

裸地斜面の凍結融解に関する数値計算

京都大学大学院
 京都大学防災研究所
 日本工営株式会社
 京都大学大学院農学研究科

○手島宏之
 堤大三・藤田正治・澤田豊明
 伊藤元洋
 小杉賢一朗・水山高久

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、流砂系において土砂生産のひとつである凍結融解現象のメカニズムを解明することは重要である。よって本研究では、土砂生産量を推定する上で必要不可欠である基岩内温度分布の変動を知るために、既往の観測結果に対する再現シミュレーションを行い、数値計算と観測値の整合性を検討した。その結果、地表面温度が凍結温度以上の時は観測結果をよく再現できたが、凍結温度以下になると実測値と計算値に若干の誤差が生じたため、その影響を考察した。

2. 既往の観測結果と計算概要

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。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(10cm, 25cm, 50cm)が観測されている。図-1は地表面温度の時間変化である。本研究ではこの地表面温度変化を境界条件として熱伝導計算を行い、基岩内温度分布変化を再現した。そして観測された地中温度変化と比較し、熱伝導計算の整合性を検討し

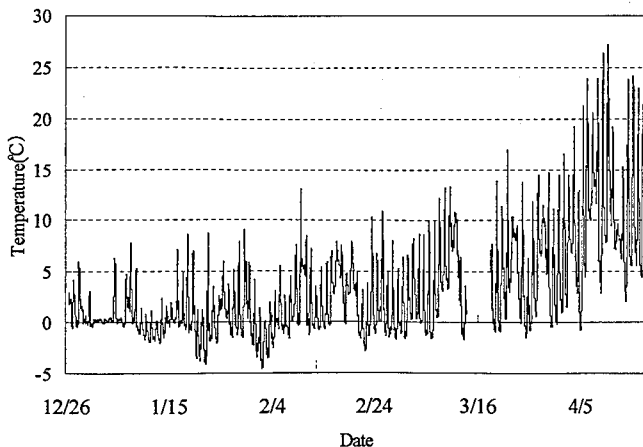


図-1 地表面温度の観測結果

た。

3. 数値シミュレーション

3.1 基礎式

本研究では以下の1次元熱伝導方程式と水分移動を表す式、不凍水と温度の関係を表す式を用い、有限要素法を用いて解いた。

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

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

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

ここに、 T : 温度, x : 位置座標, t : 時間, λ : 熱伝導率, L : 水の凍結潜熱, C_v : 体積熱容量, θ_w : 体積含水率, θ_i : 体積含氷率, ρ_w : 水の密度, ρ_i : 氷の密度, D : 水分拡散係数である。ここで熱伝導率 λ , 体積熱容量 C_v に関しては、空隙, 水, 土粒子, 氷の値にそれぞれ含有率をかけ、その合計を要素内の値とした。

また、(2)式は基岩内の水分移動を表す式である。本研究は風化基岩を対象としており、土層と比べ内部の水分移動が少ないと思われるため、(2)式において $D=0$ とした。基岩内の水分は潜熱の影響で 0°C 以下になっても凍らず不凍水として存在する。そこで、(3)式の温度と含水率の関係式を用い 0°C 以下の含水率を規定した。具体的には以下の Jame-Norum (1980) によるカロリーメートル法の実測値に基づく式を用いた。

$$\begin{aligned} T &= 0 & (\theta_w \geq 0.35) \\ T &= (\theta_w - 0.35)/6 & (0.05 \leq \theta_w < 0.35) \\ T &= (\theta_w - 0.0583) \times 60 & (0.025 \leq \theta_w < 0.05) \\ T &= -2 & (\theta_w < 0.025) \end{aligned} \tag{4}$$

パラメータは表-1に示したものを用い、境界条件

は観測により得られた地表面温度と、地下 10 m の一定温度を与え、図-2 に示した手法により収束計算を行った。また、実際の現象では凍結時に凍上現象が起き、体積膨張が見られるが、簡潔のためそれを無視した。

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 |

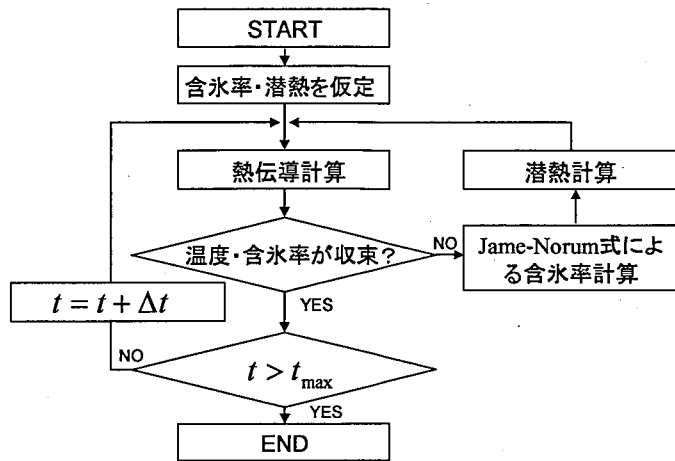


図-2 収束計算の手法

3.2 地中観測温度との整合性と考察

地中温度分布変化の計算結果と観測値との比較 (10cm, 25cm) を図-3 に示す。両結果とも、地表面温度が 0°C を下回ると同時に誤差が大きくなり、計算値の日変化 (細かな振動) が見られなくなる。考えられる要因として、凍上による体積膨張の影響や基岩中の水分移動の影響を考慮していないことによる潜熱発生形態の違いが考えられる。また (4) 式が本研究の対象である風化花崗岩の特性を正確には表していないことや、観測地点における岩の比熱や熱伝導率などの熱物性値が実際のもものと完全には一致していないことも挙げられる。しかし、現段階では正確にこれらの誤差の要因を特定することはできない。今後、風化花崗岩の熱物性値などを測定した上で、水分移動や凍上を考慮したモデルを作成し、誤差の要因を特定する必要がある。

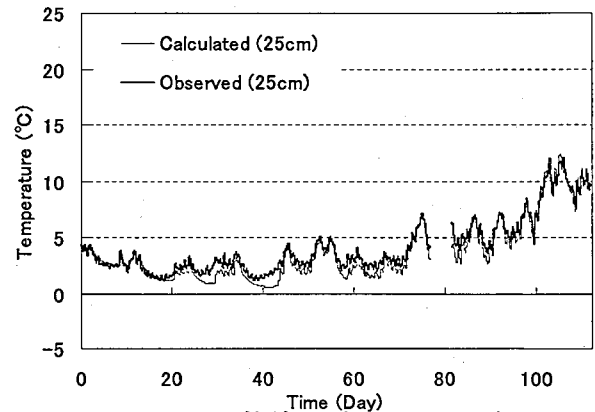
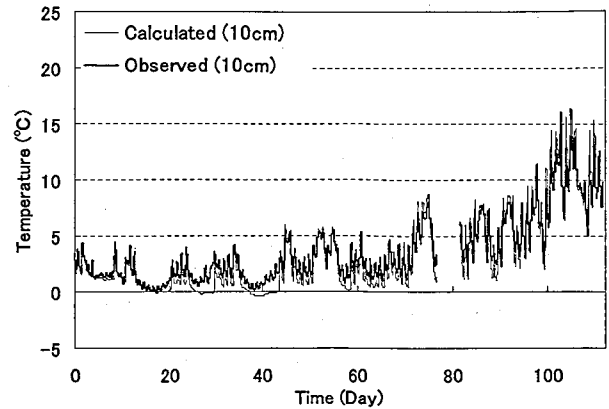


図-3 計算結果 (10cm, 25cm)

4. 終わりに

本研究では観測された地表面温度を境界条件とし、地中温度変化の再現を数値シミュレーションにより試みた。概ね観測値を再現しているが、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、岩の熱物性値の正確な把握や、(4) 式のような不凍水と氷が基岩温度によりどのように変化するかの特定期が現象を把握する上で必要となる。また、地表面での日射や風が地表面から水分が蒸発する際の潜熱等に影響すると思われることから、今後これらを含めた大気と地盤系での水と熱収支モデルの構築しなければならない。最終的にはこれらを利用し、凍結融解による土砂生産のメカニズムを解明していく。

参考文献

- 1) 堤大三, 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