

様式 8

## 河川基金助成事業

「山地河川における橋の閉塞に流木の  
形状と比重が及ぼす影響」

助成番号：2020-5211-033

京都大学防災研究所  
教授 中谷加奈

2020年度

## 1. はじめに

土砂災害で発生する流木は、山地河川の橋で閉塞することで、水位・河床上昇により氾濫や堆積被害が拡大する。しかし、流木発生により全ての橋が閉塞する訳ではなく、流木流出により全ての橋が閉塞するとは限らず、橋、流木、水理条件等の違いによる閉塞の発生条件を明らかにすることが、防災上求められる。既往検討では、枝や根の無い丸太の幹形状で水面を浮いて流れる比重が1よりも小さな針葉樹を想定した流木を対象とすることが殆どである。一方で、近年の土砂災害で発生した流木について全国の砂防事務所管内の情報を整理すると、災害事例では根付形状の流木や、2017年九州北部豪雨でみられたような広葉樹などの形状が複雑で比重が大きな流木、2018年西日本豪雨災害でみられた曲がり幹形状の流木なども確認される。

本研究では、丸太状や根付の流木形状による差や、丸太幹と曲がり幹形状による差、比重1未満だけでなく1を超える比重にも着目して、山地河川の射流域での流木による橋の閉塞発生の境界や契機となる流木挙動を実験で把握する。さらに、流木の供給条件や流木長／橋の余裕高などを指標として回帰分析を行って、閉塞確率を用いた流木による橋の危険度リスクを示すことを目標とする。また、閉塞が発生する契機となる流木の供給条件や流下中の挙動について、流木の形状や比重による差や、水理条件や橋の形状による差を明らかにすることを目指す。

本報告の構成として、2章では2018年7月豪雨で土砂災害が多発した広島県東広島市内の山間部から流出した流木形状を調査して、代表的な曲がり形状を検討した。水理実験により、直線形状の幹と曲がった形状の幹による橋梁閉塞の差を検討した。曲がった形状の流木と直線形状との混合割合についても検討した。本研究の実験は、直線水路を用いて山地溪流の射流域を対象とした。2章では直線形状の丸太幹と曲がり幹の流木、3-5章では丸太状と根付の流木、比重が1より小さな流木だけでなく、1より大きな流木模型を作成して、異なる流木長でも検討した。2-3章では一般的な橋脚を有する形状の橋を対象としたが、4-5章では川幅の狭い山地河川で多くみられるワンスパン形状の橋を対象とした。実験映像を解析して橋の直上流に到達する際の流木流量や流木濃度を指標として、データ整理を行い、回帰分析による検討を行った。4章では閉塞確率50%となる流木濃度を流木長／橋の余裕高を指標として流木形状や密度の差による表れ方を比較することや、5章では流木の流出過程に着目した試みとして、流木濃度の時間的変化を算出して、異なる時間分解能における濃度のピーク値と平均濃度を比較する検討も実施した。6章にまとめと今後の課題を示す。

キーワード：流木、山地河川、橋、閉塞、形状、比重

## 2. 山地河川の橋梁閉塞に流木の曲がり幹形状が及ぼす影響

### 2.1 曲がり幹形状の流木に着目した背景

近年、土砂災害の発生件数が増加傾向にあり、山間部から土砂だけでなく流木が流出して橋梁に閉塞することで被害が拡大する事例が見られる<sup>1)</sup>。流木に関する検討は多数実施され<sup>例えば2)-5)</sup>、近年では橋脚周辺の流木の三次元的な集積機構<sup>4)</sup>や、流木の沈下過程を考慮した橋梁閉塞<sup>5)</sup>が、実験から検討されている。一方、既往検討の多くは常流の緩勾配の河川を対象として、急勾配の射流区間の山地河川を対象とした検討は少ない。山地河川を対象とした検討は、流下時の流木の投影面積に着目した橋梁閉塞の検討<sup>6)</sup>や、流木形状を考慮した流木捕捉工の捕捉効果に関する検討<sup>7)</sup>などがある。筆者らは、橋脚0本<sup>8)</sup>や2本<sup>9)</sup>で水理条件や流木条件による橋梁の閉塞限界の差や、流木を含む土石流による河道閉塞について<sup>10)</sup>、実験により検討している。

山間部からの流木流出に関する検討は、日本で発生する大部分の流木が針葉樹であることから<sup>11), 12)</sup>、流木の幹を直線とすることが殆どである<sup>例えば2)-10)</sup>。丸太形状と根付形状に着目した検討は実施され、根付形状の方が構造物の閉塞が起こりやすいことが示されている<sup>7), 10)</sup>ものの、幹形状は直線のみが対象とされる。

しかし、土砂災害では広葉樹による流木流出も確認され<sup>13)</sup>、広葉樹は針葉樹と比べて複雑な形状を持つことが知られる。平成30年7月豪雨により広島県で発生した流木による橋梁閉塞では、直線状だけでなく曲がった形状の幹の流木も確認された。洪水後に堆積した流木は、流下過程で変形したものも含まれる可能性がある。図2.1に広島県安芸郡坂町総頭川において流木で閉塞した橋梁を示す。曲がり流木は直線状よりも流木同士が連結してジャム状になりやすくなると考えられるため、少ない流木での閉塞が推測されるが、曲がった流木に関する検討はほとんどない。



図 2.1 平成 30 年 7 月豪雨により流木で閉塞した総頭川の橋梁（2018 年 7 月 8 日撮影）

本章では、平成30年7月豪雨により山間部から流出した流木形状を調査して代表的な曲がり形状を検討した。本検討では幹が直線形状ではないものを曲がり流木として扱った。次に水理実験により、直線形状の幹と曲がった形状の幹による橋梁閉塞の差を検討した。曲がった形状の流木と直線形状との混合割合についても検討を行い、直線のみの場合との差を示すことを目指した。

## 2.2 実災害で山間部から流出した流木

### 2.2.1 対象地と調査の概要

図2.2に流木調査の対象地を示す。図中の左上が八本松曾場ヶ城山、左下の黒瀬町本岳・前平山、右上の下三永本頭、この3箇所の直線で囲んだ範囲が調査対象である。2018年7月豪雨で崩壊や土石流による土砂、並びに流木が山間部から発生した広島県東広島市内で2019年7-9月に調査を行った。調査対象には、発災後から2019年9月まで工事等による人為的影響が少なかった地点、並びに人工林よりも自然状態に近い天然生林や、広葉樹が広く分布する地域を選定した。

八本松曾場ヶ城山には林道（図2.2左の破線部）が存在し、林道の一部が崩壊して土砂移動現象が発生した。小倉神社の北西から発生した図2.2左上のA、その下流から続く林道の北東に位置するB、Aに隣接するCを調査対象とした。広島県から提供された森林資源情報から、調査地では天然生林のアカツヤクヌギが主な樹種だが、AやCには隣接してクヌギ以外の広葉樹が、Bには隣接して人工林のヒノキやスギも分布する。

東広島市黒瀬町では、本岳と前平山の山頂近くの稜線付近から放射状に多数の崩壊や土石流などの土砂移動が発生し、本岳では勾配が約15度から発生していた。対象としたのは、本岳西側の最大約100 m幅での土砂移動が見られる斜面（図2.2左下のD）、ならびに土砂が流入する被害が発生した広島国際大学東広島キャンパスの上流に位置する前平山の北側の斜面（図2.2左下のE）である。広島県の森林資源情報から、DやEも大部分は天然生林のアカツヤだが、一部でクヌギ以外の広葉樹や、人工林のスギやヒノキが分布する。

下三永本頭では、土砂流出によって家屋の全壊が1戸、半壊が1戸、死者3名の被害が発生している。森林資源情報から、このエリアは天然生林のクヌギ以外の広葉樹が分布する。

調査では、対象地の上空からドローン（Mavic 2 PRO、DJI）で取得した撮影映像により、河道に堆積した流木形状の分布を調べた。図2.2右下に、八本松曾場ヶ城山B下流での流木堆積状況を示す。図2.3のように写真を拡大すると流木形状が確認できる。ここでは曲がり流木を流木の両端を結んだ直線の長さに対して流木長が1.1倍以上になるものとした。対象区間において河道に堆積した流木を全て撮影して、直線形状を青色、曲がった形状を赤色で示し、目視で全ての流木形状を調べた。ただし、重なって堆積した流木は、上空からの写真で判別できるもののみを対象とした。調べた流木本数486本に対して、曲がり流木の混合割合は約0.1の47本だった。

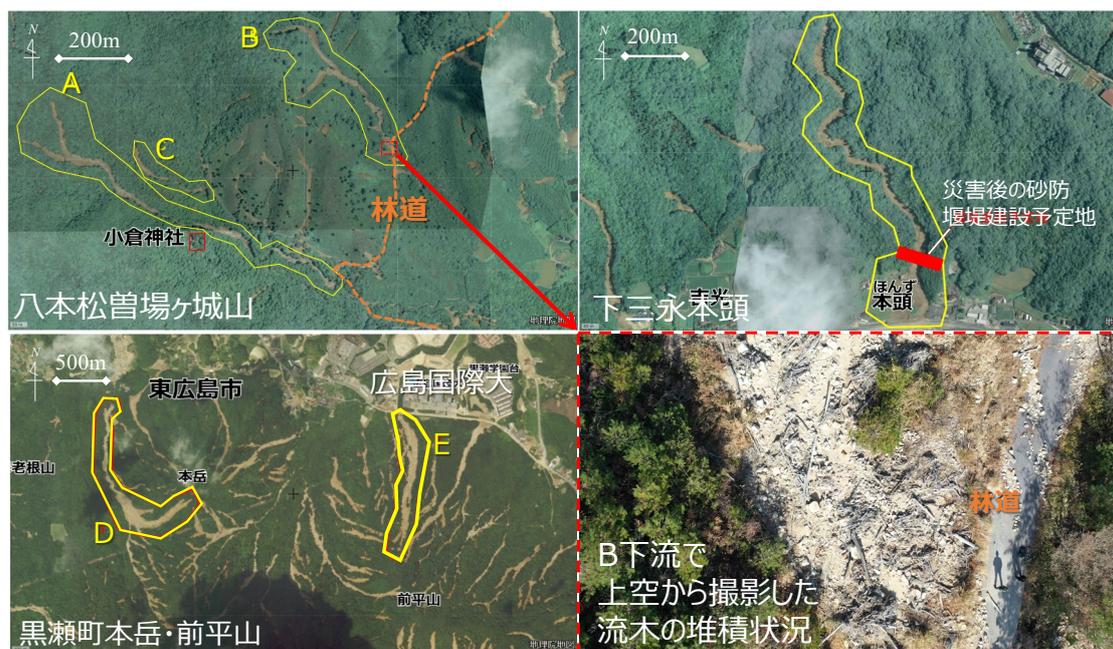


図 2.2 調査対象の東広島市内の3箇所（左上：八本松、左下：黒瀬町、右上：下三永、いずれも2018年災害後の地理院地図に加筆）と上空から撮影した流木の堆積状況（右下：曾場ヶ城山のB下流）

## 2.2.2 流木形状の検討

上空からの撮影写真を基に、形状全体が確認できる12サンプルの曲がり形状の流木を選定して、地上での現地調査を行った。デジタルカメラを用いて図2.4のように複数アングルから選定したサンプルの流木の撮影を行った。撮影した写真は Agisoft Metashapeを用いて、図2.5のように三次元的な形状のデータを得た。

曲がった流木形状を検討するために、三次元データを基に側方(x-y)、上空(x-z)方向の画像から、流木の両端を結んだ直線を4等分にした5点の位置を計測した。この際にx、y、z方向ができる限り最大長を取るような角度とした。両端を結んだ長さをL(m)、両端を結んだ直線の幅の平均値を直径D(m)として、側方(x-y)、上方(x-z)それぞれで計測した。x-y方向を4等分した一つの事例を図2.6に示す。計測点1と5の両端を結んだ直線の長さがL、幅の平均値が直径Dである。図2.6に赤の長方形で示した両端を結んだ直線と、計測点2、3、4の流木端の間隔の求め方を矢印で示す。各計測点の間隔と直径Dの比を相対長さCとして無次元量で表し、本稿では相対長さCを曲がり形状の程度を表す指標とした。x-z方向でも同様に5点を計測して、各計測点での相対長さCを得た。

表2.1にサンプル番号、両端を結んだ長さL(m)、両端を結んだ直線幅の平均値の直径D(m)、計測点2~4の相対長さCをそれぞれ側方(x-y)、上空(x-z)方向について示す。12サンプル中、半波長（以降、弓型）はx-y方向では8サンプル、x-z方向は10サンプル確認された。No.7はx-y方向は直線で、x-z方向のみ弓型を示した。一波長（以降、S字型）は両端を結んだ直線に対して、曲がりが一方向のみではなかったため、負の値も示すが、曲がりの大きさは相対長さCの絶対値で表される。S字型はx-y方向では3サンプル、x-z方向は2サンプル確認された。両方向ともS字型を示し

たのは1サンプル (No.9) で、他の3サンプル (No.3、5、12) は一方向のみS字型でもう一方は弓型だった。なお、今回計測した流木には一波長以上の曲がりを有する形状は確認されなかった。相対長さCは、弓型タイプのx-y方向は1.00~6.91、x-z方向は1.06~5.45の範囲に分布した。S字型タイプのx-y方向は-3.03~1.41、x-z方向は-1.57~1.56の範囲に分布した。

流木サンプルを基に代表的な曲がりの幹形状を提案するために、x-y方向、x-z方向について弓型とS字型の形状を分けて、計測点毎に平均を求めて得た代表値を図2.7に示す。各計測点のCは、弓型タイプは計測点2、3、4の順にx-y方向に2.26、2.64、2.62で、x-z方向に2.02、2.66、2.74だった。S字型タイプは計測点2、3、4の順にx-y方向に-1.97、1.10、1.24であり、x-z方向に-1.07、-1.47、1.44だった。各計測点のCの絶対値、すなわち曲がりの程度は、S字型の方が弓型よりも小さい。

水理実験で用いる流木模型を作成するために、直線形状の流木を対象とした既往研究の実験条件を参考に<sup>9)</sup>、長さ10 cm (ここでは、両端を結んだ長さ)、直径0.5 cmとして、3Dプリンターで流木模型を製作した。図2.8に弓型タイプとS字型タイプの流木形状を示す。模型では各計測点の間を滑らかな形状とした。



図 2.3 上空から撮影した写真による流木の直線形状と曲がり形状の判別事例 (青：直線の形状、赤：曲がり形状)



図 2.4 本岳における流木サンプルの複数アングルからの撮影

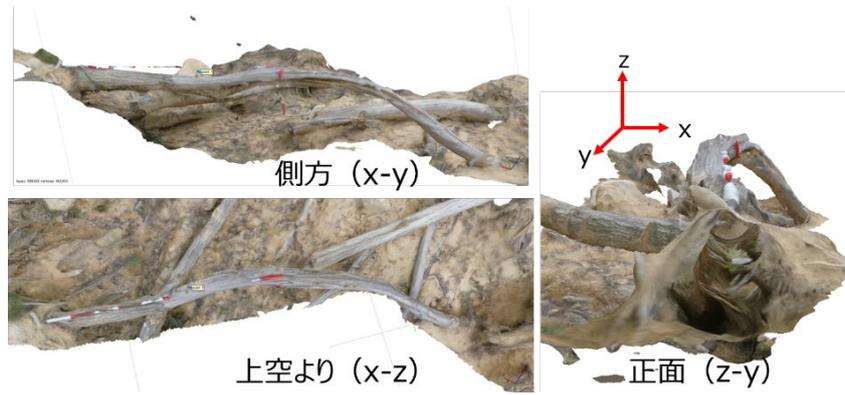


図 2.5 本岳における流木サンプルの三次元データ

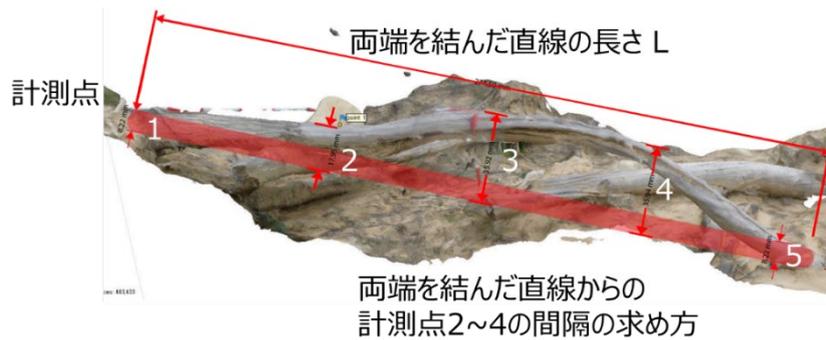


図 2.6 流木の相対長さ C を算出するための計測点の設定

表 2.1 流木サンプルの側方(x-y)方向、上空(x-z)方向からの長さ L、直径 D ならびに計測点 2、3、4 の相対長さ C

サンプル No.	(x-y) direction					(x-z) direction				
	L(m)	D(m)	C (point2)	C (point3)	C (point4)	L(m)	D(m)	C (point2)	C (point3)	C (point4)
1	2.06	0.12	1.00	1.36	2.06	1.93	0.10	2.16	2.81	2.58
2	1.77	0.15	4.84	6.34	6.91	1.43	0.12	2.10	2.18	1.66
3	2.27	0.11	-3.04	1.12	1.00	2.29	0.16	1.60	3.11	4.09
4	2.71	0.11	1.11	1.19	1.30	2.73	0.09	1.42	1.83	2.22
5	2.14	0.15	1.69	1.96	1.86	1.32	0.11	-1.17	-1.57	1.32
6	2.33	0.14	4.09	5.38	6.21	2.47	0.14	2.41	4.24	5.45
7	2.57	0.07	1.00	1.00	1.00	2.54	0.07	2.53	2.91	2.54
8	2.04	0.08	2.38	1.39	1.43	2.11	0.10	2.53	3.30	3.41
9	2.66	0.04	-1.15	1.22	1.41	2.58	0.05	1.03	-1.36	1.56
10	2.75	0.08	3.02	3.02	1.71	2.67	0.11	3.06	3.36	1.93
11	2.66	0.08	1.19	2.15	1.11	2.74	0.05	1.06	1.26	1.08
12	2.76	0.04	-1.71	0.95	1.33	2.50	0.10	1.37	1.66	2.41

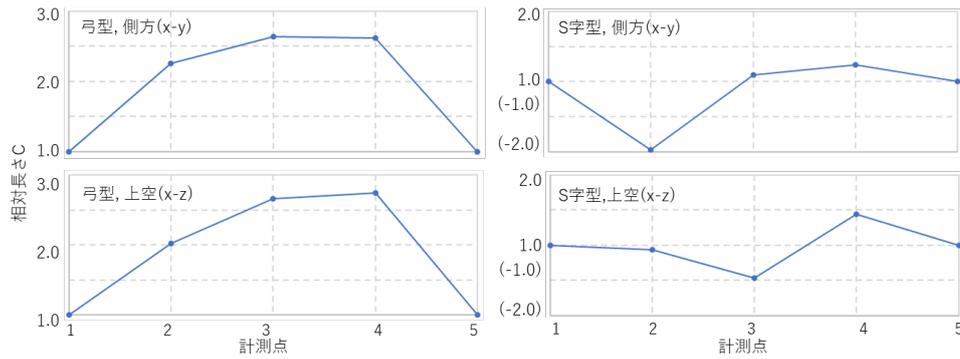


図 2.7 平均的な弓型（左）と S 字型（右）の相対長さ C



図 2.8 提案した弓型（左）と S 字型（右）の流木形状

## 2.3 水理実験

直線形状の幹と曲がり形状の幹の流木モデルを用いて、山地河川を対象とした射流域における橋梁閉塞について水理実験により検討した。

### 2.3.1 実験概要

実験には、長さ 400 cm、流路幅 20 cm の直線矩形断面水路を使用した。直線形状の流木を対象とした既往検討と同様に橋脚 2 本の橋模型を採用した<sup>9)</sup>。橋脚間、並びに橋脚と水路側壁間は 6.2cm とした。橋桁の水路横断方向幅 20 cm、縦断方向幅 8 cm、厚さ 2 cm で製作し、水路下流端から 50 cm 上流に橋桁上流が位置するよう設置した。図 2.9 に実験概要を示す。

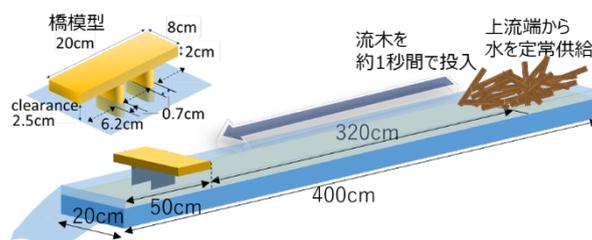


図 2.9 実験概要と橋梁模型

### 2.3.2 水理条件と流木模型

水路は勾配 2 度として、水路上流端から流量 1.85 l/s を定常的に供給した。水深 1.0 cm、平均流速 92.5 cm/s、フルード数 2.95 である。水面と橋桁下端の距離（余裕高）は 2.5cm とした。なお、勾配については、既往研究の実験<sup>9)</sup>を参考に同じ条件とした。

流木模型は直径 0.5 cm、長さは 10cm（曲がり形状では、両端を結んだ長さが 10cm）である。流木模型の体積は、丸太形状を 1 とすると、弓型で 1.12 倍、S 字型は 1.10 倍である。山地溪流から発生する流木の多くは、立木由来でも流下中に大部分で枝葉が剥がれ、幹と根の一部のみの形状となることが報告されていることから<sup>12),14)</sup>、幹のみの形状を採用した。直線の流木は木製で、実験前に十分水に浸けた状態として、このとき比重は約 0.8 である。曲がり形状の流木はいずれも ABS 樹脂製で、比重は約 0.9 である。比重が 1 を超える場合は、流木が水面から沈んで流下するため、比重が違くと流木の沈む深さが変化して、水面下で流木が移動する層が異なり、橋梁への閉塞に影響することが推測される。一方で、比重が 1 より小さい場合は、水面を浮いて移動するために流木が移動する層が変わらないことから、本実験で比重の違いの影響は小さいと考えられる。図 2.10 に流木模型を示す。上流端から定常的に水を供給した状態で、流木模型を水路上流端 30 cm 下流の位置から約 1 秒間で分散するように投入した。投入方法は橋への閉塞に影響を及ぼすが、本実験のように橋に到達した際の単位時間当たりの流木量（以下、流木流量）で評価すれば投入方法の影響が小さくなる。同一条件を繰り返し試行することで、偶発的な影響をできるだけ取り除いた。

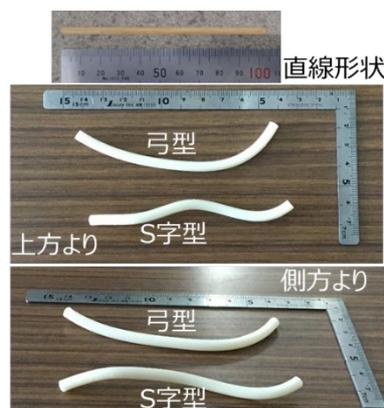


図 2.10 流木模型（上段：直線形状、中央・下段：曲がり形状を上方・側方より撮影）

### 2.3.3 実験条件と閉塞の定義

現地調査では曲がり流木が全体の約 0.1 だったが、本実験では幅広い条件で比較するため、流木の混合割合を 0.0、0.1、0.3、0.5、1.0 の条件で実施した。0.0 は直線流木のみ、1.0 は曲がり流木のみを示す。曲がり流木の形状は、弓型と S 字型の二種類を用いた。1 回の試行では一種類の曲がり流木のみを用いた。

上流端から供給する流木は、条件により閉塞が生じやすい本数が異なったため、直線のみは 10~80 本、直線と曲がり流木を混合したケースでは混合割合 0.1 では 20~60 本、混合割合 0.3、0.5 ならびに曲がり流木のみは 10~60 本の範囲で 10 本ずつ本数を変えて投入した。同じ流木条件について同じ投入本数では、概ね 10 回実施した。実験条件を表 3.2 に示す。1 回の試行では流木投入から 30 秒間通水して流木挙動を確認した。

2 台のカメラを用いて、橋上から橋梁直上流に到達する流木の挙動や時間的変化を、橋の側方から橋桁下面まで達する水位上昇と閉塞過程を記録して実験後に映像を解析し、データ整理を行った。条件によっては、数本の流木は橋上流に引っ掛かるが、水位上昇が発生しないケースが確認さ

れた。本検討では、橋の上流で水位上昇が発生した条件を閉塞とみなした。周辺への氾濫や河床上昇が起これ、被害拡大に繋がると考えたためである。また、閉塞が発生した後に、通水した 30 秒間の途中で流木流出により閉塞状態でなくなる一時的な閉塞も見られたが、これらは非閉塞として扱った。

表 2.2 実験ケース

幹の形状	曲がり流木の混合割合	曲がり流木の形状	投入本数 (10本毎)
直線のみ	0.0	—	10~80
直線と曲がりの混合	0.1	弓型,	20~60
	0.3, 0.5	S字型	10~60
曲がりのみ	1.0	弓型, S字型	10~60

#### 2.3.4 実験条件と閉塞の定義

実験では水路上流から本数を変えて流木を供給したが、同じ投入本数でも橋梁に到達する時点で流木の広がり方は異なることから、投入本数ではなく、橋梁に到達した際の流木流量で評価した<sup>8),9)</sup>。橋梁の上流端から 20 cm 上流に基準線を設け、先頭の流木が到達した時から最後尾の流木が通過し終わる時間を求め、投入量を時間で除すことで流木流量  $Q_{WD}$  を式(2.1)で定義した。

$$Q_{WD} = N \cdot V / (t_l - t_f) \quad (2.1)$$

ここに、 $Q_{WD}$ : 流木流量 ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )、 $N$ : 投入本数、 $V$ : 流木 1 本の体積 ( $\text{cm}^3/\text{本}$ )、 $t_l$ : 最後尾の流木の到達時刻 (s)、 $t_f$ : 先頭の流木の到達時刻 (s) である。

## 2.4 結果と考察

### 2.4.1 流木流量に対する橋梁の閉塞と非閉塞

図 2.11 に、流木流量  $Q_{WD}$  を指標として閉塞 (図中の×) と閉塞が発生しない非閉塞 (図中の○) の結果を示す。左から順に、直線のみ (0.0)、直線と曲がりの混合 (左から 0.1、0.3、0.5)、曲がりのみ (1.0) である。同じ混合割合では、左 S 字型、右に弓型を載せている。図 2.12 に、流木流量  $Q_{WD}$  が  $120 \text{ cm}^3/\text{s}$  の条件での直線のみ、S 字型のみ、弓型のみで橋梁が閉塞した状況の写真を示す。堰上げ水深はどれも橋桁下面までで、形状による大きな違いは見られない。どの形状においても、流木が橋脚に衝突して、速度が遅くなった流木に後続の流木が衝突して、流木や橋桁、橋脚が支点となり閉塞が生じる。直線は形状的に流木同士が連結し難く、S 字型や弓型は連結しやすい状況が確認できる。弓型は曲がりが大きいため、少ない本数が連結した際、その流木塊が疎な状態でも占める空間は大きくなる。特に、曲がり大きな弓型は橋脚をまたぎやすい形状で、少ない流木流量でも閉塞が発生しやすい (図 2.12 右下)。

実際に流木による橋梁閉塞を評価する時には最小の流木流量、すなわち危険側の条件を知ることと対策が検討される。そのため、流木流量が大きい条件で橋梁の閉塞発生、非発生が混在する領域や閉塞のみが発生する領域は、後述する回帰分析の評価で用いるが、ここでは閉塞する最小流木流量を考察した。

直線のみ結果では、閉塞する最小流木流量は  $83 \text{ cm}^3/\text{s}$  で、それ以下の  $Q_{WD}$  は全て非閉塞である。一方で曲がり流木の最小流木流量は混合割合が 0.1 では S 字型で  $38 \text{ cm}^3/\text{s}$ 、弓型で  $41 \text{ cm}^3/\text{s}$ 、0.3 では S 字型で  $33 \text{ cm}^3/\text{s}$ 、弓型で  $28 \text{ cm}^3/\text{s}$ 、0.5 では S 字型で  $30 \text{ cm}^3/\text{s}$ 、弓型で  $41 \text{ cm}^3/\text{s}$ 、1.0 では S 字型で  $56 \text{ cm}^3/\text{s}$ 、弓型で  $39 \text{ cm}^3/\text{s}$  で、それ以下の  $Q_{WD}$  では非閉塞である。閉塞が生じる最小の  $Q_{WD}$  は、曲がり流木が混在する、あるいは曲がり流木のみ全条件で、直線のみ最小値 ( $83 \text{ cm}^3/\text{s}$ 、図中に点線で示す) よりも明らかに小さい。S 字型は混合割合が 0.5 の条件で、弓形は混合割合が 0.3 の条件で最も小さい  $Q_{WD}$  により閉塞が生じる。一方、同じ形状の中で閉塞する最小の  $Q_{WD}$  が最大になるのは、S 字型では混合割合 1.0、弓形は混合割合 0.5 で、S 字型は曲がり流木のみ 1.0 の条件で、閉塞するのに必要な流木流量が最大だった。しかし、曲がり流木を含む条件の中で形状や混合割合の違いによる最小の  $Q_{WD}$  に大きな差はなく、明らかな傾向を示すものではなかった。

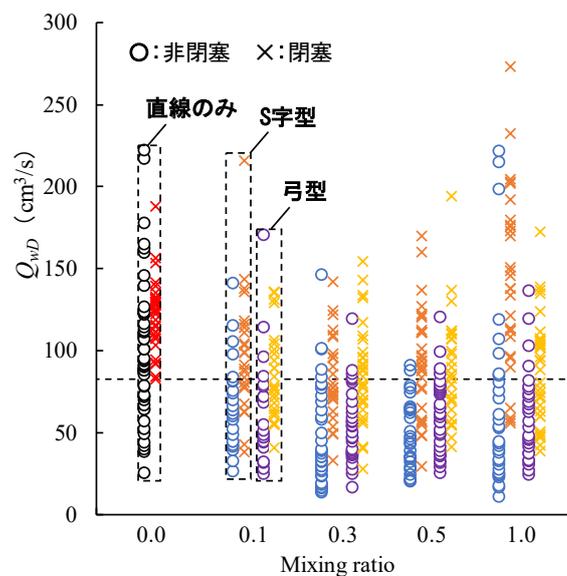


図 2.11 実験結果

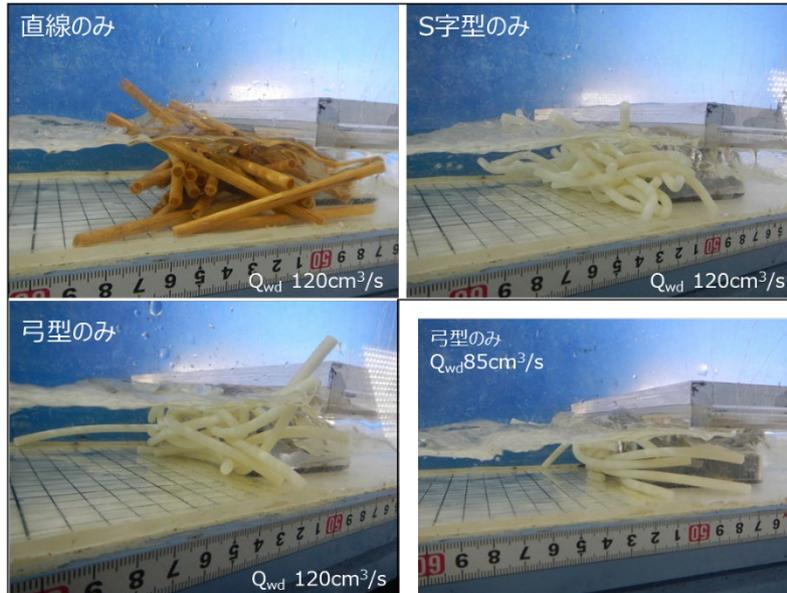


図 2.12  $Q_{WD}=120\text{ cm}^3/\text{s}$  の閉塞状況（左上：直線のみ、右上：S字型のみ、左下：弓型のみ）と弓型のみ  $Q_{WD}=85\text{ cm}^3/\text{s}$  の閉塞状況（右下）

#### 2.4.2 ロジスティック回帰分析による統計評価

各条件での流木流量  $Q_{WD}$  の増加による閉塞しやすさの違いの傾向は確認できたが、両者が混在する領域は、閉塞の発生しやすさや推移が分かり難く、試行回数にも左右される可能性がある。また、ある  $Q_{WD}$  での閉塞発生、非発生の検討では、事象が二つに限られるため、確率分布は離散型の二項分布での検討が適切である<sup>15)</sup>。分析には Logistic regression analysis を採用し、本研究では、 $Q_{WD}$  を説明変数、閉塞発生の有無を目的変数として、ある説明変数の  $Q_{WD}$  で目的変数が 1 となる確率、すなわち閉塞が発生する確率を予測する。実験結果にロジスティック回帰分析を用いると、目的変数の確率  $P$  は、説明変数の流木流量  $Q_{WD}$  を  $x$  として次式(2.2)で表される。

$$P = e^{(ax+b)} / (e^{(ax+b)} + 1) \quad (2.2)$$

ここに  $e$  は自然対数の底、 $a$  と  $b$  は係数である。図 2.13 に直線と S 字型曲がり流木の混合 0.5 ( $S_{0.5}$ ) の実験結果について回帰分析した結果と、非閉塞、非閉塞と閉塞が混在、閉塞の 3 領域に区分した対応イメージを示す。混在する領域（黄色）の位置と広がり方は、回帰曲線の位置と傾きで表現される。閉塞確率 50% の  $Q_{WD}$  が大きくなると、混在領域は  $Q_{WD}$  の大きい側になる。混在領域の広さは、閉塞確率 10~90% の  $Q_{WD}$  の差が大きいほど広がる傾向にある。

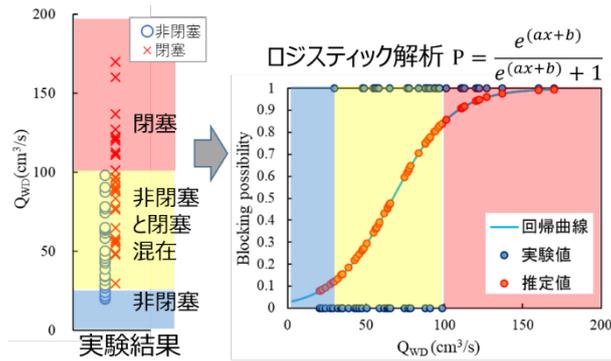


図 2.13 S<sub>0.5</sub>の実験結果（左）とロジスティック解析結果（右）

図 2.14 には、上段に S 字型、下段に弓型のロジスティック解析の結果（回帰曲線のみ）を示す。併せて実験データの信頼性を確認して、全ての条件で P 値は 0.05 以下だった。P 値は弓が 1 割（Bow<sub>0.1</sub>）の条件で最大で、0.025 を示した。また、図 2.15 には、直線形状と S 字型の全ケース、弓型の全ケースのロジスティック解析の結果（回帰曲線のみ）を示す。いずれも  $Q_{WD}$  の上昇に従い閉塞確率が上昇することが示され、ある  $Q_{WD}$  での閉塞確率が推定できる。

続いて、図 2.14 に示した両曲がり形状について混合割合毎に考察する。S 字型の結果（図 2.14 上段）からは、実験で閉塞が発生して回帰曲線の閉塞確率が上昇し始める最小の  $Q_{WD}$  は、混合割合の違いによる大きな差はないが、最大は 1.0 (S<sub>1.0</sub>) で、最小は 0.5 (S<sub>0.5</sub>) だった。また、閉塞確率が 0.5 になる  $Q_{WD}$  は S<sub>0.5</sub> が最も小さく、続いて 0.3 (S<sub>0.3</sub>)、0.1 (S<sub>0.1</sub>) で、1.0 (S<sub>1.0</sub>) の曲がり形状のみが最大となる。S<sub>1.0</sub> では、回帰曲線の傾きが他の割合と比べて緩く、非閉塞から閉塞の遷移幅が広い。一般に緩い傾きは橋への引っ掛かり難さ（非閉塞）と引っ掛かり易さ（閉塞）を併せ持つ領域が広い事を示す。S<sub>0.1</sub> と S<sub>0.3</sub> は閉塞確率が 0.2 より小さい領域では、ほぼ同様の傾きや回帰曲線の立ち上がりを示すが、閉塞確率が 0.2 より大きい領域では S<sub>0.3</sub> の方が S<sub>0.1</sub> より傾きが急になる。S<sub>0.5</sub> は閉塞確率が上昇し始める  $Q_{WD}$  が小さいが、回帰曲線の傾きは最も急で、非閉塞から閉塞の遷移幅が狭く、閉塞が急激に進むことが示される。曲がり流木はその形状から流木同士が絡みやすく、小さい  $Q_{WD}$  でも閉塞確率が高くなる。S 字型では小さな  $Q_{WD}$  での閉塞確率は混合割合による差が小さい。大きい  $Q_{WD}$  では流木同士が接触する作用点が相対的に多くなることから、S 字型はより絡みやすくなると推測される。直線形状と混合した S<sub>0.1</sub>、S<sub>0.3</sub>、S<sub>0.5</sub> では、混合割合が大きくなるほど回帰曲線の傾きが急になり、閉塞が進む。一方、曲がり形状のみの S<sub>1.0</sub> では、S<sub>0.1</sub>、S<sub>0.3</sub>、S<sub>0.5</sub> と比較して明らかに傾きが緩く、非閉塞と閉塞を併せ持つ領域が広いことから、本検討で用いた S 字型の形状では、特に  $Q_{WD}$  が大きい条件で流木同士が連結しにくく、閉塞が進みにくいことが示された。これは曲がり部分を複数有する S 字型の形状そのものや、曲がりの程度が小さいために  $Q_{WD}$  が大きくなると連結し難くなったことや、実験観察より連結を保持し難い（一時的な閉塞の後に流出する）ことが影響したと推測される。S 字型は、直線と混合する方が連結しやすく、安定した連結により閉塞が維持されたことも示される。

図 2.14 下段の弓型では、閉塞確率が上昇し始める  $Q_{WD}$  は S 字型よりも混合割合による違いが大きく、最も大きいのは混合割合 0.1 (Bow<sub>0.1</sub>)、次に 1.0 (Bow<sub>1.0</sub>) である。Bow<sub>0.3</sub> と Bow<sub>0.5</sub> には大きな差はなく、閉塞確率が上昇し始める  $Q_{WD}$  は最も小さい。閉塞確率が 0.5 になる  $Q_{WD}$  は、Bow<sub>0.1</sub> が

最も小さく、続いて  $Bow_{1.0}$  と  $Bow_{0.3}$  がほぼ同じで、 $Bow_{0.5}$  が最大となる。回帰曲線の傾きは、 $Bow_{0.1}$  が最も緩く、非閉塞から閉塞の遷移の幅が広い。次に緩いのが  $Bow_{1.0}$  で、閉塞確率が 0.6 より大きい領域では、曲線が  $Bow_{0.1}$  とほぼ同じになる。 $Bow_{0.3}$  と  $Bow_{0.5}$  は、立ち上がりは  $Bow_{0.3}$  の方が小さな  $Q_{WD}$  だが、曲線の傾きは  $Bow_{0.3}$  と  $Bow_{0.5}$  で似た傾向を示し、非閉塞から閉塞への遷移幅が同様となる。弓型では、S 字型と比較すると混合割合による回帰曲線の形状や傾きの差は小さく、特に  $Bow_{0.3}$  と  $Bow_{0.5}$  は似た形状を示す。 $Bow_{0.1}$  は他の混合割合と比較して非閉塞から閉塞への遷移幅が大きく、閉塞が進行し難いが、閉塞確率が大きい領域では  $Bow_{0.1}$  と  $Bow_{1.0}$  は似た形状を示す。

弓型では、S 字型と比較して小さな  $Q_{WD}$  での閉塞確率は混合割合による差が大きい。図 2.7、2.8 で示したように弓型は曲がりの程度  $C$  が S 字型より大きいことが影響したと推測される。しかし、弓型では大きい  $Q_{WD}$  では混合割合による閉塞確率の差が小さくなる。 $Q_{WD}$  が  $100\text{cm}^3/\text{s}$  より大きな領域では流木同士が接触する作用点が相対的に多くなることから、流木同士の連結がどの割合でも同様に生じやすくなり、一度連結して閉塞すると再流出は起こりにくいことも推測される。大きい  $Q_{WD}$  では、混合割合 0.3 と 0.5 で、並びに 0.1 と 1.0 で閉塞確率や回帰曲線が近い傾向を示し、0.3 と 0.5 の方が非閉塞から閉塞への遷移が急だった。

以上より、両曲がり形状で混合割合が大きい方が必ずしも閉塞が起きやすい結果は得られなかった。S 字型や弓型の混合割合が 0.3 と 0.5 では閉塞確率 0.5 を示す  $Q_{WD}$  や回帰曲線の傾きが類似しており、一定以上の混合割合では差が小さくなることが推測される。

図 2.15 の直線形状と S 字型の全ケース、弓型の全ケースのロジスティック解析の結果からは、両曲がり形状とも直線形状よりも傾きが急で、直線よりも曲がりの方が小さい  $Q_{WD}$  から閉塞確率が上昇し、非閉塞から閉塞の遷移が進みやすいことが示される。直線は形状的に最も流木同士が連結し難いため、閉塞が発生するには曲がりと比較して大きな流木塊となる必要があり、閉塞確率が上昇する  $Q_{WD}$  が曲がり形状よりも大きい。さらに、直線で傾きが最も緩いのは、一時的に閉塞しても再流出が最も起きやすい形状であることが影響する。また、曲がりの形状で比較すると、弓型の方が S 字型よりもわずかに急で、閉塞が起こりやすいことが示される。一般には S 字型の方が、流木同士が絡みやすくなると考えられるが、本検討では弓型の方が曲がりの程度が大きかったことや、S 字型では曲がり流木のみで閉塞し難かったことが影響したと推測される。一方、実験条件や試行回数によっては非閉塞のみや閉塞のみの領域が少なかった影響も考えられることから、試行回数を増やして更なる検討を進める。

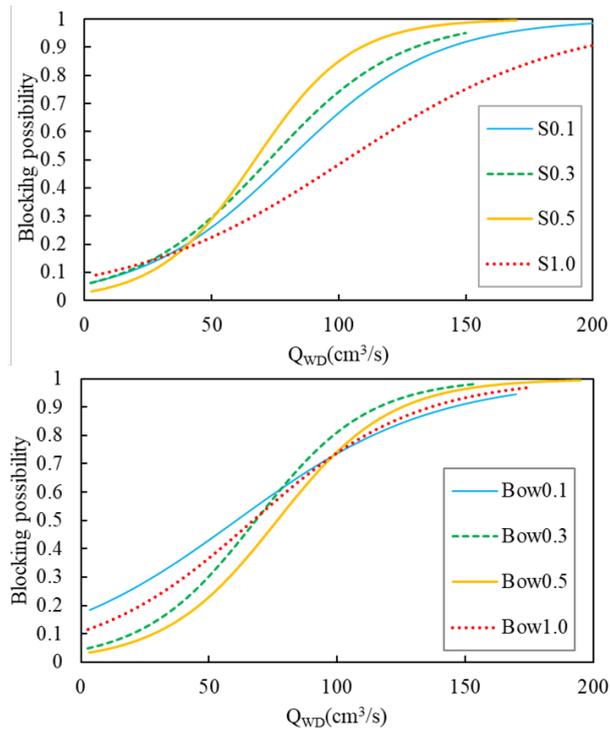


図 2.14 ロジスティック解析結果（上段：S字型、下段：弓型）

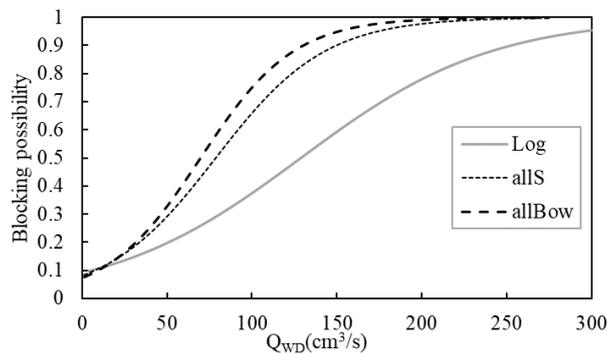


図 2.15 ロジスティック解析結果（直線形状 Log、S字型全ケース、弓型全ケース）

## 2.5 本章のまとめ

本章では、流木の幹形状が山地河川での橋梁閉塞に及ぼす影響を把握することを目的として実施した。まず、2018年7月豪雨で流出した流木を対象に、東広島市内で現地調査を実施した。ドローンで撮影したオルソ画像から、対象地では曲がった形状の流木は約1割確認された。流木サンプルの平均値から、S字型と弓型の代表的な形状を求めて、3Dプリンターで曲がった形状の流木模型を製作した。次に、曲がった形状の流木が直線形状と比べて橋梁閉塞に及ぼす影響を把握するために、水理実験を実施した。

実験結果から、曲がった流木が含まれると直線形状と比べて少ない流木流量で橋梁が閉塞することや、閉塞が進みやすいこと、曲がった流木では弓型の方がS字型よりも閉塞しやすい傾向を

示した。これは、曲がった形状の場合、直線形状と比べて流木が互いに絡みやすくジャム状になることや、S字型と弓型では曲がりの程度が大きな弓型の方がより絡まりやすかった影響と推測される。混合割合は、S字は0.5までは割合が大きい方が閉塞しやすくなるが、1.0では他の割合より閉塞し難い。S字型の形状そのものや、曲がりの程度が影響したことが推測される。弓型では、混合割合0.3と0.5で閉塞の遷移が近く、0.1や1.0よりも閉塞しやすいことを示し、曲がった流木が多い方が閉塞しやすいとは限らなかった。

今後は、実験の試行数を増やして、曲がりと同程度の場合や、S字型の方が大きい場合についても検討を行う。さらに、異なる水理条件や橋梁の条件についても検討を進める。また、2019年以降に土砂災害が発生した地域についても、山間部から流出した流木の形状について調査を行い、各地域における代表的な流木の形状や、存在割合、地域毎の特徴などを合わせて検討していく。

### 3. 山地河川の橋脚を有する橋梁の閉塞に流木の形状や比重が及ぼす影響

本章では橋脚2本の橋を対象として、根付形状の水面を浮いて流れる1より小さい比重と水中を流れる1より大きな比重の流木が、閉塞に及ぼす影響を水理実験から検討して、防災上有用な知見を得ることを目的とした。

#### 3.1 実験方法

既往研究<sup>8),9)</sup>を参考に、実験は長さ400 cm、流路幅20 cmの直線矩形断面水路を使用した(図3.1)。勾配は2度、水理条件は流量2.6 l/s、水深14 mm、平均流速0.9 m/sのフルード数2.51の射流条件である。上流端から定常的に水を供給して、上流端より30 cm下流の位置から流木模型をまとめて約1秒間で投入した。投入本数やその他の実験条件を表3.1左に示す。同一条件では10回の実施を基本とした。流木模型は直線の幹に根が付いた形状として、ABS樹脂により3Dプリンターで作成し、長さ $L_w$ は5 cmと7 cmとした。比重SGは0.8と1.2で、0.8は幹の中心部を空洞にして調整した。

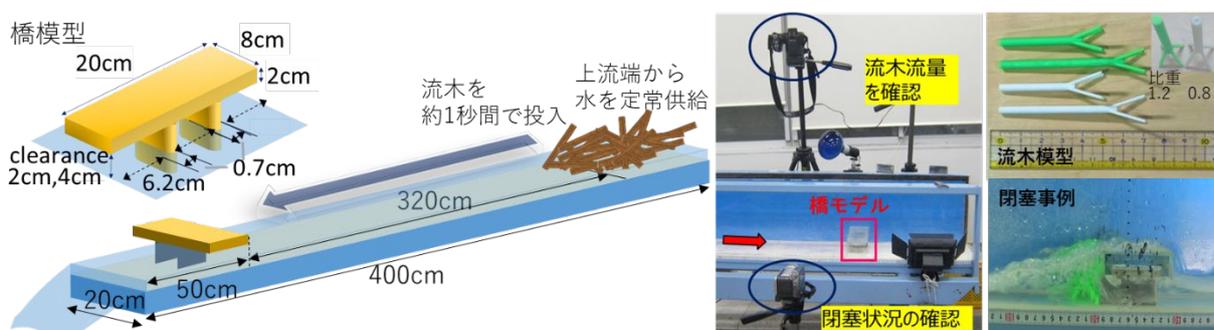


図 3.1 実験概要と橋模型 (左)、撮影の様子 (中央)、流木模型と閉塞事例 (右)

表 3.1 実験条件（左）と閉塞する最小の濃度  $C_{w\_min}$ （右）

橋	流木			実験結果 $C_{w\_min}$
	余裕高 $H_c(\text{mm})$	長さ $L_w(\text{cm})$	比重 SG 投入本数（10 本毎 に変化）	
20	5	0.8	45~80 (5 本毎)	0.045
			5~60 (5 本毎)	0.045
	7	1.2	70~150	0.032
			20~90	0.030
40	5	0.8	50~120	0.053
			20~80	0.047
	7	1.2	100~210	0.067
			40~110	0.028

橋模型は、橋脚2本（0.7 cm幅）、横幅20 cm縦幅8 cm、厚さ2 cmとして、水路下流端から50 cm上流の位置に設置した。水路側面と橋脚、並びに2本の橋脚間は6.2 cmになるように設置した。水面から橋桁下面までの余裕高 $H_c$ は20 mm、40 mmの2種類とした。

実験は2台のカメラを用い、上空から橋とその上流50 cmの区間をf.p.s.300で撮影した。橋の側面から閉塞状況を記録した。閉塞は、橋の上流側で水位が上昇している場合と定義した。投入量が同じでも、橋の上流に到達する際の拡散や集積状況は異なる。そのため、上空から撮影した映像解析から橋の20 cm上流の断面を流木が通過する時間を求めて、投入量を除した単位時間流木量 $Q_{wD}$ を基に、水の流量を考慮した流木濃度 $C_w$ を算出して<sup>1),2),4)</sup>、閉塞を評価する指標とした。3章以降では流木濃度 $C_w$ を採用した。さらに、 $C_w$ と実験結果の閉塞・非閉塞を用いてロジスティック回帰分析を行い、閉塞確率を算出した。

### 3.2 結果と考察

実験結果を図3.2に、回帰分析で得た回帰曲線を図3.3に示す。また、実験で閉塞した最小の $C_w$ （以降、 $C_{w\_min}$ と呼ぶ）を表3.1右に示す。同じ $H_c$ と $L_w$ では、 $H_c40$  mm、 $L_w5$  cmを除くとSG1.2の方が0.8より小さい。実験観察より、SG1.2では流木が水中を流れるため、水面上を流れるSG0.8よりも移動速度が遅く、橋付近での滞留時間が長くなる（図3.4左）。なお、流木模型を1本ずつ投入した場合の平均流下速度は根付のSG1.2では0.84 m/s、根付のSG0.8では0.99 m/sであり、SG0.8の方が1.17倍大きかった。丸太形状のSG0.8の平均流下速度は1.13m/sで根付のSG 0.8より1.14倍大きかった、形状による抵抗の差だと考えられる。

ワンスパン橋梁は橋桁を起点として閉塞する（図3.5）。橋脚のある橋梁では、橋桁だけでなく、橋脚間や橋脚と橋桁の間を契機とする閉塞が発生する（図3.6）。SG1.2はSG0.8より橋脚を契機とする閉塞が発生しやすく、このような傾向が出たと考えられる。

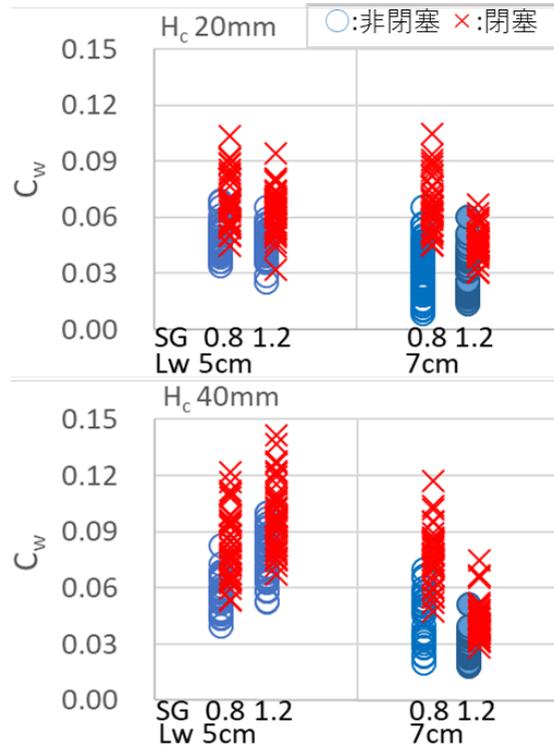


図 3.2 実験結果（上段：余裕高  $H_c 20\text{mm}$ 、下段： $H_c 40\text{mm}$ ）

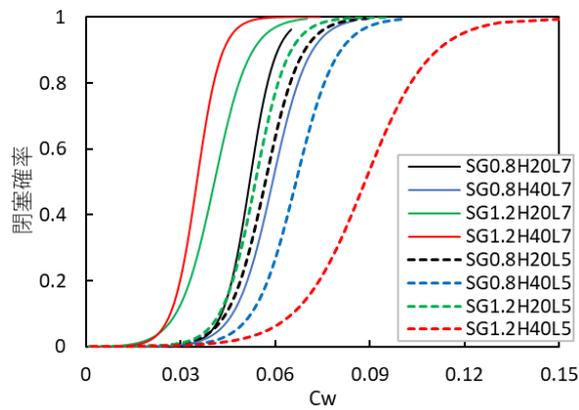


図 3.3 解析結果（凡例の H は余裕高、L は流木長）

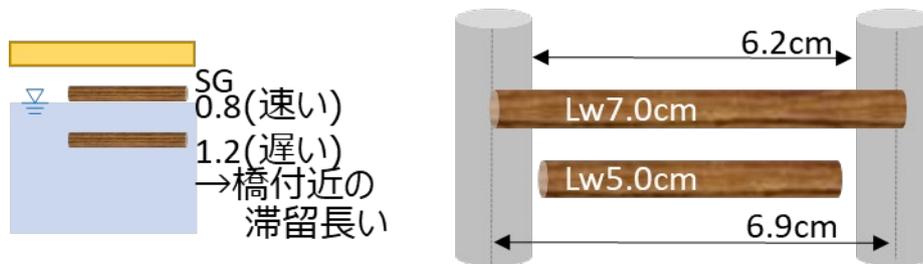


図 3.4 流木流下の模式図（左）と流木長と橋脚間の模式図（右）



図 3.5 橋脚有り、ワンスパン橋梁での橋桁契機にする流木の閉塞



図 3.6 橋脚有り橋梁での橋脚間契機（左）と橋脚と橋桁を契機（右）にする流木の閉塞

Hc20 mmは同じ比重のとき、Cw\_minは流木長Lwによる差が小さく、SG1.2では僅かに7 cmの方が5 cmより小さい。余裕高Hcが相対的に小さいため、橋桁を契機とする閉塞が主だったことが推測される。Hc40 mmでは同じ比重の流木長と比較すると、7 cmの方がCw\_minが小さく、SG1.2で差が著しい。Lw7 cmは一本で橋脚間をまたがる事が出来る長さで、SG1.2は水中で橋脚を契機とする閉塞が発生しやすく、橋桁を契機とする閉塞が少ないHc 40 mmでこのような傾向が出たと考えられる（図3.4右）。

ワンスパン、並びに橋脚2本の比重が1より小さな流木の既往検討から<sup>8)9)</sup>、余裕高が大きくなると、閉塞に必要な流木の流量や濃度は大きくなる。Hcによる差を比較すると、Lw5 cmとSG0.8、Lw7 cmのCw\_minは前述の傾向を示すが、SG1.2、Lw7 cmはHc40 mmの方が20 mmよりCw\_minが小さい。SG1.2、Lw7 cmのHc40 mmは、他の条件と比較して橋脚を契機とする閉塞が発生しやすく、橋桁を契機とする閉塞は少なかったと考えられる。

SG1.2、Lw5 cmは、Hc20 mmの方が40 mm よりCw\_minが小さい。流木長が短く橋脚を契機とした閉塞が発生し難く、更にHc40 mmでは長さとは比重の条件から橋桁を契機とする閉塞も発生し難い。また、Hc40 mm のLw5 cmではSG1.2の方が0.8よりCw\_minが大きく、他と逆の傾向を示す。橋脚ならびに橋桁、あるいは両者により閉塞が発生するには、大きな流木塊となる必要があるため、他の条件と比較して最大のCw\_minを示したと推測される。

図3.3の解析結果からも、SG1.2、Lw7 cmは閉塞が発生し始めるCwはHcによる差はないが、40 mmの方が傾きが急で、一気に閉塞が進む。SG1.2、Lw5 cmは、Hc40 mmが閉塞の始まるCwが最大で、傾きも最も緩く、閉塞が始まっても非閉塞が混在する領域が長く、閉塞し難い条件であることが明らかである。

## 4. 山地河川のワンスパン橋梁の閉塞に流木の形状や比重が及ぼす影響

本章は、急勾配の山地河川におけるワンスパン橋梁について、丸太と根付の流木形状、ならびに比重0.8と1.2による流れ方の差が、閉塞に及ぼす影響を水理実験から検討して、防災上有用な知見を得ることを目的とした。

### 4.1 実験方法

実験は、ワンスパン橋梁について比重0.8、丸太形状の流木を対象とした既往検討<sup>8)</sup>と同様に、水路長400cm、幅20cm、の直線水路を用いた（図4.1左）。橋脚のないワンスパン橋梁の模型（縦断幅8cm、幅2cm）は、橋の上流側が下流から50cm位置になるよう配置した。上流端から定常的に水を供給して、上流端より30cm下流の位置から流木模型をまとめて約1秒間で投入した。投入時のばらつきを考慮するため、同一条件の実験を10回実施した。勾配は2度、水理条件は流量3.37 l/s、水深14mm、平均流速1.2m/sのフルード数3.23の射流条件である。橋模型の水面から橋桁下面までの高さ（余裕高 $H_c$ ）は2mm、5mm、8mmの3種類で検討した。

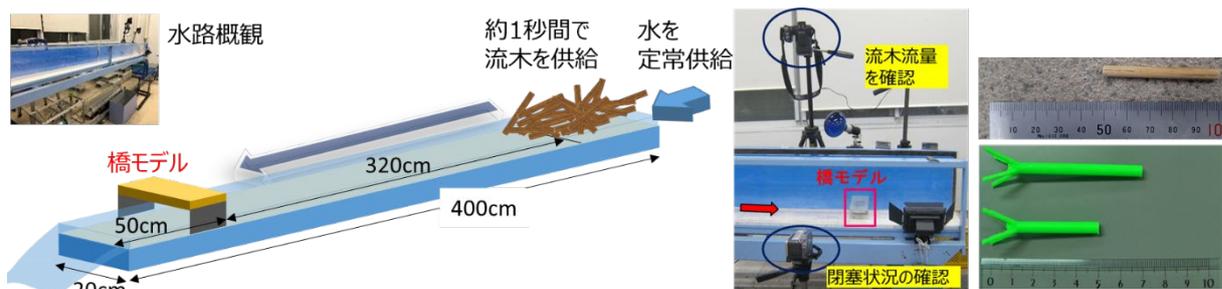


図 4.1 実験水路の概要（左）と下流の撮影状況（中央）、用いた流木模型（右、上段が丸太、下段が根付）

実験は2台の高速ビデオカメラ（300f.p.s.）で撮影し、水路上空から橋とその上流50cmまでが映る位置と橋を真横から撮影できる位置に設置した（図4.1中央）。上空から流木が橋に到達する流れの状況を、横から閉塞状況を記録した。閉塞は、橋の上流側で水位が上昇している場合と定義した。流木模型は丸太と根付きの形状で（図4.1右）、比重は0.8、1.2のものを、流木長は5cmと7cmで閉塞状況を検討した。一つの実験では一種類の流木模型を用いた。なお、丸太・比重1.2は、予備実験から丸太・比重0.8で閉塞確率0.6-0.9となる本数を投入しても全く閉塞しなかったため、本研究では対象外とした。

### 4.2 結果と考察

実験映像を解析して橋の直上流に到達する流木濃度 $C_w$ （供給した水および流木の体積に対する流木の体積）を算出し、流木濃度を指標として橋の閉塞・非閉塞を検討した結果を図4.2に示す。根付では丸太と比べて小さい流木濃度 $C_w$ で閉塞する。同じ根付形状で比重による差はあり、0.8の方が1.2より低濃度で閉塞が起こる傾向だが、流木長7cmでは余裕高2mmや8mmで差が少ない。根付では閉塞が低濃度から発生するので、丸太と比べて閉塞しない領域の濃度が小さい。

また、既往検討と同様<sup>8)</sup>に、同じ濃度でも閉塞・非閉塞が混在する領域が見られたため、実験結果を基にロジスティック解析により閉塞の起こりやすさを回帰曲線で示して、図4.3の結果を得た。いずれも濃度の上昇に従い閉塞確率が上昇して、ある濃度での閉塞確率が推定可能であり、図-2右上段のように閉塞が混在する領域（黄色）の位置と広がり方は、回帰曲線の位置と傾きで表現される。閉塞確率50%の流木濃度が大きくなると、混在領域は濃度の大きい側になる。図4.3の結果からも、比重より流木形状による差が大きいことが示される。流木長5cm、余裕高2mmを除くと、根付の方が傾きが急で、非閉塞から閉塞への遷移する濃度の範囲が小さい。

閉塞確率50%となる流木濃度を流木長/余裕高を指標として図4.4に示した。流木長/余裕高が大きくなるほど50%閉塞確率の濃度が減少傾向で、丸太・比重0.8で顕著に見られるが、根付では比重が大きくなっても減少する傾きが小さい。根付形状では、比重0.8と1.2で似た傾向を示した。

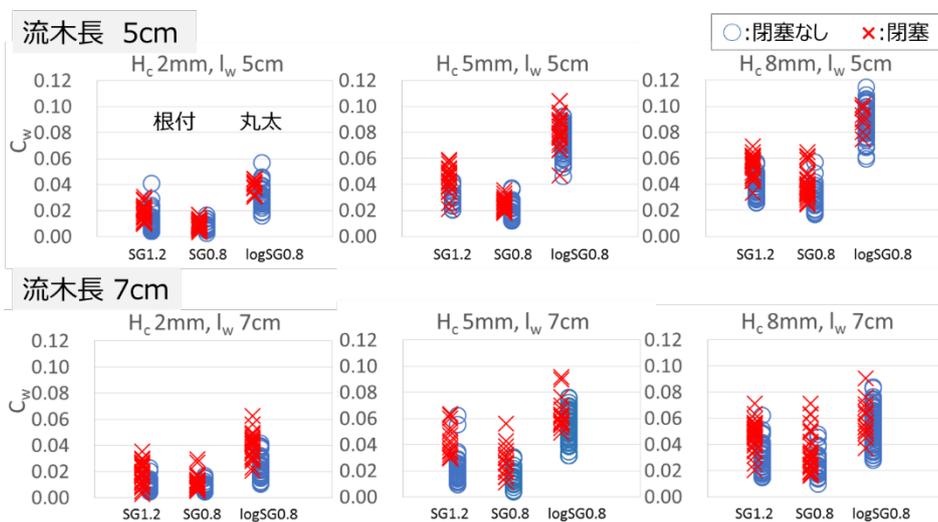


図 4.2 実験結果（図中の  $C_w$ :流木濃度、  $H_c$ :余裕高、  $l_w$ :流木長、  $SG$ :比重、  $log$ :丸太形状）

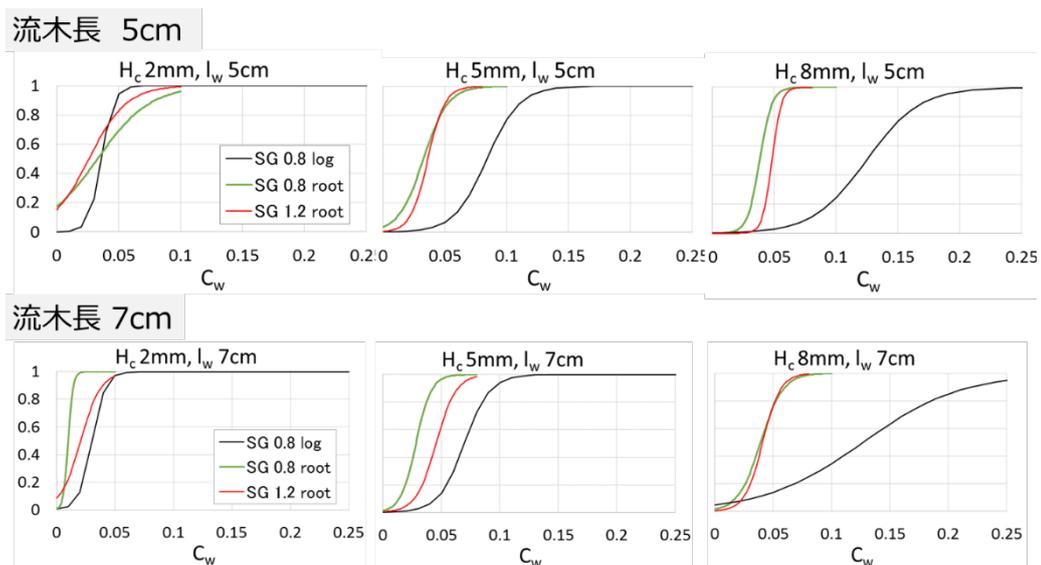


図 4.3 ロジスティック解析で得られた流木濃度  $C_w$  に対する閉塞確率（縦軸）（図中の  $log$  : 丸太形状、  $root$  : 根付形状）

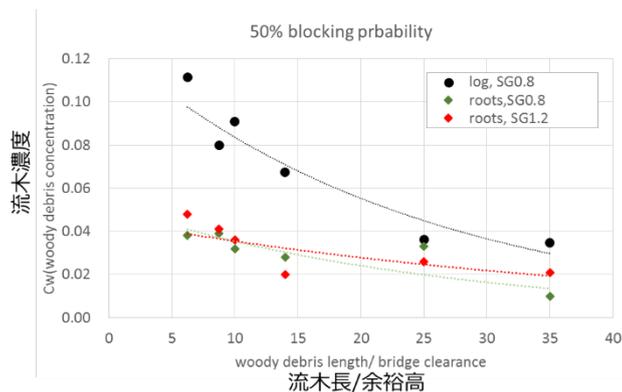


図 4.4 閉塞確率 50 %となる流木長/余裕高と流木濃度

## 5. 山地河川の橋の閉塞に流木の流出過程が及ぼす影響

山地河川での流木による橋の閉塞に関する既往研究は、流出した全流木の本数や濃度、量に着目したものが大部分である。一方、同じ量の流木が発生した場合でも、各時刻における流木の流出過程の違いにより閉塞・非閉塞が変わることは災害状況や実験からも明らかだが、橋に到達する際の流木濃度などの時間的変化に着目した検討は殆どない。

本章では、急勾配の山地河川におけるワンスパン橋梁について、流木濃度の時間的変化に着目して、橋の閉塞に影響する指標を検討することを目的とした。既往の水理実験<sup>8)</sup>を基に、異なる時間分解能による流木濃度の時間的変化を算出して閉塞と非閉塞の表れ方を整理するとともに、ロジスティック回帰分析を行い、異なる時間分解能における濃度のピーク値と既往検討での平均濃度を比較して、閉塞・非閉塞の判別指標としての妥当性を検討した。

### 5.1 方法

筆者らが実施した実験<sup>8)</sup>の一部ならびに同様の条件で追加実験を行い検討対象とした。水路長400cm、幅20cmの直線水路で、水理条件は勾配2度、流量3.17L/s、水深1.4cm、平均流速1.13m/s、フルード数3.05の射流で、橋脚なしのワンスパンの橋模型を用いた（図5.1）。

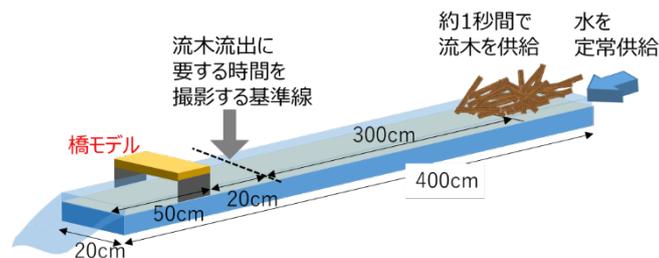


図5.1 実験の概要

流木模型は木製の比重0.8、直径0.5cmの丸太形状で、①余裕高2mm、流木長10cm ②余裕高8mm、流木長10cm ③余裕高2mm、流木長5cmの条件で投入本数を変えた各試行を対象とした。橋模型の20cm上流を基準線として、上空から撮影した動画により0.05-0.2秒(0.05秒刻み)の時間分解能による流木濃度を算出して、閉塞と非閉塞の条件を整理した。更に、各条件でロジスティック回帰分析を行い、各時間分解による流木濃度のピーク値と、既往検討で用いられた平均流木濃度（全流木が基準線を通るまでに要する時間を基に、算出された流木流量と水の供給流量から求められた濃度）について、閉塞・非閉塞の判別指標としての妥当性を比較検討した。

## 5.2 結果と考察

ロジスティック回帰分析で求めた条件①-③について各時間分解能による流木濃度のピーク値、並びに既往研究の平均濃度での対数尤度を表5.1に示す。各条件で灰色に塗りつぶした時間が同一条件の中で最も対数尤度が大きく、閉塞・非閉塞の判別性の精度が高いことが示される。

表5.1 ロジスティック解析から求めた各時間分解による流木濃度のピーク値、並びに平均濃度を指標とした場合の対数尤度

時間 (秒)	条件①	条件②	条件③
0.05	-15.96	-18.21	-25.89
0.1	-14.01	-16.25	-25.24
0.15	-15.30	-14.73	-23.75
0.2	-16.53	-13.58	-24.80
平均	-23.97	-26.93	-27.87

条件①と②では短い時間分解能によるピーク値の対数尤度が大きくなり、平均流木濃度を用いるよりも判別精度が高かった。一方で、条件③では平均濃度を用いる場合と大きな差が見られなかった。

条件①並びに条件③で最も対数尤度が大きく精度が高かった時間分解能0.1秒並びに0.15秒について、実験結果と条件①並びに条件③で最も対数尤度が大きく精度が高かった時間分解能0.1秒並びに0.15秒について、実験結果とロジスティック解析で得た閉塞確率の回帰曲線をそれぞれ図5.2上段ならびに平均濃度の結果を図5.2下段に示す。図-2中に示す縦点線は閉塞確率0.5となる流木濃度を表す。実験結果の閉塞や非閉塞と、回帰曲線から得られた閉塞確率0.5の流木濃度の対応を確認すると、確率0.5未満の濃度で閉塞した試行ならびに0.5以上の濃度で非閉塞だった試行の合計数（以降、判別ミス数と呼ぶ）は小さいほどロジスティック解析による閉塞・非閉塞の判別精度が高いといえる。条件①の判別ミス数は時間分解能0.1秒では5件に対して、平均濃度は12件で、分解能0.1秒の方が精度が高い。一方、条件③の判別ミス数は時間分解能0.15秒では10件に対して、平均濃度は11件で、両者に大きな差が見られない。

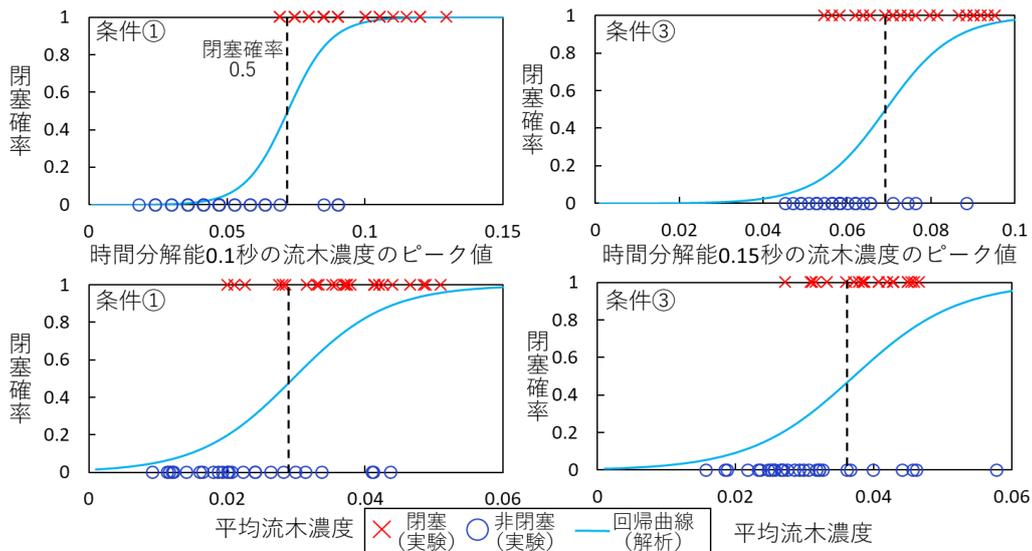


図5.2 最も対数尤度が大きい時間分解能（条件①0.1秒、条件③0.15秒、それぞれ上段）並びに平均濃度を採用した（下段）実験結果とロジスティック解析で得た閉塞確率の回帰曲線（左：条件①、右：条件③）

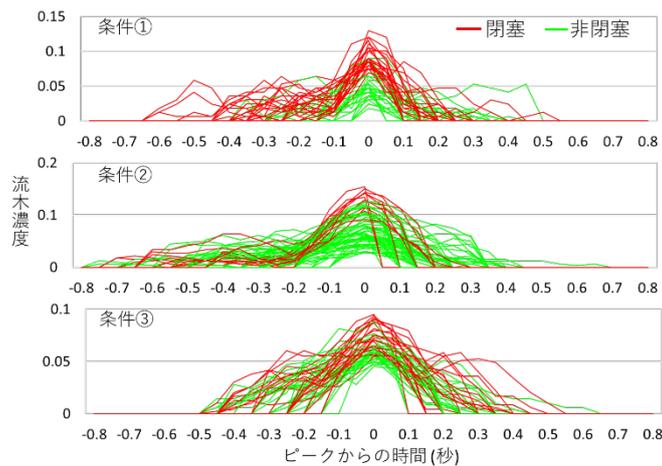


図5.3 最も対数尤度が大きい時間分解能（条件①0.1秒、条件②0.2秒、条件③0.15秒）の流木濃度の時間変化

図5.3に条件①-③について精度が高かった時間分解能の流木濃度の時間変化を示す。図5.3はピークを示した時刻を0秒として、それより前の時刻を負の値で表している。条件①では、閉塞した試行は非閉塞の試行より流木濃度のピーク値やピーク前の流木濃度が高く、ピーク前からやや高い流木濃度を示して且つ高いピーク値を示すことが閉塞に寄与したと推測される。条件②では、閉塞した試行は非閉塞より流木濃度のピーク値がやや高いが、ピーク前の流木濃度は非閉塞の方が比較的高く、急激なピークの発生が閉塞に寄与したことが推測される。このように条件①や②では、短い時間分解能による流木濃度が閉塞・非閉塞の判別指標として有用と考えられる。一方、条件③はピーク値やピーク前の流木濃度とも閉塞と非閉塞の差が明瞭でなく、短い時間分

解能による流木濃度と平均濃度の差は小さかった。

条件③は、他の条件と比べて流木長が短いために流木が上下に重なりにくく、重なった流木が橋桁に接触しても流木がずれて重なりが解消されやすい。条件③は閉塞に必要な流木塊の発生状況や流木塊の安定性が流木濃度よりも大きく影響したためだと考えられる。

本研究から流木長や橋の形状によって、短い時間分解能での流木濃度の変化やピーク値を用いることで平均の流木濃度より閉塞・非閉塞の境界が判別しやすい条件があると示された一方、それ以外の流木塊の発生しやすさや安定性を考慮する必要がある条件が存在することも示された。

## 6. おわりに

本研究により丸太状や根付の流木形状による差や、丸太幹と曲がり幹形状による差、針葉樹などの比重1未満だけでなく広葉樹など1を超える比重に着目して、山地河川の射流域での流木による橋の閉塞・非閉塞の現れ方を新たに示すことが出来た。一部の条件については、流木濃度や流木長／橋の余裕高を指標とした50%閉塞確率の推移から、橋や流木の条件による危険度の違いを示すことができた。また、閉塞が発生する契機となる流木の条件や流出過程について、流木の形状や比重による差や、水理条件や橋の形状による差を明らかにすることも一部達成した。

各形状や比重の流木について、橋の閉塞・非閉塞や推移を示すことで、流木濃度や流木長／橋の余裕高を指標とした橋の閉塞確率を示すことで、現存する山間部の橋について樹種毎の比重や橋の形状から、危険度が高い橋の優先的な防災対策が実施可能になる。山間部の水・土砂の流出解析では、現状では流木そのものの考慮は難しいが、危険度が高い橋では予め閉塞を仮定した解析を行うことで、実災害に近い氾濫や堆積の予測が可能となりこの知見は防災上有用だと考えられる。

一方で、現地調査等による流木の形状や種類についての情報収集やデータ整理による検討は計画で想定したほど実施出来ず、幅広い条件の流木での検討を行った後に、総合的な山地河川における橋や流木の安全度を示すための閉塞確率の推定式を提案するには至らなかった。

今後も、流木や橋の閉塞に関する情報収集を行って、より幅広い条件での流木の橋への閉塞に関する検討を進めた上で、総合的な山地河川における橋や流木の安全度を示すための閉塞確率の推定式を提案することが、防災上において重要な課題だと考える。

## 謝辞

本研究の実施にあたり、広島県土木建築局から流木流出や土砂災害発生箇所のデータを提供頂くとともに、調査の実施に協力頂いた。広島県農林水産局林業課からは樹種分布のデータ提供を頂いた。国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室には、全国の土砂災害や流木災害の事例や対策に関する情報を提供頂いた。広島大学大学院先進理工系科学研究科の長谷川祐治先生には、研究の遂行にあたって終始、協力や助言を頂いた。ここに記して感謝致します。

## 参考文献

- 1) 石川芳治・池田暁彦・柏原佳明ら他12名(2014)2013年10月16日台風26号による伊豆大島土砂災害, 砂防学会誌, Vol.66, No.5, pp.61-72.
- 2) 中川一・井上和也・池口正晃・坪野考樹(1993)流木群の流動に関する研究(2), 京都大学防災研究所年報, 第36号B-2, pp.487-498.
- 3) 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, 第45巻, pp.925-930.
- 4) 赤堀良介(2018)橋脚周辺における流木の3次元的集積に関して, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.74(4), pp. I\_679- I\_684.
- 5) 岡本隆明・染谷智紘・松本知将・山上路生・田中健太(2021)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(4), pp.423-437.
- 6) 橋本晴行・楠窪正和・喜多貢菜・ムハマドファリドマリカル(2016)洪水時における河道内障害物による流木群の集積過程における実験的研究, 第8回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.145-149.
- 7) 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, Vol.57A, pp.1087-1094.
- 8) 中谷加奈・長谷川祐治・里深好文(2018)山地河川を対象としたワンスパン橋梁への流木閉塞に関する検討, 土木学会論文集B1 (水工学) Vol.74, No.5, pp.I\_1081- I\_1086.
- 9) Nakatani, K., Hiura, M., Hasegawa, Y., Kosugi, K., Satofuka, Y. (2017): Experimental study on bridges over mountainous streams with blocked piers due to debris wood, 自然災害科学, Vol.36, 特別号, pp.15-24.
- 10) 長谷川祐治・中谷加奈・里深好文・水山高久(2016)流木を含む土石流による河道閉塞の形成および決壊に関する実験, 砂防学会誌, Vol.69, No.2, pp.19-23.
- 11) 小松利光監修・山本晃一編集・財団法人河川環境管理財団企画(2009)流木と災害ー発生から処理までー, 技術堂出版, 273p.
- 12) 末次忠司(2019)水害被害を助長する土砂・流木の影響, 水利科学, No.365 (第62巻, 第6号), pp.56-69.
- 13) 久保田哲也(2019)平成29年7月九州北部豪雨災害と流木の特徴, 水利科学, No.365 (第62巻, 第6号), pp.10-22.
- 14) Nakamura, F., Swanson, F. J.(1993): Effects of coarse woody debris on morphology and sediment storage of a mountain stream in Western Oregon, Earth Surface Processes and Landforms, 18, pp.43-61.
- 15) 光崎研一(1984)分布型のはなし-二項分布-, 獣医科学と統計利用, No.12, pp.34-37.

- 助成事業者紹介

中谷加奈

現職：京都大学防災研究所 教授（博士（農学））