

格子ボルツマン法を用いた多孔体中の油汚染メカニズムの評価

熊本大学工学部 学生会員 ○藤木祐作

熊本大学大学院 正会員 椋木俊文

熊本大学技術部 非会員 佐藤宇紘

2012 年度 JSPS 特別研究員 Tinet Anne-Julie

1. はじめに

ガソリンなどに代表される LNAPL (Light Non-Aqueous Phase Liquid)による地盤汚染が顕在化しており、その汚染機構解明のために著者らは X 線 CT スキャナによる地盤内部の LNAPL の可視化やその画像解析手法を提案している¹⁾。間隙内の流体挙動をより定量評価するためには数値解析が有効であるが、取り扱う現象が水-油の質量保存を満たす二相流であるため、その力学モデルは複雑となる。格子ボルツマン法(Lattice Boltzmann Method, LBM)とは、流体を多数の仮想粒子の集合体(格子気体モデル)で近似し、各粒子の衝突と並進とを粒子の速度分布関数を用いて逐次発展させることにより、そのモーメントを計算することによって、流体の熱流動場を求めるものである²⁾³⁾。LBM は混相流の解析が可能であり、混相流における数値解析の手法として近年注目されている。本概要は GPU を導入した並列化計算コードを新たに開発し、LBM を用いて LNAPL の挙動を評価した。

2. 解析プログラムについて

2.1 格子ボルツマン法

本研究では、Pan et al.(2004)が Shan and Chen モデル(1993)²⁾を拡張した等温3次元成分多相流 LBM モデルを使用した³⁾。このモデルの格子構造は3次元15方向に離散化している。流体の密度比、粘性比、濡れ特性を任意に設定可能であり、境界条件の設定も容易であることが特徴である。LBM は、仮想的な粒子の分布関数を考え、その分布関数の発展方程式を解く数値解析手法であり、この発展方程式がナビエ・ストークスの方程式を満たしている。なお、理論式の展開は参考文献²⁾に譲る。

2.2 キャピラリー数と毛管圧力

無次元パラメータであるキャピラリー数 C_a は以下の式で示され、粘性係数 $\mu(\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2)$ と表面張力 $\sigma(\text{N}/\text{m})$ の比を示す。 $u(\text{m}/\text{s})$ は間隙内流速を示す。

$$C_a = \mu u / \sigma \quad (1)$$

一般に $C_a < 10^{-6}$ であれば毛管力が支配的な流れとなる³⁾。また、毛管圧力 $P_c(\text{N}/\text{m}^2)$ は以下のように示される。

$$P_c = 2\sigma \cos\theta / d \quad (2)$$

ここで、 θ は接触角、 $d(\text{m})$ は間隙径である。この毛管圧力の式から、間隙径以外の値は定数であり、間隙径の大小が毛管圧力の大きさを決定する。水-LNAPL の二相流で、毛管力が支配的な流れの場合、間隙径の大きい箇所に LNAPL が滞留し、間隙径の小さいところに水が流れていくと考えられる。

3. 解析結果と考察

3.1 一相流解析によるプログラムの確認

開発したコードの精度を評価するために、解析メッシュ $200 \times 29 \times 3$ の領域で二次元的な筒の境界条件を用い、流速 $v = 0.02$ を与えて单相流の解析を行った。図1のような結果が得られた。図1は、管半径 $R(17.5\text{voxel})$ と管中心からの距離 r との比と、相対速度の関係を示したグラフである。水と LNAPL の粘性比を1.335であり、粘性の大きい LNAPLの方が水に比べて最大流速が小さい事がわかり、ハーゲンポアズイユの流れを評価できていることを確認した。

3.2 二相流解析

CT 撮影画像から抽出したガラスビーズの間隙構造を幾何学条件として、流体流入個所に境界条件として一定流量(キャピラリー数 $Ca = 10^{-3}$)を与え、水と LNAPL の流入解析を行う。

間隙メッシュは $400 \times 200 \times 3$ とし、図2のような境界条件を与えた。赤が LNAPL、白が水、青がガラスビーズを示す。流入する流体の上下境界には一定流量 $u_n = 0.00166$ と圧力勾配 $\partial p_n / \partial x = 0$ を与えており、LNAPL は図2に示すように上面中央部の流入口から一定流量で圧入している。水の上下境界には圧力勾配 $\partial p_w / \partial x = 0$ を与え圧力一定とした。左右境界は両液体とも周期境界条件をとる。

図2のように水で満たされた間隙内に、LNAPL を上面の流入口から下面に達するまで流入する。その

後上面の流入口から水を流入することで、間隙中の LNAPL かどのような挙動をするかを調べる。

図3は時間ごとの間隙中の水と LNAPL の密度分布結果である。22000step までは LNAPL、それ以降に水を流入している。図3より44000step と60000step の密度分布を比べると、間隙径が大きい領域では LNAPL が水の流れによって押し出される一方、間隙径の小さい領域の LNAPL はそのまま滞留していることがわかる。図4に示すのは時間変化による間隙内での LNAPL の割合の変化を示したグラフである。

44000step から54000step では LNAPL の飽和度の変化が小さいが、55000step から60000step にかけてさらにもう一度濃度変化が起こっている。この間に生じた密度分布の変化が、LNAPL がその場に滞留するかどうかの違いを表すと考えられる。この解析は、キャピラリー数が大きい($Ca = 10^{-3}$)ため毛管力の影響が少ない解析を実施している。このような条件の場合、LNAPL の輸送挙動は、間隙径の大きさに影響されず、むしろ LNAPL 領域への水の流入条件に支配されることが分かった。

4. おわりに

本報では、LBM を用いることで多孔体での LNAPL の挙動を解析した。今後は、CT 画像解析と並列して、多孔体質中の特徴抽出結果と LBM の解析結果を評価し、LNAPL 浸透メカニズムについて研究を進める予定である。

参考文献

- 1) 棕木俊文 三上和昭 佐藤宇紘 : X 線 CT データによる間隙構造の定量化と地盤内多相流汚染問題への適応性, 第9回環境地盤工学シンポジウム, pp.47-52, 2011.
- 2) Shan, X and Chen, H.; Lattice Boltzmann Model for simulating flows with multiple phases and components, Physical review E, Vol47(3), 1993
- 3) Pan, C., Hilpert and M., Miller, C. T. : Lattice Boltzmann simulation of two-phase flow in porous media, Water Resources Research, Vol40(1), pp.1-14, 2004.

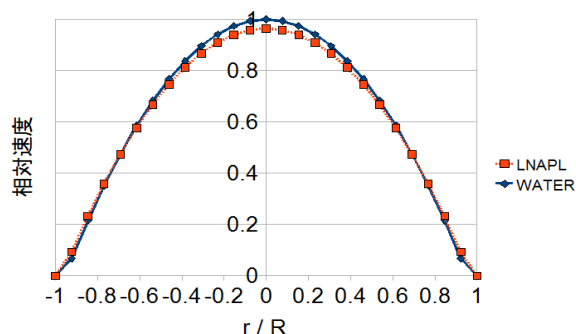


図 1. 単相流解析結果

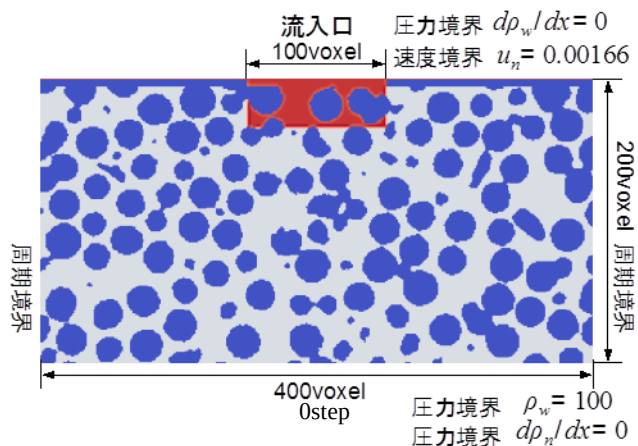
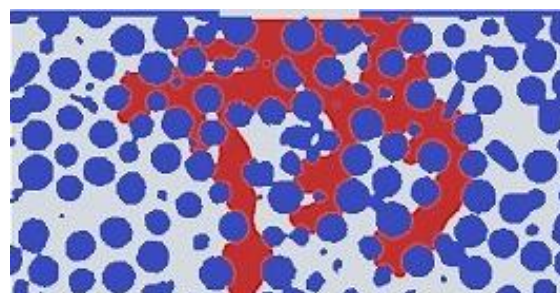
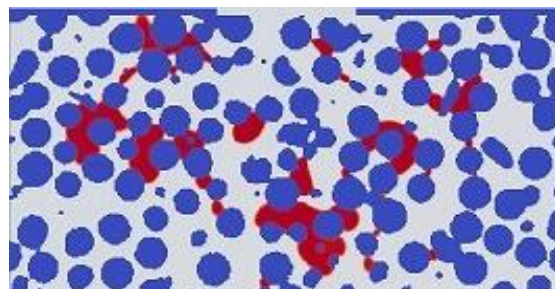


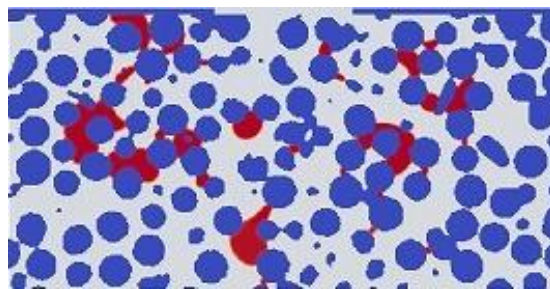
図 2. 初期条件



(a)22000step



(b)44000step



(c)60000step

図 3. 時間ごとの密度変化

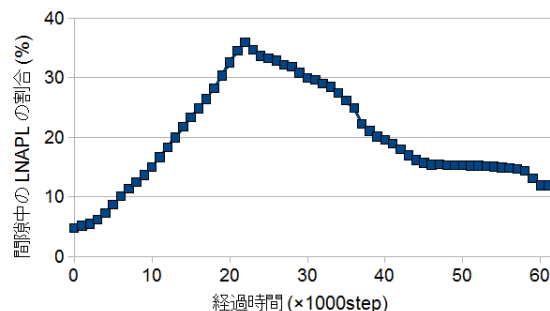


図 4. LNAPL の密度変化