

流木混じり土石流の氾濫・堆積過程に関する水路実験と数値計算

FLUME EXPERIMENTS AND NUMERICAL SIMULATIONS ON DEPOSITION PROCESSES OF LARGE WOOD IN DEBRIS FLOWS

鈴木 拓郎¹・剣持 嵩之²・経隆 悠³・浅野 志穂⁴

Takuro SUZUKI, Takayuki KENMOTSU, Haruka TSUNETAKA and Shiho ASANO

¹ (国研) 森林研究・整備機構森林総合研究所 (〒305-8687 つくば市松の里 1)

E-mail: takurosuzuki@ffpri.affrc.go.jp

² 国土交通省北海道開発局 (〒060-8511 札幌市北区北 8 条西 2 丁目)

E-mail: kemmotsu-t22aa@mlit.go.jp

³ (国研) 森林研究・整備機構森林総合研究所 (〒305-8687 つくば市松の里 1)

E-mail: tsunetakaharuka@ffpri.affrc.go.jp

⁴ (国研) 森林研究・整備機構森林総合研究所 (〒305-8687 つくば市松の里 1)

E-mail: shiho03@ffpri.affrc.go.jp

Key Words: large wood, debris flow, flume experiment, numerical simulation

1. はじめに

近年、極端豪雨の増加によって甚大な土砂・流木災害が発生している。平成 26 年広島豪雨災害では、線状降水帯による局所的な豪雨によって発生した土石流等により、74 名が犠牲となったり、この災害では、土石流の流出のみではなく、溪岸浸食に伴い発生した流木が直下の住宅地へ流出し、被害を生じさせた。平成 29 年九州北部豪雨では、山間部において多数の斜面崩壊が発生し、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²⁾。両者ともに流木災害であるが、広島豪雨災害の流木は広葉樹が主体であるのに対して、九州北部豪雨は針葉樹が主体であり、流下距離も長い。流木は流下過程で、根や枝が取れることが明らかにされていること³⁾や流下途中で流木の樹皮が剥がされていくことも踏まえると、同じ流木災害であっても樹種や流下距離によって流木の形状等に違いがあり、流木の流下過程にも影響を及ぼすと考えられる。

一方で、流木に関する既往研究は透過型堰堤の捕

捉効果等に関して水路実験による検討が数多く行われてきたが(例えば、渋谷ら⁴⁾)、流木模型に円柱状の木材を用いた場合がほとんどである。特に、流木の氾濫・堆積過程において流木の形状等に着目した既往研究は行われていない。

そこで本研究では、流木材料の表面摩擦力などの違いの影響に着目した流木の氾濫・堆積過程に関する水路実験を実施する。さらに、流木の侵食・流下・堆積を再現する格子法に基づいた 2 次元シミュレーション手法を構築する。鈴木⁵⁾の方法は流木の連続式と輸送濃度式を土石流の支配方程式に導入し、流木の先端部集積過程の再現を可能にした。本研究では、その手法を基本とし、河床からの流木の取り込みと停止(堆積)を再現する方法を導入する。この手法を用いて水路実験の再現計算を実施し、再現性を検証する。

2. 水路実験

実験は 1/50 スケールを想定し、建設技術研究所の実験水路(図-1)を用いた。幅は 0.1 m、長さは 6

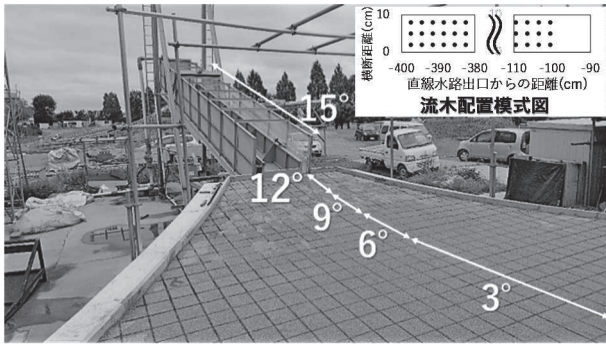


図-1 実験水路と流木配置模式図

m, 勾配が15°の直線水路と扇状地水路から構成されている。扇状地水路の縦断勾配は上流から1.0 m毎に12°, 9°, 6°, 3°と変化し、それ以降は下流端まで3°となっている。扇状地水路の河床には粗度のために直径1~2 mmの土砂を張り付けている。

直線水路内には、直径が約2.6 mm, 密度2.6 g/cm³の土砂を高さ20 cmで下流端から4.0 mの長さで容積濃度0.65 cm³/cm³で均一に堆砂させた(80L)。後述の発生土石流の流動深は最大3 cm程度であり、粒径は少し大きい設定だが、数値計算を石礫型構成則に基づいて実施するため、構成則の適用領域となる相対水深が10程度となるように設定した。

流木は丸棒と自然木の2種類を用い、流木実態調査⁶⁾を参考に設定した。丸棒は直径5.0 mm, 長さ8.0 cmのラミン材丸棒である。自然木にはスギの落枝を用い、直径は約4.0 mm~6.0 mmの範囲枝を8.0 cmの長さに切り揃えた。なお、枝分かれや1.0 cm以上湾曲したものは使用していない。3時間水に浸して十分に湿潤した状態で実験に用いた。湿潤比重は丸棒, 自然木それぞれ0.98, 1.11である。流木は堆積土砂の上流側から設置間隔を3.0×3.0 cmの等間隔で自立する深さ2.0 cmまで垂直に差し込んだ(図-1)。横断方向に3本, 縦断方向に100列の計300本である。流木の総量は既往研究を参考に流出土砂に対する流木濃度が約1%となるように設定した。流木の発生形態に関しては、実現象では崩壊土砂の上の立木が土砂に巻き込まれ、流下とともに先端部に集中していくと共に、先端部で溪畔林を取り込んでいくと考えられる。実験においては、先端に流木が集中した状態で扇状地に流入・氾濫する状況を限られた直線水路区内で再現するために、流木が容易に取り込まれて先端部に集中すること、かつ人為的なばらつきが生じないように、実現象とは異なる等間隔の挿し木による流木供給方法とした。

実験開始まで堆積土砂に散水して概ね飽和状態を保ち、上流端から流量3.0 L/sの水を60秒間供給す

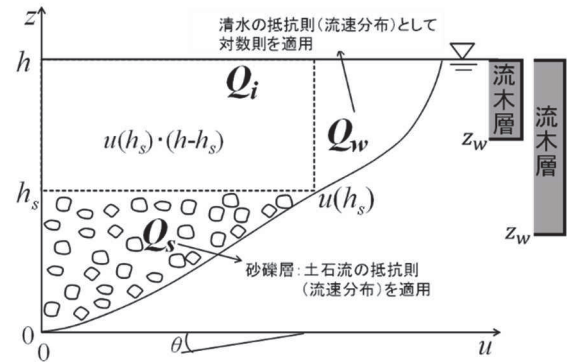


図-2 計算モデル概念図⁵⁾

ることで土石流を発生させた。土砂とともに流木は土石流に取り込まれ、流下とともに流木が先端に集中した流木混じり土石流は扇状地水路に氾濫・堆積した。直線水路出口では超音波センサーによる水位測定を行った。扇状地水路の上部からはデジタルカメラで1.0秒ごとに撮影を行った。扇状地水路内には20 cmメッシュとなるように縦断, 横断方向に補助線を引いており、流木混じり土石流が扇状地水路に到達した時点を0秒として、10秒, 20秒時点における各メッシュ内の流木本数を画像から読み取った。

前述のように本実験はフルード相似則に従い1/50のスケールであり、想定した実スケールは土石流流動深は約1.5 m, 供給流量は53 m³/s, 流木長は4 m, 流木直径は25 cm, 土砂の粒径は13 cmとなる。

3. 数値計算方法

(1) 支配方程式

格子法による2次元計算手法を用いた。支配方程式は鈴木ら⁷⁾の手法を基本とし、鈴木⁵⁾によって誘導された河床面せん断応力と流木輸送濃度式を導入した。さらに、流木の侵食・堆積を評価可能のように修正を加える。図-2に概念図, 以下に概要を示す。まず支配方程式系に以下の流木の連続式を加える。

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

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、 E_{wd} は流木の侵食・堆積速度である。なお、ここでは省略するが土石流全体の連続式と河床位方程式の右辺にも E_{wd} を加える。支配方程式中の河床面せん断応力 τ_0 , 砂礫の輸送濃度 c_t の式を以下の式⁵⁾に置き換える。

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

$$c_t = c_s \frac{\varphi_s}{\varphi_s + \varphi_i + \varphi_w} \quad (3)$$

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

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

$$\varphi_w = \frac{1}{\kappa} \sqrt{K(c)} \left(\frac{h}{d} \right)^{-1} r_w^{\frac{1}{2}} \left[\left(r_w + \frac{\eta_0}{h} \right) \ln \frac{r_w + \frac{\eta_0}{h}}{\frac{\eta_0}{h}} - r_w \right] \quad (6)$$

$$K(c) = K_s + K_d + K_f \quad (7)$$

$$K_s = \frac{\frac{1}{c_*^{\frac{1}{5}}}}{1 - \frac{1}{c_*^{\frac{1}{5}}}} k_g e^2 \frac{\sigma}{\rho} \bar{c}^{\frac{1}{3}} \tan \phi_s \quad (8)$$

$$K_d = k_g (1 - e^2) \frac{\sigma}{\rho} \bar{c}^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

$$K_f = k_f \frac{(1 - \bar{c})^{\frac{5}{3}}}{\bar{c}^{\frac{2}{3}}} \quad (10)$$

$$\eta_0 = \sqrt{k_f \left(\frac{1 - c_s}{c_s} \right)^{\frac{1}{3}} d} \quad (11)$$

$$r = 1 + \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \bar{c}, r_s = 1 + \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c_s, r_w = 1 - \frac{\bar{c}}{c_s} \quad (12)$$

ここに、 U は断面平均流速、 σ は砂礫密度、 ρ は水の密度、 c_* は堆積層濃度、 ϕ_s は砂礫の摩擦角、 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、 κ はカルマン定数である。

流木の輸送濃度 c_{twd} の式は以下となる。流木層濃度は表面から一定濃度(c_{swd})で分布し、その下部境界値の位置を z_w とする。 z_w が砂礫層高さ h_s より上か下かで式を切り替える。 c_{twd} は \bar{c}_{wd} よりも大きくなるため、流木は先端部に集中していく。

$$z_w > h_s: c_{twd} = c_{swd} \frac{\varphi_i \frac{r_{wd}}{r_w} + \varphi_{wwd}}{\varphi_s + \varphi_i + \varphi_w} \quad (13)$$

$$z_w \leq h_s: c_{twd} = c_{swd} \frac{\varphi_{swd} + \varphi_i + \varphi_w}{\varphi_s + \varphi_i + \varphi_w} \quad (14)$$

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

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

$$\left[\left(r_w + \frac{\eta_0}{h} \right) \ln \frac{r_w + \frac{\eta_0}{h}}{r_w + \frac{\eta_0}{h} - r_{wd}} + r_{wd} \left(\ln \frac{r_w + \frac{\eta_0}{h} - r_{wd}}{\frac{\eta_0}{h}} - 1 \right) \right] \quad (16)$$

$$r_{wd} = 1 - \frac{z_w}{h} \quad (17)$$

(2) 流木の侵食・堆積速度

流木の侵食・堆積速度は次のように評価する。河床に侵食可能な流木が存在する場合、土石流は流木を取り込む。数値計算では、メッシュ毎に河床に存在する流木量を単位面積当たりの流木深 d_{wd} として表す。土石流は限界濃度 c_{swd} まで流木を取り込むようにすると、侵食速度 E_{wd} は以下となる。

$$E_{wd} = \frac{1}{\Delta t} \frac{h(c_{swd} - c_{wd})}{1.0 - c_{swd}} \quad (18)$$

ここで、 Δt は数値計算の刻み時間である。ただし、河床存在流木量以上を侵食しないよう制限を加える。

$$E_{wd} \leq \frac{d_{wd}}{\Delta t} \quad (19)$$

また、実験では流木を2.0 cmの深さまで差し込んだため、土砂の侵食深が一定の大きさになるまで流木の侵食を発生させなかった。試行錯誤の結果、流木侵食開始の土砂の侵食深は1.0 cmに設定した。

次に、流木の堆積は流木の移動限界水深 h_{lim} に着目して考えることとした。流木は土石流の流動深が一定以下になると底面との接触摩擦力の影響で停止すると考えられる。そのため、土石流の流動深が h_{lim} を下回った時は次式に従って流木を全て堆積させる。

$$E_{wd} = \frac{-hc_{wd}}{\Delta t} \quad (20)$$

(3) 計算パラメータ

計算格子間隔は5.0 cm、砂礫密度 σ は2.6 (g/cm³)、水の密度 ρ は1.0 (g/cm³)、堆積層濃度 c_* は0.65 (cm³/cm³)、砂礫の摩擦角 ϕ_s は38°、反発係数 e は0.775、侵食速度 η における緩和時間は0.2 s、流木層濃度 c_{swd} は鈴木⁵⁾と同様に0.1 (cm³/cm³)を与えた。 c_{swd} は流木の限界濃度を表すものである。直線水路内での先端部集中を再現するために調整した値であり、これより大きな値を採用しても結果は大きく変わらないが、流木と土砂を独立して取り扱っているため、流木濃度と土砂濃度の和が1に近づくような

不合理が生じないような値とした。また、 h_{lim} によって流木材料（摩擦・比重）の違いを表現するために、流木直径の 0.5 cm およびその 1.5 倍の 0.75 cm の 2 種類を設定した。

(4) 土砂と流木の相互作用について

本モデルでは流木が土石流の抵抗則に与える影響は考慮していないが、今後考慮すべき課題である。また、土砂と流木の侵食・堆積は独立に扱っている。侵食に関しては本実験では流木が容易に取り込まれるように設定したため、今回の条件では土砂の侵食速度への影響は小さいと考えられる。土砂と流木の堆積に関しては、例えば流木が土砂に埋まって堆積するような場合には、土砂の侵食が生じないと再移動することはできないため、堆積物における土砂と流木の混合状態を考慮しなくてはならない。本研究においては、後述の結果で、流木が土砂に埋没するような堆積状況は生じていないため、今回は影響は大きくないと考えられるが、今後の課題である。

4. 結果と考察

図-3 に直線水路下流端における水位変化について、丸棒の実験の超音波センサーによる結果と $h_{lim} = 0.5 \text{ cm}$ の計算結果を示す。図-4、5 にはそれぞれ丸棒、自然木の実験結果を示す。図-6、7 にはそれぞれ h_{lim} が 0.5 cm, 0.75 cm の計算結果を示す。結果は土石流の先端部が扇状地水路に到達後 10, 15, 20 秒後を示している。なお、実験結果では土砂の堆積範囲を点線で示し、計算結果では土砂の堆積深をコンターで示している。また、計算結果の図では流木堆積深（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、流木堆積深 0.05 cm とは 1 メッシュ（20×20 cm）に、流木が 12.7 本存在することに相当する。

まず、直線水路下流端における水位変化は、実験結果の先端部流木群の影響が生じているが、全体的には実験結果の方が少し大きい、概ね同様の値である。なお、自然木実験、 $h_{lim} = 0.75 \text{ cm}$ の計算結果もほぼ同様である。実験と計算終了時の扇状地水路への総流出土砂量は丸棒実験、自然木実験でそれぞれ 61.6 L, 60.4 L, $h_{lim} = 0.5 \text{ cm}$, 0.75 cm の計算でそれぞれ 62.6 L, 62.7 L とほぼ同程度であり、全平均土砂濃度は約 22% である。以上より、実験と計算において同程度の土石流が生じたことが確認できる。

図-4、5 の実験結果では流下中における土砂の堆

積範囲を点線で示しており、図-6、7 の計算結果においてはコンターによる土砂の堆積深を示している。実験結果では、自然木において流木が集積している箇所が流れを阻害している影響が少しあるものの、実験、計算ともに土砂の到達距離等に関して流木材料による顕著な違いは見られなかった。実験と計算結果を比較すると、実験結果では土砂の堆積範囲は直線水路出口から 300 cm 付近まで到達しているが、数値計算では 200 cm 程度の到達距離であり、その分だけ横断的な拡がり大きい。土砂の堆積範囲の再現性に関しては例えば侵食・堆積速度の問題や、相分離の影響に関する数値計算上の問題などが考えられ⁸⁾今後の課題が残る。しかしながら、流木の堆積箇所は土砂の堆積範囲とは異なっていることから、影響は大きくないと考えて今後の検討を進める。

流木の堆積範囲に関しては、丸棒の実験では、流木は土石流の先端外縁部付近に集中しており、一部の流木が堆積しつつも、時間の経過とともに大部分の流木が下流へ流出していった。自然木の実験では、流木の一部は土石流の氾濫範囲の内側かつ土砂堆積箇所の外側で停止（堆積）している。一旦停止した流木の一部が時間の経過とともに少しずつ下流に流出しているものも見られるが、再移動しない流木も多く存在していた。このような堆積傾向の違いは流木の表面形状による摩擦抵抗力の違いや比重の影響によるものと考えられる。先に言及したように、既往研究においては水路実験ではほとんど丸棒の材料が用いられているが、流木材料の摩擦抵抗力の違いや比重は流木の流下状況に大きな影響を及ぼす。流木材料の摩擦力を場合によっては過小評価している可能性があるため、想定する状況に応じて適切な流木材料を選択する必要がある。

数値計算では h_{lim} を 0.5, 0.75 cm の 2 種類で変化させた。土砂の堆積範囲の影響で横断方向の違いに差はあるものの、流木の堆積範囲は 0.5 cm の計算結果は丸棒の実験結果に近く、0.75 cm の計算結果は自然木の実験結果に近くなっていることから、流木の

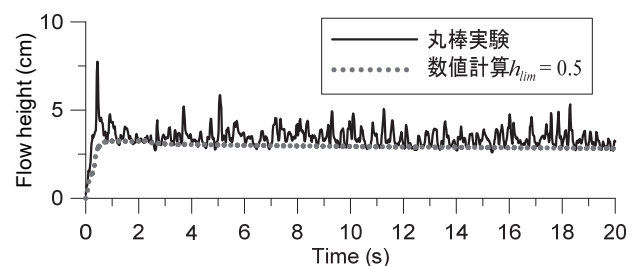


図-3 丸棒実験と $h_{lim} = 0.5 \text{ cm}$ の計算における直線水路下流端における水位変化

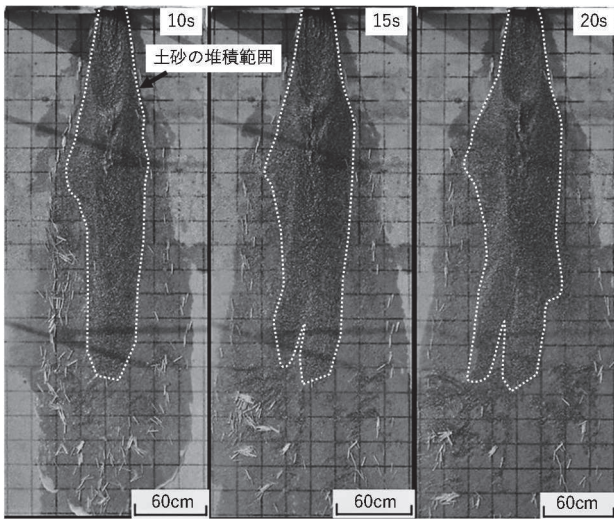


図-4 丸棒実験結果. 扇状水路に到達後 10, 15, 20 秒後の結果を示している. 丸棒は白色.

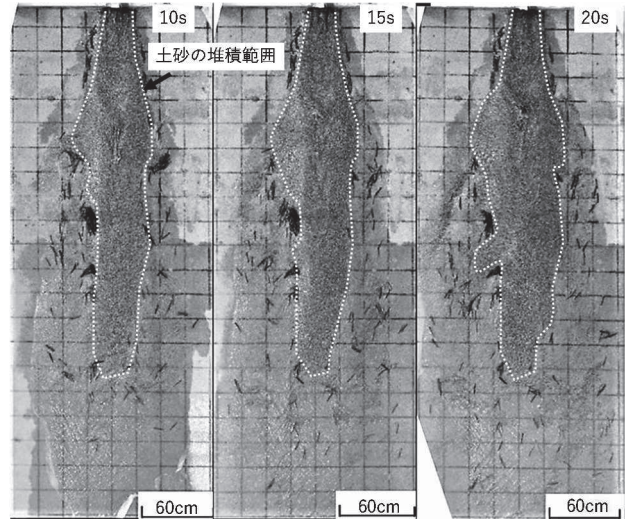


図-5 自然木の実験結果. 扇状水路に到達後 10, 15, 20 秒後の結果を示している. 自然木は黒色.

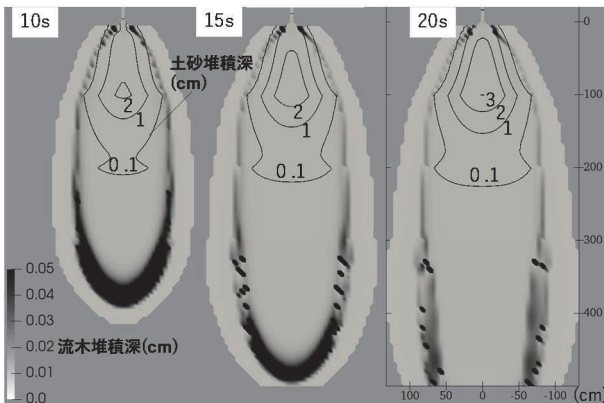


図-6 $h_{lim} = 0.5$ cm の計算結果. 扇状水路に到達後 10, 15, 20 秒後の結果を示している.

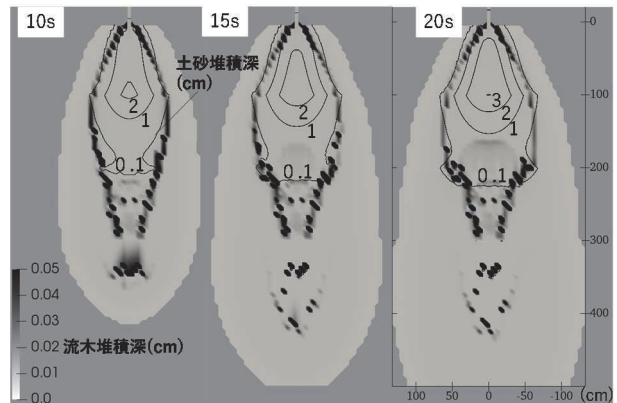


図-7 $h_{lim} = 0.75$ cm の計算結果. 扇状水路に到達後 10, 15, 20 秒後の結果を示している.

移動限界水深 h_{lim} の設定によって流木材料の違いをよく表現できていると考えられる. 特に0.75cmの計算結果(図-7)に着目すると, 流木の堆積位置は直線水路の出口から下流に向かって徐々に横断方向に広がっていき, 縦断位置150~200cmの位置を境に逆に徐々に横断方向に狭まっていき, 流木が集中して堆積している. 自然木の結果(図-5)においても氾濫範囲内側の堆積箇所には概ね同様の傾向が見取れ, 縦断的な堆積範囲はよく再現できている.

そこで, 流木の縦断方向の堆積範囲について詳細に分析した. 図-8~11には実験および計算結果における流木の縦断堆積範囲を示している. 実験においては20cm毎に補助線を引いているため, 縦断方向を20cm毎に区分し, それぞれの縦断区分に存在する流木本数の割合を算出して図に示した. 図には10, 20秒後の結果を示している. 実験結果を比較すると, 自然木に比べて丸棒はより下流側に流木の堆積範囲が分布している. また, 丸棒では時間の経過とともに

に流木の位置が下流側に大きく移動するが自然木はその変化が小さい. 計算結果を見ると, h_{lim} が小さいほど下流側に流木が分布していること, 時間の経過に対する変化が大きいことは, 実験結果と同様の傾向を示していると考えられる. 特に $h_{lim} = 0.75$ cmの結果は自然木の結果とよく傾向が一致しているが, $h_{lim} = 0.5$ cmの結果は丸棒の結果よりも下流側への堆積傾向が大きいようである. そのため, h_{lim} にもう少し大きな値を適用すると, 丸棒の実験結果に対する再現性も高まると考えられる.

5. 結論

本研究では流木材料の摩擦力, 比重の違いに着目し, 丸棒と自然木を用いた流木混じり土石流の扇状地への流出・堆積過程に関する水路実験を実施した. 摩擦力, 比重の大きい自然木よりも摩擦力, 比重の小さい丸棒の方がより下流側に流下, 堆積した. ま

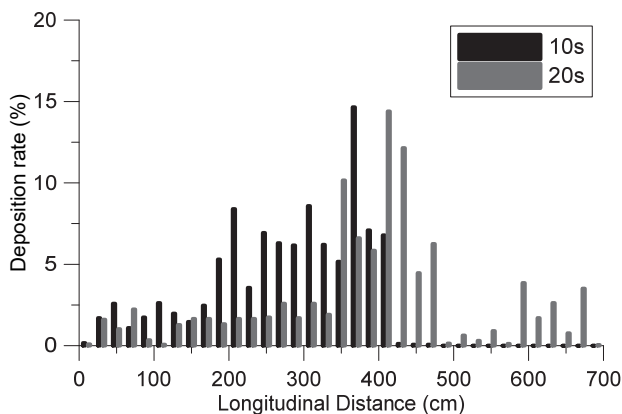


図-8 流木の縦断分布：丸棒の実験結果

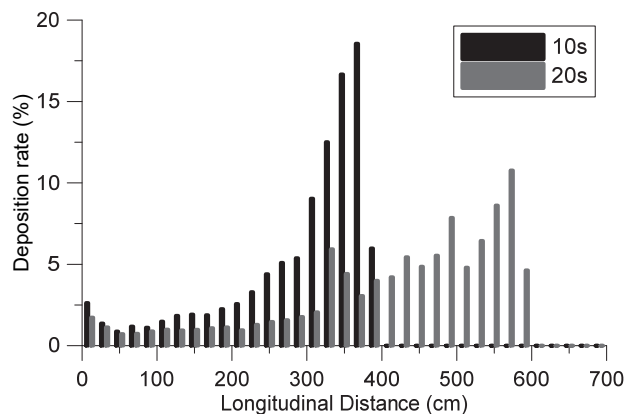


図-10 流木の縦断分布： $h_{lim} = 0.5$ cm の計算結果

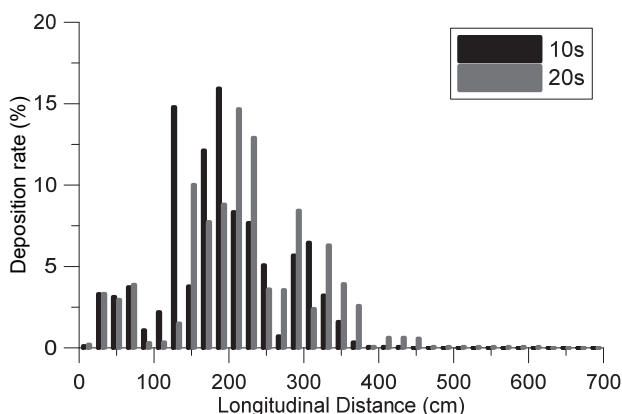


図-9 流木の縦断分布：自然木の実験結果

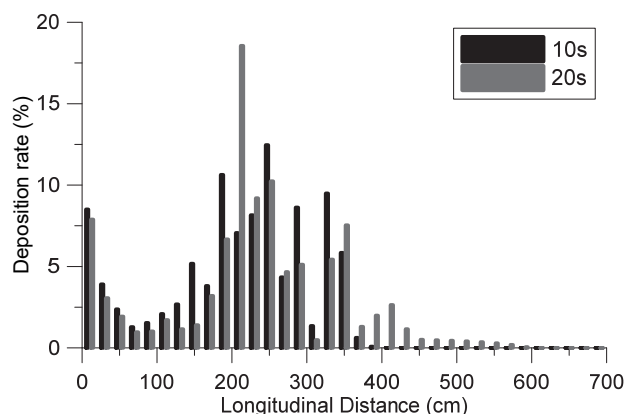


図-11 流木の縦断分布： $h_{lim} = 0.75$ cm の計算結果

た、流木の移動限界水深に着目した数値計算手法を構築・適用したところ、直線水路内において実験と同程度の流動深、総流出土砂量の土石流が再現された。扇状地水路における土砂の堆積範囲の再現性には課題が残るが、流木の縦断的な堆積位置に関しては実験結果と概ね同様の結果を示すことができた。

流木について実験や計算による検討を行う際には、樹種の違いや流下過程による変化（枝葉が落ちる、表皮が剥げる）を考慮し、適切な材料（計算においてはパラメータ）を用いることが重要である。

謝辞：本研究は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。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

1) 海堀正博, 石川芳治, 里深好文, 松村和樹, 中谷加奈, 長谷川祐治, 松本直樹, 高原晃宙, 福塚康三郎, 吉野弘祐, 長野英次, 福田真, 中野陽子, 島田徹, 堀大一郎, 西川友章: 2014年8月20日に広島市で発生した集中豪雨に伴う土砂災害, 砂防学会誌, Vol. 67, No. 4, pp. 49-59, 2014.

2) 京都大学防災研究所: 2017年九州北部豪雨災害調査報告書, 2018.

3) 渋谷一, 香月智, 大隅久, 國領ひろし: 平成22年7月16日に広島県庄原市で発生した豪雨災害における流木実態調査, 砂防学会誌, Vol. 64, pp. 34-39, 2011.

4) 渋谷一, 原木大輔, 香月智: 透過型砂防えん堤の流木混じり土石流の捕捉性能に関する実験的研究, 砂防学会誌, Vol. 62, No. 1, pp. 66-73, 2009.

5) 鈴木拓郎: 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, 関東森林研究, 73, pp. 109-112, 2022.

6) 渋谷一, 香月智, 大隅久, 國領ひろし: 平成22年7月16日に広島県庄原市で発生した豪雨災害における流木実態調査, 砂防学会誌, Vol. 64, No. 1, pp. 34-39, 2011.

7) 鈴木拓郎, 堀田紀文, 宮本邦明: 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, Vol. 62, No. 3, pp. 14-22, 2009.

8) Pudasaini, S. P.: A general two-phase debris flow model, Journal of Geophysical Reserch, 117, F03010, doi:10.1029/2011JF002186, 2012.

(2022. 5. 30 受付)