

## 流域土砂動態シミュレーションに対する粒子フィルタを用いたデータ同化の導入

京都大学 ○岩井智哉, 山野井一輝, 宮田秀介, 高山翔揮, 中谷加奈

## 1. はじめに

山地源頭部から河口までの流砂系において土砂動態の把握や予測は重要である<sup>1)</sup>。その手段として、土砂動態の数値シミュレーションは有効であるが、入力条件として必要となる斜面部から河道への土砂供給量の正確な予測に課題がある。土砂流出の把握には流砂水文観測も有効であるが、土砂動態の面的な把握や将来予測には限界がある。

そこで、本研究では流域土砂動態シミュレーションに対して下流側での掃流砂観測のデータを用いたデータ同化を導入することで土砂供給条件の不確かさを補いながら、より高精度な土砂動態のシミュレーションや土砂供給条件の把握を試みた。

## 2. 解析方法

岐阜県高山市の神通川水系足洗谷流域において2021/8/13~15にかけての出水（最大降雨強度：39 mm/h, 総降水量：303.5 mm）を対象に数値シミュレーションを行った。解析（図1の予測部分）にはSiMHIS: Storm Induced Multi Hazard Information Simulator<sup>2)</sup>を用いた。本モデルではまず、合流点ごとに区切られた直線の単位河道とその両側の長方形の単位斜面からなる地形データを作成する。降雨流出解析にはKinematic Wave法を用いる。その後、輸送方程式に基づき河道部での水と土砂に関する計算を行う。掃流砂量は芦田・道上式による。

単位時間当たりの流域への土砂供給量を観測地点の流量 $Q(t)$ とその最小値 $Q_{min}$ を用いて

$$Q_{sup}(t) = c_t(Q(t) - Q_{min})$$

とした。ここで、

$$c_t = c_{t-1} \exp(\eta_t) \quad (\eta_t \sim \mathcal{N}(0, \sigma_c^2 \Delta t))$$

であり、 $c_t$ は計算タイムステップ（本研究では $\Delta t = 1.0$  s）ごとに異なる値をもつ係数である。さらに、単位河道 $i$ への土砂供給量は単位河道 $i$ の長さ $L(i)$ に比例するとして、単位時間当たりの土砂供給量を

$$V_{sup}(i, t) = c_t(Q(t) - Q_{min}) \frac{L(i)}{\sum_i L(i)}$$

とした。

掃流砂量について、10分おきに得られるハイドロフォンによる観測値と各粒子の計算値を、それぞれ

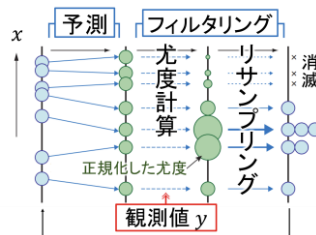
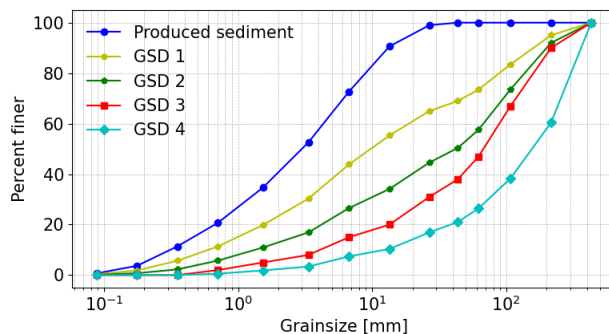
図1 粒子フィルタの概念図<sup>3)</sup>

図2 生産土砂と河床材料（初期値）の粒度分布

対数をとって比較することで1時間のフィルタリング間隔ごとに尤度を計算し、これをもとにドント方式でリサンプリングを行った。ここで、リサンプリングでは尤度の大きい粒子ほど複製されやすく、尤度が相対的に小さい粒子は消滅する（図1）。

## 3. 解析条件

河床材料の粒度分布は流域内での面的な把握や出水時の実測が困難である。そこで、図2に示す4通りの土砂の粒度分布を初期条件として与えることで簡易的に河床材料を粒子化の対象とした。生産土砂の粒度分布 $f_p(d)$ <sup>2)</sup>と基準となる河床材料の粒度分布 $f_s(d)$ <sup>2)</sup>（=GSD 3）、生産土砂の寄与率 $\alpha$ を用いて、

$$f(d, \alpha) = \alpha f_p(d) + (1 - \alpha) f_s(d)$$

とし、 $f(d, \alpha = 0.5)$ をGSD 1、 $f(d, \alpha = 0.2)$ をGSD 2とした。また、GSD 3を初期条件として対象期間の降雨を100回くり返して与えて数値シミュレーションすることにより得た観測地点における交換層の粒度分布をGSD 4とした。粒子数(予測ケースの総数)を1000とし、各粒度分布を持つ粒子は計算開始時には250粒子ずつ存在するものとした。リサンプリングでは各粒度分布を初期条件にもつ粒子が全滅することのないよう、最低1粒子は残す設計とした。

土砂供給量を支配する係数 $c_t$ の初期値は0.01とした。また、計算開始後は $c_t$ に閾値を設け、 $10^{-10} \% \leq c_t \leq 20 \%$ とした。 $c_t$ のばらつきを規定する $\sigma_c$ について、 $P(\exp(\eta_c) \geq 2) \leq 0.1\%$ となるよう、 $\sigma_c^2 = 0.050$ とした。

#### 4. 解析結果と考察

観測地点における掃流砂量の計算結果を初期条件として与えた河床材料の粒度分布ごとに図3に示す。河床材料の粒度分布や土砂供給条件によって掃流砂量の計算結果にばらつきがみられ、各フィルタリングタイミングにおける尤度が最大のものを抽出することで、観測値に対してより説明性の高い計算結果を示すことができた。上流域での土砂供給条件や河床材料の粒度分布の面的な把握は容易ではないが、下流域での流砂水文観測データを用いた同化により、これを補完できる可能性が示唆される。

8/14の6:00頃までの出水前半ではGSD 1,2,3の比較的細粒な粒度分布では掃流砂量の計算値が観測値を1~2オーダー程度上回る傾向を示した。また、粗粒なGSD 4では掃流砂がほとんど流出せず、い

れの粒子でも観測値の説明性が高いとは言えない。各粒子の流域への土砂供給量を図4に示す。各フィルタリング時点で尤度最大の粒子について出水前半に土砂供給が少ない結果となったが、これは上記の傾向により比較的細粒なGSD 3が採用され、土砂供給がより少ない粒子で尤度が大きくなる傾向が強く影響しているとみられる。

一方で8/15の0:00頃からはGSD 4による計算値が観測値に近い範囲でばらついており、土砂供給の推定結果にも出水前半のような粒度分布の設定方法に起因する顕著なバイアスは見られない。より適当な粒度分布の設定により掃流砂量の予測や土砂供給量の推定の精度向上が見込まれ、その探索方法の検討が今後の課題である。

#### 参考文献

- 1) 武川ら：河川技術論文集，2023.
- 2) 山野井・藤田：砂防学会誌，2017.
- 3) 樋口：電子情報通信学会誌，2005.

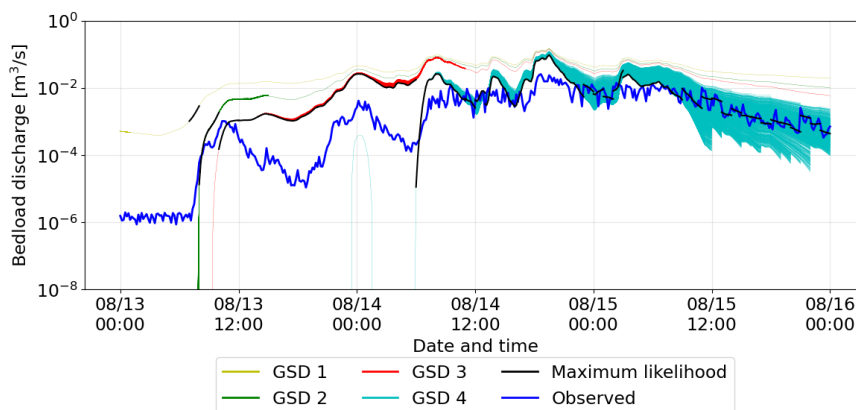


図3 観測地点における掃流砂量の観測データと各粒子の解析結果

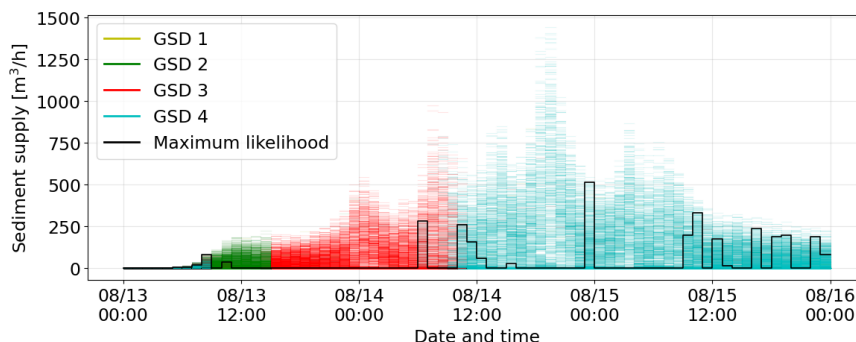


図4 各粒子における流域への土砂供給量

黒枠付のものは各フィルタリングで尤度が最大となった粒子の結果