

# 凍結層の形成と融解にともなう不飽和土中の水分・熱移動に関する研究

釘崎佑樹（土壌圏循環学教育研究分野）

**はじめに** 寒冷圏では、未凍土の水を引き寄せながら地表から凍結層が形成される。外部からの水の流入がない場合、凍結過程では単調に上向きの水分移動が生じる。凍土が消失すれば融解した水が下層へと流れるが、融解過程の土中水の移動量や方向については未解明な点が多い。ところで、現行の凍結モデルは常温の不飽和土中の水分・熱移動式に氷の発生を考慮した水分・熱結合モデルで表される。しかし、凍土の融解過程に対して現行の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、一次元のカラム凍結・融解実験を行い凍結層形成時および融解時の不飽和土中の水の再分布過程を明らかにし、さらに融解過程に現行モデルを適用した際の課題を整理することを目的とした。

**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。試料の飽和体積含水率は  $0.60 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  であった。試料の含水率を  $0.40 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  程度に調整し、乾燥密度  $1.1 \text{ g}/\text{cm}^3$  で内径  $7.8 \text{ cm}$ 、高さ  $35 \text{ cm}$  のアクリル鉛直カラムに均一に充填した。カラムには熱電対を  $1 \text{ cm}$  間隔、テンシオメータ、TDR 水分計を  $5 \text{ cm}$  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。カラム側面を断熱し、 $2^\circ\text{C}$  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。実験期間中、上下端の水分フラックスはなしとした。上下の装置内にそれぞれ  $-8^\circ\text{C}$ 、 $2^\circ\text{C}$  の冷媒を循環し、試料を上端より凍結した。48 h 凍結後、装置上部の冷媒温度を  $2^\circ\text{C}$  に切り替え、試料上下端より融解した。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 毎に試料を等分し、炉乾法で試料の全水分量を測定した。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** カラム上端の冷却を開始すると、上端より試料が一様に凍結した。図 1 に凍結層形成後の融解開始時刻を 0 h とした融解過程の土中の温度分布、図 2 にそのときの全水分量分布、図 3 に全水分量変化より求めた時間平均の水分フラックス分布を示す。なお、実験毎に初期水分量の差があったため、各実験の平均値を初期値とした相対値として全水分量を示した。融解過程 0 h には  $0^\circ\text{C}$  の凍結面は約  $17 \text{ cm}$  深にあり、凍結層と非凍結層に分布した(図 1)。このとき、全水分量は非凍結層で減少し、凍結層で増加した(図 2)。凍結前と融解過程 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、凍結面において最大値を示した(図 3)。試料上端の冷却を止め、試料の融解を開始すると、試料上下端の熱により上下両方向から融解前線が進行した。このとき、上端より非凍結層、凍結層、非凍結層の 3 層に分布した(図 1)。融解過程 24 h には、試料が地表より約  $3.5 \text{ cm}$  深まで融解し、この領域の水分量が減少した(図 2)。このとき、凍結層中央付近の全水分量が増加した(図 2)。融解過程 0 h から 24 h の平均水分フラックスは凍結層中央を境にそれより上の領域では下向き、下の領域では上向きであった(図 3)。凍結層中央付近の全水分量が増加したことから(図 1、図 2)、融解初期(0~24 h)では、流入水の多くは  $0^\circ\text{C}$  の融解前線近傍では凍らず、比較的地温の低い凍結層内において凍結したと考えられる。融解過程 48 h にはさらに地温が上昇し、試料が約  $6.8 \text{ cm}$  深まで融解した(図 1)。このとき、全層で全水分量が初期値に近づいたこと(図 2)、水分フラックスが下向きであったことから(図 3)、水は凍結層内を通過して下層へ流れたと言える。融解後期(24~48 h)では、凍結層内において流入水の再凍結が生じにくく、凍土がそれなりの透水性を持つことが示唆された。

**数値計算** 凍結モデルには水の発生を考慮した不飽和土中の水分・熱結合モデルを用いた。凍土中の不凍水の圧力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 (GCCE) を用いて温度から算出した。実測の不凍水量を評価するよう水分特性曲線を補正した。長さ 35 cm の鉛直一次元カラムを計算対象とした。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。数値計算ソフト HYDRUS-1D を用いて計算した。凍結過程を計算すると、試料上端からの凍結面の下方への進展にともなう温度・水分量・圧力変化は実測値を再現した。図 4 に 48 h 凍結後の融解過程 0, 48 h の計算と実測の水分量分布を示す。融解過程の計算では、非凍結層から凍結層へと水が移動したが、水は凍結面近傍で凍結し、この領域の全水分量は実測値を過大評価した。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、 $0^{\circ}\text{C}$  以下の領域に流入した水が瞬時に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いた。カラム実験の融解後期で見られた凍結層内を通る水の流れを再現できなかった。融解過程の計算では、熱的非平衡状態にある  $0^{\circ}\text{C}$  近傍における水の再凍結や透水係数の評価が課題である。

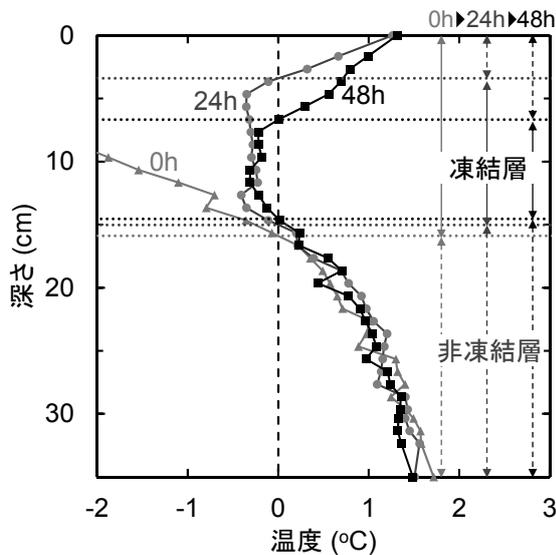


図 1: 融解過程 0, 24, 48 h 時の温度分布。

図中矢印は凍結層および非凍結層を模式的に表す。水平破線は  $0^{\circ}\text{C}$  の凍結面を表す。

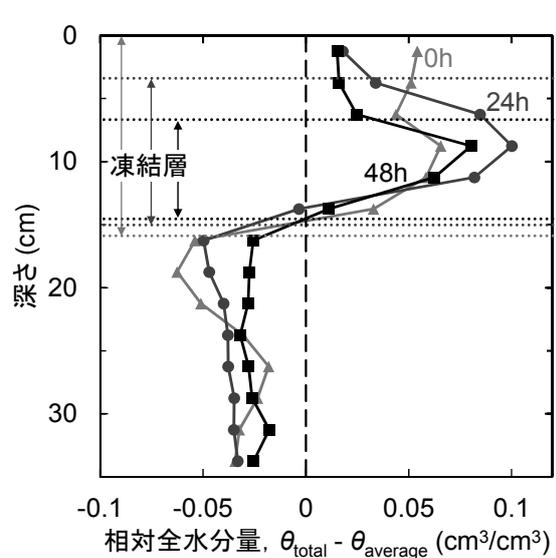


図 2: 融解過程 0, 24, 48 h 時の全水分量分布。

全水分量  $\theta_{\text{total}}$  は各実験の平均値  $\theta_{\text{average}}$  を初期値とした相対値で示した。

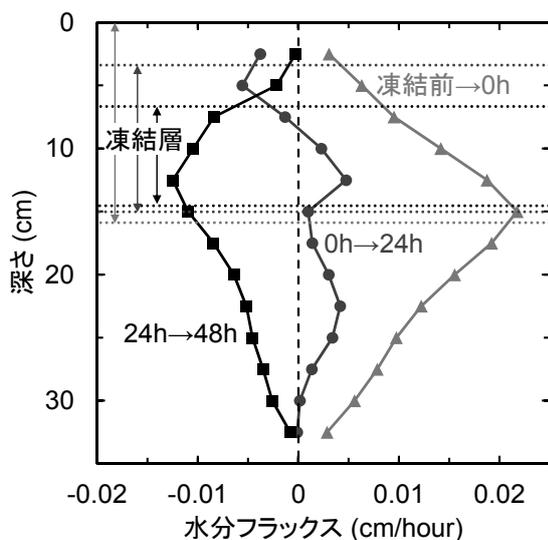


図 3: 凍結前→0 h, 0 h→24 h, 24 h→48 h の時間平均の水分フラックス分布。

正の値は上向き流れ、負の値は下向き流れを示す。

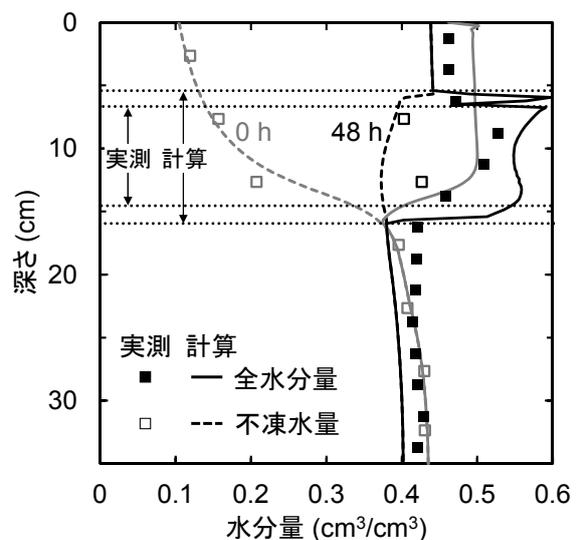


図 4: 48 h 凍結 48 h 融解の計算と実測の水分量分布。全水分量と不凍水量の差が氷量を表す。水平破線は計算と実測の 48 h 時の凍結面を表す。