J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 148, p.33～37 (2021)

低価格静電容量式土壌水分センサーの出力値の塩分依存性とその補正法

藤巻晴行[1]・齊藤忠臣[1]

Calibration of salinity effect of a low-cost capacitance soil moisture probe

Haruyuki FUJIMAKI[1] and Tadaomi SAITO[1]

Abstract: Recently, extremely low-cost soil moisture sensors, which can be powered and recorded with a low cost single-board microcontroller, Arduino, are available in shopping sites in the internet. The purpose of this study was to evaluate the accuracy of one of such low-cost sensors and present a methodology to correct the effect of salinity and temperature fluctuation on the sensor outputs. A test for individual difference among products were carried out using a saturated sand and 5 out of 10 probes were found unsuitable for use. Although the effect of temperature was negligible, large salinity dependence was found in a calibration test using a sand having known water contents and salinities, We presented an empirical function between bulk electrical conductivity and the increment from the output of non-saline soil. By combining with another extremely low cost soil moisture sensors which is essentially a electrical conductivity sensor, we may measure both water content and salinity simultaneously.

Key Words : soil moisture sensor, capacitance, electrical conductivity, salinity

1. はじめに

土壌水分の連続計測は，土壌中の水分移動の数値予測と並んで，土地の適切な水管理に大きく貢献しうる土壌物理学の中心的課題である．時間領域反射法（TDR）による土壌水分観測が始まってほぼ 40 年，TDR を用いた土壌水分計測システムが商品化されてからも 30 年以上経過しているが，今なお TDR の精度は最も高く評価されている（上村ら, 2020）．TDR は高精度ながら読み取り装置（ケーブルテスタ）がなお高価であるため，時間領域透過法（TDT），静電容量法など誘電率に基づく様々な土壌水分センサーが開発され商品化されてきた．宮本ら（2017）は，著しく塩分濃度の高い土でなければ TDT を用いて塩分の影響をほとんど受けずに水分を測定できることを示している．温度や塩分の影響を受けやすいセンサーであっても，同時に同位置で測定された温度や電気伝導度を用いて適切に補正することにより，実用上十分な精度で測定できることが示されてきた（Saito et al, 2009; 井上ら 2016; 大森ら 2019）．しかしながら，本誌の広告に記載されている誘電率水分センサーの価格は安いものでも今なお 1 万円以上と高く，開発途上国の農民が灌漑管理のために用いるには敷居がまだ高いと言える．

一方，数年前に商品化された著しく低価格な土壌水分センサーや Arduino およびその互換品，Raspberry pi などの低価格マイクロコントローラにより，作物の乾燥ストレスを早期に感知して灌水を行う自動灌漑システムの低価格化と普及が開発途上国でも急速に進む可能性がある．開発途上国でも所得水準の向上とともに従来型の計測精度の高いセンサーを用いた自動灌漑システムの普及も進むであろうが，精度は多少劣っても低価格のものの方がより広範かつ急速に普及が進むと予想される．Arduino またはその互換品は著しく低価格ながら複雑なプログラムに対応して出力値に応じた電圧出力ができる．しかし，それらの低価格センサーの精度検証はほとんど行われてこなかった．そのため，本研究ではその一つである DFROBOT 社の静電容量式土壌水分センサー Capacitive Soil Moisture Sensor V1.2（以下，CSMS, Photo 1）と製造会社不明の電気抵抗式土壌水分センサー（以下， Resistive Soil Moisture Sensor の頭文字を取って RSMS, Photo 2）について，温度や塩分への依存性を含む精度検証を行なった．前者は Amazon に出店している Wal front 社から 2019 年 3 月に 1 本 959 円で購入した．CSMS は長さ 9.8 cm，幅 2.3 cm の薄板状で TLC555 というタイミング回路で交流波を発信させ，周囲の静電容量に応じた電圧出力をするセンサーである．後者は同じく Amazon に出店している HK-JP-ShopStar 社から 2018 年 12 月に 1 本 158 円で購入した．後者は水分計としての使用ではなく，塩分依存性の大きな前者と組み合わせて水分の出力値を補正するとともに土壌間隙水の電気伝導度を同時に計測することを意図して試験に供した．RSMS は形状がほぼ同じものが異なる型番名で販売されている上に形状がやや異なるものも販売されている

[1]Tottori University, 4-101 Koyama-cho Minami, Tottori, 680-8550, Japan.
Corresponding author: 藤巻晴行, 鳥取大学乾燥地研究センター
2021 年 5 月 14 日受稿　2021 年 6 月 8 日受理

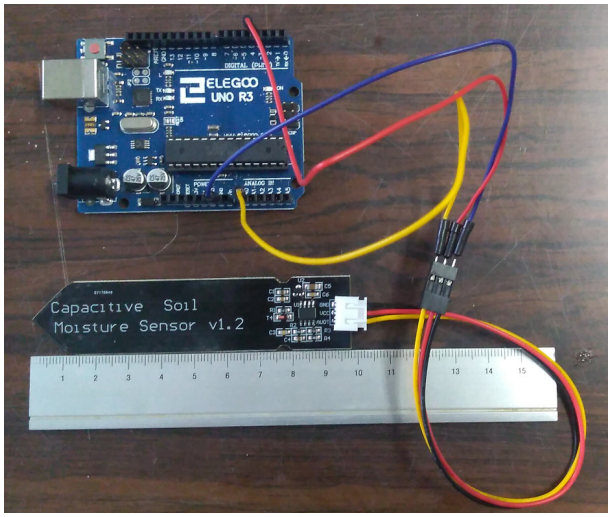


Photo 1 CSMS and Arduino used in the experiment.

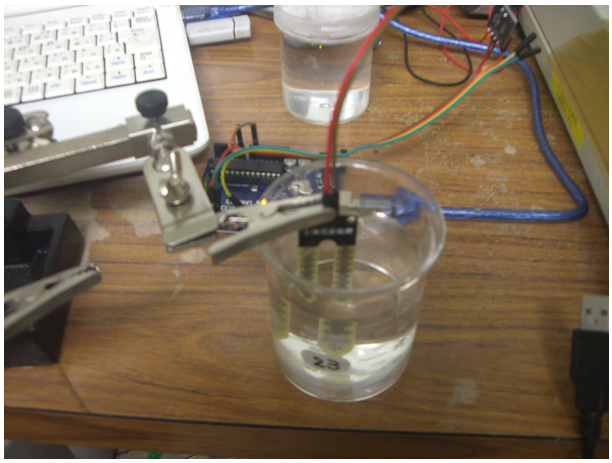


Photo 2 Experimental setup for the calibration of RSMS.

ため，本研究で得られた結果をそのまま適用できない可能性が小さくないものの，CSMS で許容できる精度での測定を行うために研究に広く用いられている高価なバルク電気伝導度センサーを用いては CSMS の使用の意義が損なわれてしまうため，RSMS の試験結果も示した．

2. 実験方法

2.1 CSMS の機差試験

内径 6.3 cm のポリプロピレン容器の高さ 7.8 cm まで塩分をほとんど含まない鳥取砂丘砂を 1.5 Mg m^{-3} の乾燥密度で充填し，水道水を用いて平均体積含水率を 0.15 もしくは 0.3 m^3m^{-3} に調整した．CSMS をその先端が底から 1.3 cm の位置になるように鉛直に挿入し，3.3 V の電圧を Arduino を介して与え，パソコン上に 5 秒毎に表示される出力値を読んだ．この出力値は電圧が 0 のときに 0，与えた電圧と等しい時に 1023 となる電圧比例値である．出力値が安定するまで 30 秒程度を要するため，安定後の値と 0.15 もしくは 0.3 m^3m^{-3} に調整した平均体積含水率を対応させた．10 本の CSMS について上記の測定を行った．実験時の室温は約 25 °C であった．

2.2 CSMS の温度依存性試験

機差試験で平均値に近い出力値を示したものを選び，Arduino で任意時刻に電圧を与えられる 5 V の出力ポートを用いて電圧を与えた．機差試験で用いた 3.3 V のポートは連続通電なので独立電源の野外では節電上好ましくないため，測定時のみ通電できる 5 V で行った．空中にぶら下げた状態で CSMS の出力値の変化を調べ，室温と対応させた．また，1 kg m^{-3} の NaCl 水溶液で 0.075 m^3m^{-3} の体積含水率に調整した鳥取砂丘砂に挿入したまま土壌面を覆って室温を 26 °C から 18 °C からまで冷房を稼働させて約 3 時間かけて下げ，さらに冷房を停止して約 2 時間かけて 22 °C まで戻し，センサー中央からセンサー面の垂直方向約 1 cm，深さ 3.3 cm の位置で熱電対により地温を測定し，地温の変化に対する出力値の変化を調べた．

2.3 CSMS の塩分依存性試験

純水を用いて風乾（0.005），0.075，0.15，0.3 m^3m^{-3} の体積含水率に調整した鳥取砂丘砂を 1.5 Mg m^{-3} の乾燥密度で内径 6.3 cm のポリプロピレン容器の高さ 7.8 cm まで充填し，中央に深さ 6.5 cm まで CSMS を挿入し，印加電圧 5V における出力値を読んだ．実験時の室温は 25 °C に設定した．1 本に対しては 0.25，0.5，1，2 kg m^{-3} の NaCl 水溶液と混合した鳥取砂丘砂でも同じ試験を行った．

2.4 RSMS の出力値とバルク電気伝導度の校正試験

Photo 2 に示すように，0.063, 0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0 kg m^{-3} の NaCl 水溶液に浸して出力値とバルク電気伝導度の関係を調べた．実験時の室温は 25 °C に設定した．

2.5 RSMS の出力値とバルク電気伝導度の校正試験

上記と同じ寸法の容器に 0.5 kg m^{-3} の NaCl 水溶液で体積含水率が 0.075 m^3m^{-3} になるように調整した鳥取砂丘砂に RSMS の電極部（3.8 cm 長）の上端が深さ 0.3 cm になるように鉛直に挿入し，パソコン上に 5 秒毎に表示される出力値を読んだ．実験時の室温は 25 °C に設定した．蒸発によって体積含水率が低下しないように土壌面をビニールシートで被覆し，初回と初回から 10, 20, 30 日後に測定した．3 本について 1 容器 1 本ずつでこの実験を行った．

3. 結果と考察

3.1 CSMS の機差試験

空中ないしは風乾砂中での計測では 10 本のうち 1 本が他のものに比べ著しく乖離していた（風乾砂で出力値が 516）．また，飽和に近い高水分（0.3 m^3m^{-3}）での測定では 10 本のうち 4 本が他のものに比べ著しく乖離していた（出力値が 365, 393, 533, 563）．従って，使用開始前の検定は空中のみでは不十分で，飽和に近い高水分

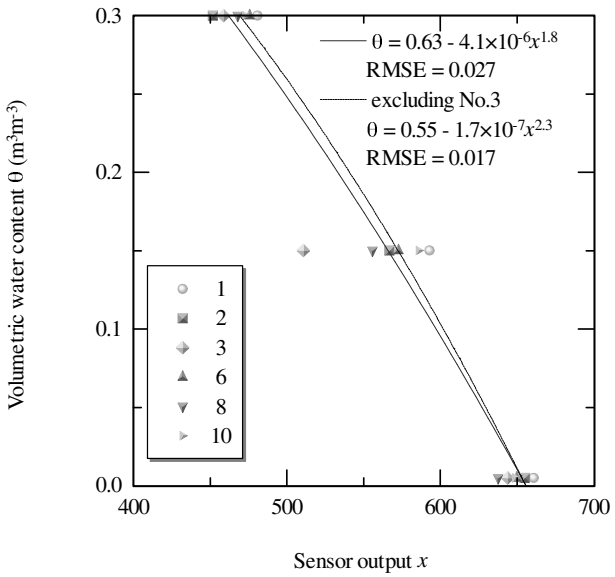


Fig. 1 Calibration function of CSMS for non-saline Tottori sand at input voltage of 3.3 V.

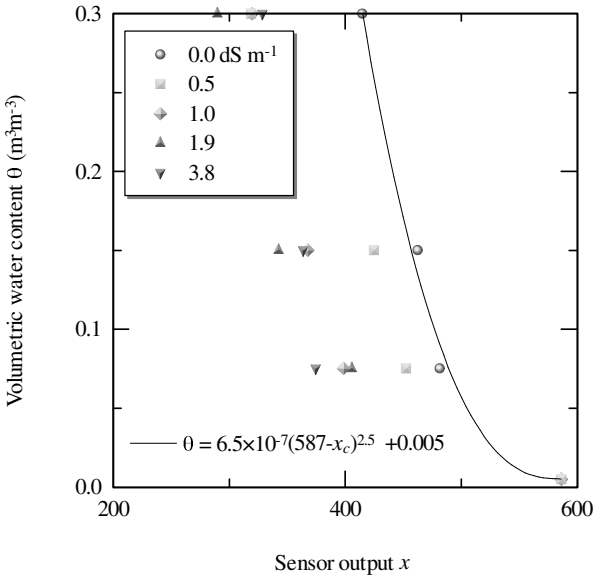


Fig. 2 Calibration function of CSMS for Tottori sand at different pore water salinity at input voltage of 5V.

（0.3 m^3m^{-3}）で検定することにより校正式から著しく外れた製品を排除できるものと思われる．次の式で曲線あてはめを行い，推定値と実測値の間の残差二乗和平均根（RMSE）を求めたところ，0.025 であった（Fig. 1）．

$$\theta = a_0 + b_0 x^{c_0} \tag{1}$$

ここで θ は体積含水率，a_0, b_0, c_0 は実験定数，x は出力値で，$a_0 = 0.63$，$b_0 = -4.1 \times 10^{-6}$，$c_0 = 1.8$ であった．$\theta = 0.15$ m^3m^{-3} において 3 番が最も平均値から外れていたため，これを排除することにより，RMSE が 0.013 m^3m^{-3} に改善した．半数のセンサーを排除しなければならないということは単価が事実上倍になるということになるが，それでも従来のセンサーに比べおよそ 1/10 である．

3.2 CSMS の温度依存性試験

18 ～ 26 °C の範囲では地温の変化に対する出力値の変化幅は 6 で，無視できる程度であった．

3.3 CSMS の塩分依存性試験

印加電圧 5 V で測定したところ，3.3 V より出力値が明らかに下がった（Fig. 2）．例えば，3.3 V における風乾時の出力値が 660 程度であるのに対して，5 V でのそれは 580 程度であった．従って，校正時と同じ計測電圧で運用する必要がある．出力値と水分の関係は，風乾での出力値と各々の水分におけるそれとの差を底とするべき乗関数に切片を与えた次式でよく近似できた．

$$\theta = a_{r0}\left(x_{rad} - x_r\right)^{b_{r0}} + \theta_{ad} \tag{2}$$

ここで a_{r0}, b_{r0} は実験定数，x_{rad} は風乾時の出力値，θ_{ad} は風乾水分量で，$a_{r0} = 6.5 \times 10^{-7}$，$b_{r0} = 0.25$，$x_{rad} = 587$，$\theta_{ad} = 0.005$ であった．土壌溶液の塩濃度が 0.25 kg m^{-3} の 0.075 と 0.15 m^3m^{-3} の体積含水率でも 0 kg m^{-3} での出力値に比べ明らかに下がり，0.5 kg m^{-3} 以上の塩濃度ではいずれの水分条件においても出力値が 100 程度下がった．静電容量式水分計の静電容量の塩分依存性は，合成誘電率の虚数部の誘電損失によって生じ，その誘電損失は塩濃度が上がるにつれ，また，周波数が下がるにつれ大きくなることが知られている（Kelleners, et al., 2005）．CSMS の周波数は 2.1 MHz 以下（Texas Instruments, 2019）で，現在，研究で広く用いられている METER 社の EC5, 10 HS（70 MHz）や Delta-T 社の WET（20 MHz）などに比べかなり低い．バルク電気伝導度（σ_b）の推定値と純水での出力値に対する出力値の増分（Δx_c）の関係を Fig. 3 に示す．バルク電気伝導度（σ_b）は鳥取砂丘砂における水分と バルク電気伝導度の関係式に基づき推定した（布ら, 2010）．σ_b と Δx_c の関係を次の式であてはめた．

$$\Delta x_c = a_c\left[1 - \exp\left(b_c \sigma_b\right)\right] \tag{3}$$

ここで a_c，b_c は実験定数で，$a_c = -105$，$b_c = 71$ であった．すなわち，土壌電気伝導度センサーで同時に近傍でバルク電気伝導度 の測定を行えば式（3）と式（2）から体積含水率が求められ，体積含水率とバルク電気伝導度がわかれば土壌間隙水の電気伝導度も同時に求められる．バルク電気伝導度が正確に測定できていると仮定して式（2）および式（3）により求めた体積含水率と実際の体積含水率の間の RMSE は 0.053 m^3m^{-3} であった．また，0.5 kg m^{-3} 以上の塩濃度であることが明らかな場合には，バルク電気伝導度センサーがなくても出力値に 105 を加えることで水分を推定できよう．なお，これらの値は特定の条件で得られたものであり、印加電圧や土壌や埋設深度，防水処理等によって変化するであろうことに留意されたい．

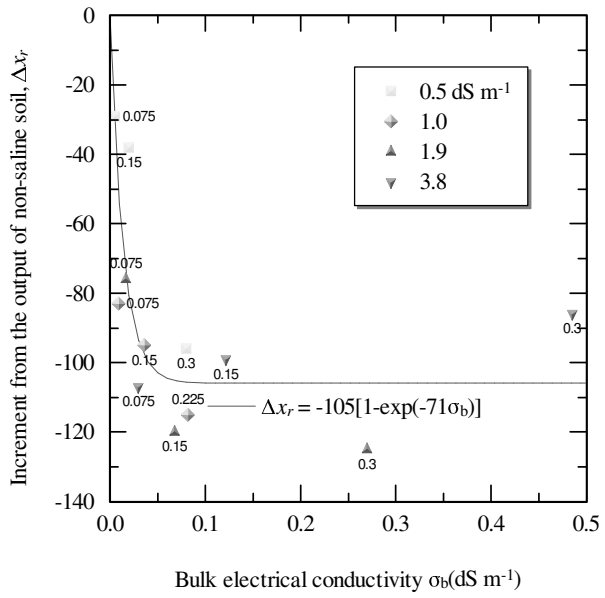


Fig. 3 Effect of pore salinity on the output. Numbers beside markers denote volumetric water content.

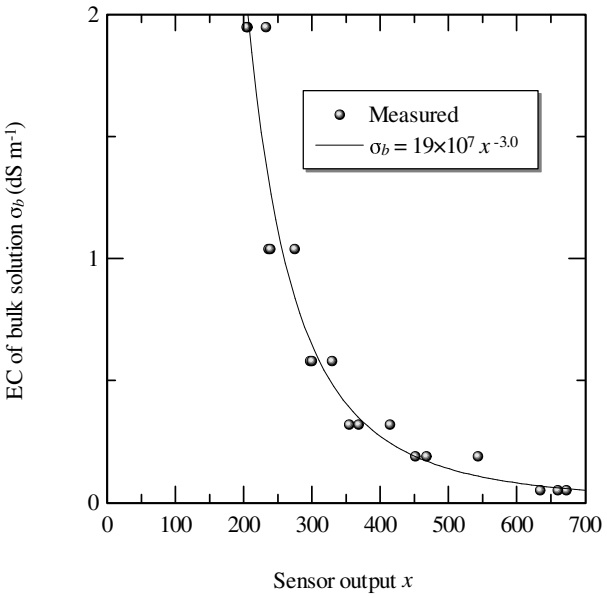


Fig. 4 Relationship between sensor output and EC of bulk solution.

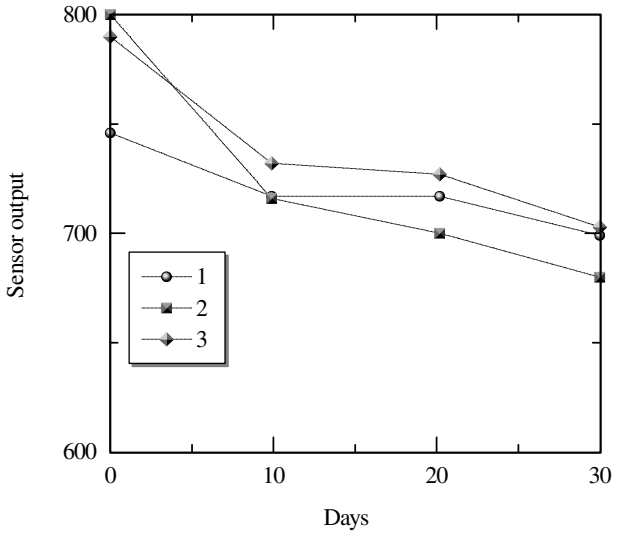


Fig. 5 Change in the outputs for Tottori sand having a 0.075 m^3m^{-3} of volumetric water content and 1.0 dS m^{-1} of pore water salinity .

3.4 RSMS の出力値とバルク電気伝導度の校正試験

出力値 x_r とバルク電気伝導度の関係を Fig. 4 に示す．両者の関係はべき乗関数で良好に近似できた．

$$\sigma_b = a_r x_r^{b_r} \tag{4}$$

ここで a_r, b_r は実験定数で，$a_r = 0.017$，$b_r = -3.0$ となった．

3.5 RSMS の出力値の経時変化試験

Fig. 5 に示すように，水分が変化していないにもかかわらず，出力値は日数の経過とともに低下した．これは電気抵抗が低下していることを意味している．数値計算上は鳥取砂丘砂の初期体積含水率 0.075 m^3m^{-3} では 7.8 cm 内部の再分配は 5 時間程度でほぼ平衡し，平衡時の上下端の体積含水率の差は 0.006 m^3m^{-3} 程度であるため，長期に渡る鉛直方向の再分配の影響は考えにくい．分極による腐食が原因であれば電気抵抗が増すと考えられるが，逆の変化を示している．この原因は不明であるが，製造者が腐食防止のために何らかの皮膜剤を塗布しており，それが劣化していった可能性も考えられる．はじめの 10 日間の低下が急速で，10 日目から 20 日目にかけて変化が緩やかになっているが，20 日目以降再びやや急になっている．なお，各回の 3 本の変動係数の平均は 0.022 で，CSMS と異なり，使用すべきでないほどの不良品は，その 3 本については見つからなかった．それを含めると同一状態における出力値の変動係数が 0.05 を超えるようなセンサー個体は，研究用にはもちろんのこと，土地の水分や塩分を管理する目的でも許容できず，排除すべきと思われる．

出力値とバルク電気伝導度の関係の校正試験は比較的迅速かつ容易であることから，1 ヶ月に 1 回程度，2 つの濃度の溶液に浸して係数を更新する必要があろう．機材の購入費用の低さと引き換えに作業コストが増すことにはなるものの，中性子水分計でも水中での測定値で線源の減衰の補正を行うことが行われてきており（Zhang, 2018），それほど非実用的なことではないだろう．とはいえ係数更新の作業の手間を考えると，1 ヶ月毎に交換する方が現実的かもしれない．

なお，CSMS, RSMS ともに接続部の防水処理が施されていないため，埋設したり野外で使用する場合にはグリース塗布やコーキング等の防水処理が必要であることに留意されたい．

4. おわりに

以上のように，CSMS と RSMS と組み合わせることにより，きわめて安価な水分塩分モニタリングシステムを構築できる可能性がある．

引用文献

布 和, 藤巻晴行, 天野貴久, 井上光弘 (2010): 砂丘砂における地中点滴灌漑下の水分塩分動態. 日本砂丘学会誌, 57(2): 41–52.

井上光弘, 齋藤忠臣, 猪迫耕二, 藤巻晴行 (2016): 高塩分濃度の砂に対する WET マルチセンサーの測定精度の評価. 日本砂丘学会誌, 63(1): 17–26.

Kelleners, T.J., Robinson, D.A., Shouse, P.J., Ayars, J.E. and Skaggs, T.H. (2005): Frequency dependence of the complex permittivity and its impact on dielectric sensor calibration in soils. Soil. Sci. Soc. Am. J., 69: 67–76.

宮本英揮, 上村将彰, 平嶋雄太 (2017): デジタル TDT センサーを用いた土壌の水分・電気伝導度の同時計測. 地下水学会誌, 59(1): 11-19

大森圭祐, 小林幹佳, 山下祐司, 足立泰久 (2019): 硬盤層を有する塩類土壌の溶脱特性 — 不撹乱土壌コアサンプルを用いた研究. 日本砂丘学会誌 , 66(1): 9–20.

Saito, T., Fujimaki, H., Yasuda, H. and Inoue, M. (2009): Empirical temperature calibration of capacitance probes to measure soil water. Soil Sci. Soc. Am. J., 73: 1931–1937.

Texas Instruments (2019): TLC555 LinCMOS^{TM} Timer datasheet. Available at https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlc555.pdf (2021 年 6 月 8 日)

上村将彰, 宮本英揮, 登尾浩助 (2020): TDR と TDT による豊浦砂の水分・電気伝導度計測の性能比較. 農業農村工学会論文集, 310 (88–1): .I_117–I_124.

Zhang, Z.F. (2018): Should the standard count be excluded from neutron probe calibration? Soil Sci. Soc. Am. J., 81(5): 1036–1044.

要　　旨

最近商品化された著しく低価格な土壌水分センサーは，飽和に近い高水分（0.3）で検定することにより，ある水分における出力の平均値から著しく外れた製品を排除できる．ある程度塩分濃度の高い条件での出力値は温度の影響を受けにくい．塩分の影響を受けるものの，バルク電気伝導度が 0.1dS m^{-1} 以上であることが自明な塩類土壌においては実用上差し支えない精度で測定できる．

キーワード：土壌水分センサー，静電容量，電気伝導度，塩分