

# 積雪地域にあるダムの 放流操作への積算予測雨量の活用について

## IMPROVING THE FLOOD CONTROL OF A DAM IN A SNOWY REGION USING FORECASTED CUMULATIVE RAINFALL

臼谷友秀<sup>1</sup>・中津川誠<sup>2</sup>

Tomohide USUTANI, Makoto NAKATSUGAWA

<sup>1</sup> 正会員 一般財団法人 日本気象協会 北海道支社 (〒064-8555 札幌市中央区北 4 条西 23 丁目)

<sup>2</sup> 正会員 工博 室蘭工業大学准教授 大学院工学研究科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

To improve the flood control of a dam, the use of rainfall forecasts in dam water release operation was examined. First, the advantages and the characteristics of errors of the forecasted cumulative rainfall were elucidated through comparison of the accuracy of such rainfall and the forecasted time series rainfall for the Ishikari River basin. Next, trial operation using the forecasted cumulative rainfall was performed for a snowmelt flood at Hoheikyo Dam in Sapporo. In the operation the necessity of releasing the reservoir water was determined by comparing the inflow calculated based on the forecasted cumulative rainfall and the space available in the reservoir, and advance release of reservoir water and flood control was performed. For the snowmelt flood, the water release operation based on the forecasted cumulative rainfall was found to be effective in improving the flood control of the dam.

**Key Words :** *flood control, forecasted cumulative rainfall, forecast accuracy, Hoheikyo Dam, advanced water release*

### 1. はじめに

積雪地域の多目的ダムでは、洪水調節容量の少ない融雪期に発生する大雨への洪水調節が課題となっている。また、気候変動に伴う局所的な豪雨、融雪期の早まりや夏期以外での大雨が懸念され、治水安全度の低下が予想されている<sup>1)</sup>。その一方で渇水リスクの増大も指摘されており<sup>2)</sup>、治水・利水安全度を両立させ得る方策が必要である。さらに財政や環境保全上の制約から新規施設の整備が難しい状況にあっては、既存ストックの有効活用が不可欠となる。多目的ダムの洪水調節機能の向上は、ダムが抱える課題の解決に加え、気候変動に対する適応策の一端を担うものと考えられる。

ダムの機能向上に関し北田ら<sup>3)</sup>は、6 時間先までの予測雨量をダムの洪水調節に活用する手法を提案し、事前放流が治水容量の確保に効果的であることを示した。また、和田ら<sup>4)</sup>は、時系列予測雨量は予測リードタイムが 2 時間を越えると急激に精度が劣化すること、また、積算予測雨量の精度は予測リードタイムによらず安定していることを指摘している。

河川の治水管理では、時系列の水位を予測する必要がある。一方、ダム管理では、流入量を時系列で予測することともに、今後ダムに流入する総流入量も重要な情報である。一般に、総流入量は総雨量に対応することから、総雨量が得られれば総流入量を見積もることができる。和田らが指摘するように積算予測雨量は長い予測リードタイムの情報が利用できる可能性があり、その活用は融雪期のダム機能の向上に役立つことが期待される。

そこで本研究では、融雪期におけるダムの機能向上策として放流操作に積算予測雨量を活用する方法を次のように検討した。

- 1) 時系列予測雨量との精度比較をとおり、積算予測雨量の優位性を示した。また、積算予測雨量の持つ誤差の特性を明らかにした。
- 2) 24 時間先までの積算予測雨量を基に事前放流と洪水調節を行う方法を提案した。
- 3) この放流方法を規模の異なる融雪洪水 2 例に適用し、ダムの放流操作に対する積算予測雨量の有効性を検討した。

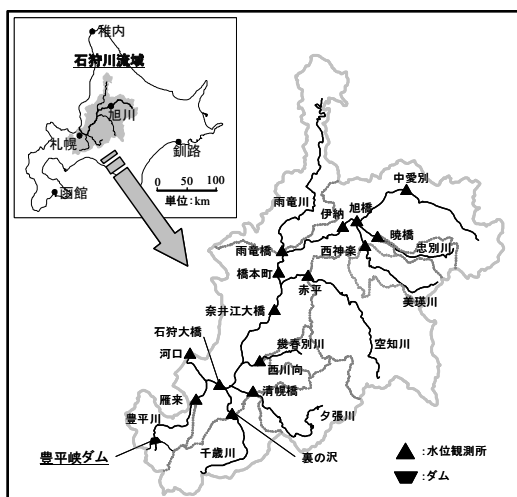


図-1 対象流域 (石狩川流域)

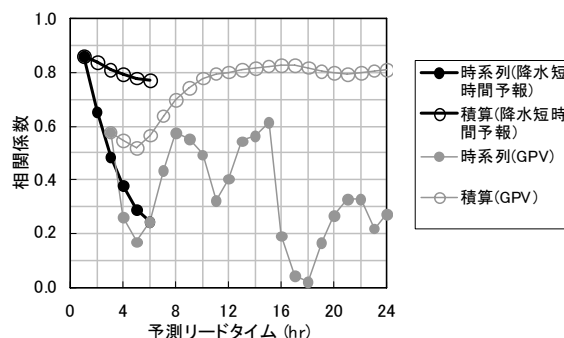


図-2 予測リードタイムと相関係数の関係

## 2. 積算予測雨量の精度

### (1) 対象流域と基礎資料

対象流域は図-1 に示すように、石狩川流域内の水位観測所 (図中、▲印) を最下流点とする 15 の流域とした。

解析には各流域の流域平均雨量を用いた。予測雨量の基礎データは、気象庁の降水短時間予報と GPV (Grid Point Value : RSM の予測値) である。降水短時間予報は 6 時間先までのメッシュ雨量 (約 1 km 四方) が 1 時間毎に更新され、GPV は 51 時間先までのメッシュ雨量 (約 20 km 四方) が 1 日 2 回の間隔で更新される。これらのデータから、流域に該当するメッシュの雨量を取り出し、それらの算術平均を予測雨量として用いた。実績雨量の算出には「解析雨量」<sup>5)</sup> を用い、予測雨量と同様な処理で流域平均雨量を算出した。精度評価は、2004 年～2008 年において、流域内および周辺のアメダスで日雨量が 100 mm を超えた 12 例を対象にした。

### (2) 積算予測雨量と時系列予測雨量の精度比較

以上の流域平均雨量を用い、実績値と予測値の相関係数を指標にして、積算予測雨量と時系列予測雨量の精度を比較した。なお、相関係数は誤差ではないが、予測値と実績値に直線関係があれば予測値の修正が可能と考え、相関係数を評価指標とした。

図-2 は予測リードタイムと相関係数の関係である。図には予測リードタイム別に相関係数をプロットしているが、各点は全ての流域のデータから算出している。図中、黒色は降水短時間予報、灰色は GPV、積算予測雨量の相関係数を白抜ききの○印、時系列予測雨量は塗りつぶしの●印で表している。この図からわかるように、積算予測雨量の相関係数は、時系列予測雨量より大きい。また、GPV の積算予測雨量は、予測リードタイムが 6 時間より長くなると相関係数が大きくなる傾向が見られる。

時系列予測雨量は、各々の時刻における雨量を当てな

ければ誤差が大きくなるのに対し、積算予測雨量は多少の時間的なずれは積算することで相殺され、誤差には反映されにくい。このような効果は積算期間を長くすれば大きくなり、その結果、GPV の相関係数が予測リードタイムとともに増大したものと考えられる。以上のように、精度の安定性といった観点では積算予測雨量は有効な情報といえる。

### (3) 積算予測雨量に対する積算実績雨量の最頻値

図-3 は、3 時間先までの積算予測雨量と積算実績雨量を比較したものである。図には、積算雨量の予測値と実績値の相関図、および、各階級の積算予測雨量に対する積算実績雨量のヒストグラムを示した。相関図に示した破線は  $y = x$  の直線、太い実線は予測値と実績値の回帰直線である。ヒストグラムは、積算予測雨量の階級が 0～10 mm, 10～20 mm, 20～30 mm, 30～40 mm, 40～50 mm の場合について示した。ヒストグラムの縦軸は積算実績雨量である。灰色の棒グラフは頻度、破線は積算予測雨量の階級の上下限、黒色の太い直線は積算予測雨量の階級平均を表している。また、黒色の曲線は、積算実績雨量の分布に次式で表されるガンマ分布を当てはめたものである。

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\beta x} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{\mu^2}{\sigma^2}, \quad \beta = \frac{\mu}{\sigma^2} \quad (2)$$

ここで、 $f(x)$  : ガンマ分布の確率密度関数、 $\alpha$  : 形状母数、 $\beta$  : 尺度母数、 $\mu$  : 平均値、 $\sigma^2$  : 分散、 $\Gamma(\alpha)$  : ガンマ関数。

さらに、図-3 のヒストグラムに記した黒色の○印は最頻値を表す。最頻値は式 (1) の微分  $f'(x) = 0$  を満たす  $x$  で与えられ次式で算出した。

$$x = \frac{\alpha - 1}{\beta} \quad (3)$$

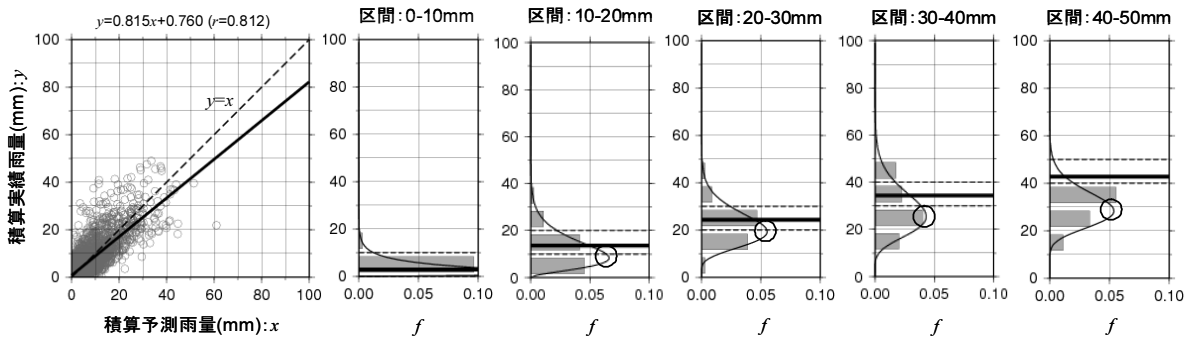


図-3 階級別積算予測雨量に対する積算実績雨量の分布（短時間降水予測，予測リードタイム3時間）．左は積算予測雨量と実績値との相関図，相関図の右側に配置した複数の図は各階級の積算予測雨量に対する積算実績雨量のヒストグラム．ヒストグラムに示した2本の破線は積算予測雨量の階級を表し，その階級における積算予測雨量の平均を黒色の太線で表した．

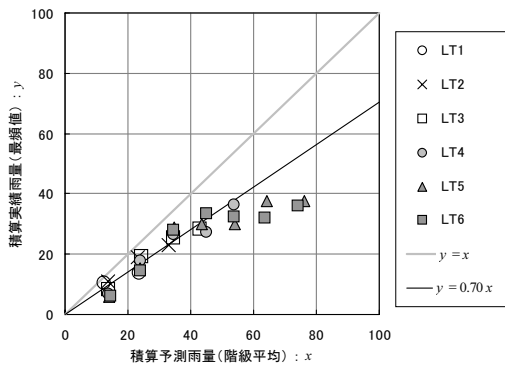


図-4 降水短時間予報の積算予測値と積算実績値の対応．凡例のLTは予測リードタイム．

図-3の相関図によると，相関係数は0.8を超えるものの，広範囲に点がちらばっているように見える．また，ヒストグラムによると，積算実績雨量の最頻値（図中○印）より積算予測雨量の階級平均（ヒストグラムの黒色の太い直線）が大きく，一般的に実績値より予測値が多くなっている．しかしながら，積算予測雨量の階級平均が大きくなるに伴い積算実績雨量の最頻値も大きくなっており，両者が対応していることがわかる．

他の予測リードタイムも含めて，積算予測雨量の階級平均と積算実績雨量の最頻値との関係を示したものが図-4と図-5である．凡例のLTは予測リードタイムを表す記号であり，例えば，LT1は予測リードタイムが1時間であることを意味する．これらの図によると，積算予測雨量の階級平均とともに積算実績雨量が大きくなっている．また，一般的には，降水短時間予報は実績値より大きめ，GPVでは予測雨量が40mm以下の場合には実績値と同程度，40mm以上の場合には少なめの傾向にある．

なお，降水短時間予報において，積算予測雨量が50mmを超えると予測値と実績値が対応していない．これは，6時間で50mmを超える大雨事例が3例しかなかったことが原因と考えられる．このような降雨の予測精度については事例の蓄積と精査が必要である．

図-4と図-5には積算予測雨量と積算実績雨量との回帰直線を黒色の実線で示したが，両者は概ね直線関係にある．平均的には，降水短時間予報の場合は積算予測雨量を0.7倍した値，GPVでは1.23倍した値が積算実績雨

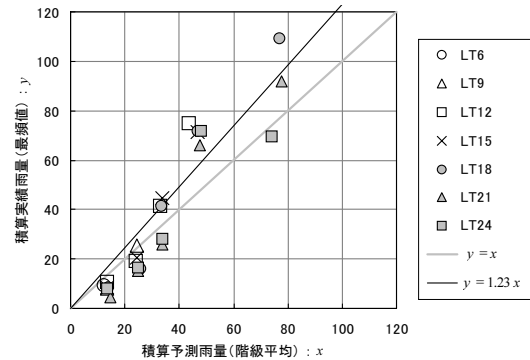


図-5 GPVの積算予測値と積算実績値の対応．凡例のLTは予測リードタイム

量になっている．

#### (4) 積算予測雨量の誤差の幅

次に，積算予測雨量に対して積算実績雨量がどのように分布していたか，すなわち誤差の幅を調べる．ここでは，図-3に示したガンマ分布の曲線式を用い，積算実績雨量の70%が含まれる範囲を定めることで誤差幅を評価した．この誤差幅70%は台風の予報円（台風の中心が予報円に入る確率は70%）を参考にした<sup>6)</sup>．70%の割合で実績値が出現する範囲は，図-6に示すように，式(1)の確率密度関数 $f(x)$ を積分し，次式を満足する上限値 $r_{\min}$ と下限値 $r_{\max}$ とした．

$$\text{下限値：} \int_0^{r_{\min}} f(x) = 0.15 \quad (4)$$

$$\text{上限値：} \int_0^{r_{\max}} f(x) = 0.85 \quad (5)$$

このようにして予測リードタイムが24時間の場合について，70%の確率で実績雨量が出現する範囲を示したものが図-7である．図の横軸は積算予測雨量（階級平均），縦軸は積算実績雨量である．○印は最頻値，○印から上下に描いた実線は積算実績雨量が70%の確率で出現していた範囲である．図によると，予測雨量が30mm程度の場合，実績雨量の70%は20～60mmの範囲にあった．予測雨量が50mmの場合の70%出現範囲は，直線 $y=x$ の上方にあり，過少な予測になっていたことを表している．他の階級の積算予測雨量は70%出現範囲に実績値が収ま

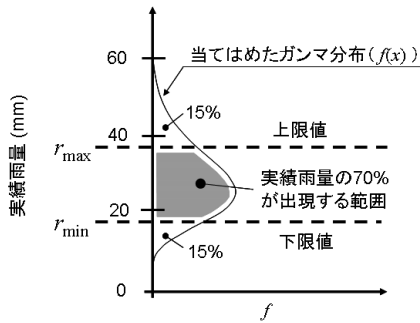


図-6 誤差幅の定義

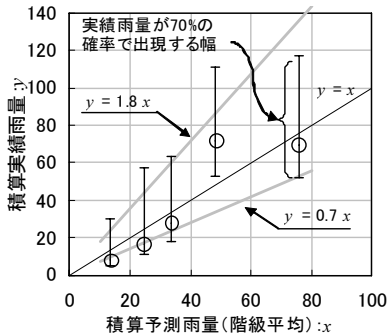


図-7 予測リードタイム24時間の70%出現幅

っている。また、積算予測雨量が多くなるのに伴い70%出現範囲は拡大しており、規模の大きな雨量ほど予測誤差が拡大することを示している。図中、灰色の実線は70%出現範囲の上限値・下限値の回帰式であるが、全般的な傾向としては、積算予測雨量を0.7～1.8倍した値の範囲に、実績雨量の70%が収まっている。

### 3. 積算予測雨量を活用したダムの放流操作

以上の結果、積算予測雨量の精度は、時系列予測雨量より安定していた。また、24時間先までの積算予測雨量を0.7～1.8倍した範囲に実績雨量の70%が収まっていた。これらの結果を踏まえ、積算予測雨量を利用したダムの放流操作を試みた。

#### (1) 対象ダムと放流方式

対象としたのは、札幌市の南部に位置する豊平峡ダム（流域面積：134 km<sup>2</sup>）である（図-1）。このダムは札幌市の水道水の供給と発電を担う多目的ダムであり、1973年に運用が開始され35年が経過する。その間、3度のただし書き操作が実施されている（1988年11月24日、1990年11月20日、2000年5月12日）。図-8に年間をとした貯水位の推移を示すが、ただし書き操作の行われた3事例に共通するのは、利水確保のため貯水位を高く維持されていた時期（非洪水期）に発生していた点にある。

豊平峡ダムの洪水調節は一定率一定量放流方式が採用されている。流入量が60 m<sup>3</sup>/s（洪水量）を超えると洪水調節に入り、60～820 m<sup>3</sup>/sの間は、次式によって放流量が算定される（定率操作）。

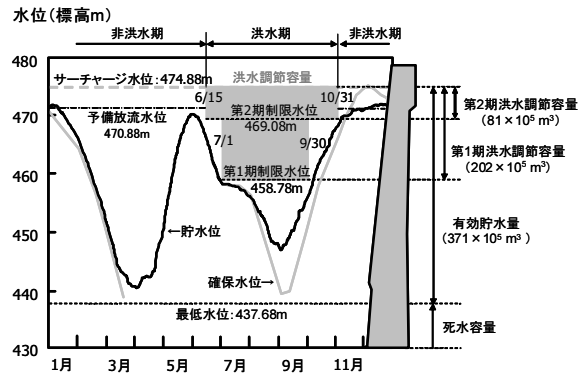


図-8 豊平峡ダムの年間貯水位・容量配分図

$$q_{out} = (q_{in} - 60) \times 0.105 + 60 \quad (6)$$

ここで、 $q_{out}$ ：放流量（m<sup>3</sup>/s）、 $q_{in}$ ：流入量（m<sup>3</sup>/s）。

その後、流入量が820 m<sup>3</sup>/sを超えると、 $q_{out}=140$  m<sup>3</sup>/sの定率操作に移行する。このような洪水調節を行ったとしても、貯水位がただし書き操作水位（472.58 m）を超え、さらにサーチャージ水位（474.88 m）に到達することが予想された時点でただし書き操作に移る。

非洪水期の洪水調節は予備放流水位（470.88 m）以上の容量を使って洪水調節が行われる。貯水位が予備放流水位を超え、洪水量（60 m<sup>3</sup>/s）以上の流入がある場合に上述した放流操作が行われる。このように、非洪水期の洪水調節は洪水期とは異なり、貯水位の高い状況で操作が開始される。

なお本研究では、以上で述べた洪水調節の操作ルールを定式化（プログラム化）し以下の解析に用いた。このプログラムは、操作規則・操作細則・ただし書き操作要領をif-then形式で構成した。放流量の計算時間間隔は、ダム放流の実態に基づき、10分単位とした。

#### (2) 解析事例

ただし書き操作の行われた事例は、いずれも、予測データが残っていない。そこで、予測データが保存されている2004年～2008年の融雪期において最大の融雪洪水である2006年5月28日の事例（ピーク流入量：228 m<sup>3</sup>/s、ピーク比流量：ピーク比流量 1.70 m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>）と、2007年5月26日の事例（ピーク流入量：128 m<sup>3</sup>/s、ピーク比流量：0.96 m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>）を解析に用いた。これら2事例に対して操作規則どおりに放流を行った場合のシミュレーション結果を図-9に示す。この図から出水規模を見ると、2006年の事例はただし書き操作が必要となる規模の大出水、2007年の事例は操作規則どおりの放流で問題なく調節ができる程度の出水であった。なお、2006年5月の洪水では、実際にはただし書き操作水位に到達する前に放流量を増量し、ただし書き操作へは移行していない。

#### (3) 積算予測雨量を用いた放流操作方法

放流開始の判断は、ダムの空き容量と貯水池に流入す

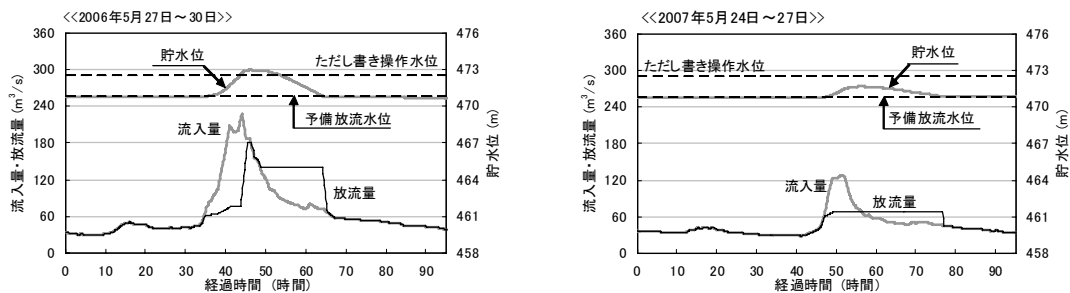


図-9 放流操作のシミュレーション結果. 上段：2006年5月27日～30日，下段：2007年5月24日～27日

る水量を比較することで行う。

空き容量は、予測を行う時点の空き容量と、今後の放流によって生じる容量との合計とした。放流量は予測する時点の放流を継続するものと仮定した。具体的には次式によって空き容量を計算した。

$$V_i = (V_T - V_0) + i \times 3600 \times q_{out} \quad (7)$$

ここで、 $i$ ：予測リードタイム (hr)， $V_i$ ： $i$ 時間後の空き容量 ( $m^3$ )， $V_0$ ：予測時点の貯水量 ( $m^3$ )， $V_T$ ：ただし書き操作水位における貯水量 ( $m^3$ )， $q_{out}$ ：予測時点の放流量 ( $m^3/s$ )。

一方、流入する水量は、積算予測雨量に応じた水量がダム貯水池に流入するものとして次式で算出した。

$$Q_i = fAR_i \times 10^3 \quad (8)$$

ここで、 $Q_i$ ：現時刻から $i$ 時間先までに流入する水量 ( $m^3$ )， $f$ ：流出率， $A$ ：流域面積 (=134  $km^2$ )， $R_i$ ：現時刻から $i$ 時間先までの総雨量 (積算予測雨量) (mm)。

なお、流出率 $f$ は、出水事例の総雨量と流出高との対応から0.82を与えた。また、積算予測雨量 $R_i$ には、前章の結果から、予測雨量を1.8倍した値を用いた(図-7)。また、式(8)の総雨量には融雪量も含める必要があるが、ここでは、観測された気象データから推定<sup>7)</sup>した値を予測値として用いた。

以上で得られる空き容量と総流入量とを比較し、空き容量が不足しないと判断される場合は操作規則どおりの放流を行う。一方、空き容量が不足すると予測された場合(貯水位がただし書き操作水位に達する場合は、下流河川の急激な水位上昇を制限する条件(放流の原則)を満たしつつ、以下のルールで放流を行った。

- 1) 流入量が60  $m^3/s$  (洪水量) 以下の場合は無害流量(60  $m^3/s$ )の放流を開始する。このとき、貯水位が予備放流水位以下になることを許す。すなわち、この放流が事前放流にあたる。
- 2) その後、流入量が60  $m^3/s$ を超え、それでもなお積算予測雨量から放流が必要と判断される場合には、流入量の変化量に応じて放流量を増加させた。ここでは、操作規則で放流できる最大量(計画最大放流量：140  $m^3/s$ )を上限に、放流量の増加速度が流入量のそれより小さくなるように、次式で放流量を決

めた。

$$q_{out}(t) = \alpha \{q_{in}(t) - q_{in}(t-1)\} + q_{out}(t-1) \quad (9)$$

ここで、 $q_{out}(t)$ 、 $q_{out}(t-1)$ ：現時刻( $t$ )および1時刻前( $t-1$ )の放流量、 $q_{in}(t)$ 、 $q_{in}(t-1)$ ：現時刻( $t$ )および1時刻前( $t-1$ )の流入量。 $\alpha$ は、流入量の増加に対し放流量を増加させる割合ある。ここでは、過去事例の放流シミュレーションによってただし書き操作が避けられた $\alpha=0.4$ を用いた。

以上の操作は操作規則とは異なり、予備放流水位より低い貯水位から流入量に見合う洪水調節を始めることになる。すなわち、利水容量を利用して想定される洪水調節を前倒して行うもので「事前放流」と呼ばれる。

#### (4) 放流シミュレーションの結果

以上の操作方法を2006年および2007年の融雪洪水に適用した。その結果が図-10である。なお、計算開始時点の貯水位には実績値を与えている。図中、黒色の太い実線は積算予測雨量に基づいて放流を行った結果、黒色の細い実線は操作規則どおりに放流した結果である。灰色の棒グラフは、積算予測雨量から判断された放流量を表している。

図によると、2006年の出水では、洪水量(60  $m^3/s$ )に到達する時刻の約5時間前に事前放流が開始され、この操作によって洪水調節に入る前の貯水位がやや低下している。洪水量に達した後も空き容量の不足が予想されたことから、前節で述べた放流ルール2)にしたがって放流量を増加させている。その後、流入量がピークを過ぎた頃から、空き容量が不足しない予想へと変わり、規則どおりの操作(一定量の放流)へと移行している。以上のように、事前放流と流入変化量の4割分だけ放流量を増大させる操作によって、ただし書き操作が回避されている。

2007年の事例では、出水の始まる約20時間前から事前放流が行われ、洪水量に達する時点の貯水位は予備放流水位よりかなり低くなっている。しかしながら、洪水が終わる時点(流入量が洪水量を下回る時点)においては、利水容量を満たす貯水位(通常、予備放流水位とそこから0.5 m低い水位の間で管理される)まで回復している。

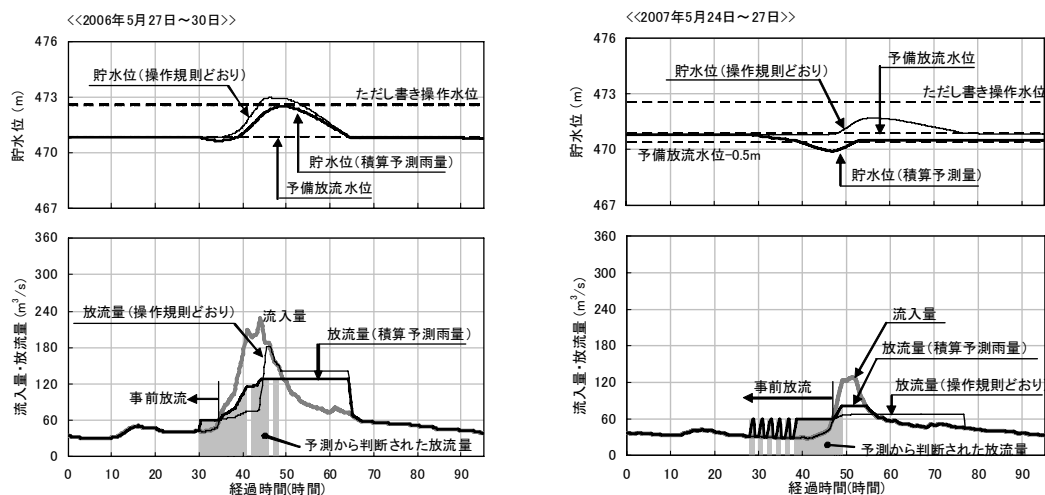


図-10 積算予測雨量を活用した操作結果. 左：2006年5月27日～30日，右：2007年5月24日～27日.

融雪期は、融雪水が日々流域に供給されるため平常時の流量は無害流量（60 m<sup>3</sup>/s）に近い。このため、融雪期の洪水調節においては、事前放流の効果は夏期より小さい反面、積極的に放流を行ったとしてもそれを補う水量が期待できる。以上のシミュレーションでは、予測雨量を1.8倍した値に基づいており、治水を重視した操作といえる。2006年の例は治水を優先させることの効果、2007年は治水を優先させたことによる利水への影響を示しており、融雪期では、治水を優先した洪水調節が可能であることを示唆したものと考えられる。しかしながら、洪水後に期待できる水量は積雪などの流域が貯留する水量とともに変化する。したがって、融雪終期においては、治水を優先する放流ができるか否かの判断が必要になる。この点は今後の検討課題である。

#### 4. まとめ

本研究では、ダムの洪水調節機能の向上を目的に、積算予測雨量を用いたダムの放流操作を試みた。結果は以下のとおりである。

- 1) 相関係数に着目し、積算予測雨量と時系列予測雨量の精度を比較した。積算予測雨量の相関係数は予測リードタイムが長くなっても安定していた。
- 2) 積算予測雨量を階級別に分類し、各階級の実績雨量のヒストグラムにガンマ分布を当てはめ、実績雨量の最頻値と積算予測雨量の階級平均値との比較、また、積算予測雨量の誤差幅を評価した。その結果、積算実績雨量の70%は、積算予測雨量の0.7～1.8倍の範囲にあった。
- 3) 積算予測雨量を活用したダムの放流操作を試みた。ここでは、積算実績雨量の70%出現範囲の上限値（予測雨量の1.8倍の値）を用い、今後24時間での総流入量と空き容量から放流の必要性を判断し、事前放流と洪水調節を行った。
- 4) この操作を大規模な融雪洪水に適用した結果、ただ

し書き操作を回避することができた。また、この操作を規模の比較的小さい出水に適用すると、一時的に貯水位が予備放流水位を下回るものの、洪水が終了する時点で利水容量が回復していた。

以上の結果、予測雨量を積算値にして利用することは誤差の安定性から有利であり、積算予測雨量の活用はダムの洪水調節機能の向上に役立つものと考えられた。ただし、過大な事前放流を行った後の利水容量の回復については今後の検討課題である。

**謝辞：**本論文をまとめるにあたり、札幌開発建設部豊平川ダム統合管理事務所からデータ提供等でご協力いただいた。ここに記して謝意を示す。

#### 参考文献

- 1) 臼谷友秀，中津川誠：北海道における冬期温暖化の傾向と水循環に与える影響，地球環境シンポジウム論文集，13，pp.1-6，2005.
- 2) 国土交通省：国土交通白書2008，pp.3-12，2008.
- 3) 和田一範，川崎将生，富澤洋介：河川の高水管理における予測雨量情報の適用に関する考察，水文・水資源学会誌，Vol.18，No.6，pp.703-709，2005.
- 4) 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，第54巻，pp.523-528，2010.
- 5) 気象庁編集，(財)気象業務支援センター発行：解析雨量年報（CD-ROM），2004～2008.
- 6) 二宮洗三，新田尚，山岸米次郎：気象の大百科，pp.345-347，オーム社，1997.
- 7) 臼谷友秀，中津川誠，星清：積雪浸透を考慮した実用的融雪流出モデルの開発，水文・水資源学会誌，Vol.20，No.2，pp.93-105，2007.

(2010.4.8 受付)