

中期アンサンブル降水予測を考慮した多目的ダムの事前放流実施に伴う 利水・発電への影響の評価

Impact of Prior Release Operation by Multi-purpose Reservoir Considering Medium-term Ensemble Prediction of Precipitation on Water Supply and Power Production

野原 大 督

要 約

ダム貯水池による事前放流や洪水調節、非洪水時における利水補給や発電操作の長期シミュレーションを実施し、気象庁週間アンサンブル予報の降水量プロダクトに基づいて事前放流の実施判断を行う場合における利水・発電への影響に関する定量的な分析を実施した。近畿地方に位置する多目的ダム貯水池を仮想化したモデルダム貯水池を対象に分析を行った結果、事前放流の実施により大規模出水時における洪水調節効果が向上した一方で、長期的な利水補給に影響が及ぶケースは見られなかった。水力発電に関しては、計算期間を通じての年間発電量の平均値には大きな変化は見られなかったが、事前放流後の貯水位回復に時間を要する場合には、水力発電取水量が低下することから、貯水位回復期間中の水力発電量が低減し、水力発電を行いながら事前放流を実施することによる増電効果が相殺される可能性が示唆された。

目 次

- I. はじめに
- II. 対象ダム貯水池
- III. 分析方法
- IV. 結果と考察
- V. おわりに

I. はじめに

気候変動に伴う水循環の変化により、今後は極端な洪水や渇水がより頻繁に発生することが懸念されている。こうした水災害の激甚化や頻発化の傾向は、ダム貯水池システムを始めとする流域の水資源システムにとって非常に脅威である。我が国では好適地の確保や社会動向などの観点から新規ダム建設が困難となる中で、こうした気候変動による水災害の激化に適応していくためには、既存ダム貯水池の運用を高度化し、水資源システムが持つ治水・利水機能を強化する必要がある。一方で、気候変動の緩和の観点からは、再生可能エネルギーである水力の利活用は重要であり、水力発電の増強も見据えたダム貯水池の運用高度化が求められている。

既存ダム貯水池の運用を適応的かつ統合的に高度化する方法の一つとして、近年ダムの事前放流が世界的に研究されている。この放流操作は、実時間の降雨予測情報等を参照し

ながら、出水が見込まれる場合には、ダムの貯留水を安全に放流することで貯水池により大きな空き容量を確保し、もって洪水調節機能を増強しようとする操作である。平常時には利水・発電等の目的のために高い貯水位を維持しながら、出水時にはより大きな治水機能を機動的に確保することが可能であることから、既存ダム貯水池の多目的での機能を高めることができる操作方法として期待が寄せられている。一方で、事前放流により貯水量を低下させたものの、出水の規模が予測されたほど小さくなく、出水後に貯水量が十分に回復しない場合には、その後の利水補給や水力発電に支障が生じることも懸念される。

こうした観点から、ダム貯水池による事前放流の効果やリスクに関する研究が近年進められている。例えば、野原・小尻¹⁾は、気象庁の領域気象モデルによる51時間先までの決定論的降雨予測情報を考慮したダム事前放流操作を行うことによる洪水・渇水管理上の効果の分析を実施している。Amari and Nohara²⁾は、33時間先までの決定論的なダム流入量予測値を考慮した事前放流の操作精度に対する予測の不確実性の効果を予測誤差の確率特性に基づくモンテカルロシミュレーションを通じて分析している。このほかにも、実時間決定論的気象・水文予測情報を考慮したダム事前放流操作の潜在的な有効性に関する研究事例が報告されている^{3),4),5)}。

キーワード：ダム操作、事前放流、アンサンブル予測、利水、水力発電、影響評価

Keywords : reservoir operation, prior release, ensemble prediction, water supply, power generation, impact assessment

一方で、降雨や降水の予測に内在する不確実性によって事前放流の効果は大きく影響を受ける可能性があることから、こうした予測の不確実性の影響を軽減するために、複数の予測シナリオが得られるアンサンブル気象・水文予測のダム事前放流意思決定への適用についても、研究が進められている。例えば、Wang et al.⁶⁾は気象庁の週間アンサンブル予報の降水量プロダクトから推定された 8 日先までの日流入量に関するアンサンブル予測値を考慮したダム貯水池の治水・利水操作の最適化手法について検討を行っている。Masuda and Oishi⁷⁾は、淀川水系木津川上流域におけるダム貯水池群を対象に、気象庁週間アンサンブル予報から算出される降雨予測分布を考慮した事前放流と洪水調節操作の最適化を実施し、その効果を分析している。Nohara et al.⁸⁾は同じく気象庁週間アンサンブル予報の降水量予報値を考慮した多目的ダム貯水池による多段階の事前放流操作の意思決定を支援する手法を開発している。そのほかにも、現業のアンサンブル予報を貯水池システムの事前放流操作決定に導入することによる効果についての研究が進められている^{9),10),11),12)}。

このように、アンサンブル気象・水文予測情報を考慮することはダム事前放流操作の意思決定において予測の不確実性の影響を軽減する上で一般的には有効であると期待されている。しかし、アンサンブル予測では複数の予測シナリオ（アンサンブルメンバや予測メンバなどと呼ばれる）が得られるものの、これらの予測メンバから導出される降雨の予測生起確率分布が将来の生起確率分布を正確に表現しているわけではなく、予測生起確率分布にもバイアスや誤差が含まれている。そのため、ダム事前放流にアンサンブル気象・水文予測を利用するにあたっては、これらのバイアスや誤差が事前放流の意思決定やダム貯水池操作の精度にどのような影響を与えるかを把握しておく必要がある。こうした観点から、著者はこれまでに中期アンサンブル降水予測とその誤差特性を考慮したダム事前放流決定の最適化手法を構築している¹³⁾。本研究では、この事前放流決定手法に基づいて多目的ダム貯水池の事前放流操作を実施した場合に、ダム貯水池が担う利水補給や水力発電に長期的にどのような影響が生じ得るかを、ダム長期操作シミュレーションにより評価した。

II. 対象ダム貯水池

近畿地方に位置する多目的ダム貯水池である A ダムを対象とした。本ダムが位置する河川流域は大きな出水に度々見舞われており、2018 年 7 月には同ダムの洪水調節能力を上回る規模の出水が発生し、異常洪水時防災操作が実施された。一方で、同ダムは下流域への利水補給を担っているほか、同ダムからの取水により水力発電も実施されている。

本研究では、分析結果の解釈を容易にするために、A ダムの諸元にダム集水域の水文特性との関係が損なわれない範

Table 1 モデルダム貯水池の諸元
(Specifications of Hypothetical Target Reservoir)

有効貯水容量	60,000 千 m ³
洪水調節容量	44,000 千 m ³
利水容量	16,000 千 m ³
集水面積	290 km ²
洪水調節方式	一定量放流方式
計画最大流入量	1,510 m ³ /s
計画最大放流量	150 m ³ /s
確保放流量	5.2 m ³ /s
最大発電使用水量	11.6 m ³ /s
最大出力	6,700 kW
有効落差	68.49 m
最大事前放流量	16,000 千 m ³

囲で若干の変更を施した（変更後の諸元を持つダムを以下ではモデルダムと呼ぶ）。モデルダム貯水池の諸元を Table 1 に示す。洪水調節容量は、A ダムの 42,000 千 m³ からモデルダムでは 44,000 千 m³ に変更している。また、利水補給ルールについては、下流基準地点での確保流量に代えて、ダム直下での確保放流量を定め、先行研究¹³⁾とは異なり A ダムの利水補給基準より大きな 5.2 m³/s をモデルダム貯水池の確保放流量に設定することで、より利水面での影響評価が安全側で行われるよう配慮した。A ダムでは事前放流によって放流することができる貯水量の最大値は公式には定められていないが、本研究では事前放流の効果と影響の評価をより容易にする目的で、ダムの構造上も可能であると考えられることから、利水容量に相当する 16,000 千 m³ を放流可能と仮定した。ダム集水域の水文データやダム流入量データについては、A ダムのものをそのまま用いた。

III. 分析方法

1. 利用した中期アンサンブル降水予測情報の概要

降水予測情報には、現業中期気象予報の中でもデータ蓄積期間が長い、気象庁の週間アンサンブル予報（従来版、日本域、以下 JMA-WEPS と表記する）の降水量プロダクトを用いた。予報値の空間解像度は緯度経度 1.25 度、時間解像度は 6 時間、予報期間は 264 時間、予報更新頻度は 1 日 2 回、アンサンブルメンバ数は 27 である。このうち、予報期間については、本研究では最初の 192 時間（8 日間）の降水量予報値を用いた。この仕様の JMA-WEPS は 2014 年 2 月 26 日～2020 年 3 月 24 日の期間で配信されており、本研究ではこのうち出水期と重なる 2014 年～2019 年の予報データを用いた。降水量予報値からダム流入量のアンサンブル予測値の算出には、分布型降雨流出モデル Hydro-BEAM¹⁴⁾ (Hydrological River Basin Environment Assessment Model)を用いた。

Table 2 長期ダム操作計算結果の概要 (治水・利水)
(Comparison in Reservoir Operation for Flood Control and Water Supply)

	事前放流無し	事前放流有り
大規模出水事例 (2018 年 7 月) における最大放流量 [m ³ /s]	968.5	871.7
平均利水貯水量 [千 m ³] (利水貯水率)	15,410 (96.3%)	13,686 (85.5%)
事前放流の実施頻度 [-]	0.000	0.249

2. 事前放流操作決定手法

中期アンサンブル降水予測情報を考慮した多目的ダム貯水池の事前放流操作決定手法については、先行研究¹³⁾の方法を用いた。この手法では、事前放流の意思決定は、事前放流を実施するかどうかと、事前放流を実施する場合の放流量の二つの項目に分けて行われる。まず、事前放流の実施については、アンサンブル予測のうち、予測される累積降水量やダム流入量が上位の (大きな) 予測メンバを参照しながら、ダムの洪水調節容量が不足するような出水が見込まれるかどうかに応じて判断する。予測変量としてダム流入量を考える場合、アンサンブル予測の上位第 i 位の予測メンバを参照するときには、次式を満足する場合に事前放流が実施される。

$$i\text{-th greatest} \left\{ \sum_{m=1, \dots, M}^L (q_{m,l} - r_{m,l}) \cdot \delta_s \right\} > Q_F \quad (1)$$

ここに、 $q_{m,l}$, $r_{m,l}$ は予測メンバ m によって予測される l 時間先のダム流入量 (m³/s) とそれに対応する操作規則上の放流量 (m³/s), δ_s は 1 時間の秒数 (s), L は予測の最大リードタイム (h), M は予測メンバ数, Q_F は事前放流実施の基準となる積算流入量 (m³) で、対象ダムの洪水調節容量や平均的な流出率、計画洪水調節操作のピークカット率等から求まる。

次に、式(1)によって事前放流を実施すると判断された場合における事前放流量は、アンサンブル予測の下位の予測メンバの予測値に基づいて決定される。下位第 k 位の予測メンバを考慮する場合、事前放流量の決定は次式によって行われる。

$$v_{PR} = k\text{-th smallest} \left\{ \beta \sum_{m=1, \dots, M}^L (q_{m,l} - d_l) \cdot \delta_s \right\} \quad (2)$$

ここに、 v_{PR} は事前放流として放流することができる最大の貯留水量 (m³/s), d_l は l 時間先の確保放流量 (m³/s), β は予測される積算流入量の何割程度を貯水量の回復に充てられると見込むことができるかを表すパラメータで、出水規模が大きくなかった際に遅くとも流入量のピーク到達以降の流入水を貯留できると考えるのであれば、少なくとも $\beta=0.5$ 程度を想定することができる。

上述の事前放流意思決定におけるその他のパラメータである i, k の値については、参照するアンサンブル予測の予測メンバを予測値の大きさと並び替えた順位別の予測誤差解析を実施することによって、より客観的に決定することができる。以降の分析では、先行研究¹³⁾に基づいて、 $i=1, k=2$ と設定した上で、事前放流実施の基準となる積算流入量 Q_F に

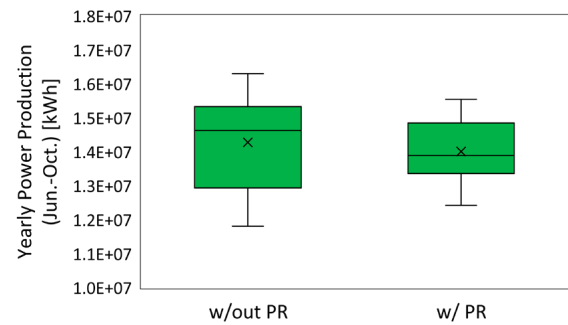


Fig.1 対象期間における各年の総発電量の分布
(A Boxplot of Total Power Production from June to October in Each Simulated Year)

ついては $\beta=0.5$ で流出率を 0.8 とした場合にモデルダム貯水池におけるピークカット率補正の相当雨量 150mm に概ね相当する $Q_F=38670000$ (m³), 事前放流可能な最大貯水量は利水容量と同じ $v_{PR}=16000000$ (m³) と設定して検討を行った。

IV. 結果と考察

モデルダム貯水池を対象とした長期操作シミュレーション分析の結果のうち、治水・利水に関する結果の概要を Table 2 に示す。このうち、利水貯水量 (利水貯水率) の平均値と事前放流の実施頻度については、計算対象期間である 2014 年~2019 年の 6 年間 (各年とも出水期に概ね該当する 6 月 1 日~10 月 31 日のみ) のダム操作シミュレーション結果の年ごとの平均値を示す。前章に記述した方法で事前放流を実施する場合においては、事前放流を全く実施しない場合と比較して、2018 年 7 月に発生した大規模出水時における最大放流量を 10%程度低減できており、大規模出水に対する事前放流実施の効果が見て取れる。一方、利水面に関しては、提案手法に基づいて事前放流を実施する場合には、事前放流を実施しない場合と比較して、利水貯水率の平均が 96.3%から 85.5%に低減している。ただし、いずれの計算年においても、モデルダムからの利水補給に支障を来す (確保放流量を満足する放流ができない) 事例は見られなかった。また、事前放流の実施頻度については、提案事前放流手法では、計算期間の概ね 1/4 に相当する期間で事前放流が実施されている。

次に、計算対象期間の各年における 6 月~10 月までの総発電量の分布を Fig.1 に示す。ここでは比較が容易となるよ

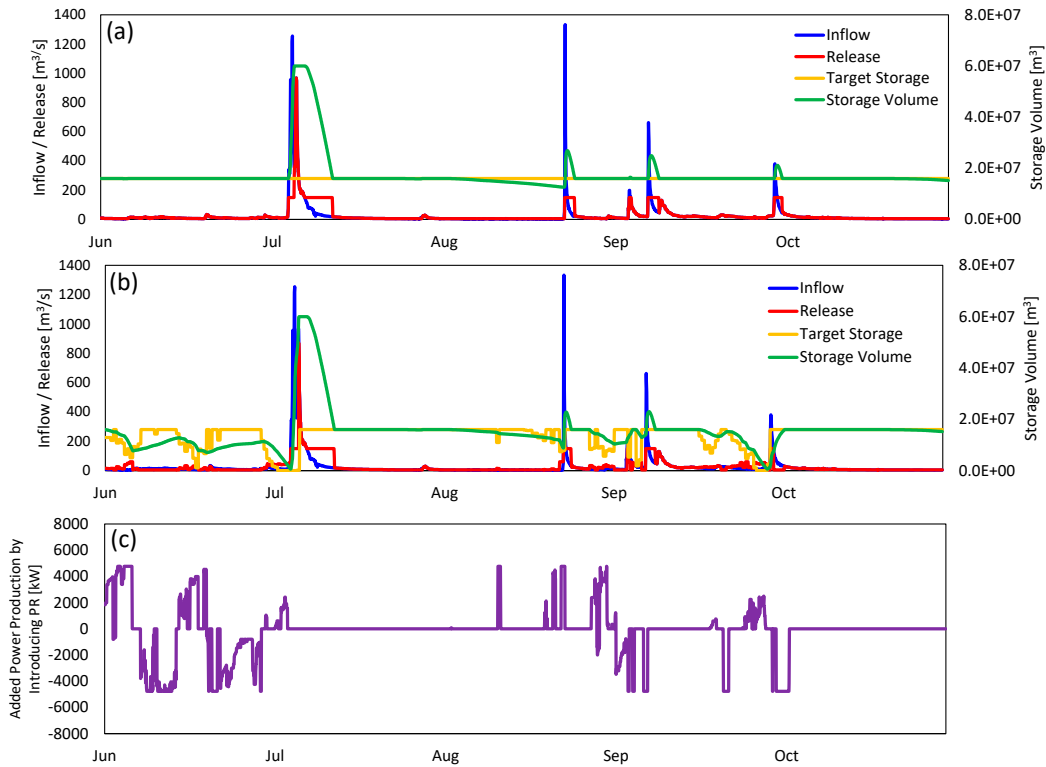


Fig.2 2018年のダム操作シミュレーション結果の比較：(a) ダム諸量（事前放流無し），(b) ダム諸量（事前放流有り），(c) 事前放流無しの場合と比較した事前放流有りの場合における発電量の差（正は増電，負は減電）
 (Comparison in Results of Long-term Reservoir Operation in 2018: (a) reservoir states (without prior release), (b) reservoir states (with prior release), (c) added power production by introducing prior release operation)

う、箱ひげ図の形式で結果を示しているが、標本サイズは6（年）であることに留意されたい。また、差が見やすくなるよう、グラフの縦軸の原点を0ではない数値を採用している。図より、提案手法で事前放流を実施する場合（図中の”w/PR”）には、事前放流を全く実施しない場合（図中の”w/out PR”）と比べて、年平均の期間発電総量は大きく変わらないものの、期間発電量が小さな年については発電量がより大きく、期間発電量が大きな年については発電量がより小さくなっており、発電量の年々変動の幅が小さくなっている。このことは、事前放流を実施する場合の方が、6月～10月における水力発電の総量がより安定する可能性を示唆している。

続いて、事前放流を導入した場合に総発電量が低下した2018年におけるダム長期操作シミュレーション結果の比較を Fig.2 に示す。図には、事前放流を実施しない場合のダム諸量のシミュレーション結果 (Fig.2(a))、事前放流を実施する場合のダム諸量のシミュレーション結果 (Fig.2(b))、及び事前放流を実施しない場合と比較した事前放流を実施する場合における増電効果 (Fig.2(c)、負値は減電) を示している。Fig.2(a), (b) に示す目標貯水量は、事前放流によって最終的に到達すべき目標となる貯水量であり、目標貯水量が貯水量を下回っている場合には、事前放流（または洪水調節操作）が実施されていることになる。発電量の差を示す Fig.2(c) とダ

ム諸量の推移 (Fig.2(a),(b)) を合わせて見ると、必要に応じて事前放流を実施する操作方式では、基本的に、事前放流が実施されている期間において発電量が増加している。反対に、事前放流後の貯水量の回復局面においては、水力発電量が減少する傾向にある。そのため、モデルダム貯水池における水力発電系においては、事前放流の実施時間に対する貯水量の回復に所要する時間の長短が、期間全体の総発電量の増減を左右することが分かる。すなわち、事前放流後にまとまった出水が生じ貯水量の回復が速やかに達成される場合には、減電の期間が短くなり、事前放流実施期間中の増電効果が支配的になる。一方で、事前放流の実施後にまとまった出水が発生せずに貯水量の回復に時間を要する場合には、減電の期間が長くなることで事前放流実施期間中の増電効果が相殺され、場合によっては出水前後の総発電量は減少する。つまり、参照する降水予測が過大で（本研究の場合はアンサンブル予測の下位のメンバの予測値が過大で）、事前放流の実施後に貯水量が回復できない場合（いわゆる事前放流の空振りの場合）には、事前放流の実施が水力発電に悪影響を与えることになる。よって、事前放流の導入に伴う水力発電への影響を評価する上では、降水予測の精度（過大予測の頻度や程度）を考慮することが非常に重要となる。2018年については、6月の梅雨期において事前放流後に貯水量の回復が速やかに行

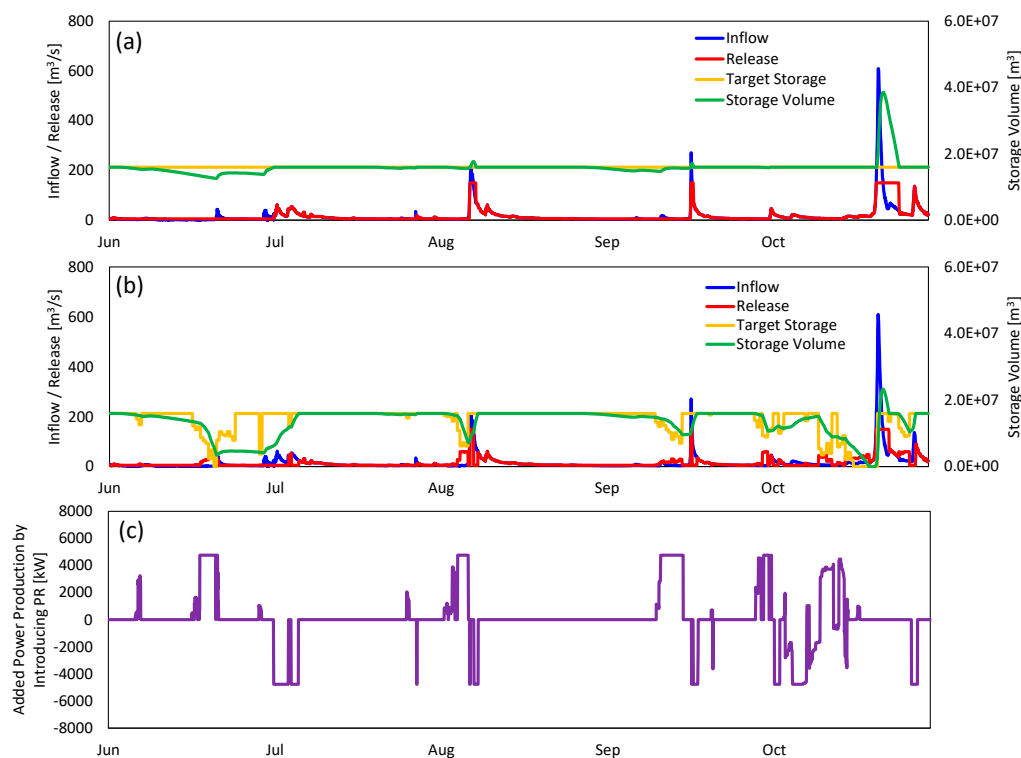


Fig.3 2017年のダム操作シミュレーション結果の比較：(a) ダム諸量（事前放流無し），(b) ダム諸量（事前放流有り），(c) 事前放流無しの場合と比較した事前放流有りの場合における発電量の差（正は増電，負は減電）
(Comparison in Results of Long-term Reservoir Operation in 2017: (a) reservoir states (without prior release), (b) reservoir states (with prior release), (c) added power production by introducing prior release operation)

えなかった事例が散見されるほか、9月～10月にかけても貯水量回復が速やかに行われず事前放流が実施されており、全体として事前放流を実施する操作方式の方が、事前放流を全く実施しない操作方式よりも期間総発電量が減少したものと考えられる。

次に、事前放流を導入した場合に水力発電量が增大した2017年におけるダム長期操作シミュレーション結果の比較をFig.3に示す。2018年のシミュレーション結果と比較すると、全体的に事前放流実施後に速やかに貯水量の回復が達成されている事例が多く、事前放流を導入した操作方式の方が、水力発電量が減少する期間が短くなっている。結果として、事前放流を実施している時間帯における増電効果が貯水量回復期間の減電効果を上回り、事前放流を導入する場合の方が、期間全体での総発電量が大きくなる結果となっている。

V. おわりに

中期アンサンブル降水予測に基づいて事前放流の実施判断を行う場合における利水・発電への影響について、多目的ダム貯水池を対象に長期操作シミュレーションを実施し、定量的な分析を行った。その結果、モデルダム貯水池においては提案する事前放流操作手法の導入による利水補給への影響は限定的であること、水力発電については年ごとの総発電

量の平均はほとんど変化せず、むしろ事前放流の実施によって水力発電量の年々変動が抑制される可能性が示唆された。また、ダム長期操作シミュレーション結果の詳細な分析からは、事前放流の実施後に貯水量の回復が速やかに行えるかどうか、事前放流の導入によって総水力発電量の増減に大きく影響することが明らかとなった。つまり、参照する降水予測が過大で、事前放流の実施後に貯水量が回復できない場合（いわゆる事前放流の空振りの場合）には、事前放流実施が水力発電に悪影響を与えることから、事前放流の導入によって増電効果を得るためには、降水予測の精度の向上が重要であることが示唆された。なお、本報で示した内容は、限られた適用事例から得られた結果や考察に過ぎないことから、今後は適用対象ダム貯水池や他の予報プロダクトなどを対象として、更なる分析を行うことが必要である。

謝 辞

本研究は、JSPS 科研費（課題番号：19K04616 及び 23K04055）の助成を受けて実施された。

参考文献

- 1) 野原大督, 小尻利治; 地球規模気象情報を考慮した学習型貯水池操作支援システム, 水文・水資源学会誌, 19(1),

- 2006, pp.25-43.
- 2) Amai, Y. and Nohara, D. ; Prior release operation of a multipurpose reservoir for flood control based on accuracy assessment of real-time hydrological prediction. Proc. 19th IAHR-APD Congress, Hanoi, 2014.
 - 3) Raso, L. and Malaterre, P.O. ; Combining short-term and long-term reservoir operation using infinite horizon model predictive control. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 143(3), 2016, B4016002-1.
 - 4) Liu, Z., Lyu, J., Jia, Z., Wang, L. and Xu, B. ; Risk analysis and response of forecast-based operation for Ankang Reservoir flood control. Water, 11, 2019, 1134.
 - 5) Wang, J., Zhao, T., Zhao, J., Wang, H. and Lei, X. ; Improving real-time reservoir operation during flood season by making the most of streamflow forecasts. J. Hydrol., 595, 2021, 126017.
 - 6) Wang, F., Wang, L., Zhou, H., Valeriano O.C.S., Koike, T. and Li, W. ; Ensemble hydrological prediction-based real-time optimization of a multiobjective reservoir during flood season in a semiarid basin with global numerical weather predictions. Water Resour. Res., 48, 2012, W07520.
 - 7) Masuda, H. and Oishi, S. ; Study on optimization of the integrated operation using ensemble prediction in the upper reaches of the Nabari River. Proc. 35th IAHR World Congress, 2013, S10065.
 - 8) Nohara, D., Nishioka, Y., Hori, T. and Sato, Y. ; Real-time reservoir operation for flood management considering ensemble streamflow prediction and its uncertainty. Advances in Hydroinformatics, Springer Singapore, 2015, pp.333-347.
 - 9) Fan, F.M., Schwanenberg, D., Alvarado, R., dos Reis, A.A., Collischonn, W. and Naumman, S. ; Performance of deterministic and probabilistic hydrological forecasts for the short-term optimization of a tropical hydropower reservoir. Water Resour. Manage., 30, 2016, pp.3609-3625.
 - 10) Ficchi, A., Raso, L., Dorchies, D., Pianosi, F., Malaterre, P.O., van Overloop, P.J. and Jay-Allemand, M. ; Optimal operation of the multireservoir system in the Seine River basin using deterministic and ensemble forecasts, J. Water Resour. Plann. Manage., 142(1), 2016, 05015005.
 - 11) 野原大督, 木谷和夫, 道広有理, 角哲也 ; 利水ダムにおける事前放流の意思決定への ECMWF 中期アンサンブル予報の利用性の分析, 土木学会論文集 B1(水工学), 76(2), 2020, pp.I_829-I_834.
 - 12) Delaney, C.J., Hartman, R.K., Mendoza, J., Dettinger, M., Monache, L.D., Jasperse, J., Ralph, F.M., Talbot, C., Brown, J., Reynolds, D. and Evett, S. ; Forecast informed reservoir operation using ensemble streamflow predictions for a multipurpose reservoir in Northern California. Water Resour. Res., 56(9), 2020, WR026604.
 - 13) 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検討, 土木学会論文集 B1(水工学), 77(2), 2021, pp.I_91-I_96.
 - 14) Kojiri, T. ; Hydrological River Basin Environment Assessment Model (Hydro-BEAM), Watershed Models, CRC Press, 2006, pp.613-626.

Impact of Prior Release Operation by Multi-purpose Reservoir Considering Medium-term Ensemble Prediction of Precipitation on Water Supply and Power Production

Daisuke Nohara

This paper presents the results of analysis on impact of prior release (PR) operation for flood management by multi-purpose reservoir considering medium-term operational ensemble prediction of precipitation on water supply and power generation. As a result of the simulation of long-term operation of a hypothetical target reservoir based on an existing multi-purpose reservoir considering One-week Ensemble Forecast of Precipitation provided by Japan Meteorological Association, it was shown that introduction of PR did not bring significant impact on water supply operation of the reservoir, while it may decrease inter-annual variation in power production. It was also clarified that introduction of PR basically increases power production when reservoir water storage recovers soon after reservoir drawdown by PR, while power production decreases when it takes long time to recover reservoir storage after drawdown of the reservoir by PR.