

2種類の土壌水分計のキャリブレーション<sup>\*1</sup>小林 政広<sup>\*2</sup> ・ 酒井 正治<sup>\*2</sup>

TDR (Time Domain Reflectometry) 法や ADR (Amplitude Domain Reflectometry) 法の土壌水分計 (誘電率水分計) の個体差チェックとキャリブレーションを効率的に行う手順を具体的に示すことを目的として、2種類の市販の土壌水分計を用いてこれらの作業を行った。土壌水分計の個体差チェック方法として、誘電率の異なる数種類の液体とガラスビーズを用いる方法を試みた。この方法は、挿入箇所の違いや挿入回数の影響を受けにくい、従来の砂カラムを用いる方法と比較してより正確かつ短時間に水分計の個体差を調べることが可能であった。粘土含量や有機物含量の異なる数種類の土壌についてキャリブレーションを行った。特に粘土含量が多い土壌の場合、メーカーが与えているキャリブレーション式では体積含水率を約10%過小評価することがあった。正確な土壌水分量の測定にはキャリブレーションが不可欠である。

## I. はじめに

TDR (Time Domain Reflectometry) 法 や ADR (Amplitude Domain Reflectometry) 法による土壌水分計 (誘電率水分計) の登場により、安全、迅速、手軽、かつ安価に土壌の体積含水率 (以下、「含水率」) の測定が行えるようになり、土壌物理や水文分野での土中水の挙動の解明を目的とした利用のみならず、立地や生態の分野などにおいても、植物の生育や土壌中での物質変換を左右する要因としての土壌水分量をモニターする場合などに利用されている。

誘電率水分計の測定原理の概要は以下の通りである。土壌を構成する物質の比誘電率は、空気では1、土粒子で3～5であるのに対し、水では80と非常に高い。そのため、これらの混合物である土壌の見かけの比誘電率は水の量によって大きく変化する。誘電率水分計は基本的には土壌中に送った電磁波の伝達の仕方から誘電率を測る装置であり、含水率の測定には、あらかじめ調べておいた誘電率-含水率の関係を用いた変換が必要である。この関係については、土壌水分の測定に TDR 法を取り入れた Topp *et al.* (1980) が数種類の土壌についての経験式を求めており、この関係式は Topp 式として知られている。また、水分計メーカーもそれぞれの水分計に独自の関係式を組み込んでいる。しかし、有機物を多く含む土壌や火山灰を母材とする土壌など、比表面積の大きい土壌では、Topp 式やメーカーが用意した関係式では含水率を過小評価するという報告例が多く (波多野ら, 1995; 宮本・安中, 1998)、正確な測定には土壌ごとのキャリブレーションが必要であることが指摘されている。また、同じセンサ (プローブ) を複数用いる場合、特に自作のプローブを複数用いて多点測定を行う場合、一つのセンサで求めた関係式を全てに用いるためには、

センサ (プローブ) の個体差が十分小さいことを確認する作業を事前に行う必要がある。

しかし、これらの作業を実際にどのように行えばよいかは、メーカーのマニュアルにも詳しく記述されていないことが多く、キャリブレーションを実施せずに使用しているケースも少なくない。そこで本研究では、誘電率水分計の個体差チェックとキャリブレーションを効率的に行う手順を具体的に示すとともに作業上の注意点等を整理することを目的として、実際に市販の土壌水分計を用いてこれらの作業を行った。

## II. 使用した土壌水分計

本研究で使用した誘電率水分計は Delta - T Devices 製の ThetaProbe ML-2 型 (以下 ThetaProbe)、および Campbell Scientific, Inc 製の HydroSense である。

ThetaProbe の誘電率測定方式は ADR 法であり、信号ロッドと土壌のインピーダンスの差による電磁波の干渉反射の振幅差から誘電率を求める (Gaskin and Miller, 1996; 中島ら, 1998)。センサの外形および寸法は図-1の通りである。電源は DC 5 - 15 V、出力は DC 0 ~ 約1.2 V のアナログ出力である。測定範囲は3本のシールドロッドの内側となり、特に中央の信号ロッド近傍で感度が高い。個体差チェックには4本の ThetaProbe を用い、その中の一本でキャリブレーションを行った。

HydroSense の誘電率測定方式は TDR 方式であり、ロッドに与えられた電磁波のパルスの伝達速度から誘電率を求める (Topp *et al.*, 1982; 堀野・丸山1992)。外形と寸法は図-2の通りである。電源は DC 5 V であり、これは専用の読み取り器から供給され、出力は周波数 (+/-2.5 V の矩形波) である。測

<sup>\*1</sup> Kobayashi, M. and Sakai, M. : Calibration of two types of soil moisture sensors

<sup>\*2</sup> 森林総合研究所九州支所 Kyushu Res. Center, For. and Forest. Prod. Res. Inst. Kumamoto 860-0862

定範囲は2本のプローブの表面から約3 cm まで分布し、全体としてはほぼ楕円形の底面を持つ柱状の領域となり、ロッド近傍で感度が高い。HydroSense では、キャリブレーションのみ行った。

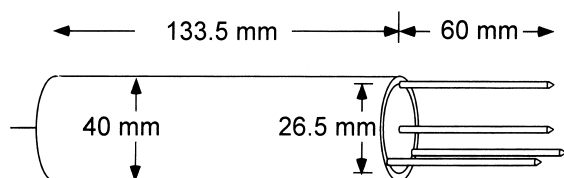


図-1. ThetaProbe

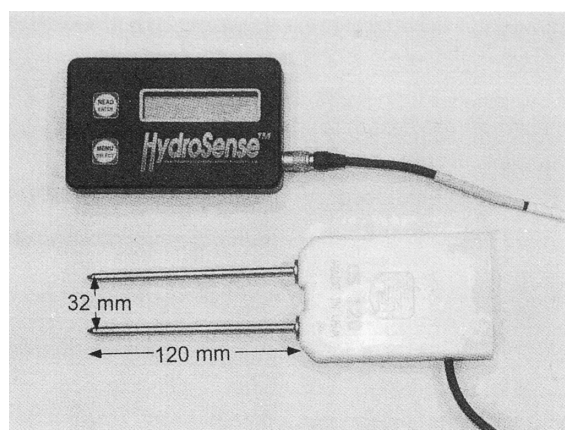


図-2. HydroSense

### Ⅲ. 個体差チェック

#### 1. 石英砂充填カラムを用いた個体差チェック

##### (1) 方法

中島ら (1980) の方法に習い、含水率を変えた複数の石英砂充填カラムを用いる方法で個体差チェックを行った。まず、一定量の風乾石英砂 (この実験では1971 g) と含水率0, 0.05, 0.10, …,  $0.30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  相当の水をビニール袋に入れ、空気を吹き込んで口を閉じ、水分が均一になるように十分に攪拌した。この石英砂を一定容積 ( $1392 \text{ cm}^3$ , 内径約 120mm, 高さ約 120 mm) のポリプロピレン容器に三角フラスコの底で締め固めながら体積がちょうど  $1392 \text{ cm}^3$  になるように充填した。この際、何度やり直しても高さが 2 ~ 3 mm 過剰となる場合があり、この場合は、過剰分の砂は規定で削り捨てた。次いで、これらを容器ごと電子天秤で秤量し、4本の ThetaProbe を測定範囲が重ならないように順に挿入し、そのときの出力電圧をテストで測定した。挿入は1ヶ所につき1回だけとした。その理由は、ThetaProbe では信号ロッドの周囲の感度が高いため、複数回挿入すると前にあけた穴の影響が測定値に大きく現れるためである。測定後、砂をステンレス製のバットに移し替え、 $105^\circ\text{C}$  のオーブンで24時間乾燥させて砂の絶乾重を求め、それぞれの容器ごとに測定直前の実際の含水率と乾燥密度を計算した。

#### (2) 結果

図-3に4本の ThetaProbe の含水率と出力値の関係を示した。低含水率側では個体差は目立っていないが、含水率  $0.30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  ではセンサごとの出力値の違いが目立ち、最大と最小の差は約 50 mV となった。これは含水率で約  $0.03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  の差に相当する。中島ら (1980) における14本の ThetaProbe を用いた同様の実験でも、同程度のばらつきが認められているが、その差は無視できるレベルにあるとしている。しかし、この差が本当にセンサの個体差のためかどうかはやや疑わしく、充填した砂が不均一だったために生じた可能性もある。そこでこの点を追求するため、Gaskin and Miller (1996) で行われた液体を用いた個体差チェックを次いで行った。

#### 2. 数種類の液体とガラスビーズを用いた個体差チェック

##### (1) 方法

Gaskin and Miller (1996) は、ADR センサの個体差チェックに、誘電率の異なる数種類の液体を用いる方法を採用した。用いた液体はシクロヘキサン、アセトン、メタノール、水である。液体を使うこの方法では、充填時の不均一の問題を回避することが可能である。本研究ではこれらの液体にグリセリンを追加した。しかし、有機溶剤の場合は塩化ビニル製の ThetaProbe のボディを溶かしてしまう恐れがあるため、あらかじめ短く切断した塩化ビニル製パイプをシクロヘキサン、アセトン、メタノール、グリセリンに15分間浸す実験を行った。その結果、アセトン、シクロヘキサンでは浸せき前後の質量に0.1%以上の変化が見られたため、この2種類の液体は塩化ビニルを溶かすと判断し、使用しなかった。誘電率の低いアセトンとシクロヘキサンに代わるものとして、本研究では粒径 1 mm のガラスビーズを用いた。ただし、充填時の不均一の問題が再び生じる可能性が考えられたので、容器に入れたビーズにセンサを複数回抜き差ししたときの出力値の変化を調べる実験を行った。その結果、抜き差しを繰り返しても出力値に 3 mV 以上の違いは現れないことが分かり、粒径 1 mm のガラスビーズには充填時の不均一の問題は生じないと判断した。

以上の予備実験を経た後、液体とガラスビーズを用いる個体差チェックを以下のように行った。容積  $1392 \text{ cm}^3$  のポリプロピレン容器を7割ほど満たすように、水、メタノール、グリセリン、ガラスビーズ、水+ガラスビーズ、水+メタノールを入れた。水+

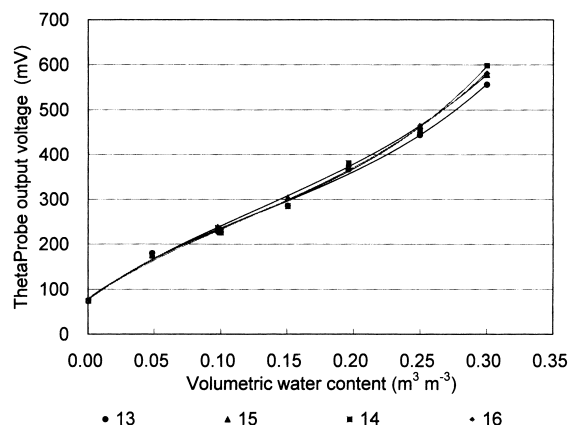


図-3. 石英砂充填カラムを用いた個体差チェックの結果

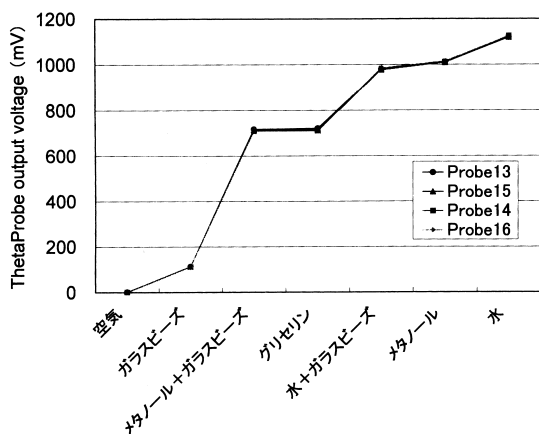


図-4. 液体とガラスビーズを用いた個体差チェックの結果

ガラスビーズおよび水+メタノールを入れる際には、はじめに液体を入れておき、空気が入らないように後からガラスビーズを少しずつ入れ、ガラスビーズの面が十分な高さに達したときに余分の液体を捨てる方法をとった。これらの試料中に、4本のThetaProbeを順にロッドが完全に漬かるように挿入し、そのときの出力値を記録した。一つの試料に挿した後は水道水でセンサを洗浄し、吸水紙でよく拭き取ってから次の試料に挿した。

#### (2) 結果

図-4に4本のThetaProbeをそれぞれの試料に挿して測定したときの出力値を示した。ここには空気中での出力値も示した。出力値の最大-最小の値は最も大きいグリセリンの場合でも9.7 mVに過ぎず、4本のThetaProbeの個体差は非常に小さいことがこの方法により示された。このことから、石英砂を用いる方法で見られた出力値の差は、製品のばらつきではなく、主に充填の不均一性によりもたらされたものであったことが明らかであり、個体差チェック方法としては、液体とガラスビーズを用いる方法がより優れていると言える。一連の作業にかかる時間も液体とガラスビーズを用いる方法であれば2時間程度で十分である。

ここで、グリセリンで出力値のばらつきが大きかった理由として考えられるのは、グリセリンは粘性が高く、ロッドの周囲に気泡が付着しやすかったことである。グリセリンの出力値とメタノール+グリセリンの出力値がほぼ等しかったことを合わせて判断すると、今後同じ実験を行う際には、グリセリンを使用する必要はない。つまり空気、ガラスビーズ、メタノール+ガラスビーズ、水+ガラスビーズ、メタノール、水の系列を用いればよい。

## IV. キャリブレーション

### 1. 供試土壌

キャリブレーションには、雲仙垂木台地の火山噴出物 (UNZ)、森林総合研究所九州支所の立田山実験林内のヒノキ林のA層土壌 (KUM)、同じ土壌を非攪乱で採取したもの (KUM - UN)、熊本県鹿北町のスギ・ヒノキ林のA層土壌 (KHK - A) およびB層土壌 (KHK - B) を用いた。その概要を表-1にまとめた。

### 2. 非攪乱試料を用いる方法

非攪乱試料を用いたキャリブレーションは、ThetaProbeで行っ

た。土壌を採取する際には、塩化ビニール製のパイプを加工して作成した内径57.5mm、高さ80mm、厚み約1mmの円筒状サンプラーを用いた。採取時に下側になる方の端部は、市販の金属製探土円筒と同様、挿入をスムーズにできるように斜めに削っていた。現場では、最終的にサンプラー上端が達する深度より約1cm浅いところまで土壌を削って平らな面を作り、サンプラーの外側となる土および根をナイフと剪定バサミで丁寧に切断し、少しずつサンプラーを押し下げ、サンプラーの高さの中心が、ThetaProbeの測定範囲の中心と一致する深度から試料を採取した。試料は合計10個採取し、運搬の際には5つの試料をビニールテープで連結して両端もビニールテープでフタをした。

実験室に持ち帰った試料の全てに、食品用のラップとビニールテープで作成したフタを用意し、上のフタを外した状態で試料が収縮しない程度まで乾燥させた。その後、含水率0, 0.05, 0.10, …, 0.40m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>相当の水を加えて上下のフタをした状態で放置して水分を行き渡らせた。約1週間後、サンプラーごと電子天秤で秤量した後に、上のフタを外し、それぞれの試料にThetaProbeを挿入して出力電圧をテストで測定した。挿入は個体差チェックの場合と同様、1回だけとした。この後、試料をサンプラーからアルミ製のトレーに移し替え、105℃のオーブンで24時間乾燥させて土壌の絶乾重を求め、それぞれの容器ごとに測定直前の実際の含水率と乾燥密度を計算した。

### 3. 攪乱試料を用いる方法

攪乱試料には風乾後に2mmの円孔篩を通過させたものを使用した。最初に、個体差チェックと同様、ビニール袋を用いて試料を均一に混ぜた後に容器に詰める方法を試みた。しかし、粘土分の多いKUMでこの方法を試したところ、含水率がある程度大きくなると団粒構造が壊れて密に詰まった状態 (ようかんのよう) になってしまうことが分かり、この方法は採用できなかった。

これに代わる方法として、以下の手順で試料を用意した。まず、樹脂製のトレーに一定の体積で詰めるときに現場の乾燥密度に近くなる量の風乾土をとり、含水率20%未満の含水率にしたい試料にはその含水率に相当する量の水を5%刻みで添加した。含水率20%以上にしたい試料には付着力が強くない範囲で、できるだけ多くの水を添加した。次に、団粒構造を破壊しないように手で穏やかに混ぜ合わせ、試料を一定容積の円柱状ポリプロピレン製容器に移し替えた。容器は、ThetaProbe用に内径約67mm、高さ125mmのものを、HydroSense用には内径約90mm、高さ145mmのものをを用いた。この後、容器を上下させて机にコツコツとぶつける動作 (タッピング) を行い、土壌試料の上面が所定の乾燥密度に対応する高さになるまでこの動作を10回程度繰り返した。その高さは、ロッドの長さより約10%大きくし、ThetaProbeの場合66mm、HydroSenseの場合133mmとした。はじめに所定の含水率に相当するだけの水を添加しなかった試料には、この後、不足分の水を試料表面の攪乱が起きないように静かに添加して全ての試料にフタをし、水分が行き渡るように約5時間放置した。その後、電子天秤で容器ごと秤量し、フタを外してThetaProbeまたはHydroSenseを挿入して出力値を記録した。この際、ThetaProbeは挿入を1回だけとしたが、HydroSenseは1度挿入した後に水平方向に90度回転させてもう一度挿入し、2回の平均の値を用いた。最後に、試料をポリプロピレン容器から

表-1. 供試土壌の概要

	記号	土性	腐植	現場 乾燥密度	実験時 乾燥密度
火山噴出物 (雲仙垂木台地)	UNZ	微砂質壤土	乏し	1.31 Mg m <sup>-3</sup>	1.42~1.50 Mg m <sup>-3</sup>
褐色森林土 (熊本県鹿北町) A層	KHK-A	埴質壤土	富む	0.47 Mg m <sup>-3</sup>	0.44 Mg m <sup>-3</sup>
褐色森林土 (熊本県鹿北町) B層	KHK-B	埴質壤土	含む	0.69 Mg m <sup>-3</sup>	0.74~0.75 Mg m <sup>-3</sup>
褐色森林土 (熊本県熊本市) A層	KUM	埴質壤土	富む	0.54 Mg m <sup>-3</sup>	0.59~0.68 Mg m <sup>-3</sup>
褐色森林土 (熊本県熊本市) A層 (非攪乱)	KUM-UM	同上	同上	同上	0.51~0.58 Mg m <sup>-3</sup>

金属製のトレーに移し替え、105℃のオープンで24時間乾燥させて土壌の絶乾重を求め、それぞれの容器ごとに測定直前の実際の含水率と乾燥密度を計算した。

この方法では、試料を容器に詰める前にある程度の水を加える操作を行った。これは、風乾土を容器に詰めた状態で水を添加しても、特に有機物に富むA層の土壌では風乾状態では撥水性が発現し、添加した水を全体に行き渡らせることが不可能であったためである。撥水性がない場合であっても、土壌の不飽和透水係数は含水率が高いほど大きいため、より早く水分を行き渡らせるためには、容器に詰めた時点でなるべく多くの水を含んでいる方が有利である。

#### 4. 結果

図-5に、ThetaProbeのキャリブレーション結果を示した。図中の実線および波線はそれぞれ、メーカーのDelta-T Devicesが鉱物質土壌および有機質土壌について与えている出力-含水率の関係である。有機物、粘土のどちらにも乏しいUNZの出力-含水率の関係は、鉱物質土壌のカーブにはほぼ一致した。UNZ以外の土壌では広い範囲にわたって与えられた出力電圧に対応する含水率が有機質土壌のカーブより最大で0.05m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>以上大きかった。これは、メーカーの与えている鉱物質土壌のカーブ(キャリブレーション関数)では含水率を過小評価してしまうことを意味している。

図-6に、HydroSenseのキャリブレーション結果を示した。HydroSenseのセンサ出力は周波数であるが、専用表示器には周波数と同時に組み込まれた関数で含水率に変換した値も表示される。そこで横軸には表示された含水率の値(%)を、縦軸には重量法で求めた含水率(m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>)を示した。組み込まれた関数が適切であればプロットされた点は実線で示した直線上に並ぶはずであるが、実際にはUNZ、KUMともに直線の上方にプロットされた。特にKUMでは最大0.13m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>の違いがあった。このことは、組み込まれた関数をそのまま用いた場合には、含水率を過小評価することを示している。ただし、非攪乱試料を用いたキャリブレーションでは、ロッドの長さ60mmに対してサンプラーの長さを80mmとしたため、試料の最下部約20mmが測定圏から外れていると考えられ、試料内の鉛直水分分布が一様ではない場合にはその影響が現れている可能性が否定できない。

今回用いた2種類の誘電率水分計をメーカーが用意した出力-含水率の関係と共に使用した場合には、試料として用いた土壌の多くで含水率を過小評価した。このような過小評価の原因として

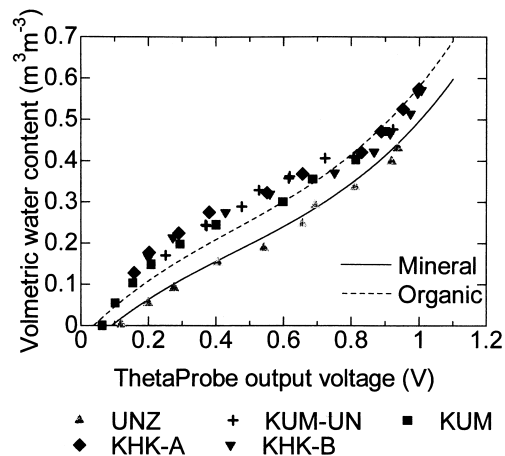


図-5. ThetaProbeのキャリブレーション結果

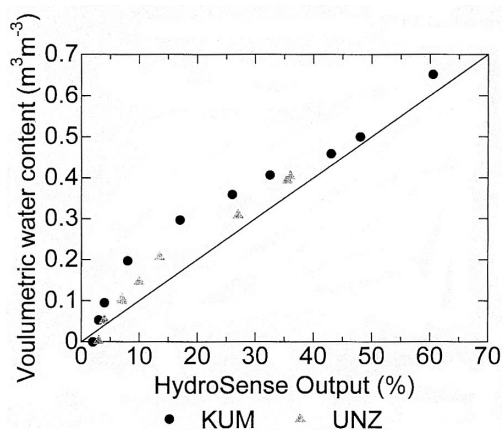


図-6. HydroSenseのキャリブレーション結果

は、土粒子に吸着されている誘電率の小さい水の存在が従来から考えられている (Topp *et al.*, 1980)。この考えによれば、有機物や粘土を多く含む比表面積の大きい土壌では、土粒子に吸着されている水の割合が高くなり、実際に同じ量の水分を含んでいたとしても比表面積の大きくない土壌より見かけの誘電率は低くなる。そのため、比表面積の大きくない土壌でキャリブレーションした誘電率水分計で含水率を測定した場合には過小評価されることになる。実際の林地土壌は母材や植生の影響を受けて、有機物や粘土の含量、乾燥密度は多様である。そのため、正確な含水率の測

定には、土壌ごとのキャリブレーションが欠かせない。

## V. まとめ

土壌水分計の個体差チェック方法として、誘電率の異なる数種類の液体とガラスビーズを用いる方法を試みた。この方法は、挿入箇所の違いや挿入回数の影響を受けにくいため、従来の砂カラムを用いる方法と比較してより正確かつ短時間に水分計の個体差を調べることが可能であった。

2種類の市販の土壌水分計を対象に、粘土含量や有機物含量の異なる数種類の土壌についてキャリブレーションを行った。特に粘土含量や有機物が多い土壌の場合、メーカーが与えているキャリブレーション式では含水率を約10%過小評価することがあった。正確な土壌水分量の測定にはキャリブレーションが不可欠である。

## 引用文献

- Gaskin, G. J. and Miller, J. D. (1996) J. Agric. Engng Res. 63 : 153 – 160.
- 波多野隆介ら (1995) 日本土壌肥科学雑誌 66 (6) : 678 – 680.
- 堀野治彦・丸山利輔 (1992) 土壌の物理性 65 : 55 – 61.
- 宮本輝仁・安中武幸 (1998) 農業土木学会論文集 194 : 165 – 166.
- 中島 誠ら (1998) 地下水学会誌 40 (4) : 509 – 519.
- Topp, G. C. *et al.* (1980) Water Resour. Res. 16 (3) : 574 – 582.
- Topp, G. C. *et al.* (1982) Soil Sci. Soc. Am. J. 46 : 678 – 684.
- (2001年11月22日 受理)