

## 土石流先頭部に集積する流木群の質量推定手法に関する実験研究

北海道大学大学院農学院 ○金城伶奈  
北海道大学大学院農学研究院 山田孝

## 1.はじめに

山地溪流では土石流に取り込まれた流木が絡み合っただけで土石流先頭部に集積し1つの群となって流下する現象がみられる。本研究ではこの現象を「流木群」と呼ぶ。流木群は家屋への衝突や河道・橋梁の閉塞、砂防施設の破壊を引き起こし、被害規模を拡大させる場合がある。そのため、流木群の発達規模を予測することが重要である。流木群の発達条件・規模に関する既往研究として、片山(2019)が勾配と流木長の比に着目し流木群の発達条件を検討した。本研究では流木群の質量に着目し、その質量を、モデルの考察と水理模型実験を通じて物理的に算出する手法を作成することを目的とする。

## 2.研究方法

片山(2019)や現地調査の結果より、流木群は図1のように土石流先頭部に押されて流下すると考えられる。よって、運動方程式により、土石流による「運搬可能流木群質量」を計算するモデルを検討した。流木群の規模を、流木群に含まれる流木の総質量、すなわち流木1本の質量に流木塊を構成する流木の本数を乗じたもので表すこととする。

N本の流木から流木群が構成されるとすると、流木群の質量 $M_w$ は(1)式により求まる。ただし、流木群の中には水や土砂は含まれないとする。

$$M_w = \left(\frac{d}{2}\right)^2 \pi l \rho_w' N \cdots (1)$$

N: 流木塊に含まれる流木の本数、d: 流木の直径 (cm)、l: 流木の長さ (cm)、 $\rho_w'$ : 流木の密度 (g/cm<sup>3</sup>)

流木塊の運動方程式を(2)式に示す。左辺は運動量変化、右辺第一項は流木群に作用する重力による推進力、第二項は流木群中の流木を介して底面に伝えられる荷重による抵抗力、第三項は流木群に及ぼす土石流の圧力、第四項は土石流から供給される運動量である。

$$\frac{d}{dt} \left( \left(\frac{d}{2}\right)^2 \pi l \rho_w' N v_w \right) = \left(\frac{d}{2}\right)^2 \pi l \rho_w' N g \sin \theta - \left(\frac{d}{2}\right)^2 \pi l \rho_w' N \mu g \cos \theta + \frac{1}{2} \rho_d \cos \theta B g h^2 + \rho_d (v_d - v_w)^2 B h \cdots (2)$$

B: 流木群の幅 (cm)、 $v_w$ : 流木群の速度 (m/s)、g: 重力加速度 (980cm/s<sup>2</sup>)、 $\theta$ : 勾配 (°)、 $\mu$ : 流木群移動時の抵抗係数、 $\rho_d$ : 土石流の密度 (g/cm<sup>3</sup>)、h: 流木群を押す土石流先頭部の流動深 (cm)、 $v_d$ : 土石流の速度 (cm/s)

抵抗係数 $\mu$ は、剛体の滑動時の動摩擦係数に相当する係数である。本研究では、土石流先頭部が流木群を押しているという考え方によっているので、流木群を構成している流木が直接溪床に接触し、溪床を構成している礫に引っかかったり、あるいは溪床の中に流木先端の一部が埋まったりしながら移動しているものと考えられる。そこで、単純に流木群の移動に必要な水平荷重は、その垂直荷重の何倍の荷重が必要になるかに着目し、その係数を流木群移動時の抵抗係数と定義する。

ここで、土石流と流木が一体となって等速で移動する定常状態を考える場合、式(2)中の左辺と右辺第4項は0となる。(2)式を整理し、(1)式を代入すると以下の(3)式が得られる。

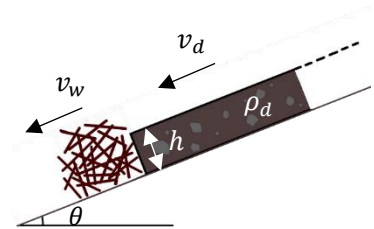


図1 流木群が土石流に押されて移動するモデル

$$Mw = \frac{\rho_d \cos \theta Bh^2}{\frac{d^2}{2} \pi l (\mu \cos \theta - \sin \theta)} \dots(3)$$

流路実験は直線流路を用いて行った。流路の長さは475 cm、流路幅(内寸)は17.8 cmである。流路全体に5 cm厚で土砂(珪砂:平均粒径1.7 mm、比重2.5)を敷いており、上流から順に土石流区間(土砂のみ、200 cm)、立木区間(立木モデルを等間隔で設置する、200 cm)、流下区間(土砂のみ、75 cm)とした。また立木区間と流下区間との境目に手動による開閉式排水口を設置し、流下区間において土石流と流木群を分離して流木群構成本数を明らかにできるようにした。流路の傾きは、片山(2019)において流木群が形成される勾配であり、かつ土石流発生～流下区間である13度に設定した。この流路の上端より給水し、土石流を発生させた。使用した立木モデルは直径3mmのヒノキ丸棒である。立木長4種(13.5, 15.5, 18, 20.25 cm)・立木本数3種(150, 120, 100本)を用意し、これらの総組み合わせを2回ずつ、計24ケース行った。得られた流木群の構成流木本数を計測し、その総質量を算出するとともに、流木集積率 $\alpha$ (=流木群構成本数/立木本数)を算出した。

また流木群質量算出モデルを用いるにあたり、事前に設定が必要な流木群の抵抗係数 $\mu$ を測定した。珪砂(平均粒径1.7 mm、比重2.5)を張り付けたアクリル板に、アクリル製のケースを置き、その中に流木群を移す。水平にアクリル製ケースを引いたときの引張荷重を計測し、垂直荷重で除することにより抵抗係数 $\mu$ を算出した。また、土石流の密度 $\rho_d$ は、土砂濃度Cdにより算出した。

実験で計測した流木群質量と、実験条件を(3)式にあてはめて得られた計算値を比較し、モデルの妥当性を評価した。

### 3.結果と考察

流路実験では、すべてのケースで流木群の発達を確認できた。流木群質量は立木長・立木本数の増加に伴って増大した。流木集積率 $\alpha$ (流木群構成本数/立木本数)について、全24ケースの結果は図2のようになり、 $0.64 \leq \alpha \leq 0.89$ 、平均0.77となった。また、重回帰分析の結果、立木本数・立木長さとの間に強い相関は見られなかった。よって、区間内の立木本数をnとすると土石流先頭部の流木群質量Mwは簡易的に $Mw=0.77n$ と表すことができる。

抵抗係数計測実験より $\mu=1.478$ と設定し、(3)式によって流木群質量を算出した。図3中の着色部分は、計算値(運搬可能流木群質量) > 実験値の領域で、発生した土石流がモデル上運搬可能な流木群質量の範囲を示している。今回は79.2%のデータがその範囲内に含まれていた。今回の実験条件では、流木群質量の実験値と計算値が比較的良好に近似したことから、運動方程式がある程度の精度で成立していると考えられる。

計算値(運搬可能流木群質量)を実験値が上回った5ケースでは、モデルの適用範囲外であった可能性や、流木群の運動形態が前提条件と異なっていた可能性が考えられる。流木群移動時の抵抗係数も併せて今後詳細な検討を行う予定である。

### 4.参考文献

- 1) 片山和純・山田孝(2019): 土石流の発生・流下に伴う流木塊発達に関する実験. 第68回2019年度砂防学会研究発表会概要集: 459-460

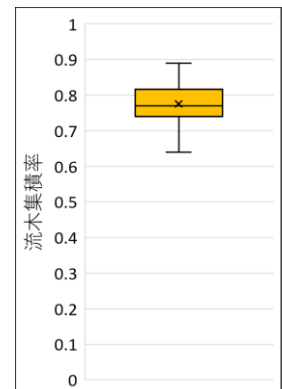


図2 流木集積率の分布(n=24)

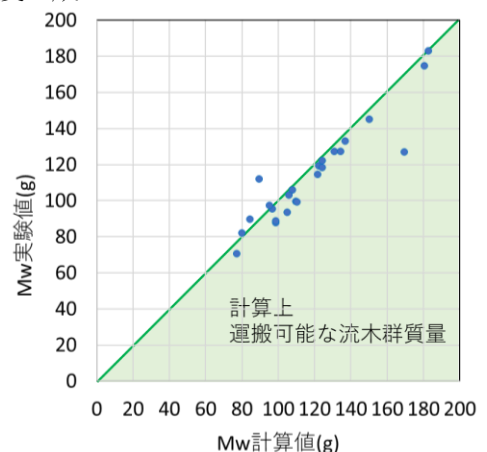


図3 流木群質量実験値と計算値の比較