

定常法による不飽和土壌の塩の分散係数測定について

(故)小谷佳人*・矢野友久*

Measurement of Salt Dispersion Coefficients in Unsaturated Soils by the Steady State Method

Yoshihito KODANI* and Tomohisa YANO*

Summary

In order to develop agriculture in arid lands, it is necessary to clarify and to analyze the salt behavior in soil. This study deals with the dispersion coefficient of salt necessary to analyze the salt problems in soil. Measurement was done by using the steady state flow method by which salt solutions were applied with constant velocity to dune sand and Masa soil (decomposed granite).

The results obtained were as follows :

- (1) Breakthrough curves represented different kinds of shape in accordance with the different soil texture, ion and soil water velocity.
- (2) The average pore velocity through dune sand was higher than that through Masa soil in case where the same salt was used in the experiment.
- (3) In case where the different anions were used, the average pore velocity of the anion with the smaller ion radius was higher than that with a larger ion radius.
- (4) The average pore velocity of anion was higher than cation, because of the negative charge at the surface of soil particles.
- (5) The amount of effluent through the soil was higher when the lower applied rate of solution into the soil was less than up to one pore volume, while the tendency was reversed when pore volume exceeded one.
- (6) The relation between the dispersion coefficient, D_s and the average pore velocity, v , was approximated with the expression : $D_s = a \cdot v^b$.
- (7) The dispersion coefficient was considered to be influenced by the soil pore structure.

* 砂丘利用研究施設水文かんがい部門

* *Division of Hydrology and Irrigation, Sand Dune Research Institute*

1. ま え が き

乾燥地の灌漑水は、地表水、地下水を問わず、種々の可溶性塩類を含んでいる。そのうえ、高温、乾燥を促す条件下にあるために、乾燥地農業は湿潤地農業とは異なり、塩による作物生育への障害、塩の地表面への集積、これを取り除くための除塩などのいわゆる塩問題が生じる。乾燥地における水管理を合理的に行うには、これら塩の土壤中での挙動現象の把握とその解明が必要である。

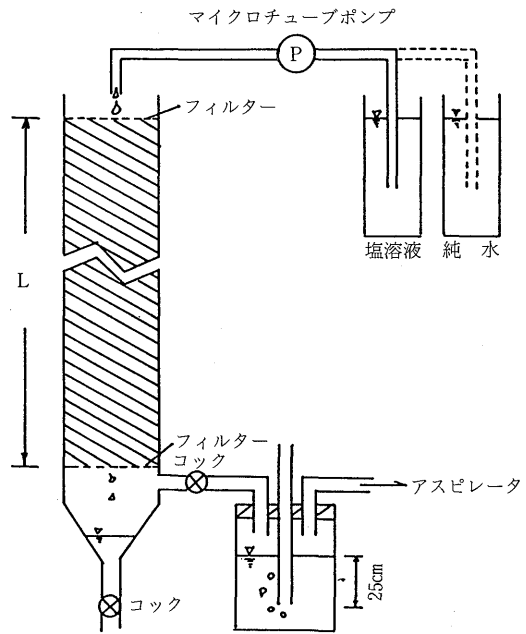
土壤中における塩の挙動を規定する重要なパラメータは分散係数 (Dispersion coefficient) である。分散は土壤水が土壤間隙中を流れる流速分布の差によって生ずる力学的分散 (Mechanical dispersion) と溶液の濃度差が原因して生ずる拡散 (Diffusion) とによって規定され、その値は、土壤の種類はもとより、土壤の状態、塩の種類、流速などによっても異なる。本研究ではこれらの支配因子と定常法の測定により得るところの流出破過曲線 (Breakthrough curve)、その解析によって求められる分散係数についてそれらの相互の関係を実験検討した。

2. 実 験 方 法

図一は分散係数の測定に用いた実験装置を模式的に示したものである。装置の主要部分はマイクロチューブポンプを備える溶液の供給部と供試土壤を入れる土壤カラム部およびアスピレータを備えた土壤カラムからの流出溶液を集めるための流出部からなる。土壤カラムは適用した流速の大きさによって、内径2.2, 3.0, 5.0, 13.5cmの大きさのものを用いた。

また、供試土壤には砂丘砂とマサ土を用いた。その土壤物理性は表一に示す通りである。また、塩には塩化アンモニウム (NH_4Cl) と酸性磷酸アンモニウム ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) を使用した。その塩濃度は NH_4Cl では102me/l (5,452ppm) と100me/l (5,345ppm)、 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ では103me/l (11,845ppm) と105me/l (12,075ppm) である。実験は次の順序で行った。

(1) 土壤カラムを洗浄し、乾燥させたのち、土壤密度が一様になるように試料土を充填する。充填密度は乾燥密度で砂丘砂1.6g/cm³、マサ土1.3g/cm³に



図一 実験装置

表一 供試土壤の物理的性質

項 目	砂丘砂	マサ土
粒径分布 (%)		
2.0 ~0.42 (mm)	14.88	30.80
0.42 ~0.074	80.92	42.75
0.074~0.005	1.27	19.45
0.005以下	2.93	7.00
有効径 (mm)	0.191	—
均等係数 (mm)	1.578	—
真比重	2.659	2.575
仮比重	1.42	1.44
間隙率 (%)	46.6	44.1
最大容水量 (%)	38.06	43.74
圃場容水量 (%)	7.39	14.32
C E C (me/100 g)	1.50	2.72
全炭素 (%)	—	0.04
pH	—	5.35

なるようにした。

(2) 土壤を充填したカラムは下端より蒸留水を毛管吸水させ、飽和につとめた。

(3) 吸水飽和させたのち、土壌カラム上端より純水をマイクロチューブポンプを用いて一定強度で供給し、下端よりアスピレータを用いて負圧25cmを作動させて流水させ、土壌カラム中の土壌水分分布を一定²⁾になるようにした。

(4) 土壌カラム中の流水が定常になったのち、純水より塩水に切り換えて、塩水を同じ強度で給水する。その瞬間を初期状態とし、土壌カラム下端よりの流出量、流出濃度の時間的変化を測定する。なお、流出溶液の塩濃度は電気伝導度計、NH₄イオンはインドフェノール法、Clイオンは水銀滴定法、H₂PO₄イオンはバナドモリブデン酸法によりそれぞれ測定した。

3. 流出破過曲線と分散係数の算出法¹⁾²⁾³⁾

流出破過曲線は横軸に溶液の流出経過時間あるいは次の(1)式で示す間隙体積 (Pore volume, P) をとり、縦軸には濃度比 (c/c₀) をとって、その両者の関係を示したものである。

$$P = \frac{v \cdot t}{L} \quad (1)$$

ここで、v：平均間隙流速、t：経過時間、L：土壌カラムの長さである。

分散係数 (Ds) は次に示すように誘導し、算出した。溶液の土壌中における挙動は一般に次式で表される。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = Ds \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} \quad (2)$$

ここで、c：濃度、c = c(x, t)、v：流速である。これを、次の初期条件および境界条件のもとに解くと、

$$\left. \begin{aligned} c(x \geq 0, t = 0) &= 0 \\ c(x = 0, t > 0) &= c_0 \\ c(x = \infty, t \geq 0) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

その解は、

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x - v \cdot t}{2\sqrt{Ds t}} \right) + \exp \left(\frac{v \cdot x}{Ds} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x + v \cdot t}{2\sqrt{Ds t}} \right) \right] \quad (4)$$

となる。

(4)式は c(x, t) の問題に対する解ではあるが、流出破過曲線に適用するには不都合である。そこで、(4)式の右辺を間隙体積の(1)式で整理すると次式となる。

$$\begin{aligned} \frac{c}{c_0} &= \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{1-p}{\sqrt{2Ds \cdot p}}} \frac{1-p}{v \cdot L} \exp \left(\frac{-w^2}{2} \right) dw \\ &+ \frac{1}{2} \exp \left(\frac{v \cdot L}{Ds} \right) \\ &+ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left(\frac{v \cdot L}{Ds} \right) \int_0^{\frac{1+p}{\sqrt{2Ds \cdot p}}} \frac{1+p}{v \cdot L} \exp \left(\frac{-w^2}{2} \right) dw \quad (5) \end{aligned}$$

これが流出破過曲線を表す理論式である。

次にこの理論式を用いて分散係数を算出する二つの方法を述べる。

(i) 1点法

(5)式を P で微分して、P = 1.0 の値を求めると、

$$\left. \frac{d \left(\frac{c}{c_0} \right)}{dP} \right|_{P=1.0} = \frac{1}{2\sqrt{\frac{\pi \cdot Ds}{v \cdot L}}} \quad (6)$$

となる。いま、左辺の値を S とすると、Ds は次式で表される。

$$Ds = \frac{v \cdot L}{4 \pi \cdot S^2} \quad (7)$$

これが求める分散係数であり、流出破過曲線を用いて次のように算出する (図-2 の模式図を参照)。流出破過曲線の P = 1.0 の点における勾配を求め、これを(7)式の S とし、同時に v、L を代入して Ds を算出する。これを 1点法と呼ぶことにし、この方法によって算出される分散係数は以後 Ds₁ と表示する。水分量 (あるいは流速) を種々変えて実験すると、以上のようにして Ds₁ と水分量 (あるいは流速) との関係が得られる。

(ii) 2点法

もう一つの方法として次のように誘導、算出する方法がある。

(4)

(4)式において、第2項を省略すると、

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{x-vt}{\sqrt{2Ds \cdot t}}}^{\infty} \exp\left(-\frac{\mu^2}{2}\right) d\mu \quad (8)$$

となる。

ここで、期待値 $m = v \cdot t$ 、標準偏差 $\sigma = (2Ds \cdot t)^{1/2}$ として、正規分布関数が $N[(x-m)/\sigma]$ であるとする、(8)式は $1 - N[(x-m)/\sigma]$ に等しくなる。正規分布関数である $N[(x-m)/\sigma]$ の特性は次のように表される。

$$N(1) = 0.8413 \approx 0.84$$

$$N(-1) = 0.1587 \approx 0.16$$

いま、

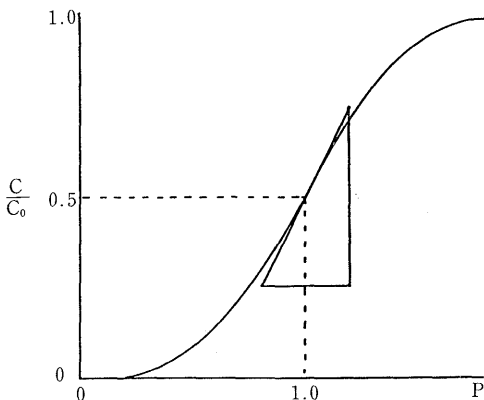
$$x_i = \frac{x - v \cdot t_i}{\sqrt{2Ds \cdot t_i}} \quad (9)$$

とすると、(8)、(9)の両式から、

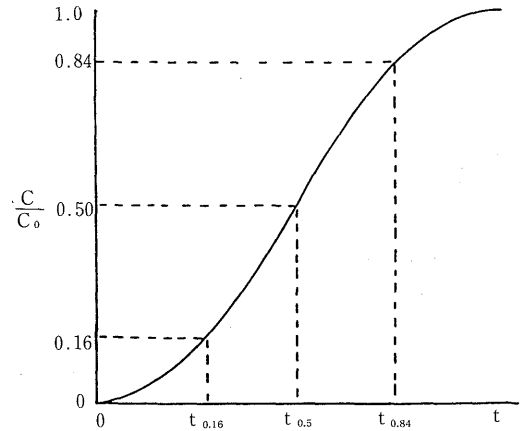
$$\begin{aligned} x_{0.16} - x_{0.84} &= 1 - (-1) \\ &= \frac{x - v \cdot t_{0.16}}{\sqrt{2Ds \cdot t_{0.16}}} - \frac{x - v \cdot t_{0.84}}{\sqrt{2Ds \cdot t_{0.84}}} \end{aligned}$$

となり、ここで $x = L$ とすると、

$$Ds = \frac{1}{8} \left[\frac{L - v \cdot t_{0.16}}{\sqrt{t_{0.16}}} - \frac{L - v \cdot t_{0.84}}{\sqrt{t_{0.84}}} \right] \quad (10)$$



図一 2 流出破過曲線



図一 3 流出破過曲線

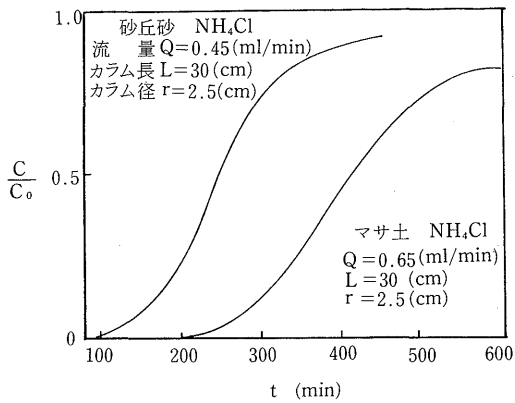
となり、これにより分散係数 Ds が算出される。ここで、 $t_{0.16}$ 、 $t_{0.84}$ は c/c_0 がそれぞれ 0.16 と 0.84 になるときの時間であり、流出破過曲線より算出される(図一 3 の模式図を参照)。この方法を 2 点法と呼ぶことにし、算出される分散係数は以後 Ds_2 と表示する。

4. 実験結果および考察

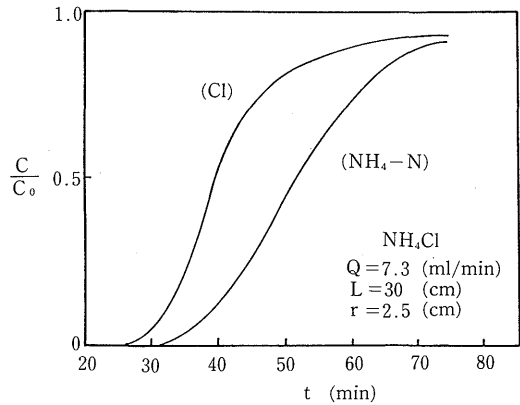
(1) 流出破過曲線の特徴

図一 4～図一 7 は測定によって得られた流出破過曲線のうちの代表的なものを示したものである。曲線は土壌、塩、イオン、流速などによってその形状が異なることを示している。流出破過曲線は一般には次のような意味を有している。すなわち、濃度比 c/c_0 の値は最初は 0 であるが、流出水の濃度が置換流体の濃度に近づくにつれて 1.0 に近似してくる。これは置換される流体のほとんどが媒体である土壌から除かれて、流出水が置換流体になっていくことを示している。

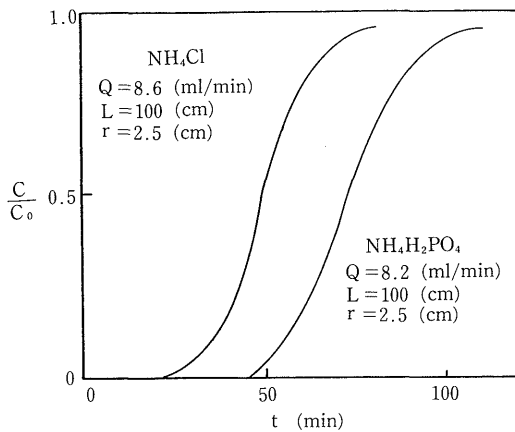
図一 4 は塩に NH_4Cl を用いて、砂丘砂とマサ土の土壌の違いによる結果を示したものである。砂丘砂とマサ土の結果には明らかな違いがみられ、塩の浸透速度は砂丘砂の場合がマサ土の場合よりも大きいという関係がある。この結果は水分子、イオンの吸着に関係する粘土量の多少、粒径の大小などによる土粒子特性と水の存在、また水の運動の場である間隙量の多少、間隙径の大小などによる間隙構造に違



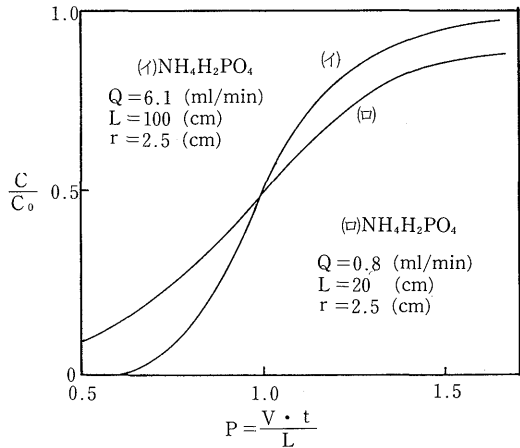
図一 4 流出破過曲線 (砂丘砂とマサ土)



図一 6 流出破過曲線 (マサ土)



図一 5 流出破過曲線 (砂丘砂)



図一 7 流出破過曲線 (砂丘砂)

いがあることに原因するのであろう。

図一 5 は土壌に砂丘砂を用いて、塩の種類の違いによる結果を示したものである。塩が異なる以外はすべての実験条件が同じであるが、浸透速度は NH₄Cl の場合が NH₄H₂PO₄ の場合よりも大きいという関係がみられる。これは陰イオンである Cl と H₂PO₄ との違いに原因するものであろう。イオン半径の大きさは H₂PO₄ の場合が Cl の場合よりも大きいという関係がある。

図一 6 は土壌にマサ土を、塩には NH₄Cl を用いて、NH₄イオンと Cl イオンとのイオンの違いによる流出を示した結果である。陽イオンと陰イオンとのイオンの違いにより明らかな差がみられる。土粒子表面

は一般にはマイナスの電荷をもつ。マイナスとマイナスは排斥が、プラスとマイナスは吸引がそれぞれ生ずるものと考えれば、浸透速度は Cl イオンの場合が NH₄イオンの場合よりも大きいという関係が生ずることは理解できる。

図一 7 は土壌には砂丘砂、塩には NH₄H₂PO₄ を用いて、土壌に塩溶液を供給する速さ、すなわち流速を変えた場合の結果を示したものである。横軸には経過時間の代わりに間隙体積 ($P = v \cdot t / L$) の大きさをとっている。P=1.0、すなわち、 $v \cdot t / L = 1.0$ までは流速の遅い方が速いものに比べて塩流出が大きくなり、 $v \cdot t / L > 1.0$ になると逆の関係となっている。v である真の流速が大きいと流速分布による分

散は大きくなり、曲線の勾配が大きくなることを示している。

(2) 分散係数と平均間隙流速との関係

図-8～図-11は分散係数と浸透速度との関係を示したものである。図中の D_{S1} は1点法, D_{S2} は2点法によりそれぞれ算出した分散係数の値である。値にはかなりのバラツキのあるものもみられるが, D_{S1} と D_{S2} との平均値 D_s をとり, この D_s と浸透速度 v との関係を見ると, $D_s = a \cdot v^b$ の関係で整理できる。表-2 はその結果をまとめたものである。相関係数

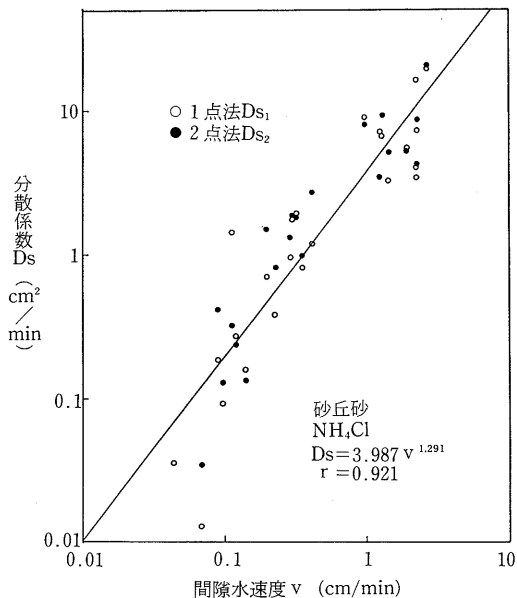


図-8 分散係数 (D_s) と間隙水速度 (v) との関係

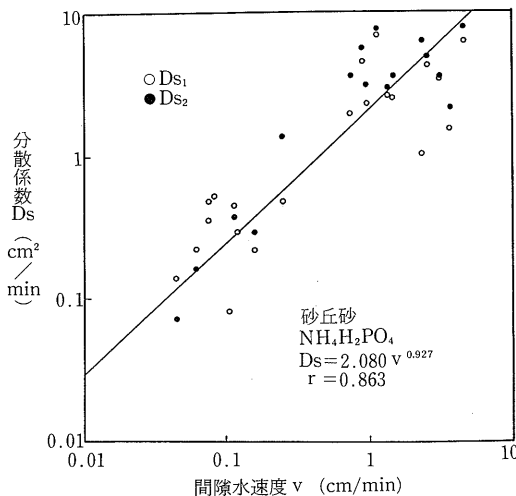


図-9 分散係数 (D_s) と間隙水速度 (v) との関係

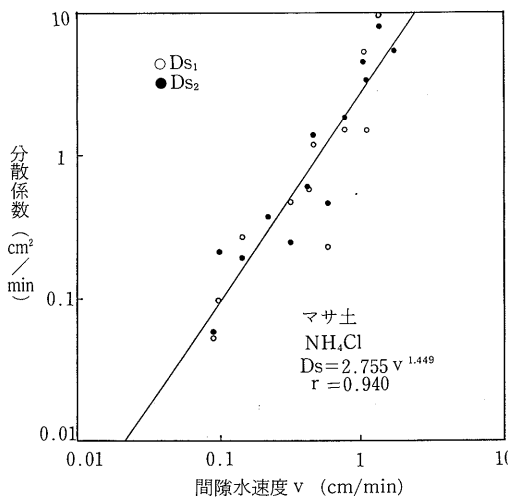


図-10 分散係数 (D_s) と間隙水速度 (v) との関係

表-2. 分散係数の実験式 ($D_s = a \cdot v^b$)

種類	砂 丘 砂			マ サ 土		
	定数 a	定数 b	相関係数 r	定数 a	定数 b	相関係数 r
NH ₄ Cl	3.987	1.291	0.921	2.755	1.449	0.940
NH ₄ -N	2.967	1.166	0.913	1.987	1.266	0.761
Cl	3.089	1.138	0.936	2.518	1.911	0.933
NH ₄ H ₂ PO ₄	2.080	0.927	0.863	2.122	1.206	0.890
NH ₄ -N	1.936	0.927	0.903	1.565	1.185	0.820
P	2.421	0.734	0.835	1.559	1.007	0.647
NaCl	0.415	0.757	0.990			

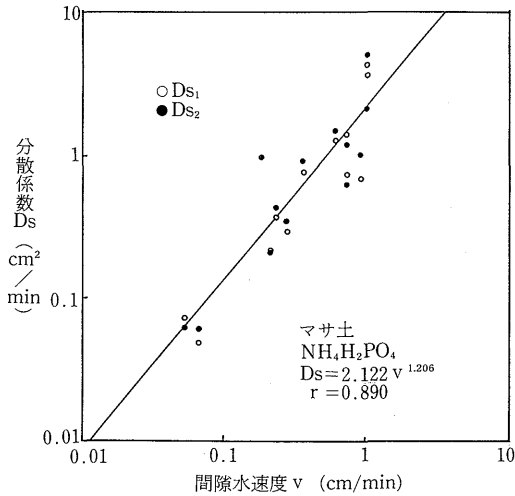


図-1-1 分散係数 (D_s) と間隙水速度 (v) との関係

r についてみると、マサ土の結果に0.65と0.76の低い値を示すものもみられるが、これ以外は0.82~0.99のかなり高い値を示している。実験定数 b は v の変化に対する D_s の変化を示すものであり、 b の大きさと用いた土壌、塩の種類の間にはマサ土の場合が砂丘砂の場合よりも大、 NH_4Cl の場合が $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ の場合よりも大という関係がみられる。 D_s の値は土壌の間隙構造に支配されるところが大きいですが、図-6の結果にみられるようにイオンの種類によっても

流出破過曲線が異なる。用いた分散係数算出の理論式には溶液の化学反応、溶質の土壌への吸着、溶質の流体中への溶解は考慮されていない。これらを考慮した D_s の評価については今後検討が必要である。

5. ま と め

不飽和土壌の流出破過曲線と分散係数を定常法により求めた。結果にみるように一定の成果をうることができた。しかし、あまりにも分散係数に影響する要因が多い。水分子、イオンの吸着現象が顕著でない砂丘砂とマサ土を材料として用いたが、結果にみるようにイオン吸着現象による影響が大きいと考えられる。今後、これらを考慮した評価を試みたい。

化学分析は藤山英保氏(農学部資源利用化学講座)にお世話になった。記して謝意を表する。

文 献

- 1) 筑紫二郎：不飽和土壌における溶質の分散係数の決定法，鳥取大砂丘研報，19，73-79(1980)
- 2) 長 智男，田中 明，小谷佳人，山本太平：土壌中の塩の分散係数測定法，鳥取大砂丘研報，20，11-16 (1981)
- 3) Kirkham, D. and W. L. Powers : Advanced Soil Physics, John Wiley & Sons, Inc., 379-427 (1972)