

領域内にトラップされた NAPL の物質移行に対する影響 Influence of Entrapped NAPL on Solute Transport

○ 鈴木 章世*・井上 一哉**・正木 一平***・田中 勉**
Fumiyo Suzuki, Kazuya Inoue, Ippei Masaki and Tsutomu Tanaka

1. はじめに

難水溶性物質 (NAPL) は地盤内に浸透すると継続的に滞留することから、原液だまりの位置や規模の把握は浄化対策やリスク管理の運用において重要となる。そこで、NAPL プールを含む帯水層におけるトレーサ実験を通して時間モーメント量を評価することにより、NAPL プールの規模が物質移動に及ぼす影響を検討する。

2. 物質移動実験

本研究では図 1 に示す長さ 100cm、幅 50cm、深さ 6cm のステンレス製の実験装置を用いて平面二次元物質移動実験を実施する。上下流のタンクに定水頭の装置を連結させることで装置内に定常流を形成し、動水勾配の調整や流量の測定を可能にしている。

NAPL プールの規模が物質移動現象へ与える影響を検討するため、一辺が 6cm の立方体 (形状: Small) と x, y, z 方向にそれぞれ 6cm, 12cm, 6cm の直方体 (形状: Large) の NAPL プールを用意し、NAPL 無しの場合 (Base Case) と合わせて 3 種類の浸透場を用いて実験を実施する。また、2 種類の NAPL プールを有する浸透場においてそれぞれ 2 回ずつ実験を行い、No.1, No.2 と表記する。可視化を目的として、NAPL プールにはサラダ油を油溶性の色素 SudanIV で着色して使用し、所与の規模の容器に浸透場と等しい間隙率になるよう計量した試料砂と NAPL を充填して冷凍することで浸透場への設置を容易にする。なお、NAPL の粘度は $0.110\text{Pa}\cdot\text{s}$ であり溶解度は低く、実験時間が比較的短いいため、実験中の NAPL の移動と溶解は無視できるものとする。

浸透場の作成には水中落下によりケイ砂を充填し、所定の回数つき固め、5cm 層ごとに上流から下流へ形成していく。NAPL プールを含む浸透場は上流より 27.5cm まで充填した時点で冷凍した NAPL プールを中央に設置し、100cm に至るまで同様の方法で浸透場を作成する。浸透場作成後一定時間放置し、図 1 に示す注入口からトレーサを注入することで、 P_1 から P_8 に設置されたセンサーにより時系列で濃度を計測する。トレーサには $5.0 \times 10^{-3}\text{g}/\text{cm}^3$ の NaCl 水溶液を使用し、可視化を目的として Brilliant Blue FCF で着色する。水溶液の比重は 1.0044 であり重力の影響やトレーサと試料砂あるいは NAPL との生化学的、物理的の反応は無視できると考えられる。

3. 時間モーメント解析

破過曲線から時間モーメント量を求めることで物質移行特性を定量的に表す。 n 次の絶対時間モーメントは式 (1) で定義される。また、 n 次の標準化絶対時間モーメントは式 (2) で表され、式 (3) は n 次の標準化中心時間モーメントに相当する¹⁾。本研究では、それぞれの破過曲線より m_0, M_1, μ_2 の値を求め、それぞれ 0 次、1 次、2 次モーメントとする。0 次モーメント m_0 は観測点を通過したトレーサの質量、1 次モーメント M_1 は観測点における平均到達時間を示す。2 次モーメント μ_2 はブリュームの広がりを数値で表したものである。

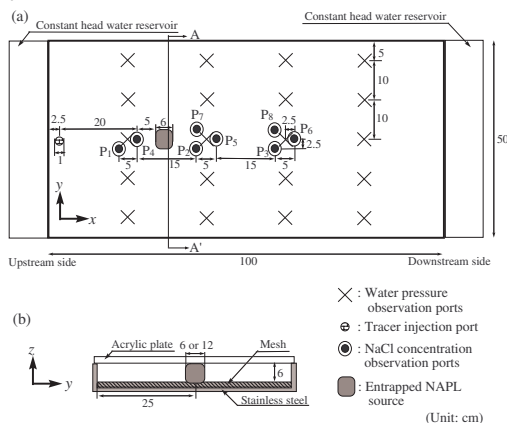


図 1: 実験装置概略図

表 1: 試料砂の物性値

土粒子密度 $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$	2.66
乾燥密度 $\rho_d(\text{g}/\text{cm}^3)$	1.58
平均粒径 $D_{50}(\text{cm})$	0.050
均等係数 $U_c(-)$	1.25
飽和透水係数 $k_s(\text{cm}/\text{s})$	0.268

$$m_n = \int_0^{\infty} t^n C(x, y, z, t) dt \quad (1)$$

$$M_n = \frac{m_n}{m_0} = \frac{\int_0^{\infty} t^n C(x, y, z, t) dt}{\int_0^{\infty} C(x, y, z, t) dt} \quad (2)$$

$$\mu_n = \frac{\int_0^{\infty} (t - M_1)^n C(x, y, z, t) dt}{\int_0^{\infty} t^n C(x, y, z, t) dt} \quad (3)$$

m_n : n 次の絶対時間モーメント

M_n : n 次の標準化絶対時間モーメント

μ_n : n 次の標準化中心時間モーメント

$C(x, y, z, t)$: 濃度, x, y, z : 座標, t : 時間

* 神戸大学大学院自然科学研究科: Graduate School of Science and Technology, Kobe University.

NAPL, 物質移動, 時間モーメント

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

*** 株式会社 日水コン: Nihon Suido Consultants Co., Ltd.

4. 結果と考察

図2と図4, 図6に観測点 P_4, P_5 における浸透流速と時間モーメントの関係を示す. また, 図3と図5, 図7には観測点 P_2, P_7 における浸透流速と時間モーメントの関係を示す.

図2と図3より0次モーメントにおいて NAPL プール上流部にある P_4 では各実験ケースにおいて NAPL プールによる影響は生じていないものの, NAPL プール直下流部の P_5 では Base Case が最も大きく, Small, Large の順に値が小さくなっていくことが見て取れる. 一方, P_2 と P_7 の結果からは Base Case の値が最も小さく, P_2 では Large の No.1, Small の No.2, P_7 では Large の No.2, Small の No.1 の値が大きく算出されていることがわかる. このことから, Base Case ではトレーサが単一方向に流れることに対して Small と Large の実験ケースはトレーサが NAPL プールを迂回して移動していることが示唆されており, 実験においても観察された現象である. NaCl トレーサの迂回方向は NAPL プールの設置位置に大きく依存するため, 観測点 P_2 と P_7 の濃度変動に差異が生じる要因となっている.

図4と図5より1次モーメントにおいては実験ケースや観測点による大きな違いは見られず, NAPL プールによる平均到達時間への影響は観察されない. これは NAPL プールの存在により浸透経路が変わるものの, 浸透路長はさほど大きく変化していない結果であると推察される. しかしながら, Large のケースにおいてわずかながらモーメント量が増加しており, トレーサが NAPL プールを迂回する路長が増加していることを示している.

図6と図7より観測点 P_4 の2次モーメント量は各実験ケースに大きな変化は見られないものの, P_5 では Large の No.1, Small の2ケース, Large の No.2, Base Case の順に小さくなり, Large の No.1 と No.2 では1オーダー程度の差が見られる. これは Large の No.2 のケースで NAPL プールが流れの中心から若干ずれ, 両側を迂回する距離が異なるためと考えられる. P_2 と P_7 ではわずかな差であるが Large の2ケース, Small の2ケース, Base Case の順に値が小さくなっており NAPL プールの規模が増すとモーメント量も増加すると考えられる.

5. まとめ

本研究において得られた知見をまとめると以下ようになる. NAPL プールより上流の地点では NAPL による影響は受けていないと考えられる. また, NAPL プールの時間モーメントに及ぼす影響は0次モーメントと2次モーメントで観察される. さらには, NAPL プールの規模より位置に大きな影響を受け, トレーサの迂回距離の差が2次モーメントの差として現れることがわかった.

参考文献: 1) Valocchi, J.A.: Validity of the local equilibrium assumption for modeling sorbing solute transport through homogeneous soils, *Water Resour. Res.*, 21(6), pp.808-820, 1985.

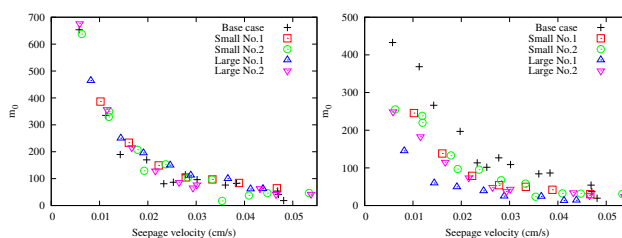


図2: 0次モーメント結果:(左) P_4 , (右) P_5

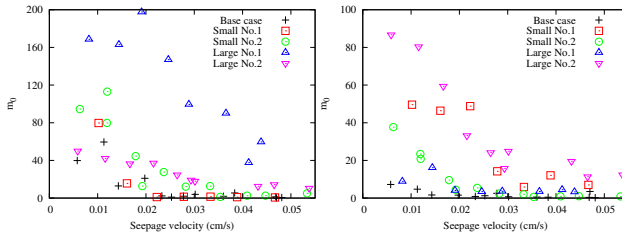


図3: 0次モーメント結果:(左) P_2 , (右) P_7

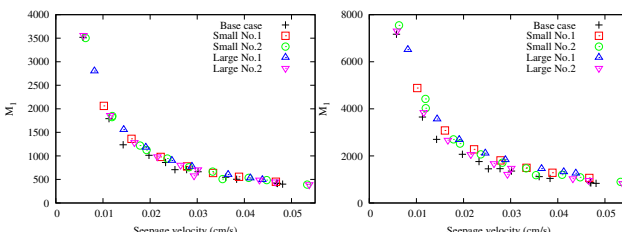


図4: 1次モーメント結果:(左) P_4 , (右) P_5

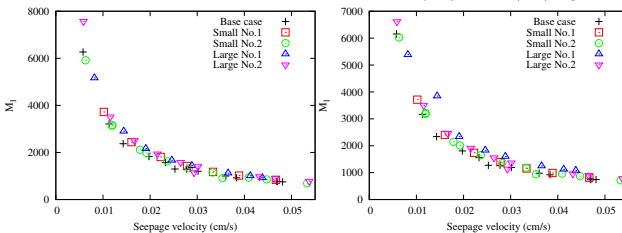


図5: 1次モーメント結果:(左) P_2 , (右) P_7

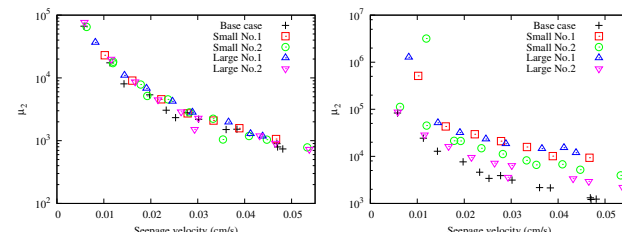


図6: 2次モーメント結果:(左) P_4 , (右) P_5

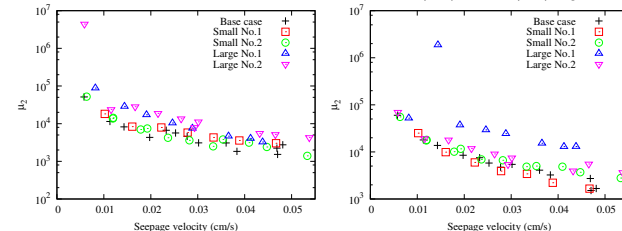


図7: 2次モーメント結果:(左) P_2 , (右) P_7