

移流分散現象に及ぼす物理的・化学的不均質性の影響 Effect of physical and chemical heterogeneity on advection-dispersion phenomena

○岡部 北斗*・鈴木 麻里子*・井上 一哉*
Hokuto Okabe, Mariko Suzuki and Kazuya Inoue

1. 緒論

帯水層の透水係数，マイクロ分散長と遅延係数は移流分散現象を左右する不均質因子である．移流分散の指標となるマクロ分散性と透水係数の空間分布の関係は明確に定量化されておらず，学術的な課題の1つである¹⁾．また，実測の難しいマイクロ分散長と遅延係数の不均質性の効果についても，知見に乏しい状況にある¹⁾．そこで本研究では，溶質輸送実験と数値解析により物理的・化学的不均質性と移流分散現象の関係を定量化した．

2. 溶質輸送実験と数値解析

2.1 不均質分布

本研究では，図1に示す幅200 cm，高さ80 cm，奥行き3 cmの装置にて溶質輸送実験を実施した．図1のzone 1に図2や図3に示すブロック状に粒径の異なる珪砂を充填し，物理的不均質因子の1つである透水係数のばらつきを考慮した．珪砂の粒径に応じて第2の物理的不均質因子であるマイクロ縦分散長，化学的不均質因子の遅延係数²⁾もばらついている．

各ブロックの透水係数，マイクロ縦分散長，遅延係数はそれぞれ定水位透水試験，カラム試験，吸着試験にて計測し，図2に示す数値を得た．図1のzone 2はzone 1と同じ配置であり，ケース名は総ブロック数を参照して，Case 20，Case 40と称する．両者の透水係数の不均質度 $\sigma_{\ln K}^2$ はともに0.743である．

2.2 実験方法と画像解析

本実験では，装置の左右に接続した定水頭タンクにて動水勾配を0.050に制御して浸透流を形成した．図1に示す11点の注入孔に初期濃度 0.2 mg/cm^3 のBrilliant Blue FCF水溶液を1点あたり 25 cm^3 注入し，溶質輸送挙動を撮影した．画像のピクセル値から空間モーメント量 M_{ij} とマクロ縦分散長 A_L を

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

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

にて求めた．ここに， t は時間， H はピクセル面積， B はR値， i と j は空間次数， ξ_c は輸送距離である．

2.3 数値解析方法

まず，FEM解析にて浸透流方程式を求解し，流速分布を求めた．次に，ランダムウォーク粒子追跡法

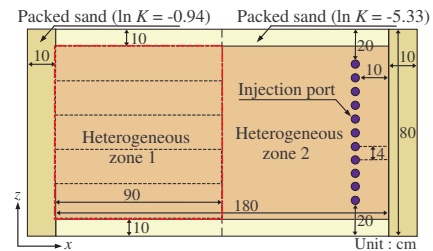


図1：溶質輸送実験装置の概略図
Fig.1 Overview of experiment apparatus

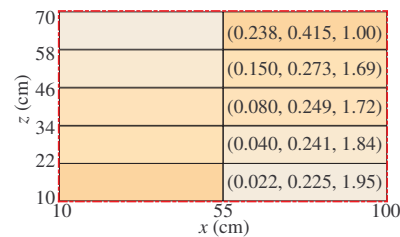


図2：Case 20の不均質分布．カッコ内は透水係数，マイクロ縦分散長，遅延係数を表す．
Fig.2 Heterogeneous distribution of Case 20

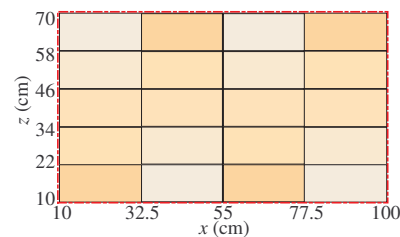


図3：Case 40の不均質分布
Fig.3 Heterogeneous distribution of Case 40

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

不均質性，マクロ分散，溶質輸送実験，ランダムウォーク粒子追跡法

(以下, RWPTと記す)にて溶質輸送を再現した.

解析過程の粒子の移動経路は, 粒子の位置ベクトル \mathbf{X}_p , 時間増分 Δt , 流速 \mathbf{v} , 分散係数テンソル \mathbf{D} , 遅延係数 R , 変位マトリクス \mathbf{B} , 正規乱数ベクトル Ξ を用いて, 式(3)で表される³⁾.

$$\mathbf{X}_p(t+\Delta t) = \mathbf{X}_p(t) + \frac{\mathbf{v} + \nabla \cdot \mathbf{D}}{R} \Delta t + \mathbf{B} \Xi \sqrt{\Delta t} \quad (3)$$

また, 粒子位置成分 $X_{p,i}$, 粒子群の重心位置 $X_{G,i}$, 時刻 t の粒子総質量 $m(t)$ と粒子総数 NP_t より, 空間モーメント S_{ij} とマクロ縦分散長 A_L を式(4)と式(5)にて求めた.

$$S_{ij} = \frac{1}{m(t)} \sum_{k=1}^{NP_t} \frac{m_p^k X_{p,i}^k(t) X_{p,j}^k(t)}{R(\mathbf{X}_p^k(t))} - X_{G,i}(t) X_{G,j}(t) \quad (4)$$

$$A_L(\xi_G(t)) = \frac{S_{11}(\xi_G(t))}{2\xi_G(t)} \quad (5)$$

3. 物理的化学的不均質性の効果

2つの実験ケースに対して, マクロ縦分散長の実験結果と数値解析結果を図4に示すと, 両者は一致していることがわかる. Case 20とCase 40の透水係数の不均質度は0.743で等しいものの, Case 40の方がマクロ縦分散長が小さい. これは, ブロック幅の縮小は水平方向への溶質伸展の抑制につながるためであり, 透水係数の不均質度のみで分散性は決まらないことを意味している.

そこで, ブロックスケールを変更したCase 10, 80, 160についてRWPTにより分散性を計算した. 図5に示すように, ブロック幅の縮小に伴ってマクロ縦分散長は低下する傾向にある一方で, Case 80と160はほぼ一致する結果が得られた. ブロック幅が縮小しても溶質伸展を際限なく抑制するわけではなく, 透水係数の不均質度に応じた漸近値が存在することを表している. この点を明らかにするため, ブロック幅の半分を見かけの相関長 λ と定義して, 見かけの相関長と最大マクロ縦分散長の関係を図6に示す. 図中,

ミクロ分散長と遅延係数の不均質性を考慮しない均質場, ならびに, 不均質度2.242の透水係数分布に対するRWPTの結果についてもプロットしている. ミクロ分散長と遅延係数の不均質性のマクロ縦分散長への影響は小さく, 対照的に透水係数の不均質性はマクロ縦分散長に顕著に影響している. また, 見かけの相関長が小さくなるにつれてマクロ縦分散長の値は透水係数の不均質度に応じた固有の値に漸近していくことがわかる.

4. 結論

本研究では, 溶質輸送実験と数値解析を通じて, 物理的化学的不均質性と移流分散現象の関係を定量化した. その結果, ミクロ分散長と遅延係数の不均質性の効果は小さいこと, 透水係数の不均質度のみでマクロ縦分散長は決まらないこと, 透水係数の不均質度に固有のマクロ縦分散長が存在することを明らかにした.

参考文献: 1) Marco, B. and Daniele, P.: *Water Resour. Res.*, 53, pp.4691–4708, 2017. 2) Flury, M. and Flühler, H.: *SSSAJ*, 59, pp.22–27, 1995. 3) Fernández-García, D. et al.: *Adv. Water Resour.*, 28(7), pp.745–759, 2005.

謝辞: 本研究は, (一社) 土地改良建設協会「2023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.

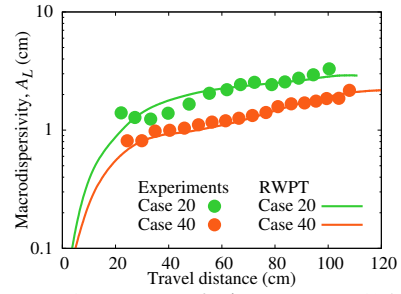


図4: 縦分散長の実験値と数値計算結果
Fig.4 Results of experiments and RWPT

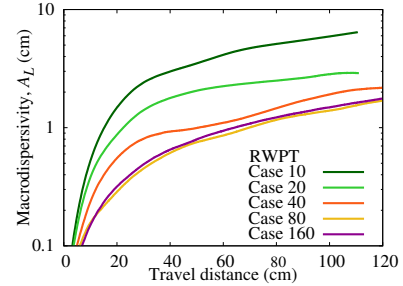


図5: ブロック数ごとの縦分散長比較
Fig.5 Comparison of dispersivity by Case

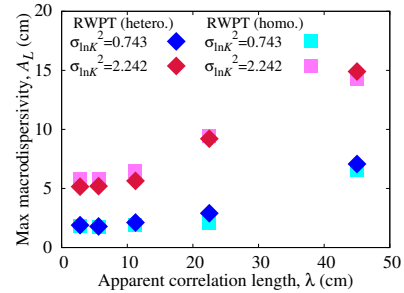


図6: 見かけの相関長と分散性の関係
Fig.6 The relationship between apparent correlation length and dispersivity