

令和 5 年 6 月 7 日現在

機関番号：17102

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H05427

研究課題名（和文）発動分子の自律的運動と機能設計のエネルギー論的研究

研究課題名（英文）Statistical physics and energetics for autonomous motion and functional design in active molecular engines

研究代表者

前多 裕介（Maeda, Yusuke）

九州大学・理学研究院・准教授

研究者番号：30557210

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 95,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、生体分子モーターのように自律的に運動する物質群（発動分子）の物理的理解を目的とし、実験および理論的研究を行なった。生体内の発動分子であるタンパク質分子モーターが集団となって力を発揮し、細胞内の配置決めや外部環境と相互作用しながら自律的運動を実現するメカニズムを解明した。さらに、細胞内のエネルギー工場とも呼ばれる回転分子モーターのF1-ATPaseが無駄なエネルギー消費を避ける機構を明らかにした。この整流機構は発動分子が高いパフォーマンスを実現しながらもその制御のコストを抑えるという巧みな戦略となっている。これらの成果は、物理的理解に基づく発動分子の設計指針を与えるものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

アクティブマターの群れ運動の制御や人工細胞の自律的運動の理解を通じ、分子の群れを操る基本的なルールが明らかになったことで、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ものと期待できる。さらに、一分子レベルにおいても、回転分子モータータンパク質が無駄なエネルギー消費を避ける機構を有することを初めて明らかにした。この結果は、生体分子モーターが単にエネルギー変換を効率的に行うだけでなく、エネルギーの漏れを抑えていることを意味する。以上の成果より、一分子から分子集団まで、高いパフォーマンスと優れたエネルギー変換効率を示す人工発動分子の設計原理が与えられるものと期待できる。

研究成果の概要（英文）：We have investigated the non-equilibrium dynamics of molecular engines, such as molecular motor proteins, spanning from single-molecule level to collective group level. We have found the underlying mechanism by which molecular motors govern positional symmetry breaking within a cell-sized space, enabling adhesion-independent migration driven by frictional force with the external environment. Moreover, at single molecule level, we have elucidated the strategy employed by F1-ATPase, a rotary molecular motor renowned as an intracellular energy factory, as it mitigates inefficient energy consumption through a rectifying ratchet system. This rectification mechanism not only achieves exceptional performance but also diminishes energetic cost associated with autonomous control. These findings have the potential to unravel design principles governing the development of novel molecular engines.

研究分野：生物物理学

キーワード：非平衡物理学 分子モーター アクティブマター バクテリア エネルギー論 ゆらぎと応答 秩序形成

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

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る。このような分子モーターや細胞は、高密度にあつまると群れをなして動くようになり、渦やレーン形成などが生じることが知られている。自律的に動く要素（アクティブマター）が多数の分子に協働性を与え、1つの分子では実現できないような新規の機能を集団として発現できると期待されているが、その理論基盤やモデル実験系の整備は十分ではない。本研究の開始以前から前多グループ（研究代表者、前多G）は、渦運動といった基本的構造の幾何学的な特徴に着目することで、多様な集団運動をシンプルなルールで制御する力学モデルを明らかにしていた。しかし、この力学モデルを分子モーターに駆動されるアクティブマター集団に拡張することができるかは明らかではなく、その実験的検証と力学モデルの拡張が必要とされていた。

さらに1分子が観察できるナノスケールになると、分子モーター1つの運動機構にも重要な課題があることが見えてくる。細胞の中のように分子スケールにおいては熱揺らぎが激しく起こっている。このゆらぎは、多様な生体分子モーターがエネルギー変換を行いながら自律的に働く上で重要な役割を担っている。とりわけ、ある種の生体分子モーターは100%に近いエネルギー変換効率を実現することが知られており、激しい揺らぎの中でも効率よく動作するように、進化の過程でエネルギー変換機構を高度に洗練させていると考えられる。これまでの研究で鳥谷部グループ（研究分担者、鳥谷部G）は生体分子モーターが、熱エネルギーのスケールでエネルギーの流れを制御して高効率を実現していることを明らかにしている。この知見は鳥谷部らが初めて実証した「マックスウェルの悪魔」に似たエネルギー変換機構である。したがって、生体分子モーターのエネルギー変換機構を解明することで、生体分子を凌駕する高性能の人工分子モーターを設計するための強力な指針が得られると期待できる。

このような背景のもと、1分子レベルから分子集団まで、自律的な運動を示す物質を「発動分子」と定め、その運動原理の物理的理解と機能創出に向けた技術基盤に関する研究を行なった。

2. 研究の目的

本研究では、発動分子の設計指針をエネルギー論に基づいて構築するとともに、発動分子の集団運動制御および集団運動によるマクロな機能の発現のための理論・実験基盤を構築することを目的とした。高いエネルギー変換効率の人工発動分子を実現するため、高効率の生体分子モーターのエネルギー変換効率を計測し、その結果を設計にフィードバックするという戦略的なアプローチの構築を目指した。さらに、1分子では実現できないマクロな機能の発現を探索するためアクティブマター物理学の基本学理の開拓を行った。

3. 研究の方法

以下の4つ研究目標を設定し、発動分子の物理的・エネルギー論的理解に向けて、非平衡統計力学とソフトマター物理学を基盤とする研究を展開した。

- (1) 自律的運動と整流作用の力学モデル：自律的な一方向運動や分子整流作用を生む発動分子素子を構築し、その力学機構を流体力学的モデルと実験検証から解明する。
- (2) 自律的運動のエネルギー変換効率の計測：生体分子機械で実現しているエネルギー変換効率の1分子測定法をさらに発展させ、より小さな発動分子のエネルギー変換効率を評価するための理論基盤を構築する。
- (3) 生体分子機械の改変プロトコル開発：より効率的な生体分子機械を生み出す分子改変プロトコルをエネルギー論から特徴付ける。
- (4) 発動分子の集団運動と機能設計：自律的な運動から渦などの秩序的集団運動が出現する仕組みを解明し、生体高分子や液晶材料の微小空間配向制御における機能設計を実現する。

4. 研究成果

本研究で得られた代表的成果を以下に記載する。

4-1. 集団運動の幾何的制御とその原理の解明

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る。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はされていなかった。そこで前多Gは、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、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

に着目した。滑走する微小管が衝突する角度をマイクロ流体デバイスで制御するために、2つの円を重ねてできる境界形状を利用することを着想した。実験の結果、微小管同士の衝突角度を小さくして急角度で相互作用するようにしていくと、境界に対して左右に分かれて滑走するパターンと、境界から垂直な方向に群れが合体して進むパターンの2つが出現することがわかった(図1)。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の数値シミュレーションでも現れることも明らかにした。そして、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幾何的ルールを見出した。さらに、明らかにした幾何的ルールに基づいて壁形状を設計し、微小管の集団をマイクロ流路に並行・直角となるように自在にパターン構築することに成功した(Nano Letters 2021)。本研究で明らかにした微小管の集団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いえる。集団運動の自在な操作を可能にすることで、ミクロなスケールで物流を制御する分子輸送デバイスにつながると期待できる。

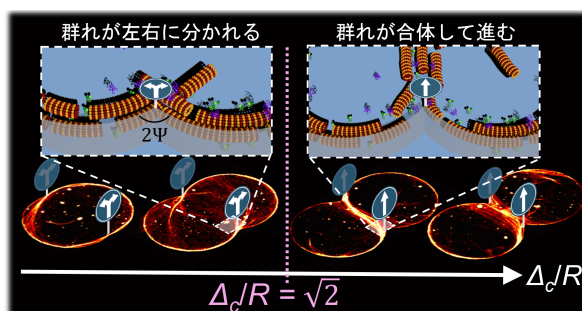


図1. 滑走する微小管集団の群れ運動の制御。

4-2. 遊泳微生物の集団運動におけるキラルエッジカレントの発見

遊泳微生物のバクテリアは、高密度になると多数の渦が出現する集団運動や、乱流のような複雑な流れ(アクティブ乱流)をつくることが知られている。ミクロな運動、中間サイズの渦ペアの秩序形成、そして乱流ダイナミクスが複雑に相互作用する状態には謎が多く、その理解と制御は発動分子の集団運動を操作する手がかりともなる。しかし、自然界に広く見られる集団運動を理解するという点では、遊泳微生物、鳥や魚、そして私たち人間にも備わる、重要な性質が十分に考慮されていない状況であった。その性質とは、動きの左右対称性の破れ(キラリティー)である。

私たちに右利き/左利きの非対称性があるように、自然界のアクティブマターは左回転と右回転が非対称的な運動を示し、遊泳バクテリアも直進する際に鞭毛の回転方向が決まっているために遊泳方向が左右でわずかに偏りが生じる。運動のキラリティーと集団運動の関係を明らかにするため、前多GはPolydimethyl siloxane (PDMS)で作られた円筒型のマイクロウェルにバクテリアを封入し、上面をミネラルオイルで封じる独自のマイクロ流体デバイスを開発した。側面は滑らかでバクテリアの運動方向に偏りを生むことはないにも関わらず、バクテリア集団の渦運動の回転方向が95%もの確率で反時計回りに偏ることを発見した(図2)。マイクロウェルの半径を大きくしても、壁際(端)を泳ぐバクテリアは反時計回りの集団運動を示すことから、自発的にキラルな秩序渦が出現することがわかった。また、キラル秩序渦の回転方向は、個々のバクテリアのバイアスされた運動方向と一致しており、集団運動に運動のキラリティーが反映されたものであることを確認した。さらに、バクテリア集団を円環状のマイクロチャンネルに封じ込めたところ、チャンネルの曲率によらない安定な流れが壁面(端)に沿って生み出される「エッジカレント(端の流れ)」が生じていることを見出した(図2)。このエッジカレントがあるために、キラル渦集団の秩序化では同じ回転方向が好まれることとなり、キラリティーが大域的な秩序形成に関わることを示した(Proc Natl Acad Sci USA 2021)。

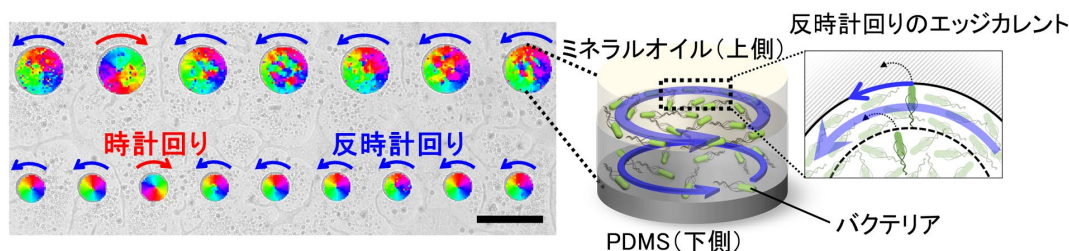


図2. バクテリア集団運動のキラル秩序渦。95%以上の確率でバクテリア集団は反時計回りのキラルな渦運動を示す。マイクロウェルの底面はPDMS、天井面は油水面になり、この境界条件の差が運動のキラリティーが集団運動に現れる要因となる。

運動のキラリティーはバクテリアのみならず真核細胞や動くタンパク質、自発的に運動する微粒子など、広く発動分子に備わる性質と考えられる。したがって、キラル渦による物質攪拌およびエッジカレントによる物質輸送を行うマイクロ流体デバイスの開発、液体中を泳ぐマイクロロボット集団の自律的制御などの物質輸送工学の発展にも展開しうる。

4-3. アクティブゲルによる細胞内対称性の制御原理の解明

すべての生命の基本単位は、小さな細胞である。その細胞の運命は、細胞核などの構造を細胞の中心におくか細胞の縁に運ぶかという配置の対称性で決定される。この問題を解決するため、アクチン細胞骨格とミオシン分子モーターを含む卵抽出液を油中液滴内に封入した人工細胞系を構築した。その結果、人工細胞の端から中央へ収縮しながら伝搬するアクチン波がクラスターを中央へ運び、人工細胞の縁とクラスターの間形成されたアクトミオシン・ブリッジが、クラスターを縁に引き寄せていることで配置対称性が破れることを発見した。周期的なアクチン凝集体の波が発生することが微小空間の構造形成を制御する新たなメカニズムである (Nature Commun. 2020, Phys Rev Research 2023)。

さらに、人工細胞の膜とアクトミオシンゲルとが接着する機能的脂質膜を与えることで、細胞骨格の収縮力を外部基盤に伝えて自律的に運動する細胞運動の再構成に初めて成功した。人工細胞を2枚のガラス板に挟むと、アクチンの流れが人工細胞の表面とガラス基板の間に摩擦力を生み、自律的に運動できることを発見した (図3)。さらに、狭い空間に拘束された運動を記述するアクティブゲルモデルを構築し、界面摩擦力と流体抵抗のバランスで運動速度が決まることを解明した (Proc Natl Acad Sci USA 2022)。効率的な力の伝達に不可欠な物理的要因の理解は、生体発動分子を用いた物質輸送デバイスに貢献する成果である。

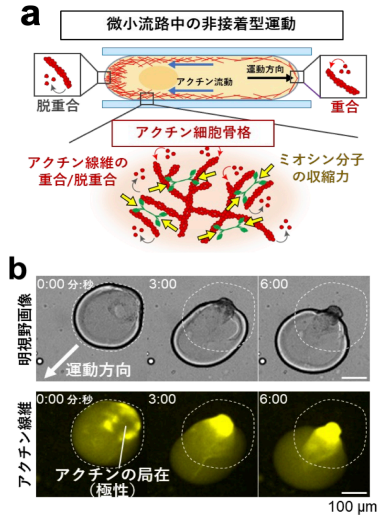


図3. 人工細胞による非接着型運動の再構成. a. 人工細胞の概要図, b. 運動する人工細胞の顕微鏡写真. 黄色はアクチン細胞骨格であり, ミオシンによる収縮力が発生する.

4-4. 生体分子モーターが無駄なエネルギー消費を抑える機構の解明

回転分子モーターである F_1 -ATPase は ATP 合成活性を有し、細胞内のエネルギー工場である ATP 合成酵素の主要ユニットである。鳥谷部 G での過去の研究により、 F_1 -ATPase が高効率のエネルギー変換機構を有することが明らかになっている。本研究では、さらに進めて、 F_1 -ATPase が無駄なエネルギー消費を避ける機構を有することを明らかにした (Phys. Rev. Lett. 2021)。

F_1 -ATPase は、単離すると ATP を加水分解しながら一方方向に回転するが、ATP 合成酵素内では他のモーターによって逆方向に回されて ATP を合成している。しかし、このトルクが弱かったり、また、遊離した F_1 -ATPase があつたりすると、ATP を浪費して回転してしまう可能性がある。

以前から、ATP 加水分解回転中に回転が一定時間停止する「ADP インヒビション」と呼ばれる現象が観測されていた。本研究では、まず、このインヒビションが ATP 合成回転中にはほとんど生じないことを 1 分子観察実験で明らかにした。これは、ATP 加水分解方向に回

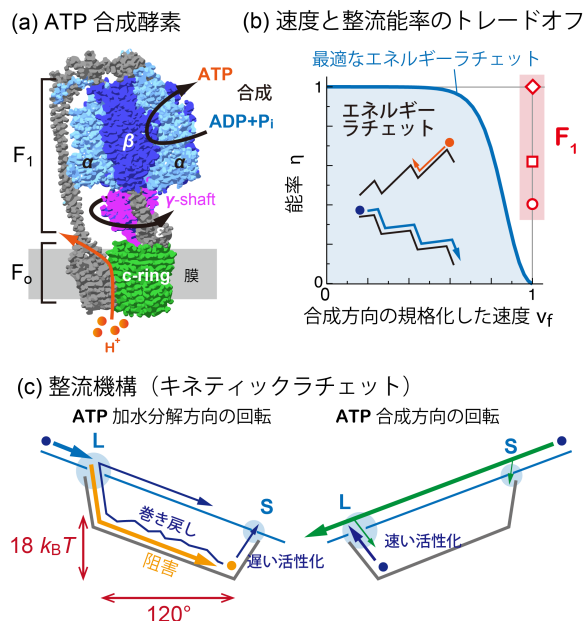


図4. F_1 -ATPase の整流機構. a. ATP 合成酵素, b. F_1 -ATPase は素朴な整流機構のトレードオフを凌駕する性能を持つ. c. 整流のメカニズム.

そうするとブレーキがかかるという整流機構を持つことを意味する。さらに、詳細な実験とモデル計算を通してその整流メカニズムを明らかにした。その結果、素朴な整流機構を持つトレードオフ関係を超える高パフォーマンスを実現し、かつ、整流自体にコスト（エントロピー生成）を必要としない巧みな機構が備わっていることを発見した（図4）。

人工発動分子を実現する上で、単にエネルギー変換を効率的に行うだけでなく、無駄な「エネルギーの漏れ」を抑えることも肝心である。本研究の結果は人工発動分子設計のための指針を与えると期待される。

4-5. 生体分子モーターの協働的なトルク制御機構の解明

バクテリアのべん毛モーターは自然界で発見されている分子機械の中で最も洗練されたものの1つであり、高速なモーター回転を状況に応じて反転できるだけでなく、オートマ制御ができることが知られている。というのは、回転子の周りの10個程度の固定子ユニットがトルクを発生するが、この固定子の数が環境に応じて動的に変化する。粘度の低い環境下では固定子が回転子から外れてその数を減らして無駄なエネルギー消費を抑え、粘膜のような粘度の高い環境では、固定子が集合してトルクを増強する。

このオートマ制御の仕組みは解明されていないが、その仕組みが分かれば、高効率性と広いダイナミックレンジを持つ出力を実現する機構として、発動分子設計の上でも参考になると期待できる。本研究では、べん毛モーターの回転観察と回転電場法による外部トルク制御を駆使して、その機構を詳細に調べた。その結果、固定子が1つも結合していない状況では固定子結合が非常に遅いが、固定子が1つ結合すると、その後は固定子が容易に結合できることを発見した（図5）。これは、固定子の結合に協働性があることを示している。さらなる実験やモデルにより、回転子の回転速度が固定子の脱着に影響することを明らかにした（Nature Commun. 2021）。

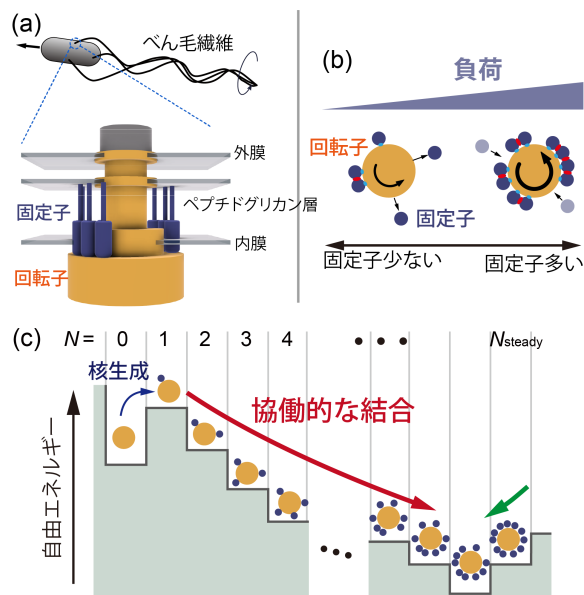


図5. バクテリアべん毛モーターの協働的な固定子結合. a. バクテリアべん毛モーター, b. 負荷依存的なオートマ制御, c. 協働的な固定子の結合. 核生成があり、1つ結合すると雪崩のように一気に固定子が結合していく。

関連論文

1. S. Araki, et al., *Nano Letters* **21**, 10478–10485 (2021)
2. K. Beppu, et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **118**, e2107461118 (2021)
3. R. Sakamoto, et al., *Nature Communications* **11**, 3063 (2020)
4. R. Sakamoto, et al., *Physical Review Research* **5**, 013208 (2023)
5. R. Sakamoto, et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **119**, e2121147119 (2022)
6. Y. Nakayama and S. Toyabe, *Phys. Rev. Lett.* **126**, 208101 (2021)
7. K. I. Ito, et al., *Nature Communications* **12**, 3218 (2021)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計36件（うち査読付論文 28件 / うち国際共著 10件 / うちオープンアクセス 11件）

1. 著者名 Beppu Kazusa, Maeda Yusuke T.	4. 巻 19
2. 論文標題 Exploring order in active turbulence: Geometric rule and pairing order transition in confined bacterial vortices	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Biophysics and Physicobiology	6. 最初と最後の頁 e190020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2142/biophysico.bppb-v19.0020	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 -
1. 著者名 Gupta Deepak, Large Steven J., Toyabe Shoichi, Sivak David A.	4. 巻 13
2. 論文標題 Optimal Control of the F1-ATPase Molecular Motor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 11844 ~ 11849
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.2c03033	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 Aoyanagi Hiroyuki, Pigoletti Simone, Ono Shinji, Toyabe Shoichi	4. 巻 122
2. 論文標題 Error-suppression mechanism of PCR by blocker strands	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Biophysical Journal	6. 最初と最後の頁 1334 ~ 1341
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.bpj.2023.02.028	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 Sakamoto Ryota, Miyazaki Makito, Maeda Yusuke T.	4. 巻 5
2. 論文標題 State transitions of a confined actomyosin system controlled through contractility and polymerization rate	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 13208
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.5.013208	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 -

1. 著者名 Fukuyama Tatsuya, Yan Lucan, Tanaka Masahito, Yamaoka Megumi, Saito Kei, Ti Shih-Chieh, Liao Chung-Chi, Hsia Kuo-Chiang, Maeda Yusuke T., Shimamoto Yuta	4. 巻 119
2. 論文標題 Morphological growth dynamics, mechanical stability, and active microtubule mechanics underlying spindle self-organization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 e2209053119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2209053119	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 Sakamoto Ryota, Izri Ziane, Shimamoto Yuta, Miyazaki Makito, Maeda Yusuke T.	4. 巻 119
2. 論文標題 Geometric trade-off between contractile force and viscous drag determines the actomyosin-based motility of a cell-sized droplet	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 e2121147119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2121147119	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 Shigeta Kazuyuki, Fukuyama Tatsuya, Takahashi Riku, Beppu Kazusa, Tanaka Aya, Maeda Yusuke T.	4. 巻 12
2. 論文標題 Collective motion of epithelial cells along a wrinkled 3D-buckled hydrogel	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 20174 ~ 20181
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D2RA01768G	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 -

1. 著者名 Maeda Yusuke T.	4. 巻 12
2. 論文標題 Negative autoregulation controls size scaling in confined gene expression reactions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 10516
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-14719-4	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 -

1. 著者名 Kato Shuzo, Garenne David, Noireaux Vincent, Maeda Yusuke T.	4. 巻 22
2. 論文標題 Phase Separation and Protein Partitioning in Compartmentalized Cell-Free Expression Reactions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Biomacromolecules	6. 最初と最後の頁 3451 ~ 3459
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.biomac.1c00546	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 Beppu Kazusa, Izri Ziane, Sato Tasuku, Yamanishi Yoko, Sumino Yutaka, Maeda Yusuke T.	4. 巻 118
2. 論文標題 Edge current and pairing order transition in chiral bacterial vortices	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 e2107461118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2107461118	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 Araki Shunya, Beppu Kazusa, Kabir Arif Md. Rashedul, Kakugo Akira, Maeda Yusuke T.	4. 巻 21
2. 論文標題 Controlling Collective Motion of Kinesin-Driven Microtubules via Patterning of Topographic Landscapes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 10478 ~ 10485
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.1c03952	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 Kikuchi Kosuke, Fukuyama Tatsuya, Uchihashi Takayuki, Furuta Tadaomi, Maeda Yusuke T., Ueno Takafumi	4. 巻 18
2. 論文標題 Protein Needles Designed to Self Assemble through Needle Tip Engineering	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Small	6. 最初と最後の頁 2106401 ~ 2106401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/smll.202106401	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 Ito Kenta I., Nakamura Shuichi, Toyabe Shoichi	4. 巻 12
2. 論文標題 Cooperative stator assembly of bacterial flagellar motor mediated by rotation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 3218
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-23516-y	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 -

1. 著者名 Nakayama Yohei, Toyabe Shoichi	4. 巻 126
2. 論文標題 Optimal Rectification without Forward-Current Suppression by Biological Molecular Motor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 208101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.208101	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 金原 数, 飯野亮太, 竹内正之, 前多裕介	4. 巻 612
2. 論文標題 はたらく分子マシン: ナノ世界のエネルギー変換へ	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 現代化学	6. 最初と最後の頁 46 ~ 50
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 無
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 中山洋平, 鳥谷部祥一	4. 巻 605
2. 論文標題 分子がはたらくということ	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 現代化学	6. 最初と最後の頁 30
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 無
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 前多裕介, 加藤修三, 福山達也	4. 巻 607
2. 論文標題 ソフトマターで分子を運ぶ, 選り分ける	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 現代化学	6. 最初と最後の頁 46-49
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 無
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 前多裕介, 白井瑞穂	4. 巻 70
2. 論文標題 遺伝情報高分子の非平衡現象と生命の起源	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 高分子	6. 最初と最後の頁 563-564
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 無
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 坂本遼太, 前多裕介, 宮崎牧人	4. 巻 76
2. 論文標題 細胞核はどこにあるか - アクティブ・ゲルと配置対称性の制御原理	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 595-600
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 無
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 R. Sakamoto, M. Tanabe, T. Hiraiwa, K. Suzuki, S-i. Ishiwata, Y.T. Maeda and M. Miyazaki	4. 巻 11
2. 論文標題 Tug-of-war between actomyosin-driven antagonistic forces determines the positioning symmetry in cell-sized confinement	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 3063
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-16677-9	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 -

1. 著者名 S. Toyabe and Y. Izumida	4. 巻 2
2. 論文標題 Experimental characterization of autonomous heat engine based on minimal dynamical-system model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 33146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.033146	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 -

1. 著者名 坂本遼太, 前多裕介	4. 巻 73
2. 論文標題 構成的アプローチで探る「発動する人工細胞」の設計原理	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 化学と工業	6. 最初と最後の頁 463-465
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 無
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 鳥谷部 祥一, BRAUN Dieter	4. 巻 60
2. 論文標題 鋳型複製系における種の起源	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 生物物理	6. 最初と最後の頁 295
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 無
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 -

1. 著者名 鳥谷部祥一	4. 巻 -
2. 論文標題 生体分子モーターの動作メカニズムとエネルギー論	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ペトロテック	6. 最初と最後の頁 -
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 無
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 Takaharu Y. Shiraki, Ken-ichiro Kamei, Yusuke T. Maeda	4. 巻 2
2. 論文標題 Randomness and optimality in enhanced DNA ligation with crowding effects	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 13360
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.013360	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 -

1. 著者名 Jun Takagi, Ryota Sakamoto, Gen Shiratsuchi, Yusuke T. Maeda, Yuta Shimamoto	4. 巻 49
2. 論文標題 Mechanically distinct microtubule arrays determine the length and force response of the meiotic spindle	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Developmental Cell	6. 最初と最後の頁 267-278
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.devcel.2019.03.014	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 Ziane Izri, David Garenne, Vincent Noireaux, Yusuke T. Maeda	4. 巻 8
2. 論文標題 Gene Expression in on-Chip Membrane-Bound Artificial Cells	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Synthetic Biology	6. 最初と最後の頁 1705-1712
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acssynbio.9b00247	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 Tatsuya Fukuyama, Yusuke T. Maeda	4. 巻 -
2. 論文標題 Optothermal diffusiophoresis of soft biological matters: From physical principle to molecular manipulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Biophysical Reviews	6. 最初と最後の頁 -
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 -

1. 著者名 前多裕介, 別府航早	4. 巻 60
2. 論文標題 遊泳バクテリアで探るアクティブマターの秩序と制御	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 生物物理	6. 最初と最後の頁 13-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2142/biophys.60.013	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 Sato, Shuichi Nakamura, Seishi Kudo, Shoichi Toyabe	4. 巻 116
2. 論文標題 Evaluation of the Duty Ratio of the Bacterial Flagellar Motor by Dynamic Load Control	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Biophysical Journal	6. 最初と最後の頁 1952-1959
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.bpj.2019.04.004	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 M. Tanaka, T. Kawakami, T. Okaniwa, Y. Nakayama, S. Toyabe, H. Ueno, E. Muneyuki	4. 巻 -
2. 論文標題 Tight chemomechanical coupling of the F1 motor relies on structural stability	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Biophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
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 -

1. 著者名 Chun-Biu Li, Shoichi Toyabe	4. 巻 -
2. 論文標題 Efficiencies of molecular motors: a comprehensible overview	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Biophysical Reviews	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12551-020-00672-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 該当する

1. 著者名 Shoichi Toyabe, Chun-Biu Li, Kazushi Kinbara	4. 巻 -
2. 論文標題 Session 2SDA-Nonequilibrium energetics of biological molecular machines	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Biophysical Reviews	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12551-020-00634-3	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 該当する

1. 著者名 Kazusa Beppu, Ziane Izri, Yusuke T. Maeda and Ryota Sakamoto	4. 巻 5
2. 論文標題 Geometric Effect for Biological Reactors and Biological Fluids	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Bioengineering	6. 最初と最後の頁 110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/bioengineering5040110	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 -

1. 著者名 鳥谷部祥一	4. 巻 84
2. 論文標題 生体分子モーター - 進化が生んだ超高性能ナノマシン-	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 精密工学会誌	6. 最初と最後の頁 905
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 -

1. 著者名 Shoichi Toyabe and Dieter Braun	4. 巻 9
2. 論文標題 Cooperative Ligation Breaks Sequence Symmetry and Stabilizes Early Molecular Replication	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. X	6. 最初と最後の頁 11056
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevX.9.011056	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

〔学会発表〕 計126件（うち招待講演 37件 / うち国際学会 19件）

1. 発表者名 Hiroyuki Aoyanagi, Simone Pigolotti, Shinji Ono, Shoichi Toyabe
2. 発表標題 Kinetic error suppression of DNA hybridization
3. 学会等名 DNA28 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroyuki Aoyanagi, Simone Pigolotti, Shinji Ono, Shoichi Toyabe
2. 発表標題 Kinetic error suppression of DNA hybridization
3. 学会等名 第60回日本生物物理学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shoichi Toyabe
2. 発表標題 Kinetic approach to biotechnology
3. 学会等名 25th Anniversary Symposium of German-Japanese Joint Research Project on Nonequilibrium Statistical Physics, Perspectives for Future Collaboration (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鳥谷部祥一
2. 発表標題 非平衡統計力学入門：分子モーターの研究に物理がどう役に立つのか？
3. 学会等名 第11回分子モーター討論会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中山洋平, 鳥谷部祥一
2. 発表標題 F1-ATPaseが示すATP合成/分解の間での基質濃度依存性の非対称性のTASAMによる解析
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福田朗大, 佐藤佑介, 横山武司, 田中良和, 鳥谷部祥一
2. 発表標題 パワーストローク型人工分子モーターの実現に向けて
3. 学会等名 2022年度日本生物物理学会 北海道-東北支部合同支部会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鳥谷部祥一
2. 発表標題 情報複製の物理と遺伝子工学
3. 学会等名 生命の情報物理学 領域会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鳥谷部祥一
2. 発表標題 熱で揺らぐ系の最適制御と最適輸送 生体分子マシンを例に
3. 学会等名 Workshop OT 最適輸送とその周辺 - 機械学習から熱力学的最適化まで (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kazuyuki Shigeta, Tatsuya Fukuyama, Riku Takahashi, Kazusa Beppu, Aya Tanaka, Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 Collective motion of epithelial cells in a 3D wrinkled hydrogel
3. 学会等名 The World Congress of Biomechanics (WCB2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 Geometry of phase transitions in confined active matter
3. 学会等名 the 15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤修三, David Garenne, Vincent Noireaux, 前多裕介
2. 発表標題 無細胞発現系における液滴形成のダイナミクス
3. 学会等名 第60回日本生物物理学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 繁田和幸, 別府航早, 田中あや, 前多裕介
2. 発表標題 上皮細胞の集団運動とペアリング秩序転移
3. 学会等名 第60回日本生物物理学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 家永竜, 別府航早, 前多裕介
2. 発表標題 筋芽細胞集団が示す位相欠陥と収縮性流れの幾何的制御
3. 学会等名 第60回日本生物物理学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomoka Kashiwabara, Syeda Rubaiya Nasrin, Arif Md Rashedul Kabir, Akira Kakugo, Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 Single molecule observation of kinesin-1 on collectively aligned microtubules
3. 学会等名 第60回日本生物物理学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 家永竜, 別府航早, 前多裕介
2. 発表標題 筋芽細胞集団が示す位相欠陥と収縮性流れの幾何学的制御
3. 学会等名 第10回ソフトマター研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤修三, David Garenne, Vincent Noireax, 前多裕介
2. 発表標題 無細胞発現系の相分離ダイナミクスと塩依存的な形状緩和過程
3. 学会等名 第10回ソフトマター研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松浦海人, 前多裕介
2. 発表標題 溶液物性制御に基づく遊泳バクテリアのアクティブ乱流状態の解析
3. 学会等名 第10回ソフトマター研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yusuke T. Maeda, Kazusa Beppu
2. 発表標題 Ordered patterns and geometric rule of multicellular systems explored in swimming bacterial population
3. 学会等名 第45回日本分子生物学会年会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 榎航平, 秋原宙, 前多裕介
2. 発表標題 回転する弾性リボンの変形と圧縮による形態転移
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 家永竜, 別府航早, 前多裕介
2. 発表標題 筋芽細胞集団における位相欠陥と収縮流れによる形態制御原理
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前多裕介
2. 発表標題 力が制御するアクトミオシンの秩序転移と自律運動・変形
3. 学会等名 第11回分子モーター討論会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 繁田和幸, 別府航早, 前多裕介
2. 発表標題 上皮細胞における集団運動の幾何的制御と自律振動
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前多裕介
2. 発表標題 アクトミオシンの秩序転移と摩擦力による自律運動
3. 学会等名 生命の情報物理学 領域会議（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shoichi Toyabe
2. 発表標題 Experiments on single-molecular energetics of biological molecular motor
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤修三, David Garenne, Vincent Noireaux, 前多裕介
2. 発表標題 無細胞発現系における液滴形成と成長のダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 繁田和幸, 別府航早, 田中あや, 前多裕介
2. 発表標題 上皮細胞の集団運動とペアリング秩序転移
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中山洋平, 鳥谷部祥一
2. 発表標題 F1-ATPaseの反応速度のATP分解/合成とで非対称な基質濃度依存性
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 家永竜, 別府航早, 前多裕介
2. 発表標題 筋芽細胞集団が示す位相欠陥とエッジ流れの幾何的制御
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前多 裕介
2. 発表標題 Understanding the instability of intracellular organization in synthetic cell
3. 学会等名 第59回 日本生物物理学会年会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂本 遼太, Ziane Izri, 島本勇太, 宮崎 牧人, 前多 裕介
2. 発表標題 アクティブな界面摩擦と流体抵抗の幾何学的バランスが決めるアクトミオシン液滴の自発運動
3. 学会等名 第59回 日本生物物理学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤 修三, David Garenne, Vincent Noireaux, 前多 裕介
2. 発表標題 細胞区画内のセルフリー遺伝子発現における液液相分離現象とぬれ効果
3. 学会等名 第59回 日本生物物理学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤 健太, 佐藤 佑介, 鳥谷部 祥一
2. 発表標題 人工回転分子モーターの設計とその自律的運動のシミュレーション
3. 学会等名 第59回 日本生物物理学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 前多裕介
2. 発表標題 アクティブマター：生命システムの理解と制御の新展開
3. 学会等名 東京大学化学生命工学専攻 談話会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 前多裕介
2. 発表標題 アクティブゲルの対称性と動きの非平衡力学
3. 学会等名 日本物理学会2021年度秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福山達也, 菊池幸祐, 上野隆史, 前多裕介
2. 発表標題 タンパク質針の相互作用と凝集による2次元集団秩序形成
3. 学会等名 日本物理学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荒木駿也, 別府航早, Arif Md. Rashedul Kabir, 角五彰, 前多裕介
2. 発表標題 アクティブ細胞骨格系における集団運動と幾何的制御
3. 学会等名 日本物理学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 別府航早, Ziane Izri, 住野豊, 前多裕介
2. 発表標題 バクテリア乱流ダイナミクスとフラストレートされた秩序渦の制御原理
3. 学会等名 日本物理学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤修三, David Garenne, Vincent Noireaux, 前多裕介
2. 発表標題 細胞区画内のセルフリー遺伝子発現における液液相分離現象と濡れ効果
3. 学会等名 日本物理学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 繁田和幸, 福山達也, 高橋陸, 田中あや, 前多裕介
2. 発表標題 3次元ハイドロゲルが誘起する上皮細胞の集団運動
3. 学会等名 日本物理学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 前多裕介
2. 発表標題 高分子共存系の非平衡現象と生命システムへの展開
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福山達也, 巖路燦, 島本勇太, 前多裕介
2. 発表標題 紡錘体の動的形状制御とアクティブゲルモデル
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 別府航早, Ziane Izri, 住野豊, 前多裕介
2. 発表標題 遊泳バクテリア集団のエッジカレントとキラルな秩序渦
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂本遼太, Guillaume Charras
2. 発表標題 分子レベルから探る細胞分裂の力学
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中山洋平, 鳥谷部祥一
2. 発表標題 自由エネルギーの浪費を抑えるF1-ATPaseの速度論的制御機構
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤修三, 坂本遼太, 宮崎牧人, 前多裕介
2. 発表標題 アクトミオシン液滴のダイナミクスと空間対称性の制御
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 Gene expression and artificial cells: Revisiting the role of active interface
3. 学会等名 日本生物物理学会第58回年会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryota Sakamoto, Tetsuya Hiraiwa, Makoto Tanabe, Kazuya Suzuki, Shin-ichi Ishiwata, Yusuke T. Maeda, Makito Miyazaki
2. 発表標題 A tug-of-war between contractile actomyosin structures determines the positioning symmetry in cell-sized droplets
3. 学会等名 日本生物物理学会第58回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenta Ito, Shuichi Nakamura, Shoichi Toyabe
2. 発表標題 Cooperative stator assembly of bacterial flagellar motor for autonomous torque regulation
3. 学会等名 日本生物物理学会第58回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yohei Nakayama, Shoichi Toyabe
2. 発表標題 Kinetic ratchet mechanism of F1-ATPase selectively suppresses hydrolysis of ATP
3. 学会等名 日本生物物理学会第58回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tatsuro Kai, Takahiro Kai, Shuichi Nakamura, Seishi Kudo, Shoichi Toyabe
2. 発表標題 Enhanced bacterial taxis by collective movement
3. 学会等名 日本生物物理学会第58回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鳥谷部祥一
2. 発表標題 キネティックな非平衡制御が生み出すエラー抑制 - 生体分子機械とPCR -
3. 学会等名 非平衡オンライン若手の会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鳥谷部祥一
2. 発表標題 発動分子のエネルギー戦略: 1分子実験でエナジェティクスを測る
3. 学会等名 CSJ化学フェスタ (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前多 裕介
2. 発表標題 高分子共存系の非平衡現象と生命システムへの展開
3. 学会等名 新潟大学理学部化学科談話会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 Understanding symmetry breaking induced by cell-sized compartments: a minimal cell approach
3. 学会等名 From Soft Matter to Protocell 2020（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中山洋平，鳥谷部祥一
2. 発表標題 F1モーターのエネルギー戦略 高効率と低損失
3. 学会等名 第10回分子モーター討論会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鳥谷部祥一
2. 発表標題 生体分子モーターの高効率なエネルギー変換機構
3. 学会等名 法政大グリーンソサエティセミナー（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Sakamoto, Z. Izri, M. Miyazaki, Y.T. Maeda
2. 発表標題 Symmetry-breaking induced adhesion-independent motility of actomyosin droplets under confinement
3. 学会等名 アクティブマター研究会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Beppu, Z. Izri, Y. Sumino, Y.T. Maeda
2. 発表標題 Chiral edge current and pairing order transition in the bacterial vortices
3. 学会等名 アクティブマター研究会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 別府航早, Ziane Izri, 住野豊, 前多裕介
2. 発表標題 遊泳バクテリア集団が示すキラルなエッジカレントと秩序渦の制御原理
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂本遼太, 宮崎牧人, 前多裕介
2. 発表標題 対称性の破れと界面摩擦が駆動するアクトミオシン液滴の自発運動
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋原宙, 前多裕介
2. 発表標題 回転する弾性バブルの振動現象
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤修三, 前多裕介
2. 発表標題 非平衡界面が誘起するセルフリー遺伝子発現における液液相分離現象
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 白井瑞穂, 前多裕介
2. 発表標題 温度勾配下における核酸高分子とペプチドの相分離液滴
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福山達也, 菊池幸祐, 上野隆史, 前多裕介
2. 発表標題 タンパク質ニードルの末端間相互作用と2次元表面上における集団秩序形成
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青柳拓志, 小野慎司, 鳥谷部祥一
2. 発表標題 DNA相補的結合のキネティックなエラー制御
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鳥谷部祥一
2. 発表標題 原田-佐々等式が切り拓く分子モーターのエネルギー論
3. 学会等名 Across nonlinear and nonequilibrium physics: 原田崇広氏が切り拓いたもの(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ziane Izri, Vincent Noireaux, Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 On-chip membrane-bound transcription and translation as minimal cells
3. 学会等名 新学術領域「発動分子科学」第2回領域会議
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryota Sakamoto, Makito Miyazaki, Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 Adhesion-independent migration of actomyosin droplet
3. 学会等名 新学術領域「発動分子科学」第2回領域会議
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前多 裕介
2. 発表標題 交わる物理学と生命科学：分子，細胞，細胞集団の非平衡ダイナミクス
3. 学会等名 第1回理研科学者会議セミナー（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前多 裕介
2. 発表標題 非接触型の自律運動とアクティブゲルの力学
3. 学会等名 第9回分子モーター討論会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 賀屋紘典，高松凌，前多 裕介
2. 発表標題 セルフリー遺伝子発現の転写抑制と幾何的制御
3. 学会等名 2019年日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福山達也，江端宏之，木戸秋悟，近藤洋平，青木一洋，前多裕介
2. 発表標題 細胞間シグナルと集団運動を結ぶ連続体力学モデルと実験検証
3. 学会等名 2019年日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 別府航早, Ziane Izri, 前多裕介
2. 発表標題 遊泳バクテリアのキラリティーと集団運動の制御
3. 学会等名 2019年日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前多裕介, 福山達也, 坂本遼太
2. 発表標題 発動分子集合体のソフトマター物理学：輸送現象からアクティブゲルまで
3. 学会等名 第68回高分子討論会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前多裕介, 福山達也
2. 発表標題 非平衡ソフトマターの輸送現象と生命科学への展開
3. 学会等名 OCU先端光科学シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 Structure and dynamics in soft active matter: Towards smart material
3. 学会等名 第3回日英先端科学シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 Geometric principle for controlling active matters: From bacterial suspension to active cytoskeletons
3. 学会等名 第3回日英先端科学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂本遼太・宮崎牧人・前多裕介
2. 発表標題 サイズが誘起する秩序形成：細胞内から多細胞まで
3. 学会等名 第42回日本分子生物学会年会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazusa Beppu, Ziane IZRI, Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 Chirality of bacterial vortices and enhanced pairing order as collective effects
3. 学会等名 Workshop on physics of soft, active and living matter
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tatsuya Fukuyama, Hiroyuki Ebata, Kazuhiro Aoki, Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 Continuum mechanical model of ERK wave-driven collective cell migration in wound healing
3. 学会等名 Workshop on physics of soft, active and living matter
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takaharu Shiraki, Ken-ichiro Kamei, Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 Kinetics of length-selective and optimal DNA growth with crowding effects
3. 学会等名 Workshop on physics of soft, active and living matter
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazusa Beppu, Ziane IZRI, Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 Chiral vortex formation in active matter as collective effect
3. 学会等名 The 1st International Symposium on Molecular Engine (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazusa Beppu, Ziane IZRI, Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 Chirality of bacterial vortices and enhanced pairing order as collective effects
3. 学会等名 The 1st International Symposium on Molecular Engine (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tatsuya Fukuyama, Hiroyuki Ebata, Kazuhiro Aoki, Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 Continuum mechanical model of ERK wave-driven collective cell migration in wound healing
3. 学会等名 The 1st International Symposium on Molecular Engine (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takaharu Shiraki, Ken-ichiro Kamei, Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 Kinetics of length-selective and optimal DNA growth with crowding effects
3. 学会等名 The 1st International Symposium on Molecular Engine (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazusa Beppu, Ziane IZRI, Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 Chirality of bacterial vortices and enhanced pairing order as collective effects
3. 学会等名 新学術領域「発動分子科学」第3回領域会議
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 白木天晴, 亀井謙一郎, 前多裕介
2. 発表標題 分子混雑による選択的DNA成長と最適化反応の速度論
3. 学会等名 日本物理学会第75回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 巖路燦, 福山達也, 島本勇太, 前多裕介
2. 発表標題 紡錘体の自己組織化の力学モデルに向けた分裂期紡錘体の定量的解析
3. 学会等名 日本物理学会第75回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 秋原宙, 前多裕介
2. 発表標題 弾性バブルのねじれと振動現象
3. 学会等名 日本物理学会第75回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福山達也, 江端宏之, 木戸秋悟, 近藤洋平, 青木一洋, 前多裕介
2. 発表標題 波に駆動される非平衡流れと細胞集団運動の力学への展開
3. 学会等名 日本物理学会第75回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 別府航早, Ziane Izri, 住野豊, 前多裕介
2. 発表標題 遊泳バクテリアのキラリティーを介したキラルな渦形成とアクティブ乱流
3. 学会等名 日本物理学会第75回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鳥谷部祥一, 甲斐達朗
2. 発表標題 集団運動による機能発現 - バクテリア走性を例に
3. 学会等名 Collective motion and functional dynamics in molecular engines (招待講演)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Kai, T. Abe, S. Nakamura, S. Kudo, S. Toyabe
2 . 発表標題 Measurement of fluctuation and response of bacterial collective motion
3 . 学会等名 新学術領域「発動分子科学」第2回領域会議
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Arai ,Y. Tsushima, S. Toyabe
2 . 発表標題 Towards the realization of artificial molecular motor using DNA molecules
3 . 学会等名 新学術領域「発動分子科学」第2回領域会議
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Kai, T. Abe, S. Nakamura, S. Kudo, S. Toyabe
2 . 発表標題 Measurement of fluctuation and response of bacterial collective motion
3 . 学会等名 第57回日本生物物理学会年会
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Arai ,Y. Tsushima, S. Toyabe
2 . 発表標題 Towards the realization of artificial molecular motor using DNA molecules
3 . 学会等名 第57回日本生物物理学会年会
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Ito , S. Nakamura, S. Toyabe
2 . 発表標題 Stator-assembly dynamics of the bacterial flagellar motor
3 . 学会等名 The 1st International Symposium on Molecular Engine
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 K. Ito , S. Nakamura, S. Toyabe
2 . 発表標題 Stator-assembly dynamics of the bacterial flagellar motor
3 . 学会等名 新学術領域「発動分子科学」第3回領域会議
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 N. Sato, Y. Nakayama, T. Yoshidome, E. Muneyuki, S. Toyabe
2 . 発表標題 Effect of hinge mutations on F1-ATPase energetics
3 . 学会等名 新学術領域「発動分子科学」第3回領域会議
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Y. Nakayama, S. Toyabe
2 . 発表標題 Kinetic ratchet mechanism of F1-ATPase reduces free-energy loss without affecting ATP-synthesis activity
3 . 学会等名 The 1st International Symposium on Molecular Engine
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Nakayama, S. Toyabe
2. 発表標題 Kinetic ratchet mechanism of F1-ATPase reduces free-energy loss without affecting ATP-synthesis activity
3. 学会等名 新学術領域「発動分子科学」第3回領域会議
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中山洋平, 鳥谷部祥一
2. 発表標題 F1-ATPaseにおけるATP合成/分解の非対称性
3. 学会等名 日本物理学会第75回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鳥谷部祥一
2. 発表標題 物理で理解する発動分子：1分子実験データから情報を絞り出す -
3. 学会等名 日本化学会第100春季年会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shoichi Toyabe
2. 発表標題 Single-molecule experimental thermodynamics of molecular motor
3. 学会等名 Stochastic Thermodynamics: Experiment and Theory 2018 (Dresden, Max-Planck Institute) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鳥谷部 祥一
2. 発表標題 熱で揺らぐ系の観察と制御
3. 学会等名 応用科学セミナー（仙台高専）（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 Geometric principle for controlling active matters: From bacterial suspension to cytoskeletons
3. 学会等名 The 79th Okazaki Conference " Synthetic, Biological, and Hybrid Molecular Engines "（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 Geometric principle for controlling active matters: From bacterial suspension to active cytoskeletons
3. 学会等名 Hokkaido-Strasbourg Symposium: Biotic and Abiotic Molecular Machines and Motors（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前多 裕介, 坂本 遼太, 宮崎 牧人
2. 発表標題 アクティブな人工細胞：自律的制御の力学と幾何学
3. 学会等名 細胞を創る研究会11.0（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazusa Beppu, Tatsuya Fukuyama, Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 On the geometry and mechanics in collective dynamics of active matters
3. 学会等名 第56回日本生物物理学会年会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazusa Beppu, Ziane Izri, Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 Geometry driven collective ordering of bacterial vortices
3. 学会等名 第56回日本生物物理学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takaharu Shiraki, Ken-ichiro Kamei, Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 Molecular origin of selective DNA ligation and information growth: The rich-get-richer model
3. 学会等名 第56回日本生物物理学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 白木 天晴, 亀井 謙一郎, 前多 裕介
2. 発表標題 遺伝情報分子のライゲーションと選択的な成長: Rich-get-richerモデル
3. 学会等名 2018年度日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福山 達也, 青木 一洋, 前多 裕介
2. 発表標題 自発的な集団運動における力学とシグナル伝搬における関係
3. 学会等名 2018年度日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tatsuya Fukuyama, Kazuhiro Aoki, Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 On the relation between mechanics and signaling in collective cell migration
3. 学会等名 International conference on advances in physics of emergent orders in fluctuations (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazusa Beppu, Ziane Izri, Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 Geometric principle of active polar vortices in dense and dilute bacterial suspension
3. 学会等名 International conference on advances in physics of emergent orders in fluctuations (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryota Sakamoto, Masatoshi Tanabe, Tetsuya Hiraiwa, Kazuya Suzuki, Shin'ichi Ishiwata, Yusuke T. Maeda, Makito Miyazaki
2. 発表標題 Actomyosin waves and percolation control nucleus-like cluster positioning in a cell-sized space
3. 学会等名 International conference on advances in physics of emergent orders in fluctuations (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ziane IZRI, Ryota Sakamoto, Vincent Noireaux, Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 On the noise of gene expression in membrane-bound picolitre biochemical reactors
3. 学会等名 Americal Physical Society March Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazusa Beppu, Ziane IZRI, Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 Collective ordering of bacterial vortices controlled by geometry and frustration
3. 学会等名 Americal Physical Society March Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryota Sakamoto, Masatoshi Tanabe, Tetsuya Hiraiwa, Kazuya Suzuki, Shin'ichi Ishiwata, Yusuke T. Maeda, Makito Miyazaki
2. 発表標題 Tug-of-war by active gel shapes positioning symmetry in cell-sized compartment
3. 学会等名 Americal Physical Society March Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsuya Fukuyama, Hiroyuki Ebata, Yohei Kondo, Satoru Kidoaki, Kazuhiro Aoki, Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 Collective cell migration induced by the interplay of contractile force and adhesion with delay under ERK signal propagation
3. 学会等名 Americal Physical Society March Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂本遼太, 宮崎牧人, 前多裕介
2. 発表標題 変形するアクトミオシン液滴の非接着運動と力学モデル
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 白木天晴, 亀井謙一郎, 前多裕介
2. 発表標題 分子共存による選択的DNA成長の統計力学
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福山達也, 江端宏之, 木戸秋悟, 青木一洋, 前多裕介
2. 発表標題 波を遡る細胞集団の力学モデルと光遺伝学
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 別府航早, Ziane Izri, 前多裕介
2. 発表標題 低密度バクテリアが示す渦運動のキラリティと流体相互作用
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前多裕介, 別府航早, Izri Ziane, 島本勇太, 宮崎牧人
2. 発表標題 微小管アクティブ液晶の位相欠陥と幾何学的制御
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鳥谷部祥一
2. 発表標題 鋳型ライゲーションにおける自発的対称性の破れと 遺伝情報の起源
3. 学会等名 日本進化学会 第20回大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 鳥谷部祥一	4. 発行年 2019年
2. 出版社 CBI学会出版	5. 総ページ数 312
3. 書名 分子ロボティクス概論「回転分子モーター」	

1. 著者名 鳥谷部 祥一	4. 発行年 2022年
2. 出版社 日本評論社	5. 総ページ数 296
3. 書名 生物物理学	

〔産業財産権〕

〔その他〕

人工細胞でさぐる細胞の「対称性」の不思議
https://www.sci.kyushu-u.ac.jp/koho/qrinews/qrinews_200930.html
 細胞内構造の配置対称性が決まる仕組みを解明：人工細胞と物理学からメカニズムに迫る
<https://www.kyushu-u.ac.jp/ja/researches/view/456>
 遺伝情報・脂質膜・エネルギー供給を備えたオンチップバイオリアクターを開発
https://www.kyushu-u.ac.jp/f/36546/19_07_18_1.pdf
 動きまわる人工細胞、その鍵は摩擦にあり～細胞が狭い空間を利用して運動する仕組みを解明～
https://www.kyushu-u.ac.jp/f/48871/22_0721_02.pdf

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	鳥谷部 祥一 (Toyabe Shoichi) (40453675)	東北大学・工学研究科・教授 (11301)	

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		
米国	ミネソタ大学	カリフォルニア大学バークレー校	
カナダ	サイモン・フレーザー大学		
英国	ロンドン大学		