

泳ぐ水滴はなぜ直進しないのか？

発表のポイント

- ・遊泳水滴は細胞や微生物と同程度の大きさであり、自ら動くという特徴を備えたシンプルな実験モデルである。今回は、その運動に多様性が生じるメカニズムを明らかにするため研究を行った。
- ・実験により、水滴サイズが大きくなるにつれて直進運動からふらふらと曲がりながら動く運動へと変化することが明らかになった。
- ・理論的な分析から、この運動モード変化は進行方向をずらすような刺激への応答性が変わることによって生じていることが示唆された。
- ・原形質流動で動く細胞といった複雑な「液滴」の運動にも同様のメカニズムが潜んでいるかもしれない。

1. 概要

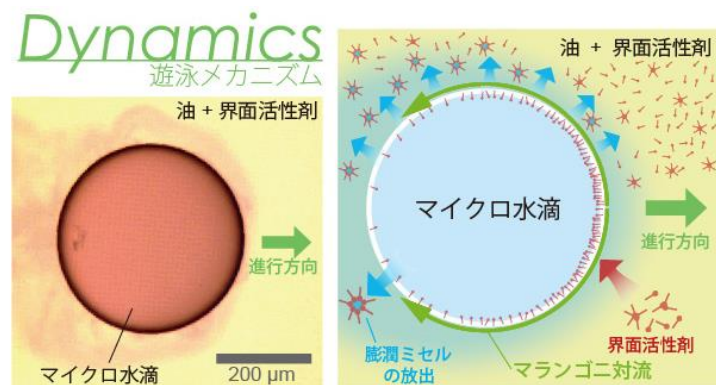
須田沙織 理学研究科博士課程学生（研究当時）、市川正敏 同講師、須田智晴 慶應義塾大学 日本学術振興会特別研究員、大村拓也 ドイツマックスプランク研究所 HFSP 研究者らの研究グループは、泳ぐ水滴の観測実験と理論的な考察を行い、水滴サイズが大きくなるにつれて直線的な泳ぎをやめて、ふらふらと彷徨い始めることを明らかにしました。遊泳水滴は多様な運動を示すことが知られていましたが、それがどの様に引き起こされるのかについては、これまでよく分かっていませんでした。遊泳水滴の観察や流動場の測定、流体力学的モデルの解析及び実験結果との比較から、進行方向の変化に対する応答性の違いが運動モードの変化のメカニズムになっていることが示されました。

2. 背景

細胞や微生物の自発的な運動は、その生態や生存戦略を左右する重要な生命機能の一つであり、まっすぐ進んだりふらふら迷ったりと多様な様相を示します。我々はそのような動きの中に生き物らしさを感じるのかもしれませんが、では、動きの多様性を決めるメカニズムは何でしょうか。生き物の場合に想定されるメカニズムは多種多様です。細胞の形、駆動力の異方性、エサの感知による方向転換、内部の化学反応の自発的な対称性の破れなど、様々なアプローチで研究が行われています。では、細胞や微生物が住んでいるミクロの流体世界そのものにも、何らかのメカニズムが潜んでいないでしょうか。

自ら遊泳する物体の性質を調べるシンプルなモデル系として、細胞や微生物と同程度の大きさを持ち、化学的な仕組みによって自ら泳ぐシステムがいくつか知られています。本研究ではその一つである、界面活性剤を溶かした油の中に水滴を導入した系に着目しました。水と油の境界の界面活性剤濃度の不均一は界面張力の不均一に繋がり、マランゴニ対流を生

じさせます。その対流を駆動力にして水滴はひとりでの遊泳を始めます。基本的には直進運動を示しますが、条件によっては多様な運動を見ることが知られています。しかし、その理由やメカニズムは分かっていませんでした。



Swimming mode

遊泳モード

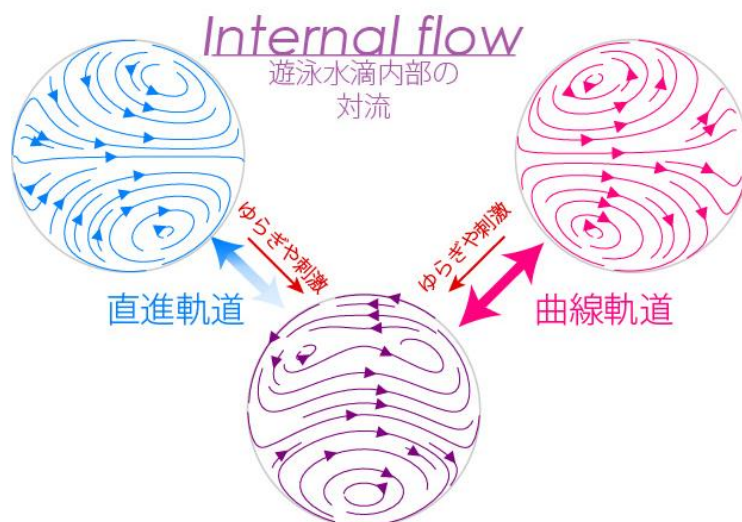
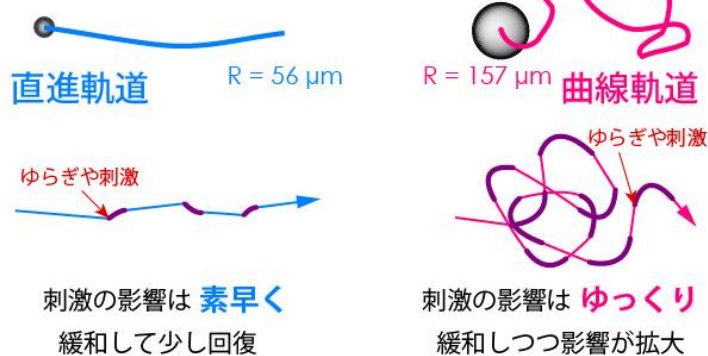


図. (上) 局所的な界面活性剤の濃度変化で引き起こされるマランゴニ対流によって遊泳する水滴の写真とその模式図。(中) 実験で観察された遊泳モードと水滴の軌跡。(下) 理論モデルで導かれた、水滴の内部対流と動きとの関係。

3. 研究手法・成果

実験では、純水の水滴、油、界面活性剤からなるシンプルな系の自己遊泳を観察しました。まず、水滴サイズを精密に制御しつつ顕微鏡観察することで、水滴を大きくすると直進運動からふらふらと曲がりながら動く運動へと変化することを見出しました。次にこの変化の原因を探るため、対流を測定する粒子画像流速測定法 (particle imaging velocimetry: PIV)を用いて、動きの変化が起きる半径 100 μm 付近の水滴の内部対流パターンを計測しました。その結果、内部対流の双極子成分と四極子成分の角度差が、水滴の運動方向の変化と系統的に相関していることを発見しました。そこで、運動方向の変化のメカニズムを解明するために流体力学的なモデルを作成しました。水滴の内部対流と界面活性剤の濃度とをそれぞれ球面調和関数展開で表現すると対称性の異なる成分に分解することができます。これは、濃度分布や推進力に見られる前後や左右の非対称を担うそれぞれの要素に分けて考えるということです。界面活性剤の濃度分布は移流拡散方程式から求められ、内部対流はストークス方程式を満たすことに着目すると、成分同士の相互作用を表現する微分方程式が得られます。理論的に導かれる安定性や予想される挙動を実験条件と比較して検討した結果、実験の時間スケールにおいて、大きな水滴では安定性が一部変化し、外力やゆらぎに対して進行方向の変化が小さい水滴に比べて大きく応答することが明らかになりました。

4. 波及効果、今後の展望

本研究で提案したメカニズムは、油中水滴という非常にシンプルな系で得られたものであり、条件が揃えば同様の現象が普遍的に現れます。特に、原形質流動で動く細胞などの複雑な「液滴」の自発的な運動にも同様のメカニズムが潜んでいることが示唆されます。また、物理学的な観点では、自己駆動する液滴の運動様相の多様化にあたることから、相分離や非平衡状態で見られるダイナミクス理解にも寄与することが期待されます。

5. 研究プロジェクトについて

本研究は日本学術振興会 特別研究員奨励費 (20J15804)、同 科学研究費補助金 (21K03855) の支援を受けて実施されました。

用語解説

・マランゴニ対流

界面活性剤の濃度に差があると界面張力に差が生じ、釣り合いの破れた張力は流体を引っ張って物質移動を引き起こします。この流体の移動 (対流) のことをマランゴニ対流と呼びます。

・粒子画像流速測定法 (particle imaging velocimetry: PIV)

画像処理を用いて流体の速度分布を求める手法の総称で、本研究では、水滴内部に分散させた粒子の位置変化を解析する画像相関法によって流速測定を行いました。

・双極子成分、四極子成分、球面調和関数展開

水滴内部の流れ場 (=対流) は表面の界面活性剤の濃度差によって生じているため、界面活性剤の分布を用いて表現することができます。水滴を球体とみなせば、この分布は球面上の関数になります。ここで、球面上の関数は球面調和関数と呼ばれる基本的な関数の項の足し合わせに分解することができます。それぞれの項をここでは成分と呼び、対称性が簡単な順に (見た目がシンプルな順に)、双極子成分 (棒磁石の S/N 極のイメージです)、四極子成分 (棒磁石 2 本が逆向きに横並びしてくっついた時のイメージです) と呼んでいます。

・移流拡散方程式

流体中の物質の移動を表す方程式です。流れによる輸送と拡散による移動の両方を考慮したもので、本研究では界面活性剤の濃度分布の変化を表すために用いました。

・ストークス方程式

一般に流体の運動はナビエ-ストークス方程式により表されますが、特に流体の粘性の効果が大きい場合はこれを簡略化することができます。その結果得られる方程式をストークス方程式といい、本研究で考察すべき流れ場はこれによって記述されます。

<論文タイトルと著者>

タイトル: Straight-to-Curvilinear Motion Transition of a Swimming Droplet Caused by the Susceptibility to Fluctuations

(揺動への感受性によって引き起こされる遊泳液滴の直線的運動から曲線的運動への転移)

著者: Saori Suda, Tomoharu Suda, Takuya Ohmura, Masatoshi Ichikawa

掲載誌: Physical Review Letters

DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.088005