

凍結・融解にともなう土中水の再分布

Soil Water Redistribution during Soil Freezing and Thawing Cycle

○釘崎佑樹¹・渡辺晋生¹

Yuki Kugisaki and Kunio Watanabe

1. はじめに

土は0°C以下で凍結し、地温の低下とともに凍土中の不凍水量が減少する。加えて、凍結の進行とともに未凍結層から凍結面への水分移動が生じるため、凍結層の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前線の進展とともに融解層から凍結層への水分移動が起こり得るが、その過程を詳細に調べた例はない。ところで、凍結をともなう土中の熱・水移動を表す数値モデルの研究が進んでいる。しかし、融解過程のモデル化は凍結過程に比べて遅れている。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、さらに実験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 cm³/cm³に調整し、内径7.8 cm、高さ35 cmの鉛直カラムに乾燥密度1.05 g/cm³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間隔で挿入した。カラム側面を断熱し、2°Cの恒温室に2日間静置して試料に初期温度・重力水分分布を与えた。試料上下端の冷却装置を恒温水槽に接続した。上下の装置内にそれぞれ-8°C、2°Cの冷却液を循環させ、試料を上端より凍結した。48 h凍結後、装置上部の冷却液温を2°Cに切り替え、融解を開始した。凍結・融解過程の温度・液状水量・土中水圧を2.5分間隔で測定した。融解過程開始から0 h(48 h凍結後)、24 h、48 h後、2.5 cm毎に試料を裁断し、炉乾法で全水量を測定した。

2-2. 実験結果

試料上端の冷却を開始すると、試料上端より一様に凍結が進行した。凍結深は約17 cm深であった。ここで試料上端の冷却を止め、試料を融解した。図1aに融解過程の水分分布を示す。実験毎に初期含水率に若干の差があったため、平均全水量との差をそれぞれ取り、相対値として含水率を表した。試料上下端からの熱で融解前線が上下両方向から進展した。この際、上端から非凍結層(融解層)、凍結層、非凍結層の3層に分布した。融解過程24 h時には、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。一方、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再分布したと言える。また、融解前線近傍よりも凍結層のほぼ中央で全水量の増分が最大となった。これは、透水性が著しく低い凍結層中央において、再分布した水が再凍結、あるいは不凍水のまま停滞していたと推察できる。融解過程48 h時にはさらに地温が上昇し、試料が6.8 cm深まで融解した。この際、融解層の水分は下方へ移動したと見られるが、24 h時よりも凍結層の全水量が減少した。一方、凍土下の非凍結層で水分量が増加した。これは、地温の上昇にともない凍結層の透水性が高くなり、不凍水が凍土中をゆっくりと流れ非凍結層へと移動したと考えられる。

3. 数値計算

3-1. 数値モデルと計算条件

渡辺ら(2007)に基づき、凍結モデルには不飽和土中の水分・熱移動式に氷の発生を考慮した項を加えた水分・熱結合モデルを用いた。ここで、凍土中の不凍水の圧力は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)から算出した。試料の水分特性曲線、不飽和透水係数を実測値に基づき補正した(渡辺ら(2010))。35 cmの鉛直一次元カラムに、初期水分量 $\theta_{mit}=0.43$ cm³/cm³、上下端の水フラックスはなしとした。初期温度は2°C、境界温度にはカラム実験の実測値を使用した。計算には汎用数値計算ソフト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1bに48 h凍結後48 h融解の数値計算とカラム実験の水分分布、融解前線位置を示す。ここで、全水量と不凍水量の差が水量である。融解過程では、融解層から凍結層へ水分が移動した。しかし、計算では48 h凍結後も凍結前線が下層へと進展し、凍土下の非凍結層から凍結層へ水分が移動し続けた。また、凍結層上下部の融解前線近傍に全水量のピークが現れた。これは、温度非平衡を考慮しない不凍水量の計算が主要要因と考えられる。すなわち、GCCEによりある温度で保持できる不凍水量が決まっているため、流入した水が即座に凍ったと推察できる。こうした水量の増加にともなう凍土の融解の遅延は、融解過程の数値モデル研究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

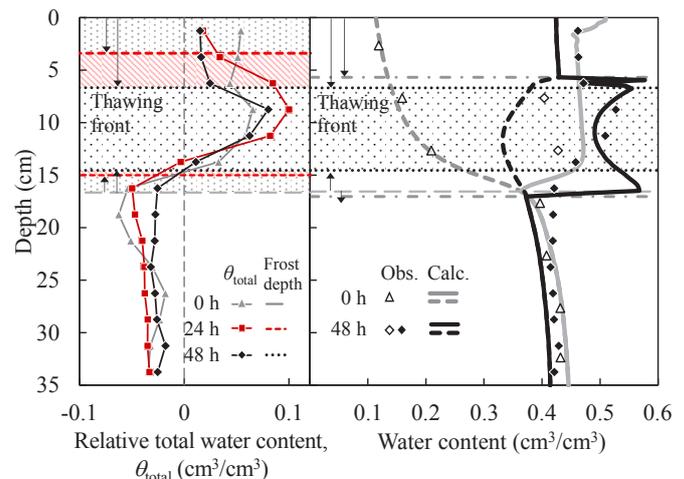


図1a 融解過程の全水量分布。融解前線の矢印は左から0, 24, 48 h。

図1b カラム実験と数値解析の液状水量(破線)、全水量(実線)分布。

白抜きはTDRによる液状水量、黒塗りは炉乾法による全水量。