

# 鏡面冷却式露点計を用いた凍土の土中水圧測定

Estimation of water potential in frozen soil using micro chilled mirror dew point sensor

○伴 俊和・渡辺 晋生

Toshikazu BAN and Kunio WATANABE

**はじめに** 凍土中には 0℃以下でも凍結しない不凍水が存在し、その土中水圧  $h$  は温度変化にとともに著しく変化する。こうした  $h$  の変化は、地表の凍結時には地中から凍結面への、融解時には凍土から地中への水分移動を誘起する。そのため寒冷地の施肥・水管理を考える際、凍結融解過程にある土中の  $h$  を把握することが重要となる。しかし、氷点下にある凍土の極めて低い  $h$  をテンシオメータで測定することはできない。そこでしばしば、凍土に氷と水の相平衡の状態方程式であるクラウジウスクラペイロン式 (GCCE, 式(1)) が適用される。

$$\frac{1}{\rho} \frac{dP_l}{dT} - \frac{1}{\rho_i} \frac{dP_i}{dT} = \frac{L_f}{T} \quad (1)$$

ここで、 $P_l = \rho gh$  と  $P_i$  は水と氷の圧力 [Pa]、 $\rho$  と  $\rho_i$  は水と氷の密度 [ $\text{kg m}^{-3}$ ]、 $T$  [K] は温度、 $L_f$  は水の融解の潜熱 [ $\text{J kg}^{-1}$ ] である。そして、不飽和土では水圧を大気圧と見なすことで式 (1) の左辺第二項を無視し、凍土の  $h$  を温度から推定する。ところで近年、極めて低い  $h$  を測定できる露点計の小型化が進み、土中に直接挿入することも可能となった。しかし、凍土中の  $h$  測定にこうした露点計を用いた例は無い。そこで、本研究では露点計を凍結実験に応用し、凍結過程にある土中の  $h$  の変化を直接測定することを目的とした。

**試料と方法** 凍土の  $h$  測定には Azbil 社の鏡面冷却式露点計 (Finedew) を用いた。Finedew は周囲の土中と平衡した小空間 (直径 1.4 cm、長さ 1.5 cm) 内の鏡面温度をペルチェ素子で調整し、鏡面の結露を光ファイバを介した光の投受光で判定する。そして、その際の露点を白金測温体で測定する。露点と熱電対で測定した地温に基づき水蒸気圧と飽和水蒸気圧の比 (相対湿度  $H_r$ ) を求め、Kelvin 方程式 (式(2)) に代入すれば土中水圧  $h$  を算出できる。

$$h = \frac{100RT}{\rho g M} \ln H_r \quad (2)$$

ここで、 $R$  は気体定数 [ $\text{mol}^{-1} \text{K}$ ]、 $M$  は水の分子量 [ $\text{g mol}^{-1}$ ] である。

**実験①** 内径 4.7cm、高さ 12cm の真鍮製のカラムに体積含水率を 0.2 に調整した藤の森シルトを乾燥密度  $1.2 \text{ g cm}^{-3}$  になるよう充填した。試料中心部に Finedew を、その周りに熱電対を 3 本設置した。カラムを恒温水槽内に沈め、水槽温度を任意の温度に設定した。各温度設定後、十分な時間試料を静置し、温度平衡に達した凍土の温度と露点を測定した。

**実験②** 内径 7.8 cm、高さ 35 cm のアクリル製のカラムに岩手大学附属農場で採取した黒ボク土を乾燥密度  $1.2 \text{ g cm}^{-3}$ 、体積含水率 0.3 になるよう充填した。カラムに 1 cm 深間隔で熱電対を、5 cm 深間隔で TDR 水分計を、2.5 cm および 7.5 cm 深に Finedew をそれぞれ設置した。3℃の恒温室にカラムを静置することで試料に初期温度と水分分布を与えた後、カラム周囲を断熱した。カラム上下端の温度を -10℃と 3℃に制御することで試料を上端より凍結し、土中の温度、土中水圧  $h$ 、水分量をモニターした。

## 結果と考察

**実験①** Finedew で測定した土中水圧  $h$  と GCCE で推定した  $h$  の関係を図 1 に示す。 $h < -12000$  cm ( $-1.9^\circ\text{C}$ 以下)の測定値は GCCE の推定値とよく一致した。しかし  $h > -23000$  cm では露点が安定せず、Finedew は  $h$  を過小評価した。

**実験②** 2.5, 7.5, 17.5 cm 深の温度と体積含水率、GCCE で推定した  $h$  の経時変化を図 2 に示す。図には Finedew で測定した 7.5 cm 深の露点と  $h$  も併記した。上端の冷却を開始すると、試料上部の地温が急激に低下し、下部の地温も次第に低下した。2.5 cm 深は 1 h で 7.5 cm 深は 5 h で  $0^\circ\text{C}$  以下に達し、48 h 後には上端から 18.5 cm の凍土が発達した。7.5 cm 深では地温の低下とともに露点が低下し、露点と地温の差も大きくなっていった。2.5, 7.5 cm 深では、地温が  $0^\circ\text{C}$  以下になると土中水の多くが凍結し、不凍水量が  $-1.3^\circ\text{C}$  で 0.1 まで急激に減少した。また、 $-1.3^\circ\text{C}$  以下では不凍水量は 0.1 でほぼ一定となった。17.5 cm の地温は 29 h で  $0^\circ\text{C}$  以下に達したが、それ以前から水分量が徐々に減少した。これは上部の凍土へ水分が移動した結果と考えられる。また、 $0^\circ\text{C}$  以下の不凍水量の急激な低下は見られなかった。GCCE に従えば、土中水圧  $h$  は地温が  $0^\circ\text{C}$  以下になると地温とともに急激に減少した。Finedew も  $-1.1^\circ\text{C}$  以下の  $h$  の経時変化を測定できた (図 2b)。しかし、モニター中に Finedew 計測部の温度が上昇することがあり、適宜センサーの ON/OFF を要した。図 1 にはカラム実験でモニターした  $h$  と GCCE の推定値も示した。実験①同様、測定値は推定値とよく一致した (図 1)。

式(1)では、地温と露点の差が  $0.01^\circ\text{C}$  変わると  $h$  が約 1000 cm 変化する。 $h > -10000$  cm ではこの影響が大きく、露点計では正確な  $h$  を測定できないと考えられる。また、 $h$  測定については露点計測部に相当する地温を測定することも重要である。実験②の様に温度勾配が存在する場合、露点計による測定精度の向上のために試料温度とセンサー測定部の温度関係について今後、詳細に検討が必要である。

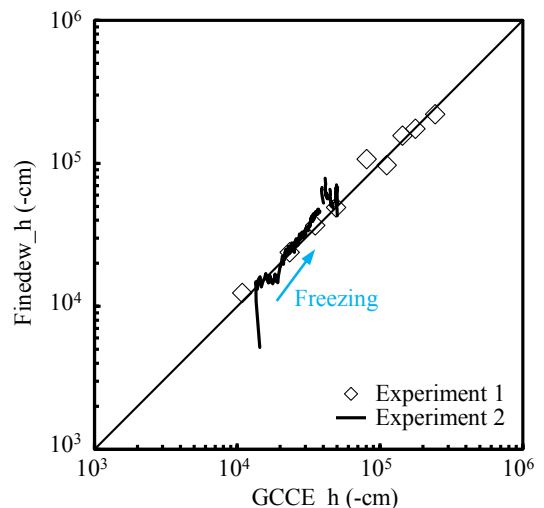


図1.土中水圧の推定値と測定値の比較  
Fig.1 Estimated and measured pressure head

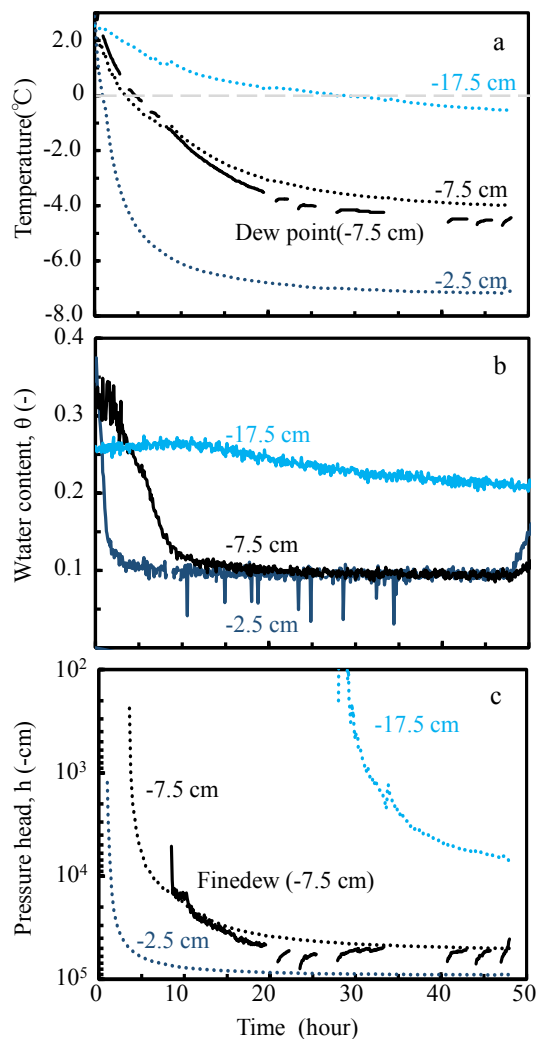


図2.温度・水分量・土中水圧の経時変化  
Fig.2 Temperature, water and pressure head