

# 長期水循環に基づく流域の湿潤状態を考慮した 洪水流出解析の研究

RESEARCH ON FLOOD RUNOFF ANALYSIS THAT TAKES INTO ACCOUNT  
SOIL WATER STORAGE ESTIMATED BY LONG-TERM HYDROLOGIC  
PROCESS

谷口陽子<sup>1</sup>・中津川誠<sup>2</sup>・臼谷友秀<sup>3</sup>

Yoko TANIGUCHI, Makoto NAKATSUGAWA and Tomohide USUTANI

<sup>1</sup>学生会員 室蘭工業大学大学院工学研究科 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>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)

This study aims at improving the accuracy of a currently used flood runoff model by taking into account the soil water storage (SWS) before flooding and continuously changing the effective rainfall input into the model. In this study, SWS was estimated by using a "long-term hydrological assessment model considering snow process" (LoHAS) first. Then, the runoff rate, which is changing hour to hour, was determined by using the estimated SWS as the initial value of the runoff. Next, the estimated effective rainfall was input into the storage function model. Compared to the accuracy of the current flood runoff model, the accuracy of the new model in terms of the reproduced hydrograph was improved. The accuracy in reproducing the second peak of a two-peak flood and in reproducing flood runoff caused by snowmelt and rainfall was particularly improved.

**Key Words** : *long-term hydrological assessment model considering snow processes, soil water storage, storage routing model, parameter optimization, parameters fixed*

## 1. はじめに

近年, 地球温暖化の影響により雨の降り方が変化してきており<sup>1)</sup>, 各地で水害が多発している. その原因となっている線状降水帯の停滞や台風によって長時間続く降雨は何波ものピークをもち, 大規模な出水になることが多い. また, 先行雨量が多い場合や融雪期では少量の降雨であっても流出量が多くなるような洪水が見られ, これらの事例は洪水前の土壌の湿潤状態が流出現象に大きく影響を与えていると考えられる.

これまで多くの洪水流出モデルが提案されてきたが, まずは流域を分割するか一括して扱うかで分布型と集中型に大別される. また, モデルの構造でみると物理モデルと概念モデルに分類される. 前者を代表するものにKinematic Waveモデル, 後者に貯留関数法があげられ, 現業では非線形の流出過程を比較的簡単な構造式で表現できる貯留関数法がよく使われている. 中でも代表的な貯留関数法は, 木村<sup>2),3)</sup>, Prasad<sup>4),5)</sup>, 星<sup>6)</sup>によって提案されたものがある.

さらに星<sup>6)</sup>は, Kinematic Wave法の集中化によって, モデル構造を物理的に説明できるようなパラメータをもつモデルを提唱した<sup>7)</sup>. また, 長期流出と洪水時の短期流出を同一のモデルで推定する手法として角屋ら<sup>8)</sup>が提案している長短期流出両用モデル, 佐山ら<sup>9)</sup>が提案している広域分布型流出予測システムがある. しかしながら, 降雨, 降雪, 蒸発散, 流出から構成される流域全体の水収支や長期水循環の観点から洪水の支配要因となる土壌の湿潤状態を評価した例は少ない.

現業上ではモデル構造の妥当性に加え, 汎用性を鑑み広域で使用できるパラメータを適切に設定する必要がある. 国土交通省北海道開発局では洪水予測モデルとして星ら<sup>6)</sup>の提案した貯留関数法(以下, 現行モデル)を使用している事例が多い. しかしながら, これを実務に適用する際, 特定のケースのみの降雨と流出の関係に基づいて固定された一定の流出率やパラメータを用いているが, 先に述べたような事例では再現精度が低下することがある.

以上の経緯から本研究では, 二山降雨事例や融雪

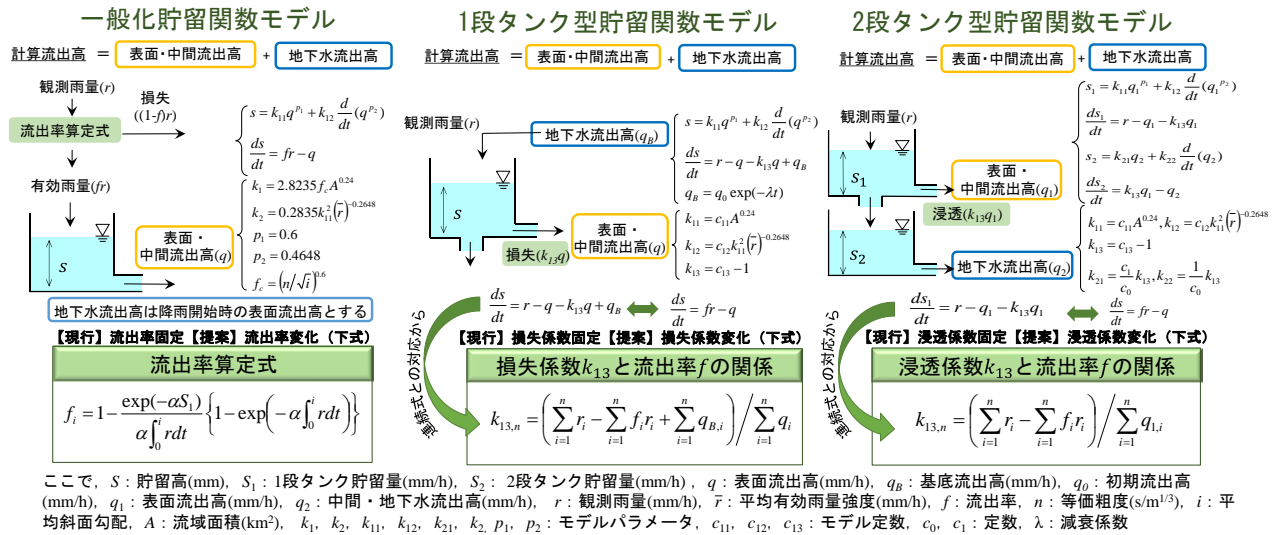


図-1 流出計算モデル(現行モデル, 提案モデル)の概念図

に大雨が相まって起こる事例(以下, 融雪+大雨事例)に重点をおき, 現行モデルの改善及び汎用性向上を目的とし, 以下の手順で検討した。

- 1) 上記事例の精度向上には洪水前の土壌の湿潤状態が関係していると考え, 土壌の湿潤状態を表す「土壌水分貯留量」を流域の長期水循環モデルから連続的かつ定量的に算出した。
- 2) 以上で算出される土壌水分貯留量を山田ら<sup>10)</sup>による保水能を考慮した流出率算定式に初期値として与え, 1時間毎に変化する流出率を求めた。
- 3) この流出率を用いて現行モデルを基本とした毎時流出率が変化する提案モデルを構築し, 一定の流出率を用いた現行モデルと再現性の比較を行った。
- 4) さらに, 現業での汎用性を向上させるため, 流域ごとにパラメータを固定し, 再現性の検証を行った。

## 2. 方法

### (1) 現行モデル

冒頭に述べたように, 国土交通省北海道開発局の現業部門では, 現行モデルとして洪水流出計算に星ら<sup>9)</sup>が提案した「一般化貯留関数モデル」, 「1段タンク型貯留関数モデル」及び「2段タンク型貯留関数モデル」の3つ(それぞれ以下, 一般化モデル, 1段モデル, 2段モデルと称する)が主に用いられている。図-1に基本式を記す。

現行モデルは流出過程の非線形性を比較的簡単な構造式で表すことができ, 河川の洪水予測や洪水時のダム操作のための貯水池流入予測に用いられている。また, 1段モデルや2段モデルは, 有効雨量を必要とせず, 観測雨量をそのまま使用できるという特徴があり, 流出解析の前処理として必要とされる基底流量の分離作業や流出率を決めるといった作業を必要としない。

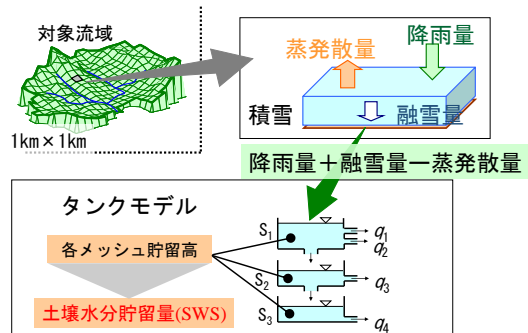


図-2 LoHASのイメージ図

しかしながら, 現行モデルではパラメータの設定を事例ごとに変えるのは現業上では現実的ではなく, それらは特定の事例の再現性をみて固定される。また近年は冒頭に述べたように二山降雨事例や融雪+大雨事例が多発しており, 現行モデルでは不適切なパラメータを固定するとピーク流量の再現性が低下する。このような事例において洪水流出計算の再現性を向上するには単に洪水時の降雨と流出の関係のみならず洪水前および洪水に変化する土壌の湿潤状態を評価できるモデルが必要であると考え。

### (2) 長期水循環モデル(LoHAS)

土壌の湿潤状態を「土壌水分貯留量(Soil Water Storage)」と称する指標で表す。この土壌水分貯留量(以下, SWS)は長期水循環から求めることができ, この推定を行うモデル(口澤ら<sup>11)</sup>, 臼谷ら<sup>12)</sup>)をLong-term Hydrologic Assessment model considering Snow processes(以下, LoHAS)と称する。

LoHASは, 近藤ら<sup>13)</sup>の提案する2層モデルに積雪・融雪の過程を加味したもので, 日単位の地上気象データ(降水量, 気温, 日射量, 風速, 相対湿度)から約1km四方のメッシュ毎に降雨量, 融雪量および蒸発散量が推定できる。これらの降雨量と融雪量の合計から蒸発散量を差し引いた推定降水量をタンクモデルに入力することで, タンクモデルの貯

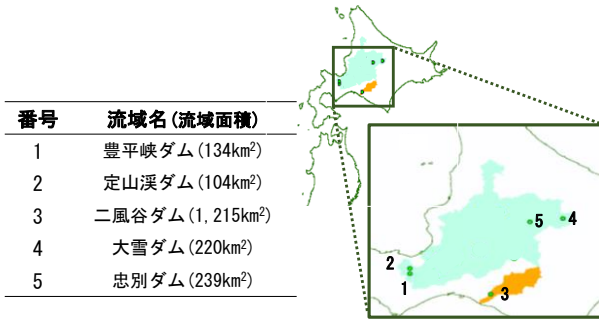


図-3 対象流域位置

表-1 パラメータ最適化による現行モデルと提案モデルの再現精度

(上段: NS 係数計算結果, 下段:  $J_{pe}$  計算結果)

流域	一般化モデル		1段モデル		2段モデル	
	現行	提案	現行	提案	現行	提案
豊平峡ダム	0.889	0.893	0.899	0.897	0.933	0.933
定山溪ダム	0.871	0.876	0.887	0.862	0.921	0.950
二風谷ダム	0.933	0.937	0.946	0.961	0.956	0.960
大雪ダム	0.827	0.863	0.825	0.844	0.896	0.882
忠別ダム	0.814	0.853	0.842	0.782	0.844	0.833
平均	0.877	0.891	0.890	0.884	0.918	0.920
流域	一般化モデル		1段モデル		2段モデル	
	現行	提案	現行	提案	現行	提案
豊平峡ダム	0.189	0.135	0.216	0.196	0.162	0.150
定山溪ダム	0.156	0.085	0.201	0.143	0.142	0.092
二風谷ダム	0.124	0.055	0.147	0.122	0.123	0.085
大雪ダム	0.269	0.201	0.251	0.236	0.181	0.218
忠別ダム	0.225	0.165	0.195	0.216	0.169	0.190
平均	0.184	0.121	0.198	0.178	0.153	0.140

\*精度の良い方を黄色く塗りつぶしをしてある。以下、全ての表で同じ形式をとる。

留高を算出する。これを各メッシュの土壌の湿潤状態を表すSWSとする。図-2にLoHASのイメージ図を示す。SWSの推定結果については白谷ら<sup>12)</sup>が検証しており、LoHASは土壌が貯留する水量を定量的に、かつ長期間連続的に表すことができることを示している。

### (3) SWSを考慮した流出モデル (提案モデル)

次にSWSを考慮した流出率の算定方法と流出モデルについて説明する。山田ら<sup>10)</sup>は、次式に示す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。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。

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

ここで、 $f_i$ は降雨開始*i*時間後の流出率、 $S_1$ は降雨開始前日のSWSのうち表層土壌の水分貯留量を表す1段目タンクの貯留高(mm)、 $r$ は雨量強度(mm/h)である。また、 $\alpha$ はパラメータ(1/mm)で、ハイドログラフの再現性から事例毎に与えられる。

ここでは現業レベルでの汎用性を鑑み、導入実績

のある以下の3つの現行モデルに式(1)を組み込むことでSWSを考慮したモデルを提案する(図-1)。新たにLoHASの結果を導入した流出モデル(以下、提案モデル)の内容を以下に示す。

#### 1) 一般化モデル

提案モデルでは流出率*f*の算定式である式(1)を組み込むことで時間毎に変化する流出率を使用する。これにより土壌の湿潤状態の変化を考慮できるようにする。

#### 2) 1段モデル

示すように損失係数 $k_{13}$ に換算して浸透効果を変化させる。これにより土壌の湿潤状態の変化を考慮できるようにする。

#### 3) 2段モデル

提案モデルでは刻々と変化する流出率*f*を図-1に示すように浸透係数 $k_{13}$ に換算して浸透効果を変化させる。これにより土壌の湿潤状態の変化を考慮できるようにする。

### (4) 対象流域と事例

図-3に示すように検討対象流域は北海道の石狩川水系の4つ、また沙流川水系の1つの計5つのダム流域とした。事例は現行モデルで再現性が低かったものを優先的に27事例選出し、二山目の再現が難しい二山降雨事例や融雪期における融雪+大雨事例を重要視した。

## 3. 結果と考察

### (1) 最適化パラメータを用いた洪水流出再現結果

各モデルの未知のパラメータは現行モデル、提案モデルともに次式で与えられる平均二乗誤差の平方根(以下、RMSE)が最小となる値を事例ごとに探索することで決定した。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (q_{oi} - q_{ci})^2} \quad (2)$$

ここで、 $q_{oi}$ は降雨開始*i*時間後の観測流出量( $m^3/s$ )、 $q_{ci}$ は降雨開始*i*時間後の計算流出量( $m^3/s$ )、 $N$ は総降雨時間数である。具体的には各未知のパラメータの最大値と最小値をそれぞれ設定しRMSEが最小となるよう試行錯誤で各パラメータを求めた。

上記の方法で事例ごとに最適化した現行モデルと提案モデルについての再現精度の比較は以下に示すNash-Sutcliffe係数(以下、NS係数)、ピーク流量相対誤差(以下、 $J_{pe}$ )の2つを用いて行った。

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (q_{oi} - q_{ci})^2}{\sum_{i=1}^N (q_{oi} - q_{oave})^2} \quad (3), \quad J_{pe} = \frac{|q_{op} - q_{cp}|}{q_{op}} \quad (4)$$

ここで、 $q_{oi}$ は降雨開始*i*時間後の観測流出量( $m^3/s$ )、 $q_{ci}$ は降雨開始*i*時間後の計算流出量( $m^3/s$ )、 $q_{oave}$ は観測流出量平均値( $m^3/s$ )、 $q_{op}$ は観測ピーク流出量( $m^3/s$ )、 $q_{cp}$ は計算ピーク流出量( $m^3/s$ )、 $N$ は総降雨時間数であ

る。

全事例のNS係数及び $J_{pe}$ の計算結果を表-1に示す。全事例の平均値を見てみると、1段モデルのNS係数を除き、提案モデルは現行モデルよりも精度の向上がみられる。特に一般化モデルにおいて $J_{pe}$ は全流域で現行モデルの精度を上回っている。具体的な数値に着目すると、提案モデルにおける全事例平均のNS係数は全モデルで0.88以上となり、0.7を超えれば再現結果の妥当性が認められるNS係数においてモデル構造の正当性を示した。また、 $J_{pe}$ に関しては二風谷ダム流域平均の一般化モデルにおいて、提案モデルは現行モデルの $J_{pe}$ を0.069下回るという最大の改善がみられた。例として二風谷ダム事例のうち、最大ピーク比流量である事例の hidrograph を図-4に示す。この事例では観測ピーク流量が $3,197\text{m}^3/\text{s}$ に対し、現行モデルでの計算ピーク流量は $2,633\text{m}^3/\text{s}$ 、提案モデルでの計算ピーク流量は $3,137\text{m}^3/\text{s}$ となり、約 $504\text{m}^3/\text{s}$ ものピーク流量の過小評価を改善した。

### 1) 二山降雨事例の考察

全事例のうち、最適化したパラメータを用いた降雨パターン別の精度指標の結果を示したものが表-2である。二山降雨事例では全モデルでNS係数、 $J_{pe}$ ともに精度向上が確認できた。全二山降雨事例のうち2事例の再現結果の hidrograph を示す図-5を

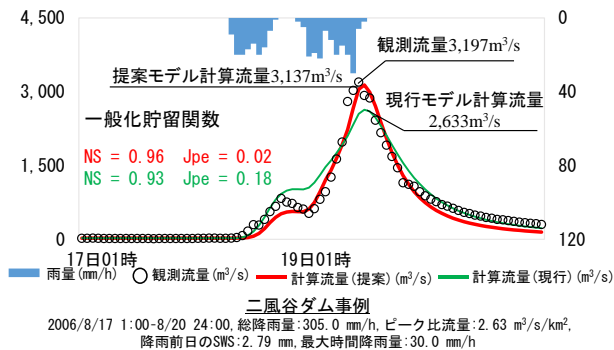
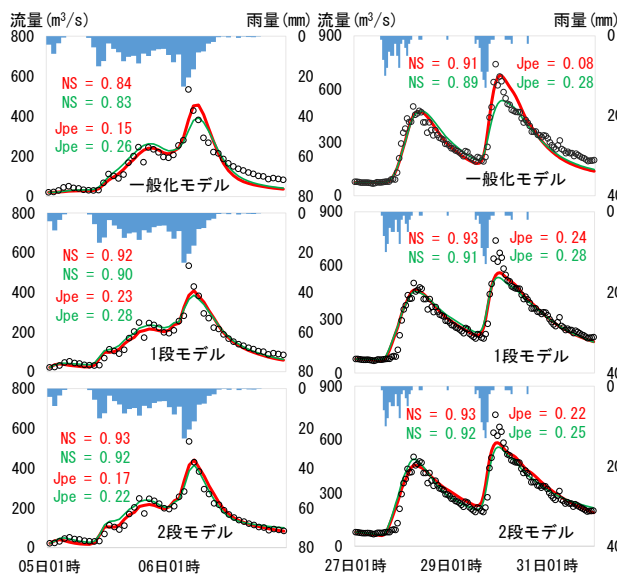


図-4  $J_{pe}$ の精度が良い事例



豊平峡ダム事例 二風谷ダム事例  
2011/9/5 1:00-9/6 24:00, 総降雨量:273.1 2010/7/27 1:00-7/31 24:00, 総降雨量:130.0 mm/h, ピーク比流量:3.98 m³/s/km², 降雨前日 mm/h, ピーク比流量:0.61 m³/s/km², 降雨前日のSWS:56.5 mm, 最大時間降雨量:25.1 mm/h のSWS:25.0 mm, 最大時間降雨量:13.0 mm/h

図-5 パラメータ最適化による二山降雨事例の再現例

見ると、2事例とも特に一般化モデルにおいてピーク流量への立ち上がり精度向上が見られる。加えて、二風谷ダムの事例は一山目と二山目において雨量はほぼ同じだが流量に関しては二山目のピークが一山目を上回る事例である。このような事例において現行モデルの計算ピーク流量は一山目と二山目で同じような結果であるが、提案モデルの計算ピーク流量は二山目のピーク流量を精度良く再現している。

### 2) 融雪+大雨事例の考察

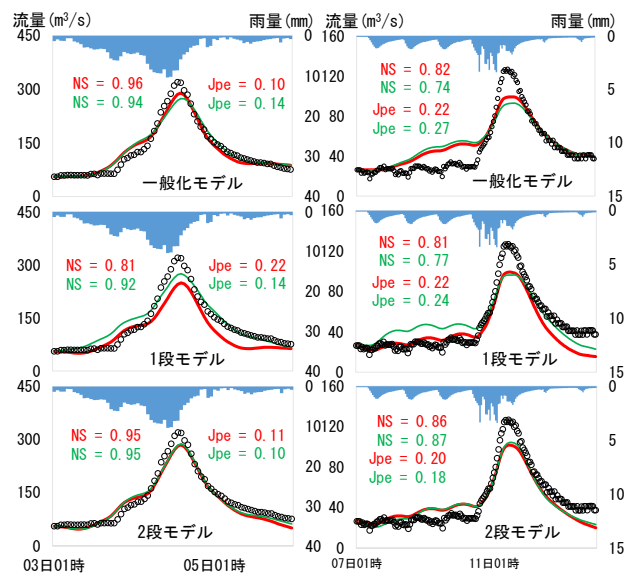
表-2の融雪+大雨事例の結果を見ると、NS係数、 $J_{pe}$ ともに現行モデルを改善できたのは一般化モデルのみだった。また1段モデルにおいては、再現例の hidrograph を示した図-6を見てわかるように、両精度指標とも提案モデルは現行モデルを下回る結果となった。

提案モデルでは、図-1に示すように流出率 $f_t$ との関係から損失係数 $k_{13}$ をピーク流量にかけて徐々に減少させていくことで精度向上を目指している。融雪+大雨事例では融雪によりSWSが大きい上に、大雨によって洪水前半から後半まで常に流出率が1に近い値となる傾向がある。融雪期は土壌が湿潤状態にあり地下水流出の寄与が大きいと考えられる。1段モデルではそれを過小評価したことによると考えられる。

ただし、同じように浸透係数 $k_{13}$ を変化させている2段モデルでは $J_{pe}$ において精度向上が確認できた。これは図-1に示すように、表面・中間流出に加え地

表-2 降雨パターン別の現行モデルと提案モデルの再現精度結果 (パラメータ最適化)

降雨パターン	精度指標	一般化モデル		1段モデル		2段モデル	
		現行	提案	現行	提案	現行	提案
二山降雨事例	NS係数平均	0.861	0.873	0.875	0.876	0.905	0.929
	Jpe平均	0.217	0.098	0.242	0.191	0.184	0.149
融雪+大雨事例	NS係数平均	0.878	0.909	0.913	0.836	0.944	0.928
	Jpe平均	0.124	0.086	0.113	0.135	0.085	0.080



豊平峡ダム事例 大雪ダム事例  
2012/5/3 1:00-5/5 24:00, 総降水量:235.5 2006/5/7 1:00-5/13 24:00, 総降水量:124.0 mm/h, ピーク比流量:2.39 m³/s/km², 降雨前日 mm/h, ピーク比流量:0.58 m³/s/km², 降雨前日のSWS:80.1 mm, 最大時間降雨量:10.4 mm/h のSWS:38.69 mm, 最大時間降雨量:3.39 mm/h

図-6 パラメータ最適化による融雪+大雨事例の再現例

表-3 各モデルパラメータの固定値（上段：現行モデル，下段：提案モデル）

流域	一般化モデル		1段モデル					2段モデル			
	$f_c$	$f$	$c_{11}$	$c_{12}$	$c_{13}$	$\lambda$	$c_{11}$	$c_{12}$	$c_{13}$	$T_c$	
豊平峡ダム	1.3511	0.4625	10.5438	0.0477	1.8906	0.0134	6.9313	0.1772	2.6406	42.5000	
定山溪ダム	1.1328	0.2750	15.1125	0.0328	2.7813	0.0125	12.3500	0.0569	3.4563	98.7500	
二風谷ダム	1.8634	0.5929	11.2571	0.1142	1.4821	0.0232	8.5857	0.2346	2.2600	84.2857	
大雪ダム	1.3823	0.3875	11.0750	0.0870	2.1875	0.0125	7.0375	0.2700	3.0938	53.7500	
忠別ダム	0.8209	0.2750	9.8000	0.1019	2.2500	0.0063	7.6750	0.1256	2.6950	38.7500	

流域	一般化モデル		1段モデル					2段モデル			
	$f_c$	$\sigma$	$c_{11}$	$c_{12}$	$\lambda$	$\sigma$	$c_{11}$	$c_{12}$	$T_c$	$\sigma$	
豊平峡ダム	1.1016	0.0080	7.9938	0.1000	0.0000	0.0381	6.4000	0.1538	61.7000	0.0227	
定山溪ダム	0.9431	0.0118	8.7375	0.1094	0.0175	0.0814	7.2500	0.1723	61.7000	0.0795	
二風谷ダム	1.6496	0.0175	9.1929	0.1398	0.0225	0.1289	7.2500	0.2586	61.7000	0.0995	
大雪ダム	1.1951	0.0108	8.9500	0.1505	0.0175	0.0867	6.6125	0.2755	61.7000	0.0243	
忠別ダム	0.7413	0.0151	8.5250	0.1505	0.0000	0.1192	7.2500	0.1649	61.7000	0.0619	

表-4 パラメータ固定による現行モデルと提案モデルの再現精度  
（上段：NS係数計算結果，下段： $J_{pe}$ 計算結果）

流域	一般化モデル		1段モデル		2段モデル	
	現行	提案	現行	提案	現行	提案
豊平峡ダム	0.675	0.789	0.648	0.733	0.603	0.762
定山溪ダム	0.809	0.849	0.820	0.687	0.857	0.501
二風谷ダム	0.818	0.881	0.800	0.785	0.766	0.535
大雪ダム	0.675	0.755	0.502	0.397	0.621	0.830
忠別ダム	0.692	0.762	0.437	0.571	0.023	0.606
平均	0.735	0.813	0.660	0.666	0.600	0.651

流域	一般化モデル		1段モデル		2段モデル	
	現行	提案	現行	提案	現行	提案
豊平峡ダム	0.271	0.216	0.340	0.263	0.300	0.239
定山溪ダム	0.144	0.130	0.224	0.222	0.159	0.285
二風谷ダム	0.226	0.113	0.218	0.177	0.265	0.174
大雪ダム	0.280	0.249	0.311	0.157	0.207	0.243
忠別ダム	0.194	0.156	0.207	0.182	0.219	0.174
平均	0.231	0.173	0.267	0.207	0.244	0.220

下水流出高の寄与を包括的に算出できるという利点が生かされたためと考えられる。

(2) パラメータ固定による洪水流出再現結果

現業での運用を考えると事例ごとにパラメータ最適化することは現実的ではなく、パラメータを固定する必要がある。過去の未知のパラメータの固定値の採用方法は、既往事例の再現などにに基づき設定するが、新たな事象に対処できるかが不明である。そこで、ここでは先の方法で事例ごとに最適化した未知のパラメータを流域ごとに平均化し、それをその流域の代表値として固定した。結果を表-3に示す。また、表-4はそれらを用いた計算結果の精度指標結果を示しており、NS係数、 $J_{pe}$ ともに提案モデルの精度向上が確認できた。

1) 二山降雨事例の考察

全事例のうち、固定パラメータを用いた降雨パターン別の精度比較結果を表-5に示す。二山降雨事例では、NS係数において提案モデルは現行モデル

表-5 降雨パターン別の現行モデルと提案モデルの再現精度結果（パラメータ固定）

降雨パターン	精度指標	一般化モデル		1段モデル		2段モデル	
		現行	提案	現行	提案	現行	提案
二山降雨事例	NS係数平均	0.794	0.827	0.778	0.763	0.772	0.746
	$J_{pe}$ 平均	0.203	0.139	0.239	0.177	0.214	0.187
融雪+大雨事例	NS係数平均	0.670	0.800	0.272	0.660	-0.039	0.723
	$J_{pe}$ 平均	0.297	0.154	0.415	0.274	0.445	0.162

より若干精度が落ちるが、 $J_{pe}$ で全モデルの精度向上が確認できた。二山目のピーク流量への立ち上がりに着目し、再現例を示した図-7を見ると、現行モデルが流量を全体的に過小評価しているのに対し、提案モデルはピーク流量の精度の面で改善していることがわかる。現行モデルの再現結果は一山目と二山目のピーク流量にあまり差がないことから、先行雨量が多い二山降雨事例では、提案モデルで洪水前の土壌の湿潤状態を考慮することで再現性を改善できることを示した。

2) 融雪+大雨事例の考察

表-4、表-5より、パラメータを固定することで全事例の中で最もNS係数、 $J_{pe}$ ともに大きな精度向上が見られたのは融雪+大雨事例であった。再現例のハイドログラフを示す図-8で見ても、現行モデルのピーク流量の過小評価を提案モデルでは大きく改善している。これは提案モデルと現行モデルで固定したパラメータが流出計算に及ぼす影響の大きさの違いにあると考えられる。

提案モデルでは式(1)から流出率算定式には未知のパラメータである $\alpha$ の他に、洪水前の特性を現すSWS、洪水時の降雨の特性を表す累加雨量が用いられている。これらが効果を上げて安定した再現精度が得られたと考えられる。

一方、現行モデルでの流出率は一定値を用いるため、最適化した値との誤差が再現精度に大きく影響され、極端に流量を過小評価したり、逆に過大評価したりと不安定な再現結果となったと考えられる。特に融雪期は夏期と比較して流出率は大きい値となる傾向があり、全期間での平均をとると、融雪+大雨事例にとって小さい流出率を固定値とする場合が多かった。そのため、ピーク流量の過小評価につながったと思われる。

以上のことから提案モデルでは広域に適用できる

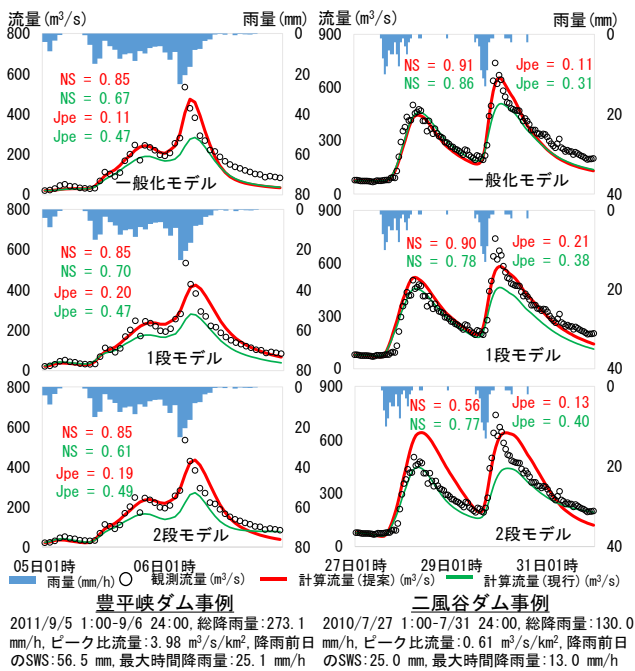


図-7 パラメータ固定による二山降雨事の再現例

パラメータの固定が現行モデルよりも適切に行うことが確かめられた。

#### 4. まとめ

本研究で得られた結果を以下に記す。

- 1) 長期水循環モデル (LoHAS) によって土壌の湿潤状態を表すSWSを推定し、保水能を考慮した流出率算定式に初期水分量として与えることで、逐次変化する流出率を算定した。
- 2) この流出率を現行モデルに組み込むことで、土壌の湿潤状態を考慮した提案モデルを構築し、現行モデルと再現性を比較した結果、流出量の再現精度の向上が見られた。
- 3) 汎用性を向上させるためモデルパラメータを固定して検証を行ったところ、提案モデルにおける二山降雨事例の二山目ピーク流量の再現性が向上した。さらに、融雪+大雨事例では現行モデルのピーク流量の過小評価を提案モデルでは安全側に評価できた。

SWSは気象庁で提案する流域雨量指数<sup>14)</sup>に相当するものである。我々の提案したSWSは、パラメータを流出から最適設定でき融雪も考慮できる。そのためより流域特性を反映したものとなっており、洪水の危険度判定に活用できる。さらに今後はSWSの特性を生かし、分布型モデルへの適用や洪水予測への検討を進めていきたいと考える。

**謝辞：**本研究の一部は国土交通省河川砂防技術研究開発公募（水防災技術分野）およびH26年度（一財）河川情報センター研究助成金（助成研究名「流量データの無い河川でも利用可能な流出計算ソルバーの開発」）の助成を受けた。ここに記して感謝の意を表す。

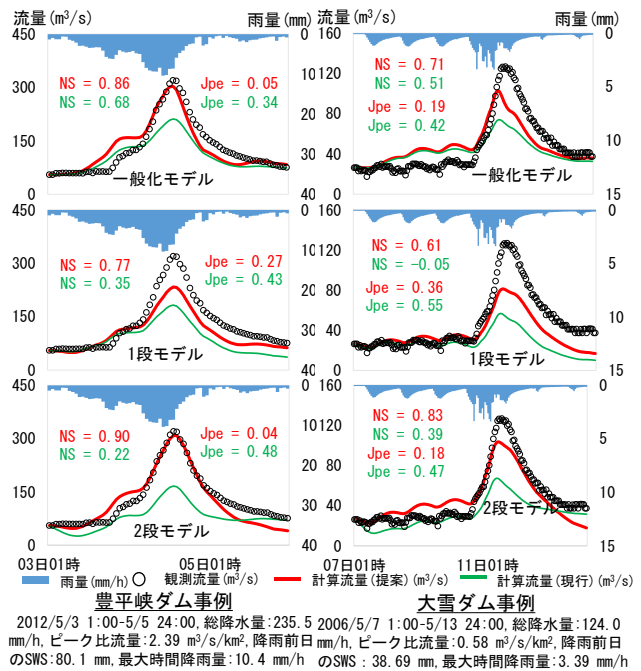


図-8 パラメータ固定による融雪+大雨事例の再現例

#### 参考文献

- 1) 和田一範, 村瀬勝彦, 富澤洋介: 地球気候モデルを用いた地球温暖化に伴う洪水・渇水リスクの評価に関する考察, 水工学論文集, 第49巻, 2005年.
- 2) 木村俊晃: 貯留関数による洪水流出追跡法, 建設省土木研究所, 1961年.
- 3) 杉山博信, 角屋睦, 長井明博: 総合貯留関数モデルに関する研究, 農業土木学会論文集, Vol.1988, +No.134, pp.69-75, a2.
- 4) Prasad, R.: A Nonlinear Hydrologic System Response Model, Jour. of Hydraul. Div., Proc. of the ASCE, Vol.93, No. HY4, pp.201-221, 1967.
- 5) Eagleson, P.S.: Dynamic Hydrology, Mc Graw-Hill Book Co., 1970.
- 6) 星清, 村上泰啓: 小流域における総合貯留関数法の開発, 第31回水理講演会論文集, pp.107-112, 1987.
- 7) (財)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4回, 第8回, 第12回, 2006.
- 8) 角屋睦, 永井明博: 長短期流出両用モデルの開発改良研究, 農業土木学会論文集136, pp.31-38, 1988.
- 9) 佐山敬洋, 立川康人, 濱馨, 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, 第803号/II-73, pp.13-27, 2005.
- 10) 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回水理講演会論文集, pp.385-392, 1983.
- 11) 口澤寿, 中津川誠: 熱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.
- 12) 白谷友秀, 中津川誠, 松岡直基: 流域貯留量を考慮した現業用洪水予測手法の改良, 河川技術論文集, 第20巻, pp.331-336, 2014.
- 13) 近藤純正: 水環境の気象学, 朝倉書店, pp.222-239, 1994.
- 14) 田中信行, 太田琢磨, 牧原康隆: 流域雨量指数による洪水警報・注意報の改善, 測候時報, 75.2, pp.35-69, 2008.

(2015. 9. 30受付)