

日本全国の地域詳細な極端気象の将来予測に資する高解像度多量アンサンブル気候データセットの作成

課題責任者

高藪 出 気象業務支援センター

著者

高藪 出^{*1,2}, 川瀬 宏明^{*2,1}, 渡邊 俊一^{*2,1}, 野坂 真也^{*2,1}, 福井 真^{*2,1}, 志村 智也^{*3}, 仲 ゆかり^{*3}, 山本 浩大^{*3}, 杉本 志織^{*4}, 鈴木 智恵子^{*5}, 伊東 瑠衣^{*5}, 石川 洋一^{*5}, 岡地 寛季^{*6}, 石原 道秀^{*6}, 星野 剛^{*7}

*¹ 気象業務支援センター, *² 気象庁 気象研究所, *³ 京都大学 防災研究所, *⁴ 海洋研究開発機構 地球環境部門 環境変動予測研究センター, *⁵ 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門地球情報科学技術センター, *⁶ 北海道大学大学院 工学研究院, *⁷ 寒地土木研究所

キーワード: 気候変動, 適応策, 極端気象, 力学的ダウンスケーリング, d4PDF

1. はじめに

平成 29 年九州北部豪雨¹⁾、平成 30 年 7 月豪雨²⁾、令和元年東日本台風³⁾、令和 2 年 7 月豪雨⁴⁾等、近年日本では毎年ように豪雨や台風、大雪、猛暑といった極端気象による気象災害が発生している。近年加速する地球温暖化がこのような極端気象の発生に影響を及ぼし始めると指摘する研究もあり^{5,6,7)}、今後、さらに地球温暖化が進行した場合、極端気象がどの程度変化するかを明らかにすることが喫緊の課題となっている。世界的にも、2021 年から 2023 年にかけて公表された IPCC の第 6 次報告書において、このような極端現象の温暖化に伴う増加が社会に及ぼす影響が懸念されている。2015 年に公開された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)^{8,9)}は、過去、将来 2 度上昇、4 度上昇シナリオにおいて、それぞれ数千年のデータを持つ巨大な気候予測データセットである。d4PDF データは、メガアンサンブル実験の特性により確率密度関数 (PDF) での評価ができ、国土交通省における治水計画等にも取り込まれている。ただし解像度が 20km であるため、適用に限界がある。例えば、線状降水帯のようなメソスケール現象を扱いたいときである。時空間スケールが小さい線状降水帯等の極端降水をもたらす現象を陽に再現しつつ、確率評価する上では、より高分解能の計算が必要となる。これまでも d4PDF からの 5km ダウンスケーリングは行われてきたが、地域や対象期間が限定的であり^{10,11)}、日本全国を評価できるデータセットではなかった。

そこで、令和 3 年のチャレンジ利用課題「日本全国の地域詳細な極端気象の将来予測に資する高解像度多量アンサンブル気候データセットの作成」及び本課題において、d4PDF のアンサンブルデータを境界値として用いて、720 年規模の全国 5km 力学的ダウンスケーリングを実施した。令和 3 年度に過去実験と 4 度上昇実験の大部分の計算が終わっていたため、今年度は 4 度の残りの計算と 2 度上昇実験を行い、日本の極端降水を中心に地球温暖化に伴う将来変化予測を実施した。

2. 実験設定

令和 3 年度に引き続き、d4PDF の 60km 全球版を境界値として、非静力学地域気候モデル¹²⁾を用いて、外側 20km、内側 5km 格子間隔の 2 段ネスティングで力学的ダウンスケーリングを実施した。計算領域は令和 3 年度の報告書を参照されたい。計算は各年 7 月 20 日から翌年の 8 月末までを行い、最初の 8 月末まではスピニアップ期間とし、9 月以降のデータを解析に用いた。評価可能な現在気候実験は 1951 年から 2010 年までの 60 年間、12 個のアンサンブル計算 (計 720 年) を実施した (過去実験)。将来気候実験は、産業革命前からの全球平均気温の昇温量が 2 度と 4 度になる気候を採用した (2 度上昇実験、4 度上昇実験)。2 度及び 4 度上昇実験のアンサンブルは、昇温パターンの異なる 6 種類の海面水温 (SST) と、それぞれに対する 2 つの初期値アンサンブルから構成されている。過去実験同様、それぞれ 60 年間の計算を行っており、アンサンブル実験の総年数は 2 度上昇実験、4 度上昇実験共に 720 年である。

3. 極端降水量の将来変化

格子間隔 20km 及び 5km で計算された 720 年分の日降水量を用いて、年最大日降水量の 50 年確率値を算出した。ここでは Cunnane のプロットングポジション公式¹³⁾を用いた。

20km 格子の過去実験では、東日本から西日本の 400mm 以上の日降水量をほとんど再現できていないが、5km 格子の過去実験は観測に近い強度で 50 年確率値を出していることが分かる (図 1a-c)。将来変化は 20km と 5km で類似の傾向を示していたが、中部山岳の周りでは両者で変化傾向が異なっており、これは 20km で中部山岳域の地形の表現が悪いためだと考えられる。特に降水量の増加率が大きかったのは、北日本や東海・近畿、九州で、40%を超える増加率を示す場所も見られた。

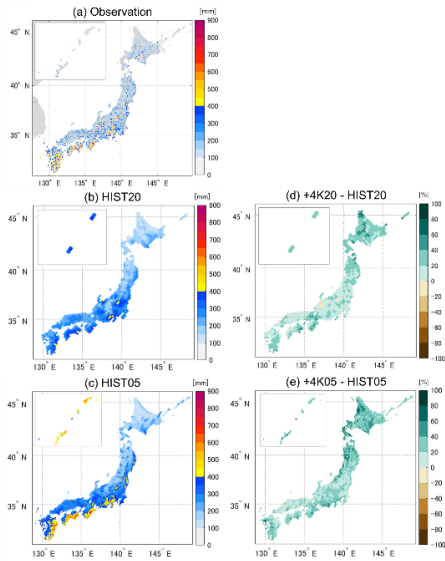


図1. 年最大日降水量の50年確率値
(a)観測(アメダス)、(b)過去実験(20km格子)、(c)過去実験(5km格子)、(d)4度上昇実験と過去実験の差(20km格子)、(e)4度上昇実験と過去実験の差(5km格子)。

4. 線状降水帯の将来変化

線状降水帯抽出手法¹⁴⁾に基づき、5km格子の実験で再現された線状降水帯の抽出を行った。線状降水帯の再現性については令和3年度の報告書を参照されたい。線状降水帯の将来変化と、全国の陸上における線状降水帯の発生数の頻度分布を図2に示す。過去実験では年間発生数が20回前後にピークが見られるが、2度上昇実験では30回から35回、4度上昇実験では35回から40回にピークが現れた。また、4度上昇実験では、過去実験では見られなかった年間60回から70回の年も現れた。

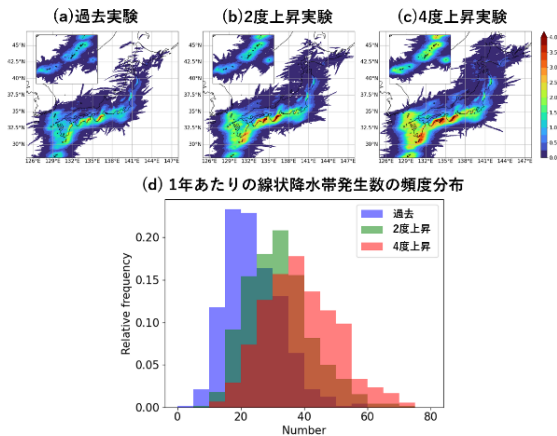


図2. 線状降水帯の10年当たりの発生数。(a)過去実験、(b)2度上昇実験、(c)4度上昇実験、(d)年間発生数(回)の頻度分布。青色が過去実験、緑色が2度上昇、赤色が4度上昇実験。

5. 強風の将来変化

年最大風速と年最大風速の極値(90%タイル値)について

て、過去実験と2度上昇実験及び4度上昇実験との差を図3に示す。年最大風速は、気温上昇に伴い、黄海で増加したが、日本列島の南の太平洋では減少する傾向がみられた(図3上段)。一方、年最大風速の極値は、オホーツク海を除く、ほぼすべての海域で増加した(図3下段)。

年最大風速と年最大風速90%タイル値の変化傾向が異なった日本列島の南の太平洋上において、強風が発生した時期を月別に調べると、強風は夏季に発生しており、台風によるものと考えられる(図略)。北西太平洋の台風の発生数は、温暖化に伴い減少するものの、猛烈な台風の割合は増えることが予測されており¹⁵⁾、本計算でも同様の傾向が見られた(図4)。これが年最大風速の将来変化に影響したとみられる。一方、日本海北東部や日本列島の東の太平洋、オホーツク海では年最大風速の発生時期が冬季であり、発達した温帯低気圧が寄与していると考えられる。

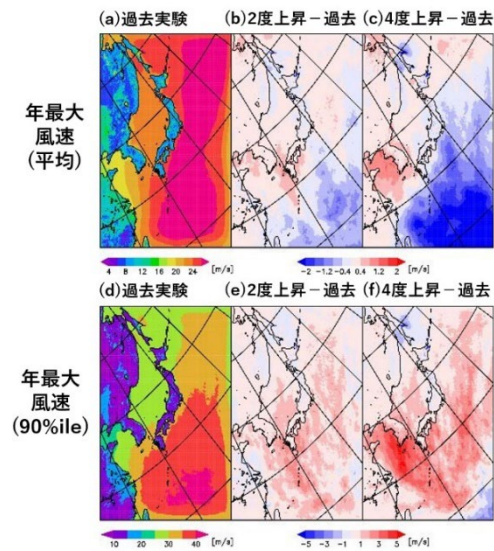


図3. 年最大風速と年最大風速の90%値。左：過去実験、中央：過去実験と2度上昇実験の差、右：過去実験と4度上昇実験の差。

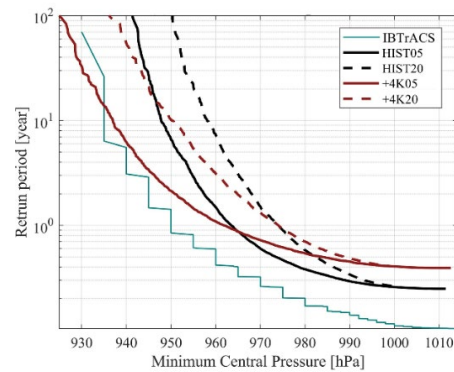


図4. 台風の最小中心気圧の将来変化。黒線が過去実験、赤線が4度上昇実験、薄緑は観測(IBTrACS)。実線が5km格子、点線が20km格子の実験。

6. まとめ

本課題では、線状降水帯、台風等、日本に災害をもたらす現象の詳細構造の再現性向上と、その将来予測を確率的に行うことを目指し、確率評価が可能な d4PDF データから、高解像度な格子間隔 5km の力学的ダウンスケーリングを行った。これにより、過去実験、2 度上昇実験、4 度上昇実験それぞれ 720 年のデータセットが完成した。5km の格子間隔まで高解像度化したことにより、日降水量の極値や線状降水帯の再現性が向上、それらの将来変化についても評価することができた。また、20km 格子での実験に比べて台風の中心気圧も観測に近づき、台風に関連する年最大風速の極値の将来予測も可能となった。

ここでは紹介しきれなかったが、温暖化に伴う極端高温や大雪、梅雨期の極端降水、河川流域別の降水量など、災害をもたらす降水や降雪、気温の将来予測についても本データセットの解析を通じて理解が進んでいる。

本課題で作成したデータセットはデータ統合・解析システム DIAS から公開される予定である。今後、文部科学省の気候変動適応戦略イニシアチブの研究課題や国土交通省、農林水産省、環境省などの多くの省庁がこのデータセットを活用することで、2 度目標に向けた温暖化緩和策・適応策策定に貢献できると期待される。

謝辞

本研究の遂行にあたっては文部科学省気候変動予測先端研究プログラム課題 3「日本域における気候変動予測の高度化」JPMXD0722680734、課題 4「ハザード統合予測モデルの開発」JPMXD0722678534 の支援を受けました。また、創生・統合プログラムのもとで作成された「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)」を使用しました。

文献

- [1] Kato, R., Shimose, K., and Shimizu, S., “Predictability of precipitation caused by linear precipitation systems during the July 2017 Northern Kyushu Heavy Rainfall Event using a cloud-resolving numerical weather prediction model”, *J. Disaster Res.*, 13, 846-859, (2018).
- [2] Shimo, et al., “Primary factors behind the Heavy Rain Event of July 2018 and the subsequent heat wave in Japan”, *SOLA*, 15A, 13-18.
- [3] Takemi, T., and Unuma, T., “Environmental factors for the development of heavy rainfall in the eastern part of Japan during Typhoon Hagibis” *SOLA*, 16, 30-36, (2019).
- [4] Araki, K., Kato, T., Hirockawa, Y., & Mashiko, W., “Characteristics of atmospheric environments of quasi-stationary convective bands in Kyushu, Japan during the July 2020 heavy rainfall event”, *SOLA*, 17, 8-15, (2021).
- [5] Kawase, H., Yamaguchi, M., Imada, Y., Hayashi, S., Murata, A., Nakaegawa, T., Miyasaka, T., and Takayabu, I., “Enhancement of extremely heavy precipitation induced by Typhoon Hagibis (2019) due to historical warming”, *SOLA*, 17A, 7-13. (2021).
- [6] Kawase, H., Watanabe, S., Hirockawa, Y., and Imada, Y., Timely event attribution strategy in Japan: an example of heavy rainfall in July 2020, In “Explaining extreme events of 2020 from a climate perspective”, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 103, S118-S123, (2022).
- [7] Imada, Y., H. Kawase, M. Watanabe, M. Arai, H. Shioyama, and I. Takayabu, “Challenges of risk-based event attribution for heavy regional rainfall events”, *NPJ Climate Atmos. Sci.*, 3, (2020).
- [8] Mizuta, R., Murata, A., Masayoshi, I., et al., “Over 5,000 Years of Ensemble Future Climate Simulations by 60-km Global and 20-km Regional Atmospheric Models”, *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 98, 1383-1393, 2016.
- [9] Fujita, M., Mizuta, R., Ishii, M., et al., S., “Precipitation changes in a climate with 2-K surface warming from large ensemble simulations using 60-km global and 20-km regional atmospheric models”, *Geophys. Res. Lett.*, 46(1), 435-442, (2017).
- [10] 星野剛, 山田朋人, 稲津将ら, “大量アンサンブル気候予測データを用いた大雨の時空間特性とその将来変化の分析”, *土木学会論文集 (水工学)*, 63, 13-18, 2018.
- [11] Sasai, T., Kawase, H., Kanno, Y., et al., “Future projection in extreme heavy snowfall event with 5-km large ensemble regional climate simulation”, *JGR*, 124, 13975-13990, 2019.
- [12] Sasaki, H., Murata, A., Hanafusa, M., et al., “Reproducibility of present climate in a non-hydrostatic regional climate model nested within an atmosphere general circulation model”, *SOLA*, 7, 173-176, 2011.
- [13] Cunnane, C. “Unbiased plotting positions - A review”, *J. Hydrology*, 37, 205-222, 1978.
- [14] Hirockawa, Y., Kato, T., Tsuguti, H., and Seino, N., “Identification and classification of heavy rainfall areas and their characteristic features in Japan”, *J. Meteor. Soc. Japan*, 98, 835-857, 2020.
- [14] Yoshida, K., Sugi, M., Mizuta, R., Murakami, H., and Ishii, M., “Future changes in tropical cyclone activity in high-resolution large-ensemble simulations”, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 9910-9917, 2017.

High Resolution Large Ensemble Dataset for Assessment of Extreme Weather Events in Whole Japan for 2-K Warming Scenario

Project Representative

Izuru Takayabu

Japan Meteorological Business Support Center

Authors

Izuru Takayabu^{*1,2}, Hiroaki Kawase^{*2,1}, Shunichi Watanabe^{*2,1}, Masaya Nosaka^{*2,1}, Shin Fukui^{*2,1}, Tomoya Shimura^{*3}, Yukari Naka^{*3}, Kodai Yamamoto^{*3}, Shiori Sugimoto^{*4}, Chieko Suzuki^{*5}, Rui Ito^{*5}, Youichi Ishikawa^{*5}, Hiroki Okachi^{*6}, Michihide Ishihara^{*6}, Tsuyoshi Hoshino^{*7}

^{*1}Japan Meteorological Business Support Center, ^{*2}Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, ^{*3}Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, ^{*4}Research Center for Environmental Modeling and Application, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ^{*5}Center for Earth Information Science and Technology, Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ^{*6}Graduate School of Engineering, Hokkaido University, ^{*7}Civil Engineering Research Institute for Cold Region

Keywords: climate change, extreme events, dynamical downscaling, ensemble experiments, adaptation, d4PDF

1. Introduction

Extremely heavy precipitation is likely to trigger inland flooding, river flooding, and geohazards, which can cause destructive infrastructure damages and catastrophic casualties. According to the sixth assessment report (AR6) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), human-caused climate change is making such extreme events more frequent and severe.

Japan has experienced heavy precipitation many times in the past. In recent years, record-breaking heavy precipitation events have occurred, such as the Northern Kyushu heavy rainfall event in July 2017¹, the heavy rainfall event of July 2018², the heavy rainfall event caused by Typhoon Hagibis in 2019³, and the heavy rainfall of July 2020⁴. Recent studies pointed out that these extreme events are affected by the anthropogenic global warming^{5,6,7}.

To project future changes in local-scale extreme precipitation in the warmer climates, the high-resolution and large ensemble experiments are required. The database for Policy Decision-making for Future climate change (d4PDF) has thousands-year historical and two future climate simulations using global and regional climate models^{8,9}. Such large ensemble datasets enable us to evaluate future changes in extreme events probabilistically. However, the grid spacings of a model is 20 km even for regional simulations in d4PDF, which is insufficient for evaluating the future changes related to local-scale and short-term meteorological phenomena, including heavy precipitations. Continuing from the project last year, this project conducts 5-km-resolution regional climate simulations for 720 years in the historical, 2-K, and 4-K warming climates, respectively. We investigate the future changes in local-scale extreme weather events, such as heavy precipitation and strong wind, around Japan.

2. Methodology

As with the previous project last year, the dynamical

downscaling is conducted by using non-hydrostatic regional climate model¹⁰ with 20-km and 5-km grid spacings. Historical experiments with 20-km and 5-km grid spacings (hereafter, referred to as HIST20 and HIST05, respectively) have been already calculated from July 1950 to August 2011 using 12 ensemble experiments in d4PDF. Our dynamical downscaling is separately conducted in each 12-month long with two-month spin-up durations. The first July and August are the spin-up duration. The annual values, such as annual maximum daily precipitation, are defined from September to the following August. Our historical climate simulations are compared with the JMA's surface observations covering Japan (Automated Meteorological Data Acquisition System, AMeDAS).

The future climate experiments are conducted using two future climate projections in d4PDF, in which the global mean surface air temperature increases by approximately 2-K and 4-K from the preindustrial period (hereafter, referred to as +2K20/+2K05 and +4K20/+4K05, respectively). The experiment for each climate has 12 ensemble members of 60-year simulations. These members are selected from 90 members, i.e., 6 SST warming patterns with 15 SST small perturbations, of the 60-km global model simulations in d4PDF. Here, the selected members are given 6 SST warming patterns with 2 SST small perturbations.

3. Future changes in daily precipitation extremes

We have compared a 50-year return value of annual maximum 24-hour precipitation obtained from HIST05 with the AMeDAS observation. Here, the 50-year return value is estimated using the Cunnane plotting position formula¹¹.

The observation shows that the 50-year return values are greater than 500 mm in the southwestern part of Japan along the Pacific Ocean (Fig. 1a). The HIST05 well reproduces the 50-year return values of annual maximum 24-hour precipitation, while the HIST20 clearly underestimates the 50-year return values, especially the southwestern part of Japan along the Pacific Ocean (Fig. 1b and c). The +4K05

shows that the 50-year return values increase by more than 40% in Hokkaido, the Japan sea side of the northern part of Japan, southern parts of Tokai and Shikoku, and western part of Kyushu (Fig. 1e). The spatial distribution of future changes is similar in +4K20 to those in +4K05, but the signs of the changes are opposite around the high mountainous areas in central Japan (Fig. 1d). This would be caused by the poor representation of precipitation around the mountainous areas in the experiments with 20-km grid spacing.

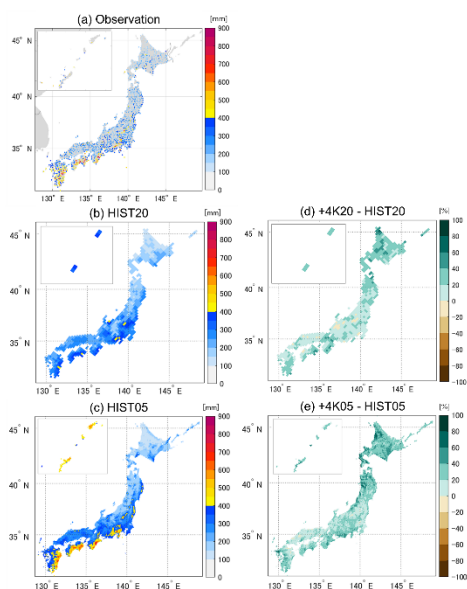


Figure 1 The 50-year return values of the annual maximum 24-hour precipitation in the historical period for (a) AMeDAS, (b) HIST20, and (c) HIST05 (unit: mm/24h). (d-e) Future relative changes in the 50-year return values of the annual maximum 24-hour precipitation (%). (d) +4K20 minus HIST20 and (e) +4K05 minus HIST05. The southwestern islands are shown in the top left corners of the panels.

4. Future changes in senjo-kousuitai

Next, we focus on future changes in “senjo-kousuitai”^{12,13}, which is a quasi-stationary band-shaped precipitation system with lengths of 50–300 km and widths of 20–50 km. The senjo-kousuitai causes short-term heavy precipitation, and often brings serious floods and landslides. As with the previous report last year, we extracted senjo-kousuitai events from 720-year dataset in each climate, based on the definition of senjo-kousuitai¹³. This study focuses on senjo-kousuitai catching at least one land grid in Japan, including islands, during the warm season from April to November.

The number of senjo-kousuitai events increases as the climate warming proceeds. In HIST05, senjo-kousuitai events frequently occur over the coastal areas in western Japan (Fig. 2a). The +2K05 and +4K05 show that the frequency of senjo-kousuitai apparently increases over the whole of Japan (Fig. 2b-c). Senjo-kousuitai events widely occur over the northern part of Japan in +4K05, where the senjo-kousuitai is rarely simulated in HIST05 (Fig. 2a). The peaks of the frequencies in the number of senjo-kousuitai events for one year are at around 20 times in HIST05, 30-35

times in +2K05, and 35-40 times in +4K05, respectively.

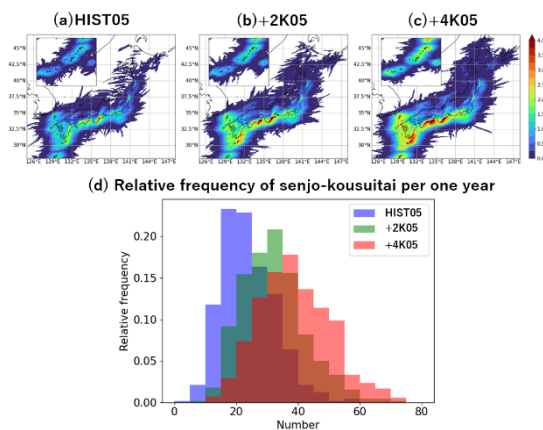


Figure 2 Horizontal distributions and accumulated number of senjo-kousuitai events in Japan. (a-c) Frequencies of senjo-kousuitai in 10 years simulated in (a) HIST05, (b) +2K05, and (c) +4K05. (d) Relative frequencies of the number of senjo-kousuitai events per year.

5. Future changes in wind extremes

The mean annual maximum wind speed is projected to increase over the Yellow Sea, but decrease over the western Pacific (Fig. 3). On the other hand, the 90%ile values of annual maximum wind speed will increase around Japan and western Pacific. Previous study indicated that global warming will reduce the number of typhoon generations but the number of strong typhoons belonging to the most intense category will increase¹⁴. The future change in typhoons would influence the future changes in annual maximum wind speed.

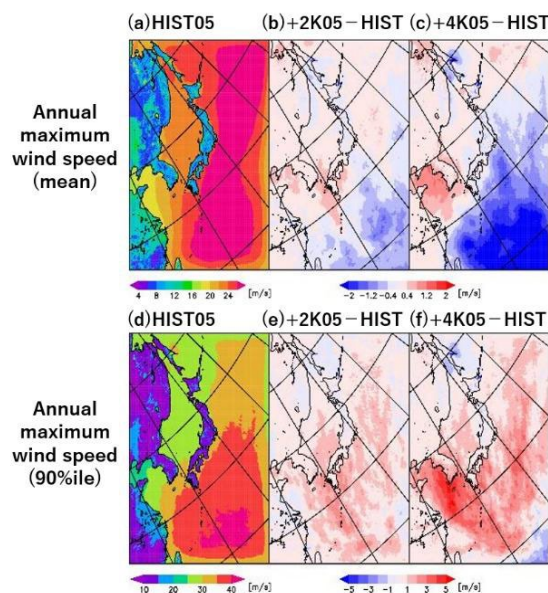


Figure.3 Annual maximum wind speed and its future changes. Upper and lower panels show mean values and 90%ile values, respectively for (left) HIST05, (middle) +2K05 minus HIST, and (right) +4K05 minus HIST.

6. Summary

This study aims to dynamically downscale d4PDF into 5-km resolution to produce a dataset for evaluating future changes in extreme events related to local-scale meteorological phenomena, such as senjo-kousuitai and typhoons. We have finished 720-year regional climate simulations with 5-km grid spacings in historical, 2-K warming, and 4-K warming climates, respectively. The historical experiment well reproduces the horizontal distribution of 50-year return values of annual maximum 24-hour precipitation and frequency of senjo-kousuitai. The future climate projections focusing on 2-K and 4-K warming climates show clear increases in frequency of senjo-kousuitai. Our projections also show the mean annual maximum wind speed will decrease over the western Pacific, while the 90%ile annual maximum wind speed will increase there, which results from the changes in number and intensity of typhoons.

Our 5-km and 720-year regional climate simulation has a possibility to evaluate the future changes in not only precipitation and wind extremes, shown in this report, but also heat waves, heavy snowfalls, and so on. This dataset will be published from the DIAS system and contribute to the adaptation for regional climate changes in local governments.

Acknowledgement

This research was also supported by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) Program for the advanced studies of climate change projection (SENTAN), Grant Numbers JPMXD0722680734 and JPMXD0722678534. We used the database for Policy Decision making for Future climate change (d4PDF) to conduct dynamical downscaling.

References

- [1] Kato, R., Shimose, K., and Shimizu, S., “Predictability of precipitation caused by linear precipitation systems during the July 2017 Northern Kyushu Heavy Rainfall Event using a cloud-resolving numerical weather prediction model”, *J. Disaster Res.*, 13, 846–859, (2018).
- [2] Shimpo, et al., “Primary factors behind the Heavy Rain Event of July 2018 and the subsequent heat wave in Japan”, *SOLA*, 15A,13–18.
- [3] Takemi, T., and Unuma, T., “Environmental factors for the development of heavy rainfall in the eastern part of Japan during Typhoon Hagibis.” *SOLA*, 16, 30–36, (2019).
- [4] Araki, K., Kato, T., Hirockawa, Y., & Mashiko, W., “Characteristics of atmospheric environments of quasi-stationary convective bands in Kyushu, Japan during the July 2020 heavy rainfall event”, *SOLA*, 17, 8–15, (2021).
- [5] Kawase, H., Yamaguchi, M., Imada, Y., Hayashi, S., Murata, A., Nakaegawa, T., Miyasaka, T., and Takayabu, I., “Enhancement of extremely heavy precipitation induced by Typhoon Hagibis (2019) due to historical warming”, *SOLA*, 17A, 7–13. (2021).
- [6] Kawase, H., Watanabe, S., Hirockawa, Y., and Imada, Y., Timely event attribution strategy in Japan: an example of heavy rainfall in July 2020, In “Explaining extreme events of 2020 from a climate perspective”, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 103, S118–S123, (2022).
- [7] Imada, Y., H. Kawase, M. Watanabe, M. Arai, H. Shiogama, and I. Takayabu, “Challenges of risk-based event attribution for heavy regional rainfall events”, *NPJ Climate Atmos. Sci.*, 3, (2020).
- [8] Mizuta, R., et al. “Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60 km global and 20 km regional atmospheric models”, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 98, 1383–1398, (2017).
- [9] Fujita, M., Mizuta, R., Ishii, M., Endo, H., Sato, T., Okada, Y., Kawazoe, S., Sugimoto, S., Ishihara, K., & Watanabe, S., “Precipitation changes in a climate with 2-K surface warming from large ensemble simulations using 60-km global and 20-km regional atmospheric models”, *Geophys. Res. Lett.*, 46(1), 435–442, (2017).
- [10] Sasaki H., Murata A., Hanafusa M., et al.: Reproducibility of present climate in a non-hydrostatic regional climate model nested within an atmosphere general circulation model, *SOLA*, 7, 173–176, (2011).
- [11] Cunnane, C. Unbiased plotting positions — A review, *J. Hydrology*, 37, 205–222, (1978).
- [12] Kato, T., “Quasi-stationary band-shaped precipitation systems, named “Senjo-Kousuitai,” causing localized heavy rainfall in Japan”, *J. Meteor. Soc. Japan*, 98, 485–509, (2020).
- [13] Hirockawa, Y., Kato, T., Tsuguti, H., and Seino, N., Identification and classification of heavy rainfall areas and their characteristic features in Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, 98, 835–857, (2020).
- [14] Yoshida, K., Sugi, M., Mizuta, R., Murakami, H., and Ishii, M., Future changes in tropical cyclone activity in high-resolution large-ensemble simulations. *Geophys. Res. Lett.*, 44, 9910–9917, 2017.