

生物環境調節学分野における ECH₂O プローブの適用事例

伊藤祐二¹・宮本英揮²・安永円理子¹・江口壽彦¹・筑紫二郎¹

Applications of ECH₂O probes to the environmental control field in biology

Yuji ITO¹, Hideki MIYAMOTO², Eriko YASUNAGA¹, Toshihiko EGUCHI¹ and Jiro CHIKUSHI¹

Abstract: Moisture measurements in a hydroponic medium with growing carrot and in a rough-rice medium using ECH₂O probes (EC-5, ECH₂O-TE; Decagon Devices) have been conducted as case studies on applications of the probes to the environmental control field in biology. In the hydroponics, it was difficult to apply directly EC-5 sensor to moisture measurement in the medium due to the effect of conductive nutrient solution on EC-5 output voltage. To eliminate the effect, a correction method that may be acceptable for known and stable electrical conductivity condition was proposed and examined. The results showed that the correction method was useful for estimating relationship between volumetric water content in the medium and the output voltage under various conductivity conditions. For the rough-rice medium, the moisture decline in the drying process was confirmed by the measurements using EC-5 and ECH₂O-TE sensors. From the experiments, we could obtain non-linear functions that are highly relating the moisture in the rough-rice medium to output voltage or relative permittivity.

Key Words: capacitance moisture sensor, culture medium management, stored grain, relative permittivity, electrical conductivity

1. はじめに

近年、静電容量式水分センサーが、野外や室内における土壤水分のモニタリングに多用されている（たとえば、Wu, 1998; Polyakov et al., 2005; Thompson et al., 2007）。なかでも ECH₂O プローブ（デカゴン社）は、時間領域反射法（TDR）に代表される他の計測法に比べて簡便かつ安価に水分計測を実施できるため（Blonquist et al., 2005）、取り扱いに専門的な技能を要する高額の計測機器を敬遠してきたユーザーに受け入れられやすくなった。一方、静電容量式センサーによる水分の測定値は、温度と電気伝導度に影響されることが知られている（Kelleners et al., 2004）。ECH₂O プローブでは、従来のセンサー（EC-10, EC-20 など）よりも高い周波数の信

号を利用した新型のセンサー（EC-5, ECH₂O-TE など）が開発され、それらの影響を低減できるようになった（Parsons and Bandaranayake, 2009）。したがって、今後、ECH₂O プローブの用途が広がり、様々な分野のユーザーに利用されるようになることが予想される。ECH₂O プローブに関する既往の研究では、旧型センサーの適用事例はいくつか報告されている（たとえば、Nemali et al., 2007; 齊藤ら, 2008）。しかし、新型センサーについては、土壌科学分野のユーザーの視点から、測定値に対する温度依存性または電気伝導度依存性の修正方法や使用上の問題などが検討されているものが多く（たとえば、Bogena et al., 2007; Kizito et al., 2008; Parsons and Bandaranayake, 2009）、適用事例に関する報告は少ない。

九州大学生物環境調節センターでは、生物環境調節学分野の研究者らが、高品質作物の周年安定生産ならびに穀物の品質管理を目的として、EC-5 と ECH₂O-TE を利用した培地および穀物の水分計測実験を実施している。本論では、それらの実験における EC-5 と ECH₂O-TE の適用事例を紹介し、使用上の問題やその対処方法について概説する。

2. 養液栽培における培地管理への適用

人工気象室（ファイトトロン）では、根菜類の周年安定生産法の確立を目指して、底面給液式砂耕装置を用いた養液栽培実験を行っている。実験の概略図を Fig. 1 に示す。養液栽培では、個々の作物の生育に適した一定濃度（たとえば、ニンジンの場合 1.3 dS m⁻¹）の培養液を

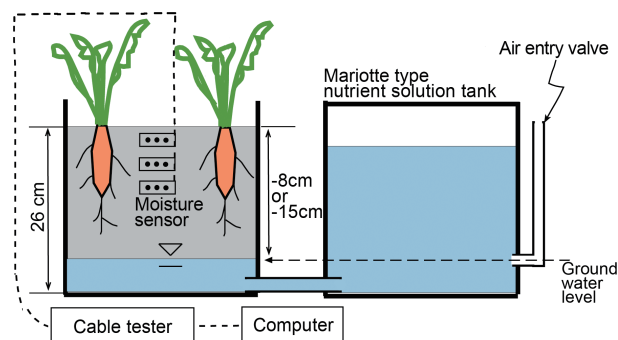


Fig. 1 ニンジンの養液栽培の概略図。Schematic diagram of a carrot hydroponics.

¹Biotron Institute, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581, Japan. Corresponding author: 伊藤祐二, 九州大学生物環境調節センター

²Organization for the Strategic Coordination of Research and Intellectual Property, Meiji University, 1-1-1 Higashi-mita, Tama-ku, Kawasaki 214-8571, Japan

2009年10月5日受稿 2010年1月22日受理
土壌の物理性 114号, 33-36 (2010)

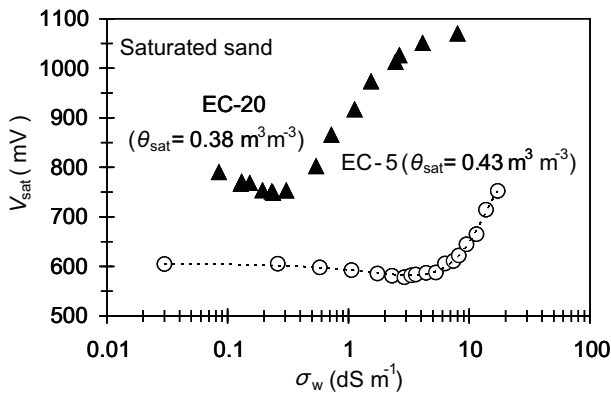


Fig. 2 溶液の電気伝導度 σ_w と水分飽和条件における出力電圧 V_{sat} との関係 (EC-20 の結果は Mojid and Cho (2006) から引用).

Relationship between solution electrical conductivity σ_w and output voltage V_{sat} in saturated condition. The results for EC-20 are referred to Mojid and Cho (2006).

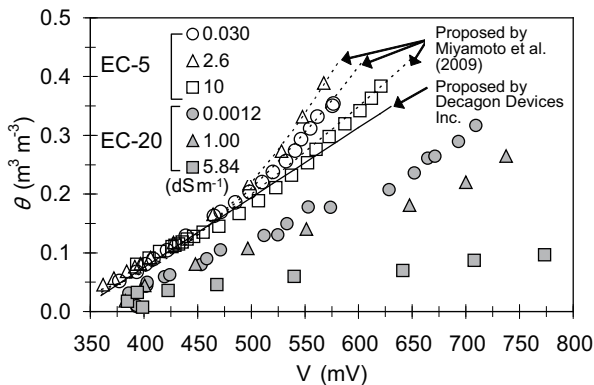


Fig. 3 導電性の異なる条件で得られた砂の体積含水率 θ と出力電圧 V との関係 (EC-20 の結果は Mojid and Cho (2006) から引用).

Relationship between output voltage V and volumetric water content θ in saline sands. The results for EC-20 are referred to Mojid and Cho (2006).

給液するため、肥培条件と培地の水分条件を容易に制御できる。底面給液法では、貯蔵根の肥大に好適な安定した培地水分条件を創出できるが、水分量が高くなりすぎると、貯蔵根の形状が悪化し、品質が低下することが知られている。そのため、江口ら (2009) は、砂培地に異なる地下水位を設定し、ニンジンの生育期間における培地の体積含水率 θ を観測することにより、貯蔵根の形状または収量と θ との関係を調べた。

実験当初、水分計測には EC-5 を使用する予定であった。しかし、EC-5 は出力電圧 V に対する電気伝導度依存性が旧型の EC-20 に比べて低減されていたものの (Fig. 2 および Fig. 3 参照)、高水分域では同一の θ であっても V は電気伝導度に応じて変動したため (Fig. 2)、デカゴン社が提示する校正式をそのまま適用できないことが判明した (Fig. 3)。そこで、宮本ら (2009) は、培養液の電気伝導度 σ_w が既知で、且つ概ね一定で推移する場合に適用できる EC-5 の電気伝導度依存性の経験的修正法を提案した。

宮本ら (2009) は、EC-5 に対する V - θ 関係を次式で

表した。

$$\theta = aV^2 + bV + c \quad (1)$$

ここで、 a 、 b 、 c は係数であり、各係数は 3 組の V - θ 関係から決定できる。すなわち、これらのうち 2 組についてはデカゴン社の校正式が実測の V - θ 関係とよく一致する点、つまり同校正式から算出した $\theta = 0.05$ と $0.15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ における V 値を用い、残りの 1 組は水分飽和条件 θ_{sat} における出力電圧 V_{sat} を用いる。これら 3 組の (V 、 θ) を式 (1) に代入して表される 3×3 行列式を解くことにより、係数 a 、 b 、 c は V_{sat} と θ_{sat} ($= 0.43 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) の関数として得られる。Fig. 2 に示す通り、 V_{sat} は σ_w の関数であるため、これらの係数も σ_w の関数となる。この手法で得た $\sigma_w = 0.030, 2.6, 10 \text{ dS m}^{-1}$ における V - θ 関係の計算値 (Fig. 3 の点線) は、実測値 (白抜き丸、三角、四角) とよく一致したことから、同法が異なる σ_w を持つ培地の V - θ 関係を求めるのに有用であることが確認された。したがって、式 (1) に基づく電気伝導度依存性の修正法は、先述の貯蔵根周辺の培地水分量のモニタリングに活用できると考える。

3. 貯蔵穀物の品質管理への適用

乾燥調整施設や貯蔵施設内の穀物のカビおよびカビ毒発生を予防するためには、穀物水分の変動を把握することが重要である。これまで、電気的特性に基づく様々な穀物水分計測法が検討されている。

安永ら (2008) および Yasunaga et al. (2009) は誘電率法に着目し、乾燥過程における籾の水分含量の経時変化の計測に EC-5、ECH₂O-TE、TDR プローブ (自作のプローブと Campbell Scientific 社製のケーブルテスター TDR100 を使用) を用い、穀物水分計測におけるこれら 3 種のプローブの有効性について検討した。実験には、下面に通気孔を設けた内径 5 cm、高さ 11 cm の上面開放型円筒容器を用いた。容器の中央にプローブを固定し、そこに水を十分に吸水させた籾を約 0.495 Mg m^{-3} の密

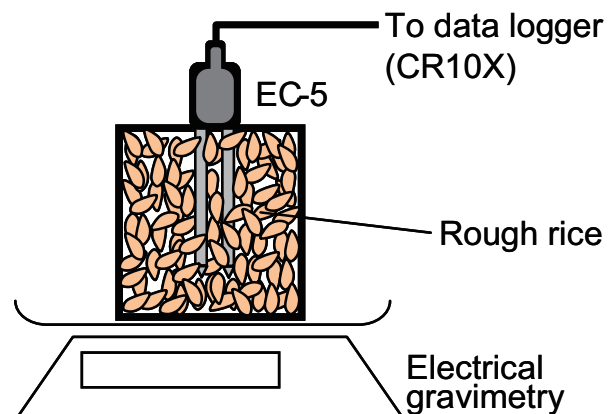


Fig. 4 EC-5 を用いた籾の水分計測の概略図。Schematic diagram of the moisture measurement with EC-5 for a rough-rice.

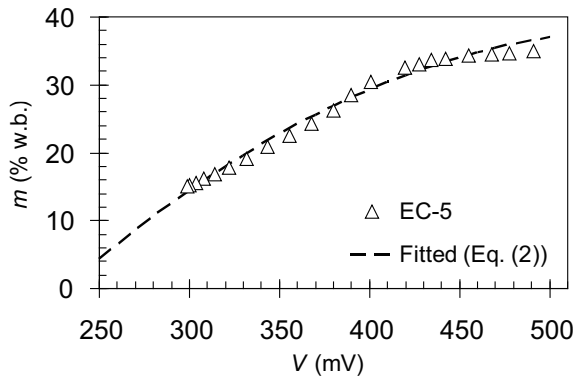


Fig. 5 籾の水分含量 m と EC-5 からの出力電圧 V との関係 . Relationship between moisture content m in a rough-rice medium and EC-5 output voltage V .

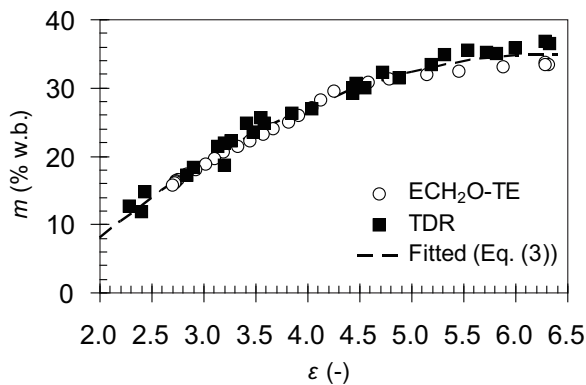


Fig. 6 籾の水分含量 m と ECH₂O-TE または TDR プローブで計測した比誘電率 ϵ との関係 . Relationships of moisture content m in a rough-rice medium to relative permittivity ϵ measured by ECH₂O-TE or TDR probe.

度で充填した後、通風して籾の水分減少過程における V または比誘電率 ϵ を測定した (Fig. 4 参照). なお、計測した籾の水分含量は、湿潤籾に占める水分の割合、すなわち湿量基準含水率 m (wet basis, %)(山下ら, 1991) として表した.

乾燥重量法により評価した実験開始時と終了時の m は、EC-5 の場合 34.9 と 15.1 % w.b. (Fig. 5 参照), ECH₂O-TE の場合 33.7 と 15.7 % w.b. (Fig. 6 参照), TDR プローブの場合 36.8 と 11.9 % w.b. (Fig. 6 参照) であった. デカゴン社が提示する比誘電率への変換式により、ECH₂O-TE からの出力値を ϵ に変換して ϵ - m 関係を評価したところ、ECH₂O-TE と TDR プローブによる計測値はよく一致することを確認した (Fig. 6). 実験により、 m と V (EC-5) または m と ϵ (ECH₂O-TE, TDR) との関係を表す校正式として、それぞれ次式を得た.

$$m = -3.589 \times 10^{-4}V^2 + 0.400V - 73.250 \quad (2)$$

$$m = -1.414\epsilon^2 + 17.970\epsilon - 22.135 \quad (3)$$

m の実測値と両式を介したプローブ計測値との間の平均二乗誤差の平方根 (RMSE) は、EC-5 (式 (2)) の場合

0.8 % w.b., ECH₂O-TE (式 (3)) の場合 0.8 % w.b., TDR プローブ (式 (3)) の場合 1.1 % w.b. であった. この結果から、乾燥過程における籾の水分減少について再現性の高い校正式を導くことができたと考える (Fig. 5, 6).

ただし、ECH₂O プローブや TDR プローブのような誘電率水分計を籾の水分計として用いる場合には、籾の充填密度の違いが校正式の評価に影響をおよぼすことに留意する必要がある (安永ら, 2008). 籾の粒径は、静電容量法や TDR が従来から対象としてきた土壤に比べて大きく、均一 (粒度が悪い) である. そのため、充填具合によって間隙率に差異が生じ、たとえ籾の湿量基準含水率が同じであってもプローブ周囲の比誘電率は異なることがある. したがって、充填密度が本実験と異なる場合には、今回評価した式 (2) と (3) を用いると誤差が大きくなる可能性があるため、対象とする籾の充填密度に応じた V - m 関係または ϵ - m 関係を別途校正し直すことを推奨する.

また、充填密度の問題は、プローブ周囲の籾の配置と関係し、実用上は、プローブを籾に挿入する際に可能な限り貯蔵時の籾の配置を乱さず、籾がプローブの周囲に均一に分布することが重要である. 今回の実験では、プローブの挿入時に EC-5 と ECH₂O-TE の形状に起因する問題が生じた. 両プローブの水分センサー部は、分岐したプレート状となっている. 実験では、プレート同士の間隔 (それぞれ約 5 mm) が籾の粒径に対して十分に広くなかったため、籾がプレート間に挟まってしまいプローブを容易に挿入できないことが判明した. したがって、今後、挿入時に籾の配置を極力乱さないような形状へとプローブを改良していくことが求められる.

4. おわりに

今回紹介した電気伝導度依存性の修正法は、電気伝導度が既知で一定の場合に有効であることを論じた. 施設内での養液栽培では、作物の生育に適した一定濃度の培養液が用いられるため、提示した修正法は養液栽培培地の水分量の評価に有用であると考えられる. また、EC-5 と ECH₂O-TE による乾燥過程の籾の水分計測実験では、概ね 15 ~ 35 % w.b. の籾の水分変化を精度よく評価できる校正式を得た.

ECH₂O プローブは安価で取り扱いやすい水分センサーであるが、養液栽培では新型の EC-5 であっても培養液の電気伝導度が出力電圧に影響をおよぼすことが明らかとなった. また、籾の水分計測では籾の粒径に対してセンサープレートの間隔が狭いためにプローブの挿入が困難であるなど、実用上の課題が認められた. 今後、電気伝導度依存性の修正法や得られた籾の水分量校正式の再現性、ならびにプローブの形状に関する課題などが解決されれば、生物環境調節学分野への同プローブの利用拡大が期待できるものと考えられる.

引用文献

- Blonquist, Jr., J.M., Jones, S.B. and Robinson, D.A. (2005): Standardizing characterization of electromagnetic water content sensors: Part 2. Evaluation of seven sensing systems. *Vadose Zone Journal*, 4(4): 1059–1069.
- Bogena, H.R., Huisman, J.A., Oberdorster, C. and Vereecken, H. (2007): Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications. *Journal of Hydrology*, 344: 32–42.
- 江口壽彦, 鈴木健彦, 宮本英揮, 濱古賀道男, 吉田 敏, 筑紫二郎, 北野雅治 (2009): 固形培地耕装置における地下水位がニンジンの生育に与える影響. *植物環境工学*, 21(2): 65–71.
- Kelleners, T.J., Soppe, R.W.O., Robinson, D.A., Schaap, M.G., Ayars, J.E. and Skaggs, T.H. (2004): Calibration of capacitance probe sensors using electric circuit theory. *Soil Science Society of America Journal*, 68(2): 430–439.
- Kizito, F., Campbell, C.S., Campbell, G.S., Cobos, D.R., Teare, B.L., Carter, B. and Hopmans, J.W. (2008): Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. *Journal of Hydrology*, 352: 367–378.
- 宮本英揮, 長 裕幸, 伊藤祐二, 筑紫二郎, 江口壽彦 (2009): 種々の電気伝導度条件に対する静電容量式土壌水分センサーの校正モデル. *植物環境工学*, 21(2): 86–91.
- Mojid, M.A. and Cho, H. (2006): Response of the ECH₂O soil moisture probe in electrically conductive soils. *Environment Control in Biology*, 44(3): 225–230.
- Nemali, K.S., Montesano, F., Dove, S.K. and van Iersel, M.W. (2007): Calibration and performance of moisture sensors in soilless substrates: ECH₂O and Theta probes. *Scientia Horticulturae*, 112(2): 227–234.
- Parsons, L.R. and Bandaranayake, W.M. (2009): Performance of a new capacitance soil moisture probe in a sandy soil. *Soil Science Society of America Journal*, 73(4): 1378–1385.
- Polyakov, V., Fares, A. and Ryder, M.H. (2005): Calibration of a capacitance system for measuring water content of tropical soil. *Vadose Zone Journal*, 4(4): 1004–1010.
- 齊藤忠臣, 藤巻晴行, 安田 裕 (2008): 誘電率水分計の温度依存性の校正. *土壌の物理性*, 109: 15–26.
- Thompson, R.B., Gallardo, M., Fernandez, M.D., Valdez, L.C. and Martinez-Gaitan, C. (2007): Salinity effects on soil moisture measurement made with a capacitance sensor. *Soil Science Society of America Journal*, 71(6): 1647–1657.
- Wu, K. (1998): Measurement of soil moisture change in spatially heterogeneous weathered soils using a capacitance probe. *Hydrological Processes*, 12(1): 135–146.
- 山下律也, 西山喜雄, 伊藤和彦, 瀬尾康久, 岩尾俊男, 早川千吉郎, 堀部和雄, 池田善郎, 村田 敏, 千場秀雄, 高畑英彦 (1991): 新版農産機械学. p.116, 文永堂出版, 東京.
- 安永円理子, 宮本英揮, 吉田 敏, 筑紫二郎 (2008): 時間領域反射法で計測した乾燥過程における籾の比誘電率特性. *植物環境工学*, 20(1): 14–20.
- Yasunaga, E., Miyamoto, H., Yoshida, S. and Chikushi, J. (2009): Response of ECH₂O probe and TDR probe in dielectric characteristics of rough rice during drying process. *Acta Horticulture*, 837: 371–376.

要 旨

生物環境調節学分野における ECH₂O プローブ (EC-5, ECH₂O-TE; デカゴン社) の適用事例として, 同プローブを利用した養液栽培におけるニンジン培地ならびに貯蔵籾の水分計測実験について概説した. 養液栽培実験では, 培養液の電気伝導度が EC-5 からの出力電圧に影響をおよぼしたため, 製造メーカーが推奨する校正式に基づき, 培地の体積含水率を精度よく評価することができなかった. その影響を修正するために, 培養液の電気伝導度が既知で概ね一定で推移する場合に適用できる EC-5 の電気伝導度依存性の経験的修正法を提案し, その有効性を検討した. その結果, 提案した修正法は, 導電性が異なる培地の体積含水率と出力電圧との関係を評価するのに有用であることを確認した. 一方, 籾が乾燥していく際の水分減少過程を, EC-5 と ECH₂O-TE で計測した. 実験により, 水分量と出力電圧との関係または水分量と比誘電率との関係を良好に表現できる校正式を得た.

キーワード: 静電容量式水分センサー, 培地管理, 貯蔵穀物, 比誘電率, 電気伝導度