

可動水・不動水モデルによる鹿沼土の溶質移動の考察

岐阜大学 正会員 佐藤 健
信州大学 正会員 棚橋秀行
岐阜大学 学生員 碓井洋介
岐阜大学 学生員 川縁浩平

1. 研究の目的

土中における可溶性汚染物質の挙動に関する研究は、流れ場の考え方によって2つに分類される。土中の水は全て動いていると考えるもの（可動水モデル、M モデルと呼ぶ）、もうひとつは、土中には動く水（可動水）と動かない水（不動水）が存在すると考えるもの（可動水—不動水モデル、MIM モデルと呼ぶ）である。砂層中の移動現象はMモデルで概ね記述でき、分散係数や遅れ係数などの特性値は室内カラム試験からの推定で推定できる。火山灰土など団粒構造を有する土の間隙は団粒内細間隙と団粒間粗間隙の二重構造で特徴付けられ、こうした団粒構造の土中移動現象は溶質の早期破過とテーリングが特徴的で、Mモデルではこの現象を正確に再現できない。

MIMモデルの特徴は、土中水を可動水と不動水に領域区分する点にあり、可動水の存在割合（ ϕ ）や土粒子が可動水に接触する割合（ f ）を決める必要がある。今のところ、カラム試験から得られる流出破過曲線の特徴から推定する以外に適当な方法は見当たらない。本研究は、団粒構造を積極的に形成するため鹿沼土によるカラム試験を行ない、得られた破過曲線の解析からMIMモデルの特性値を推定して、飽和度や流速の試験条件との関係を考察したものである。流れ場の状態とパラメータの物理化学的な関係を検討して、パラメータの意味を正確に掴むことができれば、MIMモデルのパラメータ推定に役立つと考えた。

2. MIMモデルの考え方

土中水を可動水と不動水に区分し、溶質移動を記述すると次式のようになる。

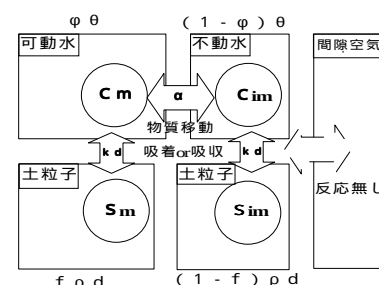


図 1

$$(\theta_m + f\rho_d k_d) \frac{\partial C_m}{\partial t} + [\theta_{im} + (1-f)\rho_d k_d] \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \theta_m D \frac{\partial^2 C_m}{\partial z^2} - \theta_m v_m \frac{\partial C_m}{\partial z} \quad (1)$$

$$[\theta_{im} + (1-f)\rho_d k_d] \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \alpha(C_m - C_{im}) \quad (2)$$

ここで、各量の下付添字のm：可動水、im：不動水、 α ：物質移動係数、 v_m ：可動水の平均実流速（ $= q / \theta_m$ ）、 ρ_d ：土の乾燥密度、 k_d ：固液分配係数、 f ：可動水と接している部分の土全体に対する質量比

(1)、(2)式の溶質移動の構造は図—1 ようになっている。

van Genuchten and Wierenga(1976)は次のような(3)～(6)式の4つの無次元量を定義し、解析解を誘導した。

$$\omega = \frac{\alpha L}{q} \quad (3), \quad \beta = \frac{\theta_m + \rho_d f k_d}{\theta + \rho_d k_d} \quad (4), \quad Pe = \frac{v_m L}{D} \quad (5), \quad R = 1 + \frac{\rho k_d}{\theta} \quad (6)$$

(3)～(6)式の無次元パラメータ（ ω 、 β 、 Pe 、 R ）と無次元カラム長を既知量として与えると、相対濃度（ c_m 、 c_{im} ）がポアボリュームの関数として得られる。カラム下端から流出するのは可動水であるので、解析解とカラム実験で得られる破過曲線を比較しながらMIMモデルのパラメータが決定される。

3. カラム試験の方法

カラム試験の装置を図-2に示した。内径5cm、長さ23cmの透明アクリル製カラムに鹿沼土（土粒子密1.1g/cm³、比表面積145m²/g、団粒径7-10mm）を一定の乾燥密度（1.22g/cm³）になるように水中落下法で充填した。カラムに水道水を流して定常流れ場を作った後、NaCl溶液（濃度 C_0 ）を流し、流出濃度（ C ）の変化（破過曲線）を記録した。濃度の計測は硝酸銀滴定法で行った。パラメータとの関係を調べるために流速、飽和度、溶質濃度を変えた実験条件を設定した。流出破過曲線の一例を図—3に示した。流れ場を可動水だけでモデル化した場合にはこの図のような早期破過とテーリングの現象は表現できない。

4. フィッティングによるパラメータ推定

カラムから流出するのは可動水で、解析解として得られた相対濃度 C_m とカラム試験から得られた破過曲線をフィッティングすれば、 R 以外の3つの無次元パラメータ（ ω 、 β 、 Pe ）を推定することができる。本研究では、計測値と解析解の二乗誤差を修正マルカート法で最小化する方法でパラメータ推定を行った。実験17に対するフィッティングの結果を図—3に示した。図中には最終的に決定されたパラメータも示した。

可動水・不動水モデル、溶質移動、分散、不動水。

佐藤、碓井、川縁（岐阜大学 Tel 058-293-2418）、棚橋（大同工大）

5. パラメータと実験条件との関係

(1) 分散係数 (D)

ペクレ数は(5)式で定義されるので、分散係数と間隙平均実流速との関係を図-4に示した。DeSmedt and Wierenga(1984)はガラスビーズに対するカラム試験の結果より $D=0.021v+1.2$ の実験式を提案している。今回の実験ではガラスビーズの結果よりはかなり大きな分散係数が推定された。ガラスビーズの粒径が鹿沼土の団粒径に較べて小さく、分散現象の発生する場の特性長さや速度分布がガラスビーズの方が小さくなるからである。

(2) β (吸着平衡時における可動水中の溶質の存在割合)

実験条件と β の関係を図-5に示した。 β は間隙平均実流速、飽和度に関わらず0.4-0.6の一定値をとることがわかる。(4)式の β には可動水の存在割合 ϕ と可動水と土粒子の接触率 f が含まれる。鹿沼土の表面積が団粒内部のミクロポアで大部分は占められることから、 $f=0$ と考え、可動水の存在割合 ϕ を推定した。その結果を図-6に示した。飽和度が増加するにつれて可動水の割合が減少する傾向が伺われる。DeSmedt and Wierenga(1984)は $\phi=0.853$ をガラスビーズに対する結果より提案している。鹿沼土の結果が飽和度の増加に対して ϕ の減少傾向を示すことは興味深い。不動水量を $\theta_{im} = \theta - \theta_m$ として推定し、その結果を図-7に示した。飽和度の増加とともに、 θ_{im} が増加する様子が伺われた。

6. 結論

団粒構造を積極的に形成させるため鹿沼土を用いたカラム試験を行った。実験ケースが少なく、今後さらにデータの蓄積が必要で研究を継続する予定である。今回の実験結果の範囲で分かった事柄をまとめると以下ようになる。

- (1) 分散係数(D)の速度依存性が確認でき、流速が増すほど分散係数は大きくなることが分かった。
- (2) 可動水の存在割合(ϕ)は飽和度が増すほど減少し、飽和度によらず ϕ が一定とした既往の研究とは異なる結果となった。
- (3) 不動水量が一定ではなく、飽和度ともに増加する傾向があることが分かった。

参考文献

De Smedt, F. and Wierenga, P.J. (1984): Solute transfer through columns of glass beads, W.R.R., Vol. 20, No. 2, pp. 225-232.
 Van Genuchten, M. Th. and Wierenga, P.J. (1976): Mass transfer studies in sorbing porous media. 1. Analytical solutions, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 40, pp. 473-480.

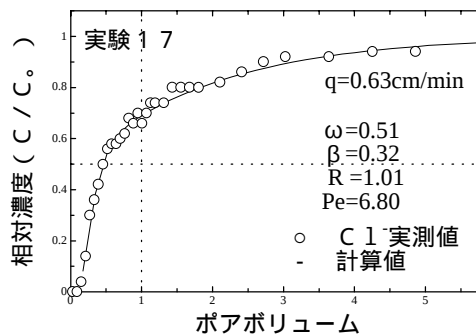
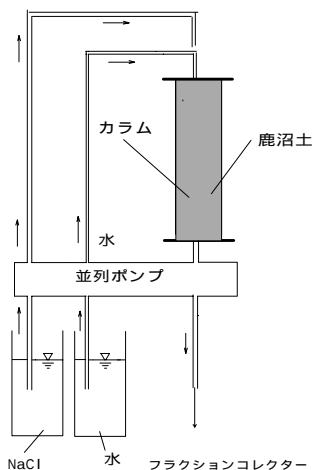


図3 Two-Regionモデルパラメータ推定結果

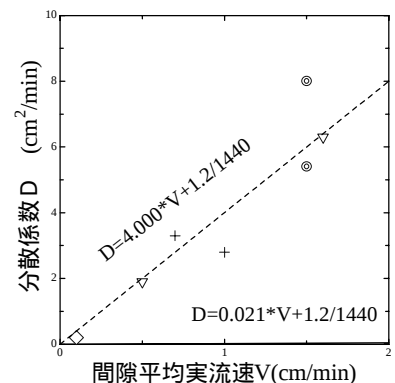


図4 間隙平均実流速と分散係数

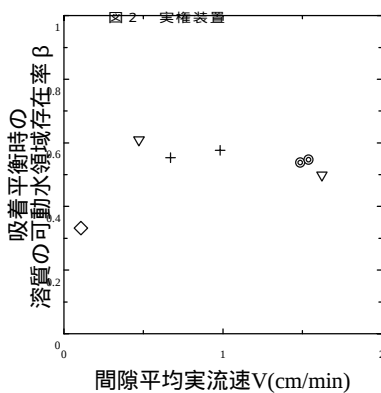


図5 間隙平均実流速と β

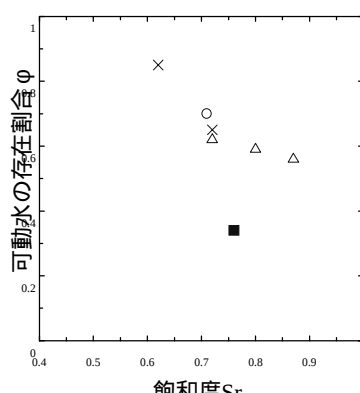


図6 飽和度と可動水の存在割合

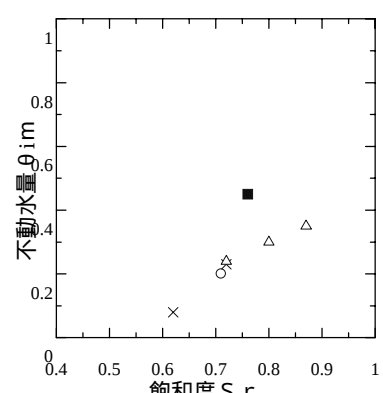


図7 飽和度と不動水量