

# 土中における非吸着性溶質の保持・輸送に関する研究

東海大学大学院 学生会員○中村 直樹  
東海大学工学部 正会員 本間 重雄

## 1. はじめに

土中における溶質の輸送解析においては、土の粒度分布状態に応じた分散特性を的確に評価することが重要である。本研究では、非吸着溶質の飽和砂中における輸送特性を粒径の異なる試料による室内カラム試験を通じて調べ、一次元輸送方程式に対する動的粒子ペクレ数の適用に基づく理論解とのフィッティングにより、溶質の分散特性を把握する方法について検討した。得られた結果と試料の平均粒径・実流速の関係について考察し、一次元 FEM 解析を通じて実験状況の再現を試みた。

## 2. 実験方法

実験装置は図-1に示すような試料を充填する鉛直カラム(内径 3cm, 長さ 50cm, フィルター部上下端 3cm), 可変ポンプおよび圧力計からなる。このカラムに、自然乾燥状態の試料砂を 5cm ずつ一定密度で詰め、50cm の円柱供試体を作成する。次に、試料の下端から蒸留水を可変ポンプを用いて送り、完全飽和状態にする。完全飽和させた後、供試体の流出間隙体積(以下、 $V_p$  と略す)を計算し、続けて  $3V_p$  に相当する塩化物水溶液(1%)を下端から一定速度で浸透させた。(ここで、流出間隙体積とは間隙を流れる流体の累積体積を土の間隙体積で除したものである。)

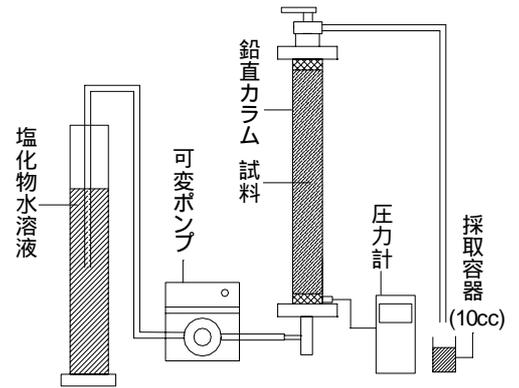


図-1 実験装置

カラムの上端から排出される水溶液は、チューブを通じて採取容器に 10 cc ずつ採取し、イオンメーターを用いて排出溶液のイオン濃度を測定した。本研究で用いたイオンメーターは、イオン濃度直読型の自動較正・測定タイプで、使用するイオン種に応じたイオン電極と比較電極の組み合わせにより溶液濃度の測定が可能である。試料には、豊浦砂(0.105mm~0.425mm)、千葉産山砂(0.25mm~0.425mm, 0.425mm~0.85mm)の3種類の平均粒径の異なる砂を用いた。

## 3. 解析方法

実験状況に対応する溶液濃度  $C$  に関する一次元輸送方程式は次式で表される。<sup>1)</sup>

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_e \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

ここに、 $x$  は流れの方向、 $C$  は溶液濃度(%),  $D_L$  は流れ方向の分散係数( $\text{cm}^2/\text{s}$ ),  $v_e$  は実流速( $\text{cm}/\text{s}$ )である。

(1)式を次の初期条件および境界条件のもとで解くと、

$$\text{初期条件: } -\infty < x < 0, \quad C = C_0, \quad t \leq 0$$

$$0 \leq x < +\infty, \quad C = C_0, \quad t \leq 0$$

$$\text{境界条件: } x = 0, \quad C = C_0, \quad t > 0$$

その解(Gupta(1972))は次のようになる。<sup>2)</sup>

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\sqrt{Pe} (1 - V_p)}{2 \sqrt{V_p}} \right) + \frac{1}{2} (\exp Pe) \operatorname{erfc} \left( \frac{\sqrt{Pe} (1 + V_p)}{2 \sqrt{V_p}} \right) \quad (2)$$

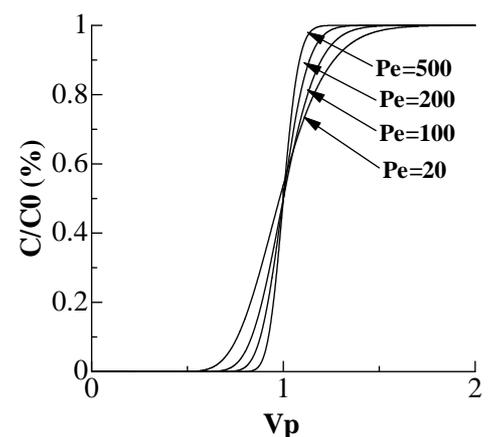


図-2 理論破過曲線

キーワード: 鉛直カラム, 溶質移動, 溶質輸送, 分散特性, FEM 解析

連絡先 〒259-1292 平塚市北金目 1117 TEL 0463-58-1211 FAX 0463-50-2045

ここで、 $V_p = \frac{v_e t}{L}$  は累積流出間隙体積、 $Pe = \frac{v_e D_p}{D_L}$  は

動的粒子ペクレ数、 $L$  は試料長、 $D_p$  は試料の平均粒径である。

図-2に示した破過曲線は、(2)式に基づき  $Pe$  の変化に対する流出液の相対濃度変化を示したものである。この理論破過曲線と実験データとをフィッティングさせた一例を図-3に示す。合致した  $Pe$  と試料の平均粒径  $D_p$  および実流速  $v_e$  から溶質の分散係数  $D_L$  が求められ、 $D_L = \alpha_L v_e$  より試料の縦方向分散長  $\alpha_L$  が求められる。

#### 4. 結果とシミュレーション

実験で用いた平均粒径の異なる3種類の試料について、実流速の大きさ、同定された動的粒子ペクレ数  $Pe$ 、分散係数  $D_L$ 、分散長  $\alpha_L$  の値を表-1に示す。 $Pe$  のフィッティングには実流速毎に若干のばらつきが見られたが、全体として流速の影響は認められず、試料の粒径に応じた一定値をとることが示された。従って、 $Pe$  の大きさには、試料の平均粒径と分散長が関係しており、実験結果から平均粒径の増加に伴って、 $Pe$  は減少することが示された。また、平均粒径が小さくなるにつれて、試料の分散長の減少割合は小さくなるという結果が得られた。実験で求められた分散長を用い、実験時の実流速を適用して(1)式の一次元 FEM 解析を行った結果が図-4である。これによると、カラム内部の濃度分布の変化が良く再現されている。シミュレーションにおいては、数値計算上のオーバーシュートを防ぐためにクーラン規準を満足しておく必要がある。<sup>3)</sup>クーラン数は、 $Cr = (\Delta t \cdot v_e) / \Delta x$  で与えられ、解析では  $\Delta t = 5(s)$ 、 $\Delta x = 1(cm)$  の条件でシミュレーションを行ったところ、クーラン数は最大でも  $Cr = 2.04$  であった。 $Cr = 2.0$  程度であっても、オーバーシュート及び擬似分散が抑えられ、カラム上端での相対濃度変化についての実験結果とシミュレーション結果は非常に良く整合した。

#### 5. まとめ

本研究では、非吸着性溶質を用いた鉛直カラム試験を行い、実験から得られた破過曲線に対し、動的粒子ペクレ数  $Pe$  及び累積流出間隙体積  $V_p$  に基づいた一次元輸送方程式の理論解とのフィッティングにより試料の粒径に対応した分散係数を合理的に求める方法を提案した。さらに、この方法によって同定された分散長に基づく FEM 再現計算は、実験結果と良い整合性を示した。今後は重金属等の吸着性溶質について、バッチ平衡試験を通じて土粒子への吸着平衡を調べ、非線形吸着特性を考慮した分散・吸着パラメータの同定を検討する予定である。

〈参考文献〉

- 1) 福江正治・加藤義久・小松田精吉 訳:地盤と地下水の原理, 東海大学出版会, pp.200-227, 1995.9.
- 2) F.A.L Dullien: Porous Media ~Fluid Transport and Pore Structure~, Academic Press, pp.329-357, 1979.
- 3) W.Kinzelbach 著 上田年比古 監訳:パソコンによる地下水解析, 森北出版, pp.217-225.1990.6.

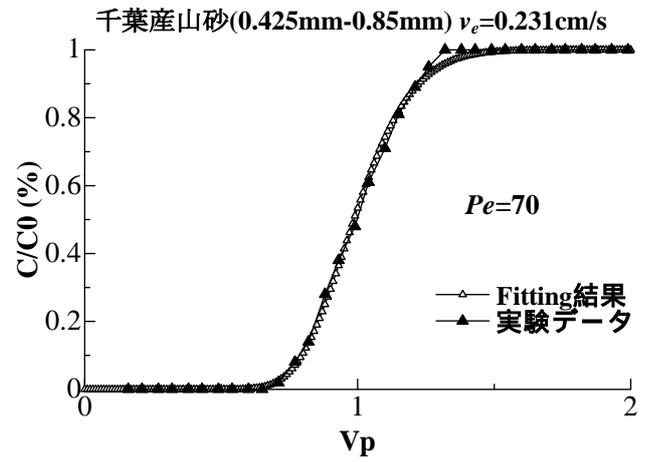


図-3 フィッティング解析結果

表-1 各試料の実験結果 (Cl-水溶液)

試料	平均粒径	実流速	動的粒子	分散係数	分散長
	$D_p$ (cm)	$v_e$ (cm/s)	ペクレ数 $Pe$	$D_L$ ( $cm^2/s$ )	$\alpha_L$ (cm)
豊浦砂	0.0265	0.195	100	$5.17 \times 10^{-5}$	$2.65 \times 10^{-4}$
		0.327		$8.67 \times 10^{-5}$	
		0.407		$1.08 \times 10^{-4}$	
千葉産山砂	0.0338	0.159	80	$6.17 \times 10^{-5}$	$4.11 \times 10^{-4}$
		0.274		$1.16 \times 10^{-4}$	
		0.343		$1.45 \times 10^{-4}$	
千葉産山砂	0.0638	0.136	50	$1.74 \times 10^{-4}$	$1.28 \times 10^{-3}$
		0.231		$2.95 \times 10^{-4}$	
		0.343		$4.37 \times 10^{-4}$	

千葉産山砂(0.425mm-0.85mm)  $v_e = 0.231 cm/s$

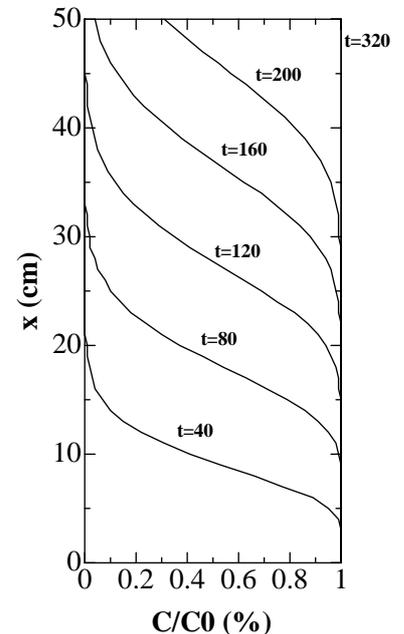


図-4 カラム内の濃度分布