

中規模溶質輸送実験によるマクロ分散現象の評価

Intermediate-scale solute transport experiments for assessing macrodispersion phenomena

○ 小尾 泰輝*・井上 一哉*・田中 勉*

Yasuteru Kobi, Kazuya Inoue, Tsutomu Tanaka

1. 緒論

地下水の流れによって引き起こされる水溶性物質のマクロ分散現象は、溶質の移動距離および地盤内の透水係数の不均質性に依存する現象であり、ラボレベルおよびフィールド溶質輸送試験によって検討されている^{1),2)}。本研究では、地球統計学に基づくラボレベルの溶質輸送実験により、不均質地盤内のマクロ分散現象について、輸送過程にある溶質の輸送経路を評価し、溶質が通過した領域の特性について考察した。

2. 不均質地盤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の実験装置を用いた。不均質場を作製するため、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種類の土質試料をセル状に配置した。セルサイズは1辺3 cmとし、透水係数の対数正規性と相関長9 cmの条件下にて、図2に示す透水係数分布をBlock Kriging³⁾により決定した。また、流れの安定のため、不均質場の上下端に $\ln K$ が -5.33 の土質試料を充填した。

次に、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。また、表1に示す各ケースに合わせて定水頭タンクを操作し、動水勾配および流下方向を x 軸の正、あるいは負の方向に変化させ、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の11点の注入孔から同時に、1点あたり 20 cm^3 の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。

3. 空間モーメント法によるマクロ分散長の推定方法

画像データより抽出した色素分布の空間変動をもとに、マクロ縦・横分散長を同定するため、空間モーメント量 M_{ij} を導出した。

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

ここに、 x と z は座標、 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。空間モーメント量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。

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

ここに、 ξ_c は色素分布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と流速との関係

Case 1 と Case 2 における、溶質の重心移動距離に応じたマクロ縦・横分散長の変動結果を図3に示す。マクロ縦分散長の推定値は輸送距離に応じて徐々に増加しており、文献^{1),2)}からも妥当な結果といえる。輸送距離の増加に応じて異なる透水係数の領域を通過しつつ、地下水の主たる流れ方向へ溶質が分散している点を反映していると考えられる。一方で、マクロ横分散長の推定値は輸送距離に応じて減少している。マクロ横分散長は流れ方向に対して鉛直方向への溶質の拡大を示すため、マクロ縦分散長の推定値と比べて大きく増加しないといえる。次に、Case 1 と Case 2 の推定値を比較するとマクロ縦・横分散長ともに同一の推移が見られる。これは、溶質の主たる移動経路に及ぼす動水勾配の影響は小さいことに起因しており、この結果はマクロ分散現象の間隙構造、ならびに、透水係数分布への依存性を示している。

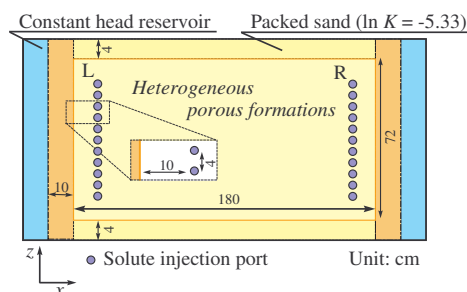


図1：溶質輸送実験装置の概略

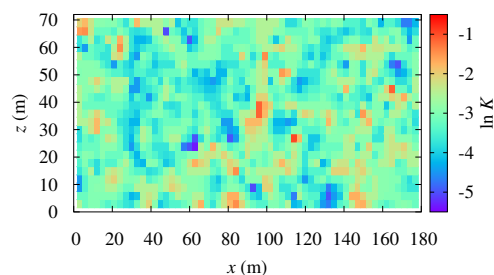


図2：実験対象の不均質場ケース

表1：実験ケース

ケース	Case 1	Case 2	Case 3
動水勾配	0.033	0.055	0.039
注入孔列	L	L	R

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

マクロ分散，不均質地盤，中規模溶質輸送実験

4.2 溶質輸送過程の透水係数分布

動水勾配はほぼ同じ条件にて、流下方向を反転させた Case 1 と Case 3 における溶質の重心移動距離に応じたマクロ分散長の推定値を図 4 に示す。Case 3 のマクロ縦・横分散長は Case 1 と似通った推移であるものの、マクロ縦分散長は Case 1 と比べて低い値で推移し、マクロ横分散長は溶質の重心移動距離が 60 cm に達するまで低い値をとっている。本研究では、図 2 に示すように、不均質地盤を用いて溶質輸送を実施しているため、溶質初期位置に依存して通過する地盤の領域に差異が生じる。よって、同一の不均質場であっても、異なるマクロ分散長の推定値が得られたと考えられる。

そこで、溶質が通過した領域を評価するため、図 5 に示すように、溶質が存在する範囲をすべてセル単位で抽出し、溶質の重心移動距離ごとに溶質が存在する領域の透水係数分布を求めた。Case 1 および Case 3 の溶質の重心移動距離に応じたヒストグラムをそれぞれ図 6 に示す。溶質の重心移動距離が 60 cm までの領域の透水係数分布において、Case 1 は Case 3 と比べて透水係数の低いセルの割合が多く存在している。透水係数の低いセルが存在する場合、溶質の一部は低透水係数の領域を迂回する流路を通過すると考えられ、主たる流れ方向に対して垂直に溶質が拡大すると考えられる。また、低透水係数の領域に流入した溶質は滞在時間が長くなる一方で、透水係数の高いセルに流入した溶質は短時間で地盤内を通過する。よって、Case 3 と比べて、Case 1 の溶質は地下水の主たる流れ方向および垂直方向に拡大しているため、マクロ縦・横分散長ともに大きく推定されたと考えられる。

次に、溶質の重心移動距離が 60 cm 以上の領域の透水係数分布を比較すると、輸送距離が増加するにつれて、Case 3 では平均的な透水係数 ($\ln K = -3.11$) のセルが多くなるのに対して、Case 1 は平均的な透水係数のセル、ならびに透水係数の高いセルに分布形態が分散している。これは、図 2 に示すように、 $x = 0$ cm から $x = 90$ cm の領域には低透水係数が集中し、 $x = 90$ cm 以降は高透水係数のセルが集中して分布していることから、それぞれのケースにおいて、より透水係数の高い領域を通過したためと考えられる。不均質性の観点から考えると、Case 3 では比較的不均質性の低い領域を溶質が通過することで、溶質の拡大が抑制された一方で、Case 1 は相対的に溶質は拡大しやすく、マクロ縦分散長の推定値に影響したと推定される。

5. 結論

本研究では、不均質地盤を対象とした中規模溶質輸送実験を実施し、マクロ縦・横分散長を推定した。結果として、溶質の輸送距離の増加とともに、マクロ縦分散長の推定値は増加した。マクロ横分散長の推定値は減少したものの、動水勾配の変化によるマクロ分散長への影響は見られなかった。また、溶質が通過した透水係数分布を評価することにより、同一の不均質場においても、マクロ分散長の推定結果に差異が生じた。これは、輸送過程において溶質が透水係数の高い領域を選択的に通過しているためと考えられる。

参考文献：1) Gelhar, L.W., Welty, C. and Rehfeldt, K.R.: A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers, *Water Resour. Res.*, 28, pp.1955-1974, 1992. 2) McNeil, J.D., Oldenborger, G.A. and Schincariol, R.A.: Quantitative imaging of contaminant distributions in heterogeneous porous media laboratory experiments, *J. Contam. Hydrol.*, 84, pp.36-54, 2006. 3) Deutsch, C.V. and Journel, A.G.: *GSLIB: Geostatistical software library and user's guide*, Oxford University Press, 340p., 1992.

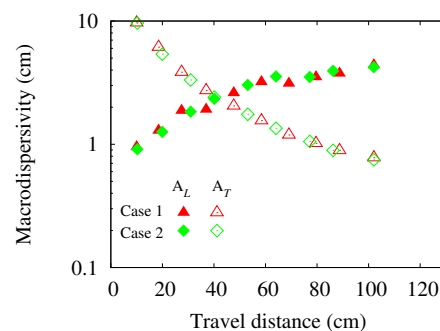


図 3 : Case 1 と Case 2 のマクロ分散長の比較

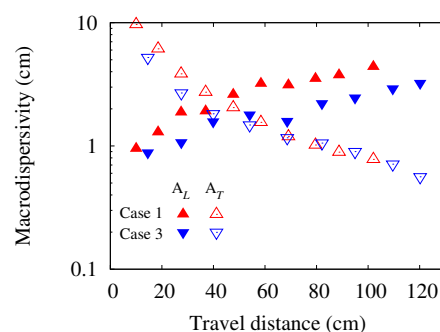


図 4 : Case 1 と Case 3 のマクロ分散長の比較



図 5 : 溶質通過領域の概念図

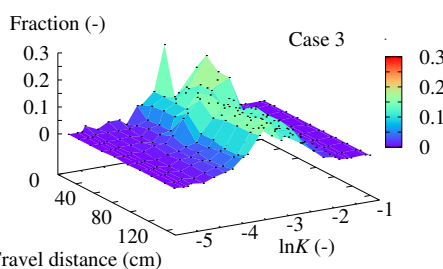
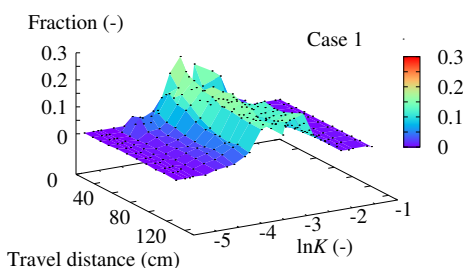


図 6 : 重心移動距離ごとの透水係数分布