

# 飽和多孔媒体モデルにおける DNAPL 重力分散に関する実験的研究

## An Experimental Investigation on Gravitational Dispersion of DNAPL in Saturated Porous Medium Models

佐藤邦明<sup>1</sup>、上野孝之<sup>2\*</sup>、R. R. GIRI<sup>3</sup>

Kuniaki Sato, Takayuki Ueno, R.R. Giri

<sup>1</sup> 埼玉大学 地圏科学研究センター  
Geosphere Research Institute of Saitama University

<sup>2</sup>(株) 大林組 技術研究所  
Technical Research Institute, Obayashi Corporation

<sup>3</sup> 埼玉大学 地圏科学研究センター  
Geosphere Research Institute of Saitama University

### Abstract

Gravitational dispersion may play significant role in DNAPL (dense non-aqueous phase liquid) transport in groundwater. Fingering and droplet settlement are two examples on gravitational dispersion of DNAPL in groundwater environment. Gravitational dispersion of small spherical solid particles and TCE droplets through water-saturated porous medium models are dealt in this paper. The experimental set-up consisted of single-layered glass sphere media and visualizing equipments with high accuracy. The experimental results, based on ergodic theorem, are compared with analytical solution of one-dimensional gravitational dispersion equation. The results showed that dispersion of the particles and droplets could be well characterized by the present study. Values of non-dimensional ratio ( $D_z/\nu$ ,  $\nu$ : kinematic viscosity) for solid particles and TCE droplets varied from 10 to 30, and 4 to 5.5, respectively. Particle and droplet Reynolds number varied between 74 and 230 in both cases..

**Key Words:** DNAPL, Dispersion coefficient, porous medium model, mass concentration

### 1. 研究目的

有機化合物などの非溶解性液 (DNAPLs : Dense Non-aqueous Phase Liquids) による地下水の汚染は社会的な環境問題となっている。DNAPLs はフィンガー状 [1]あるいは液滴状 [2]で地下水中に重力分散すると考えられている。本研究は飽和土壌をモデル化した多孔媒体中における DNAPL 液滴の重力分散を可視化すると共に、新しく重力分散現象をモデル化し、移流分散方程式を導いてその解を求め、実験結果と比較して、汚染物質の動的移行メカニズムを解明することを目的とした。

### 2. 分散方程式とその解

多孔媒体中を DNAPL 液滴群が鉛直方向に沈降する場合

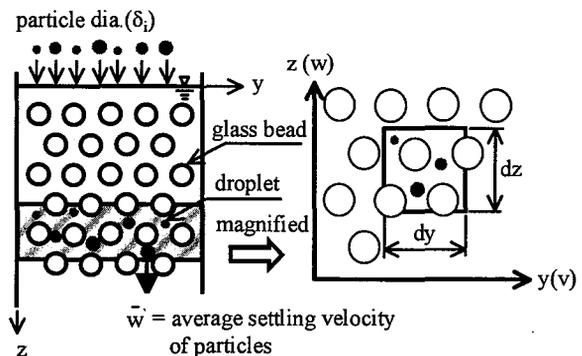


図-1 コントロールボリューム中の粒子沈降

\*〒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

合について、図-1のようにy-z直交座標を設定し、それぞれの座標軸のダルシー流速成分を $v$ 、 $w$ として $\Delta y$ 、 $\Delta z$ のコントロールボリュームにおける分散方程式を導くと次式が得られる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} - \bar{w} \frac{\partial C}{\partial z} = D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (1)$$

但し、 $C$  : DNAPL 液滴の質量濃度、 $\bar{w}$  : DNAPL 液滴の平均沈降速度、 $D_z$  : 分散係数。

初期条件  $C(z, 0) = 0$ , 境界条件  $C(0, 0) = C_0$ ,  $C(\infty, 0) = 0$  の条件で式(1)の解を誘導すると、

$$C = \frac{1}{2} C_0 \left[ e^{-\frac{\bar{w} z}{D_z}} \operatorname{erfc} \left( \frac{z - \bar{w} t}{2\sqrt{D_z t}} \right) + \operatorname{erfc} \left( \frac{z + \bar{w} t}{2\sqrt{D_z t}} \right) \right] \quad (2)$$

となり、 $z=0$ 、 $t=0$  のとき、直径 $\delta$ の違う多数の DNAPL 液滴を同時に沈降させたときの DNAPL 濃度  $C(z, t)$  の 1 次元的時間変化を規定する基礎方程式が得られる。

### 3. 実験装置と実験手順

実験装置は①配列充填多孔媒体モデル、②高速度カメラ

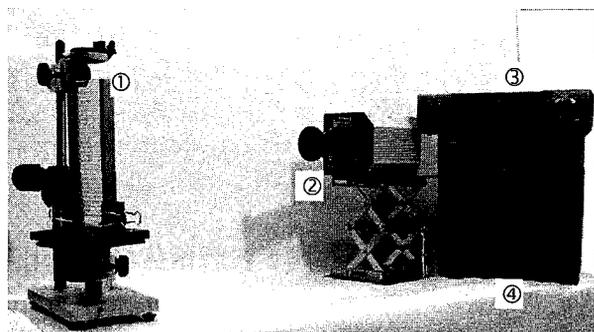


図-2 実験装置

メラ③ビデオレコーダ、及び④ビデオモニターで構成されている(図-2参照)。球粒子及びTCE液滴が多孔媒体中を沈降する状況は高速度カメラで撮影し、ビデオモニターで沈降挙動を観察しながらビデオレコーダにデジタル映像を記録した。

### 4. 実験結果と考察

配列充填多孔媒体中の球粒子、及びDNAPL液滴の沈降実験結果にエルゴード性を仮定して物質濃度分布を求め、基礎方程式の解と比較して、球粒子配列間隔 $\ell = 0.35\text{cm}$ 、及び $\ell = 0.5\text{cm}$ の2種類の多孔媒体モデルにおける球粒子群、及びDNAPL液滴群の分散係数 $D_z$ を同定した。

本研究ではレイノルズ数を $R_e = \bar{w}' \delta / \nu$ (ただし、 $\bar{w}'$ : 球粒子、及びDNAPL液滴の平均沈降速度、 $\delta$ : 球粒子及びDNAPL液滴の径、 $\nu$ : 水の動粘性係数)と定

義して、無次元化した分散係数 $D_z/\nu$ とレイノルズ数 $R_e$ の関係を整理した。

図-3に千鳥配列の多孔媒体を沈降する球粒子群及びDNAPL液滴群の分散係数 $D_z/\nu$ と球粒子、及び液滴レイノルズ数 $R_e$ の関係を示す。

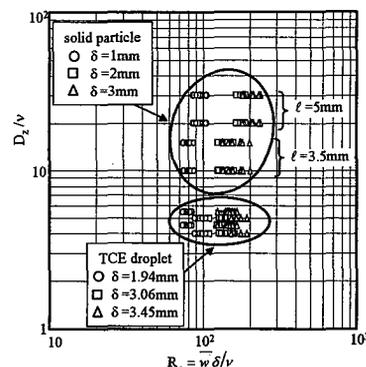


図-3 分散係数とレイノルズ数の関係

### 5. 結論

高性能ビデオカメラ、及びデータ処理システムを用いて飽和多孔媒体中を沈降する球粒子群、及びTCE液滴群の重力分散現象を実験的に可視化した。エルゴード性を仮定して整理した実験結果を一次元分散方程式の解析解と比較することによって、球粒子群、及びTCE液滴群の多孔媒体中における分散係数 $D_z$ が同定された。

この研究の結論は以下の通りである。

- (1) 一次元分散方程式は飽和多孔媒体中のDNAPL液滴の重力分散特性をうまく表現できる。
- (2) 球粒子群、及びTCE液滴群の無次元量 $D_z/\nu$ はレイノルズ数 $R_e = 74 \sim 230$ の範囲でそれぞれ $10 \sim 30$ 、および $4 \sim 5.5$ が得られた。
- (3) TCE液滴は球粒子に比べて密度が低く、沈降中変形することから沈降速度が遅く、分散係数 $D_z$ は球粒子のそれに比べて小さい。
- (4) 多孔媒体の間隔が大きくなるにつれ分散係数 $D_z$ は小さくなる。

### 参考文献

- [1] Zhang, Y., Shariati, M., and Yortsos, Y.C. (2000): The spreading of immiscible fluids in porous media under the influence of gravity. *Transport in Porous Media*, Vol. 38, pp.117-140.
- [2] Ueno T., Giri R. R., Sato K., and Wada A. (2001): Resistance on DNAPL droplet settlement through saturated porous medium models. *The 29<sup>th</sup> IAHR Congress*, Vol. "Theme A", Beijing, China.