

## 土石流・流木の数値シミュレーションにおける輸送濃度の影響

(国研)森林研究・整備機構森林総合研究所: ○鈴木 拓郎, 経隆 悠

### 1. 背景及び目的

土石流の数値シミュレーションは一般に浅水方程式に基づいた方法が用いられている。砂礫の連続式においては、メッシュ内に存在する土砂濃度である土砂体積濃度とメッシュ間を移動する土砂濃度である土砂輸送濃度は分けて評価する必要がある。土石流中の土砂は一般に河床から表面に向かって小さくなる垂直分布を持つため、堆積土砂濃度に対して輸送濃度は小さい値となる。一方、流木に関しても土砂と同様の方法で評価する数値シミュレーション手法が鄭さんされてきている。同様に体積土砂濃度と輸送濃度は分けて評価される必要があり、一般に流木は比重が軽い流れの表面付近に存在することから、流木体積濃度に対して流木輸送濃度は大きくなると考えられる。

以上のように、土石流・流木の数値シミュレーションにおいては、輸送濃度を適切に評価することが重要であると考えられる。輸送濃度の評価方法が数値シミュレーションの結果に与える影響について検討した。

### 2. 流木の先端部集積過程に関する水路実験と数値計算

鈴木ら (2021), 高橋ら (2023) は一様勾配の水路勾配を用いた水路実験によって、流木は流下に伴って土石流の先端部に集積していくことを明らかにしている。このような現象を数値計算で再現しようとする場合には、流木体積濃度より流木輸送濃度を大きく取り扱わないと不可能である。鈴木 (2022) は流木が流れの表面に浮上していると仮定し、土石流や掃流状集合流動における流木の輸送濃度式を既存の土石流構成則に基づいて誘導した。この方法では、流木が流れの抵抗則に及ぼす影響は考慮されておらず、流木は周辺の流体と同等の流速で流れていると仮定しているため、本式で導かれる輸送濃度は理想状態と考えられる。しかし、流木は回転運動等により、底面・壁面や流速の異なる砂礫や流木と接触すると考えられ、その影響があると考えられる。実際に、鈴木ら (2021), 高橋ら (2023) は河床勾配が大きいほど、あるいは流木の摩擦力が小さいほど流木の先端部集積過程が顕著であることを示している。そこで、流木の集積の程度を調整できるように下記のような係数を用いた。

$$c_{wdt} = \bar{c}_{wd} \left( \frac{c_{wdt,eq}}{\bar{c}_{wd}} \right)^k \quad (1)$$

ここで、 $c_{wdt}$ は調整後の流木輸送濃度、 $c_{wdt,eq}$ は鈴木(2022)による理想状態の式による輸送濃度、 $\bar{c}_{wd}$ は流木体積濃度である。 $k$ は係数であり、0.0 の場合は体積濃度と輸送濃度が等しくなり、1.0 の場合は理想状態の流木輸送濃度となる。

高橋ら (2023) が行った実験において、勾配 20, 10 度で

流木材料は丸棒・自然木のそれぞれの実験について、式(1)を用いた再現計算を実施し、概ね再現性の高い  $k$  の値を検証した。その結果を図-1,2 に示す。図では、流木混じり土石流の流下距離 1m (上流), 3m (中流), 5m (下流) 地点において、先端部からの経過時間と流木の通過本数を示している。勾配 20 度 (図-1) では、流木が先端部に集積していく結果を数値計算で再現できていることがわかる。丸棒よりも自然木の方が少し集積傾向が小さいが、それは係数  $k$  を少し小さくすることで再現可能になっている。勾配 10 度 (図-2) では、流下に伴う明瞭な集積傾向は認められないが、丸棒では先端部に流木が集積している領域 (傾きが大きい部分) が形成されているが、自然木では形成されていないことがわかる。このような違いについても係数を調整することで数値計算で再現可能となっている。また、河床勾配が大きいほど、あるいは流木の摩擦力が小さいほど、再現性の高い  $k$  の値は大きいようである。

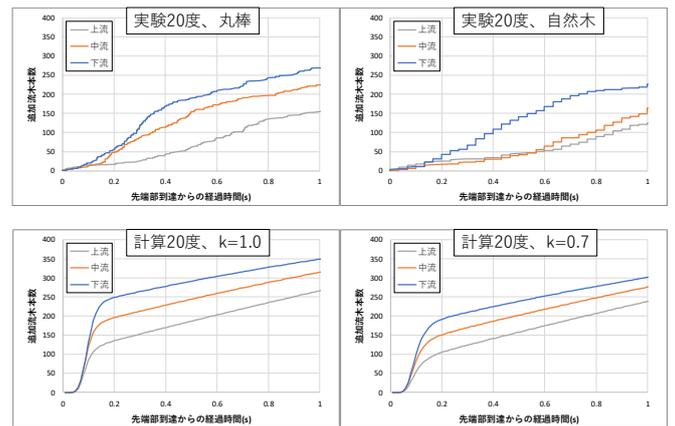


図-1 流木の先端部集積過程の実験結果と再現結果 (20 度)

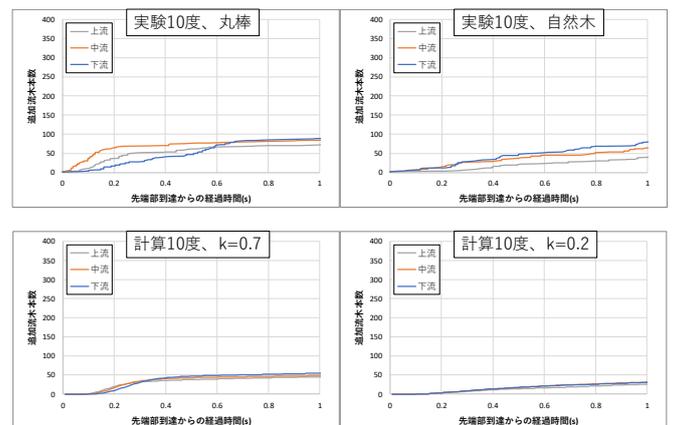


図-2 流木の先端部集積過程の実験結果と再現結果 (10 度)

### 3. 土石流の流下過程における輸送濃度の影響

鈴木・経隆 (2022) は、鈴木・堀田 (2015) による MPS-DF 法を用いて岩田ら (2013) の土石流実験の再現計算を行

い、濃度分布による輸送濃度の変化の影響を検討した。この実験では長さ 10m, 幅 10cm の直線水路を用いている。水路勾配は 15° で、水路の下流側 5.0m の底面を 10cm 嵩上げし、粗度として平均粒径 0.29cm の砂礫を貼り付けている。水路の上流側には下流側の粗度面と同じ高さになるよう、

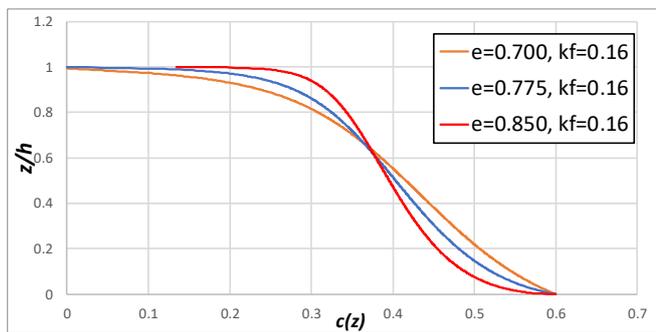


図-3 平衡濃度分布

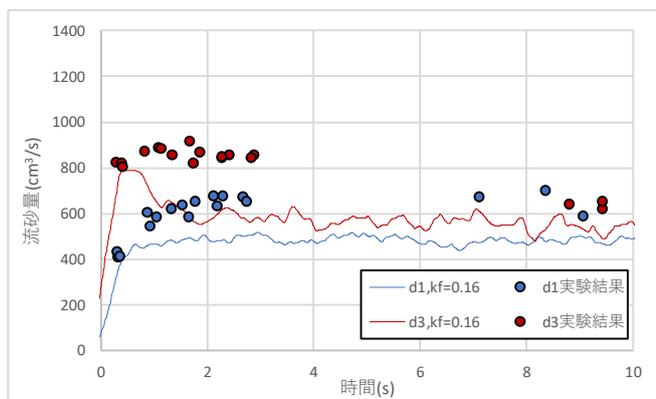


図-4 下流端流砂量の時間変化の計算結果 ( $e=0.700$ )

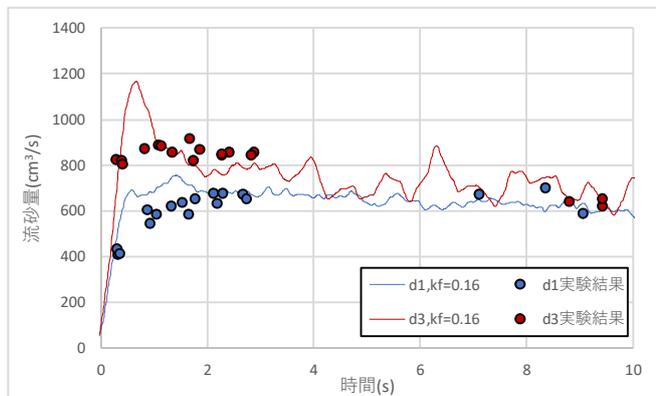


図-5 下流端流砂量の時間変化の計算結果 ( $e=0.775$ )

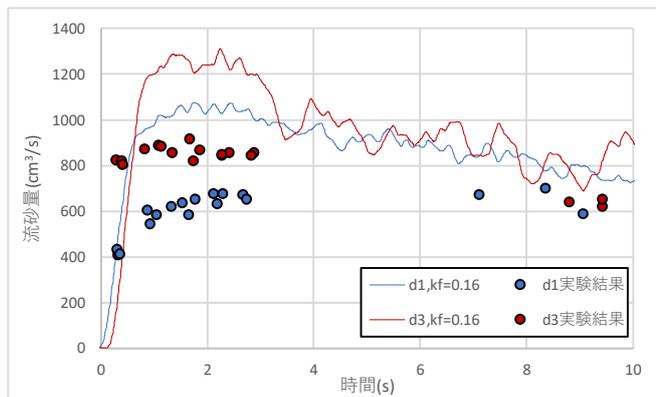


図-6 下流端流砂量の時間変化の計算結果 ( $e=0.850$ )

た 5 つの箱を素早くスライドさせることで土石流の先端から約 0.5 秒間隔で連続した 5 つのサンプルを採取した。また水でほぼ飽和した状態の砂礫を 10cm の深さまで堆積させ (移動床区間)、水路上流端より 2000 cm<sup>3</sup>/s の水を供給して上流区間で侵食・土石流化させ、水路下流端に隙間無く並べた、先端が水路下流端に到達してから約 8 秒後に再度土石流の採取を 1 度のみ行った。各サンプルの土石流流量、流砂量を算出した。実験には、0.29cm と 0.14cm の 2 種類の土砂を用いた。比重、摩擦角はともに 2.64, 34 度であり、それぞれ d<sub>3</sub>, d<sub>1</sub> と呼ぶこととする。

本研究では、Egashira et al. (1997) の構成則における反発係数  $e$  の変化による濃度分布の違いが数値計算に与える影響を検討する。反発係数  $e$  の範囲は 0.7~0.85 とされており、上・下限値と中間値を与えた。すると、平衡濃度分布は図-3 のように変化する。反発係数が小さいほど上層と下層の濃度変化が小さく、上層の濃度が大きいため、輸送濃度は大きくなる。図-4,5,6 には下流端の流砂量の変化を示している。実験結果では、粒径 (d<sub>1</sub> と d<sub>3</sub>) による違いが生じているが、数値計算ではいずれもその違いは再現できている。しかし、 $e$  の違いによって定量的には大きな差異が生じている。 $e=0.775$  で実験結果と計算結果が一致しているが、 $e$  が大きくなると、流砂量も大きくなるようである。鈴木・経隆 (2022) は、侵食・流下過程において、土砂濃度の小さい上層が土石流の先端部を形成するために、先端部への濃度分離が生じることを示している。 $e$  が大きいと上層と下層の濃度差が小さいため、濃度分離が生じにくいからである。このような影響が流下に伴って増幅し、下流端では大きな違いとなった。

#### 4. おわりに

土砂や流木は水深方向に一樣な濃度分布でないため、その濃度分布 (輸送濃度) が流下過程に大きな影響を及ぼす。流木の場合は先端部に集積していく傾向があるが、逆に土砂は先端に濃度の低い領域が分離していくため、特に固定床区間ではその影響が増幅されていく。従来の数値シミュレーション手法では、輸送濃度の評価は簡易的なものとなっていることが多いため、注意が必要であると考えられる。

#### 5. 謝辞

本研究は、本研究は JSPS 科研費 JP23K03511 の助成を受けたものです。ここに記して感謝申し上げます。

#### 6. 引用文献

- Egashira et al.(1997), Proc. 1st International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, ASCE, pp. 340-349
- 鈴木 (2022) : 関東森林研究第 73 巻, p109-112
- 鈴木・堀田 (2015) : 砂防学会誌, 2015, Vol.68, No.1, p. 13-24, 2015
- 鈴木・経隆 (2022) : 令和 4 年地すべり学会概要集
- 鈴木ら (2021) : 2021 年度砂防学会研究発表会概要集, p.625-626