

凍結融解過程にある不飽和土中の不凍水圧測定

三重大学大学院生物資源学研究所 ○伴 俊和
三重大学大学院生物資源学研究所 渡辺晋生

はじめに 寒冷地の水循環や農地の水・施肥管理を考える上で、土の凍結に伴う水の動きを把握することが重要である。それゆえ、凍土への水移動の駆動力である不凍水（0℃以下でも凍らない水）の圧力を知る必要がある。しかし、不凍水圧は極めて低圧であり、テンシオメータのような計器での直接測定は難しい。ところで近年、土中に埋設可能な露点計が開発されている。凍土中の露点が測定できれば、露点から土中の不凍水圧を算出できる。そこで本研究では異なる速度で凍結・融解する土中の露点を測定し、土中温度と不凍水圧の関係を調べることを目的とした。また不凍水圧の実測値を、試料の温度からクラウジウス・クラペイロン式（CCE）を用いて推定した不凍水圧と比較した。

試料と方法 試料には岩手大学附属農場休耕畑の表層土の2 mm 篩通過分を用いた。露点計には Azbil 社の Finedew を用いた。Finedew は先端に直径 1.4 cm、長さ 1.5 cm のセンサ部を持つ。センサ部外周は液状水を透過しないが水蒸気を透過するテフロンフィルタで覆われている。センサ部内には鏡面があり、鏡面の温度を上下することで平衡する外気の露点を計測する。直径 4.7 cm の真鍮管に 9.0 cm 深まで体積含水率 0.18 cm³/cm³ で試料を充填した。試料の 4.5 cm 深にセンサ部先端がくるように露点計を垂直に設置した。センサ部に対し先端、中央、下端と 0.75 cm 間隔で 3 本、5.5 cm 深に 1 本熱電対を設置した。真鍮管を恒温水槽に沈め、水槽の温度を調節することで試料の温度を変化させ凍結・融解した。凍結融解は 2 通り行った。1 つ目は試料の温度を一定速度（±0.34℃/h あるいは±0.68℃/h）で変化させながら露点を連続的に測定する Dynamic freezing/thawing である。この際、凍結過程から融解過程に移行する前に -7.0℃ で 4 h 静置した。2 つ目は一定温度に 2 h 以上静置した後、露点を測定してから次の温度（1.5, -2.6, -3.5, -5.1, -6.8℃）へ段階的に変化させる Step freezing/thawing である。得られた露点とセンサ部中央（3.75 cm 深）の試料温度に Kelvin 方程式を適用し、土中の不凍水圧を求めた。なお、Finedew の不凍水圧の測定信頼領域は -10000 cm 以下である。また、センサ部からの排熱を促すため、測定を幾度か中断した。

結果と考察 Dynamic で測定した露点と温度の経時変化を図 1 に示す。-0.34℃/h で試料を凍結すると露点は試料温度と共に低下し、実験開始から 16 h 以降（試料温度 -4.1℃ 以下）で試料温度を下回った。試料温度 -7.0℃ で露点 -7.9℃ となった。+0.34℃/h で試料を融解すると露点は試料温度と共に上昇し、実験開始から 40 h 以降（試料温度 -2.7℃ 以上）で試料温度を上回った。またセンサの特性上、測定中断直後の露点の測定値は一時的に低い値を示した。Dynamic で測定した不凍水圧の経時変化を図 2 に示す。±0.34℃/h で凍結融解した際の不凍水圧は、凍結開始後 15 h（-3.7℃）で -1000 cm、16.6 h（-4.2℃）で -10000 cm と急激に低下し、24 h（-7.0℃）で -90000 cm に達した。±0.68℃/h の凍結融解でも露点と試料温度、不凍水圧変化の傾向は同様であった。図 2 には試料温度から CCE を用いて求めた不凍水圧の推定値も点線で併記した。凍結過程では、凍結速度に関わらず不凍水圧の推定値は測定値より低くなった。また、不凍水圧が低下するにつれ、両者の値は近づいた。融解過程では、融解初期は不凍水圧の実測値と推定値は一致したが、その後推定値は測定値より低くなった。

Dynamic で測定した試料温度に対する不凍水圧を図 3 に示す。凍結過程と融解過程では温度不凍水圧曲線が異なった。±0.34°C/h と±0.68°C/h と凍結融解速度が異なっても大きな違いは見られなかった。凍結過程では不凍水圧は-4.2°C以下で露点計の測定信頼領域となった。その後温度低下に伴い徐々に低下、-7.0°Cで -90000 cm に達した。-7.0°Cからの融解過程では不凍水圧は温度の上昇に伴い高くなったが、凍結過程より低圧を示し、その差は次第に広がった。融解過程の不凍水圧は-3.0°Cまで露点計の測定信頼領域にあった。

Step で測定した試料温度に対する不凍水圧を図 3 にプロットで示す。Dynamic での測定結果同様、測定温度が等しくても不凍水圧は凍結過程より融解過程で低かった。また、その差は低温ほど小さくなり、-6.8°C で一致した。-6.8°Cでの測定値は Dynamic での測定値とも等しかった。各温度での凍結過程と融解過程の不凍水圧差は Dynamic で測定された差よりも小さかった。-6.8°C より高温では凍結過程の Step の不凍水圧は Dynamic より低圧に、融解過程では高圧になった。図 3 には CCE により試料温度から推定した不凍水圧も点線で併記した。推定値は Dynamic の融解曲線と-7.0~-4.8°Cではほぼ一致したが、その他の測定値より低くなった。

土の凍結融解において、土中氷の生成および融解がみかけの温度変化に追いつかないことがあると考えられる。温度が等しくても Dynamic と Step で不凍水圧が異なったことや、Dynamic の温度-不凍水圧関係にヒステリシス様の凍結融解曲線が生じたのはこのためであろう。また、CCE は-5°C以下の不凍水圧をよく推定した。今後は異なる速度で凍結融解する土中の不凍水圧変化を不凍水量や氷量の変化と共に評価する必要がある。

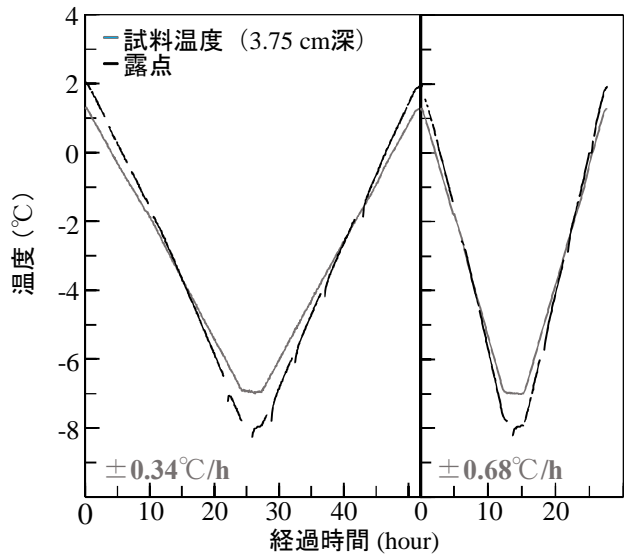


図1 露点と試料温度の経時変化

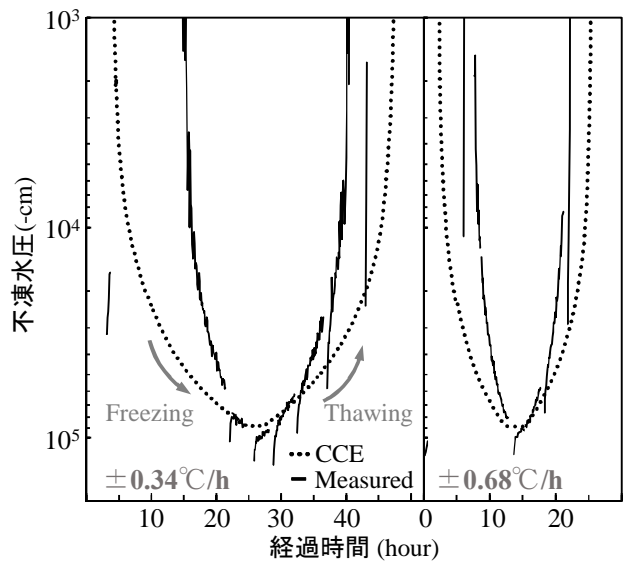


図2 不凍水圧の経時変化

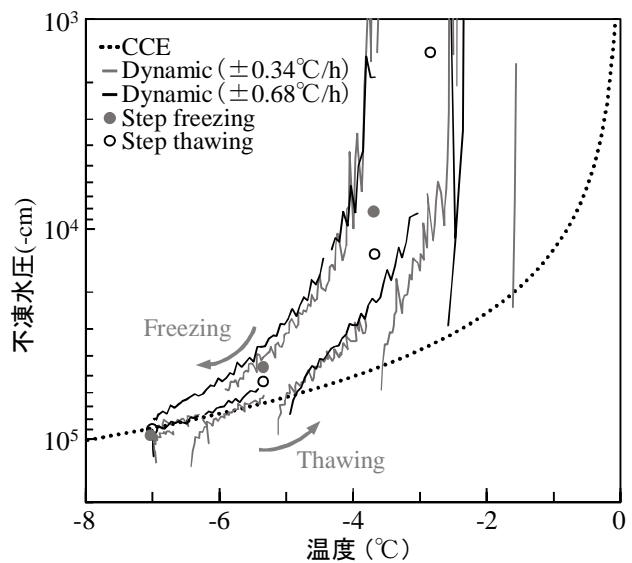


図3 温度-不凍水量関係