

溶質のマクロ分散性に与える空間相関性の影響に関する実験的検討
 Experimental study of the impact of correlation scale of solute macrodispersion phenomena

小尾 泰輝*・井上 一哉**・○松浦 聖弥***・鈴木 麻里子** 田中 勉**
 Yasuteru Kobi, Kazuya Inoue, Masaya Matsuura, Mariko Suzuki and Tsutomu Tanaka

1. 緒論

帯水層内の溶質の分散現象は、土粒子間隙の流速変化に起因するマイクロ分散現象と透水係数の空間分布に起因するマクロ分散現象に大別される。マクロ分散現象は透水係数の空間相関性や不均質性に対する強い非線形性を内包することから、定量化の難しい課題であり、有益な知見に乏しい¹⁾。本研究では、空間相関性に着目して、地球統計学に基づく室内溶質輸送実験によりマクロ分散現象に対する空間相関性の影響を定量評価した。

2. 不均質地盤の生成と溶質輸送実験

本実験では、図1に示す高さ80 cm、幅200 cm、奥行き3 cmの実験装置を用いた。不均質場を作成するため、高さ72 cm、幅180 cm、奥行き3 cmの空間に、透水係数の自然対数値 $\ln K$ が -5.33 から -0.94 の範囲にある24種類の土質試料を1辺3 cmのセル状に1440個配置した。また、透水係数分布の対数正規性と5 cm, 9 cm, 17 cmの相関長 λ に対応する3種類の透水係数分布をBlock Kriging²⁾により決定した。図2に実験対象となる不均質場を示す。土質試料を水中充填した後に、動水勾配を与えて、流下方向が x 軸の正方向になる定常流状態を形成した。また、青色色素 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2の3種類の不均質場に対して、図1に示すF列の11点の注入孔を開始地点とし、1点あたり 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撮影した。また、定水頭タンク の操作により、流下方向が x 軸の負方向になる定常流状態を形成し、R列の注入孔を開始地点とする溶質輸送実験も実施した。

3. 空間モーメント法によるマクロ分散長の推定方法

Case 1 に対する溶質挙動の一例を図3に示す。時系列画像から溶質に対応する各ピクセルの明度を抽出することにより空間モーメント M_{ij} を導出した。

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

ここに、 t は時間、 S は1ピクセルの面積、 B はピクセル明度、 i と j は空間次数である。空間モーメントからマクロ縦分散長 A_L とマクロ横分散長 A_T を推定した。

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

ここに、 ξ_c は色素分布の重心の平均移動距離である。

4. 結果と考察

4.1 マクロ分散長の推定結果

Case 1 の溶質輸送距離に応じたマクロ縦・横分散長の推定結果を図4に示す。マクロ縦分散長は増加傾向を示しており、溶質の輸送距離の増加に伴うマクロ縦分散長の増加、つまり、スケール依存性が捉えられている。また、注入列によりマクロ縦・横分散長の推定結果の推移に差異が生じており、マクロ縦分散長は最大で約2倍の差となっている。この点は、図3に示すように、局所的な低透水領域により溶質は x 軸および z 軸方向に拡大し、同一地盤においても異なるマクロ分散性が得られたと考えられる。つまり、局所的な透水性の違いから生じる輸送経路の変化に起因したマクロ縦・横分散の変動特性が示されている。

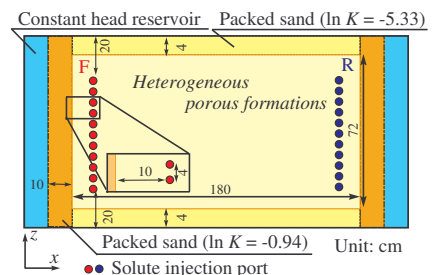


図1：溶質輸送実験装置の概略

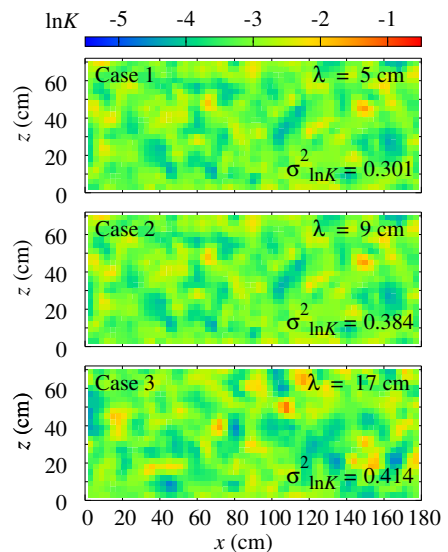


図2：実験対象の不均質場ケース

* 奈良県庁：Nara Prefecture.

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

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

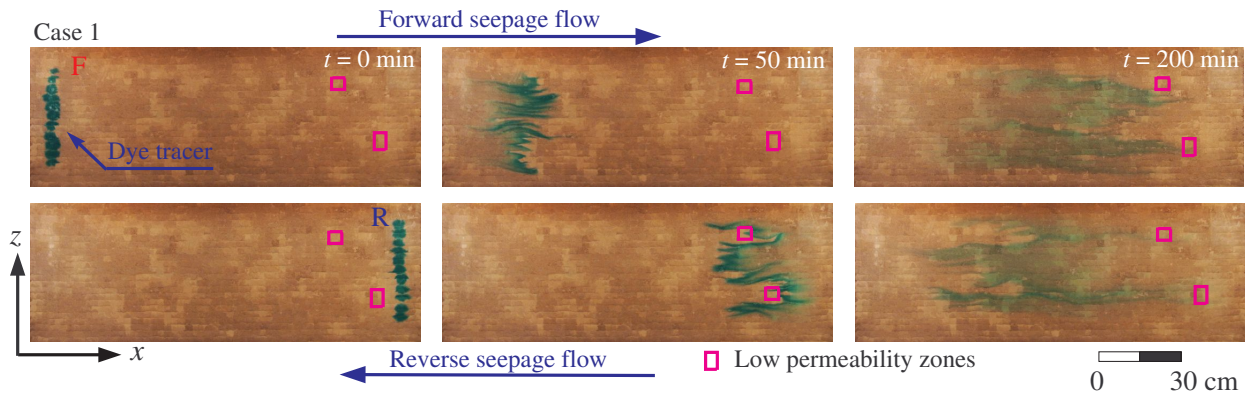


図 3 : Case 1 における溶質輸送の例. 赤枠は低透水領域を示す.

4.2 アンサンブル平均によるマクロ分散長

同一の空間相関性を有する地盤のマクロ分散現象を検討するため、アンサンブル平均による推定を検討した。アンサンブル平均をとる際には、既定の x 座標に溶質の重心位置が到達した時点のマクロ分散長の値を注入列ごとに推定した。既定の x 座標に応じたマクロ分散長がプロットされていない場合は、対象座標の前後にある 2 つの値を線形補間することで求めた。F 列と R 列で得られたマクロ縦・横分散長の値をアンサンブル平均した結果を図 5 に示す。相関長の増大に応じてマクロ縦・横分散長の推定値は増加傾向にあり、他の研究例³⁾と一致する結果が得られている。これは、透水係数の相関性が高い場では、相関性の低い場よりも透水係数の高い領域から徐々に低い領域へ変化する点に起因すると考えられる。つまり、相関性の低い場では、低透水領域から高透水領域までの距離が短い一方で、相関長が高い場ほど低透水領域から高透水領域までの移行距離も長くなり、溶質が拡大しやすいと推測される。

4.3 単位相関長あたりのマクロ分散性

前節の結果より、輸送距離に応じてマクロ分散長に対する相関長の影響の増加が見られた。つまり、フィールドにおける透水係数の空間相関性による溶質の分散性への影響が示唆されている。そこで、フィールドスケールにおける溶質輸送現象に対する本実験結果の応用を検討するため、単位相関長あたりのマクロ分散性について考慮する。主たる地下水流れ方向への溶質の拡大度合いを吟味するため、溶質の輸送距離とマクロ縦分散長を相関長で正規化した結果を回帰曲線と併せて図 6 に示す。溶質の輸送距離と相関長の比が増加するにつれて、マクロ縦分散長と相関長の比の変化はすべての実験ケースで概ね一致している。つまり、単位相関長あたりの溶質分布の拡大度合いは同一である点が示されている。本実験の不均質地盤は中程度の不均質性であり、同程度の不均質性であればフィールドにおけるマクロ縦分散長も同様の傾向を示すと考えられる。

5. 結論

本研究では、不均質場を対象とした溶質輸送実験により輸送経路に応じたマクロ縦・横分散長の推移の差異を示した。また、相関性の増加に呼応したマクロ縦・横分散長の増加を定量化するとともに、単位相関長あたりのマクロ縦分散長は地盤の相関長に関わらず一致する結果を実験的に明らかにした。

参考文献 : 1) Citarella, D., Cupola, F., Tanda, M.G. and Zanini, A.: Evaluation of dispersivity coefficients by means of a laboratory image analysis, *J. Contam. Hydrol.*, 172, pp.10-23, 2015. 2) Deutsch, C.V. and Journel, A.G.: *GSLIB: Geostatistical software library and user's guide*, Oxford University Press, 340p., 1992. 3) Heidari, P. and Li, L.: Solute transport in low-heterogeneity sandboxes: the role of correlation length and permeability variance, *Water Resour. Res.*, 50, pp.8240-8264, 2013.

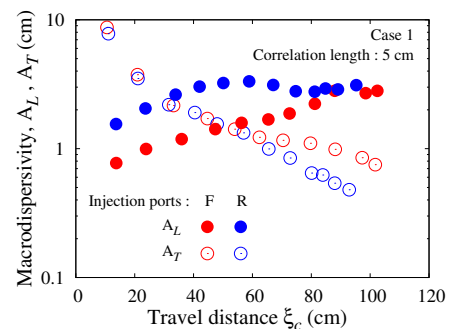


図 4 : Case 1 のマクロ縦・横分散長の変化

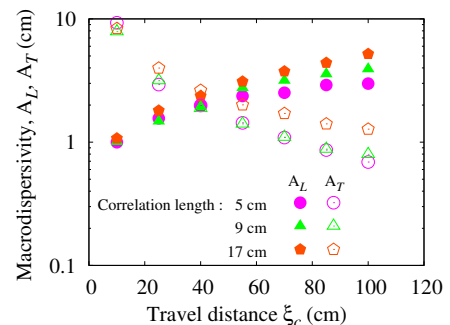


図 5 : アンサンブル平均による推定結果

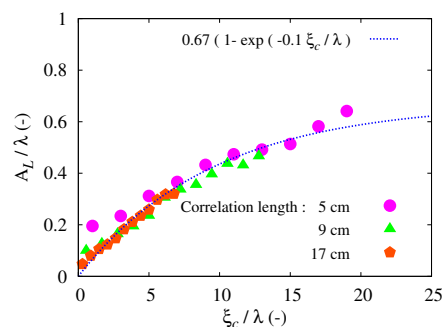


図 6 : 単位相関長あたりのマクロ縦分散長