

台風の発達に対する地球温暖化の影響

竹谷伊織（九州大学大学院総合理工学府）

時長宏樹（九州大学応用力学研究所）

森正人（九州大学応用力学研究所）

1. はじめに

台風のライフサイクルは、発生期、発達期、最盛期、衰退期に大きく分けられる。その中でも発達期は、台風の中心気圧が発生期よりも低下し、中心付近の風速もより強くなり、台風の勢力が増す期間である。本研究では、台風の発達期に着目し、RI (Rapid Intensification) という指標を用いる。RI とは、台風の急発達を意味し、本研究では中心付近最大持続風速の 24 時間変化が 30 knot 以上増加した場合を RI とみなす。Song et al. (2020) では、人工衛星観測の開始以降、北西太平洋における RI 強度には正のトレンドがあることを示した。一方、人工衛星観測のデータ期間は 40 年程度であり、RI 強度の正のトレンドが、十年規模変動などの自然変動が要因なのか、地球温暖化などの気候変化が要因なのか切り分けることが難しい。そこで本研究では、地球温暖化による RI への影響を調べるため、より長期間の大規模アンサンブルデータを提供する d4PDF を解析し、RI の長期変化の要因を解明することを目的とする。また、海面水温の昇温パターンに伴う RI 強度および頻度の違いについて

も調査する。本稿では、地球温暖化の影響に着目して結果を中心に紹介する。

2. データと解析手法

観測データは、International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) を使用した。モデルデータは database for Policy Decision making for Future climate change (d4PDF) を使用した。d4PDF は、水平解像度が 60km、鉛直層数が 64 層、最上層は 0.01hPa の気象研究所全球大気モデル MRI-AGCM3.2 (Mizuta et al. 2012) を用いて作成されており、外部境界条件として、海面水温 (SST)、海水密度、海水厚、温室効果気体、オゾン、エアロゾル等を与え、過去実験(ALL)、非温暖化実験(NAT)、4K 上昇実験(P4K)が行われている。ALL 実験の SST データは、COBE-SST2 (Hirahara et al. 2014) のデータが使用されている。P4K 実験の SST データは、観測された SST からトレンド成分を除いたものに、CMIP5 の全球大気海洋結合モデルから得られた 6 種類の SST 昇温パターンを加えたものが与えられている。これら 6 種類の全球大気海洋結合モ

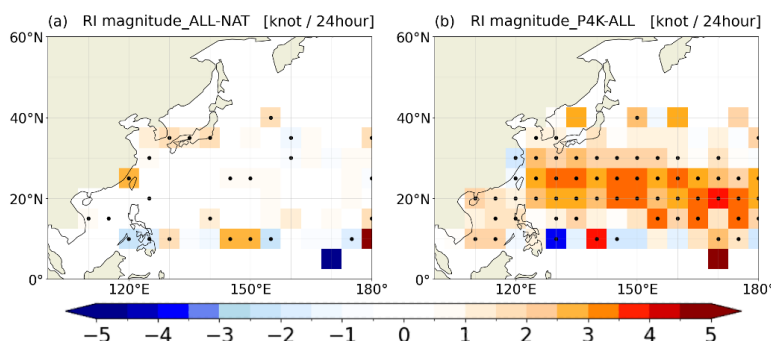


図 1

各実験における JJASO 平均の RI 強度気候値のアンサンブル平均の差を示す。

- (a) ALL-NAT,
- (b) P4K-ALL.

なお、黒丸が 95% の信頼度で有意な差があることを示す。

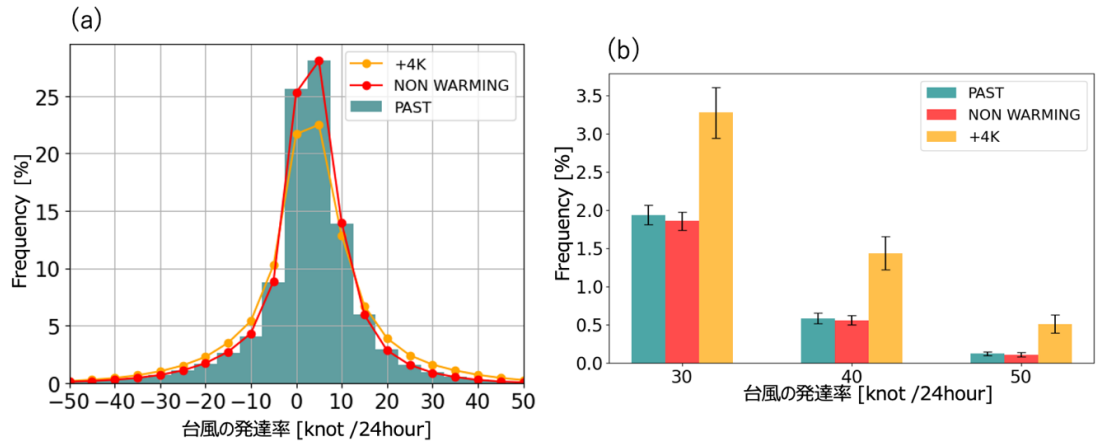


図 2 (a) 各実験における台風の発達率の頻度分布を示す. (b) 台風発達率のうち、特に、RI 以上の強度変化に焦点を当てた、各実験間の違いを示す. なお、領域内の全台風数で割ることで確率密度関数としている.

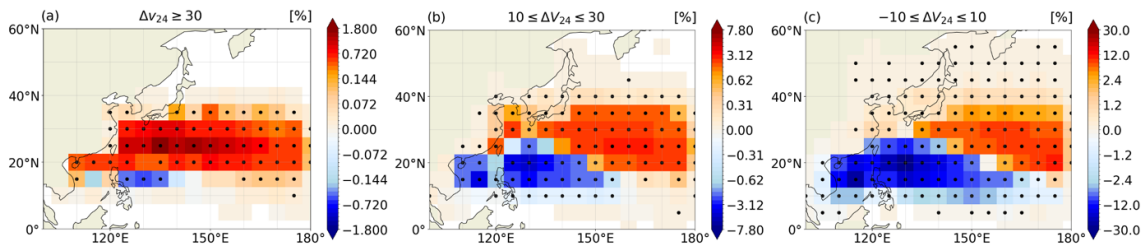


図 3 ΔV_{24} ($=\Delta V_{t+24} - \Delta V_t$). V_t は時刻 t における最大持続風速, ΔV_{t+24} は時刻 t から 24 時間後の最大持続風速を表す. なお、熱帯低気圧のライフサイクル全体を対象とし、連続する 24 時間毎に ΔV_{24} を計算した. ΔV_{24} の存在頻度の将来と過去の差を示す.

(a) $\Delta V_{24} \geq 30$, (b) $10 \leq \Delta V_{24} \leq 30$, (c) $-10 \leq \Delta V_{24} \leq 10$.

デルは、CCSM4 (CC), GFDL-CM3 (GF), HadGEM2-AO (HA), MIROC5 (MI), MPI-ESM-MR (MP), MRI-CGCM3 (MR) である. NAT 実験は非温暖化実験であり、観測された SST からトレンド成分を除いたものが使用されている. 本研究では、観測との比較を行う際に 1979 年～2010 年の 32 年間のデータを用い、地球温暖化の影響を評価する際には 1951 年～2010 年の 60 年間のデータを使用した. いずれの場合も、台風シーズンである 6 月～10 月 (JJASO) を対象とし、北西太平洋領域を対象としている. 台風の対象

強度について、IBTrACS は強度が 34 knot 以上の熱帯低気圧を対象とする. d4PDF は Yoshida et al. (2017) で作成された best track data を使用する.

3. 結果

3.1 RI 強度の比較および地球温暖化の影響

観測と d4PDF の RI 強度の平均的な空間分布を比較するため、観測と d4PDF とともに RI 強度の 32 年間の気候値を、経度 $5^\circ \times$ 緯度 5° 格子で作成した. 観測では、 10°N - 25°N に幅広い大きさの RI が疎に存在しており、

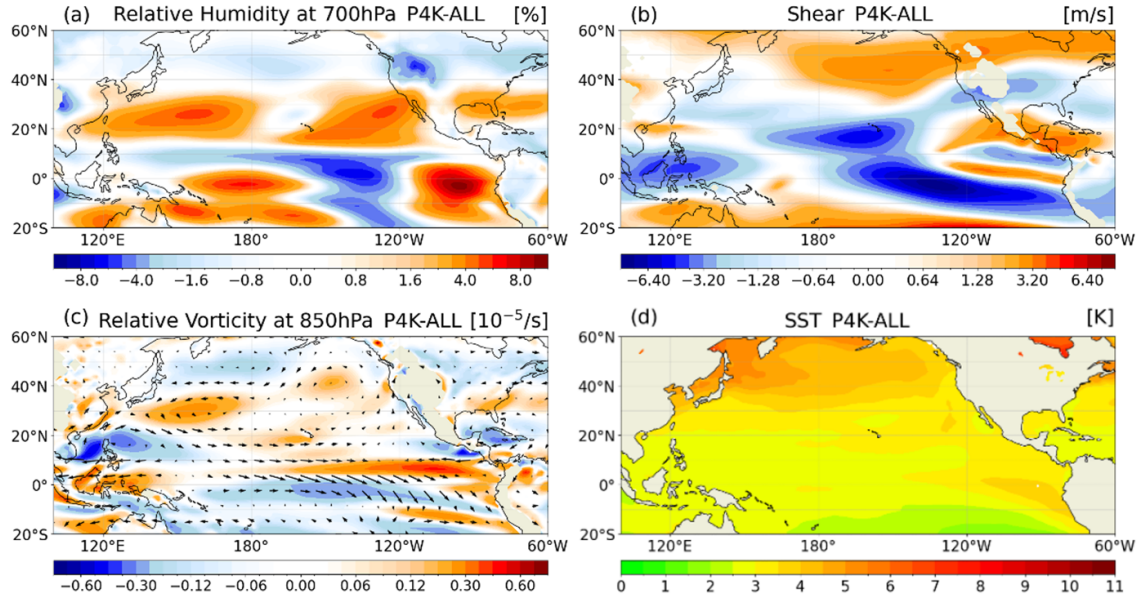


図 4 台風の発達に影響を与える大気変数の将来変化を示す。

(a) 700hPa 相対湿度, (b) 200-850hPa 風鉛直シア, (c) 850hPa 相対渦度,
(d) SST の昇温パターン。

ALL 実験のある 1 メンバのみと比較すると、観測と類似した疎な分布が確認された (図略)。一方、ALL 実験 (100 メンバ) のアンサンブル平均は、大きな RI が低緯度側を中心に存在し、高緯度に向かうにつれて RI 強度が小さくなる傾向が見られた (図略)。さらに、NAT 実験 (100 メンバ)、P4K 実験 (90 メンバ) のアンサンブル平均は、ALL 実験 (100 メンバ) のアンサンブル平均と同様な分布を示すことを確認した (図略)。

RI 強度に対する地球温暖化の影響を評価するため、ALL 実験のアンサンブル平均と NAT 実験のアンサンブル平均の差を算出し、過去の温暖化の影響を検証した (図 1a)。統計的に有意な点の数は限られているものの、日本付近では、弱いながらも RI 強度が有意に増加していることがわかる。一方、全球平均気温が 4K 上昇する将来の温暖化の影響を評価するために、P4K 実験のアンサンブル平

均と ALL 実験のアンサンブル平均との差を算出した (図 1b)。その結果、将来気候では北西太平洋全体で RI 強度が大きくなることがわかった。

次に、北西太平洋における全ての台風を対象とした ALL 実験、NAT 実験、P4K 実験における台風発達率の頻度分布を調べた (図 2a)。台風発達率を全体的にみると各実験間でよく似た頻度分布を示す。また、RI 以上の強度変化に着目すると、ALL 実験と NAT 実験の間では、急発達を経る台風の割合に統計的に有意な差は確認されなかった (図 2b)。一方、P4K 実験と ALL 実験を比較すると、急発達を経る台風の割合に統計的に有意な差が認められ、将来気候において急発達を経る台風の割合が有意に増加することが示唆される (図 2b)。

図 3 に中心付近最大持続風速の 24 時間変化 ΔV_{24} が $\Delta V_{24} \geq 30$, $10 \leq \Delta V_{24} \leq 30$,

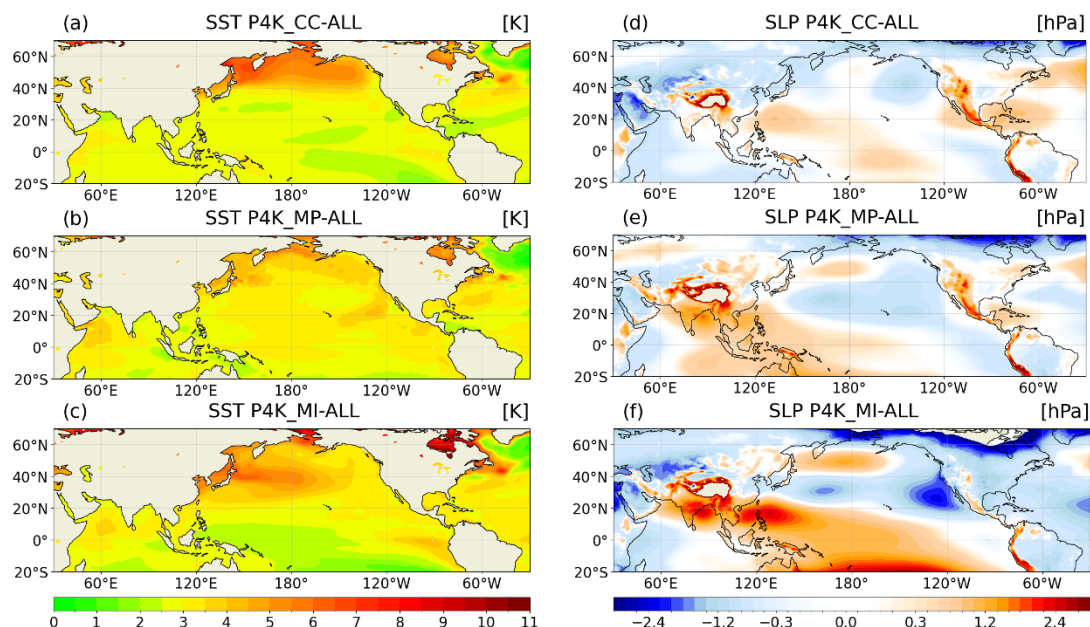


図 5 (a)および(d)は CC-ALL, (b)および(e)は MP-ALL, (c)および(f)は MI-ALL を示す。
(a)-(c)は SST の昇温パターン, (d)-(f)は SLP の将来変化を示す。

$-10 \leq \Delta V_{24} \leq 10$ の場合における台風の存在頻度の将来変化を示す。図 3a に示すように、RI を経る台風の存在頻度は $25^{\circ}\text{N} \sim 30^{\circ}\text{N}$ 付近において将来的に増加することを示唆している。また、RI には達しないものの、発達する台風や強度が大きく変化しない台風の将来変化は、 $25^{\circ}\text{N} \sim 30^{\circ}\text{N}$ の緯度帯において台風の存在頻度が増加するのに対し、 $10^{\circ}\text{N} \sim 20^{\circ}\text{N}$ 付近ではその頻度が有意に減少していることがわかる (図 3b, 図 3c)。これら結果は、将来、台風の発達が過去と比較してより高緯度側で顕著になる可能性を示唆している。

将来的に北側で台風が発達しやすくなる要因を明らかにするため、台風の発達に影響を与える大気変数を調べた (図 4)。700hPa 相対湿度は日本南方で増加し (図 4a)、200hPa と 850hPa の水平風鉛直シアは同海域で弱体化 (図 4b)、さらに、850hPa 相対渦度では背景場の低気圧性循環が強化されて

いることが確認された (図 4c)。加えて、SST は熱帯域から日本付近に向かうにつれてより昇温傾向が強くなっていることがわかる (図 4d)。これらの結果から、将来的に日本南方では台風が発達しやすい大気環境となっていることが明らかとなった。

3.2 昇温パターン毎の台風発達率の違い

全ての台風を対象とした場合、各昇温パターンにおける台風の発達率の頻度分布は全体的に類似している (図略)。一方、急発達する台風に着目すると、昇温パターンごとにばらつきが見られる (図略)。しかし、CC の昇温パターンは、他の昇温パターンと比較して有意に急発達を経る台風の割合が少ないことが確認された。

次に、RI 強度に到達した台風の割合が最も少なかった CC、最も多かった MI、およびその中間的な変化を示す MP のアンサンブルについて、SST と SLP (海面気圧) の将来

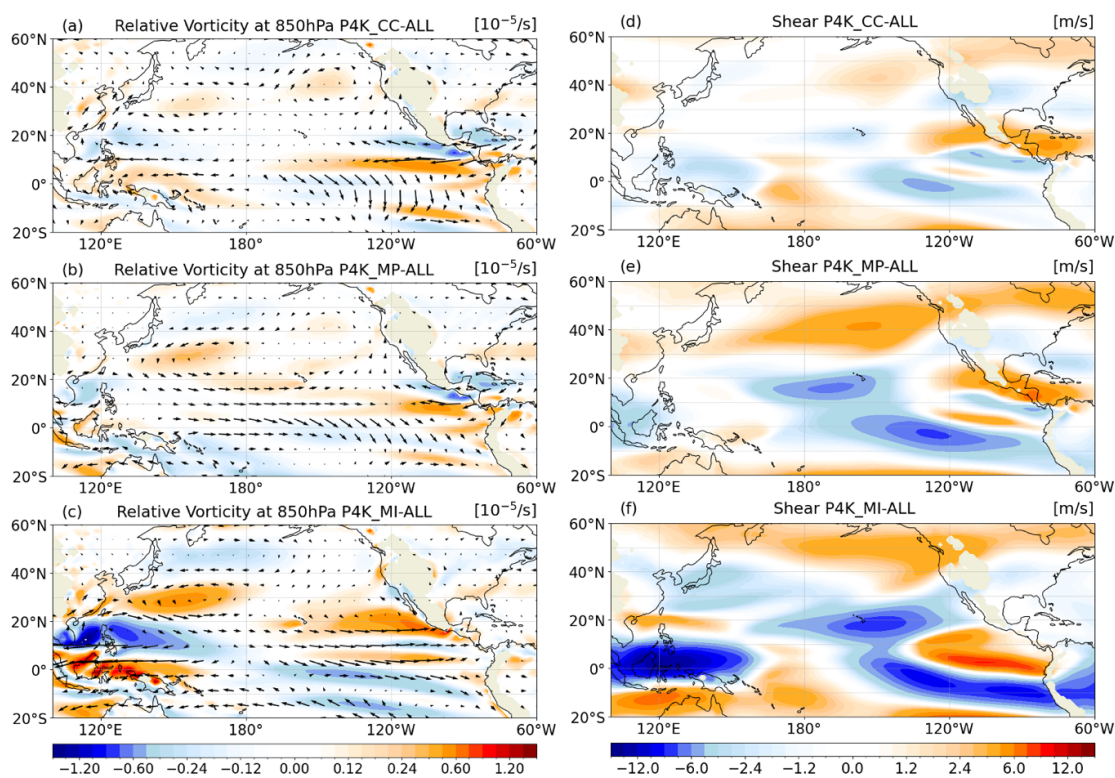


図 6 (a)および(d)は CC-ALL, (b)および(e)は MP-ALL, (c)および(f)は MI-ALL を示す. (a)-(c)は 850hPa 渦度, (d)-(f)は 200hPa-850hPa 風鉛直シアの将来変化を示す.

変化を調べた. CC の昇温パターンでは, 熱帯域における東西方向の SST 勾配変化が MI と比較して非常に弱く, SLP の変化も同様に弱くなっている (図 5a, 図 5c, 図 5d, 図 5f). MP は, CC と MI の中間的な変化傾向を示す (図 5b, 図 5e). このことから, CC の昇温パターンにおけるウォーカー循環の弱化は, 他の昇温パターンに基づくアンサンブルと比較して小さいことが示唆される.

RI 強度の存在頻度分布の将来変化について, CC の昇温パターンは, 他の昇温パターンと比較して異なる特徴を示す. 具体的には, CC では過去実験の気候値と同一の地点で急発達する台風の割合が増加するのに対し, MI および MP ではそれよりも北方の領域において急発達する台風の割合が増加するこ

とが確認された (図略). さらに, MI や MP のアンサンブルでは北緯 20°N より南側において, 急発達する台風の割合が有意に減少している領域も確認された (図略). CC が MI や MP のように, 日本南方で急発達しづらい要因として, 日本南方での SST の昇温や, 850hPa 相対渦度, 200hPa-850hPa 風鉛直シアの変化が小さいことが挙げられる (図 5a, 図 6a, 図 6d). 一方, MI では, 日本南方での SST の昇温に加え, 大気下層における背景場の相対渦度や水平風鉛直シアの顕著な変化が見られ, これが RI の存在頻度の増加に寄与している可能性がある (図 5c, 図 6c, 図 6f). このような背景場の変化の違いとウォーカー循環の弱化の度合いの関連性は今後調査する予定である.

4. まとめ

地球温暖化が台風の急発達に与える影響は過去気候においては顕著ではないものの、将来気候において地球温暖化の影響は大きくなる可能性があることがわかった。地球温暖化が進行するにつれて、北西太平洋の広範囲な領域で急発達しやすくなると予測される。これにより、将来的には急発達を経験する台風の割合が増加することが示唆される。また、SSTの昇温パターンによって、急発達を経る台風の割合にはばらつきがあることがわかった。特に、CCの昇温パターンでは、他の昇温パターンと比較して急発達する台風の割合が有意に少ないことが確認された。この理由としては、台風の発達に影響を与える変数であるSST、850hPa相対渦度、および200hPa-850hPa風鉛直シアの変化が、他の昇温パターンに比べて小さいことが要因の一つと考えられる。一方、MI、GF、MRなどのEl Niño-likeなSST昇温パターンでは、SST、850hPa相対渦度、200hPa-850hPa風鉛直シアの変化が顕著であり、これが日本南方における台風の急発達割合の増加に寄与している可能性がある。

謝辞

本研究で使用したd4PDFのベストトラックデータは気象研究所の吉田康平氏から提供していただきました。

参考文献

Mizuta, R and Coauthors, 2012: Climate Simulations Using MRI-AGCM3.2 with 20-km Grid. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 90A, 233-258.

2020: Increasing trend in rapid intensification magnitude of tropical cyclones over the western North Pacific. *Environ. Res. Lett.*, 15, 40-43.

Hirahara, S., M. Ishii, and Y. Fukuda, 2014: Centennial-Scale Sea Surface Temperature Analysis and Its Uncertainty. *Journal of Climate*, 27, 57-75.

Yoshida, K., M. Sugi, R. Mizuta, H. Murakami, and M. Ishii, 2017: Future Changes in Tropical Cyclone Activity in High-Resolution Large-Ensemble Simulations. *Geophys. Res. Lett.*, 44, 9910-9917.

Song, J., Y. Duan, P. J. Klotzbach,