

TDR 法による水田湛水深の経時測定

矢崎友嗣*・庄子侑希*・登尾浩助*

Measuring Temporal Changes in Flooding Depths in a Rice Paddy Field Using Time Domain Reflectometry

Tomotsugu YAZAKI*, Yuki SHOJI* and Kosuke NOBORIO*

* School of Agriculture, Meiji University, 1-1-1 Higashimita,
Tama-ku, Kawasaki, Kanagawa 214-8571, Japan

Abstract

Measurement of temporal changes in hydrological condition such as a flooding depth is needed to understand green-house gas exchange between paddy rice fields and the atmosphere. We introduced a simple method to monitor the flooding depth using time domain reflectometry (TDR). The results of laboratory experiments indicated that water depths measured with TDR agreed well with those observed when the water depth was estimated assuming that the second reflection of TDR pulse occurs not at the end of the rod, but at the water surface with large water depths. The laboratory experiments revealed that TDR provided precise enough water depths so that field experiments were conducted. Water levels measured with a 20-cm long TDR probe agreed well with those measured with a pressure-type water gauge with a root mean square error (RMSE) of 0.28 cm. The water levels measured by TDR, however, might be affected by raindrop depositions.

Key words : TDR method, electromagnetic wave, rice paddy field, flooding depth, continuous measurement

1. はじめに

Time domain reflectometry (TDR) 法は、1980 年に Topp *et al.* が TDR 法で測定した土壌の比誘電率を使って土壌水分量の測定に応用して以来、広く普及するようになった。TDR 法の特徴は、(1)中性子法のように健康への影響の心配が無いこと、(2)キャリブレーションが基本的に不要で、温度・塩分の影響をほとんど受けないこと、(3)測定器の自動運転が可能であること、(4)単一のプローブで比誘電率と同時に電気伝導度の測定ができることなどである。TDR 法による土壌水分量と電気伝導度の測定法やプローブの形状などの詳細については、Noborio (2001), Jones *et al.* (2002), 登尾 (2003) などの総説を参照されたい。

TDR 法を使った土壌以外の水分量やその他の物理量

の測定も紹介されている。例えば、Nadler *et al.* (2003) はレモン樹の幹の水分量変化を測定して、レモン樹の水ストレス状態をモニターすることに成功した。Tang *et al.* (2001) は地滑り地帯に同軸ケーブルを埋設して、地滑りによる引っ張りで変化する同軸ケーブルのインピーダンスの変化から地滑りを検出する方法を提案した。また、Thomsen *et al.* (2000) は特殊な短絡型プローブを製作して、タンク内の水位変化を測定した。彼らは、ロッドの先端を短絡して固定することで、長さ 1.2m のロッドにはロッドの間隔を維持するためのスペーサーを不要にした。

近年、農業からの温室効果ガス発生を緩和する必要性が高まっている。モンスーンアジアでは、水田からのメタンと亜酸化窒素の発生が多い。水田におけるこれらの温室効果ガス発生は、水田土壌の酸化還元電位や基質の量などに依存する (Hou *et al.*, 2000)。土壌の酸化還元電

* 明治大学農学部 〒214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1

キーワード : TDR 法, 電磁波, 水田, 湛水深, 連続測定

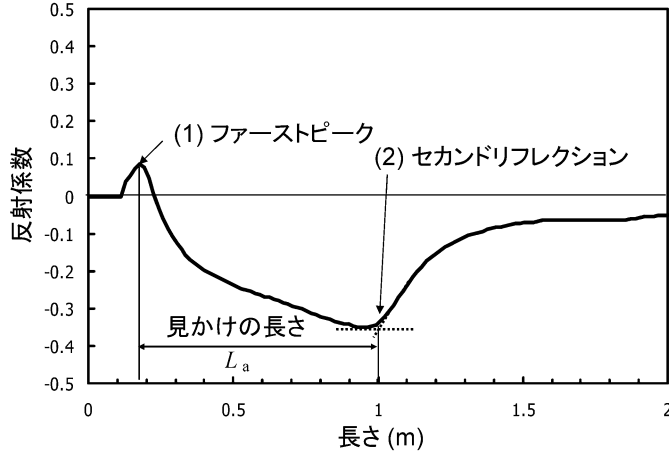


図-1 TDR 土壌水分計の反射波形の例。

Fig. 1 An example of TDR waveform.

位は湛水状態に影響を受けると考えられるので、湛水深を把握する必要がある。水田の湛水深は、従来、フックゲージを使って手で測定する場合が多かった。しかしこの方法では、経時的な変化を把握するのが困難である。近年では、圧力センサーを用いた水位の経時測定が普及している。また土壌水分量に関しては、マルチプレクサ等の多点同時モニタリングのための測器も市販されているため、TDR法を用いた多点自動計測が可能である。土壌水分モニタリングの際、余っているチャンネルを用いてTDR法で湛水深を測定できれば、使用する測定器の数を減らすことができるので、野外計測には好都合である。しかし、Thomsen *et al.* (2000)の方法では、特殊な短絡型プローブを使用するので、ロッドの見かけの長さを決定する際に、一般的な解析ソフトウェア（例えば、Campbell社のPCTDRやCR23X等の組込ソフトウェア）が使えない欠点がある。本報文では、土壌水分測定用の3線式TDRプローブを使って、湛水深の変化を測定し、現在一般的に普及している圧力式水位計の測定値と比較した。また、測定に関わる諸問題や解決手段についても検討したので、紹介する。

2. 理 論

TDR法では、水の比誘電率が空気や土粒子の比誘電率より大きいことを利用し、プローブを挿入した物質の比誘電率からその含水率を推定する。

プローブを挿入した物質の比誘電率 ϵ は、

$$\epsilon = \left(\frac{ct}{2L} \right)^2 \quad (1)$$

と計算される (Topp *et al.*, 1980)。ただし、 L はロッド長

(m)、 c は電磁波の真空中での伝播速度 ($=0.3 \text{ m ns}^{-1}$)、 t は電磁波が長さ L のロッドを往復移動するのに要する時間 (ns) である。TDRでは、ロッド終端でパルスの反射が生じる。電磁波がロッドを往復する際の反射波形 (図-1) において、 $ct/2$ をファーストピーク (図-1 (1)) とセカンドリフレクション (図-1の (2)) の距離、すなわち見かけのロッド長 L_a とする。従って比誘電率 ϵ は、 $L_a = ct/2$ を(1)式に代入して、

$$\epsilon = \left(\frac{L_a}{L} \right)^2 \quad (2)$$

のように算出する。

本研究では、ロッド周囲の物質を自由水面を含む水と空気であると仮定して、比誘電率を測定することで水深を測定する。TDRプローブが比誘電率の異なる二層に接しているとき、プローブ周囲の比誘電率は以下の式によって求められる (Schaap *et al.*, 2003)。

$$\epsilon_{\text{total}} = \left(\frac{L_1 \sqrt{\epsilon_1} + L_2 \sqrt{\epsilon_2}}{L} \right)^2 \quad (3)$$

ここで、 ϵ_{total} は二層全体の比誘電率、 L_1 、 L_2 はそれぞれ1層、2層に接触しているロッドの長さ、 ϵ_1 、 ϵ_2 はそれぞれ1層、2層の比誘電率である。本研究では、1層を空気の層、2層を水の層と仮定して、 ϵ_1 を空気の比誘電率 ($\epsilon_{\text{air}}=1.0$)、 ϵ_2 を水の比誘電率 ϵ_{water} と考えた。 ϵ_{water} の水温 T_w への依存性は、以下の式から求めることができる (Weast, 1986; Pepin *et al.*, 1995)。

$$\epsilon_{\text{water}} = 78.54 [1 - 4.579 \times 10^{-3} (T_w - 25) + 1.19 \times 10^{-5} (T_w - 25)^2 - 2.8 \times 10^{-8} (T_w - 25)^3] \quad (4)$$

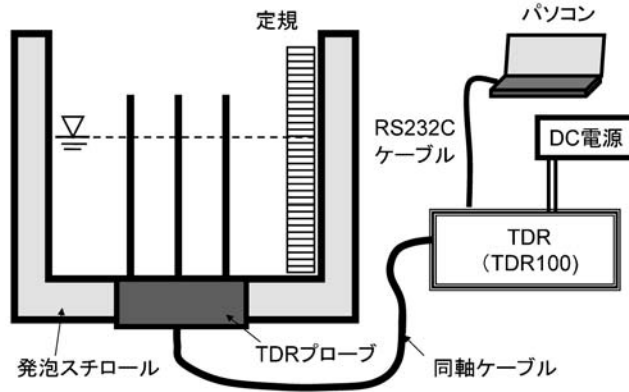


図-2 室内実験で用いた TDR 湛水深測定装置の模式図。

Fig. 2 Laboratory experimental design for measuring water depth with the TDR technique.

さらに、空気に接しているロッドの長さ $L_{\text{air}}=L_1$ 、水に接しているロッドの長さ $L_{\text{water}}=L_2$ (すなわち水深) とすると(2)式と(3)式から、

$$\frac{L_a}{L} = \frac{L_{\text{air}}\sqrt{\varepsilon_{\text{air}}} + L_{\text{water}}\sqrt{\varepsilon_{\text{water}}}}{L} \quad (5)$$

となる。(5)式を L_{water} について整理すると、

$$L_{\text{water}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{\text{water}}}} \left(\frac{L_a}{L} \cdot L - L_{\text{air}}\sqrt{\varepsilon_{\text{air}}} \right) \quad (6)$$

である。

ところで、図-2のようにロッド先端が鉛直上向きになるように TDR を設置したとき、電磁波は水に接した部分のロッドを通過した後、空気と接した部分のロッドを通過する。Mojid *et al.* (2002) は、湿潤土壌が乾燥土壌の上に存在する場合、ロッド先端部の含水率が非常に小さくなると、パルスの反射位置(セカンドリフレクションの位置)は、ロッド終端でなく乾湿層境界部で与えられることを示している。本研究でも、この例と同様に、セカンドリフレクションの位置が水面となると仮定した。したがって(5)式は、(7)式に書き換えられる。

$$\frac{L_a}{L} = \frac{L_{\text{water}}\sqrt{\varepsilon_{\text{water}}}}{L} \quad (7)$$

さらに、(7)式を水深 L_{water} で整理すると、

$$L_{\text{water}} = \left(\frac{L_a}{L} \right) \frac{L}{\sqrt{\varepsilon_{\text{water}}}} \quad (8)$$

となる。本研究では、(6)式と(8)式によって計算した L_{water} を比較した。

3. 実験方法

実験には直径 3.2 mm のステンレスロッドを使って作成した 3 線式の TDR プローブを使用した。PCV 板製台座に直径 3.2 mm の穴を一直線上に 20 mm 間隔で 3 個あけ、3 本のステンレスロッドが平行になるよう差込み、ロッドと台座をエポキシ系接着剤で固定した。中央のロッドに 50 Ω の同軸ケーブルの芯線を、両端の 2 本のロッドに編線をそれぞれ接続し、半田で固定し、エポキシ製充填剤でロッドと同軸ケーブルの接続部分を充填した。

本研究では、はじめに室内実験によって TDR 土壌水分計を用いて水深が測定できることを理論的に確認した。次に、野外の水田において、TDR 水位計と圧力式水位計で測定された水位と比較した。

室内実験は、気温約 20°C の実験室で実施した。上記のように作成したロッド長 10 cm, 15 cm, 20 cm の TDR を準備し、それぞれのプローブを、底面 15 cm × 21 cm, 高さ 12 cm の発泡スチロールケースの底面中央に、ロッド先端を上向きにしてプローブ基部をはめ込み設置し、Campbell 社製の TDR 装置 (TDR100) と図-2のように接続した。そして、水深を 0.3 cm から 10 cm の範囲内で 0.1 cm ずつ変化させながら水深と TDR100 の出力である L_a/L とそのときの水温を測定した。図-2のように TDR とパソコンを RS232C の通信ケーブルで接続し、反射波形状取ソフトウェア (PCTDR) を用いて、 L_a/L を測定した。なお、 L_a/L の決定に際して、それぞれの水深で 5 回反復測定し、その平均値をその水深における L_a/L とした。

野外実験は 2007 年 7 月 2 日 (累加日数 (DOY) 183) から 8 月 29 日 (DOY241) に実施した。2007 年 6 月 17 日 (DOY168: 定植から約 1 週間後) に、神奈川県平塚市内

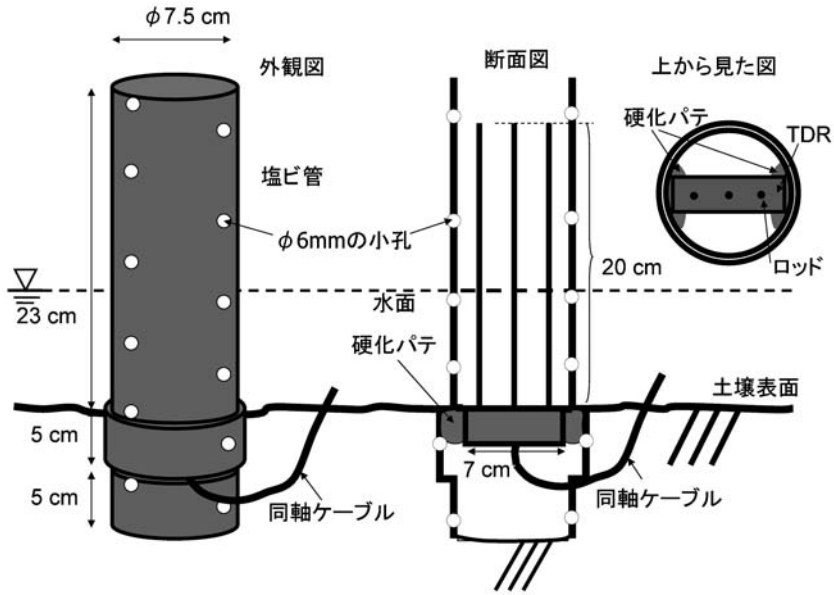


図-3 TDR 水位計の形状と水田への設置方法。

Fig. 3 The dimension of a TDR water-depth meter installed in a rice paddy field.

の管農条件下の水田に、TDR プローブを内径 75 mm、長さ 33 cm の塩化ビニル管に硬化パテで取り付けしたもの(図-3: 以下、TDR 水位計とする)を、水田の地表面がロッド基部と同じ高さになるようにベニヤ板を管頂にあてながら押し込み、土壌に固定した。なお、この塩ビ管には管内外が同じ水位になるように、四方から全長にわたって 5 cm 間隔で直径 6 mm の穴をあけた(図-3)。また、この水位計の塩ビ筒内には土が入らず、ロッドやプローブ基部のエポキシ部分は水または空気だけで接していることを確認した。この TDR 水位計を、マルチプレクサ(SDMx50, Campbell 社製)を介してデータロガー(CR23X, Campbell 社製)で制御した TDR100 と接続した。このように設置した TDR 水位計を用いて TDR 出力 L_w/L を測定した。同時に、圧力式水位計(KADECMIZU, コーナシステム社製)を TDR 水位計の近傍に設置した塩ビ製の水位観測管(内径 40 mm、長さ 100 cm、地上部分約 45 cm)内に設置し、水位を測定した。この水位観測管にも、TDR 水位計と同様に四方から全長にわたって 5 cm 間隔で直径 6 mm の穴をあけて、TDR 水位計の管内と圧力式水位計の管内が同じ水位になるようにした。

また、水田の表層水の表面水温と土壌表面の温度を T 型熱電対で、降水量を転倒ます式雨量計(No. 34-T, 大田計器製作所製)でそれぞれ測定した。これらのデータは、データロガー(CR23X, Campbell 社製)を使って 5 分間

隔で測定して記録した。

水田では、地表面の高さが変化する可能性があるため、測定中に地表面の高さと水面の位置を一度測定した。これ以降、その基準となる地表面の高さからの水深を水位と呼ぶことにする。その基準となる水位(基準水位)は DOY206 の 16 時 50 分に測定した。ある時刻の水位 WL (cm) は、そのときの TDR 水位計の水深 L_{water} から以下の式によって計算した。

$$WL = (L_{water} - L_{water,ref}) + WL_{ref} \quad (9)$$

ただし、 $L_{water,ref}$ と WL_{ref} は、ある時刻(ここでは水深を測定した DOY206 の 16 時 50 分)の L_{water} と水深の実測値 (cm) である。 L_{water} を(6)式で計算する際、水の比誘電率は、水面と 0 cm 深の地温の平均水温における値とした。

本研究では、TDR 水位計の誤差は、水位比較期間における圧力式水位計との差の平方平均二乗誤差 (RMSE) で示した。

4. 結果と考察

4.1 室内実験での水深実測値と TDR で測定した水深 L_{water} の関係

ロッド長 10, 15, 20 cm に対する水深の実測値と TDR で測定して(6)式と(8)式によって計算した水深 L_{water} の関係をそれぞれ図-4 (a) と (b) に示す。本実験中の水

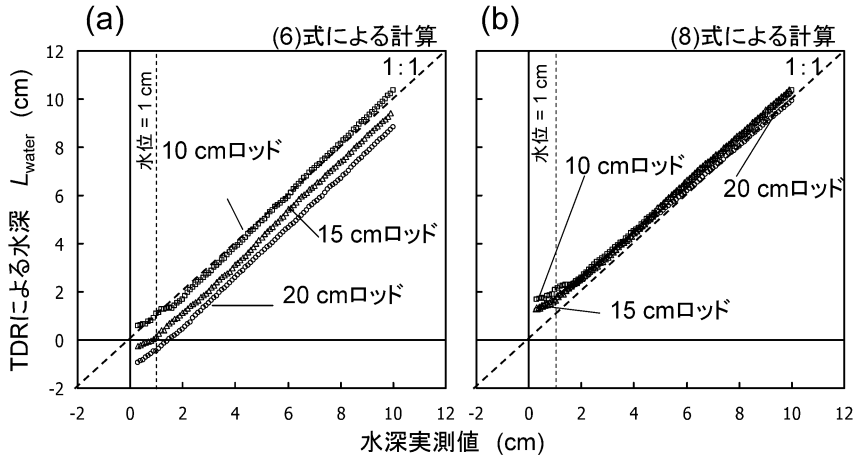


図-4 異なるロッド長での、水深の実測値と、(a) (6)式と (b) (8)式で計算された TDR 測定値 L_{water} の関係。破線は、水深 1.0 cm を示す。

Fig. 4 The relationship between manually-observed and TDR-measured water depths for different lengths of TDR rods. TDR-measured water depths L_{water} were calculated (a) with Eq. (6) and (b) with Eq. (8). Dashed lines show the water depths of 1 cm.

温は、14.5～20.0℃の範囲内であった。(6)式で計算された L_{water} と実測水深の関係は、ロッド長が長くなるほどズレが大きくなったが、(8)式で計算した L_{water} は全てのロッド長で 1:1 直線に近かった。1.0 cm 以上の水深の時に (8)式で計算した L_{water} の平方平均二乗誤差 root mean square error (RMSE) は、それぞれ 0.51 cm, 0.53 cm, 0.30 cm となった。また、(6)式で計算した L_{water} の RMSE は、ロッド長 10 cm, 15 cm, 20 cm に対してそれぞれ、0.19 cm, 0.73 cm, 1.36 cm となった。(8)式を使う方が (6)式に比べて長いロッドでも RMSE が小さかった。従ってこれ以降、(8)式を用いて L_{water} を計算することにする。

全てのロッド長で L_{water} は、水深が大きときは実測値と近かったが、水深が小さくなるにつれ実測値より大きくなった (図-4(b))。水深が小さくなると L_{water} が水深実測値を上回ったのは、水深が小さいほど L_{water} が空気の影響を受けやすくなるからと考えられる。水深が十分に大きいときは、TDR の反射波形のセカンドリフレクション (図-1) は界面の位置 (Mojid, 2002)、すなわち、水面の位置で生じ、 L_{water} と水深の実測値は概ね一致する。一方、水深が小さく、ゼロに近づいたとき、空気の比誘電率が 1 であるので、 L_a/L が 1 となり、ロッド長が 20 cm の場合 L_{water} は 2.2 に近くと予想される。TDR で推定した L_{water} は 1.2 に近づき、実測の水深 (= 0.3 cm) を上回っていた。さらに本研究で使用した 1 GHz 帯の TDR では、水分量が小さくなると反射波形が

曖昧になり、見かけの長さ L_a の誤差も大きくなることが報告されている (登尾ら, 2005)。このように水深が小さくなるほど、セカンドリフレクションの位置は水面の上に存在する空気の影響を受け、 L_{water} が水深の実測値を過大評価するので測定誤差も大きくなると考えられる。

4.2 TDR 水位計の設置時の留意点

水田における、圧力式水位計で測定した水位 WL_P と TDR 水位計で測定した水位 WL_T の関係を図-5 に示す。水位が 2.0 cm 以上のとき、 WL_T は、 WL_P とほぼ一致した。圧力式水位計の水位 WL_P が 1.0 cm 以下のときは、TDR 水位計の水深 WL_T は離散的に上昇した。また、 WL_P が 1.0-2.0 cm のときは、 WL_T が WL_P を上回った。図-5 のように WL_P が 1.0 cm 以下のときに WL_T と WL_P が大きく異なったのは、本研究で使用している TDR の波形読み取りソフトの技術的問題と考えられる。本研究で使用している TDR 組み込みソフトは、測定された波形を読み込み、その変化をもとにファーストピークとセカンドリフレクションの位置を特定し、その距離 L_a を計算するが、ロッドが水に接していない場合は、セカンドリフレクションの位置が、誤った位置に特定されてしまうことがある。その結果、実際の水位と大きく異なったと考えられる。また、 WL_P が 1.0-2.0 cm のときに WL_T が WL_P を上回ったのは、前節に述べたとおり、水深が小さかったため L_{water} の値が空気の影響を受けやすくなるからと考えられる。

また、図-5 から、 WL_P が 1.0 cm 以下のときは、 WL_T

と WL_P は直線関係にないことがわかる。これは、 WL_P が 1.0 cm 以下のときは、地表面標高が変化するため水面が TDR ロッドの部分より低い位置になっていたことが原因として考えられる。本研究では、設置時 (DOY 168) に、水田の地表面が TDR 基部と同じ高さになるよ

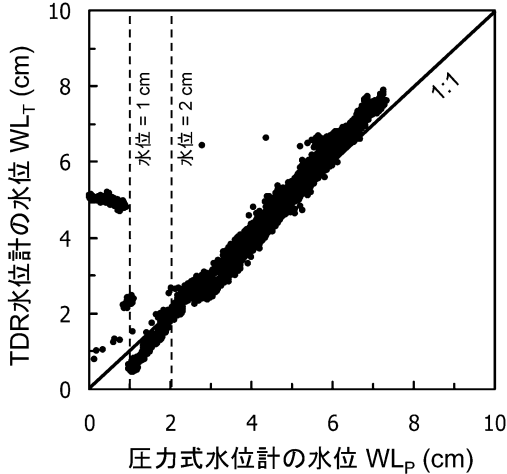


図-5 水田で測定した TDR 水位計から得られた水位 WL_T と圧力式水位計で測定された水深 WL_P の関係。水深が 0 cm 以下のデータは除いた。実線は、1:1 直線を示す。破線は、水位 1.0 cm と 2.0 cm を示す。

Fig. 5 The relationship between water levels measured with TDR, WL_T , and those measured with a pressure-type water gauge, WL_P , in a rice paddy field. Data for $WL_P < 0.0$ cm were not shown. A solid line shows a 1:1 line. Dashed lines show the water levels of 1 cm and 2 cm.

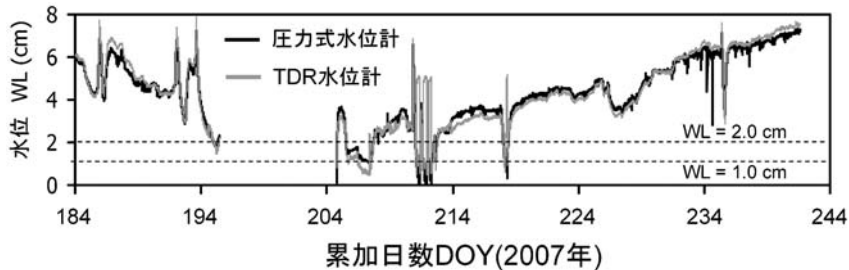


図-6 圧力式水位計と TDR 水位計で測定した水田水位の経時変化。横軸は 2007 年の累加日数 DOY を示す。破線は、水位 1.0 cm と 2.0 cm を示す。

Fig. 6 Temporal changes in water levels measured with a pressure-type water gauge and TDR. The horizontal axis shows the day of year (DOY) in 2007. Dashed lines show the water levels of 1 cm and 2 cm.

うに固定したが、設置後に水田地表面がわずかに沈下してしまっただと考えられる。実水位 WL_{ref} は DOY206 に測定したがこのときは既に地表面が沈下した後であり、TDR のロッド基部が地表面より約 1 cm 高かったと考えられる。ロッド基部より水位が低いと水位が測定できない TDR 水位計を用いて水田の水位を連続的に測定するには、水田の地表面は、水位変化に伴って地表面が上昇・沈下を繰り返すことを念頭におき、ロッド基部が土壌表面より十分に低い位置になるように設置することが必要である。

4.3 水位の測定精度と誤差の要因

図-6 は圧力式水位計と TDR 水位計で測定した水位の経時変化である。 WL_P が 2.0 cm 以上のときは、概ね一致したが、1.0 cm 以下の時は離散的に変化した。 WL_P が 1.0 cm 以下のとき WL_T が離散的に変化したのは、前節に述べたように、水面が TDR ロッド基部より低い位置にあったため、TDR 装置の組み込みソフトが電磁波の反射波形を適切に解析することができなかったためと考えられる。

図-7 は、(a) 降水量、(b) 圧力式水位計と TDR 水位計によって測定した水位の差 ($WL_P - WL_T$) の経時変化である。 WL_P が 2.0 cm 以上のときにおける WL_P と WL_T の差の絶対値は、概ね 0.5 cm 以内であった。また、 WL_T の WL_P に対する RMSE は 0.28 cm であった。

TDR で測定した水位 WL_T では、降雨日に雨滴の影響とみられるノイズが観察された。図-8 は降雨日前後の (a) 降雨強度 (mm h^{-1}) と、5 分間隔で測定した (b) 圧力式と TDR 式の水位計測定値と (c) 両水位計の測定値の差の経時変化を示す。DOY194 の 12 時 30 分頃から 15 時 00 分頃にかけて TDR 水位計で測定した水位が約 0.5 cm 以上、一時的に数回上下動した。なお、転倒ます雨量計による降雨は、ノイズの直前と約 12 時間後の 23

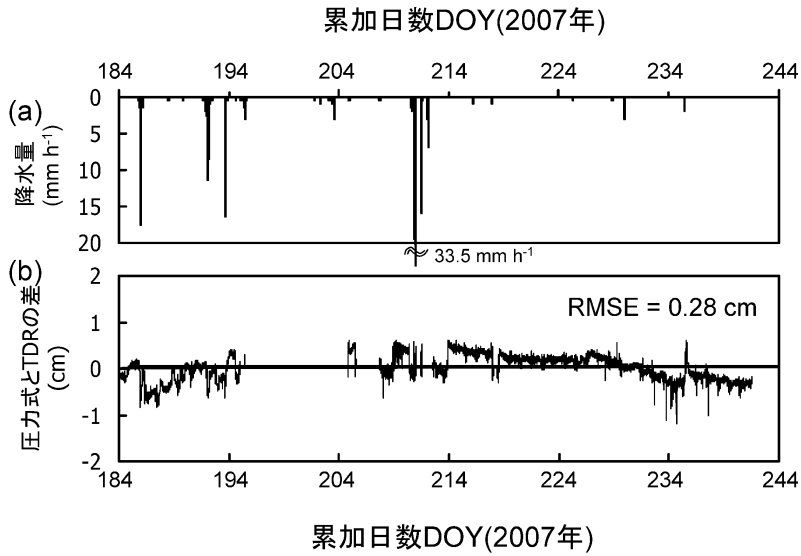


図-7 (a) 降水量 と (b) 圧力式水位計と TDR 水位計で測定された水位の差の経時変化。

Fig. 7 Temporal changes in (a) hourly precipitation and (b) the differences of water levels measured between TDR and a pressure-type water gauge.

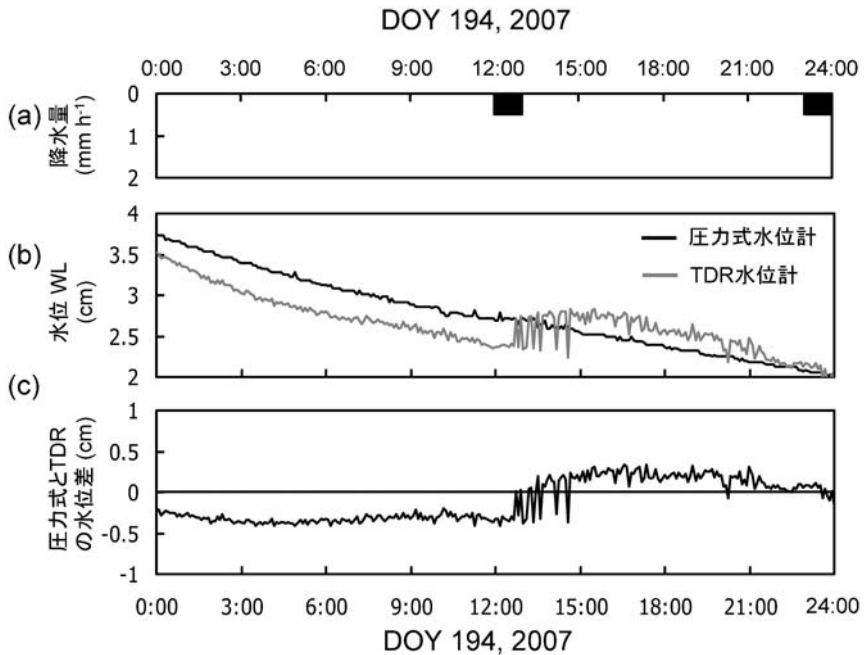


図-8 降雨日に観測された TDR 水位計のノイズの一例。(a) 時間降水量, (b) 圧力式水位計と TDR 水位計で測定された水位, (c) 圧力式と TDR 式の水水位計出力の差。

Fig. 8 An example of the TDR-water gauge noise observed on a rainy day. (a) Hourly precipitation (mm), (b) temporal changes in water levels measured every five minutes with pressure-type and TDR water gauges, and (c) the differences of water depths measured between pressure-type and TDR water gauges.

時 30 分過ぎに検出された。転倒ます雨量計で測定する雨水は、雨量計に捕捉された雨水が 0.5 mm 分たまった時に降雨として検出されるため、ノイズが現れていた時間も、実際に降雨現象があった可能性がある。したがって、図-8 で観測した WL_T の一時的な上下動は、TDR ロッドに付着した雨水の影響によると考えられる。しかし、DOY216 や DOY229 のように降雨日でもノイズがみられないことがあった。

ここで TDR ロッドに付着した雨滴が TDR 水位計の出力に及ぼす影響を検討する。雨滴の付着を再現するために、室内で図-2 のように上向きに設置したロッドに霧吹きで水を吹きかけて電磁波の反射波形を観察した。その結果、水滴付着と同時に波形が一時的にわずかに変化することはあったが、すぐに元に戻った。ここでは、一時的な反射波形の変化が TDR の出力 L_a/L に及ぼす影響を量的に表わすことができなかったが、TDR 水位計への水滴付着によって、水位の測定値に影響を及ぼす可能性があることが示唆された。

5. おわりに

本稿では、TDR 土壌水分計を用いて、水位計を作成し、測定値の妥当性と測定に向けた実用上の問題を検討した。室内実験の結果、TDR で測定した水深 L_{water} は、セカンドリフレクションが水面の位置で生じると仮定して計算すると、実際の水深とよく一致した。こうして計算した L_{water} は、水深が大きいときは実測値に近づいたが、水深が小さいときは実測値より大きくなった。しかし、水深がある程度大きければ、水深実測値の L_{water} に対する回帰式の傾きが 1 に近くなり、TDR 法で水位が測定できることが確認された。しかし、ロッド長と測定可能な水深の範囲の関係を明確にすることができなかった。その関係がわかれば、本稿で紹介した水位計の改良や設置方法について、有益な情報が得られると期待される。

次に、TDR で測定した水位 WL_T と圧力式水位計で測定した水位 WL_P の関係を検討した。その結果、 WL_P が +2.0 cm 以上のときは、 WL_T と WL_P はほぼ一致したが、+2.0 cm 以下のときは、 WL_T は過大評価された。また、水田地表面の位置（高さ）が変化しやすいため、実際の野外測定の際は、TDR 水位計のロッド基部が水田地表面より十分に低い位置になるように設置するべきであることもわかった。

TDR と圧力式水位計で測定した水位を比較した結果、その差は概ね ± 0.5 cm の範囲内であった。圧力式水位計測定値に対する TDR 水位計測定値の RMSE は 0.28 cm であり、よく一致していた。TDR 水位計の出力は降雨日にノイズが出ることもあり、雨滴付着が水位の測定

に影響する可能性があることが推察された。

本研究では、TDR 水位計と同時に圧力式水位計でも水位を測定したので、ノイズかどうかの判別が容易であった。しかし、TDR 水位計のみで水位を測定する際は、測定したデータがノイズかどうかの判別を行う必要がある。本方法の普及のためには、ノイズの判別の規準作りが必要であろう。また、本報では、水位を 5 分間と短い間隔で測定したので、ノイズかどうかの判別が比較的容易に行うことができたと考えられる。本方法で水位をモニタリングする際は、ノイズが生じる可能性があると考えたうえで、測定や記録間隔を短くする必要があると考えられる。

本稿で紹介した TDR 法は、プローブの形状が単純で既往の組み込みソフトが利用可能という利点がある。それゆえ、Campbell 社の TDR100 の土壌水分測定システムを利用する際、余ったチャンネル一つで水位測定ができれば、新たな水位計の準備の必要がなくなり、安価で簡便かつ効率的な水位のモニタリングが可能となることが期待される。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、神奈川県平塚市の熊澤肇治氏より圃場の使用を許可していただいた。神奈川県農業研究センターの山田良雄氏には、測定圃場の選定の際ご協力を頂いた。北海道大学大学院農学研究院の浦野慎一教授より、圧力式水位計を借用した。また、本報を作成するにあたり、査読者の方々より、貴重な助言を賜った。この研究の一部は（財）日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究（A）（課題番号：18208021）及び、若手研究（B）（課題番号 19780183））の補助を受けて行った。記して謝意を表します。

文 献

- Jones, S.B., Wraith, J.M. and Or, D. (2002): Time domain reflectometry measurement principles and applications. *Hydrological Processes*, **16**: 141-153.
- Hou, A.X., Chen, G.X., Wang, Z.P., van Cleemput, O. and Patric, W.H. Jr. (2000): Methane and nitrous oxide emissions from a rice field in relation to soil redox and microbiological processes. *Soil Science Society of America Journal*, **64**: 2180-2186.
- Mojid, M., Toride, N. and Cho, H. (2002): The effect of heterogeneous soil-water distribution on the TDR measurement of soil-water content. 土壌の

- 物理性, **90** : 11-19.
- Nadler, A., Ravehb, E., Yermiyahub, U. and Green, S. R. (2003) : Evaluation of TDR use to monitor water content in stem of lemon trees and soil and their response to water stress. *Soil Science Society of America Journal*, **67** : 437-448.
- Noborio, K. (2001) : Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry : a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, **31** : 213-237.
- 登尾浩助 (2003) : 実践 TDR 法活用—土壤中の水分・塩分量の同時測定—。土壤の物理性, **93** : 57-65.
- 登尾浩助・君島章太郎・石崎武志・武田一夫 (2005) : 20GHz-TDR 装置を使った比誘電率測定の特徴, 保存化学, **44** : 97-101.
- Pepin, S., Livingston, N. J. and Hook, W. R. (1995) : Temperature-dependent measurement error in time domain reflectometry determination of soil water. *Soil Science Society of America Journal*, **59** : 38-43.
- Schaap, M.G., Robinson, D.A., Friedman, S.P. and Lazar, A. (2003) : Measurement and modeling of the TDR signal propagation through layered dielectric media. *Soil Science Society of America Journal*, **67** : 1113-1121.
- Tang, L., Tao, X. and Choy, C.-I. (2001) : Possibility of using a coaxial cable as a distributed strain sensor by time domain reflectometry. *Smart Materials and Structures*, **10** : 221-228.
- Thomsen, A., Hansen, B. and Schelde, K. (2000) : Application of TDR to water level measurement. *Journal of Hydrology*, **236** : 252-258.
- 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** : 574-582.
- Weast, R.C. (ed.). (1986) : *Handbook of chemistry and physics*. pp.E51-E53. 67th ed. CRC Press. Boca Raton, FL.

要 旨

水田の温室効果ガス挙動を理解するには、湛水深の経時的な測定が欠かせない。本稿では、time domain reflectometry (TDR) 法を用いて、簡便に水位を測定する手法を紹介した。室内実験の結果、さまざまなロッド長の TDR プローブで測定した水深は、水深が大きいときに実測の水深と一致し、TDR 法を用いれば水深が測定できることが確認された。水田における測定の結果、降雨日にノイズが現れる可能性が示唆されたものの、20 cm 長の TDR ロッドを使った TDR 水位計の水位は、圧力式水位計の値と root mean square error (RMSE) 0.28 cm でよく一致した。

受稿年月日：2007 年 10 月 24 日
受理年月日：2008 年 4 月 30 日