

飽和砂中の吸着性溶質の輸送特性に関する研究

東海大学大学院 学生会員 ○ 劉 海成
東海大学工学部 正会員 本間 重雄

1. はじめに

土中での溶質輸送過程においては、移動可能な自由水が占める有効間隙部分を中心に移流・分散現象が生じるため、自由水、不動水と土固相部分の間の溶質分担を考慮することが重要である。本研究では、砂に対してほぼ線形吸着を示すカルシウムイオンによるバッチ平衡試験結果をもとに、自由水部分から不動水部分への溶質移動ならびに不動水から土粒子への吸着を考慮した輸送解析を行い、非吸着性溶質による移流・分散特性¹⁾と吸着性溶質によるカラム試験結果との比較を通じ、吸着性溶質の土中輸送機構について考察した。

2. 吸着特性

吸着性溶質の土粒子への吸着特性を調べるため、バッチ平衡試験を実施した。バッチ平衡試験では吸着性溶質を含む濃度の異なる溶液と気乾状態の土を混ぜ合わせた懸濁液について、吸着に伴う溶液濃度 C の変化から単位質量あたりの土粒子の吸着量 S を次式で算出する。

$$S = \frac{(C_0 - C)V_L}{m_s} \quad (1)$$

ここに、 C_0 は土試料投入前の原液濃度、 V_L は溶液体積、 m_s は土の乾燥質量である。図-1はカルシウムイオン(Ca^{2+})と山砂(粒径 2.0~0.105mm)の懸濁液に対する溶液濃度 C と吸着量 S の変化を示したものである。

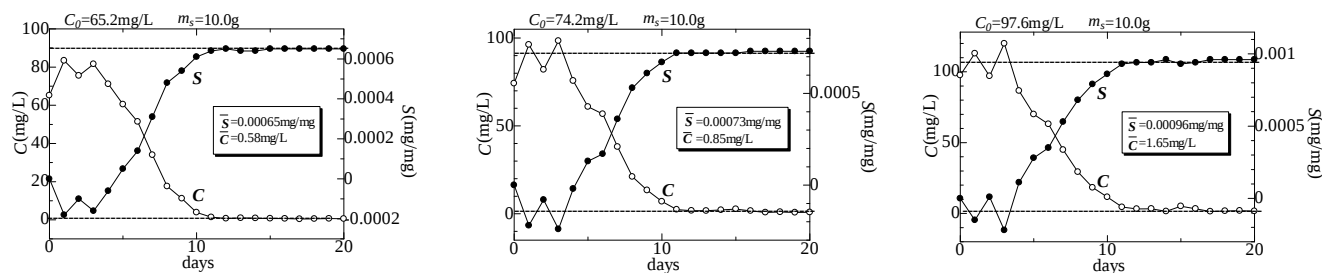


図-1 バッチ平衡試験(Ca^{2+} ～山砂)における溶液濃度および吸着量変化

平衡状態における溶液濃度 $\bar{C}$ と吸着量 $\bar{S}$ との間には $\bar{S} = k_1 \bar{C}^{k_2}$ (2) で示される *Freundlich* 吸着等温式がよく用いられる。式(2)の対数をとると

$\log_{10} \bar{S} = \log_{10} k_1 + k_2 \log_{10} \bar{C}$ (3) となるので、両対数紙への $\bar{C}$ と $\bar{S}$ のプロットにおける近時直線の勾配と、 $\bar{C}=1$ のときの $\bar{S}$ より吸着定数 k_1 , k_2 が求められる。図-2は(a) $m_s=5\text{g}$, (b) $m_s=10\text{g}$ に対するバッチ平衡試験結果を示したもので、いずれも定数 k_2 は1に近く線形吸着とみなしてさしつかえないものと思われる。吸着特性が線形の場合、定数 k_1 は分配係数 K_d と等しくなる ($\bar{S} = K_d \bar{C}$)。

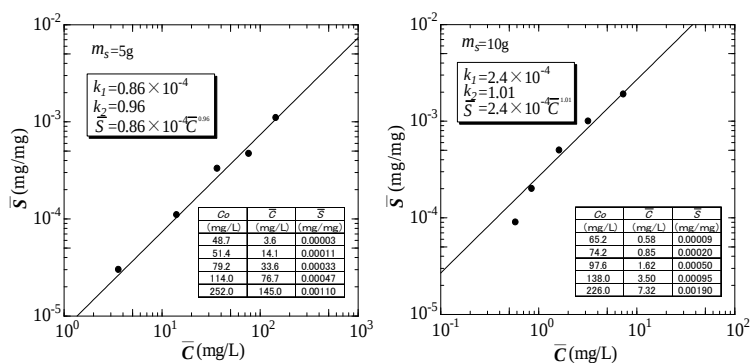


図-2 *Freundlich* プロット

3. 吸着性溶質の間隙中の移動と輸送

ここで、飽和土中における吸着性溶質の移動と土粒子への吸着ならびに輸送について考察する。図-3より単位体積の土中における溶質の全質量は

$$\Delta M = \underbrace{C_m n_e + C_{im}(n - n_e)}_{\text{溶質移動}} + \underbrace{S(1-n)\rho}_{\text{吸着}} \quad (4)$$

キーワード：バッチ平衡試験、カラム試験、吸着特性、輸送特性

連絡先：〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 1117 東海大学工学部 Tel 0463-58-1211 FAX 0463-50-2045

で与えられる．ここに C_m は自由水の濃度， C_{im} は不動水濃度， $S\rho$ は土固相部分への吸着濃度である (ρ : 単位体積の乾燥土の密度)．式(4)に対し，自由水部分の溶質の移流・分散を考慮すると輸送方程式は次のように表される．

$$n_e \frac{\partial C_m}{\partial t} + (n - n_e) \frac{\partial C_{im}}{\partial t} + \rho(1 - n) \frac{\partial S}{\partial t} = n_e D_L \frac{\partial^2 C_m}{\partial x^2} - n_e v_e \frac{\partial C_m}{\partial x} \quad (5)$$

式(5)の左辺第2項と第3項の間に線形吸着 ($S = K_d C_{im}$: 式(5)では吸着平衡状態を考慮するのでバーをはずしている)を仮定すると

$$(n - n_e) \frac{\partial C_{im}}{\partial t} + \rho(1 - n) \frac{\partial S}{\partial t} = \{(n - n_e) + K_d \rho(1 - n)\} \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = (n - n_e) R \frac{\partial C_{im}}{\partial t} \quad (6)$$

となる．ここに， $R = 1 + K_d \rho \frac{1 - n}{n - n_e}$ である．吸着平衡状態における不動水部分の濃度変化(式(6))が，自由水部分と不動水部分との濃度差に比例して生じると仮定すると

$$(n - n_e) R \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \alpha (C_m - C_{im}) \quad (7)$$

となるので，式(6)(7)を式(5)に代入すると， C_m と C_{im} の変化は次の連立微分方程式で与えられる．

$$\frac{\partial C_m}{\partial t} + v_e \frac{\partial C_m}{\partial x} - D_L \frac{\partial^2 C_m}{\partial x^2} + \alpha \left(\frac{C_m - C_{im}}{n_e} \right) = 0 \quad (8a)$$

$$\frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \frac{\alpha}{R} \left(\frac{C_m - C_{im}}{n - n_e} \right) \quad (8b)$$

また，不動水の濃度 C_{im} より土固相部分の濃度は $S\rho = K_d \rho C_{im}$ (8c) で求められる．解析は式(8a)の $\frac{\partial C_m}{\partial t} + v_e \frac{\partial C_m}{\partial x} - D_L \frac{\partial^2 C_m}{\partial x^2}$ 部分に粒子追跡法²⁾による移流分散計算を行い，そこに自由水から不動水への溶質移動および不動水から土粒子への吸着を組み合わせた解析を行った．実流速 v_e は実験から得られた値を，分散係数 D_L ，有効間隙率 n_e ，物質移動係数 α は同一条件の非吸着性溶質による実験から得られた値を用いた．図-4 に $v_e = 0.146(\text{cm/s})$ ， $D_L = 0.08(\text{cm}^2/\text{s})$ ， $n = 0.413$ ， $n_e = 0.322$ ， $\alpha = 6.5 \times 10^{-4}(\text{1/s})$ ， $R = 5670$ の計算結果を示す．

図-4(a)の破過曲線では濃度の上昇が $V_p = 1.2$ 付近で頭打ちとなり，以後排出液濃度が一定の状態 ($C_m/C_0 \approx 0.5$)で推移する実験状況がうまく再現されている．(b)はカラム内の自由水濃度の分布変化を示したもので，カラム排出端に向かって濃度の減衰が生じている．(c)は不動水の濃度分布であるが，この場合自由水部分から不動水部分に移動した溶質(図-3)は土粒子部分にそのほぼ全てが吸着されるため常に $C_{im} \approx 0$ となっている．(d)は自由水から移動した溶質はそのほとんどが土固相部に分配されることを示している．

4. まとめ

本研究では吸着性溶質の土中輸送機構について自由水部分から土粒子表面の不動水部分への溶質移動ならびに不動水から土固相部分への吸着を考慮することにより，カラム試験から得られる破過曲線の特徴が良好に再現されることを示した．今後は，濃度減衰を伴う輸送方程式の適用性について検討する予定である．

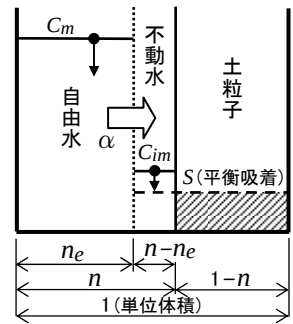


図-3 溶質移動と吸着

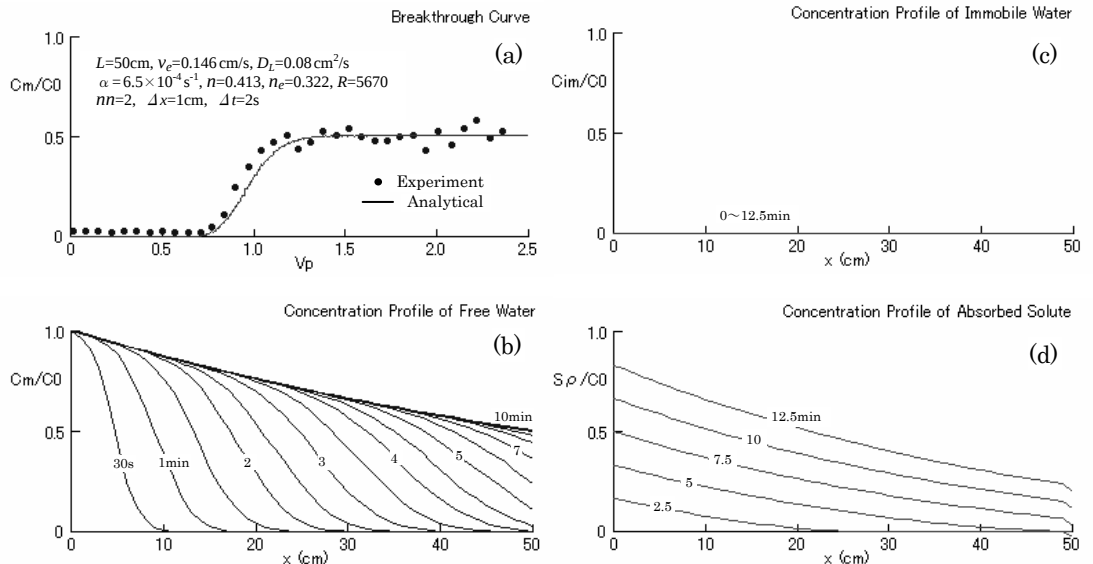


図-4 粒子追跡法による吸着性溶質の輸送解析結果

【参考文献】1) 劉海成・乙茂内康史・本間重雄「飽和砂中の溶質輸送における有効間隙および分散特性の評価」，土木学会関東支部第 33 回技術研究発表会，第Ⅲ部門，2007 2) 西垣誠他；土と基礎の講座(移流分散解析入門・粒子追跡法) 2002.9～2003.9