

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：12611

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B））

研究期間：2019～2023

課題番号：19KK0261

研究課題名（和文）Optimization of molecular robot swarms for the emergence of collective behaviors

研究課題名（英文）Optimization of molecular robot swarms for the emergence of collective behaviors

研究代表者

オベル加藤 ナタナエル（AUBERT-KATO, Nathanael）

お茶の水女子大学・基幹研究院・講師

研究者番号：10749659

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、分子ロボット集団の協調的かつロバストな群行動を創発するための最適条件を探った。集団を構成する個体が他の個体と協調して意思決定を行うことは、自然界で見られるクオラムセンシングなどのように、群行動において本質的に重要である。本研究では集団全体の振る舞いを外部刺激によって決定するのではなく、個体間の「協調的な」群行動によって創発させた。さらに、通信にノイズがある環境下でも、集団に狙い通りの「ロバストな」振る舞いをさせる条件を探ることに成功した。上記の結果は、シミュレーション、（通常の）小型ロボットの群れ、および分子ロボットの3種類のシステムそれぞれの振る舞いを検証することで評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究が該当する分子ロボティクス分野は、医療や生物学、スマートマテリアルへの応用可能性を秘めており、学術的意義は大きい。特に分子ロボットの集団運動能力を向上させることは、耐故障性や冗長性の観点で性能向上に大きく寄与するため、さまざま波及効果があると期待される。

研究成果の概要（英文）：In this project, we focused on exploring the optimal conditions for swarming behavior in a system of molecular robots. The ability for individuals in a group to collaborate and reach a consensus is an important factor for the emergence of natural phenomenon such as aggregation or quorum sensing. In the molecular robotic systems considered in this project, the behavior of the robot is decided through communication with the group and environment rather than from external influence. Moreover, we focused on the factors necessary for robust group behaviors, both to individual failure and communication noise. We validated our results in simulation, on a swarm of small (regular) robots, and on molecular robots.

研究分野：分子ロボティクス

キーワード：Molecular robotics Swarm Collective behaviors Reaction-Diffusion Microfluidics Quality-Diversity Evolutionary algorithms

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。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

分子ロボティクス分野は、分子スケールでの計算と動作の実現に焦点を当てている。特定の分子の濃度を利用してデータを符号化し、その分子間の化学反応によって計算処理を行う。同時に、他の分子も結合して構造を形成し、分子ロボットのボディを構成する。また、化学反応によって構造体の形状を変化させ、ロボットの動作を実現することも可能である。近年、この分野では、DNA オリガミ上のルールに沿って歩行する(Shin and Pierce, JACS, 2004 など)、荷物を仕分けして届ける(Thubagere et al, Science, 2017 など)、外部刺激に基づいて形状を制御する(Sato et al, Science Robotics, 2017 など)といった幅広い機能を持つ分子ロボットが誕生している。しかし、群れ行動が出現する条件についてはあまり研究されていない。さらに、このような行動を制御することは依然として課題である。

2. 研究の目的

群れ行動を行う分子システムに関する理論的・実験的な知見を深める。理論面では、組み合わせ最適化を用いた DNA の配列設計や、限られた計算能力を持つロボットによる知能創発に関する研究を進める。システムが見せる創発現象の設計や解析を行う。

3. 研究の方法

(1) 反応拡散方程式を用いたマクロなパターン形成の理論や、多数のミクロな粒子の振る舞いを予測するための分子シミュレーションツールに関する研究を行う。

(2) 反応拡散方程式を用いて小型ロボットの群れ制御を行う。この方法は、シミュレーションに比べてより現実的でありながら分子ロボットの制御よりも解析しやすい(図1)。

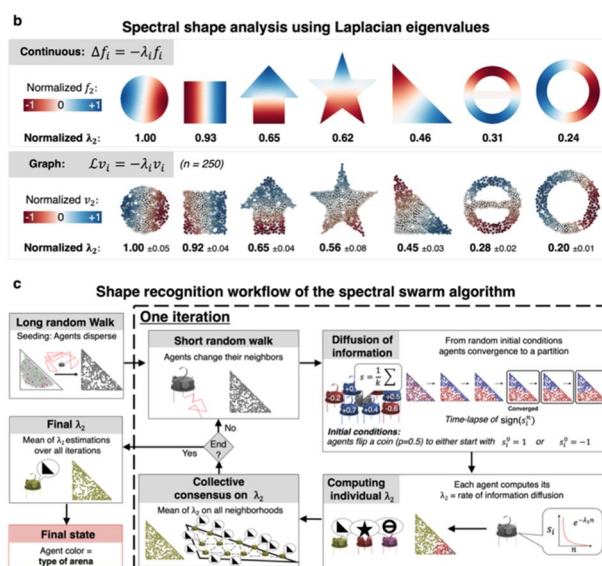


図1 反応拡散により群れの形の予測を行う。個体が全体的なデータを使わずに Laplacian の固有値を計算する。形は、固有値の分布に基づいて推定することができる。(Cazenille et al., 2024)

(3)実験面では、酵素反応により駆動される DNA 化学反応と微小管およびキネシンを用いて分子による集団運動を実装し顕微鏡観察する。化学反応の影響で変化する DNA 分子の濃度に従って群れの制御を行う（図 2）。

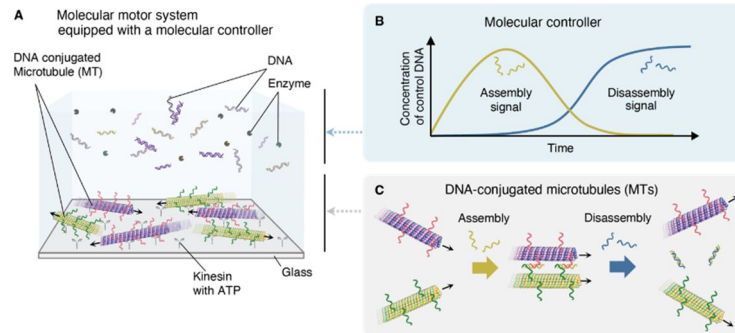


図 2：本研究で使用されている個体。酵素反応により駆動される DNA 化学反応と微小管およびキネシンを用いて分子による集団運動の制御を行う。(Kawamata et al., Science Advances, 2024)

(4)脂質膜小胞(リポソーム)集団および DNA 液滴/ゲル粒子集団における DNA 反応ネットワークを用いた集団挙動の制御方法を検討する。リポソームの集団挙動について、リポソームの表面を DNA 分子で修飾することと DNA 分子の用いた架橋により集団を形成する設計を検討とする。

4. 研究成果

(1)群れ行動を制御できる分子プログラムの設計ができ、群れ運動の創発を確認した（図 3）。

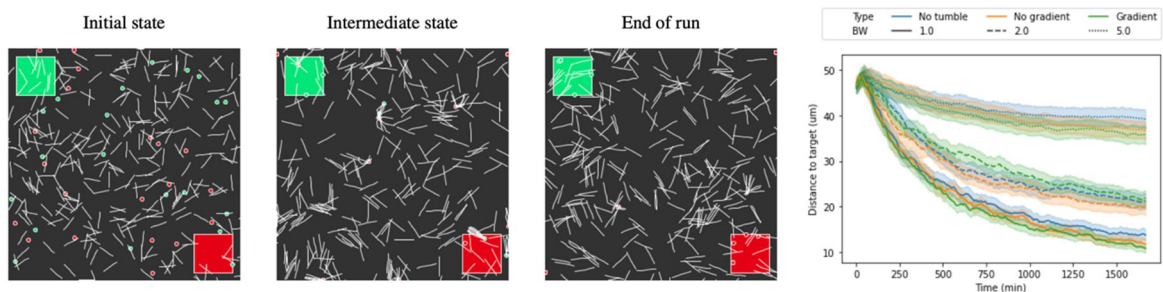


図 3 群れ運動の創発。微小管(白)が貨物(緑・赤)と結合して、目的地まで運ぶ。コントローラ(化学反応ネットワーク)による、辿る時間が変わる。(Aubert-Kato et al., ALIFE, 2023)

(2) 反応拡散により、群れの形の判断ができた。さらに、小型ロボットの数とコミュニケーション可能な距離の精度への影響を確認した（図 4）。

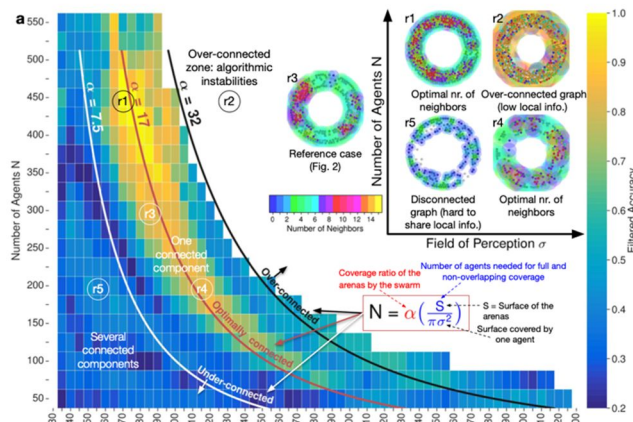


図 4 横軸：コミュニケーション可能な距離。縦軸：個体の数。色：精度。パラメータを群れの特徴にまとめることができた。(Cazenille et al., 2024)

(3) 入力 DNA に応じて出力 DNA の時間発展が変化するシステム、プログラムされた通り変形する DNA エージェント、平面状で自己組織化する DNA 構造体、微小管の集団運動を自動制御する研究等を行った (図 5)

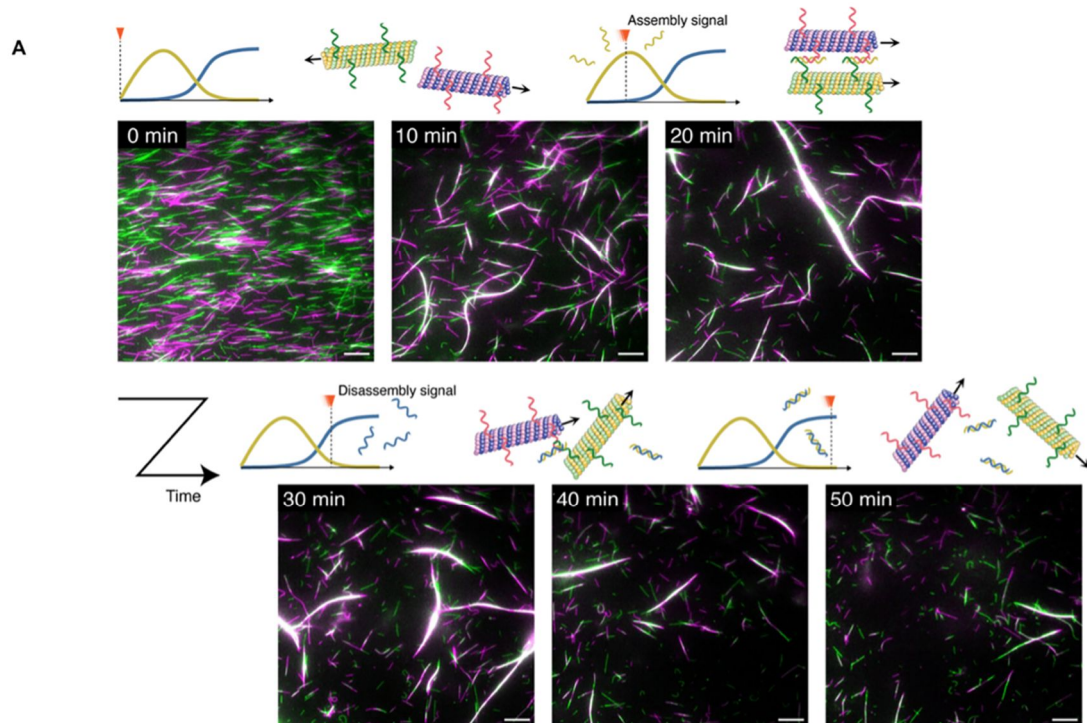


図 5 微小管の集団行動。DNA 分子の種類と濃度による集団運動の制御ができる。(Kawamata et al., Science Advances, 2024)

(4) リポソームと DNA ゲルを融合させることで、リポソーム内側膜上に形成される DNA ナノ構造の集合パターンをさまざまに調節可能なことを実証した (図 6)

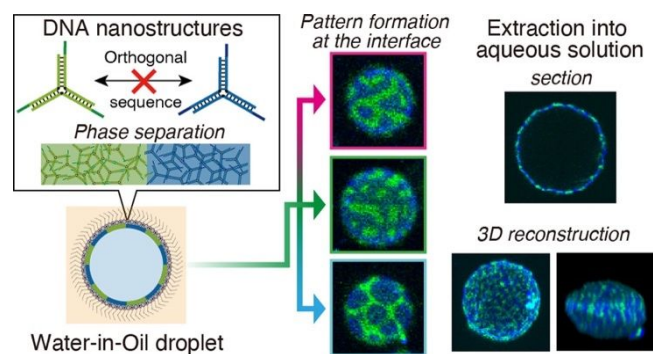


図 6 リポソームと DNA ゲルの融合。2 種類の DNA ゲルの特徴により、現れるパターンの調節ができる。(Sato & Takinoue, JACS AU, 2021)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計32件（うち査読付論文 27件 / うち国際共著 28件 / うちオープンアクセス 13件）

1. 著者名 Lobato-Dauzier N., Baccouche A., Gines G., L?vi T., Rondelez Y., Fujii T., Kim S. H., Aubert-Kato N., Genot A.J.	4. 巻 -
2. 論文標題 Neural coding of temperature with a DNA-based spiking chemical neuron	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 bioRxiv	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） 10.1101/2022.07.06.498929	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 該当する
1. 著者名 Fauste-Gay Adrien, Lobato-Dauzier Nicolas, Baccouche Alexandre, Rondelez Yannick, Kim Soo Hyeon, Fujii Teruo, Aubert-Kato Nathanael, Genot Anthony J.	4. 巻 40
2. 論文標題 Toggling Between Two Limit Cycles in a Molecular Ecosystem	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 New Generation Computing	6. 最初と最後の頁 703-721
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00354-022-00178-y	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 Mori Taisei, Kawamata Ibuki, Murata Satoshi	4. 巻 -
2. 論文標題 Self-replication and Mutation of Polymeric Molecules Simulated by Simplified Chemistry	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 14th International Workshop on Parallel and Distributed Algorithms and Applications (PDAA)	6. 最初と最後の頁 192-198
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/CANDARW57323.2022.00083	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 Elonen Antti, Natarajan Ashwin Karthick, Kawamata Ibuki, Oesinghaus Lukas, Mohammed Abdulmelik, Seitsonen Jani, Suzuki Yuki, Simmel Friedrich C., Kuzyk Anton, Orponen Pekka	4. 巻 16
2. 論文標題 Algorithmic Design of 3D Wireframe RNA Polyhedra	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 16608-16616
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acsnano.2c06035	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 Suzuki Yuki, Kawamata Ibuki, Watanabe Kotaro, Mano Eriko	4. 巻 25
2. 論文標題 Lipid bilayer-assisted dynamic self-assembly of hexagonal DNA origami blocks into monolayer crystalline structures with designed geometries	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 iScience	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) 10.1016/j.isci.2022.104292	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 Kawamata Ibuki, Nomura Shin-ichiro M., Murata Satoshi	4. 巻 40
2. 論文標題 Autonomous and Programmable Strand Generator Implemented as DNA and Enzymatic Chemical Reaction Cascade	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 New Generation Computing	6. 最初と最後の頁 723-736
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00354-022-00156-4	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 Sato Yusuke, Takinoue Masahiro	4. 巻 5
2. 論文標題 Sequence-dependent fusion dynamics and physical properties of DNA droplets	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nanoscale Advances	6. 最初と最後の頁 1919-1925
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D3NA00073G	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 Udono Hirotake, Gong Jing, Sato Yusuke, Takinoue Masahiro	4. 巻 7
2. 論文標題 DNA Droplets: Intelligent, Dynamic Fluid	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Biology	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) 10.1002/adbi.202200180	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 Iwabuchi Shoji, Nomura Shin ichiro M., Sato Yusuke	4. 巻 24
2. 論文標題 Surfactant Assisted Purification of Hydrophobic DNA Nanostructures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ChemBioChem	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) 10.1002/cbic.202200568	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 Masukawa Marcos K., Sato Yusuke, Yu Fujio, Tsumoto Kanta, Yoshikawa Kenichi, Takinoue Masahiro	4. 巻 23
2. 論文標題 Water in Water Droplets Selectively Uptake Self Assembled DNA Nano/Microstructures: a Versatile Method for Purification in DNA Nanotechnology	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ChemBioChem	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) 10.1002/cbic.202200240	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 Gong Jing, Tsumura Nozomi, Sato Yusuke, Takinoue Masahiro	4. 巻 32
2. 論文標題 Computational DNA Droplets Recognizing miRNA Sequence Inputs Based on Liquid-Liquid Phase Separation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Functional Materials	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) 10.1002/adfm.202202322	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 SATO Yusuke, TAKINOUE Masahiro	4. 巻 62
2. 論文標題 Pattern Formation and Information Processing Based on Phase-separated DNA Droplets	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Seibutsu Butsuri	6. 最初と最後の頁 345-347
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2142/biophys.62.345	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 佐藤佑介, Jing GONG, 瀧ノ上正浩	4. 巻 10
2. 論文標題 自律型分子コンピューティングの現状と未来	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 高分子	6. 最初と最後の頁 522-524
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 IWABUCHI Shoji, FUKAMI Noriki, SATO Yusuke, NOMURA Shin-ichiro M.	4. 巻 62
2. 論文標題 Construction of Artificial Cell-type Molecular Robots	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Seibutsu Butsuri	6. 最初と最後の頁 178-180
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2142/biophys.62.178	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 Inagaki Shihō, Aubert-Kato Nathanael	4. 巻 13
2. 論文標題 Controlling the Synchronization of Molecular Oscillators through Indirect Coupling	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Micromachines	6. 最初と最後の頁 245-245
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/mi13020245	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 Aubert-Kato Nathanael, Gines Guillaume, Fujii Teruo, Rondelez Yannick	4. 巻 2021
2. 論文標題 Emergence of structures from parasitic species in a spatially distributed molecular system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ALIFE 2021: The 2021 Conference on Artificial Life	6. 最初と最後の頁 111-118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1162/isal_a_00454	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 Kawamata Ibuki, Nomura Shin-ichiro M., Murata Satoshi	4. 巻 40
2. 論文標題 Autonomous and Programmable Strand Generator Implemented as DNA and Enzymatic Chemical Reaction Cascade	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 New Generation Computing	6. 最初と最後の頁 723-736
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00354-022-00156-4	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 Abe Keita, Murata Satoshi, Kawamata Ibuki	4. 巻 17
2. 論文標題 Cascaded pattern formation in hydrogel medium using the polymerisation approach	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 6160-6167
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1SM00296A	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 Yamashita Yudai, Watanabe Kotaro, Murata Satoshi, Kawamata Ibuki	4. 巻 21
2. 論文標題 Web Server with a Simple Interface for Coarse-grained Molecular Dynamics of DNA Nanostructures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chem-Bio Informatics Journal	6. 最初と最後の頁 28-38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1273/cbij.21.28	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 Iwabuchi Shoji, Kawamata Ibuki, Murata Satoshi, Nomura Shin-ichiro M.	4. 巻 57
2. 論文標題 A large, square-shaped, DNA origami nanopore with sealing function on a giant vesicle membrane	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 2990-2993
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d0cc07412h	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 Sato Yusuke, Takinoue Masahiro	4. 巻 2
2. 論文標題 Capsule-like DNA Hydrogels with Patterns Formed by Lateral Phase Separation of DNA Nanostructures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JACS Au	6. 最初と最後の頁 159-168
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacsau.1c00450	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 Aye Seaim, Sato Yusuke	4. 巻 13
2. 論文標題 Therapeutic Applications of Programmable DNA Nanostructures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Micromachines	6. 最初と最後の頁 315-315
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/mi13020315	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 K. Abe, S. Murata, I. Kawamata	4. 巻 -
2. 論文標題 Cascaded pattern formation in hydrogel medium using the polymerisation approach	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soft Matter	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 該当する

1. 著者名 Yamashita Yudai, Watanabe Kotaro, Murata Satoshi, Kawamata Ibuki	4. 巻 21
2. 論文標題 Web Server with a Simple Interface for Coarse-grained Molecular Dynamics of DNA Nanostructures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chem-Bio Informatics Journal	6. 最初と最後の頁 28-38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1273/cbij.21.28	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 Iwabuchi Shoji, Kawamata Ibuki, Murata Satoshi, Nomura Shin-ichiro M.	4. 巻 57
2. 論文標題 A large, square-shaped, DNA origami nanopore with sealing function on a giant vesicle membrane	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 2990-2993
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d0cc07412h	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 Sato Yusuke, Suzuki Yuki	4. 巻 18
2. 論文標題 DNA nanotechnology provides an avenue for the construction of programmable dynamic molecular systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Biophysics and Physicobiology	6. 最初と最後の頁 116-126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2142/biophysico.bppb-v18.013	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 Sato Yusuke, Takinoue Masahiro	4. 巻 -
2. 論文標題 Pattern Regulation of DNA Hydrogels Formed by Lateral Phase Separation of DNA Nanostructures on Water-in-Oil Droplet Interfaces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ChemRxiv	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) 10.26434/chemrxiv.14245532.v1	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 該当する

1. 著者名 Aubert-Kato Nathanael, Cazenille Leo	4. 巻 38
2. 論文標題 Designing Dynamical Molecular Systems with the PEN Toolbox	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 New Generation Computing	6. 最初と最後の頁 341-366
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00354-020-00089-w	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 Watanabe Taiki, Sato Yusuke, Otaka Hayato, Kawamata Ibuki, Murata Satoshi, Nomura Shin-Ichiro M.	4. 巻 25
2. 論文標題 DNA Origami "Quick" Refolding inside of a Micron-Sized Compartment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Molecules	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) 10.3390/molecules25010008	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 Kasahara Yu, Sato Yusuke, Masukawa Marcos K., Okuda Yukiko, Takinoue Masahiro	4. 巻 4
2. 論文標題 Photolithographic shape control of DNA hydrogels by photo-activated self-assembly of DNA nanostructures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 APL Bioengineering	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) 10.1063/1.5132929	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 Sato Yusuke, Sakamoto Tetsuro, Takinoue Masahiro	4. 巻 6
2. 論文標題 Sequence-based engineering of dynamic functions of micrometer-sized DNA droplets	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science Advances	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) 10.1126/sciadv.aba3471	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 Sato Yusuke, Morita Masamune, Suzuki Yuki	4. 巻 12
2. 論文標題 Session 1SCA-Utilizing soft compartments/interfaces for the creation of artificial biosystems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Biophysical Reviews	6. 最初と最後の頁 257-259
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12551-020-00647-y	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

〔学会発表〕 計31件（うち招待講演 11件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Aubert-Kato Nathanael
2. 発表標題 Neural coding of temperature with a DNA-based spiking chemical neuron
3. 学会等名 第6回分子ロボティクス年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ito Mika, Aubert-Kato Nathanael
2. 発表標題 化学反応ネットワークを用いた Reservoir Computingの性能向上
3. 学会等名 第6回分子ロボティクス年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshida Ruka, Aubert-Kato Nathanael
2. 発表標題 化学反応ネットワーク最適化ツールの拡張
3. 学会等名 第6回分子ロボティクス年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kawamata Ibuki
2. 発表標題 Molecular-scale robots built from DNA and their self-assembly
3. 学会等名 Workshop on optimization of molecular robot swarms for the emergence of collective behaviors (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hyakuzuka Maya, Aubert-Kato Nathanael
2. 発表標題 Prediction of DNA structure volume
3. 学会等名 Workshop on optimization of molecular robot swarms for the emergence of collective behaviors (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoshida Ruka, Aubert-Kato Nathanael
2. 発表標題 Development of automated chemical reaction network design and simulation tools
3. 学会等名 Workshop on optimization of molecular robot swarms for the emergence of collective behaviors (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ito Mika, Aubert-Kato Nathanael
2. 発表標題 Reservoir Property Enhancement for Molecular Computing
3. 学会等名 Workshop on optimization of molecular robot swarms for the emergence of collective behaviors (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kawamata Ibuki
2. 発表標題 Synthetic DNA reaction-diffusion system for pattern formation, materialization, and wrinkling
3. 学会等名 Seminar of Laboratoire Jean Perrin (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川又生吹, 村田智
2. 発表標題 学習機能を備えたDNA分子回路の設計と反応挙動の予測
3. 学会等名 SSI 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ibuki Kawamata, Motokazu Furuya, Satoshi Murata
2. 発表標題 Counting the number of input addition by DNA reaction system driven by DNA polymerase
3. 学会等名 the 28th International Conference on DNA Computing and Molecular Programming (DNA28) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山下雄大, 川又生吹, 村田智
2. 発表標題 スケラブルな大規模DNAトラス構造体の設計と構築
3. 学会等名 第6回分子ロボティクス年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田海, 川又生吹, 濱田省吾, 松林秀明, 村田智, 野村 M. 慎一郎
2. 発表標題 人工細胞間でのDNA配列情報の伝達に向けた分子トランスデューサの研究
3. 学会等名 第6回分子ロボティクス年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sato Yusuke
2. 発表標題 Construction of bio-inspired artificial molecular systems and devices based on DNA nanotechnology
3. 学会等名 The 6th FRIS and TFC Collaboration Event “Workshop on Biosystems Design From nanotechnology to microfluidics in biotechnology” (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sato Yusuke
2. 発表標題 Toward the construction of cell-like molecular systems based on DNA nanotechnology
3. 学会等名 第60回生物物理学会年会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Aubert-Kato Nathanael
2. 発表標題 A framework for molecular-based reservoir computing
3. 学会等名 日韓3女子大シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Aubert-Kato Nathanael、Gines Guillaume、Fujii Teruo、Rondelez Yannick
2. 発表標題 Emergence of structures from parasitic species in a spatially distributed molecular system
3. 学会等名 ALIFE 2021: The 2021 Conference on Artificial Life (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kawamata Ibuki
2. 発表標題 Reaction-diffusion system using DNA computing and hydrogel platform
3. 学会等名 International Workshop on Molecular Cybernetics: Toward Chemical AI (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川又生吹
2. 発表標題 DNA分子を用いてプログラミングした化学反応ネットワーク
3. 学会等名 発動分子科学 × 分子サイバネティクス共催ワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川又生吹
2. 発表標題 分子ナノテクノロジーとは, 0S 分子ロボティクス・分子サイバネティクス1/2 チュートリアル
3. 学会等名 第34回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kawamata Ibuki, Aradachi Sho, Murata Satoshi
2. 発表標題 Development of Browser-Based Software for Intuitively Manipulating and Integrating DNA Nanostructures
3. 学会等名 60th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sato Yusuke, Takinoue Masahiro
2. 発表標題 Pattern formation on capsule-like DNA hydrogels induced by lateral phase separation of DNA nanostructure
3. 学会等名 The 27th International Conference on DNA Computing and Molecular Programming (DNA 27) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤佑介, 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 DNAナノ構造の側方相分離と細胞サイズ相分離DNAベシクル
3. 学会等名 第5回分子ロボティクス年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤佑介, 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 側方相分離が誘起するカプセル様DNAハイドロゲル表面のパターン形成
3. 学会等名 第59回生物物理学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Leo Cazenille, Nicolas Lobato-Dauzier, Nathanael Aubert-Kato
2. 発表標題 Molecular programming of swarms for ALife
3. 学会等名 ALIFE 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ibuki Kawamata
2. 発表標題 Current and Future Trends of DNA Molecule Computation
3. 学会等名 SIGNAC 第33回研究会 人工知能学会合同研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Erika Yamazaki & Nathanael Aubert-Kato
2. 発表標題 VAEによる分子反応ネットワークの探索
3. 学会等名 SIGNAC 第33回研究会 人工知能学会合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Sato, Tetsuro Sakamoto, Masahiro Takinoue
2. 発表標題 Creation and control of DNA micro droplets based on phase transition and sequence design
3. 学会等名 The 23rd International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川又生吹, 岩淵祥璽, 野村 M. 慎一郎, 村田智
2. 発表標題 筒状DNAオリガミ構造によるリボソーム内外の分子拡散にむけて
3. 学会等名 SIG-MBI
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ibuki Kawamata, Shoji Iwabuchi, Shin-ichiro M. Nomura, Satoshi Murata
2. 発表標題 Toward molecular diffusion through liposome membrane using DNA origami structure
3. 学会等名 Japanese Society for Cell Synthesis Research 12.0
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ibuki Kawamata, Sho Aradachi, Satoshi Murata
2. 発表標題 A database to store design information of DNA nanostructure
3. 学会等名 Molecular Robotics Session, Chem-Bio Informatics Society (CBI) Annual Meeting 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keita Abe, Ibuki Kawamata, Shin-ichiro M. Nomura, Satoshi Murata
2. 発表標題 Programmable DNA reaction-diffusion system for a Voronoi pattern formation in hydrogel
3. 学会等名 CBI学会2019年大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 川又生吹、鈴木勇輝、村田 智	4. 発行年 2021年
2. 出版社 オーム社	5. 総ページ数 264
3. 書名 DNA origami入門	

〔産業財産権〕

[その他]

<p>Molecular programming of swarms for ALife sites.google.com/view/tutorial-alife2020-molprog</p>

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	川又 生吹 (KAWAMATA Ibuki) (30733977)	京都大学・理学研究科・准教授 (14301)	
研究分担者	佐藤 佑介 (SATO Yusuke) (60830560)	九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授 (17104)	

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1件

<p>国際研究集会 Workshop on optimization of molecular robot swarms for the emergence of collective behaviors</p>	<p>開催年 2023年～2023年</p>
---	---

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		
フランス	Sorbonne University, ISIR	Sorbonne University, LJP	