

山地河川の橋梁閉塞判別における時間変動を考慮した流木指標の有効性

中谷加奈¹・安井鴻騎²・正岡直也³

Effectiveness of Time-Varying Woody Debris Indicators for Bridge Blocking Discrimination in Mountainous Rivers

Kana HASEGAWA NAKATANI¹, Hiroki YASUI² and Naoya MASAOKA³

Abstract

When bridges are blocked with accumulated woody debris (WD), it causes damage. Recent studies focused on all WD reaching at the bridge without considering the change of concentration or volume in time series. However, it is reported that the WD runoff process including the time-series change affect the bridges blocking. In this study, we conducted channel experiments and applied logistic regression analysis with three indicators considering time-series change. In the single span bridge cases, the accuracy of distinguishing between blocking and non-blocking has improved by considering time-varying indicators and combining multiple indicators. In the two bridge piers cases, some improvement was observed in cases with small clearance heights, but no significant improvement was seen compared to single span condition.

キーワード：流木，山地河川，橋梁閉塞，水路実験，ロジスティック回帰分析

Key words: woody debris, mountainous river, bridge blocking, channel experiment, logistic regression analysis

1. はじめに

山間部で土砂災害が発生すると，崩壊部や侵食部の樹木が土砂とともに山地河川から発生・流下する。流木は構造物に衝突して直接的に被害を及ぼすだけでなく，橋を閉塞させることで水や土砂が氾濫し，周辺に被害が拡大する原因になる。近

年の流木による顕著な被害が発生した土砂災害は，2013年の台風26号による伊豆大島の土砂災害¹⁾や，2018年の西日本豪雨^{2,3)}などが挙げられる。いずれも，山間部から流出した流木により橋が閉塞して，氾濫や堆積被害が拡大した。

流木の検討は多数実施され^{例えば3-11)}，岡本らは

¹ 京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

² 前 京都大学大学院農学研究科
Former, Graduate School of Agriculture, Kyoto University

³ 京都大学大学院農学研究科
Graduate School of Agriculture, Kyoto University

流木の沈下過程を考慮した橋梁閉塞⁵⁾や、流木集積による河道閉塞率や橋にかかる流体力⁶⁾を実験から検討している。一方、常流の河川を対象とした検討が多く、急勾配の山地河川の射流区間での検討は少ない。山地河川を対象としたものは、流木の投影面積に着目した橋梁閉塞の検討⁷⁾や、流木形状を考慮した流木捕捉工に関する検討⁸⁾などがある。筆者らは、ワンスパンの橋^{3,4)}や橋脚2本⁹⁾で水理条件や流木条件による橋の閉塞限界の差や、流木を含む土石流による河道閉塞について¹⁰⁾、実験により検討している。

流木に関する既往研究は、流出した全流木や、閉塞に寄与した流木の本数や濃度、流木量、投影面積等に着目したもの^{例えば3,6-10)}が多い。一方、同じ流木量でも各時刻における流木の流出過程や流下密度の違いで閉塞・非閉塞が変わることは明らかで、実験^{5,11)}からも示される。しかし、山地河川を対象とした流木の時間的な変化に着目した橋の閉塞に関する研究は殆どない。筆者も検討¹¹⁾したが、条件が限られていた。

本研究では、流木の流出過程の時間的な変化に着目して、流木密度を反映した投影面積のハイドログラフを映像解析により高時間分解能で測定した。これを元に短期的な流木密度のピーク値やピーク到達前の流木の蓄積状況を示す新たな指標を提案し、これらが時間的な変化を考慮しない従来指標と比較して橋梁閉塞の判別に有効であるかどうかを

検証することを目的として、水路実験やログスティック回帰分析を実施した。

2. 実験

2.1 実験条件

水路長400 cm、幅20 cmの直線水路を使用した。水路外観を図1(左)に示す。水路床は低粗度の鉄板である。日本の土砂災害で流木が発生した山地溪流の橋や水理条件、既往検討を基に^{1-4,9)}、水理条件は勾配2度、流量3.17 L/s、水深1.4 cm、平均流速1.13 m/s、フルード数3.05の射流条件で実験を実施した。

図1中央上、右上に示すアクリル製の橋模型を使用した。橋桁の流路横断方向幅200 mm、縦断方向幅80 mm、厚さ20 mmである。橋脚のないワンスパンと、橋脚2本の橋模型の2種類を用いた。橋脚2本の橋模型は、横断方向に橋脚7 mm、橋脚間や側壁と橋脚間の各スパンは62 mmとした。橋模型は下流端から50 cmの位置に設置した。

図1中央下に示す直径5 mmの円柱状の木製丸棒を流木模型とした。針葉樹を想定し、比重は水に浸けた状態で0.8とした。

上空から撮影した実験のハイスピード(HS)映像を解析して、流木が占める面積の推移を機械的に抽出する方法を採用した。予備検討から、既往検討^{4,9)}と同様に木製の丸太状の流木模型をそのまま流した撮影動画では、水路床と流木模型の判

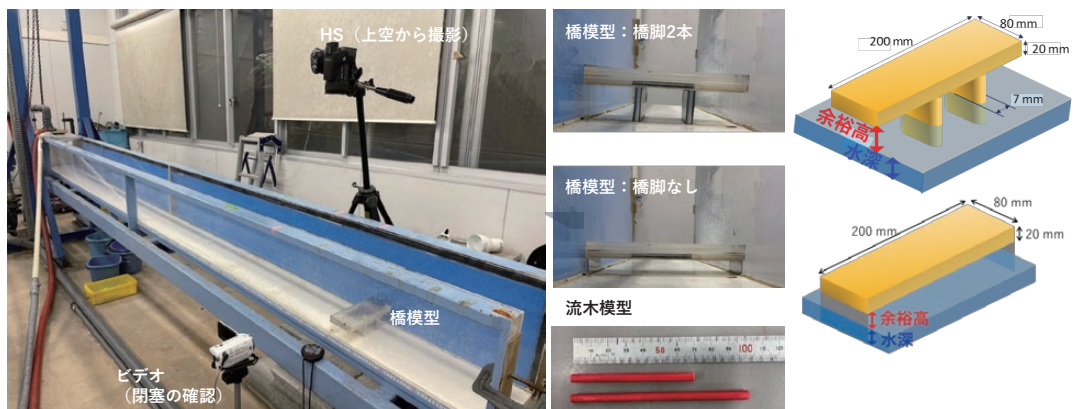


図1 水路外観(左)と橋模型(中央上、右上)、流木模型(中央下)

表 1 実験条件

	条件①	条件②	条件③	条件④	条件⑤	条件⑥
流木長	10 cm	7 cm	10 cm	10 cm	7 cm	10 cm
橋の余裕高	2 mm	2 mm	5 mm	20 mm	20 mm	30 mm
橋脚	なし	なし	なし	2 本	2 本	2 本
流木の投入本数	40~80	60~100	60~100	10~50	60~100	30~70

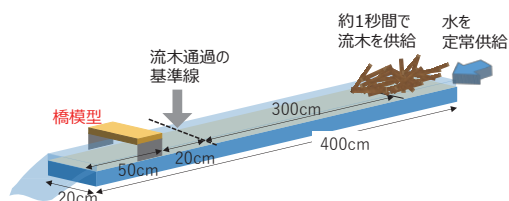


図 2 実験概要

別が困難で、抽出が出来なかった。そこで、流木模型を複数色のカラースプレーで染色して、判別に最適と確認した赤色に染色した流木模型を用いて、中谷ら^{4,9)}と同様の水理条件、橋模型はワンズパンでは余裕高2 mmと5 mm、橋脚2本では余裕高20 mmと30 mm、流木長は7 cm、10 cmの2種類を用いて実施した。予備実験から、染色による流木模型の比重や直径、摩擦速度に及ぼす影響はないものと判断した。

本研究は、模型水理実験とは異なり相似則に合わせて現地と一対一対応のスケールを目指すものではないが、日本の山地溪流でみられる川幅10 m程度(概ね1/50スケール)を想定している。

流木長・橋の余裕高・橋脚本数を変えた6つの条件で実験を行った。実験条件を表1に示す。同じ条件では5種類の投入本数(各条件で10本毎に変化)を設定し、同じ投入本数の試行を10回ずつ行い、合計50回の試行を行った。予備実験から、橋脚の有無や流木長によって閉塞しやすい流木本数や余裕高が異なることから、非閉塞から閉塞が発生するように、それぞれの条件を設定した。

実験方法の概要を図2に示す。上流端から定常的に水を供給し、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。橋とその上流約30 cmまでが映る水路上空の位置にHSカメラ(300 fps)を設置し、流木が橋に到達

する状況を記録した。また、橋を真横から撮影できる位置にビデオカメラ(30 fps)を設置し、水位上昇と橋の閉塞の有無を記録した。1回の試行では流木投入から約1分間通水して流木挙動を確認した。

側方からの撮影映像を用いて、流木が橋に集積して流路を閉塞することで起こる水位上昇の発生の有無を観察した。既往検討^{4,9)}と同様に流木の残留の有無に関わらず、橋の上流で橋桁上面を超える水位上昇が通水終了時まで継続したものを閉塞とみなした。流木が残留せずとも水位が上昇することで、周辺の氾濫、河床上昇の原因になると考えたためである。

2.2 手法

動画の解析には、Jupyter Labで作成したプログラムを用いた。橋模型の上流側15~17.5 cm、15~20 cm、15~22.5 cm、15~25 cmの4種類のエリアで(図3)、流木を河床面に投影した面積がエリア内に占める割合(以下、流木面積と呼ぶ、単位無し)を色検出プログラムにより算出した。

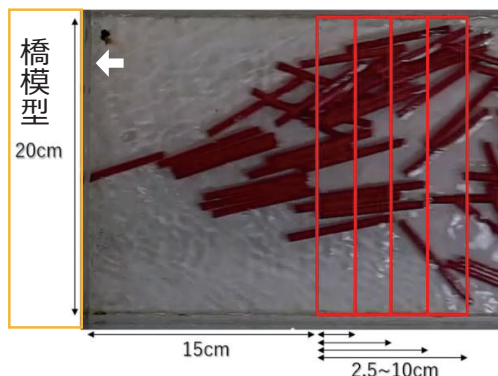


図 3 流木が占める面積の算出エリア



図4 平均流木濃度のイメージ（流木通過の基準線）

流木の色の検出では、あらかじめ設定した RGB 値の条件を満たす画素を流木が存在するエリアとした。HS カメラは300 fps だが、1/300秒では流木の移動量が小さく、全フレームで流木面積を算出すると計算時間が膨大になることから、1/150秒ごとの流木面積を算出した。橋の上流側0～15 cm のエリアは、閉塞発生時に逆流した流木が映り込むため、解析に使用しなかった。

算出した面積の推移をもとに、従来指標の時間変化を考慮しない平均流木濃度 C_{WD} (図4) に対して、画像解析を活かして得られた新指標 A_p 、 A_{BP}/A_T を導入して、以下の3種類を閉塞の指標とした。

A_p は、短い単位時間当たりの流木濃度の変化やピーク値が閉塞に寄与するとの発想から、4種類のエリア (15～17.5 cm, 15～20 cm, 15～22.5 cm, 15～25 cm) における流木面積のピーク値とした。 A_{BP}/A_T は、流木濃度がピークを迎える直前に多くの流木が橋付近に滞留していると閉塞がより発生しやすいとの発想から、橋模型の上流側15～20 cm で、流木面積がピークを迎える前の流木面積の積算値 A_{BP} が、全体の流木面積の積算値 A_T に占める割合とした。橋上流側15～25 cm のエリア内への流木の流入開始時から A_{BP} ではピーク時まで、 A_T では実験終了時までの積分値の合計を、それぞれの流木面積の積算値とした。なお、流木面積は重なりを考慮できないため本数と厳密に一对一の関係ではないが、図3のように流木が重なる面積は本実験の計測範囲内では小さかったことから、本数の増減を精度よく反映する指標であると仮定した。

平均流木濃度の算出では、流木通過の基準線を橋模型の上流側20 cm とし、既往研究^(4,9)で用いられた単位時間流木量 Q_{WD} 、流木濃度 C_{WD} の計算

式を用いた。

$$Q_{WD} = N \cdot V / (t_i - t_f) \quad (1)$$

$$C_{WD} = Q_{WD} / (Q_{WD} + Q) \quad (2)$$

ここに、 Q_{WD} ：単位時間流木量 (cm^3/s)、 N ：投入本数、 V ：流木1本の体積 ($\text{cm}^3/\text{本}$)、 t_i ：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)、 Q ：水の供給流量 (cm^3/s) である。

3. 実験結果

各指標で整理した実験結果を図5～図10に示す。閉塞を危険側として×、閉塞なしを安全側として○と表記した。各条件や各指標について、非閉塞、閉塞のそれぞれの最小値、最大値を NB_{min} 、 NB_{Max} 、 B_{min} 、 B_{Max} とする。

条件①は、流木面積のピーク値 A_p で4種類どのエリアを採用しても、 NB_{min} よりも B_{min} の方が大きい。15～17.5 cm, 15～20 cm では NB_{Max} よりも B_{Max} の方が僅かに大きく、閉塞の方が非閉塞よりも A_p が大きい。一方、15～22.5 cm, 15～25 cm では NB_{Max} の方が B_{Max} より僅かに小さく、 A_p が大きい領域で非閉塞のみが見られる。ピーク前までの流木面積の積算が全期間の積算に占める割合 A_{BP}/A_T や平均流木濃度 C_{WD} は、 NB_{min} よりも B_{min} の方が大きく、 NB_{Max} よりも B_{Max} の方が大きい。一方、 C_{WD} よりも A_{BP}/A_T の方が閉塞の方が非閉塞より大きい傾向を明瞭に示した。

条件②は、 A_p で4種類どのエリアを採用しても、 NB_{min} よりも B_{min} の方が大きく、 NB_{Max} よりも B_{Max} の方が大きく、閉塞の方が非閉塞よりも A_p が大きい。一方、 A_{BP}/A_T や C_{WD} は、 NB_{min} よりも B_{min} の方が大きい。一方、 NB_{Max} よりも B_{Max} の方が小さく、それぞれの指標が大きい領域で非閉塞のみが見られ、特に A_{BP}/A_T で顕著で、閉塞が非閉塞より大きいとはいえない。

条件③は、 A_p で4種類どのエリアを採用しても、 NB_{min} よりも B_{min} の方が大きく、 NB_{Max} よりも B_{Max} の方が大きく、閉塞の方が非閉塞よりも A_p が大きい。一方、 A_{BP}/A_T や C_{WD} は、 NB_{min} よりも B_{min} の方が大きく、 C_{WD} は NB_{Max} よりも B_{Max}

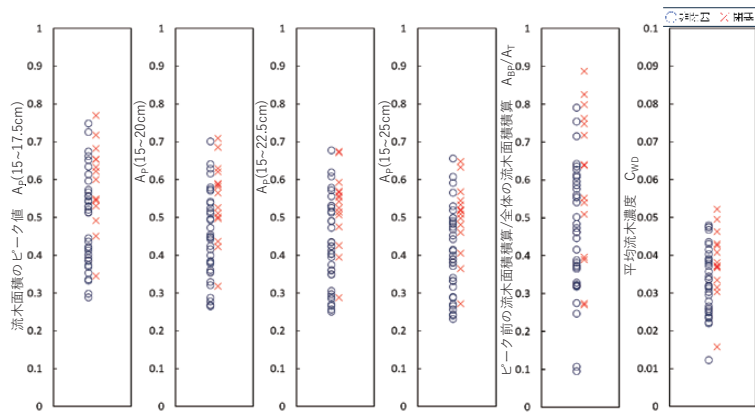


図5 条件①の実験結果 (橋脚なし, 流木長10 cm, 余裕高2 mm)

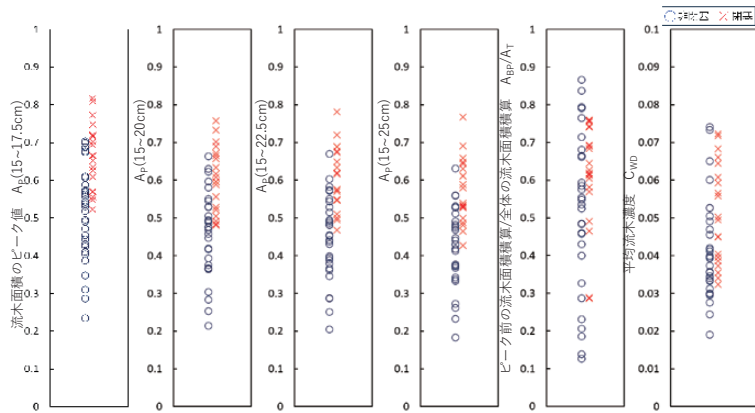


図6 条件②の実験結果 (橋脚なし, 流木長7 cm, 余裕高2 mm)

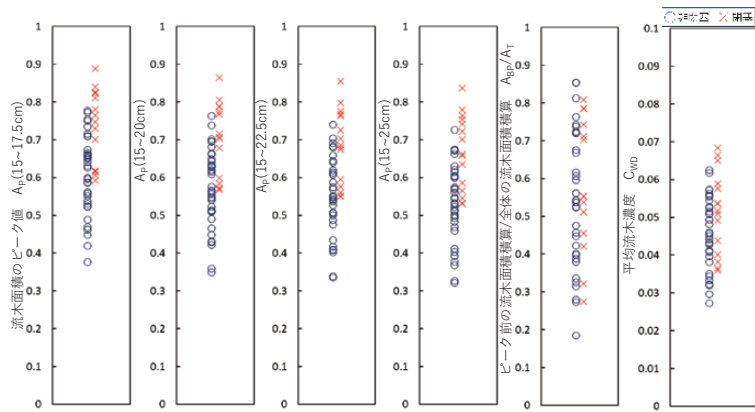


図7 条件③の実験結果 (橋脚なし, 流木長10 cm, 余裕高5 mm)

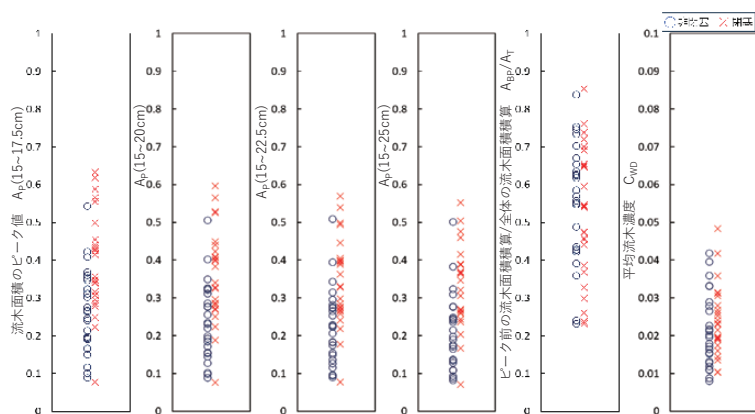


図8 条件④の実験結果 (橋脚2本, 流木長10 cm, 余裕高2 cm)

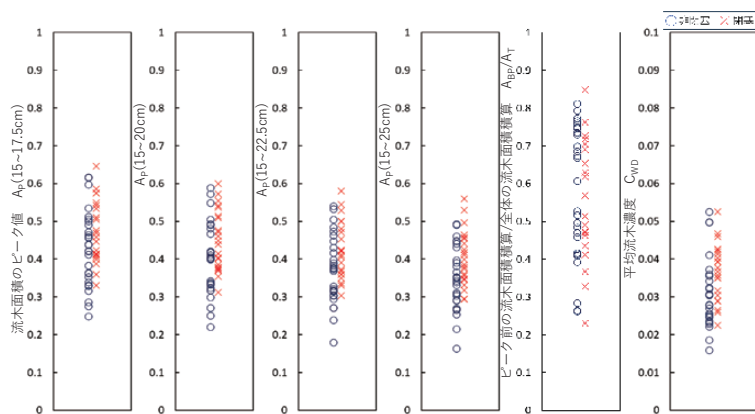


図9 条件⑤の実験結果 (橋脚2本, 流木長7 cm, 余裕高2 cm)

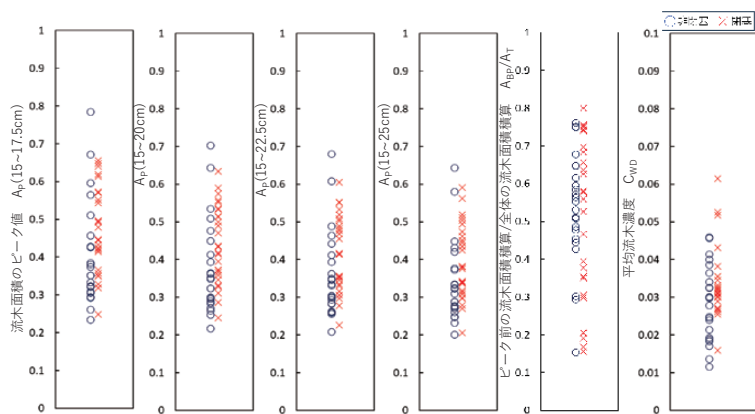


図10 条件⑥の実験結果 (橋脚2本, 流木長10 cm, 余裕高3 cm)

の方が大きく、閉塞の方が非閉塞よりも大きい。一方で、 A_{BP}/A_T では NB_{Max} よりも B_{Max} の方が小さく、条件②と同様に閉塞が非閉塞より大きいとはいえない。

条件④は、 A_p で4種類どのエリアを採用しても、 NB_{min} よりも B_{min} の方が僅かに小さい。一方、どのエリアでも NB_{Max} よりも B_{Max} の方が大きく、 A_p が大きい領域では閉塞のみの領域が示された。 A_{BP}/A_T は、 NB_{min} と B_{min} がほぼ同値で、 NB_{Max} よりも B_{Max} が僅かに大きい差は殆どなく、非閉塞と閉塞を判別できない。 C_{WD} は NB_{min} よりも B_{min} の方が大きく、 NB_{Max} より B_{Max} の方が大きく、閉塞の方が非閉塞より大きい傾向は示すが、明瞭ではない。

条件⑤は、 A_p で4種類どのエリアを採用しても、 NB_{min} よりも B_{min} の方が大きく、 NB_{Max} よりも B_{Max} の方が僅かに大きい。閉塞の方が非閉塞よりも A_p が大きく、15~22.5 cm、15~25 cmでより明瞭だった。 A_{BP}/A_T は、 NB_{min} より B_{min} が小さく、 NB_{Max} よりも B_{Max} が僅かに大きい差は殆どなく、非閉塞と閉塞を判別できていない。 C_{WD} は、 NB_{min} より B_{min} が大きい、 NB_{Max} と B_{Max} がほぼ同値で、非閉塞のみの C_{WD} の小さな領域は示すが、大きな領域での閉塞のみは判別できない。

条件⑥では、 A_p で4種類どのエリアを採用しても、 NB_{min} よりも B_{min} の方が僅かに大きく、 NB_{Max} よりも B_{Max} の方が小さく、閉塞と非閉塞の判別ができない。 A_{BP}/A_T は、 NB_{min} と B_{min} がほぼ同値で、 NB_{Max} よりも B_{Max} が僅かに大きい差は小さく、非閉塞と閉塞を判別できない。 C_{WD} は、 NB_{min} より B_{min} が大きく、 NB_{Max} より B_{Ma} が大きく、閉塞の方が非閉塞よりも C_{WD} が大きい傾向を示した。

全条件で、流木面積の取得範囲を広げることで A_p は下がる傾向だった。狭い面積の取得範囲で高いピーク値を示した試行は、面積の取得範囲を広げても比較的高いピーク値を示した。特に A_p による閉塞の判別が示された条件②③④⑤では、幅が最大の15~25 cmや2番目に大きな15~22.5 cmで、低値の領域で非閉塞のみや高値の領域で閉塞のみ等を示し、有効であった。実験観察から、閉塞の契機となる流木流出や流木塊全体を

広範囲の方が、過不足なく抽出出来たためと考えられる。

A_p で整理した結果を比較すると、 C_{WD} と同様に、流木長が大きいほど、余裕高が小さいほど、小さな A_p で閉塞が起こる傾向が見られた。これは、既往検討^{4,9)}と同様の傾向である。

ピーク前までの流木面積の積算が全期間の積算に占める割合 A_{BP}/A_T で整理した結果を比較すると、橋脚なし余裕高2 mmで流木長10 cmの条件①では、低値の領域では非閉塞のみで、数値が上がると閉塞の発生が見られ、高値の領域では閉塞のみを示した。同様の条件で流木長7 cmの条件②では、低値の領域では非閉塞のみで、数値が上がると閉塞の発生が見られるが、高値の領域でも非閉塞と閉塞が両方発生した。橋脚なし余裕高3 mmで流木長10 cmの条件③でも②と同様に、低値の領域では非閉塞のみで、数値が上がると閉塞の発生が見られるが、高値の領域でも非閉塞と閉塞が両方発生した。橋脚2本の条件では、非閉塞と閉塞の傾向の違いは見られなかった。

条件②~⑤は、 C_{WD} よりも A_p を用いる方が閉塞と非閉塞の違いが示される傾向があったものの、従来の C_{WD} を指標とした場合と同様に、 A_p や A_{BP}/A_T を指標とした場合でも、同じ数値で閉塞と非閉塞が混在する領域が多く、実験結果だけで閉塞と非閉塞の差を評価することが難しい。次章では、実験結果を基に統計的手法を用いて検討を実施する。

4. ロジスティック回帰分析による統計評価

各指標の値が増加するにともなって閉塞確率が増加する傾向を定量的に評価するため、ロジスティック回帰分析^{12,13)}を用いる。ロジスティック回帰分析は目的変数が2値(0または1)である場合に目的変数が1となる確率を予測する分析手法である。本研究では、閉塞の有無を目的変数、各指標を説明変数として閉塞が発生する確率を予測する。

説明変数に用いる指標が1つの場合、目的変数である確率 P は、説明変数 x を用いて式(3)で

表される。 e は自然対数, a と b は係数である。

$$P = \frac{1}{1 + e^{-(ax+b)}} \quad (3)$$

説明変数に用いる指標が2つの場合, 目的変数である確率 P は, 説明変数 x_1, x_2 を用いて式(4)で表される。 e は自然対数, a_1, a_2 と b は係数である。

$$P = \frac{1}{1 + e^{-(a_1x_1 + a_2x_2 + b)}} \quad (4)$$

既往検討^{3,4,9)}でも, 閉塞と非閉塞の混在領域や推移過程を評価するためにロジスティック回帰分析を実施したが, 平均流木濃度や単位時間流木量など単一指標を用いた検討に留まった。本論文では, 時間的な流木の流出過程の特徴を新たな指標を採用し, 且つ2つの指標を組み合わせまでを検討することで, 閉塞と非閉塞の境界を明らかにすることを目指した。

4.1 指標1つでのロジスティック回帰分析

指標1つでのロジスティック回帰分析の対数尤度を表2に示す。対数尤度はロジスティック回帰分析によって求めた閉塞確率の推定式のもっともらしさを表す数値で, 数値が大きいほど閉塞・非閉塞の判別性が高い。赤色で塗りつぶしたマスは, 各条件の流木面積のピーク値 A_p を指標に用いた解析で対数尤度が最大のものを示す。また, 対数尤度が最大の A_p と C_{WD} について, 尤度比検定の

結果を表2に示した。

なお, A_{BP}/A_T と C_{WD} では, 条件①で僅かに A_{BP}/A_T の対数尤度が上がったものの, 他の条件では C_{WD} の方が大きい。 A_{BP}/A_T と C_{WD} について尤度比検定を実施した結果, どの条件も優位な差は見られなかった。以降は, A_p と C_{WD} について述べる。

橋脚なしの条件①～③や, 橋脚ありの条件④では, A_p を指標に用いた時の対数尤度が大きく, 平均流木濃度 C_{WD} を指標に用いるよりも判別精度が高かった。一方, 条件⑤⑥では, A_p を指標に用いても, C_{WD} を用いた時と大きな差はなかった。条件②③や⑤⑥では, 橋の上流側15～25 cmの A_p が最も優れていた。条件①④でも, 橋の上流側15～25 cmの A_p を指標に用いた時と, 最も対数尤度の高かったエリアでの A_p を指標に用いた時では, 対数尤度の値に大きな差はなかった。

指標1つでは, 最大 A_p と C_w について条件②③並びに④で $p < 0.01$ の有意な差が得られた。条件①は統計的な有意差には至らなかったが, 軽微な傾向が示唆された($p = 0.0506$)。軽微な傾向の①までも含めると, 橋脚なしと橋脚2本で余裕高が小さく流木長が長い条件では, 閉塞の判別精度が上がったことが示された。

各条件で, A_p による対数尤度が最大のロジスティック回帰分析と, C_{WD} を指標としたロジスティック回帰分析の結果を図11, 図12に示す。

表2 指標1つのロジスティック回帰分析の対数尤度(赤色の網掛けは, 流木面積ピーク A_p を指標に用いた解析で対数尤度が最大のもの)

指標		条件①	条件②	条件③	条件④	条件⑤	条件⑥
15～17.5 cm 面積ピーク	A_p	-27.58	-23.26	-23.68	-28.75	-32.73	-32.70
15～20 cm 面積ピーク	A_p	-26.87	-22.93	-23.21	-28.29	-32.33	-32.59
15～22.5 cm 面積ピーク	A_p	-26.94	-21.46	-22.48	-27.95**	-32.05	-32.63
15～25 cm 面積ピーク	A_p	-27.14	-21.44**	-22.18**	-28.10	-31.51	-32.58
ピーク前面積積算 全体面積積算	$\frac{A_{BP}}{A_T}$	-27.69	-31.92	-30.30	-34.43	-34.03	-34.29
平均流木濃度	C_{WD}	-28.78	-30.82	-28.76	-34.19	-31.46	-32.79

** $p < 0.01$

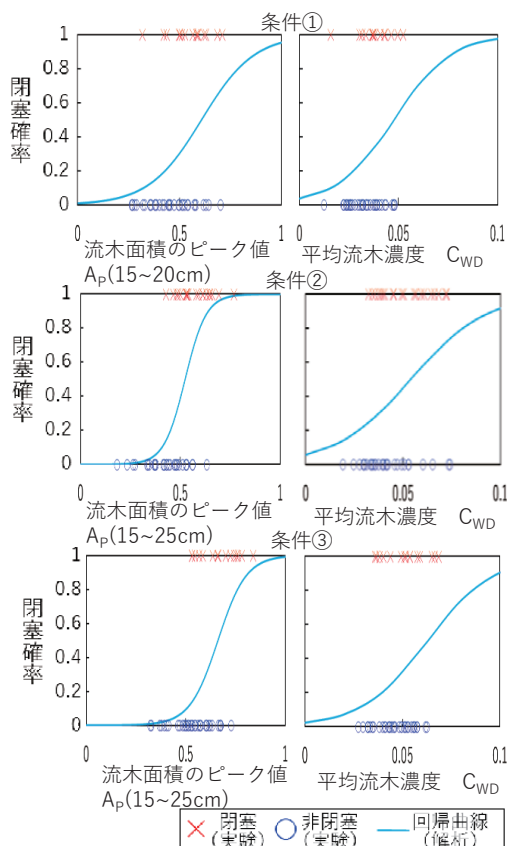


図11 対数尤度が最大の流木面積ピーク値(左)並びに平均流木濃度を用いた(右)実験結果とロジスティック解析で得た閉塞確率の回帰曲線(条件①, ②, ③)

条件①は C_{WD} を用いた際も対数尤度が大きく、ロジスティック回帰分析でも閉塞試行ほど説明変数の値が高くなる傾向が強い(回帰曲線の傾きが大きい)ため、軽微な傾向は示唆されたものの、 A_p を採用した場合でも閉塞の判別精度に大きな差はない。

条件②③④では、 C_{WD} よりも A_p を指標に用いることで、閉塞した試行ほど説明変数の値が高くなる傾向が強くなり、閉塞の判別精度が高くなる。

一方、条件⑤⑥では、 A_p を用いても C_{WD} の結果と閉塞の判別精度に大きな差は見られなかった。

A_p は、橋脚なしでは C_{WD} よりも閉塞の判別指標として有用だった。橋脚2本では、流木長が長く余裕高が小さな条件④を除くと、 A_p と C_{WD} の

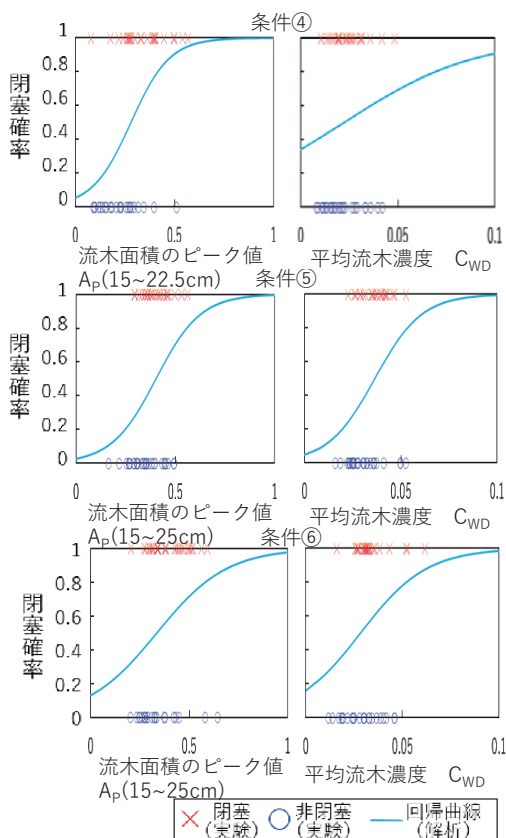


図12 対数尤度が最大の流木面積ピーク値(左)並びに平均流木濃度を用いた(右)実験結果とロジスティック解析で得た閉塞確率の回帰曲線(条件④, ⑤, ⑥)

判別精度に大きな違いはなかった。流木が密集するだけでなく、橋脚に対する流木塊の位置や流木の角度など、他の要素が閉塞に寄与したことが原因と考えられる。

ワンスパンでは流れ内に障害物となる橋脚がなく、流木が密集した流木塊となり橋桁に引っかかることで閉塞が起こる。流木の密集が A_p の増加と対応することで閉塞の判別精度が上がる。橋脚2本でも、余裕高が小さい条件④⑤では、閉塞への橋桁の影響があり、ワンスパンと同様に流木の密集も閉塞に寄与したことで A_p の増加と対応して、特に流木長が長い条件④では閉塞の判別精度が上がったと推測される。

一方、ワンスパンと比較して橋脚が2本入った

橋では、流木の密集だけでなく、橋に対してどのような姿勢で流木が到達するかが閉塞に影響する。同量の流木が流れてきた場合、流れに沿った方向が多ければ閉塞し難く、流れに垂直や斜めの方向が多ければ橋脚や側壁、橋桁に跨って閉塞しやすくなる。余裕高が小さく流木長が短い条件⑤では、流木が密集した後に解けて閉塞しないケースが見られた。余裕高が大きく流木長が長い条件⑥では、余裕高が大きいため閉塞の契機となる場所が橋脚

や側壁が主で、④と比較して橋桁は契機になり難い。そのため、 A_p や C_{WD} が閉塞に大きな影響を与えないことが推測される。

4.2 指標2つでのロジスティック回帰分析

複数の指標を用いてロジスティック回帰分析を行った。ロジスティック回帰分析には、 A_{2P} 、 A_{BP}/A_T 、 C_{WD} の3種類の指標から2つを用いた。なお、 A_{2P} は、4種類のエリアのうち、閉塞の判

表3 指標2つのロジスティック回帰分析の対数尤度（赤色の網掛けは、各条件で最大の対数尤度）

指標	条件①	条件②	条件③	条件④	条件⑤	条件⑥
面積ピーク A_{2P}	-26.87	-21.44	-22.18	-27.95	-31.51	-32.58
ピーク前面積積算 $\frac{A_{BP}}{A_T}$ 全前面積積算	-27.69	-31.92	-30.30	-34.43	-34.03	-34.29
平均流木濃度 C_{WD}	-28.78	-30.82	-28.76	-34.19	-31.46	-32.79
A_{2P} & $\frac{A_{BP}}{A_T}$	-23.08**	-19.41*	-22.16	-27.61	-31.36	-32.39
A_{2P} & C_{WD}	-26.68	-21.28	-22.15	-27.21	-29.19*	-32.03
$\frac{A_{BP}}{A_T}$ & C_{WD}	-24.14	-29.76	-28.73	-34.01	-31.07	-32.55

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

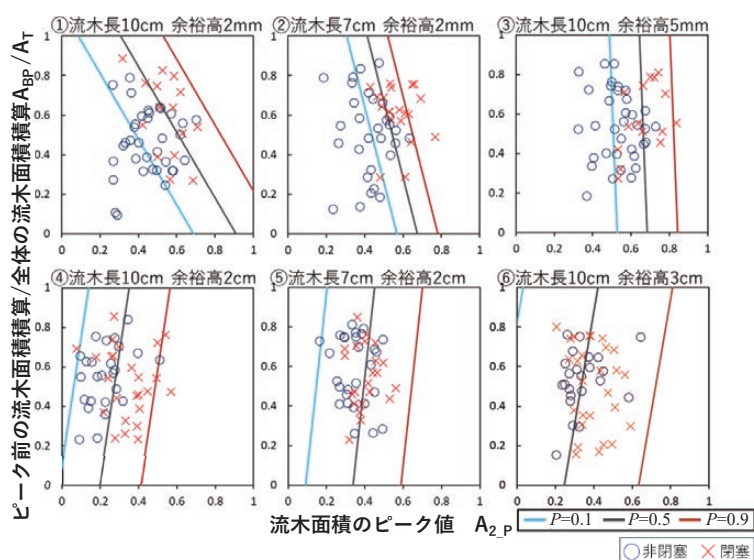


図13 閉塞の判別精度が最大の流木面積のピーク値と、ピーク前までの流木面積の積算が全期間の積算に占める割合を採用した実験結果およびロジスティック解析で得た閉塞確率の推定直線

別精度が最も高かった流木面積のピーク値である。

指標 2 つのロジスティック回帰分析の対数尤度を表 3 に示す。赤色で塗りつぶしたマスは、各条件で最大の対数尤度である。図 13～図 15 に指標 2 つのロジスティック回帰分析の結果を示す。図中

には閉塞確率 $P=0.1, 0.5, 0.9$ を青線、黒線、赤線で示している。また、対数尤度が 2 指標最大と 1 指標最大について、尤度比検定の結果を表 3 に示した。

1 指標と 2 指標のそれぞれの最大の対数尤度に

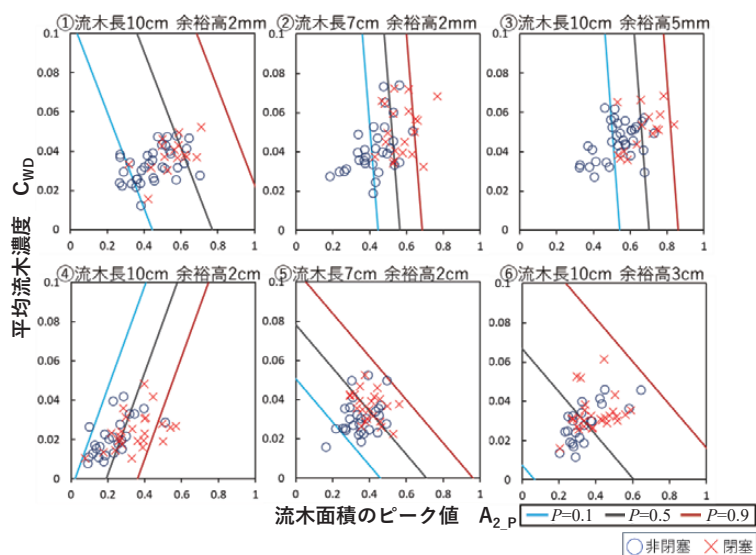


図 14 閉塞の判別精度が最大の流木面積のピーク値と、平均流木濃度を採用した実験結果およびロジスティック解析で得た閉塞確率の推定直線

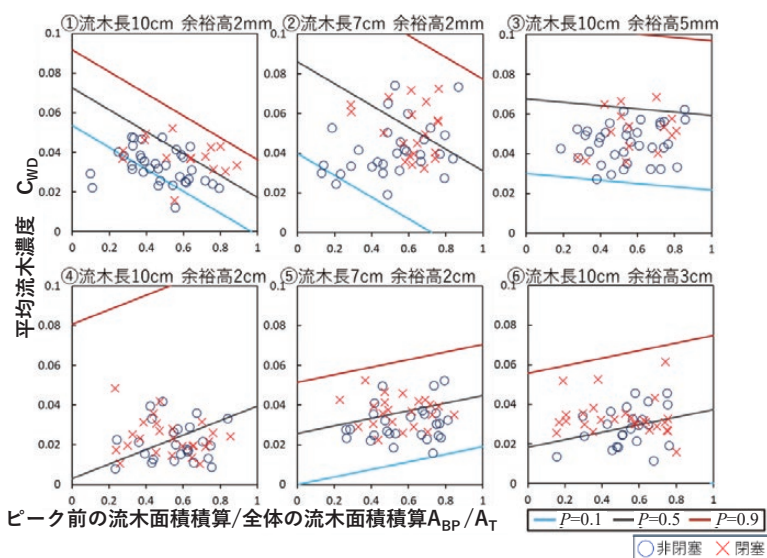


図 15 ピーク前までの流木面積の積算が全期間の積算に占める割合と、平均流木濃度を採用した実験結果およびロジスティック解析で得た閉塞確率の推定直線

ついて、条件①で $p < 0.01$ 、条件②⑤で $p < 0.05$ の有意な差が得られた。条件①②は橋脚なしで余裕高が小さく、条件⑤は橋脚 2 本で余裕高が小さく流木長が短い条件では、指標 2 つで対数尤度が上がり、閉塞の判別精度が上がったことが示された。

橋脚なしの条件①②では、流木面積のピーク値 A_{2P} と、ピーク前までの流木面積の積算が全期間の積算に占める割合 A_{BP}/A_T の 2 つを組み合わせることで、指標が 1 つよりも閉塞の判別精度が上がった。これは、面積のピーク値が高く、且つピーク前に橋に到達する流木量が多いほど、閉塞リスクが高くなることを示す。ワンスパンでは流木が橋桁に接触することを契機に閉塞が起こるが、橋脚がないと橋に引っかかった流木塊が不安定なため、ピーク後に多くの流木が衝突する場合は短時間で引っかかりが解消され易いためだと考えられる。

図13～図15を比較すると、どの図でも各線は右下がりの傾向を示す。図13では $P=0.5$ の黒線より左下の範囲に非閉塞が多く、右上の範囲に閉塞が多く示されて、閉塞と非閉塞の境界が最も明瞭に示される。

条件②では、指標 1 つでは平均流木濃度 C_{WD} の方が A_{BP}/A_T よりも対数尤度が大きかったが、指標 2 つでは C_{WD} よりも A_{BP}/A_T と A_2 を組み合わせの方が対数尤度が大きく、判別精度が上がった。 A_{2P} と C_{WD} はどちらも流木がどの程度密集しているかを示すため相関が強く、組み合わせても判別精度が上がらなかったと考えられる。

橋脚なしの条件③は、 A_{2P} と A_{BP}/A_T の 2 つを組み合わせたとした場合、 A_{2P} と C_{WD} を組み合わせたとした場合で、面積ピークのみを採用する場合と比較して対数尤度は微増したが差は小さい。図13～図15では、条件③の各線は全て右下がりだが、図13、図14では殆ど垂直に近く、横軸の面積ピーク値が閉塞・非閉塞に影響することがわかる。また、 $P=0.5$ の黒線より左の範囲に非閉塞が多く、右の範囲に閉塞が多く示されて、閉塞と非閉塞の境界が明らかである。図15では、 $P=0.5$ の黒線は水平に近く、黒線の下に閉塞と非閉塞が多数存在することから明確な指標ではない。

橋脚 2 本の条件④～⑥では、 A_{2P} と A_{BP}/A_T の 2 つを組み合わせても、 A_{2P} のみと比較して対数尤度に大きな変化はなかった。 A_{2P} と C_{WD} の 2 つを組み合わせる方が、対数尤度が大きい。しかし、 A_{2P} のみを用いた時と比べて、判別精度が上がったのは条件⑤のみである。 A_{2P} と C_{WD} はどちらも流木がどの程度密集しているかを示すため相関が強いが、 A_{2P} では短期的な流木密度のピーク値が高く、 C_{WD} は基準線を通過する時間全体で流木が多いことを示す。余裕高が小さく流木長が短い条件⑤では、通過時間全体に流木が多く、ピークも大きい場合に流木塊が生じて、橋桁も契機として閉塞が発生したことで、この 2 指標の組み合わせで精度が上がったと推測される。

図13～図15では、 $P=0.5$ の黒線は条件④は全て右上がり、条件⑤⑥は図13、図15で右上がり、図14で右下がりの傾向を示した。黒線の現れ方から、橋脚 2 本でも条件④と条件⑤⑥では、流木面積のピーク値と平均流木濃度の二つの指標は、閉塞・非閉塞に及ぼす影響が異なることがわかる。

条件④⑤は図13、図14で $P=0.5$ の黒線より左の範囲に非閉塞が多く、右の範囲に閉塞が多く示されて、図15と比較すると閉塞と非閉塞の境界が明らかである。条件⑥は、 A_{2P} と A_{BP}/A_T を用いた図13で $P=0.5$ の黒線で最も閉塞・非閉塞の境界が示されるが、他条件と比較するとその差は明確ではない。

橋脚 2 本の流木の長い条件④⑥は、特に⑥は 4.1 で検討した単一指標の A_p と C_{WD} の判別精度にも差はなく、二つを組み合わせても判別精度は向上しなかった。実験観察から、この条件は流木が密集するだけでなく、橋脚に対する流木塊の位置や流木の角度など、他の要素が閉塞に寄与したことが原因と考えられる。

5. おわりに

本研究では、流木の流出過程の時間的変化に着目して、橋の閉塞の判別精度向上の有効性を検証することを目指して、水路実験やロジスティック回帰分析を実施した。従来の平均流木濃度に加えて、短期的な流木密度のピーク値を示す流木面積

ピーク値や、ピーク到達前の流木量の蓄積状況を示すピーク前までの流木面積の積算が全期間の積算に占める割合を指標に用いて検討した。

指標 1 つのロジスティック回帰分析では、橋脚なしでは流木面積のピーク値が平均流木濃度よりも閉塞の判別指標として有用だった。一方、橋脚 2 本では、余裕高が小さく流木長が長い条件では有用だったが、他の条件では流木面積のピーク値と平均流木濃度の判別精度に差はなかった。ピーク前までの流木面積の積算が全期間の積算に占める割合では、全ての条件で平均流木濃度と差はみられなかった。

指標 2 つを用いたロジスティック回帰分析では、流木面積のピーク値と、ピーク前までの流木面積の積算が全期間の積算に占める割合を組み合わせることで、橋脚なしで余裕高の小さい条件では 1 指標よりも閉塞の判別精度が上がった。橋脚 2 本では、余裕高が小さく流木長が短い条件で、流木面積のピーク値と平均流木濃度の組み合わせで、1 指標よりも閉塞の判別精度が上がった。その他の余裕高によらず流木長が長い条件では、橋脚なしと比較すると 2 指標を採用しても判別精度に大きな改善は見られなかった。

山地河川に架かるワンスパンの橋梁における流木閉塞リスクの評価において、流出過程の時間的な変化を捉える新たな指標の有効性が示唆される。具体的には、流木面積のピーク値や、そのピークに至るまでに蓄積された流木面積が全体に占める割合を組み合わせることで、流木閉塞リスクの高い橋梁をより示して、効果的な対策立案に資する可能性が示された。

一方、水路実験で得た知見であることや、流木の形状や橋へ到達する際の流木の衝突角度などの他の要因が影響することも踏まえ、適用には更なる検討が必要である。今後は、橋脚に対する流木塊の位置や流木の角度など、本研究では考慮しなかった閉塞に寄与する要素を合わせて定量的に評価して組み合わせることで、山地河川からの危険な流木や橋についての閉塞条件を抽出することで防災対策に役立てることを目指す。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 23K22848、河川財団 河川基金の助成を受けたものです。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・牛山素行・林真一郎・森田耕司・飛岡啓之・小野寺智久・宮田直樹・西尾陽介・小川洋・鈴木崇・岩佐直人・青木規・池田武穂：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.61-72，2014.
- 2) 海堀正博・長谷川祐治・山下祐一・崎田博史・中井真司・桑志保・平松晋也・地頭蘭隆・井良沢道也・清水収・今泉文寿・中谷加奈・柏原佳明・加藤誠章・鳥田英司・平川泰之・吉永子規・田中健路・林拙郎：平成30年7月豪雨により広島県で発生した土砂災害，砂防学会誌，Vol.71，No.4，pp.49-60，2018.
- 3) 中谷加奈・長谷川祐治・海堀正博・里深好文：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，自然災害科学，Vol.40，特別号，pp.81-92，2021.
- 4) 中谷加奈・長谷川祐治・里深好文：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_1086，2018.
- 5) 岡本隆明・染谷智紘・松本知将・山上路生・田中健太：橋梁部での流木沈下過程と全面閉塞の限界条件に関する実験的研究，自然災害科学，Vol.39，No.4，pp.423-437，2021.
- 6) 岡本隆明・松本知将・田中健太・山上路生：流木長が橋梁閉塞過程に与える影響に関する実験的研究，土木学会論文集 B1 (水工学)，Vol.78，No.2，pp.I_583-I_588，2022.
- 7) 橋本晴行・楠窪正和・喜多貢菜・ムハマドファリドマリカル：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.145-149，2016.
- 8) 渋谷一・香月智・大隅久・石川信隆：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.1087-1094，2011.
- 9) Nakatani, K., Hiura, M., Hasegawa, Y., Kosugi, K., Satofuka, Y.: 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, 2017.
- 10) 長谷川祐治・中谷加奈・里深好文・水山高久：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, 2016.
- 11) 安井鴻騎・中谷加奈・正岡直也・小杉賢一郎・里深好文：流木の流出過程が山地河川の橋の閉塞に及ぼす影響, 令和5年度砂防学会研究発表会概要集, pp.551-552, 2023.
- 12) 光崎研一：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, 1984.
- 13) 長沢伸也・中山厚穂：EXCEL ソルバー多変量解析－因果関係分析・予測手法編－, pp.137-167, 日科技連出版社, 2009.
- (投稿受理：2025年4月4日
訂正稿受理：2025年7月24日)

要 旨

流木の集積により橋が閉塞すると、被害が拡大する場合がある。流木に関する既往検討では、橋に到達する全ての流木を対象として、時間的变化を考慮しない濃度や量に着目して検討していた。しかし、実際には時間変化を考慮した流木の流出過程が、橋の閉塞に影響することが報告されている。本研究では、水路実験とロジスティック回帰分析を実施して、従来の平均的な流木濃度に加えて、新たな時間変化を考慮した指標を提案して検討した。橋脚なしの条件では、新たな指標や複数指標の組み合わせにより、閉塞の判別精度が向上した。橋脚2本の条件では、余裕高が小さい場合には一部で改善が見られたが、橋脚なしと比較すると判別精度に大きな改善は見られなかった。