

TDR による不凍水量測定に温度勾配が及ぼす影響

TDR Measurement of Unfrozen Water Content of Freezing Soil under a Temperature Gradient

○伴俊和¹・渡辺晋生¹

Toshikazu Ban and Kunio Watanabe

1. はじめに

寒冷地の有効利用を考える場合、土中の水分や熱移動、特に氷点下における不凍水量を知ることが重要である。比較的安価で測定が容易な土中水分センサの一つに TDR がある。TDR は媒体の誘電率の違いから土中の水分量を推定するセンサであり、凍土の不凍水量測定にも広く活用されている。TDR の測定領域はプローブ中心から数 cm であり、測定領域内に水分分布がある場合、その平均的な水分量 (誘電率) を出力する。TDR に比べ、一般的な温度センサの測定領域は狭い。このため、温度勾配に従い TDR の測定領域に不凍水量分布が生じるような土中では、TDR は測定温度に対する不凍水量を過大あるいは過小評価する可能性がある。こうした凍土中の温度勾配は、土の冷やされ方や冷却温度、土質や水分量等に依存する。そこで本研究では、土の冷却の仕方や土中の温度勾配の違いが TDR を用いた凍土の不凍水量測定に及ぼす影響を調べることを目的とした。

2. 原理

凍土中の不凍水量は温度低下にともない減少する。すなわち、温度勾配下の凍土中の不凍水量は位置 x の関数 $\theta(T(x))$ と表せる。TDR はプローブに発振した電磁波の応答速度を測定する。この応答速度はプローブ周辺の媒体の誘電率によって決まり、またその影響強度はプローブから指数関数的に減少すると見なせる。そこで、この影響強度を $[2(A^{-1}+r)]^{-1} \exp[-A|x|-r]$ とすれば、任意の地点 x の TDR センサが出力する不凍水量 θ_{TDR} は

$$\theta_{TDR} = \int \frac{\exp[-A(|x|-r)]}{2(A^{-1}+r)} \theta(T(x)) dx \quad \text{式 (1)}$$

となる。ここで、 r はプローブ間の距離、 A は電磁波の減衰を表すパラメーターである。

3. 試料と方法

3.1 強制冷却

鳥取砂丘砂をアクリル製容器に幅 35×奥行 10×高さ 30 cm で充填し、外側を断熱した。容器片端をステンレス製凍結管とし、凍結管から 4 cm の地点から 5 cm 間隔で TDR (プローブ長 7 cm, 間隔 7 mm) と熱電対を 22.5 cm 深に設置した。試料の初期水分量、初期温度を水分飽和、2°C とした。ここで、凍結管に -15°C の不凍液を循環し、試料を凍結した。実験は 2°C の恒温室で行った。

3.2 空冷

鳥取砂丘砂を PE 製容器に直径 14.5 cm, 高さ 20 cm で充填し、側面と底面を断熱した。5.5 cm 深に TDR を、5.5 cm を中心に 5 mm 間隔で熱電対を 11 本設置した。試料の初期水分量は 5.5 cm 深で 0.18 cm³ cm⁻³ とし、初期温度は 2°C とした。ここで、-15°C の冷凍庫内に上端を開放した試料を静置し、試料を凍結した。

3. 結果と考察

図 1a (35, 385 分) と 2a (140 分) に、強制冷却時と空冷時の TDR 周辺の地温が 0°C に達した時の温度分布をそれぞれ示す。強制冷却時の凍結面近傍の温度勾配は、冷却面から 4 cm で 0.3°C/cm, 14 cm で 0.1°C/cm と冷却面に近い程大きくなった。空冷時の凍結面の温度勾配は冷却面より 5.5 cm で約 0.1°C/cm となったが、冷却温度や初期温度を変えても、これ以上の温度勾配を作れなかった。ここで、強制冷却時の冷却面から 4, 14 cm, および空冷時の冷却面から 5.5 cm の TDR と熱電対で測定した不凍水量曲線を図 1b と図 2b に示す。図中には未凍土の水分保持曲線からクラウジウスクラペイロンの式を介して推定した不凍水量曲線も併記した (図中点線)。温度勾配が 0.1°C/cm の時 (強制冷却の 14 cm と空冷の 5.5 cm), 不凍水量曲線は水分保持曲線からの推定値と概ね一致した。しかし温度勾配が 0.3°C/cm と大きくなると (強制冷却の 4 cm), 不凍水量曲線の勾配が緩やかになり、0°C 以上においても水分量が増加した。ここで、式 1 に 0.3°C/cm の線形な温度勾配と $A=0.7$ を与えると、式 1 は冷却面から 4 cm で計測した不凍水量曲線をよく再現した (図 1b 実線)。温度勾配が大きい凍土中では TDR の測定範囲内に不凍水量分布が生じ、不凍水量曲線に見かけ上の影響を及ぼすと言える。強制的に土を凍結する場合や、フィールドでも温度勾配が大きくなる地表付近の測定では、TDR の使用にこうした点を留意すべきである。

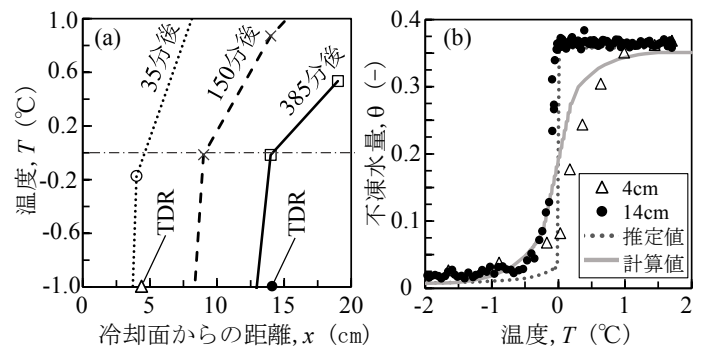


図1 強制冷却時の温度分布と不凍水量曲線

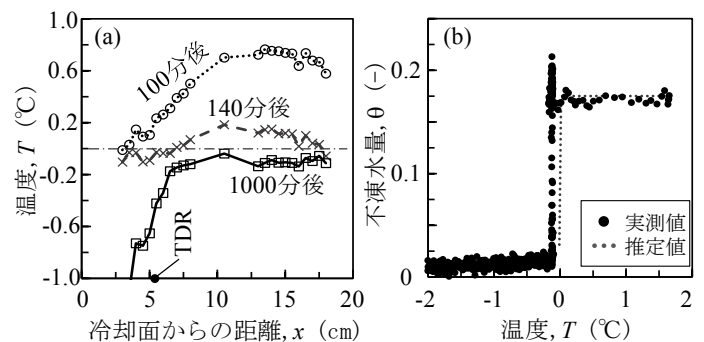


図2 空冷時の温度分布と不凍水量曲線

1 三重大学大学院生物資源学研究所

Graduate School of Bioresources, Mie University