

# 動く分子の群れが生み出す力の計測に成功

## —アクティブマター機能設計への基盤を構築—

### 概要

京都大学大学院理学研究科のモサンマツ・ラシツ・ルバヤ博士研究員（研究当時、現：テキサス・サザン大学博士研究員）、川又生吹准教授、谷茉莉准教授、角五彰教授らは、自己駆動する分子サイズのアクティブマター<sup>\*1</sup>素子の群れが生み出す力の測定に世界に先駆けて成功しました。生物の中には、鳥や魚の群れ、蟻の集団のように、群れを形成することで、単体では実現できない性質や機能、力を生み出すものがあります。これらは近年、アクティブマター物理学の観点からも注目されています。これまでに、アクティブマター素子による群れは実現されていましたが、協働的に生み出される力の大きさはわかっていませんでした。本研究では独自開発した磁気ピンセットと磁性ビーズ<sup>\*2</sup>を用いて、群れに外力を加えた際のビーズの運動速度変化を調べることで、群れが生み出す力の計測に成功しました。これにより、アクティブマター素子の群れの力は、群れの大きさに対して加算的に増加することがわかりました。本成果は群れによる機能実装への大きな知見をもたらします。本研究の成果は 2026 年 4 月 30 日にアメリカ化学会 ACS Publications が発行する国際学術誌「ACS Nano」のウェブサイトにオンラインで公開されました。



アクティブマター素子の群れが生み出す力の計測

## 1. 背景

生物の中には、鳥や魚の群れ、蟻の集団のように、自己駆動するアクティブマター素子が秩序ある集団（群れ）を形成することで、単体とは異なる性質や機能、能力を獲得するものがあります。これら群れの挙動や性質に対して、特に、群れの形成メカニズムや、群れから生み出される機能の創発機構、生命現象の解明といった観点から、近年、アクティブマター物理学の分野で盛んに研究が行われてきています。また、分子サイズのアクティブマター素子を群れ化させることで、単体では運べない大きさの物質輸送の実現も可能となってきています。群れ化することで効率が上がり、大きな力が生み出されることは予測されますが、実際にどの程度の力が生み出されるのか、アクティブマター素子の数が多ければ多いほど大きな力になるのかは、これまでわかっていませんでした。本研究では、分子サイズのアクティブマター素子からなる群れに、独自開発した磁気ピンセットと磁性ビーズを用いて外力を加え、磁性ビーズの運動速度変化を調べることで、群れが生み出す力を世界に先駆けて計測することに成功しました。

## 2. 研究手法・成果

本研究では、分子サイズのアクティブマター素子として微小管<sup>\*3</sup>を使用しました。分子モーターであるキネシン<sup>\*4</sup>により駆動される微小管の群れに、磁性ビーズを捕捉させ、磁場中で運動させました。このとき、磁場から受ける力と、群れから受ける力の方向により、磁性ビーズの運動速度が変化します。磁性ビーズの運動速度と、ビーズが磁場から受ける力の関係から、群れが生み出す力を見積もりました。ここで、群れが生み出す力は、微小管を押し出すキネシンの力に起因します。そこで、微小管の群れに関わるキネシンの数と生み出される力の大きさとの関係を調べたところ、関与するキネシンの数が多いほど、力は線形的に大きくなっていくことがわかりました。これまでの研究により、数個（10以下）のキネシンが1本の微小管を駆動する場合に、微小管が駆動される力がキネシンの数に対して線形的に増加することはわかっていましたが、数千個のキネシンが微小管の群れを駆動する場合にも線形関係が成り立つことは、本研究により、世界で初めて明らかになりました。

## 3. 波及効果、今後の予定

群れを形成するアクティブマター素子の数が多いほど、大きな力が生み出されることは一見当たり前のようで、決して自明ではありません。これは、運動会の「大玉送り」でタイミングや方向が揃うと効率よく玉を送り出せるように、アクティブマター素子もタイミングや方向を揃えることで大きな力を生み出せるものの、タイミングや方向がずれた場合には、逆に大きな力を生み出せないと考えられるためです。本研究により、微小管も数が多いほど大きな力を生み出すことが明らかになったことで、これらが協働的に動いていることが実証されたと言えます。一方で、群れが生み出す力は、一つのアクティブマター素子が生み出す力の単純な足し算ではないこともわかりました。今後、実験的・理論的な研究が進むことで、この仕組みが解明されることが期待されます。

群れが生み出す力の解明により、群れに与える最適な仕事の予測も可能となります。特に、分子スケールかつ生体由来の微小管系は、薬剤輸送や汚染物質回収などの観点からも、群れの活用や機能・仕事の実装化が期待されています。また、単純な動きをするアクティブマター素子の群れは「群ロボット<sup>\*5</sup>」として、近年ロボット工学分野で注目されている研究対象の一つであり、今後、関連分野における研究発展への波及効果も期待されます。

#### 4. 研究プロジェクトについて

本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST） 創発的研究支援事業（JPMJFR246B）、独立行政法人日本学術振興会（JSPS）科学研究費助成事業（JP18H05423, JP20H05972, JP21H04434, JP21K04846, JP21K19877, JP25H00608）、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成事業（JPNP20006）および公益財団法人ヒロセ財団（PK22201017）の助成を受けたものです。

##### <用語解説>

\*1 アクティブマター：自己駆動素子からどのように集団が形成されるのか、集団はどのように運動するのか、集団がもつ性質はどのように生み出されるのか、などの解明を目指す学問です。

\*2 磁気ピンセットと磁性ビーズ：磁場（磁石の力）を利用して、ピンセットのように操作する装置です。磁石に引き寄せられる性質をもつビーズと組み合わせることで、分子や細胞に力を加えたり、その動きを観察したりすることができます。

\*3 微小管系：直径 25 ナノメートル、長さ約数十マイクロメートル程度の細いひも状の物体であり、その太さは髪の毛の 3000 分の 1 程度になります。

\*4 キネシン：化学エネルギー（アデノシン三リン酸（ATP））を運動に変換するモータータンパク質のひとつです。微小管は、基板上に固定されたキネシンによって、ATP 依存的に自己駆動性を発現します。

\*5 群ロボット：シンプルなロボットが多数集まってチームとして動くことで、複雑な仕事を効率よく行えるようにしたロボットシステムのことで、近年、ロボット工学分野で注目されています。

##### <研究者のコメント>

私たちは協力することで、一人ではできないことを実現できます。分子の世界でも同じようなことが起こります。例えば綱引きでは、声をかけ合ったりタイミングを合わせたりして、大きな力を出す工夫をしています。分子モーターにはリーダーはいませんが、同じ対象につながることで互いの力を感じ取り、自然にタイミングをそろえて力を発揮します。こうした仕組みに触れ、小さな分子が何千も集まって効率よく力を生み出せることに強く惹かれ、その力を実際に測定しました。（モサンマツ・ラシヅ・ルバヤ）

##### <論文タイトルと著者>

タイトル：Linear Force Scaling in Kinesin-Driven Microtubule Swarms Revealed by Electromagnetic Tweezers（磁気ピンセットを用いたキネシン上で駆動する微小管集合体の力のスケールリング評価）

著者：Mst. Rubaya Rashid, Mousumi Akter, Arif Md. Rashedul Kabir, Kazuki Sada, Tetsuya Hiraiwa, Akinori Kuzuya, Ibuki Kawamata, Marie Tani, Akira Kakugo

掲載誌：ACS Nano DOI：https://doi.org/10.1021/acsnano.5c20263

< 参考図表 >

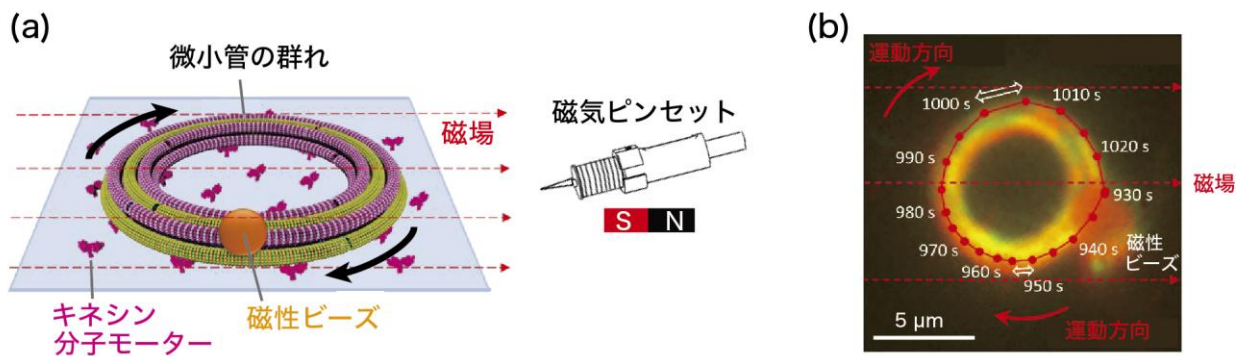


図 1 : (a)実験方法の模式図。微小管の群れに磁性ビーズを捕捉させ、独自開発した磁気ピンセットを用いて、磁場中で運動させました。(b)磁場印加中の微小管の群れと磁性ビーズの運動の様子 (930-1020 秒)。赤い点は各時刻における磁性ビーズの位置、白い数字は時間 (秒) を表しており、運動の速さが変化していることがわかります。

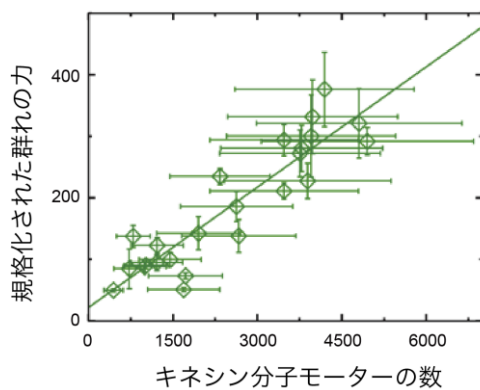


図 2 : 群れの力 (キネシン 1 個が生み出す最大の力で規格化したもの) と、キネシン分子モーターの数の関係。キネシン分子モーターが数千個集まった場合にも、キネシンの数が多いほど、群れによって生み出される力が線形的に大きくなることがわかりました。