

大井川における利水ダムを含む縦列ダム群の 洪水防災操作に関する研究

岡本 悠希¹・小柴 孝太²・Mohamed SABER³・竹門 康弘⁴
Sameh KANTOUSH⁵・角 哲也⁶

¹ 学生員 京都大学大学院工学研究科 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 C1)
E-mail: okamoto.yuki.75a@st.kyoto-u.ac.jp

² 正会員 京都大学防災研究所 助教 (〒612-8235 京都府京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

³ 正会員 京都大学防災研究所 特任准教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁴ 正会員 京都大学防災研究所 准教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁵ 正会員 京都大学防災研究所 准教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁶ 正会員 京都大学防災研究所 教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

近年頻発している大規模洪水の対策として事前放流が挙げられるが、事前放流ガイドラインによる水位低下の実施可能期間は短い。さらに、河川に縦列に配置されたダム群や利水ダムの事前放流に関する検討は不十分である。本研究では、利水ダムを含む大規模な縦列ダム群で事前放流を行う場合を想定し、開始時刻や目標水位の変更が、各ダムの治水効果を示す最大放流量や、水力発電量に直結する利水ダムの無効放流量に与える影響を検討した。大規模な出水時には、縦列ダム群で事前放流することにより、各ダムの最大放流量と利水ダムの無効放流量を低減することができた。また、現在では3日前である事前放流の開始時刻を1週間程度に早め、さらに目標とする水位低下レベルを大きくすることで、治水・利水両面に対する事前放流効果が増大した。

Key Words: pre-release, tandem series of dams, hydropower, RRI model, long time ensemble forecast

1. はじめに

近年頻発している大規模洪水により、ダムが満水となって洪水調節機能を失う事例が増加している。事前放流は有効な対策であるが、原則として洪水の全体像を早期に見通すことが難しい気象庁のガイダンス予測に基づいて行われるため、事前放流ガイドラインで規定されている最も早い開始時刻は洪水の3日前と非常に限定的である¹⁾。気候変動の影響で今後はさらに、ダムの洪水調節能力を上回るような出水が想定されることから²⁾³⁾、現在の運用では大規模ダムや前期降雨がある場合は水位低下が間に合わないことが懸念される。一方、水力発電ダムにおいては、洪水前後に発電最大使用水量を超過して放流せざるを得ず、発電に使用できない「無効放流」の増大が問題となる。今後は利水ダムでも事前放流を行うことで、洪水貯留機能を高めることで無効放流量を減らすことが期待されており、近年研究が実施されている⁴⁾。

このような課題に対処するため、著者らはSIP(戦略的イノベーション創造プログラム)において、長期的な降雨予測として(一財)日本気象協会が提供するJWAアンサンブル予測(予測先行時間15日, 51メンバー)を利用し、1週間程度前からの事前放流を実現することで、洪水貯留機能の拡大と発電機能の増大を目指す取り組みを行っている⁵⁾。この研究を社会実装するために、早期の事前放流を含むダム操作のルール化が必要となっている。また、アンサンブル降雨予測は、複数の予測シナリオや不確実性を考慮することができるため、事前放流に応用する研究が多数行われている⁶⁾⁷⁾。

さらに、河川に縦列に配置されたダム群では、連携した事前放流により洪水調節機能の拡大が期待されるが、上流ダムの事前放流が下流ダムに影響して効果が不十分となる可能性がある。しかしながら、図-1のような利水ダムと多目的ダムを含む縦列ダム群における、両者による積極的な洪水調節操作に関する検討は十分ではない。

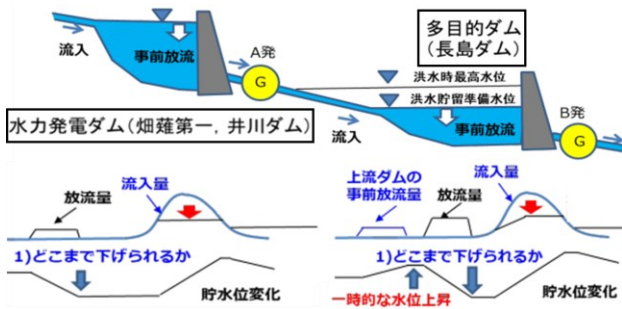


図-1 縦列ダム群の事前放流と洪水防災操作の課題⁸⁾

以上の背景を踏まえ、大規模な出水時において、利水ダムを含む大規模な縦列ダム群で連携した事前放流を行う場合を想定し、長時間の予測情報を使用することで、最大放流量を低減しつつ、利水ダムの無効放流量も低減するような操作方法について検討することを本研究の目的とした。なお、発電用の大規模ダムが上流に配置され、下流の多目的ダムと連携した事前放流を行うことが期待されている大井川水系を研究対象とした。

2. 研究対象地域

研究対象流域である大井川は、水源を間ノ岳(標高3189 m)とし、静岡県を南北に流れる長さ168 km、流域面積1280 km²の一級河川である。流域内には電力会社が管理する13の利水ダムと国土交通省が管理する唯一の多目的ダム(長島ダム)が存在する。本研究では、長島ダムに加え、特に容量の大きい利水ダムである畑薙第一ダムと井川ダムの合計3ダムについて解析を行った(図-2)。

長島ダムでは、当初計画では100年確率流量に対する洪水調節操作が採用されていたが、ダム下流の河川改修が不十分であるため、現在は40年確率流量に対する洪水調節操作(暫定操作)を行っている⁹⁾。畑薙第一ダムと井川ダムは容量の大きい利水ダムであるため、洪水の際には利水ダムの操作規程で与えられている遅らせ操作を



図-2 研究対象流域

行っている。本研究では利水ダムがより高い洪水調節効果を発揮するように、予備放流よりも大きく水位を低下させる事前放流を行うとともに、両利水ダムがダム放流率0.5の一定率放流操作をするという条件で解析を行った。

3. 研究手法

(1) 入力データの作成

降雨流出氾濫解析には佐山ら¹⁰⁾によるRRIモデルを使用した。RRIモデルは、山地・平野を問わずに降雨流出から氾濫解析までを流域全体で解析することが可能であり、ダムの洪水調節操作に関する多くの研究で使用されている¹¹⁾。標高データは空間解像度83.3 mのグローバル水路データセット¹²⁾を使用し、計算時間の短縮のために空間解像度250 mにアップスケールした。土地利用データは国土数値情報の土地利用細分メッシュデータ¹³⁾を使用し、4区分(農地、森林、市街地、河川)に再分類した土地利用ごとにパラメータを決定した。これらの条件下で、2018年台風24号出水と2019年台風19号出水とにおける畑薙第一ダムの流入量と実測値とを比較したところ、Nash係数はそれぞれ0.854、0.850となり、高い再現性が得られた。

解析には2018年台風24号出水を使用した。解析開始時刻である2018年9月21日10時(洪水の9日前)に発表されたJWAアンサンブル予測の予測値(全51メンバー)と、実績雨量は図-3の通りである。この出水での実績雨量の最大48時間雨量は、50年確率雨量である500 mmの6割程度であり、縦列ダム群のポテンシャルを考えると小さい。そこで、実績雨量を1.7倍して最大48時間雨量を500 mmまで引き延ばした(降雨波形A)。また、SIPが使用しているJWAアンサンブル予測に注目しているので、比較波形としてJWAアンサンブル予測のメンバーの中から同様に最大48時間雨量が500 mmとなるように引き延ばした2つの降雨波形を使用した。降雨波形Bには、ピークは小さいが降雨時間が長いメンバー、降雨波形Cには、前期降雨が大規模なメンバーを用いた。これら3つの降雨波形を図-4に示す。

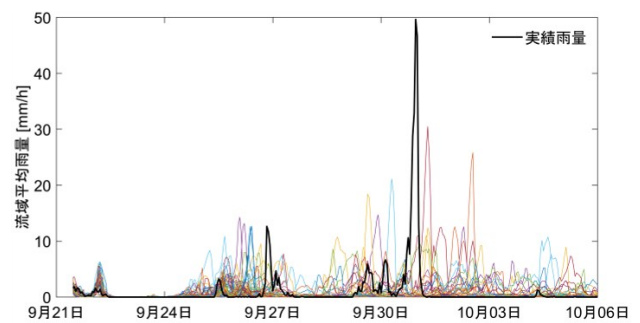


図-3 実績雨量と洪水9日前のJWAアンサンブル予測値

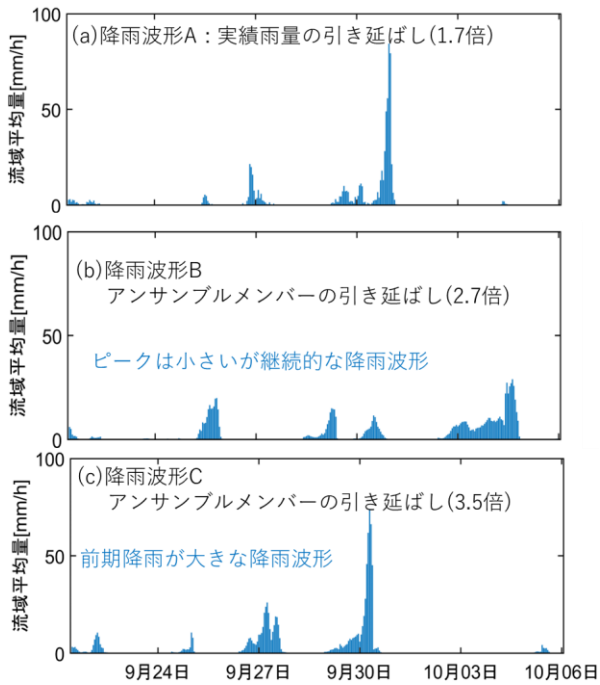


図-4 各降雨波形における流域平均1時間雨量
(a)降雨波形 A, (b)降雨波形 B, (c)降雨波形 C

(2) ダムモデルの拡充と洪水調節操作の方法

RRI モデルでは氾濫解析にダムを組み込むことができるが、事前放流のオプションは含まれていない。そこで本研究では RRI モデルのダムモデルを拡充し、事前放流を行うことのできるダムモデルを組み込んだ。具体的には、デフォルトでは1つであるダム操作のサブルーチンを、事前放流モード、洪水調節モード、後期放流モードの3つに分割することで、より複雑な操作を可能とした。事前放流モードでは、全てのダムに共通な事前放流の開始時刻と、各ダムに固有な事前放流時の放流量と目標水位を設定可能にした。また、洪水調節モードでは、ダムごとに洪水調節操作の方式を、後期放流モードでは、デフォルトでは固定されていた放流量をダムごとに設定することができる。

本研究では、事前放流無しも含めて5種類のダム操作を行った。事前放流の開始時刻は実際に長島ダムが洪水調節操作を開始した時刻を基準とし、現在の最も早い開始時刻である3日前と SIP が実現を目指す7日前の2種類で計算した。事前放流の目標水位は、各ダムに定められた事前放流で使用可能な容量を全て使用した最低水位と半分使用した50%水位の2種類で計算した。事前放流時の放流量は畑薙第一ダムで発電最大使用水量(100m³/s)とし、流域面積比から井川ダムで140m³/s(発電最大使用水量は80m³/s)、長島ダムで170m³/sとした。また、洪水時には、長島ダムに一定率一定量放流操作(暫定操作)を、畑薙第一ダムと井川ダムにダム放流率0.5の一定率放流操作を実施させた。ダムモデルと実施した操作方法の概要を図-5に示す。

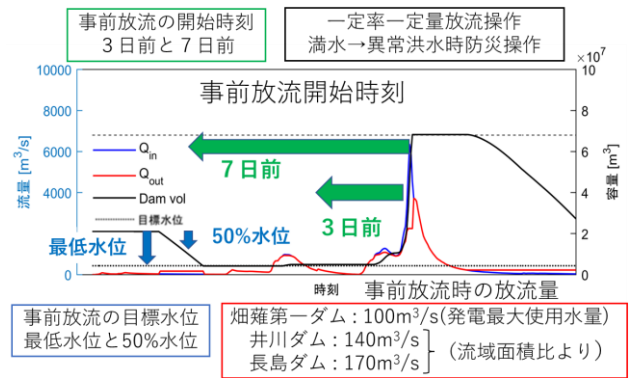


図-5 ダムモデルと操作方法

4. 結果と考察

(1) 5種類のダム操作における計算結果

各降雨波形において、事前放流を実施した4操作ごとに、操作0-0(事前放流なし)からの各ダムの最大放流量の低減量と、畑薙第一ダムと井川ダムの合計無効放流量の低減率を図-6に示す。ここで、操作x-yは、x日前からy%水位(100は最低水位に該当する)を目標に事前放流を行うダム操作を表す。いずれの操作においても、最大放流量や合計無効放流量が操作0-0から増加することはなかった。降雨波形Aでは、各ダムの最大放流量、利水ダムの合計無効放流量はともに操作7-100(7日前から最低水位を目標に事前放流)で最小となった。降雨波形Bでは各ダムの最大放流量の変化は確認されなかったが、

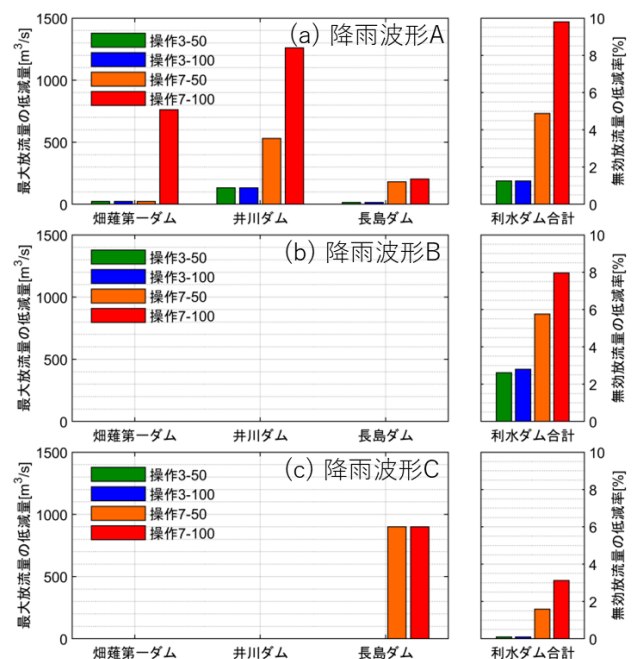


図-6 各降雨波形における計算結果比較

(a)降雨波形 A, (b)降雨波形 B, (c)降雨波形 C
(操作x-yは、x日前からy%水位を目標に事前放流を行う)

無効放流量は変化し、操作 7-100 で最小となった。また、降雨波形 C では 7 日前からの事前放流により長島ダムの最大放流量が低減され、他の降雨波形に比べると小さいものの、無効放流量も低減された。以下にケースごとの事前放流効果の相違を具体的に示す。

(2) 事前放流の開始時刻による相違

降雨波形 A において、操作 3-100 (3 日前から最低水位を目標に事前放流) と操作 7-100 における井川ダム、長島ダムの放流量と貯水容量の変化を図-7、図-8 に示す。ここで、図中の Q_{in} 、 Q_{out} 、 Dam_vol はそれぞれダムの流入量、放流量、貯水容量を表し、破線はダムの最大容量を、

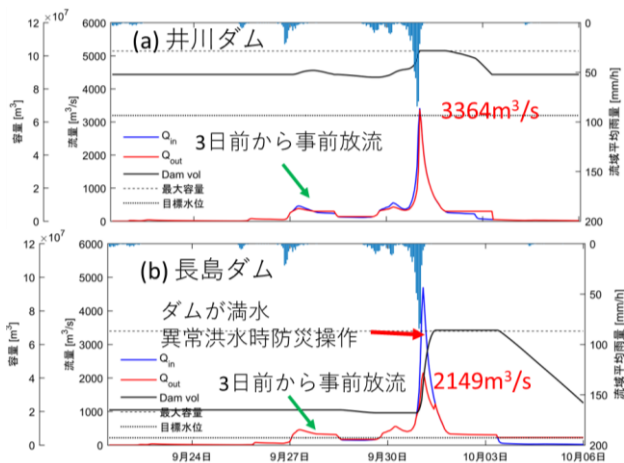


図-7 降雨波形 A 操作 3-100 における

(a) 井川ダムと (b) 長島ダムの放流量と貯水容量の変化

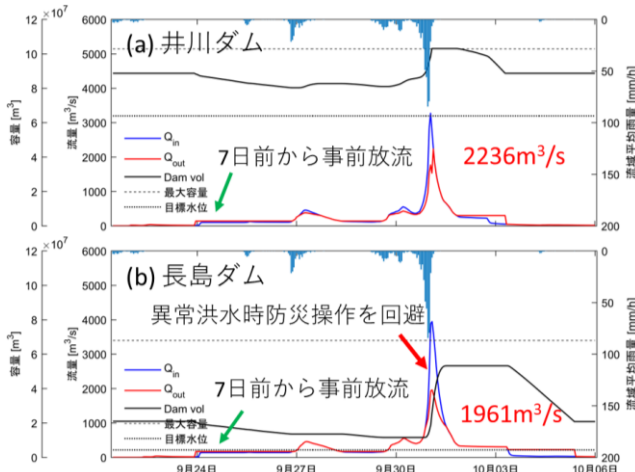


図-8 降雨波形 A 操作 7-100 における

(a) 井川ダムと (b) 長島ダムの放流量と貯水容量の変化

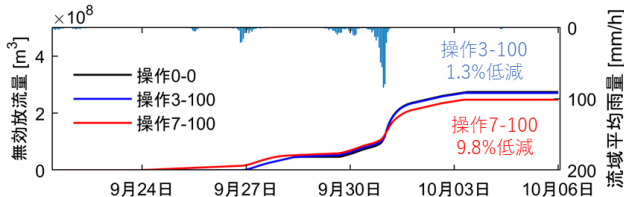


図-9 降雨波形 A 事前放流の開始時刻による利水ダムの合計無効放流量の変化

点線は目標水位における貯水容量を表す。前期降雨や上流の畑薙第一ダムの事前放流の影響のため、3 日前からの事前放流では十分な水位低下が困難であった。そのため、井川ダムの洪水貯留が小さく、下流の長島ダムは満水となって異常洪水時防災操作を実施した。一方、7 日前からの事前放流により、確保容量が増大した井川ダムでは満水になる時刻が遅れ、最大放流量が $1,000\text{m}^3/\text{s}$ 以上低減された。長島ダムにおいても最大放流量が $250\text{m}^3/\text{s}$ 以上低減され、異常洪水時防災操作を回避した。また、一連の洪水期間中の操作 0-0、操作 3-100、操作 7-100 における畑薙第一ダムと井川ダムの合計無効放流量の変化を図-9 に示す。操作 3-100 では事前放流で確保した容量が少なく、無効放流量の低減率は低い。一方、操作 7-100 では、発電最大使用水量が小さい井川ダムで事前放流に伴う無効放流が発生するが、長時間の事前放流によって空き容量を効果的に確保したことで、操作 0-0 よりも合計無効放流量が約 10% 低減され、増電に貢献した。

降雨波形 B において、操作 0-0 と操作 7-100 における畑薙第一ダムの放流量と貯水容量の変化を図-10 に示す。降雨波形 B は、ピークが中程度で連続的な波形であり、いずれの操作においても上流 2 ダムが満水となる時刻はほぼ同じであり、最大放流量は変化しなかった。合計無効放流量については、操作 3-100 でも約 3% 低減することができたが、操作 7-100 における低減率は約 8% であり、7 日前開始の事前放流がより大きな効果を発揮した。これは事前放流を早くから行うことで、特に畑薙第一ダムにおいて、前期降雨後に無効放流を伴わずに発電最大使用水量で水位を下げることであったためと考えられる。井川ダムの発電最大使用水量は $80\text{m}^3/\text{s}$ であるため、畑薙第一ダムの事前放流に伴って無効放流が発生するが、流域全体としての無効放流量は減少する結果となった。このように、ピークが中程度の降雨においても、積極的な水位低下が水力発電増大に寄与した。

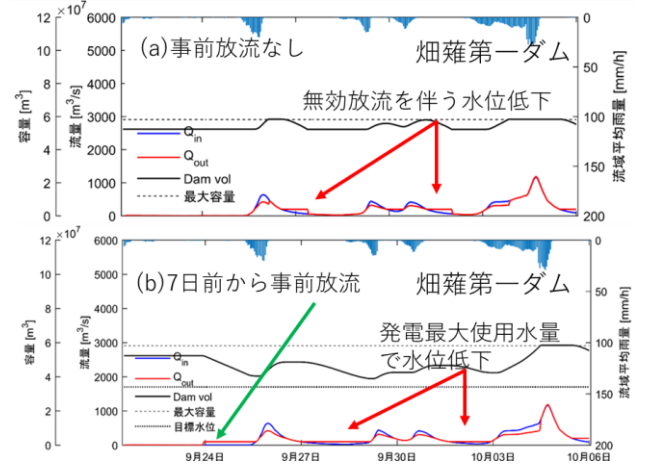


図-10 降雨波形 B における畑薙第一ダムの効果比較 (a) 操作 0-0, (b) 操作 7-100

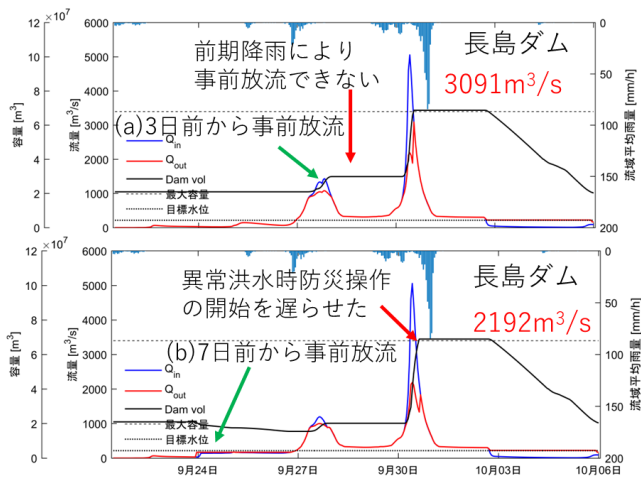


図-11 降雨波形Cにおける長島ダムの効果比較
(a)操作 3-100, (b)操作 7-100

降雨波形Cにおいて、操作 3-100 と操作 7-100 における長島ダムの放流量と貯水容量の変化を図-11 に示す。大規模な前期降雨の影響で、操作 3-100 では事前放流を行う前に畑薙第一ダムと井川ダムが満水となり、最大放流量は変化せず、無効放流量の低減率も小さかった。一方、操作 7-100 では長島ダムの最大放流量が $900\text{m}^3/\text{s}$ 程度減少し、異常洪水時防災操作の開始時刻も遅くなった。さらに、合計無効放流量も 3.1% 低減された。このことから、ピーク前にも降雨が想定される場合には、直前の事前放流では間に合わないことが示された。

今回使用したような大規模な降雨が想定される場合、7 日前から事前放流を開始することで、治水・利水両面への事前放流効果が現在の運用よりも増大する可能性があることが示された。ピークの強い降雨に対しては、特に長島ダムにおけるピーク放流量を減らし、異常洪水時防災操作を避ける、または開始時刻を遅らせることができた。これは上流の 2 ダムが洪水をより多く貯留した影響が長島ダムに伝わったからであり、利水ダムを含めた縦列ダム群による事前放流が有効であることを示している。さらに、ピークが中程度で長時間の降雨に対しても、出水前後の無効放流を低減することができたことから、長時間の降雨予測を日頃からダム運用に用いることで発電ロスが減少すると考えられる。

(3) 事前放流の目標水位による相違

降雨波形 A において、事前放流の目標水位低下レベルを変化させた操作 3-50 (3 日前から 50% 水位を目標に事前放流) と操作 3-100 では、前期降雨の影響もあり両者に大きな違いはないが、7 日前からの場合には目標水位低下レベルによる相違が確認できた。操作 7-50 (7 日前から 50% 水位を目標に事前放流) と操作 7-100 における畑薙第一ダムの放流量と貯水容量の変化を図-12 に示す。操作 7-50 では 50% 水位を超えた事前放流を実施することが

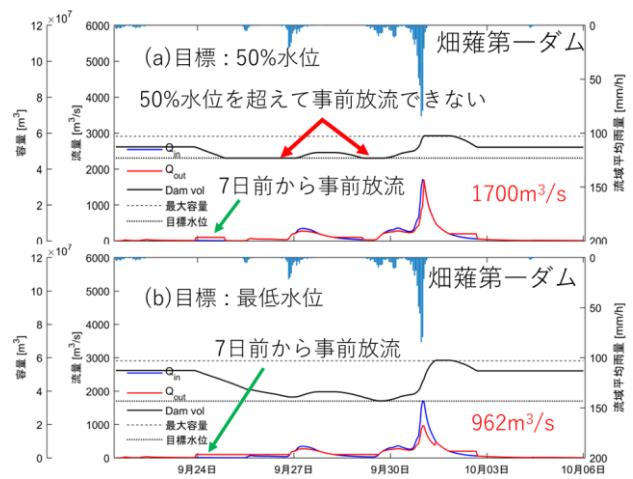


図-12 降雨波形 A における畑薙第一ダムの効果比較
(a)操作 7-50, (b)操作 7-100

できず、結果的に最大放流量が増大した。一方、操作 7-100 ではより大きな空き容量を得ることで最大放流量が $700\text{m}^3/\text{s}$ 以上低減されるとともに、操作 7-50 よりも合計無効放流量が約 5% 低減された。

降雨波形 B では、最大放流量の相違は (2) 同様に確認されなかったが、降雨波形 A と同様に操作 7-50 において、操作 7-100 よりも早く満水となることで無効放流量が拡大した。降雨波形 C でも同様の傾向が確認されたが、最大流入量が大きく短時間でピークに達するため、降雨波形 A, B に比べて無効放流量の低減率は小さかった。

以上の結果から、大規模な降雨が想定される場合、最低水位を目標に事前放流を行うことで最大放流量、無効放流量ともに低減できる可能性があることが分かった。ピークが中程度の出水に対しても、継続的な事前放流が無効放流量を低減した。また、降雨波形 A で 50% 水位を超えた事前放流を実施できない場合に、最大放流量が大きく変わってしまったことから、実際には事前放流の目標水位を予測情報が更新される度に見直すことで、無効放流量と洪水時のピーク放流量を減らすことが期待される。そのためには長時間のリードタイムを確保する必要があり、それを可能にする 1 週間以上の長時間にわたって確実に降雨を予測する方法の開発が課題となる。

5. まとめ

本研究では、大井川を RRI モデルで再現することにより、利水ダムを含む縦列ダム群で事前放流を行うことによる効果を検討した。その際、各ダムの最大放流量と利水ダムの無効放流量を比較することで、治水・利水両面への影響を評価した。以下に本研究の結論を示す。

(1) RRI モデルのダムモデルに、事前放流～洪水調節～後期放流を行うダムを縦列に組み込み、事前放流の検討を

可能にした。

(2) 利水ダムを含む縦列ダム群で事前放流を行うことで、各ダムの治水効果を示す最大放流量や水力発電量に直結する利水ダムの無効放流量が減少した。

(3) 今回扱ったような大規模な降雨の場合、事前放流を1週間程度前から開始し、水位低下目標をより大きくすることで治水・利水両面に対する事前放流効果が増大することが示された。

本研究を実際のダム操作に応用するためには、様々な降雨波形でシミュレーションを行い、アンサンブル降雨予測を用いて見逃し・空振りリスクを適切に評価しながら確率的に事前放流を実施するためのルール化を検討することが最も重要である。また、ダムの洪水吐の放流能力についての評価も含めて、事前放流時の放流量の決定方法など、ダムの規模や下流の状況に合わせた事前放流の手法に関する研究も今後の課題である。

謝辞: 本研究を進めるにあたり、国土交通省中部地方整備局、(株)中部電力よりダムモデルを作成するためのデータを、(一財)日本気象協会よりJWAアンサンブル予測のデータをいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省：事前放流ガイドライン，2020。
<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001341537.pdf>
- 2) 小島裕之，永谷言，倉橋実，川村育男，佐藤嘉展，角哲也：気候変動がダムの利水・治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），74(5), I_1333-I_1338, 2018.
- 3) 宮本昇平，丸谷靖幸，渡部哲史，谷口弘明，矢野真一郎：治水ダムの異常洪水時防災操作の発生確率に与える気候変動影響評価 一 下笠・松原ダムを例にして，土木学会論文集 B1（水工学），77(2), I_37-I_42, 2021.
- 4) 小池俊雄，中村茂，Cho Thanda Nyunt，牛山朋来，

Rasmy Mohamed，玉川勝徳，伊藤博之，池内幸司，生駒栄司，喜連川優：発電ダムの洪水調節と発電操作支援システム，土木学会論文集 B1（水工学），77(2), I_79-I_84, 2021.

- 5) 角哲也，加納茂紀，道広有理：長期間アンサンブル降雨予測を用いたダム操作のパラダイムシフト，河川77(1), 78-85, 2021.
- 6) 猪股広典，川崎将生，工藤俊：アンサンブル予測雨量を用いた洪水時ダム操作における操作決定方法に関する研究，水文・水資源学会誌，34(1)pp.24-53, 2021.
- 7) 野原大督：中期アンサンブル降水予報と誤差特性を踏まえた多目的ダムの事前放流手法に関する研究，土木学会論文集 B1（水工学），77(2), I_91-I_96, 2021.
- 8) 角哲也：長時間アンサンブル降雨予測で見える世界一ダム操作をどう変えるか？，JAPIC 水循環委員会シンポジウム，2022.4.11
http://www.japic.org/information/as-sets_c/2022/05/20220513_04.pdf
- 9) 国土交通省中部地方整備局：長島ダム定期報告書【概要版】，2022。
https://www.cbr.mlit.go.jp/kawatomizu/dam_followup/pdf/r03_iinkai/r03_iinkai_2_1.pdf
- 10) 佐山敬洋，Nay Myo LIN，深見和彦，田中茂信，竹内邦良：降雨流出氾濫モデルによるサイクロナルギス高潮氾濫シミュレーション，土木学会論文集 B1（水工学），67(4), I_529-I_534, 2011.
- 11) 岩本麻紀，竹門康弘，野原大督，小柴孝太，角哲也：d4PDF 4 度上昇実験を用いた氾濫解析に基づくダムの洪水調節操作方式の検討，土木学会論文集 B1（水工学），77(2), I_97-I_102, 2021.
- 12) MERIT HYDRO：global hydrography datasets, 2019,
http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yama-dai/MERIT_Hydro/index.html, (2021/10/29 参照)
- 13) 国土交通省：国土数値情報ダウンロードサービス，
<https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html>, (2021/11/2 参照)

(Received May 31, 2022)

(Accepted September 1, 2022)

STUDY ON FLOOD MITIGATION OPERATION OF TANDEM SERIES OF DAMS INCLUDING HYDROPOWER DAMS IN OHI RIVER

Yuki OKAMOTO, Takahiro KOSHIBA, Mohamed SABER, Yasuhiro TAKEMON, Sameh KANTOUSH, Tetsuya SUMI

Pre-release is the effective measure against large-scale floods that have frequently occurred in recent years, whereas its implementation period based on 'Pre-release guidelineis' is limited. In addition, there are few considerations of pre-release in tandem series of dams including hydropower ones. This study investigated the effect on the maximum discharge of each dam which shows the flood control effects and the waste discharge of hydropower dams, which is directly linked to the amount of hydropower generation, by changing the start time and target water level of pre-release in tandem series of dams. At the time of large-scale flooding, the maximum discharge of each dam and the waste discharge were reduced by the pre-release. Furthermore, by advancing the start time of the pre-release from 3 days to a week and increasing the target water level drawdown, the pre-release effects on both flood control and water utilization has increased.