

凍結・融解過程における黒ボク土の不凍水量曲線

Unfrozen water content of Andisol under freezing and thawing processes

長田友里恵・渡辺晋生

三重大学大学院生物資源学研究科

要旨

黒ボク土を異なる速度で凍結・融解し、不凍水量曲線を比較した。凍結速度が速いと、温度平衡時に比べ不凍水量が多くなった。また、動的に温度を変化させながら不凍水量曲線を作成すると、凍結曲線と融解曲線に氷の非平衡成長による見かけ上のヒステリシスが生じた。水分特性曲線や蒸発過程の水分量変化は不凍水量曲線と概ね一致したが、今後の詳細な検討が必要である。

テーマ：土壌物理研究の最前線 Trend in Soil Physics

キーワード：凍結曲線, 融解曲線, 水分特性曲線, 凍結速度, TDR

Key words: Soil freezing curve, Soil thawing curve, Water retention curve, freezing rate, TDR

1. はじめに

土中の水は、 0°C 以下に冷やされてもその全では凍結せず、一部が液状を保持する。この凍土中の液状水（不凍水）量と温度の関係を不凍水量曲線（SFC）と呼ぶ。SFCを得ることは、凍結過程の土中の水熱移動や、凍土層への水の浸透、凍土中の微生物活性を考える上で重要である。不凍水量は温度平衡にある土について定義されることが多いが、凍結・融解過程にある土の温度は動的に変化する。それゆえ温度を変化させながら SFC を測定できれば有用である。そこで本研究では、様々な凍結・融解状態にある土の不凍水量を測定し、SFC を検討する。

2. 試料と方法

試料には、岩手大学附属農場の無植生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 5.5 cm のアクリル円筒カラムに詰めた。2, 3, 4 cm 深に T 型熱電対を、3 cm 深にテンシオメータと 7 cm 長の TDR プローブをそれぞれカラム壁面から挿入した。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。装置を断熱し、上下基部の温度を制御することで試料を凍結・融解した。実験は 2°C の低温室で行った。

3. 結果と考察

-20°C に凍結した試料を 3 通りの条件で融解・凍結した。図-1 に試料の温度変化を示す。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。2, 3, 4 cm 深の温度差は、凍結・融解速度が $2, 1^{\circ}\text{Ch}^{-1}$ でそれぞれ $0.4, 0.3^{\circ}\text{C}$ 程度であり、それより遅いと 0.2°C 以下となった。そこで、TDR プローブ周辺の試料は概ね均一に凍結しているとみなした。

図-2 に、Step で緩やかに冷却した試料と Dynamic で -20°C に急冷した試料の SFC（凍結曲線）を示す。試料の不凍水量は緩冷時には -17°C で $0.02\text{ m}^3\text{m}^{-3}$ 程度、急冷時には $0.09\text{ m}^3\text{m}^{-3}$ 程度と凍結速度が遅いと少なくなった。急冷速度が多少異なっても SFC に違いは見られなかった。緩冷時と急冷時の SFC の違いは、団粒内間隙水の凍結の有無や間隙水の結晶粒の大きさ、溶質の氷からの吐出量の違いによると考えられる。このため、急冷した試料についても、その後一定温度が続けば、間隙水が平衡状態まで成長し、不凍水量が Step と同程度まで減少する可能性がある。そこで、 -17°C に急

冷した試料の温度を 1.5 時間一定に維持したところ、不凍水量が増減を繰り返しながら $0.09 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ から $0.07 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ まで低下した。増減を繰り返すのは潜熱の放出と再凍結を繰り返すためであろう。また、不凍水量の低下速度は次第に遅くなるため、平衡に近づくには半日から 1 日は要すると考えられる。図-3 は -17°C まで急冷した試料を Step で緩やかに融解した場合と Dynamic で急融した場合の SFC である。

-5°C 以下では、緩融時と急融時の SFC には大差は見られなかったが、急融時には不凍水量が増減を繰り返しながら増加した。また、 $-3 \sim 0^\circ\text{C}$ では、Dynamic 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。氷の融解が全体の温度変化に追いつかない非平衡状態にあると見なせる。Dynamic の凍結曲線と融解曲線を比べると、SFC がヒステリシス様に異なった (図-4)。これは、凍結時にも融解時と同様な非平衡過程が生じたためと考えられる。こうした凍結・融解状態の土には、相平衡の状態方程式であるクラペイロンの式の適用に注意が必要である。

次に、乾燥過程の水分特性曲線と凍結過程の SFC を比較した (図-1)。図中実線 (SWC) は吸引法、加圧板法、鏡面冷却露点式水ポテンシャル計の測定値に Durner のモデルを適合した水分特性曲線の圧力を、クラペイロンの式を介して温度に換算した SFC である。SWC の水分量は 0°C 近くでは Step に近かったが、 -10°C 以下では Dynamic に近づいた。間隙保水が多い土に対しては、固液界面と気液界面の自由エネルギーの違いに基づくクラペイロンの式の補正が提案されている (nSWC)。nSWC の不凍水量は SWC より低下したが、Step より高かった。自動水分吸脱着測定装置 (VSA) で測定した低圧の水分特性曲線と比べると、給水曲線が Step の SFC に近かった。凍結速度の違いによる SFC の違いや、SFC と SWC の違いは小さくなく、今後の検討が必要である。

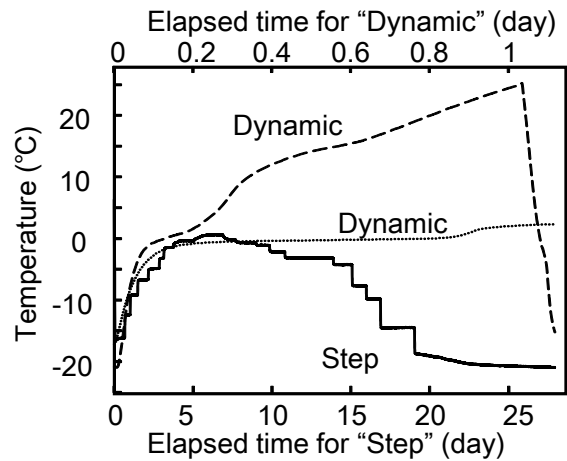


図-1 試料の温度変化

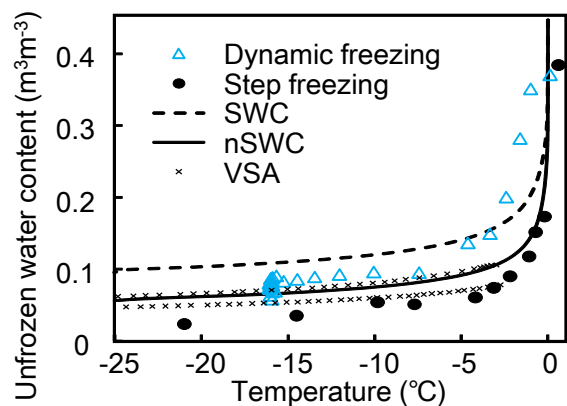


図-2 凍結過程の不凍水量曲線

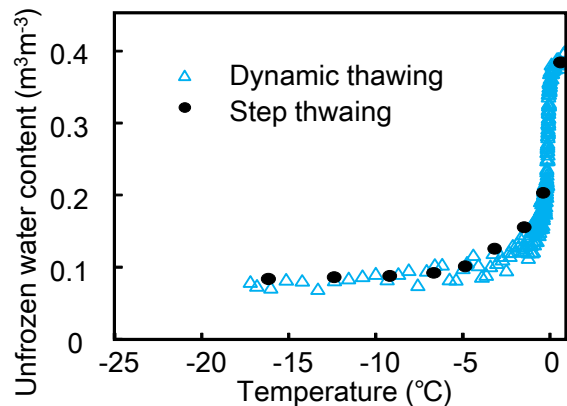


図-3 融解過程の不凍水量曲線

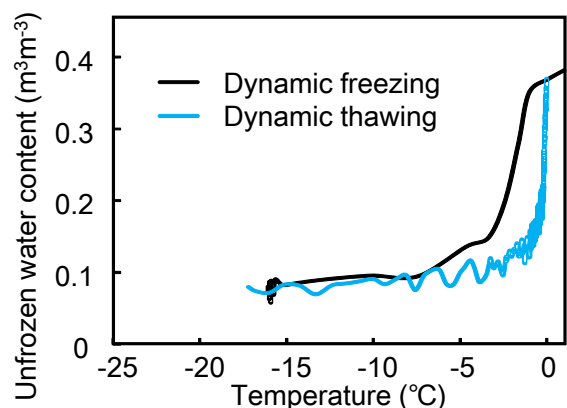


図-4 動的に測定した不凍水量曲線