

粗粒媒体における溶質の分散性に関する実験的検討
Experimental study on solute transport dispersion in coarse porous media

○ 北嶋 竜也 * · 鈴木 美妃 * · 鈴木 麻里子 * · 井上 一哉 *
Tatsuya Kitajima, Miki Suzuki, Mariko Suzuki and Kazuya Inoue

1. 緒論

亀裂に代表されるような地盤内に存在する地下水流れの集中する状況では、一般的なダルシー則に従う流れとは異なり非ダルシー流れとなる¹⁾。非ダルシー条件下における溶質輸送特性は十分に解明されておらず、地下水中の溶質輸送挙動を複雑化する大きな要因であるといえる。そこで本研究では、非ダルシー流れとなり得る粒径の大きな土質試料により構成される地盤を粗粒媒体と称し、流れの集中する粗粒媒体での分散性について実験的に評価した。

2. 実験概要

本研究では、表 1 に示す物性の異なる土質試料を用いて一次元と二次元の溶質輸送実験を実施し、溶質輸送特性を示す指標である分散長を用いて分散性を評価した。一次元の実験では、各試料を図 1 に示すアクリル製円筒カラムに均質に充填し、カラム上部に設けた孔から注入した NaCl 水溶液濃度の時系列変化をカラム下部に埋設した電圧センサにより観測して濃度の経時変化から分散長を推定した。また、二次元の実験では、図 2 のように試料 A と試料 B を配置した地盤を前面と背面をアクリル板、底部をステンレス材で構成された長さ 100 cm、幅 100 cm、奥行き 3 cm の実験装置にそれぞれ作成し、注入した色素溶液の輸送挙動をデジタルカメラにより一定時間間隔で撮影した。色素溶液には使用時の安全性や環境に対する負荷を考慮して濃度を調整したブリリアントブルー FCF を使用しており²⁾、得られた画像データの明度と溶質濃度を対応付けることで分散長を推定した。

3. 分散長の推定方法

一次元の溶質輸送実験では分散長の推定に時間モーメント法³⁾を用いた。経時変化に対する j 次標準化時間モーメント μ_j は、

$$\mu_j = \int_0^\infty t^j c_m(\xi_P, t) dt / \int_0^\infty c_m(\xi_P, t) dt \quad (1)$$

にて表される。ここに、 c_m は濃度、 ξ_P は移行距離、 t は時間である。また、 j 次標準化中心時間モーメント μ'_j は、

$$\mu'_j = \int_0^\infty (t - \mu_1)^j c_m(\xi_P, t) dt / \int_0^\infty c_m(\xi_P, t) dt \quad (2)$$

にて定義される。観測点にて計測された破過曲線に基づいて μ_j および μ'_j を算定し、分散長 α を推定した。

$$\alpha(\xi_P) = \xi_P \mu'_2(\xi_P) / 2(\mu_1(\xi_P))^2 \quad (3)$$

また、二次元の溶質輸送実験では観測域における画像データの明度の差の経時変化を用いた時間モーメント法による分散長の推定とともに、画像データの明度から得られる溶質の空間分布を用いる空間モーメント法⁴⁾による推定を実施した。二次元場における濃度分布の空間モーメント M_{ij} は

$$M_{ij}(t) = \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty c(x, z, t) x^i z^j dx dz \quad (4)$$

表 1 : 試料の物性値
Soil samples' properties.

試料	平均粒径 (cm)	土粒子密度 (g/cm ³)	透水係数 (cm/s)
A	0.14	2.68	0.306
B	0.71	2.73	0.510

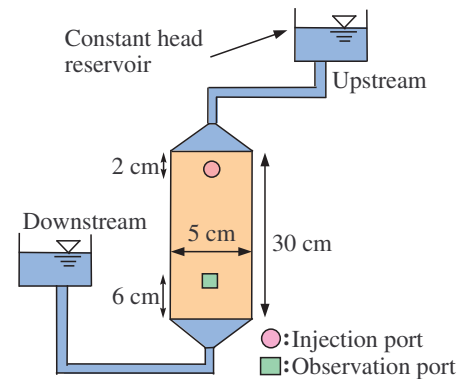


図 1 : 一次元の実験装置概略

Schematic diagram of 1-D experimental setup.

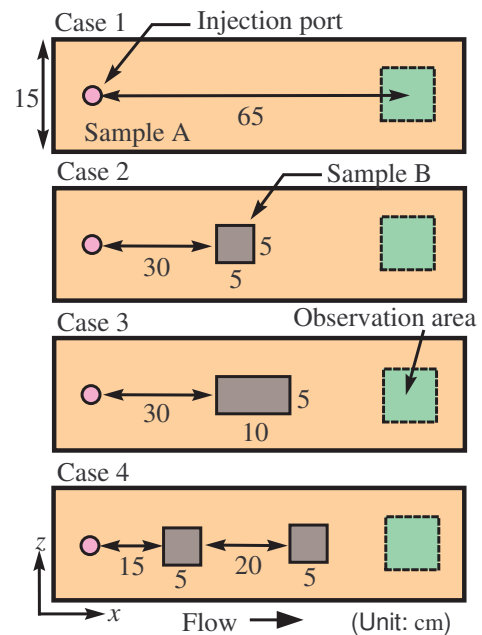


図 2 : 二次元の実験装置概略

Schematic diagram of 2-D experimental setup.

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

により表される．ここに， x と y は座標， i と j は空間次数である．本実験では，色素濃度と明度の変換関数を求めていることから，空間モーメント量は

$$M_{ij}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(x, z) I(x, z, t) x^i z^j dx dz \quad (5)$$

により算出した．ここに $U(x, z)$ は単位ピクセル面積， $I(x, z, t)$ はピクセル明度である．空間 2 次モーメントを用いて，分散長を

$$\alpha(\xi_c) = \left(\frac{M_{20}}{M_{00}} - \frac{M_{10}^2}{M_{00}^2} \right) / 2\xi_c \quad (6)$$

により求めた．ここに， ξ_c は初期の色素分布の重心位置から該当時刻の色素分布の重心位置までの距離である．

4. 結果と考察

4.1 一次元の溶質輸送実験

一次元の溶質輸送実験では円筒カラム内に同一の試料を均質に充填して粗粒媒体内における分散性を評価した．各試料とも水位差を管理し，動水勾配は 0.1 に設定しており，流れが定常状態となった後に NaCl 水溶液を注入した．実験結果から得られた平均粒径と分散長の関係を図 3 に示す．試料 A と試料 B の結果に加えて，粒径の異なる他試料の結果を併記している．試料の平均粒径の増加に伴い分散長の値は増加しており，分散長の粒径への依存が確認できる．試料の粒径が大きい場合，粒径の小さい試料に比べて粒子をより大きく迂回して溶質の輸送距離に差が生じるため粗粒媒体での分散長が増加したと考えられる．

4.2 二次元の溶質輸送実験

二次元の溶質輸送実験では比較的粒径の小さい試料で構成された地盤に局所的に粗粒媒体が配置された場合での地盤全体の分散性を評価した．一次元の実験と同様に動水勾配を 0.1 に設定している．また，図 4 には Case 3 の溶質画像を例として示しており，画像の溶質の挙動から粗粒媒体に流れが集中しているとわかる．さらに，実験結果から推定された各条件における分散長の値を表 2 に示す．Case 3 と Case 4 では時間モーメント法と空間モーメント法の間で推定値に差異が生じているものの，2 つの推定方法とも試料 B の配置されていない Case 1 において分散長が最大値となっている．一次元の実験における結果から局所的に配置された試料 B 内では分散長が増加している一方で，図 4 の溶質画像における試料 B を出た溶質が入り口付近とは対照的に流れと垂直方向に拡がっていることから推察されるとおり，試料 B の下流側における試料 A との境界面にて透水性の差から流れがせき止められることで溶質の流れ方向への収縮が生じたと考えられる．これより，試料 B と試料 A の境界面における溶質の拡がりを抑制する影響が試料 B 内における分散長増加の影響を上回ったために粗粒媒体を有しない地盤にて分散長が最大となったと考えられる．

5. 結論

本研究では，粗粒媒体を用いた一次元と二次元の溶質輸送実験を実施して分散性を評価した．一次元の実験から地盤を構成する試料の粒径が分散長に影響すると確認されたものの，二次元の実験では，分散長の増加が顕著となる粗粒媒体を局所的に配置したケースの方が配置していないケースに比べて分散長が減少した．この要因として，輸送経路の長くなる粗粒媒体内では分散長が増加するものの，粗粒媒体の下流側における境界面にて流れがせき止められ溶質の拡がりが抑制されたためであると考えられる．

今後は，配置する粗粒媒体の形状や大きさを変化させることで亀裂を模擬した実験を実施するなど，より多くのデータを蓄積して自然条件に近い状況における溶質輸送特性の定量化を課題とする．

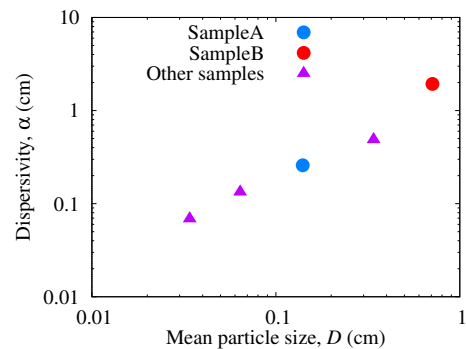


図 3 : 平均粒径と分散長の関係
Relationship between mean particle size and dispersivity.

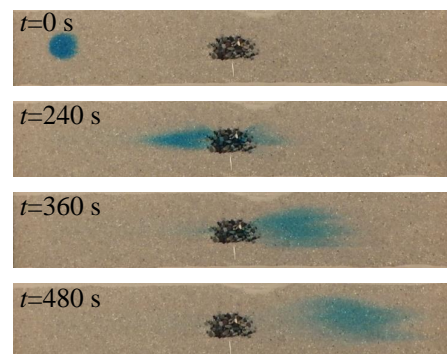


図 4 : Case 3 の溶質の経時変化
Time series change of solute in Case 3.

表 2 : 各ケースの分散長
Dispersivity of each case.

	時間 モーメント法 (cm)	空間 モーメント法 (cm)
Case 1	1.78	1.76
Case 2	1.20	1.28
Case 3	1.29	0.58
Case 4	1.44	0.60

参考文献 : 1) Qian, J., Zhan, H., Chen, Zhou. and Ye, Hao.: *J. Hydrol.*, 399, 246–254, 2011. 2) Flury, M. and Flüher, H.: *J. Environ. Qual.*, 23, 1108–1112, 1994. 3) Pang, L., Goltz, M. and Close, M.: *J. Contam. Hydrol.*, 60, 123–134, 2003. 4) Fernández-García, D., Illangasekare, T.H. and Rajaram, H.: *Adv. Water Resour.*, 28, 745–759, 2005.