

## 第7章 熱帯低気圧

**観測結果**

- ▶ 北西太平洋では、1980年代半ば以降、強度の強い熱帯低気圧が増加している。
- ▶ 台風の発生数、日本への接近数に有意な長期変化傾向は確認できない。
- ▶ 日本付近の台風は、強度が最大となる緯度が北に移動している。

**将来予測**

- ▶ 世界では全熱帯低気圧に占める非常に強い熱帯低気圧の割合が増加する（確信度は高い）。
- ▶ 日本付近の台風の強度は強まる（確信度が中程度）。
- ▶ 日本付近の台風に伴う雨の年間総量に変化はないが、個々の台風の降水量は増加する（確信度が中程度）。

熱帯又は亜熱帯地方（の海上）で発生する低気圧を熱帯低気圧という。本章第7.1節では、気候変動に伴う世界の熱帯低気圧の変化について示す。

また、熱帯低気圧のうち、北西太平洋又は南シナ海に存在し、かつ低気圧域内の最大風速（10分間の平均風速）がおおよそ17 m/s（34ノット）以上のものを、台風と呼ぶ。第7.2節では、日本周辺の台風の変化について示す。

## 7.1 世界（熱帯低気圧）

## 7.1.1 観測結果

まず、世界における熱帯低気圧の変化について述べる。IPCC (2021) では、世界の（つまり全熱帯低気圧に占める）強い熱帯低気圧（カテゴリ3～5）（1分間の平均風速49 m/s以上）の発生の割合は過去40年間で増加している 可能性が高いと評価している {11.7, SPM A.3.4, TS.2.3, Table TS.2}。北西太平洋<sup>86</sup>とベンガル湾では、1980年代半ば以降、カテゴリ4～5（1分間の平均風速58 m/s以上）の強度の熱帯低気圧が増加している（確信度が中程度）(Mei and Xie, 2016; IPCC, 2021; 12.4.2.3)。一方で、数十年～百年単位の長期的な変化傾向を確実に検出するには、熱帯低気圧の頻度や強度についてのデータの品質や期間が不十分であるため、これらの信頼性は低い {11.7, SPM A.3.4}。世界の熱帯低気圧の強度は、平均的には低緯度帯で最大となるが、Kossin et al. (2014) は強度が最大となる緯度が1980年代以降の過去約30年間において、極方向に移動していることを示した。これに対して、解析対象とする期間や海域、熱帯低気圧の強度に基づくデータの取り出し方の違いなどにより変化の程度や変化する方向などが異なることを指摘する研究もある (Tennille and Ellis, 2017; Zhan and Wang, 2017)。

世界の平均的な熱帯低気圧の移動速度に関しては、低下を指摘する研究 (Kossin, 2018) はあるものの、その変化傾向に対する研究者間の見解は一致していない (Moon et al., 2019; Lanzante, 2019; Kossin, 2019; Yamaguchi et al., 2020)。

これ以外にも、特定の地域においては、熱帯低気圧の発達率（24時間での最大風速の増加率）が強まっていること、熱帯低気圧に伴う降水量が増えていること、海洋循環の変化の影響によって熱

86 IPCC (2021) が評価するここでの北西太平洋領域には南シナ海も含む。

帯低気圧の活動が強化していることなども近年指摘されている (Liu et al., 2021; Guzman and Jiang, 2021; Sasaki and Motoi, 2022)。

(参考) 熱帯低気圧 (台風) の強さの階級

表7.1.1 及び表7.1.2 にて、熱帯低気圧の風速によるカテゴリー (The Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale) と気象庁の台風の風速階級をそれぞれ示す。これらは階級で用いられる風速の定義が異なる (それぞれ1分間平均風速、10分間平均風速) が、両者を比較するために、ここでは係数0.88 (Sampson et al., 1995) を用いて風速定義の換算を行った値も参考として併記する。例えば、10分間平均風速は係数0.88で割ることで1分間平均風速に換算している。加えて、“ノット”は約1.852 km/hを示す単位であり、“ノット”と“m/s”の換算では、“ノット”に係数0.514を乗じて“m/s”に換算している。

表 7.1.1 熱帯低気圧の風速によるカテゴリー (The Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale. (サファ・シンプソン・ハリケーン・ウィンド・スケール)<sup>87</sup>)

| カテゴリー | 最大風速                                   |   |
|-------|--|---|
|       | 10分間平均風速 (換算)                          | 1分間平均風速                                 |
| 1     | 56 ノット (28.8 m/s) ~ 72 ノット (37.0 m/s)  | 64 ノット (32.9 m/s) ~ 82 ノット (42.1 m/s)   |
| 2     | 73 ノット (37.5 m/s) ~ 84 ノット (43.2 m/s)  | 83 ノット (42.7 m/s) ~ 95 ノット (48.8 m/s)   |
| 3     | 84 ノット (43.2 m/s) ~ 99 ノット (50.9 m/s)  | 96 ノット (49.3 m/s) ~ 112 ノット (57.6 m/s)  |
| 4     | 99 ノット (50.9 m/s) ~ 120 ノット (61.7 m/s) | 113 ノット (58.1 m/s) ~ 136 ノット (69.9 m/s) |
| 5     | 121 ノット (62.2 m/s) 以上                  | 137 ノット (70.4 m/s) 以上                   |

表 7.1.2 気象庁の台風の強さの階級<sup>88</sup>

| 階級      | 最大風速                                    |   |
|---------|---|---|
|         | 10分間平均風速                                | 1分間平均風速 (換算)                            |
| (台風の定義) | 34 ノット (17 m/s)以上                       | 39 ノット (19 m/s)以上                       |
| 「強い」    | 64 ノット (33 m/s)以上<br>85 ノット (44 m/s)未満  | 73 ノット (38 m/s)以上<br>97 ノット (50 m/s)未満  |
| 「非常に強い」 | 85 ノット (44 m/s)以上<br>105 ノット (54 m/s)未満 | 97 ノット (50 m/s)以上<br>119 ノット (61 m/s)未満 |
| 「猛烈な」   | 105 ノット (54 m/s)以上                      | 119 ノット (61 m/s)以上                      |

### 7.1.2 将来予測

『日本の気候変動2020』の発行以降、IPCC第6次評価報告書 (IPCC (2021)の第11.7.5章参照) によって最新の科学的知見が発表された。その後、2022年12月にインドネシアで開催された10th International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-10, Camargo et al., 2023) で気候変動対策の政策決定のために有用な研究成果のレビューならびに更なる研究発展のための指針・提案がなされた。また、北西太平洋における熱帯低気圧の将来予測に焦点を当てたレビュー論文が Cha et al. (2020)によって発表されている。本項ではIPCC第6次評価報告書以降に発表された研究についても補足的に説明しつつ、IPCC第6次評価報告書で報告されている最新の科学的知見や科学者の見

87 シンプソン・スケールともいう。米国海洋大気庁国立ハリケーンセンターホームページを基に作成：

<https://www.nhc.noaa.gov/aboutsshws.php>

88 気象庁ホームページを基に作成：<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/typhoon/1-3.html>

解を中心に記述する。なお図 7.1.1 は IPCC 第 6 次評価報告書による世界の熱帯低気圧の将来予測についての概要を示しており、以降この図に沿って記述する。

熱帯低気圧の全球発生数の将来変化については科学的に最も議論されている問題の一つであるが、地球温暖化が全球発生数に及ぼす影響についての理論やメカニズムについては熱帯低気圧の強度や降水量に関連するメカニズムほど堅固な情報が得られていない。近年の研究から得られた将来予測は Knutson et al. (2020) によってまとめられた。140 事例の将来予測実験の結果をまとめると、地球温暖化 2°C に対して全球における熱帯低気圧の発生数が中央値で約 14%減少すると予測している。この減少予測は d4PDF (付録 A.2.4 参照) を含めこれまで気象庁気象研究所が開発してきた気候モデルによる将来温暖化予測実験によるものと定性的には一致している (Oouchi et al., 2006; Murakami et al., 2012a,b; Yoshida et al., 2017)。一方、この 140 事例による将来変化の 5~95 パーセントイルの範囲は -28%から+22%とゼロを中心に大きな幅を示している (Knutson et al., 2020)。これは一部の高解像度全球気候モデル (Bhatia et al., 2018; Vecchi et al., 2019) や統計・力学ダウンスケールモデル (Emanuel, 2021; Lee et al., 2020) によって全球の熱帯低気圧の発生数は増えるという予測結果が近年公表されたためである。これらの結果により将来変化の定量的な予測はもとより、増えるか減るかについての定性的な予測についても不確実性が大きいことを示唆している。IPCC 第 6 次評価報告書では全球熱帯低気圧の発生数は減少または不変である可能性が示唆されているが、*確信度は中程度*と結論付けている {11.7.1.5} (図 7.1.1 左側中段)。

全球発生数の将来変化の理解が進まない理由の 1 つとして全球発生数を決定づける理論やメカニズムが確立されていないことが挙げられる。近年、注目され始めたのが熱帯低気圧の発生元となる総観規模擾乱 (熱帯低気圧の種「seeds」と呼ばれており、以下「seeds」と表記。) で、seeds の数の将来変化が熱帯低気圧の発生数変化と直接関係しているのではないかという研究がいくつか発表された (Vecchi et al., 2019; Hsieh et al., 2020; Sugi et al., 2020; Yamada et al., 2021)。一方、seeds は熱帯低気圧の発生数とは直接関係はなく、水平風の鉛直シアーなどの力学的環境場や、相対湿度などの熱力学的環境場が熱帯低気圧の発生数変化に直接関係しているであろうという反論もある (Patricola et al., 2018; Emanuel, 2022)。seeds の定義がはっきりしないこと、seeds の直接的な観測がないこと、seeds の数の将来変化やモデル実験設定に関して研究間の違いがあることなどから seeds と熱帯低気圧の全球発生数に関する議論は決着しておらず進行中である (Camargo et al., 2023)。

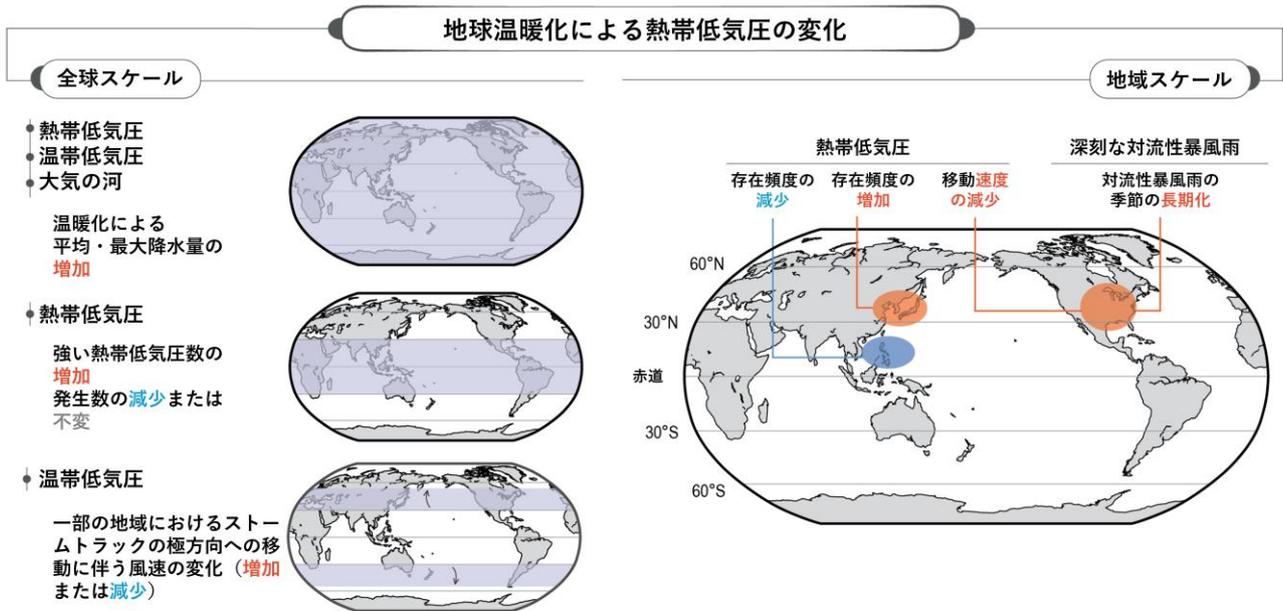


図 7.1.1 IPCC 第 6 次評価報告書で示された熱帯低気圧の過去と将来の変化に関する見解

全球スケール（左側）と地域スケール（右側）における地球温暖化による熱帯低気圧の定性的な変化についての科学的見解を示す。それぞれのスケールで過去と将来について熱帯低気圧の変化について確信度の情報とともに取り上げている。（左側上段）熱帯低気圧に伴う平均・最大降水量の増加（過去：確信度が低い、将来：確信度が高い）。（左側中段）全球発生数に対する強い熱帯低気圧数の相対的な増加（過去：確信度は中程度、将来：確信度が高い）、熱帯低気圧の全球発生数の減少または不変（過去：確信度が低い、将来：確信度は中程度）。（右側）北西太平洋における熱帯低気圧の存在頻度の中・高緯度へのシフト（過去：確信度は中程度、将来：確信度は中程度）、アメリカ合衆国に上陸する熱帯低気圧の移動平均速度の減少とそれに伴う降水量の増加（過去：確信度が低い、将来：確信度が低い）。図では温帯低気圧（Extratropical cyclones）や大気の河（Atmospheric river）についても取り上げられているが解説は省く。（IPCC, 2021; Figure 11.20 を和訳・転載。）

一方、強い強度の熱帯低気圧の発生数については弱い強度の熱帯低気圧の発生数に比べて相対的に増えるであろうと予測されている（IPCC, 2021; 11.7.1.5、図 7.1.1 左側中段）。全熱帯低気圧の発生数（最大風速 17 m/s 以上）に対するカテゴリ 4 以上の強い熱帯低気圧（最大風速 58 m/s 以上）の発生数の相対的割合が地球温暖化 2°C を仮定した複数将来実験の中央値で現在気候に比べて 13% 増加するであろうと予測しており確信度が高い（Knutson et al., 2020; IPCC, 2021）。全熱帯低気圧の発生数は上記で述べたように地球温暖化 2°C に対して中央値で約 14% 減少することが予測されていることを考慮すると、カテゴリ 4 以上の強い熱帯低気圧の発生数の変化は中央値で約 1% 程度の減少と予測されている（Knutson et al., 2020）。同様に熱帯低気圧の平均最大風速を観測の気候値に合うようにバイアス補正を施した d4PDF の結果を用いるとカテゴリ 4 以上の強い熱帯低気圧の割合は 4°C 昇温実験で増加すると予測しており、IPCC 第 6 次評価報告書の報告と定性的には整合的である（Yoshida et al., (2017) の図 4 参照）。なお、熱帯低気圧の生涯最大風速に関しては地球温暖化 2°C に対して実験間の中央値で約 5% 程度増加するであろうと予測されている（IPCC, 2021; Knutson et al., 2020）。

熱帯低気圧のサイズについて Yamada et al. (2017)では最大風速が同程度の熱帯低気圧を現在気候実験と A1B シナリオ<sup>89</sup> (地球温暖化約 3°C 程度) に基づいた将来気候実験を比較した結果、熱帯低気圧の外部コアサイズ (動径平均風速が 12m/s の外核半径) が北西太平洋、南インド洋、南太平洋で統計的に有意に約 10%程度増加していることを報告している。一方、他の気候モデルを用いた研究では統計的に有意な外部コアサイズの将来変化は見られない結果が示されておりモデル間のばらつきが大きい (Knutson et al., 2015; Schenkel et al., 2023)。IPCC 第 6 次評価報告書では熱帯低気圧の大きさに関する将来変化は**確信度が低い**と報告している {11.7.1.5}。

1 つの熱帯低気圧に伴う降水量は将来増加するであると予測されており**確信度が高い** (図 7.1.1 左側上段)。16 事例の将来予測実験の全てで増加傾向を示しており、地球温暖化 2°C に対して中央値で約 14%の増加 (5~95 パーセントイルの範囲は+6~22%) が見込まれている。この増加率はクラウド・クラペイロンのスケールから見積もられた大気中の水蒸気増加量 (理論的に算出された気温 1°C 上昇に対する約 7%の大気中の水蒸気の増加量) とほぼ同程度となっている (Knutson et al., 2020)。一方、熱帯低気圧に伴う降水の将来変化は地域的なばらつきが指摘されており、対流圏下層の水蒸気収束の変化の度合いによってはクラウド・クラペイロンスケール以上の増加が見込まれている (Knutson et al., 2015; Phibbs and Toumi, 2016; Patricola and Wehner 2018; Liu et al., 2019)。また、IPCC 第 6 次評価報告書では熱帯低気圧に伴う極端降水の将来変化についても述べられている {11.7.1.5}。Kitoh and Endo (2019) による d4PDF を用いた解析によれば、熱帯低気圧に伴う年最大 1 日降水雨量は北半球の亜熱帯・中緯度域で増加するであろうと予測している (図 7.1.2)。とりわけハワイ付近から日本付近にかけての亜熱帯域では熱帯低気圧の存在頻度とその年々変動の振幅が将来は増加すると予測されており熱帯低気圧による極端降水による災害リスクの増大が示唆される (Yoshida et al. (2017) の図 2 c、Kitoh and Endo (2019) の図 6 c を参照)。

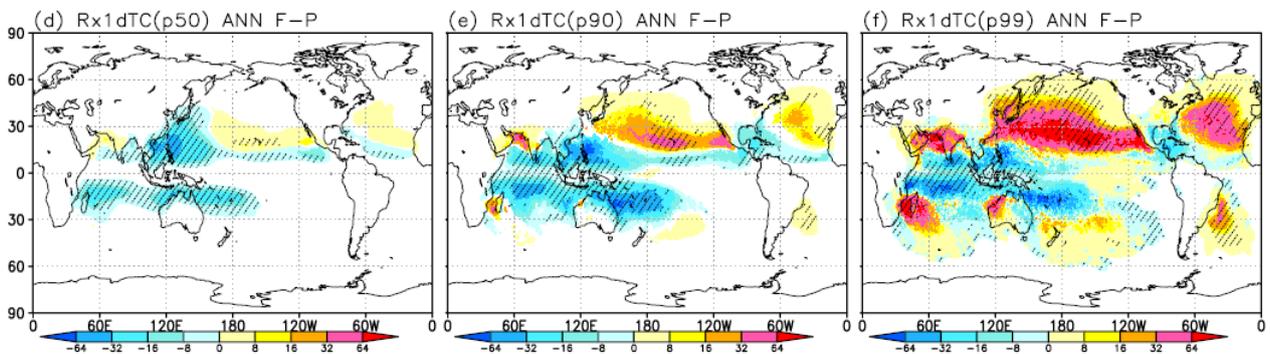


図 7.1.2 d4PDF で予測された熱帯低気圧に伴う極端降水量の将来変化

d4PDF で予測された年最大 1 日積算降水量 (Rx1d) の将来変化。Rx1d は d4PDF の全てのアンサンブルメンバーより計算され、現在気候実験 (総サンプル数 6000 年) と将来 4°C 昇温実験 (総サンプル数 5400 年) で見積もられている。左図は Rx1d の 50 パーセントイルの将来変化を、中図は 90 パーセントイルの将来変化を、右図は 99 パーセントイルの将来変化を示している。単位は mm。ハッチは 6 つの異なる海面水温パターン実験の全てが同じ増加または減少を示した領域を示し確信度が高い領域を示す。(Kitoh and Endo (2019) の図 3 より、CC-BY 4.0 ライセンス (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) に基づき転載 (一部改変)。)

<sup>89</sup> IPCC AR4 で用いられた排出シナリオで、21 世紀末で IPCC AR5 の排出シナリオの RCP6.0 に相当する。

地球温暖化による海面上昇、熱帯低気圧の風速強度の増加、熱帯低気圧の降水量の増加の複合効果に伴い熱帯低気圧による沿岸域の高潮・洪水などによる災害リスクは増加することが示唆されている。とりわけ海面上昇に伴う高潮リスクは世界のほとんどの領域で予測されており確信度が高い (Yang et al., 2018; Mori et al., 2019, 2021; Chen et al., 2020)。熱帯低気圧が引き起こす高潮リスクについては、第11章も参照のこと。

IPCC 第6次評価報告書では熱帯低気圧の発生数の地域的な将来変化についても言及しており、ベンガル湾、西太平洋、東太平洋、カリブ海を含む北大西洋については減少、ハワイ付近を含む中部太平洋やアラビア海では増加する可能性が報告されている {11.7.1.5, 12.4.2.3, 12.4.7.3}。また、IWTC-10 レポート (Camargo et al., 2023) によると、最新の気候モデルを用いたほとんどの将来予測では北半球に比べて南インド洋や南太平洋を含む南半球でより熱帯低気圧の発生数の減少率が大きいことを報告している (Knutson et al., 2020; Bell et al., 2019; Cattiaux et al., 2020; Chang et al., 2020; Roberts et al., 2020)。一部の研究では南半球における熱帯低気圧の平均存在位置が将来は相対的に高緯度側、つまり南極側にシフトするであろうことが示されている (Wehner et al., 2018)。一方、南半球に比べて北半球における熱帯低気圧の地域的な将来変化はモデル間のばらつきが大きい。

北西太平洋における将来変化に焦点をあてると、気候モデルによるほとんどの将来予測実験では熱帯低気圧発生数は減少すると予測している (Cha et al., 2020、図 7.1.3)。Bacmeister et al. (2018) や Hong et al. (2021) らによる最新の将来予測でも発生数が減少すると報告している。一方、一部の研究では発生数が増加する予測も報告されている。Bhatia et al. (2018) では熱帯低気圧の発生数は今世紀末には RCP4.5 温暖化シナリオ (世界平均地表気温約 2°C 上昇) で 6%程度増加すると予測しており、これらの増加予測は Emanuel (2021) による統計・力学モデルによる将来予測実験でも報告されている。Cha et al. (2020) のレビュー論文によると、2°C 上昇を仮定した 140 事例の将来実験の中央値で約 10%の熱帯低気圧発生数の減少 (10~90 パーセンタイルの範囲は -25~+10.5%) が予測されている (図 7.1.3)。d4PDF による 4°C 上昇実験でも北西太平洋の熱帯低気圧の発生数は減少することが予測されているが、6つの将来実験の平均で約 42%の減少を予測している (Yoshida et al., 2017)。2°C 上昇に線形換算すると約 21%程度の減少となり、Cha et al. (2020)の中央値より減少率は大きい、10~90 パーセンタイルの範囲に入っている。Cha et al. (2020) では Knutson et al. (2020) と同様、北西太平洋における熱帯低気圧強度、強い熱帯低気圧の全発生数に相対的な割合、熱帯低気圧に伴う降水量の将来変化の定量的な見積もりを報告している (図 7.1.3)。これらの将来変化は上記で述べた全球スケールの将来変化と定性的には整合的である。

北西太平洋の内部で熱帯低気圧の発生数、存在頻度が将来は偏在するであろうと予測している研究報告もある。Chang et al. (2020) や Roberts et al. (2020) では北西太平洋の南側領域で発生数は減少し、高緯度側では増加するという予測を示している。一方、Murakami et al. (2011)、Yokoi et al. (2012)、Colbert et al. (2015) では北西太平洋の西側領域で発生数が減少し東側領域で増えると報告しており研究間・モデル間のばらつきは大きい。モデルでは熱帯低気圧の地域的な発生数や存在頻度の変化は海面水温の将来変化の空間分布と関係があり、海面水温が他の海域より高く上昇した領域で熱帯低気圧の発生数がより増加する傾向がある (Murakami et al., 2012b)。しかし、海面水温の将来変化の空間分布はモデル間によるばらつきが大きいことから熱帯低気圧の地域的な発生数や存在頻度の将来変化は確信度が低い。

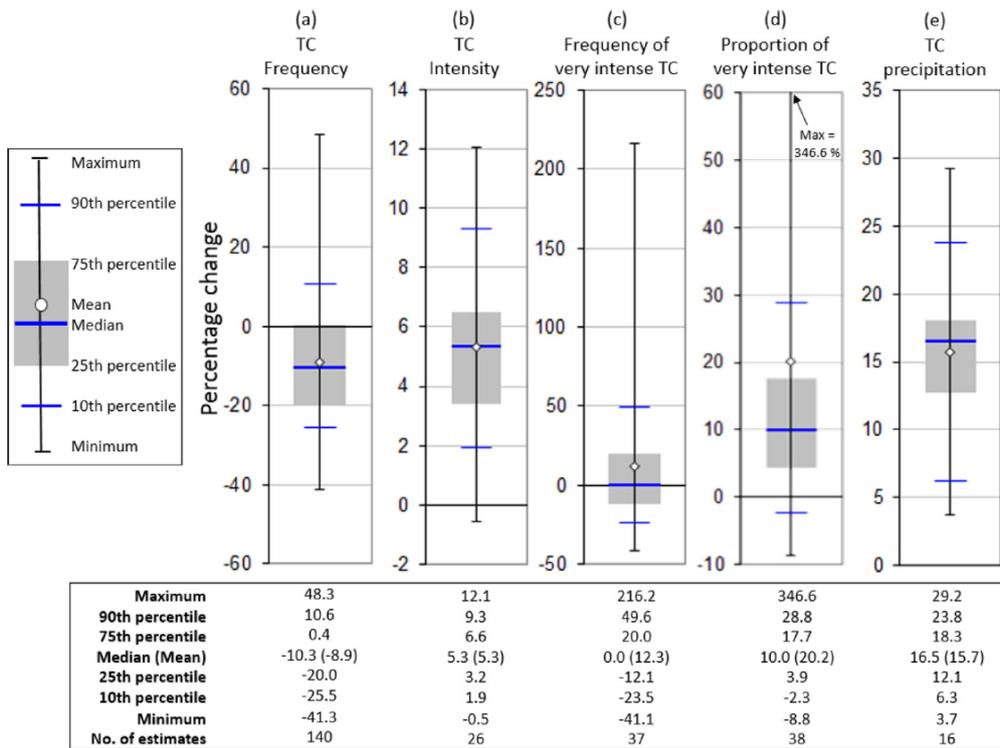


図 7.1.3 世界平均地表気温が 2°C 上昇した場合の北西太平洋における熱帯低気圧の変化予測

(a)全熱帯低気圧の発生頻度、(b)熱帯低気圧強度、(c)非常に強い熱帯低気圧の発生頻度、(d)非常に強い熱帯低気圧の全熱帯低気圧頻度に対する割合、(e)熱帯低気圧周囲の降水率を示す。箱ヒゲ図は予測される変化率の中央値、平均値、パーセンタイル範囲、最小値、最大値を示しており、具体的な数値が表に示されている。

(Cha et al. (2020) の図 1 より CC-BY-NC-ND 4.0 ライセンス (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>) に基づき転載。)

一方、熱帯低気圧の生涯最大風速が記録される位置はより高緯度になるであろうという研究が報告されている (Kossin et al., 2014, 2016)。とりわけ北西太平洋では過去数十年で最大風速を記録する平均緯度が統計的に有意に高緯度側にシフトしていることが示されており (第 7.2.1 項参照)、気候モデルによる将来実験でも高緯度側にシフトする予測結果が報告されている (Kossin et al., 2016)。観測の長期変化傾向と将来予測結果が一致していることを踏まえて、IPCC 第 6 次評価報告書では北西太平洋における生涯最大風速が記録される位置が高緯度側へシフトすることは 確信度が中程度 であるとしている (IPCC, 2021; 図 7.1.1 右側)。

熱帯低気圧の移動速度について、Yamaguchi et al. (2020) による d4PDF を用いた 4°C 上昇実験では全ての熱帯低気圧で平均した移動速度は加速がみられると報告している。一方、とりわけ北西太平洋の中緯度域で移動速度が減少することを示しており、将来の人為的な地球温暖化が特に中緯度で台風の動きを遅くする可能性があるかと報告している (Yamaguchi et al., 2020; Zhang et al., 2020)。一方、第 7.1.1 項で述べたとおり、過去に移動速度が遅くなっていることが人為的な気候変動の影響かどうかについて研究間で見解が一致していないことから、将来、熱帯低気圧の移動速度が遅くなる可能性については 確信度が中程度 である。

熱帯低気圧の温帯低気圧化の将来変化についても多数の研究が発表されている (Michaelis and Lackmann, 2019; Liu et al., 2020; Bieli et al., 2020; Lung and Lackmann, 2019, 2021; Sainsbury et al., 2020; Haarsma, 2021)。これらの研究のほとんどが北西太平洋を対象にしており、将来はより強い強度の温帯低気圧やそれに伴う降水の強化が予測されている。一方、全ての研究で統計的に有意な将来変化が得られているわけではなく定量的な将来変化の確信度は中程度である。

以上、『日本の気候変動 2020』の内容とそれ以降に発行されたレビュー論文・報告書の内容には大きな違いはない。熱帯低気圧の全球発生数の将来変化は依然として不確実性が大きい、熱帯低気圧の強度の将来増加については過去 40 年でもすでに増加傾向にあることから確信度が高い (Camargo et al., (2023)の Table 1 を参照)。また、熱帯低気圧の強度増加に伴う降水、洪水、高潮などによる災害リスクの増加についても示唆されている。一方、海盆ごとまたは海盆内部における熱帯低気圧の発生数、存在頻度や災害リスクの定量的な将来変化については不確実性が大きいのが現状である。

## 7.2 日本 (台風)

### 7.2.1 観測結果

次に、日本周辺の台風の変化について述べる。図 7.2.1 に 1951 年以降の台風の発生数や日本への接近数・上陸数を示す。ここでは、台風が国内のいずれかの気象官署等から 300 km 以内に入った場合を「接近」、北海道、本州、四国、九州の海岸線 (沖縄県など島嶼部は含まない) に達した場合を「上陸」と判定している。

気象庁の解析による台風の発生数は、1951 年から 2024 年の期間全体では統計的に有意な変化傾向は確認できないが、1960 年代中頃、1990 年代初め、2010 年代中頃に増加が見られ、1990 年代後半から 2010 年代初めにかけては平年より少ない年が多いなど、数十年スケールの変動や年々の変動が卓越している。なお、気象庁が静止気象衛星ひまわりによる本格的な観測を開始したのは 1978 年であり、この前後の台風発生数については解析精度に差がある可能性がある。また、より正確な長期変化傾向を検出するためには、更に多くのデータの蓄積が必要である。

日本への接近数は、発生数と似た傾向の変動を示しており、発生数と同様に統計的に有意な長期変化傾向は確認できない。日本への上陸数は年あたり 2、3 個程度とサンプル数が少ないため、長期変化傾向を述べるのは難しい。

台風の日本への接近数については、過去 40 年で太平洋側に接近する台風が増えていると示す研究成果がある (図 7.2.2)。Yamaguchi and Maeda (2020)は、1980 年から 2019 年の解析データにより、期間の前半 20 年に比べて後半 20 年の東京への接近数が約 1.5 倍に増加しており、また台風の移動速度が低下することで、台風による影響時間が長くなっていることを示している。

台風の強度に関する評価として、IPCC (2021) では、北西太平洋の熱帯低気圧はその強度のピークに達する位置について、緯度がより北へ移動している 可能性が非常に高く、このような変化は内部変動だけでは説明できない (確信度が中程度) と評価している {11.7, SPM A.3.4} (図 7.2.3)。1987 年から 2016 年までの 30 年間に限定した解析結果であるが、Kawabata et al. (2023) はカテゴリ 4 相当以上の台風 (10 分間最大風速で約 48 m/s 以上) について、強度のピークに達する位置がより北西側に移動する傾向が見られることを示している。

また、前述のように IPCC (2021) では、北西太平洋において 1980 年代半ば以降カテゴリ 4~5 (1 分間の平均風速 58 m/s 以上) の強度の熱帯低気圧が増加している (確信度が中程度) と評価している {12.4}。このような増加傾向について、IPCC (2021) と同様の手法 (Mei and Xie, 2016) を用いて気象庁ベストトラックデータを補正すると、直近のデータを含めた 1977~2021 年においてもカテゴリ 4~5 の熱帯低気圧の発生数は増加しているとみられる (信頼水準 90% で統計的に有意)。一方、Kawabata et al. (2023) は、気象庁が作成した時間的均質性がより高い熱帯低気圧データセットである『ドボラック再解析データ』(Nishimura et al., 2023) を用いた調査を行い、1987~2016 年におけるカテゴリ 4~5 の熱帯低気圧発生数には統計的に有意な増加傾向は確認できず、また年々や数年の規模での変動が大きいことを指摘している。

Sezaki et al. (2025) によると、気象庁の台風の強さの階級で長期変化傾向を解析すると、気象庁のベストトラックデータによって台風の強度が解析可能な 1977~2021 年の統計期間では、同データにより「強い」以上 (10 分間の平均風速 33 m/s 以上) の強さとなった台風の発生数には統計的に有意な減少傾向が確認できる。また、「非常に強い」(10 分間の平均風速 44 m/s 以上) 以上の強さとなった台風の発生数には、1977~2021 年の統計期間では統計的に有意な変化傾向は確認できない。米国合同台風警報センター (JTWC) のベストトラックデータによる 1977 年以降の解析では、「強い」及び「非常に強い」以上の強さの台風の発生数のいずれも、統計的に有意な変化傾向は確認できない。

一方、『ドボラック再解析データ』による解析が可能な 1987 年以降を統計期間とした場合、「強い」以上の強さとなった台風は、JTWC のベストトラックデータ、気象庁のベストトラックデータ及びドボラック再解析データいずれのデータセットでも減少傾向が確認された。「非常に強い」以上の強さとなった台風については、いずれのデータセットにおいても統計的に有意な変化傾向は確認できない。

「猛烈な」(10 分間の平均風速 54 m/s 以上) 台風の長期変化傾向については、その傾向や統計的有意性は、利用するデータセットや解析期間 (1977 年以降、1987 年以降) により異なり、一貫していない。気象庁及び JTWC のベストトラックデータによる「猛烈な」台風の発生数は、過去 (1977~1986 年) と最近 (2012~2021 年) の 10 年間を比較すると、統計的に有意な変化はないものの、最近 10 年間は過去 (統計期間の最初) の 10 年間に対して発生数が増加していた。

このように、熱帯低気圧は気温などの気象要素と比べてデータ数が少なく、年々変動が大きいいため、その変化傾向は不確実性が大きい。そのため、北西太平洋における熱帯低気圧の発生数に関する変化は、着目する熱帯低気圧の強度、統計の期間、解析手法の違いや元となるデータセットの違いといった解析の切り口によって評価が異なる場合があり、議論の余地がある。引き続き、より長期かつ質の高い観測を継続し、それらを活用して長期変化傾向を監視していくことが必要である。

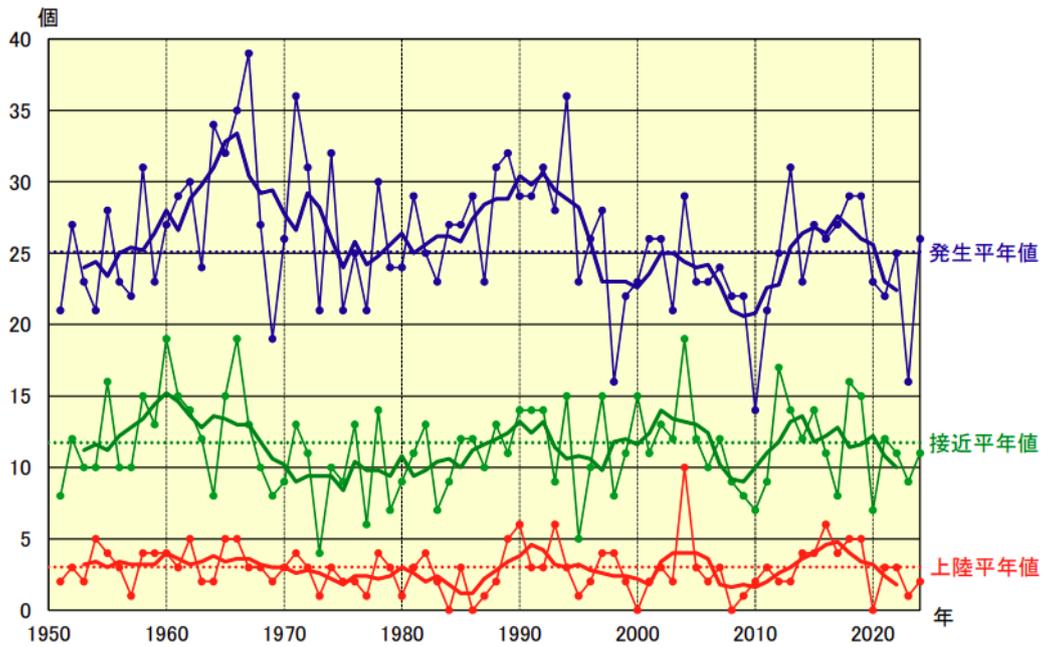


図 7.2.1 台風の発生数、日本への接近数・上陸数

細実線で結ばれた点は各年の発生数（青線）、日本への接近数（緑線）・上陸数（赤線）、太線は5年移動平均、細い破線は平年値（1991～2020年平均）を示す。

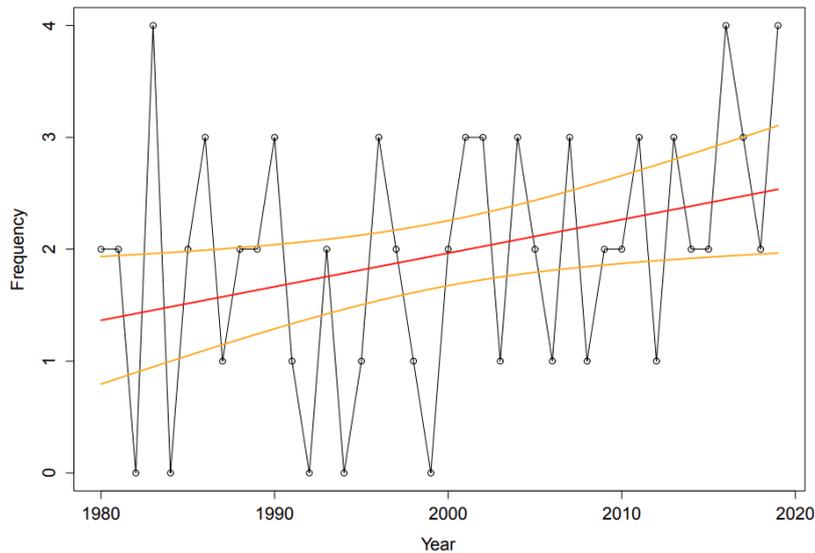


図 7.2.2 東京に接近した台風の数の経年変化（1980～2019年）

横軸は年、縦軸は各年の接近数。赤線は回帰直線、橙線は95%信頼区間（信頼水準95%で真の回帰線が含まれる範囲）を表している。増加傾向は統計的に有意である。（Yamaguchi and Maeda (2020)より、CC-BY 4.0ライセンス（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>）に基づき転載。）

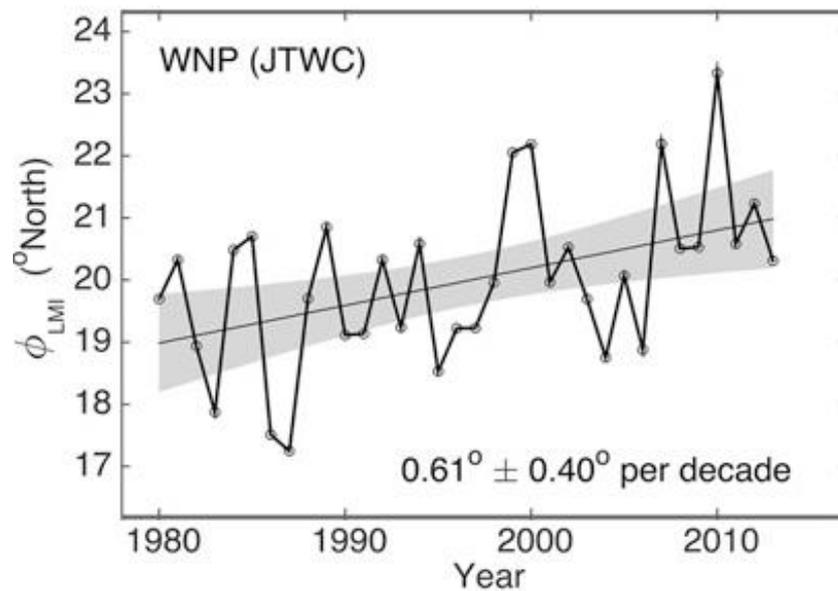


図 7.2.3 台風の強度が生涯中最大となる緯度（北西太平洋域）

縦軸は緯度（北緯）、横軸は年、太線（黒）は年平均した緯度（北緯）、直線（灰色）と陰影は長期変化傾向とその信頼区間（95%）、図中の数値（ $0.61^{\circ} \pm 0.40^{\circ}$ ）は、10年当たりの長期変化傾向とその信頼区間（95%）を表す。米国合同台風警報センター（JTWC）のデータに基づく。（Kossin et al. (2016) より図の一部を転載 © American Meteorological Society. Used with permission）

## 7.2.2 将来予測

日本付近の台風については将来強まることが予測されている（確信度が中程度）。5 km 格子の地域気候モデルを用いたアンサンブルシミュレーションの結果（Kawase et al., 2023b）によると、 $4^{\circ}\text{C}$  上昇シミュレーションにおいて、50年当たり一回の確率で生ずる台風強度（中心気圧）が現在気候シミュレーションと比べて 14 hPa 下がる結果となった。

過去の台風事例を地球温暖化が進行した条件下で再現する擬似温暖化実験<sup>90</sup>においても、将来の台風が強まるという結果が得られている。2000年から2017年にかけて日本に上陸した台風のうち、49個の台風を対象とした擬似温暖化実験（Toyoda et al., 2021）によると、今世紀末（ $4^{\circ}\text{C}$  上昇シナリオ（RCP8.5）を想定）において、勢力がピーク時の中心気圧の（49個の台風での）平均値が現在気候と比べて 45.7 hPa 下がるという結果が得られた。ただ、日本への上陸時における値を求めると、将来の中心気圧は現在と比べて 5.5 hPa 低下するという結果であった。また、Nayak and Takemi (2020)では、2016年8月の4個の台風に対して擬似温暖化実験が行われ、現在気候と比べて温暖化時（ $4^{\circ}\text{C}$  上昇シナリオ（RCP8.5）の今世紀末）には、台風期間で最も低い中心気圧が約 20 hPa 下がり、期間最大の風速が約 10 m/s 大きくなるという結果が得られた。

個別の台風事例を対象にした研究も行われている。例えば、平成30年台風第21号（2018年の台風 Jebi）を対象とした擬似温暖化実験においては、 $2^{\circ}\text{C}$ 、 $4^{\circ}\text{C}$  上昇時の日本の南海上での台風強度が現在気候のそれと比べてそれぞれ 8%、20%増加した（Fujiwara et al., 2023）。このことは日本付近の海面水温の上昇で説明された。

<sup>90</sup> 擬似温暖化実験とは、Kimura and Kitoh (2007)によって提案された力学的ダウンスケーリングの手法で、地域気候モデルの境界条件として、現在気候実験では再解析データ、将来気候実験では同じ再解析データに温暖化差分を加えたデータを用いる。詳しくは、佐藤 (2010) の解説を参考にいただきたい。

しかしながら、台風通過に伴う海面冷却の効果をモデルに含めた場合、地球温暖化が進行した時においても必ずしも台風が強まる訳ではないことが明らかになった。これは、1 km 格子の大気海洋結合モデルを用いて、平成 30 年台風第 24 号（2018 年の台風 Trami）を調べて分かったことであり、この台風の沖縄付近での中心気圧は現在気候とほぼ同じであった（Kanada et al., 2021a）。しかし最近の研究（Kanada and Aiki, 2024）によると、個々の台風によって状況が異なることが示された。具体的には、サイズが小さく、動きの速い台風ほど、地球温暖化によって強まりやすいことが明らかになってきた。

一方、台風に伴う降水については、将来個々の台風の降水量が増加する（確信度が中程度）。5 km 格子モデルを用いたアンサンブルシミュレーションの結果（Kawase et al., 2023b）によると、4°C 上昇シミュレーションにおいて、台風中心付近（半径 200 km 以内の平均）の 1 時間降水量（台風期間の最大値）が現在気候と比べて 1.31 倍（50 年当たり一回の頻度で起こる降水量で測った場合）になるという結果が得られた。また、台風に伴う日本の陸上降水（台風中心から半径 500 km 以内の領域における最大 24 時間降水量）については、4°C 上昇時は現在と比べて値が 1.30 倍（50 年当たり一回の確率で起こる降水量で測った場合）となった（図 7.2.4）。

### 台風による日本の陸上での最大24時間降水量

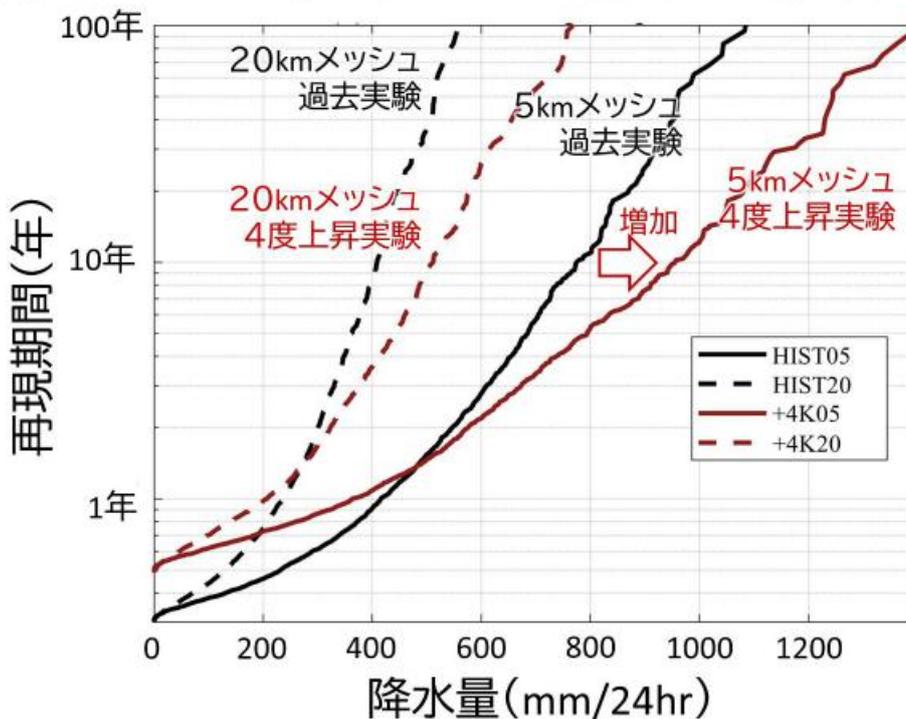


図 7.2.4 20km と 5 km メッシュの地域気候モデルから得られた台風による日本の陸上における最大 24 時間降水量

台風の中心から半径 500 km 以内の日本の陸上の格子点において最大の 24 時間最大降水量とその再現期間。黒線が過去実験、茶線が 4°C 上昇実験。実線が 5 km メッシュのモデル、破線は 20 km メッシュのモデル。線が右に移動すると、同じ再現期間（例えば 10 年当たり一回程度）の降水量が増加することを示す。（気象庁気象研究所，気象業務支援センター，海洋研究開発機構，京都大学，北海道大学，寒地土木研究所，2023）

台風に伴う降水に対する地球温暖化の影響を擬似温暖化実験によって調べた研究もある。近年、日本に大きな被害を与えた台風として令和元年東日本台風（2019年第19号: Hagibis）が挙げられる。この台風を対象とした、1 km 格子の大気海洋結合モデルでの擬似温暖化実験が Kanada et al. (2021b)によって行われた。4°C 上昇シナリオ（RCP8.5）の21世紀末における海面水温及び気温を上乗せした実験の結果によると、台風通過時の東日本の平均降水量は現在気候のそれと比べて22%増加した。この台風に対する擬似温暖化実験は Tanaka et al. (2023)でも行われており、東日本の河川流域においては、Hagibisに伴う降水量の地球温暖化による増加の程度は、クラウジウス・クラペイロンの理論関係式（1°Cの気温上昇当たり約7%の飽和水蒸気量の増加）と整合的であった。

このように、台風に伴う降水については、将来個々の台風の降水量が増加する（確信度が中程度）が、年間を通して考えた場合の台風全体の降水量に変化はない。Watanabe et al. (2019)によると、日本に接近する台風は減少するものの、個々の台風の降水強度が増大する。これらの効果が相殺するため、台風に伴う降水の年間総量には有意な変化がない。