

# 非線形フィルタリングを用いた実時間河川水位 の集中型モデルへのデータ同化

DATA ASSIMILATION TO THE FLOOD FORECASTING MODEL OF THE REAL  
TIME WATER LEVEL USING THE UNSCENTED KALMAN FILTER

田中耕司<sup>1</sup>・辻倉裕喜<sup>1</sup>・杉浦正之<sup>2</sup>

Kohji TANAKA, Hiroki TSUJIKURA and Masayuki SUGIURA

<sup>1</sup>修(工) (株)建設技術研究所大阪本社水システム部 (〒541-0045大阪市中央区道修町1-6-7)

<sup>2</sup>(株)アスコ (〒550-0006 大阪市西区江之子島1-10-1)

The model to predict water level from precipitation directly was built by the storage function method and an H-Q equation. Because this model does not use flow quantity in calculation process, this model is available in a flood prediction at the water level station not to get adjustment of flow quantity and the precipitation, and not to observe flow quantity. The constant number of this model is expressed in a self-regression model and Unscented Kalman Filter is applied to data assimilation technique. As a result of having applied this model to the Doki River basin, we obtained an almost proper result by setting self-regression coefficient and a system noise appropriately. In addition, it was revealed that the flow quantity counted backward accorded with flow quantity estimated by the storage function method. Therefore, it was understood that the built model reflected a rain-runoff process.

**Key Words :** *Data Assimilation, Storage function method, Unscented Kalman filter*

## 1. はじめに

予測結果に与える誤差には、降雨の誤差、洪水流出モデルの誤差、H-Q式の誤差があり、予測の誤差は、これらの誤差のうち最も大きいものにより決定されると考えられる。

降雨の精度向上を目的に、情報通信などの発達、演算能力の飛躍的な向上を背景に、レーダ雨量などが使用されている。流出モデルにおいては、降雨～流出過程の物理的なメカニズムを反映させた分布型流出モデル<sup>1)</sup>等により流量を推定することが可能となってきた。しかし、H-Q式の精度は従来とほとんど変わらないため、降雨とモデルの精度の向上による流量推定の精度向上がモデル全体の予測精度に反映されていない場合がある。

H-Q式における精度向上のための対策として、流量観測の高度化が図られているが、直轄河川でも十分とは言えず、ましてや、地方自治体が管理する河川では、流量観測すら行われていないことが多い。

背水区間においては不定流モデルの導入等が考えられている<sup>2)</sup>が、断面が急変する箇所や、急流部で解が安定しない等の数値解析の上の問題がある。さらに、急流河

川では、洪水毎に河床が変化することが考えられ、リアルタイムで逐次H-Q式を修正する有効な手段がないのが現状である。

そこで、H-Q式を介さずに直接、降雨から水位を予測できるモデルを構築すれば、H-Q式の問題は大部分が解消されると考えられる。仮に、それが可能であれば河床の変化の著しい河川、本川の背水の影響を受ける河川、流量観測資料のない河川の水位予測の精度が向上するものと考えられる。

実際に、河川の洪水管理の面からは、避難判断等の基準は水位であることから、この予測精度が重要となる。洪水管理の現場では、直接観測できるものは水位であり、流量は間接的に推定されるものである。

本論文は、降雨量から水位を直接予測することのメリットを見極めるため、貯留関数法の基礎式から水位予測モデルの基礎式を作成し、非線形カルマンフィルタを用いてデータ同化の実験を行った。この結果、観測水位の再現性を担保しつつも、リアルタイムでのパラメータの推定や、流量推定も可能なフィルタリング手法の適用について提案するものである。

## 2. 対象流域と洪水予測上の課題

### (1) 流域の概要

1流域の貯留関数法モデルで構築できる程度の流域面積で、洪水毎に河床が変化する<sup>3)</sup>土器川流域を対象とする。土器川は香川県の西部に位置し、瀬戸内海に注ぐ河川である。流域面積は127km<sup>2</sup>で、河床勾配は河口部の感潮区間では約1/1,200 であるが、中下流部では約1/400～1/100、上流部では約1/100 以上と全国有数の急流河川<sup>3)</sup>である。基準地点祓川橋の流域面積は106.7km<sup>2</sup>で、中流部に広がる扇状地にある。

### (2) 洪水予測における問題

国土交通省が公開している水文水質データベース<sup>4)</sup>から、祓川地点の実績水位、H-Q換算流量、実績テレメータ雨量資料を取得し、水収支等を分析した。

データが取得できる2003年から2012年までの期間において、概ね流量が100m<sup>3</sup>/s以上の洪水を対象に、図-1に示す5観測所のテレメータ雨量とH-Q式から換算した流量(以下、換算流量という)を取得した。

まず、ティーセン法<sup>5)</sup>により総雨量を算定し、換算流量より水平分離法による流出高を算定し、両者の関係を把握した。図-2に示すように総雨量とH-Q式が正確であれば、総流出高は総雨量より小さいはずであるが、流出高が総雨量より大きい事例がある。これは降雨量、H-Q式、観測水位の誤差によるものと考えられる。

流出モデルとH-Q式が一定の精度を保持できていれば、流出モデルで算定した流量と換算流量はおおむね一致する。祓川地点を対象に貯留関数法(3)～(6)式参照)のkをパラメータとして推定した流量を、流出係数(6)式参照)とH-Q式を仮定して水位を算定し、実績水位と比較すると図-3のとおりとなる。

土器川が細長い河川であるため、流域平均雨量は、洪水の流下による時間的な遅れを考慮した。まず、雨量観測所から祓川橋までの距離を算定し、クラークヘン式<sup>8)</sup>で遅れ時間を推定し、ずらしたハイレトグラフをもとにティーセン法により流域平均雨量を算定した。

流出係数fは、累加雨量R(t)が大きくなると1に近づく傾向を(1)式のように指数関数で表現した。(1)式中のαは実績のデータから算定し、0.02とした。

$$f(t) = 1 - \exp(-\alpha R(t)) \quad (1)$$

また、H-Q式は水文水質データベースの水位とH-Q換算流量の関係から式(2)で仮定した。

$$Q = 100(H - 1.7)^2 \quad (2)$$

洪水の立ち上がり部における実績水位は、2004年10月、2011年9月洪水はk=10～30における推定水位の範囲に入っている。しかし、k=10～30では水位の低減部において、実績水位を再現できない。以上の考察から、貯留関数モデルを用いた流量をH-Q式により換算する方法では、

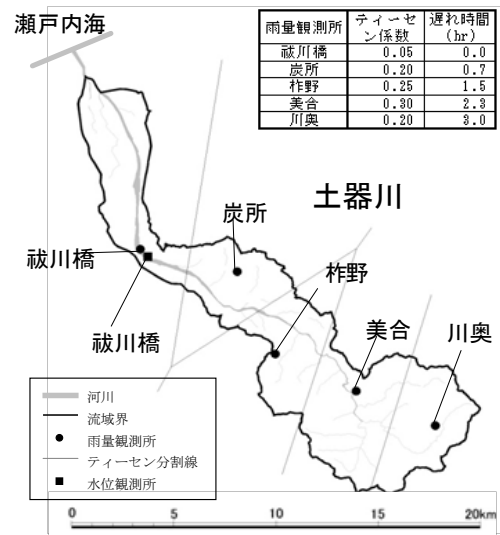


図-1 流域の概要

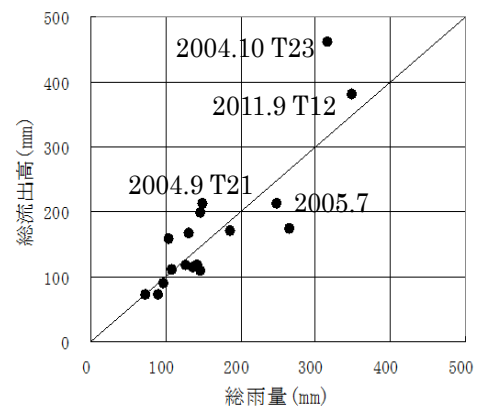


図-2 総雨量と流出高の関係

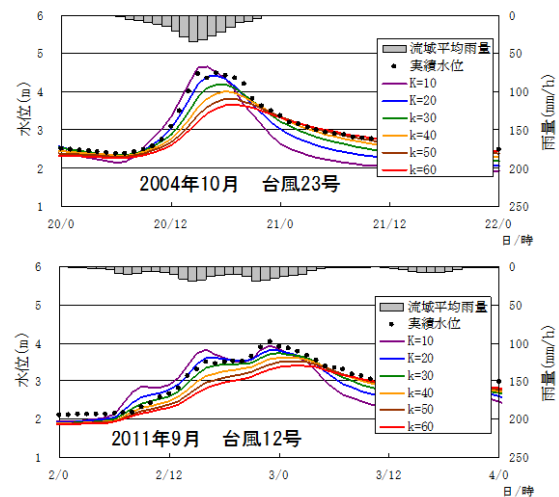


図-3 貯留関数法の定数Kによる水位推定結果  
精度の高い水位予測は、難しいことを示唆している。

## 3. 実時間河川水位の予測モデルの構築

### (1) 水位予測の基本的な考え方

従来から水位予測は、観測水位からH-Q式で流量を算定し、一方で雨量から流量を算定し、フィルタリングを行う。このときの状態量として流出係数等を調整する。この場合、雨量誤差やH-Q式の誤差を流出係数にしわ寄せすることになるため、雨量誤差が大きいとき、あるい

はH-Q式が変化した場合には予測水位の信頼性が大きく低下する可能性がある。

本論文の水位予測のフローは図-4のとおりで、水位予測モデルにより雨量から推定した水位に対して観測水位を用いてフィルタリングし、予測段階では、雨量から水位を直接推定する方法となっている。流出係数を仮定することにより流量を逆算できるようになっているが、流量の逆算結果が水位予測結果に影響しないことがわかる。

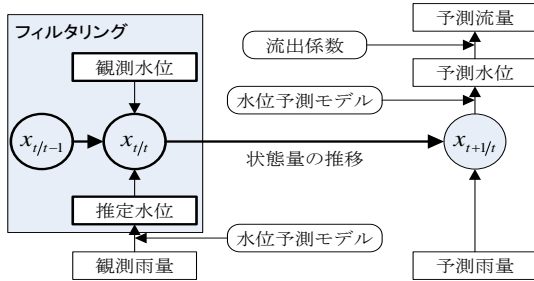


図-4 フィルタリングと水位予測のフロー

## (2) 水位予測モデルの基礎式

### 1) 基礎式の導出

貯留関数法の基礎式は(3)～(6)式のとおりである。モデルに入力する雨量はベースフロー分を加算することで、洪水前の低水流量を表現している。

$$\frac{ds(t)}{dt} = r(t) - q(t) \quad (3)$$

$$r(t) = r_a(t - T_l) + r_b(t) \quad (4)$$

$$s(t) = kq(t)^p \quad (5)$$

$$Q(t) = \frac{1}{3.6} f(t) A q(t) \quad (6)$$

ここに $s$ は貯留高(mm)、 $t$ は時間(hr)、 $r$ はモデルに直接投入する雨量(mm/hr)、 $r_a$ はテレメータ等から推定される流域平均雨量、 $T_l$ は遅れ時間(hr)、 $r_b$ はベースフローに相当する雨量(mm/h)、 $q$ は流出高、 $Q$ は実流域流量( $m^3/s$ )、 $k, p$ は貯留関数法におけるモデル定数( $p=1/2$ )、 $f$ は流出係数、 $A$ は流域面積である。

(3)～(6)式は(8),(9)式のように整理できる。(8)式は、流出係数、(7)式に示す時間的に変化するH-Q式の係数 $a$ 、流域面積をまとめた定数 $c$ 示している。定数 $c$ と(4),(5),(6)式を用いて、(3)式を $H$ と $r$ の関数にすると(9)式になる。これが本論文の水位予測モデルの基礎式である。

$$Q(t) = a(t)[H(t) - b(t)]^{1/2} \quad (7)$$

$$c(t) = \left( \frac{f(t)A}{3.6a(t)} \right)^{1/2} \quad (8)$$

$$k \frac{d(H(t) - b(t))}{dt} = c(t)r(t) - \frac{1}{c(t)}(H(t) - b(t))^2 \quad (9)$$

## 2) 解析方法

(8)式は水位が雨量と3個の定数 $k, b, c$ で表現できることを示している。また、(9)式は $\Delta t$ 時間においては、雨量および定数が一定と仮定することにより解析的に時間積分が可能となる。積分した結果は双曲線関数等で表現され(10)～(14)式が導かれる。これらの式は、関数に既知量を代入することにより、水位を推定できるため、繰り返し計算を必要とせず、安定性は高い。

1)  $(H(t-1) - b(t)) / c(t) / r(t)^{1/2} < 1$  のとき

$$H(t) = c(t)r(t)^{1/2} \tanh\left(\frac{r(t)^{1/2}}{k} \Delta t + \xi\right) + b(t) \quad (10)$$

$$\xi = \tanh^{-1}\left[\frac{(H(t-1) - b(t)) / c(t) / r(t)^{1/2}}{1}\right]$$

2)  $(H(t-1) - b(t)) / c(t) / r(t)^{1/2} = 1$  のとき

$$H(t) = H(t-1) \quad (11)$$

3)  $(H(t-1) - b(t)) / c(t) / r(t)^{1/2} > 1$  のとき

$$H(t) = c(t)r(t)^{1/2} \coth\left(\frac{r(t)^{1/2}}{k} \Delta t + \xi\right) + b(t) \quad (12)$$

$$\xi = \coth^{-1}\left[\frac{(H(t-1) - b(t)) / c(t) / r(t)^{1/2}}{1}\right]$$

4)  $r(t) = 0$  のとき

$$H(t) = \frac{kc(t)(H(t-1) - b(t))}{(H(t-1) - b(t))\Delta t + kc(t)} + b(t) \quad (13)$$

5)  $r(t) < 0$  のとき

$$H(t) = c(t)|r(t)|^{1/2} \cot\left(\frac{|r(t)|^{1/2}}{k} \Delta t + \xi\right) + b(t) \quad (14)$$

$$\xi = \cot^{-1}\left[\frac{(H(t-1) - b(t)) / c(t) / |r(t)|^{1/2}}{1}\right]$$

### (3) 定数の自己回帰モデル

係数は流出係数 $f$ とH-Q式の係数値 $a$ の関数である。洪水中に流出係数とH-Q式が変化することを想定すると、係数 $c$ は複雑に変化する。これを水理水文学的な知見からモデル化することは容易ではない。そこで定数の変化を確率過程として考え、自己回帰モデルを適用した。

#### 1) 定数の選定

$b, c$ は時間とともに変化するパラメータである。この2つの状態量で水位をフィルタリングできるが、洪水の初期の低水流量時と洪水終了後の無降雨時の水位がうまく再現できない。そこで、ベースフローに相当する雨量 $r_b$ を加えて、3つのパラメータとする。

#### 2) 定数の次数と係数

自己回帰モデルは簡便なものとして(15)～(17)式のとおりで、次数は1とした。なお、 $c$ は流出係数の関数であるため、 $0 \sim c_{max}$ の範囲で変動するものとし、Logit関数を適用し、誤差が正規分布と仮定した。

$$b_{(t)} = \alpha_b b_{(t-1)} + e_{b(t)} \quad (15)$$

$$\text{Logit}(c_{(t)}/c_{\max}) = \alpha_c \text{Logit}(c_{(t-1)}/c_{\max}) + e_{c(t)} \quad (16)$$

$$r_b(t) = \alpha_r r_b(t-1) + e_{r(t)} \quad (17)$$

ここに、上記式中の $\alpha_b=1.0$ ,  $\alpha_c=0.75$ ,  $\alpha_r=0.8$ である。また、 $e_{b(t)}$ ,  $e_{c(t)}$ ,  $e_{r(t)}$  は定数と無相関の誤差項である。

#### 4. データ同化手法の構築

##### (1) フィルタリング手法の選定

非線形モデルのフィルタリングには、Extended Kalman Filter<sup>6)</sup>が多く使用されてきたが、共分散行列が不安定になることが指摘されている<sup>7)</sup>。洪水予測においては、推定した洪水波形が実績波形と時間的にずれている場合、観測値と計算値が交差する時刻付近で、観測値と計算値の誤差が急激にプラスからマイナスに変化することにより、共分散行列が不安定になる。

この不安定性を解決する手段として考案されたものが、統計量を近似するEnsemble Kalman Filter<sup>8)</sup>である。一方、誤差分布が正規分布でなくても適用できる Particle Filter(PF)<sup>9)</sup>等も提案されている。しかし、これらのモデルが、統計量の近似にモンテカルロ近似を使用しているため計算時間を要する。

本研究で開発した水位予測モデルは、早く、安定的に一定の精度で、予測結果を提供できることを期待したものである。そのため、数百から数千回も流出解析を行うEnKF, PFは簡易な水位予測モデルにはなじまない。したがって、このため、2×状態量+1回の流出計算で統計量を近似できるUnscented Kalman Filter<sup>10)</sup>を採用した。

##### (2) Unscented Kalman Filter (UKF) の構築

###### 1) フィルタの基礎式の整理

###### ①時間更新ステップ

$x_{t-1/t-1}$ ,  $x_{t-1}$ を状態量のベクトルとし(18)式のとおり簡易な線形式で表現できる。係数の状態量は $b, c, r_b$ で表現でき、係数行列は(15)~(17)式から導かれる。 $q_n$ はシステムノイズである。なお、サフィックス $t-1/t-1$ は1ステップ前の状態量を示し、 $t/t-1$ は1ステップ前の情報から時間更新した結果であることを示している。また、 $t/t$ は現時刻における観測値更新した結果であることを示している。

$$x_{t/t-1} = Ax_{t-1/t-1} + q_n \quad (18)$$

###### ②観測値更新ステップ

観測値更新は(19)式で表現し、式中の $F_t(x_{t/t-1})$ は(10)~(14)式を示している。 $y_{t/t-1}$ は観測推定値、 $R_t$ 観測ノイズである。UKFはEKFのように線形近似をする必要がなく、流出解析プログラムをそのまま使用することができる。

$$y_{t/t-1} = F_t(x_{t/t-1}) + R_n \quad (19)$$

###### 2) システムノイズと観測ノイズの設定

水位予測モデルを運用した結果、係数 $b$ のノイズは $H-b$ の6%として設定した。さらに、 $H-b$ が大きくなると係数

$b$ が変動しやすくなるようにした。

つぎに、係数 $\alpha_c$ を0.03(無次元数)、 $r_b$ を1.0mm/hに設定した。係数 $c$ が大きくなるとは、雨量の誤差も大きいと考え $c$ と $r_b$ には誤差の相関関係があるものと仮定して、実績データから相関係数を0.7と設定した。

観測誤差については、水位予測モデルを運用した結果から $H-b$ の5%と設定した。

##### (3) UKFのアルゴリズム<sup>10)</sup>の整理

状態量の誤差をU変換により、二次までの統計量をSigma Pointsにおける状態量と観測推定値で近似することがUKFの特長である。

###### 1) Sigma Pointsの設定方法

状態量 $x_{t/t-1}$ の誤差共分散行列 $P_{t/t-1}$ は特異値分解により(20)式のとおり平方根行列で表現できるものとする。

$$P_{t/t} = \sqrt{P_{t/t}} \sqrt{P_{t/t}}^T \quad (20)$$

Sigma Points数は $2n+1$ 個で、(21)~(23)式で表現される。

$$\textcircled{1} \quad i=0 \text{ のとき } x_{t/t}^{(0)} = \hat{x}_{t/t}, \quad W^{(0)} = \lambda / (n + \lambda) \quad (21)$$

②  $i=1 \sim n$  のとき

$$x_{t/t}^{(i)} = \hat{x}_{t/t} + \sqrt{(n + \lambda) P_{t/t}^{(i)}} \quad , \quad W^{(i)} = 1 / (2(n + \lambda)) \quad (22)$$

③  $i=n+1 \sim 2n$  のとき

$$x_{t/t}^{(i)} = \hat{x}_{t/t} - \sqrt{(n + \lambda) P_{t/t}^{(i)}} \quad , \quad W^{(n+i)} = 1 / (2(n + \lambda)) \quad (23)$$

ここに $x^{(i)}$ はSigma Pointsにおける状態量、 $\hat{x}$ は状態量の期待値( $1 \times n$ の行列)、 $\sqrt{P_{t/t-1}^{(i)}}$ は誤差共分散行列の平方根の行列で $\sqrt{P_{t/t}}$ の $i$ 列、 $W^{(i)}$ はSigma Pointsにおける重み、 $\lambda$ はチューニングパラメータである。

Julierら<sup>10)</sup>は正規分布を仮定し、 $n+\lambda=3$ を推奨しているが、 $n=3$ の場合 $\lambda=0$ となり、結果として $W^{(0)}=0$ となる。これは、実質6点の近似となりすべてSigma Pointsを使用していないことになる。また、 $n$ が3より大きくなると $W^{(0)}$ がマイナスとなる。片山<sup>11)</sup>の分析では、 $\lambda$ は試行錯誤すべきパラメータとしている。

図-5は $n+\lambda=3$ と $n+\lambda=10$ の結果を比較したものであるが、2つのパラメータによる水位差は最大でも0.01mであった。このため、Julierの論文<sup>10)</sup>を参考に $n+\lambda=3$ と設定した。

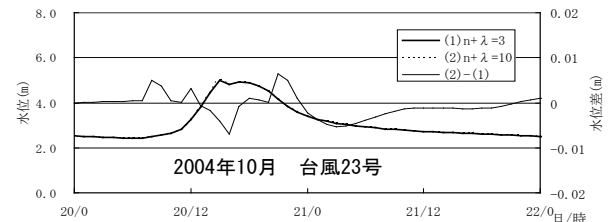


図-5  $\lambda$ の感度分析結果

###### 2) 状態量の観測値更新方法の概要

カルマンゲインは、誤差共分散行列から求めることができる。カルマンゲインにより状態量を更新する式はKalman Filter<sup>12)</sup>と同じである。

## 5. 水位予測モデルの適用結果

洪水の立ち上がりの急な2004年10月洪水と、洪水の立ち上がりが緩やかな2011年9月洪水について、水位予測モデルを適用した結果を示す。貯留関数法の定数 $k$ は、水位予測モデルの精度に影響するパラメータであり、ひとまず $k=20$ と仮定して、水位のフィルタリングの状況、定数の変動状況を把握し、定数から流量を逆算した結果を図-6および図-7に示す。

### (1) 水位の予測結果の評価

水位のフィルタリング結果を最上段の図に示す。観測値の誤差分布を正規分布と仮定すると(24)式の信頼区間が得られるので、これと実績水位を比較した。

$$\hat{y}_{t/t-1} - 1.96\sqrt{V_{t/t-1}} < y_{t/t-1} < \hat{y}_{t/t-1} + 1.96\sqrt{V_{t/t-1}} \quad (24)$$

図-6および図-7によれば、実績水位がおおむね95%信頼区間にはいっていることがわかり、フィルタリングの結果に大きな問題はないと考える。

### (2) 係数 $b$ , $c$ , $r_b$ の評価

係数 $b$ ,  $c$ ,  $r_b$ の変化を図-6および図-7の2段目に示す。係数 $c$ は洪水中大きく変化しないので $b$ ,  $c$ ,  $r_b$ でモデルの誤差を調整した結果になっている。

係数 $b$ は河床の上下方向の変化を示していると考えられる。洪水ピーク付近で、ベースフロー $r_b$ による誤差の調整ができなくなると、 $b$ が小さくなり、実測水位との調整を行う傾向にある。急流河川では、洪水中に掃流力が大きくなり、ある水深を超過すると河床形状が変化すると考えられ、この傾向がおおむね再現された結果になっている。

### (3) 定数 $c$ の $a$ , $f$ への分解方法の一試算

現状では、係数 $c$ を $a$ と $f$ に分解する方法については、有効な方法がない。ひとつの試算として $f$ を(1)式と同じとした。

$c$ を分離結果を示したものが図-6および図-7の4段目である。図では係数 $a$ が次第に大きくなる傾向を示している。流出係数 $f$ が妥当なものであれば、係数 $a$ はこうに流出係数 $f$ に追随する変化を示すことは考えにくいので、洪水期間中の流出係数 $f$ は、単調増加等の仮定が成立しない可能性もある。

### (4) 逆算流量の評価

流出係数 $f$ を仮定することにより得られたH-Q式から算定した流量を逆算流量とする。一方、流出係数 $f$ を仮定して、貯留関数法により算定した流量を推算流量とする。図-6および図-7の3段目には、これらと比較したものを示す。図-6ではこれらの方法で算定した流量がおおむね同じであることがわかる。図-7のように、逆算流量と推算流量が大きくずれている場合は、フィルタリングにより、流出モデルの他にベースフロー $r_b$ 、係数 $b$ が調整されていることがわかる。

2004年10月洪水では、2011年9月洪水とともに、水位の立ち上がり部からピーク付近にかけて、逆算流量と推算

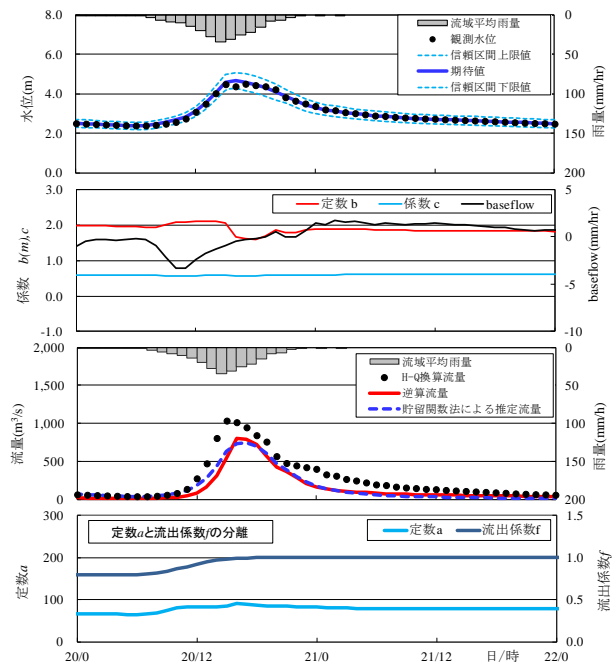


図-6 2004年10月台風23号のフィルタリング結果

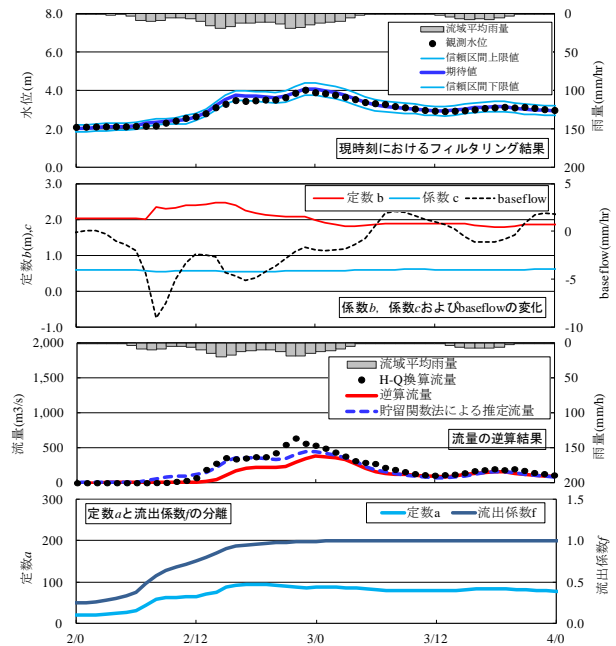


図-7 2011年9月台風12号のフィルタリング結果

流量に差が見られる。(2)の考察と合わせれば、降雨、H-Q等の要因による誤差を示していると考えられる。

次に、2011年8月洪水のように、H-Q換算流量と推算流量・逆算流量とに差がある。H-Q換算流量は流量観測から作成されたものであるが、水収支という観点から雨量と流出量との整合性が乏しいため、単純にH-Q式を用いることが最適な方法とはならないことを示唆している。

一方、逆算流量は、降雨と水位の関係を統計的に誤差が最小となるように推定したH-Q式から算定した流量である。これらは、フィルタリングの結果、一定の精度を担保しているものと考えられる。すなわち、流量という不確実性の高い量を使わずとも、降雨と水位から逆算流量をフィルタリングで求める方法は、今後の観測が十分

におこなわれていない中小河川や、観測流量の精度に不安がある場合に、有効な手法であることが推察される。

### (5) 予測水位の精度検証

実際の洪水予測は、上記までのフィルタリング結果を前提として、予測雨量を流出モデルに入力し、リアルタイムの実績水位から水位の将来の変化を算定するものである。そこで、予測雨量を貯留関数法に入力し、予測水位の精度を検証する。この計算では、実績雨量を予測雨量と見立てて、1時間間隔に予測計算を行った。

図-8には、2004年（平成16年）10月台風23号の雨量・水位から時間毎に予測計算を行った結果を示す。これによれば、当該時刻で予測した1・3時間前の予測結果と実績水位を比較している。これによれば、本研究でのフィルタリングによる状態量の推定が概ね妥当であると考えられる。なお、2011年（平成23年）9月台風12号での比較では、3時間前の予測水位の誤差が図-8に比べやや大きいものであった。これは、状態量の推定や貯留関数法で仮定した定数 $k$ の与え方に課題を残しているものと考えられる。

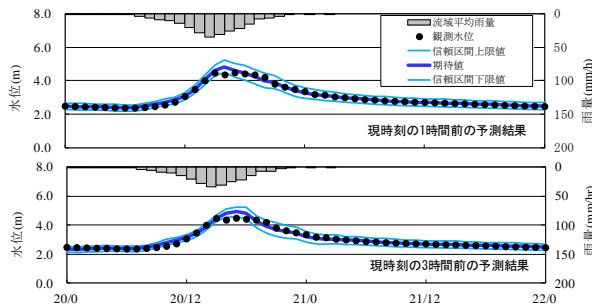


図-8 2004年10月洪水での予測結果

## 6. おわりに

### (1) 水位予測モデルの水位予測性能の評価

本研究で提示した水位予測モデルは、貯留関数法とH-Q式を組み合わせで構築された。このモデルは、演算過程で流量を使用しないことから、H-Q式で換算した流量と雨量の収支が整合のとれない河川や、流量観測結果がない水位観測所を対象にしたものである。

河道の高さの変化を表している係数 $b$ については洪水が大きくなると変動する特性を表現するために、システム誤差を $H-b$ の関数として与えた。係数 $c$ はLogit関数で変換し、自己回帰モデルを仮定した。その結果、水位を予測モデルに同化できることがわかった。

### (2) UKFの評価

フィルタリング手法について二次の統計量近似するUKFを採用した。統計量については正規分布を仮定することにより得られるSigma Pointsを使用したが、問題は発生しなかった。この結果、UKFは水位のフィルタリング手法として有効なものの一つといえる。

### (3) 水位予測モデルの定数の妥当性評価

提示した水位予測モデルは、雨量から水位を簡易的に予測できる。さらに、実績雨量で行った水位の同化結果

が良好な場合は、フィルタリングによる状態量の調整がほとんど行われず、逆算流量がおおむね貯留関数法の推算流量と一致していることがわかった。

一方、洪水時の水位においては、降雨誤差、モデルの誤差、河道の変化、H-Q式の変化等をフィルタリング必要があるが、リアルタイムで運用しているときには、個別に誤差量を特定することは困難である。このような状況のもとでも、係数 $c$ を用いてフィルタリングすることができることがわかり、本研究の方法が中小河川の洪水予測に有効であることがわかった。

また、貯留関数法の定数 $k$ の設定にも課題は残るものの、現時刻の状態量の推定結果から3時間先までの予測水位の算定した結果、実績水位と概ね良好の一致を示した。

## 参考文献

- 1) 吉野文雄, 吉谷純一, 堀内輝亮: 分布型流出モデルの開発と実流域への適用 土木技術資料32-10, pp.54-59 1990
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 洪水予測システムの課題・改善事項とその対応策.  
[http://www.nilim.go.jp/lab/rcg/newhp/checklist/kadai\\_taiou.pdf](http://www.nilim.go.jp/lab/rcg/newhp/checklist/kadai_taiou.pdf).
- 3) 国土交通省 河川局: 土器川水系河川整備基本方針 土砂管理等に関する資料(案) 2007.
- 4) <http://www1.river.go.jp/>.
- 5) 改訂新版 建設省河川砂防技術基準(案)同解説 調査編, pp.82, 山海堂, 2000.
- 6) A.H.Jazwinski: Stochastic Processing and Filtering Theory, Academic Press, 1970.
- 7) 中村和幸, 上野玄太, 樋口知之: データ同化: その概念と計算アルゴリズム, 統計数理, Vol.53, No.2, pp.211-229, 2005.
- 8) Geir Evensen: Sequential data Assimilation with a nonlinear quasi-geotropic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics, *Journal of Geo-phys Research* Vol. 99 10143-10162, 1994.
- 9) 北川源四郎: モンテカルロ・フィルタおよび平滑化について, 統計数理, Vol.4, No.1, pp.31-48, 1996.
- 10) S.J. Julier and J.K. Uhlman: A New Extension of the Kalman Filter to Nonlinear Systems, *Proc. SPIE, Signal Processing Sensor Fusion and Target Recognition IV*, pp.182-193, 1997.
- 11) 片山徹: 非線形カルマンフィルタ, 朝倉書店 pp.103-109, 2011.
- 12) R.E.Kalman: A new approach to liner filtering and prediction problems, *Trans.ASME, Journal of Basic Engineering*, Vol.83D, No.1, pp.95-108, 1961.