

海洋の渦・前線とそれらが生み出す大気海洋現象の解明

課題責任者

野中 正見

海洋研究開発機構付加価値情報創生部門アプリケーションラボ

著者

佐々木 英治^{*1}, 尾形 友道^{*1}, 野中 正見^{*1}

^{*1} 海洋研究開発機構付加価値情報創生部門アプリケーションラボ

キーワード：海面水温，海上風，アンサンブル海洋シミュレーション，生態系モデル，北太平洋

1. 本課題の概要

本課題では、高解像度の海洋・大気シミュレーションにより、黒潮等の西岸境界流に伴う海面水温前線や中規模渦などの海洋局所構造の変動が海洋や大気の大規模な循環の形成・変動に果たす役割、台風や爆弾低気圧と海洋との相互作用によって生じる影響、また、海洋の微細構造が大規模な海洋循環や生態系に与える影響等々を明らかにすることを目的とする。これらの研究を通じて、気候変動予測や地球温暖化予測では従来ほとんど考慮されてきていない、海洋局所構造の変動とそれらが引き起こす大気海洋現象に対する知見を深めるとともに、地球気候の理解と予測の発展に貢献することを目指している。

本稿では、中規模渦を解像する海洋シミュレーションを用いて日本東方に発生した海洋熱波の要因を探る研究成果と、同様の海洋モデルに海洋生態系モデルを組み込んだシミュレーションを用いた海洋循環場の変動が海洋生態系に及ぼす影響に関する成果を紹介する。

2. 海上風に高感度な北西太平洋の海面水温

近年、世界の多くの海域で海水温の異常高温現象である海洋熱波が頻発している。その海水温の異常高温による海洋生態系の変化は、漁業に多大な影響を及ぼしている。特に北西太平洋の日本近海は、海洋熱波が近年頻発している海域である。そこで、なぜ北西太平洋の海面水温が高温になるか、黒潮や親潮を現実的に再現できる高解像度の準全球海洋モデルを用いて調べた。

本研究では、水平解像度が 0.1 度で極域を除く世界海洋をシミュレートする準全球渦解像モデル OFES2[1]を用いた。モデルを大気再解析データ JRA55-do[2]で駆動し、1991 年から 2022 年までの 3 メンバーのアンサンブル実験(OFES2_JRA)を、メンバー間で僅かに異なる初期値を用いて実施した。また、海上風のみを J-OFURO3[3]に置き換えた 3 メンバーの感度実験(OFES2_JOFURO)も実施した[4]。

1992-2022 年の平均海面水温のアンサンブル平均値は、北西太平洋の黒潮親潮続流域と北西大西洋の湾流域で、OFES2_JOFURO が OFES2_JRA より高温であった。モデルを駆動した JRA55-do と J-OFURO3 の海上風そのものの差は小さいが、その回転成分は北半球の中緯度域に差が見られた。海上風に応答する海洋のロスビー波を海盆の東西方向で積分するスベルドラップ輸送を考えると、アンサンブル実験間の海上風の回転成分の海盆に広がる差が、

海盆の西部海域での南北輸送流量の差となる。その差が熱の南北輸送の差となり、海盆が大きい北太平洋の西部の日本近海で海面水温の差が特に顕著になったと考えられる。

そこで、アンサンブル平均間の北西太平洋の黒潮、親潮、それらの混合水域などの循環場の差を調べた。この海域では、海面水温が高温になる OFES2_JOFURO の方が OFES2_JRA よりも、日本東岸およびクリル諸島を北上する流れが強く、高気圧性の渦が顕著であった。これらの差は統計的に有意で、さらに黒潮続流の緯度は OFES2_JOFURO が OFES2_JRA より有意に北偏していた。したがって、OFES2_JOFURO は OFES2_JRA よりも、温かい黒潮系の海水の北へ輸送が多く、冷たい親潮系の海水の南への輸送が少なく、海水温に差が生じていた。

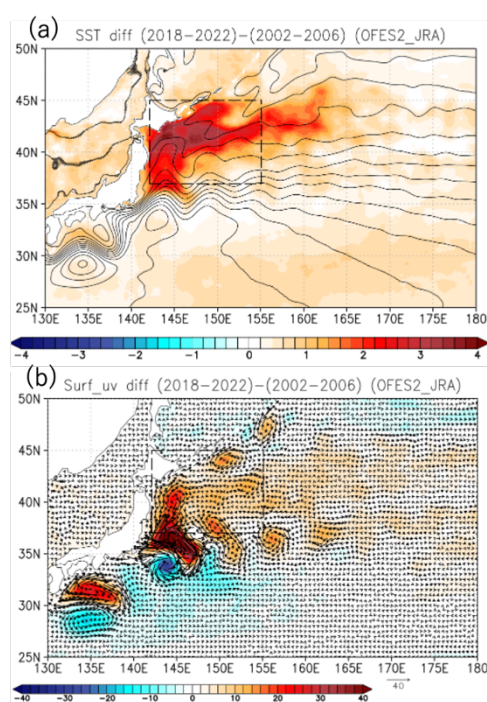


図 1. (a) OFES2_JRA の高温期 (2018-2018) と低温期 (2002-2006) のアンサンブル平均海面水温の差(°C)。 (b) 海面高度 (cm) と海面流速 (cm/s) の差。 OFES2_JOFURO の図は略。

また、各アンサンブル実験の北西太平洋の日本近海域の海面水温は、両アンサンブル実験ともに観測より少し

過大であるが2018年以降が顕著に高温であった。高温期(2018-2022)から低温期(2002-2006)を引いた海面水温差の分布(図1a)は、先に述べたアンサンブル実験間の差(図略)と似た分布であった。さらに、循環場の分布の差(図1b)も、アンサンブル実験間の差(図略)と似ており、沿岸北上流、渦活動および黒潮統流の南北位置の差も有意であった。また、各々のモデルを駆動した海上風は、いずれも高温期と低温期の北太平洋の回転成分の差の分布が、JRA-55doとJ-OFURO3の平均値の差と似ていた(図略)。これらの結果は、海上風の変化による海洋応答が北西太平洋の循環場を変化させ、その海域で海面水温が高温になったことを示唆している。

本研究では、黒潮や親潮、中規模渦をよく再現する渦解像海洋モデルを用いて、2つの異なる海上風で駆動した2組のアンサンブル実験を実施した。それらの実験を比較すると、広大な太平洋の海上風の回転成分の差が、北西太平洋の日本近海の循環場に差を生じ、その海域の海面水温に顕著な差をもたらしていた。さらに、日本近海の海面水温の近年の高温化の持続は、海上風の変動に対して同じメカニズムで発生したことが示唆された。その海面水温の高温化が持続していることが、日本近海で海洋熱波が頻発している一因と考えられる。

3. 熱帯/亜熱帯北太平洋の海洋変動と生態系

3.1 背景

北太平洋域における海洋上層の変動は、熱帯域(北緯0-15度)と亜熱帯域(北緯20-30度)で大きく異なる。熱帯域においては、海洋上層の変動は海上風応力により駆動された1.5層モデルの風成循環により良く説明される[5, 6]。一方、亜熱帯域では熱帯とは異なり、冬季に形成された厚く成層の弱い、水温一様な亜熱帯モード水(STMW)が下部から温度躍層を押し上げる事による、浅い季節躍層の変動が亜熱帯の夏季~秋季の海洋上層の変動に寄与している[7]。

本研究では、渦解像の海洋生態系モデルであるOFES2-NPZDを用いて、北太平洋熱帯/亜熱帯域の夏季~秋季に着目して海洋生態系の変動を調べた[8]。

3.2 OFES2-NPZDについて

本研究では、渦解像海洋大循環モデルであるOFES2の北太平洋版を用いた[1, 9]。OFES2は水平解像度0.1度、鉛直105層であり、力学モデルを生態系モデルと結合し(OFES2-NPZD)、1980年から2019年までの経年変動積分を行った。その中で今回は、台風による湧昇に伴う植物プランクトン増加の季節平均場への影響や、中規模渦などの海洋季節内変動に伴う栄養塩輸送の効果などを評価するため、2000年から2019年までの日毎に出力されているデータを用いて解析を行った。先行研究において、北西太平洋域の観測結果をOFES2-NPZDはよく再現している事が示されている[9]。

3.3 OFES2-NPZDで再現された生態系変動

OFES2-NPZDで再現された生態系変動について、まず水温や硝酸塩を観測データ(WOA18)と比較した。OFES2-NPZD

ではSTMWのコア水温や硝酸塩分布にバイアスがあるものの、亜熱帯域上層での硝酸塩の極小や、その下のSTMW領域の比較的高濃度かつ一様な硝酸塩分布などの特徴はよく再現していた。OFES2-NPZDでは、この硝酸塩分布に対応して、植物プランクトンも亜熱帯域での極小および中高緯度域での高濃度分布が見られ、鉛直分布は有光層(~100m深)に集中していた。また、水温変動を格子化したArgoの観測データと比較したところ、混合層や夏季~秋季の季節的な温度躍層に対応する、海洋上層の変動はよく再現されていた。

OFES2-NPZDの海洋上層(0-100m)の蓄熱量変動は、栄養塩およびプランクトン変動と負の相関を示しており、温度躍層の上昇(下降)が栄養塩/プランクトン変動の増加(減少)を引き起こすことが示唆された。熱帯域では温度躍層の変化は1.5層の浅水波モデルでよく説明できるのに対し、亜熱帯域ではSTMWによる下層からの持ち上げが重要であり、ラグ相関解析の結果からも冬季の混合層フロントで形成された水塊が、流線に沿って亜熱帯北西太平洋域に伝播する事で温度躍層を持ち上げ、この変動が生態系変動にも寄与している事が示された(図2)。この事は冬季の北西太平洋の海洋の予測可能性が、夏~秋季の亜熱帯域の生態系変動の予測に影響する可能性を示唆すると考えられる。

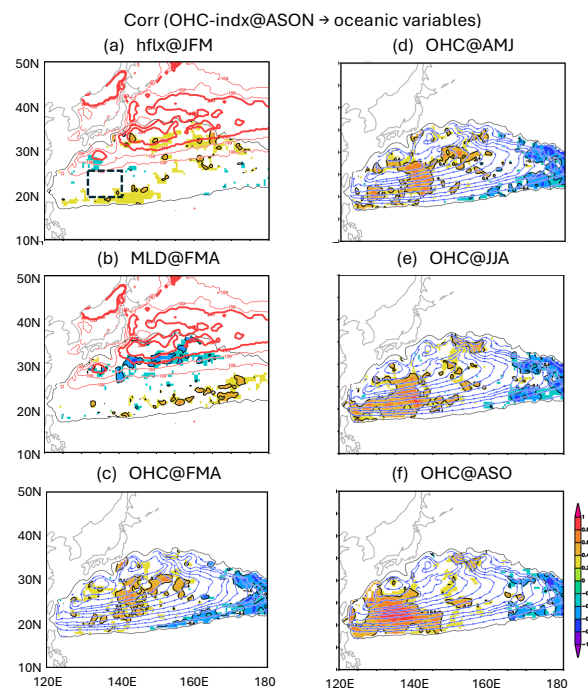


図2. OFES2-NPZDでの8-11月の西太平洋域での海洋上層(0-100m)蓄熱量偏差((a)のbox領域)に対するラグ相関: (a) 1-3月の下向き海面熱フラックス、(b) 2-4月の混合層厚、および(c) 2-4月、(d) 4-6月、(e) 6-8月、(f) 8-10月の海洋上層蓄熱量。

謝辞

第2章の研究は科研費(JP20K04065, JP19H05701)の支援を、第3章の研究は科研費(JP19H05701, JP22H00176,

JP22K03716, JP24H02221) の支援を受けた。

文献

- [1] Sasaki H, S. Kida, R. Furue, H. Aiki, N. Komori, Y. Masumoto, T. Miyama, M. Nonaka, Y. Sasai, and B. Taguchi, “A global eddying hindcast ocean simulation with OFES2,” *Geosci. Mod. Dev.*, vol.13, pp.3319-3336, 2020.
- [2] Tsujino H., S. Urakawa, H. Nakano, et al., “JRA-55 based surface dataset for driving ocean–sea-ice models (JRA55-do),” *Ocean Modell.*, vol.130, pp.79–139, 2018.
- [3] Tomita H., T. Hihara, S. Kako, M. Kubota, and K. Kutsuwada, “An introduction to J-OFURO3, a third-generation Japanese ocean flux data set using remote-sensing observations,” *J. Oceanogr.*, vol.75, pp.171–194, 2019.
- [4] Sasaki, H., K. Kutsuwada, M. Nonaka, Y. Sasai, and T. Miyama, “High sensitivity of sea surface temperature in the northwestern Pacific to atmospheric wind in the mid-latitude North Pacific in an eddying ocean model,” *J. Oceanogr.*, vol.81, pp.463–484, 2025.
- [5] Zebiak, S.E., and M.A. Cane, “A model el niño–southern oscillation,” *Mon. Weather Rev.*, vol.115, no.10, pp.2262-2278, 1987.
- [6] Ye, K., and H. Aiki, “Wind stress curl as a driving force of annual waves in the upper ocean for interpreting energetics at all latitudes,” *Prog. Earth Planet. Sci.*, vol.11, no.1, pp.29, 2024.
- [7] Kobashi, F., N. Usui, N. Akimoto, N. Iwasaka, T. Suga, and E. Oka, “Influence of North Pacific subtropical mode water variability on the surface mixed layer through the heaving of the upper thermocline on decadal timescales,” *J. Oceanogr.*, vol.79, no.4, pp.379-394, 2023.
- [8] Ogata, T., H. Aiki, F. Kobashi, and Y. Sasai, “Nutrient and phytoplankton variability in the tropical and subtropical western North Pacific simulated using OFES2,” *J. Oceanogr.*, vol.81, no.6, pp.515-534, 2025.
- [9] Sasai, Y., S.L. Smith, E. Siswanto, H. Sasaki, and M. Nonaka, “Physiological flexibility of phytoplankton impacts modelled chlorophyll and primary production across the North Pacific Ocean,” *Biogeosciences*, vol.19, no.20, pp.4865-4882, 2022.