

# 汎用貯留関数モデルを用いた洪水時河川水位予測に関する一考察

首都大学東京 都市環境科学研究科 学生会員 ○下地 誠  
 首都大学東京 都市環境科学研究科 正会員 河村 明  
 国立環境研究所 気候変動適応センター 正会員 Salitha G. Padiyedath  
 首都大学東京 都市環境科学研究科 正会員 天口 英雄  
 東京都 建設局 正会員 高崎 忠勝

## 1. はじめに

我が国では洪水流出解析モデルとして集中型概念モデルのタンクモデルや貯留関数モデルが多用されている。この内、貯留関数モデルは元々木村によって提案され、その後 Prasad や星らによりモデル改良が図られ、さらに著者らも都市貯留関数 (Urban Storage Function, 以下「USF」とする) モデルを提案し、現在まで数々の検討を行っている<sup>1),2)</sup>。貯留関数モデルは簡便かつ迅速に計算でき、洪水ハイドログラフの再現性が高い特長を有するが、集中型モデルであるため流域の降雨空間分布を考慮できない点や、出力である流出量を観測水位より水位流量曲線 (以下「H-Q 曲線」とする) を用いて換算している点に、大きな不確実性が存在している。

そこで本研究では、USF モデルの対象外である分流式下水道を有する都市流域から自然流域までを対象とし、主に降雨の空間的分布を補正する係数 (降雨係数) を付加するとともに、流量ではなく水位を直接出力できるように拡張した貯留関数モデルを汎用貯留関数 (Generalized Storage Function, 以下「GSF」とする) モデルとして提案する。そして、本モデルを分流式下水道の準都市型河川である愛知県岡崎市矢作川水系伊賀川の洪水時河川水位予測に適用し、本モデルによる水位ハイドログラフ再現特性およびその有効性評価を行った。

## 2. 対象流域および対象洪水イベント

図-1 に示す矢作川水系伊賀川は愛知県岡崎市の中央市街地を流れ、矢作川支川の乙川に合流する幹川延長 5.2 km、流域面積 14.2 km<sup>2</sup> の準都市型河川であり、本研究では伊賀橋水位観測所上流の 9.6 km<sup>2</sup> を対象とする。対象洪水イベントは 2013 年~2015 年の中からキャリブレーション用として 5 イベント、2016 年から検証用として 2 イベントを最大水位が高い順に抽出した。洪水イベント期間としてはその洪水イベントに対応する降雨開始から降雨終了 6 時間後までとした。降雨データとしては図-1 に示す 3 箇所の雨量観測所 (対象流域外に分布) のデータから、テーセン分割法により流域平均降雨量を算定し使用した。表-1 にキャリブレーション用および検証用の各洪水イベントの諸元 (発生年月日, 最大水位, 60 分最大雨量, 気象要因) を示す。なお、使用した水位・降雨データはともに 10 分値である。

## 3. 汎用貯留関数 (GSF) モデル

GSF モデルの総貯留高  $s$  は星のモデルと同様に式 (1) で表わされ、図-2 にはその流入出概念図を示す。すなわち連続式は式 (2) で表現される。式 (2) では、流域平均降雨  $R$  の主に空間的なばらつきによる誤差を考慮するため、降雨係数  $\gamma$  を乗じてこれをモデルパラメータとして追加する。さらに、河川流出量  $Q$  を H-Q 曲線式 (4) として直接基礎式に組み込み、その係数 ( $a$  および  $b$ ) もモデルパラメータとして追加する。

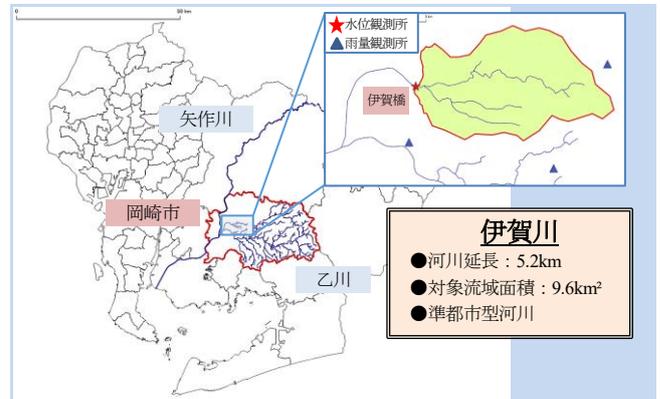


図-1 矢作川水系伊賀川流域図

表-1 対象洪水イベント

洪水イベント	洪水イベント期間	最大水位 (m)	60分最大雨量 (mm)	気象要因
キャリブレーション用イベント 2013~2015年				
C1	2015年9月10日	24.1	32.9	台風
C2	2013年9月7~8日	23.9	44.9	低気圧
C3	2015年9月8~9日	23.9	18.6	台風
C4	2013年10月15~16日	23.7	14.3	台風
C5	2014年5月26~27日	23.7	14.2	低気圧
検証用イベント 2016年				
V1	2016年9月19~21日	24.5	47.9	台風
V2	2016年3月18~19日	23.6	17.7	低気圧

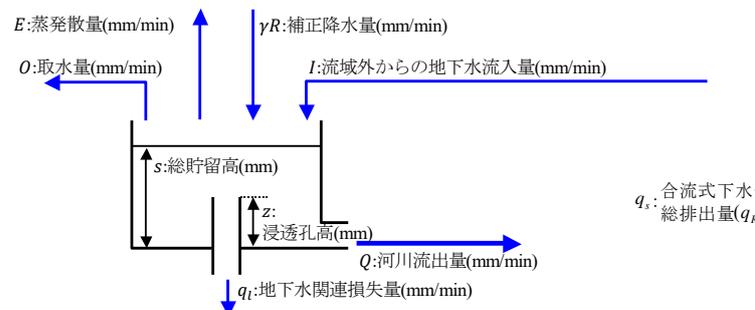


図-2 GSF モデルにおける総貯留高  $s$  の流入出概念図

$$s = k_1 Q^{p_1} + k_2 \frac{d}{dt} Q^{p_2} \quad (1)$$

$$\frac{ds}{dt} = \gamma R + I - E - O - Q - q_l \quad (2)$$

$$q_l = \begin{cases} k_3 (s - z) & (s \geq z) \\ 0 & (s < z) \end{cases} \quad (3)$$

$$Q = a(H - b)^2 \quad (4)$$

ここに、 $H$ : 観測水位 (m),  $t$ : 時間 (min),  
 $k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, z, a, b, \gamma$ : モデルパラメータ.

式 (3), (4) を式 (1), (2) に代入し, 最終的に 1 階の非線形 2 元連立常微分方程式に変換すると, この微分方程式は 9 つのパラメータが既知であれば, 数値的に解くことができる. ここでは数値解法として比較的計算が速く, 精度も高い Runge-Kutta-Gill 法を用いて計算する. さらに未知モデルパラメータの同定手法としては, 大域的探索法の一つである SCE-UA 法<sup>3)</sup>を用いた.

本研究では, 上記 GSF モデルの他に対照モデルとして, ① $\gamma=1$  と固定した 8 パラメータモデル, ② $a$  および  $b$  を流量観測で得られた値 ( $a=12.718, b=-22.580$ ) に固定した 7 パラメータモデル, ③ $\gamma, a, b$  を固定した 6 パラメータモデルの 3 モデルを検討した.

4. 結果と考察

本研究では, モデルパラメータの同定評価指標としては水位ハイドログラフの平方根平均二乗誤差 (Root Mean Square Error, 以下「RMSE」とする) を用いたが, 水位ハイドログラフの再現性の評価には, さらに Nash-Sutcliffe 指標 (以下, 「NS 指標」とする) およびピーク誤差 (Percentage of Error Peak, 以下「PEP」とする) を用いた. また, モデルの有効性評価指標としては補正赤池情報量基準 (Corrected Akaike's Information Criterion, 以下「AIC<sub>c</sub>」とする) を用いた.

図-3, 図-4 にそれぞれ, キャリブレーション用イベント (C1, C2) および検証用イベント (V1) に対する 4 モデルの水位予測結果を示す. 今回は紙面の都合上, 最大水位が高かったこれら 3 イベントについて詳しく述べる. また図-5 には, 全イベントに対する RMSE, NS 指標, PEP および AIC<sub>c</sub> 値を示す. なお, 検証用イベントでのモデルパラメータとしてはキャリブレーション全 5 イベントに対する最適同定パラメータを用いた. 図-3 より, 4 つのモデルは水位を概ね精度良く再現することが出来ている. 特に GSF モデルは他のモデルと比較して水位の上昇および遁減をより精度良く再現していることが確認できる. なお, C1 に対しては, イベントが短時間強降雨であったので他のイベントに比べその再現性は劣っている. 一方, 検証用イベントに対しては, 図-4 より全体的に水位の再現性が低くなっていることが分かる. 特に GSF モデルおよび 8 パラメータモデルは再現性が低く, ピーク水位を過小評価している. これはパラメータ数が多い GSF モデルおよび 8 パラメータモデルが, キャリブレーション用イベントにモデルパラメータを過適合した結果であると考えられる. 以上のことは, 図-5 a), c) に示す RMSE および PEP の値からも言える. なお図-5 b) より, NS 指標としてはどのイベントにおいても 80%以上となりある程度のモデル精度を確保できていると言える. 次に図-5 d) の AIC<sub>c</sub> より, ほぼすべてのイベントにおいて GSF モデルの値が最小となっており, 適合性が高く汎用的であると言え, モデルとしての有効性が確認された.

5. むすび

本研究では, 降雨係数を付加し水位を直接予測するように貯留関数モデルを拡張した GSF モデルを提案するとともに, 本モデルを矢作川水系伊賀川に適用し, 水位ハイドログラフの再現性およびその有効性を評価した. その結果, GSF モデルは対照 3 モデルと比較して, 水位ハイドログラフの再現性が高くとまた情報量基準的にも最適なモデルであることが確認された. なお, 検証用イベントに関しては, 再現性の低下が見られ, 今後はカルマンフィルターや粒子フィルター等を適用し実時間予測による検討を行う予定である.

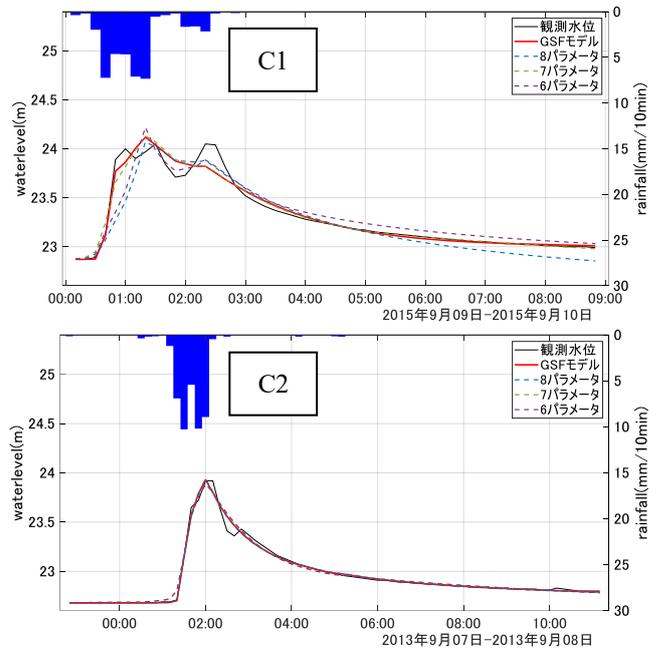


図-3 キャリブレーションに対する水位予測結果

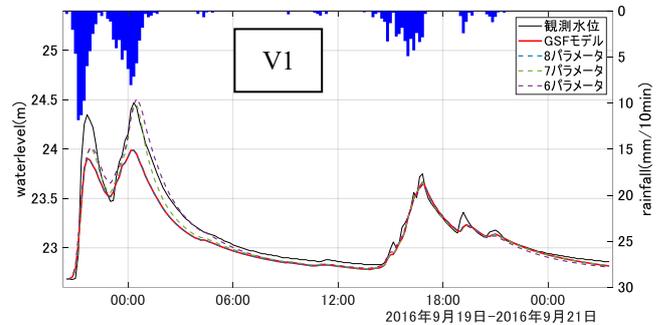


図-4 バリデーションに対する水位予測結果

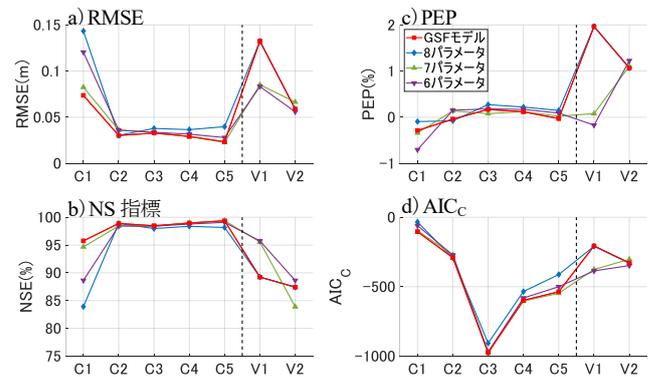


図-5 各イベントの RMSE, NS 指標, PEP, AIC<sub>c</sub>

参考文献

- 1) Padiyedath, S.G., Kawamura, A., Takasaki, T., Amaguchi, H., Azhikodan, G. : An effective storage function model for an urban watershed in terms of hydrograph reproducibility and Akaike information criterion. J. Hydrol. No.563, pp.657-668, 2018.
- 2) 高崎忠勝, 河村明, 天口英雄, 荒木千博 : 都市の流出機構を考慮した新たな貯留関数モデルの提案, 土木学会論文 B, Vol.65, No.3, pp.217-230, 2009.
- 3) 田中丸治哉 : タンクモデル定数の大域的探索, 農業土木学会論文集, No.178, pp.103-112, 1995.