

**河川砂防技術研究開発
【成果概要】**

①研究代表者	氏名 (ふりがな)	所属		役職
	やまだ たかし 山田 孝	北海道大学農学研究院		教授
②技術研究 開発テーマ	名称	【テーマ名】土石流とともに流出する流木塊の実態とその発達プロセスに基づく流木塊規模推定手法		
③研究経費 (単位: 万円) ※端数切り捨て。	令和元年度	令和2年度	令和3年度	総合計
	157万円	214万円	121万円	492万円
④研究者氏名	(研究代表者以外の研究者の氏名, 所属・役職を記入下さい。なお, 記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)			
氏名	所属機関・役職 (※令和 年3月31日現在)			
笠井美青	北海道大学農学研究院・准教授			
⑤研究の目的・目標	(様式地砂-1, 地砂-2に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)			
<p>土石流に取り込まれた流木が土石流先端部付近に集まり,鳥の巣のような「流木塊」を形成し,谷出口から流出することが幾つかの映像から確認されている。「流木塊」は,その衝突によって家屋等に被害をもたらすことや砂防堰堤の水通し断面,橋梁を短時間に閉塞させてしまうことが想定される。</p> <p>そこで,流木塊の運動状況や規模が分かる映像資料の収集・解析や谷出口直下に流出した流木塊の規模や構造などの現地調査を行い,土石流先頭部によって押されて移動する流木塊の運動モデルを考察する。それらの成果をもとに,水理模型実験により,流木塊の発達プロセス,発達に関係する要因,流出する流木量の時間変化発達規模,土石流の流れとの関係を解明する。それらの結果をもとに,土石流危険溪流レベルの小溪流において土石流とともに流出する流木塊について,谷出口でのその規模推定手法を提案する。</p> <p>研究成果は,より精度の高い流木量の推定方法,流木塊の衝撃力算定方法,砂防堰堤や橋梁の閉塞危険度の評価手法の開発に発展できる。</p>				

⑥研究成果

(具体的にかつ明確に記入下さい。4 ページ程度。)

まず初めに土石流が流木塊を含んで流下する場合における道内のハード対策の課題やニーズを砂防関係行政担当者からのヒアリングによって明らかにし以下の結果を得た。

- ・ 現行の砂防計画では、砂防堰堤の流木捕捉量は、計画規模の土石流が砂防堰堤で捕捉された場合の堆砂区間に含まれる流木すべてを対象としているので、土石流の先端部付近に多くの流木が集中する場合の流木捕捉機能評価を検討する必要がある。

- ・ 土石流の流下に伴ってそれに取り込まれる流木量が時間的にまた流下距離によってどのように変化するかを知ることができれば、現行よりもより効果的な対策ができるのではないかと。谷の出口での待ち受け型の対策と合わせて、流下区間での対策も考えられるのではないかと。

- ・ 十勝岳の1926年噴火時の大正泥流の流下状況においても記録されているように、土砂の流れの先端に大量の流木が絡み合っって小山のように流れてくることは十分想定できる。ただし、現行の砂防計画では、このような形態で流木が流れてくることを前提としておらず、現行の流木対策施設の機能がどの程度発揮されるかが課題の一つである。

本研究では、土石流が運搬する流木塊の規模を推定できる手法を提案することを目的としており、それにより上記の行政技術課題を解決するための基本になり得ると考えられる。これらの行政担当者のコメントなどを参考にして研究を進めた。

1. 土石流とともに流出する流木塊の運動の特徴についての映像解析

北海道では、研究実施期間中には流木塊を含んだ土石流の発生事例が認められず、その流下状況を撮影できた事例がないことから、AGU(米国地球物理学連合)のLandslide blog, youtube に過去10年程度内にアップされている土石流の映像資料(流木塊を運搬し、流れが平衡状態にあると推定されるもの)4事例(①長野県南木曾町梨子沢で2014年7月9日に発生した土石流, ②カナダ国ブリティッシュコロンビアで2012年7月13日に発生した土石流, ③米国ユタ州で2015年9月16日に発生した土石流, ④米国カリフォルニア州Palm Springsで2019年2月14日に発生した土石流)について、これらの映像から観察できる土石流と流木塊の運動状況の定性的な特徴を流木塊の運動モデルの作成の前提とすべく整理した。それらの結果を以下に示す。

- ・ 流木塊は、土石流の先端部によって押し立てられ、土石流と等速で流下する。土石流の後続の流れには、多少の流木は認められるが、単木で流れている場合が多く、流木塊としての形状を呈さない(①～④すべてで確認)。

- ・ 流木塊の高さは、その背後の土石流の流動深よりも大きく、土石流先端部の土砂が流木塊を乗り越えることはない(①～④すべてで確認)。

- ・ 流木塊を構成している流木の軸方向は、流れ方向に対してランダムである。流れの先端部に続く後続の流れでは、流木の軸方向は流下方向に近くなる(洪水流によって運搬される場合に近くなる)(①～④すべてで確認)。

- ・ 河道内を流れていた土石流が河道拡幅部に流入してその流れが横方向に広がって流動深が小さくなると、流木塊は堆積し、土砂や水は流木塊の周りを流れる(③で確認)。

- ・ 流木塊を先頭部に押し立てた土石流が河道屈曲部の外湾側に偏流すると、流木塊は直進し、土石流から分離して河道から越流する場合がある(④で確認)。

2. 谷出口直下に流出した流木塊の規模の解析

北海道では、研究実施期間中に流木塊を含んだ土石流の発生事例が認められなかつ

たこと、2016年に十勝地方、旭川地方で発生した流木塊を含む土石流については、すでに流木や土砂の撤去がなされていることから、2020年7月4日に熊本県芦北町で発生した流木塊を含む土石流2事例を現地調査の対象とした。調査した溪流は、女島地区の小崎川(流域面積:0.10km²)と八幡地区の園口川(流域面積:0.30km²)である。小崎川では、上流域での斜面崩壊の崩土が崩壊直下に堆積した後、その下流の溪床区間が侵食されて土石流が発達し、流下途中の杉を主とした立木を巻き込んでその先頭部に流木塊を形成し、下流の木造家屋に衝突して甚大な被害をもたらした。園口川においても主に溪床区間が侵食されて土石流が発達し、流下区間の杉などの立木を巻き込んで顕著な流木塊を形成し、谷出口直上流の区間で堆積した。これらの2溪流の流木塊堆積地点から崩壊地までの区間において、堆積土砂量(50m間隔の平均断面法による)、流木量、勾配、谷幅を計測した。ここで、溪岸部付近で土石流によって倒伏されその場に残存している樹木は流木とみなしていない。流域全体の土砂収支・流木量収支を明らかにし、主に流木塊の規模と流域全体の流木量との関係や土砂量との関係を調べた。ここで、流木塊の規模については、流木塊を直方体とみなして空隙分を除いた流木実体積として算出した。空隙率については、流木の材積を単木ごとに調査できないため、過去の他地域での調査結果である0.7(岡崎ら2008)を採用した。また、いずれの溪流においても、土砂流下痕跡やその堆積状況などから、流木塊、河道内に堆積しているその他の流木は、一波の土石流によって運搬されたと推定した。流域全体の流木量544m³のうち、約90%に相当する流木が集中して土石流先端部の流木塊に存在することが分かった。また、現地でのレベル測量の結果、流木塊内部の土石流堆積物は、流木塊上流端近傍に限定されると想定され、流木塊が土石流先端部の上に乗って堆積しているのではなく、流木塊が土石流先頭部に押されて移動・堆積したと考えられた。小崎川では、流域全体の流木量119m³のうち、約91%に相当する流木が集中して土石流先端部の流木塊に存在する。これら2事例から、土石流危険溪流のような小流域で発生する流木塊は土石流の先端に存在すること、流域で発生した流木の多くが流木塊に含まれていることが分かった。

3. 流木塊の規模を推定できる物理モデルの考察

流木塊の発達・形成プロセスは、水理模型実験により得られた画像のPIV解析などの結果、概ね下記のようなものである。立木区間に到達した土石流は、立木を巻き込みながら流下する。立木区間を流下するにつれて土石流の中央部付近に流木が集合し、集合した流木と立木は中央部付近の土石流の流下を妨げる。立木の本数(密度)、立木の長さ(流木の長さ)が小さい場合は、土砂が立木の間を通過しやすくなるので、流木と立木が土石流の流下を妨げる程度は小さく、流木塊は形成されない。減速した中央部に、流路端の流速の速い部分の流れに含まれる流木や後続の土石流が運んできた流木が追いつき、集まった流木が絡み合いながら流木塊が発達する。

上記の水理模型実験の結果や土石流が流木塊を運搬している状況を撮影できた映像資料の定性的判読結果、実地溪流での流木塊・土石流堆積実態から、図-1に示す流木塊概念モデルを作成した。この概念図では、勾配 θ の区間において平衡土砂濃度の状態に達した土石流がその先頭部に流木塊を押して、流下することを想定している。流木塊には土石流による圧力が作用

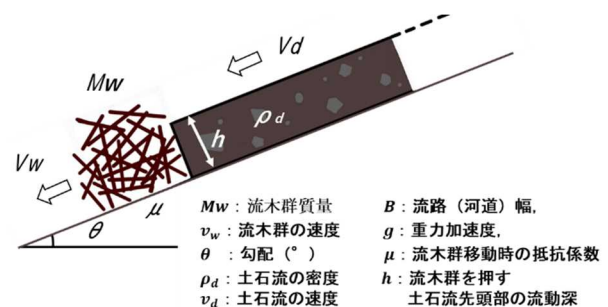


図-1 流木塊概念モデル

する。また、流木塊の内部には土砂や水は含まれないとしている。また、土石流先頭部後続の土石流に含まれる流木は、前述の実態調査などから流木塊に比較して少ないため、考慮していない。流木塊の規模は、平衡土砂濃度の状態に達した土石流先頭部が運搬できる「運搬可能流木体積」を表している。流木の供給条件としては、運搬可能流木体積以上の流木体積となる立木量が土石流流下区間に存在することを前提としている。

以上の基本的な考え方ならびに高橋(2004)による土石流先頭部への巨礫の集中化メカニズムの考え方をもとに、土石流先頭部が流木塊を押して流れる場合の流木塊の規模を表す運動方程式を作成した。流木塊の規模は、流木塊に含まれる流木の総質量で表すこととする(体積換算により流木塊を直方体と仮定した場合は、流木塊の長さ、高さ、さらには流木塊の空隙率の設定方法に課題が残るため質量換算とした)。

流木塊は N 本の流木から構成されるとすると流木塊の質量 M_w は(1)式により求まる。ただし、流木塊の中には、水や土砂は含まれないとする。

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

ここで、 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)、 ρ_w' : 流木の密度 (g/cm^3)

流木塊の運動方程式を(2)式に示す。左辺は運動量変化、右辺第一項は流木塊に作用する重力による推進力、第二項は流木塊中の流木を介して底面に伝えられる荷重による摩擦抵抗力、第三項は流木塊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。

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

ここで、 B : 流木塊の幅 (cm) (土石流先頭部の幅と等値とし、河道幅に規制されて流れている場合は河道幅と等値とする)、 L : 流れ方向の流木塊の長さ (cm)、 H : 流下面に対して垂直方向の流木塊の高さ (cm)、 v_w : 流木塊の速度 (m/s)、 g : 重力加速度 ($980\text{cm}/\text{s}^2$)、 θ : 勾配 ($^\circ$)、 μ : 流木塊移動時の抵抗係数、 ρ_d : 土石流の密度 (g/cm^3)、 h : 流木塊を押す土石流先頭部の流動深 (cm)、 v_d : 土石流の速度 (cm/s)

前述の μ (流木塊移動時の抵抗係数) 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、前述のとおり流木塊は土石流先頭部に載って移動しているのではなく、土石流先頭部が押しているという考え方によっているため、流木塊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、剛体が斜面を動摩擦係数に支配されて滑動する状況とは異なる。ただし、流木塊の中の流木の何本が溪床を構成している礫等とどのように接触して引っかかり、それが移動に伴ってどのように変化するのは現時点では定量的に把握できない。そこで、単純に流木塊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のかに着目し、その係数を流木塊移動時の抵抗係数と定義し、 μ で表すこととする。

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(定常状態に至るまでのプロセスは、後述の実験精度では、関係する水理量を精度良く判読できないため、本研究では対象としていない)。その場合は、式(2)中の左辺と右辺第4項は0となるので以下の(3)式が得られる。

$$\left(\frac{d}{2}\right)^2 \pi \rho_w' N g \sin \theta - \left(\frac{d}{2}\right)^2 \pi \rho_w' N \mu g \cos \theta + \frac{1}{2} \rho_d \cos \theta B g h^2 = 0 \cdots (3)$$

したがって、 $M_w (= \left(\frac{d}{2}\right)^2 \pi \rho_w' N)$ は(4)式により求まる。

$$M_w = \frac{\rho_d B h^2 \cos \theta}{2(\mu \cos \theta - \sin \theta)} \cdots (4)$$

(4)式により計算される流木塊の質量 M_w は、土石流の運搬可能流木量と移動可能流木量(土石流の発生・流下区間において土石流に巻き込まれる立木の量)の比較により小さいほうの流木量の質量となる。

4. 水理模型実験

水理模型実験は、図2に示す直線流路を用いて行った。定常状態での流木塊の規模を精度良く測定するために、立木区間と流下区間との境目に流路底面開閉式ゲート(長さ:20cm, 幅15cm)を設置した。流木塊を押ししている土石流の先頭部がそこを通過した直後にゲートのフックを手で引っ張って開くことにより、土石流先頭部や後続の流れは流路外に流出し、流木塊は流路内にゲート通過直後の形状を保持したまま停止させることができる。流路の長さは475cm, 流路幅(内寸)

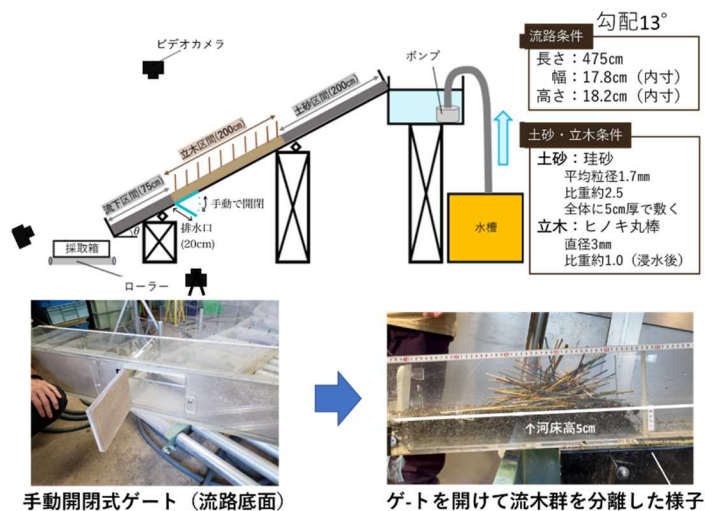


図-2 模型実験装置(流路)

は17.8cmである。流路全体に5cm厚で珪砂(平均粒径1.7mm, 比重2.5)を敷き、上流から順に土砂区間(土砂のみ, 長さ200cm), 立木区間(立木モデルを等間隔に設置, 長さ200cm), 流下区間(土砂のみ, 長さ75cm)とし、土砂区間上端から給水することにより、土石流を発生させた。実験の前提条件として、移動可能流木量(土石流の発生・流下区間での立木の量)が土石流の運搬可能流木量よりも大きい条件とした。事前の予備実験により、土砂区間末端において土石流は設定した勾配での平衡土砂濃度に達していること、立木区間に土石流が流入し、立木を巻き込んで流木塊が形成されると土石流先頭部が減速して一定速度に達し(定常状態)、流下区間を流下することを確認した。定常状態での流木塊の規模を調べるために、流路の勾配は、予備実験の結果を踏まえて土石流発生～流下区間である13度に設定した。使用した立木モデルは直径3mm, 比重1.0(水浸後)のヒノキ丸棒である。予備実験により流木塊の発達が確認された立木長(13.5, 15.5, 18, 20.25cm)・立木本数(150, 120, 100本)を組み合わせ各ケースで2回ずつ、計24ケース実験を行った結果、全てのケースで流木塊の形成が確認できた。次いで流木塊を構成する流木

を計測し、その質量を算出した。実験で計測した流木塊質量と流木塊移動時の抵抗係数の測定結果、実験条件を前述の(4)式に代入して得られた計算値を比較し、モデルの適用性を評価した。ここで、(4)式により流木塊の質量を求めるためには、流木塊移動時の抵抗係数(μ)を与える必要がある。実験水路内で移動している流木塊の抵抗係数を計測することは困難である。また、実験水路に停止した流木塊を引張ったりあるいは押すことによって移動させることは流木の何本かの一部が溪床の土砂の中に埋まっている場合が多いため流木塊を水平方向に移動させることは容易ではなく、流木塊にモーメントによる回転力が加わるためにそれを大きく変形・破壊させてしまうことになる。従って、実験条件を単純化して流木塊をできるだけ変形・破壊させないことを前提とし、粗度(流路実験で使用した珪砂(平均粒径 1.7mm))を張り付けた矩形の亚克力板の上に亚克力製の箱をのせ、流路実験で使用した立木模型をその箱の中に入れて人為的な流木塊をつくり、その状態で水平方向に等速で引っ張った時の引っ張り力を荷重計により測定した。次いで、亚克力製の箱のみを水平方向に等速で引っ張った時の荷重を荷重計により測定し、流木塊が含まれる時の荷重との差分により、流木塊のもの引っ張り荷重を求め、流木塊の垂直荷重との比により、抵抗係数 μ の値を求めた。亚克力製の箱の中に入れる流木模型の本数は、流路実験で明らかになった流木塊形成に必要な本数とした。実験は複数回繰り返し、このうち適切に流木塊を引っ張ることができた3回の事例を実験データとして採用した。結果、抵抗係数の平均値は1.48となった。したがって、この値を(4)式に μ の代表値として代入することによって(5)式を得る。

$$Mw = \frac{\rho_d B h^2 \cos \theta}{2(1.48 \cos \theta - \sin \theta)} \quad \dots (5)$$

図3に、流木塊の質量の実験値とモデルによる計算値との比較を示す。両者は比較的良く近似しており、今回の実験条件では、前述の運動方程式が相応の精度で成立していると考えられる。したがって、本実験条件においては、(5)式により流木塊の質量を比較的良く推定できると考えられる。

さらに、流木塊構成流木本数を土石流の発生・流下区間内の立木本数で除した「流木集積率」を算出した。重回帰分析の結果、流木集積率は立木長、立木本数と強い相関を持たず、その値の分布は0.64~0.89となり、平均値は0.77である。したがって、本実験条件では、土石流の発生・流下区間内の立木の総質量 Nw に0.77を乗じることにより、経験的に流木塊の質量 Mw を推定することができる。

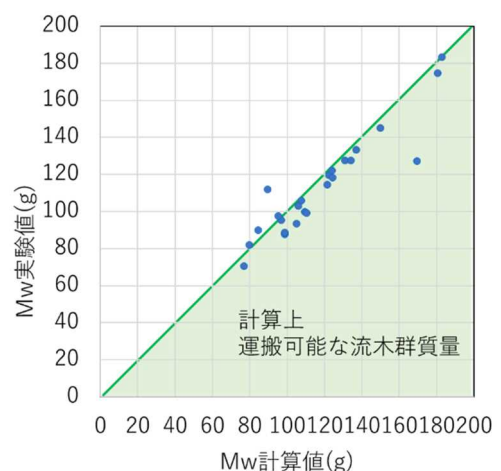


図-3 流木塊の質量(Mw)の実験値とモデルによる計算値との比較

⑦研究成果の発表状況・予定

(本研究の成果について、論文や学会への投稿等又はその予定があれば記入して下さい。)(以下記入例)

- ・これまでに発表した代表的な論文
- ・著書(教科書, 学会妙録, 講演要旨は除く)
- ・国際会議, 学会等における発表状況
- ・主要雑誌・新聞等への成果発表
- ・学術誌へ投稿中の論文(掲載が決定しているものに限る)
- ・研究開発成果としての事業化, 製品化などの普及状況
- ・企業とのタイアップ状況
- ・特許など, 知的財産権の取得状況
- ・技術研究開発成果による受賞, 表彰等

金城伶奈・山田孝(2022): 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, 2022年砂防学会研究発表会概要集

Natsumi Katayama, Takashi Yamada(2020): A study on characteristics of movement of woody debris mass in debris flows by video footage analysis, EGU2020 Sharing Geoscience Online May 2020

片山和紬・山田孝(2020): 土石流先頭部への流木の集中化, 2020年度砂防学会研究発表会概要集, p179-180

片山和紬・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, 2019年度砂防学会研究発表会概要集, p459-460

片山和紬・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38回日本自然災害学会学術講演会

⑧研究成果の社会への情報発信

(ウェブ, マスメディア, 公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL, 新聞掲載は新聞名, 掲載日等, 公開イベントは実施日, テーマ, 参加者数等を記入下さい。)

⑨表彰、受賞歴

(単なる成果発表は⑦⑧に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)

⑩研究の今後の課題・展望等

(研究目的の進捗状況・達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や砂防政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

1. 流木塊を含む土石流映像の継続収集・解析

引き続き、映像資料の収集に努め、流木塊の発達プロセスや流木塊を含む土石流の運動特性、橋梁閉塞実態等について解析を続ける。

2. 流域内流木量と流木塊の中の流木量の継続解析

流木処理量データなどを活用して流木塊の規模データ(質量や流木材積)の蓄積を継続する。さらに、土石流発生前の森林簿データ、土石流流下区間等から流出した流木量の計測データ、流域内の流木量収支データから流木塊の規模を明らかにする。

3. 流木塊物理モデルの継続考察

定常状態(流木塊の速度=土石流の速度)に至るまでの非定常状態での流木塊規模の時間変化予測手法を考察する。また、流木供給条件(移動可能流木量、運搬可能流木量)を物理モデルに組み込む手法を考察する。流木塊の抵抗係数について、より客観性の高い引張試験や数値シミュレーションによる解析などを実施する必要がある。

4. 水理模型実験による流木塊物理モデルの妥当性検証

水理模型実験を継続し、流木塊物理モデルの妥当性を検証する。

5. 実地溪流での流木塊規模予測手法

流木塊物理モデルの適用性と適用限界を明らかにする。

6. 流木塊規模と橋梁閉塞などとの関係を明らかにすることによって、橋梁閉塞条件を提案する。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、砂防政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

現行の谷出口での流木量(本研究で取り扱う流木塊の規模ではなく、土石流によって運搬される流木量の総計)の予測は、①流木発生区域内の立木量の8~9割程度が流出するとした方法、あるいは②生産土砂量と流木量あるいは流域面積と流木量との経験的な関係に基づいて予測する方法(両対数グラフで示されるデータのばらつきは大きい)によることが多い。

本研究のように、谷出口から土石流とともに流出する流木塊の規模を物理的に予測する手法が提案されることは手法の科学技術的根拠を示すという点でも有意義であると考えられる。流木塊の規模を考慮した今後の流木対策や橋梁、流路断面の設計、土石流流下区間での新たな流木塊発達抑制・捕捉工法の開発等などに発展できると期待される。