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

高薮 出 気象業務支援センター

著者

高薮 出*^{1,2},川瀬 宏明*^{2,1},渡邉 俊一*^{2,1},野坂 真也*^{2,1},福井 真*³, 志村 智也*⁴,小坂田ゆかり*⁴,山本 浩大*⁴,杉本 志織*⁵,鈴木 智恵子*⁶, 伊東 瑠衣*⁶,星野 剛*⁷,清水 啓太*⁸,岡地 寛季*⁸,石川 洋一*⁶

*¹ 気象業務支援センター *² 気象庁 気象研究所 *³ 東北大学 大学院理学研究科 *⁴ 京都大学 防災研究所 *⁵ 海洋研究開発機構 環境変動予測研究センター *⁶ 海洋研究開発機構 情報エンジニアリングプログラム *⁷ 寒地土木研究所 *⁸ 北海道大学 大学院工学研究院

近年、平成30年7月豪雨や令和元年東日本台風、令和2年7月豪雨など毎年のように豪雨が発生している。本課 題は日本に災害をもたらす豪雨や豪雪、台風、猛暑などの極端現象の将来変化を明らかにすることを目的とする。 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)の20km領域実験を、全国を対象に5km解像 度で力学的にダウンスケーリングすることで、気候変動に伴う過去から現在、将来にかけて西日本から北日本に おける大雨や大雪の変化を評価した。まず、過去再現実験において短時間に大雨をもたらす線状降水帯の抽出を 行った。全国を対象に20kmから5kmに高分解能化したことで、観測されている日本域の線状降水帯の分布をよく 再現することができた。一方、5km解像度の台風は20km解像度に比べて強度が強まり、最大風速が増加した。過 去の積雪は気温上昇に伴い、東日本や西日本で有意な減少トレンドが見られたが、観測されたような1980年半ば の急速な減少は再現されなかった。過去再現実験と4度上昇実験を比較すると、年最大1時間降水量の増加がみ られた。年最大1時間降水量は全国的に増加しており、既存の研究同様、高緯度において増加率が大きくなった。

キーワード:気候変動,極端気象,力学的ダウンスケーリング,アンサンブル実験,適応策,d4PDF

1. はじめに

2021 年 8 月に公表された IPCC WG1 第 6 次評価報告 書の政策決定者向け要約¹⁾において、地球温暖化に伴 い、豪雨をはじめとする極端現象が、過去から現在、 将来にわたって増加することが示されている。近年、 日本においても平成 30 年 7 月豪雨や令和元年東日本 台風、令和 2 年 7 月豪雨などにより、土砂崩れや河川 の氾濫、浸水などの自然災害が多発している。一方、 気象庁は令和 3 年度から線状降水帯の検知を開始した。 また、気象庁異常気象分析検討会では、このような豪 雨に地球温暖化が影響した可能性があるとの分析がな されており、今後の気候変動を踏まえた洪水対策の必 要性は、ますます高くなってきている。

気候変動に伴い、豪雨や猛暑の変化はもちろん、一 部の地域では豪雪が増えるとする研究もある。このよ うな極端現象は、発生頻度が低いうえ、日本の複雑地 形の影響を受けるために地域性が強い。このような時 空間特性を持つ極端現象に対しては、高分解能かつ多 アンサンブルの計算が必要となる。実際に、治水の計 画で必要となる数十年、数百年に1度程度の生起頻度 の大雨を把握するためには、大規模アンサンブルデー タの使用が効果的である。これまでも地球温暖化対策 に資するアンサンブル気候予測データベース(d4PDF) ²⁾や、d4PDFから事例や地域を限定して実施した5kmダ ウンスケーリングデータが、洪水のリスク評価^{3,4)}や 豪雪の再現や予測^{5,6)}などに活用されており、治水・ 海岸保全など政府施策への反映も始まっている⁷⁾。

南北に長い日本では、地域によって発生する極端現 象やその発生要因が異なる。また、平成30年7月豪 雨や令和2年7月豪雨など、九州から関東、東北に至 るまでの広域豪雨もたびたび発生する。そのため、気 候変動の影響予測・評価では、全国を網羅した均質な 気候予測データが必要となる。一方で、出現頻度が低 い豪雨や豪雪、台風、猛暑等の極端現象を網羅するた めには、高分解能の多アンサンブル実験が必要となる。 そこで本研究は、d4PDFのアンサンブルデータを境 界値として用い、全国を対象とした 5km 力学的ダウン スケーリングを実施する。これにより、d4PDF20km 領 域版では評価できなかった組織化された線状降水帯や 勢力の強い台風をはじめ、多様な気象要素について全 国規模での気候変化予測が可能となる。また、発生頻 度の低い極端現象を評価できるように、現在気候及び 将来気候を対象にそれぞれ 700 年規模の計算を行う。

2. 実験設定

非静力学地域気候モデル(NHRCM)⁸⁾を用いて、d4PDF の 60km 全球大気モデル(MRI-AGCM)⁹⁾を境界値として、 外側の領域(図1)を20km格子間隔で計算した後、内 側の領域を 5km 格子間隔で計算した(それぞれ、 d4PDF-20kmDS、d4PDF-5kmDS と呼ぶ)。元々存在する d4PDF20km 領域版は海氷が存在しない等の問題があっ たため、ここでの 20km 計算には海氷の取り扱いや放 射の再現性の向上等の改良が加えられている。計算は 各年7月20日から始め、翌年の8月末まで行った。 最初の8月末まではスピンアップ期間とし、9月以降 のデータを解析に用いた。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を 実施した(計 720 年)。一方、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4度になる気候 を採用した(4 度上昇実験)。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、それぞれに対して 2 つの初期値アンサン ブルから構成される。4 度上昇実験においても過去実 験同様 720 年の計算を予定していたが、ES の停電に伴 い、課題終了時に完了したのは 319 年分であった。そ のため、本報告では将来変化の記述は限定的である。



図 1. 外側 20km と内側 5km の計算領域

3. 線状降水帯の再現性

線状降水帯抽出手法¹⁰⁾を用いて、5km 実験で再現さ れた線状降水帯の抽出を行った。九州や四国の南岸、 紀伊半島などで多くの線状降水帯が検出されるなど、 線状降水帯の全国的な分布はよく再現されていた。発 生回数は観測に比べてやや多いが、これは解析雨量で は観測範囲外となる海上の事例が一部含まれているこ とも要因である。d4PDF-5kmDS はサンプル数が多いた め、解析雨量を基にした解析に比べて、陸上海上共に 密に検出されており、統計的な調査に十分な事例数が 得られた。しかし、東海から関東沿岸、及び福島県で 線状降水帯は、モデルでは検出されたが、観測ではほ とんど見られない。これらは地形性の降水に対するバ イアスや、対流パラメタリゼーションによるバイアス などと考えられる。



図2. 線状降水帯の分布

陰影は 10 年あたりの発生数を示す。(左)d4PDF-5kmDS からの抽出。(右)解析雨量からの抽出。 Hirockawa et al. (2020)¹⁰⁾から引用。

4. 台風強度の解像度依存性

d4PDF-20 km DS および d4PDF-5 km DS の現在気候における台風の強度の比較を行った。領域実験の台風の抽 出は、60 km 全球実験における台風トラックデータ¹¹⁾ に基づく。全球実験トラックデータの台風位置近傍の 領域実験における海面更正気圧の極小値を領域実験の 台風として抽出した。



Minimum Central Pressure [hPa] (Anomaly from 1020 hPa) 図 3. d4PDF-20kmDS と d4PDF-5kmDS の台風の比較 (上左)台風の中心気圧の比較、(上右)最大風速の 比較。緑丸はすべての台風のライフサイクル、赤丸 はライフサイクル極値。(下)最低中心気圧の超過 確率の比較。

図3にd4PDF-20km DSおよびd4PDF-5kmDSの台風強

度の比較結果を示す。ほとんどの場合で d4PDF-5kmDS が d4PDF-20kmDS の強度(中心気圧・最大風速)を上 回り再現精度が向上した。ただし、精度が向上したも のの、観測に比べるとまだ過少評価傾向にある。これ は、台風発達のためには日本の南の設定領域が狭いた め(図1)と考えられる。

5. 過去の雪の変化

東日本の日本海側の積雪は、1980年代中盤から 2000年頃にかけて大きく減少したことが観測から分 かっている。d4PDF-5kmのアンサンブル平均は、観測 で見られたような1980年代半ば以降の急激な積雪減 少は見られなかった(図4)。この結果から、観測で 見られた急激な減少は、大気の内部変動の影響を受け ていたと考えられる。d4PDF-5kmDSでも東日本の日本 海側では減少トレンドが見られ、地球温暖化により長 期的に積雪が減少していることを示している。一方、 北日本では減少トレンドが不明瞭であった。



図 4. 北日本と東日本日本海側の年最大積雪深の 年々変動。1981-2010 年平均からの差。薄線は各実 験、太線はアンサンブル平均、直線はトレンド。

6. 地球温暖化による将来の降水と風の変化

日本陸域で領域平均した年最大日積算降水量及び年 最大5日積算降水量の発生頻度について、d4PDF-20kmDSの過去実験と4度上昇実験を比較した(図5)。 その結果、強雨頻度の増加および弱い雨の減少が確認 できた。この傾向は、既存の d4PDF20km 領域版の結果 と同様である。また、特に時間スケールの短い年最大 日積算降水量で顕著であった。d4PDF-5kmDS の過去実 験は、d4PDF-20 km DS の過去実験よりも強雨の発生頻 度がやや増加した。降水に対する地形解像度の影響が 考えられる。d4PDF-5kmDS の4度上昇実験については、 全実験が終了後に解析する予定である。

図6に過去実験と4度上昇実験における年最大1時 間降水量の変化比(アンサンブル平均)を示す。4度 上昇実験では時間降水量が北海道などで最大で2倍に 増加する地域がみられた。これは既存の研究とも整合 的であるとともに、解像度が上がったことで、地形の 影響で局所的に増加率が高い場所も見られた。ただ、 与えた SST 間の違いが大きく、4 度上昇実験が全て終 了した後に再度評価する必要がある。



図 5. 年最大日積算降水量と年最大 5 日積算降水量 の頻度分布。過去実験と 4 度上昇実験。



図 6. 年最大 1 時間降水量の過去実験と 4 度上昇実 験の差(変化比)。SST (CC, MI, MP, MR) ごとに平均。

次に、風の将来変化について調査した(図 7)。こ こでは過去実験は 720年、4度上昇実験 319年分のデ ータを用いた。日本付近では将来、日最大風速が弱ま る傾向であった。オホーツク海では海氷減少に伴い、 日最大風速の増加が予測される。一方で、年最大風速 は日本の南海上で弱まる予測となっているものの、九 州以北では明確な変化傾向は見られない。日本の南海 上の年最大風速は台風に影響を受けるため、温暖化に よる台風の発達の変化が影響していると考えられる。



図7. 風速の将来変化

(a)日最大風速と(b)年最大風速のアンサンブル平均。(c-d)過去実験と4度上昇実験のそれぞれの差。

7. まとめ

本課題では、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)の全球 60km 実験を基に、 全国を対象とした 5km 力学的ダウンスケーリングを実施した。5km 実験において線状降水帯を抽出したところ、観測されている線状降水帯の分布と近い分布を再現できていたことがわかった。また、5km 実験の台風 の強度(中心気圧・最大風速)は、20km 実験の強度 を上回り再現精度が向上した。ただ、観測に比べると 主に南海上での強度が弱く、領域の設定が影響してい る可能性がある。過去の年最大積雪深の年々変化を調 べると、観測で見られた 1980 年代半ばの急速な減少 は再現されなかった一方、長期的な減少トレンドは見 られ、地球温暖化による積雪減少を示唆している。

過去再現実験と4度上昇実験を比較したところ、年 最大1時間降水量は全国的に増加しており、高緯度に おいて増加率が高くなった。また、地形の影響で局所 的に増加率が高い場所も見られた。一方、日本周辺の 風の変化を調べると、全国的に日最大風速は将来弱ま る傾向が見られたが、年最大風速は沖縄や日本の南の 海上を除いて、明確な変化傾向は見られなかった。沖 縄付近の顕著な減少には、台風の変化が影響している 可能性がある。降水量及び風の評価に関しては、4度 上昇実験の完成及びさらなる調査が必要である。

本課題で得られた成果は、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への活用や、国 土交通省、農林水産省、環境省などの多くの省庁が携 わる温暖化適応策の策定に活用されることが期待され る。また、5kmの解像度を活かし、治水対策はもちろ ん、自治体レベルでの暑熱、農業、健康、高潮、雪害 などの多岐の分野に貢献できる見込みである。

謝辞

本研究の遂行にあたっては文部科学省統合的気候モデ

ル高度化研究プログラム領域テーマ C「統合的気候変 動予測」JPMXD0717935561、テーマ D「統合的ハザー ド予測」JPMXD0717935498 の支援を受けました。また、 創生及び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] IPCC, Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. 2021.

[2] 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.

[3] 星野剛,山田朋人,稲津將ら: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.
[4] 山田朋人,星野剛,舛屋繁和ら:北海道における 気候変動に伴う洪水外力の変化,河川技術論文集,第 24 巻, 391-396, 2018.

[5] Kawase, H., Sasai T., Yamazaki T., et al.: Characteristics of synoptic conditions for heavy snowfall in western to northeastern Japan analyzed by the 5-km regional climate ensemble experiments. *J. Meteor. Soc. Japan*, **96**, 161-178, 2018.

[6] 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.

[7] 国土交通省水管理・国土保全局河川計画課:気候 変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会「気候変動 を踏まえた治水計画のあり方」(令和3年4月改訂)

[8] Sasaki H., Murata A., Hanafusa M., et al.: Reproducibility of present climate in a nonhydrostatic regional climate model nested within an atmosphere general circulation model, *SOLA*, **7**, 173-176, 2011.

[9] Mizuta R., Yoshimura H., Murakami H. et al.:
Climate simulations using MRI-AGCM with 20-km grid.
J. Meteor. Soc. Japan, 90A, 233-258, 2012.

[10] 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.
[11] Webb A. Shimura T., Mori N.: Global tropical cyclone track detection and analysis of the d4PDF mega-ensemble projection, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering), 75, 207-212, 2019.

High Resolution Large Ensemble Dataset for Assessment of Extreme Weather Events in whole Japan in the Future

Project Representative

Izuru Takayau Japan Meteorological Business Support Center

Authors

Izuru Takayabu^{*1,2}, Hiroaki Kawase^{*2,1}, Shunichi Watanabe^{*2,1}, Masaya Nosaka^{*2,1}, Shin Fukui^{*3}, Tomoya Shimura^{*4}, Yukari Osakada^{*4}, Koudai Yamamoto^{*4}, Shiori Sugimoto^{*5}, Chieko Suzuki^{*6}, Rui Ito^{*6}, Tsuyoshi Hoshino^{*7}, Keita Shimizu^{*8}, Hiroki Okachi^{*8}, Youichi Ishikawa^{*6}

*¹Japan Meteorological Business Support Center, *²Meteological Research Institute, Japan Meteorological Agency, *³Graduation school of Science, Tohoku University, *⁴Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, *⁵Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, *⁶Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, *⁷Civil Engineering Research Institute for Cold Region, *⁸Graduate School of Engineering, Hokkaido University

This study is to clarify future changes in extreme phenomena such as heavy rainfall, heavy snowfall, typhoons, and heat waves that bring disasters to Japan. Conducting dynamical downscaling from "Database for Policy Decision-Making for Future Climate Change (d4PDF)" to a 5-km resolution for the whole of Japan, we evaluated the past and future changes in precipitation, snow cover, and wind in Japan due to climate change. First, the quasi-stationary band-shaped precipitation systems and typhoons were better reproduced by increasing the resolution. Past snow cover showed a significant decreasing trend in Sea of Japan coast in eastern and western Japan as temperatures increased, but did not reproduce a rapid decrease observed in the mid-1980s. Comparing the past reproduction experiments with the 4-K warming experiment, an increase in annual maximum hourly precipitation was observed. The increase rate of annual maximum hourly precipitation was greater at higher latitudes.

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

1. Introduction

The Coupled Model Inter-comparison Project (CMIP6) data has a potential enough to discuss continental scale mean climate change. However, our concern is now focused on the changes in extreme events¹). One reason is a recent increase in extreme phenomena which cause many disasters and affect strongly the stakeholders. Mega ensemble experiments performance to count such hazard are already known. Many studies have used the "Database for Policy Decision-Making for Future Climate Change" (d4PDF)'s 20-km regional climate model ensembles data²) to estimate the hydrological disaster phenomena occurrence frequency³).

However, 20-km resolution is not enough to represent the quasi-stationary band-shaped precipitation systems⁴), which causes heavy rain events in the Baiu season (a rainy season in East Asia). We already know that a 5-km grid model is needed for representing such mesoscale phenomena. Till now, the major obstacle to producing such products is a lack of computer capacity. The high-performance capabilities of the fourth-generation supercomputer system appeared in the Earth Simulator in early 2021 makes it possible to do such a study with large ensemble simulations with a 5-km grid model. Here we arrange a product of a super high-resolution ensemble dataset of climate change projection around the Japanese archipelago and performed preliminary analyses.

2. Experimental design

Dynamical downscalings were conducted using a Non-

Hydrostatic Regional Climate Model (NHRCM)⁵⁾ with 20km and 5-km grid spacings (d4PDF-20kmDS and d4PDF-5kmDS, respectively) from the Meteorological Research Institute Atmospheric General Circulation Model (MRI-AGCM) with about 60 km grid spacings in the d4PDF. Historical experiments started from 20 July, 1950 to 31, August, 2011. The one-way double nesting approach was applied. First July and August are a spin-up duration. We evaluated the results from September 1950 to August 2011. Twelve ensemble experiments were conducted by using different initial conditions and using SST with different perturbations. A total number of calculation years is 720.

For the future climate projection, 4 K warming experiments relative to the pre-industrial period in the d4PDF were used. As with the historical experiments, 12 ensemble experiments were conducted with six SST anomalies and two initial and SST perturbation ensembles. Because of an unfortunate power outage of ES, the 4K warming experiments have not been finished.

3. Results

Using an objective identification procedure by Hirockawa et al. (2020)⁴⁾, we detected the quasi-stationary band-shaped precipitation systems (usually called senjo-kousuitai in Japanese⁶⁾) from the d4PDF-5km experiment. The obtained distribution of senjo-kousuitai in d4PDF-5km experiment is in a good agreement with observation, although there are some biases in Tokai and Kanto regions and Fukushima prefecture. Owing to large ensembles, the distribution in d4PDF-5km is much denser than observation and the total number of events is sufficient for statistical analyses.



Figure 1. Distribution of the frequencies of senjo-kousuitai per ten years. (a) d4PDF-5kmDS and (b) radar/raingaugeanalyzed precipitation (adopted from Hirockawa et al. $(2020)^{4}$).

Typhoon characteristics in the present climate were compared between d4PDF-20kmDS and d4PDF-5kmDS. The typhoon intensity of d4PDF-5kmDS is stronger than that of d4PDF-20kmDS (Fig. 2), which means that accuracy of typhoon characteristics of d4PDF-5kmDS has been improved significantly.



Figure 2. Comparison of typhoon intensity between 5km-RCM and 20km-RCM for (a) pressure and (b) wind speed.

Historical annual maximum snow depth showed significant decreasing trends in Japan Sea side in eastern and western Japan as temperatures increased, while the trend is small in northern Japan. On the other hand, a rapid decrease in snow depth observed in the mid-1980s was not reproduced.



Figure 3. Mean changes in annual maximum hourly precipitation in present climate condition and 4 K warming climate. Four SST patterns (CC, MI, MP, and MR) are shown.

Magnitudes of changes in annual maximum hourly precipitation vary in the regions. North-eastern parts of Japan such as Hokkaido show that annual maximum hourly precipitation increases by 2 times in the 4-degree rise scenario (Fig. 3). Also, the changes are different among SST patterns that should be further investigated after the 4K warming future climate experiments complete.

4. Conclusion

Our challenging experiments have a possibility to clarify future changes in extreme phenomena such as heavy precipitation, heavy snowfall, typhoons, and heat waves that bring disasters to Japan. Historical experiments with 5-km grid spacing reproduced the senjo-kousuitai and typhoons intensity. Also, historical annual maximum snow depth showed a significant decreasing trend in eastern and western Japan as temperatures increased. Comparing the historical experiments with the 4 K warming experiments, greater increases in annual maximum hourly precipitation was found at higher latitudes. Our 5-km large ensemble dataset will contribute to the adaptation for regional climate changes in local governments.

Acknowledgement

This research was supported by the Integrated Research Program for Advancing Climate Models (TOUGOU) Grant Number JPMXD0717935561 and JPMXD0717935498 from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), Japan. We used the database for Policy Decision making for Future climate change (d4PDF) to conduct dynamical downscaling.

References

[1] IPCC, Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. 2021.

[2] Mizuta R., Murata A., Masayoshi I. et al.: Over 5,000 Years of Ensemble Future Climate Simula-tions by 60-km Global and 20-km Regional Atmospheric Models, Bull.Am. Meteorol. Soc., pp.1383-1393, 2016.

[3] Mori N., Takemi T., Tachikawa Y., et al.: Recent nationwide climate change impact assessments of natural hazards in Japan and East Asia, Weather and Climate Extremes, 32, 100309, 2021.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.