

## デジタルTDR, TDTセンサーの水温依存性 Water temperature dependency of the digital TDR and TDT sensors

○元嶋 藍\* 伊藤祐二\*\* 萩井和朗\*\*

○Ran MOTOJIMA\*, Yuji ITO\*\*, and Kazuro MOMII\*\*

### 1. はじめに

土壌の体積含水率と電気伝導度 (EC ;  $\sigma$ ) の測定法である時間領域反射法 (TDR) と時間領域透過法 (TDT) は, センサーから出力される誘電率 ( $\epsilon$ ) と  $\sigma$  が温度依存性を示す. 広帯域信号を扱う両法では,  $\epsilon$  は周波数依存性を示し温度依存性は複雑である. 近年, GHz帯の信号を扱えるデジタルTDR, TDTセンサーが流通しているが, 温度依存性に関する報告はほとんどない. 本報では, 両デジタルセンサーの温度依存性の基礎的知見を得るために, 水を用いた室内実験により, 水温 ( $T$ ) が  $\epsilon$  と  $\sigma$  に及ぼす影響を調べた.

### 2. 方法

実験では, 米国Acclima製のTDR-315H, TDR-315, TDTセンサー (ACC-SEN-SDI) を用いた. 内径20 cm, 高さ18 cmの円筒容器に, 各センサーを3 cm以上の間隔で鉛直下向きに設置し, 感知部全体を純水中に沈めた. 容器一式を乾燥炉に入れ, ケーブルを通気口から取り出しデータロガー (CR1000, Campbell Scientific) に接続した. 概ね15°C~70°Cまで約10°C間隔で段階的に $T$ を上昇させ,  $T$ ,  $\epsilon$ ,  $\sigma$ を5 min間隔で記録し, 各 $T$ 条件で5つのデータの平均値を解析に用いた. また, 0.1 S m<sup>-1</sup>のNaCl水溶液でも同様に実験し, 各ECは堀場製EC計 (ES-71) で,  $T$ は予め検証した各センサーのサーミスタで測定した.

### 3. 結果と考察

純水では, 各センサーの  $\epsilon$  が負の温度依存性を示した (Fig. 1(a)黒印). TDR-315H, TDR-315, TDT の  $\epsilon$  を,  $T$  の関数式で与えられる  $\epsilon$  (Fig. 1(a)実線; 以下, 理論値と記す) と比較すると, 平均二乗誤差の平方根 (RMSE) はそれぞれ 1.2, 2.3, 4.1 であった. 理論値に対し, TDR-315H による  $\epsilon$  は近似したが, TDR-315 は過小, TDT は過大となる傾向を示し, 高温ほど誤差が拡大した. 水温依存性を定式化し補正の可能性をセンサー間で比較するために, 20°Cの理論値 ( $\epsilon_{20} = 80.4$ ; Fig. 1(a)破線) を基準とし, 各  $T$  で  $\epsilon_{20}$  と  $\epsilon$  の差 ( $\delta\epsilon$ ) を求めた (Fig. 1(b)). その結果,  $\delta\epsilon$  はいずれも  $T$  に対して直線的に変化したものの,  $T$ - $\delta\epsilon$  関係は一致しなかった. これは,  $\epsilon$  の水温依存性がセンサー毎に異なり, その補正にはセンサー固有の補正式が必要であることを示す. ちなみに, 各  $T$ - $\delta\epsilon$  関係の回帰式で水温依存性を補正した結果 (Fig. 1(a)赤印), 各  $T$  の  $\epsilon$  は  $\epsilon_{20}$  とよく一致した.

0.1 S m<sup>-1</sup>NaCl 水溶液の  $\epsilon$  測定では, 温度依存性に加え, 誤差が拡大した (Fig. 1(c)). 理論値に対する TDR-315H, TDR-315, TDT の RMSE はそれぞれ 1.7, 4.5, 5.4 であり, 純水の場合よりも増大した. 特に TDR-315 の過小傾向と TDT の過大傾向は顕著となり, 結果として  $T$ - $\delta\epsilon$  関係式 (Fig. 1(d)) は純水の式 (Fig. 1(b)) と異なった. このように  $\epsilon$  の温度依存性は  $\sigma$  条件によって異なる可能性がある. 高 EC 環境の  $\epsilon$  の過大評価は主に  $\sigma$  に伴って増大する複素誘電率の虚数部に起因すること<sup>1)</sup>,  $\sigma$  は正の温度依存性を示すことから, 理論的にも  $\epsilon$  の温度依存性は  $\sigma$  条件によって異なり得る. 一方,  $\epsilon$  の過

\*鹿児島大学大学院農林水産学研究科 Graduate School of Agriculture, Forestry and Fisheries, Kagoshima Uni.,  
\*\*鹿児島大学農学部 Faculty of Agriculture, Kagoshima Uni., キーワード: 誘電率, 体積含水率, 電気伝導度

小評価の原因については定かではない。Acclima製センサーでは、内蔵のファームウェアが $\epsilon$ のEC依存性と測定精度に影響を及ぼすため<sup>2)</sup>、 $\epsilon$ の過小評価はファームウェアを含めたセンサー特性によって生じた可能性がある。

$\sigma$ についても、各センサーの水温依存性に差異がみられた。純水の場合、 $\sigma$ は温度上昇に伴い10倍ほど増大したのに対し(Fig. 2(a)実線)、各センサーの $\sigma$ (Fig. 2(a)黒印)の変化パターンは異なった。純水の導電性は極めて低いため、いずれのセンサーも純水相当の $\sigma$ を測定することはできないと判断

され、水温依存性とその補正効果(Fig. 2(a)黒印と赤印の差異)は不明瞭であった。一方、0.1 S m<sup>-1</sup> NaCl水溶液の場合、 $\sigma$ は温度上昇に伴い約2倍になった(Fig. 2(b)実線)。これに対し、TDR-315Hの $\sigma$ は同様に増大し、誤差も軽微であった(Fig. 2(b)黒丸)。よって、25°Cからの温度差の2%を補正係数として修正した $\sigma_{25}$ は、ES-71の $\sigma_{25}$ とよく一致した(Fig. 2(b)破線と赤丸のRMSE = 0.0038 S m<sup>-1</sup>)。TDR-315も同様の水温依存性を示したものの(Fig. 2(b)黒三角)、 $\sigma$ はすべての $T$ 条件で過大となったため、水温依存性はある程度補正されたが、 $\sigma_{25}$ は全体的に過大評価された(RMSE = 0.037 S m<sup>-1</sup>)。一方、TDTによる $\sigma$ の水温応答はやや複雑であった(Fig. 2(b)黒四角)。40°Cより高温では $\sigma$ はES-71の $\sigma$ とほぼ一致し同様の温度依存性を示したが、低温では $\sigma$ は概ね一定であった。40°C付近を境に、低温域では内部ファームウェアによる補正<sup>3)</sup>によって水温依存性が小さかったと考えられ、結果的に $\sigma_{25}$ の誤差は低温ほど増大した(RMSE = 0.019 S m<sup>-1</sup>)。

#### 4. おわりに

実験結果より、最新型のTDR-315Hの $\epsilon$ と $\sigma$ の水温依存性は基準値と同等であり、高い補正効果が期待できた。TDR-315とTDTは、TDR-315Hと感知部の全長や材質が同じであるにもかかわらず、水温依存性は異なり、 $\epsilon$ と $\sigma$ の測定誤差も大きかった。よって、水についてはセンサー毎に固有の補正式が必要と考える。今後、低誘電性媒質における各センサーの温度依存性や測定誤差の違いを調べるため、土壌を用いて同様の実験を行う予定である。

参考文献 1) Robinson et al. (2003): *Vadose Zone Journal*, 2, 444–475. 2) Schwartz et al. (2016): *Vadose Zone Journal*, 15, doi:10.2136/vzj2015.08.0115. 3) Acclima inc. (2018): User manual SDI-12 soil moisture, 1–13.

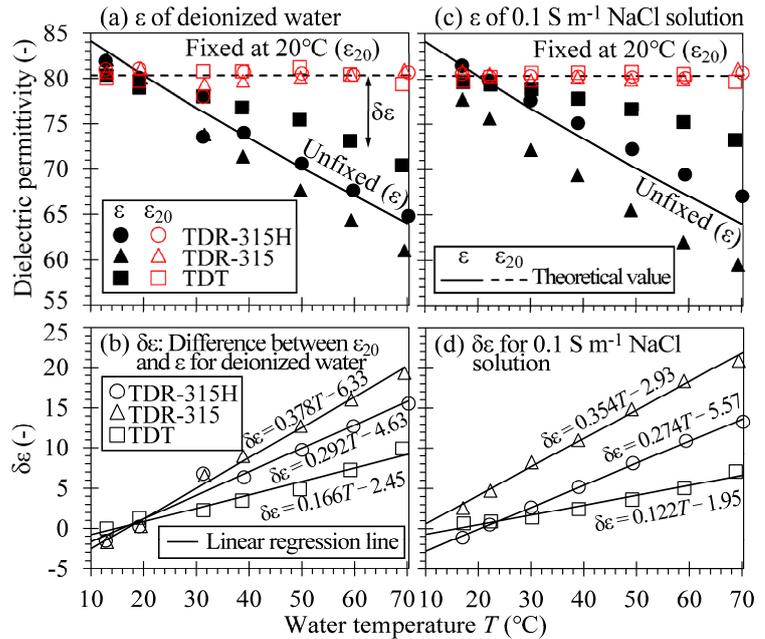


Fig. 1 誘電率( $\epsilon$ )の水温依存性  
Water temperature dependency of dielectric permittivity ( $\epsilon$ )

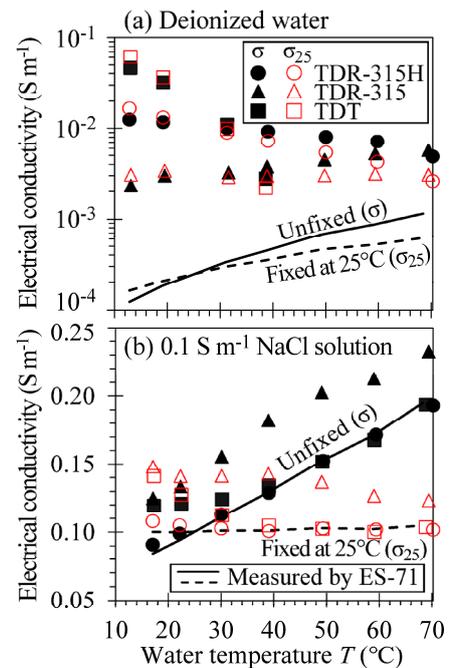


Fig. 2 電気伝導度( $\sigma$ )の水温依存性  
Water temp. dependency of electrical conduc. ( $\sigma$ )