

地球温暖化に伴う凍結融解による土砂生産特性の変化

京都大学大学院工学研究科

泉山 寛明

京都大学防災研究所

堤 大三

京都大学防災研究所

藤田 正治

1. はじめに

我が国では山間部における土砂生産現象の一つとして凍結融解による基岩の土砂化が重要である。そして将来的には地球温暖化による気候変化によって土砂生産特性が変化すると予想され、砂防工学上これを把握することが必要となる。堤ら¹⁾は凍結融解による土砂生産量は凍結深さと凍結融解を経験した回数の両方に大きく左右されると指摘していることから、両者は土砂生産量の指標として用いることができると予想される。そこで本研究では、凍結融解回数と凍結深さの両方を加味した新たな指数（以下、凍結融解強度指数と呼ぶ）を定義し、滋賀県田上山地裸地斜面を対象として堤ら²⁾の開発した一般的な気象データを入力データとする熱伝導解析モデルを用いてこれを求めた。また、将来の気候変動を想定して仮想的に気温が上昇するとした場合の凍結融解強度指数の変化を検討した。

2. 解析方法

解析に用いる基礎式は水が氷となる時の潜熱の発生を考慮した熱伝導方程式(1)と、水分の質量保存式(2)である。

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho_i L_w \frac{\partial \phi}{\partial t} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_w \theta + \rho_i \phi) \quad (2)$$

ここに、 z :深度、 λ :基岩の熱伝導度、 T :地中温度、 ρ_i :氷の密度、 L_w :水の融解潜熱、 ϕ :含氷率、 t :時間、 ρ :基岩の密度、 c :基岩の比熱、 θ :含水率である。なお解析では水分移動を無視している。そしてJame & Norum²⁾によって得られた不凍水含有率と温度との経験式を用いて未知数 T 、 θ 、 ϕ が解析される。また境界条件として地表面温度を入力する必要があるが、堤ら²⁾の方法により一般的な気象データである気温 T_a 、日射量 $S\downarrow$ 、風速 U から式(3)の地表面における熱収支式より求めることができる。

$$\int_0^{De} \frac{d(c_G \rho_G T_G)}{dt} dz + \int_0^{De} \frac{d(\rho_i L_w \phi)}{dt} dz \quad (3)$$
$$= S\downarrow - S\uparrow + \sigma T_a^4 - \sigma T_s^4 - c_p \rho C_H U (T_s - T_a)$$

ここに、 De :熱伝導を無視できる十分な深さ、 $c_G \rho_G$:基岩の

体積熱容量、 T_G :地中温度、 $S\uparrow$:上向き短波長放射量、 σ :ステファン・ボルツマン定数、 T_s :地表面温度、 T_a :気温、 $c_p \rho$:空気の体積熱容量、 C_H :バルク係数である。 $S\uparrow$ には裸地でのアルベド(0.15)を $S\downarrow$ に乗じたものを与えた。以上で地中温度を推定できるが、この計算は地面が水平である場合に対するものである。それは観測されている日射量が通常は水平面に対するものだからである。ある方角と勾配をもつ斜面では、その斜面に入射する日射量(斜面日射量)を別途求め、これを入力データとして使用しなければならない。斜面日射量は式(4)に示すように日射の入射角 i が分かれば大気透過率と太陽定数を仮定し、水平面日射量の関数として求めることができる。

$$\cos i = \cos \zeta \sinh + \sin \zeta \cosh \cos(A_s - A) \quad (4)$$

ここに、 ζ :斜面勾配、 h :太陽高度、 A_s :太陽方位角、 A :斜面の方角である。なお入射角 i は斜面に対する垂線からのずれで表現し、 $i=0$ であれば日射は斜面に垂直に入射する。

計算は鉛直次元で有限要素法により行う。入力する一般気象データには2006年12月から2007年4月に滋賀県田上山地裸地斜面で観測された気温、水平面日射量、風速を用いる。なお日射量は裸地斜面を含む $400 \times 580\text{m}$ の小領域を $20 \times 20\text{m}$ メッシュに区切り、メッシュごとの平均斜面勾配、方角から得られる斜面日射量に変換した。そしてメッシュごとに熱伝導計算を行った。さらに斜面日射量と風速は同じで、気候変化によって気温 T_{a1} のみが 2°C 上昇すると想定した場合の気温 T_{a2} を用いて計算を行った。図1は気温の入力データである T_{a1} 、 T_{a2} を示す。 T_{a1} では 0°C を下回る回数が164回であるが、 T_{a2} ではそれが102回に減少し、気温上昇による影響が見られる。

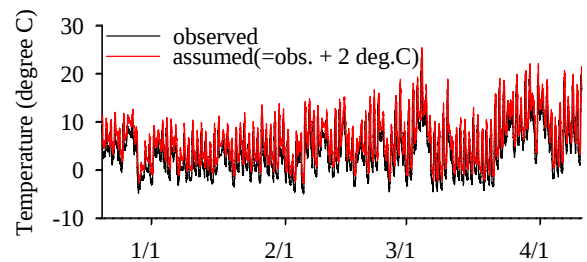


図1 気温の観測値と気候変化による 2°C の温度上昇を仮定した場合の気温

3. 解析結果と考察

図2の左図は入力データとして気温の実測値 T_{a1} を用いた時の凍結面進行曲線を示す。凍結面進行曲線は深度方向に 0°C となる点を時系列的に結んだ線であり、間隙水が凍結しているか否かを表す。期間中の最大凍結深さ推定値は 0.63m であった。そして図2の右図はこの凍結面進行曲線から得られる凍結融解回数, 最大凍結深さ及び凍結融解強度指数を示している。期間中の凍結融解回数は地表面近くで約50回程度であり, 深度が増すにつれて少なくなっていることが分かる。凍結融解強度指数は図に示すように凍結融解回数を深度方向に積分したものと定義している。冒頭にも述べたように, 凍結融解による土砂生産量は凍結深さおよび凍結融解回数に大きく依存しているため, 両方が加味された凍結融解強度指数は凍結融解の土砂生産量に与える影響を総合的に表すものと考えられる。

図3aは気温の実測値 T_{a1} を, 図3bは気候変動により気温が 2°C 上昇したと仮定した場合の気温 T_{a2} を入力データとして用いたときの, 田上山地裸地斜面での凍結融解強度指数の分布を示す。赤線で示した領域内が裸地部を表す。図3aを見るとメッシュごとに斜面向き, 勾配が異なるため, 凍結融解強度指数は場所により異なっていることが分かるが, 図3bの気温上昇を仮定した場合は場所による違いはあまり見られない。図3a, bを比較すると気温上昇により裸地全体で凍結融解強度指数が半分近く減少しており, これより土砂生産量が減少する可能性が考えられる。

4. おわりに

今回の解析結果から気温上昇により凍結融解強度指数が半分程度に減少し, これより土砂生産特性が大きく変化することが予想された。ただし, 凍結融解強度指数と土砂生産量の間に明瞭な関係は今のところ明らかではないため, 今後は両者の間の関係を明らかにすることが必要となる。また流域スケールなど, より大スケールで凍結融解強度指数の分布を表現することや, 他の気候帯における気温上昇の影響などを検討予定としている。

参考文献

- 1)堤ら：凍結融解による土砂生産に関する基礎的研究—田上山地裸地斜面における現地観測と数値シミュレーション—, 砂防学会誌 59(6), pp.3-13, 2007.
- 2)堤ら：気温上昇による土砂生産に対する凍結融解の影響変化予測, 水工学論文集 第53巻, pp.649-654, 2009.

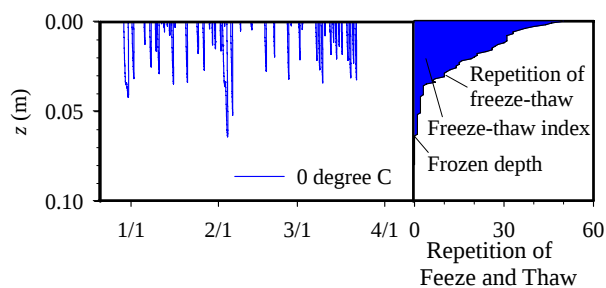


図2 水平面を仮定した場合の凍結面進行曲線（左図）と凍結融解回数, 最大凍結深さ, 凍結融解強度指数（右図）

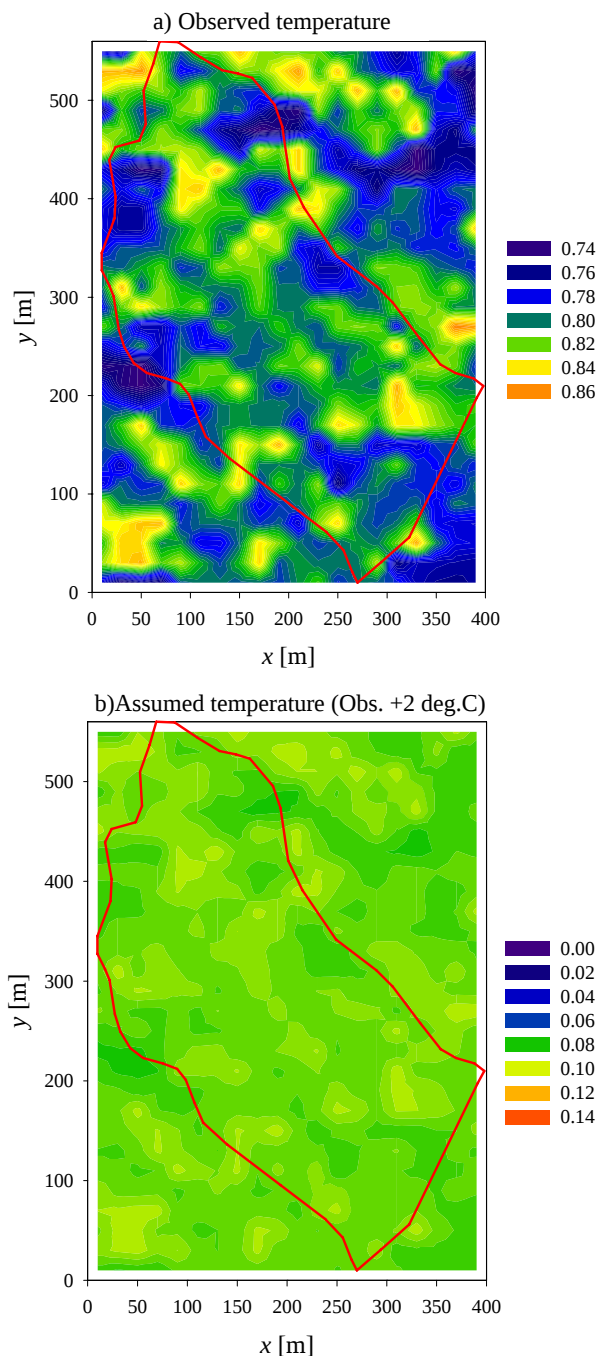


図3 田上山地裸地斜面における凍結融解強度指数の分布: a) 観測された気温を入力した場合, b) 気温が 2°C 上昇したと仮定した場合