

成層多孔質媒体における溶質輸送現象の実験的検討 Laboratory Experiments on Solute Transport in Stratified Porous Media

○倉澤智樹*・鈴木麻里子*・井上一哉*
Tomoki Kurasawa, Mariko Suzuki and Kazuya Inoue

1. 緒論

実地盤に存在する透水係数の不均質性は、地下水によって輸送される溶質を空間的に拡大させる。特に、地下水の流れ方向へ比較的大きく拡がる特徴を有しており¹⁾、この点を定量的に理解することは地下水質を管理する上で極めて重要である。本研究では、不均質場のうち成層構成に焦点を当て、ラボレベル試験によって溶質の拡大現象を定量評価した。

2. 成層多孔質媒体における溶質輸送実験

本実験では、図1に示す高さ80 cm、幅200 cm、奥行き3 cmの実験装置内に透水係数が0.325 cm/sの試料を水中充填しつつ、高さ32 cm、幅180 cm、奥行き3 cmの空間に成層地盤を構成した。なお、成層地盤の上下端には、透水係数が0.00481 cm/sの試料を充填し、不透水層を形成した。成層構成は図2に示す2種類の異なる透水係数の土質試料が交互に積み重なる2つのモデルCase 1とCase 2を対象とした。Case 1とCase 2は2種類の試料における透水係数差がそれぞれ5.3倍と1.6倍である。また、透水係数が0.167 cm/sの試料のみの均質場も実験対象とし、空間的に透水係数の変動性の無い浸透場における溶質輸送現象も捉えた。装置の水平方向の両端に設置した定水頭タンクを用いて透水場に動水勾配を与え、定常流状態を形成した後、青系色素 Brilliant Blue FCF を初期濃度 0.2 mg/cm³ に調整した色素水溶液を用いて溶質輸送実験を開始した。このとき、図1に示す a から h 点の 8 点に 20 cm³ の色素水溶液をパルス注入し、溶質輸送を時系列で撮影した。

3. 溶質挙動の定量化

色素濃度とピクセル明度の関係を予め導出し、溶質輸送状況を撮影した画像から色素分布の空間モーメント量 M_{ij} を算出した¹⁾²⁾。

$$M_{ij}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, z, t) x^i z^j dx dz \quad (1)$$

ここに、 x と z は座標、 t は時間、 i と j は各軸の空間次数、 $I(x, z, t)$ はピクセル明度である。(1)式を用いて、流れ方向、つまり、 x 軸方向に対する溶質の重心位置 x_G および溶質分布のばらつきを表す重心周りの空間2次モーメント σ^2 を求めた。

$$x_G(t) = \frac{M_{10}(t)}{M_{00}(t)}, \quad \sigma^2(t) = \frac{M_{20}(t)}{M_{00}(t)} - x_G^2(t) \quad (2)$$

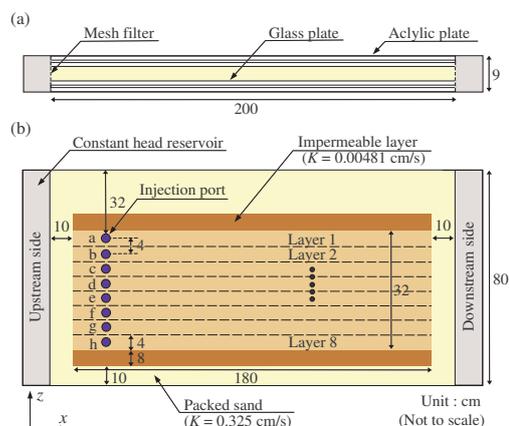


図1：実験装置の概略：(a) 平面図，(b) 断面図
Schematic of the tank: (a) top and (b) front views.

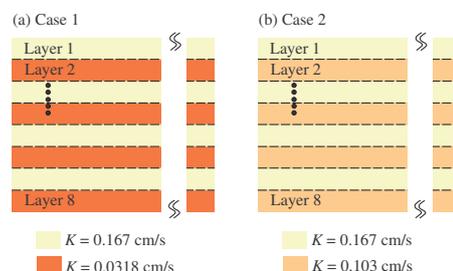


図2：対象の成層地盤：(a) Case 1, (b) Case 2
Stratified porous media: (a) Case 1 and (b) Case 2.

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

キーワード：成層地盤，溶質輸送，ラボレベル試験

(2) 式の σ^2 は溶質の拡大状況の大局的指標である。一方、地下水質の管理上、最も速く輸送されるフロント部と最も遅く輸送されるリア部のような局所的な輸送状況も重要となる²⁾³⁾。この観点から、フロント部とリア部における代表の輸送距離として、輸送距離の大きい側から累積質量が5%に達する距離 x_5 と95%に達する距離 x_{95} を算出し、定量評価した。

4. 結果と考察

4.1 重心周りの空間2次モーメント

輸送距離に対する σ^2 の結果を図3に示す。輸送距離の大きい部分において、均質場と成層構成である Case 1, 2 の間に1オーダー以上の差が生じている。均質場では溶質分布を拡大させる因子が多孔質媒体中のミクロな間隙構造のランダム性のみである一方、成層構成ではこれに加えて、浸透場内の透水係数差も影響する。この結果、成層構成の方が大きく推定されたと考えられる。また、成層構成の Case 1 (赤色) と Case 2 (緑色) の間にも差異が生じている。ここで、差異の大きさを詳細に評価するため、類似した輸送距離ごとに Case 1 から Case 2 の推定値を除き、それらの値の平均値をとると3.33であった。試料の透水係数差は Case 1 が5.3倍、Case 2 が1.6倍であり、両ケースの透水係数差の比をとると $5.3/1.6 = 3.31$ であることを踏まえると、成層地盤の透水係数差と流れ方向への溶質拡大は密接に関係していると考えられる。

4.2 フロント部・リア部の輸送状況

Case 1 と Case 2 の x_5 , x_{95} の結果をそれぞれ図4と図5に示す。図において、網掛け部分の上端が x_5 、下端が x_{95} を示す。また、参考として、赤色のラインで重心の輸送距離も示している。網掛けの幅、つまり、フロント部とリア部の幾何距離は Case 2 と比べると Case 1 の方が大きいことが確認できる。4.1節で述べたように Case 1 の方が Case 2 よりも透水係数の差異が大きく、この点がフロント部・リア部の輸送距離の幅にも影響したと考えられる。

5. 結論

本研究では、成層モデルを対象として、ラボレベルの溶質輸送実験を用いた溶質の拡大度合いの定量評価を実施した。結果として、溶質分布のばらつきを表す重心周りの空間2次モーメントおよび溶質のフロント部とリア部の間の幾何距離は、透水係数差が大きい試料で構成された成層地盤において比較的大きく推定された。

参考文献: 1) Freyberg, D.L.: A natural gradient experiment on solute transport in a sand aquifer 2. Spatial moments and the advection and dispersion of nonreactive tracers, *Water Resour. Res.*, 22(13), pp.2031–2046, 1986. 2) 倉澤智樹・井上一哉: 溶質のマクロ分散現象に及ぼす物理的不均質場のアップスケール効果, *土木学会論文集 A2 分冊 (応用力学)*, 75(2), I.93–I.104, 2019. 3) Fernández-García, D. and Gómez-Hernández, J.J.: Impact of upscaling on solute transport: Traveltimes, scale dependence of dispersivity, and propagation of uncertainty, *Water Resour. Res.*, 43, W02423, 2007.

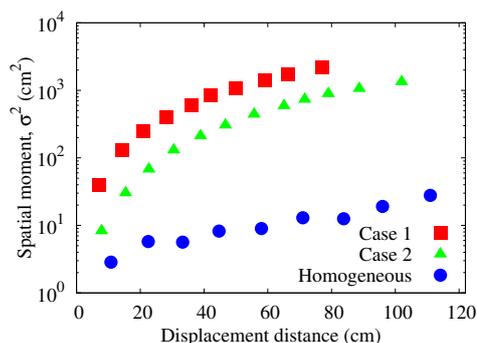


図3: 重心周りの空間2次モーメント σ^2 Comparison of the second spatial moment.

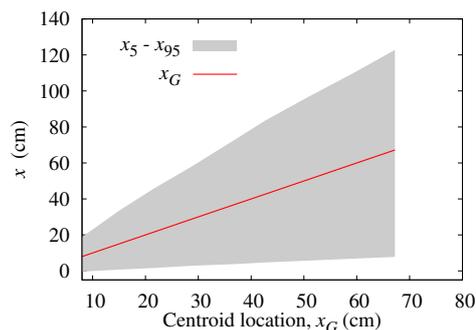


図4: Case 1における x_5 と x_{95} の結果 Evolution of x_5 and x_{95} (Case 1).

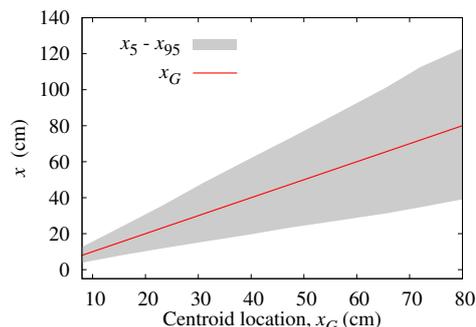


図5: Case 2における x_5 と x_{95} の結果 Evolution of x_5 and x_{95} (Case 2).