

XRAINやフィルタリング技術を活用した 水位予測システムの適用上の課題とその対応

ISSUE ON APPLYING THE WATER LEVEL PREDICTION SYSTEM UTILIZING XRAIN AND NON LINEAR FILTERING METHOD

増本健佑¹・深草新²・辻倉裕喜³・田中耕司³

Kensuke MASUMOTO, Shin FUKAKUSA, Hiroki TSUJIKURA and Kohji TANAKA

¹非会員 修(工)(株)建設技術研究所大阪本社(〒541-0045 大阪市中央区道修町1-6-7)

²正会員 修(工)(株)建設技術研究所大阪本社(〒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(〒541-0045 大阪市中央区道修町1-6-7)

We indicated two issues such as the error including in the precipitation and in the predicted water surface level in this study. Radar precipitation after improving the observed radar precipitation of MLIT revised by the rain gauge and the amount of precipitation analyzed by radar-AMeDAS, it is shown that the calculation results from the distributed cell runoff model almost accords with observation data. It shows that it is important to filter the several object water gauge stations adding on the Hirakata station to improve the accuracy of the prediction discharge at the upstream end. Furthermore, it is shown that the accuracy of the predicted water surface level was improved by adding the manning coefficient in the state values such as the discharge at the upstream end of the branches.

Key Words : XRAIN, Radar-AMeDAS, Particle filter, Water gauge stations, Manning coefficient, Filtering for several points

1. はじめに

本研究で対象とした淀川水系の洪水予測システム¹⁾は、XRAIN (eXtended RAdar Information Network : 高性能レーダ雨量計ネットワーク) を活用したX&C合成レーダ雨量を実況雨量として使用し、これを基にした移動予測による予測雨量等とともに入力データとした分布型流出モデルを用いて木津川・宇治川・桂川の上流部での流量予測を行っている。また、三川合流部前後の区間では、算出した流出量を上流端や横流入条件とし、枚方地点の水位流量関係式(以下、H-Q式)を下流端条件として与える不定流モデルにより水位予測を行っている(図-1参照)。ここで使用する分布型流出モデルや不定流モデルは、既往の複数洪水を対象とした検証計算²⁾を踏まえたモデルであり、十分な再現精度を確保しているが、予測雨量の誤差や河道状況(高水敷冠水の有無、粗度係数等)が洪水中に時々刻々変化することにより予測水位に誤差が生じることがある。そのため、フィルタリング手法に関する既往研究³⁾を参考に、不定流モデル上流端の

流量にかかる係数等を状態量とし、枚方地点の流量を対象とした単点フィルタリングにより、予測水位の高精度化を図っている²⁾。

上記の洪水予測システムは導入後数年が経過し、入出力データが蓄積されてきている中で、水位予測精度にかかる2点の課題を有することが分かってきた。その課題とは、一部の地域でX&C合成レーダ雨量の観測精度が低いこと、及びフィルタリング後の河川毎の流量再現精度が低いことである。

レーダ雨量の不確実性を指摘し対応策を示した事例としては、推定誤差の統計モデルを用いた降雨場の補正方法を提案した藤岡ら⁴⁾の既往研究が挙げられるが、これは洪水予測システムへの適用までを考慮して検討されたものではない。本論では、洪水予測システムに必要なリアルタイム性及び水位予測精度の両面を確保し得るレーダ雨量の補正方法を提案する。

また、フィルタリング後の河川毎の流量再現精度が低いことは、水系全体の洪水現象を適切に把握できていないことと同義であり、予測精度の確保に向けては改善が必要であると考えられる。そこで本論では、枚方地点の

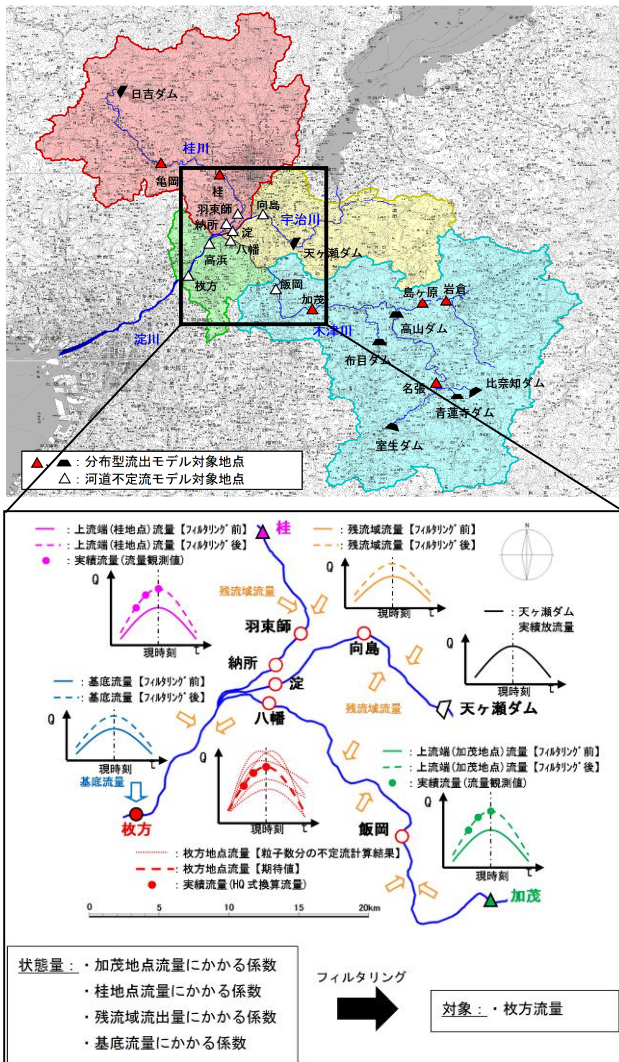


図-1 淀川水系の洪水予測システムの構成（分布型・不定流）と淀川三川合流部における水位予測手法の概念²⁾

みでなく三川合流前の地点も対象とした複数点フィルタリング手法を提案し、河川毎の流量再現精度がどの程度向上するか検証する。

2. XRAINの活用における課題とその対応

(1) X&C合成レーダ雨量の概要

淀川水系の洪水予測システムでは、XRAINを活用したX&C合成レーダ雨量を実況雨量及び移動解析による予測雨量として使用している。X&C合成レーダ雨量は、表-1に示すXバンドMPレーダ雨量と国交省Cバンドレーダ雨量をもとに作成されており、その作成方法は、XバンドMPレーダの観測雨量を最優先とし、XバンドMPレーダの観測範囲外や電波消散域等に国交省Cバンドレーダの観測雨量を合成している。

(2) X&C合成レーダ雨量の精度検証

X&C合成レーダ雨量の観測精度を検証するため、実

表-1 X&C合成レーダ雨量に用いるレーダ雨量データ

項目	解像度	更新 間隔	遅れ 時間	地上雨量に よる補正
XバンドMPレーダ雨量	250m	1分	250m	無
深山、城ヶ森レーダ雨量	1km相当	5分	1km	無
Cバンド全国合成雨量	1km	5分	—	有

表-2 精度検証結果（上流域平均雨量での比較）

河川名	地点名	平成24年9月台風17号		平成25年9月台風18号		平成26年8月台風11号	
		相関係数	総雨量比	相関係数	総雨量比	相関係数	総雨量比
木津川	比奈知ダム	0.83	0.76	0.77	0.78	0.80	0.94
	青蓮寺ダム	0.84	0.70	0.73	0.75	0.81	0.96
	室生ダム	0.66	0.74	0.71	0.84	0.86	0.97
	高山ダム	0.91	0.76	0.87	0.79	0.92	0.99
	布目ダム	0.73	0.70	0.77	0.79	0.82	1.02
	鳥ヶ原	0.88	0.77	0.81	0.74	0.91	0.81
	八幡	0.80	0.93	0.83	0.97	0.94	1.09
	日吉ダム	0.84	1.05	0.93	0.96	0.88	1.16
桂川	桂	0.82	1.08	0.96	0.99	0.91	1.20
宇治川	天ヶ瀬ダム	0.89	0.93	0.90	1.03	0.74	1.12

相関係数<0.6 総雨量比<0.6、1.4≦総雨量比
0.6≦相関係数<0.8 0.6≦総雨量比<0.8、1.2≦総雨量比<1.4
0.8≦相関係数 0.8≦総雨量比<1.2

表-3 精度検証結果（地点雨量での比較）

河川名	地点名	平成24年9月台風17号		平成25年9月台風18号		平成26年8月台風11号	
		相関係数	総雨量比	相関係数	総雨量比	相関係数	総雨量比
木津川	神末	0.92	0.65	0.90	0.75	0.96	0.88
	室生	0.96	0.74	0.96	0.76	0.95	0.87
	内牧	0.87	0.64	0.94	0.76	0.96	0.92
	家野	0.98	0.72	0.74	0.87	0.95	1.01
	峰寺	0.97	0.73	0.95	0.87	0.97	1.01
	阿波2	0.98	0.58	0.94	0.56	0.96	0.54
	坂下2	0.98	0.87	0.90	0.78	0.97	0.60
	鎌倉	0.83	1.16	0.91	0.91	0.96	1.00
桂川	新町	0.85	1.13	0.97	1.02	0.95	1.17
宇治川	黒津	0.92	1.19	0.98	1.00	0.93	1.15
	雲井	0.88	0.77	0.95	0.98	0.91	1.00

相関係数<0.6 総雨量比<0.6、1.4≦総雨量比
0.6≦相関係数<0.8 0.6≦総雨量比<0.8、1.2≦総雨量比<1.4
0.8≦相関係数 0.8≦総雨量比<1.2

況雨量の観測精度に着目し、地点及び流域平均雨量について、レーダ雨量と地上観測雨量を比較する。検証対象洪水は平成24年9月台風17号、平成25年9月台風18号、平成26年8月台風11号とする。

レーダ雨量と地上雨量の流域平均雨量における精度検証結果を表-2に示す。表-2より平成24年9月台風17号及び平成25年9月台風18号をみると、木津川上流域の観測精度に差がみられる。平成25年9月台風18号時の青蓮寺ダムでは、流出率がレーダ雨量で97%、地上雨量で70%と、観測精度に差がみられる地点のレーダ雨量による流出率は80%を超えるような高い数値となる傾向がみられるため、レーダ雨量の観測精度が低いと判断される。また、表-3に示す地点雨量と地点雨量観測所の直上メッシュにおけるレーダ雨量の精度検証結果をみても、流域平均雨量による精度検証結果と同様の傾向が確認できる。

藤岡ら⁴⁾はXバンドMPレーダについて、レーダサイトからの距離に応じた区分ごとに観測誤差を整理し、その結果、レーダサイトからの距離が遠いほど観測のばらつきが大きいことを報告している。図-2に淀川流域とレーダサイトの位置図を示すが、観測精度の低下がみられた木津川上流域は、XバンドMPレーダサイト（田口、鷲峰山）やCバンドレーダサイト（深山、城ヶ森）の遠方に位置しており、レーダ雨量の定量観測範囲（Xバンド：60km、Cバンド：120km）の縁に相当するような地域であるため、観測精度が低下したものと考えられる。

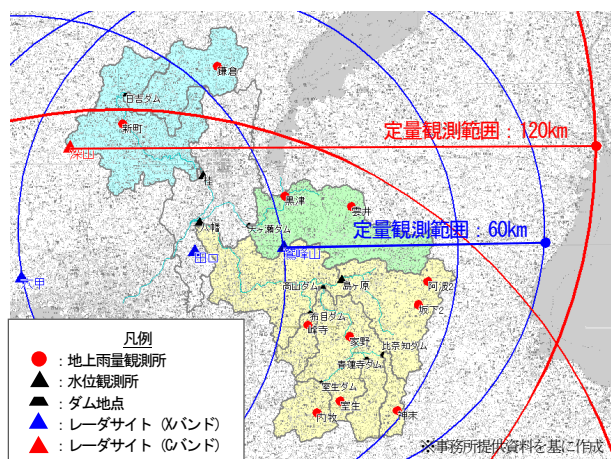


図-2 淀川流域とレーダサイトの位置図

表-4 雨量データの概要

項目	観測 間隔	解像度	備考
X&C合成レーダ雨量	1分	250m	
レーダ・アメダス解析雨量	30分	1km	
地上観測雨量	1時間	—	

(3) 流量再現精度の検証

X&C合成レーダ雨量の観測精度の検証結果より観測精度の低い地域について、淀川水系の洪水予測システムで採用している分布型流出モデルを用いて、表-4に示す複数の雨量データによる流量の再現精度を検証する。解析雨量（洪水後、さらに地上雨量により補正し、販売しているデータを指す）は、気象庁レーダで観測したレーダ雨量データを地上雨量により補正しているため、一般的に観測精度が高い雨量データである。

分布型流出モデルを用いた流量の再現検証結果の一例として、比奈知ダム地点における結果を図-3に示す。なお、使用するモデル定数は、既往の複数洪水に対し、観測精度の良い雨量データにより同定を実施した定数である。平成24年9月台風17号及び平成25年9月台風18号の結果をみると、X&C合成レーダ雨量による計算流量は実績値よりも過小であるが、地上雨量や解析雨量では実績値を概ね再現できている。これは、X&C合成レーダ雨量の観測精度が低く、実際よりも過小に観測されていることに起因していると考えられる。一方で、平成26年8月台風11号では、X&C合成レーダ雨量の観測精度が良好であるため、流量の再現精度も良好である。

(4) X&C合成レーダ雨量の観測精度への対応策

前述までの検証結果を踏まえ、X&C合成レーダ雨量の観測精度が低い地域における観測精度への対応策を以下に示す。

① 実況雨量の補正

流量の再現精度から解析雨量は、実況雨量として観測精度が良好であると考えられる。そこで、X&C合成レーダ雨量と解析雨量の流域平均雨量をもとに整理した相関関係から補正係数をあらかじめ算出し、

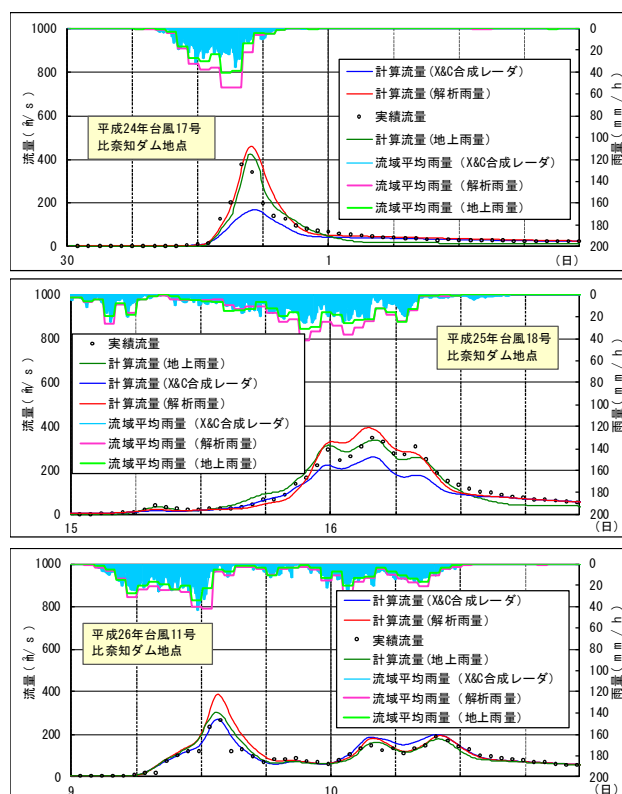


図-3 流量再現精度の比較

この補正係数をもって実況雨量を補正し、X&C合成レーダ雨量が有する観測精度の誤差について改善を図る。

② 予測雨量の代替案

予測雨量の精度向上のため、補正した実況雨量をもとに予測雨量を算定する方法が考えられるが現業では困難である。このため、気象庁が配信している降水短時間予報や降水ナウキャストといった予測雨量について、精度確認の上、適用性が高ければ、X&C合成レーダ雨量の代替とすることが考えられる。

3. フィルタリング技術の活用における課題とその対応

(1) 水位予測モデルの概要

前述の通り、淀川水系の洪水予測システムは、三川合流部前後に不定流モデルを適用し、フィードバック計算を行い水位を予測している（図-1参照）。

なお本論では、不定流モデルの非線形性を考慮するため、フィルタリング手法には粒子フィルタを用いる。

(2) 不定流モデルの基礎式

淀川三川合流部前後の区間に適用されている不定流モデルの基礎式を以下に示す。

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (1)$$

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{n^2 |Q| Q}{A^2 R^{4/3}} \quad (2)$$

t は時間座標, x は流下方向にとった空間座標, A は通水断面積, Q は流量, g は重力加速度, H は水位, R は径深, n は粗度係数である。

(3) 粒子フィルタによるデータ同化手法

粒子フィルタ^{5b)}は、非線形・非ガウス型のあらゆる状態空間モデルに適用できるフィルタリング手法である。状態量の確率分布を多数のサンプル（粒子）の実現値で近似的に表現することが特徴である。

a) 粒子フィルタのアルゴリズム⁶⁾

以下の非線形・非ガウス型の状態空間モデルを考える。

$$x_t = f(x_{t-1}, u_t) \quad (3)$$

$$y_t = h(x_t, v_t) \quad (4)$$

x_t は時刻 t の k 次元の状態ベクトル, y_t は時刻 t の l 次元の観測ベクトルであり, u_t, v_t はガウス分布とは限らない確率密度関数に従うシステムノイズと観測ノイズであり, 白色ノイズとする。 f, h は状態ベクトルに関する非線形関数で, (3)式は状態ベクトルの時間発展を表す状態方程式, (4)式は観測方程式である。

一期先の状態 x_t の推定値の確率分布（事前分布）は

$$p(x_t | Y_{t-1}) = \int p(x_t | x_{t-1}) p(x_{t-1} | Y_{t-1}) dx_{t-1} \quad (5)$$

と表される。ここで, $Y_{t-1} = (y_{t-1}, y_{t-2}, \dots, y_2, y_1)$ とする。また, 時刻 t までの観測ベクトル Y_t が得られた後, フィルタリングされた状態 x_t の確率分布（事後分布）は, ベイズの定理により

$$p(x_t | Y_t) = \frac{p(y_t | x_t) p(x_t | Y_{t-1})}{p(y_t | Y_{t-1})} \quad (6)$$

と表される。粒子フィルタではこれら条件付き確率分布を多数の粒子の実現値を用いて近似する。具体的には, (5)式の事前分布を(7)式と近似する。

$$p(x_t | Y_{t-1}) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(x_t - x_{t|t-1}^{(i)}) \quad (7)$$

N は粒子数, $\delta(\cdot)$ はDiracのDelta関数で, $x_{t|t-1}^{(i)}$ は時刻 t の i 番目粒子の事前推定値である。これを(6)式に代入して, 事後分布が(8)式となるように $x_{t|t}^{(i)}$ を設定する。

$$p(x_t | Y_t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(x_t - x_{t|t}^{(i)}) \quad (8)$$

(7)式と(8)式の $x_{t|t-1}^{(i)}, x_{t|t}^{(i)}$ は, 以下の手順で求める。

- ① 初期設定：現在時刻を $t-1$ とする。 i 番目の粒子 ($i = 1, \dots, N$) について, フィルタリング後の状態 $x_{t-1|t-1}^{(i)}$ が得られているとする（図-4の第1列）。
- ② 時間更新：状態方程式(3)式を用いて i 番目の粒子 ($i = 1, \dots, N$) の推定値 $x_{t|t-1}^{(i)}$ を求める（図-4の第2列）。これにより事前分布が(7)式より定まる。

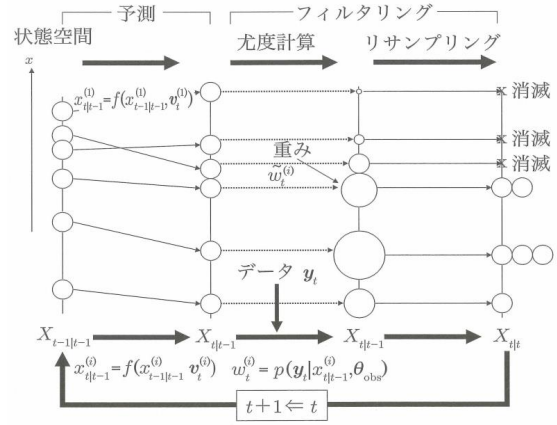


図-4 粒子フィルタのアルゴリズムの概念図⁶⁾

③ フィルタリング：(6)式の $p(y_t | x_t)$ は状態 x_t の時に観測値 y_t を得る確率（尤度）であり, (4)式から別途定まる $R(y_t | x_{t|t-1}^{(i)})$ によって得られるとする。

図-4の第3列の粒子の大きさは尤度の大小の関係を表現しており, 観測値に対する適合度が高いほど尤度大きいことを示す。(6)式の $p(y_t | Y_{t-1})$ は

$$p(y_t | Y_{t-1}) = \int R(y_t | x_t) p(x_t | Y_{t-1}) dx_t \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R(y_t | x_{t|t-1}^{(i)}) \quad (9)$$

となり, (7), (9)式を(6)式に代入し, 事後分布を

$$p(x_t | Y_t) \approx \sum_{i=1}^N w_t^{(i)} \delta(x_t - x_{t|t}^{(i)}) \quad (10)$$

として得る。ここで $w_t^{(i)}$ は正規化した尤度である。

- ④ リサンプリング：正規化した尤度（重み） $w_t^{(i)}$ に比例する割合で $x_{t|t-1}^{(i)}$ を復元抽出し, 抽出した粒子を $x_{t|t}^{(i)}$ とする（図-4の第4列）。抽出された粒子の合計は N 個で, 各粒子の重みは全て $1/N$ となり, 最終的に(8)式が得られる。
- ⑤ 時間を更新して①に戻る。

上記により, x_t の最適推定値 $\hat{x}_t$ と推定誤差分散 $\hat{\sigma}_t^2$ は

$$\hat{x}_t \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{t|t}^{(i)} = \sum_{i=1}^N w_t^{(i)} x_{t|t-1}^{(i)} \quad (11)$$

$$\hat{\sigma}_t^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{t|t}^{(i)} - \hat{x}_t)^2 = \sum_{i=1}^N w_t^{(i)} (x_{t|t-1}^{(i)} - \hat{x}_t)^2 \quad (12)$$

として求められる。信頼幅を表す95%値などについても $x_{t|t-1}^{(i)}, i = 1, \dots, N$ から直接求めることができる。

b) 枚方地点の流量予測方法

枚方地点の水位をH-Q式で変換した流量を対象に, 加茂, 桂, 残流域の流量, 基底流量にかかる係数といった状態量を, 粒子フィルタによりフィルタリングする。

観測値（枚方地点H-Q換算流量）は1時間毎に得られるとし, 1時間毎にフィルタリングを実施する。(4)式から定まる尤度関数を正規分布の確率密度関数とし,

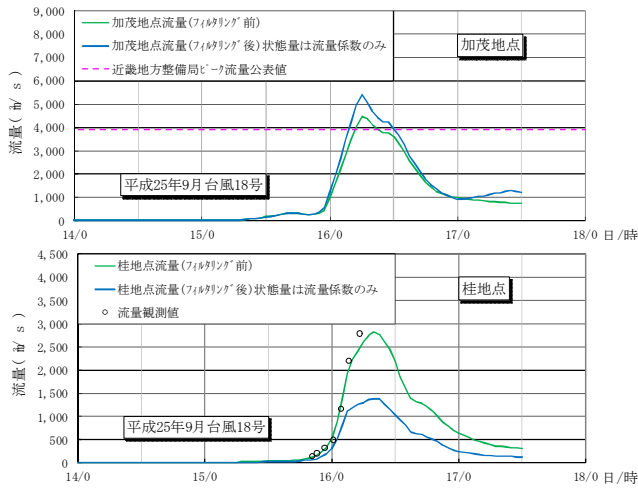


図-5 フィルタリング後の加茂・桂地点流量(H25年台風18号)

$$R(y_t | x_{t|t-1}^{(i)}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp \left\{ -\frac{(y_{t,cal}^{(i)} - y_{t,obs})^2}{2\sigma_y^2} \right\} \quad (13)$$

とする。 $R(y_t | x_{t|t-1}^{(i)})$ は粒子 $x_{t|t-1}^{(i)}$ の尤度、 $y_{t,cal}^{(i)}$ は時刻 t の i 番目の粒子の観測推定値、 $y_{t,obs}$ は観測値である。
 σ_y は観測値の標準偏差であり、H-Q換算流量に5%程度の観測誤差があるものとした。

不定流解析は現時刻の12時間（洪水到達時間程度）前から開始する。現時刻において(13)式で尤度を求め、観測値更新後の流量の確率分布を推定する。また、将来の予測値は、現時刻の状態量が継続するとして推定する。

(4) フィルタリング結果と課題

洪水予測システムでは、不定流区間の上流端流量や残流域流出量の初期値には、分布型流出モデルより算定された流出量を与えている。本論では、実測値の得られない残流域流出量は、システムと同様の与え方をしたが、上流端流量の初期値には、実測値との誤差を少なくするため、前年度確定H-Q式で水位を換算した流量を与える。これら各流量にかかる係数を状態量として平成25年9月台風18号洪水を対象にフィルタリングを行った。加茂地点、桂地点のフィルタリング後の流量を図-5に示す。なお、水位予測結果の妥当性は別途確認している²⁾。

図-5より、フィルタリング後の加茂地点や桂地点の流量は、逆解析的な側面から整合する必要がある流量観測値等から乖離していることが分かる。これらの乖離の要因としては、主に以下の2点が挙げられる。

- ① フィルタリングの対象を三川合流後の枚方地点のみとしているため、各支川の流量バランスを必ずしも適切に再現できない。
- ② 対象洪水の規模が大きく、洪水時の水位上昇等に伴い粗度係数等の河道パラメータが変化したことが推察されるが、状態量として表現できていない。

この場合、本来は各支川の河道パラメータの変化が受け持つはずの流量変化分を上流端流量や残流域流出量により調整しているため、現時刻の水位には影響は少ない

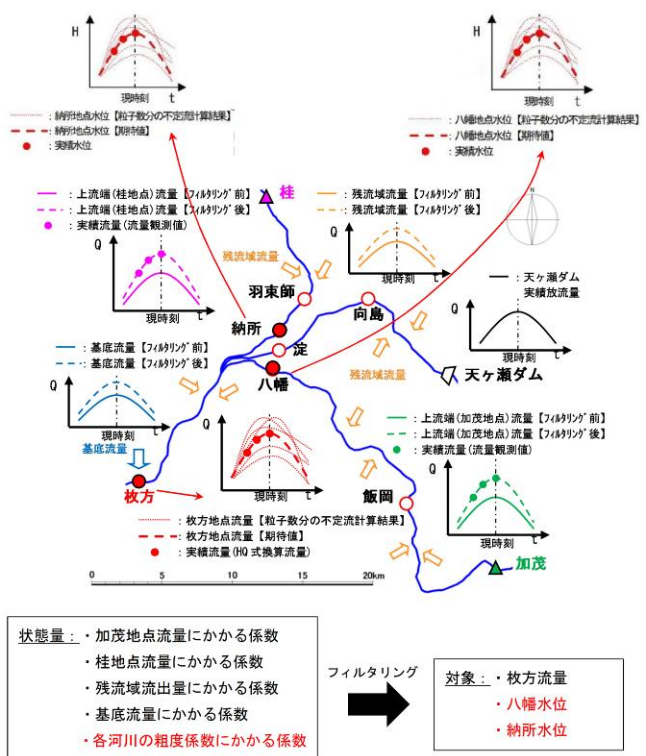


図-6 フィルタリング対象地点、状態量の追加

が、予測雨量に含まれる誤差が大きくなる数時間先の予測水位の精度に影響を及ぼす可能性があると考えられるため、改善の余地がある。

(5) フィルタリング対象地点、状態量の追加

上記の課題に対応するため、フィルタリングの対象地点を多地点とし、状態量に各支川の粗度係数にかかる係数を追加した場合（図-6参照）の加茂地点、桂地点の流量を確認する。

a) 多地点を対象としたフィルタリング方法

枚方地点流量、八幡地点水位、納所地点水位の現時刻における観測値とある粒子の不定流解析値と間の重み（尤度）を(14)式より算定する。

$$\frac{1}{(\sqrt{2\pi})^k |\Sigma|^{1/2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} [X_c - X_o]^T \Sigma^{-1} [X_c - X_o] \right\} \quad (14)$$

X_c は解析値の行列 (Q_c : 枚方地点流量, H_{c1} : 八幡地点水位, H_{c2} : 納所地点水位), X_o は観測値の行列 (Q_o : 枚方地点流量, H_{o1} : 八幡地点水位, H_{o2} : 納所地点水位), Σ は誤差共分散行列, k は観測所数で、

$$X_c = [Q_c \ H_{c1} \ H_{c2}]^T, X_o = [Q_o \ H_{o1} \ H_{o2}]^T \quad (15)$$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{Q_c}^2 & \rho_{QH1}\sigma_{Q_c}\sigma_{H1} & \rho_{QH2}\sigma_{Q_c}\sigma_{H2} \\ \rho_{H1Q}\sigma_{H1}\sigma_Q & \sigma_{H1}^2 & \rho_{H1H2}\sigma_{H1}\sigma_{H2} \\ \rho_{H2Q}\sigma_{H2}\sigma_Q & \rho_{H2H1}\sigma_{H2}\sigma_{H1} & \sigma_{H2}^2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

として、枚方地点のH-Q換算流量の観測誤差 σ_Q を5%程度、水位の観測誤差 σ_{H1}, σ_{H2} を0.5m、誤差の相互相関係数 ρ を全て0.3と設定した。

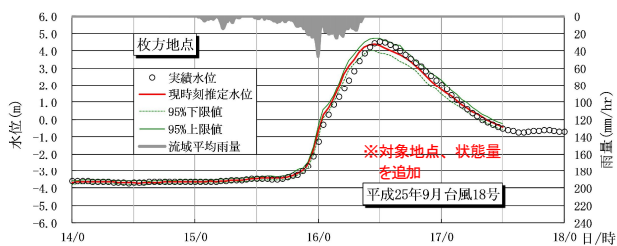


図-7 フィルタリング対象地点・状態量追加後の枚方地点水位

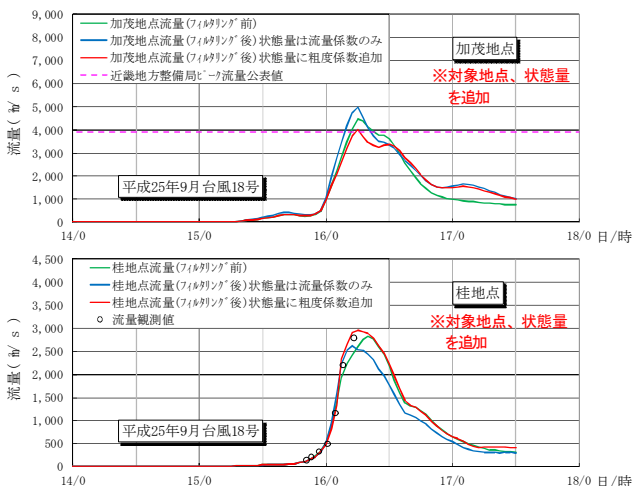


図-8 フィルタリング対象地点、状態量追加後の加茂地点・桂地点流量

b) 状態量への粗度係数の追加

状態量に粗度係数にかかる係数を加えた条件でフィルタリング計算を実施した。初期値は既往洪水で検証した粗度係数（河川別・縦断別に、淀川0.043～0.045、宇治川0.048、木津川0.043～0.045、桂川0.035）とした。

c) 対象地点・状態量追加後のフィルタリング結果

フィルタリング後の各地点の水位（図-7に枚方地点を例示）より、予測精度が良好であることを確認した。次に、図-8にフィルタリング後の加茂・桂地点の流量と状態量変化を示す。この結果より、多地点を対象にフィルタリングした場合、枚方地点のみを対象としたフィルタリング（図-5）よりも流量観測値などの再現性が高くなることが確認できた。また、状態量に粗度係数にかかる係数を追加することで、再現性がさらに向上し、洪水の立ち上がりやピークにおいて実績流量を高精度に捉えることができるようになった。

4. おわりに

本論では、洪水予測システムにおける予測精度の向上に向けて、雨量データに含まれる誤差の補正に関する観点及び、誤差を含む境界条件を用いた予測水位の補正に関する観点の双方から、現状の課題を提示するとともにその改良方策を提案した。

雨量データ（X&C合成レーダ雨量）に含まれる誤差

の補正に関しては、レーダサイトからの距離が遠い地域において実況雨量の精度が低い洪水が確認されたため、当該流域で精度が良好な解析雨量を用い、実況雨量の補正係数を導入する方策を提案した。また、実況雨量の精度が低い流域での予測雨量の代替として、気象庁配信の雨量データを使用する方策を提示した。

高解像度かつ高精度とされるXRAINのレーダ雨量についても、小流域ごとに精度を確認する視点や精度が低い場合に個別に補正・代替する視点の重要性を本論では示しており、今後は、生起する洪水に対して実況雨量の補正係数の信頼性を検証しながら向上させていくとともに、予測雨量の代替として提示した気象庁配信の雨量データの適用性を確認していく予定である。

一方、誤差を含む境界条件を用いた予測水位の補正に関しては、フィルタリング対象が単点（枚方地点）のみの場合、フィルタリング後の境界流量の再現性に不整合が認められたため、フィルタリング対象を多地点にすることを提案した。多地点を対象としたデータ同化により、枚方地点の再現性を確保しながらも、境界流量の再現性が向上することを確認した。また、状態量に粗度係数にかかる係数を追加することにより、再現性がさらに向上することも確認できた。

淀川水系のように誤差を含む複数の境界条件を用いた水位予測では、本論で示した多地点を対象としたフィルタリングや状態量の追加を検討し、データ同化方法を設計することが望ましい。今後は、本論で対象とした平成25年9月台風18号だけでなく、その他の主要な洪水について、本手法の適用性を検証する予定である。

謝辞：洪水データは国土交通省近畿地方整備局淀川ダム統合管理事務所から提供を受けた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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，19，pp.241-246，2013。
- 2) 辻倉裕喜，田中耕司，宮本賢治：水位予測における粒子フィルタの適用上の課題とその対応，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.72/No.4，pp.L181-L186，2016。
- 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，土木学会論文集B1(水工学)，67(4)，pp.L511-L516，2011。
- 4) 藤岡奨，佐山敬洋，三浦裕司，越田智喜，深見和彦：レーダ雨量の不確実性を反映した降雨場の生成に関する研究，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.69，No.4，pp.L319-L324，2013。
- 5) 北川源四郎：時系列解析入門，岩波書店，2005。
- 6) 樋口知之：粒子フィルタ，電子情報通信学会誌，Vol.88，No.12，pp.989-994，2005。

(2017. 4. 3受付)