

有限体積の液体において粘度差に由来する界面流動の新たな特性を発見

～実験と数値計算の融合で解明、石油回収や地下水汚染の高精度予測に期待～

国立大学法人東京農工大学工学部化学システム工学科 卒業生の Hamirul Bin Othman さん、同大学院工学研究院応用化学部門（生物システム応用科学府 生物機能システム科学専攻）の長津雄一郎准教授、インド工科大学ローパー校数学科 博士後期課程学生（研究当時）の Vandita Sharma さん、同 Manoranjan Mishra 准教授からなる国際共同研究チームは、実験と数値計算の融合研究により、多孔質媒質内で高粘性流体に低粘性流体を押し込んだ際に界面が不安定になり低粘性流体が指状に広がる現象（粘性フィンガリング）が、放射状に広がる有限体積の流体に形成される場合には、持続的な現象であることを発見しました。これまで、直線状に広がる有限体積の流体に形成される場合、粘性フィンガリングは過渡的な現象で、いずれ消失することが明らかになっていました。本成果は、「有限体積の流体に形成される粘性フィンガリング」の特性は、それが直線状に広がるか放射状に広がるかで、その特性が質的に異なることを示すものです。「放射状に広がる有限体積の流体に形成される粘性フィンガリング」が、地層からの石油回収プロセスや地下水における汚染物質の拡散プロセスで発生していることがわかっており、本成果は、それらのプロセスにおける現象予測の高精度化へ寄与することが期待されます。

本研究成果は、流体力学に関する専門学術誌である Journal of Fluid Mechanics（電子版 2021 年 4 月 6 日付）に掲載されました。

掲載場所：

<https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-fluid-mechanics/article/abs/viscous-fingering-of-miscible-annular-ring/AC7BEBCBAB702786C635223AFF4C551F>

論文名： Viscous fingering of miscible annular ring

著者： Vandita Sharma, Hamirul Bin Othman, Yuichiro Nagatsu, and Manoranjan Mishra

現状：多孔質媒質（*1）内で高粘性流体が低粘性流体に押されるとき、二流体の界面は流体力学的に不安定（*2）となり指状に変形して広がります。この現象は **Viscous fingering**（粘性フィンガリング、以下 VF と略記）と呼ばれており、界面流体力学の一問題として 1950 年代から研究されています。VF は、その広がり方が直線状か放射状かの二つに大別されます（図 1(a)(b)）。古典的に研究されてきたのは、半無限領域の高粘性流体が低粘性流体に押される場合でした（図 1(a)(b)）。2000 年代半ばから、有限体積の流体が粘度の異なるもう一つの流体に囲まれ、有限体積の流体ともう一つの流体がもつ二つの界面のうち、一つの界面で形成される、いわゆる「有限体積の流体に形成される VF」がクロマトグラフィーや地下水での汚染物質拡散で見られ、そのダイナミクスの理解の重要性が指摘され、直線状に VF が広がる系（図 1(c)）について主として数値解析的な研究が行われてきました。その結果、「有限体積の流体に形成される VF」は「半無限体積の流体に形成される VF」と異なり過渡的な現象（すなわち有限体積の流体に形成される VF は時間経過とともに最終的には消失する）であることが示されていました。しかしながら、「放射状に広がる有限体積の流体に形成される VF」はその研究例が非常に少なく、そのダイナミクスは不明な点が多いのが現状でした。

研究成果：本研究チームは、多孔質媒質の二次元モデルであるヘレ・ショウセル（図 1(b)）に形成される VF を対象に、グリセリン-水の溶液系を用いて、高粘性液体と低粘性液体の粘度比、有限液体の体積、流量を系統的に変化させて実験を行いました。数値計算は、商用ソフト COMSOL Multiphysics®の二相系ダルシーモデルと呼ばれるモデルを用いて行うことにより、実験条件と同一条件で行うことを可

能としました (図 2(a)(b))。その結果、「放射状に広がる有限体積の流体に形成される VF」は持続的な現象であることを発見しました (図 3)。このことは、「直線状に広がる有限体積の流体に形成される VF」が過渡的な現象であることと相反するものです。これは、VF 形成後ある程度時間が経過すると新しい VF 形成は消滅するが、VF 形成の利用できる領域が放射状に広がるため、有限の数の VF がその後、常に残存するためであることが明らかになりました。このことは、「有限体積の流体に形成される VF」の特性は、それが直線状に広がるか、放射状に広がるかで、その特性が質的に異なることが示されました。

研究体制：実験を東京農工大学・長津雄一郎准教授、長津研究室卒業生の Hamirul Bin Othman さんが行い、数値計算をインド工科大学ローパー校・Manoranjan Mishra 准教授 (東京農工大学大学院グローバルイノベーション研究院特任准教授兼任)、Mishra 研究室の博士後期課程学生 (研究当時) の Vandita Sharma さんが行いました。このような実験と数値解析の協働的な共同研究が、この「放射状に広がる有限体積の流体に形成される VF」の新たな特性の発見を可能としました。本研究は日本学術振興会外国人研究者招へい制度 (No. L19548)、東京農工大学グローバルイノベーション研究院の田川義之チーム「生体材料 3D プリント技術を拓く動的界面力学研究拠点」の支援を受けて行われたものです。

今後の展開：本研究により、「有限体積の流体に形成される VF」の特性は、それが直線状に広がるか、放射状に広がるかで、その特性が定性的に異なることが示されました。「直線状に広がる有限体積の流体に形成される VF」では、有限体積の流体が高粘度であるか低粘度であるかで、その特性が定量的に異なることが示されています。今後、本研究とは逆の、有限体積の流体が低粘度な場合についての研究を行い、「放射状に広がる有限体積の流体に形成される VF」のダイナミクスの全容解明を目指します。また「放射状に広がる有限体積の流体に形成される VF」が、地層からの石油回収プロセスや地下水における汚染物質の拡散プロセスで発生していることがわかっており、本成果は、それらのプロセスにおける現象予測の高精度化へ寄与することが期待されます。

語句解説：

- ※1 多孔質媒質：地中、スポンジ、吸取紙のように非常に小さな穴が数多くあいている媒体のこと。
- ※2 二流体界面の流体力学的安定・不安定：流体の界面で生じた微小な乱れが増幅し、それにより界面が変形する現象を流体力学的不安定という。一方、生じた微小な乱れが減衰してゆく場合、流体力学的安定という。

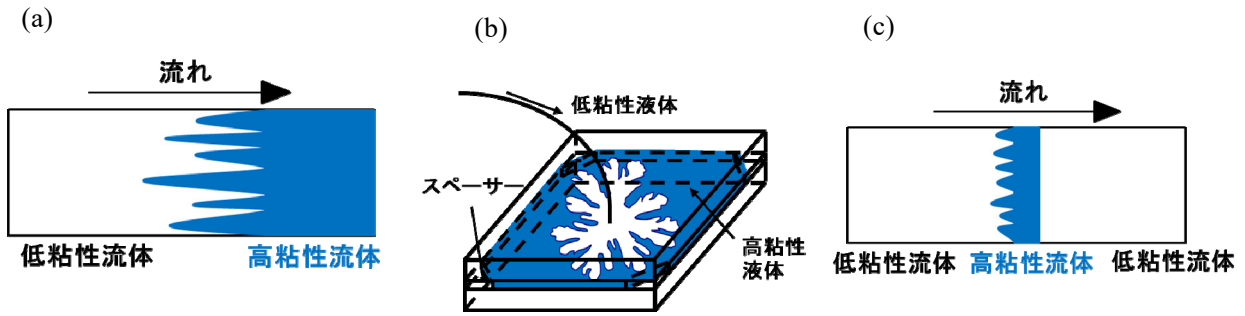


図 1 (a)直線状に広がる VF、(b)高粘性液体を満したヘレ・ショウセル（多孔質媒質の二次元モデルであり、非常に小さい距離だけ離れて設置された二枚の平行平板の隙間に低粘性液体を一点より注入すると、それらの界面は流体力学的に不安定であり、VF は放射状に広がる。(c) 直線状に広がる有限体積の流体に形成される VF。高粘性流体が低粘性流体を押している有限体積の流体の右側の界面は流体力学的に安定であり VF が形成されない。

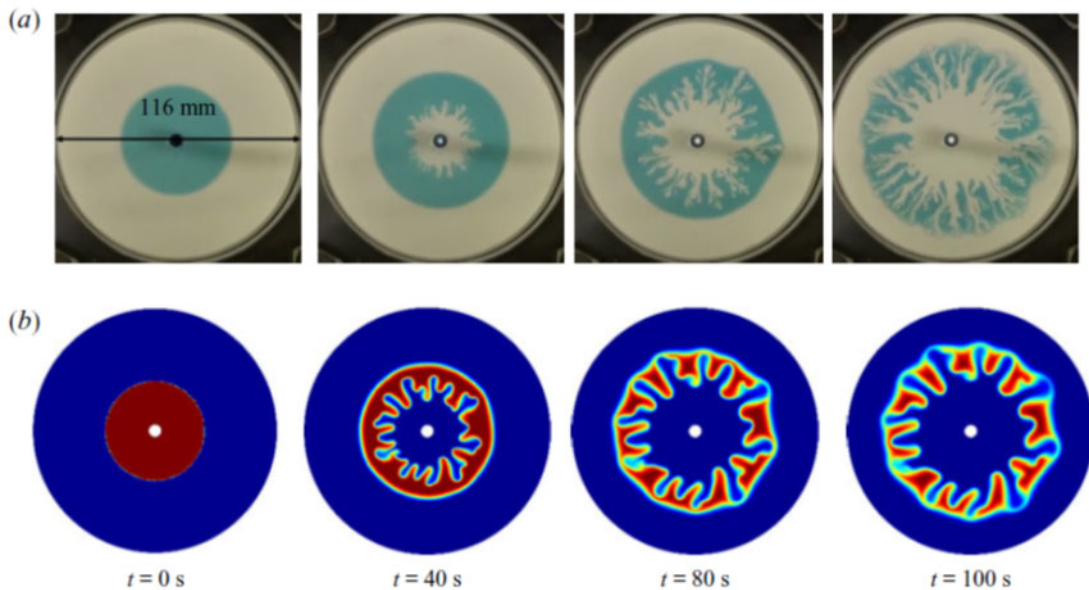


図 2 同一条件での実験(a)と数値計算(b)による放射状に広がる有限体積の流体に形成される VF。実験(a)では青い液体が高粘性液体。

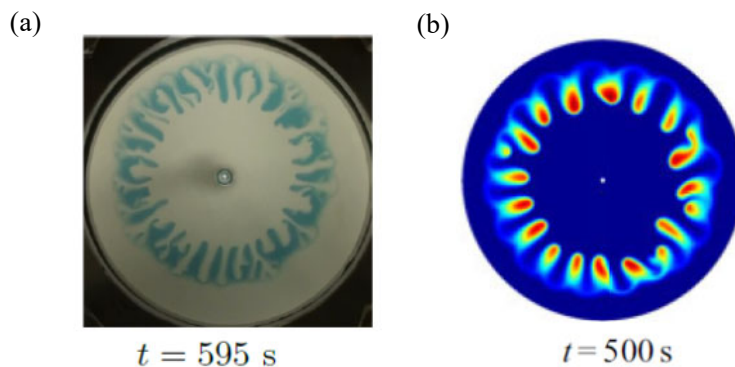


図 3 放射状に広がる有限体積の流体に形成される VF の持続性 (a)実験、(b)数値計算。VF 形成後ある程度時間が経過すると新しい VF 形成は消滅するが、VF 形成の利用できる領域が放射状に広がるため、有限の数の VF がその後、常に残存する。

◆研究に関する問い合わせ◆

東京農工大学大学院工学研究院応用化学部門

(生物システム応用科学府生物機能システム科学専攻)

准教授 長津 雄一郎

TEL/FAX : 042-388-7656/042-388-7693 E-mail : nagatsu@cc.tuat.ac.jp