

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06578

研究課題名(和文) 森林の管理状態が河道災害ポテンシャルへ与える影響評価に関する研究

研究課題名(英文) Effects of Forest Managements on Fluvial Disasters in terms of Sediment Yields and Transports

研究代表者

武藤 裕則 (MUTO, Yasunori)

徳島大学・大学院社会産業理工学研究部(理工学域)・教授

研究者番号：40263157

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：降水量に対する土砂生産・流出量の応答特性について現地観測結果から検討した結果、期別連続雨量がある閾値を上回ると流出土砂量のオーダーが変わること、さらに両者の関係は、流域や閾値前後の別に限らず自然定数を底とする指数関数で表されることが示された。流出土砂量に対する森林管理の影響としては、自然林が卓越しかつ崩壊地を流域内に有する方が流出土砂量の基底値は大きい、降水量に対する応答性は針葉樹林が卓越する流域に比べて緩慢であることが示された。以上の成果に基づき、サブ流域ごとの森林特性に基づく流出土砂量の予測を行い全流域からの平均年間流下土砂量を推定したところ、オーダー的には満足な結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、従来から指摘されてきた地形や地質などの土砂生産・流出に関するパラメータに加えて、崩壊地の有無や林齢などの森林の人的管理の影響がかなり寄与している可能性を示した点に新規性がある。ここで得られた成果は、流域管理において森林管理が、洪水流出量の調節のみならず土砂動態の制御の面からも重要であることを指摘した点で、研究の今日的意義は大きい。簡便な方法によって流域全体からの流下土砂量のある程度の精度で予測できたことは、適用限界が示されなかった点は課題として残るものの、実用に結びつく発展性が認められる。

研究成果の概要(英文)：We conducted field measurements on precipitation, water levels in the streams and undergrounds, and sediment discharge in 2 watersheds whose catchment areas are a few km². From the results we can draw a relation between cumulative rainfall in one event and corresponding sediment runoff with exponential functions. The coefficients and power indices of the functions depend on forest characteristics in addition to topography and geological features of the watershed. When considering the sediment runoff per square meter, the watershed mainly covered by natural forests, and/or having denuded lands within it, show a larger value at its fiducial stage, but its increment in accordance with rainfall increase is less, compared with that of coniferous forests. Applying these concepts together with the derived functions, we estimated the annual accumulated sediment runoff from the whole river basin, 247 km², and obtained a reasonable result.

研究分野：工学

キーワード：総合土砂管理 森林 土砂生産 流砂 河道災害 流砂量計測法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高度経済成長期には多くの流域で森林整備が進み、流出や土砂生産・河道への流入が減少し河床が低下と共に安定化した事例が数多く報告されている。一方、近年の林業を取り巻く状況変化により十分な管理がなされぬまま荒廃した森林も増加しており、そのような流域では平常時の土砂生産・流入の増加のみならず、降水多量時の崩壊危険度の増大も指摘されている。一例として和歌山県の二級河川である富田川においても、河床低下に伴い機能喪失した河川構造物が見られる一方で、平常時に河川へ流入する土砂量増大の顕在化と考えられる洪水の緩流化や瀬淵地形の曖昧化のような、一見相反する河道状態の変化が報告されている。さらに、2011年には台風12号に伴う豪雨により大規模斜面崩壊と河道閉塞が中辺路町滝尻で発生したが、流域内ではこの時大小様々な規模の斜面崩壊が至る所で発生しており、河川管理を検討する上で森林の管理状態は重要な要素である。

このような森林の河川に対する影響をまとめた代表的な業績としては、森林の樹種や林齢と流出・土壌侵食の関係について検討された恩田らのものがあげられるが[1]、プロットスケールや土壌の基礎的状态など関与するパラメータが多く、定量的に評価できる段階に至っていない。また、恩田らの研究は主として表面流出と土壌浸食量に着目しており、河道に流れ込む全流砂量や斜面内の地中水量など、河道への直接的なインパクトとなる崩壊土量の予測に関連するパラメータの観測が十分にできていない。

以上の背景に基づき代表者は、研究分担者らと共に研究チームを組織し、平成26年度京都大学防災研究所共同研究による研究助成(助成期間1年)を受けて、上述した富田川の一次支川である西谷川流域において降水量と流出量・流砂量の関係性に関する試験的観測を実施した。その結果、採用された観測方法により降水に対する地下水と流砂の応答性を把握可能であることを示すと共に、これらパラメータ間の関係を定式化し得る可能性も示したが[2]、これまでに1つの小流域を対象とした2シーズンの結果が得られたのみであり、結果の信頼度を保証する十分な降雨イベント数が確保できたとは言い難い。加えて、西谷川流域内は林齢の比較的揃った針葉樹林を主体としているため、樹種やその管理状態の差異が土砂流出に与える影響については全く検討できていない。

そこで本研究では、試験的観測を実施した西谷川流域において観測を継続すると共に、富田川流域において樹種(広葉樹林)と管理状態(手入れの行き届いた針葉樹林)の異なる斜面を新たに2箇所設定し、同様の観測を並行して実施することで、上述の課題解決を図るものである。

2. 研究の目的

本研究で指向する河道への流出水量・土砂量から森林の劣化状態を評価するためのツールとしては、降水～流出～土砂生産モデルと土砂生産～流砂モデルを組み合わせたものを想定している。また、モデルにおいて考慮すべきパラメータの選定と調整のために、樹種や管理状態の異なる複数の対象斜面を設定している。そこで、上述の素過程をつなぐ部分において必ずしも関係性が明らかとはなっていない箇所に焦点を絞り、それらを克服する観測手法や予測手法の開発・改良も含めて検討を行うことを目的とし、研究期間中に実施する大項目として、(1) 森林分布と土砂生産ポテンシャルの評価に関する検討、(2) 降水～土砂生産～流砂モデルの開発にかかる検討、の2つを設定する。具体的な内容としては以下のとおりである。

(1) 土砂生産にかかる森林の現状評価に関する検討: 富田川流域における森林の管理状況の長期的変遷を資料整理およびヒアリングによって明らかにすると共に、先行研究で着手したこの間の富田川の河道地形の変遷との関係性を、新たに河道内堆積土砂量および河道内植生分布の観点から解明する。特に、樹種や樹齢・樹木密度といった森林特性の変化が河道地形に与える影響の抽出に取り組む。

(2) 降水～土砂生産～流砂モデルの開発にかかる検討

降水から土砂生産を予測する手法の開発にかかる検討: 流出モデルを用いた土砂生産予測手法の開発を念頭に、1) 流出モデルにより評価される地中水量の精度検証、2) 地中水量および地表面流出量と土砂生産量の関係性検討、を行う。1) では、富田川流域内に設けた観測用ボーリング孔(既設1箇所、新設2箇所)内に水位計を設置し、地中水量の長期連続観測を行い、既開発の流出モデルによる地中水量の予測値との比較を行う。2) では、観測用ボーリング孔を設けた斜面下流端において流量および流砂量観測(既設1箇所、新設2箇所)を行い、地中水量、地表面流出量と土砂生産量の関係性の定式化を試みる。

土砂生産量から流砂量を予測する手法の開発にかかる検討: 土砂生産量と河道への流入流砂量との関係性の定式化を念頭に、河床変動量から期間流入流砂量の推定を試みると共に、その精度検証を行う。対象斜面下流端に設けられた堰堤上流部の河床地形を詳細に計測し、期間流入流砂量を算定すると共に、観測した土砂生産量との関係性について検討する。

3. 研究の方法

研究の目的に記載したように、本研究では以下の2つの研究小項目を設定した。

(1) 土砂生産にかかる森林の現状評価に関する検討

(2) 降水～土砂生産～流砂モデルの開発にかかる検討

まず、小項目(1)に関して、研究対象領域の過去および最新の関連資料(地形図、地質図、森

林管理図、航空写真等)を入手し、各斜面の条件を整理した上で新規観測対象斜面の候補地の絞り込みを机上で行う。この作業を通じて、斜面ごとの森林特性についての経年変化の調査およびその特性量の統計的整理も行う。絞り込まれた数カ所の対象候補地について、現地踏査および関係者(河川管理者、森林管理組合、土地所有者等)へのヒアリングを実施し、最終的に観測対象斜面を決定する。その上で、新規に選定された斜面について、地下水位計測用ボーリング孔および流砂量観測用ピットを設置する。

一方、小項目(2)に関しては、西谷川流域の既設観測施設を活用し、出水期前(5月末)までに河川水位および地下水位計測用の水位計(6台:補正用大気圧計含む:現有)、雨量計(1台:現有)を所要の地点に設置し観測を開始する。観測はいずれもデータ・ロガー方式による自動計測とし、観測期間は約6ヶ月間(11月中旬まで)とする。加えて、既設流砂観測用ピット内への流砂自動観測装置の設置を含む整備と、現有のトータルステーションを用いた期間初期河床形状の詳細測量(流砂量観測用ピットから上流約50m区間)を実施した上で、観測期間中にある程度の規模以上の出水により河床形状の変化とピット内への流砂の捕捉が見られた場合(台風および前線性豪雨を想定)は、河床形状測量および捕捉流砂量計測とその粒度分析を行う。観測期間終了時に、水位計・雨量計の回収を行うと共に、期間終期河床形状の詳細計測を実施する。

既存モデルの整理に関しては、(2) 降水～流出～土砂生産モデルについては、研究分担者によって開発された現有の流出モデル[3]のパラメータ調整を行った上で、過去の複数の降雨イベントを対象とした再現計算を行い、森林の樹種や管理状態と表面流量・地中水量との関係性の解明を試みる。また、過去の航空写真から判読される河道への土砂流入状況と降雨イベントとの関係性を重ね合わせることで、現有モデルにおいて土砂生産との関係性が高いと考えられるモデル・パラメータの抽出を試みる。(2) 土砂生産～流砂モデルについては、本年度の観測結果を先行する3カ年(平成26～28年度)の観測結果と併せて解析することで、降水量と支川流砂量の相関解析を行い、これまでに提案してきた関係式[2]の精度評価と精緻化を試みる。

観測対象斜面で得られた表面流水位および地下水位と、流出モデルによるそれらの予測値とを比較することで、モデルの予測精度を検証すると共に、森林の樹種や管理状態と表面流量・地中水量との関係性の解明のさらなる進展を図る。併せて、表面流量・地中水量の時間的変化と流砂量との関係性の解明を試みる。一方、降水量と支川流砂量の関係式について、森林の樹種や管理状態が与える影響を感度分析し、それらを考慮した式系への展開に必要なパラメータについて検討する。加えて、他の流域で提案された同種の関係式との比較を行い、式の精度や適用限界について検討する。

以上の作業を通じて、流出土砂量もしくは支川内流砂量から森林の総合的な劣化状態を評価する手法の構築を試みると共に、富田川全流域を対象とした河道内流入土砂量の予測とその精度検証を行う。

4. 研究成果

(1) 降水量に対する土砂生産・流出量の応答特性に関する検討

先行検討流域である西谷川流域に加えて、本研究において新たに抽出した熊野川谷川流域(選定理由の詳細は後述)において、降水・河川水位・流砂量・地下水位の総合観測を実施した。そこで得られた先行研究を合わせた計6年間の観測結果と、文献から降水量と流砂量の間を読み取ることが可能であった他の2流域(ヒル谷川流域、大洞沢流域)における観測結果とを用いて、降水量に対する土砂生産・流出量の応答特性について検討した。

その結果、期別連続雨量がある閾値を上回ると流出土砂量のオーダーが変わること、その閾値は流域の地質や森林特性によって変化することが示唆された。さらに、両者の関係は、流域や閾値前後の別に限らず自然定数を底とする指数関数で近似できる可能性のあること、同じ流域であっても期別連続雨量に関する閾値を境界としてその前後で指数関数の係数が異なること、本研究における対象流域では指数関数のべき指数が小さく降水量の増加に伴う流出土砂量の応答性が低いことから指数関数にかかる係数を流出土砂量の大まかなオーダーとして取り扱うことが可能なこと、などが明らかとなった。しかしながら、指数関数の係数及びべき指数と流域特性を表すパラメータ間には、対象流域の数が少ないことに加えて、異なった目的の下で実施された既往研究を引用したため流域特性に関するデータが必ずしも十分ではなく、合理的な説明を可能とする変数が明確とならず、今後の課題となった。

(2) 森林の特性と土砂生産・流出の関係に関する検討

富田川流域の森林の現状について、航空写真や森林管理図等の関連資料を用いて樹種・樹齢等の基本的情報を整理すると共に、先行検討領域である西谷川流域の森林特性の富田川流域における代表性について検討した。検討結果から広葉樹が卓越する斜面の抽出を試みると共に、地元で長年森林管理に携わり自身も森林所有者である2名の方(うち1名は抽出した斜面の土地所有者)に対して森林の管理状況やその変遷、並びにそれらが山地斜面や河道に与えてきた影響に関する印象についてヒアリングを行い、航空写真や森林管理図等の関係資料に基づき整理した基本的情報の裏付けを行うと共に、西谷川および熊野川谷川流域の森林特性の富田川流域における代表性について検討した。さらに、降水量と流出土砂量の間を検討した国内外の約100編の論文を整理し、流出土砂量に影響を与える要素としてこれまで取り上げられてきたパラメータに関してそれらの寄与度・重要度を抽出した。

一方、西谷川流域及び上述のプロセスを経て本研究において新たに抽出した熊野川谷川流域

において実施した降水・河川水位・流砂量・地下水位の総合観測結果を用いて、上述の文献調査の結果も踏まえて各流域の土砂生産・流出特性とそれに影響を与えるパラメータの整理を行った。

これらの研究の結果、今回得られた観測データの範囲においては、流域に崩壊地を含む熊野川谷川流域では、少量の降雨によっても多降雨時と同程度の土砂が流出することが観測より明らかとなった。単位面積あたりの流出土砂量で整理した場合、西谷川流域と熊野川谷川流域とでは期別連続雨量に対する応答性（先述の指数関数式におけるべき指数）が異なり、本研究の結果では自然林が卓越しかつ崩壊地を流域内に有する熊野川谷川の方が流出土砂量の基底値（指数関数式における係数）は大きい、応答性は針葉樹林が卓越する西谷川に比べて緩慢であることが示された。また、単位面積あたりからの土砂流出量は、対象流域の斜面勾配と流域内に含まれる崩壊地の面積に加えて流域代表粒径によって規定されることが資料及び現地調査を整理した結果から推測された。今回の検討対象流域では、流域内の代表的な樹種や林齢と流域代表粒径との間に何らかの関係性の存在がうかがえたが、得られたデータ数が少なくその関係性を合理的に説明できるまでには至らず、今後の課題となった。

(3) 流砂量計測法の開発に関する検討

以上に示した(1)及び(2)の成果はいずれも、降水量に関しては期別連続雨量に基づく整理結果であるが、先行研究での経験では、対象流域、特に西谷川流域では降水後に表面流が発生する程度まで河川水位が上昇するとその低減にかなりの時間を要し、夏季期間中は先行イベントによる水位が下がりきる前に次の降水が発生することが頻発し、河川水位の高止まりのため長期にわたってピット内の土砂が排除し得ず、研究開始当初は複数の降水イベントに対するまとまった土砂流出量の観測結果しか得られなかった。そこで本研究では、降水イベントごとの流砂量を峻別するために、新たに流砂量計測を自動化するための装置を開発することを研究の目的に追加した。流砂量自動計測装置は、西谷川流域における既設の流砂量計測ピット内部にピットの形状に合わせた矩形の土砂受袋と載荷板を設置し、それらの重量をピット底部に設置した3台の土圧計で計測するものである。重量計測の時間間隔はデータ・ロガーにより任意に設定できる。

研究初年度である2017年度は考案した装置を設置し計測を試みたが、載荷板下部（土圧計周辺）への細砂の侵入防止が完全でなかったことに加えて、土圧計受圧面の形状特性により載荷のバランスによっては誤った計測値となる場合があることが判明した。そこで2018年度はこれらの点について改良を加えたが、準備に時間を要したために出水期前に装置の現地への設置ができず、実際の設置は次年度での計測を見越した年度末となってしまった。研究最終年度となった2019年度においては、6月末～7月頭の豪雨に伴う計器トラブルによるその後の約2ヶ月間のデータ欠損期間を除いては、4月以降装置を撤収する10月中旬までの期間において降雨イベントごとのピット内への流入土砂量が計測でき、結果からはイベントごとの降水量と流入土砂量の間には正の相関が認められた。しかしながら得られたデータ数、特にイベント降水量が150mmを超えるようなデータが少なく、その関係性はばらつきの大きいものとなったことに加えて、データ分布の偏りのため上述の指数関数式も確認することはできなかった。なお、水位低下時に計測装置部材ごとに働く浮力が変化することに起因すると推測される異常データの修正など未だ課題は残るものの、比較的単純な原理に基づくことに加えて、流入土砂量の増加に伴う計測値の応答性は確認できたことから、装置の改良と試験の継続は実用化へ向けた今後の研究開発として十分な意義が認められるものとする。

(4) 降水～土砂生産・流出～流砂量の予測手法の開発に関する検討

最初に、徳島大学河川・水文研究室で開発された降雨～流出モデルを同流域に適用するためのプログラム修正並びにパラメータ調整を行った上で、流砂モデルの第一段階として芦田・道上式による流砂量予測を組み込み、2014年に西谷川流域で観測された主要な流砂発生イベントを対象に再現計算を試みたところ、累積流砂量のオーダーは再現できたものの、定量的な精度には問題の残る結果となった。

続いて、上述のプロセスで決定されたパラメータ調整結果（第一段階パラメータ）の有効期間について調べるために、西谷川流域における2014年以降の複数の流砂発生イベントを対象に再現計算を行ったところ、2015年夏季に発生した比較的大規模な出水イベント以降については第一段階パラメータでは流出の再現精度が大きく低下し、再度パラメータ調整が必要なることが示唆された。また、流砂モデルについて水山による改良型芦田・道上式を新たに組み込み、2014年における主要な流砂発生イベントを対象に再現計算を試み、その精度について検証を行ったところ、定量的な精度の改善はあまり見られなかった。

さらに、これまで調整を続けてきた降雨～流出～流砂モデルについて、西谷川流域に加えて熊野川谷川流域に対しても適用してパラメータ調整の後モデルの再現性を検討した結果、流出計算に関してはどちらの流域に関しても河川水位の変化をある程度良好に再現できたが、流砂量計算に関しては等流状態を仮定した既存の流砂量式（芦田・道上式及びマイヤー・ピーター・ミュラー式）では、流域ごとの土砂生産・流出特性の違いに起因する単位面積あたりの流砂量の差は表現できたものの、その予測値の絶対量はどちらも過大評価となった。この原因としては、

河道地形の複雑さに加え流量変化の著しい山地河川においては、部分的な巨礫等の存在による流砂の移動帯幅の問題に加えて、エネルギー勾配の評価に課題があることが推測された。

以上の(1)～(4)の成果を総合的に踏まえ、富田川流域全域からの平均年間流下土砂量の推定を試みた。まず、森林特性に関する調査結果に基づき、富田川流域を32のサブ流域に分割した後、各サブ流域における土砂流出形態を主として地質特性によって分類・グループ化した。次に、西谷川流域及び熊野川谷川流域での観測結果に基づき構築した期別連続雨量と流出土砂量の関係式を、各流域の特徴に応じて選択的に適用し流域ごとの流出土砂量を求めた後、それらを合算して流域全体からの推定流下土砂量とした。得られた推定値を経年的な河道地形の横断測量結果から推測される流下土砂量と比較した結果、推定値は測量による推測値の約4割程度とやや過小評価ではあるものの、流砂量のオーダーとしてはある程度満足できるものとなった。本研究で提案したモデルは非常に簡便なものではあるが、流域全体からの定常的な流下土砂量の概算値を簡易に推測できる可能性が示された。しかしながら、モデル化にあたっての流砂の流下条件は平常時を対象としていることから、山地崩壊を伴う災害が発生するような多量の土砂流下時には不適用であり、その適用限界を明らかにすることが課題として残った。

参考文献

- [1] 恩田裕一編：人工林荒廃と水・土砂流出の実態，岩波書店，245p., 2008.
- [2] Koi, N., Muto, Y. and Tamura, T.: An Observational Research on Hydrological Data and Sediment Transport in the Nishidani River Basin, Proc. IAHR-APD2016, Colombo, Sri Lanka, 2016.
- [3] 田村隆雄・能田慎也・武藤裕則：分布型流出モデルを用いた那賀川上流における森林斜面の貯水高と斜面崩壊に関する考察，水工学論文集，第56巻，pp.469-474, 2012.

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 0件）

1. 著者名 Koi, N., Muto, Y. and Takura, T.	4. 巻 -
2. 論文標題 An Observational Research on Hydrological Data and Sediment Transport in the Nishidani and Kumanogawadanigawa River Basin and Mountain Watershed	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. IAHR2019	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3850/38WC092019-0973	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 Fukuda, I., Muto, Y., Koi, N. and Tamura, T.	4. 巻 -
2. 論文標題 Prediction of Stream Discharge and Sediment Runoff Accompanied by Rainfall in Mountainous Areas	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. IAHR2019	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3850/38WC092019-1482	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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Koi, N., Muto, Y. and Takura, T.
2. 発表標題 An Observational Research on Hydrological Data and Sediment Transport in the Nishidani and Kumanogawadanigawa River Basin and Mountain Watershed
3. 学会等名 IAHR World Congress 2019, Panama City, Panama（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fukuda, I., Muto, Y., Koi, N. and Tamura, T.
2. 発表標題 Prediction of Stream Discharge and Sediment Runoff Accompanied by Rainfall in Mountainous Areas
3. 学会等名 IAHR World Congress 2019, Panama City, Panama（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福田郁子・武藤裕則・田村隆雄・小井宣秀
2. 発表標題 西谷川流域における降水による土砂流出について
3. 学会等名 平成30年度土木学会四国支部年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村栗生・武藤裕則・田村隆雄・小井宣秀
2. 発表標題 新しい流砂量計測方法の開発について
3. 学会等名 令和2年度土木学会四国支部技術研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福田郁子・武藤裕則・田村隆雄・小井宣秀
2. 発表標題 森林の状態が土砂流出に与える影響について
3. 学会等名 令和2年度土木学会四国支部技術研究発表会
4. 発表年 2020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	田村 隆雄 (TAMURA Takao) (40280466)	徳島大学・大学院社会産業理工学研究部(理工学域)・准教授 (16101)	