

モス層の断熱効果が凍結地盤の融解に及ぼす影響に関する一考察

Effects of insulation due to moss layer on thawing of permafrost

北海道大学工学部環境社会工学科	○ 学生員	落合 凌	(Ryo Ochiai)
北海道大学大学院工学院	学生員	小川 昌也	(Masaya Ogawa)
北海道大学大学院工学院	学生員	本間 翔太	(Shota Homma)
北海道大学大学院工学研究院	正会員	鄭 好	(Hao Zheng)
北海道大学大学院工学研究院	フェロー	蟹江 俊仁	(Shunji Kanie)

1. はじめに

近年、世界規模の環境問題として地球温暖化が取り沙汰される。温暖化による平均気温の上昇率は高緯度地域ほど特に大きい傾向にあり、アラスカやシベリアなどの永久凍土地帯もこの影響を強く受けている。永久凍土地帯の地盤は地下数百 m から数 m の厚さで一年を通して凍結しており、表層は季節の移り変わりに応じて凍結融解を繰り返す活動層である。活動層の表面にはモス層と呼ばれる植生が存在し、大気と地盤の間の断熱的役割を担っている¹⁾。しかし森林火災や過度な開発によりモス層が破壊され、温暖化の影響も相まって凍土の融解が急速に進む²⁾。融解により活動層の厚さが増すと、大規模な地形変形を引き起こす。この急激な地形変形が凍土地帯の社会基盤施設や人々の生活を脅かしている。(図 1-1, 図 1-2)

またひとたび凍土の融解が生じると排水の影響で加速度的に融解が進行してゆく。故に早急な対処が必要とされるが、凍土の融解機構は十分な研究・検証がされておらず有効な対策は未だに提案されていない。

本研究では、凍土の融解による斜面の形成過程を実験と解析の両面から解明することを目的とする。既往の研究より基礎的な温度侵食による斜面崩壊は室内実験で再現された。これをもとにモス層の影響に焦点を当て、その存在が融解時の地形変形に如何に起因するかを実験で検証する。また有限要素法を用いてモス層の有無による融解過程の差異を解析する。



図 1-1：地形変形



図 1-2：構造物の被害

2. 実験

2.1 実験目的

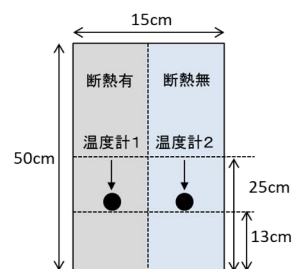
既往の研究により温度侵食による斜面崩壊の基礎的な実験方法が確立された。本実験ではこれにモス層を加味し、その存在の有無による崩壊過程の違いを観察することで、融解現象におけるモス層の役割を評価する。ここではモス層の断熱性能を表現するために断熱材として発泡スチロールを用いる。

2.2 実験方法

アクリル容器にガラスビーズを高さ 12cm まで詰め、飽和状態になるまで水を入れる。試料の一定の位置に温度計を差しこみ-10℃の環境で完全に凍結させたのち、融解させる。この際、断熱の有無による崩壊の顕著な差を観察するため、温風機をセットし融解を促進させる。融解時には2台のタイムラプスカメラを用い、断面形状の観察と温度計の計測を行う。これを基本的な実験方法とし、断熱の条件を変えていく。断熱材を全面に設置した場合と設置しない場合を比較しその効果を確認したのち、断熱材を断面方向片側半分に設置した条件で実験を行う。図 2-1 には片側半分に断熱材を設置したときの実験時の様子を示す。それぞれの実験で得られた断面形状の変化や温度の時間変化を追うことにより断熱による温度侵食の違いを見る。



断面図



平面図

図 2-1：実験条件

3. 数値解析

3.1 緒言

前章の実験では試料全体の融解の様子や温度計を差し込んだ箇所の温度変化を調査することが出来る。しかしながら試料中の任意の点の温度分布を実験で追うことは不可能であるため、本章では前章で得られたデータをもとに数値解析を行う。これにより試料の全体的な温度分布や温度勾配を表現でき、さらに将来的には実験で困難な条件であっても容易にシミュレーションが可能となることを期待する。尚、数値解析には二次元非定常熱伝導方程式を用いた有限要素法を使い、融解時の潜熱の影響も考慮すべく等価比熱法を適用する。

3.2 解析モデル

図 3-1 のように、解析領域は実験条件に即して横 50cm、高さ 12cm の二次元平面とし、各要素を一辺 0.5cm の正方形とする。

初期条件は実験開始時の初期温度に合わせ、全節点の

温度を -6°C とする．境界条件には Dirichlet 条件を適用するが，解析領域の境界に値を入れると領域の内部の温度が急激に上昇してしまう．それを防ぐため，領域内部よりも熱伝導率の低い要素を領域周辺に新たに加え，そこへ境界条件を入れる方法をとることとした．さらに，④の領域の熱伝導率を低い値に置き換えることでモス層の存在を表現する．

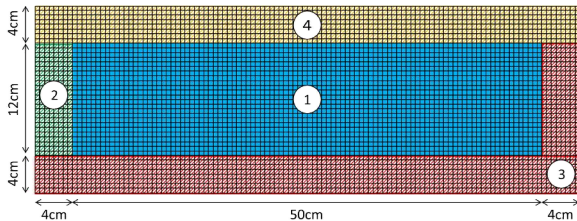


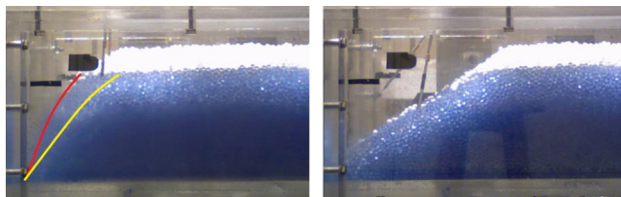
図 3-1: 解析モデル

4. 結果と考察

4.1 実験結果

断面方向片側半分に断熱材を配置した条件での崩壊過程を図 4-1 に示す．手前側半分には断熱材を置かず，奥側半分に断熱材を設置している．融解完了後（融解開始から約 16 時間後）では手前と奥で断面形状に差が見られなかったが，融解途中には斜面の角度の違いが確認された．融解開始 6 時間後の図において赤の実線が奥側の，黄色の実線が手前側の破壊面の傾斜を表している．奥側の斜面の方がより高い角度を保っていることから，断熱の効果により崩壊が遅れていることが分かる．

融解時の温度変位は解析結果と共に次節で示す．



6 時間後

16 時間後

図 4-1: 融解過程の破壊面

4.2 解析結果

実験で得られた温度変化と，解析で得られた温度計と同じ位置の温度変化を図 4-2 に示す．青の実線が断熱有（温度計 1）の，赤の実線が断熱無（温度計 2）の温度変化を表す．潜熱領域に達するまでの時間には僅かの差しか見られないが，断熱材の有無により潜熱領域の変遷時間に倍以上の差があることが確認された．さらに図 4-1 で差の見られる融解開始から 6 時間後を見ると，断熱有（温度計 1）が潜熱領域を脱しているのに対し，断熱無（温度計 2）は未だ潜熱領域内にあることから，崩壊の時間差は断熱による融解の遅れに起因すると考える．

また解析結果のグラフから，潜熱領域を脱する瞬間までは概ね実験結果と類似した値が得られていることが分かる．潜熱を超えた後の温度変位の傾きが異なっているのは，実験では融解した水は排水しているのに対し，解析では融解した後も水が存在し比熱を持っているためと考える．さらに断熱有と無のそれぞれの解析結果を可視化したものを図 4-3 に示す．断熱有の場合では上部からの熱の伝わりが遅く，無の場合と比べて凍結状態にあ

る要素が多い．また領域②の熱伝導率は双方とも同値であるにも関わらず，試料左側の温度の上りが断熱有の方が遅い．このことをより明確に表しているのが図 4-4 である．これは領域①の左端から 8cm の断面において，黒が断熱有の，赤が断熱無のそれぞれの時間毎の温度分布を示している．（左から順に 0.25, 0.5, 1, 4, 8 hr）この図から，試料上部に設置した断熱材の存在は側方にも影響を与えていることが分かる．

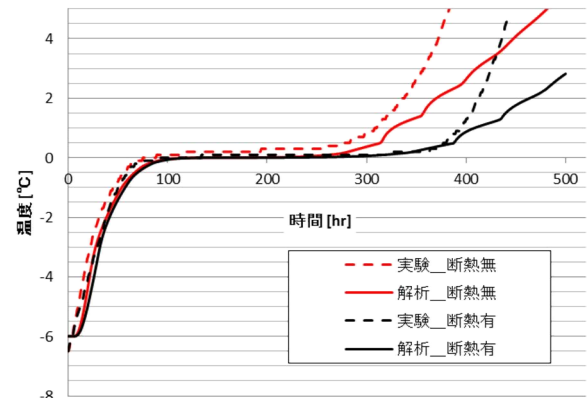
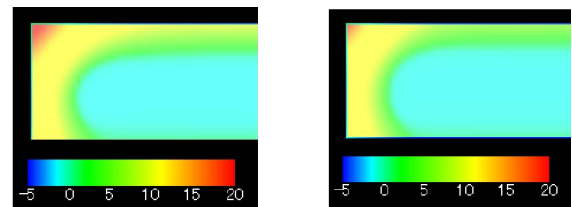


図 4-2: 温度変化



断熱無

断熱有

図 4-3: 解析結果の比較（開始 6 時間後）

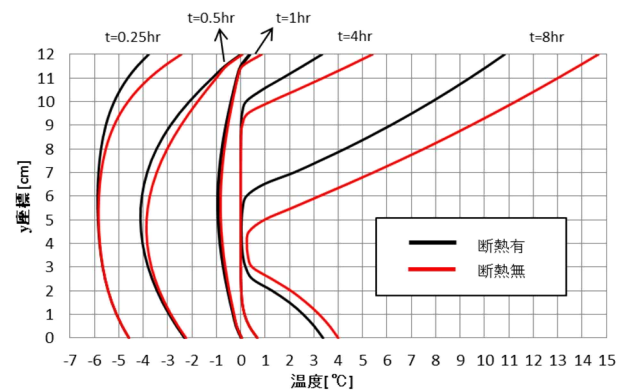


図 4-4: 融解時の断面温度分布の変遷

5. まとめと今後の展望

実験と解析から，断熱層は凍土の融解の進行を遅らせるうえで重要な役割を果たすため，永久凍土地帯においてモス層の補修を施すことは，地形変形を最小限に抑えるための効果的な対策であると言える．

今後は力学的な要素を組み込み，熱伝導・力学の連成解析に取り組んでいく予定である．

参考文献

- 1) 福田正己：永久凍土の融解と地球温暖化，講演会「温暖化に伴う環境の変遷」講演要旨 pp.1, 2005
- 2) O.A. Anisimov：Subsidence Risk from Thawing Permafrost, NATURE VOL 410, pp.889, 2001