

アンサンブル気候データを用いた 大雨の時空間パターンの把握手法

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 水環境保全チーム ○星野 剛
北海道大学大学院 工学研究院 山田 朋人

大雨による被害のパターン（被害の種類、規模、箇所、タイミングなど）は降雨量だけでなく降雨の時空間的な分布により決まるため、効果的な大雨災害の対策のためには様々な大雨パターンの事前想定が必要となる。しかしながら、降雨パターンは多岐にわたることから網羅的な把握は難しく、経験した大雨事例が少ない地域などでは十分な事前想定は難しいことが予想される。これに対し、数千年分の大雨事例が含まれるアンサンブル気候データを活用することで、地域で起こりうる大雨パターンを想定可能となる。本稿では著者らの提案する時空間的な特徴に基づく大雨事例の分類手法を解説する。また、同手法をアンサンブル気候データに適用し、十勝川流域における大雨の時空間パターンの特徴とその気候変動影響を説明する。

キーワード：大雨、降雨パターン、アンサンブル気候データ、気候変動、適応策、十勝川

1. はじめに

令和4年に公表された気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第6次評価報告書¹⁾にも述べられているように日本を含む世界の広い地域において気候変動に伴う洪水や旱魃のリスクの増大が危惧されている。近年、我が国においても大雨による甚大な被害が各地で発生している上、気候変動による外力の増大も予測されており、大雨災害対策は喫緊の課題となっている。近年では合計数千年におよぶアンサンブル気候データ^{例えは2)}が作成され、それを活用するための科学的知見を両輪とした新たなリスク評価や適応策の検討が進められている^{3), 4)}。このような気候変動を踏まえたリスク評価が行政の検討^{5), 6)}でも活用され始めるなど、新しい考え方による治水対策が模索されている。

大雨による被害のパターン（被害の種類、規模、箇所、タイミングなど）は降雨量だけでなく降雨の時空間的な分布により決まる。このため、効果的な大雨災害の対策のためには降雨量だけでなく流域内での様々な大雨パターンの事前想定が必要となる。しかしながら、降雨の時空間的なパターンは多岐にわたるため、流域内において起こりうる降雨パターンを網羅的に把握することは難しい。特に、過去に経験した大雨事例が少ない地域においては事前の大雨パターンの想定は難しいことが予想される。これに対し、前述のアンサンブル気候データを活用することで、数千年分のデータから起こりうる大雨パターンを把握可能となる。しかしながら、膨大な大雨イベントすべてに対する被害や対策の検討は膨大な計算を要することから大雨の時空間的な特徴を表す適切な降雨パ

ターン分類手法が必要となる。

本稿では著者らの提案する大雨事例の時空間的な特徴に基づく分類手法⁷⁾を解説する。また、同手法をアンサンブル気候データに適用し、十勝川流域における大雨の時空間パターンの特徴とその気候変動影響を説明する。

2. 降雨パターンの分類手法

著者らの提案する降雨パターンの分類手法の手順を図-1に示す。本手法は時間的なパターン分類、空間的なパターン分類、時空間的なパターン分類の3つで構成される。以降で各分類手法の概要を述べる。入力する降雨データはグリッド状かつ時系列の降雨データ群を想定している。本分類手法の詳細に関しては参考文献⁷⁾を参照されたい。なお、本分類手法のソースコードおよびサンプルデータは以下で公開しており、pythonで実行可能である（<https://data.mendeley.com/datasets/p3dwwn6r43>）。

(1) 時間的な降雨パターン分類

時間的な降雨パターンの分類には対象流域の流域平均降雨の時系列データ（ハイエトグラフ）を用いる。対象とするすべての降雨イベントのハイエトグラフを作成し、対象時間（次章の事例では72時間を設定）における流域平均降雨量が最大となる期間を算出する。次に、各降雨イベントのハイエトグラフの類似度をRMSE（root-mean-square error）に基づき算出する。なお、この計算において対象期間内における強い雨の出現タイミングの違いが類似度に与える影響が大きいことから（例えば、2つの

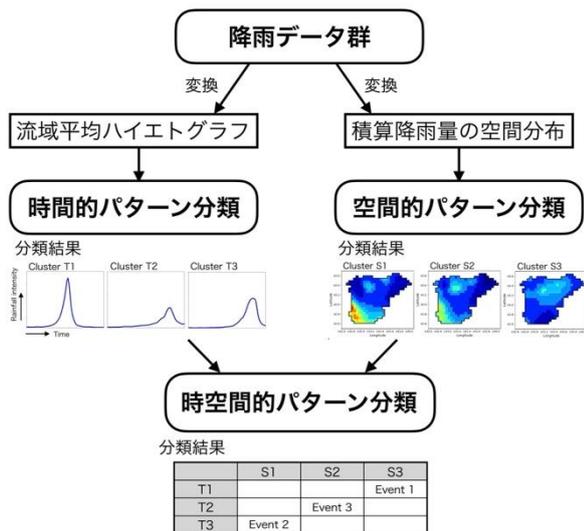


図-1 降雨パターン分類のフロー図

降雨イベントの強い雨の発生する時間帯の降雨波形が似ていたとしても期間の前半か後半に強い降雨が発生するから類似度は大きく異なる)、その影響を緩和するために、時間をずらしながら類似度を算出し、最も類似している組み合わせを2イベントの類似度として採用する。降雨データ群のすべての組み合わせで降雨イベント間の類似度を算出し、距離（類似度）行列を作成する。次に、この距離行列を用いて階層型クラスター分類を実施することで、時間的な降雨パターンの特徴に基づいた分類がなされる。

(2) 空間的な降雨パターン分類

空間的な降雨パターンの分類手順は時間的な降雨パターンの分類と同様であるものの、降雨データの変換および類似度の計算方法が異なる。類似度の算出のために、降雨データ群を時間的な分類で定義した降雨量が最大となる期間における累積降雨量に変換する。降雨イベント間の類似度は流域内の各グリッドの積算降雨量を用い、RMSEに基づいて算出する。これにより、流域内の降雨の空間分布の類似度を距離として表す。次に時間的な分類と同様に距離行列を作成し、階層型クラスター分類により分類する。

(3) 時空間的な降雨パターン分類

時空間的な降雨パターンの分類は時間的な分類と空間的な分類の結果を組み合わせ、図-1に示すように時間・空間的な分類結果（クラスター）をそれぞれ行と列とすることで分類する。これにより、時間と空間の両者の特徴を反映した降雨イベントのクラスター分類が実現する。

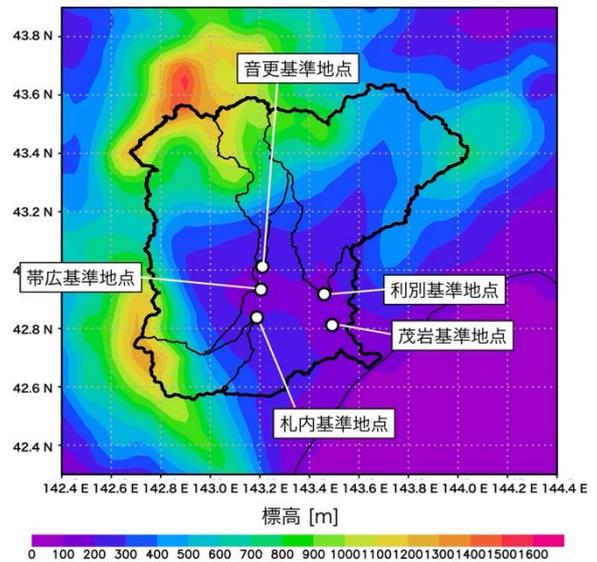


図-2 十勝川流域（太実線は十勝川流域、細実線はサブ流域を表す。図中の白丸は流量観測点を表す。カラーバーはd4PDF-5kmの作成に用いた標高を示す。）

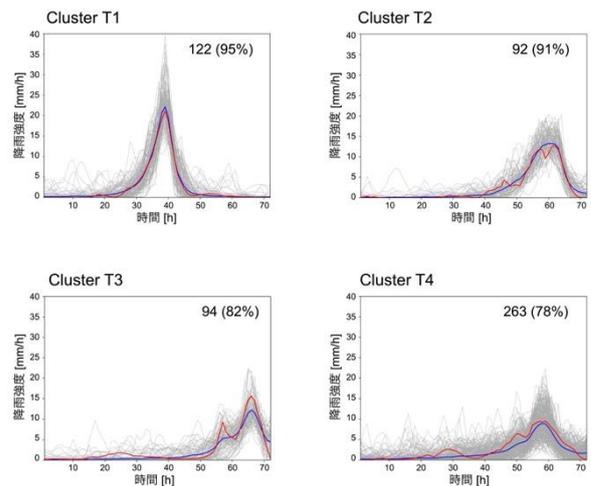


図-3 時間的な降雨パターン分類の結果（灰色線はクラスターに該当する降雨イベントのハイトグラフ、青線は該当する降雨イベントのハイトグラフの平均値、赤線は代表的な降雨イベント（平均値と最も類似している降雨イベント）のハイトグラフを表す。右上の数値は該当イベント数、括弧内は4°C上昇気候のイベントが占める割合を示す。Hoshino and Yamada, (2023)⁷⁾より引用。）

3. 降雨パターン分類手法の適用

(1) 対象流域・降雨データ

前述の降雨パターン分類をアンサンブル気候データに含まれる大雨イベントに適用し、十勝川流域（茂岩基準地点流域；図-2）における降雨パターンを明らかにする。観測された大雨イベントは限定的であることから、対象とする降雨イベントはアンサンブル気候データの一つであるd4PDF (the Database for Policy Decision Making for Future

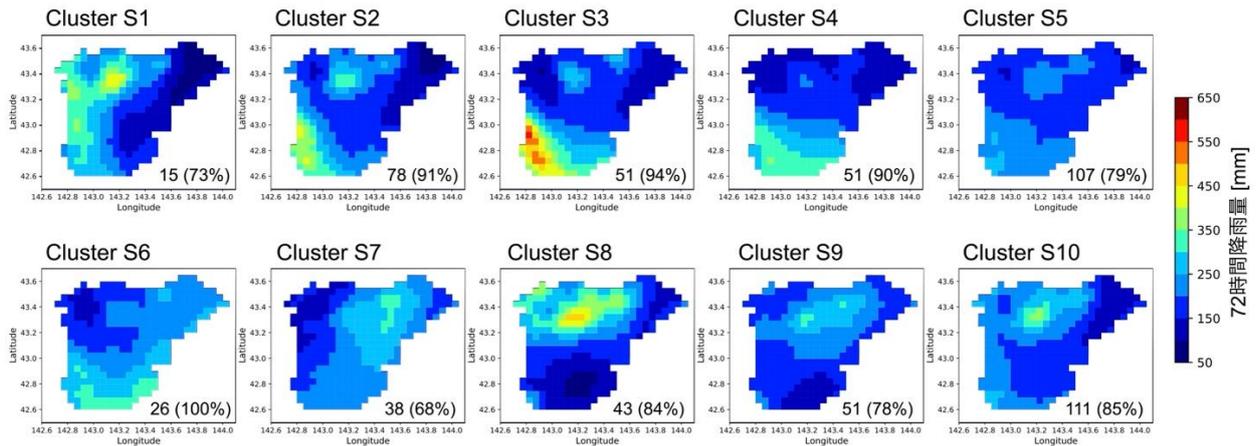


図-4 空間的な降雨パターン分類の結果（各クラスターに該当するイベントの72時間積算降雨量の平均値を示す。右上の数値は該当イベント数、括弧内は4℃上昇気候のイベントが占める割合を示す。Hoshino and Yamada, (2023)⁷⁾より引用。）

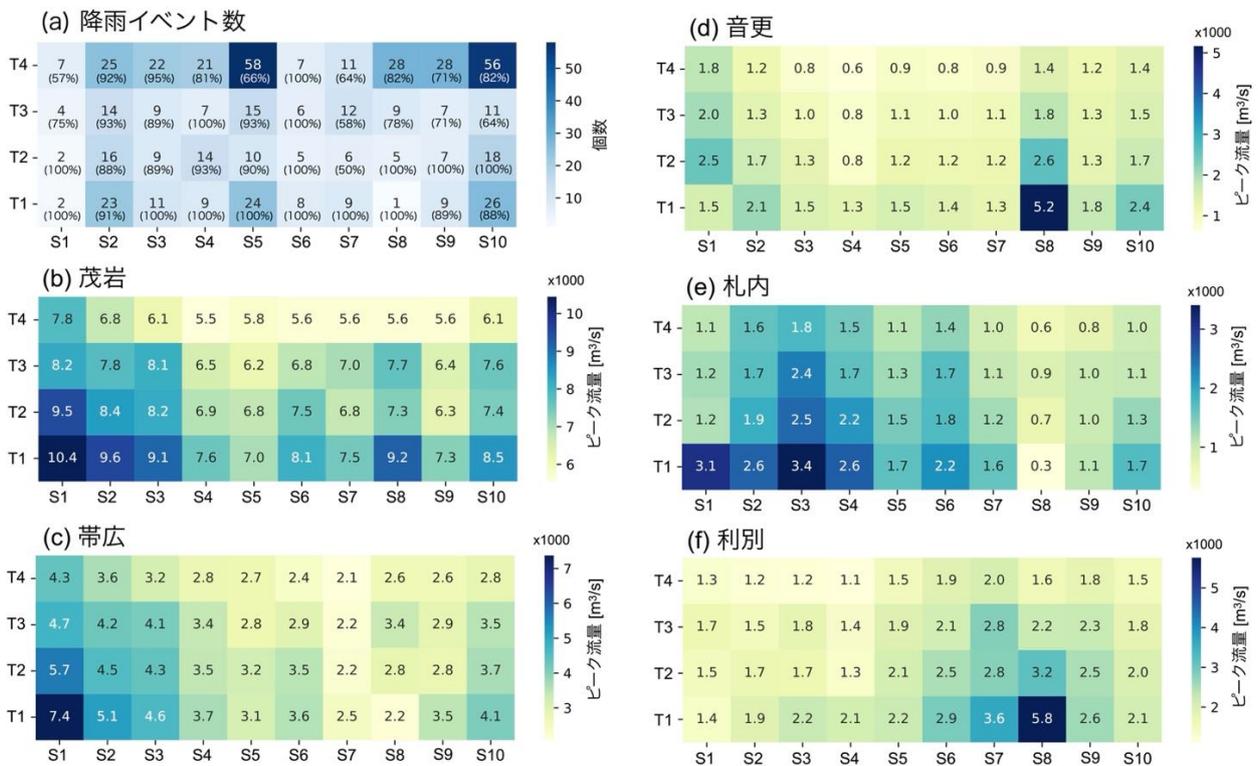


図-5 時空間的な降雨パターン分類の結果（行方向は時間的な分類によるクラスター、列方向は空間的な分類によるクラスターを表す。(a)は該当する降雨イベント数、括弧内の数値は4℃上昇気候のイベントが占める割合を示す。(b)-(f)は十勝川流域内の各地点のピーク流量の平均値を示す。Hoshino and Yamada, (2023)⁷⁾より一部引用。）

Climate Change)²⁾を5-km解像度へと力学的ダウンスケーリングを実施したデータ⁸⁾から選定した。同データのうち過去（1951-2010年）の気候条件における年最大降雨3000イベント、産業革命から4℃気温が上昇した気候条件における年最大降雨5400イベントを用いた。これらの降雨イベントから、極値統計理論⁹⁾の適用¹⁰⁾により推定された150年確率雨量相当の降雨イベント（72時間降雨量が180.0から249.1 mm）に該当する571イベント（過去気候：88イベント、4℃上昇気候：483イベント）を分類の対象とした。

HOSHINO Tsuyoshi, YAMADA Tomohito

(2) 分類結果

a) 時間的な降雨パターン分類

時間的な降雨パターン分類により、4つのクラスター（T1-4）に分類した結果を図-3に示す。同図より降雨波形の特徴ごとに分類されていることがわかる。T1は最も鋭い波形を示しており最大の降雨強度が20 mm/hに達している。T4は降雨ピークが10 mm/hと最も小さく、降雨ピークの前にも降雨が生じていることから流量が大きい時間が長く継続しやすい降雨パターンであると考え

られる。また、4°C上昇気候においては降雨ピークの大きいT1, 2に属する降雨イベントの割合が高く（それぞれ95%、91%）、同程度の降雨量の大雨イベントであっても将来気候においてはピーク流量が大きくなりやすい降雨パターンの頻度の増加が示唆される。

b) 空間的な降雨パターン分類

空間的な降雨パターン分類により、10個のクラスター（S1-10）に分類した結果を図-4に示す。同図より、クラスターごとに降雨の空間分布の特徴が異なることがわかる。S1は流域の西側に降雨が集中し、S2-4は日高山脈のある流域内の南西部に降雨が集中している。S7-10は流域内の北側に降雨が集中しており、特にS8は大雪山系における降雨が顕著である。また、S2-4においては4°C上昇気候の降雨イベントの割合が高い（それぞれ91%、94%、90%）ことがわかる。

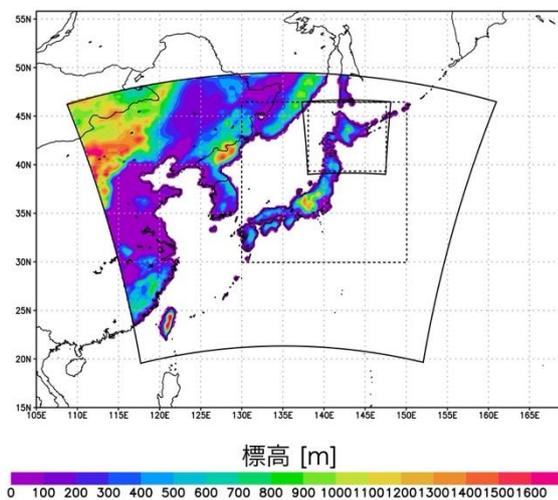
c) 時空間的な降雨パターン分類

図-5(a)に時空間的な降雨パターン分類により4×10パターンに分類した際の各クラスターに該当する降雨イベント数を示す。同図より、降雨の時間・空間パターンには関連があることがわかる。例えば、S2はT4と同程度の頻度でT1が発生しやすいことから流域南西部における大雨は時間的に集中する傾向にあることがわかる。逆にS8はT1の割合が低く、T4の比較的長いことから長時間継続する降雨により大雨となるパターンが多いことが

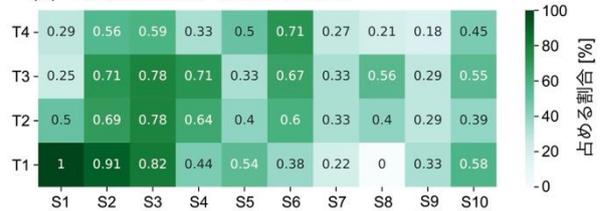
わかる。

(3) 降雨パターンとピーク流量との関係

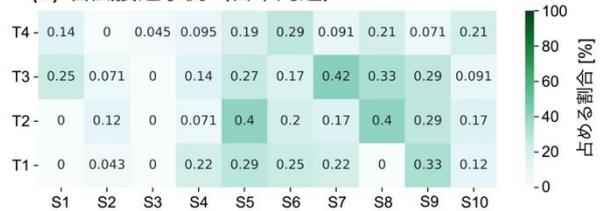
時空間的な降雨パターンと各基準地点におけるピーク流量の関係性を図-5(b)-(f)に示す。同図より、多くの空間パターンにおいてT4が最もピーク流量が小さく、T1が最もピーク流量が大きいことがわかる。これは時間的な降雨パターンは地点を問わずピーク流量に影響することを示す結果である。これに対し、降雨の空間的なパターンはピーク流量が大きくなる地点に支配的な影響を与えることがわかる。流域西側に降雨が集中するS1では十勝川本川に位置する茂岩基準地点と帯広基準地点においてピーク流量が大きい。日高山脈に最も降雨が集中するS3のパターンは札幌基準地点のピーク流量が最も高くなる。また、音更基準地点と利別基準地点はS8の降雨パターンにおいてピーク流量が最も大きくなる。一方で、降雨が広く分布するS6, S7, S9などはいずれの地点においてもピーク流量が際立って大きくならないことがわかる。このように時間と空間それぞれの降雨パターンの特徴に基づいて降雨イベントを分類することで各降雨パターンが有する危険性（危険性の空間分布やその強度）を把握できることが示された。



(a) 台風接近事例（北海道周辺）



(b) 台風接近事例（日本周辺）



(c) 非台風接近事例

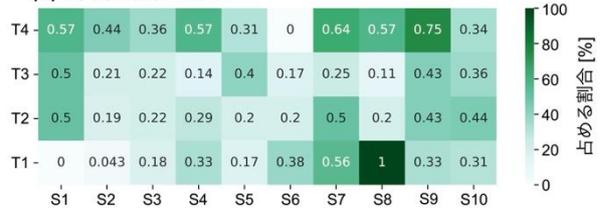


図-6 各クラスターに占める台風接近事例の割合（(a)は台風が北海道に接近したイベントの割合を示す。(b)は台風が日本（北海道・本州周辺）に接近したイベントの割合（(a)に該当する事例を除く）を示す。(c)は(a), (b)以外のイベントの割合を示す。北海道（日本）に台風が接近した事例は左図の点線の範囲に台風が位置したかどうかで判定した。）

(4) 降雨パターンと気象要因との関係

分類された各降雨パターンと気象要因との関係性を分析した。各降雨イベントを台風が北海道に接近した事例、台風が日本に接近した事例、それ以外の事例に分け、それらのイベントが各クラスターに占める割合を図-6に示した。この分類は図-6左に示す範囲に台風が位置したかどうかで判別した。なお、台風の経路にはWebb et al. (2019)のデータ¹¹⁾を使用した。

該当するイベント数はそれぞれ278、93、200個であり、半数近くを台風が北海道に接近した事例が占める。図-6(a)より、時間パターンT1、空間パターンS1-3に占める北海道に台風が接近した事例の割合は80%以上と非常に高いことがわかる。このような台風の接近に伴う日高山脈沿いでの降雨の集中は過去に十勝川流域で大きな被害をもたらした2016年の台風10号と同様であり、実際の事例からも台風の接近により生じやすい降雨パターンであることが判断できる。図-5(a)に示したように時間パターンT1、空間パターンS1-3において将来気象条件の降雨イベントの占める割合が高い理由は4°C上昇気候においては台風が強い勢力のまま北海道付近まで北上しやすい⁸⁾ことが要因であると思われる。また、図-6(c)より、台風以外でもたらされる降雨は時間パターンT4に該当する割合が高い。空間パターンではS7-10に該当する割合が高く、降雨が流域の北側に集中するような事例は台風以外の要因(前線、低気圧の通過など)により生じやすい傾向にあることがわかる。このように降雨の時空間パターンは気象要因と関係性が強いいため、気象要因—降雨パターン—被害の一連の流れを関連づけて災害シナリオとして整理できるものと思われる。

4. まとめ

アンサンブル気候データに含まれる大量の降雨データを降雨の時空間な特徴に基づいて分類する手法を提案した。分類された降雨パターンは流域内における河川流量の特徴と密接な関係にあることが示された。これは降雨パターンの分類により、流域内の危険性の地域分布や起こりうる被害のシナリオを把握できることを意味する。大雨による被害のシナリオはこれまでに地域が経験した限定的な大雨事例からでは把握が難しかったことから、アンサンブル気候データと降雨分類手法の組み合わせは地域で発生しうる大雨災害のシナリオの網羅的な把握に極めて有効だと考えられる。このようにして把握される災害シナリオは流域内でのソフトおよびハードの防災対策を進める上で重要となると考えられ、これらを活用した防災対策に関する研究¹²⁾も進められている。また、流域全体でのリスク軽減を目指す流域治水においても流域内で起こりうる降雨パターンの把握は極めて重要となると考えられ、効果的な治水対策の検討に向けた今後の活用が期待される。降雨パターンの分類手法のソースコー

ドおよび本稿で示した分類のデータは以下に公開しており、python環境の準備のみで簡単に利用することができる(<https://data.mendeley.com/datasets/p3dwwn6r43>)。今後、広く活用されることを期待したい。

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」JPMXD0722680734、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「国家レジリエンス(防災・減災)の強化」(管理法人:国立研究開発法人防災科学技術研究所)、科研費基盤研究(B)22H01594、科研費若手研究20K14832、オランダ企業庁「水のパートナー」プロジェクトの支援を受けた。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。d4PDFにもとづく台風トラックデータは、Webbら(2019)により提供されたデータを用いた。力学的ダウンスケーリングの実施にあたっては令和2年度地球シミュレータ特別推進課題および一般課題の支援により地球シミュレータを使用した。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Caretta MA, Mukherji A, Arfanuzzaman M, Betts RA, Gelfan A, Hirabayashi Y, Lissner TK, Liu J, Lopez Gunn E, Morgan R, Mwangi S, Supratid S. 2022. Water. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., Okem, A., Rama, B. (eds.)]. Cambridge University Press. In Press
- 2) Mizuta R, Murata A, Ishii M, Shioyama H, Hibino K, Mori N, Arakawa O, Imada Y, Yoshida K, Aoyagi T, Kawase H, Mori M, Okada Y, Shimura T, Nagatomo T, Ikeda M, Endo H, Nosaka M, Arai M, Takahashi C, Tanaka K, Takemi T, Tachikawa Y, Temur K, Kamae Y, Watanabe M, Sasaki H, Kitoh A, Takayabu I, Nakakita E, Kimoto M. 2017. Over 5,000 years of ensemble future climate simulations by 60-km global and 20-km regional atmospheric models. *B. Am. Meteorol. Soc.*, **98**, 1383–1398. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0099.1>
- 3) Yamada TJ. 2019. 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.
- 4) Ishii M, Mori N. 2020. d4PDF: large-ensemble and high-resolution climate simulations for global warming risk assessment. *Prog. Earth Planet. Sci.* **7**. <https://doi.org/10.1186/s40645-020-00367-7>
- 5) 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, 2017.
- 6) 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.
- 7) Hoshino T, Yamada TJ. 2023. Spatiotemporal classification of heavy rainfall patterns to characterize hydrographs in a high-resolution ensemble climate dataset. *Journal of Hydrology*, **617**(PB), 128910. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128910>

- 8) Hoshino T, Yamada TJ, Kawase H. 2020. Evaluation for Characteristics of Tropical Cyclone Induced Heavy Rainfall over the Sub-basins in The Central Hokkaido, Northern Japan by 5-km Large Ensemble Experiments. *Atmosphere* (Basel), 11, 1–11. <https://doi.org/10.3390/atmos11050435>
- 9) 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—, 日本統計学誌, 第 25 卷, 233-244, 1995.
- 10) Shimizu K, Yamada T, Yamada TJ. 2020. Uncertainty Evaluation in Hydrological Frequency Analysis Based on Confidence Interval and Prediction Interval. *Water*, 12, 2554. <https://doi.org/10.3390/w12092554>
- 11) Webb A, Shimura T, Mori N. 2019. 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, p. I_1207-I_1212. https://doi.org/10.2208/kaigan.75.I_1207
- 12) 鈴木章弘、星野剛、山田朋人、山本太郎：アンサンブル気候データを活用した事前防災と避難判断支援への取り組み、水文・水資源学会／日本水文科学会 2021 年度研究発表会要旨集、B-28、2021.