

令和 4 年 5 月 20 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02993

研究課題名(和文) 水平梁を用いた新流木捕捉手法の開発研究

研究課題名(英文) Study on developing a new method capturing large wood with horizontal rods

研究代表者

堤 大三 (Tsutsumi, Daizo)

三重大学・生物資源学研究科・教授

研究者番号：40372552

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：水平梁構造を持つ新しいタイプの流木捕捉工を開発することを目的に、水路実験・数値シミュレーション、実用化に向けた検討を実施した。水路実験において、土砂と流木を同時に供給した場合、流木が水平梁に乗り上げる形で捕捉され、土砂がその下を通過して下流に流下する様子が確認された。流木捕捉率は、流木供給密度や土砂の粒径、ロッド間隔と流木長比によって異なることが確認された。これらの実験結果を、粒子法による数値シミュレーションで再現し、多少の差異は見られるものの、およそ実験と同様の結果を再現することができた。その結果をもとに100倍にスケールアップした結果でも同様の結果が得られ、現地適用の可能性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

豪雨によって斜面崩壊や土石流が発生する際、樹木が土砂と同時に流出し、河川を流下する。近年、この流木が橋梁などの河川狭窄箇所を閉塞し、土砂や水が越流・氾濫することで、被害が拡大する現象が多発している。最近になって、種々の流木捕捉工が提案されているが、砂防ダムや遊砂池に併せて設置されることが多く、設置場所が限られ、施設が大規模化する問題点がある。本研究で検討した水平梁構造の捕捉工は、流木と土砂を分離して流木のみを効率的に捕捉する機能を有することが水路実験と数値解析で確認された。砂防堰堤等の施設が未設置の河川に設置することで、下流への流木の流出を防止し、流木災害の軽減が期待される。

研究成果の概要(英文)：For the development of a new type of large wood trap with horizontal rods, we conducted flume experiments, numerical simulations, and consideration of practical use. From results of the flume experiment, in which sediment and large wood were supplied at the same time, it was confirmed that the large wood was trapped on the horizontal rods, and the sediment flowed downstream, passing under the trap. It was confirmed that the large wood trap rate differs depending on the large wood supply density, the grain size of the sediment, ratio of the large wood length to the rod spacing. The results of these experiments were simulated by numerical simulation using the moving particle method, and although there were some differences, the results were similar to those of the experiments. Similar results were obtained with the result of scaling up 100 times based, indicating the possibility of practical application.

研究分野：砂防工学

キーワード：流木 土砂災害 捕捉工 水平梁 水路実験 粒子法 透過型砂防堰堤 流木捕捉率

1. 研究開始当初の背景

豪雨によって斜面崩壊や土石流が発生した際、山腹斜面や溪岸に存在する樹木が土砂移動と同時に流出し、土砂や礫と共に河川を流下する。この流木が橋梁などの河川狭窄箇所を閉塞し、その個所から土砂や水が越流・氾濫することで、被害が拡大する現象が近年の土砂災害では多発している(図-1)。なぜ近年になってこのような災害形態が顕在化したのかを以下に述べる。奈良時代に始まった森林資源の収奪によって、日本のほとんどの山地斜面は、はげ山に占められていた。森林資源は、建材、燃料、肥料等、多岐に利用され、はげ山状態は昭和初期まで続いた。その時代、はげ山等の荒廃地からの土砂流出が主であり、土砂移動に伴う流木量は限られていた。戦後、日本全土で大規模な植林が始まった一方で、化石燃料への転換、木材輸入自由化等の要因で、国内森林資源の利用が激減したため、山地斜面は森林化した。はげ山から森林への遷移過程で、樹木根系の斜面安定化機能や森林土層による表面流抑制機能の向上により、斜面崩壊や侵食による土砂流出が減少傾向を示したが、森林が十分に発達した現在は、土砂流出抑制機能は極大値に達している。むしろ、必要な間伐が行われずに放置された人工林の林床環境の悪化によって、これらの機能が低下しているという指摘もなされている。類似の状況は、欧州諸国でも見られるようである(例えば、Bertoldi and Ruiz-Villanueva, 2017)。



図-1 橋梁が流木と土砂によって閉塞し、氾濫が生じた場所(2018年7月の西日本豪雨、広島県坂町総頭川にて撮影)



図-2 一般的な流木捕捉施設は遊砂池等の大規模施設と共に設置される(大金沢, 2013年の伊豆大島土砂災害後撮影)

(例えば、Bertoldi and Ruiz-Villanueva, 2017)。一方で、気候変動の影響で、これまで経験したことのないような豪雨が頻発し、森林斜面の崩壊が多発している。また、戦後の土地利用変化により、急傾斜地の隣接地にまで住宅地が進出し、直接土砂流出や流木の被害を受けやすい状況となっている。このような背景が流木災害の増加に繋がっていると考えられる。現在では、土砂災害の防止・軽減を考える際、流木を無視して対策を講じることは不可能となってきている。しかし、明治初期に海外から導入され、国内で発展してきた砂防工学においては、長く土砂の移動に焦点を絞った対策が主流であったため、流木対策の重要性が認識され始めたのはようやく1970年代になってからであり(例えば、水原, 1975)、最近になって種々の流木捕捉工が提案され始めたところである(例えば、国領ら, 2018)。しかし、これらの流木捕捉工は砂防ダムや遊砂池に併せて設置されることが多く(図-2)、設置場所が限られることと、施設が大規模化するという問題点がある。全国で18万以上指定されている土石流危険渓流に対して、砂防ダム等が整備されている率が22%程度である現状を考えると、小規模河川を対象として低コストで効率の良い新たな流木対策手法の開発が望まれている。

2. 研究の目的

土砂災害発生時における流木の問題点は、橋梁等の狭窄部に流木と共に多量の土砂が同時に集中する相乗効果で閉塞が発生し、後続の土砂や水が氾濫することである。これまでに提案されている流木捕捉工による捕捉プロセスも、程度の差はあるものの流木と土砂を同時に捕捉する点では、橋梁の閉塞機構と同じであるが、砂防堰堤や遊砂池のような安全な場所で捕捉することで氾濫の危険を回避している。本研究で提案する新しい流木対策手法は、既往手法とは異なり、土砂と流木の比重および形状特性の違いを利用して鉛直方向に分離(偏析)させることで、流木の橋梁への閉塞を防ぎ、土砂と水を完全閉塞することなく流下させるものである。流木捕捉工は、鋼管等の材料で作成することを想定し、河川縦断方向に水平に設置する。土砂とともに流下した流木がこの水平部に乗り上げ、土砂・水と鉛直方向に分離されることで捕捉される。橋梁等の閉塞が心配される狭窄部の上流側に設置することで、土砂と水のみをスムーズに流下させ、流木の閉塞を回避する仕組みである。本研究では、この新たな流木捕捉手法の有効性を、実験および数

値解析によって詳細に検討し、土砂災害軽減のための実用化を目指すことを目的とする。

3. 研究の方法

本研究で提案する新たな流木捕捉工の有効性を確認するため、水路実験と数値解析を実施する。また、実用化に向けて、構造解析等の検討を行う。以下に研究方法の詳細を示す。

1) 水路実験

過去に発生した橋梁の閉塞事例を調査し、その状況を参考にして水路を作成する。この際、河床勾配は変更できる構造とする。作成した水路を用いて、種々の条件（流量、流砂量、流木量）において、流木捕捉工の構造を検討する実験を行う。土砂材料の粒度分布、流木量、流木形状（枝葉、根系の有無）を変更した実験を実施する。これによって、実際に考えられる幅広い土砂・流木流出現象へ対応できる流木捕捉工の構造を探索する。

2) 数値解析

流木と土砂の流れと構造物の相互作用を解析する手法としては、流木や構造物の形状を直接的に再現可能な粒子法が適している。分担者が開発した粒子法による土石流解析モデルをベースとして、流木と土砂の同時解析を行うプログラムが作成されており、このプログラムを用いると透過型砂防堰堤による流木捕捉過程を概ね再現可能であることを確認している。このプログラムをベースに、水路実験の再現計算が実施できるようにプログラムを修正し、水路実験の再現計算を実施することで、解析手法の精度・有効性を検証する。同時に、別の解析手法による土石流・流木挙動の検討を並行して実施する。さらに、実用化に向けて解析対象を水路実験からスケールアップし、実スケールでも流木捕捉工が機能するかを検証する。

3) 実用化検討

水路実験と数値解析の結果を反映し、流木を含む土石流に耐久性を持つ捕捉工の構造を解析する。また、実際に流木捕捉工を設置することで、土砂災害の軽減効果が最大となる様な候補地を、森林状態、地形、土地利用の側面から調査し、候補地を挙げる（分担2、代表）。本研究の範囲では、実際に捕捉工を現地に設置する実用化までは到達することはできないが、将来の実用化に向けて、各省庁（国交省、林野庁）が策定している現行の技術基準等の内容を整理し、実用化可能な箇所等の検討を行う。

4. 研究成果

1) 水路実験

実験は、三重大学と防衛大学の2か所で並行して実施した。ここでは、三重大学での実験結果について、以下に詳細を述べる。

使用した実験装置の概要を図-3に示す。水路は長さ3.0 m、深さ0.1 m、幅0.1 mの直線・矩形断面形状のもので、側壁はアクリル製、底面にはサンドペーパーを設置している。水路傾斜角は可変であるが、本研究においては土石流区間を想定して5.0°に固定した。捕捉工模型本体はアルミ製ロッドで、下流側末端を木材に挿入し、水路下流端から0.3 m、高さが河床面から5 cmの位置になるように水路に固定し、捕捉工模型全体が水平となるように設置した。ロッド部は長さ0.45 m、直径4 mmで、木材部を含めた捕捉工模型の全長は0.55 mである。流木モデルは直線型で均一形状であり、竹製で直径3 mm、長さ $L_w = 4, 6, 8, 10$ cmの4種類を用いた。水路下

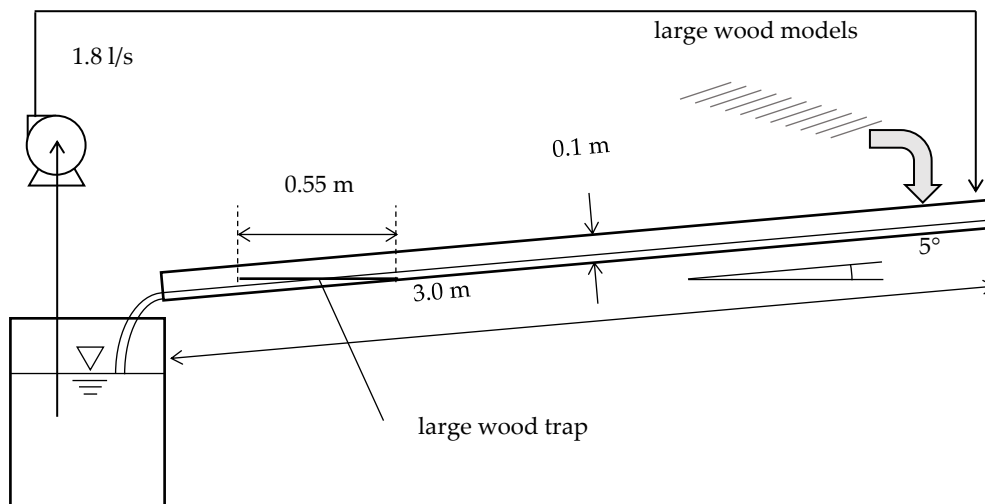


図-3 三重大学で実施した実験の実験装置概略図

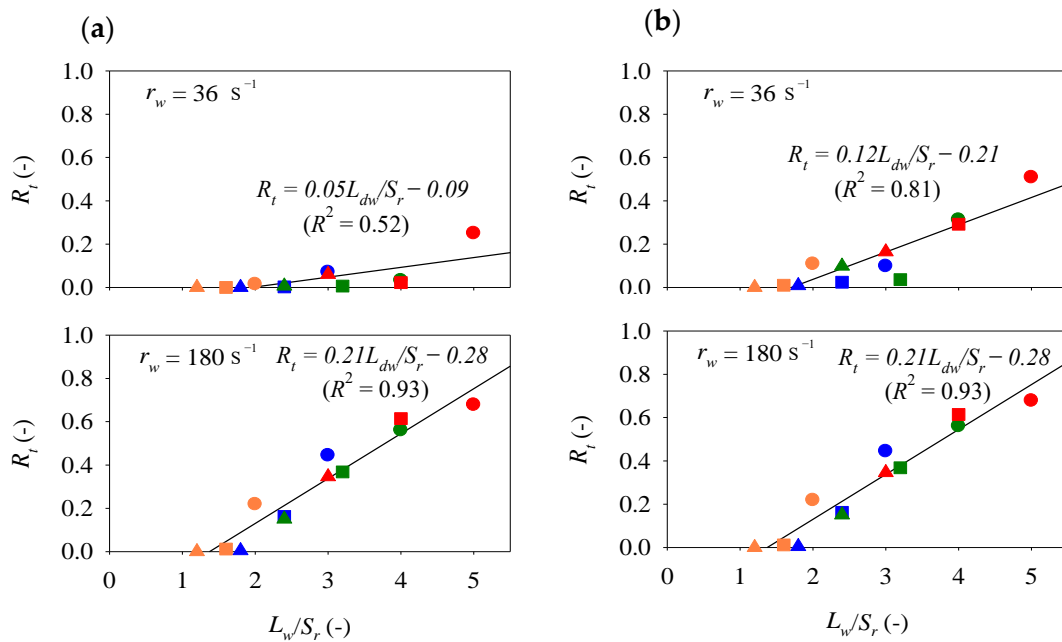


図-4 流木長とロッド間隔の比対流木捕捉率の関係 (a: 投入区間一定法, b: 投入本数一定法)
(流木長は, 黄: 4 cm, 青: 6 cm, 緑: 8 cm, 赤: 10 cm)

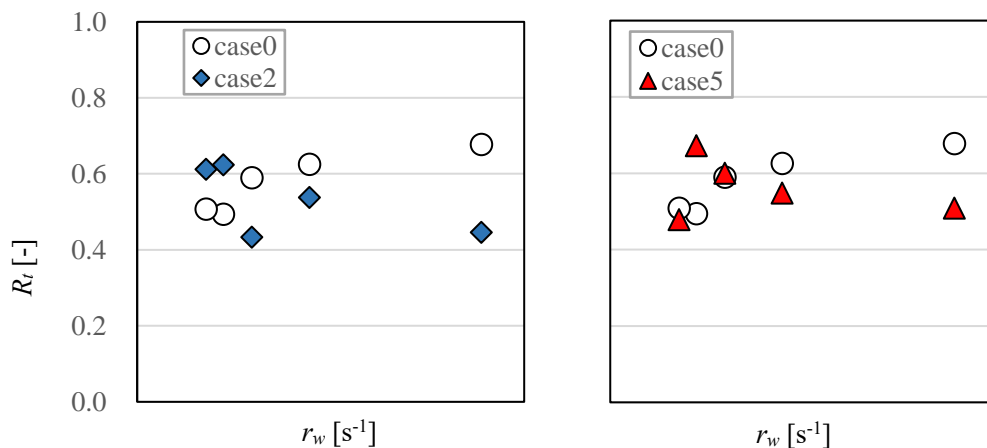


図-5 流木と土砂の同時供給実験における供給速度と流木捕捉率の関係
(土砂供給量 ○: 0 g, 左: 300 g, 右: 500 g)

流端に貯水タンクを設け, 実験時には電動ポンプ (株式会社工進製 PX-650, 最大流量: 4.3 l/s) を使用して貯水タンクから水路に 1.76 l/s の流量で連続的に給水した。流木モデルは, ベルトコンベアー (三ツ星ベルト株式会社製 NS41UGO/2G) を一定速度 (0.36 m/s) で作動させて, 水路上端に投入した。流木捕捉率 R_t は, $R_t = n_t/n$ (n : 投入した流木モデル本数, n_t : 捕捉工模型によって捕捉された流木モデル本数) によって求めた。捕捉工模型による流木の捕捉率は常に一定とはならず, ばらつきが生じる。そのことを考慮して, 同じ条件の実験を 10 回繰り返して, 捕捉率の平均値を求めた。

実験では, まず土砂を供給せず, 流木のみを供給する実験を行った。その際の実験条件は, 捕捉工条件は梁本数: 3 本, 4 本, 5 本, 流木モデル条件は直線型 4 cm, 6 cm, 8 cm, 10 cm, 流木の供給密度条件は 2 つの投入方法による異なる 9 つの供給密度 [本/s] を変化させ, これらすべての組み合わせで行った。

流木モデル長とロッド間隔が捕捉率へ与える影響を見るために, 1) 投入区間一定法および 2) 投入本数一定法の 2 つの条件に分けて, ロッド間隔 S_r に対する流木モデル長 L_w の相対値 L_w/S_r と流木捕捉率の関係について, 代表として供給密度の最大と最小を図-4 に示す。まず, 全体的な傾向として相対値 L_w/S_r が大きいほど流木捕捉率 R_t が高まること分かった。どの実験条件でも $L_w/S_r = 1.6$ 以下では, 捕捉率 $R_t = 0$ となり, 流木が捕捉されなくなった。2 つの投入方法で比較すると, b) 投入本数一定法の方が傾きは大きいことわかる。つまり, 流木モデルの供給密度 (本/s) が同じ場合でも, 投入本数が相対的に多いほうが, 捕捉率高くなること分かった。これは, 投入本数が多いほうが, 先に捕捉される流木が一定数あるので, 後続の流木がそれに絡まることで捕捉されやすくなったためだと考えられる。

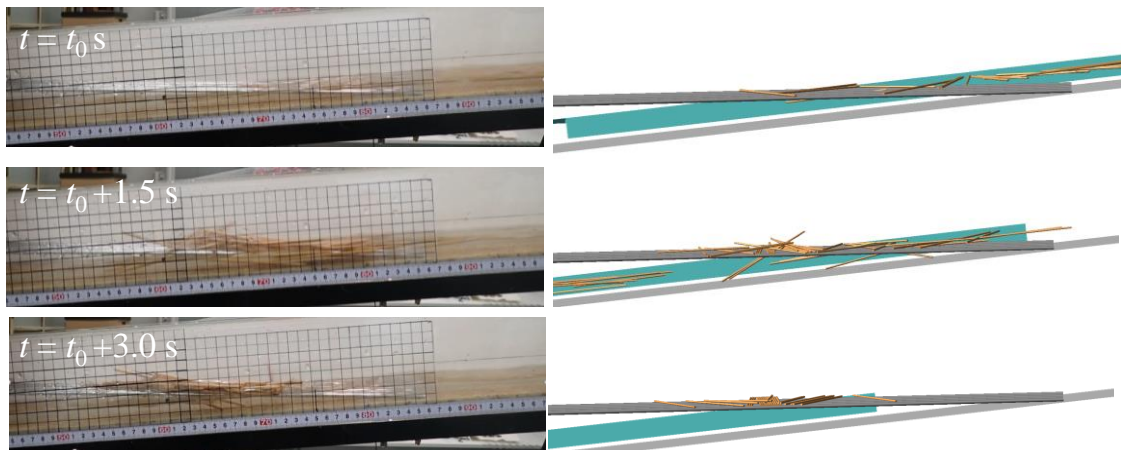


図-6 実験と数値シミュレーション（防衛大）の比較（投入区間一定法:流木 $n = 50$ ）

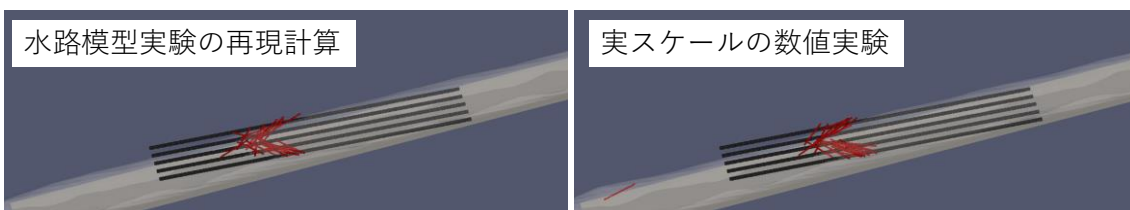


図-7 数値計算例（森林総研）

（左：模型実験の再現計算，右：模型実験を 100 倍に拡大した実スケールの数値計算）

次に、同様の方法で流木と同時に土砂（平均粒径 2, 10, 20 mm）の土砂を投入した際の流木捕捉挙動についての実験を行った。その結果の一例を図-5 に示す。これは土砂平均粒径 10 mm の結果である。流木供給密度が大きくなるにしたがって、土砂を投入しない場合に比べて流木捕捉率が低下する傾向が示されている。これは、一旦は捕捉された流木が、後続する土砂の衝突や、土砂が流れることによる水位変動によって、再度流出してしまうことが原因と考えられる。

2) 数値解析

水路実験と同じ条件で数値計算を防衛大と森林総研でそれぞれ実施した。数値計算には粒子法を用いている。流木は粒子を連結させることにより表現し、流木同士あるいは流木と水平梁が接触した際に、摩擦力が生じるモデルとなっている。結果の例を図-6, 7 に示す。投入区間一定法における実験と解析の時系列を比較している。違いは見られるものの、実験と解析を比較するとほぼ同じように流下捕捉されていることがわかる。また、水平梁が 5 本、流木の長さが 6cm, 本数が 50 本、投入速度が 180 本/s の条件で、実験を再現し、流木捕捉率を比較したところ、実験では平均で 45%であったが、数値計算では 48%であった。そこで、本計算条件をそのまま 100 倍に拡大し、実スケールの数値計算を実施した結果、流木捕捉率は 48%であり、水路模型実験スケールの結果と等しくなった。以上から、三重大大学の水路模型実験で得られた知見は実スケールにおいても適用可能であることを示した。

3) 実用化検討

流木災害の実態を整理するとともに、現行の流木対策の技術基準等を整理した。その結果、流木対策においては、土砂と流木が一体となって流下すると想定される土石流区間と、土砂と流木が分離して流下すると考えられる掃流区間に区分して、対策手法の検討が行われてきていること、土石流区間においては、透過型の堰堤など、一定の対策手法が考案されていることを明らかにした。一方で、掃流区間に対策手法は、不十分であること示したうえで、本研究で開発した対策施設の現行の流木対策体系の中での位置づけを整理した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 武藤弘典, 堤大三, 古川真由子, 内田太郎, 鈴木拓郎, 堀口俊行	4. 巻 73 (6)
2. 論文標題 新たな流木捕捉工の開発のための急勾配水路実験による基礎的研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 砂防学会誌	6. 最初と最後の頁 19-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Furukawa Mayuko, Tsutsumi Daizo, Muto Hironori, Uchida Taro, Suzuki Takuro, Horiguchi Toshiyuki	4. 巻 13
2. 論文標題 Flume Experiments Evaluating the Efficacy of a Large Wood Trap Featuring Horizontal Rods	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Water	6. 最初と最後の頁 1837 ~ 1837
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/w13131837	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 武藤弘典, 堤大三, 内田太郎, 鈴木拓郎, 堀口俊之
2. 発表標題 新たな流木捕捉工開発のための基礎的研究 -水路実験による捕捉機能の検証-
3. 学会等名 令和2年度砂防学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 堀口俊行, 古川真由子, 堤大三, 鈴木拓郎, 内田太郎
2. 発表標題 水平梁構造の流木捕捉工実験の再現シミュレーション
3. 学会等名 第48回土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武藤弘典, 奥山隆也, 本居絵子, 堤大三, 沼本晋也
2. 発表標題 水路実験による新たな流木捕捉工の検討
3. 学会等名 令和元年度砂防学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武藤 弘典, 堤 大三
2. 発表標題 水平梁構造の新たな流木捕捉工の開発研究 - 水路実験による梁本数 - 捕捉率関係の検討 -
3. 学会等名 令和元年度日本自然災害学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古川真由子, 堤大三, 内田太郎, 鈴木拓郎, 堀口俊行
2. 発表標題 水平梁構造を持つ流木捕捉工開発のための基礎的研究 - 梁構造が捕捉機能に及ぼす影響の定量的評価 -
3. 学会等名 令和3年度砂防学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清水彩花, 堤大三, 万田純菜
2. 発表標題 水平梁構造を持つ流木捕捉工開発のための実験的研究 - 土砂が流木モデルの捕捉機能に及ぼす影響 -
3. 学会等名 令和4年度砂防学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 仲田清夏, 小泉香那子, 堀口俊行, 堤大三
2. 発表標題 流木による橋梁閉塞における河川氾濫対策工の基礎的研究
3. 学会等名 第49回土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	堀口 俊行 (Horiguchi Toshiyuki) (30795703)	防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群)・システム工学群・准教授 (82723)	
研究分担者	内田 太郎 (Uchida Taro) (60370780)	筑波大学・生命環境系・准教授 (12102)	
研究分担者	鈴木 拓郎 (Suzuki Takuro) (60535524)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等 (82105)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------