

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

Water and Heat Flow in Unsaturated Soil during Formation and Deformation of Partially Frozen Layer

○釘崎佑樹¹, 渡辺晋生²
 Yuki Kugisaki and Kunio Watanabe

1. はじめに

大地が寒気に晒されると地表に凍結層が生じる。この際、雨水等の流入がない場合、下層の未凍土から凍結層への水分移動のみが生じる。凍結層の消失時には再び水分移動が生じるが、その移動量や方向には不明な点が多い。ところで、土の凍結の数値解析には、常温の不飽和土中の水分・熱移動式を氷の相変化で結合したモデルを用いることが多い。しかし、凍土の融解に現行モデルを適用した事例は少なく、その検討は不十分である。そこで本研究では、カラム実験により凍結層の形成・融解時の不飽和土中の水の再分布過程を明らかにし、凍土の融解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。

2. 試料と方法

岩手大学附属農場休耕畑の表層土(砂壤土)を試料とした。飽和含水率は $0.60 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 、飽和透水係数は 3.4 cm/h だった。試料の含水率を $0.40 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ に調整し、乾燥密度 1.1 g/cm^3 で内径 7.8 cm 、高さ 35 cm のカラムに充填した。カラムには熱電対を 1 cm 間隔、テンシオメータと TDR 水分計を 5 cm 間隔で埋設した。カラム断熱後、 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。試料上下端の温度を -8°C 、 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、試料を上下端より融解した。実験中、温度、液状水量、圧力水頭を 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 後に試料を 2.5 cm 毎に等分し、炉乾法で試料の全水分分布を求めた。そして、各時間の全水分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。

3. 結果と考察

試料を冷却すると、上端より凍結が進行し、48 h で 17.0 cm の凍結層が形成した。この間、水分量は凍結層で増加、非凍結層で減少した。図 1 に水分フラックス分布を示す。凍結層形成時(凍結前→0 h)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。融解を開始すると、融解前線 (0°C の等温線) が凍土中へ上下両方向から進行した。この際、試料は上端より非凍結層(融解層)、凍結層、非凍結層(融解層+未凍結層)の3層を成した。 24 h 後には、試料が地表より 3.5 cm まで融解し、この領域の水分量が減少、凍結層中央付近の水分量が増加した。融解 $0 \text{ h} \rightarrow 24 \text{ h}$ の平均水分フラックスは、凍結層上部では下向きだったが、凍結層下部では上向きだった(図 1)。融解初期 ($0 \sim 24 \text{ h}$) には、融解した水の凍結層内における再凍結と、それに伴う潜熱の発生による周囲の氷の融解を繰り返し、比較的地温の低い凍結層内へ水が集積したと考えられる。 48 h 後には、更に地温が上昇し、試料は 6.8 cm 深まで融解した。この際、全層の水分フラックスが下向きであった(図 1)。融解過渡期 ($24 \sim 48 \text{ h}$) では、融解した水は 0°C 面近傍で集積するよりも下層へと移動したと言える。再凍結よりも融解が卓越するとともに、水分フラックスは下向きに転じたものと考えられる。

4. 数値計算

氷の相変化で水分・熱移動式を結合した土の凍結モデルを用いて実験結果を解析した。凍土中の不凍水圧はクラウジウス-クラペイロン式 (CCE) で温度から算出した。初期温度・水分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 HYDRUS1D を用いた。図 2 に 48 h 凍結後および 48 h 融解後の計算と実測の水分分布を示す。凍結過程の計算は、凍結層形成にともなう土中の温度・水分量・圧力の変化をよく再現した。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 0°C 面で凍結し、 0°C 面近傍の全水量が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 CCE で決定されるため、 0°C で水が瞬時に凍結することによって考えられる。こうした凍結層への水の集積は、計算では土中の氷が残存する限り続き、実験の融解過渡期の水分フラックスの変化を再現できなかった。融解過程の計算では、 0°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。

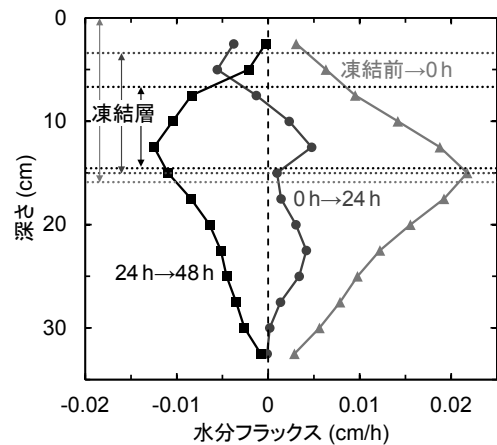


図 1 平均水分フラックス分布. 正: 上向, 負: 下向.

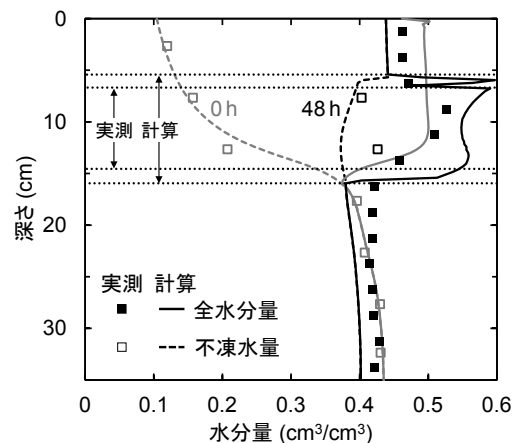


図 2 48 h 凍結, 48 h 融解時の計算と実測の水分量分布

1 株式会社 精研
 2 三重大学大学院生物資源学研究所

Seiken Co., Ltd.
 Graduate School of Bioresources, Mie University