

GISを活用した河川計画に反映可能な流木災害 リスク評価手法の改良に関する研究 報告書

九州大学大学院工学研究院 教授 矢野真一郎

本研究では、GISベースでの流域一貫した流木総合管理を可能にするための流木災害リスク評価モデルを構築することを目的として2つの研究を実行した。まず、平成29年7月九州北部豪雨により過去にない規模の流木発生が生じたことから、被災河川流域全体で得られている斜面崩壊に関するデータ類をGIS上に統一し、実際の斜面崩壊状況を再現するためにロジスティック回帰分析を行った。これにより実際の斜面崩壊に近い再現ケースの判明や、今次水害による斜面崩壊に影響を与えた主な要因が何であるのかを明らかにすることができた。さらに、再現性の高いケースをもとに流木発生量の算出と実績の流木発生量との比較により本研究で作成したモデルの有効性を確認することができた。次に、河川上の橋梁における流木災害リスク評価を高精度化するために水理模型実験を試みた。3Dプリンターで枝付き流木模型を作成して橋梁への集積傾向評価に使用するなど、新しい流木実験へ展開した。

Key Words :流木, 流域一貫, 流木災害リスク評価, ロジスティックモデル, 3Dプリンター

1. はじめに

気象庁「災害をもたらした気象事例」¹⁾には、日本国内で観測された気象災害がまとめられている。1945年から2019年に至るまでの豪雨災害を含む気象災害の事例がまとめられているが、2000年以降は豪雨災害の頻度が高まっている。また、豪雨災害のスケールが大きくなり、人的被害・物的被害が大きいものが近年増加している。

平成29年7月九州北部豪雨では降水量の大きかった筑後川右岸支川の流域で同時多発的な斜面崩壊や土石流により大量の土砂や流木が発生・流下した。福岡県・大分県では死者・行方不明者42名（平成31年3月現在）が確認され、流木による橋梁の閉塞に伴い洪水が河道から溢れる等の被害や橋梁の流出、多数の道路における流水による侵食・崩壊ならびに土砂・流木による埋没や斜面崩壊による寸断が生じ、復旧・復興の大きな障害となっている。

平成30年7月西日本豪雨では西日本に停滞した前線および台風7号の影響で日本付近に暖かく非常に湿った空気が供給され続け、九州北部、四国、中国、近畿、東海、北海道地方の多くの地点で24、48、72時間降水量が観測史上1位になるなど、広い範囲における長時間の記録的な大雨となった。大雨により河川では堤防決壊とそれに伴う広範囲にわたる浸水被害、広島県を中心とした多数の土砂災害発生により死者224人、行方不明者8名（平成30年11月6日現在）と平成に入ってから豪雨災害としては死者が初めて200人を上回った。

さらに令和元年には、8月に前線性豪雨が九州北部を襲い、8月26日から29日までの期間総降水量が

長崎県の平戸で626.5mm、佐賀県の唐津で533.0mmと8月の月降水量平年値の2倍を超える大雨を記録した。特に佐賀県では、大規模な内水被害が発生し、4名の方が亡くなった(福岡での1名を含む)。また、同年10月には台風19号により東日本全域で大雨が降り、約100名の犠牲者が出ている。神奈川県箱根では10月10日から13日の期間総降水量が1000mmを越えるなど、多くの地点で観測史上1位の記録を塗り替えている。

昨今の豪雨災害による被害や頻度が大きくなっている背景に地球温暖化の影響があるとみられている。世界の年平均気温は長期的に見て上昇傾向にあり、気象庁の解析では1891年の統計開始以来100年あたり0.69°Cの割合で上昇している。また日本の年平均気温は1898年の統計開始以来100年あたり1.14°Cの割合で上昇している。2013年に公表されたIPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)第1作業部会の第5次評価報告書では「地球の表面では、最近30年の各10年間はいずれも、1850年以降のどの10年間よりも高温であり続けた。北半球では、1983年～2012年は過去1400年において最も高温の30年間であった可能性が高い（中程度の確信度）」と報告されており、現在進行形で地球温暖化が進んでいることが報告されている。温暖化の進行による気温の上昇は降水量の増加とその規模を引き上げることに伴い、近年の豪雨災害の規模、あるいはそれ以上の規模の豪雨災害が高い頻度で起こる可能性が高まると考えられる。

将来へ向けて重要となることが予想される豪雨災害であるが、近年の大規模豪雨災害では流木の問題が同時に発生していることが多い。土石流、地滑

り、山地崩壊から流出する流木は、河道を流下する際に流下能力が低い構造を持つ橋梁に集積し、ダム化してせき上げを起こすことで氾濫を助長したり、大量に集積して洪水時の大きな流体力を受けることで橋梁を破壊したりするなどの災害を引き起こす。これまでもいくつか豪雨災害での発生事例がある。

例えば、平成24年7月九州北部豪雨では山国川や矢部川の支流星野川などで流木が橋梁に集積し氾濫を拡大させた箇所が発生した。その5年後に発生した平成29年7月九州北部豪雨では約21万 m^3 の流木が発生しており、国土交通省(2017)²⁾の解析によると、溪流単位での流木流出率(単位面積あたりの流木発生量)は、従来の記録で最大値であった1,000 m^3/km^2 を大きく上回り、最大で20,000 m^3/km^2 を記録した。このことは、温暖化の進行などに起因して降雨の形態が変化し、それに伴い斜面崩壊や流木流出がこれまでに無かった規模へ変化してきていることを端的に示している。新たなフェーズに入ってきた流木災害について、可能なハード・ソフト対策の研究が改めて必要な時期になったと考えられる。

歴史的にみると流木の研究は、砂防分野で行われてきた土石流により発生する流木の流下機構や砂防えん堤などでの捕捉工の効果についてのもの、河川工学分野で行われてきた洪水流により流下する流木が橋梁へ集積する機構や堤内地へ氾濫した際に引き起こす住居の破壊機構、ならびに河道内での運動に関する力学的な機構などについてのものが多かった。流木発生のプロセスが複雑であることから、予測手法などについては進歩がみられていなかった。流木災害のリスク評価を行う上で、流木の発生から流下までのメカニズムは、地形、降水量、河川勾配など個々の河川流域に固有の条件に応じて異なることが予想されるが、汎用性のある流域圏全体での流木リスク評価手法を確立することが将来的に甚大化するであろう流木災害に対応するために有用であると考えられる。

本研究では、平成29年九州北部豪雨で発生した数多くの斜面崩壊と、それに伴う流木発生に着目し、それらの要因について統計的手法を用いた解析を実施する。得られた評価モデルにより、降雨や地形・地質などの情報を総合的に包含した流木発生量の評価モデルの開発を行う。また、橋梁に流木が集積する現象に関する水理実験も併せて行い、河道における流木災害リスク評価の高精度化を試みた。これらにより、河川計画において統一的な確率概念を用いて流木の影響を加味できる方法論を構築することを目指すものである。

2. 既往の流木研究について

流木問題は古くて新しい問題であると考えられている。京都嵐山を流れる桂川の渡月橋、宇治川の宇治橋などでは、古くから木除杭、または芥留杭と呼ばれる杭を橋梁の上流側に配置して、流下する流

木が橋梁に直接衝突したり、大量に集積したりすることを防ぐ目的で設置されてきた³⁾。一方、太田(2012)⁴⁾は、太平洋戦争までは森林の樹木を燃料として使っており、山地には“はげ山”が多かったため、現在ほど流木の発生は多くはなかったという見解を示している。スギやヒノキの針葉樹の人工林が成長しきった状態になっているのは、現代特有の状況であると説明している。

いずれにしても、最近多発している大規模豪雨災害においては、大量の流木が流出している事例が多い。例えば、平成24年7月九州北部豪雨では、山国川、花月川(筑後川水系)、玉来川(大野川水系)、合志川(菊池川水系)、白川などで流木による被害が発生した⁵⁾。平成28年の台風10号では岩手県を流れる2級河川小本川において流木災害が発生し、グループホームで高齢者の被害者が多く出た⁶⁾。平成29年7月九州北部豪雨では、過去最大の溪流面積あたりの流木流出量を記録し、筑後川中流域右岸側の支川において甚大な流木災害を発生した^{7,8)}。平成30年7月の西日本豪雨では、広島県の太田川水系三條川などで流木に伴う橋梁被害が発生している⁹⁾。さらに、令和元年台風19号では、宮城県丸森町を流れる阿武隈川水系の内川・五福谷川・新川の流域で大規模な斜面崩壊が多発し、大量の流木と土砂が下流の集落を埋め尽くした¹⁰⁾。このように、今後も起こり続けるであろう大規模豪雨や強大な台風における流木災害については、防災・減災に向けた対策が急がれる。

これまでに実施されてきた流木に関する研究は、大まかに以下のように分類できる。

- (1) 流木の発生機構に関する研究
- (2) 土石流で流出した流木の対策工に関する研究
- (3) 河川に流出した流木の橋梁や捕捉工への集積機構に関する研究
- (4) 河川や堤内地に流出した流木の堆積・拡散機構に関する研究
- (5) 海域まで流出した流木の堆積・拡散機構に関する研究
- (6) 河川流域を対象とした流木流出量の推定方法に関する研究
- (7) その他

などとなる。ここでは、紙幅の関係から本研究に関連する(3)と(6)についてのみ示す。その他については報告書原文(様式3-2)に示している。

まず(3)については、足立・大同(1957)¹¹⁾による先駆的な研究がある。昭和28年西日本水害における九州の橋梁被害を受けて、実験水路を用いた流木投下実験を行い橋脚への捕捉と橋脚間の断面への集積・閉塞状況を調べている。また、米元(1961)¹²⁾も実験水路で橋梁への集積を調べた。水位が桁下に到達していない場合と到達している場合の比較も行った。奥澤(1998)¹³⁾は米元と同様な実験を行い、流木長 L と橋梁の径間長 S の比 L/S に対する流木集積率の関係を調べた。松本ら(2001)¹⁴⁾は、米元や奥澤の結果を踏まえて、流木を塊として投入した場合の集積状況を実験した。 $L/S=0.8$ を境に現象が変化するこ

とを示した。坂野(2003)¹⁵⁾は、幅2mの大型水路で実験を行った。長谷川ら(2015)¹⁶⁾は、山地河川を対象とするために高フルード数条件下で実験を行った。山上・岡本(2016)¹⁷⁾は、丸太状の流木に重心の偏りがある場合の力学特性を実験的に調べている。加えて、橋梁への集積についても偏心流木模型により実験した。赤堀(2018)¹⁸⁾は、PIVとPTVを併用した最新のシステムで流木の橋梁集積の物理機構を実験している。なお、各論文の実験条件は後述する第4章の表-2に示す。

加えて、数値モデルによる検証も精力的に行われている。清水ら(2006)¹⁹⁾は個別要素法による平面2次元モデルによりラグランジュ的に流木の運動を計算し、橋梁橋脚への集積を解析した。清水・長田(2007)²⁰⁾は、同じ個別要素法を用いた平面2次元モデルで枝付きの流木についての検討を行い、枝付きの場合は集積が顕著なることを示した。香月ら(2013)²¹⁾は、3次元個別要素法モデルを用いて、狭い河川にかかる小橋梁に集積する流木の様子を解析した。対象とした橋梁は、平成22年に広島県庄原市で発生した土石流で被災したコンクリート3面張りの台形断面をもつ小河川にかかる2つの連続した橋梁である。流木は長さ分布を与えて複数流している。また、流木に根がついたものについていないもの、ならびに根の長さを変えたものをそれぞれ計算している。根付きで、根の長さが長いものほど閉塞がおこりやすいことを示した。木村(2019)²²⁾は、流れを3次元モデルで計算し、流木について球体を直列配置して結合した表現を用いた3次元挙動を再現できるモデルを用いた。流木リチャードソン数を定義し、捕捉率などとの関係を調べている。

次に(6)については、Schmocker and Weitbrecht(2013)²³⁾が、いくつかの経験則を用いて2005年のスイスの河川における洪水時の流木量を推定している。一方、牧ら(2007)²⁴⁾は、全国のダムで回収された流木量を調べ、関連が予想される因子との重回帰分析をおこなった。しかし、明確な相関関係は得られていなかった。田中ら(2008)²⁵⁾は、流木のエネルギーとしての利用の観点から過去に回収された流木量調査を行い、植生や河川特性と流木回収量との関係性を因子分析した。その結果、河床勾配が重要な要素であることを示した。助川・小森(2017)²⁶⁾は、全国のダムでの流木流出量を調査し、牧ら(2007)²⁴⁾と同様な統計解析を詳細に行った。結果、森林面積と再現期間1/5の日降水量との関係が強いことを明らかにした。

一方、矢野ら(2016)²⁷⁾は平成24年九州北部豪雨で流木災害が発生した筑後川水系花月川流域を対象として、流木災害リスク評価を行った。その際、河川の各地点で流出しうる可能最大流木量を**流木発生ポテンシャル**と定義し、その評価法を提案した。そこでは、斜面崩壊に起因する流木を対象とし、斜面の地形、河道と斜面との位置関係、森林の樹種などの情報からGIS上で推定する手法を用いている。ここでは、流木発生ポテンシャルから河道上の橋梁

についてのリスクを評価し、その大きさの順位付けを可能にしたものである。矢野ら(2007)²⁸⁾は、上述のモデルを山国川流域に適用し、砂防ダムや貯水ダムが流木災害リスクの低減にどの程度寄与するかを評価した。堂蘭ら(2017)²⁹⁾は、球磨川流域を対象にLPデータから流木発生ポテンシャル評価を高精度に算出する手法を開発した。さらに矢野ら(2018)³⁰⁾は、花月川を対象にして斜面崩壊が起こる危険度を改良H-SLIDER法を適用することで、降雨と地質情報も加味したモデルへ改良し、気候変動による降雨パターンの変化が流木発生量へ与える影響を初めて評価した。また、津末ら(2018)³¹⁾は同じく花月川を対象に、流木災害リスクの大きい橋梁に流木が集積することでせき上げが発生し、それに伴い氾濫が発生することを想定した被害額の算出を行った。また、平成24年九州北部豪雨で流木が集積し氾濫を発生させた橋梁の改修について、費用対効果を計算している。竹村ら(2018)³²⁾は、歴史的な石橋が多い矢部川水系星野川において、流木災害リスクを評価した。その際、石橋に特有の桁下のアーチ構造に着目し、水理実験から通常の桁橋に比べ流木捕捉率が上昇する効果を評価し、リスク評価に組み込んでいる。一方、矢野ら(2018)³³⁾は、平成29年九州北部で流木災害が多発したことを踏まえ、各被災河川の流木発生量への影響分析を統計解析し、斜面傾斜角・3時間雨量・6時間雨量が重要なパラメータであったことを示した。竹村ら(2019)³⁴⁾は平成24年九州北部豪雨で被災した白川流域を対象として流木災害リスクを評価し、加えて平成28年に発生した熊本地震による斜面崩壊についても分析し、本来豪雨では発生源とならない斜面が地震により崩壊して流木の発生限となった割合を評価した。

3. 流域一貫した流木災害リスク評価モデルについて

(1) 平成29年7月九州北部豪雨における被災状況について

福岡県から大分県にかけて平成29年7月5日から6日までに観測史上最も多い記録的な雨量を観測し、福岡県筑後北部から大分県北西部では「線状降水帯」が形成された。このため線状降水帯が形成された筑後川右岸域を中心に長時間強い雨が降り続けた。九州北部の3水系（遠賀川、筑後川、山国川）では氾濫危険水位を超える洪水が発生し、3観測所で観測史上最高水位を更新した。

線状降水帯が形成された筑後川右岸流域では朝倉雨量観測所、角枝雨量観測所においては平成24年7月3日出水及び、平成24年7月14日出水（いわゆる平成24年7月九州北部豪雨）を上回る雨量を記録した。24時間雨量は北小路公民館雨量観測所894mm、鶴河内雨量観測所で638mm、朝倉雨量観測所で608mmを記録した。筑後川右岸流域では7月5～7日の累加雨量で、平成24年7月九州北部豪雨時の1.2~4.8倍もの雨量を記録した。さらに、24時間雨量

だけでなく3, 6, 12時間雨量も大きな値を記録している。

今次水害における死者・行方不明者および家屋被害が集中しており、死者・行方不明者が42名（平成31年3月31日現在）に対して、赤谷川では死者・行方不明者が22名と最も大きな被害を受けた。また、桂川では堤防が3箇所決壊し浸水面積が1,106haに達した。桂川上流、疣目川、黒川、奈良ヶ谷川、寒水川、白木谷川、赤谷川などの狭い谷底平野を形成する中小河川では山腹・土砂崩壊による被害だけではなく、土砂や流木による河道の埋塞や橋梁の閉塞により被害の拡大がみられた。

29年豪雨による水害の大きな特徴の一つが大量の流木が発生し、谷底平野を流れる中小河川に土石流と一緒に流れて、被害を拡大させたことであった。河道を流下した流木は、比較的小さい橋梁に集積し、ダム化することで水の流下を阻害し、土砂の堆積を促進させ、橋梁下断面を閉塞した。それにより、橋梁そのものが埋没したり、破壊されたりしたものが多数見られた。また、流下できなくなった土砂と流木を含む洪水が河川からあふれ出て、周辺の道路や宅地・田畑に流入し、家屋などを破壊したり、土砂で埋没させたり、最悪の場合には流失させたりした。

この水害においては、線状降水帯が6~9時間程度停滞し長時間にわたり強い降雨が発生したために、同時多発的に斜面崩壊が発生した。そのため斜面上の森林から立木が流木化して流下した。赤谷川・白木谷川・寒水（そうず）川・北川・奈良ヶ谷（ならがや）川の5河川が特に流木流出が特に顕著であった。また、桂川上流域や支川の妙見川、ならびに佐田川支川の黒川の流域でも崩壊が顕著であった。

流木の発生源としては、山林・溪畔林・河畔林・その他に分類されていたが、山林が大半を占めていた。国土交通省の報告²⁾によると一連の豪雨により発生した流木量は約21万m³と推定されている。一般的な土石流災害における発生流木量との比較を行った結果、過去の災害では溪流単位で見た場合の単位面積あたりの発生流木量は概ね1,000m³/km²以下であったが、今回の災害では288溪流中、約半数の134溪流で1,000m³/km²を超えて流木が発生し、また赤谷川では、その約20倍近くに達するなど過去最大級の流木災害であった。

(2) 研究方法

本研究では図-1に示す福岡県朝倉市と東峰村に流れる筑後川中流域右岸側支川河川流域を対象とする。すなわち、赤谷川（大山川、乙石川を含む）、寒水川、白木谷川、北川、奈良ヶ谷川、妙見川（桂川支川）、桂川上流（本川上流域）、黒川（佐田川支川）、疣目川（佐田川支川）大肥川上流（本川上流域のみ、宝珠山川を含む）を対象とした。小石原川と花月川、大肥川支流の鶴河内川に関しては、流木発生が少ないため除外した。また、佐田川本川については寺内ダムの流木捕捉により被害が小さいことや流域面積が大きいこと、流入支川が多いことを

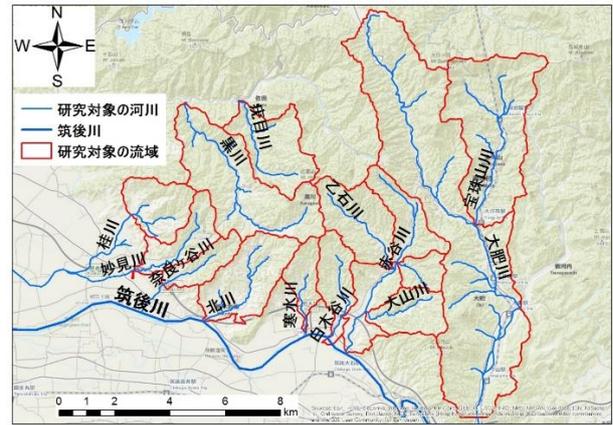


図-1 対象河川流域

表-1 素因・誘因の組み合わせの例

			case17	case18	case19	case20	case21	case22	case23	case24	
素因	傾斜角	incl	○	○	○	○	○	○	○	○	
	断面曲率	scuv	○	○	○	○	○	○	○	○	
	地質	火山性	geo2	○	○	○	○	○	○	○	○
		深成岩	geo3	○	○	○	○	○	○	○	○
		変成岩	geo4	○	○	○	○	○	○	○	○
		累積流量	kasen	○	○	○	○	○	○	○	○
	土壌被覆	草地	grass	○	○	○	○	○	○	○	○
		落葉広葉樹	dbf	○	○	○	○	○	○	○	○
		常緑広葉樹	ebf	○	○	○	○	○	○	○	○
		常緑針葉樹	enf	○	○	○	○	○	○	○	○
裸地		land	○	○	○	○	○	○	○	○	
草地+裸地		kasen2	○	○	○	○	○	○	○	○	
誘因	雨量	1hr	rain1H	○	○	○	○	○	○	○	
		3hr	rain3H	○	○	○	○	○	○		
		6hr	rain6H	○	○	○	○	○	○		
		12hr	rain12H	○	○	○	○	○	○		
		24hr	rain24H	○	○	○	○	○	○		

考慮し除外した。

本研究では斜面崩壊に寄与すると考えられる様々な要因から斜面崩壊発生面積を算出可能とするモデルの開発にロジスティック回帰分析を用いることとした。

ロジスティック回帰分析は多変数解析の一種で、Truett *et al.*(1967)³⁵⁾が心疾患のリスク研究から開発した統計理論による二項分布型の確率モデルである。二項分布をロジスティックモデルに結合し、0から1までの連続的な関数として成立させた後で、ロジスティック曲線を重回帰式で解くことによりモデルが構築されている。現象発生に関わるとみられる観測データや土地利用などの情報を量的変数・質的変数（説明変数）として取り入れてから、与えられた条件の下で二値変数（目的変数）が用いた説明変数でどれくらい説明できるのかを定量的に分析する。

斜面崩壊に寄与する要因の組み合わせでは、斜面崩壊が発生する場所の条件となる「素因」、ならびに斜面崩壊が発生するきっかけとなる「誘因」に分離している。素因には、地形や地質、地質構造、傾斜などの情報として傾斜角、断面曲率、地質（火山性地層、変成岩、深成岩）、累積流量、土壌被覆（草地、落葉広葉樹、常緑広葉樹、常緑針葉樹、裸地、草地+裸地）を設定した。一方、誘因には、斜面崩壊発生時の1時間雨量、3時間雨量、6時間雨量、12時間雨量、24時間雨量を設定した。素因・要因の組み合わせについて今回は38ケースを設定している。それらの一例を表-1に示す。

各素因・誘因については以下のようなデータを使用した。傾斜角・断面曲率・累積流量は国土地理院発行の標高データ(10mメッシュ)から、使用したGIS

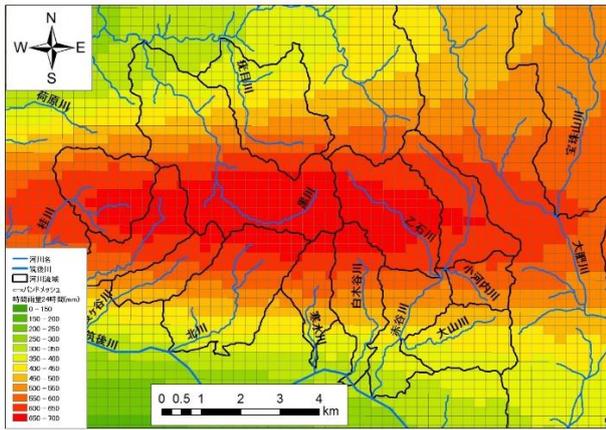


図-2 24時間累積雨量分布

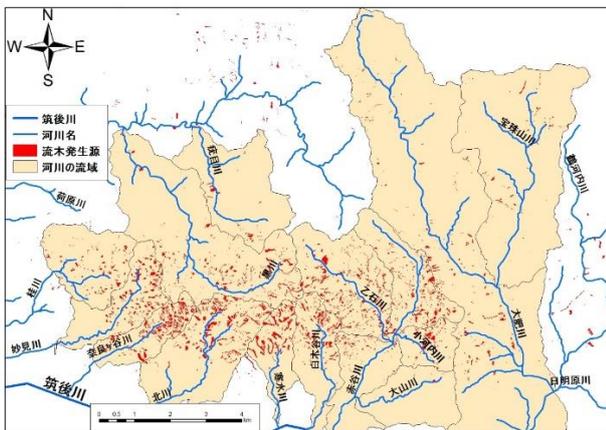


図-3 斜面崩壊地の分布

(ArcGIS, ESRI社製)の機能を用いて計算した。地質は国土交通省国土政策局国土情報課で提供されている表層地質図のGISデータから作成した。土壤被覆は宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 地球観測研究センター (EORC)が提供するALOS/AVNIR-2高解像度土地利用土地被覆図(バージョン18.03)を用いた。雨量データは国土交通省が公表している250mメッシュのC-X合成雨量データを用いた。雨量データは2017/07/05/00:00~23:59までの24時間分、1分刻みのデータが存在する。このデータから1時間、3時間、6時間、12時間、24時間の5種類で時間最大雨量を算出した。一例として、図-2に24時間最大雨量の分布図を示す。

流木の発生源となる斜面崩壊箇所については以下のように取り扱った。公開されている国土地理院の崩壊箇所データは崩壊箇所をすべて網羅できていないため、国土交通省公開の崩壊箇所データを補完的に使用した。ただし国土地理院の崩壊箇所データは崩壊地と堆積地が分離できていないため、国土交通省九州地方整備局より入手した今次水害における崩壊地と堆積地の分類図を参照して国土地理院の崩壊箇所データで使用する部分を選定した。

選定方法は国土地理院の崩壊箇所データと今次水害の崩壊地のデータが重複する部分をGISで表示し、重複箇所のみを残した。得られたデータは山林・河畔林・溪畔林の区別がついていないものであ

ったため、流木発生量の大部分が山林から発生したことを根拠としてこのデータを山林の崩壊データとして扱うことにした。そのため、このデータに対して国土交通省の崩壊箇所データから山林に関する崩壊箇所データと重複した部分についてすべて取り除いた。その後、国土交通省の山林・河畔林・溪畔林・その他林を作成した崩壊箇所データと連結させる。これにより完成した崩壊箇所データを本研究では流木発生源として用いることとした。図-3に作成された流木発生源となる斜面崩壊地分布を示す。

これらのデータを30mメッシュ上に配分し分析を行う。各メッシュに崩壊箇所が含まれる崩壊メッシュ数が3,659個、含まれない非崩壊メッシュ数が209,257個であった。解析する際は崩壊メッシュ数3,659個と同数の非崩壊メッシュ数をランダムサンプリングで抽出した。ランダムサンプリングによるバイアスを除去するために、20回のサンプリング計算を実施した。

(3) 評価結果

最も再現性の高いデータとして判定したところ、case24と判定された。case24における溪流単位の予測崩壊地面積率を溪流面積に乗じて、溪流内の崩壊面積を求めた。これから流木発生量の算出を行った。同時に実績の流木発生量の算出を国のデータから

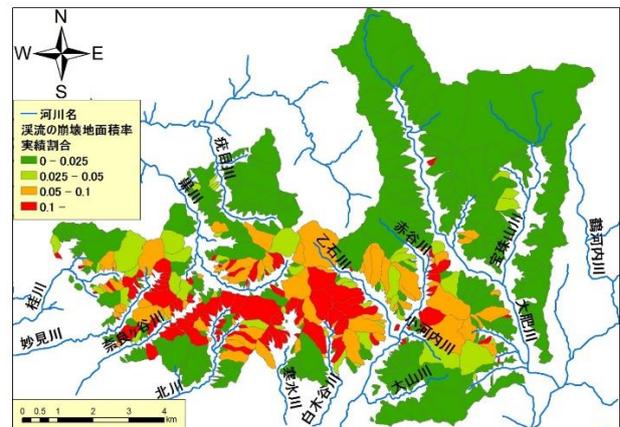


図-4 溪流毎の斜面崩壊面積割合の分布(実績)

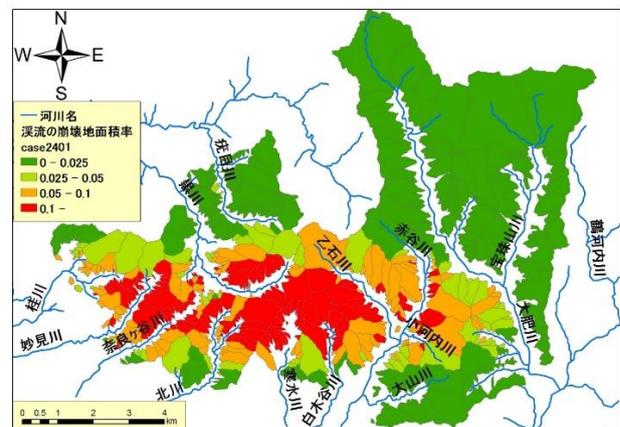


図-5 溪流毎の斜面崩壊面積割合の分布(モデル)

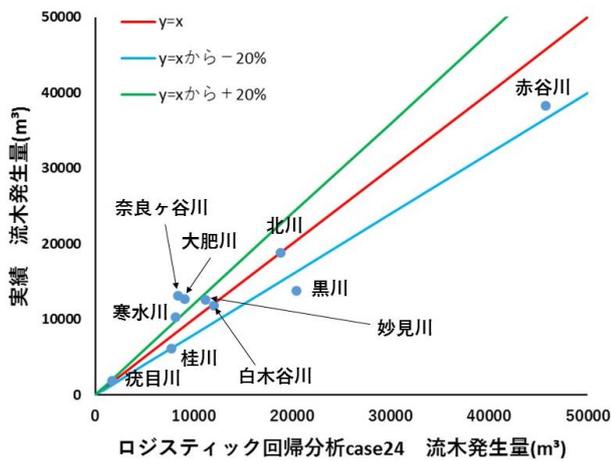


図-6 斜面崩壊地の分布

行い、両者の結果を比較した。図-4と5に崩壊面積率の分布を実績値と本モデルによる評価値から求めたものをそれぞれ示す。両者の一致度が高いことが確認できる。さらに、河川毎に流木発生量を求めた。図-6に実績値との比較を示す。対象河川の大半が±20%範囲で説明できる傾向にあり、モデルの有効性が確認できた。

今回、平成29年九州北部豪雨被災地のデータを有効活用し、素因・誘因から斜面崩壊の傾向を表現できるモデルの開発をロジスティックモデルで構築できた。これより発生流木量も的確に表現できることが分かった。このようなモデルにより降雨規模に応じた流木発生量の評価が可能になったことから、気候変動の影響により降雨量が変化した場合や空間的な降雨パターンが変化した場合に対応した流木発生量への影響評価も可能になる。

なお、各説明変数に対する回帰係数についてベストケースであるCase24をみると、雨量について負値が得られているものがあつた。このことは物理的には理解しにくい点であり、今後さらにケースを増やした検討と、雨量データの使用方法に関する検討が必要であると考えられる。加えて、必ずしも雨量として各累積雨量が与えられない場合でも評価可能にすることも必要である。よって、例えば3時間雨量のみで評価できるようなモデルも、データに不足がある場合の副次的なモデルとして採用していくことも必要であろう。

また、河川計画における計画規模に応じた降雨規模を用いることで、計画流木発生量を対応させることが可能になったと言える。このことから、河川計画上のL1・L2規模に応じて流木発生量も議論することが可能になり、流木の影響を加味した河川計画の策定が可能になったと言える。今後は、本モデルが他流域（平成30年西日本豪雨被災地とR1年台風19号被災地(宮城県丸森町)を想定）で適用可能かを検証し、より汎用性のある評価モデルへと改良することが求められる。また、L1・L2流木災害を評価するための基準とそれに応じた災害リスク評価、ならびにそれらへの対応策の検討を行うことが求められる。

る。

4. 水理模型実験について

(1) 目的

規模の大きな豪雨災害では斜面崩壊や河畔林の浸食に伴う流木の発生が見られる。それらは河道を流下する際に橋梁に捕捉され集積し、ダム化してせき上げを起すことで氾濫を助長したり、大量に集積して洪水時の大きな流体力を受けたりすることで橋梁を破壊するなど被害拡大の一因となっている。矢野ら(2016)²⁷⁾は、流木が橋梁へ捕捉される現象に関して橋梁へ流入する全流木量に対する橋梁で捕捉された流木量の比として流木捕捉率 α_i を定義し、 α_i は最小の橋脚間スパン長 S_i に対する想定される流木長 L_w の比率が捕捉現象について支配的な要因となると仮定し、次式で評価した。

$$\alpha_i = L_w / S_i \times (1/k) \quad (1)$$

ここで、 k : 橋梁における流木の集積しにくさを表す定数である。 k は水理条件や流木の形状、橋梁の構造、桁下余裕高等によって変化すると考えられるため、その設定には様々な条件で水理実験を行い、系統的に分析する必要がある。竹村ら(2018)³²⁾では常流の条件で石橋（アーチ型橋梁）を対象に k の算出を試みたものがあるものの、他の条件下での k に関する統一的な知見はない。また、第2章でレビューした論文から橋梁へ流木集積に関する水理実験は多く実施されているが、表-2に示すようにフルード数 Fr の範囲が、小さいもの(常流域)と非常に大きいもの(山地河川を対象)に分かれていた。河川中流域より下流で洪水時状況を想定すると、 $Fr=1$ 前後のデータの充実が必要であることが分かる。

また、流木に関する水理実験全般に目を向けると、その研究対象は流下時の流木の挙動や効果的な流木捕捉工の検討など多岐にわたるが、流木模型に円柱状の木材を使用しているものがほとんどである。流木の形状を考慮した実験は、流木捕捉工に関して根付きを考慮した渋谷ら(2011)³⁶⁾による捕捉工を対象とした実験など限定的で、特に橋梁への流木捕捉に関しては見受けられない。しかしながら、実際の災害では丸太のような円柱状の流木だけではなく、枝葉や根が付着したまま流下したとみられる流木も災害後の現地調査では見受けられるため、流木形状を考慮した水理実験の充実も必要と考えられる。

以上の研究背景を踏まえ、本研究ではまず桁橋を

表-2 橋梁流木捕捉の水理実験における条件設定

Paper	Fr	L/S
水理実験によるもの		
足立・大同(1957)	0.29, 0.39	0.3, 0.4, 0.5
米元(1961)	0.43, 0.51	0.22, 0.33, 0.43, 0.58, 0.67, 0.92, 1.19
奥澤(1998)	ND	0.3~1.21(7ケース)
松本ら(2001)	0.27, 0.39, 0.46	0.5~1.1(8ケース)
坂野(2003)	ND	0.21~1.24(10ケース)
長谷川ら(2015)	2.07~3.09(5ケース)	1.07, 1.25, 1.43, 2.14
山上・岡本(2016)	0.23, 0.558	2.0
赤堀(2018)	0.19, 0.38	0.83, 1.0, 1.25

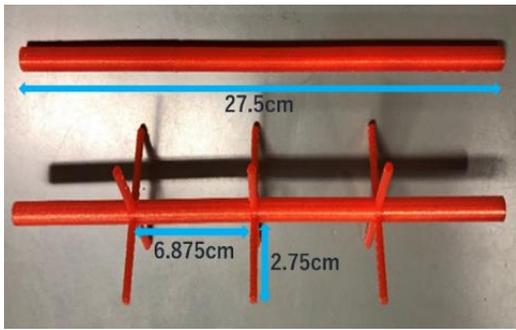


図-7 枝付き流木模型

対象として $Fr > 1$ の射流域の流木捕捉実験を行うために既設実験水路を改良することを試みた。また、改良した水路を用いて式(1)の k に関する知見を得ることを試みる。さらに、3Dプリンターを用いて枝が残っている状態の流木模型を作成し、枝の有無による流木捕捉傾向を比較することを試行的に試みる。

(2) 実験内容

まず**実験1**として、フルード数 Fr による式(1)における k への影響を評価した。次に**実験2**として、流木模型に3Dプリンター(ダヴィンチsuper, xyzプリンティング社製)で印刷されたPLA(poly-lactic acid: 糖含有植物由来のポリ乳酸樹脂組成物)製模型を導入し、従来の木製流木模型との違いを検討した。最後に**実験3**として、PLA製流木模型の枝の有無による流木捕捉率 α の違いを検討した。なお円柱状の流木模型の直径は、木製・PLA製ともに8mmであり、比重はスギ・ヒノキなどの針葉樹を想定して0.7としている。

実験1では $Fr=1.19, 1.23, 1.30, 1.36$ とし、流木長 $L_w=11.0\text{cm}, 16.5\text{cm}, 22.0\text{cm}, 27.5\text{cm}$ ($L_w/S=0.5, 0.75, 1.0, 1.25$)の4種類の木製円柱状流木模型各100本を用いた。投入方法は上流端から3秒間隔で1本ずつ入れる単独投入と10本ずつまとめて投入する集団投入を行った。それぞれ100本投入終了後に橋梁で捕捉された本数を記録した。実験試行回数は単独・集団投入ともに流木長が最大の、捕捉のされやすさを考慮し捕捉率の変化幅が大きくなる $L_w=27.5\text{cm}$ では8回の試行を、以下 $L_w=22.0\text{cm}$ で4回、他の2種類では2回ずつとした。以上より、得られた流木捕捉率 α と流木長スパン長比 L_w/S を用いて式(1)の k を算出した。

実験2では、**実験1**と同じ値の4つの Fr に対して流木長を $L_w=27.5\text{cm}$ のみにして、木製円柱状流木模型と3Dプリンターで印刷されたPLA製円柱状流木模型を各30本用いた。単独投入、集団投入それぞれ30本投入後に橋梁で捕捉された本数を記録した。試行回数は全ケース4回とした。

実験3では、**実験2**と同じ Fr と流木長の条件で、3Dプリンターで印刷されたPLA素材の円柱状流木模型と枝付き流木模型(図-7)を各30本用いて**実験2**と同じ方法で投下した。枝付き流木模型のデザインについては、枝部分の諸元は齊藤・川崎(2011)³⁷⁾、ならびに戒ら(2015)³⁸⁾を参考に分枝角度 90° 、枝長

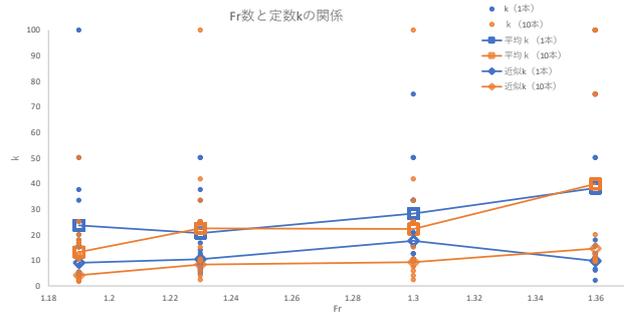


図-8 枝なし木製流木による実験結果: Fr 数と k の関係

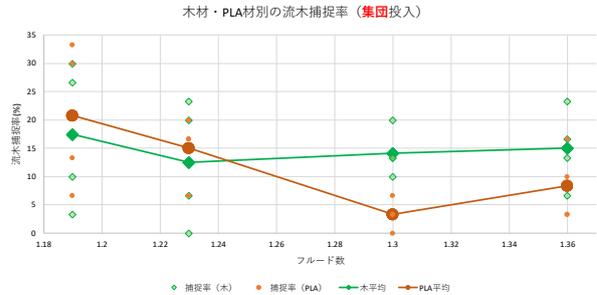


図-9 枝なし木製流木とPLA製流木による α の実験結果の比較(集団投入の場合)

2.75cmとしたが、枝径に関しては知見がなかったため暫定的に4mmとしている。

(3) 実験結果

まず**実験1**として、フルード数 Fr と式(1)における k との関係についてまとめたものを図-8に示す。桁橋について、射流($Fr=1.19\sim 1.36$)条件下では、 $k=20$ 以下に多く分布していた。しかし、 k のばらつきが大きく、一定値に収束していなかった。また Fr と k について一義的な関係性を見出すことはできないが、矢野ら(2018)³⁰⁾で用いてきた $k=10$ は近似値としては良好な値であることが確認できた。

次に図-9に**実験2**で得られた $L_w/S=1.25$ の場合のフルード数 Fr と流木捕捉率 α の関係を流木の集団投入の場合についてそれぞれ示す。単独投入(図は省略)においてはPLA製に比べて木製の捕捉率が高くなる傾向が示された。これは、材質による弾性などの異なるためである可能性がある。一方で、集団投入条件では両者の差は縮まっており、材質の違いは小さくなった。これらについては、3Dプリンターで利用できるフィラメントの材質を複数揃えた実験などを追加して、比較検討する必要がある。また、実際の河川における橋梁の橋脚(多くはコンクリート製)と流木となっている樹木との力学的関係と水理模型実験で用いる橋脚模型と流木模型との関係に対してどのような相似則が必要となるのかの検討も必要であると考えられることから、今後の課題として検証していく必要がある。

図-10に**実験3**で得られた $L_w/S=1.25$ の場合のフルード数と流木捕捉率 α の関係を流木の集団投入の場合についてそれぞれ示す。これらより、単独投入(図は省略)、集団投入の両方において、枝付き流木の方が枝なしと比べて高い捕捉率、すなわち低い k 値

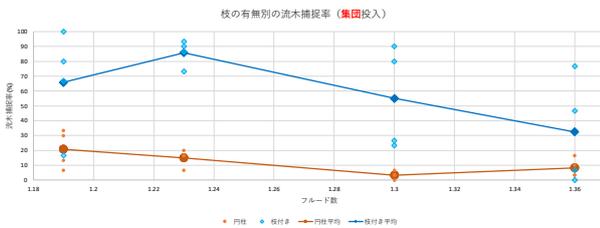


図-10 枝なしPLA製流木と枝付きPLA製流木による α の実験結果の比較 (集団投入の場合)

が示されていることが分かる。また、枝なし流木は単独投入と集団投入の間での差異が小さいが、枝付き流木ではその差が非常に大きいことも分かる。

今回の実験では、試行的に枝付き流木模型をデザインし単純化している。この模型が実際に枝の付いた状態での流木の挙動を再現できているのかは検討の余地がある。また今後、実際の立木の3次元データから流木模型を作成するなどのより現実的な枝付き流木模型の設計を行うこと、ならびに根付きの流木模型についての検討も行う必要があると考えられる。今回の3Dプリンターでの流木模型作成は3次元データの設計さえできれば精密な造形が可能になることから、今後も有用な流木模型作成のツールとして活用できると考えられる。

5. 結論

本研究では、GISベースでの流域一貫した流木総合管理を可能にするための流木災害リスク評価モデルを構築すること、さらに、得られたモデルにより河川整備計画においてL1流木災害リスクを考慮したハード整備とL2リスクに対するソフト対策を加味できるようなベースモデルとなることを目的として実行した。

ここでは、平成29年7月九州北部豪雨により過去にない規模の流木発生が生じたことから、被災河川流域全体で得られている斜面崩壊に関するデータ類をGIS上に統一し、斜面崩壊の発生に寄与すると考えられる要因をできるだけ多く抽出し、38パターンという数多くの組み合わせにより実際の斜面崩壊状況を再現するためにロジスティック回帰分析を行った。得られた38種のモデルからベストモデルを実際の斜面崩壊との比較から選択した。

これにより実際の斜面崩壊に近いモデルでの再現や、今次水害による斜面崩壊に影響を与えた主要因が何であるのかを明らかにすることなどができた。さらに、再現性の高いケースをもとに流木発生量の算出を行い、実績の流木発生量との比較により本研究で作成したモデルの有効性を確認することができた。

加えて、河川上の橋梁における流木災害リスク評価を高精度化するために、水理模型実験を試みた。その際、既往研究であまり検討されていないが、実際の水害において発生が見込まれる水理条件としてフルード数1程度の流れ場を対象として桁橋への流木集積傾向の評価を行った。加えて、3Dプリンタ

ーを用いて単純な丸太形状の流木模型に加えて、枝を模擬した枝付き流木模型を作成し、橋梁への集積傾向の評価に使用した。

一方で、斜面崩壊発生確率を斜面崩壊地面積率へ変換させる単回帰式を求める上でのデータの集計方法の問題、最も高い再現性を研究対象全体から選ぶべきか河川毎に細かく選んでいくべきかの選択基準の問題、ならびにベストモデル選定で用いた決定係数や相関係数の差が小さいため統計的に有意な選択ができていないのか判別しにくい問題、などモデル化にあたり多くの問題点も見出された。本モデルは業務でよく利用されているGISソフト、フリーの統計ソフト、国土地理院やJAXAなどの公的機関から無料で公開された土地情報などを組み込むことで斜面崩壊発生確率や予測崩壊地面積率、流木発生量などの災害情報を算出でき、自治体などでの活用が期待できるものと考えられる。また、統計的に斜面崩壊や流木発生条件を解析することでこれまで以上に正確な流木発生量の予測につながると考えられる。またさらに、将来の地球温暖化を踏まえた降水に対応しての予測もできると考えられる。将来性のあるこのモデルに対して、本研究で挙げられる多くの問題点を解決していくことが必要である。

これらの実験結果は、まだ試行的な側面が強く、完全な結論までには至っていないが、いくつか重要な結果を得ている。例えば、枝付きである場合には枝なしに比べて流木が集積しやすい傾向にあること、単独投入に比べて集団投入の方が集積しやすいことなど、既往研究で明らかにされてきたことの再確認だけでなく、流木模型の材質により集積傾向が異なっていることなどこれまでの流木に関する水理実験を考察する上で、根本的な見直しにつながる可能性を示唆する内容もあった。

以上より、当初の目的であったGISベースでの流域一貫した流木災害リスク評価モデルのベースモデルとなる第一段階のモデルを構築することは十分に達成された。さらに、河川計画においてハード整備やソフト対策を検討できるようなベースモデルとなるモデルをイメージして開発できたと考えられる。開発された流木リスク評価モデルを用いることで、流木災害への多重防衛となる防災・減災効果を評価することができるようになると期待される。さらに、流木流出量を河川の洪水頻度と同様の確率表示できるようなモデル構成になっていることから、河川と流木（と土砂）について統一した確率指標に基づく治水計画を可能にすることができるようになると期待される。

謝辞：本研究を遂行するにあたって、(一財)河川情報センターによる平成30年度研究助成による援助を頂いた。また、九州大学工学部地球環境工学科4年矢藤壯真君、同大学院工学府海洋システム工学専攻修士課程1年正垣貴大君、博士後期課程3年津末明義氏には現地観測のサポート、データ整理に尽力

頂いた。また、対象河川を管理する国土交通省九州地方整備局筑後川河川事務所、ならびに福岡県県土整備部と流域内の森林を管理する福岡県には種々のデータ提供に対して協力頂いた。ここに記し、深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 気象庁(2020): 災害をもたらした気象事例, <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/index.html> (access on 2020/01/20)
- 2) 国土交通省(2017): 平成29年7月九州北部豪雨は過去最大級の流木災害. <http://www.mlit.go.jp/common/001198670.pdf> (2018年5月時点).
- 3) 原田紹臣, 里深好文(2016): 橋梁における歴史的な流木対策に関する研究, 歴史都市防災論文集, 10, 115-122.
- 4) 太田猛彦(2012): 森林崩壊, NHK出版.
- 5) 土木学会九州北部豪雨災害調査団(2013): 平成24年7月九州北部豪雨災害調査団報告書, p.104.
- 6) 末次忠司(2017): 平成28年の台風10号による福祉施設の被災と減災対策, 水利科学, 354, 98-106.
- 7) 矢野真一郎, 大久保遼太, 津末明義, 竹村大, 富田浩平, 笠間清伸, 二瓶泰雄(2018): 平成29年7月九州北部豪雨による流木災害の発生要因に関する分析, 土木学会論文集B1(水工学), 74(5), I_1063-I_1068.
- 8) 守屋博貴, 二瓶泰雄, 長谷部由莉, 峯浩二, 鮎本健治, 矢野真一郎, 渡辺豊, 福田信行(2018): 平成29年九州北部豪雨による福岡県北川の流木災害の検討, 土木学会論文集B1(水工学), 74(4), I_1195-I_1200.
- 9) 井上隆, 山村優佳, 二瓶泰雄(2019): 豪雨時の橋梁被害リスク評価指標の検討〜H30年西日本豪雨の三條川橋梁被害縦断分布データを用いて〜, 土木学会論文集B1(水工学), 75(2), I_1417-I_1422.
- 10) 矢野真一郎(2019): 宮城県丸森町における流木災害の状況, 土木学会水工学委員会「令和元年台風19号豪雨調査団」速報会発表資料.
- 11) 足立昭平, 大同淳之(1957): 流木に関する実験的研究, 京大防災研究所年報, 1, 1-9.
- 12) 米元卓介(1961): 洪水時に流木が橋梁など堤防に及ぼす影響とその対策に関する研究, 早稲田大学理工学研究所報告, 17, 1-14.
- 13) 奥澤豊(1998): 流木の流下と集積に関する研究, 河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集, 第4回, 141-146.
- 14) 松本健作, 小葉竹重機, 清水義彦, 石田和之, 近内壽光, Ioakim Ioakim(2001): 流木塊の橋脚への堆積に関する研究, 水工学論文集, 45, 925-930.
- 15) 坂野章(2003): 橋梁への流木集積と水位かさあげに関する水理的考察, 国土技術政策総合研究所資料, 78, p.87.
- 16) 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, 京大防災研究所年報, 58B, 350-357.
- 17) 山上路生, 岡本隆明(2016): 流木の挙動安定性と橋梁閉塞に及ぼす影響に関する基礎的研究, 土木学

会論文集B1(水工学), 72(3), 88-100.

18) 赤堀良介(2018): 橋脚周辺における流木の3次元集積に関して, 土木学会論文集B1(水工学), 74(4), I_679-I_684.

19) 清水義彦, 長田健吾, 高梨智子(2006): 個別要素法を用いた流木群の流動と集積に関する平面2次元数値解析, 水工学論文集, 50, 787-792.

20) 清水義彦, 長田健吾(2007): 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, 51, 829-834.

21) 香月智, 渋谷一, 大隅久, 石川信隆(2013): 三次元個別要素法による実橋梁の流木閉塞災害事例の解析, 土木学会論文集A2(応用力学), 69(1), 1-15.

22) 木村一郎(2019): 3D-3Dカップリングモデルを用いた橋脚による流木捕捉過程の再現性, 土木学会論文集B1(水工学), 75(2), I_601-I_606.

23) Schmocker, L. and Weitbrecht, V. (2013): Driftwood: Risk Analysis and Engineering Measures, Journal of Hydraulic Engineering, 139(7), 683-695. July 1, 2013.

24) 牧孝憲, 高橋正人, 落修一, 三宅且仁, 尾崎正明(2007): 全国のダム流木発生量調査, 土木学会論文集G, 63(1), 22-29.

25) 田中博通, 居波智也, 高根大海(2008): 全国主要河川の流木発生量と河川・流域特性に関する研究, 水工学論文集, 52, 667-672.

26) 助川友斗, 小森大輔(2017): 日本全国のダム貯水池における流木流出量の統計解析, 土木学会論文集G(環境), 73(5), I_55-I_61.

27) 矢野真一郎, 土橋将太, 堂菌俊多, 笠間清伸, 北隆範(2016): 流木発生ポテンシャルの概念に基づく花月川の橋梁における流木災害リスク評価, 土木学会論文集B1(水工学), 72(4), I_289-I_294.

28) 矢野真一郎, 土橋将太, 富田浩平, 堂菌俊多, 笠間清伸(2017): 山国川流域における砂防ダム・貯水ダムの流木災害リスク低減効果と橋梁改修によるリスク変動の検討, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.73, No.4, pp.I_349-I_354.

29) 堂菌俊多, 坂井健太, 小林侑, 仁田原公亮, 柏原佳明, 青木規, 太井正史, 大野勝正, 土橋将太, 矢野真一郎(2017): 河川流域の流木災害リスク評価手法の改善と球磨川中流域への適用, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.73, No.4, pp.I_343-I_348.

30) 矢野真一郎, 土橋将太, 笠間清伸, 竹村大, 富田浩平, 楊東, 津末明義(2018): 気候変動による降水量変化が河川流域の流木災害リスクへ与える影響に関する評価, 土木学会論文集B1(水工学), 74(4), I_1327-I_1332.

31) 津末明義, 楊東, 竹村大, 富田浩平, 矢野真一郎, 土橋将太, 大久保遼太, 笠間清伸(2018): 流木に起因する氾濫による被害の推定に基づく流木災害リスクの評価法の改良, 土木学会論文集B1(水工学), 74(5), I_1051-I_1056.

32) 竹村大, 増田淑稀, 津末明義, 大久保遼太, 富田浩平, 矢野真一郎, 笠間清伸(2018): 石橋に対する流木捕捉実験に基づく星野川における流木災害リスクの評価, 土木学会論文集B1(水工学), 74(5),

I_1057-I_1062.

33) 矢野真一郎, 大久保遼太, 津末明義, 竹村大, 富田浩平, 笠間清伸, 二瓶泰雄(2018): 平成29年7月九州北部豪雨による流木災害の発生要因に関する分析, 土木学会論文集B1 (水工学), 74(5), I_1063-I_1068.

34) 竹村大, 正垣貴大, 津末明義, 大久保遼太, 矢野真一郎, 笠間清伸(2019): 白川流域における流木発生ポテンシャルへの降水量や地震の影響評価, 土木学会論文集B1 (水工学), 75(2), I_175-I_180.

35) Truett, J. Cornfield, J and Kannel, W. (1967): A multivariate analysis of the risk of coronary heart disease in Framingham, *Journal of Chronic Disease*, 20, 511-524.

36) 渋谷一, 香月智, 大隅久, 石川信隆(2011): 根付き流木モデルによる流木捕捉工の捕捉効果に関する実験的検討, 構造工学論文集, 57A, 1087-1094.

37) 齊藤哲, 川崎達郎(2011): スギ一次枝の分枝角度の特徴, 関東森林研究, 62, 99-102.

38) 戎ら(2015): 森林水文学的スギ・ヒノキ樹形モデルの構築, 砂防学会誌, 68(1), 25-31.