

# 鉛直プローブによる成層土壌の平均電気伝導度の測定値評価

落合博之<sup>1</sup>・登尾浩助<sup>1</sup>・溝口 勝<sup>2</sup>

Evaluating average electrical conductivity of a layered soil measured  
with a vertically- installed time domain reflectometry probe

Hiroyuki OCHIAI<sup>1</sup>, Kosuke NOBORIO<sup>1</sup> and Masaru MIZOGUCHI<sup>2</sup>

**Abstract:** Time domain reflectometry (TDR) has been popular to measure soil water content (WC) and electrical conductivity (EC) both in the field and the laboratory. Although a TDR probe detects average WC and/or EC along the probe length, a limited number of researches have been reported for the accuracy of averaging WC/EC in layered soils. We investigated the accuracy of averaging bulk EC in layered soils. A sandy soil and a loam were uniformly packed in three layers with various WC/EC in the constant temperature incubator. Each layer has a horizontally-installed three-rod TDR probe. Two vertical two-rod TDR probes were installed across the three layers of soil from the soil surface. We found that the vertically-probes average bulk EC of three layers with  $-9$  to  $+17$  % of accuracies. In addition, soil texture differences affected on different results of bulk EC between vertically- and horizontally-probes. However, we do not have to think differences of electrical conductivity between the vertically- and horizontally-probes because the differences in most of situation are less than  $\pm 10$  %.

**Key Words :** time domain reflectometry, electrical conductivity, layered soil, vertical TDR probe, horizontal TDR probe

## 1. はじめに

Time domain reflectometry (TDR) 法は、フィールド実験の際、土壌水分量や土壌溶液濃度の経時測定において頻繁に使われるようになってきている。TDR 法は、Hoekstra and Delaney (1974) による実験室内での土壌水分量の測定実験が起源と考えられている。その後、Dalton et al. (1984) によって TDR 法を用いた土壌水分量と電気伝導度の同時測定法が確立され、TDR 法の普及に拍車を掛けた。

鉛直 TDR プローブの普及は、Topp and Davis (1981) が、ロッド長さ 1100 mm、ロッド直径 12 mm、ロッド間隔 50 mm の 2 線式 TDR プローブ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のが始まりだと考えられているが、この TDR プローブは、不連続点を作って深さごとの水分分布の測定を試みたがうまくいかずほとんど普及しなかった。Rhoades et al. (1976) によって、理論的に土壌水分の増減も電気伝導度の増減に影響していることがわかった。それを基にして、Kachanoski et al. (1992) によって、圃場における電気伝導度の測定が単純な 2 線式の鉛直 TDR プローブで行われ、実際に土壌水分の増減も電気伝導度の増減に影響していることが報告された。Lee et al. (2001) は、ロッド直径 2.5 mm、長さ 200 mm の鉛直 TDR プローブを用いてカラム実験において溶質移動測定を行い、鉛直 TDR プローブで測定した電気伝導度が、溶液濃度を調整した土壌試料の排出液から求めた溶質濃度とほぼ等しいことを示した。また、Nadler et al. (1991, 2002) は、2 層からなる土壌を用いて、2 本の鉛直 TDR プローブ (直径 2 mm、長さ 150 mm、ロッド間隔 12.5 mm) で測定した電気伝導度の値と、3 本の水平 TDR プローブ (深さ 2.5, 7.5, 12.5 cm に挿入) の平均電気伝導度との値がほぼ等しくなることを明らかにした。しかし、落合ら (2009) が示すように、圃場では下層に蓄積された溶質が地表面に向けて上昇することがあるため、根群域では、浸潤前線や蒸発前線を含む層が形成される場合がある。そのため、鉛直 TDR プローブの長さによっては、3 層以上の溶質濃度の異なる層における電気伝導度測定を行わなければならない。そこで、これまでの既存研究で 2 層までしか研究されていない鉛直 TDR プローブによる電気伝導度の測定結果を 3 層以上で考える必要がある。以上のことから、本研究では豊浦砂と関東ロームを用いて、実験室内において土壌水分量と土壌溶液濃度を变化させた 3 層土壌に挿入した鉛直 TDR プローブの精度を評価した。

## 2. 実験方法

長さ 75 mm、直径 1.6 mm、ロッド間隔 10 mm のステンレスロッドで 2 線式 TDR プローブを作り、鉛直 TDR プローブとして用いた。水平 TDR プローブは、内径 76.5 mm、高さ 25 mm のアクリルカラムに長さ 77 mm、直径 1.6 mm、ロッド間隔 5.0 mm のステンレスロッド 3 本の両端をアクリルカラム壁で固定して 3 線式 TDR プローブとした、鉛直プローブと水平プローブのロッド片端に

<sup>1</sup>Meiji University, School of Agriculture, 1-1-1 Higashimita, Tama, Kawasaki, Kanagawa 214-8571, Japan. Corresponding author: 落合博之, 明治大学農学部

<sup>2</sup>The University of Tokyo, Interfaculty Initiative Information Studies, Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo, Tokyo, 113-8657, Japan.

2010年5月19日受稿 2010年10月15日受理  
土壌の物理性 116号, 3-8 (2010)

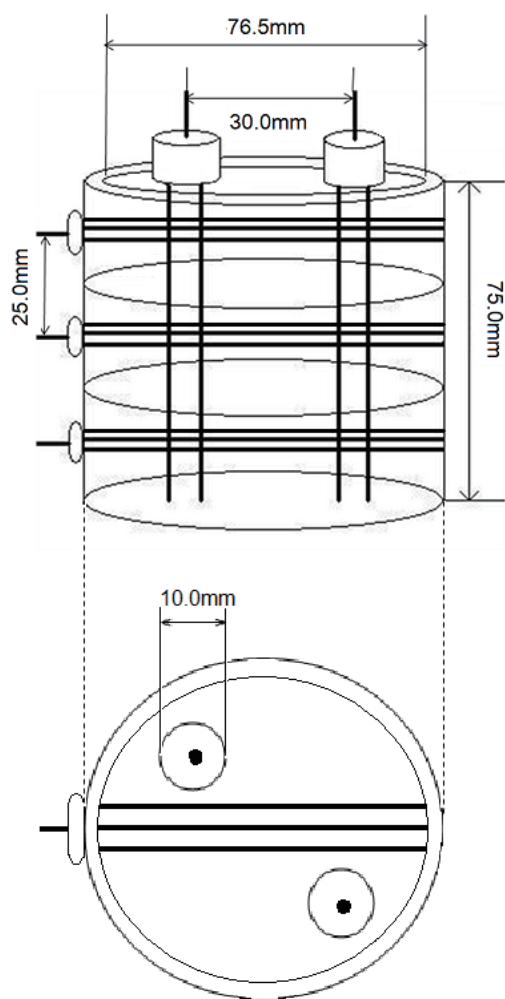


Fig. 1 実験見取り図.  
Sketch.

はそれぞれ同軸ケーブル (RG-58A/U, 50 Ω) をハンダ付けした。TDR プローブ付きカラムに土壌水分量と土壌溶液濃度を調整した土壌をカラム一つずつそれぞれで充填してラッピングし、3つのカラムに土壌を充填したのちラッピングを取りはずし、3個重ねて鉛直 TDR プローブを挿して実験を行った。充填した土壌は、まず実験開始前にある量の風乾土壌を乾燥し、風乾土に含まれていた水分量を計測し、それを考慮して土壌水分量を決定した。ジッパー付き密封式ビニール袋内で逆浸透水を風乾供試土に加えて土壌水分量を、KCl 溶液 (0.1 mol L<sup>-1</sup>) を風乾供試土に加えて土壌溶液量を調節したものをを用いた。3個重ねたカラムに2線式 TDR プローブを2本鉛直方向に挿入して実験を行った (Fig. 1)。見かけの電気伝導度の変化は、土壌水分量の変化と土壌溶液濃度の変化が、共に影響する (Rhodes et al., 1976) ことから、実験は、(1) 土壌水分量を一定 ( $\theta = 0.18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) にして土壌溶液濃度をカラムごとに変化させる (Table 1)、(2) 土壌溶液濃度を一定にして土壌水分量をカラムごとに変化させる (Table 2)、(3) 土壌水分量と溶液濃度の両方をカラムごとに変化させる (Table 3)、の3通りを行った。実験には豊浦砂と関東ロームを用いて行った。豊浦砂と

関東ロームの物理特性は、Table 4 に示した。全てのカラムにおいて乾燥密度が、豊浦砂では  $1.50 (\text{Mg m}^{-3})$ 、関東ロームでは  $0.75 (\text{Mg m}^{-3})$  となるように充填した (Table 4)。また、全ての実験は、20 °C 一定に保たれたインキュベーター内で行った。測定では、TDR プローブ間が短いことによる影響を考慮して (Castiglione et al., 2006)、SDMX50 は用いずにケーブルテスター TDR 装置 (テクトロニクス社製 1502C) を PC につなぎ、ソフトウェア WINTDR (Or et al., 1998) でデータをそれぞれ

Table 1 土壌水分量一定 ( $\theta = 0.18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) で各層の溶液濃度を変化。  
Concentration differences in layers.

		Experimental number				
豊浦砂		S01	S02	S03	S04	S05
関東ローム		C01	C02	C03	C04	C05
Layer	Top	W	KCl	W	KCl	W
	Middle	W	W	W	W	KCl
	Bottom	W	W	KCl	KCl	W
Distribution (EC)			/	\	<	>

W: water, KCl: 0.1 mol L<sup>-1</sup> (EC = 120 dS m<sup>-1</sup>) potassium chloride

Table 2 溶液濃度一定 (EC = 120 dS m<sup>-1</sup>) で土壌水分量を変化。  
Water content differences in layers.

		Experimental number				
豊浦砂		S06	S07	S08	S09	S10
関東ローム		C06	C07	C08	C09	C10
Layer	Top	0.18	0.18	0.18	0.27	0.10
	middle	0.18	0.27	0.10	0.10	0.18
	bottom	0.18	0.10	0.27	0.18	0.27
Distribution (water content)			>	<	<	\

(m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>)

Table 3 土壌水分量と電気伝導度を共に変化。  
Water content and concentration differences in layers.

		Experimental number						
豊浦砂		S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17
関東ローム		C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17
Layer	Top	KCl	KCl	W	KCl	W	W	W
	middle	0.18	0.18	0.27	0.10	0.18	0.27	0.27
	bottom	W	W	W	W	W	KCl	KCl
Distribution (EC)		0.27	0.10	0.18	0.18	0.10	0.18	0.10
		W	W	KCl	KCl	KCl	W	W
		0.10	0.27	0.10	0.27	0.27	0.10	0.18
Distribution (water content)		/	/	\	<	\	>	>
		>	<	/	\	<	/	<

**Table 4** カラムに充填した豊浦砂と関東ロームの物理特性 .  
Soil physical properties of Toyoura sand and Kanto loam packed in column.

	豊浦砂	関東ローム
土粒子密度 (Mg m <sup>-3</sup> )	2.650	2.875
乾燥密度 (Mg m <sup>-3</sup> )	1.50	0.75
飽和透水係数 (cm s <sup>-1</sup> )	2.3×10 <sup>-2</sup>	4.6×10 <sup>-3</sup>
50 % 粒径 D <sub>50</sub>	0.225	0.110

れ採取して解析後に PC に保存した . 2 本の鉛直プローブと 3 本の水平 TDR プローブそれぞれで 3 回ずつ電気伝導度を測定した . 3 本の水平 TDR プローブで測定した電気伝導度の平均値と 2 本の鉛直 TDR プローブで測定した電気伝導度の平均を比較した .

異なる濃度の溶液を用いて EC メータによる測定値 (EC<sub>b</sub> dS m<sup>-1</sup>) と WINTDR による見かけの値 (EC<sub>WINTDR</sub> dS m<sup>-1</sup>) を比較して , 電気伝導度測定に対する各 TDR プローブの校正を (1) 式により行った (Heimovaara et al., 1995).

$$EC_b = aEC_{WINTDR} + b \quad (1)$$

ここで , *a* と *b* は実験定数を表し , 本研究で用いたすべての TDR プローブに対して決定した . 本研究では恒温槽 (20 °C 一定) で実験を行ったので , 電気伝導度の温度依存性は考慮しなかった .

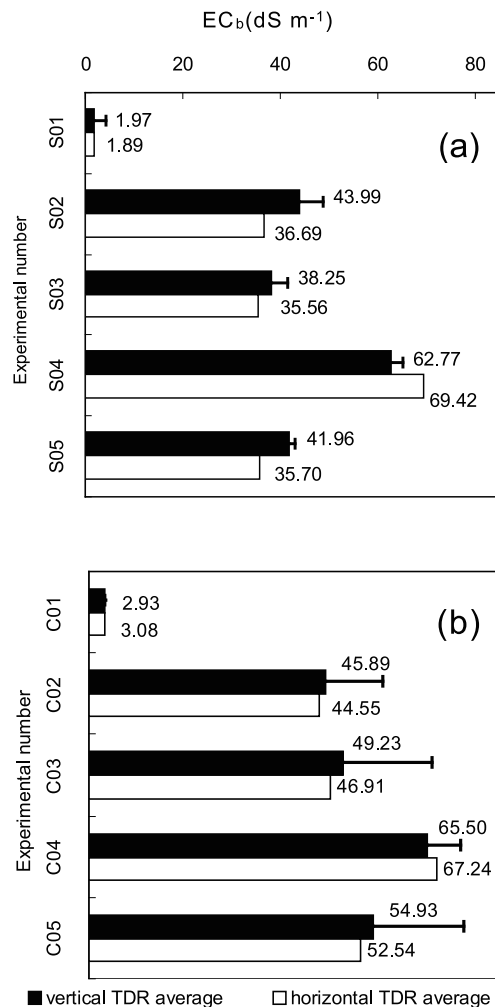
### 3. 結果と考察

#### 3.1 土壌水分量一定の場合

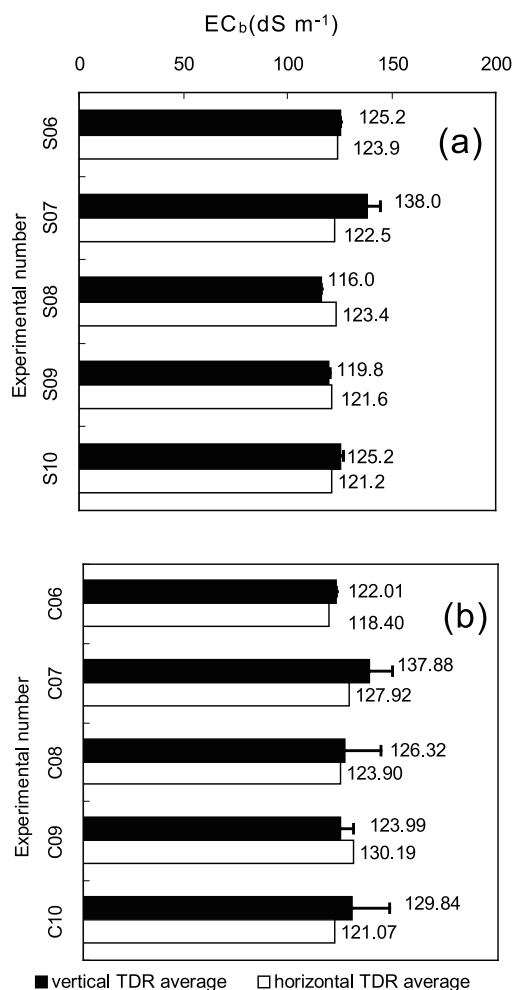
はじめに 3 つの層の土壌水分量を一定にし , 土壌溶液濃度を変化させて実験を行った . 豊浦砂での結果を S01 ~ S05 (Fig. 2 (a)) に , 関東ロームでの結果を C01 ~ C05 (Fig. 2 (b)) に示した . 豊浦砂と関東ロームに同様の傾向が見られた . 溶液濃度が一定 (S01 と C01) の場合は , 水平 TDR プローブと鉛直 TDR プローブによる EC<sub>b</sub> 測定にほとんど差はなかった . このことから単一層の土壌においては鉛直 TDR プローブと水平 TDR プローブの EC 濃度の測定が等しくなることがわかった . しかし , 上部カラム内の溶液濃度が高い場合 (S02 と C02) は鉛直 TDR プローブによる測定値が , 水平 TDR プローブの測定値より豊浦砂では 7.5 ~ 14 % 高くなり関東ロームでは 3 ~ 5 % 高くなった , この結果は , これまで行われてきた Nadlar et al. (2002) によって行われた測定結果とは異なり , 2 層の土壌における鉛直 TDR プローブと水平 TDR プローブの EC 濃度測定の結果に差があることがわかった . また , 中央のカラム内の溶液濃度が両端のカラム内の溶液濃度より低いとき (S04 と C04) は , 鉛直 TDR プローブでの測定は水平プローブより豊浦砂で 9 % , 関東ロームで 3 % 小さくなったが , 逆に中央カラムの溶液濃度が最大のとき (S05 と C05) は鉛直 TDR プローブでの測定値は水平プローブより豊浦砂で 17 % ,

関東ロームで 5 % 大きくなった . 3 層の土壌においても , 2 層の土壌同様に鉛直 TDR プローブと水平 TDR プローブの EC 濃度測定に変化が出た . また , 豊浦砂を用いた実験では溶質量が等しい場合 , 特に水平 TDR プローブによる測定では電気伝導度が 35.70 ~ 36.69 (dS m<sup>-1</sup>) とほぼ等しかったのに対して (S02, S03, S05) , 関東ロームでは濃度分布で 44.55 ~ 52.54 (dS m<sup>-1</sup>) となった (C02, C03, C05) .

以上のことから , 土壌水分量を一定にし , 溶質濃度を变化させた場合は , 層の境界部分で電磁波の減衰量が突如大きく変化することで電気伝導度の値にも鉛直 TDR プローブと水平 TDR プローブでの測定に差が生まれると考えられ , Nadlar et al. (2002) の研究と同じ結果が得られないことがわかった . さらに水平 TDR プローブによる電気伝導度測定の結果から , 関東ロームのほうが豊浦砂よりも溶質濃度を一定にすることが困難であることもわかった .



**Fig. 2** (a) 豊浦砂、(b) 関東ロームにおいて土壌水分量一定 ( $\theta = 0.18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) で各層の溶液濃度を变化 (エラーバーは  $\pm 1$  標準偏差) .  
Concentration differences in layers by (a)Toyouira sand and (b)Kanto loam (Bars indicate  $\pm$  one S.D.).



**Fig. 3** (a) 豊浦砂、(b) 関東ロームにおいて溶液濃度一定 ( $EC=122\ dS\ m^{-1}$ ) で各層の土壌水分量を変化 (エラーバーは  $\pm 1$  標準偏差)。

Water content differences in layers by (a) Toyoura sand and (b) Kanto loam (Bars indicate  $\pm$  one S.D.).

### 3.2 土壌溶液濃度一定の場合

豊浦砂での結果を S06 ~ S10 (Fig. 3 (a)) に関東ロームでの結果を C06 ~ C10 (Fig. 3 (b)) に示した。土壌水分量と溶液濃度が一定 (S06 と C06) の場合は、鉛直 TDR プローブと水平 TDR プローブの測定値はほぼ等しかった。中央カラムの土壌水分量が最大 (S07 と C07) のとき、鉛直 TDR プローブでの測定値は水平プローブのそれより豊浦砂で 12%、関東ロームで 8% 大きくなった。一方、中央のカラムの土壌水分量が最小 (S08, S09, C08, C09) のときは豊浦砂で 1 ~ 5%、関東ロームで 2 ~ 5% 小さくなった。このことから溶質濃度が等しく土壌水分量の異なる 3 層の土壌では、中央の層の土壌水分量が高い時のほうが低い時に比べて差が大きくなることわかった。さらに、下部カラム内の土壌水分量を最大にし、上部カラム内を最小 (S10 と C10) にしたときは、鉛直 TDR プローブでの測定値は水平プローブのそれより豊浦砂で 3%、関東ロームで 7% 大きくなり、2 層の土壌より 3 層の土壌のほうがより大きな差となることがわかった。S07 ~ S10 と C07 ~ C10 が同一の添加水分量、溶質量であり、豊浦砂の測定における水平 TDR プ

ローブによる値が、関東ロームでの値より近い値であったことから、この実験においても豊浦砂での実験が関東ロームより正確に実験できたことがわかった。

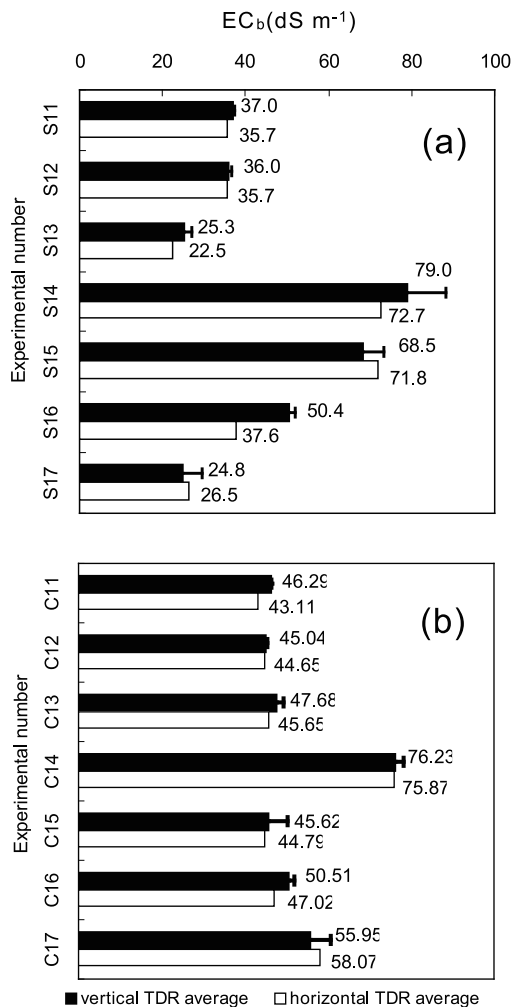
3 層に分かれた土壌状態では中央の層の土壌水分量または溶液濃度が最大 (S05, S07, C05, C07) のときは、鉛直 TDR プローブの測定値は水平 TDR プローブの平均値に比べて小さくなり、逆に 3 層のうちの中央の層の土壌水分量または溶液濃度が最小となるときの (S04, S08, S09, C04, C08, C09) のときは、鉛直 TDR プローブは水平 TDR プローブの平均値を過大評価することがわかった。これらの主な原因は、電磁波の減衰量が層の境界で急激に変化することによって電磁波の増減が急激に起き、それによって電気伝導度に影響が出たと考えられる。中央の層が電磁波の減衰量が低くなるときはその後減衰量上がることによって鉛直 TDR プローブでの測定値が低くなったと考えられ、逆に中央の層の電磁波の減衰量が高くなるときはその後の減衰量が下がることから鉛直 TDR プローブの測定値が高くなったと考えられる。

### 3.3 土壌水分量と溶液濃度が共に変化する場合

豊浦砂での結果を S11 ~ S17 (Fig. 4 (a)) に関東ロームでの結果を C11 ~ C17 (Fig. 4 (b)) に示した。土壌水分量が中央のカラムで最大となり溶液濃度が上方カラムで最大となったとき (S11 と C11)、鉛直 TDR プローブでの測定値は水平プローブのそれを豊浦砂で 15%、関東ロームで 7% 過大評価し、それぞれ S02 と S07、C02 と C07 の結果を反映した。S13, S16, C13, C16 でも同様に鉛直 TDR プローブによる測定値は水平プローブのそれに比べて大きくなった。

最後に土壌水分量の分布具合で EC を過大評価し (S07, S10, C07, C10)、溶液濃度の分布で過小評価する (S04 と C04) 組み合わせ、又は逆 (S02, S03, S05 と S08, S09 及び C02, C03, C05 と C08, C09 との組み合わせ) の場合である S12, S14, S15, S17 及び C12, C14, C15, C17 について検討した。豊浦砂では鉛直 TDR プローブでの測定値が、水平 TDR プローブの平均値を過大評価するとき (S12 と S14) と過小評価するとき (S15 と S17) があつた。関東ロームでは C12 と C14 はそれぞれ水平 TDR プローブの平均値とほぼ等しく、C15 は 2% 過大評価し C17 は 4% 過小評価した。このことから土壌水分量と水溶液濃度の分布具合によって鉛直 TDR プローブの測定値は変わってくると考えられる。

豊浦砂の結果と関東ロームの結果で関東ロームを用いての鉛直 TDR プローブによる測定値のほうが豊浦砂での測定値に比べて水平 TDR プローブ測定値により近い値を示した。特に S14 では豊浦砂では鉛直 TDR プローブでの平均値が水平 TDR プローブの平均値に比べて 9% 高かったのに対して C14 の関東ロームではほぼ等しくなった。さらに S15 の豊浦砂では鉛直 TDR プローブの平均値が水平 TDR プローブの平均値より 5% 低いのにに対して C15 の関東ロームでは 2% 高くなった。このように土性が異なることで鉛直 TDR プローブによる測



**Fig. 4** (a) 豊浦砂、(b) 関東ロームにおいて土壌水分量と電気伝導度を共に変化(エラーバーは $\pm 1$ 標準偏差)。  
Water content and Concentration differences in layers by (a) Toyoura sand and (b) Kanto loam (Bars indicate  $\pm$  one S.D.).

定値が、水平 TDR プローブの平均値を過大評価するときと過小評価するときがあることがわかったがほぼすべての測定で 10 % 以内の誤差に収まることがわかった。

#### 4. まとめ

鉛直 TDR プローブを用いた 3 層の土壌における電気伝導度の測定は、土壌水分量と溶質濃度の分布によって過大評価や過小評価することが判明した。土壌水の土壌水分量もしくは溶液濃度のみを変化させたときは、中央のカラムが最大のとき鉛直 TDR プローブの測定は 5 ~ 17 % 水平 TDR プローブの測定値より過大評価し、誤差を考慮する必要があることがわかった。しかし、土壌水分量と溶液濃度の両方を変化させた場合は、そのほとんどが誤差  $\pm 10$  % 以内に収まることがわかり、圃場での測定の際は、土壌水分量が中央のカラムで最大となり溶液濃度が上方カラムで最大 (7 ~ 15 % の誤差) といった特定の条件下以外では誤差を考慮する必要がないことがわかった。

加えて、土性が豊浦砂と関東ロームで異なると鉛直 TDR プローブによる測定値に影響を及ぼすことがわか

り、鉛直 TDR プローブを用いた電気伝導度測定において、関東ローム土壌で用いた結果が豊浦砂で用いた結果より、水平 TDR プローブの測定値に値に近いことがわかった。さらに、3 層からなる成層土壌において、関東ロームで鉛直 TDR プローブを用いた場合、すべての測定結果で誤差が 10 % 以内に収まったことから関東ロームの土壌では、鉛直 TDR プローブを用いた測定で正確な値が測定可能であることがわかった。

#### 謝辞

本研究の一部は(財)日本宇宙フォーラム第 7 回選定宇宙環境利用に関する公募地上研究の助成により行った。

#### 引用文献

- Castiglione, P., Shouse, J.P. and Wraith, M.J. (2006): Multiplexer-induced interference on TDR measurements of electrical conductivity. *Soil Science Society of American Journal*, 70: 1453–1458.
- Dalton, F.N., Herkelrath, W.N., Rawlins, D.S. and Rhoades, J.D. (1984): Time-domain reflectometry: Simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. *Science*, 224: 989–990.
- Heimovaara, T.J., Focke, A.G., Bouten, W. and Verstraten, J.M. (1995): Assessing temporal variations in soil-water composition with Time-Domain reflectometry. *Soil Science Society of American Journal*, 59: 689–698.
- Hoekstra, P. and Delaney, A. (1974): Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies. *Journal of Geophysical Research*, 79: 1699–1708.
- Kachanoski, R.G., Pringle, E. and Ward, A.L. (1992): Field measurement of solute travel times using time domain reflectometry. *Soil Science Society of American Journal*, 56: 47–52.
- Lee, J., Horton, R., Noborio, K. and Jaynes, D.B. (2001): Characterization of preferential flow in undisturbed, structured soil columns using a vertical TDR probe. *Journal of Contaminant Hydrology*, 51: 131–144.
- Nadler, A., Dasberg, S. and Lapid, I. (1991): Time domain reflectometry measurement of water content and electrical conductivity of layered soil columns. *Soil Science Society of American Journal*, 55: 938–943.
- Nadler, A., Green, S.R., Vogeler, I. and Clothier, B.E. (2002): Horizontal and vertical TDR measurements of soil water content and electrical conductivity. *Soil Science Society of American Journal*, 66: 735–743.
- 落合博之, 登尾浩助, 北直裕, 加藤高寛 (2009): 熱水土壌消毒時及びその後の土壌中における溶質動態. *土壌の物理性*, 112: 9–12.
- Or, D., Fisher, B., Hubscher, R.A. and Wraith, J. (1998): WinTDR 98 V.4.0 —Users Guide—. Department of Plants, Soil and Biometeorology, Utah State University, Logan, UT.
- Rhoades, J.D., Raats, P.A.C. and Prather, R.J. (1976): Effects of Liquid-phase electrical conductivity, water content, and sur-

face conductivity on bulk soil electrical conductivity. Soil Science Society of American Journal, 40: 651–655.  
Topp, G.C. and Davis J.L. (1981): Detecting infiltration of wa-

ter through soil cracks by time-domain reflectometry. Geoderma, 26: 13–23.

## 要 旨

TDR 法は、土壌水分量と電気伝導度の両方を圃場や実験室内で同時に経時的に測定できることから頻繁に使われている。これまで TDR プローブ間の平均土壌水分量と平均電気伝導度に関するいくつかの研究がされている。そこで、本研究では 3 層からなる成層土壌での平均バルク電気伝導度の測定値の評価をした。実験は、豊浦砂と関東ロームを用いた。土壌水分量と土壌溶液濃度を層ごとで調節し、温度一定に保たれたインキュベーター内で行った。それぞれの層に水平 TDR プローブを、また地表面から鉛直 TDR プローブを埋設した。鉛直 TDR プローブでの平均バルク電気伝導度は  $-9 \sim +17\%$  誤差を生じることがわかった。しかし、ほぼすべての実験で  $10\%$  以下の誤差だったことから鉛直 TDR プローブと水平 TDR プローブによる電気伝導度の測定は圃場においてほぼ等しく測定可能であることが判明した。

キーワード：TDR，電気伝導度，成層，鉛直 TDR プローブ，水平 TDR プローブ