

凍結融解作用による土砂生産とモデル化

京都大学大学院工学研究科
日本工営株式会社
京都大学防災研究所

○手島宏之
伊藤元洋
堤大三・藤田正治

1. はじめに

裸地斜面では、凍結に伴い構造破壊が生じた基岩が融解することによって土砂が生産される。我が国においては、冬期における裸地斜面の凍結融解作用は九州地方まで見られるため、こうした現象を解明することは重要である。よって本研究では、このような現象に起因する土砂生産機構の解明を行う。そのために、現地観測とその結果を基に再現シミュレーションを行い土砂生産量の適合性を検討した。また、生じた土砂が堆積することによる熱伝導への影響も検討した。その結果、土砂化するには基岩が凍結融解を繰り返し受けなければならないこと、また、凍結深さには堆積土砂によって熱的性質が変化することによる影響は少ないことが分かった。

2. 現地観測

滋賀県田上山の裸地斜面において、2004 年 12 月 26 日から 2005 年 4 月 17 日まで凍結融解に関する観測が行われた¹⁾。風化花崗岩がむき出しになっている斜面に観測地点を設け、地表面温度、地中温度および観測地点範囲内の土砂量が測られている。また、地点は約一週間毎に土砂を剥ぎ取り採取したもの（以下プロット 1）と、観測期間中手を加えず放置していたもの（以下プロット 2）に区別されている。

図-1 にプロット 1 での土砂生産量と積算寒度（0℃以下の温度と時間の積算値）の関係を示した。ある程度の相関が見られるが、概ね観測初期の土砂生産量が少なく期間の後半に土砂が多く生産されることから、土砂化のためには凍結融解を繰り返し受け風化されることが必要であると思われる。また、土砂生産量はプロット 1 では合計 34.1kg であったのに対し、プロット 2 では半分以下の 13.9kg であった。この要因は堆積土砂の影響や剥ぎ取りによる基岩面の露出が考えられる。以上の観測結果の要因を以下の数値シミュレーションによって検討する。

3. 数値シミュレーション

3.1 基礎式

本研究では既往の研究²⁾を参考にして、以下の 1 次元熱伝導方程式を用いた。

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) + L \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = C_v \frac{\partial T}{\partial t} \tag{1}$$

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D \frac{\partial \theta_w}{\partial x}\right) - \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \tag{2}$$

$$\theta_w = \theta_w(T) \tag{3}$$

ここに、 x ：位置座標、 t ：時間、 λ ：土の熱伝導率、 L ：水の凍結潜熱、 C_v ：土の体積熱容量、 θ_w ：体積含水率、 θ_i ：体積含水率、 ρ_w ：水の密度、 ρ_i ：氷の密度である。また、(3)式は温度と含水率の関係式であり、本研究では Jame-Norum 式を用いた。また、凍上による体積膨張や基岩内の水分移動は本研究では簡単のため考慮していない。また、パラメータは表-1 に示したものをうい、境界条件

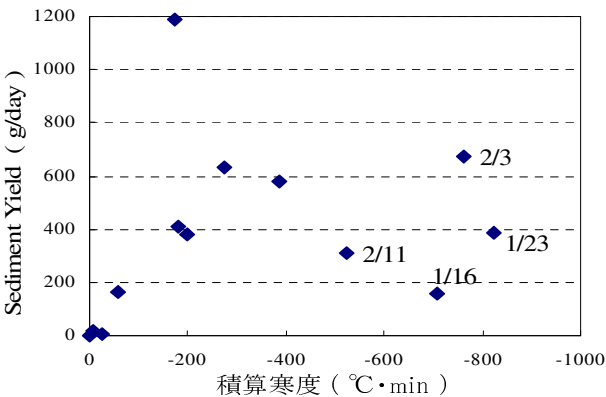


図-1 プロット 1 の土砂
表-1 計算で用いたパラメータ

	熱伝導率 λ [W/m ² /K]	比熱 C [W/kg/K]	密度 ρ [kg/m ³]
基岩	3.0	921.0	2650.0
空気	0.024	1006.0	1.29
水	0.582	4186.0	1000.0
氷	2.255	2093.0	1000.0

キーワード 凍結融解，土砂生産，モデル
連絡先 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄京都大学防災研究所流砂災害研究領域 TEL0774-38-4121

は観測により得られた表面温度と、地下 10 m には 50cm の実測値のねっかん平均温度 10.17℃を与えた。

3.2 堆積土砂の影響

ここでは基岩表面に生産された土砂が堆積することによる温度の伝わり方の変化を調べるため、堆積土砂の熱拡散率を変え数値実験を行った。まず、初期条件として地表面から 2 cm が土砂（熱拡散率 $\lambda/C=3.8 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ）となっていると仮定したものと全て基岩（熱拡散率 $\lambda/C=6.1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ）であるものに区別し、周期一日のサインカーブを地表面温度変化として与えた。図-2 より、両者には若干の違いが見られるが、その凍結深さにはほとんど影響が無く、先に示したプロット 1 と 2 の違いの要因は熱物性値の違いによる凍結深さの影響ではなく、剥ぎ取りにより基岩面が露出することによって新たな土砂が生産され、両者の土砂量の違いとなったと推察される。

3.3 凍結融解履歴の効果

次に観測された土砂量の再現計算を試みた。剥ぎ取りのタイミングは観測と同じとし、不凍水を考慮して -1℃ を凍結と融解の基準温度とした。さらに凍結融解による風化を考慮するため、剥ぎ取りの層を、凍結融解作用を 1, 5, 10 回受けたものに分類して、それぞれ計算を行った。図-3 より、凍結融解作用を 10 回受けたものを剥ぎ取った結果（以下ケース 1）が、最も実測と近い値となった。他の 2 つは実測より大きな結果を得ており、これは観測結果において初期の土砂生産量が少ないこととよく対応している。このことより、基岩が土砂として生産されるには凍結融解を複数回受けなければならないと言える。

また、図-4 よりケース 1 におけるプロット 1 の土砂量の合計と、プロット 2 を再現した計算結果（最後に土砂の剥ぎ取りを行った結果）の土砂量の違いは計算値が実測値より大きな値を示しているが、その傾向は概ね観測を再現できている。

4. 終わりに

本研究では凍結融解による土砂生産量を数値シミュレーションにより試みた。概ね観測値を再現することができたが、現段階では凍上や水分移動を考慮していないため、今後これらを考慮したモデルを作成する必要がある。また、地表面での日射や風を含めた大気と地盤系での水と熱収支モデルの構築や、凍結融解に起因する基岩の構造破壊がどのようなメカニズムで行われているかを解明し、凍結融解の深さや回数がどのように土砂生産に影響しているかを検討していく必要がある。そして今後、凍結融解作用による土砂生産の総合的な予測を行い、その量や生産過程を解明していく。

参考文献

- 1) 伊藤元洋ほか：田上山地の裸地斜面における凍結融解と土砂生産の観測，平成 17 年度砂防学会研究発表会概要集，p296-297
- 2) 陳曉飛ほか：熱と水の同時移動モデルによる土壌凍結・融解課程の数値実験法，土壌の物理性，No.78，p.25-34，1998

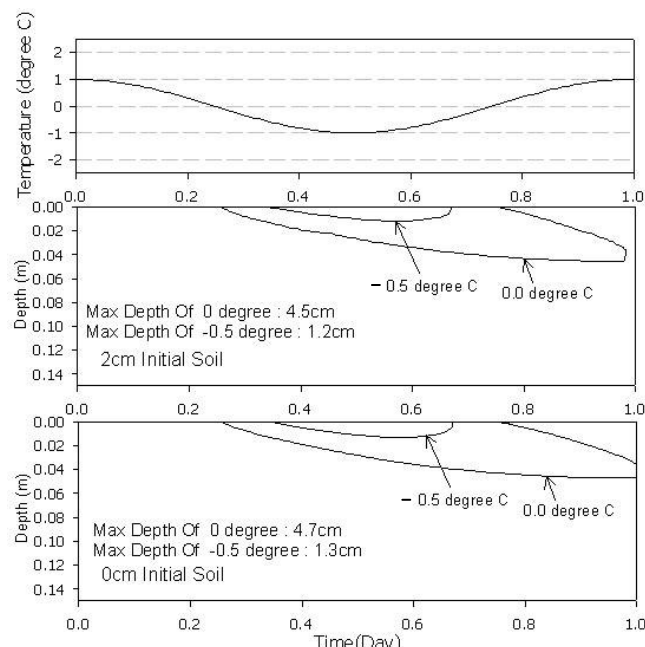


図-2 数値実験結果

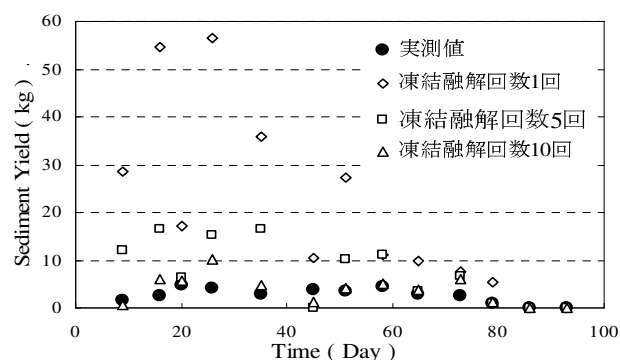


図-3 土砂生産量の計算結果

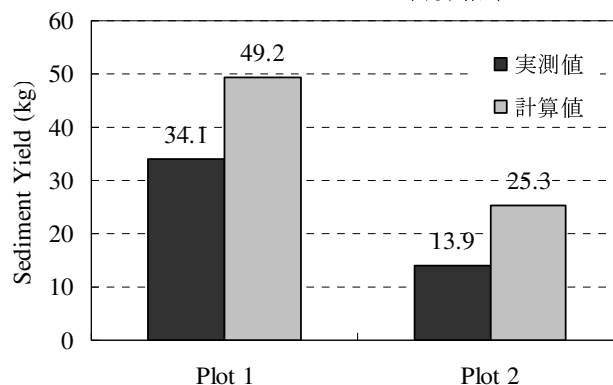


図-4 プロット 1 と 2 の比較