

## サーモ TDR を用いた凝固点近傍の温度域における凍土氷含有量の新たな測定法

## A new approach to quantify soil ice content at temperatures near freezing point with a thermo-time domain reflectometry

○小島悠揮<sup>1</sup>, 中野雄太<sup>1</sup>, 加藤千尋<sup>2</sup>, 登尾浩助<sup>3</sup>, 神谷浩二<sup>1</sup>, Robert Horton<sup>4</sup>

Yuki Kojima, Yuta Nakano, Chihiro Kato, Kosuke Noborio, Kohji Kamiya, and Robert Horton

## はじめに

凍土中の氷量の測定は、冬季の水循環や春先の土壌侵食、凍上現象等の理解に向けた重要課題である。これまでサーモ time domain reflectometry (TDR)を用いた土中氷量の測定が取り組まれてきた。Tian et al. (2015)はサーモ TDR の TDR 機能により凍土の液状水分量を測定し、またヒートパルス機能によって測定した凍土の体積熱容量から氷量を推定した。この手法では土中氷量を推定できる温度域が $-5^{\circ}\text{C}$ 以下に限定され、最も氷量に変化しやすい凝固点近傍の温度域において推定が困難であった。また Tian et al. (2017)は、体積熱容量の代わりに熱伝導率から氷量を推定する手法を提案した。この手法によって、体積熱容量から推定した場合よりも高精度で、且つ $-2^{\circ}\text{C}$ や $-1^{\circ}\text{C}$ といった比較的凝固点に近い温度での推定が可能となった。ただし、凝固点近傍の温度域では誤差が大きかった。本研究では、凝固点近傍の温度域における氷量を測定する新たな手法を提案し、その測定精度を評価する。本手法では、既往研究と同様にサーモ TDR を用いるが、内装したヒーターは熱特性測定ではなく凍土の融解に使用し、加熱による凍土の融解前後の水分量（即ち、融解前が凍土の液状水量、融解後が全水分量）を TDR 機能で測定し、その差を土中氷量とする。

## 実験方法

Figure 1 に本研究で用いたサーモ TDR の概要を示す。3本の長さ7.7cmの中空ステンレスロッドに熱電対、さらに中央のロッドにはヒーター線を内装した。3つのロッドは同軸ケーブルを介して TDR100 (Campbell Scientific)に接続し、土壌の比誘電率を測定した。また、ヒーターの制御、温度の測定にはデータロガーCR1000 (Campbell Scientific)を用いた。

まず、実験で用いる土壌の液状水分量と TDR によって得られる比誘電率  $K_a$  の関係性を校正実験により得た。本研究では、豊浦砂（土性：Sand）と黒ボク土(Loam)を用いた。内径7.7cm、高さ2.5cmのアクリルカラム内に水平にサーモ TDR を固定し、様々な水分量に調整した土試料を充填した。5°Cの恒温室において、各水分量における比誘電率を TDR で測定し、比誘電率と水分量の関係性を得た。これらの関係性は最適化した3次関数と dielectric mixing model (Watanabe and Wake, 2009)によって表した。本研究では3次関数と mixing model, 両方の土中氷量推定精度を評価した。

本実験では、様々な水分量に調節した土試料を前述のカラムに充填し、凍土の液状水、全水分、氷の体積分率( $\theta_l$ ,  $\theta_t$ ,  $\theta_i$ )を推定した。

測定は $-2^{\circ}\text{C}$ の恒温室で行い、ヒーターによる加熱はロッドの温度が $2^{\circ}\text{C}$ に達するまで継続させた。推定結果はそれぞれ水分特性曲線から計算した $\theta_l$ 、質量から得た $\theta_t$ 、その2値の差から得た $\theta_i$ を基準値として比較した。

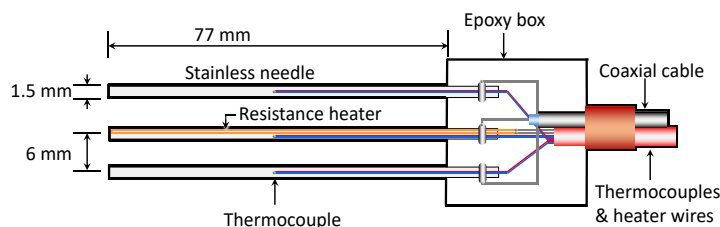


Fig. 1. Schematic of thermo-time domain reflectometry.

- 1) 岐阜大学工学部, Faculty of Engineering, Gifu University
- 2) 弘前大学農学生命科学部, Faculty of Agriculture and Life Science, Hirosaki University
- 3) 明治大学農学部, School of Agriculture, Meiji University
- 4) アイオワ州立大学農学科, Department of Agronomy, Iowa State University

キーワード：土壌凍結，土中氷量，サーモ TDR

## 結果と考察

Figure 2 に校正実験で得られた  $\theta_t$  と  $K_a$  の関係性を示す。3次関数による最適化では、mixing model よりも決定係数が高く、より精度よく未凍結土の  $\theta_t (= \theta_i)$  を推定できると考えられる。その一方で、mixing model は氷の誘電率を考慮しているため、凍土の  $\theta_t$  をより正確に推定できる可能性がある。

Figure 3 に  $\theta_t, \theta_i, \theta_s$  の測定値と基準値の比較を示す。図中において  $\theta_t$  の基準値を黄線で示した。豊浦砂では 3 次関数、mixing model 共に  $\theta_t$  の測定値は基準値と一致し、精度良く測定できた。一方で、 $\theta_i$  に関しては 3 次関数を用いると過大評価する傾向にあった。Mixing model では予想通り、比較的基準値に近い  $\theta_t$  を推定できた。3 次関数では、この  $\theta_t$  の過大評価によって  $\theta_i$  の推定値が若干過小評価される結果となった。Mixing model で推定された  $\theta_t$  は基準値と良く一致した。豊浦砂における 3 次関数及び mixing model による  $\theta_t$  推定の二乗平均平方根誤差(RMSE)はそれぞれ 0.04 と 0.02  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  であった。黒ボク土では、3 次関数で推定した  $\theta_t$  は基準値と近かったが、mixing model で推定した  $\theta_t$  は過小評価される傾向があった。これは Fig. 2 から明らかのように、黒ボク土では mixing model は実測値から若干乖離する傾向にあったためと考えられる。 $\theta_t$  に関しては豊浦砂と同様に mixing model の方が推定精度が高かった。3 次関数を使用した際の  $\theta_t$  の過大評価の影響が大きかったため、 $\theta_i$  の推定精度は黒ボク土においても mixing model の方が優れていた。黒ボク土における 3 次関数と mixing model による  $\theta_t$  推定の RMSE はそれぞれ 0.04 と 0.03  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  であった。本研究で得られた RMSE は、Tian et al. (2017) で示された値よりも小さく、より精度良く推定できた。

## おわりに

土中氷量測定法として新たなサーモ TDR 手法を提案した。提案した新手法により、従来精度良い測定が難しかった凝固点近傍での  $\theta_t, \theta_i, \theta_s$  が高精度で推定された。今回の実験では  $-2^\circ\text{C}$  で測定を行ったが、より凝固点に近い温度においても高精度の推定が可能であると考えられる。本手法は今後土壌の凍結融解現象に関連した諸問題の理解に貢献できると考えられる。

【謝辞】本研究は JSPS 科研費若手研究 18K13826 の支援を受けた。【引用】Tian et al. 2015. *Vadose Zone J.* 14(8); Tian et al. 2017. *J. Hydrol.* 555:786-796; Watanabe & Wake. 2009. *Cold Reg. Sci. Technol.* 59, 34-41.

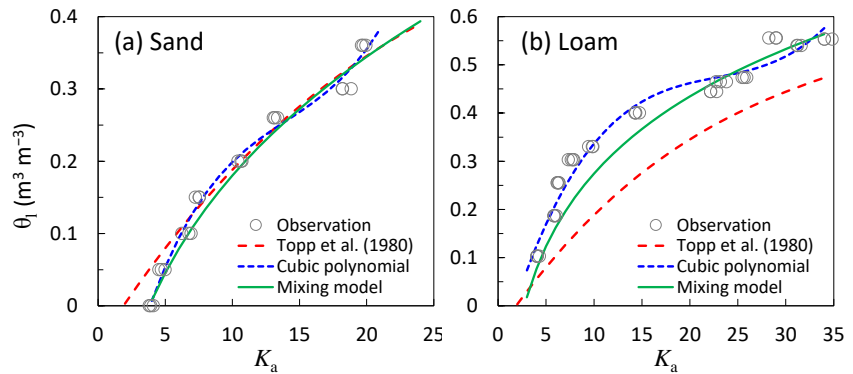


Fig. 2. Relationships between  $\theta_t$  and  $K_a$  measured with TDR at  $5^\circ\text{C}$ .

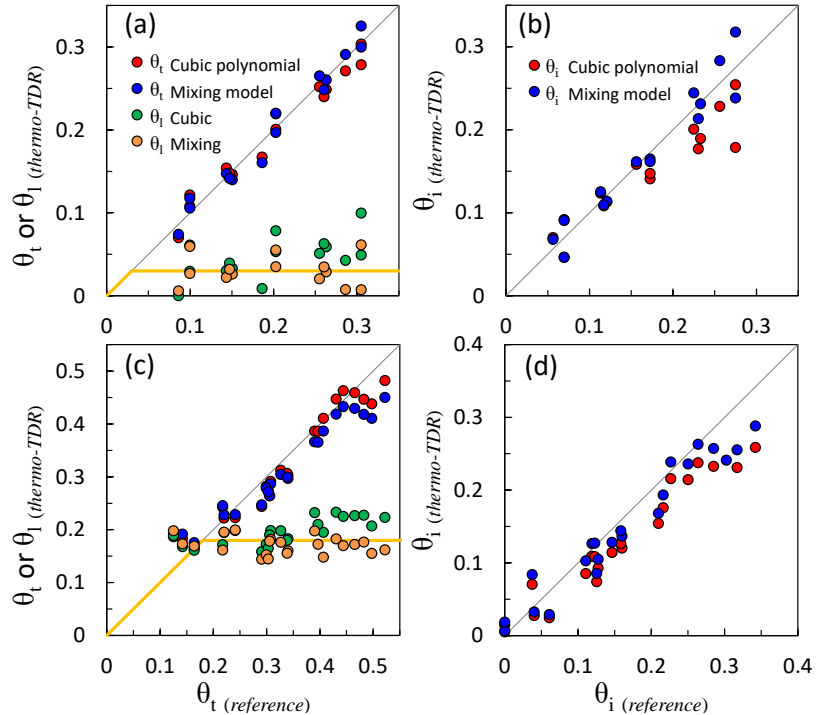


Fig. 3. Reference vs measured values of (a)  $\theta_t$  and  $\theta_i$  of sand, (b)  $\theta_t$  of sand, (c)  $\theta_t$  and  $\theta_i$  of Andisol, and (d)  $\theta_t$  of Andisol. The x-axis of panel (a) only shows reference values for  $\theta_t$ , and reference values of  $\theta_i$  is presented by yellow line.