

## 融雪期の異常出水予測を踏まえたダム管理方策の研究

Study on Dam Management Scheme Based on Runoff Prediction for Abnormal Flood Event in Snowmelt Season

室蘭工業大学

室蘭工業大学

(財)日本気象協会 北海道支社

○学生員 大橋 和平 (Kazuhei Ohashi)

正員 中津川 誠 (Makoto Nakatsugawa)

正員 白谷 友秀 (Tomohide Usutani)

## 1. はじめに

北海道や東北・北陸地方のような積雪地域では、地球温暖化による融雪期の早まりや、ダム計画上の非洪水期における大雨が懸念されている。融雪期の多目的ダムでは、利水の確保を目指すため貯水位を高く維持しており、そのような時期の大雨によって洪水調節量以上の放流（いわゆるただし書き操作）を行うような事態が起こっている<sup>1)</sup>。しかしながら、財政・環境上の制約により新規施設の整備が困難な場合、既存施設の機能向上が不可避となる。例えば、治水と利水の安全度の両立を図る多目的ダムでは、洪水調節機能をこれまで以上に引き出すために、流域の貯留効果に基づいた洪水予測に基づく放流操作が戸谷ら<sup>2)</sup>によって提案されている。

本研究は、融雪出水を含む非洪水期に異常洪水が発生した場合のダムの洪水調節機能の問題点を明らかにするとともに、ダム操作の工夫による対応方策を検討するものである。研究の背景と目的は次のとおりである。

- 1) ダムの事前放流により、異常洪水に対しても治水安全度の向上を図れる可能性がある。
- 2) しかしながら、降雨予測・流入量予測の精度は低く、予測が空振りした場合には、多目的ダムでは利水容量の回復が困難となる。
- 3) そこで、予測情報に頼らない大胆な事前放流を可能にしたい。もし流域貯留量（土壌中水量や積雪水量）を的確に把握できれば、その違いで今後の洪水流出の動向、無降雨時の貯水量の回復を判断できると考える。
- 4) そのために、流域貯留量を長期的な水収支の観点から明確化することを目指すこととした。

以上を踏まえ、下記の手順で検討を進めた。

- 1) 流域貯留量を既往研究手法<sup>3)</sup>・<sup>4)</sup>から推算した。
- 2) 流域貯留量を用いて、降雨・融雪に伴う流入量予測を行った。
- 3) 上記に基づくダム操作シミュレーションにより、事前放流とただし書き操作回避の実行可能性についての検討を行った。

以上より、非洪水期に想定される異常洪水に対するダムの洪水調節機能に関して、流域貯留量を定量化することで「汎用性のあるダム流入量予測、事前放流の実施、ただし書き操作の回避」に向けての方法論が提示できた。

## 2. 積雪地域の洪水リスク

今回の解析対象としたのは、北海道札幌市の南部に位置する豊平峡ダム（流域面積：134km<sup>2</sup>）である（図-1）。

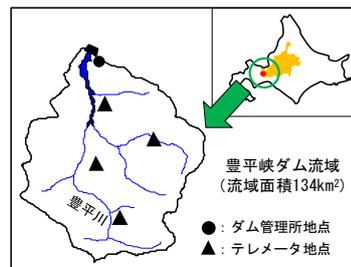


図-1 解析対象（豊平峡ダム）



図-2 豊平峡ダムにおける貯水位の変化

積雪期間は11月下旬～翌年5月中旬の約6カ月間で、融雪に伴う増水は4月中旬～5月下旬にみられる。降水量（雨量換算値）は約1,000mmで年間降水量の約50%を占め、融雪水は貴重な水資源である。しかし一方では、融雪洪水の原因ともなっている。このダムは洪水調節機能に加え、札幌市の水道水の供給と発電を担う多目的ダムであるが、1973年に運用が開始されて以来3度のただし書き操作が実施された。それはいずれも非洪水期（11月1日～翌年6月14日）に操作が行われた（1988年11月24日、1990年11月20日、2000年5月12日）。図-2は年間をとおした貯水位の推移であり、ただし書き操作が行われた事例に共通することは、利水のために貯水位を高く維持するために洪水調節機能が低い時期ということである。また、融雪が起きる時期には土壌が湿潤であるため、この時期に大雨が降った場合には、流出率は大きくなると見られる。したがって、より安全かつ普遍的な洪水対応のためには、このような洪水規模を定量的に評価して対応策を考えていく必要がある。

しかしながら、現高水計画では非洪水期における洪水規模の確率的な評価はなされておらず、また近年は気候変動による季節外れの大雨が懸念されている状況にある。そのような背景から、非洪水期における確率雨量を対数正規分布の岩井法を適用して求めた。使用したデータ<sup>5)</sup>は1973年～2008年の非洪水期における年最大流域平均3日雨量である。その結果、100年確率3日雨量とし

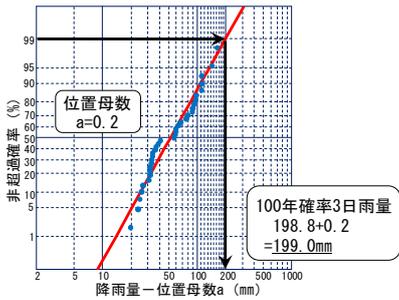


図-3 対数正規確率紙プロット  
(非洪水期年最大3日雨量, 岩井法, Cunnane Plot)

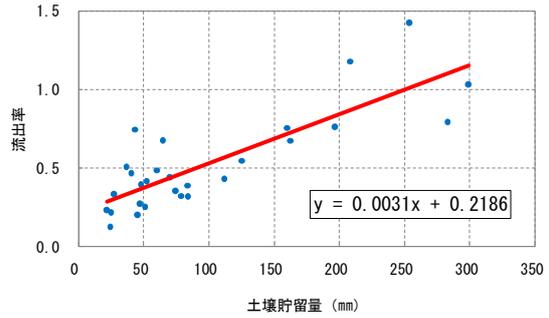


図-5 土壤貯留量と流出率の関係 (豊平峡ダム流域)

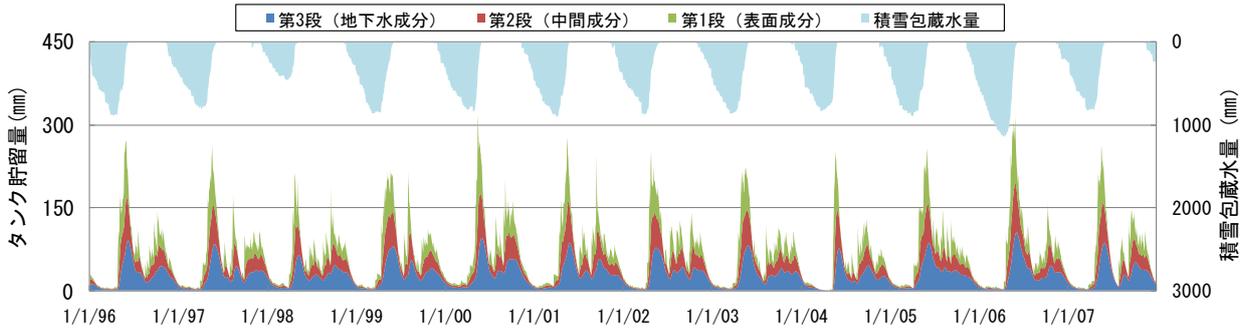


図-4 流域貯留量の推移 (豊平峡ダム流域, 1996. 1. 1~2007. 12. 31)

て 199 mm (標準最小二乗規準 SLSC, 0.039) という結果が得られた (図-3) . ここで 3 日雨量を用いたのは, ダム流域の現行計画雨量と同一条件で求めるためであり, ダム流域の現行計画雨量は 100 年確率 3 日雨量で 349 mm と設定されている.

### 3. 流域貯留量の評価

#### 3.1 流域貯留量の推算

流域内の土壤や積雪に存在する水量 (以下, 流域貯留量とする) の推算には, 流域スケールで長期的な水収支を表現できる長期熱・水収支モデル (口澤ら<sup>3)</sup>) と流出を的確に再現できる長期流出モデル (中津川ら<sup>4)</sup>) を組み合わせたモデルを用いた. なお, 長期流出計算におけるタンク貯留量を土壤貯留量とみなした.

1996 年~2007 年の 12 年間にわたる推定結果を図-4 に示す. これより, 土壤貯留量および積雪包蔵水量からなる流域貯留量を融雪期も含む長期間で再現できた. このようにして流域貯留量を把握することによって, 洪水調節の前倒し (事前放流) といったダム操作への活用が期待できると考えられる.

#### 3.2 土壤貯留量と流出率の関係

土壤中の水量の違いが流出量にどのような影響をもたらすかをみるために, 1996 年~2007 年において 2 日間総雨量が 100 mm 以上の 28 事例について, 土壤貯留量と流出率の関係を解析した. ここで, 土壤貯留量とは前述した長期流出計算による洪水事例対象日の前日の推算値, 流出率とは対象とした 2 日間の総観測流出量を総観測降雨量で除した値と定義する. 期間を 2 日間と設定したのは, 降雨 1 イベントが 2 日間に収まると見なされるためである. 図-5 に解析結果を示す. 大雨が降ったときの豊平峡ダム流域の流出率は, 土壤貯留量が 50 mm 程度の場合には約 0.4, 土壤がより湿潤な状態の 200 mm 程度の場合には約 0.8 というように, 土壤貯留量が大きくなるにつれて流出率が大きくなる傾向が得られた. また, 図-5 では流出率が 1.0 以上を示す部分が見られるが, これは流出率を求める際に分母で融雪量を考慮していないために, 過大評価したためである. このようにして前日までの土壤貯留量を把握しておく, その後の洪水流出の流出率を推計でき洪水予測の点で役立つと考えられる.

場合には約 0.4, 土壤がより湿潤な状態の 200 mm 程度の場合には約 0.8 というように, 土壤貯留量が大きくなるにつれて流出率が大きくなる傾向が得られた. また, 図-5 では流出率が 1.0 以上を示す部分が見られるが, これは流出率を求める際に分母で融雪量を考慮していないために, 過大評価したためである. このようにして前日までの土壤貯留量を把握しておく, その後の洪水流出の流出率を推計でき洪水予測の点で役立つと考えられる.

### 4. 流域貯留量を考慮した洪水流出の再現

#### 4.1 貯留関数法による短期流出計算

ここでは, 長期的に土壤貯留量の情報を把握しておくことは, その後の短期的な洪水流出計算で役立つかどうか, 洪水流出の再現を行うことで検討する. 再現洪水事例として融雪期の大雨により生じた洪水を 2 事例取り上げる (表-1) . 計算には, 融雪を伴った洪水を再現するため, 融雪・積雪浸透といった過程を考慮できる白谷ら<sup>6)</sup> の融雪流出モデルを適用した. このモデルでは, 2 段タンク型貯留関数法<sup>7)</sup> を用いる. これは流出過程を表面・中間流出と地下水流出の 2 成分に分離し, 両者を下記に示すように別々の貯留関数で表わす.

$$\begin{cases} s_1 = k_{11}q_1^{p_1} + k_{12} \frac{d}{dt}(q_1^{p_2}) \\ \frac{ds_1}{dt} = r_e - q_1 - f_1, f_1 = k_{13}q_1 \end{cases} \quad (1)$$

$$s_2 = k_{21}q_2 + k_{22} \frac{dq_2}{dt}, \quad \frac{ds_2}{dt} = f_1 - q_2 \quad (2)$$

ここで,  $s$ : 貯留量 (mm),  $q$ : 流出高 (mm/h),  $f$ : 浸透量 (mm/h),  $r_e$ : 有効雨量 (mm/h) で流出率×観測雨量,  $k$  および  $p$ : モデルパラメータ, 添え字の 1 および 2 は各々表面・中間流出および地下水流出を意味する.

土壤の貯留効果を流出計算に与える方法としては, 長

表-1 再現洪水事例（豊平峡ダム流域）

事例	再現期間	再現時間 (hr)	観測雨量 (mm)	観測流出高 (mm)	初期貯留量 (mm)
1	2000/5/11~5/13	72	110	184	208
2	2006/5/27~5/29	72	116	144	283

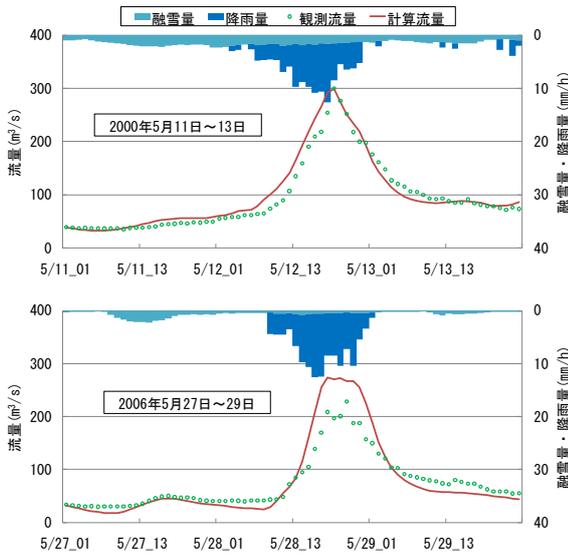


図-6 流出計算の再現結果  
(上段：事例1，下段：事例2)

期流出計算で推算された計算対象日の前日の土壌貯留量を初期条件として、図-5 に基づく流出率を降雨量に乗じることで与えた。すなわち、土壌貯留量に応じた有効雨量を与えることを意味する。なお、本報告で扱った両事例は融雪最盛期であることから土壌が湿潤状態とみなし、流出率は 1.0 として与えることとした。また、流出モデル（2 段タンク型貯留関数法）のパラメータは臼谷ら<sup>6)</sup> が同定した値を基本とし、再現性が向上するように試行錯誤により決定し、両事例で共通の値を使用した。

#### 4.2 流出計算の再現結果と考察

洪水流出の再現結果を図-6 に示す。両流出パターンを共通のパラメータでおおむね妥当に再現できたと見なせる。また、立ち上がりの流出量が的確に表現できていることに注目できる。つまり、洪水予測がその局面だけを抽出して行うものがほとんどであったが、長期的に流域貯留量を把握することは短期イベントの洪水流出の汎用的予測に有効であると考えられる。

### 5. ダムの洪水調節機能の評価

この章では、融雪期に生じ得る洪水規模を 100 年確率雨量と前章の流出モデルを用いて定量化し、ダムの対応シミュレーションを行うことでダムの洪水調節機能の改善策について検討する。

#### 5.1 ダム操作ルールの定式化

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  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  (洪水量) を超えると洪水調節に入り、 $60 \text{ m}^3/\text{s}$  から  $820 \text{ m}^3/\text{s}$  までの間は、次式によって放流量が算定される（定率操作）。

$$q_{out} = (q_{in} - 60) \times 0.105 + 60 \quad (3)$$

表-2 洪水規模の計算ケース

ケース	流出率	引伸ばし率	3日降雨量 (mm)	3日融雪量 (mm)	最大流入量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
1	1.00	1.81	199	108	509
2	1.00	1.72	199	44	491

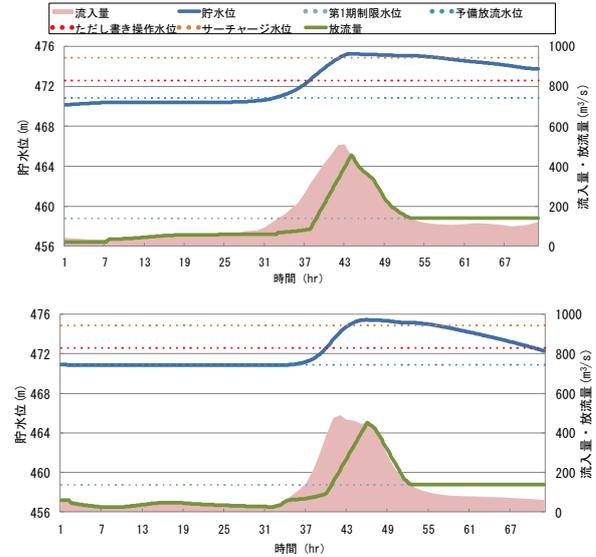


図-7 通常の操作による対応シミュレーション結果  
(上段：ケース1，下段：ケース2)

ここで、 $q_{out}$  : 放流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )、 $q_{in}$  : 流入量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) である。

次いで、流入量が  $820 \text{ m}^3/\text{s}$  を超えると、放流量  $140 \text{ m}^3/\text{s}$  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 ( $472.58 \text{ m}$ ) を超え、さらにサーチャージ水位 ( $474.88 \text{ m}$ ) 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。

本研究では、上記したダムの洪水調節に関する操作ルールを定式化（プログラム化）し解析を進めた（以下、ダム放流操作モデルとする）。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、モデル化にあたっては、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、ダム操作の実態から 10 分単位とした。なお、流入量は 1 時間間隔で計算されることから、その値を直線で補間して 10 分間隔の値に変換した上で、ここでのプログラムに入力した。

#### 5.2 ダムの洪水調節機能の改善策

洪水規模の計算は、前章の事例を基に融雪を伴った大雨を 2 パターン想定した（表-2）。ハイエトグラフは各事例で観測 3 日雨量を図-3 で求めた 100 年確率 3 日雨量  $199 \text{ mm}$  に引伸ばした降雨量と、前章で推算した融雪量を合算して設定した。それから流出計算で得られたハイドログラフをダム放流操作モデルに入力し、ダムの貯水位と放流量の対応シミュレーション結果（図-7）を得た。なお、初期貯水位は各事例の計算対象日前日の日平均貯水位<sup>5)</sup> を与えた。

その結果、両ケースともに貯水位がただし書き操作水位だけでなく、サーチャージ水位をも超過していることがわかる。これは非洪水期の多目的ダムでは、利水の確保のために貯水位を高く維持することによって、洪水調節を予備放流水位 ( $470.88 \text{ m}$ ) 以上の限られた容量を使

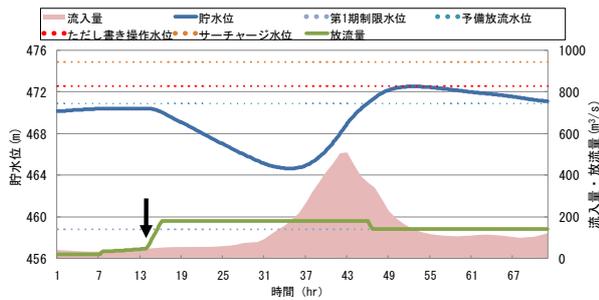


図-8 事前放流シミュレーション結果  
(ケース1, 図中の矢印は基準時刻の24時間前)

表-3 ただし書き操作を回避するための事前放流量

ケース	基準時刻	24時間前から開始した場合の事前放流量 (m³/s)	必要な事前放流量 (×10⁶ m³)	流域貯留量 (うち積雪包蔵水量) (×10⁶ m³)
1	図-7 (上段) の38時間目	180	15.6	96.6 (68.6, 71%)
2	図-7 (下段) の40時間目	165	14.3	60.2 (22.2, 37%)

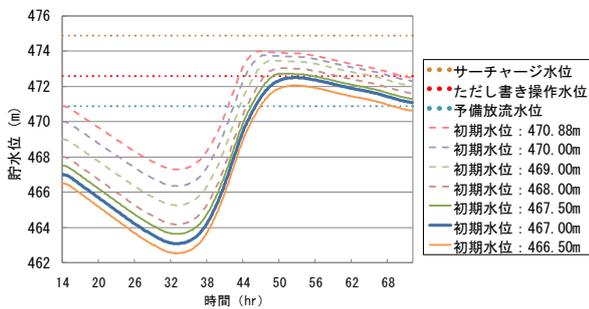


図-9 初期水位の設定の違いによる貯水位の変化  
(ケース1)

って行わなければならない管理が要求されており、洪水調節機能がもともと低いためである。そこで、非洪水期においては、貯水位が予備放流水位以下の時点から一時的に利水容量の一部を用いる事前放流を開始することによってただし書き操作を回避することが考えられる。

ただし書き操作水位に到達した時刻を事前放流開始の基準時刻とし、ただし書き操作の回避に必要な事前放流量をシミュレーションにより推計した。図-8 によれば、ケース1では基準時刻の24時間前から180 m³/sの事前放流を開始することによってただし書き操作を回避できるとわかる。シミュレーション結果の一覧を表-3に示す。これより、両ケースともに基準時刻の24時間前から事前放流を開始した場合でも、通常操作の無害放流量(60 m³/s)の約3倍もの流量を放流しなければならない結果となった。一方で、表-3の結果からは必要とされる事前放流量より多くの流域貯留量があることも推定されており、大胆な事前放流も可能と言える。すなわち、流域貯留量を把握しておくことで今後流入してくる水量の判断材料となり、予測が空振りした場合でも利水容量の回復判断に活用できると考えられる。

次に、流入量が820 m³/sを超えない状況にあっても、事前放流量を現況規則で洪水調節機能を最大限使ったといえる計画最大放流量140 m³/sとした場合に、基準時刻の何時間前から放流を開始しなければならないかを推計した。その結果、ケース1では基準時刻の36時間前、ケース2では同31時間前から放流を開始しなければただし書き操作は回避できないという結果となった。

図-9は、ケース1において事前放流量を140 m³/sに固定し放流開始時点(基準時刻の24時間前)の貯水位を変えて貯水位を計算した結果である。この図によれば、放流量を140 m³/sに設定すると、放流開始時の貯水位は467.00 m(現状予備放流水位470.88 mよりさらに3.88 m)まで下げることが必要と読み取れる。

以上より、非洪水期に想定される融雪洪水に対して、現況より無害流量(洪水調節開始前流量)の増量だけでなく、予備放流水位(洪水調節開始水位)の見直しを必要とする結果も示唆された。その場合、利水容量の確保も不可欠な命題となり、ダム容量の再編や複数ダムでの連携操作など総合的な水管理方策の検討が必要となる。

## 6. まとめ

本報告において得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 積雪地域のダム流域を対象に、十数年にわたり流域の流域貯留量が再現された。
- 2) 積雪包蔵水量と土壌貯留量を定量化することで、非洪水期(融雪出水期)における「汎用性のあるダム流入量予測、事前放流の実施、ただし書き操作の回避」に向けての方法論が提示できた。
- 3) 流域貯留量の把握によって、大胆な事前放流が可能となり、また利水容量の回復も判断できる可能性を示した。

謝辞：本論文をまとめるにあたり、石狩川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) 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) 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量の推定, 北海道開発土木研究所月報, No.588, pp.19-38, 2002.
- 4) 中津川誠, 濱原能成, 星 清: 積雪変化を考慮した長期流出計算, 水工学論文集, 第47巻, pp.157-162, 2003.
- 5) 国土交通省 水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp/>
- 6) 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.
- 7) 財団法人 北海道河川防災研究センター・研究所: 実践流出解析ゼミ(講義テキスト編), 第10章, 2006.
- 8) 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, 第53巻, pp.469-474, 2009.