

## 砂防堰堤堆砂敷における堆積流木から情報を得るための予備的考察

国土交通省北陸地方整備局富山河川国道事務所\* 中谷洋明

\*前 (一財)砂防・地すべり技術センター砂防技術総合研究所

### 1 はじめに

山地小溪流における土石流に伴う流木の挙動と対策については、十分な乱雑さを仮定し、安全側の上限値を想定することにより、工学的にはほぼ解決済みである(石川芳治, 2021)。行政的、実務的なところでは、対策はまだ緒に就いたばかりで、整備対象の絞り込みも遅れており、流木の大径化(秋田ら, 2024)を見据えた計画的な整備が求められる。

流域面積が大きく(>10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>)、河道調節によって土砂が分離され、流木が先頭部に集中する場合の流木の挙動と対策については、現地計測(工藤ら, 2021)、水理模型実験(土研 2019, 平田ら, 2024, 武藤ら 2021)、及び数値モデル(長谷川ら, 2015, また流木に限定されないが堀口、別府ら, 2024)等、依然として多くの取り組みが継続中である。満砂した砂防堰堤堆砂敷で定常流を仮定出来れば、順流と(反)転流が比較的安定して共存的に分布し、流木挙動が平面的になるため、捕捉効果の高い構造物の形状や配置についても検討が出来ており(嶋ら, 2022)、この分野の黎明期に懸念された「堰上げ係数」(水原, 1973 及び 1974)の不安定さも解消されている。堰上げ効果による短期一洪水期間中の調整流量も、互いに潜り込みが起らない前提で、平均流木直径と湛水面積(≒堆砂面積)の積で近似的に推定出来る(土石流・流木対策指針及びその解説, 2016)。

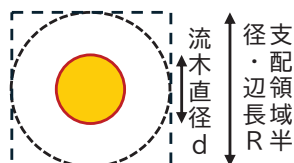


図-1: 単体流木とその円筒状支配領域のモデル

しかしながら、堆積流木の状態から当初の流送・堆積時の状況を復元的に推定する手法については、洪水時の流水(捕捉堆積後の後続流を含む)、及び洪水後の調査がされるまでの沈積作用等による攪乱が著しいこともあって、十分な検討がなされていない(平成29年九州北部豪雨時の流木について多角的な考察を試みた原田, 2018 についても依然議論の余地がある。)。LPと流木解体作業を伴う現地調査結果の取りまとめ時にも、マクロな密実度(純容積率)の整理で留まらざるを得ない。このことは、成層構造の有無、沈積時の間隙水圧消散等から流動状態や二次流の発生程度を論じ得る土石流・土砂洪水との大きな違いである。球状体・要素については個別要素法の適用により複数粒径の場合のランダムさを考慮した堆積・空隙生成を検討出来るのに対して、流木を模した円筒状剛体については、自由度が高過ぎるため、十分な数値実験の条件設定には依然困難性が強い(古いところでは例えば、外山ら, 1985。最近でも条件を絞ったものは多数ある。)。そこで本検討では、砂防堰堤堆砂敷において土砂が混入せずに、流木を先頭に洪水流が到達する状態を想定して、堆積流木から情報を得るための予備的考察を行う。

### 2 モデルの設定

(1)まず、直径、長さとも同一形状を仮定した上で、単体の流木とその円筒状支配領域を図-1のように置く。比重についても一律に1.0を想定しておく(立木は1.0未満、漂流で浸潤されている場合1.3程度まで増加するが、ここでは検討対象にしない。)。長軸に直交する断面で考えると、円(筒)の最密充填率は $\sqrt{3} \cdot \pi / 6 \div 90.69\%$ 、円(筒)を鉛直・水平方向に並べる場合の充填率は

は $\pi/4 \div 78.54\%$ であることに留意する。次に、簡単化のために捕捉・堆積される流木の向きとして、流向に平行な「矛」と流向に直交する「盾」の2つのモードを想定する。

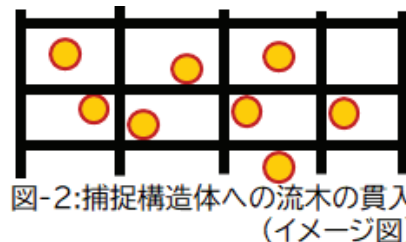


図-2: 捕捉構造体への流木の貫入(イメージ図)

(2)円筒状支配領域の範囲

ピッチングとヨーイングの回転中心は円筒の中心と一致とする(先頭部が根株で後尾のみを振る尻振りとは考えないで)。検討対象の流木が流下過程で根株及び枝を失い、幹のみとなっていればRは小さくなる。水面波の波高が小さければピッチング幅が小さく、Rは小さくなる。実際、捕捉、閉塞、及び堆積の直前から初期の段階では、水通し部からその直上の堆砂敷では射流であり波高は小さい。河幅が狭い、或いは流木が群として流下する場合、平面内で規制されヨーイング幅が小さく、Rは小さくなる。横断面内の循環、即ち螺旋流により流下速度と見合う角運動量を与えるローリング(スピン)が生じ、これによりRは小さくなる。例えば、流速が大きければ、但し、幹のみとなっている場合、螺旋流との間ですべりが生じるため、この関係は一定ではない。半径Rは本来確率的な領域であり(例えば、外れ・飛び値を許して90%存在する、等)、隣接領域相互で必ずしも排他的ではないが、ここでは検討の都合上確定的に想定しておく。

円筒の長軸方向はわざわざ「支配」等と呼称するまでもなく長さlで表現する。流下過程での狭窄部での折損(立木の1/2~1/3となった事例が知られている(水山・石川ら)を想定すれば、「根株と枝がない」仮定は非現実的ではないものの、①根株は大きな形状抵抗を持ち流水中「フロントドライブ」となり、②流送される流木の姿勢(特にピッチング)に影響し、③捕捉・堆積後、周囲に乱流域を形成し追加の捕捉(空隙充填)に影響することには留意が必要である。溪岸上の斜面からの大径木の供給等があれば根株が残存することは観察される。

### 3 数値例を用いた分析

(1)矛が主体の場合

流木防止柵等、捕捉構造体に密に突き刺さり貫入した場合(図-2)、提示したモデルでは空間充填率は面的充填率と一致し、式-1で表され、GとR/dの関係は図-3のようになる。

$$G = \frac{\pi}{4} \frac{d^2}{R^2} \% \quad \text{式-1}$$

ここに、Gは空間(面的)充填率

R/dは、G=10%の時に約2.80、G=30%の時に約1.62である。今、直径d=25cm(1/4m)、長さ10mの流木を考えると、G=10%及び30%を与える流向に対する角度(偏走角)は、それぞれ約4.02°、約2.32°となる。逆に、偏走角の関数としてR/dを与えると図-4のようになり、 $\theta=10^\circ$ で約6.95、 $\theta=20^\circ$ で約13.68等となる。洪水中や水理模型実験中の観察では流下中の偏走角は、捕捉構造体と接触が開始される際に30~40°を超えることもしばしばである。矛モードのみで実際に観察される充填率10~30%を説明

するのは困難である。言い換えれば、盾モードの捕捉なしでの説明では充填率について矛盾が生じる。

※:密度度(純容積率)について、大きな流域で多量の流木があった事例では河川・ダム分野では、調査流域平均で30%(小松・山本,2009)、最近の砂防分野では工藤ら(前掲)が14.5%としている。

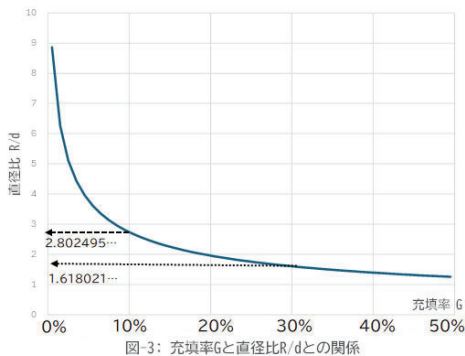


図-3: 充填率Gと直径比R/dとの関係

## (2) 盾が主体の場合

水通し、或いは捕捉構造物、他の流木との接触、さらには後続流の影響等により、ヨーイングから回転して流向に直交した「盾」モードで捕捉・堆積された流木は、減水期に沈積することで支配領域は縮小し、充填率は上昇する（直径まで縮小する場合、設定どおり充填率は約78.54%）。減水期の縮小が、乱流、夾雑物混在等で十分縮小切れなければ充填率の上昇は限定的になる。下流側が盾モードで堆積を開始した後、矛モードが入ると充填効率の高い盾モードでの堆積が抑制されることで見掛けの嵩のみが増大する。このことは、現地調査で観察される空隙が多い構造と矛盾しない。

## (3) 矛と盾が混在する場合

上述と同じ  $d=25\text{cm}$ 、 $l=10\text{m}$  の流木(群)が、水深1.0m、幅10mの捕捉構造物に捕捉される場合、矛モードを先行させると、先ほどの  $G=10\%$ 、即ち  $R/d \approx 2.8$  では矛モードの捕捉本数は約20.37本となる。流木1本の充填率への寄与は0.5%弱であるが、このような槍倉状態のところへ浮遊する流木が盾モードで追加されるのはごく少数であろう。一方、盾モードを先行させると、1列目に4本で約2%、2列目に4本(計8本)で約4%、となり縦断方向に10mの範囲で数列あれば1~3割の充填率となり得る。このことから、実現象と整合するのは盾モードから開始する、或いは盾モードが主体となる現象の遷移である、と予想される。

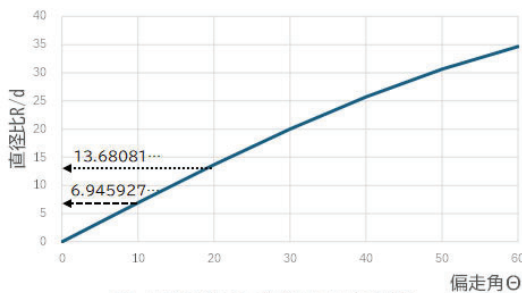


図-4: 偏走角 $\theta$ と直径比R/dの関係

## 4 小括

堆積流木から情報を得るため、矛モードと盾モードの2つのモードによりモデルを設定し、数値例により分析した。堆積開始前のピッチングとヨーイング等を考えると、円筒状支配領域の大きさが無視出来ず、矛モードでは充填率が現実と比較して過小になる。従って、盾モードとの混在、特に先行的な盾モードの発生、及びその卓越が継続する、と想定される。現地調査に用いられる道具が高度化し、従来の本数及び(胸高ないし根元)直径に加えて見掛けのかさと充填率(密度度、純容積率)を得ることが可能になりつつある。計測される(点群)データを整理する際に、矛と盾の2モードを意識すると充填率のみ

ならず流動・流下の様態について、より詳細に復元し、解析出来る可能性がある。現地調査結果が蓄積されれば、捕捉構造物の衝突荷重への安全性照査用のモードを検討する面で、より信頼性を高めることにもつながると期待出来る。

## 参考文献

石川芳治(2021): 流木災害対策は多重防御で, Vol.73, No.6, pp.1-2

秋田寛己・今泉文寿・中谷洋明・堤大三(2023):過去40年程度の主要流木災害における発生流木量の傾向について, 令和5年度砂防学会札幌大会発表概要集 P-126, pp.613-614

工藤拓也・永野統宏・松岡 暁・早川智也・上條孝徳・松山洋平・小山内信智・笠井美青(2021): 平成28年8月豪雨による北海道戸蔭別川流域の流木実態と流木量の推定, Vol.73, No.6, pp.3-11

土砂管理研究グループ火山・土石流チーム(2019):「流木の流出実態を踏まえた流木対策の高度化に関する研究」成果概要,平成27~30年運営費交付金研究, 土木研究所 HP

平田遼・小柳賢太・石井靖雄(2024): 堆砂条件と流木長が不透過型砂防堰堤の流木捕捉効果に与える影響の実験的検討, 砂防学会誌, Vol.77, No.2, pp.3-11

武藤弘典・堤大三・古川真由子・内田太郎・鈴木拓郎・堀口俊行(2021):新たな流木捕捉工の開発のための急勾配水路実験による基礎的研究, 砂防学会誌, Vol.73, No.6, pp.19-26

長谷川祐治・中谷加奈・竹林洋史・里深好文・藤田正治(2015):流木の流下と橋梁への集積に関する実験, 京都大学防災研究所年報, No.58B, pp.350-357

堀口俊行(2024):個別要素法を用いた透過型堰堤の損傷メカニズム推定法の提案, 令和6年度砂防学会和歌山大会, 概要集 T3-5, p.29

別府万寿博・國領ひろし・松澤遼・峯好古(2024): 礫衝突の各種条件が鋼管部材の衝撃応答に与える影響解析, 令和6年度砂防学会和歌山大会, 概要集 R2-8, p.85-86

嶋丈示・安富懸一(2022): 不透過型砂防堰堤の上流に付設する流木捕捉工の流木捕捉機能,砂防学会誌, Vol.75, No.4, pp.14-24

水原邦夫(1973): 流木の運動機構に関する研究(一)円筒状流木について, 砂防学会誌(新砂防), Vol. 26, No. 1, p. 17-25

水原邦夫(1974): 流木の運動機構に関する研究(一)主として形状効果について, 砂防学会誌(新砂防), Vol. 27, No. 2, p. 6-12

国土技術政策総合研究所(2016):土石流・流木対策設計技術指針解説, 国土技術政策総合研究所資料

原田紹臣(2018): 話題提供「河川への流木流出特性と対策案」, 2018年度河川技術に関するシンポジウム「OPS2:豪雨による流木流出の特徴と対策へ向けて」

外山茂樹・中村正秋・森英利・岸光展(1985):長い円柱の2次元充填構造, 粉体工学会誌, 研究報告, Vol.22, No.12, pp.17-22

小松利光監修、山本晃一編著(2009): 流木と災害, 技報堂, p.42