

力学的ダウンスケーリングによる洪水リスクの将来変化予測とその要因分析

課題責任者

山田 朋人 北海道大学 大学院工学研究院

著者

星野 剛*¹, 山田 朋人*¹

*¹北海道大学 大学院工学研究院

気候変動がもたらす大雨の頻度や強度への影響の評価は喫緊の課題である。本課題は気候変動の影響による洪水リスクの変化をアンサンブル気候データの力学的ダウンスケーリングにより明らかにするものである。本研究ではこれまでに実施した北海道を対象とした 5km 解像度への力学的ダウンスケーリングの事例数を追加するとともに、関東や九州地方を対象に実施した。これにより、5km 解像度の気候データに基づく大雨に関する気候変動の影響を全国的に評価可能となった。また、5km 解像度への力学的ダウンスケーリングにより流域スケールでの降雨量の変化だけでなく降雨の要因の分析も可能となった。流域内における降雨量の空間偏差の要因を力学的・熱力学的効果から評価したところ、全体的には熱力学効果が支配的であるものの、地形の効果により上昇流が強化される山地等では力学効果も偏差に寄与していることがわかった。また、降雨強度と地上気温との関係性は気候変動前後の条件下において気温と飽和水蒸気圧の関係式 (Clausius-Clapeyron の関係; 約 7%/°C) に概ね従うものの、地域によっては同関係式以上に気温への応答が高まることから気温および湿度の高い状態における大雨災害により警戒すべきであることが示唆された。このような流域内での降雨分布の特徴やその要因の分析には高解像度かつ十分なサンプル数が必要であり、その創出を本課題による地球シミュレータの活用により実現した。

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, 気象研究所非静力学地域気候モデル NHRCM

1. はじめに

近年、我が国では甚大な豪雨災害が毎年のように発生しており、それらは地球温暖化による降雨量の増大が指摘されている (例えば[1]) など、温暖化の影響による降雨強度の増大の顕在化が危惧されている。また、気候変動がもたらす大雨の頻度や強度に関して学術雑誌等で数多くの議論がなされている (例えば[2])。それらの予測結果に基づき、気候変動による洪水外力の増大に備えるための法整備が進められている。このように今後の大雨リスクの変化をいかに評価し、適応策につなげるかは社会的に重要な課題となっている。

近年、合計数千年におよぶアンサンブル気候データ The Database for Policy Decision Making for Future Climate Change (d4PDF) [3]が作成され、洪水等の各種の自然災害リスクの評価に用いられている。d4PDF は過去の気候や温暖化進行後の気候における数千年分の気候シミュレーションデータである。このデータは各種自然災害のリスク評価において気候システムの自由度がもたらす極端現象の生起確率を物理モデルによるモンテカルロ手法として推定可能とするものであり、気候変動の影響評価に広く用いられている。アンサンブル気候データを活用することで計画対象の降雨量の取りうる幅や様々な降雨の時空間的なパターンの考慮が可能となるなど多角的な洪水リスク評価が実現する[4]。

著者らはこれまでに北海道を対象に d4PDF を水平解像度 5km へと力学的にダウンスケーリング(DDS)することで、

その計算結果が観測された大雨の特徴をよく表すことを明らかにしており、北海道において気候変動による年最大降雨の特徴の変化を定量化した[5]。本研究では気候変動による大雨の変化量の評価を全国的に実施可能とするために地球シミュレータを用いた DDS を北海道地方、関東地方、九州地方を対象に実施した。本報告では北海道と九州地方を対象とした大雨の特徴分析の結果を紹介する。

2. 力学的ダウンスケーリング

本研究は気象研究所非静力学地域気候モデル (NHRCM) [6]を用いた DDS を実施し、流域での降雨の特徴をより詳細に把握するため d4PDF の領域実験 (20km 解像度) を 5km 解像度へと変換した。d4PDF 領域実験は領域気候モデルにより作成された水平解像度 20 km の気候予測データであり、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、海氷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。本研究では DDS の対象期間を 2 種類 (15 日間、1 年間) 設定し、洪水リスクを多角的に評価した。

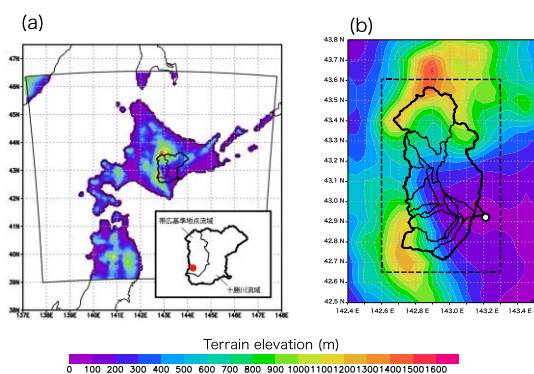


図1 対象流域. 外側の実線は水平解像度 5 km への力学的ダウンスケーリングの対象領域を示し、カラーバーは力学的ダウンスケーリングで使用した標高を表す. (参考文献[8]より引用)

3. 解析方法

本報告では以下の 2 つの手法により、降雨に対する力学・熱力学効果の寄与度を調べた結果を示す。

3-1. 降雨の空間偏差に対する力学・熱力学効果の算出

本研究では降雨変化に対する力学・熱力学の算出手法である Emori and Brown の手法[7]を応用し、d4PDF の過去・4°C上昇気候それぞれで図1に示す十勝川帯広基準地点流域周辺における降雨量の空間偏差の要因を調べた。方法の詳細については星野・山田(2020)[8]を参照された。

3-2. 降雨強度と気温・露点温度との関係性

各気温に対する極端降雨の強度(例えば気温 1°Cビンに含まれる降雨強度の 99 パーセンタイル値)は Clausius-Clapeyron の関係(約 7%/°C)に従い増加し、気温が高い状態であるほど降雨強度が高まるとされている。本研究では観測および d4PDF の両者において十勝川帯広基準地点流域周辺を対象に気温と降雨強度の関係性を調べた。

4. 結果

4-1. 降雨の空間偏差に対する力学・熱力学効果の影響

図 2(a)に示す降雨強度の空間偏差からわかるように対象流域では大雨時に最大で±2 mm/hr 程度の空間偏差が生じることがわかる。この空間偏差の要因を明らかにするため、本研究で提案する手法を用いて降雨の空間偏差に対する力学効果、熱力学効果、共変効果を算出し、それぞれ図-2(b)、(c)、(d)に示す。同図上段、中段には過去実験 3000 事例、4°C上昇実験 5400 事例から算出した結果を示す。同図より降雨量の偏差と熱力学効果はよく似た空間分布を示しており、同流域での降雨の空間偏差の要因は熱力学効果が支配的なことがわかる。熱力学効果の強い地域は領域平均と比べて同程度の上昇気流であっても強い降雨が生じやすいことを意味している。対象流域でこのような違いが生じる要因としては大雨をもたらす南東からの水蒸気供給は日高山脈や大雪山系で雨に変わることで消費され、対象領域の西側では上昇気流が生じ

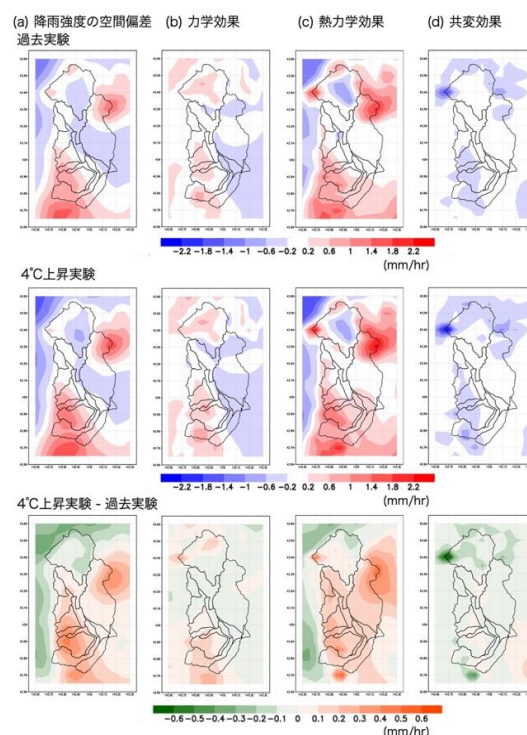


図 2 (a)降雨強度の空間偏差とそれに対する(b)力学効果、(c)熱力学効果、(d)共変効果。上から過去実験、4°C上昇実験、4°C上昇実験と過去実験との差(4°C上昇実験から過去実験を引いた値)を示す。(参考文献[8]より引用)

たとしても強い雨が发生しづらいからだと考えられる。

図 2(b)に示す力学効果に着目する。対象流域では流域全体において鉛直風速が強いほど降雨強度も高まる関係にあり、例えば、図1赤丸地点においては上昇流の相対頻度が空間平均の頻度よりも高いため力学効果は降雨の強化に作用する。この上昇流の高頻度は山岳による強制上昇の影響だと考えられる。また、0 m/s 付近の鉛直風速における降雨強度が空間平均よりも高いことから熱力学効果も降雨を強化する。このように日高山脈周辺では地形の影響での強制上昇により上昇気流が他の地域よりも発生しやすい上、大雨時には南東から多量の水蒸気がもたらされることが予想され、その結果、力学効果と熱力学効果の両者によって降雨が相対的に強い地域となることが示唆された。これは熱帯低気圧の接近時においても日高山脈周辺では十勝川流域内の他の地域と比べて力学・熱力学効果の両者ともに卓越し、強い降雨が発生しやすいことを意味する。

4-2. 降雨強度と地上気温・地上露点温度との関係

1時間降雨強度と地上気温に関して、気象庁の帯広気象官署における観測値(1991年から2019年までの29年間)、5kmにダウンスケーリングしたd4PDF(過去実験782年、4°C上昇実験782年)の結果を図3に示す。同図より、観

測値と d4PDF 過去実験の降雨と地上気温の関係は近く、両者とも 99.9 パーセントイル値の降雨強度は Clausius-Clapeyron の関係 (以降、C-C 関係) に従いながら増大し、23°C 付近でピークを迎え、それ以上の気温では減衰する。この関係は 4°C 上昇実験においても同様であるものの、ピークを迎える気温は過去実験よりも高い。これは温暖化進行後では C-C 関係に従い、より強い 1 時間降雨がもたらされる傾向にあることを示す結果である。また、同図 (d) より、20km 解像度では強い降雨強度が過小評価される傾向にあり、強い降雨の分析には 5km 解像度が有効であることがわかる。

このような気温と降雨強度の関係性の地域特性を調べるために北海道周辺域における気温と降雨強度の関係の空間分布を図 4、5 に示す。図 4 より、20km 解像度では C-C 関係を下回る地域が多いのに対し、5km 解像度は北海道の南半分および東北地方北部で気温と降雨強度の関係は 1 (%/°C) 程度増大し、C-C 関係に近いことがわかる。特に、20km 解像度では地形性の降雨が卓越する日高山脈周辺において気温と降雨強度関係は C-C 関係程度にとどまっている。この要因として 20km 解像度では地形形状の反映や対流の表現の難しさが挙げられる。また、図 5 に示すように温暖化進行後の気候においては多くの地域で C-C 関係を上回ることから高い気温での短時間降雨の危険性がより高まることが示唆された。図面は割愛するが、それらの気温と降雨強度の関係は観測のような数十年のデータのみからでは値が大ききばらつくことが示された。これは、アンサンブル気候データを活用することで気温と降雨強度の関係性がより明確となることを意味する。

5. おわりに

地球シミュレータを用いて複数の地域を対象に d4PDF の力学的ダウンスケーリングを実施し、洪水リスクの将来変化を評価した。本報告では 2 つの異なる方法から十勝川流域における降雨の空間分布の要因について述べた。流域スケールでの降雨分布の特徴やその要因の分析には高解像度かつ十分なサンプル数が必要となることから、本課題による地球シミュレータの活用により実現した。得られた結果から、地形の効果を考慮すべき場所やその度合に関する定量的な情報を得ることができ、他地域での同様の分析の実施により、力学的ダウンスケーリングがより重要となる地域やその影響の事前推定が可能となると思われる。

本課題での成果は国土交通省や北海道開発局と北海道が設立した専門家委員会 [10], [11] などにおける気候変動を踏まえた洪水リスクの推定や効果的な治水対策の議論の土台となり、本課題の成果は十勝川や常呂川の河川整備計画の検討にも波及している。また、本成果は国際連合 UNFCCC において IPCC 事務局長をはじめとする各国の政府関係者に対して紹介し、本課題の成果を土台とする物理的・統計的な手法による洪水リスク評価は国際的にも高く評価されている [12]。

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

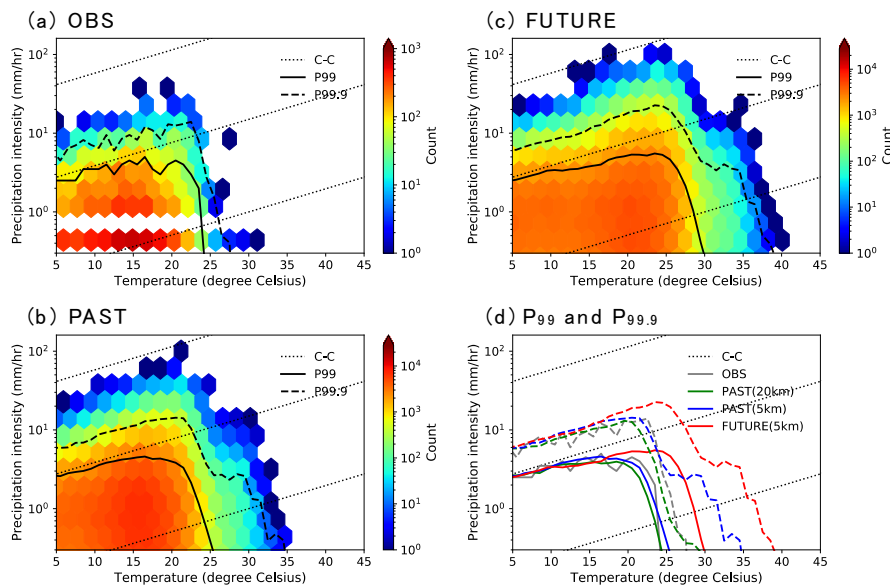


図 3 1 時間降雨強度と地上気温との関係 ((a)、(b)、(c)はそれぞれ観測、d4PDF 過去実験、d4PDF 4°C 上昇実験の結果である。色、実線、破線、点線はそれぞれ頻度、同気温帯 (1°C 間隔) における 99 パーセントイル降雨強度、同 99.9 パーセントイル降雨強度、C-C 関係の傾きを表す。(d)は 99、99.9 パーセントイル降雨強度の比較を示す。各線は観測 (灰色)、20km 解像度の過去実験 (緑色)、5km 解像度の過去実験 (青色)、5km 解像度の過去実験 (赤色) を表す。) (参考文献 [9] より引用)

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] 気象庁異常気象分析検討会, “「平成30年7月豪雨」及び7月中旬以降の記録的な高温の特徴と要因について”, (2018).
- [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, Bonn, Germany. (2019).
- [3] Mizuta, R.; and Coauthors: “Over 5,000 Years of Ensemble Future Climate Simulations by 60-km Global and 20-km Regional Atmospheric Models”, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, *98*, 1383-1398, (2017).
- [4] 山田朋人: “アンサンブル手法による気候変動予測・リスク評価の考え方”, 雑誌「河川」, 令和2年12月号, 77-81, (2020).
- [5] 山田朋人ら, “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.
- [6] 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).

- [7] Emori, S.; Brown, S. J.: “Dynamic and thermodynamic changes in mean and extreme precipitation under changed climate”. *Geophysical Research Letters* **32**: L17706, (2005).
- [8] 星野剛, 山田朋人, “力学・熱力学効果の観点での降雨の空間偏差要因の分析”, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. **76**, No.2, I_19-I_24., (2020).
- [9] Yamada TJ, Hoshino T, Suzuki A., “Using a massive high-resolution ensemble climate dataset to examine dynamic and thermodynamic aspects of heavy precipitation change”. *Atmospheric Science Letters* 1-11., (2021).
- [10] 国土交通省北海道開発局・北海道, 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, (2019).
- [11] 国土交通省水管理・国土保全局, 気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会, (2019).
- [12] Yamada TJ, “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 (2019).

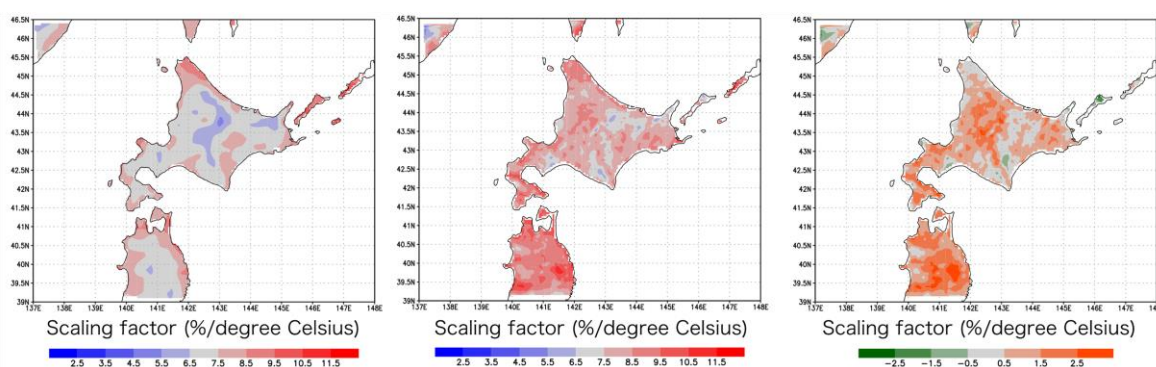


図4 異なる解像度における気温-降雨強度関係の比較 ((左) 20km 解像度, (中) 5km 解像度, (右) 20km 解像度と 5km 解像度の差。いずれも各気温における 99.9 パーセントイル降雨強度が対象。)

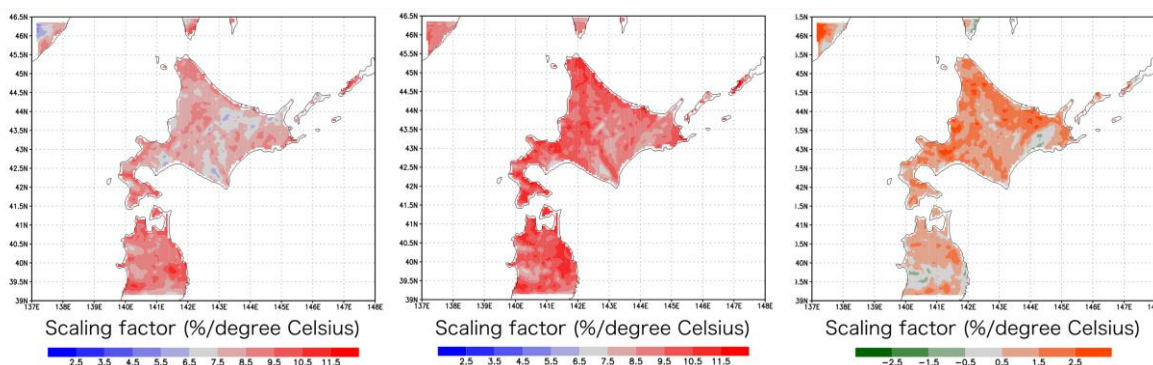


図5 異なる気候条件下における気温-降雨強度関係の比較 ((左) 過去実験, (中) 4℃上昇実験, (右) 過去実験と 4℃ 上昇実験の差。いずれも各気温における 99.9 パーセントイル降雨強度が対象。)

Assessment of Future Flood Risks and Its Cause using Dynamical Downscaling

Project Representative

Tomohito J. Yamada

Faculty of Engineering, Hokkaido University

Authors

Tsuyoshi Hoshino *¹, Tomohito J. Yamada *¹

*¹Graduate school of Engineering, Hokkaido University

This study evaluates different types of flood risks associated with climate change using dynamical downscaling of ensemble climate data. The number of cases of 5-km dynamical downscaling were increased for Hokkaido; Kanto and Kyushu regions were also included. The results helped us analyze the factors influencing rainfall and the changes in the rainfall intensity due to climate change. The factors contributing to the spatial deviation of rainfall within the basin were evaluated in terms of dynamical and thermodynamic effects. Additionally, the relationship between rainfall intensity and near-surface air temperature was investigated. The analyses of the characteristics of the rainfall distribution in the basin and its influencing factors require high resolution data and significant number of samples, which was realized using Earth Simulator in this project.

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

1. Introduction

In recent years, Japan has experienced severe damages due to torrential rainfall. In addition, there is a concern that the intensity and frequency of heavy rainfall will increase owing to global warming. Therefore, the assessing the impact of climate change on the frequency and intensity of heavy rainfall needs to be urgently addressed for planning various adaptation measures.

This project aims to evaluate the flood risk due to climate change using dynamical downscaling of the database for policy decision making of future climate change (d4PDF) [1]. In this project, the number of cases of 5-km dynamical downscaling was increased for Hokkaido; the Kanto and Kyushu regions were also included. The results enabled us to analyze rainfall factors as well as changes in the amount of rainfall due to climate change. The factors that contribute to the spatial deviation in rainfall within the basin were evaluated in terms of the dynamical and thermodynamic effects. In addition, the relationship between rainfall intensity and near-surface air temperature was also investigated.

2. Dynamical downscaling

This research uses d4PDF, which consists of a large ensemble of climate simulation results, i.e., past climate (PAST) of total 3,000 years and 4-K warmer climate (FUTURE) of total 5,400 years with a 20 km grid spacing for DDS, which converts the horizontal resolution from 20 to 5 km. We conducted DDS using the regional climate model NHRCM [2] for the Hokkaido, Kanto, and Kyushu regions. We set two experimental settings, where one included 15-day DDS targeted for annual maximum rainfall events, and another was 1 year continuous DDS.

3. Result

Figure 1 illustrates the relationship between hourly precipitation and temperature using results of OBS and PAST

d4PDF (20 km), PAST and FUTURE from d4PDF (5 km) at the Obihiro, AMeDAS point for OBS, and the corresponding closest grid cell for d4PDF (20 km) and d4PDF (5 km). Figure 1(a,b,d) show that the frequencies of precipitation intensity for each temperature bin of OBS and PAST d4PDF (5 km) are similar, except in the high-temperature range (> 25 °C). The 99th and 99.9th percentile hourly precipitation of each temperature bin (P_{99} and $P_{99.9}$, respectively) are shown in Figure 1 as lines. The precipitation–temperature relationship follows the Clausius–Clapeyron (C–C) relation (i.e., increase in atmospheric water-holding capacity associated with increasing temperature) at 7% per 1 °C until a certain temperature. The P_{99} and $P_{99.9}$ of PAST d4PDF (5 km) and PAST d4PDF (20 km) were similar; however, PAST d4PDF (5 km) showed more intense precipitation and its peak precipitation intensity was closer to OBS. Figure 1(c, d) show that the P_{99} and $P_{99.9}$ of FUTURE are also close to C–C relationship up to a certain temperature, and are negative at higher temperatures. However, the temperatures corresponding to peaks P_{99} and $P_{99.9}$ are both 24 °C, which is 3–4 °C higher than those of PAST. The maximum SF of $P_{99.9}$ was approximately 10 %/°C, which is higher than that of PAST.

We also investigated the reason for the differences in precipitation–temperature relations between PAST and FUTURE. The thermodynamic factor dominates the differences in P_{99} and $P_{99.9}$ between PAST and FUTURE (not shown). The results indicate that the thermodynamic effect (near-surface moisture availability) is a key factor for the generation of the gradient of precipitation–temperature relationship. The

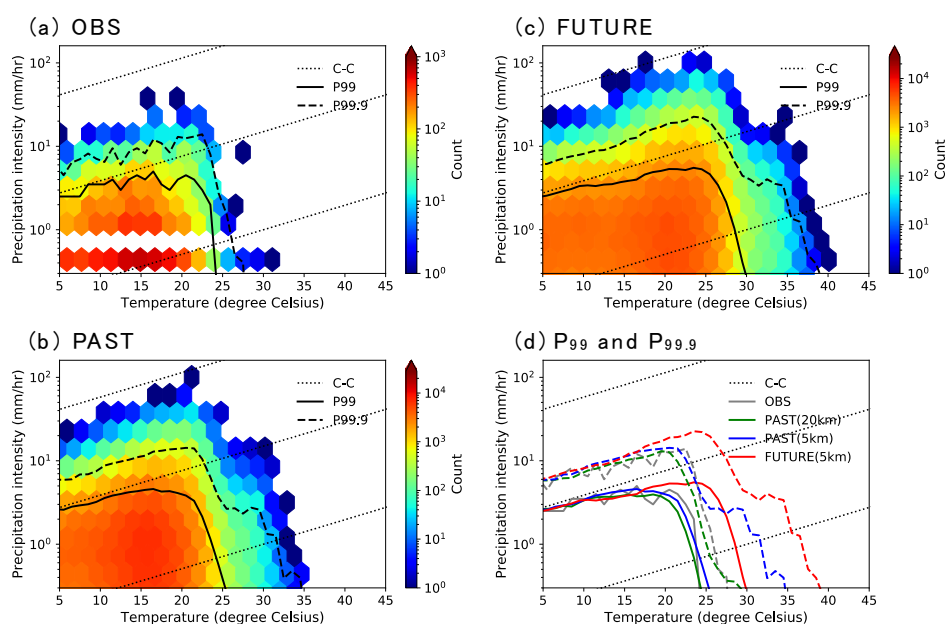


Figure 1. Relationship between precipitation intensity and near-surface air temperature for (a) OBS, (b) PAST d4PDF (5 km), and (c) FUTURE d4PDF (5 km). P_{99} and $P_{99.9}$ of OBS, PAST d4PDF (5 km), FUTURE d4PDF (5 km), and PAST d4PDF (20 km) are shown in Fig. 1d. The color bars, black solid line, black dashed line, purple solid line, purple dashed line, and dotted line indicate the number of occurrences corresponding to each hexagonal grid, P_{99} , $P_{99.9}$, P_{99dpt} , $P_{99.9dpt}$, and C–C relation (7% increase per 1 K), respectively. (cited from [3])

differences in P_{99} and $P_{99.9}$ between PAST and FUTURE in the entire catchment was mainly associated with ambient thermodynamics, regardless of the extent of the surface characteristics (e.g., flat versus mountainous areas).

4. Conclusion

We performed dynamical downscaling from a spatial resolution of 20 km to a resolution of 5 km from the past (PAST) and future (FUTURE) ensembled climate experiments for Hokkaido, Kanto, and Kyushu regions. A comparison of extreme precipitation and the corresponding temperature for observation data and PAST showed that the 5 km experiment better represented the precipitation–temperature relation compared to the 20 km experiment. Observation, PAST, and FUTURE demonstrated the rate of change in extreme precipitation with temperature follows slopes close to the C–C relationship until a certain temperature with negative value at higher temperatures.

The application of 5 km resolution of hundred-year climate dataset enabled us to quantify the spatial distribution of each contribution over thousands of square kilometers of river catchment (not shown). The application of better computer resources and relevant adaptation measures in the future will enable us to analyze precipitation and other hydrometeorological variables using the statistical methods provided in this study, especially given the large climate information ensembled at high spatiotemporal resolution.

Acknowledgment

This research was supported by the integrated research program for advancing climate models (TOUGOU) grant number JPMXD0717935561 from the Ministry of education, culture, sports, science, and technology (MEXT), Japan; and JSPS KAKENHI Grant number 19H02241. This study utilized the database for policy decision making for future climate change (d4PDF), which was produced under the SOUSEI program.

References

- [1] Mizuta, R.; Murata, A., Ishii, M. et al. “Over 5,000 Years of Ensemble Future Climate Simulations by 60-km Global and 20-km Regional Atmospheric Models”, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 98, 1383–1398, (2017).
- [2] 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).
- [3] Yamada, T.J., Hoshino, T., Suzuki, A. “Using a massive high-resolution ensemble climate dataset to examine dynamic and thermodynamic aspects of heavy precipitation change”. *Atmos. Sci. Lett.* 1–11., (2021).