様　式　C－19、F－19－1、Z－19　(共通)

科研費
KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　6 年　5 月 29 日現在

機関番号：１４３０１

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：２０K０４７０６

研究課題名（和文）土石流規模の予測に向けた山体の三次元的な集水領域の指標化と流量ピーク推定法の提案

研究課題名（英文）Proposing index method of three dimensional water catchment area and peak discharge estimating method for debris flow scale prediction

研究代表者

中谷　加奈（Nakatani, Kana）

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：８０６１３８０１

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、土石流規模の予測に向けて山体内部の水貯留や流域を越える水移動を考慮した新たな集水領域の指標化を提案するとともに、土石流規模に影響する要因を明らかにすることを目指した。土石流事例について調査や実験を実施し、地形・地質的な差に着目してデータ整理、GIS分析、土石流シミュレーションを実施した。土石流規模を表す地形指標は、従来の二次元的な流域に加えて、流域を三次元化した山体の体積、隣接渓流を考慮した広範囲の山体を含む集水領域を考慮して、山体の体積が土石流規模を表現し得ることを示した。土石流ピーク流量を表現する解析方法を提案して、土石流規模や挙動を表現する各種パラメータの設定方法を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
土石流災害を軽減するためには、規模予測を精確に行うことが求められる。従来、土石流規模を示す指標に二次元的な流域面積が用いられる。しかし、発生した土石流の土砂量や、土石流として挙動するのに必要な降雨由来の水の量が、流域面積では十分表現されなかった。広島県内の土石流事例を対象として、調査やGIS分析、シミュレーションにより検討して、流域を三次元化した山体の体積を用いることで土砂量をベースとした土石流規模が表現されること、隣接流域を含む広い山体で水の量を検討すると、必要な水の量が表現されることを明らかにした。更に土石流の流量ピークを推定する解析手法を提案して、防災に貢献する知見を得た。

研究成果の概要（英文）：This study proposes a new water catchment area index that takes into account water storage within a mountain body and water movement across basins to predict the scale of debris flows, and aims to clarify the factors that affect the scale of debris flows. We conducted surveys and experiments, focused on topographical and geological differences, conducted data organization, GIS analysis, and applied simulations on debris flows. In addition to the two-dimensional basin, the topographical index that represents the scale of debris flows well is the volume of a mountain body takes into account the three-dimensional basin. And we considered the water catchment area includes a wide range of mountain bodies that takes into account adjacent mountain streams shown to be able to express the water volume needed to consist the real debris flows. We proposed an analysis method to express the peak discharge of debris flows, and investigated various parameters setting to express debris flow scale.

研究分野：砂防学

キーワード：土石流　集水領域　規模推定　GIS　数値シミュレーション

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１（共通）

１．研究開始当初の背景

土石流は土砂災害の中でも被害が甚大になることから、被害軽減のために適切に土石流規模を予測することが重要である。土石流は土砂と水で構成される流れで、発生時には水の量に対応した土砂量が流出する。実務上では土砂量から規模が推定されることが多く[1)]、土石流の水の起源や量に着目した研究は少ない。また、従来から集水領域には二次元的な地形として流域が用いられる。しかし、土石流発生時には流域への降雨量よりも多い水流出が発生していると推測される事例も見られ、隣接渓流からの移動や山体内部からの水の寄与の影響が考えられる。

２．研究の目的

本研究は、土石流の水の量に着目して従来とは異なる集水領域を検討する 2)とともに、土石流の規模に影響する要因を明らかにすることを目的とした。

３．研究の方法

2014 年 8 月に土石流が発生した広島市安佐南区の 18 渓流[2)]を対象とした（図 1 左）。各渓流の流出土砂量[3)]を基に、災害前の解像度 1m の DEM（Digital Elevation Model）用いて HyperKANAKO で[4)]土石流シミュレーションを実施した。このシステムは高橋モデル[5)]を採用しており、設定土砂と供給した水に対して、渓流の勾配に応じた土石流の侵食・堆積が表現される。

計算では急勾配の谷部を一次元領域（計算点間隔 5m、川幅 10m）、谷出口から下流の住宅地を二次元領域（1m メッシュ）とした。また、災害で実際に移動した土砂量を、一次元領域に均一厚で設定した。上流端から供給する水の総量を（流域面積×雨量×流出率）により算出した。流域面積は GIS で求めた各対象の数値を（表 1 左）、雨量は高瀬観測所で雨の降り始めから降り終わりの 6 時間で 189 mm、流出率は山地を想定して 0.7 とした。ハイドログラフは台形形状で、継続時間は 350 秒とした。計算結果から、渓流からの土砂の流出状況を実災害と比較した。これは流域への降雨による水の量で、災害と同程度の土砂流出が発生するかを検証するためである。

土石流が発生する降雨イベントでは、山体の内部に貯留された水の寄与や、隣接渓流からの水移動が発生することも考えられる。従来の流域だけでなく、三次元的な山体の体積や、隣接渓流も含む大きな流域、谷出口よりも標高が高いエリア全体の山体、などが土石流規模に影響することを着想した。対象渓流について、流域の末端よりも標高が高い部分を QGIS で抽出して、流域に対する体積 Volume を求めた（図 1 右）。土砂量との対応を検証する際、地形指標である流域面積ならびに流域体積はそれぞれが土砂量に影響する。このため、流出土砂量を地形指標で除した値を単位面積（体積）あたりの土砂量として検討した（表 1 左）。

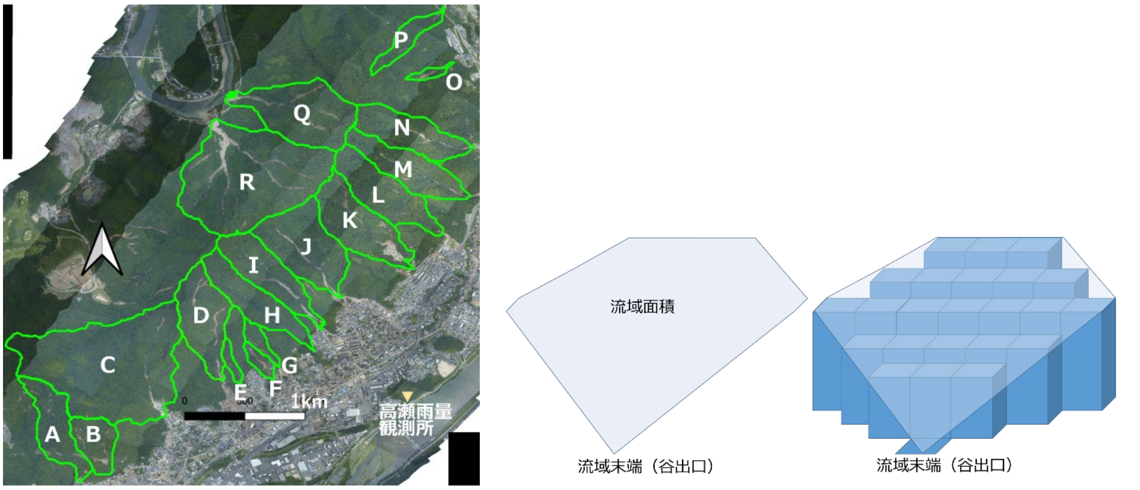

図 1 対象とした広島市安佐南区の 18 渓流の流域（左図：緑線が流域界，背景は災害後オルソ）と流域の体積抽出のイメージ図（右図）

表 1 対象渓流

	渓流の諸元						シミュレーションの設定条件	
渓流名	流域面積 Area (km^2)	流域体積 Volume (km^3)	流域の代表勾配 θ(deg)	Area *tanθ (km^2)	流出土砂量 Sediment (m^3)	地質 G:花崗岩 S:堆積岩	供給した水の量 / Sediment	1D 領域流路長 (m)
A	0.171	0.022	30.9	0.102	13,000	G	1.7	940
B	0.109	0.009	30.8	0.065	7,200	G	2.0	760
C	0.766	0.120	29.8	0.438	11,200	G	9.0	950

D	0.222	0.047	33.6	0.148	33,000	G+S	0.9	1370
E	0.023	0.002	31.5	0.014	3,100	G	1.0	280
F	0.031	0.002	31.4	0.019	2,000	G	2.1	190
G	0.036	0.004	36.6	0.027	7,900	G	0.6	300
H	0.190	0.047	37.5	0.146	4,900	G+S	5.1	495
I	0.203	0.053	37.7	0.157	22,200	G+S	1.2	900
J	0.285	0.064	34.9	0.199	10,400	G+S	3.6	735
K	0.249	0.050	31.3	0.152	8,900	G+S	3.7	750
L	0.221	0.067	32.4	0.140	12,100	G+S	2.4	1105
M	0.199	0.046	33.5	0.132	19,100	G+S	1.4	1130
N	0.199	0.053	34.5	0.137	16,600	G+S	1.6	620
O	0.018	0.002	34.8	0.013	2,400	G+S	1.0	260
P	0.071	0.009	31.7	0.044	3,400	G+S	2.8	455
Q	0.313	0.102	35.8	0.225	33,900	S	1.2	1505
R	0.669	0.194	36.5	0.496	62,300	S	1.4	3115

４．研究成果

実際の流出土砂量と計算結果と比較した。土石流規模に影響する要因として、地質、地層、流域の形状についても検討した。一次元領域での計算結果の残存土砂量を供給土砂量で除した土砂残存率(%)として各渓流で求めた（図 2、表 1 右）。堆積範囲も実災害より狭いものが多かった。流域面積を集水領域として降雨をもとに算出した水の量では土砂流出しない渓流が多く、実際の土石流規模で流出するには水が不足すること示された。

図 2 に示した地質との対応から、土砂が多く残存して水が不足する渓流は、花崗岩で構成されている割合が多く、地質が土石流を構成する水の量や起源に影響することが推測される。また、流域面積が小さいもの（0.1 km^2 以下）や、流域よりも標高の高い上流側に別の流域が存在する渓流で、土砂残存率が多いことも示された。流出土砂量の多い渓流は、土砂に対する水の供給量が少なく、実際の流出土砂量が少ない渓流では、土砂に対する水の量が多い。流出土砂量が少ない渓流から、流出土砂量の多い渓流へと水が地下経路を経て移動すること等が推測できる。

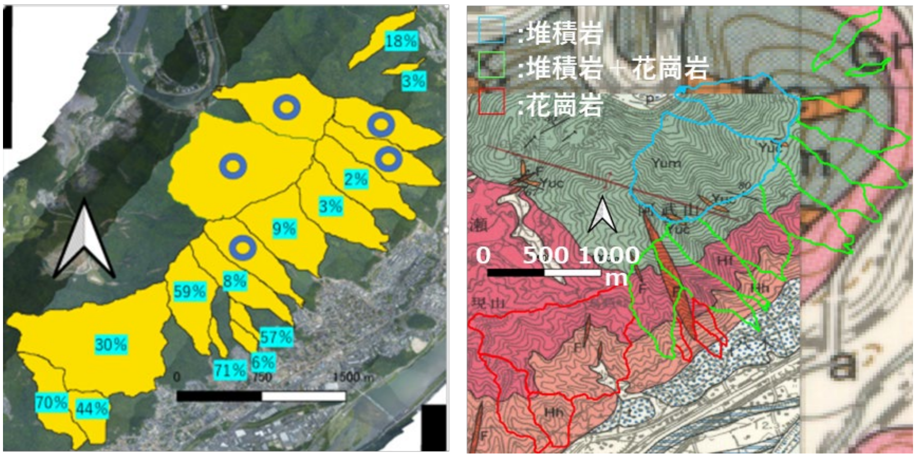

図 2 計算終了時の 1D 領域の土砂残存率（左、○は全流出）と地質の分布（右、産総研の 5 万分の 1 ならびに 20 万分の 1 地質図 [6]）に加筆）

図 3 で結果について土砂残存率が 30%を超えたケースと 30%以下のケースを区別してプロットした。Area を指標とした場合は、小さいときに Sediment/Area が大きく、Area が大きくなると小さくなる傾向だが明瞭な相関は見られない。Area*tanθを指標とした場合は、小さいときに Sediment/ Area*tanθが大きく、Area*tanθが大きくなると小さくなる傾向だが、Area と同様に明瞭な相関は見られないが、Area*tanθは Area よりも規模や残存率の差を示す指標と考えらえる。Volume を指標とした場合，他の二つと比べて小さいときに Sediment/ Volume が非常に大きく、Volume が大きくなると緩やかに小さくなる減少傾向を明瞭に示す。他の 2 つの指標と比較して Volume や Sediment/ Volume を指標とした場合は、残存率 30%を境界としたプロットの区別も明瞭であり、体積が小さく体積当たりの土砂量が大きい流域で、面積への降雨以上の水供給が発生したと推測できる。地形指標の中で Volume が最も土石流規模との対応がよく、流域で発生し得る土石流の土砂量や水の量を表現したといえる。

図 2 で示した土砂残存率が 10%を超えた 7 渓流について、先述の方法で算出した水の量を基準値(1 倍)として、他の計算条件は全て同じとして整数倍毎に増やした水の量を供給した際に、残存率が 10%未満になる最小値を求めた結果を図 4 に示す。例えば、最南西の渓流の「×8」は、水の量を基準の 8 倍で供給した際には土砂残存率が 10%未満となったが、7 倍の供給までは残存率が 10%以上だったことを表す。

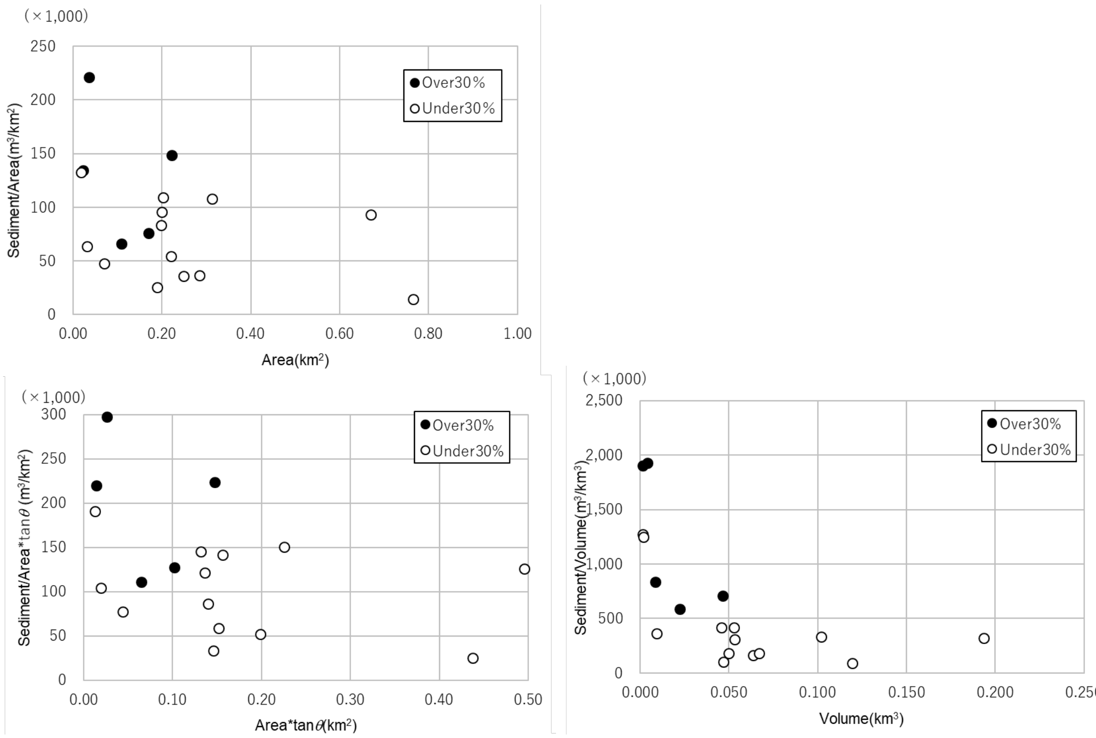

図 3 流域の面積と土砂量（左上段）、Area*tanθと土砂量（左下段）、体積と土砂量（右下段）（Over30%は土砂残存率 30%を越える、Under30%は 30%以下の渓流）

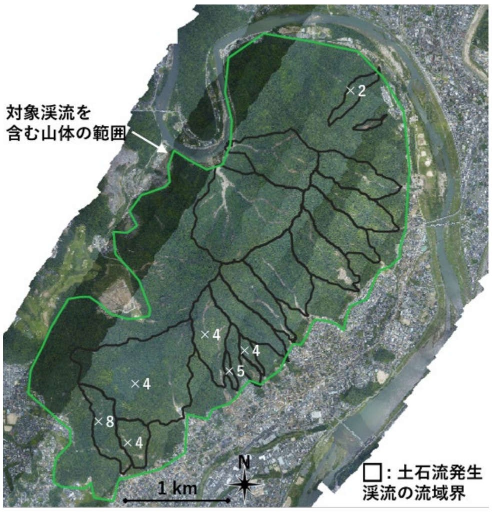

図 4 土砂残存率が 10%未満になる水の供給量（先述の方法を 1 倍）と 18 渓流全体を含む阿武山山体の抽出範囲（背景は災害後オルソ）

土砂残存率が 10%未満となる水の供給量が、実災害と同規模の土石流を発生させるために必要な水の量だと仮定して、全 18 渓流についての水の総量を合計すると、1,160,000 m^3 で、この量を降雨から得るために必要な面積は 8.77 km^2 となった。一方で、流域面積と降雨量を基に先述した方法で計算される水の量の合計は 526,000 m^3 で、水の量が必要と考えられる量の半分以下の 0.45 倍であり不足傾向を示した。降雨から水の量を算出する際に流出率 0.7 を用いたことを鑑みて、流出率 1.0 を想定した場合でも、算出される水の量は災害規模の土石流が発生するのに必要な水の量の 0.64 倍で、流域面積と降雨からの水供給では不足傾向だといえる。

流域への降雨以外の水の供給過程には、隣接する渓流からの移動や、山体内部に貯留された水の供給などが挙げられる。後者は、流域の三次元的な体積や地下水帯の分布や地下水挙動の把握により検討出来るが、ここでは前者の隣接渓流からの降雨による水の移動を想定した。阿武山について QGIS を用いて全 18 渓流を含むよう山体の範囲を抽出した結果を図 4 に示す。この範囲の面積の合計値は 8.48 km^2 で、必要な水の量から計算される面積と比較すると 0.97 倍である。個々の渓流の流域面積だけでなく、全渓流を含む広範囲の山体への降雨からの水の供給量として考えると、必要な水の量が概ね対応することが示された。

更に、2018 年 7 月豪雨 [7]により広島市安芸区矢野東で発生した土石流 14 事例を同様の手法で検討した（図 5）。対象地は花崗岩が分布し地質による差はない。流出土砂量を 1D 領域に移動可能土砂として、流域面積に対して降雨量（2018/7/6 災害発生時刻までの連続 12 時間雨量 148 mm）と流出率 0.7 から算出された水を供給ハイドログラフとして土石流シミュレーションを実施すると、土砂が 10%以上残存する渓流が 2014 年災害より多かった。残存率が 10%未満となる水の量を算出（426,000 m^3）して、必要な面積を求めた。流域面積と降雨から計算される水は 132,000 m^3 で必要量の 0.31 倍で 2014 年より不足傾向だった。図 5 に示す渓流全体を囲む山体の範囲を抽出した結果から計算される水の総量は 456,000 m^3 で必要な水の 1.07 倍、2014 年と同様に全渓流を含む広範囲の山体を考慮する方が個々の流域面積より水の量が対応することが示された。

図 5 矢野東の土砂残存率 10%未満になる水の供給量（背景は災害後オルソ）と渓流全体を含む山体の抽出範囲

本研究では、2014 年や 2018 年に広島で土石流が発生した渓流を対象に、流域面積への降雨による水の供給量で災害規模の土石流が発生するかシミュレーションで検討した。結果から水が不足する渓流が多く、不足傾向なのは面積 0.1 km^2 以下や花崗岩に多く、水が十分な場と不足する場が隣接したり山体を挟んで位置することが示された。特に小さな流域で、面積は土石流発生に必要な土砂や水の量の十分表さないと考え、新たに隣接渓流や山体内部からの水移動を考慮した三次元的な流域の体積や山体全体を考慮した地形指標を検討した。流域の体積を地形指標とした場合、土石流規模の対応が最もよく、シミュレーションで土砂残存率が高い渓流と低い渓流の差も他指標より明らかに示された。

森林水文分野の研究では、花崗岩は風化が進みやすく基岩への降雨浸透が多いこと [30]や、大傾斜の流域では地下水賦存量が多いこと [31]、流域界を越えた地下水移動が実際に見られること [32]等も、推察の根拠に挙げられる。また、近隣で発生した全土石流渓流を含む広範囲の山体を考慮する方が、個々の流域面積では表現されなかった降雨由来の必要な水の量と対応することが示され、流域を超えた隣接渓流からの水移動の可能性も示された。更に、土石流のピーク流量を表現する解析方法を提案して、土石流規模や挙動を表現する各種パラメータの設定方法を検討することで、防災に貢献する知見を得た。今後は、他の土石流事例で検証するとともに、土石流前後の流量や水位観測などと検証しながら、検討を進める。

謝辞　本研究は、JSPS 科研費 20K04706 の助成を受けたものです。災害前後の LP データや関係資料を 2014 年災害では国土交通省中国地方整備局太田川河川事務所に、2018 年災害では広島県土木建築局よりご提供頂きました。京都大学大学院農学研究科の辻淳基氏には，データ整理や解析に協力頂いた。広島大学大学院先進理工系科学研究科の長谷川祐治先生には、研究の遂行にあたって終始、協力や助言を頂いた。ここに記して感謝致します。

参考文献

1) 国土交通省砂防部：砂防基本計画策定指針（土石流・流木対策編）解説，2016
2) 中谷加奈・小杉恵・里深好文・水山高久：家屋や道路が土石流の氾濫・堆積に及ぼす影響-2014 年 8 月に発生した広島土砂災害を対象として-，砂防学会誌, Vol.69, No.5, pp.3 -10, 2017
3) 吉野弘祐：広島災害の誘因の特徴と土砂移動の状況，公益社団法人砂防学会 2014 年広島土砂災害に関する緊急調査報告会講演概要集, JSECE Publication No.74, pp.31-36, 2014
4) 堀内成郎・岩浪英二・中谷加奈・里深好文・水山高久：LP データを活用した土石流シミュレーションシステム「Hyper KANAKO」の開発，砂防学会誌，Vol. 64, No. 6, pp. 25-31, 2012
5) 高橋保・中川一：豪雨時に発生する石礫型土石流の予測，砂防学会誌，Vol. 44, No. 3, pp. 12-19, 1991
6) 産総研地質調査総合センターウェブサイト,地質図 Navi, https ://gbank.gsj.jp/geonavi/，参照 2022-3-29
7) 海堀正博・長谷川祐治・山下祐一ら，他 16 名：平成 30 年 7 月豪雨により広島県で発生した土砂災害，砂防学会誌，Vol. 71, No.4, pp.49-60, 2018.
8) Kosugi, K., Katsura, S., Katsuyama, M. et. al: Water flow processes in weathered granitic bedrock and their effects on runoff generation in a small headwater catchment, Water Resources. Res., 42, W02414, 2006
9) Kosugi, K., Fujimoto, M., Katsura, S., et. al: Localized bedrock aquifer distribution explains discharge from a headwater catchment, Water Resources. Res., 47, W07530, 2011
10) Masaoka, N., Kosugi, K., Fujimoto, M.: Bedrock groundwater catchment area unveils rainfall-runoff processes in headwater basins, Water Resources. Res., 57, e2021WR029888, 2021

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計1件（うち査読付論文　1件／うち国際共著　0件／うちオープンアクセス　1件）

１．著者名 中谷加奈，里深好文	４．巻 41
２．論文標題 土石流の規模推定に向けた山地渓流の集水領域に関する研究	５．発行年 2022年
３．雑誌名 自然災害科学	６．最初と最後の頁 141-150
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

〔学会発表〕　計4件（うち招待講演　1件／うち国際学会　0件）

１．発表者名 中谷加奈、辻淳基、小杉賢一朗
２．発表標題 土石流の規模推定に向けた集水領域の指標化に関する研究
３．学会等名 令和４年度（公社）砂防学会研究発表会
４．発表年 2022年

１．発表者名 辻淳基、中谷加奈、小杉賢一朗、長谷川祐治、里深好文
２．発表標題 土石流規模予測に向けた集水領域の指標化に関する研究
３．学会等名 令和３年度(公社)砂防学会オンライン研究発表会
４．発表年 2021年

１．発表者名 中谷加奈、青柳昌憲、小杉賢一朗、里深好文
２．発表標題 マルチシナリオによる住宅地内の土石流リスクの評価方法の検討
３．学会等名 令和５年度（公社）砂防学会研究発表会
４．発表年 2023年

１．発表者名 中谷加奈
２．発表標題 山間部からの土砂流出シミュレーションシステムの開発と防災への適用
３．学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会（招待講演）
４．発表年 2023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

７．科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕　計0件

８．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関