

土石流先頭部に集積する流木群の実態

片山和紘¹・金城伶奈²・山田孝³

Actual Situations of Woody Debris Masses Accumulated at the Head of Debris Flows

Natsumi KATAYAMA¹, Reina KINJO² and Takashi YAMADA³

Abstract

We collected and analyzed domestic and foreign video footage of woody debris masses carried by debris flow to clarify the qualitative characteristics of their movement. Woody debris masses were pushed by the front of the debris flows and moved down the flow section and the deposition section of the debris flow. In addition, it was estimated from the field survey that the woody debris masses contained about 90% of the volume of woody debris carried by the flows.

キーワード：土石流, 流木群, 映像判読, 現地調査

Key words: Debris flow, woody debris masses, video footage analysis, field study

1. はじめに

土石流危険渓流において、土石流に取り込まれた大量の流木がからみあった塊となって土石流先頭部付近に集積し（以下、本論では「流木群」という）、谷出口から流出する状況が幾つかの映像から確認される（写真1）。流木群の規模によっては、不透過型砂防堰堤水通し部や橋梁が閉塞され（写真2）、施設の破壊や橋梁の流失、河道外への氾濫を引き起こすことが想定される。

現在までに、洪水中の流木の運動や橋梁などで

の流木の集積に関する研究は比較的多くなされている（Mazzoranaら（2011）¹、Ruiz-Villanuevaら（2014）²、Comiti, Lucia and Rickenmannら（2016）³、長谷川ら（2016）⁴、岡本ら（2021）⁵）。土石流中の流木が土石流先頭部に集積していることを現地で明らかにした研究としては、尾崎ら（1998）⁶が、銅製透過型砂防堰堤によって捕捉された流木混じり土石流を掘削調査した事例がある。また、実験では、立石ら（2015, 2016）^{7,8}は、回転円筒流路を用いて土石流に含まれる流木の偏析について検

¹ 北海道大学農学院（現 日本工営株式会社）
Graduate School of Agriculture, Hokkaido University

² 北海道大学農学院
Graduate School of Agriculture, Hokkaido University

³ 北海道大学農学研究院
Research Faculty of Agriculture, Hokkaido University

本稿に対する討議は2023年11月末日まで受け付ける。



写真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に伴う流木群(国土交通省中部地方整備局多治見砂防国道事務所提供。写真に追記した矢印は土石流の流下方向を示す)

討した。そして、実河川において流水が河床から摩擦力を受け働く粘性により、流水の上層と下層に速度差が生じている場合には、流木は前に押し出されることによって、流木群を形成し、段波先頭部への流木の集積が促進されるとの考えを示した。福岡ら(2017)⁹⁾は、水路実験により流木を伴った土砂移動を再現し、勾配8°から勾配13.8°までの条件下では、勾配が急であるほど流木は大きな群を形成し、盛り上がった形状を呈することを確認した。奥山ら(2020)¹⁰⁾は、勾配10°から勾配20°までの条件下では、勾配が緩く、流下距離が長いほど、流木が移動土砂の先頭部に集中しやすいことを確認した。片山ら(2019)¹¹⁾は、流木の集中化によって形成される流木群の発達条件等を水理模型実験で検討し、流木長と流路幅の比が重要なパラメータであることを明らかにした。さらに、流木と土砂を6つの採取箱により量と土砂濃度の時間変化を調べた結果、土石流がピーク流量を示す付近で流木群が含まれることを明らかにした。

しかしながら、流木群の運動形態の特徴は解明されていない。また、流木群は土石流先頭部の流れ中に浮遊しているのかあるいは土石流先頭部に押されて移動しているのかは不明である。

土石流危険渓流での流木群による被害を効果的に軽減するためには、これまでの危険渓流から流出する流木流出量の経験的予測手法(国土交通省



写真2 流木群による砂防堰堤水通し断面の閉塞事例

国土技術政策総合研究所(2016)¹²⁾に加え、流木群の規模推定手法が必要と考えられる。そこで、本研究では、そのための基礎として、まず初めに国内外で撮影された土石流先頭部に集積した流木群の運動状況の映像資料を収集し、その定性的な運動の特徴を整理した。次いで、土石流先頭部に集積した流木群が攪乱せずに残存している渓流において、谷出口上流域から流出した流木の体積、土砂量、谷出口直下に流出・堆積した流木群の規模や構造などの現地調査を行った。

2. 土石流先頭部に集積した流木群の運動の定性的特徴(映像判読)

国内では、流木群の移動が撮影された映像としては、唯一、2014年7月9日に長野県南木曾町梨子沢で発生した土石流(国土交通省中部地方整備局多治見砂防国道事務所提供)が該当する。それ以外の土石流に伴う流木群が撮影された映像資料は現時点では存在は不明である。国外については、AGU(米国地球物理学連合)のLandslide blogや動画共有サービスであるYoutubeに過去10年程度内にアップロードされた土石流の映像資料から選定した。サイトの検索欄にflash flood, debris flow, woody debris等のキーワードを入力して映像を検索し、結果、以下の4事例を選定した。

映像資料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(写真1)

木曾川流域の梨子沢において土石流が発生し、

流木群を伴って、谷出口付近に位置する梨子沢第2砂防堰堤水通しを通過した（撮影箇所の勾配約4°）。最初に流木群が堰堤水通しを通過し、その後流量ピークと想定される土石流先頭部（平均流速：6.5 m/s、流動深：2.3 m（国土交通省中部地方整備局多治見砂防国道事務所（2016）¹³⁾）が通過した。流木群の速度はその後続の土石流先頭部と同じ程度である。流木群を構成する流木の軸方向は流れ方向に対して平行なものは少なく多様である。流木群と連続して流下する土石流先頭部が堰堤水通しを通過した後の映像は、不鮮明な部分が多いが流木群は存在しないように観察される。

映像資料②¹⁴⁾ カナダ国ブリティッシュコロンビア州 Washington's Snohomish County で2012年7月13日に発生した土石流（写真3）

Google earth 画像によると、斜面崩壊と土石流が発生し、土石流が流下経路の樹木を巻き込み谷出口直下の扇状地で分波したように推察される。扇状地で流れが右岸側に分波し（撮影箇所の勾配約5°）、湖水面に突入した。土石流先頭部の前に流木群が存在し、その速度は後続の土石流先頭部と同じ程度である。流木群を構成する流木（直線状の針葉樹が主体）の軸方向は流れ方向に対してランダムである。



写真3 カナダ国ブリティッシュコロンビア州 Washington's Snohomish County で2012年7月13日に発生した土石流に伴う流木群 <https://www.youtube.com/watch?v=n1cCs-S5EKc>（写真に追記した矢印は土石流の流下方向を示す）



写真4 米国ユタ州で2015年9月16日に発生した土石流に伴う流木群（写真上：河道内を流下中、写真下：路面での流木群の一部分解・堆積）<https://www.youtube.com/watch?v=rjJCTr-VEI4>（写真に追記した矢印は土石流の流下方向を示す）

映像資料③¹⁵⁾ 米国ユタ州で2015年9月16日に発生した土石流（写真4）

土石流は、両岸に規制されて河道内を流下し、流木群を先頭にして流下した（撮影箇所は特定できないため、勾配の正確な計測は不可）。流木群の速度は後続の土石流先頭部と同じ程度である。流木群は溪岸に頻繁に接触しながら移動した。流木群を構成する流木の軸方向は流れ方向に対して多様である。土石流が河道を横断する道路に到達すると、横断方向の規制がなくなったために横方向に広がって流動深が小さくなった。そして、土石流は流木群の横の流れ、流木群は分解して、バラバラになった流木が路面に堆積した。

映像資料④¹⁶⁾ 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（写真5）

土石流は、河道幅に規制されて流下し、流木群を先頭にして流下した（撮影箇所の勾配は google earth の地形情報による計算では、約8.5°）。流木群の速度は後続の土石流先頭部と同じ程度である。



写真5 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伴う流木群 <https://www.desertsun.com/videos/news/2019/03/01/flash-flood-palm-springs-aerial-tramway/3033788002/> (写真に追記した矢印は土石流の流下方向を示す)

流木群を構成する流木の軸方向はランダムである。土石流は河道屈曲部を偏流時にその外湾部から越流しなかったが、流木群の一部が群の形態を保持して河道外湾側から溢れ、氾濫・堆積した。

これらの映像から判読した流木群の運動状況の定性的な特徴を以下に整理する。

- 1) 流木群は、土石流先頭部によって押されているように観察され、土石流と同じ程度の速度で流下する。土砂単体の流れが流木群に先行している場合もあるが、その規模は小さく、土石流ピーク流量を呈する土石流先頭部ではないように観察される(映像資料④)。土石流先頭部の流動深が後続の流動深と比較して特に盛り上がっているかまでは画像からは判別できない。土石流の後続の流れには、多少の流木は認められるが、単木状態で流れている場合が多く、流木群としての形状を呈さない(映像資料①～④すべてで確認)。
- 2) 流木群の高さ(複数の流木がお互いに高密度で重なり合っているところまでの高さ)は、その背後の土石流の流動深よりも大きく、土石流先頭部が流木群を乗り越えることはない(映像資料①～④すべてで確認)。流木群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。土石流の後続の流れでは、
- 流木群は形成されないで、流木の軸方向は流下方向に対して平行に近くなる(映像資料①～④すべてで確認)。
- 3) 河道内を横断方向に規制されて流れている土石流が路面に到達するとその流れが横方向に広がり流動深が小さくなる。土石流は流木群の横を流れ、流木群は分解してバラバラになる。流木群背後の土石流流動深が低くなったことにより、流木群を押す力が低下したと推察される(映像資料③で確認)。
- 4) 流木群を先頭にした土石流が河道屈曲部の外湾側に偏流すると、流木群の一部は直進し、河道から越流する場合がある(映像資料④で確認)。

3. 土石流危険溪流の谷出口下流に流出・堆積した流木群の規模と構造

2020年7月4日に熊本県芦北町で流木群を伴った土石流が発生した。当時の降雨状況、流域の地形・地質、植生、発生した土砂移動現象、家屋などの被害実態等については既に報告されている(地頭菌ら(2020)¹⁷⁾)。調査した溪流は、女島地区の小崎川(流域面積:0.10 km²)と八幡地区の園口川(流域面積:0.30 km²)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流水により侵食されて土石流が発達した。土石流は流下経路内の杉を主とした立木を巻き込んで流木群を形成し、勾配7度程度の箇所位置する木造家屋に流木群が衝突して停止し、甚大な被害をもたらした(写真6)。園口川においても崩土の堆積区域直下流での溪床侵食により土石流が発達し、流下区間の杉などの立木を巻き込んで顕著な流木群を形成し、勾配3度程度のところで堆積した(写真7)。これらの2溪流の崩壊地直下(崩土の堆積先頭部で土石流発生開始地点と判断した)から流木群堆積地点までの区間(小崎川:水平距離383 m, 園口川:水平距離747 m)において、堆積土砂量、堆積している流木体積、勾配、谷幅を計測した。堆積土砂量は、差分解析を行うためのLPデータを取得できなかったため、溪流縦断方向50 m(斜距離)間



写真6 熊本県芦北町女島地区小崎川流域で2020年7月4日に発生した土石流に伴う流木群

隔の平均断面法によって算出した。流木は、調査区間での溪床に堆積しているものを対象とし、溪岸部付近で土石流によって倒伏されてその場に残存している樹木は流木とみなさず調査対象から除外した。流木の体積は、直径と長さをメジャー



写真7 熊本県芦北町八幡地区園口川流域で2020年7月4日に発生した土石流に伴う流木群

で計測し円柱とみなして求めた。溪床内に流木の一部が埋まっている場合は、地上部のみの流木の長さを計測した。流木群の実体積については、まず、UAV (DJI 製 Phantom4) で流木群の真上から撮影した画像から矩形平面積を求め、これに流木群の高さ(流木群の正面と側面から見て、複数の流木がお互いに高密度で重なり合っているところまでの高さとした)と流木群の空隙率を乗じて求めた。流木群の空隙率は、流木群が解体されない限り流木の材積を単木ごとの計測と集計から求めることができないため、岡崎ら(2008)¹⁸⁾が他地域で明らかにした空隙率の平均値である0.72を

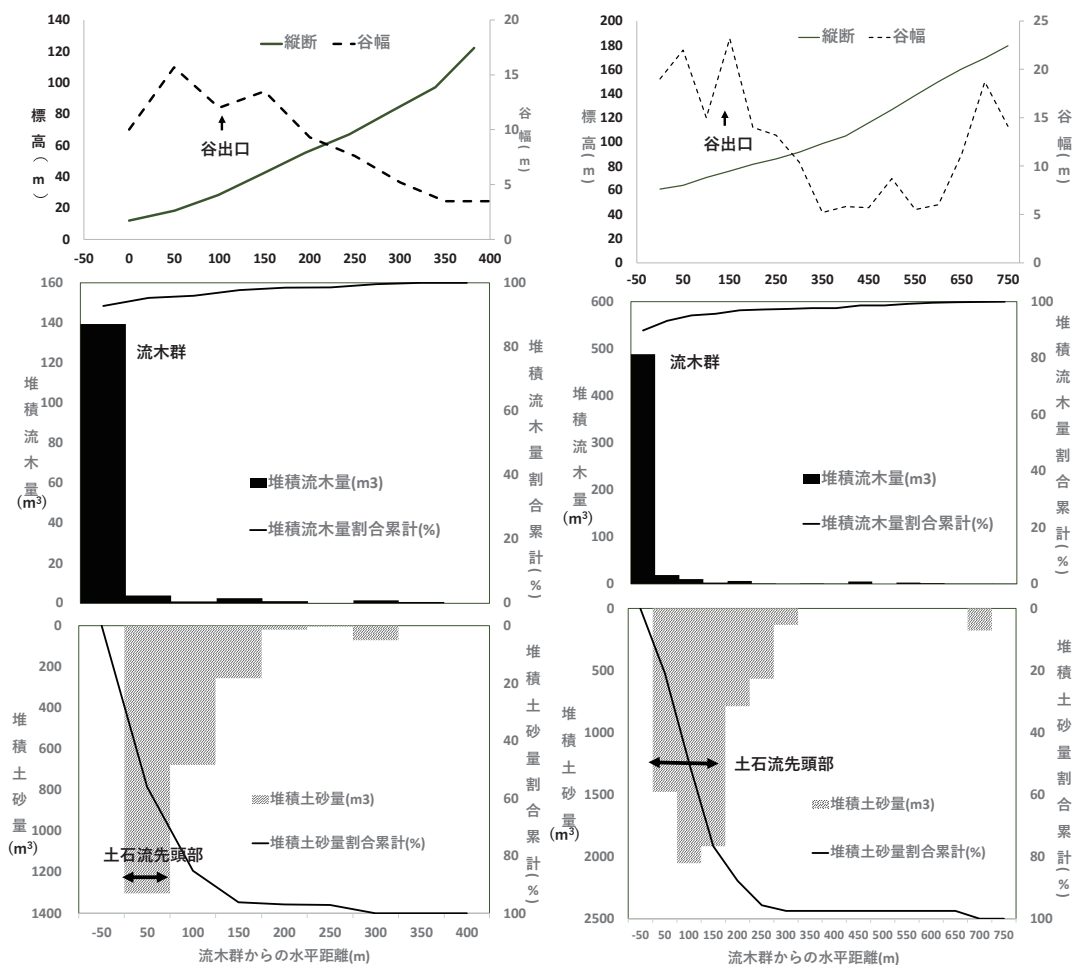
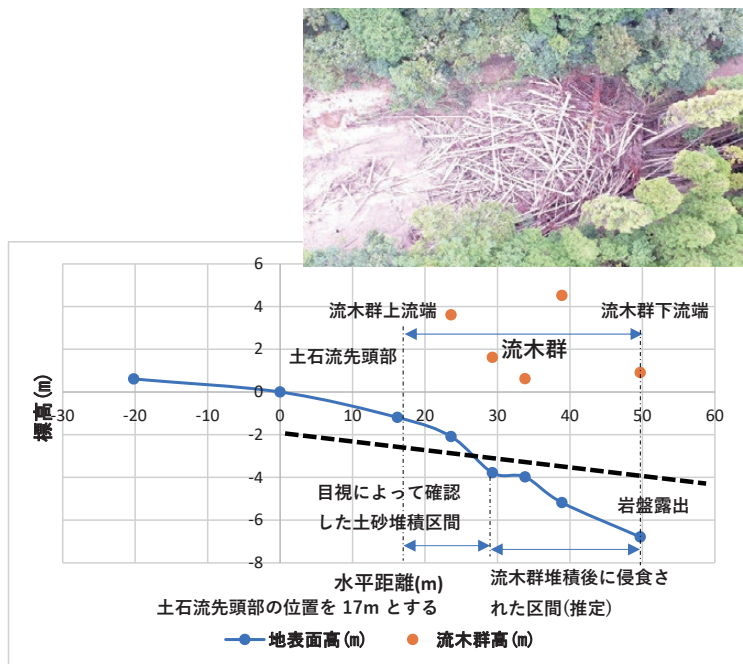


図1 流域内からの流木流出量と流木群の体積(左図：熊本県芦北町小崎川，右図：熊本県芦北町園口川)(流木群上流端の位置が0)

用いた。これらのデータから調査対象区間での土砂量・流木体積の縦断距離分布を明らかにし、流木群の規模と調査区間全体での流木体積との関係や土砂量との関係を調べた。いずれの溪流においても、明瞭な土石流先頭部と判断できる堆積微地形(ローブ)が一つであることや土砂量の距離変化(図1)などから、流木群、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ものとみなした。

図1に調査結果を示す。小崎川では、流木群の実体積は約140 m³と推定され、調査区間内の流木体積約150 m³の約93%に相当する。流木群を構成

する流木長は1.6~21.7 m、平均流木長は11 mである。直径は0.08~0.46 m、平均直径は0.37 mである。なお、上流域渓岸部付近の山腹斜面での毎木調査の結果(調査本数20本)では、平均胸高直径24 cm、平均樹高20 mである。ほとんどの流木は樹皮が剥離し、枝葉は樹幹についていない。また、すべての流木で確認出来てはいないが、多くは円柱状の丸太形状であり、根付である(垂直根、射出根、水平根はいずれも短く破断されている)。流木群直上流50 m区間に土石流先頭部とみなされる土砂が堆積し、その体積は約1,290 m³(空隙込み)と計測された。この堆積土砂量は、調査区



.....土石流発生前の旧地盤線(縦断勾配3°)

図2 流木群の内部の土砂堆積状況の測量結果(熊本県芦北町園口川)

間全体の堆積土砂量(空隙込み)約2,300 m³の約56%に相当する。流木群先頭部の底部付近(家屋の敷地地盤との境界付近)には土石流先頭部の土砂はほとんど堆積しておらず、流木群を土石流が乗り越えた痕跡は認められない。この現場では、後述の園口川の流木群で実施した地表面のレベル測量を行えなかったため(測量実施前に被災家屋とともに流木群が撤去された)、流木群内部の土砂堆積状況に関する定量的な情報を得ていない。ただし、2021年に芦北町役場から提供いただいた流木群撤去後の地上写真によれば、流木群存在区間全域にわたり土砂が堆積しているようではなく、土石流先頭部直下に限定されることを確認できた。

園口川においても、小崎川と同様の方法で流木群の実体積を求めた結果、約490 m³となり、調査区間内の流木体積約544 m³の約90%に相当する。流木群を構成する流木の平均長は15 m、平均直径は0.4 mである。ほとんどの流木は樹皮が剥離し、枝葉は樹幹についていない。また、流木群直上流150 m 区間に土石流先頭部とみなされる土砂

が堆積し、その体積は5,450 m³(空隙込み)と計測された。この堆積土砂は、調査区間全体の堆積土砂量(空隙込み)約7,060 m³の約77%に相当する。流木群を土石流が乗り越えた痕跡も認められない。

図2に、流木群の縦断方向の複数点(河道縦断中心線沿い)において測量用スタッフを流木群の隙間から鉛直に差し込んでレベル測定した現地表面の高さを示す。流木群の上流端から下流に10 m 程度までの水平区間は、土砂が堆積していることが流木群を構成している流木から鉛直下向きの目視により確認された。また、流木群上流端での土砂堆積厚は、近傍の流路の露頭断面から旧地盤との境界が明らかであり約2 mと測定された。それより下流10 m 程度までの水平区間での土砂堆積厚については、流木群の狭い空間内で旧地盤まで人力で土砂掘削することが困難であるため不明である。流木群下流端の底部には土砂が堆積しておらず、基岩と想定される岩盤が露出している。

土石流発生前の旧地盤線を推定するために、地形図から流木群上流端と下流端の標高を読み取り、

それら2点を直線で結んだ結果、縦断勾配は3°となった(図2)。それとレベル測量で求めた現地表面の縦断線との交点を求めると、流木群上流端から下流に約10mの地点となる。それより下流、流木群下流端までは地形図から求めた縦断線は、レベル測量で求めた現地表面を上回っていることから、この間は、土石流の後続流あるいは土石流発生後の降雨による流水などで侵食されたと推定される。ただし、この区間が侵食される前に、土石流先頭部の土砂の流れが堆積していたのかは不明である。

流木群内部で土砂が堆積している区間は、流木群上流端から下流に10m程度となり、目視による結果と調和する。流木群の下流端近傍は、旧河床が侵食されて岩盤が露出した区間であると考えられ、その岩盤の上に流木群が堆積している。流木群内部の土砂堆積区間は限定されている。

こうした実態から、流木群の移動形態として以下の二つのパターンが考えられる。前述の流木群の映像資料の判読成果も併せると、以下の①、②のいずれかなのかは現時点では断定はできないが、筆者らは②の可能性もあると考えている。

- ① 流木群は、土石流先頭部の土砂の流れに浮遊した状態で移動・堆積し、その後の後続流や出水で流木群下流端付近が侵食された。
- ② 流木群は土石流先頭部に押されて移動した。流木群内下部の水平距離区間の一部には、土砂の流れの層が存在するが、それよりも下流区間には土砂の流れは存在しない。すなわち、その区間は流木群が土砂の流れの層に浮遊しているのではなく、流木群と旧地盤が接し、移動している。

以上から、土石流危険溪流のような小流域で発生する流木群は、土石流先頭部の前方に隣接して存在すること、土石流によって運搬された流木の多くが流木群に含まれていること、流木群は土石流先頭部により押されるようにして移動したと考えることもできる。

4. 結論

本研究によって以下のことを明らかにした。

- 1) 流木群とともに流下する土石流の国内外の映像資料を収集・判読し、その運動の定性的な特徴を整理した。土石流の流下・堆積区間では、流木群は土石流先頭部によって押されて流下していることなどが推察された。
- 2) 2020年に熊本県芦北町の2つの土石流危険溪流で発生した流木群を伴った土石流を対象として現地調査を実施した。流木群は、土石流先頭部の前方に隣接して存在することが明らかとなり、土石流によって運搬された流木体積の約9割が流木群に含まれていたことが推定された。流木群内部には土砂の堆積区間が限定されている。流木群が土砂の上に乗る形態ではなく、流木群が土石流先頭部により押され、流木群の一部が旧地盤と接触して移動した可能性もある。

本研究は、国土交通省河川砂防技術研究開発公募地域課題(砂防)「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、研究代表者：山田孝、研究期間：平成31年度～令和3年度」の一環として実施し、国土交通省北海道開発局旭川開発建設部に支援いただいた。また、国土交通省中部地方整備局多治見砂防国道事務所には、梨子沢の流木群の写真を使用することをお許しいただいた。

参考文献

- 1) B.Mazzorana, J.Hubl, A.Zischg and A.Largiader: Modelling woody material transport and deposition in alpine rivers, *Natural Hazards*, Vol.56, pp.425-449, 2011.
- 2) Virginia Ruiz-Villanueva, Ernest Blade, Marti Sanchez-juny, Belen Marti-Cardona, Andres Diez-Herrero and Jose Maria Bodoque: Two-Dimensional Numerical Modeling of Wood Transport, *Journal of Hydroinformatics*, Vol.16, No.5, pp.1077-1096, 2014.
- 3) F.Comiti, A.Lucia and D.Rickenmann: Large wood recruitment and transport during large floods: A review, *Geomorphology*, Vol. 269, pp.23-39, 2016.

- 4) 長谷川祐治・中谷加奈・里深好文・藤田正治：山地河川における流木の流下と橋梁集積に関する検討，第8回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp.133-138，2016.
- 5) 岡本隆明・染谷智紘・松本知将・山上路生・田中健太：橋梁部での流木沈下過程と全面閉塞の限界条件に関する実験的研究，自然災害科学，Vol.39，No.4，pp.423-437，2021.
- 6) 尾崎幸忠・鴨川義宣・水山高久・葛西俊一郎・嶋丈示：流木が混入した土石流の鋼製透過型ダムによる捕捉形態の調査，砂防学会誌，Vol.51，No.2，pp.39-44，1989.
- 7) 立石龍平・堀口俊行・香月智：回転円筒実験における流木混じり土石流の段波形成に関する実験的検討，構造工学論文集 A，61A (0)，pp.926-934，2015.
- 8) 立石龍平・香月智・石川信隆：回転円筒実験による水・砂・流木の混合土石流の偏析に関する基礎検討，構造工学論文集，62A，pp.1097-1110，2016.
- 9) 福岡尚樹・山本泰己・永野博之・池松伸也・橋本晴行：流木を伴った土石流の先頭部の抵抗則に関する実験的研究，平成29年度砂防学会研究発表会概要集，pp.94-95，2017.
- 10) 奥山遼佑・村上正人・飯田弘和・高橋佑弥・浅野志穂・鈴木拓郎・経隆悠：土石流と共に流下する流木の流下過程に関する水理模型実験，第59回日本地すべり学会研究発表会講演集，p.149-150，2020.
- 11) 片山和紘・山田孝：土石流の発生・流下に伴う流木塊発達に関する実験，日本自然災害学会第38回学術講演会，2019.
- 12) 国土交通省国土技術政策総合研究所：砂防基本計画策定指針（土石流・流木対策編）解説，国土技術政策総合研究所資料，No.904，2016.
- 13) 国土交通省中部地方整備局多治見砂防国道事務所：平成27年度木曾川梨子沢砂防計画検討業務報告書，2016.
- 14) GlobalNews, EPIC mudslide caught on camera [Raw Video], <https://www.youtube.com/watch?v=n1cCs-S5EKc>, 参照2022-06-13, 2022.
- 15) This Is Happening, Flash Flood Hits Utah Road | Washed Away, <https://www.youtube.com/watch?v=rjJCTr-VEI4>, 参照2022-06-13, 2022.
- 16) Palm Spring Aerial Tramway, Palm Springs Aerial Tramway takes pounding during February storm, <https://www.desertsun.com/videos/news/2019/03/01/flash-flood-palm-springs-aerial-tramway/3033788002/>, 参照2022-06-13, 2022.
- 17) 地頭蘭隆・伊倉万理・植弘隆・大石博之・垣本毅・木藤賢一・古賀省三・坂井佑介・坂島俊彦・篠原慶規・清水収・田方智・寺本行芳・鳥田英司・永谷直昌・中濃耕司・西脇彩人・平川泰之・福塚康三郎・水野秀明：令和2年7月豪雨による熊本県の土砂災害，砂防学会誌，Vol.73，No.4，pp.41-50，2020.
- 18) 岡崎正宜・伊藤博光・神原孝義・大谷健一：土石流発生溪流における流木の流出について，平成20年度砂防学会研究発表会概要集，pp.22-23，2008.

(投稿受理：2022年7月29日
訂正稿受理：2022年11月17日)

要 旨

土石流に伴う流木群の国内外の映像資料を収集・判読し，その運動の定性的な特徴を明らかにした。流木群は土石流先頭部の前方に存在し，土石流先頭部に押されて流下しているように観察された。さらに，現地調査により，流木群の規模やその内部構造を調べ，流域内で発生した流木体積量の約9割が流木群の体積量であること，流木群上流端付近に土石流先頭部の土砂が堆積していることが明らかにされた。