

## 不透過型堰堤の堆砂敷における流木の停止過程

鈴木拓郎<sup>1</sup>・経隆 悠<sup>1</sup>・浅野志穂<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 森林総合研究所

**要旨**：土砂流出に伴う流木の捕捉には透過型堰堤が有効であるが、既に設置された不透過型の堰堤においても流木が捕捉された事例が報告されている。施設対策を効率的に進めるためには、既存の不透過型堰堤の捕捉効果を適切に評価することが重要である。そこで本研究では、不透過型堰堤の堆砂敷における流木の停止過程を現地調査および数値計算により検討した。現地調査では、不透過型堰堤が流木を捕捉した広島県の事例について、流木の停止角度（流下方向に対する角度）などを分析した。粒子法による数値計算においては、流木長を変化させて流木の停止角度などを分析した。現地調査、数値計算ともに流木は平均的に約 35 度で停止しており、流木長の影響は小さかった。したがって、流木の停止条件は流木の直径をもとに設定することが合理的であると示唆された。

**キーワード**：流木、不透過型堰堤、停止角度

### Deposition process of large wood in the upstream area of a closed-type check dam

Takuro SUZUKI<sup>1</sup>, Haruka TSUNETAKA<sup>1</sup>, Shiho ASANO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Forestry and Forest Products Research Institute

**Abstract**: An open-type check dam is effective in capturing large wood associated with debris flows. On the other hand, there have been some cases where existing closed-type check dams have trapped large wood. It is important to properly evaluate the effectiveness of existing closed-type check dams to efficiently implement countermeasures. In this study, the deposition process of large wood in the upstream area of a closed-type check dam was investigated through field surveys and numerical calculations. In the field survey, the deposition angles of large wood were analyzed in a case study in Hiroshima Prefecture, where closed-type check dams actually trapped large wood. In the numerical simulation using the particles method, the deposition angles of large wood were analyzed by changing the length of the large wood. In both the field survey and the numerical simulation, large wood was deposited at about 35 degrees on average, and the effect of large wood length was small. Therefore, it is suggested that it is reasonable to set the deposition conditions based on the diameter of the large wood.

**Keywords**: large wood, closed-type check dam, stopping angle

#### 1 はじめに

近年、気候変動による極端豪雨が増加しており、流木災害の激甚化が懸念されている。このような流木災害の被害の防止・軽減のためには、治山堰堤等の施設による捕捉が有効であり、一般的には透過型の流木捕捉式治山堰堤の設置が推進されている。しかしながら、新たな施設の設置や既存施設の透過型への改良は費用・時間の観点で限界がある。一方で、すでに多くの流域に設置されている不透過型堰堤によっても流木が捕捉され、被害の軽減に効果を発揮した事例が報告されている(4)。そのため、効率的な施設配置計画を検討するためには、既存の不透過型堰堤の捕捉効果を適切に評価することが重要となる。透過型堰堤は流木を直接的に捕捉するが、不透過

型堰堤は基本的に満砂状態であるため、堆砂敷において流木が停止する過程となる(2)。

鈴木(6)は効率的な施設配置計画に資することを目的として流木の先端部集積過程を再現するシミュレーション手法を開発した。鈴木ら(8)は流木の移動限界水深の設定により流木の停止過程の再現が可能であることを示した。したがってこの方法は不透過型堰堤の堆砂敷における流木の停止過程にも適用可能であると考えられる。重要なのは流木の停止条件をどのように設定するかである。土井(1)は流向と並行な流木に対する流体力と抗力の関係から流木の移動限界を検討している。Shields and Gippel(5)は、流木の移動には流向に対する流木の角度が強く影響することを指摘している。このように流木の角

度によって流木の流下方向断面長さが変化するため、流木がどのような角度で停止するかを把握したうえで、流体力と抗力の関係性を評価することが、数値シミュレーションを実施する際の流木停止条件の設定のために必要である。

そこで本研究では、不透過型堰堤の堆砂敷において流木を捕捉した事例（平成30年7月豪雨、広島県東広島市八本松地区）を対象として、UAVによる空撮結果を基に捕捉された流木の実態を把握した。さらに、流木の停止過程の基礎的理解のために、粒子法による数値計算手法を用いて数値実験を実施した。現地調査結果、数値実験結果を比較検証したうえで、流木の停止条件の適切な設定方法を考察した。

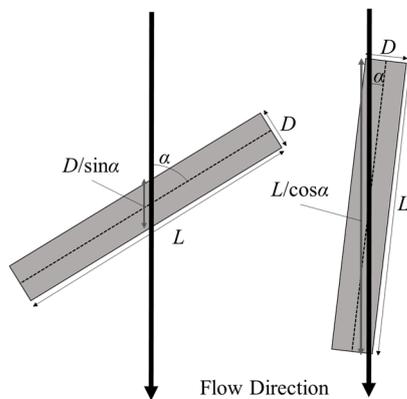


図-1. 流木角度の模式図

Fig. 1 Schematic of large wood angle

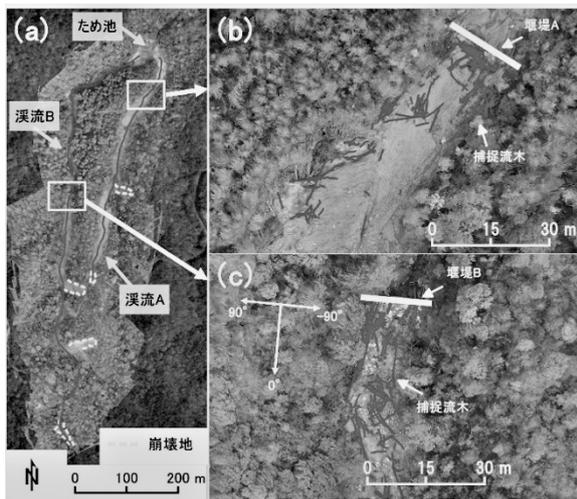


図-2. 研究対象地 (a) 対象地全景, (b) 堰堤 A, (c) 堰堤 B

Fig. 2 Maps of study site (a) Panoramic view, (b) Dam A, (c) Dam B

## II 方法

### 1. 考え方 堆砂敷における流木の停止とは流木の摩

擦抵抗が土石流からの流体力を上回り自然停止する過程であり、その条件を評価するためには、流下方向の力の釣り合い（主に流体力と摩擦抵抗力）を考えることになる。図-1は流木の回転角度の模式図であり、 $L$ は流木長、 $D$ は流木直径、 $\alpha$ は流木の長さ方向と流下方向の成す角度である。流下方向の力の釣り合いを考える際には、流木の流下断面長さを評価する必要があり、流木直径が支配的な場合（図-1の左）と流木長が支配的な場合（図-1の右）を考慮すると、 $D/\sin \alpha$ と $L/\cos \alpha$ の小さい方の値をとることになり、流木の角度が重要となる。したがって、実際に流木が停止する角度を現地調査と数値実験により把握した。

### 2. 現地調査 広島県東広島市八本松地区の隣接した2

つの溪流を対象地とした（以下、図-2 aのように溪流Aおよび溪流Bと呼ぶ）。不透過型の堰堤は、溪流Aでは1基、溪流Bでは計3基設置されている。平成30年7月に発生した豪雨により、両溪流の源頭部および側岸部で表層崩壊が発生し、流木を含む土砂流れが流下し、土砂および流木の大部分はこれらの堰堤および末端のため池に堆積した。溪流の最高地点標高は、溪流Aが約325m、溪流Bは約380mとほぼ同程度であるが、流路長は溪流Aが約465m、溪流Bは約880mである。地質は風化した花崗岩であり、森林の樹高はおおよそ10~20m、アカマツ、ヒノキの混交林で、70%以上が広葉樹である。

本研究では、堰堤A（溪流A上流から約400m地点、図-2 b）と溪流Bの最上流の堰堤である堰堤B（上流から約525m地点、図-2 c）を対象として、流木の捕捉状況を比較した。

2018年11月16日にUAV（Mavic pro, DJI Co.）によって空撮を実施した。マニュアル操作により、対地高度約50~150mで約300枚の画像を撮影した。SfM解析ソフト（Metashape, Agisoft LLC.）を用いて画像を処理することにより、解像度3cmのオルソ画像を作成した（図-2）。オルソ画像の絶対座標は、撮影時の機体位置のGNSS測定結果として各画像に付加されたExif情報を用いた簡易的なジオリファレンスで与えた。作成したオルソ画像を分析し、堰堤の中心から流木の重心位置までの距離、流木の捕捉角度（座標系は図-2 cのとおり）および流木の長さを算出した。

### 3. 数値実験 鈴木(6)が用いた実験水路（図-3）を粒子

法(8)によって再現して用いた。水路は幅0.1m、長さ6m、勾配15°の直線水路と、勾配が上流から1m毎に12°、9°、6°、3°と変化する扇状地水路から構成される。扇状地水路部分における勾配変化、流れの広がりがない不透過堰堤の堆砂敷の地形状況と類似していると考えられる。

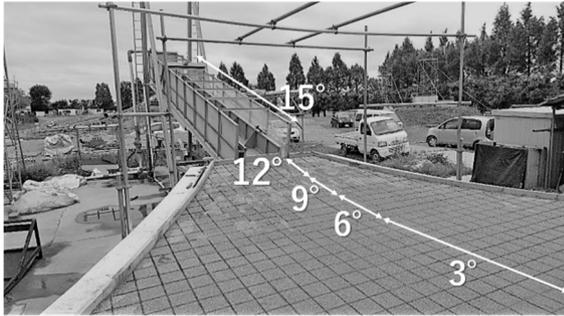


図-3. 数値計算で再現した水路 (6)

Fig. 3 Experimental flume reproduced in numerical simulation (6)

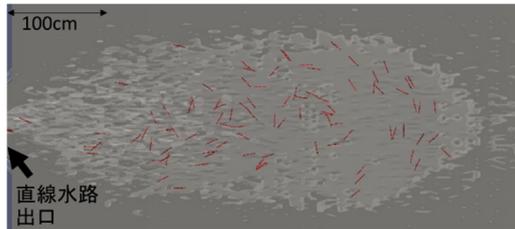


図-4. 粒子法における流下途中の様子。図中の棒状の要素は流木であり、薄いグレーは清水の氾濫範囲を示している。

Fig. 4 An example of particles simulation. The bar elements are large wood and the light gray indicates the inundation area of the water.

粒子法による計算方法は (7)の方法を参照されたい。なお、本研究では土砂の影響を排除するために、土砂濃度を 0.01 の一定値として計算した。また、流木は(3)に従って粒子を直線に連結して再現した。直線水路の下流端より 1m 地点から流量 3 l/s の水を 10 秒間供給した。流木は 25 本/s で先頭から 4 秒間の計 100 本、流木の水平方向の回転角度を一樣乱数を用いてランダムに与えた。

粒子法による計算においては、流木同士あるいは流木と底面が接触した際の摩擦力を評価する必要がある。そこで、着目粒子*i*と近傍粒子*j*の間に作用する摩擦力  $\tau_{c,ij}$  を次式によって評価した。

$$\tau_{c,ij} = \mu \left[ \frac{P_i + P_j}{2} - \rho g(h_i - z_i) \right] \frac{\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i}{|\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i|} \quad (1)$$

ここに、 $\mu$ は摩擦係数、 $P$ は圧力、 $\rho$ は水の密度、 $g$ は重力加速度、 $h_i$ は*i*に対応する表面粒子の鉛直方向高さ（鈴木・堀田(7)）、 $z_i$ は*i*の鉛直方向高さである。本研究では間隙水圧を簡易的に静水圧  $\rho g(h_i - z_i)$  で評価した。また、 $\mathbf{u}$ は流速ベクトルであり、 $(\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i)/|\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i|$ は*i*に対する*j*の相対速度の単位ベクトルを意味する。粒子間距離による重みづけ関数(3)を用いて影響範囲内の周辺粒子との摩擦力を評価し、着目粒子に作用する摩擦力を算出した。

計算条件は次のとおりである。流木長を 8 cm とすることを基本とし、一樣乱数は 3 セット (R1, R2, R3) とした。さらに流木長を 4 cm の条件を設定し、乱数は R1 のみ実施した。流木が完全に停止後、流木の水路出口からの縦断距離と流木角度（直線水路流下方向と流木長方向の成す角）を算出した。

### III 結果と考察

図-2 のオルソ画像から、堰堤 A と堰堤 B とともにほぼ満砂し、流木がそれぞれ約 200 本および約 300 本捕捉されたことが確認された。また、粒子法による計算の様子は図-4 のとおりであり、どの計算条件においても流木は計算領域内にほぼ全ての流木が停止した。堰堤 A と堰堤 B の分析結果では、流木の流木長、停止距離、停止角度の間に明確な関係性はみられなかった。一方、数値計算において 8cm-R1 の流木の到達距離と停止角度の関係を図-5 に示す。到達距離が短い流木は停止角度が 0 度に近い状態となっていることがわかる。これは図-1 右の状態で、流木の流下断面長さが大きく、それに比例する摩擦抵抗力が大きく停止しやすいからである。上流側は勾

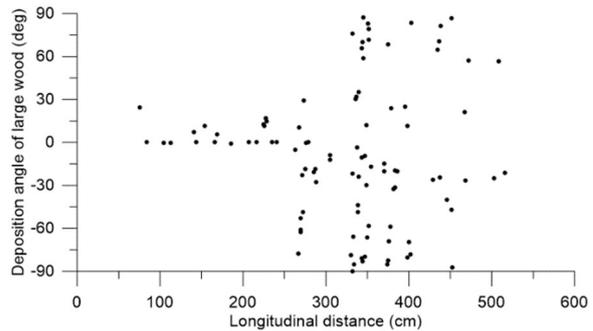


図-5. 流木の到達距離と停止角度 (8cm-R1)

Fig. 5 Deposition distance and angle of large wood (8cm-R1)

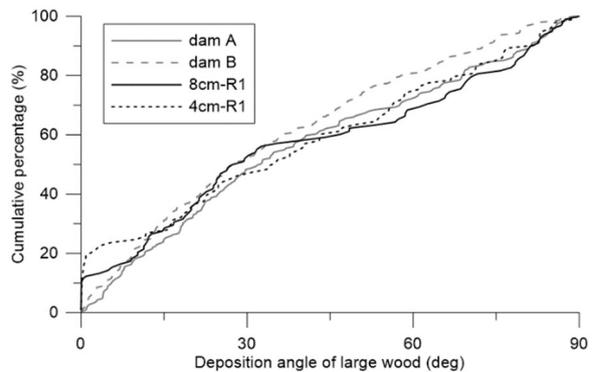


図-6. 流木停止角度の累加百分率

Fig. 6 Accumulated percentage of large wood deposition angle

配が急で流下幅が小さく、単位幅当たりの流体力が大きいため、流下方向と平行に近い流木のみが停止条件を満たしたと考えられる。数値実験では単純な地形条件で計算を行ったため、一部このような流木が生じたと考えられるが、流木の大部分は流体力を受けて回転しながら流下し、概ね 300 cm 前後の範囲に停止した。その範囲では流木角度は現地調査と同様に幅広く分布していた。

図-6 には現地調査および数値計算の流木堆積角度の分析結果を示している。横軸に角度をとり、縦軸は累加百分率としている。数値計算においては、乱数セット R1～R3 による大きな差異は生じていなかったため、R1 のみを示した。図より、流木停止角度の分布は現地調査および数値計算で概ね同様の傾向を示していることがわかる。全体的に上に凸のグラフになっており、角度が小さいほど変化率が大きい、すなわち存在割合が大きくなっていることを示している。これは前述のように流木の角度が小さいほど流下断面長さが大きくなるからである。表-1 には、流木の平均停止角度と平均停止距離を示している。現地調査と数値計算ともに、平均停止角度は約 35 度となっていることがわかる。35 度を図-1 の関係に適用すると、 $D/\sin \alpha < L/\cos \alpha$  となる条件は  $L/D > 1.45$  である。 $L/D=1.45$  はもはや木片であり、基本的には考え難いため、一般的な状態は  $L/D > 1.45$  の条件を満たす。したがって、流木の流下断面長さに対して流木直径が支配的（図-1 左の状態）であると言える。また、表-1 に示す通り、数値計算において流木長による停止角度や停止距離の違いは生じなかったのは、流木の流下断面長さに対して流木長は支配要因ではないことを裏付けていると考えられる。現地調査においても流木長と停止距離、停止角度の間に明瞭な関係性は得られなかった。ただし、写真の解像度の問題で今回は分析できなかったが、流木直径と停止距離の間の関係性については今後検討の必要がある。

表-1. 流木の平均停止距離と平均停止角度

Table 1 Average deposition distance and angle of large wood

	平均停止 角度 (deg)	標準偏差 (deg)	平均停止 距離 (cm)
dam A	38.6	27.2	
dam B	33.6	24.9	
8cm-R1	38.7	29.7	326.2
8cm-R2	37.2	29.3	312.7
8cm-R3	34.7	31.2	293.1
4cm-R1	37.2	29.1	302.3

#### IV まとめ

不透過型堰堤の堆砂敷における流木捕捉能力の評価に資することを目的として、流木の停止条件を UAV による現地調査および粒子法による数値計算によって検討した。流木の停止角度（流下方向に対する角度）は現地調査、数値計算ともに角度が小さいほど存在割合が多くなっており、概ね平均 35 度であった。これは、流木の停止条件を流体力と摩擦抵抗力の釣り合いから考える際に必要な流下断面長さに対して、流木直径が支配的な状態である。したがって、流木長の影響は小さいと考えられ、実際に現地調査と数値計算において流木長の影響はみられなかった。以上より、数値シミュレーションなどにおいて流木の停止条件を設定するには、本研究の範囲内では停止角度を 35 度として、流木直径を考慮して設定することが合理的と考えられる。今後、幅広い事例・条件において流木直径の影響を含めて検討を進めていきたい。

**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)の助成を受けたものである。ここに記して感謝申し上げます。

#### 引用文献

- (1) 土井康弘 (2000) 流木の堆積と再移動に関する研究—自然河道と不透過型砂防ダムにおける挙動を中心として—。筑波大学博士論文, 106pp.
- (2) 土井康弘・南哲行・山田孝・天田高白 (2000) 満砂状態の不透過型砂防ダムによる流木捕捉機構に関する実験的研究。砂防学会誌 52(6): 49-55
- (3) Koshizuka S, Oka Y (1996) Moving Particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid. Nuclear Science and Engineering 123: 421-434
- (4) (一財) 砂防・地すべり技術センター (2018) 土砂災害の実態 2017
- (5) Shields FD, Gippel CJ (1995) Prediction of effects of woody debris removal on flow resistance. Journal of Hydraulic Engineering 121: 341-354
- (6) 鈴木拓郎 (2021) 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: 109-112
- (7) 鈴木拓郎・堀田紀文 (2015) 土石流の構成則に基づいた粒子法モデルの構築と堆積過程への適用。砂防学会誌 68(1): 13-23
- (8) 鈴木拓郎・剣持嵩之・経隆悠・浅野志穂 (2022) 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。土砂災害に関するシンポジウム論文集 11: 95-100