

流域貯留量を考慮した現業用洪水予測手法の改良

IMPROVING FLOOD PREDICTION TECHNIQUES FOR RIVER MANAGEMENT BY CONSIDERING THE BASIN STORAGE CAPACITY

臼谷友秀¹・中津川誠²・松岡直基³

Tomohide USUTANI, Makoto NAKATSUGAWA and Naoki MATSUOKA

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

³ 非会員 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)

The model parameters for flood prediction currently used by river management have been established based on the relationship between precipitation and runoff for only a few specific cases. The prediction accuracy can be low when the data of cases that differ from the specific cases used for parameter-setting are applied, even when the subject cases are from the same basin as the specific cases. In this report, to improve the flood prediction accuracy of river management, a technique to calculate the runoff rate corresponding to the basin storage capacity, which represents the wetness/dryness of the basin, was introduced by quantifying the basin storage capacity. By using the newly developed technique, reproduction of hydrographs and simulations of flood prediction were done. The technique was found to be effective in stably reproducing the hydrographs and in reducing prediction errors compared with the currently used technique in which the runoff rate is fixed.

Key Words : *basin storage capacity, flood prediction, long-term hydrologic process, runoff rate, storage routing model*

1. はじめに

洪水予測精度を左右する要因として、初期値に用いられる観測情報に含まれる観測誤差、流出計算モデルの精度に関わるシステム誤差がある。さらには、予測雨量に含まれる誤差、モデル計算を流量ベースで行う場合には H-Q 変換にともなう誤差なども加わり、精度向上を目指す上でそれらのいずれも避けては通れない課題である。このような誤差をリアルタイムで最小化するため、モデル出力と観測情報の同化を図るカルマン・フィルター¹⁾や近年は粒子フィルター²⁾といった手法も提案されており、その観点からの研究も数多く進められてきた。

以上の背景のもと、特にモデル出力の精度に着目すると、ある条件下では再現性の良いものが、事例が変わると途端に精度が落ちる例がよく見られ、現業担当者を悩ませてきた。例えば、先行降雨が多い場合や 2 山洪水の 2 山目、また、融雪期においては、少量の降雨であっても予想をはるかに超える大規模な出水に至るケースや、無降雨が継続した後では、まとまった雨が降ったとしてもさほど流出しないケースがある。以上のように流域の湿潤状態が流出現象に大きく関与しており、このことを

考慮しなければ普遍性のある洪水予測は難しいと考える。しかしながら現在現業化されている洪水予測システムでは、特定のケースのみの降雨～流出関係に基づいてモデルパラメータが設定されているため、たとえ同一流域であっても異なる事例をあてはめると精度が悪化することがある。

そこで本研究では、現業での洪水予測の精度向上を目的に、流域の湿潤度を表す「流域貯留量」に応じた流出率の導入によって洪水の再現と予測の精度向上を試みた。具体的には次の手順で検討を進めた。

- 1) 「流域貯留量」の定量化を目的として、長期的な水文諸量 (雨量, 融雪量, 蒸発散量) を包括的に推定し、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。
- 2) 以上で算出される各タンクの残留水を貯留量とみなし、これによって時々刻々と変化する洪水期間中の流出率を算定する方法を検討した。
- 3) この流出率算定式を用いて流出率を逐次変化させる方式、ならびに、現在運用されている流出率を固定する方式によって洪水の再現と予測を行い、両者を比較した。

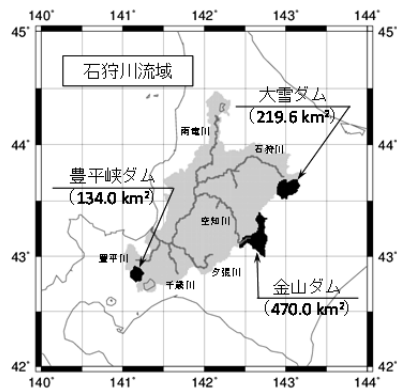


図-1 対象流域。
0) 内の数値は流域面積。

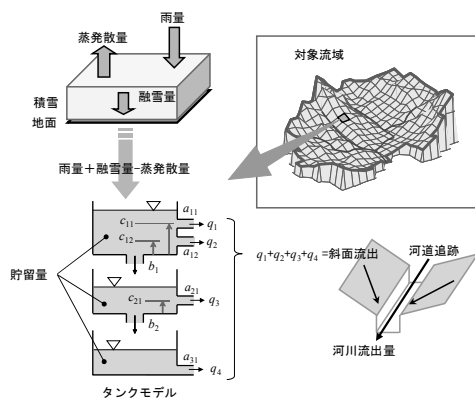


図-2 流域貯留量の推定イメージ。

表-1 タンクモデルのパラメータ。

パラメータ	豊平峡ダム	大雪ダム	金山ダム
a_{11}	0.132	0.234	0.115
a_{12}	0.146	0.104	0.086
a_{21}	0.041	0.041	0.064
a_{31}	0.073	0.100	0.037
b_1	0.104	0.156	0.155
b_2	0.098	0.054	0.096
c_{11}	53.7	89.8	84.8
c_{12}	20.6	14.4	11.5
c_{21}	45.6	65.8	20.5

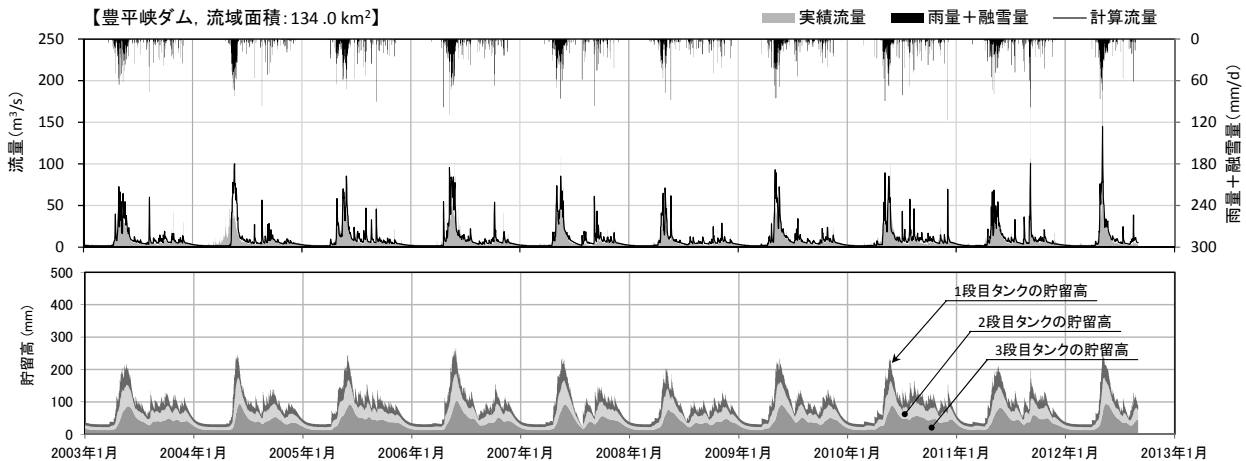


図-3 豊平峡ダムにおける流量、および、貯留量の推定結果。

以上の結果、流域貯留量を考慮する計算手法は、洪水の再現・予測の精度向上に効果のあることがわかった。

2. 対象流域

対象流域は、石狩川の上流部に位置する豊平峡ダム流域（流域面積：134.0 km²）、大雪ダム流域（流域面積：219.6 km²）、金山ダム流域（470.0 km²）とした（図-1）。いずれも洪水調節、発電や水道水の供給、また、国内有数の稲作地帯である石狩平野のかんがい用水の供給を担う多目的ダムである。なお、本研究では、豊平峡ダムを対象に検討を進め、検討手法の一般性を大雪ダム・金山ダムにて検証した。

3. 流域貯留量の推定

(1) 流域貯留量の推定手法

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³⁾。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）が得られる。以上で得られる雨量と融雪量の合計から蒸発散量を差し引き、それをタンクモデルに入力し、タンクモデルの貯留高を算出した（図-2）。この貯留高を各メッシュの

湿潤度を表す貯留量とみなした。

貯留量の妥当性は直接的には検証できない。そこで、タンクモデルによって計算される斜面流出量を kinematic wave 式を用いて河道追跡を行い、ダム地点で観測される流量の再現性をもって貯留量の妥当性を確認した。なお、タンクモデルのパラメータは流域特性を反映した値となることから、流域毎に値を設定することにした。ここでは、計算流量と実績流量の誤差が小さくなるようパラメータを探索し、表-1 に示す値を採用した。

計算には気象や地形に関するデータが必要となるが、本研究では、気象データとしてダム管理用のルーチンデータ（気温、湿度、降水量、風速など）を用い、地形データとしては石狩川ランドスケープ情報⁴⁾や国土数値情報を利用した。

(2) 流域貯留量の推定結果

図-3 は、豊平峡ダムにおける2003年～2012年の流量および貯留量を推定した結果である。図の上段は流量の再現結果、下段はタンクの貯留高である。

上段の図において実線は計算流量、灰色の面は実績流量である。この図から、計算流量は長期的な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いといけない。したがって、計算流量が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れる。

下段の図はタンク貯留高であるが、メッシュ毎に計算され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、供給される水量の少ない厳冬期はタンク貯留高が小さく、一方、融雪期は貯留高が大きい。融雪期の土壌は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。このような変化は、一般的に言われる特徴ではあるものの、本手法により土壌が貯留する水量を定量的に表すことができた。

4. 流域貯留量を考慮したハイドログラフの再現

(1) 流出率の算定方法と流出モデル

山田らは流域の保水能を考慮した流出率の算定方法を提案している³⁾。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章で求めた流域貯留量を与え、これによって流出率の算定を試みた。基礎式は次のように与えられる。

$$f_i = 1 - \frac{\exp(-\alpha S_1)}{\alpha \int_0^i r dt} \left\{ 1 - \exp\left(-\alpha \int_0^i r dt\right) \right\} \quad (1)$$

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 ：雨量強度（mm/h）、 α ：未知定数（1/mm）。なお、山田³⁾らの報告によると、初期水分量は表層土壌を対象にしていることから、本報告では、式（1）の初期貯留量 S_1 には表層土壌に対応するものとして 1 段目タンクの貯留高を与えた。ただし、2・3 段目のタンク貯留高の利用も考えられるが、この点は今後の検討課題である。

以上の流出率算定式で得られる流出率を観測雨量に乘じ、それを表面・中間流出量に寄与する雨量とし、残りを地下水流出量に寄与する雨量とした。このように分離したそれぞれの雨量を別々の貯留関数モデルに入力して流出量を算出し、その合計を全流量とした（図-4）。ここでは、モデル定数の少ない、以下の貯留関数モデルを用いた。

表面・中間流出量の算出には次式を用いた⁶⁾。

$$\begin{cases} s_{s1} = k_{11}q_1^{p_1} + k_{12}\frac{d}{dt}(q_1^{p_2}) \\ \frac{ds_{s1}}{dt} = fr - q_1 \end{cases} \quad (2)$$

ただし、

$$\begin{cases} k_{11} = 2.8235f_cA^{0.24} \\ k_{12} = 0.2835k_{11}^2(\overline{fr})^{-0.2648} \\ p_1 = 0.6, p_2 = 0.4648 \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 q_1 ：表面・中間流出高（mm/h）、 s_{s1} ：貯留高（mm）、 k_{11}, k_{12} ：貯留係数、 p_1, p_2 ：貯留指数、 f ：流出率、 \overline{fr} ：

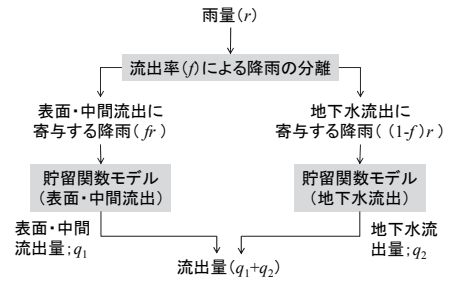


図-4 流出モデルのイメージ。

表面・中間流出に關与する雨量の平均強度（mm/h）、 f_c ：モデル定数（未知定数）。

また、地下水流出量の計算には次式を用いた⁷⁾。

$$\begin{cases} s_{s2} = k_{21}q_2 + k_{22}\frac{dq_2}{dt} \\ \frac{ds_{s2}}{dt} = (1-f)r - q_2 \end{cases} \quad (4)$$

ただし、

$$k_{21} = 0.0617f_bA^{0.24}, k_{22} = 0.4k_{21}^2 \quad (5)$$

ここで、 q_2 ：地下水流出高（mm/h）、 s_{s2} ：貯留高（mm）、 k_{21}, k_{22} ：貯留係数、 f_b ：モデル定数（未知定数）。

(2) ハイドログラフの再現結果

以上で述べた方法によって洪水時のハイドログラフを再現した。ここでは、流域貯留量を考慮することの効果を見るため、流出率算定式による流量再現に加え、複数事例の平均的な流出率に固定した場合の流量再現も行い、両者を比較した。

計算に用いる未知定数（流出率算定式の α 、流出モデルの $f_c \cdot f_b$ ）は、次式で与えられる RMSE が最小となる値を探索することで決めた。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (q_{o,i} - q_{c,i})^2} \quad (6)$$

ここで、 N ：データ数、 q_o ：実測流量、 q_c ：計算流量。

具体的には、値の範囲を $0.001 \leq \alpha \leq 0.015$ 、 $0.1 \leq f_c \leq 1.5$ 、 $100 \leq f_b \leq 400$ として、その間を 40 に分割し、41³種類の未知定数の組み合わせについて流量計算を行い RMSE が最小となる未知定数を採用した。また、固定した流出率を用いる場合は、流出率を $0.01 \leq f \leq 1.00$ の範囲で RMSE が最小となる未知定数を探索した。

解析対象は、豊平峡ダムにおいて、2003 年～2011 年の 7 月～10 月の期間で、ピーク流量が当該ダムの洪水量（60 m³/s、比流量：0.45 m³/s/km²）以上、もしくは、日雨量が 50 mm 以上となった 18 洪水とした。

以上によって得た未知定数を表-2 に、また、流出率算定式（式（1））の特性を図-5 に示す。図には、初期貯留量 S_1 （1 段目タンクの貯留高）が 0 mm、20 mm、40 mm の場合において算定される流出率を示した。比較のため、

表-2 未知定数の探索結果（豊平峡ダム）.

計算方法	流出率算定式の未知定数(α), 流出率(f)	流出モデルの未知定数	
		f_c	f_b
流出率算定式	$\alpha=0.0057$	0.66	265
固定流出率	$f=0.36$	0.92	243

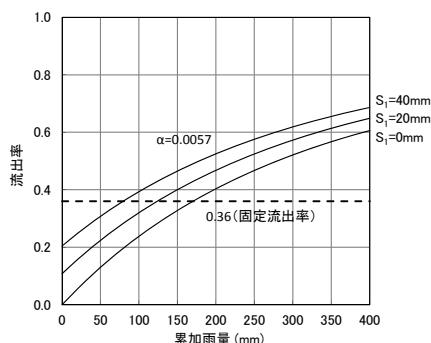


図-5 流出率算定式の特長（豊平峡ダム）.

複数事例から決めた固定流出率 ($f=0.36$) も図示した. この図によると, 流出率算定式で得られる流出率は, 初期貯留量, および, 累加雨量の増大に伴って大きくなる様子がわかる. 初期貯留量 S_1 が 0 mm の場合は累加雨量 200 mm で流出率は 0.4, これに対し, 初期貯留量が 40 mm の場合は累加雨量 100 mm で流出率 0.4 に達し, 初期貯留量が流出率に大きく関与するといった特性が把握される. また, 複数事例から得た固定流出率と比較すると, 流出率算定式を用いる場合, 累加雨量の少ない事例では固定流出率より小さな流出率, 累加雨量の多い事例では大きな流出率が設定されることになる.

図-6 および図-7 は, 複数の流量ピークを有する洪水を, 流出率算定式と固定流出率を用いて再現した結果である. なお, 図-7 に示した事例は, 18 の解析事例の中でピーク流量が最大となった洪水である. 図の上段には, 流出率算定式によって与えられた流出率と固定流出率を示し, 下段には流量を示した. 下段の図において○印は実績流量, 黒色の実線は流出率算定式を用いて再現した流量, 灰色の実線は固定流出率による再現流量である. これらの図によると, 流出率算定式を用いた効果は, 図-6 の経過時間 6 時間目の最初の流量ピークと, 図-7 の経過時間 30 時間目以降に明瞭に表れている.

以上の 2 事例を含めた 18 の洪水事例を対象に流出率算定式の優位性を調べた. ここでは, 次式で与えられる Nash-Sutcliffe 指標⁸⁾を用いて流出率算定式および固定流出率による再現性を比較した.

$$E_i = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (q_{o,i} - q_{c,i})^2}{\sum_{i=1}^N (q_{o,i} - \bar{q}_o)^2} \quad (7)$$

ここで, N :データ数, q_o :実測流量, q_c :計算流量, \bar{q}_o :対象期間の平均流量. Nash-Sutcliffe 指標 E_i は, 値が 1 に近いほど実測値と計算値の適合度が高いことを表し, 0.7 以上で再現性が良好とされている. このように, 洪水規模に依らず評価できることから, この指標を用いることにし

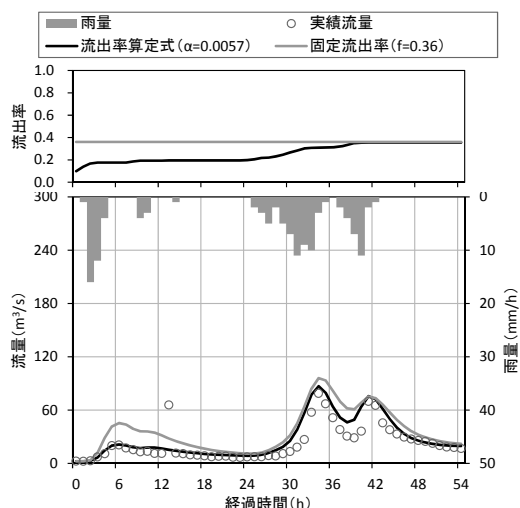


図-6 ハイドログラフの再現結果（豊平峡ダム）.

2003 年 8 月 8 日～9 日の洪水. 総雨量: 126 mm, ピーク比流量: $0.59 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$, 前日の 1 段目タンク貯留高: 18 mm.

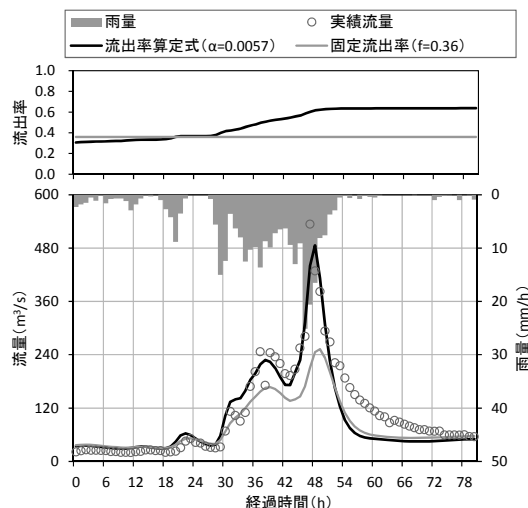


図-7 ハイドログラフの再現結果（豊平峡ダム）.

2011 年 9 月 1 日～8 日の洪水. 総雨量: 404 mm, ピーク比流量: $3.98 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$, 前日の 1 段目タンク貯留高: 15 mm. 図示した期間は 9 月 4 日～7 日.

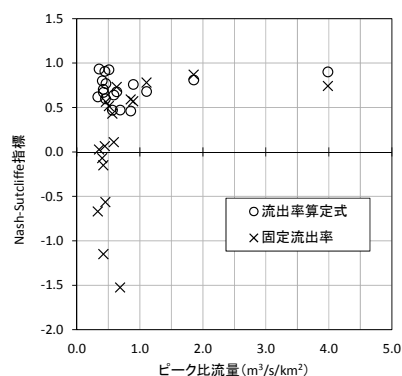


図-8 各事例の Nash-Sutcliffe 指標（豊平峡ダム）.

た.

以上で求めた Nash-Sutcliffe 指標とピーク比流量との対応を図-8 に示した. 図中, ○印は流出率算定式による再現結果, ×印は固定流出率による再現結果である. この図によると, ピーク比流量が $1.0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ より大きい場合

表-3 豊平峡ダムにおけるリードタイム毎の流量の予測誤差 (RMSE)。

事例	日付(ピーク 流量出現日)	総雨量 (mm)	ピーク 流量 (m ³ /s)	RMSE(m ³ /s): 固定流出率①						RMSE(m ³ /s): 流出率算定式②						誤差の比(=②÷①)					
				リードタイム						リードタイム						リードタイム					
				1時間	2時間	3時間	4時間	5時間	6時間	1時間	2時間	3時間	4時間	5時間	6時間	1時間	2時間	3時間	4時間	5時間	6時間
1	2003/08/09	126	79	34.76	36.89	38.52	39.50	40.20	41.26	41.94	44.21	46.10	47.50	48.76	50.32	1.21	1.20	1.20	1.20	1.21	1.22
2	2003/10/23	70	57	10.21	12.24	12.90	13.75	14.38	14.90	6.72	7.75	7.36	7.16	7.10	7.29	0.66	0.63	0.57	0.52	0.49	0.49
3	2003/10/29	62	148	11.60	16.71	16.67	15.19	14.08	14.33	11.08	16.02	16.26	15.40	14.66	14.93	0.95	0.96	0.98	1.01	1.04	1.04
4	2004/08/20	75	45	5.32	6.33	7.13	7.87	8.27	8.47	3.37	4.02	4.41	4.62	4.74	4.84	0.63	0.63	0.62	0.59	0.57	0.57
5	2004/08/31	59	115	10.01	12.40	12.60	12.46	12.44	12.27	9.84	15.01	16.29	16.60	16.87	17.12	0.98	1.21	1.29	1.33	1.36	1.40
6	2004/09/08	57	76	12.84	17.64	17.71	17.00	15.46	13.54	11.57	15.99	16.58	16.29	15.97	15.97	0.90	0.91	0.94	0.96	1.03	1.18
7	2005/08/03	116	120	15.24	17.24	14.35	13.31	12.04	10.06	14.74	15.96	13.57	12.76	11.34	10.15	0.97	0.93	0.95	0.96	0.94	1.01
8	2005/09/07	139	249	19.20	22.88	24.45	26.16	24.42	23.41	18.03	20.87	21.50	22.68	22.57	22.59	0.94	0.91	0.88	0.87	0.92	0.97
9	2006/10/08	121	68	4.21	5.47	6.88	8.22	9.46	10.51	2.63	3.28	3.93	4.54	5.09	5.57	0.62	0.60	0.57	0.55	0.54	0.53
10	2007/09/07	92	60	8.35	10.52	11.38	12.49	13.56	14.36	4.04	4.85	4.56	4.39	4.56	4.66	0.48	0.46	0.40	0.35	0.34	0.32
11	2008/10/09	55	47	7.45	8.69	10.30	11.81	12.76	13.34	4.03	3.97	3.95	4.16	4.27	4.32	0.54	0.46	0.38	0.35	0.33	0.32
12	2008/10/24	64	62	5.44	6.18	6.68	7.03	7.06	7.33	3.42	4.55	5.07	5.34	5.46	5.66	0.63	0.74	0.76	0.76	0.77	0.77
13	2010/07/29	79	85	5.29	6.49	7.06	8.20	9.08	9.98	6.22	7.87	8.79	9.89	10.89	11.88	1.17	1.21	1.24	1.21	1.20	1.19
14	2010/09/28	65	54	8.54	10.22	11.50	12.67	13.47	13.89	7.56	7.47	7.66	7.85	7.91	7.98	0.89	0.73	0.67	0.62	0.59	0.57
15	2011/07/04	57	61	6.50	8.51	9.19	9.39	9.89	9.91	3.97	5.18	5.25	5.06	5.05	5.11	0.61	0.61	0.57	0.54	0.51	0.51
16	2011/07/16	61	56	3.95	4.99	6.24	7.38	8.04	8.57	3.06	3.60	4.24	4.82	5.09	5.37	0.77	0.72	0.68	0.65	0.63	0.63
17	2011/08/14	109	92	10.86	10.85	12.52	13.49	14.09	14.40	7.99	6.49	6.30	6.15	6.16	6.10	0.74	0.60	0.50	0.46	0.44	0.42
18	2011/09/06	404	534	24.14	30.94	37.37	40.78	43.20	44.74	18.28	18.20	20.91	21.97	23.05	23.87	0.76	0.59	0.56	0.54	0.53	0.53
平均																0.80	0.78	0.76	0.75	0.75	0.76

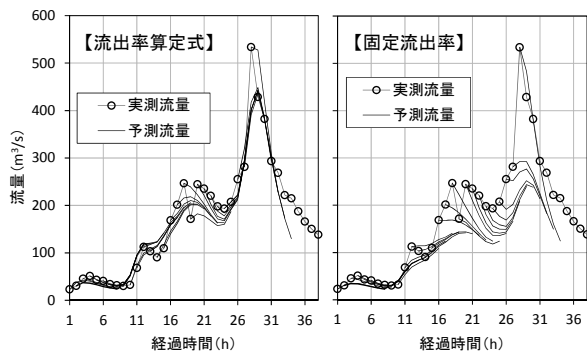


図-9 洪水予測結果。

2011年9月5日～6日の洪水。左：流出率算定式を用いた場合、右：固定流出率を用いた場合。

は、流出率算定式と固定流出率による結果には大きな違いはない。しかしながら、ピーク比流量が $1.0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ より小さい場合では、固定流出率を用いた場合の Nash-Sutcliffe 指標は著しく小さい値になる事例があるものの、流出率算定式を用いた場合にはそのような事例は見られない。出水規模の比較的小さな洪水は、土壌の湿潤状態の違いにより、出水規模の大きな洪水にも、小さな洪水にもなり得る。流出率算定式の Nash-Sutcliffe 指標は安定しており、土壌の湿潤度を流出計算に反映させることで再現精度の安定化に効果のあることがわかった。

5. 洪水予測への適用

(1) 豊平峡ダムへの適用結果

流出率算定式を洪水予測計算に利用し、洪水予測における効果を見た。ここでは、計算手法自体を検証する意図から、予測雨量には実績値を与えた。計算に際しては、実運用を勘案し、カルマン・フィルター⁹⁾を用いて計算流量や流出モデル定数 ($f_c \cdot f_b$)、また、流出率を逐次補正した。

図-9は、2011年9月5日～6日の洪水を予測した結果である。左の図は流出率算定式を用いた場合の予測結果、右の図は固定流出率を用いた場合の結果である。図の○印は実測流量、黒色の実線は1時間毎に計算された6時

表-4 未知定数の探索結果 (大雪ダム、金山ダム)。

流域	計算方法	流出率算定式の未知定数 (α)、流出率 (f)	流出モデルの未知定数	
			f_c	f_b
大雪ダム	流出率算定式	$\alpha=0.0068$	0.71	190
	固定流出率	$f=0.31$	0.97	235
金山ダム	流出率算定式	$\alpha=0.0038$	0.88	160
	固定流出率	$f=0.21$	1.14	175

間先までの予測流量である。図によると、流出率算定式を用いた予測結果は実績流量に近い予測値となっているものの、固定流出率を用いた場合の予測は実績流量より小さな予測流量となっている。この例では、流出率算定式を用いた方が予測精度が高いといえる。

18の洪水事例について予測誤差を整理した結果が表-3である。表には、個々の事例における予測誤差 (RMSE) をリードタイム別に掲載した。また、表の「誤差の比」は、固定流出率の RMSE と流出率算定式の RMSE の比であり、この値が 1.0 を下回れば、固定流出率より流出率算式による予測精度が高いことを意味する。また、表の最下行には、誤差の比の平均値を掲載した。

誤差の比に着目すると、比が 1.0 を超える事例が 6 例あるものの、多くの事例は 1.0 を下回り、流出率算定式を用いることで予測誤差が小さくなることがわかった。平均的には、1時間～6時間先の予測誤差 (RMSE) は、20%～25%程度の減少となった。

以上の結果、豊平峡ダム流域の洪水予測では、流出率算定式が予測精度向上に効果のあることがわかった。次に、本手法を大雪ダム・金山ダムに適用し、その効果を検証する。

(2) 他の流域での適用結果

以上で述べた方法を大雪ダムおよび金山ダムに適用し、予測流量の精度を調べた。流域貯留量を推定し、2005年～2010年の洪水から得られた未知定数を表-4にまとめ、流出率算定式の特性を図-10に示した。これらの未知定数を用いて洪水予測を行い、予測流量の誤差を整理したものが表-5である。この表によると、大雪ダムにおける誤差の比の平均は 0.83～0.89 であり約 15%の誤差の減少

表-5 大雪ダムおよび金山ダムにおける流量予測の誤差 (RMSE)。

流域事例	日付(ピーク流量出現日)	総雨量(mm)	ピーク流量(m ³ /s)	RMSE(m ³ /s): 固定流出率①						RMSE(m ³ /s): 流出算定式②						誤差の比(=②÷①)						
				リードタイム						リードタイム						リードタイム						
				1時間	2時間	3時間	4時間	5時間	6時間	1時間	2時間	3時間	4時間	5時間	6時間	1時間	2時間	3時間	4時間	5時間	6時間	
大雪ダム	1	2005/08/03	82	104	11.28	14.01	15.48	16.02	15.47	15.69	10.89	12.98	13.86	14.08	13.55	13.88	0.97	0.93	0.90	0.88	0.88	0.88
	2	2005/08/22	108	88	6.58	9.93	12.54	15.17	17.36	19.73	6.88	10.61	13.97	17.51	20.66	23.68	1.05	1.07	1.11	1.15	1.19	1.20
	3	2005/09/08	114	180	12.17	20.74	26.20	29.17	31.02	32.64	10.61	17.18	20.34	21.05	20.78	20.36	0.87	0.83	0.78	0.72	0.67	0.62
	4	2006/09/19	166	302	20.83	31.76	33.49	29.48	24.64	23.72	18.45	27.84	31.45	32.06	31.35	31.30	0.89	0.88	0.94	1.09	1.27	1.32
	5	2007/09/07	102	74	7.11	11.25	15.20	19.15	23.21	27.04	4.73	7.43	9.51	11.27	12.86	14.28	0.67	0.66	0.63	0.59	0.55	0.53
	6	2007/09/16	64	113	9.69	13.30	14.57	15.56	16.26	17.49	7.55	9.95	9.92	9.70	9.09	8.83	0.78	0.75	0.68	0.62	0.56	0.51
	7	2010/08/24	99	303	24.34	39.83	45.78	44.45	39.65	35.09	20.30	32.09	36.98	38.99	39.97	40.34	0.83	0.81	0.81	0.88	1.01	1.15
平均																0.86	0.84	0.83	0.85	0.88	0.89	
金山ダム	1	2005/08/22	126	235	8.98	8.88	11.94	12.99	15.12	15.90	9.08	9.22	12.19	12.78	13.68	12.78	1.01	1.04	1.02	0.98	0.91	0.80
	2	2005/09/08	106	144	13.76	16.49	19.97	21.85	23.70	25.35	13.29	15.76	18.67	19.80	21.38	22.34	0.97	0.96	0.94	0.91	0.90	0.88
	3	2006/09/19	186	380	23.34	34.94	44.04	50.84	57.46	63.76	22.01	31.57	38.27	42.88	47.58	51.76	0.94	0.90	0.87	0.84	0.83	0.81
	4	2010/08/12	103	152	10.03	8.64	10.17	10.07	10.91	11.94	10.06	8.86	10.50	10.55	11.63	12.80	1.00	1.03	1.03	1.05	1.07	1.07
	5	2010/08/24	101	192	14.68	19.24	22.43	24.53	26.39	28.16	14.96	19.24	21.43	21.69	21.26	21.98	1.02	1.00	0.96	0.88	0.81	0.78
平均																0.99	0.98	0.96	0.93	0.90	0.87	

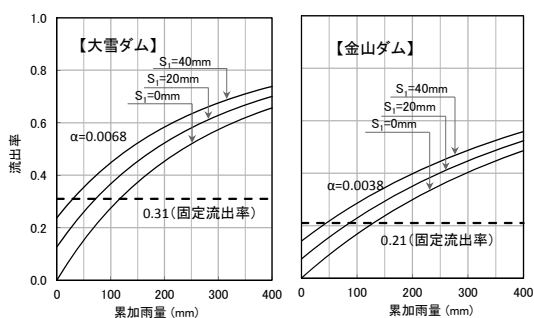


図-10 流出率算定式の特性。

左：大雪ダム，右：金山ダム。

となった。一方、金山ダムでは比が 1.0 を超える場合はあるものの、平均的には 1%～10% 程度の誤差の減少が見られた。以上、流出率算定式は、他の流域においても予測精度向上に効果が見られた。

6. まとめ

本論文では、現業での洪水予測の精度向上を目的に、流域貯留量に着目して手法の改良を試みた。得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 長期的な流域水循環計算をとおり、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) 流域貯留量に基づいて時々刻々と変化する流出率を算定する機能を組込んだ流出モデルを作成し、豊平峡ダムのハイドログラフを再現した。その結果、流出率を固定する場合に比べて再現性が安定することがわかった。
- 3) 豊平峡ダムを対象に、流出率算定式および固定流出率を用いた洪水予測のシミュレーションを行った。予測雨量には実測雨量を与え、モデル自体の性能を評価した。その結果、6 時間先までの予測誤差は、固定流出率を用いる場合の誤差に比べ、20% 程度減少することがわかった。
- 4) 手法の一般性を検証するため、別の 2 流域で同様の洪水シミュレーションを行った。その結果、効果の大きさは異なるものの、予測誤差が減少することがわかった。

以上、流域貯留量を考慮した本手法は、洪水の再現と予測の精度向上に効果があるものと考えられた。今後、融雪洪水を対象に検討を進めるとともに、実運用を目指していきたい。

謝辞：本研究の一部は学術研究助成基金助成基金基礎研究 (C) (課題番号 23560602) および国土交通省河川砂防技術研究開発公募 (水防災技術分野) の助成を受けた。また、本研究を進めるにあたり、北海道開発局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) 日野幹雄：水文流出系予測へのカルマン・フィルター理論の適用，土木学会論文報告集，第 221 号，pp.39-47，1974。
- 2) 立川康人，須藤純一，椎葉充晴，萬和明，キム スンミン：粒子フィルタを用いた河川水位の実時間予測手法の開発，水工学論文集，第 55 巻，2011。
- 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) 監修 北海道開発局建設部河川計画課，編集・発行 財団法人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，1997。
- 5) 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。
- 6) 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，pp.7(1)-7(32)，2006。
- 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。
- 8) Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V.: River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles — , *J. of Hydrology*, Vol.10, pp.282-290, 1970。
- 9) (監修) 国土交通省・北海道開発局建設部河川管理課，〔編集・発行〕(財) 北海道河川防災研究センター・研究所：「実時間洪水予測システム理論」解説書，396p., 2004。

(2014. 4. 3 受付)