

# 複合流域モデルによる中小河川の計画・逐次洪水予測法

(株)シン技術コンサル

○正 員 東海林 勉

(財)北海道河川防災研究センター

宮武真由子

(財)北海道河川防災研究センター

フェロー 星 清

## 1. はじめに

近年多発する水害に対し、国土交通省は、豪雨災害緊急アクションプランの施策の一つとして「中小河川における洪水予測等の高度化」を策定し、平成17年度以降5年間で一級河川の主要な中小河川約900河川について洪水予測システム整備を行う計画である。

本報告は、損失項を含む貯留関数法(1段タンク型貯留関数モデル)を用いた複合流域流出解析モデルに、カルマン・フィルター理論を適用させた洪水流出予測法を構築し、中小河川をフィールドとして、様々なハイドロ形状を有する洪水事例について解析・考察を行う。

また、中小河川の河道計画策定における同モデルの利用について検討する。

## 2. 解析流域諸元

解析対象流域は、平成15年8月の北海道・日高豪雨災害で甚大な被害を受けた二級河川厚別川とし、流域モデル図及び流域・河道諸元を図-1に示す。

解析対象地点は水位観測が行われている豊田(流域

面積270km<sup>2</sup>)とする。解析対象洪水は、表-1に示す異なるハイドロ形状を有する4洪水とした。

## 3. モデルの概要

次式に損失項を含む貯留関数法を示す。

$$\begin{cases} \frac{ds}{dt} = r - q - b + q_0, & s = k_{11}q^{p_1} + k_{12}\frac{d}{dt}(q^{p_2}) \\ b = (c_{13} - 1)q, & q_0 = q_B \exp(-\lambda t) \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 $s$ :貯留高[mm],  $r$ :観測雨量[mm/h],  $q$ :観測流出高[mm/h],  $b$ :損失高[mm/h],  $q_0$ :地下水流出高[mm/h],  $q_B$ :初期流出高[mm/h],  $k_{11}, k_{12}$ :貯留係数,  $p_1, p_2$ :貯留指数,  $\lambda$ :減衰係数

$$\begin{cases} k_{11} = c_{11}A^{0.24}, & k_{12} = c_{12}k_{11}^2(\bar{r})^{-0.2648} \\ p_1 = 0.6, & p_2 = 0.4648 \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 $A$ :分割流域面積[km<sup>2</sup>],  $\bar{r}$ :平均雨量強度[mm/h],  $c_{11}, c_{12}, c_{13}$ :未知定数  
河道の洪水流を次式に示す。

$$\begin{cases} \frac{ds_s}{dt_s} = q_o(t) - q_s(t), & s_s = k_4q_s^{p_3} + k_5\frac{d}{dt_s}(q_s^{p_4}) \\ a_s = \alpha q_s^m \end{cases} \quad (3)$$

ここに、 $s_s$ :河道貯留量[m<sup>3</sup>],  $q_s$ :河道流量[m<sup>3</sup>/s],  $t_s$ :時間[s],  $a_s$ :河道断面積[m<sup>2</sup>],  $q_o$ :河道上流端境界条件[m<sup>3</sup>/s],  $k_4, k_5, p_3, p_4$ :河道の貯留係数・貯留指数,  $\alpha, m$ :河道定数(秒とメートル単位)

流出計算と河道計算の単位が異なる場合、計算が煩雑になるため、式(3)を[mm]と[h]に変換して使用する。このとき、河道の貯留係数は次式で表わされる。

$$k_{h4} = \frac{K_4 \alpha L_h}{A_r} \left( \frac{A_r}{3.6} \right)^m (\bar{q}_{ho})^{m-p_3}, k_{h5} = \frac{K_5}{K_4^2} k_{h4}^2 (\bar{q}_{ho})^{2p_3-p_4-1} \quad (4)$$

ここに、 $k_{h4}, k_{h5}$ : [mm]と[h]を用いた河道貯留係数,  $K_4, K_5$ :無次元貯留係数<sup>1)</sup>, 河道長: $L_h$ [km],  $A_r$ :当該河道上流流域面積[km<sup>2</sup>],  $\bar{q}_{ho}$ :河道上流端平均流入高[mm/h]

なお、未知定数は全分割流域で同一値をとるものとする。

## 4. 計画洪水予測手法の結果

計画予測(design forecast)では、図-1の流域・河道網を用いて基本高水を推定している。そのためには、既往洪水解析によりモデル定数の同定が必要である。

流量測定箇所が少ない中小河川では、本モデルによって支川流域の流出流量と河道流量を推定でき、河道

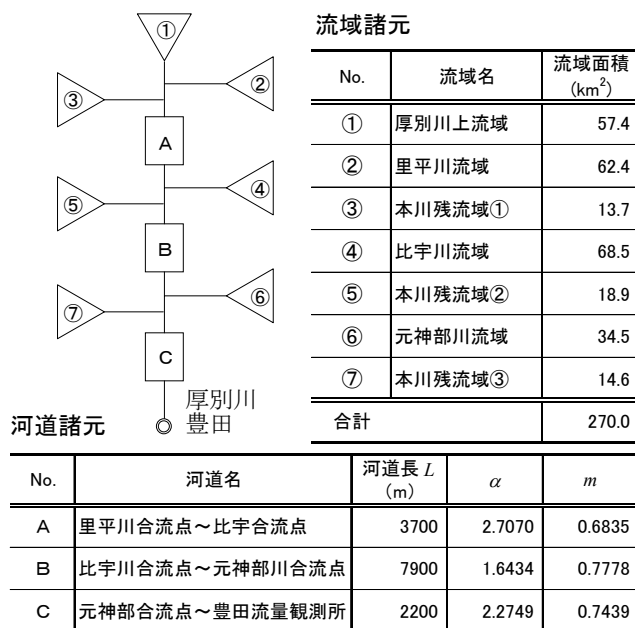


図-1 厚別川流域モデル(基準地点: 豊田)

表-1 厚別川解析対象洪水(基準地点: 豊田)

| No. | 洪水年月日       | ピーク流量 (m <sup>3</sup> /s) | ピーク比流量 (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> ) | ハイドロ形状 |
|-----|-------------|---------------------------|---------------------------------------------|--------|
| ①   | H11.5.4～5   | 392.71                    | 1.45                                        | 一山     |
| ②   | H12.5.12～14 | 344.77                    | 1.28                                        | 二山     |
| ③   | H13.8.22～23 | 457.92                    | 1.70                                        | 三山     |
| ④   | H14.8.7～10  | 335.56                    | 1.24                                        | 一山集中   |

キーワード: 中小河川の計画・逐次予測、複合流域、貯留関数法、カルマン・フィルター、基本高水

連絡先: 〒003-0021 札幌市白石区栄通2丁目8-30 TEL)011-859-2600 FAX)011-859-2616

計画への反映が期待できる。洪水事例①について、モデル定数の最適化を行った結果、図-2 に示すとおり再現性は良好であった。

## 5. 逐次洪水予測手法の結果

逐次予測 (operational forecast) では洪水生起時に流量・水位を迅速に予測する必要がある。本報告では、流出モデルにカルマン・フィルター理論を組み合わせ、予測計算を行う<sup>2)</sup>。流域モデルの状態変量には、変数  $x_1 (=q^{p_2})$ ,  $x_2 (=d(q^{p_2})/dt)$ 、モデル定数  $c_{11}, c_{12}$  及び  $c_{13}$  と予測雨量  $r$  の合計 6 つを選定する。システム誤差、観測誤差及びモデル定数誤差の取扱いについては、乗算的ノイズ<sup>3)</sup>を導入して、状態変量の 10% に固定した。

なお、洪水時には  $\bar{r}$  と  $\bar{q}_{ho}$  は未知なので、既往洪水の値を参考として  $\bar{r}=5$  mm/h、河道流入地点で  $\bar{q}_{ho}$  を  $0.5$   $m^3/s/km^2$  に固定した。

予測雨量は、分割流域毎に流域平均雨量の 3 時間移動平均雨量とし、その誤差分散は以下の式を用いた。

$$Var(\hat{r}_t) = a^2 \ell \bar{r}_t^{2b} \quad (5)$$

ここに、 $\hat{r}_t$ ：予測雨量、 $a, b$ ：定数、 $\ell$ ：リードタイム ( $\ell$  時間先の予測)、 $\bar{r}_t$ ：3 時間移動平均雨量

$a, b$  の値はそれぞれ、北海道全域の平均値である 1.135, 0.880 を使用した<sup>4)</sup>。

モデル定数  $c_{11}, c_{12}$  及び  $c_{13}$  の初期値は、北海道を特性毎に 4 地域に分類したときの、同モデルの平均最適値から標準偏差を引いた値である、8.484, 0.055 及び 1.000 を与えた<sup>5)</sup>。また、減衰係数  $\lambda=0.017$  に固定した。

図-3(上)は、洪水事例①について、モデル定数 ( $c_{11}, c_{12}, c_{13}$ ) の初期値を 100% としてオンライン同定された値を 1 時間毎に変化率で表わしたものである。予測計算を行いながら観測値に見合うパラメータを毎時探索しており、ハイドログラフの立ち上がり付近では、 $c_{11}$  が 20% 近く増大している。図-3(下)は、洪水事例①について、1~3 時間先予測毎の流量における標準偏差を時系列で表わしたものであり、予測値のまわりの信頼区間を計算するために活用される。

次に、洪水事例②~④について、1~3 時間先の流出予測計算を行った結果を図-4 に示す。洪水事例②では、一山目のピーク流量はほぼ推定できているが、二山目は降雨量が一山目と同程度であったため、予測値は一山目より小さくならなかったと考えられる。洪水事例③では、一山目の予測値がかなり大きく、三山目では実測値よりも小さく推定されている。洪水事例④では、時間約 30mm の集

中豪雨に反応し、2 時間先まではピーク流量を推定できている。

一般的に、流量・水位の予測値精度は、予測雨量をいかに精度良く推定するか依存するが、本結果を全体的に見れば、本モデルはハイドログラフの形状が複雑に変化しても、高い精度を持った予測が可能である。

## 6. おわりに

本報告のまとめを以下に記す。

- ・中小河川の計画予測においても、流域・河道網を用いた基本高水算定が可能である。
- ・計画時の流域・河道網を用いることにより、中小河川の逐次洪水予測が容易に行うことができる。
- ・本モデルにより、水文観測情報が少ない中小河川における、支川・河道での計画流量や予測流量の推定が可能である。

## 参考文献

- 1) (財)北海道河川防災研究センター・研究所 編集・発行：一般化貯留関数法による流域流出解析・河道洪水追跡実用計算法, 152p., 2001.
- 2) (財)北海道河川防災研究センター・研究所 編集・発行：「実時間洪水予測システム理論」解説書, 396p., 2004.
- 3) 宝 馨・高 棹 琢馬・椎 葉 充晴：洪水流出の確率予測における実際的手法, 第 28 回水理講演会論文集, 土木学会, pp. 415-422, 1984.
- 4) 東海林勉・星 清・橋本識秀：洪水予測における予測降雨の推定誤差指標の総合化, 土木学会第 60 回年次学術講演会, CD-ROM 概要集, II-18, 2005.
- 5) 大泉卓也・星 清・橋本識秀：2003 年台風 10 号による中小河川のハイドログラフ推定, 土木学会第 59 回年次学術講演会, CD-ROM 概要集, II-42, pp. 83-84, 2004.

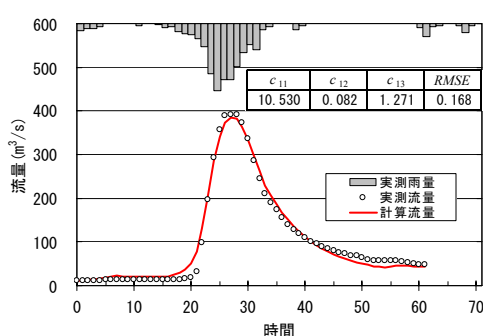


図-2 最適計算結果(豊田地点)

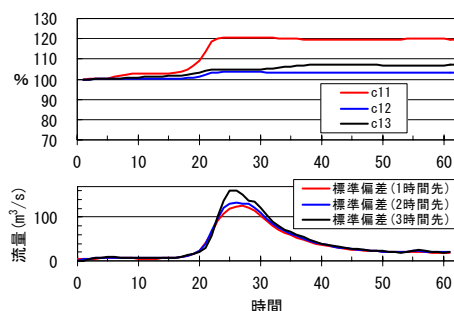


図-3 モデル定数と標準偏差の変化

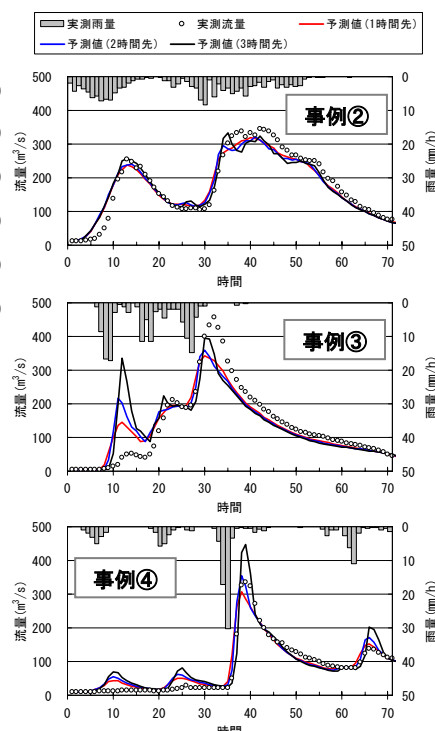


図-4 予測計算結果(豊田地点)