

2019 年度（第 55 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 19-A-7

土砂・流木災害

立命館大学 教授

里深好文

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2019 年 9 月

土砂・流木災害

Sediment Disasters and Driftwood Disasters

里深 好文

Yoshifumi SATOFUKA

1. はじめに

気候変動の影響であると思えないような豪雨災害が近年頻発している。豪雨による洪水発生時には膨大な量の土砂と流木とが河道を流れ下り、それらの急激な堆積は河道断面の急変を生み、予測困難な洪水・土砂氾濫を引き起こしている。一般的な洪水氾濫解析において河床変動や流木の影響を考慮していない場合が多く見受けられるが、我が国の中山間地及び山麓地域を対象とする場合、そのような解析は意味をなさないといえよう。ここでは土砂災害と流木災害に焦点を当て、その特徴や対策法について説明する。

2. 土砂災害

土砂災害とは、豪雨や地震などが引き金となって、山腹斜面や崖が崩れたり、水と混じり合った土砂礫が下流域へと大規模に流出したりすることによって、人命や社会に大きな損失を生じさせる自然災害のことである。土砂災害は「土石流」「地すべり」「がけ崩れ」などに大別されるが、水工学分野に最も関連するのは土石流であろう。ここでは土石流災害を中心として解説する。

2. 1 土石流とは

土石流は河床や山腹の土砂礫が、降雨や急激な融雪によって供給される大量の水と混じりあって流動化し、谷地形に沿って下流域へと流出する現象をいう。土石流の先頭部には、大きな石や岩、流木などが集中することが多く、時として時速 40km に近い速度で流下することがある。土砂濃度がさほど高くない場合には鉄砲水と呼ばれることもある。土石流の代表的な発生形態としては、次の 3 つが挙げられる。

- 1) 溪床堆積物の流動化：溪床基岩上に堆積した土砂が豪雨によって供給された大量の水と混じりあい、流動化したもの。我が国で発生する土石流の大半を占めるもので、我が国における現在の土石流対策は基本的にこの発生形態のものを対象としている。



図-1 2018 年 7 月の豪雨によって土石流が発生した安芸郡熊野町川角の溪流

- 2) 斜面崩壊および地すべり土塊の流動化：河道沿いの山腹斜面において大規模崩壊や地すべりによって生じた土塊がそのまま流動化したもの。1997年7月に鹿児島県出水市針原川において発生した土石流や2003年7月に熊本県水俣市水俣川水系宝川内川支流集川において発生した土石流はこの形態であったとされている。渓床起源のものに比べ大規模になることが多く、通常の対策工では防ぎきれないため、被害が大きくなることが懸念される。

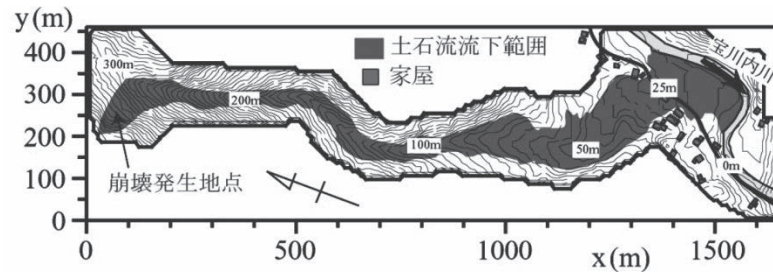


図-2 2003年に水俣川水系宝川内川支流集川において発生した土石流の流下範囲

- 3) 天然ダムの決壊：山腹斜面の崩壊等により河道が大量の土砂によって埋められたものを天然ダムという。ダムの高さが80mを超えるような場合もある。ダム決壊時にはダム上流に溜まった水が堤体の土砂と混じりあって一気に流出するため、大規模な土石流・鉄砲水を生じさせる。



図-3 宮崎県耳川流域における野々尾天然ダム決壊後の状況

上流域の急勾配の領域で発生した土石流は、谷地形に沿って流下する。非粘着性の土砂礫と水によって土石流が構成される場合、平衡状態において土砂濃度 C は、勾配 θ に強く依存することが知られている。砂の内部摩擦角を ϕ ，砂の密度を σ ，水の密度を ρ とするとき、

$$C = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (1)$$

と表される。土石流の平衡濃度は勾配の単調増加関数となっていることがわかる。上記の式をはじめ、土石流の機構に関しては高橋保著「土石流の機構と対策」（近未来砂刊）に詳しく解説されているので、興味のある方は一度読んでみることをお勧めする。

流下するに伴い河床勾配が緩くなってくると、土石流に含まれる土砂の一部は河床上に堆積するようになる。谷出口の扇状地はこのような堆積の結果形成されてきたものである。扇状地上の河川は数度の勾配があり、流速が大きいこともあって、通常の出水に対しては十分な排水能力を有している。しかしながら、上流から土石流が流下してくると、河道内に急激な土砂堆積が生じ、河道断面が維持できない場合が多い。これ

は扇状地の成り立ちを考えても分かるように、谷出口を過ぎると勾配が緩くなるからであり、砂防構造物による適切な土砂調節を行わないかぎり、顕著な土砂堆積を抑制することはむずかしい。

前述のように土石流の先頭部には巨礫や流木が集中していることが多く、その破壊力は凄まじい。図-4に示した2018年7月の豪雨の際の広島県呉市安浦町の事例では、上流に砂防堰堤が設置されていたもののその能力を大きく上回る規模の土石流が発生し、その直撃により複数の家屋が大きな損傷を受けた。災害発生前、地域内を流れるこの溪流の幅は1mに満たないほどであったが、土石流は数10mの幅で流下したと考えられる。すなわち、土石流が発生するかどうかでピーク流量に大きな違い生まれるといえる。土石流発生時の降雨強度を基にピーク流量を推定してもこのような大きな流量は説明できないので、河床堆積土砂や河岸斜面の崩壊土と流水との混合プロセスを考慮する必要があるのだが、現状において必ずしも合理的に説明できているわけではなく、今後一層の検討が必要である。



図-4 2018年7月の豪雨による呉市安浦町の被災状況



図-5 2017年7月の九州北部豪雨による福岡県朝倉市赤谷川流域の土砂・洪水氾濫

2. 2 土砂・洪水氾濫

大規模土石流の発生時には上述のような扇状地における土石流による直接的な破壊だけではなく、さらに下流において深刻な災害が発生する。国は2018年10月31日、2018年7月豪雨を教訓として土砂災害対策の方向性をまとめている。これによると、18年7月豪雨では広島市一帯で大量の土砂が河川下流域まで流出し、河道内に顕著な土砂堆積が生じたことによって河川が氾濫し、平野部市街地にまで土砂と水が流入する事例がいくつも確認されている。これを「土砂・洪水氾濫」と呼び、全国の谷底平野や扇状地において同様の災害リスクが高い箇所を緊急点検し、遊砂地の整備を推進することとした。他にも2017年7月の九州北部

豪雨の際の福岡県朝倉市赤谷川流域や2011年9月の紀伊半島大水害の際の和歌山県那智勝浦町那智川流域においても深刻な土砂・洪水氾濫が生じている。

山地河道で発生・流下した土石流に含まれる細粒土砂は、扇状地においてそのすべてが堆積するわけではなく、掃流砂あるいは浮遊砂として下流域へと流出する。狭窄部や合流点付近等で土砂輸送能力が低下するのに伴い、それらの土砂は河床上に堆積し、河道断面の縮小を生む。大粒径土砂の直撃は生じないものの、氾濫水には流木が混じる場合も多く、河道ではない場所にも氾濫水が押し寄せるため、大規模な被害を生じさせる。

2. 3 土砂災害対策（ハード対策）

土石流による災害を防止するために一般的に用いられるのが砂防堰堤である。土砂礫の流下を抑制するために谷の上流や谷出口において設置されることが多く、コンクリート構造や鋼構造のものがある。堰堤の上流ポケットに土石流中の土砂を捕捉することを主たる目的としているが、山腹斜面の脚部安定を図り、崩壊発生を抑制することも効果として挙げられている。

中小規模の出水時に発生する小規模な土砂流出を抑制せず、土石流発生時まで堰堤上流のポケット（空き容量）を確保しようとするのが透過型砂防堰堤である。透過型砂防堰堤は平水時の流れの連続性を確保でき、河川生態系に対する影響も小さくできるため、近年、積極的に導入が進められている。従来の不透過型堰堤に比べ、流木を捕捉する能力も高いことが明らかになっている。



図-6 透過型堰堤の設置例（右は流木の捕捉状況）

砂防堰堤が谷部や谷出口に設置されるのに対し、遊砂地はもう少し下流に設置されることが多い砂防構造物である。河道の一部を拡幅することにより、その内部に洪水流とともに土砂を氾濫させ、堆積させるものである。谷部に置かれる砂防堰堤のポケットのサイズは谷幅や谷の縦断勾配に拘束されるため、必ずしも十分な貯砂量を確保できない場合もあり、このような条件下においては遊砂地による対策が不可欠となる。また、2018年の西日本豪雨の際の広島県の事例のように、多数の溪流から同時多発的に本川へと土砂が流入し、土砂輸送能を大幅に超えてしまうような場合にも、本川河道に遊砂地を設けることによって下流の被害を大幅に抑制できると考えられる。ただし、遊砂地の設置には用地確保が課題となるためか、我が国において設置された事例は多いとはいえない。

3. 流木災害

近年、林業の衰退による山林の荒廃や地球温暖化の影響を受けた集中豪雨による斜面崩壊等¹⁾に伴って発生した流木が流出し、下流域において多大な被害が報告されている。特に、我が国は国土の約4分の3が山地であり、その大部分が森林に覆われているため、山腹崩壊や溪岸崩壊による多量の流木の発生及び流出が懸念される²⁾。また、流木は河川横過部の橋梁や箱渠の上流等で閉塞し、橋梁の損傷や流出、閉塞箇所上流部における洪水氾濫の原因となることが、これまでの災害事例より報告されている^{3), 4)}。一方、従来の不透過型砂防堰堤における流木捕捉機能の一部不足が指摘⁵⁾され、鋼材の併用による流木捕捉機能を強化する考え方⁶⁾が設計マニュアル等において示された。なお、平成29年7月に九州北部で発生した豪雨災害^{7), 8)}では、多くの不透過型砂防堰堤において殆どの流木を捕捉できずに、下流において多くの被害を与えた（例えば、図-7）。これらの報告を踏まえて、今後、新たな流木対策の実施や流木捕捉機能の強化が重要であると考えられる。また、こういった災害を受け、溪流から下流河川区域まで含めた総合的流域における流木対策の方向性や事業の推進⁹⁾が示され、流域全体における合理的な流木対策技術の確立が望まれている。一方、山地河川における流木対策や、橋梁における流木閉塞に関するメカニズムとそれらの対策、下流河川区域における流木対策工（例えば、木除杭：図-8）等について、議論されてきている。

ここでは、流木の流出に関する特性や被害リスクを整理するとともに、これらの流木の挙動に関する予測手法を紹介する。さらに、流域全体における事業分野（例えば、治山・森林分野、砂防・ダム・河川分野、道路・鉄道等の交通分野、港湾・漁港・海岸等の沿岸域での事業分野）に応じた流木対策の検討に関して、今後の参考となる考え方や留意点について紹介する。



図-7 流木の流出による下流域における被害の事例
（平成29年7月九州北部豪雨；奈良ヶ谷川流域）⁷⁾

3. 1 既往報告に基づく流木の流出特性と被害リスク

流木の発生や流出特性について把握するため、過去に貯水池（矢作ダム）に流入した流木について詳細に調査された結果¹¹⁾を用いて、流入した樹木種毎の流木本数を、その発生原因地である流域の森林における樹木種構成比（森林構成比）で除して無次元化させた矢作ダムにおける樹木種別の流木流出率 R_{i_out} ：式（2）を図-9に示す。



図-8 木除杭の設置状況（京都嵐山；渡月橋）¹⁰⁾

$$R_{i_out} = n_{i_c} / A_{i_e} \quad (2)$$

ここで、 n_{i_c} は貯水池（矢作ダム）に流入した樹木種毎の流木本数、 A_{i_e} は森林構成比（流域における樹木種面積比）である。図-9 に示すとおり、針葉樹のスギは他の樹木種と比較して、顕著に流出する割合が高いことが分かる。この要因として、一般的に、樹木種毎の生息する地盤環境特性（例えば、斜面の安定度）の違いによる影響等が考えられる。なお、スギは水分の要求性が高く^{12), 13)}、比較的含水比の高い斜面や谷沿に植林されるため、流木流出率の違いはスギの生育する斜面地盤内における含水比の高さと斜面崩壊の発生し易さとの関係¹⁴⁾等に強く影響を受けたものと考えられる。

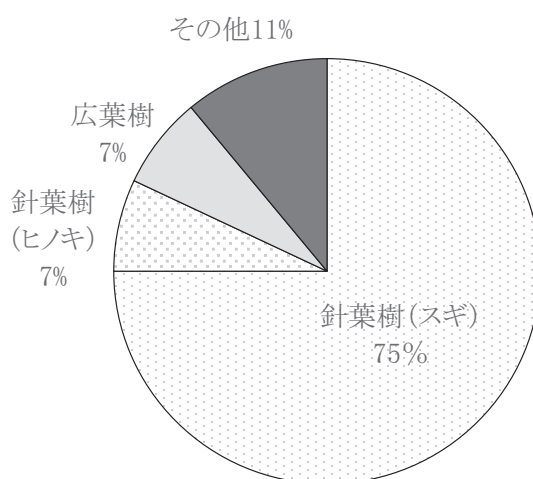


図-9 矢作ダムに流入した流木本数をその森林構成比¹¹⁾で除して無次元化した樹木種毎の流木流出率

一方、樹木種毎における比重の違いによる下流への流下特性を議論するため、樹種毎における生木の比重¹⁵⁾を図-10 に示す。図-10 に示すとおり、針葉樹は広葉樹等と比較して比重が小さく、特に、スギやヒノキの比重が顕著に小さい傾向である（スギやヒノキの生木比重：0.7～0.8 程度）。なお、一般的に、洪水時中は河川流水内における土砂濃度の上昇に伴う流水の比重の増加が考えられ、洪水流出中は更なる浮力による流木の遠距離への運搬に伴う下流域における被害が懸念される。

これらによると、土壌水分の違いによる斜面崩壊のリスクが高いと考えられる斜面に植林されるとともに、比重の小さいと考えられる針葉樹のスギは、他の樹木種と比較して、特に多くの流木が下流域まで河川等の流れにより運搬されることが懸念される。今後、これらの特性を考慮した議論が重要であると考えられる。

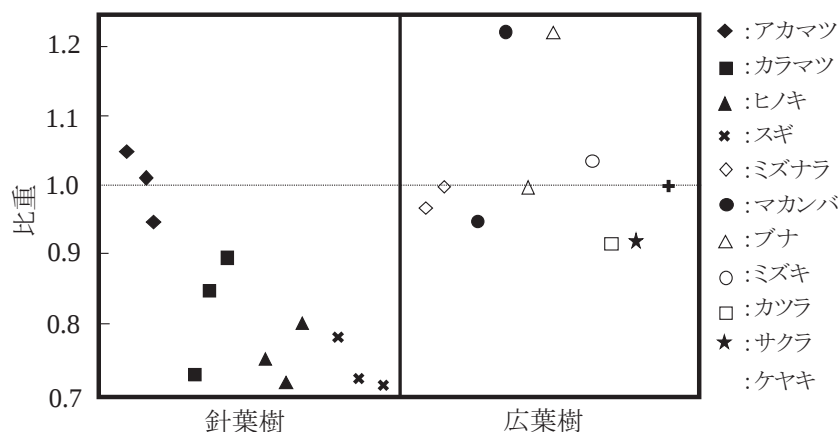


図-10 生木の比重¹⁵⁾

次に、これまでの流木による災害や被害に関する既往報告を参考に、今後、河川流域の各空間区分において懸念される流木による主な被害リスクを表-1に示す。表-1に示すとおり、流域における流木による被害は、主に、①土砂流出に伴う流木の家屋への衝突等による被害、②下流域まで運搬された流木の構造物（例えば、橋梁）への衝突や流木閉塞に伴う構造物の損傷、③橋梁・河道閉塞に伴うその上流部での洪水氾濫、④貯水池ダムや海岸・港湾における流木処理・利用制限等の間接的な被害等に分類される。

表-1 流域の空間区分において懸念される流木による主な被害リスク

流域の空間区分		主な流木被害リスクの概要	主な被害事例
山地・森林	斜面・溪流	土砂流出に伴う流木の家屋への衝突等	・1988 広島県 ¹⁶⁾ ・2004 愛媛県 ¹⁷⁾
		流木による河道閉塞に伴う上流部での洪水氾濫等	・1998 那珂川 ¹⁸⁾ ・2005 宮崎県 ¹⁹⁾
	貯水池・ため池	余水吐や取水設備における流木の閉塞による堤体の決壊や損傷	・2005 宮崎県 ²⁰⁾ ・2017 福岡県 ²¹⁾
		流出した流木の処分・撤去	・2003 北海道 ²²⁾
沖積平野	河川：緩勾配区間	橋梁や横断構造物における流木の閉塞や衝突による橋梁、取付道路の損傷	・1998 那珂川 ¹⁸⁾ ・2007 多摩川 ²³⁾
	その他		
沿岸域	漁港・港湾	流木流出による漁業活動への影響	・2003 静岡県 ²⁴⁾
	海岸	流木堆積による利用制限	・2005 静岡県 ²⁵⁾

3. 2 流木挙動の予測手法

河川における流木挙動の予測は、水災害の軽減や河川環境等の観点から非常に重要な課題であると考えられる。特に、洪水時の流木の集積や堆積は、構造物の破壊や機能低下、上流河川の水位上昇や周辺河床の浸食など様々な影響を及ぼすことが懸念される。

流木の挙動に関して、これまで多くの数値計算による手法が提案^{例えば, 26)}されており、近年では、流木を固体の浮体（例えば、図-11）としてラグランジュ的に追跡し、流木の流動をオイラー型モデルで解く手法等が提案されている。なお、流木（固相）の移動を水面付近で運動と仮定して流水（液相）を平面二次元的に解くモデル（2D-2D 型モデル）^{27), 28)}や、液相を三次元モデルとしたもの（3D-2D 型モデル）^{29), 30)}、さらに、液相、固相とも三次元的に解くモデル（3D-3D 型モデル）³¹⁾等も提案されている。なお、木村ら³⁰⁾は三次元（3D）流動モデルと二次元（2D）流木挙動モデルをカップリングして構築した 3D-2D モデル（カップリングには流木から流れに及ぼす抗力を考慮した Two-way カップリングモデル）により、二次流の影響を受ける湾曲部の流れ場の流木輸送現象を対象に、2D-2D モデル（流動、流木ともに二次元モデル）との結果について比較して考察している（図-12）。さらに、障害物周辺の流木集積現象に本モデルを適用し、実験によるモデルの適用性等について考察している（図-13）。

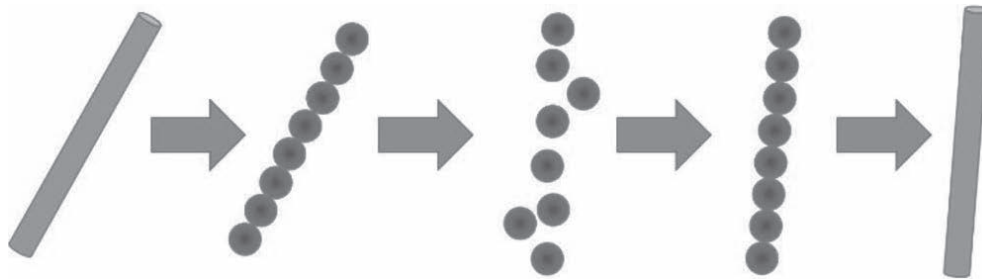


図-11 流木挙動解析における流木追跡計算過程の一例³⁰⁾

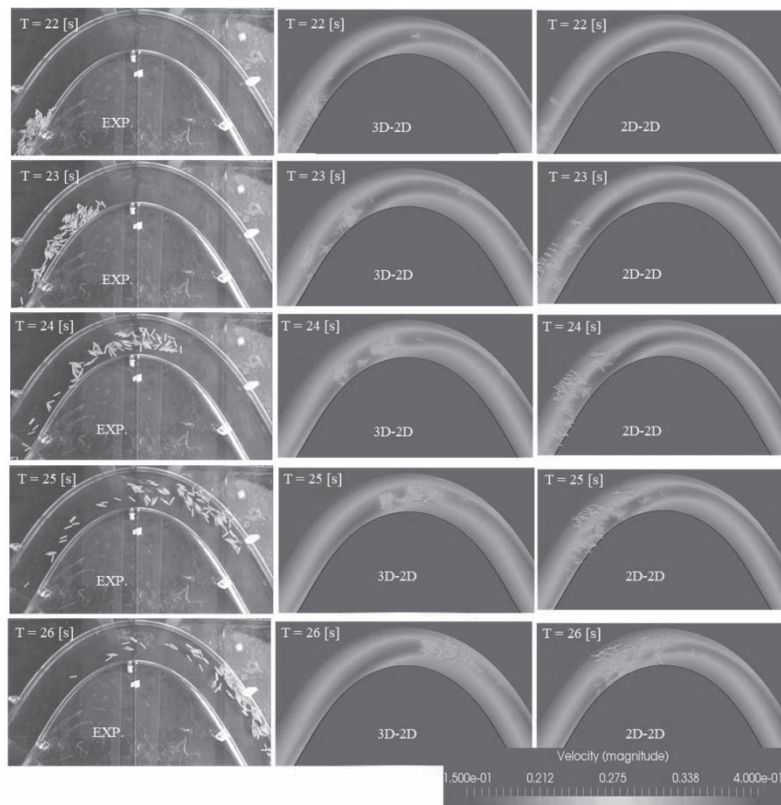


図-12 流木移流過程の比較³⁰⁾

（左：実験，中：数値解析 Case 1 (3D-2D model)，右：数値解析 Case 2 (2D-2D model)，1 秒間隔）

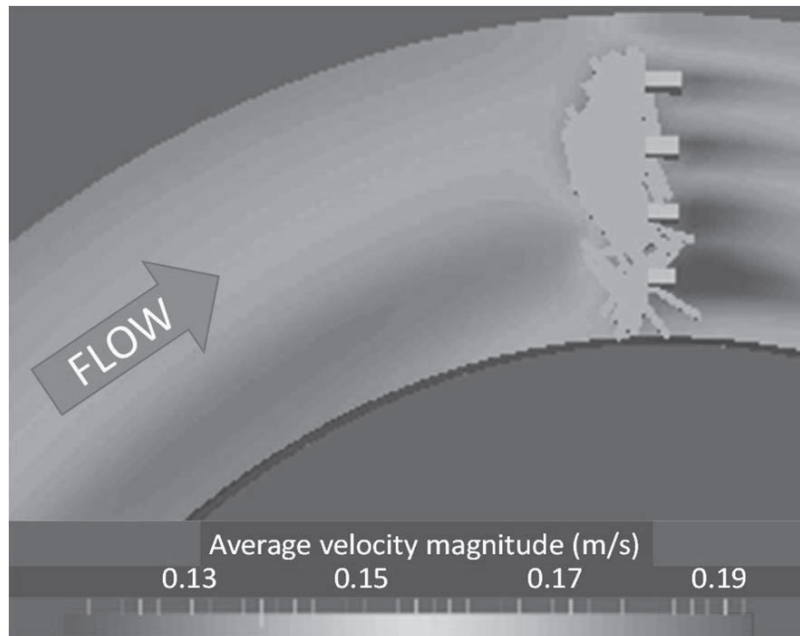


図-13 実験及び数値解析結果における障害物周辺の流木の堆積状況³⁰⁾

3. 3 流木の流下範囲に関する予測

大規模な出水時に流木がどの範囲まで流出するのかを定量的に知ることは、災害防止のために大変重要な課題である。山崎ら³²⁾は流木の生産が上流域の崩壊・土石流による表土層の侵食に伴うものとしてモデルを作成し、流木の生産・流出に関する解析を行っている。土砂の侵食・堆積速度式を用いて流木の生成と貯留（停止）に関する定式化を行った上で、通常の水と土砂の流出・氾濫に関する2次元モデルに組み入れている。山崎ら³²⁾は、このモデルを平成29年九州北部豪雨における福岡県赤谷川流域の一部に適用したところ、ある程度まで実現象を再現できたと結論付けている。図-14には空中写真から判読された流木の長さや位置および土砂移動範囲³²⁾を示し、図-15に計算開始から600秒後の流木の単位面積あたり堆積量の空間分布³²⁾を示している。この計算モデルが十分な予測を行えるものかどうかは、今後さらに他流域の事例に適用されることによって確認されると思う。流木の生産が土砂の侵食と強く結びつくことは否定しないが、土砂の堆

積と流木の（貯留）停止を直接関連付けられるのかは現時点では確かとはいえない。災害直後に流木貯留（停止）の空間的な分布を計測し、それをストックしていくことがモデルの確かさの検証に必要であるといえよう。

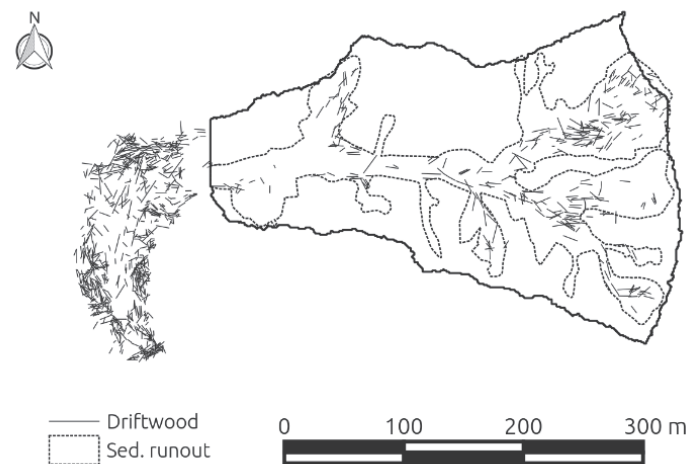


図-14 流木の位置および長さと土砂移動範囲³²⁾

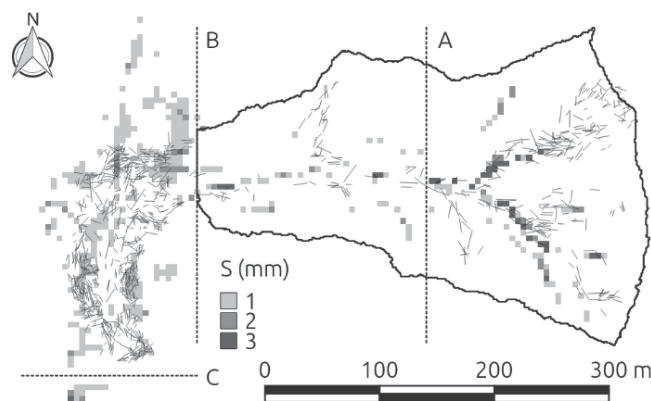


図-15 計算開始から 600 秒後の流木の単位面積あたり堆積量の空間分布と実際の流木の空間分布³²⁾

3. 4 山地から河口域までにおける総合的な流木対策

山地河川から緩勾配区間の河口域までにおける流域全体とした総合的な流木対策⁶⁾の推進を目的に、これまで講じられてきた対策工について整理するとともに、計画や設計に際して懸念される各対策工における留意点について示す。さらに、これらの流木対策工の内、伝統的な木除杭（図-8）の流木対策機能に関して、最近の技術知見を紹介する。

(1) 流域の各空間区分における主な流木対策工と留意点

これまで、流域の各空間区分において流木捕捉や被害軽減を目的に講じられてきた主な対策工及びその概要を表-2 にそれぞれ示す。表-2 に示すとおり、前述に示す各空間区分で懸念される流木による被害リスク（表-1）に応じて、主に、①山腹工等による斜面での流木発生防止、②砂防堰堤等による流木捕捉、③木除杭による橋梁への衝突防止、④閉塞時の橋梁流出防止等に分類される。さらに、各流木対策工における計画上や運用上における主な留意点も表-2 に示している。流木発生防止等に関して、未対策の斜面が流域に残ってい

る場合、流木の流出特性により、それらの残斜面から発生した流木が下流域まで運搬されることが懸念されるため、必要に応じて全ての斜面に対して対策を講じる必要がある。また、溪流における砂防堰堤による流木捕捉等も同様であり、下流域の状況に応じては、全ての支流や溪流の谷出口付近で対策を講じる必要があるとともに、定期的な維持管理（例えば、捕捉後における流木・土砂の速やかな除去）の実施が必要である。一方、流木による被害報告の多い橋梁（表-1）における対策として、高欄等を有さずに床版のみで構成された潜水橋（例えば、四万十川一斗俵橋）や古くから用いられてきた木除杭（図-8）が挙げられる。ただし、これらの対策工に関しては今後の維持管理や運用上において、日常的な維持管理による対策機能や安全性の確保等が必要となる。また、流木閉塞による橋桁の流出防止を目的とした鎖構造等の落橋防止装置については、流木閉塞による河積阻害に伴う直上流部における洪水氾濫による影響¹⁸⁾について留意しておく必要がある。

表-2 流域の各空間区分において考えられる主な流木対策工

対象	対策工	目的・概要	主な留意点
斜面・ 溪流	山腹工・ 床固工	・斜面崩壊防止による流木発生防止	・全ての原因地で対策が必要 ・地権者との調整
	砂防 堰堤工	・土砂や流木を鋼材等で捕捉	・除石、除木等の維持管理が必要 ・全ての支流で対策が必要
河川	流木捕捉施設、 遊木池等	・杭や網場等により流木を捕捉	・除木等の維持管理が必要 ・広大な用地の確保が必要
橋梁 等	潜水橋 (沈下橋)	・床版のみによる流木閉塞の低減	・出水後の橋梁構造の安全性確認や通行 規制などが必要
	木除杭	・流木の衝突防止	・芥撤去等の維持管理が必要
	落橋防止装置	・鎖等による上部工の移動防止	・橋梁部における流木閉塞に伴う上流域で の洪水氾濫

(2) 伝統的な木除杭の流木対策機能

橋脚間が狭小な橋梁部において、古くから経験的に用いられてきた流木対策である木除杭（図-8）において期待される機能の概要¹⁰⁾を図-14に示す。図-14に示すとおり、上流から流下してきた流木は、橋梁の直上流に設置された杭を中心に、流木軸方向が流れ方向と同じ角度に面内で回転し、そのまま橋脚間を円滑に通過する機能（流木流向制御）が期待できると考えられる。なお、木除杭の配置に関して、橋脚と木除杭との設置間隔 L_3 として流木長 l 以上の確保が望まれるとともに、これらの更なる機能向上を目的とした千鳥配置（図-15）による木除杭の設置について、実験により示している¹⁰⁾。

一方、木除杭は芥留杭とも称されており、木除杭として提案する杭の配置形式における芥捕捉機能についても実験（図-16）により検証し、妥当性を確認している。また、芥捕捉と流木流向制御機能との相互干渉による影響についても、実験により確認している¹⁰⁾。ただし、現存する木除杭（例えば、伊勢神宮内の宇治橋）等において、上下流の橋梁で連続して木除杭による対策の事例が少ないため、今後、連続した木除杭の設置による対策については留意が必要であると考えられる。

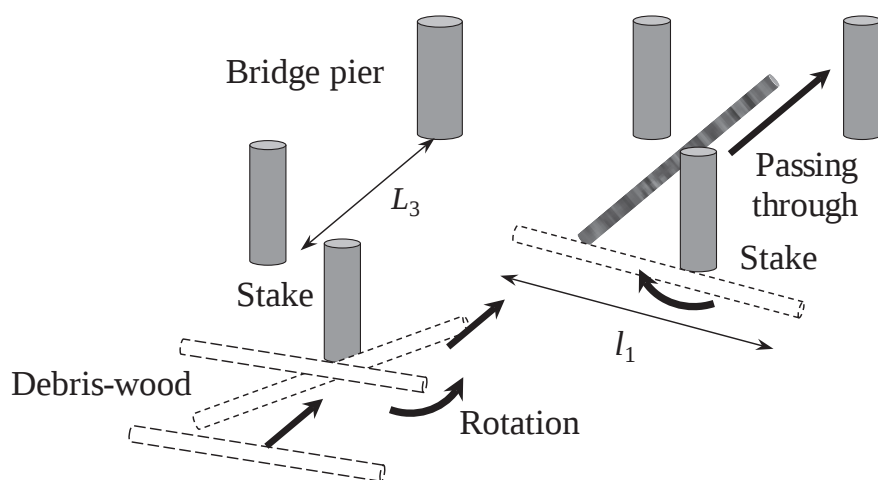


図-14 木除杭における流木対策機能（流向制御）の概要¹⁰⁾

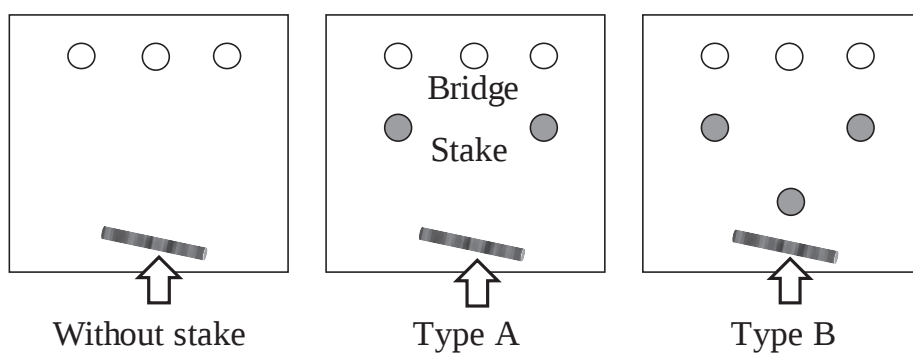


図-15 木除杭の配置形式¹⁰⁾

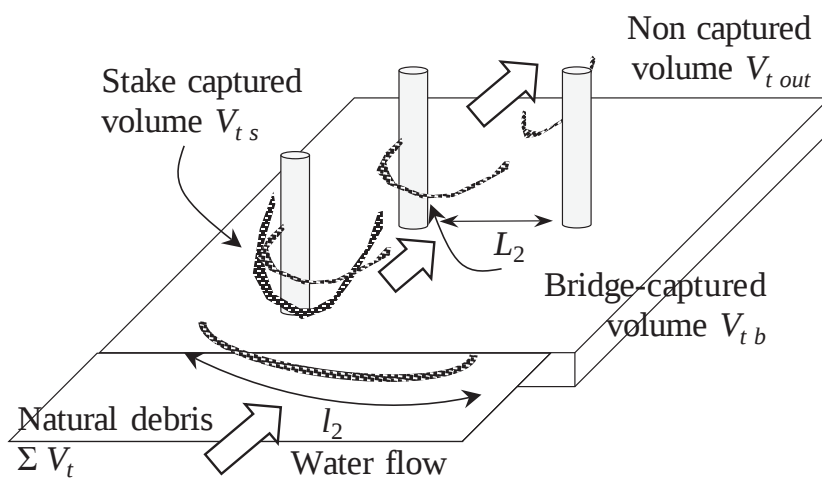


図-16 芥留機能に関する実験概要¹⁰⁾

3. 5 流域特性を踏まえた流木対策方針案の提案

上述のように、流木の流出特性や流域の各空間区分において懸念される流木流出に伴う被害リスクや各対策工についてそれぞれ示した（表-1、表-2）。ここで、各空間区分における流域特性（例えば、保全対象や利用状況）を考慮した対策方針案について以降に示す。

山地や上流域に保全対象（例えば、家屋）等が存在する場合、これまでの砂防事業と同様に、保全対象上流域において、山腹工や砂防堰堤等による流木の生産・流出防止を目的とした対策が望まれる（図-17）。その際、下流域の状況（例えば、橋梁の横過条件、沿岸部の利用状況）により、全ての斜面または溪流等からの流木流出に対して防止を講じる必要がある。ここで、山地や上流域において家屋等の保全対象が存在しないとともに、下流河川域において流木捕捉施設の設置が可能な地形条件を有する場合は、図-18 に示すとおり、河川下流域（一箇所）での集中的な流木捕捉も有効であると考えられる。なお、下流域での流木捕捉は流木の運搬や撤去においても有効であると考えられる。

一方、流木発生量や河口域・沿岸部での利用状況によっては、海岸や港湾管理者等との調整により、木除杭を併用させた流木の自然流下による沿岸部での流木の集約・撤去も考えられる（図-19）。ただし、流木対策や処理に関して、主な発生域の管理者（森林管理者等）との調整、対策における便益者の違いを考慮した流木捕捉や流木の集積・処分（例えば、貯水池ダムや沿岸域での流木集積）に係る費用の負担調整、総合的な河川流域の事業における費用便益効果分析手法の確立が重要である。

今後、山地から河口域までの流域において効果的に流木対策を推進するためには、森林管理者、砂防施設管理者、河川管理者、海岸管理者、港湾・漁港管理者、道路管理者等が連携していく必要がある。さらに、貯水池ダム等の湛水部における網場を併用した流木捕捉も有効と期待される。今後、更なる合理的な流木対策の議論が望まれる。

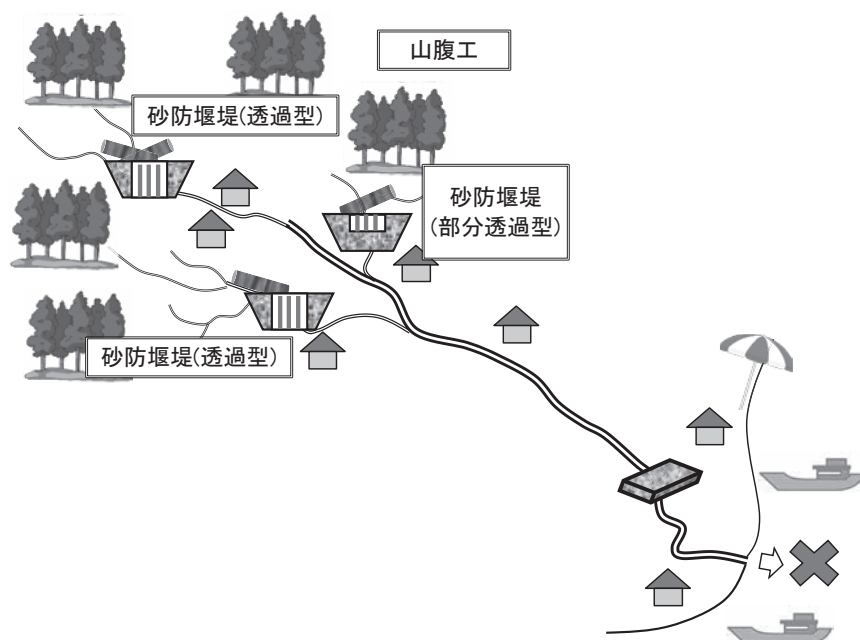


図-17 砂防堰堤や山腹工等による山地や上流における対策例
（山間地域における保全対象：有，沿岸域への流木放流：不可）

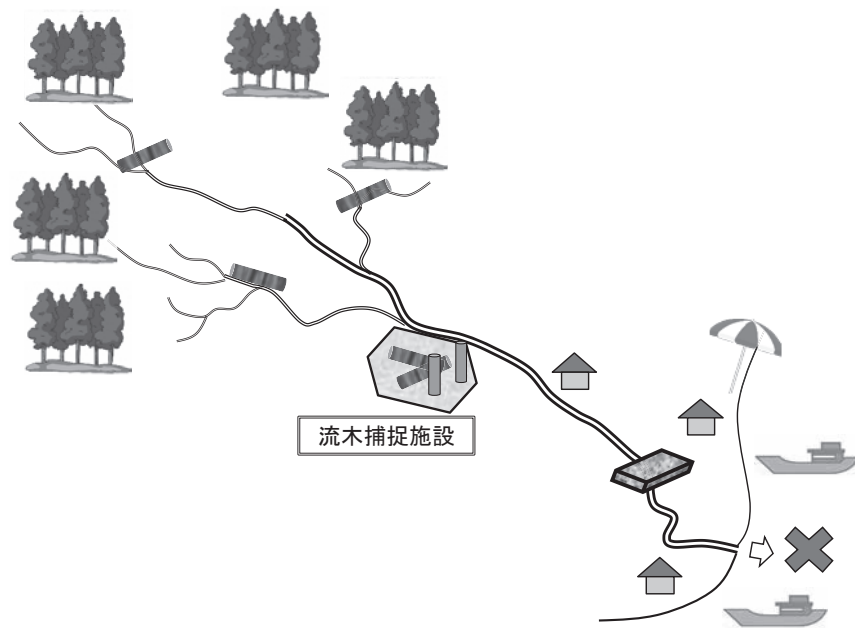


図-18 下流河川における流木捕捉施設等による対策例
(山間地域における保全対象：無，沿岸域への流木放流：不可)

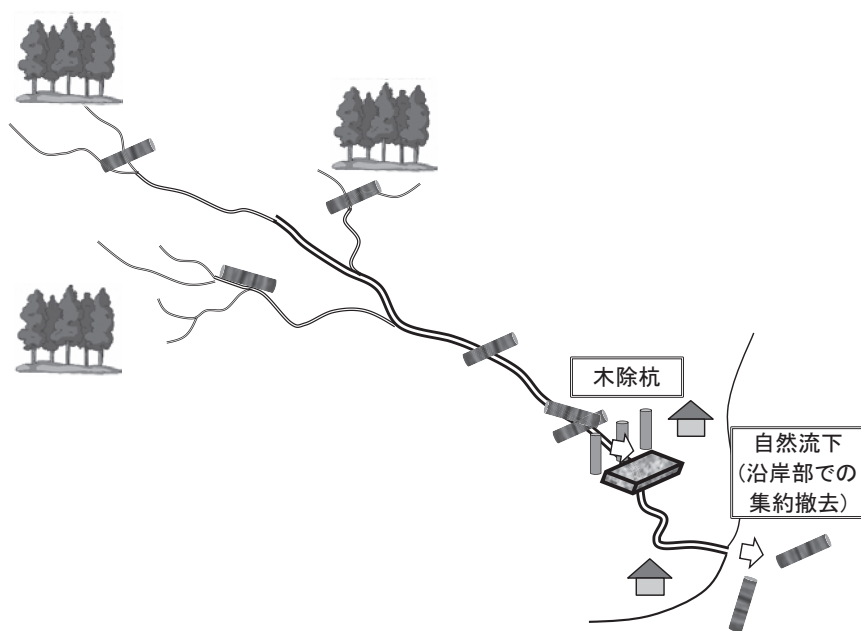


図-19 木除杭等による対策例
(山間地域における保全対象：無，沿岸域への流木放流：可)

4. おわりに

気候変動が原因と思われる豪雨発生機会の増加によって、これまで大きな危険にさらされてこなかった扇状地や谷底平野あるいはその下流域においても深刻な土砂災害・流木災害が生じることが避けられなくなっている。本稿に示された内容は、現時点における現象に対する理解や、近い将来可能となるだろう対策方法である。しかしながら、土石流をはじめとする大規模な土砂流出プロセスや流木の発生・流下プロセスに関

しては未解明な部分も多く残されている。今後、そういった分野の研究が一段と進展することにより、さらに合理的な対策を実現できると考える。

【謝辞】

本稿を作成するにあたり、原田紹臣氏（三井共同建設コンサルタント株式会社砂防部長，京都大学大学院農学研究科研究員，立命館大学客員教授）の全面的な御協力をいただいた。ここに記して感謝します。

参考文献

- 1) 藤田正治：気候変化が土砂災害の素因・誘因に及ぼす影響，砂防学会誌，Vol. 65, No. 1, pp. 14-20, 2012.
- 2) 石川芳治：山地小溪流からの流木を伴う土砂流出による災害に関する研究，京都大学博士学位論文，1990.
- 3) 石野和夫，橋丸大史，玉井信行：2004 年 7 月 18 日福井水害における流木の橋梁への影響調査結果，土木学会第 61 回年次学術講演会，Vol. 2, pp. 9-10, 2006.
- 4) 足立昭平，大同淳之：流木に関する実験的研究，京都大学防災研究所年報，Vol. 1, pp. 41-49, 1957.
- 5) 藤村直樹，黒岩智恵，泉山寛明，赤澤史顕，水野秀明：不透過型砂防堰堤による流木の捕捉と流出に関する実験報告書，土木研究所資料，Vol. 4331, 2016.
- 6) 国土交通省 砂防部：事務連絡，流木対策の実施（当面の対応），2015.
- 7) 地盤工学会：平成 29 年 7 月九州北部豪雨緊急災害報告会資料，2017.
- 8) 鈴木健吾，篠原麻太郎，守屋博貴，二瓶泰雄，長谷部由莉，五十川周，矢野真一郎，赤松良久：平成 29 年九州北部豪雨による福岡県朝倉市 山の神ため池の決壊・洪水氾濫状況，土木学会論文集 B1, Vol. 74, No. 4, pp. I_1183-1186, 2018.
- 9) 国土交通省 砂防部：事務連絡，平成 29 年 7 月九州北部豪雨災害を踏まえた今後の砂防事業における流木対策，2017.
- 10) 原田紹臣，内藤秀弥，里深好文，水山高久，小杉賢一朗：橋脚における木除杭及び芥留杭の機能に関する基礎的な実験，土木学会論文集 B1, Vol. 72, No. 4, pp. 301-306, 2016.
- 11) 森田 実，田中茂信，高橋洋一：H12.9 東海豪雨による流木調査，河川技術論文集，Vol. 8, pp. 231-236, 2002.
- 12) 堤 利夫：現代の林学，Vol. 10, 造林学，文永堂出版，pp. 5-10, 1994.
- 13) 丹下 健：スギ造林木の成長に関する生態生理学的研究，東京大学博士論文，1993.
- 14) 酒匂一成，須田剛文，里見知昭，深川良一，北村良介：降雨によるまさ土斜面の浸透・崩壊に関する室内土槽試験，第 4 回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp. 21-26, 2008.
- 15) 坂野 章：橋梁への流木集積と水位せきあげに関する水理的考察，国土技術政策総合研究所資料，Vol. 78, pp. 8-9, 2003.
- 16) 石川芳治，水山高久，福沢 誠：扇状地における流木の流下，堆積特性，土木技術資料，Vol. 33, No. 5, pp. 38-44, 1991.
- 17) 岡本 敦：平成 16 年度 愛媛県で発生した土砂災害の対策，第 37 回砂防学会シンポジウム講演集，pp. 73-90, 2005.
- 18) 伊藤和典，須賀堯三，池田裕一：余笹川にみる低頻度大洪水による横侵食性河道変化の実態とその考察，水工学論文集，Vol. 45, pp. 781-786, 2001.
- 19) 消防庁：平成 17 年台風第 14 号と豪雨による被害状況，2005.
- 20) 九州電力：耳川水系ダム最大流入量及び最大放流量一覧，2006.

- 21) 堀 俊和, 泉 明良, 正田大輔:平成 29 年 7 月九州北部豪雨での被災ため池に関する調査報告書, 2017.
- 22) 佐藤 創, 長坂 有, 浅井達弘, 寺澤和彦:2003 年台風 10 号災害における厚別川流域の流木の堆積量と組成, 砂防学会誌, Vol. 58, No. 6, pp.11-17, 2006.
- 23) 玉井信行, 石野和男, 榎田真也, 前野詩朗, 渡邊康玄:豪雨による河川橋梁災害 その原因と対策, 2015.
- 24) 国土交通省中部地方整備局:総合的な沿岸漂着物対策検討調査, 2003.
- 25) 佐藤慎司:河川流出ゴミの海岸への漂着実態の解明, 河川整備基金研究成果報告書, 河川環境管理財団, 2006.
- 26) 中川 一, 井上和也, 池口正晃, 坪野考樹:流木群の流動と堰止めに関する研究, 水工学論文集, Vol. 38, pp. 543-550, 1994.
- 27) 清水義彦, 長田健吾:流木形状を考慮した個別要素法による橋脚周辺の流木集積過程に関する数値実験, 水工学論文集, Vol. 51, pp. 829-834, 2007.
- 28) 初田直彦, 赤堀良介, 清水康行:蛇行流路の流体場と流木の挙動に関する実験と数値解析, 応用力学論文集, Vol. 15, pp. 415-422, 2012.
- 29) Kitazono, K., Kimura, I., Shimizu, Y. & Kyuka, T.: Computation on driftwood motions around obstacles coupling with a three-dimensional flow model, Proceedings of 19th Congress of the Asia Pacific Division of the International Association for Hydro Environment Engineering & Research, Colombo, Sri Lanka, 2016.
- 30) 木村一郎, 北園和也:流木捕捉形態の流木リチャードソン数依存性と 3D-2D 型モデルの適用性, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 73, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 20), I_553-I_562, 2017.
- 31) 牛島 省, 福谷 彰, 牧野統師:3次元自由水面流中の接触を伴う任意形状物体運動に対する数値解法, 土木学会論文集, Vol. 64, No. 2, pp. 128-138, 2008.
- 32) 山崎祐介, 江頭進治:豪雨に伴う土砂・流木の生産と流下過程に関する研究, 河川技術論文集, 第 24 巻, 2018.