

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20H00619

研究課題名(和文) デジタルー分子情報変換によるマクロファージ型分子ロボットの構築と制御

研究課題名(英文) Construction and control of macrophage-like molecular robots by digital-to-molecular information transformation

研究代表者

瀧ノ上 正浩 (Takinoue, Masahiro)

東京工業大学・情報理工学院・教授

研究者番号：20511249

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,700,000円

研究成果の概要(和文)：分子コンピューティングの新たな基盤として注目されている、DNA液滴の物理学・化学・情報科学を開拓し、マクロファージ型分子ロボットへ応用するとともに、デジタルハイブリッドな分子コンピューティングの基礎を確立した。特に、分岐型DNAナノ構造を集合させたDNA液滴の物理的・化学的特性と塩基配列の関係を解明することで、DNA液滴の安定性や挙動を制御する方法を確立した。これにより、miRNAなどの生体分子を認識して分裂挙動を示す新たな液滴分子コンピューティング技術を実現し、がん細胞を選択的に認識できるDNA液滴分子ロボットの実現にも成功した。また、電気化学を用いたDNAゲル操作を細胞技術と融合させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義は、従来溶液系の反応でしか行われていなかった分子コンピューティングを、DNA液滴という情報分子によるマイクロ流体によって実現する方法を見出したこと、また、そのための基礎として、塩基配列によって、DNA液滴の物理的・化学的性質が変えられることを発見し、原理を解明したことである。

社会的意義は、このような基礎科学を応用し、miRNAなどの生体分子やがん細胞を選択的(特異的に)に認識して動的な挙動を示す新たな液滴分子コンピューティング技術を実現したことである。これにより、医薬分野における革新的診断・治療に向けた分子コンピューティング・分子ロボティクス技術の開発ができるようになった。

研究成果の概要(英文)：In this project, we pioneered DNA droplets, a new fundamental technology of molecular computing, and applied them to constructing macrophage-type molecular robots (artificial cells). In addition, we attempted to construct the basis for digital-molecular-hybrid computing based on this technology. We revealed the relationship between the physical/chemical properties of DNA droplets and the DNA sequence of branched DNA nanostructures forming DNA droplets. In addition, we established a method to control the thermodynamic stability and dynamic behavior of DNA droplets. This has led to novel droplet-based molecular computing technologies that can recognize biomolecules such as miRNAs and show division behaviors, and to the realization of DNA droplet-based molecular robots that can selectively recognize cancer cells. In addition, DNA gel manipulation using electrochemistry was integrated with cell technology.

研究分野：情報生命物理学

キーワード：分子コンピューティング 分子ロボティクス 人工細胞 DNAナノテクノロジー ソフトマター 液-液相分離 DNA液滴・RNA液滴 電気化学

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

情報生命物理学の分野において、分子コンピューティングは、生体分子反応の持つ潜在的な計算能力について探求し、生命システムが持つ複雑かつ高度な情報処理能力を分子反応システムの観点から解明する分野である。分子コンピューティングの応用として、分子センシング、分子アクチュエータとのインテグレーションにより、分子ロボットや人工細胞を構築する研究が進んでいる。分子ロボットは、生体内・環境中でセンシング・コンピューティングし、プログラムされたタスクをこなす超微小ロボットであり、次世代情報工学技術である **Internet of Nano Thing (IoNT)** を担う技術の一つとして期待されている。しかし、ロボットと言っても、現状では、試験管内の水溶液中での多少の運動や、数段階の化学反応をするレベルにとどまる。環境情報をセンシングし、半自律的に活動するというような微小ロボットに期待されていることは、まだ実現できていない。これは分子ロボットの機能を担う生体分子ソフトマター材料に関して、未だ、物理学的・化学的な理解が進んでいないことが原因である。

生体分子ソフトマター材料の構成要素である生体分子は、核酸 (DNA や RNA) であれば塩基 (A,G,C,T,U)、タンパク質であれば 20 種類のアミノ酸をモノマーとした比較的ランダムなヘテロポリマーであり、その配列情報によってその生体分子の機能が決まるため、情報学的な分子であると言える。その情報生体分子ソフトマター材料の物理学的・化学的特性が配列情報によって、どのように制御できるかを解明し、生体分子による情報センシングや、情報処理 (計算) がいかに実現されているかを解明することは、情報生体分子ソフトマター材料の物理学・化学のみならず、人工的に細胞様の機能を実現する合成生物学や、生命システムの情報処理系から学ぶ分子コンピューティング・分子ロボティクスにおいて、大きな課題となっている。また、このような、情報を埋め込む仕組みの解明に加えて、生体・環境の分子情報を分子的または電気的な情報に変換・伝達したりする分子コンピューティングのハイブリッド化技術の開発を進めることも、自律性や操作可能性を目指した、ソフトマターや分子コンピューティングの応用研究を進展させる上で重要である。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ、本研究課題では、生体分子ソフトマターに情報を埋め込み、制御する仕組みの開拓、生体・環境の分子情報を分子的または電気的な情報に変換・伝達したりする分子コンピューティングのための基礎技術の開拓を行うことを目的とした。また、典型的な例として、生体内における高度な分子コンピューティング・分子ロボットシステムであると考えられる、免疫細胞を例に取り、それを模倣した「マクロファージ型分子ロボット」のプロトタイプを構築することを目標に必要となる情報物理学の開拓と分子コンピューティングとのインターフェースを開拓することを目指した。

生体内のマクロファージと呼ばれる免疫細胞は、分子ロボットに求められている、次の機能「センシング機能・コンピューテーション機能」(病原体を分子的に認識しターゲットとして判断する機能)、「アクチュエーション機能」(ターゲットの取り込みとターゲットへの攻撃をする機能)、「コミュニケーション機能」(ターゲットの情報を他の免疫細胞へ伝達する機能)を有している。いずれも、生体分子ソフトマター材料に情報・プログラムを埋め込み、材料を操作する仕組みによって達成される。そこで、マクロファージをモデルとしたマクロファージ型分子ロボットの構築を通じて、生体分子ソフトマターによる情報処理システムの実現に関して解明し、将来的には、デジタルの世界と分子の世界をつないで、人間がコンピュータで制御できるデジタルハイブリッドな分子ロボットを構築するための基盤技術を開拓することを目指した。

3. 研究の方法

本研究では、情報やプログラムを埋め込む生体分子ソフトマターとして、DNA ゲルと呼ばれる DNA でできた材料を用いた。DNA ゲルは、Y字型/X字型などの分岐型 DNA ナノ構造をネットワーク状に集積させて構築することができる (図 1)。DNA ゲルの安定性は、塩基配列によって決めることができると考えられるため、塩基配列と DNA ゲルの間の関係を評価した。また、分子ロボットへの応用を考え、DNA ゲルにセンサー等の機能を導入する方法を開拓した。最終的に、DNA ゲルの物理的・化学的特性を評価するとともに、がん細胞表面を認識する能力を与えられたこと検

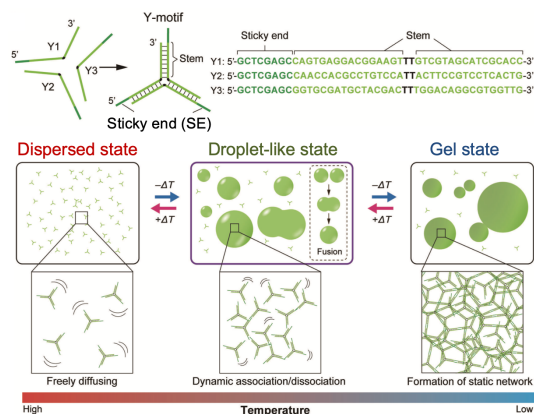


図 1. 分岐型 DNA ナノ構造と DNA ゲル

証した。

DNA ナノ構造の塩基配列や構造の設計は、熱力学パラメータを用いたダイナミックプログラミングによる予測計算を利用した。設計した DNA の化学合成は、DNA 化学合成会社に依頼し、バッファー等の試薬や、購入した酵素等を混ぜることで分子反応を行った。実験結果は、共焦点レーザー走査型蛍光顕微鏡を用いて可視化し、DNA ナノ構造が集積して形成された DNA ゲルの熱安定性や表面張力・粘性等の熱力学的特性の計測を行った。また、他の化学反応や細胞との相互作用に関する実験も同様に行った。

4. 研究成果

(1) DNA 液滴の発見と塩基配列による物理的・化学的性質の制御

本研究では、Y 字型/X 字型などの分岐型 DNA ナノ構造を集積させて DNA ゲルを構築した。分岐末端の sticky end の塩基配列を変更することで、分岐型 DNA ナノ構造の結合安定性を変えたり、環境温度を変更したりすることにより、分岐型 DNA ナノ構造の集積構造である DNA ゲルが実際には、ある条件下で液滴のように振る舞う状態をとることを発見した (図 2)。ソフトマター物理学においては、生体高分子の液-液相分離液滴と呼ばれるもので、DNA の塩基配列によって、系統的に熱力学的特性を制御できるということを初めて実証した (Sci. Adv. 2020)。また、安定性だけでなく、液滴同士の融合プロセスにおける、表面張力や粘性などを制御できる可能性を示した (Nanoscale Adv. 2023)。

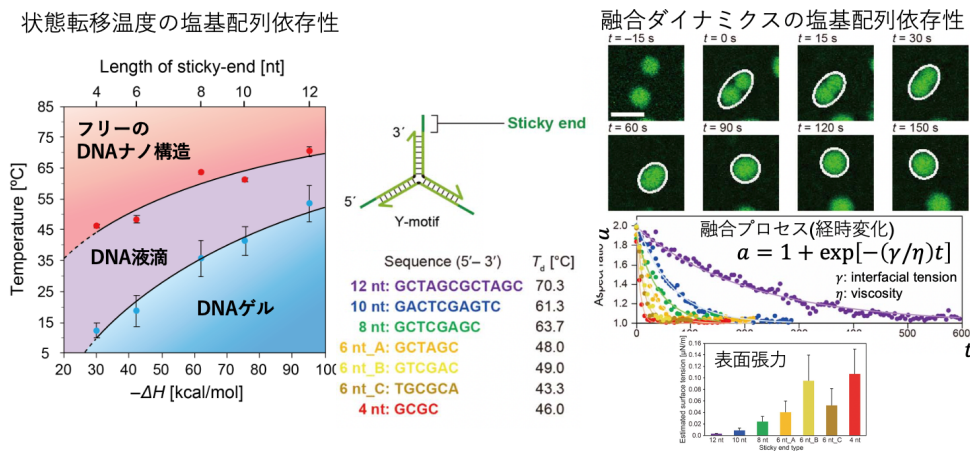


図 2. DNA 液滴の熱安定性と表面張力

(2) DNA 液滴への動的挙動のプログラムと分子コンピューティングへの応用

本研究では、分岐型 DNA ナノ構造による DNA 液滴の構成要素の一部のナノ構造を切断することで、DNA 液滴の分裂を誘発するメカニズムを確立した (図 3)。酵素や、miRNA の入力を認識し、分裂を引き起こせることを示した (Sci. Adv. 2020)。これを応用し、4 種類の miRNA の入力が (1,1,1,0) であったときに限り、分裂を引き起こすような分子コンピューティングの論理演算回路 (miRNA1 ∧ miRNA2 ∧ miRNA3 ∧ ¬miRNA4) を実現できることを示し、バイオセンシング等のバイオメディカル応用の可能性を示した (Adv. Funct. Mater. 2022)。

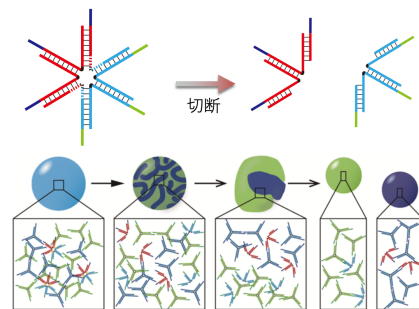


図 3. DNA 液滴の分裂

(3) DNA ゲル・DNA 液滴へのセンサー分子 (アプタマー等) の導入

細胞表面等の分子認識のために、DNA ゲルに、分子認識ができる DNA/RNA (アプタマー) や細胞表面の抗原を認識する抗体を修飾した。抗体およびアプタマを修飾するため、抗体の場合は、これらにビオチンストレプトアビジン結合を介して DNA でタグを付けておき DNA 会合反応を利用して選択的に、DNA ゲルに結合させた。また、DNA アプタマーの場合は、化学合成段階で DNA 分岐構造に配列として組み込むことで導入することに成功した。

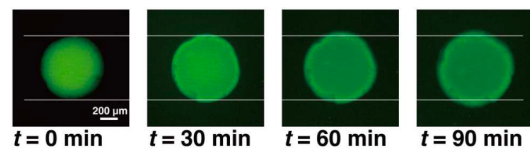


図 4. アプタマーセンサを導入した DNA ゲル

さらに、ターゲット分子を認識することで、DNA ゲルが膨張するなど機械的な動作に変換できることも示した (図 4) (MEMS 2024)。

(4) DNA ゲルおよび界面活性剤被覆ポリマー粒子の電気化学的な制御

本研究では DNA と他の生体高分子 (chitosan) の複合ポリマーゲルをファイバー化することに成功し (図 5)、この DNA ベースのゲルファイバーに細胞をトラップし、培養することにも成功している (Adv. Healthcare Mater. 2023)。また、chitosan-alginate ファイバー間の結合を電気化学的に制御することにも成功した (Micromachines 2020)。

また、界面活性剤で被覆したマイクロ粒子集団に一定電圧をかけることで、ラチェット型マイクロ電極の上を、自律的に一方向的に進む新たなアクティブマターの輸送原理を発見した (Adv. Intelli. Syst. 2020)。

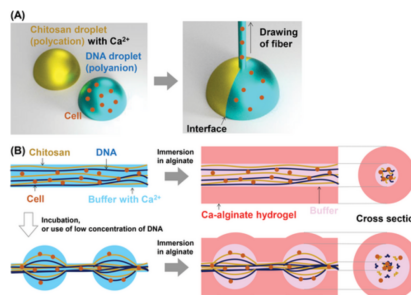


図 5. DNA ファイバー

(5) DNA 液滴によるがん細胞認識と人工細胞組織の構築

本研究では、マクロファージ型分子ロボットの構築を目指し、DNA 液滴に細胞表面のタンパク質を認識するアプタマーを修飾して、DNA 液滴によるがん細胞補足ができることを示した (図 6)。これにより、本プロジェクトで目的としていた、生体分子ソフトマター材料の物理学的・化学的制御に基づいた、高次機能発現の仕組みを構築できることが示された。

さらに、マルチコンパートメントな脂質ベースの人工細胞組織集団も実現することができ (Langmuir 2023)、人工免疫細胞システムの構築に向けた基盤が確立してきた。

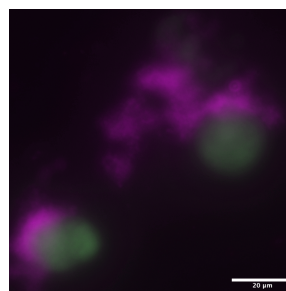


図 6. DNA 液滴によるがん細胞の補足. 緑: がん細胞、マゼンタ:DNA 液滴

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計23件（うち査読付論文 23件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 20件）

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 -
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 2200180 ~ 2200180
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 -
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 e202200240
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 -
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 2202322 ~ 2202322
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 -

1. 著者名 Utagawa Yoshinobu, Ino Kosuke, Hiramoto Kaoru, Shiku Hitoshi	4. 巻 23
2. 論文標題 Simple, Rapid, and Large Scale Fabrication of Multi Branched Hydrogels Based on Viscous Fingering for Cell Culture Applications	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Macromolecular Bioscience	6. 最初と最後の頁 2300069
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/mabi.202300069	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 Konno An, Ino Kosuke, Utagawa Yoshinobu, Shiku Hitoshi	4. 巻 39
2. 論文標題 Electrochemical imaging for cell analysis in microphysiological systems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Current Opinion in Electrochemistry	6. 最初と最後の頁 101270 ~ 101270
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.coelec.2023.101270	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 Archer Richard J., Hamada Shogo, Shimizu Ryo, Nomura Shin-ichiro M.	4. 巻 39
2. 論文標題 Scalable Synthesis of Planar Macroscopic Lipid-Based Multi-Compartment Structures	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Langmuir	6. 最初と最後の頁 4863 ~ 4871
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.langmuir.2c02859	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 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 e202200568
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 -

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 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 Nomura Shin-ichiro M., Shimizu Ryo, Archer Richard James, Hayase Gen, Toyota Taro, Mayne Richard, Adamatzky Andrew	4. 巻 4
2. 論文標題 Spontaneous and Driven Growth of Multicellular Lipid Compartments to Millimeter Size from Porous Polymer Structures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ChemSystemsChem	6. 最初と最後の頁 e202200006(1~7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/syst.202200006	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 -

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 -

1. 著者名 Masukawa Marcos Kunihiro, Okuda Yukiko, Takinoue Masahiro	4. 巻 12
2. 論文標題 Aqueous Triple-Phase System in Microwell Array for Generating Uniform-Sized DNA Hydrogel Particles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Genetics	6. 最初と最後の頁 705022
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fgene.2021.705022	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 Wakamori Masatoshi, Okabe Kohki, Ura Kiyoe, Funatsu Takashi, Takinoue Masahiro, Umehara Takashi	4. 巻 48
2. 論文標題 Quantification of the effect of site-specific histone acetylation on chromatin transcription rate	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nucleic Acids Research	6. 最初と最後の頁 12648 ~ 12659
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/nar/gkaa1050	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, 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 eaba3471
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hayakawa Masayuki, Kishino Yusuke, Takinoue Masahiro	4. 巻 2
2. 論文標題 Collective Ratchet Transport Generated by Particle Crowding under Asymmetric Sawtooth Shaped Static Potential	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Intelligent Systems	6. 最初と最後の頁 2000031
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/aisy.202000031	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 Masukawa Marcos K., Hayakawa Masayuki, Takinoue Masahiro	4. 巻 10
2. 論文標題 Surfactant concentration modulates the motion and placement of microparticles in an inhomogeneous electric field	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 8895 ~ 8904
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0RA00703J	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 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 16109
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Archer Richard J., Hamada Shogo, Shimizu Ryo, Nomura Shin-ichiro M.	4. 巻 39
2. 論文標題 Scalable Synthesis of Planar Macroscopic Lipid-Based Multi-Compartment Structures	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Langmuir	6. 最初と最後の頁 4863 ~ 4871
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.langmuir.2c02859	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 Utagawa Yoshinobu, Ino Kosuke, Takinoue Masahiro, Shiku Hitoshi	4. 巻 12
2. 論文標題 Fabrication and Cell Culture Applications of Core Shell Hydrogel Fibers Composed of Chitosan/DNA Interfacial Polyelectrolyte Complexation and Calcium Alginate: Straight and Beaded Core Variations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Healthcare Materials	6. 最初と最後の頁 2302011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adhm.202302011	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 Ino Kosuke, Wachi Mana, Utagawa Yoshinobu, Konno An, Takinoue Masahiro, Abe Hiroya, Shiku Hitoshi	4. 巻 1304
2. 論文標題 Scanning electrochemical microscopy for determining oxygen consumption rates of cells in hydrogel fibers fabricated using an extrusion 3D bioprinter	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Analytica Chimica Acta	6. 最初と最後の頁 342539
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.aca.2024.342539	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 Morita Masamune, Sakamoto Tetsuro, Nomura Shin-ichiro M., Murata Satoshi, Yanagisawa Miho, Takinoue Masahiro	4. 巻 11
2. 論文標題 Liquid DNA Coacervates form Porous Capsular Hydrogels via Viscoelastic Phase Separation on Microdroplet Interface	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Advanced Materials Interfaces	6. 最初と最後の頁 2300898
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/admi.202300898	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 Utagawa Yoshinobu, Ino Kosuke, Kumagai Tatsuki, Hiramoto Kaoru, Takinoue Masahiro, Nashimoto Yuji, Shiku Hitoshi	4. 巻 13
2. 論文標題 Electrochemical Glue for Binding Chitosan-Alginate Hydrogel Fibers for Cell Culture	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Micromachines	6. 最初と最後の頁 420
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/mi13030420	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 -

〔学会発表〕 計73件 (うち招待講演 25件 / うち国際学会 21件)

1. 発表者名 Satofumi Kato, Masahiro Takinoue, Hiroaki Onoe
2. 発表標題 Dual-sensing Mechanical Hydrogel Biosensor Composed by Aptamer Recognition and DNA Logic Gates
3. 学会等名 The 36th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Shin-ichiro M. Nomura
2. 発表標題 Toward the Creation of Molecular Auto-Matter
3. 学会等名 Unconventional Computing Workshop 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryoya Hasegawa, Jing Gong, Shin-ichiro M. Nomura, Masahiro Takinoue
2. 発表標題 Selective liposome capture in DNA droplets (DNA液滴における選択的ナノリポソーム捕捉)
3. 学会等名 第61回日本生物物理学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長谷川諒弥、Jing Gong、野村 M. 慎一郎、瀧ノ上正浩
2. 発表標題 生体条件下におけるDNA液滴への選択的ナノリポソームの取り込み
3. 学会等名 第7回分子ロボティクス年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hirotake Uono, Shin-ichiro. M. Nomura, Masahiro Takinoue
2. 発表標題 DNA condensate capable of photocontrollable rheological change creates multi-mode DNA microflow
3. 学会等名 The 29th International Conference on DNA Computing and Molecular Programming (DNA29) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鶴殿寛岳、范敏之、齊藤洋子、大野博久、野村M.慎一郎、清水義宏、齊藤博英、瀧ノ上正浩
2. 発表標題 miRNAの入力に応じてAND演算を行うRNA液滴
3. 学会等名 CBI学会分子ロボット倫理研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 鶴殿寛岳、范敏之、齊藤洋子、大野博久、野村M.慎一郎、清水義宏、齊藤博英、瀧ノ上正浩
2. 発表標題 Kissing-loop相互作用により構築されたRNA液滴によるAND論理演算
3. 学会等名 第61回日本生物物理学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Naaki Yoshida, Masahiro Takinoue
2. 発表標題 Control of deoxyribozyme activity by computational DNA droplets
3. 学会等名 第61回日本生物物理学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuta Aizaki, Masahiro Takinoue
2. 発表標題 DNA liquid-liquid phase separation engineering for a switch element in DNA reaction networks
3. 学会等名 The 29th International Conference on DNA Computing and Molecular Programming (DNA29) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuta Aizaki, Masahiro Takinoue
2. 発表標題 Design of phase-separation switch element for DNA droplet. (DNA液滴のための相分離スイッチ素子の設計)
3. 学会等名 第61回日本生物物理学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomoya Maruyama, Ryohei Furuichi, Akihito Yamamoto, Jing Gong, Masahiro Takinoue
2. 発表標題 Controlled division of DNA droplet-based artificial cells coupled with enzymatic time delay circuit
3. 学会等名 The 29th International Conference on DNA Computing and Molecular Programming (DNA29) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 丸山智也, 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 DNA液滴ベース人工細胞の分裂時間制御
3. 学会等名 「細胞を創る」研究会 16.0
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 丸山智也, 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 Controlled division of DNA droplet-based artificial cells coupled with enzymatic time delay circuit
3. 学会等名 第61回日本生物物理学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山下和誼, Marcos K. Masukawa, 茶野真由美, 佐藤佑介, 湊元幹太, 吉川研一, 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 DNAオリガミマイクロカプセルとDNAハイドロゲルでできた異種人工細胞間の通信
3. 学会等名 「細胞を創る」研究会16.0
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nagi Yamashita, Marcos K. Masukawa, Mayumi Chano, Yusuke Sato, Kanta Tsumoto, Kenichi Yoshikawa, Masahiro Takinoue
2. 発表標題 STIMULI-RESPONSIVE DNA ORIGAMI MICROCAPSULES
3. 学会等名 The 27th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (microTAS2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nagi Yamashita, Marcos K. Masukawa, Mayumi Chano, Yusuke Sato, Kanta Tsumoto, Kenichi Yoshikawa, Masahiro Takinoue
2. 発表標題 Communication between different types of artificial cells based on DNA origami microcapsules and DNA hydrogels
3. 学会等名 第61回日本生物物理学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山下和誼, 佐藤佑介, 鈴木勇輝, 石川大輔, 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 DNAオリガミ構造体の自己集合化によるDNAオリガミ装甲化DNA凝縮体の構築
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 吉田光輝, 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 DNAコンピューティング液滴の金表面上での液-液相分離
3. 学会等名 第7回分子ロボティクス年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉田光輝, 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 DNAゲルコンピューティングの計測に向けた電気デバイスの開発
3. 学会等名 第14回マイクロ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤佑介
2. 発表標題 Assembly and Applications of Liquid-like Condensates Formed from Sequence-Designed DNA nanostructures
3. 学会等名 The 29th International Conference on DNA Computing and Molecular Programming 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 甲斐省吾, 佐藤佑介
2. 発表標題 Regulation of spatiotemporal formation of DNA droplets
3. 学会等名 CBI学会2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Satofumi Kato, Masahiro Takinoue, Hiroaki Onoe
2. 発表標題 Dual-sensing Mechanical Hydrogel Biosensor Composed by Aptamer Recognition and DNA Logic Gates
3. 学会等名 The 36th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2023) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 堀田遥香
2. 発表標題 核酸診断のための増幅機能を持つDNA液滴コンピュータの開発
3. 学会等名 第7回分子ロボティクス年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高木幹太, 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 核酸をセンシングして自律移動する微小DNA液滴
3. 学会等名 第48回化学とマイクロ・ナノシステム学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高木幹太, 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 核酸をセンシングして自律移動するDNA液滴の構築
3. 学会等名 第7回分子ロボティクス年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 Artificial cell engineering with DNA droplets
3. 学会等名 Build-a-Cell Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 プログラム可能な相分離液滴による分子コンピューティングと人工細胞構築
3. 学会等名 サイテックサロン (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 分子コンピュータと人工生命
3. 学会等名 第54回一橋祭「一橋大学・東京工業大学合同講義」(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 ゲノムサイズの核酸集合体の液-液相分離のデザイン・制御と応用
3. 学会等名 第61回日本生物物理学会年会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 分子ロボットがひらく未来
3. 学会等名 読売テクノ・フォーラムセミナー（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 DNA/RNAの液-液相分離液滴の制御
3. 学会等名 ソフトバイオ研究会2023（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 DNA コンピューティングに基づく知的人工細胞の構築
3. 学会等名 電子情報通信学会 システムナノ技術に関する特別研究専門委員会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 非平衡システムによる動的な人工細胞の構築
3. 学会等名 第一回「物質、デバイス、生命の融合」研究会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山下和誼, Marcos Masukawa, 茶野真由美, 佐藤佑介, 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 水性二相分離液滴をテンプレートとしたDNAオリガミカプセルの機能化
3. 学会等名 「細胞を創る」研究会15.0
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nagi Yamashita, Marcos Masukawa, Mayumi Chano, Yusuke Sato, Masahiro Takinoue
2. 発表標題 Construction of DNA origami capsules using phase-separated droplets as templates
3. 学会等名 The 60th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshiaki Sano, Masahiro Takinoue
2. 発表標題 Photocontrol of DNA hydrogel formation and deformation
3. 学会等名 The 60th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古市遼平, 丸山智也, 山本陽大, 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 Simulation for the phase separation of DNA droplet with chemical reactions
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 鶴殿寛岳, 野村M.慎一郎, 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 光制御によるDNA液滴の『ゲル-液』相転移ダイナミクスで駆動するマイクロ流れ
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 鶴殿寛岳, 野村M.慎一郎, 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 遠隔操作が可能なDNA流体のマイクロ流制御
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 鶴殿寛岳, 野村M.慎一郎, 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 DNA流体の『ゲル-液』相転移ダイナミクスにより駆動されるマイクロ流れ遠隔操作
3. 学会等名 生物物理学会サブグループ人工細胞&分子ロボティクス第3回研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hirotake Udono, Shin-ichiro M. Nomura, Msasahiro Takinoue
2. 発表標題 Remotely controllable DNA microflow
3. 学会等名 The 26th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (uTAS2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宇田川喜信、瀧ノ上正浩、伊野浩介、珠玖仁
2. 発表標題 界面高分子電解質複合体ハイドロゲルファイバーを用いた3次元細胞培養
3. 学会等名 CHEMINAS45
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宇田川喜信、伊野浩介、瀧ノ上正浩、梨本裕司、珠玖仁
2. 発表標題 界面高分子電解質複合体ハイドロゲルファイバーを用いたバイオファブリケーション
3. 学会等名 2022年電気化学秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊野浩介
2. 発表標題 細胞培養ハイドロゲルファイバーの電気化学接着とバイオ計測
3. 学会等名 第32回日本MRS年次大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masahiro Takinoue
2. 発表標題 Molecular Robotics based on Soft Matter Physics of DNA
3. 学会等名 33rd 2022 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (From Micro & Nano Scale Systems to Robotics & Mechatronics Systems) (MHS 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masahiro Takinoue
2. 発表標題 DNA droplet nanotechnology for molecular computing and robotics
3. 学会等名 AsiaNANO 2022 (SESSION 10. Emerging nanoscience & nanotechnology) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masahiro Takinoue
2. 発表標題 Artificial cells emerging from programmable soft matter droplets
3. 学会等名 Cell Mimicry: bottom-up engineering of life (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 DNAでコンピュータを作る～人工細胞構築を目指した情報生命物理学～
3. 学会等名 第27回市民教養講座 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 Toward DNA nanostructure-based designed artificial cells and artificial organelles
3. 学会等名 第 60回日本生物物理学会 –生体分子の人工設計：タンパク質、RNA、DNA– (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 リビングシステムズ材料学を目指した情報分子DNAによる分子ロボティクス
3. 学会等名 第3回TAC-MI最先端研究セミナー（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤智史, 石羽友莉花, 瀧ノ上正浩, 尾上弘晃
2. 発表標題 DNAのカスケード伸長反応を利用したDNA架橋ゲルによる抗原センサ
3. 学会等名 日本機械学会 第13回マイクロ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nomura Shin-ichiro M.
2. 発表標題 Molecular Cybernetics: viewpoints from the material side
3. 学会等名 14th INTERNATIONAL WORKSHOP ON NATURAL COMPUTING (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野村 M. 慎一郎
2. 発表標題 踊る人工多細胞
3. 学会等名 第73回コロナおよび界面化学討論会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Archer Richard J., Nomura Shin-ichiro M.
2. 発表標題 Synthesis of Macroscopic Lipid-Based Multi-Compartment Structures
3. 学会等名 13th International Gel Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yusuke Sato
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) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yusuke Sato
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 Masahiro Takinoue
2. 発表標題 DNA nanotechnology for soft micromachines and molecular robots
3. 学会等名 AROB 27th 2022, ISBC7, SWARM5 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masahiro Takinoue
2. 発表標題 DNA droplet technology for novel soft micromachines and molecular robots
3. 学会等名 NANO Korea 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jing Gong, Nozomi Tsumura, Yusuke Sato, Masahiro Takinoue
2. 発表標題 DNA computing droplet to detect miRNAs for cancer diagnosis
3. 学会等名 The 25nd International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (microTAS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jing Gong, Nozomi Tsumura, Yusuke Sato, Masahiro Takinoue
2. 発表標題 DNA computing droplets for cancer diagnosis based on identifying biomarker miRNAs
3. 学会等名 The 27nd International Conference on DNA Computing and Molecular Programming (DNA27) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jing Gong, Shin-ichiro M. Nomura, Masahiro Takinoue
2. 発表標題 Aptamer functionalized DNA hydrogels for drug delivery
3. 学会等名 第4回分子ロボティクス年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jing Gong, Nozomi Tsumura, Yusuke Sato, Masahiro Takinoue
2. 発表標題 DNA computing droplet-based sensing system for the detection of miRNAs
3. 学会等名 化学とマイクロ・ナノシステム学会第44回研究会 (Cheminas44)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jing Gong, Nozomi Tsumura, Yusuke Sato, Masahiro Takinoue
2. 発表標題 Cancer diagnosis based on identifying miRNAs with DNA computing droplets
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 茶野真由美, Marcos K. Masukawa, 湊元幹太, 吉川研一, 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 水性二相分離液滴を用いたDNAマイクロカプセルの設計と作製
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 茶野真由美, マスカワ マルコス, 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 水性二相系液滴を利用したDNAマイクロカプセルの設計
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 山下和誼, 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 Design of 3D DNA Nanostructures with small Poisson's ratio
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 山下和誼, 佐藤佑介, 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 DNAオリガミ構造体のDNAマイクロ構造体への自己集合化
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masahiro Takinoue
2. 発表標題 Soft matter biophysics study of DNA capsules and DNA droplets toward micrometer-sized molecular robots
3. 学会等名 17th Annual Conference on FOUNDATIONS OF NANOSCIENCE: SELF-ASSEMBLED ARCHITECTURES AND DEVICES (FNANO20) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 DNAのソフトマター物理による分子ロボティクス
3. 学会等名 東京大学大学院工学系研究科化学生命工学専攻 第13回ChemBioハイブリッドレクチャー (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤佑介, 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 DNA ナノ構造の液-液相分離による液滴形成と二次元界面への展開
3. 学会等名 「細胞を創る」研究会13.0
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鶴殿寛岳, 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 光応答性塩基を用いたDNA液体-DNAゲルの相転移の光制御
3. 学会等名 「細胞を創る」研究会13.0
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本陽大, 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 粗視化Brown動力学法を用いた化学反応を伴うDNA 液滴の相分離シミュレーション
3. 学会等名 「細胞を創る」研究会13.0
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 津村希望, 佐藤佑介, 瀧ノ上正浩
2. 発表標題 液-液相分離現象を伴うDNAゲルによる核酸センシング
3. 学会等名 「細胞を創る」研究会13.0
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計5件

1. 著者名 野村 M. 慎一郎, 齋藤明, 田中敦, 小椋利彦	4. 発行年 2022年
2. 出版社 ニューサイエンス	5. 総ページ数 56
3. 書名 月刊「細胞」, 54(4), 194-197	

1. 著者名 Ang M.H., Khatib O., Siciliano B. (eds), Takinoue, M "Manipulation technologies for molecular robots"	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Springer, Berlin, Heidelberg	5. 総ページ数 -
3. 書名 Encyclopedia of Robotics	

1. 著者名 Ang M.H., Khatib O., Siciliano B. (eds), Nomura, S.-i. M., Archer R. J. "Biomolecules for molecular robot structures"	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Springer, Berlin, Heidelberg	5. 総ページ数 -
3. 書名 Encyclopedia of Robotics	

1. 著者名 Satoshi Murata (Ed) (Chapter 3: Shin-ichiro M. Nomura)	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Springer Nature Singapore	5. 総ページ数 296
3. 書名 Molecular Robotics: An Introduction	

1. 著者名 川又 生吹, 清水 稜, Richard J. Archer, 野村 M. 慎一郎	4. 発行年 2023年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 545
3. 書名 実験の自動化・自律化によるR&Dの効率化と運用方法 - AI、ロボット技術、ChatGPT、MI、ベイズ最適化、 秘密計算など - (第10章第5節 "実験自動化による人工多細胞体の作製と観察への取り組みと今後の展望")	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 短鎖核酸複合分子、短鎖核酸複合分子が凝集してなる液滴、及び、それを用いた分子、粒子又は細胞の集積、輸送、配置又はセンシング方法	発明者 瀧ノ上正浩、ゴンジン、野村慎一郎	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-95761	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

瀧ノ上研究室 https://takinoue-lab.jp/ 野村研究室 https://sites.google.com/site/snomuralaboratory/ 尾上研究室 http://www.onoe.mech.keio.ac.jp/index-j.html 伊野浩介Researchmap https://researchmap.jp/read0140766/?lang=japanese 佐藤研究室 https://sites.google.com/view/ysato-web

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	伊野 浩介 (Ino Kosuke) (00509739)	東北大学・工学研究科・准教授 (11301)	
研究分担者	尾上 弘晃 (Onoe Hiroaki) (30548681)	慶應義塾大学・理工学部・教授 (32612)	

6. 研究組織（つづき）

	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	野村 慎一郎 (Nomura Shin-ichiro) (50372446)	東北大学・工学研究科・准教授 (11301)	
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	Stony Brook University	New York University		
英国	University of Cambridge	Imperial College London		
フランス	Ecole Normale Supérieure, Paris			