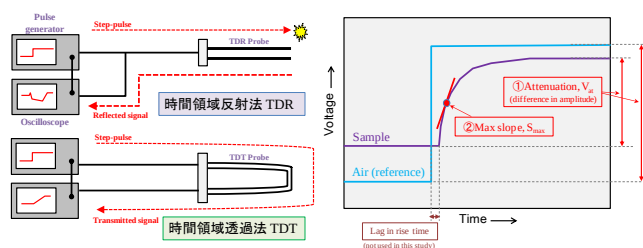


TDT センサーの改良による野外土壤水分探査への適用

京都大学大学院農学研究科 ○正岡直也・小杉賢一朗

1. 研究背景

山地斜面の土壤水分に基づいた崩壊危険度評価のために水分センサーを用いた野外観測が積極的に行われるようになり、精度と信頼性の高さから時間領域反射法(Time Domain Reflectometry, TDR)が頻繁に利用されている。しかし、TDR で計測する電気パルスの反射信号(図 1)は波形が複雑でノイズを多く含み、正確に読み取るには高い帯域幅とサンプリングレートを持つ高価・大型のオシロスコープ(価格 80 万円～)が必要となり、コスト面から野外観測で気軽に用いにくいという問題がある。TDR の代替法として、時間領域透過法(Time Domain Transmissiometry, TDT)が近年土壤物理学分野で検討されている¹⁾。TDR の反射信号とは異なり透過信号を計測するため(図 1)、同軸ケーブルが往路と復路で 2 本必要であり、プローブ先端がループを形成しているのが特徴である。TDT の最大の利点は、反射波ノイズが混入しにくく波形が単純なため読み取り精度が高いことにある。本研究では、性能が低い代わりに安価・小型で野外利用しやすい USB オシロスコープ(価格 5 万円程度)を用いて TDT システムを運用し、限られた情報から含水率を特定する新たな解析手法を検討することを目的とした。



(左) 図-1 TDR と TDT の測定原理

(右) 図-2 TDT 波形解析の模式図

コイル型の TDT プローブを作成した。プローブは 2 本のステンレスワイヤ ($\phi = 0.55 \text{ mm}$) を、透明 PVC パイプ ($\phi = 16 \text{ mm}$) の外周に平行に 5 周巻きつけた構造となっている。TDT 波形の計測と分析には、USB オシロスコープ (Picoscope 2206A, Pico Technology) を用いた。主な性能は帯域幅 50 MHz、最大サンプリングレート 500 MS/s (分解能 2 ns) である。TDT 波形解析の模式図を図 2 に示した。一般的な TDT の水分計測手法で用いる波形の上昇開始時間は、本研究で用いる USB オシロスコープの分解能では検出できない。その代わりに低分解能でも検出可能な①電圧減衰量(V_{at})と②勾配最大値(S_{max})の 2 項目を測定した。

2.2. 実験方法

図 3 に示す実験装置を用いてセンサーのキャリブレーション実験を行った。センサーを埋設した土壌(豊浦標準砂)を、EC を調整した試料水で飽和させた後、セラミックフィルタに約 250 cmH_2O の負圧を与えて排水させる過程で TDT 波形を 17~18 点で計測し、それぞれ排水量から含水率を計算した。試料水の EC を 7 段階で変化させ、同様の実験を繰り返した。

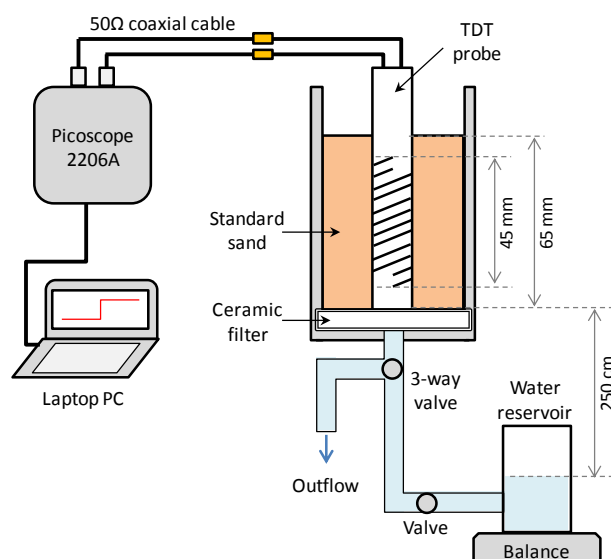


図-3 実験装置

2. 実験装置・手法

2.1. 作製した TDT センサーと計測システム

本研究では土壌への挿入しやすさを考慮して、

3. 結果と考察

3.1. 含水率と EC に対する V_{at} と S_{max} の変化

計測した全ての TDT 波形から得られた電圧減衰量 (V_{at}) と含水率 (θ) の関係を図 4a に示す。EC (σ) が一定の条件下で、 V_{at} は θ と非常に良好な正の相関関係を示した。回帰曲線の傾きは、 σ が大きくなるほど急になる傾向がみられた。また得られた最大勾配値(S_{max})と θ の関係を図 4b に示す。 σ が一定の条件下で、 S_{max} は θ と良好な負の相関関係を示した。回帰曲線の傾きは、 σ が大きくなるほど急になる傾向がみられた。また、ここで得られた回帰曲線を用いて、任意の θ における V_{at} および S_{max} を算出した (図は省略)。

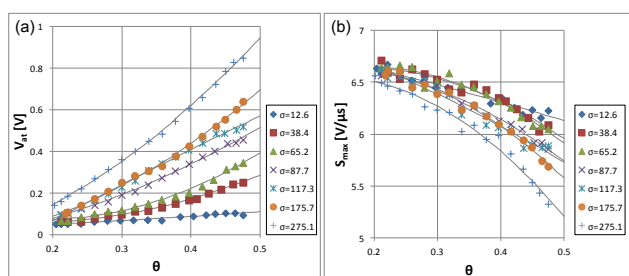


図-4 (a) $V_{at} \times \theta$ (b) $S_{max} \times \theta$ の計測値と回帰曲線

次に図 5 に示すように、 V_{at} と S_{max} を同一平面上にプロットし、両者の関係が θ と σ の関数で表せるかを検討した。 σ が一定の条件下では、 V_{at} と S_{max} は良好な負の相関関係を示し (図 5a)、切片と傾きを σ の関数と仮定して式(1)に示す一次式を回帰直線としてフィッティングした。また θ が一定の条件下でも (図 5b)、切片と傾きを θ の関数と仮定して式(2)に示す二次式を回帰曲線としてフィッティングした。

…式(1)

…式(2)

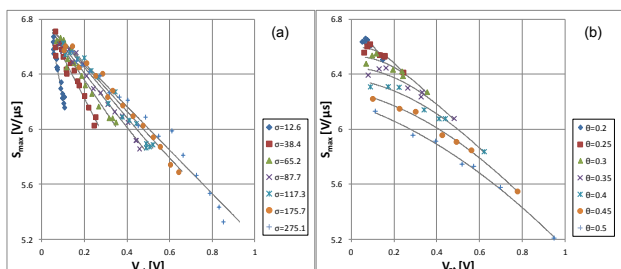


図 5 $V_{at} \times S_{max}$ 計測値と回帰直線／曲線
(a) σ 一定 (b) θ 一定の場合

式(1)のパラメータ $A(\sigma)$, $B(\sigma)$ に対し σ を変数として、式(2)の $C(\theta)$, $D(\theta)$, $E(\theta)$ に対し θ を変数として指数関数を良好にフィッティングすることができた (式は省略)。以上から、計測した TDT 波形より V_{at} と S_{max} を検出し式(1),(2)に代入すれば、それぞれ σ , θ が得られる。ただし式形が複雑なため、Microsoft Excel のソルバー機能などの数値最適化アルゴリズムを用いる必要がある。

3.2. 推定精度

図 6(a)に θ の実測値と推定値 (V_{at} と S_{max} に基づく計算値) の比較を示す。プロットは概ね 1:1 の直線付近に集まっており、本手法が θ について良好な推定精度を有していることがわかった。また θ が大きいほど推定精度が高くなる傾向がみられた。 σ による推定精度の違いはみられなかった。次に、図 6(b)に σ の実測値と推定値の比較を示す。 σ が大きくなるほどばらつきが大きく、推定精度は高いとはいえなかった。主に農耕地を対象とした TDT の既往研究¹では 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以上の範囲を対象とすることが多いが、これに対し一般的な山地渓流水を想定した本研究の検討範囲($12.6 < \sigma < 275.1 \mu\text{S}/\text{cm}$)は小さく、 σ 計測への適用は難しいと考えられる。それでも本手法は安価・小型の計測装置のみを用いて、土壌水の σ に影響されることなく θ を高精度で推定できる点で画期的であり、将来的に TDR に代わる野外土壌水分計測手法になりうると考えられる。

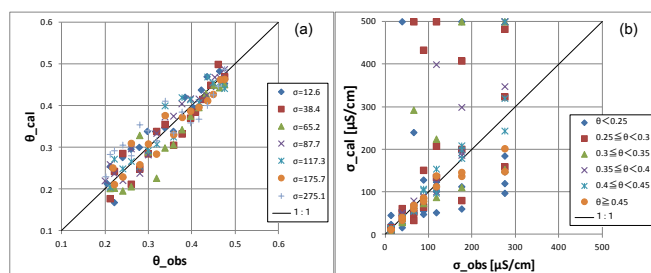


図 6 (a) θ , (b) σ の実測値 $\times$ 推定値

謝辞：本研究は平成 29 年度砂防学会若手研究助成によって実施しました。

参考文献：(1). 宮本ら(2013): 農業農村工学会論文集, 81(6), 513-519.