

水平砂柱への水分と吸着性化学物質の移動特性

大同工大工学部

○ 万庭加津美・白松 洋人

同上

正員

下島 栄一

1. はじめに：近年、土壌・地下水汚染の問題と関連して、地中への肥料や農薬の移動問題は特に関心事となっている¹⁾。これらの物質は移動中に土壌粒子への吸着特性を示す。本報告は、簡単な条件下で行った非定常状態下の浸透・物質移動実験を通して、特に吸着性化学物質の挙動を検討した結果を示したものである。

2. 物質移動実験

(1) 実験方法： 内径、長さ共3cmのガラス管のユニットを多数用意し、これらを接着テープで接合し、適当な長さにしたものに、気乾状態の比較的均一な砂(平均粒径:0.12mm, water-exit value:-25cmH₂O)を出来るだけ一様になるように充填して砂柱を作り、水平に設置した。砂柱の一端には、Bruce & Kluteの実験法²⁾と類似に、水溶液が零水圧で供給できるようマリオット装置を接続し、また他端は大気に解放した。供給水溶液は、蒸留水にKH₂PO₄を適当量溶かし、PO₄³⁻濃度(C_b)として1~100(mg/l)の範囲とした。浸透実験を所定の時間(T:60min, 150min)行った後、砂柱を各ユニットごとに分解した。その砂サンプルの一部に対し、含水率を炉乾法で求め、残部については、遠心分離器で砂サンプルより水を採取し、イオンクロマトでリン酸イオン濃度(C)を測定した。

(2) 実験結果

図1は、種々の条件下の実験で得た砂柱での水分量分布(θ :体積含水率)を、水供給面からの距離(x)を $T^{1/2}$ で除したもの(= ξ)に対して調べたものであるが、経過時間や供給濃度に関係なく、データはほぼ合致することが認められる。この結果は従来より認められている事実³⁾であるが、各実験ケースの水供給や浸透場(砂柱)の条件が同様な状態になっていたとみなせる。

図2は、C_b=40mg/lの実験条件下の濃度分布(C/C_b)を、図1と同様、 ξ に対して調べたものである。濃度を固定した場合、各濃度分布は、実験時間(T)に関係なく、C=C(ξ :C_b)となることが分かるが、図1の結果と比較すると、リン酸イオンの移動は水分移動に比し遅れている。

図3は当該イオンの移動に及ぼす供給水濃度の影響を調べたものである。実験時間は同一(150min)であるが、C_bが高い場合は低い場合に比し、同イオンの輸送は迅速に行われていることが分かる。

(3) 実験結果の考察

1) 基礎式

本実験条件のような水平砂柱への水分移動の基礎式は以下で与えられる。

$$\partial \theta / \partial t + \partial V / \partial x = 0 \quad \cdots \cdots ①$$

$$V = -D(\theta) \cdot \partial \theta / \partial x \quad \cdots \cdots ②$$

ここに、t:時間、x:水分の移動距離、D:土壌水分拡散

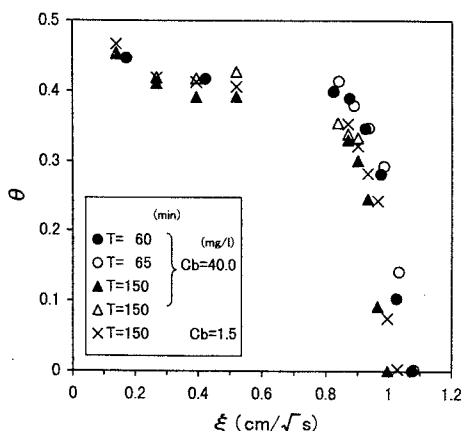
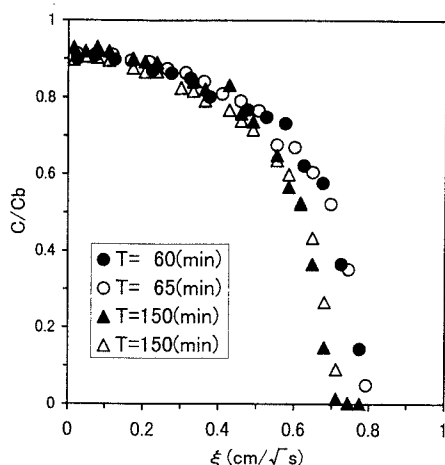


図1：水分量分布

図2：無次元濃度分布 (C_b = 40 mg/l)

係数である。

砂柱への吸着性化学物質の移動は次式に従う。

$$\partial(\theta C)/\partial t + \partial F_c/\partial x = -\rho_s \cdot \partial S/\partial t \cdots \textcircled{3}$$

$$F_c = V \cdot C - D_e \cdot \partial C/\partial x \cdots \textcircled{4}$$

ここに、 S : 砂単位質量当たりの吸着量、 ρ_s : 乾燥砂の密度、 D_e : 有効分子拡散係数(D_m^e)と有効機械的分散係数(D_d^e)の和であり、次式で与える。

$$D_m^e = D_{m0} \cdot \theta \cdot \tau, \quad D_d^e = \theta \cdot F(V/\theta) \cdots \textcircled{5}$$

ここに、 D_{m0} : 分子拡散係数、 τ : tortuosity (=const.)。

また、吸着量(S)と砂粒子周囲の間隙水濃度(C)の間に、次の平衡等温式が成立するとする⁴⁾。

$$S = G(C) \cdot H(\theta) \cdots \textcircled{6}$$

浸透実験での状況を考慮して、以下の初期・境界条件を設定する。 図3: 無次元濃度分布 ($T = 150 \text{ min}$)

・水分量: [初期条件] $t = 0, x > 0$ で、 $\theta = \theta_i (= \text{const.} = 0) \cdots \textcircled{7}$

[境界条件] $t > 0, x = 0$ で、 $\theta = \theta_b (= \text{const.} (\text{飽和})) \cdots \textcircled{8}$; $t \geq 0, x \rightarrow \infty$ で、 $\theta = \theta_i \cdots \textcircled{9}$

・濃度: [初期条件] $t = 0, x > 0$ で、 $C = 0 \cdots \textcircled{10}$

[境界条件] $t > 0, x = 0$ で、 $C = C_b (= \text{const.}) \cdots \textcircled{11}$; $t \geq 0, x \rightarrow \infty$ で、 $C = 0 \cdots \textcircled{12}$

2) 結果の検討

水分量: 式①, ②は式⑦~⑨の下で、

$$\theta = \theta(\xi); \quad \xi = x/t^{1/2} \cdots \textcircled{13}$$

なる相似解を持つが、実験結果(図1)は、前述の通り、式⑬の関係を満足している。

濃度: 物質移動も相似解($C = C(\xi)$)をもつとすると、物質移動の基礎式は次式で書き換えられる。

$$\xi/2 \cdot \theta \cdot R \cdot dC/d\xi + D \cdot dC/d\xi \cdot d\theta/d\xi + C \cdot d(D \cdot d\theta/d\xi)/d\xi + A =$$

$$-\xi/2 \cdot (C + \rho_s \cdot G \cdot dH/d\theta) \cdot d\theta/d\xi \cdots \textcircled{14}$$

ここに、 $R = (1 + \rho_s/\theta \cdot H \cdot dG/dC) \cdots \textcircled{15}$

$$A = [D_{m0} \cdot \tau \cdot d(\theta \cdot dC/d\xi)/d\xi$$

$$- \alpha \cdot t^{-1/2} \cdot d(D \cdot dC/d\xi \cdot d\theta/d\xi)/d\xi] \cdots \textcircled{16}$$

ここに、式⑭では、 (V/θ) が小さいとして、 $F = \alpha \cdot (V/\theta)$ と置いた($\alpha: \text{const.}$)。Aの第一項、第二項は物質移動での分子拡散項と分散項に対応するが、[分子拡散項]》[分散項]ならば、 C_b が一定値の実験群の場合、式⑭で $C = C(\xi)$ の相似解の成立が保証される。図2の結果はこの状況をほぼ満足していたとみなせる。なお、輸送過程で、分散項は時間と共に分子拡散項に比し小さくなる。また、式⑭の両辺を C_b で除した式で、 C に関する各項が (C/C_b) の無次元濃度で表せるためには、 (dG/dC) が定数となる必要がある。この条件は、式⑥で S が C の線形関数となることに一致するが、図3の結果は、この関係を満足していないことを示唆する。事実、実験砂50gを種々の濃度のリン酸水溶液(15ml)で水分飽和させてパッチ吸着実験を行ったところ、図4に示す通り、約3カ月間という長時間後(ほぼ平衡状態)では、 S は $C^{0.32}$ に比例するという関係が満足された。ここに、同図で、同一の記号のデータ群は、左側に位置するものほど実験時間は長い。

3. おわりに: 今後は、パッチ実験の結果等を用いて、物質移動実験に対する数値計算を試みたい。

<<参考文献>> 1) Brusseau(1994): Review of Geophys. (AGU); 2) Bruce & Klute(1956): Soil Sci. Soc. Am.; 3) Philip(1969): Adv. in Hydroscie., Vol. 5, Academic Press; 4) Shimojima & Sharma(1994): J. Hydrol.

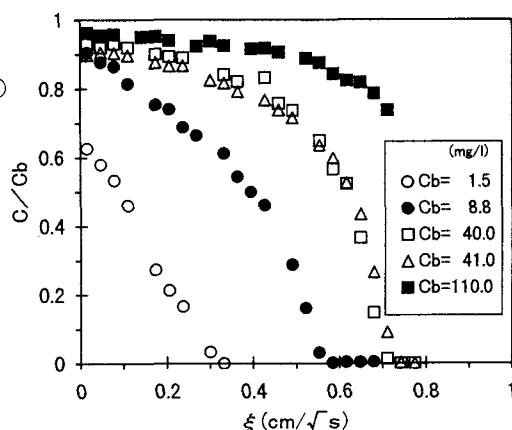


図3: 無次元濃度分布 ($T = 150 \text{ min}$)

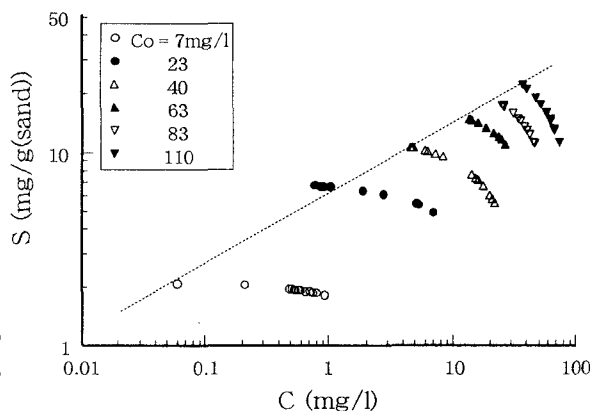


図4: $S \sim C$ の関係 (C_0 : 初期の水溶液濃度)