水工学論文集,第54巻,2010年2月

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

A NEW TECHNIQUE OF DISCHARGE RELEASE FROM DAM RESERVOIR FOR FLOOD CONTROL BASED ON THE SHORT-TERM PRECIPITATION FORECAST OF JAPAN METEOROLOGICAL AGENCY

北田悠星[1]・菊地慶[1]・岡部真人[1]・山田正[2]
Yusei KITADA, Kei KIKUCHI, Masato OKABE and Tadashi YAMADA

[1]学生員　中央大学大学院　理工学研究科土木工学専攻（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）
[2]フェロー会員　工博　中央大学教授　理工学部都市環境学科（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）.

Dam gate operation plays one of the prominent roles in comprehensive flood control management of basin. Recently an increase frequency and strength of rainfall was reported by current IPCC reports as a result the frequency and strength of flood is expected to increase. There is a possibility that present dam operating rules cannot deal with this climate change. The new discharge release rule called “anticipatory release” is proposed in this paper. This rule temporarily increases flood control capacity by using the principle irrigation capacity for flood control capacity and lowering the water level of the dam reservoir before a heavy storm reaches to the dam catchment by using the precipitation forecast of Japan Meteorological Agency. This method calculate outflow by calculating the inflow without using analytical solution. The result of simulation shows the new method is highly effective for the current dam operate situation.

Key Words: *anticipatory release, runoff characteristics, flood control capacity*

1. はじめに

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．近年，かつての洪水常襲地帯における宅地開発，流域の土地利用の変化，降雨形態の変化等があり，既存ダム群の従来通りの運用だけでは頻発する豪雨災害に必ずしも対応できなくなりつつある．実際，様々な機関から最近の異常気象や長期的な気象の変動についての報告書が発行されている．例えば，IPCCの第4次報告[1)]においては，20世紀後半，北半球中・高緯度域においては，大雨の発現頻度が2～4%増加した可能性が高いと述べられるとともに，自然現象の極端化，例えば洪水規模が大きくなる反面，渇水も増えるということが指摘され，今後の気温上昇は避けることが出来ない現実の問題であることが指摘されている．また，異常気象レポート2005[2)]においては，最近20年程度の8～9月期の100mmおよび200mm以上の日降水量発生日数は，過去約100年間でみられなかった頻度であることが指摘されている．こういった気候変動に対する我が国の治水対策は十分でないのが現状である．現行のダム操作規則による放流操作は，時々刻々の流入量データを基に行っているが，近年増加傾向にある大規模な出水に対応するためには，ダム貯水池からの放流操作に関して今まで以上に効率的な操作を行うことで，ダムの洪水調節機能を最大限に発揮する必要がある．

著者らは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．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．事前放流に関する貯水池操作方法として，著者ら[3)]は，ダム流域におけるハイドログラフの逓減特性から流入量を算出して事前放流量を決定する手法を提案している．その放流方法とは，現在までに降った降雨のうち確実にダム貯水池へ流入する量を実際に流入する以前に利水容量も含めて放流するという方法であり，降雨の予測を行うものではない．この事前放流によりダムが大きな治水容量を持った状態で洪水調節を行う事が可能になる．また，事前放流量の総量は洪水の逓減部の積分値としているため，洪水終了後には利水容量は確保され利水上支障のないことを示している．また，著者ら[4), 5)]は，洪水の発生要因である降雨情報を得ることにより，ダム貯水池への流入量を実際に流入が開始する以前に算定することが可能である事を示している．これはダム上流の降雨情報を放流操作に組み込むことで，放流の開始時刻を早めることを目的とした提案である．

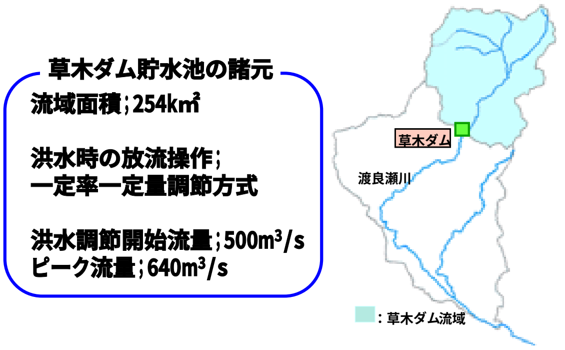


図-1 渡良瀬川流域及び草木ダムの位置関係と諸言

事前放流手法による洪水調節を行う際には，当然ながらダム下流懸案地点あるいは懸案地区に対してどのような洪水調節を行う事が最も適切かを考える必要があり，下流懸案地点における可能放流量を考慮した放流量の決定方法を提案している．このように，ダム貯水池における上・下流の水文情報を考慮し放流操作を行う事で，実務により即した放流が効率的に行える事を示している．

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，著者らは不確実性を伴わない実測降雨を用いた事前放流手法について検証する一方で，確率予報を用いた際の事前放流の決定手法[6]，及び降雨予測を仮想的に用いた事前放流手法[7]についても検証してきた．

本研究では降雨予測を用いた事前放流手法を実際の洪水に適応させることによって，既往の提案より早い時刻から事前放流を開始し、治水容量を増大させる提案を行った．

2．解析対象ダム貯水池について

本研究では利根川水系最大の支川である渡良瀬川上流に存在する草木ダム(流域面積254km^2)を対象として解析を行った．**図-1**に渡良瀬川流域および草木ダムの位置関係を示す．草木ダムでは昭和52年の建設当初に定められた操作規則に従って洪水調節が行われている．それ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．

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

$Q_{OUT}(t)$：ダム貯水池からの放流量(m^3/s)，$Q_{IN}(t)$：ダム貯水池への流入量(m^3/s)，Q_A：洪水調節開始流量(m^3/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，α=0.1と定義されており，ピーク流入量640m^3/sに達するまでは洪水時は流入量500m^3/sを上回った量の1割に500m^3/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．

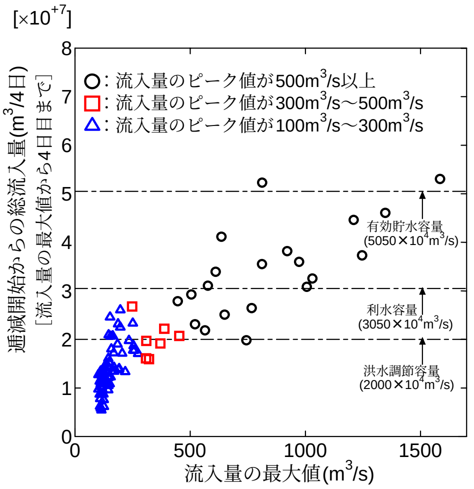


図-2 草木ダム流域におけるピーク流入量とピーク以降4日間の総流入量の関係

3．著者らが提案する事前放流量の決定手法

図-2は草木ダムにおけるピーク流入量と流入量のピーク時から4日間（草木ダム流域において流入量のピーク以降から直接流出が終了するまでの日数として定義）の総流入量の関係である．この関係は降雨が止んだ時点以降に，流量逓減部のみからダム貯水池へ流入する総量を示している．流量逓減時に降雨が存在する場合は，山田[8]の流出高逓減部に関する解析解よりえられる自然逓減曲線を用いることで，逓減部の降雨による流量増分を総量から除外している．**図-2**よりダムの利水容量に相当する流量が洪水の逓減部に流入していることがわかる．この関係が著者らの提案する事前放流量の決定手法の原点であり，非常に重要である．この関係は，ダムの利水容量分を洪水発生以前に事前放流し貯水池を空にしても，洪水逓減部で確実に利水容量分を溜め込むことが可能である事を意味する．現状では，ダムの利水容量は水利権の問題等により，洪水調節に用いることが不可能であるが，この利水容量分を一時的に洪水調節に用いることが出来れば，個々のダムの洪水調節能力を向上する事ができる．以下に提案する放流量の算出方法の概要を記す．

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$Q_{OUT}(t)$を決める．

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

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

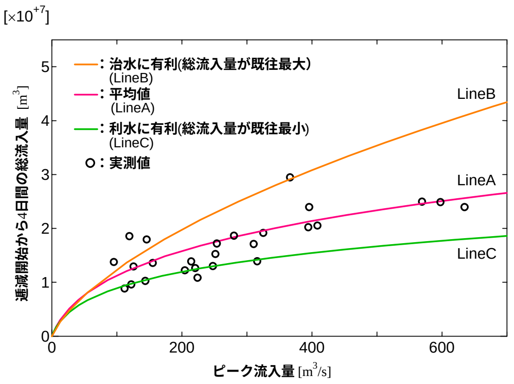


図-3　逓減開始時の流入量Q_{IN}とその後4日間の総流入量Vの関係

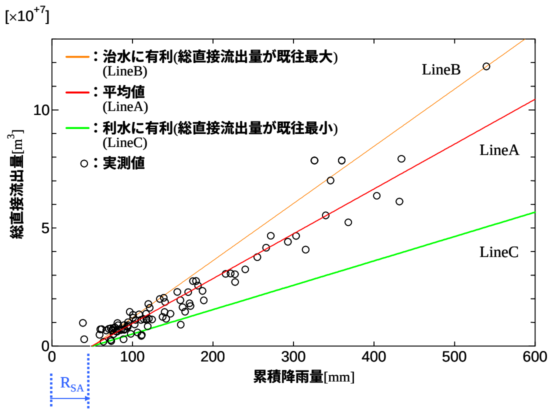


図-4　ダム流域における総降雨量$R(t)$と総直接流出量$V(R(t))$の関係

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．よって，事前放流直後に降雨が終了したとしても，貯水位は最低でも所定の水位(夏期制限水位)まで回復する．ここで，放流量の算出に関して$V(t)$の表し方によって以下に示す3通りの考えがある．

0. 流出計算により算定する
1. 時々刻々の流入量$Q_{IN}(t)$の関数で表す：

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

2. 時々刻々の累積降雨量$R(t)$の関数で表す：

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

著者らが提案する手法に基づく1.の考えを用いた放流方法を逓減特性方式，2.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．以下に逓減特性方式および総降雨量方式を用いた放流量の算出方法の概要を記す．

① 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．

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

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-3**)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．これにより，著者らが提案する放流手法はいかなるダムに対しても普遍的に適用可能である．逓減特性方式では，流入量の立ち上がり時を時刻t=0と定義する．

② 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．

$$R(t)=\int_0^t r(t)\,dt \qquad (6)$$

$$Q_{OUT}(t)=Q_{IN}(t)+\frac{dV(t)}{dR(t)}\cdot\frac{dR(t)}{dt(t)}=Q_{IN}(t)+\frac{dV(t)}{dR(t)}\cdot r(t)$$

(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-4**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，降雨に伴う流出は雨が降った瞬間から始まるものではなく，ある閾値に達しなければ流出は始まらない．この閾値をR_{SA}と定義し，累積降雨量がR_{SA}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．

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

ここに，$A(h)$：湛水面積(m²)，$h(t)$：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

従来の著者らの研究において，上記で説明した総降雨量方式で用いる累積降雨量には実測の降雨を用いて行ってきたが，実際に放流を開始する際には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．そのため，実際にこの手法を現場にて用いる場合，より早期に放流量を算出する必要性が生じる．そこで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．

気象庁の降水短時間予報による予測降雨は必ずしも実測降雨と一致するわけではなく，予測した降雨量に対して実際の降雨量が少なければ，事前放流後に貯水位は回復しない．逆に実際の降雨量が予測降雨よりも多いと，事前放流による効果が薄れる可能性が出てくる．特に山地において気象庁の降水短時間予報を用いることに関しては，降水に方向性が無く前線を伴わない降雨では予報が外れやすく，雲の移動や風の方向性が明確な台風時の降雨では予報が当りやすい，また実測降雨に比べ過小評価される傾向がある，といった報告がなされている[11]．

また、著者らは実測降雨と予測降雨の誤差をできるだけ少なくするため，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値とする．予測降雨を用いた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値として組み込んで放流量を算出する．

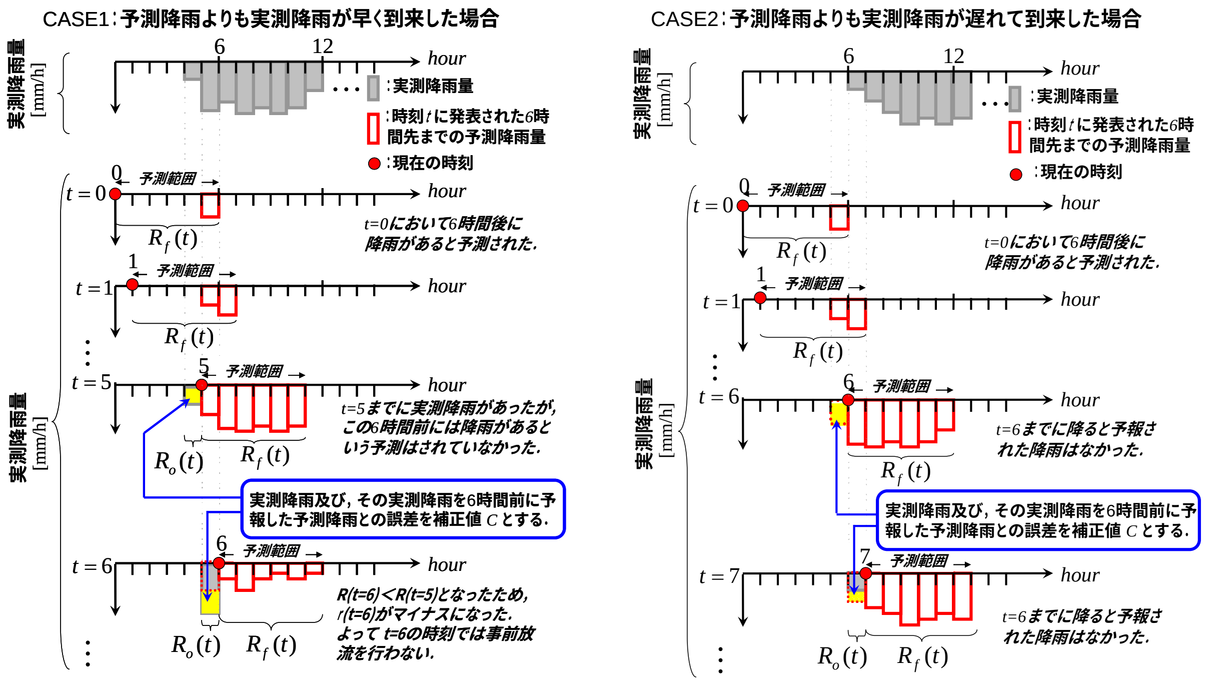
以上をまとめると予測降雨を用いる総降雨量方式では，累積降雨量を(9)式より求め，これを(10)式に代入して放流量を計算する．

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

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

ここにt ;現時刻，t'; $t' = t + n$, ただし$n = 1,2...6$[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．

実測降雨量と比較する予測降雨量については，予測降雨の中でも予測先時間の長いもの程，精度が落ちるという仮定を踏まえて，用いる予測降雨において最も長い予測先時間のものと比較する．提案した補正方法は現時刻



予測降雨を用いた累積降雨量の算出式

$$R(t) = R_o(t) + R_f(t) + C$$

単位時間当りの予測降雨量の算出式

$$r(t) = R(t) - R(t-1)$$

※本文中の(9)式では放流時間とダム貯水池への流入量の時系列を合わせるために時間の変数をt'=t+nとしているが，本図では降雨量のみを議論しているため時間の変数には単純にtを用いている．

図-5　予測降雨を総降雨量方式に用いるための累積降雨量の算出手法

から未来を予測した降雨を補正することはできないため，現時刻までに降った雨において，実測降雨に比べて予測降雨が過小評価されていればその誤差だけ多く放流し，予測降雨が過大評価されていれば，その誤差だけ少なく放流する．また，累積降雨量は，(9)式によって毎時間計算しなおされるため，求める現時刻の累積降雨量が1時間前の累積降雨量より小さくなる，つまり$r(t')$がマイナスの値になるという計算上の問題が発生することがある．これは現時刻に予報された予測降雨量より1時間前に予報された予測降雨量のほうが大きいからであり，この場合，1時間前の事前放流において過大放流してしまったことになるため，現時刻において事前放流を行わないことにする．

図-5に予測降雨と実測降雨が合わない場合について，予測降雨よりも実測降雨が早く到来する場合(CASE1)，予測降雨よりも実測降雨が遅れて到来する場合(CASE2)に分けて，予測降雨を総降雨量方式に用いるための累積降雨量の算出手法を示す．

5．実際の洪水調節における本手法の適応

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

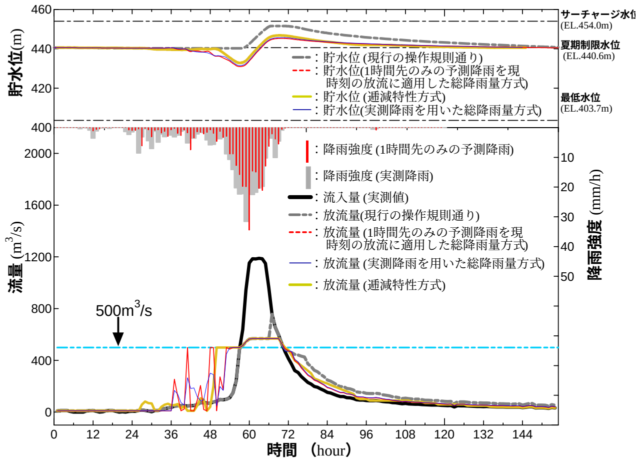


図-6　1時間先までの降雨予測を用いた草木ダム流域における洪水時の流入・放流量及び貯水位の時系列

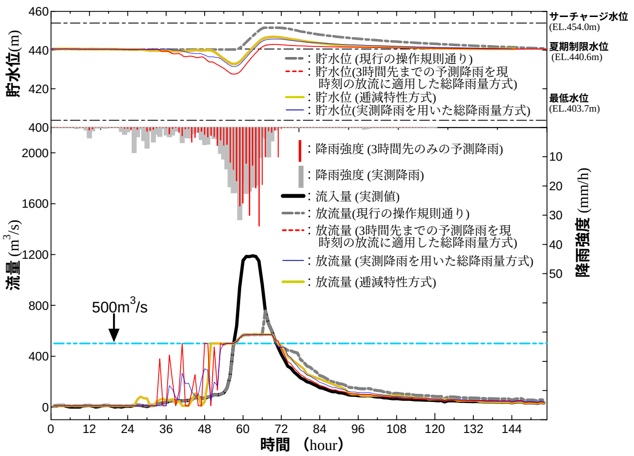


図-7　3時間先までの降雨予測を用いた草木ダム流域における洪水時の流入・放流量及び貯水位の時系列

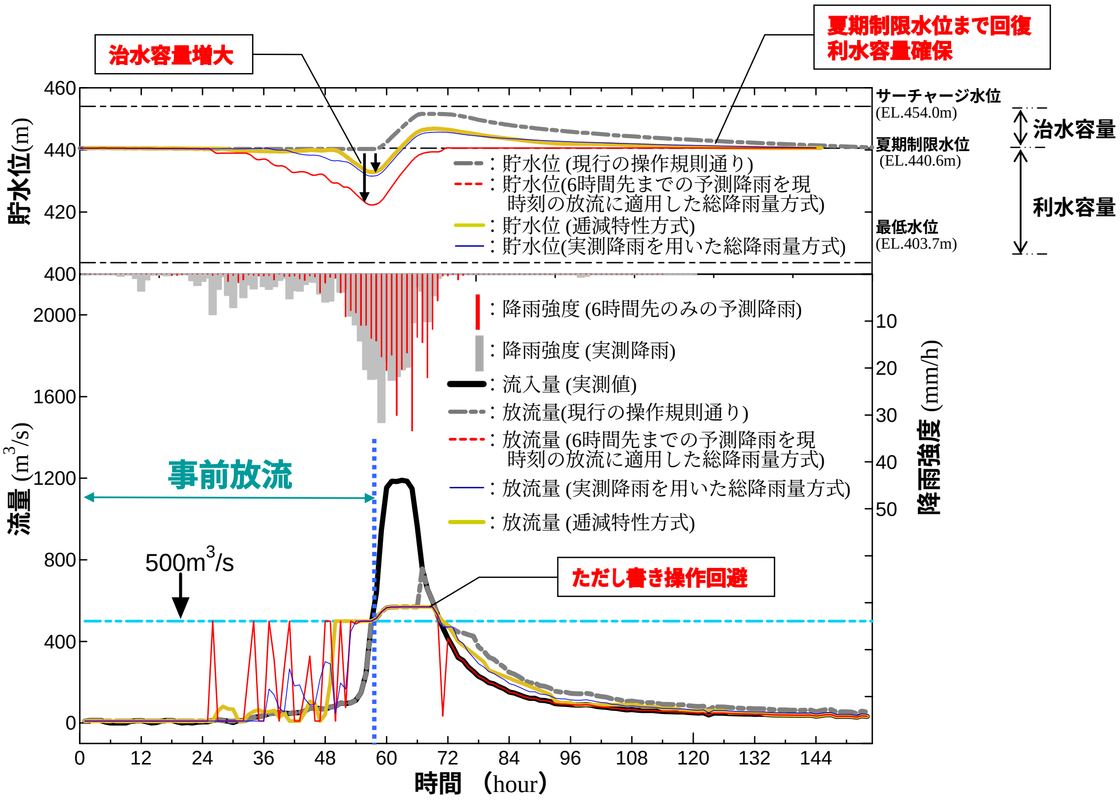


図-8　6時間先までの降雨予測を用いた草木ダム流域における洪水時の流入・放流量及び貯水位の時系列

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500m^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R_{SA}は平均して46mmである．

図-6,7,8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[4)]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-3，4**)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-6,7,8**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．初期水位が夏季制限水位より低い場合は，夏季制限水位に回復するまでの貯水容量分を差し引いて事前放流を行う，夏季制限水位まで回復させた後に事前放流を行うといった方法がある．

図-8のt=72時間のところにおいて，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．

地形特性の強い地域や降雨形態によっては予測降雨が空振りにあう可能性もあるので，こういった場合は**図-3，4**において利水に有利なラインを用いて事前放流を行う，実測降雨を用いた総降雨量方式，もしくは逓減特性方式を用いた事前放流を行うといった対策が挙げられる．

６．結論

著者らが提案する事前放流手法は，ピーク時の流入量とその後に貯水池へ入ってくる総流入量の関係を用いた逓減特性方式，予測降雨・実測降雨に基づいた総降雨量方式，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．よって提案する事前放流手法はいかなるダム流域においてもその流出特性を明らかにすることで適用することができる，最も単純且つ合理的な方法と言える．

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，予測降雨を補正して用いた事前放流が最も効果的であり，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) 気象庁：異常気象レポート 2005 近年における世界の異常気象と気候変動～その実態と見通し～(VII), pp.61-64, 2006.
3) 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，Vol.62, No.1, pp.27-40, 2006.
4) 下坂将史，呉修一，戸谷英雄，山田正：既存ダム群の洪水調節機能向上のための新しい放流方法の提案，土木学会水工学論文集，Vol.52, pp.511-516, 2008.
5) 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，Vol.65, No.2 pp.145-155, 2009.
6) 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，II，17, 2006.
7) 菊地慶，呉修一，戸谷英雄，山田正，吉川秀夫：ダムの治水機能向上を目的とする事前放流手法の提案，第35回関東支部技術研究発表会，II，68, 2008.
8) 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.
9) 呉修一，腰塚雄太，山田正：ハイドログラフの逓減特性を用いた流出特性の抽出，土木学会水工学論文集，Vol.48, pp.13-18, 2004.
10) 呉修一，山田正，吉川秀夫：有効降雨の推定に関する研究．土木学会論文集，Vol.65, No.3, pp.231-245, 2009.
11) 久保田哲也，大槻恭一：インターネット降水短時間予報情報の山地実測雨量との誤差．砂防学会誌，Vol.60, pp.31-38, 2008.

(2009.9.30 受付)