

## 排水解析モデルへの拡張カルマンフィルタの適用

## Water Level Simulation in Lowland Area by Data Assimilation Using Extended Kalman Filter

○吉永育生<sup>\*</sup>・福重 雄大<sup>\*</sup>・皆川 裕樹<sup>\*</sup>YOSHINAGA Ikuo<sup>\*</sup>, FUKUSHIGE Yudai<sup>\*</sup>, MINAKAWA Hiroki<sup>\*</sup>1. はじめに

気候変動や流域環境の変化等により、河川や水路の溢水による浸水被害が頻発するなかで、水理解析モデルによる水位の予測や浸水する範囲や時間の予測は、各種の対策を行う上で有効である。これまでに多数の水理解析モデルが開発されており、例えば吉川ら(2011)、安瀬地ら(2021)が一次元不定流解析に基づくモデルを開発している。なお、一次元の基礎式に基づくモデルは、二次元のモデルに比べて計算用データの作成に時間を要し、物理的な再現性に劣るものの、計算負荷が小さい利点を有している。

本研究は、低平な干拓地にクリークが広がる地域の氾濫現象を対象とし、安瀬地ら(2021)のモデルに、データ同化手法を導入することで再現性の向上を目指したものであり、その結果を報告する。

2. 方法2.1 水理モデル

適用した水理モデルは、安瀬地ら(2021)が提案した一次元不定流のモデルである。排水路の流れは、開水路における連続式と1次元の水面形方程式を基礎式とし、離散化は1次精度の風上差分による陽的差分である。背後地は、排水路との相互の流出入を考慮して排水路に接続する幅広の水路とみなすことで基礎式を局所慣性方程式とし、陰的に差分している。

2.2 データ同化手法

拡張カルマンフィルタ理論の離散化表示による計算式及び計算過程は次のとおり。なお、計算式の表記方法とコーディングは足立と丸田(2012)、片山(2011)を参考にしている。

1)初期値を $\hat{x}_{0/-1} = \bar{x}_0$ ,  $P_{0/-1} = P_0$ とおき,  $t = 0$ とする。

2)予測ステップ Input :  $[\hat{x}_{t/t-1}, P_{t/t-1}] \rightarrow$  Output :  $[\hat{x}_{t/t}, P_{t/t}]$

・事前状態推定値  $\hat{x}_{t/t} = f_t(\hat{x}_{t/t-1})$

・状態推定式のヤコビ行列  $\hat{F}_{t-1} = \left[ \frac{\partial f_t}{\partial x_t} \right]_{x_t = \hat{x}_{t/t-1}}$

・事前予測誤差の共分散行列  $P_{t/t} = \hat{F}_{t-1} P_{t/t-1} \hat{F}_{t-1}^T + Q_{t-1}$

ここで、 $f_t$ は状態推定式、 $Q_t$ はシステム雑音の共分散行列。なお、水位の基礎式である移流方程式を離散化する際に、時間方向にオイラー法、空間方向に中心差分法を適用したところ、計算が不安定となった。このため、空間方向は風上差分を適用した。

3)フィルタリングステップ Input :  $[\hat{x}_{t/t}, P_{t/t}, y_t] \rightarrow$  Output :  $[\hat{x}_{t+1/t}, P_{t+1/t}]$

・観測行列のヤコビ行列  $\hat{H}_t = \left[ \frac{\partial h_t}{\partial x_t} \right]_{x_t = \hat{x}_{t/t}}$

・拡張カルマンゲイン  $K_t = P_{t/t} \hat{H}_t^T [\hat{H}_t P_{t/t} \hat{H}_t^T + R_t]^{-1}$

<sup>\*</sup>農研機構 農村工学研究部門 Institute for Rural Engineering, National Agriculture and Food Research Organization

キーワード：水理解析，データ同化，リアルタイム予測

ここで、 $R_t$ は観測雑音の共分散行列.

- ・状態推定値  $\hat{x}_{t/t+1} = \hat{x}_{t/t} + K_t [y_t - h_t(\hat{x}_{t/t})]$
  - ・事後誤差の共分散行列  $P_{t/t+1} = P_{t/t} - K_t \hat{H}_t P_{t/t}$
- 以後は 2), 3) を繰り返す.

### 3. テストケースその1

解析解が公表されている矢野 (1958) の条件で水理解析を実施した. 計算条件は次のとおり.  
水路長: 100km, 初期水深: 0.5m, 河床勾配: 1/2,500, Chezy の定数: 40, 上流側の境界条件: 0~4hr で 0m から 5m まで上昇し, 4~32hr で 5m から 0m に下降する.

観測点を上流端から 20km の地点に設定し, 解析解に一定のノイズ的な誤差を加えた値を観測値とする. 観測値を直接代入する場合と, 拡張カルマンフィルタによってデータ同化する場合の上流端から 40km 地点の値の差異を評価する. 結果の詳細はセッション会場にて報告する.

### 4. テストケースその2

佐賀市の低平な干拓地を解析対象とし, 当該地区の最も東側に位置する幹線水路を計算対象とした. データ同化の有無による計算精度の検証は, データ同化無しのケースは, 計算対象範囲の上流側と下流側の端点に水位境界等の条件を与えて計算を行った. データ同化有りのケースは, データ同化無しのケースと同じ境界条件を与えつつ, 地点 A と地点 C に実測値によるデータ同化を行い, 地点 B にて検証を行った. データ同化の頻度は 10 秒毎とし, 直近の実測値が次の観測時刻まで継続するような設定とした.

計算結果の比較を Fig.1 に示す. 計算期間を通じて, データ同化を行うことで地点 B の実測値に近づいている. RMSE は, データ同化なしの場合 0.20, データ同化ありの場合 0.10 であった. なお, データ同化によって馴らし計算も含めた計算時間は 6.7 min から 137.9 min へと増加した.

### 5. おわりに

一次元不定流モデルにカルマンフィルタを導入することによって, 近傍の地点における水位の再現性の向上が確認できた. 計測器や通信環境が向上しており, 実測値を取り込みながらの逐次計算は益々増えると思われる. 本研究で得られた知見がその一助になれば幸いである.

謝辞: 本研究は, 内閣府総合科学技術・イノベーション会議 SIP3 期 (スマート防災ネットワークの構築: JPJ012289, 推進機関: (国研) 防災科研) の助成を受けて実施された. プログラム開発等に (株) アーク情報システムの名古屋靖一郎氏と西田尚央氏の協力を頂いた. 研究資金の提供, 及び関係者のご協力に謝意を表明する.

#### 引用文献

- 安瀬地一作ら (2021) 深層学習と物理モデルを用いたリアルタイム水位予測システム, 水土の知, 89(1), 11-15  
足立修一, 丸田一郎 (2012) カルマンフィルタの基礎, 東京電機大学出版局, 240p  
片山徹 (2011) 非線形カルマンフィルタ, 朝倉書店, 192p  
矢野勝正 (1958) 洪水流の特性について, 京都大学防災研究所年報, 2, 27-40  
吉川夏樹ら (2011) 低平農業地帯を対象とした内水氾濫解析モデルの開発, 土木学会論文集, 67, 991-996

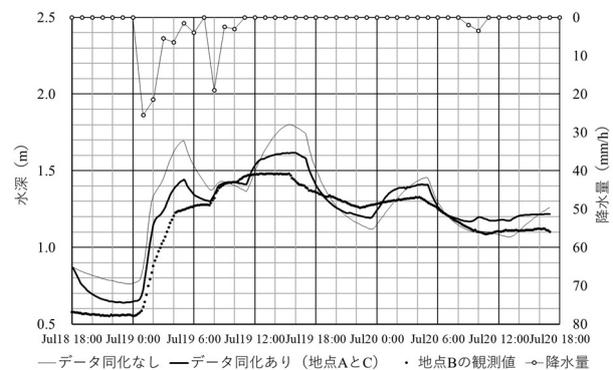


Fig. 2 地点 B におけるデータ同化の比較  
Simulation results comparison between not treated via data assimilation and treated via extended kalman filter