

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03673

研究課題名(和文) 生体分子機械による革新的動力システムの合理設計

研究課題名(英文) Rational design of a novel power system from biomolecular motor

研究代表者

角五 彰 (Kakugo, Akira)

北海道大学・理学研究院・准教授

研究者番号：10374224

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,520,000円

研究成果の概要(和文)：生体分子機械を用いた分子デバイスや動力システムの研究・開発が世界中で精力的に行われている。本研究は、生体分子機械の数の利を生かし集団で機能するシステムの開発を目的とし、生体分子機械における1) 集団運動の発現機構の解明、2) 集団運動の構造的安定性の解明、ならびに3) 集団運動のエネルギー収支の微視的および巨視的な観点からの理解に取り組んできた。本成果は集団運動に基づく材料創成のグランドデザインを提示するだけでなく、自律的に運動する物質群を理解する学理の構築にも貢献しうると期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生体分子機械を動力源とした動力システムは数多く提案されてきたが集団運動による協調的な運動を実現した例は数少ない。このような動力システムには、デザイン性や拡張性、摂動に関する頑健性ととも自己修復性など既存にはない機能性が期待される。また本研究で開発した実時間可視化シミュレーション技術は分子形状や密度など幾何学的パラメーターが考慮されており、リアルな系に即した集団運動の評価が可能になると期待される。さらに生体分子機械が創出する集団運動のエネルギー収支が理解されれば仕事効率に関する考察も可能となり、実用化の道筋を明示できるようになると期待される。

研究成果の概要(英文)：Recently there has been a surge of interest in developing power systems using biomolecular motors that run on chemical energy. The purpose of this study is to develop an amplified power system composed of biomolecular motors that will work in groups in a concerted fashion (swarming). This study is aimed at achieving the following targets: understanding the emergence of swarming of biomolecular motors and its stability, as well as the energetical advantage of swarming. Possible outcomes will not only provide a grand design for power systems based on coordinated behavior of biomolecular motor but also contribute to establish a theory for understanding the dynamic behavior of active materials.

研究分野：アクティブマター

キーワード：生体分子機械 集団運動 高速数値シミュレーション 熱力学 動力システム

1. 研究開始当初の背景

今日に至るまで内燃機関や電動機など様々な動力システムが開発されてきた。取り巻く環境の変化や科学技術の進歩に伴い動力システムの刷新にも期待が寄せられている。

2016年のノーベル化学賞は「分子機械の設計および合成」に関する有機化学的な研究に授与され分子機械の将来性が期待された。高分子化学の分野では分子機械をポリマーに組み込むことで光や熱などの外部制御に対応した巨視的な運動が実現されている。一方、バイオエンジニアリングの分野では化学エネルギーを力学的仕事に変換することで自律的に運動する「生体分子機械」を用いた動力システムが提案されてきた。このように分子機械を基軸とした動力システムの研究開発が国内外で精力的に行われている。しかし、分子機械の自律性と構造的な秩序との両立が挙げられてきた。即ち「自律性を有する分子機械をいかに秩序だって組織化し、協調性のある運動を実現するか」が課題とされていた。

このような背景をもとに申請者らは、自律運動する生体分子機械（微小管/キネシン系）に局所的な相互作用を導入すると協調的な運動（集団運動）が発現されることを見出してきた。しかし、1) 集団運動の秩序や形態形成の機構や、2) 形成される集団運動の構造安定性、3) 集団運動形成におけるエネルギーの収支などに関する知見が申請段階では得られていなかった。動力システムの合理的な設計指針を提案するだけでなく、実質的な効率を把握するためにも、上記3課題を統一的に理解する必要があるとの発想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、生体分子機械における1) 集団運動の発現機構、2) 集団運動の構造的安定性、3) 集団運動のエネルギー収支を微視的および巨視的な観点から統一的に理解することを目的とした。さらに、これらの知見をもとに生体分子機械による革新的動力システムの合理的な設計指針を提案すること目的とした。

3. 研究の方法

課題1) 生体分子機械の集団運動を支配する制御因子の探索とその安定性の評価

本課題では生体分子機械の形状、運動特性や枯渇力により導入される引力相互作用に着目しながら形成される集団運動の形態と制御因子との関係を明確にする。また形成される集団運動の安定性は、独自開発してきたマイクロ力学試験機を用い、力学的なストレスを印加することで系に摂動を与え、その結果生じる形態変化から評価する。

課題2) 高速数値シミュレーション技術を用いた生体分子機械の形態予測

本課題では演算装置 (GPGPU) を中心とした数値シミュレーションを高速実行する現有技術を拡張し、生体分子機械の集団運動を実時間でかつより実験系に近い条件で再現する実時間可視化シミュレーションシステムの開発を目的とする。そのシステムを用いて実験系における制御因子の統一的な理解を深める。

課題3) 生体分子機械による集団運動の熱力学的考察

本課題では生体分子機械の集団運動を巨視的な量として捉えることで形態形成を熱力学的に解釈する。具体的には生体分子機械が消費する全エネルギーを、タイトカップリング性などを利用して見積もるとともに集団運動の動態を熱力学ポテンシャルへと変換可能な秩序パラメータで評価することで系のエネルギー収支を考察する。

4. 研究成果

生体分子機械としてキネシン/微小管を従来の方法に倣い調整した。集団運動はキネシン上でアデノシン三リン酸 (ATP) をエネルギー源として自律運動する微小管にメチルセルロース (Mw: 140 KDa) を導入することで発現させた。

課題1) ①生体分子機械の集団運動を支配する制御因子探索：本課題では微小管の集団運動がどのような制御因子によって支配されているのかを実験を通して統一的に理解するとともに集団運動と制御因子との関係を一般化することを目的とした。制御因子としては、これまでの試行から、微小管の運動速度、微小管の運動持続長および微小管間の相互作用などに着目した。具体的な手法とし、微小管の運動速度はATP濃度 (0~5 mM) により、運動持続長は微小管の長さ (1~30 μm) や硬さ ($30 \times 10^{-24} \sim 60 \times 10^{-24} \text{ Nm}^2$) により、微小管間の相互作用はメチルセルロースの濃度 (0~0.3 wt%) を調整することで制御した。微小管による集団運動の時間変化データは自動焦点距離維持システム、高解像度カメラおよ

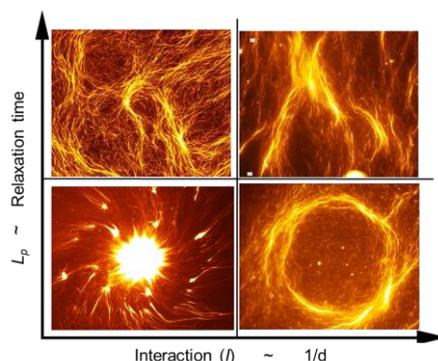


図1: 微小管集合体の形態と制御因子との関係性を示した相図。

びXY電動ステージを用いて広範(10 mm×20 mm)に取得した。得られる時系列データの秩序変化や相関解析などを行い集団運動の運動特性を評価した。さらにその運動特性と制御因子との関連を相関にまとめながら微小管の集団運動をクラス分けした。図1は微小管間の相互作用や微小管の運動持続性により集団運動のパターンが変化する様子を捉えたものである。集団運動の秩序が微小管の濃度や微小管間の相互作用(枯渴力)により変化している。以上のように微小管の固さや微小管間の相互作用に依存して集団運動の形態が大きく変化することを明らかにした。

課題1) ②生体分子機械による集団運動の安定性評価: 本課題では集団運動する微小管の構造的な安定性を、力学的な摂動に対する応答性から評価することを目的とした。具体的には集団運動に歪、歪速度、伸張パターンを系統的に変化させながら力学的ストレスを印加し、その結果生じる運動特性の変化を解析することで安定性の評価を行う。図2(上)は顕微鏡観察しながら力学的ストレスを印加可能なマイクロ力学試験機の概要である。エラストマー基板はポリジメチルシロキサン(PDMS)製のフィルム(膜厚:50 μm、ヤング率:1.0 MPa、破断歪:400%)を用いた。力学刺激を特徴付ける歪パターン(単一、繰返し)、試験モード(一軸伸張/二軸伸張)に対する応答も評価した。図2(下)は集団運動のパターンが力学ストレスのモードに応じて多様に変化する様子を捉えたものである。詳細な検討の結果、微小管の集団運動は微小な伸張歪に対しては安定に維持されるが、ある臨界伸張歪が与えられた場合には形態変化が起こり、さらにその形態変化は伸張パターンや伸張モードにも依存するという知見が得られた。この結果は同程度の安定性を持つ複数の準安定状態が存在することを示唆する。

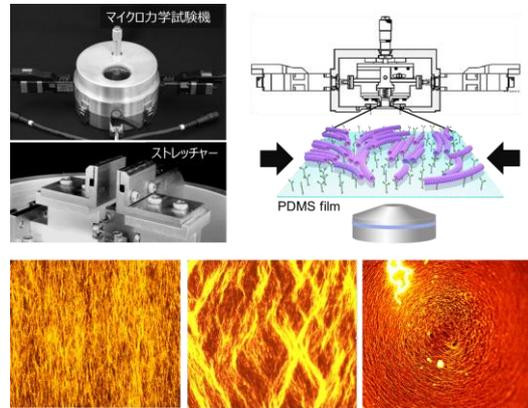


図2: マイクロ力学試験機の外観ならびに力学ストレスのモードに依存した集団運動パターンの変化。

課題2) 実時間可視化シミュレーションによる生体分子機械の形態予測: 本課題では微小管による集団運動を実時間で再現するシミュレーションシステムを開発するとともに本系を用いて実験系における制御因子の統一的な理解を深めることを目的とした。実時間シミュレーションは演算装置(GPGPU)を用い、微小管の可視化はn-粒子からなるボーススプリングモデルを用いて行った(図3(上左))。枯渴力に対応した引力相互作用は微小管間にLennard-Jones型のポテンシャルを働かせることで導入した(R. Lang et al Soft Matter 2011)。実験系で指標とした制御因子(微小管の長さ、曲げ剛性、相互作用の程度)を考慮しながらキネシン(K)を駆動し(速度:0~400 nm/s、力:5 pN)、数万本規模の微小管の形態予測を行った。図3(上右)は、微小管の動態をボーススプリングモデルを用いた可視化粒子法により予測した結果である。実際に数万本の微小管を実時間で可視化できることが確認された。ある条件(微小管長:7 μm、微小管密度:3万本/mm²)では、リング状の集団運動も再現されることがわかった。さらに集団運動の秩序がある配向秩序(~40%)を超えると急激に増幅されることもシミュレーション実験により明らかになった(図3(下))。

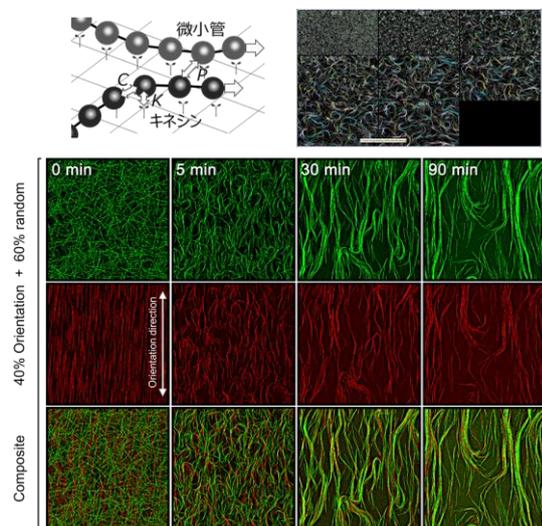


図3: 実時間可視化シミュレーションによる生体分子機械の形態予測。

課題3) 生体分子機械による集団運動の熱力学的考察: 本課題では集団運動する微小管から取り出せる仕事量の見積もりを目的とした。方法としては、集団運動の異方性を表す秩序パラメーター(S)によりエネルギー量を分配することで仕事量の見積もりを試みた。ATPの加水分解によって得られる全エネルギー量は、キネシン・微小管の“タイトカップリング性”から見積もった。即ちキネシン1分子が単位時間あたりに消費する自由エネルギーと定常状態に至るまでの時間に占有する微小管およびキネシン密度から求めた相互作用点の積より算出した。キネシン密度

は水晶振動子センサにより定量した。秩序パラメーター (S) は全微小管の平均角度を画像解析により求め、その統計的な分散値の平均をもとに算出した。図5は、微小管による集団運動の形態 (画像データ) を秩序パラメーター (S) に変換し、さらに各条件における秩序パラメーターを微小管濃度およびメチルセルロース濃度の逆数で整理したものである。ある条件を境に集団運動への転移現象が観測されている。このような秩序パラメーターへの変換および分配関数の関係式を基に集団運動におけるエネルギー収支が算出できる可能性を示した。一方、興味深い知見として集団運動中の微小管は単体よりも 1.4 倍 (n=100) の速度で移動しているという結果が得られた。これは集団運動によりエネルギー効率 (協同性) が向上しているということを示唆するもので、同時にタイトカップリング性を用いたエネルギー消費量の見積もりの妥当性を問い直すものでもある。以上より集団運動による仕事の見積もりには、より直接的な計測法の開発が必要であるという結論を得た。

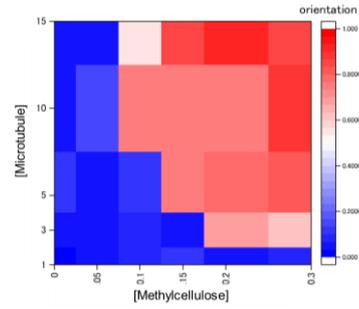


図5：微小管濃度およびメチルセルロース濃度が秩序パラメーターに及ぼす影響。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 22件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kabir Arif Md. Rashedul, Sada Kazuki, Kakugo Akira	4. 巻 57
2. 論文標題 Controlling the length of self-assembled microtubes through mechanical stress-induced scission	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 468 ~ 471
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0CC07327J	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Pramudwiatmoko Arif, Gutmann Gregory, Ueno Yutaka, Kakugo Akira, Yamamura Masayuki, Konagaya Akihiko	4. 巻 20
2. 論文標題 Tensegrity representation of microtubule objects using unified particle objects and springs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chem-Bio Informatics Journal	6. 最初と最後の頁 19 ~ 43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1273/cbij.20.19	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Inaba Hiroshi, Yamada Mayuki, Rashid Mst. Rubaya, Kabir Arif Md. Rashedul, Kakugo Akira, Sada Kazuki, Matsuura Kazunori	4. 巻 20
2. 論文標題 Magnetic Force-Induced Alignment of Microtubules by Encapsulation of CoPt Nanoparticles Using a Tau-Derived Peptide	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 5251 ~ 5258
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.0c01573	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Akter Mousumi, Keya Jakia Jannat, Kabir Arif Md. Rashedul, Asanuma Hiroyuki, Murayama Keiji, Sada Kazuki, Kakugo Akira	4. 巻 56
2. 論文標題 Photo-regulated trajectories of gliding microtubules conjugated with DNA	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 7953 ~ 7956
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0CC03124K	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Inaba Hiroshi, Nagata Miyuu, Miyake Kyeongmi Juliano, Kabir Arif Md. Rashedul, Kakugo Akira, Sada Kazuki, Matsuura Kazunori	4. 巻 52
2. 論文標題 Cyclic Tau-derived peptides for stabilization of microtubules	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Polymer Journal	6. 最初と最後の頁 1143 ~ 1151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41428-020-0356-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Inoue Daisuke, Kabir Arif Md. Rashedul, Tokuraku Kiyotaka, Sada Kazuki, Kakugo Akira	4. 巻 7
2. 論文標題 Mechanical Stimulation Induced Orientation of Gliding Microtubules in Confined Microwells	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Materials Interfaces	6. 最初と最後の頁 1902013 ~ 1902013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/admi.201902013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Keya Jakia Jannat, Kudoh Hiroki, Kabir Arif Md. Rashedul, Inoue Daisuke, Miyamoto Nobuyoshi, Tani Tomomi, Kakugo Akira, Shikinaka Kazuhiro	4. 巻 15
2. 論文標題 Radial alignment of microtubules through tubulin polymerization in an evaporating droplet	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 0231352 ~ 0231352
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0231352	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nasrin Syeda Rubaiya, Ishihara Tsukasa, Kabir Arif Md. Rashedul, Konagaya Akihiko, Sada Kazuki, Kakugo Akira	4. 巻 52
2. 論文標題 Comparison of microtubules stabilized with the anticancer drugs cevipabulin and paclitaxel	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Polymer Journal	6. 最初と最後の頁 969 ~ 976
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41428-020-0334-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nasrin Syeda Rubaiya, Afrin Tanjina, Kabir Arif Md. Rashedul, Inoue Daisuke, Torisawa Takayuki, Oiwa Kazuhiro, Sada Kazuki, Kakugo Akira	4. 巻 3
2. 論文標題 Regulation of Biomolecular-Motor-Driven Cargo Transport by Microtubules under Mechanical Stress	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Bio Materials	6. 最初と最後の頁 1875 ~ 1883
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsabm.9b01010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kabir Arif Md. Rashedul, Sada Kazuki, Kakugo Akira	4. 巻 524
2. 論文標題 Breaking of buckled microtubules is mediated by kinesins	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Biochemical and Biophysical Research Communications	6. 最初と最後の頁 249 ~ 254
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.bbrc.2020.01.082	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nasrin Syeda Rubaiya, Kabir Arif Md. Rashedul, Sada Kazuki, Kakugo Akira	4. 巻 52
2. 論文標題 Effect of microtubule immobilization by glutaraldehyde on kinesin-driven cargo transport	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Polymer Journal	6. 最初と最後の頁 655 ~ 660
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41428-020-0309-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Munmun Tasrina, Kabir Arif Md. Rashedul, Katsumoto Yukiteru, Sada Kazuki, Kakugo Akira	4. 巻 56
2. 論文標題 Controlling the kinetics of interaction between microtubules and kinesins over a wide temperature range using the deep-sea osmolyte trimethylamineN-oxide	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 1187 ~ 1190
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c9cc09324a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Munmun Tasrina, Kabir Arif Md. Rashedul, Sada Kazuki, Kakugo Akira	4. 巻 304
2. 論文標題 Complete, rapid and reversible regulation of the motility of a nano-biomolecular machine using an osmolyte trimethylamine-N-oxide	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators B: Chemical	6. 最初と最後の頁 127231 ~ 127231
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.snb.2019.127231	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Md. Jahirul Islam, Kazuya Matsuo, Halley M. Menezes, Masayuki Takahashi, Hidehiko Nakagawa, Akira Kakugo, Kazuki Sada, Nobuyuki Tamaoki	4. 巻 17
2. 論文標題 Substrate selectivity and its mechanistic insight of the photo-responsive non-nucleoside triphosphate for myosin and kinesin	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Organic & Biomolecular Chemistry	6. 最初と最後の頁 53-65
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8OB02714E	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kento Matsuda, Arif Md. Rashedul Kabir, Naohide Akamatsu, Ai Saito, Shumpei Ishikawa, Tsuyoshi Matsuyama, Oliver Ditzer, Md. Sirajul Islam, Yuichi Ohya, Kazuki Sada, Akihiko Konagaya, Akinori Kuzuya, Akira Kakugo	4. 巻 19
2. 論文標題 Artificial Smooth Muscle Model Composed of Hierarchically Ordered Microtubule Asters Mediated by DNA Origami Nanostructures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 3933-3938
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.9b01201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroshi Inaba, Takahisa Yamamoto, Takashi Iwasaki, Arif Md. Rashedul Kabir, Akira Kakugo, Kazuki Sada, Kazunori Matsuura	4. 巻 55
2. 論文標題 Stabilization of Microtubules by Encapsulation of GFP Using Tau-Derived Peptide	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 9072-9075
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9CC04345D	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Syeda Rubaiya Nasrina Arif Md. Rashedul Kabir, Akihiko Konagaya, Tsukasa Ishihara, Kazuki Sada, Akira Kakugo	4. 巻 516
2. 論文標題 Stabilization of microtubules by cevipabulin	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Biochemical and Biophysical Research Communications	6. 最初と最後の頁 760-764
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.bbrc.2019.06.095	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroshi Inaba, Takahisa Yamamoto, Takashi Iwasaki, Arif Md. Rashedul Kabir, Akira Kakugo, Kazuki Sada, Kazunori Matsuura	4. 巻 4
2. 論文標題 Fluorescent Tau-derived Peptide for Monitoring Microtubules in Living Cells	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 11245-11250
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.9b01089	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Daisuke Inoue, Greg Gutmann, Takahiro Nitta, Arif Md. Rashedul Kabir, Akihiko Konagaya, Kiyotaka Tokuraku, Kazuki Sada, Henry Hess, Akira Kakugo	4. 巻 13
2. 論文標題 Adaptation of Patterns of Motile Filaments under Dynamic Boundary Conditions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 12452-12460
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.9b01450	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Keya Jakia Jannat, Suzuki Ryuhei, Kabir Arif Md. Rashedul, Inoue Daisuke, Asanuma Hiroyuki, Sada Kazuki, Hess Henry, Kuzuya Akinori, Kakugo Akira	4. 巻 9
2. 論文標題 DNA-assisted swarm control in a biomolecular motor system	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-017-02778-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Keya Jakia Jannat, Kabir Arif Md. Rashedul, Inoue Daisuke, Sada Kazuki, Hess Henry, Kuzuya Akinori, Kakugo Akira	4. 巻 8
2. 論文標題 Control of swarming of molecular robots	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-30187-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Arif Md. Rashedul Kabir, *Akira Kakugo	4. 巻 50
2. 論文標題 Study on active self-assembly using biomolecular motors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Polymer Journal	6. 最初と最後の頁 1139-1148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計58件 (うち招待講演 26件 / うち国際学会 33件)

1. 発表者名 角五 彰
2. 発表標題 群れることで機能創発する分子システム
3. 学会等名 CSJ化学フェスタ2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 角五 彰
2. 発表標題 生体分子機械の集団運動制御
3. 学会等名 新学術領域合同シンポジウム - ソフトロボット学と発動分子科学の境界 - (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 角五 彰
2. 発表標題 Synchronous operation of bio-molecular engines
3. 学会等名 第20回日本蛋白質科学会年会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 角五 彰
2. 発表標題 ロボット&ナノ 極微の世界の協働性
3. 学会等名 第 67 回応用物理学会春季学術講演会ランチョンセミナー（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akira Kakugo
2. 発表標題 Swarming of a molecular machine for exploiting emergent functions
3. 学会等名 Scientific Meetings in King Faisal University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akira Kakugo
2. 発表標題 Emergent function of molecular swarm robot
3. 学会等名 14th International Symposium on Polymer Physics 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akira Kakugo
2. 発表標題 Synchronous operation of bio-molecular engines
3. 学会等名 2020 World Conference of Protein Society (WCPS) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akira Kakugo
2. 発表標題 Applications of ATP-fueled molecular swarm robots
3. 学会等名 International Conference on Manipulation Automation and Robotics at Small Scales (MARSS) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akira Kakugo
2. 発表標題 What the ATP-fueled molecular swarm robot be used for?
3. 学会等名 Intelligent droplets, marbles and vesicles (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akira Kakugo
2. 発表標題 Bio-molecular robots for sustainable development
3. 学会等名 International Conference on Recent Advances in Chemistry (ICRAC 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 Farhana Afroze, Daisuke Inoue, Arif Md. Rashedul Kabir, kazuki Sada, Akira Kakugo
2 . 発表標題 Correlation of microtubules density with the direction and polar motion of microtubules in collective motion
3 . 学会等名 11th CSE Autumn School
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Syeda Rubaiya Nasrin, Christian Ganser, Seiji Nishikawa, Kazuki Sada, Takayuki Uchihashi, Henry Hess, Akira Kakugo
2 . 発表標題 The most rigid cytoskeletal filament microtubule shows mechanosensing activity
3 . 学会等名 International Conference on Recent Advances in Chemistry (ICRAC 2020)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Syeda Rubaiya Nasrin, Tanjina Afrin, Arif Md. Rashedul Kabir, Daisuke Inoue, Takayuki Torisawa, Kazuhiro Oiwa, Kazuki Sada, Akira Kakugo
2 . 発表標題 Mechanical deformation of microtubule to regulate dynein-driven cargo transport
3 . 学会等名 69th Symposium of Macromolecules
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Mst. Rubaya Rashid, Mousumi Akter, Jakia Jannat Keya, Arif Md. Rashedul Kabir, Kazuki Sada, and Akira Kakugo
2 . 発表標題 Force Determination of Circular Swarm Microtubules Driven by Kinesin using Electromagnetic Tweezers
3 . 学会等名 The 11th CSE Autumn School & The 8th ALP International Symposium
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 Jakia Jannat Keya, Akira Kakugo
2. 発表標題 Autonomous molecular swarm robot realized by the intelligence of biomolecular motor system and DNA
3. 学会等名 35th Summer University in Hokkaido (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jakia Jannat Keya, Yuta Yamasaki, Akinori Kuzuya, Akira Kakugo
2. 発表標題 Autonomous molecular swarm robots realized by sequential transfer of DNA signal
3. 学会等名 58th Annual Meeting of Biophysical Society of Japan
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mousumi Akter, Jakia Jannat Keya, Arif Md. Rashedul Kabir, Kazuki Sada, Hiroyuki Asanuma, Akinori Kuzuya, Akira Kakugo
2. 発表標題 Molecular swarm robot- a highly efficient molecular cargo carrier system
3. 学会等名 54th Society of Polymer Science (SPSJ) Winter Meeting, 27 January2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mousumi Akter, Jakia Jannat Keya, Arif Md. Rashedul Kabir, Kazuki Sada, Hiroyuki Asanuma, Akinori Kuzuya, Akira Kakugo
2. 発表標題 Molecular swarm robot- a highly efficient molecular cargo transport system
3. 学会等名 Chemical Society of Japan (CSJ) Hokkaido Branch Meeting 2020 (TOUKIKEN), 28-29 January 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tasrina Munmun, Arif Md. Rashedul Kabir, Kazuki Sada, Akira Kakugo
2. 発表標題 Controlling the interaction between microtubule and kinesin over a wide temperature range using the deep-sea osmolyte trimethylamine N-Oxi
3. 学会等名 超異分野meetup Toward innovation beyond boundaries, Hokkaido University
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tasrina Munmun, Arif Md. Rashedul Kabir, Kazuki Sada, Akira Kakugo
2. 発表標題 On/off switching of the motility of a nano-biomolecular machine using a natural osmolyte trimethylamine-N-oxide
3. 学会等名 Chemical Society of Japan (CSJ) Hokkaido Branch Meeting 2020 (TOUKIKEN), 28-29 January 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Satsuki Ishii, Mousumi Akter, Jakia Jannat Keya, Arif Md. Rashedul Kabir, Hiroyuki Asanuma, Akinori Kuzuya, Kazuki Sada, and Akira Kakugo
2. 発表標題 Photocontrol of the Swarming of trans-on and cis-on Switched Biomolacular Based-Microrobots
3. 学会等名 The 11th CSE Autumn School & The 8th ALP International Symposium
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Satsuki Ishii, Mousumi Akter, Jakia Jannat Keya, Arif Md. Rashedul Kabir, Keiji Murayama, Hiroyuki Asanuma, Kazuki Sada, and Akira Kakugo
2. 発表標題 Photocontrol of the Swarming of Vis-ON and Vis-OFF Switched Biomolacular Based-Microrobots
3. 学会等名 The 101st CSJ Annual Meeting
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mousumi Akter, Jakia Jannat Keya, Kentaro Kayano, Arif Md. Rashedul Kabir, Daisuke Inoue, Kazuki Sada, Hiroyuki Asanuma, Henry Hess, Akinori Kuzuya, Akira kakugo
2. 発表標題 Trans on switched cargo transportation by molecular swarm robot
3. 学会等名 The 10th Graduate School of Chemical Sciences and Engineering (CSE) and Ambitious Leaders' s Program (ALP) International Summer School (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mousumi Akter, Jakia Jannat Keya, Kentaro Kayano, Arif Md. Rashedul Kabir, Daisuke Inoue, Kazuki Sada, Hiroyuki Asanuma, Henry Hess, Akinori Kuzuya, Akira Kakugo
2. 発表標題 Regulation of trans on switched cargo transportation by molecular swarm robot
3. 学会等名 2nd Asian-French Workshop on Polymer Science 2019 (CSE International Student Symposium 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mousumi Akter, Jakia Jannat Keya, Arif Md. Rashedul Kabir, Kazuki Sada, Hiroyuki Asanuma, Akinori Kuzuya, Akira Kakugo
2. 発表標題 Photo-regulated spatiotemporal cargo transportation by molecular swarm robot
3. 学会等名 The 57th Annual meeting of the Biophysical Society of Japan (BSJ 2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mousumi Akter, Jakia Jannat Keya, Arif Md. Rashedul Kabir, Kazuki Sada, Hiroyuki Asanuma, Akinori Kuzuya, Akira Kakugo
2. 発表標題 Spatiotemporal trans on switched cargo transportation by molecular swarm robot
3. 学会等名 Okinawa Colloids 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mousumi Akter, Jakia Jannat Keya, Arif Md. Rashedul Kabir, Kazuki Sada, Hiroyuki Asanuma, Akinori Kuzuya, Akira Kakugo
2. 発表標題 Spatiotemporal regulation of trans on switched molecular swarm robot
3. 学会等名 The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mousumi Akter, Jakia Jannat Keya, Arif Md. Rashedul Kabir, Kazuki Sada, Hiroyuki Asanuma, Akinori Kuzuya, Akira Kakugo
2. 発表標題 Molecular swarm robot- a highly efficient molecular cargo carrier system
3. 学会等名 Hokkaido University National Central University Joint Symposium on Materials Chemistry and Physics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Syeda Rubaiya Nasrin, Arif Md. Rashedul Kabir, Kazuki Sada, Akira Kakugo
2. 発表標題 Effect of Mechanical Deformation of Microtubule by External Stimuli on Microtubule-Dynein Interaction
3. 学会等名 2nd Asian-French Workshop on Polymer Science 2019 (CSE International Student Symposium 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Syeda Rubaiya Nasrin, Christian Ganser, Seiji Nishikawa, Kazuki Sada, Takayuki Uchihashi, Henry Hess, Akira Kakugo
2. 発表標題 High-Resolution Observation of the Effect of Microtubule Bending on Single Kinesin Motility
3. 学会等名 The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Syeda Rubaiya Nasrin, Christian Ganser, Seiji Nishikawa, Kazuki Sada, Takayuki Uchihashi, Henry Hess, Akira Kakugo
2 . 発表標題 High-Resolution Observation of the Effect of Deformation Microtubule on Single Kinesin Motility
3 . 学会等名 Hokkaido University-National Central University Joint Symposium on Materials Chemistry and Physics 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Mst. Rubaya Rashid, Mousumi Akter, Jakia Jannat Keya, Arif Md. Rashedul Kabir, Kazuki Sada, Akira Kakugo
2 . 発表標題 Force Measurement of Microtubules in Swarming Using Electromagnetic Tweezers
3 . 学会等名 7th International Life Science Symposium for Young Scientist (ILSS). (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Tasrina Munmun, Arif Md. Rashedul Kabir, Kazuki Sada and Akira Kakugo
2 . 発表標題 Regulation of the motility of a nano-biomolecular machine using trimethylamine-N-oxide
3 . 学会等名 7th International Life Science Symposium for Young Scientist (ILSS). (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Tasrina Munmun, Arif Md. Rashedul Kabir, Kazuki Sada and Akira Kakugo
2 . 発表標題 Complete, rapid and reversible regulation of the motility of a nanobiomolecular machine using trimethylamine-N-oxide
3 . 学会等名 2nd ICRéDD International Symposium (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Tasrina Munmun, Arif Md. Rashedul Kabir, Kazuki Sada and Akira Kakugo
2. 発表標題 A deep-sea osmolyte TMAO regulates the motility of a nano-biomolecular machine
3. 学会等名 The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tasrina Munmun, Arif Md. Rashedul Kabir, Kazuki Sada and Akira Kakugo
2. 発表標題 Repeated on/off switching of the motility of a nano-biomolecular machine using a deep-sea osmolyte trimethylamine-N-oxide
3. 学会等名 Hokkaido University-National Central University Joint Symposium on Materials Chemistry and Physics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松田健人、アリフ コピル ムハンマド ラセドゥル、角五彰、葛谷明紀、佐田和己
2. 発表標題 キネシンおよびDNA-origamiを介した微小管ネットワークの収縮弛緩挙動の制御
3. 学会等名 第68回高分子討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kento MATSUDA, Arif Md. Rashedul KABIR, Kazuki SADA, Akinori KUZUYA, Akira KAKUGO
2. 発表標題 Control of volume change of microtubule network by using kinesin and DNA-origami
3. 学会等名 2nd Glowing Polymer Symposium in KANTO
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松田健人、Arif Md. Rashedul Kabir、佐田和己、角五彰、葛谷明紀
2. 発表標題 キネシンおよびDNA-origamiを介した微小管ネットワークの収縮・弛緩挙動の制御
3. 学会等名 2019年度北海道高分子若手研究会 34th Summer University in Hokkaido
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jakia Jannat Keya, Arif Md. Rashedul Kabir, Kazuki Sada, Akinori Kuzuya, Akira Kakugo
2. 発表標題 Autonomous information transfer by molecular swarm robots through DNA-based sequential signaling
3. 学会等名 68th Symposiym on Macromolecules (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jakia Jannat Keya, Sosei Ichiseki, Ibuki Kawamata, Arif Md. Rashedul Kabir, Shinichiro M. Nomura, Akira Kakugo
2. 発表標題 Swarming of molecular robots under autonomous strand generator
3. 学会等名 The 20th RIES-HOKUDAI International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jakia Jannat Keya, Sosei Ichiseki, Ibuki Kawamata, Arif Md. Rashedul Kabir, Shinichiro M. Nomura, Akira Kakugo
2. 発表標題 Computing swarming of molecular robots under autonomous strand generator
3. 学会等名 Hokkaido University-National Central University Joint Symposium on Materials Chemistry and Physics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Kakugo
2. 発表標題 Design of molecular swarm robots
3. 学会等名 Energy Science and Engineering (ESE) seminar 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Kakugo
2. 発表標題 Construction of molecular swarm robot
3. 学会等名 18th International Conference on Unconventional Computation and Natural Computation (UCNC2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Kakugo
2. 発表標題 Construction of molecular swarm robot integrating biomolecular soft actuators and processors
3. 学会等名 The 3rd International Symposium for Advanced Gel Materials & Soft Matters (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Kakugo
2. 発表標題 Molecular swarm robot driven by chemical energy
3. 学会等名 International Conference on Manipulation Automation and Robotics at Small Scales (MARSS) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Kakugo
2. 発表標題 Overcoming the challenges for designing swarm molecular robots
3. 学会等名 CSJ, Okinawa Colloids 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Kakugo
2. 発表標題 A swarm molecular robot fabricated from photo-sensor, DNA processor and biomolecular motor
3. 学会等名 Japan-Israel Nano-Bio Interfaces Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Kakugo
2. 発表標題 Task execution by molecular robots through DNA based information transfer
3. 学会等名 Research Seminar in Mathematics and Computer Science, Research Group in Mathematics and its Applications (RGMA) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Kakugo
2. 発表標題 Task execution by molecular robots through DNA based information transfer
3. 学会等名 Seminar on MOLECULAR ROBOTS AND ARTIFICIAL LIFE (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Kakugo
2. 発表標題 A swarm molecular robot constructed from photo-sensor, DNA processor and biomolecular motor
3. 学会等名 The 2nd International Conference on Materials Research and Innovation (ICMARI) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 角五 彰
2. 発表標題 A soft matter that couples sensing, processing and actuation/感じて考えて行動するソフトマター
3. 学会等名 第28回日本MRS年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 角五 彰
2. 発表標題 生体分子モーター群の自律的な振る舞い
3. 学会等名 【細胞を創る】研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 角五 彰
2. 発表標題 動きの制御～分子機械から分子ロボットへと繋げる "3 × 3" のルール～
3. 学会等名 日本化学会CSJ化学フェスタ (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akira Kakugo
2. 発表標題 Biomolecular motors for studying collective dynamics of active soft matters
3. 学会等名 2018 Japan-Taiwan bilateral symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akira Kakugo
2. 発表標題 ATP fueled active soft matter for molecular robotics
3. 学会等名 The 5th International Conference on Nanomechanics and Nanocomposites (ICNN5) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jakia Jannat Keya, Arif Md. Rashedul Kabir, Kazuki Sada, Akira Kakugo
2. 発表標題 Swarm robots constructed from DNA computers and bio-molecular motors
3. 学会等名 The 1st "Molecules, Materials, Devices and Systems" (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 栢野健太郎、ケア ジャキア、コビル アリフ、佐田和己、角五 彰、葛谷明紀
2. 発表標題 スワーム型ロボットによる物質輸送の時空間制御
3. 学会等名 第30回 高分子ゲル研究討論会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 栢野健太郎、角五彰	4. 発行年 2019年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 12
3. 書名 次世代のポリマー・高分子開発、新しい用途展開と将来展望	

1. 著者名 栢野健太郎、角五彰	4. 発行年 2018年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 11
3. 書名 高分子ゲルを用いた生体分子モーターとその応用、その可能性について	

1. 著者名 西川聖二、佐田和己、角五彰	4. 発行年 2018年
2. 出版社 NTS出版	5. 総ページ数 9
3. 書名 生体分子モーターを用いたソフトロボット	

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 微小管の集積法	発明者 角五 彰	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2019/001293	取得年 2019年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

北海道大学大学院理学研究院化学部門物質化学研究室
<https://wwwchem.sci.hokudai.ac.jp/~matchemS/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	小長谷 明彦 (Konagaya Akihiko) (00301200)	恵泉女学園大学・人文学部・客員教授 (32694)	
研究分担者	秋山 良 (Akiyama Ryo) (60363347)	九州大学・理学研究院・准教授 (17102)	
研究分担者	勝本 之晶 (Katsumoto Yukiteru) (90351741)	福岡大学・理学部・教授 (37111)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関