

# 粒子フィルタ法を用いた高濁度河川水のリアルタイム発生予測

岐阜大学工学部  
 岐阜大学大学院自然科学技術研究科  
 (株)日水コン中央研究所  
 岐阜大学工学部

学生会員 ○中澤 麗稀  
 学生会員 范 顔楊  
 正会員 川口 智哉  
 正会員 篠田 成郎

## 1 はじめに

近年、降水現象の極端化に伴い、森林や耕地などから流出する高濃度の濁質を含む河川水が問題になっている。高濁度発生時には、水道事故防止のため、上水道原水取水を制限する必要があるが、そのタイミングを決める技術は確立されていない。

林ら<sup>1)</sup>および范ら<sup>2)</sup>は、濁質が降雨流出成分に応じて流出するとした新たな濁質流出モデルを提案するとともに、データ同化手法の一つである MCMC 法を用いてモデルパラメータを同定した。その結果、全体的な濁度の増減傾向は再現できるものの、高濁度発生イベントごとの推定濁度はそれほど高くはなく、取水タイミングをリアルタイム推定できるほどの精度は得られていないことが判明した。

そこで本研究では、時々刻々のデータ更新に伴いモデルパラメータを逐次同定できるデータ同化手法である粒子フィルタ法を用いてモデルパラメータを同定し、濁度のリアルタイム予測を目指す。

## 2 濁質流出モデルへの粒子フィルタ法の適用

### 2.1 濁質流出現象のモデル化

降水量や流量によって一意的に濁度が定まらない性質をヒステリシス特性と呼び、その適切な評価が濁質予測には不可欠となる。本研究では林ら<sup>1)</sup>によって構築されたヒステリシス特性を考慮した濁質流出モデルを用いる。濁質流出は、A (直接流出, 早い中間流出), B (遅い中間流出), C (基底流出) の3つの流出成分から生じていると仮定する。各流出成分にLQ式を適用した式を以下に示す。

$$L = \alpha_A Q_A^{\beta_A} + \alpha_B Q_B^{\beta_B} + \alpha_C Q_C^{\beta_C} \quad (1)$$

ここに、 $Q_i$ および $\alpha_i, \beta_i$ : 第*i*流出成分 (*i*: A, B, C) に関する流量およびパラメータである。基底流出からの濁質流出はほとんどないと仮定できるため  $L_C = \alpha_C Q_C^{\beta_C} = 0$  とする。ここでは、粒子フィルタ法の適用による濁度予測精度向上を確認することが主目的であるため、降雨流出モデルには集中型流出モデル<sup>3)</sup>を適用し、流出成分ごとの流量を求める。

### 2.2 粒子フィルタ法を用いた濁質流出モデルの同定

粒子フィルタ法はベイズの定理に基づくフィルタリングを用いて、任意

の観測モデルとシステムモデルを同化する手法である。粒子フィルタ法概念図を図1<sup>4)</sup>に示す。独立な実現値とする多数のアンサンブルメンバ (粒子) を用いて状態ベクトルの予測分布とフィルタ分布が得られる。フィルタ分布は観測値によって定まるそれぞれの予測粒子群の尤度を重みとしてリサンプリング (復元抽出) して求められる。予測とフィルタリングの操作を繰り返し、時々刻々の最適値を同定する。

状態ベクトルの定義方法によって様々なシステムモデルを構成することができ、高濁度発生時にはA層成分の影響が大きいと考えるため、表1に示すような3つのモデルについて検討する。モデルIはA層のパラメータ、モデルIIはA層の流量、モデルIIIはA層のパラメータおよび流量についてそれぞれ不確実性を考慮し、逐次修正する。粒子化の対象としていないパラメータについては范ら<sup>2)</sup>によって MCMC 法を用いて同定された結果  $\alpha_A = 97.82, \beta_A = 1.84, \alpha_B = 1.78, \beta_B = 1.94$  を固定して用いる。パラメータを粒子化するときの初期分布には MCMC 法による上記の値に基づく予測計算結果を用いる。

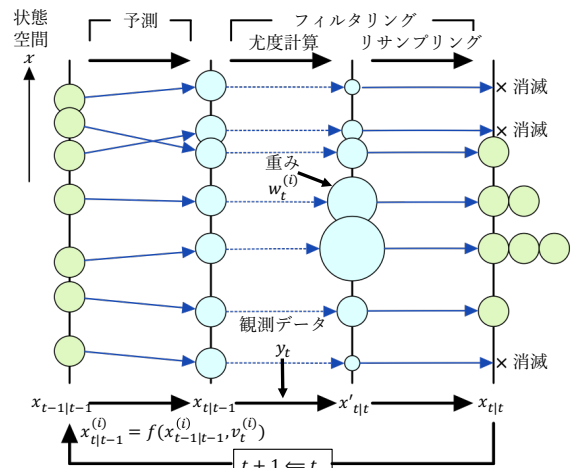


図1 粒子フィルタ法概念図

表1 システムモデルの設定条件

モデル	予測分布の各粒子 $x_{t t-1}^{(i)}$	上限・下限値	システムノイズ
I	$\begin{pmatrix} \alpha_{A,t t-1}^{(i)} \\ \beta_{A,t t-1}^{(i)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{A,t-1 t-1}^{(i)} \\ \beta_{A,t-1 t-1}^{(i)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_{\alpha_{A,t}}^{(i)} \\ v_{\beta_{A,t}}^{(i)} \end{pmatrix}$	$60 \leq \alpha_{A,t} \leq 500$ $1 \leq \beta_{A,t} \leq 5$	$v_{\alpha_{A,t}}^{(i)} \sim N(0, (0.2\alpha_{A,t-1 t-1}^{(i)})^2)$ $v_{\beta_{A,t}}^{(i)} \sim N(0, (0.2\beta_{A,t-1 t-1}^{(i)})^2)$
II	$Q_{A,t}^{(i)} = (Q_{A,Sim,t}^{(i)}) + (v_{Q_{A,t}}^{(i)})$	$0 \leq Q_{A,t} \leq 500$	$v_{Q_{A,t}}^{(i)} \sim N(0, 10^2)$
III	$\begin{pmatrix} \alpha_{A,t t-1}^{(i)} \\ \beta_{A,t t-1}^{(i)} \\ Q_{A,t}^{(i)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{A,t-1 t-1}^{(i)} \\ \beta_{A,t-1 t-1}^{(i)} \\ Q_{A,Sim,t}^{(i)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_{\alpha_{A,t}}^{(i)} \\ v_{\beta_{A,t}}^{(i)} \\ v_{Q_{A,t}}^{(i)} \end{pmatrix}$	$60 \leq \alpha_{A,t} \leq 140$ $1 \leq \beta_{A,t} \leq 3$ $0 \leq Q_{A,t} \leq 500$	$v_{\alpha_{A,t}}^{(i)} \sim N(0, (0.1\alpha_{A,t-1 t-1}^{(i)})^2)$ $v_{\beta_{A,t}}^{(i)} \sim N(0, (0.1\beta_{A,t-1 t-1}^{(i)})^2)$ $v_{Q_{A,t}}^{(i)} \sim N(0, 10^2)$

ここでは、A市浄水場原水取水口にて観測された2ヶ月半における原水濁度を解析対象とする。図2は観測濁度 $C_{obs}$ とモデルIIIによる推定濁度 $C_{sim}$ を比較したものである。なお、観測濁度は高濁度発生時にしか得られていないため、データ同化時には低濁度 $C_{ten}$ を仮に与えることにした。また、観測流量 $Q_{obs}$ および降雨流出モデルによって推定されるA層とB層からの流出流量 $Q_{A,sim}$ と $Q_{B,sim}$ も併せて示す。この期間内には9つの高濁度イベントが発生しており、図中にはこれらのイベント番号を丸数字で記入してある。例としてイベント⑦および⑧に関する観測濁度と各モデルによる推定濁度の比較を図3に示す。上記の3つのモデルの中ではパラメータと流量を逐次修正するモデルIIIが全体を通して良い結果を示す。

### 3. 高濁度発生タイミングの予測

この浄水場では200度を超える濁度を高濁度と定義し、取水が停止される。取水制限操作を適切に実施するためには取水停止と取水再開のタイミングを高精度で推定することが不可欠となる。そこで、高濁度発生タイミングを図4のように定義する。例として、イベント⑦および⑧における観測値およびモデルI, II, IIIの取水停止と取水再開のタイミングの推定結果を表2に示す。なお、観測値から線形内挿により得られる時間を真値とする。いずれのモデルによる結果も真値との差はモデルシミュレーション時間間隔の10分間以内であり、高い推定精度を有していると判断できる。現実的には、自動濁度計を用いた短時間間隔の濁度計測が可能な場合に、取水制限タイミングを精度良く推定できるようになる。しかし、小規模な浄水場などではマニュアル採水・濁度計測を余儀なくされるケースもある。この場合であっても、モデル推定計算では時間ステップを小さくすることで推定精度を高めることも可能であり、本手法の有用性がさらに高まると期待される。

### 4. おわりに

流量を逐次修正したモデルにおいてより良い推定結果を示したため、推定流量の不確実性が大きいと考えられる。本研究では集中型流出モデルにより推定流量を算出しており、分布型流出モデルを適用することで流量および濁度のさらなる推定精度向上が見込まれる。

### 参考文献

- 1) 林浩平, 范顔楊, Vivien Wanda Rahma, 川口智哉, 篠田成郎: データ同化手法を用いた高濁度河川水の発生予測に関する検討, 令和元年度中部支部土木学会研究発表会講演概要集, 2020.
- 2) 范顔楊, 中澤麗稀, 川口智哉, 篠田成郎: MCMC法および粒子フィルタ法を用いた河川濁度推定モデルの検討, 令和2年度中部支部土木学会研究発表会講演概要集, 2021.
- 3) Y. Matsui, S. Itoshiro, M. Buma, T. Matsushita, K. Hosogoe, A. Yuasa, S. Shinoda, and T. Inoue: Predicting pesticide concentrations in river water with

a hydrologically calibrated basin-scale runoff model, Water Science and Technology, 45(9), 141-148, 2002.

- 4) 樋口知之: 予測に生かす統計モデリングの基本—ベイズ統計入門から応用まで, 講談社, 2011.

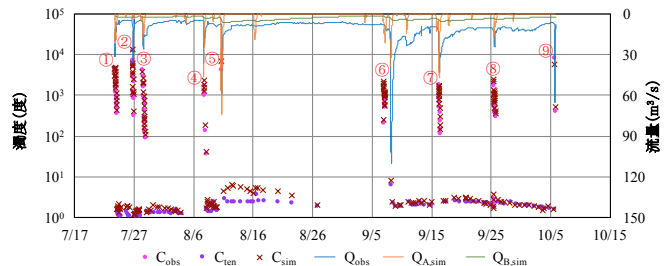
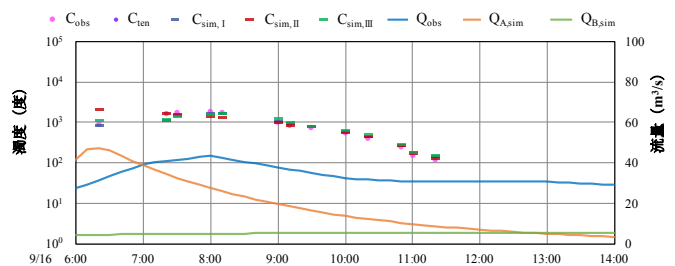
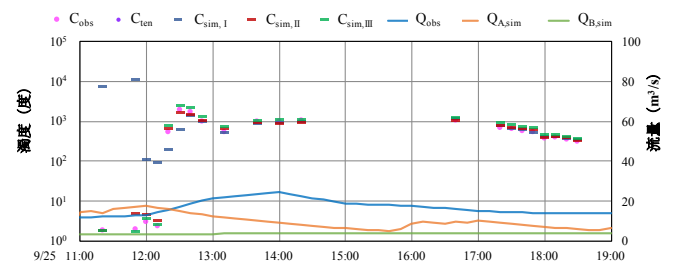


図2 全期間を対象としたモデルIIIの推定濁度



(a) イベント⑦



(b) イベント⑧

図3 特定イベントでのモデルI, II, IIIの推定濁度

表2 観測値およびモデルI, II, IIIの取水停止と取水再開のタイミングの推定結果

イベント⑦	$t_{d,b}$	$t_{d,a}$	$C_{d,b}$	$C_{d,a}$	$t_u$
観測値	9/16 10:50	9/16 11:00	240.0	150.0	9/16 10:53
モデル I	9/16 10:50	9/16 11:00	271.8	185.1	9/16 10:57
モデル II	9/16 10:50	9/16 11:00	270.1	171.8	9/16 10:56
モデル III	9/16 10:50	9/16 11:00	298.9	185.4	9/16 10:58
イベント⑧	$t_{u,b}$	$t_{u,a}$	$C_{u,b}$	$C_{u,a}$	$t_u$
観測値	9/25 12:10	9/25 12:20	2.4	560.0	9/25 12:18
モデル I	9/25 12:10	9/25 12:20	96.3	203.3	9/25 12:19
モデル II	9/25 12:10	9/25 12:20	3.3	676.6	9/25 12:17
モデル III	9/25 12:10	9/25 12:20	2.7	806.1	9/25 12:17

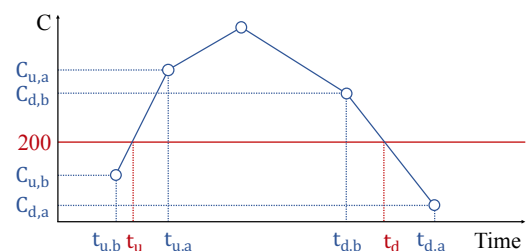


図4 高濁度発生タイミングに関する定義図