

土砂移動シミュレーションにおけるパラメータ推定手法に関する研究

○山野井一輝¹⁾²⁾, 大石哲²⁾, 小柴孝太¹⁾, 川池健司¹⁾, 山越隆雄³⁾

1) 京都大学防災研究所 2) 理化学研究所 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所

1. 研究の背景と目的

土石流シミュレーションや、土砂流出シミュレーション等の土砂移動シミュレーションには、多数の物理パラメータの設定が要求される。これらのパラメータ設定は、現地調査に基づいて設定されることが一般的であるが、調査自体に多大な労力がかかることや、空間分布するパラメータが限定的な調査では十分に設定できないことなどに課題がある。

一方で、近年は計測技術が発展し、土石流がもたらす地表面変化の航空 LP 観測に基づく標高差分 (DoD, DEM of Difference) の観測や、ハイドロフォンによる河道部の掃流砂量の連続観測、濁度計や TDR¹⁾による浮遊砂量の連続観測等、リッチな観測データを得ることができるようになってきた。これを用いることで、計算結果との一致度を定量化することができるため、パラメータの数理最適化や、不確実性の評価に応用可能と期待できる。これを踏まえ、本研究では、土石流シミュレーションを対象とした標高差分で得られる DoD データと近似ベイズ計算を用いたパラメータの不確実性込みでの推定と、降雨・土砂流出シミュレーションを対象としたパラメータの数理最適化を実施した。

2. DoD を用いた土石流シミュレーションのパラメータ推定

平成 30 年 7 月豪雨で発生した広島県総頭川流域の土石流シミュレーション¹⁾を対象に、細粒分の流動化率 $C_r[-]$ 、平均粒径 $d_m[m]$ 、内部摩擦角 $\phi[degrees]$ 、土層厚 $D_s[m]$ 、単位面積当たりの後続流量 $q_a[m/s]$ を推定する。計算結果の観測との一致度は、得られる地形変化量 Δz_i^{calc} と、LP 差分解析で得られる Δz_i^{obs} をもとに、次式で得られる RMSE で評価する。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta z_i^{calc} - \Delta z_i^{obs})^2}{N}}$$

本章では、パラメータを不確実性込みで推定するため、パラメータの最適値ではなく、パラメータの確率密度関数の算定を試みた。ここでは Approximate Bayesian computation (ABC)に基づき、対象のパラメータをランダムに与えた 3775 ケースのうち、RMSEが閾値以下のケースを Accept し、Accept されたパラメータの集合からカーネル密度推定により確率密度関数(PDF)を算出した。例として RMSE が 0.6788[m]以下となる場合の各パラメータのヒストグラムと PDF を図-1 に示す。 d_m 、 D_s 、 q_a については pdf の形状がピークを有するが、 C_r や ϕ については比較的平坦な結果となった。この結果から、 C_r や ϕ は計算結果にあまり効かないという見方もできるが、これらがどのような値を取っ

ても、他のパラメータの組み合わせ次第で良好な計算結果となる場合がある、とも解釈が可能である。また、この pdf を計算の入力条件としてパラメータ設定したシミュレーションをアンサンブル実行することで、土石流の被災領域を確率として評価できると期待できる。

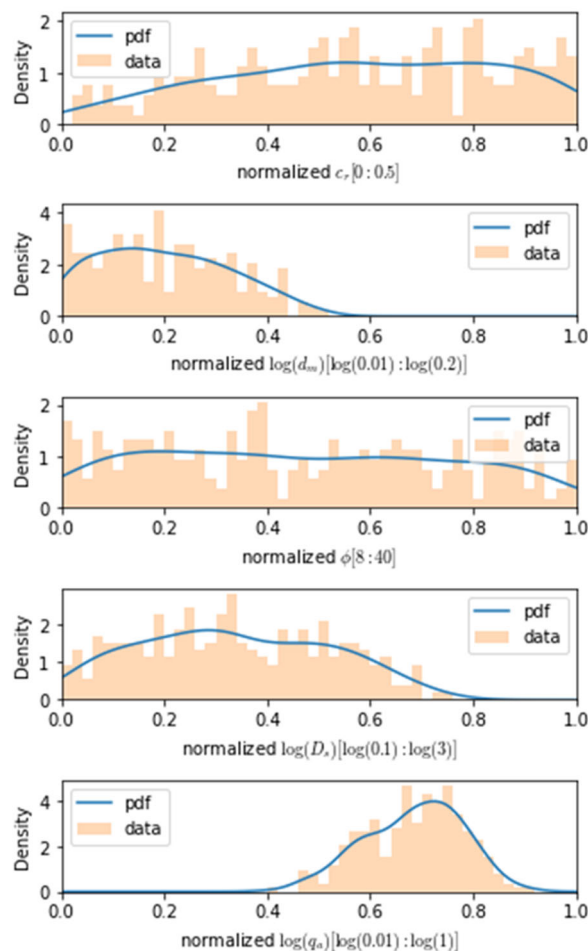


図-1 土石流シミュレーションのパラメータ推定結果。上から標準化された $C_r[-]$ 、 $d_m[m]$ 、 $\phi[degrees]$ 、 $D_s[m]$ 、 $q_a[m/s]$ のヒストグラムと推定された確率密度関数(pdf)の形状を示す。

3. 降雨・土砂流出シミュレーションを対象としたパラメータ推定

降雨・土砂流出シミュレーション SiMHIS²⁾を対象に、降雨流出パラメータと、河床材料パラメータの数理最適化を試みた。ここでは、魚野川流域の大野原橋地点の上流域を計算の対象とし、観測値には同地点における流量・掃流砂量 (ハイドロフォン) を用いた。

本研究では、まず土砂移動非考慮の条件で降雨流出関係のパラメータを最適化し、土砂移動を考慮し

た条件で河床材料のパラメータを最適化する。表-1
に対象としたパラメータと探索範囲を示す。評価関
数は、大野原橋における流量の Nash - Sutcliffe
efficiency (NSE)とした。最適化計算のアルゴリズム
には TPE を用い、実装には Python のライブラリ
Optuna を用いた。計算の試行回数は 3000 とし、30
並列で実行した。得られたパラメータは表-1 の右列
に示す。これを用いた場合の計算結果は図-2 の上図
に示すとおりであり、NSE の値は 0.7505 と良好な
予測性能を示した。

次に、河床材料のパラメータを推定する。ここで
は、河道毎の代表粒径が次式⁴⁾で与えられると仮定
した。

$$\frac{d}{d_0} = \left(\frac{i}{i_0}\right)^{\frac{7}{9}} \left(\frac{A}{A_0}\right)^{\frac{2}{3}(1-\beta)}$$

ここに、 d 、 i 、 A はそれぞれ対象とする河道の代表
粒径、勾配、集水面積であり、添え字 0 は基準点 (本
本研究では下流端) の値を示す。 β は川幅に関するレジ
ーム則 $B = \alpha Q^\beta$ の β を表す。現論文⁴⁾では一般値 $\beta =$
0.5が用いられているが、本研究ではこれを可変のパ
ラメータとして扱う。各河道の i および A は地形デー
タから算定であるため、この式に d_0 と β をパラメー
タとして与えることで、各河道の代表粒径 d を求め
ることができる。ただし、本モデルは混合粒径のモ
デルであるため、各地点の河床材料の粒度分布が対
数正規分布に従うことと仮定し、その標準偏差相対
標準偏差 RSD もパラメータとして導入した。以上表
-2 に示す d_0 、 β 、RSD の 3 パラメータを対象に、同様
のライブラリで最適化計算を実行した。最適化対象
の評価関数は、掃流砂量の NSE とした。ここでは、
同様のアルゴリズムで 4593 試行の計算を 30 並列で
実行した。得られた最適パラメータの結果を表-2 右
列に、得られた掃流砂量の計算結果を図-2 下図に示
す。NSE の値は 0.06997 と流量に比べると値は小さ
いが、2 つのピーク時の流砂量の発現期間が適切に
表現されていることが分かる。また、得られた代表
粒径の空間分布を図-3 に示す。対象領域から上流に
向けて、勾配と集水面積に応じて粗粒化していく空
間分布になっていることが分かる。今後、同様の手
法をより広い流域に適用し、得られる河床材料の粒
径分布の空間分布と現地の分布を比較することで、
本手法の妥当性等を検証していく予定である。

表-1 降雨流出モデル中のパラメータ

パラメータ	最適値探索範囲	最適化結果
損失水頭 f [mm/h]	0.001 - 0.02	0.008198
斜面の粗度係数 n_{ms} [$m^{-1/3}s$]	0.1 - 1.0	0.1328
河道の粗度係数 n_{mc} [$m^{-1/3}s$]	0.02 - 0.05	0.02277
初期水深 h_{ini} [m]	0 - D_B	$0.9303 \times D_B$
A 層 透 水 係 数 k_A [m/s]	1.0×10^{-4} - 1.0	5.169×10^{-3}
B 層 透 水 係 数 k_B [m/s]	1.0×10^{-6} - 1.0	8.853×10^{-5}
A 層の厚さ D_A [m]	0.01 - 0.5	0.04342
B 層の厚さ D_B [m]	0.1 - 5	1.528

表-2 河床材料のパラメータ

パラメータ	最適値探索範囲	最適化結果
下流端粒径 d_0 [m]	0.05 - 0.3	0.2109
粒径分布の相対 標準偏差 RSD	0.1 - 1.5	0.1278
β	0.3 - 0.7	0.6577

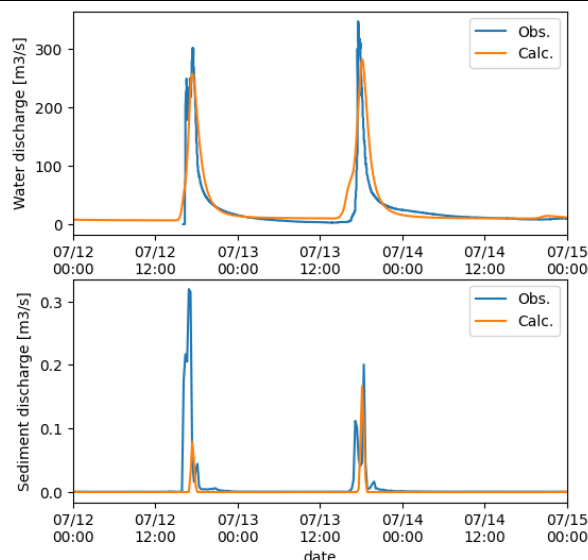


図-2 計算結果と最適化パラメータを用いた計算結
果(上:流量, 下:掃流砂量)

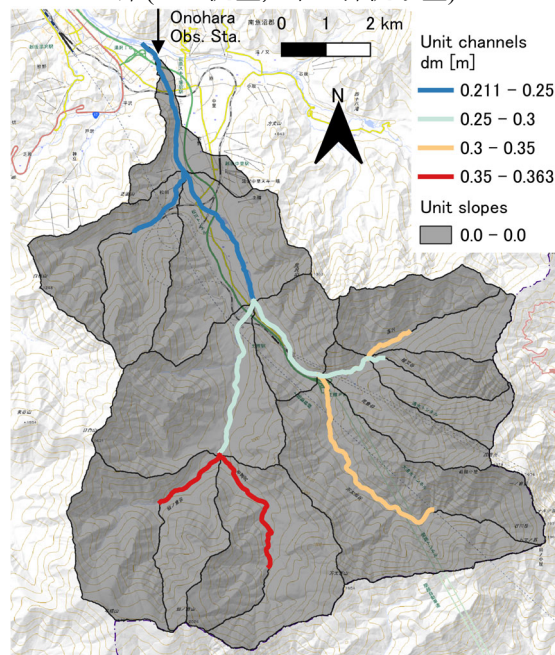


図-3 得られた平均粒径の空間分布

謝辞：本研究で用いた観測データは、国土交通省北
陸地方整備局湯沢砂防事務所から提供を受けたもの
です。また、本研究の遂行にあたり、砂防・地すべ
り技術センターの研究助成を受けました。ここに記
して感謝申し上げます。

参考文献：1) Miyata et al., Journal of Hydrology,
2020. 2) Yamanoi et al., arXiv:2211.06837,
2022. 3) 山野井・藤田, 土木学会論文集 B1 (水
工学), 2014. 4) 江頭ら, 土木学会論文集 B1 (水
工学), 2018