J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 132, p.31 ～ 39 (2016)

ユーザーから見た市販マルチセンサーの測定精度の評価

井上光弘 [1]

Evaluating measurement accuracy of commercial multiple sensor from user's viewpoint

Mitsuhiro INOUE[1]

1. はじめに

灌漑時期の判定のために，ポーラスカップの中央に圧力センサーを配置して昼夜の温度変化の影響を軽減し（井上ら，1994），土性に影響されずに水分状態を測定できる埋設型感圧センサー（井上，1995）を開発した．これを野菜栽培の水分制御（井上・竹内，1997; 井上・竹内，2000; Nishihara et al., 2001）に適用し，タイマー制御よりもセンサー制御の方が節水と省エネになり，年間の収穫量と収益を向上できることを明らかにした．しかし，テンシオメータよりもメンテナンスを必要としない誘電率水分計を用いた計測システムの方が長期の自動制御には有利である．

井上（2003）は塩分の影響が少ない 3 本ロッドの長さ 6 cm の TDR センサーを開発し，Dehghanisanij et al.（2004; 2007）はこれを点滴灌漑下の水分塩分測定に使用し，東ら（2005; 2007）は下方浸透水のモニタリングシステムに採用した．これらは，改良型 TDR センサーを Campbell 社製の TDR100 とデータロガー CR10X に接続して，水分・塩分測定に使用する計測システムであるが，かなりの測定ノウハウが必要なため，農家の自動灌漑システムへの適用は容易ではない．

そこで，市販の水分センサーとデータロガーの組み合わせの中から，砂丘畑の自動灌漑システム（井上，2014）のセンサーに採用でき，また，肥培管理などの土壌中の肥料分の情報も取得できるマルチセンサー（水分・塩分・地温を同一地点で同時に自動計測可能なセンサー）を選択することを目的に，センサーの測定精度を評価した．ここでは，詳細な測定原理には触れずにマルチセンサーの採用基準について述べ，現在市販されている最新の 6 つのマルチセンサーに対して，砂ベッド蒸発実験の測定結果を用いて測定精度を評価した．

2. マルチセンサーの採用基準

センサーを選択する場合，測定対象の土壌は何か，どの程度の大きさの領域を測定するか，必要な測定精度はいくらか，などの視点によって採用基準は異なる．

2.1 センサーの測定影響領域，安定性などの情報

センサーが土壌中のどの空間を測定しているかに着目する．この測定影響領域は，空間的なセンサーの埋設位置の決定，校正容器の大きさの決定などに必要な情報である．中島ら（1998）は，Delta-T 社製 ML1 で，ロッドの外側周辺 1 cm までの範囲を影響領域として，内径 10.5 cm，高さ 15 cm の校正容器を用いた．井本ら（2005）は，Decagon 社製 ECH$_2$O プローブの EC-10 と EC-20 に対して，影響領域が水に対してプローブの面側で 2 cm，エッジ側で 1 cm であることを示した．A.R.P. 社製 WD-3 の影響領域は，平面の絵柄がある側で外向きに約 4 cm，U字型のセンサーがある側で外向きに約 6 cm で非対称であり，先端方向は約 1 cm である（井上，2015a）．久保・登尾（2011）は，内径 15 cm，長さ 16 cm の塩ビ製の円筒を校正容器に採用して混合充填法で WD-3 の校正を行った．このように，それぞれのセンサーに固有の影響領域があるため，センサーの校正を行う場合，あらかじめ把握した測定影響領域よりも大きな校正容器を用いる必要がある．

根圏を含む土壌断面全体の水分量を 1 つの水分計で測定したい場合には，プローブ長が 30 cm 程度の Campbell 社製 CS650，深さ 10, 20, 30, 40, 60, 100 cm の地点を計測する Delta-T 社製プロファイルプローブ PR2/6（井上，2002; 井上ら，2004; 井本ら，2006），深さ 1 m 付近までの土壌断面の水分分布の経時変化を把握できる Sentek 社製 Drill & Drop Probe（坂井ら，2015）などがある．井本ら（2006）は，Delta-T 社製プロファイルプローブの校正に鉛直方向に 10 cm，水平方向に 10 cm の円柱体を必要とした．ロッド長 12 cm の Campbell 社製 CS655 の影響領域は，2 本ロッドの中心から球体ではなく楕円体で，長辺方向が 20 cm，短辺方向が 12.2 cm の領域である（井上，2015a）．このように，それぞれのセンサーで影響領域の大きさが異なるので，実験などによって把握する必要がある．

ユーザー側からの評価の事例として，星野ら（2010）は，圃場の水分測定システムを構築するための必要経費を検討し，60 本以上のセンサーを使用する場合は TDR

鳥取大学乾燥地研究センター
2016 年 1 月 10 日受稿　2016 年 2 月 15 日受理

センサー，少数の 15 点程度の測定では Decagon 社製 5TE などの市販マルチセンサーが経済的であることを報告した．しかし，安価なシステムは，センサーの動作不良の発生状況，ロガー機種依存のリスクがあることを指摘した．同様に，三石・溝口（2007）は Decagon 社製の同じ型のセンサーでも，例えば 10 本購入したセンサーに個体間のばらつきがあり，それぞれのセンサー間に器差があることを指摘した．一方，センサーの器差を小さくするように調整された製品もある．また，電気伝導度をあらかじめ 25 °C に補正した値を出力するセンサーがある．いずれにしても，購入の際には，ユーザーの目的に適合したセンサーの測定影響領域，測定精度，測定範囲，測定の安定性，測定の再現性などの情報をあらかじめ把握する必要がある．

2.2 土壌水分の測定範囲

水分量の測定範囲は使用目的と対象土壌に依存する．ここでは，砂地の畑地灌漑へのマルチセンサーの適用を前提として，対象土壌を砂とした．鳥取砂丘砂は他の土壌と比較して低水分領域でマトリック水頭が大きく変化する土壌水分特性曲線を描き，保水性，保肥力が乏しく，ヒステリシスを有することが知られている（井上，2000; Nishihara et al.，2001; 井上，2015b）．降雨遮断ガラス室の地下水位が深さ 8 m にある砂地圃場で，定常湛水状態から 10 日間の排水過程の実験を行い，定容積採土で深さ 20 cm の水分の経時変化を測定した結果（井上ら，1994），体積含水率（VWC）は，1 時間後，1 日後，10 日後に，それぞれ，0.125 $m^3\ m^{-3}$, 0.075 $m^3\ m^{-3}$, 0.06 $m^3\ m^{-3}$ であった．栽培条件下では土壌はさらに乾燥して，遠心法による水分当量（pF 3）の値，生長阻害水分点が 0.0284 $m^3\ m^{-3}$（井上・野村，1983）であることから，対象とする水分の測定範囲は，0.03 ～ 0.125 $m^3\ m^{-3}$ とした．これは，マトリック水頭で −850 cm ～ −25 cm の範囲に相当し，テンシオメータの測定範囲である．

2.3 土壌溶液の電気伝導度の測定範囲

灌漑水に河川水，地下水を使用するが，肥料を与えないと作物は育たない．当然，土壌溶液の電気伝導度（σ_w）はゼロではなくて，ある範囲にある．土岐ら（1991）は，土壌溶液の電気伝導度と野菜の生育・収穫の関係を，ホウレンソウ，トマト，レタス，スィートコーン，ダイコンなどの栽培試験の結果から，例えばホウレンソウの最適な σ_w の値は 2 ～ 4 dS m^{-1} の範囲にあると報告している．また，連作によって土壌溶液中の NO_3-N の濃度が上昇し，表層 5 cm の 1 : 5 法による懸濁液の電気伝導度が 1 dS m^{-1} 程度を超えないように土壌管理することを奨励している．

2.4 蒸発散量を推定するための水分測定誤差の許容範囲

水分測定に基づいて 1 次元の水収支式によって蒸発散量（ET）を推定する場合，水分測定誤差の許容範囲を検討する必要がある．Cho et al.（1975）は，砂丘圃場で，ウェイイングライシメータによる蒸発散量と中性子水分計を用いた水収支式による蒸発散量を比較した結果，水収支式によって 8 ～ 11 % の誤差内で蒸発散量を推定できることを示した．深部浸透量（Dra）は排水収支型ライシメータで直接測定するか，圃場に埋設したテンシオメータによる動水勾配と不飽和透水係数の積から求めることができる（東ら，2005）．ライシメータ実験の転倒マスで 0.5 mm の精度で排水量を測定できる．降水量（Pre）や灌水量（Irr）は雨量計や流量計で 0.5 mm の精度で正確に求めることができる．

今，根群域を土壌面から深さ 40 cm までとして，深さ 5，15，25，35 cm に水分計を埋設する．厚さ 10 cm の層の各深さの平均水分量 θ_5，θ_{15}，θ_{25}，θ_{35} を測定すると，層厚と平均水分量の積で根群域の水分貯留量（Sto）を（1）式で計算できる．また，（2）式で示した 1 次元水収支式で蒸発散量（ET）を推定する．

$$\mathrm{Sto} = 100(\theta_5 + \theta_{15} + \theta_{25} + \theta_{35}) \tag{1}$$

$$\mathrm{ET} = \mathrm{Pre} + \mathrm{Irr} - \mathrm{Dra} - (\mathrm{Sto}_i - \mathrm{Sto}_f) \tag{2}$$

ここで，添字の i は計算対象期間の初期，f は計算対象期間の最終で，単位は mm で，時間単位は日単位が多い．

このとき，（1）式の水分量（VWC）の測定誤差が ET の推定誤差に及ぼす影響を検討することが関心事である．仮に，1 か月を 31 日として，月消費水量を 100 mm（駒村，2004）とすると日消費水量は 3.2 mm d^{-1} になる．計算対象期間を 10 日間とすると，この期間の消費水量は 32 mm/10 d となる．（2）式の Pre，Irr，Dra は 0.5 mm の精度で測定できるが，今，検討したいのは（2）式の（$\mathrm{Sto}_i - \mathrm{Sto}_f$）の測定誤差である．この値は（1）式の水分測定の誤差に由来する．水分計の測定誤差の許容範囲を ±0.03 $m^3\ m^{-3}$ とする．θ_5，θ_{15}，θ_{25}，θ_{35} の測定誤差が ＋ と − で相殺される場合もあろう．空間変動が少ない灌漑直前に水分測定する場合で，計算対象期間中に追肥などを行うと，2.5 節で述べるように，塩の影響で計算対象期間の最終で測定した水分量がすべて過大評価される場合がある．（1）式の Sto_i の誤差は無視できるとしても，Sto_f の誤差は 4 層の厚さが 400 mm であるから ET の計算で 12 mm の誤差になる．今，（$\mathrm{Sto}_i - \mathrm{Sto}_f$）の誤差を ET の値で除した相対誤差で検討すると，ET の相対誤差は 37.5 % に相当する．

水分計の測定誤差の許容範囲を ±0.01 $m^3\ m^{-3}$ とすると，同様に，ET の推定誤差は 4 mm となり，ET の相対誤差は 12.5 % に相当する．この相対誤差の許容範囲を仮に 10 % にすると，水分計の測定誤差の範囲は 0.01 $m^3\ m^{-3}$ 以内に収めたい．

2.5 水分測定に及ぼす塩分濃度の影響

中島ら（1998）は，14 本の Delta-T 社製 ML1 の校正試験を行い，淡水に対して 14 本の ML1 の出力値がほぼ同じ曲線に合致し，器差が少ないことを示した．井上（2004a）は NaCl 塩を含んだ高塩分濃度の砂を供試土壌として，混合充填法で ML1 の校正試験を行い，含水比と塩分濃度による調整水分量と ML1 の出力電圧の関係か

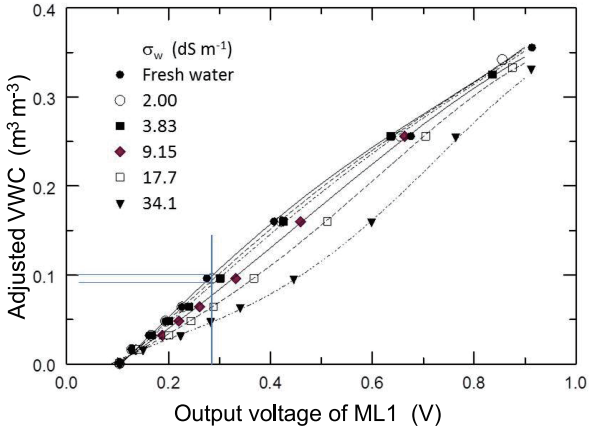


Fig. 1 ML1 の水分測定に及ぼす塩分濃度の影響

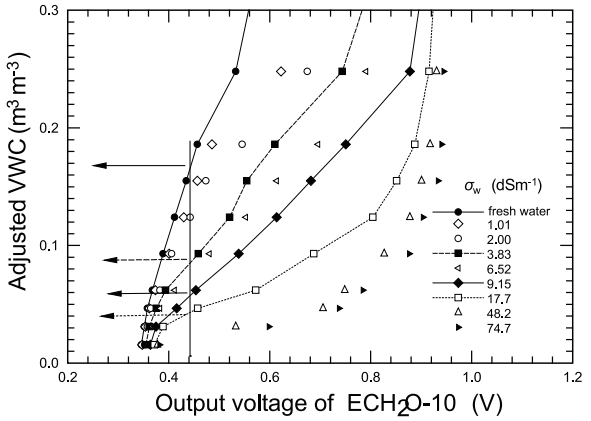


Fig. 2 ECH_2O-10 の水分測定に及ぼす塩分濃度の影響

ら，ML1 の塩分濃度の影響を評価した（Fig. 1）．2.3 節で述べた土壌溶液の電気伝導度（σ_w）の知見から，Fig. 1 で σ_w の値が 3.83 dS m^{-1} の土壌溶液に注目する．ML1 の出力が 0.28 V であれば，淡水の校正曲線から，0.10 m^3 m^{-3} の水分量と判断できるが，実際の水分量は 0.09 m^3 m^{-3} であり，0.01 m^3 m^{-3} の過大評価である．

Inoue et al.（2008）は同様な方法で，Delta-T 社製 ML2，WET-1，SM200，Decagon 社製 ECH_2O-10，Campbell 社製 miniTDR などの 12 種の市販の水分計に対して，水分量（VWC）の測定に及ぼす塩分濃度の影響を評価した．ECH_2O-10 の測定例（Inoue et al., 2008）を Fig. 2 に示す．ECH_2O-10 の仕様によると，使用温度範囲は 0 ～ 50 °C，水分測定の分解能は 0.001 m^3 m^{-3}，測定精度は ±0.03 m^3 m^{-3} である．Fig. 1 に示した ML1 と同様に，通常の肥料を含む農地を考慮して σ_w の値が 3.83 dS m^{-1} の土壌溶液に注目する．ECH_2O-10 の出力電圧が 0.44 V であれば，淡水の校正曲線を使用するので，0.17 m^3 m^{-3} の水分量と判断する．しかし，実際には水分量は 0.09 m^3 m^{-3} である．つまり，ECH_2O-10 は 0.08 m^3 m^{-3} も水分量を過大評価している．農地では肥料濃度（土壌溶液の電気伝導度）が変化するので，水分計 ECH_2O-10 の測定精度は，仕様に記載された ±0.03 m^3 m^{-3} 以内に測定できていないことがわかる．

水分測定に関して，原理的には比誘電率を測定しているが，ADR 法（SM200，ML1，ML3 など），FD 法（WET-1，WET-2 など），TDR 法（mini-TDR，CS655 など），静電容量法（ECH_2O-10，EC-5，5TE，GS3 など），TDT 法（ACC-SEN-SDI など）など電気的に出力する方法が異なる．マルチセンサーで水分測定を行う場合，栽培でしばしば遭遇する土壌溶液の電気伝導度がわずか 4 dS m^{-1} であっても，水分測定に大きな誤差が発生するセンサーがある．その原因の 1 つにプローブが発生する周波数がある．塩による影響が小さかった ML1 の周波数は 100 MHz，塩による影響が大きかった ECH_2O-10 の周波数は 5 MHz であった．ちなみに，現在，Decagon 社製 EC-5，5TE，GS3 の周波数は 70 MHz で塩の影響を軽減している（井上，2015a）．

Saito et al.（2008）は，鳥取砂丘砂を供試土壌として，ECH_2O-10，ECH_2O-20 の水分測定に及ぼす高塩分濃度の依存性を検討した．その結果，Fig. 2 に示した非線形の強い ECH_2O-10 の出力値と土壌溶液の電気伝導度との関係を，体積含水率をパラメータとするシグモイド曲線で表して，水分補正法を提案した．

2.6 水分測定に及ぼす温度の影響

誘電率水分計の原理は物質の比誘電率の相違に由来している．すなわち，空気が約 1，水が約 81 で，土壌中に水を多く含めば，土壌のみかけの比誘電率が高くなることを利用して水分量を測定する．静電容量法は静電容量が比誘電率に比例することを利用する．しかし，水の比誘電率は 81 で一定ではなく，温度に依存する．特に氷点下 10 °C になると水の比誘電率は著しく小さい（井上，2004b）．水の比誘電率は温度が 5 °C から 50 °C の範囲で，温度上昇に対して比誘電率が低下する負の相関を示し，25 °C を基準とした補正式（Pepin et al., 1995）が提案されている．鈴木ら（2007）は粘土の多い火山灰土で実験した結果，逆に温度上昇に対して正の相関があるセンサーが存在することを示した．例えば，Campbell 社製 CS605 で測定した場合は，正の相関を示さないが，塩分濃度が高い場合や水分量が少ない場合に正の相関が存在した．CS605，CS616，CS615，ECH_2O の周波数が，それぞれ，1.45GHz，175 MHz，44 MHz，5 MHz で，周波数の小さなセンサーほど塩分濃度の影響で正の相関を示すと結論づけた．井本ら（2007）は ECH_2O を用いて，風乾した石英の 4.7 °C から 50.7 °C の温度変化に対して，1 °C に対して 0.16 mV 程度の正の相関を示した．藤巻・井上（2003）は，水分量が 0.01，0.07，0.154，0.336 m^3 m^{-3} のローム質砂土に対して，ECH_2O の温度依存性を調べた．いずれも高い正の相関があり，その勾配を水分量の 2 次関数で与えた．齊藤ら（2008）は，中国の黄土に対して，ECH_2O-20 の温度依存性を調べ，ECH_2O-20 の出力値，水分量，温度の関係を用いて経験的な校正式を導いた．

今，鳥取砂丘砂を供試土壌として，Delta-T 社製 ML2X の温度依存性を示す．水分量（VWC）の出力値 θ_p と地温 T との関係を Fig. 3 に示した（Saito et al., 2012）．図

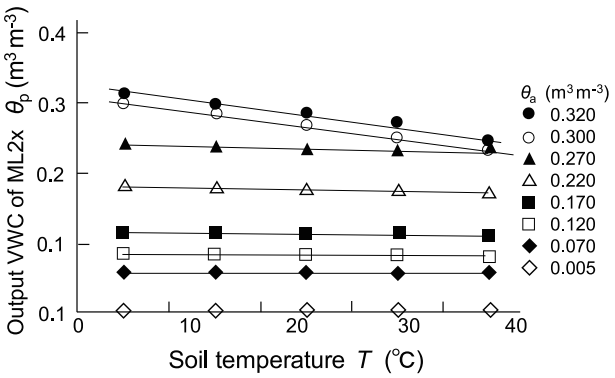


Fig. 3 鳥取砂に対する ML2X の温度依存性.

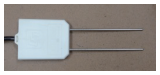
中の θ_a は実際の水分量で，0.3 m^3 m^{-3} 以上の高水分領域では温度上昇に対して負の相関が認められるが，通常の水分領域では温度（T）の依存性は認められない．この勾配 $d\theta_p/dT$ が前述の市販のセンサーによって異なり，正の勾配であったり，負の勾配であったり，水分量 θ_a に依存することが知られている（井上，2015a）.

Saito et al.（2009）は，黄土，鳥取砂丘砂，関東ロームを供試土壌にして，ECH_2O-20，EC-5，5TE の温度依存性に関する室内試験から，センサーの出力値を体積含水率と地温の関数として表現する校正式を導き，温度補正法を提案した．また，Saito et al.（2012）は，黄土と鳥取砂丘砂を供試土壌として，Delta-T 社製 WET-2，ML2X と Campbell 社製 MiniTDR，Decagon 社製 ECH_2O-10，ECH_2O-20，EC-5，5TE に対して温度依存性の室内試験を行い，勾配 $d\theta_p/dT$ と θ の関係を検討した．そして，温度変化に依存する水分量の経時変化を，圃場の時系列データから補正する方法を提案した．安中・花山（2014）は，5TE に対して 3 か月間の現地実験で午前 6 時のデータのみを抽出して，1 日の温度の時間変動の影響を除き，砂丘畑表層 20 cm の溶液濃度と体積含水率の長期変動を測定した.

市販センサーで水分量の経時変化を測定する必要性は多い．しかし，水分量に関する出力値が，温度や塩分に依存して，水分量を過大評価あるいは過小評価することが問題となっている．そこで，ユーザーは，対象とする土壌に対して，使用するセンサーの特徴を理解しておくことが必要である．2 章の検討の結果，センサーの採用基準として，

1）砂地圃場で使用する場合，体積含水率（VWC）で，少なくとも 0.03 ～ 0.125 m^3 m^{-3} の範囲を測定できること
2）砂地の野菜栽培で土壌溶液の電気伝導度の値が 2 ～ 4 dS m^{-1} の範囲にあることから，土壌溶液の電気伝導度の値が 4 dS m^{-1} 程度の塩分量でも，水分測定に影響しないこと

Table 1 使用したマルチセンサー，データロガー，解析ソフト，センサーの測定範囲と精度（体積含水率 VWC，電気伝導度 EC，温度 Temp）

Multiple sensor (Company) Frequency		Data-logger (Company)		Software	VWC ($m^3 m^{-3}$)	EC (dS m^{-1})	Temp (°C)
5TE (Decagon) 70 MHz		Em50 (Decagon)		ECH20 Utility	±0.03 (< 10 dS m^{-1})	0 ～ 23 ±10 % (0 ～ 7)	−40 ～ 50 ±1
GS3 (Decagon) 70MHz		Em50 (Decagon)		ECH20 Utility	±0.03 (< 5 dS m^{-1})	0 ～ 23 ±10 % (0 ～ 10)	−40 ～ 50 ±1
TDT (Acclima)		CR800 (Campbell)		Logger-Net	±0.01 (< 5 dS m^{-1}) (1 ～ 50 °C)	0 ～ 5 ±0.2 (1 ～ 50 °C)	1 ～ 50 ±2
CS655 (Camp-bell)		CR1000 (Campbell)		Logger-Net	0.05 ～ 0.5 ±0.03 (< 10 dS m^{-1})	0 ～ 8 ±5% + 0.05	−10 ～ 70 ±0.5
WET-2 (Delta-T) 20 MHz		GP1 (Delta-T)		Delta Link	0.1 ～ 0.55 ±0.05 (0 ～ 40 °C)	0 ～ 3 ±0.1 (1 ～ 40 °C)	−5 ～ 50 ±1.5
WD-3 (A.R.P.) 30 MHz		CR1000 (Campbell)		Logger-Net	0 ～ 1 ±0.03 (< 0.5)	0 ～ 7 ±0.35	−10 ～ 50 ±1

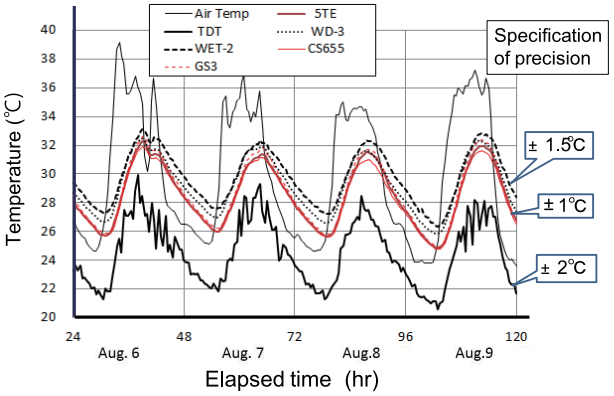


Fig. 4　深さ 10 cm の各マルチセンサーで測定した地温の経時変化.

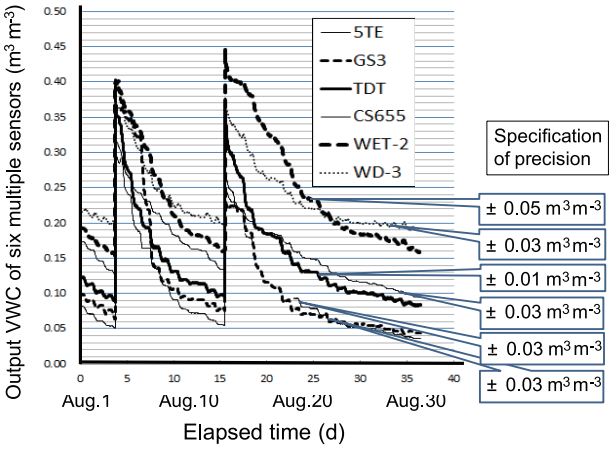


Fig. 5　深さ 10 cm の各マルチセンサーで測定した出力水分量の経時変化.

3）水分計の測定誤差の許容範囲は ±0.01 m^3 m^{-3} 程度であること
4）水分測定に及ぼす塩分濃度，温度の影響が少ないこと
5）仮に，塩分・温度依存性があっても，塩分濃度，温度の補正法を適用して，測定精度を確保できること

の条件で，マルチセンサーを評価することとした.

3. 砂ベッド蒸発実験

最近，市販されているマルチセンサーに対して，繰り返し実験ができる砂ベッド蒸発実験（井上，2015a; 2015b）を行った．使用した市販センサーとロガー，データ解析ソフト，センサーの測定範囲，測定精度などの仕様を Table 1 に示す．マルチセンサーの温度依存性と，液肥（電気伝導度 2.4 dS m^{-1}）を灌漑した場合のセンサーの応答を検討するために，実験は 2015 年 7 月 6 日から 9 月 6 日までの夏期で，気温の日較差が大きな時期を選んだ．降雨遮断用のビニルハウス内に，長さ 120 cm 幅 60 cm 厚さ 24 cm の砂ベッドを作成した．マルチセンサーの中心を深さ 10 cm に埋設し，表面が湛水状態になるように灌漑した．基本的にロッド以外の回路部が浸透を阻止しないように鉛直に挿入し，ロッドを水平向きに埋設した．砂ベッドの底面から水が浸出して，砂ベッド内が定常浸潤状態になってから灌漑を停止し，蒸発過程の実験を開始した．実験は 3 回繰り返し，4 回目は液肥を加えた.

3.1 地温の経時変化

今回採用したマルチセンサーはいずれも地温を直接出力できる．日較差が 10 °C 以上の晴天日の 8 月上旬，深さ 10 cm の地温の経時変化を Fig. 4 に示した．地温の 1 日の最高地温，最低地温の値もセンサーによって異なる．多くのセンサーの測定誤差は ±1 °C（分解能 0.1 °C）であるが，Acclima 社製 TDT はバラツキが大きく，仕様に示された測定精度が ±2 °C で安定性（Stability）も低いことが Fig. 4 からもわかる.

マルチセンサーの仕様の中で，測定精度が ±0.5 °C と最も高い Campbell 社製 CS655 の地温変化は，ほとんど 5TE の変化と同じであった．この変化が正確に温度を測定していると考えると，Delta-T 社製 WET-2 と Acclima 社製 TDT は，この値と 1.5 °C から 4 °C 異なっていた．Fig. 4 の仕様に示した測定精度はそれぞれ，±1.5 °C, ±2.0 °C と対応していることから，地温という簡単な測定項目でも，センサーによって出力温度が異なり，それぞれのセンサーの仕様に示された測定精度の値（Table 1）が参考になることを確認した.

3.2 体積含水率の経時変化

実験では，7 月 9 日 16:30，7 月 24 日 20:00，8 月 4 日 18:30，8 月 16 日 12:00 に定常浸潤状態の散水を停止した．その後の砂ベッド蒸発過程の体積含水率（VWC）を，深さ 10 cm に埋設したマルチセンサーとロガーで自動計測した．8 月 1 日から 36 日間のセンサーが出力した体積含水率（以下，出力水分量という）の経時変化を Fig. 5 に示した.

湛水状態（飽和に近い状態）からの圃場の排水過程（井上ら，1994）や，砂ベッドの乾燥過程（井上，2015b）は，天候に若干左右されるが，平面的な差異は少なく，深さ 10 cm の水分量の経時変化は 1 次元の単調な減少曲線であると考えられる．Fig. 5 に示されるように，蒸発過程が進行し，ほぼ平衡状態になった 8 月 15 日に，センサー間の出力水分量の差が大きく．最大値と最小値で 0.15 m^3 m^{-3} の差があり，仕様に示された測定誤差の大きな ±0.05 m^3 m^{-3}（WET-2）の 3 倍にもなる.

Decagon 社製 5TE と GS3 の 7 月 9 日から 9 月 6 日の水分減少曲線を Fig. 6 に示した。同じ Decagon 社の製品でもセンサーによる出力水分量が大きく異なる．例えば，5TE と GS3 のセンサーで，8 月 7 日のわずか 24 時間（Fig. 6 の 30 日目）に，それぞれ 0.012m^3 m^{-3}，0.10 m^3 m^{-3} の水分減少があった．その差は仕様に明記された測定誤差の ±0.03 m^3 m^{-3}（Table 1）よりも 2.9 倍大きい.

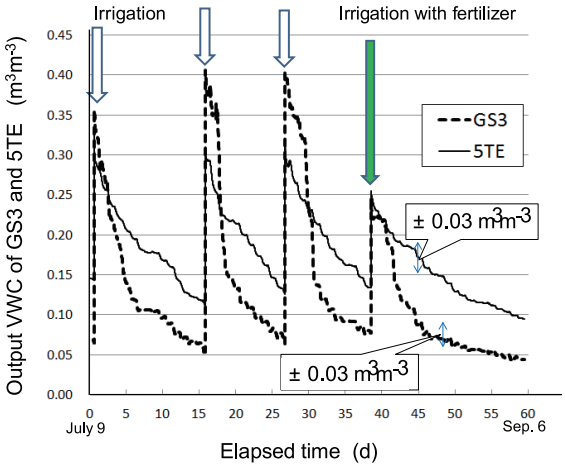


Fig. 6 深さ 10 cm の 5TE と GS3 で測定した出力水分量の経時変化.

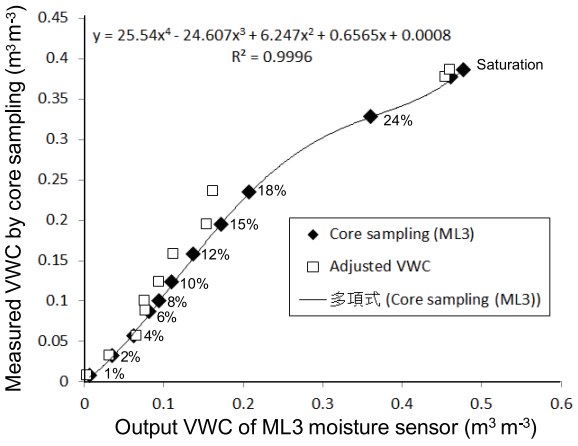


Fig. 7 ML3 の校正曲線.

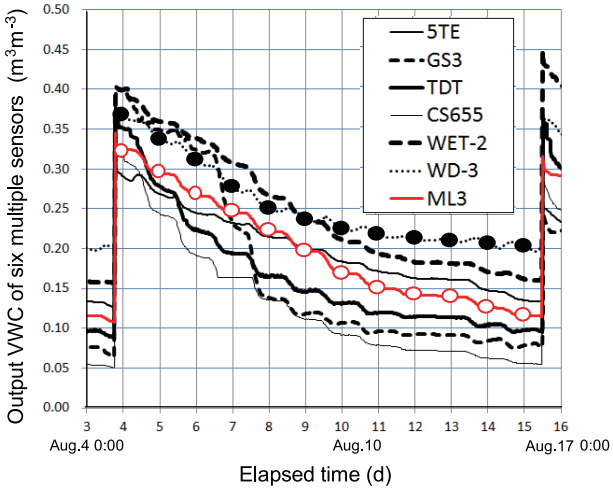


Fig. 8 砂ベッド蒸発実験の WD-3 と基準センサー（ML3）の出力水分量の対応.

これらのマルチセンサーの出力水分量が正しいかどうかは，センサー周辺の土壌を採土して体積含水率を求めて確認する方法（原位置定容積採土法）しかない．そこで，実験終了時の 9 月 6 日 13 時にセンサー周辺の定容積採土を行い，出力水分量と比較した（井上，2015b）．定容積採土との差は 5TE，GS3，TDT，CS655，WET-2，WD-3 に対して，それぞれ，0.013，0.021，0.013，0.041，0.073，0.115 $m^3\ m^{-3}$ であった（井上，2015b）．この差を検討するために，基準センサー比較法を試みた．

4. 砂ベッド蒸発実験の基準センサー比較法

水分センサーの校正方法には，水分調整混合充填法，水分追加混合充填法，上方浸潤迅速法，蒸発・重量計測法，排水・吸引過程吸引法，原位置定容積採土法，基準センサー比較法，などがある（井上，2015a）．

4.1 基準センサーの校正曲線

水分測定に対する塩分依存性，温度依存性がほとんどないことを確認した Delta-T 社製 ML3 を基準センサーに採用した．ML3 のロッド長は 60 mm，仕様によると，分解能は 0.001 $m^3\ m^{-3}$，測定精度は ±0.01 $m^3\ m^{-3}$ である．

水分調整混合充填法による校正実験では，本来は ML3 の測定影響領域を考慮して深さが浅い容器を使用すべきであったが，長さ 120 mm のロッドを有する CS655 の測定影響領域（20 cm × 12.2 cm の楕円形）と TDT のロッド長 144 mm を考慮して，縦 216 mm，横 309 mm，深さ 236 mm の 9.5 L のアスベル社製のパッキン付の容器を用いた．この容器に，含水比を 1，2，4，6，8，10，12，15，18，24 % に調整した鳥取砂丘砂を均一に充填して，ML3 の出力水分量を 9 月 24 日に測定し，直後に 100 mL の円筒サンプラーで定容積採土を行った．このときの採土深は，採土円筒の中心と ML3 のロッドの中心が一致するようにした．

定容積採土による乾燥密度の平均値は 1.46 g cm^{-3} であった．ML3 の校正試験の結果を Fig. 7 に示した．飽和実験では，容積が既知の容器に，水と土を交互に挿入し土壌表面と水面が一致するようにした．飽和水分量は与えた水量の総重量と容器の容積から計算した．鳥取砂丘砂の場合，少しでも振動させると液状化現象と同様に表面に水が湛水し，乾燥密度が大きくなるので注意深く実験する必要がある．10 月 9 日に上述の 9 月 24 日に作成した校正用サンプルに ML3 を挿入して校正の追加実験を行った．水分調整した含水比と乾燥密度の積から平均体積含水率を求め，ML3 の出力水分量との関係を Fig. 7 図中に □ 印で示した．体積含水率が 0.1 $m^3\ m^{-3}$ 以上の場合，9 月 24 日に行った定容積採土法の校正結果と異なった．水分調整して 2 週間後，容器は密閉しているので蒸発はないが，含水比が 4 % までは水分移動はなくても，高水分では容器の下部へ水分が移動する．その結果，ML3 のロッド長 60 mm で測定している測定範囲は底部付近の水分量を測定していないので，出力水分量が小さくなったと考えられる．したがって，校正試験のデータは，測定直後に定容積採土を行ったものだけを採用して，校正曲線を作成した．0.2 $m^3\ m^{-3}$ 以下の水分範囲であれば，直線回帰が可能であろうが，鳥取砂丘砂の

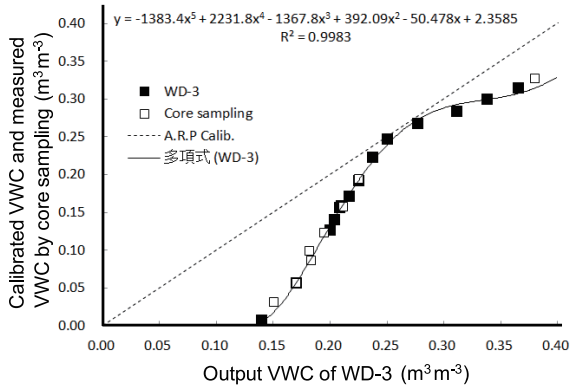


Fig. 9　基準センサー比較法による WD-3 の校正.

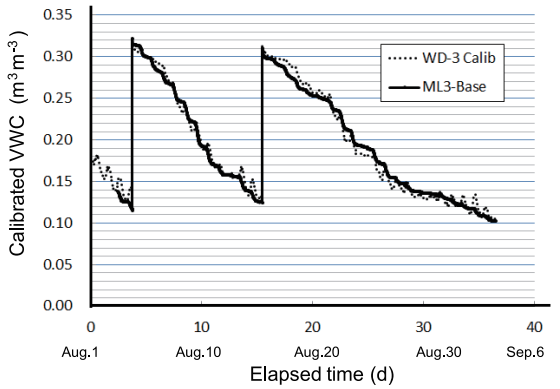


Fig. 10　WD-3 の校正水分量の経時変化.

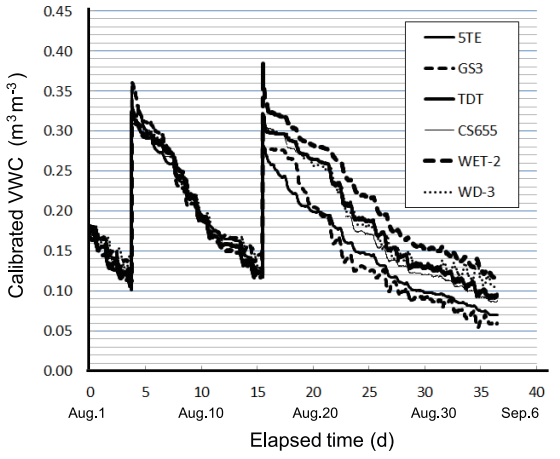


Fig. 11　基準センサー比較法による 6 つのマルチセンサーの校正水分量の経時変化.

基準センサーとして使用するために，風乾土から飽和土壌までの水分範囲に対して，4 次の多項式を採用した.

Fig. 5 に示した 3 回目の実験期間（8 月 4 日 18:30 開始）に対して，各マルチセンサーの出力水分量と基準センサー（ML3）の校正曲線から求めた体積含水率（VWC）の経時変化を Fig. 8 に示した．基準センサー比較法を行うために，4 日目（8 月 5 日 0:00）から 15 日目（8 月 16 日 0:00）まで，1 日ごとに 12 個の基準センサーの体積含水率のデータ（Fig. 8 の図中の〇印）を抽出した.

4.2 WD-3 の校正曲線

実験終了後に，出力水分量と定容積採土法による体積水分量との差が 0.115 $m^3\ m^{-3}$ と最も差が大きかった A.R.P. 社製 WD-3 に対して，基準センサー比較法を適用した．校正曲線の作成法について具体的に説明する.

基準センサーによる体積含水率のデータと同様に，WD-3 の出力水分量に対して，4 日目（8 月 5 日 0:00）から 15 日目（8 月 16 日 0:00）まで 1 日ごとに 12 個のデータ（Fig. 8 の図中の●印）を抽出する．これらの〇印と●印で示した体積含水率（VWC）を校正データに使用する．しかし，実験データが 0.12 $m^3\ m^{-3}$ と 0.33 $m^3\ m^{-3}$ の範囲にあるので，さらに乾燥領域のデータとして，風乾土と含水比 4 % の水分調整を行った校正データを加えて，WD-3 の校正曲線を作成した．その結果を Fig. 9 に示した.

Fig. 9 に A.R.P. 社が与えた WD-3 の校正曲線を点線で示した．WD-3 の仕様によると測定精度は ±0.03 $m^3\ m^{-3}$ であるが，0.2 $m^3\ m^{-3}$ 以下の低い水分領域では，A.R.P. 社が与えた校正式と 0.1 $m^3\ m^{-3}$ 以上も大きく異なることがわかる．久保・登尾（2011）は，WD-3 を使用して鳥取砂丘砂に対して，電圧から水分量を推定する場合に，直線回帰式ではなく指数関数を採用した．低水分では Fig. 9 の結果と同様に，A.R.P. 社の校正による水分量は過大評価することを指摘した．そこで，10 月 4 日と 5 日に水分調整法と定容積採土法で，含水比 2，4，6，8，10，12，15，21 % に対して校正実験を行い，その結果を Fig. 9 に示した（図中の □ 印）．基準センサー比較法で求めた校正データと混合充填法で求めた校正データはほぼ類似したところに分布した．ここでは，基準センサー比較法のデータに対して 5 次の多項式で校正曲線を与えた.

4.3 WD-3 の校正水分量の経時変化

3 回目の実験（8 月 4 日 18:30 開始）の 12 日間のデータに基づいて，基準センサー比較法による校正法で 36 日間の WD-3 の水分変動を Fig. 10 に示した．1 日の水分変動が温度変化と同期し温度依存性が認められる．しかし，4 回目の実験（8 月 16 日 12:00 開始）を含めて，基準センサーの水分変化と良く一致していて，液肥灌漑程度の塩分の影響は認められない．WD-3 の仕様による測定精度は ±0.03 $m^3\ m^{-3}$ で，これを採用基準にすれば，温度変化の影響を含めても十分に使用できる．鳥取砂丘砂に対しては，今後，温度補正を行えば，より正確な水分計（測定精度 ±0.01 $m^3\ m^{-3}$）として採用できよう.

4.4 6 つのマルチセンサーの校正水分量の経時変化

Fig. 5 に示した 6 つのマルチセンサーの出力水分量のバラツキに対して，基準センサー比較法による校正水分量の推移を Fig. 11 に示した．灌漑水を与えた 3 回目の実験（8 月 4 日 18:30 開始）期間の校正水分量は ±0.01 $m^3\ m^{-3}$ 以内の測定精度で推移した（井上, 2015b）．すなわち，各マルチセンサーの出力水分量は鳥取砂丘砂に対して適用できないことがわかった．Fig. 6 に示した 5TE と GS3 による出力水分量は同じ Decagon 社製のマルチ

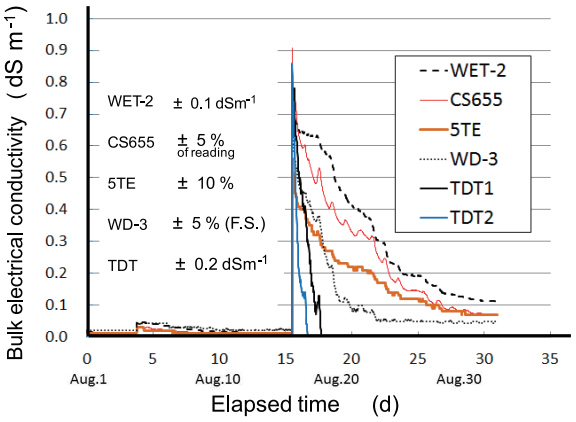


Fig. 12 深さ 10 cm の各マルチセンサーで測定したバルク電気伝導度の経時変化.

センサーであるが，前者は Topp 式に，後者は Decagon 社の計算アルゴリズムに由来していて，いずれも鳥取砂丘砂には適用できなかった.

液肥を与えた実験（8 月 16 日 12:00 に散水停止，液肥の電気伝導度 2.4 dS m^{-1}）では，Fig. 11 に示すように，鳥取砂丘砂に対する校正水分量の経時変化から，各マルチセンサーの測定精度の評価を行った結果，塩の影響が少ないセンサー（TDT, CS655），塩の影響は少ないが温度影響が認められるセンサー（WD-3），塩分の影響によって，仕様の測定精度（±0.03 m^3 m^{-3}）以上に水分を過大評価するセンサー（WET-2），水分を過小評価するセンサー（5TE, GS3）があることがわかった.

4.5 バルク電気伝導度の経時変化

土壌溶液の濃度を把握するために，Fig. 12 に各マルチセンサーで測定したバルク電気伝導度の経時変化を示した．Acclima 社製 TDT の場合，仕様によるとバルクの電気伝導度の測定精度は ±0.2 dS m^{-1} である．しかし，Fig. 11 に示した体積含水率が 0.2 m^3 m^{-3} 以上の測定日時に着目すると，Fig. 12 に示したバルク電気伝導度は 0.5 から減少し，水分量が低下した時刻のバルク電気伝導度はゼロになった．別の実験で NaCl 水溶液 5000 ppm（電気伝導度 9.15 dS m^{-1} に相当）の中では，2 本の TDT ともゼロを出力した。すなわち，低水分量あるいは高塩分濃度では Acclima 社製 TDT の出力値がゼロになり計測できないことが認められた．他のマルチセンサーについては，バルクの電気伝導度の測定精度は，仕様によると測定精度の高い WET-2 で ±0.1 dS m^{-1}，Decagon 社製の 5TE と GS3 が ±0.7 dS m^{-1}，CS655 が ±0.45 dS m^{-1} であり，肥培管理の情報を得るためのセンサーの測定精度を評価するためには，さらに塩分濃度に関して別途に校正する必要がある.

5. おわりに

砂地の自動灌漑システムのセンサーとして採用できる適切なマルチセンサーを検討するために砂ベッド実験で測定精度を評価した．その結果，いずれのマルチセンサーも対象土壌の校正が必要であることを確認した．わずかな塩分濃度の液肥（電気伝導度 2.4 dS m^{-1}）でも，水分量測定に塩の影響が認められるセンサーもあり，今後のさらなる検討が必要である.

筑紫（1998）は，TDR 水分計の応用とその問題点をシンポジウムで発表した．あれから 20 年近くなるが，今も水分測定の問題点は多く残されている．今回は鳥取砂丘砂を対象としたが，関東ロームや黒ボク土などの他の土壌でも同様にセンサーの特徴を明らかにする必要がある。また，センサーのシリアルナンバーによっても性質が異なる場合もある。これらの種々の問題に対して，製造会社のスタッフとユーザーとの情報の共有が重要と考える．この解説が多くのユーザー間の情報共有になれば幸いである.

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 5 ＴＥセンサーを用いた測定. 日本砂丘学会誌, 61: 1–9.

筑紫二郎 (1998): TDR 水分計の応用とその問題点. 平成 10 年度農業土木学会九州支部シンポジウム, 1–17.

Cho, T., Nomura, Y., Yano, T., Yamamoto, T. and Inoue, M. (1975): Application of neutron moisture meter for estimation of evapotranspiration. In Water Management in a Sand Dune Area, pp. 1–18. IAEA/FAO, Vienna.

Dehghanisanij, H., Yamamoto, T. and Inoue, M. (2004): Practical aspects of TDR for simultaneous measurements of water and solute in a dune sand field. J. Jpn. Soc. Soil Phys., 98: 21–30.

Dehghanisanij, H., Yamamoto, T., Inoue, M. and Akbari, M. (2007): Water flow and solute transport under drip irrigation in sand dune field. Journal of Applied Science, 7(20): 2997–3005.

土岐和夫・下野勝昭・西田忠志・川原祥司 (1991): ハウス土壌における塩集積の進行とその回避策. 日本土壌肥料学会編, 塩集積土壌と農業, pp. 96–122, 博友社, 東京.

藤巻晴行・井上光弘 (2003): ECH_2O 水分プローブの温度校正. 第 45 回土壌物理学会シンポジウム講演要旨集, 62–63.

東 直子・森 也寸志・井上光弘 (2005): 自動サクション制御による不飽和砂質土壌中の下方浸透水採取装置の開発. 土壌の物理性, 101: 27–35.

東 直子・森 也寸志・井上光弘 (2007): 不飽和土壌中の下方浸透水モニタリング, 自動吸引圧制御型サンプラーによる肥料溶脱傾向の把握. 環境浄化技術, 6(6): 44–48.

星野亜季・藤巻晴行・大黒俊哉・竹内和彦 (2010): 土壌水分センサーの動作不良発生状況およびロガー依存出力値について. 土壌の物理性, 114: 23–26.

井本博美・溝口 勝・宮崎 毅 (2005): 豊浦砂・黒ボク土・立川ロームに対する ECH_2O プローブの特性. 第 47 回土壌物理学会講演要旨集, 62–63.

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.

井本博美 · 西村 拓 · 宮﨑 毅 (2007): キャリブレーション法と温度変化が ECH_2O プローブの応答特性に与える影響. 第 49 回土壌物理学会講演要旨集, 20–21.

井上光弘 · 野村安治 (1983): 砂丘砂の水分恒数と乾燥過程における土壌水分特性曲線の決定. 砂丘研究, 30(1): 15–25.

井上光弘 · 竹内芳親 · 山本太平 (1994): 砂地圃場における土壌水分測定に及ぼす温度影響と水分センサーの改良. 日本砂丘学会誌, 41(2): 49–55.

井上光弘 (1995): 埋設型土壌感圧水分センサー. 日本砂丘学会誌, 41(2): 74–79.

井上光弘 · 竹内芳親 (1997): 砂ベッド野菜栽培における埋設型土壌感圧水分センサーによる土壌水分制御. 日本砂丘学会誌, 44(1): 30–35.

井上光弘 (2000): 砂丘の砂. 日本砂丘学会編, 世紀を拓く砂丘研究, 砂丘から世界の沙漠へ, pp.48–54. 農林統計協会, 東京.

井上光弘 · 竹内芳親 (2000): 土壌水分制御によるハウス内の砂ベッドおよび砂地野菜栽培 — 感圧センサーの開発とその適用 —. 農業および園芸, 75(5): 600–606.

井上光弘 (2002): プロファイルプローブによる土壌水分測定とその応用. 第 57 回農業土木学会中国四国支部講演会, 113–114.

井上光弘 (2003): 誘電率水分センサーの開発. 日本砂丘学会第 50 回全国大会講演要旨集, 24–25.

井上光弘 (2004a): ADR 水分計による高塩分濃度の砂丘砂の水分測定. 日本砂丘学会第 51 回全国大会講演要旨集, 18–19.

井上光弘 (2004b): 2.1.3 水分量の計測（室内および原位置）. 不飽和地盤の挙動と評価. 地盤工学会編, pp. 17–24, 丸善, 東京.

井上光弘 · 森井俊広 · 西村 拓 · 藤巻晴行 (2004): プロファイル水分計を用いた不飽和透水係数の原位置試験法. 農業土木学会論文集, 231: 39–45.

Inoue, M., Ould Ahmed, B.A., Saito, T. and Irshad, M. (2008): Comparison of twelve dielectric moisture probes for soil water management under saline conditions. American Journal of Environmental Sciences, 4(4): 367–372.

井上光弘 (2014): 自動地中灌漑システムと土壌センサーの評価. 畑地農業, 671: 23–27.

井上光弘 (2015a): ユーザーから見た市販マルチセンサー（水分–塩分–温度）の評価. 2015 年度土壌物理学会大会講演要旨集, 第 57 回シンポジウム「進化する土壌水分計測」, 18–35.

井上光弘 (2015b): 砂ベッド蒸発過程における 6 つのマルチセンサーの測定精度の評価, 2015 土壌水分ワークショップ, 33–43.

駒村正治 (2004): 畑の土と水, 湿潤地域の畑地灌漑論, pp. 60–61. 東京農大出版会, 東京.

久保武広 · 登尾浩助 (2011): 折返し平行伝送路方式による国産土壌水分計 WD–3 の特性. 2011 土壌水分ワークショップ, 33–37.

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.

中島 誠 · 井上光弘 · 澤田和男 · クリスニコル (1998): ＡＤＲ法による土壌水分量の測定とキャリブレーション. 地下水学会誌, 40(4): 509–519.

Nishihara, E. , Inoue, M., Kondo, K., Takahashi, K. and Nakata, N. (2001): Spinach yield and nutritional quality affected by controlled soil water matric head. Agricultural Water Management, 51: 217–229.

Pepin, S., Livington, N.J. and Hook, W.R. (1995）: Temperature dependent measurement errors in time domain reflectometry determinations of soil water. Soil Sci. Soc. Am. J., 59: 38–43.

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.

Saito, T., Fujimaki, H. and Inoue, M. (2008): Calibration and simultaneous monitoring of soil water content and salinity with capacitance and four-electrode probes. American Journal of Environmental Sciences, 4(6): 690–699.

Saito, T., Fujimaki, H., Yasuda, H. and Inoue, M. (2009): Empirical temperature calibration of capacitance probes to measure soil water. Soil Science Society of America Journal, 73(6): 1931–1937.

Saito, T., Fujimaki, H., Yasuda, H., Inosako, K. and Inoue, M. (2012): Calibration of temperature effect on dielectric probes using time series field data. Vadose Zone Journal, doi: 10.2136/vzj2012.0184: 1–6.

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.

鈴木伸治 · 廣田知良 · 岩崎秀威 · 桑尾和伸 · 岩田幸良 (2007): なぜ誘電土壌水分センサーは正の温度依存性を示すか？ 第 49 回土壌物理学会講演要旨集, 32–33.