

地球温暖化がさらに進行した場合、  
線状降水帯を含む極端降水は増加することが想定されます

気象庁気象研究所等の研究チームは、日本域を対象に高解像度かつ多数の気候予測シミュレーションを行い、地球温暖化が進行すると、線状降水帯をはじめとする暖候期の極端な大雨がさらに増加する可能性が高いことを明らかにしました。本研究で作成したシミュレーション結果は、データ統合・解析システム（DIAS）を通じて公開する予定です。今後の日本の防災、気候変動適応計画の策定等への活用が期待されます。

気象研究所と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、寒地土木研究所は共同で、「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース（d4PDF）」（用語解説1）を元に、これまでにない日本全国を網羅した多数の高解像度気候予測シミュレーションを実施しました。

このデータを分析した結果、地球温暖化の進行に伴い、日本における50年に一度程度の大雨（用語解説2）や線状降水帯の頻度及び強度が増加し、台風に伴う大雨も増加することが分かりました。今回実施した5kmメッシュ（水平格子間隔）のシミュレーションは、d4PDFの20kmメッシュのシミュレーションに比べて、発生頻度の低い大雨の再現性が向上し線状降水帯の検出も可能となりました。線状降水帯の発生頻度は、20世紀半ばから21世紀初頭と比べて、地球全体の平均気温が工業化以降2度上昇した気候（用語解説3）ではおよそ1.3倍、4度上昇した気候ではおよそ1.6倍になると予測されました。ただし、本研究での線状降水帯の定義は、現在気象庁が「顕著な大雨に関する気象情報」の発表基準として定義している線状降水帯とはやや異なります（用語解説4）。

本データは今後、データ統合・解析システム（DIAS）を通じて公開する予定です。本研究で示した大雨に限らず、猛暑や大雪等も含む極端気象に対する今後の日本の防災、及び地球温暖化適応策策定への活用が期待されます。

この研究成果は、令和5年9月19日に米国地球物理学連合の科学誌「Journal of Geophysical Research – Atmosphere」に掲載されました。

< 発表論文 >

掲載誌： *Journal of Geophysical Research – Atmosphere*

タイトル： Identifying robust changes of extreme precipitation in Japan from large ensemble 5-km-grid regional experiments for 4K warming scenario

著者名： Hiroaki Kawase<sup>1</sup>, Masaya Nosaka<sup>1</sup>, Shunichi I. Watanabe<sup>1</sup>, Koudai Yamamoto<sup>2</sup>, Tomoya Shimura<sup>2</sup>, Yukari Naka<sup>2</sup>, Y.-H. Wu<sup>2</sup>, Hiroki Okachi<sup>3</sup>, Tsuyoshi Hoshino<sup>4</sup>, Rui. Ito<sup>5</sup>, Shiori Sugimoto<sup>5</sup>, Chieko Suzuki<sup>5</sup>, Shin Fukui<sup>1</sup>, Tetsuya Takemi<sup>2</sup>, Youichi Ishikawa<sup>5</sup>, Nobuhito Mori<sup>2</sup>, Eiichi Nakakita<sup>2</sup>, Tomohito J. Yamada<sup>3</sup>, Akihiko Murata<sup>1</sup>, Tosiya Nakaegawa<sup>1</sup>, and Izuru Takayabu<sup>1</sup>

所 属： 1 気象庁気象研究所. 2 京都大学. 3 北海道大学. 4 寒地土木研究所.  
5. 海洋研究開発機構.

< 関連情報 >

本研究は、海洋研究開発機構「地球シミュレータチャレンジ利用課題」、文部科学省「気候変動予測先端研究プログラム」、領域課題3「日本域における気候変動予測の高度化」（JPMXD0722680734）、領域課題4「ハザード統合予測モデルの開発」（JPMXD0722678534）の助成を受けて実施されました。

## 1. 背景と経緯

人為起源の温室効果ガス排出の増加に伴う地球温暖化によって、世界平均気温は1850～1900年頃と比べて既に1度程度上昇しました（IPCC第6次評価報告書（参考資料①））。近年の気温や海面水温の上昇が、平成29年7月九州北部豪雨や平成30年7月豪雨、令和元年東日本台風による大雨等に影響を与えていたとの報告もあります（令和2年10月20日気象研究所報道発表（参考資料②）、同年12月24日気象研究所報道発表（参考資料③））。

地球温暖化がさらに進行した将来において猛暑や豪雨、大雪などの極端気象がどのように変化するかを調べるため、大規模な地球温暖化予測データベース「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース(d4PDF)」（用語解説1）が作成され、2016年に公開されました。d4PDFは水平約60kmメッシュの全球版と、日本域を対象とした20kmメッシュの領域版があり、いずれも過去、2度上昇、4度上昇の気候下（用語解説3）において数千年規模のデータを有します。d4PDFにより、国内外の極端気象の将来予測研究が大きく進展しました。

しかし、d4PDFは領域版でもメッシュ間隔が20kmであるため、狭い範囲に短時間に多量の雨をもたらす線状降水帯や、複雑な地形の影響を受けた大雨を再現することはできませんでした。一方、北海道や本州などの地域を対象に、d4PDFを5kmメッシュに高解像化した計算も実施されましたが（平成30年11月20日北海道大学報道発表（参考資料④）、令和元年12月17日東北大学報道発表（参考資料⑤））、それぞれ実験設定が異なり、全国一律に評価することは困難でした。そこで本研究では、日本全国を網羅し、d4PDFの過去、2度上昇、4度上昇のそれぞれの気候での、のべ720年分のデータ（用語解説5）を用いて、地域気候モデル（用語解説6）により5kmメッシュに高解像度化し、日本における線状降水帯を含む極端降水の過去実験及び将来実験を実施しました。

## 2. 主な結果

### （1）線状降水帯の頻度の増加と強化

のべ720年分の過去実験及び将来実験の結果から、既存の手法（参考資料⑥）を用いて線状降水帯の抽出（用語解説4）を行いました。過去実験から得られた線状降水帯の出現頻度分布を図1aに示します。線状降水帯は紀伊半島

や四国の南東斜面、九州から沖縄で発生頻度が高いことが分かります。この傾向は気象庁の解析雨量を元に抽出した結果（参考資料⑥）とも整合的です。図1bに、4度上昇実験における線状降水帯の分布を示します。関東から九州にかけての太平洋側では出現頻度が増加し、広範囲で10年あたり2回以上の線状降水帯が発生しています。過去実験と同様に、紀伊半島や四国、九州で線状降水帯の出現頻度が高くなっています。過去実験では線状降水帯がほとんど抽出されなかった東北北部や北海道でも、4度上昇実験では少ないながらも抽出されました。

次に、日本全国で積算した1年あたりの線状降水帯の発生数の頻度分布を調べました（図1c）。ここでは過去実験と4度上昇実験に加え、2度上昇実験の結果も加えています。過去実験では年間15-25回に頻度のピークが見られませんが、2度上昇実験ではピークが30-35回に増加し、さらに4度上昇実験では35-40回に増加しました。平均的な年間発生回数は、過去実験で23回、2度上昇実験で31回（過去実験のおよそ1.3倍）、4度上昇実験で38回（過去実験のおよそ1.6倍）になっています。4度上昇実験では多い年は年間60回を超える年もみられました。

## （2）50年に一度の大雨の増加

全国を対象におよそ50年に一度程度の大雨（用語解説2）の降水量の変化を調べました（図2）。過去実験において、50年に一度程度の年最大24時間降水量は東海から九州にかけての太平洋側と南西諸島で多く、場所によっては600ミリを超えています（図2a）。これはアメダスの観測データから求めた値と近い値です（図省略）。4度上昇実験では全国的に増加し（図2b）、特に東海や九州にかけての太平洋側と北日本で増加率が高く、40%を超える場所も見られました。

50年に一度程度の年最大1時間降水量は、過去実験では東北南部や関東、九州西部を含む、太平洋側を中心とした広い範囲で80ミリ以上の値（気象庁の定義で猛烈な雨）が計算されていました（図2c）。紀伊半島や四国、九州東部、南西諸島では1時間に100ミリから120ミリを超える値もみられます。アメダスを用いた解析と比較すると、分布は似ていますが、やや過大評価しています（図省略）。4度上昇実験では24時間降水量と同様、全国的に増加傾向を示しました（図2d）。また、増加率で見ると北日本ほど高く、特に北海道で高くなる傾向が見られました。将来の極端降水量の増加率が北海道で高いことはこれ

までも指摘されており（参考資料⑦）、今回も総合的な結果となりました。北海道は本州以南に比べてもともと降水量が少なく、対策を取る目安の極端降水量の値も本州以南と比べ小さいものとなっています。ここでの降水量の増加以上に、水災害に結びつく事例が増える可能性があります。

### （3）梅雨前線や台風による大雨の将来変化

梅雨期の後半にあたる7月上旬は豪雨災害がたびたび発生しています（平成30年7月豪雨、令和2年7月豪雨等）。この期間で平均した日降水量の分布について、過去実験の結果を図3a、その将来変化を図3bに示します。過去実験では、梅雨前線による降水帯が九州から東海に東西に伸び、九州や四国、紀伊半島、東海で降水量が多いことが分かります。将来変化の図3bを見ると、九州西部を除き、4度上昇実験では東日本から西日本で降水量が減少していました。この傾向は、確信度は低いものの日本の気候変動2020（参考資料⑧）や地球温暖化予測情報第9巻（参考資料⑨）でも指摘されており、梅雨前線の北上の遅れと日本域での早期の弱化の影響と考えられています。

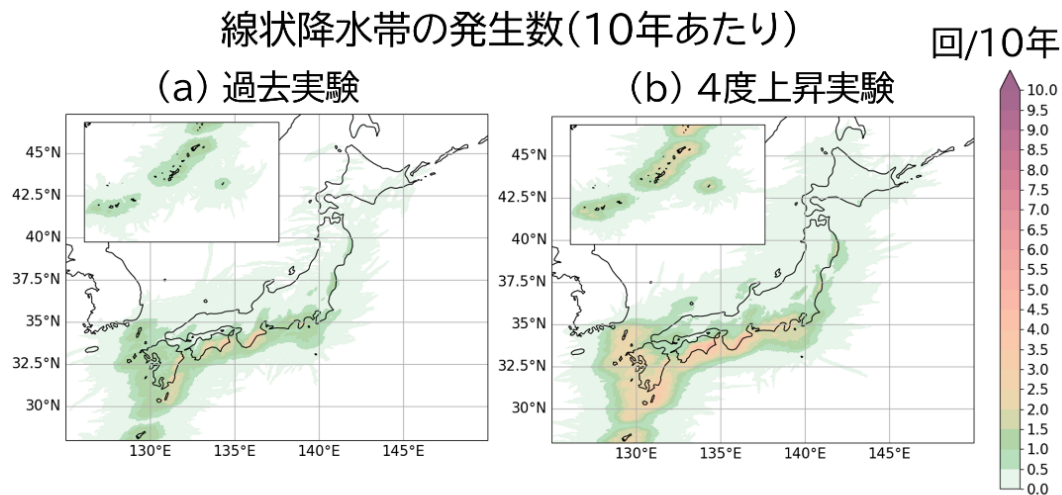
極端日降水量（期間内60年間の最大の日降水量）の地域分布を見ると、過去実験では静岡県や紀伊半島と四国の南斜面、九州で降水量が多く、局地的に400ミリを超えています（図3c）。極端日降水量の将来変化は平均日降水量とは異なり、広域で増加傾向を示しました（図3d）。つまり、温暖化が進むと7月上旬は、九州西部を除く西日本、東日本で総降水量は減少するものの、数十年に一度のような大雨は全国的にさらに増加することを示唆しています。

最後に、台風起因で発生する日本の最大24時間降水量（台風の半径500km以内における日本の陸上で発生した最大24時間降水量）を分析したところ、過去実験と4度上昇実験のいずれにおいても、5kmメッシュのモデルでは20kmメッシュのモデルに比べてより多くの降水量が再現されました（図4）。一方、過去実験と4度上昇実験を比較すると、5kmメッシュでは500ミリ/24hr程度（20kmメッシュでは250ミリ/24hr程度）を境に、出現頻度の将来変化が減少から増加に転じているのが分かります。台風起因の雨も10年に一度のような大雨については、降水量が増加する予測となりました。

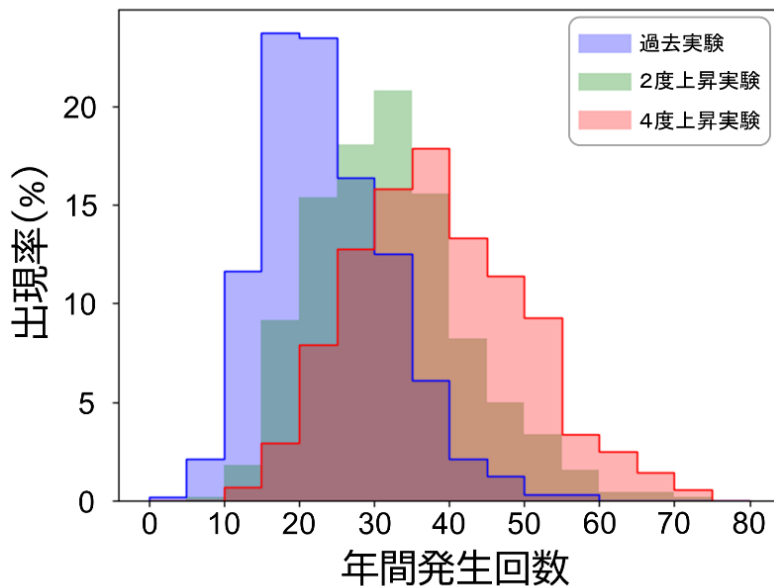
## 3. 今後の展望

本研究では高解像度のアンサンブル気候シミュレーションにより、線状降水帯や梅雨末期、台風による大雨の将来変化を評価することができました。今後

は、線状降水帯の頻度や強度が変化する要因の分析や、冬季の大雪や夏の猛暑、台風や温帯低気圧に伴う暴風といった極端気象の将来変化の分析に取り組んで参ります。本データセットはデータ統合・解析システム（DIAS）を通じて公開する予定です。将来の気候について、2度上昇と4度上昇の2種類のシナリオが存在するため、異なる温暖化レベルによる変化を評価することが可能です。本データが幅広く利用され、今後の日本の防災対策や地球温暖化の社会への影響を低減させる適応策への取り組みの推進に役立てられることが期待されます。



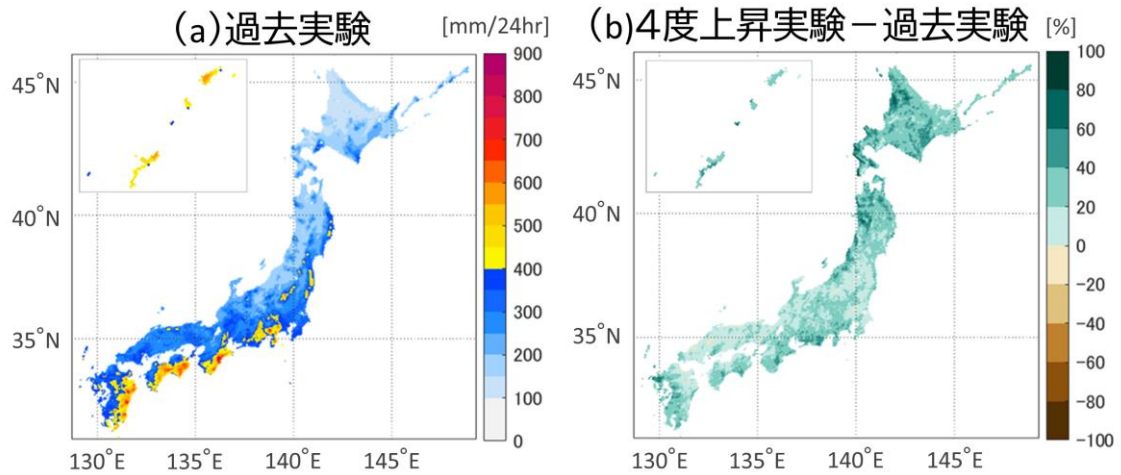
日本全国における線状降水帯の年間発生数の頻度分布



**図1 線状降水帯の出現頻度**

上段が、(a)過去実験と(b)4度上昇実験における線状降水帯の発生数（10年あたり）。下段が、日本全国で積算した線状降水帯の年間発生数の頻度分布。青：過去実験、緑：2度上昇実験、赤：4度上昇実験。過去実験と4度上昇実験を太線で囲っている。

## 年最大24時間降水量 (再現期間50年)



## 年最大1時間降水量 (再現期間50年)

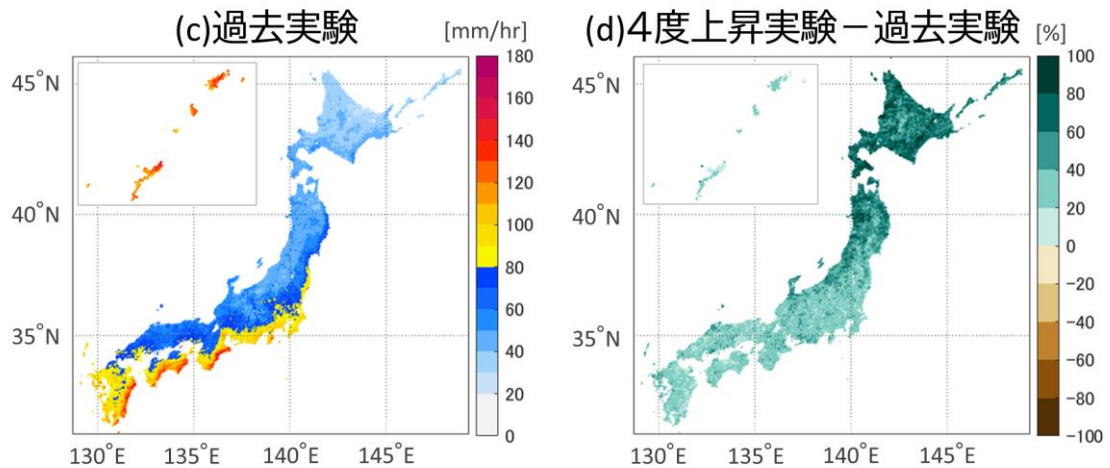
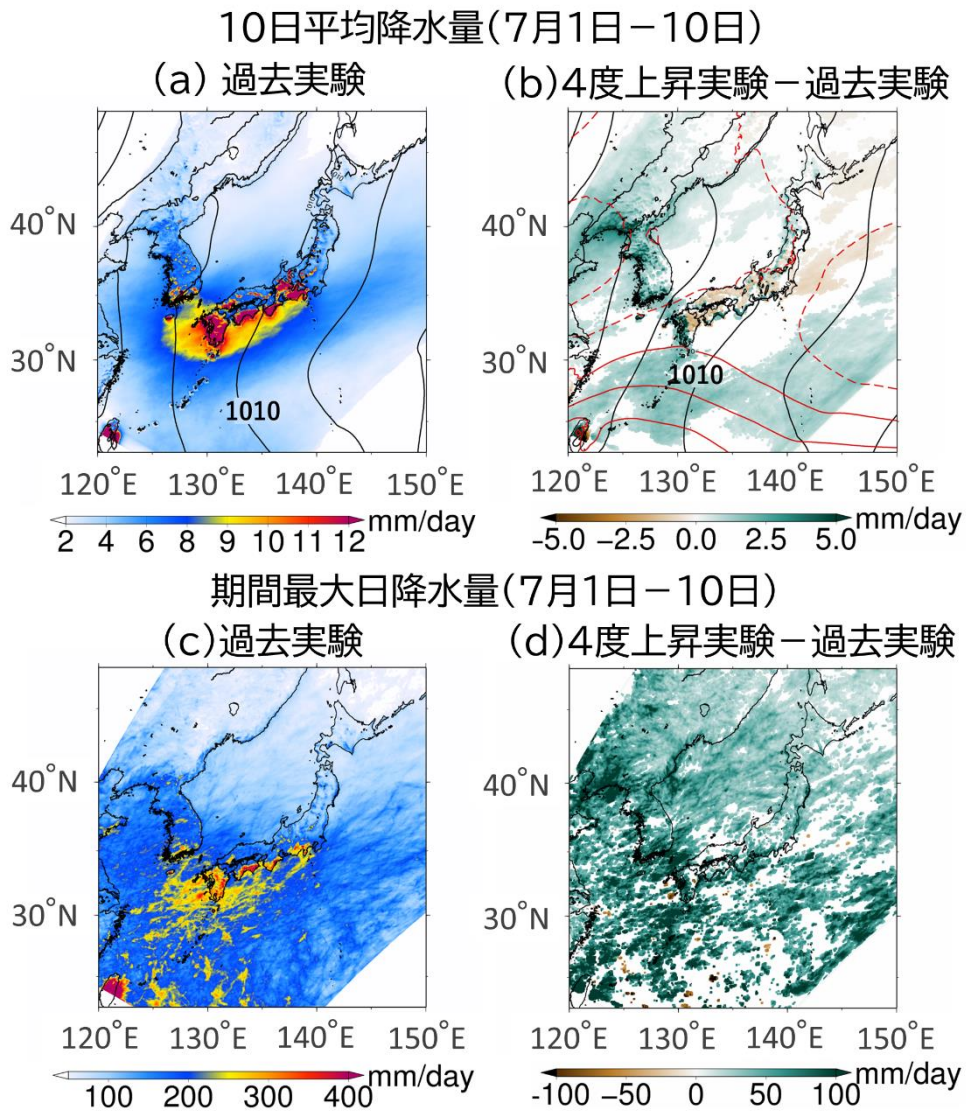


図2 再現期間50年の年最大24時間降水量と年最大1時間降水量の将来変化

過去実験における日本の陸上の再現期間50年の(a)年最大24時間降水量 (mm/24hr) と(c)年最大1時間降水量 (mm/hr)。(b, d)年最大24時間降水量と年最大1時間降水量の変化率 (%)。4度上昇実験から過去実験を引き、過去実験で割ることで、変化率 (%) として示している。





**図3 日本周辺の7月上旬の平均日降水量と期間内最大日降水量の将来変化**

過去実験における(a)7月1日から10日の平均日降水量 (mm/day) と、(c)同期間内の最大日降水量 (mm/day) 。最大日降水量は過去実験1ケース(60年間)の最大値を12ケースで平均したもの。台風が日本の近くに存在する日を除いて計算している。(b, d) 4度上昇実験から過去実験を引いたもの。(b) 期間平均日降水量 (mm/day) 、(d)期間最大日降水量 (mm/day) 。(b)、(d)ともに統計的に信頼できるメッシュのみ評価。

## 台風による日本の陸上での最大24時間降水量

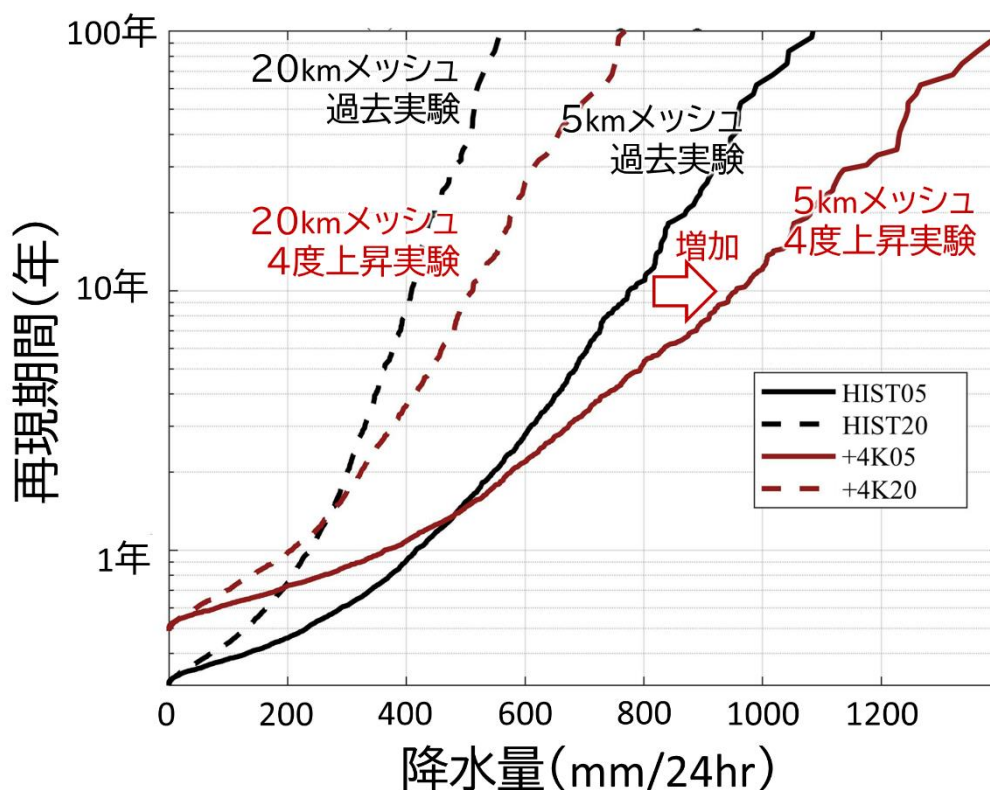


図4 20kmと5kmメッシュの地域気候モデルから得られた台風による日本の陸上における最大24時間降水量

台風を中心から半径500km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度上昇実験。実線が5kmメッシュのモデル、破線は20km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年に一度程度）の降水量が増加することを示す。

## 用語解説

1) 地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース(d4PDF: database for Policy Decision making for Future climate change)

気象研究所が開発した全球大気モデル（水平約60kmメッシュ）と地域気候モデル（水平20kmメッシュ）を使用して作成した、地球温暖化気候シミュレーション実験結果のデータベース。後者は、日本域を対象として、過去60年（1951～2010年を対象）×50メンバー（のべ3000年分）、21世紀半ばに相当するデータ（のべ3240年分）、21世紀末に相当するデータ（のべ5400年分）の多数のシミュレーションから成る。過去気候は観測された過去60年間の海面水温と海氷を全球大気モデルに与えている。一方、2つの将来気候は、過去60年間のデータから昇温傾向を除き、工業前の状態にしたうえで、将来予測される6つの昇温パターンを加えて作成した海面水温と海氷を全球大気モデルに与えている。また、海面水温に観測誤差程度の微小な値（摂動と呼ぶ）を付与することで、多量の年数の計算（アンサンブル計算）を実現している。

2) 50年に一度程度の大雨

ここでは再現期間50年を言い換えている。再現期間はある現象が平均的に何年に1回起きるかを表した値である。50年に一度程度は年発生確率1/50と同じ意味を持つ。再現期間は、気象庁の異常気象リスクマップと同様に、カナンプロットのプロットングポジション公式をもとに算出した。50年・100年といった低頻度の降水量（確率降水量）は、その地点で長い期間においてどれくらいの大雨が起こりうるかを示す資料であり、防災計画や河川保全計画などの背景となる気候情報となる（気象庁の解説参照（参考資料⑩））。

3) 「過去気候」、「2度上昇気候」、「4度上昇気候」

d4PDFデータの中で、過去計算期間60年分（1951年から2010年）を「過去気候」、RCP8.5シナリオ（用語解説7）に基づき工業化以降の世界平均気温が2度上昇した気候状態を仮定したとき（21世紀半ばに相当）を「2度上昇気候」、同様に4度上昇した気候状態を仮定したとき（21世紀末に相当）を「4度上昇気候」という。2023年現在、工業化以前から既に1度程度昇温しているため、21世紀初頭との比較ではそれぞれ1度、3度上昇となる。

#### 4) 線状降水帯の抽出

Hirockawa et al. (2020, JMSJ) (参考資料⑥) で開発された手法を、5kmメッシュの地域気候モデル用に一部改良した手法で抽出を行っている。3時間積算降水量が80mm (最大値で100mm) を基準として強雨域を検出し、強雨域の時間連続性から同一事例を集約する。集約された強雨域の形状や移動から、線状性・停滞性強雨域を定義し、線状降水帯を判定する。これにより、5kmメッシュのモデルでも解像可能な線状降水帯を抽出した。なお、本研究では、日本の陸上にかかった線状降水帯のみを対象し、観測ではほとんど存在しない15時間以上継続したものは除外した。暖候期 (4月~11月) のみを対象。

なお、気象庁が発表している「顕著な大雨に関する気象情報」では、降水量や降水域の形状に関する基準のほか、キキクル (危険度分布) に関する基準を用いて判定しており、本研究と抽出条件は異なる。(気象庁の解説資料 (参考資料⑪) )

#### 5) 720年分のデータ

本研究では、d4PDFの過去気候の中から12メンバー (1メンバー60年でのべ720年)、2度上昇気候及び4度上昇気候の中から、6つの昇温パターンをそれぞれ2メンバー (1メンバー60年で、それぞれのべ720年) のデータを用いて、5kmメッシュの高解像度計算を実施した。

#### 6) 地域気候モデル

気象庁が以前現業で用いていたメソ数値予報モデル (NHM) を、気候計算用に改良した領域気候モデル。d4PDFや気象庁の地球温暖化予測情報を作成するために使用されている。

#### 7) RCP8.5

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第5次評価報告書における地球温暖化シナリオのうち最も温暖化が進む想定シナリオ。RCPは代表的濃度パスの略。政策的な地球温暖化の緩和策が行われず、気温の上昇が今後も続くシナリオ。今世紀末に地球の平均気温が工業化以前に比べて約4度上昇すると予測される。

## 参考資料

- ① IPCC第6次評価報告書統合報告書 政策決定者向け要約 暫定訳（文部科学省、経済産業省、気象庁、環境省），  
<https://www.env.go.jp/earth/ipcc/6th/index.html>
- ② 令和2年10月20日の気象研究所報道発表資料，  
[https://www.mri-jma.go.jp/Topics/R02/021020/press\\_021020.html](https://www.mri-jma.go.jp/Topics/R02/021020/press_021020.html)
- ③ 令和2年12月24日の気象研究所報道発表資料，  
[https://www.mri-jma.go.jp/Topics/R02/021224-1/press\\_021224-1.html](https://www.mri-jma.go.jp/Topics/R02/021224-1/press_021224-1.html)
- ④ 平成30年11月20日の北海道大学報道発表資料，  
[https://www.hokudai.ac.jp/news/181120\\_pr.pdf](https://www.hokudai.ac.jp/news/181120_pr.pdf)
- ⑤ 令和元年11月20日の東北大学報道発表資料，  
<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2019/12/press20191216-01-gosetu.html>
- ⑥ Hirockawa, Y., Kato, T., Tsuguti, H., & Seino, N. (2020) Identification and classification of heavy rainfall areas and their characteristic features in Japan. J. Meteor. Soc. Japan, 98, 835–857.
- ⑦ 国土交通省，「気候変動を踏まえた治水計画のあり方」提言（令和3年4月改訂）  
[https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai\\_blog/chisui\\_kentoukai/index.html](https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/chisui_kentoukai/index.html)
- ⑧ 文部科学省，気象庁：日本の気候変動2020 大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書（詳細版）（2020），  
[https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/2020/pdf/cc2020\\_shousai.pdf](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/2020/pdf/cc2020_shousai.pdf)
- ⑨ 気象庁：地球温暖化予測情報 第9巻，  
<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/GWP/Vol9/index.html>
- ⑩ 気象庁：異常気象リスクマップ「確率降水量の推定方法」，  
[https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/riskmap/cal\\_qt.html](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/riskmap/cal_qt.html)
- ⑪ 気象庁：「顕著な大雨に関する気象情報とは」，  
[https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/kishojoho\\_senjokousuitai.html#b](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/kishojoho_senjokousuitai.html#b)