土石流先頭部に集積した状態で到達する流木群の栅状部捕捉機構に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON TRAPPING OF WOODY DEBRIS CONCENTRATED IN DEBRIS FLOW'S FRONT BY TRANSVERSE COLUMNAR GROUPS.

和田 孝志[1]・山﨑 一輝[2]・三輪 浩[3]
Takashi WADA, Kazuki YAMASAKI and Hiroshi MIWA

[1]鳥取大学工学部（〒680−8550　鳥取市湖山町 4 丁目 101 番地）
E-mail: wada-t@tottori-u.ac.jp
[2]株式会社エイト日本技術開発（〒700−8617　岡山市北区津島京町三丁目 1 番地 21 号）
E-mail: yamasaki-ka@ej-hds.co.jp
[3]鳥取大学工学部（〒680−8550　鳥取市湖山町 4 丁目 101 番地）
E-mail: miwa-h@tottori-u.ac.jp

***Key Words**: woody debris trapping, flow's front, volume density, longitudinal direction, flume experiment*

1. はじめに

近年，豪雨に伴う出水や土石流に多量の流木が混入してそれらが流下し，下流部での氾濫被害が拡大する事象が多発している．2013(平成 25)年 10 月の伊豆大島土砂災害では，三原山山麓斜面の崩壊を起因とする大規模土石流が大量の立木を巻き込みながら流下し，それらの流木が橋梁部で閉塞したことで氾濫被害が拡大した[1]．また，2017(平成 29)年 7 月九州北部豪雨による土砂災害では，当該地域の約半数の山地渓流で流域面積当たりの発生流木量の上限を上回るほどの流木が発生し，河川内での堆積や橋梁部での閉塞などによって氾濫被害を拡大させた[2]．このように，流木流出に伴う氾濫被害拡大は，氾濫域内の橋梁部での流木閉塞を契機とすることが多く，流木による氾濫被害拡大を防止するためには流木閉塞の発現条件をより厳密に把握する必要がある．

流木閉塞のメカニズムや発現条件を把握するため，これまで多くの実験的研究が行われてきた．水山・石川ら[3),4)]は狭窄部または栅状部捕捉工における流木閉塞発現条件を実験的に把握し，狭窄部または栅状部での流木捕捉率 T はフルード数 Fr，狭窄部・栅状部直上流の水深と流木直径の比 h/D_w，狭窄幅（捕捉工間隔）と流木長の比 B_w/L_w と負の相関があることを見出している．近年，CCTV 等による実際の土石流観測から，土石流に混入した流木は流れの先頭部に集積する傾向があることが報告されている[5),6)]が，前述の水山・石川ら[3),4)]をはじめ，狭窄部・栅状部の流木捕捉に関する既往実験では，定常流条件下での流木供給（以下，定常流型と称する）が主に行われ，先頭部に流木を集積させた状態での供給（以下，先頭部集積型と称する）による例は少ない．流れ先頭部では，段波形状を有している場合が多く，その特徴的な水理特性から Fr, h/D_w 等のパラメータが影響を受けることが想定され，上記の知見がこのような条件にも適用可能かについて検証する必要がある．加えて，先頭部の水理的特性から，捕捉工断面到達時の流木集積密度，流れ方向に対する流木軸方向，到達時流速等も定常流条件とは異なることが想定される．原田ら[7)]は到達流木群中の流れ方向に対する流木軸の向きの分布特性が，中谷ら[8)]は到達流木群の集積密度がそれぞれ T に影響することを示唆している．これらのことから，流木供給条件の違い（定常流型，先頭部集積型）が流木捕捉機構（T と

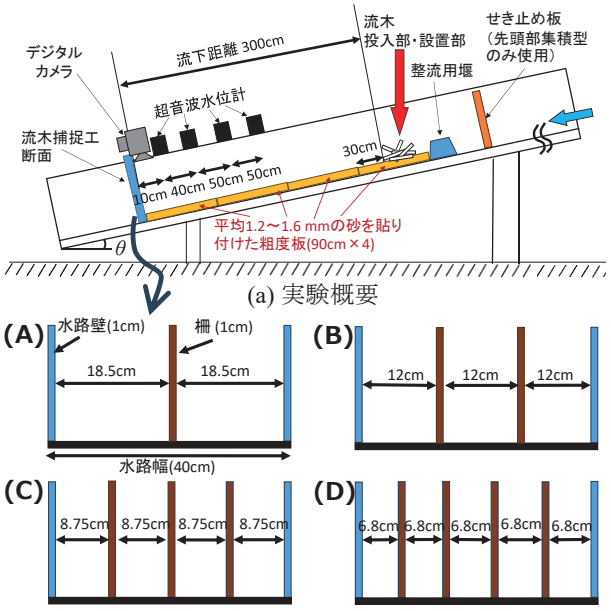
Fr, h/D_w, B_w/L_w の関係）に及ぼす影響を検討する際には，それぞれの条件における到達時の性状（流木集積密度，流木軸方向，到達時流速）が及ぼす影響を踏まえる必要があると考えられる．

本研究では，定常流型と先頭部集積型の 2 種類の流木供給条件で柵状部流木閉塞に関する水路実験を行い，到達流木群の性状と流木捕捉率 T の関係から，流木供給条件の違いが流木捕捉（既往提案パラメータ）に及ぼす影響を検討した．また，合わせて捕捉後の堰上げ水深 h_d に対する影響も検討した．なお，本実験の流木模型は水分を多く含む広葉樹渓畔林の侵食による流木供給を想定し，坂野 [9]を参考に比重を 1 程度とした．よって，本実験では流木は河床にも一部接触しながら流下することを想定している．

2. 実験概要

実験水路と実験器具の配置を**図−1** に示す．実験では幅 40 cm の循環式可変勾配水路を用い，水路床には平均粒径 1.2 mm の砂を貼り付けた粗度板（マニング粗度係数 0.0178 $m^{-1/3}$・s）を長さ 360 cm 設置した．その直上流には整流用の固定堰（高さ 5 cm，上面長 20 cm，下面長 30.5 cm）を設置した．実験は幅 10 m 程度の小規模河川を想定しており，縮尺はおよそ 1/25 である．粗度板の最下端を柵状捕捉工断面とし，図に示す 4 種類の柵状部間隔 B_w（18.5，12.0，8.75, 6.8 cm）を設定した．到達流木群の流下条件は，定常流型と先頭部集積型の 2 種類である．流木模型は ABS 樹脂の丸棒（比重 1.05）であり，根・枝部がない単純な棒状模型とした．計測装置は，デジタルカメラ（SONY 社製 RX100V, Panasonic 社製 LUMIX-TZ95），超音波水位センサー（OMRON 社製 E4C-DS30）4 台である．水路勾配は 1°または 3°，流木模型本数 N は 50 本または 100 本（縮尺 1/25 から実規模の総幹材量はそれぞれ 6，12 m^3 相当，砂防基本計画策定指針の広葉樹発生流木量実績 [10]より対象流域面積は 0.06〜0.12 km^2），流木模型長 L_w は 20，15，10 cm の 3 種類，流木直径 D_w は 7 mm の 1 種類として計 48 ケースの条件（**表−1**）で行った．結果のばらつきを考慮し，1 ケースにつき 10 回試行を行い，全試行の結果を平均したものを各ケースの結果とした．

定常流型の実験では，流量 6L/s が流れている状態（柵状部直上流の水深 h は**表−1** に示すとおり）で，捕捉工断面から 300 cm 上流地点で流木模型を一気にランダムな向きで投入し，流木を 300 cm 流下させ捕捉工断面に到達させた．先頭部集積型の実験では，300 cm 上流地点に流木模型をランダムな向きにまとめて置いた後，整流用堰上流で塞き止め板を設置し，所定の水位（先頭部流量が 12L/s となる水位）となった瞬間に堰き止め板を外し，形成された先頭部段波に流木模型を含めさせた状態で捕捉工断面に到達させた（柵状部直上流の段波水深 h は**表−1** に示すとおり）．水路下端で断面を通過した流木を集計し，N と通過流木本数から流木捕捉率 T を算出した．また，捕捉工断面上方からデジタルカメラにより流木



図−1　実験概要.

表−1　実験ケース.

Case 名	流木群流下条件	対象本数 N (本)	流木長 L_w (cm)	水路勾配(°)	柵状部間隔 B_w (cm)
1-100	定常流型 (流量 6L/s) h =2.5 cm	100	20	1	各ケースそれぞれに対し，(A)18.5cm (B)12.0cm (C)8.75cm (D)6.8cm で実施
1-50		50			
2-100		100	15		
2-50		50			
3-100		100	10		
3-50		50			
4-100	先頭部集積型 (流量 12L/s) h =3.8 cm	100	20		
4-50		50			
5-100		100	15		
5-50		50			
6-100		100	10		
6-50		50			
7-100	定常流型 (流量 6L/s) h =1.8 cm	100	20	3	
7-50		50			
8-100		100	15		
8-50		50			
9-100		100	10		
9-50		50			
10-100	先頭部集積型 (流量 12L/s) h =2.7 cm	100	20		
10-50		50			
11-100		100	15		
11-50		50			
12-100		100	10		
12-50		50			

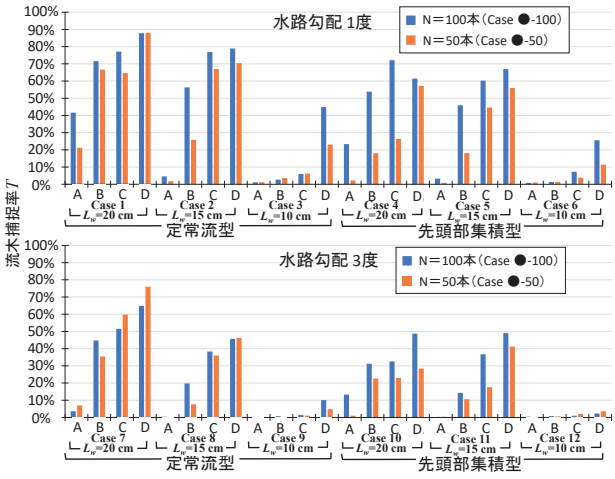
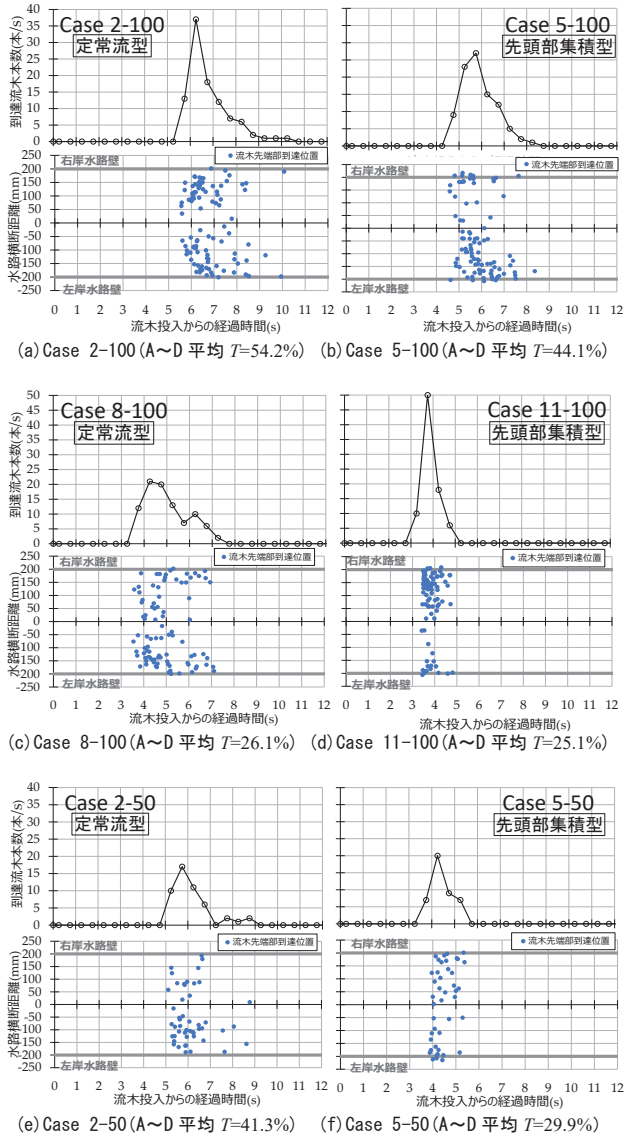


図-2　流木捕捉率 T（各ケース 10 回試行の平均）.



(a) Case 2-100 (A～D 平均 T=54.2%)　(b) Case 5-100 (A～D 平均 T=44.1%)

(c) Case 8-100 (A～D 平均 T=26.1%)　(d) Case 11-100 (A～D 平均 T=25.1%)

(e) Case 2-50 (A～D 平均 T=41.3%)　(f) Case 5-50 (A～D 平均 T=29.9%)

図-3　捕捉工断面に到達する流木本数の時間変化と流木横断方向到達位置.

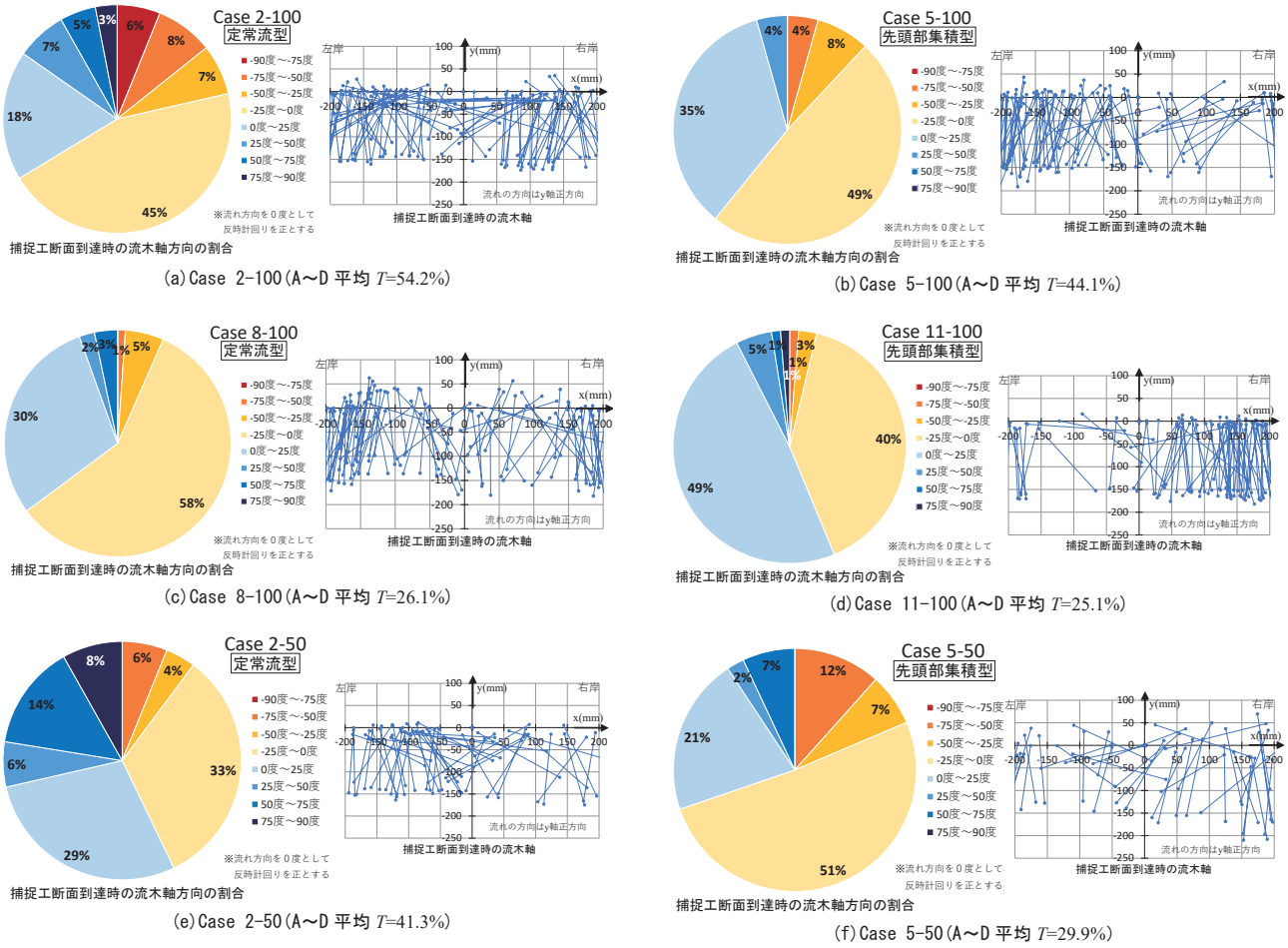
模型の到達状況を撮影し，「Dipp-Motion V　Ver1.2.7（DITECT 社）」を用いて到達時の集積密度，流木模型両端座標から到達時の流木軸方向を取得した．捕捉工断面上流側の超音波水位計により堰上げ水深 h_d を計測した．

3. 実験結果および考察

(1) 流木捕捉率 T に対する流木群の性状の影響

図-2 に流木捕捉率 T について 10 回試行結果の平均値を実験ケース別に示す．すべてのケースにおいて，B_w が小さく L_w が大きいほど（すなわち B_w/L_w が小さいほど），T が増大する傾向があり，また水路勾配が急な（Fr が大きい）ほうが T が小さくなる傾向も確認できる．これらは石川ら [4]，長さの異なる棒状流木の柵状部流木捕捉に関する実験を行った渋谷ら [11]の既往成果と同様であった．流木供給条件別で比較すると，定常流型のほうが先頭部集積型よりも全体的に T が大きくなる傾向が確認できる．先頭部集積型のほうが h が大きいことから，h/D_w が小さいほど T が大きくなるという石川ら [4]，渋谷ら [11]の傾向と合致している．先頭部集積型では N の大小で T が顕著に変化する傾向が確認できるが，定常流型では N に対する T の変化は小さい．

この結果について，流木群が捕捉工断面に到達する際の性状の観点から検討する．図-3 は，L_w =15 cm の 6 ケースにおける捕捉工断面に到達する流木本数の時間変化と流木横断方向到達位置をケース別に示したものである．水路勾配や流木供給条件により流木集積密度のピークが異なるが，図に示すケースの中で最もピーク集積密度が大きくなった Case 11-100 の T はこれらの中では最も小さく，ピーク集積密度と T の関係は明瞭でなかった．一方，この図のケースの中で到達時流速が最も遅い Case 2-100 の T は最も大きい値となっていた．このことから，ピーク集積密度よりも到達時流速のほうが T との関係性が大きいことが示唆され，定常流型の T が比較的大きい値を示したのは遅い到達時流速に起因していることが考えられる．図-4 は，L_w =15 cm の 6 ケースにおける捕捉工断面に到達する流木群の流れに対する流木軸方向の分布をケース別に示している．図に示すケースの中で流れ方向に対する流木軸角度が 75 度以上となる割合が大きい Case 2-100，Case 2-50 の T は 6 つのケースで比較的大きい値となっていた．また，先頭部集積型よりも定常流型のほうが流木軸方向の分布が多様で流れ方向と大きく異なる流木軸方向をもつ流木の割合が比較的大きい傾向も確認できた．ただし，水路勾配が急となる Case 8-100，Case 11-100 では違いは顕著ではなかった．水路勾配が急



(a) Case 2-100 (A～D 平均 T=54.2%)　(b) Case 5-100 (A～D 平均 T=44.1%)

(c) Case 8-100 (A～D 平均 T=26.1%)　(d) Case 11-100 (A～D 平均 T=25.1%)

(e) Case 2-50 (A～D 平均 T=41.3%)　(f) Case 5-50 (A～D 平均 T=29.9%)

図-4　捕捉工断面に到達する流木群の流木軸方向の分布.

な条件では，高密度な流木群が形成されやすく，流木同士が絡み合って一体となって流れることで流木群全体が流れ方向に回転している可能性があり，流木個々が比較的独立している緩い水路勾配の定常流型のほうが多様な流木軸方向分布を有することができると考えられる．**図-2** に示すように緩い水路勾配条件下の定常流型のほうが T が大きいことから，流れ方向と大きく異なる流木軸方向をもつ流木割合が大きいほど T が大きくなる傾向があると考えられる．これは，流れ方向に対する流木軸角度が大きい流木による架橋構造の形成が流木捕捉のトリガーとなっていることを示唆している．これらのことから，流木軸の流れ方向に対する向きの割合が流木捕捉と関係性が高いことが示唆された．ただし，**図-4** に示す Case 5-100 では，流れ方向と大きく異なる流木軸方向をもつ流木の割合が比較的少ないにもかかわらず大きい T を有することから，このような流木の割合が小さい場合でも他の要因（N や B_w/L_w など）によって T が大きくなる場合があることに留意する必要がある．以上の傾向を踏まえると，緩い水路勾配（小さい Fr）で定常流型のほうが，到達時流速が遅く，

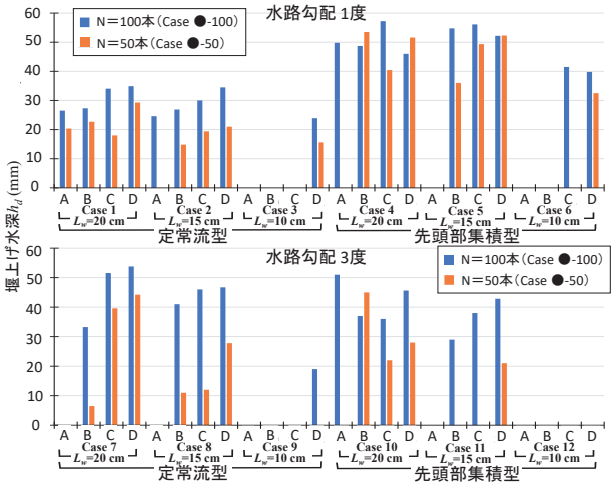


図-5　堰上げ水深 h_d（各ケース 10 回試行の平均）.

流木集積密度が小さくなることで，流木個々が比較的独立して多様な流木軸方向分布を有することができ，流れ方向と大きく異なる流木軸方向をもつ流木割合が大きくなることで T 増大に有利となると考えられる．

(2) 堰上げ水深 h_d に対する流木群の性状の影響

図-5 に捕捉後の堰上げ水深 h_d について 10 回試行結果の平均値を実験ケース別に示す. 定常流型では, 全体的に B_w/L_w が小さいほど（すなわち T が大きいほど）, h_d が増大する傾向がある. 流木供給条件別で比較すると, 水路勾配 1°では先頭部集積型のほうが定常流型より h_d が大きい傾向があり, 水路勾配を大きく（Fr を大きく）したほうが流木供給条件に関係なく h_d が大きくなる傾向も確認できる. これは, **図-3** に示すケース別の捕捉工断面への流木群の到達時間を踏まえると, 流木群の到達時流速（すなわち流木群の運動エネルギー）が大きいほど流木閉塞が圧縮されてより密な閉塞を形成させたことが原因と考えられる. ただし, 密な閉塞の形成には閉塞に寄与する流木材積量が多いことが条件となるため, N が多い条件のほうが h_d が大きくなる傾向が確認できる. これは T に対しても同様であり, T が大きくなる条件でも h_d が大きくなるのは前述の通りである. 一方で, 流木集積密度が大きい Case 11-100 や, 流れ方向に対する流木軸角度が 75 度以上となる割合が大きい Case 2-100, Case 2-50 の h_d は他のケースと比較して顕著に大きい値を示さなかった. したがって, 流木集積密度や流れ方向と大きく異なる流木軸方向をもつ流木割合は h_d との関係が小さく, 到達時流速や閉塞に要する流木材積量（到達流木本数 N や流木捕捉率 T）が大きい条件のほうが h_d 増大に有利になると考えられる.

(3) 流木供給条件・水路勾配・流木本数が異なる場合の流木群の性状と T および h_d の関係

表-2 は各実験ケースの B_w= 6.8 cm（閉塞が最も起こりやすい B_w 条件）における流木捕捉率 T, 堰上げ水深 h_d と, 流木集積密度, 流れ方向に対する流木軸角度が 75 度以上となる流木割合, および, 到達時流速をまとめたものである. L_w= 15 cm のケース（Case 2, 5, 8, 11）では 3. (1) に示したように, 流れ方向と流木軸方向が大きく異なる流木割合が大きいほど, 流木集積密度が大きいほど, T とが増大する傾向が確認できる. しかしながら, L_w= 20 cm, 10 cm のケースでは, それらの傾向が明瞭に現れていない. これは, 到達する流木群の性状として抽出した流木集積密度, 流れ方向に対する流木軸の向きの割合, 到達時流速の評価だけでは柵状部における流木捕捉機構をとらえきれていないこと, B_w/L_w が T に及ぼす影響が大きいことを示唆している. また, 本研究の試行数が少なく, 結果が偏っている可能性も考えられるため, 更なる検証が必要と考えられる. 一方, 捕捉工断面への到達時流速が大きいほど h_d が大きくなる傾向については, 流木供給条件や水路勾配が異なる場合でも確認できた.

表-2　実験ケース別の結果一覧.

Case 名	流木捕捉率 T	堰上げ水深 h_d (mm)	ピーク集積密度(本/s)	流れに対する流木軸方向が 75 度以上となる割合	捕捉工断面への到達時流速 (cm/s)
1-100(D)	87.8%	35	38	5.8%	78.5
1-50(D)	88.0%	29	21	0.0%	65.6
2-100(D)	78.9%	35	37	9.2%	55.8
2-50(D)	70.4%	21	22	8.2%	59.2
3-100(D)	44.9%	24	34	7.2%	79.8
3-50(D)	23.0%	16	14	8.0%	74.4
4-100(D)	61.4%	46	39	7.1%	81.5
4-50(D)	57.2%	52	16	2.3%	75.8
5-100(D)	66.9%	52	30	2.2%	75.9
5-50(D)	56.0%	52	20	0.0%	72.7
6-100(D)	25.6%	40	54	7.9%	77.5
6-50(D)	11.4%	33	26	12.2%	79.2
7-100(D)	64.9%	54	19	5.3%	103.1
7-50(D)	76.0%	44	12	4.7%	105.6
8-100(D)	45.7%	47	23	4.4%	89.4
8-50(D)	46.2%	28	19	2.0%	107.4
9-100(D)	10.1%	19	53	5.1%	138.2
9-50(D)	4.8%	なし	28	10.2%	119.2
10-100(D)	48.7%	46	51	4.0%	99.8
10-50(D)	28.4%	28	16	2.3%	96.4
11-100(D)	49.0%	43	56	4.7%	103.9
11-50(D)	41.2%	21	22	5.4%	99.7
12-100(D)	2.3%	なし	59	10.0%	102.7
12-50(D)	3.6%	なし	38	13.2%	103.4

以上より, 到達流木群の性状よりも水山・石川ら[3),4)]が見出した B_w/L_w のほうが T に対する影響が大きく, Fr, h/D_w については到達流木群の性状を踏まえた考察を行った結果, 水山・石川ら[3),4)]が見出した T との関係と合致するようである. ただし, 渋谷ら[11)]が指摘するように, 平均流木長や捕捉工の外側間隔など, 水山・石川ら[3),4)]のパラメータを修正したものを用いることでより妥当な T を算定できる可能性が残されている. h_d については, 流木供給地点から捕捉工断面に至る流送過程の中で流木群流速が変化することから, 流木供給地点から捕捉工断面に至る流下勾配・流下断面変化を踏まえた流木群流速の評価が必要になると考えられる.

(4) 流木供給条件・水路勾配・流木本数が異なる場合の流木捕捉率に関する既往パラメータの検証

図-6 は水山・石川ら[3),4)]により提案された狭窄部または柵状部の流木捕捉率 T に関するパラメータ（$=Fr\times(h/D_w)\times(B_w/L_w)^2$, h は狭窄部（柵状部）直上流の水深）で本実験結果を整理したものである. なお, 本図には水山ら[3)], 石川ら[4)], 渋谷ら[11)], 山上・

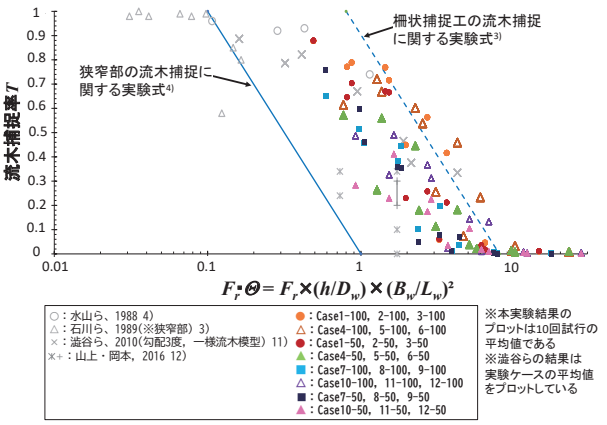


図-6　狭窄部または栅状捕捉工における流木捕捉率に関する既往パラメータ 3),4) に対する本実験結果.

岡本 12)の既往実験結果と，水山ら 3)，石川ら 4)が提案した狭窄部または栅状捕捉工における流木捕捉率に関する実験式も合わせて示している．この図より，本実験結果は，狭窄部・栅状部の既往提案パラメータに対して T が負の相関を持つ傾向という既往研究の傾向が確認できる．これは，**表-2** に示すように，Fr が大きい条件ほど T が小さくなること（例えば Case 4~6 > Case 1~3），同一の D_w に対して h が大きい条件（h/D_w が大きい条件）ほど T が小さくなること（例えば Case 4~6 > Case 1~3），同一の B_w に対して L_w が小さい条件（B_w/L_w が大きい条件）ほど T が小さくなること（例えば Case 3＜Case 2＜Case 1）など，水山・石川らが見出した T に対する各パラメータの傾向が本実験結果でも表れたためである．このことから，本研究で着目した流木供給条件の違い（定常流型，先頭部集積型）による T の結果も既往提案パラメータで統一的に扱うことが可能であると考えられる．しかしながら，流木本数 N や水路勾配が異なる条件では，横軸（既往提案パラメータ）が近い値であっても T が異なっており，流木本数 N や水路勾配の T への影響が大きいことが示唆される．今後，これらのパラメータが T に及ぼす影響を把握する必要があると考えられる．

4. おわりに

本研究では，流木供給条件の違い（定常流型，先頭部集積型）が栅状部流木捕捉に与える影響に着目した水路実験を行った．その結果，水山・石川ら 3),4)の流木捕捉率に関する提案パラメータが流木供給条件が異なる場合でも適用可能であること，特に狭窄幅（捕捉工間隔）と流木長の比が強く影響することが確認された．また，流木本数 N や水路勾配の流木捕捉率への影響が大きいことも示唆された．到達流木群の性状として，流れ方向と大きく異なる流木軸方向をもつ（架橋構造を形成し得る）流木の割合や到達時流速が流木捕捉に影響を及ぼしていることも示唆されたが，これらのみでは T や h_d を整理するには至らなかった．今後，多角的・系統的な実験条件下でこれらの知見をさらに検証する必要がある．

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(5), pp.61-72, 2014.

2)国土交通省　水管理・国土保全局　砂防部：平成 29 年 7 月九州北部豪雨による土砂災害の概要（速報版），Vol.6, 2017.

3)水山高久，石川芳治，矢島重美：透過型砂防ダムによる流木捕捉効果，土木技術資料，Vol.30(11)，pp.623-628, 1988.

4)石川芳治，水山高久，福沢　誠：土石流に伴う流木の発生及び流下機構，砂防学会誌，Vol.42(3)，pp.4-10，1989.

5)平松晋也，福山泰治郎，山田　孝，逢坂興宏，中谷加奈，松本直樹，藤村直樹，加藤誠章，島田　徹，久保　毅，松尾新二朗，西尾陽介，吉野弘祐：平成 26 年 7 月 9 日長野県南木曽町で発生した土石流災害，砂防学会誌，Vol.67(4), pp.38-48, 2014.

6)片山和紬，金城伶奈，山田　孝：土石流先頭部に集積する流木群の実態，自然災害科学，Vol.42, pp.43-51, 2023.

7)原田紹臣，高山翔揮，里深好文，水山高久，中谷加奈：不透過型砂防堰堤における鋼製部材を用いた流木対策工の捕捉機能に関する基礎的な実験，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.73(4), pp.I_1351-I_1356, 2017.

8)中谷加奈，安井鴻騎，正岡直也：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，自然災害科学，Vol.44, pp.191-204, 2025.

9)坂野　章：橋梁への流木集積と水位せきあげに関する水理的考察，国土技術政策総合研究所資料 78 号，p.9, 2003.

10)国土交通省国土技術政策総合研究所：砂防基本計画策定指針（土石流・流木対策編）解説，国土技術政策総合研究所資料 904 号，p.24，2016.

11)渋谷　一，香月　智，大隅　久，石川信隆，水山高久：流木捕捉工の捕捉性能に関する実験的研究，砂防学会誌，Vol.63, No.3, pp.34-41, 2010.

12)山上路生，岡本隆明：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），Vol.72(3), pp.88-100, 2016.

（2026. 5. 29　受付）