

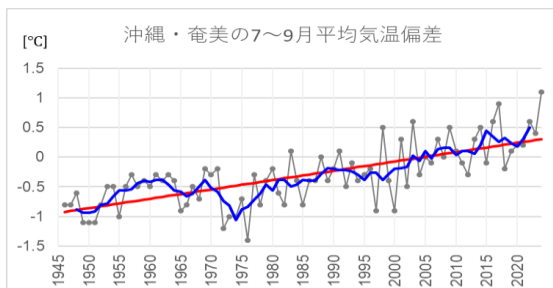
2024 年夏～秋の沖縄・奄美近海の記録的に高い海水温と大気への影響

佐藤 大卓（気象庁 大気海洋部 気候情報課）

1. はじめに

2024 年夏、日本は 2023 年と並んで記録的な暑夏となった（気象庁 2024）。2023 年夏は北・東・西日本で記録的な高温、沖縄・奄美は平年並の暑さだったのに対して、2024 年は沖縄・奄美も含めて全国的に記録的な暑夏となり、特に沖縄・奄美では梅雨明け後の盛夏～初秋（7～9 月）に記録破りの暑さとなった（第 1 図）。地上観測データに基づく沖縄・奄美の 7～9 月の 3 か月平均気温は平年に比べて 1.1℃高く、1946 年の統計開始以降の高温記録更新となった。他方で沖縄・奄美近海では海面水温（SST）が極端に高い状態が続く現象「海洋熱波」（Hobday *et al.* 2016）が発生していた。

気象庁異常気象分析検討会は、2024 年夏の日本の異常高温の要因について、偏西風の北上などの大気循環の大きな揺らぎを主要因としつつ、北日本と沖縄・奄美については近海の高い海面水温も一因に挙げた（気象庁 2024）。北日本の猛暑については 2023 年夏と同様に黒潮続流の顕著な北上の影響（Sato *et al.* 2024; Takemura *et al.* 2024）があったとみられるが、沖縄・奄美は北日本とは海流の分布が大きく異なり、大気への影響に関与するプロセスも異なると推察される。本稿では同検討会における議論を発展させ、沖縄・奄美周辺の海洋熱波が同地域の記録的猛暑にどのように影響したかについて調べた結果を報告する。



第 1 図 沖縄・奄美の 7～9 月平均の地上気温平年差（℃）

細線は各年の値、青線は 5 年移動平均値、赤線は線形トレンド。平年値期間は 1991～2020 年。

2. 使用データと解析手法

大気循環場の解析には気象庁第 3 次長期再解析（JRA-3Q; Kosaka *et al.* 2024）を用いた。SST の解析には MGDSSST（Kurihara *et al.* 2006）、海洋表層の解析には MOVE/MRI.COM モデルによる海洋同化データの北太平洋域版（以降 MOVE-NPR; Hirose *et al.* 2019）及び全球版バージョン 3（以降 MOVE-G3; Fujii *et al.* 2023）をそれぞれ用いた。以降、海洋表層の解析は断りの無い限り MOVE-NPR を用いる。

平年値期間は断りの無い限り 1991～2020 年の 30 年とし、偏差を平年値からの差で定義した。ただしデータが揃う期間の都合から MOVE-NPR は 1993～2022 年の 30 年を平年値期間とした。

また、海洋熱波の発生を「その海域・時期としては 10 年に 1 度程度（10%）しか起きないような著しく高い海面水温が 5 日以上連続する」という基準（Hobday *et al.* 2016）に従って判定した。海洋熱波の強度は次の 4 つのカテゴリー（Hobday *et al.* 2018）で分類した。すなわち、海面水温が海洋熱波の閾値を超えるとカテゴリー I（modest）とし、さらに海面水温の平年差が、海洋熱波の閾値と平年との差の 2 倍 / 3 倍 / 4 倍を超えるとそれぞれカテゴリー II（strong） / III（severe） / IV（extreme）とした。

3. 解析結果

3.1 盛夏～初秋（7～9 月）平均の循環場

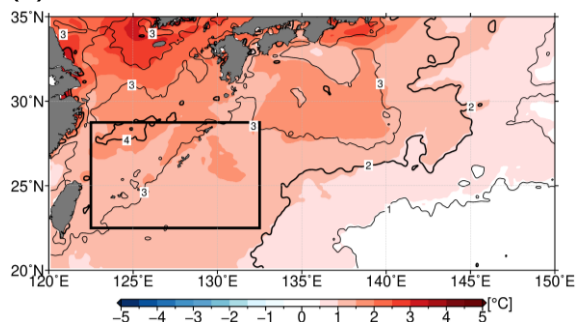
2024 年盛夏～初秋（7～9 月）は沖縄・奄美周辺の海水温が記録的に高く、海洋熱波の状態が持続した。沖縄・奄美周辺の SST（第 2 図(a)）は、沖縄近海で標準偏差の 3 倍程度、東シナ海南部で 4 倍程度の顕著な正偏差がみられた。沖縄・奄美周辺（第 2 図(a)の矩形領域; 22.5°-28.75°N, 122.5°-132.5°E）で平均した海面水温（第 3 図）の変動をみると、この海域では梅雨明け後の 2024 年 6 月下旬から海洋熱波が発生し、7 月上旬にカテゴリー III（severe）に到達した後、中断を挟みつつ 11 月まで概ね持続した。加えて、

2024 年 7～9 月の沖縄・奄美周辺の海洋熱波の日数はこの海域では前例のないほど多かった（図略）。また、顕著に高い水温は海面付近にとどまらなかった。沖縄本島の南や先島諸島の南から沖縄本島の西にかけては深さ 100m においても顕著に水温が高く（第 1 図(b)）、いずれも標準偏差の 2 倍程度の正偏差がみられた。後者の正偏差は概ね黒潮に沿ってみられる。

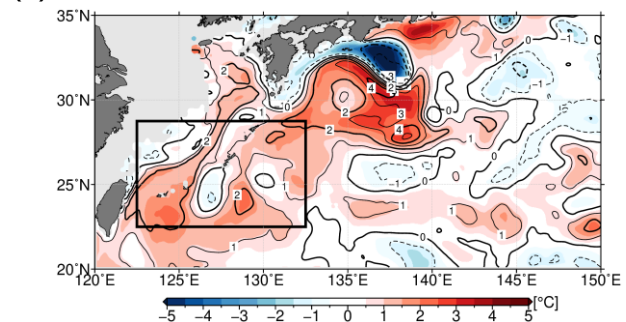
一方、地表付近の大気も平年に比べて顕著な高温かつ弱風であることが特徴的だった。地上気温 (SAT)

偏差（第 2 図(c)）の分布は SST 偏差とよく対応しており、沖縄・奄美周辺の SAT は+1.0℃程度の顕著な正偏差（標準偏差の 2～2.5 倍程度；図略）だった。また沖縄・奄美周辺では、平均的な地上風速（第 2 図(c)）は平年に比べて弱かった。700hPa 鉛直運動の偏差（第 2 図(d)）は、沖縄・奄美周辺では正負混在しているが、7 月は下降流偏差が顕著に強く、8 月と 9 月は概ね上昇流偏差で季節変化が明瞭だった（図略）。

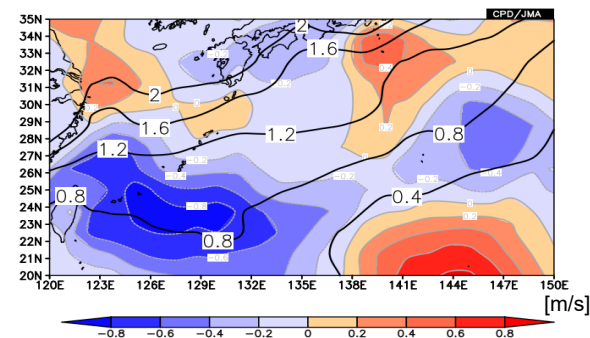
(a) SST



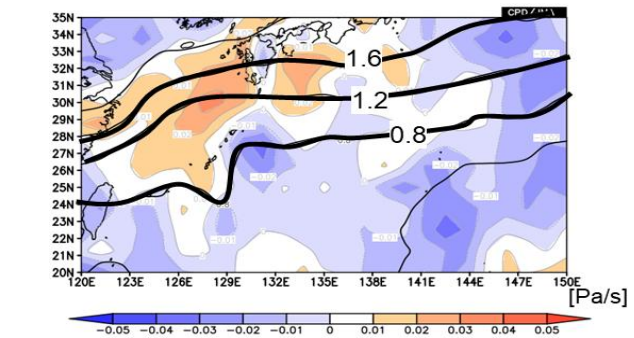
(b) 100m 深 水温



(c) 地上風速と SAT

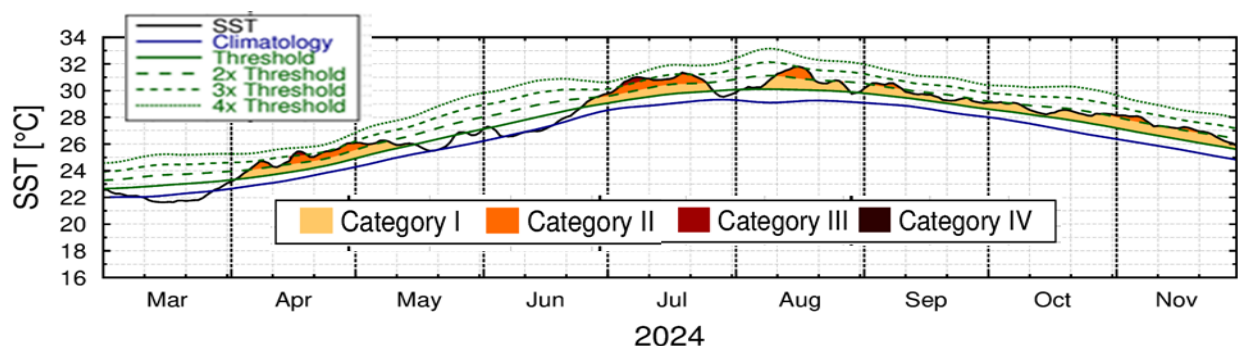


(d) 700hPa 鉛直 p 速度と 850hPa 気温



第 2 図 2024 年 7 月～9 月の海水温及び対流圏下層循環場の偏差

(a)は SST、(b)は 100m 深の水温。陰影が偏差(℃)で、等値線は平年値期間の標準偏差で規格化した偏差(無次元)で間隔は 1。矩形領域は後述の沖縄・奄美周辺[22.5°-28.75°N, 122.5°-132.5°N]を表す。(c)は地上風速偏差(m/s; 陰影)と SAT 偏差(℃; 等値線、0.4℃間隔)。(d)は 700hPa 鉛直 p 速度(Pa/s; 陰影)と 850hPa 気温偏差(℃; 等値線、0.4℃間隔)。



第 3 図 沖縄・奄美周辺(図 2a の矩形領域)における SST(℃;黒線)と海洋熱波指標(2024 年 3～11 月)

青線は平年値。着色は海洋熱波の強度カテゴリー。Threshold は海洋熱波の閾値で、これを超えるとカテゴリー I の海洋熱波と判定される。さらに 2x/3x/4x Threshold は、それぞれカテゴリー II/III/IV の閾値。

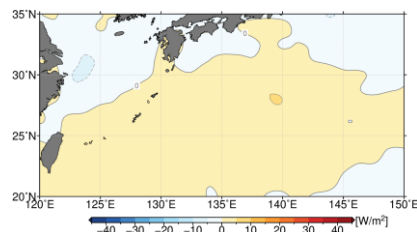
3.2 海洋による大気の加熱

沖縄・奄美の記録的暑夏に対する海洋からの局所的な影響について、まず沖縄・奄美周辺では顕著に高い SST に伴い、海洋が大気を直接的に強く加熱する状況だったことが寄与したとみられる。SAT も高いが SST がそれよりも高く、顕熱フラックスは、解析値と平年偏差がともに上向き（第 4 図(a)）であった。さらに、バルク式に基づく顕熱フラックス偏差の線形分解（Tanimoto *et al.* 2003）から、その偏差は顕著に高い SST によってもたらされていたことがわかった（図略）。定性的には、SAT の正偏差及び地上風速の負偏差（図 2(c)）はいずれも上向き顕熱フラックスを弱めるように作用するが、実際は記録的な高 SST による強化がそれらを上回った。また、極めて簡便な大気境界層の熱収支（境界層の厚みを 600m で固定。但しこの仮定からの隔たりが大きいであろう台風通過日は除外する。）より、7～9 月平均では、気温偏差に対して、下降流による断熱加熱、水平暖気移流、上向き顕熱フラックスによる加熱の各効果は概ね同程度だった。これより、大気の高温に対する上向き顕熱フラックス強化が重要だったことが示唆される。なお、潜熱フラックス（第 4 図(b)）も、弱風偏差（図 2(c)）にも拘らず上向き偏差であった。これも顕熱フラックスと同様にバルク式に基づく線形分解から、SST 正偏差の項が支配的であった。

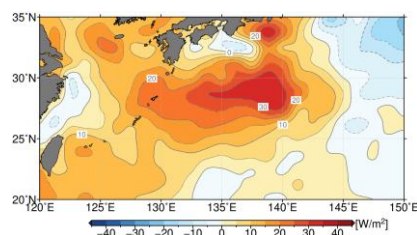
大気境界層の熱収支は非常に簡便なものであり、また熱収支各項の相対的寄与は季節内変化が大きく、さらに詳細な評価を行う必要がある。特に、上向き顕熱及び潜熱フラックスは台風通過前後に集中的に

強化されていた。概算では、顕熱及び潜熱フラックスの台風通過日（8 日間）の偏差の積算は 3 か月（92 日間）の偏差の積算のそれぞれ約 50%、60%を賄う。

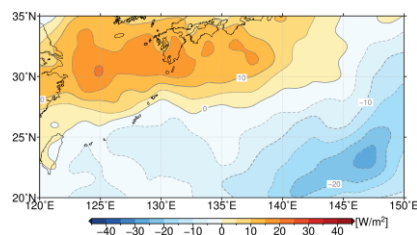
(a) 上向き顕熱フラックス



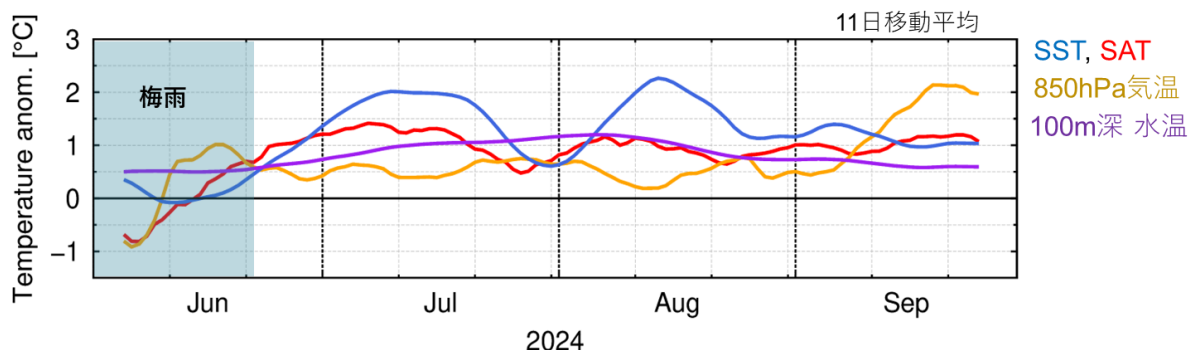
(b) 上向き潜熱フラックス



(c) 正味（下向き－上向き）短波放射フラックス



第 4 図 2024 年 7 月～9 月の(a)上向き顕熱フラックス (W/m^2)、(b)上向き潜熱フラックス (W/m^2)、(c)正味（下向き－上向き）短波放射フラックス (W/m^2) の偏差



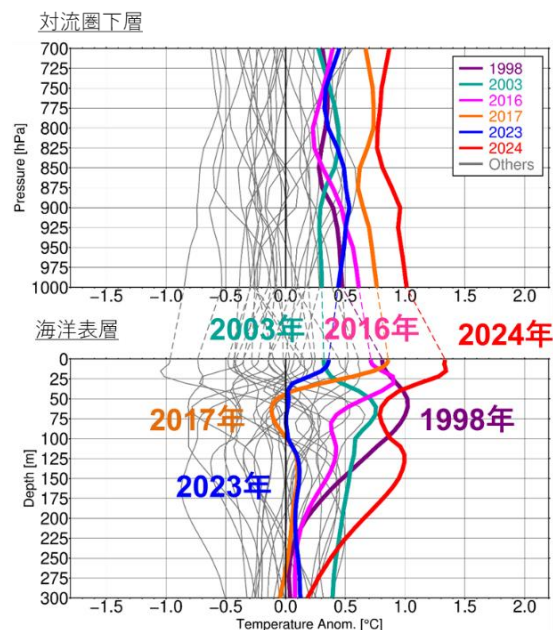
第 5 図 沖縄・奄美周辺(図 2a の矩形領域)における気温と水温の偏差の変化(2024 年 6～9 月)
青は SST($^{\circ}\text{C}$)、赤は SAT($^{\circ}\text{C}$)、黄は 850hPa 気温($^{\circ}\text{C}$)、紫は 100m 深の水温($^{\circ}\text{C}$)。いずれも 11 日移動平均。網掛けは梅雨。

3.3 SST 正偏差の要因

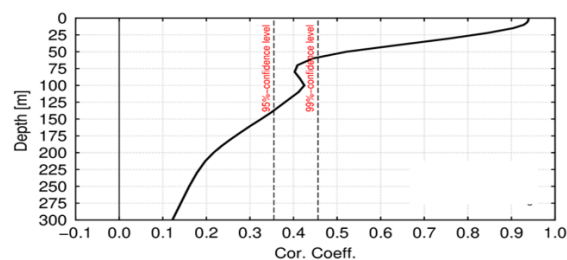
SST 偏差と SAT 偏差の季節内変動は概ね対応している。第 5 図に沖縄・奄美周辺の気温と水温の偏差の 11 日移動平均時系列を示す。SST と SAT はいずれも正偏差を基調として、それに季節内変動が重畳している。特に 7～8 月は、SST 正偏差が増大する時期に SAT 正偏差も増大しており、両者の変動の位相にはある程度の対応がみられる。但し、変動の振幅は SST の方が SAT に比べて大きい。一方、850hPa 気温偏差と SAT 偏差の対応は、正偏差が持続している点では共通しているものの、季節内変動の位相や振幅の対応は不明瞭である。以下では SST 偏差と SAT 偏差の関係を更に検討する。

まず、SST 偏差と SAT 偏差の季節内変動は、詳細は省くが、大気循環場の変動との対応が明瞭だった。3 か月平均場（第 2 図(d)、第 4 図(b)及び(c)）では明瞭でないが、6 月下旬から 7 月中旬には梅雨明け後の小笠原高気圧の強い張り出しに伴う多照と下降流強化、8 月上旬は弱風偏差による蒸発抑制を通じて SST 及び SAT 正偏差が増大したとみられる。海洋混合層の熱収支解析（Morioka *et al.* 2010; Takahashi *et al.* 2023）より、熱・放射フラックスによる熱的強制に加えて、弱風偏差に伴って海洋混合層が薄くなったことによる昇温効果もあった（詳細略）。一方、7 月下旬、8 月中旬後半～下旬前半にみられた SST 正偏差の減衰は台風第 3 号や第 9 号、その他熱帯擾乱の通過と対応している。

しかしながら他方で、前述した大気循環による局所的な強制に加え、海洋混合層よりも深い層にわたる顕著に高い水温偏差も、記録的に高い SST を支えた可能性がある。まず 100m 深の水温が、期間を通じて正偏差が持続している（第 5 図）。さらに、沖縄・奄美近海における 7～9 月平均の大気下層気温偏差及び海洋表層水温偏差の鉛直プロファイル（第 6 図）は海洋の影響を示唆する。ここでは 2024 年（赤）の特徴を、2017 年（橙；7～9 月の 3 か月平均気温がかつて過去最高だった年）との比較を通じて検討する。まず 700hPa から 1000hPa までの自由対流圏下部から大気境界層の気温は、両年ともに他の年に比べて顕著に高い。これは小笠原高気圧の沖縄・奄美方面へ



第 6 図 沖縄・奄美周辺（図 2a の矩形領域）における 1993～2024 年の各年の 7～9 月平均の気温（℃）と水温（℃）の平年差の鉛直分布
ここでは平年値をいずれも 1993～2022 年とした。赤は 2024 年、青は 2023 年、橙は 2017 年、桃は 2016 年、緑は 2003 年、紫は 1998 年、鼠色が 1993 年～2024 年のうち上記以外の年をそれぞれ表す。



第 7 図 沖縄・奄美周辺（図 2a の矩形領域）における 7～9 月平均の SAT と表層水温との同時相関係数（1993～2023 年）
統計期間は 1993～2023 年。破線は、Student の *t*-test に基づく有意水準 95%及び 99%のレベル。

の張り出しが平年に比べて強いこと、対流圏の帯状平均気温が高いことなどの大気循環偏差が記録破りの暑さに影響したことを示唆する。また両年を比較すると 2024 年は 2017 年をさらに上回る高温で、かつ最下層で高温偏差が最大である。このことは異常な暑さの要因が上空の大気循環変動に加えて、海洋側にもあることを想起させる。たしかに海洋表層の水温は、2017 年は顕著な正偏差が混合層に見られるのみだが、2024 年は混合層の突出した正偏差に加えて、更に下方の深さ 200m 程度まで顕著に水温が高

かった。加えて、図 7 に示すように深さ 125m 程度までの表層水温は SAT と有意な正の相関を持ち、海洋力学によって引き起こされる海洋変動が SST 及び SAT 偏差に影響を与える可能性が示唆される。

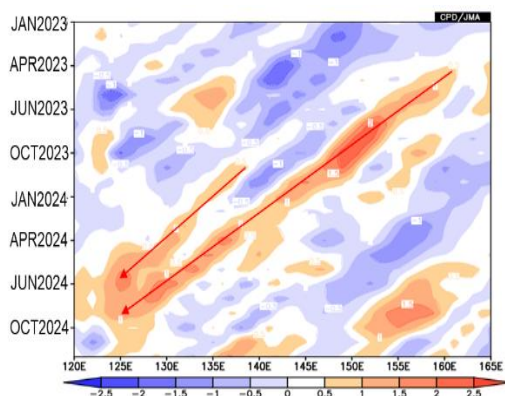
以上より、2017 年は大気循環の大きな偏差が海洋に対して熱的な強制を与えた一方で、2024 年は大気循環の大きな揺らぎに加えて海洋表層の異常に高い水温も記録的な暑さに影響した可能性が示唆される。

3.3 海洋表層の高い水温の要因

前節までに SST 正偏差の要因として、大気の直接的な強制に加えて海洋表層の暖水偏差を指摘した。この暖水偏差の形成には、日本の南の 20°-25°N 付近を約 1 年かけてロスビー波のように西進した暖水偏差（第 8 図）が影響した可能性がある。2023 年夏ごろには日本の南東 150°E 付近に暖水偏差が見られ、それが約 1 年かけて西進し、2024 年夏～秋に沖縄の南に到達した。暖水偏差の西進の速さは約 8.1cm/s（1 年間で経度約 25 度）である。これは以下で計算されるロスビー波の理論値よりもやや速い。ここで内部ロスビー波の位相速度

$$\frac{\beta}{k^2 + 1/R^2}$$

β : コリオリ因子南北勾配, k : 東西波数, R : 変形半径は、波動の東西波長を 600km、 R を北西太平洋 20°N 度付近の第 1 傾圧モード内部変形半径 60km (Chelton *et al.* 1998) として西向き約 5.4cm/s と概算した。

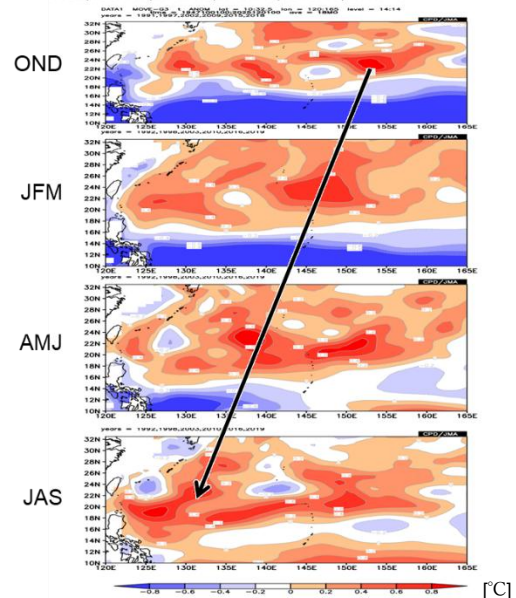


第 8 図 20°-25°N で平均した 100m 深の水温偏差 (°C) の経度-時間断面図
MOVE-G3 で作成。

さらにこの西進する暖水偏差には前年のエルニーニョ現象が影響している可能性がある。第 9 図には過去のエルニーニョ現象の成熟期～終息後の 100m 深の水温偏差合成図を示す。エルニーニョ現象の成熟期に日本の南東 (150°E 付近) にみられる暖水偏差が徐々に西へ進んで、エルニーニョ終息後の夏～秋に沖縄の南に到達しているように見える。たしかに、第 6 図の表層水温偏差を見ると、100m 深水温が高温の年にはポストエルニーニョの年 (2024 年、1998 年、2003 年、2016 年) が多い。今回のイベントでも、2023 年春～2024 年春に発生したエルニーニョ現象に伴う日本の南東海上の下層風偏差が、日本の南東から海洋内部を西進する暖水擾乱を強制し、それが平年で最も気温が高くなる 7～9 月に沖縄付近に到達して、同地方の記録破りの暑さに影響した可能性が示唆される。ただし、エルニーニョ現象のイベントごとに西進擾乱の発生位置や時期には違いがあり、沖縄の南への到達時期にも数か月程度の幅がみられる (図略)。

El Niño成熟→衰退期 100m 深 水温偏差合成図

1991/92, 1997/98, 2002/03, 2009/10, 2015/16, 2018/19



第 9 図 エルニーニョ現象の成熟期～終息後の 100m 深 水温 (°C) 偏差の合成図

1992/93 年、1997/98 年、2002/03 年、2009/10 年、2015/16 年、2018/19 年の 6 事例について、OND (10-12 月)、JFM (1-3 月)、AMJ (4-6 月)、JAS (7-9 月) の季節ごとの合成図。MOVE-G3 で作成。

4. まとめと議論

2024 年 7～9 月に沖縄・奄美は記録破りの暑さに見舞われるとともに、近海では SST も記録的に高く、ほぼ期間を通じて「海洋熱波」の状態が持続した。SST に加えて 100m 深の水温も平年に比べて高く、沖縄の南東及び黒潮に沿って顕著な正偏差がみられた。SST と SAT は正偏差を維持しつつ、大気循環の変動と対応した増大／減衰の季節内変動を呈していた。具体的には晴天や弱風による SST 正偏差の増大、台風などの擾乱通過による SST 正偏差減衰である。

2024 年夏は対流圏下層の気温が他の年に比べて顕著に高く、かつ高温偏差は最下層で最大だった。海洋の表層水温は、混合層の突出した高温偏差に加えて深さ 200m 程度まで顕著に高い状態だった。さらに 100m 深の水温偏差は SST 正偏差と有意な正相関を持っていた。これらより、記録的に高い SST 正偏差は、大気循環変動の影響に加えて、海洋表層水温の正偏差によっても支えられた可能性が考えられた。こうしてもたらされた高い SST によって、海洋が大気を直接強く加熱していた。

さらに、海洋表層の高い水温偏差には日本の南を約 1 年かけて西進した暖水偏差の影響が考えられた。これがエルニーニョ現象の遅延影響であることも過去の統計解析から示唆された。

ポストエルニーニョの夏には沖縄・奄美が平年より暑くなりやすい傾向がある。その背景要因としては、ポストエルニーニョの夏にはインド洋キャパシター効果 (Xie *et al.* 2009) によって小笠原高気圧が沖縄・奄美方面へ強く張り出すことが季節予報の現場でもよく知られている (竹村 2025)。本調査の結果はこれに加えて、エルニーニョ現象成熟期に日本の南東海上から西進し始めた暖水擾乱がエルニーニョ終息後の夏～秋に沖縄・奄美の南に到達して、同地域の暑さを下支えするというプロセスも働いている可能性を示唆している。そして更に、こうした大気に比べてゆっくり進む海洋の波動を監視することが沖縄・奄美の長期予報にとって有益であることをも暗示している。

今後は大気境界層の熱収支、エルニーニョ現象と日本の南を西進する暖水偏差との関係など、より詳

細な解析を進める予定である。本稿では海洋混合層の高温に対して弱風と多照が影響したことを言及したが、海洋内部のプロセスについては定量的な評価ができていない。本調査で提示したプロセスは、数値モデルを用いるなど、より定量的な分析によって更に検証される必要がある。

謝辞

異常気象分析検討会委員の皆さま、気象庁気候情報課内関係官から頂いた助言をもとに本調査を進めることができました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 気象庁, 2024: 「令和 6 年 7 月以降の顕著な高温と 7 月下旬の北日本の大雨の特徴と要因について」(令和 6 年 9 月 2 日報道発表), <https://www.jma.go.jp/jma/press/2409/02a/kentoukai20240902.html> (2025 年 4 月 22 日閲覧)
- 竹村和人, 2025: 夏のインド洋熱帯域の海洋変動と関連する循環場、日本の天候の特徴とそのメカニズム. 気象庁季節予報技術資料, **2**, 34-40.
- Chelton, D. B., R. A. deSzoeke, M. G. Shlax, K. E. Naggar and N. Siwertz, 1998: Geographical Variability of the First Baroclinic Rossby Radius of Deformation. *J. Phys. Oceanogr.*, **28**, 433–460.
- Fujii, Y., T. Yoshida, H. Sugimoto, I. Ishikawa, and S. Urakawa, 2023: Evaluation of a global ocean reanalysis generated by a global ocean data assimilation system based on a Four-Dimensional Variational (4DVAR) method. *Front. Clim.*, **4**, 1–20. <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.1019673>
- Hirose, N. et al. 2019: Development of a new operational system for monitoring and forecasting coastal and open-ocean states around Japan. *Ocean Dynamics*, **69**, 1333–1357. <https://doi.org/10.1007/s10236-019-01306-x>.
- Hobday, A. J. et al. 2016: A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Prog. Oceanogr.* **141**, 227–238.
- Hobday, A. J. et al. 2018: Categorizing and naming marine heatwaves. *Oceanography*, **31**, 162–173.
- Kosaka, Y. et al. 2024: The JRA-3Q reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **102**, 49-109. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2024-004>.

- Kurihara, Y., T. Sakurai, and T. Kuragano, 2006: Global daily sea surface temperature analysis using data from satellite microwave radiometer, satellite infrared radiometer and in-situ observations. *Weather Service Bulletin*, 73, Special issue, s1-s18 (in Japanese).
- Morioka, Y., T. Tozuka and T. Yamagata, 2010: Climate variability in the southern Indian Ocean as revealed by self-organizing maps. *Climate Dynamics*, **35**(6), 1059–1072.
- Sato, H. *et al.* 2024: Impact of an unprecedented marine heatwave on extremely hot summer over Northern Japan in 2023. *Sci. Rep.*, **14**, 16100.
- Takahashi, N. *et al.* 2023: Observed Relative Contributions of Anomalous Heat Fluxes and Effective Heat Capacity to Sea Surface Temperature Variability. *Geophys. Res. Lett.* **50**, e2023GL103165.
- Takemura, K. *et al.* 2024: Preliminary diagnosis of primary factors for an unprecedented heatwave over Japan in 2023 summer. *SOLA*, **20**, 69-78.
- Tanimoto, Y., H. Nakamura, T. Kagimoto and S. Yamane, 2003: An active role of extratropical sea surface temperature anomalies in determining anomalous turbulent heat flux. *J. Geophys. Res.* **108**, 3304.
- Xie, S.-P. *et al.* 2009: Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño. *J. Climate*, **22**, 730–747.