

# ランダム不均質場におけるマクロ分散現象に及ぼす空間相関性の影響

Effect of correlation length of random heterogeneity field on macrodispersion

○ 竹内 佑衣\*・鈴木 麻里子\*・井上 一哉\*

Yui Takeuchi, Mariko Suzuki and Kazuya Inoue

## 1. 緒論

地下水中の溶質は、移流分散現象によってその存在範囲を拡げる。特に、溶質の拡がりに大きく寄与するマクロ分散現象は、不均質透水場における流速分布に起因して生じ、実測は難しい。本研究では、透水係数分布の空間相関長がマクロ分散現象に与える影響について定量評価するため、ランダム不均質透水場を作製し、溶質輸送実験を実施した。

## 2. 実験概要および解析方法

本実験では、図1に示す幅200 cm、高さ80 cm、奥行き3 cmの実験水槽を使用した。幅180 cm、高さ60 cmの空間に不均質場を形成すべく、コレスキー分解を伴う方法<sup>1)</sup>によりランダム性を有する透水係数分布を決定した。このとき、透水係数の相関長 $\lambda$ は領域サイズを考慮して5 cmおよび17 cmとした。生成した透水係数分布を図2に示す。25種類の土質試料を1辺3 cmの立方体格子状に1200個配置して図2に示す不均質場透水場を作製した。定水頭タンクを調整して動水勾配 $I$ を0.025または0.050に制御した。本実験では、パターンLとして図1のL列にある11点の注入孔に初期濃度 $0.2 \text{ mg/cm}^3$ のBrilliant Blue FCF水溶液を1点あたり $20 \text{ cm}^3$ 注入し、溶質輸送挙動を撮影した。また、パターンRとして流向を逆流させてR列に水溶液を注入することでマクロ分散現象の相違を評価した。溶質挙動の一例を図3に示す。

取得画像のピクセル明度から空間モーメント量 $M_{ij}$ とマクロ縦分散長 $A_L$ 、マクロ横分散長 $A_T$ を

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

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

により算出した。ここに、 $t$ は時間、 $H$ はピクセル面積、 $B$ はピクセル明度、 $i$ と $j$ は空間次数、 $\xi_c$ は溶質重心の輸送距離である。

## 3. 結果と考察

### 3.1 分散長の推定結果

マクロ縦分散長の結果を図4と図5に示す。マクロ縦分散長は溶質の輸送距離の増加に伴って拡大するスケール依存性<sup>2)</sup>が見られ、同時に相関長5 cmのランダム場のパターンLとパターンRのマクロ縦分散長に差異が生じた。相関長5 cmの透水

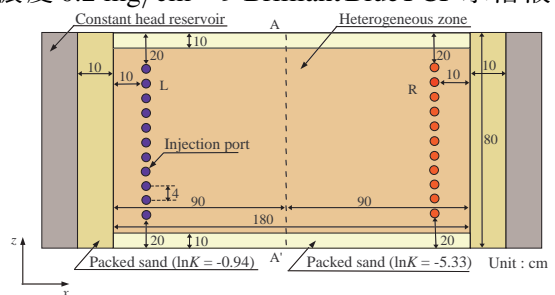


図1：実験装置の概略図

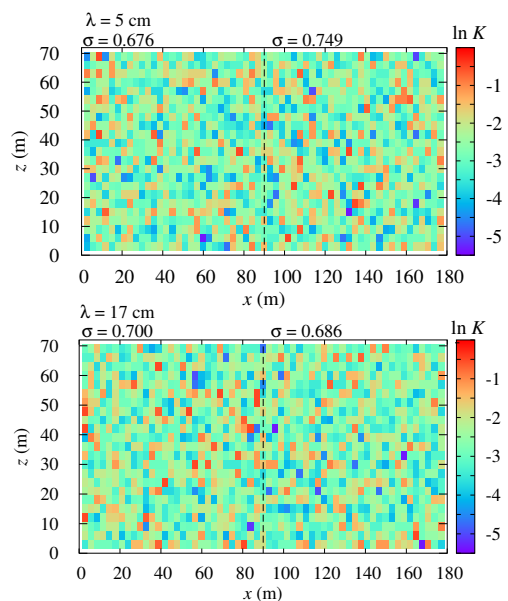


図2：1200個のセルから成るランダム不均質場

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

マクロ分散，相関長，溶質輸送実験，ランダム場

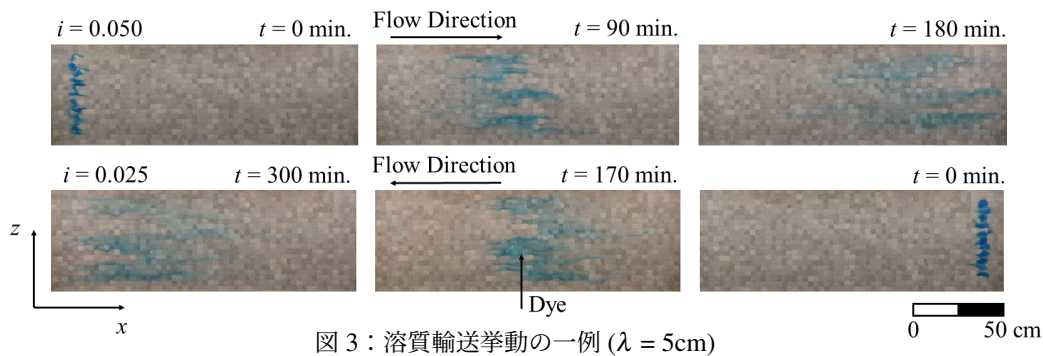


図3：溶質輸送挙動の一例 ( $\lambda = 5\text{cm}$ )

係数分布では、図1に示すA-A'線より左側と右側の不均質度 $\sigma$ は0.676と0.749であり、両者の差は0.073、相関長17 cmでは左右の差は0.014である。したがって、輸送領域の不均質度はマクロ分散現象への感度の大きい因子と言える。

一方、図6にはマクロ横分散長の結果を示す。マクロ横分散長は相関長 $\lambda$ に依存せず、溶質の輸送距離の増加に伴って減少する。これは、 $z$ 軸方向の流速成分の相対的な小ささに起因した分散性の低さが一要因である。図4~図6より動水勾配に起因するマクロ分散長の差異はいずれの実験ケースにおいても生じていない。マクロ分散現象は間隙構造と透水係数分布に依存し、動水勾配に依らない<sup>2)</sup>点は妥当な結果と言える。

### 3.2 相関長の分散長への影響

分散長に及ぼす相関長の影響を検討するため、各相関長で得られた4つの分散長の推移を輸送距離に応じてアンサンブル平均した。相関長ごとに得られたアンサンブル平均と輸送距離の関係を図7に示す。相関長5 cmと17 cmのアンサンブル平均は一致し、マクロ分散現象に及ぼす空間相関性の影響は小さいと言える。これは、本実験にて採用した透水係数分布のランダム性が高く、空間相関性の効果を弱めていることに起因すると推測される。

### 4. 結論

本研究では、溶質輸送実験により透水係数分布の空間相関性とマクロ分散現象の関係を定量化し、不均質度はマクロ分散現象に強く影響する点、透水係数分布のランダム性は空間相関性の効果を弱める可能性がある点を明らかにした。

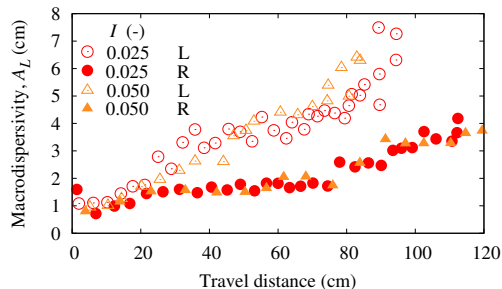


図4：マクロ縦分散長 ( $\lambda = 5\text{cm}$ ) の変動結果

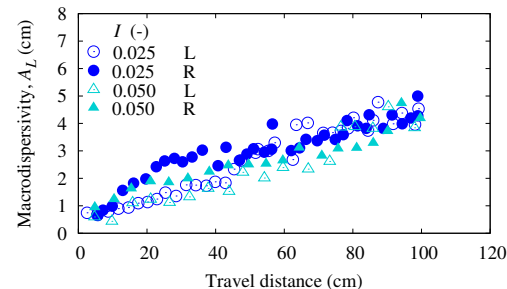


図5：マクロ縦分散長 ( $\lambda = 17\text{cm}$ ) の変動結果

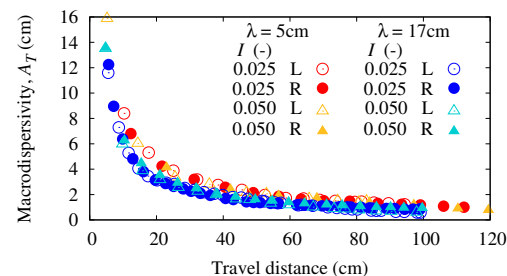


図6：マクロ横分散長の変動結果

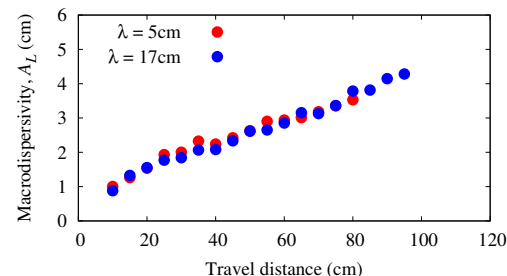


図7：相関長の異なる実験ケースの比較

参考文献：1) Kasama, K. and Whittle, A. J.: Bearing capacity of spatially random cohesive soil using numerical limit analyses, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(11), pp.989-996. 2011. 2) Gelhar, L.W., Welty, C. and Rehfeldt, K.R.: A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers, *Water Resources Research*, 28, pp.1955-1974, 1992.

謝辞：本研究は、(一社)土地改良建設協会「2022年度国営事業地区等フィールド調査学生支援事業」による支援を受けました。