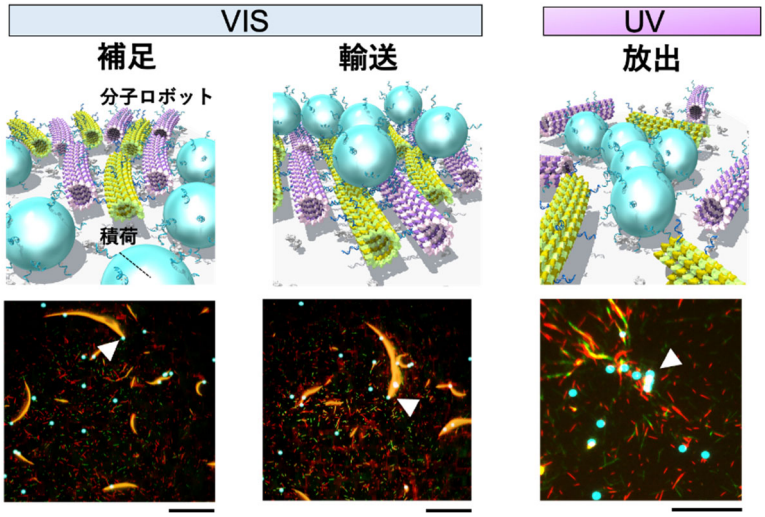


群れをなし，働き始めた分子ロボット

～実働するマイクロサイズの分子ロボットを世界に先駆けて開発することに成功～

ポイント

・分子ロボットに群れという協働作業戦略を取り入れることで物質輸送という実効的な仕事を達成。
・群れを利用することで分子ロボット単体と比べ輸送効率は最大 5 倍，積荷サイズを 10 倍に拡大。
・薬剤の運搬や選択，汚染物質の回収など様々な現場で活躍するロボットとして期待。

概要

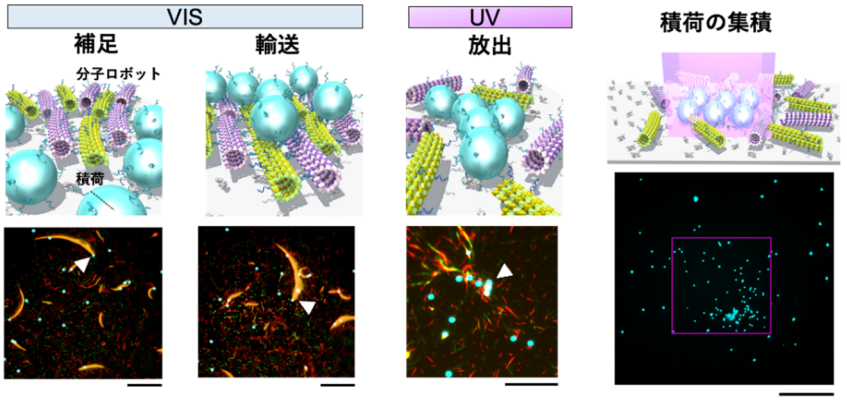
国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学大学院工学研究科の浅沼 浩之 教授，北海道大学大学院理学研究院のモウシュミ・アクタ 博士研究員，角五 彰 准教授及び佐田 和己 教授，九州大学大学院芸術工学研究院の井上 大介 助教，関西大学化学生命工学部の葛谷 明紀 教授らの研究グループは，生き物の生存戦略の一つでもある「群れ」の利点を取り入れた実働するマイクロサイズの分子ロボットを世界に先駆けて開発することに成功しました。

近年，「群ロボット*[1]」という群れの様々な機能に着目した研究が注目を集めてきました。ロボットを群れとして利用することで，作業の分担やリスク対応，また環境に適したフォーメーションが可能となるなど，単体のロボットにはない機能を持たせることができます。医療や災害現場での応用が期待されており，これまでに数多くのロボットが開発・提案されてきました。近年の技術進歩により，ロボットはマイクロスケールやナノスケールまで小型化されましたが，サイズの小ささゆえ，これらのロボットを実働させるには至っていませんでした。

本研究では，群れの形成解離を遠隔で操作する分子機構を導入することで，分子ロボットによる物質輸送という実効的な仕事の遂行に成功しました。分子ロボットは直径 25 ナノメートル，全長は 5 マイクロメートル（髪の毛の 20 分の 1）程度のサイズで，駆動系としてモータータンパク質*[2] 制御系として DNA 分子コンピュータを持ち，光を感知するフォトクロミック色素を組み込むことで，遠隔操作を可能にする受信部としての役割を果たしています。群れを利用した分子ロボットが，単体では実現し得なかった数十マイクロメートルサイズという大きな物質を輸送できるようになりました。分子ロボット単体と比べると約 5 倍の輸送効率の向上，積荷サイズは 10 倍にも拡大されています。さらに積荷の輸送先は光（紫外光）を照射するだけで任意に指定することも可能としました。

将来は，医療現場や環境保全などで活躍するマイクロナノマシンとしての応用が期待されます。

本研究成果は，日本時間 2022 年 4 月 21 日（木）午前 4 時公開の Science Robotics 誌に掲載されました。



分子ロボットの群れによる物質輸送の概念図（上）と実際に物質を輸送している分子ロボットの蛍光顕微鏡写真（下）。光照射位置を指定することで目的の場所に積荷を集積することも可能（右）。

【背景】

群れとは，複数の個体の秩序ある集団行動のことです。群ロボット工学は，生物の行動から着想を得て， 群れでタスクを達成させることに焦点を当てた学問分野として台頭してきました。現在までに，マクロスケールの群ロボットが開発され，荷物の運搬や集積，形状の形成，複雑な構造物の構築など，様々な用途に利用されています。近年の技術進歩により，ロボットはマイクロスケールやナノスケールまで小型化されてきました。小型化によるロボット数の増加は，様々な状況下に対応する柔軟性の飛躍的な向上が期待されています。これまでに磁場，電場，光のエネルギーを動力源とするマイクロサイズのロボットが開発・提案されてきましたが，実効的なタスクの遂行には至っておりませんでした。

【研究手法】

直径 25 ナノメートル，全長は 5 マイクロメートルとなる群れる分子ロボットの基本ユニットは，モータータンパク質（駆動系），DNA 分子コンピュータ*[3]（制御系），フォトクロミック色素*[4]（センサー系）を化学的な手法で組み上げました。駆動系，制御系，センサー系を備えた分子ロボットの基本ユニットは約 100 万体作成しました。可視光や紫外光で群れの形成解離を遠隔操作するため，アゾベンゼンをフォトクロミック色素として用いました。輸送物質の対象として，直径数マイクロメートルから数十マイクロメートルの様々なサイズのポリスチレン製のマイクロビーズを用意しました。ビーズ表面にもフォトクロミック色素を導入した DNA を修飾することで，光照射による結合解離機構を持たせています。積荷の輸送先は，フォトマスクなどを用いて，紫外光を局所的に照射することで指定しました。

【研究成果】

まず作成した分子ロボットが可視光照射下で群れを形成し，紫外光照射下で離散することを確認しました。次にマイクロビーズを積荷とした物質輸送を比較対象として分子ロボット単体で試みました。その結果，分子ロボット単体では，3 マイクロメール程度までのビーズが可視光照射下（波長 480 ナノメートル）で捕捉・運搬され，紫外光（波長 365 ナノメートル）照射下で放出されることがわかりました。

次に分子ロボットの群れによる物質輸送を試みました。分子ロボット単体と同様に可視光照射下ではビーズが捕捉・輸送され，紫外光照射下では放出されることがわかりました。さらに輸送可能なビーズのサイズを調査したところ 30 マイクロメールにも及ぶビーズも輸送されることがわかりました。分子ロボット単体と比べると 10 倍ほど拡大されたことになります。さらに 3 マイクロメールのビーズを対象に，分子ロボット単体と分子ロボットの群れによる輸送を比較したところ，群れによる輸送では 5 倍ほど効率（輸送距離と輸送量）が向上することも明らかとなりました。

また照射する紫外光の照射位置を指定することで，ビーズを任意の場所に集めることに成功しました。輸送の空間精度も３０マイクロメートル以下と誤差も極めて少ないことがわかりました。

本研究は，マイクロサイズの分子ロボットが実働することを実証した世界初の報告例となります。以上のように群れの持つ利点を活用することで，単体ではなし得なかった大きなサイズの積荷を運搬できるようになっただけでなく，輸送効率も大幅に向上することが可能になりました。

【今後への期待】

5 年後には，以下のような応用例が想定されています。

・薬剤送達や汚染物質回収
・分子発電素子（化学エネルギーから電気エネルギーを作り出す微小な発電機/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）のプロジェクト予算により開発研究中）
・微量検出素子（微量な核酸情報や病原体などを濃縮し検出するシステム）
・マイクロリアクタ（分子ロボットによるナノ部品の組み上げ工程や化学プラントなどのシステム）

【謝辞】

本研究は，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「人と共に進化する次世代人工知能に関する技術開発事業」（JPNP20006），さらに文部科学省科学研究費助成事業新学術領域研究「発動分子科学」(18H05423)，基盤研究基盤研究(A)(21H04434)の支援を受けて行われました。

論文情報

論文名	Cooperative cargo transportation by a swarm of molecular machines（分子機械の群れによる協働的な物質輸送）
著者名	Mousumi Akter[1]，Jakia Jannat Keya[1]，Kentaro Kayano[2]，Arif Md. Rashedul Kabir[1]，Daisuke Inoue[3], Henry Hess[4], Kazuki Sada[1,2], Akinori Kuzuya[5], Hiroyuki Asanuma[6], *Akira Kakugo[1,2]（[1] 北海道大学大学院理学研究院，[2] 北海道大学大学院総合化学院，[3] 九州大学芸術工学研究院，[4] コロンビア大学医用生体工学部，[5] 関西大学 化学生命工学部，[6] 名古屋大学大学院工学研究科）
雑誌名	Science Robotics
ＤＯＩ	10.1126/scirobotics.abm0677
ＵＲＬ	https://www.science.org/doi/10.1126/scirobotics.abm0677
公表日	日本時間 2022 年 4 月 21 日（木）午前 4 時（米国東部時間 2022 年 4 月 20 日（水）午後 2 時）（オンライン公開）

【参考図】

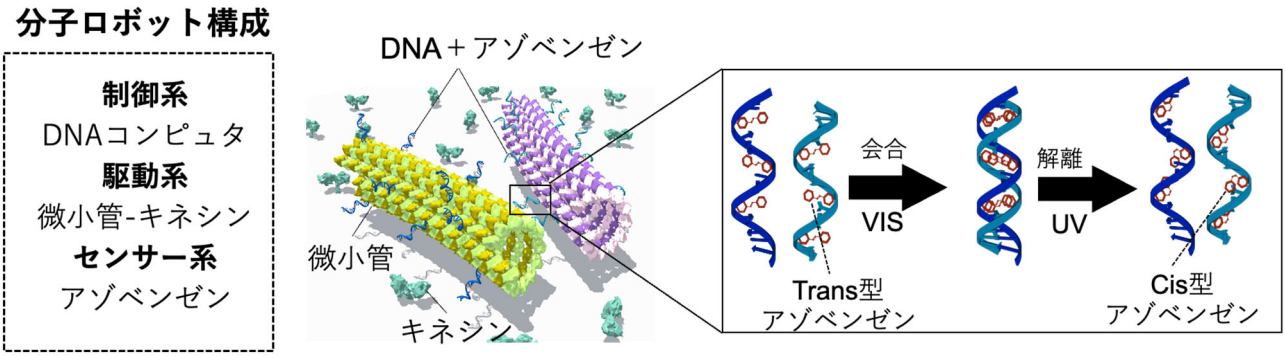


図 1 モータータンパク質（駆動系），DNA 分子コンピュータ（制御系），フォトクロミック色素（センサー系）から構成される分子ロボットの模式図。光照射によるアゾベンゼンのシス-トランス異性化反応により，分子ロボットによる群れの形成解離が引き起こされる。

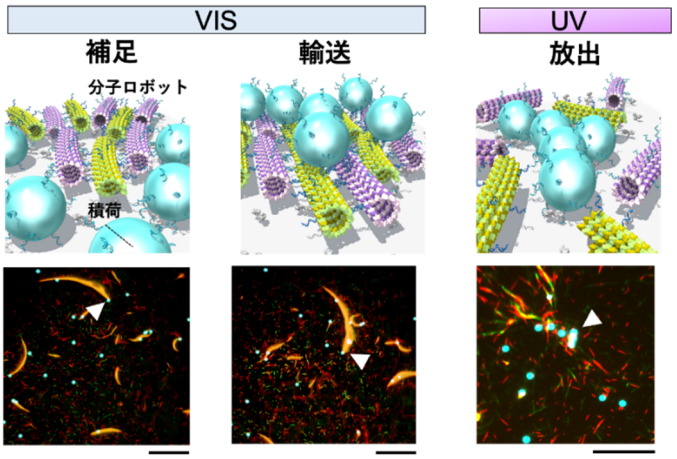


図 2　分子ロボットの群れによる物質輸送の概念図(上）と実際に物質を輸送している分子ロボットの蛍光顕微鏡写真（下)。輸送される物質は直径 1.1 マイクメートルのポリスチレン製ビーズ（矢印)。図中の数字の単位は分。スケールバーは 20 マイクロメートル。

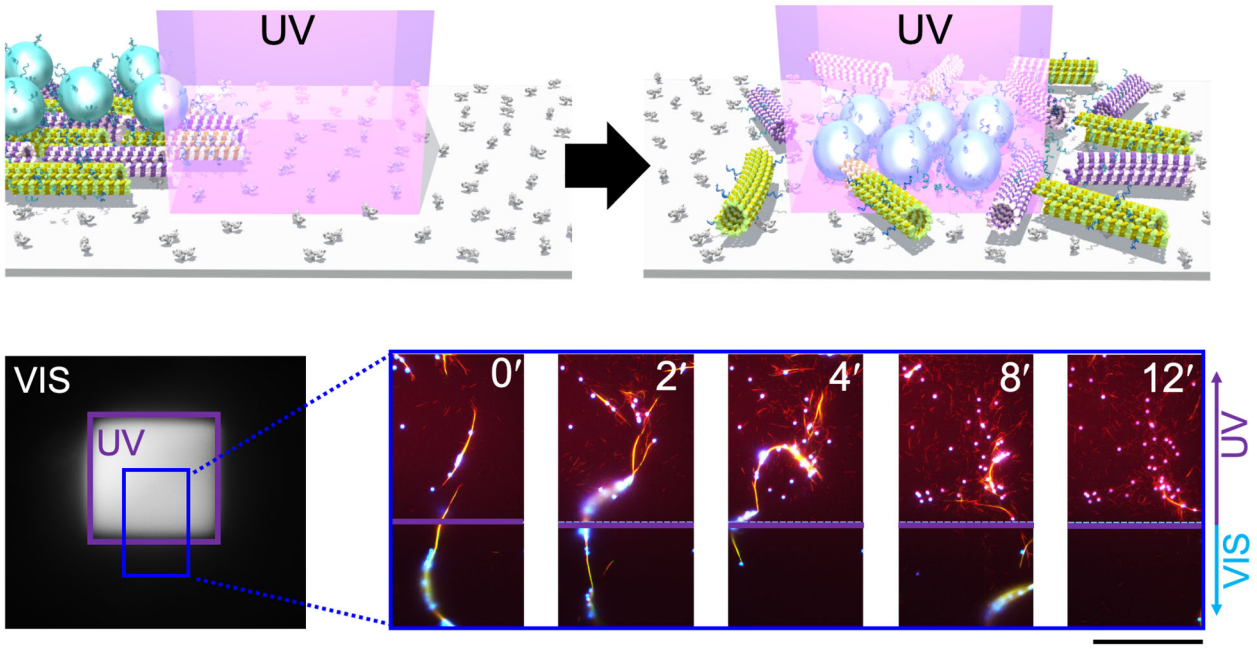


図 3 紫外光照射位置の指定による積荷集積の概念図（上）と実際に紫外光照射下で積荷を放出している分子ロボットの蛍光顕微鏡写真（下）。図中の数字の単位は分。スケールバーは 50 マイクロメートル。

【用語解説】

＊1 群ロボット … 多くの単純なロボットから構成されるロボットシステム。ロボット間で相互作用しながら群れとして行動することで，単体のロボットにはできない複雑な仕事を効率よくこなすことができる。鳥や魚，昆虫などの群れが群ロボット開発のヒントになっている。

＊2 モータータンパク質 … アデノシン三リン酸（ATP）の加水分解によって生じる化学エネルギーを運動に変換するタンパク質。生物のほとんどすべての細胞に存在しており，物質の輸送や細胞分裂に関わっている。アクチン上を動くミオシン，微小管上を動くキネシンやダイニンが知られている。本研究では微小管とキネシンを使用した。

＊3 DNA コンピュータ … 生体の DNA（デオキシリボ核酸）に含まれる塩基を演算素子として用いるコンピュータのこと。DNA を構成する 4 つの塩基「アデニン（A)」「チミン（T)」「グアニン（G)」「シトシン（C)」の分子配列および酵素の作用を，演算処理の分野に応用した。

＊4 フォトクロミック色素 … 光をあてると色や構造が変わり，また別の波長の光をあてることで元の色・構造に戻すことができるような有機材料のこと。本研究では感光性分子として，可視光で平面形態（トランス体)，紫外光で屈曲形態（シス体）となるアゾベンゼンを使用した。