

凍結層融解時の水分移動に関する実験および数値解析

Experimental and Numerical Studies on Soil Water Movement during Thawing Process

○釘崎佑樹・渡辺晋生

三重大学大学院生物資源学研究科

要旨 (Abstract)

土の融解過程に関する詳細な実験は少なく、数値モデルの検討も凍結過程に比べて遅れている。本研究では、凍結層融解時の水分移動を実験と数値計算により明らかにすることを目的とした。実験では融解層の水が凍結層中央に向かって移動したが、計算では凍結層上下端で水の再凍結が生じ、水分移動が停滞した。こうした氷量の過大評価の解消は融解モデルの今後の課題である。

テーマ：土壌物理研究の最前線 Trend in Soil Physics

キーワード：凍土、不凍水、再分布、HYDRUS-1D

Key words: frozen ground, unfrozen water, redistribution, HYDRUS-1D

1. はじめに

土は 0°C 以下で間隙水が凍結し凍土となる。間隙水の多くは氷になるが、一部は毛管力や分子間力により不凍水として液状で存在する。不凍水の水ポテンシャルは低く、凍結面近傍では未凍土から凍結層へと水分移動が起きる。このため、凍結層中の氷量、不凍水量を合わせた全水量は凍結以前よりも増加する。こうした凍結層が融解する際には、融解した層の水が凍結層、あるいは凍結層下へと移動すると考えられる。しかし、凍結過程にある土中の水分移動を測定した例は多くあるが、凍結層融解時の土中水の再分布過程を実験的に確認した例は少ない。

土の凍結過程に関しては、数値解析による現象理解や数値モデルの改良が進んでいる。一方、融解過程に関しては、数値モデルの検討例は少なく、凍結過程に比べて研究が遅れている。そこで本研究では、カラム実験により凍結層融解時の水の再分布過程を明らかにし、さらに結果を数値モデルで解析することを目的とする。

2. カラム実験

2-1. 試料と方法

試料には岩手大学附属農場休耕畑の表層土（黒ボク）を用いた。試料の含水率を $0.40 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ （飽和含水率： $0.60 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ）に調整し、

内径 7.8 cm 、高さ 35 cm のアクリル鉛直カラムに乾燥密度 $1.05 \text{ g}/\text{cm}^3$ で充填した。カラムに熱電対を 1 cm 間隔、TDR 水分計とテンシオメータを 5 cm 間隔で埋設した。なお、TDR は凍土中の不凍水量を測定できるように検量した。試料を 2°C の低温室に 1 日以上静置することで、試料に初期温度・重力水分分布を与えた。カラムの上下端には冷却装置を取り付けた。上下の装置内にはそれぞれ -8°C 、 2°C の冷却液を循環させ、試料を上端より下方へ凍結した。48 h 凍結後、装置上部の冷却液温を 2°C に切り替え、試料を融解した。凍結・融解過程の温度・液状水量・圧力水頭を 2.5 分間隔でモニターした。融解開始から 0, 24, 48 h 後に試料を等分し、炉乾法により試料の全水量を求めた。

2-2. 実験結果

試料上端を 2°C に昇温すると、上下端からの熱流により、上下 2 方向から凍結層が融解した。図 1 に融解過程の試料中の温度・全水量分布を示す。全水量は初期値との相対値で表した。上端から非凍結層（融解層）、凍結層、非凍結層の 3 層に分化した。24 h には、地表から 3.5 cm 深まで凍土が融解し、この領域の全水量が減少した。この際、凍結層の全水量は増加したため、融解層の水分が凍結層へと移動したと言える。

また、融解前線よりも凍結層中央で全水量がより増加した。凍結層の地温は $-3\sim-5^{\circ}\text{C}$ であり凍土の透水性が低かったこと、あるいは凍結層内で水が再凍結したものと考えられる。48 hにはさらに融解前線が進行し、試料が 6.8 cm 深まで融解した。この際、融解層の水は下方へ移動したが、同時に凍結層の全水量が減少し、凍結層下の非凍結層の水分量が増加した。地温の上昇により融けた水の多くは凍結層内で停滞するよりも、凍結層下へ流下したと考えられる。このことは融解過程にある凍土中では、流入水の再凍結は生じにくく、凍土がそれなりの透水性を持つことを示唆している。

3. 数値計算

3-1. 数値モデルと計算条件

計算には氷の発生を考慮した不飽和土中の水分・熱移動式を用いた(渡辺ら(2007))。相平衡の状態方程式である一般化クラジウス・クラペイロン式(GCCE)で温度から凍土中の不凍水圧を算出し、水分・熱移動式を結合した。試料の水分特性曲線、不飽和透水係数を実測値の不凍水量を評価するように補正した(渡辺ら(2010))。35 cmの鉛直次元カラムを計算対象とした。初期水分量 θ_{init} は $0.43\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 、初期温度は 2°C 、上下端の水フラックスはなしとし、境界温度は実測値を用いた。計算には数値計算ソフトHYDRUS-1Dを用いた。

3-2. 計算結果

凍結過程では、計算はカラム実験の温度・水分分布を再現した。図2に融解開始後0, 24, 48 hの温度・全水量分布の計算結果を示す。融解過程では、カラム実験と同様に(図1)、融解層から凍結層へ水分が移動した。しかし、計算では凍結後も凍結前線が下層へと進展し、凍結層下の非凍結層から凍結層へ水分が移動し続けた。また、凍結層上下の融解前線近傍で水分移動が著しく停滞しこの領域の全水量が増大した。これは、計算では不凍水量が相平衡を仮定してGCCEで決定されるため、 0°C 以下の領

域に流入した水が瞬時に全て凍結することによると考えられる。こうした氷量の非現実的な増加にともなう凍土の融解の遅延をどのように解消するかが、融解過程の数値モデルの今後の課題である。

参考文献

- 1) 渡辺晋生, 取出伸夫, 坂井勝, Jiri Šimůnek (2007): 土壌の物理性, 106, 21-32
- 2) 渡辺晋生, 紀藤哲矢, 坂井勝, 取出伸夫 (2010): 土壌の物理性, 116, 9-18

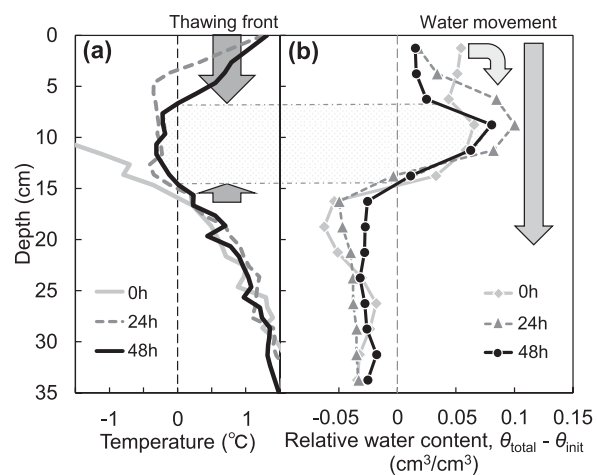


図1 カラム実験の(a)温度(b)全水量分布。

図中の矢印は(a)0h→48hの融解前線の進展、(b)左から0h→24h, 24h→48hの水分移動を模式的に表す。網掛けは48h時の凍結層を表す。

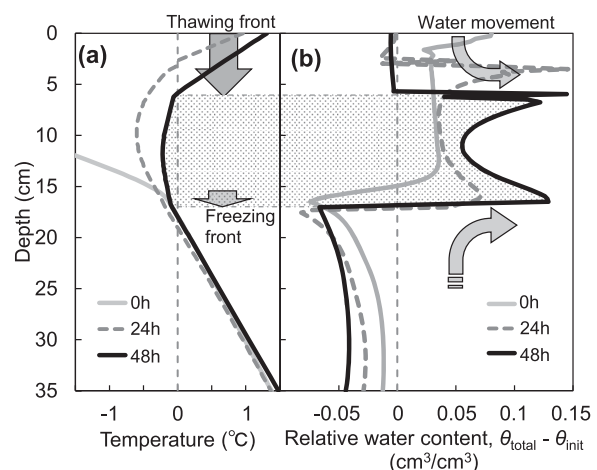


図2 (a)温度(b)全水量分布の計算結果。

図中の矢印は(a)0h→48hの融解および凍結前線の進展、(b)0h→48hの水分移動を模式的に表す。網掛けは48h時の凍結層を表す。