



多重階層結合系における対流圏大気現象の過去・現在・未来/
日本周辺の海流の力学過程およびその影響の理解

黒潮域における台風 通過時の海面水温変化 — 気象庁気象研究所の大気海洋結合 モデル実験から —

川上 雄真¹⁾ 中野 英之¹⁾
浦川 昇吾¹⁾ 豊田 隆寛¹⁾
坂本 圭¹⁾ 吉村 裕正¹⁾
新藤 永樹¹⁾ 山中 吾郎¹⁾

**Interactions Between Ocean and Successive
Typhoons in the Kuroshio Region in 2018 in
Atmosphere-Ocean Coupled Model
Simulations**

**Yuma Kawakami, Hideyuki Nakano, L.
Shogo Urakawa, Takahiro Toyoda, Kei
Sakamoto, Hiromasa Yoshimura, Eiki
Shindo, Goro Yamanaka**

1) 気象庁気象研究所 全球大気海洋研究部

気象庁気象研究所（以下、気象研究所）では、高解像度の大気海洋結合モデルの開発に取り組んでおり、日スケールの現象を対象とした数値実験を行っている。本稿では、数値実験から明らかになった黒潮域における台風通過時の海面水温変化の特徴を記述するとともに、気象研究所の大気海洋結合モデル実験について紹介する。

1. はじめに

熱帯擾乱は、表層海洋中に鉛直混合や湧昇流を励起することで、その経路に沿って海面水温を低下させることが古くから知られている（例えば Leiper, 1967 や Stramma *et al.*, 1986）。コールドウェイクとも呼ばれるこうした海面水温低下域は、後続の熱帯擾乱に影響を与えることが指摘されている（例えば Schade & Emanuel, 1999 や Karnauskas *et al.*, 2021）。例えば、コールドウェイク上では海洋から大気への熱や水蒸気の供給が少ないため、しばしば熱帯擾乱の発達抑制/弱化が見られる。そのため、コールドウェイクの形成やそれによる後続熱帯擾乱へのフィードバックといった、表層海洋と熱帯擾乱の相互作用について理解することは、熱帯擾乱の予測精度向上につながる重要な課題である。

北西太平洋でも、台風によるコールドウェイクの形成が数多く報告されている（例えば Sakaida *et al.*, 1998 や Sun *et al.*, 2015）。ところが、高海面水温が特徴の黒潮域も台風通過時に他の海域と同じように冷えるのか否かについては、まだよくわかっていない。黒潮域の水温低下は他の海域と比べて小さい傾向にあるとも言われているが（例えば Lin & Wei, 2015）、事例数や観測データの時空間解像度が十分でなく、必ずしも十分に理解されているとは言えない。また、黒潮域の海面水温低下が周囲に比べて小さいとした先行研究でも、そうした黒潮域の特徴による後続台風への影響については議論されていない。

2018年の8月下旬から9月上旬にかけて、3つの台風（SOULIK, CIMARON, JEBI）が黒潮域を続けて通過した（図1）。短期間に複数の台風が

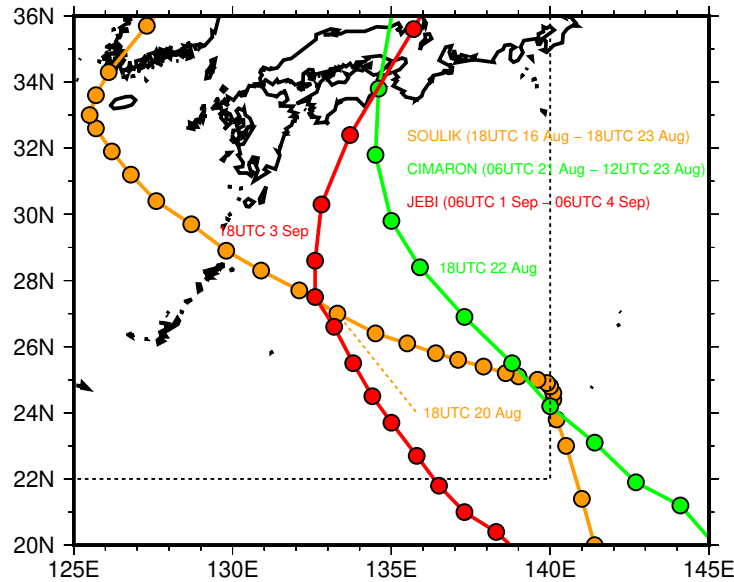


図1 気象庁のベストトラックデータに基づく2018年夏季に日本付近を通過した台風SOULIK (橙), CIMARON (緑) およびJEBI (赤) の経路。丸印は、6時間毎の位置を表している。図中には、各台風が北緯20–36度、東経125–145度の領域内に位置した期間も表示している。破線は、この調査の解析対象海域を示している。

通過したこの事例は、「(1) 台風による海面水温場への影響」と「(2) 台風の影響を受けた海面水温場による後続台風への影響」の両方を調べるのに適している。そこで本稿では、Kawakami *et al.* (2022) の内容をもとに、これら3つの台風の事例から、「(1) SOULIK と CIMARON が黒潮域を含めた日本近海の海面水温場に与えた影響」と「(2) それら台風の影響を受けた海面水温場が後続した JEBI やその周辺大気に与えた影響」について議論する。

2. 大気海洋結合モデル実験

これまで、大気海洋結合モデルは主に長期（季節～）の大気・海洋現象の予測や調査に利用されてきた。ところが、近年は短期・中期（～10日）の予測においても大気海洋結合モデルが使われるようになり、その有用性が広く認められつつある（例えば Mogensen *et al.*, 2017）。気象庁気象研究所（以下、気象研究所）でも、高解像度の大気海

洋結合モデルの開発を行っており、短期・中期予測への有効性を調べている（気象研究所の経常研究「地球システム・海洋モデリングに関する研究」：https://www.mri-jma.go.jp/Research/project/M/M_2019-2023.html）。現時点では、気象庁の短期予報や週間予報の現業に大気海洋結合モデルの導入を計画する段階には至っていないものの、気象研究所のこの取り組みは将来を見据えたフィージビリティスタディの一環である。

気象研究所で開発する高解像度の大気海洋結合モデルは、大気モデルに気象研究所全球大気モデル(MRI-AGCM)バージョン4(以下、MRI-AGCM4)を用いている。MRI-AGCM4は、2017年5月から気象庁で現業利用されていた全球モデル(GSM1705; Yonehara *et al.*, 2018; Japan Meteorological Agency, 2019)がベースになっている。鉛直層数は100で、モデルトップは0.01 hPaである。海洋モデルには、気象研究所共用海洋モデル(MRI.COM)バージョン4(MRI.COM4; Tsujino

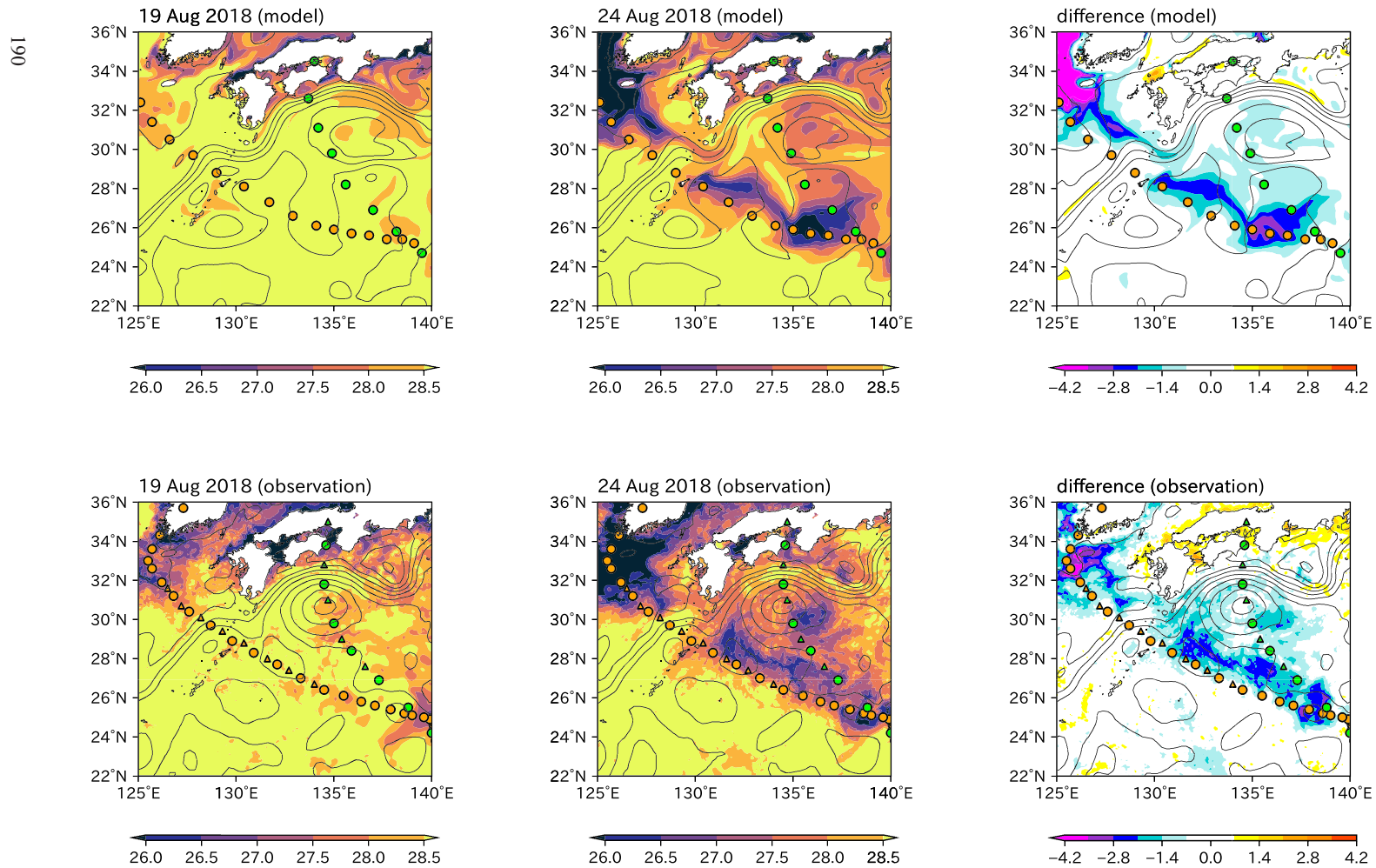


図2 (上段) モデル (Hi-Hi実験) と (下段) 衛星観測による (左) 2018年8月19日と (中) 8月24日の海面水温 (°C) および (右) その差分. 等値線は海面高度 (cm) の分布を表す (20 cm間隔). 橙と緑の丸印は, SOULIKとCIMARONの6時間毎の位置をそれぞれ表す. 衛星観測の図では, 一部3時間毎の台風位置が三角印で示されている.

et al., 2017) を使用している。MRI.COM4 の鉛直総数は 60 で、層厚は深い層ほど大きい (例えば、最上層厚は 2 m で最下層厚は 700 m)。これら二つのモデルを、気象研究所で開発したカップラー (Scup; Yoshimura & Yukimoto, 2008) で結合している。

大気・海洋の両モデルについて、それぞれ 2 種類の水平解像度を準備している (MRI-AGCM4 は約 10 km と約 55 km, MRI.COM4 は約 10 km と約 100 km)。高解像度 (Hi) のモデル同士を用いて行う実験 (Hi (大気)-Hi (海洋) 実験と呼ぶ) から現象の再現性やメカニズムを調べつつ、低解像度 (Lo) のモデルも用いた実験 (Hi-Lo 実験, Lo-Hi 実験, Lo-Lo 実験) で予測精度の水平解像度依存性も確認できるようになっている。また、別途大気モデル単体の実験も行い、海洋結合による効果についても評価を行うこととしている。大気モデルの初期値には気象庁の 6 時間毎の全球解析を用いており、海洋モデルの初期値は Toyoda *et al.* (2021) のデータ同手法で作成している。

現在、気象研究所では上記の大気海洋結合モデルについて精度評価を行っているところであるが (Shindo *et al.*, in prep.), 並行して実験結果を用いた大気・海洋現象の調査も進めている (例えば Toyoda *et al.*, under review)。本稿では、その一例として黒潮域における台風通過時の海面水温変化に関する調査 (Kawakami *et al.*, 2022) の概要を紹介する。

3. SOULIK および CIMARON の通過時の海面水温変化

8 月 19 日の 00 UTC を初期値とした 11 日間の実験から、SOULIK と CIMARON が黒潮域を含めた日本近海の海面水温場に与えた影響を調査した。なお、この数値実験が SOULIK や CIMARON の強度や経路をある程度妥当に再現していることは事前に確認してある。SOULIK と CIMARON が日本に接近する前 (8 月 19 日) と通過した後 (8 月 24 日) とで海面水温の分布を比べると、台風通過後はそれら台風の経路に沿って海面水温が広く低下

していた (図 2)。太平洋域では、最大でおよそ 3.5 °C の水温低下が見られる。一方で、黒潮域の水温低下は最大でも 1.5 °C 程度と周囲に比べてかなり小さかった。この特徴は、モデル実験の結果だけでなく、衛星海面水温観測からも確認された。

次に、なぜ黒潮域では他の海域に比べて海面水温の低下が小さいのかを理解するために、台風通過時の混合層熱収支解析を行った。台風の通過時に海面水温が低下する主な要因としては、海洋表層中の鉛直混合、湧昇流 (冷たい亜表層海水の移流)、および熱フラックスの 3 つが考えられる。熱収支解析の結果、鉛直混合が支配的なプロセスであることがわかった (図 3)。鉛直混合を表す鉛直拡散項 (図 3e) が、混合層の水温低下全体 (図 3a) を凡そ説明している。湧昇流も台風の経路に沿って発生していたが (図 3c の橙線)、その混合層水温への寄与は小さかった (図 3c)。

黒潮域に注目すると、鉛直混合による混合層水温への影響が非常に小さくなっていた (図 3e)。つまり、黒潮域では鉛直混合による混合層の冷却が効きにくく、その結果として台風通過時の水温低下が他の海域に比べて小さかった。黒潮域において鉛直混合による冷却効果が弱いのは、海洋内部の水温構造による。黒潮域では、他の海域に比べて鉛直方向の水温勾配が緩やかなために混合層水温が鉛直混合に対して比較的鈍感であることが、さらなる解析によって確認された。

暖流である黒潮の周辺では、水平方向の熱移流が水温に大きな影響を与えていることから、黒潮による熱輸送が台風通過時の海面水温低下を緩和している可能性も考えられる。しかしながら、混合層の熱収支解析によると、水平熱移流の影響は小さい (図 3b)。よって、黒潮域の台風通過時の海面水温低下が周囲に比べて小さいのは、黒潮の熱移流によって海面水温低下がある程度打ち消されているからではなく、海洋内部の水温構造が鉛直混合による冷却の効果を和らげているためであると言える。ただし、台風通過後の海面水温の回復についてみてみると、水平移流項の寄与が最も大きく、黒潮による熱移流が重要な役割を果たして

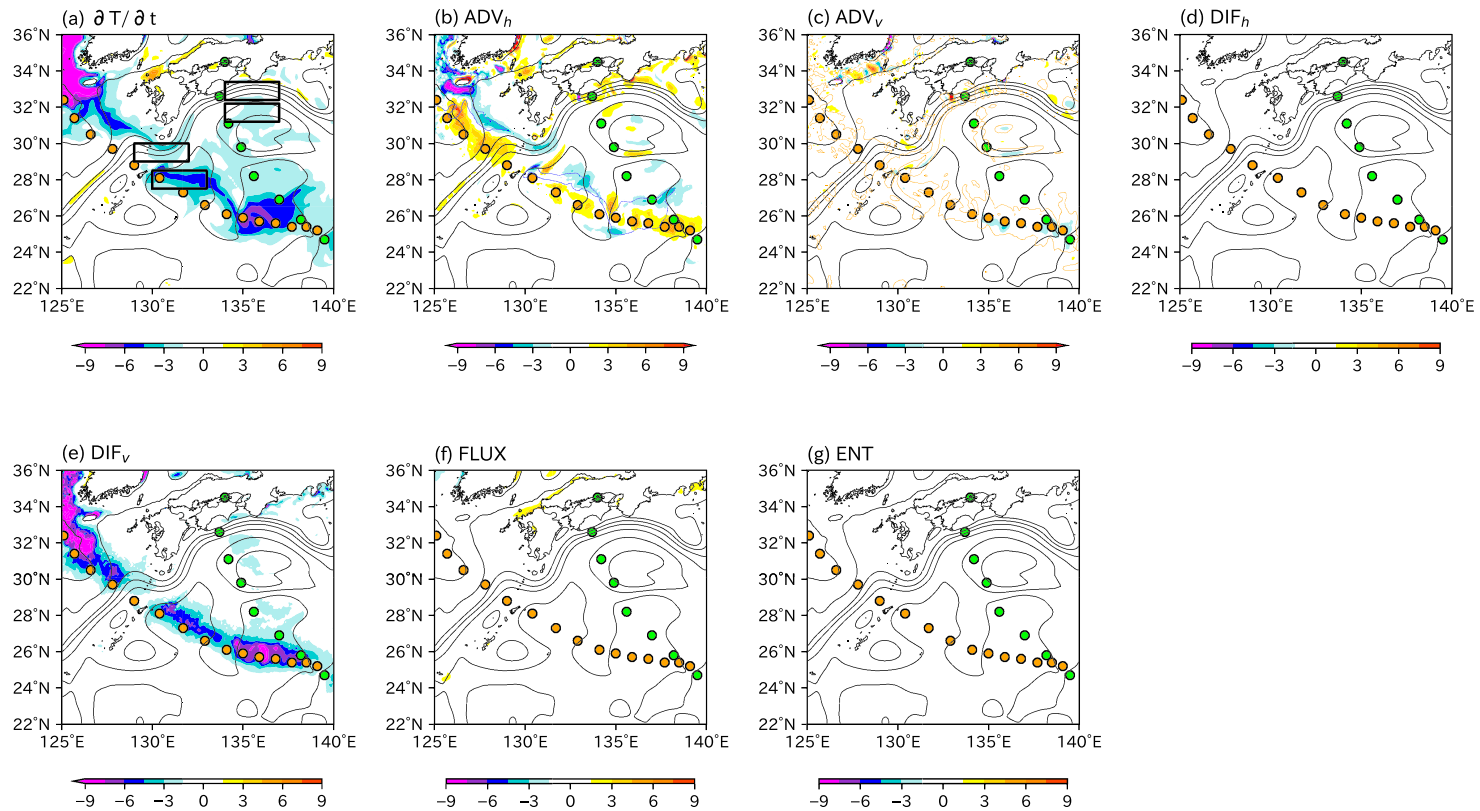


図3 2018年8月19日から8月24日にかけての混合層熱収支 ($10^6 \text{ } ^\circ\text{C s}^{-1}$). それぞれのパネルは, (a) 水温変化項, (b) 水平移流項, (c) 鉛直移流項, (d) 水平拡散項, (e) 鉛直拡散項, (f) 熱フラックス項, および (g) エントレインメント項を表している. 等値線は, 海面高度 (cm) を表している (20 cm間隔). パネル (b) の青線は, 水温変化項 (パネル (a)) の $-4.5 \times 10^6 \text{ } ^\circ\text{C s}^{-1}$ の等値線を表している. パネル (c) の橙線は, 上向き鉛直流速 $20 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ の等値線を表している. 橙と緑の丸印は, SOULIKとCIMARONの6時間毎の位置をそれぞれ表す. (a) の図に示してある矩形は, S1域 (黒潮域, 北緯29–30度, 東経129–132度), S2域 (黒潮の南, 北緯27.5–28.5度, 東経130–133度), C1域 (黒潮域, 北緯32.4–33.4度, 東経134–137度) およびC2域 (黒潮の南, 北緯31.2–32.2度, 東経134–137度) を表している.

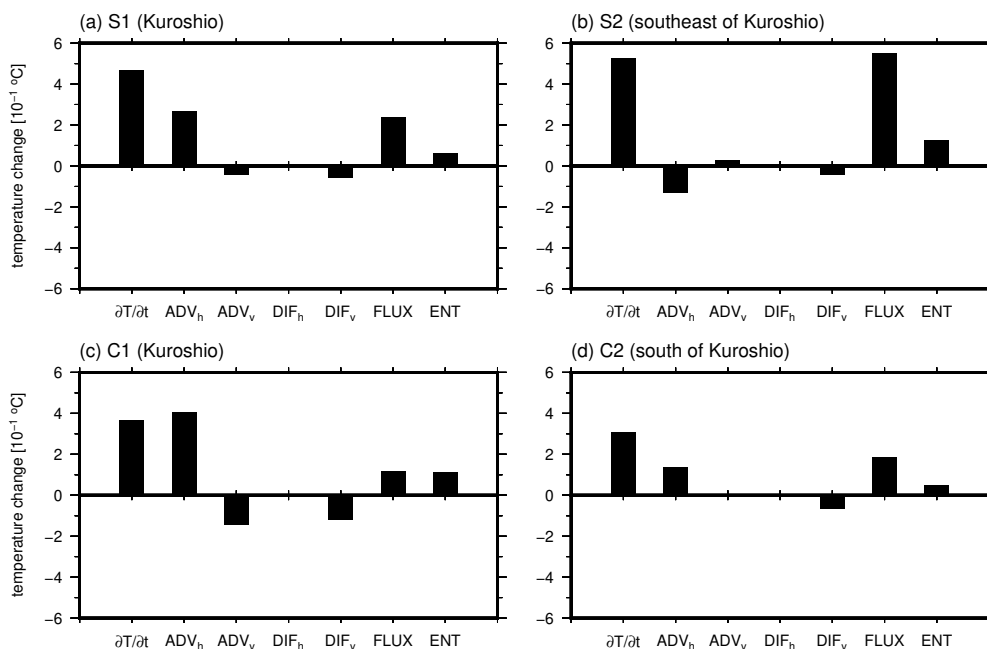


図4 台風通過後3日間の混合層熱収支の積算値 ($10^{-1} \text{ }^\circ\text{C}$). 左から順に、水温変化項, 水平移流項, 鉛直移流項, 水平拡散項, 鉛直拡散項, 熱フラックス項, およびエントレインメント項を表す. それぞれのパネルは, 図3に示されてる (a) S1 域, (b) S2 域, (c) C1 域, および (d) C2 域を表している.

いた (図4). これは、熱フラックスによる寄与が最も大きいという黒潮から離れた海域とは対照的な特徴である.

上記のように、黒潮域の台風通過時/台風通過後の応答は、他の海域とは異なる特徴を持っている. 最後に、こうした黒潮域の特徴的な応答について、モデル解像度による再現性の違いを調べた (図5). その結果、黒潮域が他の海域に比べて冷えにくいという特徴をよりよく再現するためには、大気モデルと海洋モデルの両方が高解像度であることが必要であるとわかった. 高解像度の海洋モデルと結合することで初めて表現できる現象があることを示した本調査は、今後の短期予測の精度向上に役立つ基礎的な知見になると期待される.

4. SOULIK および CIMARON による水温場が JEBI に与えた影響

9月1日の00 UTCを初期値とした11日間の実験から、先行して通過したSOULIKとCIMARON

の影響を受けた海面水温場がJEBIやその周辺大気に与えた影響を調べた. JEBIは北緯28度、東経133度付近にSOULIKが作ったコールドウェイク (図2) を通って北上したが (図1参照), そうした経路はこの数値実験でよく再現されていた. 一方で、JEBIの強度は再現されなかった. そのため、ここでは海面水温場とJEBIの強度の関係については議論せず、JEBI周辺の大気への影響に注目する.

JEBI周辺の乱流熱フラックス (潜熱フラックスと顕熱フラックスの合計) を調べると、これは海面水温の分布をよく反映することがわかった. 乱流熱フラックスは、海面水温が低下したコールドウェイク上では小さく、暖かく維持された黒潮近傍では大きくなっていった (図6). また、JEBI周辺の降水量についても調べたところ、コールドウェイク上では少なく、黒潮近傍では多くなっていった. このことから、台風通過時にも温かく維持される黒潮域は、熱や水蒸気の供給を通して後続台風に影響を与えることが示唆される.

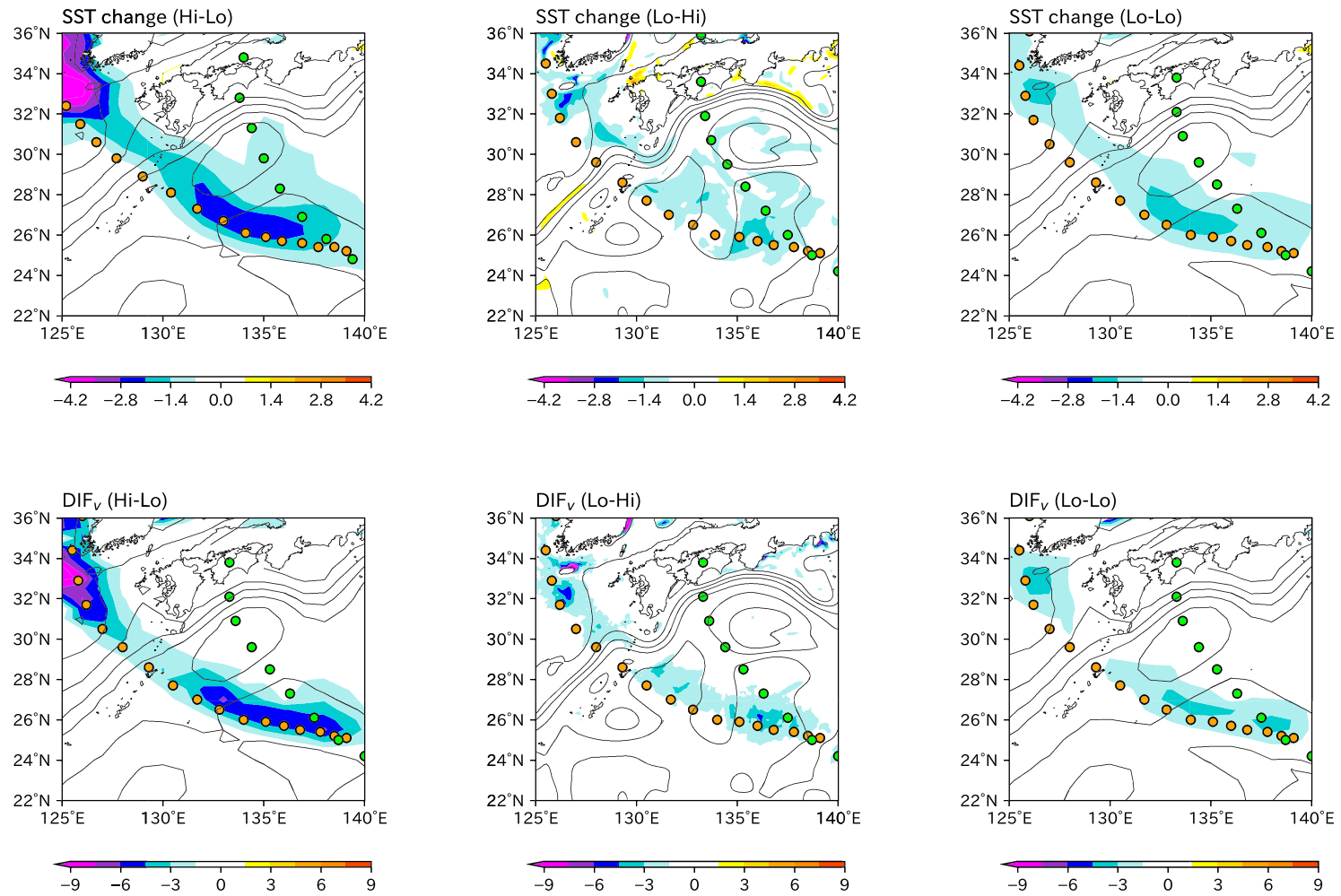


図5 (左) Hi-Lo実験, (中) Lo-Hi実験, および (右) Lo-Lo実験に基づく, (上段) 2018年8月19日と8月24日の海面水温の差分 (°C) と (下段) 図3の(e)と同様の図.

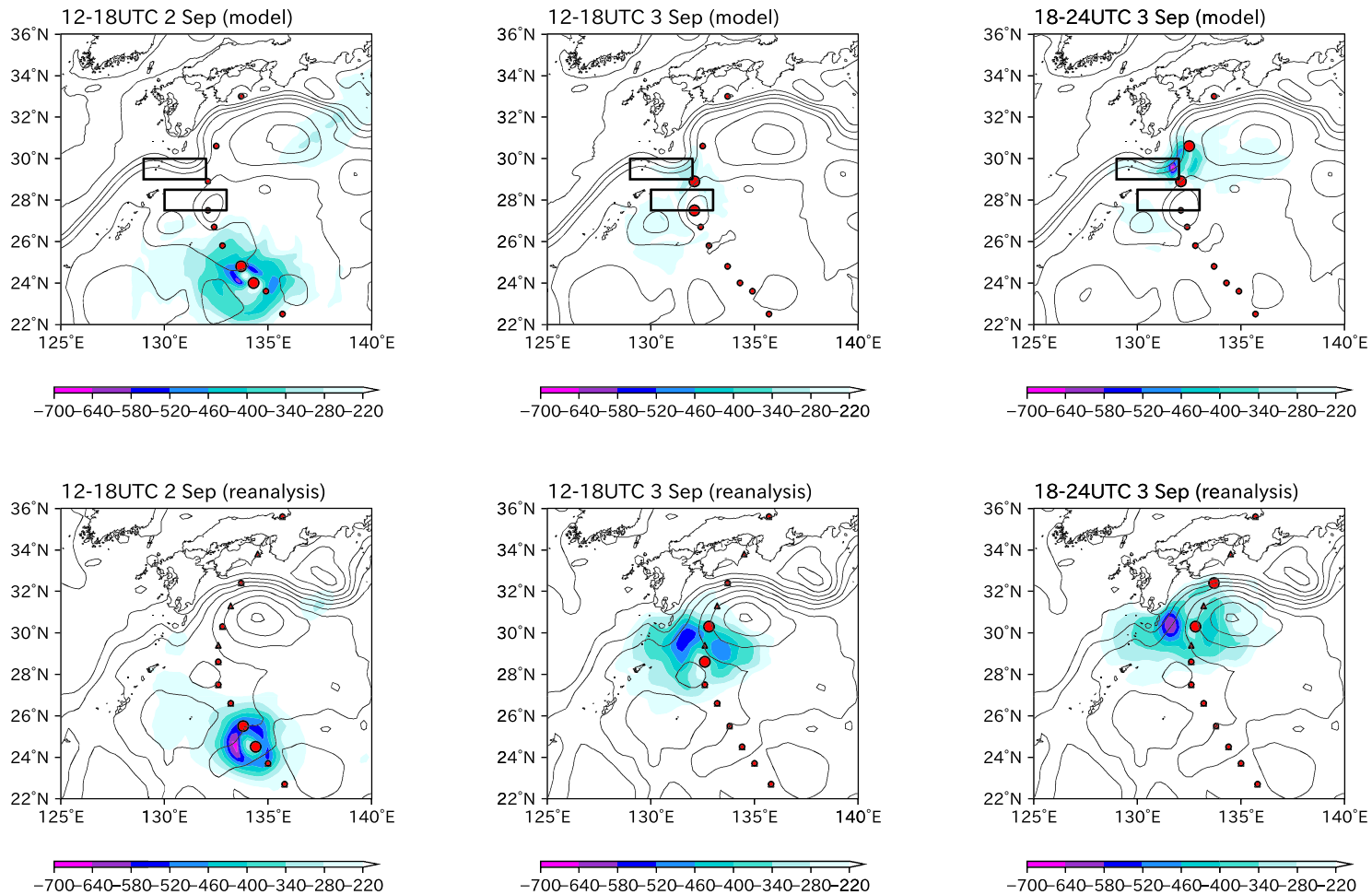


図6 (上段) モデル (Hi-Hi実験) と (下段) 再解析データに基づく (左) 9月2日 12-18UTC, (中) 9月3日 12-18UTC, および (右) 9月3日 18-24UTCの平均乱流熱フラックス($W m^{-2}$). 等値線は海面高度(cm)を表す (20 cm間隔). 乱流熱フラックスは, 負値が海洋からの熱放出を意味する. 赤丸印は, 6時間毎のJEBIの位置を表す. 各パネルの大きな赤丸印は, 9月2日 12-18 UTC, 9月3日の 12-18UTC, および 9月3日 18-24 UTCの JEBIの位置を表す. 再解析データに基づく図 (下段) には, ベストトラックデータから得た3時間毎のJEBIの位置を三角印で示している. 上段の図中の矩形は, 図3に示されているS1域およびS2域を表している.

5. まとめ

本稿では、気象研究所の大気海洋結合モデルに関する取り組みと、その数値実験の結果を用いた海洋—台風間の相互作用に関する調査を紹介した。気象研究所で開発した高解像度の大気海洋結合モデルによる実験から、黒潮域では台風通過時の海面水温低下が亜熱帯循環内の他の海域に比べて小さいことを示した。また、混合層熱収支解析を行った結果、黒潮が冷えにくいのは、黒潮域における海洋内部の緩やかな鉛直水温勾配が鉛直混合による冷却の効果を緩和するためであることが明らかになった。黒潮による熱輸送の影響についても調べた結果、台風による海面冷却を緩和する効果は小さかったが、台風通過後の海面水温回復には重要な役割を果たしていることがわかった。さらに、台風通過時も海面水温が高く維持されるという黒潮域の特徴は、熱や水蒸気の供給を通して後続台風に影響し得ることが示唆された。

本調査から、高解像度の大気海洋結合モデルを用いることの重要性が指摘された。台風通過時も海面水温が高く維持されるという黒潮域の特徴は、高解像度の大気海洋結合モデルを使うことで初めて十分に扱えるようになることが、水平解像度の異なる大気モデル・海洋モデルを用いた実験との比較から明らかになった。本稿で紹介した大気海洋結合モデルの仕様や調査・解析の詳細については、関連資料 (Kawakami *et al.*, 2022 : オープンアクセス) に記述してあるので、そちらを参照されたい。

参考文献

- [1] Japan Meteorological Agency (JMA). (2019). Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency. Appendix to WMO technical progress report on the global data-processing and forecasting system and numerical weather prediction 229.
- [2] Karnauskas, K. B., Zhang, L., & Emanuel, K. A. (2021). The feedback of cold wakes of tropical cyclones. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091676.
- [3] Kawakami, Y., Nakano, H., Urakawa, L. S., Toyoda, T., Sakamoto, K., Yoshimura, H., Shindo, E., & Yamanaka, G. (2022). Interactions between ocean and successive typhoons in the Kuroshio region in 2018 in atmosphere-ocean coupled model simulations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127, e2021JC018203.
- [4] Leipper, D. F. (1967). Observed ocean conditions and hurricane Hilda, 1964. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 24, 182-186.
- [5] Liu, X., & Wei, J. (2015). Understanding surface and subsurface temperature changes induced by tropical cyclones in the Kuroshio. *Ocean Dynamics*, 65, 1017-1027.
- [6] Mogensen, K. S., Magnusson, L., & Bidlot, J. R. (2017). Tropical cyclone sensitivity to ocean coupling in the ECMWF. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122, 4392-4412.
- [7] Sakaida, F., Kawamura, H., & Toba, Y. (1998). Sea surface cooling caused by typhoons in the Tohoku Area in August 1989. *Journal of Geophysical Research*, 103, 1053-1065.
- [8] Schade, L. R., & Emanuel, K. A. (1999). The ocean's effect on the intensity of tropical cyclones: Results from a coupled atmosphere-ocean model. *Journal of Atmospheric Science*, 56, 642-651.
- [9] Stramma, L., Cornillon, P., & Price, J. F. (1986). Satellite observations of sea surface cooling by hurricanes. *Journal of Geophysical Research*, 91, 5031-5035.
- [10] Sun, J., Oey, L. Y., Chang, R., Xu, F., & Huang, S. M. (2015). Ocean response to typhoon Nuri (2008) in Western Pacific and South China sea. *Ocean Dynamics*, 65, 735-749.
- [11] Toyoda, T., Nakano, H., Aiki, H., Ogata, T., Fukutomi, Y., Kanno, Y., *et al.* (2021). Energy flow diagnosis of ENSO from an ocean reanalysis. *Journal of Climate*, 34, 4023-4042.
- [12] Toyoda, T., Urakawa, L. S., Aiki, H., Nakano, H., Shindo, E., Yoshimura, H., Kawakami, Y., Sakamoto, K., Yamakami, A., Ushijima, Y., Harada, Y., Kobayashi, C., Tomita, H., Tozuka, T., & Yamanaka, G. (TBD). Evolution of tropical instability waves resolved in coupled atmosphere-ocean predictions. under review.
- [13] Tsujino, H., Nakano, H., Sakamoto, K., Urakawa, S., Hirabara, M., Ishizaki, H., & Yamanaka, G. (2017). Reference manual for the Meteorological Research Institute Community Ocean model version 4 (p. 80). Technical Report of Meteorological Research Institute.
- [14] Yonehara, H., Sekiguchi, R., Kanehama, T., Saitou, K., Kinami, T., Shimokobe, A., *et al.* (2018). Upgrade of JMA's operational global NWP system. CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling, 48, 4.17-4.18.
- [15] Yoshimura, H., & Yukimoto, S. (2008). Development of a simple coupler (Scup) for Earth system modeling. *Papers in Meteorology and Geophysics*, 59, 19-29.

