

デジタルTDTセンサー実践活用

Practical application of digital time domain transmission sensors

佐賀大学農学部 宮本英揮

取り扱いが簡単で、しかも頑丈で安価。
おまけに、TDRなみの性能を持つ！
そんなすごいセンサーはないだろうか？



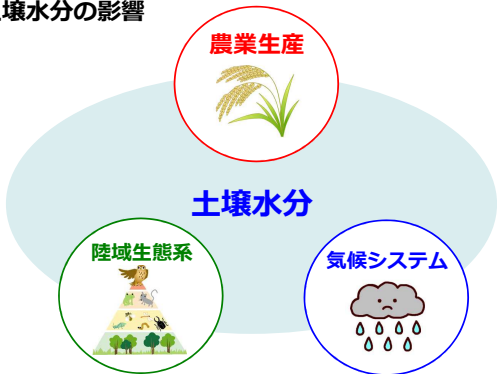
発表のアウトライン

- 1. 野外の多点計測に適したセンサーとは？
- 2. 時間領域透過法(TDT)の仕組み
- 3. デジタルTDTセンサーの性能
- 4. デジタルTDTセンサーの適用事例
- 5. まとめ

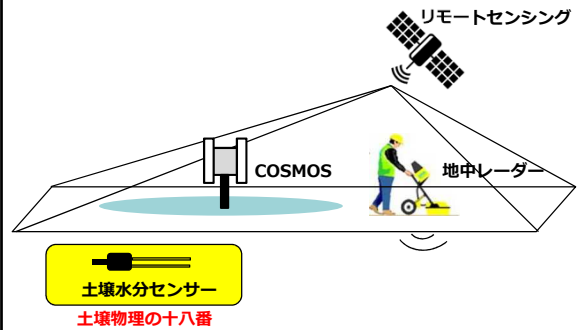


1. 野外の多点計測に適したセンサーとは？

土壌水分の影響



測定深度や空間スケールの異なる土壌水分計測



2大・土壌水分計測法

Decagon社・ECH₂Oプローブ



- ◎ 周辺機器や適用事例が豊富
- ◎ 使い易く、安価である
- * EC・温度依存性，土壤ごとの校正

センサーの特徴を理解すれば、誰もが簡単に利用できる国内普及率1位のセンサー！

時間領域反射法(TDR)



- ◎ GHz帯の信号発信器を搭載
- ◎ EC・温度の影響は軽微
- ◎ Topp式の高い適合性
- * 高額機器，スキルが必要

機器が高額で、ユーザーには一定のスキルが要求されるが、玄人好みの測定法！

野外研究に使うためには、

簡単・安価

+

玄人も納得する高い性能

堅牢性
拡張性
安定性

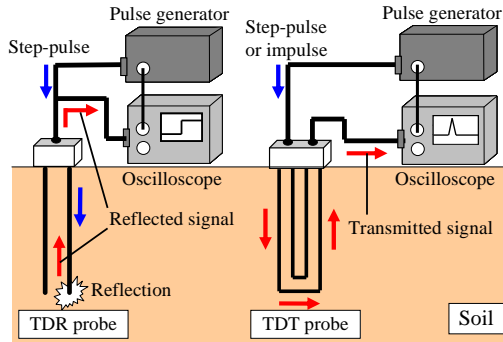


デジタルTDTセンサー

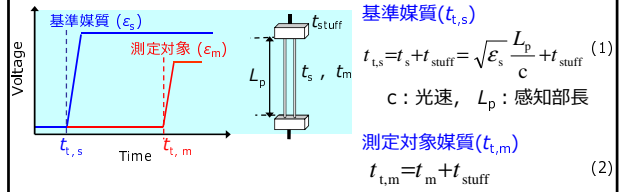


2. 時間領域透過法(TDT)の仕組み

時間領域透過法(TDT)の仕組み



TDTによる水分計測原理



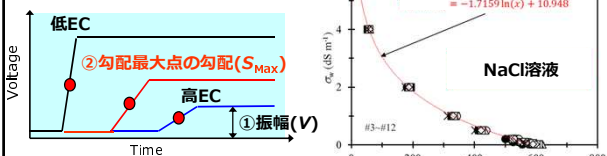
伝播時間および見かけの誘電率の算出方法

$$(1), (2) \text{式より} \quad t_m = t_{t,m} - t_{t,s} + \sqrt{\epsilon_s} \frac{L_p}{c} \quad (3)$$

$$\text{伝播時間}(t_m) \rightarrow \text{見かけの誘電率}(\epsilon_s) \quad \epsilon_s = \left(\frac{ct_m}{L_p} \right)^2 \quad (4)$$

→ 体積含水率(θ)

TDTによるEC計測原理



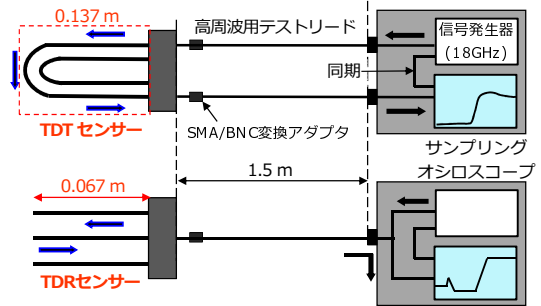
① 振幅に基づくEC計測法 (宮本ら, 2013)

パルクECによって、透過信号の減衰量が異なる性質を利用する、従来のTDRと同一原理に基づく方法
→ センサーが個性を有するため、センサーごとの校正が必要

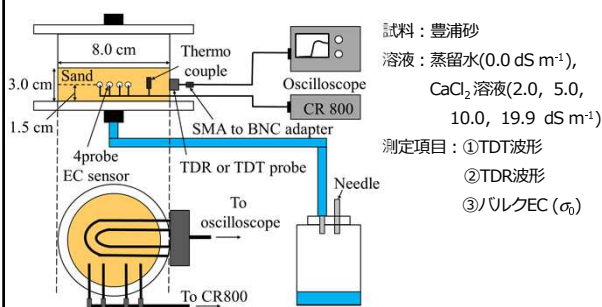
② 勾配最大点の勾配 (S_{Max}) に基づくEC計測法

透過信号に含まれる高周波数成分の減衰量に基づく方法
→ センサーの個性の影響が軽微で、校正の手間が省ける!

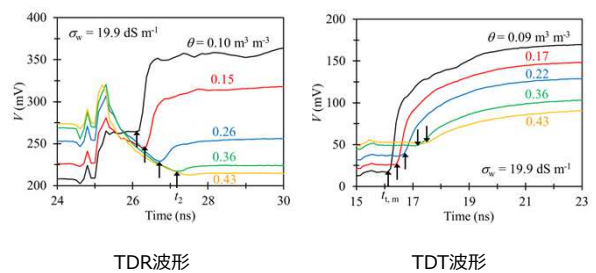
どちらが優れた手法なのか? - TDR 対 TDT -

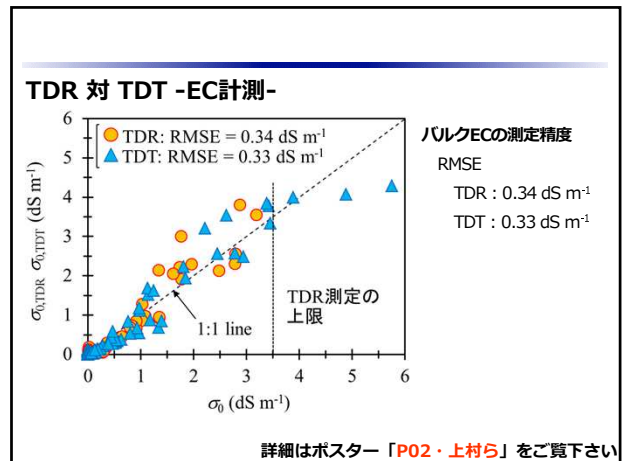
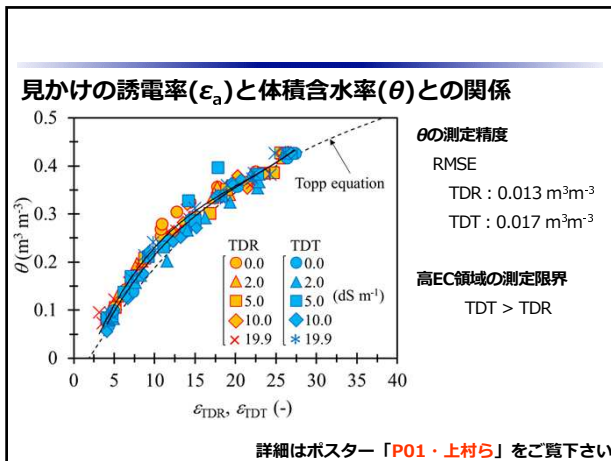


性能比較実験



TDR波形とTDT波形 ($\sigma_w = 19.9 \text{ dS m}^{-1}$)



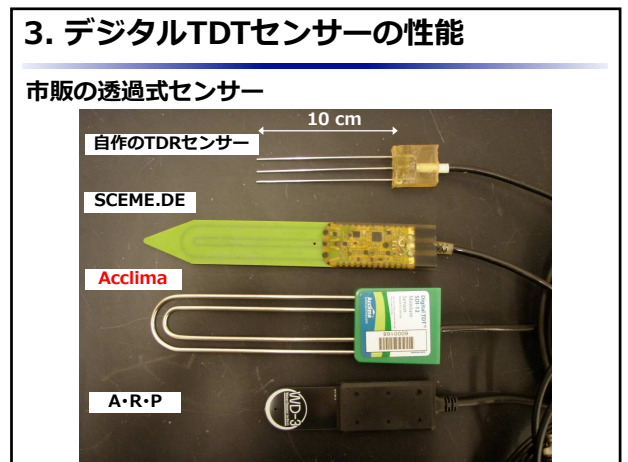


TDR 対 TDTの比較実験のまとめ

- 体積含水率(θ)・バルクECの測定精度： TDT \approx TDR
- 高EC条件における適用限界： TDT > TDR
- 波形解析の容易さ： TDT \gg TDR (解析エラーの発生頻度)

結論：
 TDRにない長所を、
 TDTは持っている

うまく検出できない!

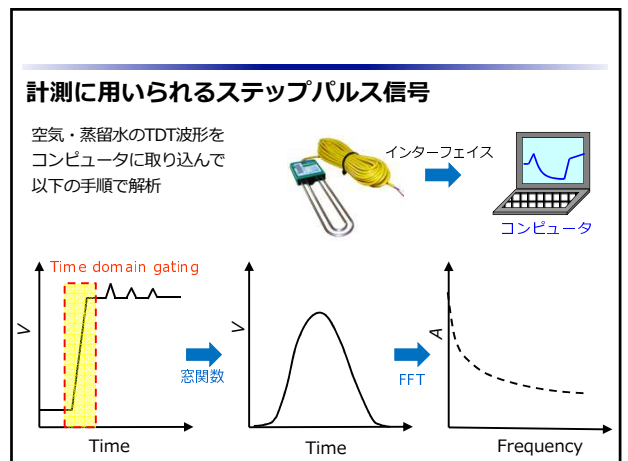


SDI-12プロトコルに対応したデジタルTDTセンサー

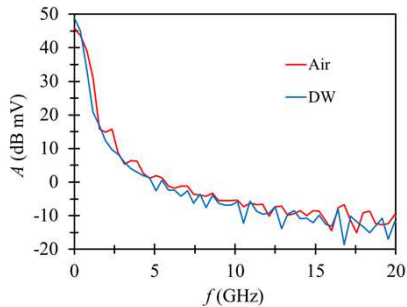
RecNum	22
TimeStamp	2012/09/28 19:58:50
batt_volt_Min	12.3
体積含水率 WVC1	102.6
温度 TempC1	25.0
見かけの誘電率 K1	82.4
電気伝導度 EC1	0.2
波形解析情報 sensor1WF	303+9960+9620+9075+320

0-582.08+311+9975+9635-9090-320

- 基本測定項目：体積含水率(θ)、温度、見かけの誘電率(ϵ_a)、バルクEC(σ_{TDR})
- その他の測定項目：波形解析情報(文字列)：最大勾配点の勾配(S_{Max}) (ほか)
- その他の特徴：10個/ch接続可、約60mにケーブルを延長可、堅牢で安価、波形出力可、時間分解能は驚異の5ps、見かけの誘電率を出力、GHz帯の信号発信機能

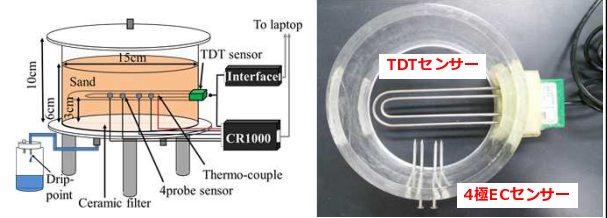


信号のパワースペクトル



空気および蒸留水(DW)中で測定したTDT波形から求めたパワー(A)スペクトル

デジタルTDTセンサーを用いた水分・EC計測実験

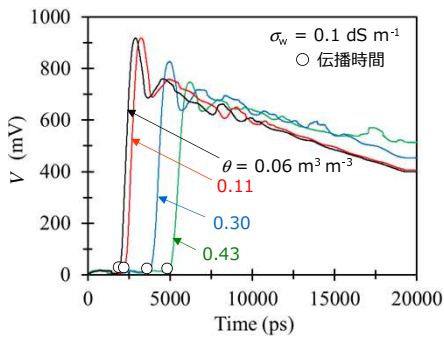


NaCl 溶液 : 0.1, 5.0, 10.0, 19.9 dS m⁻¹

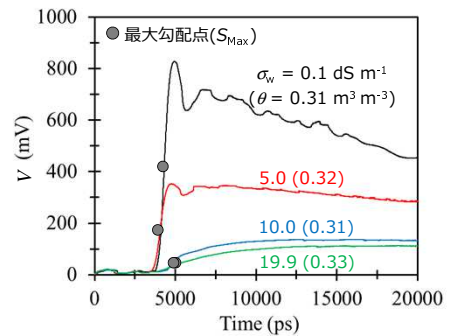
積算排水量 → 体積含水率(θ), 4極ECセンサー → バルクEC (σ_b)

TDTセンサー → 見かけの誘電率(ϵ_{TDT}), バルクEC(σ_{TDT}), 最大勾配(S_{Max})

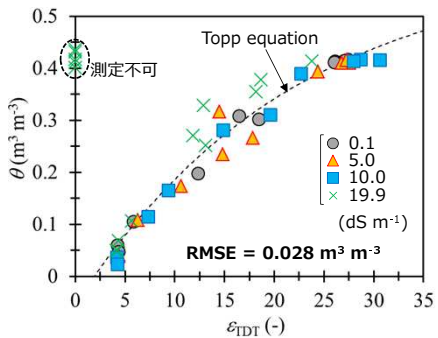
体積含水率(θ)の異なる砂のTDT波形



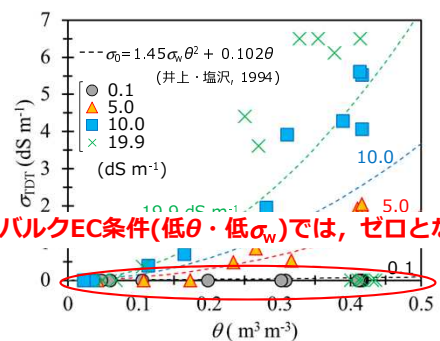
NaCl溶液の電気伝導度(σ_w)の異なる砂のTDT波形

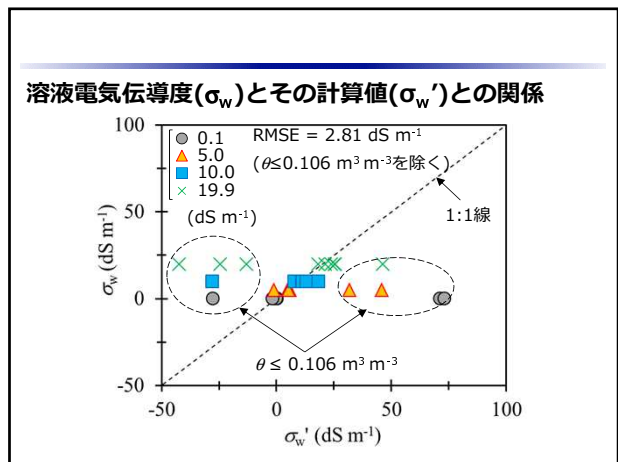
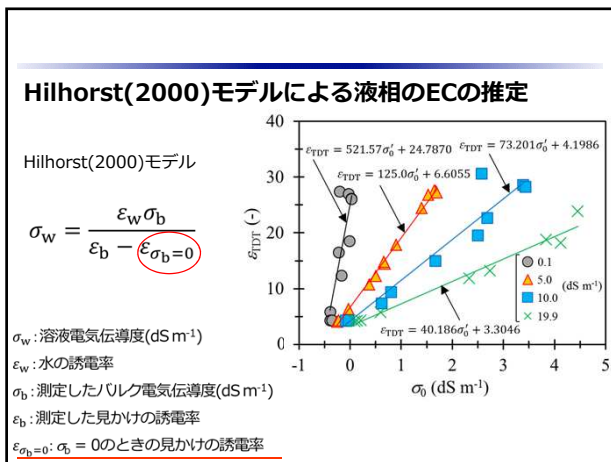
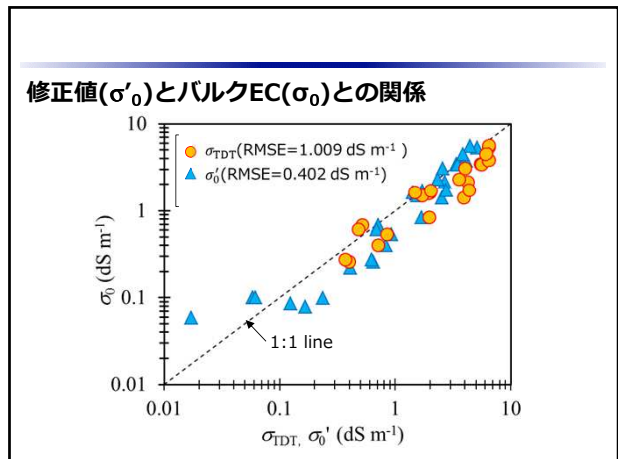
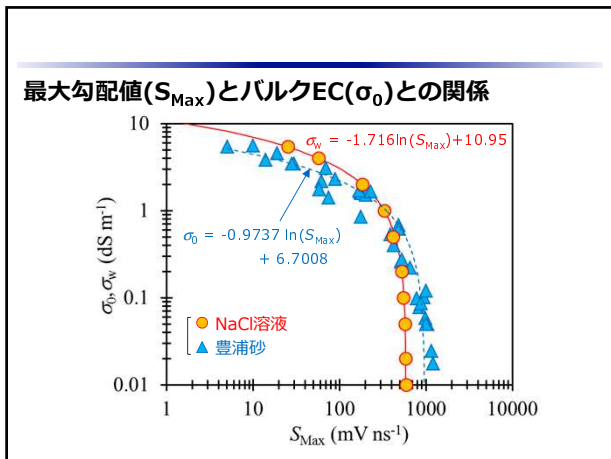


見かけの誘電率(ϵ_{TDT})と体積含水率(θ)との関係

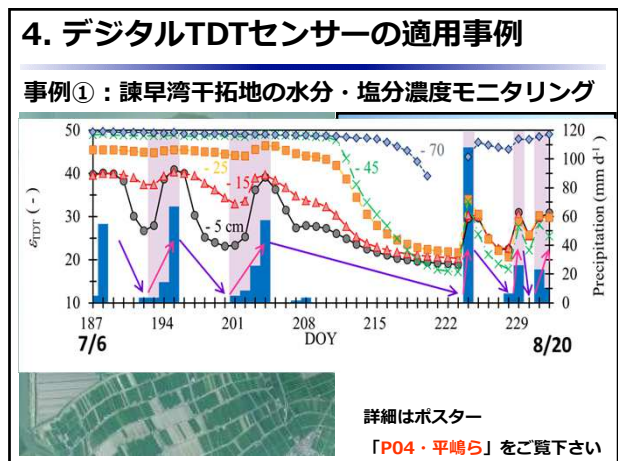


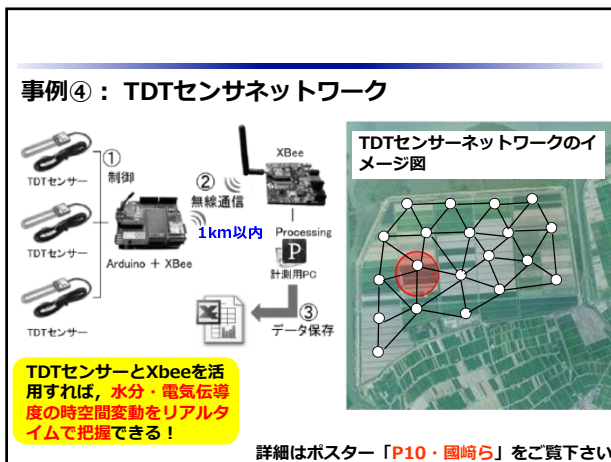
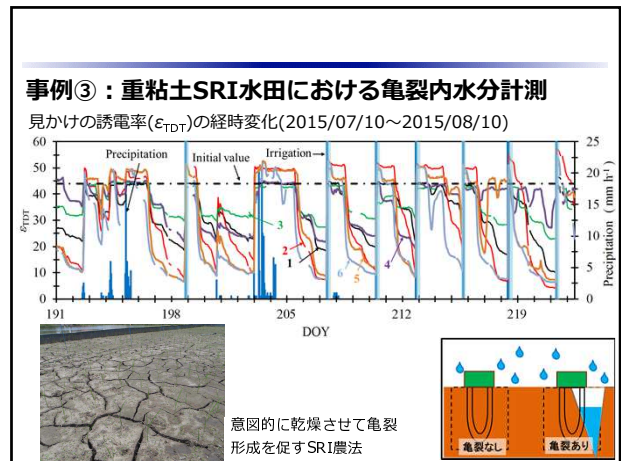
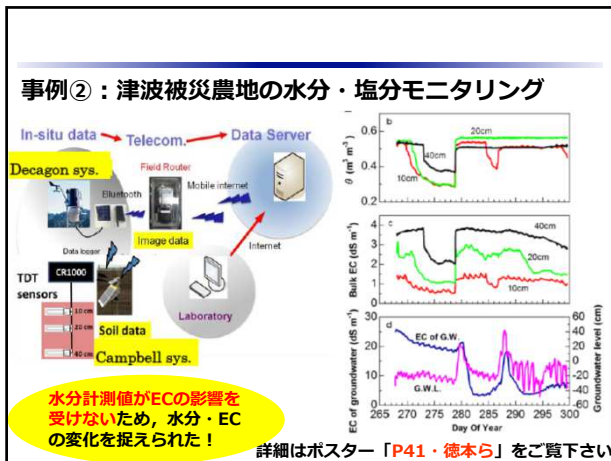
TDTセンサーで測定したバルクEC(σ_{TDT})と θ との関係





- ### 性能評価実験のまとめ
- 従来のTDRと同様に、体積含水率(θ)とバルクECを同時に測定できる。 θ 計測に対するECの影響は認められない。
 - 低EC条件(低水分、低電解質濃度)におけるECの計測値はゼロとなるが、波形の最大勾配値(S_{Max})に基づいて修正可能である。
→ CR-Basicを利用して、ロガー内部で演算して出力可能!
 - 低水分条件を除けば、測定した θ およびバルクEC値に基づき、土中溶液のEC(σ_w)を推定可能である。





5. まとめ

デジタルTDTセンサーの長所

- 単一チャンネルに10個のセンサーを接続可能
- 測定精度を落とすことなく、約60mまでケーブルを延長可能
- 堅牢で安価、波形解析エラーは皆無
- 波形と波形の解析情報を出力できる → 独自の校正
- ケーブルテスターと同じGHz帯の信号 → θ に及ぼすECの影響は軽微
- 見かけの誘電率を計測できるので、過去30年のTDR研究において蓄積した知見(ϵ - θ 関係)を、そのまま無駄なく活用できる

(例) ・ Topp et al.(1980) $\epsilon = 3.03 + 9.3\theta + 146\theta^2 - 76.7\theta^3$

・ 黒ボク土 (Miyamoto et al., 2001)

$$\theta = -0.0356 + 4.35 \times 10^{-2}\epsilon - 1.23 \times 10^{-3}\epsilon^2 + 1.48 \times 10^{-5}\epsilon^3$$

・ 誘電率混合モデル

$$\epsilon_m = 3\epsilon_s + 2(\theta - \theta_{gw})(\epsilon_{fv} - \epsilon_s) + 2\theta_{gw}(\epsilon_{gw} - \epsilon_s)$$

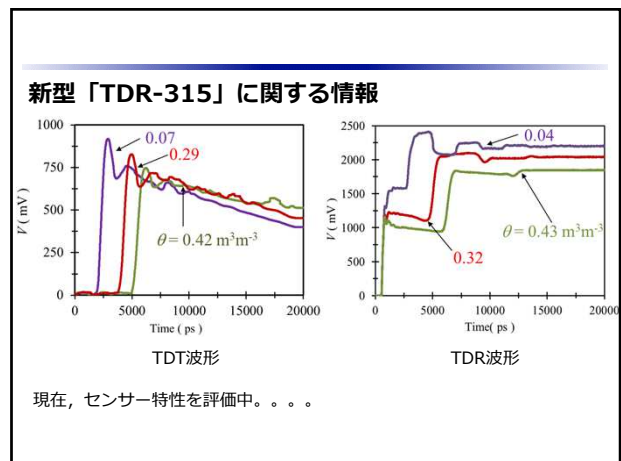
(Maxwell-De Loorモデル)

$$3 + (\theta - \theta_{gw})\left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_{fv}} - 1\right) + \theta_{gw}\left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_{gw}} - 1\right)$$

課題

- 適用事例が少なく、情報が乏しい
- 低バルクEC条件における正確なEC計測には、測定対象土壌における校正(S_{Max} -バルクEC関係)を行う必要がある → 校正のノウハウや、代表的な土壌における情報を蓄積する必要がある
- 構造上の理由から、土を乱さずにセンサーを設置できない → TDR-315を利用する!?

クリマテックHPより転載



TDTは普及するか？

我が国ではTDTの適用事例が少ないものの、

- ・ かつてのTDRマニアが、TDTへ乗り換えている
- ・ 欧米では利用者急増中！
- ・ 我が国でも、口コミレベルで広がっている！



↓
なぜか？

その答えは、**TDRなみの高い性能**を持ち、しかも**堅牢で安価**。これらのことから、TDTセンサーは**野外計測**のための非常に**強力な研究ツール**になり得ると考えられ、今後の利用拡大が期待される

本研究は、以下の皆様のご助力のもと実施しました。
ここに記して、謝意を表します。

- ・ M.Tuller先生(アリゾナ大学)、石川洋平先生(有明高専)、弓削こずえ先生(佐賀大学)、徳本家康先生(佐賀大学)
- ・ S.Anderson氏(Acclima)、クリマテック株式会社、長崎県農林技術開発センター・干拓営農研究部門
- ・ 上村将彰氏(鹿児島大学大学院,D1)、平嶋雄太氏(佐賀大学大学院, M1)、松本 薫氏(佐賀大学, B4)、中村 実津希氏(佐賀大学, B3)

