

研究概要・成果の要旨

研究テーマ：流木及び細粒土砂の流出過程を考慮した二次元土砂・洪水氾濫解析モデルの高度化

研究代表者：氏名（所属）竹林洋史（京都大学防災研究所）

【研究概要】（FS・一般全体の研究概要）

2011年に土砂・洪水氾濫が発生した那智川流域を対象として、現地観測、水路実験で得られた知見を用いて、流木の橋梁への集積・氾濫現象と細粒土砂の流出過程・プラントルの第一種二次流などを考慮した平面二次元河床変動シミュレーションモデルを構築するとともに、2011年に那智勝浦町井関で発生した流木の集積及び土砂と水の氾濫現象に適用し、効率的・効果的な土砂・洪水氾濫対策を検討する。

【研究成果の要旨】（FS・一般全体の研究成果）

流木捕捉モデルは、水路実験と力学的な考察により開発した。流木を連続体として扱うため、流木は濃度として取り扱った。開発したモデルでは、流木濃度が異なる複数の条件においても流木投入に伴う流木の橋梁における捕捉数の変化を精度良く予測できている。また、流木捕捉数が少ないときは、流木投入に伴う流木の捕捉数の増加が少なく（流木捕捉割合が小さく）、流木捕捉数が30本を超えると、投入した流木全てが捕捉される（流木捕捉割合が100%）ことも表現されている。

大規模出水時の高濃度浮遊砂の濃度を計測するため、TDRを用いた浮遊砂観測システムを那智川および常願寺川上流に導入した。TDRは水と砂の比誘電率差から浮遊砂濃度を推定でき、粗粒土砂を含む高濃度条件でも計測可能である。常願寺川での観測では、濁度計が上限を超えて正確に計測できなかった出水ピーク時にも、TDRにより最大0.17の高濃度浮遊砂を捉え、多量の土砂流出を確認した。さらに、UAV画像、SfM解析、画像解析ソフトBASEGRAINを組み合わせ、山地流域における河床材料粒径分布を面的に推定する手法を検討した。従来の篩分析や線格子法は広域調査に多大な労力を要するが、本手法により現地採取を大幅に減らしつつ、高精度な粒径分布推定が可能となる。これにより、急勾配溪流などアクセス困難な地域でも土砂流出や河床変動解析の高度化に活用できる可能性を示した。

連行の概念による細粒土砂の輸送過程を考慮した数値シミュレーションモデルを開発した。開発したモデルによって、土砂・洪水氾濫で見られる空間的に異なる流砂形態の連続的な解析が可能であることが示された。また、砂州や流路形状を再現するために、プラントルの第一種二次流、局所河床勾配、河岸浸食、浸透流などの数値モデルを平面二次元河床変動モデルに導入した。特に、河道湾曲部では、流動深平均の流向と河床近傍の流向が異なり、内岸方向への流れを生じるプラントルの第一種二次流が砂州形成に大きく影響することを示した。解析では、二次流を考慮しない場合、砂州の波高が大幅に小さくなり、実現象を十分再現できなかった。また、局所河床勾配は流砂の輸送方向に影響を与え、これを考慮しないとモード1の交互砂州の形成水理条件であってもモード2以上の複列砂州が形成されることが示され、局所河床勾配の影響を考慮する必要性が示された。さらに、那智勝浦町井関の源道橋周辺で発生した土砂と水の氾濫現象の数値シミュレーションを実施した。源道橋への流木の集積により氾濫域と浸水深が拡大することが示され、状況に応じた流木対策の必要性が示された。

河川砂防技術研究開発 【成果概要】

①研究代表者	氏 名 （ふりがな）	所 属		役 職
	竹林洋史（たけばやしひろし）	京都大学防災研究所		特定教授
②研究テーマ	名称	F S スタート（該当を残して、他を削除してください） 【テーマ名】 流木及び細粒土砂の流出過程を考慮した二次元土砂・洪水氾濫解析モデルの高度化		
③研究経費 （単位：万円）	令和 5 年度	令和 6 年度	令和 7 年度	総 合 計
※端数切り捨て。	299万円	849万円	849万円	1997万円
④研究者氏名 （研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）				
氏 名		所属機関・役職（※令和5年3月31日現在）		
宮田秀介		京都大学農学研究科・准教授		
山野井一輝		京都大学防災研究所・准教授		
⑤技術研究開発の目的・目標 （様式地砂-1、地砂-2に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。） 【FSスタートの場合は、FS研究と一般研究を別立てで記入してください】 本研究は以下の3つのサブテーマに沿って研究を実施する。 1. 橋梁への流木の集積による土砂及び洪水の氾濫特性 2. 連行の概念による細粒土砂の輸送過程を考慮した河床変動特性 3. 橋梁への流木の集積及び細粒土砂の流出過程を考慮した二次元土砂・洪水氾濫解析モデルの那智川流域への適用と土砂・洪水氾濫対策の検討 これらの内、FS研究では課題1と課題2の一部を実施し、残りを一般研究で実施する。 FS研究 課題1については、氾濫原を有する直線水路に橋梁モデルを設置し、流砂及び河床変動を考慮した橋梁への流木の集積に伴う土砂と水の氾濫現象に関する実験を行う。課題2については、細粒土砂の輸送過程の数理モデルを掃流砂・浮遊砂・ウォッシュロードを考慮した平面二次元河床変動シミュレーションモデルに導入し、細粒土砂の流出過程の再現性を改善する。また、那智川流域で土砂濃度及び河床変動の連続観測を実施し、細粒土砂の流出量と出水時の河床変動特性の把握に努める。 一般研究 課題1については、河床変動を考慮した流木の集積条件に関する数理モデルを構築する。課題2では、プラントルの第一種二次流、河岸浸食、局所河床勾配の影響、植生、多層粒度分布モデル、砂州内の浸透流の数理モデルを考慮した平面二次元河床変動シミュレーションモデルを構築する。課題3については、開発した平面二次元河床変動シミュレーションモデルを統合的に用い、2011年に那智川流域で発生した土砂・洪水氾濫現象に適用し、現象の再現を試みるとともに、発生していた物理現象、土砂・洪水氾濫の発生過程及び発生メカニズムを明らかにする。また、那智川流域を対象として、河川・溪流の効率的・効果的な土砂・洪水氾濫対策について検討する。				

⑥研究成果

(具体的にかつ明確に記入下さい。4ページ程度。)

【FSスタートの場合は、FS研究と一般研究を別立てで記入してください】

FS研究

1. 固定床・移動床での流木捕捉実験

流木の流出が発生する河川の多くは移動床である。しかし、既存の流木捕捉実験は、固定床を対象としており、移動床での流木捕捉特性に関する知見が皆無に近い状態である。そこで、固定床・移動床で流木捕捉実験をし、移動床での流木捕捉特性について検討した。

その結果、固定床・移動床の両方の条件において、一度に橋梁部に到達する流木量が少ないほど橋梁部で捕捉される流木量は少なくなり、多いほど橋梁部で捕捉される流木量も多いことが示された。これは、実際の流木流出時においては、同じ洪水時間の中で同程度の流木量が発生する場合、流木の流出濃度を減少させて、少量ずつ流下させることであれば、橋梁部で河道閉塞を発生させずに流木を流下させられる可能性を示すものである。また、図1に示すように、固定床より移動床の方がより多くの流木が橋梁に捕捉されており、橋脚での流木捕捉現象は、移動床での評価が必要であることが示された。

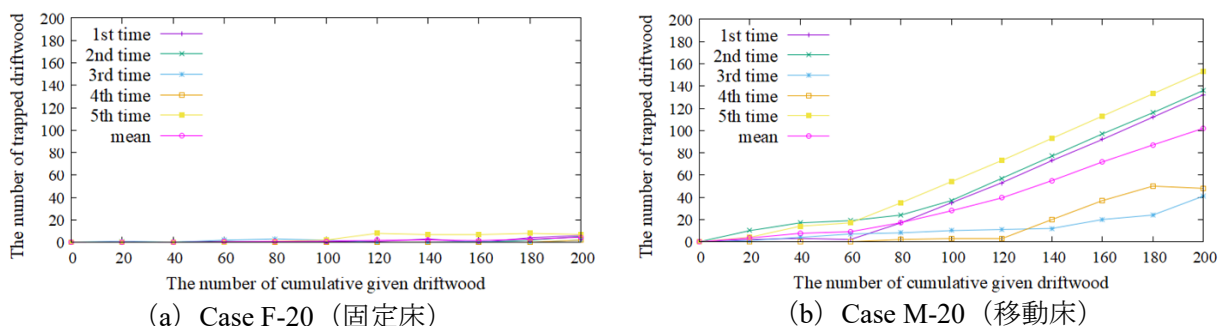


図1 固定床と移動床の流木捕捉量の違い (横軸が累積流木投入量, 縦軸が捕捉量)

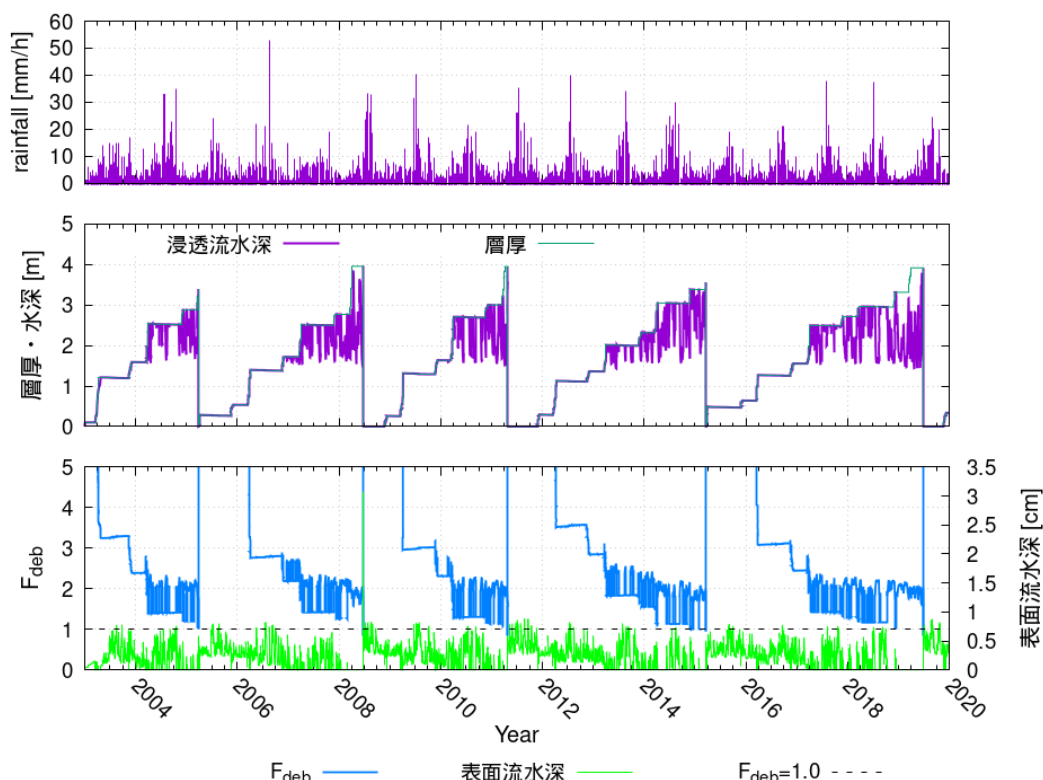


図2 白水谷源頭部(河道番号33)におけるシミュレーション結果(川幅:5.0 m, 粘着力:20 kPa, 透水係数:1.0×10⁻³ m/s)

2. 細粒土砂の流出特性に関する検討

FS 研究実施年度は、那智川流域では高濃度の土砂流出が観測されなかった。しかし、平行して観測を実施していた足洗谷流域で9月に3000NTU以上の土砂流出が観測された。

また、二次元河床変動計算の土砂の上流端境界条件に影響を与える土石流発生ポテンシャルの評価について検討を行った。土砂の生産は斜面崩壊だけでなく溪床堆積物の浸食を起源としても発生する。そのため、細粒土砂の流出量などを予測するためには、溪床堆積物の量の把握が重要となる。そこで、山地土砂動態モデルを用いて流域の源頭部での溪床堆積物の変動に着目し、流域の土石流発生ポテンシャルを検討した。

その結果、図2に示すように、改良を加えた土砂動態モデルにより、冬期に生産された土砂で冬から春に層厚が上昇し、梅雨や台風の降雨による出水で浸食されるという年間プロセスが繰り返されて溪床堆積層厚が徐々に増加し、ポテンシャルが閾値を超えた状態で大きな降雨があると土石流が発生するというプロセスを再現することができた。

一般研究

1. 流木捕捉モデルの構築

流木捕捉モデルは、FS研究における水路実験と力学的な考察により開発した。流木を連続体として扱うため、流木は濃度として評価した。流木濃度の輸送方程式は以下のようである。

$$\frac{\partial C_{drf}h}{\partial t} + \frac{\partial C_{drf}uh}{\partial x} + \frac{\partial C_{drf}vh}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x h \frac{\partial C_{drf}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y h \frac{\partial C_{drf}}{\partial y} \right) - \frac{\partial h_{drf}}{\partial t}$$

ここに、 u, v : x, y 方向の水深平均流速、 h : 水深、 C_{drf} : 流木濃度、 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$: x, y 方向の流木の拡散係数、 κ : カルマン定数(0.4)、 h_{drf} : 橋梁上流域における単位面積あたりの流木集積量。流木集積量は、以下の関係で評価する。

$$\frac{\partial h_{drf}}{\partial t} = \frac{C_{drf}uh p_b}{x_{drf}}$$

ここに、 x_{drf} : 流木の流下方向の集積長さである。 p_b は流木捕捉割合であり、FS研究で得られた実験結果を参考に、以下の関係で評価する。

$$p_b = \begin{cases} A \cdot C_{drf} \frac{h}{H_{bb}} & (0 \leq \frac{9.5 h_{drf}}{H_{bb}} \leq 1) \\ 1 & (\frac{9.5 h_{drf}}{H_{bb}} \geq 1) \end{cases} \quad A = 50 \exp \left[4 \frac{9.5 h_{drf}(x_b, y_b)}{H_{bb}} - 1 \right]$$

ここに、 H_{bb} : 河床面-橋桁下端間の距離。

図3に実験結果と流木捕捉モデルの解析結果を比較したものを示す。流木濃度0.005の場合も0.012の場合も流木投入に伴う流木の捕捉数の変化を精度良く予測できている。また、流木捕捉数が少ないときは、流木投入に伴う流木の捕捉数の増加が少なく（流木捕捉割合が小さく）、流木捕捉数が30本を超えると、投入した流木全てが捕捉される（流木捕捉割合が100%）ことが、評価されている。

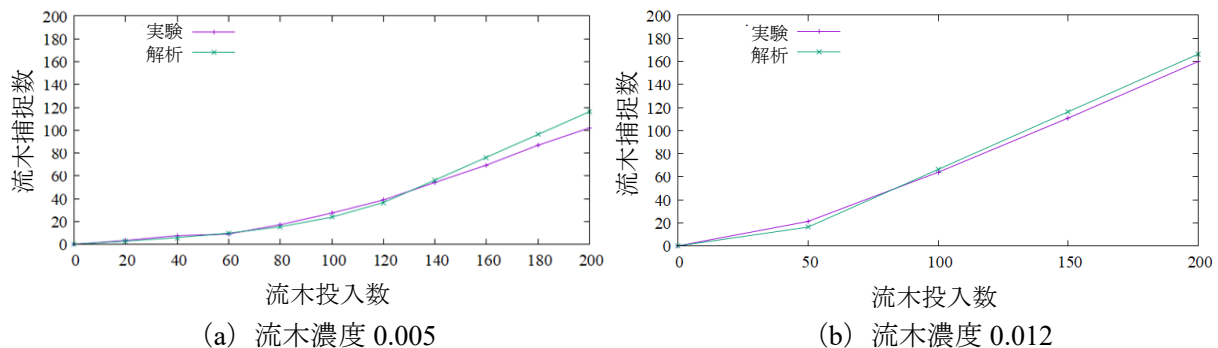


図3 実験結果と流木捕捉モデルの解析結果の比較

2. 細粒土砂の輸送・流出特性

2.1 那智川流域での土砂流出観測



図4 内の川における TDR センサー設置の様子

那智川流域の土砂動態を解明するためにハイドロフォンおよび濁度計による流砂観測が行われているが、大規模な出水中の浮遊砂は従来の濁度計では正確に観測できない。そこで、高濃度の浮遊砂流の濃度の観測が期待できるTDR（Time Domain Reflectometry）を利用した浮遊砂観測システムを那智川左支川の内の川流砂観測施設に導入した。

上に述べたTDRを利用した河川での浮遊砂濃度計測手法は、様々な河川での観測に導入されつつある。本手法は水（比誘電率 ≈ 80 ）中の砂粒子（比誘電率 ≈ 3 ）の存在比を比誘電率計測結果から推定するものである。本手法は、物質の比誘電率を計測するTDRを利用する。浮遊土砂を含む河川水の比誘電率 ϵ_{obs} が水および砂の比誘電率（それぞれ ϵ_w 、 ϵ_s ）と体積土砂濃度 C を用いた以下の式で表される（内藤ら，2018；Miyata et al., 2020）。

$$\sqrt{\epsilon_{obs}} = (1 - C)\sqrt{\epsilon_w} + C\sqrt{\epsilon_s}$$

水の比誘電率 ϵ_w は水温 T の関数であり、約70～80であることが知られる。また砂の比誘電率 ϵ_s は、3～5の既知の値である。そのため、浮遊土砂を含む河川水の比誘電率 ϵ_{obs} が計測できれば、土砂濃度 C を求めることができる。本手法は、室内実験と現地観測により、体積土砂濃度 $0.002 \text{ m}^3/\text{m}^3$ を超えるような高濃度を対象とした計測に適し、浮遊土砂の粒径に計測結果が依存しない特徴を有することが明らかにされている（Miyata et al., 2020）。大規模な出水では粗粒土砂も浮遊状態で輸送され、広く用いられる濁度計ではこのような粗い浮遊砂を正しく計測できていない可能性が指摘されている。そのため、濁度計とTDR計測を併用することで、様々な規模の出水での浮遊砂流出量を把握できると考えられる。

内の川地点は砂防堰堤の水通し部側岸にセンサーを設置し、土砂濃度観測を実施した（図4）。TDRセンサーは堰体の影響をなるべく受けないよう、堰堤表面から約5cm離して取りつけた。また出水中の損傷を考慮してステンレス製の保護カバーをかぶせた。

TDRセンサーによる土砂濃度計測はセンサーが完全に水没する必要があるが、内の川地点では研究期間中に土砂濃度を正確に計測できるほど水位が上昇しなかった。これは観測地点の直上流に整備された砂防施設の効果によるものと考えられる。

2.2 常願寺川上流での観測

研究期間中に那智川で土砂濃度を正確に計測できるほど水位が上昇しなかったため、平行して常願寺川上流で観測も実施した。融雪期や梅雨期での出水時に土砂流出が見込まれる常願寺川上流の流砂水文観測地点にTDRセンサーを設置した（図5）。本観測点は河床変動による計測機器の損傷を避けるために橋脚に水位計、光学式濁度計、プレート式ハイドロフォン、TDRセンサーが設置されている。そのため、ある程度水位が上昇しなければ計測されない。

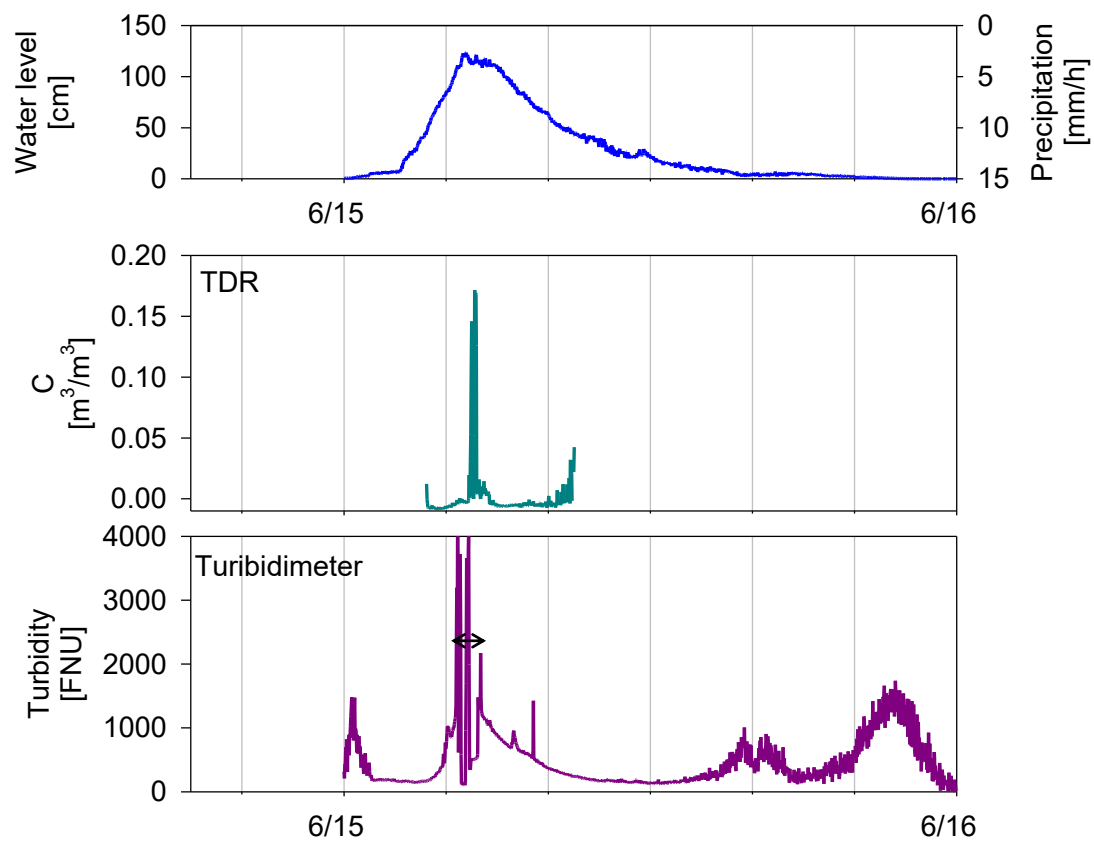


図5 常願寺川妙寿砂防堰堤下流での2025年6月15日降雨の水位、浮遊砂体積濃度、濁度観測結果



図6 常願寺川妙寿砂防堰堤下流の橋脚（上）に設置したTDRセンサー（下）。TDRセンサーは保護用金属格子の内部に設置した。

2025年6月20日の降雨時（アメダス立山芦峯での総雨量：39.0 mm，最大降雨強度：10.5 mm）の観測結果を図5に示す。橋脚でのピーク水位は123.7 cmと2025年の観測期間で最も大きかった。濁度は4:15ごろから5:20ごろまで約140 FNUから約4000 FNUの間で急激な振動がおこった（図5に示す矢印の期間）。本濁度計の計測上限は4000 FNUであり、実際の浮遊砂濃度は濁度計の上限を超えていたと考えられる。光学式濁度計の計測結果は浮遊物質の粒径の影響を強く受けることが知られており（横山，2002），出水ピーク付近でのこのような濁度計測値の変動は粗い粒径の浮遊砂が卓越したことによると考えられる。

TDRセンサーで浮遊砂濃度を正しく計測するにはセンサー一部が全て水没している必要がある。そのため、水位が約45 cmを超えたときの結果のみを図5に示した。本出水中、TDRセンサーで計測された浮遊砂体積濃度は $-0.0087 \sim 0.17$ であった。上記の通り、水の誘電率は水温 T の関数であり、水温計測の精度も浮遊砂濃度に影響を及ぼす。今回用いたTDRセンサー付属の温度計は、やや低い値をとる傾向にあり、一部で負の濃度となった。出水ピーク付近で濁度を正確に計測できなかった期間(4:15~5:20)にTDRセンサーでは土砂濃度を観測できており、ピーク濃度が0.17と非常に高く、多量の土砂流出が発生したことが示された。

2.3 UAV-SfMと画像解析を用いた河床材料粒径分布の面的把握の試行

河床材料の粒径分布は土砂輸送量を支配する重要なパラメータである。山地流域では河床勾配や土砂供給の影響を受けるため、河床材料の粒径分布は空間的に大きく変化する。そのため、計算領域内の粒度の空間分布を適切に与えることが、下流への土砂流出量を精度よく予測する上で重要となる。

しかし、空間的な変化の大きい粒度を詳細に把握する場合、従来の河床材料調査法では調査労力が大きいという問題がある。例えば、篩分析や線格子法、面格子法などの直接法は、1地点の粒径分布を得るだけでも多くの作業を要するため、広範囲にわたる空間分布を把握することは容易ではない。一方、BASEGRAIN (Weitbrecht, 2012) などの画像解析ソフトウェアを用いれば、河床画像から粒径分布を自動推定することが可能であり、調査労力の軽減が期待さ



● 撮影地点

図7 対象流域と対象地点（地獄平，黒谷，白水谷）の位置図

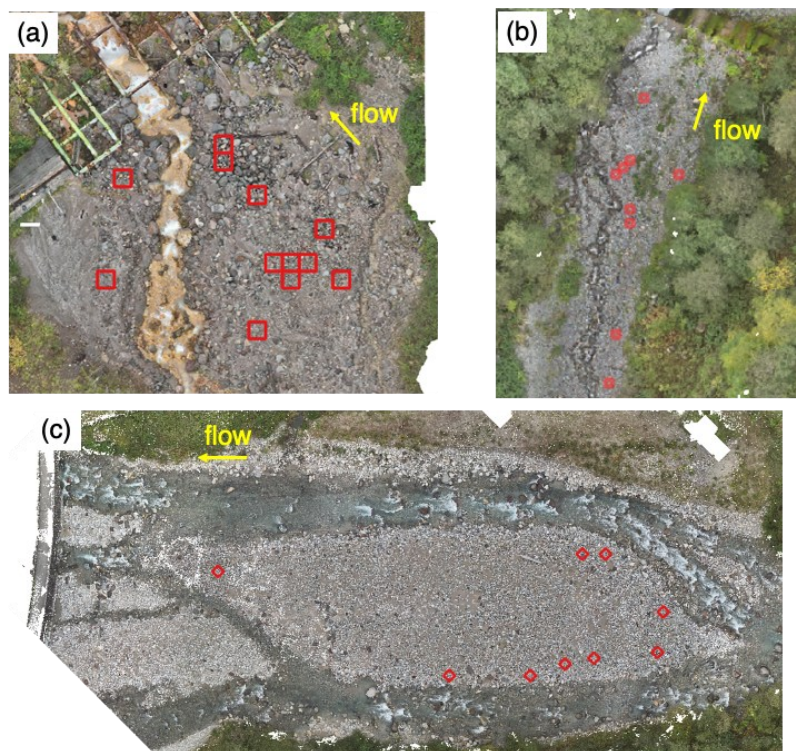


図8 対象流域の対象領域のオルソ画像。赤い正方形は BASE BRAIN によって粒径分布をサンプリングした地点である。(a) (b) (c)はそれぞれ白水谷，黒谷，地獄平を示す。

る。調査労力の軽減が期待さ

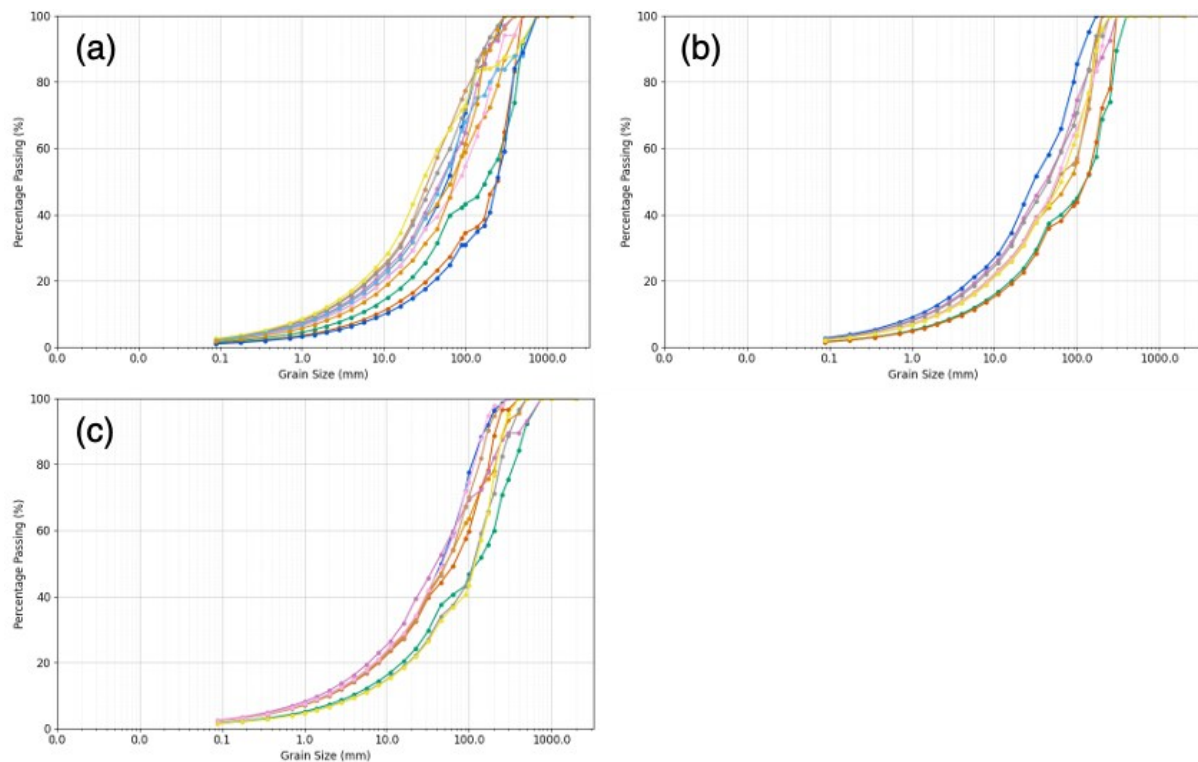


図9 各地点の対象領域（図2の赤枠グリッド）を対象にBASE GRAINによって推定された河床材料粒径分布. (a) (b) (c)はそれぞれ白水谷，黒谷，地獄平を示す.

れる．しかし，自動推定のみでは精度が十分でない場合が多く，手動による補正が必要となるため，空間分布を広範囲に評価する場合には依然として一定の労力を要する．

本研究では，Jan et al. (2025) の手法において推定式構築時に必要となる粒径分布データを，直接法ではなくBASE GRAINによるUAV撮影画像の解析で取得することで，現地で土砂の採取を必要としない粒径分布推定法の構築を試みる．これが実現すれば，調査労力の大幅な削減に加え，アクセスが困難な急勾配溪流や活火山周辺などにおいても粒径分布の推定が可能になる．

将来的に那智川流域等の他流域への適用を想定し，まずは既往観測データが蓄積されている穂高砂防観測所が設置されている岐阜県神通川流域の足洗谷周辺の3地点（図7）を対象に検討を行った．

UAVによる画像撮影を2025年10月下旬に実施し，曇天条件下で影の少ない画像を取得した．SfM解析によって作成した点群データの地上解像度は概ね2.6～4.9 mm/pixであり，河床表面の微地形を把握するのに十分な精度を確保している．撮影には，DJI Mavic 3Tを使用した．

得られた画像をもとに構築したオルソ画像を図8に示す．各地点，代表的な砂防堰堤の上流側にある，広く土砂が堆積している領域を解析対象に選定した．次に，図8の赤枠をつけた小領域を対象に，BASEGRAINによって，表層画像から河床材料粒径分布を推定した．本研究ではこれらを真値とみなし，河床表層の粗度高さから推定する統計解析を実施するが，この小領域の選定時に，ある程度河床材料の大きさがばらつくように留意した．これらの領域で得られた粒径加積曲線を図9に示す．D50～D90で，1オーダー程度のばらつきを有する粒径分布のデータが得られたことがわかる．

山地流域において河床材料粒径の空間分布を把握できることは，土砂流出の予測や土砂・洪水氾濫等のシミュレーションの高度化において大きな意義を持つ．河床材料の粒径分布は，掃流砂量や河床変動量を支配する基本的な条件である．特に山地流域では，砂防堰堤上流の堆砂域，支川合流部，谷幅の変化点，土砂供給源に近い区間などにおいて，粒径分布が局所的に大きく変化する．このような空間的な不均質性を考慮せず，流域全体に単一の代表粒径を与えた場合，局所的な土砂移動の開始条件や下流への土砂供給量を適切に表現できない可能性がある．

一方で，山地流域における粒径分布の面的把握は，これまで実務上・研究上ともに大きな制約を受けてきた．篩分析，線格子法，面格子法などの従来手法は，個々の調査地点において信頼性の高い粒

径分布を得られる一方で、現地作業に多大な労力を要する。そのため、急勾配溪流やアクセス困難な山地河川において、広範囲の粒径分布を高密度に取得することは困難であった。本研究で試行したように、UAV画像、SfM点群、画像解析を組み合わせることで、現地での直接採取を大幅に減らしつつ、河床材料粒径の空間分布を推定できるようになれば、これまで定量化が困難であった山地流域内の粒径のばらつきを、流域土砂動態解析に利用可能な情報として扱えるようになる。これは、山地流域における土砂移動場の理解を進める上で重要な成果である。

また、今回の解析では、BASEGRAINに基づく粒径分布データの数が各領域10点程度に限られていたため、モデル構築に利用可能な教師データは必ずしも十分ではなかった。そのため、本研究で得られた結果は、UAV-SfMと画像解析を組み合わせた粒径分布推定の有効性を示す試行的な成果として位置づけられる。今後、より多くの地点・流域でデータを蓄積することで、領域ごとのモデルの安定性や、他流域への転用可能性をより詳細に評価できると考えられる。特に、流域内で複数の代表的な堆積環境を含むように教師データを取得することで、局所的なばらつきに依存しにくい推定式の構築が期待される。

以上より、UAV-SfMにより得られる河床表面の粗度情報と、UAV画像に基づく粒径分布解析を組み合わせることで、山地流域における河床材料粒径分布を面的に推定できる可能性を示した。

2.4 連行の概念による細粒土砂の輸送モデル

連行の概念による細粒土砂の輸送過程を考慮した河床変動解析モデルの掃流砂層（層流層）と浮遊砂層（乱流層）のエネルギー散逸は以下のように評価する。

$$\tau = \tau_y + \rho_m v_m \frac{\partial u}{\partial z} \quad \text{掃流砂層（層流層）} \quad \tau = \rho v_t \frac{\partial u}{\partial z} \quad \text{浮遊砂層（乱流層）}$$

ここに、 τ_y は降伏応力、 ρ_m は掃流砂層の密度、 ρ は浮遊砂層の密度、 v_m ：掃流砂層の動粘性係数、 v_t ：浮遊砂層の渦動粘性係数である。掃流砂層の厚さは以下の関係から得る。

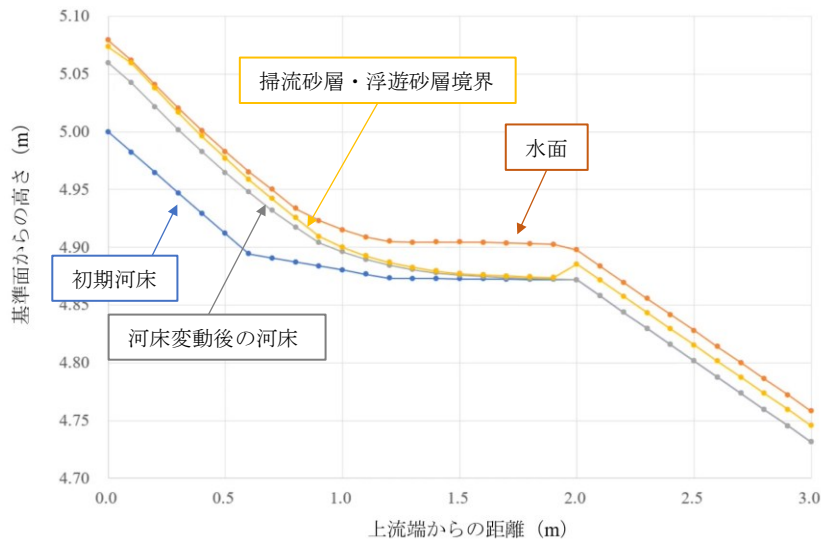


図 10 連行の概念による細粒土砂の輸送過程を考慮した河床変動解析モデルによる解析結果

$$\frac{h_s}{h} = \frac{1}{sc_s} \frac{1 + sc_u}{\tan \phi + \left(\frac{c_u}{c_s} - 1 \right) \tan \theta} \tan \theta$$

ここに、 h は流動深、 h_s は掃流砂層の厚さ、 s は土砂の水中比重、 c_s は掃流砂層の土砂濃度、 c_u は浮遊砂層の土砂濃度、 ϕ は安息角、 θ は河床勾配。

浮遊砂の輸送方程式は以下のである。

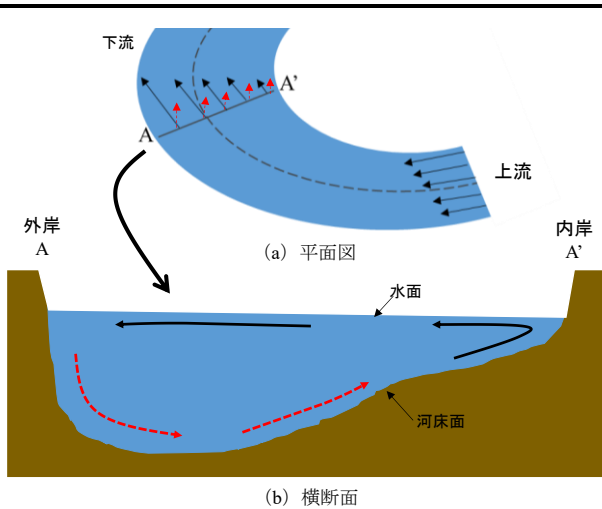


図 11 プラントルの第一種二次流の模式図

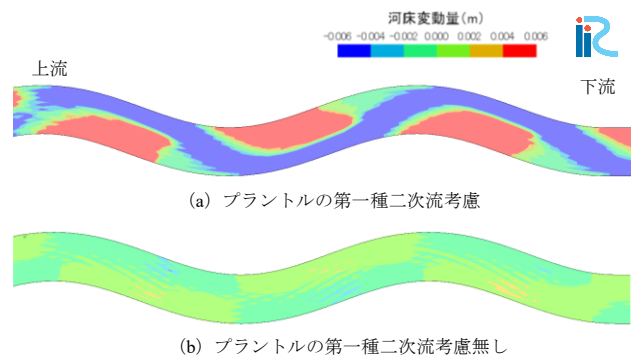


図 12 二次流が砂州波高に与える影響

$$\frac{\partial}{\partial t}(h_u c_u) + \frac{\partial}{\partial \xi}(h_u c_u u_u) + \frac{\partial}{\partial \eta}(h_u c_u v_u) = (W_e c_s - w_f c_u) + \frac{\partial}{\partial x}\left(h_u D_x \frac{\partial c_u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(h_u D_y \frac{\partial c_u}{\partial y}\right)$$

連行速度 W_e は以下の関係を用いる。

$$W_e = \frac{K}{R_{i*}} U_u$$

$$R_{i*} = \frac{sc_s gh}{v^2} \quad K = 0.0015$$

$$U_u = \frac{g}{v_t} i \left(\frac{h^3}{3} - \frac{hh_s^2}{2} + \frac{h_s^3}{6} \right) + \frac{gh^2}{v_m} i \left(\frac{h_s}{h} \right)^2 \left[\frac{1}{2} (sc_s + 1) \left(\frac{sc_s}{sc_s + 1} \frac{\tan \phi}{\tan \theta} - 1 \right) - \frac{v_m}{v_t} \frac{h}{h_s} \left(1 - \frac{h_s}{2h} \right) \right] h_u$$

図10に途中に緩勾配を有する急勾配溪流における河床変動及び掃流砂層と浮遊砂層の境界の時間的な変化を示す。上流からの給水・給砂は定常的に行った。図に示すように、上流と下流の急勾配域は掃流砂層が厚く、土石流状態となっていることがわかる。一方、途中の緩勾配域は掃流砂層が薄くて浮遊砂層が厚くなっており、典型的な掃流砂・浮遊砂領域の流れとなっている。つまり、土砂・洪水氾濫で見られる空間的に異なる流砂形態の連続的な解析が可能であることがわかる。

2.5 種々の数理モデルの導入による河床変動解析モデルの高度化

プラントルの第一種二次流、河岸浸食、局所河床勾配の影響、植生、多層粒度分布モデル、砂州内の浸透流など、砂州や流路形状を再現するために必須となる数理モデルを導入した。これらの内、プラントルの第一種二次流と局所河床勾配の影響について、解析例を用いて数理モデル導入の効果を説明する。

図11に河道湾曲部に発生するプラントルの第一種二次流の模式図を示す。平面二次元モデルでは、深さ方向に積分した現象を扱っている。つまり、流速については流動深平均の流速となり、流向も流動深平均の流向となる。しかし、河道湾曲部や直線河道であっても砂州などの形成によって流線が湾曲している場所では、河床近傍の流向は流動深平均の流向とは異なっている。河道湾曲部であれば、水面付近の流れは流速が速く、流動深平均の流向よりも外岸方向の流れとなる。一方、流砂の方向を決定する河床近傍の流速は流動深平均の流向よりも内岸方向の流れとなる。このように平均流に対する横断方向の流れがプラントルの第一種二次流である。河道湾曲部の内岸の砂州の形成にはこのようなプラントルの第一種二次流が強い影響を与える。プラントルの第一種二次流を考慮した河床近傍の流向は、流線の曲率を用いて以下のように表現される。

$$u_b = u_{bs} \cos \alpha_s - v_{bs} \sin \alpha_s$$

$$v_b = u_{bs} \sin \alpha_s + v_{bs} \cos \alpha_s$$

$$u_{bs} = 8.5u_*$$

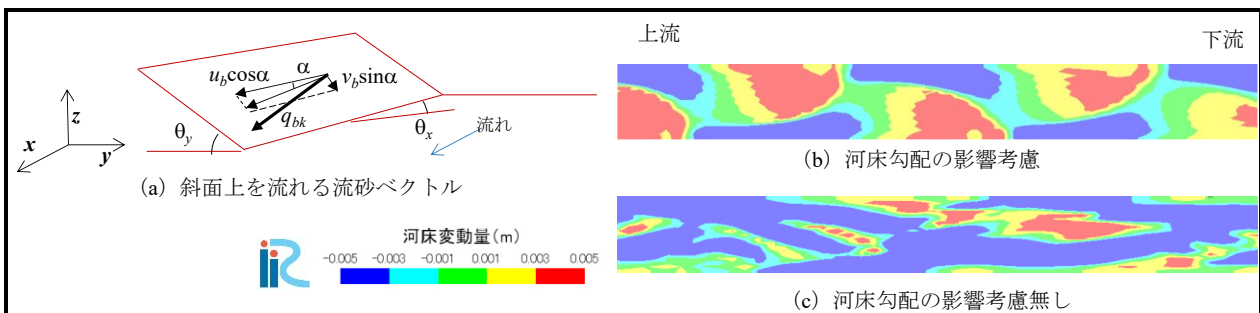


図 13 河床勾配を考慮した流砂ベクトルが交互砂州形状に与える影響

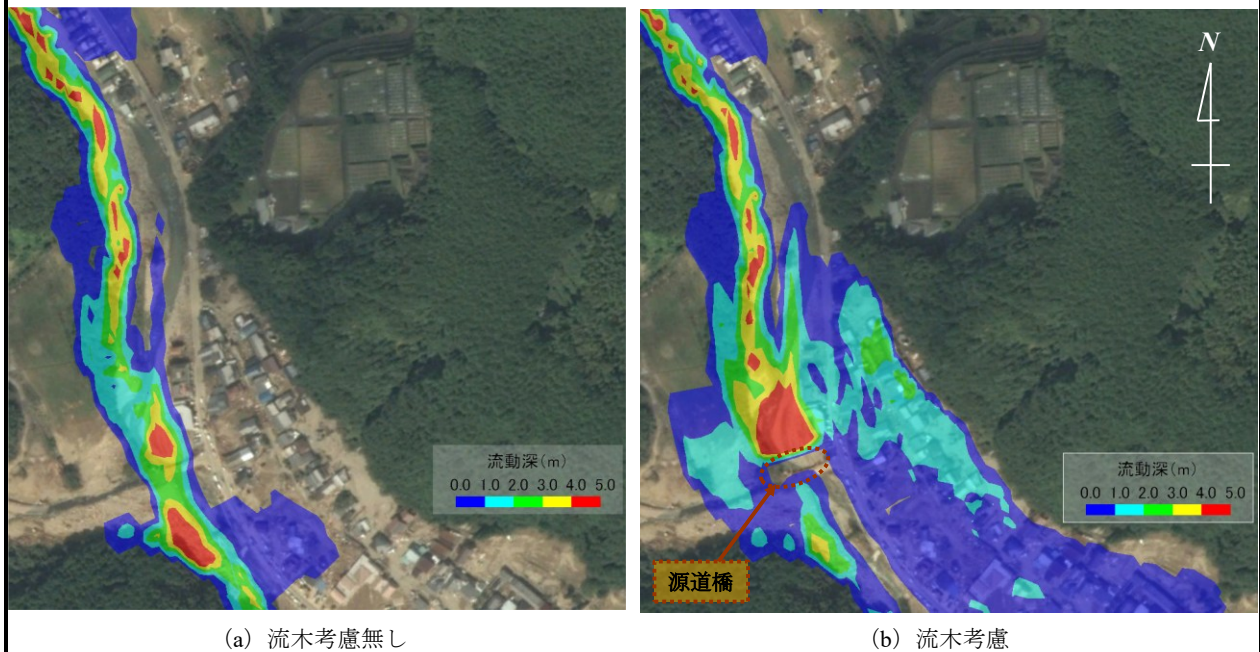


図 14 源道橋への流木の集積が氾濫特性に与える影響 (背景: Google Earth)

$$v_{bs} = -N_* \frac{h}{r} u_{bs}$$

ここに、 $\alpha_s = \arctan(v/u)$ であり、 N_* は 7.0 である (Engelund, 1974). r は流線の曲率であり、以下の関係より求められる (Shimizu and Itakura, 1991).

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{(u^2 + v^2)^{3/2}} \left\{ u \left(u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial x} \right) + v \left(u \frac{\partial v}{\partial y} - v \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\}$$

図12は定常的な給水条件での連続蛇行河道に形成される砂州の形状を示している. 図12 (a) はプラントルの第一種二次流を考慮した解析結果, 図12 (b) はプラントルの第一種二次流を考慮していない解析結果である. 砂州形状は, 平均河床勾配を差し引いて表示している. 図に示すように, プラントルの第一種二次流を考慮しないと砂州の波高が半分以下となっており, 砂州を有する場の河床変動シミュレーションではプラントルの第一種二次流の考慮が必要であることがわかる.

図13 (a) に斜面上を流れる流砂ベクトル (q_{bk}) と河床近傍の流向との関係を示している. 斜面上を流れる流砂は河床勾配 (重力) の影響を受け, 河床近傍の流向よりも斜面下方へ輸送される. 砂州を有する場の河床変動シミュレーションでは, 特に横断方向の局所勾配が強い影響を受ける. 図13 (b) と (c) は両岸付近に交互に堆積域と浸食域が形成されるモード1の交互砂州の形成水理条件で河床変動シミュレーションを実施したものである. 図13 (b) に示すように, 横断方向の河床勾配が流砂ベクトルに与える影響を考慮するとモード1の交互砂州が形成されるが, 横断方向の河床勾配が流砂ベクトルに与える影響を考慮しないと横断方向に複数の浸食域と堆積域を有するモード2以上の交互砂州 (複列砂州) が形成され, 実現象とは形成される砂州モードが大きく異なることがわかる. 河道の

幅・水深比が大きい（例えば、河床勾配1/100で幅・水深比10以上）と、河道内には砂州が形成されるため、非常に広い条件で局所河床勾配が流砂ベクトルに与える影響を考慮しなければならないことが分かる。

3. 那智勝浦町井関の源道橋における流木の集積が氾濫特性に与える影響

2011年の紀伊半島南部豪雨災害では、那智勝浦町井関において河道から多くの土砂と水が氾濫し、多くの人的・物的被害が発生した。被害の大きかった地区の西側には源道橋が那智川に架かっており、被災後、多くの流木が源道橋に集積したことが確認されている。氾濫に影響を与えた要因はいくつか考えられるが、ここでは流木の有無が氾濫特性に与える影響を検討した。

図14に示すように、流木を考慮することにより、源道橋東側の領域の氾濫域が広くなるとともに、流動深が深くなっていることが分かる。初年度の研究成果を適用すると、源道橋周辺を固定床としたり、源道橋到着時点の流木濃度を低下させることにより、流木の集積を抑制することは可能である。しかし、図14の解析条件では、源道橋西から那智川に流れ込む金山谷川で発生した土石流は、流木の集積後と仮定して考慮していない。金山谷川は土石流が発生した他の那智川流域の溪流よりも流域が広く、土石流の流動距離も長い。那智川との合流点付近は河床勾配が緩やかであるため、土石流として那智川に流れ込んだ土砂量は発生土砂量の一部である。実際、土石流が那智川に流れ込んだ地点の東側（那智川左岸側）の家屋は流失していない。しかし、那智川を一時的に閉塞する程度の土砂は流れ込むと推定されるため、源道橋を通過させるような流木対策は単独では機能しない可能性が高い。既に実施されているような金山谷川の土石流が那智川に流れ込まない対策を併用するか、那智川上流域での流木捕捉工の設置などが必要である。橋梁に流木を捕捉させないような対策は、別の橋梁で実施する方が効果的である。

参考文献

- Engelund, F. (1974): Flow and bed topography in channel bends. Jour. of Hy. Div. ASCE, Vol. 100, No. HY11.
- Jan, C.-D., Lai, T.-Y., & Lai, K.-C. (2025). Characterizing the Surface Grain Size Distribution in a Gravel-Bed River Using UAV Optical Imagery and SfM Photogrammetry. Remote Sensing, 17(23), 3890. <https://doi.org/10.3390/rs17233890>
- Miyata, S., Mizugaki, S., Naito, S., Fujita, M. (2020): Application of time domain reflectometry to high suspended sediment concentration measurements: laboratory validation and preliminary field observations in a steep mountain stream, Journal of Hydrology, 585, Article 124747.
- 内藤秀弥, 宮田秀介, 岸本昌之, 服部浩二, 石塚忠範, 永田葉子, 小菅尉多, 藤田正治 (2018) : TDRによる土砂濃度計測を用いた山地河川での浮遊砂鉛直分布の観測, 砂防学会誌, 71(4), 3-12.
- 横山勝英 (2002) : 濁度計の粒径依存特性と現地使用方法に関する考察, 土木学会論文集, Vol.698, II-58, p.93-98.
- Shimizu, Y. and Itakura, T. (1991): Calculation of flow and bed deformation with a general non-orthogonal coordinate system, Proc. of XXIV IAHR Congress, Madrid, Spain, C-2, pp.41-48.
- Weitbrecht, M. (2012) Automatic object detection to analyze the geometry of gravel grains – a free stand-alone tool, River Flow 2012, pp.595–600.

⑦研究成果の発表状況・予定

(本技術研究開発の成果について、論文や学会への投稿等又はその予定があれば記入して下さい。)(以下記入例)

- ・これまでに発表した代表的な論文
- ・著書(教科書、学会抄録、講演要旨は除く)
- ・国際会議、学会等における発表状況
- ・主要雑誌・新聞等への研究成果発表
- ・学術誌へ投稿中の論文(掲載が決定しているものに限る)
- ・研究成果としての事業化、製品化などの普及状況
- ・企業とのタイアップ状況
- ・特許など、知的財産権の取得状況
- ・研究成果による受賞、表彰等

国際会議、学会等における発表

澤田悦史, 片岡宏介, 鎌田直樹, 花田良太, 蔭山 星, 飛岡啓之, 竹林洋史, 桑原正人(2026): 橋梁への流木集積による洪水氾濫特性, 砂防学会研究発表会令和8年度三重大会

山野井一輝, 岩井智哉, 宮田秀介, 高山翔揮(2026): 流域土砂動態シミュレーションにおける不確かさ伝播に関する研究, 砂防学会研究発表会令和8年度三重大会

竹林洋史(2025): 2024年能登地震・豪雨によって発生した輪島市の土砂災害, 砂防学会研究発表会令和7年度長野大会

木下拳汰, 竹林洋史, 藤田正治, 山野井一輝(2024): 土石流による土砂供給過程を考慮した流域土砂動態モデルの開発, P-194, 砂防学会研究発表会令和6年度和歌山大会

和田眞典, 吉田真也, 藤田正治, 竹林洋史(2024): 流木濃度の違いによる橋梁閉塞率とせき上げ水深の時間変化に関する検討, R4-2, 砂防学会研究発表会令和6年度和歌山大会

有本心, 竹林洋史(2024): 蛇行流路における水と土砂の氾濫流, P-210, 砂防学会研究発表会令和6年度和歌山大会

岩井智哉, 宮田秀介, 山野井一輝, 藤田正治(2024): 足洗谷流域源頭部における土石流発生ポテンシャルの変動, P-211, 砂防学会研究発表会令和6年度和歌山大会

山野井一輝, 大石哲, 小柴孝太, 川池健司, 山越隆雄(2024): 土砂移動シミュレーションにおけるパラメータ推定手法に関する研究, 砂防学会研究発表会令和6年度和歌山大会

学術誌へ投稿中の論文(掲載が決定しているものに限る)

Hiroshi Takebayashi, Masaharu Fujita (2025): Bridge Collapse in Mutsu, Aomori Prefecture, Japan in 2021, Journal of Flood Risk Management, Volume18, Issue1, e70025.

Bonfrisco, M., Coviello, V., Vignoli, G., Miyata, S., Piantini, M., Engel, M., Nadalet, R., Dinale, R., Comiti, F. (2025): Temporal variability of bedload vs suspended sediment load and respective hysteresis cycles in a glacier-fed Alpine river, Journal of Hydrology, 660, 133215.

岩井智哉, 宮田秀介, 山野井一輝, 藤田正治: 溪床堆積物が土石流化する場の条件に関する感度分析: 改良版SiMHISの神通川水系ヒル谷への適用, 砂防学会誌 77 (1), 17-24, 2024-05

⑧研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

マスメディア

朝日新聞, 2025年1月10日, 豪雨時、橋に流木が詰まり氾濫 能登、少なめの雨量で土石流 住宅が流失
読売新聞, 2024年12月6日, 能登半島の大雨災害、流木・土砂が橋にひっかかり浸水被害拡大…「中小河川近くではより早い避難必要」

NHKweb, 2024年10月21日, 流れが激変 塚田川で何が? 新耐震基準の住宅も倒壊おそれ

朝日新聞, 2024年10月3日, 地震時の土砂で被害拡大か 能登豪雨の河川氾濫、研究者同行ルポ

公開イベント

能登半島地震・豪雨による複合災害と対策への教訓 2025年12月22日, 建築学会, 300人

チリKIZUNA II_洪水・土砂災害コース研修 2025年12月9日, iRIC-Morpho2DH, 30人

iRIC lecture at Universiti Putra Malaysia 2024年4月18日, Introduction of Morpho2DH, 50人

チリKIZUNA II_洪水・土砂災害コース研修 2024年7月18日, iRIC-Morpho2DH, 30人

ブラジル水資源学会 END 基調講演 2024年10月9日, Can sediment disasters be predicted?, 200人

⑨表彰、受賞歴

(単なる研究成果発表は⑦⑧に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)

⑩技術研究開発の今後の課題・展望等

(研究目的の進捗状況・達成状況や得られた研究成果を踏まえ、技術研究開発の更なる発展や砂防政策の質の向上への貢献等に向けた、技術研究開発の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

本研究では、流木集積、細粒土砂輸送、河床変動および氾濫現象を一体的に扱う数値解析技術を高度化し、山地流域における土砂・洪水氾濫現象の再現性向上に貢献した。特に、橋梁における流木の集積を表現できる流木濃度を考慮した橋梁流木捕捉モデルの開発や、連行概念を導入した細粒土砂輸送モデルの構築により、従来困難であった複雑な土砂移動現象の再現が可能となった。また、UAV・SfM・画像解析を組み合わせた粒径分布推定法は、アクセス困難な山地流域における広域調査の効率化と高精度化を実現し、砂防計画や河床変動解析への活用が期待される。さらに、二次流や局所河床勾配を考慮した解析により、砂州形成や流路変動の再現精度向上に重要な知見を得た。一方で、開発したモデルは計算負荷が大きく、迅速に解析結果が必要なへ事案の適用には課題が残るため、必要機能を維持しつつ高速化を図るサロゲートモデル等の開発が必要である。加えて、大規模出水時の高濃度浮遊砂観測データの蓄積を進め、より詳細なモデルの検証とさらなる高度化を行う必要がある。さらに、流木集積モデルについては適用困難な橋梁条件を整理し、橋梁形状や流況条件を考慮した汎用性の高いモデルへ改良することで、流木が流出する土砂・洪水氾濫災害の対策や砂防政策の高度化への貢献が期待される。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

(本技術研究開発で得られた研究成果の実務への反映等、砂防政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

構築した流木の集積量と流木濃度が流木捕捉に与える影響を考慮した流木捕捉モデルは、流木を伴う土砂・洪水氾濫における水及び土砂の氾濫域の予測など、山地域の中小河川の整備計画を立案する上で有用な情報を提供できるツールとなると考えている。

プラントルの第一種二次流、局所河床勾配、河岸浸食、浸透流などの数値モデルを平面二次元河床変動モデルに導入し、砂州や流路形状の再現性を高めたとともに、これらの数値モデル導入の必要を解析結果とともに示し、土砂・洪水氾濫時の河床変動特性に関する有用な情報を提供できた。また、土石流と掃流砂・浮遊砂を有する流れを連続的に取り扱うとともに、掃流砂層と浮遊砂層の境界における連行を考慮した細粒土砂の輸送過程を考慮した河床変動解析モデルについても細粒土砂が多く流出する土砂・洪水氾濫における水及び土砂の氾濫域の予測など、山地域の中小河川の整備計画を立案する上で有用な情報を提供できるツールとなると考えている。

さらに、那智勝浦町井関の源道橋周辺で発生した土砂と水の氾濫現象の数値シミュレーションを実施した。源道橋への流木の集積により氾濫域と浸水深が拡大することが示され、状況に応じた流木対策の必要性を示すことができた。さらに、開発したモデルを使用することにより、様々な状況に対応した解析結果の出力が可能となり、山地域の中小河川の整備計画を立案する上で有用な情報を提供できるツールとなっていると考えている。

UAV・SfM・画像解析を組み合わせた粒径分布推定法は、アクセス困難な山地流域における広域調査の効率化と高精度化を実現し、得られた粒度データを河床変動解析に用いることにより、解析精度の向上が期待される。