

Faxai(2019)および Hagibis(2019)による海面水温低下の解析 Analysis of sea surface temperature decreases by Faxai and Hagibis

飯田康生^{*1,2}, 筆保弘徳^{*1}, 田中裕介^{*2}, 飯塚聡^{*3}, 宮本佳明^{*4}

Koki IIDA, Hironori FUDEYASU, Yuusuke TANAKA, Satoshi IIZUKA, Yoshiaki MIYAMOTO

Typhoons Faxai and Hagibis in 2019 caused severe damages over the eastern Japan islands. Although these two typhoons had relatively similar tracks with similar moving speed over the western North Pacific, but the amount of sea surface temperature (SST) decreases caused by the heavy winds associated with Faxai and Hagibis were quite different between two typhoons. Using ocean calculated it a high-resolution ocean model and meteorologic GPV data, we estimated the cooling parameter (C_o) to evaluate the effect of the oceans and the typhoon characters on the SST decreases. This study applied C_o to the real typhoon and found that C_o and Δ SST are corresponding. Therefore, it is suggested that it is able to express Δ SST using C_o . The correspondence between C_o and Δ SST suggests that not only ocean conditions such as OHC and TCHP but also Typhoon characteristics are sufficiently important for ocean cooling associated with typhoon passage, since C_o includes typhoon characteristics. In particular, the moving speed and the size of the typhoon. Therefore, we believe that C_o is useful for estimating the SST decreases in a simple way, even if the target is a real typhoon.

1. はじめに

2019年台風15号Faxaiおよび台風19号Hagibisは、ともに関東に上陸し、日本に大きな被害を与えた。気象庁のベストトラックデータによると、Faxaiは最大風速85knotで、Hagibisは105knot、水平サイズを示すR15の最大は、それぞれ330kmと750kmである。つまり、Hagibisの方が、強度はやや強く、サイズは2倍も大きい。Faxaiは9月上旬、Hagibisは10月上旬と比較的に同じ季節で同じ海域をよく似た経路で日本に接近している(図1)。それにもかかわらず、台風通過後の海面水温(SST)の低下は大きな違いがあった。これは台風の特徴の違いからFaxaiとHagibisによる海への影響は大きく異なっていると仮説が立てられる。

台風はSSTが高いほど台風は水蒸気流入を経て発達する(例えばEmanuel, 1986)。しかし、台風通過時には短時間でSSTが低下することも観測により知られている(Price, 1981; Ginis, 1995)。台風通過に伴うSST低下には、海水が台風の強風により鉛直方向にかき混ぜられ、深い海水ほど冷たいた

めSSTが低下する1次元の応答と、海洋表層における流れの影響があり、3次元の応答がある(Price, 1981; Yablonsky and Ginis, 2009; Suzuki et al., 2011)。

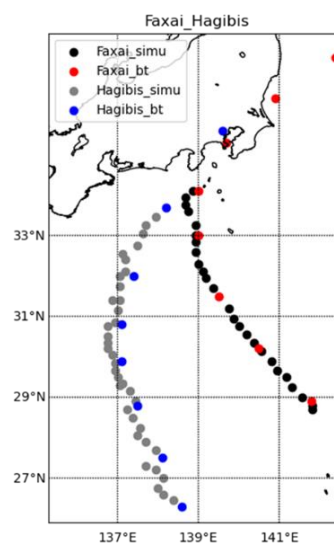


図1 : (a)Faxai と Hagibis における気象庁ベストトラック (黒・グレー) と中心検出トラック (赤・青) の比較. またこの領域が海洋モデルの計算領域となる。

*1 横浜国立大学 iida-koki-br@ynu.jp

Faculty of Education, Yokohama National University

*2 海洋研究開発機構

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

*3 防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

*4 慶応義塾大学環境情報学部

Faculty of Environment and Information Studies, Keio University

他には影響は大きくないが、降水による SST 低下もある (Yu and Subrahmanyam, 2017). この台風通過に伴う短時間での SST 低下は、結果的にその台風の構造変化への影響や、強度の発達を抑制し、弱体化することにつながる (Wada, 2007; Wada et al., 2010; Soloviev et al., 2017 など). 台風の発達予測をするうえでは、海が大気に水蒸気をわたすことと同時に、台風が海洋を冷やす効果を双方向的に理解することが重要となる。

海洋から台風強度への影響度合いを示す指標については、海洋熱容量 (OHC) がある。また、Leipper and Volgenau (1972) は 26°C 以上の海水が持つ熱容量を台風に関する潜在的な熱量、つまり海洋貯熱量 (TCHP) も指標とされる。これらの OHC や TCHP はどちらも海洋の状態から見積もられた海洋から台風強度への影響度合いを示すことが可能な指標であるが、一方で、台風から海洋への影響度合いを示す指標はなく、Miyamoto et al.(2017)のクーリングパラメータがその候補となる。Miyamoto et al.(2017) は、MPI(Emanuel)の精度を改良するために、クーリングパラメータ (C_o) を提案した。この C_o は、理論的に海洋状態による影響と台風の特徴 (最大風速、サイズ、移動速度) の影響で海洋をかき混ぜる効果による SST 低下を引き起こす量を示した無次元数である。この C_o では、台風の最大風速・サイズが大きいほど、移動速度が遅いほど大きな値を示し海洋をかき混ぜる効果が大きい。つまり、 C_o はそれぞれの特徴を持った台風と海洋状態を考慮することで、台風が SST をどのくらい低下させられるかを示している。しかし、Miyamoto et al.(2017)は C_o を MPI の精度向上の目的で開発したもので、理想場における台風のみで検証にとどまっており、まだ実際の台風や海洋データに C_o を適用したことはない。

そこで本研究は、現実の台風である Faxai(2019)と Hagibis(2019)の通過に伴う SST 低下の違いを、高解像度海洋モデルと C_o を用いて定量的に明らかにする。特に、 C_o における台風の特徴と海洋状態を分離して、実際の SST 低下にどの程度に影響しているのかを示すことを目的とする。

2. 解析手法

2.1. 海洋モデル

本研究の目的は時間スケールの小さい SST 変化と、海洋の詳細な温度分布が必要であるため、観

測結果や再解析データではなく、高解像度海洋モデルの結果を用いる。海洋モデルは、気象庁気象研究所が開発する海洋大循環モデル MRI.COM Ver.4.7(Tsujino et al., 2017)をベースとして田中ほか (2018) で開発されたモデルと異なる海域の東日本太平洋沿岸モデル (ICTKSMW) を用いている。このモデルの計算領域は、北緯 25.99746° ~ 37.98606° 、東経 135.3167° ~ 142.54° (図 1)、解像度は、水平 $1/60 \times 1/60$ ($\sim 1.85 \text{ km}$)、鉛直 35 層 ($0.25 \sim 5825 \text{ m}$) という高解像度モデルである。潮汐モデル (Sakamoto et al., 2013) が組み込まれており、主要 8 分潮の潮汐力によって駆動する。側面境界条件は、MOVE-3DVAR (Usui et al., 2006) をもとにした気象庁による北西太平洋の解析値と、NAO.99Jb (Matsumoto et al. 2000) による潮汐成分 (海面高度、順圧流速) を与えた。海面境界条件には、Meso-Scale Model (MSM) による風速 (10 m)、海面圧力、大気温 (1.5 m)、比湿 (1.5 m)、下向き短波放射、降水を hourly で、JRA-55 による下向き長波放射を 3hourly で与えている。海面フラックスにおけるバルク式として Large and Yeager (2004, 2009)、混合層モデルとして Noh and Kim (1999) を用いた。海洋データを 225 m までを 1 m ごとに内挿した水温データを用いた。

2.2. クーリングパラメータ

Miyamoto et al. (2017) が提案した C_o は、式(1)のように台風が海洋を 1 次元的に混合させる効果の度合い (台風の特徴 (台風項) : typhoon characteristics) と海洋の混ざりにくさ (海洋の状態 (海洋項) : ocean conditions) の比で表された、大気場と海の状態から、SST がどの程度冷えるかを示す無次元の指標である。 C_o は水平移流や湧昇の効果を含まない 1 次元的応答に適用したものであるため、3 次元的応答は考慮していない指標であることに注意したい。

C_o の分子である typhoon characteristics は、台風ごとのパラメータとして、風速 15 m 半径 (R15)、最大風速半径 (RMW)、最大風速 (Vm)、台風の移動速度が含まれる (式(2) (3) (4))。最大風速は約 4 乗、移動速度は -2 乗で効いている。R15 や RMW は台風の大きさを表す λ に含まれ、 λ は 2 乗で効いている。一方で C_o の分母である ocean conditions 海洋の状態を表す分母には、混合層の厚さと混合層下の水温勾配が含まれる。混合層の厚さは 4 乗で効く。

$$C_o = \frac{2F_{ms0}^2(\lambda/vt)^2}{\rho^2 \alpha g \Gamma h_0^4} \quad (1)$$

ここで F_{ms0} は表面での運動量フラックス, λ/vt は混合時間スケール (λ : R15, RMW, Vm が含まれる. vt : 台風の移動速度), ρ は水の密度, g は重力加速度, α は熱拡散係数, Γ は混合層下の水温減率, h_0 は混合層の深さである. F_{ms0} , λ は次のように表される.

$$F_{ms0} = \rho_a \times C_d \times V_m^2 \quad (2)$$

ここで ρ_a は大気密度 (1.3 km/m^3),
 C_d は交換係数 (2.5×10^3) である.

$$\begin{aligned} \lambda = & \left(\frac{r_m}{r_0}\right)^{2\beta} \times (r_0^2 - r_m^2)^{0.5} \\ & + 2.0\beta \left(\frac{r_m}{r_0}\right)^{2\beta} \\ & \times \left(\left(-r_0/(2\beta - 1)\right) + r_m^2/r_0/(4\beta + 2) \right. \\ & \left. + r_m^4/r_0^3/(16\beta + 24) \right) + 2.0\beta r_m(1/(2\beta - 1) \\ & - 1/(4\beta + 2) - 1/(16\beta + 24)) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\beta = \log\left(\frac{15.433}{V_m}\right) / \log\left(\frac{r_m}{r_{15}}\right) \quad (4)$$

ここで r_m は RMW, r_{15} は R15, r_0 は最も外側の半径 ($600 \times 10^3 \text{ m}$) である.

台風の位置や特徴を示すデータとして, 6 時間ごとの気象庁ベストトラックを用いずに, MSM のデータから 1 時間間隔の R15, RMW, Vm を検出して用いる. 検出方法は Wang(2007)にならい, 軸対称平均接線風が最大となる渦の中心検出した. R15やRMWは, 軸対称平均接線風を用いている.

C_o の ocean conditions は海洋モデルの結果を用いた. 計算時間は, 台風が接近する点におけるそれぞれの 24 時間前の海洋状態を用いた (基準). 直前のデータは, 台風の影響を受けた海洋状態をとるために用いない. SST 低下量 (ΔSST) は海洋モデルの基準とした時間から台風通過後 12 時間後の水温差と定義した. つまり, 台風通過 24 時間前と 12 時間後を合わせた 36 時間での SST 変化となる.

本研究では, Faxai は 9 月 7 日 12 時 (UTC) Hagibis は 10 月 11 日 6 時 (UTC) から 24 時間後までのおよそ北緯 29~34°を解析対象とし, それぞれ全 25 点の台風中心に対して C_o の計算を行った. 各時刻の台風中心から, 2°の四方範囲で 16 点を平均し, 詳細な解析を行った.

3. 結果

図 2 は台風通過に伴う SST 低下の違いを示すために, 台風通過前後の ΔSST を示している. 海洋モデルにおける妥当性の検討として, ひまわり 8 号による衛星観測データを用いた. その結果, ΔSST が大きい領域は衛星観測データと海洋モデル結果はおおよそ対応していることがわかる. また, Faxai に着目すると Price(1981) で言及されるように台風進行方向左右で非対称性が確認でき, トラックにそって海洋が冷やされている. それに対して Hagibis は台風の左右関係なく広い範囲で ΔSST が低下しており, Hagibis の方が Faxai より広い範囲の海洋に影響していることもわかる.

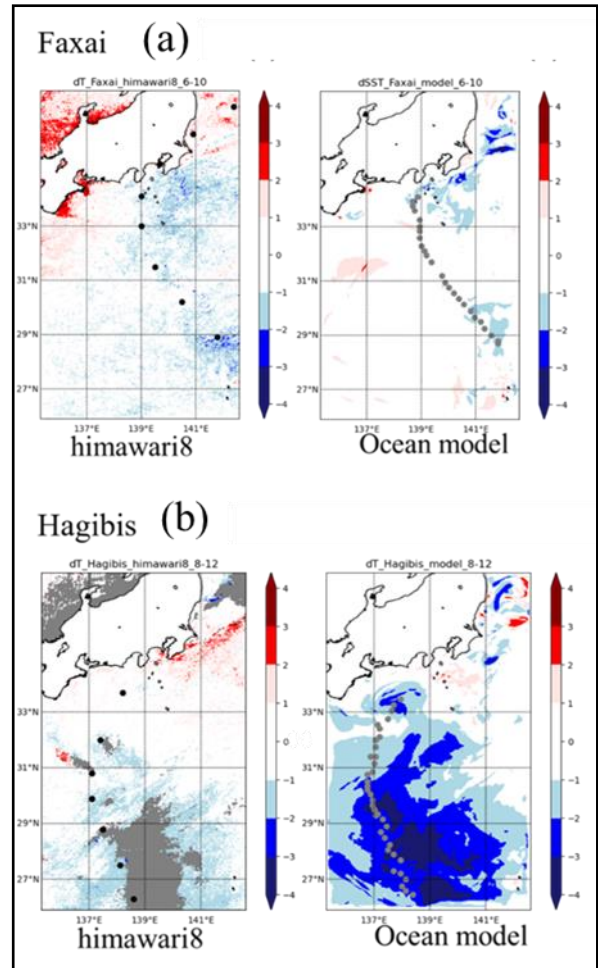


図 2 : Faxai (a) と Hagibis (b) における衛星観測と海洋モデルによる ΔSST の比較.

Faxai については 9 月 6 日と 9 月 10

日, Hagibis については 10 月 8 日と 12 日における SST の差をとったものである.

図3は台風通過に伴う海面水温の変化を海洋内部のどの深さまで影響があるかを示した図である。FaxaiとHagibisともに台風の右側でよく冷えているがHagibisは左側でも水温が低下しており、

Faxaiより水平方向に広い範囲を冷やしている。また鉛直方向に着目すると、Faxaiは50mより浅いところまで、Hagibisは50m以上の深さまで影響し混合している。

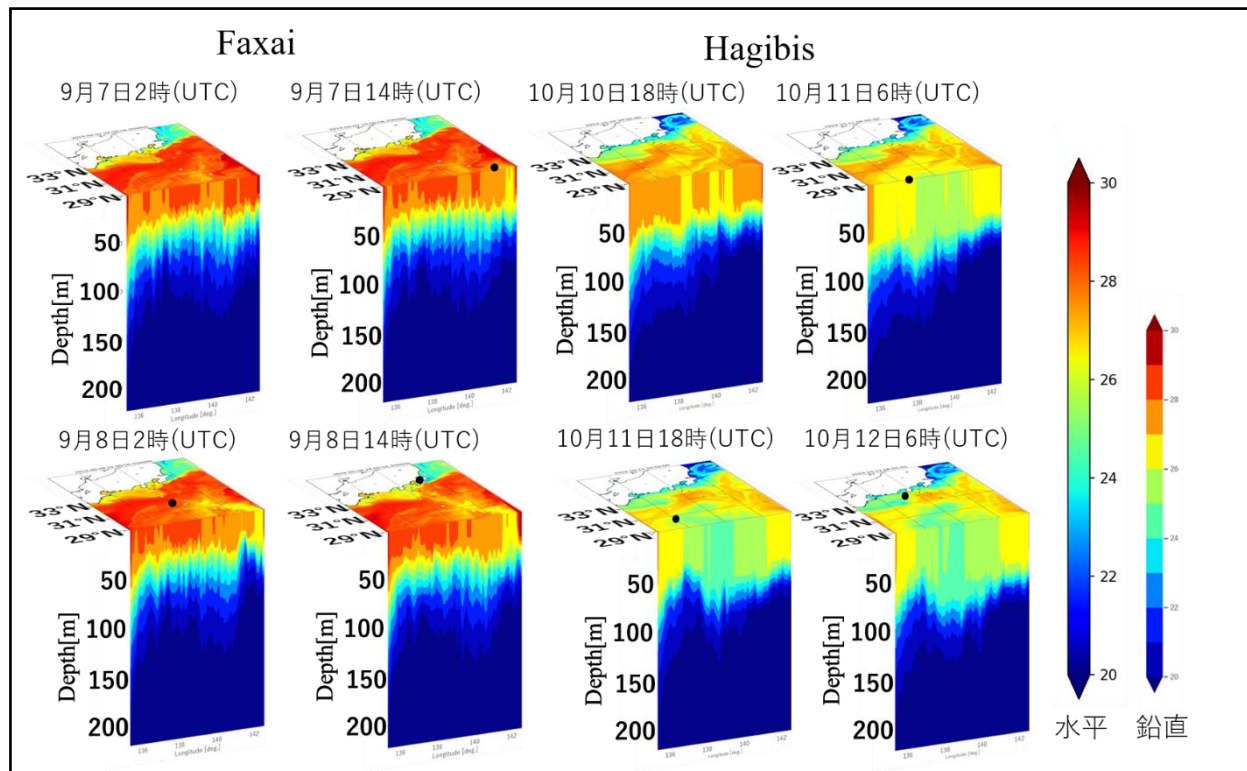


図3：FaxaiとHagibisの通過に伴うSST低下と北緯29°における水深225mまでの水温変化。北緯29°に台風が通過する時間から12時間前、12時間後24時間後を示している。

FaxaiとHagibisについて解析対象の北緯29～34°をそれぞれ全25点の台風中心に対して C_o の計算を行い、それぞれの地点における ΔSST を算出した。その C_o と ΔSST 関係を図4に示す。その結果、 C_o は ΔSST とおおよそ比例関係にあり、そのFaxaiとHagibisそれぞれの近似曲線の傾きはほぼ同じである。 C_o が高いほど、 ΔSST が大きくなっている傾向がみられる。Faxaiに着目すると、 C_o が3以下の値に集中しているのに対して、Hagibisは広い範囲に分布している。 C_o の標準偏差は、Faxaiは0.7、Hagibisは7.5で、Hagibisの方が10倍ばらつきは大きい。また平均値を見るとFaxaiは1.6、Hagibisは3.6と2.25倍Hagibisの方が大きい。 ΔSST の平均値について、Faxaiは0.9°C、Hagibisは1.5°CとHagibisの方が約1.5倍大きい結果となった。衛星観測や海洋モデルの結果と同様にHagibisの方がよく海洋を冷やしているということが C_o からも得られた。したがって C_o を用いて2つの台風によるSST低下の違いを示せた。また C_o と ΔSST の相関をとるとFaxaiは0.40、Hagibis

は0.50であった。よって、 C_o は海洋冷却の指標として、実際の台風に対してもおおよそ適用することができる。

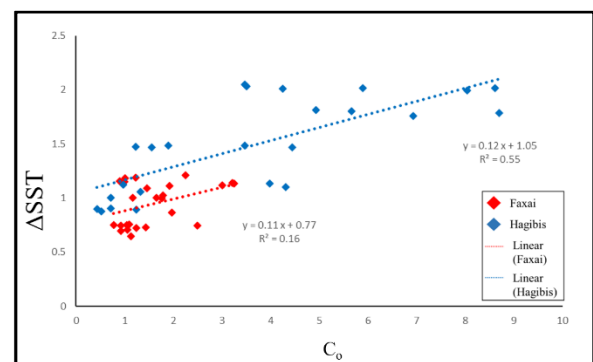


図4： C_o と ΔSST の関係

1時間ごとでの2度の領域平均をとり、Faxaiは25点Hagibisは24点ある。ただし C_o が10以上を示すものを除いたためHagibisは1点少ない。

Faxai と Hagibis の台風の特徴の違いと、 Δ SST, C_o , C_o の typhoon characteristics ・ ocean conditions の時間変化を示したのが図 5 である。まず MSM から得られた R15 と RMW に着目すると、Faxai と Hagibis ではサイズが大きく異なる (図 5a,b)。それぞれの値の平均は、Faxai は 150.2 km, 35.0 km である。Hagibis は、421.6 km, 59.6 km と R15 は 3 倍, RMW は 2 倍大きい。また最大風速では、Faxai と Hagibis とともに、24 時間後までほぼ 35 m/s とほぼ一定である (図 5c)。移動速度については、ほぼ同じである (図 5d)。 Δ SST について、Faxai では、ほぼ一定であるが、Hagibis は時間とともに Δ SST が低下し 24 時間後には約 1°C 低下している (図 5e)。また C_o の typhoon characteristics の時間変化をみると、台風の特徴にともなって、 C_o が 4 以上から 1 未満へ大きく変化している (図 5f)。さらに Δ SST の結果と対応している。両者の typhoon characteristics 差を生んでい

るのは、サイズの差の影響が大きい。 C_o の ocean conditions の時間変化をみると、typhoon characteristics のような変動はないが Hagibis は Faxai のおよそ 2 倍であり、Hagibisの方が冷えにくい海である (図 5g)。

また、typhoon characteristics と ocean conditions に着目すると、Faxai についてそれぞれ平均値は、6.5, 4.5, 標準偏差は 3.0, 1.7 であり、一方 Hagibis についてそれぞれ平均値は、41.9, 11.5, 標準偏差は 55.1, 5.8 であった。Hagibis の方がともにばらつきが大きく、typhoon characteristics のみに着目すると、Faxai より Hagibis の方が 6 倍以上大きい。つまり、台風の特徴として Hagibis が Faxai より海洋を冷やすポテンシャルを持っていたことになる。しかし ocean conditions に着目するとは Faxai より Hagibis が冷えにくい海であった。すなわち Hagibis は冷えにくい海であったにもかかわらず Faxai より冷えていたことから台風の影響が大きかった。

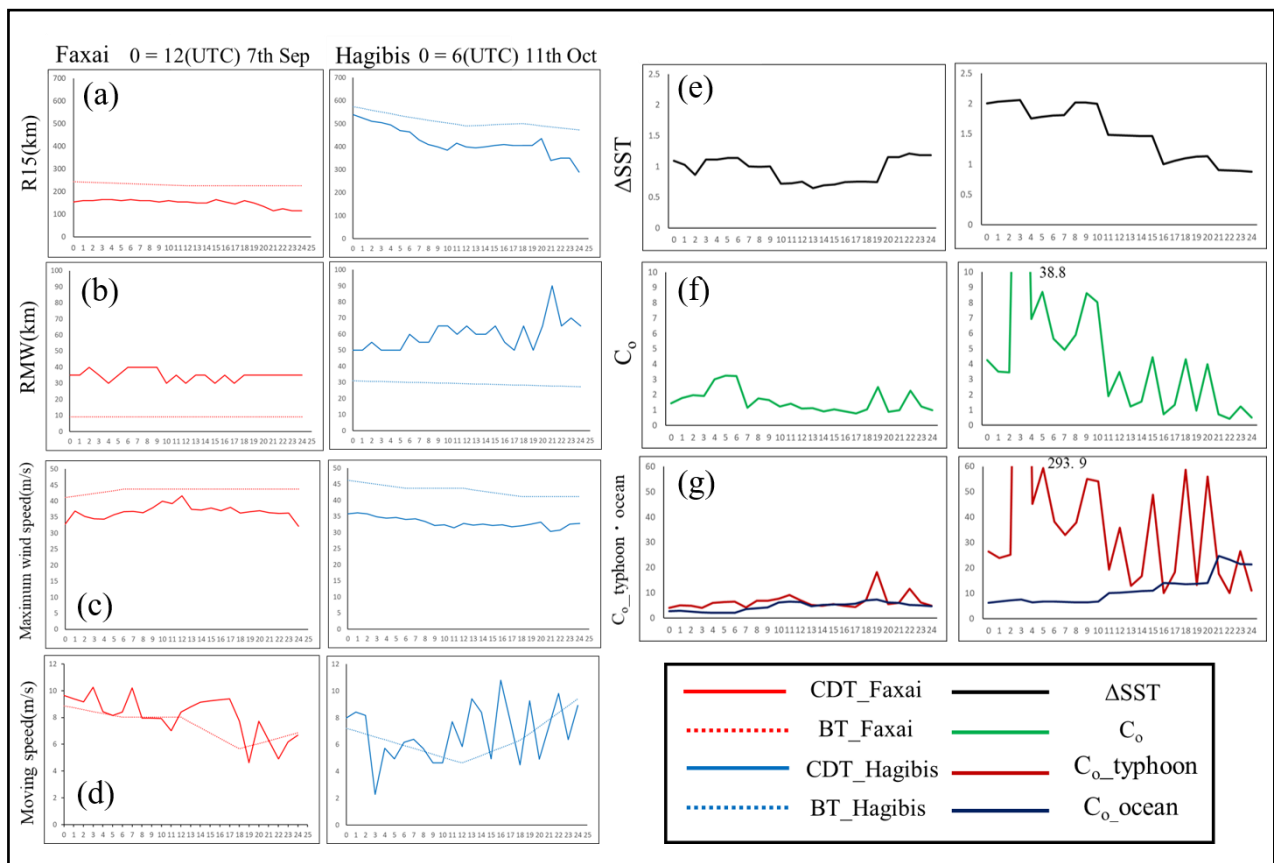


図 5 :Faxai と Hagibis における台風の特徴の差および Δ SST, C_o , C_o の typhoon characteristics (red) と ocean conditions (blue) の時間変化。
(a)R15, (b)RMW, (c) 最大風速, (d)台風の移動速度, (e) Δ SST, (f) C_o , (g) C_o の typhoon characteristics (red) と ocean conditions (blue)。

図 5 で Faxai と Hagibis の C_o の違いで, typhoon characteristics の影響を示せた. 図 6 では C_o の台風の特徴に着目し, それぞれの特徴の比較を示している. それぞれの特徴で異なる挙動がみられ, Hagibis は Faxai よりも値がバラついている. 個々の特徴に着目していくと, 移動速度は指数関数的な挙動を示し, 移動速度が小さくなると C_o の typhoon characteristics が大きくなる傾向がある(図 6d). しかしその他の特徴では指数関数的な挙動は見ることができない. 中でも最大風速は大きいからといって, C_o の typhoon characteristics が大きくなるとは限らない(図 6c). つまり最大風速の大小はあまり C_o の typhoon characteristics に寄与せず台風が海洋を冷却するポテンシャルに影響しない. R15 や RMW も同様に指数関数的な挙動は見られないが, $R15 \cdot RMW$ が大きいほど C_o の typhoon characteristics が大きくなり, Faxai と Hagibis の差が顕著である(図 5a,b). よって, C_o の typhoon characteristics には台風の移動速度が効いているが, Faxai と Hagibis の違いに着目した場合では, サイズが差を生んでおり, 台風が海洋を冷却するポテンシャルには特にサイズが影響する. したがって, サイズが大きい Hagibis は台風が海洋を冷却するポテンシャルが大きかったという結果になり Faxai よりも海洋をよく冷やしていたことになる.

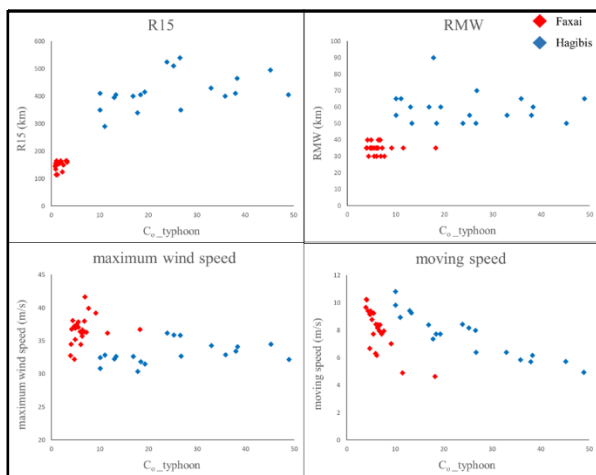


図 6 : C_o の typhoon characteristics と台風の特徴の比較.

(a)R15, (b)RMW, (c) 最大風速, (d)台風の移動速度

4. まとめ

本研究では, 現実の台風や海洋環境に C_o を実際に適用してみたところ C_o と ΔSST はおおよそ対応していることが分かった. よって C_o を用いて, ΔSST の度合いを表せることが示唆され, 台風から海洋への影響度合いを示す指標として期待される. しかし C_o が低い (高い) が, ΔSST が高い (低い) 点もわずかにあった. これは C_o には湧昇や移流の効果が含まれていないためと考えられ, さらに詳細に C_o と ΔSST の関係を理解するには今後, 湧昇や移流の効果を含める検討が必要である. C_o と ΔSST が対応していることから, C_o には台風の特徴を含んでいるため, 台風通過に伴う海洋冷却には OHC や TCHP のような海洋の状態だけでなく台風の特徴も十分重要となることが考えられる. 今回の事例は台風のサイズである. よって現実温台風を対象とした場合であっても, C_o は SST 低下量を簡易的に見積もるには有効だと考える.

C_o の typhoon characteristics に着目すると Hagibis は Faxai より, 海洋を冷やすポテンシャルを持つが, C_o の ocean conditions に着目すると Hagibis は Faxai より, 冷えにくい海であったことが分かる. しかし, 実際は Hagibis の方が C_o は大きく, 衛星観測や海洋モデルの結果から海洋は Hagibis の時の方が冷えていた. よって Hagibis は冷えにくい海であったにもかかわらず, よく冷えていたことから台風のインパクトが大きかったことが考えられる. また, 今回の C_o は水平移流や湧昇は考慮されていないが, C_o で海洋を冷やす台風のポテンシャルを見積もることはできる. 特に台風が海洋を冷却するポテンシャルは, 比較的計算コストが低いので現業で使いやすいと考えられる.

今後の展開として, 本研究は 2 事例であるが, さらに事例を増やし, 一般的な理解を行う. また, また台風からどの程度離れた海洋まで影響するのか, その影響範囲を明らかにすることを考えている.

謝 辞

本研究は, 2019 年度新学術領域「変わりゆく気候系における中緯度大気海洋相互作用 hotspot」(JP19H05696) と, 日本学術振興会科学研究費助 21K03658, JST, CREST, JPMJCR1681 の支援を受けました.

参 考 文 献

- 田中 裕介, 石川 洋一, 五十嵐 弘道, 西川 悠, 蒲地 政文, 2018: 三陸沖の高解像度海洋モデルの開発, 日本水産学会誌 84(6) 1047-1049.
- Emanuel, K. A., 1986: An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: Steady-state maintenance, *J. Atmos. Sci.*, **43**, 585-604.
- Ginis, I., 1995: Ocean response to tropical cyclone, *Global perspective on Tropical Cyclones*, WMO, 198-260.
- Gray, M., 1979: Hurricanes: their formation, structure, and likely role in the tropical circulation. Meteorology over the Tropical Oceans, *Roy. Meteor. Soc.*, 155-218
- Leipper, D. F., and D. Volgenau, 1972: Hurricane heat potential of the gulf of Mexico, *J. Phys. Oceanogr.*, **2**, 218-224.
- Large, W. G., and S. Yeager, 2004: Diurnal to decadal global forcing for ocean and sea-ice models: the data sets and flux climatologies. Technical Note NCAR/TN-460+STR., CGD Division of the National Center for Atmospheric Research. doi:10.5065/D6KK98Q6.
- Large, W. G., and S. Yeager, 2009: The global climatology of an interannually varying air-sea flux data set. *Clim. Dyn.*, **33**, 341-364, doi:10.1007/s00382-008-0441-3.
- Matsumoto, K., T. Takanezawa, and N. Ooe, 2000: Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional model around japan. *J. Oceanogr.*, **56**, 567-581, doi:10.1023/A:1011157212596.
- Miyamoto, Y., G. H. Bryan, and R. Rotunno, 2017: An analytical model of maximum potential intensity for tropical cyclones incorporating the effect of ocean mixing. *Geophysical Research Letters*, **44**, 5826-3885.
- Price, J.F., 1981: Upper ocean response to a hurricane, *J. phys. oceanogr.*, **111**, 153-175.
- Sakamoto, K., H. Tsujino, H. Nakano, M. Hirabara, and G. Yamanaka, 2013: A practical scheme to introduce explicit tidal forcing into an OGCM. *Ocean Sci.*, **9**, 1089-1108, doi:10.5194/os-9-1089-2013.
- Yu, S.Y. and Subrahmanyam, M.V., 2017: Typhoon-induced SST cooling and rainfall variations: The case of typhoon CHAN-HOM and Nangka, *Open Access Library Journal*, **4**, e3967.
- Soloviev, A.V. et al., 2017: Is the State of the Air-Sea Interface a Factor in Rapid Intensification and Rapid Decline of Tropical Cyclones?. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **122**(12), 10174-10183.
- Suzuki, S., H. Niino, and R. Kimura, 2011: The mechanism of upper-oceanic vertical motions forced by a moving typhoon, *Fulid Dyn., Res.*, **43**, 25504.
- Tsujino, H., H. Nonaka, K. Sakamoto, S. Urakawa, M. Hirabara, H. Ishizaki, and G. Yamanaka, 2017: Reference Manual for the Meteorological Research Institute Community Ocean Model version 4 (MRI.COMv4). TECHNICAL REPORTS OF THE METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE No.80, doi:10.11483/mritechrepo.80.
- Usui, N., Ishizaki S., Fujii Y., Tsujino H., Yasuda T., and Kamachi M., 2006: Meteorological Research Institute multivariate ocean variational estimation (MOVE) system: Some early results. *Advances in space Research*, **37**, 896-822
- Wada, A., 2007: Numerical problems associated with tropical cyclone intensity prediction using a sophisticated coupled typhoon-ocean model. *Pap. Meteor. Geophys.*, **58**, 103-126.
- Wada, A., N. Kohno and Y. Kawai, 2010: Impact of wave-ocean interaction on Typhoon Hai-Tang in 2005, *SOLA*, **6A**, 13-16.
- Wang, Y., 2007: A multiply nested, movable mesh, fully compressible, non hydrostatic tropical cyclone model-TCM4: Model description and development of asymmetries without explicit asymmetric forcing. *Meteor. Atmos. Phys.*, **97**, 93-116.
- Wu, R., and Li, C., 2018: Upper ocean response to the passage of two sequential typhoons. *Deep Sea Res I Oceanogr Res Pap* 132:68-79.
- Yablonsky, R. M., and I. Ginis, 2009: Limitation of one-dimensional ocean models for coupled hurricane-ocean model forecasts, *Monthly weather review*, **137**(12), 4410-4419.