

京都大学防災研究所

京都大学大学院

京都大学大学院

フェロー

学生員

学生員

嘉門雅史

遠藤和人

○小林誠司

1. はじめに

近年、揮発性有機塩素化合物（VOCs）に代表される高密度難水溶性化学物質（DNAPL）による地盤・地下水汚染が顕在化している。DNAPL は水より密度が大きいため、汚染が地下水面を貫き難透水層にまで達する。DNAPL が通過した帯水層では、土の間隙構造によって DNAPL がトラップされる。DNAPL の溶解度はゼロではないために、汚染物質はトラップされた残存 DNAPL から地下水中へと溶け続け、深刻な汚染をもたらす。このような汚染の拡散を評価する上で間隙 DNAPL の挙動の把握は必要不可欠である。本研究では間隙に水と DNAPL の2相が存在する砂質土試料において一次元カラム浸透試験を行い、水の浸透、DNAPL の物性が間隙における DNAPL 挙動に及ぼす影響を評価した。

2. 実験システム

地盤内における水-DNAPL 2 相流系浸透の一次元的な浸透を測定するシステムとして鉛直カラム実験装置を使用した。システムの概要を Fig. 1 に示す。内径 3.5 cm、長さ 50 cm のアクリル製円筒型カラムを使用し、底部にステンレス製メッシュを貼り付けて試料室としている。豊浦標準砂（土粒子密度 $\rho_s = 2.641 \text{ g/cm}^3$ ）を水中落下法にて間隙率 $n = 0.38$ になるように振動を与えながら調整して供試体とした。供試体高さはカラム下端より 46 cm とした。液体の流入はカラム上端より、排出はカラム下端よりそれぞれ流量調整機能付きのロータリーチューブポンプによって行った。DNAPL は実際の揮発性有機塩素化合物を用いると危険を伴うため、代替 DNAPL として密度、粘性係数、水への難溶性、安全性を条件に、3M 社製のフッ素系不活性液体であるハイドロフルオロエーテル（HFE-7100）、パフォーマンスフルード（PF-8050）を選択した。HFE-7100 の物性は流体密度が 1.52 g/cm^3 、粘性係数が $5.8 \times 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ であり、トリクロロエチレンと類似している。PF-8050 の物性は流体密度が 1.76 g/cm^3 、粘性係数が $1.2 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ である。

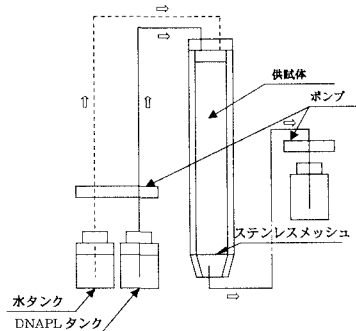


Fig. 1 多相流鉛直カラム実験装置

3. 繰り返しカラム浸透試験

3.1 試験方法 初期条件が水飽和である供試体に対して、水-DNAPL の2相流繰り返しカラム浸透試験を HFE-7100、PF-8050 を用いて数パターンの排出流量で行った。カラム下端からロータリーチューブポンプで強制的に間隙水を排水し、同時に、カラム上端から空気飽和度がゼロの状態を保つ条件で DNAPL を間隙容量の約2倍量である 320 ml 供給した。次に間隙流体の排水（液）は一定流量で継続させながら同様の条件で水を 320 ml 供給した。以上の行程を1サイクルとして4サイクル行って実験を終了とした。

3.2 実験結果と考察 繰り返し浸透試験において、それぞれの排出流量での試料中に残存している DNAPL 飽和度をサイクル毎に示したのが Fig. 2 である。縦軸が試料中に残存している DNAPL 飽和度 S_n 、横軸がサイクル数を示している。残存 DNAPL 飽和度はサイクル毎の DNAPL の供給量と排出量との差により算出した。HFE-7100 を用いた試験では排出流量が小さくなるに伴い、残存飽和度が大きくなる。これは、水の

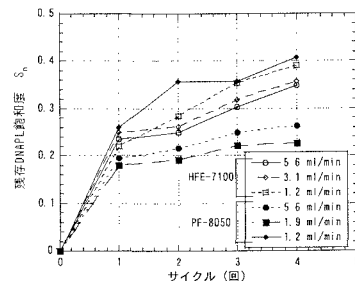


Fig. 2 繰り返し浸透試験でのサイクルと残存飽和度の関係

浸透過程で水と DNAPL の界面においてせん断力が働き、水の浸透速度が速いほど DNAPL は間隙内より流出し易いためであると考えられる。排出流量が 1.2 ml/min である PF-8050 を除いて HFE-7100 での残存飽和度が大きな値を示している。PF-8050 は HFE-7100 に比べ粘性が大きく、界面に働くせん断力が大きくなるためであると考えられる。排出流量が 1.2 ml/min である PF-8050 の残存飽和度は同排出流量の HFE-7100 のそれよりも大きな値を示している。排出流量はポンプでの既定値であり、実流量は流体の粘性に依存する。同じ排出流量に調節しているが、1 サイクルの浸透時間は HFE-7100 では約 9400 sec、PF-8050 では 14500 sec 要した。したがって、HFE-7100 と比べ、PF-8050 における浸透試験の実流量が小さいことを示し、実流量が同じであれば HFE-7100 の残存飽和度が大きくなると推測される。また、先ほどの HFE-7100 と PF-8050 との比較においても実流量の影響が考えられる。しかし PF-8050 は実流量が小さいにもかかわらず同じ排出流量の HFE-7100 よりも残存飽和度が小さい。これは粘性による影響が卓越していることを示している。

繰り返し浸透試験でのサイクル毎の初期 DNAPL 飽和度と、残存 DNAPL 飽和度の増加量 ΔS_n の関係を Fig. 3 に示す。1 サイクル目のデータは除外している。初期 DNAPL 飽和度が増加するにつれ、残存 DNAPL 飽和度の増加量も大きくなることが確認できる。これは、サイクル数の増加に伴い、DNAPL 飽和度の増加率が大きくなる傾向を示している。

水-DNAPL の 2 相流において相対透水係数 k_{rw} と水飽和度 S_w の関係は van Genuchten model¹⁾ により以下の式で推定することができる。

$$\text{van Genuchten model : } k_{rw} = S_c^2 \left[1 - \left(1 - S_c^m \right)^m \right]^2, \quad \text{where } S_c = \frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr}},$$

ここで m は水-DNAPL における水分特性曲線のフィッティングにより得られるパラメーターであり、HFE-7100 においては $m=0.870$ 、PF-8050 においては $m=0.862$ である²⁾。HFE-7100、PF-8050 について推定された曲線を Fig. 4 に示す。縦軸が相対透水係数、横軸が水飽和度を示している。したがって、繰り返し浸透試験における各サイクルでの相対透水係数は、残存 DNAPL 飽和度から算出した水飽和度により推定が可能である。各サイクルにおける残存 DNAPL 飽和度の増加量 ΔS_n と、相対透水係数から算出した不飽和透水係数 k_w の関係を Fig. 5 に示す。プロットを結ぶ線は、サイクルによる変化を示す。不飽和透水係数が大きくなるに伴い、DNAPL 飽和度の増加量が小さくなることが確認できる。すなわち、水が浸透し易いほど、DNAPL は間隙内より流出する傾向を示している。

4. 結論

排出流量、粘性が残存 DNAPL 飽和度に与える影響を評価したところ、間隙内における DNAPL の挙動は粘性の影響を大きく受けることが確認された。水の浸透速度、DNAPL の粘性が大きいほど DNAPL は間隙内より流出する。サイクルごとの試料中における初期 DNAPL 飽和度、不飽和透水係数が DNAPL 飽和度の増加量に与える影響を評価したところ、初期 DNAPL 飽和度が大きく、不飽和透水係数が小さいほど DNAPL 飽和度の増加量が大きくなることが確認された。

<参考文献> 1) van Genuchten, M.T.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 44, pp. 892-898, 1980. 2) 嘉門雅史・遠藤和人・小林誠司・勝見 武 : DNAPL 浸透における k - S - p relations の実験的検討, 第 4 回環境地盤工学シンポジウム, 2001, (投稿中)。

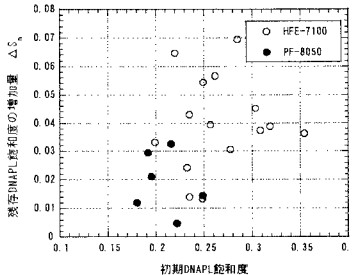


Fig. 3 残存 DNAPL 飽和度の増加量と初期残存 DNAPL 飽和度の関係

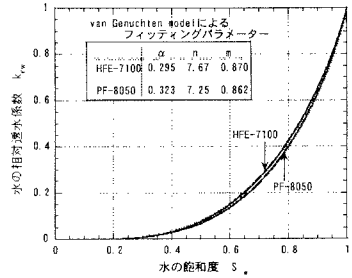


Fig. 4 水の飽和度と推定された相対透水係数の関係

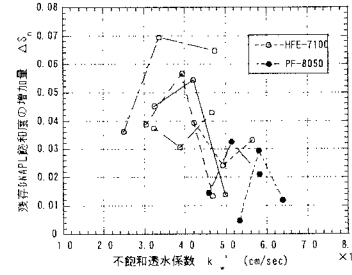


Fig. 5 不飽和透水係数と DNAPL 飽和度の増加量の関係