

プロファイル土壌水分計 PR2/6 の水田転換畑土壌に対する 測定誤差の解析と効率的校正法の提案

望月秀俊・小原輝之¹・田中一彦¹・亀高巧¹

キーワード：プロファイルプローブ，土壌水分量，測定誤差，校正，PR2/6

目	次
I はじめに	45
II 方法	46
1 実験方法	46
2 校正式の決定	46
3 解析方法	48
III 結果と考察	49
1 出力値の時間的バラツキ	49
2 出力値の位置によるバラツキ	50
3 センサー間およびプローブ間の 出力値の差異	50
4 校正式を用いた計算値と 実測値との適合性	52
5 PR2/4 の場合	55
IV おわりに	56
V 摘要	57
謝辞	57
引用文献	57
Summary	58

I はじめに

Delta-T 社製プロファイルプローブ PR2/6 は、土壌中に設置したアクセスチューブに本体を挿入することで、0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 50-60, 90-100cm 層の平均の体積含水率を測定できる。本機は先行機 PR1/6 に較べて、土壌溶液の塩分濃度（電気伝導度）の影響が軽減された⁴⁾。当該機器のアクセスチューブの外径は 27mm と細く、対象土壌の破壊を最小限に抑えながら、試坑を掘らずに体積含水率を測定できる利点がある。また、測定中にセンサーの故障があったとしても、センサー交換のために再度試坑を掘った上で新たなセンサーを埋設する、といった労力を使って測定対象土層を再度乱すこともない。このほかにも、多地点のモニタリングの際に、アクセスチューブを設置しておけば、1 台の PR2/6 で効率的なモニタリングが可能である⁷⁾。PR2/6 以外にも、Sentek 社製のプロファイルプローブ EnviroSMART 等が存在する。EnviroSMART はプローブの長さを最大 30m まで延長可能なことや、最大 16 個のセン

サーを設置できること等の特徴があるが、本体の外径が 50.5mm、アクセスチューブの外径が 56.5mm と PR2/6 に較べて大きいことに加え、携帯可能なサイズのデータロガーが無いと、装置全体の持ち運びが困難である。

TDR の出現以来、土壌水分量などの測定の簡便化・測定器の小型化が進んだが、常に、供試土壌毎の校正式の作成の必要性と、温度や塩類濃度などの各種依存性や測定器毎の測定値のバラツキ（個体差）を含む測定誤差の把握の必要性が主張されてきた^{2,6)}。井本ら（2006）⁵⁾ は、PR2/6 の先行機である PR1/6 を用いて、各センサーの影響範囲を調べ、深さ 30cm の小型校正容器を用いて、黒ボク土と立川ロームとを対象とした校正を実施し、Huang et al. (2004)³⁾ や Evett et al. (2006)²⁾ と同様に、土壌毎の校正が必要なことを明らかにしている。また、Silva et al. (2012)⁸⁾ は、PR2/6 についても、Delta-T 社提供の校正式¹⁾ を用いた推定値と実測値との適合性が低く、供試土壌毎の校正式を得る必要があることを示している。また、1 つのプローブに 6 つの土壌の体積含水率を測定する ADR センサー（以下セン

サーと呼ぶ)を具備している当該機器の場合、出力値のセンサー間のバラツキやプローブ間のバラツキは、実際の測定で必要になる校正式の数左右すると思われる。

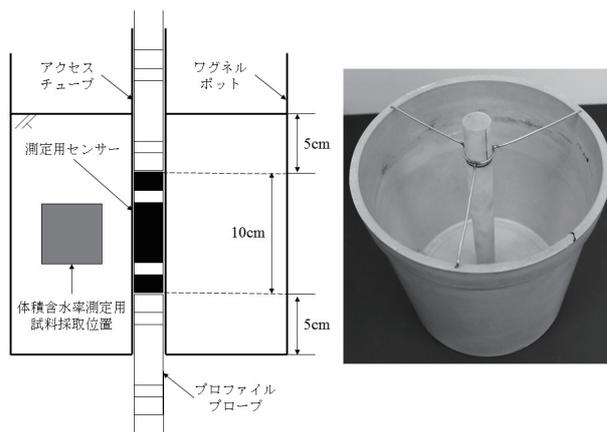
そこで本研究では、プロファイル土壌水分計 PR2/6 について、6つの供試土壌(水田転換畑土壌)に対する校正作業を通じて、プロファイルプローブの各センサーの時間的バラツキや位置によるバラツキを検証することと、得られた校正式の誤差や3本のプローブの個体差を解析することで、効率的な校正法を提案することを目的とした。ここで、本研究の校正作業においては、対象土壌の既知の体積含水率と、プロファイルプローブの各センサーの出力値との関係を明らかにすることで、校正式を得た。また、2台の PR2/4 (PR2/6 の姉妹機: 測定土壌層 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 cm 層) についても、同様の検討を行った。

水田への野菜作などの導入が一層推進されると予想される現況においては、水田転換畑における土壌水分量の測定の重要性は増してくる。一方で、当該機器の転換畑における使用例に関する報告は見当たらず、本研究のような水田転換畑などに対する当該機器の校正式などを積み上げて報告することは、今後実施される転換畑における安定多収栽培の実現を目指す一連の研究において、大きな意義を持つと考えられる。

Ⅱ 方 法

1 実験方法

井本ら (2006)⁵⁾ を参考に、1/2000a ワグネルポット(外径: 256mm (上部) ~ 234mm (下部))の中央に、PR2/6 アクセスチューブと同一内径の穴を開け、40cm に切断したアクセスチューブを取り付けて校正容器とした(第1図)。この校正容器に水分量を調整した供試土壌を所定の乾燥密度 (1.20 Mg/m³) で 20cm 充填し、PR2/6 本体をアクセスチューブに挿入後、充填土壌の中央に測定するセンサーが来るように位置を調整してから、読み取り機 HH2 (Delta-T 社製) を用いて測定した(第1図)。HH2 を使用する場合、マニュアル記載の校正式を用いて算出した体積含水率もしくは誘電率を 0-1000mV に



第1図 校正容器の概要図(左)と写真(右)

変換した電圧の2つの出力方式を選択できるが、本研究では供試土壌毎の校正式を決定するため、後者の電圧形式の出力値を用いて解析した。測定終了後、センサーを設置した充填土壌中央付近の土壌を採取し、炉乾法によって土壌水と乾燥土の質量を測定し、水の密度 1.00Mg/m³ と設定乾燥密度から体積含水率 (m³ m⁻³) を算出した(第1図)。

PR2/6 マニュアル (Delta-T Ltd., 2008) によると、センサーの影響圏は半径 100mm 程度であり、使用したワグネルポットは影響圏よりも十分に大きい。また、井本ら (2006)⁵⁾ でも PR1/6 の影響圏を調べ、同様の手法で校正式を得ている。測定には合計 4 本の PR2/6 プローブ(プローブ番号 1 ~ 4) と 2 本の PR2/4 プローブ(プローブ番号 5, 6) を使用した。各測定に使用したプローブについては、各試験の項で明示した。本研究の 6 つの供試土壌(水田転換畑土壌)とその土性、乾燥密度、設定体積含水率、測定終了後の測定位置付近の体積含水率は第1表に示す。

2 校正式の決定

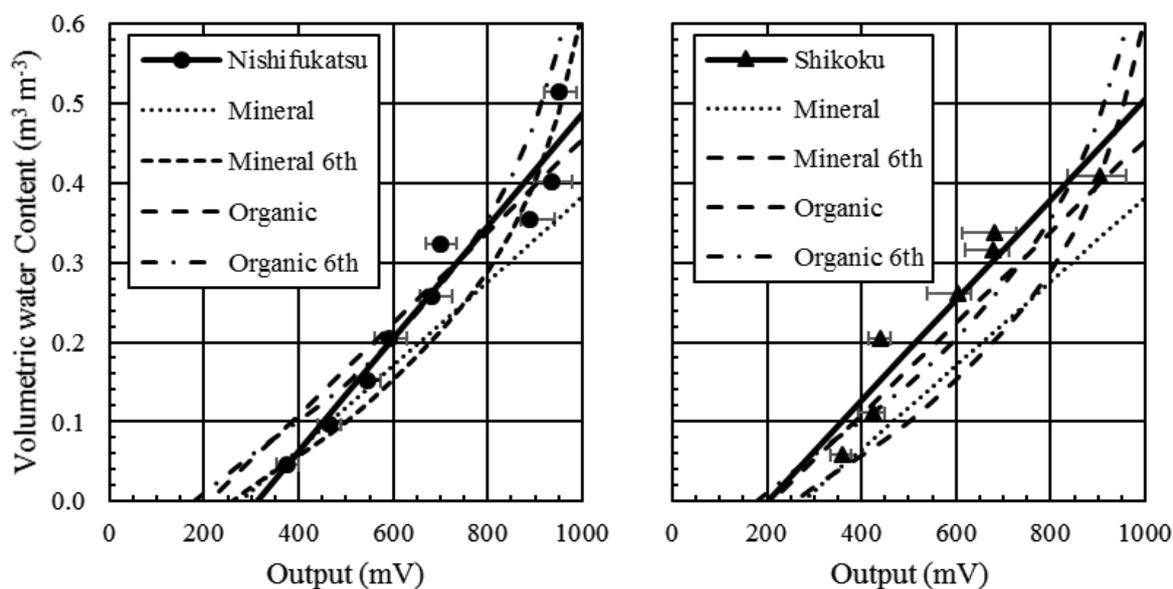
西深津転換畑土壌(粗粒質還元型グライ低地土 (CL)、広島県福山市で採取: 以下西深津土壌)と四国水田土壌(中粒質普通低地水田土 (CL)、香川県善通寺市で採取: 以下四国土壌)における PR2/6 の出力値 (mV) と土壌水分量 (m³ m⁻³) の関係を第2図に示す。PR2/6 マニュアル¹⁾ では、有機質土壌(極めて高い有機物含量を呈する土壌)と鉱質土壌(主に、砂・シルト・粘土など)の2種類の土壌

第1表 供試土壌の土性と乾燥密度，設定体積含水率，測定後の体積含水率

供試土壌 (土性)	乾燥密度 (Mg m^{-3})	設定体積含水率 (測定後の体積含水率) ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
西深津 (CL)	1.20	0.05(0.05), 0.10(0.10), 0.15(0.15), 0.20(0.21), 0.25(0.26), 0.30(0.32), 0.35(0.35), 0.40(0.40), 0.50(0.51)
四国 (CL)	1.20	0.06(0.06), 0.12(0.11), 0.18(0.21), 0.24(0.26), 0.30(0.32), 0.42(0.41)
山口表土 01 (CL)	1.20	0.03(0.03), 0.15(0.17), 0.30(0.28), 0.45(0.44)
山口下層土 01 (CL)	1.20	0.03(0.03), 0.15(0.18), 0.30(0.32), 0.45(0.42)
山口表土 02 (L)	1.20	0.03(0.04), 0.15(0.17), 0.30(0.28), 0.45(0.43)
山口下層土 02 (L)	1.20	0.03(0.03), 0.15(0.17), 0.30(0.32), 0.45(0.43)

のみについて，全水分域を対象とした6次の校正式（第2図中の Organic 6th と Mineral 6th）と，実際の農地で頻繁に呈する $0.30 \text{m}^3 \text{m}^{-3}$ までを対象とした1次の校正式（第2図中の Organic と Mineral）が示されている．第2図には両方を示すが，本研究で供試したすべての転換畑土壌については，水分量にかかわらず出力値と土壌水分量が直線関係を示し，最

小二乗法による直線近似によって決定した校正式が全水分域で適用可能であると判断された（Ⅲ4校正式を用いた計算値と実測値との適合性の項参照）．そのため本研究では，直線近似によって決定した校正式と，マニュアルに記載された $0.30 \text{m}^3 \text{m}^{-3}$ までを対象とした1次の校正式を解析の対象とした．



第2図 PR2/6 の出力値と体積含水率の関係

(左：西深津土壌，右：四国土壌)

点線などはマニュアルに記載されている校正式（鉱質土壌用・有機質土壌用）

転換畑土壌の校正式は、(1) 個別のセンサーの出力値を用いて、各センサー用の校正式を決定するパターンと、(2) 6つのセンサー(PR2/4については4つ)の出力値の平均値を用いて、すべてのセンサー共通の校正式を決定するパターンについて解析した。なお、本研究では、時間的バラツキとして、同一条件で連続測定した際の測定値のバラツキの小ささを扱った。また、位置によるバラツキとして、Oda and Ogata (2008)⁷⁾のように、プロファイルプローブを再設置した際の測定値のバラツキの小ささを扱った。

3 解析方法

R2/6による測定誤差を解析するため、(1) 出力値の時間的バラツキ、(2) 出力値の位置によるバラツキ、(3) センサー間およびプローブ間の出力値の差異について、次に示す手順で出力値を解析した。

1) 出力値の時間的バラツキ

PR2/6の出力値の時間的バラツキを明らかにするため、センサーの位置を校正容器に固定した後、20秒間隔(測定に必要な時間は1秒程度)で連続5回測定し、得られた出力値の平均値と変動係数(C.V.)を調べた。なお、本試験には、プローブ番号1のPR2/6を使用し、土壌サンプルの採取が容易な西深津土壌を供試した。

2) 出力値の位置によるバラツキ

PR2/6の出力値の位置によるバラツキを明らかにするため、プローブを移動させ測定するセンサーを1回の測定毎に変更しながら(#1→#2→・・・→#6→#6→#5→・・・→#1の繰り返し:ここで#iはセンサーの番号(プローブの根元から順に、#1, #2, ..., #6とした。)), 合計5回測定した場合の出力値の平均値とC.V.を調べた。この際、なるべく充填土壌中央の同じ位置にセンサーが位置するように配慮した(第1図)。なお、本試験には、プローブ番号1のPR2/6を使用した。II 3 1)の測定において時間的バラツキが極めて小さかったため(III 1 出力値の時間的バラツキの項参照)、複数の土壌サンプルを供試する必要はないと判断し、本試験には土壌サンプルの採取が容易な四国土壌のみを供試した。

3) センサー間およびプローブ間の出力値の差異

PR2/6が持つ6センサーの出力値の差異を明らかにするため、西深津土壌と四国土壌について、前述の2つの試験の測定結果をもとに、各センサーの出力値のC.V.と6センサーの出力値間のC.V.を解析した。

また、6つのセンサーの出力値の大小傾向がプローブによらず共通しているかや、プローブにより出力値の大小に違いがあるかを検証するため、山口県山口市の転換畑2圃場から採取した表土と下層土(細粒質下層褐色低地水田土。以下山口表土01:CL, 山口下層土01:CL, 山口表土02:L, 山口下層土02:L)について、プローブ番号2~4のPR2/6を使用した出力値を用いて、分散分析と多重比較(Ryan法)を行った。Ryan法は計算がやや煩雑になるものの個別群間の有意差を検出しやすいため採用した。なお、II 3 2)の測定によって、当該機器の出力値の位置によるバラツキが極めて小さいことが示されたため(III 2 出力値の位置によるバラツキの項参照)、各水分条件についての測定を1回に限った。

4) 校正式を用いた計算値と実測値の適合性

PR2/6の校正式の適合性について検討するため、(1) PR2/6のマニュアル¹⁾に記載された2つの校正式を使用した場合と、(2) 個別のセンサーについて校正式を作成・使用した場合、(3) すべてのセンサーの出力値の平均値を用いて校正式を作成・使用した場合、(4) 個別のセンサーに対して作成した校正式を他のセンサーに使用した場合について、校正式を用いて算出した体積含水率と実測された体積含水率を比較した。ここでは、計算値と実測値の間の平均2乗誤差(RMSE)を算出し、RMSEの低さを以て適合度とした。本試験には、西深津土壌、四国土壌、4つの山口転換畑土壌(山口表土01, 山口下層土01, 山口表土02, 山口下層土02)の合計6土壌を供試した。なお、西深津土壌と四国土壌については、プローブ番号1のPR2/6を使用した。また4つの山口転換畑土壌については、PR2/6の個体差を検討するため、3本のPR2/6(プローブ番号2~4)を使用した。

また、1つのプローブで決定した校正式を他のプ

ローブの校正式とした場合の誤差を、誤差伝播の法則をもとに4つの山口転換畑土壌に対するプローブ毎の校正式のパラメータなどから検討した。

5) PR2/4 の場合

PR2/6 には、センサーを4つ具備する姉妹機 PR2/4 が存在する。そこで、PR2/6 で行った校正式に関する一連の試験と解析を2本の PR2/4 (プローブ番号5, 6) についても実施した。なお、4つの山口転換畑土壌(山口表土01, 山口下層土01, 山口表土02, 山口下層土02)を PR2/6 と同様の条件で供試した。

Ⅲ 結果と考察

1 出力値の時間的バラツキ

西深津土壌の各水分条件について、得られた各センサーの平均値と C.V. を第2表に示す。体積含水率を風乾から飽和近傍まで採ったことで、350～990mV までの範囲の出力値(平均値)が得られた。また、C.V. は 0.01 を超えるケースはほとんどなく、体積含水率の大小にかかわらず、当該機器の出力値の時間的バラツキは極めて小さいことがわかった。

第2表 PR2/6 プローブ番号1の各センサーの出力値(mV)の平均値と変動係数(C.V.)(n=5)

供試土壌	設定体積含水率(m ³ m ⁻³)		出力値						
			#1	#2	#3	#4	#5	#6	#1～#6
西深津	0.05	平均値	352.7	360.7	376.3	391.5	400.3	375.7	376.2
		C.V.	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0033	0.0436
	0.10	平均値	440.3	449.8	462.7	478.0	489.3	461.3	463.5
		C.V.	0.0011	0.0010	0.0010	0.0017	0.0047	0.0018	0.0353
	0.15	平均値	516.0	525.0	546.0	559.5	572.8	546.5	544.3
		C.V.	0.0014	0.0013	0.0000	0.0009	0.0019	0.0020	0.0354
	0.20	平均値	561.0	568.8	592.0	611.0	629.3	590.6	592.1
		C.V.	0.0013	0.0008	0.0012	0.0012	0.0013	0.0023	0.0393
	0.25	平均値	657.0	661.8	673.0	694.8	724.3	674.4	680.9
		C.V.	0.0024	0.0016	0.0009	0.0017	0.0091	0.0012	0.0335
	0.30	平均値	668.2	670.2	700.4	721.8	735.2	699.0	699.1
		C.V.	0.0017	0.0011	0.0015	0.0011	0.0013	0.0010	0.0351
	0.35	平均値	875.8	869.0	878.8	895.8	942.8	870.0	888.7
		C.V.	0.0009	0.0008	0.0005	0.0009	0.0104	0.0008	0.0290
	0.40	平均値	899.2	905.8	918.6	942.8	979.2	960.8	934.4
		C.V.	0.0013	0.0008	0.0005	0.0008	0.0023	0.0007	0.0311
	0.50	平均値	919.0	925.7	937.6	961.8	986.6	964.2	949.1
		C.V.	0.0010	0.0008	0.0007	0.0008	0.0045	0.0011	0.0250
四国	0.06	平均値	333.6	346.0	357.8	371.7	378.0	364.8	358.7
		C.V.	0.0015	0.0029	0.0019	0.0025	0.0031	0.0037	0.0421
	0.12	平均値	394.0	406.0	422.0	437.0	448.0	431.7	423.1
		C.V.	0.0021	0.0014	0.0027	0.0023	0.0018	0.0051	0.0434
	0.18	平均値	414.7	426.0	435.2	451.2	462.8	449.8	439.9
		C.V.	0.0011	0.0027	0.0025	0.0015	0.0019	0.0033	0.0372
	0.24	平均値	540.0	590.2	604.2	627.0	632.8	621.3	602.6
		C.V.	0.0019	0.0021	0.0036	0.0120	0.0037	0.0038	0.0522
	0.30	平均値	620.3	658.5	675.7	697.2	713.3	703.0	678.0
		C.V.	0.0034	0.0015	0.0011	0.0093	0.0022	0.0027	0.0465
	0.36	平均値	613.0	662.8	678.8	695.8	727.5	708.8	681.1
		C.V.	0.0125	0.0367	0.0336	0.0358	0.0258	0.0248	0.0540
	0.42	平均値	834.5	884.2	896.8	920.5	959.3	927.2	903.8
		C.V.	0.0060	0.0014	0.0010	0.0037	0.0048	0.0115	0.0432

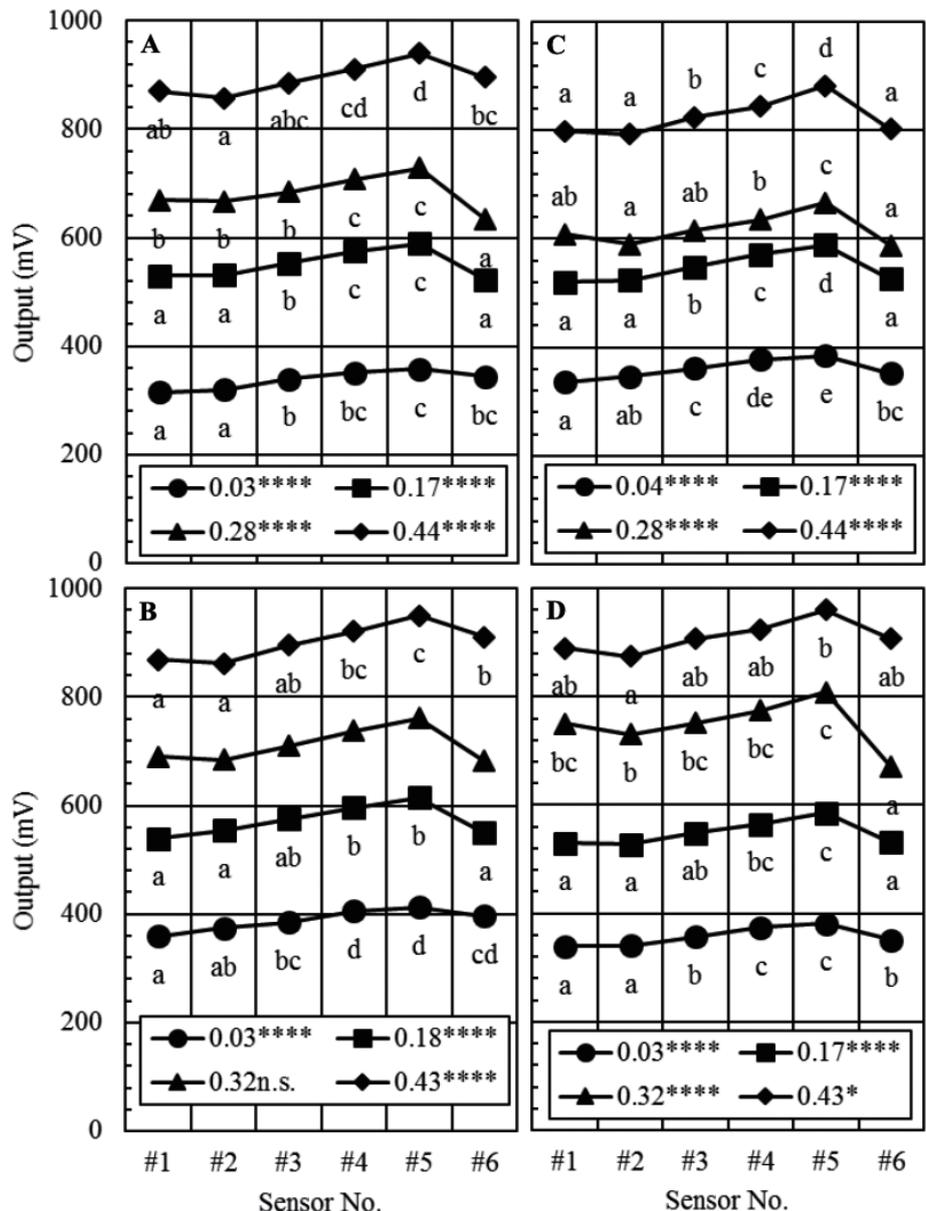
2 出力値の位置によるバラツキ

四国土壤の各水分条件について、得られた各センサーの平均値とC.V.を第2表に示す。330～960mVまでの範囲の出力値(平均値)が得られた。C.V.は、位置を固定して連続した前述のケースよりも若干大きくなるものの、0.01を超えるケースはほとんどなかった。当該機器の出力値のバラツキの主要因として考えられる出力値の時間的なバラツキと機器の位置によるバラツキのうち、前項で時間的なバラツキは極めて小さいことが明らかになっており、本項で観測されるバラツキは位置によるバラツキを示していると考えられる。本項でも、水分条件にかかわらず、当該機器の出力値のバラツキは極めて小さかったことから、位置によるバラツキも小さいことが示された。すなわち、当該機器を用いれば、1回の測定結果をもとに土壤の体積含水率を決定しても問題ないことが示された。

3 センサー間およびプローブ間の出力値の差異

第2表に示すとおり、供試土壤や設定体積含水率にかかわらず、各センサーの出力値のC.V.が0.01を超えることがほとんどないのに対して、同一プローブの6センサー間の出力値のC.V.は0.05程度となり(第2表右端のカラム)、センサーの違いによる出力値の差異の方が明らかに大きかった。センサーとプローブを主要因として、各土壤における体積含水率毎に出

力値について、2元配置の分散分析・多重比較を行い、主要因(センサー)の効果を見ると、#5はすべての条件で最も大きな平均値を示し、特に#1～#3、#6のセンサーの出力値と有意差が検出された(第3a)図)。一方で、#3については、常に中位の平均値を示し、他のセンサーと有意差(5%)が検出されないことが多かった(第3a)図)。また、上記の2つの傾向はすべての土壤で共通であったため、PR2/6内で各センサーと基部を結ぶケーブル長



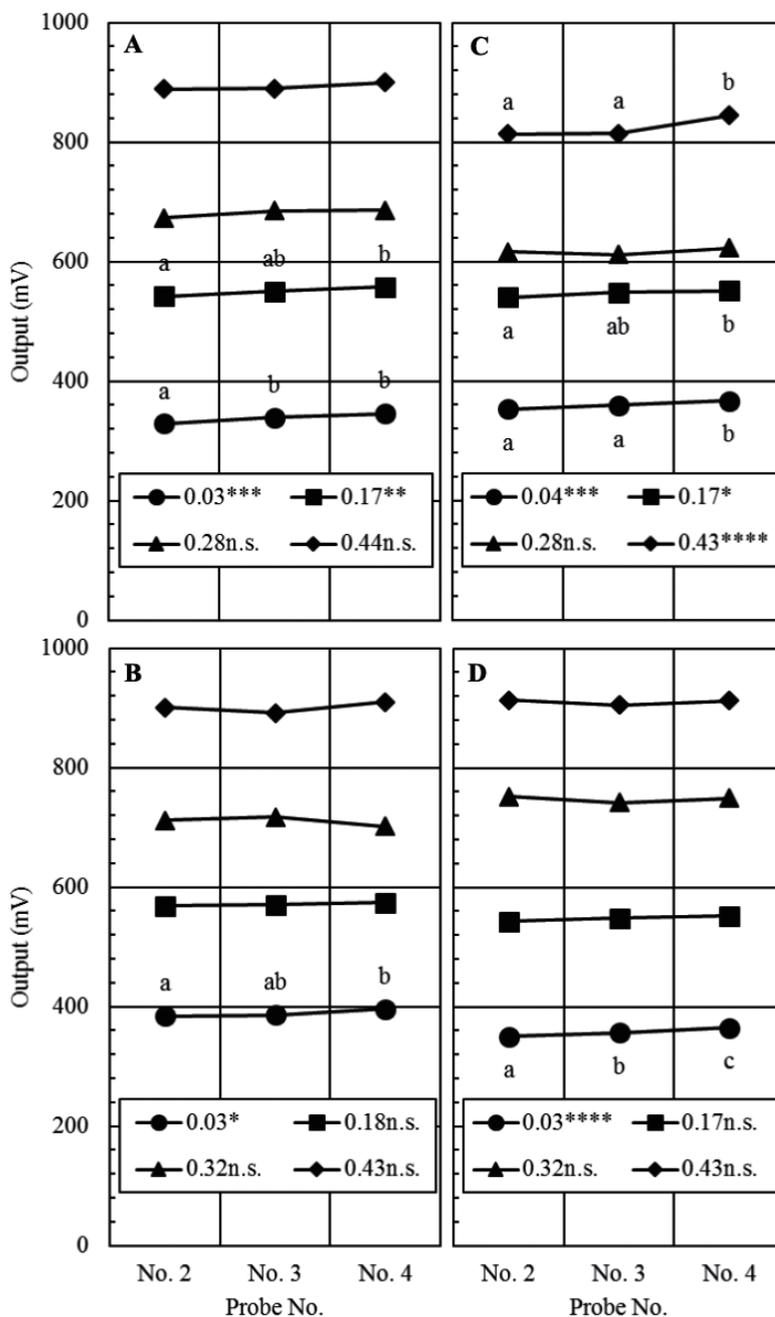
第3a) 図 センサーとプローブを主要因とした出力値についての分散分析の結果—センサーについての分散分析・要因効果・多重比較—
 (A: 山口表土 01, B: 山口下層土 01, C: 山口表土 02, D: 山口下層土 02)
 出力値は、プローブ 2,3,4 の平均値: 主要因(センサー)の効果, **** (有意差あり: 0.1% 水準), *** (同: 0.5% 水準), ** (同: 1% 水準), * (同: 5% 水準), n.s. (有意差なし) は分散分析の結果。

の違い等の内部構造などに起因した潜在的な特徴であることが示された。なお、#5は#1～#6のセンサーの最小出力値に対して、1～2割高い値を示した。本報では、校正式として出力値(mV)の一次関数を採用し、傾きは $0.6 \times 10^{-3} \sim 0.8 \times 10^{-3}$ であったため、飽和に近い条件(出力値が1000mV程度)において、設定体積含水率に対して0.06～0.08($m^3 m^{-3}$)高く算出されることとなる。また、プローブ番号1を用いた測定結果を第3表に示すように、実際に当該機を使用する前に、水中で測定を行うと、この点の確認が可能である。

また、第3b)図に示すとおり、前述の分散分析・多重比較の結果について主要因(プローブ)の効果を見ると、高水分条件を中心に有意差が検出されなかった。また、低水分条件を中心とした有意差が検出された条件も、多重比較の結果では、すべてのプローブ間で出力値に有意差が検出されたのは1条件に限られた。すなわち、出力値にプローブ間の差異がほとんどないことが示された。

第3表 水に対するPR2/6プローブ番号1の出力値(mV)

センサー	出力値(mV)
#1	1005
#2	1024
#3	1044
#4	1075
#5	1114
#6	1080
平均	1057



第3b)図 センサーとプローブを主要因とした出力値についての分散分析の結果—プローブについての分散分析・要因効果・多重比較—

(A: 山口表土 01, B: 山口下層土 01, C: 山口表土 02, D: 山口下層土 02)
出力値は、センサー #1～#6の平均値: 主要因(プローブ)の効果, **** (有意差あり: 0.1%水準), *** (同: 0.5%水準), ** (同: 1%水準), * (同: 5%水準), n.s. (有意差なし)は分散分析の結果。

4 校正式を用いた計算値と実測値との適合性

PR2/6の校正式の適合性について検討するため、前述の4つの場合(1)～(4)について、校正式を用いた体積含水率の計算値と実測値を解析した。

本研究では、測定値を直線近似することで校正式を決定したが、この方法の適否と得られた校正式の土壌間の差異を確認するため、すべてのセンサーの出力値の平均値と個別のセンサーの出力値を用いた場合の校正式の傾きと切片、決定係数を第4表に示す。いずれの場合も0.905以上と決定係数が高く、出力値を直線近似することで体積含水率をできることが確認された。また、近似直線の傾きは、すべてのセンサーの出力値の平均値を用いて校正式を決定した場合、0.632-0.876と土壌によって大きく異なっており、供試土壌毎に、校正式が必要であることが示された。

一方で、校正式と実測値の適合性を評価するため校正式を用いた計算値と実測値の間の平均2乗誤差

(RMSE)と、マニュアルに記載された鈣質土壌用と有機質土壌用の2つの校正式(以下それぞれ鈣質土壌用校正式、有機質土壌用校正式)の6つの供試土壌に対するRMSEを第4図に示す。

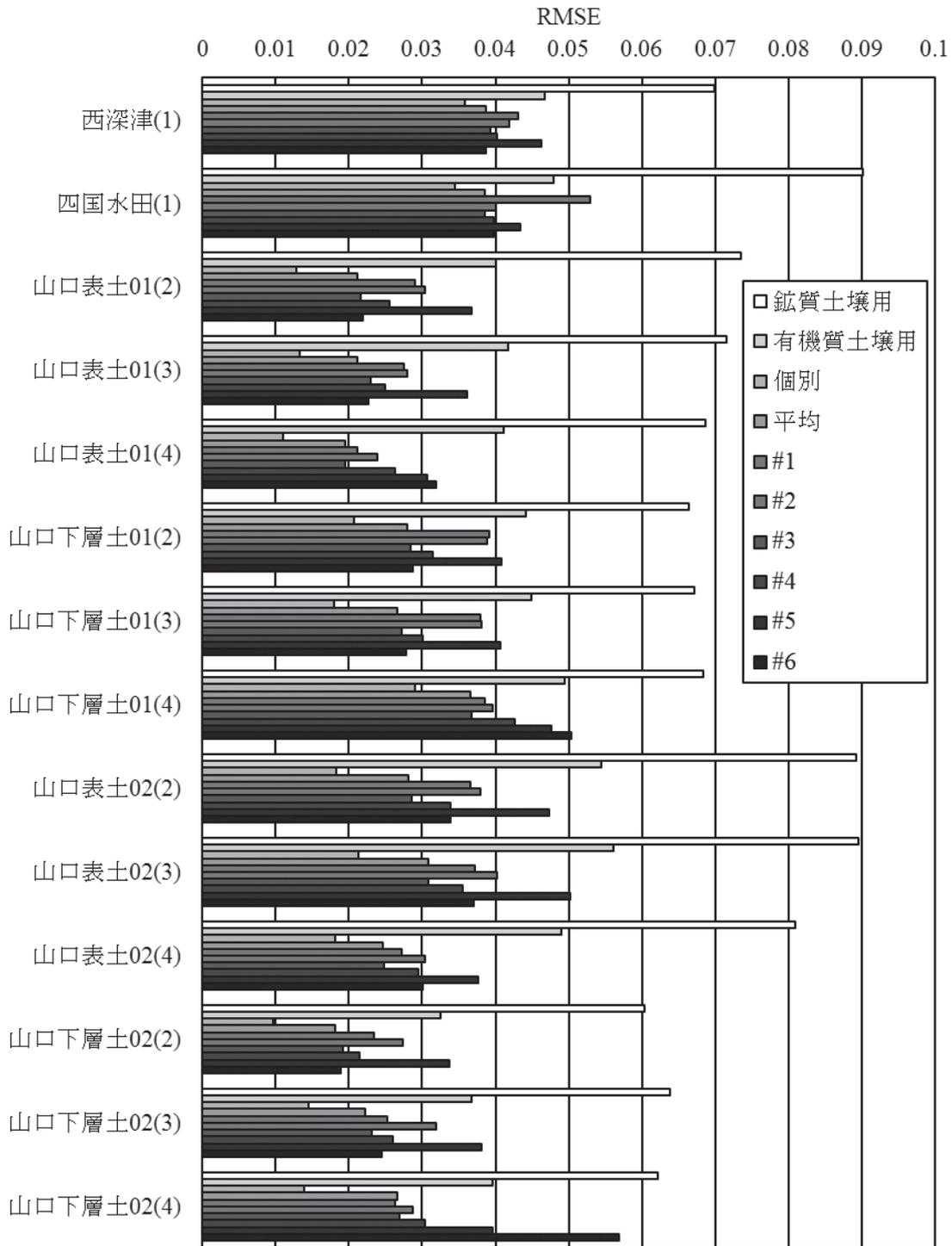
鈣質土壌用校正式は0.060-0.090のRMSEを示した。後述の有機質土壌用校正式よりもRMSEが大きく、今回の方法の中では最も適合度が低かった。また、有機質土壌用校正式は0.032-0.056のRMSEを示した。本研究で供試した転換畑土壌においては、鈣質土壌用校正式よりも適合度は高かったが、本研究のように、供試土壌毎に校正式を決定するよりも適合度が低かった。

センサー毎に個別の校正式を決定した場合は、RMSEが0.010-0.036となり、最も適合度が高かった。また、全センサーの平均値を用いて校正式を決定した場合は、RMSEは0.019-0.039となり、個別の校正式を決定した場合に次いで適合度が高かった。

センサー毎に決定した校正式を他のセンサーに

第4表 各センサーの出力値にもとづいた校正式の傾き ($\times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ mV}^{-1}$) と切片 ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)、決定係数

供試土	プロ ープ 番号		校正式						
			平均	#1	#2	#3	#4	#5	#6
西深津	1	傾き	0.708	0.708	0.719	0.729	0.719	0.679	0.694
		切片	-0.221	-0.202	-0.213	-0.232	-0.239	-0.226	-0.213
		決定係数	0.9394	0.9316	0.9356	0.9431	0.9464	0.9311	0.9434
四国	1	傾き	0.632	0.696	0.639	0.636	0.625	0.592	0.610
		切片	-0.127	-0.131	-0.121	-0.128	-0.133	-0.123	-0.124
		決定係数	0.9149	0.9054	0.9151	0.9142	0.9141	0.9138	0.9219
山口 表土 01	2	傾き	0.754	0.754	0.780	0.767	0.753	0.716	0.746
		切片	-0.228	-0.209	-0.224	-0.237	-0.242	-0.235	-0.217
		決定係数	0.9984	0.9976	0.9982	0.9980	0.9968	0.9967	0.9896
山口 下層土 01	2	傾き	0.760	0.755	0.800	0.776	0.760	0.730	0.742
		切片	-0.251	-0.220	-0.252	-0.259	-0.265	-0.261	-0.247
		決定係数	0.9843	0.9881	0.9831	0.9837	0.9851	0.9851	0.9794
山口 表土 02	2	傾き	0.865	0.855	0.895	0.872	0.863	0.808	0.903
		切片	-0.275	-0.246	-0.246	-0.246	-0.246	-0.246	-0.246
		決定係数	0.9907	0.9954	0.9954	0.9954	0.9954	0.9954	0.9954
山口 下層土 02	2	傾き	0.703	0.699	0.734	0.721	0.705	0.674	0.681
		切片	-0.212	-0.195	-0.213	-0.221	-0.225	-0.222	-0.193
		決定係数	0.9999	0.9995	1.0000	0.9997	0.9998	0.9994	0.9885



第4図 校正式による平均2乗誤差の差異 (PR2/6の場合)

図中の括弧は使用したプローブ番号を示す。個別とは、個別に決定した校正式。平均とは、すべてのセンサーの平均値を用いて決定した校正式。#i (i=1-6) とは、センサー毎に決定した校正式を他のセンサーにも適用した場合。

も適用した場合には、RMSEは0.019-0.053となり、前述の全センサーの平均値を用いて構成式を決定した場合と有機質土壌用校正式の間の適合度となった。個別のセンサーの校正式を見ると、#3の校正式は平均値を用いて校正式を決定した場合と同程度の適合度であった (RMSE: 0.019-0.039)。これは、本研究で実施したすべての測定において、#3の出力値がすべてのセンサーの出力値の平均値と極めて近い値を示したためである。また、#5の校正式はRMSEが0.031-0.050となり、全6センサーの校正式のうち最も適合度が低く、有機質土壌用校正式と同程度であった。これは、#5が全センサーの出力値の中で最大値を示したためである。さらに、これらの傾向はプローブにかかわらず示された共通の傾向であった。

各校正式の適合度を、RMSEをもとに整理すると、個別に決定した校正式 > すべてのセンサーの平均値を用いて決定した校正式 ≥ #3・・・#5 (センサー毎に決定した校正式を他のセンサーにも適用した場合) ≥ 有機質土壌用 > 鈹質土壌用となる。マニュアルでは当該機の測定精度を ± 0.04m³m⁻³ としており、この条件を満たすのはRMSEが0.04以下であった個別・平均・#3の3つであった。また、マニュアルに記載された2つの校正式については、既報⁸⁾のとおり適合度が低いことが確認された。

以上のことから、実際の測定においては、センサー毎に校正式を作成・使用することが推奨されるが、時間の都合などで実現が難しい場合には、#3のセ

ンサーのみで校正式を作成し、すべてのセンサーに対して使用することが、効率的であることが示された。

ここまでPR2/6の校正式として、その出力値 (mV) の一次式が採用できることが示された (式 (1))。

$$\theta = \alpha v + \beta \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 θ は体積含水率 (m³m⁻³)、 v は出力値 (mV)、 α は校正式の傾き (m³m⁻³mV⁻¹)、 β は校正式の切片 (m³m⁻³) である。

式 (1) について、誤差伝播の法則に基づき、 σ_θ^2 が無視できるほど小さいとして、推定値の分散 σ_θ^2 を表すと式 (2) となる。

$$\sigma_\theta^2 = v^2 \sigma_\alpha^2 + \sigma_\beta^2 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、4つの山口転換畑土壌に対して、プローブ毎に決定した3つの傾きと切片をもとに σ_α^2 、 σ_β^2 を計算するとともに、3つのプローブの全出力値の平均を用いて計算した推定値と分散、標準偏差を第5表に示す。4つの山口転換畑土壌とも、その標準偏差は0.01 m³m⁻³程度以下になり実際の測定上、どのプローブ用の校正式を使用したとしても、推定値のバラツキが小さいことが示された。すなわち、複数のPR2/6プローブを同一圃場に設置するような場合には、1本のプローブを用いて校正式を作成したものを、他のプローブに使用可能であることが示された。

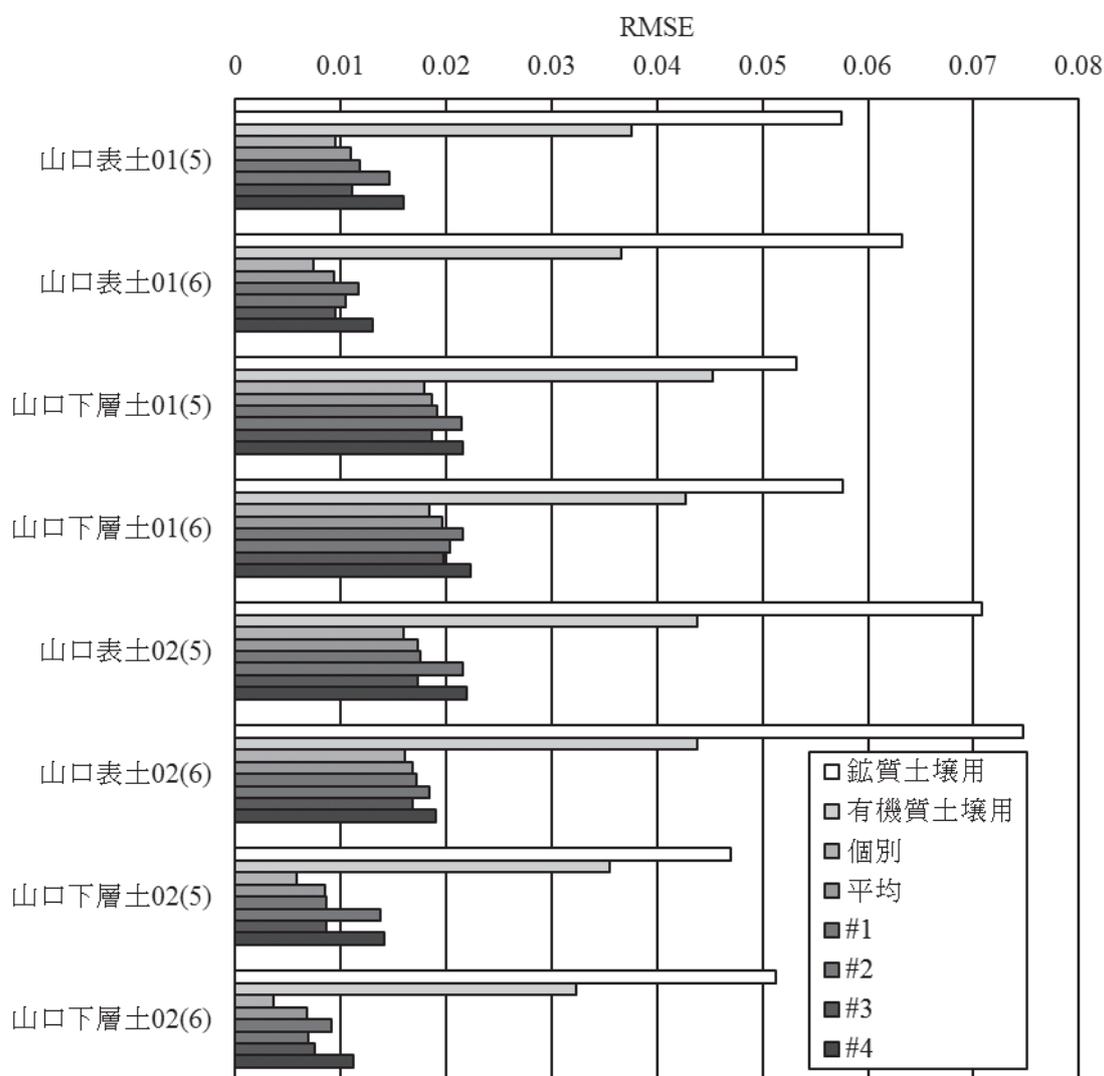
第5表 体積含水率の推定値の標準偏差 (PR2/6)

土壌	傾き		切片		出力値(mV)			体積含水率(m ³ m ⁻³)			
	平均	分散	平均	分散	プローブ			平均	推定値	分散	標準偏差
					1	2	3				
山口表土 01	7.61 × 10 ⁻⁵	2.49 × 10 ⁻¹¹	-0.238	4.74 × 10 ⁻⁵	616	616	622	616	0.230	5.68 × 10 ⁻⁵	7.54 × 10 ⁻³
山口下層土 01	7.67 × 10 ⁻⁴	7.02 × 10 ⁻¹²	-0.256	1.76 × 10 ⁻⁵	642	642	645	643	0.237	3.67 × 10 ⁻⁵	6.05 × 10 ⁻³
山口表土 02	8.58 × 10 ⁻⁴	3.46 × 10 ⁻¹⁰	-0.276	3.52 × 10 ⁻⁵	581	583	597	587	0.228	1.54 × 10 ⁻⁴	1.24 × 10 ⁻³
山口下層土 02	7.19 × 10 ⁻⁴	1.13 × 10 ⁻¹⁰	-0.223	5.74 × 10 ⁻⁵	640	638	645	641	0.237	1.04 × 10 ⁻⁴	1.02 × 10 ⁻³

5 PR2/4 の場合

PR2/4 のセンサー間の C.V. は 0.03 未満で、PR2/6 のそれよりも小さかった（データは割愛）。また、PR2/4 について、4 つの供試土壌に対する RMSE を第 5 図に示す。PR2/4 についても、個別に校正式を作成・使用した場合に RMSE が 0.004-0.018 で最小となり、次いですべてのセンサーの出力値の平均値を用いて校正式を作成・使用した場合（RMSE：0.007-0.020）、#3 のセンサーを使用した場合（RMSE：0.008-0.020）、の順となった。しかし、PR2/6 に較べて、

センサー毎の RMSE の差が小さく、どのセンサーでも大きな差はなかった。これは、センサー数が少なく、PR2/6 で 6 センサーの中で常に最大の出力値を示した #5 のようなセンサーがなかったことによるものである。マニュアルに記載された校正式については、PR2/6 と同様に有機質土壌用校正式の方が低い RMSE を示したが（第 5 図、RMSE：0.032-0.045）、マニュアルの測定精度を満たさない場合の方が多かった。



第 5 図 校正式による平均 2 乗誤差の差異（PR2/4 の場合）

図中の括弧は使用したプローブ番号を示す。個別とは、個別に決定した校正式。平均とは、すべてのセンサーの平均値を用いて決定した校正式。#i (i=1-4) とは、センサー毎に決定した校正式を他のセンサーにも適用した場合。

第6表 体積含水率の推定値の標準偏差 (PR2/4)

土壌	傾き		切片		出力値			体積含水率(m ³ m ⁻³)		
	平均	分散	平均	分散	プローブ		平均	推定値	分散	標準偏差
					1	2				
山口表土 01	7.34× 10 ⁻⁴	4.30× 10 ⁻¹¹	-0.235	2.00× 10 ⁻⁷	641	628	634	0.230	1.75× 10 ⁻⁵	4.18× 10 ⁻³
山口下層土 01	7.38× 10 ⁻⁴	7.02× 10 ⁻¹²	-0.253	5.94× 10 ⁻⁷	669	658	664	0.237	9.03× 10 ⁻⁶	3.01× 10 ⁻³
山口表土 02	8.04× 10 ⁻⁴	1.03× 10 ⁻¹²	-0.263	1.16× 10 ⁻⁵	615	605	610	0.227	1.20× 10 ⁻⁵	3.46× 10 ⁻³
山口下層土 02	6.89× 10 ⁻⁴	1.15× 10 ⁻¹¹	-0.219	1.60× 10 ⁻⁶	667	657	662	0.237	6.64× 10 ⁻⁶	2.58× 10 ⁻³

第6表に示すとおり、PR2/4についても供試したすべての山口転換畑土壌に対して、その標準偏差は0.01m³ m⁻³程度以下となり、実際の測定上どのプローブを用いて決定した校正式を使用しても、測定値のバラツキが小さいことが示された。このことから1つのプローブを用いた校正式は他のプローブにも使用できることが示された。すなわち、PR2/4についても、プローブを同一圃場に設置するような場合には、1本のプローブを用いて校正式を作成したものを、他のプローブに使用可能であることが示された。

Ⅳ おわりに

Delta-T社製のプロファイル土壌水分計PR2/6について、6つの供試土壌(水田転換畑土壌)に対する校正作業の結果に基づいた誤差解析によって、

- ① 当該機の出力値は時間的バラツキ、位置によるバラツキ共に小さいこと
- ② 各センサーの出力値の時間的バラツキや位置によるバラツキよりも、センサー間の出力値のバラツキの方が大きいこと
- ③ プローブ毎の出力値には有意差(5%)がほとんど検出されず、出力値にプローブ間の差が無いこと

が明らかになった。

校正式の適合性については、

- ① センサー個別の校正式を用いることが望ましいが、全センサーの出力値の平均値を用いた校正式も、同程度のRMSEに抑えられること

② 3番目のセンサー(#3)の測定値を用いて校正式を決定すれば、全センサーの出力値の平均値を用いた場合と同程度のRMSEに抑えることができ、マニュアルに記載された当該機の測定精度が維持されること

③ 誤差伝播の法則に基づいて、推定値の標準偏差を解析したところ、どのプローブを用いて決定した校正式を用いたとしても、その標準偏差は実際の測定上問題にならない程度に小さいことが明らかになった。

PR2/4については、

- ① センサー間の出力値の差異がPR2/6よりもさらに小さいため、いずれかのセンサー1つの出力値に対して校正式を決定すれば良いことが示された。

誤差解析の結果から、PR2/6の校正式について、

- ① 校正式は、出力値と土壌水分量の関係の最小自乗法による直線回帰によって、校正式が得られること
- ② 同一の土壌に対して、複数のプローブを用いる場合にも、1本のプローブのみで決定した校正式は、他のプローブでも使用できること
- ③ センサー毎に校正式を得ることが最も精度が高いが、3番目のセンサーだけを用いても十分な精度が得られること

が明らかになった。

V 摘 要

プロファイル土壌水分計 PR2/6 は、対象土壌の破壊を最小限に抑えつつ、100cm 深のうち 6 層の平均土壌水分量を測定できるが、土壌毎に校正式を得る必要がある。本稿では、6 土壌に対する校正作業の結果に基づいて、出力値の誤差を解析し、①各センサーの出力値の時間的バラツキ・位置によるバラツキはともに小さいこと、②各センサーの出力値のバラツキよりもセンサー間のバラツキの方が大きいこと、③センサー個別の校正式を決定した場合に適合性が最も高くなるが、全センサーの平均出力値を用いて校正式を決定した場合や 3 番目のセンサーの校正式をすべてのセンサーに使用した場合も高い適合性が得られること、④プローブ間のバラツキは小さく、1 本のプローブに対して得られた校正式は、他のプローブにも使用できること、が明らかになった。

謝 辞

本研究の測定データの一部は、平成 25 年度計画基礎諸元調査（中国四国農政局農村計画部資源課：現 農村振興局農村環境課）で得られたものである。また、校正容器の作成など、農研機構西日本農業研究センター業務第 1 科員および契約職員の協力を得た。記して、謝意を表します。

引用文献

- 1) Delta-T Device Ltd. 2008. User Manual for the Profile Probe type PR2. 1-43.
- 2) Evett, S.R., J.A. Tolk and T.A. Howell 2006. Soil Profile Water Content Determination: Sensor Accuracy, Axial Response, Calibration, Temperature Dependence, and Precision. *Vadose Zone J.* 5 (3) : 894-907.
- 3) Huang, Q., O.O. Akinremi, R. Sri Rajan and P. Bullock 2004. Laboratory and field evaluation of five soil water sensors. *Can. J. Soil Sci.* 84 (4) : 431-438.
- 4) 井上光弘・山崎真吾・張清涛 2005. プロファイル水分計による土壌水分測定に及ぼす塩濃度の影響. 平成 17 年度農業土木学会大会講演要旨集. 160-161.
- 5) 井本博美・鴨下顕彦・加藤洋一郎・常田岳志・宮崎毅 2006. Profile Probe による黒ボク土と立川ロームの土壌水分測定 ―室内キャリブレーションと現場測定―. *土壌の物理性* 104 : 51-60.
- 6) 三石正一・溝口勝 2007. デカゴン土壌水分センサーの個体間のばらつきと簡易キャリブレーション法に関する一考察. 第 49 回土壌物理学会講演要旨集. 40-41.
- 7) Oda, M. and C. Ogura 2008. Soil Moisture Movement during the Dry Season in the Sandy Soil Area of Northeast Thailand. *システム農学* 24 (1) : 57-64.
- 8) Silva, B.M., G.C. de Oliveira, M.E. Serafim, J.J. da Silva, A. Colombo and J.M. de Lima 2012. Accuracy and calibration of capacitance probe in a Rhodic Ferralsol planted with coffee. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 47 (2) : 277-286.

Measurement error analysis for the PR2/6 soil moisture profile probe on converted paddy soil and proposal on an efficient calibration method

Hidetoshi MOCHIZUKI, Teruyuki OHARA¹, Kazuhiko TANAKA¹ and Takumi KAMETAKA¹

Key words: Profile probe, Soil moisture, Measurement error, Calibration, PR2/6

Summary

The PR2/6 moisture profile probe (Delta-T) allows measurement of the average soil moisture contents in each of six layers to a 100-cm depth with minimum soil disturbance, but it requires a calibration equation for each soil. In this study, we analyzed the device's measurement errors based on calibration equations for six Japanese converted paddy soils. The variability among measurements by each sensor was so small, C.V.<0.01, that the measurements showed quite low variance based on both time and orientation. The measurement variability of each sensor was smaller than that between sensors. When a calibration equation was determined for each sensor, the highest agreement among measurements was confirmed. High levels of agreement were also achieved with a single equation determined based on all measurements from the six sensors and with an equation determined by measurements of the no. 3 sensor. Finally, the variability between sensors was so small, $<\pm 5\%$, that the calibration equation based on measurements of one probe can be used for other PR2/6 probes.