

# 土壌水分特性曲線を用いた TDR 法による土壌水分測定に関する研究

長岡技術科学大学 非会員 佐藤遥  
長岡技術科学大学 正会員 陸旻皎

## 1. はじめに

土壌水分特性曲線は土壌中の水分分布（移動）の予測をするために用いられ、曲線を描くための数式パラメータ土壌水分量の実測データによって与えられる。土壌水分量の測定方法として、広く利用されているのは Topp ら<sup>1)</sup>によって提唱された TDR（Time Domain Reflectometry）による土壌水分測定である。当初、TDR による測定では有意な温度依存性はないとしていたが、山本ら<sup>2)</sup>によって土壌温度そのものが TDR 土壌水分量計測値に影響を与えることが明らかとなった。山本は TDR 法による計測をする際、土壌中の水分分布予測として van Genuchten が提案したモデル（以下 VG モデル）を用いていたが、模擬土壌の VG モデルパラメータとして使用した値<sup>3)</sup>は高サクシヨンのデータが得られていない不完全なパラメータであった。本研究では高サクシヨンのデータを得るための実験を行い、VG パラメータの再検討を行った。また、算出したパラメータを使い先行研究と比較するため TDR による土壌水分測定も行った。

## 2. パラメータ検討

### 2.1. 既存パラメータについて

山本は模擬土壌としてガラスビーズを用いており、その VG パラメータとして西脇<sup>3)</sup>が算出した値を使用している。西脇はパラメータを求めるために土壌内の水分量を表す指標として土壌水分欠損量（SMD）とい

う考えた方を用いている。SMD は図 1 に示す装置を用いて測定した。円筒形容器の長さは 1600mm であり、容器内に飽和させたガラスビーズを充填している。図の破線で囲まれた部分が上下に動くようになっており、この部分を下げることで地下水面が下がり、保持できない水が排水され、SMD を測定することができる。

### 2.2. 三軸試験

西脇は 2.2 節で述べた実験より VG パラメータを算出したが、装置の関係上、低サクシヨンのデータのみで算出しており、土壌水分特性曲線にすると地下水面が浅い位置で飽和に近づくものであった。よって、本研究では、写真 1 に示す三軸試験機を用いて高サクシヨンを加えたときの含水率変化のデータを得る実験を行った。三軸試験では低サクシヨンのデータを得られないため、西脇のデータと本実験データを合わせてパラメータの検討を行う。試験機内に粒径 0.150～0.180mm のガラスビーズを用いて作成した供試体を設置し、圧密排水試験を実施した。実験では 25, 50, 100, 200, 400kPa の圧力を加え、その間断的に排水量を測定する。実験後、得られた排水量から体積含水率を算出する。

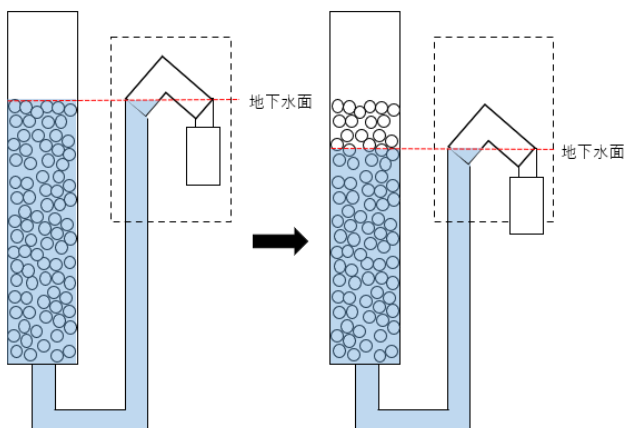


図 1 実験装置<sup>3)</sup>



写真 1 実験装置

## 3. TDR による土壌水分測定

### 3.1. 測定原理

TDR は土の比誘電率を測定し、体積含水率との校正曲線に当てはめて推定する方法である。本研究で使用したセンサーを写真 2 に示す。制御部に 2 本のロッドがついている構造となっており、このロッド部分に電



写真2 TDRセンサー (C-CS655)

磁波を発射し、先端部で反射して戻ってくるまでの時間を計測する。電磁波の伝播速度はロッド周辺の媒体の誘電率によって変化する特性を持つため、これより土壌の誘電率を求めることができる。誘電率から体積含水率への変換は式に示す Topp の式により行う。

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

ここで、 $\theta$ は体積含水率、 $K$ は土壌の比誘電率である。

### 3.2. 実験

本実験では山本の結果と比較するため同じ装置を用いて実験を行った。図2に示すようにアクリル製円筒形容器に模擬土壌としてガラスビーズを充填した。装置は図2のようにセンサーを垂直、水平に設置できるようになっている。設置方法を変えると土壌内の水分分布は図3のようになると考えられ、TDRセンサーの構造上、垂直に設置した場合、制御部とロッドの継ぎ目とロッド先端部では水分量に差が生じる。水平に設

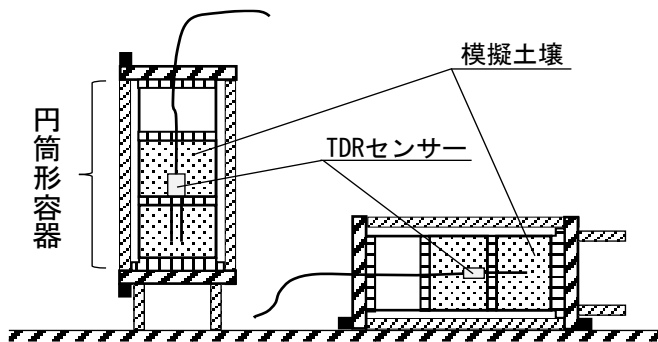


図2 実験装置<sup>2)</sup>

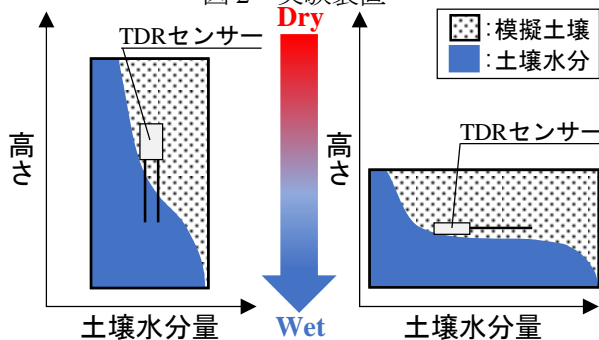


図3 土壌水分分布<sup>2)</sup>

置する場合は水分分布の偏りを抑えることができる。実験は恒温室で行い、土壌温度を5°Cから40°Cまで変化させる間 TDR センサーによって断続的に体積含水率を測定する。ガラスビーズは保水性試験と同様の粒径 0.150~0.180mm を使用し、充填する際には体積含水率が3%になるように調整した。

## 4. 実験結果及び考察

### 4.1. VG パラメータ

西脇の SMD のデータと本研究で得られたデータをそのまま合わせることはできないため、まず、西脇の SMD のデータから体積含水率の値に変換してから合わせた。2つのデータの体積含水率と地下水面位置から VG モデルにフィッティングした結果、表1に示すパラメータと図4に示す水分特性曲線得ることができた。

表1 VG パラメータ

	佐藤	西脇	山本
$\theta_s$	0.4316	0.4582	0.4582
$\theta_r$	0.0168	0.1418	0
$\alpha[\text{mm}^{-1}]$	0.0020	0.0016	0.0016
$n$	3.4846	11.3078	11.3078
$m$	0.7130	0.9116	0.9116

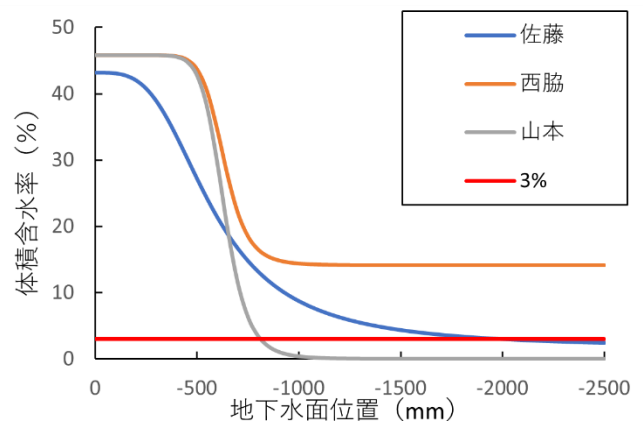


図4 土壌水分特性曲線

VG モデルについては次節で詳しく述べるが、表1には今回検討したパラメータのほかに西脇が算出した値も載せている。また、山本は西脇のパラメータを用いて模擬土壌内の水分分布を予測しようとしたが、 $\theta_r$ の値が高く、模擬土壌平均含水率を3%、5%など低く設定した場合、曲線に表現できないため $\theta_r = 0$ として計算を行っている。

今回得られたパラメータは西脇と比べると $n$ の値が低くなっていることがわかる。このパラメータはグラフの

滑らかさに影響を与えるものであり、土壌の間隙率が小さくなるほど保水力が高くなりグラフは直線に近い形状になる。三軸試験により高いサクションの含水率のデータを得られたことから、より深い位置の土壌水分の動きを表せていると判断できる。

#### 4.2. 土壌水分分布

本研究で用いた VG モデルは以下の式である。

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (1 + |\alpha z_g|^n)^{-m} \quad (4.1)$$

ここで、 $Se$ は有効飽和度、 $\theta_s$ は飽和体積含水率、 $\theta_r$ は残留体積含水率、 $z_g$ (mm)は地表面を基準とした地下水面位置、 $\alpha$  ( $\text{mm}^{-1}$ )は空気侵入圧ポテンシャルの逆数、 $n, m$  ( $= 1 - 1/n$ )は孔隙分布に関するパラメータである。VG モデルの曲線の形状を与えるパラメータは $\alpha, n, m$ である。地下水面位置 $z_g$ は模擬土壌内には存在せずさらに深い位置にあると考えられる。そのため、模擬土壌の平均含水率を任意に設定した時の地下水面を算出する必要がある。まず、式 4.2 により土壌内の任意の位置  $z$  の体積含水率を表せる。

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)(1 + |\alpha(z_g - z)|^n)^{-m} \quad (4.2)$$

ここで、鉛直上向き方向を正、垂直設置では地表面、水平設置では中心位置を  $z=0$  としている。次に模擬土壌全体の $\theta$ は、垂直設置の場合式 4.3、水平設置の場合式 4.4 によって表現できる。

$$\int_0^L \theta A dz = \theta_m A L \quad (4.3)$$

$$\int_{-R}^R 2\theta D \sqrt{R^2 - z^2} dz = \theta_m A D \quad (4.4)$$

ここで  $L$ [mm]は模擬土壌の鉛直方向長さ、 $A$  [ $\text{mm}^2$ ]は模擬土壌を垂直方向で見たときの底面積、 $R$ [mm]は半径、 $D$ [mm]は模擬土壌の水平方向長さ、 $\theta_m$ は模擬土壌全体の平均含水率である。以上より垂直設置では式 4.2 と式 4.3、水平設置では式 4.2 と式 4.4 を用いて、模擬土壌の平均含水率を任意に設定した時の地下水面位置を算出することができる。算出した結果、表 2 のようになった。

表 2 地下水面位置

	地下水面位置[mm]			
	3%	5%	10%	20%
垂直(1)	-1103	-1058	-986	-882
水平(1)	-830	-787	-726	-652
垂直(2)	-2253	-1617	-1170	-861
水平(2)	-2007	-1379	-933	-629

※(1)山本のパラメータ、(2)本研究のパラメータ  
表 2 より山本の推定では 200mm ほどの狭い範囲で急激に含水率が変化することがわかる。新たなパラメータでは 1000mm 以上かけて緩やかに分布していくことがわかる。

また、模擬土壌内の水分分布として表したものを図 5 に示す。それぞれ模擬土壌平均含水率を 3~20% で変化させたときの水分特性曲線である。山本が使用したパラメータでは、土壌内において水分移動が多く行

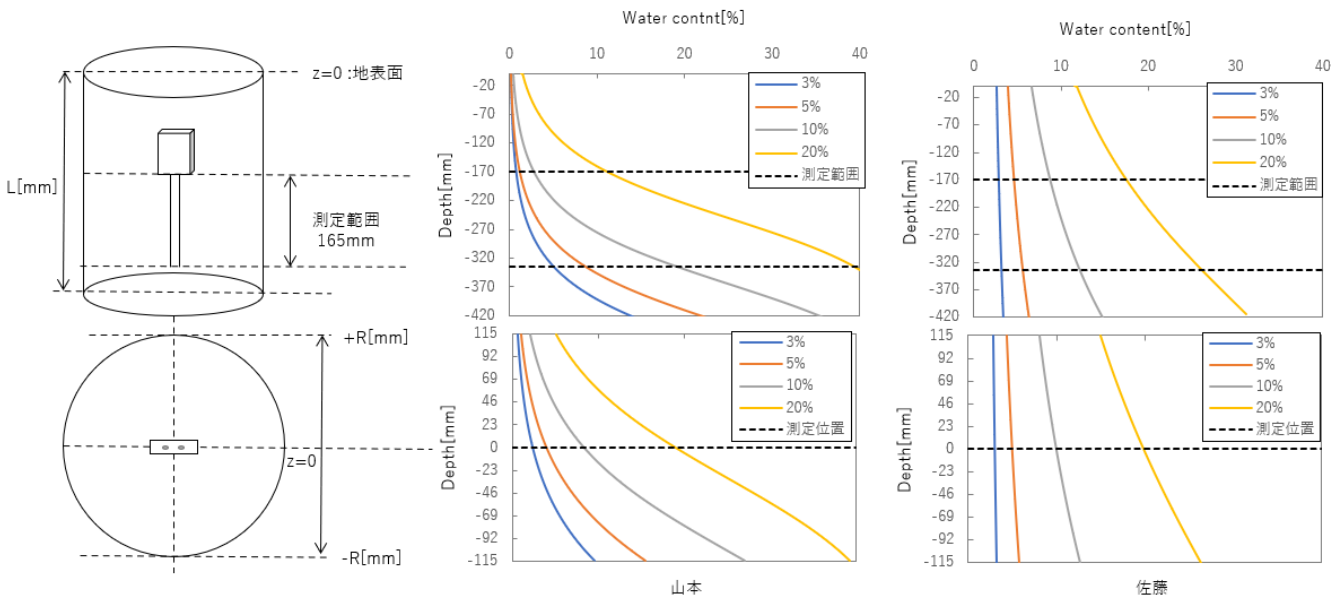


図 5 模擬土壌内水分分布

われていると推定でき、新たなパラメータを用いると変化が少ないことがわかる。

次に設置方法によるセンサーロッド付近の含水率を見ていく。土壌平均含水率 3%のときの値を表 3 に示す。

表 3 ロッド付近含水率 (3%)

	体積含水率 (%)			
	平均	中心	上部	下部
垂直(1)	2.288		0.733	5.056
水平(1)	2.724	2.378		
垂直(2)	3.110		2.889	3.161
水平(2)	3.008	3.006		

※(1)山本のパラメータ, (2)本研究のパラメータ

表 3 にはセンサー測定範囲の平均値, 水平設置の場合は測定範囲の中心部, 垂直設置の場合はセンサーロッドの上部と下部の値を示している。垂直設置で山本のパラメータを使うと, 上部と下部で体積含水率が大きく変化していることがわかる。新たなパラメータでも含水率の変化を確認できるが, その変化は小さいものである。水平設置では新たなパラメータは中心位置の値が測定範囲平均と近いものであることがわかる。また, 垂直, 水平ともに新たなパラメータのほうが設定した土壌平均含水率に近いことがわかる。

最後に TDR センサーで測定した体積含水率の実測値とセンサー測定範囲の推定値について図 6 に示す。図 6 は推定値から実測値を引いた値を示している。結果より温度変化による体積含水率の変化が確認できた。

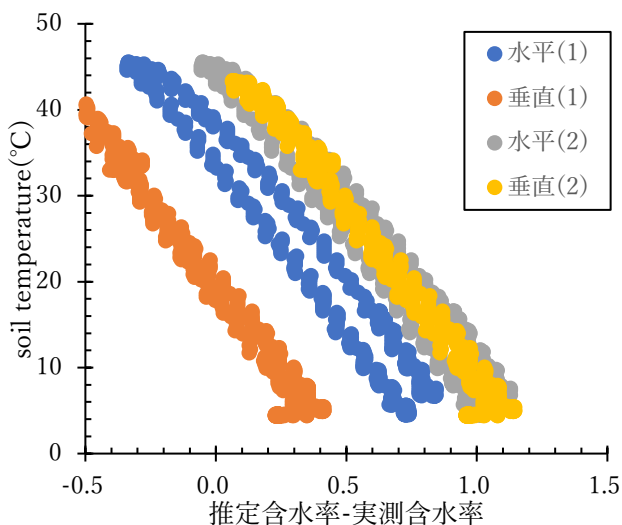


図 6 TDR 実測値と推定値

また, 新たなパラメータでは設置方法の違いによる含水率の変化がほとんどないことが示されている。

## 5. 結論

三軸試験による高サクシオンデータ取得により新たな VG パラメータを算出することができた。山本のパラメータを用いて推定すると垂直水平ともに設定した平均土壌含水率と差が生じていたが, 新たなパラメータを用いることで, センサー位置の水分分布を正確に推定できていると考えられる。そのため, 今回用いたガラスビーズの土壌水分分布を推定する際は, 新たなパラメータの土壌水分特性曲線を用いることが従来のものより適していると判断する。

今後は体積含水率を上げて実験を行っていく。また, 山本の実験では体積含水率 10%の時に土壌温度と体積含水率の関係に負の相関がみられたので, どの含水率から負の相関が起こるのかの特定なども行う。

## 6. 参考文献

- 1) Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. : Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines, *Water Resour. Res.*, Vol 16, pp574-582, 1980.
- 2) 山本寅大 : 誘電型土壌水分センサーによる測定値の温度依存性に関する研究, 長岡技術科学大学修士論文, 2023
- 3) 西脇和希 : 土壌水分保持特性が土壌の含水率測定に及ぼす影響, 長岡技術科学大学学士論文, 2018