

# TDR 法に基づく土壤凍結深計の検討

## Application of a TDR Probe to Frost Depth Monitoring

○奥田 涼太\*・渡辺 晋生\*・相馬 啓\*\*  
 Ryota Okuda\*, Kunio WATANABE\* and Hiroshi SOMA\*\*

**はじめに** 地盤が寒気に晒されると、地表に土壤凍結層が発達する。凍結層の厚さの把握は、寒冷圏の農地の水分施肥管理や温暖化の指標として重要であり、人工凍土の利用を考える上でも必須である。凍結層の厚さは、凍結深度棒や地温計測、地中探査レーダー等から推定される事が多い。しかし、これらの計測法には測定長や精度、自動計測などに問題がある。例えば地温計測については、線形補間の不確かさや土中水の凝固点降下から凍結層の厚さを正確には測定できない可能性がある。ところで、TDR 法は水の比誘電率が土固相や気相より高いことを利用し土中の水分測定に広く用いられるだけでなく、氷の比誘電率が土固相に近いことを利用し凍土中の不凍水量測定にも用いられる。また、成層構造をなす媒体に TDR プローブを挿入した場合、TDR 法は各媒体長に対する平均の比誘電率を計測する。それ故、凍結に晒される地表にプローブを挿入すれば、凍土と未凍土の比誘電率の違いから、TDR 法により凍結層の厚さをモニターできると考えた。そこで本研究では TDR 法の凍結深計への応用と、地温計測と TDR 法で測定される凍結層の厚さの違いの検討を目的とした。

**試料と方法** 水洗後炉乾した鳥取砂丘砂を体積含水率  $0.25 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$  に調節し、乾燥密度  $1.4 \text{ g cm}^{-3}$  で、縦  $37 \text{ cm}$  × 横  $63 \text{ cm}$  のプラスチック製容器に深さ  $30 \text{ cm}$  まで詰めた (Fig. 1)。容器の側面と底面を比誘電率 2.7、厚さ  $5 \text{ cm}$  の発泡スチレンで断熱した。そして、容器下端からプローブ長  $30 \text{ cm}$  の TDR を鉛直上向きに設置した。また、 $5, 10, 15, 20 \text{ cm}$  深に熱電対を、 $10, 20 \text{ cm}$  深にプローブ長  $7 \text{ cm}$  の TDR を水平に設置した。

試料上端には  $0.5 \text{ cm}$  厚の鉄板を敷き、その中央に  $14 \text{ cm}$  長の凍結管をモルタルで貼り固め実験装置とした。装置を  $2^\circ\text{C}$  の低温室に一昼夜静置し、初期温度分布と水分分布を与えた後、装置表面を  $1 \text{ cm}$  厚のゴムシートと  $5 \text{ cm}$  厚の発泡スチレンで断熱した。ここで、凍結管に  $-15, -20, -25, -30^\circ\text{C}$  の冷媒を循環することで試料を上面から凍結した。鉛直に設置した  $30 \text{ cm}$  長の TDR は、凍土、未凍土、断熱材三層の見かけの比誘電率  $\epsilon_r$  を測定する。凍土と未凍土、断熱材の比誘電率  $\epsilon_f, \epsilon_{uf}, \epsilon_s$  が長さ  $L_f, L_{uf}, L_s$  で完全に異なるとすれば、 $\epsilon_r = (\epsilon_f L_f + \epsilon_{uf} L_{uf} + \epsilon_s L_s) / (L_f + L_{uf} + L_s)$  の関係が仮定できる。ここで、TDR のプローブ長を  $L_f + L_{uf} + L_s = L$  と置けば、凍結深  $L_f$  は次式で求められる。

$$L_f = \frac{L(\epsilon_r - \epsilon_{uf}) + L_s(\epsilon_{uf} - \epsilon_s)}{\epsilon_f - \epsilon_{uf}} \quad (1)$$

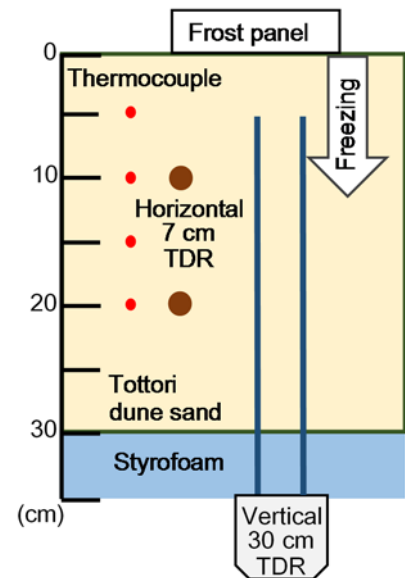


Fig. 1 Schematic of apparatus.

\* 三重大学大学院生物資源学研究科 Graduate School of Bioresources, Mie University

\*\*ケミカルグラウト (株) Chemical Grouting Co., Ltd.

キーワード: 凍土, 土中氷, 比誘電率, 温度計測

**結果と考察** Fig. 2, 3 に $-30^{\circ}\text{C}$ の冷媒で試料を凍結した際の 10, 20 cm 深の温度と比誘電率を示す. 冷却を開始すると, 試料の温度が上面から徐々に低下し地表に凍結層が形成した. 10, 20 cm 深の温度は各々 855 分, 2220 分で  $0^{\circ}\text{C}$  に達し, しばらく停滞した後, 再び低下した. 凍結前の 10, 20 cm 深の比誘電率は, 含水率の違いで異なった. 10 cm 深の比誘電率は最初緩やかに,  $-0.3\sim-0.7^{\circ}\text{C}$  の間に急激に低下し, その後一定値となった. 20 cm 深の比誘電率も温度が  $-0.3^{\circ}\text{C}$  以下に低下し始めると急激に低下した. 一方, 鉛直に設置した TDR の比誘電率は凍結層の伸張にともない 13.8 から 5.3 まで連続的に低下した. 10, 20 cm 深の比誘電率の初期の緩やかな低下は, 上層の凍結による上向きの水分移動の結果と考えられる. また, 比誘電率が  $-0.3^{\circ}\text{C}$  から急激に低下し始めたことから, 土中氷の発生温度は  $-0.3^{\circ}\text{C}$  以下だったと考えられる.

Fig. 4 に各深さの熱電対が  $0^{\circ}\text{C}$  に達した時間を \* で, 比誘電率が急激に低下し始めた時間を ● で示す. それぞれ温度計測および TDR 法で推定した凍結深と見なせる. いずれの凍結深も時間の平方根に比例して深くなったが, TDR 法は温度計測より凍結深を  $-0.3^{\circ}\text{C}$  分薄く見積もった. Fig. 5 に 10, 20 cm 深の比誘電率が急激に低下し始めた時間の, 各 TDR で求めた比誘電率と断熱材の比誘電率を示す. 図中には式 (1) に任意の比誘電率  $\epsilon_r$  を代入して求めた凍結深も示した. この際, 凍土の比誘電率は, 7 cm 長の TDR が低含水率の比誘電率を過大評価することを考慮し, 氷と土固相の比誘電率から  $\epsilon_f = 2.7$  とした. 一方, 未凍土の比誘電率は 10 cm 深の TDR の初期値から  $\epsilon_{uf} = 16$  とした. また,  $L$  と  $L_s$  はプローブと断熱材の長さから各々 30, 5 cm とした. 式 (1) は鉛直に設置した TDR の比誘電率と凍結深の関係をよく表した. そこで, 鉛直 TDR で求めた比誘電率を式 (1) の  $\epsilon_r$  として凍結深を求めた (Fig. 4 実線). 式 (1) は 7 cm 長の TDR で測定した凍結深をよく表しており, 凍結層に鉛直に挿入した TDR プローブを凍結深計として活用できるといえる. TDR 凍結深計の実用化を考えるには, 今後異なる土質, 水分量, プローブ長での検証が必要である.

**謝辞** 本研究はケミカルグラウト(株)との共同研究の一環として行った.

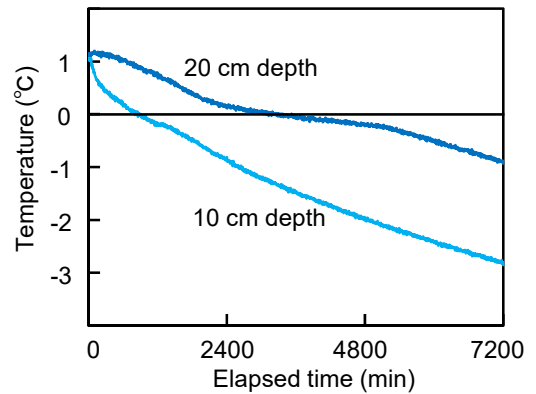


Fig.2 Soil temperature during freezing.

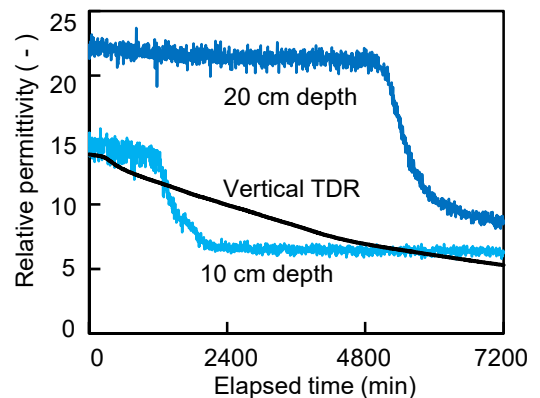


Fig.3 Relative permittivity during freezing.

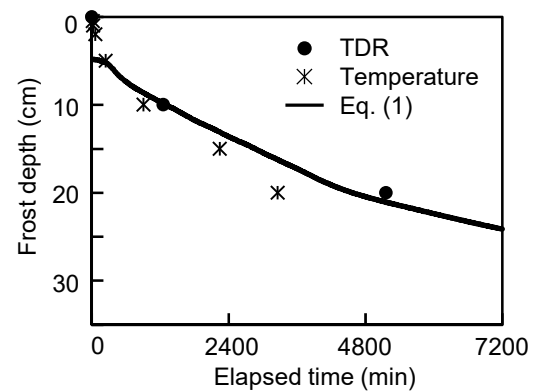


Fig.4 Comparison of frost depth estimated by temperature and TDR.

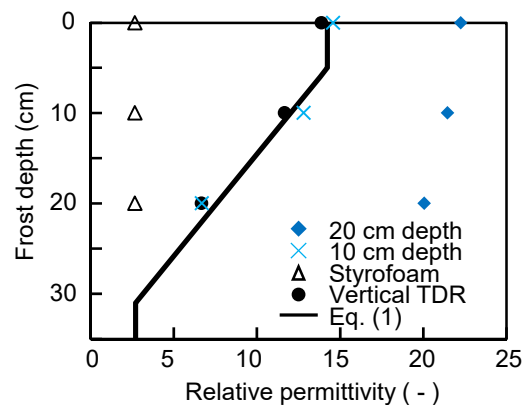


Fig.5 Frost depth estimation by TDR.