

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

DEVELOPMENT OF A METHOD TO GENERATE AND UPDATE RATING CURVE USING PARTICLE FILTERS AND A FLOOD ROUTING MODEL

キム ヨンス¹・立川 康人²・萬 和明³・キム スンミン⁴
Yeonsu KIM, Yasuto TACHIKAWA, Kazuaki YOROZU, Sunmin KIM

¹正会員 博(工) 京都大学 研究員 大学院工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)

²正会員 博(工) 京都大学 教授 大学院工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)

³正会員 博(工) 京都大学 助教 大学院工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)

⁴正会員 博(工) 京都大学 准教授 大学院工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)

As an alternative to establish and update a water stage and discharge relationship (rating curve) using directly measured discharge, we developed a method to estimate a rating curve using a 2D dynamic wave model and particle filters, which considers possible conditions induced by uncertainties of inflow at the upper end of a study river channel, roughness parameters, and stage measurements. The method was applied to the Katsura River in Kyoto, Japan, and it was sequentially applied to the 2004 flood, the 2011 flood, and the 2013 flood. The flood hydrographs were reproduced without the measured discharge, and the rating curves were estimated. Dynamic characteristics of the flood and the uncertainties of the rating curve were also evaluated using the estimated state variables.

Key Words : Particle filters, 2-dimensional dynamic wave model, rating curve, sequential estimation

1. はじめに

河川の計画や管理には、長期の適切な流量データが存在することが重要であり、通常は水位データを変換して流量データを得る。また、洪水予警報の発令には水位予測が重要であり、予測流量を水位に変換することが求められる。これらの水位と流量の変換には、水位流量曲線が重要な役割を果たす。一般に水位流量曲線は流速観測に基づく流量データと連続的に測定される水位データを用いて二次関数等のべき乗関数に当てはめた関係式が用いられ、河道の変化を考慮して年ごとに更新される。しかし高水流量の観測機会は毎年ある訳ではなく、また、大洪水時には流速測定が困難となる場合がある。そのため、過去に経験のない大洪水の流量を水位流量曲線を外挿して推定すると、相当の誤差を伴うことが考えられる。水位流量曲線の作成は、流量観測データを基本としつつ、さらにそれを補完する別の方法を併用して、水位流量曲線の作成や更新を実現する方法を考える必要がある¹⁾。

水位流量曲線は様々な要因による不確かさを含むため、その推定とともに、その誤差を見積もることも重要である。水位流量曲線の不確かさの要因としては、洪水の不

定流特性や河川形状、植生の経時的な変化などがある。水位と流量の関係を一価関係で表現する水位流量曲線は、本質的に洪水の不定流特性を反映する事ができないため、これによる不確かさが大きく現れることがある^{2,3,4,5)}。また、河川形状や植生の形態・分布の時間的な変化によって流れの抵抗が変化し、それらが水位と流量の関係に大きな影響を与える。これらによる水位流量曲線の誤差を見積もることができると都合がよい。

これらの目的を実現するためには観測データと合わせて解析モデルによる洪水流の分析が有効である。福岡⁶⁾は江戸川や円山川の洪水流観測をもとに、高分解能の水位縦断データを用いた非定常平面二次元解析が、流量ハイドログラフを高精度で推定する有力な手段であることを明らかにした。河川区間上端で与える流量や下端での観測水位、粗度係数の不確かさを扱うためには、非定常平面二次元解析モデルと観測データを組み合わせたフィルタリング手法が有効と考えられる。

不定流計算モデルにフィルタリング手法を導入した推定手法として、Shiiba *et al.*⁷⁾は一次元不定流モデルにカルマンフィルタを適用し、水位と流量を逐次推定するアルゴリズムを開発した。また、立川ら⁸⁾は、粒子フィルタを用い一次元不定流モデルの境界条件とモデルパラ

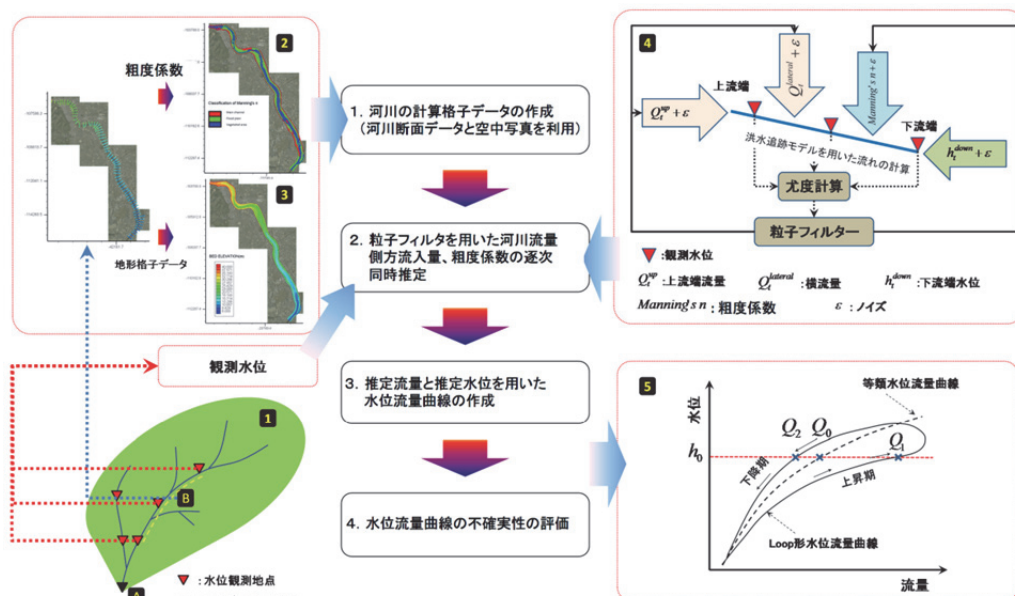


図-1 水位流量曲線の推定手順

メータを逐次推定して水位予測を行う方法を示した。Kim *et al.*⁹⁾は、河川地形や粗度の平面的な変化をより適切に考慮するために平面二次元不定流モデルを導入し、粒子フィルタを用いて粗度係数と境界条件を時々刻々推定しながら水位を予測する方法を示した。次に、河川の被覆状況を区別し、それぞれの粗度係数を逐次推定して、既存の水位流量曲線を更新する方法を示した¹⁰⁾。また、2011年9月の台風12号による新宮川の洪水を対象として水位流量曲線を作成するとともに、基準点である相賀地点の流量ハイドログラフを推定した¹¹⁾。本論では、これらの手法を桂川に適用して水位流量曲線を作成するとともに、2013年9月の台風18号による洪水流量を推定する。また、粒子フィルタによる推定結果を用いて、水位流量曲線の推定誤差と不定流的な特性を分析する。

2. 手法の概要

本論では、観測水位データのみを用いて水位流量曲線を作成する手法を示し、それを水位流量曲線の更新や大洪水の流量推定に応用することを目的とする。水位流量曲線の作成手法は、図-1に示すように4つの手順、1) 河川の計算格子データの作成; 2) 粒子フィルタを用いた河川区間上端流量と側方流入量、粗度係数の逐次同時推定; 3) 得られた推定流量と水位を用いた水位流量曲線の作成; 4) 水位流量曲線の不確実性の評価、からなる。

淀川水系の桂川で天竜寺水位観測所から羽束師水位観測所までの約12.8kmを対象とし(図-2の赤線)、計算格子(図-3の左)の設定には国土交通省近畿地方整備局から提供された河道横断面データを用いた。河道の平面的な被覆状態は空中写真を用いて判別し、それぞれの計算格子を低水路と高水敷、植生域に分類した(図-3の右)。

推定対象とした洪水は、2004年台風23号洪水、2011年台風12号洪水、2013年台風18号洪水である。対象河川区



図-2 淀川水系の桂川流域および対象河道区間(天竜寺水位観測所から羽束師水位観測所)

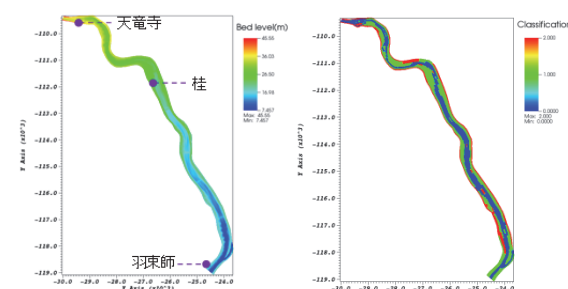


図-3 計算格子の地形の標高(天竜寺水位観測所から羽束師水位観測所)と空中写真による各格子の被覆区分(青色:低水路, 緑色:高水敷, 赤色:植生域)

間上端の天竜寺地点の直上流で与える流量は、2004年洪水の推定計算では等流を仮定してマンニング式により観測水位から初期推定流量を設定した。次に、その推定計算の結果得られた天竜寺地点の水位流量曲線を用いて2011年洪水の初期推定流量を設定し、さらにこの推定計算の結果得られた水位流量曲線を用いて2013年洪水の初期推定流量を設定した。このように、順次、水位流量曲線の更新を図りながら各洪水の流量ハイドログラフ、側方流入量、粗度係数を逐次推定した。

3. 粒子フィルタ

粒子フィルタ (Particle filters, PFs) は観測データに基づく状態ベクトルの条件付き確率分布を多数の粒子で近似的に表現し、ベイズの定理を応用してその時間推移を数値的に評価する推定手法である^{12, 13)}。粒子とはここでは二次元不定流モデルを意味し、粒子ごとに異なる上端流入量や粗度係数を設定する。この各粒子に設定する重みを観測水位を用いて逐次更新する。重みが小さな粒子は計算を中止し、その分、重みに比例して粒子を複製し推定計算を繰り返す。具体的には、図-4 に示すように各粒子の尤度を式(1)で計算し、その値を用いて各粒子に対する正規化した重みを式(2)を用いて計算する。

$$w_t^{i,k} = R(z_t^k | x_t^{i,k}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x_t^{i,k} - z_t^k)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

$$\tilde{w}_t^i = w_t^{i,1} w_t^{i,2} / \sum_{j=1}^N w_t^{j,1} w_t^{j,2} \quad (2)$$

ここに、 z_t^k は時刻 t の地点 k での観測水位、 $x_t^{i,k}$ は各粒子 i の計算水位、 σ は尤度関数のパラメータである。 $w_t^{i,k}$ を天竜寺観測所(地点1)と桂観測所(地点2)で計算し、二地点での観測値を基に総合的な各粒子の重み $\tilde{w}_t^i$ を求める。また、各粒子の重みによって、有効な粒子の数を確認するために有効サンプルサイズ (Effective sample size, ESS) を計算する。

$$ESS = 1 / \sum_{i=1}^N (\tilde{w}_t^i)^2 \quad (3)$$

全粒子の重みが等しい場合、ESSの値は総粒子数 N になり、特定の粒子の重みが大きくなると1に近づく。ここでは ESS/N の値が0.5以上のときはリサンプリングを実施しないSIS (Sequential Importance Sampling) アルゴリズムを、0.5以下となった場合にリサンプリングを実施するSIR (Sampling Importance Resampling) アルゴリズムを適用する。(2)式による各尤度の結合確率のESSだけでなく、各地点のESSも計算して、合計3つのいずれかのESSが0.5以下に低下した場合に、SIRアルゴリズムを適用した。

4. 二次元不定流計算モデル

河川流れへの地形形状および被覆の影響を考慮するために二次元不定流計算モデルを用いる。基礎式は平面二次元流れの連続式と運動方程式である。デカルト座標系で表示すれば、以下のようである¹⁴⁾。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_s}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-\overline{u^2} h \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\overline{u v} h \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_s}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-\overline{u v} h \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\overline{v^2} h \right) \quad (6)$$

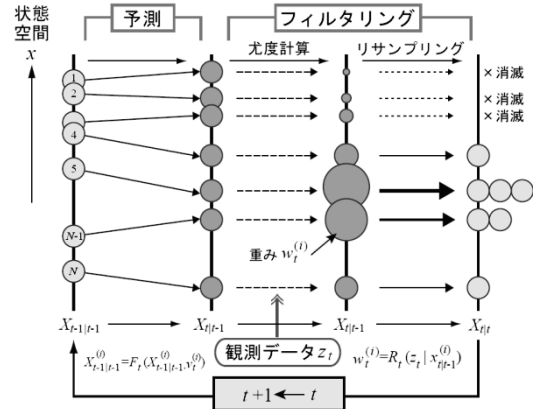


図-4 粒子フィルタ¹³⁾。観測値に応じて粒子の重みを更新し、重みに比例させて粒子を複製し推定計算を繰り返す。

ここに、 t は時間、 x, y は空間座標、 u, v は x, y 方向の水深平均流速、 M, N は x, y 方向の流量フラックス、 g は重力加速度、 h は水深、 ρ は水の密度、 z_s は基準面からの水位、 τ_{bx}, τ_{by} は x, y 方向の面せん断応力の成分、 $\overline{u^2}, \overline{v^2}, \overline{u v}$ は x, y 方向の水深平均レイノルズ応力である。数値解析法としては長田¹⁴⁾を参考にし、移流項の離散化には一次精度の風上差分を用い、時間積分にはAdams-Bashforth 法とEuler法を用いる。

5. 開発した手法の適用

(1) 初期条件とノイズの設定

粒子の個数を256個とし、それぞれの粒子 P_i の推定対象を次のように設定した。 i は粒子の識別番号である。

$$P_i = P_i(n_{main}, n_{flood}, n_{veg}, q_{up}, q_{lat1}, q_{lat2}) \quad (7)$$

括弧内の推定対象は、左から低水路、高水敷、植生域の粗度係数、上流端流量、天竜寺から桂までの側方流入量、桂から羽束師までの側方流入量であり、粒子ごとに異なる値を設定して各時刻の観測水位を用いて逐次推定する。

初期設定として低水路、高水敷、植生域の粗度係数をそれぞれ0.02~0.04、0.03~0.07と0.03~0.07とした。対象河川区間上端の初期流量は、2004年洪水ではマニング式を用いて水位から流量を設定した。側方流入量は、上流端の流域面積と各区間に寄与する流域面積の比率（天竜寺から桂までは上流端流域面積の8%、桂から羽束師は15%）を上流端の初期流量に乗じた値とした。下流端条件である羽束師地点の水位は、観測誤差を考慮して式(8)のように観測ノイズを入れて与えた。

$$h_{t+1}^{down,i} = h_{t+1}^{down,obs} + \varepsilon_{t+1}^i, \varepsilon_{t+1}^i \sim N(0, 0.05^2) \quad (8)$$

前節で説明したように、 ESS/N が0.5以上になった時、すなわち、SISアルゴリズムを適用する場合は、粗度係数は現在ステップの値で固定し、上端流量は現在ステップの各粒子の値と初期流量の比を用いて次の各粒子の初期流量の値を決めた。

SIRアルゴリズムを適用する場合は、現在時刻の各変数の分散を考慮してノイズを付加する。上流端の流量と側方流入量は、現在時刻の標準偏差が平均値の20%を超える時、分散を減少させる1以下のパラメータ β を導入して¹⁵⁾、式(9)および式(10)のようにノイズを付加した。粗度係数は現在時刻の標準偏差が0.002以上の場合、式(11)を適用した。上とは逆の場合、すなわち状態量の分散が一定の値より小さくなる場合は、流量は現在時刻の平均値の10%を標準偏差とする正規分布に従うノイズを設定した。粗度係数は、0.002を標準偏差とする正規分布に従うノイズを付加した。

$$Q_{t+1}^i = Q_t^i \frac{q(h_{t+1}^{obs})}{q(h_t^{obs})} + \varepsilon_{t+1}^i, \varepsilon_{t+1}^i \sim N(0, (\beta \sigma_i^Q)^2) \quad (9)$$

$$Q_{lat,t+1}^i = Q_{lat,t}^i \frac{q(h_{t+1}^{obs})}{q(h_t^{obs})} + \varepsilon_{t+1}^i, \varepsilon_{t+1}^i \sim N(0, (\beta \sigma_i^{LQ})^2) \quad (10)$$

$$n_{t+1}^i = n_t^i + \varepsilon_{t+1}^i, \varepsilon_{t+1}^i \sim N(0, (\beta \sigma_i^n)^2) \quad (11)$$

ここに、 Q_{t+1}^i 、 $Q_{lat,t+1}^i$ 、 n_{t+1}^i 、 $h_{t+1}^{down,i}$ は時刻 $t+1$ での i 番目の粒子の上流端流量、側方流入量、粗度係数と下流端水位、 σ_i^Q 、 σ_i^{LQ} 、 σ_i^n は時刻 t の上流端流量、側方流入量と粗度係数の標準偏差、 β は0.1、 N は正規分布を表し、 $q(h_t^{obs})$ は水位流量関係式で変換した上流端の初期推定流量である。2011年洪水と2013年洪水を推定するときには、前の推定計算で作成した水位流量曲線を $q(h_t^{obs})$ とし、推定した粗度係数の最後の時間の70%区間(図-9の水色の幅)を初期条件として利用した。

(2) 適用結果

図-5から図-10に2004年台風23号洪水、2011年台風12号洪水、2013年台風18号洪水の順に実行した推定計算(リサンプル前の予測計算)の結果を示す。図-5と図-6は推定した各粒子の水位(赤い点)、粒子の重み付平均水位(黒い線)と観測水位(黒い点)であり、水色と黄色はそれぞれ粒子の70%区間幅、90%区間幅を表す。重み付平均水位と観測水位はよく一致し、開発した手法が適切に機能していることがわかる。

図-7と図-8は流量の推定結果と観測値とを比較したものである。流量観測値は流速測定から得られた流観値であり、推定計算には利用していないが、2004年洪水と2011年洪水ではよく一致した。2013年9月の台風18号洪水では途中から流観値は存在しない。本手法による天龍寺地点と桂地点のピーク流量の重み付平均値は、それぞれ約2,823m³/sと約3,025m³/sであり、それぞれの70%区間と90%区間の上下限値は表-1のようになった。

図-9は推定した低水路の粗度係数の時間変化である。重み付平均値は0.024から0.027であり、国土交通省近畿地方整備局¹⁶⁾による逆算粗度(6.8~12.2km区間で0.027)とよく対応した。図-10は天龍寺地点から桂地点の間の側方流入量の推定結果である。直接比較できる資料はないが、側方流入量を推定対象に入れることで図-7と図-8に示す流量の推定精度が向上したと考えられる。

表-1 推定した2013年台風18号洪水の平均値からの上下限値

推定区間	ピーク流量	70%区間	90%区間
天龍寺地点	2,823m ³ /s	上+18%, 下-13%	上+27%, 下-20%
桂地点	3,025m ³ /s	上+13%, 下-7%	上+18%, 下-15%

6. 水位流量曲線の作成とその不確実性の評価

各洪水の推定計算によって得られた流量と水位を用いて水位流量関係を示した。図-11(天龍寺地点)と図-12(桂地点)の赤点は2013年洪水の推定計算で得たリサンプル後の各粒子の水位と流量のシミュレーション結果であり、黒実線はそれらに適合するように求めた水位流量曲線、青点と黒点は2004年と2013年の流観値である。最近の大洪水である2013年洪水と2004年洪水の流観値はここで推定した水位流量曲線とよく対応した。また、多数の粒子の結果を用いて、水位流量関係式の誤差を次式により見積もった。式(12)は水位流量関係式からの平均的な相対誤差であり、式(13)は相対誤差の最大値である。

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \left(\frac{|q(h_i(t)) - Q_i(t)|}{q(h_i(t))} \times 100 \right) / (NT) \quad (12)$$

$$\text{Max} \left(\frac{|q(h_i(t)) - Q_i(t)|}{q(h_i(t))} \times 100 \right) \quad (13)$$

ここに $h_i(t)$ と $Q_i(t)$ は1時間ごとの時刻 t の粒子 i の推定水位と推定流量であり、 $q(h)$ は推定した水位流量曲線、 N は総粒子数、 T は総計算時間数である。2013年洪水の推定計算結果を用いて誤差を算定したところ、天龍寺地点と桂地点の平均相対誤差はそれぞれ4.5%と5%、最大相対誤差はそれぞれ26.5%と17.5%であった。これらを用いて設定した水位流量曲線の平均相対誤差に対応する推定幅を点線で、最大相対誤差に対応する推定幅を青線で示す(図-11と図-12)。最大誤差曲線の内部にすべて流観値が存在し、平均誤差曲線の線上付近にかなり流観値があることをみると、こうした誤差の見積もりは妥当であり、この程度の誤算を勘案して水位流量関係式を用いる必要があることが分かる。本手法はこうした水位流量関係の誤差を見積もることができる。

なお、図-12の桂地点での水位流量関係は、低水位の部分で計算値が流観値を上回る結果となった。これは天龍寺地点から桂地点の間での取水の影響を、シミュレーションモデルでは考慮していないためと考えられる。

図-13の(a)(b)(c)は、各粒子を加重平均して得た水位流量関係の時間変化である。河川勾配が大きい天龍寺地点と桂地点ではほぼ一価関係で水位流量関係が表されるが、羽束師地点ではループを描くことが確認できる。図-13(d)は河川上端での推定流量と低水路の粗度係数の時間変化を示している。粗度係数の時間変化は2004年洪水、2011年洪水、2013年洪水とも同じようなパターンで変化しており、水位上昇に応じて粗度係数が減少し、洪水ピーク後に粗度係数が増加する変化が見られた。

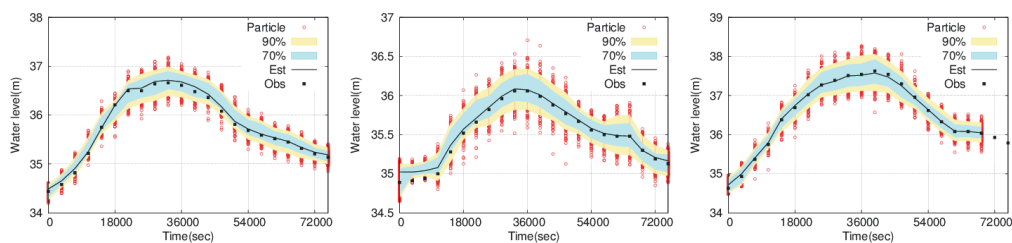


図-5 推定した水位と観測水位(天竜寺) (左から 2004 年台風 23 号, 2011 年台風 12 号, 2013 年台風 18 号洪水)

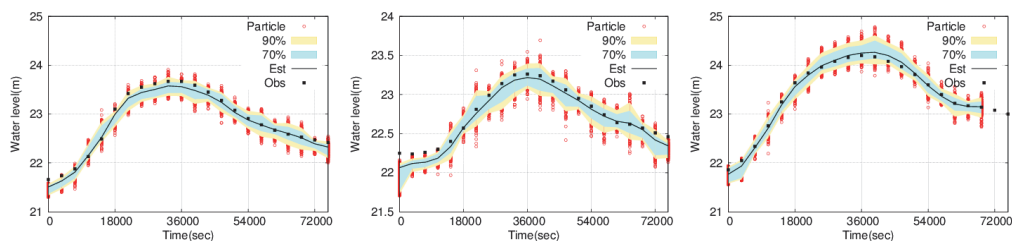


図-6 推定した水位と観測水位(桂) (左から 2004 年台風 23 号, 2011 年台風 12 号, 2013 年台風 18 号洪水)

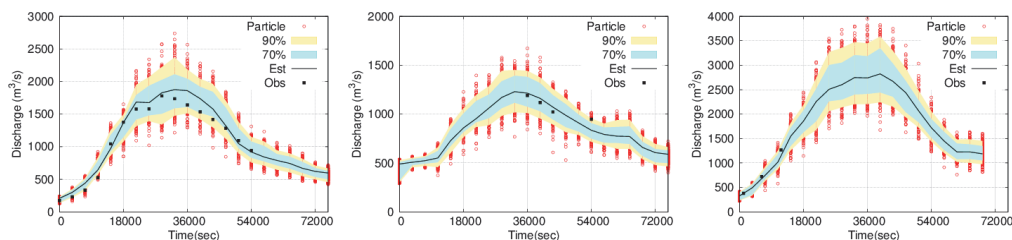


図-7 推定した流量と観測流量(天竜寺) (左から 2004 年台風 23 号, 2011 年台風 12 号, 2013 年台風 18 号洪水)

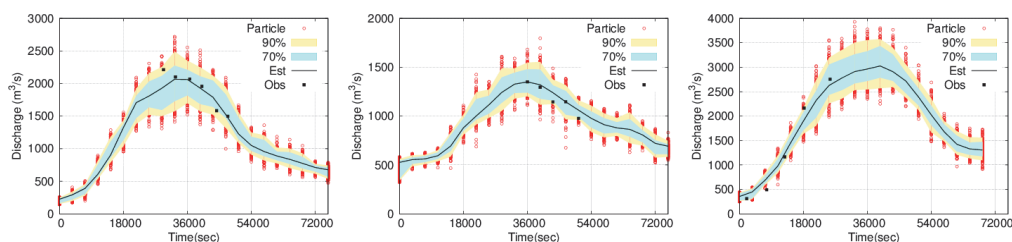


図-8 推定した流量と観測流量(桂) (左から 2004 年台風 23 号, 2011 年台風 12 号, 2013 年台風 18 号洪水)

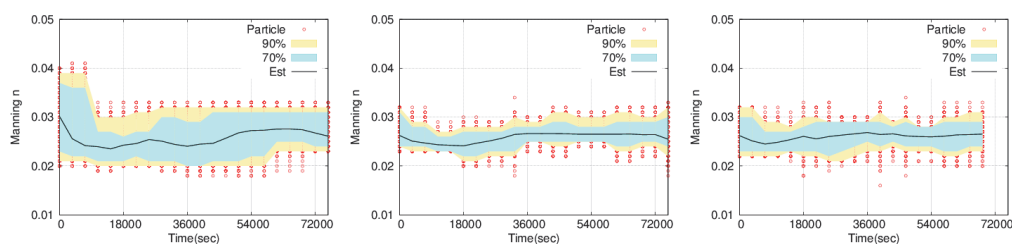


図-9 推定した粗度係数(低水路) (左から 2004 年台風 23 号, 2011 年台風 12 号, 2013 年台風 18 号洪水)

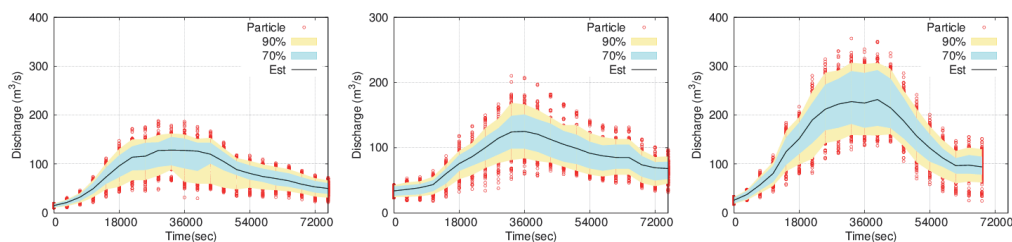


図-10 推定した側方流入量(天竜寺から桂の区間) (左から 2004 年台風 23 号, 2011 年台風 12 号, 2013 年台風 18 号洪水)

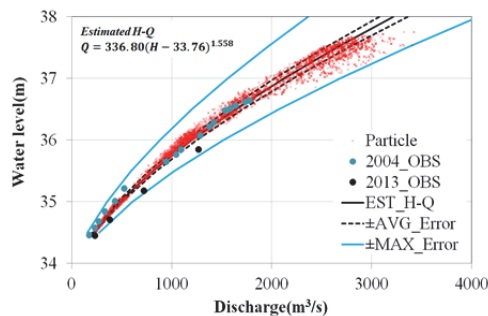


図-11 水位流量曲線と観測流量（天竜寺，2013 年洪水）

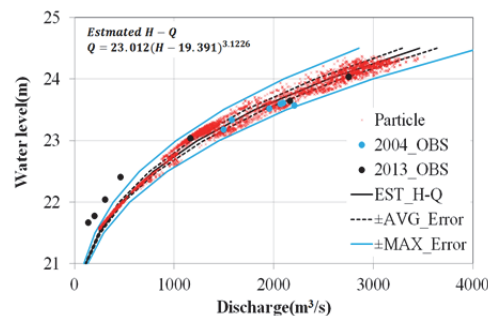
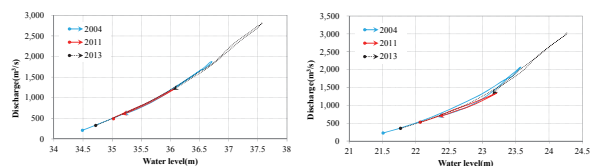
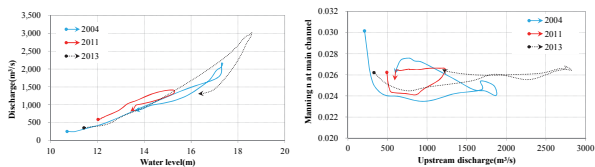


図-12 水位流量曲線と観測流量（桂，2013 年洪水）



(a) 天竜寺の水位と流量の関係 (b) 桂の水位と流量の関係



(c) 羽束師の水位と流量の関係 (d) 低水路の粗度係数と上流端の流量

図-13 洪水の不定流特性の分析

7. おわりに

不定流計算モデルと粒子フィルタを組み合わせた逐次推定手法により，水位流量曲線を作成・更新する手法を提案した．水位流量曲線を得るためには流量観測が基本であることは今後とも変わらないが，流量観測が困難な場合，あるいはこれまで流量観測が行われていない地点で水位観測データがあれば，本手法を適用することが可能と考えられる．以下に本手法の成果をまとめる．

(1) 水位流量曲線の作成と更新：流量測定結果を使用せず，河川地形，空中写真，観測水位を用いて水位流量曲線を作成する手法を示した．この手法を経時的に利用することで，河道状態の変化に伴う流れの変化を考慮して，水位流量曲線の継続的な更新が可能である．また，流量

観測が困難な大規模洪水での流量推定や，観測で作成した水位流量曲線の物理的な外挿，流量観測が存在せず水位データのみ存在する地点での水位流量曲線の推定に用いることができると考えられる．

(2) 水位流量曲線の不確実性の評価：限られた観測値から得た水位流量曲線の不確実性を評価することは容易ではない．本手法では，多数の粒子の推定結果を用いて水位流量曲線の不確実性を見積もることができる．

謝辞：本研究を実施するにあたり，国土交通省河川砂防技術研究開発公募（水防災技術分野）の補助を受けた．本研究で用いた水理・水文データは国土交通省近畿地方整備局から提供を受けた．記して謝意を表する．

参考文献

- 1) 田村隆雄，山下瑛人，武藤裕則：水位・雨量データと流出モデルを使用して作成した洪水時における水位流量曲線の妥当性，土木学会論文集 B1(水工学)，70(4)，pp. I_379-I_384，2014.
- 2) 二瓶泰雄：河川流量のモニタリング，ながれ，29(3)，pp. 187-192，2010.
- 3) 篠原 努，深見和彦，吉谷純一，大手方如：HQシステムを用いた水位流量曲線の作成，土木学会年次学術講演会講演概要集，CD-ROM，59，pp. 2-064，2004.
- 4) Di Baldassarre, G. and A. Montanari: Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol. 13, pp. 913-921, 2009.
- 5) Pelletier, M. P.: Uncertainties in the determination of river discharge: a literature review, *Can. J. Civ. Eng.*, 15, pp. 834-850, 1987.
- 6) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法，1. 9，洪水流の二次元非定常解析と流量ハイドログラフ・貯留量の推算，1. 10，洪水流量の観測法，pp. 60-94，森北出版，2005.
- 7) Shiiba, M., X. Laurenson, and Y. Tachikawa: Real-time stage and discharge estimation by a stochastic-dynamic flood routing model, *Hydrological process*, 47(3)，pp. 481-495, 2000.
- 8) 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，土木学会論文集 B1(水工学)，67(4)，pp. I_511-I_516，2011.
- 9) Kim, Y., Y. Tachikawa, M. Shiiba, S. Kim, K. Yoroze, and S. Noh: Short term prediction of water level and discharge using a 2D dynamic wave model, *Journal of Japan Society Civil Engineers*, 68(4)，pp. I_25-I_30, 2012.
- 10) Kim, Y., Y. Tachikawa, M. Shiiba, S. Kim, K. Yoroze, and S. Noh: Simultaneous estimation of inflow and channel roughness using 2D hydraulic model and particle filters, *Journal of Flood Risk Management*, 6(2)，pp. 112-123, 2013.
- 11) Kim, Y., Y. Tachikawa, S. Kim, M. Shiiba, K. Yoroze, and S. Noh: Estimating the 2011 largest flood discharge at the Kumano river using a 2D dynamic wave model and particle filters, *Journal of Japan Society Civil Engineers*, 69(4)，pp. I_163-I_168, 2013.
- 12) Ristic, B., S. Arulampalam, and N. Gordon: Beyond the Kalman filter: particle filters for tracking applications, Artech House, 2004.
- 13) 樋口知之：予測にいかす統計モデリングの基本，講談社，2011.
- 14) 長田信寿：一般座標による河川流の計算，水理公式集例題プログラム集，土木学会，CD-ROM，例題2-08，2002.
- 15) Moradkhani, H., K.-L. Hsu, H. Gupta, and S. Sorooshian : Uncertainty assessment of hydrologic model states and parameters: Sequential data assimilation using the particle filter, *Water Resour. Res.*, 41, W05012, doi:10.1029/2004WR003604, 2005.
- 16) 国土交通省近畿地方整備局：淀川水系河道技術資料(桂川編)，2008.

(2014. 4. 3受付)