

【受賞解説】

北海道における気候変動情報の創出と河川リスクの評価

—日本気象学会北海道支部 2023 年度「北海道支部賞」受賞に際して—

寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ 水環境保全チーム
星野 剛

1. はじめに

この度は日本気象学会北海道支部より「北海道支部賞」をいただきまして、大変光栄に思います。後述しますように私自身は博士号取得までは直接気象学に関する研究は行っておらず、数年前にはこのような賞をいただけるとは全く想像すらしていませんでした。研究をなんとか進めることができ、このような賞をいただけることとなった背景には多くの方のご指導、応援、サポートがあり、ほとんどそのおかげと言っても過言ではありません。改めて関わっていただいた皆様に感謝申し上げます。

私は博士号取得まで新潟大学の河川工学研究室に所属しており、安田浩保先生に指導をいただきました。そこでは、河川流や氾濫流のシミュレーション・データ同化や河川の地形形成に関する室内水理実験や観測手法を研究していました。今思うと、シミュレーションの対象は異なりますが、この時にプログラミングや流体の数値シミュレーションに関する基礎を修得できたことが受賞理由の一つである大規模な気象シミュレーションの実現につながったと思います。その後、2017年から北海道大学工学部の山田朋人先生のもとで博士研究員として研究を開始しました。ご縁があり山田先生のもとでお世話になることになりましたが、ちょうどその頃に私自身は気象分野で用いられる“アンサンブル”という考え方に興味があり、河川工学の分野に活かせないかと考えていました。また、自分の研究の視野を広げ、気象から河川までを総合的に取り扱った研究がしたいと思っていましたので、またとない機会だと感じて二つ返事で北海道行きを決めたことを覚えています。山田研では研究者のみならず、行政や民間企業の方々とも交流が盛んで研究に関するたくさんの議論の機会がありました。ここでは書ききれませんが様々な方との繋がりができ、研究のみならず多くのことを学ばせていただきました。この度の受賞内容に関しては北大での博士研究員時代での成果が中心となります。2021年からは寒地土木研究所に所属しており、河川環境や水資源などに関する研究を行っています。以下にこの度の受賞に関する研究内容をご紹介します。

2. 北海道における気候変動情報の創出

近年、合計数千年の気候シミュレーションによるアンサンブル気候データが作成され、気候変動の影響評価や適応策の検討に活用されています。アンサンブル気候データの代表的

なものに大量アンサンブルかつ日本周辺域における高解像度データの整備が進められている database for Policy Decision making for Future climate change (d4PDF)¹⁾があります。当時の私の研究の狙いは北海道内の河川の洪水リスクの将来変化を予測することでした。そのための第一段階として、d4PDF を 5km 解像度に変換する力学的ダウンスケーリングを実施し、大雨リスク評価に向けた高解像度の気候変動情報を作成することとしました。

d4PDF に関して簡単に説明します。d4PDF は 1951 年から 2010 年までの気候条件（過去実験）、産業革命前から 1.5°C、2°C および 4°C 全球平均気温が上がった気候条件（それぞれ 1.5°C 上昇実験、2°C 上昇実験、4°C 上昇実験）、海面水温のトレンド成分を除いた産業革命前を想定した気候条件（非温暖化実験）で構成されます。それらの実験は底面の境界条件に各気候条件の海面水温を与えた水平解像度約 60 km の全球大気モデルによる実験（全球実験）と全球実験の結果を側方境界条件として領域気候モデルにより 20 km 解像度へと高解像度化（力学的ダウンスケーリング）した実験（領域実験）とで構成されます。各実験は海面水温に摂動を与えることでアンサンブルメンバが作成され、合計で数千年の気候シミュレーション結果で構成されています。例えば、過去実験は 50 アンサンブルメンバ（全球実験は 100）×60 年の合計 3000（6000）年分、4°C 上昇実験は海面水温 6 パターン×15 ア

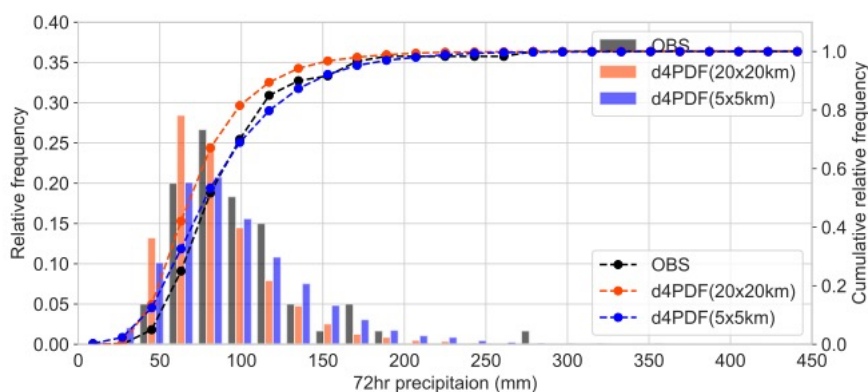


図-1 十勝川帯広基準地点流域における年最大 72 時間降水量の頻度分布（参考文献³⁾に加筆）

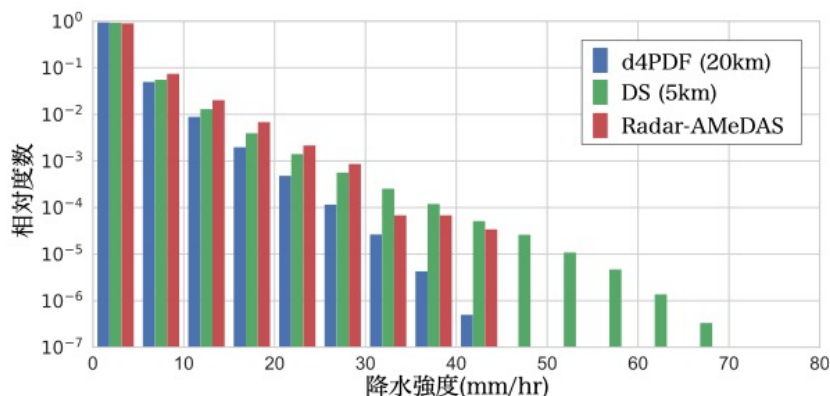


図-2 十勝川帯広基準地点流域における 1 時間降水強度の頻度分布³⁾

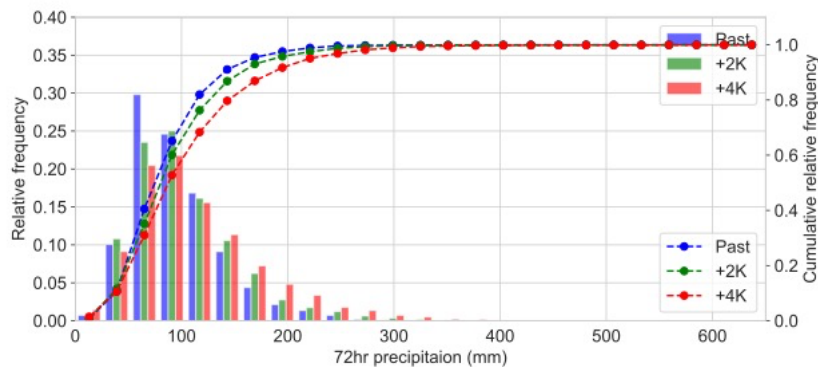


図-3 十勝川帯広基準地点流域における年最大 72 時間降水量の頻度分布（参考文献³⁾に加筆）

ンサンプルメンバ×60年の合計5400年分のデータで構成されます。2024年現在ではさらに力学的ダウンスケーリングを実施した5km解像度のd4PDFが作成・公開されています²⁾が、研究を開始した2017年当時は日本周辺で20km解像度のものが最も高解像度のものでした。20km解像度では1つの計算格子が20×20=400km²であることから、大雨災害の議論に必要な強い雨を計算上表現することが難しいです。同様の理由で降雨に大きく影響する地形形状も十分に計算で表現できません。また、日本の河川は国管理の大河川であっても流域面積は数千km²程度（本研究で対象とした十勝川帯広基準地点流域は約2700km²）であり、仮に20km解像度であった場合は30個に満たない程度の格子数（十勝川帯広基準地点流域は約7個）で流域内の降雨の空間分布が表現されることとなります。このように、地域気候モデルの中での空間的に集中した強い雨の表現、モデルへの地形の形状の適切な反映、数個の格子数による流域内の降雨の空間分布の表現、など大雨リスクを議論する上で問題となりうる点がいくつも存在します。このような問題点を解消し、流域における大雨リスクを詳しく調べるためにd4PDFの5km解像度への力学的ダウンスケーリングを実施することとしました。

力学的ダウンスケーリングには気象研究所非静力学地域気候モデル(NHRCM)を用いました。d4PDFは合計で数千年分のデータで構成されていることから、全ての大雨イベントをダウンスケーリングするには膨大な計算が必要となりました。このため、地球シミュレータ特別推進課題に応募することとし、無事に採択された結果、地球シミュレータを用いて数ヶ月の期間で計算を完了することができました。力学的ダウンスケーリングの前後における降雨の変化や観測値との比較の詳細な説明は参考文献に譲りますが、5km解像度への力学的ダウンスケーリングにより降雨量(図-1)や30mm/hを超えるような短時間降雨の出現頻度(図-2)、降雨の空間分布などが観測された降雨の特徴を良く表すことがわかりました^{3), 4), 5)}。この力学的ダウンスケーリングをd4PDFの過去実験、2℃上昇実験、4℃上昇実験に適用することで各気候条件における大雨リスクが評価可能となりました。

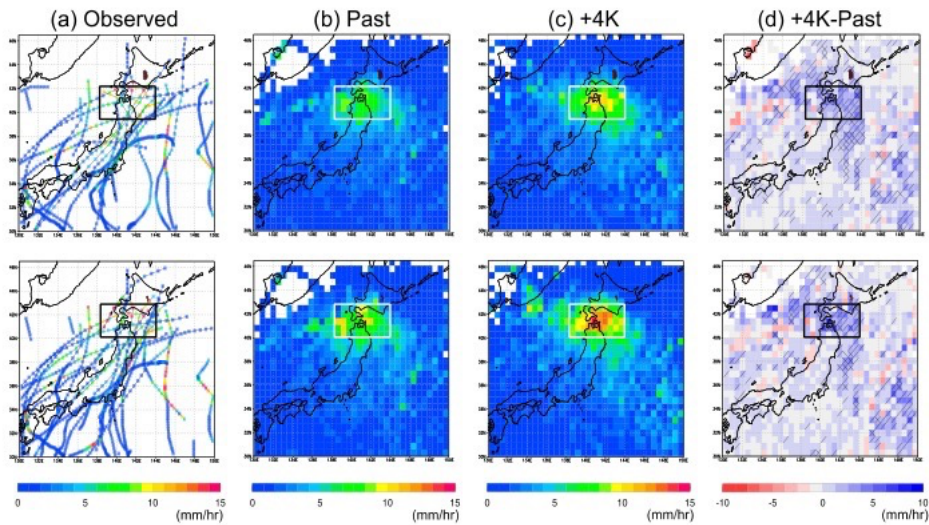


図-4 熱帯低気圧の位置と降水強度との関係⁶⁾（上段は十勝川帯広基準地点流域、下段は音更川音更基準地点流域における流域平均降水強度）

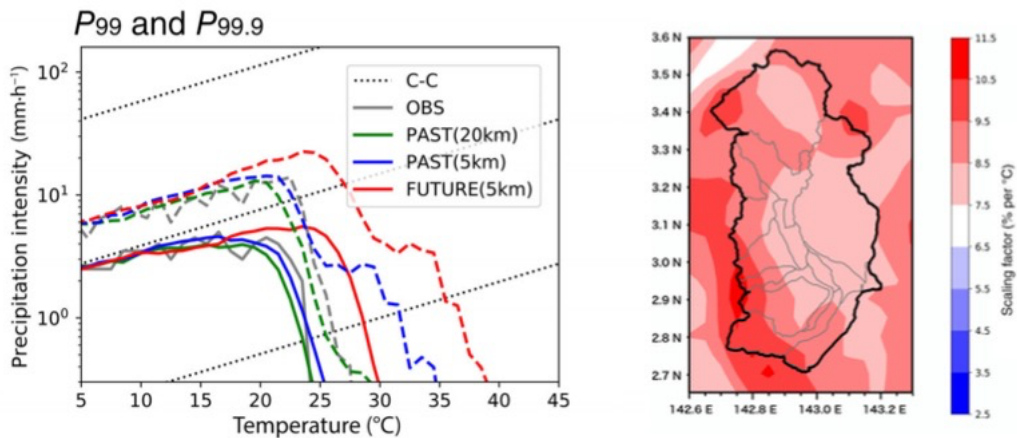


図-5 地上気温と1時間降水強度の関係（左）とその傾きの空間分布（右）⁷⁾

3. 大雨リスクの将来変化に関する研究

5km 解像度にダウンスケーリングを実施した d4PDF の妥当性が確認できたため、同データを用いて各気候条件における大雨を分析しました。その結果、温暖化の進行に応じて年最大降雨量は増大することや(図-3)、1時間降雨強度が高まることが明らかになりました³⁾。また、それらの要因についても分析しました。大雨をもたらす台風性の降雨を分析し、台風の強度が強まることにより山岳域のサブ流域において降雨量が増大しやすいことが明らかとなりました(図-4)⁶⁾。1時間降雨強度の増大は気温と飽和水蒸気圧の関係式(Clausius-Clapeyron 関係)から概ね説明できること、将来気候においては地形性の降雨が卓越する山

岳部では Clausius-Clapeyron 関係を上回ることを明らかにしました (図-5)^{7),8)}。また、降雨イベントを時空間パターンに基づいて分類する手法を開発し、5km 解像度の d4PDF に適用したところ短時間に集中的な降雨イベントおよび空間的に強雨域が集中する降雨イベントが増加することがわかりました⁹⁾。このような降雨パターンの時空間的な集中化と降雨量の増大の両者により、河川のピーク流量の増大に寄与することも明らかとなりました。

アンサンブル気候データに含まれる大量の極端現象を用いることにより、地域で起こりうる災害のシナリオを考慮することも可能となります。例えば大雨による災害は降雨の時空間分布の違いにより被害規模や被害箇所、被害の生じ方などが異なりますが、アンサンブル気候データに含まれるさまざまな大雨パターンを考慮することにより地域で生じうる災害のシナリオを検討することが可能となります。このような考え方にに基づき、令和元年台風19号 (Hagibis) と類似の台風を d4PDF から抽出した結果を示します¹⁰⁾。図-7(a)に示すように数千年のデータで構成される d4PDF からは過去に観測された台風よりも遥かに多い台風事例を検討可能であり、Hagibis と類似した台風を抽出した結果、図-7(b)に示す過去の類似経路の台風事例は19事例であったのに対し、図-7(c)に示すd4PDF過去実験(3000年分)では332事例存在し、類似の台風がもたらす被害をより豊富な事例から検討可能となることがわかります。さらに温暖化進行後における被害の特徴の変化も評価可能であり、具体的な事例に対する適応策の検討も可能となります。このような考え方は地域の防災を

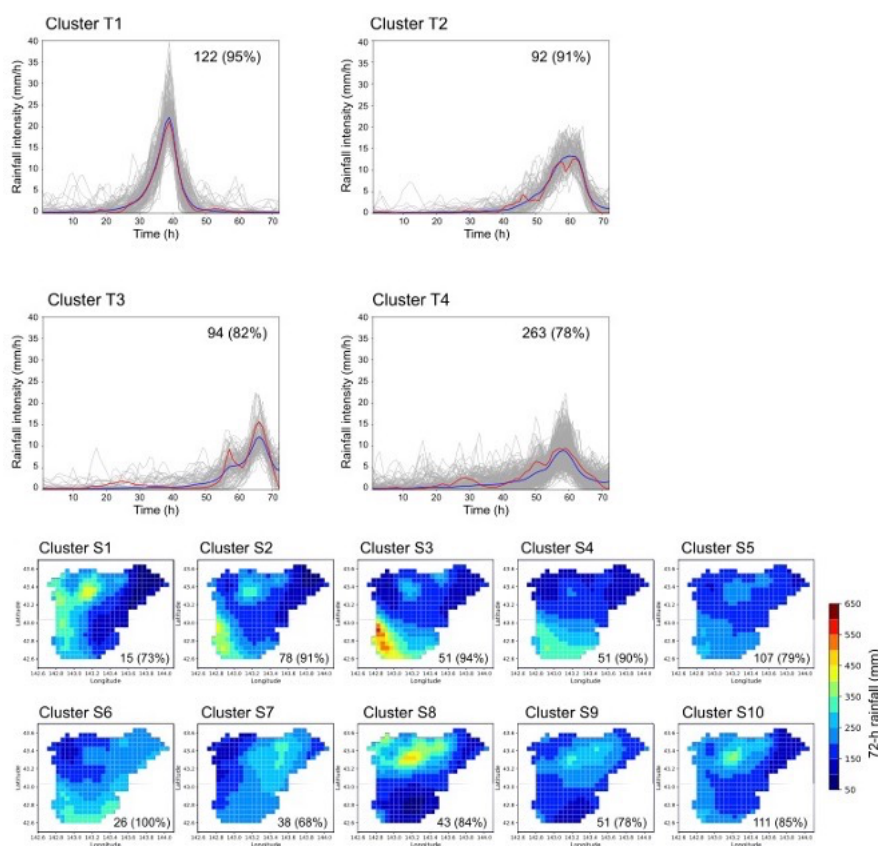


図-6 降雨の時間パターンの分類結果 (上) と降雨の空間パターンの分類結果 (下)⁹⁾

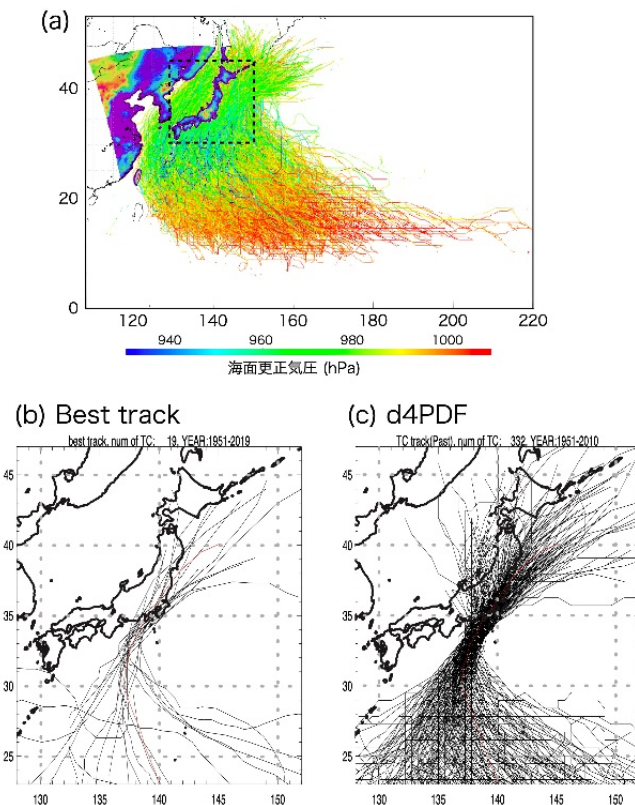


図-7 過去のデータとアンサンブル気候データに含まれる台風の経路¹⁰⁾

考える上で重要であると考えており、様々な外力に対して緊急時の防災活動を事前に想定した、確実かつ効果的な緊急時対応に繋げるための研究を進めています（内閣府戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第3期「スマート防災ネットワークの構築」にて実施中）。

4. おわりに

近年、d4PDF を活用したリスク評価と適応策の検討が進められており、行政の検討でも活用され始めています。国土交通省では平成 30 年度より「気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会」を開催し、将来の降雨量の増加率を取りまとめ（図-8）、気候変動を考慮した降雨量を計画で想定する外力とするように提言が出されています。また、国土交通省北海道開発局と北海道は平成 29 年度に「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」、令和元年度に「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」を開催し、十勝川や常呂川流域における大雨リスクの将来変化（図-9）を調べるなどリスク評価および適応策の検討が進められています。本研究はこれらの行政的検討に貢献することができ、科学的な成果を意思決定や社会実装につなげる重要な過程の一旦を担うことができたものと思います。これらの研究から社会実装に至るまでは様々な方が関わっており、研究機関と行政と民間の連携により短期間でも大きく推進することを実感しました。この

<地域区分毎の降雨量変化倍率>

地域区分	2°C上昇	4°C上昇	
			短時間
北海道北部、北海道南部	1.15	1.4	1.5
九州北西部	1.1	1.4	1.5
その他(沖縄含む)地域	1.1	1.2	1.3

※ 4°C上昇の降雨量変化倍率のうち、短時間とは、降雨継続時間が3時間以上12時間未満のこと
3時間未満の降雨に対しては適用できない
※ 雨域面積100km²以上について適用する。ただし、100km²未満の場合についても降雨量変化倍
率が今回設定した値より大きくなる可能性があることに留意しつつ適用可能とする。
※ 年超過確率1/200以上の規模(より高頻度)の計画に適用する。

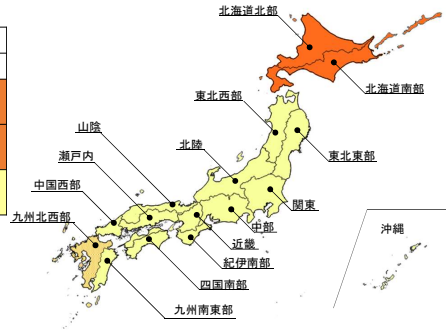
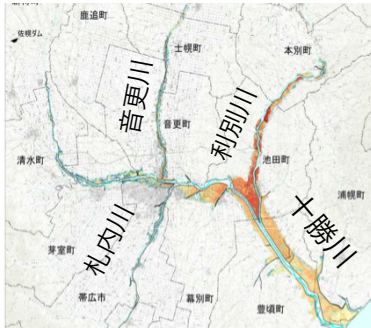
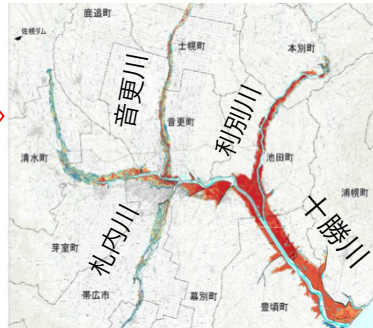


図-8 降雨量の変化倍率¹¹⁾

過去実験



4°C上昇実験



将来変化

図-9 十勝川流域における浸水確率の将来変化¹²⁾

ような一連の過程に関わることができたのは、自分の中での今後の研究への取り組み方や方向性を考える上で非常に良い経験をさせていただきました。冒頭にも述べましたが、これらの研究は関わっていただいた皆様のおかげで進めることができました。北海道大学山田 朋人教授をはじめ、関係の皆様に変更して感謝申し上げます。

引用文献

- 1) Mizuta, R., Murata, A., Ishii, M., Shiogama, 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. and Kimoto, M.: Over 5,000 Years of Ensemble Future Climate Simulations by 60-km Global and 20-km Regional Atmospheric Models, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 98, pp.1383–1398, 2017.
- 2) H. Kawase, M. Nosaka, S. I. Watanabe, K. Yamamoto, T. Shimura, Y. Naka, Y.-H. Wu, H. Okachi, T. Hoshino, et al: Identifying Robust Changes of Extreme Precipitation in Japan

From Large Ensemble 5-km-Grid Regional Experiments for 4K Warming Scenario, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128, 18, 2023.

- 3) 山田朋人, 星野剛, 舩屋繁和, 植村郁彦, 吉田隆年, 大村宣明, 山本太郎, 千葉学, 戸村翔, 時岡真治, 佐々木博文, 濱田悠貴, 中津川誠: 北海道における気候変動に伴う洪水外力の変化, 土木学会河川技術論文集, 第 24 巻, pp.391-396, 2018.
- 4) 星野剛, 山田朋人, 稲津將, 佐藤友徳, 川瀬宏明, 杉本志織: 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 B1(水工学), Vol. 74, pp.I_13-I_18, 2018.
- 5) 星野剛, 山田朋人: 大量アンサンブル気候予測データを用いた年最大降雨の時空間特性の将来変化の把握~十勝川流域を対象として~, 土木学会論文集 G(環境), Vol. 74, pp.I_25-I_31, 2018.
- 6) T. Hoshino, T. J. Yamada and H. Kawase: 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*, 11, 435, 2020.
- 7) T. J. Yamada, T. Hoshino and A. Suzuki: Using a Massive High-Resolution Ensemble Climate Data Set to Examine Dynamic and Thermodynamic Aspects of Heavy Precipitation Change, *Atmospheric Science Letters*, e1065, 2021.
- 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, pp.I_19-I-24, 2020.
- 9) T. Hoshino and T. J. Yamada: Spatiotemporal classification of heavy rainfall patterns to characterize hydrographs in a high-resolution ensemble climate dataset, *Journal of Hydrology*, 617(PB), 128910., 2023.
- 10) T. Hoshino, H. Okachi, Y. Takehara, T. J. Yamada: EVALUATION OF HEAVY RAINFALL RISK OF TYPHOON HAGIBIS (2019) ASSOCIATED WITH TYPHOON TRACK, *Journal of JSCE*, Vol. 10, pp.534-544, 2022.
- 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、2017.
- 12) 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.