

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

DEVELOPMENT OF FLOOD FORECASTING SYSTEM APPLIED DATA
ASSIMILATION TECHNIQUE TO THE OBSERVATION WATER LEVEL IN THE
REACH INCLUDING THE JUNCTION OF RIVER YODO

田中耕司¹・辻倉裕喜¹・大八木豊²・杉浦正之³・森田宏⁴・志鹿浩幸⁴・井川智博⁴
Kohji TANAKA, Hiroki TSUJIKURA, Yutaka OYOYAGI, Masayuki SUGIURA, Hiroshi MORITA,
Hiroyuki SIGA and Tomohiro IGAWA

¹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)

²正会員 博(工) (株)建設技術研究所大阪本社 (同 上)

³正会員 (株)建設技術研究所大阪本社 (同 上)

⁴正会員 国土交通省近畿地方整備局淀川ダム統合管理事務所 (〒573-0166 大阪府枚方市山田池北町10番1号)

This study is to build the flood forecasting system comprised of a distributed runoff model and a one dimensional hydrodynamic model for the whole Yodogawa water system using the data assimilation technique for the real-time observation water level by the particle filter. We built data assimilation technique to let observation water level perform a fitting of the forecast of one dimensional hydrodynamic model and inspected the compatibility with the results flood in the model. Results of having judged prediction data with Nash values and RMSE show extremely precise.

Key Words : data assimilation, flood forecasting system, reach of junction, particle filter

1. はじめに

従来から観測されている地点雨量, 水位観測の他, 近年進展してきたレーダ雨量を用いることによって, 台風, 集中豪雨によって発生する洪水を予測することが容易になってきた。さらに, 降雨～流出量への変換は, 非線形性を考慮できる貯留関数法といった集中型モデルを用いられてきたが, 最近では分布型流出モデルを用いた洪水予測モデルが構築されている。この理由として, レーダ雨量の時空間分布が直接的に入力条件になり, 流域内のきめ細かい流量分布が把握できることにある。また, 水位流量特性(以下HQと略す)から推定・予測流量を水位に変換し, 水位観測所の基準水位に対する水位の変化を把握できるようになっている。

洪水予測システムに関する総合的な研究として, 淀川を対象にした事例がある。立川等³⁾は, 淀川水系全体に物理水文モデルを用いた実時間流出予測システムを開発し公開している。

一方で, 洪水予測を実施するにあたり, 次の2つの課題が依然存在し, 予測結果の精度を左右している。

①モデル・パラメータの最適化

②リアルタイムの流量・水位を同化する方法

①については, 過去経験した洪水データに基づくモデルのパラメータを, 経験的¹⁾にあるいは遺伝的アルゴリズム²⁾などの数理工学的な手法から最適値を求めるなどの工夫が行われている。このような方法で算定されたパラメータ等は, HQ式や降雨量の精度により影響を受けるが, 洪水を増やすことでその精度を高めているものと考えられる。一方で, ②については, 一般に, 観測水位に推定水位をフィッティングするために, 観測水位に合うようにモデルのパラメータを調整するフィードバックが適用されている。

このフィードバック手法については, 従来から経験的な方法¹⁾, 非線形フィルタリング手法⁴⁾⁵⁾が用いられ, 流域の特性やシステムの規模などを勘案し適用されてきた。例えば, 立川等⁶⁾は, 淀川水系桂川の流況の再現に一次元不定流モデルを用い, 現時刻時点に対する計算水位を観測水位に同化させるために, Particle Filterを適用している。具体的には, 粗度係数と河道の断面形状を状態量として, モデル区間全体の水位をフィルタリングしている。なお, 予測分布を作成するために状態量の確率分布

の他に、上流端に与える流量にかかる係数に確率分布を与えている。

本研究は、淀川三川合流区間の複雑な流況に対して一次元不定流モデルを用いて、Particle Filterを用いて枚方地点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目的としたものである。水理解析手法と同化手法は立川等と同じであるが、本研究で構築したモデルはリアルタイムの予測に与えられた時間で演算することを条件に、基準点の枚方地点の予測精度の向上を重視したものである。このため、状態量を上流端に与える流量と残流域流出量等にかかる係数とし、状態量の数をできるだけ少なくした手法を提案するものである。

2. 淀川水系洪水予測モデルの概要

(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。本研究では、猪俣等⁷⁾が適用したモデルを参考に構築したものである。

(2) 洪水予測システムの構築

淀川水系の洪水予測システムは、木津川・桂川・宇治川の上流部で分布型流出モデルを適用して、水位観測所毎に水位予測を行っている。さらに、図-1に示す模式図のように、下流の三川合流部前後の区間においては、分布型流出モデルの流出量を上流端条件、枚方地点のHQ式から算定した水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ものである。

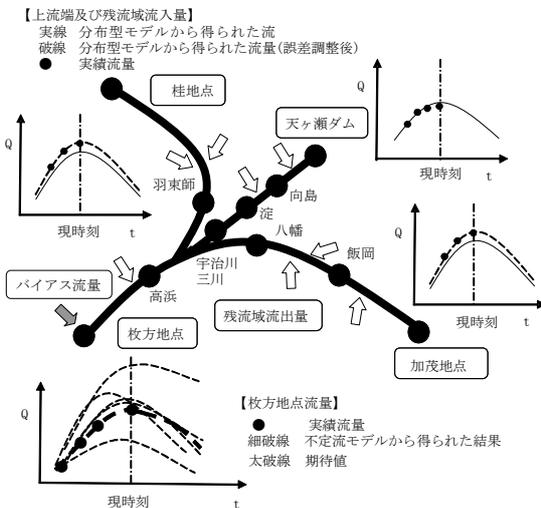


図-1 淀川一次元不定流モデルの概要

本研究では、状態量を加茂地点、桂地点、残流域にかかる係数とした。また、枚方地点における流量のフィルタリングでは、HQ式の変化が無視できないと判断し、枚方地点の流量を調整するバイアス流量を設定し、バイアス流量はおおむね $300\text{m}^3/\text{s}$ と判断し、これにかかる係数も状態量とした。

3. Particle Filterの適用

(1) 時間更新、観測値更新ステップ

y_t を現時刻における観測値で観測値の状態量行列(枚方地点流量) $Y_t = (y_t, y_{t-1}, \dots, y_2, y_1)$ を考え、状態量は(1)式とする。時間更新ステップにおける(2)式は、一期前の現時刻における最適な状態量から現時刻の状態量を推定したときの確率分布の変化を示したものである。観測値更新ステップにおける(3)式は観測値による状態量の確率分布の変化を示したものである。この式はベイズの定理そのもので、時間更新した分布を事前分布、 $p(y_t | g(x_t))$ を尤度とみなすと、 $p(x_t | Y_t)$ が事後分布になる。

ここで、 $p(x_t | x_{t-1})$ は時間更新による状態量の確率分布の変化を示しているが、本システムでは、流量にかかる係数を状態量としているので、 $p(x_t | x_{t-1})$ は一様分布 $U(-\infty, +\infty)$ となる。以下に状態量を(1)式、時間更新ステップを(2)式および観測値更新ステップを(3)式のように表す。

$$x_t = |x_1(t) \quad x_2(t) \quad x_3(t) \quad x_4(t)| \quad (1)$$

$$p(x_t | Y_{t-1}) = \int p(x_t | x_{t-1}) p(x_{t-1} | Y_{t-1}) dx_{t-1} \quad (2)$$

$$p(x_t | Y_t) = \frac{p(y_t | g(x_t)) p(x_t | Y_{t-1})}{p(y_t | Y_{t-1})} \quad (3)$$

ただし $p(y_t | Y_{t-1}) = \int p(y_t | x_t) p(x_t | Y_{t-1}) dx_t$ であり、定数で両辺が等しくなるように調整する定数である。また、 $g(x_t)$ は不定流モデルによる解析水位または流量であることを示している。

Particle Filterの時間更新ステップにおける(2)式、更新ステップにおける(3)式をディラックのデルタ関数 $\delta(x)$ を使用して表現し、 $p(x_t | x_{t-1})$ が一様分布であることを考慮すると以下に示す(4)および(5)式になる。これが本研究で使用するParticle Filterの基礎式である。(4)式はすべての粒子の重みが同じことを示しており、(5)式は、観測値により重みが増加することを示している。

$$p(x_t | Y_{t-1}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta(x_{t-1} - x_{t-1}^{(i)}) \quad (4)$$

$$p(x_t | Y_t) = \frac{p(y_t | g(x_t)) \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta(x_t - x_t^{(i)})}{p(y_t | Y_{t-1})} \quad (5)$$

ここに、 n は粒子の個数である。

(2) リサンプリング

観測値更新ステップでは尤度により粒子の重みが変化しているため、次の時間更新ステップを行うためには、確率分布を変えないで粒子の重みを同じにする必要がある。この作業をリサンプリングという。

リサンプリングには重みの大きい順に抽出する方法（重み順方式）と重み付きランダムサンプリングがある。重み順方式は、粒子の中から重みの最大値を抽出する等の計算が必要になり、重み付きランダムサンプリングより時間がかかる。しかし、重み順方式は重みの小さい粒子が選択される確率が低いため、粒子数が少ない場合でも解が安定する傾向にあるのでこれを採用した。具体的には、図-2のように、粒子の重みを高さで表し、棒の高い順にサンプリングする方法を採用した。

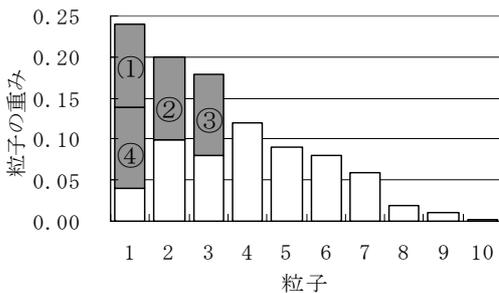


図-2 重み順方式の概念図

(3) システムノイズの追加

リサンプリング後の粒子には同じ値のものが存在する。このため、状態量の確率分布を変化させずに、粒子の値を変化させることが望ましい。さらに、状態量の確率分布にノイズを加えないと粒子が退化してしまい、観測値が急激に変動したときに、最適解が得られないことが起きる。そこで、これらの状況を避けるために時間更新ステップにおいては、システムノイズを加えることとした。

4. 流量および水位の予測方法

(1) 枚方地点の流量の予測方法

試算の結果、Particle Filterの観測誤差とシステム誤差を示す尤度を設定した。尤度は不定流解析で得られた観測推定値と観測値差とで表現し(6)式を用いた。枚方地点の流量の観測誤差 σ_y をHQ換算流量の10%とし、システムノイズを0.05とした。

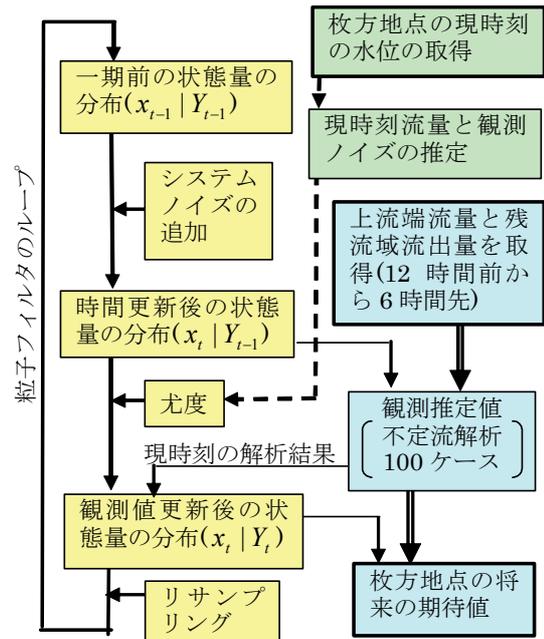


図-3 粒子フィルタと不定流解析の手順

$$p(y_t | g(x_t)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left\{-\frac{1}{2} \frac{(y_t - g(x_t))^2}{\sigma_y^2}\right\} \quad (6)$$

枚方地点の水位と流量の予測は図-3に示す手順で解析を実施した。図-3に示す左側の手順は、状態量を最適な状態に保つフィルタリングである。最初は一期前の状態量から時間更新を行う時間更新ステップで、状態量は一期前とほとんど同じと仮定し、システムノイズのみを追加するものである。次に、観測値から尤度を算定し、尤度により状態量を最適な分布に変換する観測値更新ステップを行い、粒子の重みを同じにするリサンプリングを行う。

これと並行して、右側の手順は不定流解析の流れを示している。分布型流出モデルから、上流端及び残流域の流量を取得し、時間更新後の状態量の分布から、水位及び流量の分布を算定する。次に観測値更新後の状態量の分布から、将来の期待値を推定する。

図-4は枚方地点の流量の解析結果と確率分布を示した

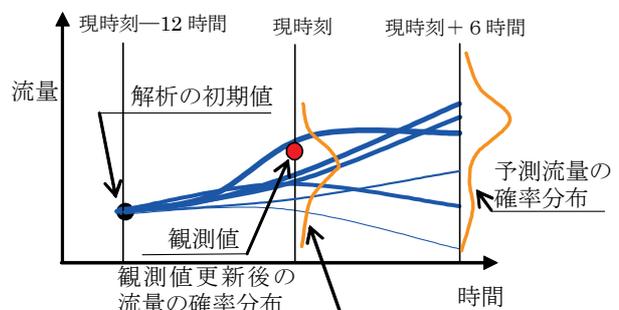


図-4 予測流量の確率分布の算定の概念図

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。

ものである。不定流解析は現時刻から遡った12時間前から開始する。これは、現時刻までの水位および流量の誤差は、洪水到達時間前における上流端流量の誤差が大きな要因であると想定した。

現時刻においては、H-Q換算流量から推定した尤度を用いて、観測更新後の流量の確率分布を推定する。また、将来における期待値は、現時刻の状態量が継続するものとして推定する。将来においては、状態量は変化しないが、不定流解析による予測流量の確率分布が変化することになる。

(2) 枚方地点上流の水位の予測方法

枚方地点の予測を重視した結果モデルであるが、不定流解析結果は、枚方地点上流の水位の予測においても有効な情報であることがわかった。このため、不定流解析結果を用い、上流の水位観測値に適合する結果を推定するために、再度重みを解析し、加重平均により水位を予測した。水位観測値と解析結果の重みは(7)式を採用した。水位の観測誤差は0.5m、誤差の相互相関係数を0.3と設定した。

$$f(X_C - X_O, \Sigma) =$$

$$\frac{1}{(\sqrt{2\pi})^m |\Sigma|^{m/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2} (X_C - X_O) \Sigma^{-1} (X_C - X_O)^T\right\} \quad (7)$$

ここに X_O は観測値の行列、 X_C は解析水位の行列、 Σ は誤差共分散行列、 m は水位観測値の個数である。

図-5は、上流の水位観測所の水位の推定するための方法を示している。枚方地点の流量のフィルタリングに用いて不定流解析の水位分布を用い、観測値から得られた重みにより、期待値を推定する方法とした。

さらに、現時刻の解析値が確率分布の期待値となるため、現時刻水位と観測水位に若干の差が生じる。そこで、この差を解消するために、期待値を現時刻の観測値にスライドさせることとした。

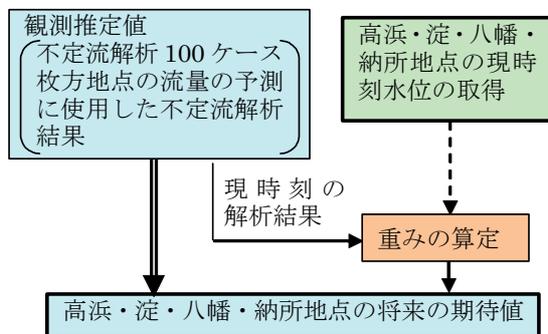


図-5 上流水位の予測手順

5. 実績洪水の解析

(1) 現時刻におけるフィルタリング

分布型流出モデルから算定した加茂、桂地点の流量と実績の天ヶ瀬ダム放流量を上流端の条件とし、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。対象洪水は、近年の洪水で平成21年10月8日洪水、平成23年9月2日～5日洪水および平成23年9月20日～23日洪水である。平成21年10月8日洪水は、木津川の流出が卓越し他の河川では目立った流出量はない洪水であり、残り二洪水は三河川とも目立った流出量がある。

図-6は、平成23年9月2日～5日洪水における解析結果を示している。上図は上流端流入量と残流域流出量合計のハイドログラフを示している。洪水は木津川流域から始まり、洪水の初期はほとんどが木津川流域からのものであることがわかる。その後に残流域からの流入量、天ヶ瀬ダムの放流量が増加し、最後に桂川で流量が増加している。このように時刻により流量の構成比が変化するため、三川合流部分は複雑な流況になっていることがわかる。

現時刻でのフィルタリングの結果には、流量の確率分布がわかるように流量の期待値と95%信頼区間のハイド

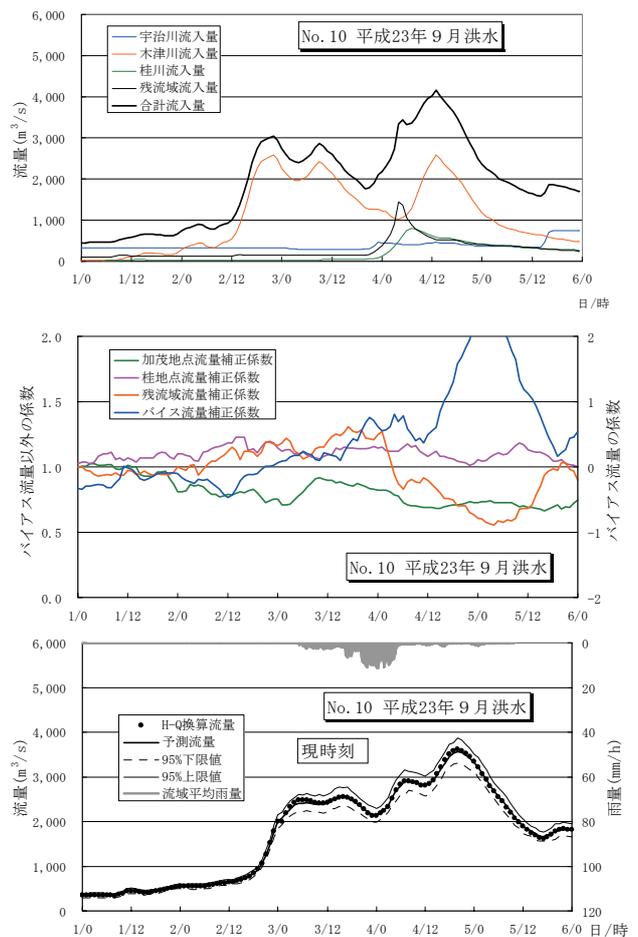


図-6 平成23年9月2日洪水におけるフィルタリング結果

ロググラフを示している。また、状態量の変化がわかるように、流量の補正係数の時間変化を示している。補正係数は、実績流量と適合するように時間的に変化していることがわかる。枚方地点のバイアス流量の補正係数については、ハイドログラフの立ち上がりからピークにかけて約二倍の変化を示している。これは、洪水後期の背水の影響によりHQ式が変化している可能性が高く、その変化量が補正されていることを示している。

(2) 現時刻からの予測水位の解析結果

現時刻におけるフィルタリング結果は、いずれの洪水においても、適合性は高いことがわかったので、この時点から将来の予測水位の結果を算出した。表-1には、実績洪水の水位と、現時刻、3時間先、6時間先の予測水位

との差を、二乗平均誤差、Nash値を指標として評価した結果を示している。また、図-7には平成21年10月8日洪水、図-8には平成23年9月2日～5日洪水、図-9には平成23年9月20日～23日洪水における枚方・八幡・飯岡・淀・納所地点の実績水位に対して12時間先までの予測結果をひげ(図中の赤線)で表示したものである。

平成21年10月洪水における枚方地点の適合性については、他の二洪水に比べて、精度の低い結果となっている。これは、木津川の八幡地点における立ち上がり部分の予測が枚方に伝搬したものである。この地点は、低水路幅が広く、水深が浅くなる区間に位置しており、この地点を含む区間における不定流解析の安定性を優先させたためである。その結果、貯留効果を正確に解析できていないという課題が残されたものと考えられる。今後、今回

表-1 予測水位の二乗平均誤差とNash値による適合性の評価

地点	平成21年9月洪水			平成23年9月洪水			台風12号	平成23年9月洪水			台風15号	
	現時刻	3時間先	6時間先	現時刻	3時間先	6時間先	現時刻	3時間先	6時間先	現時刻	3時間先	6時間先
枚方	0.458	0.509	0.853	0.201	0.116	0.192	0.171	0.137	0.242			
高浜	0.353	0.456	0.721	0.289	0.132	0.219	0.173	0.111	0.193			
宇治川三川	0.367	0.501	0.813	0.254	0.139	0.223	0.089	0.111	0.181			
淀	0.233	0.433	0.674	0.274	0.140	0.221	0.284	0.100	0.155			
向島	0.148	0.290	0.434	0.387	0.191	0.285	0.593	0.095	0.159			
八幡	0.714	0.609	0.936	0.251	0.188	0.303	0.157	0.184	0.283			
飯岡	0.596	0.348	0.532	0.138	0.105	0.150	0.271	0.115	0.150			
納所	0.260	0.429	0.620	0.331	0.201	0.292	0.134	0.185	0.266			
羽東部	データ無し			0.196	0.196	0.269	0.163	0.134	0.220			
平均	0.391	0.447	0.698	0.258	0.156	0.239	0.226	0.130	0.206			

地点	平成21年9月洪水			平成23年9月洪水			台風12号	平成23年9月洪水			台風15号	
	現時刻	3時間先	6時間先	現時刻	3時間先	6時間先	現時刻	3時間先	6時間先	現時刻	3時間先	6時間先
枚方	0.862	0.830	0.523	0.980	0.993	0.982	0.970	0.981	0.940			
高浜	0.940	0.899	0.748	0.966	0.993	0.980	0.973	0.989	0.967			
宇治川三川	0.945	0.897	0.729	0.976	0.993	0.982	0.994	0.991	0.976			
淀	0.974	0.910	0.781	0.969	0.992	0.980	0.928	0.991	0.978			
向島	0.979	0.921	0.808	0.898	0.975	0.943	0.367	0.984	0.954			
八幡	0.832	0.878	0.712	0.977	0.987	0.966	0.987	0.982	0.958			
飯岡	0.810	0.935	0.848	0.991	0.995	0.990	0.965	0.994	0.989			
納所	0.876	0.664	0.299	0.951	0.982	0.962	0.985	0.972	0.942			
羽東部	データ無し			0.983	0.984	0.969	0.983	0.989	0.970			
平均	0.902	0.867	0.681	0.965	0.988	0.973	0.906	0.986	0.964			

水位誤差 ±0.3m以内

Nash値: 0.8以上

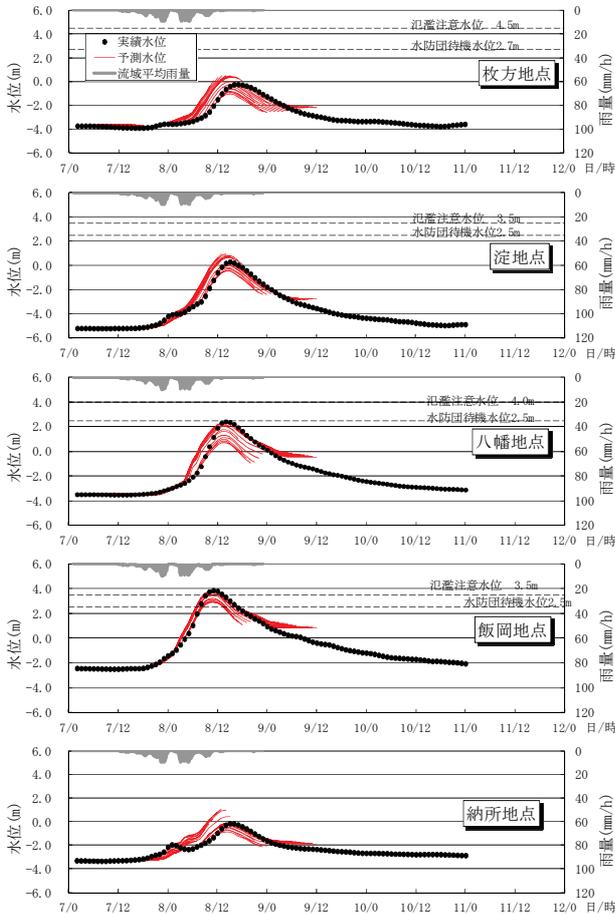


図-7 現時刻水位からの予測水位の変化(H21.9洪水)

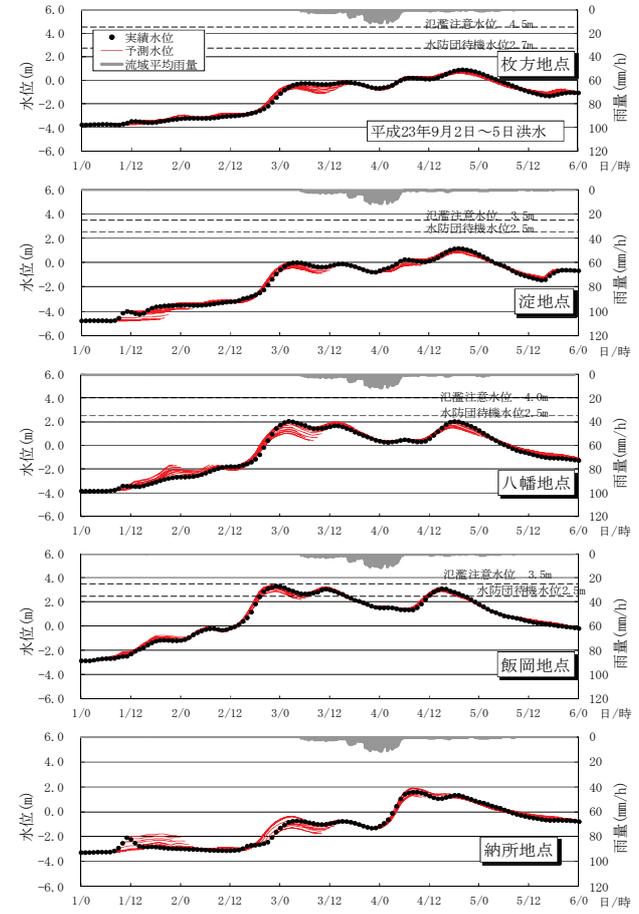


図-8 現時刻水位からの予測水位の変化(H23.9.2洪水)

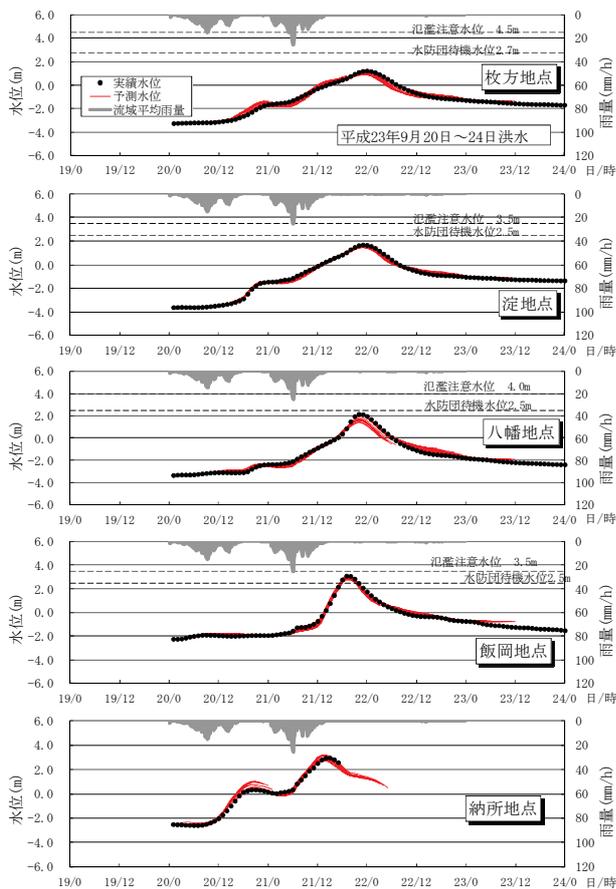


図-9 現時刻水位からの予測水位の変化(H23.9.20洪水)

対象にした洪水よりも大きな洪水における貯留効果と、不定流解析の安定性を確保する課題を解消する必要があると考えている。

一方で、平成23年の二洪水においては、表-1に示すように各地点の基準水位に比べれば、大きな洪水とは言えないものの、十分な精度の予測結果を得ている。平成23年9月2日～5日洪水では、6時間先の予測水位の二乗誤差が30cm前後であり、平成23年9月20日～23日洪水では、30cm以内に抑えられている。数時間先までの精度として、この程度の誤差は、十分な精度を有しているものと判断した。また、波形の適合性を評価する指標として、6時間先までの波形に対するNash値で見ても、ほとんどの地点で90%以上となっている。

以上の結果から、淀川下流域の三川合流前後の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。さらに、状態量として流量の補正係数を採用し、現時刻から将来の予測結果から、洪水予測を目的として採用した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、非線形フィルリング手法のうち最近注目されているParticle Filterを淀川水系における三川合流部前後の複雑な流況に対して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。

- 分布型流出予測モデルによる上流域の流出量を予測するシステムに、下流部の背水区間、流出特性の違いによる水位の解析に不定流モデルを適用した。その結果、粗度係数といった不定流モデルに関するパラメータを状態量に使用しなくても、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。
- 予測結果を評価する定量的な指標で比較し、概ね30cm程度の誤差に入っていることから、今後の防災活動、水防活動に資する情報提供が期待できるものと考えられる。
- Particle Filterを用いた予測解析においては、粒子の確率密度から期待値を算出することができる。そのため、今後の水位予測の表示や提供に際し、基準水位の超過確率等を表示することにより、避難判断・行動や水防活動などに有効に機能する情報提供内容になるもの期待できる。

謝辞：本検討に際し、京都大学大学院 立川先生からParticle Filterの適用や洪水予測に関する御意見・御助言頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 田中耕司・杉浦正之：歴史的風致地区の浸水被害軽減を支援する洪水予測システムの精度向上，歴史都市防災論文集 Vol. 6, 2012.7
- 2) 田中丸治哉：遺伝的アルゴリズムによるタンクモデル定数の同定，京都大学防災研究所年報 Vol.36-B, pp.231-239, 1993.4
- 3) 立川康人・佐山敬洋・寶馨・松浦秀起・山崎友也・山路昭彦・道広有里：広域分布型物理水文モデルを用いた実時間流出予測システムの開発と淀川流域への適用，自然災害科学 26-2, pp.289-201, 2007.
- 4) 例えば、片山徹：非線形カルマンフィルタ，朝倉書店，2011.11
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.

(2013.4.4受付)