水深10m), 気温(7日間移動平均), および黒潮流軸までの距離

と比べて低いことと符合している。加えて、この時期は7日間移動平均の日平均気温が5度以下の日が続いたこと、さらには北側の水域からの水温の低い水塊の流入が重なったため、日平均水温が12度程度という低水温状態に至った。

以上を整理すると、黒潮接岸時期の2017年は南岸に位置する黒潮の影響が支配的であり、黒潮から分派した水温の高い領域の接近により高い水温状態が維持されるものの、北側からの水温の低い水塊の流入時には一時的

に水温が低下する。黒潮離岸時期の2018年は、観測地点を含む周辺海域の水温が接岸時期(2017年)と比較してかなり低かったことに加えて、低い気温が継続したことで北側からの水温の低い水塊の流入があいまってまれにみる低水温状態に至った。

(2) 黒潮離岸時期(2018年と2019年)の比較

図-7(b)に示す2018年と2019年はともに黒潮が蛇行している時期であるが、2019年の水温が2018年と比べて高いことが確認できる。2019年の3ヶ月間の平均水温は16.4度であり、黒潮接岸時期の2017年とほぼ同じである。これは、観測地点周辺の水温分布が2018年と2019年で大きく異なるためで、2018年の18度等温線付近に2019年は21度の等温線がある(気象庁, 日別海面気温)。その結果、観測地点付近には17度程度の等温線が位置することが多く、平均水温を大きく押し上げる結果になったと考えられる。また、2019年は7日間移動平均の日平均気温が5度を下回るような強い気温低下もなく、北側の水域からの水温の低い水塊の流入の頻度、程度ともに小さかったこともあり、2018年のような低水温状態にはならず、黒潮接岸時期の2017年に観測されているような一時的な水温低下も確認されていない。

図-7(b)において、2018年の40日頃、2019年の50日頃に水温が数度上昇する様子が確認される。これは南側から水温の高い領域が観測地点付近に接近したことによるものである。ただし、2017年の黒潮接岸時期と比較して水温の上昇は一時的であり、2017年のように10日程度にわたって継続することはない。これは、黒潮接岸時期のように紀南分岐流(振り分け潮)のような水温の高い領域を北上させる要因が無いためと考えられる。

このように、同じ黒潮離岸時期であっても、周辺海域の水温分布、観測地点付近の気温、水温の低い水塊の流入状況により水温変化が大きく異なることが確認された。

4. おわりに

ここでは、過去数年にわたり田辺湾湾口部で観測された水温データに基づき、黒潮の接岸、非接岸時期別に水温の変動傾向を比較した。また、冬期(1月～3月)の水温変動について、2017年, 2018年, 2019年の3年間の観測結果について比較検討を行った。

黒潮接岸時期と離岸時期の水温データから、両方の時期において30日程度の周期を持つ水温変動が存在することが確認された。過去の事例からも同程度の周期をもつ水温変動は確認されているが、黒潮の接岸時期、離岸時期ともに確認されることから、黒潮の離接岸とは別に30日程度の周期を持つ水温変動をもたらす要因のあることがうかがえる。

2017年～2019年の冬期の水温データの比較から、黒潮接岸時期（2017年）には黒潮の影響が支配的であり、黒潮から分派した水温の高い領域の接近時には高い水温状態が10日程度継続することが確認された。一方で、北側からの水温の低い水塊の流入時には一時的ではあるが水温が大きく低下する。この冬期に見られる急激な水温の低下は、時系列データの変化度の大きい部分として抽出できる可能性があることも確認された。

同じ黒潮離岸時期である2018年と2019年の水温は、平均水温に大きな開きが見られた。これは、観測地点周辺の水温分布に数度程度の差があることが大きく影響している。また、2018年の低水温状態は周辺海域の水温が低かったことに加えて、低い気温が継続したこと、および北側からの水温の低い水塊の流入が重なったことが要因であることが確認された。また、黒潮離岸時期においても、紀伊半島西岸沿いを水温の高い領域が北上することが確認され、その結果観測地点の水温が上昇する結果が確認されているが、紀南分岐流（振り分け潮）のように水温の高い領域の北上を継続させる要因が無いためか、水温上昇の継続時間は黒潮接岸時期よりも短い。

謝辞：本論文において使用した「海面水温に関する研究プロダクト」は、宇宙航空研究開発機構（JAXA）の分野横断型プロダクト提供サービス（P-Tree）より提供を受けました。本研究の一部は京都大学防災研究所一般共同研究費（29G-09）及び科学研究費補助金（18H03791, 19H00782）の補助を受けました。また、本論文で示した観測データの計測については、京都大学防災研究所技術

職員の久保輝広氏を始めとする関係各位のご協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 竹本淳一：紀伊半島周辺の海洋構造と変動および漁業への影響，東京水産大学博士学位論文，2004.
- 2) 福田 久，郭 新宇，山形 俊男：紀南分岐流（振り分け潮）の数値モデル研究，海の研究，11 巻，5 号，p. 513-527，2002，<https://doi.org/10.5928/kaiyou.11.513>.
- 3) 日向博文，陳 敏坤，片岡智哉：紀南分岐流（振り分け潮）の短周期変動に与える海上風影響について，土木学会論文集 B2(海岸工学)，72 巻，2 号，p. I_463-I_468，2016，https://doi.org/10.2208/kaigan.72.I_46.
- 4) 野村恵一，平林勲：2018 年冬季に紀伊半島西岸で観察された異常低水温によるサンゴ群集の大量斃死，串本海中公園マリンバビリオン，特別号 No.7，2018.
- 5) 海上保安庁：黒潮流軸数値情報，地点別流軸距離情報，https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/KAIYO/qboc/kuroshio_axis.xls，参照 2020-06-25.
- 6) 馬場康之：黒潮蛇行時非蛇行時に観測された田辺湾湾口における水温変動特性，土木学会論文集 B1（水工学），74 巻，5 号，p. I_553-I_558，2018，https://doi.org/10.2208/jscejhe.74.5_I_553.
- 7) 井手 剛：入門 機械学習による異常検知，コロナ社，pp.199-205，2015.
- 8) 気象庁：日別海面水温，https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/db/kaikyo/daily/sst_HQ.html，参照 2020-08-20.

(Received June 30, 2020)

(Accepted August 28, 2020)

INFLUENCE OF ONSHORE-OFFSHORE MOVEMENTS OF THE KUROSHIO ON WATER TEMPERATURE VARIATION MEASURED AT AN OFFSHORE OBSERVATION TOWER

Yasuyuki BABA

This paper shows the relationship between onshore-offshore movements of the Kuroshio and water temperature variation at an observation tower. Field observation has been carried out at the observation tower of Shirahama Oceanographic Observatory (SOO), DPRI, Kyoto University, and measured water temperature data from 2015 to 2019 include both periods of straight and meandering paths of the Kuroshio. When the Kuroshio has straight path, the axis of the Kuroshio exists close to the land, and the bifurcation current called "Furiwakeshio" often occurs. On the other hand, when the Kuroshio has meandering path, the axis of the Kuroshio apart from the land.

From the results of frequency analysis, variations of water temperature with about 30 days interval exist regardless of the axis positions of Kuroshio. This result indicates that some factors other than the onshore-offshore movements of the Kuroshio lay behind the water temperature variations at the observation site.

Water temperature variations in the winter of 2017, 2018 and 2019 are also influenced by onshore-offshore movements of the Kuroshio. In 2017, the Kuroshio exists close to the land, and the existence of Kuroshio has a dominant influence on the water temperature variations. When the axis of Kuroshio is apart from the land in 2018 and 2019, water temperature variation at the observation site is affected primarily by the water temperature distribution in adjacent area. Drop in air temperature and movement of cold water mass act as triggers for an event of colder water around the observation site in 2018.