

2018 年度（第 54 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 18-A-3

GIS を用いた流域全体の流木災害リスク管理手法

九州大学・教授

矢野真一郎

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2018 年 9 月

GIS を用いた流域全体の流木災害リスク管理手法

Management Method for Driftwoods Disaster Risk in Overall Watershed Area by Using GIS

矢 野 真 一 郎

Shinichiro YANO

1. はじめに

近年の我が国において、記録的豪雨に起因する大規模洪水・土砂災害が多発している。例えば、2012 年の九州北部豪雨（平成 24 年 7 月九州北部豪雨。以下、24 年豪雨）、2013 年の伊豆大島豪雨、2014 年の広島豪雨、2015 年の関東・東北豪雨、2016 年の北海道・東北豪雨、2017 年の九州北部豪雨（平成 29 年 7 月九州北部豪雨。以下、29 年豪雨）、そして記憶に新しい 2018 年 7 月の西日本豪雨と毎年のように発生している。

このような災害においては、氾濫や斜面崩壊などに起因する被害が主要なものである。一方で、斜面崩壊や河岸浸食の発生などに伴い、多くの流木が河道に流出して洪水被害を助長している事例が多数報告されている。これらの流木は、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。さらに、後述するように 29 年豪雨ではこれまでのレベルを大きく超えた流木発生量を記録しており、温暖化の影響による災害外力の変化が流木災害にも顕著な形で現れた可能性がある。

このような状況から、これまで議論されてきた水や土砂の流出管理に加えて、今後は大規模洪水時の流木流出の管理技術の開発が必要であると考えられる。また、2015 年に閣議決定された「気候変動の影響への適応計画」[環境省, 2015] の中でも、気候変動の流木流出への影響評価や適応策の検討の推進が謳われている。既往の流木研究では、災害調査における流木災害の事例を調査したものが多く、橋梁への捕捉メカニズムに関する水理実験や数値実験、砂防施設における流木対策効果の検証などに重点がおかれてきた[例えば、水原, 2016; 長谷川ら, 2015; 香月ら, 2013; 小松, 2009; 末次ら, 2001]。しかし、流域全体での流木災害の危険度などを評価するような方法は存在していなかった。そのような中で、矢野ら(2016)は河川流域全体での流木による災害リスクを評価する手法の開発を始めている。流域からの流木の可能最大発生量を「流木発生ポテンシャル」と定義し、その評価から河川に架かる橋梁における相対的な流木災害リスクを評価することを可能とした。その後、矢野ら(2017)は開発したモデルを用いて、流域内の砂防ダムや貯水ダムが相対的な流木災害リスクに与える影響の評価を試みた。また、矢野ら(2018)は、斜面の地質の情報を加味したモデルの改良を行い、降水規模の変化に応じた流木発生ポテンシャルの変化を表すことを試みている。加えて、相対的な流木災害リスクが大きい橋梁について、流木による河道閉塞が発生した場合に起こる氾濫を数値モデルで解析し、その氾濫状況による被害額を算定することで、リスクとしてより明確な意味での流木災害リスクを評価することも行っている[津末ら, 2018 (投稿中)]。

開発された流木災害リスク評価モデルは、地理情報システム GIS 上でほぼ全ての情報を集約して解析を行えるようにしている。本稿では、これまでの流木災害事例を紹介した後、評価モデルの概略の解説と、その適用例として、山国川、矢部川支川の星野川、筑後川支川の花月川での評価事例を紹介する。なお、本モデルの使用手法の詳細は、著者らの研究グループが作成しているマニュアルがあり、それに詳しいデータ取得方法、整理方法、解析方法などを掲載している[公開を検討中]。また、使用している GIS は ArcGIS(ESRI 社)を用いており、解析にはいくつかのエクステンション機能が必要である。

注) 本稿の図面は白黒では限界があるため、カラー版を <http://www7.civil.kyushu-u.ac.jp/kankyo/> に掲載していますので参照ください。

2. 最近の流木災害事例

2.1 平成 24 年 7 月九州北部豪雨

平成 24 年(2012 年)7 月 3 日, ならびに 7 月 11 日～14 日に九州北部地方を 2 度にわたり襲った梅雨前線性の豪雨は, 特に後者について気象庁より国内で初めて「これまで経験したことのないような大雨」と表現され, 甚大な河川災害を熊本・大分・福岡・佐賀県域にもたらした. 被災した主な河川(水系)は, 矢部川水系, 筑後川水系, 山国川水系, 遠賀川水系, 白川水系, 菊池川水系, 大野川水系, 牛津川水系の一級河川 8 水系の本川・支川であり, その他にも二級河川における被災も見られている. これら河川の流域では多数の地点で既往最大の降水量が観測され, それに伴う既往最大水位が各河川で観測された. 特に, 7 月 14 日に矢部川本川では越流しなかったにもかかわらず, 氾濫危険水位以上の状態が 5 時間以上続いたため, パイピングにより堤防が破堤するという重大な事象が発生した. その他, 矢部川の派川である沖端川(福岡県管理)において 2 カ所, 筑後川支川の花月川(国直轄区間)においても 2 カ所(7 月 3 日)で堤防の決壊が発生した. さらに, 山国川と花月川では, 7 月 3 日豪雨で氾濫し, その応急復旧が終了した直後の 7 月 14 日に再度続けて被災するという地域住民にとっても大変苦しい事態となった. また, 熊本県の阿蘇地方を筆頭に, 土砂災害も多数発生し物的・経済的損失に加えて, 人的被害も 30 人以上と多数に上った.

山腹崩壊や河岸の浸食に伴い発生した多量の流木が, 主に橋梁に集積することにより流下能力を低下させ, 氾濫を助長した箇所が多数の河川で見られた. 山国川や矢部川上流の支川星野川(写真-2.1)などでは, 石橋が多数架かっているが, アーチ状になった橋脚の構造上水位が上がるにつれ幅が狭くなり, 水面付近を流れる流木が引っかかり易い構造により破損する事例が多く見られた. 文化財としての側面もあるこれらの石橋を治水上どのように取り扱うかについては, 昭和 57 年の長崎大水害の際に同様に問題になった長崎市内中島川の眼鏡橋のように幅広



写真-2.1 星野川宮ヶ原橋の流木被災



写真-2.2 玉来川阿蔵新橋の流木被災



写真-2.3 合志川の橋梁の流木被災



写真-2.4 高瀬川の橋梁の流木被災

い議論が求められる。また、大野川水系玉来川（写真-2.2）、菊池川水系合志川（写真-2.3）、筑後川水系高瀬川（写真-2.4）などで流木が桁橋に集積し、氾濫を助長したり、橋桁を落下させたりした。

2.2 平成 29 年 7 月九州北部豪雨

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（写真-2.5、2.6）。

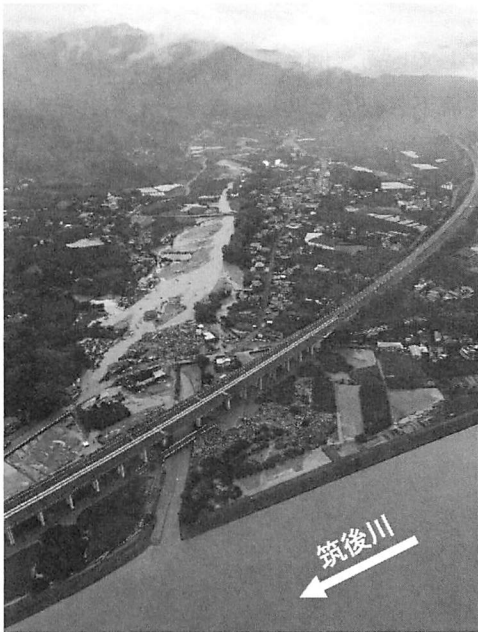


写真-2.5 北川の流木被災



写真-2.6 北川下流域の土砂・流木被災

表-2.1 29 年豪雨による被災河川の流木関連情報

本川	流域面積 (km ²) ¹⁾	推定 流木量 (m ³) ¹⁾	山林から の流木量 (m ³) ¹⁾	流木発生 量中の山 林由来分 の割合 (%)	斜面崩壊 面積 (km ²) ²⁾	崩壊率 (%)	推定発生 土砂量 (万 m ³) ¹⁾	推定堆積 土砂量 (万 m ³) ¹⁾	流木 流出係数 (m ³ /km ²)	山林由来 流木 流出係数 (m ³ /km ²)	平均河 床勾配	地質 ¹⁾	被災形態 ¹⁾
小石原川	87.4	7,009	4,513	64.4			9	3	80	52	0.0124	変成岩	被災小
佐田川	72.7	19,010	10,886	57.3	1.35	1.86	173	182	261	150	0.0096	変成岩	流水
桂川	45.4	28,815	15,066	52.3	0.90	2.38	93	96	635	332	0.0027	変成岩	流水
奈良ヶ谷川	3.8	19,601	13,427	68.5	0.48	12.71	46	37	5,158	3,533	0.0354	変成岩	土砂＋流木
北川	7.0	27,616	18,085	65.5	0.59	8.74	66	67	3,945	2,584	0.0389	花崗閃緑岩	土砂＋流木
寒水川	3.7	22,660	13,244	58.4	0.29	7.73	55	55	6,124	3,579	0.0577	花崗閃緑岩	土砂＋流木
白木谷川	3.9	12,520	8,225	65.7	0.35	9.67	59	50	3,210	2,109	0.0300	花崗閃緑岩	土砂＋流木
赤谷川	20.1	39,230	27,581	70.3	1.36	6.77	290	222	1,952	1,372	0.0148	変成岩、 花崗閃緑岩	土砂＋流木
大肥川	77.6	27,163	16,189	59.6	1.04	1.34	178	103	353	211	0.0108	火山岩	流木
花月川	130.2	6,753	6,108	90.4	0.39	0.30	96	47	52	47	0.0292	火山岩	流水

注：1) 筑後川右岸流域河川・砂防復旧技術検討委員会報告書(2017)より、2) 国土地理院HPより

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。表-2.1 に被災河川毎に流木量や流出係数（流域面積あたりの流木量）などの情報をまとめたものを示す。ここで、流木量は国土交通省の推定値を示している。この推定値は、斜め航空写真から流木発生源を特定し、面積当たりの材積量を掛け合わせることで

算出されている。その際、福岡県人工林収穫予測システム (<http://www.pref.fukuoka.lg.jp/contents/sugi-yosoku.html>)を用いて、樹齢45年を仮定した場合に推定される単位面積当たり材積量 $54,900\text{m}^3/\text{km}^2$ を用いている。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顕著であることが分かる。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ることが分かる。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。

また、国土交通省(2017)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、従来の最大値であった $1,000\text{m}^3/\text{km}^2$ を大きく上回り、最大で $20,000\text{m}^3/\text{km}^2$ 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必要な時期になったと考えられる。

2.3 その他

近年に発生した2回の九州北部豪雨以外にも、流木災害は頻発している。例えば、平成25年10月の台風26号では伊豆大島で大規模な土砂災害が発生し、同時に多量の流木が流下し被害を助長した〔土木学会・地盤工学会・日本応用地質学会・日本地すべり学会平成25年10月台風26号による伊豆大島豪雨災害緊急調査団, 2014〕。平成28年8月の台風10号による災害では、岩手県の二級河川小本川で大量の流木が発生し住民の避難行動などに影響があったことが指摘されている〔平成28年台風第10号水害土木学会・地盤工学会合同調査団, 2017〕。また、一般にはあまり知られていないが、平成28年9月台風16号により鹿児島県鹿屋市を流れる中小河川で、大量の流木が発生し橋梁が6基流失した事例もある〔中西（現鹿屋市長）, 2017〕。このとき、鹿屋市の高隈ダム（大隈湖。集水面積： 38.4km^2 ）で約1万 m^3 、流出係数にして約 $260\text{m}^3/\text{km}^2$ の流木流出があった。これは、29年豪雨の際に記録された寺内ダム（集水面積 51.0km^2 ）における $10,000\text{m}^3$ の流木発生量から得られる流出係数 $196\text{m}^3/\text{km}^2$ と較べても大きい。

3. 流木災害リスクの評価方法

3.1 流木発生ポテンシャルの概念

まず、著者らが一連の研究で提案している「流木発生ポテンシャル」の概念について説明する。ここでは、流域内から発生しうる最大の流木量に相当する量を流木発生ポテンシャルとして定義している。実際に流木が発生する洪水イベントは確率論的な側面が大きく、流木発生量や発生箇所が主に降雨の時空間的パターンに依存するため、発生量を確率量として表現することは非常に困難である。よって、それらの全ての事象を包含すると考えてよい流木発生ポテンシャルを定量的に表現することで、流木災害の相対的なリスク算定や、その結果に伴う橋梁の新規計画または更新にあたっての構造設計等に寄与することを目指したものである。

大規模洪水に起因する流木の河道への供給は、斜面崩壊による森林の倒壊と河畔林・河道内樹林が洪水で崩壊する場合が主要であると考えられる。その他の発生要因としては、貯木場や製材所に保管されている材木の流出や森林の間伐材が大雨の時に流出することが想定されるが、ここでは上述の考え方から、樹木量として大部分を占める斜面崩壊起源のみをまずは対象としている。各洪水イベントの再現などを考える際には、当然、河畔林や河道内樹林の発生量を考慮すべきであるが、ここでは実際の流木発生イベントを再現するものではないため概念的な流木発生ポテンシャルは十分に評価できると考えた。

3.2 流木発生ポテンシャルの評価

本評価法では、使用するデータについての情報整理を地理情報システム GIS(ESRI 社製 ArcGIS10.2 以降を使用)上で行った。まず、橋梁管理者から提供される橋梁台帳より対象河川流域内の全橋梁の位置と構造(桁長、桁高、

橋脚数、径間長など)に関する基本情報を収集する。しかしながら、一般的には一級河川の国直轄区間以外は橋梁台帳では必要な情報を把握できない橋梁が多数存在している。そのため著者らは、レーザー距離計などを用いて対象流域内の全橋梁についての現地踏査を行い、橋梁位置・桁下高・橋長・構造形式・幅員・橋種・橋脚数の項目を整理している。

次に、森林基本書、森林計画書、ならびに森林簿を森林の管理者から収集し、林班・第1樹種林相・第1樹種面積のデータに基づき、林相区分図を作成する。林班とは大字や天然の地形などで面積が50ha程度となるように分割された森林区画の単位を表し、林相とは森林を構成している樹種を表している。現状では、針葉樹・広葉樹・竹林・無立木地・更新困難地の5つに分類している。一例として、花月川の針葉樹について図-3.1に示す。

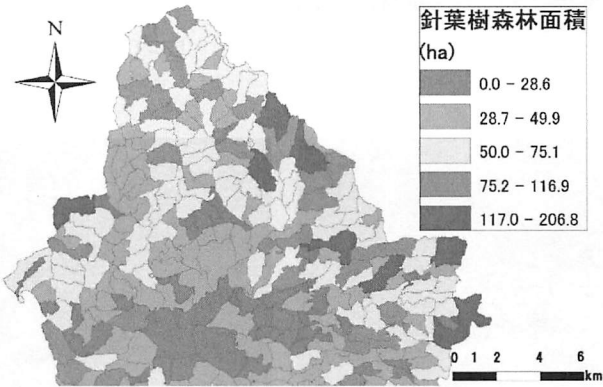


図-3.1 林相区分図の例（花月川周辺、針葉樹）

次に、流域内から流出する流木について想定される代表長さを決定する。流域内の斜面崩壊危険区域から流域を大まかに包含できるように適当な数の斜面を選択し、所有者の許可を得て立ち入り、各斜面での立木の寸法についての現地調査を実施している。測定はレーザー距離計で樹高を、巻き尺やスケールを用いて胸高直径を測定している。流木は河道を流下する過程で、折損等により立木の約1/2～1/3の長さになると経験的に言われている〔林野庁、2012〕。現状では、想定流木長 L_w を得られた立木高さの平均値の半分と設定している。

次に、後述する流木発生可能斜面の選定と、得られた斜面と河道との地形的関係を評価する。ここでは、国土地理院発行の標高データ(10mメッシュ)を用いている。表-3.1に必要なデータを一覧として示す。

表-3.1 流木発生ポテンシャル評価に必要なデータ類

必要なデータ類	想定されるデータ収集元	(例) 花月川のデータ収集元
橋梁台帳	自治体の道路管理部署	日田市土木建築部、大分県土木建築部
森林基本書	自治体の農林水産部	大分県農林水産部林務課
森林計画書	〃	〃
森林簿	〃	〃
標高データ	国土地理院基盤地図情報 DL サービス	

斜面崩壊によって発生した倒木が河道まで到達することにより初めて河川に流出した流木となる。そのため河道まで到達する可能性のある斜面のみを流木発生源として選択する必要がある。「急傾斜地の崩壊による災害の防止に関する法律」によって角度が30°以上の箇所が急傾斜地とされている。そこで、流木になりうる倒木が斜面崩壊により発生する可能性のある斜面を選択するために、標高データをもとにGISによって斜面角度が30°以上の斜面を選定する。図-3.2に一例として花月川の場合を示す。ただし、後述するようにこの選定方法には改善の

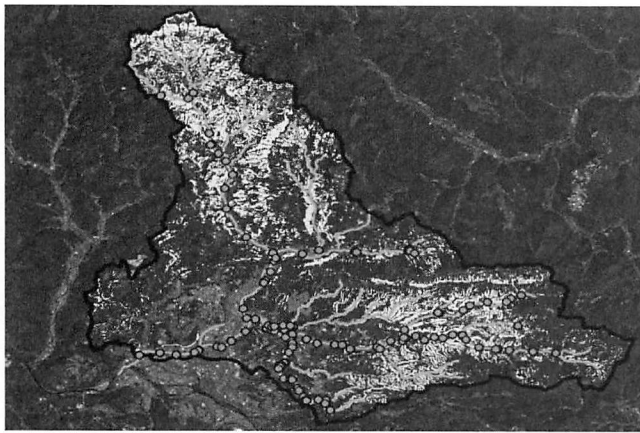


図-3.2 急傾斜地の選定例（花月川、黄色箇所が急斜面、点が橋梁、青線が河道である。）

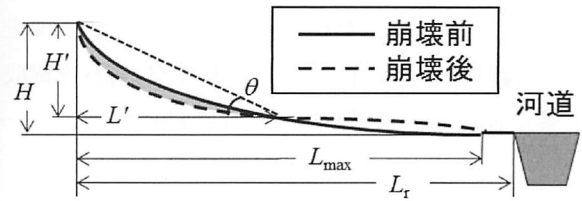


図-3.3 崩壊土砂の最大到達距離と河道までの距離の関係

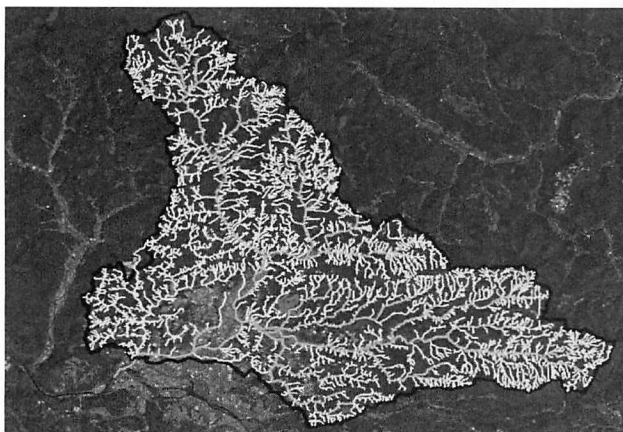


図-3.4 急傾斜地から河道までの最短到達経路の選定例（花月川、黄線が最短到達経路。）

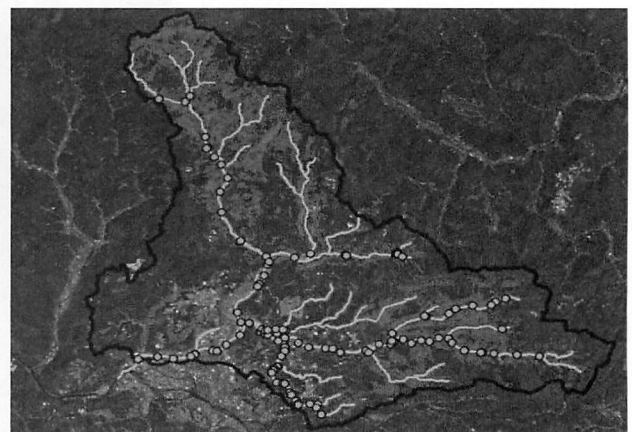


図-3.5 流木到達可能箇所の選定例（花月川、赤いエリアが流木到達可能箇所。）

余地がある。また、流木が発生する斜面は、傾斜角のみで規定されず、斜面の地質構造や地盤構造、降雨の時空間的なパターン、降雨時の地下水の状態、森林の状況（間伐の状態、自然林と人工林の差異、など）等が複合的に影響しあい、決定されることが考えられる。これらの効果を一部取り込んだ評価については、第4章で後述する花月川の事例で紹介したい。

次に、選択された各急傾斜地において河道に流入する最短経路を求め、倒木が河道まで到達できる可能性の有無を評価する必要がある。そこで、図-3.3 に示すような斜面縦断形状から斜面崩壊により発生する土砂が到達できる最大距離 L_{max} を推定する経験式(1)〔森脇, 1987〕を用いて評価を行っている。

$$H / L_{max} = 0.73 \tan \theta - 0.21 \quad (1)$$

ここで、 θ : 傾斜角度($\tan \theta = H/L$)、 H : 斜面高である。各急傾斜地の地形情報に基づき、 θ ならびに H が推定できるため、(1)式から推定した倒木の最大可能到達可能距離 L_{max} と斜面上端からの河道までの水平距離 L_r と比較することで、 $L_{max} > L_r$ ならば発生倒木が河道へ到達して流木化する可能性があるかと判定している。

実際の複雑な地形上では最大可能到達可能距離 L_{max} の算定は、若干複雑な計算を要する。ここでは、以下の要領で ArcGIS のエクステンション機能を組み合わせて算出している。まず、標高データから単位均一降雨時に各セルを通過する累積流量を ArcGIS の累積流量計算ツールにより計算することで、峰や谷などの地形を判断する。得られた各セルの累積流量の逆数について、峰に相当する箇所が非常に大きい値を持つように設定し、谷筋と考えられ

る個所には0を与える操作を ArcGIS の再分類ツールにより行う。そして、各急傾斜地下端から河道までの最短到達経路、すなわち、図-3.3 における L_r-L' をとる経路を ArcGIS のコストパスツールにより算定する。このツールは斜面から河道までの到達可能な経路の中で通過するセル値の合計が最小になる経路を選択できるため、峰を超えずに河道まで流れる最短到達経路を決定できることになる。一例として花月川の場合について、図-3.4 に示す。得られた各急傾斜地から河道までの最短到達経路、標高データから得られる各急斜面の平均角度 θ 、ならびに得られた最短到達経路と河道との合流地点までの標高差 H が推定できるため、(1)式から倒木の最大可能到達可能距離 L_{max} が推定でき、各急傾斜地から倒木（全倒木が最下点に到達すると仮定）が河道に到達するか判定できることになる。よって、河道に倒木が到達できないと判断された斜面は流木の発生源から削除される。一例として花月川の場合の流木到達可能箇所の分布を図-3.5 に示す。

河道上の任意地点における流木発生ポテンシャルは、その地点の集水域のうち上述の方法で判定された斜面崩壊による倒木が河道に到達できる急傾斜地から生産されると考えられる。本研究では、河道上の橋梁 i 地点における流木発生ポテンシャル $V_i(m^3)$ について、「土石流・流木対策の手引き」[林野庁, 2012] で用いられた石川の経験式を適用して次式で評価している。

$$V_i = \sum_k \beta_k A_{ki} \quad (2)$$

ここで、 β_k : k 種の森林における流木流出係数(m^3/km^2)、 A_{ki} : 河道上の i 地点（ここでは各橋梁位置となる）における集水面積中の k 種の林相分の流木発生可能森林面積(km^2)である。 β_k について、矢野ら(2017)までは、林野庁(2012)より針葉樹は $1000 m^3/km^2$ 、広葉樹は $100 m^3/km^2$ 、竹林は平均値である $500 m^3/km^2$ 、無立木地と更新困難地は $0 m^3/km^2$ としていた。本評価式は、過去に生じた土砂災害から得られた流木量データをもとにして、樹種ごとの溪流単位での最大の流木発生量を表現したと解釈できる経験式である。よって、本研究で検討している流木発生ポテンシャルの評価に適した経験式といえる。ただし、29 年豪雨によりこの経験式から推定される以上の流木が発生したことから、流木流出係数 β_k は矢野ら(2018)により以下の通りに再検討された

29 年豪雨では、福岡県朝倉市を流れる筑後川支川の赤谷川（福岡県管理）において、 $20,000m^3/km^2$ という最大値が記録された [国土交通省, 2017]。この値は流出した流木の大半がスギの人工林からの流出であった事実から、針葉樹を想定していると考えてよい。よって、過去の経験と較べて最大 20 倍の流木が流出した極端現象が生じたことが理解される。この事実から鑑みて、これまで使用していた流出係数 $1,000m^3/km^2$ が可能最大流出量を評価するには小さすぎることが理解できた。本モデルでは、流木発生源になりうる崩壊可能斜面の面積に流出係数をかけることで評価しているので、その斜面上に存在している立木の単位面積あたり材積量を流出係数にすることで、当初の考え方に沿った可能最大流木流出量に相当する流木発生ポテンシャルが評価できるものと考えられる。よって、ここではその考えに則り、29 年豪雨において国土交通省が流木量の推定に使用した福岡県人工林収穫予測システム (<http://www.pref.fukuoka.lg.jp/contents/sugi-yosoku.html>) を用いて、戦後の植林から 40～50 年経っていることから樹齢 45 年を仮定した場合に推定される単位面積当たり材積量 $54,900m^3/km^2$ を流出係数として用いて評価することにした。この考えに基づくと、過去の評価 [矢野ら, 2016; 2017] における流木発生ポテンシャルは、29 年豪雨より前の実績での流木発生量（実際に発生すると想定される流木量レベルであり、ここで求めたい可能最大流木発生量ではない）に相当したものと解釈できる。ゆえに、今後はこの流出係数を元にした算定が望ましいと考えられる。また、流域が異なれば、当然ながら流木流出係数は異なることが想定されるため、より合理的な算定方法としては、森林内の単位面積あたり立木材積量を算定することが考えられる。これについては、広域な流域を対象にする場合には LP データの活用 [林野庁, 2016] が想定されるが、通常は高密度な LP データ（例えば、測定密度：4 点/ m^2 ）が必要とされている。堂蘭ら(2017)により既存 LP データ（測定密度：1 点/ m^2 ）を活用した推定方法の提案がされているので参照されたい。

3.3 河川橋梁における相対的な流木災害リスクの評価

流木が発生し河道を流下する際に、通常は河川の横断構造物のうち橋梁とダムで流木は集積して捕捉される。災害リスクを評価する際には、一般的には災害により発生する経済的、もしくは人間的な被害の大小で議論されるが、ここでは橋梁地点における流木発生ポテンシャルの算定結果を用いて、各橋梁の構造に起因する流木の捕捉量、すなわち想定される最大の捕捉量に相当する量で比較することを試みる。無論、実際に発生する流木災害では流出する可能性のある流木が全て流出することではなく、流木発生ポテンシャルのうちの一部が流出する。よって、ここで評価しているリスクは、当該橋梁に集積する確率に相当する評価を行っていると解釈できる。この評価により各橋梁の構造とその地点における可能な流木発生最大量を考慮した“相対的な”流木災害の可能性を比較できることになる。ここでは、各橋梁における相対的な流木災害リスクを、その上流域からの流木発生ポテンシャルから上流の全ての橋梁により捕捉される量を差し引いた分のうち、対象とする橋梁へ流下し捕捉される流木量として表現した漸化式(3)を用いて評価する。

$$\tilde{V}_i = (V_i - \tilde{V}_{i-1} - \tilde{V}_{i-2} \cdots \tilde{V}_1) \alpha_i = \alpha_i (V_i - \sum_{k=1}^{i-1} \tilde{V}_k) \quad (3)$$

ここで、 $\tilde{V}_i$ ：流木発生ポテンシャルから得られる橋梁 i における流木捕捉量、すなわち相対的な流木災害リスク、 α_i ：橋梁 i の構造から推定した流木捕捉率である。ただし、式中の i は上流から下流に向かって数字が増えるように付ける橋梁の番号である。また、河川が合流する地点では、両方の影響を合算する。分流する場合については、水理実験や数値モデル等で流木の分派比を求めるのが合理的ではあるが、通常、関心のある橋梁に対して影響が大きい場合以外はそのような方法はとられないため、ここでは、(i) 河川計画上の分派比が既知の場合はそれを流木分派比として適用する、(ii) 河川幅に比例させて流木分派比を設定する、などの便宜的な方法をとっている。漸化式(3)を導入したことで、流木に対して安全性の高い橋梁への改修が行われた場合などに、下流に流木災害リスクが遷移する状況も評価できる。

流木捕捉率 α_i は、通常の桁橋を想定して最小径間長 S_i (橋脚間スパン長の最小のもの) に対する想定される流木長 L_w の比率 (以下、相対径間長) が流木の捕捉現象について支配的な要因となると仮定し、次式で評価している。

$$\alpha_i = \frac{L_w}{S_i} \times \frac{1}{k} \quad (4)$$

ここで、 k ：橋梁における流木の集積しにくさを表す係数とする。なお、 k^{-1} を係数にすることもできるが、係数を整数値で表現するために式(4)の表現としている。

流木捕捉率 α_i には相対径間長 S_i/L_w 以外のパラメータ、例えば出水時の橋桁のクリアランス、橋梁や橋脚の詳細な構造、流木の形状 (枝や根の有無やそれらの形状など)、ならびに河川の水理条件 (曲率、勾配、流速など) なども関係すると考えられるが、現段階でこれらを定量化して取り扱うことを可能とする包括的な知見がないので、それらの不確定要素は係数 k に含まれると考えて評価をしている。なお、現状では対象河川において全橋梁で k は一定と仮定している。また、流木捕捉率 α_i は、原理的に 0 から 1 の間の値となる係数である、すなわち、100%以上の捕捉はあり得ないことから、必然的に流域内の L_w/S_i の最大値から決定される k の下限値が設定される。一例として、花月川全橋梁について算出した相対径間長の逆数の分布を図-3.6 に示す。この場合、 L_w/S_i の最大値が 4 程度であることから、花月川流域では k は 4 以上とする必要があることになる。

k を用いた式(4)の表現は流木が橋梁に捕捉される現象をかなり単純化した考え方になっており、この式で全てを

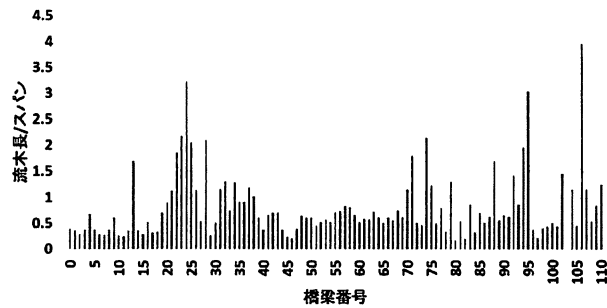


図-3.6 相対径間長の逆数(L_m/S_j)の分布例 (花月川)

表現できるとは考えられない。流木が集積して被災する橋梁の多くは、実際には古くて小さい桁橋が大半を占めている。このような橋梁は、昭和 51(1976)年に制定された河川管理施設等構造令（以下、構造令）に則っていない古いものが多い。そのような橋梁は、橋脚の数が多くクリアランス（計画高水位から橋桁下面までの高さ）が小さいものとなっている。また、構造令制定以後であっても、小河川の特例第七十六条として「計画高水流量が一秒間につき百立方メートル未満の小河川に設ける河川管理施設等については、国土交通省令で定めるところにより、この政令の規定によらないものとするができる。」という例外規定があり、小河川では流木に対して危険な橋梁が継続して建設されている可能性もある。

この事情を考慮すると、式(4)による表現は不完全ながらも、 L_m/S_j の大小で流木の捕捉されやすさの傾向はある程度表現できていると考えられる。過去の研究 [矢野ら, 2016; 2017; 竹村ら, 2017] において、 k の値を種々与えて相対的に流木災害リスクを評価し、橋梁の中で危険性の高いものを抽出することを行っていた。花月川、山国川、白川などで本モデルを適用した際に、相対的な流木災害リスクの高い橋梁では、実際の水害時に流木被害を受けていることが多く、傾向をうまく表現できていたのはそのためであると考えられる。一方、小松ら(2009)にまとめられている国土技術政策総合研究所が実施した桁橋への流木集積に関する水理実験結果を参照すると、流木長径間長比 L_m/S_j が 1 になる場合の流木捕捉率の実験結果の平均値から k を逆算した結果、 $1.2 < k < 10$ の範囲で示された [矢野ら, 2018]。条件 $\alpha_i \leq 1$ を満足させるためには、小さい値は採用せず、 $k=10$ 程度を採用することが望ましいと考えられる。

実際の河川においては、河道で流木を捕捉する可能性のある構造物として、貯水ダム、砂防ダム、沈下橋、石橋などが存在する場合がある。これらの取り扱いは、現状では以下のように行っている。まず、貯水ダムについては、ダム湖内に網場が設置されて捕捉されることが前提になるので、流木捕捉率 α_i は 1（100%捕捉される）としている [矢野ら, 2017]。ただし、実際の洪水では流木が網場を乗り越えたり、網場が破損したりして流木が流下する事態も想定され、あわせて発電用の流れ込み式ダムなど網場がない場合の取り扱いにも検討の余地がある。

次に、砂防ダムについては、スリットを持つ透過型とコンクリート壁で構成される非透過型で捕捉率が異なると想定される。一般的に砂防分野では、透過型は 2～3 割、非透過型は 1 割の流木捕捉性能と考えられているが、本モデルでの設定には検討の余地がある。また、砂防ダムの堆砂状況にも左右されることになるが、現状でどのような堆砂状況となっているか整理されていない場合が多く、正確な状況の管理が必要である。

最後に、桁橋以外の構造の橋梁について考える。現在では建造が行われていない沈下橋（沈み橋）については、流木が発生する規模の洪水では水位が HWL に近い状態が想定されることと、流木化しやすい針葉樹は一般的に水より比重が軽い [小松, 2009] ことから、河床付近に存在する沈下橋には流木は集積しにくい。よって、 α_i は 0 と置くのが適当であると考えている。

石橋については、桁下がアーチ構造であるため、水位が上昇するにつれて水面幅が減少し、流木長に対して径間長が減少していく。そのため流木が集積しやすい構造であるといえる。実際に、24 年水害では山国川の耶馬溪橋、矢部川水系星野川の宮ヶ原橋で流木集積が発生し、後者ではせき上げによる氾濫が発生して被害が拡大した。矢野ら(2017)では、山国川に 3 基ある石橋について評価する際に、式(4)の最小径間長 S_j を橋脚間のアーチ構造より下の

一定幅部分 S_{max} から、代表幅としてその半幅 $0.5S_{max}$ を S_f として採用していた。しかし、これには明確な根拠がなかった。そこで、竹村ら(2018, 投稿中)では、石橋の模型を用いた流木捕捉に関する水理実験を行い、式(4)の S_f として適当な長さスケールを求めた。その結果、 $S_f=0.47S_{max}$ が適当であると判断された。よって、結果的に矢野ら(2017)で仮定した半幅が適当であったことになる。

4. 流木災害リスクの評価事例

ここでは、第3章で紹介した河川流域での相対的流木災害リスクの評価方法の適用例として、山国川、矢部川支川の星野川、ならびに筑後川支川の花月川の3河川について紹介する。その他、白川 [竹村ら, 2017], 球磨川 [堂蘭ら, 2017], 筑後川支川の赤谷川と奈良ヶ谷川 [矢野ら, 2018 (投稿中)], 鳥取県管理河川 [2017 年度に実施された鳥取県の調査] での適用実績があるが、紙幅の関係もあるので詳細は参考文献に譲る。

4.1 山国川の事例

a) 24 年豪雨における山国川の被災

平成 24 年 7 月九州北部豪雨では、大分県中津市を流れる山国川において、7 月 3 日の既往最大出水に続いて、約 10 日後の 7 月 14 日に再度同規模の大出水（既往 2 位水位（下唐原））に見舞われており、河川施設の被災における応急復旧体制のあり方に一石を投じることとなった [土木学会九州北部豪雨災害調査団, 2013]。また、大規模な洪水時によく見られる流木の発生が起こった。

山国川には、歴史的文化財としての価値が高い石橋が 3 橋ある。このうち、最下流の耶馬溪橋(15.5k)とその上流に位置する羅漢寺橋(17.0k)では流木の集積が起こった。耶馬溪橋ではせき上げにより右岸側の樋田地区と左岸側の曾木地区が越水により浸水し、両橋で欄干が破壊する被害が発生した [九州地方整備局山国川河川事務所, 2015]。また、最上流の馬溪橋(21.3k)では、流木がその上流に位置する津民橋(25.0k)に大量に集積したため流木被害は免れたが、石橋の特長である橋脚の多さやアーチ形状による桁下空間の狭さなどの通水能力の低さに起因するせき上げが生じ、両出水で両岸の平田・戸原地区に浸水（床上 50 戸、床下 24 戸）が生じた。河川管理者の九州地方整備局は馬溪橋の撤去を検討したものの、文化庁から文化財としての保護を要請されたことや、地元自治体から存置が求められた。そこで、山国川治水対策検討委員会を設置して議論した結果、橋梁の上下流の河川改修と橋梁根付け部の改修などにより、流下能力を確保する対策が取られることとなった。しかしながら、上流の津民橋は上部構造が破壊されたことから撤去されることが決まっており、その下流では流木流下によるリスクが上昇することが見込まれる。よって、山国川流域における石橋などの流木災害リスク評価が求められた。

さらに、同水害では上流の耶馬溪ダムに流木が堆積したが、このことは貯水式の洪水調整ダムが水や土砂の流下を調整するのみでなく、流木災害リスクを軽減する効果を持つことを意味している。よって、ダムによる流木災害リスク低減効果を評価することには重要な意味があると考えてよい。加えて、もはや地球温暖化は防ぎようがないことが明らかになり [IPCC, 2013], 適応策への関心が高まっているが、社会資本整備審議会の答申 [社会資本整備審議会, 2015] にもあるように、流木災害については評価手法などについて研究の推進が求められている。そこで、流木災害に対する適応策メニューとして考えられる砂防ダムの適切な配置と運用がどの程度のリスク低減効果があるのかを評価することも重要である。このような背景から、山国川を対象に橋梁改修による流木災害リスクの変化、砂防ダムならびに貯水ダムの流木災害リスク低減効果を評価することを試みた。

b) 山国川における相対的流木災害リスクの評価

(1) 山国川流域の概要

山国川は大分県中津市を流れる一級河川であり、総延長 56km、流域面積 540km² である。今回、石橋群のうち最下流に位置する耶馬溪橋より上流の区間を対象領域とした。よって、対象流域の流域面積は 435.7km²、本川の延長は 34.5km である (図-4.1 参照)。本川上には文化的価値の高い 3 つの石橋が架かっている。それぞれ、上流から、



図-4.1 山国川の評価対象流域（赤線）と橋梁の分布

馬溪橋（1923 年築造，5 連石造アーチ橋，橋長 81.8m，中津市指定有形文化財），羅漢寺橋（1920 年築造，3 連石造アーチ橋，橋長 91m，県指定有形文化財），ならびに耶馬溪橋（1923 年築造，8 連石造アーチ橋（日本唯一），橋長 115.6m（石造アーチ橋として日本最長），県指定有形文化財）である。

(2) 流木災害リスク評価の概要

山国川流域内の全ての橋梁（図-4.1，計 456 箇所）の桁下高・橋長・構造形式・橋脚数の項目について，橋梁台帳と現地踏査から得た情報を整理し，森林基本書，森林計画書，ならびに森林簿から，林班・第 1 樹種林相・第 1 樹種面積に基づき流域内での林相区分図を作成した．対象流域を大まかに包含するように急斜面から 12 箇所の斜面を選択し，それらの森林で立木の寸法（樹高と胸高幹径）についての現地調査を実施し，想定流木長 L_w として，立木高さの平均値の半分となる 10.43m を設定した．

砂防ダムについては，中津市土木事務所，大分県北部振興局から収集した位置情報を整理した．建設済みの砂防ダム（計 634 基）の分布を図-4.2 に示す．流木発生ポテンシャルの算定において，流木発生源となる斜面の選択には，従来の方と法と同様に傾斜角度が 30° 以上の箇所を選択した．

式(4)中の定数 k については，実際の出水時の橋梁地点における総流木流出量とその橋梁へ捕捉された流木量の



図-4.2 砂防ダムの分布

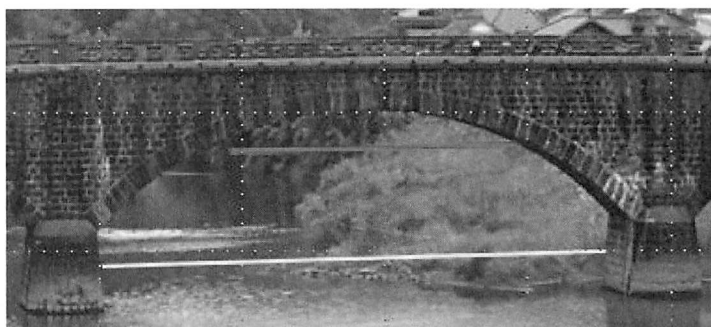


写真-4.1 羅漢寺橋のアーチ構造

両方のデータが十分に揃っていれば決定できると考えられるが、そのようなデータは不十分であり現状では決定できない。そこで、ここでは $k=200$ を設定して用いている。この値から推定される流木捕捉量は、あくまで相対値として評価されているので、橋梁間の流木捕捉傾向を比較するために用いていると解釈すべきである。

山国川に多数存在する沈下橋については、出水時には流木を捕捉しないと考えて $\alpha_i = 0$ と仮定した。また、対象流域内には耶馬溪ダムがあるが、貯水式のダムであるため流木は全て網場で捕捉されると仮定し $\alpha_i = 1$ とした。石橋については、写真-4.1 に示す羅漢寺橋のアーチ構造のように平水時には黄線で示す幅が径間長となるが、流木が流出するような規模の大きい出水時には水位が上昇するため、例えば赤線で示す様な幅が水面幅となる。ここでは、(4)式中の S_i を径間長（黄線）の半分とした。

山国川に多数存在している砂防ダムの流木捕捉率も設定する必要がある。ここでは試行的に砂防ダムの流木捕捉率を一律 0.5 と設定した。また、砂防ダムの流木捕捉が橋梁での流木災害リスクへどのように影響するかを把握するために、砂防ダムが満砂状態などで全く機能しないと想定した捕捉率 0 から、完全に捕捉できる場合の 1 まで変化させた場合の評価を行った。また、全砂防ダムが一定の流木捕捉率を持つ、すなわち、同じ堆砂状態を示しているという設定は現実的でないことから、ランダムに捕捉率を変化させて影響を評価することも併せて試みた。ここでは、全砂防ダムに与える流木捕捉率の平均値をパラメータとして設定して一律の場合と比較するため、確率密度関数としてベータ関数を用いた乱数(0~1)を与えた。平均値が 0.1 刻みで 0.1 から 0.9 まで変化させ、それぞれ 10 回の試行を行った。

(3) 評価結果

まず、対象流域末端になる耶馬溪橋地点における流木発生ポテンシャルは、 $53,695\text{m}^3$ と評価された。この評価では耶馬溪ダムの流木捕捉効果を考慮しているため、ダムの集水域からの発生分は含まれていない。次に、得られた流木発生ポテンシャルから各橋梁における相対的な流木災害リスクとみなせる流木捕捉量を評価した。図-4.3 に山国川本川の各橋梁に捕捉される流木量の分布 ($k=200$ の場合)、すなわち相対的な流木災害リスクの分布を示す。24 年豪雨で流木が集積した耶馬溪橋において相対的なリスクが大きく評価された。また、同洪水で流木による欄干等が破壊された津民橋も比較的大きい値を示している。

24 年豪雨においては、津民橋がフィルターとなり石橋である馬溪橋への流木の流下を防いだ形になっていた。また、耶馬溪橋へ流木が捕捉され、その上流ではあまり見られなかったのは、耶馬溪橋上流から流入する支川（跡田川）起源の流木が流出したためと推測される。ここでは、最大可能流木発生量に相当する流木発生ポテンシャルに基づき評価したため、定性的な評価にとどまるが、流木発生源・発生量と橋梁集積量のデータセットから定量的な評価が可能となるので、今後の災害において詳細に記録されることが望まれる。

次に、砂防ダムによる流木災害リスク低減効果について評価を試みた。まず、砂防ダムの流木補足率を一律に

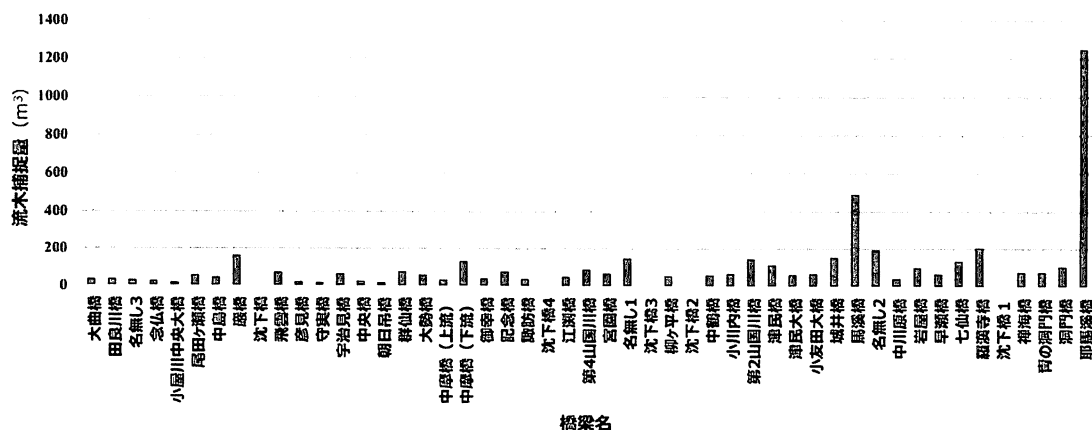


図-4.3 山国川本川での相対的流木災害リスクの評価結果
($k=200$ の場合、左から右に向けて流下方向を示す。)

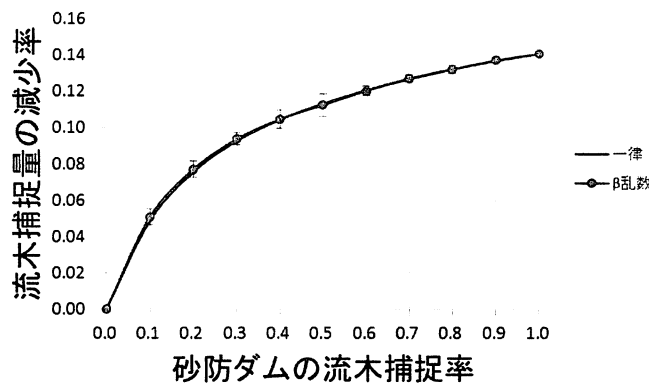


図-4.4 砂防ダムの平均流木捕捉率と捕捉量減少率の関係

与えた場合について検討した。図-4.4 に全ての砂防ダムが無いとした場合に対する山国川本川上の全橋梁での総流木捕捉量の減少率と砂防ダムの流木捕捉率との関係を示す。両者の関係は線形的ではなく、流木捕捉率の小さい範囲で減少率は急激に上昇し、その後直線的に最大値の14.1%に向かうことが分かる。このことから、砂防ダムの捕捉率が1に近い状態でない、すなわち各砂防ダムが完全に流木を捕捉できなくても、十分な流木リスク低減効果が発揮できることが分かる。また、砂防ダムの流木捕捉率が2割($\alpha_i=0.2$)から3割($\alpha_i=0.3$)あれば、それぞれ減少率は7.6%と9.3%を示しており、最大限効果を発揮した場合($\alpha_i=0.141$)の54%と66%の削減効果を持つことが分かった。このことは、今後砂防ダムの機能を維持していく上で重要な指針を与えられ考える。

次に、砂防ダムの流木捕捉率を乱数で与えた場合について検討した。図-4.4 に砂防ダムの流木平均捕捉率と捕捉流木量の減少率との関係を重ねて示す。バーは10回の試行における標準偏差を表している。捕捉率との関係は、一律な場合と概ね同じであることが分かる。一方、偏差は平均捕捉率が小さい時の方が大きく、平均捕捉率が大きくなると平均値へ収束していることが分かる。これは、平均捕捉率が小さい場合に、直列的に砂防ダムが配置された箇所でも一つでも大きな捕捉率が設定された場合に低減効果が発揮されるが、平均捕捉率が大きいとその効果が薄まるためと考えられる。

最後に、貯水式ダムである耶馬溪ダムがもつ山国川流域への流木災害リスク低減効果を評価した。耶馬溪ダムは総貯水量2,330万 m^3 、集水面積89 km^2 の重力式コンクリートダムである。24年豪雨では、7月3日に2,200 m^3 、7月14日に500 m^3 の流木等が捕捉されている。また、1993年(平成5年)の台風13号により約7,000 m^3 の流木が捕捉された実績がある[九州地方整備局山国川河川事務所,2015]。このように、貯水式ダムでは洪水調整を行うだけでなく、流木の流出抑制効果もあることが理解できる。

耶馬溪ダムの集水域からの流木発生ポテンシャルを評価したところ、8,815 m^3 と見積もられた。前述の耶馬溪橋地点での値53,695 m^3 と足し合わせると、62,510 m^3 となる。ゆえに、ダムによる流木カット効果は約14%ということになる。対象流域面積435.7 km^2 に対してダムの集水面積89 km^2 は約20.4%と同レベルであったことから、流木カットの観点からも有効な位置にダムがあったことが分かる。このような検討は他のダムでも容易に可能であることから、ダムの機能として流木流出抑制効果を評価することを今後は行うべきであろう。

4.2 星野川の事例

a) 24年豪雨における矢部川水系の被災

矢部川は福岡県八女市矢部村を源流とし、みやま市、筑後市、柳川市に流下する、流域面積647 km^2 、幹川流路延長61 km 、計画流量3,700 m^3/s (船小屋)の一級河川である。2012年7月14日9時には、船小屋水位観測所において観測史上最高の水位9.76 m を、派川の沖端川でも新村橋水位観測所において観測史上最高の6.29 m を記録した。本川1箇所と沖端川2箇所の計3箇所で堤防が決壊し、流域のうち柳川市では市内の1/3が浸水するなどの甚



写真-4.2 宮ヶ原橋 (2017年撮影。橋桁上部は工事中。)

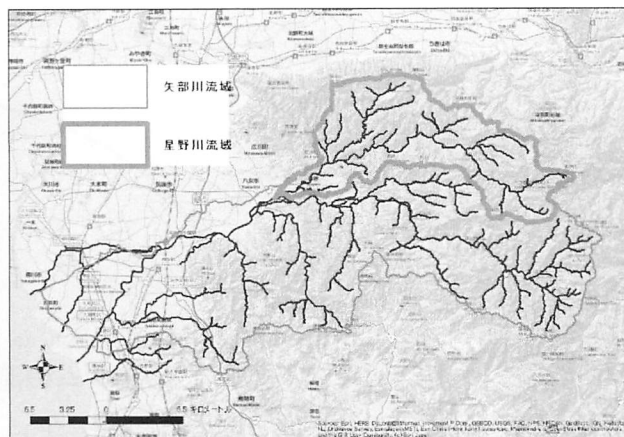


図-4.5 星野川流域

大な被害が発生した。柳川市やみやま市等では、堤防決壊による外水はん濫や内水はん濫等により、浸水面積 2,579ha、床上浸水 697 戸、床下浸水 1111 戸にまで被害が達した。

また、八女市を流れる支川の星野川においては、流木が洪水流と共に流下し石橋である宮ヶ原橋(写真-4.2)へ集積したことで氾濫被害が助長される事態が発生した[右田・西尾,2016]。星野川流域には、明治時代から大正時代にかけて架けられた、宮ヶ原橋を代表とする 13 基の歴史的な石橋が存在している。石橋の桁下構造は一般的にアーチ形状を有しており、流木が発生する規模の洪水においては水位が HWL 近くまで達することが多いため、橋脚下部の径間長と比べて水面幅が狭まるアーチ上部に水位が到達すると考えられる。そのため、河川へ流出した流木が宮ヶ原橋へ引っ掛かり、流れをせき止めたことが越水による氾濫を発生させた。

b) 星野川における相対的流木災害リスクの評価

(1) 対象流域について

調査対象は図-4.5 の青線で示した矢部川支川の星野川流域、ならびに流域内の全橋梁である。流域面積は 143km² (GIS で推定)、幹川延長は 28.5km である。平成 26 年に制定された河川整備計画における計画流量は矢部川合流地点において 1,000m³/s である。流域は歴史的な石橋を多く有しており、石橋が多数存在することによる流木集積への影響を把握するため、調査対象流域として選定した。

(2) 流木災害リスク評価の概要

星野川流域の森林の状況について、福岡県農林水産部森林整備課から提供された森林簿から得た林班・森林の種類・データのに基づき、林相区分図を作成した。ここでは、針葉樹・広葉樹・竹林・その他の 4 種類に分類した。

橋梁データは 2017 年 10 月に現地踏査して測定したものをを用いた。各橋梁の諸元はレーザー距離計などを用いて計測した。調査項目は、橋桁長・橋脚数・橋桁高・径間長とした。星野川流域全体における橋梁数は 222 基であり、そのうち石橋は 13 基であった。橋梁位置は図-4.6 に示したとおりである。

現地踏査から得られた流域内の代表的な森林において立木高さを測定し、川を流下した際に想定される代表的な流木長を推定した。図-4.7 にその調査の際のサンプル採取点を示す。推定される流木長には立木高さの 1/2 を用いており、サンプルの平均値が 22.71m であったことから、想定流木長を $L_w=11.35\text{m}$ と設定した。

林相区分図を基に河道の各地点での集水面積から流木発生ポテンシャルを推定した。推定は流木発生源となる斜面面積に斜面上の樹木の幹体積密度を掛け合わせることで行った。樹木の幹体積密度(単位面積あたりの樹木体積に相当)について、29 年豪雨において国土交通省が流木量推定に使用した 54,900m³/km²を適用した。広葉樹については、過去の経験値である針葉樹と広葉樹の流木流出率比から、1/10 の 5,490 m³/km²を仮定した。また、星野川流域内では、竹林の比率が約 1 割しかないため、竹林については考慮していない。

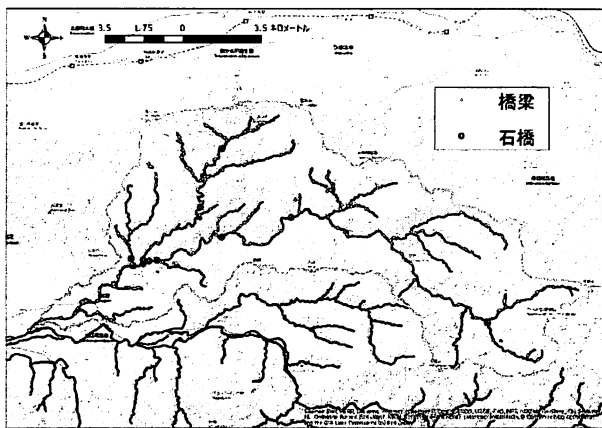


図-4.6 星野川流域の橋梁位置

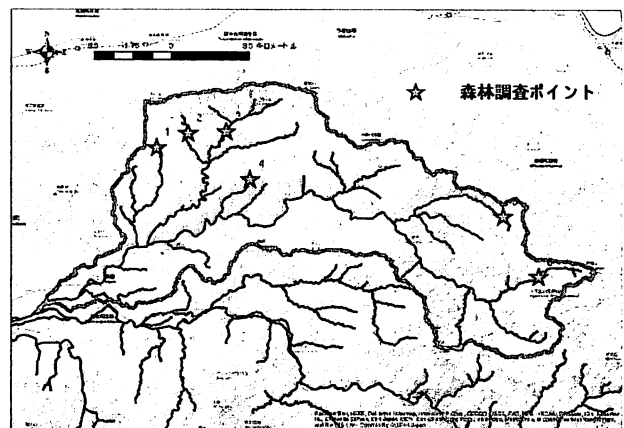


図-4.7 星野川流域での森林調査地点

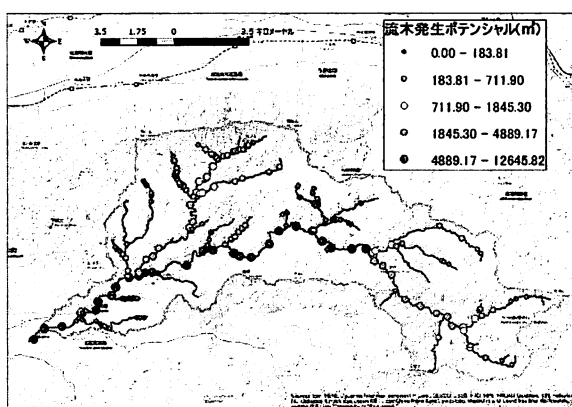


図-4.8 星野川流域の流木発生ポテンシャルの分布

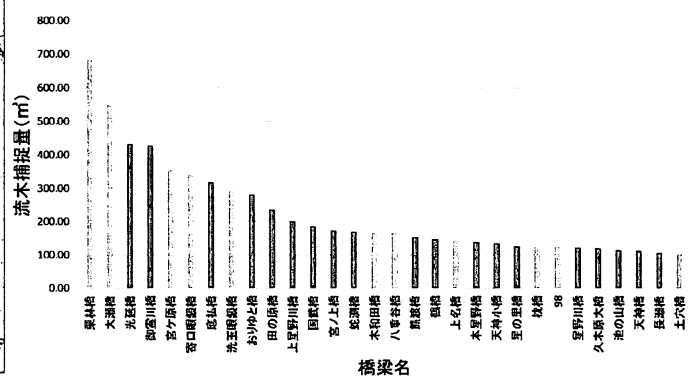


図-4.9 星野川での相対的流木災害リスク
(上位30橋、黄色は石橋。)

星野川流域における橋梁位置での流木発生ポテンシャルの評価結果を図-4.8に示す。当然ながら、集水面積の狭い支川上流では小さく、支川の合流を繰り返して下流にいくにつれて大きくなることが分かる。星野川本川が矢部川本川に合流する最下流地点に位置する星野川橋における値が約 12,600m³であった。この値は29年豪雨において星野川と較べて流域面積の小さい中小河川において実際に発生した流木量と比べて小さいものであった。例えば、最も流域が小さい寒水川（流域面積 3.7km²）で 22,600m³、すなわち単位流域面積あたりの流木発生量は 6,108m³/km²となっていた[筑後川右岸流域河川・砂防復旧検討委員会, 2017]。星野川での流木発生ポテンシャルから得た同じ量が 88.1 m³/km²であり、このように星野川での評価結果が過小評価となったのは、崩壊する可能性のある斜面について傾斜角を 30° 以上としたためと考えられる。29年豪雨では、傾斜角 10° 程度の緩やかな勾配の斜面でも崩壊が発生していた。可能最大流木発生量に相当する流木発生ポテンシャルの評価においては、10° 程度の傾斜角まで潜在的流木発生源として考慮すべきであることを示唆している。

式(4)において、 $k=10$ を与えた場合の各橋梁における流木捕捉量について、上位30橋をピックアップして図-4.9に降順で示す。星野川流域の全橋梁222基に対して、石橋は13基であるが、その多くはリスクの高い橋梁に属していた。リスクの高い上位30基中に11基の石橋が入った。特に、栗林橋、大瀬橋、宮ヶ原橋の3基は上位1, 2, 5位となっており、24年豪雨のような既往災害に見られたように、石橋が高い流木災害リスクを有していることが分かる。リスクの高い橋梁のうち、宮ヶ原橋は24年豪雨において実際に流木で被災しており、流木集積の傾向性については定性的に正しい評価ができていると判断される。

24年水害で被災した宮ヶ原橋では、被災後に架け替えの議論が起こったが、石橋の文化財的な価値や観光資源としての利用を鑑みて、存置されることとなった[右田・西尾, 2016]。洪水の軽減のために橋の右岸側に分水路が

建設され、洪水時にはそちらへ流す設計となっている。しかし、流木の流下が分水路側に起こるかどうかの検討まではされておらず、流木の直進性を考えると本川上の宮ヶ原橋に多くが流下する可能性も否定できない。

石橋に起因して氾濫が発生し、掛け替えが議論された事例としては、1982 年の長崎大水害における中島川の眼鏡橋（国重要文化財）〔長崎県，2018〕や平成 24 年九州北部豪雨での山国川の馬溪橋（中津市指定有形文化財）〔矢野ら，2017〕の事例がある。馬溪橋の上流では流木により桁橋の津民橋が損傷し、その後撤去された。いずれも、石橋の文化財や観光資源としての価値を優先し、眼鏡橋では両岸に分水路（暗渠バイパス）を、馬溪橋では橋梁前後の河道掘削や橋梁の断面の一部改良などで流下能力を上げる工夫がされている。このように石橋には流木リスクや氾濫リスクが存在しているが、実際に洪水氾濫被害が発生しても撤去せずに存置して改修することが多い。しかし、星野川宮ヶ原橋や山国川馬溪橋のように流木リスクが顕著な場合には、流水のみならず流木災害リスクの評価まで行う改修の検討が必要と考えられ、本評価法がそのような事例において活用されることが望まれる。

4.3 花月川の事例

a) 24 年豪雨における花月川の被災

花月川は大分県日田市を流れる、筑後川の支川である。流域面積は 136.1km²、延長 16.6km であり、筑後川との合流地点から上流 8.7km 地点までが国直轄区間、それより上流が大分県管理区間となっている。主要な支川としては、筑後川との合流地点から 5.2km 地点で合流する有田川、8.8km 地点で合流する小野川がある。

24 年豪雨では、2012 年 7 月 3 日に花月雨量観測所で 1 時間雨量 81mm、3 時間雨量 172mm の既往最大降雨を記録した。続く 7 月 14 日には同地点で 1 時間 63mm、3 時間 124mm をそれぞれ記録している。3 日の降雨が短時間豪雨であり、14 日が日単位の豪雨であったという特徴がみられている〔土木学会九州北部豪雨災害調査団，2013〕。花月水位観測所では、7 月 3 日 9 時 30 分に既往最大水位 4.16m を観測し、同月 14 日 7 時 30 分には 4.37m と記録を更新した。これは、10 日間程度の短期間で既往最大水位を二度も更新したことを示しており、豪雨の凄まじさを表している。7 月 3 日の出水では堤防決壊が 2 箇所、越水が 13 箇所が発生し、氾濫が発生した。日市内は 121.3ha の広い地域で浸水し、835 戸の家屋や道路、田畑等に多大な損害を与えた。その後の決壊箇所の応急復旧により 14 日の出水では決壊は起こらず、越水による 79ha の浸水被害にとどまった。

流木の橋梁集積による被害も発生している。花月川 4.8km 地点の夕田橋では、橋脚に流木が集積することによる堰上げが生じ、市の中心部が浸水する一因となった。この夕田橋は、花月川と支川の有田川の合流地点下流の最初の橋であり、花月川と有田川の両方の流域で発生した流木が集中する場所となっている。加えて、当時の夕田橋には川幅約 60m に対して橋脚が 3 本あり、構造上も流木の集積を起こしやすいものであった。被災後、激甚災害対策特別緊急事業により橋脚を 1 本にする改修計画が進められ、2016 年度末に供用された。旧橋の撤去もその後行われ、29 年豪雨時には新橋のみであったことから、流木による被害は発生しなかった。また、有田川に架かる日掛橋においても、同様に流木の集積が氾濫を拡大させる要因となった。この橋梁も欄干が破損するなどしたこともあり、架け替えが決まった。事業計画によると、橋から下流 800m の区間を優先的に改修し、川幅が狭いことから周辺で床上浸水が発生したため、左岸側を 4.4m～7.5m 拡幅し最大幅を約 30m にすることになっている。

b) 花月川における相対的流木災害リスクの評価

まず、第 3 章で紹介した流木発生ポテンシャルの評価法を花月川流域に適用し、全橋梁の相対的な流木災害リスクの評価を行った。評価方法は第 3 章の通りであるため、使用したパラメータについてのみ紹介し、結果を示す。花月川の橋梁数は 111 基であり、急斜面は傾斜角 30° 以上を条件に判定した。想定流木長 L_r は現地踏査より、9.16m となった。式(4)の k については、5～10,000 まで変化させ、相対的な流木災害リスクの変化を確認した。

ここでは、 $k=5, 50$ の場合についての相対的流木災害リスクの評価結果を図-4.10, 11 にそれぞれ示す。両図を比較すると、相対的に流木災害リスクが大きくなる橋梁は同じであることが分かる。ただし、リスクの比率は変化していることから、絶対的なリスクを評価するためには定数 k の決定方法の確立が必要である。また、単に橋梁の形状のみで評価した場合に相当する図-3.6 と比較すると、分布形状が異なっており、流木発生源との地理的な関係

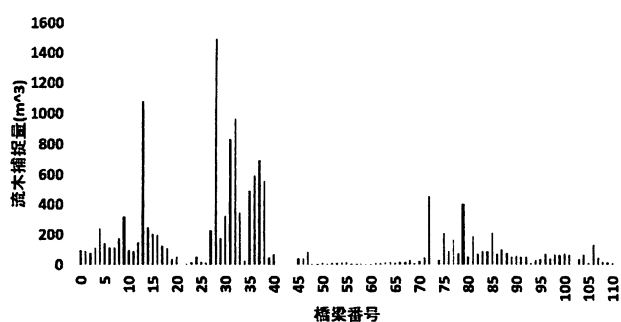


図-4.10 花月川の相対的流木災害リスク($k=5$)

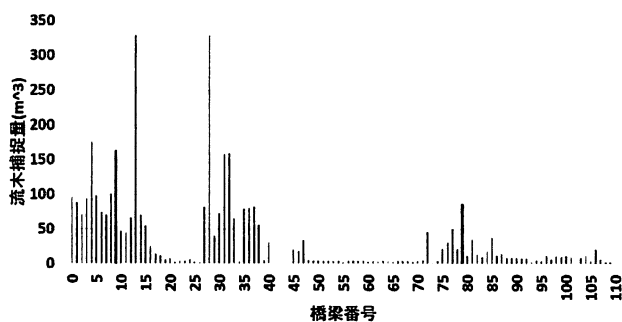


図-4.11 花月川の相対的流木災害リスク($k=50$)

性を考慮することの重要性が理解される。24 年豪雨において実際に流木が集積した花月川の夕田橋(9)と有田川の日掛橋(79) (図中の赤いバー) について着目すると、 k 値に関わらずリスクが相対的に高く評価されている。よって、本評価法により橋梁の流木集積の傾向性については評価できていると判断される。なお、この水害では流木災害リスクが高いと判断された橋梁の全てで流木が集積していないが、これは実際の災害での流木発生箇所と橋梁位置との関係があるためと考えられる。

c) 花月川における地質や降雨規模による影響を組み込んだ新しい流木災害リスクの評価

矢野ら(2016,2017)が提唱しているモデルでは、傾斜角度が 30 度以上の斜面を選定し、その後、斜面崩壊が発生した際に土砂が河道まで到達しうるかを崩壊土砂の可能到達距離に関する経験式から評価することで流木発生源となり得る斜面の決定を行っていた。しかし、この方法では斜面地盤の地質の情報は加味されておらず、また、降雨強度による流木流出量の変化も表現できないものであった。

矢野ら(2018)は、各斜面の地形、地質、ならびに定常降雨強度とその継続時間から崩壊が発生する可能性を評価できる拡張 H-SLIDER 法 [内田ら, 2015] を流木発生源の選択に適用した。これにより、継続時間 t に対する（可能性のあるという意味で）崩壊が発生する定常降雨強度、すなわち表層崩壊発生危険定常降雨強度 $r(t)$ が得られることになり、流域内の各斜面について崩壊が発生する任意継続時間の降雨強度、例えば $t=1h$ ならば 1 時間雨量として評価できることになる。 $r(t)$ を評価する式は次式となる。

$$r(t) = \frac{K_s h \sin I [c(1+e) + \gamma_w h \cos I (G_s + eS_r)] \cdot (\cos I \tan \phi - \sin I)}{A \gamma_w h \cos I [(1+eS_r) \cos I \tan \phi + e(1-S_r) \sin I] \left[1 - \exp \left(- \frac{1+e}{e-eS_r} \frac{K_s \sin I}{A} t \right) \right]} \quad (5)$$

ここで、 K_s : 透水係数、 h : 土層深、 I : 斜面勾配、 c : 粘着力、 e : 間隙比、 γ_w : 水の単位体積重量、 G_s : 土粒子の比重、 S_r : 飽和度、 ϕ : 土の内部摩擦角、 A : 集水面積である。各モデルパラメータについては、地盤力学的に妥当と考えられる経験値や九州地盤情報共有データベース（地盤工学会九州支部発刊）から花月川流域内に含まれる全 97 地点のボーリングデータを抽出して与えた。

ここでは、1 時間降雨を対象とし、確率年規模に応じた崩壊斜面の分布を計算した。これら確率年ごとに得られた崩壊斜面から河道に流木が達し得る斜面を選定し、任意地点の流木発生ポテンシャルを得た。図-4.12 に花月川最下流地点における流木発生ポテンシャルの 1 時間降雨の確率年規模に対する評価結果を示す。24 年豪雨規模（40 年）と 200 年規模を比較すると雨量は 1.4 倍であるが、流木発生ポテンシャルは 2.8 倍となっており、雨量の増加が流木発生量に敏感に影響することが理解できる。

旧夕田橋を対象として確率雨量毎の流木災害リスクを求めた（図-4.13）。当然ながら、流域全体での流木発生ポテンシャルと同様に確率年が上がるにつれリスクが上昇する。24 年豪雨規模（40 年）の約 3,560m³ と比べて、200 年規模では約 8,790m³ と約 2.5 倍であり、流域全体の流木発生ポテンシャルの倍率の 2.8 倍とは異なっていた。こ

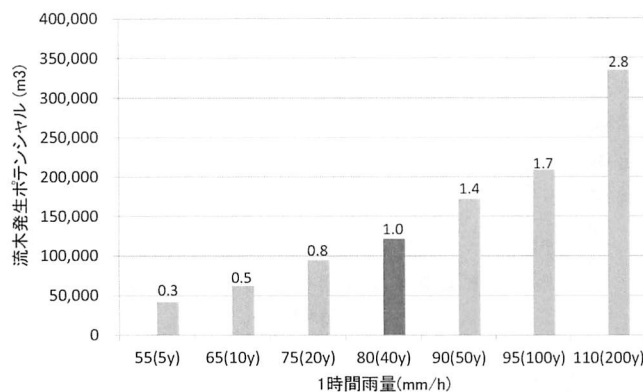


図-4.12 1時間雨量の確率年規模に対する最下流地点の流木発生ポテンシャルの評価結果[括弧内は確率年. 数字は40年降雨を基準にした倍率.]

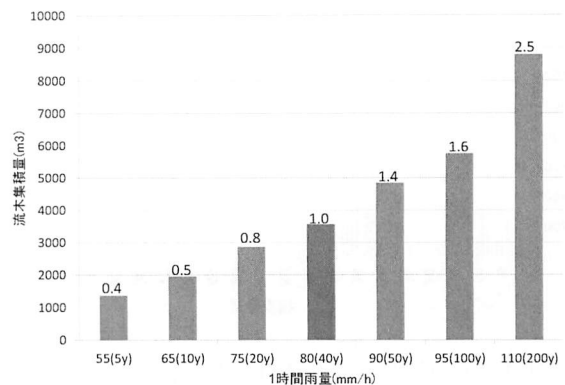


図-4.13 旧夕田橋の相対的な流木災害リスクの変化[括弧内は確率年. バー上の数字は40年降雨を基準にした倍率.]



図-4.14 花月川夕田橋の閉塞による氾濫状況

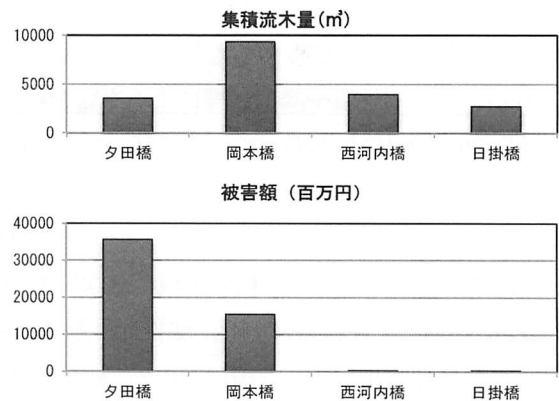


図-4.15 相対的な流木集積傾向と被害額で示した流木リスク評価結果の比較

のことは、流木の発生量と各橋梁での流木災害リスクは比例関係にはなく、橋梁位置より上流のリスクの高い橋の存在や、崩壊リスクのある斜面の分布などの複合的な影響を組み込むことの重要性を示していると考えられる。

温暖化の進行により降雨規模が増大し、それに伴い斜面崩壊の発生頻度が上がることで流木災害リスクが大きく上昇することが示された。今後は、流域内の地盤情報の解像度を上げることや非定常降雨に対応した斜面崩壊危険度の評価法の確立、さらに橋梁への流木集積機構をより詳細に調べて集積確率を橋梁諸元から決定できる手法の開発などを進めることで本評価法の精度向上を図る必要がある。

最後に、夕田橋などの流木災害リスクが高いと判定された橋梁に流木が集積して完全閉塞した最悪の状況を想定し、河川整備計画流量（2018年改正前の整備計画で、花月川本川が1,100m³/s）を流した場合に発生する氾濫状況を汎用河川流シミュレーション・ソフトウェア iRIC Nays2D Flood を用いて平面2次元氾濫解析から推定した（花月川の結果：図-4.14）。得られた氾濫域から被害総額を治水経済調査マニュアル（案）[国土交通省, 2005]に基づき算定した。図-4.15に被害額の算定結果を示す。市街部に架かる夕田橋の被害額が356億円と突出して大きく、次いで市街部の上流に架かる岡本橋の被害額が154億円と大きい。西河内橋や日掛橋の被害額は3億円程度で、夕田橋の被害額の1%に満たない。夕田橋と岡本橋は、24年豪雨を契機に河川激甚災害対策特別緊急事業で橋梁の改築（夕田橋：橋脚3基→1基、岡本橋：橋脚2基→1基）を行っており、今回試算した流木集積による氾濫被害が低減したことは大きな意味があったと解釈できる。被害額を算定したことで、単に流木の集積傾向だけで

は分からなかった橋梁の位置に依存した現実的なリスク評価が可能になった。このような評価により、橋梁の改修に伴う効果に流木リスク軽減の便益を組み込むことが可能になった。[詳細は、津末ら(2018, 投稿中)に譲る。]

5. おわりに

本稿では、著者らが GIS ベースで開発した河川流域全体の流木災害リスク評価手法について概説した。いうまでもなく、本評価手法は発展途上であり、信頼性の向上に向けて改善すべき点が多数ある。例えば、流木発生源とする斜面の選択について、花月川で行ったような地質情報を組み込むための高密度なボーリングデータベースの構築が必要であること、流木発生源としての溪畔林・河畔林の組み込み、橋梁への流木集積率についての河道条件・水理条件・橋梁の詳細な諸元を用いた普遍表示化、などがある。しかし、不完全ながらも本評価手法により、これまで評価されてこなかった河川全体を俯瞰した流木災害リスクを表現することが可能になり、これに基づいた橋梁の流木に対するリスクの順位付けや、貯水ダムや砂防ダムの持つ流木災害抑制効果の評価、温暖化の進行に伴う流木災害リスクの変化傾向の評価、などを表現できるようになった。

今後は、前述の課題に取り組むと共に、河川計画に流木災害リスクを組み込むことを可能とする評価法の改善が最重要な課題であると考えられる。今後提案される見込みである温暖化の影響を組み込んだ河川計画をより実効性の高いものにするためにも、水・土砂・流木を考慮したリスク評価手法を完成させる必要があり、この種の研究が精力的に展開されることが求められる。

謝辞：

本研究は著者が所属する九州大学環境流体力学研究室の学生諸氏、ならびに共同研究者である東京工業大学の笠間清伸准教授、東京理科大学の二瓶泰雄教授の協力によりなされたものである。国土交通省九州地方整備局、福岡県、朝倉市、大分県、日田市、熊本県、水資源機構にはデータ提供等で多大な協力を得た。また、科研費挑戦的萌芽研究(JP15K14042)、科研費特別研究推進費(JP17K20140)、文部科学省気候変動適応技術社会実装プログラム(SI-CAT)、ならびに平成 26,27,29 年度河川財団河川整備基金の援助により実施された。ここに記し、深甚なる感謝の意を表します。

参考文献：

- 内田太郎，秋山浩一，石塚忠範：表層崩壊発生場所と発生降雨量の関係の予測，平成 23 年度砂防学会研究発表会概要集，pp.130-131, 2011.
- 香月智，渋谷一，大隈久，石川信隆：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），Vo.69, No.1, pp1-15, 2013.
- 環境省：気候変動の影響への適応計画について，2015.
- 九州地方整備局山国川河川事務所，山国川治水対策検討委員会資料，2015.
- 国土交通省：治水経済調査マニュアル（案），2005.
- 国土交通省：平成 29 年 7 月九州北部豪雨は過去最大級の流木災害，2017. <http://www.mlit.go.jp/common/001198670.pdf> (2017 年 9 月時点).
- 小松利光（監修）：流木と災害 発生から処理まで，技報堂出版，2009.
- 社会資本整備審議会：水災害分野における気候変動適応策のあり方について，2015.
- 末次忠司，坂野章，二村貴幸：谷底平野を流下する河川の橋梁取付部における超過洪水時の被災現象，河川技術論文集，第 7 巻，pp.133-136, 2001.
- 竹村大，土橋将太，富田浩平，楊東，矢野 真一郎，笠間 清伸：白川流域における熊本地震による流木災害リスクへの影響の評価，土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集，pp.227-228, 2017.

筑後川右岸流域河川・砂防復旧検討委員会：筑後川右岸流域 河川・砂防復旧検討委員会報告書, 2017.

津末明義, 楊東, 竹村大, 富田浩平, 矢野真一郎, 土橋将太, 大久保僚太, 笠間清伸：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, 2018. (投稿中)

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：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, 2017.

土木学会九州北部豪雨災害調査団：平成 24 年 7 月九州北部豪雨災害調査団報告書, 2013.

土木学会・地盤工学会・日本応用地質学会・日本地すべり学会平成 25 年 10 月台風 26 号による伊豆大島豪雨災害緊急調査団：平成 25 年 10 月台風 26 号による伊豆大島豪雨災害調査報告書, 2014.

長崎県：長崎大水害 30 年だより Vol.9 (中島川眼鏡橋の保存に至った経緯について), <http://www.doboku.pref.nagasaki.jp/~kasen/sintyaku/201203nagasakidaisuigaikiji9/201203nagasakidaisuigaikiji9.html> (2018.5.28 参照)

中西茂：災害を振り返って, 講演資料, 2017.

長谷川祐治, 中谷加奈, 竹林洋史, 里深好文, 藤田正治：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, 第 58 号 B, pp.350-357, 2015.

平成 28 年台風第 10 号水害土木学会・地盤工学会合同調査団：平成 28 年台風第 10 号による岩手県災害調査報告書, 2017.

右田隆雄, 西尾慎也：星野川筋宮ヶ原地区(福岡県八女市)豪雨災害復旧における石橋保存のための分水路計画, 九州技報, No.58, pp.46-52, 2016.

水原邦夫：土石流に伴う流木による災害とその防止軽減対策に関する考察, 水利科学, No.352, pp.1-46, 2016.

森脇寛：崩土の到達距離予測, 地すべり, Vol.24, No.2, pp.10-16, 1987.

矢野 真一郎, 土橋将太, 堂菌俊多, 笠間清伸, 北隆範：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), Vol.72, No.4, pp.I_289-I_294, 2016.

矢野真一郎, 土橋将太, 富田浩平, 堂菌俊多, 笠間清伸：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, 2017.

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：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), Vol.74, No.4, pp.I_1327-I_1332, 2018.

矢野真一郎, 大久保僚太, 津末明義, 竹村大, 富田浩平, 笠間清伸, 二瓶泰雄：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, 2018. (投稿中)

林野庁：土石流・流木対策の手引き, 2012.

林野庁：流木対策の必要な森林を抽出する手法手引き書(案), 2016.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): Summary for Policymakers, 5th Assessment Report, 2013.