

岐阜大学 学生会員 ○碓井洋介
信州大学 正会員 棚橋秀行
岐阜大学 正会員 佐藤 健

1. 溶質移動における流れ場の考え方

土中における可溶性の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つに大別される。土中の水は全て動いていると考えるもの（可動水モデル、以下、Mモデルと呼ぶ）、もうひとつは、土中には動く水（可動水）と動きにくい水（不動水）が存在すると考えるもの（可動・不動水モデル、以下 MIMモデルと呼ぶ）である。砂のような粒状材料における物質の移動現象はMモデルで概ね記述できる。それに対し粘土や火山灰土などは、間隙径分布を特徴付ける土粒子構造が砂のような粒状材料に較べ大変複雑である。このような土における間隙は、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、団粒構造の発達した土における物質の移動は、①溶質の早期破過、②テーリングという形で、破過曲線の中にその特徴が顕著に現れる。団粒構造の土に対して、除染時に効果判定目標になかなか汚染濃度が低減しない現象や、汚染の拡大が予想しない早さで進行する現象などを正確に追跡するには、土中の流れ場の特徴を正確に記述した物質移動モデルを下敷きにすることも必要である。

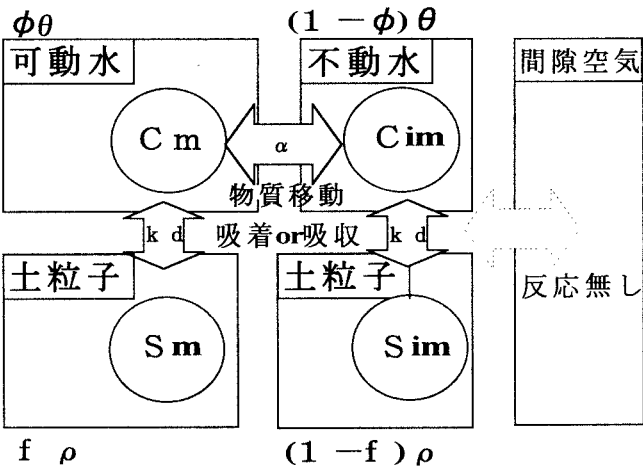


図1 MIMモデル概念図

2. MIMモデルにおける流れ場の考え方

溶質移動の特徴を図-1に示した。図中の $\phi = \theta_m / \theta$ は土中水全体に対する可動水の存在割合である。MIMモデルで表現される溶質移動現象を実地盤で応用するには、移動現象を特徴付けるD, k_d , α , θ_m , θ_{im} の各パラメータを予め決める必要がある。しかしながら、 k_d 以外、パラメータの効果的な決め方は見あたらず、カラム実験で得られる破過曲線とMIMモデルの計算結果をフィッティングさせながら決める以外に今のところ効果的な方法はない。パラメータ推定に役立つように、van Genuchtenら¹⁾は次のような(1)～(4)式の4つの無次元量を定義するとともに、溶質濃度 (C_m , C_{im})、距離 (z)、時間 (t) を無次元化し、解析解を誘導した。

$$\omega \text{ (Stanton数)} = \frac{\alpha L}{v_m} \dots\dots (1)$$

$$\beta \text{ (可動水中の溶質の存在割合)} = \frac{\theta_m + \rho_d f k_d}{\theta + \rho_d k_d} \dots\dots (2)$$

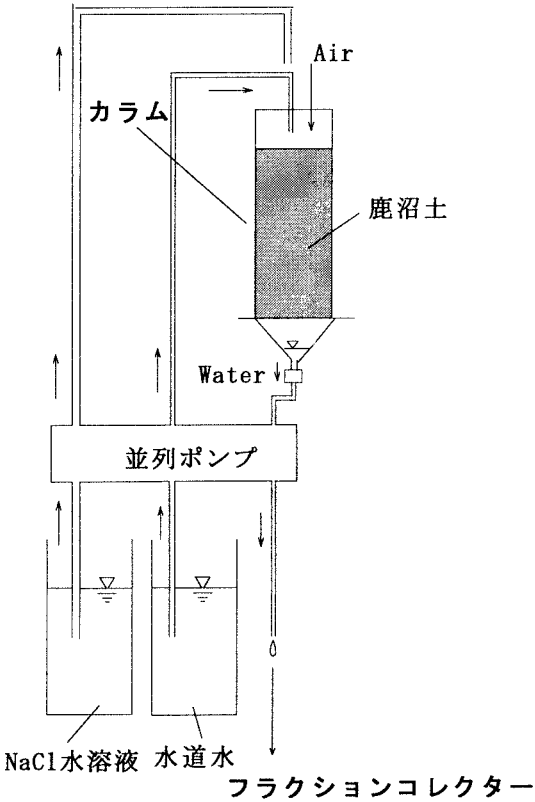


図2 室内カラム実験装置

$$\cdot Pe \text{ (ペクレ数)} = \frac{v_m L}{D} \dots\dots (3)$$

$$\cdot R \text{ (遅延係数)} = 1 + \frac{\rho k_d}{\theta} \dots\dots (4)$$

(1) ~ (4) 式の無次元パラメータ (ω 、 β 、 Pe 、 R) から、相対濃度 (c_m 、 c_{im}) が時間 (T) の関数として得られる。この解析解による相対濃度 c_m を追跡すれば、カラム実験で得られる破過曲線上に現れる Two-Region モデルの特性値を評価することができる。

3. カラム試験の装置と試験法

今回用いたカラム試験の装置を図-2 に示した。内径 5 cm、長さ 20 cm の透明アクリル製カラムに試料土を一定の充填密度 (1.22 g/cm^3) になるように気泡を除いて充填した。カラムに水道水を流して定常流れ場を最初に作った。定常状態を確認した後、NaCl 溶液 (濃度 C_0) を流し、カラム下端における流出濃度 (C) の経時変化 (破過曲線) を記録した。

4. 実験条件との関係

(1) ペクレ数 (Pe)

ペクレ数は (3) 式で定義されるので、分散係数と実験条件の関係を求め、図-3 (a)、(b) に示した。分散係数はカラム長にそれほど依存せず、流速に強く依存し、流速が増すほど分散係数は大きくなる傾向が得られた。流速が早くなるほど溶質の分散が大きくなる傾向は、M モデルの適用から推定される傾向と同じであり、流れ場の構造が違っていても、間隙実流速が早くなるほど間隙各部の速度の非均一性が増し、機械的分散が大きくなるものと理解された。

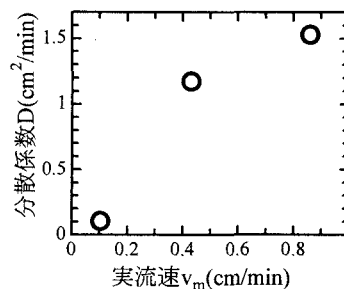


図-3(a) 実流速と分散係数

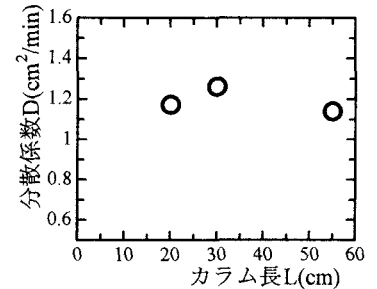


図-3(b) カラム長と分散係数

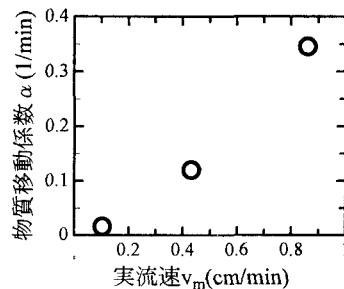


図-4(a) 実流速と物質移動係数

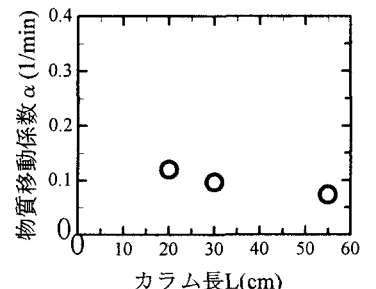


図-4(b) カラム長と物質移動係数

(2) スタントン数 (ω)

スタントン数 ω は (1) 式で定義されるので、物質移動係数 (α) と実験条件の関係を図-4 (a)、(b) に示した。実流速の増加に対し物質移動係数 α が大きくなっている。これは、流速が増すほど不動水と接触する面積が広がり、可動水から不動水への物質移動の貢献が増加するからである。

5. おわりに

室内カラム試験の目的は、対象土質の流出破過曲線の導出と破過曲線に基づく最適な物質輸送モデルの探索にある。団粒構造の発達した土質であっても、室内カラム試験による破過曲線の計測とそれに基づく物質輸送モデルの解析によって、物質輸送を記述するパラメータは推定可能であると考えている。しかしながら、流れ場の考え方によって幾通りもの溶質輸送の構造を考えることができ、土粒子構造が作る間隙の空間的な構造と土中水の存在形態、流れ場の状態に対する深い理解が、物質移動を決めるためのパラメータ評価にも不可欠である。MIM モデルの適用例として、鹿沼土を用いたカラム試験に対する破過曲線の解析結果を紹介したが、実験ケースが少なく、今後さらにデータの蓄積に努めるとともに、パラメータと実験条件との関係について考察を深める必要がある。

参考文献

- 1) M. Th. Van Genuchten and P. J. Wierenga: Mass transfer studies in sorbing porous media, 1. Analytical solutions, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 40, pp. 473-480, (1976)