

胆振東部地震による崩壊を有する火山性土壌の小流域における降雨流出応答

○荒田洋平¹・五味高志²・井手淳一郎³・遠藤いづ貴⁴¹北海道立総合研究機構林業試験場、²名古屋大学、³公立千歳科学技術大学、⁴兵庫県立大学

1 はじめに

山地小流域における斜面土壌は雨水の浸透や貯留に影響し、流域からの降雨流出において重要な役割を果たす (Lin et al., 2010)。地震に伴う崩壊は山地小流域の地形を大規模に変化させるプロセスであり、深度 2~3m までの斜面表層土壌を削剥する (Fan et al., 2019)。このような崩壊裸地斜面では、下層の土壌や岩盤が露出するとともに、保水性が低下し、雨水の流出経路が変化することで、降雨に対する流出応答も変化することが指摘されている (Sidle et al., 2018)。しかしながら、崩壊による山地小流域における降雨流出応答への影響を把握した事例は少ない (Zhang et al., 2018 など)。

さらに、地震多発地域の周辺では、噴火に伴う複数回の降下物 (灰や軽石など) の堆積と腐植の集積により複数層から構成される火山性土壌が分布する傾向がある (三浦, 2011)。このような火山性土壌は層ごとに異なる物理性や保水性を有することから (Arata et al., 2020)、崩壊の降雨流出応答への影響評価の検討では、崩壊によって削剥された土壌の保水性を踏まえる必要がある。以上のことから、本研究は、火山性土壌の山地小流域における崩壊の降雨流出応答への影響評価を目的とし、

(1) 崩壊後の降雨流出応答の把握、(2) 崩壊土壌の保水性の把握を実施した。

2 観測流域概要と方法

本研究は北海道胆振地方の頗美宇川上流に位置する3つの隣接した小流域で実施した (図1)。観測流域の地質 (新第三紀堆積岩類) や土壌 (主に腐植層と9000年前降下のTa-d層)、植生 (落葉広葉樹二次林) は同様である。一方で、2018年北海道胆振東部地震による崩壊が占める面積率が異なり、0%の流域 (崩壊無し流域: 1.1ha)、11%の流域 (崩壊11%流域: 1.5ha)、52%の流域 (崩壊52%流域: 0.7ha) である (図1)。崩壊無し流域は本震による影響が比較的小さかったと仮定した。崩壊は尾根付近で発生し、河道まで達している。崩壊深度は0.4~1.6mであり、すべり面はTa-d軽石層下部に位置していた。また、崩壊裸地斜面には幅と深さ10cm程度の無数のリルが形成されている (図1)。

降雨流出応答を検討するために、降水量、水流出量、

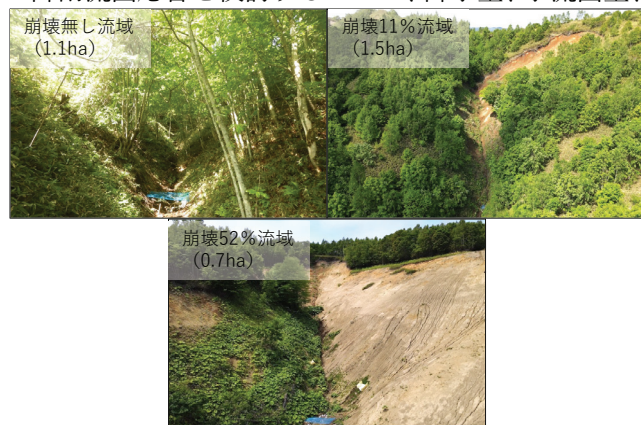


図1. 観測流域の様子。

土壌体積含水率を観測した。降水量は0.2mm 転倒マス雨量計 (Davis 社) を用いて崩壊52%流域末端から約40m 下流側の地上から高さ1.5mで観測した。水流出量は、各観測流域の末端で木製直角量水堰の設置から静電容量式水位計 (Trutrack 社) を用いて観測した。体積含水率は、各土壌採取地点で誘電率型土壌水分センサー (Decagon 社) を用いて深度2.6mまで4深度で観測した。観測は2020年10月~2022年7月 (体積含水率は2021年10月~) で実施し、10分間隔で記録した。

降雨時の水流出と土壌水分の応答を検討するために、1つの降雨イベントを連続した12時間以上の無降雨期間で定義した。降雨時の流域末端における水流出応答の検討はピーク流出量と直接流出量の評価およびハイドログラフの形状の把握から実施した。直接流出は、ハイドログラフの立ち上がり点から逓減時の変曲点を直線で結び、基底流出と分離した。さらに、降雨時の土壌中の水貯留量変化を観測した体積含水率をもとに層ごとに (1) 式から評価した (Arata et al., in prep.)。

$$\Delta S_{Ln} = (VWC_{Ln} - VWC_{L0}) * D_L \quad (1)$$

ここで、 ΔS_{Ln} は土壌層Lにおける降雨開始からn時間後の貯留量変化、 VWC_{Ln} は土壌層Lにおける降雨開始からn時間後の体積含水率、 VWC_{L0} は土壌層Lにおける降雨開始時の体積含水率、 D_L は土壌層Lの土層厚である。

さらに、斜面土壌の物理性を検討するために、2021年9~12月に崩壊無し流域の斜面 (斜面長=30m) の3箇所 (約10m 間隔: 上部、中部、下部) で深度2~3mの未攪乱土壌をライナー採土器 (Daiki 社) で採取した。採取土壌は実験室に持ち帰り、5cm ごとに分割した後、乾燥密度と礫含有率 (>2mm)、含水比を分析した。

3 結果

3.1 観測流域の降雨流出応答

降雨イベントにおける降雨量に対する水流出量は流域ごとに異なった。観測できた全ての降雨イベント時のピーク流出量と直接流出量は総降雨量の増大に伴い増大し、特に総降雨量20mm以上で急激に増大した。この閾値以降の崩壊11%と52%流域のピーク流出量は崩壊無し流域よりもそれぞれ平均1.8と3.3倍高くなった。さらに、崩壊11%と52%流域の平均流出率 (直接流出量/総降雨量) はそれぞれ10% (2~34%) と15% (1~59%) となり、崩壊無し流域の平均流出率5% (2~15%) よりも高くなった。

さらに、降雨に応答したハイドログラフの形状も流域ごとに異なった。例えば、最も降雨量が多くなった期間 (2021年11月6日~2021年12月5日、降雨量192.4mm) では、崩壊有り流域のハイドログラフは崩壊無し流域と比較して、降雨に応答して急激に立ち上がり、ピーク流出量も大きくなる傾向があった (図2a)。ただし、ハイドログラフの立ち上がりやピークは全ての流域で同時に発生した。ピーク流出後は、崩壊11%流域からの流出量は崩壊無し流域よりもゆっくりと逓減する傾向があり、基底流出量も多くなった。一方で、崩壊52%流域では流出が素早く逓減する傾向があった。

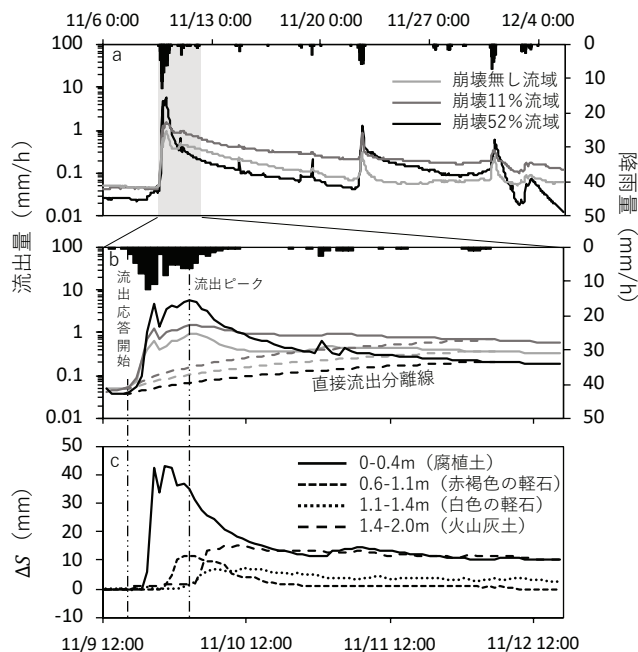


図2. a) 2021年11月6日～12月5日のハイドログラフ。
b, c) 降雨イベント時のハイドログラフと貯留量変化。

3.2 ハイドログラフと土壌貯留量変化の関係性

降雨時の崩壊無し流域におけるハイドログラフと崩壊の影響を受けていない斜面土壌の ΔS （体積含水率と層厚から推定）の応答の関係性は層ごとに異なった。例えば、観測期間の最大降雨量イベント時（2021年11月9～12日、総降雨量：96.0mm、時間最大：15.4mm/h）では、表層の腐植層（深度0～0.4m）や赤褐色軽石層（0.6～1.1m）の ΔS は、ハイドログラフの立ち上がりより遅れて応答を開始したが、 ΔS のピークは流出ピークまでに到達した（図2b, c）。一方で、下層の白色軽石層（1.1～1.4m）と風化火山灰層（1.4～1.8m）の ΔS はピーク流出より遅れて応答を開始し、その結果、ピーク ΔS は、水流出の逓減時に発生した。ピーク到達後は、腐植層と赤褐色軽石層の ΔS は水流出の逓減とともに素早く逓減したものの、白色軽石層と風化火山灰層の ΔS は比較的一定であった。

斜面土壌の乾燥密度は $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ より小さくなる傾向があったが、軽石層の平均乾燥密度（ $\approx 0.3\text{g}/\text{cm}^3$ ）はそれより上部と下部の層（ $>0.6\text{g}/\text{cm}^3$ ）よりも低かった。一方で、軽石層の平均礫含有率（ $>60\%$ ）は、それより上部と下部の層（ $<20\%$ ）より高かった。斜面中部と下部の各層の厚さは異なったが、物理性は同様であった。

4 考察

本研究が示した崩壊有り流域からの降雨時の水流出量が崩壊無し流域よりも大きかったことは、既往研究と同様の結果であった。例えば、Zhang et al. (2018)は崩壊後（面積率3%）の小流域（3.2ha）におけるピーク流出量と直接流出量は崩壊前と比較して1.2～1.3倍に増加したことを示した。このような流出量の増大は、崩壊裸地斜面に降った雨水が表面流として河道に流出したとともに（Zhang et al., 2018）、土層厚の低下により崩壊斜面に降った多くの雨水が斜面で貯留されずに河道へ流出したためであると考えられる（Penna et al., 2011）。一方で、流出逓減では、崩壊11%流域で崩壊無し流域より遅く、基底流出量が大きくなった。このことから、面積率11%程度の崩壊による土壌剝削の基底流

出への影響よりも、流域の内部構造の違いによる貯留量の違いが影響を及ぼした可能性がある（Masaoka et al., 2021）。

崩壊有り流域における保水性の低下は、崩壊による深度1～2m程度に堆積する軽石層の剝削が影響を及ぼしたと考えられる。斜面土壌中を鉛直に浸透した雨水は流出ピークよりも遅れ時間を持って軽石層（白色）に浸透した。本研究の軽石層は礫を多く含むことから、上部の細粒土壌から時間遅れを持って水が浸透することができた可能性がある（Capparelli et al., 2020）。その後、軽石層に浸透した雨水は長い時間貯留され、基底流出に寄与した。一般的に、多孔質で高い空隙率を有する軽石の水分保持能力は高いとされ（Whitham and Sparks, 1986）、本研究と同じ起源の軽石（対象流域から3km南西に堆積）も同様な物理性や水分特性を有する（Noviandi et al., 2022）。したがって、斜面に厚く堆積した軽石層が雨水貯留場としての役割を果たし、崩壊後の保水性に影響を及ぼした。

以上のことから、本研究は崩壊による水貯留に寄与する火山性土壌の剝削（特に、深度1～2mの軽石層）が斜面の雨水浸透-貯留過程を変化させ、降雨に対する流出応答特性を変化させたことを示した。このような崩壊後の降雨流出応答の変化は、流域内の生産から流出への土砂動態に影響を及ぼす可能性が考えられる。

5 引用文献

- Arata et al. (2020). Topographic features and stratified soil characteristics of a hillslope with fissures formed by the 2016 Kumamoto earthquake. *Geoderma*, 376, 114547.
- Arata et al. (in prep.). Soil-water response in a volcanic ash hillslope affected by fissures and microtopographic changes caused by the Kumamoto earthquake, Japan.
- Capparelli et al. (2020). Physical modeling investigation of rainfall infiltration in steep layered volcanoclastic slopes. *Journal of Hydrology*, 580, 124199.
- Fan et al. (2019). Earthquake-induced chains of geologic hazards: Patterns, mechanisms, and impacts. *Reviews of Geophysics*, 57(2), 421-503.
- Lin et al. (2010). Linking principles of soil formation and flow regimes. *Journal of Hydrology*, 393(1-2), 3-19.
- Masaoka et al. (2021). Bedrock Groundwater Catchment Area Unveils Rainfall-Runoff Processes in Headwater Basins. *WRR*, 57(9), e2021WR029888.
- 三浦 (2011). 第四紀の環境変動と人為活動を読みとるための土壌研究の方法論:「堆積土壌」における土壌断面の見方と考え方. *地球環境*, 16(2), 139-150.
- Noviandi et al. (2022). The Mobility of Landslides in Pumice: Insights from a Flume Experiment. *Water*, 14(19), 3083.
- Penna et al. (2011). The influence of soil moisture on threshold runoff generation processes in an alpine headwater catchment. *HESS*, 15(3), 689-702.
- Sidle et al. (2018). Ecosystem changes following the 2016 Kumamoto earthquakes in Japan: Future perspectives. *Ambio*, 47(6), 721-734.
- Whitham and Sparks (1986). Pumice, *Bulletin of Volcanology*, 209-223.
- Zhang et al. (2018). Runoff response and sediment yield of a landslide-affected fire-climax grassland micro-catchment (Leyte, the Philippines) before and after passage of typhoon Haiyan. *Journal of hydrology*, 565, 524-537.