

## 裸地斜面における霜柱に起因した表面侵食の簡易モデル化

信州大学 ○中沢勇真, 福山泰治郎, 堤大三

### 1. はじめに

崩壊地等の裸地斜面で発生する凍結・融解に起因した土砂生産現象は、小規模だが恒常的である。本研究は、それら凍結・融解現象の中で霜柱に起因した表面侵食に着目し、生産土砂量を求める簡易モデルの開発を目的として現地実験を実施し、モデルと理論式の結果との比較を行った。

### 2. 実験方法

信州大学農学部構内の圃場で、市販の黒ボク土を用いて盛土斜面を造成した。斜面は勾配  $30^\circ$ 、幅 75 cm、斜面長 140 cm である（図-1）。法尻に土砂受け箱（幅 32 cm）を設置し、早朝と霜柱融解後に箱内部の侵食土砂を回収した。同時に、霜柱の形態（土粒子の混入程度）の観察、ノギスを用いた霜柱長の計測、50 ml の採水ボトルを用いて霜柱のサンプルを採取し、霜柱の含有土砂量（土粒子の含有量）を計測した。さらに、基準位置に置いた指標の移動距離を融解後に測り、凍結・融解による土砂の移動距離を求めた。気温や風速、日射量、降雨量、斜面上部と下部の体積含水率、地温（深度：3 cm、10 cm）を観測した。

観測は 2023 年 12 月～2024 年 3 月まで実施した。斜面下部では上部に比べ、地温や体積含水率が霜柱の形成に適した条件となることが多く、安定した霜柱の消長が確認されたことから、斜面下部において霜柱の形態観察や計測を行った。観測期間において、土粒子の混入量が少なく透明に近い透明な霜柱と土を多分に含んだ土柱の発生率はほぼ同等であり、全て「透明」か「土柱」のどちらかに判別した。

### 3. 実験結果

図-2 に示したとおり、夜間の気温が低く、氷点下以

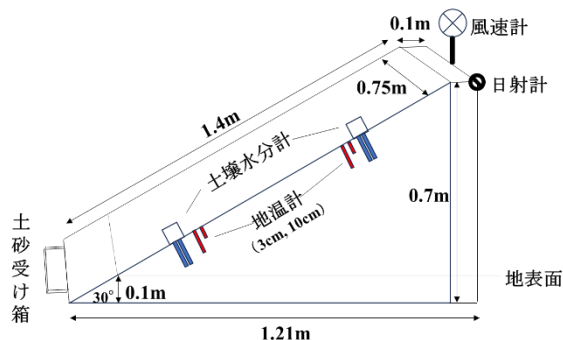


図-1 盛土斜面の概要

下の時間が長いほど、霜柱が長く成長する傾向にあり、降雨・融雪後の数日間で透明な霜柱が発生する傾向が見られた。辰野（1961）は土壤水分によって霜柱の形態に変化が見られたことを報告している。そこで、土壤水分の指標として実効雨量を適用し、実効雨量（半減期 3 日）と霜柱の形態とを比較したところ、異常値を除いた際、実効雨量 15 mm において、霜柱の形態が土柱と透明に近い霜柱とに分かれる傾向が見られた（図-3）。また、土柱では、霜柱長が長いほど土砂子の含有量が多くなる傾向が見られたものの、透明な霜柱では同様の傾向は見られず、多くの場合で土柱の方が透明な霜柱に比べ、土粒子の含有量が多かった。土砂の移動距離は、霜柱長の増加と共に長くなる傾向が見られた。

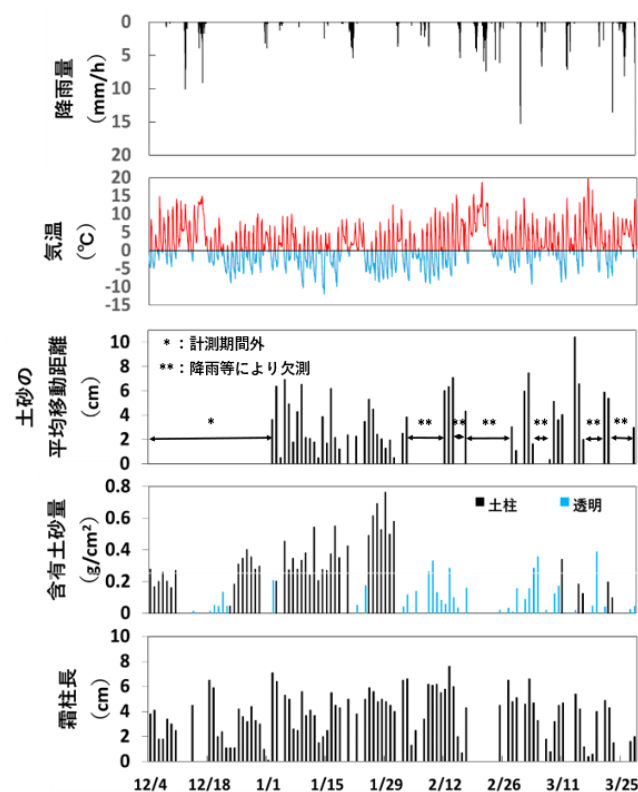


図-2 霜柱に関する観測結果及び気温、時間雨量の経時変化

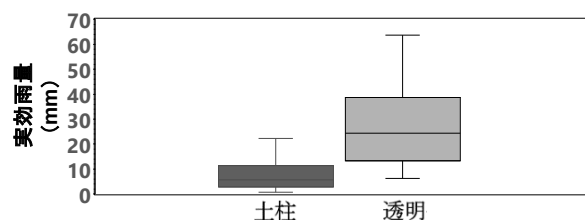


図-3 実効雨量と霜柱の形態との関係

#### 4. 簡易モデルの構築

本研究では、霜柱の凍結・融解サイクル1イベントが24時間以内に完結するものとした。

霜柱による一回の侵食土砂量： $Q$  (g) は、従来、例えば小野 (1978) が述べている通り、理論的には以下の式で導ける。

$$Q = q \times L \times B \quad (1)$$

ここに、 $q$ ：霜柱の含有土砂量 ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )、 $L$ ：上載土砂の移動距離 (cm)、 $B$ ：斜面幅 (cm) である。

実験結果の検討から、式 (1) 中の  $q$  は、土柱では霜柱長を関数とした二次式で表される傾向が示されたが、霜柱長が 6 cm 未満では、直線式で近似できる事が分かった。

$$q = \alpha l \quad (2)$$

ここに、 $l$ ：霜柱長 (cm)、 $\alpha$ ：実験定数である。

土砂の移動距離： $L$  に関して、実験から得られた霜柱長と移動距離の関係や Lawler (1984) 同様に、霜柱が斜面下方にドミノ状に倒れる様子が観察されたことから、霜柱の頂部より先に霜柱底面が融解し、土を含んだ霜柱が斜面下方へと転倒する toppling が発生していると判断した。このことから、 $L=l$  とした。以上を (1) 式に代入して整理すると次式が得られる。

$$Q = \alpha l^2 B \quad (3)$$

霜柱の形態が土柱の時、含有土砂は霜柱中に等分布で混入していると仮定すると、(3) 式は以下となる。

$$Q = 1/2 \alpha l^2 B \quad (4)$$

霜柱長： $l$  は、以下の式で導ける。

$$l = \bar{v} \times t \quad (5)$$

ここに、 $\bar{v}$ ：霜柱の平均成長速度 ( $\text{cm}/\text{h}$ )、 $t$ ：霜柱の成長時間 (h) である。霜柱の成長速度は地表面の放射熱のみを考慮した場合、 $0.2 \sim 0.4 \text{ cm}/\text{h}$  である (金光, 1956)。そこで、成長速度を  $0.3 \text{ cm}/\text{h}$  とし、気温  $0^\circ\text{C}$  以下の時間を霜柱の成長時間として、簡易的に求めたところ、十分な再現性が見られた。

#### 5. 理論式の検証及び簡易モデルとの比較

今回の計測では、1 イベントの侵食土砂の全量が毎回土砂受け箱に到達するわけではなく、斜面下端に一時的に堆積した後、まとまって土砂受け箱に入る現象が断続的に発生したため、1 イベント毎の再現性は低い結果となった。

そこで、積算の侵食土砂量とモデル式による再現値との比較を行った。(3) ～ (5) 式において  $\alpha = 0.09 \text{ g}/\text{cm}^3$ 、 $\bar{v} = 0.3 \text{ cm}/\text{h}$ 、 $B = 32 \text{ cm}$  とした。

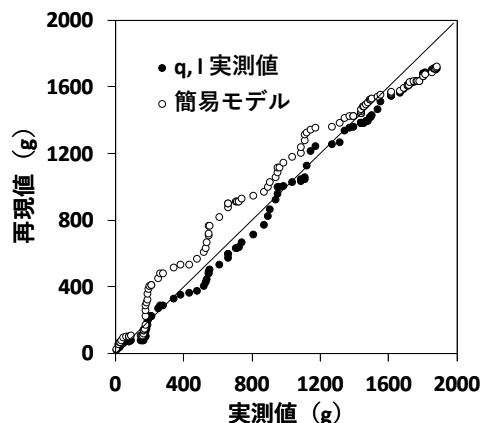


図-4 積算侵食土砂量の実測値と再現値との関係

この結果、実測の  $q$ 、 $l$  を用いた理論的な再現値 (図-4, ●) は実測の積算侵食土砂量を概ね再現しており、1 シーズンを通した積算侵食土量は、実測値 (1,880 g) に対して 1,707 g (91 %) となった。また、実効雨量 25 mm を霜柱の形態変化の閾値として、実測の気温及び降雨量を入力値とする簡易モデルによる再現値 (図-4, ○) は、実測値に対して 1,719 g (91 %) となった。これらの結果から、理論式および簡易モデルはともに十分に実態を再現しうると判断した。

#### 6. おわりに

霜柱による侵食土砂量を求める理論式を、実測に基づいて検証し、理論の妥当性を実証した。加えて、モデル式の変数がいずれも全て霜柱長との関係性が見られたことを利用し、気温と降雨データから侵食土砂量を推定する簡易なモデルを構築した。今後は、変化する水分量や異なる土質での霜柱の特性に関して研究を行い、それらに対応可能なモデル作成を目指していく予定である。

#### 引用文献

- Lawler, D.M. (1984) : Processes of river bank erosion: the River Ilston, South Wales, U.K., Unpubl. Ph.D. thesis, Univ. of Wales
- 金光達太郎 (1956) : 土地と接地気層の気象条件による霜柱発生予測の予知について, 茨城大学農学部学術報告, Vol.4, p.135-143
- 小野有五 (1978) : 周氷河営力としての霜柱, 筑波大学水理実験センター報告, Vol.2, p.47-55
- 辰野良秋 (1961) : 霜柱による侵食の防止に関する実験的研究, 京都大学博士論文, 79 pp.