



PRESS RELEASE (2021/12/08)

生体分子モーターによる群れ運動を操る幾何法則を解明 ～分子の群れの交通ルールでミクロな世界の物流を操る～

鳥や魚の群れ、微生物などは、自律的に動き多数集まることで、秩序だった集団運動(注1)を示す群れを形成します。このように自ら動き、組織化していく物質群はアクティブマター(注2)と呼ばれ、物理学から生命科学、工学まで広く研究が行われています。群れ運動は分子スケールの極微の世界にも現れます。植物細胞内では生体分子モーターによって自走する細胞骨格フィラメントが群れをなし、細胞の形の制御で重要な役割を担うと考えられています。しかし、細胞骨格フィラメントの群れ運動(以下では単に群れ運動)をどのようにして操るのか、秩序だったパターンをどのように作るのかという「分子の群れの交通ルール」は明らかにされていませんでした。

九州大学大学院理学研究院 前多裕介 准教授、理学府修士課程の 荒木駿也 大学院生、博士課程の 別府航早 大学院生らの研究グループは、北海道大学大学院理学研究院 角五彰 准教授、Arif Md. Rashedul Kabir 同特任助教らの研究グループと共に、生体分子モーター(注3)によって運動する細胞骨格タンパク質の群れを交通整理する新たなルールを見出し、このルールを利用して細胞内にみられるような細胞骨格の壁構造を作り出すことに初めて成功しました。

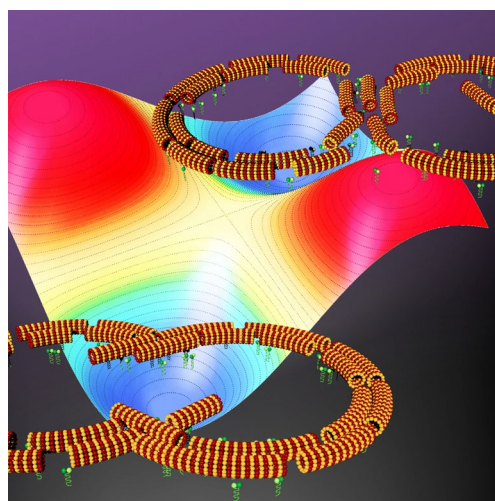
本研究グループは、細胞骨格フィラメントが群れる際に運動の方向を揃えていく点に着目し、運動方向の揃え方を精密に制御できる新しいマイクロ流体デバイス(注4)を構築しました。その結果、細胞骨格フィラメントの衝突にはパターンがあり、そのパターンをもとに衝突角度を制御することで群れ運動の方向制御を実証しました。さらに、明らかにした群れ運動の制御法から、植物細胞に見られるような細胞骨格の壁構造を構築することにも成功しました。本研究で得られた知見から、分子の群れを操る基本的なルールが明らかになるとともに、生体分子モーターの化学エネルギーで動作する革新的デバイスの開発につながると期待されます。

本研究成果は、2021年12月7日(米国東部時間)に米国科学雑誌「Nano Letters」で公開されました。



荒木 駿也 大学院生

研究者からひとこと:分子同士の衝突を制御するというシンプルな発想から、分子の群れを操るルールを明らかにしました。九大の研究支援プロジェクトで導入した顕微鏡が、成功の鍵になりました。(荒木)



滑走する微小管の集団運動を操るイメージ図

【お問い合わせ】九州大学大学院理学研究院 前多 裕介 准教授
TEL:092-802-4071
Mail: ymaeda@phys.kyushu-u.ac.jp

生体分子モーターによる群れ運動を操る幾何法則を解明 ～分子の群れの交通ルールでミクロな世界の物流を操る～

【研究背景】

自然界ではしばしば、鳥や魚などの生物が多数集まることで群れを成し、集団秩序を形成します。そのような自発的に運動する機構をもつ物質群をアクティブマターと呼びます。アクティブマターとしてよく知られる生体分子モーターによって滑走する細胞骨格タンパク質—微小管—は、高密度になると向きを揃えて集団で群れをなす集団運動をつくることが知られています。生体分子モーターは化学的なエネルギーを消費して動作するタンパク質分子であり、目に見えないほど小さなミクロスケールでの物流を操るための鍵となる分子として世界中で研究が行われています。しかし、生体分子モーターの群れ運動をどのようにして操ることができるのか、そして群れのパターンを制御して細胞内に見られるような構造をどのようにして人工的に作ることができるかは明らかにされていませんでした。

【研究内容】

生体分子モーターによる細胞骨格フィラメントの群れ運動を操るため、本研究では微小管同士が向きを揃えようとする相互作用を制御することに着目しました。滑走する微小管が衝突する角度 ψ をマイクロ流体デバイスの壁の形状で制御するために、2つの円を重ねてできる境界形状を利用することにしました。このとき、細胞骨格フィラメントは壁に沿って運動するため、衝突角度 ψ を図1のようにマイクロ流体デバイスの形状から決めることができます。衝突角度 ψ を小さくして急角度で細胞骨格フィラメントが相互作用するようにしていくと、壁に対して左右に分かれて滑走するパターン(図1左側)と、壁から垂直な方向に群れが合体して進むパターン(図1右側)の2つが出現しました。このようなパターンの切り替えは実験のみならず、アクティブマターの集団運動のモデルとして用いられる自己駆動ロッドモデル(注 5)の数値シミュレーションでも現れることがわかりました。自己駆動ロッドモデルの理論解析から、2つのパターンの切り替えが起こる衝突角度は $\psi=45^\circ$ ($\cos\psi=1/\sqrt{2}$ を満たす角度)であることがわかり、この結果は実験と一致することがわかりました(図1)。さらに、微小なマイクロ流路チャンネルに明らかにした群れの交通ルールに基づいて壁形状を設計することで、微小管のレールを流路に並行・直角と自在に構築することに成功しました。

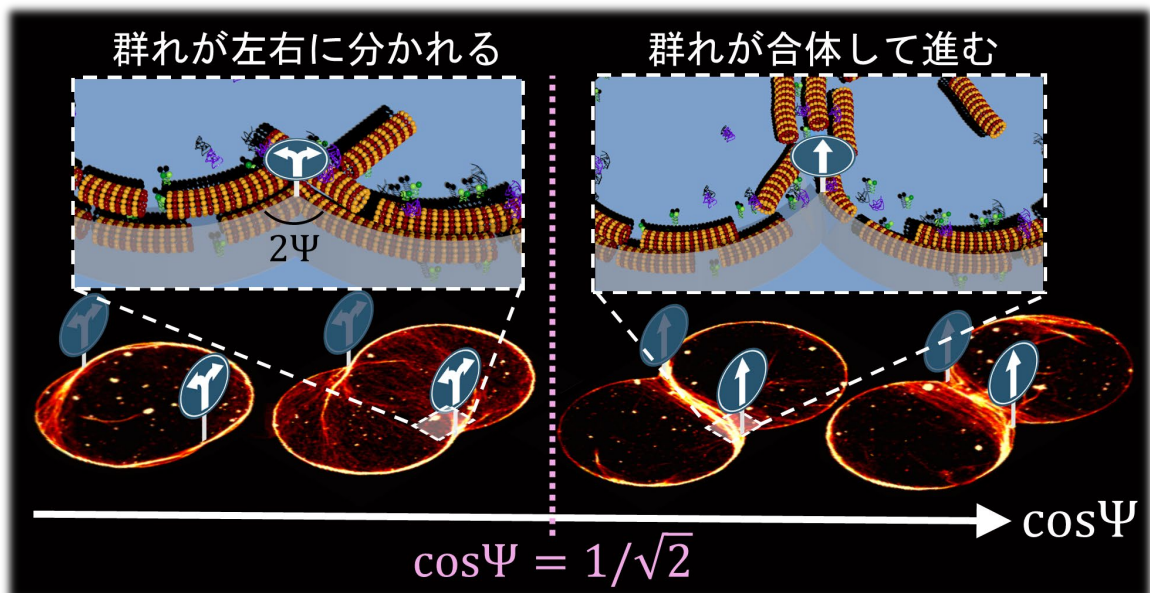


図1. 微小管の衝突角度 ψ に依存して形成される二つのパターン。壁に対して平行に滑走するパターン(左)と垂直になるパターン(右)。衝突角度 $\psi=45^\circ$ を境にパターンが切り換わる。

【今後の展開】

本研究で明らかにした群れ運動を操る幾何法則は、ミクロな世界で物流を整理する基本的な交通ルールと言えます。ミクロなスケールで生体分子モーターによる微小管の群れ運動を自在に操ることができれば、自律的に物流を操作する新たな分子輸送デバイスに必要不可欠な輸送経路の選択や切り替えを可能にします。これにより、化学エネルギーを用いて動作する省エネルギー小型デバイスの実現につながります。群れの効率的な誘導に向けた通路設計への応用に止まらず、実際にその原理を利用して動作すると思われる細胞内の物流の基本的な仕組みを理解するという生命科学の新たな展開にも貢献することが期待できます。

【論文情報】

タイトル: Controlling collective motion of kinesin-driven microtubules via patterning of topographic landscapes (キネシンモーターで滑走する微小管の集団運動を地形図パターンで制御する)

著者名: Shunya Araki, Kazusa Beppu, Arif M.R. Kabir, Akira Kakugo, Yusuke T. Maeda

掲載誌: Nano Letters

DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.1c03952>

2021 年 12 月 7 日 (米国東部時間) オンライン版掲載

【謝辞】

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金 JP18H05427, JP20H01872, JP21K18605 (研究代表者: 前多裕介)、JP18H05423, JP21H04434 (研究代表者: 角五彰)、JP21K04846 (研究代表者: Arif M.R. Kabir) および JP20H05972 (研究分担者: Arif M.R. Kabir) の支援を受けて行われました。

【用語解説】

注 1) 集団運動

鳥の群れや魚群の渦など、自律運動する物体・物質群 (アクティブマター) が多数集まって、互いに向きを揃えるなどの相互作用をすることで出現する特徴的な運動様相。

注 2) アクティブマター

自律的に動き、互いに相互作用しあう粒子の総称。小さいものでは微生物バクテリア、真核細胞、アリなどの昆虫、さらには魚や鳥、ヒツジやヒトなど大型動物も含む。近年は、自律的に運動するコロイド粒子も含み、生物・非生物を問わない広い概念となっている。

注 3) 生体分子モーター

アデノシン三リン酸 (ATP) を加水分解することによって生じる化学エネルギーを運動エネルギーに変換するたんぱく質。代表的なものとして、アクチンの上を動くミオシン、微小管の上を動くキネシンやダイニンが挙げられる。本研究では、キネシンが微小管上を動く力を利用した微小管の運動を観測した。

注 4) マイクロ流体デバイス

微細加工技術を利用して 100 万分の 1 メートル (マイクロメートル) ~ 1 万分の 1 メートル (100 マイクロメートル) 程の幅や厚みをもつ微小な流路や容器からなる小さなデバイス。透明で顕微鏡観察に適している。

注 5) 自己駆動ロッドモデル

アクティブマターの代表的な物理モデル。「自発的な運動」と「周りの粒子と向きを揃える」というアクティブマターの最も重要な性質を取り入れた理論モデルであり、運動方向を長距離にわたって揃える秩序相や群れ運動が現れることが知られている。

【お問合せ先】

＜研究に関するお問い合わせ＞

九州大学 大学院 理学院 准教授 前多 裕介

TEL:092-802-4071 Mail: ymaeda@phys.kyushu-u.ac.jp

北海道大学 大学院 理学院 准教授 角五 彰

TEL:011-706-3474 Mail: kakugo@sci.hokudai.ac.jp

＜報道に関するお問い合わせ＞

九州大学 広報室

TEL:092-802-2130 Mail: koho@jimu.kyushu-u.ac.jp

北海道大学 総務企画部広報課広報・渉外担当

TEL:011-706-2610 Mail: jp-press@general.hokudai.ac.jp