

ダム機能向上のための流域貯留量の定量化

QUANTITATIVE ANALYSIS OF THE BASIN STORAGE CAPACITY TOWARD IMPROVEMENT OF FLOOD CONTROL BY DAMS

臼谷友秀¹・中津川誠²

Tomohide USUTANI, Makoto NAKATSUGAWA

¹ 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)

² 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 cope with climate change, there are calls to improve the flood control and water utilization capacities of multi-purpose dams. Because the runoff of a river depends on the wet/dry conditions of the basin, quantitative understanding of the basin storage capacity is indispensable for effective control of dams. In this paper, we quantify the basin storage capacity by making a long-term assessment of the hydrologic cycle. In addition, using the basin storage capacity, we propose methods for calculating the minimum dam water level that secures the capacity for water utilization and for calculating the percentage of runoff. Applying these methods to several cases of flooding events with different wet/dry conditions of the basin and to several cases of dam control proved that using the long-term hydrologic cycle to assess the basin storage capacity effectively improves dam operations.

Key Words : basin storage capacity, long-term hydrologic cycle, runoff percentage, pre-flooding release, capacity for water utilization

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考えられる。

そこで本報告では、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とおしてダムの洪水調節機能の向上策を検討した。具体的には次の手順で検討を進めた。

- 1) 長期水循環モデルによって流域貯留量の空間分布を推定した。
- 2) 流域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。この流出率算定式に基づいて、土壌の乾湿状態の異なる洪水を再現した。
- 3) 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見積もるのに有効であることがわかった。

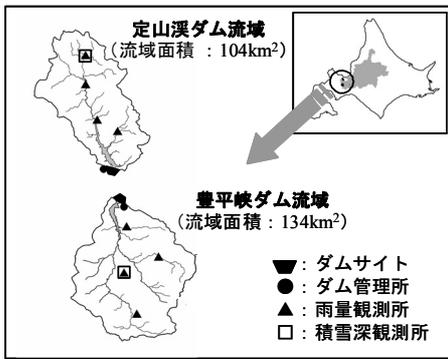


図-1 対象流域(豊平峡ダム流域, 定山溪ダム流域)

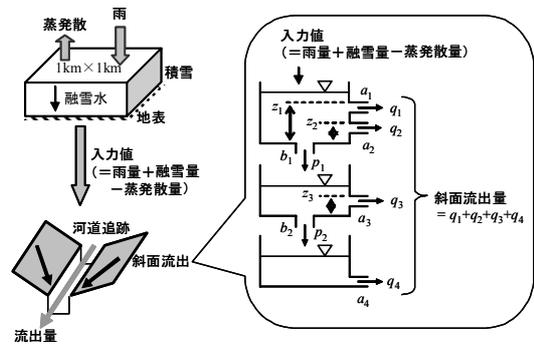


図-2 長期水循環の計算イメージ

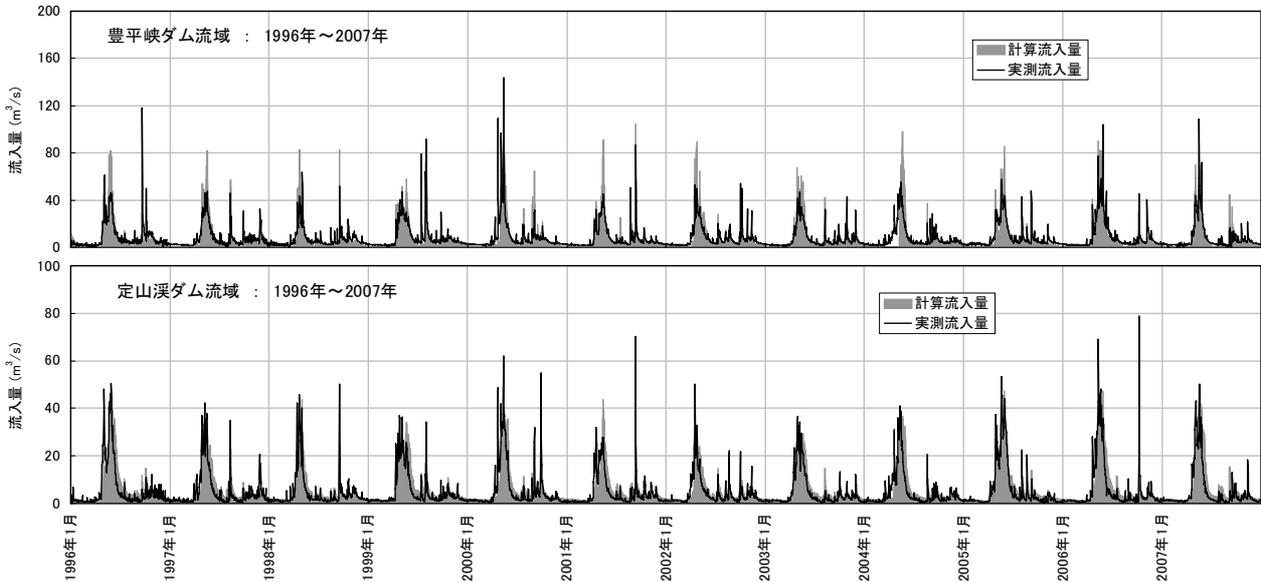


図-3 長期流入量の再現結果. 上段: 豊平峡ダム, 下段: 定山溪ダム.

2. 対象流域

対象とした流域は、200万都市札幌を貫流する豊平川の上流部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で占められ、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. 流域貯留量の定量化

(1) 流域貯留量の計算方法

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ていることが重要と考えられる。そこで、流域貯留量の推定にあたっては、口澤らが開発した水・熱収支モデルを採用した⁸⁾。この手法では、地上気象データ(日単位)から約1km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の検討報告¹⁰⁾を用い、流域の全てのメッシュに同一の値を設定した。以上の計算において、各メッシュのタンク貯留高を流域貯留量とみなした。

(2) 流域貯留量の推定結果

以上で求めた流域貯留量の妥当性は、直接的には検証できない。そこで、タンクモデルと河道追跡によって得られるダム地点の流入量の再現性によって、推定値の妥当性を確認した。

図-3は、1996年～2007年の流入量を再現した結果である。実線は実測流入量、灰色の面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ければならない。したがって、計算流入量の実績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

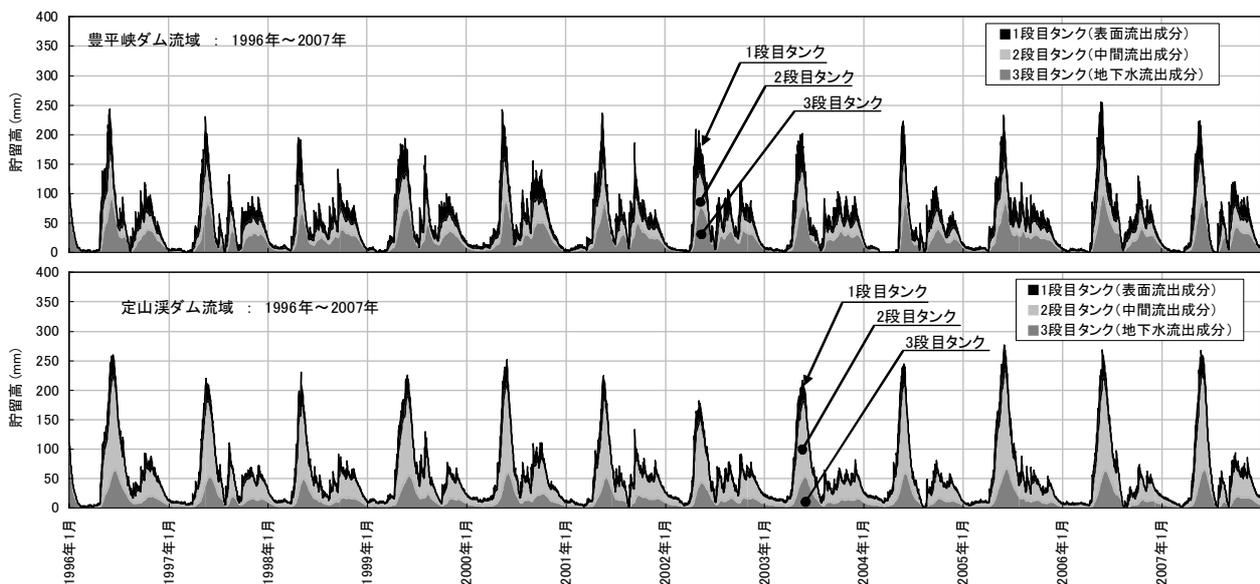


図-4 流域貯留量の長期変化. 上段：豊平峡ダム，下段：定山溪ダム。

れる。

図-4は流域貯留量を時系列で図化したものである。ここに示した流域貯留量は、メッシュ毎に計算される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期のタンク貯留高は低く、その一方で、融雪期の貯留高が大きい。融雪期の土壌が多量の水を含んでおり、湿潤状態が長期間つづく様子がわかる。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すことができるものである。

4. 流域貯留量を用いた流出率の定式化

(1) 流出率の算定方法

山田ら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¹¹⁾。この方法において流出率は、初期水分量と累加雨量から算出される。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章で求めた貯留量を与え、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)の未知定数は、観測データから決めるべきだが、洪水事例から得られる流出率は、洪水期間中の平均的な値である。そこで未知定数 α は、式(1)に任意の α を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とから、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た。

(2) 流出率算定式の決定

以上の手順で決めた最適値 α を表-1と表-2に示す。この表には、降雨事例ごとに求めた最適 α と、それらの平均値を示した。本報告では、各事例の最適 α の平均値を流域の代表値とした。以上から、豊平峡ダムは $\alpha=0.0085$ 、定山溪ダムでは $\alpha=0.0130$ を得た。

このように得た流出率算定式の特性を示したものが図-5である。図中の横軸は累加雨量、縦軸は流出率である。図の左側に豊平峡ダム流域、右側には定山溪ダム流域を示した。図中の曲線は、1段目タンクの初期貯留高 S_1 が0 mm、20 mm、40 mm、60 mm、80 mmのときの、累加雨量と流出率の関係である。洪水前の初期貯留高で1本の曲線が定まり、さらに、降雨開始からの累加雨量によって刻々と変化する流出率が得られる。図によると、累加雨量および初期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 = 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=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

表-1 豊平峡ダム流域における α の最適値

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	45.83	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 定山溪ダム流における α の最適値

No	降雨期間		合計雨量 mm	総直接 流出高 mm	降雨開始前日の 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	150	76.53	4.73	0.0114	0.0130	0.32	0.70
平均値(採用 α)						0.0130			

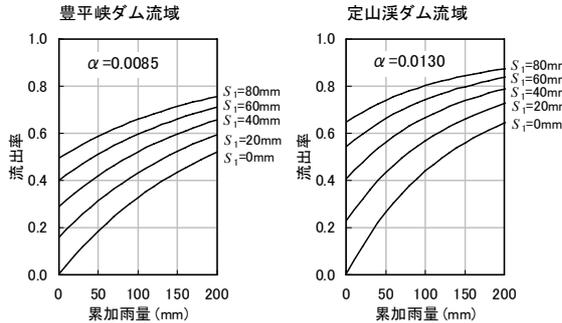


図-5 流出率の特性曲線。左：豊平峡ダム流域，右：定山溪ダム流域。

ことがわかった。

(3) 洪水ハイドログラフの再現への適用

以上で決定した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の再現を試みた。

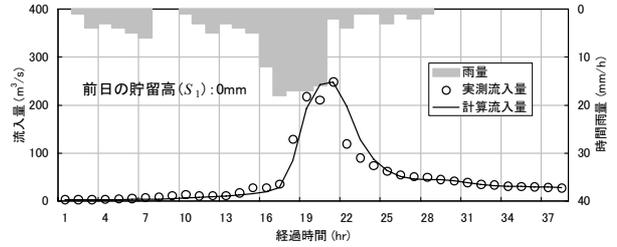
流出計算は、以下に示す斜面流出モデルと河道追跡モデルとを組み合わせて行った。斜面流出モデルには、直接流出と地下水流出の2成分を考慮し、次に示す基礎式を用いた。

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

$$\text{地下水流出: } \begin{cases} s = k_1 q_b + k_2 dq_b/dt \\ ds/dt = (1-f)r - q_b \\ k_1 = c_1 k_2, k_2 = (c_3 - 1)/c_0 \\ c_0 = (\delta/T_c)^2, c_1 = \delta^2/T_c \end{cases} \quad (4)$$

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),

2005年9月7日~9月8日



2000年5月11日~5月14日

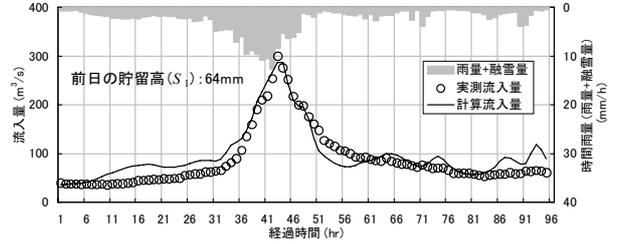
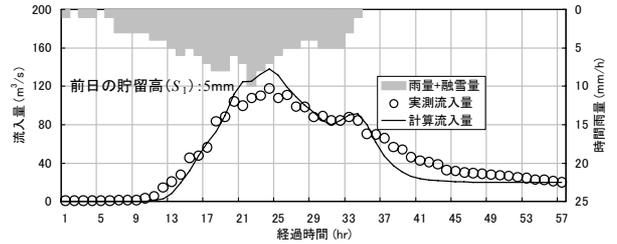


図-6 豊平峡ダムにおける洪水流量の再現結果。上段：夏期洪水，下段：融雪洪水。

2006年10月7日~10月9日



2000年5月11日~5月14日

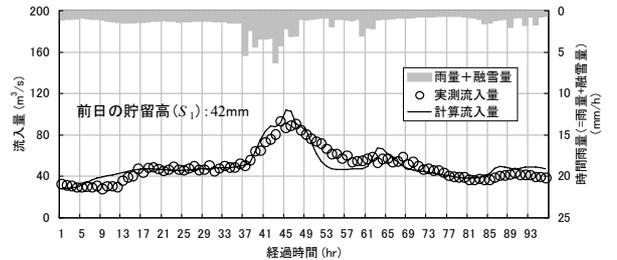


図-7 定山溪ダムにおける洪水流量の再現結果。上段：夏期洪水，下段：融雪洪水。

i_s : 斜面勾配, n_s : 等価粗度 ($m^{-1/3}$), s : 貯留高 (mm), q_b : 地下流出成分流出高 (mm/h), c_3 : モデル定数, δ : 減衰係数 (=2.1), T_c : 地下水流出成分の時定数。なお、等価粗度は、当該流域が全て林地であることから $n_s=0.04$ を設定した。また、モデル定数は $c_3=3.0$, $T_c=60$ とした。

河道追跡には次式を用いた¹²⁾。

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

ここで、 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)。河道の粗度係数には $n_c=0.03$ を与えた。河道幅 B は、山口ら¹³⁾ が提案する式によって決めた。河道勾配や斜面勾配、落水方向などの地形情報は石狩川ランドスケープ情

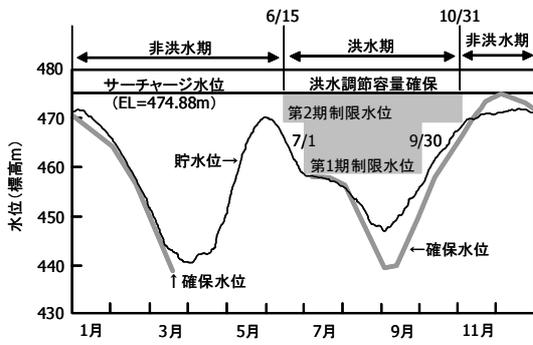


図-8 豊平峡ダムにおける貯水位の年間推移

報¹⁴⁾ から与えた。

再現結果を図-6 と図-7 に示す。図-6 は豊平峡ダム、図-7 は定山溪ダムの結果である。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¹⁵⁾ 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、夏期洪水、ならびに、融雪期の洪水を再現している。図には前日の貯留高を示したが、流域の乾湿状態の異なる場合においても良好な結果であった。また、異なる流域においても良好な再現性が得られた。

以上から、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利水容量の回復判断

(1) 洪水調整の課題とそれに向けた提案

豊平峡ダムでは、利水目的で貯水位を高くしている非洪水期（図-8 参照）において、過去に3度、ただし書き操作が実施された（1988年11月24日、1990年11月20日、2000年5月12日）。近年、このような時期に大雨が発生しており、洪水調節機能の低い時期に発生する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は、予測雨量を用いたダムの放流操作法を提案している¹⁶⁾。提案する操作フローを図-9 に示すが、提案の特徴は、時系列予測雨量ではなく、予測精度の安定している積算予測雨量を利用する点にある。予測雨量を1.8倍した値を入力すべき総降水量とし、今後ダムに流入する水の総量を予想する。この水量とダム貯水池の空き容量との比較をとおして事前放流を開始するものである。この提案を既往洪水に適用した結果、大規模洪水においては、ただし書き操作が回避可能であった。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

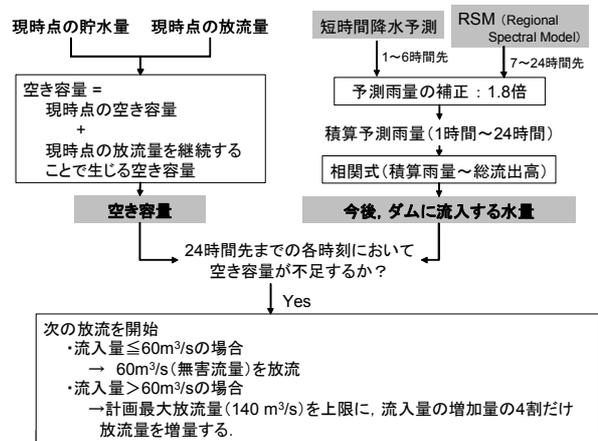


図-9 積算予測雨量を利用した放流操作法¹⁶⁾

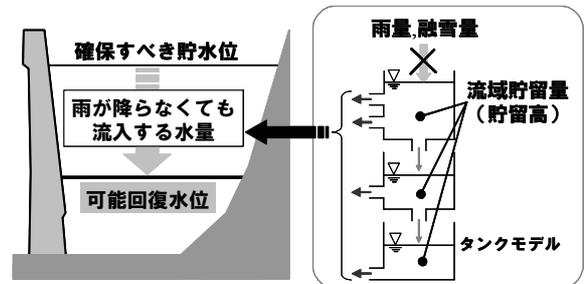


図-10 回復可能水位の考え方

ている。

しかしながら、急激に発達する雷雨など、予測の難しい現象もある。もし、予想され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、洪水後に利水容量が確保できないことが懸念される。

そこで、前述の流域貯留量を利用して、回復可能な貯水位の算定を試みた。

(2) 回復可能水位の算出

3章において日々の流出量を計算する際、同時に、タンクの貯留高も算出されている。貯留高が定まれば、それをタンクモデルの初期値にして、入力雨量の無い条件での流出量が計算できる。ここで得られる水量は、雨が降らなくてもダムに流入してくる水量、すなわち、今後ダムに流入する最低限の水量といえる。この水量を、確保すべき貯水位から差し引いた貯水位は、雨が降らなくても回復できる貯水位といえる（図-10）。

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。図の上段は貯水位、下段は流入量と放流量である。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、灰色の3本の線は、上から、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ている。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

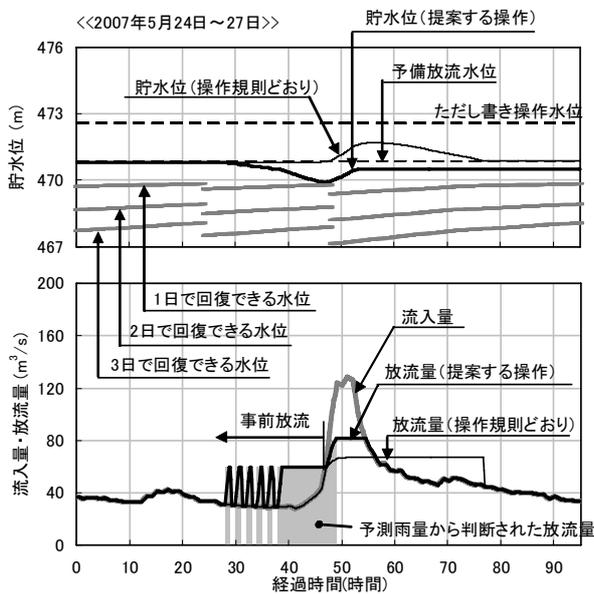


図-11 流域貯留量に基づく回復可能貯水位の算定結果. 2007年5月24日～27日.

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時間前に事前放流を開始し、流入量が増加する時点（経過時間が42時間の時点）では貯水位が大きく低下している。しかし、貯水位と回復可能水位とを比較すると、最も低い時点の貯水位は、降雨がなくても1日で回復できる水位と判断できる。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季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、雨量予測が外れることを想定した容量回復判断を行う際に有効な情報と考えられる。

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) 三石真也, 尾関敏久, 角哲也: 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. 2, pp. 110-120, 2011.
- 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) 臼谷友秀, 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) 臼谷友秀, 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.
- 13) 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.
- 14) (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.
- 15) 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.
- 16) 臼谷友秀, 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.

(2011. 5. 19 受付)