

# 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

臼谷 友秀<sup>1</sup>・中津川 誠<sup>2</sup>

<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)

E-mail: usu@jwa.or.jp

<sup>2</sup>正会員 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)

E-mail: mnakatsu@mmm.muroran-it.ac.jp

気候変動に対する適応策の一環として多目的ダムの治水・利水機能が注目されている。その背景の一つに、積雪寒冷地の多目的ダムでは、利水容量の確保を優先した融雪期における大雨への対応が懸念されていることがある。そこで本論文では、ダムの洪水調節機能の向上を目指し、予測雨量を利用したダムの事前放流の可能性を検討した。最初に、積算予測雨量と時系列予測雨量の精度を比較し、積算予測雨量の優位性を明らかにした。次に、積算予測雨量に基づいた事前放流方法を提案し過去の大雨を伴う融雪洪水に適用した。以上の結果、積算予測雨量の利用は融雪期のダムの洪水調節機能の向上に有効であることがわかった。さらに、融雪期の多目的ダムの管理においては、事前放流によって治水機能の向上が可能であることを示唆することができた。

**Key Words :** dam operation, releasing water before heavy rain, flood control, forecasted rainfall, snowmelt flood

## 1. はじめに

積雪寒冷地では、融雪水は貴重な水資源であるとともに融雪洪水の原因でもある。融雪期の多目的ダムでは利水の確保を目指す一方で、出水時の洪水調節も不可欠であり、貯水位管理として相反する運用が要求されている。ここ数年、これまで大雨の発生が少ないものと考えられてきた非洪水期といわれる時期に豪雨が発生しており、洪水調節量以上の放流を必要とする事態が起きている<sup>1)</sup>。非洪水期は、水需要量の確保を重視することから高い貯水位が維持され、その反面、ダムの洪水調節機能の低い時期でもある。このような時期における想定外の降雨に対する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も懸念され<sup>2)</sup>、はん濫や浸水頻度の増加といった河川の治水安全度の低下が予想されている<sup>3)</sup>。その一方で、渇水リスクの増大も指摘されており、将来にわたって治水・利水安全度を両立させ得る方策を見出すことが必要である。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おいては既存ストックの有効活用が不可欠となる。その一つがダムの機能向上であり、特に、多目的ダムでは利水機能を損ねることなく洪水調節機能の向上が図れれば、上述した問題の

解決につながることに加え、気候変動に対する適応策の一端を担うことができると考えられる。そこで本研究は、降雨予測や洪水予測といった予測情報に基づいた事前放流によってダムの治水安全度を向上させることが可能かどうかを論じた。

ダムの操作に関する研究は古くから進められてはいるものの、複数のダムを適切に操作する手法を論じた報告例<sup>4)</sup> <sup>5)</sup>が多い。最近では、国土交通省が豪雨災害対策緊急アクションプラン<sup>6)</sup>を策定したのを受け、洪水に対するダム操作法の検討が注目されている。佐山ら<sup>7)</sup>はダムの流況制御過程を組み込んだ流出予測システムを用いてダム単体および複数のダムが存在する場合について治水効果を定量化し、治水に対するダムの有効性を示した。予測情報の活用に関して和田ら<sup>8)</sup>は、夏期出水を対象にして降雨および流出予測精度を評価し、積算予測雨量と6時間先までの流出予測は高水管理に利用可能であることを報告している。しかしながら、洪水予測モデルの研究や予測雨量を用いてダム流入量を予測した報告例は多く見られるものの、予測情報がダムの放流操作に対して有効かどうかを論じた報告は少ない。また、山田らの一連の研究報告<sup>9)</sup> <sup>10)</sup> <sup>11)</sup>のように、誤差を持つ予測情報を使うのではなく、ハイドログラフの通減部に着目しそこから事前放流量を決定する例も見られる。予測情報をダム

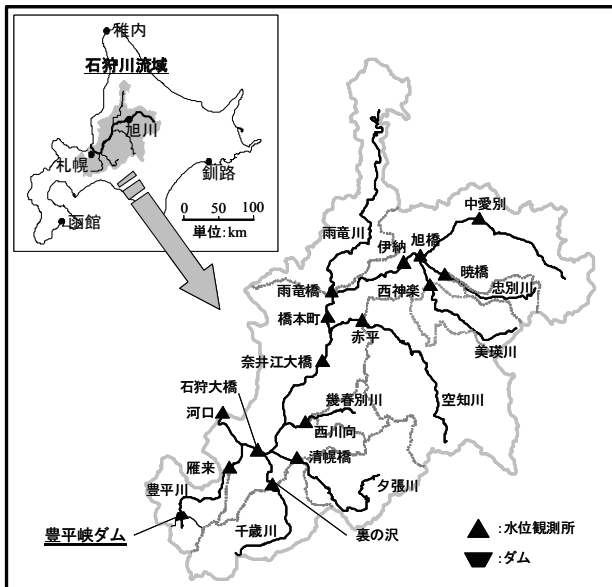


図-1 対象流域 (石狩川流域)

表-1 対象流域の流域面積

No	地点名	流域面積 (km <sup>2</sup> )	備考
1	河口	14,327	本川
2	石狩大橋	12,697	〃
3	奈井江大橋	8,941	〃
4	橋本町	5,711	〃
5	伊納	3,379	〃
6	旭橋	1,917	〃
7	中愛別	1,083	〃
8	暁橋	263	忠別川
9	西神楽	646	美瑛川
10	赤平	2,531	空知川
11	雨竜橋	1,713	雨竜川
12	西川向	325	幾春別川
13	清幌橋	1,116	夕張川
14	裏の沢	1,142	千歳川
15	雁来	651	豊平川

表-2 解析に用いた降雨事例

No	年	月/日	日雨量 (mm)	観測地点
1	2004	08/20	127	手稲山
2	2005	08/22	123	幾寅
3	〃	09/07	237	支笏湖畔
4	〃	10/22	109	〃
5	2006	05/28	162	〃
6	〃	06/16	106	〃
7	〃	08/04	108	小車
8	〃	10/07	109	瑞穂
9	2007	05/26	117	支笏湖畔
10	2008	05/20	125	〃
11	〃	06/06	101	〃
12	〃	10/09	185	〃

操作に活用することは決して新しい着想ではないものの、ダム操作に対する予測雨量の有効性を示した報告例は少ない<sup>12)</sup>。

河川を対象にした洪水予測は、避難勧告を発令するタイミングを判断する場合などに利用される情報であり、水位や流量を時系列で予想することが不可欠となる。一方ダム管理では、流入量を時系列で予測できることもさることながら、今後貯水池に流入する総流入量も重要な情報といえる。一般に、総流入量と総雨量の間には対応関係があることから、積算予測雨量から総流入量を見積もることができる。したがって、積算雨量の予測精度が時系列雨量より優れるのであれば、積算予測雨量の利用はダムの洪水調節機能を向上させる有効な手段になり得ると考える。

そこで本論文では、積算雨量の予測精度を明らかにした上で、積算予測雨量を利用したダムの洪水調節をシミュレートした。具体的には、次の手順で検討を進めた。

- 1) 積算雨量と時系列雨量の予測精度を比較した。ここでは、予測値と実績値の相関係数を評価指標として、積算予測雨量の優位性を明らかにした。
- 2) 積算雨量の予測値と実績値との対応を調べた。ここでは、予測雨量に対する実績雨量の分布を整理し、予測誤差を明らかにした。
- 3) 積算予測雨量を利用したダムの放流方法を提案した。この方法は、積算予測雨量から予想される流入量とダムの空き容量とを比較することで放流の必要性を判断し、放流が必要と判断された場合には、所定の事前放流を行うものである。
- 4) 提案した放流方法を過去の大雨を伴う融雪出水に適用し、本方法の有効性を検討した。

## 2. 積算予測雨量の精度

### (1) 対象流域と基礎資料

対象とした流域は、図-1に示すように、石狩川水系の水位観測所 (▲印) を最下流点とする15の流域とした。各流域の集水面積は263 km<sup>2</sup>~14,327 km<sup>2</sup>である (表-1)。

用いた予測雨量は、気象庁から配信されている短時間降水予測とGPV (Grid Point Value) の一種であるRSM (Regional Spectral Model) による予測値である。いずれも、気象予報士による修正が施された値ではなく、配信された値をそのまま用いた。短時間降水予測は、6時間先までの約1 kmメッシュの雨量を毎時更新で配信される。一方GPVは、51時間先までの予測雨量が1日2回配信される。メッシュサイズは約20 kmである。これらのデータを基に、流域に該当するメッシュの雨量を取り出し、それらの平均値を流域平均雨量として用いた。また、

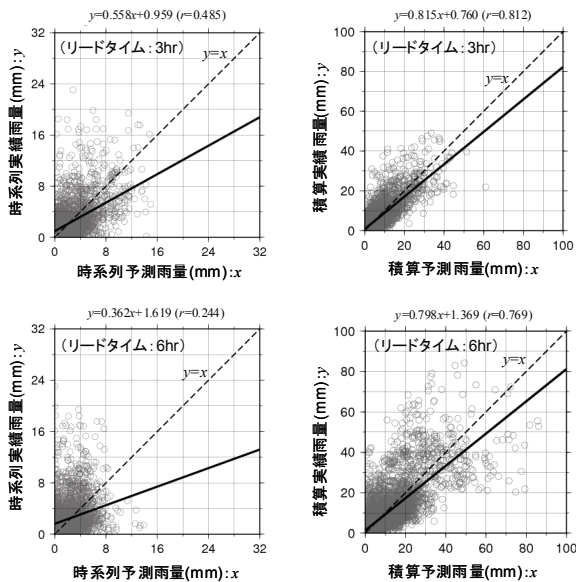


図-2 短時間降水予測の予測値と実績値の関係。左：時系列予測，右：積算予測，上段：リードタイム3時間，下段：リードタイム6時間。

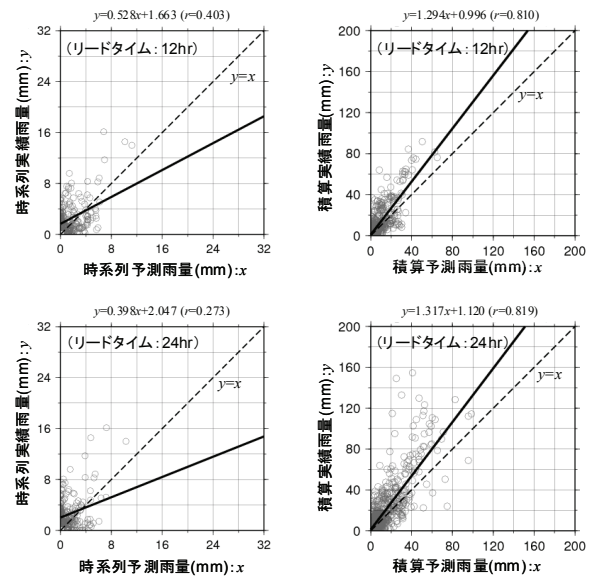


図-3 GPVの予測雨量と実績雨量の関係。左：時系列予測，右：積算予測，上段：リードタイム12時間，下段：リードタイム24時間。

実績値にはレーダ雨量を地上雨量で補正したメッシュ雨量（解析雨量<sup>13)</sup>）を用い、上述した予測雨量の処理と同様に流域平均雨量を求めた。精度評価の対象とした降雨は、予測データの保管されていた2004年から2008年の期間で、石狩川流域内および周辺のアメダスにおいて日雨量100 mm以上が観測された事例とした（表-2）。

(2) 積算予測雨量と時系列予測雨量の精度比較

以上で整理した流域平均雨量の予測値と実績値の相関図を図-2および図-3に示す。図-2は短時間降水予測のリードタイムが3時間および6時間の場合、図-3はGPVのリードタイムが12時間および24時間の場合である。なお、本論文では、積算予測雨量の“リードタイム”は、積算時間の意味で用いる。例えば、“リードタイム24時間の積算予測雨量”とは、予測雨量を24時間先まで合計した値を意味する。図中の点は、表-2に示した全ての降雨事例を対象にして、全流域の同じリードタイムのデータをまとめてプロットしてある。両図とも、左側に時系列雨量、右側に積算雨量の相関図を配置した。これらの図によると、リードタイムが長くなると点の散らばりが大きくなること、また、時系列雨量より積算雨量の方が点の散らばりが小さいことがわかる。このような両者の相関性に着目し、実績値と予測値の相関係数から積算予測と時系列予測の精度を比較した。相関係数は直接的には誤差ではないが、予測値と実績値に強い相関関係があれば予測値の補正が可能と考え、相関係数を評価指標とした。

図-4は相関係数とリードタイムの関係を示したものである。各々の点は、表-2に示した全ての降雨事例を対象にして、同一リードタイムの全流域のデータから求め

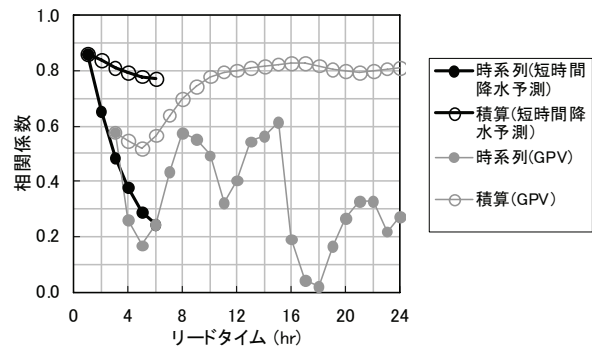


図-4 相関係数とリードタイムの関係

たものである。図中、横軸はリードタイム、縦軸は相関係数である。黒色は短時間降水予測、灰色はGPVであり、それぞれ、積算値の相関係数を白抜きのお印で、時系列値を塗りつぶしの●印で表した。図によると、短時間降水予測の相関係数は、時系列値と積算値の両方とも、リードタイムが長くなるのに伴って直線的に減少している。一方GPVの場合は、時系列値の相関係数は変動しつつ減少しているものの、積算値はリードタイムが6時間より長くなると増大する傾向が見られる。また、時系列予測と積算予測の相関係数を比較すると、短時間降水予測、GPVとも積算予測の方が大きい。

以上の結果は、時間的な平均化が予測精度を安定させるのに効果的であることを示したものと考えられる。時系列値は特定の時刻をピンポイントで当てなければならないのに対し、積算値は積算期間内での時間的なずれは前後の時間における誤差で相殺され得る。したがって、時系列値に大きな誤差があるように見えても、積算値に

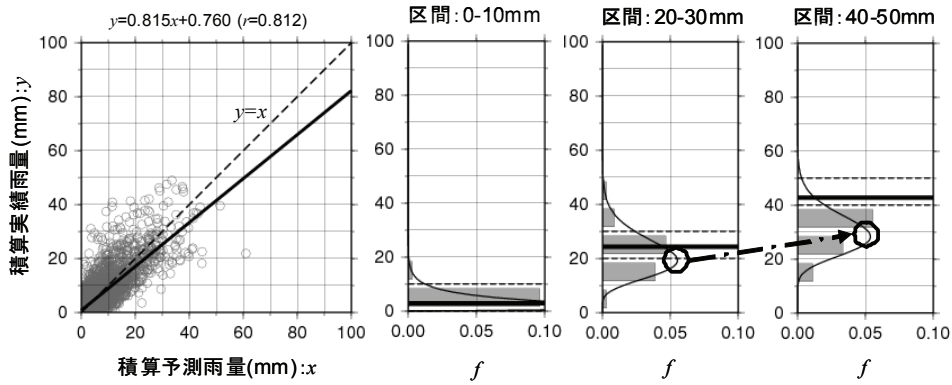


図-6 予測雨量に対する実績雨量の分布（短時間降水予測，予測リードタイム3時間）．左は積算予測雨量と実績値との相関図，相関図の右側に配置した複数の図は各区間の予測雨量に対する実績雨量のヒストグラム．ヒストグラム中の2本の点線は予測雨量の区間を表し，その区間の予測雨量の平均を太線で表した．

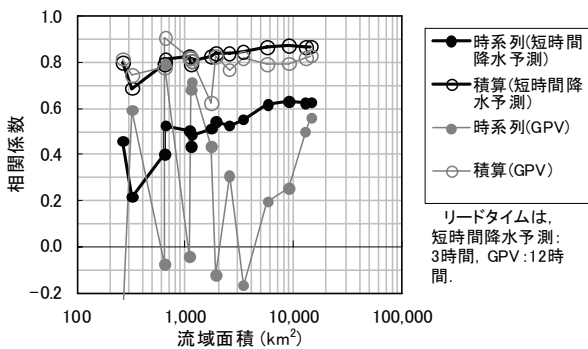


図-5 相関係数と流域面積の関係

すれば大きな誤差にならないと考えられる．また，積算期間を長くすれば平均化の効果が大きくなり，その結果，GPVの積算値の相関係数がリードタイムとともに増大したものと考えられる．

以上では時間的な平均化が予測値を安定させることがわかった．次に，空間的な平均化によって予測雨量の精度がどのように変わるかを見た．図-5は，表-1に示した15流域の流域面積と相関係数との関係を示したものである．図の相関係数（丸印）は，表-2に示した全ての降雨事例から算出しており，短時間降水予測はリードタイム3時間の値，GPVはリードタイム12時間の値を示した．図中の横軸は流域面積，縦軸は相関係数である．黒色は短時間降水予測，灰色はGPVであり，それぞれ，積算値は白抜き○印で，時系列値は塗りつぶしの●印で表した．図によると，面積の広い流域の相関係数は，狭い流域より値が大きいことがわかる．これは，GPVの時系列値を除いて，全般的に見られる傾向である．また，短時間降水予測とGPVの積算値は，流域面積に関わらず0.8程度の相関係数を有していた．空間的な平均化は，雨域や前線の位置が多少ずれたとしてもその影響が緩和される．このため，面積の広い流域は面積雨量の精度は高いものと考えられる．その一方で，狭い流域ほど精度の高い予測が難しいことを示唆する結果といえる．

以上の結果，予測雨量の時空間的な平均化は，予測精度を安定化させるのに有効であることがわかった．空間的な平均化は流域面積で制約されるので，時間的な平均化が現実的な利用方法と考えられる．例えばダム管理において予測リードタイムは，出水前に必要な空き容量を準備するための時間としてより長いことが望ましい．上述の図-4によれば，24時間先までの積算値を予測した場合であっても相関係数は0.8を保ち，長いリードタイムを確保するのに有効であろう．洪水予測では時系列で流量や水位を予測することが必要であるものの，ダム管理では今後貯水池に流入する総流入量も重要な情報である．一般に，総流入量と総雨量の間には対応関係があることから，積算予測雨量から総流入量を見積もることができる．したがって，積算予測雨量は，ダムの管理に活用できるのと同時に，予測精度の安定性の観点からも有効な情報になり得るものといえる．

### (3) 積算雨量の予測値と実績値との対応

次に実績値との比較に基づき，積算予測雨量の精度を検証してみる．図-6と図-7は，予測リードタイムが3時間，6時間の場合の予測雨量と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，予測値の区間ごとの実績値のヒストグラムを示した．図中，左の図は相関図，相関図の右側に配置した複数の図はヒストグラムである．相関図の横軸は積算予測雨量，縦軸は積算実績雨量，破線は傾き45度の直線，実線は予測値と実績値の回帰式である．ヒストグラムは，予測雨量が0～10 mm，20～30 mm，40～50 mm，60～70 mmであった場合の実績雨量の出現頻度を示している．横軸は頻度，縦軸は実績雨量である．灰色の棒グラフは頻度，灰色の点線は予測雨量の区間の上下限，黒色の太い直線は予測雨量の区間平均を表す．また，黒線で表した曲線は，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．

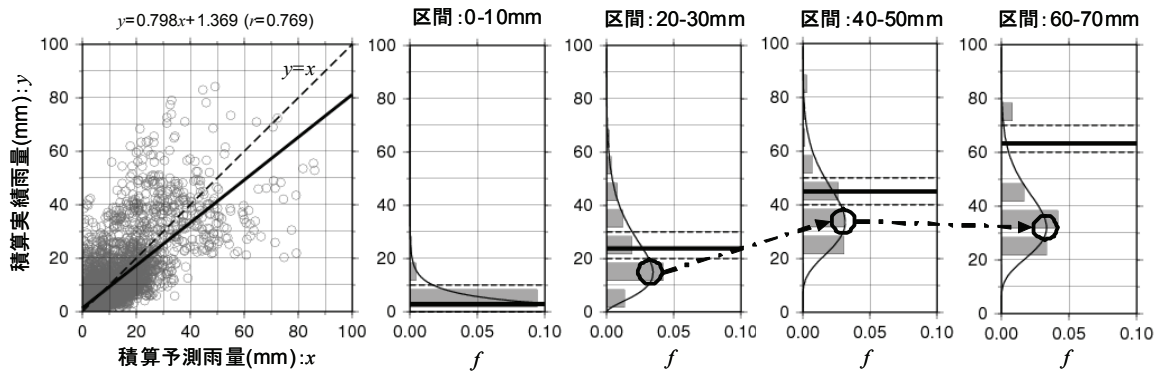


図-7 予測雨量に対する実績雨量の分布（短時間降水予測，予測リードタイム6時間）．左は積算予測雨量と実績値との相関図，相関図の右側に配置した複数の図は各区間の予測雨量に対する実績雨量のヒストグラム．ヒストグラム中の2本の点線は予測雨量の区間を表し，その区間の予測雨量の平均を太線で表した．

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

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

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， $\Gamma(\alpha)$ ：ガンマ関数である．

さらに、図-6、図-7のヒストグラムには、実績値の代表値を黒色の○印で表した．代表値には、平均値ではなくモードを用いた．これは、積算実績雨量の分布には偏りがあり、平均値は出現頻度の最も大きい階級と一致しないためである．モードは式(1)の微分 $f'(x)=0$ を満たす $x$ であり次式で算出した．

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

図-6、図-7の相関図によると、点は広い範囲にちらばっている．しかしながら、予測雨量（ヒストグラムの黒色の太い直線）が大きくなるのに伴って実績雨量（モード）も大きくなっており、予測値よりは少ないものの実績値は予測値に対応している．なお、全般に予測雨量が過大評価されている．ただし、図-7の区間60～70 mmの場合は、予測雨量が大きくなったとしても実績雨量は増加していない．

他のリードタイムも含めて、予測雨量と実績雨量の関係を示したものが図-8である．図中の横軸は予測雨量、縦軸は実績雨量である．凡例のLTはリードタイムを表す記号であり、LT1はリードタイム1時間、LT6はリードタイム6時間を意味する．なお、予測雨量が40 mmを超える範囲にLT1やLT2の点はない．これは、1時間や2時間といった短い時間で、40 mmを超えるような降雨が予測されることは少なく、式(3)のモード $x$ が算出できなかったためである．

図によると、予測雨量が50 mm以下の場合、予測値

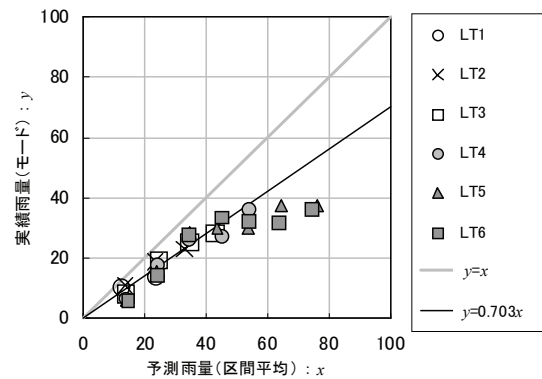


図-8 短時間降水予測の予測値と実績値の対応．凡例のLTはリードタイム．

と実績値は直線関係にあるものの、50 mmを超えると両者は対応していない．すなわち、予測雨量が50 mmであっても70 mmであっても実際に降った雨量は変わらない結果となっている．用いた降雨事例の中で、6時間の合計雨量が50 mmを超えた大雨は3事例と少なく（2005年8月21日：幾春別川流域：73 mm/6hr，2005年9月7日：夕張川流域：84mm/6hr，2008年10月9日：千歳川：66mm/6hr），このため、以上のような傾向が現れたものと考えられる．積算予測雨量が50 mmを超えるような場合の予測精度については、今後、事例の蓄積と精査が必要と考える．

そこで、データ数が不十分と考えられる50 mm以上の範囲を除いて回帰式を作成した．その式が図-8の黒色の実線である．平均的には予測値の約7割が実績雨量となっている．

同様な手順でGPVについて整理したものが図-9である．図の横軸は予測雨量、縦軸は実績雨量であり、リードタイムが6、9、12、15、18、21および24時間の7種類について示した．図によると、短時間降水予測とは異なり、50 mmを超える雨量に対しても、実績値と予測値は対応している．図に示した黒色の実線は予測雨量と実績雨量の回帰式であるが、それによると、全般的には予測

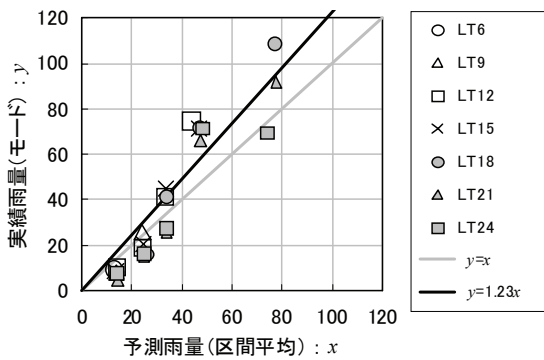


図-9 GPVの予測値と実績値の対応. 凡例のLTはリードタイム.

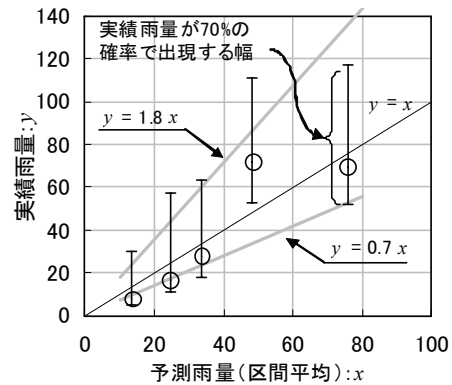


図-11 GPVの予測値に対する実績値の70%出現範囲(リードタイム24時間)

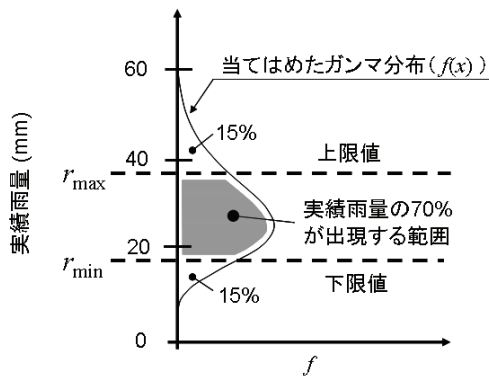


図-10 実績雨量の幅

値より実績値が大きく、予測値の1.23倍が実績値となっている。

以上では、予測値と実績値の平均的な値に注目して両者の関係を見てきた。次に、予測値に対する実績値の分布に着目して誤差の幅を調べる。ここでは、上述で得られているガンマ分布の曲線式を用い、実績雨量の70%が含まれる範囲を定めることで誤差の幅を評価した。この誤差の幅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>14)</sup>。70%の割合で実績値が出現する範囲は、図-10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  $r_{\min}$  (下限値) と  $r_{\max}$  (上限値) を求めればよい。

$$\text{上限値} : \int_0^{r_{\max}} f(x) dx = 0.15 \quad (4)$$

$$\text{下限値} : \int_0^{r_{\min}} f(x) dx = 0.85 \quad (5)$$

このようにしてリードタイムが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-11である。図の横軸は予測雨量、縦軸は実績雨量である。○印はモード、○印から上下に描いた実線は実績雨量が70%の確率で出現していた範囲を示している。図によると、予測雨量が30 mm程度の場合、実績雨量の70%は概ね20 mm~60 mmの範囲にある。予測雨量が50 mmの場合、70%出現区間は直線  $y=x$  の上側にあり、実

績値を過少に予測していたことがわかる。他の予測雨量については70%出現範囲に実績雨量が収まっている。また、予測雨量が多くなるのに伴って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様子がうかがえる。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、24時間予測の場合、実績雨量の70%は、概ね予測値を0.7倍~1.8倍した範囲にあることがわかった。

### 3. 積算予測雨量を利用したダム放流操作

以上の結果、積算予測雨量は時系列雨量に比べて、実績値との相関性が高く、予測精度が安定していることがわかった。そこで、積算予測雨量を利用したダムの事前放流について検討してみる。

#### (1) 対象流域

検討の対象は、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>)とした(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36年が経過する。図-12に貯水位の推移と容量配分を示すが、豊平峡ダムでは、流水の少ない厳冬期は水利用によって3月まで貯水位は長期に亘って低下し続ける。その後、夏の水需要に備えて融雪水を利用した貯留を開始し、6月にはダムの貯留できる最大限の水量が確保される。6月15日~10月31日の期間は洪水期と定められており、降雨による流水をダムに貯めるための容量(洪水調節容量)を確保する目的から、所定の貯水位(第1期・第2期制限水位)以下で管理される。9月以降は、厳冬期の利水容量を確保するために貯水位を上昇させ厳冬期を迎える。以上のように、洪水期は流水を制御する洪水調節容量を持つが、「非洪水期」と呼ばれる洪水期以外の期間については利水容量の確保を優先した管理がなされ洪水調節容量の小さい時期が現れる。

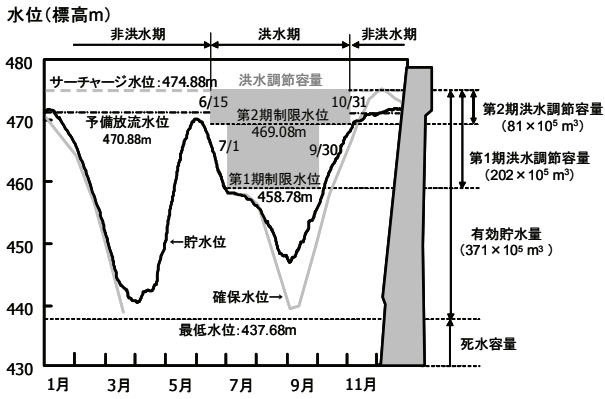


図-12 豊平峡ダムの年間貯水位・容量配分図

表-3 2004年～2008年においてピーク流入量100 m<sup>3</sup>/sを超えた出水（豊平峡ダム）

年月日	ピーク流入量 (m <sup>3</sup> /s)
2004/08/31	115
2005/08/03	120
2005/09/07	249
2006/05/28	228
2007/05/18	192
2007/05/26	128
2008/05/20	156

豊平峡ダムでは、過去に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）。操作が行われたのは5月と11月であり，いずれも貯水位の高い洪水調節容量の小さい非洪水期に行われていた。

(2) 現行の操作ルール

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を超えると洪水調節に入り，60 m<sup>3</sup>/sから820 m<sup>3</sup>/sまでの間は，次式によって放流量が算定される（定率操作）。

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

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の定量操作に移行する。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行われる（図-12参照）。このため，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は上記で示した洪水調節を行う。

なお，本研究では，上述したダムの洪水調節に関する

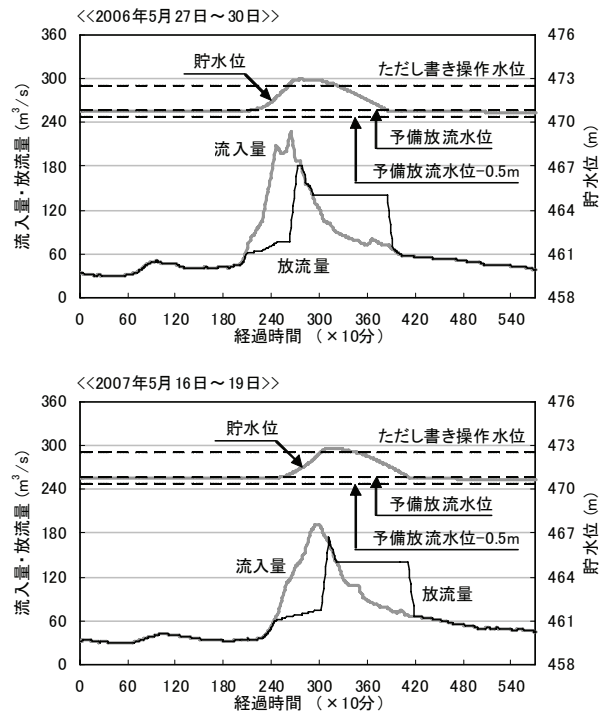


図-13 操作規則に従った放流結果。上段：2006年5月28日，下段：2007年5月18日

る操作ルールを定式化（プログラム化）し検討を進めた。この処理は貯水位・流入量に応じて放流量を算定するものであり，プログラム化にあたっては，操作規則・操作細則・ただし書き操作要領をif - then形式の組み合わせで定式化した。放流量の計算時間間隔はダムの操作実態から10分単位とした。

(3) 解析事例

解析に用いる事例には，ただし書き操作の行われた出水を採り上げたいが，予測データが保存されている2004年～2008年においてはそのような事例はない。そこで，2004年～2008年の間でピーク流入量が100 m<sup>3</sup>/sを超えた出水（表-3）に対して操作規則どおりの放流操作をシミュレーションし，ただし書き操作が必要となるか否かを調べた。シミュレーションでは貯水位が高く維持される5月や11月を想定し，計算の初期貯水位には470.80 m（予備放流水位-8 cm）を与えた。シミュレーションの結果より，ただし書き操作が必要になった2006年5月28日と2007年5月18日を解析に用いることにした（図-13）。

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達する前に放流量を増やし，ただし書き操作は行われていない。また，2007年5月の洪水においても，実際の貯水位がシミュレーションで設定した初期貯水位より低かったため，ただし書き操作は行われていない。実際とシミュレーションには，以上の違いがあることに留意されたい。

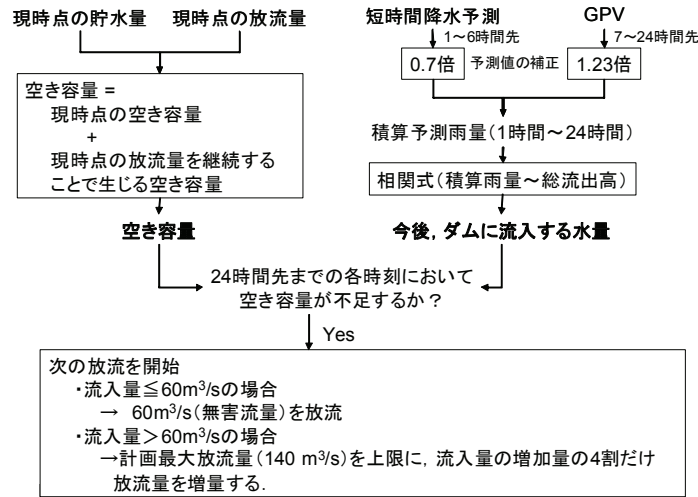


図-15 積算予測雨量を用いた放流操作手順

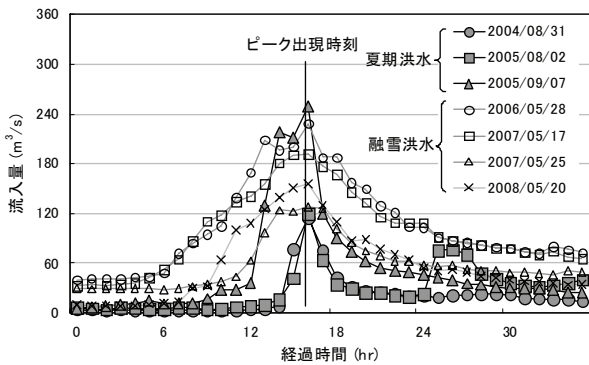


図-14 洪水ハイドログラフ。各事例とも、流入量のピークが出現した時刻が一致するように図化した。

表-3によると、ピーク流入量の最大は2005年9月7日の事例であるが、高い初期貯水位を与えたここでのシミュレーションでもただし書き操作には至っていない。表-3の出水事例のハイドログラフを図-14に示すが、この図によると、夏期の洪水はピーク流入量に対して総量が少なく、融雪洪水は降雨と融雪水と相まって総量が多くなる特徴が見られる。このため、2005年9月7日の事例はピーク流入量が最大ではあるものの、総ボリュームが小さいためにただし書き操作には至らなかったと考えられる。さらに、この事例は洪水期の出水であることから洪水調節容量が確保されており、ただし書き操作を必要とする可能性は小さいといえる。その一方で、融雪期の出水は長期間にわたり、加えて初期水位も高く、夏期と同規模の雨量であってもただし書き操作を引き起こすリスクが大きいともいえる。

前項で述べた現行の操作ルールに加えて、予備放流水位以下の利水容量を一時的に放流(事前放流)し、その容量も洪水調節に使えば、ただし書き操作を回避し得る可能性がある。そこで、前項の2例に対して以下に述べる積算予測雨量を利用した放流操作を試みる。

(4) 積算予測雨量を用いた操作方法

放流開始の判断は、24時間先までの各時刻におけるダムの空き容量と、その間に貯水池に流入する水量を比較することで行う(図-15)。各時刻における空き容量は、予測する時点の空き容量と、今後の放流によって生じる容量の合計とした。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、 $i$ 時間後の空き容量  $V_i$  は次式で計算した。

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

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

一方、流入する水量は、降雨に伴う出水事例から総雨量と総流出高の関係式を作成し、それに基づいて積算予測雨量から総流出高を算出する。図-16は、1996年から2007年の期間で30 mm以上の雨量が観測されたときの総雨量と総流出高の関係である。図中、横軸は総雨量、縦軸は総流出高である。黒色の細い実線は総雨量が130 mm以下の回帰式、黒色の太い実線は総雨量130 mm以上の回帰式である。なお、回帰式の傾きは流出率に相当する。灰色の実線は流出率が1となる線である。これによると、総雨量が130 mmまでは流出率が0.31、それを超えると0.82となっている。ここで対象としている事例は融雪期の出水であることから、土壌は飽和に近い状態にあるものと考えられる。そこで、総雨量130 mm以上の流出率を使い、次式から総流入量を算出した。

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

ここで、 $Q_i$  : 現時刻から  $i$  時間先までに流入する水量 (m<sup>3</sup>)、 $f$  : 流出率 (=0.82)、 $A$  : 流域面積 (=134 km<sup>2</sup>)、 $R_i$  : 現時刻から  $i$  時間先までに降る総雨量 (積



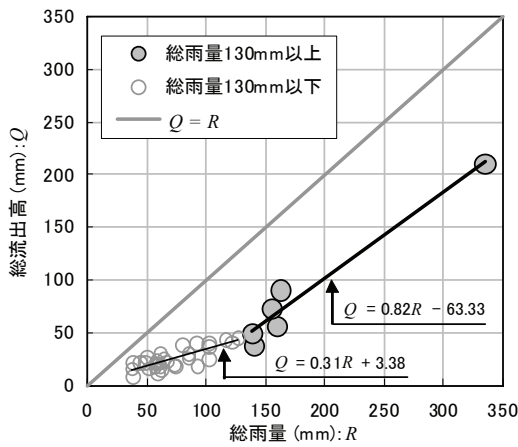


図-16 総雨量と総流出高の関係 (降雨出水事例による)

算予測雨量) (mm). 本来, 降雨と流出には時間のずれがある. しかしながら, 対象流域の集水面積が比較的小さいことと, 融雪期の土壌は飽和に近い湿潤状態にあることから, 降雨に対する流出の応答は速いと考えられる. このため, 降雨と流出の時間的なずれは考慮しなかった.

なお, 計算に当たっては総雨量に融雪量も含める必要がある. ここでは, 予測が完全的中したものと仮定し, 融雪量には, 豊平峡ダムで観測された気象データから次のように推定した値を用いた.

- 1) まず, 観測されたダム流域の気象データから流域内の積雪分布を推定し, 融雪水の発生する範囲を特定する. ここでは, 蒸発散を含む流域水循環が的確に推定でき, かつ, 長期的な水収支を担保し得る長期水・熱収支モデル<sup>15)</sup>を用いた.
- 2) 次に, この積雪分布を基に融雪量を推定する. 融雪量の計算は熱収支法に基づき, これに加えて, 融雪量が積雪層を流下する際の遅れを加味した手法<sup>16)</sup>を用いた.

このように推定した2006年5月28日の融雪量が図-17である. 図によると, 降雨期間中の融雪量は雨量に比べて小さく, 融雪洪水への寄与は降雨が大きいことがわかる. したがって, 式 (8) で算出される総流入量は雨量予測の精度に決定付けられるといえる. 運用においては, 降水が雨か雪かを判別することが必要になるが, 気温の予測情報を参考にすると判断が可能である. もし, 降水が雪の場合は, 雨量を0として総流入量を求めれば良い.

以上で得られる1時間毎の空き容量と総流入量とを比較し, 空き容量が不足しない場合は操作規則どおりに放流操作を行う. もし, 24時間先までのどこかの時刻で空き容量が不足する場合 (貯水位がただし書き操作水位に達する場合) には, 下流河川の急激な水位上昇を制約する放流条件 (放流の原則) を満たしつつ, 以下のルールで放流を行った.

- ・ 流入量が60 m<sup>3</sup>/s (洪水量) 以下の場合は無害流量

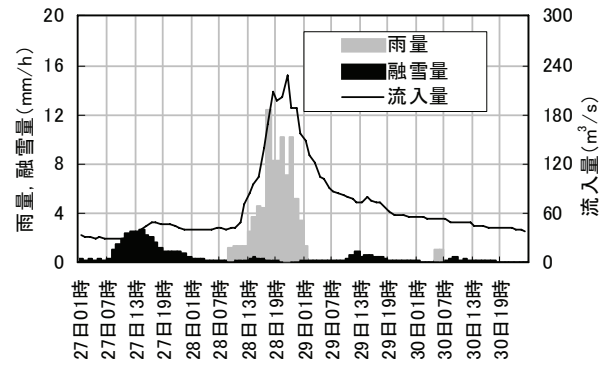


図-17 2006年5月27日~30日の出水状況

(60 m<sup>3</sup>/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.

- ・ その後, 流入量が60 m<sup>3</sup>/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, 操作規則において放流できる最大量 (計画最大放流量: 140 m<sup>3</sup>/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する放流量の増加の割合であり, ここでは  $\alpha=0.4$  とした. 操作規則では式 (6) に示したように流入量の約9割が貯水池に貯留されるが, その一部を貯留せずただし書き操作の回避に割り当てた操作といえる.

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して行うもので「事前放流」と呼ばれる.

### (5) ダム操作シミュレーションの結果と考察

以上で述べた操作を2006年5月28日および2007年5月18日に適用した. その結果を図-18と図-19に示す. それぞれ, 上段には24時間の積算雨量 (前章で示した回帰式による補正は行っていない) および積算融雪量, 下段には放流量, 流入量, および, 貯水位を示した. 図によると, 積算予測雨量に基づいて放流が行われているものの, 貯水位はただし書き操作水位を超えており, ただし書き操作の回避には結びついていない. 積算予測雨量が実績値に対してかなり少なかったため, 早い時点から放流を開始することはできていない.

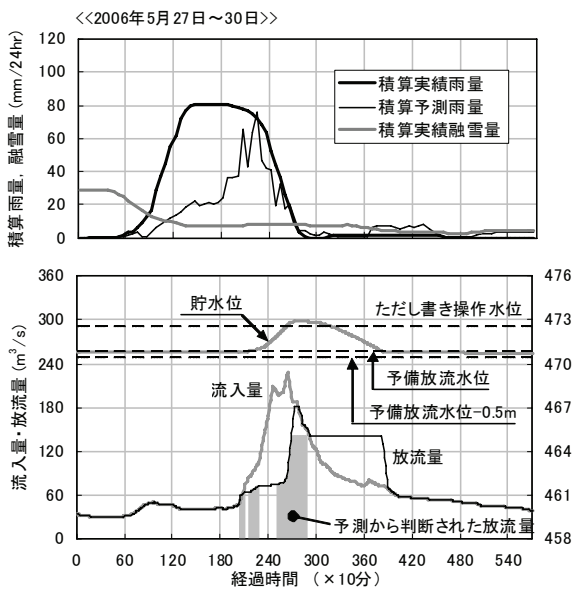


図-18 積算予測雨量およびそれに基づいた放流操作結果 (2006年5月27日～30日). 上段: 24時間積算雨量および融雪量, 下段: 放流量, 流入量, 貯水位.

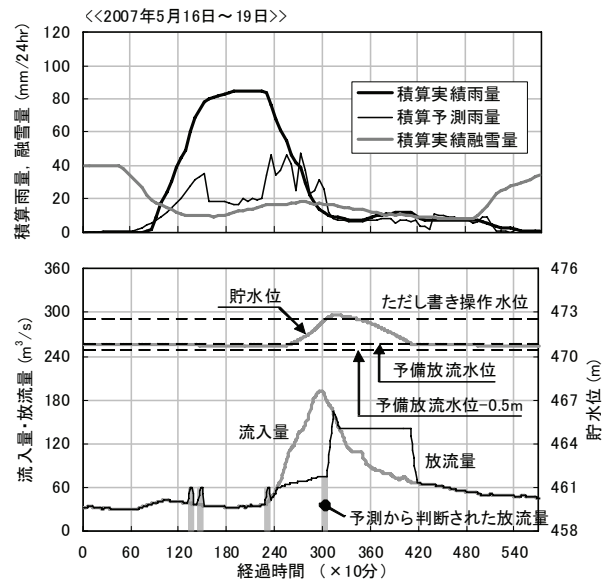


図-19 積算予測雨量およびそれに基づいた放流操作結果 (2007年5月16日～19日). 上段: 24時間積算雨量および融雪量, 下段: 放流量, 流入量, 貯水位.

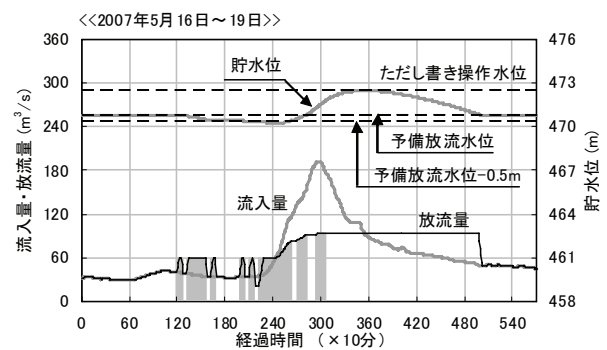
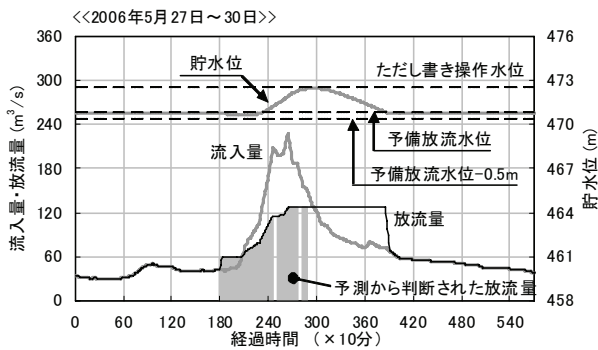


図-20 積算予測雨量に安全側の値を採用した場合の放流結果. 左: 2006年5月27日～30日, 右: 2007年5月16日～19日.

前章の結果によれば、リードタイム24時間の場合、積算した実績雨量は予測雨量の70%出現範囲は概ね0.7倍～1.8倍の範囲にあった。そこで、入力する積算予測雨量を、ただし書き操作を回避する観点で安全側に見積もって利用することを想定した。具体的には、図-15に示した処理フローの“予測値の補正”を、「短時間降水予測」は0.7倍を1.8倍に、また、「GPV」は1.23倍を1.8倍に変更して計算を行った。その結果が図-20である。この図からわかるように、安全側の予測雨量を用いることでただし書き操作が回避されている。図-18および図-19と比較すると、流入量の増加期間の放流量は、提案した方法が大きいものの、放流量のピークは大幅に減少している。ただし書き操作の弊害は、多量の水を放流することと、放流量を急激に増大させることにある。本操作は、現行の操作ルールで定まる放流量を超えることはあるものの、放流可能な範囲（計画最大放流量）の操作によって、ただし書き操作に伴う急激な放流量の増大を防いでおり、有効な洪水調節と考えられる。また、図-20にお

ける貯水位の変化に着目すると、貯水位はただし書き操作水位付近まで上昇しており、治水容量が有効に活用されていることがわかる。

なお、図-20の2007年5月の例では、放流量は増減を繰り返しており、この点は運用上の課題である。貯水位や流入量の状況に加え、積算予測雨量の増減傾向から、その防止策を検討することが必要である。

以上の結果、ただし書き操作を必要とする事例に対して、安全側の積算予測雨量を用いることでただし書き操作を回避できることがわかった。しかしながら、安全側の予測雨量を用いることは過大な放流をしていることにほかならない。大規模な出水に対してはただし書き操作が回避できたとしても、規模の小さな出水では洪水後に必要となる利水容量が回復できないことが考えられる。そこで、ただし書き操作を必要としない出水に対して、提案した操作を適用し、洪水調節後において利水容量が確保できるかどうかシミュレーションした。

対象洪水は、上述の表-3においてピーク流入量の最も

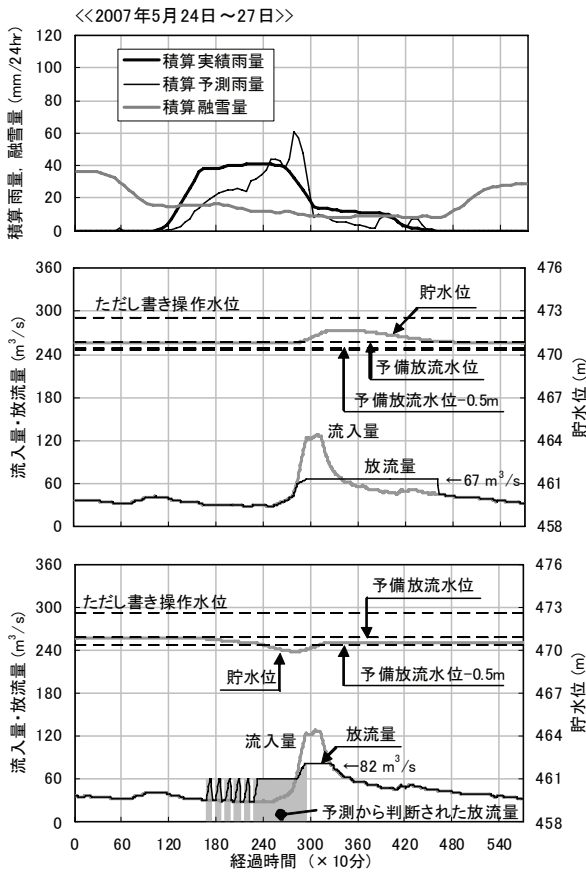


図-21 2007年5月26日出水の放流操作のシミュレート結果。上段：24時間積算雨量および融雪量，中段：操作規則どおりの放流を行った場合，下段：安全側の予測雨量（積算予測雨量を1.8倍した値）を用いて放流を行った場合。

小さい2007年5月26日の事例である。シミュレーションの結果が図-21である。図の上段は24時間にわたって積算した雨量と融雪量，中段は操作規則どおりに放流量を行った結果，下段は予測雨量を1.8倍した値に基づいて放流を行った結果である。中段の図によると，この洪水は，現行の操作規則による洪水調節で問題のない洪水である。積算予測雨量を用いて放流を行った場合，流入量が60 m³/sに達する前にただし書き操作が必要と判断され，60 m³/sの放流を開始している。このため，洪水調節を開始する時刻では，貯水位は予備放流水位より低い。流入量が60 m³/sを超えた時点から，流入量に応じて放流量を増加させ80 m³/s程度まで達している。その後，放流量が一定になっているが，これは，現行の操作規則に則った操作に移行したことを表している。流入量の減少とともに放流量も減少し洪水調節を終了した。この間の貯水位は，一時的に予備放流水位-0.5 mより低くなるものの，洪水調節が終了する時点（流入量が60 m³/sを下回る時点）では利水容量が確保されている。

放流量の最大は82 m³/sであり，操作規則どおりに放流を行った場合の67 m³/sよりやや大きい。このように，提

案する操作では，比較的小さな洪水に対しては，ピーク流量を低減させるダム機能は低下する。しかしながら，洪水調節の終了する時点では利水容量が確保されており，融雪期に発生するただし書き操作の回避を優先しても利水機能を損なわない操作が可能であることを示唆したものと考えられる。これは，過大な事前放流を補う水量が，融雪水に起因する流入量に期待できるからである。しかしながら，積雪量の変化に応じて期待できる流入量も変化することから，利水・治水のどちらを重視した洪水調節を行うべきかの判断もその時々で変わることになる。ここでは一例を採り上げ利水容量の回復について見てきたが，その一般性に関しては今後のさらなる検討が必要である。

#### 4. まとめ

本研究では，気候変動に伴う大雨への適応策として気象予測情報を利用したダムの洪水調節機能の向上を目的に，気象庁の配信している短時間降水予測とGPVの予測精度の評価，ならびに，積算予測雨量を用いたダム操作をシミュレーションした。得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 相関係数に着目し積算雨量と時系列雨量の予測精度を比較した。リードタイムと相関係数の関係，および，流域面積と相関係数の関係について整理した結果，積算値の相関係数は，時系列値より大きくリードタイム・流域面積の変化に対して安定していることがわかった。実績値と予測値の相関性は，時系列予測雨量より積算予測雨量が優れていることを明らかにした。
- 2) 積算予測雨量を対象に誤差の幅を評価した。リードタイムが24時間の場合，実績値の70%は予測値の0.7~1.8倍の範囲にあった。
- 3) 積算予測雨量を利用したダムの放流方法を提案した。この方法は，積算予測雨量から予想される流入量とダムの空き容量とを比較することで放流の必要性を判断し，放流が必要と判断される場合には，所定の事前放流を行うものである。
- 4) 提案した操作方法を過去の事例に適用した結果，安全側の予測雨量（予測雨量の1.8倍の値）に基づいて事前放流を行えばただし書き操作が回避できることが示された。
- 5) 融雪期においては，ただし書き操作の回避を優先させた放流を行ったとしても，融雪水により利水容量が回復できることを示唆する結果が得られた。これは，治水機能を優先しても利水機能を損なわない操作が可能であることを示した結果と考えられる。

以上、積算予測雨量を利用したダムの放流操作は、洪水調節容量の少ない融雪期の洪水調節機能を向上させるのに有効な操作法といえる。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一般性を検証していくことが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) 中津川誠, 星 清：融雪期に豪雨が相俟って生起する出水の予測について, 河川技術論文集, 第 7 巻, pp.453-458, 2001.
- 2) 白谷友秀, 中津川誠：北海道における冬期温暖化の傾向と水循環へ与える影響, 地球環境シンポジウム論文集, 13, pp.1-6, 2005.
- 3) 国土交通省：国土交通白書 2008, pp.3-12, 2008.
- 4) 竹内邦良：貯水量の累加損失係数を用いた貯水池群の最適操作方法, 土木学会論文報告集, 第 222 号, pp.93-103, 1974.
- 5) 高棹琢馬, 池淵周一, 小尻利治：水量制御からみたダム群のシステム設計に関する DP 論的研究, 土木学会論文報告集, 第 241 号, pp.39-50, 1975.
- 6) 国土交通省：豪雨災害対策緊急アクションプラン, 2004.
- 7) 佐山敬洋, 立川康人, 寶 馨, 市川温：広域分布型流出予測システムの開発とダム群治水効果の評価, 土木学会論文集, No.803/II-73, pp.13-27, 2005.
- 8) 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降雨情報の適用性に関する考察, 水文・水資源学会誌, Vol.18, No.6, pp.703-709, 2005.
- 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流出, 水工学論文集, 第 48 巻, pp.13-18, 2004.
- 10) 秋葉雅章, 腰塚雄太, 宮本守, 戸谷英雄, 佐藤直良, 山田正：流出特性に応じたダム放流量の決定とその洪水水位逓減効果に関する研究, 河川技術論文集, 第 10 巻, pp.89-94, 2005.
- 11) 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.
- 12) 白谷友秀, 中津川誠, 清治真人：予測情報に基づいた積雪地域のダム放流操作の考察, 水工学論文集 (CD-ROM), 第 53 巻, 2009.
- 13) 気象庁編集, (財) 気象業務支援センター発行：解析雨量年報 (DVD-ROM), 2004~2008.
- 14) 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.
- 15) 口澤寿, 中津川誠：熱・水収支を考慮した流域スケールの積雪と蒸発散の推定, 北海道開発土木研究所月報, 第 558 号, pp.19-38, 2002.
- 16) 白谷友秀, 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.

(2009. 12. 24 受付)

## IMPROVING THE FLOOD CONTROL OF DAMS DURING THE SNOWMELT SEASON BASED ON FORECASTED CUMULATIVE RAINFALL

Tomohide USUTANI and Makoto NAKATSUGAWA

The flood control and water use of multipurpose dams have been drawing attention as one of the adaptable measures against climate change. At the same time, there are concerns about the ability of multipurpose dams in cold, snowy regions to control heavy rain during the snowmelt season, when the impounding of service water is prioritized and the flood control capacity is small. Toward improving the flood control capacity of such dams, this study examines the possibility of releasing dam water based on weather forecasts before heavy rain. First, the forecasted cumulative rainfall was compared with the forecasted time series rainfall in terms of accuracy, and the former was found to be more accurate. Next, a method for dam water release before heavy rainfall based on the forecasted cumulative rainfall was proposed, and the method was applied to a past flood during the snowmelt season. Utilization of the forecasted cumulative rainfall was found to be effective in improving the flood control of dams during the snowmelt season. The study results further suggest that it will be possible to put emphasis on flood control in managing multipurpose dams during the snowmelt season.