

アンサンブルカルマンフィルタによる分布型流出モデルの水位データ同化に関する研究
Application of Ensemble Kalman Filter to a Distributed Rainfall-Runoff Model with Observed
Water Level Data (for presentation in Japanese)

○松本紘治・佐山敬洋

○Koji MATSUMOTO, Takahiro SAYAMA

Distributed rainfall-runoff models have been widely used for real-time flood forecasting. The models include uncertainties due to input, initial conditions, parameters and model structure. Data assimilation is the way to improve the accuracy of predictions using observation data. In this study, we evaluate the performance of Ensemble Kalman filter to be applied to the Rainfall-Runoff-Inundation model. The water level is first estimated with the model, and the distributed water depths are updated with Ensemble Kalman filter based on observations. This study proposes two cases in the application. Case1 prepares 21 ensemble members with ensemble rainfall prediction and calculates independently. Case2 prepares 21 ensemble members with ensemble rainfall prediction and 1 member with observed rainfall, so that the initial value of estimation is made by the observed rainfall input. The results of are compared also with Optimal Interpolation (OI), and Case2 shows the better accuracy. (144 words)

1. 背景

近年、集中豪雨の発生頻度の増加やその被害の甚大化によって、その対策の必要性が大きくなっている。それに伴い、予測精度の向上は中小河川においても重要である。

豪雨による氾濫予測に関しては分布型流出モデルの開発やその適用へと研究が進められ、計算精度も向上している。しかし依然として、モデル構造やパラメータなどに不確定さを含んでおり、当然誤差を含む。

一方で、現在の河川の水位や流量に関しては観測を通して正確に知ることが可能である。以前はコスト面での問題が大きかったが、現在では全国で低コストの水位計設置が進められている。しかしながら、全地点で観測の情報を得ることは困難であり、観測情報だけでは数時間後の水位や流量の情報を知ることができない。

データ同化とはベイズの定理を応用してシミュレーションにより算出した状態量の中に、観測情報を反映させる方法であり、前述したモデル予測と観測の問題点を解決することが期待できる。

流出モデルを観測流量で同化する研究は 1960 年に日野¹⁾がカルマンフィルタを流出モデルに適用したことが始まりであり、様々な手法を用いて研究が進められてきた。しかし、三宅ら²⁾に代表

される観測水位を用いた同化に関する研究は例が少なく、この研究では重み行列を時間変化させない最適内挿法を用いており、時々刻々と変化するモデル誤差を反映して、かつ観測水位を用いた研究は十分に進められていないのが現状である。

本研究ではアンサンブルカルマンフィルタ（以下 EnKF）により、観測水位を同化させ、それによって予測精度がどのように向上するのか、また最適内挿法と比較し、その効果は十分に得られているのかを比較、考察することを目的とする。

2. 対象流域と降雨

本研究では兵庫県に位置する千種川流域を対象流域とする。千種川は流域面積 754km²であり、その流域のほぼ全体が森林部である。水源である千種町西河内から蛇行しながら流下し、中流部で佐用川、下流部で矢野川などと合流し、播磨灘へと流れる。

この流域ではしばしば豪雨により悩まされており、2009 年の台風 9 号を契機に大規模な河道改修が行われている。

また本研究では 2004 年の 9 月 27 日午前 00 時から 9 月 30 日午前 0 時までの降雨と 2018 年 7 月 5 日午前 0 時から 7 月 8 日午前 0 時の降雨を用いる。

3. 手法

本研究では EnKF を用いて観測水位データを予

測結果に同化させる。EnKF はモデルによる一期先の予測と、カルマンゲインを用いたフィルタリングを繰り返し行うことで、目的の時間までデータ同化を繰り返し行うことができる。

一期先予測は Rainfall-Runoff-Inundation モデル (以下 RRI モデル) を用いて行う。このモデルは標高データや雨量データを入力し流域一体で降雨流出と洪水氾濫を解析するモデルである。本研究ではこのモデルにより水位を予測する。

フィルタリングは以下の式に基づいて行う。

$$x_{i,t}^a = x_{i,t}^b + K_t(o_t - H_t x_{i,t}^b) \quad (1)$$

$$K_t = P_t H_t^T [H_t P_t H_t^T + R_t]^{-1} \quad (2)$$

ここで x は状態量であり、 a が同化後の分析値、 b が同化前の予測値を表す。また K はカルマンゲインであり、これは観測演算子 H や n 個のアンサンブルメンバーにより導出される予測誤差分散共分散行列 P 、観測誤差分散共分散行列 R を基に式(2)より導出される。また、 o は観測値である。なお、 $x_{i,t}^a$ は時刻 t における i 番目のアンサンブルメンバーの分析値を表す。

本研究では千種川流域において 2018 年 7 月 5 日午前 0 時から 7 月 5 日午前 9 時まで、観測雨量データを入力し、RRI モデルを用いて水深を計算する。その後、7 月 5 日 9 時から 7 月 8 日午前 0 時まで、3 時間ごとに RRI モデルを用いて水位を予測し、EnKF を適用させて観測水位データを同化させる。その際、アンサンブルメンバーは 21 つの降雨アンサンブル予測によって生成する。本研究では、同化後の結果をアンサンブルメンバーのアンサンブル平均とし、各アンサンブルメンバーを独立させ計算を行うものを case1 とし、観測降雨データを入力して計算を行った状態量の同化後の値を同化後の結果とし、その後 3 時間の予測をこの値を複製し降雨アンサンブル予測を各メンバーに入力して行うものを case2 とする。

4. 結果

以下に上記の EnKF を適用した結果の二乗平均平方根誤差 (以下 RMSE) とアンサンブル平均した水深の比較を示す。比較を行うのは上記の case1 と case2 と、case1 と同様の手順で同化方法のみ最適内挿法を用いているものである。

なお、ここ用いる最適内挿法の重み行列などは三宅らの研究^[2]に基づいている。

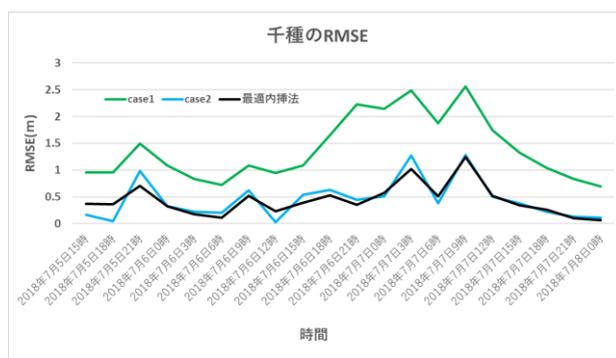


図1 千種地点の手法別 RMSE

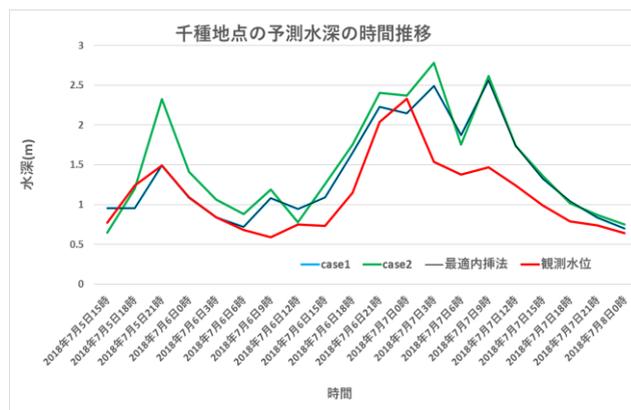


図2 千種地点の手法別平均予測水深

グラフから明らかなように、case1 は他の方法と比較してメンバーのばらつきが大きく、平均すると最適内挿法の予測平均と酷似した結果となる。一方で、case2 はばらつきが小さいが今回の結果では予測精度の向上が小さかった。これは観測雨量データを入力して計算を行った水深の予測精度に問題があったのが原因であり、この問題が解決されれば大幅な精度向上が期待される。

5. まとめ

本研究では、降雨アンサンブル予測を用いてノイズを表現し、それを用いて生成したアンサンブルメンバーを用いて EnKF の適用とその予測精度の変化を比較、考察した。降雨アンサンブル予測によってノイズは表現されており、観測値に予測精度の向上がみとめられた。一方で、そのアンサンブル予測や、観測雨量データによって適用結果が大きく左右されることも課題として生じた。

6. 参考文献

- [1]日野 幹雄：水文流出予測へのカルマンフィルター理論の適用，土木学会論文報告集，第221号1、I_39-I_47, 1974.
- [2]三宅 慎太郎，佐用 敬洋，寶 馨：最適内挿法による分布型水文モデルの河川水位データ同化法，水工学論文集，Vol.74, No.4, I_1009-I_1014, 2018.