

流域特性を考慮した流木対策の提案

COUNTERMEASURES AGAINST DEBRIS WOOD DAMAGE BY CONSIDERING BASIN CHARACTERISTICS

原田 紹臣¹・木村 一郎²・朝位 孝二³・里深 好文⁴・水山 高久⁵

Norio HARADA, Ichiro KIMURA, Kouji ASAI, Yoshifumi SATOFUKA
and Takahisa MIZUYAMA

¹正会員 博（工）/ 博（農） 三井共同建設コンサルタント株式会社（〒552-0007 大阪市港区弁天1-2-1-1000）

²正会員 博（工） 富山大学都市デザイン学部 都市・交通デザイン学科 教授（〒930-8555 富山市五福3190）

³正会員 博（工） 山口大学大学院創成科学研究科 教授（〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1）

⁴正会員 博（工） 立命館大学理工学部 教授（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1）

⁵非会員 農博 京都大学名誉教授（〒606-8502 京都市左京区北白川追分町）

Debris wood, created by landslides that follow heavy rainfall, damages downstream bridges and other structures. In 2017, heavy rains in the northern area of Kyushu triggered such damage. A nationwide project commencing recognized the urgent need for effective countermeasures. Here, we develop comprehensive measures to prevent debris wood damage at the basin level. We extracted debris wood damage risks by reference to earlier damage reports. We explored the correspondence between runoff characteristics and such damage. Finally, we developed a basin-wide policy that features debris wood countermeasures by referring to basin characteristics.

Key Words: Countermeasure, debris wood, disaster prevention, maintenance, basin characteristics

1. はじめに

近年、林業の衰退による山林の荒廃や地球温暖化の影響を受けた集中豪雨による斜面崩壊等¹⁾に伴って発生した流木が流出し、下流域において多大な被害が報告されている。特に、我が国は国土の約4分の3が山地であり、その大部分が森林に覆われているため、山腹崩壊や溪岸崩壊による多量の流木の発生及び流出が懸念される²⁾。また、流木は河川横過部の橋梁や箱渠の上流等で閉塞し、橋梁の損傷や流出、閉塞箇所上流部における洪水氾濫の原因となることが、これまでの災害事例より報告されている^{3) 4)}。一方、従来の不透過型砂防堰堤における流木捕捉機能の一部不足が指摘⁵⁾され、鋼材の併用による流木捕捉機能を強化する考え方⁶⁾が設計マニュアル等において示された。なお、平成29年7月に九州北部で発生した豪雨災害^{7) 8)}では、多くの不透過型砂防堰堤において殆どの流木を捕捉できずに、下流において多くの被害を与えた。これらの報告を踏まえて、今後、新たな流木対策の実施や流木捕捉機能の強化が重要であると考えられる。また、今回の災害を受け、溪流から下流河川区域まで含めた総合的流域における流木対策の方向性や事業の推進⁹⁾が示され、流域全体における合理的な流木対策技

術の確立が急務な課題となっている。

これまで、山地河川における流木対策や、橋梁における流木閉塞に関するメカニズムとそれらの対策、下流河川区域における流木対策工（例えば、木除杭：写真-1）等に関して、それぞれ個別に議論されてきている。そこで、本稿では、既往研究や筆者らの研究成果等を参考に、これまで殆ど議論されてこなかった流域全体における事業分野（例えば、治山・森林分野、砂防・ダム・河川分野、道路・鉄道等の交通分野、港湾・漁港・海岸等の沿岸域での事業分野）に応じた具体的な流木対策の検討に関して、今後の設計実務者が検討に際して参考となる考え方や留意点について考察することを目的としている。



写真-1 木除杭の設置状況（京都嵐山；渡月橋）

2. 既往報告に基づく流木の流出特性と被害リスク

流木対策の計画に際して、流木の発生や流出特性について把握するため、過去に貯水池（矢作ダム）に流入した流木について詳細に調査された結果¹⁰⁾を用いて、流入した樹木種毎の流木本数を、その発生原因地である流域の森林における樹木種構成比（森林構成比）で除して無次元化した矢作ダムにおける樹木種別の流木流出率 R_{i_out} ：式 (1) を図-1に示す。

$$R_{i_out} = n_{i_c} / A_{i_e} \quad (1)$$

ここで、 n_{i_c} は貯水池（矢作ダム）に流入した樹木種毎の流木本数、 A_{i_e} は森林構成比（流域における樹木種面積比）である。図-1に示されるとおり、針葉樹のスギは、他の樹木種と比較して、顕著に流出する割合が高いことが分かった。この要因として、一般的に、樹木種毎における根の緊縛力の違いによる影響や、樹木種毎の生息する地盤環境特性（例えば、斜面の安定度）の違いによる影響等が考えられる。しかしながら、樹木種毎における根系の引張強度特性¹¹⁾（図-2）によると、根の緊縛力による違いと樹木種毎の流木流出率との関係性については、更なる整理が必要であると考えられる。一方、スギは水分の要求性が高く^{12), 13)}、比較的に含水比の高い斜面や谷沿に植林されるため、流木流出率の違いはスギの生育する斜面地盤内における含水比の高さと斜面崩壊の発生し易さとの関係¹⁴⁾等に強く影響を受けたものと考えられる。

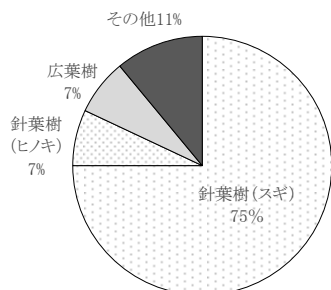


図-1 矢作ダムに流入した流木本数をその森林構成比¹⁰⁾で除して無次元化した樹木種毎の流木流出率

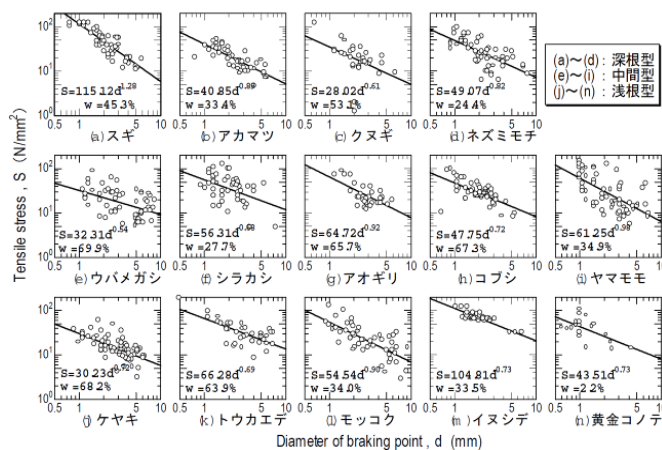


図-2 樹木種の違いによる根系の引張強度と直径との関係¹¹⁾

ここで、樹木種毎における比重の違いによる下流への流下特性を議論するため、樹種毎における生木の比重¹⁵⁾を図-3に示す。図-3に示されるとおり、針葉樹は広葉樹等と比較して比重が小さく、特に、スギやヒノキの比重が顕著に小さい傾向であった（スギやヒノキの生木比重：0.7~0.8程度）。なお、一般的に、洪水時中は河川流水内における土砂濃度の上昇に伴う流水の比重の増加が考えられ、洪水流出中は更なる浮力による流木の遠距離への運搬に伴う下流域における被害が懸念される。

これらの結果によると、土壌水分の違いによる斜面崩壊のリスクが高いと考えられる斜面に植林されるとともに、比重の小さいと考えられる針葉樹のスギは、他の樹木種と比較して、特に多くの流木が下流域まで河川等の流れにより運搬されることが懸念される。今後、これらの特性を考慮した議論が重要であると考えられる。

次に、流木流出に伴う被害防止の目的を明確にするため、これまでの流木による災害や被害に関する既往報告を参考に、今後、河川流域の各空間区分において懸念される流木による主な被害リスクを表-1に示す。表-1に示されるとおり、流域における流木による被害は、主に、①土砂流出に伴う流木の家屋への衝突等による被害、②下流域まで運搬された流木の構造物（例えば、橋梁）への衝突や流木閉塞に伴う構造物の損傷、③橋梁・河道閉塞に伴うその上流部での洪水氾濫、④貯水池ダムや海岸・港湾における流木処理・利用制限等の間接的な被害等に分類される。

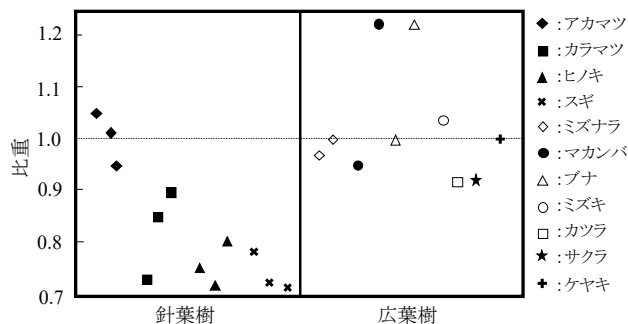


図-3 生木の比重¹⁵⁾

表-1 流域の空間区分において懸念される流木による主な被害リスク

流域の空間区分		主な流木被害リスクの概要	主な被害事例
山地・森林	斜面・溪流	土砂流出に伴う流木の家屋への衝突等 流木による河道閉塞に伴う上流部での洪水氾濫等	・1988 広島県 ¹⁶⁾ ・2004 愛媛県 ¹⁷⁾ ・1998 那珂川 ¹⁸⁾ ・2005 宮崎県 ¹⁹⁾
	貯水池・ため池	余水吐や取水設備における流木の閉塞による堤体の決壊や損傷 流出した流木の処分・撤去	・2005 宮崎県 ²⁰⁾ ・2017 福岡県 ²¹⁾ ・2003 北海道 ²²⁾
沖積平野	河川：緩勾配区間 その他	橋梁や横断構造物における流木の閉塞や衝突による橋梁、取付道路の損傷	・1998 那珂川 ¹⁸⁾ ・2007 多摩川 ²³⁾
沿岸域	漁港・港湾	流木流出による漁業活動への影響	・2003 静岡県 ²⁴⁾
	海岸	流木堆積による利用制限	・2005 静岡県 ²⁵⁾

3. 山地から河口域までにおける総合的な流木対策

山地河川から緩勾配区間の河口域までにおける流域全体とした総合的な流木対策⁹⁾の推進を目的に、今後の効果的な対策計画を立案するため、これまで講じられてきた対策工について整理するとともに、計画や設計に際して懸念される各対策工における留意点について示す。さらに、これらの流木対策工において、各対策機能に関して更なる解明が必要であると考えられる対策工（例えば、木除杭：写真-1）に関して、筆者らの既往研究において得られた技術的な知見や留意点等を示す。

(1) 流域の各空間区分における主な流木対策工と留意点

これまで、流域の各空間区分において流木捕捉や被害軽減を目的に講じられてきた主な対策工及びその概要を表-2にそれぞれ示す。表-2に示されるとおり、前述に示す各空間区分で懸念される流木による被害リスク（表-1）に応じて、主に、①山腹工等による斜面での流木発生防止、②砂防堰堤等による流木捕捉、③木除杭による橋梁への衝突防止、④閉塞時の橋梁流出防止等に分類される。さらに、各流木対策工における計画上や運用上における主な留意点を表-2に示す。流木発生防止等に関して、未対策の斜面が流域に残っている場合、流木の流出特性により、それらの残斜面から発生した流木が下流域まで運搬されることが懸念されるため、必要に応じて全ての斜面に対して対策を講じる必要がある。また、溪流における砂防堰堤による流木捕捉等も同様であり、下流域の状況に応じては、全ての支流や溪流の谷出口付近で対策を講じる必要があるとともに、定期的な維持管理（例えば、捕捉後における流木・土砂の速やかな除去）の実施が必要である。一方、流木による被害報告の多い橋梁（表-1）における対策として、高欄等を有さずに床版のみで構成された潜水橋（例えば、四万十川一斗俵橋）や古くから用いられてきた木除杭が挙げられる。ただし、これらの対策工に関しては今後の維持管理や運用上において、日常的な維持管理による対策機能や安全性の確保等が必要となる。また、流木閉塞による橋桁の流出防止を目的とした鎖構造等の落橋防止装置については、流木閉塞による河積阻害に伴う直上流部における洪水氾濫による影響¹⁸⁾について留意しておく必要がある。

表-2 流域の各空間区分において考えられる主な流木対策工

対象	対策工	目的・概要	主な留意点
斜面・溪流	山腹工・床固工	・斜面崩壊防止による流木発生防止	・全ての原因地で対策が必要 ・地権者との調整
	砂防堰堤工	・土砂や流木を鋼材等で捕捉	・除石、除木等の維持管理が必要 ・全ての支流で対策が必要
河川	流木捕捉施設、遊水池等	・杭や網場等により流木を捕捉	・除木等の維持管理が必要 ・広大な用地の確保が必要
橋梁等	潜水橋（沈下橋）	・床版のみによる流木閉塞の低減	・出水後の橋梁構造の安全性確認や通行規制などが必要
	木除杭	・流木の衝突防止	・芥撤去等の維持管理が必要
	落橋防止装置	・鎖等による上部工の移動防止	・橋梁部における流木閉塞に伴う上流域での洪水氾濫

(2) 伝統的な木除杭の流木対策機能とその高度化

橋脚間が狭小な橋梁部において、古くから経験的に用いられてきた流木対策の一つである木除杭に期待される機能の概要¹⁹⁾を図-4に示す。図-4に示されるとおり、上流から流下してきた流木は、橋梁の直上流に設置された杭を中心に、流木軸方向が流れ方向と同じ角度に面内で回転し、そのまま橋脚間を円滑に通過する機能（流木流向制御）が期待できると考えられる。なお、木除杭の配置に関して、橋脚と木除杭との設置間隔 L_3 として流木長 l 以上の確保が望まれるとともに、これらの更なる機能向上を目的とした千鳥配置（図-5）による木除杭の設置について、実験により示している²⁰⁾。

一方、木除杭は芥留杭としても称されており、木除杭として提案する杭の配置形式における芥捕捉機能についても実験（図-6）により検証し、妥当性を確認している。また、芥捕捉と流木流向制御機能との相互干渉による影響についても、実験により確認している²⁰⁾。ただし、現存する木除杭（例えば、伊勢神宮内の宇治橋）等において、筆者らが知る限り、上下流の橋梁で連続して木除杭による対策の事例が無いため、今後、連続した木除杭の設置による対策については留意が必要である。

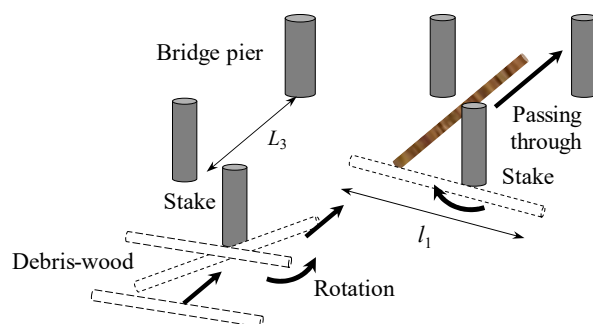


図-4 木除杭における流木対策機能（流向制御）の概要²⁰⁾

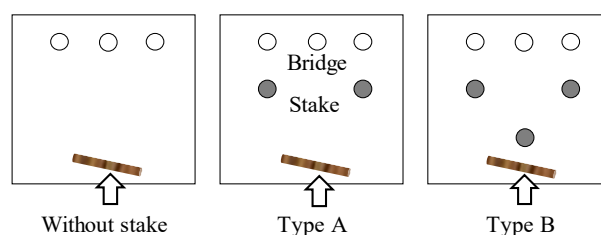


図-5 木除杭の配置形式

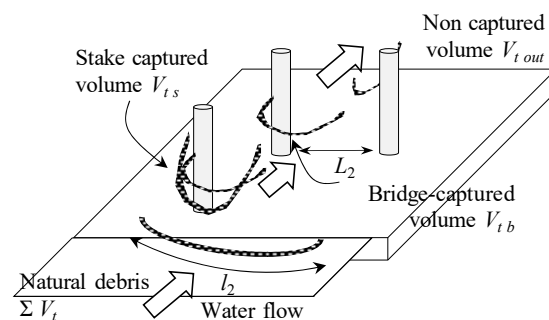


図-6 芥留機能に関する実験概要

(3) 掃流区間におけるコンクリート・スリット堰堤やため池等の湛水部で期待される流木捕捉機構

これまで流木捕捉機構について殆ど議論されてこなかった掃流区間におけるコンクリート・スリット堰堤、貯水池ダムやため池の湛水部において期待される流木捕捉機能に関する筆者らの実験概要²⁷⁾を図-7に示す。図-7に示されるとおり、直線水路の上流から水と流木模型を投入し、スリット堰堤直上流に発生する湛水部における流木の捕捉（調節）効果について観察している（図-8）。なお、給水中のスリット直上流湛水部における三次元的な水位分布（堰上げに伴う背水効果：図-9）の影響を受けて、流木は湛水面内の流水直角横断方向に輸送されるのが確認され、多くの流木が湛水部内に一時的に貯留される効果が新たに分かった（図-8）。ただし、上流からの給水が停止（洪水終了）した後は、この堰上げ効果による三次元的な水位分布が消失し、湛水部において貯留されていた多くの流木がスリット間を通過して、下流に流出してしまうことが分かった。なお、この貯留された流木の流出対策として、スリット部における効果的な流出防止対策工に関して、実験により有効な構造について提案している。今後、この提案する対策工や網場などの併用による流木捕捉機能の強化・向上が望まれる。

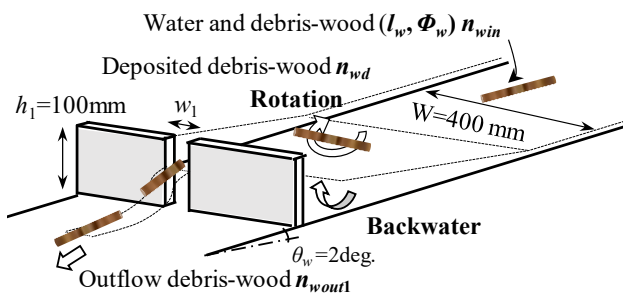


図-7 実験概要（コンクリート・スリット堰堤）

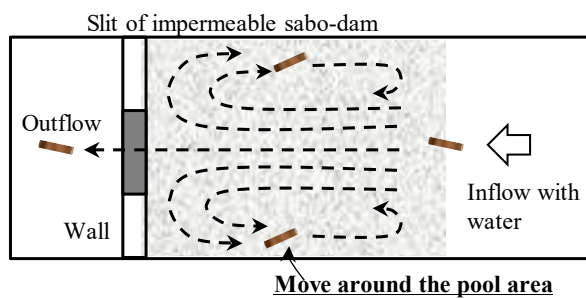


図-8 給水中の湛水面における流向及び流木挙動の平面概要²⁷⁾

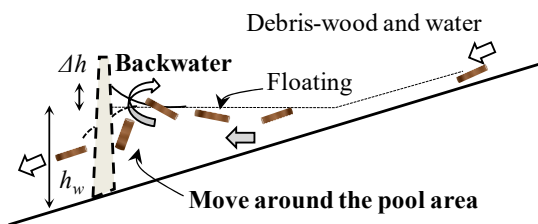


図-9 給水中の湛水部における流向及び流木挙動の縦断概要²⁷⁾

(4) 砂防堰堤工（部分透過型等）における計画上の留意点

不透過型コンクリート砂防堰堤における流木捕捉機能の向上を目的に、鋼製部材を併用させた複合構造による対策構造（例えば、部分透過型砂防堰堤、本堤直下流における前庭保護工の副堰堤部での捕捉工：図-10）⁹⁾が提案されており、それらの流木捕捉機能や効果に関して、実験により比較・検討している^{28), 29)}。なお、これらの実験結果によると、鉛直下部にコンクリート等による不透過部を有するとともに、その上部に鋼材（杭）を有する構造（図-11：部分透過型砂防堰堤）は、流木捕捉において有効であることが示された。特に、下部の不透過部において適切に除石管理（捕捉空間の確保）されている場合、流木を効果的に捕捉できることが分かった。この要因として、上流より供給された流水や土砂、流木が不透過部上流の湛水部においてそれぞれ分離し、そのまま下流へ輸送された流木と流水は、不透過部直上流で見られる堰上げ効果（背水効果）により、流木の軸方向が面内の流水流れ直角方向に回転し、上部の杭部で確実に捕捉されることが分かった（図-12）²⁸⁾。

これらの結果より、堰堤の上部における除石有無の違いが流木捕捉効果に影響を与えることがわかったため、今後、適切な除石管理が重要であると考えられる。

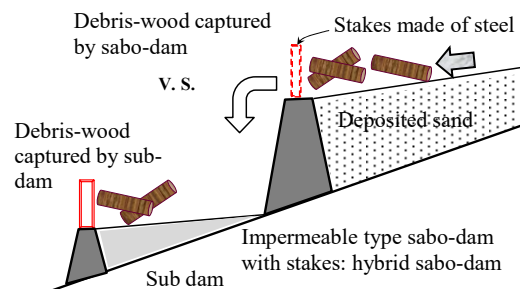


図-10 不透過型砂防堰堤における流木対策・機能補強の概要

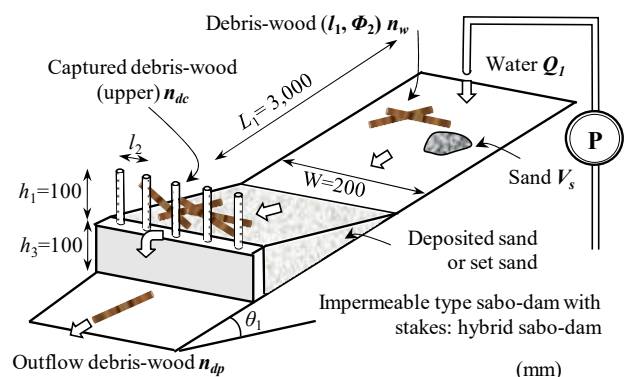


図-11 部分透過型砂防堰堤の流木捕捉機能に関する実験概要

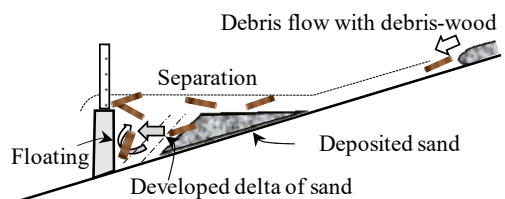


図-12 部分透過型砂防堰堤（除石管理有）の流木捕捉機構²⁸⁾

4. 流域特性を踏まえた流木対策方針案の提案

前述までに、流木の流出特性や流域の各空間区分において懸念される流木流出に伴う被害リスクや各対策工についてそれぞれ示した（表-1、表-2）。ここで、各空間区分における流域特性（例えば、保全対象や利用状況）を考慮した対策方針案について以降に示す。

山地や上流域に保全対象（例えば、家屋）等が存在する場合、これまでの砂防事業と同様に、保全対象上流域において、山腹工や砂防堰堤等による流木の生産・流出防止を目的とした対策が望まれる（図-13）。その際、前述にも示すとおり、下流域の状況（例えば、橋梁の横過条件、沿岸部の利用状況）により、全ての斜面または溪流等からの流木流出に対して防止を講じる必要がある。ここで、山地や上流域において家屋等の保全対象が存在しないとともに、下流河川域において流木捕捉施設の設置が可能な地形条件を有する場合は、図-14に示すとおり、河川下流域（一箇所）での集中的な流木捕捉も有効であると考えられる。なお、下流域での流木捕捉は流木の運搬や撤去においても有効であると考えられる。

一方、流木発生量や河口域・沿岸部での利用状況によ

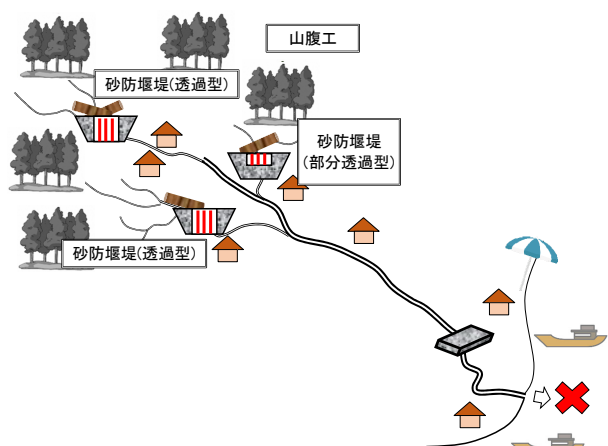


図-13 砂防堰堤や山腹工等による山地や上流における対策例
(山間地域における保全対象：有，沿岸域への流木放流：不可)

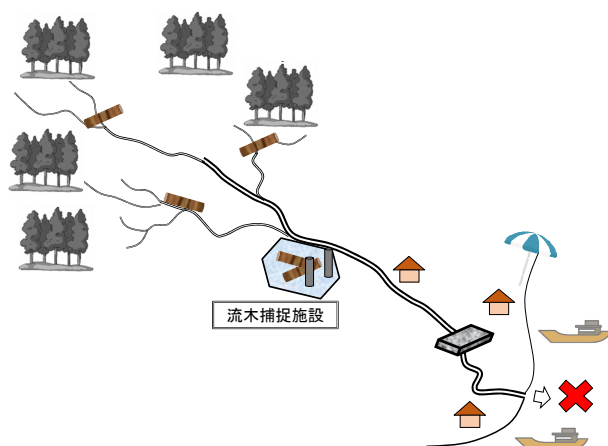


図-14 下流河川における流木捕捉施設等による対策例
(山間地域における保全対象：無，沿岸域への流木放流：不可)

っては、海岸や港湾管理者等との調整により、木除杭を併用させた流木の自然流下による沿岸部での流木の集約・撤去も考えられる（図-15）。ただし、流木対策や処理に関して、主な発生域の管理者（森林管理者等）との調整、対策における便益者の違いを考慮した流木捕捉や流木の集積・処分（例えば、貯水池ダムや沿岸域での流木集積）に係る費用の負担調整、総合的な河川流域の事業における費用便益効果分析手法の確立が重要である。

これらの流域特性に応じた流木対策方針について議論するための検討フローを図-16に示す。図-16に示されるとおり、山地から河口域までの流域において効果的に流木対策を推進するためには、森林管理者、砂防施設管理者、河川管理者、海岸管理者、港湾・漁港管理者、道路管理者等が連携していく必要がある。なお、本稿では目的が異なるため対象としていないが、貯水池ダム等の湛水部における網場を併用した流木捕捉も有効と期待される。今後、更なる合理的な流木対策の議論が望まれる。

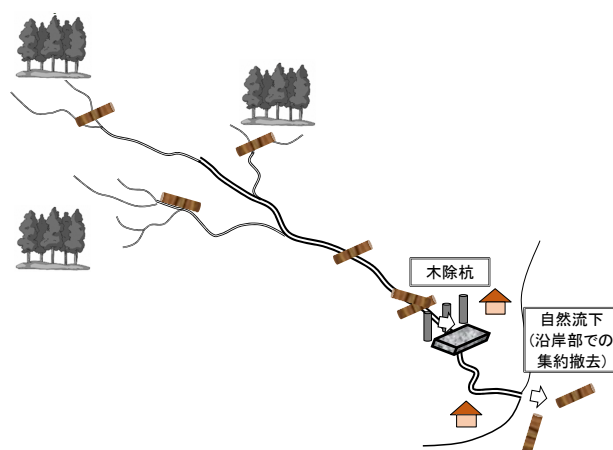


図-15 木除杭等による対策例
(山間地域における保全対象：無，沿岸域への流木放流：可)

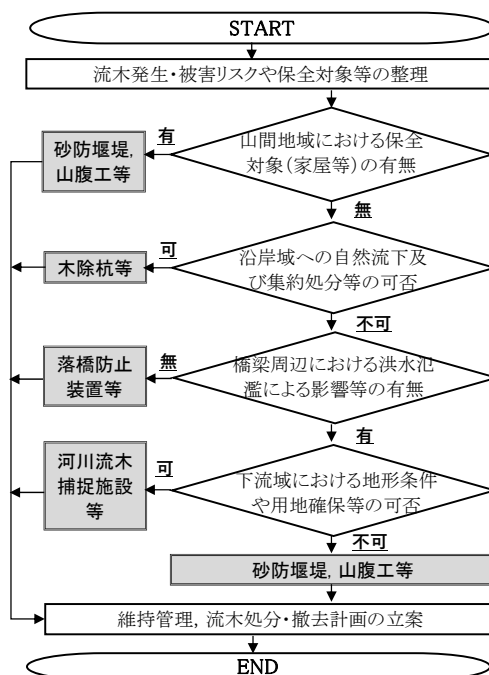


図-16 流木対策方針の概略検討フロー例

5. おわりに

今後の河川流域等における総合的な流木対策の推進に向けて、既往の被害報告や筆者らの既往研究に基づいて、流木対策における課題やそれらの対応について考察した。本研究により得られた成果を以下に要約する。

- 1) 既往の貯水池（矢作ダム）に流入した樹木種毎の流木本数やその森林構成比を用いて分析したところ、針葉樹のスギは他の樹木種と比較して、顕著に流出する割合（流木流出率）が高いことが分かった。
- 2) 流木による被害リスクやこれまでの流木対策工について整理するとともに、各流木対策工の検討等に際しての留意点を示した。
- 3) 流域特性等を考慮した流木対策方針案を例示するとともに、総合的な流木対策の検討フロー案を示し、今後の実務者における総合的な流木対策について議論するための基礎資料を提案した。

参考文献

- 1) 藤田正治：気候変化が土砂災害の素因・誘因に及ぼす影響，砂防学会誌，Vol.65，No.1，pp.14-20，2012.
- 2) 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.
- 3) 石野和夫，橋丸大史，玉井信行：2004年7月18日福井水害における流木の橋梁への影響調査結果，土木学会第61回年次学術講演会，Vol.2，pp.9-10，2006.
- 4) 足立昭平，大同淳之：流木に関する実験的研究，京都大学防災研究所年報，Vol.1，pp.41-49，1957.
- 5) 藤村直樹，黒岩智恵，泉山寛明，赤澤史顕，水野秀明：不透過型砂防堰堤による流木の捕捉と流出に関する実験報告書，土木研究所資料，Vol.4331，2016.
- 6) 国土交通省 砂防部：事務連絡，流木対策の実施（当面の対応），2015.
- 7) 地盤工学会：平成29年7月九州北部豪雨緊急災害報告会資料，2017.
- 8) 鈴木健吾，篠原麻太郎，守屋博貴，二瓶泰雄，長谷部由莉，五十川周，矢野真一郎，赤松良久：平成29年九州北部豪雨による福岡県朝倉市 山の神ため池の決壊・洪水氾濫状況，土木学会論文集B1，Vol.74，No.4，pp. I_1183-1186，2018.
- 9) 国土交通省 砂防部：事務連絡，平成29年7月九州北部豪雨災害を踏まえた今後の砂防事業における流木対策，2017.
- 10) 森田 実，田中茂信，高橋洋一：H12.9東海豪雨による流木調査，河川技術論文集，Vol. 8，pp.231-236，2002.
- 11) 福田耕司，大塚泰洋，杉山太宏，赤石 勝：樹種の違いによる樹木根系の引張強度特性，土木学会第57回年次学術講演会，VII-015，pp.29-30，2002.
- 12) 堤 利夫：現代の林学，Vol. 10，造林学，文永堂出版，pp.5-10，1994.
- 13) 丹下 健：スギ造林木の成長に関する生態生理学的研究，東京大学博士論文，1993.
- 14) 酒匂一成，須田剛文，里見知昭，深川良一，北村良介：降雨によるまさ土斜面の浸透・崩壊に関する室内土槽試験，第4回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp.21-26，2008.
- 15) 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，Vol.78，pp.8-9，2003.
- 16) 石川芳治，水山高久，福沢 誠：扇状地における流木の流下・堆積特性，土木技術資料，Vol. 33，No.5，pp.38-44，1991.
- 17) 岡本 敦：平成16年度 愛媛県で発生した土砂災害の対策，第37回砂防学会シンポジウム講演集，pp.73-90，2005.
- 18) 伊藤和典，須賀堯三，池田裕一：余笹川にみる低頻度大洪水による横侵食性河道変化の実態とその考察，水工学論文集，Vol. 45，pp.781-786，2001.
- 19) 消防庁：平成17年台風第14号と豪雨による被害状況，2005.
- 20) 九州電力：耳川水系ダム最大流入量及び最大放流量一覧，2006.
- 21) 堀 俊和，泉 明良，正田大輔：平成29年7月九州北部豪雨での被災ため池に関する調査報告書，2017.
- 22) 佐藤 創，長坂 有，浅井達弘，寺澤和彦：2003年台風10号災害における厚別川流域の流木の堆積量と組成，砂防学会誌，Vol. 58，No. 6，pp.11-17，2006.
- 23) 玉井信行，石野和男，榎田真也，前野詩朗，渡邊康玄：豪雨による河川橋梁災害 その原因と対策，2015.
- 24) 国土交通省中部地方整備局：総合的な沿岸漂着物対策検討調査，2003.
- 25) 佐藤慎司：河川流出ゴミの海岸への漂着実態の解明，河川整備基金研究成果報告書，河川環境管理財団，2006.
- 26) 原田紹臣，内藤秀弥，里深好文，水山高久，小杉賢一朗：橋脚における木除杭及び芥留杭の機能に関する基礎的な実験，土木学会論文集B1，Vol.72，No.4，pp.301-306，2016.
- 27) 原田紹臣，中谷加奈，木村一郎，里深好文，水山高久：掃流区間におけるコンクリート・スリット堰堤の流木処理機能に関する提案，土木学会論文集B1，Vol.75，No.4，pp.I_1075-1080，2018.
- 28) 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，Vol.73，No.4，pp. I_1351-1356，2017.
- 29) 原田紹臣，高山翔揮，中谷加奈，里深好文，水山高久：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，Vol.74，No.4，pp. I_1219-1224，2018.

(2019. 4. 2受付)