

LBMを用いた多孔体における水-LNAPL の 3次元輸送機構と接続性の評価

熊本大学大学院 学生会員 ○永井 千彩希 熊本大学大学院 正会員 椋木 俊文
熊本大学大学院 学生会員 藤木 祐作

1. はじめに

油の地盤内浸透メカニズムに影響を及ぼす因子は間隙構造の空隙径分布、形状、そして間隙の接続性である¹⁾。これらの因子を定量評価するために、著者らはLNAPL(Light Non-Aqueous Phase Liquid)による地盤汚染とその浄化対策を研究テーマとして、マイクロ X 線 CT スキャナを用いることにより、砂材料の3次元間隙構造を抽出し、間隙構造中の油の残留分布を定量評価する手法を提案してきた¹⁾。また、ナビエ・ストークス方程式系を離散化してそれを計算機で解くという従来の手法と異なり、仮想的な粒子の分布関数を考えてその分布関数の発展方程式を解く格子ボルツマン法(Lattice Boltzmann Method : LBM)の導入を検討してきた。

本報では、ガラスビーズの X 線 CT 画像を幾何学的条件として LBM に導入し、多孔質材料内の二相流動挙動を評価したので報告する。

2. 解析手法および解析条件

著者らは、LBM モデルとして Pan et al.²⁾によって改良され等温 3 次元成分多相流の Shan and Chen³⁾モデルを使用している。また、接続性を考慮した解析を行い、水に対する LNAPL の流動挙動を考察するため、CT 画像から 3 次元間隙分布を評価可能な画像解析手法である 3 次元間隙径分布解析を使用した¹⁾。LBM の解析には、ガラスビーズの X 線 CT 画像を用い、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する。また、図 1 に示すような解析領域において流体流入箇所境界条件として一定流量を与え、水-LNAPL の流入解析を行う。赤が LNAPL、水色が水、グレーがガラスビーズを示している。流入口と出口に圧力差を与え 2 相流体の流体挙動を表している。左右境界は両液体ともバウンスバック境界条件をとる。水と LNAPL の粘性比を 1.335 (20°C) とし、また使用するパラメータは実験によって求められ、水中において実施した LNAPL-固体の接触角から接触角を 75° と決定した⁴⁾。

3. 解析結果

3.1 LBM 解析結果

図 2 は 3 次元 LBM 解析の最終ステップでの水と LNAPL の密度分布図で、オレンジ色が LNAPL を表している。図 3 は LBM と同じ領域に対して 3 次元間隙径分を示している。LNAPL の領域を 1、その他を 0 とした図 2 の CT 値と図 3 の CT 値を掛け合わせることで、LNAPL 流入箇所の間隙径分布のみを算出することができる。図 4 は間隙全の間隙径分布と LNAPL 流入領域の間隙径分布のヒストグラム表示であり、縦軸は全間隙数と LNAPL 数をそれぞれの全ボクセル数で除算した正規化値である。図 4 より、

LNAPL は全間隙と同様に、全間隙径に分布しており、間隙径の大きさだけでは間隙の接続性に起因する LNAPL の流動箇所を定量的に評価することは難しいことがわかった。

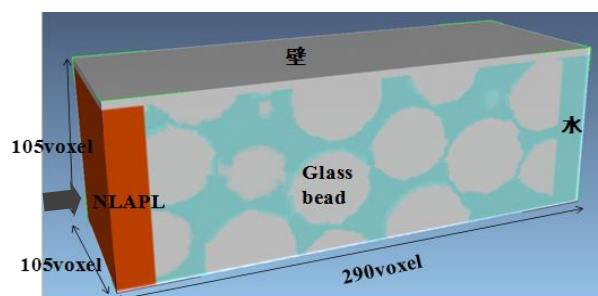


図 1 初期条件

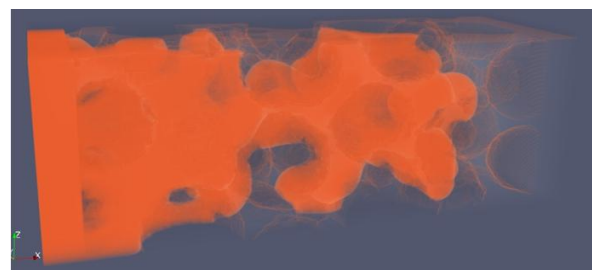


図 2 LBM による LNAPL 流入結果

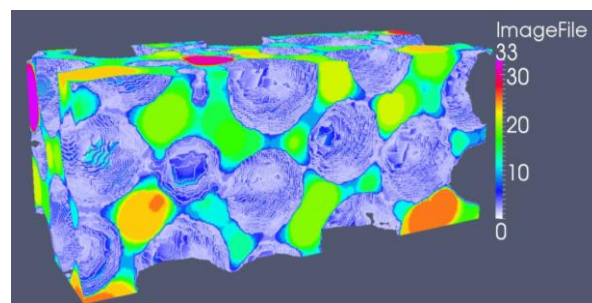


図 3 3次元間隙径分布図

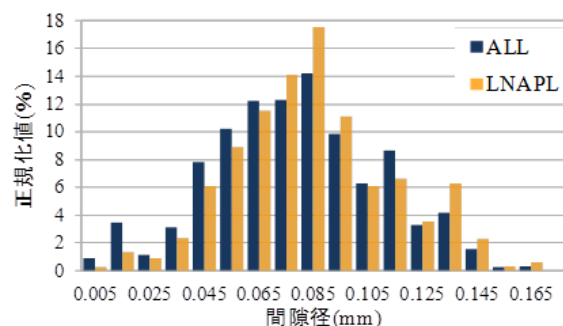


図 4 3次元間隙径分布のヒストグラム

3. 2 間隙の接続性評価に対する試み

間隙の接続性を定量的に評価するために、間隙径をパイプの径に置換させたモデル(以下、パイプモデルと呼ぶ)に対して水とLNAPLの2相流動解析を行った。具体的には、まず、3次元間隙径分布により得られた画像(図3)を分割する(図5(a))。分割した1つの長方体画像に対して間隙径の平均値を求め、その平均値をパイプの太さにした画像を作成し(図5(b))、図5(b)に対して同様に水-LNAPLの2相流動解析を実施した。図6に接続性を考慮したモデルの解析結果を示す。この結果より優先してLNAPLが流れている箇所と流れていない箇所が存在することが分かる。また、CT画像に対して行った解析結果(図2)と、パイプモデルに対して行った解析結果(図6)を合成した画像を図7に示す。図7より同じような箇所でも優先して流れているのが分かる。

3. 3 パイプモデルの評価方法と結果

図8はA~Iにおいてインクビン効果係数と平均間隙径の関係を示したグラフである。ここでは流体の進行方向の垂直面をA~Iとし、進行方向を1~5とする。横軸の平均間隙径とは進行方向の間隙径、つまりパイプの太さの平均値を意味する。次に、縦軸の差の平均間隙径とは流体の進行方向の間隙径、つまりパイプの太さの変化であり、式は

$$\text{インクビン効果係数} = \frac{\sum_{n=1}^4 |X_{n+1} - X_n|}{4} \quad (3.1)$$

と表され、Xは場所(A~I)である。例えばインクビン効果係数の値が大きい時、パイプの径の変化が大きくインクビン効果が大きくなるということを意味している。

図6のパイプモデルの解析結果よりC,D,Gは優先して流れている箇所である。次に、図8のC,D,Gを確認してみると、グラフのIVの事象に集中している。つまり、平均間隙径の値がより大きく、差の平均間隙径の値が小さい箇所ほど、優先してLNAPLが流れるということが分かった。

4. まとめ

間隙中を流れる流体の挙動を評価するには間隙径だけでなく接続性が重要であり、今回用いたパイプモデルを用いることで評価できることがわかった。また、解析結果から、水で飽和された間隙にLNAPLを流す場合は、間隙径の値がより大きく、インクビン効果係数の値が小さい(間隙径の変動が少ない)領域ほど流れやすいということがわかった。

5. 参考文献

- 1) 椋木俊文, 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用性, 第9回環境地盤工学シンポジウム, pp.47-52, 2011. 藤縄克之: 環境地下水学, 共立出版 pp.210-254, 2010
- 2) Pan, C., Hilpert, M., Miller, C. T.: Lattice Boltzmann simulation of two-phase flow in porous media, Water Resources Research, Vol.40(1), pp.1-14, 2004.
- 3) Shan, X and Chen, H.: Lattice Boltzmann Model for simulating flows with multiple phases and components, Physical review

E, Vol.47(3), 1993

- 4) T. Mukunoki, C. Nagai, Y. Fujiki, A.J. Tinetti and K. Mikami (2013), Evaluation of oil contamination in porous media by X-ray CT image analysis and LBM simulation, Proc. of the 7th International Joint Symposium on Problematic Soils and Geoenvironment in Asia, pp.63-66

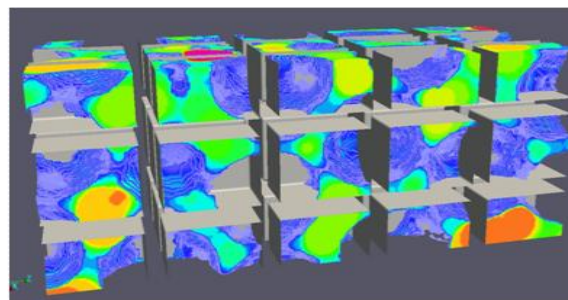


図5(a) 分割した3次元間隙径分布図

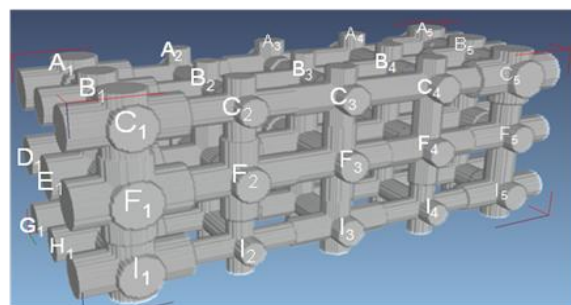


図5(b) パイプモデル

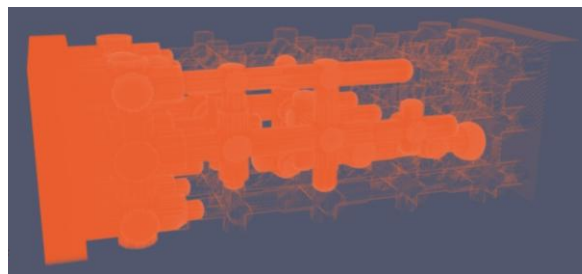


図6 接続性を考慮したモデルによるLNAPL流入結果

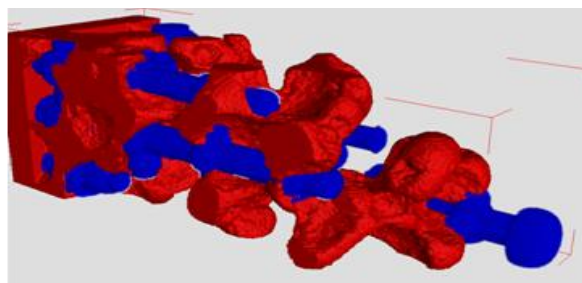


図7 CT画像とパイプモデルのLBM解析結果の比較

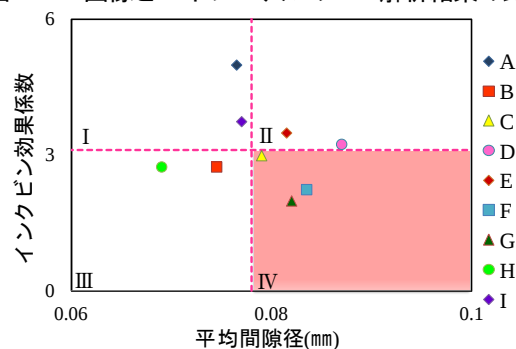


図8 平均間隙径とインクビン効果係数の関係を表したグラフ