

d4PDFを用いた日本全国の主要河川流域 におけるダム治水効果の将来変化分析

田中 智大¹・北口慶一郎²・立川 康人³

¹正会員 京都大学大学院助教 地球環境学堂 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)
E-mail: tanaka.tomohiro.7c@kyoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

²学生会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)
E-mail: kitaguchi.keiichirou.84x@st.kyoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学大学院教授 工学研究科 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)
E-mail: tachikawa@hywr.kuciv.kyoto-u.ac.jp

全国一級水系で構築した分布型降雨流出モデルと d4PDF から得られる年最大降水量を用いて 59 一級水系でダムがある場合とない場合の降雨流出計算を行い、ダムの治水効果の全国的な将来変化を分析した。基準地点の洪水ピーク流量の比率（ダムあり/ダムなし）は一定規模以上の洪水で増加する水系と増加しない水系があることがわかった。前者は降雨規模が大きく貯水容量が小さい九州や太平洋側、後者は瀬戸内海や日本海側に分布した。計画規模に相当する洪水強度は 4 度上昇シナリオのもとで全国的に増大し、両者の違いは現在の治水容量によって決まることがわかった。また、4 度上昇シナリオ下での異常洪水時防災操作に入る回数も治水容量によって決まることがわかった。

Key Words: d4PDF, flood control, dam, climate change

1. はじめに

近年、平成 30 年西日本豪雨や令和元年台風 19 号、令和 2 年 7 月豪雨などの度重なる豪雨により、立て続けに甚大な被害が発生しており、洪水の激甚化が顕著となっている。度重なる洪水災害や気候変動による将来の豪雨の強化・頻発化を踏まえ、国土交通省は既設ダムの洪水調節機能の強化に向けた基本方針に基づき、より柔軟なダム操作の実施可能性を検討して洪水被害のさらなる軽減に取り組んでいる¹⁾。

既設ダムの洪水調節効果に対する気候変動の影響は国内外の様々なダムで評価されてきた²⁾³⁾⁴⁾。一方、全国的な影響評価はダム諸量データの収集とモデル化に膨大な労力が必要なことから容易でなく、既往研究ではダムの治水・利水機能に及ぼす影響を評価した小島ら⁵⁾などに限られている。さらに、洪水調節効果への影響を評価するうえでは計画規模以上の洪水の発生頻度の変化を適切に評価する必要がある、近年の気候予測計算の大アンサンブル数を活用することが重要であるが、両者を実現するにも多大な労力を要する。

これに対して、小林ら⁶⁾は日本全国一級水系 109 流域の洪水時ダム操作を考慮した降雨流出モデルを構築し、大規模アンサンブル気候予測データベース d4PDF⁷⁾を活用して計画規模以上の極値流量の全国的な将来変化の傾向を分析した。ただし、気候変動によるダムによる治水効果への影響については北上川、淀川、吉野

川、大淀川の 4 水系に限られており、全国的な分析がなされていない。既設ダムが気候変動下で有効活用できる可能性を議論するうえでは、貯水能力や河川流量の将来変化と将来のダムの治水効果との関係を全国で網羅的に分析することが重要である。さらに、ダムが満水となり流入量と同量を放流する異常洪水時防災操作は急激な流量変動によってダム下流域に多大な影響を及ぼすことから、ダム管理の視点ではダムが満水となる頻度の将来予測も重要な基礎情報となる。本研究では、小林ら⁶⁾が構築したバイアス補正済み d4PDF 降雨データと降雨流出モデルを利用し、全国一級水系のダムによる洪水ピーク流量低減効果とダム貯留量の将来変化を推定し、またその地域傾向について分析する。

2. d4PDF 年最大降雨事例の降雨流出計算

本研究では、小林ら⁶⁾が構築した降雨流出モデル 1K-DHM⁸⁾から対象のダムを除いたモデル（以下、ダムなしモデル）を用いて降雨流出計算を行い、小林ら⁶⁾によるダムがあるモデル（以下、ダムありモデル）による計算結果と比較して d4PDF 過去実験および 4 度上昇実験におけるダム効果の変化を全国の主要流域を対象に分析する。ダムありモデルは、各水系でダムの集水面積が基準地点の集水面積の 5% を超えるダム計 106 基を対象に、ダムの洪水調節機能をモデル化している。ただし、利根川・淀川水系は、流域面積の大きさから

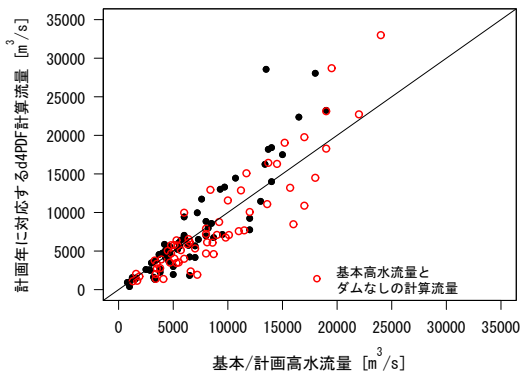


図-1 対象水系における基本高水流量と d4PDF 過去実験（ダムなし）の計画年に対応する計算流量の比較図（赤丸）。計画高水流量と d4PDF 過去実験（ダムあり）の計画年に対応する計算流量（小林ら⁶⁾ 図-10 のプロット）を併記する（黒点）。

主要なダムでもその集水面積が基準地点の流域面積の 5% 未満であるが、治水機能を持つ直轄ダムの数が多いことから降雨流出モデルに反映させている。本研究では、小林ら⁶⁾ でダムモデルが実装されている 58 一級水系を対象とした（水系・ダム名は図-3 参照）。

(1) d4PDF の概要と降雨データのバイアス補正

降雨データには「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 (d4PDF)」⁷⁾ の日本周辺域の領域実験のうち、過去実験および 4 度上昇実験による降水量データを用いる。小林ら⁶⁾ は、気象庁解析雨量との確率分布の乖離が大きい 67 水系を対象に、気象庁解析雨量および過去実験における計画継続時間内の年最大流域平均雨量のクオンタイル値の比を降雨強度に掛け合わせて、年最大流域平均雨量の降雨事例（以下、d4PDF 年最大降雨事例）のバイアス補正済みデータを作成した。本研究はこの年最大降雨データを 1K-DHM へ入力した。

(2) 降雨流出モデルとダムモデルの概要

降雨流出モデル 1K-DHM は、流域を空間分解能 30 秒（約 1 km）のセルに分割し、各セルの斜面流出および河道流下をキネマティックウェーブ式に基づいて計算する分布型降雨流出モデルである。斜面要素では不飽和・飽和中間流・地表面流型の、河道要素では Manning 則による流量流積関係式を連続式と連立し、空間ステップ 25 m、時間ステップ 600 秒で陰解法を用いて雨水流を計算する⁸⁾。

ダム操作には一定量放流方式や一定量一定率放流方式等が採用されている。ダム下流の河川区間の河川整備状況や中小洪水に対する治水効果を考慮して一定量一定率放流方式を採用しているダムがあるが、河川整

備後は大規模な洪水に対応するために一定量放流方式を採用することが基本となると考えられる。本論では、基準点に対するダム治水効果の将来変化を全国的に分析するためには同じダム操作方式で比較検討することが望ましいと考え、すべてのダムで一定量放流方式を仮定した。初期貯留量は洪水期制限水位に対応する利水容量とする。したがって、有効貯留量から利水容量を引いたものが治水容量となる。

ダムなしモデルの挙動を確認するため、基準地点における基本高水流量とダムなしモデルによる計画規模の確率年に対応する計算流量の比較を図-1 に赤丸で示す。参考のため、小林ら⁶⁾ による計画高水流量とダムありモデルの計算流量を黒丸で併記する。計算流量は、d4PDF 過去実験の年最大降雨事例から計算した 3,000 個の洪水ピーク流量に Weibull 公式を用いて、計画規模の再現期間に対応する流量として算定した。基本高水流量とダムなしモデル（赤点）が 45 度線上に分布している。基本高水流量と本研究の計算流量は同じ確率年に対応する流量値の算定過程が異なるものの、全体的には計画高水流量と比較した結果（黒丸）と同様によく対応している。本研究では本モデルが洪水時の自然流況を再現できるとして以降の分析を行った。

3. ダム治水効果の将来変化

気候変動によるダム治水効果への影響評価では様々な指標が考えうる。本研究では、1) 基準地点においてダムありモデルとダムなしモデルの年最大降水量に対応する洪水ピーク流量の比（以下、年最大洪水ピーク流量比）と 2) ダムが満水となる再現期間を用いる。小島ら⁵⁾ は、利水機能を含めた多目的ダムの評価に焦点を当てており、治水機能については流況曲線の第 1 位の日流量の平均値を用いている。本研究は、計画規模以下の洪水から最大クラスまで様々な規模の洪水に対する治水効果の特徴とその将来変化を分析するため、d4PDF 年最大降雨事例ごとの年最大洪水ピーク流量比を計算し、その特徴と将来変化を分析する。

(1) 洪水規模と年最大洪水ピーク流量比の関係

d4PDF 過去実験および 4 度上昇実験のすべての年の d4PDF 年最大降雨事例に対してダムありモデルとダムなしモデルでの基準地点における年最大洪水ピーク流量比をダムなしモデルの洪水ピーク流量で整理した。例として、北上川水系における結果を図-2-a に示す。図上部の横軸は図下部の横軸のピーク流量に対応する再現期間（下段が過去実験、上段が 4 度上昇実験）を表す。なお、4 度上昇実験では再現期間ごとに 6 種類の海面水温上昇シナリオ（各計 900 年分）のメンバ 6 個の平均値を示している。計画規模に対応する再現期間は

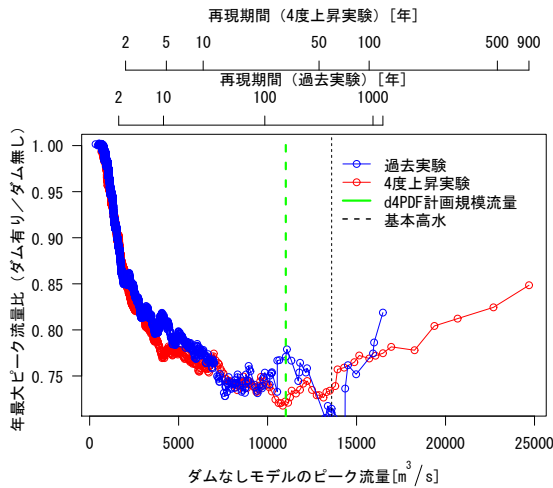


図-2-a 北上川

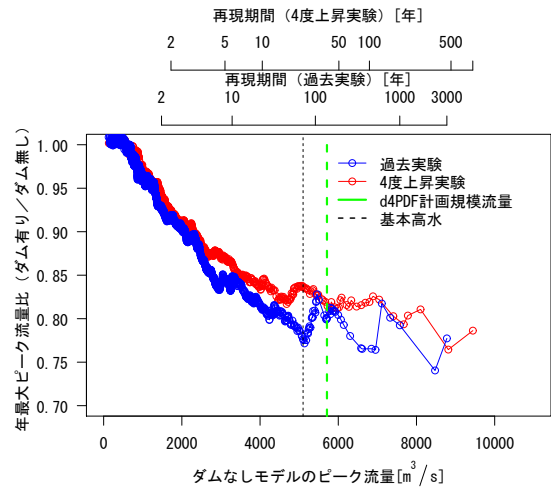


図-2-b 斐伊川

図-2 ダムなしモデルによる洪水ピーク流量の計算値と洪水ピーク流量の比（ダム有り/ダム無し）の関係。青線は過去実験，赤線は4度上昇実験の海面水温の将来予測アンサンブルの平均値を示す。

過去実験と4度上昇実験でそれぞれ150年と約40年であり、計画規模以上の洪水事例はそれぞれ3,000個中20個および900個中22個であった。

年最大洪水ピーク流量比は、各ダムの流入量の増加に伴って小さくなり、ダム治水効果が大きくなる。さらに洪水規模が大きくなり、ダム流入量がピーク時刻の前に満水になると年最大洪水ピーク流量比が1.0に近づき、基準地点の洪水ピーク流量低減への寄与が小さくなる。その結果、年最大洪水ピーク流量比のグラフは洪水ピーク流量比が減少から増加へ転じる極小値を持つ。過去実験（青線）と4度上昇実験（赤線）を比較すると、4度上昇実験の方がより短い再現期間で極小値を取り、同じ確率規模の洪水に対してダムによる基準地点の洪水ピーク流量低減への寄与が小さくなる。一方、斐伊川（図-2-b）のように4度上昇実験の最大規模の洪水に対してもダムが効果を発揮し続け、d4PDFの範囲では明瞭な極小値をもたない水系も存在する。

(2) 基準地点におけるダム治水効果とその将来変化の全国的な分析

ダムによる基準地点の洪水ピーク流量低減効果は、ある再現期間から寄与が小さくなる水系と最大規模の洪水でも持続する水系に分けることができる。そこで、4度上昇実験を対象に年最大洪水ピーク流量比の極小値の有無を目視により判断し、極小値を持つ水系をV字型水系、明瞭な極小値を持たない水系を効果持続型水系とした。全対象水系において極小値に対応するダムなしモデルの洪水ピーク流量の再現期間を日本地図上に表示したものを図-3に示す。V字型の水系には各実験での再現期間を示し、効果持続型水系は両実験とも

青色で示す。

効果持続型の水系は中国地方、四国地方の瀬戸内海側および日本海側に多く分布している。一方、V字型水系は九州南部や東北地方太平洋側を中心に広く分布しており、過去実験でも10～50年以下の再現期間で極小値を迎える水系も存在する。4度上昇実験ではその再現期間はさらに短期化し、ほぼすべての水系で50年以下の再現期間となり、4度上昇気候下ではV字型水系においてダムによる下流での治水効果の地域差がより明瞭になる。なお、全てのV字型水系が過去実験で極小値を持つことを確認しており、4度上昇実験で初めて極小値を持つV字型水系は存在しなかった。一方で、極小値の再現期間が100年以上（図-3の緑色）の中には、後志利別・沙流川・嘉瀬川・球磨川水系など過去実験において極小値の再現期間が1,000年程度となる水系も見られた。これらの水系は、現在の気候では極端洪水に対してもダムが治水効果を発揮するが、4度上昇下の気候で初めて極端洪水発生時に治水効果の低減を経験することになる。

(3) ダム治水効果の地域性の要因分析

4度上昇実験の極端洪水においてもダムが治水効果を発揮し続けるか（効果持続型水系であるか）は、ダムの貯水能力を決める貯留量や現在気候での洪水規模、4度上昇実験における洪水規模の増加に左右される。そこで、V字型水系と効果持続型水系を分ける要因として、ダムの貯水能力、現在気候での雨量規模および4度上昇実験における洪水規模の3点を確認した。

ダムの貯水能力の指標には、治水容量をダム流域面積で割った相当雨量を用いる。ただし、水系に複数基

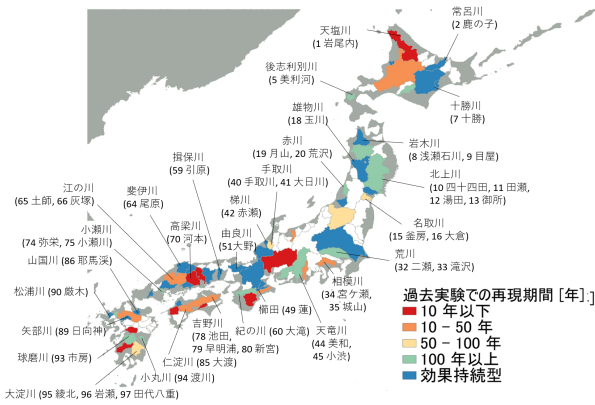


図-3-a 過去実験全国図

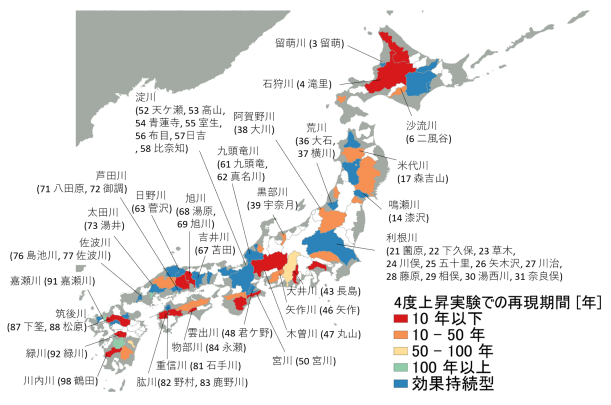


図-3-b 4度上昇実験全国図

図-3 V字型水系で極小値（洪水規模の増加に伴ってピーク流量比が減少から増加に転じる洪水ピーク流量）の再現期間と効果持続型水系の全国図。

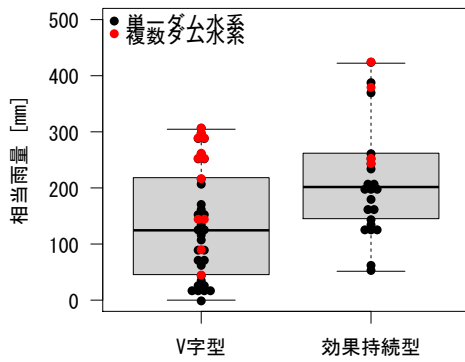


図-4 V字型水系および効果持続型水系での相当雨量の比較図。黒点および赤点は水系内にそれぞれ1基および複数基の対象ダムが含まれる水系を表す。

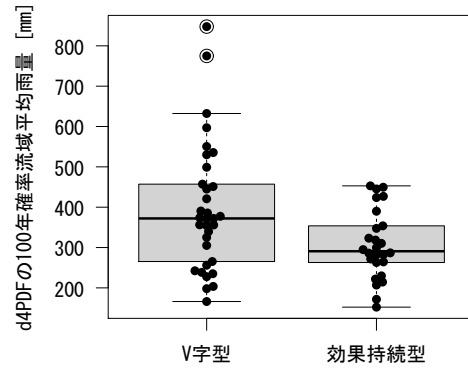


図-5 V字型水系および効果持続型水系でのd4PDF過去実験の100年確率流域平均雨量の比較図。

のダムが存在する場合は複数の計算方法が考えられる。水系に単一のダムが存在する場合と同様に考えると、水系中の N 基の各ダムの治水容量の総和 $\sum_i^N V_i$ を集水面積を A_i の総和 $\sum_i^N A_i$ で割って相当雨量 $r_{\text{cap}} = \sum_i^N V_i / \sum_i^N A_i$ とする方法が考えられるが、この指標はダムが複数存在することで下流のピーク流量がより低減する効果を表現できない。例えば、すべてのダムが同じ容量 $V_i = V_0$ 、同じ集水面積 $A_i = A_0$ を持つ場合、相当雨量は $r_{\text{cap}} = \sum_i^N V_i / \sum_i^N A_i = V_0 / A_0$ となってダムが1基の場合と同じ値になる。ダムが N 基存在する影響を考慮するため、相当雨量を N 倍し、 $r_{\text{cap}} = N \sum_i^N V_i / \sum_i^N A_i$ と定義する。この相当雨量は、すべてのダム群を治水容量 $V = \sum_i^N V_i$ 、集水面積が各ダムの平均値 $\bar{A} = \sum_i^N A_i / N$ となる1基の巨大なダムとみなした場合の単一ダムの相当雨量 $r_{\text{cap}} = V / \bar{A}$ と解釈できる。ただし、モデル上のダム操作は下流のピーク流量を最小化する操作ではないため、厳密には巨大な一つのダムと見なせるわけではなく、ダム群の治水能力はダムの位置関係に影響される。ここではダム（群）

の相対的な貯水能力を表す指標として上記の相当雨量を用いた。なお、単一のダムを持つ水系では $N = 1$ となりそのダムの相当雨量に一致する。

V字型水系と効果持続型水系で相当雨量を比較した図を図-4に示す。複数のダムを持つ水系（赤点）では容量が大きくなる分、相当雨量が大きくなる。両分類を比較すると、その平均的な相当雨量には明瞭な差があることがわかった。両者の分布は2標本K-S検定で有意水準1%で有意に異なった。

次に、現在気候での雨量規模としてd4PDF過去実験の100年確率流域平均雨量を図-5に示す。ダムの貯留規模とは対照的に、100年確率流域平均雨量はV字型水系の方が大きく、両者の分布は2標本K-S検定で有意水準1%で有意に異なった。なお、図-4を治水容量 $V = \sum_i^N V_i$ と平均集水面積 \bar{A} に分解すると、どちらもV字型水系の方が大きい傾向であった。V字型水系の方が極値雨量の雨量規模が大きいことと合わせて考えると、V字型水系は元々の降雨規模が大きい地域にあり、それに対応するため治水容量の大きいダムが建設されてきたといえる。一方、V字型水系ではダムの

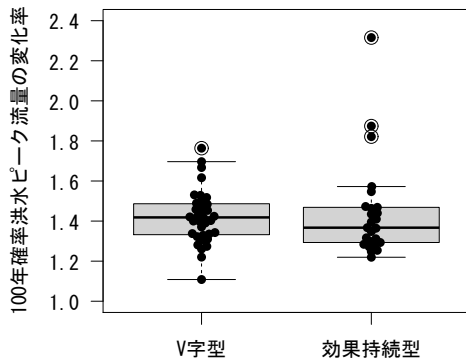


図-6 V字型水系および効果持続型水系での小林ら⁶⁾による100年確率洪水ピーク流量の変化率の比較図。

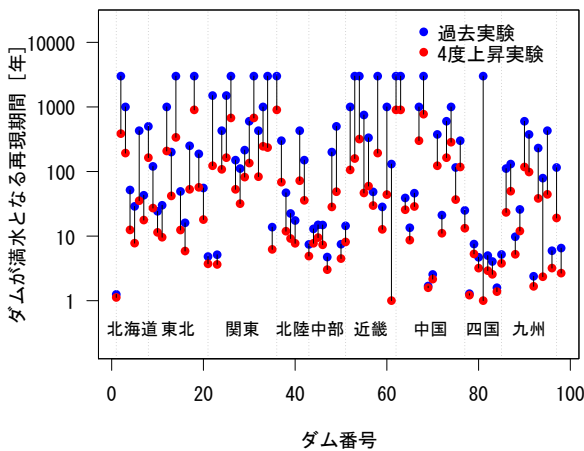


図-7 本研究の対象水系における各ダムが満水となる再現期間。青丸と赤丸はそれぞれ d4PDF 過去実験と 4 度上昇実験の結果を表し、変化を実線で示す。ダム番号に対応するダム名は図-3 参照。

集水面積も大きく、その結果相当雨量が相対的に小さくなり、大きな洪水規模に対するピーク流量低減効果が発揮されにくくなると考えられる。

最後に、各型の 100 年確率洪水ピーク流量の過去実験から 4 度上昇実験への変化率を図-6 に示す。各型の水系で大きな違いはなく、2 標本 K-S 検定でも有意に異ならなかった。このことから、洪水ピーク流量の増加率が高い地域と V 字型水系はおおむね対応するものの、4 度上昇気候下での洪水ピーク流量低減効果は洪水ピーク流量の増加率ではなく、上流のダム（群）の相当雨量（治水容量と集水面積のバランス）と現在気候の外力に大きく左右されることが示唆された。

4. ダムの満水頻度の将来変化分析

次に、過去実験および 4 度上昇実験においてダムが満水となる再現期間をダムごとに示した図を図-7 に示す。ダムが満水となる再現期間は、d4PDF 年最大降雨事例における最大貯留量が治水容量となる年数から Weibull

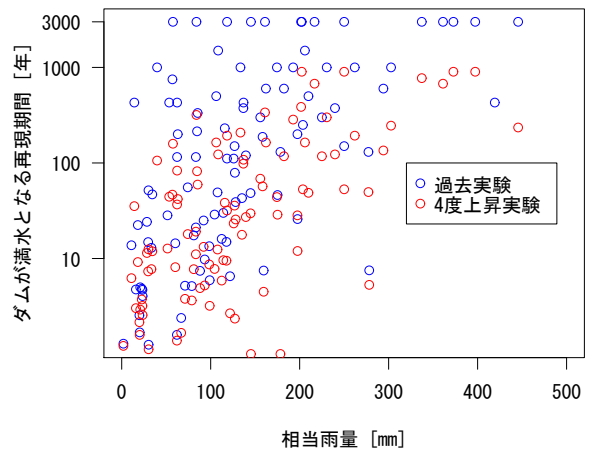


図-8 各ダムの相当雨量とダムが満水となる再現期間の関係。青丸と赤丸はそれぞれ d4PDF 過去実験と 4 度上昇実験の結果を表す。

公式により算定した。年最大洪水ピーク流量比と同様に、4 度上昇実験では 6 種類の海面水温上昇シナリオの平均値を用いた。まず、再現期間 10 年以下で満水となるダムが複数存在することがわかる。これらのダムでは、ダム統計情報⁹⁾においても多くの年で最大貯留率が 100% となっている。ただし、最大貯留率が 100% であっても、満水となるまでの洪水制御により下流のピーク流量低減効果は発生するため、必ずしもピーク流量低減効果が発揮されないわけではない。

北海道・東北・関東・北陸地方では、過去実験において再現期間が 10 年を下回るダムはほぼ存在せず、現状ではダムが満水となる頻度が他の地域に比べて低い様子を読み取れる。一方、4 度上昇実験ではすべての地域で過去実験よりも再現期間は短期化した結果、北海道・東北・関東・北陸地方でも複数のダムで再現期間が 10 年を下回り、困難な洪水調節操作の高頻度化が想定される。各ダムの相当雨量および満水となる再現期間の関係を図-8 に示す。過去実験（青点）に比べて 4 度上昇実験（赤点）では全体的にダムが満水となる再現期間が短期化する一方、4 度上昇実験においても再現期間は相当雨量と対応していることがわかる。相当雨量と再現期間を直線回帰したときの回帰係数に対して t 検定を行うと、係数がゼロである帰無仮説は両実験とも有意水準 1% で棄却された。ダムの異常洪水時防災操作となる頻度という観点でも、治水容量の確保が気候変動下でも重要であることが示された。

5. おわりに

気候変動による洪水災害の激甚化が懸念されており、その対策が急務となっている。洪水によるピーク流量や浸水被害に対する影響評価は全国的な評価がなされ

始めているが、ダム治水効果に関する評価は個別のダムを対象にすることが多い。本研究では、小林ら⁶⁾が構築した降雨流出モデル 1K-DHM を用いて 59 水系を対象に d4PDF 年最大降雨事例における自然流況計算を行い、ダム操作を考慮した小林ら⁶⁾の計算結果と比較することで水系全体としての主要ダムによる洪水ピーク流量低減効果の特徴とその将来変化を全国的に分析した。得られた結論を以下に示す。

- 1) ダムによる治水効果は水系によって 4 度上昇実験でも効果を発揮し続ける場合（効果持続型）とある再現期間からダムによる基準地点の洪水ピーク流量低減への寄与が小さくなる水系（V 字型）に分けることができる。
- 2) 4 度上昇気候における両者の治水効果の持続性の違いは、ダムの相当雨量と極値雨量の規模の関係によって決まり、相対的に 100 年確率降水量が相当雨量が小さい九州南部や東北地方太平洋側において V 字型水系が多く見られる。逆に、効果持続型の水系は中国地方、四国地方の瀬戸内海側および日本海側に多く分布する。
- 3) V 字型水系は、4 度上昇実験で 50 年確率以上の洪水に対してダムによる下流の洪水ピーク流量低減効果が小さくなり、下流の治水効果の地域差が効果持続型より明瞭になる。
- 4) 4 度上昇実験ではダムが満水となる再現期間がすべてのダムで短期化した。どちらの気候でも満水となる再現期間は相当雨量に対応しており、気候変動下でも治水容量の確保が異常洪水時防災操作の防止に対して重要である。

分析全体を通して、ダムによるピーク流量低減効果の持続性や満水となる頻度は、将来の洪水ピーク流量の増加率に支配されるのではなく、ダムの相当容量に大きく影響を受けることがわかった。事前放流を中心

としたダムの弾力的な運用によって治水容量を一時的に治水容量に活用することが、気候変動下のダムの治水効果に大きく寄与することが示唆された。

謝辞: 本研究は、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 D「統合的ハザード予測」JPMXD0717935498 の支援を受けて実施された。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局：事前放流ガイドライン、2020。
- 2) 吉見和紘 山田正：利根川上流域における降雨パターンに着目した洪水流出解析とダムの治水効果の評価。土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 69, No. 4, L1621-L1626, 2013。
- 3) Ehsani, N, Vörösmarty, CJ, Fekete, BM, Stakhiv, EZ. : Reservoir operations under climate change: storage capacity options to mitigate risk. *Journal of Hydrology*, Vol. 555, pp. 435-446, 2017.
- 4) 近者敦彦, 中村要介, 阿部紫織, 佐山敬洋, 若月泰孝：平成 27 年 9 月関東・東北豪雨における鬼怒川上流ダムによる洪水調節効果の分析。土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 74, No. 4, L1507-L1512, 2018。
- 5) 小島裕之, 永谷言, 倉橋実, 川村育男, 佐藤嘉展, 角哲也：気候変動がダムの治水・利水機能に及ぼす影響の評価指標化の提案。土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 74, No. 5, L1333-L1338, 2018。
- 6) 小林敬汰, 田中智大, 篠原瑞生, 立川康人：d4PDF を用いた日本全国一級水系における極値流量の将来変化分析。土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 76, No. 1, pp.140- 152, 2020。
- 7) 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 d4PDF : <http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/> (2021/6/25 確認)
- 8) Tachikawa, Y., Tanaka, T. : 1K-DHM/1K-FRM, <http://hywr.kuciv.kyoto-u.ac.jp/products/1K-DHM/1K-DHM.html> (2021/6/25 確認.)
- 9) ダム諸量データベース : <http://mudam.nilim.go.jp/home> (2021/6/25 確認)

(Received June 30, 2021)

(Accepted September 3, 2021)

FUTURE CHANGES OF FLOOD CONTROL EFFECT BY DAM RESERVOIRS OVER JAPAN USING d4PDF

Tomohiro TANAKA, Keiichiro KITAGUCHI and Yasuto TACHIKAWA

Future changes of flood control effect (FCE) by major existing dams were analyzed for 59 river systems all over Japan using d4PDF rainfall data and the rainfall-runoff model 1K-DHM. The rate of flood peak discharge with/without dams increased for floods over a particular magnitude (FCE was reduced) for some river systems near the Pacific Ocean and not (FCE was remained) for ones near the Seto Inland and Japan Seas. The former has smaller dam capacity despite receiving heavier rainfall, where larger future changes of extreme discharge are projected but its impact was not significant. Similarly, the frequency of emergency operation is also related to the flood storage, indicating that flexible dam operation such as preliminary release will make a significant contribution to flood control in a changing climate in Japan.