

## 〈研究発表〉

### アンサンブルデータ同化を用いた原水濁度の予測精度向上に関する研究

川口 智也<sup>1)</sup>, 村田 道拓<sup>2)</sup>, 濱谷 義晃<sup>2)</sup>, 篠田 成郎<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> ㈱日水コン 中央研究所  
(〒163-1122 東京都新宿区西新宿 6-22-1 新宿スクエアタワー)

<sup>2)</sup> ㈱日水コン コンサルティング本部 環境・資源部  
(〒163-1122 東京都新宿区西新宿 6-22-1 新宿スクエアタワー E-mail: murata\_m@nissuicon.co.jp)

<sup>3)</sup> 岐阜大学 工学部社会基盤工学科  
(〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1 岐阜大学工学部 E516 室)

#### 概要

著者らは、アンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) による原水濁度の実時間予測の研究を進めている。ただし、解析誤差共分散行列を求める手法は観測データに摂動を与える摂動観測法 (PO 法) を用いており予測性能に課題が残されている。本研究では、PO 法に加えて現在の主流である平方根フィルタ (SRF 法) を導入しケーススタディーを実施した。降雨完全予測条件下にて、2つの手法の予測性能を評価した結果、SRF 法が優位であることを確認した。また、降水短時間予報を用いた予測降雨条件下にて、SRF 法による濁度の予測性能は良好であることを明らかにした。

キーワード：原水濁度、アンサンブルカルマンフィルタ、アンサンブルアップデート、摂動観測法、平方根フィルタ

原稿受付 2024.6.12

EICA: 29(2・3) 127-131

## 1. はじめに

過去、断水に至った水道被害件数は台風や豪雨に起因したものが多く、最近の気候変動によるゲリラ豪雨の増加傾向から高濁度の発生に伴う原水水質の悪化への対応が望まれている。著者らは、原水濁度の把握は気候変動による適応策として喫緊の課題と考え、これまでにアンサンブルカルマンフィルタ (以下、EnKF) を用いた原水濁度の実時間予測<sup>1)</sup>を進めている。ただし、予測精度に次の課題が残されており、本研究では常呂川水系を対象としたケーススタディーを通して、これら内容を明らかにする。

- ・アンサンブルアップデートと呼ばれる解析誤差共分散行列を計算するプロセスで観測データに摂動を与える摂動観測法 (PO 法)<sup>2)</sup>を用いている。現在、現業気象機関や研究機関で最も採用されているのは PO 法でなく平方根フィルタ (SRF 法)<sup>3)</sup>であり、実装方法の違いによる両者の予測精度を明らかにする必要がある。
- ・降水短時間予報を用いた予測降雨条件下にて、予測降雨の精度を評価すること、流れ解析とデータ同化を用いた原水濁度の予測精度を明らかにする必要がある。

## 2. 方法

### 2.1 シミュレーションモデル

#### (1) 流れ解析モデル<sup>1)</sup>

日本国内を対象に整備されている流域データ<sup>4)</sup>を利用するため、AIST-SHANEL<sup>5,6)</sup>を参考に構築した流れ解析モデルを利用した。水平方向に3次メッシュ、鉛直方向に地表面と土壌を3層 (表層から A, B, C) に分割し、地表面は5つの土地利用 (山林、水田、畑、市街地、水域) を考慮する。地表面、土壌 A 層、河道では出水時での降雨～流出の非線形性を考慮して kinematic wave 法を、土壌 B, C 層は線形貯留法を用いる。

#### (2) 濁度解析モデル<sup>1)</sup>

1次元移流拡散モデルを用い、3次メッシュ単位の原水濁度を推定する。

#### (3) 対象水系と出水イベント<sup>1)</sup>

対象水系は、常呂川水系の上常呂地点上流域 (流域面積 718 km<sup>2</sup>) を選定した。出水イベントは 2009～2018 年の 10ヶ年の降雨量と濁度の 1 時間データから、ひと雨を 0.5 mm 以上かつ前後 12 時間無降雨と定義して 962 個の独立降雨を抽出し、この中から総降雨量の最も多い独立降雨 (降雨番号 739: 2016/8/17 3:00～2016/8/22 6:00, 継続時間 124 時間) を対象とした。ここで、降雨量は対象水系のアメダス観測地点に基づくティーセン分割にて支配面積の最も大きな置戸

常元地点、河川流量は取水口近傍の上常呂地点の1時間データ、原水濁度は取水口のデータを用いた。

## 2.2 データ同化手法

### (1) アンサンブルカルマンフィルタ

EnKFは時間発展による予報( $f$ )と、尤もらしい状態を推定する解析( $a$ )の2つの手続きから構成される。時刻 $i$ の予報値 $x_i^{f(k)}$ は、時刻 $i-1$ の解析値 $x_i^{a(k)}$ を初期値としたシミュレーションモデルによる予報から得られる。その予報値と同じ時刻 $i$ での観測値を同化することで、時刻 $i$ において予報値及び観測値の両者より尤もらしい解析値 $x_i^{a(k)}$ が得られる。それ以降も同様に、予報と観測、解析の手続きを逐次的に繰り返す。 $k$ はアンサンブルメンバーを表す添字である。

データ同化サイクルにおいて、時刻 $i$ の予報値 $x_i^{f(k)}$ を得るには時刻 $i-1$ の解析値 $x_i^{a(k)}$ だけでなくアンサンブル摂動 $\delta x_i^{a(k)}$ が必要となる。アンサンブル摂動を得るための作業はアンサンブルアップデートと呼ばれ、解析誤差共分散行列を計算するプロセスである。このプロセスの実装方法は大きく2つに分けられ、1つは摂動観測法(PO法)、もう1つは平方根フィルタ(SRF法)である。PO法は初期のEnKFでよく用いられたものの、この方法は観測データに摂動を与えるといった新たなサンプリングエラーを導入しており、観測データに摂動を与えないSRF法に比べて性能が劣る懸念が指摘<sup>3)</sup>されている。現在、現業気象機関や研究機関で最も採用されている実装方法はSRF法である。著者らのEnKFはアンサンブルアップデートにPO法を用いていることから予測性能に課題があると考えられる。本研究では、降雨完全予測条件下にてPO法とSRF法の予測精度を明らかにし、アンサンブルアップデートのアルゴリズムを選定する。なお、観測誤差 $R$ は濁度の観測値 $yobs_i$ を用いて、 $R=(0.1 \cdot yobs_i)^2$ と設定した。

### (2) 共分散膨張

データ同化は不確実性を持つ指標を状態量とし、シミュレーションモデルでは観測値を完全に再現できないものとして捉え、システムモデルと観測モデルを連立させた状態空間モデルを考える。これまで、出水時における濁度の発生源とされる畑の $L-Q$ 式の係数 $\alpha$ 、 $\beta$ を状態量とし、時不変のパラメータ $\alpha$ 、 $\beta$ であるもののシミュレーションに完全性を仮定しないで、システムモデルにランダムウォークを用いて直接的に摂動を加えた。EnKFではデータ同化サイクルにおいて背景誤差共分散を繰り返し小さく見積もると、生成されるアンサンブル摂動は徐々に小さくなり、最終的にはカルマンゲイン $K_i$ が極端に小さくなることによって観測情報は解析値にほとんど取り込まれなくなる、すなわちフィルタが発散してしまうことへの対応である。

ただし、この方法では予報値に摂動を直接的に加えるため、 $\alpha$ 、 $\beta$ が時不変のパラメータであるとの前提を壊してしまうため、本研究では共分散膨張を導入した。ここでは、解析誤差共分散 $P_i^a$ を任意の正数 $\delta$ を用いて恣意的に $P_i^a(1+\delta)$ と修正する方法を用いた。 $\delta=0.15$ とした。

### (3) 局所化

状態量が多い、すなわち自由度の大きな大気・海洋モデルは計算負荷が大きいいため、アンサンブル数は高々100程度となる。モデルの自由度(状態量の数)に対してアンサンブル数が少ないと離れた点の間の偽相関が生ずるため、重み関数を用いて誤差共分散を強制的に小さくする強い局所化が必要となる。一方、状態量が少ない、すなわち低自由度のモデルは局所化を必要としない。 $L-Q$ 式の係数 $\alpha$ 、 $\beta$ を状態量とする本研究は局所化を必要としない。計算負荷を考慮してアンサンブル数は200とした。

## 3. 予測降雨の精度評価と流れ解析

### 3.1 予測降雨の精度評価

河川流域を対象にした出水時の原水濁度の推定に必要な降雨量の時間・空間の解像度から、利用する予測降雨のプロダクトは気象庁の降水短時間予報を選定した。実況値として解析雨量、予測値として1~6時間先の予測雨量を用いた(**Fig. 1**参照)。解析雨量とは、気象レーダーの観測データに加え、全国の雨量計データを組み合わせて、1時間の降水量分布を1km四方の細かさで解析したものであり、雨量計の観測網にかからないような局所的な強雨も把握できるとされる。

**Fig. 2**は置戸常元地点のアメダス降雨量と降水短時間予報の解析雨量から得た両者の累積雨量を比較したものである。解析雨量は雨量計データが反映されており、両者は整合していることが確認できる。

次に、降水短時間予報の予測精度を気象庁スコア<sup>7)</sup>(Score)により評価する。気象庁スコアは、やや強い雨に対する予測精度を評価するものであり、5km格子ごとに計算した比を、日本の陸上付近で1年間にわたって平均したものである。 $p=3$ のスコアが気象庁から公表<sup>7)</sup>されている。気象庁スコアは0~1の値をとり、値が大きいほど予測精度が良いことを意味する。2023年のそれは0.5であり、実況値は少ない場合で予測値の半分、多い場合で予測値の2倍の範囲に納まっていると解釈できる。

$$Score = \frac{1}{n} \sum_i \frac{\min(\hat{r}(t|t-p), r(t))}{\max(\hat{r}(t|t-p), r(t))}$$

ここに、 $r(t)$ : 解析雨量 mm/hr,  $\hat{r}(t|t-p)$ : 時刻

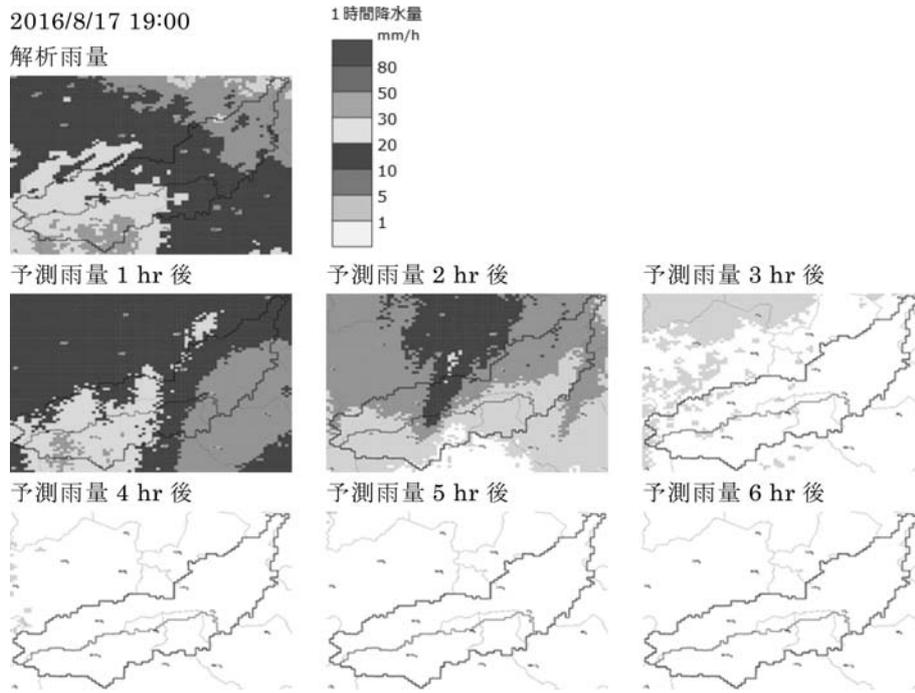


Fig. 1 Operational forecast and actual precipitation used by Japan Meteorological Agency (JMA), which are called Short-Range Forecast of Precipitation

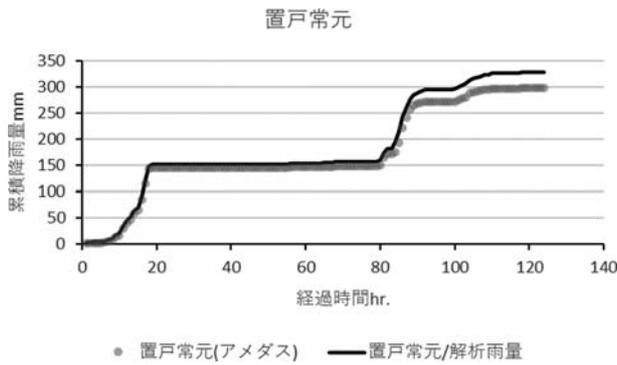


Fig. 2 Comparisons between the actual precipitation and Radar-Automated Meteorological Data Acquisition System (AmeDAS) Precipitation

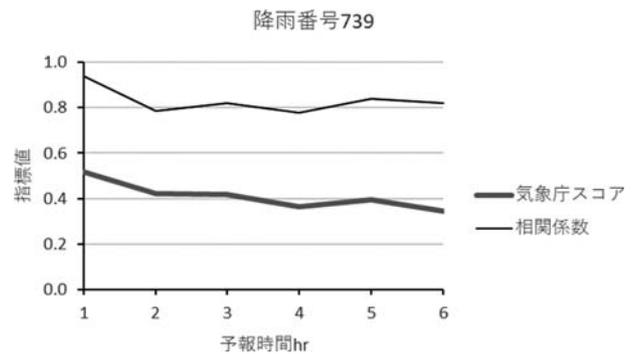


Fig. 3 Accuracy validation of the forecast precipitation

$t-p$ における時刻  $t$  の予測雨量 mm/hr,  $n$ : サンプル数である。ただし,  $r(t|t-p) + r(t) \geq 20$ , である。

Fig. 3 は上常呂地点上流域の解析雨量と予測雨量から求めた気象庁スコアと相関係数を示したものである。 $p=3$  のスコアは約 0.4 となっており、公表値と同程度であることから当該水系の予測雨量も現在の技術相当で予測できているものと考えられる。

### 3.2 流れ解析

Fig. 4 は対象水系の下流端にある上常呂地点の流量の推定結果を示したものである。入力とする降雨データは、アメダス降雨量を用いた場合（降雨完全予測条件下）、降水短時間予報（解析雨量と予測雨量を用いた予測降雨条件下）の 2 つである。現在時刻の推定値はアメダス降雨量と解析雨量を入力とした場合で両者は一致しており、観測値とも良好に整合している。0.7 以上で推定精度が良好とされる Nash-Sutcliffe 係

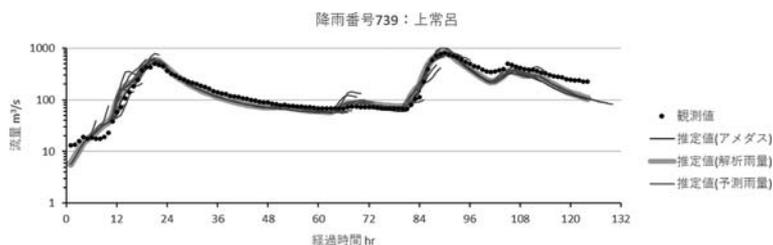


Fig. 4 Simulated flood runoff hydrograph

数はアメダス降雨量を入力とする場合で 0.88, 解析雨量を入力とする場合で 0.90 である。1~6 時間先の予測雨量を用いた流量の予測値は, 予測雨量の推定精度から解析雨量を用いた流量の推定値に一致しないことがあり観測値に比べて大きめに予測されている。

#### 4. 原水濁度の実時間予測

##### 4.1 降雨完全予測条件下における原水濁度の予測

Fig. 5 は取水口での原水濁度のデータを同化し, 予測降雨の推定精度の影響の無い降雨完全予測条件下にて原水濁度を予測したものである。アンサンブルアップデートに PO 法と SRF 法を用いた。この結果, 両者による予測結果に大きな差異は認められないものの,

計算開始から間もない経過時間 12 時間までにおいて, 濁度の解析値と予測値との乖離が PO 法では認められるが, SRF 法でその乖離は認められない。これは観測データに摂動を与えて新たなサンプリングエラーを導入したことが解析値に反映されたものと考えられる。SRF 法の予測精度は PO 法に比べ優位と判断した。

##### 4.2 降水短時間予報を用いた予測降雨条件下における原水濁度の予測

Fig. 6 は降水短時間予報を用いた予測降雨条件下において, 取水口での原水濁度を予測したものである。アンサンブルアップデートに SRF 法を用いた。予測値は観測値を良好に再現していることが確認できる。ただし, 観測値が乱高下する経過時間 24 時間まで

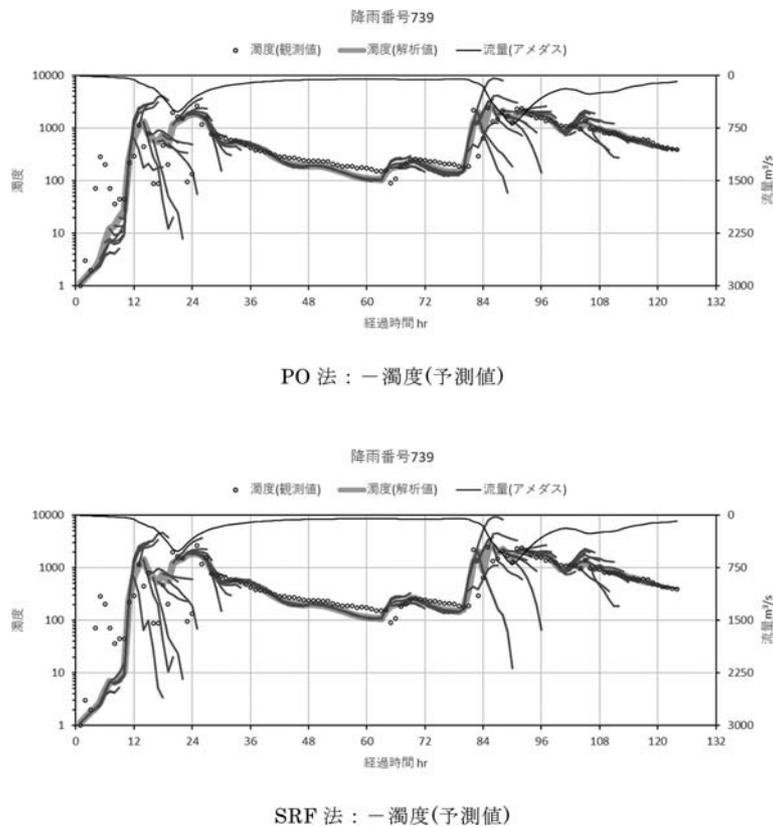


Fig. 5 Forecasting of turbid river water under the condition of AmeDAS Precipitation

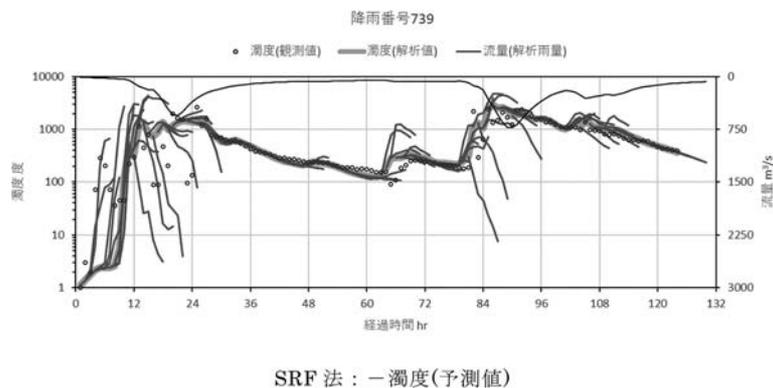


Fig. 6 Forecasting of turbid river water under the condition of Short-Range Forecast of Precipitation

は予測値も観測値に同調しており、予測値をそのまま情報として利用しにくい。より良い同化システムの設計には、個々の観測データがどの程度、予測の改善に寄与しているのか定量化することが重要である。観測データが予報をどの程度改善したかを測る手法 EFSO (Ensemble FSO)<sup>8)</sup> を用いて、観測が予測に与える影響を把握することにより、データ同化する・しないを判断して、予測精度の向上だけでなく安定した予測情報の提供が課題である。

## 5. おわりに

本研究では常呂川水系を対象としたケーススタディーを通して、1) 降雨完全予測条件下での原水濁度の予測結果から、アンサンブルアップデートの実装は PO 法でなく SRF 法が望ましいことと、2) 現在、採用実績の多い SRF 法により降水短時間予報を用いた予測降雨条件下において原水濁度は良好に予測できることの2つを検証した。

## 参考文献

- 1) 川口智也, 村田道拓, 濱谷義晃, 榎原康之, 篠田成郎: データ同化を用いた原水濁度の実時間予測手法の開発, 水道協会雑誌, Vol. 92, No. 4, pp. 30-42 (2023)
- 2) 三好建正: 第3章カルマンフィルタ, 気象学におけるデータ同化, 気象研究ノート, 第217号, pp. 69-95 (2008)
- 3) J.S. Whitaker and T.M. Hamill: Ensemble data assimilation without perturbed observations, Mon. Wea. Rev., 130, 1913-1924 (2002)
- 4) 石川百合子, 川口智哉, 東野晴行: 国内の任意水系を対象にした化学物質リスク評価のための産総研-水系暴露解析モデル (AIST-SHANEL) Ver. 3.0, 水環境学会誌, Vol. 40, No. 5, pp. 199-208 (2017)
- 5) 石川百合子, 東海明宏: 河川流域における化学物質リスク評価のための産総研-水系暴露解析モデルの開発, 水環境学会誌, Vol. 29, No. 12, pp. 797-807 (2006)
- 6) 石川百合子, 川口智哉, 東野晴行: 産総研-水系暴露解析モデル (AIST-SHANEL) による日本全国の1級水系を対象とした化学物質濃度の推定, 水環境学会誌, Vol. 35, No. 4, pp. 65-72 (2012)
- 7) 気象庁, ([https://www.data.jma.go.jp/yoho/kotan\\_kensho/kotan\\_hyoka.html](https://www.data.jma.go.jp/yoho/kotan_kensho/kotan_hyoka.html)) (2024年6月11日最終閲覧)
- 8) K. Eugenia, O. Yoichiro, M. Takemasa and L. Junjie: A simpler formulation of forecast sensitivity to observations: application to ensemble Kalman filters, Tellus A, 64, 18462 (2012)