

効率的な河道管理を目指した、河川のデータ同化法の構築と洪水河川への適用 Development of data assimilation method for efficient river management and its application to flooded rivers

岡山大学環境生命科学研究科 准教授 吉田 圭介

(研究計画ないし研究手法の概略)

1. 研究背景

近年、水工学分野では気候変動による水害の激甚化（H25島根・山口豪雨災害，H27関東・東北豪雨災害）や，社会構造の変化および緊縮財政下のインフラ維持・更新が大きな課題となっている。本研究ではこうした自然及び社会状況を鑑み，効率的な河道管理に資する水理解析手法を検討する。一般に，現地の水理現象の予測や推定では観測データや模型実験に基づく帰納的手法および計算機による演繹的手法が有力である。そのため，従来，河川工学の学術や実務では各手法の高度化が専ら行われてきた。しかし，前者の結果は具体的だが離散的であり，後者の結果は網羅的だが常に誤差を含み，一長一短がある。

そこで本研究では視点を変え，両手法を組み合わせ，現地モニタリングの最適化と解析の高度化を実現する技術開発とその応用を検討することを目指す。具体的には，河道の樹林化が進行する岡山県・旭川を対象として，洪水時の植生の流水抵抗や河道の流量を精度良く推定する手法を開発する。本報告では流水抵抗の平面分布の推定に焦点を当てた，基礎的な検討結果を提示する。

2. 研究手法

物理現象のモデルや観測情報に基づき，解析の初期条件，境界条件及びパラメータなどを逆算するデータ同化手法は気象学，海洋学，水文学などの地球物理学の分野で発展してきた。現在，有力な手法には4次元変分法（adjoint法）と逐次的な手法であるアンサンブルカルマンフィルタがあり，両者は動的なデータ同化手法として活用されている。著者等はこれまでadjoint法を用いて，樹林化が懸念される岡山県・旭川下流部の洪水時(2011年洪水，ピーク流量3400m³/s)における植生の流水抵抗（相当粗度係数）を現地の自記水位計データを同化して逆算し，推定された粗度の平面分布と植生種の繁茂状況には相関関係があることを見いだした（図-1，図-2，写真-1）。一方，adjoint法では解析モデルごとにadjointモデルを新たに定式化またはコーディングする必要があり，一般に逐次データ同化手法の方が開発コストは遥かに小さい。本研究では河川工学の実務への応用の観点から，簡易な実装にも関わらず汎用性を有する粒子フィルタ（逐次同化手法の一手法）に着目し，上記と同様の場でデータ同化解析を行い，適用性を比較検討した。

一般に，逐次同化手法では時間軸に沿って「一期先予測」と「フィルタリング」操作を逐次的に行うことで，解析誤差を最小化する解析値を得る。状態空間モデル（樋口ら，2011）の観点から考えると，逐次同化手法ではシステムモデルと観測モデルを連立することになる。

$$\text{[システムモデル]} \quad \mathbf{x}_t = \mathbf{G}(\mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{v}_t) \quad (1)$$

$$\text{[観測モデル]} \quad \mathbf{y}_t = \mathbf{W}(\mathbf{x}_t, \mathbf{w}_t) \quad (2)$$

ここで， \mathbf{G} は流れの支配方程式のモデル， \mathbf{W} は観測モデル， \mathbf{v} はシステムノイズ， \mathbf{w} は観測ノイズである。

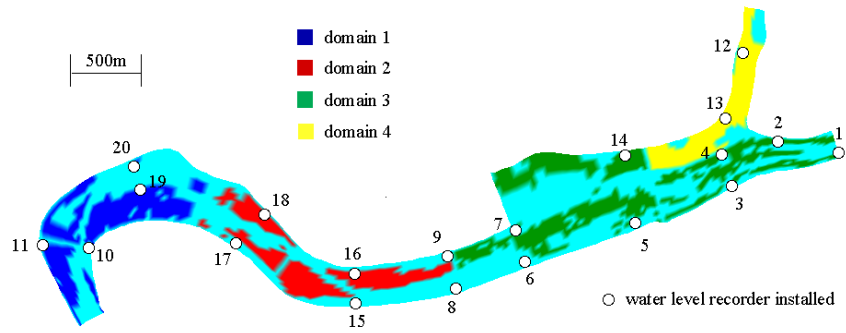


図-1 対象河道における領域区分と水位計の設置点

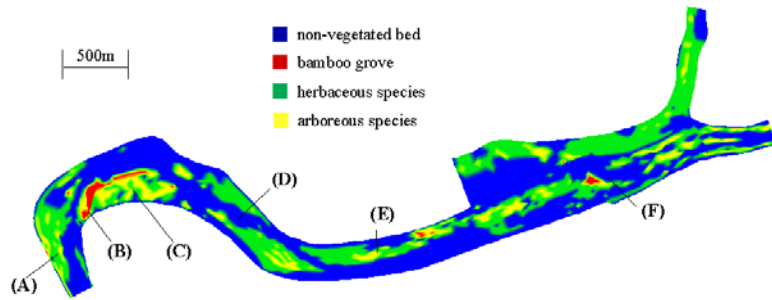


図-2 河道内の高水敷における植生の分布



(A) 倒伏状態の木本類



(B) 密生する竹林



(C) 果樹園 (桃, 柿, 蜜柑, など)



(D) 礫河原上の木本類と草本類



(E) 礫河原で樹林化した木本類



(F) 河川敷ゴルフ場跡地

写真-1 現地の植生繁茂の状況 (2012年9月13日 撮影, (A)~(F) は図-2参照)

また、従属変数を確率変数と捉え、逐次ベイズ推定の考えに基づき、(A)一期先予測と(B)フィルタリング操作から変数の確率分布を逐次更新する。

$$(A) \quad p(\mathbf{x}_t / \mathbf{y}_{1:t-1}) = \int p(\mathbf{x}_t / \mathbf{x}_{t-1}) p(\mathbf{x}_{t-1} / \mathbf{y}_{1:t-1}) d\mathbf{x}_{t-1} \quad (3)$$

$$(B) \quad p(\mathbf{x}_t / \mathbf{y}_{1:t}) = \frac{p(\mathbf{y}_t / \mathbf{x}_t) p(\mathbf{x}_t / \mathbf{y}_{1:t-1})}{p(\mathbf{y}_t / \mathbf{y}_{1:t})} = \frac{p(\mathbf{y}_t / \mathbf{x}_t) p(\mathbf{x}_t / \mathbf{y}_{1:t-1})}{\int p(\mathbf{y}_t / \mathbf{x}_t) p(\mathbf{x}_t / \mathbf{y}_{1:t-1}) d\mathbf{x}_t} \quad (4)$$

ここで、 $p(\mathbf{x}_t / \mathbf{y}_{1:t-1})$ は時刻 $t-1$ までの観測情報 $\mathbf{y}_{1:t-1}$ が与えられたときの \mathbf{x}_t の条件付き分布を意味し、 $p(\mathbf{x}_t / \mathbf{y}_{1:t-1})$ を事前分布、 $p(\mathbf{x}_t / \mathbf{y}_{1:t})$ を事後分布と呼ぶ。

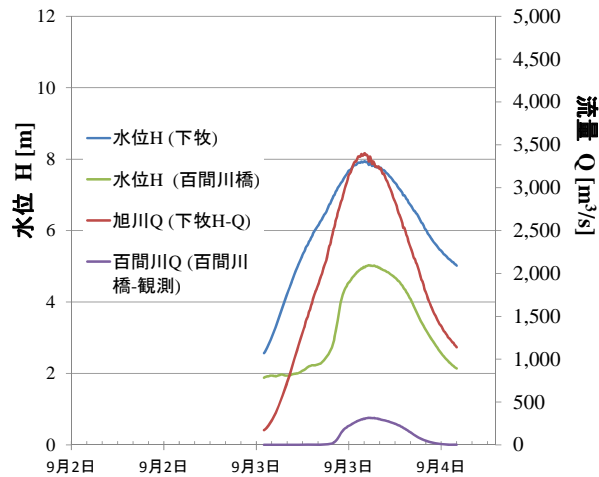


図-3 2011年旭川洪水時の水位・流量ハイドログラフと解析対象期間(9/3 12:00 - 9/4 8:00)

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。この手法では状態量の確率分布を多数のサンプル（粒子）の実現値で近似的に表現する。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）を算出し、それに応じて粒子の残存・消滅を決定する。本研究では「一期先予測」において浅水流モデルを適用し、粒子毎に1step毎の流動場を求める。一方、「フィルタリング操作」では、観測データが得られる度に粒子毎に解析値と照合して尤度を計算し、それらを正規化して重み l_i を求める。また、重みに応じて粒子を復元抽出する。なお、粒子フィルタをさらに簡略化した手法に逐次重点サンプリング法(SIS法)があり、本研究ではSIS法も検討した。

3. 解析条件

河川の洪水流れの基礎方程式には境界適合座標で記述した浅水流モデルを用いる。また、平面2次元流モデルの枠組みで河道内植生による流水抵抗を評価するモデルとして、本研究ではマニング式を用いた。この場合、植生に起因する流水抵抗は地被粗度に含め、マニング式で計算している。対象河道（図-1）、対象洪水および諸々の解析条件は既往の著者等のもと同じであり、参照願いたい。同化した観測データは洪水時に得られる水位計（図-1）の時系列データである。20本の水位計（No.1～No.20）のうち、No.1とNo.12の水位計データは各々、旭川および百間川の下流端境界条件のために利用し、またNo.19は洪水中に流出したため、結果として残りの17本の水位計のデータを同化計算に利用した。図-3には対象洪水時の水位・流量ハイドログラフを示した。これらは解析の境界条件や検証データとして用いた。なお、データ同化の計算は一般に高負荷であるが、粒子フィルタ法では粒子毎に独立な計算が多く、実行時にはGPGPUを用いてスレッド並列計算を行った。

（実験調査によって得られた新しい知見）

表-1には小領域毎（図-1）の解析期間平均の粗度係数の推定値を既往研究と本研究で比較した。なお、本研究の結果はアンサンブル平均化されている。表より、Adjoint法と粒子フィルタ法では概ね同じ結果が得られたが、逐次重点サンプリング法では縮退が生じたため、結果がやや異なっている。一方、定性的な傾向として、図-4に示す通り、逐次同化手法による結果では各領域の粗度係数は植生種の存在割合に関連することが再確認された。例えば、竹林が存在する割合が多いと、その領域は流水抵抗がより大きくなる。粒子フィルタ法では用いる粒子数（アンサンブル個数）が実用上

表-1 領域毎の解析期間平均の粗度係数の比較

解析期間平均の粗度係数	領域1	領域2	領域3
Adjoint法 (既往研究)	0.100	0.0330	0.0480
粒子フィルタ (本研究)	0.104	0.0385	0.0512
逐次重点サンプリング (本研究)	0.096	0.0408	0.0594

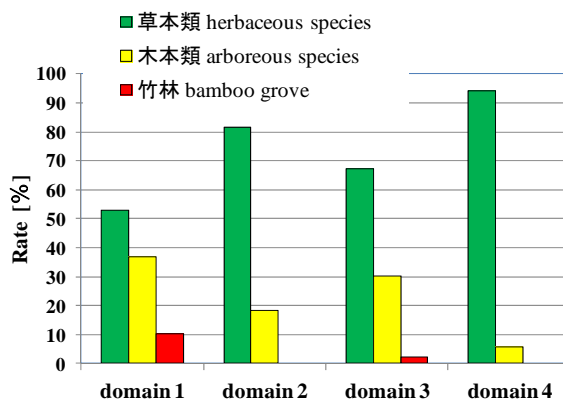


図-4 各領域での植生種の割合

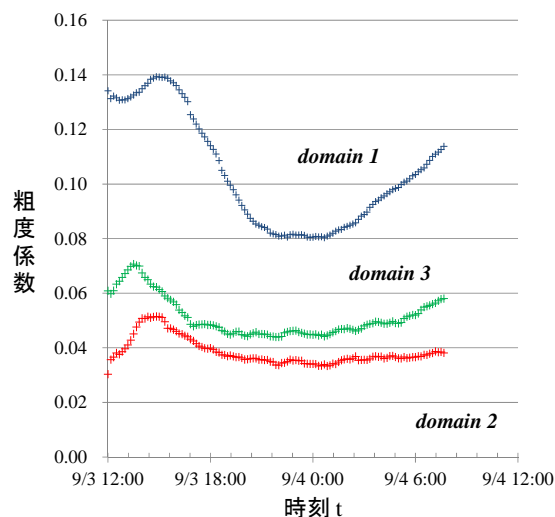


図-5 各領域でのアンサンブル平均化された粗度係数の推定値の時間変化

の課題になるが、本研究では5通り（15, 45, 135, 405, 1215）の粒子数を検討した結果、概ね結果は同じであった。

粒子フィルタ等の逐次同化手法ではアルゴリズムの特徴から粗度係数の時間変化が容易に推定できる（図-5）が、現状ではこの変化を物理的に解釈するための観測データが不足している。よって、今後は観測データの拡充を行いながら研究手法の細部の検討を進めるとともに、植生の伐採計画や効果的な観測システムの整備等の河川実務に役立てることを検討したい。

（発表論文）

- 1) K. Yoshida, S. Maeno: Sequential data assimilation for estimating bed roughness of vegetated flooded rivers, *Proc. 20th IAHR-APD Congress, Sri Lanka, 2016. (CD-ROM)*
- 2) 吉田圭介, 前野詩朗: 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, 第69回土木学会中国支部研究発表会講演概要集, 2017. (発表予定)