

河道の実時間水位予測を用いた遊水地樋門操作

Operating System of Retarding Basin Sluice Ways Using Real-time Stage Prediction

高棹琢馬*・椎葉充晴**・立川康人***・森田健太郎****

by Takuma TAKASAO, Michiharu SHIIBA, Yasuto TACHIKAWA and Kentaro MORITA

A system for operating many sluice ways located along retarding basins using a real-time runoff prediction scheme is developed. In the Ueno Retarding Basins (area:250ha, pondage:9.0 million m³) in Japan, there are thirty-six sluice ways and during a flood at least seventy-two operators must stand by to operate the sluice ways. But it has been very difficult to arrange such many people. In this system, to operate many sluice ways one after another with as few people as possible, the stage of the river at each sluice way is predicted on a real-time basis and the time when the stage rises up to the operation stage at each sluice way is given. For the flood data from September 19 to 20 in 1990, this system was simulated and the time when the stage of the river rised up to the operation stage of each sluice ways was predicted and compared to the actual operation time.

keywords : Real-time stage prediction, Kalman filter, Retarding basins, Four-point implicit method

1. はじめに

都市化域での洪水災害による被害を防止・軽減する上で、河川水位を実時間で予測する意義は非常に大きい。これまで、実時間の流出予測理論は主として山地流域を対象とし、ダム湖流入量など河川流量の予測に主眼がおかれてきた。しかし、都市域における避難予警報の発令、樋門などのゲート操作のためには、流量よりも河川水位の予測情報が重要となることが多い。

本研究では、緩勾配かつ背水の影響を考慮せねばならない都市域での河川水位を実時間で予測するために、カルマンのフィルタリング・予測理論を用いた流量予測システム^{1),2)}と、4点陰形式差分スキーム^{3),4),5)}による不定流追跡システムを組み合わせ、河道の特定の区間での水位を実時間で予測するシステムを構築し、その実流域への適用として、木津川上流の上野盆地で建設されている上野遊水地の樋門操作に応用した。

2. 上野遊水地の樋門操作と実時間水位予測の必要性

木津川上流の上野遊水地（総面積約250ha、総湛水容量約900万m³）は4つの遊水地からなり、出水時の本川の洪水調節および上野市周辺の治水対策を目的として現在も建設が進められている（図-1参照）。遊水地には、樋門が多数、設置されており、内水河川が遊水地を横切る地点、すなわち、遊水地に入る地点および遊水地から出て本川に注ぐ地点と、排水用に遊水地の下端に建設されている。現在、樋門は36ヶ所に設置されており、洪水時の樋門操作は、地元消防団等の地域住民の協力により次の手順で行われている。

*	正会員	工博	京都大学教授	工学部土木工学教室	(〒606 京都市左京区吉田本町)
**	正会員	工博	京都大学助教授	工学部土木工学教室	(同上)
***	正会員	工修	京都大学助手	工学部土木工学教室	(同上)
****	学生会員		京都大学院生	工学部大学院修士課程	(同上)

1. 本川の河川水位が上がり、内水河川側すなわち遊水地側に河川水が流入し始める時点で樋門を閉鎖し、本川の洪水流量調節のための容量を確保する。
2. 本川流量が一定流量以上になった場合、各遊水地に1箇所づつ設置されている越流堤から洪水を自然越流させ、本川流量を調節する。
3. 本川水位の低下に応じて、樋門を全開し、遊水地内の湛水を樋門より排水させる。

1つの樋門を操作するためには最低2人の人員が必要であるため、現在、洪水時には70人近くの操作員を待機させる必要がある。さらに、将来計画されている樋門が完成すると50ヶ所を超え、必要な人員は、100名を超えることになる。しかし、それだけの人員の確保は非常に難しくなっており、できるだけ少ない人員で多数の樋門を操作する手法を構築する必要がある。

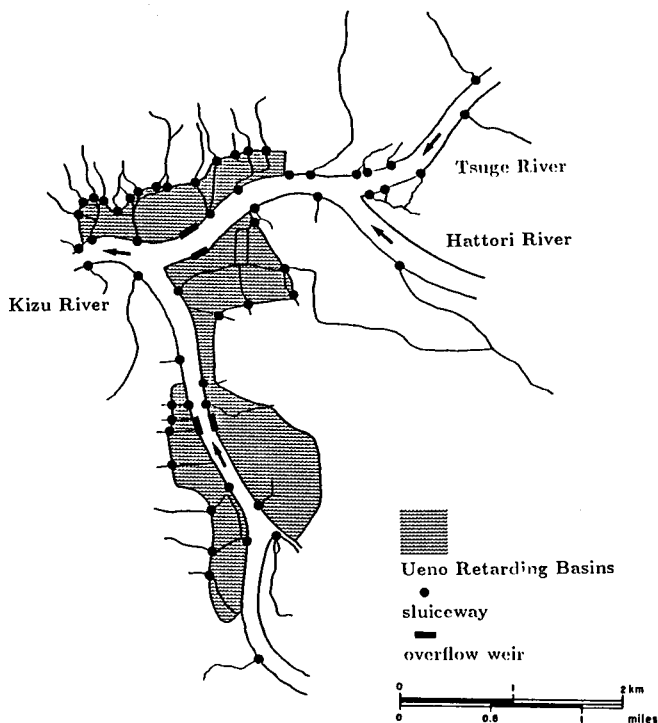


図-1 上野遊水地概要

そこで、本研究では、数時間先までに操作水位に達する樋門を予測できれば、その樋門を順次、監視・操作することにより、小人数で多数の樋門を操作することができると考え、河川水位を実時間で予測し、操作水位に達する時刻を予測して操作すべき樋門を指示するシステムを開発した。

なお、現行の樋門操作規則では、洪水時に本川から内水河川への逆流が始まる時点での水位を操作水位とし、順次、樋門を閉鎖すると決められている。この操作規則に従って樋門の操作水位に達する時刻を予測するためには、内水河川も考慮する必要があるが、本研究では、まず、各樋門位置の地盤高が樋門の操作水位であると考え、本川水位によってのみ操作水位は決ると仮定した。

3. 操作水位到達時刻の予測手法

モデル化した対象流域を図-2に示す。予測の手順として、まず、対象とする河道区間上端での流量を、観測流量（佐那具・荒木・依那古地点）を用いてカルマンのフィルタリング理論により貯留量を逐時推定しながら予測する。次に、予測した流量と河道区間下端（岩倉地点）での水位流量曲線を境界条件として、不定流計算を行うことにより樋門位置での本川水位を予測し、操作水位に達する時刻を予測する。作業の流れを図-3に示す。

3.1 流出予測システム

流出予測システムでは、流出モデルを貯留関数法を用いた状態空間型モデルで表し、これに正規白色を仮定した観測ノイズとシステムノイズを導入した。状態方程式、観測方程式はそれぞれ

$$\frac{dx}{dt} = f(x, r_k, t) + Fw(t), \quad t_{k-1} \leq t \leq t_k \quad (1)$$

$$y_k = g(x, t_k) + Gv_k \quad (2)$$

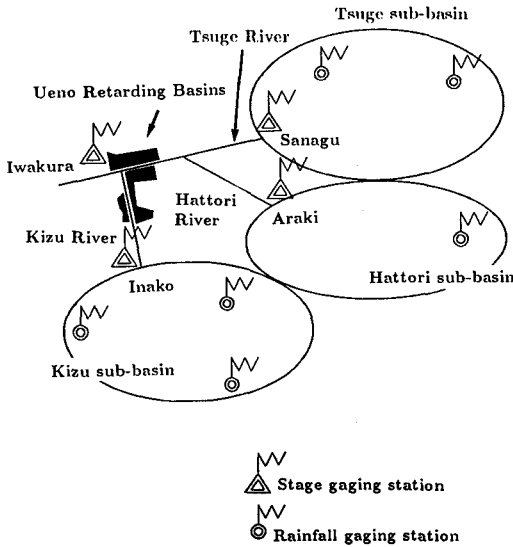


図-2 流域の模式図

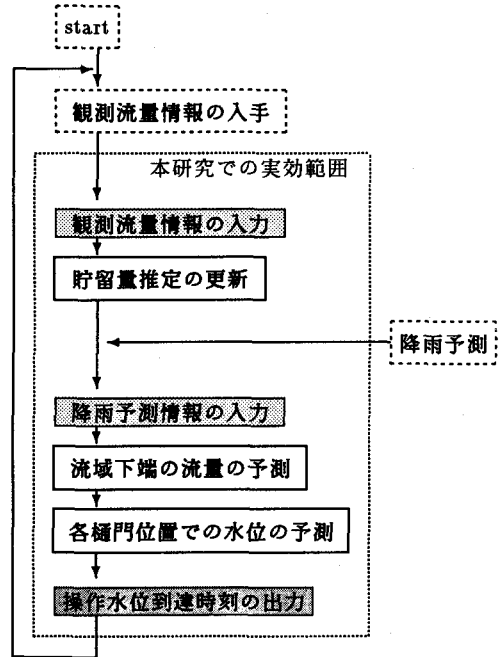


図-3 操作水位到達時刻の予測の流れ

であり、 x ：状態量ベクトル、 r_k ：時刻 $t_{k-1} \leq t \leq t_k$ での平均降雨強度ベクトル、 y_k ：時刻 t_k での出力ベクトル、 f, g ：非線型のベクトル値関数、 F, G ：係数行列、 $w(t), v_k$ ：システムノイズベクトル、観測ノイズベクトルで、

$$E[w(t)] = 0, E[w(t)w(\tau)^T] = Q\delta(t - \tau) \quad (3)$$

$$E[v_k] = 0, E[v_k v_l^T] = R\delta_{k,l} \quad (4)$$

とする。ここに、 $\delta(t - \tau)$ は Dirac のデルタ関数、 $\delta_{k,l}$ は Kronecker のデルタ関数、 $E[\cdot]$ は期待値記号を表す。この状態方程式 (1) を、降雨 r_k を与えて、現時点での状態量 x の確率分布を初期条件として近似的に解き、将来時刻での x の確率分布を求め、観測式 (2) によって将来時刻での y の確率分布を近似的に求める (予測更新)。次に、時刻が進んで、実際に y の観測値が得られた時点で観測式 (2) をもとに状態量 x を推定し直し、予測更新のための初期値とする (観測更新)。

(a) 予測更新

現在時刻を t_k として、 ΔT 時間先の時点 $t_{k+1} = t_k + \Delta T$ での洪水流量の予測値を得るために、状態方程式 (1) を微小時間間隔 $\Delta t (\leq \Delta T)$ 毎に線形化・離散化して近似的に解く。この手順を時刻 t_{k+1} まで繰り返すことにより、状態量の予測値 $\tilde{x}_{k+1}$ とその予測誤差分散 $\tilde{P}_{k+1}$ を求める。次に、観測式 (2) の g を時刻 t_{k+1} で線型化して、

$$y_{k+1} = Hx_{k+1} + d + Gv_{k+1}, \quad (5)$$

を得ることにより、 y_{k+1} の予測値 $\tilde{y}_{k+1}$ と予測誤差分散 $\tilde{Y}_{k+1}$ は、

$$\tilde{y}_{k+1} = H\tilde{x}_{k+1} + d, \quad \tilde{Y}_{k+1} = H\tilde{P}_{k+1}H^T + GRG^T. \quad (6)$$

となる。

(b) 観測更新

時間が ΔT だけ進んで出力（流量）の観測値 y_{k+1} が得られたら、カルマンフィルタを適用して、

$$\hat{x}_{k+1} = \tilde{x}_{k+1} + K(y_{k+1} - \tilde{y}_{k+1}) \quad (7)$$

$$\hat{P}_{k+1} = (I - KH)\tilde{P}_{k+1} = (I - KH)\tilde{P}_{k+1}(I - KH)^T + KGRG^TK^T \quad (8)$$

$$K = \tilde{P}_{k+1}H^T(H\tilde{P}_{k+1}H^T + GRG^T)^{-1} \quad (9)$$

を得る。この $\hat{x}_{k+1}$ と $\hat{P}_{k+1}$ を次ぎの将来時刻の予測更新の初期値とする。なお、ここでは降雨強度は確定的に与えられるものとしている。手法の詳細は文献1)2)を参照されたい。

3.2 操作水位到達時刻予測システム

流出予測システムで得た流量の予測値を河道区間上端での境界条件、水位流量曲線を下端での境界条件として、不定流の基礎方程式

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gA(I_f - i) = 0 \quad (11)$$

を解き、各樋門位置において、河川水位が樋門操作水位に到達する時刻を予測する。ここで、 A ：流水断面積、 Q ：断面平均流量、 h ：水深、 I_f ：摩擦勾配、 i ：河床勾配、 g ：重力加速度である。洪水追跡の計算手法は、4点陰型式差分スキーム^{3),4),5)}を採用した。本スキームは空間差分間隔を任意に設定することができるため樋門設置位置を計算断面にとることができる。N個の計算断面を設定し、上流端の流量と下流端の水位流量曲線を境界条件として(10)、(11)式を差分化すると、2N元の非線型連立方程式となる。これを、ニュートン法を適用して解く。つまり、現在、得られている水位・流量を近似解としてその近傍でテイラー展開し、近似値からの差 $\Delta h, \Delta Q$ に関する線形連立方程式を構成し、 $\Delta h, \Delta Q$ を求める。所定の精度が得られるまでこの手順を繰り返し、各計算断面での水位・流量を求めていく。

4. シミュレーション結果と考察

平成2年9月19日～20日にかけて台風19号により発生した9019洪水を対象とし、河川水位が樋門操作水位に到達する時刻の予測シミュレーションを行ない、実際の操作時刻と比較した。

流出モデルは木村の貯留関数法を採用し、(1)、(2)式

をそれぞれ

$$\frac{dx}{dt} = fr(t - T_L) - \xi x^{1/p} + w(t) \quad (12)$$

$$y_k = \xi x_k^{1/p} + v_k \quad (13)$$

表-1 流出モデルのパラメタ

	柘植川	服部川	木津川
流域面積 (km ²)	152.76	94.03	148.88
f	0.474	0.769	0.631
T_L (hr)	1	0	1
K	17.336	27.345	18.726
p	0.536	0.554	0.489

とした。ここに x ：貯留高(mm)、 r ：降雨強度(mm/hr)、 y_k ：流出高(mm/hr)、 $\xi = (1/K)^{1/p}$ である。 f, K, p, T_L はモデルパラメタであり、本研究で同定したこれらの値を表-1に示す。

なお、河道での不定流計算を行なう際に、各計算断面で、流積～水深の関係式と潤辺～水深の関係式が必要となるが、現況河道の横断面形状よりそれらの関係式を求めるのは困難であったため、横断面形状は計画河道の横断面を、縦断面形状は現況河床を用いた。粗度係数はいずれの場合も全ての断面で $0.035m^{-1/3}sec$ とした。シミュレーションの手順を以下に示す。

(1) 貯流量の観測更新 観測された水深を水位～流量曲線によって流量に変換して観測流量とし、流域の貯留量をフィルタリングする。橋本ら⁶⁾は、水位～流量変換に伴う誤差を考慮した観測式を提案している

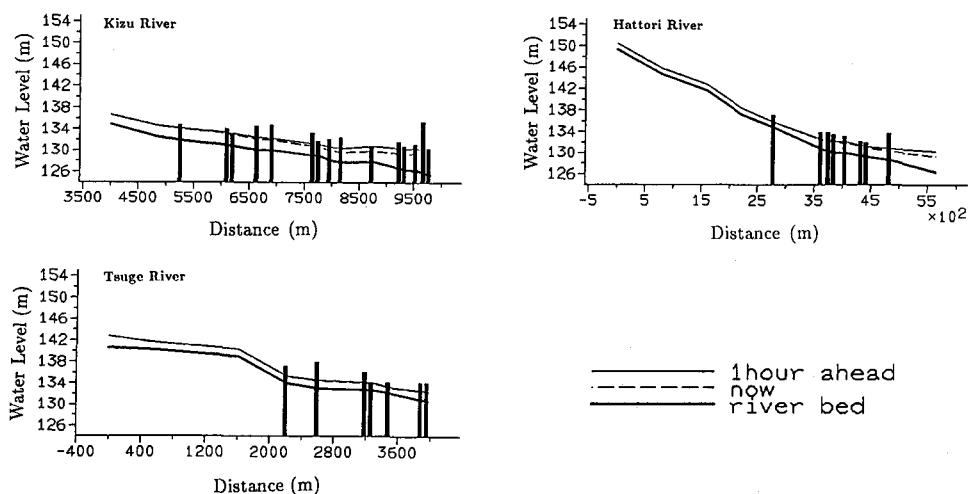


図-4 21 時の推定水位と予測水位

表-2 9019 洪水での樋門操作記録と操作水位到達時刻の予測結果

樋門名	操作記録	予測結果	樋門名	操作記録	予測結果
岩倉排水樋門	22:40	既* (23)**	大坪排水樋門	21:30	
平野川排水樋門	22:00		城出排水樋門		22:20 (22)
市場排水樋門			西出排水樋門		
朝屋排水樋門	22:00		浅子川排水樋門		
岩根川排水樋門	20:00	既 (22)	新居排水樋管		
往古川排水樋門			三田排水樋門		
木興排水樋門	22:00	22:27 (22)	大谷排水樋門		
八幡排水樋門	20:00	21:03 (21)	服部第一排水樋管		
清水排水樋門 (右岸)	19:40	既 (23)	三田第一排水樋管		
清水排水樋門 (左岸)			三田第二排水樋管		21:27 (21)
小田新田排水樋門			小田水門		22:11 (22)

操作記録 実際の樋門操作時刻。

予測結果 流出モデルによる予測流量を河道区間上端で与えた場合の各樋門での操作水位到達時刻の予測結果。

* “既”は予測計算を実行した時刻までに操作水位に達することが予測できず、この時刻に操作水位に達している場合を表す。

** ()内の数字は予測計算を実行した時刻を表す。表中のブランクは洪水期間中、操作水位に達しなかったことを表す。

が、ここでは流量の観測誤差は、分散 $0.001(\text{mm/hr})^2$ として加算的に与えた。モデル誤差の分散は全洪水期間中 $5.0(\text{mm/hr})^2$ で固定した。

- (2) 予測降雨の入力と流量予測 既往洪水の観測データより観測降雨を予測降雨として確定的に与え、毎時、3 時間先までの河道区間上端 (佐名具、荒木、依那古) の流量の予測値と予測誤差分散を求める。
- (3) 河道の各樋門位置での水位予測 安全側を見込んで、(2) で求めた予測流量に予測誤差の標準偏差分を加えた流量を各河道上端の境界条件とし、毎時、3 時間先まで、佐名具・荒木・依那古と岩倉水位観測所ではさまれる河道区間の水位を算定し、各樋門位置での水位を予測する。
- (4) 操作水位に達した樋門の出力 (3) で得られた各樋門位置での 3 時間先までの予測水位が各樋門の地盤高に達した場合、その達した時刻を操作時刻と考え、その樋門と操作水位到達時刻を出力する。
- (5) 時刻の更新 時刻を更新し (1) に戻る。

図-4、に各河道区間での 19 日 21 時の推定水位と 1 時間先の水位の予測結果を示す。図中、Distance はそれぞれの河道区間上端からの距離を表し、Water Level は、大阪湾平均潮位を 0 とした水位を表す。棒グラフは、樋門の位置とその操作水位を表している。

表-2 は、9019 洪水での実際の樋門操作時刻と予測シミュレーションによる操作水位到達時刻を示している。予測流量を与えた場合の操作水位到達時刻は全体的に操作記録よりも遅れている。1 時間ごとに予測計

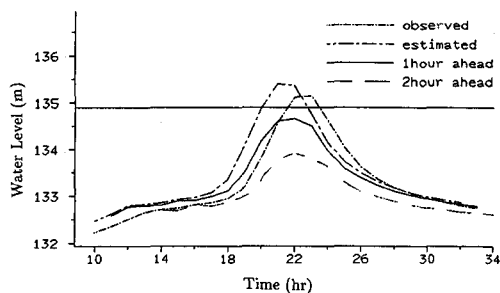


図-5 岩根川排水樋門での水位予測結果

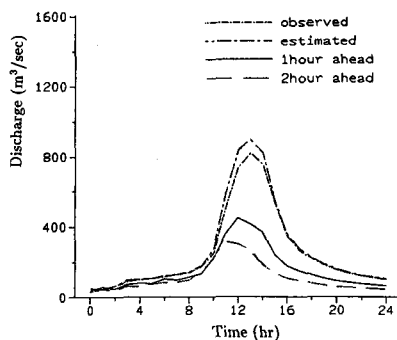


図-6 木津川依那古地点での流量予測結果

算を行なっているが、操作水位に達することが予測できずに操作水位に達してしまう樋門があり、予測できた場合も、予測計算を実行した時刻から操作水位に到達すると予測している時刻までの時間が短い。

この原因として、横断面に計画断面を用いているため現況の横断面よりも流積が広く水位が低く計算されること、内水河川からの流入量を考慮していないことが考えられるが、根本的な原因は、河道区間上端での流量の予測結果が実測値よりも小さかったことである。

図-5は木津川にある岩根川排水樋門での予測水位ハイドログラフである。予測のリードタイムが長くなるにつれて水位を全時刻で低く予測している。図-6は木津川依那古地点での流量予測ハイドログラフである。こちらも、リードタイムが長くなるにつれて流量を低く予測しており、服部川、柘植川でも同様の結果であった。

5. 結論と今後の課題

遊水地における多数の樋門操作を小人数で合理的に行うために、樋門位置での河川水位を実時間で予測し、操作すべき樋門を指示するシステムを開発した。3時間先までの水位予測を含む1回の予測計算に必要な計算時間は約3分であり、実時間予測としての機能を十分に果たすものであるが、流出予測の精度の重要性が改めて認識された。今後の課題として、精度よい流出モデルの導入、内水河川を考慮した水位予測があげられる。

なお、本研究で利用したデータは建設省近畿地方建設局木津川上流工事事務所から提供して頂いた。また計算処理等で栖原聖二君の協力を得た。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 宝 馨・高埜琢馬・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，pp.415-422，1984。
- 2) 高埜琢馬・椎葉充晴・宝 馨：リアルタイム洪水予測のモデルと手法，水資源研究センター研究報告，pp.19-21，1985。
- 3) Amein, M. and Fang, C.S.: Implicit flood routing in natural channels, ASCE, J. Hyd. Div., vol.96, no. HY12, 2481-2500, 1970。
- 4) 神田徹・辻貴広：低平地河川網における洪水流の特性とその制御，建設工学研究所報告，第21号，pp.105-132，1979。
- 5) 土木学会：水理公式集昭和60年度版，第3編河川編，pp.211-217，1985。
- 6) 橋本識秀・愈 朝夫・星 清：洪水流出予測における実際の課題とその解決法，水工学論文集，第36巻，pp.567-572，1992。