

一方向凍結過程にある不飽和土中の水ポテンシャル勾配と水分移動 Gradient of Unfrozen Water Potential in a Directionally Frozen Soil Column

○渡辺晋生¹, 伴 俊和¹
Kunio Watanabe and Toshikazu Ban

1. はじめに

凍結融解過程にある不飽和土中の水分移動の予測は、寒冷地の農地の水分・施肥管理や地下水涵養、水・熱収支の評価を考える上で重要である。地表が寒気に晒され、凍結層が形成すると、凍土中の水ポテンシャルの低下が未凍土から凍結面近傍への水分移動を引き起こす。この際の水分移動量は水ポテンシャル勾配に比例するが、凍土中の水ポテンシャルは極めて低圧なため、また土中の間隙氷の成長は必ずしも平衡に達しないため、測定が困難である。ところで近年、土中に直接挿入でき、応答速度も速い小型の鏡面冷却式露点計が開発された。そこで本研究では、この露点計を用いて凍結融解過程にある凍土中の水ポテンシャルを実測することを目的とする。そして、実際の凍結融解過程と温度平衡を仮定した際の水ポテンシャル勾配の差違や、この差違によって生じる水分移動計算のエラーを評価する。

2. 試料と方法

岩手大学附属農場の A 層から採取した黒ボク土の 2 mm 篩通過分を試料とした。試料の 1:5 懸濁水の電気伝導度は 0.05 S m^{-1} であり、土中水の凝固点降下や浸透ポテンシャルを無視できるとみなした。試料を内径 78 mm、高さ 350 mm のアクリルカラムに、含水率が $0.36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 、乾燥密度が 1.14 Mg m^{-3} になるよう均一に詰めた。カラム側面から試料にプローブ長 70 mm の TDR とテンシオメータを 50 mm 間隔で各 7 本、T 型熱電対を 10 mm 間隔で 34 本、露点計を 7.5 および 12.5 cm 深にそれぞれ挿入した。TDR は不凍水量を測定できるよう前もって検量した。また、露点計で測定した露点と同地点の地温から相対湿度が求められる。そして相対湿度をケルビン方程式に代入すれば水ポテンシャルを計算できる。この方法で、一定温度に置かれた凍土の水ポテンシャルを凍結・融解過程や土質に依存せず測定できることをクラウドスクラペイロン (CCE) 式との比較から先に確認した。

カラムを 3°C の低温室に 48 時間以上静置し、試料に一定の初期温度分布と重力水分分布を与えた。試料側面を 10 mm のゴムシートと 50 mm のガラス繊維シートで断熱した。そして、試料の上下端に設置した温度制御ユニットにより、試料上端を -12°C に、下端を 3°C に 48 時間保ち、試料上部に凍結層を形成した。その後、試料上端の温度を -7°C に上げ、凍結層を徐々に 48 時間融解した。実験中、試料上下端からの水の流入出はなしとし、各深度の地温、水分量 (凍土内では不凍水量)、水ポテンシャルを 10 分間隔でモニターした。この際、凍上は見られなかった。

3. 結果と考察

試料の上端の温度を -12°C に低下すると、試料内を凍結線が初期に急激に、次第に緩やかに進行し、48 時間で 25 cm の凍結層が形成された。この際、凍結層内の水ポテンシャルは温度低下にともない低下した。また、未凍土から凍土への水分移動が確認された。露点計で求めた凍土の水ポテンシャルは、温度平衡を仮定し地温と CCE から推定した水ポテンシャルより常に高くなった。こうした水ポテンシャルの差違は凍結速度が速いほど、また氷への相変化量が多い程大きくなった。これは、間隙氷の

成長が地温低下に追い付かなかったためと考えられる。また、48 時間後には凍結線の進行が見かけ上止まり、露点計と CCE から求めた水ポテンシャルが概ね一致するようになった。

次に、試料上端の温度を -7°C に上げると、48 時間で、7.5 cm 深の地温が -6.3°C から -4.5°C に、12.5 cm 深の地温が -4.0°C から -2.0°C に緩やかに上昇した。この間、融解過程であっても未凍土から凍土への水分移動が継続した。これは、凍結層が縮小傾向であっても、凍土の水ポテンシャルが十分に低いためである。融解過程においては、露点計で求めた両深度の水ポテンシャルの上昇は、CCE で推定した水ポテンシャルとよく一致した。本実験の融解過程は、凍結過程に比べ凍結線の進行速度が遅く、間隙氷の融解は地温の上昇速度に遅れなかったと考えられる。

ここで、図 1 に凍結融解過程における 2.5~7.5 cm 深と 7.5 cm ~12.5 cm 深の温度勾配の経時変化を示す。この際、2.5 cm の地温は上端の温度を変化後、凍結過程で -11°C 、融解過程で -7°C で概ね一定であり、相変化も少ないことから、露点計で求めた水ポテンシャルと地温と CCE から推定した水ポテンシャルは一致すると仮定した。凍結過程においては、CCE による推定はよく凍結した凍土 (2.5~7.5 cm 深) の水ポテンシャル勾配を過小評価する一方、凍結面近傍の凍土 (7.5 cm~12.5 cm 深) の水ポテンシャル勾配を過大評価する傾向があった。こうした過大評価は数十 MPa m^{-1} にも及んだ。一方、融解過程においては (図中 48~96 時間)、CCE による推定は水ポテンシャル勾配を何れの深さについてもよく表した。CCE を用いた数値解析は凍土への水分移動を概してよく表すが、凍結初期や多量の水が凍土に流入する時には、留意が必要といえる。

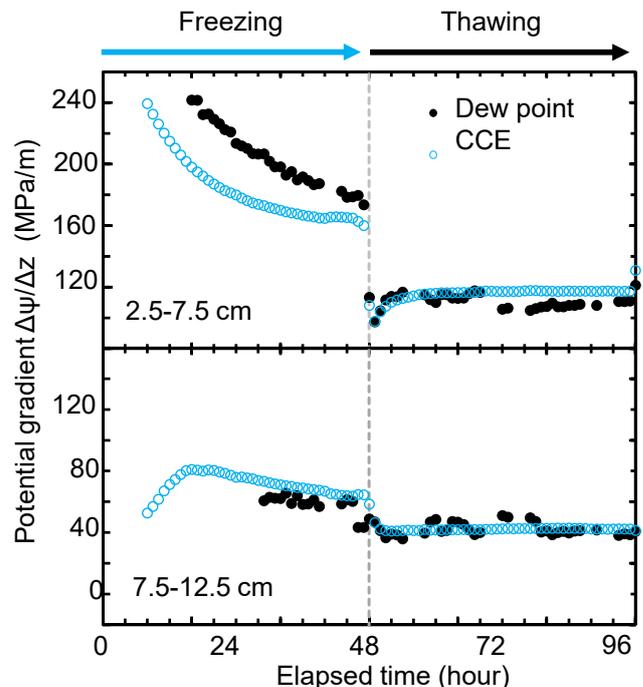


図 1 凍結融解過程にある凍土の水ポテンシャル勾配