

流木の土石流先端部集積過程を再現するための数値シミュレーション手法

鈴木拓郎¹

1 森林総合研究所

要旨：近年、極端豪雨の増加により甚大な流木災害の増加が懸念されており、効果的な対策を検討する必要がある。流木の比重は土石流の比重よりも軽く、流速の速い表面付近の流れに乗って流木は先端に集中していくと考えられる。流木が先端に集積した状態で施設によって捕捉することが効果的である。本研究では、このような流下に伴う流木の先端部集積過程を再現する数値シミュレーションを構築した。流木が表層付近を流れると仮定し、流木の体積濃度と輸送濃度の関係式を既存の土石流の構成則に基づいて誘導し、連続式に適用した。この手法を用いて、直線傾斜水路から扇状地への流木混じり土石流の流出過程の水路実験の再現計算を実施した。実験では、扇状地に流出した土石流の先端外縁部に流木が集積していたが、本研究の手法でその再現が可能であった。

キーワード：土石流、流木、先端部集積、数値シミュレーション

Numerical method for simulating the accumulation of large wood at the debris-flow head

Takuro SUZUKI¹

Forestry and Forest Products Research Institute, Ibaraki 305-8687

Abstract: Large-scale debris flows associated with heavy storms may be accompanied by considerable amounts of large wood. Large wood can significantly damage structures; consequently, effective countermeasures should be developed. Since the specific density of large wood is lower than that of debris flow, large wood accumulates at the debris-flow head aided by the fast flow near the flow surface. Accordingly, check dams can effectively collect the large wood at the debris-flow head. In this study, we developed a numerical simulation technique for reproducing the accumulation of large wood at the debris-flow front. Assuming that large wood flows near the surface layer, we derived the relational formula between the volume and transport concentration of large wood based on existing constitutive equations of debris flow. Further, we conducted channel experiments and numerical calculations for outflow to the alluvial fan. Experimental results indicated that the debris flowed into the alluvial fan and then spread in the transverse direction. Large wood accumulated along the edge of the debris flow. The predicted results were in good agreement with the experimental results.

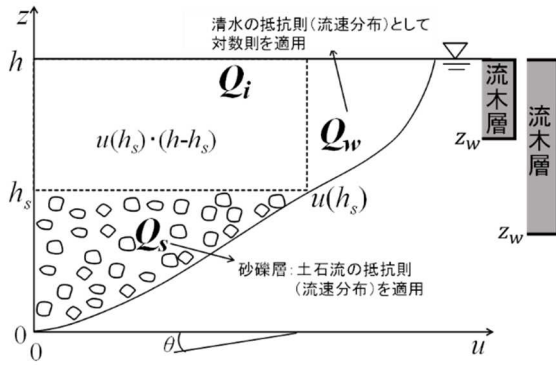
Key-word: debris flow, large wood, accumulation at the debris-flow head, numerical simulation

I はじめに

平成 29 年九州北部豪雨では斜面崩壊が多く発生し、その上に生育していた立木が土砂とともに流下して福岡県朝倉市、大分県日田市を中心に甚大な被害をもたらした。近年、気候変動に伴い極端豪雨は増加しており、このような流木災害への被害軽減対策の検討が必要である。

流木対策には治山堰堤等の施設による捕捉が有効であるが、効率的な施設の設置箇所や設置構造などについて十分な知見はない。流木の流下メカニズムに応じた効率的な捕捉方法を検討するには数値シミュレーションが有効であると考えられる。流木を伴う土石流の数値シミュレーション方法はほとんど存在しないため、開発する必

要がある。流木の評価方法は従来の土石流シミュレーション(4, 5, 6)における砂礫の評価方法と同様の方法で取り扱うことができると考えられる。すなわち、流木の連続式を新たに加えるという方法である。流木の連続式において、流木は流木濃度という平均量として取り扱うことになる。重要なのは、閉空間内における体積濃度と移流を評価するための輸送濃度の関係である。流木の比重は一般的に土石流の比重よりも小さく、土石流表面付近の速い流れに乗って土石流先端部に集積していくと考えられる。つまり、体積濃度よりも大きな輸送濃度で先端部に輸送されていくということである。このような現象を再現するためには流木輸送濃度式を適切に評価する



図・1. 流木混じり土石流の模式図

Fig.1 Schematic diagram of debris flow and large wood

必要がある。宮本・伊藤(4)は Egashira et al. (1)の構成則に基づいた数値シミュレーション手法において、砂礫の濃度分布と土石流の流速分布に基づいて砂礫の輸送濃度式を導いている。

そこで本研究では、宮本・伊藤(4)の方法を流木に適用して流木輸送濃度式を誘導するとともに、流木混じり土石流の数値シミュレーション手法を再構築した。そして、扇状地への流出過程に関する水路実験を検証対象として再現計算を実施し、本手法の適用性を検証した。

II 数値シミュレーション手法の構築

1. 考え方 流木を含む土石流の数値シミュレーション手法を既存の土石流の数値シミュレーション手法に準拠して構築する。本研究では流木が表面の速い流れに乗ること、すなわち輸送濃度が大きい状態を考慮する。そのため、土砂の濃度分布を考慮して輸送濃度式を評価した宮本・伊藤(4)の方法を参考にする。また、この方法では動的せん断応力を評価する際に一部不合理な式の誘導がみられるため、河床面せん断応力式についても鈴木ら(6)の方法を準用して再構築する。

2. 式の誘導 浅水方程式に基づいた数値シミュレーション手法において、土砂や流木の計算に必要な河床面せん断応力と輸送濃度式を誘導する。ここでは、基本的に宮本・伊藤(4)、鈴木ら(6)の方法に準拠するため、基本的な支配方程式系等は本研究では省略する。本手法では、支配方程式に以下の流木の連続式を加える。

$$\frac{\partial(\bar{c}_{wd}h)}{\partial t} + \frac{\partial(Qc_{twd})}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

ここに、 \bar{c}_{wd} は流木の体積平均濃度、 c_{twd} は流木の輸送濃度、 h は水深、 Q は土石流の単位幅流量である。

図-1は流木混じり土石流の模式図である。 θ は河床勾配であり、流下方向の x 軸と直行する方向に z 軸をとる。砂礫層の土砂濃度は一定濃度(c_s)と仮定し、砂礫層

の上部境界値を h_s とする。流木層濃度は表面から一定濃度(c_{smd})で分布し、その下部境界値の位置を z_w とする。 $u(z)$ は高さ z における流速である。流速を z 方向に積分すれば流量 Q となり、添え字 s, i, w は砂礫、境界、水流の成分を示している。

まず、砂礫層の流速分布 $u_s(z)$ を鈴木ら(6)の方法に、Egashira et al. (1)の構成則を適用して誘導する。

$$u_s(z) = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{g \sin \theta}{K(c)}} \frac{2}{3r_s} \left\{ (rh)^{\frac{3}{2}} - (rh - r_s z)^{\frac{3}{2}} \right\} \quad (2)$$

$$K(c) = K_d + K_f \quad (3)$$

$$K_d = k_g(1 - e^2) \frac{\sigma}{\rho} \frac{1}{\bar{c}^{\frac{1}{3}}} \quad (4)$$

$$K_f = k_f \frac{(1 - \bar{c})^{\frac{5}{2}}}{\bar{c}^{\frac{2}{3}}} \quad (5)$$

$$r = 1 + \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \bar{c} \quad (6)$$

$$r_s = 1 + \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c_s \quad (7)$$

ここに、 g は重力加速度、 σ は砂礫密度、 ρ は水の密度、 k_g は土石流構成則の定数で0.0828、 e は反発係数、 k_f は粒子間隙スケールの係数で0.16、 d は粒径である。

水流層の流速分布 $u_w(z)$ は対数則(1)に従うとすると、以下の式となる。

$$\frac{u_w(z)}{U_{*w}} = \frac{u_s(h_s)}{U_{*w}} + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z - h_s + \eta_0}{\eta_0} \quad (8)$$

$$U_{*w} = \sqrt{g(h - h_s) \sin \theta} \quad (9)$$

$$\eta_0 = \sqrt{k_f} \left(\frac{1 - c_s}{c_s} \right)^{\frac{1}{3}} d \quad (10)$$

ここに、 κ はカルマン定数である。

以上の流速分布より、河床面せん断応力 τ_0 、砂礫の輸送濃度 c_t の式をそれぞれ鈴木ら(6)、宮本・伊藤(4)の方法で誘導すると以下の式となる。

$$\tau_0 = \rho K(c) r (\varphi_s + \varphi_i + \varphi_w)^{-2} \left(\frac{h}{d} \right)^{-2} U^2 \quad (11)$$

$$c_t = c_s \frac{\varphi_s}{\varphi_s + \varphi_i + \varphi_w} \quad (12)$$

$$\varphi_s = \frac{4}{15} r_s^{-2} \left[\frac{5}{2} r^{\frac{3}{2}} r_s - \frac{5}{2} r^{\frac{3}{2}} r_w r_s + r_w^{\frac{5}{2}} - r^{\frac{5}{2}} \right] \quad (13)$$

$$\varphi_i = \frac{2}{3} r_s^{-1} \left[r^{\frac{3}{2}} r_w - r_w^{\frac{5}{2}} \right] \quad (14)$$

$$\varphi_w = \frac{1}{\kappa} \sqrt{K(c)} \left(\frac{h}{d} \right)^{-1} r_w^{\frac{1}{2}} \left[\left(r_w + \frac{\eta_0}{h} \right) \ln \frac{r_w + \frac{\eta_0}{h}}{\frac{\eta_0}{h}} - r_w \right] \quad (15)$$

$$r_w = 1 - \frac{\bar{c}}{c_s} \quad (16)$$

ここに、 U は断面平均流速である。

同様の方法で流木の輸送濃度 c_{twd} の式を誘導する。その際に流木層の下部境界値の位置 z_w が砂礫層高さ h_s より上か下かで式を切り替える。

$$z_w > h_s: c_{twd} = c_{swd} \frac{\varphi_i \frac{r_{wd}}{r_w} + \varphi_{wwd}}{\varphi_s + \varphi_i + \varphi_w} \quad (17)$$

$$z_w \leq h_s: c_{twd} = c_{swd} \frac{\varphi_{swd} + \varphi_i + \varphi_w}{\varphi_s + \varphi_i + \varphi_w} \quad (18)$$

$$\varphi_{swd} = \frac{4}{15r_s} \left[\frac{5}{2} r^{\frac{3}{2}} r_s - \frac{5}{2} r^{\frac{3}{2}} r_w r_s + r_w^{\frac{5}{2}} - \frac{5}{2} r^{\frac{3}{2}} r_s \frac{z_w}{h} - \left(r - r_s \frac{z_w}{h} \right)^{\frac{5}{2}} \right] \quad (19)$$

$$\varphi_{wwd} = \frac{1}{K} \sqrt{K(c)} \left(\frac{h}{d} \right)^{-1} r_w^{\frac{1}{2}}.$$

$$\left[\left(r_w + \frac{\eta_0}{h} \right) \ln \frac{r_w + \frac{\eta_0}{h}}{r_w + \frac{\eta_0}{h} - r_{wd}} + r_{wd} \left(\ln \frac{r_w + \frac{\eta_0}{h} - r_{wd}}{\frac{\eta_0}{h}} - 1 \right) \right] \quad (20)$$

$$r_{wd} = 1 - \frac{z_w}{h} \quad (21)$$

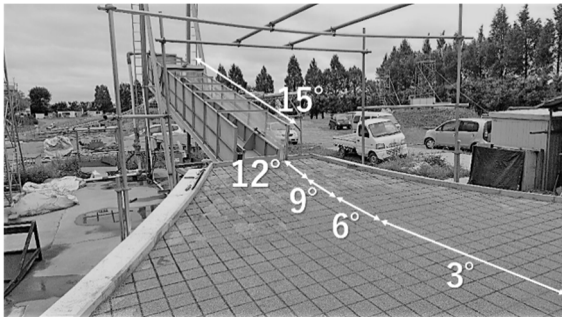


図-2. 実験水路

Fig.2 Experimental Flume

III 水路実験と計算条件

1. 水路実験 剣持(3)による流木混じり土石流の扇状地への流出過程に関する実験を検証対象とした。実験には図-2の実験水路を用いている。幅0.1 m, 長さ6 m, 勾配15°の直線水路と、勾配が上流から12°, 9°, 6°, 3°, 1°と変化する扇状地水路から構成されている。直径が約2.6 mmの土砂を80 L使用し、直線水路内に高さ20 cmで下流端から5 mの長さで堆砂させた。上流端から流量3 l/sの水を供給することで土石流を発生させた。

流木は直径5 mm, 長さ8 cmのラミン材丸棒を用いた。堆積土砂の上流側に設置間隔を約3×3 cmの等間

隔として深さ1.5 cmまで垂直に差し込んだ。横断方向に3本, 縦断方向に100列の計300本とした。

2. 計算条件 数値計算では、計算メッシュ間隔を5×5 cmとして、基本的には実験条件をそのまま再現した。ただし、本計算手法では堆積土砂からの流木の取り込み(侵食)は再現できないため、上流端から供給する水に流木濃度を乗じて与えることとした。流木濃度は石川(2)を参考に一般的な値である0.02を、実験の流木と総体積が一致するよう7.85秒間与えた。流木層濃度 c_{swd} は実験の様子を参考に、供給濃度の5倍である0.1とした。また、本研究の流木輸送濃度式を導入しない場合、つまり体積濃度=輸送濃度とした場合についても計算した。

IV 結果と考察

図-3に実験結果を示す。直線水路から扇状地水路に流出した時点から0秒として、3, 5, 7秒後の様子を上面から撮影した様子を示している。扇状地水路には20 cm毎にグリッド線が引かれている。扇状地水路に流出した土石流は少し横断方向に広がりながらも、直線的に流下している。流木は土石流の先端外縁部に沿って存在しているが、3秒後時点では直線水路から流出する後続土石流中にも一部含まれている。5, 7秒後と時間が経過するにしたがって、土石流先端外縁部付近への流木の集積が進んでいることがわかる。

図-4に流木輸送濃度式を導入しない場合、図-5に流木輸送濃度式を導入した場合の計算結果を示す。実験結果と同様に3, 5, 7秒後の様子を示している。図では単位面積当たりの流木体積(cm)によって色分けしており、白(0 cm)から黒(0.05 cm)のグラデーションとしている。なお、単位体積当たりの流木体積0.05 cmとは実験の1グリッド(20×20 cm)に、流木が12.7本存在することに相当する。計算結果では土石流の横断方向の拡がりを実験結果よりも少し大きいようである。これは流木の計算とは関わりない問題であるが、今後の課題としたい。流木輸送濃度式を導入しない場合(図-4)、流木濃度はほぼ初期条件の0.02で流出し続ける。そのため、流木体積が相対的に多い領域は土石流水深が大きい中央部付近となっているが、流木は全体的に平均的に存在している。また、流木供給時間は7.85秒であるから、扇状地水路到達後7秒後時点では流木は扇状地水路に全て到達していない。一方、流木輸送濃度を導入した場合(図-5)、流木が先端外縁部に集積している様子が再現されていることがわかる。また、扇状地水路到達後7秒後時点で、流木はほぼ全て扇状地水路に流出していることがわかる。直線水路上流端における流木供給時間は7.85秒

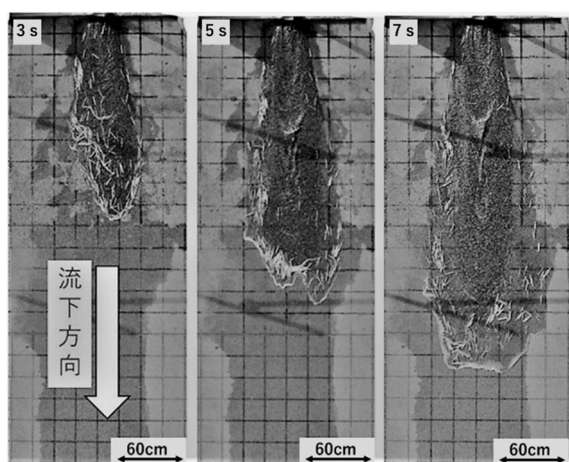


図-3. 剣持 (3)の実験結果

Fig.3 Experimental results by Kenmotsu (3)

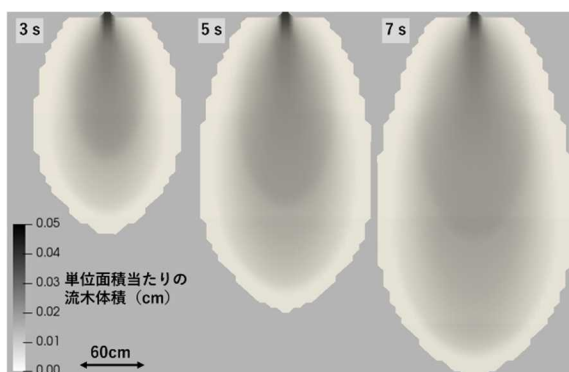


図-4. 流木輸送濃度式を導入しない場合の計算結果

Fig.4 Calculation results without the large wood transport concentration formula

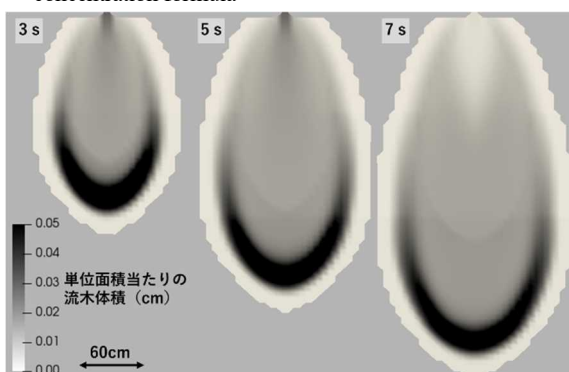


図-5. 流木輸送濃度式を導入した場合の計算結果

Fig.5 Calculation results with the large wood transport concentration formula

間であるが、流木輸送濃度式によって流木が先端部に集中して、7秒間よりも短い時間で流木が流出したからである。3秒後の結果を実験結果と比較すると、実験結果に比べて計算結果の方が先端部への集積の程度が大きい

ように思われる。これは実験と計算における流木の供給方法の違いによるものと考えられる。実験では堆積土砂の上流部に流木を等間隔に配置したため、下流側に存在する流木ほど直線水路の流下距離が短く、先端へ集中しにくい。計算では流木は全て上流端から供給したため、全ての流木が直線水路5mの流下距離を使って集積することができたためである。

V まとめ

流木の先端部集積過程を再現するために流木の輸送濃度式を誘導し、既存の土石流の数値シミュレーション手法に導入することで、流木の数値シミュレーション手法を構築した。構築した手法を用いて、流木の扇状地流出過程の水路実験の再現計算を実施したところ、流木の集積過程をよく再現できた。一方、計算においては流木を上流端からしか与えることができなかったため、流木の取り込み（侵食）や、流木の停止・堆積を再現できるように今後改良していく必要がある。

謝辞：本研究は令和3年度農林水産研究推進事業委託プロジェクト研究(個別課題番号 19191196)の助成を受けたものである。北海道庁の剣持嵩之氏には実験データを提供していただいた。ここに記して感謝申し上げます。

引用文献

- (1) Egashira S, Miyamoto K, Itoh T (1997) Constitutive equations of debris flow and their applicability. 1st. International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, ASCE, 340-349
- (2) 石川芳治・水山高久・福澤誠 (1989) 土石流に伴う流木の発生及び流下機構, 新砂防 42: 4-10
- (3) 剣持嵩之 (2019) 扇状地における土石流に伴う流木の氾濫・堆積 特性に関する実験的検討. 筑波大学大学院修士論文
- (4) 宮本邦明・伊藤隆郭 (2002) 支配方程式に侵食速度式を導入した場合の土石流の数値シミュレーション手法. 砂防学会誌 55(2): 24-35
- (5) 鈴木拓郎・堀田紀文・宮本邦明 (2009) 非連行型侵食速度式を用いた勾配・流路幅の変化点や砂防ダムにおける土石流の数値シミュレーション. 砂防学会誌 62(3): 14-22
- (6) 鈴木拓郎・内田太郎・岡本敦 (2013) 土砂移動シミュレーション手法における輸送形態の遷移に伴う不連続性の解消に関する研究. 砂防学会誌 66(2): 21-30