

カラム実験で測定した三種の土の不凍水量曲線と保水曲線の比較

Freezing curves of three soils obtained by column freezing experiment

渡辺晋生・紀藤哲矢

三重大学大学院生物資源学研究科

Abstract 鉛直一次元のアクリル円筒に砂，ローム，シルトロームを詰め，それぞれ上端より凍結した．そして，各深さにおいて不凍水量と温度を同時に測定した．カラム実験で得られた不凍水量は，クラウジウスークラペイロンの式を介して保水曲線から読み替えた不凍水量曲線より特に凍結面近傍で多かった．こうした差異は，温度変化が速いほど顕著で，低温になる程小さくなった．砂については表面張力の比によるクラウジウスークラペイロン式修正の有効性が確認できた．凍結面近傍の不凍水量に氷の成長速度と温度の変化速度の差異や水の流れの影響があることが示唆された．

キーワード: 不凍水量曲線，保水曲線，クラウジウスークラペイロン式

Soil freezing curve, Soil water retention curve, Clausius Clapeyron equation

はじめに 土中の水は，土粒子の表面力や間隙効果により， 0°C 以下に冷やされてもその全ては凍結せず液体状態を維持する．この不凍水の量と温度の関係を不凍水量曲線と呼ぶ．不凍水量曲線は，凍結・融解過程にある土中の水分移動予測や凍土の強度・安定性を考える上で本質的に重要な土固有の物性値である．不凍水量曲線は，一般に，水の流れのない系において温度平衡下で測定される．一方，凍土の数値モデルでは，土の凍結過程と乾燥過程における土中間隙の氷と空気の相同性を仮定し，二相共存系の状態方程式（クラウジウスークラペイロン式）を介して，土の保水曲線を不凍水量曲線に読み替える．温度平衡下で測定した不凍水量曲線と保水曲線の比較検討はこれまでにも行われているが，自然凍結ではこうした条件が整うことは希である．そこでここでは，鉛直一次元の土カラムを上端より凍結し，水分移動をとめない凍結線が進行している状態で各深さの不凍水量曲線を測定し，土の保水曲線との比較を試みた．

試料と方法 試料には鳥取砂丘砂，十勝の畑地の表層より採取した有機質なローム（黒ボク），藤森の深土より採取した無機質なシルトロームを用いた．図1に吸引法，加圧板法，鏡面冷却式露点計測法で測定した各試料の保水曲線を示す．異なる含水率に調整した試料を，内径 7.8 cm，高さ 35 cm のアクリル鉛直カラムに，均一な乾燥密度でそれぞれ充填した．カラム壁面より，試料に熱電対を 1 cm 間隔で，テンシオメータ圧力計と TDR 土壌水分計を 5 cm 間隔でそれぞれ挿入した．TDR は不凍水量が測定できるよう，前もって校正した．カラム側面を断熱し 4°C の低温室に 48 h 以上静置することで初期水分分布と温度分布を与えた．ここで，試料への給排水なしの条件で，カラム上下端の温度をそれぞれ -8°C と 4°C に制御し，試料を上端から 48 h 凍結した．この際，試料内の温度，圧力水頭，液状水分分布を測定した．テンシオメータの測定範囲は -800 cm 程度までであり，常温から -0.05°C の土中水圧測定に用いた． 0°C 以下の圧力 h については，クラウジウスークラペイロンの式(1)により温度 T から算出した．

$$h = \frac{v_l L_f}{\rho_b g} \ln \frac{T}{T_m} \quad (1)$$

ここで、 v_l は水の比容積、 L_f は凍結の潜熱、 ρ_b は土の乾燥密度、 g は重力加速度、 T_m はバルクの水の凝固点である。凍結は4連で行い、任意の時間にいずれかのカラムを2.5 cm 間隔に切断し、炉乾法により試料内の全水量分布を求めた。

結果と考察 カラム上端を冷却すると、いずれの試料の凍結深も48 hで約15 cmに達した。0°C線の進行速度は凍結初期に速く、徐々に遅くなった。図2に2.5, 7.5, 12.5 cm 深において測定した各試料の不凍水量 θ を示す。図中、 $T < -0.06^\circ\text{C}$ は熱電対の測定温度を、 $T > -0.06^\circ\text{C}$ はテンシオメータで測定した h を式(1)で換算した温度を示す。また、実線は図1の近似曲線を式(1)で読替えた不凍水曲線である。いずれの試料の不凍水量も温度低下にともない指数関数的に減少した。カラム実験の不凍水量は、保水曲線から読み替えた不凍水量と概ね一致したが、特に高温で多くなった。こうした傾向は凍結速度の速い試料上部程顕著だった。保水曲線からの読み替えは不凍水量の簡便な推定法と見なせる。一方、詳細な検討を要する際には保水曲線との差異に留意が必要であろう。例えば、主として毛管力により水が保持される試料においては、式(1)を空気-水と氷-水の表面張力の比で修正する必要がある。修正を施すと、砂の保水曲線とカラム実験から得た不凍水量曲線の差異は小さくなった。しかしこの修正のみでは、他の試料や凍結初期の不凍水量の違いは説明できなかった。氷の成長速度と温度の低下速度の違いや水の流れが不凍水量曲線に影響を及ぼしていると考えられる。

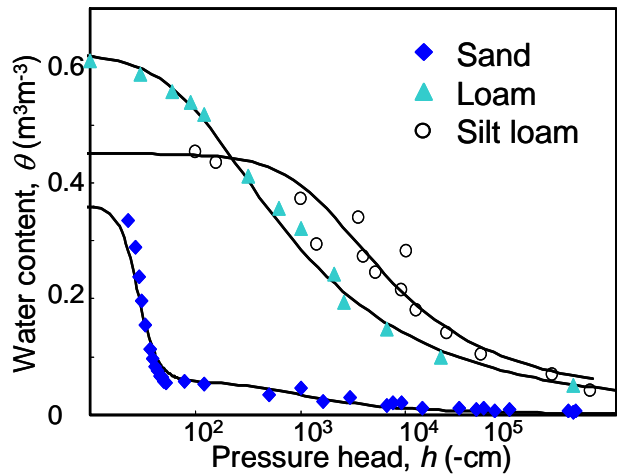


図1 試料の保水曲線

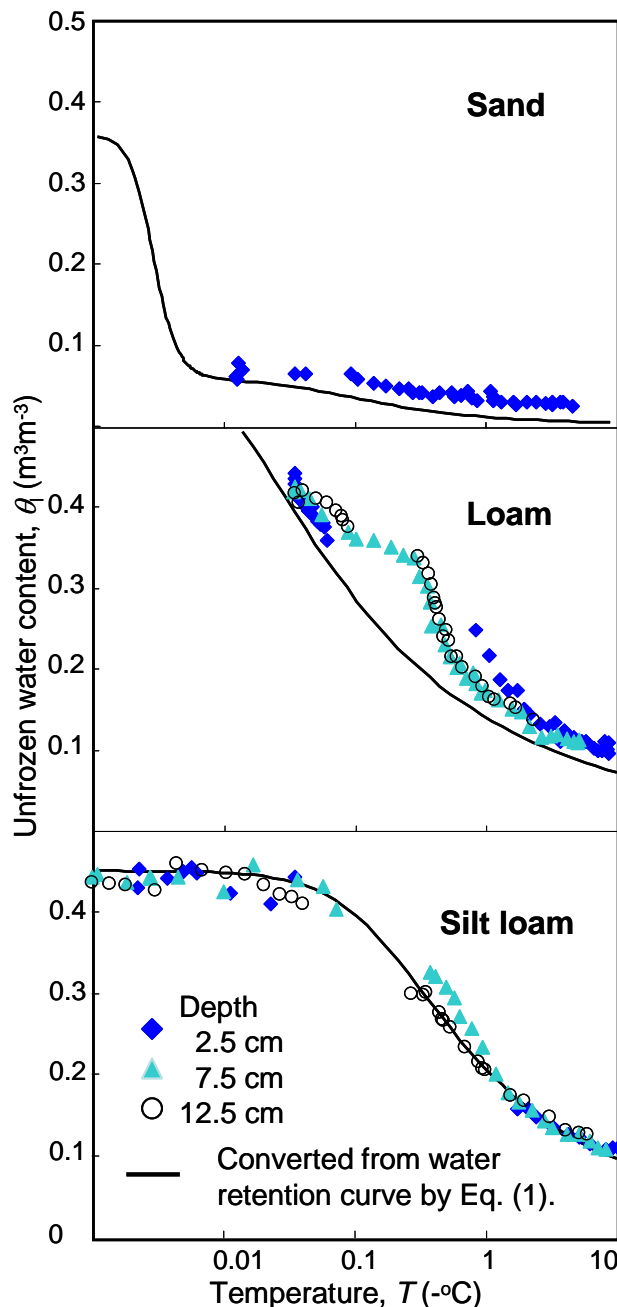


図2 カラム実験から得た不凍水量曲線