

掃流砂の観測データを用いたパラメーター最適化による土砂供給条件の推定 Optimization-Based Estimation of Sediment Supply Conditions based on Bedload Observations

○岩井智哉・山野井一輝・宮田秀介・高山翔揮・中谷加奈

○Tomoya IWAI, Kazuki YAMANOI, Syusuke MIYATA, Shoki TAKAYAMA, Kana NAKATANI

Quantitative estimation of sediment supply from upstream reaches remains a major challenge in catchment-scale sediment management. This study examines whether upstream sediment-supply conditions can be inferred from downstream bedload observations combined with catchment-scale sediment dynamics simulations. A flood event in the Ashiarai-dani Catchment, central Japan, was analyzed using bedload discharge derived from acoustic pulses recorded by a Japanese pipe hydrophone and numerical simulations with SiMHIS. A total of 1,000 simulations were conducted by varying the magnitude and spatiotemporal distribution of sediment supply, and model performance was evaluated using the Nash–Sutcliffe efficiency (NSE). Conventional bedload-transport formulas reproduced general temporal trends but severely overestimated bedload discharge ($\text{NSE} \leq -18.3$). By introducing a model that accounts for reduced effective shear stress due to immobile grains in complex mountainous channels, NSE values improved substantially (up to 0.785). Optimal simulations suggested that the total sediment supply was an order of magnitude larger than the observed sediment runoff and was concentrated near the peak flow. (160 words)

1. はじめに

山地源頭部から河口に至る流砂系において土砂動態を理解することは、流域全体の土砂管理において重要である。そのための有効な手法として土砂動態数値シミュレーションが挙げられるが、斜面崩壊や河岸浸食は正確な予測が難しく、上流域で河道に供給される土砂の供給量やタイミング（以降、土砂供給条件と呼ぶ）を境界条件として精緻に与えることには課題がある。

流砂水文観測もまた上流の土砂供給条件を推定する有用な手法であるが、これによる議論は定性的な内容にとどまる場合が多い。本研究では、下流側で観測された掃流砂量を流域土砂動態数値シミュレーションと組み合わせ、出水時における上流側の土砂供給条件を定量的に推定することを目的とした。

掃流砂量式は芦田らによるモデル¹⁾が広く用いられてきた。一方で、これは河床波が形成された場を想定したもので、山地河川のような粗粒礫が多くより複雑な河床形態への適用には限界がある可能性がある。本研究ではこの点についても検討を行った。

2. 対象流域と対象イベント

対象流域は、神通川水系に属する岐阜県高山市の足洗谷流域（図1）である。本流域では防災研究

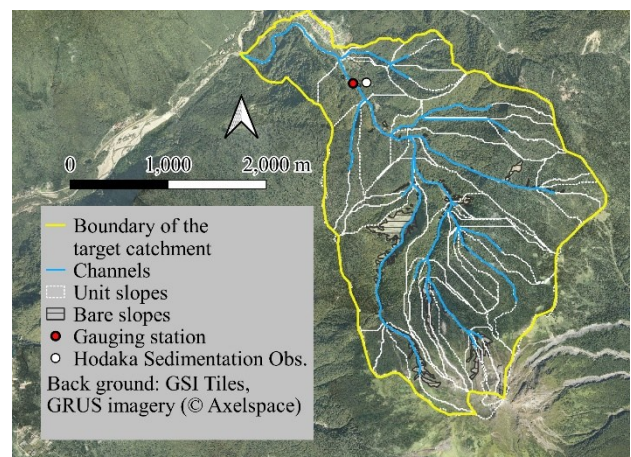


図1 対象流域

赤丸が観測地点である。河道の合流点で区分される単位河道とその両側に接続する単位斜面をもとに数値シミュレーションを行った。

所の穂高砂防観測所によって継続的に調査、観測が行われている。中でも流域下流の観測地点（図1）ではコンクリート水路内において水位や流速のほか、ハイドロフォンによる連続的な掃流砂量の観測が行われている（図2）。

2021年8月13日から15日にかけて発生した土砂流出イベントを解析対象とした。総降雨量は303.5 mm、最大時間雨量は39 mm/h、イベント期間中の総土砂流出量は1,054 m³であった。

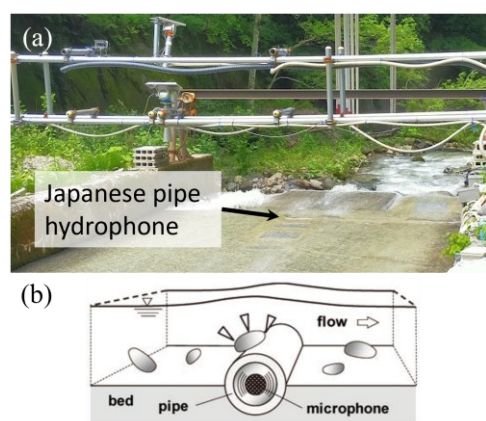


図2 ハイドロフォン
(a) 設置状況, (b)概念図²⁾

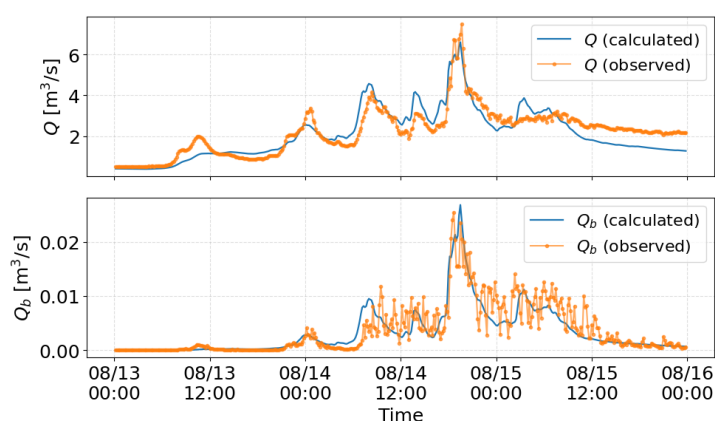


図3 NSE が最大となったケースの解析結果
 Q, Q_b は観測地点における流量と掃流砂量

3. 解析手法

土砂動態の数値シミュレーションには、降雨流出、土砂供給、河道における土砂輸送を統合的に扱う Storm Induced Multi-Hazard Information Simulator (SiMHIS)³⁾を用いた。

土砂供給の総量および時空間分布を系統的に変化させ、計 1,000 ケースの数値シミュレーションを実施し、これらを Python ライブラリである Optuna⁴⁾と組み合わせてパラメーター最適化を行うことで、土砂供給条件の推定を行った。ここで、土砂供給の総量は土砂流出量の α 倍とし、パラメーターの探索範囲は $0.1 \leq \alpha \leq 20$ とした。 α によって定まった総量をあらかじめ地形情報から決定した 3 通りの空間分布と観測地点の流量から決定した 7 通りの期間分布に従って計 21 通りの時空間分布に従って分配した。掃流砂量の観測値と計算値の一致度は Nash-Sutcliffe 係数 (NSE) を指標として評価した。

芦田ら¹⁾の掃流砂量式系を用いた計算では掃流砂量の過大評価が確認されたため、Yager ら⁵⁾に倣った、不動の粗粒礫による有効掃流力の低減効果を考慮した改良モデルを導入した。

4. 結果と考察

芦田ら¹⁾のモデルでは、掃流砂量の増減タイミングは良好に観測結果を再現したものの、観測値と比較すると過大評価の傾向があり、NSE は -18.3 以下となった。

Yager ら⁵⁾のモデルでは $\alpha = 15.2$ としたケースで NSE = 0.785 を得ており、観測データとの一致度が高まった (図 3)。イベント期間中の総土砂供給量は、観測された土砂流出量を 1 オーダー程度、

上回る規模であったことが示唆された。また、土砂供給が洪水ピーク付近の時間に集中する条件で高い NSE が得られた。これと比較して、ピーク前に土砂が供給されると仮定したケースでは NSE は最大でも 0.620 であった。土砂供給の空間分布に関しては、裸地面積の寄与は小さく単位河道長や単位河道に接続する単位斜面の面積の寄与が大きく、出水時における裸地斜面からの直接的な土砂供給の寄与は限定的である可能性が示唆された。

5. おわりに

本研究では有効掃流力の計算に 2 種類のモデルを使って数値シミュレーションを行った。本対象流域のような山地流域においては出水時も移動しない粗粒礫による有効掃流力の低減を考慮する必要性が示唆された。

また、本研究は、下流における掃流砂観測と流域土砂動態数値シミュレーションを統合することで、上流での土砂供給条件を推定する方法を提示した。下流の観測点における掃流砂量の観測データを数値シミュレーションと組み合わせることは流域スケールの土砂供給条件推定および土砂管理への応用において有用な手法であると言える。

参考文献

- 1) 芦田ら：土木学会論文報告集，1972.
- 2) 堤ら：砂防学会誌，2019.
- 3) 山野井ら：砂防学会誌，2017.
- 4) Akiba ら：KDD'19，2019.
- 5) Yager ら：Water Resources Research，2007.