

アメーバのように水中を泳ぎ回る微小物体の化学創製
～分子でつくる油型アメーバ～

1. 発表者：

伴野太祐（慶應義塾大学理工学部応用化学科 助教）
浅見有紗（東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻 大学院生（当時））
上野直子（東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻 大学院生）
北畑裕之（千葉大学大学院理学研究科基盤理学専攻 准教授）
小谷野由紀（千葉大学大学院理学研究科基盤理学専攻 大学院生）
朝倉浩一（慶應義塾大学理工学部応用化学科 教授）
豊田太郎（東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻、複雑系生命システム研究センター 准教授）

2. 発表のポイント：

- ◆水中を変形しながら泳ぎ回るアメーバ様の動きをする細胞サイズの人工の油滴を創製した。
- ◆油滴の運動機構は、油滴の後方で形成される強い流れ場と油滴内部の局所的な対流構造によって、速度変化の後に変形が誘起されるという新たな運動機構であることを推定した。
- ◆水中で障害物が多く狭い領域でも移動できる化学型探査ロボットの試作機としてのみならず、非平衡物理学の観点から細胞運動を理解するためのツールとしても有用である。

3. 発表概要：

比較的高濃度の電解質を含んだカチオン性界面活性剤（注1）水溶液中において、脂肪族アルデヒドとアルコール（注2）を混合したマイクロメートルサイズの油滴が、高頻度で変形しながら方向転換して泳ぐアメーバ様の動きをするを見出しました。電解質濃度、界面活性剤濃度ならびに油滴成分の組成を変えた際の顕微鏡観察と、アメーバ様の動きをする油滴の運動解析および周囲の流れ場解析から、油滴の後方に形成される急峻な界面張力勾配（注3）と油滴内部の局所的な対流構造による運動機構を提案しました。本現象は、水中で障害物が多く狭い領域でも移動できる化学型探査ロボット（注4）の試作機としてのみならず、非平衡物理学（注5）の観点から細胞運動を理解するためのツールとしても有用であることが期待できます。

4. 発表内容：

水中を動き回るマイクロメートルサイズの微小物体は、自然環境を改善したり、生体内を探索、治療したりするための機能体としての応用可能性を有していることから注目を集めています。中でも、水中を動き回る液滴には、有用物質を含ませて目的の場所まで到達させたり、対象物質を環境中から吸収して回収できるといった高次機能をもたせたりすることができます。近年では、化合物の濃度勾配場や光照射といった外部刺激を利用することで、液滴の駆動を制御する手法も報告されてきています。しかし、アメーバのように自在に変形しながら泳ぎまわるマイクロメートルサイズの液滴はこれまでに開発されていませんでした。このような液滴は、

水中で障害物が多く狭い領域でも移動できる化学型探査ロボットとして非常に有用であると考えられます。

今回の研究では、本研究グループが先に見出した油滴実験をもとに、カチオン性界面活性剤水溶液中での脂肪族アルデヒドとアルコールを混合したマイクロメートルサイズの油滴の挙動を顕微鏡により観測しました。その結果、水溶液に塩酸や塩化ナトリウム、塩化マグネシウムなどの電解質を少量混合した条件において、数十マイクロメートルの油滴が1秒に数回という高頻度で変形しながら方向転換して動き回るアメーバ様の動きをすることを見出しました(図1)。この油滴の変形を、円形から楕円形への擬二次元的な形態変化(注6)として解析を行ったところ、油滴の駆動する方向と変形の長軸方向とがほぼ垂直という傾向がわかり、また、油滴の速度変化のタイミングよりも変形のそれが若干(0.1秒程度)遅れて起こることが明らかとなりました(図2)。さらに、蛍光ビーズを用いて変形する油滴周囲の流れ場を可視化したところ、駆動する方向に対して前方よりも後方において著しく強い流れが引き起こされていることがわかりました。界面活性剤濃度や、油滴成分およびその組成を変えた際の油滴の運動の様子を顕微鏡観察した結果より、本現象は油滴の後方に形成される急峻な界面張力勾配にもとづく強い流れ場と、局所的な界面張力勾配および界面活性剤分子と油分子間にはたらく分子間相互作用(注7)の時空間的な変化にもとづく特異な対流構造によるものと推定されます(図3)。

本研究で見出したアメーバ様の油滴の駆動時間や速度、変形は、電解質濃度や界面活性剤と油滴成分の組み合わせによって制御可能であると考えられます。したがって、このような油滴はマイクロメートルサイズのソフトマター(注8)を用いた探査ロボットとしての応用が考えられると同時に、非平衡物理学の観点から細胞運動を理解するための強力なツールとなることが期待されます。

本研究は、東京大学、慶應義塾大学、千葉大学の研究グループの共同研究であり、文部科学省若手研究(B)および新学術領域研究「ゆらぎと構造の協奏:非平衡系における普遍法則の確立」からの支援を受けて行われました。

5. 発表雑誌:

雑誌名: 「Scientific Reports」

論文タイトル: Deformable Self-Propelled Micro-Object Comprising Underwater Oil Droplets

著者: Taisuke Banno, Arisa Asami, Naoko Ueno, Hiroyuki Kitahata, Yuki Koyano, Kouichi Asakura, and Taro Toyota*

DOI 番号: 10.1038/srep31292

アブストラクト URL: www.nature.com/articles/srep31292

6. 注意事項:

日本時間8月9日(火)午後6時(イギリス時間:9日(火)午前10時)以前の公表は禁じられています。

7. 問い合わせ先:

東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻

准教授 豊田 太郎 (とよた たろう)
〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1
TEL: 03-5465-7634 (研究室直通)
E-mail: cttoyota@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

8. 用語解説:

(注1) カチオン性界面活性剤: 逆性石けん、部屋干し洗濯洗剤、頭髮トリートメント等に含まれる洗剤の一種。陽イオンとなる部位を末端にもつ界面活性剤である。

(注2) 脂肪族アルデヒドとアルコール: 水になじみにくい炭化水素の長い鎖の末端にアルデヒド (-CHO) やアルコール (-OH) という官能基が結合した化合物。人工的に合成できるだけでなく、生命起源環境モデルでの熱水反応でも生成する。

(注3) 界面張力: 油と水など混じり合わない二種類の液体の界面で生じる力。界面張力が大きいと、界面上の分子は横方向に強く引っ張られる。同一の界面で、界面張力が大きい領域と小さい領域があると、界面上の分子は界面張力の勾配によって流れる。

(注4) 化学型探査ロボット: 周囲からの刺激に応答して、運動する微小物体のうち、化学的に創製されるもの。移動や変形は構成成分やその化学反応で制御できる。

(注5) 非平衡物理学: 力や濃度・エネルギーが釣り合いの状態から離れている過程にみられる自然現象をあつかう物理学。

(注6) 擬二次元的な形態変化: 顕微鏡下で動いている油滴を観測する場合、油滴は3次元体であるが、本研究では焦点のあっている面の形を油滴の形態としてあつかい、その時間変化を観測した。

(注7) 分子間相互作用: 分子どうしにはたらく力。

(注8) ソフトマター: 結晶や一般の固体とは区別される、柔らかい物質の総称。界面活性剤分子集合体、液晶、高分子溶融体、溶液中の高分子などをさす。

9. 添付資料：

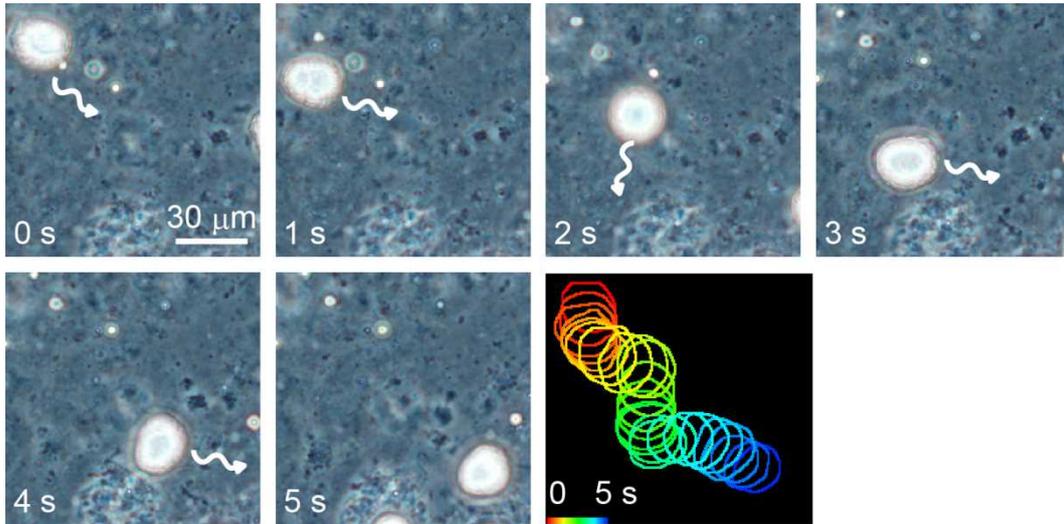


図1 アメーバ様に水中を泳ぐ油滴の連続写真とその軌跡。油滴は駆動する方向に対して扁平となる変形をしめす。

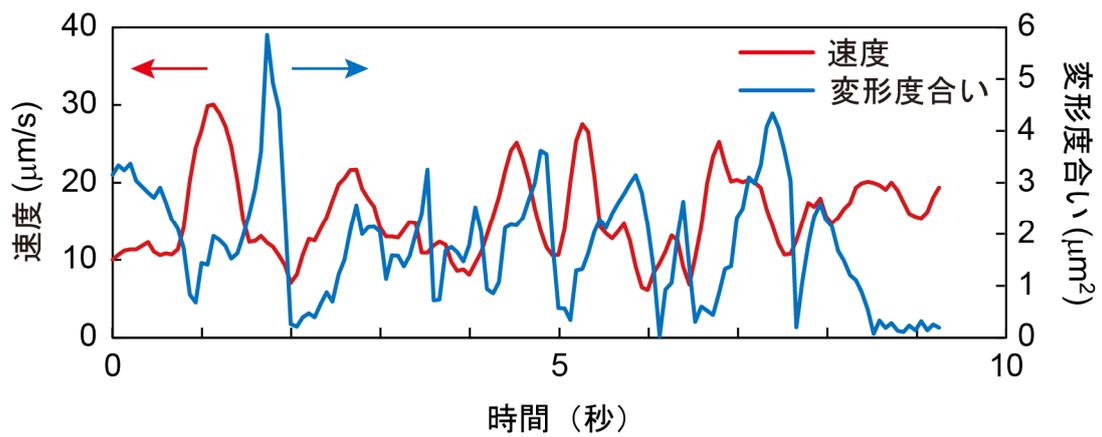


図2 速度と変形度合いの経時変化。油滴の速度変化よりも若干（0.1秒程度）遅れて油滴の変形は起こる。

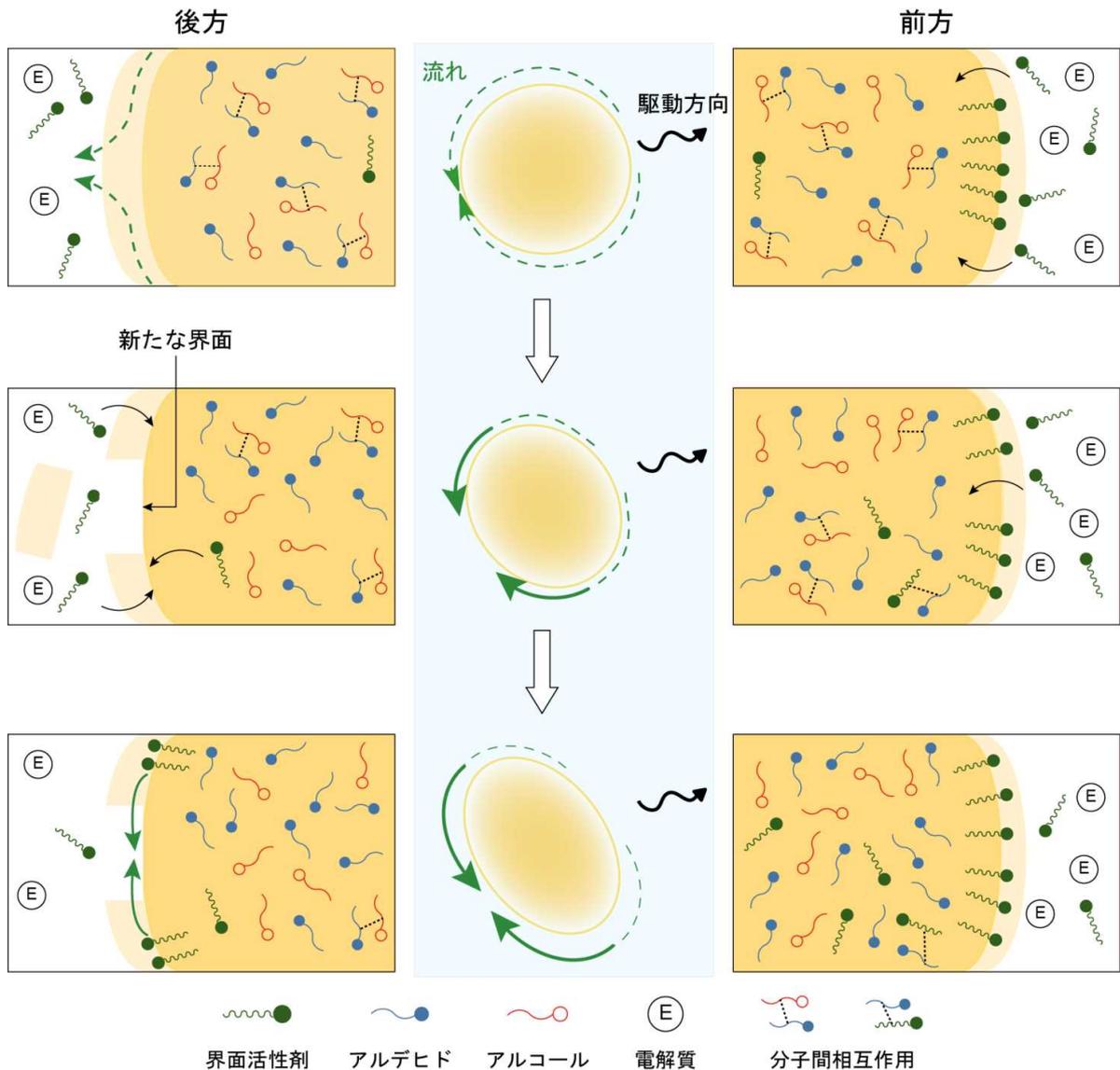


図3 アメーバ様に水中を動く油滴の推定機構。本現象は油滴の後方に形成される急峻な界面張力勾配にもとづく強い流れ場と、局所的な界面張力勾配および界面活性剤と油分子間にはたらく分子間相互作用の時空間的な変化にもとづく特異な対流構造によるものと推定される。