

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	
		堀田 紀文（ほった のりふみ）		東京大学		准教授	
②研究 テーマ	名称	現地観測および水路実験の比較検証に基づく土砂生産域における土石流評価手法の開発					
	政策 領域	[分野] 地域課題分野（砂防）		融合 技術	(リモートセンシング、非破壊検査、認知行動学 等)		
		[公募課題]					
③研究経費（単位：万円） ※端数切り捨て。		平成28年度	平成29年度	平成30年度	総 合 計		
		175	168	154	498		
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・役職（※平成31年3月31日現在）					
今泉文寿		静岡大学・准教授					
早川裕弐		北海道大学・准教授					
藤村直樹		国立研究開発法人土木研究所・主任研究員					
山川陽祐		筑波大学・助教					
経隆 悠		国立研究開発法人森林総合研究所・研究員					
⑤研究の目的・目標（申請書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。）							
大規模崩壊地である大谷崩で発生する土石流発生・流下の数値計算による評価手法の開発は、総合土砂管理計画が策定された安倍川流域への土砂供給量の予測を可能にするという点で重要な課題である。申請者らのこれまでの調査から、大谷崩の土石流が多様な流動形態をとり、そこに地形条件や材料特性・水文特性などの素因・誘因が大きく影響することに加え、それらが土石流との相互作用で時間的に変化することが明らかになった。しかしながら、数値計算の検証に供することが可能な精度での現地データの取得は今なお困難である。そこで本研究では、大谷崩における現地調査結果から、土石流に関する重要な未解決課題を整理・抽出したうえで、水路実験による検証と数値計算との比較を実施する。両者の比較を通して、物理的な素過程を極力反映する形で、既存の土石流モデルと数値計算手法を改良することを目的とする。							

⑥研究成果

(様式 F-10と同じ内容について、具体的にかつ明確に記入下さい。)

1. 大谷崩における土石流現地調査

土石流が豪雨時に恒常的に発生する荒廃溪流源頭部の大谷崩「一ノ沢」において、土石流の発生・流下・停止の一連を観測するため、複数台のインターバルカメラを流路沿いに縦断的に配置して撮影し、土石流の流下状況の把握を行った。また、UAVによる地形計測を行い、土石流の発生に伴う溪床変動や、土石流の発生・流下・停止が多い溪流区間の地形的特徴を調べ、溪床堆積物の堆積厚が土石流の流下特性に与える影響を検討した。また、土石流扇状地における流下痕跡を地形測量結果から判読し、土石流の堆積状況に関する解析も実施した。

1. 1 土石流段波の発生及び流下状況

水位の観測結果から土石流と考えられる土砂の流動は、2016年からの2年間で計10回イベント確認された。どのイベントにおいても最大10分間雨量は5 mmを超えており、既往の報告における土石流の発生条件と一致した。また、1分間隔での水位計測に基づいて描画されたハイドログラフを合わせて確認したところ、土石流の通過は水位の急激な跳ね上がりに対応しており、段波一つ一つがハイドログラフのピークとして明瞭に識別できた。段波のピーク時における水位は0.5 m程度の小規模のものから2 m以上と大規模なものまで観測された。

TLCによる土石流サージの到達時間をイベントごと、地点ごとに整理し(図-1)、それをサージの伝播の形が分かる形にしたものが図-2である。降雨中に繰り返し発生する小規模な土砂移動を経たうえで、降雨強度が5 mm/10分を超えるタイミングで、上流部の支流合流点付近の河道堆積深が2 mに達している区間で土石流が発生する。流下に伴い土石流はその形態(飽和型・不飽和型)を変化させることもあり、停止位置もさまざまであった。

土石流の発生地点および停止位置の分布と、河床の堆積深の分布、および、土石流の発生・流下・停止に伴う地形変化について、UAVによる測量結果の差分から確認したところ、それらは土石流によって時空間的に明瞭に変化しており、本研究の初年度成果である土石流発生位置の地形区分と、昨年度の危険雨量に関する成果と合わせて、土石流の発生・流下危険度が、UAVによる高頻度・高精細な地形測量で評価できる可能性を示唆する。

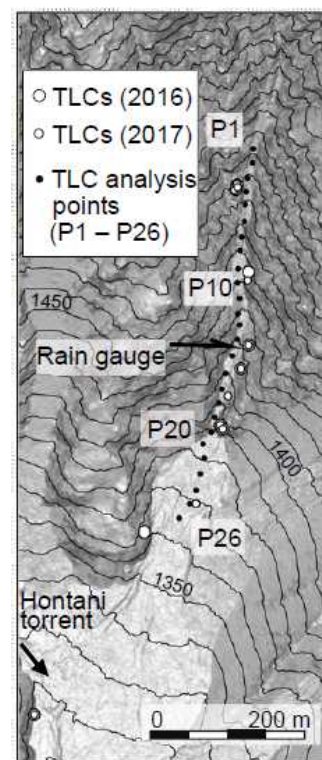


図-1 静岡県大谷崩一ノ沢上での土石流通過ポイントの設定

1. 2 扇状地上での土石流の停止と首振り

もっとも発達したサージのいくつかは、下流の扇状地まで到達し、扇状地上で堆積した。しかしながら、初年度の成果から分かる通り、土石流は扇状地上で首振りを行い、その到達範囲は現状の技術レベルでは数値計算によって予測することは困難である。そこで、扇状地上での土石流の停止状況を整理し、その類型化を試みた。

まず、2016～2017年にUAVによって取得された数値標高モデル(20 cm解像度)と、そこから判読した土石流

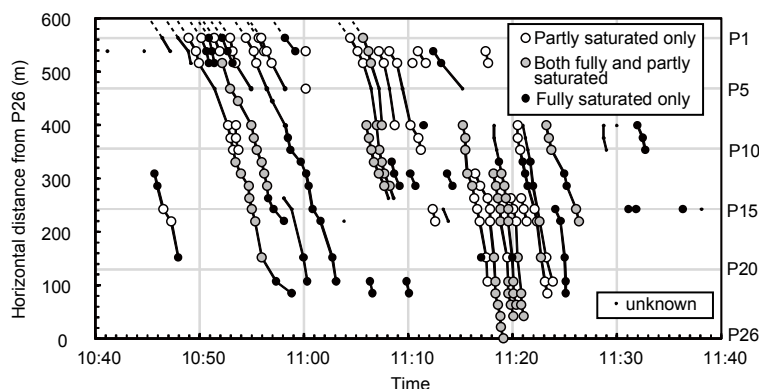


図-2 大谷崩一ノ沢における土石流サージの記録例

土石流通過ポイント各点での通過時刻を基に作成。画像解析の結果から、土石流の区分(飽和・不飽和)も実施。連結線から、各サージの移動速度やその変化までもが明瞭に読み取れる。

⑥研究成果（つづき）

サージの停止位置を明らかにした（図-3）．土石流サージの停止位置はLiDARデータ（1 m解像度）から読み取ることは困難であるが，UAVによる地形データにはサージ先頭部の地形的な特徴が明瞭に現れ，また高頻度で測量を実施できるため，降雨イベントごとの整理が可能になる．扇状地上では，河道は概ね3方向（中央，右岸側，左岸側）に別れて存在しており，土石流サージは中央部を中心としてそれぞれの河道で見られるが，土石流堆積物は中央部水路でもっとも顕著であった．

土石流の流下方向を定義したうえで，各サージの流下方向と到達距離の変化を整理した結果が図-4である．図-4からは規則的で周期的な結果が明瞭に見て取れるが，この結果が示す現象は次の通りである．土石流サージは，首振り（流路変更）後の最初の到達距離がもっとも長く，その後は最初のサージによる浸食部位を埋める形で，以降の土石流サージの停止・堆積位置が流路を遡上していく（back stepping）．停止・堆積位置の遡上が扇頂に達した後，次のサージは新たな方向に流下し，同様の繰り返しが生じる．サージの繰り返しは多くの場合，1降雨イベント内で完結するが，降雨イベント中に流路の変更が生じるケースや降雨イベントをまたいで，サージの遡上が生じるケースもある．また，扇状地上の土石流の挙動は，扇状地の地形条件の影響を大きく受ける．例えば，2018年8月19日のイベントが示唆するように，急勾配で流路内の流送によらずとも，斜面上での土石流の移動が可能な場合には，土石流の流下方向は固定せず，常に首振りを生じることもある．前節と同様，高精細・高頻度の地形測量によって，土石流の到達範囲の予測を行える可能性を示唆する結果だと言える．

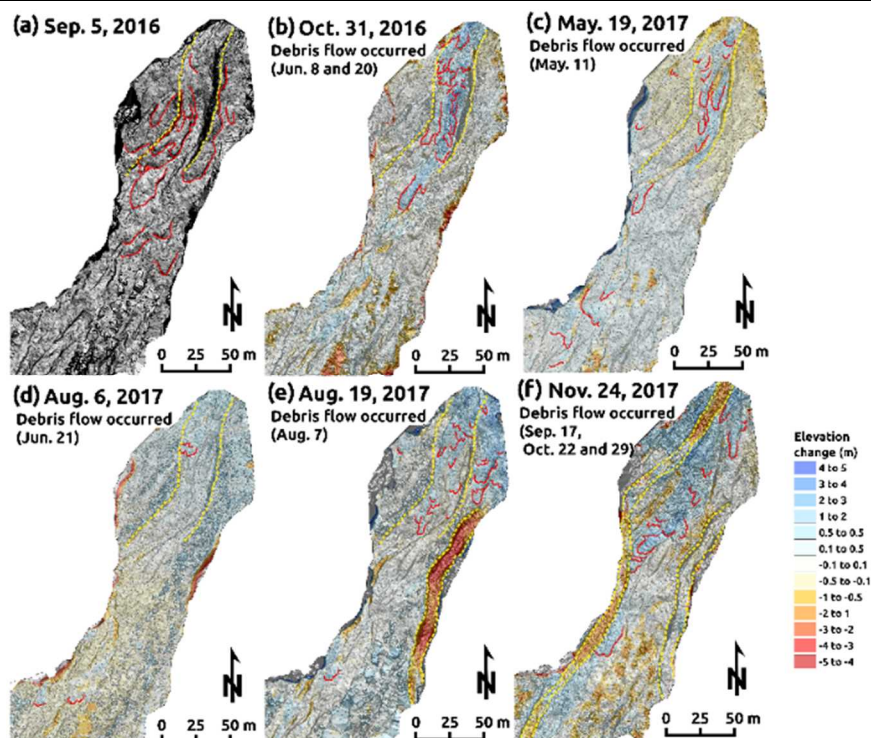


図-3 土石流サージの停止位置（赤線で描画）

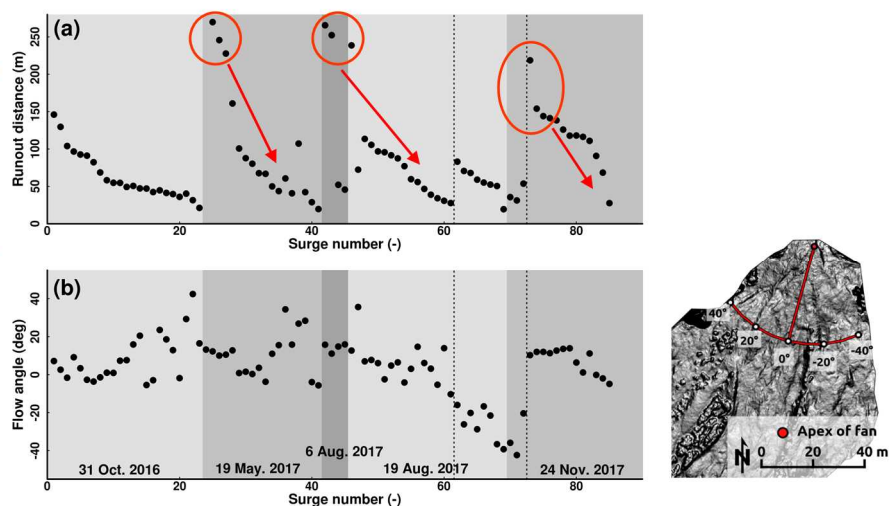


図-4 土石流扇状地上での土石流サージの(a)到達距離と(b)流下方向
(b)の流下方向は，横図にあるように扇頂（図-1のP20直下）を起点として定義される．

2. 土石流数値計算の適用性の検討

昨年度の成果として，二粒径の土石流水路実験から，運動学的条件に応じて，小粒子の液相化の割合を評価するモデルを開発した．しかし，この液相化モデルは単純化のため二粒径を仮定しており，また，実験スケールで検証したのみで，実際の土石流への適用性は不明である．そこで本年度は，開発済みの液相化モデルを用いて，過去の土石流発生事例の再現計算を行い，現地スケールでの適用

⑥研究成果（つづき）

表-1 検討対象とした土石流発生事例

土石流発生事例	発生年	流出土砂量(m ³)	流下距離(km)	平均勾配(°)
(a) 熊本県集川	2003年	30,500	1.6	9.5
(b) 徳島県大用地	2004年	622,000	1.0	10.2
(c) 宮崎県片井野川	2005年	272,000	3.6	3.8
(d) 宮崎県七瀬谷	2005年	183,000	0.9	5.0
(e) 鹿児島県船石川	2007年	19,000	0.6	8.6
(f) 鹿児島県深港川	2015年	91,000	1.1	6.8

性を調べた。

本研究で対象としたのは崩壊が発生起因であるとされる6つの土石流事例である(表-1)。崩壊土砂量は最大の事例bと最小の事例eで30倍以上の差があり、土石流の規模の幅が広い。本研究では、土石流発生前後の河床変動高を現地のデータと数値シミュレーションで比較した。河床変動高の残差の二乗平方根(以下RMS: Root Mean Square)を誤差の評価基準とした。液相化モデルにおける寄与率 α (0~1の値を取り、1が全ての微細土砂が液相化したことを表す)によって示される液相化の割合を、様々な境界粒径Dcを用いて計算し、残差のRMSの変化を事例ごとに比較して最適なDcを求めた。また、液相化モデルの適用結果(α が変動: 変動液相化モデル)と、 α を常に1とした場合(: 固定液相化モデル)の結果を合わせて検討した。

数値シミュレーションにおける各事例のDcと、数値計算と現地データの河床変動高の残差のRMSの関係をモデルごとに比較した結果を図-5に示す。変動液相化モデルでは、最も誤差の小さい事例a, fでは境界粒径を変化させても誤差の変化が少なく、どの境界粒径を選択しても再現性が高かった。境界粒径を変えた計算での河床変動高から、境界粒径を変えても堆積形状が大きく変化しなかったことが分かる。一方、事例c, d, eでは、再現性の高いDcの範囲は存在しているが、その範囲が狭く、範囲から外れた境界粒径を選択すると再現性が大きく下がってしまった。また、事例bではどのDcを選択しても残差のRMSが大きく再現性は低かった。

固定液相化モデルでは、変動液相化モデルで再現性が低かった事例bをよく再現できていた。また、事例cでも変動液相化モデルより固定液相化モデルの方が再現性は高かった。数値シミュレーションにおけるDcと各モデルでの残差のRMSの関係を事例ごと確認したところ、どの事例でもDcを小さく選択すると変動液相化モデルと固定液相化モデルの結果がほとんど変わらなかった。Dcを大きくしていくと2つのモデルでずれが生じるDcが存在した。各モデルでの最適なDcにおける残差のRMSを事例ごとに比較すると、事例e, fは変動液相化モデルの再現性が高く、事例b, cは固定液相化モデルの再現性が高かった。a, dの事例では液相化モデルによる違いはあまり見られなかった。流況に応じて液相化を評価したモデルで再現性が高い土石流と、常に最大の液相化が起きているとするモデルでの再現性が高い土石流があることが示された。

以上より、本研究で使用した液相化モデルは現地スケールでもある程度の適用性が確認できた。また、2種類の液相化モデルでの適用性を比較することで、今まで土石流として扱われていた事例を土石流と土塊に分類できる可能性も示唆された。

3. 土石流の堆積過程に粒径が及ぼす影響の検討

土石流の数値計算には、構成則とは別に濃度則が必要であるが、現在では一般的に侵食速度式を導入するケースが多い。侵食速度式にはいくつかの考え方が提案されているが、粒径の影響は十分に考慮されていない。前節で考慮した微細土砂の液相化は、必然的に土石流の代表粒径の変化を意味し、構成則では粒径の影響が考慮されていることから、土石流の侵食・堆積プロセ

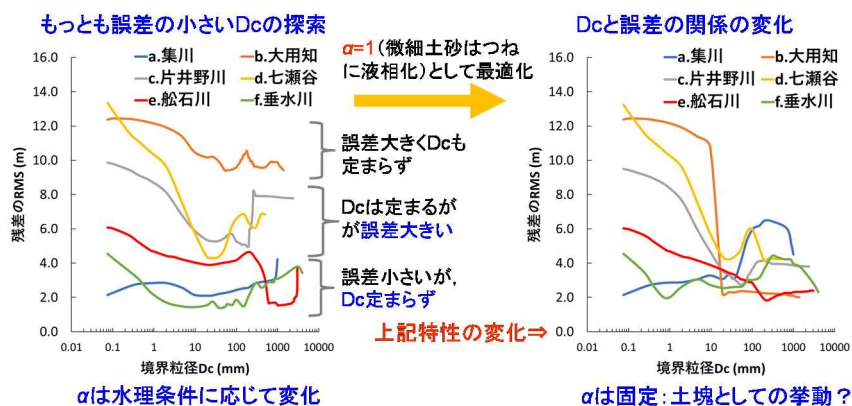


図-5 境界粒径 Dc とモデルの誤差(RMS)の関係

⑥研究成果（つづき）

表-2 実験条件

ス，すなわち侵食速度式に粒径の影響があるかどうかを検討することは重要な視点となる．そこで本研究では，粒径が侵食速度式へ与える影響に関して実験と数値計算の比較検討を行い，土石流の堆積に関する粒径の依存性について明らかにすることを目的とする．

実験には幅10 cmの2つの直線水路（上流側：長さ10 m，下流側：長さ3 m）を接続した水路を使用した．水路は側面がガラス張りとなっており，上流側の勾配は15°，下流側は2°に固定して実験を行った．上流側水路の下端から6.77 mの位置においてホッパーを用いた単位時間当たり一定量の給砂を行い，水路の上流端から給水することで一定濃度の土石流を発生させた．勾配変化点付近での堆積形状の時間変化をビデオカメラによる撮影画像の解析によって求めた．実験は表-2に示したような6ケースの条件を設けて各ケース2～3回ずつ実施した．

本研究では，江頭ら（1998），高橋・匡（1986），鈴木ら（2009）の提案する侵食速度式について検討した．これらの式は与えられた条件下で侵食も堆積も起こらない局所的な平衡状態を想定し，現在の状態と平衡状態の差が小さくなるように侵食や堆積が生じるという点で，侵食・堆積に関する基本的な考え方が共通している．

各ケースにおける時間・空間ごとの堆積深の変化を，実験と計算とで比較を行った．侵食速度式に対する粒径の影響を見るために，高橋式，鈴木式において，計算結果が実験をもっとも良好に再現するように，両者の差のRMSが最小となる時の堆積速度係数と緩和時間をそれぞれ求めた．江頭式に関しては全ケースでそれぞれのRMSを求めている．それらをケース間で比較することにより侵食速度式に対する粒径の依存性を調べた．結果の例を図-6に示す．高橋式で用いられる堆積速度係数については粒径と正の相関が，鈴木式で用いられる緩和時間に関しては負の相関が見られたことから，堆積速度は粒径に依存し，粒径の増大に伴い堆積速度も増大することが明らかとなった．

4. 総括

土石流の発生・流下・停止に関して，現地調査での課題の抽出と，水路実験・数値計算によるその解明と実装化という本研究のフレームワークは良く機能した（図-7）．技術開発の成果と今後の研究展望を，土石流研究全体の枠組みの中で効果的に提示できたと考えている．

ケース	粒径(cm)	流量(L/s)	時間(s)	濃度(L/L)
1	0.67	1	30	0.14
2	0.67	3	10	0.14
3	0.28	1	30	0.21
4	0.28	3	10	0.15
5	0.14	1	30	0.14
6	0.14	3	10	0.14

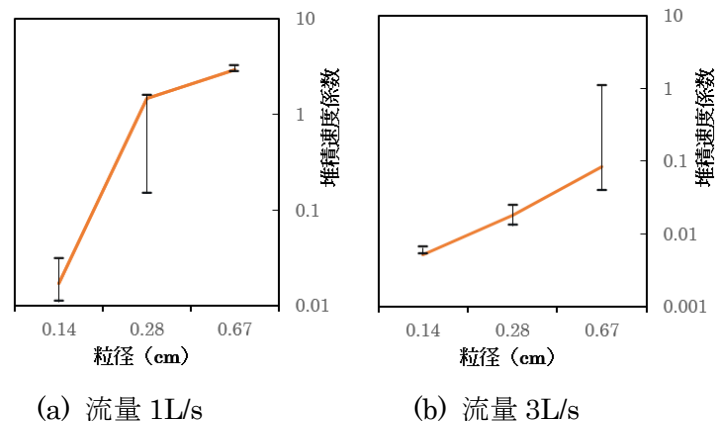


図-6 粒径と堆積速度係数の関係

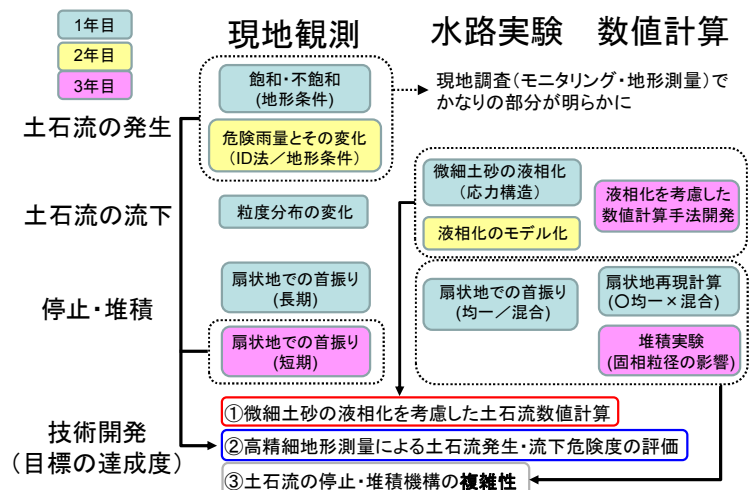


図-7 研究全体の構成・相互関係と達成度

⑦研究成果の発表状況

(本研究の成果について、予定しているものも積極的に記入して下さい。(以下記入例))

【論文】

Sakai Y, Hotta N, Kaneko T, Iwata T., Effects of grain-size composition on flow resistance of debris flows: behavior of fine sediment. Journal of Hydraulic Engineering 145(5), 2019. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001586

【国際会議】

Sakai Y, Hotta N, Kaneko K, Iwata T. "Effects of grain size composition on the representative diameter of debris flows: Laboratory experiments with bidispersive granular materials". EGU General Assembly 2018, Vienna, Austria, April 2018 (査読有り)

【国内学会】

経隆悠・堀田紀文・今泉文寿・早川裕弐・増井健志, 流域源頭部の土石流発生降雨パターンが示す土砂流出の長期的なサイクル ―静岡県安倍川大谷崩での観測事例―, 砂防学会研究発表会(鳥取), 2018年5月

酒井佑一・堀田紀文, 土石流における土砂の粒径の役割, 砂防学会研究発表会(鳥取), 2018年5月
戸部潤一郎・堀田紀文・酒井佑一・西口幸希・内田太郎, 微細土砂の液相化を考慮した現地再現計算における土石流の挙動, 砂防学会研究発表会(岩手), 2018年5月, 発表予定.

田澤直也・堀田紀文・酒井佑一, 土石流の堆積過程に粒径が及ぼす影響, 砂防学会研究発表会(岩手), 2018年5月, 発表予定.

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。)

(公社)砂防学会の助成を受けて、「土石流中の微細土砂の挙動に関する研究会」を開催した。一般公開／参加のワークショップは3月14日に開催し、砂防学会員を中心に22名の参加があった。ワークショップに先立って、水路実験講習会も開催し、本研究で実施した水路実験のデモと、実験法についての説明等を行った。

⑨表彰、受領歴

(単なる成果発表は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。)

該当なし

⑩研究の今後の課題・展望等

(研究目的の達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究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、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

土石流の発生・流下に関して、UAV等を用いた高頻度・高精細な地形データを基に、危険度の事前評価の可能性を示せた点は重要な結果だと言える。土石流の誘因となる降雨条件に加え、「場の条件」を考慮することで土砂災害対策の精度向上に繋がることを意味し、昨今の急速な技術革新に対応した成果である。また、地形条件に加え、もう一つの場の条件である、土石流材料特性に関して、微細土砂の液相化の観点から、そのモデル化と数値計算への実装が行えた点にも大きな意義がある。現在、土砂洪水流出予測において微細土砂の液相化の評価が求められているが、本研究の成果は、水路実験におけるメカニズムの検証を経ている点で、一定の信頼性が担保されたと言える。土石流において粒度分布が重要であるという視点は、本研究を通じて一貫しているが、最後に、侵食・堆積プロセスの粒径依存性が示せた点は注目に値する。新たに得られた知見であり、そのメカニズムも含めて、今後の土石流研究の方向性を示せたと言えよう。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

(本研究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。)

今後、自動航行でのUAV測量や、地形の差分データの自動解析などが現実的になれば、安全・迅速・簡易に危険を察知することは技術的に可能になり、本研究の成果は具体的に土砂災害対策の質の向上に寄与すると考えられる。また、微細土砂の液相化について得られた結果も、数値計算への実装という当初の目的が達成されたことで、実用化の目処が立ったと言える。安倍川総合土砂管理計画においても、「粒径毎の土砂量評価」や、「山腹崩壊等のインパクトなどとの関係」が生産・供給土砂量に関する未解明事項として挙げられている。また、土砂・洪水氾濫対策の観点からも、微細土砂の取り扱いが重要であることが指摘されている(国総研資料1048)。国土技術政策総合研究所、および土木研究所と、本研究成果に基づく今後の共同研究についての議論を開始したところである。