

**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         |    | 今泉文寿<br>(いまいずみふみとし)   | 静岡大学<br>学術院農学領域 | 教授    |       |
| ②技術研究<br>開発テーマ | 名称 | 複合型リスクを有する土石流渓流での土砂流出の実態解明と対策の検討  |                 |       |       |
| 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。       |    | 144万円   | 148万円           | 195万円 | 489万円 |
| 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)  |                 |       |       |
| 逢坂興宏           |    | 静岡県農林環境専門職大学・教授   |                 |       |       |
| 柏原佳明           |    | アジア航測株式会社・副部長   |                 |       |       |
| 高山翔揮           |    | 静岡大学学術院農学領域・助教  |                 |       |       |
| ⑤研究の目的・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。)  |                 |       |       |
| 【研究目的】         |    | 土石流、スラッシュ雪崩など、複数種類の土砂流出現象が頻発している富士山大沢川流域において、既往の資料の整理、航空レーザー測量成果を用いた地形解析、現地観測により、それぞれの現象の流下特性を把握する。そのうえで土砂流出発生時の降水量、地盤の凍結の有無、積雪の状況、不安定土砂の堆積状況が、土砂流出の流下特性へ及ぼす影響を調べる。最後に、複合的なリスクを有する渓流におけるソフト・ハード対策の在り方についての検討を行う。  |                 |       |       |
| 【研究目標】         |    | 大沢川の上流域に位置し、土砂流出現象の発生場でもある大沢崩れにおいて、航空レーザー測量成果の解析や現地調査によって不安定土砂の生産・堆積状況の把握を行う。また現地観測や観測資料の取りまとめにより、近年の気象条件や地盤凍結・積雪期間の把握をし、それをもとに過去の土砂流出イベント時の地盤の凍結の状況や積雪の状況を調べる。<br>大沢崩れから扇状地にかけて、航空レーザー測量成果を用いた地形解析を行い、土砂流出に伴う堆積・侵食の状況を整理する。この結果と、現地の観測成果を照らし合わせることで、土砂流出イベントの流下特性(土砂流出タイプ、土砂濃度、流出土砂量等)をとりまとめ、さらには地盤の凍結や積雪が土砂流出のタイプ、流下特性へ及ぼす要因の特定を行う。<br>以上の研究成果をもとに、土石流対策が他の現象に対して発揮する効果についての評価を試みる。特に本研究では、土砂流出のタイプが警戒避難のタイミングや範囲、砂防堰堤の有する土砂移動抑制効果にどのような影響を与えるのかに着目した検討を行う。 |                 |       |       |

## ⑥研究成果

本研究では土石流、スラッシュ雪崩などの複数の土砂流出現象が頻繁に発生する富士山大沢川流域を対象に現地観測、過去の観測資料の整理、地形解析を行った(図1)。大沢川の上流域には最大幅約500m、最大深さ約150m、面積約1km<sup>2</sup>の大沢崩れがあり、山腹からの活発な土砂の供給により、崩れの内部には多量の堆積物が貯留されている。土石流、スラッシュ雪崩などの土砂流出イベントはここを起点とする。下流域には大沢扇状地があり、床固工群、遊砂地の効果もあり、ここで多くの土砂が堆積をする。

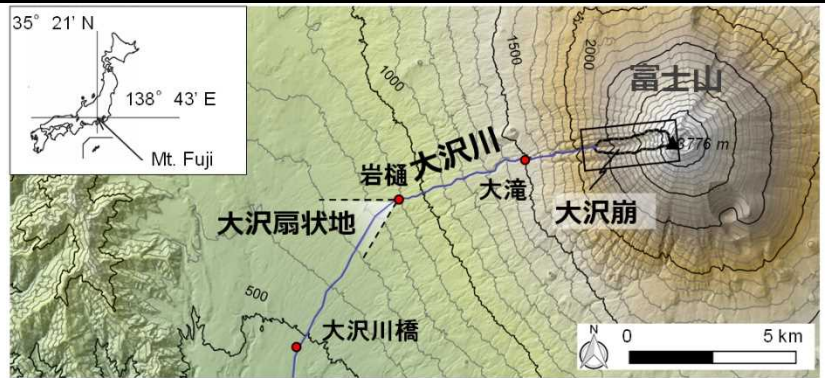


図1 研究対象地の地形図

| 1月 | 2月 | 3月 | 4月  | 5月 | 6月 | 7月  | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 |
|----|----|----|-----|----|----|-----|----|----|-----|-----|-----|
| 凍結 |    |    | 非凍結 |    |    | 非凍結 |    |    | 凍結  |     |     |
| 積雪 |    |    | 非積雪 |    |    | 非積雪 |    |    | 積雪  |     |     |
| ①  |    |    | ②   |    |    | ③   |    |    | ②   |     |     |

- ① スラッシュ雪崩(一部、流下中に土石流化)
- ② 凍結期土石流・土砂流
- ③ 非凍結期土石流・土砂流

図2 富士山大沢川における土砂流出タイプの季節変化の例

### 1. 発生場の気象条件および不安定土砂の堆積状況の把握

#### 1.1 発生場の気象条件と地盤凍結・積雪

富士山では図2に示すように、季節により様々なタイプの土砂流出が発生する。それぞれの土砂流出の特性を明らかにするためには、流域における積雪や地盤の凍結状況の把握が不可欠である。そこで静岡県が運用しているライブカメラ「富士山ビュー」の画像を目視判読することで、大沢崩れ内の2008年以降の、積雪期間・範囲を確認した。その結果、標高2600m以上では10月後半、2600m未満では11月から継続的な積雪が確認された。また消雪は2600m以上で5月末～6月初旬、2600m未満では5月に確認された。高標高域では斜面全体にわたって積雪している期間が長い、標高2600m未満では斜面方位や斜面形の影響を受けて局所的に積雪がみられた。

地盤の凍結融解状況を把握するため、地温計による観測を行った。2800m付近から山頂までおよそ標高100mおきに11箇所において、地表と0.5m深(地点によっては0.45m)の温度を計測した(図3)。本研究課題開始前の2017年に観測を開始し、2021年まで観測を行った。その結果、地表面においては日周期の凍結融解が確認されたものの、0.5m深においては季節周期で凍土層が形成されていること、標高帯や年によって凍結期間が異なることが明らかになった。

次に標高帯別の凍土の形成状況推定する手法を確立するため、Degree-day法を大沢川流域に適用した。入力データには富士山頂の気温(欠測時にはアメダス富士の気温)を用いた。その結果、凍結、融解のタイミングともに、観測結果を概ね良好に再現することができた(図3)。この手法を用いて、2008年から2021年まで発生した土砂流出イベントについて、地盤の凍結状況を推定した。

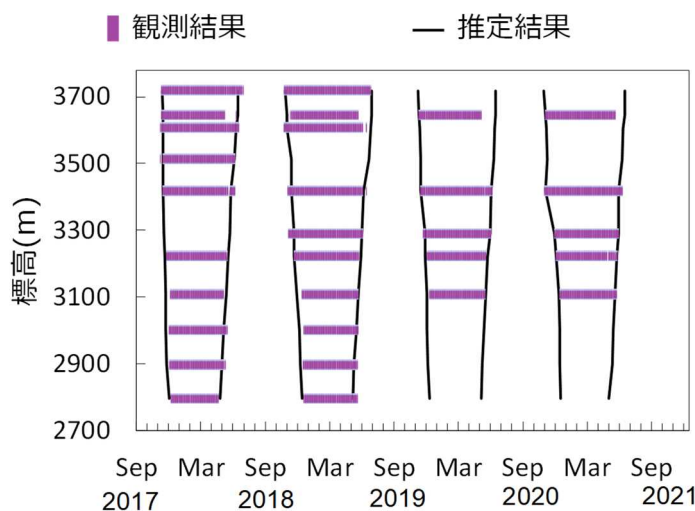


図3 0.5m深の凍結期間の観測結果と推定結果

1.2 土砂生産の把握および土石流の発生条件

#### 1.2 土砂生産の把握および土石流の発生条件

2016年10月4日から2020年10月21日にかけての11時期の測量成果(DEM)をGISソフト(QGIS)により差分処理することで、大沢崩れ内の地形変化を追跡した(図4)。解析の対象としたのはUAVによる測量が行われている大沢崩れの下部(標高2200～2600m付近)である。時期別の侵食量を算出したところ、連続雨量510mm、最大時間

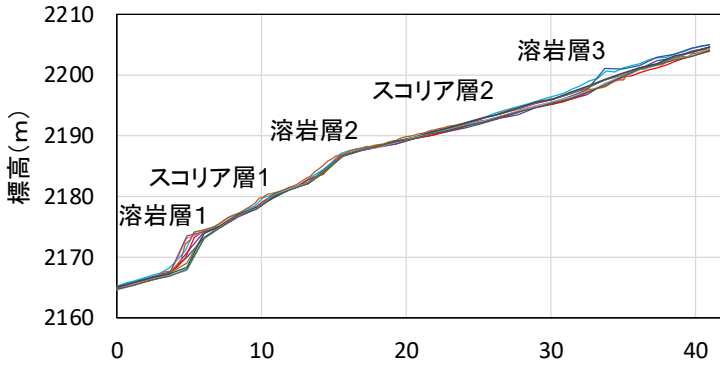
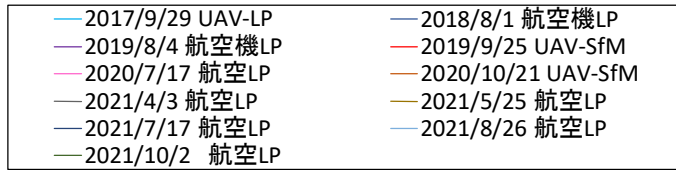


図4 航空測量により計測された斜面の地形変化

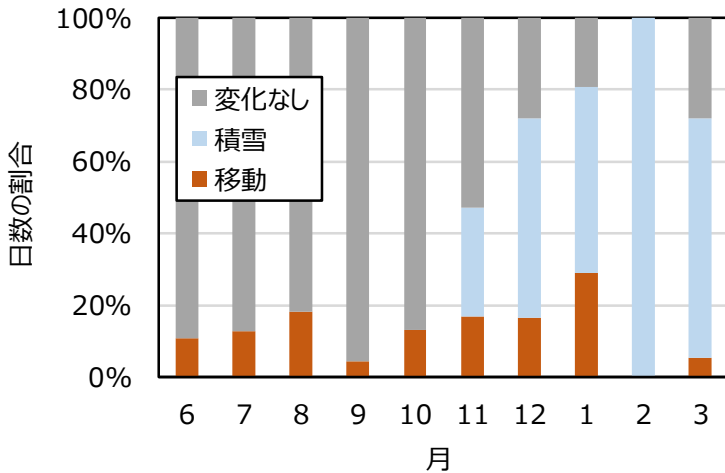


図5 月別の土砂移動日数の割合

雨量79 mm/h を記録した2021年7月17日～2021年8月26日の期間において最も侵食量が大きく、溶岩層、スコリア層ともに明確な侵食がみられた。その一方で、他の時期については、層ごとに侵食のタイミングや頻度、侵食量が異なっていた。土砂生産量を把握するためには、降雨や地盤の凍結、溶岩層の亀裂の発達度や隣接する地層の侵食状況など、様々な要因を考慮しなければならないことが明らかとなった。

次に標高2500 m付近に設置したインターバルカメラの画像を判読し、土砂移動が確認された日数の割合を月別に算出した(図5)。4月～5月は欠測が続いたため解析からはずした。その結果、最も土砂移動発生日の割合が高いのは1月であった。1月は地温が低く地盤凍結の作用があることに加え、融雪日の水分供給により地盤が湿潤な状態にあることが、土砂移動が活発化する原因となっていると考えられる。2月はほぼ雪に覆われているため、土砂移動は確認できなかった。また、降雨強度の高い雨がみられる8月も土砂移動の頻度が高い結果となった。

富士砂防事務所が行った航空レーザー測量による大沢崩れ内の溪床堆積物量の調査結果によると、堆積物量は長期的に減少傾向にある。しかしながら高い土石流の発生頻度が維持されており、特に2021年には溪床堆積物が8.6万m<sup>3</sup>と少量あったのにも関わらずガリ一底部の侵食により大規模なスラッシュ

ユ雪崩および土石流が発生し、74万m<sup>3</sup>の土砂が大沢崩れから流出した。このことは、土砂生産量や溪床堆積物量の予測に基づき土砂流出量を予測することのむつかしさを示している。その一方で、土石流の発生の有無については、地盤の凍結や溪床堆積物の量によってある程度整理することが可能である。凍結期には溪床堆積物の大小に関わらず少ない降水量で土砂流出が発生する(図6a)。このことは、地盤の凍結が土砂流出を発生させやすくすること、表層付近、つまり凍結層やそれよりも上層の水文過程が土石流の発生に影響を及ぼしていることを意味している。それに対し、非凍結期には、堆積物量が大きくなると、土石流の発生に必要な降雨条件の閾値が上昇する(図6b)。このことは、土砂の飽和に多くの水の供給量が、堆積物量によって変化することを示している。

## 2. 土砂流出の流下特性の検討

過去の航空レーザー測量成果を解析することで、土砂流出の発生、流下特性について取りまとめた。土砂流出の濃度が、流下中の溪床勾配から与えられる平衡濃度よりも高ければ土砂の堆積に伴う河床の上昇がおき、低ければ侵食に伴う河床の低下がおきる。そのため、堆積(河床の上昇)、侵食(河床の低下)それぞれが発生する溪床勾配を整理すれば、土砂流出の濃度を考察するための有用な情報が得られる。また、侵食、堆積勾配の整理は、土砂流出に対する砂防施設の効果を検討する上でも重要である。そこで、前後する2時期の航空レーザー測量成果を差分し、河床勾配ごとの侵食・堆積量を調べた。凍結期に発生した土石流の事例として、2021年3月21日のスラッシュ雪崩によって引き起

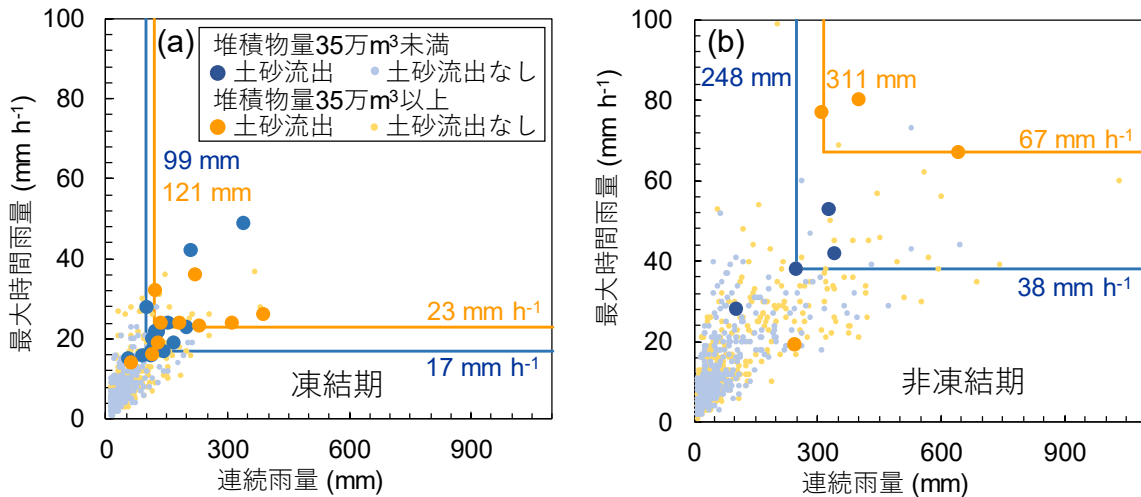


図6 凍結期・非凍結期の土砂流出発生条件

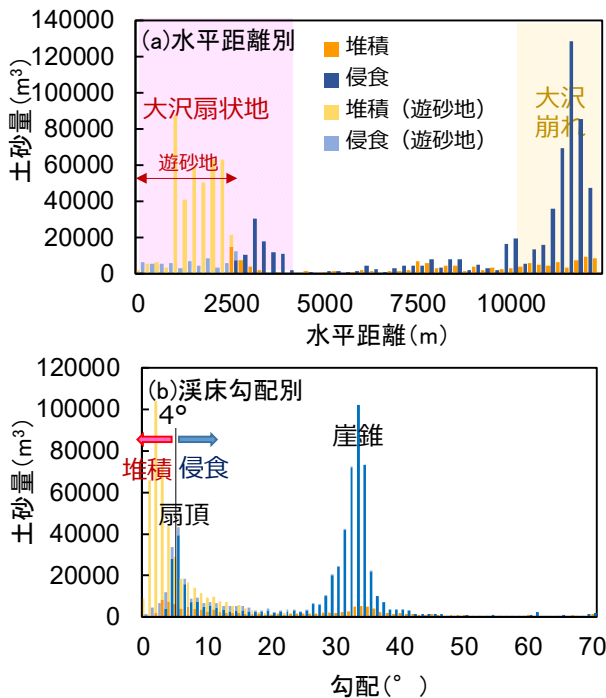


図7 スラッシュ雪崩流下時の侵食・堆積状況 (2020/10~2021/4 の変化)

こされた河床変動を示す(図7)。このイベントでは大沢崩れから遊砂地直上まで侵食が卓越した(図7a)。勾配で整理した場合、 $4^\circ$ を境界として、侵食傾向から堆積傾向に切り替わっている(図7b)。この境界となる勾配を、本研究では侵食・卓越閾値と定義する。土砂流出はこの侵食・堆積閾値周辺では、平衡濃度に近い土砂濃度であることが予想できる。土砂流出のタイプが侵食・堆積閾値に与える影響を検討するため、連続雨量と侵食・堆積閾値を対比し、土砂流出のタイプごとにプロットした(図8)。その結果、非凍結期土石流は凍結期土石流(土砂流)やスラッシュ雪崩よりも連続雨量がはるかに大きいものにも関わらず、急勾配区間から堆積が開始されている。つまり非凍結期土石流は土砂濃度が高いことが示唆される。凍結期土石流とスラッシュ雪崩のみに注目し、連続雨量と侵食・堆積閾値の関係性を調べると、両者の間には負の相関がみられた( $R^2=0.47$ )。このため、連続雨量が高いほど緩勾配区間まで侵食が卓越するといえる。連続雨量と侵食・堆積閾値との関係性に与える溪床堆積物量の影響

は明確でなかった(図9)。次に、土砂流出イベントのピーク時の水位と流速とを、土砂流出のタイプごとに対比した。観測地点は扇頂にあたる岩樋観測所である。同程度の水位で比較した場合、スラッシュ雪崩の流速が最も高く、凍結期の土石流が続き、非凍結期の土石流が最も流速が低い結果となった。このことは、非凍結期よりも凍結期に発生する土砂流出のほうが高い流動性を有することを示唆するものである。

大沢川において、地盤の凍結が土砂流出の発生条件(図7)や流下特性(図8)へ影響を及ぼすメカニズムを明らかにするため、土砂流出発生時の凍土層の深度分布をDegree-day法により標高帯ごとに求め、それを土砂流出発生前と発生後のDEMの差分から得られる侵食・堆積量と対比させた。図10には大規模なスラッシュ雪崩が発生した2021年3月21日の事例を示す。このとき、現頭部の大沢崩れから遊砂地の直上まで侵食傾向にあったが、凍結をしていたのは大沢崩れの内部のみであった。また、大沢崩れ内において、凍土層よりも深い位置から侵食がおきていた。このため、凍結期に土砂濃度が低く流動性が高い土砂流出が発生する原因としては、次の2つの理由が考えられる。ひとつは大沢崩れ内の斜面から溪流への水の供給量の増加である。既往の研究から、地盤が凍結すると浸透能が

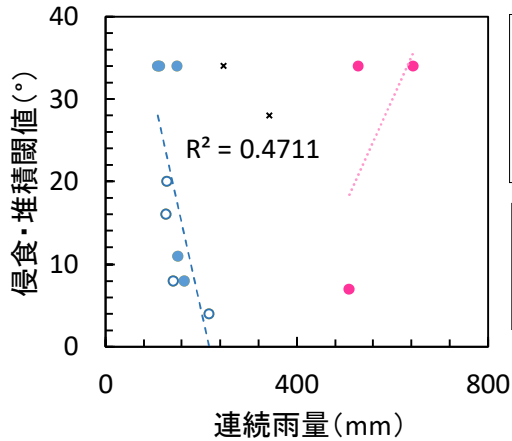


図8 連続雨量と侵食・堆積閾値の対比

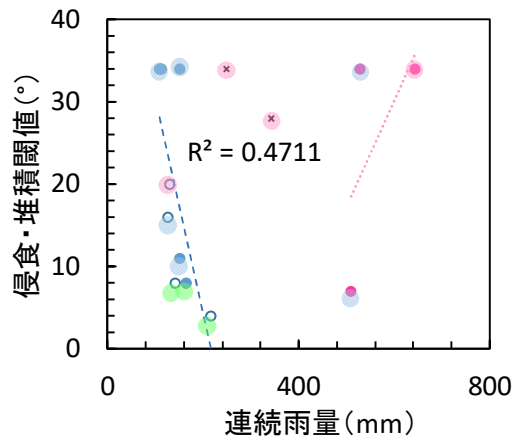


図9 渓床堆積物量に着目した連続雨量と侵食・堆積閾値の対比

低下し、地表流量が増加することが報告されている (Iwata et al., 2010; Coles and McDonell, 2018)。大沢崩れの堆積物は本来透水係数が高いが、凍結に伴い透水係数が大幅に低下する (南坂・岩田, 1999)。このため、地盤の凍結により溪流へ水が供給されやすくなったことで、土砂流出が発生しやすくなる (図6)、また濃度の低い土砂流出が発生したものと考えられる (図8)。積雪期には、融雪も水の供給の増加に寄与する。もうひとつの理由は渓床堆積物の凍結による、土石流 (スラッシュ雪崩) 中の水の、渓床への浸透量の減少である。渓床への水の浸透は、土石流の流動性の低下につながる (Takayama et al., 2021)。凍結期には、土砂流出発生・発達の初期段階で、堆積物の凍結により渓床へ水が浸透しなかったことが、流動性が高まる原因となったと考えられる。

### 3. 複合型リスクを有する溪流におけるソフト・ハード対策の在り方の検討

大沢崩れ下端から遊砂地上端までの自然河道区間、および遊砂地内のそれぞれにおいて、連続する2時期の航空LP測量成果を差分処理することで、堆積土砂量と侵食土砂量を計算した (図11)。そのうえで、自然河道区間、遊砂地内の土砂収支を比較することで、土砂の流下特性とハード対策の効果について考察した。その結果、自然河道区間の侵食・堆積傾向に限らず遊砂地では安定して土砂を捕捉すること、さらには凍結期土石流・スラッシュ雪崩は少ない雨量で発生するのにも関わらず、遊砂地に到達する土砂量が大きい傾向が得られた。

本研究の結果、大沢崩れ内部の地盤の凍結が、土砂流出の発生条件や下流部も含めた土砂の流下特性へ影響を及ぼしていることが明らかになった。このため、気温や地温の観測とそれに基づいた凍土層の分布域の推定により、効率的・効果的なソフト対策を講じることができ、凍結期には降水量が少なくても大量の土砂が砂防施設まで到達する可能性があるため、凍結期の土砂流出をふまえた施設の計画や除石の実施が必要であることが示された。

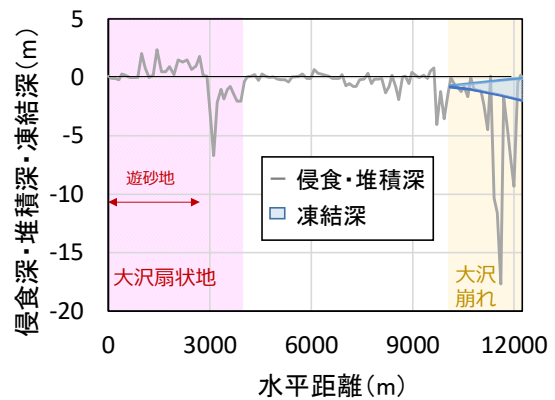


図10 スラッシュ雪崩による侵食・堆積深と発生時の凍結深度 (2021年3月21日の)

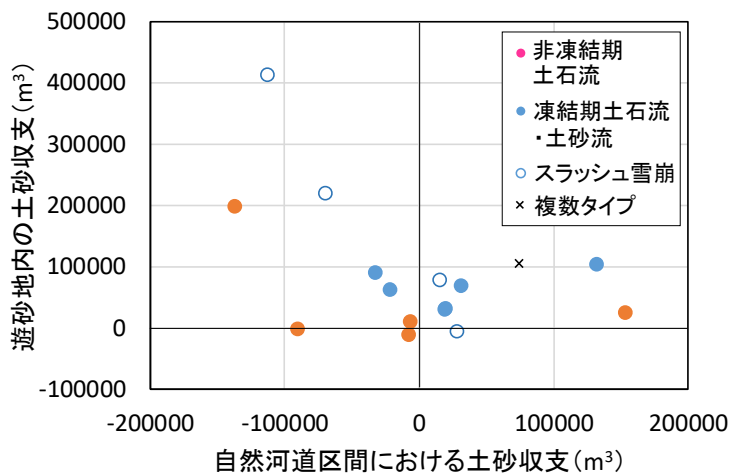


図11 自然河道区間と遊砂地内の土砂収支

### 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。)

山本一樹, 今泉文寿, 逢坂興宏, 池田敦 (2020) 富士山大沢崩れにおける凍土の季節変化と土石流発生との関係, 令和2年度砂防学会研究発表会概要集, 187-188

山本蓮, 今泉文寿, 逢坂興宏 (2020) 気象・地形要因が富士山大沢崩れの土石流発生場所に及ぼす影響, 令和2年度砂防学会研究発表会概要集, 205-206

山本蓮, 今泉文寿 (2020) 富士山大沢崩れで発生する土石流の流下特性に気象・地形要因が及ぼす影響, 山岳科学学術集会, P2-18

今泉文寿, 山本蓮, 池田敦, 逢坂興宏, 柏原佳明, 西村直記 (2021) 富士山大沢川における土砂流出形態と侵食堆積特性の関係, 令和3年度砂防学会研究発表会概要集, 651-652

山本蓮, 今泉文寿 (2021) 気象・地形要因が富士山大沢崩れで発生する土石流の流下特性に及ぼす影響, 山岳科学学術集会, 02-05

Imaizumi, F., Ikeda, A., Yamamoto, K., Ohsaka, O. (2021) Temporal changes in the debris flow threshold under the effects of ground freezing and sediment storage on Mt. Fuji. Earth Surface Dynamics, 9, 1381-1398. <https://doi.org/10.5194/esurf-9-1381-2021>

高山翔揮, 今泉文寿, 里深好文 (2021) 不飽和河床上における土石流の発生・発達過程に関する実験的研究, 令和3年度砂防学会研究発表会概要集, 635-636

今泉文寿, 山本蓮, 池田敦, 逢坂興宏, 柏原佳明, 西村直記 (2021) 富士山大沢川における土砂流出形態と侵食堆積特性の関係, 令和3年度砂防学会研究発表会概要集, 651-652

Imaizumi, F., Yamamoto, R., Ikeda, A. (2022) Runout characteristics of debris flow under effects of ground freezing on Mt. Fuji, Japan Geoscience Union 2021

今泉文寿, 池田敦, 逢坂興宏, 柏原佳明, 西村直記 (2023) 富士山大沢川において地盤凍結が土砂生産・流下特性へ与える影響, 令和5年度砂防学会研究発表会, 発表予定

Imaizumi, F., Ikeda, A., Takayama, S. Effects of ground freezing on runout characteristics of debris flow on Mt. Fuji, Japan. Geomorphologyへ論文投稿予定

### 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。)

静岡大学・中日新聞連携講座2021「いのちとくらしを守るイノベーション」 「土砂災害はいつどこでおきるのか?～土砂災害の実態と対策～」, 2021年11月9日, web開催において, 土砂災害の実態と対策を市民に説明した。

防災の日「土砂災害にどう対処すればよいのか ー土砂災害の実態と対策ー」, 2022年2月19日, 静岡市番町市民活動センターにおいて, 土砂災害への対策について説明した。

第四紀学会シンポジウム「静岡県の土石流災害ー土石流発生メカニズムから考えるー」, 2022年8月28日, 静岡県地震防災センターにおいて, 富士山大沢川の土石流の流下実態を説明した。

日本防災環境「高齢者・障害者施設のための災害リスクマネジメント研修2022ー土砂災害編ー」, 2023年1月11日, web開催において土砂災害への対策手法を説明した。

### ⑨表彰、受賞歴

(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。)

なし

### ⑩研究の今後の課題・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、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。)

本研究により、大沢崩れにおける標高ごとの地盤凍結期間の推定手法の確立や、土砂生産のタイミングに関する定量的整理、堆積物量が土砂流出の発生条件へ与える影響の評価を行った。また、土石流、土砂流、スラッシュ雪崩といった様々な土砂流出イベントによる侵食・堆積傾向を明らかにし、遊砂地の効果を数値的に示した。地盤の凍結期と非凍結期で土砂流出の発生条件や、砂防施設に堆積する土砂量が異なることが明らかになったため、土石流発生域での地温の観測、あるいは別地点での気温観測結果に基づく土石流発生域の地温の推定が、効果的なソフト対策につながると考えられる。

これまで富士山大沢川では、大沢崩れ内の溪床堆積物の貯留が土石流の規模に関わるとされてきたが、平成3年度には、溪床堆積物の貯留がほとんどない条件で2度の大規模な土砂流出イベントが発生した。ガリーの谷底の大規模な侵食により、土砂が生産されたことが原因である。このため今後は、溪床堆積物の把握のみならず、堆積物の下の谷底の侵食に関する研究を進めることが課題であるといえる。

### 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。)

本年度の研究により、土砂流出のタイプや降雨イベントの規模と土砂の侵食・堆積傾向の関係性について検討した。また、土砂流出のタイプごとに、砂防施設による土砂の捕捉効果がどの程度ことなるかについての検討を行った。これらの成果は、様々な土砂流出現象が生じる溪流における砂防堰堤の土砂調節効果を考えるうえで重要であり、適切な施設の配置や規模に関する検討を行っていくうえで有益な情報をもたらすと考えられる。