

黒ぼく土を用いた成層土の凍結実験

Water and heat flow in frozen layered soils

○渡辺晋生 紀藤哲矢

Kunio Watanabe and Tetsuya Kito

はじめに 地表が 0°C 以下に冷やされると、土中水が凍結面近傍に引き寄せられ凍結する。こうした冬期の土中水の再分布は、春先の融雪水の浸潤過程や農地の地耐力、微生物活性に影響を及ぼす。また、土の凍結・融解に伴う水分移動は、化学物質やコロイドの移動も引き起こす。そこで本研究では、実際の畑土を用いて次元カラム凍結実験を行い、黒ぼく土の水分特性や土の成層構造が凍結面の進行や土中の水・熱移動に与える影響を調べた。

試料と方法 2008 年 10 月に北海道農業研究センター（芽室拠点）の畑土壌を採土した。土壌は A 層（黒ぼく／シルトローム）と C 層（クレイローム）が深さ 40 cm を境に比較的明瞭に分かれており、採土時のそれぞれの体積含水率は 0.40, 0.34、乾燥密度は 0.95, 0.67 g cm⁻³ であった。凍結実験には自然含水率の試料をそのまま用いた。内径 7.8 cm、高さ 35 cm のアクリル鉛直カラムに、Exp. I では全層に A 層土を、Exp. II では上層 25 cm に A 層土、下層 10 cm に C 層土を、現場の乾燥密度になるよう下層より 2 cm ずつ繰り返し充填した。この際、カラム上下端の冷却板と試料が実験毎に同じく接するよう配慮した。比較のため、Exp. III では凍上試験によく用いられる藤の森土（無機質なシルトローム）を全層に詰めた。藤の森土は 2 mm ふるい通過分を用い、充填時の含水率と乾燥密度をそれぞれ 0.40, 1.18 g cm⁻³ とした。Fig. 1 に吸引法、加圧板法、露点計測式水ポテンシャル装置で測定した試料の保水曲線を示す。図中、第二横軸には一般化 Clausius-Clapeyron の式(GCCE)を用いて圧力から換算した温度を、第二縦軸には、Durner (1994)の式を用いて推定した不飽和透水係数を併記した。試料の水分量は、充填状態から凝固点相当の圧力範囲でそれぞれ異なったが、-1°C 以下の保水（不凍水量）曲線には差異が見られなかった。

熱電対を 1 cm 間隔で、テンシオメータと前もって不凍水量測定用に校正した TDR センサー（プローブ長 7 cm、間隔 5 mm）を 5 cm 間隔でカラム側面より挿入し、温度と比誘電率、土中水圧を CR10X、TDR100、マルチプレクサを用いて 5 分間隔で測定した。カラム側面をゴムシートとガラスウールで断熱し、低温室に静置した。試料内の温度分布が均一（4°C）になった後、カラム上下端の冷却板の温度をそれぞれ -8°C と 2°C に制御し、試料を上端より凍結した。この際、カラム上下端からの水の流入出はなしとした。任意の凍結時間において試料を 2.5 cm 間隔で切断し、炉乾法により全水量分布を測定した。

結果と考察 Fig. 2a, 3a に Exp. I（黒ぼく単層）および Exp. II（成層）の各凍結時間におけるカラム内の温度分布を示す。カラム両端の温度制御を始めると、冷却板に接する試料の温度が速やかに設定温度に達した。試料の凍結面の進行速度は初期に速く、時間経過と共に緩やかになった。この際、Exp. I と II では、凍結速度に顕著な差は見られなかった。試料内には -0.2 ± 0.05 °C で温度が停滞する領域が見られた。この領域は、凍結の進行と共に長くなり、凍結面が停滞しはじめると再び短くなった。Fig. 2b, 3b は温度分布と同時刻にテンシオメータで測定した圧力分布である。また、Fig. 4 には凍結面からの距離を基準に

圧力分布を整理した。凍結面に近づくにつれ圧力は減少した。圧力が減少する領域は、凍結が進行するにつれ、また Exp. I より Exp. II で長くなった (Fig.4)。圧力分布を凍結面へ外挿すると、凍結面の圧力を-1200~-2500 cm 程度と見積もれる。これは、GCCE に従えば-0.1~-0.2°Cに相当し、温度の停滞領域と一致する。Fig. 2c, 3c に凍結開始後 0, 24, 48 時間の試料内の水分分布を示す。図中、破線は TDR で測定した不凍水量を、実線は炉乾法で測定した全水量を示し、その差は氷量に相当する。試料が凍結すると、凍土内の水分量が増加し、未凍土内の水分量が減少した。Exp. I と Exp. II では初期の圧力分布は等しいが、C 層土の初期水分量が低い。また初期水分量近くで水分量が減少すると、C 層土の圧力は A 層土より低下する (Fig. 1)。このため、Exp. II では C 層土の水分が凍結面に流れ始めると、Exp. I に比べ未凍土の圧力が低下し (Fig. 4)、水分移動が抑制された。こうした傾向は、凍結面が C 層に近づくにつれ顕著となった。Fig. 5 に圧力と Fig. 1 から求めた Exp. I の各時間のフラックス、炉乾法で求めた含水率から求めた Exp. I, II, III の 24-48 時間の平均フラックスを示す。凍結初期には凍結面近傍の水がまずは凍結面へ引き寄せられ、凍結が進行するにつれ、より深くの水が凍結面へ流れ始めることが確認できる。また、Exp. I, II では既に凍結した領域内の水分量に変化は見られなかった。一方、Exp. III では凍結進行後も不凍水移動が生じ、凍土内の全水量分布が変化した (Fig. 5)。黒ぼく土と藤の森土ではある温度で等量の不凍水を有しても、その保持形態が異なる可能性が示唆される。

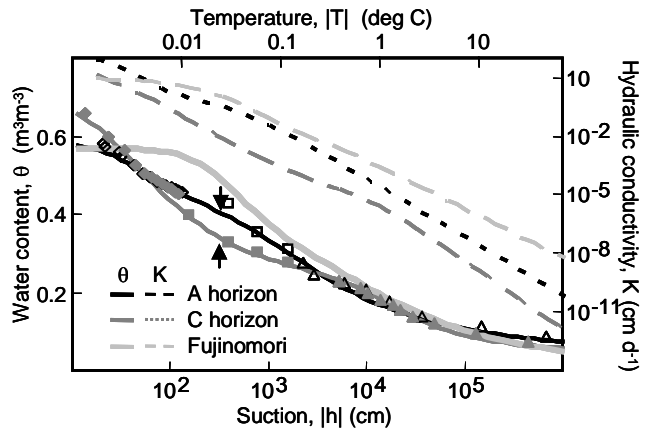


Fig. 1 試料の保水曲線と不飽和透水係数。矢印はExp. I, II の初期圧力を示す。
Hydraulic properties of three soil samples.

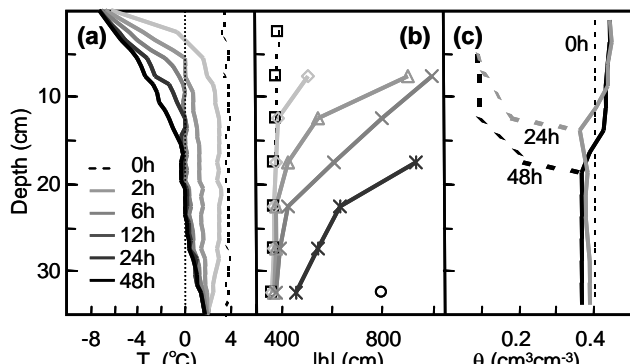


Fig. 2 Exp. I (黒ぼく単層) の温度T, 圧力h, 水分θ分布。
Temperature, suction and moisture profiles in Exp. I.

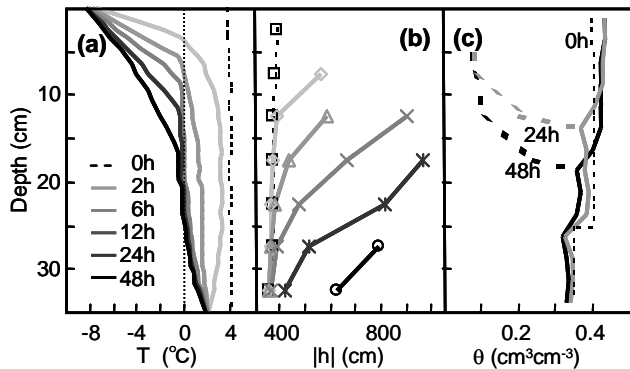


Fig. 3 Exp. II (成層) の温度T, 圧力h, 水分θ分布。
Temperature, suction and moisture profiles in Exp. II.

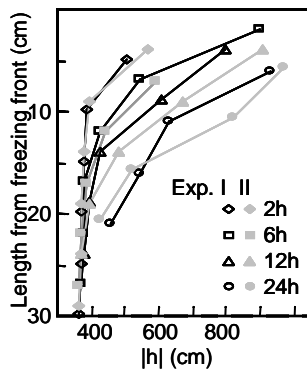


Fig. 4 凍結面からの距離と圧力。
h-profiles from the freezing front.

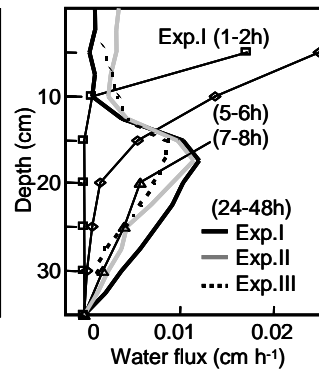


Fig. 5 フラックス分布。
Water flux profiles.