

築山を用いた野外実験に基づく地表面侵食過程の解析

京都大学大学院農学研究科 ○普神紗良 小杉賢一朗

1. はじめに

斜面に火山灰や崩壊土砂が堆積した場所では、地表面侵食が進行し、時間とともに地形が変化する。この侵食は、主に降雨時の侵食と乾燥時の侵食に分けられる。降雨時の侵食が雨滴衝撃によるものであるのに対し、乾燥時の侵食は、粘着力の低下した地表面の土粒子がパラパラと重力で移動する現象である。このような地表面侵食を理解することは、地形発達や土砂生産の観点から重要であるが、既往の研究は雨滴侵食に着目したものが多く、降雨と乾燥を繰り返す条件下で双方の影響を同時に考慮した解析は十分には行われていない。

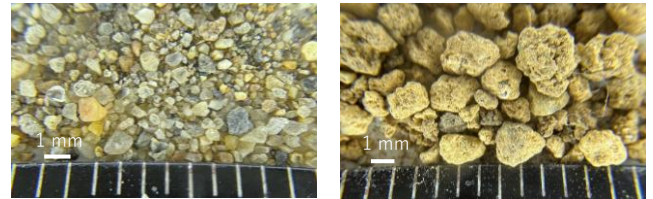
また、従来の地表面侵食の計測では、斜面下端のピットで回収した流亡土砂量を計測し侵食量とする手法や、目盛り付きの杭を用いて地表面高の変化を計測する手法が広く用いられてきた。しかしピットを用いた手法では、侵食土砂が斜面下端に至るまでの運搬・堆積過程が計測値に影響することから、侵食現象を分離して把握することが難しい。一方で杭を用いた手法では、侵食深を直接評価できる利点はあるものの、測定精度向上には杭の設置密度を上げる必要があり、計測自体が侵食現象に人為的な影響を及ぼしてしまう問題がある。

以上を背景として本研究では、野外において土性の異なる材料を用いた2種類の小型の築山を作製し、地表面形状の変化を高分解能の3D スキャナーを用いた非接触計測により把握することによって侵食量の高精度計測を実施した。さらに、現地で計測された詳細な気象観測データを用いて降雨時と乾燥時の侵食現象を同時に解析しモデル化を行った上で、両者が及ぼす影響を土性の違いに着目して定量化した。

2. 研究方法

2025年6月19日に、京都大学北白川試験地の上空の開けた場所に砂および小粒赤玉土(図1)を用いた小規模な築山を2種類作製した(図2)。以降、砂山、赤玉山と呼ぶ。8月25日までの約2か月間に20回、1mm分解能の構造化光スキャナー(Artec 3D社製 Artec Eva)を用いて地表面形状の三次元計測を行った上で、連続する2時期にz座標が減少した部分の体積を築山の底面積で割ることで、全19期間の各々について侵食深 E [mm] を算出した。

次に、期間ごとの侵食深 E と10分間隔気象観測データとの関係を解析し、砂山・赤玉山それぞれについて、侵食量を再現するモデルを構築した。



砂:細かい鉱物粒子

赤玉土:大径・多孔質の団粒

図1: 砂および赤玉土の粒子 拡大図



図2: 作製直後の築山 砂山(左), 赤玉山(右)

3. 結果と考察

3.1 モデル化

各期間の侵食量と気象観測データとの関係を解析し、それぞれの期間 $i_1\Delta t \sim i_2\Delta t$ における侵食量を再現するモデルを構築した(式1)。

$$E = A \sum_{i=i_1+1}^{i_2} \exp(-\alpha(i-0.5)\Delta t) [r(i\Delta t)]^a \Delta t + B \sum_{i=i_1+1}^{i_2} \exp(-\beta(i-0.5)\Delta t) p(i\Delta t, H_c) \Delta t \quad (\text{式1})$$

パラメータ A : 定数 [(mm/day)/(mm/10min) $^{-a}$],
 B : 定数 [mm/day], α, β : 正の実数 [day $^{-1}$],
 a : べき数 [-], H_c : バケツ容量 [mm].
 その他変数 Δt : 気象観測間隔(今回は10分) [day],
 i : 観測開始からの時間ステップ,
 i_1 : 対象期間の開始, i_2 : 対象期間の終了,
 $r(i\Delta t)$: 時刻 $i\Delta t$ における降雨強度 [mm/10min],
 $p(i\Delta t, H_c)$: 時刻 $i\Delta t$ において地表面が乾燥ならば1、湿潤ならば0を返す指示変数 [-].

本モデルでは、第1項で降雨時の侵食量を、第2項で乾燥時の侵食量を計算しており、降雨時の侵食量は降雨強度のべき乗の積算値に比例し、乾燥時の侵食量は地表面の乾燥期間の長さ按比例すると仮定している。さらに、時間の経過に伴い斜面が緩勾配化して侵食が起こりにくくなることを考慮するために、降雨時と乾燥時の侵食量がそれぞれ指数関数的に減少すると仮定している。なお、地表面の乾燥もしくは湿潤の判定については、深さ H_c [mm] のバ

ケツモデルを用いて雨量と蒸発量を与えた逐次計算を行い、貯水量ゼロを乾燥状態と定めた。ここで蒸発量の推定にはペンマン式を用いている。

適切なパラメータの値の組み合わせを Excel のソルバーで最小二乗法により決定した(表 1)。決定係数は砂山・赤玉山ともに 0.85 で、いずれも侵食量を良好に再現した(図 3)。

表 1：モデルのパラメータ

パラメータ	A	α	a	B	β	H_c
単位	$[(\text{mm}/\text{day})/(\text{mm}/\text{day})^a]$	$[\text{1}/\text{day}]$	$[-]$	$[\text{mm}/\text{day}]$	$[\text{1}/\text{day}]$	$[\text{mm}]$
砂	1.1087	0.00147	1.967	0.1355	0.0114	1.27.E-03
赤玉	0.9020	0.00109	2.042	0.8343	0.0369	5.51

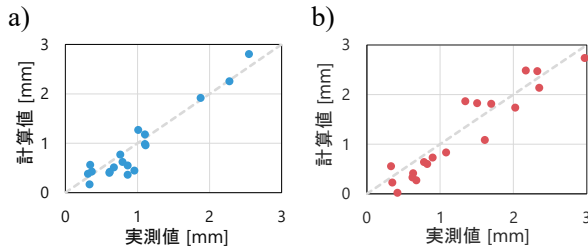


図 3：侵食深の実測値と計算値
a) 砂山, b) 赤玉山

3.2 降雨・乾燥の寄与

第 1 項および第 2 項の計算値をそれぞれ実験期間全体で積算し、全体の侵食量における降雨と乾燥の寄与の内訳を砂山・赤玉山で比較した(図 4)。降雨時の侵食量が同程度であったのに対し、乾燥時の侵食量は赤玉土で砂の約 2 倍であった。この違いの原因として、砂山ではクラストが形成されて乾燥時の侵食が抑制されることや、粒径が大きい赤玉土では乾燥時に土粒子が転がり落ちる際に一粒当たりの変化量が大きくなることが考えられる。

3.3 パラメータ値が示す侵食メカニズム

1) 降雨時の侵食

表 1 より、砂山・赤玉山ともに a はおよそ 2 となった。この値の妥当性を検討するため、 a に 0.1 から 5 までの様々な値を入れて固定し、残りのパラメータの値を再度ソルバーにより決定して決定係数の推移を調べたところ、いずれの土質においても $a=2$ で明瞭なピークが見られた(図 5)。 $a=1$ の場合、モデルは、侵食量が降雨量に比例することを表しているが、 $a=2$ の場合でより大きな決定係数が得られていることから、降雨強度が大きいほど侵食に及ぼす影響が大きくなることが考えられる。既往研究(種田, 1950、小高ら, 1984)においても侵食量が降雨強度のおよそ 2 乗と強い関係を示すことが報告されており、種々の土質に共通した雨滴侵食に関する一般的な傾向であることが推察される。

2) 乾燥時の侵食

バケツ容量 H_c は、降雨後に築山表面の土粒子が

移動を開始するまでに要する蒸発量を表している。表 1 より H_c は砂ではゼロに近く、赤玉土ではより大きな値となった。図 1 に示したように砂は鉱物粒子から成り、粒子間の水分が蒸発すれば粒子間の粘着力が直ちに失われて移動を開始することが考えられる。これに対して赤玉土は多孔質の粒から成り、粒子の移動開始のためには、粒子間の水分だけでなく、粒子内部の水分が蒸発して粒子の軽量化が進む必要があると考えられる。以上の違いが H_c の違いを生んだと推察される。

3) 侵食現象の時間減衰

観測期間における $\exp(-\alpha t)$ 、 $\exp(-\beta t)$ の時間変化を図 6 に示す。 $\exp(-\alpha t)$ に着目すると、砂山・赤玉山ともにほとんど減衰していない。このことは、降雨時の侵食には、時間とともに変化する斜面形状の影響はほとんど現れず、外部からもたらされる雨滴の衝撃力が支配的な要因となっていることを示唆している。

一方で $\exp(-\beta t)$ に着目すると、実験初日と比べて最終日には砂で約 1/2、赤玉土で約 1/10 にまで減衰している。このことは、乾燥時の侵食には斜面形状の与える影響が大きく、時間の経過に伴う斜面の緩勾配化によって侵食量が減少することを示唆している。特に赤玉土では減衰が大きくなっており、斜面形状変化が与える影響には土質差があると考えられる。

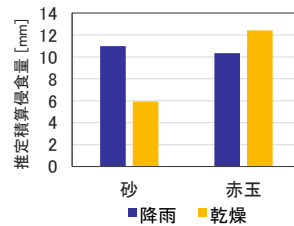


図 4：寄与の内訳

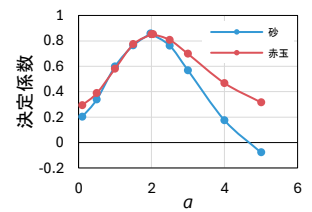


図 5：a による決定係数の変動

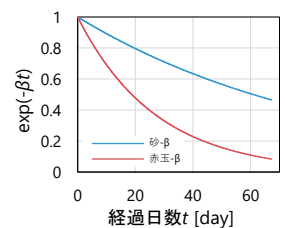
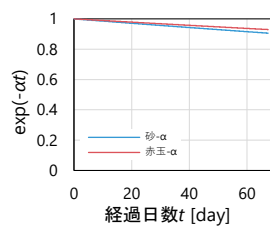


図 6： $\exp(-\alpha t)$ 、 $\exp(-\beta t)$ の時間変化

謝辞

本研究を行うにあたり、実験区画の整備および気象データの提供にご協力いただいた京都大学北白川試験地の皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- 小高和則, 遠藤治郎(1984)日本林學會誌,66(2), p.67-71.
- 種田行男(1950)農業土木研究,18(2), p.94-100.