

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：12612

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2012～2016

課題番号：24104003

研究課題名(和文) 知能分子ロボット実現に向けた化学反応回路の設計と構築

研究課題名(英文) Design and Implementation of Chemical Reaction Circuits for Molecular Robots with Intelligence

研究代表者

小林 聡 (Kobayashi, Satoshi)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：50251707

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 148,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、知能を備えた分子ロボットのためのDNAを用いた化学反応回路の設計論を提示すると同時に、新学術領域「分子ロボティクス」の他班との共同研究により、分子ロボットプロトタイプの創製に貢献した。主要な結果としては、光応答性の人工塩基を用いた高速な計算デバイスの開発、環境の変化に適応できる化学反応系の例の実装、さらに、デバイス間の濃度ギャップ問題を解決し得る高性能な1000倍の濃度増幅器の開発が挙げられる。この増幅器は、分子ロボットプロトタイプの創製に大きな役割を果たした。また、分子ロボット開発に有効な、リアクティブな化学反応系の設計論と分子ロボット群のための分散計算理論を構築した。

研究成果の概要(英文)：In this research project, we presented a design methodology of chemical reaction circuits using DNA for molecular robots with intelligence, and chemically implemented a prototype of a molecular robot in collaboration with other teams in "Molecular Robotics" project. Main results include: the development of high speed computing devices equipped with light responsive artificial nucleotides, implementation of an example of chemical reaction circuit which can adopt effectively to changes of environment, and the development of a high performance 1000-fold amplifier which resolved concentration gap problem between devices in molecular robots, and greatly contributed to the implementation of a prototype of molecular robot. We also developed a design theory of "reactive" chemical reaction circuits and theory of distributed computing, both of which are adequate for molecular robots.

研究分野：計算機科学

キーワード：分子ロボット DNAコンピュータ 自己組織化 知能ロボティクス 生体生命情報学

1 . 研究開始当初の背景

本新学術領域が採択された当初、化学分野の発展により、分子そのものを設計することで、さまざまな分子デバイスを合成・設計することが可能となっていた。タンパク質モーターや脂質二重膜などの生体分子についても、動作原理の解明にともないエンジニアリングの可能性が現実味を帯びてきていた。しかしながら、その当時は、「センサーにより外部環境から情報を獲得し、情報処理回路によりその情報を変換し、その出力結果に応じてモーターを動かし環境に働きかける」という一連のプロセスを実行する、“ロボット”を分子で組み上げる方法論はまだ確立されていなかった。そこで、本計画研究は、分子デバイス群を統合して動作させる分子ロボットの知能中枢を担う、核酸をベースとした化学反応回路（分子コンピュータ）の構築を通じて、知的に動作する分子ロボットを設計・構築する方法論の確立に取り組んできた。また、分子ロボット実機の作成のためには、センサー、アクチュエータとのインタフェースの構築も重要であり、本計画研究の主要な研究課題であった。

2 . 研究の目的

本研究課題では、新学術領域「分子ロボティクス」の領域全体での密な議論を通して、以下の5つの項目に関する目標を設定した。

- (1) 化学反応回路素子の高性能化
- (2) 化学反応回路の設計論の構築
- (3) 分子ロボットプロトタイプの創製
- (4) 学習や環境への適応能力を持つ化学反応回路の設計

(5) 分子ロボット群のための分散計算理論
以下、(1) ~ (5) の内容を順番に説明する。

- (1) 回路素子の高性能化

最も技術的に重要かつ早急に要求される課題として、1 論理演算の計算に数 10 分かかかる当時の演算素子を高速化することが挙げられた。特に、ほとんどの核酸をベースとした化学反応回路で用いられている DNA 鎖交換反応を高速化することを目指した。さらに、DNA 鎖交換反応の速度や開始・停止を制御できる技術を得ることで、より高機能・高性能な化学反応回路の設計に役立てることを考えた。

- (2) 化学反応回路の設計論

分子ロボットを知的に動作させる分子コンピュータを構築するためには、分子ロボットに適した性能を持つ化学反応回路の設計論を構築することが重要である。そこで、分子ロボットに適した化学反応回路がもつべき性質を他班と連携しながら十分に議論し、そのような性質を持つ反応回路の設計論を構築することを目指した。

- (3) 分子ロボットプロトタイプの創製

分子ロボットを構築するためには、センサーやアクチュエータと化学反応回路の間のインタフェースを構築することが重要である。化学反応回路とのインタフェースに関しては、センサーやアクチュエータで用いられる核酸の濃度と、化学反応回路における核酸の濃度の間に、1000 倍程度の濃度ギャップが存在することがわかっており、早急に解決する必要があった。このため、核酸配列の高性能な増幅回路を構築することを最初の目標とした。そして、開発した増幅回路を用いて、センサーやアクチュエータとのインタフェースの構築に用いることを目指した。そして、開発したインタフェースをセンサー・アクチュエータと統合することにより、分子ロボットプロトタイプの構築を目指した。

- (4) 学習や環境への適応能力を持つ化学反応回路

将来、より高度な知的機能である学習や環境への適応能力を持つ分子ロボットを構築していくために、まずは、数理モデルに基づいたシミュレーションレベルで、そのような機能をもつ化学反応回路の設計を目指すこととした。さらに、可能であれば、簡潔な実験を通して、学習や環境への適応能力を持つ化学反応回路の実装の可能性を探求することとした。

(5) 分子ロボット群のための分散計算理論
分子ロボットシステムを設計することを将来的に見据えると、分子ロボットシステムを構成するロボット数は他の群ロボットシステムに比較できない程度に多いので、そのスケールメリットを享受できる可能性がある。自律性のある分子ロボットシステムを設計する際に、分子ロボットシステムが満たすべき望ましい性質や、個々の分子ロボットが持つべき機能について議論することは重要である。本研究課題では、望ましい性質を満たすように分子ロボットシステムを設計する際の基本方針の成否に対する指針を情報学、特に、分散計算の立場から明らかにすることを目指した。そして、それによって、分子ロボットシステムの設計を正しい方向に誘導できるような分散計算理論を構築することを目指した。

3 . 研究の方法

(1) ~ (5) の各項目について以下のように研究を進めた。

(1) 回路素子の高性能化について
演算素子の高速化に向けて、その基礎反応である DNA 鎖交換反応に注目した。しかし、塩濃度や DNA 配列により DNA 鎖交換反応速度は変化するものの大きく高速化することは難しい。一方、我々はこれまで酵素を用いない核酸類操作法を報告してきた。光応答性の人工核酸を用いることにより、配列選択的に超高速で核酸類を操作することが可能である (K. Fujimoto et al., Org. Lett.,

2008)．そこで、この核酸類の光操作技術を用いることにより、DNA 鎖交換反応を操作することが可能ではないかと考えた．

DNA 鎖交換反応の高速化・速度制御()と DNA 鎖交換反応の開始・停止の制御()に関連する研究を以下の方針で進めた．

DNA 鎖交換反応の高速化・速度制御

DNA 鎖交換反応において反応速度のボトルネックとなっているのは多段階の平衡反応を含むブランチャイグレーションである．そこで、DNA 鎖交換反応における Invader 鎖に光架橋素子である 3-シアノピニルカルバゾール(CNVK)を導入することにより、DNA 鎖間に熱的に不可逆な結合を形成する．平衡反応における逆反応が阻害されるため、鎖交換反応を加速することが可能だと考えた．

配列選択的光開裂反応の開発

光架橋時の構造が明らかとなり(雑誌論文[11])、光架橋後にもカルバゾール骨格が維持されていることから、従来よりも長波長で光開裂反応を誘起できる可能性が示唆された．しかし、366 nm 付近では従来、架橋反応が進行するため、通常の条件下では開裂反応は進行しない．そこで DNA 鎖交換反応を組み込んだ新規光開裂反応により従来よりも長波長で配列選択的に光開裂反応を誘起出来ると考えた．

(2) 化学反応回路の設計論

分子ロボットは、環境からの入力を受け取ると、それを分子コンピュータ(化学反応回路)で処理し、アクチュエータに伝えるというサイクルを継続的に繰り返す必要がある．そして、その結果として、知的に制御された振る舞いを提示する．まず、この一連のサイクルを実現にするためには、従来の分子コンピュータでは何が足りないのかを議論する必要がある．そこで、分子ロボットで用いる化学反応回路に要求される特性を他班と議論しながら明らかにすることを第一に考えた．そして、望ましい特性を持つ化学反応回路の設計論を構築するために、化学反応のシミュレータを開発する．また、化学反応を数理的に解析する技術としては、定常状態解析技術や常微分方程式を解析するための諸技術を用いることを考えた．

(3) 分子ロボットプロトタイプ構築

小宮は、DNA ポリメラーゼ伸長反応を利用した状態遷移技術をベースとした優れた化学反応回路の設計技術を持っている．この技術をさらに汎用化・高機能化することにより、他班と連携しながら、本領域の最終目標であるアメーバ型およびスライム型分子ロボットのプロトタイプ創製に向けて研究を進めることにした．その際に、他班が開発するセンサーやアクチュエータ技術との統合を見据えた設計を行い、積極的に班間連携を進めて目標を達成する．特に、センサーとアクチュエータの間にある3桁以上の分子濃度ギャップを克服することに重点に取り組み、高速

かつ信頼性の高い DNA シグナル増幅回路の実現を目指すほか、ナノメートルサイズの分子反応によるマクロな応答や、応答動作の時間的な制御を実現するための回路を構築することを目指すこととした．

(4) 学習や環境への適応能力を持つ化学反応回路の設計

学習や環境適応能力をもつ化学反応回路として、まず入力配列に応じて循環的な化学反応系を抽象化学系により設計した．そして、入力配列に変異ノイズを加えることで環境の外乱を加え、正規の入力配列でなくても動作可能なノイズ入り配列を学習・選択することで環境への適応能力を持つ化学反応回路の設計と実装を行った．

まず、抽象化学系をもちいて学習や環境への適応能力をもつ自己維持的な化学反応系、Self Reinforcement Reaction(入力された分子を維持し続ける)を設計し、反応シミュレーションによりこの系が学習と環境適応することを確認した．次にこの系を簡略化し DNA 分子をもちいて生化学実装した．そして環境に適応して自己維持的な反応を行うことを生化学実験により確認した．

(5) 分子ロボット群のための分散計算理論
本研究では、主要な自律性の一つである自己組織化について、分子ロボットシステムが様々な自己組織化能力を持つために必要となる性質を明らかにする．そのために、分子ロボット群を分散システムとしてモデル化する．そして、得られた分散システムモデル上で、多くの異なる自己組織化問題に対して、その問題が解決できるために必要十分な分子ロボットの性質を明らかにするという研究方針である．これは、ある特定の自己組織化問題が解決できるように分子ロボットシステムをしたい場合に、そのロボットは、対応する必要条件を満たすように設計しなければならないことを確約するという意味で、分子ロボット設計に指針を与えることになる．

具体的には、分子ロボット群のパターン(形状)形成問題について、自己安定性の問題や分子ロボット間の同期の問題について深く考察することとした．これは、例えば、タンパク質の機能は折り畳まれたときに出現する3次元形状(パターン)が柔構造である、すなわち、形状は柔軟に動くことが重要であることに動機付けられている．これは、分散計算論の専門用語に置き換えると、自己安定性、すなわち、一時的なパターンからの逸脱からシステムが自動的に復元するという性質が重要である、ということの意味しているからである．また、分子ロボット間の同期をとる問題は技術的な困難が伴う．従って、同期の問題を分散計算の立場から考察することも重要である．

4. 研究成果

(1) ~ (5) の各項目について、以下に成

果を述べる。

(1) 回路素子の高性能化について

DNA 鎖交換反応の速度制御

藤本らは, Invader 鎖に CNVK を導入し, DNA 鎖交換反応中に光照射を行うことにより, DNA 鎖間を光架橋可能であることを確認した。また, FRET を用い DNA 鎖交換反応を追跡したところ, 光架橋反応を用いることにより, DNA 鎖交換反応を 21 倍加速出来ることを見出した(産業財産権[1])。実験およびシミュレーションの両面からこの DNA 鎖交換反応の加速には光架橋速度が非常に重要であり, 秒単位の光照射により架橋可能な CNVK により初めて DNA 鎖交換反応の加速効果が得られる。さらに, 光架橋反応を変化させることにより DNA 鎖交換反応速度を制御できることを見出した(学会発表[2])。

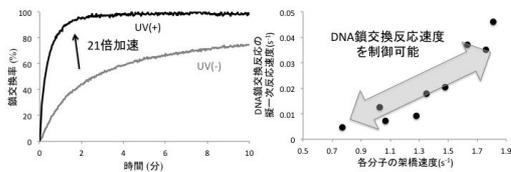


図1 光架橋反応による DNA 鎖交換反応速度制御

配列選択的光開裂反応

366 nm の光照射下で CNVK が光平衡状態を取っており, 光架橋・光開裂が共に進行していることが確認された。そこで, 藤本は, 光開裂反応を選択的に誘起するため DNA 鎖交換反応を組み込んだ新規開裂反応を検証した。その結果, 室温条件下で配列選択的に光開裂反応を誘起することに成功した(雑誌論文[5])。

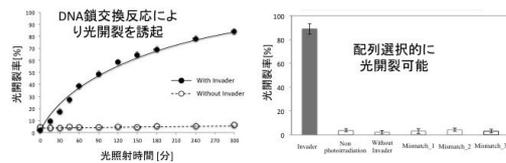


図2 新規光配列反応

(2) 化学反応回路の設計論

小林は, スライム班の萩谷らとの共同研究により, 分子ロボットを知的に制御するために分子コンピュータに要求される特性として, リアクティブ性(入力の値が変化してもそれに応じて出力を適切に変化できること), 状態をもつこと, ハイブリッド性(離散性と連続性を合わせもつこと), 永続性(永続的に動作すること)が重要であることを議論した(雑誌論文[6])。

特に, これらの特性のうち, 最も基本的で重要なのはリアクティブ性をもつという要求事項であると考えた。そこで, 本研究では, 環境は分子ロボットよりも系が巨大であるので, 入力値は出力が得られるまで不変に維持されるとの自然な仮定のもとで, DNA 鎖交換反応を利用したリアクティブなアナログ回路を設計する方法を提案した(学会発表

[3], 招待講演)。そして, テイラー展開で近似可能な関数であれば, その関数の値の正負で分類するタスクを, アナログ回路を用いて近似的に実装できることも理論的に示した。この成果は, 小林, 小宮, 藤本, スライム班の萩谷らの共同研究による成果である。

他の研究項目と本研究項目の関係を補足すると, この(2)研究成果を背後で支えるのは, (1)の回路素子の高速化技術と(5)の分散計算理論からの知見である。(1)の DNA 鎖交換反応の高速化技術により, アナログ回路素子の設計自由度を高めることができる。また, 後述する(5)の研究成果は, 状態を実現しなくても関数が実現できれば, 分子ロボット群としては能力の劣らないシステムを設計できることを示唆している。

定数ゲートを入カシステムとして用いたアナログ加算器のシミュレーション結果

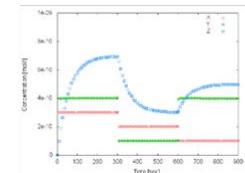


図3 リアクティブ性を持つアナログ回路

(3) 分子ロボットプロトタイプ

小宮は, DNA ポリメラーゼ伸長反応と核酸の分子内構造形成を利用する状態遷移技術について, モジュール化した設計を可能にするため, 分子間の結合をベースとした設計に発展させて基本動作に成功した(雑誌論文[9])。この化学反応回路について, さらに時間的な制御を可能にする設計へと拡張して動作を検証した(学会発表[5])。また, DNA デバイスの自動設計を可能にするため, 熱力学モデルの構築と自動設計手法の提案を行った(雑誌論文[7, 8])。

分子ロボットのプロトタイプ創製において必須となる, センサーと知能, 知能とアクチュエータの間をつなぐインターフェースとして, 前述の化学反応回路を利用した DNA シグナル生成機構を構築した。分子濃度ギャップを克服するための DNA シグナル増幅回路へと改良し, 増幅反応の高感度化・高速化・信頼性向上のための各種技術開発に成功した(図4)(学会発表[1])。

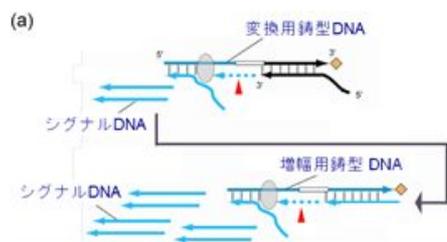


図4 DNA シグナル増幅回路

そして, 30分で1000倍の高速増幅回路を構築することができた。本増幅回路を用いて, 班間連携によるセンサー・知能・アクチュエータを備えたアメーバ型分子ロボット

の構築を行い、動作検証をするに至った。また、スライム型分子ロボットについても、要素技術となる架橋部分をDNAで構成したハイドロゲルを構築するための手法を開発し、分子刺激に対してマクロな応答動作をさせることに成功した(学会発表[4])。

(4) 学習や環境への適応能力を持つ化学反応回路の設計

鈴木は、抽象化学系(化学系の数理モデル)を用いて学習能力をもつ化学系を提案した、Self Reinforcement Reaction をもちいて Neural Network(パーセプトロン)を構築し、線形分離問題に対する学習を行うことにより、学習能力の確認を行った(雑誌論文[3])。また計算機の外界音のマイク入力の周波数スペクトルを線形分離問題に変換し、その問題を学習によって解くことにより、環境適応する計算系を構築した(雑誌論文[4])。

また、鈴木は、環境に適応する化学反応回路を実際に構築する実験にも取り組んだ。特に、化学反応回路の基本回路であるシーソーゲートを対象として、環境に適応する化学反応回路の設計・実装を試みた。ここでは、環境の変化を入力配列に変異が生じることと考え、回路を実装した。その結果、回路への入力として、変異のある配列と変異のない配列と混在させると、濃度の高い入力配列を選択して回路が機能するという興味深い現象を確認した(図5)。またこの系では、低濃度の変異のない配列が通常の数倍の速度で入力配列と結合したり(図5)、足場となる配列(toehold)がなくても動作したりすることなど従来の理解を超えた挙動が確認されている。本研究を担当した鈴木は、この研究により、NASA Astrobiology Institute との共同研究に発展させている(雑誌論文[2])。

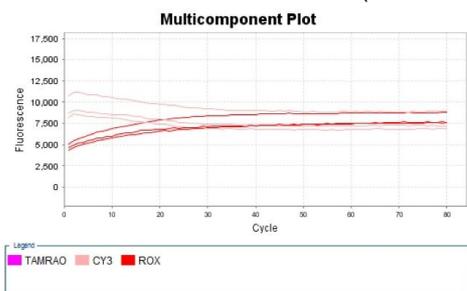


図5 正配列(ミスマッチなし)に対しミスマッチ配列の濃度を倍にすると、濃度の高い配列を選択するようになることを確認した。低濃度の正配列が急速に入力配列と結合していることが示されている。

(5) 分子ロボット群の分散計算理論

山下らは、公募班の山内らと共同研究を進めながら、以下の4種類の研究問題を考察した。すなわち、単一パターン形成問題(与えられた単一パターンを形成する問題)、パターン系列の繰り返し形成(パターンの有限列があたえられたときに、その列を繰り返し形成する問題)、マーチング(フロッピング)問題(与えられたパターンを崩さないように、ロボット群が自然に移動する問題)、自励振

動(同期)問題である。

また、現実の分子ロボットの特徴を考慮して計算モデルを拡張して研究を進めた。特に、ロボットが存在する空間は2次元空間やグラフと考えてよい場合もあるので、最初に2次元の場合を考察し、その後3次元の場合に拡張した(雑誌論文[1])。

これら多くの成果の中から主要な成果の一つは、以下の2次元空間上を移動するロボットに関する事実である(雑誌論文[10])

決定的無記憶非同期匿名ロボットと決定的有記憶完全同期匿名ロボットはランデブー問題を除くと同じパターン形成能力を持つ。

このことから、自己組織化能力を持つ分子ロボットの設計という観点からは、分子ロボットへのメモリーの搭載(状態の実装)や分子ロボット間の同期の実現の困難さは本質的な障害ではないということを示唆している。

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計61件)

[1] Yukiko Yamauchi, Taichi Uehara, Shuji Kijima, and Masafumi Yamashita, Plane Formation by Synchronous Mobile Robots in the Three Dimensional Euclidean Space, Journal of the ACM, 査読あり, 採録決定

[2] Yasuhiro Suzuki, Rie Taniguchi, Molecular Artificial Intelligence by using DNA reactions, Proceedings of International Conference on Artificial Life and Robotics, 査読あり, 591-594, 2017

[3] Yasuhiro Suzuki, Neural Networks by using Self-Reinforcement Reactions, Proceedings of ICAROB2017 (International Conference on Artificial Life and Robotics 2017), 査読あり, 595-598, 2017

[4] Yasuhiro Suzuki, Artificial Chemistry by Sound Waves, Proceedings of ICAROB2017 (International Conference on Artificial Life and Robotics 2017), 査読あり, 599-602, 2017

[5] Shigetaka Nakamura, Hayato Kawabata, and Kenzo Fujimoto, Sequence-specific DNA photo-splitting of 3-cyanovinylcarbazole using DNA strand displacement, ChemBioChem, 査読有, 17巻, 2016, 1499-1503. DOI: 10.1002/cbic.201600236

[6] Masami Hagiya, Nathanael Aubert-Kato, Shaoyu Wang, Satoshi Kobayashi, Molecular computers for molecular robots as hybrid systems, Theoretical Computer Science, 632, pp.4-20, 2016, 査読あり, <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2015.11.002>

[7] J. A. Rose, K. Komiyama, "Analysis and design of a single-molecule DNA nanodevice for thermal band-pass filters" Proceedings of the 11th IEEE Annual International Conference on Nano/Micro

Engineered and Molecular Systems (NEMS), 査読有り, 2016, (6 pages), DOI: 10.1109/NEMS.2016.7758205

[8] J. A. Rose, K. Komiya, S. Kobayashi, "Engineering multistate DNA molecules: a tunable thermal band-pass filter" *Micro & Nano Letters*, 査読有り, Vol. 11, No. 10, 2016, pp. 595-601, DOI: 10.1049/mnl.2016.0345

[9] K. Komiya, M. Yamamura, "Cascading DNA Generation Reaction for Controlling DNA Nanomachines at a Physiological Temperature" *New Generation Computing*, 査読有り, Vol. 33, No. 3, 2015, pp. 213-229, DOI: 10.1007/s00354-015-0304-5

[10] Nao Fujinaga, Yukiko Yamauchi, Hirota Ono, Shuji Kijima, and Masafumi Yamashita, Pattern Formation by Oblivious Asynchronous Mobile Robots, *SIAM Journal on Computing*, Vol.44, Issue 3, pp.740--785, (2015). 査読あり

DOI: 10.1137/140958682

[11] Kenzo Fujimoto, Asuka Yamada, Yoshinaga

Yoshimura, Tadashi Tsukaguchi and Takashi Sakamoto, Details of the ultra-fast DNA photocrosslinking reaction of 3-cyanovinylcarbazole nucleoside; Cis-trans isomeric effect and the application for SNP based genotyping, *J. Am. Chem. Soc.*, 査読有, 135 巻, 2013, 16161-16167, DOI: 10.1021/ja406965f.

〔学会発表〕(計 91 件うち招待講演 22 件)

[1] K. Komiya, C. Noda, M. Komori, K. Dong, T. Takenaka, T. Enomoto, T. Yoshimura, M. Yamamura, "Construction of an isothermal DNA amplification reaction system for simplified nucleic acid test" 第 10 回バイオ関連化学シンポジウム, 2016 年 9 月 7-9 日, 石川県立音楽堂 もてなしドーム地下イベント広場, 石川県金沢市

[2] 中村重孝、藤本健造、超高速光架橋反応を用いた DNA 鎖交換反応の加速、日本化学会第 96 回春季年会、2016 年 3 月 24-27 日、同志社大学(京都府京田辺市)

[3] S. Kobayashi, K. Yanagibashi, K. Fujimoto, K. Komiya, M. Hagiya, "Analog DNA Computing Devices Toward the Control of Molecular Robots" *Proceedings of Workshop on Self-organization in Swarm of Robots: from Molecular Robots to Mobile Agents (WSSR 2014)*, October 6, 2014, 147-157, DOI: 10.1109/SRDSW.2014.7468414, Nara-shi, Nara 招待講演.

[4] T. Kitajima, K. Komiya, M. Hayakawa, M. Takinoue, M. Yamamura, "Construction of a DNA-based stimuli-responsive microhydrogel" *Proceedings of Nineteenth International Meeting on DNA Computing and*

Molecular Programming (DNA19), 24-25 September 2013, Arizona State University, Tempe, USA.

[5] K. Komiya, C. Noda, M. Yamamura, "Construction of a DNA Generation Circuit for a Molecular Robot" CBI 学会 2015 年大会, 2015 年 10 月 27-29 日, タワーホール船堀, 東京都江戸川区

〔図書〕(計 4 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 4 件)

[1] 名称: 鎖交換された二重鎖オリゴヌクレオチドの製造方法

発明者: 藤本健造、中村重孝、橋本浩寿、小林聡 権利者: 北陸先端科学技術大学院大学、電気通信大学 種類: 特許 番号: 特願 2013-133163 出願年月日: 平成 25 年 6 月 25 日 国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

・小林 聡 (Kobayashi Satoshi)
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授 研究者番号: 50251707

(2) 研究分担者

・藤本 健造 (Fujimoto Kenzo)
北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授 研究者番号: 90293894

・小宮 健 (Komiya Ken)
東京工業大学・情報理工学院・助教 研究者番号: 20396790

・山下 雅史 (Yamashita Masfumi)
九州大学・システム情報科学研究院・教授 研究者番号: 00135419

・鈴木 泰博 (Suzuki Yasuhiro)
名古屋大学・情報科学研究科・准教授 研究者番号: 50292983

(3) 連携研究者

・横森 貴 (Yokomori Takashi)
早稲田大学・教育・総合科学学術院・教授 研究者番号: 60139722

・井村 順一 (Imura Junichi)
東京工業大学・大学院情報理工学研究科・教授 研究者番号: 50252474

・速水 謙 (Hayami Ken)
国立情報学研究所・情報学プリンシプル研究系・教授 研究者番号: 20251358

・ロンドレーズヤニック (Rondelez Yannick)
東京大学・生産技術研究所・准教授 研究者番号: 10548770