

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

藤原 圭太^{*1}, 名倉 元樹^{*2}, 笹井 義一^{*3}, 野中 正見^{*4}

^{*1} 京都大学 防災研究所 気象・水象災害研究部門 暴風雨・気象環境研究分野, ^{*2} 海洋研究開発機構 地球環境部門 大気海洋相互作用センター, ^{*3} 海洋研究開発機構 地球環境部門 地球表層システム研究センター, ^{*4} 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: 台風, 黒潮大蛇行, 赤道波, 黒潮続流, 海洋生態系

1. 本課題の概要

本課題では、高解像度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。これにより、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、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、特に黒潮の大蛇行から台風への遠隔的な影響、熱帯域の大気と海洋の変動を理解する鍵となる赤道波、日本東方の黒潮続流域での植物プランクトンの十年規模での変動に関する成果を紹介する。

2. 黒潮大蛇行が遠隔台風に与える影響

黒潮の流路は紀伊半島沖で南へ蛇行する状態（黒潮大蛇行）を数か月～数年にわたり維持することがあり、大蛇行期には東海沖/紀伊半島沖の海面水温（SST）が昇温/降温するという特徴的な SST 変動が観測される[1]。近年の研究は、黒潮の SST 変化が、台風への水蒸気流入量の変化を通して、秋季に日本のはるか南海上に北上する台風（遠隔台風）の強度に遠隔的な影響を与えることを報告している[2]。しかし、先行研究は黒潮の長期的な高温化や暖水渦に起因する SST 変化に注目しており、黒潮大蛇行に関連した沿岸域の複雑な SST 変動が遠隔台風に与える影響は未解明である。そこで、本研究は数値実験を通じて黒潮大蛇行が遠隔台風に与える影響の解明を目的とする。

事例解析として、2019 年 10 月の大蛇行期に日本に接近した台風（Neoguri）に注目した。遠隔台風の強度変化に対する黒潮大蛇行の影響を調査するために、雲解像領域気象モデルによる再現実験（CTL run）と黒潮大蛇行に関連する SST 変動に対する感度実験を実施した。感度実験は、東海沖の正の SST 偏差のみを取り除く実験（NW run）、紀伊半島沖の負の SST 偏差のみを取り除く実験（NC run）、両海域の SST 偏差を取り除く実験（NWC run）を設定した。

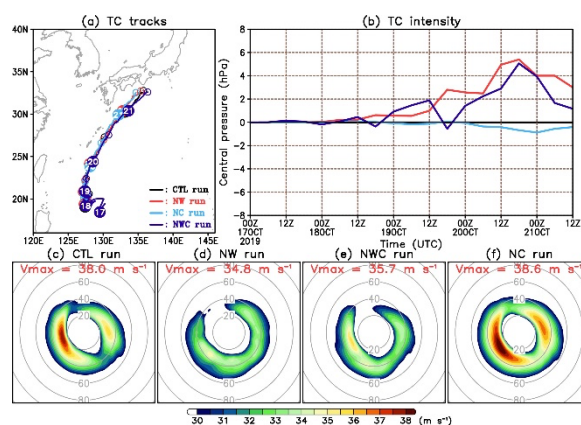


図1. CTL run（黒線）、NW run（赤線）、NC run（青線）、NWC run（紫線）から得られた (a) 台風経路と (b) 中心気圧差の時系列図。中心気圧差はSST 改変実験 minus CTL run として計算し、正/負の値は台風発達が抑制/促進されたことを表す。(c-f) 発達期（10月20日00UTC-21日00UTC）で時間平均した台風中心付近の地上風速分布。

初期値/境界値には気象庁 GSM と JCOPE2M を使用した。

図1は数値実験から得られた Neoguri の経路、中心気圧、中心付近の地上風速分布を表す。台風経路に対する黒潮大蛇行の影響は小さい（図1a）。台風強度に関しては、10月17-18日の各実験間の中心気圧差は不明瞭であったが、発達期（10月20日）にはNW/NC run の台風発達が明らかに抑制/促進された（図1b）。また、台風中心付近の風速もNW/NC run ではCTL run よりも減少/増大した（図1c-f）。このとき、Neoguri は東海沖/紀伊半島沖の SST 改変領域から約 1000km/800km 離れた海域に位置していた。この結果は、大蛇行期の東海沖/紀伊半島沖の SST 昇温/降温が遠隔台風の発達を促進/阻害することを表す。

NW/NC run では、東海沖/紀伊半島沖の海面蒸発量に応じて台風への水蒸気流入量が減少/増加し、台風内部の大気境界層内の相当温位も減少/増加することで、台風中心付近の潜熱加熱が弱まっていた/強まっていた。このような変化が台風発達の抑制/促進に寄与したと考えられる。また、2019年10月の黒潮大蛇行では東海沖の SST 昇温が非常に顕著であったため、NWC run ではNW run と同様な結果（黒潮大蛇行は Neoguri をより強めた）が得られた。

本研究は、黒潮大蛇行が台風強度に遠隔的な影響を与えることだけでなく、遠隔台風の発達における黒潮大

蛇行の相反する役割を示唆した。NC run の結果に基づくと、紀伊半島沖の SST 降温が顕著な黒潮大蛇行（2017 年 10 月など）は、本研究の結果とは反対に、遠隔台風の発達を抑制する可能性がある。遠隔台風に対する黒潮大蛇行の相反する影響について更なる調査が望まれる。

3. 赤道インド洋表層の混合ロスビー重力波

混合ロスビー重力波は赤道上の南北方向の流れの振動を伴う。先行研究によってインド洋の混合ロスビー重力波は約 14 日周期であることが報告されていた。一方、赤道インド洋中央部に設置された音響式流速計の現場観測値を解析したところ、スペクトルピークが二つあることが分かった[3]。一つ目のピークは周期約 14 日に位置し表層で最も振幅が大きく、二つ目のピークは周期が約 20 日程度で密度躍層のある水深 100 m 付近で最も振幅が大きい（図 2a）。前者は従来の研究の指摘と一致するが、後者はこれまで知られていなかったものである。今年度は、海洋大循環モデルを用いて観測されたスペクトル分布を再現し、数値実験によってその成因を調べた[4]。以下では二つの周期帯の変動を「短周期成分」および「長周期成分」と呼ぶ。

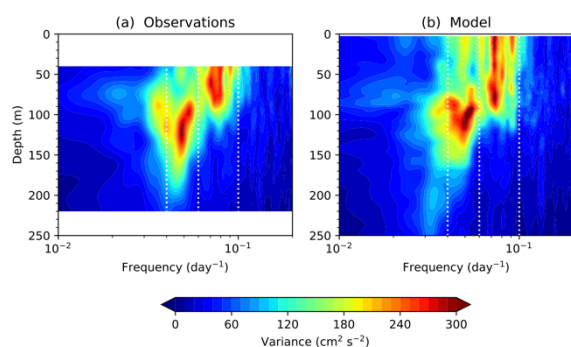


図 2. (a) 音響式流速計および(b)インド洋領域 OFES から得た、赤道上の東経 80.5 度における南北流のスペクトル。横軸が振動数、縦軸が水深を表す。単位は $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$ 。白の点線が周期 10, 17, 25 日を示す。

使用した数値モデルは OFES である。モデルの水平解像度は 0.1 度、鉛直に 105 層を有し、グリッド間隔は本研究が対象とする混合ロスビー重力波の波長より十分に短い。モデル領域を熱帯インド洋(南緯 20 度～北緯 20 度、東経 35～115 度)に限定し計算負荷を軽減することによって、多数の感度実験を行った。領域の端は海水の流入・流出のない壁とした。JRA55-do の気象データを用いて 2000 年から 2016 年までモデルを駆動し、音響式流速計の観測期間（2008 年 8 月から 2016 年 2 月まで）のモデル出力を解析に使用した。モデル結果は観測データに見られた赤道上の南北流の二つのスペクトルピークを再現できた（図 2b）。

モデル出力を用いて統計解析を行い、波形や波長を調べたところ、短周期成分と長周期成分はともに静止場における線形の混合ロスビー重力波と考えられることが分

かった。そこで数値モデルを用いて感度実験を行い、二つの成分の成因を調べた。海上風の約 14 日周期の変動と約 20 日周期の変動を抽出し、それぞれの成分でモデルを駆動した。その結果、二つの周期帯の混合ロスビー重力波は共に海上風によって駆動されており、背景場の流れの力学的不安定は波動の励起にほとんど寄与しないことが分かった。混合ロスビー重力波の長周期成分は、海面で海上風によって励起されたのち鉛直下方に伝播し、深度約 80～120 m に位置する密度躍層の上部と下部で反射され、躍層内にエネルギーが捕捉される。これによって長周期成分が深さ約 100 m 付近にスペクトルパワーのピークを持つことが分かった。

混合ロスビー重力波は密度躍層を超えて海洋中層に到達する。このような波動の平均場へのインパクト（たとえばエネルギーフラックスやストークスドリフト）は、振動数や波長に依存することが知られている。本研究で特定された波動の性質はこのような躍層下へのインパクトの理解に貢献する可能性がある。

4. 黒潮続流域における植物プランクトンの 10 年規模変動

北西太平洋における黒潮続流は、数年から十年の時間スケールで、流路が比較的安定し直線的に流れる安定期と、流路が安定せずに蛇行しながら流れる不安定期の間を遷移することが知られている[5]。この変動は、黒潮続流域の生態系にも大きな影響を与えることが考えられ、Lin et al. (2014) [6]は、クロロフィル a 濃度や海面高度の衛星観測データ等の解析より、安定期には、黒潮続流の南（北）側で春季ブルームが抑制（増幅）されることを示した。また、ロスビー波に伴う鉛直栄養塩輸送の変動が重要な役割を果たしている可能性を示唆した。その後、Lin et al. (2020) [7]は、地球生物化学モデルを結合させた高解像度領域海洋モデルによるシミュレーションを実施し、窒素の収支解析より、栄養塩の鉛直輸送偏差の重要性を示した。しかしながら、これらの先行研究では、春季ブルーム期の表層における植物プランクトン濃度の変動にのみ着目し、期間が短いために偏差の統計的有意性も不明である。そこで、モデルの長期積分結果を用いて、黒潮続流域における植物プランクトン濃度鉛直分布の十年規模変動について調べた[8]。

北太平洋渦解像モデル（OFES2）に組み込まれた低次生態系（NPZD）モデルの結果を使用した[9]。モデル領域は 100° E-70° W、20° S-68° N である。また、水平解像度は 0.1°×0.1°であり、鉛直方向には 105 レベルある。モデルは、大気再解析データ JRA 55-do の 3 時間間隔のデータにより駆動されており、1980 年から 2019 年まで 40 年分のモデル結果を使用した。

黒潮続流の安定期と不安定期を定義するために、黒潮続流域（140° E-170° E、30° N-40° N）の海面高度偏差の EOF 第 1 モードの主成分の年平均值（海洋同化データ FORA から得られた同時系列との相関係数は 0.62）を使用した。

主成分の年平均値が 1 標準偏差以上の 8 年を黒潮続流の安定期、-1 標準偏差以下の 8 年を不安定期とし、月別（2 月と 8 月）のコンボジット解析を行った。すると、安定期には、流軸の南側で植物プランクトンが減少し、北側で増大する傾向があることが明らかになった（図 3）。さらに、8 月の海面付近では、有意な植物プランクトン濃度偏差が見られなくなるが、亜表層には、偏差が残り続けることも明らかになった（図 3）。その原因を探ったところ、ロスビー波に伴う栄養塩躍層深の上下動や栄養塩の鉛直拡散フラックス偏差が、重要な役割を果たしている可能性が示唆された。一方、不安定期には、安定期とは逆符号の偏差が見られた。

本研究では、海上衛星で捉えられる表層植物プランクトンの長期変動だけでなく、亜表層における植物プランクトンの長期変動を理解することの重要性を示唆している。さらに、BGC アルゴのような海洋内部を観測できる測器と組み合わせることで、この海域における植物プランクトンの変動を正確に理解することに繋がる。

（第 4 章は令和 4 年度の成果であるが、令和 4 年度成果報告に入れられなかったため本稿に加えた。）

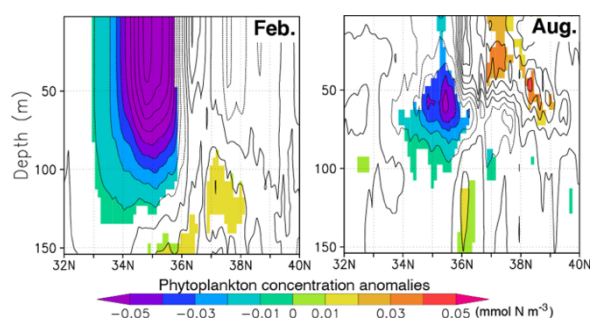


図 3. 黒潮続流の安定期における（左）2 月と（右）8 月の植物プランクトン濃度偏差。東経 145 度の黒潮続流を横切る断面図。等値線間隔は 0.01mmol N m⁻³。

謝辞

第二章の研究は科研費新学術領域研究「変わりゆく気候系における大気海洋相互作用 hotspot」「台風・爆弾低気圧の予測可能性とスケール間大気海洋相互作用」、科研費基盤研究 A「メガストームに係る災害ハザードの近未来予測研究」、科研費若手研究「黒潮大蛇行が作る複雑な海面水温分布が遠隔海域の台風の強度・構造変化に与える影響」の支援を受けています。第三章の研究は科研費基盤 C「インド洋の南北循環：気候の数十年周期変動の理解に向けて」および科研費基盤 A「大気と海洋の波動エネルギー循環のシームレス解析による熱帯・中緯度相互作用の解明」の支援を受けています。第四章の研究は科研費新学術領域研究「変わりゆく気候系における大気海洋相互作用 hotspot」「黒潮・親潮等海洋前線帯の大気海洋結合系における役割とその経年変動の予測可能性」の支援を受けています。

文献

- [1] Sugimoto, S., B. Qiu, and A. Kojima, "Marked coastal warming off Tokai attributable to Kuroshio large meander", *Journal of Oceanography*, vol.76, 141–154, 2020.
- [2] Fujiwara, K., and R. Kawamura, "Active role of sea surface temperature changes over the Kuroshio in the development of distant tropical cyclones in boreal fall", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol.126, e2021JD035056, 2021.
- [3] K. Pujiana, and M. J. McPhaden, "Biweekly mixed Rossby-gravity waves in the equatorial Indian Ocean," *Journal of Geophysical Research Oceans*, vol.126, e2020JC016840, 2021.
- [4] M. Nagura, and M. J. McPhaden, "Dual-frequency wind-driven mixed Rossby-gravity waves in the equatorial Indian Ocean," *Journal of Physical Oceanography*, vol.53, no.6, pp.1535-1553, 2023.
- [5] B. Qiu, S. Chen, N. Schneider, and B. Taguchi, "A coupled decadal prediction of the dynamic state of the Kuroshio Extension system," *Journal of Climate*, vol.27, 1751–1764, 2014.
- [6] P. Lin, F. Chai, H. Xue, and P. Xiu, "Modulation of decadal oscillation on surface chlorophyll in the Kuroshio Extension," *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol.119, 187–199, 2014.
- [7] P. Lin, J. Ma, F. Chai, P. Xiu, and H. Liu, "Decadal variability of nutrients and biomass in the southern region of Kuroshio Extension," *Progress in Oceanography*, vol.188, 102441, 2020.
- [8] T. Tozuka, Y. Sasai, S. Yasunaka, *et al.*, "Simulated decadal variations of surface and subsurface phytoplankton in the upstream Kuroshio Extension region," *Progress in Earth and Planetary Science*, vol.9, 70, 2022.
- [9] Y. Sasai, S.L. Smith, E. Siswanto, H. Sasaki, and M. Nonaka, "Physiological flexibility of phytoplankton impacts modeled biomass and primary production across the North Pacific Ocean," *Biogeosciences*, vol.19, 4865–4882, 2022.