

**投稿論文(和文)  
PAPERS**

# 河川水位実時間予測手法の開発と木津川上流域への適用\*

高棹琢馬\*\*・椎葉充晴\*\*\*・立川康人\*\*\*\*

背水の影響を考慮した実時間での河川水位予測手法を提案する。本手法は、カルマンのフィルタリング・予測理論を用いた流出予測システムと、不定流の基礎方程式を4点陰形式差分スキームで解く洪水追跡システムから構成される。本手法を木津川上流域の上野遊水地の樋門位置での水位予測に適用した結果について報告する。

**Key Words :** real-time prediction, kalman filter, storage function method, four-point implicit method

## 1. 序論

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なことが多い、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是非常に大きい。これまで実時間の流出予測理論<sup>1)~5)</sup>は、主として山地流域を対象とし、河川流量の予測に主眼をおいてきたが、近年は直接河川水位を出力する形の予測手法<sup>6),7)</sup>も提案されている。これらの予測手法は、いずれも流出モデルとして貯留型のモデルをもとにカルマンのフィルタリング・予測理論を応用したものであり、我が国において貯留型の流出モデルがよく用いられていることを考えると、非常に適用範囲が広い。しかし、背水の影響など、下流の影響が上流に及ぶような河道区間での水位・流量を予測することは意図されていない。

そこで筆者らは、これらの影響を考慮に入れた水位の予測手法として、カルマンのフィルタリング・予測理論を用いた流出予測システム<sup>1)~5)</sup>と、不定流の基礎方程式を4点陰形式差分スキーム<sup>8),9)</sup>で解く洪水追跡システムを組み合せて、河道の特定の区間での水位を実時間で予測する方法を提案した<sup>10)</sup>。この方法は、まず流出予測システムにおいて、対象とする山地流域を木村の貯留関数法を用いた状態空間型モデルとしてとらえ、カルマンのフィルタリング・予測理論を適用して対象河道区間上端での流量を予測し、次に洪水追跡システムにおいて、流出予測システムで得られた河道区間上端での流量の予測値と、河道区間下端での水位流量曲線を境界条件として、

4点陰形式差分スキームを用いて不定流の基礎方程式を解くことにより、対象とする河道区間内の各断面での水位を予測するというものであった。

本研究では、この水位予測手法を基本とし、流出予測システムの予測精度の向上を図るために、遅滞時間が出水ごとに異なることを考慮した流出予測手法を提案し、モデルを再構築して木津川上流の上野遊水地の樋門位置での水位予測に適用する。

次章以後の本論文の構成は以下のようである。2.で、河川水位の実時間予測手法を述べる。3.では、洪水ごとに遅滞時間が異なることを考慮した流出予測手法を提案し、その性能を検証する。4.で、前章までに構築した河川水位の実時間予測手法を木津川上流の上野遊水地の樋門位置での水位予測に適用し、その結果に対して考察する。5.で結論を述べる。

## 2. 河川水位の実時間予測手法

### (1) 洪水流出予測システムの構成

流出予測システムでは、流出モデルを木村の貯留関数法を用いた状態空間型モデルで表現し、これにシステムノイズと観測ノイズを導入する。ここで、システムノイズ、観測ノイズは白色正規性を仮定して固定的に与える。カルマンフィルターを適用するための非線形関数の線形化には、統計的線形化を用い、それをUD分解フィルターと結合させる手法<sup>4),11)</sup>を利用した。モデル化手法および数値計算手法は、高棹・椎葉・宝<sup>5)</sup>と同様であり、ここでは要点のみ述べる。

#### a) 流出モデルの状態空間表示

木村の貯留関数法を基に、 $t_{k-1} \leq t \leq t_k$ における状態方程式を

$$\frac{d}{dt}x(t) = fr(t - T_L) - (x(t)/K)^{1/p} + w(t) \dots \dots \dots (1)$$

\* 本論文では、実時間水位予測システム<sup>10)</sup>の予測精度を向上させるために、洪水ごとに遅滞時間が異なることを考慮した流出予測システムを導入し、再計算した結果を報告する。

\*\* 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

\*\*\*\* 正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学教室



式差分スキーム<sup>8), 9), 12), 13)</sup>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、水位情報が必要となる治水施設のある位置（例えば遊水地の橈門位置）を計算断面にとることができ好都合である。システム全体の予測の手順を Fig.1 に示す。

### 3. 洪水ごとに遅滞時間が異なることを考慮した洪水流出予測システムの構成

基本的な洪水流出予測システムの枠組は 2. (1) で示した通りであり、降水から流量への変換モデルとして貯留関数法を採用している。貯留関数法は非常に簡便なモデルであるが、流出現象の非線形性を考慮しており、実際の流量ハイドログラフをよく再現することができる。しかし、その最適モデルパラメタが出水ごとに変化するという欠点を持つ。筆者らが対象とする木津川流域においても、同定したモデルパラメタは出水ごとにかなり異なる値を示しており、永井・角屋<sup>14), 15)</sup>も、洪水ごとに遅滞時間  $T_L$  の最適値が異なることを指摘している。したがって、現におこりつつある洪水に合うモデルパラメタが過去に同定したモデルパラメタと適合するとは限らず、適合しない場合は良い予測結果は得られない。これに対処するためには、モデルパラメタを時々刻々推定する方法も考えられるが、遅滞時間  $T_L$  を時々刻々変えるということは、それに応じて入力となる降雨が時々刻々不規則に変化することになり、たとえば、現時刻での  $T_L$  が 0 時間であったものが、1 時間後には 2 時間となって降雨の時間順が逆転することも考えられ、妥当な考え方とは言えない。むしろ、 $T_L$  は一洪水期間中は一定とし、洪水ごとに変化し得ると考える方が合理的である。

そこで、本章では 2. (1) で示した流出予測システムを複数準備し、それぞれのシステムに異なる  $T_L$  を設定して、これらのシステムを同時進行させることで洪水ごとに  $T_L$  が異なることを考慮した洪水流出予測システムを提案する。

#### (1) 予測のアルゴリズム

まず、既往洪水から同定した遅滞時間  $T_L$  の回りに複数の遅滞時間を設定して、それぞれの遅滞時間をもつ流出予測システムを用意し、各流出予測システムの重みの初期値を設定する。次に、各流出予測システムごとに、流量の推定値・予測値とその予測誤差分散を求め、推定値の誤差の確率分布が正規分布に従うとして、現在観測された流量が生起する確率密度を求める。次に、各流出予測システムにおいて、現在の観測流量が生起する確率密度を重みとして、各流出予測システムの重みを更新する。最後に、更新されたそれぞれの重みを、対応する流量の推定値・予測値に乘じて総和をとることにより、流量の推定値・予測値の最確値を得る。予測のアルゴリズムは次のようになる。

Table 1 Parameters of the runoff prediction model.

sub-basin	area ( $km^2$ )	$f$	$K$	$p$	$t_L (hr)$
Tsuge	154.0	0.573	27.57	0.390	1
Hattori	94.0	0.755	23.0	0.495	0
Kizu	149.4	0.757	14.83	0.313	1

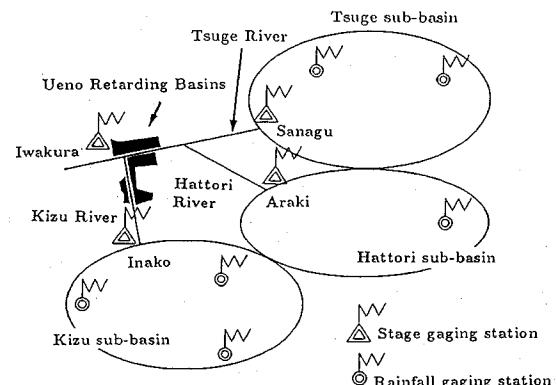


Fig.2 Schematic drawing of the forecasting system for the Ueno Retarding Basins.

1) 遅滞時間  $T_L$  が  $T_{L1}, T_{L2}, \dots, T_{Ln}$  の離散的な  $n$  個のケースをとり得ると考え、 $T_L = T_{Li}, (i = 1, \dots, n)$  であるような流出予測システムの重みを  $P_i$  とし、 $P_i$  の初期値を設定する。

2) 遅滞時間  $T_{L1}, T_{L2}, \dots, T_{Ln}$  のそれぞれについて流出予測システムを適用し、遅滞時間が  $T_{Li}$  である流出予測システムの観測更新後の流量の推定値  $\hat{y}_i(t)$  とその誤差分散  $\hat{Y}_i(t)$  を算定する。

3) 遅滞時間が  $T_{Li}$  である流出予測システムでの推定値  $\hat{y}_i(t)$  と推定誤差分散  $\hat{Y}_i(t)$  から、観測流量  $y(t)$  が生起する確率密度

$$f(y(t)|T_L = T_{Li}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\hat{Y}_i(t)}} \exp\left[-\frac{(\hat{y}_i(t) - y(t))^2}{2\hat{Y}_i(t)}\right] \quad (20)$$

を求める。

4) 遅滞時間  $T_{Li}$  を持つ流出予測システムの重み  $P_i, (i = 1, \dots, n)$  を次式によって更新する。

$$\hat{P}_i = \frac{f(y(t)|T_L = T_{Li})P_i}{\sum_{i=1}^n f(y(t)|T_L = T_{Li})P_i} \quad (21)$$

5) それぞれの流出予測システムに対する流量の予測値  $\tilde{y}_i(t + m\Delta T)$  から総合的な予測値  $\hat{y}(t + m\Delta T)$  を求める。

$$\tilde{y}_i(t + m\Delta T) = \sum_{i=1}^n \hat{P}_i \tilde{y}_i(t + m\Delta T) \quad (22)$$

ここで  $m$  は 1 以上の整数であり、 $\Delta T$  は予測の時間ステップである。

## (2) 実流域への適用と予測シミュレーションの計算条件

対象流域の模式図を Fig.2 に示す。木津川上流域の柘植川流域（佐那具水位観測所より上流域）・服部川流域（荒木水位観測所より上流域）・木津川本川流域（依那古水位観測所より上流域）を対象として、昭和 61 年洪水の降雨と流量の観測データよりモデルパラメタを同定し、平成 2 年洪水の予測シミュレーションを行なった。同定したパラメタを Table 1 に示す。流入係数  $f$  は洪水ごとの変動が大きいため、平成 2 年洪水で同定したもの用い、システムノイズは、 $10 (\text{mm}^2/\text{hr}^2)$ 、観測誤差は、平成 2 年洪水のピーク流量の約 10% 程度を目安として  $10 (\text{mm}^2/\text{hr}^2)$  とした。また、本手法の性能を検証するために、観測降雨を予測降雨として与えた。実際には降雨も予測することになるので、その予測誤差が流出予測システムの誤差に加わることになる。

### (3) 本手法導入の効果

本手法の効果を検証するために、それぞれの流域において

**Case 1** 既往の洪水から同定した遅滞時間を持つ單一つのフィルターを用いて流量を予測する方法

**Case 2**  $T_{L1}=0.0(\text{hr}), \dots, T_{L9}=4.0(\text{hr})$  まで 0.5 時間ごとに 9 個のフィルターを用意し、同定した遅滞時間を持つフィルターの重みの初期値を 0.6、それ以外は 0.05 として流量を予測する方法

**Case 3**  $T_{L1}=0.0(\text{hr}), \dots, T_{L9}=4.0(\text{hr})$  まで 0.5 時間ごとに 9 個のフィルターを用意し、全てのフィルターの重みの初期値を同じ値 (0.11) に設定して流量を予測する方法

の予測結果を比較検討した。柘植川流域、服部川流域、木津川本川流域での Case 1, Case 2, Case 3 の予測ハイドログラフを、Fig.3, Fig.5, Fig.7 に示す。また、各流域での Case 2, Case 3 での各流出予測システムの重みの推移を Fig.4, Fig.6, Fig.8 に示す。なお、いずれのグラフも時刻は平成 2 年 9 月 19 日午前 11 時を起点としている。

柘植川流域での予測ハイドログラフ (Fig.3 の Case 1, Case 2, Case 3) を比較すると、ハイドログラフが立ち上がる 20 時以前においては、複数のフィルターを同時進行させた Case 2, Case 3 の方が Case 1 よりも実測値に近い予測結果を出しているが、全体的にはそれほど大きな差はない。これは、柘植川流域において、既往の出水で同定した遅滞時間 (1 時間) が今回対象とした洪水にも適合したためであり、Fig.4 の Case 3 に示すように、ハイドログラフが立ち上がり始める 20 時以後、1 時間の遅滞時間を持つフィルターの重みが最も大きくなっていることからもわかる。なお、すべての流域について言え

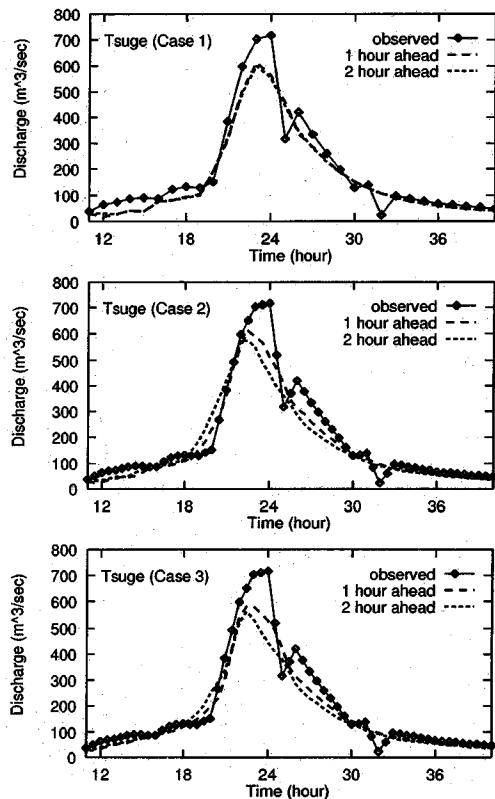


Fig.3 1- and 2-hour-ahead prediction of Tsuge subbasin.

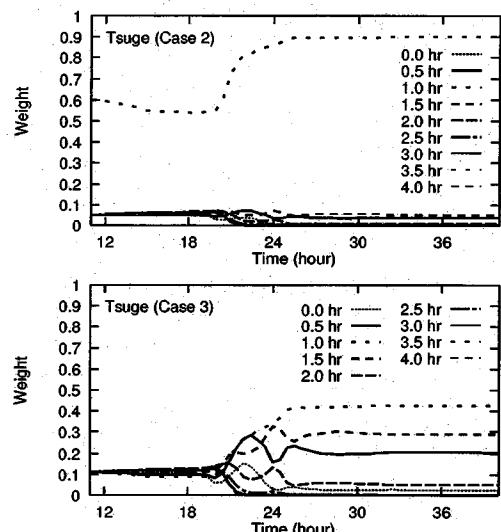


Fig.4 A change of weight on each filter for Tsuge subbasin.

ることだが、ハイドログラフが立ち上がる以前とピーク後の減衰時では、降雨の変動が緩やかとなるため  $T_L$  が違っても流量波形はあまり違わなくなり、各フィルターの重みは変動しないようになる。

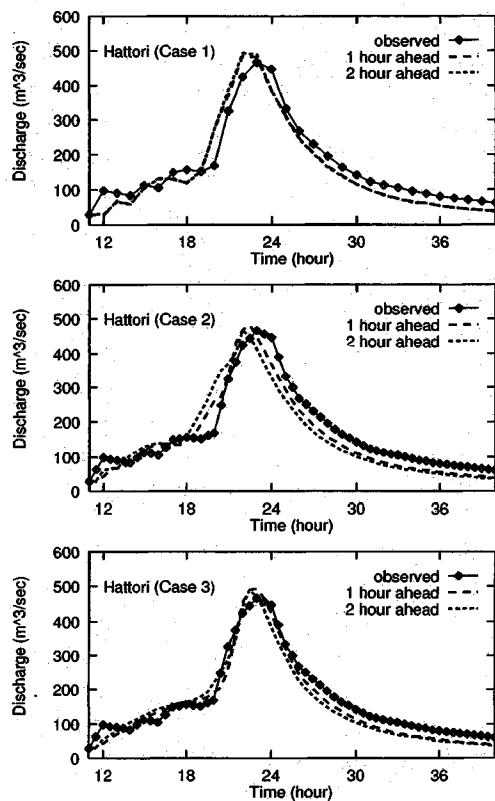


Fig.5 1- and 2-hour-ahead prediction of Hattori subbasin.

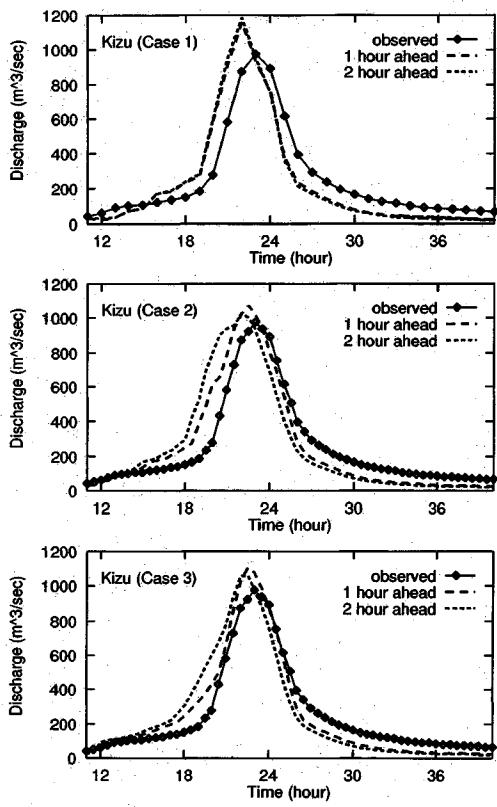


Fig.7 1- and 2-hour-ahead prediction of Kizu subbasin.

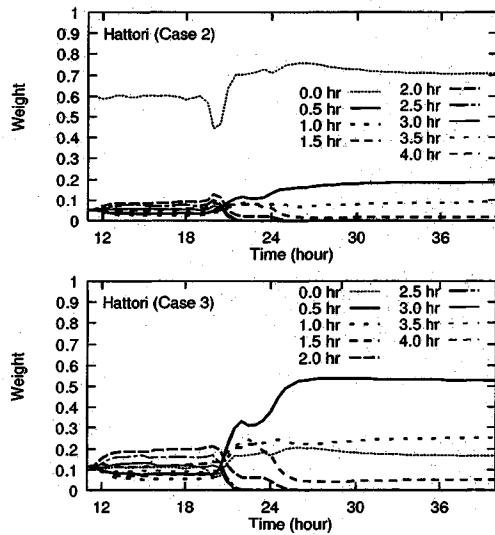


Fig.6 A change of weight on each filter for Hattori subbasin.

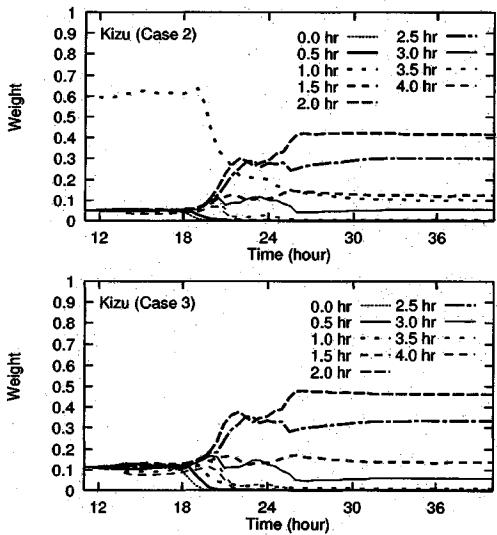


Fig.8 A change of weight on each filter for Kizu subbasin.

次に、服部川流域での予測ハイドログラフ (Fig.5 の Case 1, Case 2, Case 3) を比較すると、重みの初期値を異なる値に設定した複数のフィルターによる予測結果 (Case 2) は、単一のフィルターによる予測結果 (Case

1) をそれほど改善しているとは言えないが、重みの初期値を同じ値に設定した複数のフィルターによる予測結果 (Case 3) はかなり実測に近い値を示している。既往の出水で同定した服部川流域での遅滞時間は 0 時間である

が、Case 1 では、予測したハイドログラフの方が実測のハイドログラフよりも早く立ち上がっていることから、今回の洪水に対しては、多少の遅滞時間を持つ方が予測値は実測値に近づくことが予想できる。Fig.6 (Case 3)を見ると、ハイドログラフが立ち上がる 20 時以後、0 時間、0.5 時間、1 時間の遅滞時間を持つフィルターの重みが大きくなっています。今回の洪水に対しては、0.5 時間前後の遅滞時間を持つフィルターが最もよく適合することがわかる。Case 2 で予測結果が改善されなかった原因は、Fig.6 (Case 2) からわかるように、0 時間の遅滞時間を持つフィルターの重みの初期値を大きくとったため、最後までこのフィルターが重視されたからである。既往の洪水で同定した遅滞時間と対象とする洪水に合う遅滞時間が適合しない場合は、各フィルターの重みの初期値を等しく設定して流量を予測する方法が最も良い予測を行なうという結果となった。

この結果は、Fig.7 の木津川本川流域での予測ハイドログラフでも確認できる。既往の出水で同定した木津川本川流域での遅滞時間は 1 時間であるが、Fig.8 (Case 3) に示すように今回の洪水に対しては、2 時間前後の遅滞時間を持つフィルターが最もよく適合することがわかり、重みの初期値を同じ値に設定した複数のフィルターによる Case 3 の 1 時間先の予測値はかなり実測値に近づいている。一方、重みの初期値が異なる複数のフィルターによる Case 2 では、ハイドログラフが立ち上がり始める 18 時以後、1 時間の遅滞時間を持つフィルターの重みが小さくなっているが、それでもピーク生起時刻の 23 時まではかなり大きな値を取るため、予測値を改善するには至っていない。

なお、どの流域も Case 1 の 1 時間先予測と 2 時間先予測の結果がほぼ同じなのは観測降雨を予測降雨として与えているためであり、Case 2 と Case 3 で若干異なるのは複数のフィルターを同時に進行させて予測値を得ているためである。

以上をまとめると、

- 既往の洪水で同定した遅滞時間と対象とする洪水に合う遅滞時間が適合する場合は、当然のことであるが、同定した  $T_L$  を持つフィルターの重みの初期値を最も大きな値に設定した複数のフィルターによる予測結果 (Case 2) と、同定した  $T_L$  を持つ単一のフィルターによる予測結果 (Case 1) とは大差ない。
- この場合、重みの初期値を同じ値に設定した複数のフィルターによる予測結果 (Case 3) は Case 1, Case 2 に若干劣るもの、Case 1, Case 2 に近い予測結果を示す。
- 既往の洪水で同定した遅滞時間と対象とする洪水に合う遅滞時間が適合しない場合は、Case 1, Case 2 と比べて Case 3 はかなり良い予測結果を示す。

という結論が得られ、各フィルターの重みの初期値を等しく設定して流量を予測する方法は、安定した予測結果が得られることがわかる。予測結果は各フィルターに与える重みの初期値にかなり依存するため、さらに良い結果を得るために既往の全ての洪水について遅滞時間を同定し、その頻度分布とともに各フィルターの重みの初期値を設定する必要がある。なお、ここでは遅滞時間のみを取り扱ったが、流入係数  $f$  の最適値も洪水ごとにかなり変動するため、 $f$  についても同様に取り扱うことによって、さらによい流出予測システムを構築できる可能性がある。

#### 4. 実時間水位予測手法の木津川上流域への適用

本章では、前章までに提案した河川水位の実時間予測手法を木津川上流の上野遊水地<sup>16)</sup>の樋門位置での水位予測に適用する。

##### (1) 上野遊水地の樋門操作と実時間水位予測の必要性

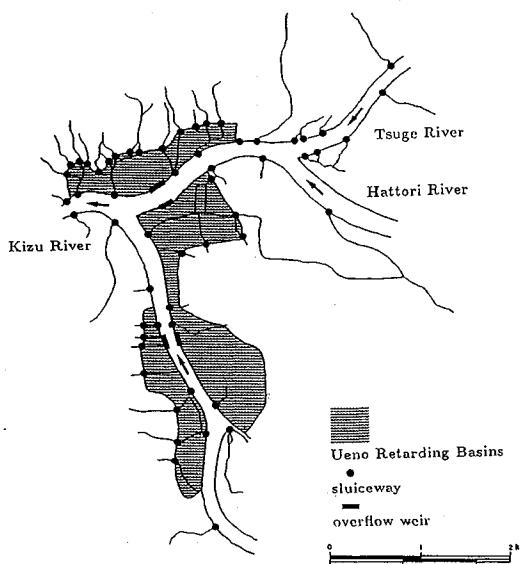
木津川上流の上野遊水地(総面積約 250 ha, 総湛水容量約 900 万 m<sup>3</sup>)は、4 つの遊水地(長田、木興、小田、新居)からなり、大洪水時に一時的に洪水を湛水させる本川の流量調節および上野市周辺の治水対策を目的として現在も建設が進められている(Fig.9 参照)。

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、遊水地に入る地点及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。

- 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は樋門を開鎖し、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、樋門を開鎖し、遊水地内の湛水を樋門より排水する。

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ヶ所を超える、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きており、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していく必要がある。

このような状況に対して、実時間で数時間先までの河川水位を予測し、操作水位に達すると考えられる樋門を把握することができれば、その樋門を順次、監視・操作す



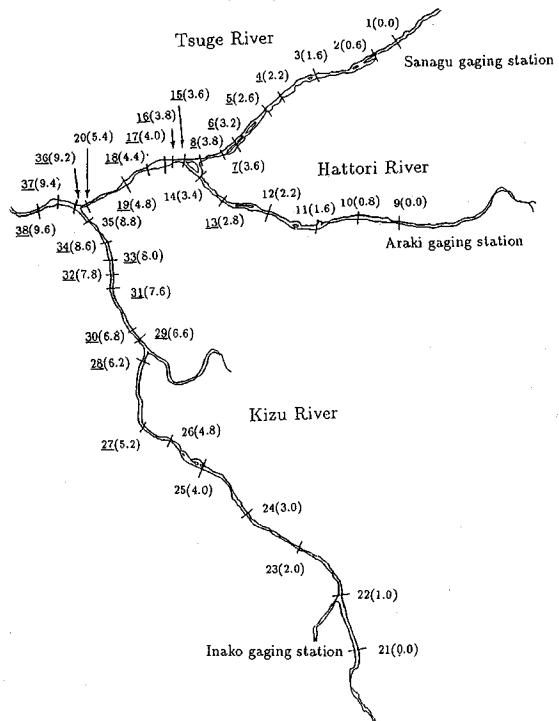
ることにより小人数で多数の樋門を操作する方法を構築することが考えられる。また将来的に遠隔地から自動的に樋門を集中的に開閉する場合も、瞬時に樋門の開閉を行うことは不可能であると考えられるため、事前に樋門位置での水位を予測することによって、樋門管理者に開閉のタイミングに関する情報を提供することができる。

## (2) 流域のモデル化と予測シミュレーションの手順

モデル化した対象流域、および各流域の貯留閑数パラメタはFig.2, Table 1に示した通りである。予測の手順として、まず、対象とする流域の貯留高を、それぞれ佐那具・荒木・依那古水位観測所の流量を用いてカルマンのフィルタリング理論により逐時推定しながら予測する。次に、河道区間上端（佐那具・荒木・依那古）での予測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河川水位を予測し、操作水位に達する時刻を予測する。

河道での洪水追跡計算では、各計算断面での流積  $A$  と水深  $h$  の関係式、および溝辺  $R$  と水深  $h$  の関係式が必要となる。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、計画河道の横断面より  $A \sim h$  と  $R \sim h$  の関係式を  $A = ah^2 + bh + c, R = dh + e$  として求めた。河道縦断形状は現況河道を用いた。粗度係数は過去に得られている値を用いて、全ての断面で  $0.035 (\text{m}^{-1/3}\text{sec})$  とした。Fig.10 は設定した計算断面である。図中にその断面番号を示す。下線のついた断面番号は、そこに樋門が存在することを表しており、カッコ内の数字は、各河道区間上端からの距離(km)である。

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、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。また、残流域からの流出は無視できるものとし、ここでは対象となかった。予測対象洪水は、3. と同様に平成2年洪水である。シミュレーションの手順を以下に示す。

### 1) 貯留高の観測更新

観測された水深を水位流量曲線によって流出高に変換して観測値とし、流域の貯留高をフィルタリングする。なお、3. で示したように、遅滞時間の異なる9個のフィルター（各フィルターの重みの初期値は等しく設定）を同時に実行していく。

### 2) 予測降雨の入力と流量予測

観測降雨を予測降雨として与え、30分ごとに、3時間先までの流量の予測値と予測誤差分散を求める。

### 3) 河道の樋門位置での水位予測

予測流量を各河道上流端の境界条件とし、河道下流端での水位流量曲線を下流端での境界条件として、洪水追跡計算を行ない、3時間先までの樋門位置の水位を予測する。

### 4) 操作水位に達した樋門の出力

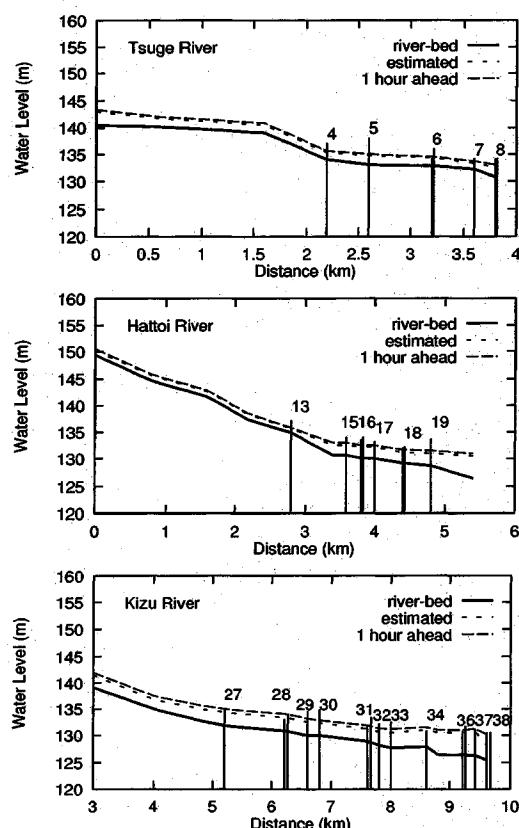


Fig.11 Current stage estimation and one-hour-ahead stage prediction at 21 hour on 19th.

3) 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。

### (3) 適用結果と考察

平成2年9月19日21時の各河道区間の現時刻の推定水位(estimated)と1時間先の予測水位(1 hour ahead)をFig.11に示す。ここで、推定水位とは各流域の観測更新後の推定流量を各河道区間上端の境界条件として与えた場合の水位である。図中、Distanceは、それぞれの河道区間上流端からの距離、Water Levelは、大阪湾平均潮位を0mとする水位を表す。縦線とその番号は、樋門位置とその地盤高およびその断面番号を示しており、左右岸に樋門がある場合は、縦線の左側が左岸、右側が右岸の樋門を表す。破線は現在時刻の推定水位、点線は1時間先の予測水位である。木津川においては、21時の時点では、断面番号28の左岸(清水樋門)および断面番号34の樋門はすでに操作水位に到達しており、断面番号27, 31(左

Table 2 Comparison between actual operation time and predicted operation time.

close section number	sluice way	actual operation time	predicted operation time		
			20:00	20:30	21:00
19	Ootubo	21:30	-	-	-
27	Iwanekawa	20:00	22:04	22:00	21:48
28	Yawata	20:00	-	22:22	-
28	Shimizu	19:40	20:58	20:56	#*
29	Kiko	22:00	-	-	-
30	Chouya	22:00	-	-	-
36	Hiranokawa	22:00	-	22:07	21:47
38	Iwakura	22:40	-	22:41	22:17

† “-” denotes that the stage did not rise to the operation stage in this simulation.

\* “#” denotes that the stage had already rose to the operation stage at the time when the computation for forecast was executed.

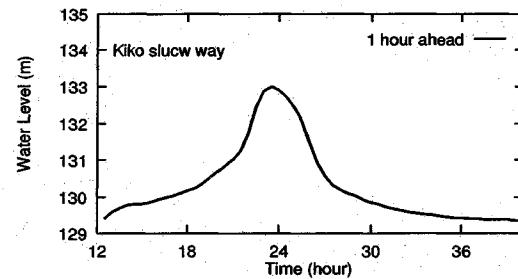


Fig.12 1-hour-ahead stage prediction at Kiko sluice way.

岸), 36(左岸), 37 の樋門では、1時間以内に操作水位に到達すると予測されていることがわかる。Fig.12に、断面番号29の木興排水樋門での1時間先の予測水位を示す。木興排水樋門での操作水位は135(m)であり、今回のシミュレーションでは操作水位には到達しなかった。

Table 2は、平成2年洪水で実際に閉鎖された樋門について、20時, 20時30分, 21時における操作水位到達時刻の予測結果と実際の操作記録<sup>[17]</sup>を示したものである。実際の操作記録と予測結果を比較すると、断面番号38の岩倉排水樋門、および断面番号36(左岸)の平野川樋門の予測結果を除いて、予測のほうが実際の操作時刻よりもかなり遅れており、断面番号19, 29, 30の大坪排水樋門、木興排水樋門、朝屋排水樋門では、操作水位に到達することが予測できなかった。この理由として、計画河道横断面が現況の横断面よりも大きいため、水位の計算結果が実際よりも低いこと、危険を感じて早めに樋門が閉鎖されたことなどが考えられる。

### 5. 結論と今後の課題

本研究では、都市域での河川水位の実時間予測手法として、緩勾配、背水の影響を考慮するために、流出予測システムと洪水追跡システムを組み合せた手法を提案し、上野遊水地の樋門位置での水位の実時間予測を試みた。

流出予測システムにおいては、洪水ごとに滞留時間が異なることを考慮した流出予測手法を導入することにより、流量の予測精度を向上させることができた。

位予測に関しては、洪水追跡システムを適用した河道区間が河道改修の途中段階にあるために、河道の幾何学的特性など実際の流域の条件を忠実にモデルに反映させることが難しく、予測の精度についてここでは評価できないが、都市化が進み河道改修の進んだ地域では、ある程度の成果が期待できると考えている。

なお、今回、提案した実時間の水位予測手法は、対象河道区間の上流端および下流端でしか観測水位を取り込むことができない。しかし実際には、対象河道区間内部にも水位観測所があることも考えられ、そこで得られる観測水位も状態の推定に利用することができれば、さらに予測精度を向上させることができると考えられる。また、河道区間内での水深の予測値だけでなく、その予測誤差分散を得られるような河川水位のフィルタリング手法を開発する必要がある。これらは今後の課題である。

本研究を進めるにあたり、大学院学生 森田健太郎氏（現通産省）の協力を得た。また、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より提供して頂いた。記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 高棹琢磨・椎葉充晴・宝馨：集中型流出モデルの構成と流出予測手法、京都大学防災研究所年報、第 25 号 B-2, pp.221-243, 1982.
- 2) 高棹琢磨・椎葉充晴・宝馨：貯留モデルによる実時間流出予測に関する基礎的研究、京都大学防災研究所年報、第 25 号 B-2, pp. 245-267, 1982.
- 3) 高棹琢磨・椎葉充晴・宝馨：複合流域における洪水流出の確率予測手法、京都大学防災研究所年報、第 26 号 B-2, pp.181-196, 1983.
- 4) 高棹琢磨・椎葉充晴・富澤直樹：統計的 2 次近似理論を適用した流出予測システムの構成、京都大学防災研究所年報、第 27 号 B-2, pp. 255-273, 1984.
- 5) 高棹琢磨・椎葉充晴・宝馨：リアルタイム洪水予測のモデルと手法、京都大学防災研究所水資源研究センター研究報告、pp.19-31, 1985.
- 6) 椎葉充晴・小尻利治・宝馨・中北英一・堀智晴：都市域の実時間洪水予測モデルについて、水文・水資源学会 1991 年研究発表要旨集, 1991.
- 7) 橋本謙秀・愈朝夫・星清：洪水流出予測における実際的課題とその解決法、水工学論文集、第 36 卷, pp. 567-572, 1992.
- 8) Amein,M. and Fang,C.S. : Implicit flood routing in natural channels, Journal of the Hydraulics Division, Proc. of ASCE, vol.96, no. HY12, 2481-2500, 1970.
- 9) 神田徹・辻貴之：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.
- 10) 高棹琢磨・椎葉充晴・立川康人・森田健太郎：河道の実時間水位予測を用いた遊水地樋門操作、水工学論文集、第 37 卷, pp.81-86, 1992.
- 11) Bierman, G. J. : Factorization methods for discrete sequential estimation, Academic Press, 1977.
- 12) 土木学会編：水理公式集, pp.211-217, 1985.
- 13) 土木学会編：水理公式例題集, pp.50-59, 1985.
- 14) 永井明博・角屋睦：流出モデル定数の最適化手法、京都大学防災研究所年報、第 22 号 B-2, pp.209-224, 1979.
- 15) 永井明博・角屋睦：洪水流出モデルの最適定数、京都大学防災研究所年報、第 24 号 B-2, pp.183-196, 1981.
- 16) 建設省近畿地方建設局木津川上流工事事務所：上野市域の治水計画、1988.
- 17) 建設省木津川上流工事事務所：上野遊水地樋門操作計画検討業務報告書, pp.4-64, 1991.

(1993.10.7 受付)

## DEVELOPMENT OF A REAL-TIME STAGE PREDICTION SYSTEM AND ITS APPLICATION TO THE UPSTREAM KIZU RIVER BASIN

Takuma TAKASAO, Michiharu SHIIBA and Yasuto TACHIKAWA

A real-time stage prediction system which takes account of backwater effect is developed. The system is made up of a real-time runoff prediction system and a flood routing system. The real-time runoff prediction system is used to forecast the discharge which flows into the upstream end of a channel reach. This system is based on the filtering and prediction theory developed by Kalman and others. A lumped runoff model is transformed into a stochastic model by incorporating noise terms. The resulting stochastic differential equations are solved by an iterative difference method with the aid of a statistical linearization technique. In the flood routing system, the flow of the channel reach is modeled using the one-dimensional equations of unsteady flow and these equations are solved with the four-point implicit method. The upstream boundary condition is given by the predicted discharge and the downstream boundary condition is given by the stage-discharge relationship as provided by the rating curve. As a case study, this system is applied to the prediction of the stages at the sluice ways located along the Ueno Retarding Basins.