

画像解析を用いた物質移動パラメータの実験的検討 Experimental Examination of Transport Parameters Using Image Analysis

○ 正木 一平* ・井上 一哉**・瀬恒 直子* ・田中 勉**
Ippei MASAKI, Kazuya INOUE, Naoko SETSUNE and Tsutomu TANAKA

1. はじめに

地下水内へ流入した汚染物質の物質移行を把握する上で汚染物質の分散挙動や遅延特性は重要な因子である．本研究は色素トレーサを用いた物質移動実験を実施し，均質飽和地盤における移流分散特性を平面二次元的に検討することを目的としている．トレーサの挙動をデジタル撮影することにより時系列で得られた画像を解析し，分散係数と分散長を推定するとともに色素トレーサの遅延係数についても推定する．

2. 物質移動実験

Fig.1に示す長さ100cm×幅50cm×厚さ6cmのステンレス製タンクに，飽和させた試料砂を水中落下により充填させることで平面二次元の飽和地盤を作成する．上流タンクと下流タンクに給水装置と排水装置を連結し，所定の動水勾配条件下にて定常流れ場を形成する．流出量とマノメータの測定により浸透場の定常状態を確認後，注入口よりトレーサを20cm³注入し，トレーサの移動を定期的にデジタルカメラで撮影する．試料砂には平均粒径の異なる3種類のケイ砂を使用し，物質移動現象を可視化するため，3.15mol/m³のブリリアントブルーFCF（青色1号）水溶液をトレーサとして使用する．試料砂の物性値をTable 1に列記する．本研究では各試料砂に対して動水勾配を種々に変えたとともに，同一の動水勾配条件下にて2回繰り返して実験している．

3. 画像解析

本研究ではBear¹⁾の統計モデルに基づいて画像解析を適用し，分散係数と分散長を推定する．測定時刻の異なる2つの画像を対象に，各時刻におけるトレーサ分布を画像処理により抽出し，重心座標と輪郭座標を求めることで，トレーサの移動速度と2つのトレーサ分布の偏差を算出する．得られた偏差を式(1)に代入し，式(2)を用いて流れ方向に対して回転させることにより分散係数テンソルが推定される．また，トレーサの移動速度と分散係数の関係から式(3)を用いて浸透場の縦分散長と横分散長が推定される．

4. 分散係数・分散長推定結果

Fig.2は試料砂Aの画像解析結果であり，推定された縦分散係数 D_{xx} と横分散係数 D_{yy} の値をトレーサの移動距離に対して示す．動水勾配の変化に応じて分散係数の値が変動しており，動水勾配の大きい透水場ほど得られる値が大きい傾向にある．Fig.3には試料砂Bに対して，トレーサ移動距離と分散長の関係を示している．トレーサの移動距離に応じて値が変動しているものの，動水勾配への依存性はあまり見られない．分散長の値は動水勾配に関わらず一定値になることが期待されるが，透水場作成時におけるミクロ的な粒子配置の相違により値の変動が生じていると推定される．

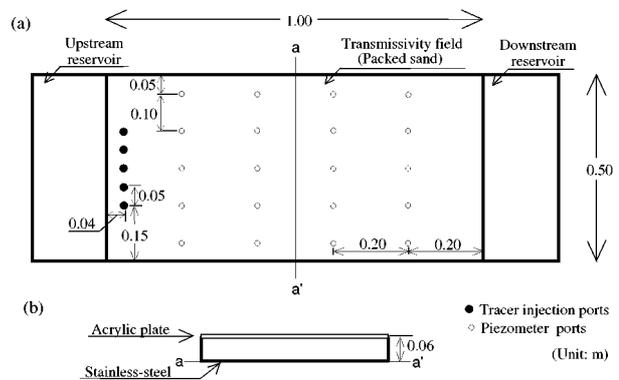


Fig.1 Schematic of the water tank. (a) Plan view. (b) a-a' cross section.

実験装置概略図 (a) 平面図，(b)a-a' 断面図

Table 1: Properties of soils.
試料砂の物性値

試料砂	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	平均粒径 D_{50} (cm)	間隙率 n (-)	飽和透水係数 K_s (cm/s)
A	2.68	8.5×10^{-2}	0.41	0.751
B	2.66	5.0×10^{-2}	0.41	0.268
C	2.66	2.5×10^{-2}	0.41	0.064

$$D_{ij} = \begin{pmatrix} D_{\bar{x}\bar{x}} & D_{\bar{x}\bar{y}} \\ D_{\bar{y}\bar{x}} & D_{\bar{y}\bar{y}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \frac{\bar{x}_m^2}{2\Delta t} & \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \frac{\bar{x}_m \bar{y}_m}{2\Delta t} \\ \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \frac{\bar{y}_m \bar{x}_m}{2\Delta t} & \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \frac{\bar{y}_m^2}{2\Delta t} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{yx} & D_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_{\bar{x}\bar{x}} & D_{\bar{x}\bar{y}} \\ D_{\bar{y}\bar{y}} & D_{\bar{y}\bar{y}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$D_{xx} = \alpha_L |V_x|, \quad D_{yy} = \alpha_T |V_x| \quad (3)$$

$$R_{d,app} = \frac{V}{|V_x|} \quad (4)$$

D_{ij} :分散係数テンソル， $|V_x|$:トレーサの移動速度， α_L :縦分散長， α_T :横分散長， $R_{d,app}$:見かけ遅延係数， V :浸透水の実流速

*神戸大学自然科学研究科：Graduate School of Science and Technology, Kobe University.

**神戸大学農学部：Faculty of Agriculture, Kobe University.

トレーサ実験，物質移動，画像解析

次に、同一の動水勾配条件下にて得られた値の平均値を求め、動水勾配と分散係数の関係について Fig.4 に示す。同様に、Fig.5 には各動水勾配における分散長の変化を示す。縦分散係数は 1.5×10^{-4} から $3.3 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ の範囲に、横分散係数は約 1 オーダー小さい 7.4×10^{-6} から $3.2 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ の範囲に分布しており、動水勾配の増加に伴って増加傾向にある。また、分散係数は流速依存のパラメータであることを受けて、透水性の高い試料砂 A, B, C の順に大きな値をとる。一方、縦分散長は 1.9×10^{-2} から $1.5 \times 10^{-1} \text{ cm}$ の範囲に、横分散長は 2.1×10^{-3} から $1.6 \times 10^{-2} \text{ cm}$ の範囲に動水勾配には関係なく一定値になっており、縦分散長と横分散長の比は約 10 である。平均粒径が小さい地盤ほど分散長の値が増加する結果が得られており、平均粒径の低下による間隙構造の複雑化が分散長へ影響していると考えられる。分散係数と分散長ともに既往の研究例²⁾と比較して妥当な範囲に推定されており、良好な結果が得られている。

5. 遅延係数推定結果

実験に用いたトレーサは土粒子への吸着が考えられる³⁾ことから、遅延特性を評価するため、画像解析にて得られたトレーサの流速と実流速の関係から見かけの遅延係数を式 (4) により推定する。なお、間隙率と有効間隙率は等しいと仮定し、実流速はダルシー流速と間隙率から算出している。Fig.6 に得られた見かけの遅延係数と動水勾配の関係を各試料砂に対してプロットする。平均粒径が大きく、透水性の高い試料砂 A と B の遅延係数は流速に関わらず約 1.2 から 1.5 と推定され、平均粒径が小さく、透水性の低い試料砂 C は遅延係数が約 3.0 である。地盤の構成材料に応じてトレーサの遅延特性が異なり、粒径の小さい粒子ほど吸着する溶質量も増加する現象が示されており、この点は実験中に観察されている。既往の文献値と比較すると、本実験と物性値が類似した試料を用いて遅延特性を検討した Flury と Flühler の結果³⁾では遅延係数は 1.2 と推定されており、Anderini と Steenhuis⁴⁾は砂質土を対象として 1.5 から 7.0 の範囲で遅延係数の値を得ている。この点から、本実験より推定された見かけの遅延係数は妥当な値であると言える。

参考文献

- 1) Bear, J.: Dynamics of Fluids in Porous Media, Elsevier, 764p., 1972.
- 2) Chao, H. C.: Scale Dependence of Transport Parameters Estimated from Forced-Gradient Tracer Tests in Heterogeneous Formations, Doctoral Thesis, University of Colorado, 208p., 2000.
- 3) Flury, M., and H. Flühler: Tracer Characteristics of Brilliant Blue FCF, Soil Science Society of America Journal, 59, pp.22-27, 1995.
- 4) Andreini, M. S., and T.S. Steenhuis: Preferential Paths of Flow under Conventional and Conservation Tillage: Geoderma, 46, pp.85-102, 1990.

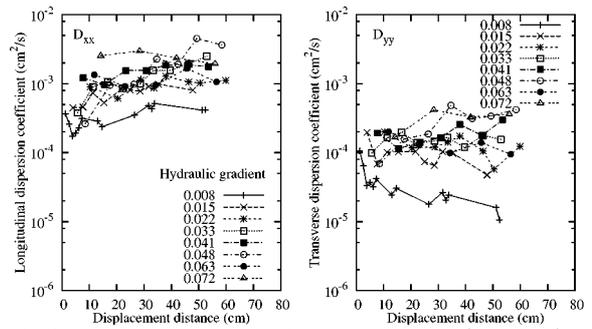


Fig.2 Estimated dispersion coefficients (Sand A).
トレーサの移動距離と分散係数の関係 (試料砂 A)

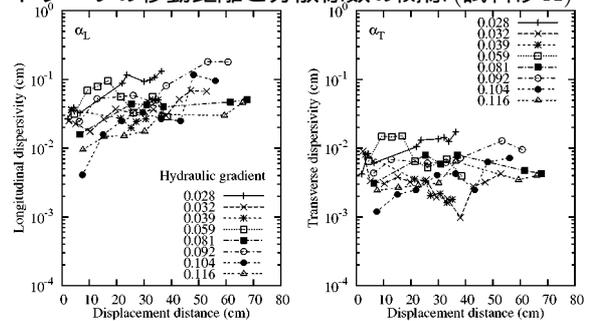


Fig.3 Estimated dispersivity (Sand B).
トレーサの移動距離と分散長の関係 (試料砂 B)

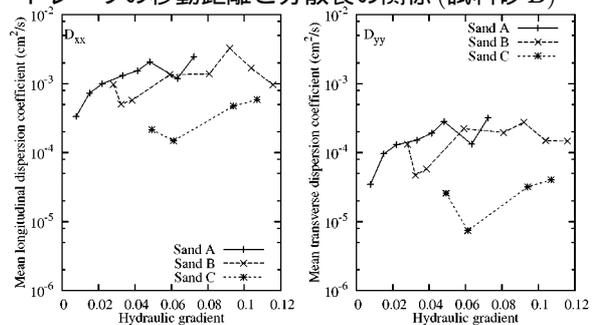


Fig.4 Comparison of dispersion coefficients.
動水勾配と分散係数の関係

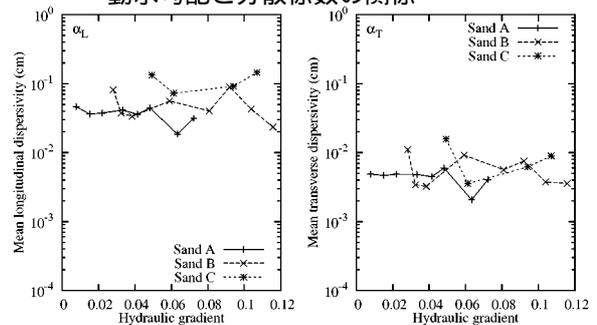


Fig.5 Comparison of dispersivity.
動水勾配と分散長の関係

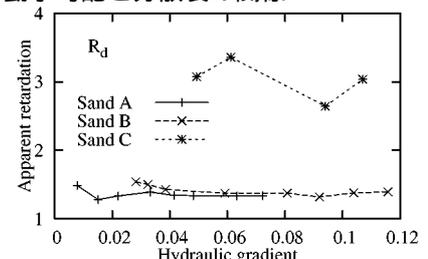


Fig.6 Apparent retardation factor.
見かけの遅延係数