

2003 年台風 10 号による沙流川二風谷ダム流入量予測

(株) リブテック

○正 員 片山直樹

(財) 北海道河川防災研究センター

フェロー 星 清

北海道工業大学

フェロー 橋本識秀

1. はじめに

本報告では、「地下水流出成分を含む貯留関数法」に「カルマン・フィルター理論」を組み合わせ、洪水逐次予測を行う手法を検討する。流出に関する4個の変数の他に3個のモデル定数及び予測雨量を「状態変数」に加えて、「システム方程式」の拡大を図り、モデル定数の誤差分散や予測雨量の誤差分散を導入して、予測流量の精度を定量的に算出した。

2. 予測雨量の誤差評価

ランク分けされた予測雨量に対応する1～3時間先の実測雨量データにガンマ分布をあてはめた結果、次の予測降雨の誤差分散(S_{k+1}^2)算定式が提案されている¹⁾。

$$\text{Var}(\hat{r}_{k+1}) = S_{k+1}^2 = a_s^2 l r_{k+1}^{2b_s} \quad (1)$$

ここに、 $\text{Var}(\cdot)$ ：分散、 $\hat{r}_{k+1}$ ：予測値、 r_{k+1} ：真値、 a_s 、 b_s ：予測定数、 l ：リードタイム(h)

八重岳レーダ(沖縄)と御在所レーダ(中部)による豪雨情報を再整理して、定数が以下のように決定されている¹⁾。

$$a_s = 1.37, \quad b_s = 0.64 \quad (2)$$

式(2)の予測定数がどの地点においても適用可能かどうかの疑問は残るが、本報告での予測降雨誤差分散算定式として、式(1)と式(2)を用いて解析を行うこととする。 $r_{k+1} = 0$ のとき、分散がゼロとなる不合理を避けるために、 $r_{k+1} = 0.1 \text{ mm/h}$ と小さな値を想定して計算を進める。

3. 洪水予測モデル

本報告では、次式に示す地下水流出成分を含む貯留関数法(2段タンク型貯留関数モデル)を流出モデルとして採用する(図-1 参照)²⁾。

$$\begin{cases} s_1 = k_{11}q_1^{p_1} + k_{12} \frac{dq_1^{p_2}}{dt} \\ \frac{ds_1}{dt} = r - q_1 - b \\ b = k_{13}q_1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} s_2 = k_{21}q_2 + k_{22} \frac{dq_2}{dt} \\ \frac{ds_2}{dt} = b - q_2 \end{cases} \quad (4)$$

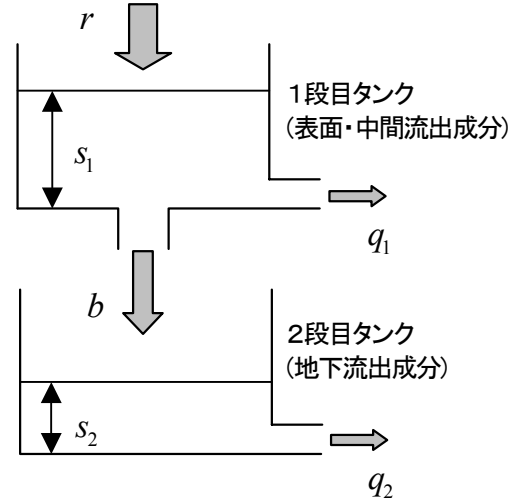


図-1 2段タンク型貯留関数モデル

ここに、 s_1 ：1段目タンク貯留高(mm)、 s_2 ：2段目タンク貯留高(mm)、 r ：観測雨量(mm/h)、 q ：全流出高(mm/h)、 q_1 ：表面・中間流出高(mm/h)、 q_2 ：地下流出高(mm/h)、 b ：1段目タンクから2段目タンクへの浸透供給量(mm/h)、 $k_{11}, k_{12}, k_{21}, k_{22}$ ：貯留係数、 k_{13} ：浸透係数、 p_1, p_2 ：貯留指数

また、 k_{11}, k_{12}, k_{13} と k_{21}, k_{22} は、次式で表現される。

$$\begin{cases} k_{11} = c_{11}A^{0.24} \\ k_{12} = c_{12}k_{11}^2\bar{r}^{-0.2648} \\ k_{13} = c_{13} - 1 \end{cases}, \quad \begin{cases} k_{21} = \frac{c_1}{c_0}k_{13} \\ k_{22} = \frac{1}{c_0}k_{13} \end{cases} \quad (5)$$

ここに、 A ：流域面積(km^2)、 $\bar{r}$ ：平均雨量強度(mm/h)、

c_{11}, c_{12}, c_{13} ：未知定数、 c_0, c_1 ：確定値

c_0, c_1 は次式で与えられていることが知られている。

$$c_0 = (\delta/T_c)^2, \quad c_1 = \delta^2/T_c \quad (6)$$

ここに、 T_c ：地下水流出成分の分離時定数、 δ ：減衰係数

式(3)と式(4)を解くために、次の変数を「状態変数」に選定する。

$$x_1 = q_1^{p_2}, \quad x_2 = \frac{dx_1}{dt}, \quad x_3 = q_2, \quad x_4 = \frac{dx_3}{dt} \quad (7)$$

モデル定数 c_{11}, c_{12}, c_{13} および予測雨量 r は、洪水毎に変化することが予想される。したがって、 c_{11}, c_{12}, c_{13} および予測雨量 r も「状態変数」に加えてシステム方程式を作成する。

$$X_1 = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T, \quad X_2 = [c_{11} \ c_{12} \ c_{13}]^T, \quad X_3 = r \quad (8)$$

キーワード：貯留関数法、地下水流出成分、カルマン・フィルター、洪水予測

連絡先：〒065-0018 札幌市東区北18条東1丁目3-3 TEL 011-722-0483 FAX 011-722-0487

4. 実測データへの適用

沙流川二風谷ダム地点（流域面積 1214.8km²）平成 15 年 8 月 9 日 1 時～8 月 11 日 24 時洪水を対象に前述した予測モデルを用いて 1 時間～3 時間先予測までの洪水予測シミュレーションを行う。その際に、実際の予測計算を考慮し旧建設省の洪水予報業務においてよく用いられている過去 3 時間の移動平均雨量を将来 3 時間先予測降雨として用いた。この方法は単純な時系列予測であるが、従来の流出予測において特別な不都合を生じなかったこと、またその計算が簡便であることなどから多用されてきたものである。

沙流川流域における 60 洪水例を用いて 3 個のモデル定数 c_{11} 、 c_{12} 及び c_{13} ($=k_{13}+1$) の最適同定を行った。その結果によるモデル定数の平均値(μ)と標準偏差 (σ) が表-2 に示されている²⁾。

表-2 沙流川におけるモデル定数統計量

	c_{11}	c_{12}	c_{13}
平均値(μ)	8.035	0.264	1.898
標準偏差(σ)	2.279	0.176	0.586

モデルパラメータ(c_{11} , c_{12} , c_{13})の初期値は、安全側の計画となるように選択する。 c_{11} が小さい時はハイドログラフが尖鋭化し、 c_{12} が小さくなるとピークの生起時刻が早まる。 c_{13} が小さくなると総流出量が大きくなる。したがって、モデル定数 c_{11} は $\mu - \sigma$ 、 c_{12} は $\mu - \sigma$ 、 c_{13} は $\mu - \sigma$ ($c_{13} \geq 1$) の値を用いた。

なお、実際の予測計算を想定し予測降雨値として、雨量が容易に加工可能な旧建設省の洪水予報業務においてよく用いられていた過去 3 時間の移動平均雨量を用いた。以下に、現時刻 t_k から l 時間後の降雨予測値を $\hat{r}_{k+l}$ とした場合の式を以下に示す。

$$\hat{r}_{k+l} = (r_{k-2} + r_{k-1} + r_k) / 3 \quad (9)$$

3 時間先予測流入量の計算例を図-2 及び表-4 に示す。ハイドログラフの 8/9～8/10 における立ち上がり部にかけての適合度は良好であることがわかる。

ピーク近傍におけるハイドログラフの適合度については、実際の雨量は急激に増加、減少しているのに対し、計算では過去 3 時間の平均値を用いて予測を行っているため、実際のピーク時刻より遅れている。

評価基準には、 $RMSE$ （平均 2 乗誤差の平方根）、 J_{PE} （ピーク流量相対誤差）、 J_{RE} （ハイドログラフの相対誤差）を用い、1 段タンクモデル（表-3）と今回採用した 2 段タンクモデル（表-4）との誤差を比較すると、ハイドロ全体の相対誤差は悪いが洪水予報に大事なピーク誤差の精度は上がったといえる。図-3 は、モデル定数の初期値を 100% として、逐次更新される値を 1 時間ごとに変化率で表したものであり、 c_{11} 、 c_{12} 及び c_{13} の最大変化率はそれぞれ 37%、19%、20% である。

表-3 1 段タンク型貯留関数モデル³⁾

	1 時間先予測	2 時間先予測	3 時間先予測
$RMSE/Q_{op}$	0.0351	0.0657	0.1034
J_{PE}	0.0022	0.0557	0.1104
J_{RE}	0.0737	0.1160	0.1682

表-4 2 段タンク型貯留関数モデル

	1 時間先予測	2 時間先予測	3 時間先予測
$RMSE/Q_{op}$	0.0277	0.0514	0.0862
J_{PE}	0.0062	0.0353	0.0686
J_{RE}	0.0940	0.1440	0.2015

※ Q_{op} : 観測ピーク流量

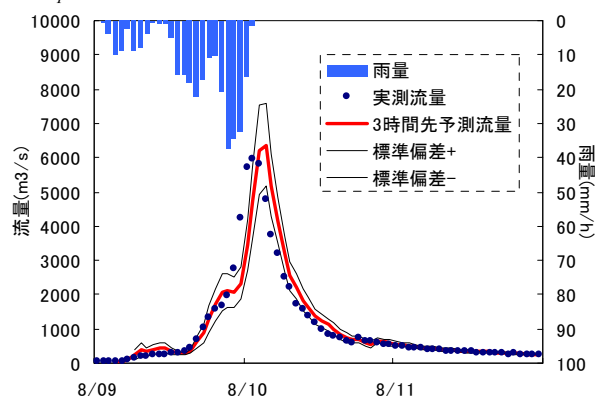


図-2 3 時間先予測結果

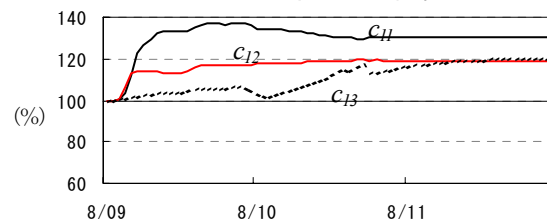


図-3 パラメータ変化率

5. まとめ

本報告では、予測雨量の誤差を考慮した 2 段タンク型貯留関数モデルを沙流川二風谷ダム地点に適用し、洪水予測シミュレーションを試みた。本モデルの特徴は、カルマン・フィルターによる予測値の誤差分散つまり予測雨量の誤差を含んだ予測精度（信頼区間）を自動的に算定することにより、河道追跡を含む場合にも拡張可能である。

参考文献

- 1) Etoh, T., Kamibayashi, Y., Nakanishi, M. and Yoshida, M.: A study on prediction error in rainfall forecasting and its application to on-line operation of detention storage, Proc. of International Conference on Water Resources & Environment Research: Towards the 21st Century, Vol. I, pp.531-538, 1996.
- 2) (財)北海道河川防災研究センター・研究所編集・発行：単一流域を対象とした貯留関数法の精度比較, 189p., 2002.
- 3) 片山直樹・星 清・橋本識秀：予測雨量の誤差を考慮した実用的洪水予測モデルの開発，土木学会北海道支部論文報告集，第 60 号，pp. 292-295, 2004.