

ダムの洪水管理への流域貯留量の活用

UTILIZATION OF THE STORAGE CAPACITY OF A BASIN FOR FLOOD CONTROL BY A DAM

臼谷友秀¹・中津川誠²

Tomohide USUTANI and Makoto NAKATSUGAWA

¹正会員 (財) 日本気象協会 北海道支社 (〒064-8555 札幌中央区北 4 条西 23 丁目)

²正会員 博士 (工学) 室蘭工業大学大学院工学研究科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

Efficient flood control by a dam requires proper understanding of the basin storage capacity (BSC) in upstream area, because flood runoff depends on the water content there. Using a long-term water cycle model, this paper estimates the BSC to be used for flood control. Two methods (1) the runoff percentage calculation and (2) the BSC-based minimum dam water level that secures the necessary water supply are proposed and applied to the flooding events with different basin conditions (wet/dry). The application results suggest that the BSC obtained from the long-term water balance is useful for effective flood control by a dam.

Key Words : basin storage capacity, long-term water cycle model, runoff percentage, pre-flooding release, minimum water level of a dam

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¹⁾。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。その一方で渇水リスクの増大も指摘され²⁾、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く、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。

ダムの操作に関する研究は古くから進められていたものの、平成 16 年に策定された豪雨災害対策緊急アクションプラン³⁾を受け、最近ではダムの洪水調節に関する報告が見受けられる。例えば、ダムの洪水機能の評価に関する研究⁴⁾や、事前放流の実施に予測雨量の活用を目指した研究^{5), 6)}、その一方で、予測雨量を使わずに流域の貯留機能に基づいて事前放流量を決定する方法⁷⁾も提案されている。

長雨の続いた後で流域が湿潤な状態にある場合は、雨が降り止んでも流出量の多い状態が続くことがある。また、融雪期は土壌が湿潤な状態にあることから、少量の降雨であっても、大規模な出水が生じた例もある。こ

のように、洪水時の流出状況は流域の乾湿状態に大きく依存している。このため、洪水予測を含めダムの洪水管理を効率的に行うには、流域の貯留している水量を的確に評価することが重要となる。

そこで本研究では、ダムの洪水調節機能の向上策として、流域貯留量を定量化し、それを利用した洪水ハイドログラフの再現、また、事前放流に対する回復可能水位の算定を試みた。具体的には次の手順で検討を進めた。

- 1) 気象データから長期の熱・水収支を推定し、それを入力条件として、タンクモデルで構成した分布型流出モデルによって流出量を算出した。以上により、長期にわたる水文諸量(降雨、降雪、積雪、融雪、蒸発散、流出)を推定した。
- 2) タンクモデルのタンク内残留水を貯留量とみなし、流域の貯留する水量を推算した。
- 3) 推定した貯留量と降雨時の流出率との関係を既往事例について調べ、流出率の算定式を導いた。この算定式に基づいて、土壌の乾湿状態の異なる洪水を再現した。
- 4) 流域貯留量から今後ダム貯水池に流入する水量を推算し、利水容量の確保できる最低限のダム貯水位を算定した。

以上の結果、提案した流域貯留量の推定手法は、洪水ハイドログラフの再現や、事前放流に対する回復可能水位を決定するのに有効であることがわかった。

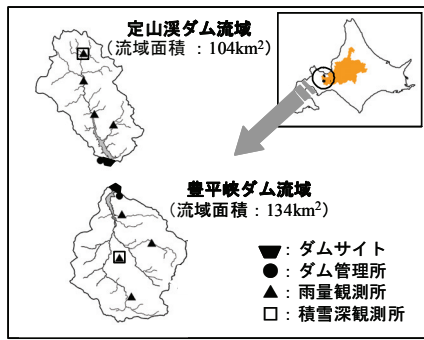


図-1 対象流域（豊平峡ダム流域、定山溪ダム流域）

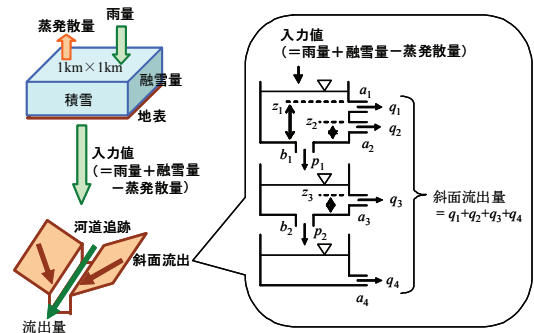


図-2 長期水循環計算の模式図

2. 対象流域の概要

対象とした流域は、札幌市を流れる豊平川の上流に位置する豊平峡ダム流域（流域面積：134 km²）と定山溪ダム流域（流域面積：104 km²）である（図-1）。これらのダムは、洪水調節（治水）および札幌市の水道水の供給と発電を担う多目的ダムである。流域の大半は常緑針葉樹林となっており、広葉樹の少ない積雪寒冷地特有の森林を成している。積雪期間は、11月下旬～翌年5月中旬の約6ヶ月間であり、4月中旬～5月下旬の1ヶ月半は融雪に伴う増水がみられる。

3. 洪水ハイドログラフの再現方法

(1) 流域貯留量の推定

流域貯留量を推定するには、流域スケールで長期的な水収支が担保され、加えて、流出状況を的確に再現できる手法が望ましい。そこで推定には、口澤ら⁸⁾の開発した流域水循環を定量化する手法を採用した。この手法では、地上気象データ（日単位）から約1 km四方のメッシュ毎の水文諸量（降雨、降雪、積雪、融雪、蒸発散量）が推定される。ここでは、ダム管理用のルーチンデータ（気温、湿度、降水量、風速など）を使用した。

以上で得た雨量と融雪量の合計から蒸発散量を差し引き、それを流出モデル⁹⁾に入力し、流出量を算出した。流出量の推定には、メッシュの斜面流出量をタンクモデルで算出し、kinematic wave式を用いて河道追跡を行った（図-2）。タンクモデルのパラメータは中津川ら¹⁰⁾の検討報告を用い、流域の全てのメッシュに同一の値を設定した。以上の計算過程において、斜面流出計算に用いたタンクモデルの貯留高をメッシュの貯留量とみなした。

(2) 流出率の算定

山田ら¹¹⁾は流域の保水能を考慮した流出率の推定方法を提案している。この方法では、初期水分量と累加雨量から流出率が算出される。すなわち、降雨前の土壌の乾湿状態と、降雨規模を反映した流出率が得られる。ここでは、山田らの方法で使われている初期水分量に前節で算出した貯留量を与え、これによって流出率が推定で

きるかを試みた。基礎式は次のように与えられる。

$$f_i = 1 - \frac{\exp(-\alpha S_1)}{\alpha \sum_{n=1}^i r_n} \left\{ 1 - \exp\left(-\alpha \sum_{n=1}^i r_n\right) \right\} \quad (1)$$

ここで、 f_i ：降雨開始*i*時間後の流出率、 S_1 ：降雨開始前日における貯留量（1段目タンクの貯留高）（mm）、 r_n ：時刻*n*の雨量強度（mm/h）、 α ：未知定数。

式（1）の未知定数 α は、観測データから決めるべきだが、毎時の流出率 f_i は観測値からは得られない。そこで、任意の α を式（1）に与えて有効雨量の合計を求め、その値と総直接流出高（観測流入量から求まる直接流出高の合計）との差が最小になるように決定した。具体的には、次に示す評価関数*J*を最小にする α を採用した。

$$J = \left(\sum_{i=1}^m f_i r_i - \sum_{i=1}^m q_i \right)^2 \quad (2)$$

ここで、 f_i ：式（1）で与えられる時刻*i*における流出率、 r_i ：時刻*i*における時間雨量（mm/h）、 q_i ：時刻*i*における直接流出高（mm/h）、 m ：データ数。

なお、直接流出高は、洪水開始前の流量を基底流量として、水平分離によって算出した。このため、解析の対象が表面流出になる。このような理由から、式（1）の初期貯留高 S_1 には、1段目タンクの貯留高を採用している。

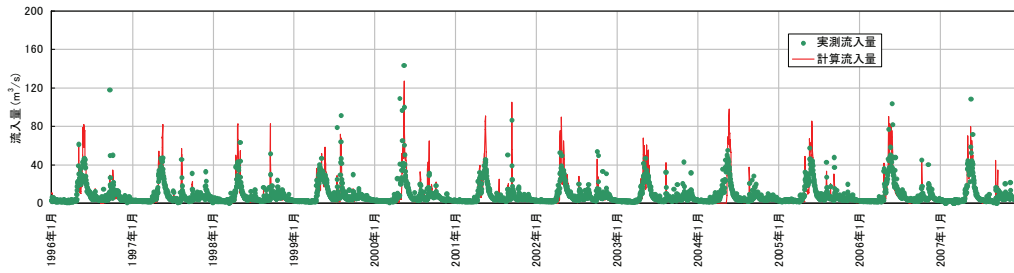
(3) 流出計算

流出率算定式を用いて有効雨量を求め、その値から洪水ハイドログラフを算出する。ここでは、計算対象を直接流出量とし、斜面流出と河道追跡とを組み合わせ計算を行った。用いた基礎式は次のとおりである。

$$\text{斜面流出} : \begin{cases} \frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = fr, q_s = \beta h_s^p \\ \beta = \sqrt{i_s} / n_s, p = 5/3 \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{河道追跡}^9) : \frac{\partial q_c}{\partial t} + \frac{5}{3} \frac{i_c^{0.3} q_c^{0.4}}{n_c^{0.6} B^{0.4}} \frac{\partial q_c}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

豊平峡ダム流域：1996年～2007年



定山溪ダム流域：1996年～2007年

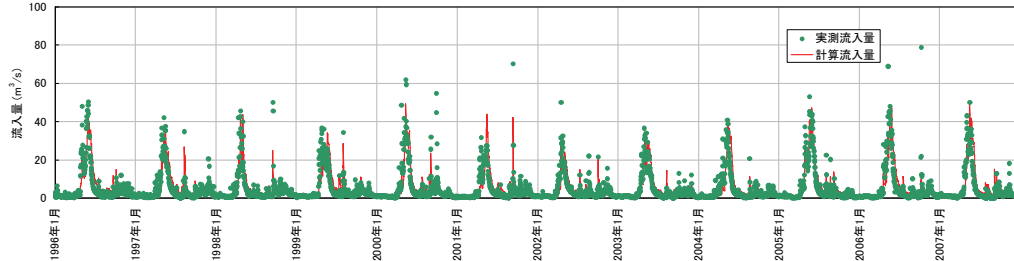
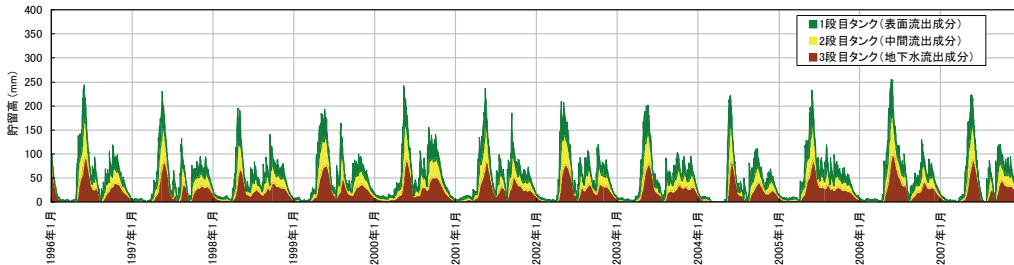


図-3 ハイドログラフの再現結果. 上段：豊平峡ダム流域, 下段：定山溪ダム流域.

豊平峡ダム流域：1996年～2007年



定山溪ダム流域：1996年～2007年

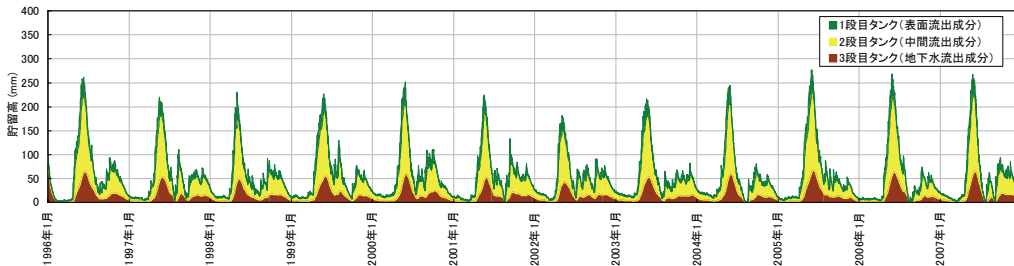


図-4 流域貯留量の推定結果. 上段：豊平峡ダム流域, 下段：定山溪ダム流域.

ここで、 h_s ：斜面の水位 (m)、 q_s ：単位幅流量 (m^2/s)、 f ：式 (1) によって決まる流出率、 r ：雨量強度 (m/s)、 i_s ：斜面勾配、 n_s ：等価粗度 ($m^{-1/3}$)、 h_c ：河道の水位 (m)、 q_c ：河道の流量 (m^3/s)、 n_c ：粗度係数 ($m^{-1/3}$)、 i_c ：河道勾配、 B ：河道幅 (m)。

式 (4) の河道幅 B は、山口ら¹²⁾ の報告を参考に、流域面積 A (km^2) から次のように与えた。

$$B = 3.476A^{0.435} \quad (5)$$

等価粗度は地帯に応じて変わるものの、当該流域は全て林地であることから $n_s = 0.04$ を設定した。また、河道の粗度係数には $n_c = 0.03$ を与えた。河道勾配と斜面勾配は、石狩川ランドスケープ情報¹³⁾ から与えた。なお、以上の計算では直接流出量が算出される。この計算値に基底流量 (降雨開始前の流量) を一律加算して全流量とした。

4. 洪水ハイドログラフの再現結果

(1) 流域貯留量の推定結果

前章の方法によって流域貯留量が推定されるが、その値は直接的には検証できない。そこで流域貯留量の妥当性は、タンクモデルによる計算流入量の再現性によって確認した。

図-3 は、1996 年～2007 年の流入量を再現した結果である。緑色の丸印は実測流入量、赤色の実線は計算流入量を表している。この図から、計算流入量は、長期間の流出状況を適切に再現していることがわかる。流出量を再現するには、タンク貯留高が実態に合っていないと仮定して、計算値が実測値に符合した結果は、タンク貯留高が良好に推定されていることを示したものと考えられる。

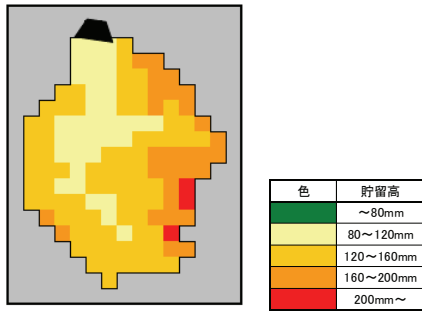


図-5 豊平峡ダム流域における2000年6月1日のタンク貯留高の分布。貯留高は、1~3段目のタンク貯留高の合計

表-1 豊平峡ダム流域の最適 α

No	降雨期間		合計雨量 mm	総直接流出高 mm	降雨開始前日の 1段目タンクの 貯留高 (mm)	最適 α	採用 α	算定流出率	
	年	降雨開始 ~ 降雨終了						降雨開始時	降雨終了時
1	1996	09月19日22時 ~ 09月21日04時	162	82.96	10.97	0.0126	0.0085	0.09	0.53
2	1996	10月04日00時 ~ 10月04日15時	102	33.64	6.32	0.0130	0.0085	0.06	0.37
3	1997	09月26日04時 ~ 09月27日18時	102	20.12	2.01	0.0053	0.0085	0.02	0.40
4	1998	09月16日01時 ~ 09月17日06時	127	43.14	6.93	0.0110	0.0085	0.06	0.43
5	1999	07月13日15時 ~ 07月14日18時	160	51.2	0.00	0.0097	0.0085	0.00	0.46
6	1999	07月29日20時 ~ 07月31日19時	137	45.93	30.73	0.0040	0.0085	0.23	0.61
7	1999	08月01日12時 ~ 08月02日12時	117	47.65	81.20	0.0047	0.0085	0.50	0.68
8	2000	09月01日12時 ~ 09月03日03時	102	28.22	29.43	0.0059	0.0085	0.22	0.50
9	2001	08月22日06時 ~ 08月23日15時	140	35.53	0.00	0.0088	0.0085	0.00	0.42
10	2001	09月10日05時 ~ 09月12日16時	155	69.95	32.50	0.0088	0.0085	0.24	0.58
11	2005	08月02日20時 ~ 08月04日08時	116	34.7	20.39	0.0071	0.0085	0.19	0.47
12	2005	09月07日04時 ~ 09月08日06時	139	43.03	0.00	0.0115	0.0085	0.00	0.41
13	2006	10月07日05時 ~ 10月08日17時	121	39.63	20.87	0.0080	0.0085	0.17	0.48
						平均値(採用 α)	0.0085		

表-2 定山溪ダム流域の最適 α

No	降雨期間		合計雨量 mm	総直接流出高 mm	降雨開始前日の 1段目タンクの 貯留高 (mm)	最適 α	採用 α	算定流出率	
	年	降雨開始 ~ 降雨終了						降雨開始時	降雨終了時
1	1997	08月09日11時 ~ 08月10日09時	83	27.17	16.14	0.0107	0.0130	0.19	0.50
2	1998	09月16日02時 ~ 09月17日08時	157	67.43	9.73	0.0125	0.0130	0.12	0.62
3	2000	09月01日13時 ~ 09月03日04時	111	40.23	8.77	0.0132	0.0130	0.11	0.53
4	2000	09月26日04時 ~ 09月28日20時	137	93.30	6.61	0.0249	0.0130	0.23	0.64
5	2001	09月10日13時 ~ 09月12日08時	147	65.56	13.34	0.0130	0.0130	0.16	0.63
6	2004	08月20日00時 ~ 08月20日17時	106	16.39	0.38	0.0062	0.0130	0.02	0.46
7	2005	08月02日15時 ~ 08月03日18時	80	21.15	4.97	0.0123	0.0130	0.07	0.42
8	2006	10月07日05時 ~ 10月08日14時	120	76.53	4.73	0.0114	0.0130	0.32	0.70
						平均値(採用 α)	0.0130		

図-4 は流域貯留量を時系列で図化したものである。この図における流域貯留量は、メッシュ毎に算出したタンクの貯留高を流域内で平均化した値である。この図によると、水の供給量の少ない厳冬のタンク貯留高が低い。その一方で、融雪期の貯留高が大きく、この時期の土壌が多量の水を含んでいる様子がわかる。このような特徴は、一般的に言われる内容ではあるものの、ここでの結果は、土壌が貯留する水量を定量的に表される利点がある。また、図-5 は2000年6月1日における豊平峡ダム流域の貯留量分布であるが、このように面的な把握も可能である。

(2) 流出率算定式の決定

前章の方法によって、流出率算定式の未知定数 α を決めた。ここでは、複数の降雨事例を抽出し、各事例から得られた α の平均値を流域の代表値とした。

表-1 は豊平峡ダム流域の計算例である。降雨事例としては総雨量100 mm以上の13例を用いた。この結果、 $\alpha=0.0085$ を得た。また、定山溪ダムも同様の処理の結果、 $\alpha=0.0130$ を得た(表-2)。なお、定山溪ダム流域

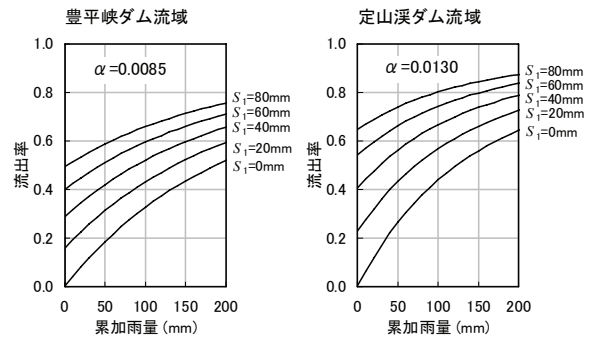
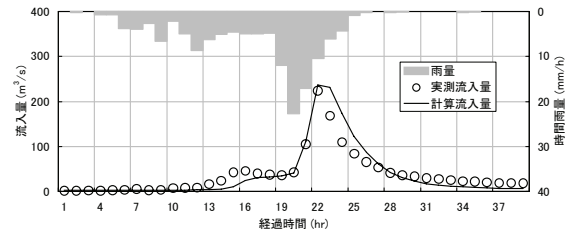


図-6 流出率の算定曲線。左：豊平峡ダム流域、右：定山溪ダム流域。

2001年8月22日~8月23日



2005年9月7日~9月8日

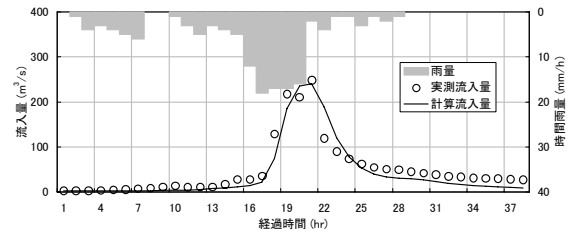


図-7 豊平峡ダムにおける夏期洪水の再現結果。上段：2001年8月22日~23日、下段：2005年9月7日~8日。

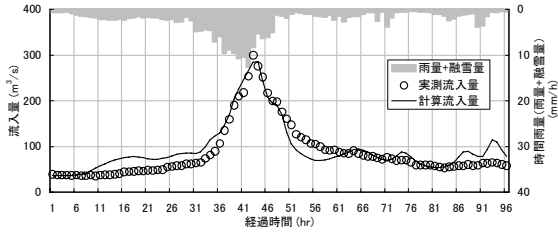
では総雨量100 mm以上の降雨事例が少ないことから、80 mm以上の8事例から決めた。

以上で得た流出率算定式の特性を図-6に示す。図中の横軸は累加雨量、縦軸は流出率である。図では、1段目タンクの貯留高 S_1 が0 mm, 20 mm, 40 mm, 60 mm, 80 mmの流出率について示してある。図によると、累加雨量およびタンク貯留高の増大とともに流出率が増加することがわかる。豊平峡ダム流域の場合、貯留高 $S_1=60$ mmの流出率は、降雨開始時(累加雨量が0 mm)では0.4である。この値は、貯留高 $S_1=0$ mmの場合では累加雨量が約130 mmの場合に相当する。このように、ここで決めた流出率算定式は、初期貯留高を大きく反映した特性を持つことがわかった。

(3) 洪水ハイドログラフの再現結果

以上で決定した流出率算定式を用いて洪水ハイドログラフを再現した。その結果を図-7~図-9に示す。図-7と図-8は、それぞれ、豊平峡ダム流域の夏期洪水と融雪期の洪水を再現した結果、図-9は定山溪ダム流域の結果である。図の左側の縦軸は流入量、右側の縦軸は時間雨量である。図中、○印は実測流入量、黒色の実線は

2000年5月11日～5月14日



2006年5月27日～5月30日

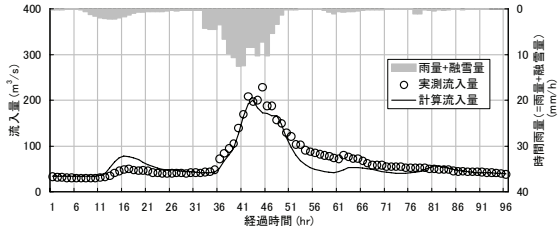


図-8 豊平峡ダムにおける融雪期洪水の再現結果。上段：2000年5月11日～15日，下段：2006年5月27日～31日。

計算流入量を表している。また、灰色の棒グラフは雨量（もしくは、雨量と融雪量の合計）である。なお、融雪量は、臼谷らの提案する手法¹⁴⁾によって推定した。

これらの図によると、計算ハイドログラフは、逡減部に課題はあるものの、夏期洪水、ならびに、融雪期の洪水を良好に再現していることがわかる。また、異なる流域においても良好な再現性が得られている。

以上の結果、提案する流出率算定式は、夏期・融雪期を問わず適切な流出率を与えることがわかった。さらに、流出率を決めるのに流域貯留量が有効な情報であること、また、提案する流出率算定式は汎用性のあることもわかった。

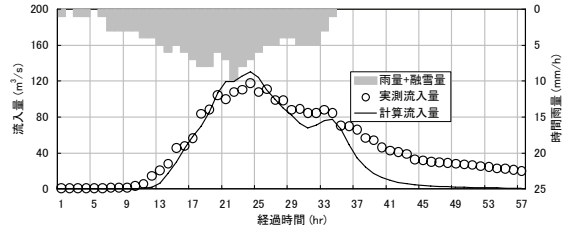
5. 流域貯留量を利用した容量回復の判断

(1) 豊平峡ダムにおける管理上の課題

豊平峡ダムでは、これまで、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-10に年間をとおした貯水位を示すが、ただし書き操作は、利水目的で貯水位を高くしている時期、すなわち、洪水調節機能の低い時期に行われていた。近年、このような時期に大雨が発生しており、洪水への対応が課題となっている。

このような背景から筆者ら⁶⁾は、予測雨量を用いたダムの放流操作法を提案している。この提案の特徴は、時系列予測雨量に比べて予測精度の安定している積算予測雨量を利用している点にある。具体的な操作は、まず、積算予測雨量の1.8倍の値を用いて今後流入する水量を予想する。積算予測雨量に乗じる1.8は、予測雨量と実測雨量の対応から導いた値である。このように得た今後流入することが想定される水量と、ダムの空き容量とを比較し、もし、空き容量が不足する場合は、事前放流を開始するものである。この提案をただし書き操作を必要

夏期洪水：2006年10月7日～10月9日



融雪洪水：2000年5月11日～5月14日

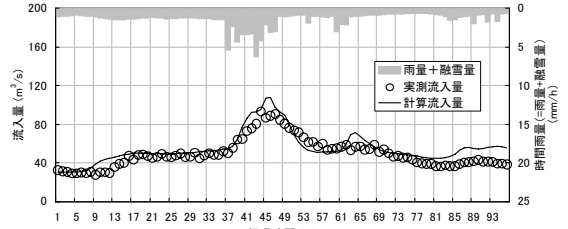


図-9 定山溪ダムにおける洪水再現結果。上段：夏期洪水，下段：融雪洪水。

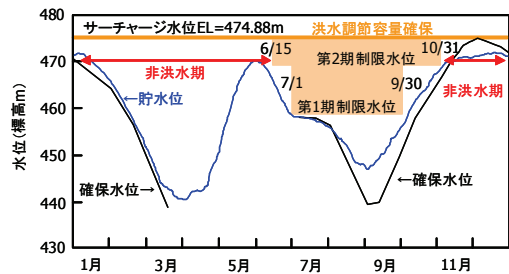


図-10 豊平峡ダムにおける貯水位の年間推移

とする大規模洪水に適用し、ただし書き操作が回避可能であることを示した。また、融雪期における小規模洪水に対しても、利水容量を損ねることなく洪水調節ができることも報告している。

しかしながら、予測雨量は完全ではなく、外れることもある。もし、予想されていた降雨が実際に降らなかった場合、事前放流によって過剰に貯水位を下げ、その結果、洪水後の利水容量の確保が困難になることが懸念される。

(2) 回復可能水位の算出

そこで、流域貯留量を利用し、回復可能な貯水位の算定を試みた。

4章において日々の流出量を計算した際、同時に、タンクの貯留高が算出される。任意の日における貯留高が定まれば、それをタンクモデルの初期値として、入力雨量の無い場合の流出量が計算できる。この計算で得られる流出量は、ダムに流入する最少の水量といえる。すなわち、降雨が無くてもダムに流入する水量である。したがって、この水量を、確保すべき貯水量から差し引いて得られる貯水位は、雨が降らなくても回復できる貯水位といえる。

以上の考えに基づいて回復可能水位を計算した結果が図-11である。上段は貯水位、下段は流入量および放流

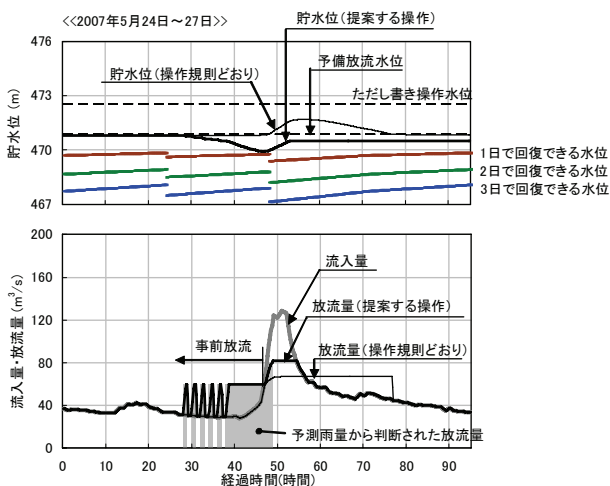


図-11 流域貯留量に基づく回復可能貯水位の算定結果. 2007年5月24日~27日.

量である。図には、操作規則どおりに放流操作を行ったシミュレーション結果、また、前述した筆者らが提案する操作ルールに従ったシミュレーション結果を示した。上段の図において、茶色、緑色、青色の線は、それぞれ、1日後、2日後、3日後に、降雨が無くても予備放流水位にまで回復できる貯水位を表している。なお、回復可能水位は、日単位の計算流入量から算出した。また、回復可能貯水位が不連続になっている部分は日界にあたる。

この例は、出水規模としては比較的小さく、操作規則どおりの操作で問題なく洪水調節ができる洪水である。

図-11によると、積算予測雨量を参照して放流を行う場合、流入量の増加が始まる約20時間前に事前放流が開始され、流入量が増加する時点では貯水位が大きく低下している。しかし、ここで提案した回復可能水位と比較すると、最も低下した時点の貯水位は、降雨がなくても1日で回復できる水位(茶色の線)と判断できる。また、3日程度の回復期間を設ければ、さらに多量の放流が可能であることも示している。

事前放流の実施にあたっては、洪水後には利水容量が確保されていなければならない。ここで示した回復可能水位の算定方法は、長期水収支に裏付けられた有効な手法と考えられる。

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) ダム流域を対象に、長期の熱・水収支および流出計算をとおり、流域貯留量を含む一連の水文諸量を包括的に推定した。
- 2) 推定した流域貯留量と降雨イベントの累加雨量を用いた流出率算定式を導いた。
- 3) 流出率算定式を用いて、土壌の乾湿状態の異なる夏期と融雪期の洪水ハイドログラフを計算した。その結果、季節を問わず、同一の計算手法で洪水

ハイドログラフが再現できた。

- 4) 流域貯留量を利用し、貯水位の回復可能水位を算定する手法を提案した。この手法は、雨量予測が外れた場合の容量回復判断に有効と考えられる。

以上、長期水収支に裏付けられた流域貯留量は、ダムの洪水管理に有効な情報であると考えられる。

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協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

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) 国土交通省：国土交通省白書2008, pp.3-12, 2008.
- 3) 国土交通省：豪雨災害対策緊急アクションプラン, 2004.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 白谷友秀, 中津川誠：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, 2010.
- 7) 坂下将史, 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B, Vol.65, No.2, pp.106-122, 2009.
- 8) 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.
- 9) 白谷友秀, 工藤啓介, 中津川誠：石狩川を対象にした水循環の定量化, 北海道開発土木研究所月報, No.628, pp.18-34, 2005.
- 10) 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.
- 11) 山田正, 山崎幸二：流域における保水能の分布が流出に与える影響について, 第27回水理講演会, pp.385-392, 1983.
- 12) 山口甲, 新庄興, 三田村一弘, 上野順也：豊平川の生産土砂について：土木学会北海道支部 論文報告集 第55号(B), pp.268-271, 1998.
- 13) (財)北海道河川防災研究センター：石狩川流域ランドスケープ情報, 1998.
- 14) 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.

(2010.9.30 受付)