

空間モーメント法による成層地盤のマクロ分散推定 Identifying Macrodispersion in Stratified Formations Using Spatial Moment Approaches

○ 倉澤 智樹*・井上 一哉*・藤原 隆之*・田中 勉*
Tomoki Kurasawa, Kazuya Inoue, Takayuki Fujiwara and Tsutomu Tanaka

1. 結論

自然地盤は透水係数の不均質性を有しており、透水係数の空間分布に応じたマクロ分散現象¹⁾により、溶質移行距離とともに汚染範囲が拡大する。マクロ分散は溶質移行のスケールと不均質性に大きく依存するため、汚染予測や汚染浄化対策を実施する上で重要な因子である。本研究では、成層地盤において溶質輸送実験を実施することで、マクロ分散のスケール依存性に加えて、マクロ分散と不均質性の関係について考察した。

2. 中規模溶質輸送実験

2.1 実験試料と実験方法

本実験では、表 1 に示す透水係数の異なる 4 つの土質試料を用いた。図 1 に示す実験装置内に、試料 K4 を充填しつつ、Layer 1 から Layer 4 に充填する試料を変えることで成層地盤を形成した。図 2 に示すように、Layer 2 と Layer 3 で透水係数が異なる 2 層地盤、図 3 に示すように Layer 1 から Layer 4 で透水係数が異なる 4 層地盤を対象とした。さらに比較のため、単一の土質試料のみを用いた均質地盤についても実験対象とした。図 1 の b~d 点、あるいは、a~e 点から初期濃度 0.4 mg/cm^3 の色素水溶液を 1 つの注入点あたり 20 cm^3 注入し、一定の時間間隔で色素水溶液の挙動を撮影した。以下では、浸透場の層構成ケースを 2 層地盤では K4-5、4 層地盤では K3-4-5-7 のように記す。

2.2 マクロ分散長の推定

溶質輸送を捉えた画像データから色素水溶液の空間分布を抽出し、時系列で空間モーメント 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、 x と z は座標、 t は時間、 S は 1 ピクセルの面積、 B はピクセル強度、 i と j は空間次数である。空間モーメントを基に、マクロ縦分散長 A_L とマクロ横分散長 A_T の時系列変動を次式より推定した。

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

ここに、 ξ_c は色素分布の平均移動距離である。

3. 結果と考察

3.1 マクロ分散長のスケール依存性

2 層地盤におけるマクロ縦分散長とマクロ横分散長の結果を各土質試料の均質地盤の結果とともに、それぞれ図 4 と図 5 に示す。図 4 を見ると、2 層地盤では溶質移行距離の増加に伴い、マクロ縦分散長は増加している。これは浸透場を構成する土質試料の透水性の差異により、流速分布の幅が大きくなることで溶質の拡がりが増加するためである。

表 1：土質試料の物理特性

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
K7	0.011	1.25	0.0334

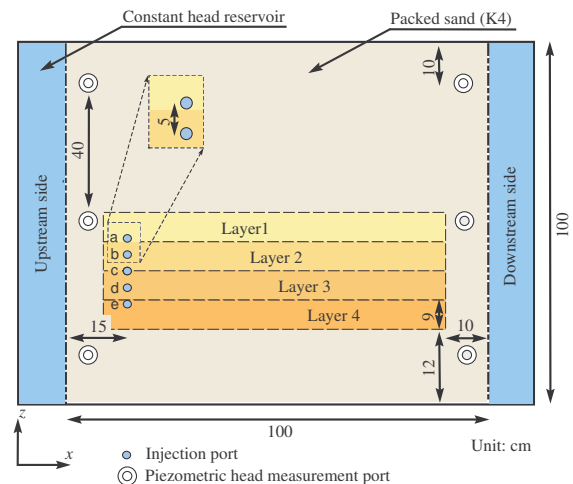


図 1：実験装置の概略

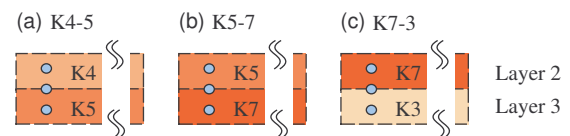


図 2：2 層地盤の層構成

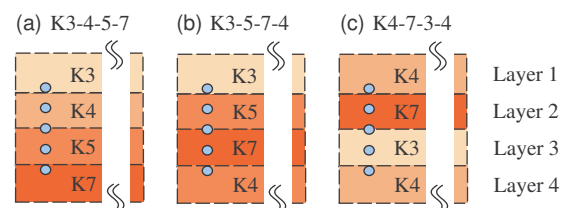


図 3：4 層地盤の層構成

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

空間モーメント法、マクロ分散、成層地盤、不均質性、中規模溶質輸送実験

一方、図5では、マクロ横分散長はすべての浸透場において減少傾向にあることがわかる。本実験では、 $x=0$ の軸上に注入点を並べていることから、初期配置時点における重心から x 方向への溶質分布が大きくなるため、過大評価されているマクロ横分散長が輸送とともに本来の値、すなわち間隙内の流速分布に由来する分散による値に漸近している過程を示している。

4層地盤におけるマクロ縦分散長の推定結果を各試料の均質地盤の結果とともに、図6に示す。4層地盤においては、縦分散長と横分散長ともにケース間で近い値を示しており、K4-7-3-4地盤の縦分散長は他の2ケースと比べると移行距離に対する縦分散長の上昇率が低くなっている点が特徴的である。これはK4-7-3-4地盤が同じ透水係数の試料K4を2層充填しているのに対して、他の2ケースにおける浸透場の構成は全層で透水係数が異なるためである。また、K3-4-5-7地盤とK3-5-7-4地盤の推移が近い結果となっている。これらの2ケースは同じ試料を用いて層の構成を変化させており、この結果より層構成の差によってマクロ縦分散長は変化しないと言える。さらに、成層地盤のマクロ縦分散長は均質地盤に比べて1オーダーほど高い値でかつ、増加しながら推移している。2層地盤と同様に、この推移がマクロ縦分散長のスケール依存性の発現を表している。

3.2 不均質性とマクロ縦分散長

場の不均質性とマクロ縦分散長の関係を検討するため、図7に対象場の透水係数分布の幾何分散、すなわち不均質性に対するマクロ縦分散長の結果を示す。また、比較として、Mercado²⁾の理論解を併記する。不均質性の増加に呼応して、本実験のマクロ縦分散長は増加しており、Mercadoの解より比較的低い結果である。Mercadoの理論解では他の層への溶質移動は考慮しておらず、各層の溶質輸送は移流のみによるものと仮定している。一方、本実験のように、実際の輸送現象は分散の影響を受けるため、 A_L は低い結果となったと考えられる。また、不均質性の増加とともにマクロ縦分散長は増加し、かつ、漸近的に収束する傾向を有していることは、他の研究でも報告されており¹⁾³⁾、妥当な実験結果と考えられる。

4. 結論

本研究では、成層地盤を対象として中規模溶質輸送実験を実施することで、マクロ縦分散長のスケール依存性およびマクロ縦分散長と不均質性の関係について検討した。その結果、本実験スケールにおいてマクロ縦分散長のスケール依存性が確認された。また、不均質性が増加するとともにマクロ縦分散長は増加し、また、漸近的に収束する結果を得た。

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(7), pp.1955-1974, 1992. 2) Mercado, A.: The spreading pattern of injected water in a permeability saturated aquifer, *Artificial Recharge and Management of Aquifers*, IAHS Publ., 72, pp.23-36, 1967. 3) Fiori, A., Boso, F., Barros, F.P.J., Bartolo, S.D., Frampton, A., Severino, G., Suweit, S. and Dagan, G.: An indirect assessment on the impact of connectivity of conductivity classes upon longitudinal asymptotic macrodispersivity, *Water Resour. Res.*, 46, W08601, 2010.

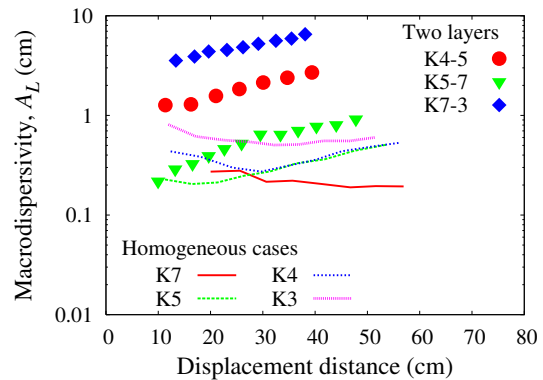


図4：2層地盤のマクロ縦分散長推定結果

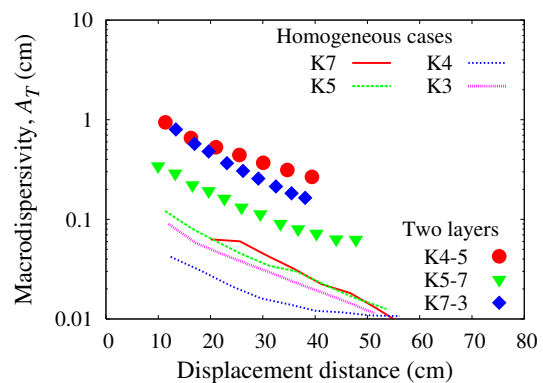


図5：2層地盤のマクロ横分散長推定結果

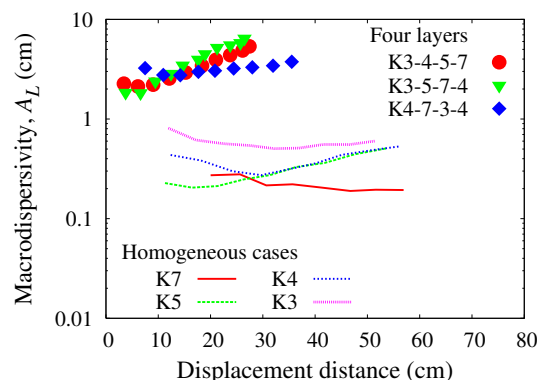


図6：4層地盤のマクロ縦分散長推定結果

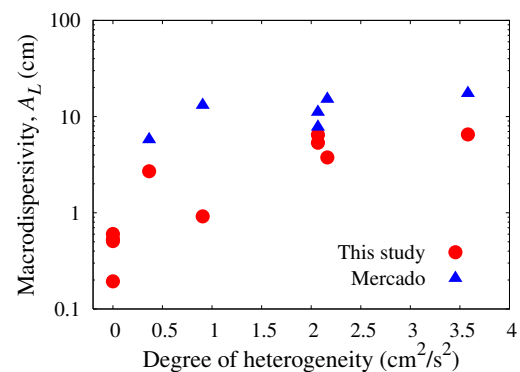


図7：マクロ縦分散長と不均質性の関係