

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
		宮田 秀介（みやた しゅうすけ）	京都大学		准教授
②研究テーマ	名称	一般型 【テーマ名】山地土砂動態シミュレーションにおけるデータ同化手法の検討			
③研究経費（単位：万円） ※端数切り捨て。		令和３年度	令和４年度	令和５年度	総 合 計
		171万円	171万円	143万円	486万円
④研究者氏名					
氏 名		所属機関・役職（※令和6年3月31日現在）			
山野井一輝		京都大学・准教授			
小柴孝太		京都大学・助教			
⑤技術研究開発の目的・目標					
現在、山地流域の中長期的な土砂動態（土砂流出および河床変動）を予測する方法が確立されていない。ひとたび斜面崩壊や土石流などの事象がおこると、下流での流砂量は大きく変動するが、それを高精度でシミュレーションするには斜面崩壊や土石流などの土砂生産から河道網への土砂供給の量と質（粒径）を境界条件として入力する必要がある。しかしながら、このように河道網への供給土砂の情報を流域内で面的に得てシミュレーションの入力条件とすることは時間や労力の点から現実的でない。 一方、近年、様々な山地流域での流砂水文観測が整備されつつあり流出する土砂量に関する基礎的な情報は蓄積されているものの、現地観測の成果が必ずしも将来予測や計画に十分活用されていない面もある。 このように山地流域の観測成果とシミュレーション技術がそろいつつあるが、観測結果はシミュレーションの検証などに用いられている程度であり、十分に活用されているとはいえない。そこで、本研究では流砂水文観測の成果のシミュレーションへのより積極的な活用を目指す。土砂動態シミュレーションを実施する流域について、斜面から河道への土砂供給量とその粒径分布を流砂水文観測データを利用して逐次設定するデータ同化手法を取り入れた土砂動態予測手法を提案する。 データ同化は統計数理学にもとづいて観測や実験とシミュレーションの架け橋となる有力な手法であり、気象や海洋だけでなく新型コロナウイルス感染症の感染予測などにも利用されている。観測データを単純にシミュレーションの入力データとして利用するのではなく、シミュレーションの軌道修正に用いて「確からしい」推定結果を得ることができる。					

⑥研究成果

本課題では神通川水系の足洗谷観測流域（流域面積：6.5 km²）を対象として研究を行った（図-1）。現地観測とシミュレーションに大別できる。

観測流域の概要

足洗谷観測流域は神通川水系蒲田川の左支川であり、標高2455 mの焼岳を源流とする。本流域は1962～1963年の焼岳噴火を契機として観測が開始されており、1974年には足洗谷本流にコンクリート製観測水路が建設され、現在まで試験流域末端での流砂水文観測ステーションとして利用されている。水路幅は5 m、水路勾配は1/20であり、本課題ではこの観測地点の結果をデータ同化に用いる。またヒル谷末端には観測用の試験堰堤があり、流砂水文観測が行われている。

足洗谷観測流域はヒル谷、割谷、白水谷、黒谷の4つの主な支流で構成される。これまでの研究から、凍結・融解作用で基岩が土砂化する土砂生産が冬季に起こり、融雪期および梅雨期に土砂流出が活発となることが分かっている。また数年～10年に一度、支流で土石流が発生し、河道網に多量の土砂を供給する。直近では2020年7月にヒル谷、白水谷、黒谷において土石流が発生し、多量の土砂流出により足洗谷観測水路およびヒル谷試験堰堤が被害を受けた。

現地観測

足洗谷観測水路において、流砂水文観測を実施した。浮遊砂、ウォッシュロード濃度観測のための濁度計、掃流砂量観測のためのハイドロフォンが以前より設置されており、さらに粗い粒径の浮遊砂も捕捉するためにTDR土砂濃度計に改良を加えた。ロッド径を大きくしたセンサーについて、室内で実験した結果、改良を加えたTDRセンサーでも比誘電率計測を問題なく行うことができ、比誘電率から土砂濃度に変換できることがわかった。このように改良を加えたTDR土砂濃度計を水路床に設置した（図-2）。TDR土砂濃度計は比誘電率を計測するものであるが、2022年3月の設置後、モルタルが完全に乾燥した8月頃以降に正常な計測結果が得られた。

2023年9月21日の降雨（総降雨量：42 mm、60分最大降雨強度：28 mm）での足洗谷観測水路における流砂水文観測結果を図-3に示す。水位が上昇しだすのとほぼ同じタイミングで濁度計に応答がみられたが、9/21 20:00ごろに出力がほぼ0となった。大量の土砂流出によりセンサーの一部が埋没したためと考えられる。同時刻にTDR土砂濃度計で計測された比誘電率は約70まで急激に減少しており、河川水中の土砂濃度が非常に高濃度であったことを示すものである。ハイドロフォンも水位上昇とともにパルスが記録された。本降雨イベントは降雨後に水位が低下しても濁度計、TDR土砂濃度計、ハイドロフォンの応答が継続したことが特徴的である。降雨終了後6時間経過した9/22 6:00ごろからのTDR土砂濃度計およびハイドロフォンの応答は顕著であり、間欠的な土砂流出が起こったと推測された。9/22 14:00頃に実施した現地踏査によると、流域末端の足洗谷観測水路で見られた濁りは支流の白水谷のみからもたらされていた。踏査可能な範囲では新規斜面崩壊や河岸崩壊などは確認できず、源頭域において

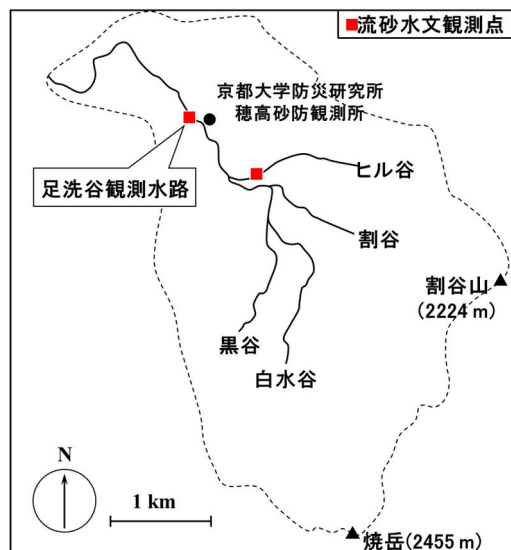


図-1 足洗谷観測流域



図-2 足洗谷観測水路の水路床に（上）TDR センサーを設置中、（下）設置後の様子

河道への土砂供給がおこったと考えられた。

掃流砂量観測モデルの構築

掃流砂を観測するハイドロフォンは、砂礫の衝突による音響の音圧もしくはそれを加工して得るパルス数が計測結果であり、掃流砂量への換算にはいくつかの方法が提案されているが、いずれも一義に計測結果—掃流砂量関係を決定するものであり、掃流砂量計測結果の精度は十分に評価されていない。しかしデータ同化手法を採り入れるためには、観測結果のもつ誤差を評価する必要がある。そこで、足洗谷観測水路のハイドロフォンを対象として現地実験を2022年11月に実施した（図-4）。ハイドロフォンの両側を流れ方向に仕切ること観測水路内に実験水路を仮設した。実験水路の上流端からハイドロフォンまでの距離は約6.5 mである。

実験にはほぼ均一な粒径の4種類の砂（50%粒径：3.3, 5.2, 11.9, 20.1 mm；Case 1~4, 図-5）を用い、実験水路の上流端から給砂強度が均一となるように5分間投入した。単位幅あたり給砂強度は約3.3, 1.6, 0.8, $0.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ の4通りである。さらに50%粒径が約7.5 mmとなるよう調整した混合砂を4通り作成し、実験に用いた（Case A~D, 図-5）。水深は各実験の前後にポイントゲージを用いて計測した。ハイドロフォンの計測は5秒間隔で行った。

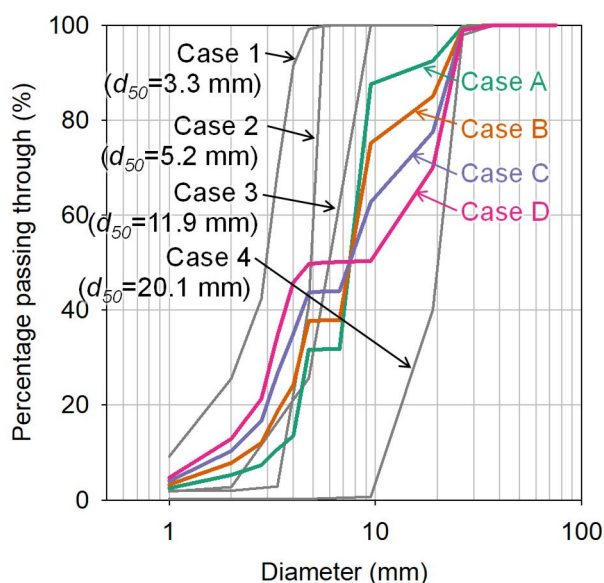


図-5 実験に用いた砂の粒度分布

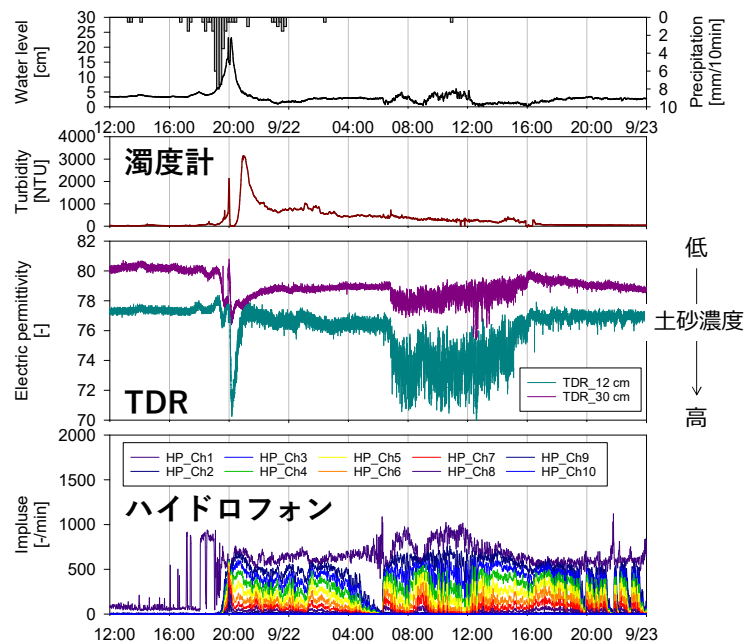


図-3 2023年9月21~22日の流砂水文観測結果

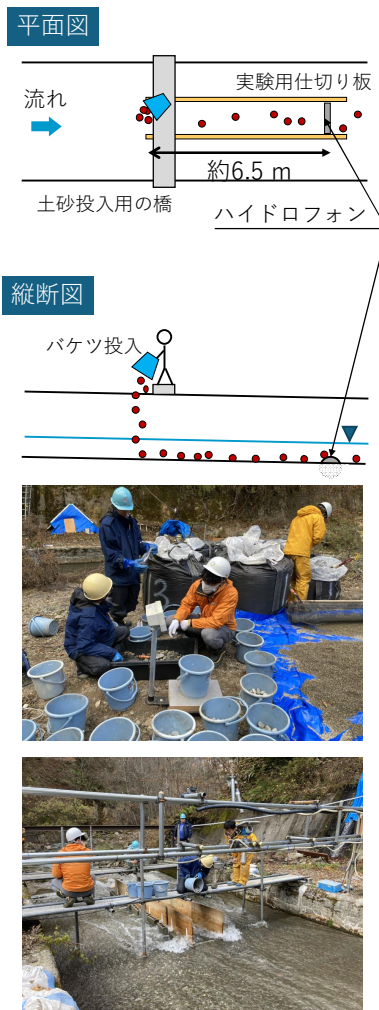


図-4 (上) 実験の模式図, (中) 実験砂準備および (下) 実験の様子

均一粒径砂の実験（Case 1～4）の結果を図-6に示す。ここではハイドロフォンのアンプ倍率が4, 64, 1024倍でのパルス数と掃流砂量の関係を示す。パルス数と掃流砂量には正の相関関係があり、定性的にはアンプ低倍率でのパルス数は大粒径、アンプ高倍率でのパルス数は小粒径に対応していた。

これら現地実験結果と足洗谷観測水路においてハイドロフォンとピット流砂計の結果がそろった9期間からランダムに抽出した結果を教師データとして観測モデルを構築した。10種類の異なるアンプ倍率に対するパルス数を変数としてガウス過程回帰を導入し、観測モデルを構築した。単純にパルス数と掃流砂量の関係を回帰するだけでなく、予測のバラツキを評価でき、さらに教師データの無い外挿部のバラツキについてもある程度効力を発揮できるようなカーネルを導入した。バラツキは標準偏差 σ および 2σ で示す。そのため、データ同化に必要な「幅を持った」流砂量観測値を示すことができる。

構築した観測モデルによる流砂量とスロットサンプラでの実測値の比較例を図-7に示す。本観測モデルは出水に対する応答が鋭敏でない特徴がみられたが、一方、観測モデル平均（ μ ）+ 2σ の結果は大きく変動しており、実測値はほぼこの範囲に含まれた。教師データとした9期間のうち、累積流砂量実測値が4期間で $\mu \sim \mu + \sigma$ 、4期間で $\mu \sim \mu + 2\sigma$ に納まっており、本観測モデルは概ね良好に推定できた。

本観測モデルを1年間（2016年11月～2017年10月）に適用した結果を図-8に示す。参考として音響波形の音圧を流砂量に変換する堤ら（2013）の提案した方法による結果を併記した。年間での推定掃流砂量の $\mu - 2\sigma$ 、 $\mu - \sigma$ 、 μ 、 $\mu + \sigma$ 、 $\mu + 2\sigma$ はそれぞれ約1,000、1,800、3,700、7,400、21,000 m^3 であった。堤ら（2013）の方法での年間流砂量は6,600 m^3 であり、これまでの結果とも矛盾しない。また、足洗谷観測流域での既往研究によると、平均年間土砂生産量は11,000 m^3 あり（澤田，1985，京都大学博士論文），土砂生産量と比較しても矛盾しない結果が得られた。

簡易的なデータ同化による課題の抽出

実装に向けた課題の抽出を目的として、上で構築した観測モデルで得られる流砂量観測結果といくつかの土砂供給条件での土砂動態シミュレーション結果を比較する簡易的なデータ同化を行った。

土砂動態シミュレーションには複合土砂災害シミュレータSiMHiS（山野井・藤田，2014，水工学論文集）を用いる（図-9）。SiMHiSは流域を単位河道及び単位斜面に区分して水・土砂の輸送を計算する。流域地形を単純化することで計算コストの大幅な削減が図られており、リアルタイムでの多数のシナリオを平行して計算することが可能である。また、凍結・融解作用による土砂生産が起こる足洗谷流域では、気温、日射などの気象データから流域内での各裸地での土砂生産量を計算することができるため、斜面での土砂生産—河道への供給—河道での輸送の長期シミュレーションに適する。

シミュレーションには足洗谷観測流域での既往研究で用いられたパラメータ値を用いた。本パラメ

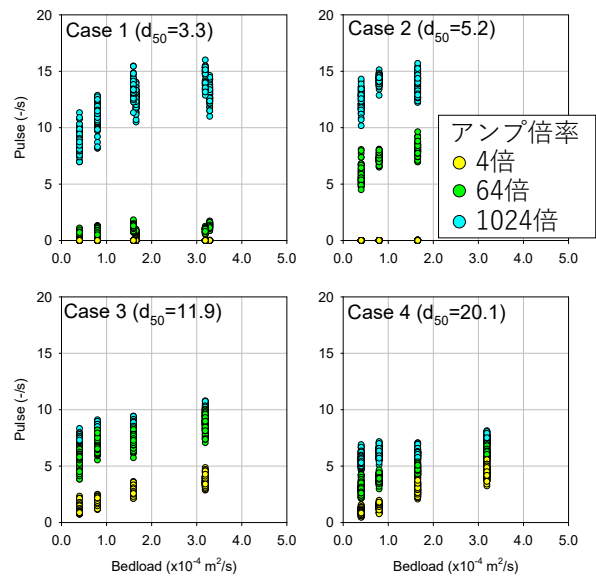


図-6 均一粒径砂の実験結果

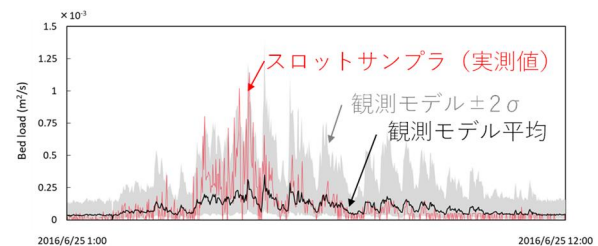


図-7 教師データ期間の観測モデルによる流砂量とスロットサンプラによる実測値

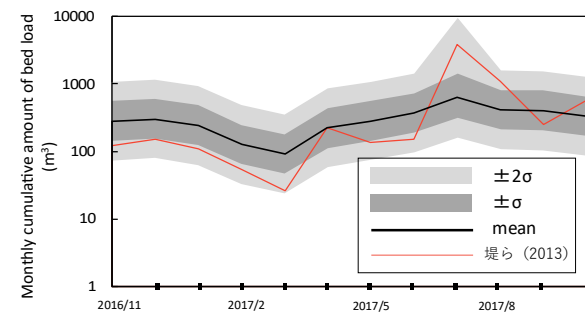


図-8 観測モデルによる1年間の流砂量

ータセットでは中小降雨に対して河川流量、掃流砂量のある程度再現できることが確認されている（山野井・藤田，2014）。本研究では2018年6月25日～7月12日を対象としてシミュレーションを実施した。災害が発生するような極端な豪雨では観測施設の被災などで欠測することがあり，本期間は足洗谷観測水路地点で観測データがそろった中で最も降雨規模の大きなイベントを含むことから選定した。期間中の降雨イベント（24時間の無降雨期間を含まない期間と定義）では，総降雨量，最大1時間降雨強度がそれぞれ304.5 mm，37.5 mm/hであった。河道への土砂の供給条件を変えてシミュレーションを実施した（表-1）。Case 0以外の2条件は，本流域の平均年間土砂生産量を1カ所に供給したものである。土砂供給はシミュレーション開始時とした。足洗谷観測水路地点での観測結果とシミュレーション結果を図-10に示す。流砂量の観測値 $\mu+2\sigma$ が最大0.01 m³/sであったのに対し，新規土砂供給を0としたCase 0でも観測値を大きく超過する流砂量となった。ただし7/5などの降雨強度が低い時間帯は新規土砂供給無し（Case 0）＜観測値＜土砂供給有り（Case ck6, Case cs6）となった。この結果は，土砂供給を一括でなく，時間的にも分割した条件を設定する必要，すなわち，土砂供給を時空間的に詳細に決定する必要があるを示す。

上記のシミュレーションは中小降雨での流出土砂のある程度再現できるパラメータで実施した結果，大規模降雨では観測値に対して過大評価となった。本イベントのみを考えるのであれば，斜面の透水係数や川幅のパラメータなどを変更することで，シミュレーション結果の再現性を向上させることは可能である（図-11）。しかしながら，このように対象としたイベントのみの再現結果は土砂動態シミュレーションにデータ同化を適用して流域の内部情報を推定するシステム構築を目指す本研究の目的には沿わないため，最適パラメータの探索，決定は行わなかった。これらのシミュレーション結果は，むしろ，シミュレーションを正しく実施するためには初期の条件を合理性を持って決定する重要性を示している。そのため，本課題を発展させる形で流砂の質的情報を用いた初期条件の設定に関する検討を別途，開始した。このような初期条件設定をデータ同化の第1段階とすることで，本課題で行ったシミュレーションと観測モデルの比較による準リアルタイムデータ同化が可能となる。

最後に，準リアルタイムでの流域土砂動態シミュレーションへのデータ同化を実装するための課題を記す。多量の土砂流出が発生するような豪雨時には観測データの欠落が起こる可能性があり，欠測時の同化の取り扱いを決めておかななくてはならない。また定期的な河川縦断測量や河床材料調査，LPデータによる差分解析などとシミュレーション結果を比較する，観測結果以外からのフィードバックは誤差が累積すると予想される長期シミュレーションの検証，是正に必要である。また対象となる流域サイズの限界についても今後の検討が必要である。

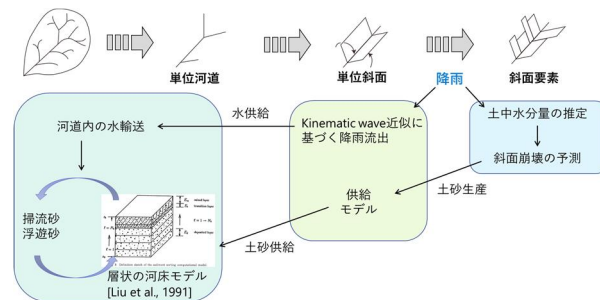


図-9 SiMHIS の概要

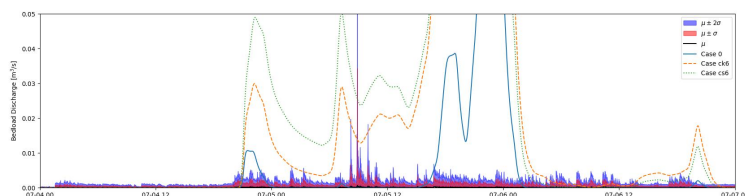


図-10 足洗谷観測水路地点での観測モデルとシミュレーションの流砂量の比較

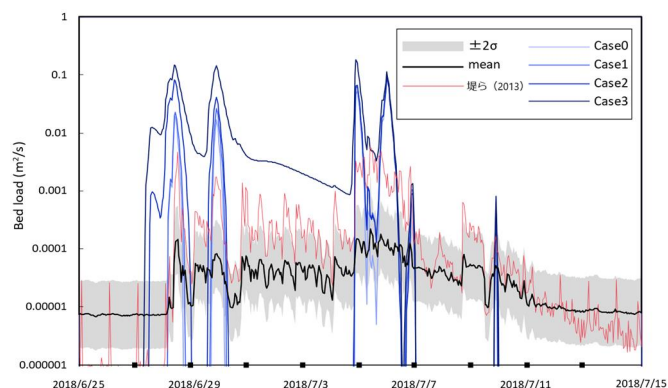


図-11 足洗谷観測水路地点での観測モデルとシミュレーションの流砂量の比較

シミュレーションに用いたパラメータ値は図-10 で用いた一般的なものと比較して斜面の透水係数や川幅を変更している。

⑦研究成果の発表状況・予定

学術誌への投稿論文

- 山野井一輝, 藤田正治, 鈴木豪太 (2021) : SiMHiSとNHRCM05データを用いた土砂・洪水災害の将来変化に関する研究, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.77, No.2, I_481-I_486.
- 東 豊, 堤 大三, 宮田秀介, 藤田正治 (2022) : パルス法による山地河川における流砂量推定手法の高度化, 砂防学会誌, 74(5), 3-13
- ゴメス クリストファー・宮田秀介・片岡幹人・足利健介・金井彩佳・ブラダク バラージュ・藤田正治 (2022) : 粗粒な未固結堆積物かさ密度測定のためのフィールド SfM - MVS 法 ―ヒル谷観測流域での調査―, 砂防学会誌, 75(4), 25-29
- Yamanoi, K., Oishi, S., Kawaike, K., & Nakagawa, H. (2022): Predictive simulation of concurrent debris flows: How slope failure locations affect predicted damage. Journal of Flood Risk Management, 15(2), e12776
- 木戸理歩, 井上卓也, 鳩野美佐子, 山野井一輝 : アンサンブル気候変動予測を用いた流出土砂量への影響評価, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.78, No.2, I_55-I_60, 2022.
- 山野井 一輝, 篠原 滉志, 川池 健司, 小柴 孝太 (2024) : 崩壊斜面起源の土砂供給影響下における厚真川の土砂動態シミュレーション, 土木学会論文集, 80 (16) , 論文ID: 23-16092

学会での発表

- 篠原滉志、山野井一輝、川池健司、中川 一 : 厚真川の崩壊裸地斜面からの土砂供給による土砂動態変化に関するシミュレーション, 2021年度砂防学会研究発表会
- 小林正直、藤田正治、竹林洋史、宮田秀介、山野井一輝、坂井紀之 : 焼岳噴火後の足洗谷における土石流発生 of 長期的変化, 2021年度砂防学会研究発表会
- 左藤起也, 宮田秀介, 山野井一輝, 坂井紀之, 藤田正治 : レーダー降雨観測・掃流砂観測と土砂動態シミュレータを用いたデータ同化による流域スケールの土砂流出の予測手法, 令和4年度砂防学会研究発表会, ST2-17
- 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検討―ヒル谷源頭部を対象とした数値解析―, R8-19, 2023年度砂防学会研究発表会
- S. Miyata, D. Tsutsumi, M. Fujita: Impacts of Debris Flows on Bedload Transport from a Mountain Catchment, The Indonesian Association of Hydraulic Engineers (HATHI) Bangka Belitung Workshop in conjunction with the 10th International Workshop on Multimodal Sediment Disasters, 2023.

⑧研究成果の社会への情報発信

特になし。

⑨表彰、受賞歴

令和4年度砂防学会技術賞「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」

⑩技術研究開発の今後の課題・展望等

本研究で対象とした足洗谷観測流域での流砂水文観測の継続に支障は無く、データの蓄積が期待できる。ハイドロフォンを対象として構築した観測モデルは、外挿部となる大規模な土砂流出に対する応答がやや鈍いため、カーネルの見直しなど、モデルの改良を行う予定としている。

シミュレーションと観測モデルの比較で示されたように、従来の中小降雨の流砂水文観測結果で最適とされたパラメータセットでは大規模降雨での再現性が低いことあると示された。このような知見をもとに科研費（2023～2025年度）に申請しており、パラメータセットを見直すのではなく、シミュレーション開始前の第1段階でのデータ同化により初期条件を合理的に設定する検討を行う予定である。既に土砂トレーサを用いた流砂の土砂生産源推定結果から初期条件を探索する研究を開始している。

当初の計画では準リアルタイムでのデータ同化システムの雛形を構築する予定であったが、健闘の結果、上記のような課題が判明したため、システム構築は実施せず、初期条件を合理的に設定する研究を先行させた。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

データ同化手法を適用する利点は、流域出口での観測値をもとに流域内部の情報（ここでは土砂供給が発生した場やその量）を逆推定することができる点である。本研究では流域面積6.5 km²の足洗谷流域が対象であるが、より大きな流域での適用を検討するには、神通川流域で実施されている流砂観測結果の活用が必要と考えられる。広域でも本手法が適用可能であれば、今後対策を施すべき支流やその重要度を定量的に示すことができる。また本研究で提案する手法を準リアルタイム運用できれば、多量の土砂流出が起こった豪雨イベントの最中もしくは直後に顕著な土砂生産が起こった支流を推定することが可能となり、緊急調査箇所の絞り込みや迅速な対応に活かすことができる。シナリオに焼岳の噴火などの極端な事象を含めておくことで、極端な現象が突発的に起きた際の対象流域内および下流域への影響を推定するというような利用も想定できる。