

ECH₂O 土壤水分センサーのキャリブレーション方法

Calibrating ECH₂O Soil Moisture Sensors

Douglas R. Cobos and Chris Chambers

Revised 11/17/10

序論

デカゴン社のECH₂Oセンサーを使用することで、含水量と強い相関を持つ土壤の誘電率から土壤の体積含水率を測定することが可能となる。しかし、全ての土壤が同一の電気特性を有するわけではない。土壤バルク密度、鉱物、岩石組織及び塩分濃度の違いにより、ECH₂O センサー (EC-5, 10HS, 5TE, 5TM)の標準のキャリブレーションでは、ほとんどの鉱物土壤に対して精度 ±3-4%、無土壤成長基材 (培養土、ロックウール、その他) では精度± 5%である。ただし、土壤に特定のキャリブレーションすることによって、全ての土壤と無土壤基材で精度は± 1-2% に向上する。DecagonはECH₂Oセンサーのユーザーに対し、体積含水率測定に最良の精度を得るため、土壤特定のキャリブレーションを実施することを薦めている。独立の研究者 (Czarnomski et al., 2005) による研究では、ECH₂Oセンサーへの土壤特定のキャリブレーションによって、分解能、精度、再現性及びECH₂Oセンサー間の一致率は非常に良好とされているため、一つのセンサーに対して土壤特定のキャリブレーションを実施すれば、その土壤については、同じタイプの全てのセンサーに適用可能である。本アプリケーションノートでは、ECH₂Oセンサーに土壤特定のキャリブレーションを実施するための、ステップ毎の説明を目的とした。

キャリブレーション方法

ECH₂Oのキャリブレーションは、通常Starr and Paltineanu (2002)で概説された静電容量センサーキャリブレーションの一般手法に従って行われる。以下に土壤特定のキャリブレーションを実施する際の説明ガイドを載せた。

1. 必要装置

- 1.1. シャベルと土壤収集容器 (1 シャベル, 土壤タイプ毎に1容器) : 土壤収集及び土壤乾燥用。
- 1.2. キャリブレーション容器 (1)キャリブレーション容器は、土壤を自然のかさ密度に戻すよう収納する。一方、ECH₂O センサー全体(電子機器部分も含む)に加え、プローブ先端及び数cmのケーブル各々から数cmの余裕を持った土壤深さを保つ。容器は比較的剛直で土壤表面に届きやすいものであれば良い。
- 1.3. ECH₂Oセンサーとデータ取得システム (各1)
 - 1.3.1. ECH₂O センサーの出力は、同タイプのセンサーと非常に似ている。それ故、単一のセンサーをキャリブレーションすれば同じ土壤に対しては、そのキャリブレーション内容を同タイプの他センサーに適用でき、非常に良好な精度を保つことが可能である。

1.3.2. 現場で使用するデータ取得システムは、どのようなものでも使用可能である。(ProCheck, Em50, Em5b, Campbell Scientificデータロガー、その他)

1.4. 容量土壌サンプラー(1)

1.4.1. ECH₂O センサーのキャリブレーションには、容量土壌サンプラーを使用する。これは体積含水率測定用に、キャリブレーション容器から規定容量の土壌を採取するために使う。販売されている土壌サンプラー (Environmental Sampling Supply販売のESS Core N' Oneなど)か、または自作のサンプラーが使用可能。サンプラーの唯一の必要事項は、土壌かさ密度を変えずに規定容量の土壌サンプルを採取できる。

1.4.2. サンプラーがない場合は、金属製導管ないし小径(1.5 - 2.5 cm)の金属製または薄壁で強固なプラスチック製管を長さ3 - 5 cmで切断し、使用することを薦める。これにより、管両端のぼりを取り、一方の管端を研ぐことで容易に土壌に挿入できる。

1.4.3. サンプラー長さとお内径を正確に計測し、容積を計算する($\pi r^2 h$)。

1.5. 土壌乾燥容器 (土壌タイプ毎に5-7容器)

1.5.1. 乾燥容器は加熱炉乾燥に適しており、ふたが密閉可能であれば、どのような容器でも構わない(土壌サンプリング管、ベビーフード用容器)。

1.5.2. 清浄で乾燥した土壌乾燥容器の質量を測ってから土壌を入れる。風袋を表1に記載する。

1.6. 天秤または秤量天秤(1) : 特定土壌での最良のキャリブレーションのため、天秤は0.01g未満の精度が必要である。

1.7. 乾燥加熱炉(1): 安定的に105 - 110 °Cを保てる加熱炉であれば、どのようなものでも構わない。

2. 土壌サンプルの採取

2.1. およそ4リッター(1 ガロン)の土壌を採取する。

2.2. ECH₂O センサーで測定したい部位/深度から採取された土壌であるかどうかを確認する。

2.3. サンプル採取の際、土壌の現場かさ密度を測定する場合もある。

2.3.1. 容量土壌サンプラーを使用し、自然な状態の土壌を数サンプル採取する。

2.3.2. 容量サンプラーを使用するため、土壌サンプルは既知の容量(V_{soil})となる。

2.3.3. 加熱炉で芯状の土壌を乾燥し、乾燥土壌の質量を測定する(m_{dry})。

2.3.4. 下記の式4によって、土壌のかさ密度を求める。

3. 土壌の調整

3.1. 土壌を風乾させる。土壌を薄い層に広げる。風が土壌上を流れるのであれば、風乾が最速の手段である。

3.2. 大きな物体を土壌から取り除く。

- 3.2.1. 大きな石や物体が残っているとキャリブレーション工程を複雑にしてしまう。よって、次工程に移る前に、大きな塊を粉砕し2-5 mm のふるいにかけることを薦めたい。
- 3.2.2. 材料によっては(たとえばコンポスト、マルチ、無土壌成長基材)、材料の性質を大きく変えない限りは大きな粒子を取り除けない。

4. キャリブレーション

- 4.1. おおよそ現場のかさ密度で、土壌をキャリブレーション容器に入れる。
 - 4.1.1. 乾燥土壌から始める場合、既知容量の容器に一定量の土壌を入れることにより、かさ密度の制御が可能である。
 - 4.1.2. 通常、複数層に分けて土壌を入れ、一層ごとに詰めていくことが必要である。
 - 4.1.3. 10HSの場合、センサー挿入前に半分強の土壌のみを容器に詰める。
 - 4.1.4. EC-5, 5TE及び5TMの場合、全量の土壌容量を容器に入れる。
- 4.2. ECH₂Oセンサーの挿入 (EC-5, 5TE, 5TM)
 - 4.2.1. EC-5, 5TE及び5TMは、土壌がフルに詰まった容器に直接垂直に挿入できる。
 - 4.2.2. **重要:** センサーのプロープが一直線に挿入され、プロープと土壌の間に空隙ができないよう気をつける。
 - 4.2.3. センサーを完全に土壌に挿入する。これには、センサーの黒いプラスチックの基部も含む。黒いプラスチック部分を完全に土壌に挿入できない場合、可能な範囲で深く挿入した後、土を追加しセンサー基部と可能であれば数cmのケーブルを埋める。
- 4.3. ECH₂Oセンサー(10HS)の挿入
 - 4.3.1. 10HSセンサーを可能な限り土壌容器の中に挿入する。土壌の種類と湿度レベルによっては、他のECH₂Oセンサーと同様10HSの全体を土壌に挿入可能である。
 - 4.3.2. ある種の土壌の場合、10HS 全体を柱状の土壌に挿入することができない。
 - 4.3.2.1. ECH₂O センサー用挿入ブレードまたは10HSよりわずかに薄いその他のブレードがあれば、それらを用いて誘導孔を開け、センサーを完全に挿入することができる。
 - 4.3.2.2. 誘導孔開けツールが利用できない場合、可能な限り10HSを柱状土壌に挿入する。その後、センサーの露出部分を空隙のないように土壌で覆い、所定のかさ密度に設定する。
 - 4.3.3. 10HSの黒いプラスチック部分を土壌で覆うよう注意する。黒いプラスチック部分を完全に土壌に挿入できない場合、可能な範囲で深く挿入した後、土を追加しセンサー基部と可能であれば数cmのケーブルを埋める。
- 4.4. **重要事項:** センサーは、その平坦な検知部分から少なくとも半径5cm以上隙間なく土壌で覆われている必要がある。10HSの場合、10 cm以上覆われなくてはならない。
- 4.5. センサー値の読み取り
 - 4.5.1. Decagonのデータ取得装置を使用しない場合、EC5で使用するのと同様の励起電圧でセンサーを励起するように留意する。全ての他のDecagonセンサーは、それぞれ

の励起電圧で制御されるため、最適な電圧範囲はマニュアルを参照のこと。

4.5.2. 生データをセンサーから収集する (未キャリブレーション)。

4.5.3. 4.2 - 4.5のステップを1, 2回繰り返す、再現性を確認してもよい。一般的に僅かなばらつきがあるため (僅かな生カウントあるいは mV単位)、平均値が取られる。

4.5.4. センサー読み取り値を表1に記録する。

4.6. 容量土壌サンプルの採集

4.6.1. ECH₂O を抜き取らずに、センサー付近の自然状態の土壌に容量土壌サンプラーを挿入する。

4.6.2. サンプラーを抜き、内部の柱状土壌が問題ないことを確認する。平らな刃で端部の過剰な土壌をそぎ取る。また、起こり得る小さな欠陥を埋める。

4.6.3. 乾燥容器に柱状土壌全体を入れ、ふたをする。サンプリングから最初の秤量までの水分量減は体積含水量の計算に誤差をもたらす。

4.6.4. 4.6.1 - 4.6.3のプロセスを少なくとも1回繰り返す。これにより、サンプルの空間変動性効果の減少に貢献する。

4.7. 次に掲げる質量を計測する。湿潤土壌 + 容器 (ふたなし) : 表1の質量を記録する。

4.8. キャリブレーションされた土壌を湿潤させる。

4.8.1. 土壌容積10 mL に対し、およそ1 mLの水を加える(VWC を10%増加させる)。水を可能な限り均等に土壌に加える。

4.8.2. 手またはこてを用いて、混合物が均一になるまで土壌をよく混合する。

4.9. 4.1から4.8のプロセスを土壌がほぼ飽和するまで繰り返す。これは通常、4-6のキャリブレーションポイントをもたらす。各水分量で同じ土壌サンプルを同じ量だけキャリブレーション容器中に詰めることによって、キャリブレーション中のサンプルかさ密度が調整される。

4.10. 体積土壌サンプルを乾燥させる。

4.10.1. 秤量済みの湿潤サンプルを105 °Cの加熱炉に24時間放置する。

4.10.2. 有機物を多く含む土壌の場合、105 °Cでの乾燥は揮発性有機化合物の相当量を 損失する事があり、キャリブレーションエラーにつながることを注意する。土壌を60-70 °Cで48時間以上乾燥することを推奨したい。

4.11. 乾燥土壌を秤量する。

4.11.1. 土壌乾燥容器を加熱炉から取り出し、熱い間にふたを取り換える。

4.11.2. 土壌及び容器を冷却する。

4.11.3. 乾燥土壌+容器(ふた抜き)の質量を測定する。

4.11.4. 値を表1に入力する。

表1. 土壌特定ECH₂O センサーキャリブレーションの例示データ取得表

サンプル番号	平均センサー読み 取り値 (raw countまた はmV)	乾燥容器風袋量 (g)	サンプル容量 (cm ³)	容器 + 湿潤土壌の 質量 (g)	容器 + 乾燥土壌の 質量 (g)
1	664	70.605	15.31	94.836	94.215
2	764	72.245	15.31	96.433	95.194
3	902	71.713	15.31	96.923	94.785
4	1030	74.45	15.31	101.979	98.834
5	1318	70.997	15.31	100.402	95.873
6	1374	71.48	15.31	101.060	95.886

5. 結論

体積含水率は、土壌バルク単位体積当たりの水の体積と定義される。

$$\theta = V_w/V_t \quad (1)$$

θ は体積含水率 (cm³/cm³)、 V_w は水の体積 (cm³)、及び V_t は土壌バルクの体積(cm³)である。土壌サンプル採取の際、容量サンプラーを使用するため、サンプルの V_t は既知である (1.4項参照)。 V_w を求めるには、加熱炉乾燥中に土壌サンプルから失われた水の体積を計算する：

$$m_w = m_{wet} - m_{dry} \quad (2)$$

$$V_w = m_w/p_w \quad (3)$$

m_w は水の質量、 m_{wet} は湿潤土壌の質量(g)、 m_{dry} は乾燥土壌の質量、及び p_w は水の密度である(1 g/cm³)。体積含水率に加え、土壌サンプルのかさ密度も求められる。かさ密度(ρ_b) は乾燥土壌の密度と定義される(g/cm³)。:

$$\rho_b = m_{dry}/V_{soil} \quad (4)$$

上記計算は、MS Excel のようなスプレッドシートプログラムによって最も容易に実行される。表2は、表1データにつき上記計算が実行されたExcelスプレッドシートを示している。また、計算実行に用いられたセル操作は列3に示す。ECH₂O センサーの出力は、土壌かさ密度のわずかな差には敏感ではない。しかしながら、キャリブレーション中の土壌のかさ密度が現場採取の土壌の密度と非常に大きく異なる場合、キャリブレーションに誤差をもたらす。現場のかさ密度を2.3項記載のように測定した場合は、キャリブレーション容器中の土壌かさ密度をレベルよく(4.1.1項参照)制御できる。既知のかさ密度に詰めない場合は、キャリブレーション容器中のかさ密度は現場のかさ密度と比べ20%以上異なるため、キャリブレーションを繰り返すとともに、より現実的なかさ密度に土壌を詰めるよう考慮すべきである。

表2. 例示キャリブレーションデータつきエクセルスプレッドシート

列2は、計算セクションで使われる可変数名称を示す。また、列3はキャリブレーションデータからVWCを計算する際に使用されるセル操作を示す。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	サンプル番号	センサー出力(raw count)	容器重量 (g)	サンプル体積 (cm ³)	湿潤土壌質量+容器(g)	乾燥土壌質量+容器(g)	水の質量及び体積 (cm ³)	乾燥土壌質量 (g)	土壌かさ密度 (g/cm ³)	VWC (cm ³ /cm ³)
2			Vt				(mw, Vw)	mdry	Pb	θ
3							=E3-F3	=F3-C3	=H3/D3	=G3/D3
4	1	664	70.605	15.31	94.836	94.215	0.621	23.610	1.54	0.0406
5	2	764	72.245	15.31	96.433	95.194	1.239	22.949	1.50	0.0809
6	3	902	71.713	15.31	96.923	94.785	2.138	23.072	1.51	0.1396
7	4	1030	74.45	15.31	101.979	98.834	3.145	24.384	1.59	0.2054
8	5	1318	70.997	15.31	101.402	95.873	4.529	24.876	1.62	0.2958
9	6	1374	71.48	15.31	101.060	95.886	5.174	24.406	1.59	0.3379

6. 結果及びキャリブレーション機能の使用

上記計算をスプレッドシートプログラムで実行する場合、キャリブレーション関数の結果を得ることは難しい。単純に、X軸にはセンサー出力を、Y軸には計算されたVWCを取る散布図を作成する(図1)。近似曲線または曲線近似機能を用い、両者の関係を示す数学モデルを作成する。下に示すように、この関係は大抵直線になるが、二次方程式で最も合致する場合もあり、特に有機物量の多い土壌の場合が該当する。

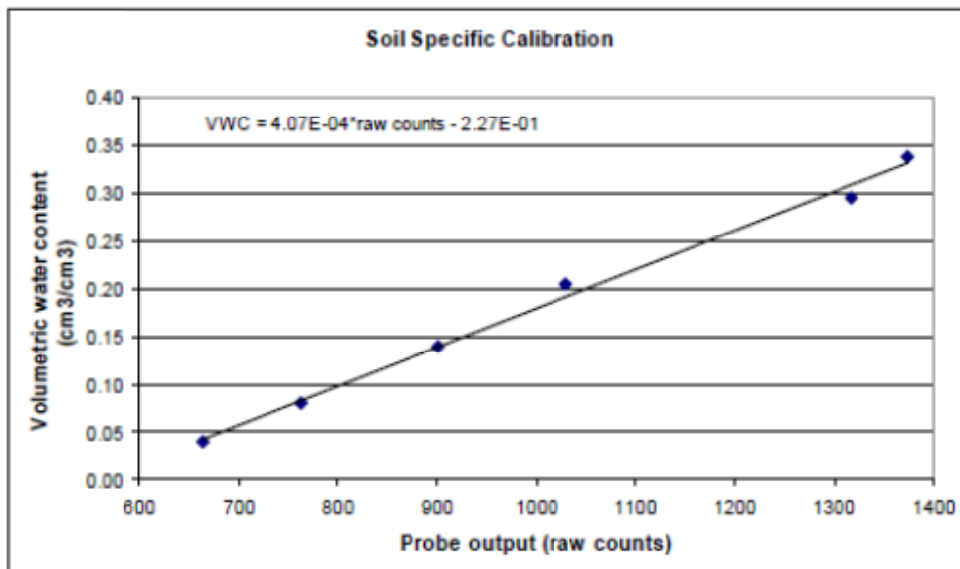


図1. 例示キャリブレーションデータ 土壌特有キャリブレーション式は図の左上に示される。

キャリブレーション関数を作成し、その後、取得したECH₂O センサーデータに適用する。Em 50及びEMm5bデータロガーでデータ取得する場合、データロガーからダウンロードした生データに本計算式を適用しなければならない。また、DataTracソフトウェアパッケージを使用する場合、セットアップタブにキャリブレーション関数を適用できる。さら

に、Campbell Scientificデータロガーを使用の場合は、データロガープログラムにキャリブレーションプログラムを入れるか、プロセス後の過程でのキャリブレーションが実施可能である。

参照文献

Czarnomski, N. G. Moore, T. Pypker, J. Licata, and B. Bond. 2005. Precision and accuracy of three alternative instruments for measuring soil water content in two forest soils of the Pacific Northwest Can. J. For. Res. 35(8): 1867-1876.

Starr, J.L., and I.C.Paltineanu. 2002. Methods for Measurement of Soil Water Content: Capacitance Devices. p. 463-474. In J.H.Dane, and G.C.Topp (ed.) Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods. Soil Science Society of America, Inc.