J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 131, p.15 ～ 22 (2015)

論　文
Original Paper

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

宮本輝仁 [1]・亀山幸司 [1]・岩田幸良 [1]・塩野隆弘 [1]

Soil salinity assessment in a field covered with seawater using the 5TE sensor

Teruhito MIYAMOTO[1], Koji KAMEYAMA[1], Yukiyoshi IWATA[1] and Takahiro SHIONO[1]

Abstract: It is essential to simultaneously monitor soil water content (θ) and bulk electrical conductivity (EC_a) in field soils for soil salinity assessment. A low-cost capacitance sensor, 5TE (Decagon Devices), can be used to study temporal variations in θ and EC_a. Laboratory and field experiments were conducted to investigate the applicability of the 5TE sensor to monitor the salinity in the fields damaged with seawater at the time of the 2011 of the Pacific coast of Tohoku earthquake. The dependency of calibration curves on salinity for estimating θ was evaluated. The salinity effects could be neglected when the solution EC (EC_w) was lower than 7 dS m^{-1}. The Rhoades model was found to be reasonably accurate to describe the EC_a–EC_w–θ relationships. Moreover, EC_w obtained by the 5TE sensor, combined with the Rhoades model, was positively correlated with $EC_{1:5}$ (EC of 1 : 5 soil:water extracts). These results suggested that $EC_{1:5}$ can be estimated from the θ and EC_a measurements using the 5TE sensor. Field monitoring using the 5TE sensors revealed that salts in the root zone were sufficiently removed by rainwater during the summer after the damage; thus, $EC_{1:5}$ values at 0.15 and 0.3 m depths became adequately lower by the end of July. In the following months, $EC_{1:5}$ values at 0 and 0.3 m depths remained lower than 0.2 dS m^{-1} during the cultivation period for strawberries from October to April whereas $EC_{1:5}$ values at 0.45 m depth fluctuated between 0.4 and 0.8 dS m^{-1}. Simultaneous monitoring of θ and EC_a, by using the 5TE sensors, can provide highly detailed information concerning temporal variations in soil salinity.
Key Words : capacitance sensor, tsunami, salt concentration, electrical conductivity

1. はじめに

東日本大震災における津波により多量の塩分が流入した農地では，現在，除塩作業により営農を再開している．しかし，除塩が十分でない農地や下層からの塩分上昇が懸念される転換畑や畑では，今後とも塩分動態のモニタリングを行いながら，適時に灌水等により塩分制御を行うことが重要である．

わが国では土壌中の塩分濃度の把握のために，乾土 1 に対して蒸留水 5 を加えた懸濁液の電気伝導度（$EC_{1:5}$）を測定する 1 : 5 水浸出法が用いられる．この測定法は簡便法として普及しているが，多くの農地で 1 : 5 水浸出法を用いて EC を測定するのは多大な労力を要する．また，土壌採取時に現場を撹乱してしまうため，定点調査にも向かない．他方，除塩の効果を判別するために，電磁誘導法や簡易 EC 計等を用いてバルク土壌 EC（EC_a）が測定されている．EC_a の測定は簡易に行えるため，多くの農地でのデータ取得を可能とし，除塩の効果を判定する上で有用な指標とされている（冠ら, 2012）．しかし，EC_a は土壌の固相部分と土壌水の両方の伝導性が反映される EC である．加えて，EC_a は土壌水分量にも大きく依存し，降雨直後や灌水後などには，塩分量は変わらなくても，EC_a が上昇することがしばしば起こる．

電磁波を利用した体積含水率（θ）と EC_a の同時測定技術が 1990 年代から盛んに研究されてきている．Time domain reflectometry（TDR）は，電磁波の伝播速度を利用して土壌の誘電率から θ を，また，電磁波の減衰特性から EC_a を同時に測定できる．TDR では同じ土壌体積中の θ と EC_a を迅速に測定できるため，室内や野外における溶質移動測定に用いられてきた（例えば，Noborio, 2001）．TDR が野外における溶質移動測定に適用された初期の段階では，TDR で測定される EC_a を用いた溶質濃度の推定が行われたが，EC_a は θ と土壌溶液 EC（EC_w）の両方に依存するため，θ をある程度一定の条件にして測定する必要があった（Kachanoski et al., 1992; Ward et al., 1994; Vanclooster et al., 1995）．野外で θ が変化する条件下での溶質移動モニタリングを行うため，TDR で測定される θ と EC_a から EC_a–EC_w–θ 関係を介して EC_w を推定する方法が検討され（Heimovaara et al., 1995; Mallants et al., 1996; Risler et al., 1996），更に EC_w から溶質濃度を推定する方法も検討された（De Neve et

[1]NARO Institute for Rural Engineering, 2-1-6 Kan-nondai, Tsukuba, 305-8609, Japan. Corresponding author : 宮本輝仁，農研機構　農村工学研究所.
2015 年 6 月 26 日受稿　2015 年 10 月 8 日受理

al., 2000; Muñoz-Carpena et al., 2005）．この方法により野外でも肥料成分や塩分の移動過程を把握できることが報告されている（Bhabani et al.，1999；登尾ら，2005；Miyamoto et al., 2015）．これらの研究の中で EC_a–EC_w–θ 関係の経験モデル（例えば, Rhoades et al., 1976）や理論モデル（Mualem and Friedman, 1991; Hilhorst, 2000）についても適用性の検討がなされた（Bhabani et al., 1999; Muñoz-Carpena et al., 2005; Miyamoto et al., 2015）．しかし，TDR による測定では取り扱いに専門的な技能を要する高額な測定機器を使用するため，土壌中の水・溶質移動の観測を専門とする研究者や技術者以外のユーザーには導入しにくい測定手法であった．

近年，TDR と同様に θ と EC_a，更に温度を同時測定できるセンサーが普及してきている．Decagon 社の 5TE センサーはその一つであり，TDR と比べて操作性が簡便なうえ導入コストも抑えて測定が行える利点がある．ただし，この 5TE センサーは印加周波数が 70 MHz と TDR に比べて低いため，θ を測定するときに塩分の影響を受けやすい（Scudiero et al., 2012; Kargas et al., 2014）．そのため，5TE センサーで測定された θ の塩分依存性には注意が必要である．わが国では東日本大震災時に EC_a を簡便に測定できるセンサーの一つとして，5TE センサーが現地調査で広く使われるようになった（千葉ら，2011；加藤ら，2011；関矢ら，2012）．しかし，5TE センサーを用いて野外でモニタリングを行い，TDR と同様に θ と EC_a を同時測定して EC_w を推定し，更に塩分濃度を推定する試みは世界的に見ても少ない．宮本ら（2012）や武藤ら（2011）は津波被災農地の除塩過程を評価するために 5TE センサーで θ と EC_a を同時測定し，それらの測定値をもとに EC_w を推定している．しかし，復旧初期の迅速な対応が求められる中での評価であったため，EC_w の推定に用いた EC_a–EC_w–θ 関係は既存のものを用いており，適用性に関する詳細な検討は行われていなかった．その後，安中・花山（2014）は 5TE センサーを用いて砂丘砂の EC_a–EC_w–θ 関係を得たうえで，砂丘畑の土壌水分・溶質量変動の測定を行った．また，武藤ら（2015）は 5TE センサーで測定した土壌水分量の簡易補正法と Rhoades et al.（1976）や Hilhorst（2000）のモデルを用いた EC_w の推定の適用性を実験室レベルで検討している．

本研究の目的は，津波被害を受けた砂質畑の土壌塩分モニタリングへの 5TE センサーの適用性の検討である．そのため，宮本ら（2012）では未実施であった実験室レベルでの 5TE センサーの θ 測定値の塩分依存性の検討，対象圃場の EC_a–EC_w–θ 関係の取得とともに，EC_w から $EC_{1:5}$ に変換する校正式の取得を行った．更に，これらの結果を用いて砂質畑の土壌塩分モニタリングを行い，既存の塩害指標との比較による塩害リスク評価を行うとともに，土壌塩分モニタリングへの 5TE センサー利用の課題を検討した．

2. 試験方法

2.1 試験圃場の概要

試験圃場は宮城県亘理郡亘理町内のイチゴ栽培ハウスで，東日本大震災時には津波により海水が 5 日間，1 m 程度冠水した．表層に 5 ～ 7 cm 堆積したヘドロを除去後，6 月上旬にハウスのビニールが取り払われ，降雨による除塩が開始された．6 月下旬からは隣接するハウス 6 棟を使い，東北農政局の農地の除塩実証調査が実施された（仁後・河田，2011）．除塩作業が終了し，10 月からはイチゴ栽培が再開された．イチゴ栽培はハウスの中に地表面から 0.3 m の高さの畝を立てて行われた．畝部と畝間の全面にビニールマルチが敷かれ，畝の中央部に敷設した灌水チューブにより灌水が行われた．試験圃場は宮本ら（2012）と同一圃場であり，表層（0 ～ 0.3 m）が黒色の A 層，下層（0.3 m 以深）が黄色の B 層であった．表層土は砂壌土，下層土は壌質砂土であった．乾燥密度は表層土が 1.24g cm^{-3}，下層土は 1.38 g cm^{-3} であった．また，間隙率は表層土，下層土それぞれ 0.54 と 0.5 であった．その他の主な土壌の物理性は宮本ら（2012）に報告されている．

2.2 5TE センサーのキャリブレーション

試験圃場の表層土および下層土から採取した攪乱土をそれぞれ内径 10 cm，高さ 40 cm のアクリル円筒に高さ 30 cm まで詰め，3 ポアヴォリューム分の脱イオン水を浸透させて土壌中の塩分を除去した．その後，2 mm 篩で篩分けを行い，風乾させた土壌試料を用いた．

土壌水分量の測定のためのキャリブレーションは次のように行った．直径 6 cm，高さ 13 cm の円筒容器に 11 cm の高さまで，現地の乾燥密度になるように土壌試料を均等に詰めた．5TE センサーを回路部分まで埋設して，θ に関する出力値をハンドヘルドリーダー（Decagon 社）で読み取った．5TE センサーの出力値を 50 で割ることにより誘電率（ε）に換算した．土壌カラム全体の重量を測定して θ を求めた．測定終了後，円筒容器内の土壌試料を容器に出して，脱イオン水を加えて水分調整を行い，一晩置いて土壌試料と水を十分馴染ませてから再び円筒容器に入れ，5TE センサーの出力値の取得と重量測定を行った．この作業を 7 ～ 8 回繰り返して表層土と下層土のそれぞれの ε–θ 関係を得た．

θ と EC_a から EC_w を推定するための EC_a–EC_w–θ 関係の取得実験は次のように行った．4 種類の KCl 溶液（1，3，5，7 dS m^{-1}）をそれぞれ土壌試料に加えて 3 種類の θ の土壌カラムを作成した．5TE センサーを回路部分まで埋設して，θ に関する出力値と EC_a をハンドヘルドリーダーで読み取った．5TE センサーでは温度も同時測定して，25°C に温度補正された EC_a の値が出力される（Decagon devices, 2015）．そのため、EC_a の値はセンサー出力値を用いた．また，土壌カラム全体の重量を測定して θ を求めた．その後，遠心分離機で土壌試料中の液状水を抽出して EC メーター（Twin Cond，HORIBA

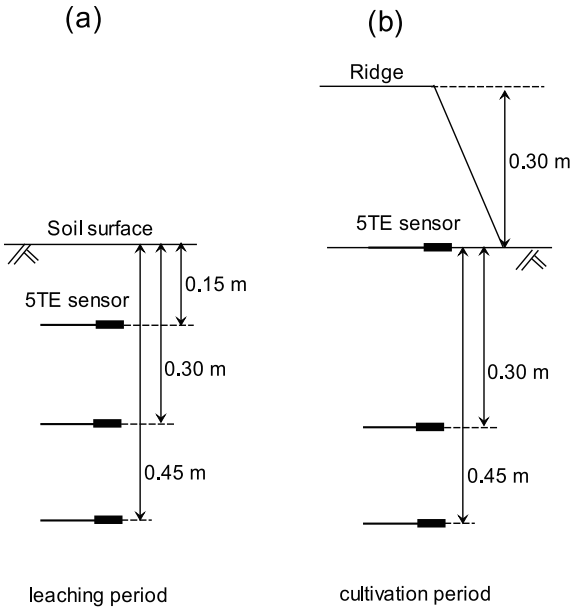


Fig. 1　試験圃場への 5TE センサーの設置状況.
Schematic of 5TE sensors set-up (a) leaching period (from July to August, 2011), (b) cultivation period of strawberry (from October, 2011 to April, 2012).

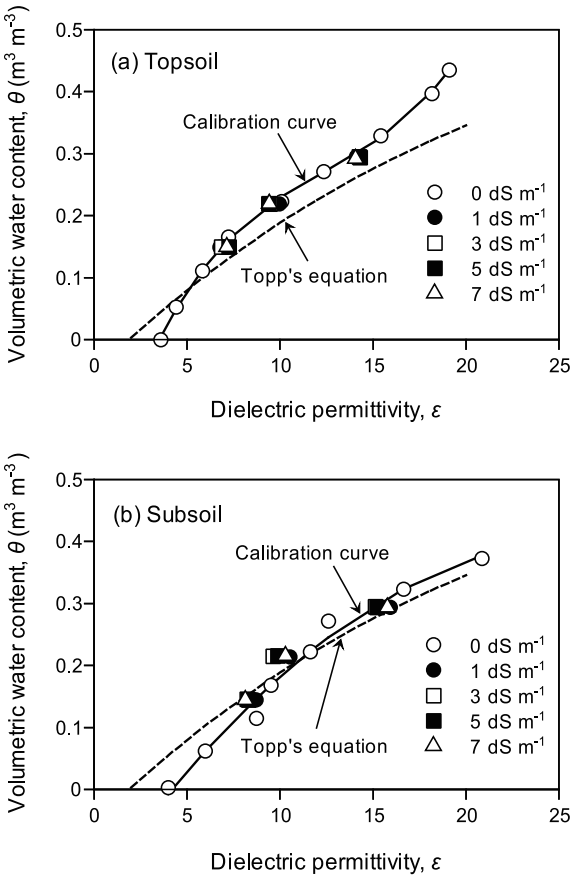


Fig. 2　5TE センサーで測定された誘電率（ε）と体積含水率（θ）の関係．(a) 表層土，(b) 下層土.
Relationship between dielectric permittivity, ε, measured by 5TE sensor and volumetric water content, θ, for topsoil (a), and subsoil (b). The calibration function derived from Topp et al. (1980) is also shown for comparison.

社）により EC_w を測定した．得られた EC_a–EC_w–θ 関係は Rhoades et al.（1976）のモデルでフィッティングした.

$$EC_a = T\theta EC_w + EC_s \quad (1)$$

ここで，透過係数 T は，屈曲度の効果と固液・気液界面近傍でのイオンの移動度を表現し，$T = a\theta + b$，(a，b は定数）で与えられる（Rhoades et al., 1976）．EC_s は固相表面の EC 寄与分である．EC_a，EC_w および θ の測定値をもとに（1）式のフィッティングパラメータ（a，b および EC_s）を非線形最小二乗法により求めた.

EC_w から $EC_{1:5}$ を推定するために，宮本ら（2012）が土壌中の塩分濃度と $EC_{1:5}$ を測定した後，土壌水分量が変わらないようにポリ袋に入れて密閉した状態で冷蔵保管していた土壌試料を用いた．関矢ら（2012）に倣い，ポリ袋中の土壌試料（0.4 L 前後）に 5TE センサーを挿入して袋ごと手で土壌を握り，土壌試料と 5TE センサーの密着性をよくした状態で θ に関する出力値と EC_a をハンドヘルドリーダーで読み取り，フィッティングで得られた Rhoades 式で EC_w を得た．$EC_{1:5}$ は以前に測定した結果（宮本ら，2012）を用いた.

2.3 圃場における土壌水分・EC のモニタリング

除塩過程における土壌水分・EC のモニタリングは，5TE センサーを深さ 0.15 m と 0.3 m，0.45 m の 3 深度に埋設して行った（Fig. 1（a））．5TE センサーはデータロガー（Em50，Decagon 社）に接続され，1 時間間隔で深さごとの θ と EC_a，温度を測定した．観測期間は 2011 年 7 月 8 日から 8 月 2 日である．その後，一旦観測器材を撤去した.

除塩作業が終了し，地表面に高さ 0.3 m の畝立てがされた後，再び 5TE センサーを地表面から深さ 0 m と 0.3 m，0.45 m の 3 深度に埋設して，栽培期間中の土壌水分・EC のモニタリングを行った（Fig. 1（b））．これは除塩作業で下層に移動した塩分が再上昇して，イチゴの栽培に影響があるかどうかを検討するためである．データの取得方法は上記と同様である．観測期間は 10 月 1 日から翌年 4 月 30 日までである.

3. 結果と考察

3.1 5TE センサーのキャリブレーション

表層土と下層土の ε–θ 関係を Fig. 2 に示す．宮本ら（2012）では土壌水分量の測定に，有機物含量の少ない鉱質土壌の校正式としてよく用いられる Topp 式を使用したが，本研究で脱イオン水を用いて得られた表層土の ε–θ 関係は Topp 式と比較して同じ誘電率でも 0.05 $m^3\ m^{-3}$ 前後大きい値となった（Fig. 2（a））．また，下層土の ε–θ 関係は Topp 式とほぼ同じになった（Fig. 2（b））．表層土と下層土で別々に 3 次と 2 次の回帰曲線を求めた.

表層土：

$$\theta = 1.8\times10^{-4}\varepsilon^3 - 6.7\times10^{-3}\varepsilon^2 + 9.94\times10^{-2}\varepsilon - 2.74\times10^{-1} \quad (R^2 = 0.99) \tag{2}$$

下層土：

$$\theta = -7.92\times10^{-4}\varepsilon^2 + 4.24\times10^{-2}\varepsilon - 1.64\times10^{-1} \quad (R^2 = 0.98) \tag{3}$$

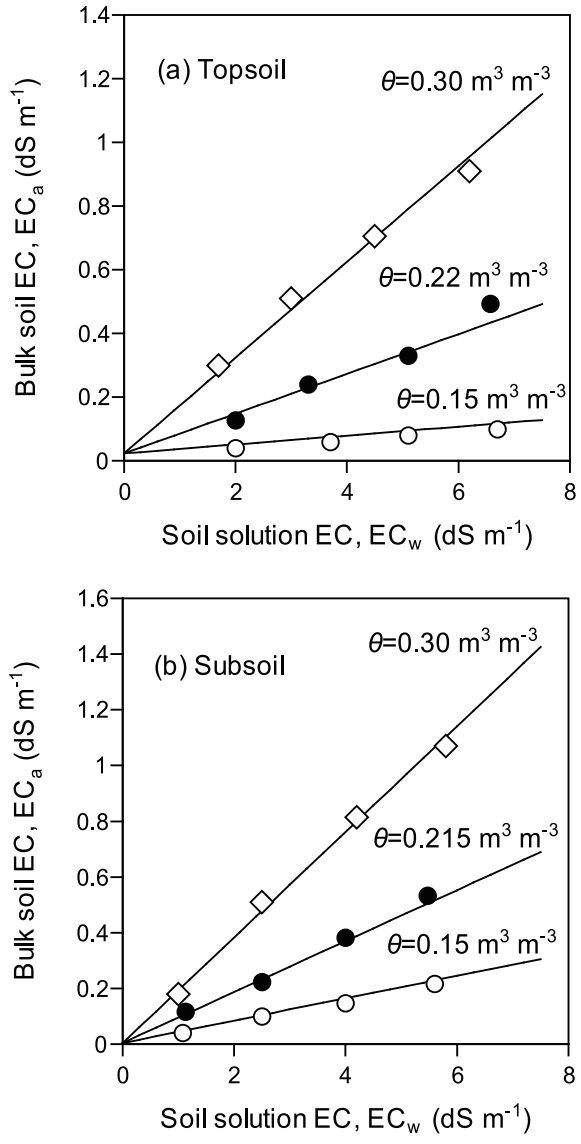


Fig. 3 異なる体積含水率での 5TE センサーで測定されたバルク土壌 EC（EC_a）と土壌溶液 EC（EC_w）の関係．(a) 表層土，(b) 下層土．実線は Rhoades et al. (1976) モデルを用いてフィッティングを行った結果．
5TE sensor-measured bulk soil electrical conductivity, EC_a, vs. electrical conductivity of the soil solution, EC_w, measured using an EC meter for different water contents for topsoil (a), and subsoil (b). The solid lines are the fitted relationships by using Rhoades et al. (1976) model.

また，1 ～ 7 dS m^{-1} の KCl 溶液で求めた ε–θ 関係を同図にプロットすると，表層土と下層土ともに，少なくとも測定した 0.3 m^3 m^{-3} までは塩分依存性がほとんどないことがわかる．5TE センサーで測定される ε の塩分依存性は，砂質土では土壌溶液の EC が 10 dS m^{-1} を超えると大きくなることが報告されている（Scudiero et al., 2012；武藤ら，2015；安中・花山，2015）．このため，土壌溶液の EC が 7 dS m^{-1} を超えない範囲であれば ε–θ 関係の塩分依存性が小さく，得られた 5TE センサーのキャリブレーション式は有効であると判断した．

3.2 EC_a–EC_w–θ 関係

表層土と下層土の EC_a–EC_w–θ 関係を Fig. 3 に示す．それぞれの θ に対応する EC_a–EC_w 関係は直線的な関係になった．この結果は EC_w の範囲が 7 dS m^{-1} 以下で比較的狭かったことによる．EC_w の範囲が限定されている場合，最も単純な Rhoades モデルがよく利用されている（Bhabani et al., 1999; De Neve et al., 2000; Muñoz-Carpena et al., 2005）．本研究でも Rhoades モデルを適用したところ，EC_a–EC_w–θ 関係をよく表現できることが確認された（Fig. 3）．Rhoades モデルのパラメータは，表層土が $a = 2.72$，$b = 0.315$，$EC_s = 0.023$，下層土では $a = 2.43$，$b = 0.093$，$EC_s = 0.004$ であった．

3.3 $EC_{1:5}$ の推定

5TE センサーで得られた θ と EC_a をもとに推定された EC_w と $EC_{1:5}$ の関係を Fig. 4 に示す．EC_w と $EC_{1:5}$ には高い相関関係が認められた．Nadler（1997）は TDR で測定した θ と EC_a をもとに推定された EC_w と $EC_{1:1}$ を比較して，砂や壌土では高い相関関係が得られたことを報告している．これらの研究結果から，粘土分の少ない土壌では 5TE センサーで得られた θ と EC_a をもとに EC_w を推定し，更に $EC_{1:5}$ の推定が可能であると考えられる．

3.4 除塩過程での土壌水分・EC 観測結果

Fig. 5 に除塩過程での土壌水分や EC の観測結果を示

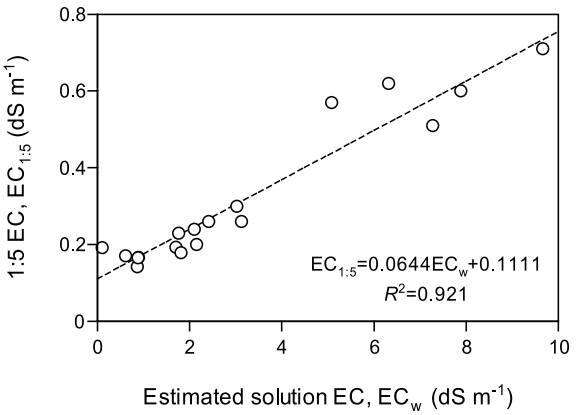


Fig. 4 体積含水率とバルク土壌 EC をもとに推定した土壌溶液 EC（EC_w）と 1 : 5 浸出法による EC（$EC_{1:5}$）の関係．
Relationship between EC_w based on the 5TE measurements and $EC_{1:5}$.

す．深さ 0.15 m の土壌水分は降雨状況（Fig. 5（a））に応じて鋭敏に反応している（Fig. 5（b））．また，深さ 0.15 m と 0.3 m の土壌水分量は 0.45 m に比べて値が大きかった．これは深さ 0.3 m までは砂壌土であったのに対して深さ 0.45 m は壌質砂土に分類され，下層の方が砂分の多く，シルト，粘土分が少ない土壌であったためである．

それぞれの深さの EC_a は土壌水分変動の影響を大きく受けている（Fig. 5（c））．深さ 0.15 m と 0.3 m の EC_a は降雨による土壌水分増加に伴って増加している．また，深さ 0.45 m の EC_a も土壌水分変動と同様な変化をしている．EC_a は EC_w と θ の両方に依存する測定値であるため，EC_a の経時的な変化だけから塩分濃度の変化を把握するのは難しい．これに対して，Rhoades モデルを用いて推定した EC_w は，土壌水分変動とは別の変動傾向を示した（Fig. 5（d））．深さ 0.15 m では EC_w は低く推移しており，観測開始時には既に除塩が進行していたことがわかる．深さ 0.3 m は 7 月 20 から 21 日までのまとまった降雨によって EC_w が低下したことや，深さ 0.45 m では 7 月上旬に塩分濃度が一旦上昇したが，その後の降雨により除塩が進んだことなど，EC_a では捉えられない塩分濃度の変化をモニタリングできることがわかる．

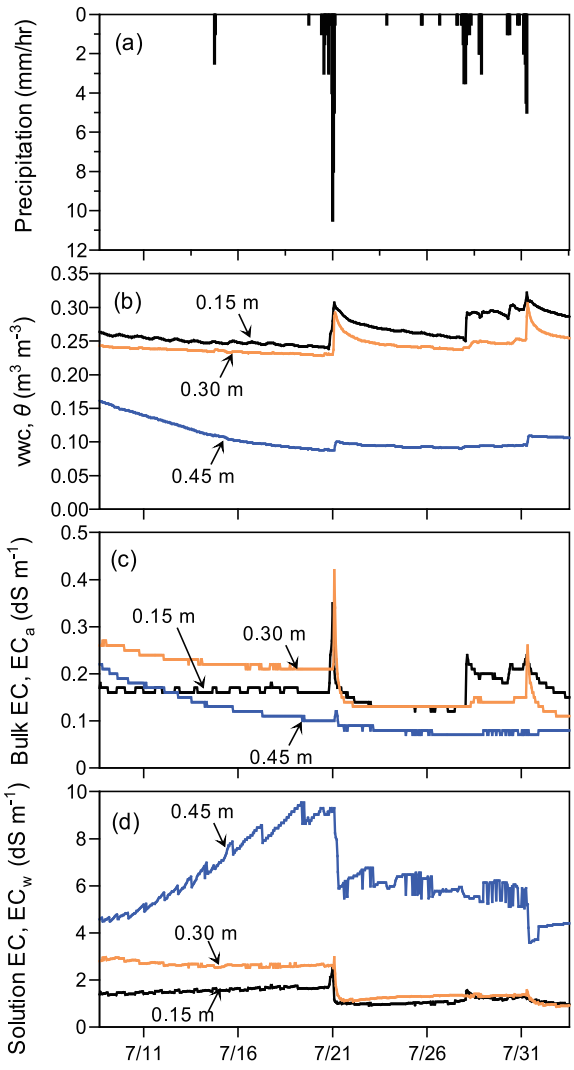


Fig. 5　除塩過程での (a) 降雨，(b) 体積含水率 (vwc，θ)，(c) バルク土壌 EC（EC_a）および (d) 土壌溶液 EC（EC_w）の経時変化（2011 年 7 月 8 日 ～ 8 月 2 日）．
Measured values of (a) precipitation, (b) volumetric water content (vwc, θ), (c) bulk electrical conductivity, EC_a, and (d) solution electrical conductivity, EC_w, at three depth; −0.15 m, −0.3 m, and −0.45 m during salt leaching period (8 July 2011 – 2 August 2011).

わが国では除塩の目標値が $EC_{1:5}$ で示されるため，EC_w をもとに $EC_{1:5}$ を推定した（Fig. 6）．同一圃場で深さ 0.1 ～ 0.2 m の $EC_{1:5}$ を調査した結果（仁後・河田，2011）と比較すると，5TE センサーの測定をもとに推定した $EC_{1:5}$ は類似の変化傾向を示している．$EC_{1:5}$ の低下する時期の違いは，調査方法の違いによるものと考えられる．仁後・河田（2011）は圃場全体を 3 区画に分け，それぞれの区画の 2 箇所から採土し，全ての土壌試料を混合して平均の $EC_{1:5}$ を求めた．そのため，圃場内の除塩のばらつきも反映されたと考えられる．これに対して本研究では，一地点での $EC_{1:5}$ の経時変化を観測したものであった．

$EC_{1:5}$ の値を用いて除塩の進行状況を見ると，深さ 0.15 m では 0.2 dS m^{-1} 前後の値で推移しており，既にイチゴを対象とした除塩の目標値である 0.3 dS m^{-1}（宮城県農産園芸環境課，2011）を下回っていたことがわかる．深さ 0.3 m では 0.3 dS m^{-1} 前後の値を示し，観測開始時には除塩の $EC_{1:5}$ の目標値前後であったと推定された．その後徐々に $EC_{1:5}$ の値が減少し，7 月 20 日から 21 日の降雨で深さ 0.15 m の値に近い 0.2 dS m^{-1} 前後まで低下したことがわかる．これに対して，深さ 0.45 m では表層からの塩分の移動により，わずかながら $EC_{1:5}$ の値が増加傾向にあったが，7 月 20 日から 21 日の降雨で除塩が進み，その後の降雨により更に $EC_{1:5}$ の値が

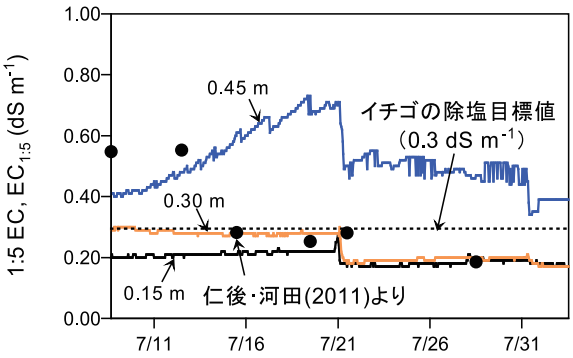


Fig. 6　除塩過程における 5TE センサーの測定値から推定された $EC_{1:5}$ の経時変化．仁後・河田（2011）によって測定された同圃場の 0.1 ～ 0.2 m の 1 : 5 浸出法による土壌 EC も比較のために示した．また，イチゴの除塩の目標値も示した．
Estimated $EC_{1:5}$ based on the 5TE measurements. $EC_{1:5}$ data at soil layer between 0.1 and 0.2 m by Nigo and Kawada (2011) are plotted for comparison. The target $EC_{1:5}$ value of leaching for strawberry (0.3 dS m^{-1}) is plotted with dotted line.

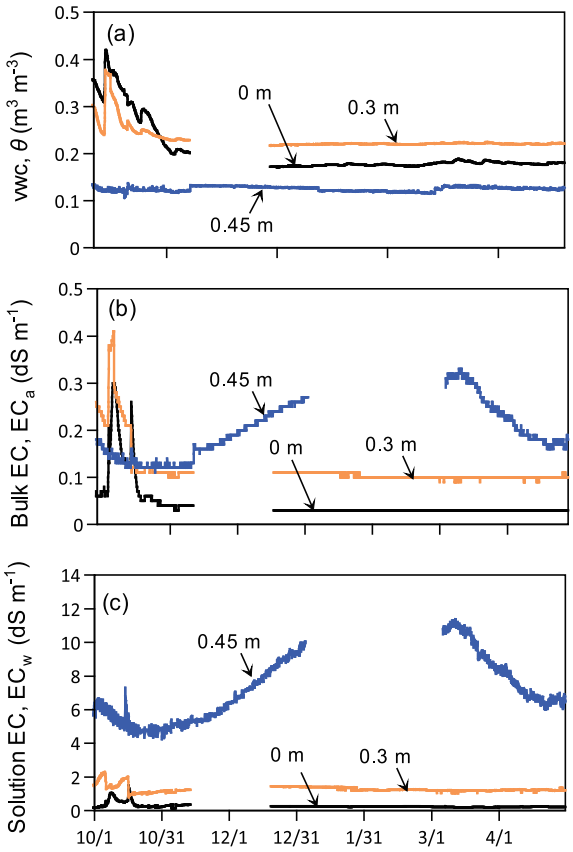


Fig. 7 イチゴ栽培期間における (a) 体積含水率 (vwc, θ), (b) バルク土壌 EC（EC_a,）および (c) 土壌溶液 EC（EC_w）の経時変化（2011 年 10 月 1 日 ～ 2012 年 4 月 30 日）. Measured values of (a) volumetric water content (vwc, θ), (b) bulk electrical conductivity, EC_a, and (c) solution electrical conductivity, EC_w, at three depths; 0 m, −0.3 m, and −0.45 m during the cultivation period (1 Octorber 2011 – 30 April 2012).

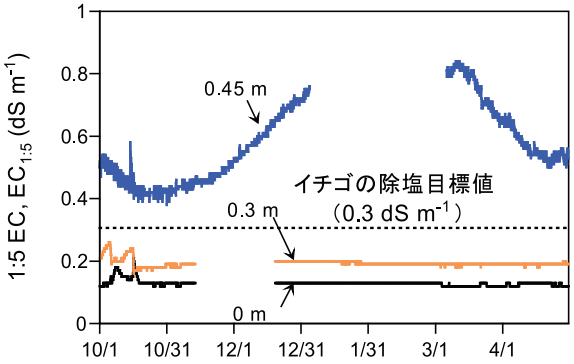


Fig. 8 栽培期間における 5TE センサーの測定値から推定された $EC_{1:5}$ の経時変化．イチゴの除塩の目標値も示した. Estimated $EC_{1:5}$ from measured data of 5TE sensor during the cultivation period. The target $EC_{1:5}$ value of leaching for strawberry (0.3 dS m^{-1}) is plotted with dotted line.

下がっていったことがわかる．ただし，深さ 0.45 m の $EC_{1:5}$ は，除塩終了時でも 0.4 dS m^{-1} 前後までしか低下しておらず，下層の塩分除去は容易に進まなかったことを示している．

3.5 栽培期間中の土壌水分・EC 観測結果

イチゴ栽培はハウスの中で行われ，土壌表面にはビニールマルチが全面に敷かれたため，灌水された水が畝部で主に消費され，余剰水が下層に排水される状況であった．畝部下端に相当する 0 m，更にそれよりも深い位置で観測した土壌水分量の変動を Fig. 7（a）に示す．10 月にイチゴの苗が移植され，畝部に十分な灌水が行われたことがわかる．土壌水分量は深さ 0.3 m でも増加が確認された．土壌水分は排水により減少し 12 月には平衡に達している．イチゴは水分要求度の高い作物であり，下層へ排水を生じない程度の灌水が行われていたことがわかる．なお，11 月中旬から 12 月中旬まで深さ 0 m と 0.3 m のデータに欠測があった．営農作業中に間違ってケーブルが抜かれてしまったことによる．

深さ 0 m と 0.3 m の EC_a は，10 月のイチゴの苗の移植に伴う施肥や灌水により変動した（Fig. 7（b））．その後はほぼ一定で推移した．深さ 0.45 m の EC_a は 11 月以降徐々に増加し，3 月まで高い状態が続いた．しかし，深さ 0.45 m の EC_a は 12 月下旬から 2 月までの期間は不連続に急激な低下や上昇を示したため，欠測扱いとした．5TE センサーによる EC_a の測定は，センサー櫛部に埋め込まれた 2 つの電極の突起部を用いて行われるため，密着性の影響を受けやすいことが想定される．しかし，この課題の詳細な議論は別の機会に行う．

深さごとの EC_w の経時変化を Fig. 7（c）に示す．10 月に深さ 0 m と 0.3 m の土壌水分量が大きく変動したが，その後はほぼ一定であったため，EC_w は EC_a に似た経時変化をした．特に深さ 0.45 m は全期間を通じて土壌水分量の変動が小さかったため，EC_a と同様の経時変化を示した．また，深さ 0 m と 0.3 m の EC_w は深さ 0.45 m の EC_w と比較して低い値であった．このことから，除塩によって一旦低下した EC_w は再び上昇することがなく，低いままであったことがわかる．

除塩の $EC_{1:5}$ の目標値である 0.3 dS m^{-1} と比較すると，深さ 0 m と 0.3 m の $EC_{1:5}$ はそれぞれ 0.15，0.2 dS m^{-1} 前後の値で推移しており，イチゴの栽培期間を通じて目標値を下回っていた（Fig. 8）．これに対して，深さ 0.45 m の $EC_{1:5}$ は 0.4 ～ 0.8 dS m^{-1} で変動しており目標値までは低下していなかった．これらの観測結果から，対象圃場では地表面下 0.45 m 付近ではまだ塩分濃度が比較的高い状況であったが，砂質土であることや下層の土壌水分が低いなど塩分上昇が起こりにくい環境にあり，深さ 0 m から 0.3 m までの土層はイチゴ栽培に対して十分低い塩分濃度となっていたことがわかる．更に地表面に高さ 0.3 m の畝立てを行い，イチゴの根域を畝内に留めるとともに適切な灌水を行うことにより，塩害リスクを受けないイチゴ栽培が行われていたと判断できる．

4. まとめ

本研究では，θ と EC_a，温度を同時測定できるセン

サーである 5TE センサーを津波被害を受けた砂質畑の土壌塩分のモニタリングに適用することを検討した．室内でのキャリブレーション実験から，土壌溶液の EC が 7 dS m^{-1} を超えない範囲であれば ε–θ 関係の塩分依存性が小さく，同一のキャリブレーション式で測定が行えることを明らかにした．また，対象土の EC_a–EC_w–θ 関係は Rhoades モデルでよく表現できることを確認した．更に，5TE センサーで測定された θ と EC_a から推定された EC_w は，別途測定した $EC_{1:5}$ と高い相関関係を示した．そのため，5TE センサーの測定値をもとに既存の塩害指標との比較が可能であることがわかった．除塩作業が行われた圃場で 5TE センサーを用いて除塩過程とその後の栽培期間中の $EC_{1:5}$ の経時変化を測定したところ，深さ 0.3 m までの表層では除塩が速やかに進む一方，地表面下 0.45 m 付近ではまだ塩分濃度が比較的高い状況であったことが確認された．砂質土であることや下層の土壌水分が低いなど塩分上昇が起こりにくい環境にあり，栽培期間中も深さ 0 m から 0.3 m までの土層は十分低い塩分濃度となっていたことがわかった．更に地表面に高さ 0.3 m の畝立てを行い，イチゴの根域を畝内に留めるとともに適切な灌水を行うことにより，塩害リスクを受けないイチゴ栽培が行われていたことも確認された．このように，θ と EC_a，温度の 3 つを同時測定できるセンサーを活用すると非破壊で連続的な EC_w の推定が可能となり，リアルタイムで塩分濃度の監視が可能となる．このようなセンサーは津波被災地や干拓地の塩害対策，ハウス栽培の塩類集積対策等でも有用な情報を得るための重要なツールとなる．

引用文献

安中武幸, 花山 奨 (2014): メロンがトンネル栽培された砂丘畑における土壌水分・溶質量変動の 5TE センサーを用いた測定. 日本砂丘学会誌, 61: 1–10.

Bhabani, S.D., Wraith, J.M. and Inskeep, W.P. (1999): Nitrate concentrations in the root zone estimated using time domain reflectometry. Soil Science Society of America Journal, 63: 1561–1570.

千葉克己, 加藤 徹, 冠 秀昭, 加藤 幸, 武藤由子, 溝口 勝 (2011): 宮城県の津波被災農地における塩類の挙動. 2011 土壌水分ワークショップ論文集, 49–54.

De Neve, S., Van De Steene, J., Hartmann, R. and Hofman G. (2000): Using time domain reflectometry for monitoring mineralization of nitrogen from soil organic matter. European Journal of Soil Science, 51: 295–304.

Decagon devices (2015): 5TE Water content, EC and temperature sensor, May 13, 2015 version. http://www.decagon.com/education/5te-manual/ （2015 年 5 月 25 日に確認）

Heimovaara, T.J., Focke, A.G., Bouten, W. and Verstraten, J.M. (1995): Assessing temporal variations in soil water composition with time domain reflectometry. Soil Science Society of America Journal, 59: 689–698.

Hilhorst, M.A. (2000): A pore water conductivity sensor. Soil Science Society of America Journal, 64: 1922–1925.

加藤 幸, 高松利恵子, 長利 洋, 武藤由子, 千葉克己, 溝口 勝 (2011): 青森県の津波被災水田における土壌環境モニタリング. 2011 土壌水分ワークショップ論文集, 55–60.

Kachanoski, R.G., Pringle, E.A. and Ward, A. (1992): Field measurement of solute travel times using time domain reflectometry. Soil Science Society of America Journal, 56: 47–52.

冠 秀昭, 関矢博幸, 遊佐隆洋, 大谷隆二 (2012): 電磁探査法による津波浸水農地の土壌電気伝導度迅速調査法. 土壌の物理性, 121: 19–28.

Kargas, G., Kerkides, P. and Seyfried, M.S. (2014): Response of three soil water sensors to variable solution electrical conductivity in different soils. Vadose Zone Journal, 13: doi:10.2136/vzj2013.09.0169.

Mallants, D., Vanclooster, J., Toride, N., Vanderborght, J., van Genuchten, M.Th. and Feyen, J. (1996): Comparison of three methods to calibrate TDR for monitoring solute movement in undisturbed soil. Soil Science Society of America Journal, 60: 747–754.

宮城県農産園芸環境課 (2011): 東北地方太平洋沖地震（3 月 11 日）に伴う園芸作物の技術対策（第 3 報）, http://www.pref.miyagi.jp/uploaded/attachment/66566.pdf （2015 年 6 月 22 日に確認）

宮本輝仁, 亀山幸司, 塩野隆弘 (2012): 平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震による津波で冠水被害を受けた砂質畑の土壌塩分モニタリング. 農村工学研究所技報, 213: 73–78.

Miyamoto, T., Kameyama, K. and Iwata, Y. (2015): Monitoring electrical conductivity and nitrate concentrations in an Andisol field using time domain reflectometry. Japan Agricultural Research Quarterly, 49: 261–267.

Mualem, Y. and Friedman, S.P. (1991): Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil. Water Resources Research, 27: 2771–2777.

Muñoz-Carpena, R., Regalado, C.M., Ritter, A., Alvarez-Benedi, J. and Socorro, A.R. (2005): TDR estimation of electrical conductivity and saline solute concentration in a volcanic soil. Geoderma, 124: 399–413.

武藤由子, 河合成直, 倉島栄一, 加藤 幸, 千葉克己, 溝口 勝 (2011): 岩手県の津波被災農地における塩分濃度モニタリング. 2011 土壌水分ワークショップ論文集, 44–48.

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.

Nadler, A. (1997): Discrepancies between soil solute concentration estimates obtained by TDR and aqueous extracts. Australian Journal of Soil Research, 35: 527–537.

仁後祐輔, 河田直美 (2011): 塩害を受けた畑地の除塩実証試験について. 畑地農業, 636: 2–12.

Noborio, K. (2001): Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. Computers and Electronics in Agriculture, 31: 213–237.

登尾浩助, 颯田尚哉, 古賀 潔, 馬場秀和, 向井田善朗 (2005): TDR 法を使った不飽和土壌中における水分・硝酸態窒素含量の測定. 土木学会論文集, 783/VII-34:15–21.

Rhoades, J.D., Raats P.A.C. and Prather, R.J. (1976): Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. Soil Science Society of America Journal, 40: 651–655.

Risler, P.D., Wraith, J.M. and Gaber, H.M. (1996): Solute transport under transient conditions using time domain reflectometry. Soil Science Society of America Journal, 60: 1297–1305.

Scudiero, E., Berti, A., Teatini, P. and Morari, F. (2012): Simultaneous monitoring of soil water content and salinity with a low-cost capacitance-resistance probe. Sensor, 12: 17588–17607.

関矢博幸, 冠 秀昭, 大谷隆二, 吉住佳与, 武田純一 (2012): 海水進入農地の土壌電気伝導度の測定における土壌 EC センサの利用法. 日本土壌肥料学雑誌, 83: 292–295.

Vanclooster, M., Mallants, D., Vanderborght, J., Diels, J., Feyen, J. and Van Orshoven, J. (1995): Monitoring solute transport in a multi-layered sandy lysimeter using time domain reflectometry. Soil Science Society of America Journal, 59: 337–344.

Ward, A.L., Kachanoski, R.G. and Elrick, D.E. (1994): Laboratory measurements of solute transport using time domain reflectometry. Soil Science Society of America Journal, 58: 1031–1039.

要　　旨

本研究では，θ と EC_a，温度を同時測定できるセンサーの一つである 5TE センサーの冠水被害を受けた砂質畑の土壌塩分モニタリングへの適用性を検討した．室内実験から，EC_w が 7 dS m^{-1} を超えない範囲であれば θ–ε 関係の塩分依存性が小さく，同一のキャリブレーション式で測定が行えることや，対象土の EC_a–EC_w–θ 関係は Rhoades モデルでよく表現できることを確認した．更に，5TE センサーで測定された θ と EC_a から推定された EC_w は，別途測定した $EC_{1:5}$ と高い相関関係を示した．5TE センサーを用いて除塩過程とその後の栽培期間中の $EC_{1:5}$ の経時変化を推定したところ，深さ 0.3 m までの表層では除塩が速やかに進み，栽培期間中もイチゴの除塩の目標値を下回っていたことや，地表面下 0.45 m 付近では，観測期間を通じて塩分濃度が比較的高い状況であったことなどが明らかとなった．θ と EC_a，温度を同時測定できるセンサーを用いると非破壊で連続的な EC_w の推定が可能となり，土壌中の塩分濃度のモニタリングが行える．

キーワード：キャパシタンスセンサー，津波，塩分濃度，電気伝導度