

土壌水の電気伝導度モニタリングのための Rhoadesパラメータ決定法と計算プログラム

関 勝寿*・宮本輝仁**・岩田幸良**

Method and calculation program for determining Rhoades parameters
for monitoring electrical conductivity of soil water

Katsutoshi SEKI*・Teruhito MIYAMOTO**・Yukiyoshi IWATA**

Abstract

Understanding the process of water and solute transport is important for sustainable agricultural management to avoid excess fertilizer application. Electrical conductivity of soil water (EC_w) is a good index of the concentration of fertilizer. Time domain reflectometry (TDR) can be used to monitor change in volumetric water content (θ) and apparent electric conductivity of soil (EC_a). For monitoring EC_w with TDR, it is essential to determine the relationship among θ , EC_w , EC_a . It can be expressed by the model of Rhoades et al. (1976), where the parameters should be determined by laboratory experiment. This paper presents a method for determining the Rhoades parameters only from field data published in Seki et al. (2019). In addition, the proposed algorithm is implemented as a CGI program on the web which can be easily run. The method is expected to be applied for the monitoring of the concentration of fertilizer.

Keywords : Electrical conductivity, Rhoades model, parameter estimation

1. 序論

農地における土壌中の水分や肥料に由来する窒素の動きを知ることは、作物に吸収されずに下方に流出する肥料の量を減らして、農業のコスト削減および環境負荷の低減をする

*) 東洋大学自然科学研究室 〒112-8606 東京都文京区白山 5-28-20

Natural Science Laboratory, Toyo University, 5-28-20 Hakusan, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8606, Japan

***) 農研機構農村工学研究部門 〒305-8609 茨城県つくば市観音台 2-1-6

Institute for Rural Engineering, NARO, 2-1-6 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8609

ためにも重要である。

土壌中の水分量を継続的にモニタリングする土壌水分センサーには色々なものがあり、その中の1つにTDR (Time-domain reflectometry; 時間領域反射率測定法)がある (Davis and Chudobiak, 1975)。TDRは、試料中に電極を挿入してパルス信号を与えて電磁波の伝わる速さを測定することで、試料の誘電率を決定する。水の誘電率は土粒子や空気の誘電率と比べて非常に大きいため、土壌の誘電率は水分量に大きく依存する。Topp et al. (1980) はTDRによって測定される土壌の誘電率と体積含水率の間の経験式 (3次式)を提案した。Toppの式は様々な土壌によく適合するが、有機質土、粘質土、火山灰では必ずしも当てはまらず、キャリブレーションが必要とされる (Miyamoto et al., 2001)。さらに、TDRの測定から得られる反射係数から、土壌のみかけの電気伝導度 (EC_a)を計算することができる (Dalton et al., 1984; Nadler et al., 1991; Noborio, 2001)。そのため、TDRにより土壌中の塩分や硝酸イオンなどの溶質の濃度変化を知ることができる。

一般に土壌中の水に含まれる肥料成分が多いほど電気が通りやすくなるため、肥料由来する溶液濃度を知るためには、土壌水の電気伝導度 (EC_w)が指標となる。TDRによって土壌のみかけの電気伝導度 (EC_a)と土壌水分量 (θ)を測定できるものの、 EC_w の変化を知るためには、 EC_a と θ と EC_w との間を知る必要がある。Rhoades et al. (1976)のモデルはとてもよく使われる標準的なモデルであるが、そのパラメータを決定するためのキャリブレーション実験には大きな労力が必要とされる。

本稿では、実験室のキャリブレーションによってRhoades et al. (1976)のモデルのパラメータを決定する従来の手法を改良して、現場のデータから直接パラメータを決定する Seki et al. (2019)の手法を紹介する。2節ではパラメータを決定する方法について記述し、3節では現場のデータでパラメータを決定した実例を示し、従来の手法に対するこの手法の優位性を示すとともいくつかの注意点を記す。4節では、この手法によるRhoadesパラメータの決定をWebから実行できるプログラムを紹介する。

2. Rhoades パラメータの決定方法

2.1. Rhoades モデル

Rhoades et al. (1976)は、土壌のみかけの電気伝導度 (EC_a)、土壌水の電気伝導度 (EC_w)、土壌水分量 (θ)の間に次のような関係式を導入した。

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

ここで、 T は θ に依存する伝達係数であり、 EC_s は土壌固相の電気伝導度である。さらに、Gupta and Hawks (1972)の経験式

$$T = a\theta + b \quad (2)$$

(ここで、 a と b は定数)が成り立つと仮定して、式(2)を式(1)に代入した

$$EC_a = (a\theta + b)\theta EC_w + EC_s \tag{3}$$

という式を導いた。本稿ではこの式をRhoadesモデルとする。これは、 (a, b, EC_s) というパラメータの組（Rhoadesパラメータ）を決定することにより、3つの物理量 EC_w, EC_a, θ の関係が得られるというモデルである。

ひとたびRhoadesパラメータが得られれば、TDRから得られた現場の EC_a と θ からリアルタイムに EC_w の値を計算することができる。そこで、どのようにしてRhoadesパラメータを決定するのが重要である。そのための方法として、Miyamoto et al. (2015) の手法を「従来法」、Seki et al. (2019) の手法を「改良法」とし、それぞれを紹介した上で比較する。図1のように、従来法では実験室でRhoadesパラメータを決定するが、改良法では現場の θ, EC_a, EC_w からRhoadesパラメータを決定できるところに、改良法の強みがある。以下の節で、従来法と改良法をそれぞれ記す。

2.2. 従来法

従来法 (Miyamoto et al., 2015) は2段階線形回帰法である。1段階目の線形回帰では、異なる水分量の条件で、それぞれ水分量一定で溶質濃度を変えて EC_w と EC_a の関係を線形回帰する。その回帰式は、(3)式より傾きが $S = (a\theta + b)\theta$ でy切片が EC_s の一次関数となる (図3参照)。次に、 θ に対して S/θ の直線回帰をすることで、 a と b が得られる。このようにして、Rhoadesパラメータ (a, b, EC_s) が決定される。

この方法では、1段階目の線形回帰で「ECが異なり θ が同じ」であるようなデータが必要となる。現場では、通常はECも θ もばらばらであるため、現場のデータに直接この方法を適用することができない。そのため、キャリブレーション実験はカラムに再充填して水分量を制御する室内実験で行われる。たとえば、1段階目の線形回帰で4点、2段階目の線形回帰で4点のデータを取得するためには、 $4 \times 4 = 16$ 個のデータを得る必要があり、実験の労力が大きい。それを軽減することを目的として、次の改良法が提案された。

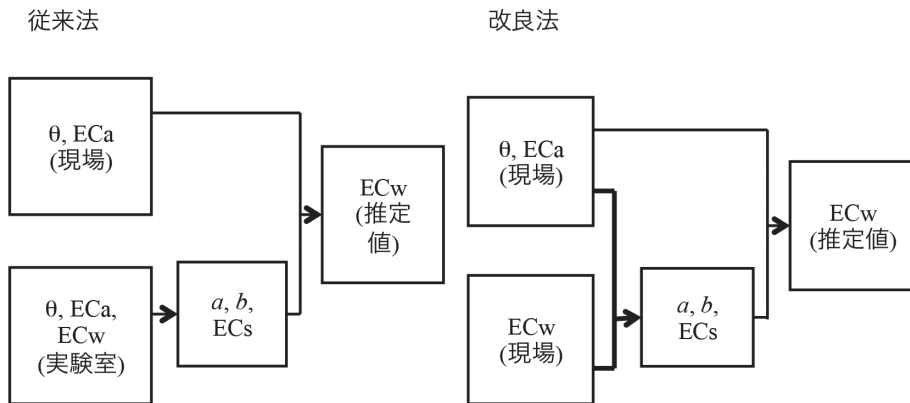


図1. 従来法 (Miyamoto et al., 2015) と改良法 (Seki et al., 2019) の比較

2.3. 改良法

改良法 (Seki et al., 2019) は非線形最小二乗法である。非線形最小二乗法については、サクション h と体積含水率 θ の関係である水分特性関数 $\theta=f(h)$ について関 (2019) で解説した。Rhoades式は $EC_a=f(\theta, EC_w)$ という2変数関数であるため、 $\mathbf{x}=(\theta, EC_w)$ と変数をベクトル表記する。 $y=EC_a$ として、Rhoadesパラメータを $\mathbf{p}=(a, b, EC_s)$ とすると、モデル関数を $y=f(\mathbf{x}, \mathbf{p})$ と書くことができる。 (\mathbf{x}, y) の測定値の n 個の組 $(\mathbf{x}_1, y_1), (\mathbf{x}_2, y_2), \dots, (\mathbf{x}_n, y_n)$ が与えられたときに、残差の平方和

$$O = \sum_{i=1}^n (y_i - f(\mathbf{x}_i, \mathbf{p}))^2 \quad (4)$$

を最小とするような $f(\mathbf{x}, \mathbf{p})$ を与える \mathbf{p} を決定する。非線形最小二乗法にはGauss-Newton法、Levenberg-Marquardt法、Trust Region Reflective法などいろいろなアルゴリズムがあるが、その多くは初期値を定めてから反復計算によって最適な解を探索するというアルゴリズムであり、初期値を適切に与えないと良い解が得られない場合があることから、初期値を適切に選ぶことが重要である (関, 2019)。

そこで、(3)式を変形した

$$\frac{EC_a - EC_s}{EC_w \theta} = a\theta + b \quad (5)$$

という式を使う。まずは EC_s を定数 (たとえば0.25dS/m) として、 θ と(5)式の左辺 $(EC_a - EC_s)/EC_w \theta$ の線形回帰によって a と b を得る。そうすることで、ほどよく測定値に適合する (a, b, EC_s) の組を得ることができる。それを初期値として非線形最小二乗法で最適な (a, b, EC_s) を決定する。

改良法では、従来法のように EC が異なり θ が同じであるようなデータを用意する必要がないため、図1に示したように現場で得られた (θ, EC_a, EC_w) の測定値の組から直接パラメータの組を推定することができる。そのことで、室内実験によるキャリブレーションを省略できる。なお、実験室でキャリブレーションする場合にも、従来法よりも格段に少ないデータで改良法によってRhoadesパラメータを決定することが可能である。

3. 現場への適用例

Seki et al. (2019) では、Miyamoto et al. (2015) による現場でのモニタリングのデータに対して、改良法によるRhoadesパラメータの推定結果から EC_w を推定し、従来法と比較している。その結果の一部を紹介する。

3.1. 測定方法

Miyamoto et al. (2015) の測定方法について記す。つくばの農研機構農村工学研究部門の圃場で2007年12月から2008年8月までの8ヶ月間の測定が実施された。図2に土壤断面



図2. Miyamoto et al. (2015) の現場の土壌断面（上）と測定機器（下）

と測定機器を示す。土壌は黒ボク土であり、深さ50cmで表土と心土の層に分けられる。上の写真の緑丸がTDRのセンサー部分であり、深さ20, 40, 60cmに埋設されている。TDR水分センサーと同じ深さにそれぞれ熱電対を埋設し、 EC_a の測定値を温度によって補正した。図2の下の写真のように3個のピットを掘って、それぞれ同じ深さにTDR水分センサーを埋設した。このようにして測定機器を設置してからピットを埋め戻し、TDRと同じ深さに採水管を2箇所ずつ設置した。

TDRから得られる誘電率と EC_a と熱電対から得られる温度の測定値を、それぞれ測定期間中1時間ごとに記録した。誘電率と体積含水率 θ の関係については、別途室内実験によってキャリブレーション式を作り、 θ と EC_a の変化を測定した。採水管からは測定期間中に17回土壌水を採取し、EC計によってその土壌水の EC_w を測定した。

従来法 (Miyamoto et al., 2015) では、表土 (topsoil) と心土 (subsoil) それぞれ採取した攪乱土壌をアクリルカラムに充填し、 θ とECを調整することで、 θ ごとの ($\theta=0.35, 0.40, 0.50, 0.60$) EC_a - EC_w 関係を測定し (図3)、2節で解説した2段階線形回帰によって

Rhoadesパラメータを決定した。そのパラメータとTDRによる (θ, EC_a) 変化の測定値から、式(3)により EC_w を推定した。

改良法(Seki et al., 2019)では、採水管から採取した土壤水によって測定された EC_w の測定値を、8組のキャリブレーションデータ(1ヶ月ごと)と、残りの9組の検証データに分けて、キャリブレーションデータが測定された日の θ と EC_a の日平均測定値を組み合わせることで、8組の (θ, EC_a, EC_s) データを得た。そのデータから改良法によって非線形回帰をすることでRhoadesパラメータを決定した。決定されたRhoadesパラメータとTDRによる (θ, EC_a) 変化から、式(3)により EC_w を計算した。

3.2. 結果

図4に従来法と改良法による深さ60cmにおける EC_w の推定値を、採水管により採取した土壤水の実測値と共に示す。従来法では、6月から8月にかけて実測値よりも2倍以上大きな値となるが、改良法では実測値により近い値が得られた。改良法は現場のデータを用いてモデルのパラメータを決定しているため、TDRが埋められた場所の土壤の状態及び水分移動状況に応じてパラメータが最適化されたため、推定結果がより実測値に近くなったと考えられる。土壤の状態は不均一であるため、改良法のパラメータはある種類の土壤を代表するパラメータではなく、TDRセンサーの設置状況を反映した圃場特有のパラメータであることに注意が必要である。たとえば、Miyamoto et al. (2015)では EC_w と硝酸態窒素濃度の関係式を使って、推定された EC_w から硝酸態窒素濃度を推定している。そのような推定をするときには、 EC_w の推定値が現実の値から大きく乖離していないこの手法は、実用上のメリットが大きい。

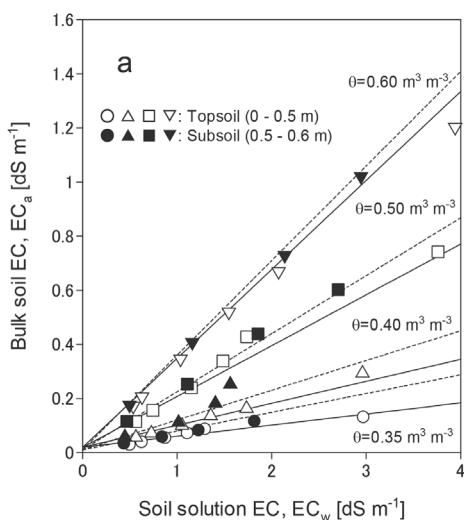


図3. Rhoadesパラメータのキャリブレーション (Fig. 1 a; Miyamoto et al., 2015)

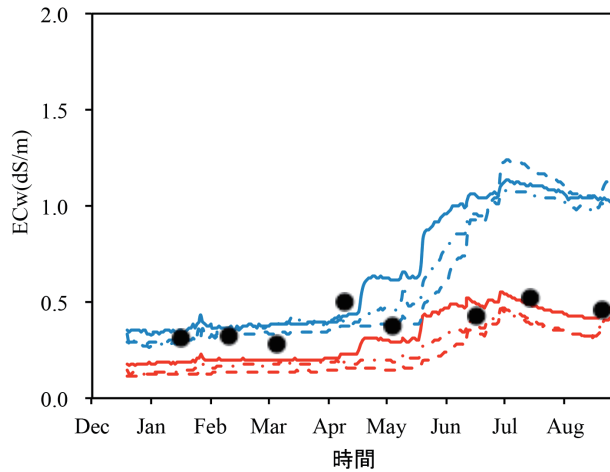


図4. 深さ60cmの EC_w の実測値（黒丸）とTDRセンサー3本それぞれの測定値からの推定値 [青線は従来法 (Fig. 3 ; Miyamoto et al., 2015)、赤線は改良法 (Fig. 7 ; Seki et al., 2019)]。

深さ40cmにおける従来法と改良法の推定精度の違いについては、深さ60cmほど明確ではないが、全体的な傾向としては、従来法と比べて改良法の方が実測値に近い推定値が得られた (Miyamoto et al., 2015; Seki et al., 2019)。

ところが、深さ20cmについては改良法の推定について一部 EC_w の計算値が負の値になってしまうという問題が生じた (Fig. 4; Seki et al., 2019)。その原因は、土壌が乾燥すると採水管からの採水が難しくなるため、土壌が乾燥していた期間に EC_w の実測値が得られなかったためである (Fig. 5; Seki et al., 2019)。すなわち、キャリブレーションに使われたデータよりも乾燥した土壌の EC_w を計算するときには、キャリブレーション範囲を超えて外挿することとなり、非現実的な推定値が得られた。この現象を回避するために、室内実験による（高 θ ，高EC）と（低 θ ，低EC）の2組のデータを加えて、現場8組、室内実験2組の合計10組のデータをキャリブレーションに用いることで、推定が改善された。

従来法と改良法のこれまでの推定精度を、RMSE（二乗平均平方根誤差）によって比較した (図5)。改良法の深さ20cmのデータは、室内実験の2つのデータをキャリブレーションデータとして追加したものであり、深さ40cmと60cmでは追加していない。全体的に改良法の方がRMSEが小さく、従来法と比べて推定精度が向上した。特に、深さ60cmでは推定精度の向上が著しかった。

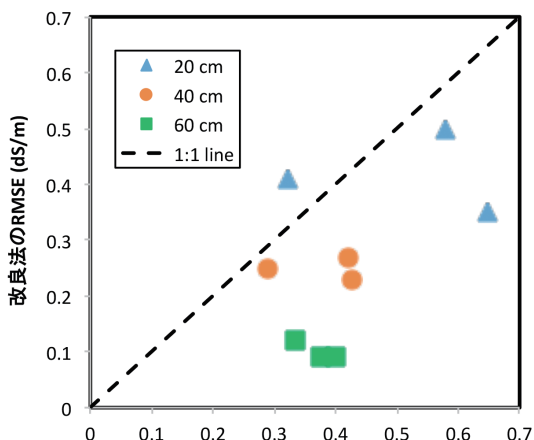


図5. 従来法 (Miyamoto et al., 2015) と改良法 (Seki et al., 2019) の誤差の比較

4. Web計算ソフト

改良法 (Seki et al., 2019) をWebから簡単に計算できるCGIプログラムEC Fitを作成した。URLは <http://seki.webmasters.gr.jp/ecfit/> である (図6)。このプログラムは、 (θ, EC_a, EC_w) の組を

```
0.35 0.0356 0.4341
0.35 0.0599 0.8346
0.35 0.0836 1.2226
0.35 0.1176 1.8134
0.40 0.0584 0.4468
0.40 0.1117 1.0154
```

のようにフォームにテキストでそのまま貼り付けて (Microsoft Excelで表を作って、そのままコピーペーストすれば良い) 「計算する」 ボタンをクリックすることで、式 (3) のRhoadesモデルの最適化されたパラメータが計算され、フィッティングの適合度 (決定係数、標準誤差) が計算される。

なお、Seki et al. (2019) では非線形回帰の計算に数値計算言語GNU Octaveのライブラリに用意されているLevenberg-Marquardt法を使ったが、このプログラムはPythonを使っているため、非線形回帰にはSciPyのscipy.optimize.least_squaresというライブラリで実装されているTrust Region Reflective法とLevenberg-Marquardt法を使い、より良い推定値が得られたものを結果として返すようにした。

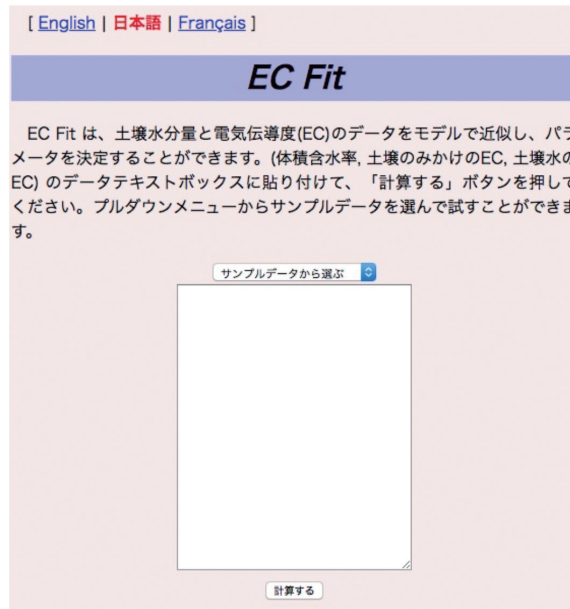


図6. Rhoadesパラメータ計算ソフトEC Fit

5. おわりに

本報では、TDRによる測定データから土壌水の電気伝導度を推定するRhoadesモデルのパラメータを決定するためのアルゴリズムと、そのアルゴリズムに従ってWebからRhoadesモデルのパラメータを簡便に計算するプログラムについて解説した。

このアルゴリズムは、現場のデータから直接パラメータを決定するところに特徴がある。従来の手法に対する本手法の優位性は、(1) 従来法では室内実験に多量のサンプルと多大なる労力が要されたが、本手法では現場から採水管により何回か採取された土壌水の電気伝導度の測定値を用いることで、モデルのパラメータを決定する手間が大きく省力化される。(2) 現場のデータから直接キャリブレーションをすることによって、より現場の状況を反映した適切な推定値が得られる、という点である。

一方で、現場から直接パラメータを推定する今回提案した手法を用いる場合には、(1) 得られたパラメータはある土壌を代表するようなパラメータではないため、他の場所では使うことができないこと、(2) 現場の土壌水分変動範囲をカバーするようなキャリブレーションデータを集める必要があること、に注意が必要である。(2) については、乾燥条件と湿潤条件の室内実験データを追加することで、キャリブレーションの水分領域が狭くなりがちであるという現場キャリブレーションの弱点を克服できることが示された。

本手法によって、キャリブレーション実験と計算の手間が軽減されたため、土壌中の肥料の動きをモニタリングするためのシステムへの応用が期待される。そのためには、現場のデータから直接キャリブレーションするというアプローチは、まだ適用例が少ないた

め、より多くの現場で適用例を積み重ねることが必要である。

本稿で解説したアルゴリズムは農研機構と東洋大学で共同特許を出願中（特開2019-190855）である。

引用文献

- Dalton, F.N., W.N. Herkelrath, D.S. Rawlins, J.D. Rhoades (1984): Time-domain reflectometry: simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. *Science* 224, 898-990. doi: 10.1126/science.224.4652.989
- Davis, J.L. and W.J. Chudobiak (1975): In situ meter for measuring relative permittivity of soils. *Geological Survey of Canada, Part A Paper* 75-1, 75-79.
- Gupta, S.C. and R.J. Hawks (1972): Influence of water content on electrical conductivity of the soil. *Soil Science Society of America Journal*, 36 (6): 855-857. doi: 10.2136/sssaj1972.03615995003600060011x
- Miyamoto, T., R. Kobayashi, T. Annaka and J. Chikushi (2001): Applicability of multiple length TDR probes to measure water distributions in an Andisol under different tillage systems in Japan. *Soil and Tillage Research*, 609: 91-99. doi: 10.1016/S0167-1987(01) 00172-6
- Miyamoto, T., K. Kameyama and Y. Iwata (2015): Monitoring electrical conductivity and nitrate concentrations in an Andisol field using Time Domain Reflectometry. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 49 (3): 261-267. doi: 10.6090/jarq.49.261
- Nadler, A., S. Dasberg and I. Lapid (1991): Time domain reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns. *Soil Science Society of America Journal* 55: 938-943. doi: 10.2136/sssaj1991.03615995005500040007x
- 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. doi: 10.1016/S0168-1699 (00) 00184-8
- Rhoades, J.D., P.A. Raats and R.J. Prather (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. doi: 10.2136/sssaj1976.03615995004000050017x
- Seki, K., T. Miyamoto and Y. Iwata (2019): Estimation of electrical conductivity of a soil solution from the monitored TDR data and an extracted soil solution. *International Agrophysics*, 33 (1): 113-119. doi: 10.31545/intagr/104413
- 関勝寿 (2019) 水分特性曲線の回帰プログラム SWRC Fit (3) —回帰アルゴリズム—. 東洋大学紀要自然科学, 63: 29-39.
- Topp, G.C., J.L. Davis and A.P. Annan (1980): Electromagnetic determination of soil

water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*,
16 (3): 574-582. doi: 10.1029/WR016i003p00574

