

降水短時間予報を利用した既存ダムの洪水調節手法の提案とその効果の検証

中央大学大学院 学生員 ○北田 悠星
中央大学大学院 学生員 岡部 真人
中央大学 フェロー会員 山田 正

1. 目的

我が国の治水の計画及び管理においてダムのゲート操作は大きな役割の一つを担う。一方 IPCC¹⁾などによって指摘されている気候変動に対し、我が国の治水対策は十分でないのが現状である。著者ら^{2),3)}は以前より既存ダムにおいて、治水容量に加えて利水容量分も放流することでダム貯水池のもつ治水効果を向上させるという事前放流手法を提案してきた。事前放流手法の有効性を説明する概念図を図-1に示す。本手法はダム流域の流域特性に基づいて放流量を決定するもので、時々刻々の累積降雨量や流入量からそれ以降に最低限流入する総量を放流するというものである。一方、実際に放流を開始する際には人員の確保や関係機関への放流通知、放流開始の判断や設備点検などに約3時間の放流準備時間を必要とするのが現状である。この事実に対し、著者らは確率予報を用いた際の事前放流の決定手法⁴⁾、及び降雨予測を用いた事前放流手法⁵⁾についても検証してきた。著者らが提案してきた手法を表-1にまとめる。本論文では著者らが提案してきた3つの事前放流手法を実際の洪水に適用し比較することによってその効果を検証する。

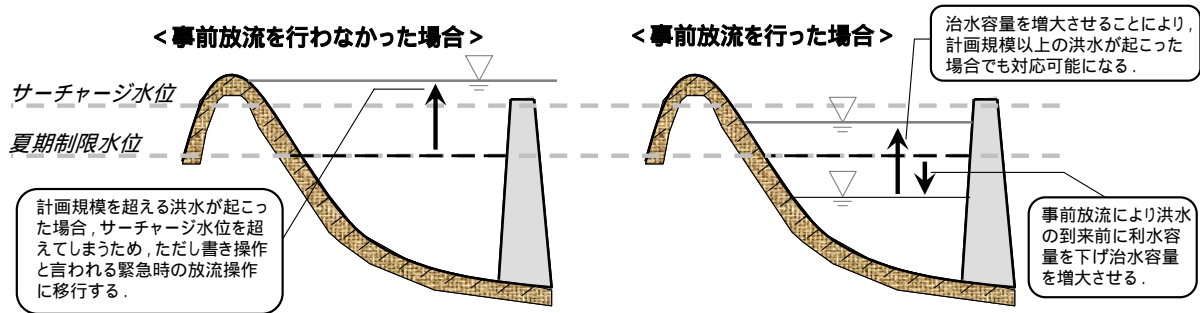


図-1 事前放流手法の有効性を示す概念図

2. 解析対象ダムの諸元

本研究では渡良瀬川上流に存在する草木ダム(流域面積 254km²)を対象として解析を行った。草木ダムの操作規則によると洪水時の草木ダムの操作規則はピーク流入量までは流入量に対して一定率の貯留を行い、ピーク以降は一定量の放流する一定率一定量調節方式に従っている。一定率の貯留操作は貯水池への流入量が洪水調節開始流量以上になると行われ、放流量は式(1)によって算出する。

$$Q_{OUT}(t) = (Q_{IN}(t) - Q_A) \times \alpha + Q_A \quad (1)$$

$Q_{OUT}(t)$: ダム貯水池からの放流量(m³/s), $Q_{IN}(t)$: ダム貯水池への流入量(m³/s), Q_A : 洪水調節開始流量(m³/s), α : 一定率操作を行うための定数である。草木ダムでは $Q_A=500$, $\alpha=0.1$ と定義されており、ピーク流入量 640m³/s に達するまでは洪水時は流入量 500m³/s を上回った量の 1 割に 500m³/s を足した一定率の放流を行う。本研究ではこの放流操作を 1 割放流と定義する。この放流は常用洪水吐の操作によって行われるが、ダムが満水に近づくとき非常用洪水吐から流入量と同じ量を放流するただし書き操作に移行する。

キーワード 事前放流, 流出特性, 降水短時間予報

連絡先; 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 03-3817-1807 中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻

E-mail: yusei-kitada@civil.chuo-u.ac.jp

表-1 提案する事前放流手法

	手法名	現時刻以降のダム貯水池への流入量を推測する際に使用する水文情報	特徴
手法 1	逓減特性方式	現時刻までのダム貯水池への実測流入量	現時刻以降にダム貯水池へ流入する量を確実に事前放流できる
手法 2	実測降雨を用いた総降雨量方式	現時刻までの実測降雨	現時刻以降にダム貯水池へ流入する量を確実に事前放流できる
手法 3	予測降雨を用いた総降雨量方式	予測降雨, 現時刻までの実測降雨	より早い時刻から事前放流を開始できる

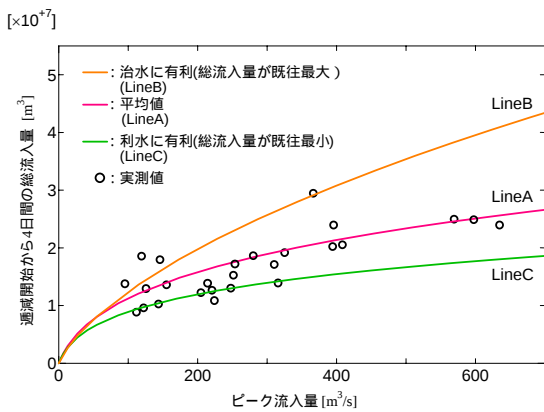


図-2 逓減開始時の流入量 Q_{IN} とその後 4 日間の総流入量 V の関係

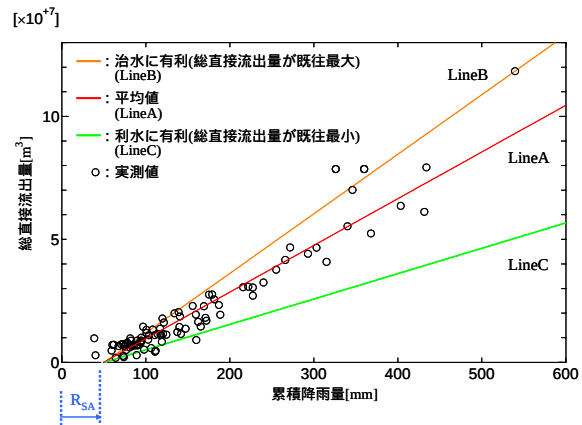


図-3 ダム流域における総降雨量 $R(t)$ と総直接流出量 $V(R(t))$ の関係

3. 著者らが提案する事前放流量の決定手法

ダム貯水池における流入量，放流量に関して式(2)に示す連続式を満たすように放流量 $Q_{OUT}(t)$ を決める．

$$-\int_0^t (Q_{IN}(t) - Q_{OUT}(t)) dt = V(t) \quad (2)$$

ここに， $V(t)$ ：現時点(=時刻 t)以降に確実にダム貯水池への流入が見込める総流入量(m^3)， $Q_{IN}(t)$ ：ダム貯水池への流入量(m^3/s)， $Q_{OUT}(t)$ ：ダム貯水池からの放流量(m^3/s)である．事前放流としては，ある時刻における流入量や降雨量などのダム貯水池における水文諸量から，その後最低限貯水池への流入が見込める総流入量を算出し，それに見合う流量を放流する．放流量の算出に関しては $V(t)$ の表し方によって以下に示す 2 通りの考えがある．

時々刻々の流入量 $Q_{IN}(t)$ の関数で表す：

$$-\int_0^t (Q_{IN}(t) - Q_{OUT}(t)) dt = V(Q_{IN}(t)) \quad (3)$$

時々刻々の累積降雨量 $R(t)$ の関数で表す：

$$-\int_0^t (Q_{IN}(t) - Q_{OUT}(t)) dt = V(R(t)) \quad (4)$$

著者らが提案する手法に基づく の考えを用いた放流方法を逓減特性方式， の考えを用いた放流方法を総降雨量方式と定義し，以後この表現を用いる．

ダム貯水池への時々刻々の流入量を用いた放流量の決定方法（逓減特性方式）

ダム貯水池への時々刻々の流入量から放流量を算出する逓減特性方式による放流量は式(3)を時間 t で微分して得た式(5)で決定される．

$$Q_{OUT}(t) = Q_{IN}(t) + \frac{dV(t)}{dQ_{IN}(t)} \cdot \frac{dQ_{IN}(t)}{dt} \quad (5)$$

この式(5)を用いるとともに，流域における流入量 $Q_{IN}(t)$ と $V(t)$ の関係図(図-2)を事前に作成しておくことで，事前放流量を決定できることが示されている．ここで，この累積降雨量と直接流出量の関係のばらつきが大きいダム流域に対しては，回帰直線の傾きを変化させることで，平均値のライン (LineA)，治水に有利なライン (LineB)，利水に有利なライン (LineC) を定義して用いることができる．どのラインを使用するかはダムの管理者が出水規模，貯水容量，洪水調節の主目的などに応じて決定することができる．

ダム貯水池における時々刻々の累積降雨量を用いた放流量の決定方法（総降雨量方式）

時々刻々の降雨データ(累積降雨量)を基に放流量を決定する総降雨量方式について述べる．洪水の発生要因である降雨の情報を得る事により，ダム貯水池への流入量を実際に流入が開始する前に算出することが可能である．これにより，さらに効率的な洪水調節を行える可能性がある．式(4)を時間 t で微分し，式(6)の $dR/dt=r(t)$ の関係を用いると式(7)が得られる．

$$R(t) = \int_0^t r(t) dt \quad (6) \quad Q_{OUT}(t) = Q_{IN}(t) + \frac{dV(t)}{dR(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} = Q_{IN}(t) + \frac{dV(t)}{dR(t)} \cdot r(t) \quad (7)$$

ここに， $R(t)$ ：ダム流域において降雨が開始した時刻から時々刻々の累積降雨量(mm)， $r(t)$ ：時々刻々の降雨量(mm/h)である．式(7)とともに，図-3 に示す草木ダム流域における累積降雨量と総直接流出量の関係を用いることにより dV/dR が決定され，放流量を算出することができる．逓減特性方式で用いた相関図と同様に，平均値のライン (LineA)，

治水に有利なライン (LineB), 利水に有利なライン (LineC) を定義して用いることができる。この総降雨量方式では, 降雨開始時を時刻 $t=0$ と定義する。ところで, 降雨に伴う流出はある閾値に達してから始まる。この閾値を RSA と定義し, 累積降雨量が RSA に到達した時刻を時刻 $t=0$ とした。また, ダム貯水位に関しては総降雨量方式, 逓減特性方式ともに式(8)より算出可能であり, 利水容量の安全性も同時に確認できる。

$$A(h) \frac{dh(t)}{dt} = Q_{IN}(t) - Q_{OUT}(t) \quad (8)$$

ここに, $A(h)$: 湛水面積(m^2), $h(t)$: 貯水位(m)である。

4. 提案する手法(総降雨量方式)に予測降雨を用いた事前放流量の決定手法

実際に放流を開始するには 1 章で記した通り約 3 時間の放流準備時間を必要とするのが現状であるため, 著者らは事前放流量を決定する際に, 気象庁の 1km メッシュ降水短時間予報 (30 分間隔で発表され, 6 時間先までの各 1 時間雨量を予測する。以後, 予測降雨と表現する。) による予測降雨量を用いる提案をする。予測降雨から流入量の算出を早期に行い, 放流開始時刻を早めようという試みである。著者らは実測降雨と予測降雨の誤差を小さくするため, 予測降雨を実測降雨で補正して総降雨量方式の累積降雨量を求めている。同じ時間における予測降雨と実測降雨の誤差を補正值とする。事前放流量の算出に使用する累積降雨量は現時点までの実測降雨の累積降雨量と現時点から n 時間先までの予測降雨量の累積値の和であり, これに同時間どうしの実測降雨と予測降雨の差を補正值として組み込んで放流量を算出する。以上より予測降雨を用いる総降雨量方式では累積降雨量を(9)式より求め, これを(10)式に代入して放流量を計算する。

$$R(t') = R_o(t') + R_f(t') + C \quad (9)$$

$$Q_{OUT}(t) = Q_{IN}(t) + \frac{dV(t')}{dR(t')} \cdot r(t') \quad (10)$$

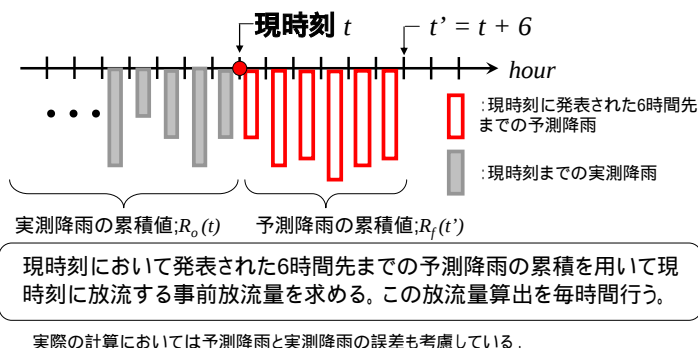


図-4 6 時間先までの予測降雨を用いて事前放流量を求める概念図

ここに t : 現時刻, t' : $t' = t + n$, ただし $n = 1, 2, \dots, 6$ [hours] (気象庁の降水短時間予報における予報先行時間), $R_o(t')$: 現時刻までに降った実測降雨量の累積値, $R_f(t')$: 現時刻 t において予報された t' 時間先までの予測降雨の累積値, C : 時刻 $t-1$ と時刻 t の 1 時間の間に降った実測の単位時間雨量と同時間に降ると予測された予測降雨量の差である。予測先行時間 $n=6$ の場合の予測降雨を用いた事前放流量算出の概念図を図-4 に示す。

5. 実際の洪水調節への適応

逓減特性方式, 実測降雨を用いた総降雨量方式及び予測降雨を用いた事前放流手法を実際のダムに適応し, 実際の洪水のデータを用いて解析を行った。対象とした洪水は, 過去の降水短時間予報データが得られた 2007 年 9 月の台風 9 号 (草木ダムへのピーク流入量 $1,190 m^3/s$, 既往 2 番目の規模) に伴う洪水である。ここで, 事前放流手法は現状より効率的に洪水調節を行うことを目的としているため, 事前放流量の最大値は, 解析対象としているダムにおいて洪水流量と定義されている $500 m^3/s$ とし, 洪水調節開始流量に到達以降は現行の操作規則に従う洪水調節を行った。草木ダム流域における RSA は平均して 46mm である。

図-5, 6, 7 にそれぞれ, 1 時間先, 3 時間先, 6 時間先の降水短時間予報を用いた総降雨量方式, 実測降雨を用いた総降雨量方式, 及び逓減特性方式による事前放流量を算出した際の流入量, 放流量, 貯水位の時系列を示す。実務において, 河川下流における最大流量及び, 水位の上昇速度, 及びダム管理に基づいたゲート操作を考慮する必要があることに対して, 著者ら³⁾は既に検討しており, 放流準備時間の短縮や予測降雨の活用により放流開始を可能な限り早め, 早い段階から徐々に放流を行うことが重要であるという結論に達しているが, 本論文では新しく予測降雨を用いた事前放流手法の理論の枠組みを提案することが目的なので, 事前放流手法の算出結果をそのまま示す。

逓減特性方式及び, 総降雨量方式で用いる各相関図(図-2, 3)においてはそれぞれ平均ラインを用いて計算を行っている。実際の本洪水時の初期貯水位は夏期制限水位より低かったためただし書き操作に移行しなかったが, シミュレーションでは初期水位を夏期制限水位に設定しているため, 現行操作はただし書き操作に移行している。それに対して, 予測降雨量, 実測降雨量を用いた総降雨量による事前放流手法, 逓減特性方式による事前放流手法は図

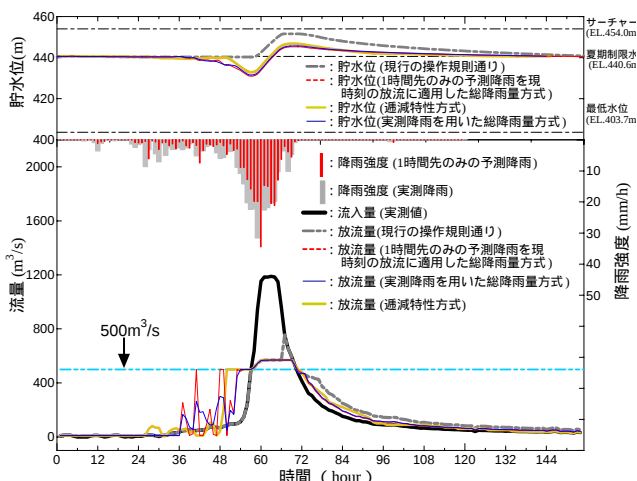


図-4 1時間先までの降雨予測を用いた草木ダム流域における洪水時の流入・放流量及び貯水位の時系列

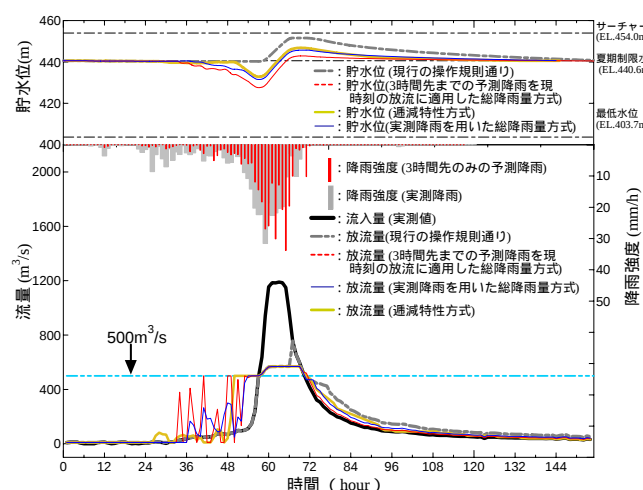


図-5 3時間先までの降雨予測を用いた草木ダム流域における洪水時の流入・放流量及び貯水位の時系列

-5,6,7 いずれの場合においても, 事前放流を行ったことでダム貯水池への流入が卓越する前に治水容量を増大させて洪水調節に成功し, 洪水終了後には利水容量を確保している. その中でも予測降雨を用いた事前放流手法は他の手法よりも多くの量を事前放流できる. これにより検証した洪水においては, 最長6時間前から洪水に備えることが可能であるとともに, 不確実性を伴う予測降雨量を用いたとしても貯水容量を失うことなく事前放流が可能であることを示した. 図-7 の $t=72$ 時間において予測降雨を用いた事前放流手法による放流量を流入量より下げているのは, 洪水終了時に貯水容量が夏季制限水位まで

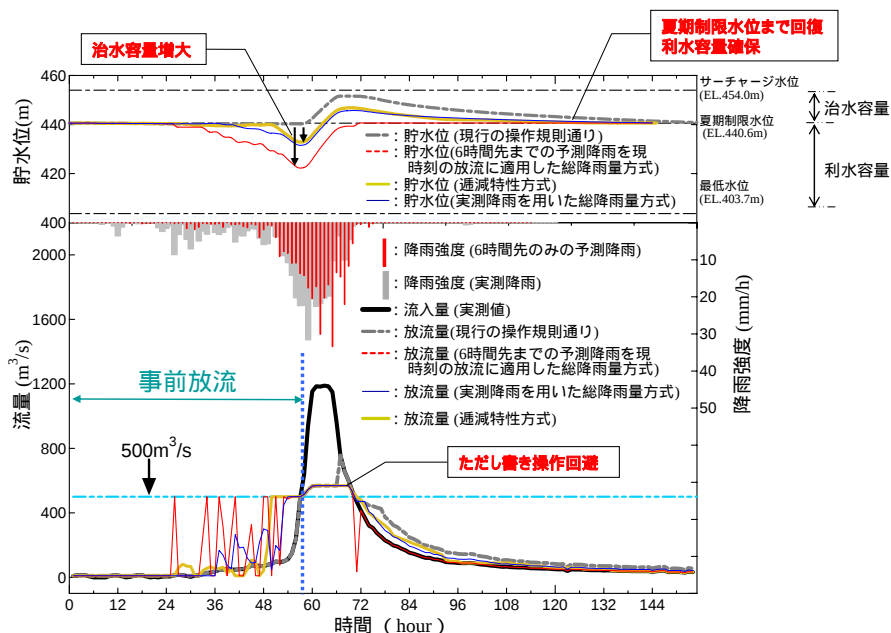


図-6 6時間先までの降雨予測を用いた草木ダム流域における洪水時の流入・放流量及び貯水位の時系列

回復しなかったため, 洪水終了時に放流量を抑えて水位を回復させているからである. 著者らが提案する事前放流手法では洪水終了後の貯水池への流入量も考慮に入れて事前放流量を算出しているため, この操作に問題はない.

6. 結論

著者らが提案する3種類の事前放流手法はいずれの場合もダム貯水池への流入が卓越する前に治水容量を増大させて洪水調節に成功し, 洪水終了後には利水容量を確保することを示した. その中でも予測降雨を用いた事前放流手法はより早い時間から事前放流を開始して治水容量を大幅に確保できるため最も効果的であり, 最大6時間前から洪水に備えることが可能であることを示した. 以上より著者らが提案する事前放流手法は, ゲート操作に3時間程度の準備時間がかかる現状において非常に有効であり, 現実的な放流手法と考えられる.

<参考文献> 1) CLIMATE CHANGE 2007 -The Physical Science Basis-, IPCC FOURTH ASSESSMENT REPORT, Technical Summary, pp.19-92, 2007. 2) 戸谷英雄, 秋葉雅章, 宮本守, 山田正, 吉川秀夫: ダム流域における洪水流出特性から可能となる新しい放流方法の提案, 土木学会論文集 B, Vol.62, No.1, pp.27-40, 2006. 3) 下坂将史, 呉修一, 山田正, 吉川秀夫: 既存ダム貯水池の洪水調節機能向上のための新しい放流方法の提案, 土木学会論文集 B, Vol.65, No.2 pp.106-122, 2009. 4) 腰塚雄太, 下坂将史, 戸谷英雄, 山田正: 確率予報を用いたダムによる事前放流量の決定手法に関する研究, 第33回関東支部技術研究発表会, 17, 2006. 5) 北田悠星, 菊地慶, 岡部真人, 山田正: 気象庁の降水短時間予報を用いて既存のダムの洪水調節機能を向上させる手法の提案, 水工学論文集, 印刷中, 2010