

Unscented Kalman Filterを適用した水位予測 システムの高速化と精度評価

DEVELOPMENT AND ESTIMATION OF ACCURACY OF WATER LEVEL PREDICTION SYSTEM USING THE UNSCENTED KALMAN FILTER

辻倉裕喜¹・宮本賢治²・田中耕司³

Hiroki TSUJIKURA, Kenji MIYAMOTO and Kohji TANAKA

¹正会員 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)

²非会員 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)

³正会員 博(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)

The prediction accuracy of the flood prediction system is better because of many state values is set in the data assimilation method such as the Particle Filter. On the other hand, nonlinear filter theorem such as the Particle Filter, the Ensemble Kalman Filter et al spends much time for calculating and is not the actual. The authors had developed the flood prediction system using the Particle Filter and secured enough accuracy of the water level prediction. So the Unscented Kalman Filter was applied for the flood prediction system of the Yodo River in order to secure the prediction accuracy of the water level under the few state values and to shorten the time that a calculation takes. It was concluded that the unscented Kalman Filter is effective and secure the prediction accuracy of the water level as the method for the Particle Filter.

Key Words : *Unscented Kalman Filter, Particle Filter, Water level prediction, Flood prediction system*

1. はじめに

近年、洪水による浸水被害の頻発化、激甚化が顕著になってきているにもかかわらず、住民の避難や水防活動などを支援する防災体制においては、十分な対応がなされていない場合もある。例えば、平成27年9月鬼怒川の氾濫に伴い多くの住民が避難せずに氾濫の中で孤立し、救助された¹⁾。行政・住民が予測結果を用いて避難判断・行動を迅速にできれば、多くの人たちへの救助活動は軽減できた可能性は否めない。

一方で、これらを支援するための降雨予測、洪水予測(水位予測)の精度を向上することが、直轄河川を中心に鋭意進められてきた。降雨予測の精度向上、流出モデルと1次元不定流モデルによる流量、水位の再現精度の向上、リアルタイムでの観測水位や流量に対するモデルの補正方法(フィードバック手法)、さらに、高精度な観測によるHQ式の設定など、様々な観点から検討が行われ、一定の成果が得られている²⁾。特に、洪水予測システムは、統一河川情報システムとのデータ共有の下で導

入され、リアルタイムでの観測値、予測雨量といった予測に必要なデータが取得できる環境が整備されている。

さらに、洪水予測システムの結果は、統一河川情報システムへ返信し、地方自治体を含めた行政間で共有できる仕組みが構築されている。また、これらの仕組みは、現在10分間隔で情報を更新している。

このような洪水予測結果に要求されている時間的な制約の中で、予測精度の向上のためにParticle Filterのような計算負荷のかかるフィードバック手法の開発が行われてきている。例えば、1次元あるいは2次元不定流による水位予測への応用という観点から、立川等³⁾⁴⁾⁵⁾は、Particle Filterを適用し、流量観測値とフィルタリング後の流量が良く一致していることを示し、河川の状態を推定する方法を提案している。しかしながら、時間的な制約という観点からは、まだ課題が残っている。一方で、著者等⁶⁾は、実用的な観点から上流端流量、下流端流量および残流域流出量を状態変数に設定して、一方で粗度係数を既往出水での平均的な値で固定し、現業の洪水予測システムにParticles Filterを適用している。

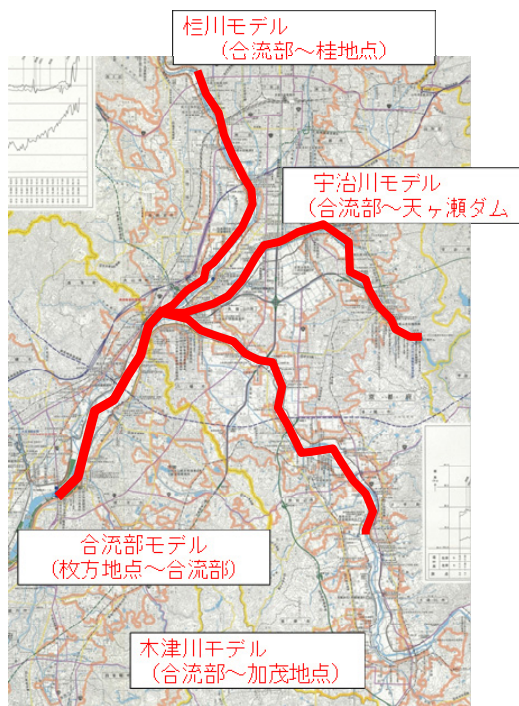


図-1 淀川における水位予測対象区間

本研究では、10分更新での洪水予測結果の配信に対して、Particle Filterの適用は、対象とした淀川流域では難しいため、これに替わる方法として、Unscented Kalman Filter⁷⁾の適用を提案し、その妥当性や計算の高速化の効果を検証する。

2. 対象流域の洪水予測手法

本研究では、既に洪水予測システムが稼働している淀川流域の枚方から三川合流部を経て、桂川、宇治川および木津川の直轄区間を対象にしている。図-1には、対象区間を示している。

この区間の水位予測手法は、図-2に示すように、以下の2つの手順で行われている。

- 1) 分布型流出モデルで流域全体の流出量を実況雨量および予測雨量から算定する。この段階では、図-1に示す直轄区間より上流域の水位観測所での流量ならびに水位を予測する。
- 2) 木津川加茂地点・宇治川榎尾山地点・桂川桂地点を上流端とし、枚方地点を下流端とした1次元不定流モデルで水位を予測する。

なお、手順2)の上流端での流量は、手順1)の分布型流出モデルで計算された各地点の流量を与えている。一方で、下流の水位は、観測水位を入力している。

3. Unscented Kalman Filterの概要

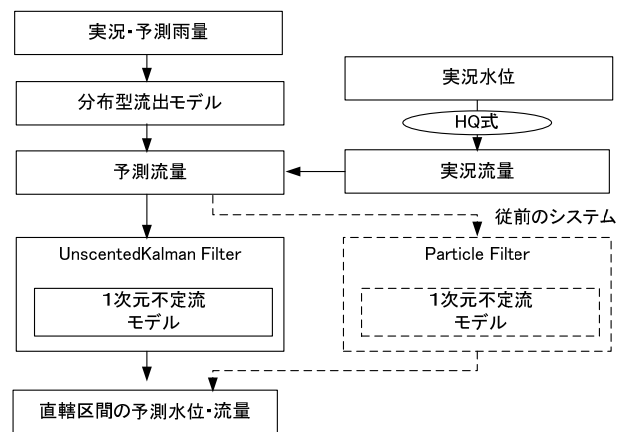


図-2 洪水予測システムのフロー

(1) 検討条件

三川合流部では、洪水期間中に粗度係数、縦断的な水面形が変化するとともに、背水により桂川・宇治川の水位流量特性が洪水毎に異なっている。このため、現行システムでは三川合流部の不定流モデルのフィードバック手法として複数の不確実な変数（粗度係数、残流域からの流出量等）を最適化する粒子フィルタを導入し、30分に予測結果を提供している。しかしながら、10分後に予測結果を配信する必要があるために、Particle Filterでは、これを満足しないこととなる。そこで、このシステムでの予測結果をより早く洪水予警報に繋げるために、Unscented Kalman Filterの適用を試みた。

Unscented Kalman Filterは、Extended Kalman Filterのように予測式の線形化を必要としないかわりに、状態量の事前分布の平均値と誤差共分散から事後分布を近似的に求める方法である。状態量 n 個に対して、 $2n+1$ 個(Sigma points)の予測をすればよく、状態量の期待値をこの範囲内で算定する方法である。一方で、Particle Filterは分布を仮定しないため、 $10^2 \sim 10^3$ 個の粒子毎に不定流計算を実施する必要がある反面、精度向上が期待される。しかし、洪水予測の時間的制約の中では実用的でない可能性があり、Unscented Kalman Filterは、システムの非線形化を保持したまま、少ない計算回数で期待値が算定される。

本検討では、フィードバック地点を枚方地点とし、状態量を桂川上流流量、木津川上流端流量、残流域流量および枚方地点のバイアス流量に係る定数を設定した。

加茂地点、桂地点の流量についてHQ式により換算されたものであり、予測流量は分布型流出モデルで算定されたものである。HQ式については過去の洪水データにより作成されたものであるため誤差が含まれており、同様に予測流量も分布型流出モデルで算定されているため、誤差が含まれているものと考えられる。

したがって、状態量の誤差分散をUnscented Kalman Filterで表現し、フィルタ分布を作成する。これにより、図-3ならびに図-4に示すようなフィードバック手法で枚方地点の水位・流量をフィルタリングする。そ

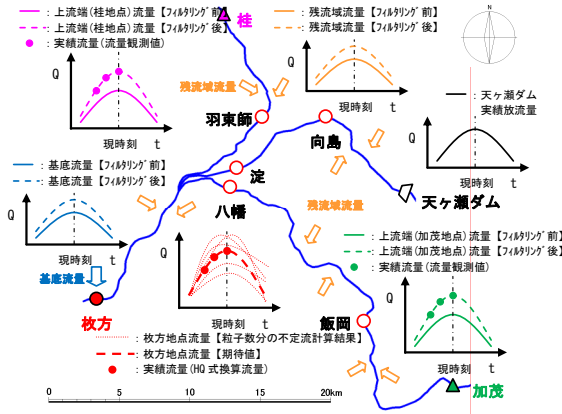


図-3 河道不定流モデルにおけるフィードバック手法の概念図

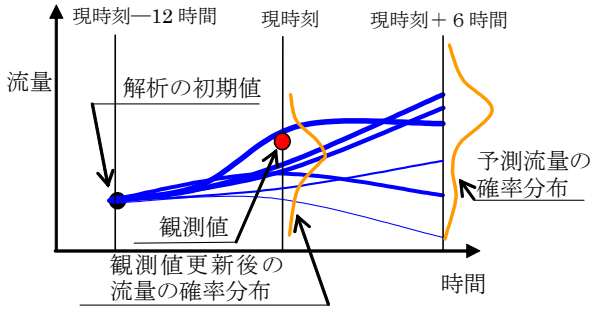


図-4 予測流量の確率分布の算定の概念図

青線は不定流解析結果を示し、線の太さは、観測値更新後の重みの大きさを示している。

の次に、枚方地点の水位を出発し、Sigma Points毎の不定流計算結果から上流観測所地点（高浜、淀、向島、八幡、飯岡、納所、羽束師）の水位の期待値を算定し、現時刻を説明する状態量を推定するものである。なお、本研究では、流量でフィルタリングする枚方地点の他に、八幡、飯岡、納所、淀を対象とした三川合流部の背水の影響を受ける地点の予測水位の精度を検証する。

(2) Unscented Kalman Filterの基礎式

基礎式は、Kalman Filter と同じで、予測式と観測式で表現される。式(1)式は、一期前の状態量から現時刻の状態量を推定するものである。一期前における時間更新後の値を現時刻からみると誤差があることから、予測式にはシステムノイズ w が加わる。同様に、式(2)は、観測推定値と観測値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）

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

②観測値更新ステップ（観測式）

$$y_t = h(x_t) + v \quad (2)$$

不定流モデルの状態量は不定流モデル上流端流量、残流域流量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。時間更新ステップにお

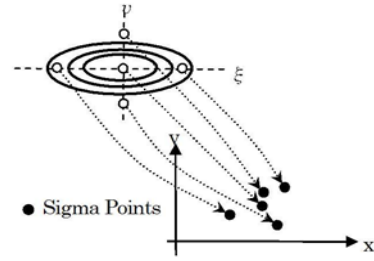


図-5 Unscented Transform の概念図

いて、状態量が変わらない場合は予測式を式(3)と表現する。

$$x_t = x_{t-1} + w \quad (3)$$

また、式(2)中の $h(x_t)$ は、状態量から観測推定値を求めるもので、不定流モデルで解析することを示している。

(3) Unscented Transform

Ensemble Kalman Filter や Particle Filter では、安定的に解を得るためにアンサンブルメンバーや粒子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。この問題を解決するため、U 変換(Unscented Transform : UT)⁸⁾を使用して粒子やメンバー数を減少させたものが Unscented Kalman Filter である。

状態量を $x(t|t) = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{n-1} \ x_n]^T$ とすると、誤差共分散 $P_{xx}(t|t)$ は式(4)、式(5)の平方根行列の 2 乗で表現できる。平方根行列の計算には特異値分解を用いる。

$$P_{xx}(t|t) = \sqrt{P_{xx}(t|t)} \sqrt{P_{xx}(t|t)}^T \quad (4)$$

$$\sqrt{P_{xx}(t|t)} = \begin{bmatrix} \sqrt{p_{1,1}} & \sqrt{p_{1,2}} & \dots & \sqrt{p_{1,n-1}} & \sqrt{p_{1,n}} \\ \sqrt{p_{2,1}} & \sqrt{p_{2,2}} & \dots & \sqrt{p_{2,n-1}} & \sqrt{p_{2,n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \sqrt{p_{n-1,1}} & \sqrt{p_{n-1,2}} & \dots & \sqrt{p_{n-1,n-1}} & \sqrt{p_{n-1,n}} \\ \sqrt{p_{n,1}} & \sqrt{p_{n,2}} & \dots & \sqrt{p_{n,n-1}} & \sqrt{p_{n,n}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

平方根行列から観測推定値を算定するための点 (Sigma Points) を設定する。Sigma Points 数は $2n+1$ 個 (n は状態量の数) で、Sigma Points は式(6)式～(8)式で表現される。Sigma Points は二次元平面上では、図-5 のとおり 5 点となる。値はすべて主成分分析で得た軸上にある。

$$x^{(0)}(t|t) = \hat{x}(t|t), \quad W_0 = \frac{\kappa}{n + \kappa} \quad (6)$$

$$x^{(i)}(t|t) = \hat{x}_k(t|t) + \left(\sqrt{(n + \kappa) P_{xx}^{(i)}(t|t)} \right),$$

$$W_i = \frac{1}{2(n + \kappa)} \quad (7)$$

$$x^{(n+i)}(t|t) = \hat{x}_k(t|t) - \left(\sqrt{(n + \kappa) P_{xx}^{(i)}(t|t)} \right),$$

表-1 適合度指標の評定値

指標		評価範囲	設定根拠
波形誤差	Nash指標	1 0.8以上	立川等、Ragab等の研究を基にレベル1,2を設定
		2 0.7~0.8	
		3 0.7以下	
ピーク水位誤差	水位差 [Δh]	1 0.3m以下	レベル1は立川等の研究を基に設定 レベル2は、レベル1の±20%の誤差として設定
		2 0.3m~0.5m	
		3 0.5m以上	
ピーク水位位相差	ピーク発生 時間のずれ	1 -1.0hr~0hr	洪水予測の利用の観点から実績より位相のずれは不可。レベル1は、1時間前以内の誤差を設定 2時間前以内を許容誤差としてレベル2を設定
		2 -2.0hr~-1.0hr, 0~1.0hr	
		3 -2.0hr以下, 1.0hr以上	

$$W_{n+i} = \frac{1}{2(n+\kappa)} \quad (8)$$

ここに、 $\mathbf{x}^{(i)}$ はSigma Pointsにおける状態量 $((2n+1) \cdot n$ の行列)、 $\hat{\mathbf{x}}$ は状態量の期待値 $(1 \times n$ の行列)、 $\sqrt{P_{xx}^{(i)}(t|t)}$ は誤差共分散の平方根 $(1 \times n$ の行列で、式(5)の i 列)、 $\mathbf{W}^{(i)}$ はSigma Pointsにおける重み、 κ はチューニングパラメータで、ガウス分布の場合は $n+\kappa=3$ が良いとされている⁷⁾。

(4) アルゴリズム

Unscented Kalman Filterの計算手順^{7) 9)}は、以下の①～⑤の通りである。状態量の期待値と誤差共分散が対となり、時間更新と観測値更新を繰り返しながら逐次計算を行う。

- ①状態量の期待値の時間更新
- ②状態量の誤差共分散の時間更新
- ③観測値を取得して Kalman Gain を算定
- ④状態量の期待値の観測値更新
- ⑤状態量の誤差共分散の観測値更新

4. 精度評価と高速化

(1) 評価指標

実績降雨を分布型流出モデルに入力し、時刻毎に各河川の上流端流量を予測した結果を用いて、Unscented Kalman Filter の精度を表-1に示す指標¹⁰⁾で評価した。なお、表-1に示す指標の評定値を立川等¹¹⁾、Ragab、R¹²⁾等の研究を下に設定した。

(2) 対象洪水での現時刻時点の再現性

対象洪水としては、平成25年9月台風18号の出水、平成26年8月台風11号とした。これらは、近年まれに見る大きな出水であり、特に平成25年9月台風18号は、初めての特別警報が発令され、桂川では観測史上最高水位を記録した¹³⁾。

Unscented Kalman Filterを用いた過去（一期前）から現在時点での観測値を説明しうる状態量を推定した

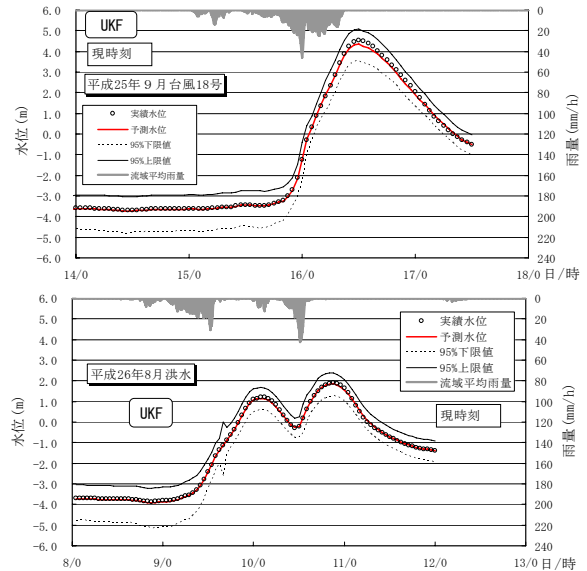


図-6 枚方地点での現時刻までの水位予測結果

(フィードバック後) 予測水位流量と観測値の差を比較する。これらの洪水での枚方地点の実績水位とUnscented Kalman Filterでのフィードバックの結果を図-6に示す。この計算におけるシステムノイズ、観測ノイズの与え方は、 $N(1,0.05)$ の正規分布を与えている。これによれば、フィードバック後の枚方地点観測水位と現時刻までの予測結果は、ほぼ一致しており、Unscented Kalman Filterを用いても安定したフィードバック結果を得られることがわかった。

(3) 1・3および6時間先の予測計算の再現性

現時刻までの予測、すなわち、フィードバック後における予測計算の条件としては、実績雨量を予測雨量と見立てた分布型流出モデルから算定した加茂地点、桂地点および榎尾山地点の流量と枚方の流量を上下流端に与えた。この条件から、枚方、八幡、淀、納所地点での各時間の予測計算を行い、当該時刻の1, 3および6時間前に予測した流量、水位と実績を比較した。その結果を図-7および図-8に示す。これらの精度評価結果を表-2に示す。なお、後述するParticle Filterの精度評価についても併記している。

これによれば、1,3および6時間先の予測結果は、概ね再現できているものと判断できる。特に、Nash値については、どの地点も0.8以上の数値となっている。一方で、ピーク水位の水位差や、生起時間のずれについては、6時間先での精度は現時刻の直近1時間先に比べて、低下している。これは、上流端で与えている流出量の精度が、水位予測結果に影響を与えていることを示している。

一方で、Unscented Kalman Filterと同じ誤差分布を与えたParticle Filter⁹⁾の結果を図-9および図-10に示す。さらに、木津川の飯岡地点（八幡より上流）および桂川の羽束師地点（納所より上流）も加えた指標による評価を表-2に示す。このParticle Filterの結果は、現業システムに

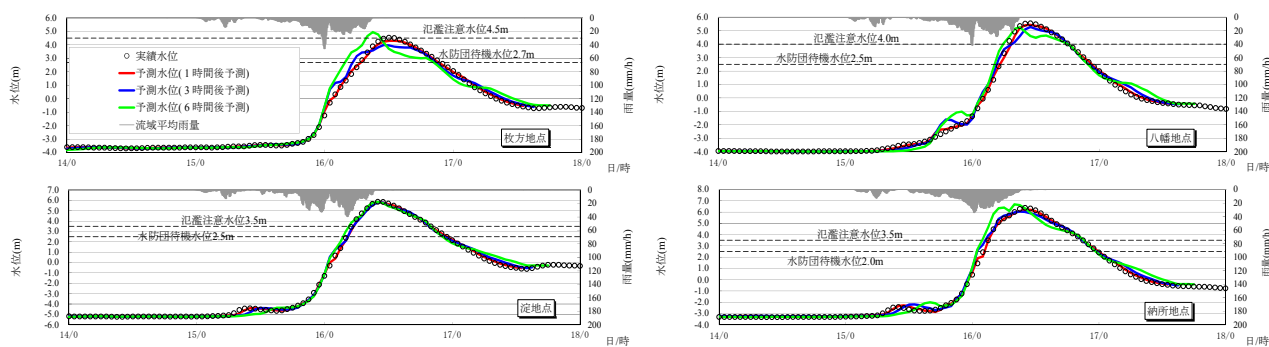


図-7 平成25年9月台風18号における1・3および6時間先の予測結果と実績水位との比較（本川；枚方，木津川；八幡，桂；納所，宇治川；淀）

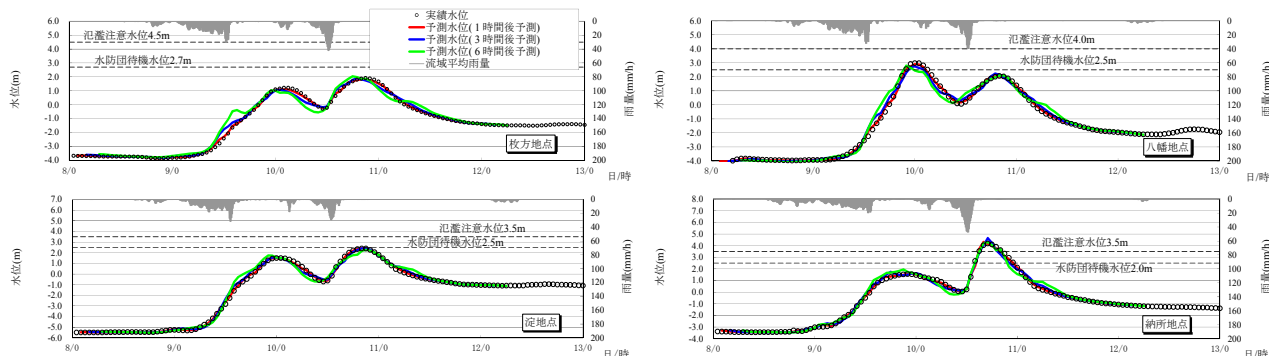


図-8 平成26年8月台風11号における1・3および6時間先の予測結果と実績水位との比較（本川；枚方，木津川；八幡，桂；納所，宇治川；淀）

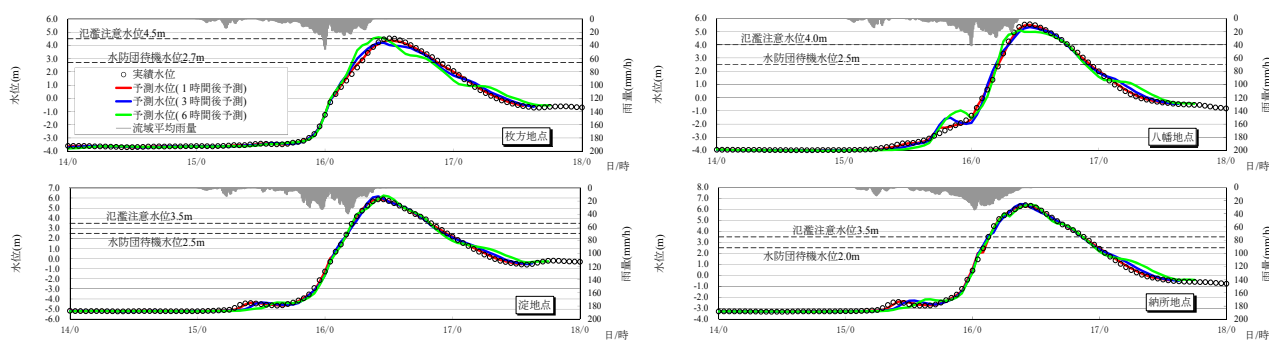


図-9 平成25年9月台風18号におけるParticle Filterによる1・3および6時間先の予測結果と実績水位との比較（本川；枚方，木津川；八幡，桂；納所，宇治川；淀）

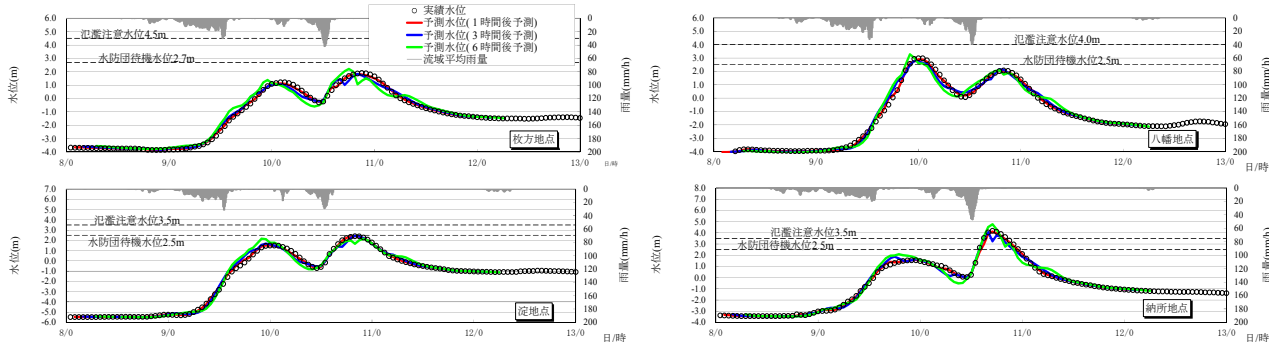


図-10 平成26年8月台風11号におけるParticle Filterによる1・3および6時間先の予測結果と実績水位との比較（本川；枚方，木津川；八幡，桂；納所，宇治川；淀）

組み込まれているものである。システムノイズ，観測ノイズの与え方は，Unscented Kalman Filterと同一のものである。これらの比較から，粒子数が100の状態量を有するParticle Filterの計算結果は，その多様性から，予測精度がUnscented Kalman Filterのそれよりも若干良くなる傾向

がある。予測精度から見れば，Particle Filterよりも若干劣るものの，その差はわずかなものであり，実用的な観点から見れば，Unscented Kalman Filterは，Particle Filterとほぼ同様の精度を有しており，予測業務における結果の信頼性を損なうものではないことが理解される。

表-2 フィルタイリング手法による洪水予測の精度評価

フィルタリング手法		Unscented Kalman Filter						Particle Filter					
洪水	項目	枚方	八幡	飯岡	納所	羽東師	淀	枚方	八幡	飯岡	納所	羽東師	淀
	基準水位	はん瀬危険水位	5.5	-	-	-	-	5.5	-	-	-	-	-
		避難判断水位	5.4	-	-	-	-	5.4	-	-	-	-	-
		はん瀬注意水位	4.5	4.0	3.5	3.5	-	4.5	4.0	3.5	3.5	-	3.5
		水防団待機水位	2.7	2.5	2.0	2.0	-	2.7	2.5	2.0	2.0	-	2.5
平成25年9月台風18号	NASH値	1時間先	0.999	0.999	0.998	0.999	0.996	0.999	0.999	0.998	0.999	0.999	1.000
		3時間先	0.992	0.994	0.994	0.994	0.994	0.997	0.995	0.994	0.992	0.997	0.994
		6時間先	0.970	0.985	0.990	0.983	0.993	0.995	0.984	0.988	0.985	0.993	0.995
	ピーク水位誤差	1時間先	-0.229	-0.112	-0.099	-0.171	-0.019	-0.054	-0.167	-0.051	0.411	-0.090	0.104
		3時間先	-0.541	-0.274	-0.235	-0.332	0.065	-0.060	-0.327	-0.210	0.649	0.099	0.383
		6時間先	0.418	-0.294	-0.327	0.308	0.423	-0.025	0.081	-0.434	0.360	0.079	0.393
	ピーク生起位相差	1時間先	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		3時間先	-1	0	1	-1	-1	0	-2	0	1	-1	0
		6時間先	-3	-2	-1	-2	0	0	-2	-2	-1	1	2
	NASH値	1時間先	0.995	0.998	0.997	0.992	0.976	0.993	0.999	0.998	0.999	0.998	0.997
		3時間先	0.961	0.987	0.987	0.972	0.955	0.952	0.989	0.990	0.995	0.989	0.986
		6時間先	0.889	0.967	0.974	0.935	0.920	0.870	0.966	0.977	0.988	0.974	0.974
平成26年8月台風11号	ピーク水位誤差	1時間先	0.089	-0.001	0.022	0.003	-0.007	0.115	-0.093	-0.077	0.056	-0.071	-0.072
		3時間先	0.340	-0.011	0.040	0.567	0.524	0.427	-0.077	-0.207	0.143	-0.104	-0.543
		6時間先	0.550	-0.024	0.039	0.901	0.781	0.747	0.308	0.293	0.020	0.580	-0.662
	ピーク生起位相差	1時間先	-1	1	0	1	1	0	-1	0	-1	0	0
		3時間先	0	0	1	-2	-2	-1	-1	-1	0	-1	0
		6時間先	1	2	4	1	1	2	-3	-2	1	0	-22

※表中の着色は、表-1の精度評価のレベルに対応したものととなっている。

況等について、平成 27 年 9 月 15 日

(4) 計算速度の比較

今回の検証から、現業の洪水予測システムに組み込まれているParticle Filter⁶⁾を用いた場合、100個の粒子による不定流計算が必要になるが、Unscented Kalman Filterでは、9回の不定流計算でほぼ同様の結果を得られる。これは、1/10の時間で計算可能であり、かつ予測結果を従前に比べ早くシステムで提示することができ、Unscented Kalman Filterを組み込んだ水位予測手法は有効な方法であることが期待できることがわかった。一方で、Particle Filterとほぼ同じような精度であれば、時間的な制約から、Unscented Kalman Filterの実用性を図れたと考えられる。ここで、システム全体で、データの取得から、流出計算を経て、水位予測の結果を算定するまでの時間を計測すると、Unscented Kalman Filterでは、約8～9分（フィードバック部分で2分弱）で結果が表示され、Particle Filterでは、約25分（フィードバック部分で19分）を要する。相対的には約10倍近く早くなり、システム全体では、約1/3程度の時間で計算が可能となった。なお、計算に用いたPCのCPUは、Intel® Core™ i7-4790 CPU 3.60GHz、実装メモリは4GBである。

5. おわりに

本研究では、実用的な観点から、水位予測部分の計算負荷を拭えないParticle Filterに替わるUnscented Kalman Filterを用いた場合のフィードバック時の精度、現時刻以後の予測結果の精度を評価した。その結果、精度はParticle Filterに比べて若干劣るものの、実用的な観点からはほぼ同等の精度を確保できることがわかった。また、予測結果から洪水予警報を判断、発令することが短時間で可能となり、洪水予測の時間的制約から見ても、今後期待ができる手法であると考えられる。

参考文献

1) 内閣府: 平成 27 年台風第 18 号による大雨等に係る被害状

- 2) 椿涼太・小林健一郎・内藤正彦・谷口丞:洪水予測技術の現状と課題について、河川技術論文集、第19巻、pp.1-6, 2013.
- 3) 立川康人・須藤純一・椎葉充晴・萬和明・キムスンミン:粒子フィルタ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、第55巻、pp.S511-S516, 2011.
- 4) 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への課題、河川技術論文集、第19巻、pp.229-234, 2013.
- 5) キムヨンス・立川康人・萬和明・キムスンミン:粒子フィルタと洪水追跡モデルを用いた水位流量曲線の作成および補正手法の開発、河川技術論文集、第20巻、pp.361-366, 2014.
- 6) 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:淀川三川合流部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、第19巻、pp.241-246, 2013.
- 7) 片山徹:非線形カルマンフィルタ、pp.103-109, 2011.
- 8) S.J. Julier and J.K. Uhlmann : A New Extension of the Kalman Filter to Nonlinear Systems, *Proc.SPIE, Signal Processing Sensor Fusion and Target Recognition IV*, pp.182-193, 1997.
- 9) 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が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、第19巻、pp.253-258, 2013.
- 10) Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V.: River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, pp.282- 290., 1970.
- 11) 立川康人・田窪寮一・佐山敬洋・寶馨: 平成16年福井豪雨における洪水流量の推定と中小河川流域の治水計画に関する考察、京都大学防災研究所年報、48B, pp.1-13, 2005.
- 12) Ragab, R., Moidinis, D., Albergel, J., Khouri, J., Drubi, A. and Nasri, S. (2001) : The HYDROMED model and its application to semi-arid Mediterranean catchments with hill reservoirs 2 : Rainfall-runoff model applications to three Mediterranean hill reservoirs. *Hydrology and Earth System Sciences*, 544- 562.
- 13) 国土交通省近畿地方整備局河川部:平成25年9月台風18号洪水の概要、2014.

(2016. 4. 4受付)