

## 予測流入量情報を用いたダム事前放流操作の 影響分析手法に関する基礎的検討

### A Fundamental Impact Analysis of Prior Release Operation at a Reservoir Considering Inflow Prediction

天井洋平<sup>(1)</sup>・野原大督・堀智晴・角哲也

Yohei AMAI<sup>(1)</sup>, Daisuke NOHARA, Tomoharu HORI and Tetsuya SUMI

(1) 京都大学大学院工学研究科

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University

#### Synopsis

A method for impact analysis of a reservoir's prior release operations precedential to floods is developed as a fundamental study in this paper. A Monte Carlo simulation model of a reservoir's prior release operation coupled with artificial generation model of inflow predictions is proposed here. The inflow predictions can be generated with random errors based on given accuracies of the prediction so as to take impacts of inflow prediction's accuracy on the effectiveness of prior release operations into consideration. Impacts of prior release operations on flood mitigation and water storage for water utilization are then analyzed and discussed by use of proposed simulation model for the assumed reservoir operations which are derived from an existing multi-purpose reservoir.

**キーワード:** 事前放流操作, モンテカルロシミュレーション, 予測流入量の模擬発生  
**Keywords:** prior release operation, Monte Carlo simulation, simulated generation of inflow prediction

#### 1. はじめに

流域における洪水による被害を防止・軽減するための重要な施設の一つに多目的ダムがある。多目的ダムは通常、治水や利水、発電といった複数の管理目的を持つ。そのため、各目的のために利用することのできるダム容量は、予備放流方式を採用しているダムを除き、それぞれの目的を達成するよう予め定められ、治水操作も時季ごとに定められた治水容量を利用して行われることが多い。しかし、計画規模を超えるような出水や、河川整備途上のため下流河川における治水安全性が十分でない場合においては、ダム下流の河川流量を低下させるためにダムに

より多くの流出水を貯留するなどの柔軟な操作を行うことができれば、河川流域全体の治水安全性を高めることができると考えられる。

こうした中、ダムの治水機能を向上させるための手段として、近年、多目的ダムの事前放流操作に対する関心が高まっている。事前放流操作は出水が見込まれる場合に、事前に放流を行ってダム貯水位を制限水位よりも低下させ、より大きな空き容量をもって洪水調節を行おうとする操作であり、平時におけるダムの利水機能を損ねることなく、洪水時において洪水調節に利用できる容量を一時的に増大させることができる操作として期待されている。しかし、参照する予測情報の精度が悪い場合には、予測を信

頼して事前放流操作を行ったものの予測されたほど出水が大きくなり、出水後に貯水量が十分に回復しないといった利水面への悪影響が生じる可能性も考えられる。したがって、事前放流操作の効果を考える際には、利用する予測情報の精度が操作に与える影響についても合わせて検討する必要がある。

ダム貯水池の事前放流操作の検討は、近年盛んになってきている。下坂ら（2009）は、出水直前および出水時における時々刻々の累積降雨量や流入量からその時点以降に最低限流入すると考えられる総量を推定し、その量を事前に放流する方法を提案している。一方、予測情報に基づいた事前放流操作の検討については、例えば三石ら（2011）は、米国のNCAR/NCEP（The National Center for Atmospheric Research/National Centers for Environmental Prediction）により現業用、研究用に開発されたメソスケール気象モデルWRF（Weather Research and Forecasting Model）による降雨予測を用いたダム事前放流操作の有効性を検証し、事前放流操作によって洪水調節効果の向上が期待できる一方、予測の誤差に起因する治水・利水上のリスクが存在することを示している。白谷・中津川（2010）は、積算予測雨量に基づいた融雪期におけるダムの事前放流操作の検討を行っている。また、北田ら（2010）は、下坂ら（2009）の提案する事前放流を用いた洪水調節方式に加えて降雨予測情報を合わせて考慮する方法を提案している。しかし、これらの研究では、予測情報を考慮する際に、ある程度の予測誤差を見込んで安全側の操作を行う、より予測精度が高いと考えられる積算雨量の予測情報を利用する、あるいは実績降雨と予測降雨との差から予測値を補正する等、予測情報に含まれる不確実性に対応するための工夫が施されているものの、操作の効果の分析にあたっては、ある降雨予測モデルによって実際に提供された予測系列を考慮した場合の操作結果についてのみ検討が行われている。現業の予測情報の精度は向上し常に変化していることを考えると、予測情報の精度と事前放流操作の効果との関係を網羅的に分析し、事前放流操作導入の判断に資するような方法論を確立することは重要であると考えられる。

このような観点から、著者らはダム流入量予測情報の精度と事前放流操作の効果を分析するシミュレーションモデルの開発に取り組んでいる。すなわち、任意の予測精度を有した予測流入量系列を多数模擬発生させた上で、それぞれの予測流入量系列を考慮した事前放流操作に関するモンテカルロシミュレーションを実施し、それらの結果を総合的に分析することのできるモデルである。本稿では、構築したモデルを用いて、予測流入量情報を用いた事前放流操

作による治水・利水面への効果やリスクについて基礎的な分析を行った結果を示す。

## 2. ダム事前放流操作シミュレーションモデル

### 2.1 シミュレーションの概要

本研究では、定められた精度となるように予測流入量系列をランダムに模擬発生させる機構を構築するとともに模擬発生させた予測流入量系列に基づいたダム事前放流操作のシミュレーションモデルを構築し、分析を行う。水文予測情報を用いたダム操作に関する研究では、水文予測情報として降水予測情報を考えている事例が多い（三石ら，2011；白谷・中津川，2010；竹内，1990）が、ここでは予測降水量から予測流入量へ変換する際の不確実性の影響を取り除いて分析を容易にする目的から、予測水文量として予測流入量を考えることとした。

シミュレーションを用いた分析の流れは次の通りである。まず、対象とするダム貯水池における流入量の観測値に、2.2に述べる方法によって、ある予測精度パラメータの下で発生させた誤差を加えることによって、定められたリードタイム $L$ までの任意の精度の予測流入量情報を予め模擬発生させる。次に模擬発生させた予測流入量情報に基づいてダム貯水池の事前放流操作実施の判断を行い、実施する基準を満たせば事前放流操作を、そうでなければ利水操作を実施する。ただし、流入量の観測値から洪水調節に移行する必要がある場合は、所定の洪水調節操作を行う。以上の手順を一つの出水事例に対する分析対象期間 $T$ にわたって繰り返すことで、一回の操作シミュレーションが完了する。この操作シミュレーションを、予測流入量情報の模擬発生を行いながら多数回繰り返して行い、得られた結果を総合的に評価することで、ある予測精度を有する予測流入量情報を用いた場合のダム事前放流操作の分析を行うことができる。さらに、予測精度パラメータの値を変化させながら同様のシミュレーションおよび分析を行うことによって、様々な予測精度の下での予測情報を用いた事前放流操作の効果を分析することができる。以上の分析のフローをFig. 1に示す。

### 2.2 予測流入量情報の模擬発生機構

竹内（1990）は、予測情報の精度の表現方法として二つの方法を挙げている。一つは、予測値と実現値の差の程度によって予測精度を表す方法である（Datta and Burges, 1984；Lettenmaier, 1984；Sivaarthritis and Takeuchi, 1995）。この方法では、予測のリードタイムが長くなると予測精度が低下するといった関係を容易に表現できる一方、新たな予測

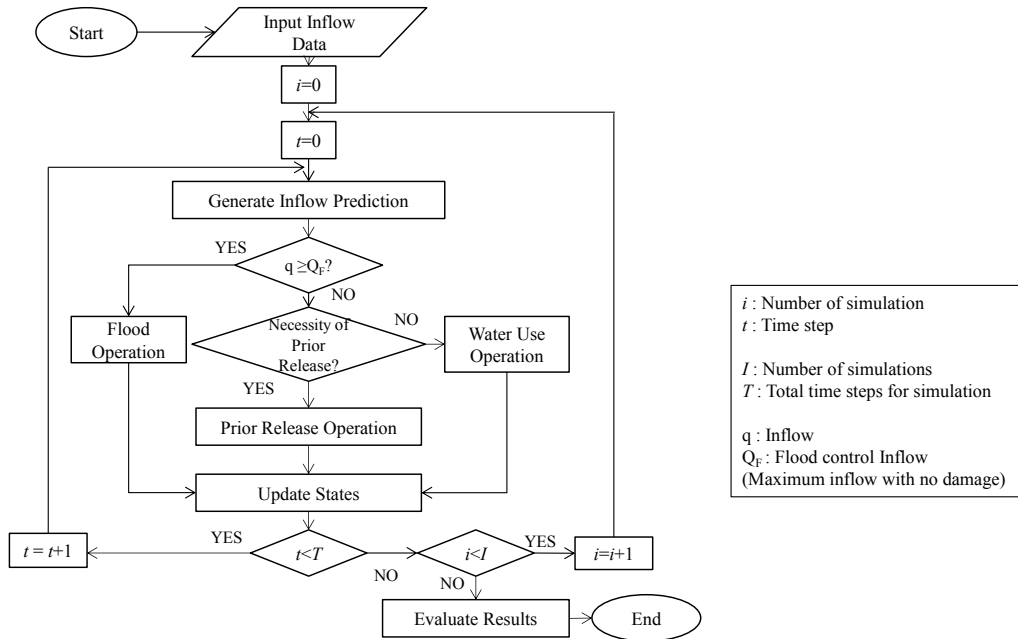


Fig. 1 Schematic flow of impact analysis using the proposed simulation model

実施時点における予測値の更新のメカニズムを構成しにくいという特徴がある。もう一つは予測値が次の予測更新時点で前回の予測値からどの程度変化するかで表す方法である。この方法は予測の安定性等の予測値更新のメカニズムを表現しやすい一方で、予測リードタイムと予測情報の精度との関係を表すのは難しい。事前放流操作においては、予測リードタイムと予測情報の精度との関係が操作の効果を分析する上で重要であると考えられるので、以上で述べた予測精度を表す二つの方法のうち、本研究では前者の精度の表現方法を採用する。

具体的には、流入量の観測値に、平均を0とした正規分布に従う変数を模擬発生させた上で予測誤差として加えることによって、予測実施時刻 $t$  ( $t=0\sim T$ )における $l$ 時間先 ( $l=1\sim L$ )の予測流入量(時間単位)を1時間ごとに模擬発生させる。ここでは参照する予測情報のバイアスは既知であると仮定し、バイアスを補正した上で当該予測情報を参照するものと考え、予測誤差の模擬発生の際に用いる確率分布の平均を0としている。予測誤差はリードタイム方向に1次の自己相関を考え、各予測時点における予測誤差系列の模擬発生モデルとしてAR(1)モデルを採用した(星, 1997)。定式化すると以下ようになる。

$$e(t, l) = e(t, l-1) \cdot \rho_L(l) + r(t, l) \sqrt{1 - \{\rho_L(l)\}^2} \quad (l \geq 2, t \geq 0) \quad (1)$$

ここに、 $e(t, l)$ は時刻 $t$ における $l$ 時間先の予測値の実測値からの誤差、 $\rho_L(l)$ は予測リードタイム方向

の予測誤差の1次の自己相関係数、 $r(t, l)$ はランダムに発生させた誤差成分である。 $r(t, l)$ が従う確率分布は平均を0、標準偏差を、時刻 $t+l$ の観測値 $I_o(t+l)$ と誤差の広がり表現する係数 $c_e(l)$ の積である $c_e(l) \cdot I_o(t+l)$ とする正規確率分布 $N(0, \{(c_e(l) \cdot I_o(t+l)\}^2)$ とし、分散が流入量の真値に対して一定比となるように与えている。また、 $e(t, l)$ は(1)式によって各時刻、リードタイムについて決定論的に1つの値が算出される。予測精度のパラメータの係数である $c_e(l)$ については、まずは基礎的な検討を行うため、予測の誤差がリードタイムに対して線形に増加すると仮定し、以下のように設定した。

$$c_e(l) = \alpha l \quad (l \geq 1) \quad (2)$$

以上のように誤差を表現することにより、 $\alpha$ を変化させることで模擬発生させる予測情報の精度、すなわち予測誤差の大きさを任意に変化させることができる。各予測実施時点における予測誤差の初期値 $e(t, 1)$ は、正規確率分布 $N(0, \{(c_e(1) \cdot I_o(t+1)\}^2)$ からのランダムサンプリングによって値を決定する。時刻 $t$ における、 $l$ 時間先の流入量予測値 $I_p(t, l)$ は以下ようになる。

$$I_p(t, l) = I_o(t+l) + e(t, l) \quad (3)$$

一方、予測の更新時にも、前回出された予測の誤差と新たに出される予測の誤差との間の相関関係を考

えることができるが、本研究では分析を容易にするため、予測実施時刻方向に予測誤差間の相関は無いと仮定する。

## 2.3 予測流入量情報を用いたダム事前放流操作モデル

事前放流操作では、実施の判断に出水の予想状況を考慮することが多い。この点を踏まえて、本研究では、流入量予測のリードタイム内において、当該ダムの操作規則等により洪水調節を開始する必要があると定められている流入量（以後、洪水流量と呼ぶ）以上の流入が予測された場合に事前放流操作の実施が決定されるものとする。ただし、事前放流を実施するにあたって、下流河川における安全確認や周知、関係機関への通知等の作業に3時間程度を要すると仮定し、事前放流操作の実施が決定されてから3時間後に事前放流操作を開始する。

事前放流の際には、定められた放流増分限界を遵守しながら、洪水流量を放流量の上限として洪水調節の開始時刻までに速やかに所定の水位（以後、事前低下水位と呼ぶ）まで低下させるものとする。事前放流による水位低下完了後は、洪水調節が開始されるまで低下させた水位を維持する。一方、洪水調節操作が完了した場合、または事前放流操作の一時中断が行われている時に出水が洪水流量を超えずにピークを迎え、かつピーク流量以上の流入がリードタイム内において予測されなかった場合、低水操作へと移行するものとする。

## 2.4 操作結果の評価方法

一般に、事前放流操作は治水面、利水面両方に影響を及ぼすことから、事前放流操作の評価にあたっては、この二つの視点から検討する必要がある。本研究では、まずは基礎的な検討として、ダム貯水池の水位（貯水容量）という物理量のみに着目し、次のように評価する。すなわち、治水面については、事前放流操作が洪水調節の開始時までに完了するかどうかを評価する。これは、本来事前放流操作の実施が必要であったにも関わらず、予測が過小であったために、事前放流操作が実施されない、または実施判断が遅れ、所定の事前低下水位を確保できなかったという、事前放流操作実施の必要性の見逃しがどの程度あるかを検証するためである。一方、利水面については、洪水調節実施後に利水容量が回復しているかどうかを評価する。これは、本来事前放流の必要のない規模の出水に対して、過大な予測を信頼して事前放流操作を実施してしまい、その結果、出水後に定められた利水容量を回復できないケース（事前放流操作実施の空振り）がどの程度あるかを

検証するためである。

## 3. 適用と分析

### 3.1 対象流域の概要とシミュレーション条件

名取川水系の碓石川に位置する釜房ダムを対象に適用を行った。釜房ダムの洪水調節操作では、一定率一定量操作が採用されており、 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ （洪水流量）以上の流入があった場合には流入量がピークに達するまで一定率の洪水調節、流入量がピークに達してからは一定量の放流を行い、最大放流量は $850 \text{ m}^3/\text{s}$ と定められている。一定率放流における放流量は、次式によって算定される。

$$q_{out} = (q_{in} - 300) \times 0.407 + 300 \quad (4)$$

ここに、 $q_{out}$ ：放流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )、 $q_{in}$ ：流入量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )である。また、洪水期間が設定されており（7月1日～9月30日）、この洪水期間における洪水調節容量は $21,000,000 \text{ m}^3$ 、それ以外の非洪水期間では予備放流によって確保した空き容量によって洪水調節を行うことと定められている。

釜房ダム下流の名取川では、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により堤防の損壊等が生じ、一時的に治水機能が低下した状況が生じた。この低下した治水機能を補うために、釜房ダムにおいて必要に応じて事前放流操作を実施することが定められた。この事前放流操作を含む洪水調節操作では、出水が予想される場合に洪水流量である $300 \text{ m}^3/\text{s}$ を限度に事前放流を行い、洪水調節の開始時点よりも前に、制限水位以下1m分（約 $2,400,000 \text{ m}^3$ に相当）の空き容量をさらに確保すると共に、従来と比べてより大きく確保した空き容量を使って流入水を貯留することで、ダム貯水位が但し書き操作開始水位を超えないと判断される限りにおいて、最大放流量を $600 \text{ m}^3/\text{s}$ に抑えることができるとされている。

事前放流の具体的な実施条件については、24時間前において流域内の累加雨量が $50 \text{ mm}$ 以上の降雨で洪水が予想された場合または累加雨量が $80 \text{ mm}$ 以上の降雨が予測された場合という条件が考慮されている。本研究では、2.1でも述べたように、予測水文量として（総）雨量ではなく流入量を考えていることから、上記の実施条件に対応する条件として、24時間以内に洪水流量である $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上の流入量が予測された場合に事前放流操作を実施するものと仮定した。ただし、予測情報は時々刻々と更新されるため、更新の前後で事前放流実施の判断基準となる事象である、 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上の流入が予測されているかど

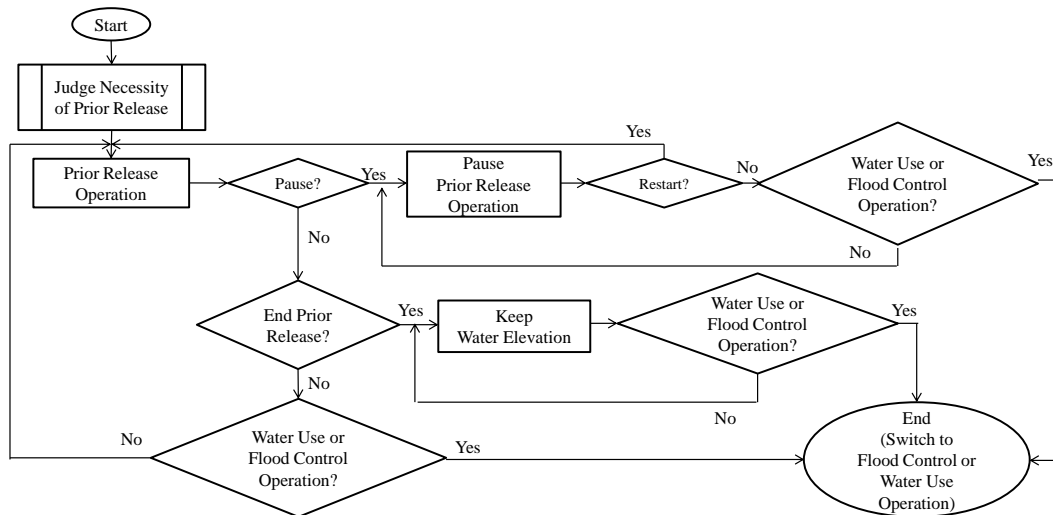


Fig. 2 Schematic flow of the operation rule for prior release operation

うかが、予測実施時刻によって変わる可能性がある。こうした予測の更新に対して一貫性のある操作判断が必要となるが、ここでは、事前放流操作実施判断への予測情報の反映方法として、I) 予測情報を全面的に信頼し、 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上の流入が予測されればただちに事前放流操作に移行する、II) 予測情報の更新状況を見極めるため、 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上の流入が3時刻続けて予測された場合に事前放流操作に移行する、の2種類を考えた。また、事前放流操作開始後の取り扱いについても、i) 事前放流操作を中断なく完了させる、ii) 予測情報の更新により $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上の流入が予測されなくなった場合には水位低下操作を中断し、現水位を維持した上で、再び $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上の流入が予測された場合には水位低下操作を再開する、の2種類を考えた。ここで、事前放流操作の中断や再開を何度も繰り返すことは現実の操作では考えにくいいため、事前放流操作の中断の条件を3時刻続けて $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上の流入が予測されなくなった場合、再開の条件を3時刻続けて $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上の流入が予測された場合としている。Fig. 2に事前放流操作のフローを示す。

予測リードタイム方向の予測誤差の1次の自己相関係数 $\rho_L(1)$ は、本研究においては基礎的な検討として、0.9と仮定した。予測の精度のパラメータ $C_e(l)$ の係数 $\alpha$ は、0.01, 0.015, 0.02, 0.025, 0.03の5通りを考え、予測精度の変化に伴う事前放流操作の効果の違いを分析した。シミュレーションに用いる出水事例については、2002年から2011年の間に洪水流量以上の流入量を観測した6事例と、ピーク流量が $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上かつ洪水流量未満であった比較的規模の小さな出水5事例の計11事例の流入量系列の観測データを用いた。ただし、事例間の操作シミュレーション結果の比較を可能とするために、これらの出水を全て洪水期間である7月～9月に生じたものと仮定し、

初期貯水量を洪水期間における制限水位の下での貯水量に相当する $18,300,000 \text{ m}^3$ とした上で、各事例について1000回の操作シミュレーションを実施した。シミュレーション開始時点は、事前放流操作の実施判断に向こう24時間以内の予測情報を用いることを考慮し、それに更に24時間の余裕をもたせた出水の48時間前とした。シミュレーション終了時点については、ここでは流入量が概ね落ち着くと考えられる、出水後48時間とする。

### 3.2 予測流入量情報の模擬発生状況の検証

予測流入量情報の模擬発生についての検証結果を示す。ここでは一例として、2005年8月26日の出水事例（ピーク流入量 $580 \text{ m}^3/\text{s}$ ）に対する予測流入量情報の模擬発生結果を取り上げる。模擬発生結果の検証にあたっては、ME（Mean Error）によって誤差の正負の偏りの程度を、MAE（Mean Absolute Error）によって誤差の大きさを確認する。実測流入量のピーク時刻の24時間前（ $t = T_1$ ）および12時間前（ $t = T_2$ ）における流入量予測のリードタイムごとのME, MAEをFig. 3, Fig. 4に示す。ただし、時刻 $t$ における $l$ 時間先の流入量予測のMEである $ME(t, l)$ 、時刻 $t$ における $l$ 時間先の流入量予測のMAEである $MAE(t, l)$ はそれぞれ以下の式によって算出している。

$$ME(t, l) = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I e(i, t, l) \quad (5)$$

$$MAE(t, l) = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I |e(i, t, l)| \quad (6)$$

ここに、 $e(i, t, l)$ はシミュレーション $i$ における、時刻 $t$ に実施した $l$ 時間先の予測値の予測誤差、 $I$ はシミュレーション総数（=1000）である。

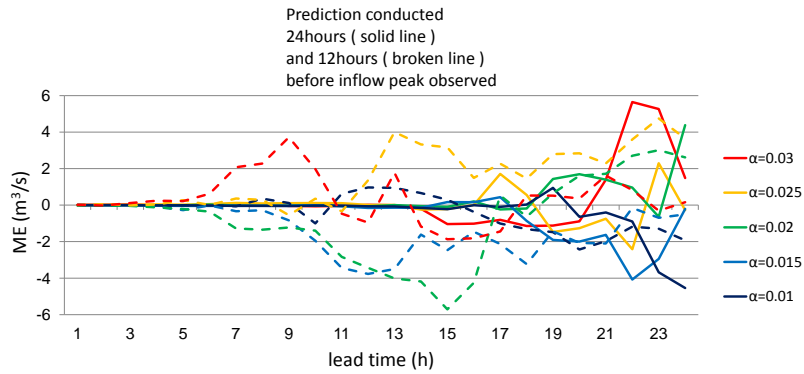


Fig. 3 ME of generated inflow prediction

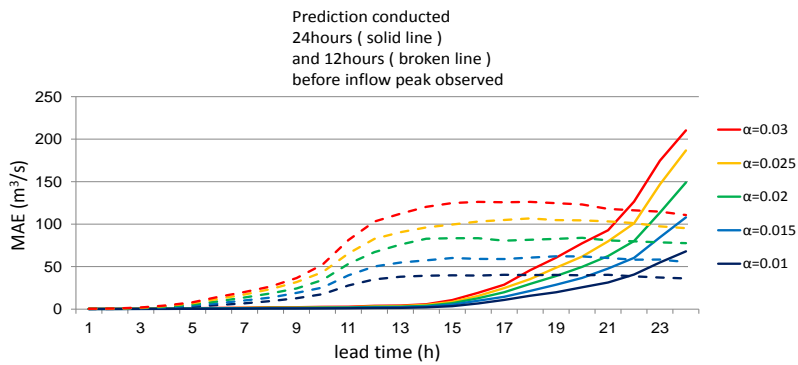


Fig. 4 MAE of generated inflow prediction

MEに関して、流入量実測値が大きい部分ではばらつきが見られるが、これは乱数発生が完全ではなく、設定した確率分布から多少歪んだ形となっていることが原因であると考えられる。しかし、この乱数が原因の誤差は予測対象時刻の流入量実測値が大きい部分で実測値の約1%程度であり、分析上大きな影響を与えないと考え、意図どおりに誤差を模擬発生できていると判断した。

MAEに関して、 $\alpha$ が大きいほどMAEの値も大きくなっていること、ピーク流量までのリードタイムが長い24時間前における予測のほうが、12時間前における予測と比較してMAEが大きいことが分かる。このことから、異なる予測誤差を模擬発生できるように予測精度のパラメータの定義ができていて、また、リードタイムが大きくなるに従って予測誤差が大きくなる性質を組み込むことができていて確認できる。

### 3.3 予測流入量情報を用いた事前放流操作の分析

構築したモデルによる事前放流操作のシミュレーション分析の結果を述べる。ここでは、誤って事前放流を行ってしまった場合に出水後の水位の回復がより難しいと考えられる洪水流量以下の出水事例を用いたシミュレーション結果によって事前放流操作

の利水面への影響を評価するとともに、事前放流が必要な洪水流量以上の出水事例を用いたシミュレーション結果によって事前放流操作の治水面での評価を行う。事前放流操作の操作方法については、3.1で述べた操作方法のうち、1) 洪水流量以上の予測が出された時点で実施、中断なし、2) 洪水流量以上の予測が3時刻続けて出された時点で実施、中断なし、3) 洪水流量以上の予測が出された時点で実施、事前放流操作の中断あり、の3種類を検討した。

事前放流操作実施後に利水容量が回復されるかに関しては、全出水事例に関するシミュレーションにおいて利水容量が回復される結果となった。これは、今回釜房ダムにおいて事前放流操作によって空けるよう定められた容量が比較的小さいことが原因と考えられる。そのため、ピーク流量が100~300m<sup>3</sup>/sの中小規模の出水時に事前放流が行われた場合においても、その後の流入水によって貯水位を十分に回復できたものと考えられる。今回検討を行っていないさらに規模の小さな出水では貯水位が回復しない可能性もあるが、今回実施したうち最もピーク流量が小さい(ピーク流量:120m<sup>3</sup>/s)出水事例を用いたシミュレーションでは、誤って事前放流操作が実施されたケースがほとんどなかったことから、それより規模の小さな出水では、多少の予測誤差があっても事前放流そのものが行われない可能性が極めて高い

Table 1 Number of simulations in which prior release operation was conducted out of those using flood events in which prior release operation is not necessary (5000 simulations)

Operation rule	$\alpha=0.01$	$\alpha=0.015$	$\alpha=0.02$	$\alpha=0.025$	$\alpha=0.03$
1)	0	37	213	548	903
2)	0	0	0	1	9
3)	0	0	0	2	17

Table 2 Number of simulations in which prior release operation was not finished before flood control operation out of those using flood events in which prior release operation is necessary (6000 simulations)

Operation rule	$\alpha=0.01$	$\alpha=0.015$	$\alpha=0.02$	$\alpha=0.025$	$\alpha=0.03$
1)	0	0	0	0	0
2)	0	6	6	3	5
3)	0	0	0	1	0

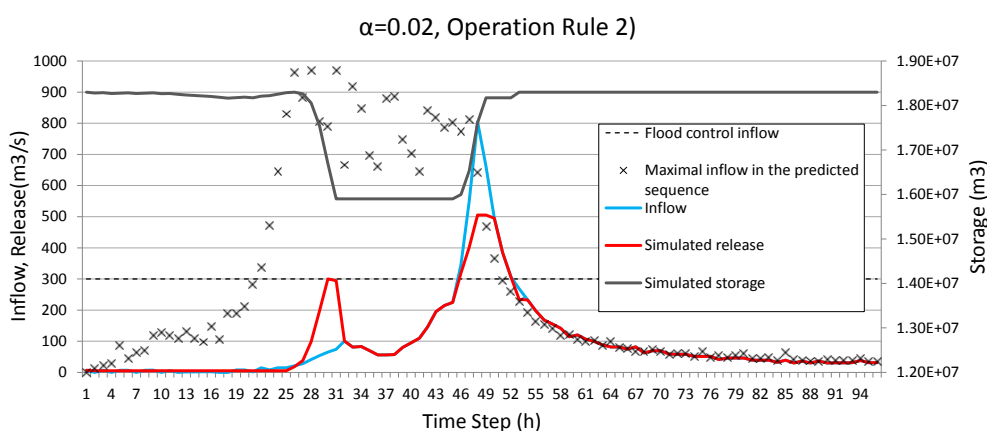


Fig. 5 Time series of reservoir operation in a simulation during the flood event on July 11<sup>th</sup> in 2002

と考えられる。

次に、操作規則上は事前放流が不必要な規模の出水事例(5事例)を用いたシミュレーションにおいて、予測の精度ごとに定められた容量(2,400,000 m<sup>3</sup>)の事前放流を行ったケース数をTable 1に示す。Table 1より、予測精度パラメータ $\alpha$ が大きくなり、つまり誤差が大きくなるにつれ、不要に事前放流を行う危険性が高くなることとわかる。特に、操作1)のように予測を全面的に信頼するような操作を仮定した場合には、予測の精度が悪化することによって事前放流実施判断を誤る可能性が著しく大きくなっている。一方、操作2)や操作3)のように、予測の不安定性に対する対応や段階的な操作方法を採用した場合には、不要な事前放流を行うケースが著しく軽減し、予測精度の悪化にも操作の判断が左右されにくくなっている。

一方、事前放流操作が必要となる洪水流量以上の流入量を観測した6事例の出水事例に対する操作シミュレーションにおいて、事前放流操作が洪水調節開始前に完了しなかったケース数をTable 2に示す。全ての操作方法において、予測の精度に関係なくほとんどのケースで事前放流操作が洪水調節開始前に

完了していることが確認できる。一例として、今回用いた出水事例のうちピーク流入量が最大である2002年7月11日の出水事例(ピーク流入量805 m<sup>3</sup>/s)を用いたシミュレーション結果をFig. 5に示す。今回、事前放流操作の実施判断に予測系列の最大値を考慮することとしているが、模擬発生させた予測値系列の中に過大評価をしているものがある限りは、事前放流が必要となる流入量を見逃すことがないことが原因であると考えられる。一方、予測の不安定性に対する対応や段階的な操作を考慮した操作2)と操作3)では、実施判断や操作の遅れ等から、事前放流を洪水調節開始時まで完了できないケースが非常に若干ながらあった。

以上、釜房ダムの事前放流操作を対象としたシミュレーション結果から、今回の予測情報の事前放流操作への反映方法では、全体的に治水側では安全側に、利水面では危険側に評価されたことが分かる。また、操作方法によっては予測精度の良し悪しが比較的小さな規模の出水における事前放流操作実施の判断に影響を与えることが確認された。本適用では、事前放流で確保する空き容量が比較的小さかったこ

ともあり、出水後に利水容量が回復しないようなケースは無かったものの、確保すべき空き容量が大きくなれば、実施判断の誤りによる利水面への影響が生じることも懸念される。一方、予測の更新を考慮した事前放流実施判断や段階的な操作によって、実施判断の誤りの頻度を軽減できる可能性や予測精度の悪化への対応性等の利水面でのメリットが示唆されたものの、慎重な判断を行うがゆえに事前放流操作を所定の時点までに完了できない可能性がわずかに増大し、治水面でのデメリットが増す危険性を示す結果となった。

また、今回用いた出水事例については出水の規模が小さかったこともあり、実操作において但し書き操作が行われた事例はなく、シミュレーションにおいても但し書きが行われたケースはなかった。事前放流に期待される重要な効果の一つと考えられる但し書き操作の回避・軽減については分析できなかったため、今後、但し書き操作の実施が必要な規模の出水についての分析を行いたい。

#### 4. 結論

本研究では、予測情報を考慮した事前放流操作の効果を分析するために、予測流入量系列の模擬発生機構を含むダム事前放流操作シミュレーションモデルを構築し、名取川水系釜房ダムを対象に予測流入量情報に基づいた事前放流操作の効果を分析した。その結果、操作方法によっては、予測精度の良し悪しが比較的小さな規模の出水における事前放流操作実施の判断に影響を与える可能性があること、予測の更新を考慮した事前放流実施判断や段階的な操作によって実施判断の誤りの頻度の軽減や予測精度の悪化への対応が期待できるものの、事前放流を所定の時点までに完了できない危険性がわずかに増大する可能性があること等が示唆された。ただし、先の章でも述べているように、本シミュレーションでは予測誤差の表現方法や事前放流操作の実施判断に用いる予測情報の水文量、事前放流の実施判断方法等に様々な仮定を置いていることから、ここで得られた結果の一般性を検証するためには、各条件や仮定による分析結果への影響についてさらなる検討が必要であると考えられる。また、ダム貯水池の実管理上では予測情報の精度に関する情報が必ずしも入手できない場合もあるため、本論での基礎的な分析結果を踏まえた上で、今後、予測情報に含まれる系統的な誤差が事前放流操作結果に及ぼす影響を分析すること等も重要であると考えられる。

#### 謝 辞

本研究の実施にあたり、国土交通省東北地方整備局よりダム貯水池および流域に関する資料の提供を頂いた。また、平成23年度京都大学防災研究所特別緊急共同研究（課題「東日本大震災において被災した河川下流域の環境変化に対応するための流域管理手法の検討」）より支援を受けた。関係諸氏に対し、ここに深い謝意を表す。

#### 参考文献

- 白谷友秀，中津川誠（2010）：積算予測雨量に基づいた融雪期におけるダムの洪水調節機能の向上について，土木学会論文集B，Vol.66，No.3，pp.268-279.
- 北田悠星，菊池慶，岡部真人，山田正（2010）：気象庁の降水短時間予報を用いて既存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，Vol.54，pp.523-528.
- 下坂将史，呉修一，山田正，吉川秀夫（2009）：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.
- 竹内邦良（1990）：降雨予測の精度と予備放流方式の効果について，水工学論文集，Vol.34，pp.73-78.
- 星清（1997）：7.4.3時系列データの模擬発生，水文・水資源ハンドブック，株式会社朝倉書店，pp.249-251.
- 三石真也，尾関敏久，角哲也（2011）：WRFによる降雨予測を活用した新たな洪水調節手法の適用性検討，水文・水資源学会誌，Vol.24，No.24，pp.110-120.
- Datta, B. and Burges, S.J. (1984): Short-term, single, multiple-purpose reservoir operation: Importance of loss functions and forecast errors, Water Resources Research, Vol.20, No.9, pp.1167-1176.
- Lattenmaier, D.P. (1984): Synthetic streamflow forecast generation, J. Hydraul. Eng. Am. Soc. Civil. Eng., Vol.110, No.3, pp.277-289.
- Sivaarthikul V, Takeuchi K. (1995): Assessment of efficiency increase of reservoir operation by the use of inflow forecasts: a case study of the Mae Klong River Basin in Thailand, Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources, Vol.8, No.6, pp.590-601.

（論文受理日：2013年6月11日）