

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K12216

研究課題名(和文) 実世界で動作するDNAナノマシン構築手法の確立

研究課題名(英文) Development of a construction methodology for DNA nanomachines that operate in the real world

研究代表者

小宮 健 (Komiya, Ken)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門(超先鋭研究開発プログラム)・研究員

研究者番号：20396790

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：ナノ構造の設計に対し、ナノマシンの設計では構造間で変化する効率なども考慮して設計する必要がある。本研究では、シミュレーションと実験を併用しながら、ナノ構造を段階的に変化させて仕事をする人工ナノマシンを構築する手法の開発に取り組んだ。従来の反応条件の最適化では不可避であった酵素反応における副反応を、人工核酸の導入により抑制できることを見出したほか、多段階の伸長反応で情報処理を実行するDNAナノマシンを所望の温度条件下で効率良く動作させることなどに成功し、その成果について学会発表や論文公表を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の反応条件の最適化では抑制できない酵素反応の副反応を、人工核酸の導入によって抑制する効果の発見は、本研究課題で構築するDNAナノマシンのみならず、DNAポリメラーゼを用いて一本鎖DNAを合成する反応系に広く適用できる有用な知見であり、核酸検査から材料調整まで多くの分野で活用が期待される。また、情報処理を実行するDNAナノマシンによる多段階動作の達成は、分子反応で情報を処理する実用レベルの反応系を創製するための基盤となる成果である。

研究成果の概要(英文)：Compared to the design of nanostructures, the design of nanomachines needs to take into account the efficiency of structural changes. In this study, we developed a methodology to construct artificial nanomachines that work by multi-step nanostructural changes, using a combination of model simulation and experimental investigation. It was found that the side reaction known in the targeted enzymatic reaction, which were inevitable with the common optimization of reaction conditions, could be suppressed by introducing artificial nucleic acids. In addition, DNA nanomachines that perform information processing through multi-step extension reactions were successfully made to work efficiently under the desired temperature conditions. These results were presented at conferences and published as papers.

研究分野：DNAコンピューティング

キーワード：DNAコンピューティング DNAナノマシン 分子ロボティクス

1. 研究開始当初の背景

従来の切削加工等による「トップダウンのものづくり」に対し、「ボトムアップなものづくり」の方法論として、DNA 分子の塩基配列特異的な自己会合を利用する「DNA ナノテクノロジー」が近年急速に発展している。ナノメートルサイズの構造体を構築する手法については、所望の形状へと自律的に折り畳まる配列を設計するソフトウェアが開発されている。今後は、ナノ構造体の構造を変化させて機械的な仕事や分子の輸送を行うような、実用的な人工ナノマシンの創製が期待されているが、所望の性能を示す配列を定量的に設計してナノマシンを構築する手法はまだ確立されていない。これは、DNA の 4 種の塩基のうち A と T、G と C が結合する単純な塩基対規則にしたがって配列を設計するナノ構造体と比べ、ナノマシンの設計では動作の各段階でとる安定状態について、状態間の遷移、すなわち構造変化の効率などを予測する必要があり難しいためである。

ナノマシンの構築においては、溶液条件に応じて形成する複数の構造が各条件下で最も安定であるだけでなく、“最安定ではないがとり得る構造”も適切に考慮しなければ、目的の構造変化を効率良く行える配列は設計できないと考えられる。また、分子の輸送といった複数のナノマシンが共同して実現する機能を達成するには、個々のナノマシン単独の安定性を考慮するだけでは不十分である。本研究では、現実世界により近い複数の安定状態の存在を考慮した設計を行うことで、目的の動作を効率良く行うナノマシンの構築や、動作エラーにつながるクロストークの低減に取り組み、「実世界で動作するナノマシンを構築するには最安定ではない構造をどのように取り扱うべきか？」という問いを検証する。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者らがこれまでに開発した、複数の安定状態を考慮する設計手法を用いてナノマシンを実際に構築し、生化学的な実験を行って設計手法の妥当性を検証するとともに、実験で得たパラメータを取り入れて精度をさらに高め、これまで難しかった DNA ナノマシンの定量的な設計と構築の実現を目指す。所望の動作性能を示す DNA ナノマシンを定量的に設計・構築する手法を確立することを目的として、部分配列の結合をそれぞれ独立に考慮していた設計を、複数の部分配列が競合して結合するシステムの設計へと拡張する。これにより、個別の構造についての熱力学的な安定性だけで議論していた従来のナノマシン研究を、どのくらいの割合の分子が目的の構造変化を起こすかという定量的な議論が行える、より精緻な研究に発展させる。DNA の結合を競合させるという独自の着想にもとづいて、これまでは“できる限り存在しないようにすべきエラー”として扱われていた、最安定でない構造を設計の対象に取り入れたり、定量的な指標を用いるなどしてナノマシンを設計して構築する方法論をこころみ、その有効性を検証する。

3. 研究の方法

本研究では、段階的により高い設計精度が求められる複数の DNA ナノマシンを構築し、それぞれ所望の動作特性を示すことを、シミュレーションや生化学的な実験によって検証する。温度応答に関して任意に設定したピーク温度や半値幅を示す DNA ナノマシンを設計して、はじめにシミュレーションにより動作特性を検証する。その次に、酵素反応の制御用フィルタとしての応用を想定して、より急峻な温度応答を示す狭い半値幅を持った DNA ナノマシンを構築する。その知見にもとづいて、特定の箇所で鎖置換が起こる反応を多段階に行う DNA ナノマシンが、最終的に蛍光基で修飾された複数の DNA 分子の結合サイトを生成する一連の動作を設計し、実験で実証する。

(1) 設計手法の精度を検証して改善するための DNA ナノマシン構築実験

所望のバンドパスフィルタ特性を持った DNA ナノマシンを構築するため、DNA ナノマシン配列における分子内で結合する領域、およびループを形成する領域の適切な配列長を設計し、ピーク温度と半値幅を評価指標として計算機シミュレーションを行い、動作特性を検証する。はじめは、これまでの研究で設計が比較的容易であることがわかっている、高温のピーク温度と広い半値幅を持った DNA ナノマシンを対象として研究を実施する。2 種のヘアピン構造の形成が競合して起こる DNA の温度応答について、評価指標を用いてどの程度までのバンドパスフィルタ特性が実現可能であるかをシミュレーションで検証し、所望の特性を示すことが予測された DNA 配列を実際に合成する。そこで得た知見を(2)のナノマシン構築に活用する。

(2) 酵素反応制御への応用の可能性を検証する DNA ナノマシン構築実験

任意のピーク温度と半値幅を持つナノマシンが構築できること、およびナノマシンで狭い温度範囲でのみ酵素反応を起こす制御が可能であることを示すため、狭い半値幅を持つ DNA ナノマシンを構築して DNA 伸長反応実験を行う。狭い半値幅を持つナノマシンが目的構造を形成する割合は、温度変化に対して急峻な応答を示すとともに、低いピーク値にとどまることがこれま

での研究から予想された。目的構造を形成するナノマシンの割合が 10%を下回る場合には、DNA ナノマシン研究でよく行われる蛍光測定実験では定量が困難である。反応が高速に進行する酵素反応を介して十分量の産物が生成することで、実験による定量的な検証が可能になると考えた。DNA ナノマシンが目的構造を形成したときにのみ伸長反応が進行することを利用して、各温度条件下で目的構造を形成したナノマシンの割合を評価して産物量を定量し、設計通りのバンドパスフィルタ特性を示しているか、また酵素反応が狭い温度範囲で制御できているかを検証する。

(3) 特定の温度条件下で多段階の鎖置換反応が進行して複数の修飾 DNA が結合する DNA ナノマシンシステムの構築実験

相補的な配列を持つ DNA と結合して部分的に二本鎖を形成した DNA に対し、より 5'側に結合する DNA を投入して伸長反応が起こると、先に結合していた DNA と置き換わる鎖置換反応が起こる。これを多段階に実行すれば情報処理機構として利用することが可能で、多段階反応の結果として“積み荷”としての複数の修飾 DNA が結合するサイトが生成される。各段階の構造変化が起こるピーク温度を適切に設計することで、特定の温度条件や、温度の上昇もしくは下降にตอบสนองして起こるナノマシンの反応を制御し、実世界で動作して有用な仕事をする DNA ナノマシンシステムを構築する。

4. 研究成果

当初三年間の研究計画を、コロナ禍の影響や想定外の結果に適切に対応して本研究課題の目的を達成するため、実施期間を二年間延長して一部の内容を適宜修正して実施した。

初年度には、任意に設定した特性値を示す DNA ナノマシンを構築するため、実際の動作特性をシミュレーションや蛍光測定実験等により検証した。また、次の段階で計画している DNA ポリメラーゼによる酵素反応の制御に向けて、DNA ナノマシンの定量的な動作の検証を可能にするため、DNA ポリメラーゼを用いた反応で予期しない副反応が起こらないための条件検討、および副反応を抑制する手法の開発に取り組んだ。その結果、従来の統計熱力学モデルにもとづく二次構造予測と反応条件を最適化するだけでは、酵素反応における副反応を十分に抑制できないことを明らかにした。その対応策を検討するなかで、添加剤の探索や DNA 配列長の検討、二次構造の導入など様々な方法の有効性を検証し、非天然型の核酸を適切な部位に導入することで副反応が十分に抑制され、所望の結果が得られることを見出した。この成果は、本研究課題で構築する DNA ナノマシンのみならず、DNA ポリメラーゼによる酵素反応を用いた反応系に広く適用できる有用な知見である。

二年度目には、DNA ポリメラーゼによる酵素反応で駆動される DNA ナノマシンについて、動作を予測するシミュレーションと生化学的な実験を集中的に行った。多段階の構造変化をとまなう DNA ポリメラーゼを利用した DNA ナノマシンの動作について、二次構造形成した DNA に相補的な DNA が結合するステップを中心として、ソフトウェア「oxDNA」を用いた分子動力学シミュレーションと生化学実験結果を比較し、そこでの考察にもとづいて反応効率が向上する配列を設計し、さらにシミュレーションと実験を行うプロセスを繰り返した。その結果、当初の配列を用いた実験では所望の多段階動作が検出できなかったが、改良した配列を持つ DNA ナノマシンでは所望の多段階動作が進行したと思われる結果が得られた。

三年度目には、DNA ポリメラーゼによる伸長反応で情報処理機能を示す分子システムの要素反応について検証を行った。蛍光プローブを用いた実験の結果を定量的に評価し、設計の妥当性を検討した。そこで得た知見から、二次構造を多段階に形成・変化させることで有用な作業を実行する分子システムを実現するという目標に向けて、望ましい低温での動作と高い反応効率を達成するためには、反応機構の改変が有効であることが示唆された。そこで、分子内で起こる反応に限定しない機構に改変して、生化学実験による検証を行ったところ、所望の温度条件下で多段階動作が効率良く進行すると思われる予備的な成果を得た。

四、五年度目には、DNA ポリメラーゼによる伸長反応で情報処理を行う分子システムとして機能する DNA ナノマシンについて、前年度に改変した反応機構を検証して高効率な動作の達成に取り組んだ。反応効率がさらに向上する配列を設計し、その配列を用いて行った実験結果を設計にフィードバックするプロセスを繰り返して、機能性分子システムとしての多段階動作の達成を目指す。特に、DNA 分子のみの反応が比較的シミュレーションによる予測通りに振る舞うのに比べて、酵素反応を組み合わせた生化学的な反応系では予期しない多様な副反応が起こるので、さらに多くの実験が必要となる。そのため、各段階の反応効率をより詳細に検証し、二次構造を多段階に形成・変化させる反応で動作する DNA ナノマシンの最適な反応条件を特定するためには、簡便な操作で効率良く DNA ナノマシンを調整できる手法を開発して、実験のスループットを高める必要性が認識された。そこで、調整時に行う反応の改変にも並行して取り組んだ。その結果、これまで難しかった多段階の動作を再現性良く行うことに成功した。この DNA ナノマシンの動作指令となるシグナル DNA を生成する反応についても検証を行い、短鎖シグナル DNA を効率良く増幅生成することに成功した。

以上の成果について、研究期間全体を通じて複数の学会発表や国際専門誌での論文公表を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ken Komiya, Chizuru Noda, Masayuki Yamamura	4. 巻 -
2. 論文標題 Characterization of Cascaded DNA Generation Reaction for Amplifying DNA Signal	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 New Generation Computing	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/s00354-024-00249-2	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 Ken Komiya*, Ryuma Shineha>(*equal contribution), Naoto Kawahara	4. 巻 4
2. 論文標題 Practice of responsible research and innovation in the formulation and revision of ethical principles of molecular robotics in Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 SN Applied Science	6. 最初と最後の頁 305
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s42452-022-05164-z	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 Ken Komiya	4. 巻 -
2. 論文標題 Molecular programming	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Encyclopedia of Robotics (M. H. Ang, O. Khatib, B. Siciliano Eds.)	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） 10.1007/978-3-642-41610-1_210-1	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 Ryutaro Yako, Daihei Ise, Ken Komiya, Kenzo Fujimoto, Satoshi Kobayashi	4. 巻 in press
2. 論文標題 Monotone Control of R Systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 New Generation Computing	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/s00354-022-00166-2	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 Kimoto Nobuya, Nakamura Shigetaka, Komiya Ken, Fujimoto Kenzo, Kobayashi Satoshi	4. 巻 862
2. 論文標題 Reducing control alphabet size for the control of right linear grammars with unknown behaviors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Theoretical Computer Science	6. 最初と最後の頁 193 ~ 213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tcs.2020.11.051	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 Komiya K., Komori M., Noda C., Kobayashi S., Yoshimura T., Yamamura M.	4. 巻 17
2. 論文標題 Leak-free million-fold DNA amplification with locked nucleic acid and targeted hybridization in one pot	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Organic & Biomolecular Chemistry	6. 最初と最後の頁 5708 ~ 5713
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9OB00521H	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 Komori M., Komiya K., Shirakawa T., Morikawa T.J., Yoshimura T.	4. 巻 411
2. 論文標題 Measurement of microRNA with isothermal DNA amplification on fully automated immunoassay analyzers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Analytical and Bioanalytical Chemistry	6. 最初と最後の頁 3789 ~ 3800
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00216-019-01878-z	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 Y., Komiya K., Kawamata I., Murata S., Nomura S.M.	4. 巻 55
2. 論文標題 Isothermal amplification of specific DNA molecules inside giant unilamellar vesicles	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 9084 ~ 9087
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9CC03277K	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28件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Harune Suzuki, Ken Komiya, Ryuji Kawano
2. 発表標題 THERANOSTICS MOLECULAR ROBOT: DETECT A MIRNA FROM TUMOR CELLS AND GENERATE THE DNA DRUG IN A LIPOSOME
3. 学会等名 The 27th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (μTAS 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ken Komiya, Chizuru Noda
2. 発表標題 Simple Cascading of DNA Generation Reaction for Avoiding Leak Amplification
3. 学会等名 Twenty ninth International Meeting on DNA Computing and Molecular Programming (DNA29) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ken Komiya
2. 発表標題 Toward Sustainable ELSI Discussion and RRI Implementation for Basic Researchers in Emerging Technologies
3. 学会等名 The 23rd biennial international conference of the Society for Philosophy and Technology (SPT2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小宮健
2. 発表標題 萌芽段階にある分子ロボット技術分野の基礎研究者が行う市民対話実践の意義の探究
3. 学会等名 科学技術社会論学会 第22回年次研究大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ken Komiya, Koji Sakamoto
2. 発表標題 Characterization of a DNA state machine driven by primer extension accompanying strand displacement reaction toward biological application
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 Ken Komiya, Chizuru Noda, Masayuki Yamamura
2. 発表標題 Experimental Investigation of Cascaded DNA Generation Reaction as A Signal Amplification Circuit
3. 学会等名 CBI学会2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木春音, 小宮健, 川野竜司
2. 発表標題 miRNA 検出とアンチセンス薬生成のためのCascade 反応を内包した分子ロボット開発
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 小宮健
2. 発表標題 分子ロボット研究しながらRRI実践
3. 学会等名 第7回分子ロボティクス年次大会(招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Ken Komiya, Chizuru Noda
2. 発表標題 Experimental Investigation of Extended Nucleic Acid Generation Circuits for DNA-based Signal Transduction
3. 学会等名 CBI学会2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ken Komiya, Chizuru Noda
2. 発表標題 Characterization of Nucleic Acid Generation Circuits for DNA-based Signal Transduction
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 小宮健
2. 発表標題 10年後の分子ロボット倫理研究に向けて
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 小宮健
2. 発表標題 分子ロボット研究者はなぜ未来について考えるのか
3. 学会等名 分子ロボット倫理シンポジウム「分子ロボットELSI論点モデル・ライフコースモデルの先へ：科学コミュニケーション実践をつうじた論点モデルの構築」
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takayuki Suzuki, Ken Komiya, Satoshi Kobayashi
2. 発表標題 DNA Sequence Search for Hairpins with Hill-Shaped Melting Curve
3. 学会等名 Twentyseventh International Meeting on DNA Computing and Molecular Programming (DNA27) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Daihei Ise, Shigetaka Nakamura, Ken Komiya, Kenzo Fujimoto, Satoshi Kobayashi
2. 発表標題 On Monotone Control of Right Linear Grammars with Unknown Behaviors
3. 学会等名 Twentyseventh International Meeting on DNA Computing and Molecular Programming (DNA27) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ken Komiya
2. 発表標題 Reduction of the length of state sequences for efficient operation of a DNA state machine under low temperature conditions
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 Ken Komiya, Satoshi Kobayashi, Masayuki Yamamura and John A. Rose
2. 発表標題 Investigation of the optimal arrangement of state sequences for efficient operation of a DNA state machine
3. 学会等名 CBI学会2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小宮健
2. 発表標題 DNAが切り拓くものつくりについて
3. 学会等名 近畿青年技術士懇談会 2021年7月度例会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小宮健
2. 発表標題 分子ロボット技術の継続的なRRI実践モデルの構築
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 Shuntaro Sato, Masayuki Yamamura, Ken Komiya
2. 発表標題 Optimization of the multi-step DNA computing reaction that implements a state machine
3. 学会等名 第58回日本生物物理学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shuntaro Sato, Masayuki Yamamura, Ken Komiya
2. 発表標題 Optimization of the multi-step DNA computing reaction using oxDNA MD simulation
3. 学会等名 CBI学会2020年大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小宮健
2. 発表標題 分子ロボット将来像の共創に向けて
3. 学会等名 第4回分子ロボティクス年次大会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小宮健
2. 発表標題 DNAコンピューティングによる”機器不要”診断薬の創製に向けて
3. 学会等名 バイオインダストリー奨励賞受賞者セミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Komiya K., Enomoto T., Yamamura M.
2. 発表標題 Construction of DNA Amplification Circuit for Directing DNA Nanodevices and Quantifying Nucleic Acids
3. 学会等名 Twentyfifth International Meeting on DNA Computing and Molecular Programming (DNA25) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Komiya K., Enomoto T., Yamamura M.
2. 発表標題 Characterization of DNA Generation Circuits for Controlling DNA Nanodevices
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 Sato Y., Komiya K., Kawamata I., Murata S., Nomura S.M.
2. 発表標題 Amplification of specific DNA molecules inside giant unilamellar vesicles at isothermal and physiological temperature
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 Komiya K., Noda C., Enomoto T., Yamamura M.
2. 発表標題 Experimental Investigation of DNA Generation Circuits toward Molecular Robot Control
3. 学会等名 CBI学会2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小宮健
2. 発表標題 分子からIoTまで、ものづくりのシンギュラリティ
3. 学会等名 Tokyo Tech Research Festival 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小宮健
2. 発表標題 核酸素子で生命のソフトウェア工学を探究する
3. 学会等名 核酸化学懇話会2020 北海道・東北地区セミナー（招待講演）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Takashi Nakakuki, Ibuki Kawamata, Satoshi Kobayashi, Ken Komiya, Nathanael Aubert-Kato, Shun-ichi Azuma, Gutmann Gregory Spence, Akihiko Konagaya, Yukiko Yamauchi, Yasuhiro Suzuki, Ken Sugawara	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Springer Singapore	5. 総ページ数 46
3. 書名 Design Theory of Molecular Robots (in Molecular Robotics -An Introduction (S. Murata Eds.))	

〔産業財産権〕

〔その他〕

山村研究室 IoMグループのページ https://bio-inspired.chemistry.jpn.com/
--

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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------