

多孔質体への水浸入時に発生するフィンガークロウの間隙スケールシミュレーション Pore-scale Simulation of Finger Flow during Water Intrusion into Porous Media

○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

不飽和の多孔質体へ水が浸入する際、フィンガークロウと呼ばれる選択的な流れが生じることがある。流体力学的な不安定性によるフィンガークロウは透水係数の空間分布が少ない均質な多孔質体においても発生し、この現象は40年以上にわたり研究されてきた[1]。この種のフィンガークロウの発生の有無やその程度は初期水分量[2]、フラックスと透水係数の関係[3]、粒径[4]、接触角[4,5]などに影響を受けると考えられているが、明確な基準は未だ明らかになっていない。

フラックスの大小によるフィンガークロウの発生の有無は、間隙スケールで界面がピストン状に進行するか拡散的に進行するかによって定まると推測されている[6]。また、初期水分量や接触角によっても間隙スケールでの水移動の様態が変化し、フィンガークロウ形成に影響を与えたと考えられる。したがって、間隙スケールでの観測やシミュレーションを用いてフィンガークロウ形成を議論することが重要である。

間隙スケールシミュレーション手法として格子ボルツマン法(LBM)が近年注目されており、石油採取や二酸化酸素貯留の分野で適用されてきた[7]。LBMは近似的にナビエ-ストークス方程式を解く手法であり、複雑境界での境界条件の適用が比較的容易であるのが利点である。本研究でもLBMを採用して間隙スケールでの水浸入のシミュレーションを行い、フィンガークロウの発生を確認する。

2. 格子ボルツマン法(LBM)

混相流のLBMには大きく分けてcolor-gradient, Shan-Chen, phase-fieldの3つのモデルが存在するが、いずれも高密度比での安定な混相流計算に課題を抱えている開発途上のモデルである。そのため水-空気の多孔質体内混相流の計算を行った文献は見られず、水-油や水-超臨界二酸化炭素など、密度のオーダーが等しい混相流に適用されてきた。

本研究ではphase-fieldモデルを採用し、二相界面スキームに相当する保存型Allen-Cahn方程式

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi \mathbf{u}) = \nabla \cdot [M(\nabla \phi - \lambda \mathbf{n})] \quad (1)$$

と連続式及びナビエ-ストークス方程式

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + \mathbf{F} \quad (3)$$

をLBMで解いて水-空気の混相流の計算を行う。ここで、 ϕ は0から1の値をとる秩序関数、 \mathbf{u} は流速ベクトル、 M はモビリティ、 λ は界面厚さと関係がある値、 \mathbf{n} は界面法線ベクトル、 ρ は密度、 p は圧力、 μ は粘性係数、 \mathbf{F} は界面張力項と重力項から成る体積力である。LBMではこれらの方程式を直接解くわけではなく、摂動展開することで対象の方程式が近似的に導出される格子ボルツマン方程式(LBE)を解く。保存型Allen-Cahn方程式のLBEにはLiangらのモデル[8]を、連続式及びナビエ-ストークス方程式のLBEにはZu and He [9]のモデルを用いる。LiangらのモデルはLBEへの時間微分項の導入により摂動展開した際に式(1)がより精度よく満たされる点、Zu and Heのモデルは弱圧縮性のスキームである通常のLBMと異なりそれぞれ式(2)、(3)のように非圧縮の質量保存則とナビエ-ストークス方程式が導出される点が

*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

優れている。 $\phi=0$ が空気、 $\phi=1$ が水を表し、 $0 < \phi < 1$ が拡散界面となる。添え字 a , w をそれぞれ空気、水として、界面での密度と粘性係数は以下の 2 式により補間する。

$$\rho = \phi(\rho_w - \rho_a) + \rho_a \quad (4)$$

$$\mu = \phi(\mu_w - \mu_a) + \mu_a \quad (5)$$

3. 計算条件

2 節で示した phase-field LBM の二次元モデルを実装し、二次元多孔質体への水浸入シミュレーションを行った。今回採用したモデルでは流速などの空間微分を計算する必要があり、直交格子と適合しない固体境界近傍での差分の妥当性が検証できていないため、固体粒子は正方形とした。

左右境界には周期境界を与えた。上端境界には流速境界を与え、水を一定流速で浸入させた。下端は圧力境界とし、基準となる空気の圧力を与えた。初期状態での水分量はゼロとして計算を行った。

4. 結果

図 1 に粒子の一辺の長さが 0.5 mm、浸入流速 3.3633×10^{-3} m/s、接触角 45° での 0.0826 PV 浸入時、0.165 PV 浸入時、ブレイクスルー時の流体分布を示す。ここで、PV はポアボリューム(間隙総体積)である。2 本のフィンガーが形成されていることが確認できる。フィンガー流発生時には、フィンガー内部が先端でほぼ飽和し後背部で不飽和となる saturation overshoot が起きることが知られている。本計算では先端部、後背部共に完全に飽和しており、saturation overshoot は見られない。ただし、中央のフィンガーは 0.165 PV と比較してブレイクスルー時にフィンガー上部で排水が行われやや細くなっている。そのため計算領域を十分大きくとればより排水が行われ、saturation overshoot が発生すると考えられる。講演ではその他の計算条件での結果も紹介する予定である。

5. おわりに

本研究では phase-field LBM を用いて多孔質体への間隙スケールの水浸入のシミュレーションを行った。LBM を多孔質体内の水-空気の不飽和流れに適用した例はこれまで見られなかったが、改良された phase-field LBM を用いることで安定に計算できることを示した。今回適用した解法を用いることでフィンガー流に限らず様々な状況での不飽和流れが計算可能だと考えられる。今後は計算の三次元化、大規模並列計算に向けたコードの改良を行っていく。

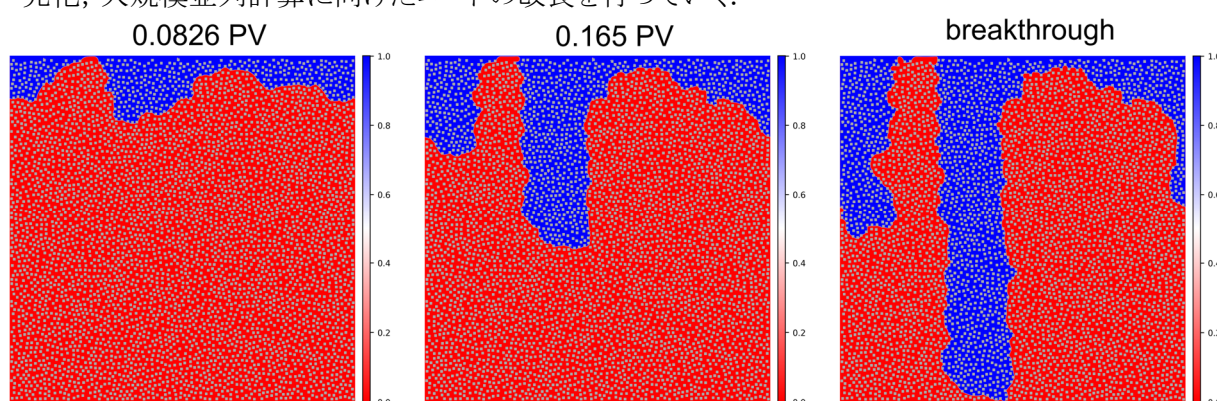


図 1 0.1PV 浸入時、0.2PV 浸入時、ブレイクスルー時の流体分布

Fig. 1 Fluid distribution at 0.1 PV injection, 0.2 PV injection, and breakthrough

参考文献

- [1] DiCarlo, D. A. (2013). *Water Resources Research*, 49, 4531–4544. [2] Bauters, T. W. J., et al. (2000). *Journal of Hydrology*, 231–232, 244–254. [3] Glass, R. J., & Nicholl, M. J. (1995). *Geoderma*, 70(2-4), 133-163. [4] Selker, J. S., & Schroth, M. H. (1998). *Water Resources Research*, 34(8), 1935-1940. [5] Annaka, T., & Hanayama, S. (2010). *Soil Science & Plant Nutrition*, 56(3), 366-370. [6] DiCarlo, D. A. (2006). *Water Resources Research*, 42(7), W07408. [7] Liu, H., et al. (2016). *Computational Geosciences*, 20(4), 777-805. [8] Liang, H., et al. (2018). *Physical Review E*, 97(3), 033309. [9] Zu, Y. Q., & He, S. (2013). *Physical Review E*, 87(4), 043301.