

多孔質体内における浸透流と溶質輸送の非線形性に関する実験的検討  
 Experimental studies on nonlinearity of seepage flow and solute transport in porous media

○ 北嶋 竜也 \* · 井上 一哉 \* · 鈴木 麻里子 \* · 田中 勉 \*  
 Tatsuya Kitajima, Kazuya Inoue, Mariko Suzuki and Tsutomu Tanaka

1. 結論

一般に、地下水流動は線形則であるダルシー則に従う一方で、高透水性多孔質体内や岩盤の亀裂内では非線形の非ダルシー流れとなる。非ダルシー領域における溶質輸送は異常輸送現象につながるものの、非ダルシー流れの形成機構や非ダルシー条件下の溶質輸送特性は十分に解明されていない。そこで本研究では、多孔質媒体を構成する土粒子の粒径に応じた非ダルシー流れの形成と分散性の変動について実験的に評価した。

2. 実験概要

本研究では、表 1 に示す平均粒径の異なる 5 種類の土質試料を用いた。試料ごとに図 1 に示す内径 5 cm、高さ 30 cm のアクリル製円筒カラムに水中充填し、既定の動水勾配条件を設定した。カラム実験では、流出流量  $Q$  と水温を測定し、流出流量をカラム断面積で除してダルシー流速  $v$  を求めた。また、カラム上端 2 cm の位置に設けた孔から初期濃度  $5.0 \text{ mg/cm}^3$  の NaCl 水溶液を注入し、下端 6 cm の位置に埋設した電圧センサにより、NaCl 濃度の時系列測定を実施した。

表 1: 試料の物性値

試料	平均粒径	土粒子密度	間隙率
(-)	(cm)	( $\text{g/cm}^3$ )	(-)
A	0.034	2.68	0.44
B	0.064	2.68	0.44
C	0.14	2.68	0.44
D	0.35	2.68	0.44
E	0.71	2.73	0.36

3. 時間モーメント法による分散長の推定

溶質輸送特性を示す 1 つの指標として分散長に着目し、計測した NaCl 濃度の経時変化に時間モーメント法<sup>1)</sup>を適用した。経時変化に対する  $j$  次標準化時間モーメント  $\mu_j$  は、

$$\mu_j = \int_0^\infty t^j c_m(\xi_P, t) dt / \int_0^\infty c_m(\xi_P, t) dt \quad (1)$$

にて表される。ここに、 $c_m$  は濃度、 $\xi_P$  は移行距離、 $t$  は時間である。また、 $j$  次標準化中心時間モーメント  $\mu'_j$  は、

$$\mu'_j = \int_0^\infty (t - \mu_1)^j c_m(\xi_P, t) dt / \int_0^\infty c_m(\xi_P, t) dt \quad (2)$$

にて定義される<sup>1)</sup>。観測点にて計測された破過曲線に基づいて  $\mu_j$  および  $\mu'_j$  を算定し、分散長  $\alpha$  を推定した。

$$\alpha(\xi_P) = \xi_P \mu'_2(\xi_P) / 2(\mu_1(\xi_P))^2 \quad (3)$$

4. 結果と考察

4.1 流れの非線形性に関する評価

動水勾配とダルシー流速の関係を試料ごとに図 2 に示す。試料 A や B では動水勾配に対するダルシー流速は線形に増加し、線形ダルシー則が成立していると考えられる一方で、粒径が大きくなるに従って微小ではあるものの増加に非線形性が表れている。図 2 の結果のみでは、非ダルシー流れに対する明確な判断は難しいため、非線形透水法則である Forchheimer 式

$$J = av + bv^2 \quad (4)$$

にて評価する。ここに、係数  $a$  と  $b$  は、ダルシー流速と動水勾配をフィッティングして求めた。式 (4) の右辺第 2 項と第 1 項の比を  $F = bv/a$  と定義して、ダルシー流速と  $F$  の関係を図 3 に示す。

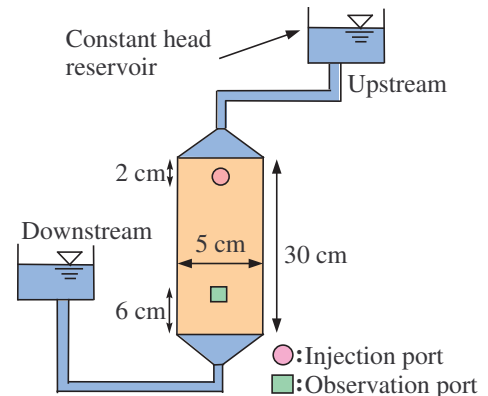


図 1: カラム実験装置の概略

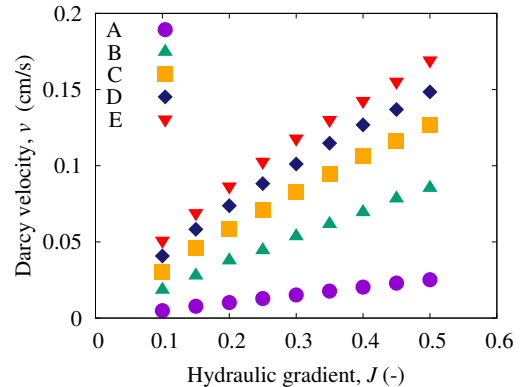


図 2: 動水勾配とダルシー流速の関係

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

非ダルシー流れ, Forchheimer 式, 分散長, ペクレ数

$F$  の値が 0.1 程度になると非線形効果を見逃すことが指摘されており<sup>2)</sup>、試料 C, D, E は 0.1 を上回る  $F$  の値であることから、流れは非ダルシーであると評価でき、粒径 1 mm 程度の粒子から成る多孔質媒体では、土粒子と流体の境界面に作用する摩擦力の影響が及ぶ範囲よりも流路を構成する間隙が粗大となるため非ダルシー流れに遷移すると推量される。

Forchheimer 式による非ダルシー流れの評価に関して整合性をとるため、流れの状態を表す無次元数であるレイノルズ数

$$Re = ud_m/\nu \quad (5)$$

によって評価する。ここに、 $u$  はダルシー流速を間隙率で除した実流速、 $d_m$  は平均粒径、 $\nu$  は動粘性係数である。平均粒径とレイノルズ数の関係を図 4 に示す。レイノルズ数の値が 1 以上になると流れが層流であっても線形関係が崩れ、非線形性が顕著になると指摘されており<sup>3)</sup>、試料 C, D, E では非ダルシー流れであると判断できる。 $F$  の値とレイノルズ数による評価は、非線形流れとなる状況として整合的であるため Forchheimer 式による非ダルシー流れの評価をするうえで有用であるといえる。

#### 4.2 非線形流れにおける分散性の評価

各試料の動水勾配に対する分散長の推移を図 5 に示す。ダルシー領域にある試料 A や B の分散長は直線状に増加するのに対して、非ダルシー領域にあるその他の試料は分散長の増加に非線形性が表れている。また、粒径の大きい試料ほど小さい動水勾配条件下で分散長の増加度合いは大きくなる傾向にあり、平均粒径に起因する非ダルシー流れによる分散性への影響が確認される。

溶質輸送特性を定量的に評価するため、ペクレ数

$$Pe = ud_m/D_d \quad (6)$$

により分散性を評価する。ここに、 $D_d$  は分子拡散係数である。ペクレ数と分散係数  $D_L = \alpha u$  を分子拡散係数で除した値の関係を図 6 に示す。また、既往研究による結果と本実験結果の近似曲線を

$$D_L/D_d = 3.1Pe^{1.1} \quad (7)$$

を図 6 に併記する<sup>4)-7)</sup>。本実験結果は既往の研究例と遜色なく表現できており、非ダルシー領域であるペクレ数の高い点においても式 (7) は十分に表現できている。よって、分散長の増加に非線形性が表れる非ダルシー領域においても、ペクレ数を用いた非線形形式を適用することで溶質輸送特性の評価が可能であるといえる。

#### 5. 結論

本研究では、カラム実験を通じて非ダルシー流れと溶質輸送特性について評価した。粒径の増加に呼応した動水勾配に対するダルシー流速の増加に非線形性が認められ、Forchheimer 式にて明確な非線形領域の判別ができた。また、レイノルズ数による流れ状態との比較から Forchheimer 式による評価の妥当性を確認できた。細粒媒体の分散長は流速依存性が低いのに対して、平均粒径 1 mm を超える粗粒媒体では分散長の非線形増加を確認できた。ペクレ数と分散係数の関係は非線形形式によって表現でき、流れが非ダルシーとなる高いペクレ数の領域での評価も可能であるとわかった。

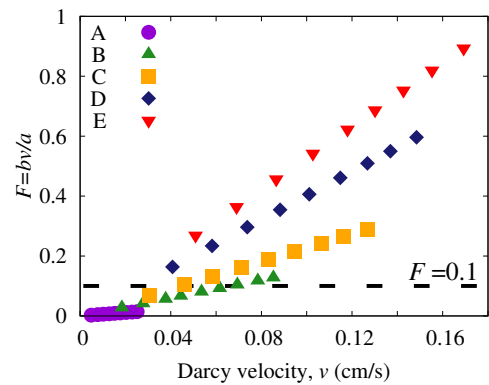


図 3：ダルシー流速と  $F = bv/a$  の関係

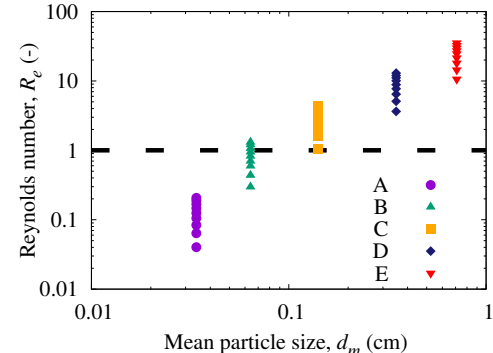


図 4：平均粒径とレイノルズ数の関係

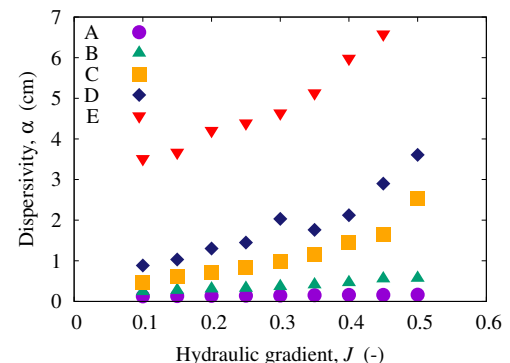


図 5：動水勾配と分散長の関係

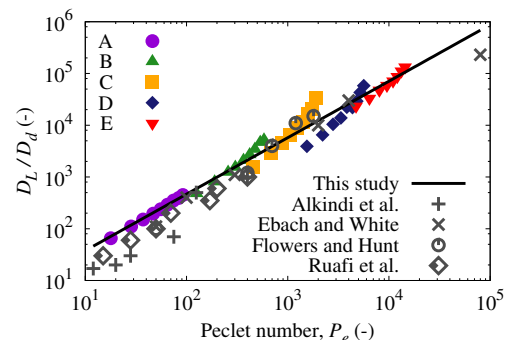


図 6：ペクレ数と分散係数の関係

参考文献：1) Pang, L., Goltz, M. and Close, M.: *J. Contam. Hydrol.*, 60, pp.123–134, 2003. 2) 吉岡真弓, 登坂博行：地下水学会誌, 52, 275–284, 2010. 3) 岩井卓, 登坂博行：地下水学会誌, 45, 279–298, 2003. 4) Alkindi, A.S., Al-Wahaibi, Y.M., Bijeljic, B. and Muggeridge, A.H.: *J. Contam. Hydrol.*, 120-121, 170–183, 2011. 5) Ebach, E.A. and White, R.R.: *AIChE J.*, 4, 161–169, 1958. 6) Flowers, T.C. and Hunt, J.R.: *Water Resour. Res.*, 43, W01407, 2007. 7) Rifai, M.N.E., Kaufman, W.J. and Todd, D.K.: *UC Berkeley, Inst. Eng.*, 1–157, 1956.