

流出モデルと貯水位平滑化フィルタを用いたダム流入量推定法の検討

石川工業高等専門学校専攻科

○小島徹也

石川工業高等専門学校

正会員 鈴木洋之

北海道開発土木研究所

正会員 石田享平

1. はじめに

ダム貯水池への流入量推定はダム管理上の重要な技術である。流入量は静水位を貯留量に変換してその時間差分を求め、これに放流量を加えて推定される。しかし、計測水位データに含まれる各種水面振動に起因したノイズが静水位（流入量）の推定を困難にしている。この問題に対して、鈴木ら¹⁾はデジタルフィルタを用いた流入量推定法を提案してきたが、この方法にはデジタルフィルタの特性によって推定された洪水波形に生じる遅れ時間の問題が指摘されている。

本研究は流出モデルをシステムとするカルマンフィルタにデジタルフィルタ¹⁾で推定された流入量を観測値として与える手法を構築して時間遅れの無い流入量の推定を試みるものである。

2. 貯水位平滑化フィルタ¹⁾

鈴木ら¹⁾は流入量の推計に計測水位の信号からセイシュなどの貯水池水面振動の信号をデジタルフィルタ（貯水位平滑化フィルタと呼ぶ）で濾波して得られる推定静水位を用いる手法を示した。この手法では真値である静水位を含む計測水位からノイズを除去して静水位を推定するため、推定静水位には遅れ時間とノイズの影響が残るものの、真値の情報が含まれている。この意味で貯水位平滑化フィルタによる推定流入量（静水位）は真値の保障性を持つと考えられる。

3. カルマンフィルタの定式化

本研究ではカルマンフィルタのシステムに式(1)から式(8)で表される佐藤・嵯峨ら²⁾の流出モデル(図-1)を用いる。ただし、 S_1, S_2 =貯留高、 r =降雨量、 q_1, q_2 =流出高、 b_1, b_2 =浸透量、 $k_{11}, k_{12}, k_2, \alpha_1, \alpha_2, \lambda, p_1, p_2$ =モデルパラメータ、 Q_B =初期流量である。ここで、星³⁾⁴⁾は式(2)と同じ構造の貯留関数をカルマンフィルタに定式化しており、本稿での定式化もこれに従った。基礎式に式(11)の変数変換を施してTaylor展開による局所線形化を行うと式(12)を得る。式(12)の形のベクトル微分方程式は式(13)の漸化式で表されることが知られており、式(13)にシステム誤差 w_i を加えた式(14)がカルマンフィルタの状態方程式となる。式(13)は佐藤・嵯峨ら²⁾がモデルの数値解法に用いた式でもある。ただし、 $c_i=1+\alpha_i$ ($i=1, 2$)、 A は各パラメータで定まる定数行

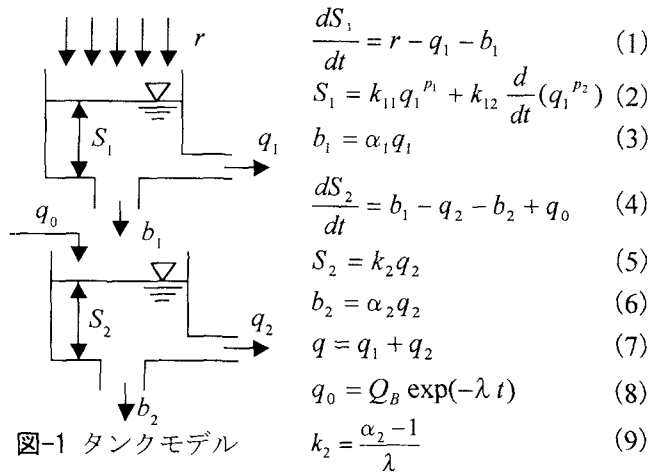


図-1 タンクモデル

$$\frac{dS_1}{dt} = r - q_1 - b_1 \quad (1)$$

$$S_1 = k_{11} q_1^{p_1} + k_{12} \frac{d}{dt}(q_1^{p_2}) \quad (2)$$

$$b_1 = \alpha_1 q_1 \quad (3)$$

$$\frac{dS_2}{dt} = b_1 - q_2 - b_2 + q_0 \quad (4)$$

$$S_2 = k_2 q_2 \quad (5)$$

$$b_2 = \alpha_2 q_2 \quad (6)$$

$$q = q_1 + q_2 \quad (7)$$

$$q_0 = Q_B \exp(-\lambda t) \quad (8)$$

$$k_2 = \frac{\alpha_2 - 1}{\lambda} \quad (9)$$

$$Y = [y_1 \ y_2 \ y_3 \ y_4 \ k_{11} \ k_{12} \ c_1 \ c_2]^T \quad (10)$$

$$y_1 = q_1^{p_2}, \ y_2 = \frac{d}{dt}(q_1^{p_2}), \ y_3 = q_2, \ y_4 = q \quad (11)$$

$$\frac{dY}{dt} = A \cdot Y + D \quad (12)$$

$$Y_i = \Phi_{i-1} Y_{i-1} + \Gamma_{i-1} D_{i-1} \quad (13)$$

$$\text{where } \Phi_i = I + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m!} A_i^m \cdot \Delta T^m$$

$$\Gamma_i = \Delta T \left[I + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m!} A_i^{m-1} \cdot \Delta T^{m-1} \right]$$

$$Y_i = \Phi_{i-1} Y_{i-1} + \Gamma_{i-1} D_{i-1} + w_{i-1} \quad (14)$$

$$Z_i = H_i Y_i + v_i \quad (15)$$

$$\text{where } H = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

列、 T は転置を表す。また、式(10)の状態変量のうち実際の観測量は q のみなので、観測誤差を v_i とすれば観測方程式は式(15)となる。カルマンフィルタの w_i と v_i には白色ノイズを仮定した。パラメータ p_1 と p_2 はモデルの物理性を維持するために星ら⁵⁾の結果からそれぞれ0.6と0.4648に固定した。また、 λ はほぼ同じモデルを用いた佐々木ら⁶⁾の流出計算の結果を参考に0.019とし、 k_2 は嵯峨⁷⁾が示した式(9)により α_2 から定めた。

4. 流入量推定法の計算アルゴリズム

図-2に本流入量推定法のアルゴリズムを示す。貯水位平滑化フィルタで現時刻 T_r に推定された流入量は実際には貯水位平滑化フィルタが与える遅れ時間 T_{lag} 前の時刻 ($T_r - T_{lag}$) での流入量となる(図-2(1)(2)軸)。そこで、本手法では現時刻 T_r に貯水位平滑化フィルタで推定された流入量を初期値とするカルマンフィルタのオフライン予測計算によって T_{lag} 時間先まで予測を行う。この計算で得られた予測値が実際の現時刻推定値となる(図-2(3)軸)。また、現時刻が $T_r + \Delta t$ になる

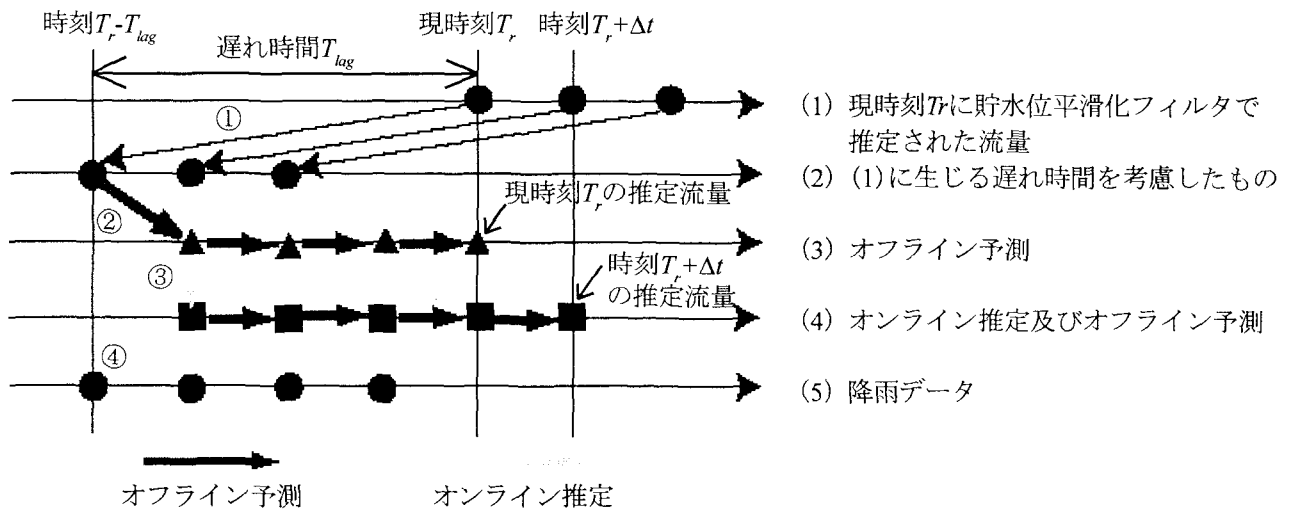


図-2 カルマンフィルタの計算アルゴリズム概要図

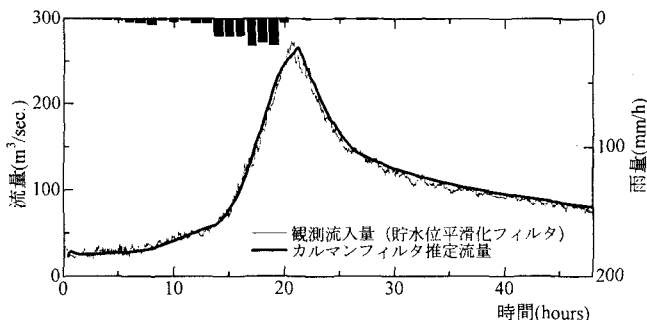


図-3 カルマンフィルタ計算結果の比較 (case1)

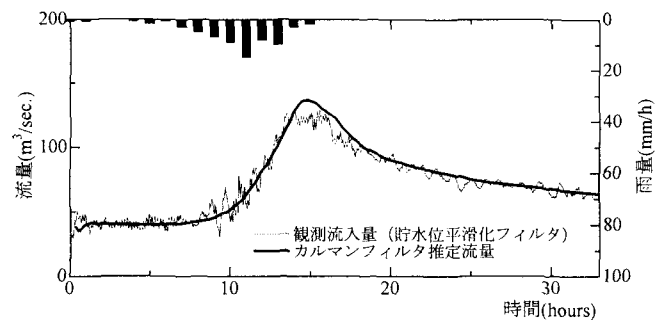


図-4 カルマンフィルタ計算結果の比較 (case2)

と新たな観測流量が得られる。この新たな観測流量と図-2(3)軸に示した予測計算で得た $(T_r + \Delta t - T_{lag})$ 時間での予測値を用いてカルマンフィルタのオンライン推定を行う(図-2③)。このオンライン推定で得られた推定値を初期値としたオフライン予測計算で時刻 $T_r + \Delta t$ での現時刻推定値を求める。この方法により貯水位平滑化フィルタに生じる遅れ時間の解消が可能となる。また、予測ステップ計算を行う時間は実際には過去となるため、予測ステップ計算は計測雨量を用いる実時間流出計算に相当することが本法の特徴である。

5. 計算結果と考察

本解析では金山ダム流域で98年9月16日0:00から98年9月17日24:00 (case1) と98年9月22日15:00から98年9月23日24:00 (case2) に記録された出水¹⁾を対象とした。計算に際してカルマンフィルタの観測流量は遅れ時間20分の貯水位平滑化フィルタ¹⁾で推定された流量を用いた。また、観測誤差分散には観測流量の振幅幅に合わせて $30\text{m}^3/\text{sec}$ 相当の値を与えた。システム誤差分散はその物理的意味が曖昧なため、本解析では0とした。case1とcase2での推定結果をそれぞれ図-3、図-4に示す。これらの図ではカルマンフィルタの観測値である貯水位平滑化フィルタによる流量を比較のために示した。ただし、貯水位平滑化フィルタの流量は設

定した20分の遅れ時間分早めて表示している。両ケース共にカルマンフィルタで推定された洪水波形のピークに若干のオーバーシュートが見られる。しかし、カルマンフィルタの推定流量は真値の保障性が高いと考えられる貯水位平滑化フィルタの洪水波形とほぼ同じであり、本手法で遅れ時間のない流入量の推定が可能になると考えられる。

6. おわりに

本手法によって時間遅れの解消と流入量推定精度の向上が期待される結果を得た。今後、推定性能の評価を初めとした解析を進めて実用化を目指したい。

参考文献

- 1) 鈴木洋之、長谷川和義、藤田睦博、石田享平、岩崎誠司：デジタルフィルタを用いたダム貯水池への流入量推定手法の開発、土木学会論文集、No.677/II-55、pp.1-20、2001。
- 2) 佐藤力信、嵯峨浩、馬場仁志、星清：損失機構を含む貯留関数法を応用したタンクモデルの提案、土木学会北海道支部論文報告集、第55号(B)、pp.32-35、1988。
- 3) 星清：洪水予測システムの基礎的検討(1)、土木試験所月報、No.385、pp.48-68、1985。
- 4) 星清：洪水予測システムの基礎的検討(2)、土木試験所月報、No.386、pp.42-48、1985。
- 5) 星清、山岡勲：雨水流法と貯留関数との相互関係、第26回水理講演会論文集、第43巻、pp.273-278、1982。
- 6) 佐々木靖博、星清、井出康郎、松木賢治：北海道における損失項を含む総合化貯留関数法、土木学会北海道支部論文報告集、第56号(B)、pp.210-215、2000。
- 7) 嵯峨浩：北海道におけるタンクモデルの総合化、北海道河川防災研究センター研究所紀要(11)、pp.87-92、2000。