

関東地方における洪水リスクの将来変化予測に向けた高解像度アンサンブル気候データセットの構築

課題責任者

山田 朋人 北海道大学 大学院工学研究院

著者

山田 朋人*¹, 星野 剛*¹, 清水 啓太*^{2,3}, 成 岱蔚*¹

*¹ 北海道大学 大学院工学研究院

*² 中央大学大学院 理工学研究科

*³ 現 北海道大学 大学院工学研究院

気候変動に伴う豪雨の激甚化を踏まえ、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の領域実験を 5km 解像度に力学的にダウンスケーリングした情報を基に今後の治水対策が検討されている。北海道では全国に先駆けてアンサンブル気候データを用いた大規模豪雨の生起リスク情報と予測される被害の規模に基づいた洪水リスク評価が実施されており、リスク情報に基づく具体的な適応策の検討が推進されている。本課題では、大雨リスクの将来変化や適応策の全国的な検討の推進を可能とする気候変動予測データベースを構築するために、関東地方を対象とした d4PDF 領域実験への力学的ダウンスケーリング (DDS) を実施した。DDS による計算値と観測値双方の規模とその生起確率を統計解析することで、DDS の適用による気候モデルの再現性の向上が示された。加えて、DDS により算定された降雨量の頻度分布は、数理統計理論により決定する信頼区間の幅と適合することが明らかとなり、DDS による計算値が理論から支持されることが分かった。以上の結果は、北海道での洪水リスク評価により既に得られた結果と整合しており、当該手法の全国的展開の実現可能性に寄与するものである。

キーワード：気候変動，適応策，洪水リスク，力学的ダウンスケーリング，d4PDF

1. はじめに

近年、我が国では、河川計画の設計外力となる降雨量（計画降雨量）を上回る豪雨が発生しており、人命ならびに社会基盤への被害が深刻化している。この現状に鑑み、近年の記録的豪雨の多発傾向ならびに気候変動の影響を踏まえた洪水対策に関する技術検討が実施されている。北海道では先駆的な気候変動適応策への検討が推進されている。平成 28 年 8 月北海道大雨激甚災害を契機として、国土交通省北海道開発局と北海道が共同で設置した「平成 28 年 8 月北海道大雨激甚災害を踏まえた水防災対策検討委員会」¹⁾では、気候変動が水災害リスクに及ぼす影響を分析するとともに、「気候変動による将来の影響を科学的に予測し、具体的なリスク評価をもとに治水対策を講じるべき」との提言が示された。この提言を受け、国土交通省北海道開発局および北海道は「北海道地方における気候変動予測（水分野）技術検討委員会」²⁾を設置し、将来の洪水リスクを検討した。その結果を踏まえ、令和元年度に設置された「北海道地方における気候変動を踏まえた治水対策技術検討会」³⁾は、後述する科学的信頼性を有する大量アンサンブル気候再現予測データを用い、気候変動の影響を踏まえた詳細なリスク評価、ならびにハード・ソフト等の一体的な適応策の更なる検討を実施している。また、「気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会」⁴⁾がとりまとめた提言では、治水計画の立案にあたり、「実績の降雨を活用した手法」から「気候変動により予測される将来の降雨を活用する手法」への転換が示されている。前述の北海道における専門家委員会では、

「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)」⁵⁾への力学的ダウンスケーリング (Dynamical downscaling, 以降 DDS と表記) 結果に基づいた検討が推進されている。d4PDF は過去の気候や温暖化進行後の気候 (将来気候) を対象とした、数千年間分の気候シミュレーションデータである。当該データの活用により、過去の降雨観測では、想定できなかった豪雨ならびに、将来気候における豪雨の規模や発生確率が推定可能となる。

我が国では、過去数十年間に亘る降雨観測に基づく河川計画が策定されている。一方、多様な降雨現象をもたらす気候システムの自由度は、膨大な大きさを有している。その膨大な気候システムの自由度に対して、各流域がこれまで経験した豪雨の物理特性の分析を経て蓄積されてきた気候システムへの認識は、情報量として限定的であり、不確実性を有する。大量アンサンブルデータの使用は、過去の観測情報と併用することで、気候システムへの理解を促進させ、過去の観測情報により規定された計画降雨量の不確実性の定量化を実現させる。具体的には、膨大な気候再現・予測シミュレーションを実施することで、気候システムの自由度を考慮した上で、災害の要因となる低頻度極端現象の評価が初めて可能となった。これは、膨大なシミュレーションにより推定可能となる、対象とする系の統計的閾値によって、非線形力学系が有する有界性 (boundedness) を議論することと数学的に同義である。北海道におけるその具体的検討として、d4PDF 領域実験を境界条件とした DDS が実施され、高解像度の気候再現・予

測情報が整備されている[6][7]。加えて、当該情報により、計画降雨量に内在する不確実性の信頼区間幅としての定量化ならびに、降雨の時空間分布等を踏まえた洪水リスクの評価手法が提案されており、当該手法による将来気候下での大規模洪水に伴う人的・経済的被害の推定が可能となった。また、これらの研究成果は前述の北海道における一連の技術検討の基礎となっている。

本課題は、気候変動適応策の策定に資する基盤情報を創出するために、日本全域の洪水リスクの将来変化を評価可能なデータセットの構築を目的とするものである。具体的には、関東地方を対象としたd4PDF領域実験のDDSを実施し、その計算値と観測値の比較分析ならびに、数理統計理論を用いたその妥当性の検証を行った。本報告ではその詳細を示す。

2. 実験条件

本課題は、気象研究所非静力学地域気候モデル(Nonhydrostatic Regional Climate Model:NHRCM)⁸⁾を用いてDDSを実施し、20km水平解像度であるd4PDF領域実験(d4PDF-20km)の過去実験および4°C上昇実験を、図1に示す関東地方周辺部を計算対象領域として5km解像度(d4PDF-5km)へと変換した。なお、d4PDF領域実験は、領域気候モデルNHRCMにより作成された水平解像度20kmの気候再現・予測データであり、長期観測データが得られる1951年から2010年の60年間を対象に異なる初期値、海水と海面水温に摂動を加えた50メンバの数値計算である過去実験(60年×50メンバ=3000年)、産業革命以前に比べて全球平均温度が2°C上昇した世界を想定し、6種類の海面水温パターンとそれに摂動を与えた9メンバの数値計算を実施した2°C上昇実験(60年×海面水温6パターン×9メンバ=3240年)および同様に4°C上昇した世界を想定した4°C上昇実験(60年×海面水温6パターン×15メンバ=5400年)で構成される。DDSの条件設定は対流パラメタリゼーションにKain-Fritschスキーム、雲物理過程に氷相を含むバルクモデル、乱流クロージャモデルにImproved Mellor-Yamada Level3、陸面モデルにimproved MRI/JMA-SiBを用いた。DDSの対象は利根川八斗島基準地点の集水域において6月から11月の6ヶ月間においてd4PDF-20kmの流域平均72時間降雨量が最大となるイベント(本研究では年最大降雨イベントと定義)とした。DDSは15日間の計算を実施し、対象の降雨イベントの発生日の10日前から計算を開始した。

上記のDDSの対象イベント選定の妥当性ならびに当該流域以外での適用可能性を検証するため、以下の分析を実施した。まず、年間を通したDDSについて、過去実験458年、4°C上昇実験291年を対象に実施した。この通年DDSの計算値と、d4PDF-20kmにおける年最大降雨イベントへのDDSの計算を比較し、後者のDDS対象イベントの選定手法により5km空間解像度の大雨イベントが十分に抽出可能であることが分かった。次に、DDSの対象事例数の削減の検討に向けて、選定した降雨イベントと周辺流域における年最大降雨イベントが一致する程度を分析し

た。この分析には、アジアの日降水量グリッドデータ(Aphrodite)⁹⁾とd4PDF-20kmを用いた。図2に利根川八斗島基準地点流域での年最大降雨と全国各流域での年最大降雨イベントの同時生起の割合を示す。なお、本研究では、各流域において各年の年最大72時間降雨の期間を抽出し、利根川八斗島基準地点流域と少なくとも1時間以上重なる場合を同時生起と定義し、同時生起した年最大降雨イベントが発生した年数が検討する年総数に占める割合をOverlap率と定義する。同図より、降雨量が上位のイベントであるほど周辺流域において年最大降雨イベントが発生していることが分かり、本課題で実施した、降雨の選定方法により、周辺流域において強い降雨イベントは概ねカバーされていることが示された。なお、上記したOverlap率、流域をまたぐ大雨をもたらす気象擾乱、地形の影響および大気安定度等を考慮し、当該流域以外での年最大降雨イベントの抽出を行うことで、DDSの計算資源の削減が可能となる。

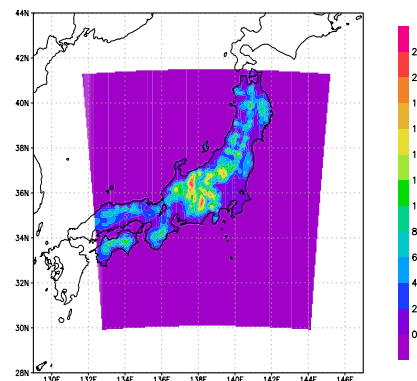


図1 DDSの対象領域(図中、着色された領域が5kmへのDDSの対象範囲である。なお、カラーバーは計算で使用された標高(m)。

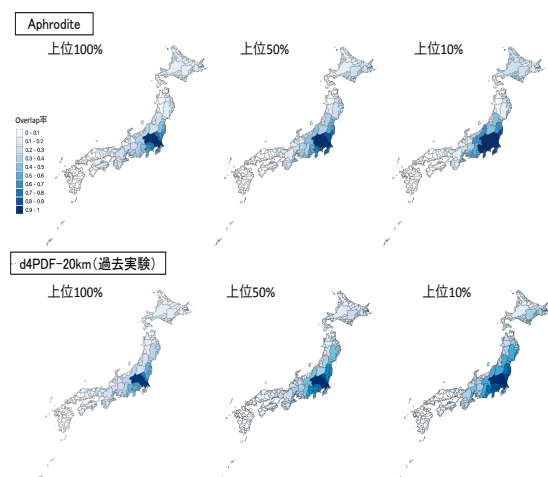


図2 利根川八斗島基準地点流域での年最大降雨イベントと同時生起した降雨イベントの割合(上段:Aphrodite、下段d4PDF-20km(過去実験)、左から全ての事例、利根川八斗島基準地点流域での上位50%の降雨量の年、利根川八斗島基準地点流域での上位10%の降雨量の年をそれぞれ対象とした際の割合を示す。)

3. 力学的ダウンスケーリング前後の降雨量の比較

利根川八斗島基準地点流域における年最大72時間降雨量の観測値（期間は1926年から2019年）と、d4PDF-20kmおよびd4PDF-5kmにおける過去実験の計算値の頻度分布を図3に示す。同図より、d4PDF-20kmは観測値と比べて降雨量は大きい傾向にあることがわかる。d4PDF-5kmにおいては、それらの乖離は緩和されている。また、図4には、観測とd4PDFの結果のそれぞれの降雨量を降順に並べ、最小二乗法による傾きを算出した結果を示す。この傾きはバイアス補正手法の一つである1次関数型のピアニの手法の補正係数¹⁰⁾を意味する。なお、過去実験50アンサンブルに対してそれぞれ傾きを算出し、平均値を算出した。観測期間1951年から2010年までの60年間を対象とした場合、傾きの平均値はそれぞれd4PDF-20kmで0.81、d4PDF-5kmで0.89となり、d4PDF-5kmの方が観測値に近くバイアス補正量が小さいことがわかる。また、図3は大量アンサンブルデータを用いることの利点も示している。観測の最大値は1947年のカスリーン台風時の308.6mmであるものの、d4PDFにはこれを上回る降雨イベント事例が複数事例含まれており、このような過去の最大級の降雨イベントやそれを上回る降雨の危険性の理解に有効となる。

4. 計画確率規模における降雨量の信頼区間の評価

計画降雨量は、一般的に、観測年最大降雨量が従う確率分布を推定し、その確率分布において、目標とする治水安全度相当の年超過確率のクオンタイル値（確率降雨量）として算出される。年超過確率 p の確率降雨量は、1年間に当該の確率降雨量以上の降雨が発生する確率が p であるということの意味する。推定確率分布における年超過確率の逆数は、確率年として定義されており、河川計画における重要な指標となっている。一方で、前述のように、現行の計画降雨量は有限な観測情報に起因する不確実性を有する。本課題では、アンサンブル実験により、この不確実性を頻度分布として定量化するとともに、その妥当性を数理統計理論により検証した。その概要を次に示す。アンサンブル実験により得られる、多数の年最大降雨量の標本別に確率分布の外挿による確率雨量の推定を行うことで、確率雨量の頻度分布が把握可能となる。なお、確率雨量を始めとした、標本から求めた統計的推定値の振れ幅は、信頼区間として数学上定義されている。例えば、95%信頼区間は、推定統計量の頻度分布の95%を含むものである。信頼区間は、河川計画に採用してきた計画降雨量の振れ幅を表すため、従来では想定外として扱われるような大規模豪雨をその範囲内の事象として解釈可能とし、その生起リスクを定量化するものである。したがって、信頼区間をどこまで議論するかによって治水計画におけるリスクが検討可能となる。ここで、利根川八斗島基準地点流域における確率降雨量の信頼区間を考慮した、年最大降雨量のDDS前後の頻度解析結果を図5に示す。同図中において黒点は、過去60年間に亘る年最大流域平均72時間降雨量の観測値であり、黒実線はこれらの観測値が従

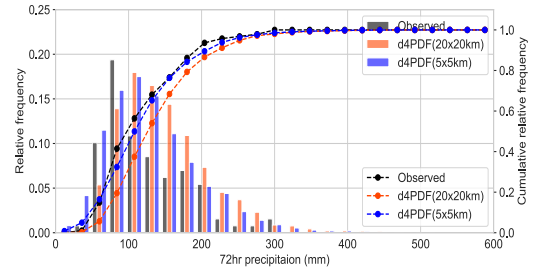


図3 年最大降雨量の頻度分布（棒グラフは相対頻度、折れ線グラフは累積相対頻度を表す。黒色は観測、橙色はd4PDF-20km、青色はd4PDF-5kmを表す。）

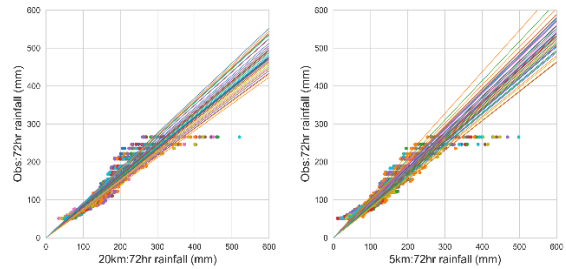


図4 観測値とd4PDFの降水量の関係（左：d4PDF-20km、右：d4PDF-5km、点と線の色はアンサンブルメンバーを表す。）

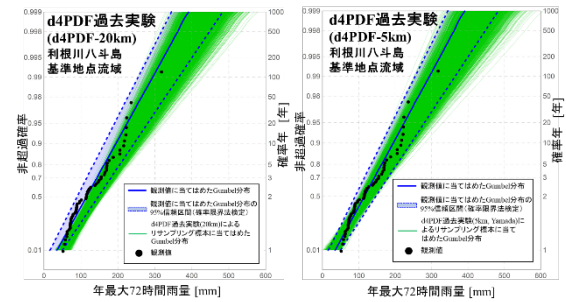


図5 DDS前後の確率年最大72時間降雨量の比較（左：d4PDF-20km、右：d4PDF-5km。）

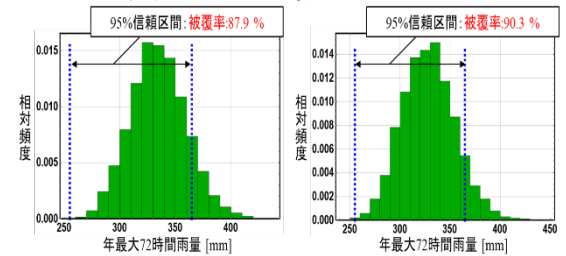


図6 DDS前後の100年確率率年最大72時間降雨量の比較（左：d4PDF-20km、右：d4PDF-5km。）

うと仮定したGumbel分布である。青破線の幅は後述する確率限界法検定の理論に基づく95%信頼区間、緑の破線群はd4PDF過去実験からサンプリングした標本に当てはめたGumbel分布である。このGumbel分布群は、3000年間に亘る過去実験値群から観測値の総数と同数のデータをランダムに選択することで得られたものであり、これにより、所与の確率年における確率降雨量の不確実性を頻度分布として定量化可能となった。図5より、DDS結果によるGumbel分布群は、理論により導出された信頼区間

と概ね整合しており、DDS 前に対して、特に 1 年から 50 年程度の確率年において、両者の適合度が向上しており、DDS の適用により統計的再現性が向上することが示された。

次に、気候モデルを用いたアンサンブル実験から得られた確率雨量の幅を数理統計理論である確率限界法検定¹¹⁾を応用することで評価した。確率限界法検定は、仮定した確率分布のもとで発生する可能性のある降雨量の統計的閾値を推定可能とするものであり、計画確率規模に相当する分布の裾野に対して高い推定精度をもつ。著者らの既往研究¹²⁾では、確率限界法検定により理論上決定する降雨量の統計的閾値に対して、Gumbel 分布の成立を仮定することで、信頼区間の構成手法を提案している。図 6 は、図 5 に示す 100 年確率における、過去実験より算定した Gumbel 分布群による確率降雨量の頻度分布と確率限界法検定による 95%信頼区間である。同図より、DDS 前においては、95%信頼区間に頻度分布が含まれる割合(被覆率)は 87.9%である一方、DDS 後はその割合は 90.3%となり、DDS の適用により両者が極めて高い精度で整合することが分かった。この結果は、本課題により創出されたアンサンブルデータと、観測値および数理統計理論からそれぞれ独立に導出された確率降雨量の取りうる幅が、概ね一致することを示しており、この結果は、本課題の DDS の数理的な妥当性を支持するものである。

5. まとめ

本課題では、令和 2 年度地球シミュレータ特別推進課題の支援のもと、地球シミュレータを用いて、水平解像度 20km の d4PDF 領域実験 (d4PDF-20km) 結果を境界条件とした力学的ダウンスケーリングを実施し、関東地方における水平解像度 5km の気候変動・再現予測情報 (d4PDF-5km) を整備した。その結果、利根川八斗島基準地点流域において、降雨量の過大評価傾向が緩和され、モデル計算値の観測値に対する統計的再現性が向上することが示された。さらに、「d4PDF-5km」と「観測値と確率限界法検定の理論」の双方からそれぞれ独立に構成された確率降雨量の信頼区間が高い精度で整合することを明らかとし、d4PDF-5km の妥当性が統計理論上から支持されることを示した。

本課題で得られた DDS の統計的再現性に関する一連の結果は、著者らがこれまでに実施した北海道での DDS の検証結果と同様の数値を示しており、このことは DDS 結果を導入した洪水リスク評価手法の全国的展開の実現可能性に寄与するもの考える。

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 および科研費基盤研究(B) 19H02241 の支援を受けた。また、創生プログラムのもとで作成された、地球温暖化施策決定に資する気候再現・予測実験データベース (d4PDF) を使用した。ここに記して謝意を表し

ます。

文献

- [1] 平成 28 年 8 月北海道大雨激甚災害を踏まえた水防災対策検討委員会：平成 28 年 8 月北海道大雨激甚災害を踏まえた今後の水防災対策のあり方，2017.
- [2] 北海道地方における気候変動予測（水分野）技術検討委員会
(https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/kawa_kei/splaat00000vdyw.html)
- [3] 北海道地方における気候変動を踏まえた治水対策技術検討会
(https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/kawa_kei/splaat00001offi.html)
- [4] 気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会
(https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/chisu_i_kentoukai/index.html)
- [5] Ryo Mizuta, Akihiko Murata, and Masayoshi Ishii : Over 5,000 Years of Ensemble Future Climate Simulations by 60-km Global and 20-km Regional Atmospheric Models, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, pp.1383-1393, 2016.
- [6] 山田朋人, 星野剛ら：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, pp.391-396, 2018.
- [7] Yamada, T.J. Adaptation Measures for Extreme Floods Using Huge Ensemble of High-Resolution Climate Model Simulation in Japan. Summary Report on the Eleventh Meeting of the Research Dialogue 2019, 28-30, UNFCCC Bonn Climate Change Conference, Bonn, Germany (19 June 2019).
- [8] Sasaki, H.; Murada, A.; Hanafusa, M.; Oh'izumi, M.; Kurihara, K.: Reproducibility of Present Climate in a Non-Hydrostatic Regional Climate Model Nested within an Atmosphere General Circulation Model, *SOLA*, 7, 173-176, 2011.
- [9] Yatagai, A., K. Kamiguchi, O. Arakawa, A. Hamada, N. Yasutomi and A. Kitoh (2012): APHRODITE: Constructing a Long-term Daily Gridded Precipitation Dataset for Asia based on a Dense Network of Rain Gauges, *Bulletin of American Meteorological Society*, 93, 1401-1415.
- [10] C. Piani, J. O. Haerter, E. Coppola : Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe, *Theoretical and Applied Climatology*, Volume 99, Issue 1-2, pp 187-192, 2010.
- [11] 森口繁一：確率表現関数の検定について—Kolmogorov-Smirnov 検定を考え直す—, pp. 233-244, *日本統計学会誌*, 第 25 巻, 1995.
- [12] Shimizu, K.; Yamada, T.; Yamada, T.J. Uncertainty Evaluation in Hydrological Frequency Analysis Based on Confidence Interval and Prediction Interval. *Water* 2020, 12, 2554.

Construction of a High-resolution Ensemble Climate Dataset for Future Projection of Flood Risk in the Kanto Region

Project Representative

Tomohito J. Yamada

Faculty of Engineering, Hokkaido University

Authors

Tomohito J. Yamada *¹, Tsuyoshi Hoshino *¹, Keita Shimizu *^{2,3}, Cheng Daiwei *¹

*¹Graduate School of Engineering, Hokkaido University

*²Graduate School of Science and Engineering, Chuo University

*³Present affiliation: Graduate School of Engineering, Hokkaido University

Flood control measures formulation has become necessary in the light of climate change accompanied by global warming. In our previous study, a flood risk evaluation methodology based on significantly large ensemble climate projection data was proposed. The study demonstrated the feasibility of the methodology, targeting Hokkaido region, Japan. In this study, dynamical downscaling is applied to the regional experiment of d4PDF over the Kanto region. The objective is to construct a climate change projection database, which has the potential to enable nationwide consideration of adaptation measures. A comparative analysis of the simulated rainfall scale by DDS and observations was conducted, and it was shown that the application of DDS improves the statistical reproducibility of climate models. Additionally, the frequency distribution simulated by DDS was consistent with the width of the confidence interval determined using mathematical theory. The consistency indicates that the ensemble simulation using DDS is supported by mathematical theory.

Keywords: climate change, adaptation, flood risk, dynamical downscaling, d4PDF

1. Introduction

In recent years, Japan has been experiencing torrential rainfall that exceeds the design rainfall for river planning, affecting human lives and social infrastructure. Considering the recent trend of record-breaking heavy rainfall and the effects of climate changes, technical studies on flood control measures have been conducted in Japan. In Hokkaido, a pioneering study was conducted. An expert committee convened by the Ministry of land, infrastructure, transport, and tourism (MLIT) conducted a detailed risk assessment study based on the impact of climate change using scientifically reliable large ensemble climate data. This committee has been promoting studies based on the results of dynamical downscaling (hereinafter referred to as DDS), which were applied to the database for policy decision making for future climate change (d4PDF) [1]. The d4PDF is climate simulation data covering thousands of years of past and futuristic climatic changes. The use of such large ensemble data, in conjunction with past observations, is expected to enhance our understanding of the climate system and enable us to quantify the low-frequency extremes. In the technical studies carried out in Hokkaido, DDS simulations were performed using d4PDF regional experiment as a boundary condition, and high-resolution climate reconstruction and projection information were developed in the surrounding area of the Hokkaido region [2]. In addition, a flood risk assessment methodology based on this information was proposed, which enabled the quantification of human and economic damages associated with large-scale flooding under future climate conditions.

The objective of this study is to develop a dataset that can

evaluate flood risk across Japan and generate basic information that will contribute to the formulation of climate change adaptation measures. Specifically, we conducted DDS calculations of the d4PDF regional experiments, targeting the Kanto region, compared the simulated data with the observations, and verified the validity of the simulations using mathematical statistical theory.

2. Dynamical downscaling

In this study, DDS was performed using the non-hydrostatic regional climate model (NHRCM) [3] and the results from the past experiments of d4PDF regional experiment (d4PDF-20 km) with 20 km horizontal resolution and the 4 °C warmer experiments converted to 5 km resolution (d4PDF-5 km) in areas surrounding the Kanto region.

3. Results

The frequency distributions of the observed annual maximum of 72 h rainfall at the Tone river of Yatujima reference point basin (during the period from 1926 to 2019) and the simulated annual maximum of 72 h rainfall of the past experiments from d4PDF-20 km and d4PDF-5 km are shown in Figure 1. It can be observed that the rainfall at d4PDF-20 km tends to be higher than the observation, while the divergence between them is mitigated at d4PDF-5 km. Figure 2 shows the results of the slope calculated by the least-squares method by arranging the rainfall of each observations and d4PDF results in descending order. The slope was calculated for each ensemble of past experiments, and the average value was accordingly calculated. The average values of

slopes were 0.81 and 0.89 for d4PDF-20 km and d4PDF-5 km, respectively, indicating that the reproducibility of ensemble simulations were improved by the DDS. Figure 1 also demonstrates the advantages of using large ensemble data. Although the observed maximum was 308.6 mm during Typhoon Kathleen in 1947, the d4PDF contains several cases of rainfall events that exceeded this maximum, which is useful for understanding the risk of such past maximum rainfall events and their exceedances.

The range of probable rainfall obtained from ensemble experiments using a climate model was evaluated by applying the probability limit method [4]. The probability limit method enables the estimation of the statistical threshold of rainfall that can occur under an assumed probability distribution. It has high estimation accuracy for the tail of the distribution corresponding to the design level. A method has been proposed for constructing confidence intervals of an assumed probability distribution for the statistical threshold of rainfall, which was theoretically determined using the probability limit method [5]. Figure 3 shows the frequency distribution of the 100-year annual maximum rainfall based on the Gumbel distribution, and the 95% confidence interval is based on the probability limit method. As shown in the figure, before DDS, the percentage of frequency distributions included in the 95% confidence interval (coverage ratio) was 87.9%, while after DDS, the percentage was 90.3%. Thus, the results indicate that the application of DDS lets goodness of fit between simulation and theory improved. In addition, the ensemble data generated in this study and the range of probable rainfall derived independently from observations and the mathematical theory are almost consistent, which supports the mathematical validity of the DDS simulation in this study.

4. Conclusion

A series of results on the statistical reproducibility of DDS simulations obtained in this study are mostly similar to the results of the validation of DDS conducted in Hokkaido [2]. The study is expected to contribute to the feasibility of nationwide deployment of flood risk assessment methods based on DDS calculation results.

Acknowledgment

This study was supported by the Ministry of education, culture, sports, science, and technology of Japan (MEXT), the integrated research program for advancing climate models (TOUGOU), Theme C "Integrated Climate Change Prediction" JPMXD0717935561, and JSPS KAKENHI Grant No. 19H02241.

References

[1] Mizuta, R., Murata, A., Ishii, M. et al. "Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60 km global and 20 km regional atmospheric models",

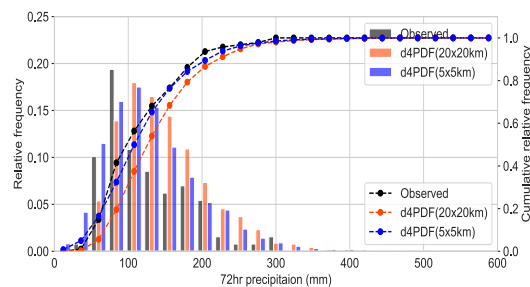


Figure 1. Frequency of the annual maximum rainfall over Tokachi river basin

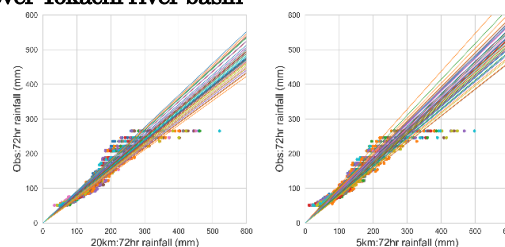


Figure 2. Relation between observation and d4PDF (Left : d4PDF-20 km, Right : d4PDF-5 km, dots and line express ensemble members)

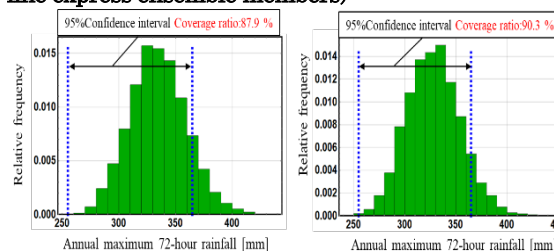


Figure 3. Relation between 100-year annual maximum rainfall and confidence interval derived from d4PDF and theory, respectively (Left : d4PDF-20 km, Right : d4PDF-5 km)

Bull. Am. Meteorol. Soc., pp.1383–1393, 2016.

[2] Yamada, T. J. "Adaptation Measures for Extreme Floods Using Huge Ensemble of High-Resolution Climate Model Simulation in Japan", *Summary Report on the Eleventh Meeting of the Research Dialogue*, 28-30, UNFCCC Bonn Climate Change Conference, 2019.

[3] Sasaki, H., Murada, A., Hanafusa, M., Oh'izumi, M. and Kurihara, K., "Reproducibility of Present Climate in a Non-Hydrostatic Regional Climate Model Nested within an Atmosphere General Circulation Model", *SOLA*, 7, 173–176, 2011.

[4] Moriguti S. Testing hypothesis on probability representing function – Kolmogorov-Smirnov test reconsidered", *Jpn. J. Stat. Data Sci.* 25, 233-244, 1995.

[5] Shimizu, K., Yamada, T., Yamada, T. J. "Uncertainty Evaluation in Hydrological Frequency Analysis Based on Confidence Interval and Prediction Interval", *Water*, 12, 2554, 2020.