

河川砂防技術研究開発
【成果概要】

		氏名 (ふりがな)	所属	役職	
①研究代表者		内田 太郎 (うちだ たろう)	筑波大学 生命環境系	教授	
②研究テーマ	名称	FSスタート 豪雨時の細粒土砂の挙動を考慮した掃流状集合流動区間の土砂動態解析手法の提案			
③研究経費 (単位:万円)		令和2年度	令和3年度	令和4年度	総合計
※端数切り捨て。		297万円	825万円	873万円	1995万円
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)			
里深 好文		立命館大学 理工学部 教授			
権田 豊		新潟大学 農学部 教授			
西口 幸希		株式会社 建設技術研究所			
久保 毅		国際航業株式会社			
丹羽 諭		国土防災技術株式会社			
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】					
【背景】		近年、豪雨の激甚化により、土砂・洪水氾濫による被害が頻発し、深刻化している。豪雨時の山地流域で斜面崩壊等により発生する土砂は河床の土砂に比べて一般に相当程度細かく、土砂・洪水氾濫被害を引き起こす土砂は粒径 1cm 以下の細粒土砂が占める割合が大きい。また、斜面崩壊等による土砂生産は河川流量等の流水の土砂を運搬する能力に依存せず河川に供給される。そこで、山地流域内に広く分布する掃流状集合流動区間の斜面崩壊等により大量に供給された細粒土砂の動態を把握・予測することが土砂・洪水氾濫対策を検討するために必要不可欠である。しかし、従来の掃流状集合流動区間の土砂動態に関する研究は石礫の挙動に着目したものが大半で、細粒土砂の挙動に着目した研究は少なく、解析手法も定まっていない。			
【目的・目標】		(FS研究) まず、FS研究として、斜面からの土砂供給が大きな影響を及ぼした実際の土砂流出現象に対して、既往の理論に基づく、豪雨時の河床変動量、流出土砂量に関する再現計算を試み、既往の理論・手法の適用範囲及び精度を明らかにする。 (一般研究) 一般研究では、FS研究の成果を踏まえて、水路実験及び数値解析により掃流状集合流動区間における大量な細粒土砂が存在する場合の流砂のプロセスの理解を進め、数値解析に当該プロセスを組み込むことにより、流域の特性を考慮した土砂・洪水氾濫対策検討に実装可能な土砂動態の解析手法の提案を目的とする。			

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研究】

FS研究では、土砂・洪水氾濫対策検討に実装可能な大量の細粒土砂の挙動を考慮した掃流状集合流動区間の土砂動態の解析手法の提案の第1段階として既往の理論・手法の適用範囲及び精度を明らかにすること、更なる検討が必要なプロセス(素過程)を抽出することを目的とし、以下の2項目について実施した。

1. 既往研究の整理とプログラムの作成
2. 大規模土砂生産・流出現象の再現計算と感度分析

以下ではそれぞれの成果について述べる。

1. 既往研究の整理とプログラムの作成

FS研究では、主として掃流状集合流動を対象とした水路実験に関する国内外の研究事例について収集分析した。収集した文献は、水工学論文集、砂防学会誌、京都大学防災研究所年報、土木学会論文集、Journal of Hydraulic Engineering、Journal of Geophysical Research,等に掲載されているもので、発表時期は1980年代から2010年代である。

文献整理・分析の結果、掃流状集合流動に関する流砂の動態については、かなりの知見の蓄積があるものの、①細粒土砂の液相化する条件、②砂礫移動層と水流層間の土砂の交換、③液相化した細粒土砂の河床との交換、④液相化した細粒土砂の流れへの影響評価については、既往の検討が不十分であると考えられた(図1参照)。その上で、既往の水路実験、理論的な研究に基づき実証されてきたプロセスをモデル化しつつ、①~④のプロセスは図1の仮定A~Dのように仮定し、便宜的に取扱い河床変動計算プログラムを作成した。

2. 大規模土砂流出現象の再現計算と感度分析

FS研究では、土砂生産プロセスの異なる2つの事例を対象とし、再現計算を実施した。1つ目は、富士川砂防事務所管内の春木川流域の2011年台風6、12、15号および2012年台風4号の4台風による土砂流出である。ここでは、大規模崩壊地からの継続的な土砂流出現象を対象とした。2つ目は、九州筑後川流域の赤谷川流域における2017年の九州北部豪雨による土砂流出である。ここでは、新規崩壊による土砂生産・流出現象を対象とした(図2参照)。

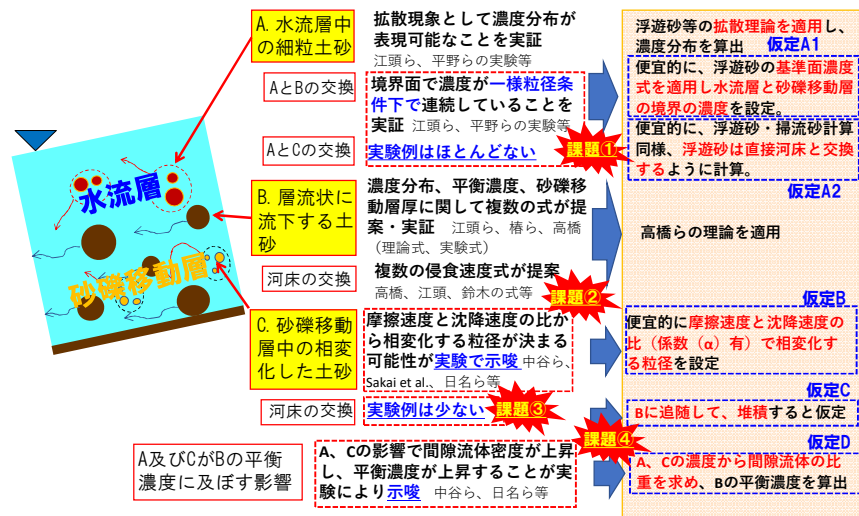


図1 文献レビュー結果と試作プログラムの概要

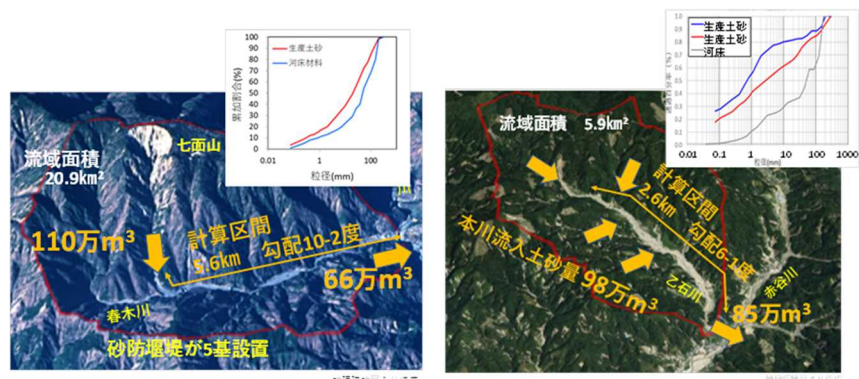


図2 春木川と乙石川(地理院地図より作成)の土砂流出状況と粒度分布

作成したプログラムを用いて、春木川で生じた土砂流出現象について再現計算を行った、春木川では、生産土砂の粒径は比較的粗く、河床材料との粒径分布の違いが小さかった（図2）。このとき、細粒土砂の液相化の影響を考慮せずに土砂動態は概ね再現できた（図5b参照）。

一方、新規崩壊により大量な細粒分を含む土砂の生産（図2参照）が生じた乙石川の再現計算では、考える範囲で入力条件の感度分析をしたものの、細粒土砂の液相化を考慮しないと土砂流出現象を再現は困難であった（図4b参照）。一方、細粒土砂の液相化を考慮することによって土砂流出現象を概ね再現できた。しかし、一部の係数を実績に合わせて決定する必要があった。すなわち、粒径が細かい土砂による土砂・洪水氾濫現象については、1の①～④の素過程の取扱いが計算結果に及ぼす影響を検証し、影響の大きい素過程の把握した上で解析手法を提案することの重要性を示した。

【一般研究】

3. 既往水路実験に関する数値解析

ここでは、FS研究で作成した数値解析プログラムを検証するために富士川砂防事務所以前実施された混合粒径の水路実験の結果を収集し、解析できるようにデータ整理を行った。当該実験では、4種類の混合粒径の土砂をホッパーから定常的に供給し、平衡状態の河床勾配を計測している。ホッパーからの土砂供給速度を変化させることにより、土砂濃度を変化させ、土砂濃度と平衡勾配の関係を計測している。すなわち、粒度分布が異なる土砂ごとの土砂濃度（輸送濃度）と平衡勾配の関係が実験により得られている。

ここでは、作成したプログラムのうち、「摩擦速度と沈降速度の比で液相化する粒径を設定」（図1の仮定B）および「水流層中の浮遊砂と砂礫移動層中で液相化した土砂の濃度から間隙流体の比重を求め、砂礫層移動層中の粗粒土砂の平衡濃度を既往の実験式より算出」（図1の仮定D）の2つの取扱いの妥当性について、水路実験を対象とする再現計算から検討した。閾値とする摩擦速度と沈降速度の比を3としたときの計算結果と実験結果を図3に示す。図に示す通り、土砂濃度、土砂の粒度分布に関わらず、一定の閾値で実験結果を概ね再現できた。また、感度分析の結果、仮定Dの影響は小さかった。以上より、仮定B、Dは少なくとも本水路実験の範囲では妥当であることを確認した。

4. 大規模土砂流出現象に関する数値解析

ここでは、FS研究に引き続き春木川、乙石川の土砂流出現象（図2）を対象に研究を実施した。

(1) 乙石川の再現計算

FS研究の結果、乙石川では、細粒土砂の液相化を考慮しないと、供給土砂の粒度分布を実測の粒度分布より相当小さく設定した場合であっても、流出土砂量を再現することができなかった、そこで、ここでは、FS研究で明らかになった課題のうち、「土砂の砂礫移動層と水流層の交換」（図1の課題①）、「細粒土砂の液相化する条件」（図1の課題②）に

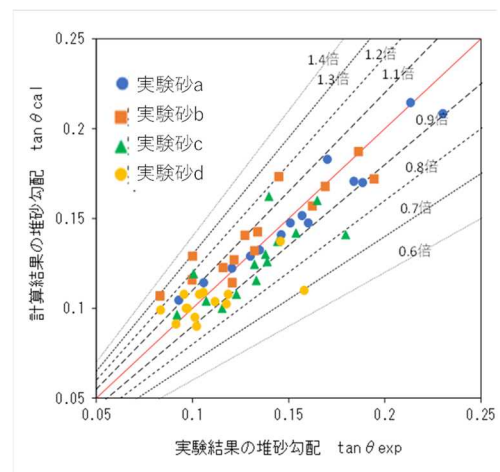


図3 実験結果と計算結果の比較

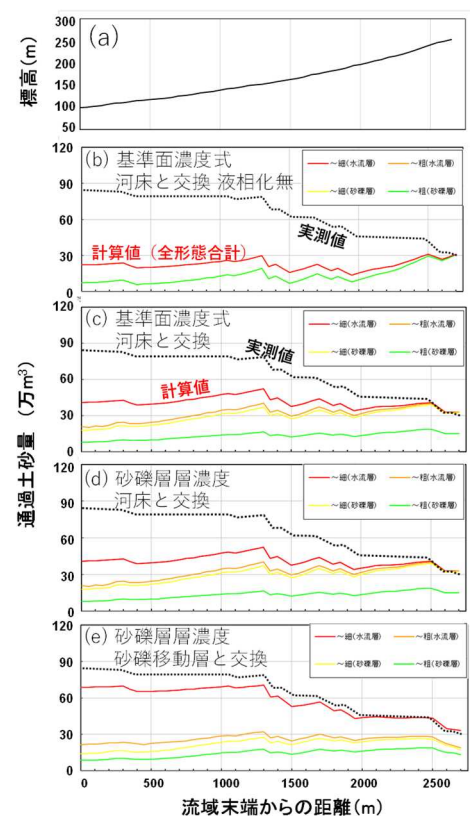


図4 乙石川の再現計算：

ついて検討を行った。

前節の水路実験の再現計算と同様に、摩擦速度に対する沈降速度の比が3以上の土砂が液相化すると仮定した計算を実施した。まず、水流層中の浮遊する土砂を表現するにあたり、水流層底部の濃度の平衡濃度の算出に浮遊砂の基準面濃度の理論を適用し（図1の仮定A1）、水流層中の土砂は河床面と直接交換すると仮定した（図1の仮定A2）。その結果、通過土砂量は下流端で実績の約半分程度になった（図4c）。そこで、水流層底部の濃度を砂礫移動層の濃度と等しいと仮定（仮定A1の変更）した。このケースでは、仮定A1を用いたケースに比べ、流出土砂量は50%程度増加したものの、実績よりは小さかった（図4d）。

そこで、砂礫移動層に一定の厚みがある掃流状集合流動においては、水流層中の土砂は砂礫移動層中の土砂と交換し、砂礫移動層中の土砂が河床と交換すると仮定し（仮定A2の変更）、プログラムを変更した。その結果、通過土砂量は前の2ケースに比べて増加し、実績の流出土砂量に比べて8割程度の計算結果となり、実績の流出土砂量を概ね再現できた（図4e）。

(2) 春木川の再現計算

FS研究の結果、春木川では、細粒土砂の液相化を考慮しなくとも流出土砂量、河床変動量が概ね再現できた（図5b）。一方で、細粒土砂の液相化を考慮せずとも概ね流出土砂を再現できる春木川の土砂流出現象に対して、細粒土砂の液相化を考慮するとかえって流出土砂量が過大評価になることが懸念される。

そこで、本研究では、水路実験や乙石川の再現計算で比較的再現性が良かった条件と概ね同様の条件で細粒土砂の液相化を評価し、流出土砂量の再現性を確認する計算を実施した。その結果、摩擦速度に対する沈降速度の比が2~4以上の土砂が液相化すると仮定した計算では、全体的に流出土砂量は増加したものの、影響は比較的小さく、計算区間の下流端付近において、計算と実績の流出土砂量の違いは2割程度であった（図5c、d）。乙石川では、細粒土砂の液相化の有無によって、流出土砂量が倍半分違ったの対し、春木川では影響が相対的に小さかった。また、計算結果を詳しく見ると、細粒土砂の液相化を考慮すると、砂礫移動層中を液相化して流出する土砂量は顕著に増加するものの、水流層中を浮遊して流出する土砂量、砂礫移動層中を層流状に流下する土砂量が減少した結果、細粒土砂の液相化の有無による流出土砂量への影響が比較的小さくなっていた（図5c、d）。

5. 掃流状集合流動区間における細粒土砂の挙動に関する水路実験

(1) 非接触の土砂濃度計測手法の開発

本研究では、土石流や掃流状集合流動に関する水路実験を想定し、非接触で高い時空間分解能を有するデータの取得が期待される画像解析による土砂濃度の推定手法の有効性について検討した。本研究では水槽を用意し、水槽中の土砂濃度が一樣になるように調整し、側面から画像を撮影した。水槽の奥行は10 cmであり、水槽の背面には青色の画用紙を張り付けた。

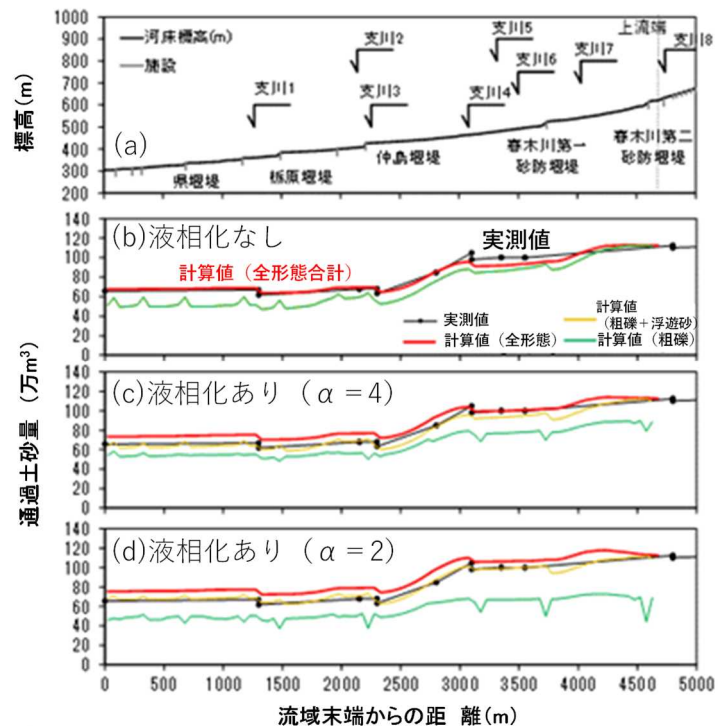


図5 春木川の再現計算

実験に用いた土砂は粒径 2 mm および 0.2 mm の 2 種類、色は白と赤の 2 種類とした。また、照明を画像撮影用のカメラと同じ側に設置した。

この実験から、土砂濃度の増加に伴う画素値の平均値の変化について、

- 1) 背景が土粒子に遮蔽される範囲が拡大するため、画像の画素値の平均は背景の画素値から、土粒子の画素値に近づくように変化する、
- 2) 光が強く当たる手前にある土粒子が画像上に写るようになるため、土粒子の平均的な画素値は高くなる

と考えられた。そこで、水槽内で土粒子は、ランダムに分布していると仮定した上で、土砂濃度と画素値の関係を理論的に導き、実験結果と比較した。ここで、1)の土砂による光の消散・散乱を、a.一度の消散を評価したモデル、b.多重散乱を評価したモデルの2つ手法で評価し、画素値から土砂濃度を推定する手法を提案した。a.では、光の消散に関わる係数を実験から同定する必要があるものの、いずれの手法であっても画素値が飽和するまでの領域においては、一定の精度で画像から非接触で土砂濃度を計測できることを確認した(図6)。さらに、画素値が飽和する土砂濃度は、粒径と水路(水槽)の奥行の比で評価可能であることを示し、粒径が細かいほど、奥行きが長いほど飽和しやすいことを理論と実験から確認した。

(2) 提案手法を用いた水路実験の実施

本研究では、小型の水路実験を実施し、新たに提案した画像から濃度を推定する手法を適用して掃流状集合流動時の土砂濃度の鉛直分布を計測した(図7)。はじめに、手法の妥当性を検証すために、流れ全体の実測の輸送濃度と画像から求まる平均濃度の関係を検討し、提案手法の妥当性を確認した。

その上で、実験映像の解析から、砂礫移動層の土砂濃度は鉛直方向に倍半分程度の違いがある場合があるものの、河床近傍、砂礫移動層と水流層の境界付近を除き、概ね一様であり、従来の数値解析の仮定を支持するものであることを示した。一方で、勾配、供給水量が同じ条件で土砂の供給量を増加させると、掃流状集合流動における砂礫移動層中の土砂濃度は変化した。流れ全体の土砂濃度が約3倍になると、砂礫移動中の土砂濃度は約2倍になった。この結果から、数値解析で砂礫移動層中の土砂濃度は掃流状集合流動の場合、流れの条件によらず一定と仮定することが多いが、条件によって砂礫移動層中の土砂濃度を変化させることが必要である可能性が考えられた。また、同手法を用いて実験を実施することで、掃流状集合流動区間の土砂動態に関する知見が蓄積されることが期待される。

6. まとめ

本研究では、土砂・洪水氾濫の被害推定などを念頭に掃流状集合流動区間の土砂動態の解析手法について、既往研究のレビュー、数値計算プログラムの作成、水路実験・大規模土砂流出事例の再現計算・感度分析、新たな実験手法の提案・実験の実施を行い、一定程度の精度で実現象を再現する解析手法を提案することができた。また、解析上、留意すべきプロセスについても明確にした。これらのプロセスの一部は今後も本研究で提案した実験手法を活用するなどし、明らかにしていく必要がある。

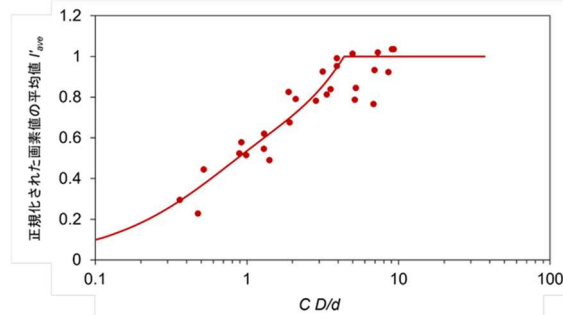


図6 土砂濃度 C と土砂と背景の画素値により正規化された画素値の関係： d は粒径と D は水槽の奥行、プロットは実験結果、線は多重散乱モデルによる提案した濃度推定手法に基づく理論線

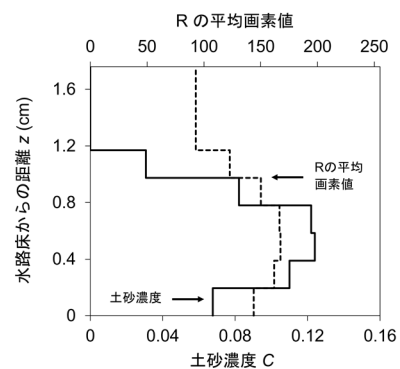


図7 水路実験による土砂濃度の鉛直分布推定例

⑦研究成果の発表状況・予定

(本研究の成果について、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)

【学会誌への投稿】

- ① 佐藤光平; 内田 太郎; 権田 豊; 里深好文「画像解析を用いた土砂濃度測定手法の基礎的検討」砂防学会誌/75(4)/pp.3-13
- ② Nishiguhi, Y., Uchida, T. (2022) Long-runout landslide induced debris flow: The role of fine sediment deposition processes in debris flow propagation, Journal of Geophysical Research: Earth Surface/127(2)/ 2021JF006452

※ その他、2編の論文の砂防学会誌への投稿準備中

【国際学会・学会の発表状況】

- ① 丹羽 諭ほか「生産土砂の粒径が大規模な土砂生産時の流出土砂量に及ぼす影響に関する数値計算」令和3年度 砂防学会研究発表会
- ② 佐藤光平・内田 太郎「水路実験を想定した画像解析による土砂濃度測定手法の検討」令和4年度 砂防学会研究発表会
- ③ 丹羽 諭ほか「生産土砂の粒度が粗い流域を対象としたフェーズシフトの適用性に関する検討」令和4年度 砂防学会研究発表会
- ④ 佐藤光平・内田 太郎「室内水路実験における画像解析を用いた土砂濃度の空間分布の把握」令和5年度 砂防学会研究発表会
- ⑤ 丹羽諭ほか「生産土砂の粒度が粗い流域を対象とした河床変動計算における土砂の相変化の特徴」令和5年度 砂防学会研究発表会
- ⑥ Uchida et al. “How are fine sediments described in sediment sheet flow?” 8th International Conference on Debris Flow Hazard Mitigation (予定)
- ⑦ Sato and Uchida “Testing Applicability of Image Analysis for Measurement of Sediment Concentration in Laboratory Experiments” 8th International Conference on Debris Flow Hazard Mitigation (予定)

【企業とのタイアップ状況】

株式会社 建設技術研究所、国土防災株式会社、国際航業株式会社と連携し、解析プログラムの作成、プログラム作成上の課題解決、再現計算の実施を進めてきている。

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。)

ウェブ、マスメディア等への効果については、特にありません。

一方で、研究の成果の一部は下記の講習会等で紹介している。

- ・砂防等計画設計 一般財団法人 全国建設研修センター (2022年6月など)
- ・宮城県 丸森地区 砂防シンポジウム (2022年9月)
- ・土木学会 応用力学講演会 2021 「水理学・水文学のボーダーレス化と次世代治水対策の可能性を探る！」 (2021年12月)
- ・「大規模土砂災害対応研修」 国土交通省 中部地方整備局 (2022年11月など)

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。)

砂防学会 令和4年度 砂防学会研究発表会 若手奨励賞

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。)

研究成果でも述べたように、掃流状集合流動区間の土砂動態解析にあたっては未解明なプロセスも少なくない(図1参照)。一方で、気候変動等による土砂・洪水氾濫の被害の激甚化はすでに顕在化しつつある。そこで、現象の解明と技術の社会実装を並行して進めていくことが望ましいと考える。社会実装の際に、解析上の課題が残されていることを踏まえつつ、解析手法の見直し、現地データの取得を当面継続的に実施していく必要があると思料する。一方で、本研究で提案した新たな実験手法や解析手法を用いた研究を継続的に実施することで、未解明なプロセスの解明につながっていくことが期待できると考えられる。

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。)

検討成果を実際の対策への活用という視点から、本成果の活用方法や解析上の留意点について、整理を行った。整理にあたっては、近年の全国的な土砂・洪水氾濫の事例の分析および富士川砂防事務所管内の早川・釜無川の災害事例を分析に基づき整理した。

その結果、早川・釜無川においては、

- ① 大規模崩壊地などからの継続的な粗い粒径の土砂流出
- ② 新規崩壊の多発などによる大量な細粒土砂も含む土砂の流出

の2つの現象の発生が想定されると考え、活用方法・留意点を整理した。

具体的には、本研究に基づくと、いずれの現象に対しても数値解析に基づく砂防計画等の検討は可能であり、今後推進していくことが望ましいと考える。その上で、検討を進めるにあたっては、

- ・対象とする現象を踏まえた解析手法・条件の設定
- ・対象とする現象の土砂生産源を把握し粒径分布の調査の実施
- ・計算で評価が困難な現象(急勾配区間の再侵食など)に留意した解析の実施。

が望ましいと考えられる。