

飽和多孔媒体モデルにおける DNAPL 挙動に関する実験的研究

An Experimental Investigation on DNAPL Migration in Saturated Porous Medium Models

佐藤邦明¹、上野孝之^{2*}、R. R. GIRI³

Kuniaki Sato, Takayuki Ueno, R.R. Giri

¹ 埼玉大学 地圏科学研究センター

Geosphere Research Institute of Saitama University

²(株) 大林組 技術研究所

Technical Research Institute, Obayashi Corporation

³ 埼玉大学 地圏科学研究センター

Geosphere Research Institute of Saitama University

Abstract

Resistance on DNAPL droplets settling in a saturated porous medium and DNAPL migration behavior through a saturated pore is experimentally investigated. Motion of a settling droplet is described by an equation, which is similar to that for a rigid solid sphere settling in an infinite liquid medium. A correlation between droplet Reynolds number (Re) and comprehensive resistance coefficient (CR) is established for each droplet size. The results indicate that a settling droplet wobbles throughout its motion in a porous medium. Equivalent DNAPL thickness (h) in a saturated pore just before and after snap-off is correlated to pore neck area in rectangular and triangular pores. It is found that the power and linear relation hold well in the former and latter cases respectively within the data range of this study. Three different stages in DNAPL migration through a saturated pore are observed. The results indicate that the migration behavior depend on both geometry and DNAPL physical properties.

Key Words: DNAPL migration, saturated porous media, comprehensive resistance coefficient, pore neck area

1. 研究目的

有機塩素化合物などの非溶解性液体 (DNAPLs : Dense Non-aqueous Phase Liquids) による土壌や地下水の汚染は産業界において環境問題となっている。本研究は土壌をモデル化した多孔媒体中の DNAPL 液滴の沈降挙動のメカニズムおよび、水で飽和した間隙における DNAPL の浸透特性を解明することを目的とした。

2. 実験 I

Fig.1 に実験 I で用いた多孔媒体モデルを示す。多孔媒体モデルは水で飽和した縦 12cm、横 6cm の 2 枚のガラス板の間に直径 5mm のガラス球を正方配列および千鳥配列にして、奥行き方向一層に貼り付けたもの

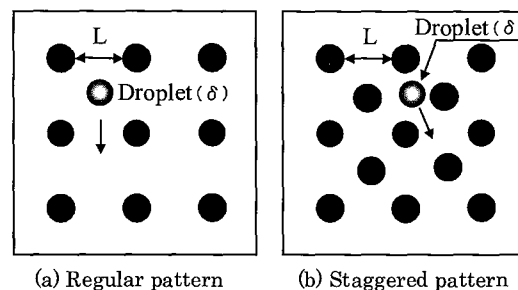


Fig.1 Schematic Diagram of Porous Medium Models.

である。

実験は 5 種類のガラス球間隔 L のモデルに対して 8 種類の直径 δ の TCE 液滴を沈降させた。TCE 液滴の沈降はデジタルカメラで連続撮影し、ビデオレコーダに

*〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640
電話: 0424-95-0921 FAX: 0424-95-0903
E-mail: ueno.takayuki@obayashi.co.jp

記録した。記録したデータから各時間(Δt)における沈降距離(Δz)を読みとり、液滴の最終沈下速度 U_0 を算定し、式(1)から抵抗係数 C_R を算出した。

$$U_0 = \sqrt{\frac{4\delta g}{3C_R} \left(\frac{\rho_d - \rho_l}{\rho_d} \right)} \quad (1)$$

ただし、 U_0 : 最終沈降速度(Terminal velocity)、 δ : 液滴の直径、 ρ_d : 液滴の密度、 ρ_l : 水の密度、 C_R : 抵抗係数、 g : 重力の加速度。

また、得られた最終沈降速度から(2)式によってレイノルズ数を算定した。

$$Re = \frac{U_0 \delta}{\nu} \quad (2)$$

ただし、 Re : レイノルズ数、 δ : 液滴の直径、 ν : 粘性係数。

レイノルズ数 Re と抵抗係数 C_R の相関を Fig.2 に示す。レイノルズ数が 102 ~ 103、抵抗係数は 0.7 ~ 11 の範囲に分布する。実験から得られた Re と C_R の相関は次式で表現できることがわかった。

$$C_R = aRe^{-n} \quad (3)$$

ここに、定数 a と指数 n は正方配列、千鳥配列の多孔媒体における沈降液滴の体積に依存する。

沈降液滴の大きさに係わらず、指数 n はおよそ 2 で、定数 a は $6.25 \times 10^4 \sim 4.57 \times 10^5$ の範囲の値を持つ。

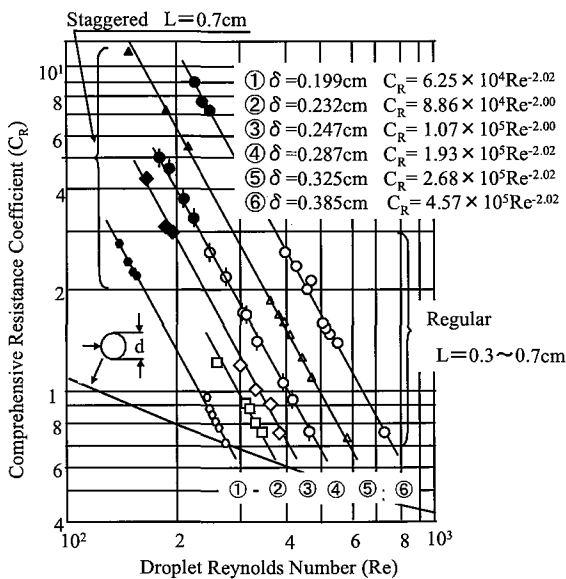


Fig.2 Relationship between C_R and Re

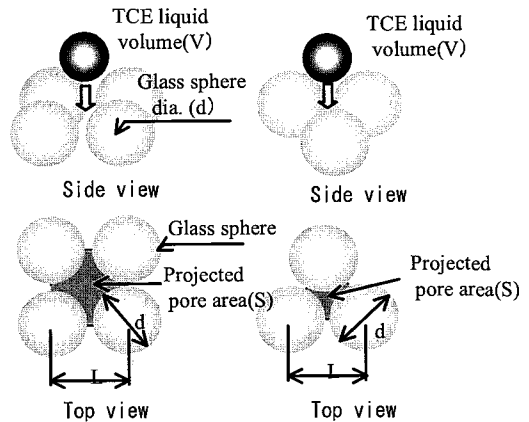
抵抗係数 C_R は空隙率 (固体粒子の密度)、配列 (多孔

媒体の構造)、および DNAPL 液滴の大きさ、さらに、液滴の沈降時のゆれ効果などと密接な関係があることが判明した。

3. 実験 II

実験 II で用いた空隙要素モデルは Fig.2 に示すように、ガラス球を 1 層の格子配列、および三角配列し、水で飽和させた。上部から注入管を用いて空隙に DNAPL (TCE) を充填し、表面張力に打ち勝って、DNAPL が通過するときの体積、すなわち、透過限界体積を測定した。また空隙残留体積も併せて測定した。

実験はガラス球直径 d を 7 種類、ガラス球の離間距離 L を 2 種類として空隙の投影面積を変化させた。

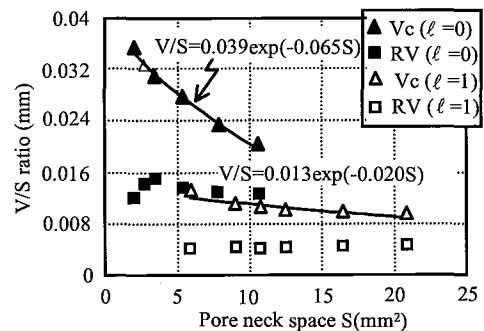


(a) Rectangular case (b) Triangular case

Fig.2 Schematic diagram of pore model II

Fig.4 に 1 例として、ガラス球間隔 $l=0$ および $l=1mm$ で格子配列された空隙を液滴が通過するときの $Vc/S \sim S$ の関係を示す。

ガラス球間隔 $l=0$ の場合、空隙面積が大きくなるほど Vc/S が指数関数的に減少する。また、ガラス球間隔 $l=1$ の場合も空隙面積が大きくなるほど Vc/S が指数関数的に減少するが、 $l=0$ に比べて現象比率は小さい。



(a) TGE

Fig.4 Relationship between (V/S) and S in rectangular pore