

低水分領域における土壌中の溶質拡散係数と電気伝導度

Molecular diffusion coefficients in soil and bulk soil electrical conductivity at low water content

○宮坂加理 塩沢 昌 西田和弘

Katori Miyasaka, Sho Shiozawa, Kazuhiro Nishida

1. はじめに

土壌中の溶質拡散係数は、農業生産、汚染物質の改善、そして廃棄物処理などを考える上で重要な値である。本研究では、土壌水中の溶質拡散係数 D_p を次式で定義する。

$$J = -\theta D_p(\theta) \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

$$D_p(\theta) = \tau(\theta) D_o \quad (2)$$

ここで、 J は溶質拡散フラックス、 θ は体積含水率、 C は溶液濃度、 x は空間座標、 $\tau(\theta)$ は拡散に対する屈曲度、 D_o は土壌水中の溶質拡散係数である。このとき、相対拡散係数 $D_r (= D_p/D_o)$ は、実験式として、

$$D_r = \alpha \theta^n \quad (3)$$

と表される (α, n : 実験定数)。式(3)における n は、高水分時には 1~2 の値を取ることが数多く報告されている。これは 屈曲度 $\tau(\theta)$ の定義がマクロに見たときの実際の拡散経路長に対する直線経路長の比の二乗で表されるとし、これが θ の二乗と等しいと考えるモデルから説明されている。しかし、低水分になると、 n は 4 にもなり、 θ の減少によって拡散が急激に抑えられるとの報告がある (Mehta et al. 1995)。この原因として、土粒子の表面電荷により、土壌水中の同じ極性の溶質イオンが土粒子表面近傍から排除され拡散できなくなる、電気拡散二重層 (以下: 二重層) の影響ではないかと考えられていた (Mehta et al. 1995)。しかし、Miyasaka et al. (2014) は、電解質 (NaCl, CaCl₂) と二重層の影響を受けないと考えられる非電解質 (グリセリン) の D_r を単粒の砂 (庄内砂丘砂) と団粒土 (関東ローム土) それぞれで測定し、電荷の有無に関わらず D_r に差異が見られなかったことを示した (Fig. 3 参照)。この結果は低水分時に D_r

が θ の 4 乗に比例する原因が、土粒子の表面電荷によるものではないことを意味している。

本研究では、この関係を電気伝導度の測定からも確認した。

2. 土壌の電気伝導度と D_p との関係

粘土をあまり含まない砂などの土壌の電気伝導度 EC_b は、固相表層の電気伝導度を無視できるため、次式で表すことができる (Rhoades et al., 1976)。

$$EC_b = \theta EC_w \tau(\theta) \quad (4)$$

ここで、 EC_w は溶液の電気伝導度、 $\tau'(\theta)$ は電気伝導度に対する屈曲度である。

土壌 (砂) の液相をマイクロに見ると、複雑な形態ではあるがどの部分においても土壌の電気抵抗の逆数 (コンダクタンス) はイオンの経路長に反比例し液相断面積に比例する。一方で、溶質拡散コンダクタンス ($= \theta D_p / \Delta x$) においても同様に経路長に反比例し液相断面積に比例する。このことから、式(2)における $\tau(\theta)$ と式(4)における $\tau'(\theta)$ が同じであると考えられる。この場合、相対電気伝導度 $EC_r (= EC_b / EC_w)$ は、式(3)と(4)から、

$$\frac{EC_r}{\theta} = \alpha' \theta^{n'} \quad (5)$$

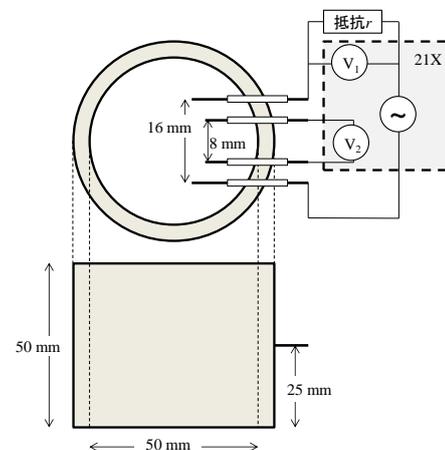


Fig. 1 Schematic diagrams of the experimental columns.

* 東京大学大学院農学生命科学研究科 Graduate School of Agric. and Life Sciences, The Univ. of Tokyo
キーワード: 溶質拡散, 電気伝導率, 屈曲度, 拡散係数, 4極センサー

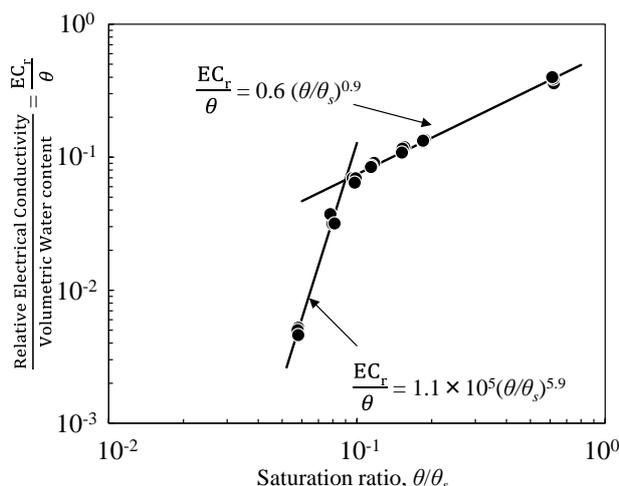


Fig. 2 Relationship between relative soil electrical conductivity /volumetric water content, EC_r/θ , and saturation ratio, θ/θ_s ($\theta_s = 0.43$).

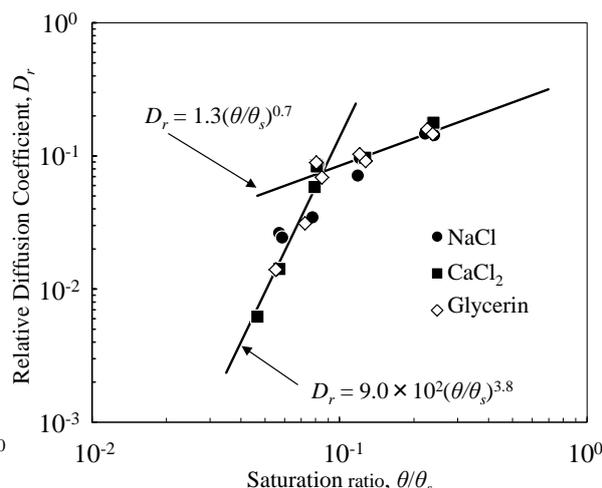


Fig. 3 Relationship between relative diffusion coefficients, D_r , and saturation ratio, θ/θ_s ($\theta_s = 0.43$) (Miyasaka et al., 2014).

で表されると予測される。ここで、 α' と n' は実験定数である。本研究では、Miyasaka et al. (2014)で用いた庄内砂丘砂で様々な θ における EC_b を測定し、 D_r の結果と比較して、 D_r と同様の結果が得られるかについて調べた。

3. 実験方法

炉乾した土壌試料(庄内砂丘砂)に1.0 mol/LのNaCl溶液を所定量加え、均一になるようによくかき混ぜた。この試料を内径5.0 cm、長さ5.0 cmの円筒カラムに均一(乾燥密度:約1.36 g/cm³)に充填し、25℃のチャンバー内に静置した(Fig. 1)。

カラムの中央に4極センサーを取り付け、データロガー21X(Campbell Scientific社)に接続した。このセンサーを用いて、4極法から EC_b を算出した(井上・塩沢, 1994)。式(5)における α' と n' は EC_b を θ 除した結果から最小二乗法を用いて求めた。 θ は0.0248~0.267 cm³/cm³の範囲であった。

4. 結果と考察

Fig. 2に EC_r/θ と飽和度 θ/θ_s (θ_s :飽和体積含水率=0.43 cm³/cm³)の関係を、Fig. 3に比較として θ/θ_s とNaCl, CaCl₂, グリセリンの D_r との関係(Miyasaka et al., 2014)を示す。その結果、折れ点(n が変わるときの θ)は、 EC_r/θ では $\theta = 0.039$, D_r では $\theta = 0.035$ のときであった(Fig. 2)。また、式(5)における実験定数 n' は、 $\theta \geq 0.039$ のとき $n' = 0.91$, $\theta < 0.039$ のとき $n' = 5.9$ となった。また、式(3)における実験定数 n は $\theta \geq 0.035$ のとき $n = 0.97$,

$\theta < 0.035$ のとき $n = 3.9$ であった(Fig. 3)。

この結果から、 EC_r/θ と θ の間にも D_r と θ の間にも見られた折れ点は、ほぼ同じ体積含水率であり、また n' と n は高水分時にほぼ1であった。低水分においても、 n' は約6となり、拡散係数と同様、低水分時に比べて大きい値を示した。

以上、粘土分の少ない砂では土壌の電気伝導度の測定からも、拡散係数と同様の結果を得ることができた。

式(3)の n および式(6)の n' が低水分($\theta < 0.035$)においてが大きくなるのは、わずかな θ の減少が直列電導・拡散のネックの抵抗を著しく増加させるためであると考えられる(Fig. 4)。

引用文献:

Mehta et al. (1995) *Soil Sci.*, 159: 115-121. Miyasaka et al. (2014) *SSSA*, 78:1852-1858. Rhoades et al. (1976) *SSSA*, 40:651-655. 井上・塩沢 (1994) 土壌の物理性, 70: 23-28.

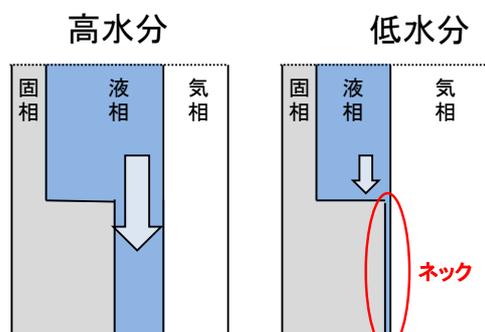


Fig. 4 Schematic model of the electrical conductivity or diffusion pathway in soil.