

山地流域における流木対策の推進に向けた あと施工流木捕捉工の提案

PROPOSAL FOR DRIFTWOOD CAPTURE MEASURES IN MOUNTAIN WATERSHEDS

原田 紹臣¹・石川 芳治²

Norio HARADA and Yoshiharu ISHIKAWA

¹一般財団法人 災害科学研究所 (〒541-0043 大阪市中央区高麗橋 4-5-13)

E-mail: harada3@kais.kyoto-u.ac.jp

²東京農工大学名誉教授 (〒183-8509 東京都府中市幸町 3-5-8)

E-mail: y_ishi@cc.tuat.ac.jp

Key Words: Driftwood countermeasures, experiments, forests, maintenance management, pile foundations

1. はじめに

森林は、大気中における二酸化炭素の吸収によって地球温暖化防止に貢献する地球環境保全機能、木材等の林産物を算出・供給する木材等生産機能等、国土保全機能等の多面的な機能が期待されている¹⁾。一方、近年における地球温暖化²⁾等の影響を受けて、これまでの観測記録を上回る豪雨が多発し、増水時における河岸の侵食による立木や倒木の流出、溪流沿いの斜面崩壊に伴う土砂や樹木の流出等、山地河川や森林域における流木化による被害が顕在化している³⁾。なお、流木災害は森林資源の喪失とともに、人命・財産への被害や漁業等の産業活動への被害等の川上から川下までの流域全体に対して影響を与える⁴⁾。これらより、今後、流木被害の軽減に向けた更なる流木対策の推進が望まれている¹⁾。

このような中、これらの豪雨に伴った水災害の激甚化・頻発化等を踏まえ、堤防の整備、ダムの建設・再生などの対策をより一層加速するとともに、集水域から氾濫域にわたる流域に関わるあらゆる関係者が協働して水災害対策を行う流域治水の考え方が示された⁵⁾。また、治山分野においても砂防事業等との連携により、森林整備や流木対策工による流域全体での流木被害(例えば、図-1)を防止・軽減する

ことが求められている⁶⁾。その際、流木止工等による新たな流木捕捉技術が試行的に提案されている^{例(例えば、7),8),9)}。しかしながら、これらの流木止工等は安定性を確保するため、比較的に規模の大きなコンクリート基礎を必要とするものなどが多く、今後、既存治山堰堤等において簡易かつ制約が少なく、流木対策補強(あと施工)が可能な対策工の提案が重要であると考えられる。また、これらの流木止工の効果的な配置に関する更なる知見の整理が必要⁷⁾である。そこで、本研究では、山地流域や森林区域等における流木対策の推進に向けて、あと施工が可能な流木捕捉工とその効果的な配置について提案する。

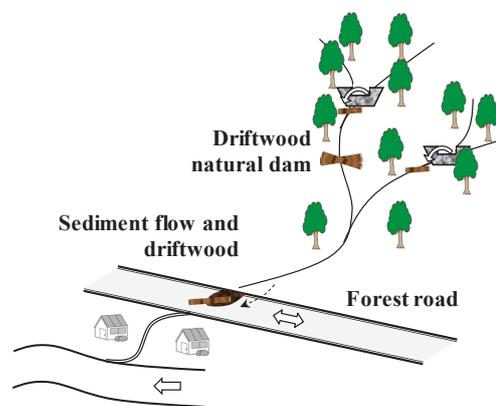


図-1 山地流域における流木流出に伴う被災リスクの概要

2. 簡易的なあと施工流木捕捉工の提案

山地流域や森林区域等における流木対策の更なる推進^{3),6),7)}に向けて、既設治山施設¹⁰⁾周辺や林道(例えば、**図-1**)等の直上流において、簡易的なあと施工が可能な流木捕捉工とその効果的な配置を提案する。今回提案する流木捕捉工(捕捉杭)の適用例を**図-2**に示す。**図-2**に示すとおり、上流から流下してくる流木を、複数の捕捉杭を自由な間隔や方向で、並立に設置して捕捉する構造である。以降に、提案する流木捕捉杭の構造について示す。**図-2**(下)に示すとおり、今回提案する流木捕捉杭(Driftwood capture body)は、上部の流木捕捉柱部材(Column member)と下部の杭基礎(Pile foundation)で構成されるものである。なお、これらは挿入方式での接合(一部、コンクリート併設)により一体化を図る構造で、**図-3**に示すとおり維持管理で求められる流木捕捉柱部材(上部)を簡易的に設置交換するため、コンクリートの部分撤去により柱部材が着脱・分離可能な構造としている。

また、既設施設や対策工周辺等における安定性能や、あと施工時における施工性の向上を考慮して、**図-4**に示す杭基礎(螺旋状)とし、杭頭を貫入方向へ打撃すると自律的に回転しながら地盤内で固定化させる構造体としている。その際、貫入方向に対して、漸次縮径する先細りの杭先端部を有する棒状の杭本体部と、杭本体部の外周面に杭先端部の一部または全部の外周面に沿ったスパイラル状としており、杭本体部が地盤に貫入する際の地盤からの反力を杭本体部の回転力に変換させる羽根面を有する構造としている。これらの工夫により、大規模なコンクリート基礎の打設による安定化を必要とせず、人力等による地盤(N値≒40まで)への打設による施工が可能となる。一方、土石流等の外力作用時において、一般的に構造上の弱部と想定される接合部(上部の流木捕捉柱部材:基部)に対して、流木捕捉柱部材(円筒体:流木捕捉輪柱)内に細長状の四角筒体を挿入させた補強が可能となる(**図-5**:右上)。また、**図-3**に示す継手については、挿入方式の簡易的な接合方法を採用している(**図-5**:右下)。

ここで、これらの流木捕捉杭の配置に際して、林道や家屋等の保全対象(**図-1**)より山側の河道や空地において、比較的自由に設置することを基本としている。なお、流木捕捉杭の設置間隔については、想定される最大流木長の2分の1程度¹¹⁾を目安とする。また、**図-4**に示す独立した基礎の採用により、河道内における横断方向の略直線状での任意による配

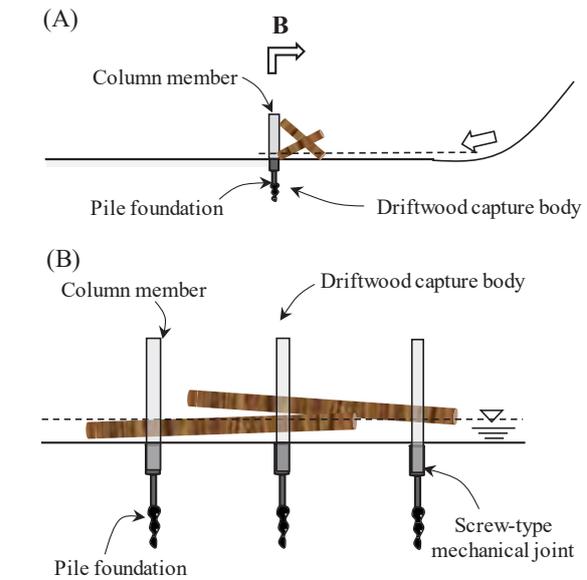


図-2 提案する流木捕捉工の適用例(上:断面, 下:正面)

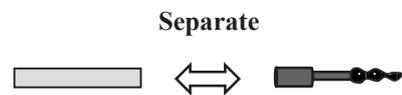


図-3 流木捕捉杭における基礎着脱の概要

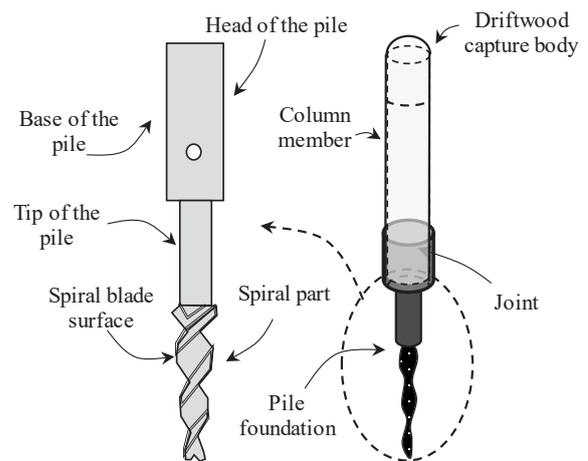


図-4 流木捕捉杭の構造およびその基礎形状

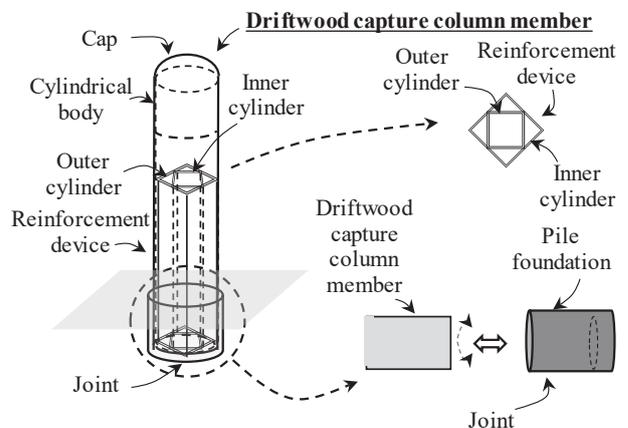


図-5 流木捕捉杭の詳細構造(内部補強と継手構造)

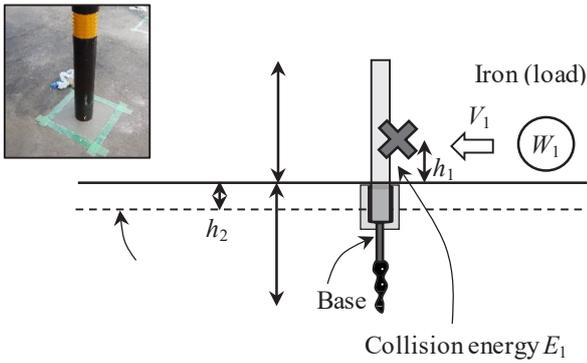


図-6 実験概要（荷重載荷試験）

置や、流水や地形条件を考慮した略扇形状又は略逆扇形状による自由な配置が可能となる。さらに、道路際の縦断方向に略直線状での任意による配置も可能である。

ここで、提案する流木捕捉杭の安定性能に関して、一般的な土石流を想定して、道路への流木流出（図-1）防止を目的とした沿道（アスファルト舗装部、地盤N値：10程度）への設置を想定した流木等の外力作用（図-6）時における荷重を構造物に載荷させた衝撃試験¹²⁾（条件：表-1）の実施により検証する。実施した衝撃実験の結果によると、表-1に示す荷重作用条件に対して、一部変形しながらも十分に機能することが示唆された。なお、紙面の関係より、詳細については報告できないため、今後、別途で報告する予定とする。

3. 配置条件の違いが捕捉機能に与える影響

前述までに提案する自由に配置が可能な流木捕捉工における捕捉機能の高度化を目的に、図-2（上）に示す空間等を対象にした流木捕捉工（捕捉杭）の配置条件（詳細な設置位置）の違いが捕捉機能に与える影響について、基礎実験に基づいて考察する。

(1) 流木の流出や回転特性を考慮して提案する流木捕捉工配置に関する概要

これまでの災害事例⁴⁾等を参考に、山地流域や森林区域等において提案する流木対策工（捕捉杭）の配置条件の違いが捕捉機能に与える影響について検討する。ここで、河道内等に流木捕捉杭を設置する場合、一般的に流木だけでなく芥等による河道閉塞等の影響が懸念される。また、流木捕捉時における用地の確保や、日常的な維持管理に対して留意する必要がある⁹⁾。その際、流木はその比重より水面付近を面内で回転することが想定され、流木捕捉工の直上流における流れの変化による影響が考えられる。なお、緩勾配区間から急勾配への急激な変化（ V_{n-1}

表-1 実験条件

		Unit	Value
Weight	W_1	kg	1805
Load position value	h_1	mm	200
Pavement thickness	h_2	mm	140
Capture body length	h_3	mm	850
Pile length	h_4	mm	850
Collision speed	V_1	km/h	47.1

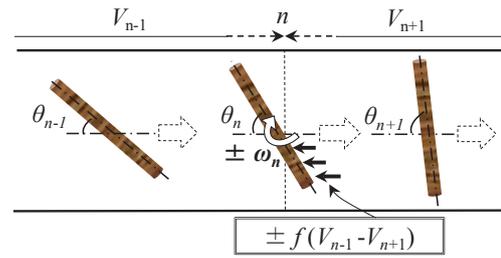


図-7 期待する流水中における流木の回転機構の概要図

$<<V_{n+1}$) による影響を受ける場合、流木が流れ方向に回転（例えば、図-7； ω_n が一方向へ回転）し、一般的に用いられる流木捕捉工の杭間隔（最大流木長の半分¹¹⁾では十分に捕捉せずに流木がそのまま杭間を通過してしまうことが懸念される¹³⁾。一方、杭間隔を顕著に狭くした場合、前述に示すとおり、日常的な芥や流木等の閉塞防止のための多大な維持管理が別途に必要となる。

そこで、比較的に広い杭間隔配置においても効果的に流木を捕捉するためには、流木捕捉が優位となる方向（図-7：流れに対して直角方向： $\theta_{n+1} \gg$ ）へ回転¹³⁾させることが有効である。その際、一般的に急勾配から緩勾配へ流れが顕著に変化（ $V_{n-1} \gg V_{n+1}$ ）する場合、流木が流れ直角方向へ回転（ ω_n が+方向へ回転）する特性を活用し、山地河川における治山堰堤等の土石流堆積地や沿道等の平坦地への設置に着眼した流木捕捉工の配置が有効であると考えられる（図-2）。以降に、本稿では急峻な流路から緩勾配の平坦地へ流下する際に期待される流木の回転（図-7）に着眼した実験に基づいて考察する。

(2) 実験概要

既設治山堰堤の堆砂域等における流れが急勾配から緩勾配へ急変する箇所における流木捕捉工の設置に関する有効性を検証するための実験に使用した急拡水路（直線水路及び平面氾濫台）を図-8に示す。

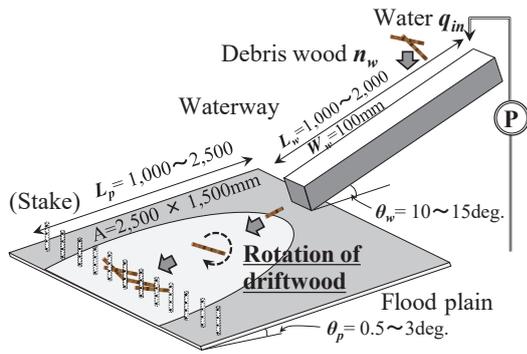


図-8 実験水路の概要

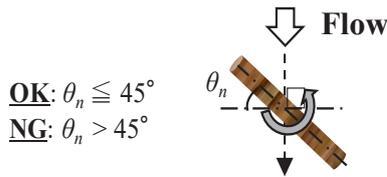


図-9 流木回転の制御効果の評価に関する定義図

表-2 実験条件

CASE	q_{in} (ℓ/s)	ϕ_1 (mm)	θ_w (deg.)	θ_p (deg.)	L_w (m)	L_p (m)
1-1	0.25					
1-2	0.80				1.0	
1-3		1.6		2.0		
1-4						1.0
1-5		2.8				
1-6			15	1.0	2.0	
1-7	0.50			3.0		
1-8		1.8		0.5		
1-9						2.0
2-1					0.5	1.0
2-2				2	2.0	2.0
2-3	0.80	2.8				
2-4	0.50	1.6	10	0.5	1.0	1.0

図-8 に示すとおり、実規模に対して約 1/100 程度の縮尺を想定して、傾斜させた直線水路（幅 10 cm）の上流から水（ q_{in} ）、流木（ただし、円形材料、流木長 8 cm、乾燥状態での比重：約 0.75、手動により投入：時間あたりの投入速度が概ね 1 本/0.5 秒）を供給し、下流の平面氾濫台における流木捕捉直前での流木の

軸方向 θ_n （図-9）をそれぞれ計測している。流木の投入に関して、群集で流下する流木は捕捉されやすいことが知られており¹⁴⁾、これらの影響を軽減するため、流木を単体で投入している。また、流木の供給条件（初期投入方向）の違いが流木の回転制御効果（図-7）に影響を与えないように配慮するため、流木の方向を、流れの水平面内において全方向にほぼ同じ割合となるように投入している。

水路の傾斜角は土石流流下区間（10 度¹¹⁾以上）を基本としている。また、流木の投入位置 L_w や平面氾濫台における流木方向の評価（図-9）位置（捕捉工位置） L_p をそれぞれ変化させている（図-8）。なお、予備実験において、流水への土砂混入、流木の枝付加、流木の投入速度等の違いによる影響について事前に把握している。

各実験条件の違いが流木の回転等を与える影響を考慮して流木捕捉工の最適な配置について提案するため、流量（ q_{in} ）、水路勾配（直線水路： θ_w 、平面氾濫台： θ_p ）、流木径 ϕ_1 等を変化させて、それぞれの条件における流木の回転（制御：図-9）効果を比較している。また、手動での流木投入による影響等を低減するため、実験は同じ条件（表-2）で 3 回実施して平均化を図っている。

(3) 実験結果及び考察

前述に示すとおり、流木は一般的に水平面内方向における回転が想定される。そこで、実験結果における流木の回転に関して、評価時における流れの変化に伴う流木の回転効果（流木の回転率） f_c は、

$$f_c = n_0 / n_w \quad (1)$$

と表される。ここに、 n_0 は平面氾濫台上で計測位置 L_p において θ_n が 45 度以上（図-9）であった流木の本数、 n_w は流木の全供給（図-8）本数である。以降に、実験条件の違いが流木の回転効果に与える影響について考察する。

供給流量の違いによる流木の回転率 f_c の変化を図-10 に示す。図-10 に示すとおり、流量及びレイノルズ数（ただし、直線水路）が大きくなるに伴って、流木回転効果が顕著となった。実験中の観察によると、直線水路から平面氾濫台へ流木が運搬される際、その上下流で発生する流速差の影響を受けて流木が回転¹³⁾（図-9）するため、流量が大きくなるに伴って、この上下流の流速差が顕著になったことによるものと考えられる。

次に、堰堤堆砂域等における流木径や水深の違いによる流木の回転率 f_c の変化を図-11 に示す。図-11

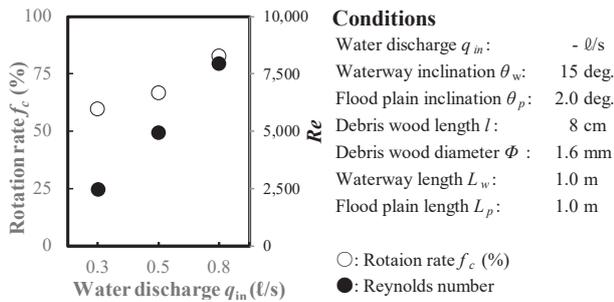


図-10 供給流量の違いによる流木回転効果の変化

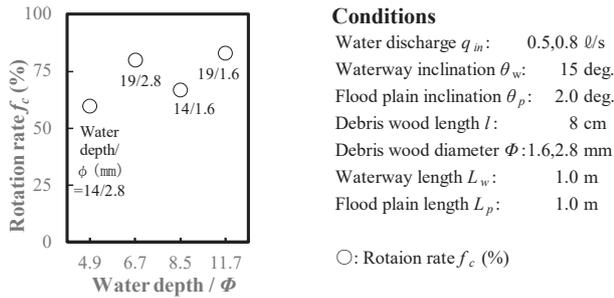


図-11 流木径や水深の違いによる流木回転効果の変化

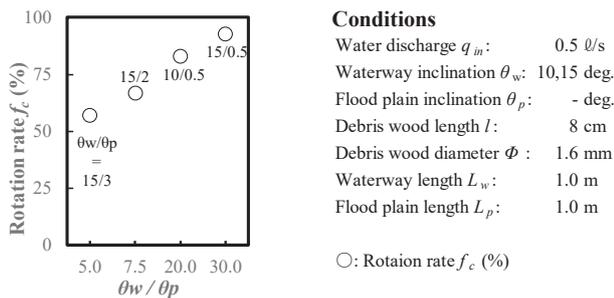


図-12 河床勾配変化の違いによる流木回転効果の変化

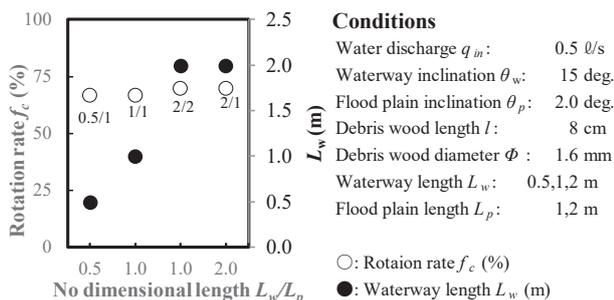


図-13 流木の流下延長の違いによる流木回転効果の変化

に示すとおり、流木径が細く水深が大きくなるに伴って回転効果が顕著となった。実験中の観察によると、前述と同様に水深（流量）が大きくなるに伴って上下流の流速差が顕著になるとともに、流木の重量が小さくなるに伴って流れの影響を受けやすくなったことによるものと考えられる。これより、河道

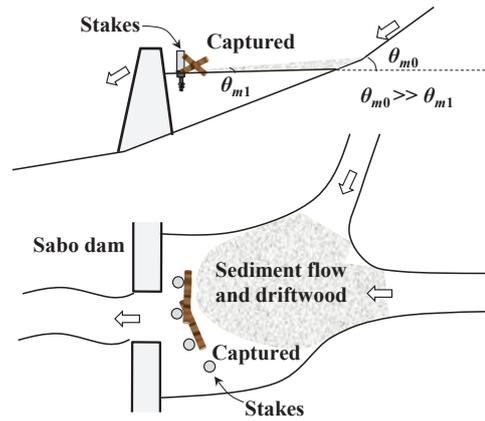


図-14 既設治山堰堤での流木捕捉機能向上としての流木捕捉工の配置（堆砂域における流木捕捉杭）提案

幅が狭く流下する流木規模が小さい上流域においては、特に、流れの影響を受けやすいものと考えられる。

河床勾配の変化（直線水路と平面氾濫台との勾配比）の違いによる流木の回転率 f_c の変化を図-12 に示す。図-12 に示すとおり、河床勾配に影響を受けた流速の変化が流木の回転効果に影響（図-7）を与えることが確認された。これらより、上流の急勾配河道に設置された既設治山堰堤の堆砂域等における流木捕捉工設置の有効性について示唆された。

一方、流木の流下延長（流木の投入位置 L_w 、平面氾濫台における流木方向の評価位置 L_p ：図-8）の違いによる流木の回転率 f_c の変化を図-13 に示す。図-13 に示されるとおり、流木の流下延長等は流木の回転効果に殆ど影響を与えないことが確認された。実験中の観察によると、流木回転は前述にも示すとおり、流速の変化付近において主に発生したことによるものと考えられる。これらの結果より、道路沿での谷部との間における平坦地や既設治山堰堤の堆砂域（例えば、図-14）等に見られる地形やそれに伴う流れの変化を活用すると、流木捕捉工としての杭を比較的に広い間隔で経済的に配置させることが可能となり、維持管理や土地利用等においても有効であることが示唆された。ただし、本実験は基礎的な実験であるため、今後、更なる検討が望まれる。

最後に、これらの具体的な適用事例を図-14 や図-15 に示す。図-14 に示すとおり、上流域における当該治山堰堤は更に上流 2 カ所からの溪流（0 字谷：急勾配河道）の合流地点であり、高さ 1m 程度の放水路¹⁰⁾（水通し¹¹⁾）袖部により河道中央部に流れが集約されており、この放水路の直上流に捕捉工を流入する流れに対応した円弧上に配置して捕捉するのが、効果的であると考えられる¹³⁾。また、図-15（上）

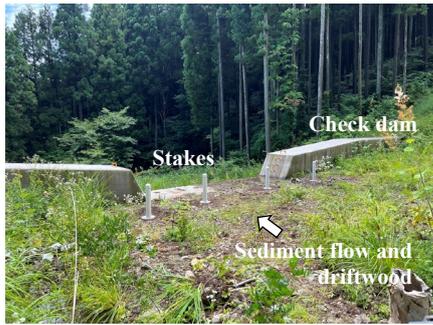
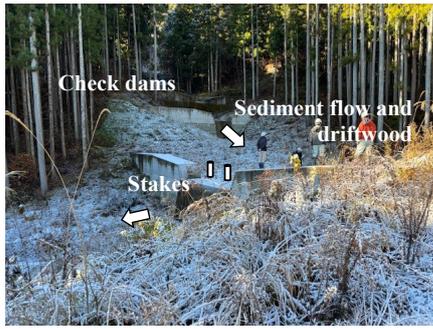


図-15 あと施工流木捕捉工の設置事例（上：隣接する林道から撮影，下：堆砂域から設置後に撮影）

に示されるとおり，当該堆砂域は既設林道に隣接しており，日常的な維持管理や捕捉された流木の除去が容易であると想定される．一方，当該流域は上流域であるため，流域集水面積も小さく，放水路を通過する流水の水深は浅いものと考えられる．そこで，従来の流木捕捉杭（上部捕捉体長の最低長：2m¹⁵⁾）の代替として，新たに小型の捕捉工（捕捉体長：約1m，図-15）を提案する．なお，本構造の小型化により，施工性においても有効であると考えられる．今後，これらの設置による流木捕捉効果についてモニタリングし，報告する予定である．

4. おわりに

本研究は，山地流域等における流木対策の更なる推進に向けて，あと施工が可能な流木捕捉工とその有効な配置に関して提案した．得られた成果を以下に要約する．

- 1) 本研究において，維持管理，安全性，コスト等に配慮し，人力で施工が可能な螺旋形状の杭基礎を接合させて分離可能な新たな流木捕捉工（捕捉杭）を提案した．
- 2) 提案する流木捕捉工の流木捕捉機能を更に高めるため，治山堰堤等の急勾配変化を有する地形条件

の変化に伴った流木挙動に着眼した水路実験結果に基づいて，最適な配置条件を提案した．

謝辞：本研究にあたり，日之出水道機器株式会社，ヒロセ補強土株式会社，国土防災技術株式会社ならびに群馬県利根沼田環境森林事務所の関係各位に多大な協力を得た．また，里深好文立命館大学教授，水山高久京都大学名誉教授，中谷加奈京都大学防災研究所教授に助言を得た．末筆ながら記して謝意を表します．

参考文献

- 1) 林野庁：森林・林業白書，2023.
- 2) IPCC: Sixth Assessment Report, 2022.
- 3) 北海道水産林務部林務局：流木被害の軽減を目指す森林づくりについて，2019.
- 4) 石川芳治：山地小溪流からの流木を伴う土砂流出による災害に関する研究，京都大学博士学位論文，1990.
- 5) 福岡捷二：近年の洪水災害を踏まえた流域治水を考える，河川技術論文集，Vol. 28, pp. 457-462, 2022.
- 6) 国土交通省・林野庁：流域治水と連携した森林整備・治山対策の具体的取組事例，https://www.mlit.go.jp/river/kasen/suisin/pdf/renkei_siryou03/siryou05.pdf，2024.
- 7) 林野庁：土石流・流木対策指針，2023.
- 8) 中澤敏雄：既設治山ダムを活用した流木捕捉工の開発～流木災害防止緊急治山対策プロジェクト～，水利科学，Vol. 65, No. 1, pp. 44-62, 2021.
- 9) 加藤翔吾，岩谷栄林，福井 治，岩見収二，上杉大輔，柳田隆一，松井康彦，池田和也，吉田大貴，内田龍彦：流木捕捉池内の流況制御を考慮した流木捕捉施設配置の設計，河川技術論文集，Vol. 29, pp. 545-550, 2023.
- 10) 林野庁：治山技術基準（総則・山地治山編），2023.
- 11) 国土交通省 砂防部：砂防基本計画策定指針（土石流・流木対策編）解説，国総研資料，Vol.904, 2016.
- 12) 日本道路協会：防護柵の設置基準・同解説，2021.
- 13) 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, No.4, pp. I_1351-I_1356, 2017.
- 14) 原田紹臣，高山翔揮，里深好文，水山高久，中谷加奈：既設不透過型砂防堰堤における流木対策の高度化に関する提案，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.74, No.4, pp. I_1219-I_1214, 2018.
- 15) 砂防・地すべり技術センター：新編・鋼製砂防構造物設計便覧 令和 3年版，2021.

(2024. 5. 31 受付)