

# 融点近傍の凍土の透水係数と不凍水量曲線

長田 友里恵 (土壌圏循環学教育研究分野)

**はじめに** 寒冷地の水循環や、凍土遮水壁などの人工凍土の利用を考えるうえで、凍土の水分移動特性を知ることが重要である。凍土中には  $0^{\circ}\text{C}$  以下でも凍らない液状水(以降、不凍水)が存在する。不凍水量は、融点近傍で著しく変化し、その際に凍土の透水係数も激しく変化する。凍土の不凍水量と透水係数はほとんどの場合温度平衡状態で測定される。しかし、通常の土の凍結は温度が連続的に変化するため、こうした測定値が現実を表現しているかは確かではない。また、凍土の不凍水量と透水係数は測定の難しさから、しばしば未凍土の水分保持曲線(水分量-土中水圧の関係)と不飽和透水係数から推定される。しかし、これまでに凍土の不凍水量と透水係数の同時測定の例がないため、その妥当性は十分に検討されていない。そこで本研究では凍土の不凍水量曲線(不凍水量-温度の関係)を様々な温度変化で測定しその影響を確認すること、凍土の不凍水量と透水係数を同時測定し、凍土の透水係数を水分量に基づき評価すること、これらの結果に基づき、未凍土の水分保持曲線と不飽和透水係数からの凍土の不凍水量曲線と透水係数推定の妥当性を評価することを目的とする。

**試料と方法** 実験には、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(以降、岩手黒ボク土) および藤森シルトロームの  $2\text{ mm}$  篩通過試料と、鳥取砂丘砂の 3 種を用いた。試料を乾燥密度が一定になるように内径  $7.8\text{ cm}$ 、高さ  $3\text{ cm}$  のアクリル円筒カラムに詰めた。1, 1.5, 2 cm 深に熱電対 (TC) を、1, 2 cm 深に間隙水圧計とテンシオメータ (Pressure) 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)。試料を飽和後、試料の上下端をアルミ基部で密閉し、装置を断熱した。不凍水量曲線の測定では、試料凍結後、恒温水槽から不凍液を基部に循環することで、試料の温度を調整した。アクリルカラムに挿入した熱電対で温度を、不凍水を測定できるように検量した TDR で水分量を測定した。不凍水量と透水係数の同時測定では、試料を  $-4.5^{\circ}\text{C}$  で 24 時間以上凍結した後、試料を  $0.5^{\circ}\text{C}$  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。TDR で水分量を、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を、蒸発法で不飽和透水係数をそれぞれ求めた。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凍土の不凍水量、透水係数と比較した。この際、 $0^{\circ}\text{C}$  以下の水の粘性の温度依存性は考慮しなかった。実験は  $2^{\circ}\text{C}$  の低温室で行った。

**結果と考察** 凍結実験において、3 計測深度の温度差は  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  程度であり、試料が均一に融解しているとみなした。不凍水量曲線の測定では、 $-20^{\circ}\text{C}$  に凍結した試料を 2 通りの条件で融解・凍結した。Step では、試料の温度を段階的に上下した後、0.5 日以上一定に維持し、不凍水量と温度を測定した。Dynamic では、それぞれ異なる融解・凍結速度で連続的に試料の温度を変えながら不凍水量と温度を測定した。図 2 は  $-17^{\circ}\text{C}$  まで急冷した試料を Step で緩やかに融解した場合と Dynamic で急速に融解した場合の不凍水量曲線(プロット)と、未凍土の水分保持曲線から推定した不凍水量曲線(破線)である。Dynamic-1 は Dynamic-2 よりも融解初期の水分量が小さく、融解速度が速い場合の測

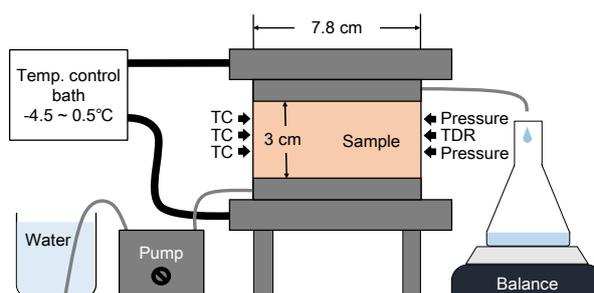


図1 凍結実験の装置の概要

定結果である。-5°C以下では、Step と Dynamic-1 の不凍水量曲線には大差は見られなかった。しかし、Dynamic-2 は不凍水量を過小評価し、融解速度をさらに上げると、正温になっても氷が土中に残存した。これは、氷の融解が全体の温度変化に追いつかない状態にあると見なせる。

通水した場合の不凍水量は通水のない場合の不凍水量よりも大きくなった (図 3)。未凍土からの推定値と比較すると、通水のない場合は概ね実測値と推定値が一致したが、通水のある場合は推定値が不凍水量を過小評価した。これは水が流れることにより氷ができにくくなることや、圧力融解することにより起因すると考えられる。

図 4 に岩手黒ボク土で測定した凍土の透水係数 (プロット) を示す。-0.5°C以下では、10 m 以上の水压をかけても凍土に水は通らなかった。-0.5°C以上になると、凍土の透水係数は-0.2°Cまで急激に、その後緩やかに温度上昇に伴い増加し、-0.2°Cまでに 5 オーダー以上変化した。凍土の透水係数と温度の関係は通水速度が 18 ~ 135 cm d<sup>-1</sup> の範囲で異なっても変化しなかった。未凍土の不飽和透水係数からの推定値 (破線) と比較すると、推定値は凍土の透水係数を過小評価した。これは、凍土の透水係数が不凍水量に依存するとみなせば、不凍水量を過小評価したため、透水係数を過小評価したと考えられる。

そこで、透水係数を水分量に基づき評価した (図 5)。プロットは凍土の透水係数と不凍水量の関係、破線は未凍土の不飽和透水係数と含水率の関係である。凍土と未凍土の透水係数と水分量の関係が概ね一致した。こうした一致は、いずれの試料においても同様だった。これより、凍土の透水係数が未凍土同様水分量に依存することが確認できた。また、凍土の透水係数の推定はクラウジウス-クラペイロンの式を介するより、水分量に基づくほうがも妥当と考えられる。

以上より、凍土の透水係数はしばしば未凍土の透水係数から推定されるが、0°C近傍においてはその推定値と実測値がずれやすいことが分かった。これは通水がある場合の水の流れなど、温度によって不凍水量が一定でないためである。相平衡の状態方程式は、こうした現象を考慮していない。そこで、通水などの効果を加えたモデルを作ることが今後期待される。

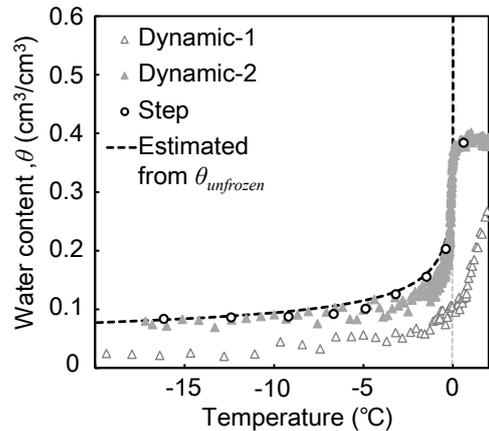


図2 通水のない時の不凍水量曲線と未凍土の水分保持曲線からの推定

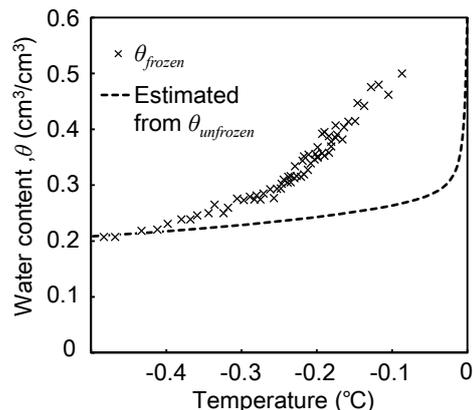


図3 通水のある時の不凍水量曲線と未凍土の水分保持曲線からの推定

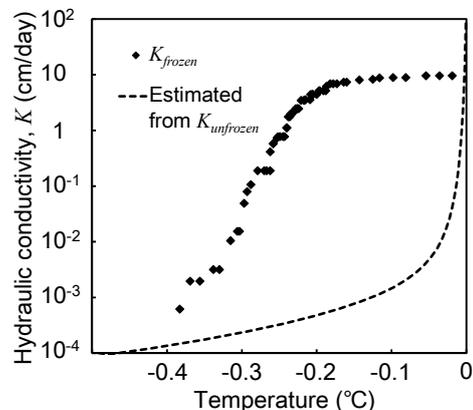


図4 凍土の透水係数(岩手黒ボク土)と未凍土の不飽和透水係数からの推定

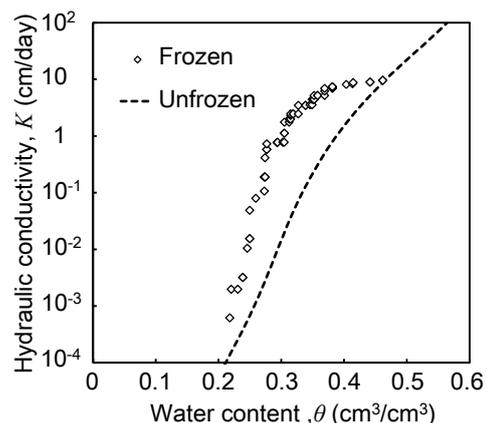


図5 凍土と未凍土の透水係数と水分量の関係