

二相格子ボルツマン法による間隙スケールでの排水過程と吸水過程のシミュレーション Pore-scale Lattice Boltzmann Simulation of Drainage and Imbibition Processes

○竹内 雄人*・竹内 潤一郎*・藤原 正幸*

TAKEUCHI Yuto, TAKEUCHI Junichiro, and FUJIHARA Masayuki

1. はじめに

多孔質媒体内のマクロスケールでの流体の浸透は、間隙スケールでの無数の浸入イベントの産物である。従って、間隙スケールでの流体シミュレーションがマクロスケールでのモデル化に重要な役割を果たす。ここでは、color-gradient 型の二相格子ボルツマン法を用いて、間隙スケールで排水過程と吸水過程の数値解析を行う。数値解析結果から、各過程間での浸入様式の違いについて検討を行う。

2. 格子ボルツマン法

格子ボルツマン法は、近似的にナビエ-ストークス方程式を満足するボルツマン方程式を離散化して解く数値流体力学手法である。流体を微視的視点で捉え、流体粒子の衝突と移流を離散化した速度空間で計算し、そのモーメントを取ることで巨視的な圧力や流速を求めることができる。格子ボルツマン法の詳しい解説としては文献[1]を参照されたい。また、本研究で用いた color-gradient 型の格子ボルツマン法は主に文献[2]を参考にした。

3. 計算条件

解析対象の多孔質媒体(図 1)は、個別要素法で粒径 1mm~3mm の粒子を充填することで作成した。格子ボルツマン法の格子幅 Δx は 0.1mm とし、上流側と下流側の固体粒子を含まない幅 $20 \Delta x$ のバッファ層を含む $300 \Delta x \times 300 \Delta x \times 340 \Delta x$ の範囲で計算を行った。

表 1 に濡れ性/非濡れ性流体の無次元化した物性値を示す。固体への濡れは接触角 θ で導入し、濡れ性流体側の接触角を 45° とした。密度と粘性は二流体で同一とし、濡れ性の違いによる影響のみを検討する。

上流側の面に速度境界、下流側の面に流出境界、他の 4 面と粒子に滑りなし境界条件を与えた。排水過程では間隙を濡れ性流体が一様に占める初期状態から、吸水過程では間隙を非濡れ性流体が一様に占める初期状態から一定の流速で他方の流体の注入を行った。

4. 結果

図 2 に 0.5, 1, 2PV (Pore Volume) 注入時の排水・吸水過程での各流体の分布を示す。境界条件の影響が見られたため、上流側と下流側それぞれ 5 格子分を省いて示している。1PV は多孔

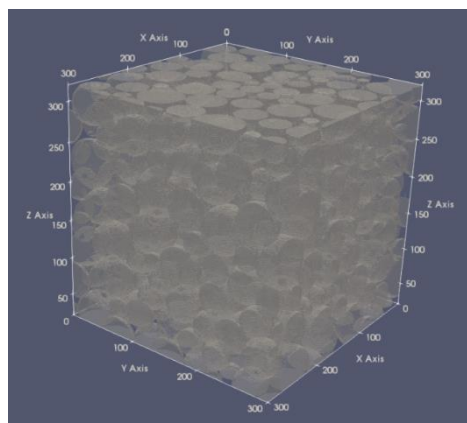


図 1 解析対象の多孔質媒体

Fig. 1 Simulated porous medium

表 1 流体の物性値

Table 1 Fluids properties

$Ca=2.4 \times 10^{-4}$ *	濡れ性流体	非濡れ性流体
密度 ρ	1	1
粘性係数 μ	1/6	1/6
接触角 θ	45°	135°
界面張力 σ	0.07	
浸入流速 u_{in}	0.0001	

$$* Ca = \mu u_{in} / \sigma$$

*京都大学大学院農学研究科 Graduate School of Agriculture, Kyoto University

キーワード: 数値流体力学, 浸透流, 水分移動

質媒体の全間隙体積に相当する。図 2 から、排水過程と吸水過程では浸入の仕方が異なることが分かる。

排水過程では、被浸入流体を完全に置換することなく浸入が進んでおり、浸透前線よりも上流側の被浸入流体の飽和度が高い。 $Ca = 2.4 \times 10^{-4}$ の本シミュレーションでは、アクセス可能な径の大きい間隙から順に埋める capillary fingering[3]に近い流れが発生していたと考えられる。その結果、径の小さい間隙は 2PV 注入後も置換されず、被浸入流体が多く残っている。

吸水過程では置換効率がより高く、上流側から順々に浸透が進んでいく様子が確認できる。これは cooperative pore filling[4]と呼ばれる吸水過程特有の浸入イベントの結果だと考えられる。cooperative pore filling とは、複数の界面が間隙で合流し新たな一つの界面を形成する現象である。加えて、僅かながら残留した被浸入流体は、毛管圧のため濡れ性流体がアクセスしにくい大きな間隙を主に占めていることが分かる。

図 3 に、排水過程と吸水過程での浸入流体の 0.1PV 注入ごとの飽和度を示す。どちらも 1PV 注入したあたりで飽和度が頭打ちになっている。図 2 で定性的に見たように、排水過程では残留飽和度(2PV 注入後の被浸入流体の飽和度)が 32.2%と大きく、吸水過程では 2%程度で置換効率が低い。

以上に示した浸入様式の違いは、水分特性曲線や不飽和浸透率のヒステリシスの原因の一つだと考えられる。なお、表 1 に示した通り本シミュレーションの物性値は水-空気のそれとは大きく異なり、あくまで濡れによる浸透の違いについて論じている。

5. おわりに

二相格子ボルツマン法を用いて間隙スケールでの排水過程と吸水過程のシミュレーションを行い、浸入様式について検討を行った。今後は、本手法を用いて、濡れ性だけでなく粘性や界面張力も含めた浸入様式のパラメタ依存性の検討や、疎水性粒子による水分保持特性の変化など応用に際した解析を行っていく。

参考文献

[1] Krüger, T., et al. (2017). Springer International Publishing, 10(978-3). [2] Chen, Y., et al. (2019). Water Resources Research, 55(12), 11144-11165. [3] Lenormand, R., et al. (1988). Journal of Fluid Mechanics, 189(1), 165-187. [4] Cieplak, M., & Robbins, M. O. (1988). Physical Review Letters, 60(20), 2042.

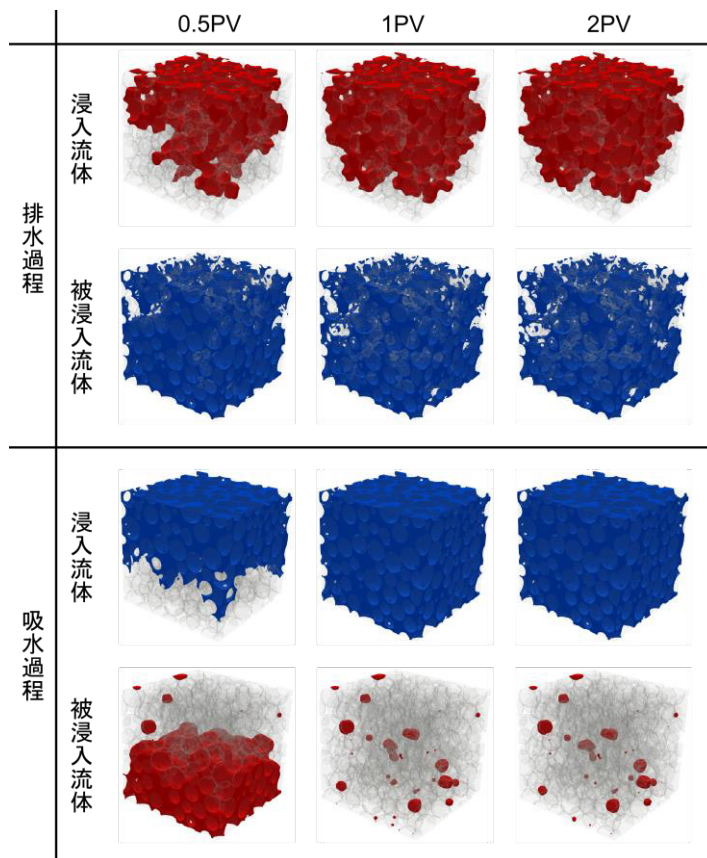


図 2 排水過程と吸水過程の 0.5, 1, 2PV 注入時の流体分布
Fig. 2 Fluid distribution at 0.5, 1, and 2 PV injection for drainage and imbibition processes

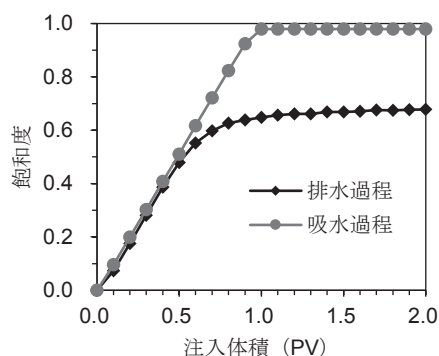


図 3 0.1PV 注入ごとの浸入流体の飽和度
Fig. 3 Saturation of injected fluid at every 0.1PV injection for drainage and imbibition processes