

水中を泳ぐ分子ロボットを創出

～マイクロな空間を動物のように移動するとても小さな無人型ソーラー潜水艦～

ポイント

- ・自身のヒレを動かし水を掻くことで水中を泳ぐ分子ロボットを実現。
- ・実験を通じて、プランクトンほどの大きさの物体が水中を泳ぐための新たな方法を提示。
- ・狭い空間を移動する自動運転型分子ロボットの実現に光明。

概要

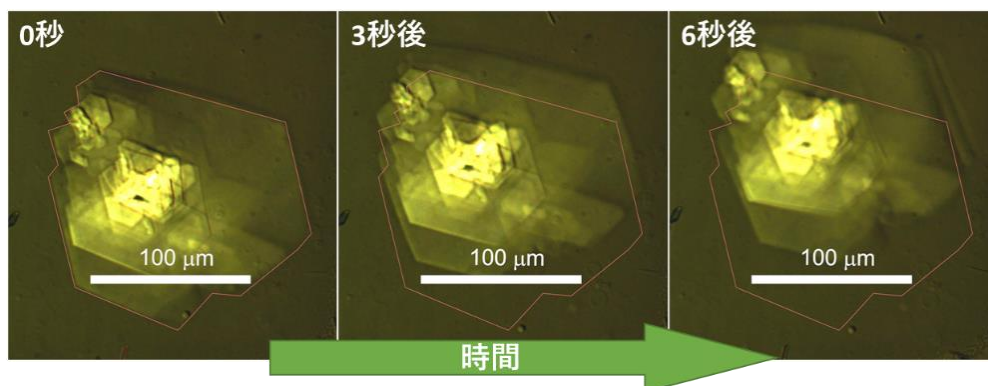
北海道大学大学院理学研究院の景山義之助教らの研究グループは、動物のように体を動かしながら泳ぐ、1mmより小さな分子ロボット*1を、人工的に作り出すことに成功しました。

血管のような狭い空間を自在に泳げる分子ロボットの実現は、小説や映画の中で夢見られてきた事柄です。しかし、小さな分子ロボットを自律的に泳がせる*2ためには、科学的に難しい二つの課題を解決しなくてはなりません。一つは、変形を続けられる分子ロボットを作ることです。またもう一つは、その変形によって分子ロボットが移動できるようにすることです。景山助教らの研究グループは、2016年に「屈曲を繰り返す分子ロボット」を発表しています。本研究では、その分子ロボットを水中で泳がせることに成功しました。動物のように自分の体を自律的に動かして泳ぐ分子ロボットを実現した世界初の研究成果です。

なお、この研究の背景には、プランクトンほどの大きさの物体は、ヒレを屈曲させるような往復型の変形だけでは泳ぐことはできない、という物理学における共通の理解があります。これに対して、本研究では、屈曲運動を示す分子ロボットが泳ぎました。この事実は、ロボットが変形を繰り返したことに加えて、別の仕組みが働いていることを示しています。研究グループは、分子ロボットに働く力を計算することを通じて、泳いだ空間が狭いことが分子ロボットの遊泳を可能にした主要因であると結論付けました。

分子ロボットが自律遊泳できることを実験的に示した本研究は、分子ロボットの新たな可能性を示すものです。例えば、血管のような狭い水路を清掃したり、狭路を遊泳することで薬物を送達したりする「自動運転型分子ロボット」の実現可能性を高めるなど、分子ロボット開発のさらなる発展を期待させる研究成果です。

なお、本研究成果は、2021年11月27日（土）公開の *Small* 誌にオンライン掲載されました。



水を掻いて泳ぐ分子ロボット。橙色の輪郭線は初期位置を示す。

【背景】

血管のような狭い空間を自在に泳げる分子ロボットの実現は、小説や映画の中で夢見られてきた事柄です。しかし、小さな分子ロボットを継続的に泳がせるためには、永らく二つの大きな課題がありました。一つは、変形を続けられる分子ロボットを作ることであり、もう一つは、その変形挙動が分子ロボットの移動を可能にするようなものでなくてはならないということです。この二つの課題は、著名な物理学者であるシュレーディンガーの「負のエントロピー」やパーセルの「帆立貝定理」などのキャッチフレーズとともに知られています。景山助教らの研究グループは、2016年、一つ目の課題を解決した「屈曲を自ずから繰り返す分子ロボット」を発表しました。本研究では、二つ目の課題である、「分子ロボットに水中を泳がせること」を実現すると共に、泳ぐ仕組みを明らかにしました。

小さな分子ロボットが水中で受ける力の軽重は、我々人間が水中を泳ぐときに受ける力と異なります。小さな分子ロボットの場合、重力や浮力など、大きさに比例する力はあまり働かない一方で、粘性抵抗が相対的に大きく働きます。このような環境では、「勢いをつけて動く」ということはできません。そのため、体を曲げることで前進したとしても、体を元の形に伸ばすと、元の位置まで後退してしまいます。これが、二つ目の課題の背景です。我々人間が静かな湖面でボートを漕ぐとき、オールを水中に入れたままで前後に動かしても、ボートは前後に揺れ動くだけで進まないことと似ています。

このような背景に対し、研究グループは、秒速 $10\mu\text{m}$ (1秒間に体長の約 $1/10$ 程度) を越える速度で分子ロボットを泳がせることに成功すると共に、その遊泳の仕組みを明らかにしました。

【研究手法と研究成果】

本研究では、化学的に合成した分子 (アゾベンゼン) と、サラダ油などに含まれるオレイン酸という分子を混合した結晶 (分子ロボット) を作りました。この分子ロボットの大きさは、縦数十 μm 、横数百 μm 、高さ $1\mu\text{m}$ 程度の大きさです。スライドガラスで作った幅 28mm 、奥行 17mm 、深さ 0.3mm の水槽にこの分子ロボットを入れ、運動のエネルギー源になる青色の光を照射しました。光学顕微鏡で観察すると、分子ロボットは、自身の一部をヒレのように動かすことで前後に動きました。前進する距離と後退する距離に差のある分子ロボットも存在し、それらは泳いで移動することができました (図1, 図2)。分子ロボットには、ヒレを前方にして泳ぐもの (犬かき型) と、ヒレを後方にして泳ぐもの (ばた足型) がありました (図3)。遊泳速度は、速いもので秒速 $15\mu\text{m}$ に達し (人間に換算すると時速 500m に相当)、小さなものは屈伸型の運動では水中で泳げないとする従来の考え方を大きく覆すものでした。

遊泳方向を決める因子や、遊泳速度・遊泳距離を決める因子について、分子ロボットの運動を単純な運動に置き換えた上で力学計算をすることで探索しました。その結果、分子ロボットの上下運動が制約されるような平面状の狭い空間を条件として設定したとき、小さなロボットは泳げることが示されました。なお、この仮定を含んだモデル計算については、ヒレの曲がり方によって泳ぐ方向が決まる事実や、遊泳速度についての実験結果と良く一致していた事実から、整合性が認められました。

【今後への期待】

分子を組み立てることによって小さなロボットを作るとは、分子機械研究やナノテクノロジー研究の一つのゴールとして認知されています。しかし、分子ロボットをどのように動かすか、より正確には、分子ロボットにどのように動いていただくかということについては、これまで科学者は明確な方法論を有してきませんでした。理論的研究においては、1977年にノーベル化学賞を受賞した散逸構造論により、変形を自ずから継続するための基本的仕組みが明かされた一方、移動の実現方法につ

いては現在でも様々な検討が行われています。他方、実験的に実現させることを目指す研究では、変形を繰り返す物体を人工的に創出するという一つの課題も極めて挑戦的課題であり、その課題に取り組んでいる研究者はほとんどいません。ましてや、その変形によって自律移動を実現する分子ロボットを開発することは、これまで成し遂げられなかった夢でした。本研究の、パタパタと変形を繰り返す小さな結晶が、狭い空間であれば自律的に泳ぐことができることを実験的に示した研究成果は、血管のような狭い空間を移動できる自動運転型の分子ロボットの開発を大きく進めることになることと期待されます。併せて、人工的なものに限らず、小さな生命体の狭い空間での動き方について、理解が進展する可能性もあります。

論文情報

論文名 Self-propulsion of a light-powered microscopic crystalline flapper in water (光をエネルギー源にしてパタパタ動く小さな結晶の水中での自律推進)
著者名 小原一馬¹, 景山義之², 武田 定² (1北海道大学大学院総合化学院, 2北海道大学大学院理学研究院)
雑誌名 Small (物質科学系融合分野の学術雑誌)
DOI 10.1002/sml.202105302
公表日 2021年11月27日(土)(オンライン公開・オープンアクセス)

お問い合わせ先

北海道大学大学院理学研究院 助教 景山義之(かげやまよしゆき)

T E L 011-706-3532 F A X 011-706-4841 メール y.kageyama@sci.hokudai.ac.jp

U R L https://www.sci.hokudai.ac.jp/~y.kageyama/public/index_jp.html

配信元

北海道大学総務企画部広報課(〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

【参考図】

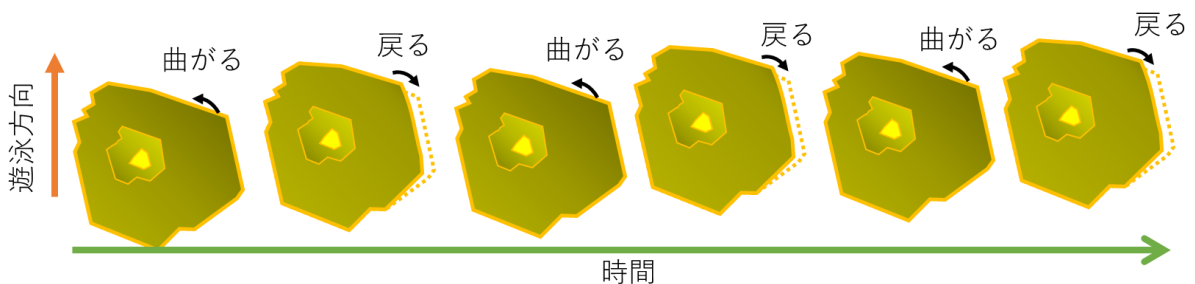
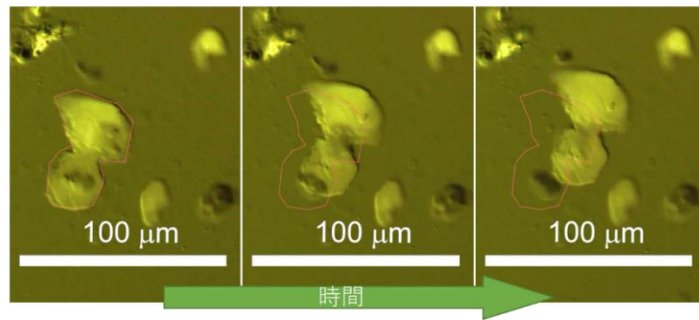


図1. 水を掻いて泳ぐ分子ロボット (p.1 図) の動き方

水を掻いて泳ぐ分子ロボット



水を蹴って泳ぐ分子ロボット

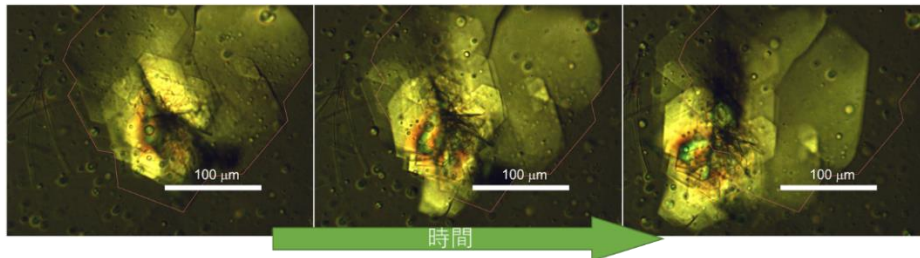


図 2. 青色の光のエネルギーを利用して泳ぐ分子ロボットの顕微鏡像

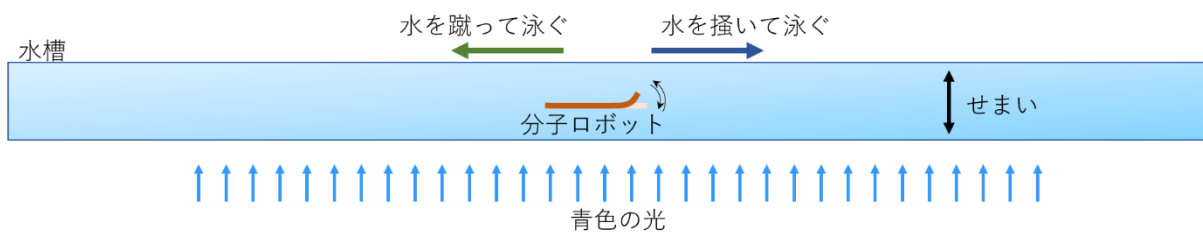


図 3. 分子ロボットが泳いだ環境の模式図

深さ 0.3 mm(300 μm)の水槽内を泳ぐ様子を顕微鏡で観察。

【用語解説】

- *1 分子ロボット … 大きさ 1nm 程度 (1nm は 1mm の 100 万分の 1) の大きさの分子を組み立てて作ったロボットの事。その大きさは、現在、世の中で活躍しているロボットよりも圧倒的に小さい。
- *2 自律的に泳ぐロボット … 外からの操作によって動かされるロボットとは違い、定常的な環境下であっても、自ら決めた方向に向かって泳ぎ続けることができるロボットの事。なお、泳ぐためのエネルギーについては、外から供給することが必要。