

アンサンブル気候予測データを用いた利根川上流域における

極値水文量の将来変化の推定

清水啓太*, 小島 彩織*, 山田正*

Future Estimation of the characteristic change of extreme hydrological quantity in upper Toner river basin using a large ensemble climate projection database

Keita SHIMIZU*, Saori KOJIMA* and Tadashi YAMADA**

Abstract

In recent years, future projection of climate is conducted to clarify the characteristics of heavy rainfall in the time of proceeding of global warming in Japan. Also, estimation of extreme flood discharge becomes important to construct the flood control management considering the effect of global warming. This estimation can be possible by rainfall runoff analysis using heavy rainfall samples derived from future projection database. Therefore, this research analyzes the future change of extreme flood discharge in upper Tone river basin by using heavy rainfall samples projected by ensemble climate database, d4PDF. As a result, heavy rainfall event, which occurs more shorter term than design duration time has a possibility of causality of severe flood discharge.

1 はじめに

我が国においては、気候変動の影響により、今後、降雨量ならびに洪水の発生頻度が増加すると予測されている¹⁾。このような現状を鑑みると、地球温暖化に伴う豪雨の激甚化を加味した洪水対策の実現は喫緊の課題である。したがって、気候変動が水文量（降雨量や河川流量）に与える影響を評価し、洪水対策に取り込む必要があるが、その実現のためには、気候変動予測による将来気候場の不確実性の定量評価が不可欠である。そのために、我が国では、気象モデルによって、地球温暖化進行時における将来気候を予測する研究が多数行われている²⁾。従来の予測データベースは、高い空間解像度を有し、将来気候下における大規模豪雨のパターンを推定可能とするが、アンサンブル数が少ないために、発生頻度の低い極値降雨の確率的評価が十分ではなかった。一方、文部科学省気候変動リスク情報創生プログラムで作成された「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 database for Policy Decision making for Future climate change(d4PDF)」(以下、d4PDFと表記する)³⁾は、これまでにない多数の気候シミュレーションに基づく多数の極値降雨量の統計サンプルを格納している。このデータベースは、水平解像度 60 kmの気象研究所全球大気モデル MRI-AGCM3.2に加えて、日本域をカバーする水平解像度 20kmの気象研究所領域気候モデル NHRCMを用いた領域ダウンスケーリング実験で構成されている。現在、d4PDFを活用することで、気候変動を踏まえた洪水リスク評価が行われている^{4,5,6,7)}。本研究では、d4PDFの領域実験データを用いて、地球温暖化進行時における降雨量の変化が、河川流量に与える影響を分析した。これにより、規定の計画降雨量値・流量値を超過する、洪水対策上危険な降雨パターンを把握することができる。本論では、我が国の経済活動上重要な役割を有する利根川上流域を対象として、気候変動予測により示された豪雨事例を用いて、将来生起しうる極値河川流量の規模を検討した。さらに、極値河川流量値と降雨量の関係を

*中央大学理工学研究所 東京都文京区春日 1-13-27

明らかにし、利根川上流域においてより危険側にある豪雨パターンの傾向について明らかにする。

2 対象流域における大量アンサンブル気候予測データベースd4PDFの適用の妥当性に関する検証

2.1 使用データと対象流域の概要

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20kmの気候予測データであり、産業革命以前に比べて全球平均気温が2°Cあるいは4°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らに摂動を与えた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）、6種類の海面水温パターンとそれに摂動を与えた15メンバの数値計算を実施した4°C上昇実験（60年×海面水温6パターン×15メンバ＝5400年）をもつ。本研究で使用したd4PDFデータは、利根川上流域に相当するd4PDFのモデル格子における、3000年間分の過去実験結果および5400年間分の4°C上昇実験結果での、年最大流域平均日雨量および年最大流域平均3日雨量である。なお、利根川上流域に相当するd4PDFの計算グリッドの雨量データの算術平均値を流域平均雨量と定義している。ここで、**Fig-1**に利根川上流域の流域図（薄青色の範囲）および当該流域に相当するd4PDFの計算グリッドを示す。なお、同図には、後節に記す降雨流出計算の概要の説明にあたり、設定した140個のサブ流域ならびに河川網（青線）を付記している。

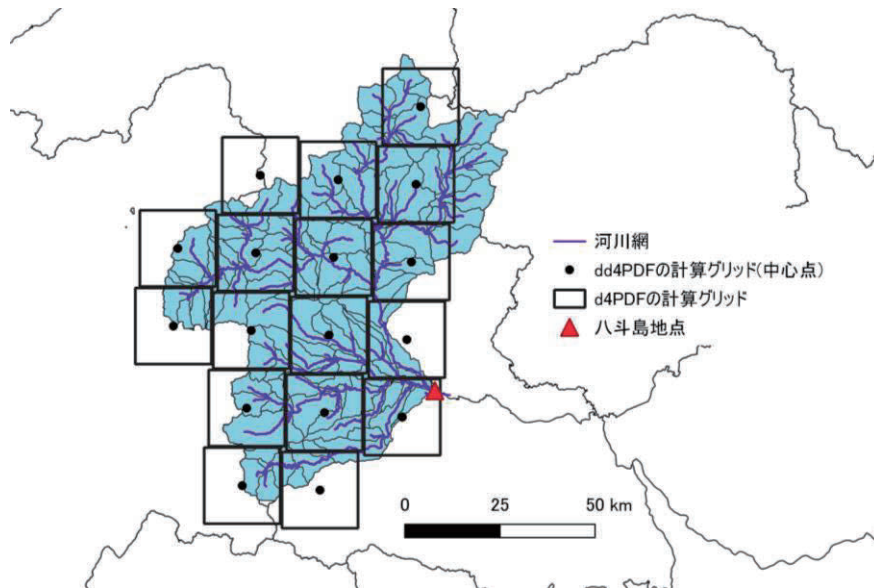


Fig-1 Basin map of upper Tone river basin (a light blue colored area), Calculation grids of d4PDF's regional experiment and their central points of the grids, 140 sub basins and river nets (solid blue lines)

2.2 評価手法

利根川八斗島地点上流域に対応する過去実験および将来実験(2°C上昇・4°C上昇)と過去60年間分(1943年～2002年)の年最大流域平均3日雨量の観測実績の時系列降雨データについて比較を行う。過去実験および将来実験データは、**Fig-1**に示す利根川八斗島地点上流域に対応する17メッシュの時系列降雨量データをd4PDFから抽出した。対象とする降雨イベントは、各アンサンブル・各年の時系列降雨データより、流域平均3日降雨量が最大となる降水イベント（過去実験：3000イベント、2°C上昇実験：3240イベント、4°C上昇実験：5400イベント）とした。抽出した過去実験における年最大流域平均3日降雨量と、観測実績の年最大流

域平均3日降雨量を比較するにあたり、d4PDFの気候データはモデルの系統誤差を含んでいる可能性があるため、ピアニの手法⁸⁾によるバイアス補正を行った。本手法では、まずモデルによる計算値と実測値をそれぞれソートし、昇順に並べ替えてxy平面にプロットする。ソートされた計算値xと実績値yの関係を最小二乗法により近似曲線で表し、実績値yに対する計算値xの増減傾向をバイアスとして補正する方法である。関係式作成の対象データは、過去実験の各50アンサンブルの関係式である。作成した50アンサンブルメンバの関係式の係数を平均化し、全サンプルに適用した。なお、ここでは補正係数として1.24が得られた。

2. 3 d4PDF による過去実験の再現性の検証

流域平均3日降雨量が年最大となる、過去実験 3000 イベントに対してピアニの手法によるバイアス補正を行った。Fig-2 に過去実験のバイアス補正前後および観測実績の頻度分布の比較、Table-1 に各種統計量の比較を示す。これらの図表より、計画規模に相当する 99%ile 値の倍率から、過去実験は、バイアス補正を行うことで、観測実績との整合性が高くなるため、より信頼性の高い補正値が得られる。本研究では、バイアス補正後の降雨量を降雨流出解析に使用した。なお、気候モデルの系統誤差に関して、将来気候と過去気候で同様な傾向をとることを前提とし、将来実験に対しても一律 1.24 の補正係数を採用した。

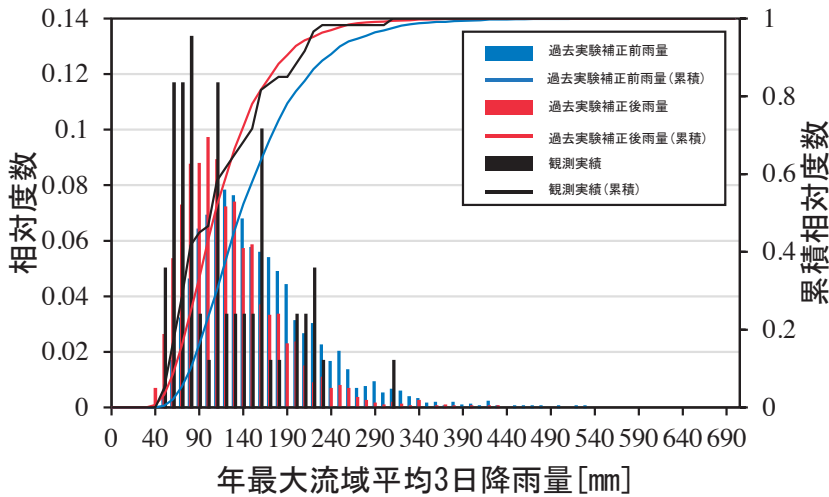


Fig-2 Comparison of annual maximum 3-days rainfall between bias corrected and non-bias corrected past experiment

	観測実績	過去実験 補正前	過去実験 補正後	倍率 (補正前/実績)	倍率 (補正後/実績)
平均値 [mm]	124.3	159.4	128.1	1.28	1.03
最大値 [mm]	317.6	535.2	430.1	1.69	1.35
95%ile値 [mm]	221.3	283.0	227.4	1.28	1.03
99%ile値 [mm]	317.6	360.3	289.5	1.13	0.91

Table-1 Comparison of statistics value of annual maximum 3-days rainfall between observed data and past experiment

2. 4 d4PDF における過去実験と将来実験の比較

Fig-3に年最大流域平均3日降雨量の将来実験(2°C上昇・4°C上昇)および過去実験の比較を示す。2°C上昇・4°C上昇ともに、将来実験における頻度分布の裾部分が右に歪んでおり、低頻度かつ大規模な降雨が地球温暖化進行時で増加することが確認できる。また、計画規模に相当する99%ile値は2°C上昇時に対し、4°C上昇時はおよそ10%増加していることが分かる。過去実験、将来実験と観測実績の年最大流域平均3日降雨量の比較結果から、d4PDFの実験データには、観測データだけではサンプル数が少なく調べることのできない低頻度、高強度のイベントが現れることが示された。なお、Fig-2およびFig-3に示されているヒストグラムのビンの横幅(階級)は10mmとした。

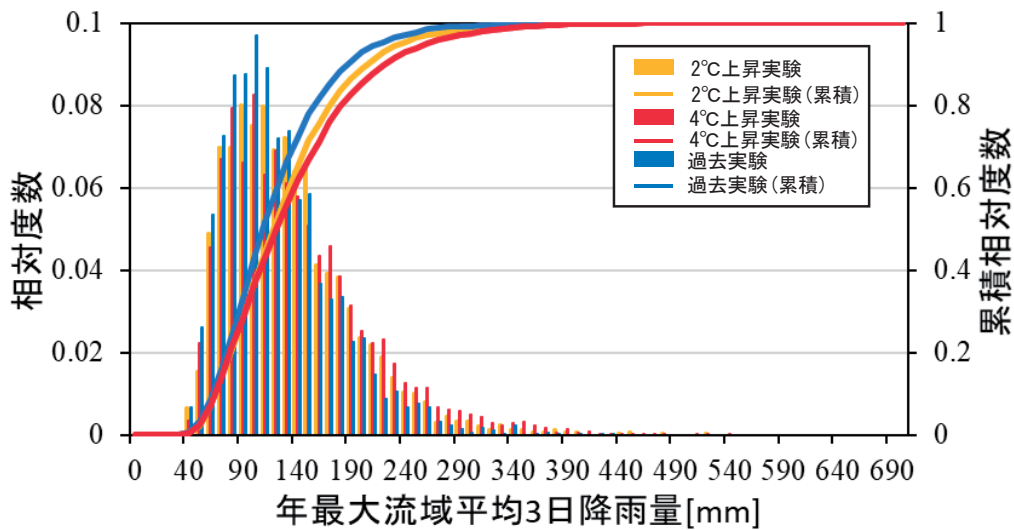


Fig-3 Future change of frequency distribution of annual maximum 3-days rainfall

	過去実験	2°C上昇 実験	4°C上昇 実験	倍率 (2°C上昇/過去実験)	倍率 (4°C上昇/過去実験)
平均値[mm]	128.1	138.2	144.07	1.08	1.12
最大値[mm]	430.08	523.9	547.08	1.22	1.27
95%ile値[mm]	227.38	245.5	268.97	1.08	1.18
99%ile値[mm]	289.25	332.0	358.89	1.15	1.24

Table-2 Comparison of statistics value of annual maximum 3-days rainfall between past experiment and future experiment

3 大量アンサンブル気候予測データベースd4PDFにおける大規模豪雨事例を入力降雨とした流出解析

3. 1 対象降雨イベント

4°C上昇実験における 60 年間分に亘る降雨データをもつ 90 アンサンブル標本から、年最大流域平均日雨量値および年最大流域平均 3 日降雨量値の上位 10 イベントを抽出し、これらの豪雨イベント群における降雨強度時系列を対象降雨とした。この対象降雨を入力降雨として、流出計算を実施した。

3. 2 降雨流出計算手法

流出計算では、吉見・山田^{9,10)}により提案された「鉛直浸透機構を考慮した降雨流出モデル」を用いた。本節では、当該モデルの概要を示す。山田⁹⁾は流域の最小スケールを単一斜面と見做し、斜面流下方向流れを kinematic wave model として扱い、単一斜面における一般化した降雨流出の基礎式を導出した。さらに、吉見・山田¹⁰⁾は複数の層により山腹斜面が構成されているとして、浸透量および雨量の連続関係に着目し、 n 層目における鉛直浸透現象を定式化した。その概要を次に示す。 $n-1$ 層から n 層目への浸透量 V_{n-1} ($=b_{n-1}s_{n-1}$)、 n 層目から $n+1$ 層目への浸透量 V_n ($=b_n s_n$) と各層における流出に寄与する雨量（流出に寄与する降雨量）の連続関係から式(1)を得る。

$$\frac{dS_n}{dt} = V_{n-1} - r_{nm} - V_n \quad (1)$$

$$\begin{cases} r_{nm} = 0 & (s_n < h_{nm}) \\ r_{nm} = a_{nm}(s_n - h_{nm}) & (s_n > h_{nm}) \end{cases} \quad (2)$$

各層における浸透量と流出に寄与する雨量の連続関係から、各層の流出に寄与する水量（土壌に浸透する降雨量を起因とする）は、式(2)より土層内水位 s_n が各層の保水力 h_{nm} を超えた時点で発生するとする。また、鉛直方向への浸透量 V_n と土層内水位 s_n には比例関係が成立するものとする。加えて、鉛直浸透機構における各層の側方成分は、土壌に浸透する降雨量のうち、流出に寄与する水量として式(3)の入力降雨として与える。すなわち、式(2)における r_{nm} を式(3)に示す基礎式⁹⁾に斜面流出に寄与する降雨として与えることで一連の斜面計算を行う。

$$\frac{dq_{nm}}{dt} = \alpha_{nm} q_{nm}^{\beta_{nm}} (r_{nm} - q_{nm}) \quad (3)$$

吉見・山田により提案された鉛直浸透機構は、降雨が流出に寄与するまでの遅れ時間や損失雨量を表現することができる。ここに、 n ：層数、 m ：各層における側方成分の番号、 q_{nm} ：流出高[mm/h]（表層から数えて n 層目の上から m 番目の流出成分）、 s_n ：各層の土層内水位[mm]、 a_{nm} 、 b_n ：各側方成分、浸透成分の比例定数[1/h]、 h_{nm} ：流出成分発生の閾値[mm]、 r_{nm} ：有効降雨量[mm/h]、 V_n ：鉛直浸透量[mm/h]である。流出計算において採用した鉛直浸透機構を考慮した流出モデルの構造は2段3層構造とした。このモデルの概念図を Fig-4 に示す。なお、流出計算に当たっては、対象流域を140個のサブ流域に分割した。また、降雨流出解析で使用するパラメータは、草木ダム流域(流域面積254km²)において、既往の19個の洪水イベント別に同定したパラメータ¹¹⁾の平均値を全てのサブ流域に一樣に与えた。なお、これらのパラメータは、利根川上流域の八斗島基準地点における既往洪水を精度良く再現可能であることが確認されている¹²⁾。

3. 3 河道計算手法

河道計算は一次元不定流計算で行い、斜面計算によって算出された各サブ流域の流量を上流端境界条件として与える。下流端は利根川河口および江戸川河口であり、いずれの計算も天文潮位を与えて計算している。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (4)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{n^2 g Q |Q|}{AR^{4/3}} = 0 \quad (5)$$

ここに、 A :通水断面積[m²]、 Q :流量[m³/s]、 q :側方流入単位幅流量[m²/s]、 α (=1.0):エネルギー補正係数、 g :重力加速度[m/s²]、 n :Manningの粗度係数[m^{-1/3}/s]、 R :径深[m]である。

なお、本解析における河道計算では、堤防からの越水や溢水及び決壊は発生しないと仮定しており、かつ、

洪水調節施設は考慮していない。

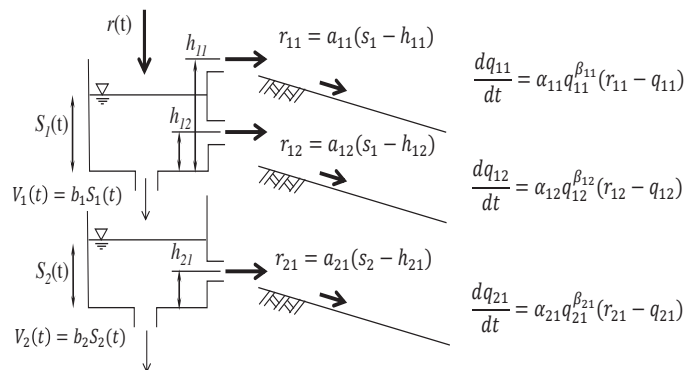


Fig-4 Conceptual diagram of runoff analysis method considering vertical infiltration

3. 4 全球平均気温上昇シナリオ別の河道計算結果

2°C上昇実験・4°C上昇実験における、八斗島地点におけるピーク流量と流域平均3日降雨量の関係をFig-5に示す。同図より2°C上昇実験・4°C上昇実験ともに、ピーク流量が既定計画の基本高水¹³⁾のピーク流量である22000m³/sを超過するイベントがあり、これを超える流量が起り得る可能性が示された。本研究では、年最大流域平均3日降雨量が全サンプル内で最大であった降雨イベントにおいて、必ずしも最大のピーク流量をもたらすわけではないことから、降雨の時空間分布に着目し、洪水対策上危険な流出現象をもたらす降雨パターンを検討する。

Fig-6 とFig-7はそれぞれ、2°C上昇実験・4°C上昇実験におけるピーク流量が最大であった降雨イベントに対する流出解析結果である。同図群におけるハイドログラフは、上述した各降雨時系列を入力として鉛直浸透構造の降雨流出モデルに与え、出力された流量を用いて河道計算を行い算出された流量である。この時のピーク流量は2°C上昇実験で21739m³/s、4°C上昇実験で29651m³/sであった。さらに、これら最大のピーク流量をもたらした降雨の流域平均3日降雨量は、2°C上昇実験の場合、上位第9位である489mm、4°C上昇実験の場合、上位第2位である643mmであった。また、上位のピーク流量をもたらす降雨パターンの多くは、比較的短い降雨継続時間で強い降雨強度が発生する、台風性降雨であった。

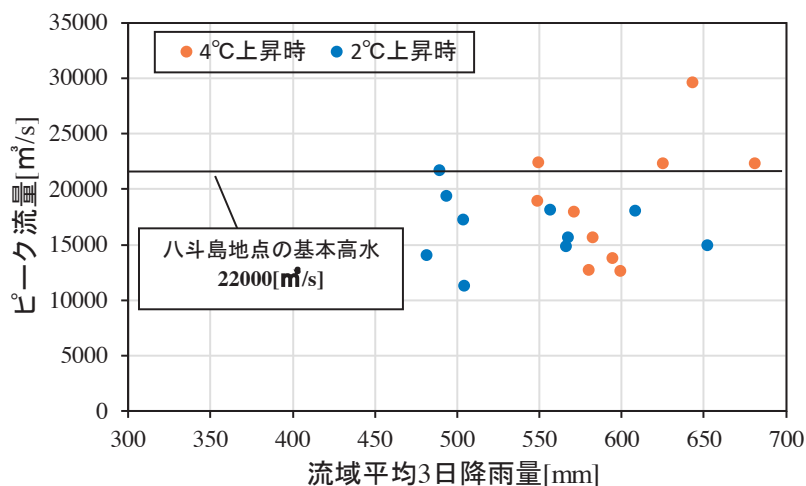


Fig-5 Relation between 3-days total basin average rainfall and calculated peak discharge in both cases of +2K experiment and +4K experiment of d4PDF

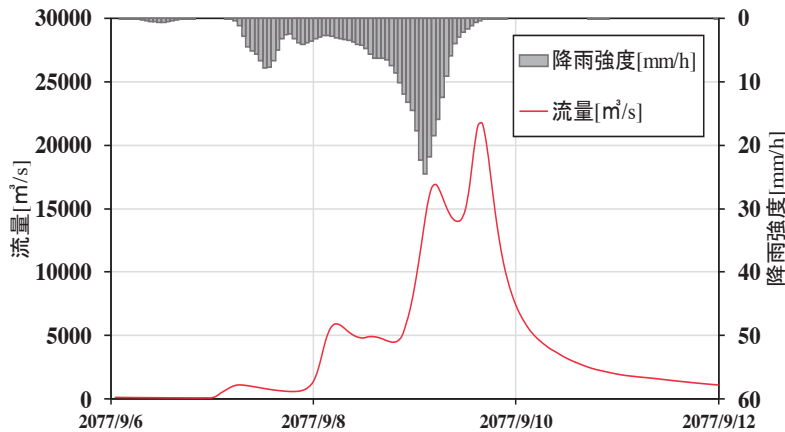


Fig-6 Calculated hydrograph which gives the top 1 value of peak discharge in +2K experiment

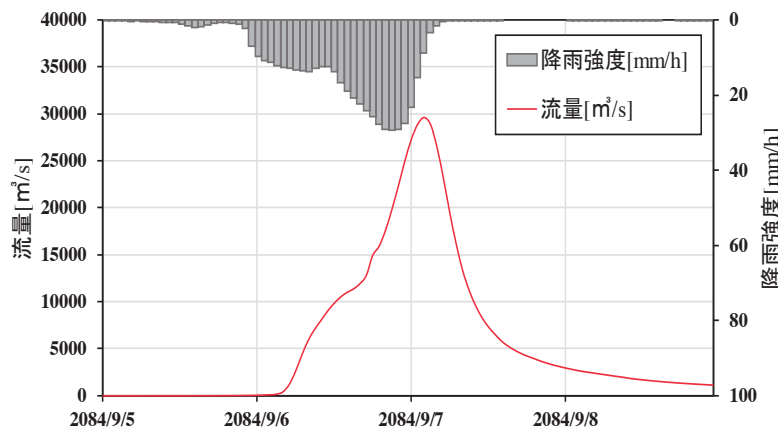


Fig-7 Calculated hydrograph which gives the top 1 value of peak discharge in +4K experiment

3. 5 総降雨量値とピーク流量値の関係

4°C上昇実験における年最大流域平均日雨量および年最大流域平均3日降雨量上位10イベントの降雨流出解析から、八斗島地点におけるピーク流量と流域日平均雨量及び流域平均3日降雨量との関係が得られる。この関係図をFig-8, 9に示す。同図群より、流域平均日降雨量上位10イベントのピーク流量は、流域平均3日降雨量上位10イベントのピーク流量に対して大幅に上回っており、対象流域において、24時間で大規模な豪雨をもたらす降雨形態が流量を増加させ、洪水リスクの増大に寄与する可能性が示唆された。

さらに、流域平均日降雨量とピーク流量の大小関係について、両者のランクが対応しなかったことから、降雨継続時間に着目し、各降雨イベントの降雨継続時間とピーク流量の関連性について分析を行った。得られた関係図をFig-10に示す。Fig-10左図は、年最大流域平均日降雨量上位10イベントの、降雨強度別に見た降雨継続時間を示す。さらにFig-10右図は、Fig-10左図で示す流域平均日降雨量上位10イベントに対応するピーク流量である。なお、両図群の横軸の番号は、年最大流域平均日降雨量をランク化した数字である(例えば、「No.1」は最大の年最大流域平均日降雨量値をもたらしたイベントに対応している)。同図群より、ピーク流量が30000 m³/sを超過するイベント(年最大日降雨量上位No.1, No.2, No.7, No.10にあたるイベント)をもたらす降雨のうち、年最大日降雨量上位No.1, No.7, No.10は30mm/h以上の激しい

雨が数時間にわたって継続する降雨形態であった。

次に、ピーク流量第1位をもたらした、年最大流域平均日降雨量第1位の降雨イベントにおける降雨強度分布及び海面更正気圧分布を Fig-11, 12 に示す。これらの降雨強度分布には、地上風速ベクトルを付記している(参照ベクトルの風速は 20m/s としている)。地上風速ベクトルの成分は、東西風速 u (西風を正とする)と南北風速 v (南風を正とする)である。また、海面更正気圧分布には、地表面水蒸気フラックスベクトルを付記している。本研究では、地表面水蒸気フラックスは、地表面比湿 q と地表面風($u=(u,v)$)の積($q \times u$)により表している。これらの図中における参照水蒸気フラックスベクトルの大きさは、 $0.5(\text{kg/kg}) \cdot \text{m/s}$ としている。

Fig-11, 12 に示す気象場では、太平洋沖から、台風が関東地方に接近・上陸しており、また、日本列島に張り出した強い太平洋高気圧の縁辺部に沿って台風が供給する大量の水蒸気が関東地方に流入し続けることで関東地方で大規模豪雨が発生した。

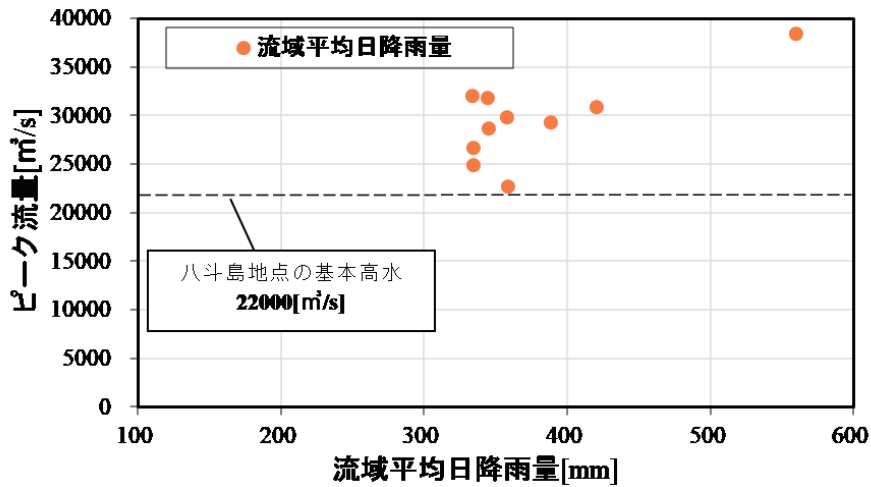


Fig-8 Relation between total amount of daily-rainfall rainfall events in descending order of their values from top 1 to top 10 and the calculated peak discharges which derived from runoff analysis which input rainfall are these rainfall events, in the +4K experiment of d4PDF.

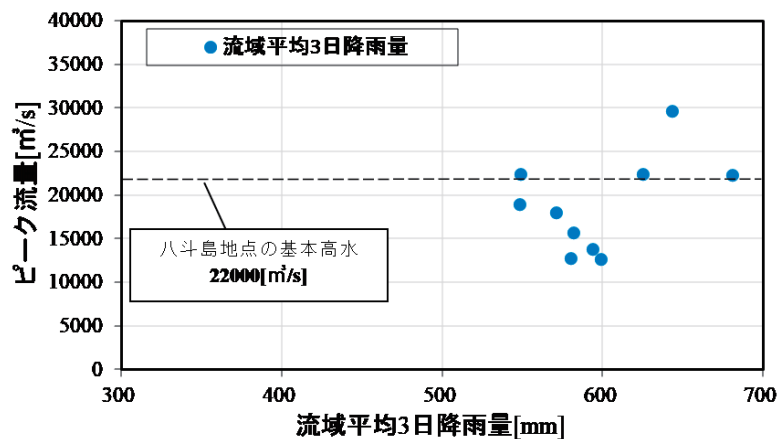


Fig-9 Relation between total amount of three day rainfall events in descending order of their values from top 1 to top 10 and the calculated peak discharges which derived from runoff analysis which input rainfall are these rainfall events, in the +4K experiment of d4PDF.

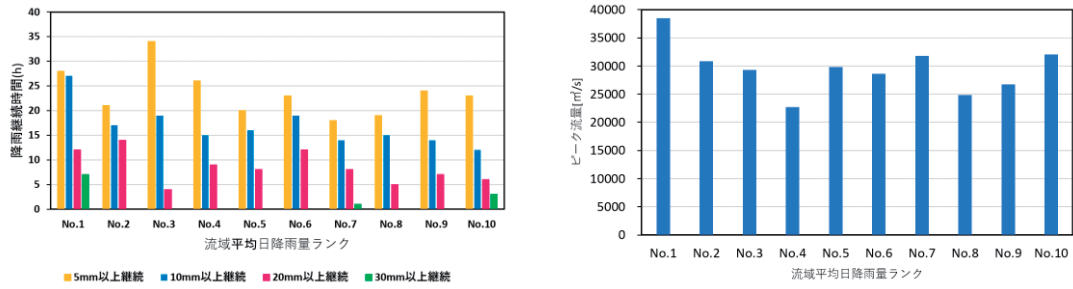


Fig-10 (Left) Duration of rainfall in the top 10 events of total amount of daily-rainfall in the basin by rainfall intensity, in the +4K experiment of d4PDF.

(Right) The calculated peak discharges which derived from runoff analysis which input rainfall are these rainfall events, in the +4K experiment of d4PDF.

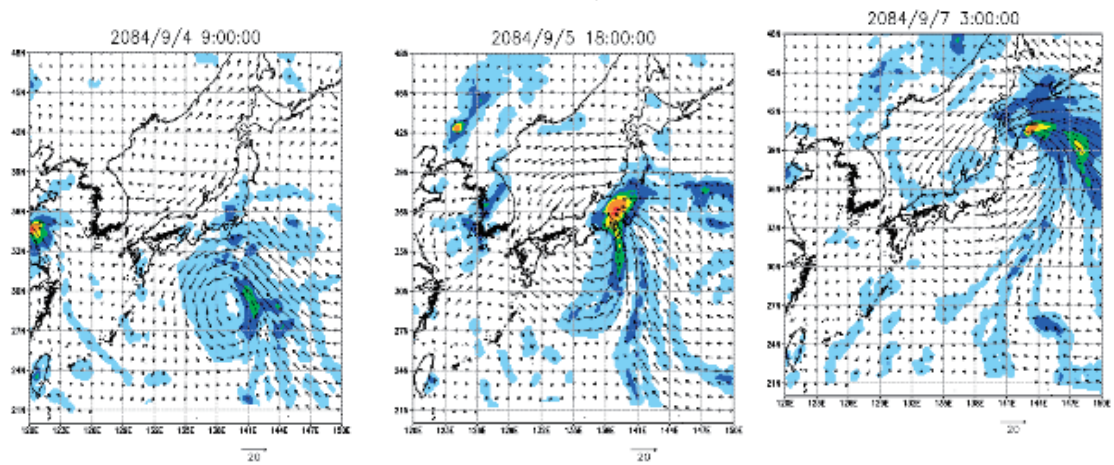


Fig-11 Spatial distribution of rainfall intensity and horizontal surface wind velocity of a torrential rainfall event which causes a maximum flood peak discharge in 4K experiment of d4PDF

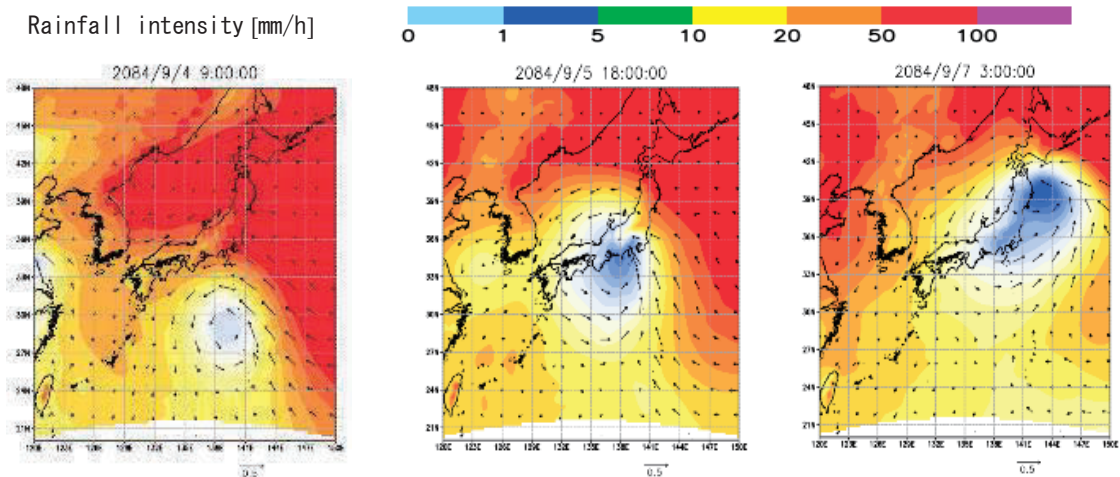


Fig-12 Spatial distribution of mean-sea-level barometric pressure and horizontal surface vapor flux of a torrential rainfall event which causes a maximum flood peak discharge in 4K experiment of d4PDF

mean-sea-level barometric pressure [hPa] 1000 1001 1002 1003 1004 1005 1006 1007 1008 1009 1010 1011 1012 1013 1014 1015

4 まとめ

本研究では、利根川上流域を対象に、温暖化進行時における降雨の将来変化が極値河川流量に及ぼす影響を推定するとともに、これらの極値河川流量をもたらす大規模豪雨の降雨継続時間や降雨パターンについて分析を行った。

具体的には、利根川上流域において、観測年最大3日降雨量とピアニの手法によるバイアス補正を実施したd4PDFの過去実験から抽出した、年最大3日降雨量の頻度分布を算定し、両ヒストグラムの形状を比較した。99%ile値より、観測された既往最大規模の降雨は、d4PDFの過去実験においても既往最大級であることが示され、分布の裾野での高い適合度が確認された。このため、d4PDF過去実験は観測実績の頻度分布を十分な精度で再現していると言える。このため、当該流域におけるd4PDFの適用性は高いと判定した。次に、気候モデルの系統誤差に関して、将来気候と過去気候で同様な傾向をとることを前提とし、同様の補正係数により、d4PDFの将来実験へのバイアス補正を実施した。その後、補正したd4PDFの将来実験における大規模降雨を入力降雨とした流出解析を実施し、将来気候下において、現在定められている基本高水を超える、流量の規模を算定した。具体的には、4°C上昇実験における最大のピーク流量値は29651 m³/sと算定され、この値は、現行の基本高水である22000 m³/sを大幅に超過するものである。さらに、このような大規模な洪水流量値をもたらす気候場は、太平洋高気圧が日本側に張り出した気圧場において、台風が太平洋沖から関東地方に接近・上陸し、太平洋沖に移動していく、というものであることを示した。

今後の課題としては、気候変動に伴う降雨の激甚化に伴い、現行の計画流量を超過する洪水の生起リスクを確率分布により定量化することがある。本研究では、予測降雨量群を入力降雨とした流出解析を実施しているがその回数は限られたものであるため、当該の確率分布の推定には不十分な計算ピーク流量のサンプル数である。今後は、一連の流出解析の事例数を増やし、計画流量を超過する流量の確率分布の算定を行い、当該流域における極値水文量の将来変化を推定していく。

参考文献

- [1] 国土交通省 国土技術政策総合研究所 気候変動適応研究本部：気候変動適応策に関する研究（中間報告）、国総研資料 749号，II-112-154，2013.
- [2] 文部科学省 気象庁 環境省：気候変動の観測・予測及び影響評価統合レポート「日本の気候変動とその影響」，2013.
- [3] 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.
- [4] 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)
- [5] 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.
- [6] 清水啓太，山田朋人，山田 正：確率限界法検定に基づく確率分布モデルの信頼区間を導入した新しい水文頻度解析手法，土木学会論文集 B1(水工学) Vol.74, No.4, I_331-I_336, 2018.
- [7] Shimizu, K.; Yamada, T.; Yamada, T.J. Uncertainty Evaluation in Hydrological Frequency Analysis Based on Confidence Interval and Prediction Interval Water 2020, 12, 2554.
- [8] 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.
- [9] 山田正：山地流出の非線形性に関する研究，土木学会水工学論文集，Vol.47, pp.259-264，2003.
- [10] 吉見和紘，山田正：鉛直浸透機構を考慮した流出計算手法の長短期流出解析への適用，土木学会論文集 B1(水工学) Vol.70 No.4, I_367-I_372, 2014.
- [11] 諸岡良優，山田正：鉛直浸透機構を考慮した降雨流出モデルのロバスト性についての基礎的検討，pp.83-84，第25回地球環境シンポジウム講演集，2017.
- [12] 中村晃基，佐藤憲弥，山田 正：分布型流出モデルにおけるサブ流域スケールに応じたパラメータの変動特性に関する基礎的研究，pp.121-124，第25回地球環境シンポジウム講演集，2017.
- [13] 国土交通省：河川整備基本方針，利根川水系，基本高水等に関する資料
https://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/seibi/tonegawa_index.html