

凍結層融解過程にある不飽和土中の水分フラックスの変化

三重大学大学院生物資源学研究所 釘崎佑樹

三重大学大学院生物資源学研究所 ○渡辺晋生

はじめに 地表が冷やされ凍結層が形成するとき、未凍土から凍結層へ上向き水分移動が生じる。凍結層の融解時には融解水の再分布が生じるが、その際の水分移動量や移動方向の変化のタイミングについては不明な点が多い。ところで、土の凍結過程の解析には常温の不飽和土中の水分・熱移動式に氷の生成を考慮した水分・熱結合モデルが用いられることが多い。しかし、凍土の融解過程に対して現行モデルを適用した事例は少なく、その検討が不十分である。そこで本研究では、不飽和土の一次元カラム実験を行い凍結層融解時の土中水の再分布過程を観察するとともに、現行モデルを融解過程に適用した際の課題を整理する。

試料と方法 試料には岩手大学附属農場休耕畑の表層土を用いた。試料の飽和含水率は $0.60 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ だった。試料を内径 7.8 cm 、高さ 35 cm のアクリルカラムに含水率 $0.40 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 、乾燥密度 $1.1 \text{ g}/\text{cm}^3$ で充填した。カラムには熱電対を 1 cm 間隔、テンシオメータと TDR を 5 cm 間隔で埋設した。TDR は凍土中の不凍水量を測定できるよう別途検量した。カラムを断熱後 2°C の恒温室に静置し、試料に初期温度・重力水分分布を与えた。実験中、試料上下端からの水の流入出はなしとした。ここで試料上下端の温度をそれぞれ -8°C と 2°C に保ち、試料を上端より凍結した。48 h 凍結後、試料上端の温度を 2°C に切り替え、試料を融解した。各深さの温度、液状水量、圧力水頭は 2.5 分間隔で測定した。融解開始から 0 h (48 h 凍結後)、 24 h 、 48 h 後に 2.5 cm 毎に試料を分画し各深さの全水分量を炉乾法で測定した。各時間の全水分量変化を貯留量変化とし、凍結・融解過程の時間平均の水分フラックスを求めた。

結果と考察 試料上端を冷却すると、凍結層が上端より 17 cm 形成した。このとき、全水分量は凍結層で増加し、非凍結層で減少した。図 1 に凍結層融解開始を 0 h とした土中の温度分布、図 2 にそのときの全水分量分布、図 3 に全水分量の変化より求めた時間平均の水分フラックス分布を示す。凍結前と融解 0 h の全水分量変化から水分フラックスを求めると、凍結層形成時の水分フラックスは常に上向きであり、凍結面で最大値を示した (図 3)。

試料上端の冷却を止めると、凍結層内を上下両方向から融解前線 (0°C 線) が進行した。そして、試料内に上端より非凍結層 (融解層)、凍結層、非凍結層 (融解層 + 未凍結層) の 3 層が生じた (図 1)。融解 24 h には、試料表層は 3.5 cm 深まで融解した。このとき、全水分量は表層の融解層で減少し、凍結層中央付近で増加した (図 2)。融解 0 h から 24 h の平均水分フラックスは凍結層中央より上の領域では下向き、下の領域では上向きだった (図 3)。凍結層中央付近の全水分量が増加したこと (図 1, 図 2)、融解初期 ($0 \sim 24 \text{ h}$) には、下層から凍結層への

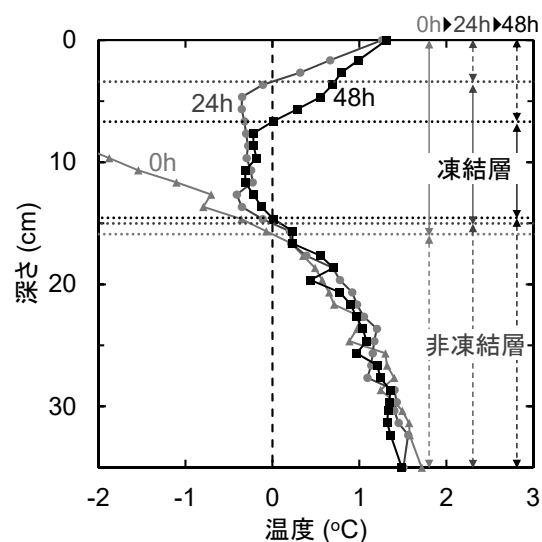


図 1 0, 24, 48h 融解時の温度分布量分布

水分移動が継続する一方、表層の融解水が凍結層に流入し、 0°C の融解前線近傍ではなく比較的低温の低い凍結層内で再凍結したと考えられる。

融解 48 h には、試料表層が 6.8 cm 深まで融解した。凍結層の温度は全層で 0°C に近づき (図 1), 全水分量は飽和に近づいた (図 2)。このとき、水分フラックスは全層で下向きとなった (図 3)。融解過渡期 (24~48 h) では、凍結層内における流入水の再凍結より凍土の融解が卓越し、凍結層下の水分フラックスが下向きに転じたと考えられる。

数値計算 氷の生成を考慮した不飽和土中の水分・熱結合モデルを用いてカラム実験の計算を試みた。凍土中の不凍水圧は相平衡の状態方程式であるクラウジウス-クラペイロン式を仮定して温度から算出した。水分特性曲線は実測の不凍水量を評価するように補正した。計算対象は長さ 35 cm の鉛直一次元カラムをとり、初期温度・水分量分布および境界条件は実測値に基づいて決定した。計算には HYDRUS-1D を用いた。

凍結過程については、計算は試料上端からの凍結前線の進行にともなう土中の温度・水分量・圧力変化をよく再現した。図 4 に 48 h かけて形成した凍結層の融解過程の水分量分布 (0 h, 48 h) の計算値と実測値を示す。融解過程については、計算では土中水が非凍結層から凍結層へ移動し、凍結面近傍で凍結した。そして、この領域の実測値の全水分量を過大評価した。これは、計算では 0°C 以下の領域に流入した水が瞬時に相平衡に達し凍結することによると考えられる。こうした凍結層への水の集積は、計算では凍結層が残存する限り続き、カラム実験の融解過渡期に見られた水分フラックスの変化を再現できなかった。現行モデルを不飽和凍土の融解過程に適用する際の課題は、熱的非平衡状態にある 0°C 近傍における水の再凍結と透水係数の評価にあると言える。

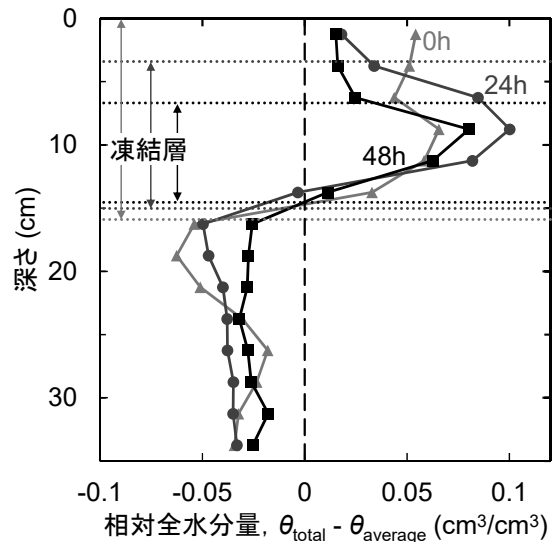


図 2 0, 24, 48h 融解時の全水分量分布量分布

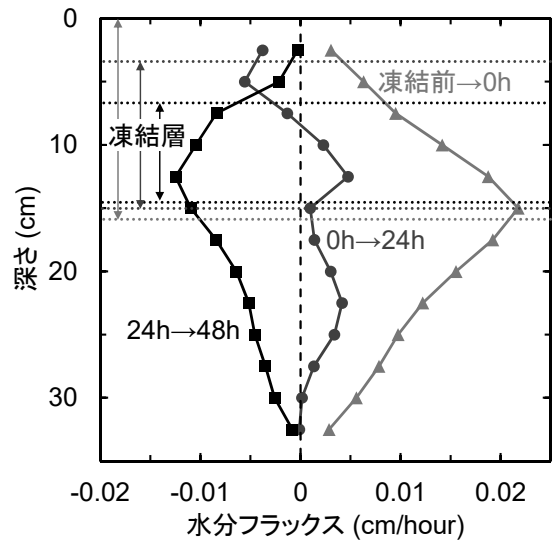


図 3 凍結前→0 h, 0 h→24 h, 24 h→48 h の時間平均の水分フラックス分布

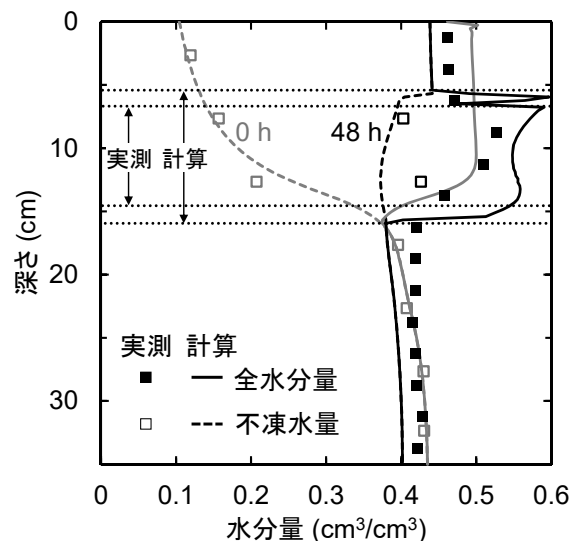


図 4 凍結・融解過程の水分量分布の計算と実測