

気候変動が凍結融解による土砂生産に与える影響

広島大学 ○木戸理歩・井上卓也・サムナー圭希

寒地土木研究所 水垣滋

1. はじめに

気候変動の進行によって極端な高温、大雨、干ばつ、熱帯低気圧の増加や海氷、積雪、永久凍土の縮小が予測されており、寒冷地における土砂生産要因である凍結融解には、気温の上昇や積雪の縮小が影響を及ぼす。凍結融解とは、風化基岩の間隙に存在する水分が凍結し、岩石の構造が破壊されて土砂化する現象であり、毎年恒常的に河道へ土砂を供給する¹⁾。積雪があると、その断熱効果によって凍結が抑制されることが分かっており、気候変動が凍結融解に及ぼす影響を明らかにするためには、気温と積雪の両方を考慮するべきである。

本研究では現地観測を行い、凍結融解による侵食量を把握する。さらに、大量アンサンブル気候予測データ(d4PDF)²⁾の気象データを、地温の深度分布を計算するモデルに入力し、気温と降雪量が凍結融解に及ぼす影響やその変化を検討する。

2. 対象流域

対象流域は北海道十勝川水系ペケレベツ川の上流部であり、日高山脈東部に位置する。このあたりは、主に風化しやすい花崗岩で構成されている。また、谷底の斜面表層には、氷河期に岩盤が凍結と融解を繰り返して形成された周氷河堆積物が分布している。観測を行った斜面について、標高は496m、斜面方位は南東方向、勾配は斜面上部で約60度から70度、斜面下部で約40度から50度である。

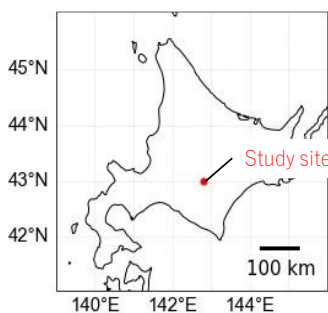


図-1 ペケレベツ川の位置と上流域の様子

3. 現地観測

3.1 観測方法

凍結融解による侵食深を調べるため観測を行った。観測期間は冬前の2022年11月から融雪後の2023年5月である。侵食深を把握するため、斜面に侵食ピンを挿し、冬前と融雪後に地上露出分の長さを計測した。また、数値計算の再現に用いるため、観測期間中の気温、日射量、深さ15cmにおける地温を計測した。

3.2 観測結果

まず、深さ15cmにおける地温の観測結果を見ると、積雪期間外は地温の変動が大きかったのに対し、積雪期間中は-3℃から0℃の間でしか変動しておらず、積雪期間外と積雪期間中で地温の変動に差が見られた。

次に侵食深の観測結果について説明する。冬前に20本挿した侵食ピンのうち7本が抜け落ちていた。図-2に残っていた13本の侵食ピンの侵食深を示す。黄色が斜面上部、緑色が斜面中部、青色が斜面下部の結果である。図-2より、斜面上部の侵食深が大きく平均18cm、最大29cmの侵食が見られた。斜面中部は上部に比べると侵食深が小さく、平均6cm、最大11cmであった。また、斜面下部には堆積が見られ、平均9cm、最大26cmの堆積があった。最も降雪量が多かった12月18日の斜面の様子を見ると、斜面上部にはほとんど雪が積もっていなかったが、斜面中部には時々積雪が見られた。その他の日も斜面上部には積雪がないが斜面中部には積雪がある日が数日確認できた。このことから、積雪の有無が侵食深に影響する可能性が考えられる。

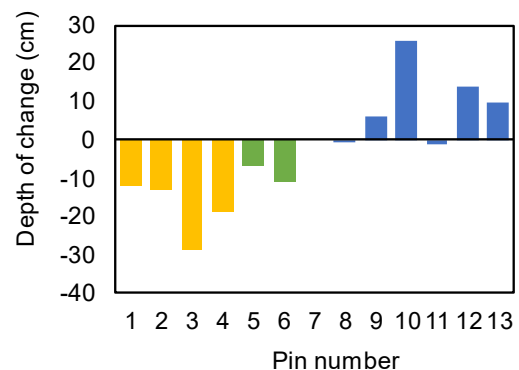


図-2 侵食ピンによる測定結果

4. モデルの概要

凍結融解による侵食深の推定には、泉山³⁾が開発した風化基岩温度を推定するモデルを用いた。

$$\rho_G c_G \frac{\partial T_G}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial z} \right) + \rho_i L_w \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (1)$$

$$\rho_w \theta + \rho_i \phi = \rho_w \theta_0 \quad (2)$$

$$\phi = \begin{cases} 0.0 & (T_G \geq 0) \\ -10(\theta_0 - 0.29)T_G & (0 > T_G \geq -0.1) \\ \theta_0 - (0.6T_G + 0.35) & (T_G < -0.1) \end{cases} \quad (3)$$

$$G_1 = \int_0^{De} \frac{d(c_G \rho_G T_G)}{dt} dz - \int_0^{De} \frac{d(\rho_i L_w \phi)}{dt} dz \quad (4)$$

$$G_2 = (1 - \alpha) S \downarrow + \varepsilon \sigma T_a^4 - \sigma T_{G0}^4 - c_{air} \rho C_H U (T_{G0} - T_a) \quad (5)$$

ここで、 ρ_G は風化基岩密度、 c_G は風化基岩比熱、 T_G は風化基岩温度、 λ_G は風化基岩熱伝導率、 ρ_i は氷密度、 L_w は水の凍結潜熱、 ϕ は含水率、 θ は含水率、 De は検査領域、 α はアルベド、 $S \downarrow$ は水平面日射量、 ε は気温、水蒸気量、雲の種類や雲量から決まる係数、 σ はステファンボルツマン定数、 c_{air} は空気熱容量、 ρ は空気密度、 C_H はバルク係数、 U は風速である。本モデルでは、地表面の熱収支を熱伝導解析モデルに組み合わせることで風化基岩温度の時系列変化を推定する。なお、凍結融解回数は含水率が0から最大（初期含水率）になった回数、つまり土中内の全ての水が凍結した回数とする。

5. 気候変動予測

上述のモデルに d4PDF 気象データを入力し、凍結融解による侵食深の気候変動予測を行った。標高が1m高くなると気温は0.0065℃低下する。気温による変化を調べるため、本研究では観測対象斜面の標高496mに加え、1332m、0mの3ケースの予測を行った。今回は標高1332m、0mの結果について説明する。

5.1 標高1332mのケース

図-3 左に累積凍結融解回数の時間変化を示す。このケースでは、将来気候の凍結融解回数が少ない。この原因として、気温が低下し、0℃を跨ぐ時期が日射量の多い時期にずれることで、この時期の凍結融解回数の差が広がることが挙げられる。また、将来気候における冬の平均気温は約-10℃であり、この期間にほとんど凍結融解が進行しなくなる。そのため、標高が高くなり気温が低下することで、気候変動後の凍結融解は減少する。

5.2 標高0mのケース

図-3 右に累積凍結融解回数の時間変化を示す。このケースの場合、将来気候の凍結融解回数が多い。図-3 右を見ると、現在気候では秋と春に活発に凍結融解が起きているのに対し、将来気候では計算期間中常に凍結融解が進行し続けている。これは、将来気候での冬季の気温が0℃に近いことためである。標高1332mのケースでは気温が0℃を跨ぐ時期が気温の季節的な変化中に訪れていたが、ケースの将来気候ではその時期が気温の安定する冬季に訪れるため、長い間凍結融解が起き続ける。そのため、標高0mの場合、凍結融解は減少する。

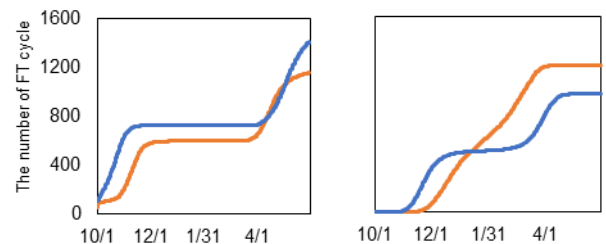


図-3 凍結融解回数（左：1332m、右：0m）

6. 結論

気候変動前後での凍結融解による土砂生産は気温が0℃を跨ぐ時期の変化によって決まることが明らかになった。まず、0℃を跨ぐ時期が冬季に訪れる気候では、凍結融解が冬の間常に活発に進行し続けるため、最も生産土砂が多くなる気候であると言える。続いて、冬季の気温が0℃以下になる気候では、気温が0℃を跨ぐ冬前、冬後に凍結融解が活発に起きる。この気候の中では、年間を通した気温が低い地域ほど、0℃を跨ぐ季節の日射量が多くなるため、凍結融解が活発に起きる。このように、気候変動前後で0℃を跨ぐ時期がどのように変化するかが、凍結融解に起きる土砂生産量の変化を決定する。

参考文献

- 1) 守岩勉, 平松晋也ら: 地上レーザによる大規模溪岸崩壊地での凍結融解による土砂生産量の計測, 砂防学会誌, 70(1), 31-37, 2017.
- 2) Mizuta R, Murata A, Ishii M et al.: Over 5,000 years of ensemble future climate simulations by 60-km global and 20-km regional atmospheric models. Bull Am Meteorol Soc 98:1383-1398, 2017.
- 3) 泉山寛明: 風化基岩における凍結融解による土砂生産プロセスとそのモデル化に関する研究, 京都大学, 2012.