

溪床堆積物量が土石流発生降雨条件に及ぼす影響

静岡大学大学院山岳流域研究院○大沼恵季

静岡大学大学院農学領域 今泉文寿

1. はじめに

土石流の発生予測においては、降雨強度と降雨継続時間に基づく降雨閾値（Intensity-Duration : ID 閾値）が広く用いられている。しかしながら、既往研究の多くは降雨条件のみに着目しており、溪床における堆積土砂量の時系列変化が閾値に与える影響については十分に検討されていない。また、降雨イベントの定義に用いられる無降雨期間（Minimum Inter-event Time : MIT）は、累積雨量や降雨継続時間の算定に影響するため、閾値設定の不確実性要因の一つである。そこで本研究では、溪床堆積土砂量の変化を考慮した土石流発生条件の解明を目的とし、土石流発生時の閾値を解析した。併せて降雨イベントの分割に用いる MIT の違いが降雨閾値に及ぼす影響について検討した。

2. 対象流域

静岡県中部を貫流する安倍川源流部に位置する大谷崩「一の沢」上流域を対象とした。大谷崩を含む一帯は古第三紀層の四万十帯及び瀬戸川層群に属する。大谷崩では砂岩、頁岩、砂岩および頁岩の互層がみられ、構造運動による断層・褶曲によって破碎が著しい（建設省静岡河川工事事務所、1988）。「一の沢」では冬季の凍結融解により溪床に砂礫が供給され、春季から秋季にかけての豪雨に伴い土石流が発生し、溪床堆積物が流出するため、溪床の堆積土砂量が時系列的に変化する。

3. 研究方法

3.1. 土石流発生時刻の観測

水圧計、タイムラプスカメラ（TLC）を土石流発生域の下端部に設置し、土石流の先頭部が到達した時刻を観測した。本研究ではこの到達タイミングを「発生時刻」として解析を行った。

3.2. 降雨解析

「一の沢」上流域において、1回転倒 0.2 mm の転倒ます型雨量計を設置し、2020年から2025年までの降水量を観測した。本研究では、降雨イベントの定義が降雨指標の算定および降雨閾値の設定に与える影響を評価するため、無降雨期間（MIT）を用いて降雨系列を分割した。MITは、一定時間以上降雨が観測されない状態が継続する時間として定義され、本研究では30分、180分、360分の3条件を設定し、それぞれについて降雨データセットを作成した。降雨閾値の設定に用いる降雨指標については、従来、総降雨量が用いられることが多いが、降雨イベント内のどの時点までの降雨を対象とするかによって判別性能が変化する可能性がある。そこで本研究では、土石流発生時刻までの累積雨量、降雨イベント内のピーク降雨に至るまでの累積雨量、降雨イベント全体の総降雨量、の3種類の指標を設定し、それぞれについて発生・非発生の判別性能を比較した。

3.3. 溪床堆積物量の把握

UAV-SfMから数値標高モデル（以下DEM : Digital Elevation Model）を作製した。堆積土砂量はある時期のDEMから基岩DEMを差し引くことで求めた。基岩DEMとは各グリッドに対して現在までの最低標高値を採用したDEMである。これにより溪床における堆積土砂量の時系列変化を定量的に把握した。

3.4. 降雨閾値（Intensity-Duration 法, ID 法）の設定

ID法による降雨閾値は $I = \alpha D^{-\beta}$ (Caine, 1980) と定義される。 α は降雨強度 (mm/h)、 β は降雨継続時間 (h) を表す。本研究では、2値分類の混同行列を使用して降雨閾値の判別性能を評価し、True Skill Statistic (TSS) を主指標として採用した。TSSは誘発降雨のうち誘発すると予測された降雨の割合（再現率）から非誘発降雨のうちの誤って誘発すると予測された降雨の割合（偽陽性率）を差し引いた値として定義される。誘発降雨および非誘発降雨の双方を考慮可能であるため、不均衡データに対しても安定した評価が可能であり、閾値の判別能力を適切に評価できる。降雨閾値の設定手法にはLR&TSS, TSS&TSS, CSI&CSIなど、様々なものがある。LR&TSSでは β を誘発降雨について最小二乗法を使用して両対数スケールで決定、その後、すべての降雨

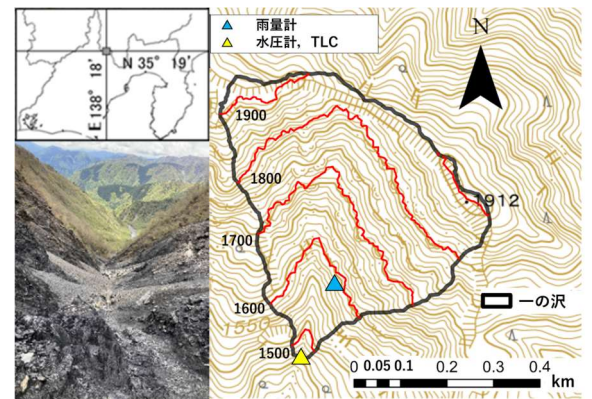


図 1 大谷崩地形図（国土地理院に加筆）

について α を TSS が最大となるように決定する。TSS&TSS ではすべての降雨について α , β を TSS が最大となるように決定する。Hirschberg et al. (2021) は、ローカルスケールのデータセットにおいて、非発生事例の影響を限定的に扱う LR&TSS により推定された閾値の方が、TSS&TSS と比較してパラメータの不確実性が小さくなることを報告している。そこで本研究では、両者のうち LR&TSS を使用した。CSI&CSI は発生事例に対する予測の適中度を評価する指標としてスレットスコア (Critical Success Index : CSI) を用いる手法である。CSI は真陽性 (TP), 偽陰性 (FN), 偽陽性 (FP) に基づいて定義され、発生事例の検出率と誤警報の程度を評価する指標である。CSI&CSI ではすべての降雨について α , β を TSS が最大となるように決定する。

4. 結果と考察

CSI&CSI, LR&TSS により設定された閾値の判別結果から、ほとんどの降雨指標において MIT が短いデータセットほど判別性能が高くなる傾向が確認された(表1)。これは、MIT が短い場合に降雨イベントが細分化され、降雨継続時間および降雨強度の特徴がより明確に反映されるためと考えられる。本研究では土石流イベント数の確保および判別性能の観点から、以降の解析では総降雨量を用いた。

観測期間中に 30 の降雨イベントで土石流の発生が確認され、そのうち発生前の堆積土砂量を把握できたものは 21 イベントであった。堆積土砂量については、区分ごとのイベント数が概ね均等となるよう 25,000 m³を閾値として区分した。その結果、CSI&CSI では堆積土砂量が 25,000 m³以上かつ MIT が 30 分の場合に最も高い判別性能 (CSI=0.89) を示した。一方で、LR&TSS に基づく評価ではすべての区分において比較的高い判別性能が得られた(表2)。さらに、堆積土砂量別に最も判別性能の高い閾値を比較すると、MIT が 30 分の場合には、堆積土砂量 25,000 m³以上の閾値線が 25,000 m³未満の場合よりも上方に位置した(図2)。これは、堆積土砂量が多いほどより降雨条件が大きくなることを示唆する結果であり、既往研究と同様の傾向がみられた(Tsunetaka et al., 2021)。しかしながら、MIT が 180 分および 360 分の場合には、堆積土砂量が 25,000 m³未満の閾値線が上方に位置する結果となった(図3)。この要因として、MIT を長く設定したことにより複数の降雨イベントが統合され、降雨継続時間や累積雨量等の特徴値が変化した可能性が考えられる。また、MIT が長い場合には CSI に基づく判別性能も相対的に低下する傾向が確認された。

表 1 CSI&CSI, LR&TSS による降雨指標の評価

MIT(min)	CSI&CSI			LR&TSS		
	debris flow	peak	total	debris flow	peak	total
30	0.32	0.54	0.70	0.95	0.94	0.95
180	0.35	0.58	0.59	0.81	0.82	0.85
360	0.38	0.57	0.52	0.71	0.75	0.82

表 2 堆積土砂量によって区分された降雨閾値の判別性能

MIT(min)	CSI&CSI		LR&TSS	
	<25000 m ³	≧25000 m ³	<25000 m ³	≧25000 m ³
30	0.64	0.89	0.90	0.98
180	0.62	0.67	0.84	0.93
360	0.50	0.64	0.90	0.93

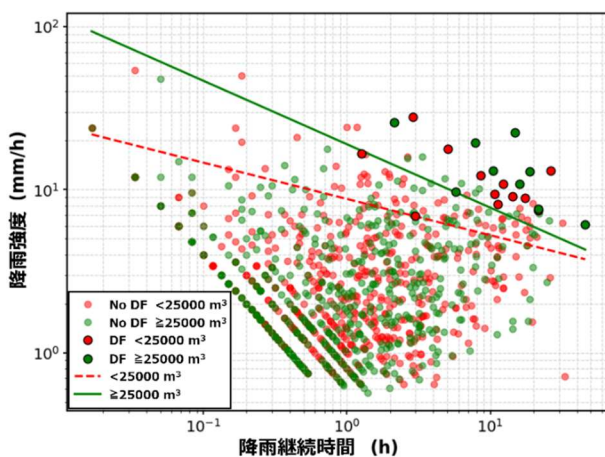


図 2 MIT30 min の LR&TSS による降雨閾値

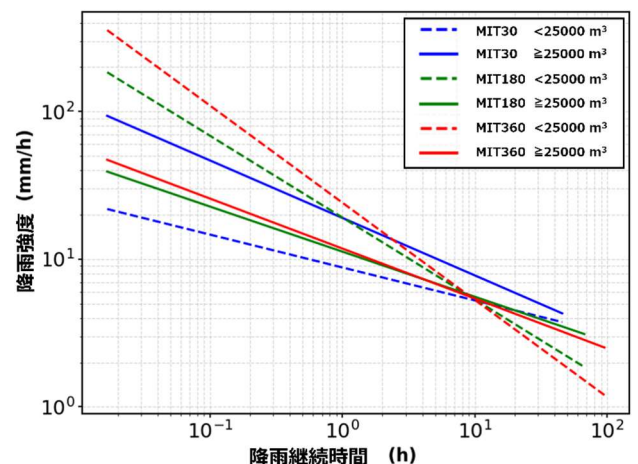


図 3 堆積土砂量・MIT と降雨閾値の関係

参考文献：建設省静岡河川工事事務所 (1988) : 安倍川砂防史 ; Tsunetaka, H., Hotta, N., Imaizumi, F., Hayakawa, Y., Masui, T.: Variation in rainfall patterns triggering debris flow in the initiation zone of the Ichino-sawa torrent, Ohya landslide, Japan, *Geomorphology*, Vol.375, 2021 ; Hirschberg, J., Badoux, A., McArdeall, B. W., Leonarduzzi, E., and Molnar, P.: Evaluating methods for debris-flow prediction based on rainfall in an Alpine catchment, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21, 2773–2789, <https://doi.org/10.5194/nhess-21-2773-2021>, 2021.