

蛍光色素を用いた画像解析による分散現象の実験的検討 Experimental Investigation of Dispersion Phenomena Using Image Analysis with Fluorescent Dye

井上 一哉¹・竹之内 亮¹・松永 尚子²・○鈴木 克季³・田中 勉¹
Kazuya Inoue, Ryo Takenouti, Naoko Matsunaga, Katutosi Suzuki and Tsutomu Tanaka

1. はじめに

汚染物質の拡がりの指標となる分散長や分散係数の推定は物質移行挙動を予測する上で極めて重要であり、色素トレーサの挙動を撮影した時系列画像を用いて分散特性を評価する非破壊の研究例が報告されているものの、発展途上の段階にある。そこで本研究では、粒度分布の異なる地盤を対象として色素トレーサ実験を実施し、トレーサ分布の変化を画像撮影により捉えることで、画像解析の観点から縦および横分散長の推定について検討する。また非蛍光色素と蛍光色素を用いてトレーサや光の状態が画像解析結果に及ぼす影響を検討することで、画像解析手法のフィールドへの応用に向けた一助とすることを目的とする。

2. 移流分散実験

図 1 に示す実験装置には 2 つのトレーサ孔を設け、同時にトレーサを注入することで画像解析結果と濃度測定結果を比較する。また、蛍光色素を励起させるため、紫外線 (UV) ライトを設置している。トレーサには青系非蛍光色素である Brilliant Blue FCF 水溶液と黄系蛍光色素である Brilliant Sulfaflavine 水溶液を用いる。濃度測定に用いるトレーサには NaCl 水溶液に Brilliant Blue FCF を混合してトレーサの移行過程を可視化する。さらに、トレーサ分布を鮮明に捉えるため、試料にはガラスビーズを使用し、表 1 のように各粒径の配合割合を変えて実験に供している。

3. 画像解析手法

色素トレーサの分散量と分散係数の関係は次式により表される¹⁾。

$$D_l = \frac{1}{2} \frac{d\sigma_l^2}{dt} \quad (1)$$

ここに、 σ_l^2 はプルームの分散量 (cm^2)、 D_l は分散係数 (cm^2/s)、 t は時間 (s) である。本解析では式 (1) を基に以下の手順で分散長や分散係数を推定する²⁾。(1) 2 枚の画像からプルームを抽出し、それぞれの重心位置を得る。(2) プルームの重心から輪郭への偏差ベクトルを計算する。(3) すべてのベクトルに対して式 (1) を用いて Δt の間に移動するプルームの分散係数テンソルを計算する。(4) 流れの主方向にテンソルを回転させることによって縦および横分散係数を得る。(5) 求めた分散係数を実流速で除することで分散長を求める。

4. 画像解析手法の妥当性評価

ケース A の均質地盤における分散長の結果を図 2 に示す。光の状態に関わらず、縦分散長は約 $1.0 \times 10^{-2} \text{cm}$ 、横分散長は約 $1.0 \times 10^{-3} \text{cm}$ であり、色素間の推定結果にも大きな相違はないことが見てとれる。

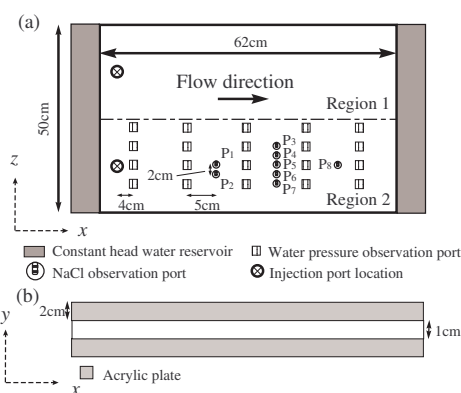


図 1：物質移動実験装置

表 1：実験ケース

実験試料	A	B	C
0.080cm 径の配合割合	100	90	90
0.040cm 径の配合割合	0	10	0
0.007cm 径の配合割合	0	0	10
平均粒径 (cm)	0.08	0.0760	0.0727
均等係数	1.00	1.56	4.57

¹ 神戸大学大学院農学研究科：Graduate School of Agricultural Science, Kobe University.

² (株) UFJ 日立システムズ：UFJ & Hitachi Systems, Co. Ltd.

³ 神戸大学農学部：Faculty of Agriculture, Kobe University.

次に縦横分散比の観点から結果を考察するため、レイノルズ数と分散比の関係を図3に示す。同一流れ場に対する色素や光条件の差異は小さいことから、実験試料ごとにまとめてプロットしている。一般に、多孔質媒体の縦横分散比 α_L/α_T は約2から10であり、本実験結果は良好な範囲に収まっていると言える。加えて、レイノルズ数に関わらず、 α_L/α_T は一定となっており、本実験のレイノルズ数の範囲では縦横分散比は流速に依存せず、妥当な結果であると考えられる。

以上の点より、画像解析の最大の利点である非破壊でのパラメータ推定が可能である点が示唆される。濃度観測は観測点の位置に依存する問題点を画像解析では考慮する必要がなく、カラム実験では困難な横分散長を縦分散長と同時に捉えることができる点は強調すべき事項である。また、蛍光色素とUVライトを用いたトレーサ実験は非蛍光色素と室内光によるトレーサ実験と同程度の精度を有している。したがって、夜間のトレーサ実験やトレーサと地盤の区別が困難な場合などに蛍光色素の活用は有効であると考えられる。

5. 分散現象の評価

前述のようにパラメータ推定の信頼性を検証できたことから、本節では多孔質体内の分散現象に関して考察する。分散長を対象としてレイノルズ数との関係を図4に示す。平均粒径の減少とともに縦分散長は増加することがわかる。また、ケースAの縦分散長はケースCに比べて約1オーダー小さく得られており、異なる粒径の試料が混在することにより、分散性は大きく異なると言える。分散現象はトレーサ粒子がガラスビーズを迂回することによって起こるため、混合試料の平均粒径の減少に伴い同じ間隙率でも各トレーサ粒子移動経路は多様となり、トレーサ粒子の移行状態に対するばらつきは大きくなることから、結果として分散長は増加すると考えられる。

本実験の試料Bとほぼ同じ均等係数の条件で分散現象を検討した Harleman と Rumer³⁾ は均質地盤におけるレイノルズ数と分散係数の関係式を式(2)のように提案した。

$$\frac{D}{v} = bRe^f \quad (2)$$

ここに、 D は分散係数 (cm^2/s)、 v は動粘性係数 (cm^2/s)、 b 、 f は無次元の係数である。式(2)と本実験の結果を図5に示す。ケースBの結果は式(2)とよく合致している。一方、ケースAとCの結果は式(2)よりも小さくあるいは大きく算出されており、均等係数の差異に依存すると推察される。したがって、多孔質体の分散長および分散係数は平均粒径だけでなく、均等係数つまりは粒度分布に応じて大きく変化すると言える。

参考文献：1) Bear, J.: *Dynamics of fluids in porous media*, Dover Publications, 764p., 1972. 2) Inoue, K., Takenouti, R., Matunaga, N. and Tanaka, T.: Non-Intrusive Technique for Identifying Solute Dispersion in Porous Media Using Image Analysis, *Proceedings of the 19th International Offshore and Polar Engineering Conference and Exhibition 2009*, 2009 (in press). 3) Harleman, D.R.F. and Rumer, R.R.: Longitudinal and lateral dispersion in an isotropic porous media, *Journal of Fluid Mechanics*, 16, pp.385-394, 1963.

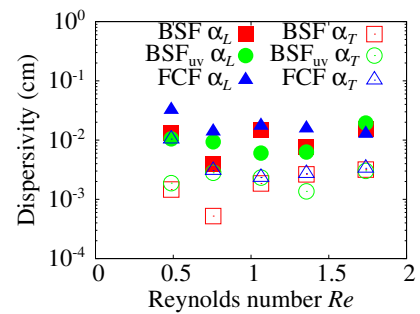


図2：縦および横分散長の推定結果

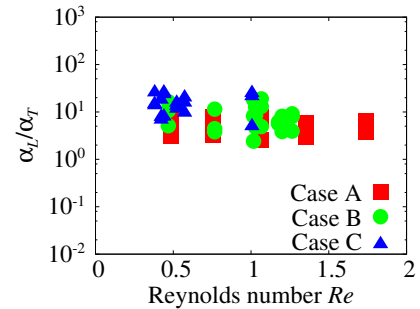


図3：レイノルズ数と分散比の関係

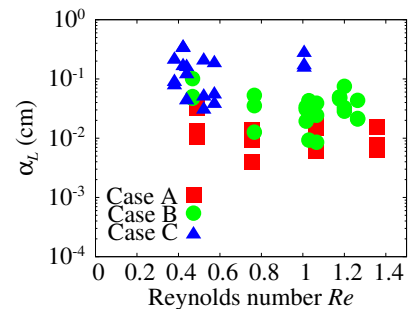


図4：平均粒径による分散長の変化

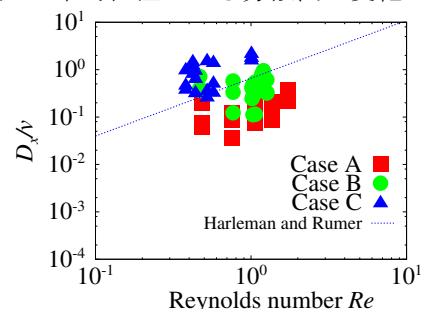


図5：レイノルズ数と縦分散係数の関係