

局所的な低透水域を有する不均質地盤の溶質保持特性 Retention Characteristics of Solute on Heterogeneous Porous Media with a Low Conductivity Area

○ 高橋 仁太郎* · 倉澤 智樹* · 鈴木 麻里子* · 井上 一哉*
Yoshitaro Takahashi, Tomoki Kurasawa, Mariko Suzuki and Kazuya Inoue

1. 緒論

自然地盤にて局所的な低透水域が存在すると、低透水域に汚染物質が保持されるため、帯水層の修復にコストを要する¹⁾。効率的な修復には、場の水理地質条件に応じた溶質保持特性の把握が必要である一方、原位置試験の難しさから実験的検討は少ない²⁾。本研究では、カラム実験にて局所的な低透水域を有する不均質地盤の溶質保持特性を評価した。

2. カラムによる溶質輸送実験

本研究では、図 1(A) に示す直径 10.8 cm、長さ 30 cm の円筒カラムに透水係数 4.5×10^{-1} cm/s のケイ砂 K1 を高透水域、 4.8×10^{-3} cm/s のケイ砂 K2 を低透水域として充填した。低透水域の形状と溶質保持特性の関係を評価するため、低透水域の直径 d cm、流れ方向への長さ L cm を変えた図 1(B) に示す 4 ケースを対象とした。また、溶質保持特性と流速の関係を検討するため、ケースごとに $Q_\alpha = 0.6$ cm³/min と $Q_\beta = 26$ cm³/min の 2 種類の流量を設定した。初期濃度 10 mg/cm³ の NaCl 水溶液にて場全体を飽和させ、定量ポンプを用いて脱イオン水を注入して実験を開始した。低透水域の中心に設置したセンサにより、濃度の時系列変動を測定し、溶質保持特性の評価に供した。

3. 流れ場における支配現象の特定

場の流速と溶質輸送を支配する現象の変化を捉えるため、溶質輸送現象の相対的な支配性を示すダムケラー数 Da とペクレ数 Pe を

$$Da = \frac{HD^*}{V_{out}R^2}, \quad Pe = \frac{V_{in}R}{D^*} \quad (1)$$

にて算出した。ここに、 H はカラム長さ、 D^* は有効分子拡散係数、 V_{out} は高透水域の流速、 R は低透水域の半径、 V_{in} は低透水域の流速である。図 2 にダムケラー数とペクレ数の関係を示す。流速の遅い場は溶質輸送において拡散現象、速い場は移流現象が支配的であると確認できる。

4. 結果と考察

NaCl 濃度の変動を図 3 に示す。縦軸は相対濃度、横軸はカラムの間隙体積が水に置換された回数である Pore volume を表す。低透水域の溶質保持特性を定量的に表す指標として、相対濃度がある値 x に到達するまでに要した Pore volume を無次元化した累積体積 P_x と定義する。

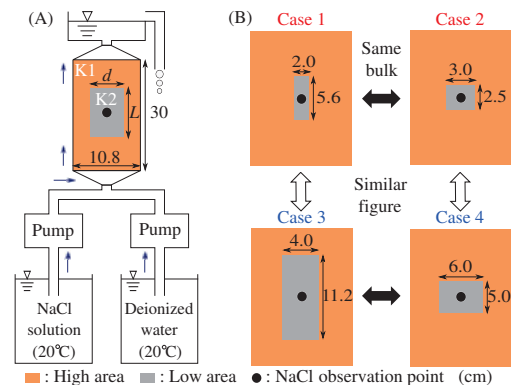


図 1：実験装置および対象地盤の概要
Schematic of the equipment and porous media.

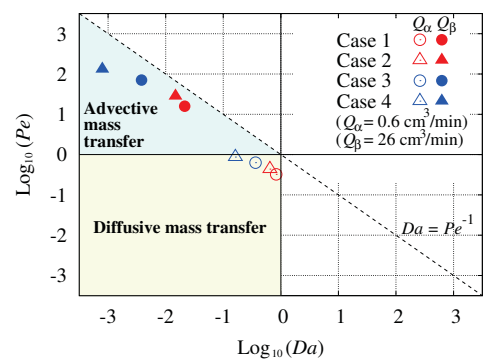


図 2：対象ケースにおける支配現象の特定
Evaluation of flow regime in our experiments.

* 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，移流・拡散，カラム実験

Case 1において流速の速い Q_β と流速の遅い Q_α を比較すると、速い Q_β の場合よりも遅い Q_α の方が小さい累積体積 P_x であり、流出に要する水量が少ないことを表している。Case 2から4についても同様の傾向を示す。流速の速い Q_β の場合では注入水の大部分が高透水域を通過し、低透水域の溶質の流出に寄与しないため、濃度低下に水量を要したと推察される。また、流速の速い場では移流現象が支配的であることから、低透水域に存在する溶質は主に下流端から流出し、側方からの流出割合は少ないと考えられる。

そこで、低透水域の流れ方向長さ L と P_x の関係を図4に示す。図中、低透水域の輸送状況を全体的に捉えるため、濃度低下の初期 $P_{0.9}$ 、流出過程の中間点 $P_{0.5}$ 、流出の最終段階 $P_{0.01}$ に対する結果を示す。同一体積であるCase 1と2を比較した場合、 L の大きいCase 1において、濃度の低下に要する水量 $P_{0.01}$ は大きい傾向にある。Case 3と4も同様の傾向がある。Di palmaら³⁾は本実験と似た地盤モデルの数値解析にて溶質が主に低透水域の下端から流出する様子を再現しており、本実験結果は妥当性を有すると判断される。よって、移流支配的な条件では、流れ方向へ低透水域が長くなれば、低透水域内の溶質濃度の低下に要する水量は増加すると言える。

一方、流速の遅い Q_α の場合では拡散現象が支配的であるため、側面からの流出は多くなると予想される。そこで、流速の遅い場について比表面積と累積体積 P_x の関係を図5に示す。同一体積であるCase 1と2を比較した場合、比表面積の大きいCase 1にて、濃度低下に必要な水量である $P_{0.01}$ が小さく、Case 3と4も同様である。低透水域の比表面積が大きければ単位水量あたりに流出する溶質の量は多くなるため、 $P_{0.01}$ は小さくなると推察される。よって、拡散現象が支配的な場合、比表面積の大きな形状では溶質の濃度低下に要する水量は小さくなると言える。

5. 結論

本研究では、局所的な低透水域の溶質保持特性をカラム実験にて評価した。移流支配の条件では、流速方向に対する低透水域が長ければ、濃度の低下に要する累積体積は増加する結果を得た。拡散支配の条件では、濃度低下に要する累積体積が小さくなり、低透水域の比表面積が大きくなれば、流出に要する累積体積も小さくなること分かった。

参考文献：1) Hadley, P. W. et al.: Groundwater remediation: the next 30 years, *Groundwater*, 50(5), pp.669–678, 2012. 2) Chapman, S. W. et al.: Testing high resolution numerical models for analysis of contaminant storage and release from low permeability zones, *J. Contam. Hydrol.*, 136-137, pp.106–116, 2012. 3) Di Palma, P. R. et al.: Pore-scale simulations of concentration tails in heterogeneous porous media, *J. Contam. Hydrol.*, 205, pp.47–56, 2017.

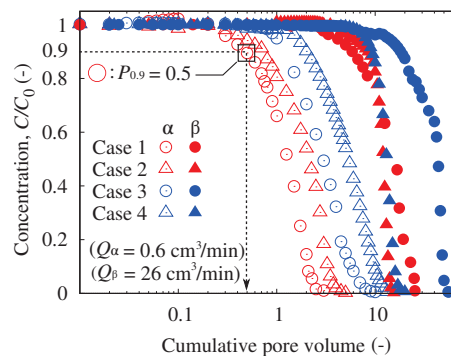


図3：NaCl濃度の変動
Breakthrough curves of NaCl.

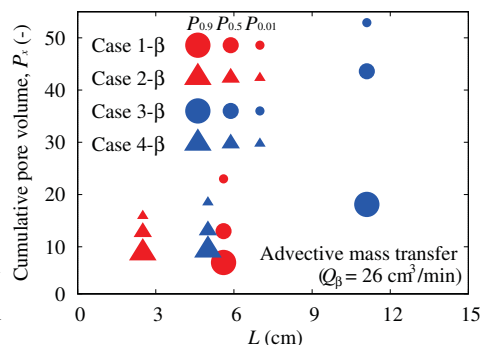


図4：低透水域長さ L と P_x の関係
Relationships between L and P_x .

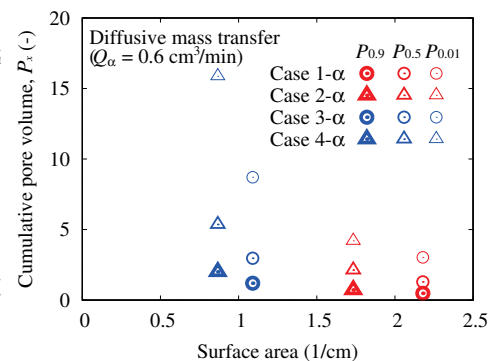


図5：低透水域の比表面積と P_x の関係
Relationships between surface area and P_x .