J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 137, p.3 ～ 9 (2017)

論　文
Original Paper

圃場における土壌水分量と電気伝導率の連続観測のための 5TE センサーの簡易な原位置キャリブレーション

武藤由子 [1]・窪田有真 [2]・桐山直盛 [3]・渡辺晋生 [4]

Simple calibration methods for the application of the 5TE sensor to field monitoring of soil water content and electrical conductivity

Yoshiko MUTO[1], Yuma KUBOTA[2], Naomori KIRIYAMA[3] and Kunio WATANABE[4]

Abstract: Feasible calibration methods are required for the application of commercial sensors to field monitoring of soil water content and solution concentration. Simple in situ calibration methods for the 5TE sensor are proposed for the estimation of soil water content (θ) and 1 : 5 soil to water extract electrical conductivity ($EC_{1:5}$). θ can be obtained from 5TE sensor readings with a correction factor C, which is available from several soil samples taken during monitoring. $EC_{1:5}$ can be obtained from a linear function of soil pore water electrical conductivity (EC_p). EC_p is derived from 5TE sensor readings using the Hilhorst equation, and the gradient and intercept of the linear function are also calculable from a small number of soil samples taken during monitoring. The proposed calibration methods were applied to monitoring of θ and $EC_{1:5}$ in a tomato field under drip fertigation, and the efficacy of the methods was confirmed by comparison with methods using conventional lab-based calibration.

Key Words: 5TE sensor, soil water content, electrical conductivity, on site monitoring, in situ calibration

1. はじめに

わが国では近年，畑地農業における灌水や，灌水と施肥を同時に行う養液土耕栽培の導入が進んでいる．こうした作物の生育段階に応じた適切な肥培管理により，作物の生育が安定し収穫量が増加すること，塩類集積が防止されること等が期待される（吉田ら, 2011; 坂口ら, 2013）．灌水や施肥に関するより効果的な技術開発が求められるなか，市販のセンサーを用いた体積含水率と土壌溶液濃度の連続観測の需要が高まっている．体積含水率の連続観測は，比較的安価な静電容量型土壌水分センサーにより可能である．園芸学分野では，灌水技術と作物の生育との関係を調べる研究に，それらのセンサーが広く利用され始めている（安・池田, 2009; 堀内ら, 2011; 吉田ら, 2011）．静電容量型土壌水分センサーを用いて現実に即した体積含水率を得るためには，対象となる土壌各々について，センサーの出力値である unprocessed data や電圧値，土壌の比誘電率 ε とされる値のいずれかと体積含水率 θ の関係式を導出する必要がある（例えば三石・溝口, 2014）．しかし，推奨されるキャリブレーション法は室内試験に基づくものであり，乾燥から飽和までの幅広い水分条件に対する複数個の土壌試料の作製が必要で，関係式の導出作業は煩雑である．また，これらの試料には撹乱土壌を用いることが多く，乾燥密度に配慮しても必ずしも圃場の土壌構造や不均一性を反映しない．このため，室内試験で導出した関係式は常に相応の誤差を内包する．

一方，土壌溶液濃度については，溶液濃度と相関の高い，4 極センサーや TDR センサーで測定される土壌の見かけの電気伝導率 EC_a の連続観測が有用である．この際，EC_a と土壌水の電気伝導率 EC_p や，農地で広く測定されている 1 : 5 水浸出法による電気伝導率 $EC_{1:5}$ の関係式を導出する必要がある．静電容量型土壌水分センサーには土壌水分量に関する測定値と併せて EC_a と地温を同時に出力できる製品もあり，植物工場の施肥管理に使用され始めている．土壌物理学分野では，小島ら（2015）はキャベツ畑において TE センサー（5TE センサー（Decagon Devies, Inc.）の旧タイプ）で測定した EC_a を Hilhorst モデル（Hilhorst, 2000）によりに EC_p に換算した．また，宮本ら（2015）は，5TE センサーで測定した津波被災農地の EC_a から EC_p と $EC_{1:5}$ を推定した．推定には，室内試験で EC_p-EC_a および EC_p-$EC_{1:5}$ の関係式を導出して用いている．

このように，農地における土壌の体積含水率と電気伝導率の連続観測は技術的には可能である．今後，肥培管理技術の開発・改良や，生産現場での農地管理における

[1]Faculty of Agriculture, Iwate University, Ueda 3-18-8, Morioka 020-8550, Japan. Corresponding author: 武藤由子, 岩手大学農学部.
[2]Hokkaido Government, Kita 3-jo, Nishi 6-chome, Chuo-ku, Sapporo 060-8588, Japan.
[3]Iwate Agricultural Research Center, 20-1, Narita, Kitakami 024-0003, Japan.
[4]Graduate School of Bioresources, Mie University, Kurima-machiya 1577, Tsu 514-8507, Japan.
2017 年 3 月 17 日受稿　2017 年 6 月 28 日受理

センサー利用が広く普及するためには，簡単なキャリブレーション法や補正法の提案が重要であると考えられる．体積含水率 θ 観測のための補正法の提案については，武藤ら（2015）が 5TE センサーについて，三石・溝口（2015）が GS3 センサー（Decagon Devies, Inc.）について，それぞれ Em50 データロガー（Decagon Devies, Inc.）との組み合わせで出力される θ の簡易補正法を提案している．また諸泉ら（2008）は ADR 法に基づく Probe PR1/6（Delta-T Devies, Ltd.）を用いて，坂井ら（2015）は FDR 法に基づく Drill & Drop Probe（Sentek, Pty Ltd.）を用いて，それぞれ原位置キャリブレーションによる θ 観測を行っている．原位置キャリブレーションには，室内試験によるキャリブレーションと比較して，試料の θ を任意に設定できないこと，関係式 ε–θ を導くための炉乾法による θ 測定を ε 測定と同一の土壌試料で行えないこと等の欠点があるが，θ の異なる複数個の試料作製が不要なこと，キャリブレーション結果に圃場の土壌構造特性が反映されるという利点がある．一方，電気伝導率については，圃場における既存モデルを用いた EC_a からの EC_p の推定や，室内試験でのキャリブレーションによる EC_a から $EC_{1:5}$ の推定が報告されているものの，特に栽培分野・園芸学分野で需要の高い $EC_{1:5}$ について，農業の現場で実践が容易な推定法はほとんど報告されていない．

そこで本研究では，5TE センサーを用いて畑地土壌の θ と $EC_{1:5}$ を連続観測するための，センサー利用者にとって容易なキャリブレーション方法を提案することを目的とした．ここで，キャリブレーション方法の検討は，室内試験での試料の作製を伴わない原位置キャリブレーションに絞った．θ の推定には，武藤ら（2015）が室内試験により提案した，5TE センサーの出力値として得られる体積含水率 θ_{Topp} に補正係数 C を乗じる方法を用い，この補正係数 C を原位置キャリブレーションで求めることとした．なお，武藤ら（2015）は C を，室内試験によって導出した ε-θ に 5TE センサーの出力値 ε を代入して得た体積含水率 θ_{lab} と θ_{Topp} の比としている（$C = \theta_{lab}/\theta_{Topp}$）．$EC_{1:5}$ の推定は，5TE センサーの測定値 EC_a から直接推定する方法と EC_p の推定を介する方法がある．前者の場合，EC_a-$EC_{1:5}$ の関係式を導出する必要があるが，その関係は θ に強く依存し線形近似できない（Gupta and Hanks, 1972）ことから，現場での実用性に欠ける．後者の場合は，EC_a-EC_p と EC_p-$EC_{1:5}$ の 2 つの関係式が必要となる．EC_a から EC_p への換算は Hilhorst モデルにより概ね可能であり，この際 θ の影響も考慮される（武藤ら，2015，小島ら，2015）．また，EC_p-$EC_{1:5}$ 関係は θ にあまり依存しないため，ある程度の誤差を許容すれば直線近似できることが室内試験で示されている（宮本ら，2015）．そこで，ここでは Hillhorst モデルによる圃場の EC_p（$EC_{p_Hilhorst}$）推定の妥当性を先ずは確認し，次いで $EC_{p_Hilhorst}$-$EC_{1:5}$ の関係式を原位置キャリブレーションで求めることとした．

これらのキャリブレーションに基づく簡易推定法の妥当性の検討は，室内試験でキャリブレーションした推定式や圃場における実測値との比較により行った．

2. 方法

2.1 原位置キャリブレーションと圃場条件

5TE センサーを用いた θ と $EC_{1:5}$ の観測と原位置キャリブレーションは，岩手県農業研究センター（岩手県北上市）のトマトの養液土耕栽培を行うパイプハウスにおいて，その栽培期間（2015 年 5 月 18 日 定植）に行った．試験区の土壌は非アロフェン質黒ボク土で，土性はシルト質埴土，土粒子密度は 2.65 Mg m^{-3}，観測開始時に測定した乾燥密度は 0.80 Mg m^{-3} である．トマトの品種は「桃太郎サニー」で，栽植様式は畝幅 180 cm，株間 45 cm の 2 条植えとし，地表面を黒ポリマルチで被覆した．試験区は 1 区画 13.5 m^2 で，施肥条件の異なる 4 試験区を設置した（Table 1）．試験区 1・2 と試験区 3・4 間では可給態窒素量が異なり，試験区 1・3 と試験区 2・4 では化成肥料の施用量が異なった．可給態窒素量の違いは，事前に施用された有機質肥料の量に由来する．可給態窒素量は，保温静置培養法（30 °C 4 週間）で測定し，測定には各試験区の表層（0 ～ 20 cm）から採取した土壌を 40 °C で乾燥後，その 2 mm フルイ通過分を用いた．2・4 区の化成肥料の施用量は，岩手県の施肥基準で，基肥は粒状肥料，追肥は液体肥料である．なお，灌水は灌水チューブによるマルチ下散水とし，手動で行った．灌水始点は深さ 20 cm の pF（試験区 4 に設置したテンシオメータ（大起理化工業 DIK-8333）で測定）が 2.3 に達した時点を目安とした．1 回の灌水量は 1 株当たり 1 ～ 2 L で，全試験区で同量とした．灌水頻度は，毎日午前中に 1 回を基本とし天候に応じて調整した．追肥は灌水同時施肥で，第 3 果房開花期から各段果房開花毎に，窒素成分で 15 kg ha^{-1} を計 12 回（計 180 kg ha^{-1}）施用した．この 1 回分の液肥が連続した 3 ～ 4 回分の灌水に分けて施用された．

5TE センサーは全長 10 cm（回路部が約 5 cm）のセンサーで，センサー先端より 3.5 cm に EC 測定用の電極対を持つ．トマト定植後の 2015 年 5 月 21 日に 5TE センサーを地表面と垂直に株間の中央に埋設した．この際，5TE センサーの設置深を，回路部分とケーブルの繋目が地表面より 10 cm 深となるようにした．従って，測定値には 10 ～ 20 cm 深の平均的な体積含水率と

Table 1 試験区の施肥条件.
Manuring condition of experimental plot.

試験区	可給態窒素（mgN kg^{-1} 乾土）	化成肥料（kgN ha^{-1}）	
		基肥	追肥
1 区	47	0	0
2 区		120	180
3 区	100	0	0
4 区		120	180

16.5 cm 深の電気伝導率が反映される．また，地温の測定位置は 10 ～ 14 cm 深である．測定には Em50 データロガーを用い，測定間隔は 1 時間とした．5TE センサーと Em50 データロガーを組み合わせて使用した場合，水分量に関する出力値として ε の 50 倍とされる値が得られる．また，Topp 式（$\theta_{\mathrm{Topp}} = -5.3\times10^{-2} + 2.92\times10^{-2}\varepsilon - 5.50\times10^{-4}\varepsilon^2 + 4.3\times10^{-6}\varepsilon^3$, Topp et al., 1980）で ε から θ を算出した値 θ_{Topp} も出力される．電気伝導率は 25 °C の値に補正された EC_{a} が出力される（Decagon Devices, 2014）．記録されたデータを，フィールドルーター（X-Ability）を介して 24 時間間隔でインターネットサーバー上に保存した．観測は栽培を終了する直前の 2015 年 11 月 5 日まで行った．

5 月 21 日，8 月 5 日，10 月 8 日，11 月 5 日に各試験区の 15 cm 深から 100 cm^3 の採土円筒を用いて不撹乱土壌を，その近傍で撹乱土壌をそれぞれ採取した（4 試験区 × 4 回，合計 不撹乱土壌 16 個，撹乱土壌 16 個）．採取土壌の θ は，不撹乱土壌で炉乾法により測定した．採取土壌の $EC_{1:5}$ は，乾燥土 10 g 相当の撹乱土壌と 50 g の蒸留水を混合した懸濁液の電気伝導率とし，電気伝導率計（HORIBA B-771）で測定した．原位置キャリブレーションには，これら採取土壌の θ と $EC_{1:5}$，土壌採取時の 5TE センサーの出力値 ε と θ_{Topp}，EC_{a} を用いた．キャリブレーションに用いる EC_{p} は Hilhorst モデルにより EC_{a} から換算した（式（1））．

$$EC_{\mathrm{p_Hilhorst}} = EC_{\mathrm{a}} \times \frac{\varepsilon_{\mathrm{w}}}{\varepsilon - \varepsilon_0} \qquad (1)$$

ここで，ε_{w} は水の 比誘電率で 80.3（20 °C）とした．今回の圃場で観測された土壌温度は 15 °C ～ 30 °C であった．水の比誘電率には温度依存性があるためこの温度範囲では ε_{w} に ±4 % の差違が生じるが，ここではこれを無視できると見なした．ε_0 は乾燥土壌の比誘電率を表す補正値で（Decagon Devices, 2016），ハウスの試験区外の一ヶ所（表層 0 ～ 20 cm）から採取した土壌を乾燥し 5TE センサーで測定したところ 2.57 だった．また，比較のため採取土壌（$EC_{1:5}$ を測定した撹乱土壌）から遠心抽出（pF 4.2 相当）した土壌水の電気伝導率も測定し，これを本研究では EC_{p} と見なすこととした．

2.2 室内試験

試験区の土壌に対する ε–θ と EC_{p}-$EC_{1:5}$ の関係式を導出するための室内試験を，武藤ら（2015）の方法に準じて行った．その際，試料にはハウスの試験区外の一ヶ所（表層 0 ～ 20 cm）から採取した土壌の 2 mm フルイ通過分を用いた．試料の乾燥密度は，試験区の乾燥密度に従い 0.80 Mg m^{-3} とした．試料の水分調整には蒸留水と濃度が 0.05，0.1，0.15 mol L^{-1}（電気伝導率 0.67，1.27，1.855 S m^{-1}）の KCl 溶液を用いた．体積含水率と電気伝導率が異なる試料を作製し，5TE センサーと Em50 データロガーで ε と EC_{a} を測定した．また，遠心分離機で抽出した土壌水の EC_{p} と土壌懸濁液の $EC_{1:5}$ の測定も行った．

3. 結果と考察

3.1 補正係数 C の決定

Fig. 1 に ε と θ の関係を示す．図中◆印は各試験区に設置した 5TE センサーで原位置測定した ε とその際に採取した不撹乱土壌について炉乾法で測定した体積含水率 θ_{mes} の関係，その他のマーカーは室内試験において蒸留水（◯ 印）や KCl 溶液（×，＋，△ 印）で調整した試料の ε と体積含水率 θ_{lab} の関係である．これらの値はよく一致した．図中の点線は Topp 式，実線（θ_{lab} m^3 m^{-3}）は室内試験の測定値の内，蒸留水で水分調整を行った結果を最小二乗法で三次式に近似したものである（$\theta_{\mathrm{lab}} = -2.8\times10^{-2} + 3.8\times10^{-2}\varepsilon - 6.5\times10^{-4}\varepsilon^2 + 2.4\times10^{-6}\varepsilon^3$）．Topp 式は，$\theta_{\mathrm{mes}}$ と θ_{lab} を過少評価した．また，θ_{lab} と θ_{Topp} の差は θ の増加に従い大きくなり，$\theta_{\mathrm{lab}} = 0.56$ で最大となった．θ_{mes} と θ_{Topp} の比（$\theta_{\mathrm{mes}}/\theta_{\mathrm{Topp}}$）として求められる θ_{Topp} の補正係数 C は，各試験区で得られた 4 つの平均値が試験区 1 で 1.50，2 区で 1.43，3 区で 1.41，4 区で 1.52 であった．試験区間での差が小さかったことから，全ての試験区の C をこれらの平均値 1.46 で与えられるとした．図には，θ_{Topp} の補正値（$C\times\theta_{\mathrm{Topp}} = 1.46\theta_{\mathrm{Topp}}$）を破線で示した．$C\times\theta_{\mathrm{Topp}}$ は採取土壌の測定値および室内試験の結果とほぼ一致した．すなわち，武藤ら（2015）の θ の簡易補正法は，原位置キャリブレーションにも有効であり，$C\times\theta_{\mathrm{Topp}}$ で圃場の体積含水率を推定することが概ね可能といえる．ただし，$C\times\theta_{\mathrm{Topp}}$ は $\theta > 0.5$ で体積含水率を過大評価するため，灌水始点など低い体積含水率の判定には有用であるが，飽和近くの高い体積含水率を判定したい場合には留意が必要である．

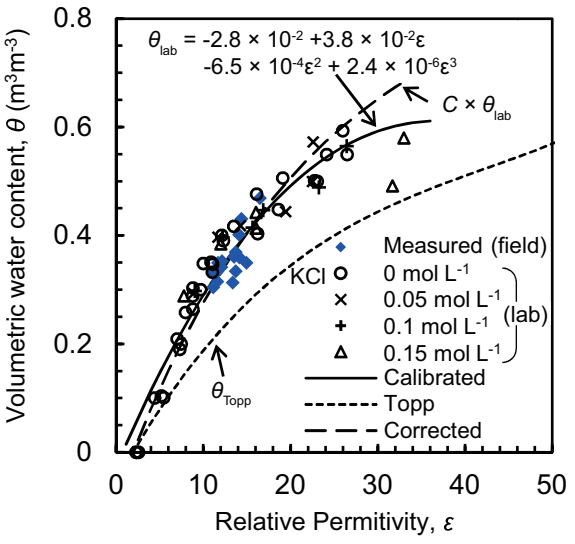


Fig. 1　5TE センサーで測定した比誘電率と炉乾法による体積含水率の関係．
Relationship between relative permittivity, ε measured by 5TE and volumetric water content, θ obtained by oven method. Lines indicate the calibrated, θ_{lab}, Topp's equations, θ_{Topp} and corrected, $C\times\theta_{\mathrm{Topp}}$.

室内試験によるキャリブレーションで導出した試料の θ_{lab} や原位置キャリブレーションで得られた $C \times \theta_{Topp}$ は，KCl 溶液で水分調整した試料の ε-θ_{lab} の関係とも概ね一致した．ただし，KCl 濃度が 0.15 mol L^{-1}（1.85 S m^{-1}）と高い溶液で水分調整をした試料については $\theta > 0.5$ において ε が他の試料に比べ高くなった．5TE センサーで測定される ε の電気伝導率依存性はこれまでにも報告されている（安中・花山, 2015）．ε が影響を受けた 2 点の EC_p は 0.89 と 1.07 S m^{-1}, $EC_{1:5}$ は 0.16 と 0.19 S m^{-1} であった．黒ボク土では，$EC_{1:5}$ が 0.129 S m^{-1} で作物への生育阻害が報告されている（土壌環境分析法編集委員会, 1997）．今回 ε の電気伝導率依存が確認された $EC_{1:5}$ は，この値よりも若干大きいが，施肥の直後に局所的に起こる可能性があると考えられる．このように電気伝導率が高い場合，$C \times \theta_{Topp}$ は実際の圃場の体積含水率を過大評価する．よって，ε への電気伝導率の影響を評価するためにも，電気伝導率を同時に観測することの重要性は高いといえる．

3.2 1:5 水浸出法による電気伝導率 $EC_{1:5}$ の推定式

試料の EC_p-$EC_{1:5}$ 関係を Fig. 2 に示す．◆印が，試験区からの土壌採取時の 5TE センサーの出力値 EC_a S m^{-1} から式（1）で求めた $EC_{p_Hilhorst}$ S m^{-1} と，採取土壌で測定した $EC_{1:5}$ の関係である．これを，最小二乗法で一次式に近似して $EC_{p_Hilhorst}$-$EC_{1:5}$ の関係式（$EC_{1:5} = 0.098 EC_{p_Hilhorst} + 0.007$　$R^2 = 0.647$）を求めた（太い実線）．図には，同じ採取土壌から抽出した土壌水で測定した $EC_{p_extract(field)}$ S m^{-1}（測定値は × 印，近似式は破線），と，室内試験で任意の濃度の KCl 溶液と混合した土壌から抽出した土壌水で測定した $EC_{p_extract(lab)}$ S m^{-1}（測定値は ◯ 印，近似式は細い実線）も併せて示した．なお，室内実験の測定値は，θ が 0.3 と 0.4 の条件のものを用いた．これは，試験区からの採取土壌の θ が 0.30 ～ 0.45（平均 0.35）であったためである．$EC_{p_extract(field)}$-$EC_{1:5}$ 直線と $EC_{p_extract(lab)}$-$EC_{1:5}$ 直線は，いずれも傾きがおよそ 0.1 で切片も同等であり，決定係数は 0.9 以上だった．これに対し，$EC_{p_Hilhorst}$-$EC_{1:5}$ 直線の決定係数が 0.647 と低かったのは，$EC_{p_extract(field)} > 0.15$ S m^{-1} での $EC_{p_Hilhorst}$ と $EC_{p_extract(field)}$ の差が大きいためである．この要因として，5TE センサーによる EC_a の測定精度，$EC_{p_Hilhorst}$ を EC_a から推定した際の誤差，原位置キャリブレーションでは $EC_{p_Hilhorst}$ と $EC_{p_extract(field)}$ を同一の試料から得られないことの影響が考えられる．今回の原位置キャリブレーションでは，$EC_{p_Hilhorst}$ が 0.2 S m^{-1} 以上の測定値は 1 点しか得られなかったが，$EC_{p_Hilhorst}$-$EC_{1:5}$ 直線は $EC_{p_extract(field)}$-$EC_{1:5}$ 直線および $EC_{p_extract(lab)}$-$EC_{1:5}$ 直線とよく一致した．しかし，$EC_{p_Hilhorst} > 0.2$ S m^{-1} での測定値によっては，$EC_{p_Hilhorst}$-$EC_{1:5}$ 直線が大きく異なった可能性もあるため，$EC_{p_Hilhorst} > 0.2$ S m^{-1} での測定点を増やす必要があると考えられる．以上の結果，試料を採取するタイミングの選定に課題が残るものの，原位置キャリブレーションによる EC_p-$EC_{1:5}$ の関係式の導出が可能であったといえる．

3.3 体積含水率の観測結果

ハウストマト栽培期間における θ の観測結果を Fig. 3 に示す（写真はトマトの生育状況）．図は上から順に，5TE センサーの θ の出力値（θ_{Topp}），原位置キャリブレーションによる 5TE センサー出力値の補正値（$C \times \theta_{Topp}$），室内試験で導出した ε–θ の三次式を 5TE センサーの ε の出力値に適用して求めた θ_{lab} である．図中の◇印は，炉乾法で求めた各試験区からの採取土壌の θ の実測値で，3.1 節（Fig. 1）で C の算出に用いた θ_{mes} である．θ_{Topp} は，全ての試験区で測定期間の全体において θ_{mes} を下回った（Fig. 3 上段）．これは，Fig. 1 に示したように Topp 式が試験区の土壌の ε-θ 関係を正しく表していないためである．また，Fig. 1 で θ_{Topp} と θ_{lab} の差は θ により異なった．こうした θ の差違は，例えば θ_{Topp} を用いて消費水分量を算出した場合に実際の消費水分量を過小評価する原因となる．今回の場合は，$\theta_{mes}/\theta_{Topp}$ が 1.46 であったことから 7 割程度に過少評価すると考えられる．

原位置キャリブレーションによる $C \times \theta_{Topp}$（Fig. 3 中段）は，室内試験に基づく θ_{lab}（Fig. 3 下段）と概ね同様の値を推移し，θ_{mes} とよく一致した．$C \times \theta_{Topp}$ は $\theta > 0.5$ での過大評価が懸念されたが，θ_{lab} の推移から，今回の各試験区では θ が 0.5 以下に保たれたと考えられ，問題とならなかった．これは，灌水後の速やかな排水により高含水率状態が継続しなかったためと考えられる．

試験区 2・4 では，試験区 1・3 に比べて灌水時の θ の振れ幅が大きかった．これは，3 つの推定方法の全て

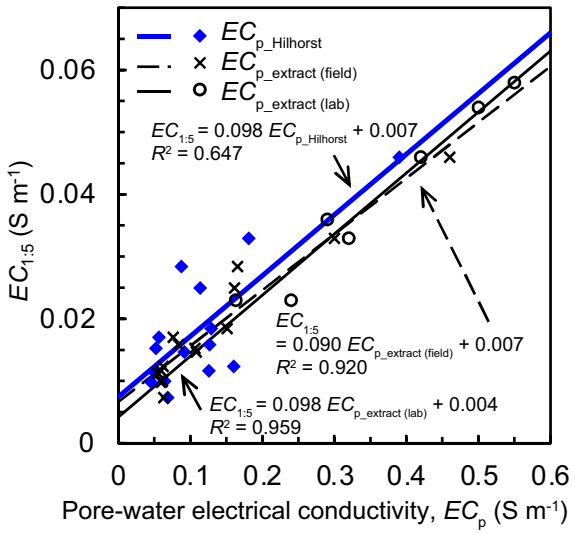


Fig. 2 土壌水の電気伝導率と 1 : 5 水浸出法による電気伝導率の関係．$EC_{p_Hilhorst}$ は Hilhorst モデルを用いて EC_a からの推定した土壌水の電気伝導率，$EC_{p_extract}$ は遠心抽出した土壌水の電気伝導率．
Relationship between pore-water electrical conductivity, EC_p and electrical conductivity of 1 : 5 soil-water suspension,$EC_{1:5}$. (R^2 is the coefficient of determination) Calculated from EC_a by Hilhorst model, $EC_{p_Hilhorst}$, electrical conductivity of the centrifugal extract of soil water, $EC_{p_extract}$.

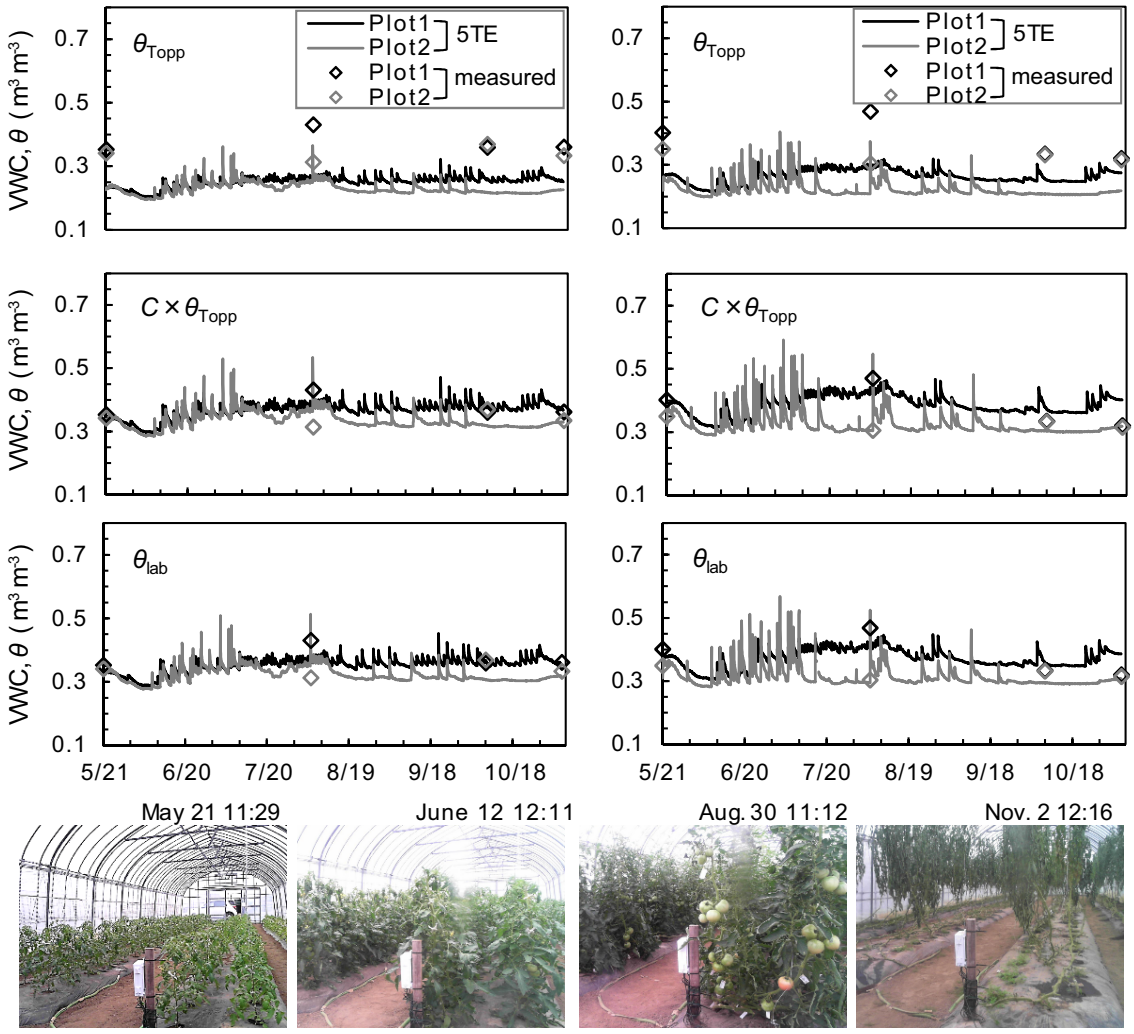


Fig. 3　ハウストマト栽培期間の体積含水率と圃場の状態．θ_{Topp} は Topp 式による 5TE の出力値，$C \times \theta_{Topp}$ は原位置キャリブレーションによる θ_{Topp} の補正値，θ_{lab} は室内試験による推定値．
Volumetric water content during tomato cropping and field images. 5TE output value by Topp's equations, θ_{Topp}, correction value of θ_{Topp}, $C \times \theta_{Topp}$, estimated value from laboratory test, θ_{lab}.

で確認された．試験区 2・4 は灌水に液肥が混入しているが，その濃度は後述のように ε 測定に影響するほどではなかった．よって，試験区 2・4，試験区 1・3 の違いは，センサーの設置状況やセンサー付近の土壌構造，灌水の供給地点とセンサーの位置関係といった条件の違いによるものと考えられる．実際の農地では様々な制約もあり全てに配慮することは難しいが，土壌構造や水分移動に影響を与えないようセンサーを設置する，複数のセンサーを設置し相互確認するなど配慮することが望ましい．

各試験区での灌水量は同じであったが，試験区 2・4 の θ は試験区 1・3 区よりも低く推移した．トマト一株当たりの葉の合計乾燥重量（6 株の平均）は，1 区で 152 g，2 区で 279 g，3 区で 225 g，4 区で 276 g で，化成肥料が施用された 2 区と 4 区で草勢が強かった．よって，2 区と 4 区では蒸散量が多かったために，θ が低く推移したと考えられる．以上の結果，5TE センサーの原位置キャリブレーションによる簡易利用法が，作物の生育状況に対応した土壌水分量の推移の詳細な観測に有効であることが確認できた．

3.4 電気伝導率 $EC_{1:5}$ の観測結果

電気伝導率の推定結果を Fig. 4 に示す．上から順に，5TE センサーの測定値 EC_a，EC_a を用いて Hilhorst モデルで推定した $EC_{p_Hilhorst}$，$EC_{p_Hilhorst}$ を $EC_{p_Hilhorst}$-$EC_{1:5}$ の近似式（Fig. 2 の太い実線）で換算した $EC_{1:5}$ である．$EC_{p_Hilhorst}$ の図には，液肥タンクを灌水システムに設置した日時を × 印で示した．すなわち，× 印以後 3 ～ 4 回の灌水に液肥が混入している．また，その他のマーカーは採取土壌の抽出液の $EC_{p_extract(field)}$ と採取土壌懸濁液の $EC_{1:5}$ で，後者は 3.2 節（Fig. 2）の原位置キャリブレーションに用いた値に等しい．

EC_a は θ の変化と肥料成分濃度の影響を受けて変化する（Fig. 4 上段）．これを $EC_{p_Hilhorst}$ に換算することで，θ の影響を除外し土中水の電気伝導率の推移を把握できる（Fig. 4 中段）．採取土壌で実測した $EC_{p_extract(field)}$ と $EC_{1:5}$ より，試験区の電気伝導率は，初め基肥が施

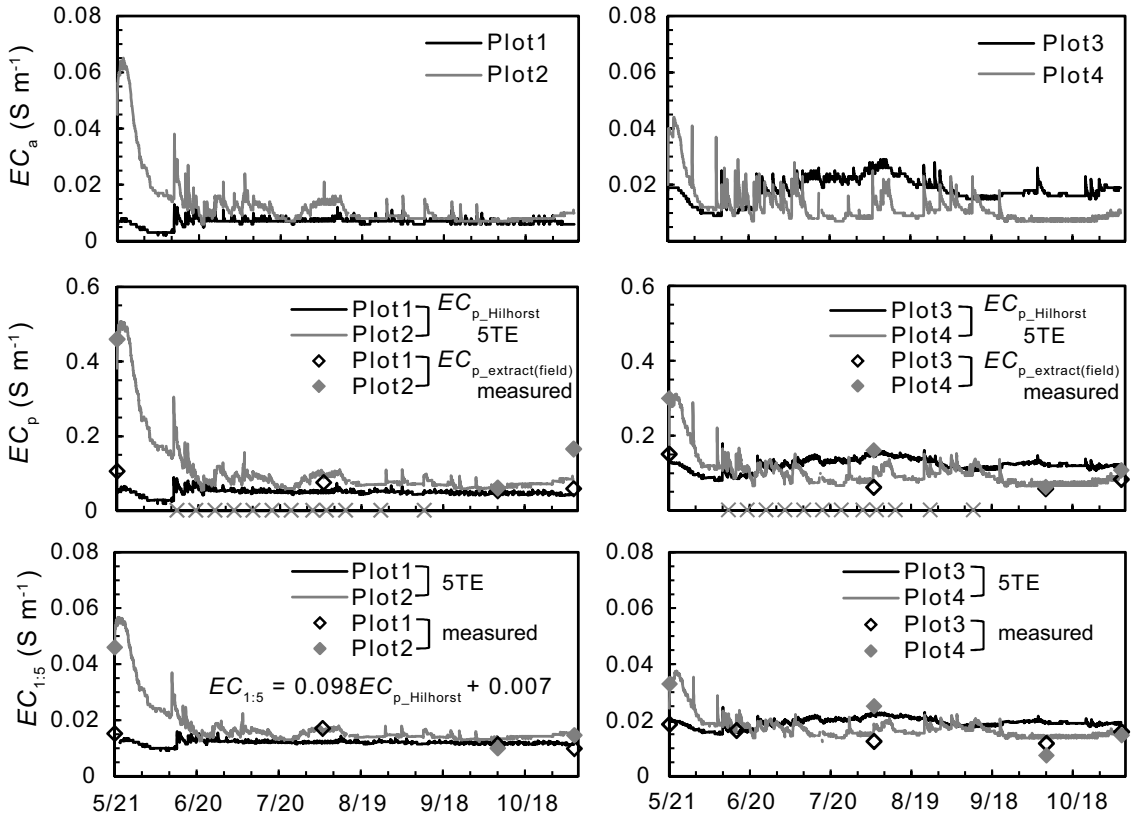


Fig. 4 ハウストマト栽培期間の電気伝導率．EC_a は 5TE で測定された土壌の見かけの電気伝導率，$EC_{p_Hilhorst}$ は Hilhorst モデルを用いて EC_a からの推定した土壌水の電気伝導率，$EC_{1:5}$ は原位置キャリブレーションにより EC_a から換算した 1 : 5 水浸出法による電気伝導率．マーカーは採取土壌で測定した電気伝導率．
Electrical conductivity during tomato cropping. Bulk electrical conductivity measured by 5TE, EC_a, pore-water electrical conductivity calculated by Hilhorst model, $EC_{p_Hilhorst}$, electrical conductivity of 1 : 5 soil-water suspension estimated from EC_a,$EC_{1:5}$. The markers indicate each electrical conductivity of the sample soils.

用された 2 区と 4 区で高く，8 月 5 日には低下して試験区間の差が小さくなったことがわかる．$EC_{p_Hilhorst}$ の推移は実測値の推移と概ね一致した．$EC_{p_Hilhorst}$ から推定した $EC_{1:5}$ の推移も，実測値の推移と概ね一致した（Fig. 4 下段）．このことから，原位置キャリブレーションにより $EC_{1:5}$ の連続観測が可能と考えられる．ただし，$EC_{p_Hilhorst}$ を介した $EC_{1:5}$ の推定精度の向上には，$EC_{p_Hilhorst} > 0.2$ S m^{-1} での測定値を増やす必要が示唆された（3.2 節）．本観測においては，試験区 2・4 の 5 月中が該当する（Fig. 4 中段）．しかし，この期間は基肥の効果で電気伝導率分布が不均一な可能性が高く，この際はこうした電気伝導率の土中分布への配慮も必要と考えられる．

4. おわりに

原位置キャリブレーションによる，5TE センサーの簡便な θ の補正法と $EC_{1:5}$ の推定法を提案した．θ の補正法は，原位置キャリブレーションで求めた補正係数 C を出力値 θ_{Topp} に乗じるものである．補正係数 C は，観測期間に数回，圃場に設置した 5TE センサーの近くで採取した土壌の炉乾法で求めた θ_{mes} と，土壌採取時の出力値 θ_{Topp} との比（$\theta_{mes}/\theta_{Topp}$）とした．本法は，飽和近くの θ 推定に課題が残るが，室内試験に基づく推定法に遜色なく圃場の θ 変化を詳細に捉えることができ，灌水管理の指標に有用と考えられる．一方，$EC_{1:5}$ の推定法は，採取土壌で測定した $EC_{1:5}$ と，土壌採取時の出力値 EC_a から Hilhorst モデル（式（1））で得た $EC_{p_Hilhorst}$ との関係を直線近似する方法である．本法で推定した $EC_{1:5}$ も実測値とよく一致した．ただし，より良好な推定式の導出には $EC_{p_Hilhorst} > 0.2$ S m^{-1} でのサンプリングの頻度を増やす必要があると考えられた．このように，本論で提案したキャリブレーション手法は，容易かつ省力であるため圃場での実践が可能であり，5TE センサーの出力値 θ_{Topp}，ε，EC_a を用いた，現場で求められる精度の土壌水分量と電気伝導率の連続観測に有用である．

引用文献

安東 赫, 池田英男 (2009): 根域への積極的な水分管理は露地土耕においても作物の生育, 収量と肥料利用効率の向上に役立つ. 園学研, 8: 439–443.

安中武幸, 花山 奨 (2015): ECH$_2$O5TE による土壌含水率出力への電気伝導度と温度の影響. 土壌の物理性, 130: 13–18.

Decagon devices (2014) (accessed 2014.10.1): 5TE sensor integrators guide, p.11. (online), < http://manuals.decagon.com /Integration Guides/5TE Integrators Guide.pdf >

Decagon devices (2016): 5TE Water content, EC, and temperature sensor, March, 11, 2016 version. http://manuals.decagon.com /Manuals/13509_5TE_Web.pdf (2017 年 5 月 24 日に確認)

土壌環境分析法編集委員会 (1997): 土壌環境分析法, p.203. 博友社.

Gupta, S.C. and Hanks, R.J. (1972): Influence of water content on electrical conductivity of the soil, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 36: 855–857.

Hilhorst, M.A.(2000): A pore water conductivity sensor. Soil Sci. Soc. Am. J., 64: 1922–1925.

堀内尚美, 亀有直子, 車 敬愛, 鈴木 栄, 平沢 正, 荻原 勲 (2011): 乾燥ストレスにおけるブルーベリー葉の水ポテンシャルおよび光合成特性. 園学研, 10: 485–490.

小島悠揮, 三石正一, 溝口 勝 (2015): 気象・土壌観測データと現地画像をリンクした農地 ICT モニタリングの有効性 — 高冷地キャベツ畑における解析事例. 土壌の物理性, 131: 5–13.

三石正一, 溝口 勝 (2014): 静電容量型 ECH_2O 土壌水分センサーのキャリブレーション. 土壌の物理性, 126: 63–70.

三石正一, 溝口 勝 (2015): 一次補正式を用いた静電容量型 GS3 土壌センサーが測定した体積含水率の補正. 土壌の物理性, 130: 19–25.

宮本輝仁, 亀山幸司, 岩田幸良, 塩野隆弘 (2015): 5TE センサーを用いた津波被害を受けた砂質畑の土壌 EC モニタリング. 土壌の物理性, 131: 15–22.

諸泉利嗣, 池本賢弘, 濱田浩正, Somsak SUKCHAN (2008): Profile Probe による原位置キャリブレーションと土壌水分測定 —東北タイ天水圃場における事例 —. 水文・水資源学会誌, 21: 361–367.

武藤由子, 渡辺晋生, 山本清仁, 倉島栄一 (2015): 5TE センサーで測定した土壌水分量の簡易補正と電気伝導率の検証. 農業農村工学会論文集, 296: I_9–I_17.

坂口雅己, 日笠裕治, 中住晴彦 (2013): 夏秋どりトマトの点滴灌水施肥 (養液土耕) における果実生産と施肥窒素利用率からみた生育時期別の適性窒素施肥量. 土肥誌, 84: 11–20.

坂井 勝, 取出伸夫, 坂本祐樹 (2015): プロファイルプローブ Drill & Drop Probe の埋設方法と簡易補正の検討. 土壌の物理性, 130: 27–32.

Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. (1980): Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines, Water Resour. Res., 16: 574–582.

吉田千恵, 岩﨑泰永, 牧野 周, 池田英男 (2011): 養液土耕における灌水管理の違いがトマトの生育および収量に及ぼす影響. 園学研, 10: 325–331.

要　　旨

市販のセンサーを用いた土壌水分量と土壌溶液濃度の連続観測の需要が高まっており，農業の現場で実践可能な簡単なキャリブレーション法や補正法の提案が求められている．そこで本研究では，5TE センサーを用いて畑地の θ と $EC_{1:5}$ を観測するための原位置キャリブレーションによる簡便な θ の補正法と $EC_{1:5}$ の推定法を提案した．その結果，θ は数回の土壌採取で 5TE センサーの出力値を補正できることを示した．$EC_{1:5}$ は，採取土壌で測定した $EC_{1:5}$ と，5TE センサーの土壌の電気伝導率 EC_a を Hilhorst モデルで換算した土壌水の電気伝導率 EC_p との直線関係から推定できた．本法に基づき，トマトを養液土耕栽培するハウスで θ と $EC_{1:5}$ を連続観測した結果，室内試験に基づく推定法に遜色なく θ と $EC_{1:5}$ の推移を詳細に捉えることができた．

キーワード：5TE センサー，土壌水分量，電気伝導率，連続観測，原位置キャリブレーション