

不均質透水場における溶質のマクロ分散現象とスケール依存性の定量化

神戸大学大学院農学研究科	正会員	井上 一哉
大阪府庁	正会員	藤原 隆之
神戸大学大学院農学研究科	学生会員 ○	倉澤 智樹
神戸大学大学院農学研究科	正会員	田中 勉

1. 結論

地下水中の溶質マクロ分散現象は、透水係数の空間分布に応じた場の物理的不均質性に大きく依存する現象である¹⁾。場の不均質性と溶質分散特性、スケール依存性に関わる定量化手法は発展途上の段階にある。本研究では、地球統計学に基づくラボレベル溶質輸送実験を通じて、マクロ分散現象、ならびに、場の不均質性と溶質分散の関係を定量化した。

2. 不均質地盤における溶質輸送実験

本実験では、表 1 に示す 5 種類の土質試料を用いて不均質透水場を形成した。図 1 に示す高さ 100 cm、幅 100 cm、奥行き 3 cm の実験装置内に試料 K4 を水中充填しつつ、高さ 45 cm、幅 80 cm、奥行き 3 cm の空間に 5 種類の試料をブロック状に配置した。試料の配置は、透水係数の対数正規性と相関長 5 cm の指数型バリオグラム仮定に基づく Block Kriging²⁾ にて確率統計的に定め、高さ 5 cm、幅 5 cm、奥行き 3 cm のブロックを所定の位置に充填した。透水係数分布の幾何分散、すなわち不均質度は 1.15 であり、図 2(a) に示す試料構成である。溶質のマクロ分散挙動を比較するため、図 2(b) と図 2(c) に示す同一の不均質度を有する不均質透水場、さらには試料 K5 のみの均質場を実験対象とした。

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/cm^3 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。図 1 に示す a から e 点の一つに 20 cm^3 の色素水溶液をパルス注入し、溶質分布の時系列変化をデジタル撮影した。この過程をすべての点に対して繰り返した。

3. 溶質分散の推定方法

色素濃度とピクセル明度の関係を予め導出し、撮影画像から色素分布の空間モーメント量 M_{ij} を時系列で算出した。

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

ここに、 x と z は座標、 t は時間、 i と j は各軸の空間次数、 $H(x, z)$ は 1 ピクセル面積、 $I(x, z, t)$ はピクセル明度である。また、空間モーメントを用いて、マクロ縦分散長 A_L とマクロ横分散長 A_T を求めた³⁾。

$$A_L = \frac{M_{20}M_{00} - M_{10}^2}{2\xi_c M_{00}^2}, \quad A_T = \frac{M_{02}M_{00} - M_{01}^2}{2\xi_c M_{00}^2} \quad (2)$$

表 1：土質試料の物理特性一覧

試料	平均粒径 (cm)	均等係数 (-)	透水係数 (cm/s)
K3	0.145	2.01	1.47
K4	0.081	1.65	0.751
K5	0.048	1.34	0.224
K6	0.030	1.31	0.101
K7	0.011	1.25	0.0334

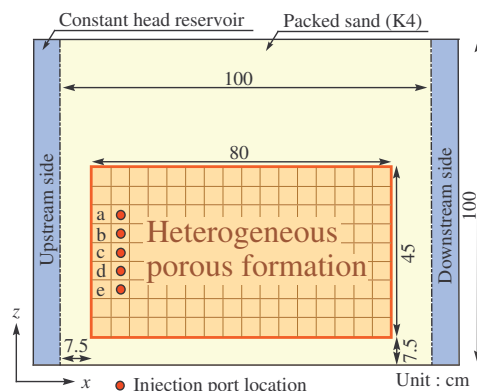


図 1：溶質輸送実験装置の概略

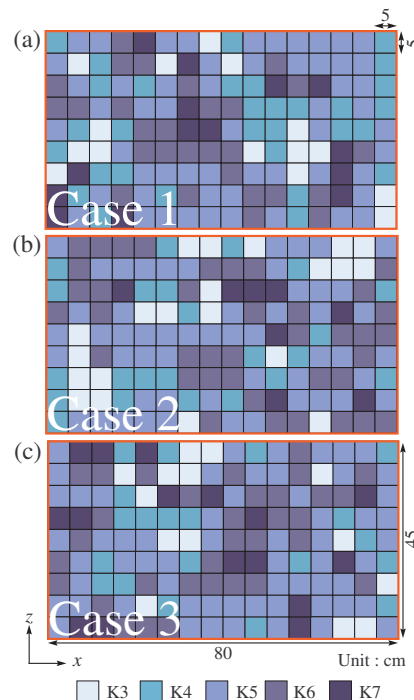


図 2：不均質ケース 1～3 の試料構成

キーワード マクロ分散，空間モーメント法，スケール効果，不均質性

連絡先 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1 神戸大学大学院農学研究科 Tel: 078-803-5853

ここに, ξ_c は初期の色素分布の重心から該時刻の色素分布の重心までの距離である.

4. 結果と考察

4.1 マクロ分散長の推定結果とアンサンブル評価

初期位置 a~e の各点を起点とした溶質輸送に対するマクロ縦・横分散長の推定結果を図 3 に示す. 溶質の初期配置に応じて縦・横マクロ分散長の推定値は異なり, 最大で 1 オーダー以上の差異が生じている. 初期位置に応じて溶質の輸送経路となる透水係数の分布状態は局所的に異なり, 分散挙動が変化することで, マクロ分散長の推定値の差異につながったと考えられる.

不均質場の分散を評価する際, 溶質が対象場全体を移動する状態が理想的であるものの, 線状や面状の溶質注入は点状の注入に比べると難しい. その点を踏まえて, 溶質を 5 点同時注入した際のマクロ縦分散長の推定値と点状注入の結果をアンサンブル平均した結果を図 4 に示す. 5 点同時注入の結果とアンサンブル平均の結果は概ね一致しており, 溶質の点状注入でもアンサンブル評価することで対象場全体のマクロ縦分散長を推定できる可能性を示唆している. また, 図 4 に併記した均質地盤の結果に比べて, マクロ分散性は 2 倍から 10 倍大きく, 透水係数分布の影響が分散の拡大として反映されている.

4.2 不均質度に関する新たな評価手法⁴⁾

不均質度に応じたマクロ分散のスケール依存性を定量化するため, 図 5 に示すように溶質が通過した範囲を対象領域として画像から抽出することで, 不均質度を定義する方法を考案した. すべての実験ケースに対して, マクロ縦・横分散長の推定値と不均質度 $\sigma_{\ln K}^2$ の関係を既存の経験式¹⁾とともに図 6 に示す. 図中のプロットは, 各実験で最大の輸送距離となる色素分布より得られた局所的不均質性の値とマクロ分散長の値である. 図より, 推定結果は経験式と乖離しておらず, 一定の妥当性を有していると判断される. また, 透水係数の不均質性に対するマクロ分散長の依存性が確認できる. すなわち, 透水係数分布のバラツキが溶質のスケール効果を生み出す主要因と言える.

5. 結論

本研究では, 溶質分散と不均質性の関係をラボレベルにて検討した. 溶質輸送過程では局所的不均質性の影響を受けるものの, アンサンブルにより場全体の分散性を概ね評価できることを示した. また, 溶質輸送経路を追跡することで, 不均質度に対するマクロ分散長のスケール依存特性を定量化した. さらに, 本研究にて推定したマクロ分散長の値は類似した規模の研究例と比較して良好な推定結果であることがわかった.

参考文献: 1) Tompson, A.F.B. and Gelhar, L.W.: Numerical simulation of solute transport in three-dimensional, randomly heterogeneous porous media, *Water Resour. Res.*, 26(10), pp.2541-2562, 1990. 2) Deutsch, C.V. and Journel, A.G.: *GSLIB: Geostatistical software library and user's guide*, Oxford University Press, 340p., 1992. 3) 井上一哉・小林晃・鈴木克季・竹之内亮・田中勉: 色素トレーサと空間モーメント解析を用いたマクロ分散長推定法, *水工学論文集*, 55, pp.613-618, 2011. 4) 井上一哉・藤原隆之・倉澤智樹・田中勉: 中規模溶質輸送実験による不均質多孔質体内の溶質マクロ分散現象と局所的不均質性の定量化, *土木学会論文集 A2 分冊 (応用力学)*, (投稿中).

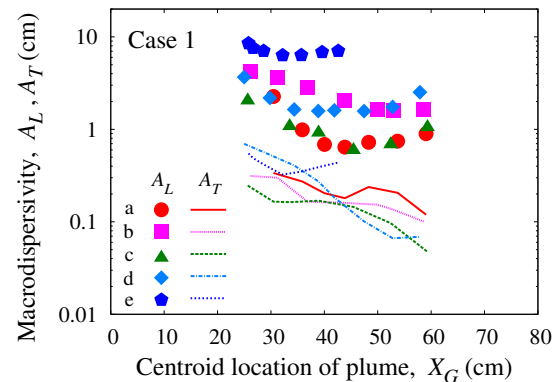


図 3: マクロ縦・横分散長の推定結果

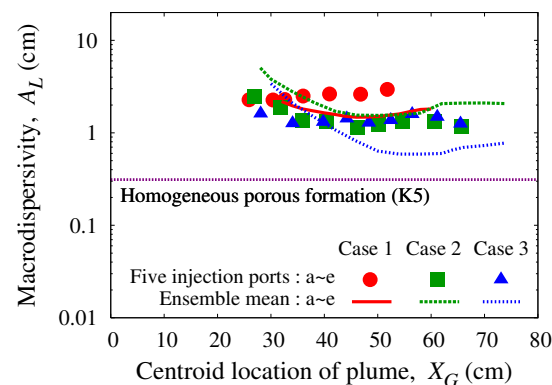


図 4: 5 点同時注入と 1 点のアンサンブル平均

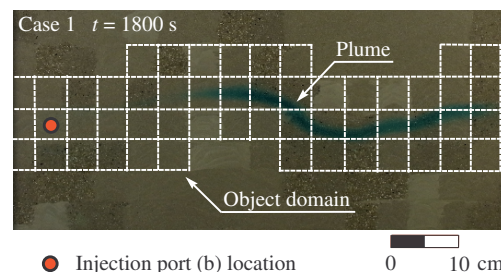


図 5: 不均質度の評価方法

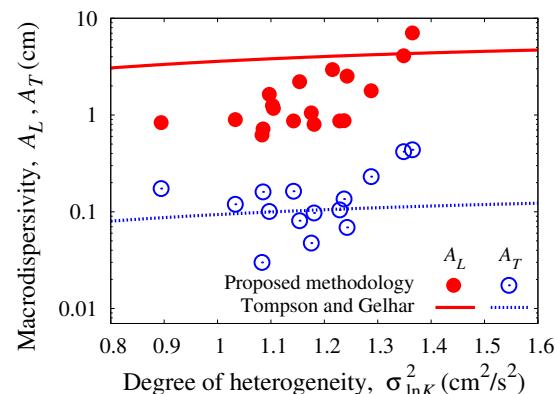


図 6: 不均質度とマクロ分散長の関係