配信先：文部科学記者会、科学記者会、共同通信 PR ワイヤー

２０２６年１１月１８日

東京都公立大学法人　東京都立大学

泡が動くと、液体は速くしみ込む

― 浸透効率向上につながる仕組みを解明 ―

1. ポイント

- 泡への液体浸透は、従来、泡がもつ浸透圧[注1]によって決まると考えられてきたが、実験で得られる浸透速度と理論予測が一致しなかった。
- 泡が動ける境界条件では、液体の浸透とともに泡全体が移動し、見かけの浸透が速くなることを確認した。
- 泡の動きを抑えると、液体の侵入によって泡が圧縮され、その反発によって浸透が遅くなることを明らかにした。
- 液体の浸透速度は、毛細管力だけでなく、泡そのものの移動や圧縮といった力学的応答によって支配されることを示した。
- 泡を利用した油や微粒子の回収などにおいて、境界条件や泡の動きやすさを制御することで、浸透効率を高めるための新たな設計指針につながることが期待される。

2. 概要

泡は、油や微粒子によって駆動されると考えられてきましたが、実際の浸透速度は理論予測と一致しない場合があり、その原因は十分に分かっていませんでした。

東京都立大学大学院理学研究科の玉木健登（博士前期課程）、柳沢直也（研究当時：博士後期課程、現在：東京大学大学院総合文化研究科先進科学研究機構　特任助教）、栗田玲教授の研究グループは、泡に液体がしみ込む速さが、泡の境界条件[注2]、すなわち泡そのものが動けるかどうかによって大きく変化することを明らかにしました。泡が動ける場合には、液体の侵入とともに泡全体が移動し、見かけの浸透が速くなります。一方、泡の動きが抑えられると、泡が圧縮され、その反発によって浸透が遅くなります。

今回の研究では、液体の浸透と泡の動きを同時に観察することで、泡への液体浸透が単なる毛細管現象[注3]ではなく、泡の力学的な応答と強く結びついていることを示しました。この知見は、浸透効率を向上させるための新たな設計指針になることが期待されます。

■本研究成果は、11 月 13 日付けで Nature Publishing Group が発行する英文誌 *Communications Physics* に発表されました。本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費助成事業（No. 26K00676）の支援を受けて行われました。

3. 研究の背景

泡は、気泡が密に詰まった柔らかい材料であり、内部に液体を吸い込む性質をもっています。この性質は、油や微粒子の回収など、泡を利用したさまざまな技術にも関係しています。泡に液体が入り込むとき、その駆動力は、泡がもつ表面エネルギーに由来する「浸透圧」であると考えられてきました。また、液体の浸透速度は、細い管に液体が吸い上げられる毛細管現象と同様の理論で説明されることが一般的でした。しかし実際の泡では、液体の浸透速度がこうした理論予測と一致しない例が数多く報告されています。特に、気泡がほとんど並び替わらないほど密に詰まった状態でも、予想より遅く液体が浸透し、その原因は明らかになっていませんでした。

そこで本研究では、液体が侵入するときに、泡を固定された構造として考えるのではなく、泡そのものが移動したり圧縮されたりすることに注目しました。泡の境界条件を変えながら、液体の浸透と気泡の動きを同時に観察することで、泡の力学的な応答が浸透速度にどのような影響を与えるかを調べました。

4. 研究の詳細

研究グループは、泡への液体浸透を調べるため、泡の両端の境界条件を変え、液体が浸透する距離と泡そのものの動きを同時に観察しました。泡が自由に動ける「開放条件」、片側のみ動ける「半開放条件」、泡の動きを両側から抑えた「閉鎖条件」の3種類を比較しました。

図１は、これらの条件で液体が泡の中へどのように浸透したかを示しています。泡が動ける条件では液体は速く浸透しましたが、泡の動きを抑えた閉鎖条件では、浸透速度が大きく低下しました。この結果から、同じ泡、同じ液体を用いても、泡が動けるかどうかによって浸透の速さそのものが変化することが分かりました。

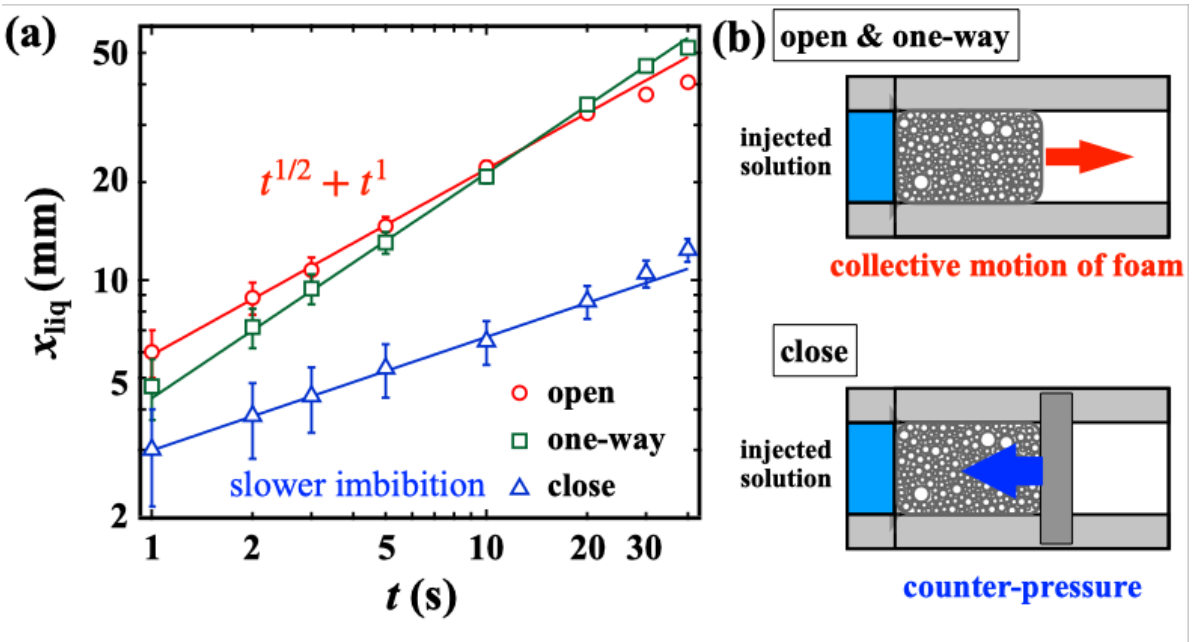


図１　泡が自由に動ける開放系では液体の浸透が速くなる一方、泡が動けない閉鎖系では液体の浸透が遅くなる。

そこで、液体が浸透するときに泡自身がどのように動いているかを詳しく観察しました。図２は、片側のみ泡が動ける条件での浸透の様子です。液体が左側から浸透すると、それに伴って泡全体が右側へ押し出されるように移動していることが分かります。画像解析からも、液体が到達していない領域の泡は大きく再配置することなく、ほぼ一体となって移動していることが確認されました。

一方、泡の動きを両側から抑えた場合には、泡全体が移動することができません。そこで一層の泡を用いて個々の気泡の変位を追跡したところ、図３に示すように、液体を入れた場所から閉じた壁に向かって気泡の移動量が徐々に小さくなっていました。これは、液体の侵入によって泡が圧縮されていることを示しています。実際、その圧縮ひずみは約1%程度でした。

このわずかな圧縮でも、気泡内部の圧力上昇は液体を吸い込む浸透圧と同程度になり得ます。そのため、泡が動けない場合には、液体が侵入するほど泡の圧縮による反発が強くなり、さらに液体が入りにくくなります。逆に泡が動ける場合には圧縮が蓄積せず、泡そのものが移動することで液体を受け入れられます。

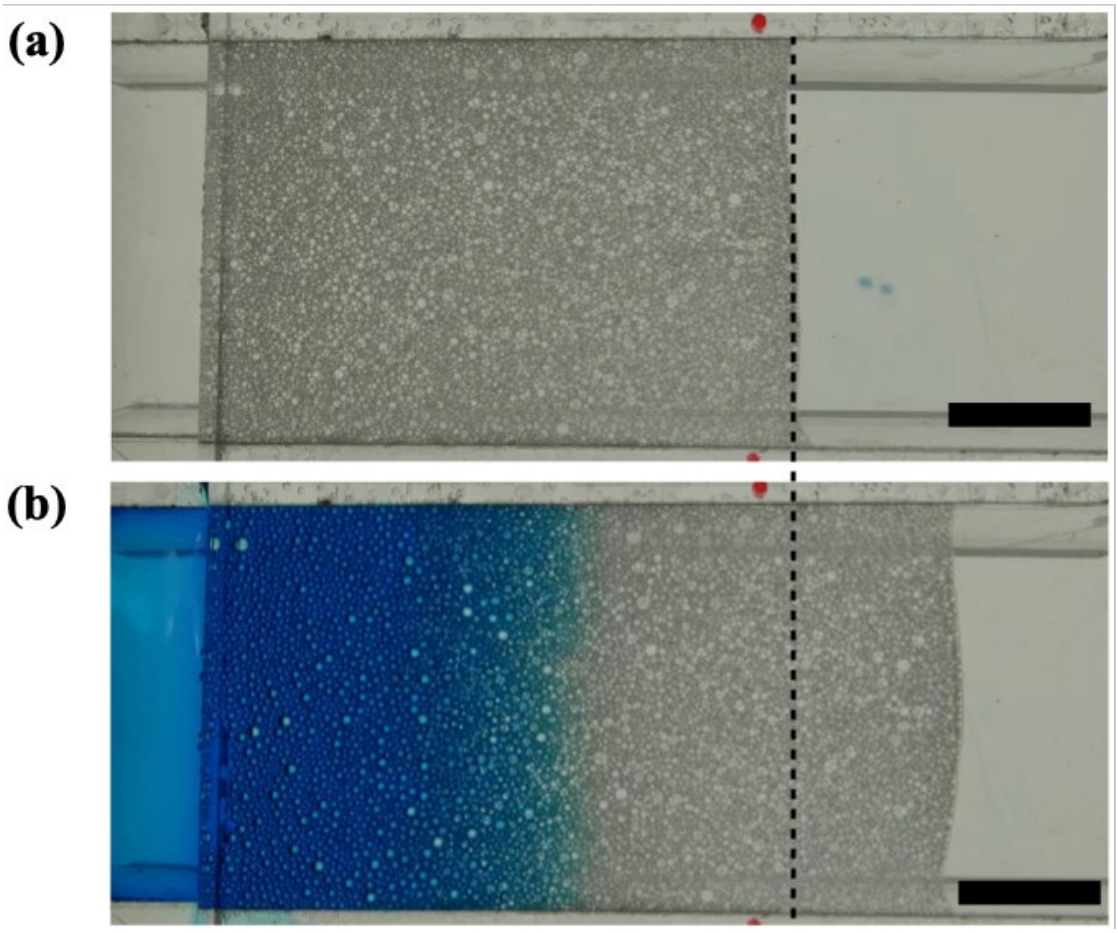


図２　右側が自由に動ける半開放系における、(a) 液体浸透前と (b) 液体浸透中の様子。点線は液体浸透前の泡の右端の位置を示している。液体の浸透とともに、泡の右端が右方向へ移動している様子が分かる。

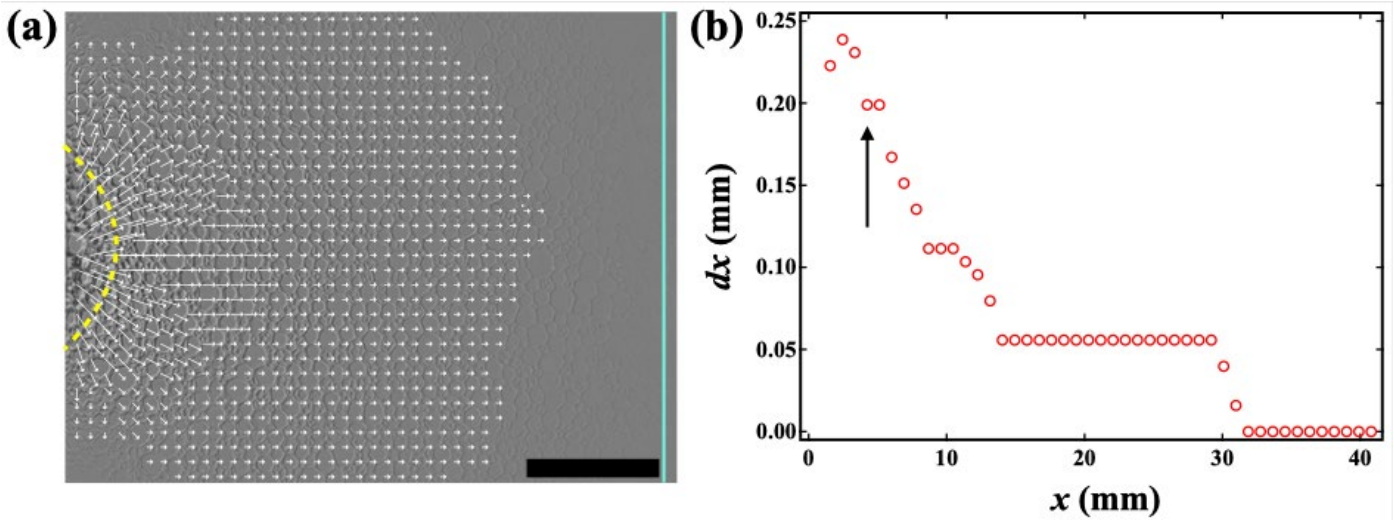


図３　(a) 閉鎖系における気泡の動き。矢印は液体を注入した際の気泡の変位を示し、点線は液体が浸透した領域を示している。(b) 気泡の変位量の位置依存性。注入口に近いほど変位が大きく、左壁付近ではほとんど変位していない。この変位量の傾きは、泡が圧縮されていることを示している。

5. 研究の意義と波及効果

本研究では、泡への液体浸透が、液体側の性質や泡の浸透圧だけで決まるのではなく、泡そのものがどのように動き、変形できるかによって大きく変化することを明らかにしました。特に、泡が移動できる場合には浸透が速く進み、移動が抑えられる場合には泡の圧縮による反発が生じ、浸透が遅くなることを示しました。

この成果は、泡への液体浸透を考える際に、泡を単なる固定された多孔質材料として扱うのではなく、液体の侵入に応じて動く「柔らかい構造体」として考える必要があることを示しています。これは、泡に限らず、エマルションやゲルなど、柔らかい構造の内部を液体が移動するさまざまな材料にも共通する考え方です。

また、泡は油や微粒子の回収、分離、洗浄など幅広い用途で利用されています。本研究の結果は、泡の組成だけでなく、泡が動きやすい構造や境界条件を設計することで、液体の取り込み速度や回収効率を高められる可能性を示しています。今後、実際の回収プロセスや複雑な三次元泡への展開によって、より効率的な泡利用技術につながることが期待されます。

6. 用語解説

（注１）　浸透圧：泡の内部では、気泡が密に詰まって変形することで過剰な表面エネルギーが生じる。泡はこのエネルギーを減らすために外部から液体を吸い込むことができる。このとき、液体を吸い込む駆動力となる圧力のこと。

（注２）　境界条件:泡の端が自由に動けるか、壁などによって動きを制限されているかを表す条件のこと。

（注３）　毛細管現象：非常に細い管（毛細管）を液体に挿入すると、表面エネルギーの変化によって、毛細管に液体が入っていく現象のこと。

7. 論文情報

掲載誌：Communications Physics

タイトル：Boundary-controlled imbibition reveals liquid-structure coupling in soft jammed systems

著者：Kento Tamaki, Naoya Yanagisawa and Rei Kurita

ＤＯＩ：10.1038/s42005-026-02960-6

ＵＲＬ：https://www.nature.com/articles/s42005-026-02960-6

8. 問合せ先

（研究に関すること）

東京都立大学大学院　理学研究科　教授　栗田玲

TEL：042-677-2505　E-mail: kurita@tmu.ac.jp

（大学に関すること）

東京都公立大学法人

東京都立大学管理部 企画広報課 広報係

TEL：042-677-1806　E-mail: info@jmj.tmu.ac.jp