

TDR による表層土壌水分計の開発とその有効性の評価

伊藤祐二¹、筑紫二郎¹、宮本英揮²

Development and effectiveness of TDR probe to measure near-surface soil moisture distribution

Yuji ITO¹, Jiro CHIKUSHI¹, and Hideki MIYAMOTO²

Abstract: To establish a method to monitor the vertical profile of volumetric water content (θ) near soil surface, a multi-wire profile probe (MWP probe) was designed and applied to the θ -profile observations during the evaporation processes in sand and decomposed granite soil. The probe consists of eight sets of the 3-wire TDR (time domain reflectometry) probes, which are attached to a print-circuit board with a low permittivity, and is capable of measuring relative permittivity (ϵ_{mwp}) at intervals of 3 mm. The relationship between ϵ_{mwp} and θ for sand did not agree with one derived from Topp equation because the board had the influence on the ϵ_{mwp} measurements. Thus, we calibrated the probes for sand with different moisture conditions and found that the probes can determine θ within acceptable accuracy. In the evaporation processes, the observed θ -profiles showed that the moisture contents for sand at 3 and 6 mm depths locally decreased in the initial stage of the process, while the moisture contents for decomposed granite soil uniformly decreased at any depth. We concluded that the designed MWP probe would be useful for millimeter-interval measurements of vertical θ -profiles near soil surface.

Key Words: time domain reflectometry (TDR), relative permittivity, Topp equation, vertical soil water content profile, soil surface evaporation

1. はじめに

地表面付近の土壌水分量は、表面流出、土壌面からの蒸発、植物による蒸散、栄養塩の循環などの物質循環過程に影響をおよぼす (Nielsen et al., 1995; Hebrard et al., 2006)。とりわけ地表面から深さ 0 ~ 5 cm の土壌水分量が地表面付近の水循環におよぼす影響は大きく (Wigneron et al., 2003)、たとえば蒸発による水蒸気輸送を考えた場合、地表面での土壌水分が液相から気相へと状態変化する深度は、表面から 2 cm 以内の領域にあるといわれている (Kondo and Xu, 1997)。したがって、地表面直下 (たとえば、地表面から深さ 2 cm 以内の領域)

の鉛直水分プロファイルを定量的に評価することは、地表面付近で生じる蒸発散、表面流出、地下水涵養などの時空間スケールの異なる水文循環過程を明らかにするうえで重要である。

土壌水分量の計測法には、誘電特性を評価する時間領域反射法 (Time domain reflectometry: TDR)、静電容量法、マイクロ波リモートセンシング、地中レーダーなどがあり、これらの計測法は地表面付近の土壌水分測定法として広く利用されている (たとえば、Inoue et al., 2001; Huisman et al., 2002; Wigneron et al., 2003; Moret et al., 2006; Bogaen et al., 2007)。なかでも、近年の TDR の普及により、土壌水分量を非破壊かつ高精度で測定することが可能になった。

TDR は、土中に埋設したプローブにステップパルスを与え、パルスの伝播速度から評価される比誘電率より、土の体積含水率を決定する技術である (登尾, 2003; Robinson et al., 2003)。比誘電率に基づく体積含水率の評価には、以下の Topp et al. (1980) の実験式が広く用いられる。

$$\theta = 4.3 \times 10^{-6} \epsilon^3 - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon^2 + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon - 5.3 \times 10^{-2} \quad (1)$$

ここで、 θ は土の体積含水率 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)、 ϵ は土の比誘電率である。上式を有機質土壌や火山灰土壌に適用することは困難であるが (波多野ら, 1995; Miyamoto et al., 2001)、多くの土に対して、1.3 % 以内の誤差で θ を評価することができる (Topp et al., 1980)。

TDR における比誘電率測定用のプローブには、これまで用途に応じて、多彩な機能を持つプローブが開発されているが (たとえば、Selker et al., 1993; Inoue et al., 2001; 宮本・筑紫, 2006)、一般に金属棒を平行に配置した 2 線式または 3 線式のプローブが用いられる。土中の鉛直水分プロファイルは、複数のプローブを土壌に水平に挿入することで計測可能であるものの、設置したプローブ同士の干渉を防ぐために、プローブの挿入間隔は最低でも数センチメートルとすることが多い (Inoue et al., 2001; Suleiman and Ritchie, 2003)。ところが、シルトや粘土のような細粒分を含まない砂などの粗大な土粒子から構成される土壌の蒸発過程では、地表面直下に急勾配の水分プロファイル、すなわち局所的な乾燥層が形成され、その層が地表面流出や地下浸透などのマクロな水

¹Biotron Institute, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581, Japan. Corresponding author: 伊藤祐二, 九州大学生物環境調節センター

²Faculty of Culture and Education, Saga University, 1 Honjo-machi, Saga 840-8502, Japan

2008 年 9 月 3 日受稿 2008 年 11 月 22 日受理
土壌の物理性 111 号, 35-41 (2009)

移動を支配する可能性がある。したがって、地表面直下での局所的な水分変化の状況を捉えるためには、少なくとも地表面から深さ数ミリメートルの範囲の水分変化を把握する必要があり、そうした微小間隔で水分プロファイルを計測できる小型プロファイルプローブの開発が不可欠である。

以上の背景から、本研究では、8組の TDR プローブを 3.2 mm 間隔に取り付けたプロファイルプローブ（以下、MWP プローブと記す）を作製し、珪砂およびマサ土を対象に蒸発実験を実施した。作製した MWP プローブによって地表面から深さ 2.5 cm 以内の鉛直水分プロファイル測定し、その経時変化のモニタリングを試みるとともに、表層土壌水分計測に対する同プローブの有効性について検討した。

2. 実験材料および方法

2.1 MWP プローブおよび比誘電率測定システム

Fig. 1 は、著者らが自作した多線式プロファイルプローブ (MWP プローブ) の模式図である。本研究で用いた MWP プローブは、長さ 105 mm、幅 30 mm、厚さ 2 mm のガラスとエポキシ樹脂との積層基板に、長さ 100 mm、幅 0.2 mm、厚さ 0.01 mm の電極銅線を 1.4 mm の間隔で埋め込んだものである。同プローブは、金属棒の代わりに銅線を用いた 3 線式プローブを 8 組並列した構造 (Fig. 1 の P1 ~ P8) となっている。最大の特徴は、3 線式の隣合うプローブ同士が両端の銅線をシールド線として共用することにより、8 組のプローブの一体化と高密度化を実現した点にある。プローブ同士の干渉を検討するために宮本・筑紫 (2006) と同様の方法で別途実施した電場シミュレーションによれば、各プローブのサンプリング体積は、中央の電極銅線から概ね 1 ~ 2 mm の範囲内に限定された。したがって、MWP プローブを土壌に水平方向に挿入することにより、土壌水分量を各プローブの中央の銅線の間隔、すなわち 3.2 mm 間隔の計 8 点で測定することが可能である。

本研究における TDR プローブを用いた比誘電率の測定では、プローブに対するステップパルスの送受信装置に 1502C 型ケーブルテスター (Tektronix) を使用した。MWP プローブにおいては、8 組のプローブを SDMX50 型マルチプレクサー (Campbell Scientific) を介してケーブルテスターに接続した。また、波形解析・計測制御ソフト WinTDR (Or et al., 2004) を用いて TDR 波形の計測ならびに解析を行った。解析で得られる電磁パルスの伝播速度に基づいて、比誘電率は次式により評価される (登尾, 2003)。

$$\varepsilon = \left(\frac{L_a}{LV_p} \right)^2 \quad (2)$$

ここで、 L_a は電磁パルスの伝播速度から評価される見かけのプローブ長、 L は実際のプローブ長、 V_p はケーブルテスターで設定する同軸ケーブル内における電磁パルスの相対伝播速度 (= 0.99) である。

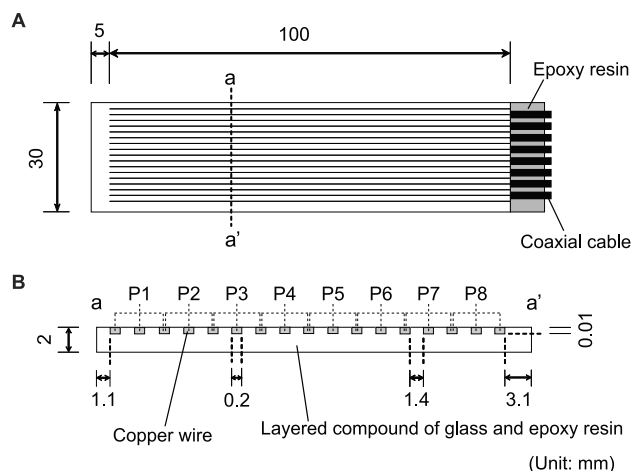


Fig. 1 MWP プローブの模式図 (図 B は図 A の a-a' 断面図)。Schematic diagram of the MWP probe (Diagram B shows a cross section at the a-a' line in diagram A).

2.2 流体の比誘電率測定

MWP プローブの誘電特性を明らかにするために、9 種の流体に対して比誘電率の測定を行った。測定用の流体として、本実験では、約 24 °C の蒸留水、濃度の異なるエタノール、エタノールと植物性油の混合液、植物性油、空気を用いた。濃度の異なるエタノールとして、蒸留水との質量混合比の違いによって 20 %、40 %、60 %、80 %、100 % の 5 つのサンプルを用意し、エタノールと植物性油の混合液については、両者の質量比を 1 : 1 とした。

内径 7.5 cm、高さ 15 cm の円筒型容器に 9 種の流体を満たし、容器中央部に MWP プローブを固定した。P1 ~ P8 の 8 組のプローブにより各流体の比誘電率を 3 回測定し、それらの算術平均値を各流体に対する比誘電率値としてプローブ毎に記録した。また、比較のために長さ 100 mm、直径 1.2 mm のステンレス製電極棒を有す 3 線式プローブにおいても同様の計測を行った。

2.3 砂の水分計測および校正

MWP プローブを用いて砂の体積含水率を測定するために、内径 5 cm、高さ 13 cm のアクリル製円筒型カラム内の中央部にプローブを固定し、その内部に風乾の珪砂 (粒径 0.15 ~ 0.6 mm: 6 号, 西戸崎興産) (以下、砂と記す) を均一に充填した。砂の表面に蒸留水を霧吹きで噴霧し、蒸留水が均様に拡散するのを待った後、MWP プローブ上の 8 組のプローブで比誘電率を計測した。同時に、カラム全質量を計量し、充填した砂および噴霧した蒸留水の質量から、砂の体積含水率を評価した (以降、この手法を重量法と称す)。一連の加湿ならびに計測を繰り返すことにより、広範な水分条件における砂の比誘電率と体積含水率との関係を調べた。

2.4 蒸発実験

砂およびマサ土の蒸発過程における地表面直下の鉛直水分プロファイルの経時変化を調べるために、縦 10 cm、横 20 cm、高さ 4 cm の塩化ビニール製の直方体容器に MWP プローブの P1 を上面、P8 を底面に向けて固定した。その後、蒸留水を加えながら砂を容器上面まで充

Table 1 3 線式プローブと MWP プローブにより測定した蒸留水, 濃度の異なるエタノール, エタノールと植物油の混合液, 植物油, 空気の比誘電率.
Relative permittivities of distilled water, ethanol with different concentrations, ethanol-oil mixture, vegetable oil, and air measured by the 3-wire and the MWP probes.

Fluid	Relative permittivity									
	Measured with 3-wire probe	Measured with MWP probe								
		Average*	Differences from average							
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	
distilled water	80.1	43.7	-1.0	-0.6	-0.3	0.0	0.5	-1.1	2.0	0.4
20%-ethanol solution	68.1	37.1	-0.7	-0.7	-0.4	0.0	0.6	-0.9	1.8	0.3
40%-ethanol solution	54.3	30.3	-0.7	-0.5	-0.2	0.1	0.5	-0.9	1.4	0.3
60%-ethanol solution	41.3	23.4	-0.5	-0.4	-0.2	0.0	0.3	-0.8	1.3	0.2
80%-ethanol solution	30.3	17.7	-0.5	-0.4	-0.1	0.1	0.4	-0.7	1.1	0.1
Ethanol	20.8	12.1	-0.4	-0.2	-0.1	0.1	0.3	-0.6	0.8	0.0
Ethanol-oil mixture	9.2	8.2	-0.2	-0.3	-0.2	-0.1	0.4	-0.4	0.8	-0.1
Vegetable oil	3.5	4.8	-0.2	-0.1	0.0	0.1	0.2	-0.3	0.5	0.0
Air	1.5	3.6	-0.1	-0.1	0.0	0.1	0.1	-0.3	0.3	0.0

* Average is a mean value of the relative permittivities measured by P1 to P8. Ethanol solutions were made by mixing different mass of ethanol in distilled water. Ethanol and vegetable oil were mixed in same mass when the mixture was made.

填し, 水分飽和試料とした. 飽和試料の表面を大気に開放して水分の蒸発を促し, MWP プローブ上の 8 組のプローブで, 蒸発過程における比誘電率分布の経時変化を 5 分間隔で測定した. また, 砂との比較のために, マサ土 (粒径 0.106 mm 以下が 9 %, 0.106 ~ 0.85 mm が 63 %, 0.85 ~ 2 mm が 28 %) においても同様の計測を行った. 砂およびマサ土に対する実験期間の気温は, それぞれ約 27 °C および約 32 °C であった. なお, 8 組のプローブの測定値は, 各プローブ中央の電極銅線の位置, すなわち表面から深さ 0.28, 0.6, 0.92, 1.24, 1.56, 1.88, 2.2, 2.52 cm の体積含水率を代表するものとした.

マサ土について, 別途実施した粒度分析の結果によれば, 今回使用したマサ土は, 細粒分を含む砂土に相当し, 砂や砂質土などに適用可能な Topp 式の適用範囲にあることが明らかとなった. 既往の研究 (林ら, 2001) によれば, マサ土は砂と同様の誘電特性を有することが知られており, 本研究で用いた砂とマサ土も同様の誘電特性を有するものと考えられる. また, 土壌の比誘電率と体積含水率との関係は, 比表面積が大きい有機質土壌や火山灰土壌を除けば, 土壌の構造や土性の影響を受けないことから (波多野ら, 1995; 登尾, 2003), 本研究におけるマサ土の体積含水率の評価には, 後述する砂で得られた校正式を用いた.

3. 結果と考察

3.1 流体を用いたプローブの特性

Table 1 に, 3 線式プローブと MWP プローブで測定した蒸留水, 濃度の異なるエタノール, エタノールと植物油の混合液, 植物油, 空気の比誘電率を示す. 表中の MWP プローブの結果は, P1 ~ P8 で測定した各流体に対する比誘電率 (3 回の測定に対する算術平均値) の平均値, およびその平均値と各プローブの測定値との残差 (以下, 測定差と記す) を示す.

3 線式プローブで測定した蒸留水の比誘電率は, 一般に報告されている水の比誘電率 80.4 (水温 20 °C にお

ける値) (国立天文台, 2008) と一致した. 濃度の異なるエタノールおよび空気の測定値も, 宮本・筑紫 (2006) の測定結果と概ね一致した. したがって, 本実験の 3 線式プローブによる測定値は, 各流体の比誘電率を概ね再現しているものとする.

一方, MWP プローブによる各流体の比誘電率は, エタノールと植物油の混合液, 植物油, 空気を除けば, 3 線式プローブによる測定値の半分程度と小さかった. これは, MWP プローブの電極銅線と接着している低誘電性のガラス・エポキシ樹脂積層基板が電極周辺の電場特性に影響をおよぼしたためと考えられる. 同様の結果は, 銅線とアクリル基板の接着型プローブを用いた既往の実験 (宮本・筑紫, 2006) においても報告されている. また, プローブ毎に評価した各流体に対する測定差の平均 Bias (Cosh et al., 2005) は, -0.43 (P1), -0.32 (P2), -0.14 (P3), 0.05 (P4), 0.30 (P5), -0.59 (P6), 0.98 (P7), 0.14 (P8) であった. P1 ~ P8 の構造は概ね等しいものの完全に一致しないため, 各々のプローブの個性が測定差に反映されたものとする. ただし, 各プローブの測定差は, プローブ毎に校正を行うことにより, 後述の比誘電率や体積含水率の測定に影響しないものとする.

3.2 比誘電率と体積含水率との関係

Fig. 2 は, MWP プローブで測定した砂の比誘電率と体積含水率との関係, および Topp 式による計算値を示す. MWP プローブの結果に対して, Fig. 2 では, 前述の流体実験において測定差が最も小さかった P4 と測定差が最も大きかった P7 (Table 1) に対する結果を示した.

MWP プローブで測定した砂の比誘電率は, 体積含水率が約 0.12 を越えると, Topp 式で評価される比誘電率よりも小さくなり, Topp 式との差異は水分量の増加とともに大きくなった. 逆に, 体積含水率が約 0.12 よりも小さくなると, MWP プローブで測定される比誘電率は, Topp 式で評価される比誘電率よりも大きくなり, その差異は砂の水分量の減少とともに大きくなった. 同様の傾

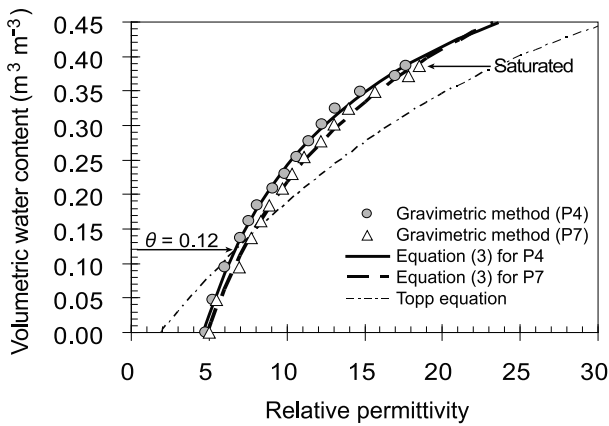


Fig. 2 砂に対する比誘電率と体積含水率との関係。
Relation between relative permittivity and volumetric water content for sand.

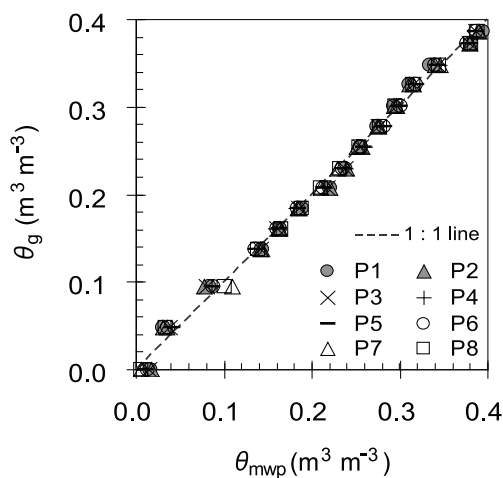


Fig. 3 重量法 (θ_g) と MWP プローブ (θ_{mwp}) により評価した砂の体積含水率の比較。
Comparison of volumetric water content of sand measured by the gravimetric method (θ_g) and the MWP probe (θ_{mwp}).

向は、割愛した他の 5 組のプローブにも認められたことから、Topp 式を用いて体積含水率を評価することは困難である。したがって、Topp 式に代わる MWP プローブに対する校正式として、本研究では、測定された比誘電率と体積含水率との関係を次式で表した。

$$\theta_{mwp} = a(\log \varepsilon_{mwp})^2 + b \log \varepsilon_{mwp} + c \quad (3)$$

ここで、 ε_{mwp} は MWP プローブで測定される土の比誘電率、 a 、 b 、 c はフィッティングパラメータであり、 θ_{mwp} は MWP プローブで測定される比誘電率を用いて (3) 式より評価される体積含水率である。本研究では、測定された砂の比誘電率と体積含水率との関係に基づいて、P1 ~ P8 のパラメータ a 、 b 、 c を非線形最小二乗法により最適化し、各プローブに対する校正式 (Fig. 2 における実線および破線) を得た。なお、(3) 式の対数式は、多項式などの別の近似式に比べて実測値との一致度が最も高く、かつパラメータを決定する際の実測値のばらつきに対する影響が小さかった。

3.3 体積含水率の評価

Fig. 3 は、重量法で評価した砂の体積含水率 θ_g と (3) 式より評価した体積含水率 θ_{mwp} の比較を示す。体積含水率が $0.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ のとき各プローブで評価した体積含水率は若干ばらついたものの、それを除けば広範な水分領域で 1:1 線上に分布し、重量法による結果とよく一致した。P1 ~ P8 に対する体積含水率の平均二乗誤差の平方根 RMSE (Root Mean Square Error) は、全プローブに対する平均値で $0.007 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ であった。したがって、各プローブで評価される体積含水率の再現性は高いといえる。

3.4 蒸発過程における水分プロファイルの変化

Fig. 4 は、砂に対する蒸発実験から得た深さ 0.28, 0.6, 0.92, 1.24, 1.56, 1.88, 2.2, 2.52 cm の体積含水率の経時変化を示す。深さ 0.28 および 0.6 cm の体積含水率は、蒸発開始から約 2 時間の間に急速に低下し (Fig. 4a)、初期水分の約半分が蒸発により失われた。一方、深さ 1.56 ~ 2.52 cm の体積含水率は、2 時間後においても変化が小さく (Fig. 4b)、蒸発による水分減少は小さかった。また、水分プロファイル (Fig. 4b) においては、蒸発開始以降、表面から順に体積含水率が低下し、表層から下層に向けて乾燥前線が進行する様子が確認された。12 時間後以降、全体的に乾燥が進行し、168 時間後 (1 週間後) には全深度の体積含水率が 0 付近で一定となった。

Fig. 5 は、砂との比較のために行ったマサ土に対する蒸発実験の結果を示す。マサ土の体積含水率は、各深度においてほぼ一様に低下し (Fig. 5b)、砂で観察された下方への乾燥前線の進行は観察されなかった。蒸発開始から 12 時間後までの砂とマサ土の体積含水率を比較すると (Fig. 4a, Fig. 5a)、表面に比較的近い 0.28 ~ 1.24 cm の深度 (グレー線) では、砂の方が急速に水分を失う傾向にあるが、1.56 cm 以深 (黒線) では、両者に大きな差異は認められなかった。一方、実験開始から 12 ~ 24 時間後の水分の減少量は、マサ土の方が大きい傾向を示した。

土による蒸発過程の違いを比較検討した既往の研究では、地表面直下の詳細な検討は行われていないものの、微細な土粒子から構成される粘土やロームに比べて、砂の水分量は表面近くで局所的に減少し、逆に深い位置では、粘土やロームの水分減少が大きい傾向にあることが示されている (Hillel, 1977)。また、表面の水分が急速に減少した後 (本研究では、5 ~ 12 時間以降) の土壌水分の減少速度は、砂よりもロームの方が速い傾向にあることが報告されている (Suleiman and Ritchie, 2003)。本研究における砂とマサ土の蒸発実験では、実験時の気温や湿度の違いにより両者の表面境界条件が異なり、その影響もいくらか含まれると考えられるが、計測された水分プロファイルの経時変化は、既往の研究で述べられた砂とそれよりも微細な土粒子から構成される土壌の一般的な経時変化の特徴を反映しているものと考えられる。表面付近の水分プロファイルの計測に関する既往の研究 (たとえば、Richards et al., 1956; Bruckler et al., 1988; Inoue et

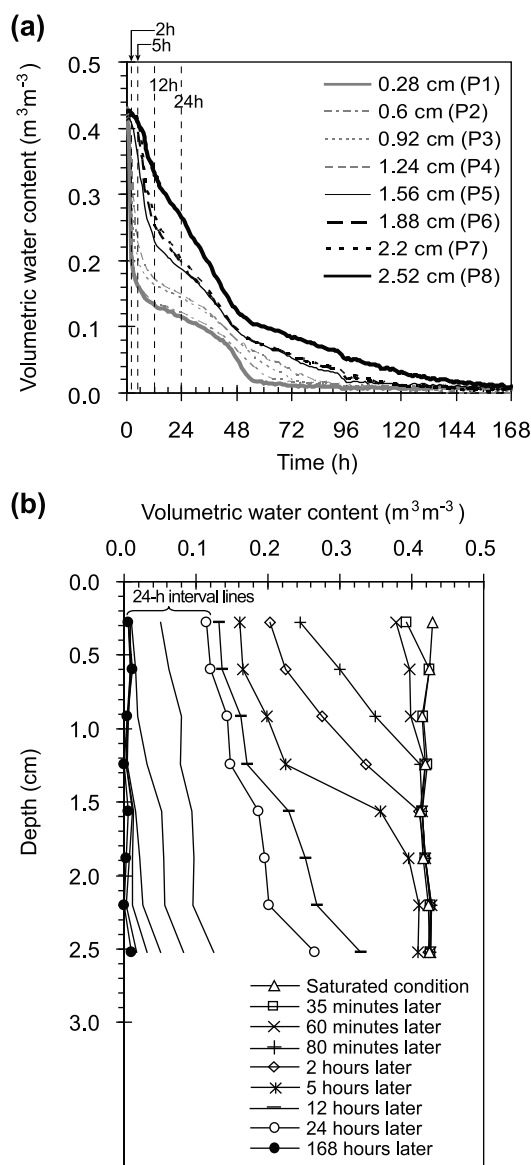


Fig. 4 砂に対する体積含水率の鉛直プロファイルの経時変化. (a) 深度別体積含水率, (b) 鉛直水分プロファイル. Temporal change in vertical volumetric water content profiles in sand. (a) Volumetric water content in every depth, (b) Vertical water content profile.

al., 2001; Suleiman and Ritchie, 2003) では, 地表面からの深さ数センチメートルから数十センチメートルの領域を対象としているものが多い. そのため, 地表面に極めて近い深さ 0.28 ~ 2.52 cm の領域を対象とした本研究の結果は, 既往の研究に比べより地表面に近い領域の水分プロファイルの特徴を示しているものと考えられる. 本研究で示したミリメートル間隔の水分プロファイルの計測結果から, 地表面直下の水分動態の把握に MWP プローブが有用であると考えられる.

4. おわりに

本研究では, 地表面直下の鉛直土壌水分プロファイルを明らかにするために, 8 組の 3 線式 TDR プローブを 3.2 mm 間隔に配置した多線式プロファイルプローブ (MWP プローブ) を作製し, 砂およびマサ土の水分プロ

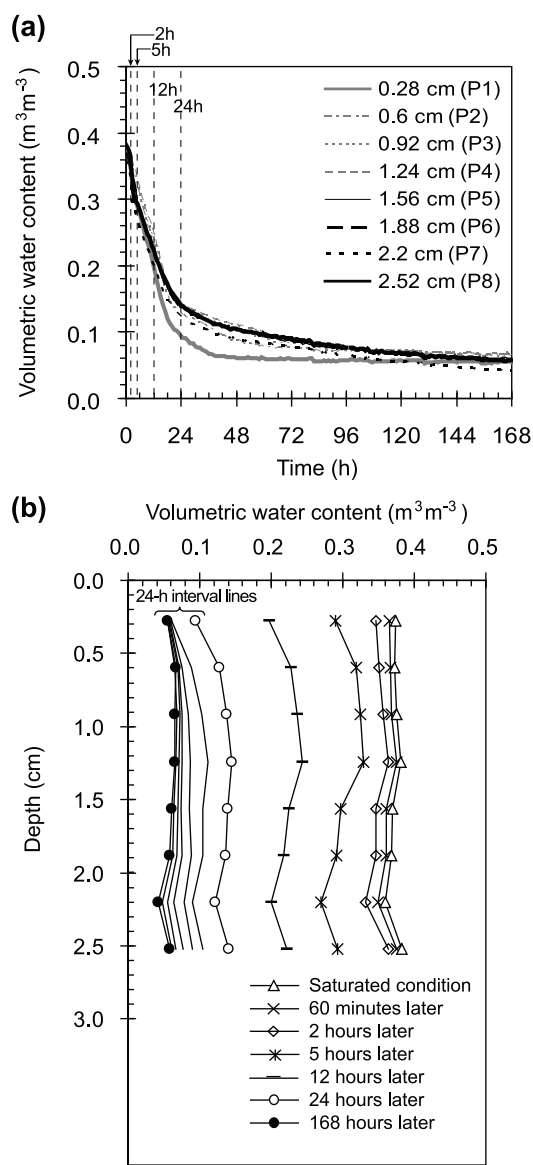


Fig. 5 マサ土に対する体積含水率の鉛直プロファイルの経時変化. (a) 深度別体積含水率, (b) 鉛直水分プロファイル. Temporal change in vertical volumetric water content profiles in decomposed granite soil. (a) Volumetric water content in every depth, (b) Vertical water content profile.

ファイル計測に対する有効性を検討した.

MWP プローブにおいては, 比誘電率を測定するための電極銅線が低誘電性のガラスとエポキシ樹脂との積層基板に接着されているため, その基板材が対象とする媒体の誘電率測定に影響をおよぼした. 測定した土の比誘電率と体積含水率との関係は, Topp 式で評価される両者の関係と一致しなかったことから, MWP プローブで測定した比誘電率を Topp 式に適用することはできなかった. したがって, Topp 式に代わる体積含水率の評価式として, 本研究では, MWP プローブで測定した砂の比誘電率と体積含水率の実測値との関係に基づいて対数校正式を導いた. 得られた校正式に基づいて砂の体積含水率を評価した結果, MWP プローブで測定した体積含水率は, 8 組のプローブすべてにおいて重量法による結果と一致した.

MWP プローブで測定される比誘電率と対数校正式に基づいて砂およびマサ土の地表面直下の鉛直水分プロフィールを評価した結果、実験初期に飽和状態にあった両試料の水分は、時間の経過とともに蒸発によって失われ、水分プロフィールは、それぞれ特異的な経時変化を示した。すなわち、マサ土においては、各深度での水分減少は同様であったが、砂においては、表面から深さ方向に向かって順次乾燥していく様子が観察された。特に、砂における深さ 0.28 および 0.6 cm の土壌水分は、短時間で急激な減少を示した。

MWP プローブの使用においては、プローブ埋設時に 8 本の同軸ケーブルが測定領域周辺の土中水の移動に影響をおよぼさないように注意が必要であったり、プローブが精密で測定領域が微小であるため、目的とする測定位置に正確に設置する必要があるため、従来の TDR プローブでは軽視できたプローブと土壌との接触具合についても十分な注意を要する。また、正確な水分計測を実現するためには、測定する土壌に対して 8 組のプローブの校正が必要である。しかし、機器の性能を維持できる環境において、各プローブに校正を施し、本研究と同様の測定システムを導入すれば、これまで室内実験においても測定困難とされてきたミリメートル間隔での水分プロフィールの計測が可能であり、対象とする土壌の体積含水率を概ね $0.007 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ の精度で評価できる。また、先述の点に注意すれば、現地観測においても測定間隔 3.2 mm という高密度での鉛直水分プロフィールの計測に MWP プローブが適用できるものと考えられる。

引用文献

- Bogena, H.R., Huisman, J.A., Oberdorster, C., and Vereecken, H. (2007): Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications. *Journal of Hydrology*, 344: 32–42.
- Bruckler, L., Witono, H., and Stengel, P. (1988): Near surface soil moisture estimation from microwave measurements. *Remote Sensing of Environment*, 26: 101–121.
- Cosh, M.H., Jackson, T.J., Bindlish, R., Famiglietti, J.S., and Ryu, D. (2005): Calibration of an impedance probe for estimation of surface soil water content over large regions. *Journal of Hydrology*, 311: 49–58.
- 波多野隆介, 長谷川周一, 佐久間敏雄 (1995): TDR 土壌水分計のキャリブレーション. *日本土壌肥科学雑誌*, 66(6): 678–680.
- Hebrard, O., Voltz, M., Andrieux, P., and Moussa, R. (2006): Spatio-temporal distribution of soil surface moisture in a heterogeneously framed Mediterranean catchment. *Journal of Hydrology*, 329: 110–121.
- Hillel, D. (1977): Computer simulation of soil-water dynamics: a compendium of recent work. pp.94–101, International Development Research Centre, Ottawa.
- Huisman, J.A., Snepvangers, J.J.J.C., Bouten, W., and Heuvelink, G.B.M. (2002): Mapping spatial variation in surface soil water content: comparison of ground-penetrating radar and time domain reflectometry. *Journal of Hydrology*, 269: 194–207.
- Inoue, Y., Watanabe, T., and Kitamura, K. (2001): Prototype time-domain reflectometry probes for measurement of moisture content near the soil surface for applications to "on-the-move" measurements. *Agricultural water management*, 50: 41–52.
- 国立天文台編 (2008): 理科年表. p.412, 丸善, 東京.
- Kondo, J. and Xu, J. (1997): Seasonal variations in the heat and water balances for nonvegetated surfaces. *Journal of Applied Meteorology*, 36: 1676–1695.
- 林 為人, 山岡 博, 杉田信隆, 高橋 学 (2001): 砂の比誘電率および比抵抗に及ぼす間隙水の塩分濃度の影響. *応用地質*, 42(3): 140–148.
- 宮本英揮, 筑紫二郎 (2006): 誘電混合モデルによるカラム内壁面接着型 TDR プローブのキャリブレーション. *土壌の物理性*, 104: 5–12.
- Miyamoto, T., Kobayashi, R., Annaka, T., and Chikushi, J. (2001): Applicability of multiple length TDR probes to measure water distributions in an andisol under different tillage systems in Japan. *Soil and Tillage Research*, 60: 91–99.
- Moret, D., Arrue, J.L., Lopez, M.V., and Gracia, R. (2006): A new TDR waveform analysis approach for soil moisture profiling using a single probe. *Journal of Hydrology*, 321: 163–172.
- Nielsen, D.C., Lagae, H.J., and Anderson, R.L. (1995): Time-domain reflectometry measurements of surface soil water content. *Soil Science Society of America Journal*, 59: 103–105.
- 登尾浩助 (2003): 実践 TDR 法活用 — 土壌中の水分・塩分量の同時測定—. *土壌の物理性*, 93: 57–65.
- Or, D., Jones, S.B., VanShaar, J.R., Humphries, S., and Koberstein, L. (2004): WinTDR —Users Guide— for Ver. 6.1, Department of Plants, Soil and Biometeorology, Utah State University, Logan Utah, USA, Available at <http://soilphysics.usu.edu/wintdr/index.htm>.
- Richards, L.A., Gardner, W.R., and Ogata, G. (1956): Physical processes determining water loss from soil. *Soil Science Society of America Journal*, 20: 310–314.
- Robinson, D.A., Jones, S.B., Wraith, J.M., Or, D., and Friedman, S.P. (2003): A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry. *Soil Science Vadose Zone Journal*, 2: 444–475.
- Selker, J.S., Graff, L., and Steenhuis, T. (1993): Noninvasive time domain reflectometry soil moisture measurement probe. *Soil Science Society of America Journal*, 57: 934–936.
- Suleiman, A.A. and Ritchie, J.T. (2003): Modeling soil water redistribution during second-stage evaporation. *Soil Science Society of America Journal*, 67: 377–386.
- Topp, G.C., Davis, J.L., and Annan, A.P. (1980): Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16(3): 574–582.
- Wigneron, J.-P., Calvet, J.-C., Pellarin, T., Van de Griend, A.A., Berger, M., and Ferrazzoli, P. (2003): Retrieving near-surface soil moisture from microwave radiometric observations: current status and future plans. *Remote Sensing of Environment*, 85: 489–506.

要 旨

自作した多線式プロファイルプローブ (MWP プローブ) を用いて, 砂とマサ土の地表面直下の鉛直水分プロファイルを測定した. 8 組の 3 線式 TDR プローブを 3 mm 間隔に配置した MWP プローブにおいては, プローブに用いた低誘電性の基板材が比誘電率の測定に影響をおよぼした. 同プローブで測定した比誘電率を Topp 式に用いることはできなかったが, その測定値を本研究で得た対数校正式に用いることで, 砂の体積含水率を精度よく評価することができた. 水分飽和状態の砂とマサ土に対して, 蒸発過程における土壌水分減少量を表層の 8 点で測定した結果, マサ土では各深度での水分減少は同様であったが, 砂では深さ 3 ~ 6 mm で生じる局所的な水分減少の状況が観察された. MWP プローブを用いることで, これまで測定困難とされてきた土壌のごく表層 (0 ~ 2.5 cm) の鉛直水分プロファイルをミリメートル間隔で計測できることを明らかにした.

キーワード：時間領域反射法 (TDR), 比誘電率, Topp 式, 鉛直土壌水分プロファイル, 土壌面蒸発