

## 土壌水分・温度の鉛直分布測定用新型TDRセンサーの開発

誌名	明治大学農学部研究報告 = Bulletin of the Faculty of Agriculture, Meiji University
ISSN	04656083
著者	落合, 博之 登尾, 浩助
巻/号	58巻4号
掲載ページ	p. 137-141
発行年月	2009年3月

〔研究ノート〕

## 土壌水分・温度の鉛直分布測定用新型 TDR センサーの開発

落合 博之<sup>1</sup>・登尾 浩助<sup>2</sup>

(2008年12月22日受理)

### Developing a new sensor with time domain reflectometry for measuring vertical profile of soil water content and temperature

Hiroyuki OCHIAI<sup>1</sup> and Kosuke NOBORIO<sup>2</sup>

**要 旨** 1970年代以降, time domain reflectometry (TDR) を使った土壌水分量測定に関する様々な研究が行われてきた。地表面から鉛直方向に挿入した TDR プローブを使うと土壌プロフィールの平均土壌水分量の測定が可能であること等も報告されている。しかし, 従来報告されているような鉛直 TDR プローブでは, 異なる深さごとの土壌水分量を正確に測定することは困難である。そこで, 本研究では異なる深さごとの土壌水分量と温度の測定が可能な TDR センサーを開発した。この新型 TDR センサーを用いて測定した土壌水分量と水平方向に埋設した通常の 3 線式 TDR センサーで測定した土壌水分量を比較したところ, 両方の値は良く一致した。また, 新型 TDR センサーに取り付けた熱電対による温度測定は, ポリ塩化ビニル (PVC) パイプの影響をほとんど受けないことが判明した。

キーワード: PVC, センサー, TDR, 土壌水分量, 地温, 鉛直分布

#### はじめに

近年, フィールド実験において土壌水分量や土壌溶液濃度を経時測定する際, time domain reflectometry (TDR) 法が一般的に使われるようになってきている。TDR 法による土壌水分量の測定は, Hoekstra and Delaney (1974) による実験室内での実験が起源と考えられる。Dalton ら (1984) によって TDR 法を使って土壌水分量と電気伝導度を同時に測る方法が確立され, その後の TDR 法の普及に拍車を掛けた。

1981 年には Topp and Davis が, 2 線式 TDR プローブ (ロッド長さ 1100 mm, ロッド直径 12 mm,

ロッド間隔 50 mm) を地表面から鉛直に挿入して土壌水分量分布の測定を行った。彼ら是一对の TDR ロッドの先端から長さ 100, 300, 600 mm の位置のロッド直径を小さくして深さごとの土壌水分量を測定した。しかし, TDR 法ではロッド長さ内の平均土壌水分量を測定するため, あまり長い鉛直プローブを使うと浸潤前線の通過を正確に把握しづらい欠点がある。また, プローブからの反射波形の解析が難しいことから, Topp and Davis (1981) が考案した TDR プローブはほとんど普及しなかった。近年では長さ 30 cm, 45 cm, 60 cm の異なる鉛直 TDR プローブを用いて圃場で土壌水分量変化を測定し, 多重層での土壌水分量を 1 本の鉛直 TDR プローブで正確に測るのは難しいことが Greco and Guida (2008) によって発表されている。

一方, 2001 年に Lee らは長さ 200 mm の鉛直プローブ (ロッド直径 2.5 mm) を用いて測定した土壌

<sup>1</sup> 明治大学大学院農学研究科,

<sup>2</sup> 明治大学農学部農学科

神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1 〒214-8571

メールアドレス: noboriok@isc.meiji.ac.jp

TEL: 044-934-7156

Fax: 044-934-7902

水分量が、電子天秤を用いて測定した水分量とほぼ等しいことを示した。また、Nadlerら (2002) は、鉛直 TDR プローブ (ロッド直径 2 mm, ロッド長さ 150 mm, ロッド間隔 12.5 mm) で測定した土壤水分量と、2.5 cm, 7.5 cm, 12.5 cm 深さに埋設した 3 本の水平 TDR プローブの平均土壤水分量がほぼ等しくなることを明らかにした。さらに宮本と深見 (2008) は、ポリ塩化ビニル (PVC) パイプを心棒として用いた TDR プローブでの土壤水分測定が十分実用的であることを明らかにした。しかし彼らの TDR プローブでは、1 対の電極のみ PVC 心棒に取り付けているので、一度に一点の測定しかできない。

TDR 法を用いた土壤中の水分量測定は、次のどちらかの方法によって行なわれるのが一般的である。一つは土壌を掘り起こし、土壌断面に対して水平方向に TDR プローブを挿入して埋め戻す方法で、もう一つは、TDR プローブを地表面から鉛直に挿入する方法である。前者は、従来からの TDR プローブの埋設法で、深さごとの正確な土壤水分量を測るのに適している。しかし、埋設時に広範囲にわたり土壌構造を破壊するため、非掘削部と掘削部で土壌状態に大きな違いが生じる。そのため、土壌中の水分移動に影響を及ぼす恐れがある。また、深い深度での測定を行う際、プローブ設置のため大きな穴を掘らなければならないことから多大な労力と時間を要する。また、圃場が水田のように湛水状態下であるときや、乾燥密度の小さい土壌のときは、水平方向にプローブを設置することが困難である。一方、後者は、非破壊測定という面では申し分ない。また、水平プローブの埋設に比べて労力と時間がかからない。しかし、土壌に挿入したプローブ長さ間の平均値を測定するため、長さの長いプローブを使った場合は、土壌中の正確な鉛直位置での水分量が測れないという欠点がある。

従って、非破壊的に深さごとの土壤水分量を測定できる TDR センサーの開発は有益である。本研究で開発した TDR センサーは、土壌構造を大きく破壊することなく簡単に埋設でき、深さごとの土壤水分量の経時変化測定を可能とした。また熱電対を取り付けることにより、同時に地温も経時的に把握することがで

きた。

## 実験方法と材料

図 1 に本報の新型 TDR センサーの見取り図を示した。外径 20 mm, 肉厚 4 mm, 長さ 450 mm のポリ塩化ビニル (PVC) パイプを心棒として用いた。この PVC 心棒の外側の長さ方向に直径 1.6 mm, 95 mm 長のステンレスロッドを 2 本一組として TDR センサー用電極として取り付けした。2 本のステンレスロッドの片側には同軸ケーブル (RG-58A/U, 50 Ω) をハンダ付けした。この際、4 組の同様の TDR センサー電極をそれぞれのセンサーが重ならないように、100 mm 間隔で、PVC 心棒の長さ方向に取り付けた。また、それぞれの 4 組の TDR センサー電極間と PVC パイプの上端に熱電対を設置して、各々の深さごとの温度と土壤水分量を測定できるようにした。

この新型 TDR センサーの土壌への埋設では、一回り大きなサイズの PVC パイプを使って先導孔をあけ、そこに TDR センサーを挿入した。水田や耕起した畑においては先導孔を用いることなく TDR センサーを挿入することが可能であったので、埋設に費やす時間と労力は軽減された。土壤水分量測定には、従

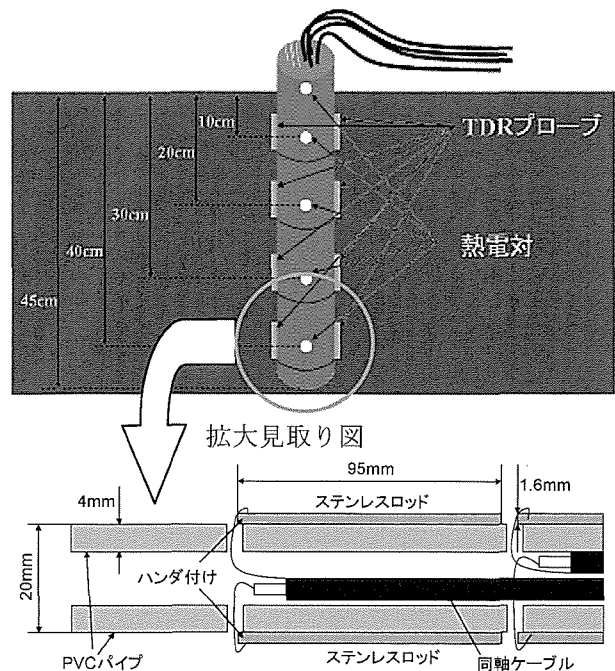


図 1 新型 TDR センサー

来の TDR センサーと同様に TDR 装置（キャンベル社 TDR100）を用い、データロガー（キャンベル社 CR3000）でデータを経時的に採取して保存した。土壌水分量の測定と同時に、圃場における地温を測定した。水平に埋設した 3 線式 TDR センサーから 15 cm 離れた同じ深さのところに T 型熱電対を埋設した。

TDR 法では、パルス状電磁波をセンサーに向けて送り出してからこの電磁波がセンサーで反射されて戻ってくるまでの時間から比誘電率を決定する。比誘電率は物質によって異なり（水は約 80，土粒子は 3～10，空気は 1），水の比誘電率が空気や土粒子の比誘電率に比べて著しく大きいことから土壌水分量の測定に用いることが可能である。本研究で開発した新型 TDR センサーは電極が PVC パイプに接しているため、接触部分がつねに PVC の比誘電率約 3 となる。そのため一般によく使われている比誘電率の測定値から土壌水分量を推定する Topp ら（1980）の校正式は、適用できない。従って、センサーごとに校正の必要がある。校正式を求めるため、直径 250 mm，長さ 600 mm の容器に水分量を調整した関東ロームを乾燥密度 0.80 (Mg/m<sup>3</sup>) になるように充填し、新型 TDR センサーを挿入して比誘電率を測定した。その後、TDR センサー深さごと（10 cm，20 cm，30 cm，40 cm）の土壌試料を 100 cc サンプラーで各深さ 3 つずつ採取し、105℃で 24 時間炉乾燥させ土壌水分量を決定した。

比誘電率の温度依存性を調べるため、関東ロームの土壌水分量を  $\theta = 0.05, 0.27, 0.46$  (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) に調整し、直径 115 mm，長さ 600 mm の PVC 容器に充填して密閉し、一昼夜炉乾燥機（70～90℃）に入れ温度を平衡にした。その後、温度 5℃の恒温室内で徐々に冷ましながら温度と比誘電率を新型 TDR センサーで測定した。測定開始前と終了後にそれぞれ 100 cc 土壌サンプラーで 3 つずつ採取して、土壌水分量を求めた。

## 実験結果と考察

### (1) 新型 TDR センサーの校正

様々な割合に水分を調整した関東ロームに新型 TDR センサーを挿入し、そのときの比誘電率と炉乾

法により決定した土壌水分量の関係から、校正式を決定した（図 2）。宮本と深見（2008）は、PVC パイプとステンレスロッドの接触面積を等しくすることによって、センサーごとの土壌接触面積が等しくなることから、校正式は一つで良いと報告している。しかし、本研究で開発したセンサーは、それぞれのセンサーと PVC パイプの接触面積が異なるので、各々のセンサーに対してそれぞれ異なった校正式を求めた（表 1）。

次にセンサーの温度依存性について検討した。種々の温度条件下で測定した比誘電率を 25℃における比誘電率に対する相対値で表すと、温度依存による比誘電率の変動は実験した土壌水分量全てに対して 0.85～1.2 となった（図 3）。さらに全データの約 95% が 0.9～1.1 の間に分布した。従って、新型 TDR センサーでは、温度依存を考慮しないこととした。測定開始前と終了時の土壌水分量はほとんど差がなかった（表 2）。

### (2) 新型 TDR センサーの性能

#### (i) 土壌水分量

次に実際の圃場で一般的によく使われている 3 線式 TDR センサー（電極長さ 100 mm，直径 3 mm，

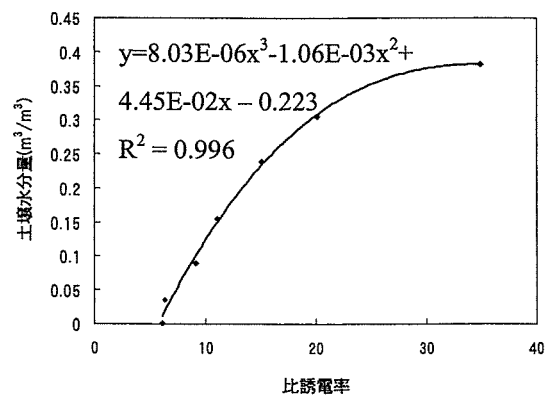


図 2 新型 TDR センサーの校正

表 1 校正実験から導いた各々のセンサーに対する校正式

深さ (cm)	土壌水分量の校正式	決定係数 R <sup>2</sup>
0-10	$y = 8.03E-06x^3 - 0.0011x^2 + 0.0445x - 0.223$	0.996
10-20	$y = 1.68E-05x^3 - 0.0016x^2 + 0.0543x - 0.261$	0.999
20-30	$y = 3.28E-05x^3 - 0.0013x^2 + 0.0421x - 0.244$	0.895
30-40	$y = 4.67E-05x^3 - 0.0035x^2 + 0.0859x - 0.380$	0.928

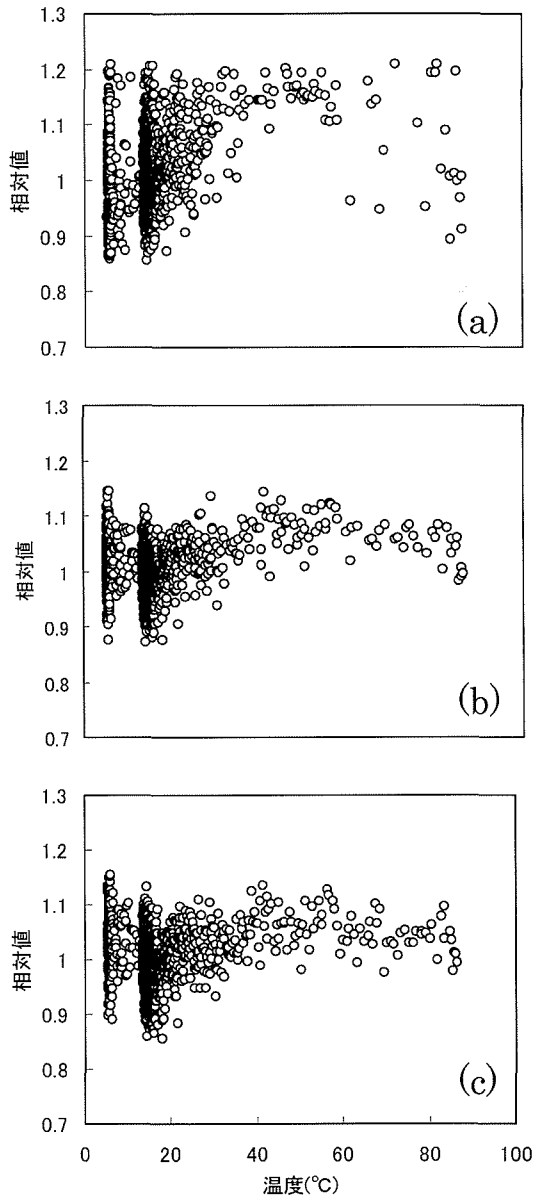


図3 (a), (b), (c) 25°Cにおける比誘電率に対する種々の温度での比誘電率の相対値 (a:  $\theta=0.05$ , b:  $\theta=0.27$ , c:  $\theta=0.46$  ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ))

表2 土壌比誘電率の温度依存性実験における実験開始時と終了時の体積含水率の変化 (平均値±標準偏差, n=3)

設定含水率 ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )	開始時 $\theta$ ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )	終了時 $\theta$ ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )
0.05	$0.053 \pm 0.006$	$0.050 \pm 0.002$
0.27	$0.274 \pm 0.004$	$0.271 \pm 0.003$
0.46	$0.460 \pm 0.002$	$0.456 \pm 0.018$

間隔20 mm) と開発した新型 TDR センサーを比較することで、新型 TDR センサーの性能を調べた。実験は神奈川県農業技術センターのガラスハウス内圃場で

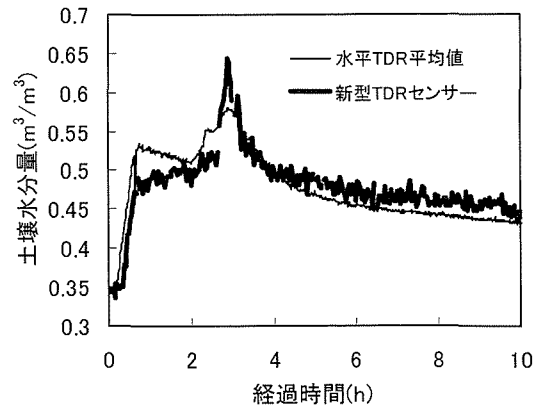


図4 新型 TDR センサーによる土壌水分量測定

行った。圃場の土壌は関東ロームで、実験に先立って 40 cm まで耕起した。土壌表面から新型 TDR センサーを鉛直に挿入した。この鉛直センサーから約 100 cm 離れた場所に穴を掘り、通常の 3 線式 TDR センサーを地表面から深さ 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm, 35 cm, 40 cm に水平に挿入した後、穴を埋めもどした。その後、地表面に 95°C の熱水を 204 L /  $\text{m}^2$  散布した。Nadler ら (2002) に倣って、鉛直 TDR センサーで測定した土壌水分量 (深さ 5 cm から 15 cm までの平均値) と、深さ 5 cm, 10 cm, 15 cm に水平に埋設した 3 線式 TDR センサーで測定した土壌水分量の相加平均値を比較した (図 4)。新型 TDR センサーによる土壌水分量の変化具合は、従来の水平 TDR センサーによるものと良く一致した。測定開始から約 1 時間後に水平 TDR の平均値が新型 TDR の値より高くなったのは、水平 TDR センサーを埋めた場所の土壌水分量が、選択流により、先に上昇したためと考えられる。すべての深さで同様の結果となった。

(ii) 温度

新型 TDR センサーの熱電対は PVC パイプに取り付けたため、土壌とは熱伝導率の異なる PVC パイプの影響が出る可能性があると考えた。しかし図 5 に示すように、温度測定には PVC パイプの影響はほとんどないことがわかった。新型 TDR センサーに接着して測定した土壌温度は、土壌に直接挿入した熱電対で測定した土壌温度と非常に良く一致した。

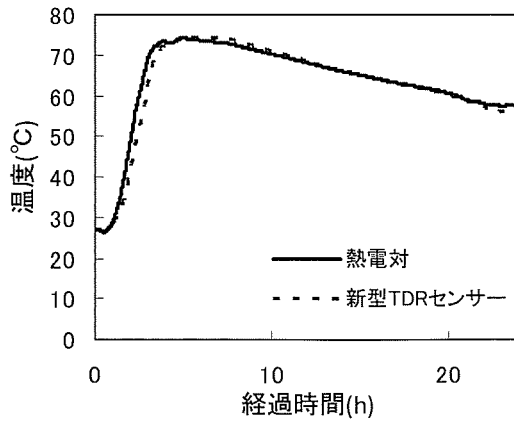


図5 新型 TDR センサーでの温度測定

### まとめ

本研究で開発した新型 TDR センサーの測定値は、水平に埋設した従来型の 3 線式 TDR センサーで測定した土壌水分量の平均値と良く一致した。新型 TDR センサーに取り付けた熱電対も、経時的な温度変化を正確に測定できた。また、新型 TDR センサーの設置は、非破壊的に一人で簡単に行えたことから、土壌水分移動と地温のプロフィールを測定するのに有効だと考えられる。

謝辞 圃場実験に際しては、神奈川県農業技術セン

ターの北宜裕博士に御協力いただいた。深謝致します。

### 引用文献

- Dalton, F. N., W. N. Herkelrath, D. S. Rawlins, and J. D. Rhoades (1983): Time-domain reflectometry: Simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe, *Science*, 224, 989-990
- Greco, R., and A. Guida (2008): Field measurements of topsoil moisture profiles by vertical TDR probes, *J. Hydrol.*, 348, 442-451
- Hoekstra, P. and A. Delaney (1974): Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies, *J. Geophys. Res.*, 79, 1699-1708
- Lee, J., R. Horton, K. Noborio, and D. B. Jaynes (2001): Characterization of preferential flow in undisturbed, structured soil columns using a vertical TDR probe, *J. Contaminant Hydrol.*, 51, 131-144
- Nadler, A., S. R. Green, I. Vogeler, and B. E. Clothier (2002): Horizontal and vertical TDR measurements of soil water content and electrical conductivity, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66, 735-743
- Topp, G. C., J. L. Davis, and A.P. Annan (1980): Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines, *Water Resour. Res.*, 16, 574-582
- Topp, G. C., and J. L. Davis (1981): Detecting infiltration of water through soil cracks by time-domain reflectometry, *Geoderma*, 26, 13-23
- 宮本輝仁・深見公一郎 (2008) : 土壌硬度計と併用することにより不飽和土壌中の三次元水分分布計測のためのシャフト埋め込み式 TDR プロローブ試作, 2008土壌水分ワークショップ, 2008年3月, 109-114