

融点近傍の凍土の不凍水量と透水係数

Unfrozen water content and hydraulic conductivity of frozen soil near 0°C

○長田 友里恵・渡辺 晋生

Yurie OSADA, Kunio WATANABE

はじめに 土が凍結・融解する際、土中水の相転移にともなう潜熱により、地温が融点近傍で停滞する。この際、どのタイミングでどの程度の水が土中に浸透するのかを知ることは寒冷圏の水循環や農地管理を考えるうえで重要である。また、人工凍土を活用する上でも凍土の温度制御や遮水性の評価は必要不可欠である。しかしながら、凍土の透水係数の測定例は少なく、透水係数と凍土中の不凍水（液状水）量との関係も分かっていない。そこで本研究では 0°C 近傍の凍土の透水係数の変化を不凍水量の変化と共に明らかにすることを目的に、実際に凍結融解に晒される畑地の黒ボク土を用いて、一次元カラム実験を行った。

試料と方法 試料には、岩手大学附属農場の休耕畑の表層から採土した黒ボク土を用いた。2 mm 篩通過分を乾燥密度 0.88 g cm^{-3} になるように内径 7.8 cm、高さ 3 cm のアクリル円筒カラムに詰めた。1、1.5、2 cm 深に T 型熱電対 (TC) を、1、2 cm 深にテンシオメータと間隙水圧計 (P-gauge) を、1.5 cm 深に TDR プローブをそれぞれカラム壁面から挿入した (図 1)。試料下端に水面を置き、試料の水分量を調整した後、試料上下端をアルミ基部で密閉した。断熱した装置の上下基部を -4.5°C に維持し、試料を 12 時間以上凍結した。その後、上下基部を 0.5°C に昇温しながら下端から定量ポンプで試料に基部温度の水を通水し、上端からの排水量を測定した。凍結実験は 2°C の室内で行った。測定した 2 深の圧力差と排水速度から透水係数を求めた。また、吸引法、加圧板法、WP4、VSA で未凍土の水分保持曲線 (θ - h 関係) を、蒸発法で透水係数 (K - h 関係) をそれぞれ求めた。そして、クラウジウス・クラペイロン式で圧力を温度に換算し、測定した不凍水量曲線 (θ - T 関係) や凍土の透水係数 (K - T 関係) と比較した。この際、 0°C 以下の水の粘性は不明なため、その温度依存性は考慮しなかった。

結果と考察 図 2 に凍結試料を通水しながら融解した時の試料の温度と不凍水量の変化を示す。なお、図には 3 計測深度の平均温度を示した。上下基部の温度を上げると、試料温度は -0.5°C まで速やかに、その後 -0.1°C まで緩やかに上昇した。3 計測深度の温度差は 0.03°C 程度であり、試料が均一に融解しているとみなした。試料の不凍水量は温度上昇と共に増加し、試料が正温になると (図 2 では 8 h) 飽和含水率と等しくなった。この時の試料中央 1 cm 間の圧力差と凍土の透水係数を図 3 に示す。試料が -0.5°C 以下の時は 20 m 以上の水圧をかけても凍土は通水しなかった。試料が -0.5°C 以上になると、透水係数は一旦急激に、その後緩やかに増加し、 -0.23°C までに 5 オーダー以上変化した。 -0.23°C 以上では、

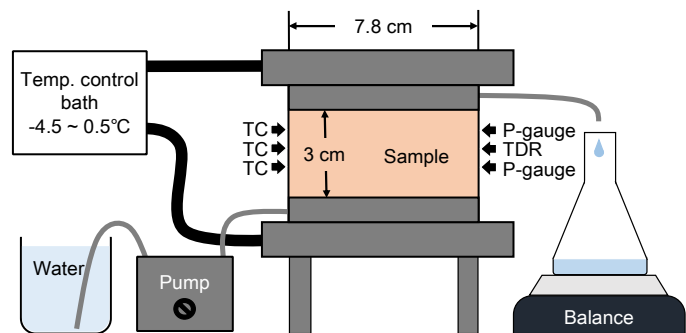


図1 実験装置の概要
Fig.1 Schematics of experimental set up

凍土の透水係数は未凍土の飽和透水係数とほぼ一致した。

図4に試料を凍結、融解通水した際に測定した不凍水量曲線を示す。図中破線は未凍土の水分保持曲線から推定した不凍水量曲線である。凍結過程では不凍水量は -0.5°C までに速やかに減少し、その後は温度低下と共に徐々に減少した。不凍水量が水分保持曲線からの推定値より高かったのは、温度低下に氷の成長が追い付かなかったためと考えられる。その後試料を -4.5°C に維持すると、不凍水量が推定値まで減少した。融解過程では不凍水量は -1°C までほとんど変化せず、 $-1\sim 0^{\circ}\text{C}$ の間に急激に増加した。融解過程の不凍水量曲線は水分保持曲線からの推定値とほぼ一致したが、 0°C 付近では推定値より過大となった。これは、水の流れや水圧による氷の融解が原因と考えられる。ここで、凍土の透水係数と温度の関係を不凍水量曲線と共に図5に示す。図中には、蒸発法で測定した未凍土の不飽和透水係数も付記した。凍土の透水係数と温度の関係は、通水速度が $18\sim 135\text{ cm d}^{-1}$ の範囲で異なっても変化しなかった。 $-0.4\sim 0^{\circ}\text{C}$ の凍土の透水係数の増加傾向は未凍土の不飽和透水係数と異なり、その値も未凍土からの推定値より数オーダー大きくなった。凍土の透水係数と不凍水量の関係は未凍土の透水係数と水分量の関係と概ね一致したことから、こうした違いは、 0°C 付近の凍土が水分保持曲線から推定した値より不凍水を多く保持したためと思われる。また、 -0.23°C 以上では、凍土の透水係数は変化しなかったものの、不凍水量は10%以上増加した。これは、比較的大きな間隙内の通水にあまり寄与しない部分や団粒内などに氷が残っており、それらの氷が融解したためと考えられる。

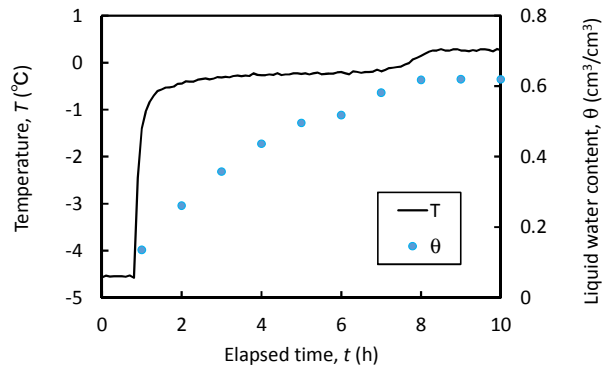


図2 融解通水時の黒ボク土の温度と不凍水量
Fig.2 Temperature and liquid water content in thawing soil

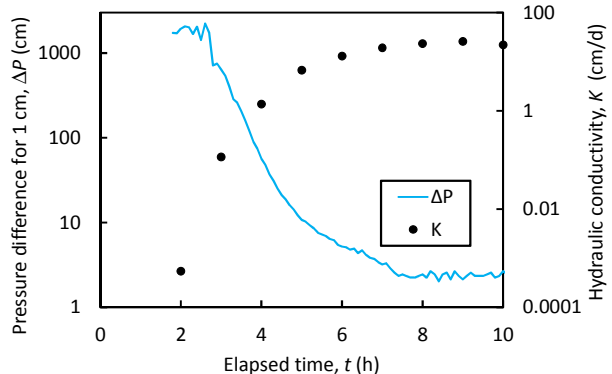


図3 融解通水時の黒ボク土1cm間の圧力差と透水係数
Fig.3 Pressure gradient and hydraulic conductivity

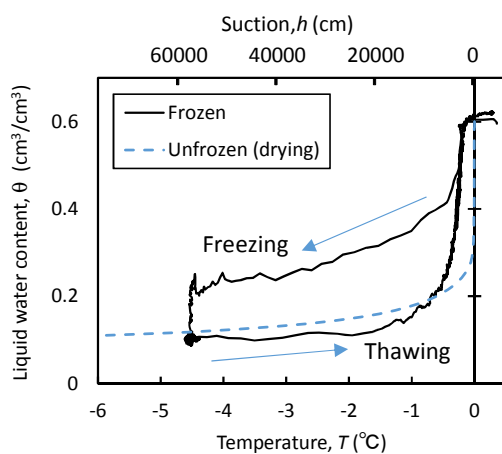


図4 黒ボク土の不凍水量曲線と水分保持曲線
Fig.4 Soil freezing curve and water retention curve

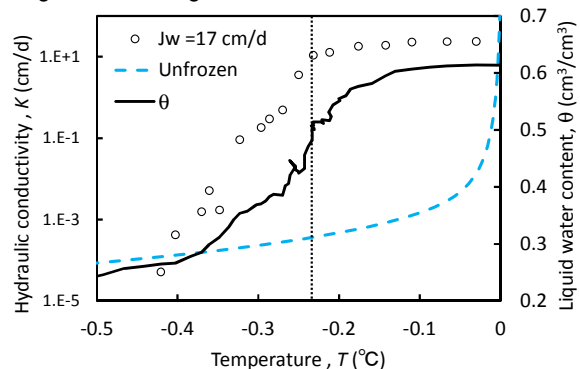


図5 融解通水時の黒ボク土の透水係数
Fig.5 Hydraulic conductivity of frozen soil