# 河口砂州崩壊の影響を受ける河道区間の 水位予測手法の開発

## DEVELOPMENT OF WATER SURFACE LEVEL PREDICTION METHOD AT REACH AFFECTED BY THE RIVER MOUTH SANDBAR COLLAPSE

# 佐々木昌俊<sup>1</sup>・辻倉裕喜<sup>1</sup>・田中耕司<sup>1</sup>・白波瀬卓哉<sup>2</sup>・藤井未知<sup>2</sup> Masatoshi SASAKI, Hiroki TSUJIKURA, Kohji TANAKA, Takuya SHIRAHASE and Michi FUJII

<sup>1</sup>正会員 修(工)(株)建設技術研究所大阪本社(〒541-0005 大阪市中央区道修町1-6-7) <sup>2</sup>正会員 国土交通省近畿地方整備局紀南河川国道事務所(〒646-0003 和歌山県田辺市中万呂142)

This paper described the prediction system of the water surface level applied of the non-linear filtering techniques, which take consideration to temporal change affected by the sand bar collapse. This study inspected applicability of the non-linear filtering techniques for backwater reach in the Kumano River. One dimensional hydrodynamic model of unsteady flow analysis was applied for the longitudinal profile of the water surface level at reach affected by sand bar collapse of the river mouth. It is shown that bed deformation dz as one of the state quantities could take account for the timing of the sand bar collapse. Moreover, error coefficients as other of the quantities is applicable for data assimilation of the observation water surface level. As a result of predicting the state quantities after the filtering as an initial condition, the predictive water level almost accorded with observation water level.

*Key Words :* flood prediction, sandbar collapse, non-linear filtering technique, unscented Kalman filter, particle filter, bed deformation

1. はじめに

平成23年9月の台風12号の襲来では、山間部では深層 崩壊の多発、既往最大の洪水が発生し、尊い命が失われ た.熊野川においては、この洪水に限らず、その地理的 な位置により毎年のように大中様々な洪水が発生してい る<sup>1)</sup>.さらに、土砂流出量の多い川としても知られてい る<sup>1)</sup>.

本論文で対象にしている洪水予測システムは、国土交 通省管理区間である河口から治水基準点である相賀地点 と支川相野谷川の水位予測を目的としたものである.こ のシステムを構築する際、図-1に示すような河口砂州の 存在が、洪水予測を難しくしている.河口砂州は、毎年 同じような形状・位置で形成されているわけではない. その年の形状は前年の洪水によって崩壊した後に形成さ れるため、その崩壊の程度によっても異なることが想定 される.過去の観測記録から見て、河口砂州の崩壊を開 始する流量は、平均的に8,500m<sup>3</sup>/sと見られている.しか しながら、同一年で数回も洪水が来た場合は、河口砂州 が再形成されないために影響を受けない洪水もある.

そのような特性を持つ河川では、河口砂州形状の逐次 観測と、洪水量・砂州崩壊の予測を平行的に実施するこ とが水位予測手法として考えられる.しかし、観測施設・ 体制の整備という観点から、予測計算に必要なデータを 取得して、所定の時間内で予測結果を提供するのは困難 であるといわざるを得ない.

河口砂州の崩壊過程として河口砂州そのものの物理的 な変動量を捉えるのは、今現在の観測体制からは困難で あるため、本研究では、熊野川の現在までの状態を推定 する手法として、非線形フィルタリング手法を応用した. この手法は、システム方程式から算出される流量から算 定される水位と、観測水位からフィルタリング手法を用 いて時々の観測値を説明する変数の挙動を捉えるもので ある.すなわち、河川水位の予測を行うにあたり、現時 刻の観測水位への補正方法として非線形フィルタリング 手法を用いて洪水予測と河口砂州の挙動を同時に追跡し ようと試みたものである. このような取り組みの事例として、立川ら<sup>2)3</sup>,田中ら <sup>4)</sup>が、粒子フィルタ法を採用して水位予測システムの適 用性について検討している.立川らは、淀川支川桂川の 区間でのHQ式の推定<sup>2)</sup>や、熊野川での平成23年台風12号 での推算流量を算定している<sup>3)</sup>.また、田中らは、淀川 水系洪水予測システムを構築するにあたり、粒子フィル タ法をもちいて、一意的なHQの関係が担保できない背 水区間の予測水位の精度を向上させている.

まだ,研究事例は蓄積されつつある手法であるが,実務的には,計算速度とシステムの運用上の課題をいかに 解決していくかが重要になる.本研究は,熊野川水系の 洪水予警報や水防警報の作業に資するシステムの構築の 一貫として行われたものである.

河口砂州の背水区間における水位予測手法として,現 時刻までの観測水位に対して,これに適合する状態量

(残流域流出量,等)を同化させて,現時刻時点での最 も確からしい水位を予測する方法が有効的であると考え, 非線形的な現象である河口砂州フラッシュについて Particle Filter手法を用い,モデル上で河口砂州変動を説 明する状態量と河口砂州フラッシュによる水位変化の把 握が可能かを検討し,将来の水位を予測するための フィードバック・システムを構築することを目的とした ものである.

#### 2. 熊野川の河口砂州の変動

熊野川河口付近では河口砂州が発達しており,上流の 成川水位観測所等では背水の影響を大きく受けている. また,洪水中には発達した河口砂州の崩壊(以下,河口 砂州フラッシュ)が発生しており,図-1に示すように, 平成23年台風6号洪水では河口砂州は洪水前後で、約 500mに渡り崩壊することが目視により把握されている.

このとき,河口付近のあけぼの水位観測所の観測水位 と流量観測地点である相賀地点のHQ換算流量から水位 流量関係を整理したものを図-2に示す.これによれば, 洪水中の水位流量関係(以下,HQ関係)は一意的な関 係とならず,流量増加にも関わらず水位は低下すると いった現象が生じており,この河口砂州の崩壊が水位に 及ぼす影響が大きいことがわかる.

複数洪水を対象とした現地観測による河口砂州フラッシュ状況とHQ関係からみると、河口砂州フラッシュは 概ね相賀地点8,500m<sup>3</sup>/s程度で発生するとされているが、 一方で、河口砂州フラッシュの影響の大きさについては、 洪水前の河口砂州の発達状況により大きく異なっており、 上記の平成23年台風6号洪水で大きくフラッシュしたあ と、平成24年になり再堆砂が進むまでに発生した洪水で は水位に及ぼすフラッシュの影響は小さい.

このように、河口砂州フラッシュの影響により、HQ 関係は一価性のHQ関係では表すことができないため、



図-2 河口部の水位流量関係(平成23年台風6号洪水)

洪水予測には、HQ関係から推定・予測流量を水位に変換する手法の適用は困難であると考えられる.言い換えると、現時刻の状態を推定できないと言うことは、その後予測の計算の精度を狂わす大きな原因となる.

また,不定流モデル(水位追跡モデル)においても, このような砂州の崩壊等による水位変動を反映できるモ デルが必要となる.日々稼動する水位予測システムを想 定すると、フラッシュを含めて現況の河口砂州状況を再 現するようなモデルが求められることになる.このとき、 通常の河床変動モデルなどでは、洪水中のリアルタイム の河床状況の観測ができないため、実態との乖離という 点で実質的に難しいものと考えられる.また、仮に河床 位がリアルタイムで、かつ面的に観測できたとしても、 水流・流砂のシステム方程式(支配方程式)中のパラ メータを観測値に同化させるために要する時間は増大し てしまい、実用的ではない.

以上から、河口砂州の背水区間における水位予測手法 として、現時刻までの観測水位に対して、これに適合す る状態量(河口砂州変動高等)を同化させるフィルタリ ング手法が有効と考えられる.

## 3. 熊野川水位予測モデルの概要

#### (1) 分布型流出モデルの適用

分布型流出モデルは、流域内の全メッシュに鉛直方向 に並べられた3層のモデル(表層,不飽和層,地下水層 モデル)と河道モデルからなる.各層からの流出成分を 落水線に沿った河道モデルに入力し,Kinematic Wave法 で河道流量を逐次計算するモデルである.このモデルの 特徴としては、各層・各メッシュに土地利用、土壌、表 層地質の水文学的な特性を反映したパラメータを設定で きることである.なお、本研究では、猪俣等<sup>5</sup>が適用し たモデルを参考に構築した.

### (2) 水位予測モデルの構築

水位予測モデルは,熊野川本川および支川相野谷川の 直轄区間を対象に,分布型流出モデルによる計算流出量 を上流端条件,下流端である"あけぼの地点"のHQ換 算水位もしくは観測水位(予測計算では天文潮位)を下 流端条件とした不定流モデルにより水位予測を行う.

また、河口砂州フラッシュによる水位変化を把握する ために適用するフィルタリング手法として、4. で概説 する2種類の手法による精度検証を行い、その適用性を 検討する.本研究では、水位フィードバックの対象地点 およびフィルタリングにおける状態量を、表-1、図-3に 示すとおり設定した.ここで、河口砂州のフラッシュを 表現する状態量については河床変動高dzとし、適用性に ついて検討する.

## 4. フィルタリング手法の概説

#### (1) フィルタの基礎式

フィルタの基礎式は、予測式と観測式で表現される. (1)式は一期前の状態量から現時刻の状態量を推定する



図-3 水位予測モデルの概要(下流端条件をHQ式とした場合)

表-1 水位フィードバック対象地点とフィルタリング状態量

対象地点	状態量
<ul> <li>・成川地点</li></ul>	・熊野川,相野谷川の上流端流量にかかる係数
(熊野川) <li>・高岡地点</li>	・残流域流出量にかかる係数
(相野谷川)	・河床変動高dz

ものである.一期前における時間更新後の値を現時刻で みると誤差があるため、予測式に予測ノイズ(システム ノイズ) wが加わる.

同様に,(2)式は観測推定値 $h(x_t)$ と観測値 $y_t$ の関係 を示しており,観測式にも観測ノイズvが加わる. ①時間更新ステップ(予測式)

 $\mathbf{r} = f(\mathbf{r}) + w$ 

$$x_t - f(x_{t-1}) + w \tag{1}$$

②観測値更新ステップ(観測式)

 $y_t = h(x_t) + v \tag{2}$ 

不定流モデルの状態量は上流端流量,残流域流量等に かかる係数である.これらのパラメータの変化を示した 式が予測式である.

また, (2)式の $h(x_t)$ は、状態量から観測推定値を算出 するもので、不定流モデルで解析することを示している.

## (2) フィルタリング手法の特徴

非線形性が強い水位変化には、カルマンフィルタなど、 誤差分布にガウス分布を仮定した手法の適用性は低いと されてきたが、近年の研究の進歩により、非線形の状態 空間モデルへの拡張が試みられている.本検討では、ガ ウス分布の制約は強いが、計算速度は比較的速い Unscented Kalman Filter<sup>6</sup>と、ガウス分布の制約はないが、 粒子数によっては、計算速度が比較的遅くなるParticle Filter<sup>7)</sup>の2種類の手法について、その適用性を検討する. 以下に、両手法の特徴を示す.





図-4 Kalman Gainと重み付きサンプリングの違い

#### a) Unscented Kalman Filter

アンサンブル・カルマンフィルタでは、安定的に解を 得るためにアンサンブルメンバーを多く用意する必要が あり、不定流モデルなどの解析に時間を要する場合には、 リアルタイムでの運用が難しい.この問題解決のため、 U変換(Unscented Transform)を使用してメンバー数を 減少させたものが"Unscented Kalman Filter"である.

Unscented Transformの概要や、Unscented Kalman Filter のアルゴリズムについては、辻倉ら<sup>8</sup>を参照されたい.

以下には、カルマンフィルタ(Kalman Filter)の手順 を示す.状態量の期待値と誤差共分散がセットになり、 時間更新と観測値更新を繰り返す手順である.この手順 は、カルマンフィルタ(Kalman Filter)以外の手法でも 同じである.

①状態量の期待値の時間更新を行う.

 $\hat{x}(t|t-1) = A\hat{x}(t-1|t-1)$  (3) ②状態量の誤差共分散の時間更新を行う.

(4)

$$P(t | t - 1) = AP(t - 1 | t - 1)A^{T} + W_{x}$$
③観測値を取得してKalman Gainを算定する.

$$K = P(t | t - 1)B^{T} [BP(t | t - 1)B^{T} + vv^{T}]^{-1}$$
(5)  
① 比能量の期待値の観測値再新を行う

$$x(t|t) = x(t|t-1) + K[y(t) - B\hat{x}(t|t-1)]_{(6)}$$
  
⑤状態量の誤差共分散の観測値更新を行う.

$$P(t \mid t) = (I - KB)P(t \mid t - 1)$$
<sup>(7)</sup>

## b) Particle Filter

個々の粒子に状態量を与え、粒子の密度で確率分布を 近似するモンテカルロ近似を用いる.時間更新と観測値 更新にはベイズ定理を用いることで、カルマンフィルタ において前提となっていたガウス分布の制約がなくなり、 任意の分布のフィルタリングを可能としたものである.

Particle Filterのアルゴリズム等については、田中ら<sup>4</sup>を 参照されたい.ここでは、Particle Filterの特徴でもある 重み付きサンプリングと、カルマンフィルタで用いる Kalman Gainとの違いを整理する.

図-4に示す観測推定値と状態量の空間において、粒子



あるいはメンバーの値のばらつきの傾向が理論解を示す. 理論解を直線近似し、その勾配がKalman Gainであり、 観測値が得られたときに直線から状態量の期待値を逆算 するものである.一方、重み付きサンプリングは観測値 周辺の状態量を重み付き平均したものを期待値とする.

粒子のばらつきの中に観測値がある場合で,理論解の 非線形性が強いときには,重み付きサンプリングが良い 結果を与える.ばらつきの外に観測値がある場合には, 重みつきサンプリングでは観測値に最も近い粒子の値が 期待値になり,外挿できないことが分かる.一方, Kalman Gainを使用する方法は直線の外挿により期待値 を求めるため,ある程度の精度を維持することができる. このため, Particle Filterでも外挿にならないようにする ためには,粒子数を多くとる必要がある.



図-6 現時刻からの予測水位の変化(左図:UKF、右図:PF)

■UKF(アンセンテッド・カルマンフィルタ)							
洪水名	地点名	1hr先予測	3hr先予測	6hr先予測			
H23.07 T06	成川	0.99	0.96	0.94			
	高岡	0.98	0.94	0.91			
H23.09 T15	成川	0.99	0.93	0.81			
	高岡	0.97	0.94	0.88			
H24.06 T04	成川	0.95	0.76	0.31			
	高岡	0.97	0.89	0.71			
H24.09 T17	成川	0.95	0.81	0.64			
	高岡	0.96	0.86	0.81			

表-2 予測水位のNash値による適合性の評価

■PF(粒子	フィルタ)			
洪水名	地点名	1hr先予測	3hr先予測	6hr先予測
H23.07 T06	成川	0.99	0.97	0.94
	高岡	0.99	0.97	0.94
H23.09 T15	成川	0.99	0.95	0.85
	高岡	0.99	0.95	0.88
H24.06 T04	成川	0.98	0.89	0.81
	高岡	0.99	0.94	0.88
H24.09 T17	成川	0.96	0.84	0.78
	高岡	0.96	0.86	0.80

## 5. 非線形フィルタリング手法を用いた予測結果

分布型流出モデルから算定した本川上流,支川上流の 流量を上流端の条件とし,別途分布型流出モデルで推定 した残流域の流出量を横流入とし,不定流解析を行った. 対象とした洪水は,近年の洪水で,平成23年台風6号

# 洪水,平成23年台風15号洪水,平成24年台風4号洪水, 平成24年台風17号洪水である.

# (1) 状態量の変化

適用したフィルタリング手法(Particle Filter)による 状態量の時系列的変化を図-5に示す.ここでは、状態量 である下流端断面の河床変動高dzと成川地点のフィルタ リング前後の計算流量の時系列変化を示す. 洪水初期や末期の低流量時にはdzの変動が大きくなる 傾向を示す.これは、背水の影響をdzにより表現してお り、河口砂州の背水の影響が大きい当該区間の特徴を現 していると考えられる.また、洪水初期でdzが変動する 理由としては、計算に用いている河道が洪水発生時点に 近い年度の測量結果であり、河口砂州の状況が必ずしも 洪水時の状況とは一致していないために、洪水初期での フィルタリングにより調整されていると考えられる.

河口砂州が大きくフラッシュした平成23年台風6号洪 水では、フラッシュが開始する時刻においてdzは-3.0m 程度となり、河床低下という実現象との同化ができてい ることがわかる.ただ、フラッシュ開始時の次の時刻か らは、河口の砂州変動を表現する状態量(dz)は変動が 小さくなり、かわりに残りの状態量である流量値の変動 が大きくなる.これは、現時点の成川地点水位を説明で きるようにフィードバックするため、流量が大きい状態 では、成川地点の水位は河口砂州のフラッシュではなく、 流量に規定されることが要因と考えられる.

## (2) フィルタリング手法の適用性検討

以上より、河口の砂州変動を表現する状態量(dz)の フィルタリングにより、河口砂州の変動を考慮できるこ とがわかった.ここではフィルタについて、Unscented Kalman FilterおよびParticle Filterの適用性を検討する.

評価は、実績洪水の水位と、1時間先、3時間先、6時 間先の予測水位との差をNash値(波形の適合性を評価す る指標)を指標として比較検討した.1時間先、3時間先 では両手法ともにほとんどの地点で80%以上と高い適合 度を示している.また、6時間先まで見ると、Particle Filterに比べUnscented Kalman Filterの適合度は低くなるが、 モデルへの適用性については両手法ともに十分な精度は 有していると考えられる.

図-6には、成川地点の実績水位に対して12時間先の予 測結果をひげ(図中の実線)で表示した.

全ての対象洪水で,洪水の立ち上がりは遅れることな く予測されている.このうち,平成23年台風15号洪水, 平成24年台風17号洪水では,ピーク付近で3時間先など の予測水位が実績よりも低く予測される.これら2洪水 に対して,平成24年台風4号洪水はその規模も同等であ るにも関わらず予測精度は高いことから,フィルタリン グの安定性に課題があると考えられる.全体としてUKF とPFとで予測ハイドログラフの大きな差はなく,同等の 精度を有していると考えられる.

以上の結果から,熊野川下流の河口砂州崩壊の影響を 受ける区間に適用した水位予測手法が妥当であると考え られる.不定流モデルを基本とし,現時刻のデータ同化 手法として,適用したフィルタリングが有効な方法であ ることがわかった.また,状態量として流量,下流端断 面の河床変動高の補正係数を採用し,現時刻からの将来 予測の結果から,状態量の妥当性も説明できたものと考 えられる.

## 6. おわりに

本研究では、熊野川を対象に、河口砂州崩壊の影響を うける区間に対して、砂州崩壊等による水位変動を考慮 できる水位予測手法として非線形フィルリング手法を適 用した結果を示した.本研究で得られた成果は、以下の 通りである.

- ・分布型流出モデルによる上流域の流出量を基本とした システムに、河口砂州の背水・崩壊の影響を受ける区 間の水位の解析に不定流モデルを適用した.その結果、 河口砂州の変動を表す状態量として河床変動高dzを設 定することにより崩壊等の影響を考慮できるように なった.また、流量の補正係数を状態量にすることに より、データ同化が可能であることがわかった.
- ・現時刻の水位に対する適合性は、非常に高いことがわかった.これは、水位に合わせるように状態量が変化したためである.この妥当性として、現時刻の状態量を初期状態として予測計算した結果、その適合性は非常に良いことがわかった.

#### 参考文献

- 国土交通省:新宮川水系河川整備基本方針,2008, https://www.mlit.go.jp/river/basic\_info/jigyo\_keikaku/gaiyou/seibi/ pdf/shingugawa66-1.pdf
- 2) 立川康人・須藤純一・椎葉充晴・萬和明・キムスンミン:
   Particle Filterを用いた河川水位の実時間予測手法の開発,水工 学論文集, Vol.55, pp.S511-S516, 2011.2.
- 3) 立川康人・日野貴嗣・キムスンミン・椎葉充晴:2011年熊野 川大洪水の再現計算からみた実時間河川水位予測の精度向上 の課題,河川技術論文集 VOI.19, pp.229-234, 2013.6.
- 4)田中耕司・辻倉裕喜・大八木豊・杉浦正之・森田宏・志鹿浩 幸・井川智博:淀川三川合流区間を対象にした水位予測シス テムの開発,河川技術論文集 VOI.19, pp.229-234, 2013.6.
- 5) 猪股広典・深見和彦:吉野川流域広域洪水危険度判断支援シ ステムの開発,河川技術論文集, Vol.13, pp.433-438, 2007.6.
- 6) 片山徹: 非線形カルマンフィルタ, 朝倉書店, 2011.11.
- 7) 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.44/ No.3, pp.31-48, 1996.
- 8) 辻倉裕喜・田中耕司・杉浦正之: Unscented Kalman Filterを 用いた洪水到達時間の短い流域を対象にした水位予測システ ムの適用,河川技術論文集 Vol.19, pp.253-258, 2013.6.

(2014.4.3受付)