

## 4極法による土壌カラム内の 電気伝導度測定とその応用

井上 光弘・塩沢 昌\*

### Measurement of Electrical Conductivity in Soil Columns by the Four-electrode Method and its Application

Mitsuhiro Inoue and Sho Shiozawa\*

Arid Land Research Center, Tottori University

\*Faculty of Agriculture, Tokyo University

#### Summary

In order to investigate the simultaneous movement of salt and water in unsaturated soil, or in order to determine the dispersion coefficient associated with soil solution, we need the sensor that can monitor quickly the salinity of the soil solution and its changes with time.

In this paper, we developed a method to determine the changes in NaCl concentrations (C) and water contents ( $\theta$ ) in a laboratory soil column, in which bulk soil electrical conductivities (ECa) were measured by the four-electrodes and matric suction by tensiometers simultaneously.

We get a calibration equation for a sandy soil without clay particles that gives the bulk soil electrical conductivity (ECa) from volumetric water content ( $\theta$ ) and soil water electrical conductivity (ECw) :

$$ECa = a \cdot ECw \cdot \theta^2 + b \cdot \theta$$

where a and b are experimental coefficients.

Examples of applying this method for monitoring simultaneous movement of water and salt in the unsaturated sand during infiltration and evaporation process were shown.

**Key words :** four-electrode method, sandy soil, soil electrical conductivity, calibration equation, salinity measurements, soil water characteristics curve

(Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn, 70,23-28, 1994)

#### 1 まえがき

土壌中の溶質移動を定量的に測定したり、塩の分散係数を決定するためには、土壌溶液の濃度変化を土壌中で迅速に測定することが必要である。土壌溶液の塩濃度は電気伝導度で評価できる。採取された土壌サンプルであれば、飽和抽出や1:5, 1:1等の抽出液の電気伝導度を測定することができる。しかし、土壌水の電気伝導度を直接測定することは必ずしも容易ではない。多孔体を用いた現場用の土壌塩分センサーは、土壌溶液と多孔体センサー内の溶液濃度を平衡させて電気伝導度を測定するもので、この平衡をとるために数時間を要する(伊

藤ら, 1977, Rhoades et al., 1986)。また、田中ら(1991)が開発しているロックウール培地用のECセンサーも応答時間が約15分を要し、これより速い溶質移動の変化は測定できない。土壌の電気伝導度は4極法を用いて直接測定できる。しかし、土壌の電気伝導度は土壌溶液の電気伝導度(塩濃度)とともに土壌水分量に強く依存するため、事前のキャリブレーションが必要である。

著者らは、土壌カラム内の水と塩の同時移動現象を測定するために4極法を用いることを試みてきた(塩沢ら1993)。土壌カラム内の多点で電気伝導度を同時に測定しようとするとき、電極相互の干渉によって正しい測定

鳥取大学乾燥地研究センター(〒680鳥取市浜坂1390) \*東京大学農学部(〒113東京都文京区弥生1-1-1)

キーワード: 4極法, 砂土, 土壌の電気伝導度, 校正式, 塩分測定, 土壌水分特性曲線

ができないため、これを防ぐ測定回路の工夫が必要であり、ここではまず、その方法を述べる。次に、粘土分を含まない砂丘砂を試料として、その電気伝導度と溶液濃度および土壌水分量との関係を求めるためにキャリブレーションを行い、その結果と得られた実験式を示す。そして、これを用いて、土壌カラム内の浸潤過程と蒸発過程において、水と塩の同時移動を測定した例を示し、4極法測定が、土壌中の塩濃度の測定とともに、限られた条件ではあるが、土壌水分量の測定にも使えることを示す。

2 4極センサーの構造と測定方法

本研究で作製した4極センサーは、外径1mmの4本のステンレス棒の電極を、高さが20mm、内径50mmの亚克力製リングの側面に平行に挿入したもので、このリングを土壌カラムの一部として使用する(図-1)。外側の2本が電流供給電極で16mmの間隔、内側の2本が電圧測定電極で8mmの間隔で配置した。電流供給電極は先端の長さ18mm、電圧測定電極は先端の12mmほどを露出させて他の部分は絶縁し、カラム断面の中央部の土壌の電気伝導度を測定する構造になっている。

外側の電流供給電極を流れる電流*e*と内側の電圧測定電極間の電位差*V<sub>2</sub>*の比(*e/V<sub>2</sub>*)を測定すると、この比は媒体の比抵抗に反比例し、電気伝導度に比例する。内側の電圧測定電極には電流がほとんど流れないため、電流電極周囲の接触抵抗などの局所的な抵抗の影響を避けることができる。ただし、電極の分極を避けるために、高周波の交流電流を電流供給電極に流す必要がある。電流供給電極を流れる電流*e*は、回路内に既知の値の抵抗*R<sub>r</sub>*を入れて、その両端の電位差*V<sub>1</sub>*を測定することによって、*e*=*V<sub>1</sub>*/*R<sub>r</sub>*の関係から求まる。つまり、参照抵抗*R<sub>r</sub>*

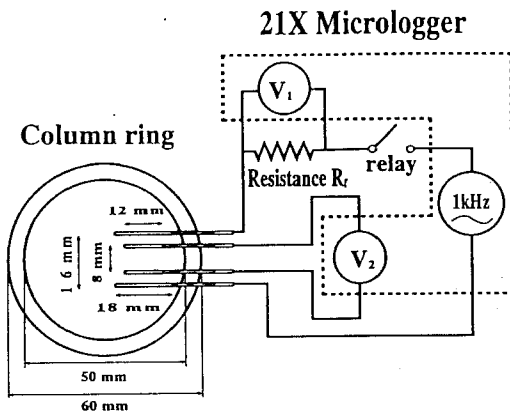


図-1 4極センサーと測定回路

Fig. 1 Four-electrode sensor and electric circuit for measurement.

にかかる電圧*V<sub>1</sub>*と電圧測定電極の電圧*V<sub>2</sub>*の比(*V<sub>1</sub>*/*V<sub>2</sub>*)が媒体の電気伝導度に比例する。

このような回路による測定は、Campbell Scientific社(Logan, Utah, USA)のデータロガー/コントローラ21xまたはCR7を使うと、簡単なプログラムをセットするだけで、容易に行うことができる。21XまたはCR7の「Instruction 9」を使うと、データロガーのExcitation端子から1kHzの矩形波の交流が出力され、この波形に同期させて、アナログ入力端子につないだ*V<sub>1</sub>*と*V<sub>2</sub>*の比が自動的に測定される。

土壌カラム内で塩や水の移動現象を測定しようとする場合、一つのカラムに複数のセンサーを設置して同時に測定することが必要になる。21Xの場合、8対のアナログ入力端子と4つのExcitation出力端子があるので、1台に4セットまでの4極センサーを接続することができる。しかし、一つのカラムに複数のセンサーをセットして1台の測定器につなぐと、一つのセンサーの電流供給電極に与えた電圧によって、他のセンサーの電流供給電極のアース線に向かう電流がカラム内に生じてしまい、それぞれのセンサー位置の電気伝導度を正しく測定できない。このセンサー間の干渉をなくすためには、測定中のセンサー(電圧を与えているセンサー)以外のセンサーのアース線を切断しておく、測定中のみ接続されるようにしなければならない。これには、アース線にリレースイッチを付けて測定に合わせて開閉させる必要がある。幸い、21XやCR7はこのようなリレー制御も簡単に行うことができる。21Xには、0~5Vの電圧で電流を出力できるCAO(Continuous Analog Output)端子が2チャンネルあるので、2つまでのリレーは、CAO端子で直接開閉できる。さらに3つ以上ならば、6チャンネルあるControl出力端子を使うことができる。Control出力端子は0Vか5VのON-OFF信号を出力する端子であるが、直接リレーを開閉するほどの電流を供給できないので、図-2のような回路で、トランジスタを介してリレーを開閉するようにした。

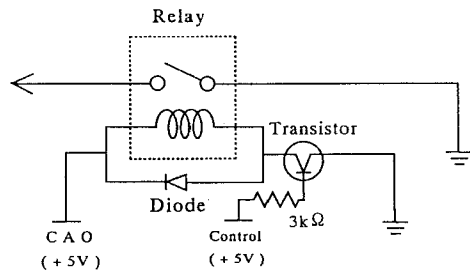


図-2 21Xマイクロロガーによる開閉回路

Fig. 2 Relay control circuit by 21X Micrologger.

### 3 キャリブレーション

#### 1) センサー定数

4極法で測定される電圧比 ( $V_1/V_2$ ) は媒体の電気伝導度に比例するが、その比例係数は電極とカラムリングの形状や構造に依存する。この比例係数 (センサー定数またはセル定数) は電気伝導度が既知の媒体を測定して決定できる。ここでは、濃度が既知の塩化ナトリウム水溶液 (NaCl溶液) の電気伝導度ECwを市販の電気伝導度計で求め、NaCl溶液濃度と温度を変えて、3つの4極センサーに対して、電圧比 $V_1/V_2$ を測定してセンサー定数を決定した。その結果、NaCl溶液の電気伝導度ECw (dS/m) は電圧比 $V_1/V_2$ および測定時の温度T (°C) との間に、電気伝導度への温度の影響を考慮して、 $ECw = \alpha \cdot [(V_1/V_2) / \{1 + 0.0199 \cdot (T - 25)\}] + \beta$ なる形の実験式を得た。3つの4極センサーに対して、相関係数が0.99999で、切片 $\beta$ はほぼゼロとなり、センサー定数 $\alpha$  (dS/m) は、それぞれ、0.0136, 0.0155, 0.0147となった。なお、NaCl溶液の電気伝導度ECwは基準温度25°Cに温度補正したものである。

#### 2) 実験方法

供試土壌を鳥取砂丘砂、溶質を塩化ナトリウムとして、土壌の電気伝導度ECaと、土壌溶液の電気伝導度ECwおよび体積含水率 $\theta$ との関係を調べた。

試料は蒸留水でよく洗って粘土分と塩分を取り除き、乾燥させた後、所定の濃度のNaCl溶液を加えて水分量を調節し、25°Cの恒温状態で2日間ビニル袋に保管して、測定に供した。すなわち、濃度、0.005, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.08, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 mol/dm<sup>3</sup>の12種類のNaCl溶液を調整し、これらの

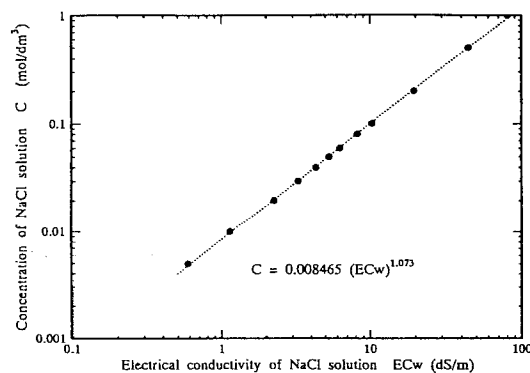


図-3 NaCl溶液の濃度と電気伝導度との関係

Fig. 3 Relationship between electrical conductivity and concentration of NaCl solution.

NaCl溶液の電気伝導度は市販の電気伝導度計で測定した。ここで、測定したNaCl溶液の25°Cの電気伝導度ECw (dS/m) と溶液濃度c (mol/dm<sup>3</sup>) との関係は、

$$c = 0.008465 ECw^{1.073} \quad (1)$$

であった (図-3)。したがって、(1)式によって、ECwの測定値をcに換算できる。

次に、粘土分と塩分を取り除いた乾燥砂250gに対して、調整した12種類のNaCl溶液を、メスピペットで5ml、あるいは10, 15, 20, 25, 30, 35ml加え、飽和状態も含めて96種類の試料を調整した。この調製した砂を内径50mm、高さ60mmの、中央に4極センサー付リングを入れた円筒カラムに均一に充填し、上面をシールして蒸発防止した後、土壌の温度と4極法による土壌の電気伝導度を測定した。その後、円筒カラムを解体し、土壌の乾燥密度と体積含水率を測定した。その結果、土壌の温度は25.0±0.5°C、乾燥密度は1.45±0.02g/cm<sup>3</sup>ではば一定であり、体積含水率は0.0287~0.454cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>の範囲であった。

#### 3) 結果と考察

前述の96種類の試料を測定した結果、体積含水率( $\theta$ )を一定とした場合の土壌の電気伝導度 (ECa) とNaCl溶液の25°Cの電気伝導度 (ECw) の関係を図-4に、また、ECwを一定とした場合のECaと $\theta$ との関係を図-5に示した。 $\theta$ を固定した場合、ECaとECwとの関係は1次式で与えられる。一方、ECwを固定した場合の、ECaの $\theta$ への依存性は複雑で、2次式やべき関数で表すことができる (井上ら, 1993)。いくつかの関数形を検討した結果、ECaとECwとの関係は1次式、ECaと $\theta$ との関係は2次式で表すことにして、実験結果を次式で表すことにした。

$$ECa = a \cdot ECw \cdot \theta^2 + b \cdot \theta \quad (2)$$

ここでa, bは定数で、最小2乗法で求めた値は、a = 1.45, b = 0.102であった。bの単位はdS/m, aは無次元である。(2)式を、図-4, 図-5に点線で示した。溶液濃度と水分量の広い範囲で実験結果を正確に表していることがわかる。

ところで、ECaと $\theta$ およびECwとの関係について、一般性のある物理的なモデルとして、代表的なものにRhoeadsら (1976) の次のモデルがある。

$$ECa = ECw \cdot \theta \cdot Tc + ECs \quad (3)$$

ここで、右辺第1項は間隙中の溶液を伝わる電導成分、第2項のECsは土粒子表面の吸着イオンによる粒子表面の電導成分であり、(3)式は、この2つの電導成分の並列配置で土壌の電気伝導度を表わそうとするモデルである。(3)式のTcは伝達係数 (transmission coefficient) と呼ばれ、屈曲度その他による、間隙中の溶液の電気伝導低

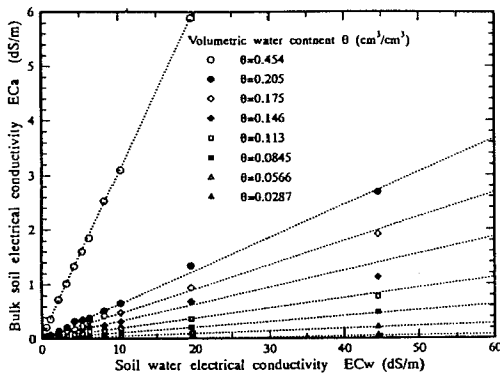


図-4 体積含水率を一定とした場合の土壌の電気伝導度と土壌溶液の電気伝導度との関係

Fig. 4 Relationship between soil water electrical conductivity and bulk soil electrical conductivity for fixed volumetric water contents.

下を示す因子で、体積含水率に依存する。このTcについて、Rhoadesら (1976) は、体積含水率に対して単純な場合として一次式

$$Tc = a \cdot \theta + b' \quad (4)$$

を仮定している。ここで a, b' は土に依存する実験定数である。

本研究の試料の特性を示す(2)式と、種々の土に対して成立するとされる理論的なモデルの(3)式を比較して、実験結果の物理的な内容を検討してみると、まず、(2)式は(3)式のECsに相当する定数項を含んでいない。本研究の試料は粘土分を含まないので、(3)式のECsはゼロとみてよく、粘土分を含まない試料では、固相は絶縁体で、間隙中の溶液だけを電気が流れると考えてよいことを示している。また、このとき(4)式のb'と(2)式の係数bとの関係は、b' = b/ECwであり、係数aは両者で同じものである。さらに、(2)式の係数a, bの値では、ECwがとくに小さい場合を除いて、右辺第1項が第2項に比べて大きく((4)式でb' = 0)、土壌と溶液との電気伝導度の比 (ECa/ECw) は、およそ、体積含水率θの2乗に比例することがわかる。これは、これまで他の土壌で測定された結果 (白井, 1961) と同様である。このように、本研究の試料でもRhoadesら (1976) のモデルが概略、成立するといえるが、キャリブレーション曲線としては、より正確な(2)式を使うことにした。

4) θとECwの推定

実験式(2)からは、土壌溶液の電気伝導度ECwが既知であれば体積含水率θを、また、θが既知であればECwを求めることができる。

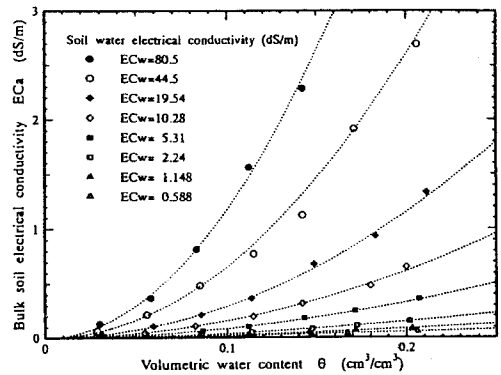


図-5 土壌溶液の電気伝導度を一定とした場合の土壌の電気伝導度と体積含水率との関係

Fig. 5 Relationship between volumetric water content and bulk soil electrical conductivity for fixed soil water electrical conductivity.

体積含水率の推定値[θ]eと、土壌溶液の電気伝導度の推定値[ECw]eは、(2)式から、それぞれ

$$[\theta]_e = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4 \cdot a \cdot ECa \cdot ECw}}{2 \cdot a \cdot ECw} \quad (5)$$

$$[ECw]_e = \frac{(ECa/\theta) - b}{a \cdot \theta} \quad (6)$$

なる式で得られる。キャリブレーションによる実験データ数を n, (5)式または(6)式による推定値をYe, 実測値をYmとして、 $100 \cdot \Sigma (|Ym - Ye| / Ye) / n$ を平均相対誤差 (%) とすると、(5)式による体積含水率の推定平均相対誤差は2.41%, (6)式による溶液濃度の推定平均相対誤差は5.60%である。ECaの体積含水率への依存性が強いために、(5)式による体積含水率の推定精度が高くなっている。したがって、土壌溶液の濃度が既知であれば、4極法によるECaの測定と(5)式によって、体積含水率をかなり正確に求めることができる。

4 水と塩の同時移動問題への4極法による電気伝導度測定の適用

1) 塩濃度一定条件での水分量変化の測定

水の流れのある土壌カラム内において、体積含水率とマトリックサクションとの関係、つまり土壌水分特性曲線を得るために、4極法による電気伝導度測定を適用した。実験装置は浸潤実験に用いるために作製したもので、内径50mm, 長さ300mmの円筒カラムの側面に、圧力変換器付きテンシオメータと4極センサーを深さ13, 23cmに取付けた。また、カラム上端から2連の定流量ポンプで2つのNaCl溶液を給水し、カラム下端には焼

結ガラスフィルターを介して一定のサクシオンを与え、排水量を電子天秤で測定できるようにした。

浸潤させるNaCl溶液の濃度は $0.02\text{mol}/\text{dm}^3$ で一定条件とし、飽和からの排水過程の後に、上端からの給水流量を $0.4\text{cm}^3/\text{min}$ と $3.2\text{cm}^3/\text{min}$ の間で変化させて浸潤-排水を3回、繰り返した。こうして変化させた土壌水分量を、4極センサーで測定したECaから(5)式を使って求め、マトリックサクシオンをテンシオメータで同時に測定した。こうして、非定常な溶液の流れの中で、深さ23cmの測定で得られた体積含水率( $\theta$ )とマトリックサクシオン( $h$ )との関係を図-6に示した。排水過程と浸潤過程での土壌水分特性曲線の相違、つまり、ヒステリシスが測定されている。なお、Bottrandら(1985)によると、土壌の電気伝導度は、土壌溶液の塩濃度が一定ならば、土壌水分量で決まり、ヒステリシスの影響はほとんどないとされている。

2) 水分量と溶液濃度変化の同時測定

土壌カラム内の体積含水率も溶液濃度も変化する場合、テンシオメータでマトリックサクシオンを測定し、あらかじめ得られた土壌水分特性曲線を使って体積含水率 $\theta$ を求めれば、4極センサーで測定したECaの値と(6)式、さらに(1)式から、土壌溶液の濃度 $c$ を測定できる。

前述の浸潤実験装置において、水分フラックス $0.000321\text{cm}/\text{s}$ 、塩濃度 $0.02\text{mol}/\text{dm}^3$ の定常流を作っておき、2連の定流量ポンプと3方コックを用いて、上端からの給水のフラックスを $0.00258\text{cm}/\text{s}$ 、溶液濃度を $0.1\text{mol}/\text{dm}^3$ に瞬時に切り替えた(このときの時刻を

$t = 0$ とする)後の、深さ23cmにおけるマトリックサクシオン $h$ 、土壌の電気伝導度ECa、体積含水率 $\theta$ 、土壌溶液中のNaCl濃度 $c$ の経時変化を図-7に示した。

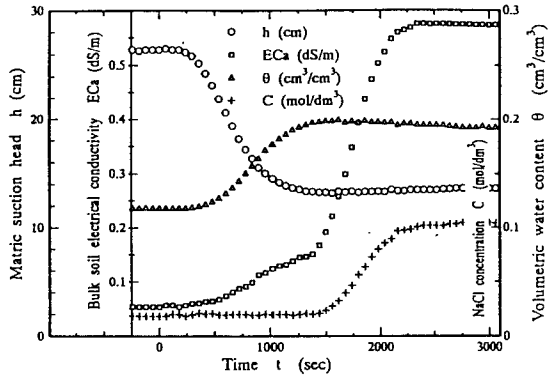


図-7 浸潤する塩溶液の水分フラックスと溶液濃度を同時に変えた後の、土壌カラム内深さ23cmにおけるマトリックサクシオン  $h$ 、土壌の電気伝導度ECa、体積含水率 $\theta$ 、塩溶液濃度Cの経時変化

Fig. 7 Variation of matric suction head  $h$ , bulk soil electrical conductivity ECa, volumetric water content  $\theta$  and NaCl concentration C with time at the depth of 23 cm in soil column after changing both water flux and salt concentration of applied water at  $t = 0$ .

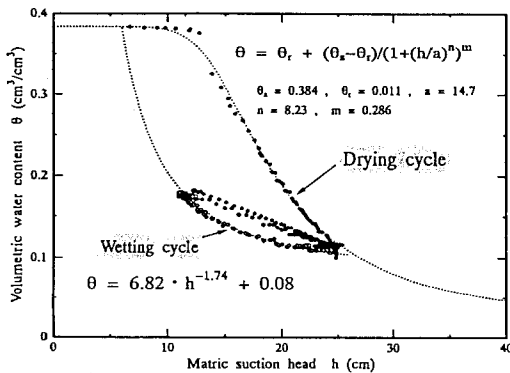


図-6 塩濃度一定の砂丘砂カラム内の浸潤-排水過程で測定したマトリックサクシオンと体積含水率との関係

Fig. 6 Relationship between matric suction head and volumetric water content of dune sand during wetting and drying cycle for constant salt concentration in soil column.

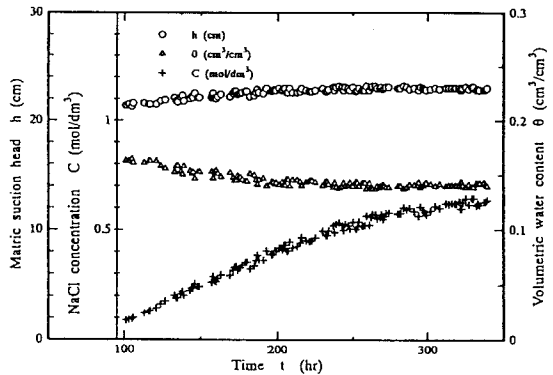


図-8 地下水位深さ20cm一定条件下の蒸発過程の土壌カラム内深さ3cmにおけるマトリックサクシオン  $h$ 、体積含水率 $\theta$ 、塩濃度 $c$ の経時変化

Fig. 8 Variation of matric suction head  $h$ , volumetric water content  $\theta$ , and NaCl concentration C with time at the depth of 3 cm in soil column during evaporation process on the condition of constant of water table at the 20 cm depth.

$t=250$ 秒頃から深さ23cmにおける体積含水率が増加し、これより遅れて、 $t=1400$ 秒頃から塩濃度が増加している様子がわかる。

もう一つの例として、塩濃度 $0.1\text{mol}/\text{dm}^3$ で飽和した砂を充填したカラムにおいて、マリOTT管を使ってこの塩濃度の地下水位を深さ20cmに一定に維持し、 $35^\circ\text{C}$ 、25%の恒温恒湿室で $0.0182\text{cm}/\text{h}$ で蒸発させた時の深さ3cmのマトリックサククション $h$ と体積含水率 $\theta$ 、土壌溶液中のNaCl濃度 $c$ の経時変化を図-8に示した。 $\theta$ は、テンシオメータの測定から排水過程の土壌水分特性曲線を使って求め、塩濃度 $c$ は4極法で測定したECaから、(6)式と(1)式を使って求めたものである。蒸発に伴うカラム内の土壌溶液の塩濃度の上昇の様子がわかる。

## 5 まとめ

土壌の電気伝導度ECaは、土壌溶液の電気伝導度ECwと体積含水率 $\theta$ に依存する。それぞれの土壌について、この $\text{ECa} = f(\text{ECw}, \theta)$ の関係を実験によって求めておけば、土壌の電気伝導度の測定値から、体積含水率が既知であれば土壌溶液の濃度を、土壌溶液の濃度が既知であれば体積含水率を求めることができる。本研究では、4極法のキャリブレーションを示し、洗い砂と塩化ナトリウム溶液という単純な系ではあるが、4極法で土壌カラム内の電気伝導度を直接測定し、テンシオメータによるマトリックサククション測定と組み合わせることによって、水と塩の同時移動を把握できることを示した。

なお、本研究は、乾燥地研究センターの共同研究によって遂行されたもので、実験に乾燥地研究センターのアリッドトロンを使用した。また、トランジスタによるリレー

制御回路の作り方を東京大学農学部の中本博博士に教えていただき、実験装置の製作に同学部、井本博美技官の助力を得た。記して感謝の意を表するものである。

## 引用文献

- Bottraud, Jean-Christophe and Rhoades, J.D. (1985) : Referencing water content effects on soil electrical conductivity-salinity calibrations, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49 : 1579-1581.
- 井上光弘・塩沢 昌 (1993) : 4極法による土壌の電気伝導度測定, 平成5年度農業土木学会講演会講演要旨集, 42-43.
- 伊藤純雄・湯村義男 (1977) : ECセンサーによる電気伝導度の現場連続測定法, *土壌誌*, 48 : 59-60
- Rhoades, J.D. and Oster, J.D. (1986) : Slute content, In A. Klute (ed.) 'Method of soil analysis Part 1', 2nd ed. SSSA, 985-994.
- 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 Sci. Soc. Am. J.* 40 : 651-655.
- 塩沢 昌・井上光弘 (1993) : 浸潤に伴う不飽和砂中の水分・塩分移動の実験と解析, 平成5年度農業土木学会講演会講演要旨集, 24-25.
- 白井清恒 (1961) : 土壌の物理的伝導度に関する研究, 三重大学農学部学術報告24 : 127-191.
- 田中和夫・安井秀夫 (1991) : ロックウール培地用ECセンサーの開発, *生物環境調節* 29 : 39-43.

(受稿年月日1994年3月6日)