

中規模溶質輸送実験による物理的不均質場のアップスケールと  
溶質マクロ分散の関係

Intermediate-Scale Solute Transport Experiments for Assessing the Relation between Upscaling  
of Physical Heterogeneity and Macrodispersion of Solute

○ 井上一哉\*・倉澤智樹\*\*・田中勉\*  
Kazuya Inoue, Tomoki Kurasawa and Tsutomu Tanaka

1. 結論

地下水中の溶質輸送現象を再現したり、予測したりする場合、実地盤の透水係数分布の解像度をモデル地盤に反映させることは物理的に困難である。そのため、アップスケールにより解像度を低くしたモデル地盤を構築することになるものの、アップスケールの度合いに応じた透水係数分布の変化と溶質のマクロ分散現象の関係を実験的に明らかにした研究はない。そこで本研究では、ラボレベルの溶質輸送実験を通じて、二軸方向のマクロ分散性を推定することにより、透水係数分布のアップスケールがマクロ分散現象へ及ぼす影響を定量化した。

2. 不均質地盤における溶質輸送実験

本実験では、図1に示す高さ100 cm、幅100 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、透水係数の自然対数值  $\ln K$  が  $-1.18$  の土質試料を水中充填しつつ、高さ48 cm、幅72 cm、奥行き3 cmの空間に  $\ln K$  が  $-4.19$  から  $-0.94$  の範囲にある18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6 cmの条件下にて、図2(a)に示す透水係数分布をBlock Kriging<sup>1)</sup>により決定した。図2(a)をReference fieldとして、隣接セルの透水係数を幾何平均してアップスケールしたUpscale A、さらにアップスケールしたUpscale Bをそれぞれ図2(b)と(c)に示す。加えて、単独試料のみを充填した均質場も実験対象とした。

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  $0.2 \text{ mg/cm}^3$  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~eの5点同時に、1点あたり  $20 \text{ cm}^3$  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、 $\xi_c$  は色素分布の平均移動距離である。

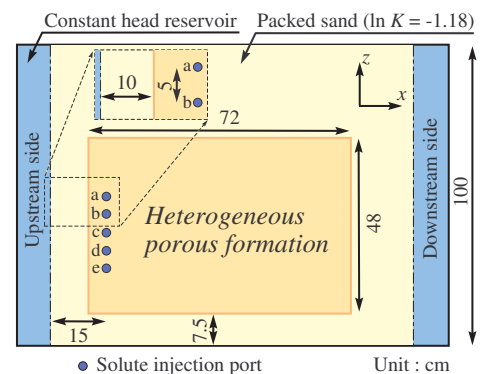


図1：溶質輸送実験装置の概略

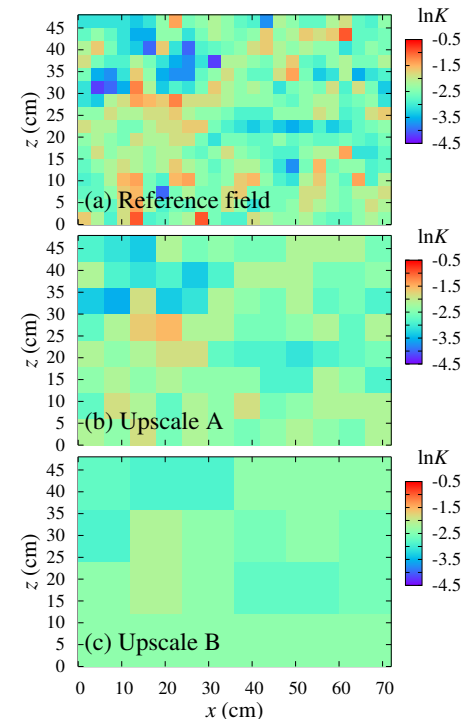


図2：実験対象の不均質場ケース

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

\*\* (独) 水資源機構：Japan Water Agency.

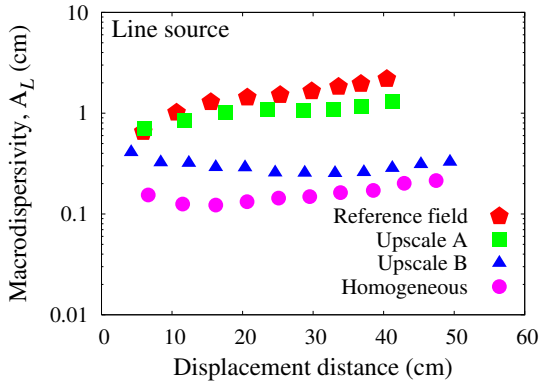


図3：マクロ縦分散長の推定結果

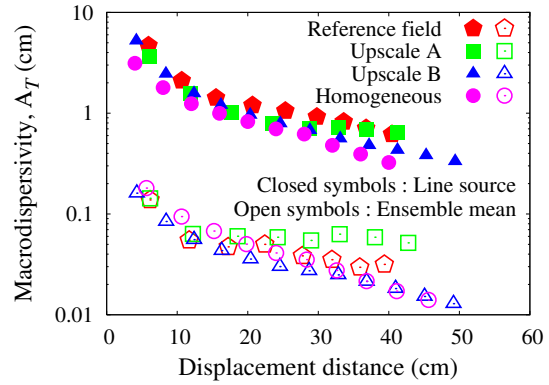


図4：マクロ横分散長の推定結果

#### 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

溶質の移動距離に応じたマクロ縦分散長の変動結果を図3に示す。アップスケールするとマクロ縦分散長は減少しており、Reference field に対して Upscale A は約 2 分の 1、均質場は約 10 分の 1 に低下している。この点はアップスケールを重ねるごとに透水係数のばらつき度合い（不均質度）が減少することに起因すると考えられ、アップスケールすると溶質の拡がりを過小評価することを示唆している。また、不均質度の比較的高い Reference field と Upscale A においては、溶質の移行距離の増加に伴うマクロ分散長の増加、すなわち、スケール依存性が顕著に現れている。

溶質の移行距離に応じたマクロ横分散長の推定結果を図3と同じシンボルで図4に示す。マクロ縦分散長よりも大きく推移する結果は縦方向への分散性が卓越する溶質輸送現象に適合しない結果である。本研究では、場全体を溶質が通過するように流れに対して鉛直方向へ線状に初期の溶質を配置しており、線状配置がマクロ横分散長の過大評価につながったと考えられる。そこで図5に示すように、a～eの各点からの点状輸送を追加実験し、マクロ横分散長をアンサンブル推定する方法を考案した。図4に併記したアンサンブル推定結果を見ると、マクロ縦分散長と比べて低く推移しており、大幅な改善が図られている。

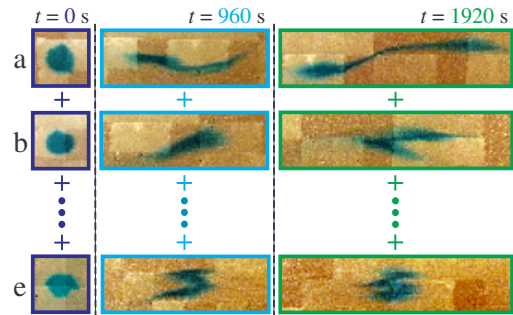
##### 4.2 分散長と不均質度

推定結果の妥当性を検証するため、マクロ縦・横分散長と不均質度の関係を文献値<sup>2)3)4)</sup>とともに図6に示す。推定結果は文献値と概ね一致しており、妥当性を有していると判断される。また、アップスケールに伴う不均質度の減少とともにマクロ縦分散長は低下する点を確認できる。一方、マクロ横分散長のアップスケールに対する感度が低い点の特徴的であり、z方向流速成分の寄与の低さを反映していると推測される。

#### 5. 結論

本研究では、透水係数分布のアップスケールによるマクロ分散性への影響を実験的に明らかにした。アップスケールに応じてマクロ縦分散長は減少し、マクロ横分散長は変化しないことがわかった。また、マクロ横分散長のアンサンブル推定方法を考案し、良好な結果を得た。

参考文献：1) Deutsch, C.V. and Journel, A.G.: *GSLIB: Geostatistical software library and user's guide*, Oxford University Press, 340p., 1992. 2) Greiner, A., Schreiber, W., Brix, G. and Kinzelbach, W.: Magnetic resonance imaging of paramagnetic tracers in porous media: quantification of flow and transport parameters, *Water Resour. Res.*, 33(6), pp.1461-1473, 1997. 3) 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. 4) Nick, H.M., Schotting, R., Gutierrez-Neri, M. and Johannsen, K.: Modeling transverse dispersion and variable density flow in porous media, *Transp. Porous Med.*, 78, pp.11-35, 2009.



Ensemble means at  $t = 0, 960$  and  $1920$  s.

図5：アンサンブル平均の概念図

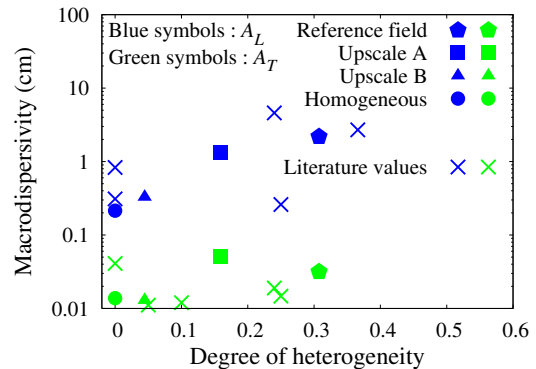


図6：マクロ縦・横分散長と不均質度の関係