

長岡工業高等専門学校 非会員 ○保坂 八洋
非会員 山谷 樹 正会員 山本 隆広

1. はじめに

産業革命以降、文明の進歩に伴い、人類の活動に伴うエネルギー消費の増大と温室効果ガスの排出による地球温暖化の進行によって、気候変動が世界的に深刻な問題として注目を浴びるようになった。このような背景のもと、気候変動が降水特性や河川流量に与える影響を把握し、将来の水害リスクを適切に評価することが、治水上の重要な課題の一つとなっている。

本研究では将来の気候変動予測の不確実性を考慮するため、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である d4PDF(database for Policy Decision making for Future climate change)の中でも高解像度で地形を詳細に反映することができる 5 km 解像度版¹⁾を用い、千曲川生田上流域を対象として、将来気候変動下における降水特性および洪水特性の分析を行うことを目的とする。

本稿では、2 章で使用データと解析手法を、3 章で分布型水文モデルの不確実性、d4PDF の再現性、ならびに降水特性の比較および温暖化に伴う洪水特性の変化についての結果と考察を示し、4 章で本研究の成果をまとめる。

2. 方法

2.1. 使用データ

本研究では、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である d4PDF を使用している。d4PDF には、60 km 解像度である全球気候モデル、力学的ダウンスケーリングをして 20 km 解像度となった非静力地域気候モデル、それを更に力学的ダウンスケーリングをした 5 km 解像度版の気候モデルがあり、本研究では、より高解像度の 5 km 解

像度版を使用している。過去実験と 4 K 上昇実験にはそれぞれ 12 メンバーがあり、本研究では、過去実験の 1985 年から 2010 年までの 5 メンバーと、4 K 上昇実験の 2050 年から 2100 年までの 6 メンバーを用いた。

2.2. 分布型水文モデルによる流量計算の不確実性

千曲川生田の過去に発生した洪水イベントを 12 個抽出して、流量の観測値と降水から河川流量を計算できる分布型水文モデル²⁾を使用して得られた計算値を、Nash-Sutcliffe 効率係数(NS)、ピーク流量の相対誤差(RE)といった指標を用いて、分布型水文モデルの不確実性の把握を行い、この結果を整理して温暖化実験時の洪水特性を分析した。NS は 1 に近いほど、RE は 0 に近いほど、計算値が観測値をよく再現していることを示す。図 1 には、分布型水文モデルの計算に使用されている信濃川水系の観測所の位置の一覧を示した。

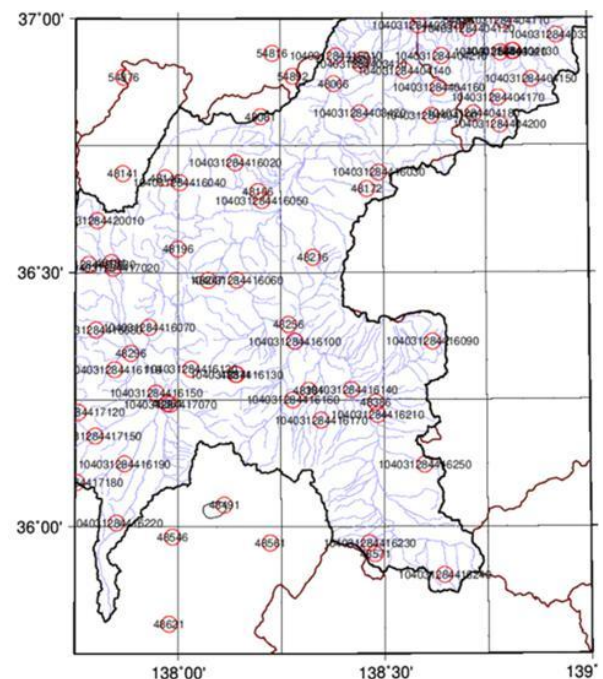


図 1 分布型水文モデルで使用されている信濃川水系の観測所の位置の一覧

2.3. 現在気候下での d4PDF の利用可能性

d4PDF は、初期値に起因する気象の揺らぎを表現するため、多数のアンサンブルメンバーを有している。本研究では、この初期値の違いが河川流量の出力結果に与える不確実性を統計的に把握するため、1985 年から 2010 年の期間で d4PDF の現在気候実験データから 5 つのメンバー(D45K01~05)を抽出して解析に用いた。各メンバーの降水データを分布型水文モデルに入力し得られた河川流量のばらつきを比較、検討した。これにより、気候の初期値の違いに伴う流量予測の振れ幅を評価すると同時に、観測値ベースの気象データによるシミュレーションと比較することで d4PDF の不確実性を評価した。

2.4. 将来気候下での降水特性の分析手法

将来の降水特性を把握するため、観測値ベース(C0)と d4PDF の将来気候における年間合計降水量を比較した。解析にあたっては、それぞれの平均値および標準偏差を算出し、平均値の違いと年ごとの変動幅を比較した。

2.5. 将来気候下での洪水特性の分析手法

将来気候における洪水特性の変化を評価するため、d4PDF の将来気候予測データである産業革命以前の平均気温からの 4 K 上昇時実験のデータを用い、現在気候と同様の手法で分布型水文モデルによる流出計算を行った。将来予測において、2050 年から 2100 年の期間で 6 つのアンサンブルメンバー(CC, GF, HA, MI, MP, MR)を分布型水文モデルの入力値に用いることで、将来気候下における河川流量の算出を行い、得られた流量データから年最大流量を抽出し、一般化極値分布(GEV)を適用することで、100 年確率流量をはじめとする各種確率規模の流量を推定した。これら 6 つのメンバーは、将来の海面水温の昇温パターンを与えた CMIP5 の気候モデル(CCSM4, GFDL-CM3, HadGEM2-AO, MIROC5, MPI-ESM-MR, MRI-CGCM3)の違いを表す。また、アンサンブルメンバーのばらつきに伴う不確実性を考慮す

るため、Bootstrap 法を用いて確率流量の変動幅を評価した。

また、採用分布形を決定する際、モデルの適合度を評価する指標として SLSC(Standard least-squares criterion, 標準最小二乗規準)を使用した。この指標は、確率紙上における標本と理論分布とのずれの大きさを表し、値が小さいほど適合度が高いことを示す。SLSC は、0.04 以下の値であれば適合度は、良好であると言える。他の分布形と比較した際、GEV が最も優れていたため、本研究では GEV を採用している。これによって、温暖化に起因するピーク流量の増大傾向を解析し、生田上流域における将来の洪水特性の変化についての評価を試みた。

3. 結果と考察

3.1. 分布型水文モデルの不確実性の把握

表 1 各イベントのピーク時観測流量、ピーク時計算流量、Nash-Sutcliffe 効率係数、ピーク流量の相対誤差

	ピーク時計算流量 [m ³ /s]	ピーク時観測流量 [m ³ /s]	NS	RE
flood01	1184	1018	0.883	0.164
flood02	1041	1128	0.902	0.076
flood03	1168	1100	0.902	0.063
flood04	2133	2067	0.982	0.032
flood05	1841	2360	0.912	0.220
flood06	1712	2055	0.924	0.166
flood07	1646	1540	0.800	0.069
flood08	2943	3073	0.917	0.042
flood09	1827	1762	0.957	0.037
flood10	1313	1245	0.889	0.054
flood11	6442	7267	0.975	0.113
flood12	1632	1280	0.646	0.275
平均	2074	2158	0.891	0.109

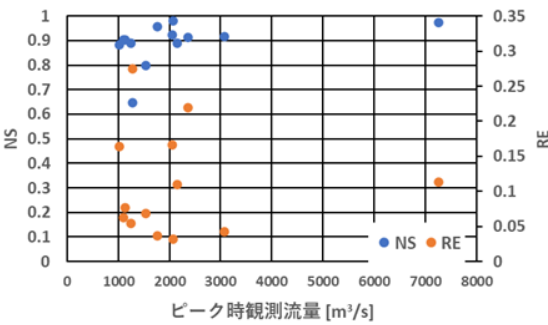


図 2 各ピーク時観測流量の Nash-Sutcliffe 効率係数、ピーク流量の相対誤差

12 個のイベントのピーク時観測流量、ピーク時計算流量、NS、RE をまとめたものを表 1 に、各ピーク時観測流量の NS、RE をグラフでまとめたものを

図 2 に示した. 各イベントの NS は 0.646~0.982, RE は 0.032~0.275 の範囲であった. 平均値はそれぞれ NS が 0.891 と高い値を示して, RE は 0.109 と低い値を示しており, 分布型水文モデルは概ね妥当に流量計算を再現できていることを確認できた.

しかし, RE は最大で 0.275 となった. この値をモデルの再現誤差の参考値として扱い, 以降の解釈では, モデル自体の不確実性にも留意した.

3.2. d4PDF の再現性検証

d4PDF 現在気候データの妥当性を検証するため, 流量の順位統計量に基づき分布形状を比較した結果を図 3 に示した. 図 3 は, 各ケースの時間流量を大きさの順に並べた順位統計量を, パーセンタイルが 0.999 以上の範囲について示したものである. 観測値ベースの流量(D45KC0)はアンサンブルメンバー(D45K01~05)の変動幅の下限付近に位置しているが, モデルの相対誤差を含めて範囲内に収まっており, このことから, d4PDF を用いたシミュレーションは現在気候の統計的性質を概ね再現しており, 将来予測に利用できる可能性が示された.

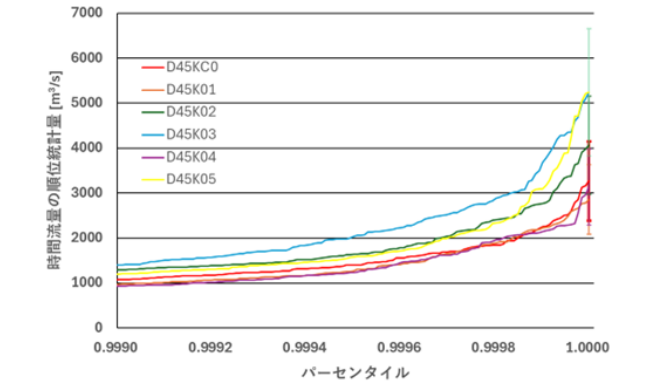


図 3 d4PDF 現在気候実験と観測値ベース計算による流量の順位統計量比較

3.3. 観測値ベースと将来気候の降水量の比較

観測値ベース(C0)と d4PDF の将来気候における年間合計降水量を比較した結果を図 4 に示した. 千曲川生田上流域において, 将来気候の平均値は, 観測値ベースより最大 10 %程度高かった. ただし, 観測値ベースとの比較であるため, この差を温暖化の影響のみと解釈することはできない. また, 標準偏差の範囲は両者で重なっていた.

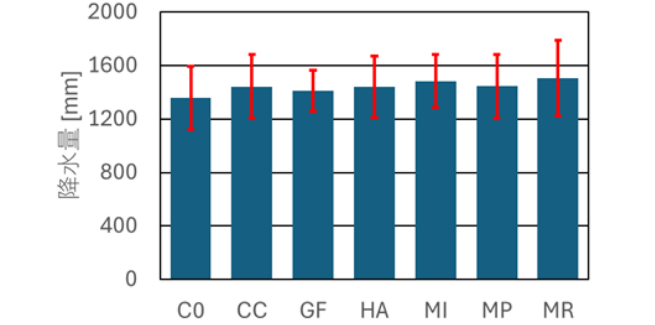


図 4 年間合計降水量の平均値の比較

3.4. 水文統計解析による 100 年確率流量の評価

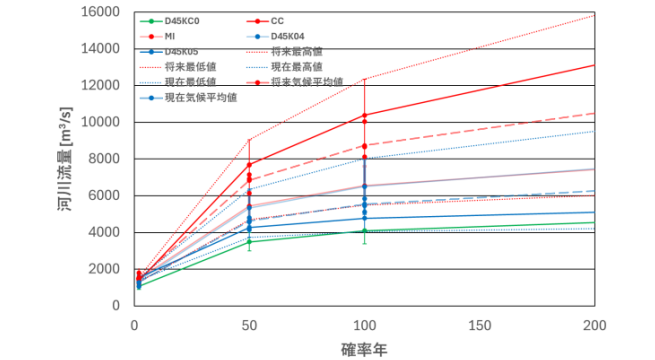


図 5 洪水特性の変化

表 2 観測値ベースと現在気候の標準最小二乗規準, 100 年確率流量, Bootstrap 推定誤差

メンバー	C0	m001	m002	m003	m004	m005
SLSC(99%)	0.027	0.024	0.034	0.020	0.027	0.024
100年確率流量 [m³/s]	4095	5463	5109	5836	6504	4773
Bootstrap推定誤差 [m³/s]	708	866	575	824	1508	723

表 3 将来気候の標準最小二乗規準, 100 年確率流量, Bootstrap 推定誤差

メンバー	CC	GF	HA	MI	MP	MR
SLSC(99%)	0.032	0.036	0.035	0.027	0.044	0.037
100年確率流量 [m³/s]	10380	10034	8127	6544	8658	8658
Bootstrap推定誤差 [m³/s]	1963	1526	1364	1048	1056	1027

GEV を用いた水文統計解析の結果を図 5 に, 観測値ベースと現在気候の SLSC, 100 年確率流量, Bootstrap 推定誤差を表 2 に, 将来気候の SLSC, 100 年確率流量, Bootstrap 推定誤差を表 3 に示した. 表 2 の C0 は D45KC0, m001~m005 は D45K01~05 を表す. なお, Bootstrap 推定誤差は, Bootstrap 法によって求めた 100 年確率流量の推定誤差であり, 各メンバーの 100 年確率流量がどの程度の幅をもって推定されているかを表している. 図 5 の横軸は確率年, 縦軸は河川流量であり, 確率年が大きいほど,

すなわち発生頻度の低い大規模な洪水ほど、確率流量が大きくなる関係を示している。図 5 には、現在気候と将来気候のそれぞれについて、誤差を含む最大値と最小値、平均値、および D45KC0 を記載している。現在気候と将来気候の 100 年確率流量の平均値は、それぞれ 5537 m³/s, 8733 m³/s であり、将来気候の方が 57.7 %高かった。また、将来気候の 6 メンバーの推定値(6544~10380 m³/s)は、現在気候の 5 メンバーの推定値(4773~6504 m³/s)をいずれも上回った。ただし、両者の最も近い値(MI の 6544 m³/s と D45K04 の 6504 m³/s)の差は小さく、Bootstrap 推定誤差を含めた範囲は一部重なった。範囲の重なりだけでは変化の有意性は判断できないため、将来気候の推定値が一貫して大きかったことを示すにとどめる。

また、CC の推定値 10380 m³/s に Bootstrap 推定誤差 1963 m³/s を加えると 12343 m³/s となる。生田の流域面積(2036 km²)は、信濃川水系の基準地点である立ヶ花(6442 km²)の約 3 分の 1 にすぎないが、この値は立ヶ花の現行の基本高水流量 11500 m³/s を上回る。ただし、推定値自体はいずれも 11500 m³/s を下回っている。

以上より、将来の流量の増加の可能性と、本研究で示した推定の不確実性の幅を併せて考慮したうえで、基本高水流量や既存の河川改修計画の見直しの必要性を検討することが望ましいと考えられる。

4. まとめ

本研究では、千曲川生田上流域を対象として、d4PDF の 5 km 解像度版の降水データを分布型水文モデルに入力し、現在気候と 4 K 上昇時の 100 年確率流量を比較した。分布型水文モデルは 12 個の洪水を NS の平均 0.891 で再現し、RE は最大 0.275 であった。観測値ベースの流量は、モデルの相対誤差を含めると d4PDF 現在気候のメンバーの変動幅の下限付近に収まり、d4PDF の 5 km 解像度版は将来予測に利用できる可能性が示された。100 年確率流量の平均値は現在気候 5537 m³/s、将来気候

8733 m³/s(57.7 %増)で、今回用いたメンバーでは将来気候の推定値が一貫して大きかった。一方、推定誤差を含めた範囲は一部重なり、変化の統計的有意性は評価していない。

本成果は、平均値のみでは捉えることのできない将来予測の幅を示したものであり、アンサンブル予測による確率的な広がりを考慮した流域治水を検討するうえでの基礎資料となると考えられる。一方で、解析に用いたメンバーは現在気候で 5、将来気候で 6 にとどまっている。

今後は、d4PDF の過去実験および 4 K 上昇実験に含まれる 12 メンバーのデータを活用してアンサンブル数を拡充し、変化量とその不確実性を定量的に評価することが課題である。また、流出解析の結果を氾濫解析と組み合わせて浸水範囲や浸水深を推定し、さらに経済被害評価へとモデルを拡張することで、洪水リスクをより総合的に評価することも今後の課題である。これらの取り組みにより、気候変動を考慮した治水計画の立案に対して、より実用的な知見を提供できると考えられる。

文献

- 1) H. Kawase 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
Volume128, Issue18(2023).
- 2) 星野大雅ほか. 年最大流量の非超過確率を用いた洪水危険度指標の開発の試み.
水工学論文集, 第 59 巻 (2015).