

## 非 Fick 輸送に関する実験的検討 Experimental Investigation on Non-Fickian Transport

○ 鈴木美妃\*・鈴木麻里子\*・井上一哉\*  
Miki Suzuki, Mariko Suzuki and Kazuya Inoue

### 1. 緒論

地下水流れにおける溶質の分散性は  $D = \alpha \cdot u^n$  による非線形式で表される<sup>1)</sup>。ここに、 $D$  は分散性を示す分散係数、 $\alpha$  は間隙構造に依存する分散長、 $u$  は実流速である。Fick 則に従う場合は  $n=1$  となる一方、粗粒媒体中や高透水性地盤では  $n \neq 1$  の非 Fick 輸送になり、溶質輸送挙動の把握を困難にしている。本研究では、粒径に応じた分散性の変動とべき数  $n$  に関する知見を得ることを目的として、カラム実験を実施した。

### 2. カラム実験概要

本実験では、表 1 に示す平均粒径の異なる 5 種類のケイ砂を用いた。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落下させることで各試料を充填し、所定の動水勾配の流れ場を形成した。速い流れ場の溶質輸送挙動を的確に捉えるため、 $0.2 \text{ mg/cm}^3$  の水溶性色素 Brilliant Blue FCF にて着色した  $5.0 \text{ mg/cm}^3$  の NaCl 水溶液を上流端から通水し、カラム下端に埋設した塩分センサにより NaCl 濃度の変化を観測することで、分散係数  $D$  を算出した。また、各試料の間隙構造を反映する分散長  $\alpha$  を推定するため、カラム上端 2 cm の位置に設けた孔から同濃度の NaCl 水溶液を  $20 \text{ cm}^3$  注入した。NaCl 水溶液の流出濃度変化から時間モーメント量<sup>2)</sup> を算定することで分散長  $\alpha$  を推定した。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 分散長 $\alpha$ の推定

分散長推定の一例として、試料 S5 におけるレイノルズ数と推定した分散長の関係を図 3 に示す。レイノルズ数は流れの状態を表す無次元数であり、 $Re = ud_{50}/\nu$  にて表現される<sup>3)</sup>。ここに、 $\nu$  は動粘性係数であり、本実験では計測流量を 15 度に温度補正しているため、 $1.14 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{min}$  とした。分散長は一定値で推移した後、レイノルズ数が 2 を超えると増加している。分散長は層流から乱流への遷移領域にて増加していることから、流れの影響を受けていると考えられ、間隙構造のみに依存する分散長は、乱流に遷移する前の 5 点の平均値  $\alpha = 0.35 \text{ cm}$  とする。

表 1: 試料の物性値  
Properties of the sand materials.

試料 (-)	平均粒径 (mm)	間隙率 (-)
S1	0.3	0.459
S2	0.6	0.451
S3	1.3	0.457
S4	2.0	0.451
S5	3.1	0.454

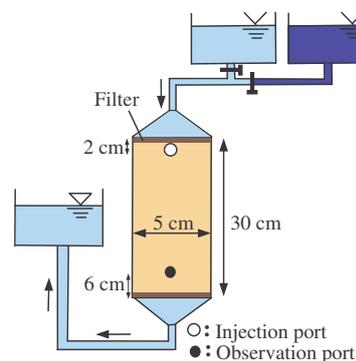


図 1: カラム実験装置の概略  
Schematic diagram  
of column experimental setup.

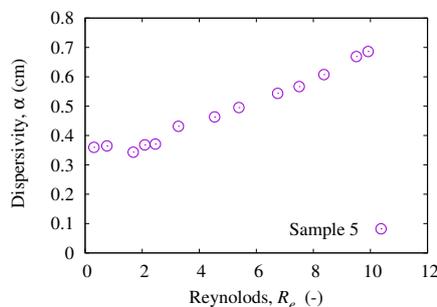


図 2: S5 の  $Re$  と  $\alpha$  の関係  
Relationship between  $Re$  and  $\alpha$  in S5.

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

キーワード: 溶質輸送特性, カラム実験, 分散性

### 3.2 分散係数 $D$ の推定

対象場で計測した濃度変化を移流分散方程式の解析解

$$\frac{C(x,t)}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Rx-vt}{2\sqrt{DRt}}\right) + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{vx}{D}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{Rx+vt}{2\sqrt{DRt}}\right) \quad (1)$$

へフィッティングして分散係数  $D$  を推定した．ここに， $R$  は遅延係数， $C$  は濃度， $x$  は距離， $C_0$  は初期濃度であり<sup>4)</sup>，NaCl 水溶液を用いた本研究では遅延係数  $R = 1$  とみなした．パラメータの同定にはカッコウ探索<sup>5)</sup>を用いており，推定した分散係数とレイノルズ数の関係を試料ごとに図3に示す．レイノルズ数の値から試料 S3, S4, S5 は遷移領域に入っており，レイノルズ数の増加に伴い分散係数は増加することが確認できる．一方，レイノルズ数が等しい場合においても粒径に応じて分散性に差異が生じており，小さな粒径ほど分散係数は増加することが読み取れる．各試料の間隙率はほぼ同程度であることから，粒径が小さくなると，間隙内の浸透水と溶質輸送経路の屈曲度が増すことで，分散性の増加に繋がったと推測される．

### 3.3 非 Fick 輸送とべき数 $n$

時間モーメント法により算出した分散長  $\alpha$ ，実流速  $u$  と分散係数  $D$  を用いて，非線形関数  $D = \alpha \cdot u^n$  のべき数  $n$  を導出した．ペクレ数とべき数  $n$  の関係を図4に示す．図中，各試料のべき数  $n$  の平均値を点線で示す．また，分散の大きさを示す無次元数であるペクレ数は  $Pe = ud_{50}/D_d$  にて表現される．ここに， $D_d$  は分子拡散係数であり，NaCl を用いた本研究では  $1.27 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{min}$  とした．ペクレ数が増加するとべき数  $n$  の値は1から増加する傾向にあり，非 Fick 輸送が確認できる．粒径が大きくなると流速は増加するため，溶質が速く流れる部分と遅く流れる部分の差が大きくなり，分散現象が顕著になった結果，べき数  $n$  の増加に繋がったと推測できる．また，試料 S1 はべき数  $n$  が比較的一定であるものの，粒径の増加に伴いばらつきが生じている．試料 S3, S4, S5 は遷移領域に入っていることから，流れの乱れにより変則的な溶質輸送となることでべき数  $n$  の値は変動したと考えられる．ばらつきはあるものの，粒径の増加と連動してべき数  $n$  の値は変化することから，実流速にかかるべき数  $n$  の値は非 Fick 輸送における溶質挙動の把握に寄与すると考えられる．

## 4. 結論

本研究では，溶質輸送特性を表す  $D = \alpha \cdot u^n$  のべき数  $n$  を導出して非 Fick 輸送を含む溶質輸送特性について評価した．層流場の分散長は流速依存性が低いのに対して，層流から乱流への遷移領域では，分散長の線形増加を確認できた．べき数  $n$  の値は，ペクレ数の増加に伴い1付近から増加しており，粒径が大きくなるほど非線形性が現れた．また，粒径の増加に伴って流れ場が乱れるため，べき数  $n$  の値は変動しやすくなることが示唆された．

参考文献：1) Qian, J. et al.: *J. Hydrol.*, 399, pp.246–254, 2011. 2) Pang, L. et al.: *J. Contam. Hydrol.*, 60, pp.123–134, 2003. 3) Sedghi-Asl, M. et al.: *Transp. Porous Med.*, 101, pp.215–227, 2014. 4) 菅野雄一，西垣誠，西面志保：ガソリン添加物である ETBE の測定法と土中での挙動に関する研究，土木学会論文集 C, 66, pp.66-77, 2010. 5) Yang, X.S. and Deb, S.: *World Cong. on Nature and Biologically Inspired Computing*, pp.210–214, 2009.

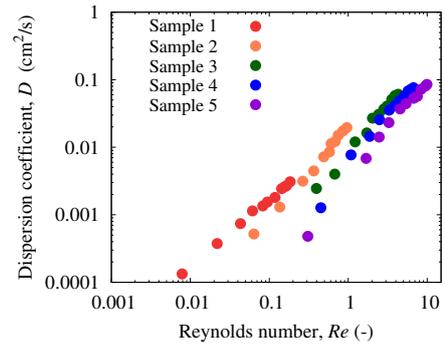


図3：  $Re$  と  $D$  の関係

Relationship between  $Re$  and  $D$ .

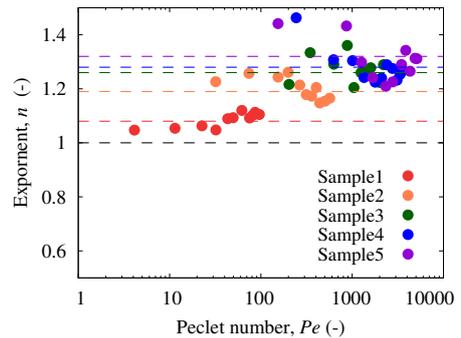


図4：  $Pe$  とべき数  $n$  の関係

Relationship between  $Pe$  and  $n$ .