

逐次重点サンプリング法による洪水時の河道内植生による流水抵抗の逆推定

岡山大学 正会員 ○吉田 圭介
岡山大学 フェロー会員 前野 詩朗

1. 序論

旭川下流部ではここ20年程度の間で河川の樹林化が著しく進行している。河道内の植生は一般に、洪水疎通能力を減少させ、砂州固定や滞筋の深掘れなどの治水上の問題を生じさせる。また、旭川では河川の景観や植物種を変化させるようになった。そのため、旭川下流部では樹木伐採が定期的に行われると共に、洪水営力による樹木流出を狙って砂州切り下げが行われた¹⁾。洪水時に植生に起因する流水抵抗を精度良く推定することは河道管理にとって重要である。河道内の植生が洪水時にどの程度の流水抵抗を有するかを実洪水のデータから分かっておけば、樹木伐採などの管理で効率化を検討する際に役立てられる。

著者ら²⁾は旭川下流部の約10km区間を対象に、2011年に生じた洪水時の植生に因る流水抵抗を観測水位から逆推定するために、粒子フィルタを用いた逐次データ同化手法を開発した。この方法では多数のサンプルを用いたアンサンブル平均により、河道内植生に起因する等価粗度(マニング粗度係数)を算出するため計算機負荷は一般に大きい。そこで、本研究では一層、計算負荷を軽減し簡易な実装とするため、逐次重点サンプリング法(sequential importance sampling; SIS)³⁾を適用し、推定精度を既往研究と比較検討した。

2. 解析方法

逐次データ同化手法では水理現象を支配するシステムモデル(物理モデル、初期・境界条件、各種パラメータ等)が何らかの理由で不完全と考え、水理観測結果を利用することで合理的で精度良い現象予測を目指す。以下では本研究で用いた枠組みを示す。

2.1 状態空間モデル

システムモデルと観測モデルを連立させた、非線形・ガウス型の状態空間モデル⁴⁾を考える。

$$\mathbf{x}_t = f_t(\mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{v}_t) \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_t = h_t(\mathbf{x}_t, \mathbf{w}_t) \quad (2)$$

$$\mathbf{v}_t \sim N(0, \mathbf{Q}_t), \quad \mathbf{w}_t \sim N(0, \mathbf{R}_t) \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{x}_t は状態変数ベクトル、 \mathbf{y}_t は観測変数ベクトル、 $\mathbf{v}_t, \mathbf{w}_t$ はガウス分布に従うシステムノイズと観測ノイズであり、 $\mathbf{Q}_t, \mathbf{R}_t$ は分散共分散行列である。また、 f_t は非線形の流動モデル(下記の浅水流モデル)、 h_t は観測モデルである。下付添え字 t は時刻を指す。

2.2 浅水流モデル

本研究では洪水流計算には浅水流モデルを用いる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} + \frac{\partial \tau_{xx} h}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy} h}{\partial y} \quad (5)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho} + \frac{\partial \tau_{xy} h}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy} h}{\partial y} \quad (6)$$

ここで、 x, y は平面デカルト座標、 u, v は x, y 方向の水深平均流速、 M, N は x, y 方向の線流量、 h は局所水深、 H は水位、 $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ はレイノルズ応力であり、線形0方程式モデルから評価する。 τ_x, τ_y は x, y 方向の河床せん断応力であり、本研究では河床地被に由来する抵抗の他に、植生繁茂に起因する抗力を含み、マニング粗度係数で流水抵抗の大きさを合わせて評価する。

2.3 粒子フィルタと逐次重点サンプリング

粒子フィルタは非線形・非ガウス型のあらゆる状態空間モデルに適用できる汎用的なフィルタリング手法である⁴⁾。この手法では状態量 \mathbf{x}_t の確率分布を多数のサンプル(粒子)の実現値で表現する。

$$p(\mathbf{x}_t | \mathbf{y}_{1:t}) \cong \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(\mathbf{x}_t - \mathbf{x}_t^{(i)}) \quad (7)$$

ここで、 δ はデルタ関数、添え字 i は粒子番号、 $p(\mathbf{x}_t | \mathbf{y}_{1:t})$ は時刻1~ t までの観測情報 $\mathbf{y}_{1:t}$ が得られた与えられた時の状態量の条件付き分布(事後分布)である。粒子フィルタでは事後分布を求める際にカルマンゲインではなく、各粒子で観測値との適合度(尤度 $p(\mathbf{y}_t | \mathbf{x}_t^{(i)})$)を算出し、その重みに応じて復元抽出を行う。

$$p(\mathbf{x}_t | \mathbf{y}_{1:t}) \cong \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \beta_t^{(i)} \delta(\mathbf{x}_t - \mathbf{x}_{t-1}^{(i)}) \quad (8)$$

一方、逐次重点サンプリングでは観測が得られる度に重みを下記の式で求め、復元抽出は行わない。

$$\beta_t^{(i)} = \beta_{t-1}^{(i)} p(\mathbf{y}_t | \mathbf{x}_t^{(i)}) \quad \sum_i \beta_t^{(i)} = 1 \quad (9)$$

3. 解析対象と解析条件

図-1には解析領域を示す。旭川河道の上流から3つの小領域を設け、各々の箇所での粗度を推定する。同化データは●で示した箇所の観測水位である。図-2には解析対象の洪水時の水位・流量ハイドログラフを示す。9/3の12時から9/4の8時までを同化時間とする。また、同化計算の条件として、各小領域の粗度係数を0.03から0.1まで規則的に変えた512の粒子を生成した。また、ノイズ設定では $\mathbf{Q}_t = 0, \mathbf{R}_t = \sigma^2 \mathbf{I}$ 、 σ^2 は 0.1m^2 とした。

キーワード 河道内植生, 流水抵抗, 逆推定, 逐次重点サンプリング

連絡先 〒700-0081 岡山市北区津島中3-1-1 岡山大学大学院環境生命科学研究科

TEL 086-251-8149

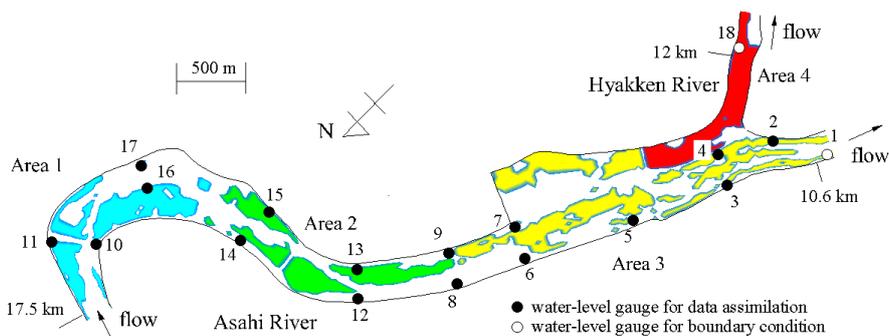


図-1 解析領域 (3つの対象小領域 Area1~3と18箇所の水位観測)

その他、諸々の計算条件は既往研究²⁾と同一とする。

4. 解析結果

表-1 には各小領域の粗度係数のアンサンブル平均値の推定結果を示した。逐次データ同化手法(本手法と既往研究²⁾)では解析終了時点の値を示す。また、参考までに、同一の解析を変分法によって行った既往研究⁵⁾の結果も示す。僅かな違いは見られるが、3つの手法はほぼ同じ結果を示す。いずれの結果も上流域でやや高く、これは竹林の影響と思われる。

図-3 には各小領域の粗度係数のアンサンブル平均値の推定履歴を示した。逐次データ同化手法では観測情報を得る度に、粗度係数の推定値が更新される。上流領域と下流域ではほぼ値は一定だが、中流域では大きく減少する。係数値が変化する理由として、(1)植生の倒伏・消失、(2)システムモデルの不完全性、(3)H-Q式による流量誤差、などが考えられる。

5. 結論

本研究では簡易な実装を可能とする逐次重点サンプリング法を用いて、2011年の旭川洪水時の植生に起因する流推抵抗の逆推定を試みた。得られた結果は既往の結果とほぼ一致し、対象河道内の小領域毎の植生繁茂状況と整合性がある結果となった。ただし、推定結果の時間変化を説明するには検討の余地がある。

謝辞: 本研究を行うにあたり、国土交通省中国地方整備局 岡山河川事務所より、研究関連の諸データを提供頂きました。また、本研究の一部は財団法人前田記念工学振興財団および財団法人ウエスコ学術振興財団、ならびに文部科学省科学研究費補助金・基盤研究(C) (題目: 戦略的河道管理のための河床動態・植生動態予測モデルの改良と現地への適用, 代表者: 前野詩朗, 課題番号: 16K06511) より助成を受けて行われました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 渡辺敏, 前野詩朗, 藤塚佳晃, 宮崎貢, 眞田淳二: 旭川における礫河原再生と樹林化抑制に関する現地試験による検証, 水工学論文集, 第50巻, pp.1201-1206, 2006.
- 2) 吉田圭介, 前野詩朗: 洪水時の河道内植生による流水抵抗の逆推定手法の検討, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.72, No.4, I_1075-I_1080, 2016.
- 3) Doucet, A., Godsill, S., and Andrieu, C.: On sequential

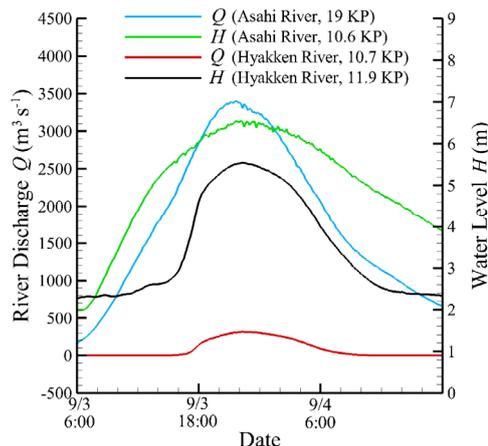


図-2 水位・流量ハイドログラフ

表-1 粗度の推定結果の比較

領域	本研究	粒子フィルタ ²⁾	変分法 ⁵⁾
上流域 Area1	0.090	0.10	0.10
中流域 Area2	0.040	0.038	0.033
下流域 Area3	0.050	0.051	0.046

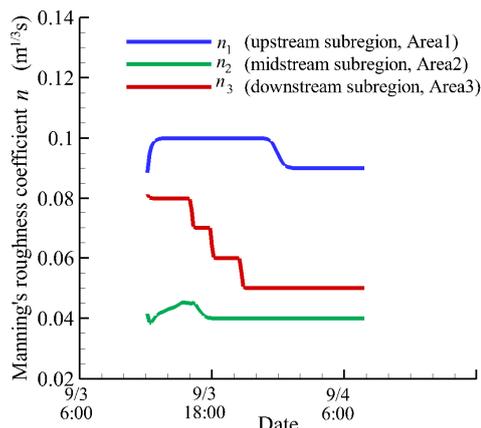


図-3 粗度の推定結果の時間変化

Monte Carlo sampling methods for Bayesian filtering, *Statistics and Computing*, 10, 197-208, 2000.

4) 樋口知之(編著): データ同化入門, 朝倉書店, 240p, 2011.

5) 吉田圭介, 前野詩朗: 2011年9月旭川洪水における河道内植生の流水抵抗特性の検討, 水工学論文集, 第57巻, I_715-I_720, 2013.