

領域略称名：分子ロボティクス
領域番号：2403

平成29年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る事後評価報告書

「感覚と知能を備えた分子ロボットの創成」

(領域設定期間)

平成24年度～平成28年度

平成29年6月

領域代表者 (東京大学・情報理工学系研究科・教授・萩谷 昌己)

目 次

1. 研究領域の目的及び概要	9
2. 研究領域の設定目的の達成度	11
3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	14
4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況	15
5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	17
6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧，ホームページ，公開発表等）	20
7. 研究組織（公募研究を含む.）と各研究項目の連携状況	25
8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用，研究費の効果的使用を含む）	27
9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	31
10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	32
11. 総括班評価者による評価	33

研究組織 (総括：総括班, 計画：総括班以外の計画研究, 公募：公募研究)

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	構成員数
X00 総括	24104001 分子ロボティクスの支援と 広報	平成 24 年度～ 平成 28 年度	萩谷 昌己	東京大学・情報理工学系研究科・教授	2
A01 計画	24104002 核酸ナノ構造を活用した多 元分子情報変換デバイスの 創成	平成 24 年度～ 平成 28 年度	齊藤 博英	京都大学・iPS 細胞研究所・教授	4
B01 計画	24104003 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	平成 24 年度～ 平成 28 年度	小林 聡	電気通信大学・情報理工学研究科・教授	6
C01 計画	24104004 アメーバ型分子ロボット実 現のための要素技術開発と その統合	平成 24 年度～ 平成 28 年度	小長谷 明彦	東京工業大学・情報理工学院・教授	7
D01 計画	24104005 構造化ゲルと化学反応場の 協働による運動創発	平成 24 年度～ 平成 28 年度	萩谷 昌己	東京大学・情報理工学系研究科・教授	7
総括・計画研究 計 5 件					
A01 公募	25104524 数理モデル構築を指向した 生化学ネットワーク解析環境 の実装	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	舟橋 啓	慶應義塾大学, 理工学部, 准教授	1
A01 公募	25104518 天然ラージ・リボザイムを用い たシグナル多重増幅・並列処 理 RNA デバイスの創成	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	井川 善也	富山大学, 大学院理工学研究部(理学), 教 授	1
A01 公募	25104514 光応答性ナノ材料による脂質 二重膜構造変換とその医療 応用	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	村上 達也	京都大学, 物質－細胞統合システム拠点, 特定拠点准教授	1
A01 公募	25104509 仮想物理世界における大規 模論理回路の実現	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	成見 哲	電気通信大学, 情報理工学(系)研究科, 教 授	1
A01 公募	25104506 光増感剤を用いた汎用的セ	平成 25 年度 ～	寺井 琢也	東京大学, 薬学研究科(研究院), 助教	1

	センサーシステムの開発	平成 26 年度			
A01 公募	25104505 リポソーム表面で生体分子を センスする双頭核酸ヘッド型 両親媒性分子の開発	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	庄田 耕一郎	東京大学, 総合文化研究科, 助教	1
A01 公募	25104504 環境自律応答型転写系を備 えた移動型分子ロボットの創 出	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	多田隈 尚史	京都大学, 物質-細胞統合システム拠点, 研 究員	1
A01 公募	25104503 RNA-ペプチド複合体による 人工チャネルの進化工学的 創製	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	根本 直人	埼玉大学, 理工学研究科, 教授	1
B01 公募	25104525 上皮成長因子受容体誘導シ グナル伝達系の動作原理, 制御機構の解明	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	中荃 隆	九州工業大学, 大学院情報工学研究院, 准 教授	1
B01 公募	25104523 スウォームネットワークによる 分子情報処理機構に関する 研究	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	礪川 梯次郎	兵庫県立大学, 工学(系)研究科(研究院), 准教授	1
B01 公募	25104521 記憶制限ランダムエージェン トモデルとしての分子ロボット システム	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	小野 廣隆	九州大学, 経済学研究科(研究院), 准教授	1
B01 公募	25104520 瞬速生体分子ロボットのため の分子ブースター創製	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	嶋田 直彦	東京工業大学, 生命理工学研究科, 助教	1
B01 公募	25104519 自律分散ロボット群の制御理 論に基づく化学反応回路素 子の高機能化	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	山内 由紀子	九州大学, システム情報科学研究科(研究 院, 助教	1
B01 公募	25104516 分子ロボットに適した単純な 分散アルゴリズム	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	大下 福仁	大阪大学, 情報科学研究科, 助教	1
B01 公募	25104515 分子デバイスで実現可能な 確率制御器のモデル化と解 析設計手法の確立	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	東 俊一	京都大学, 情報学研究科, 准教授	1

C01 公募	25104527 分子間相互作用アニメーション構築支援ソフトウェアの開発	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	上野 豊	独立行政法人産業技術総合研究所, バイオメディカル研究部門, 主任研究員	1
C01 公募	25104526 アメーバロボット内部に構成部品の非対称分布を作り出す手法の確立	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	小笠原 慎治	北海道大学, 創成研究機構, 特任助教	1
C01 公募	25104522 ソフトマター物理による非対称マイクロゲルの創成と制御	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	柳澤 実穂	東京農工大学, 工学(系)研究科(研究院), 准教授	1
C01 公募	25104517 細胞骨格及びモータータンパク質によるリボソームの変形と運動の数値シミュレーション	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	梅田 民樹	神戸大学, 海事科学研究科(研究院), 准教授	1
C01 公募	25104512 分子ロボットの骨格となるナノ構造体の開発と高機能化	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	池田 将	岐阜大学, 工学部, 准教授	1
C01 公募	25104511 DNA 捕捉・放出能力をもつ新規高分子材料等の開発	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	坂本 隆	北陸先端科学技術大学院大学, マテリアルサイエンス研究科, 助教	1
C01 公募	25104510 応答性と運動性を兼ね備えた人工細胞ロボットの構築	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	濱田 勉	北陸先端科学技術大学院大学, マテリアルサイエンス研究科, 准教授	1
C01 公募	25104507 情報駆動型ミセル-ベシクル転移の探究	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	豊田 太郎	東京大学, 総合文化研究科, 准教授	1
D01 公募	25104528 高分子粗視化シミュレーションによるソフトアクチュエータ材料の物性とダイナミクス	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	森田 裕史	独立行政法人産業技術総合研究所, ナノシステム研究部門, 主任研究員	1
D01 公募	25104508 生体内シグナルを応用したアメーバ型自律運動制御系の開発	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	澤井 哲	東京大学, 総合文化研究科, 准教授	1
D01 公募	25104502 ソフト&ウェットな眼球ロボットの創成	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	古川 英光	山形大学, 理工学研究科, 教授	1

D01 公募	25104501 BZ 反応場とシンクロする高分子ゲルの力学的性質とダイナミクスに関する理論	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	眞山 博幸	旭川医科大学, 医学部, 准教授	1
A01 公募	15H00828 ペプチドと核酸の人工複合二次構造を用いた刺激応答感覚素子の作製	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	臼井 健二	甲南大学, フロンティアサイエンス学部, 准教授	1
A01 公募	15H00826 圧力を知覚し機能発現する人工細胞型ロボットの構築	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	藤原 慶	慶應義塾大学, 理工学部(矢上), 助教	1
A01 公募	15H00813 細胞内外で活性を切り替える機能性核酸の創製	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	真嶋 司	京都大学, エネルギー理工学研究所, 助教	1
A01 公募	15H00812 光で人工的細胞内情報伝達系を制御するシステムの構築	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	山下 高廣	京都大学, 理学研究科, 助教	1
A01 公募	15H00811 膜親和性ナノ材料による脂質二重膜構造の光制御とその医療応用	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	村上 達也	富山県立大学, 工学部, 教授	1
A01 公募	15H00803 ナノポアセンシングによる分子演算システムの構築	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	川野 竜司	東京農工大学, 工学(系)研究科(研究院), 特任准教授	1
A01 公募	15H00798 環境自律応答する移動型転写分子ロボットの創出	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	多田隈 尚史	京都大学, 物質-細胞統合システム拠点, 特定研究員	1
A01 公募	15H00792 分子モーターと DNA オリガミのハイブリッドで「感覚を持つ分子ロボット」を創る	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	鳥谷部 祥一	東北大学, 工学研究科, 准教授	1
B01 公募	15H00823 DNA 計算による制御系設計法の構築と制御系設計支援ツールの開発	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	中荃 隆	九州工業大学, 大学院情報工学研究院, 准教授	1
B01 公募	15H00821 分散システム論に基づく化学反応系の設計方法の確立	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	山内 由紀子	九州大学, システム情報科学研究院, 助教	1
B01 公募	15H00816 分子ロボットに適した特性をも	平成 27 年度 ～	大下 福仁	奈良先端科学技術大学院大学, 情報科学研究科, 准教授	1

	つ分散アルゴリズムの開発	平成 28 年度			
B01 公募	15H00815 群分子ロボット実現のための 多細胞間情報伝達の数理モ デル化	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	安井 真人	国立研究開発法人理化学研究所, 生命シス テム研究センター, 特別研究員	1
B01 公募	15H00814 生化学反応ネットワークのトポ ロジベース制御	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	東 俊一	京都大学, 情報学研究科, 准教授	1
B01 公募	15H00804 超高速演算分子ブースター システムの構築	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	嶋田 直彦	東京工業大学, 生命理工学院, 助教	1
B01 公募	15H00800 確率変動にロバスト性を有す る演算素子の設計理論と分 子実装	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	小林 徹也	東京大学, 生産技術研究所, 准教授	1
B01 公募	15H00793 核酸上を一次元的に動く分 子マシンの開発	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	鬼塚 和光	東北大学, 多元物質科学研究所, 助教	1
C01 公募	15H00824 分子ロボットアームとしての高 速大振幅な自発伸縮系の構 築	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	相樂 隆正	長崎大学, 工学研究科, 教授	1
C01 公募	15H00819 アメーバ型分子ロボットの内 部構造と機能を制御する 3 次元探索型ナノマシンの構 築	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	森島 圭祐	大阪大学, 工学研究科, 教授	1
C01 公募	15H00818 生体分子を利用した光駆動 性分子ロボットハンドの開発	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	水上 進	東北大学, 多元物質科学研究所, 教授	1
C01 公募	15H00809 ナノ構造体の構造変化を利 用した分子ロボットの形態変 化	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	池田 将	岐阜大学, 工学部, 准教授	1
C01 公募	15H00808 DNA 捕捉・放出能力をもつ 多機能性ペプチド・ゲル・リポ ソームの創出	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	坂本 隆	北陸先端科学技術大学院大学, 先端科学 技術研究科, 助教	1
C01 公募	15H00807 システム制御化された多機能	平成 27 年度 ～	濱田 勉	北陸先端科学技術大学院大学, 先端科学 技術研究科, 准教授	1

	性リポソームの構築:放出機能と運動機能	平成 28 年度			
C01 公募	15H00806 粗視化分子動力学シミュレーションによる荷電脂質膜の相分離と変形	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	下川 直史	北陸先端科学技術大学院大学, 先端科学技術研究科, 助教	1
C01 公募	15H00805 細胞内の自発的超分子構築を駆動する分子針の開発	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	上野 隆史	東京工業大学, 生命理工学院, 教授	1
C01 公募	15H00801 一本鎖核酸をトリガーとする生体分子モータースイッチングシステムの開発	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	庄田 耕一郎	東京大学, 大学院総合文化研究科, 助教	1
C01 公募	15H00797 膜穿孔タンパク質と熱応答磁性ナノ粒子による環境感応型リポソーム駆動システムの構築	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	根本 直人	埼玉大学, 理工学研究科, 教授	1
C01 公募	15H00790 色彩を感知し自ら内部に非対称性を生み出すアメーバロボットの創出	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	小笠原 慎治	北海道大学, 創成研究機構, 特任助教	1
D01 公募	15H00827 生体分子応答性ゲルを用いたマイクロアクチュエータシステムの構築	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	宮田 隆志	関西大学, 化学生命工学部, 教授	1
D01 公募	15H00825 分子の形態変化・拡散制御に基づく情報処理機構の開発	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	礪川 悌次郎	兵庫県立大学, 工学研究科, 准教授	1
D01 公募	15H00820 非線形振動子の相互引き込みによる形態形成と反応場モデル	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	清水 正宏	大阪大学, 基礎工学研究科, 准教授	1
D01 公募	15H00802 ジャイアントベシクル型スライムの構築	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	豊田 太郎	東京大学, 大学院総合文化研究科, 准教授	1
D01 公募	15H00796 生分解性ポリマー製 ECM による細胞の自動組立と分解を	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	福島 和樹	山形大学, 大学院理工学研究科, 助教	1

	駆動力とする分子ロボパーツ 化				
D01 公募	15H00791 環境に応じて運動するスライ ム構築の実現に向けたシステ ムデザイン	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	眞山 博幸	旭川医科大学, 医学部, 准教授	1
公募研究 計 60 件					

1. 研究領域の目的及び概要（2ページ以内）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、応募時までの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

■どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」なのか

従来のものづくりの方法論はすべて、材料となる物質の塊を外部から与えた情報に従って加工することで望みの形状を得るトップダウンのアプローチによっている。最近、これとは全く逆の方法論、つまり、物質を構成する分子そのものの性質をプログラムすることにより、その物質自身が望みのものに「なる」ボトムアップのアプローチが注目を集めている。分子そのものを設計し、分子の自己集合によって、原子分解能をもつ人工物を作り上げるこの方法論の出現は、ものづくりの歴史的転換点となることは間違いない。これにより、あらゆる人工物が分子レベルの精度を持つようになれば、生体機能を人工的に再構成できるだけでなく、分子レベルの自己修復、自己改変といったことが可能となり、医療、食料、エネルギーをはじめ、さまざまな分野への波及効果は計り知れないものとなるだろう。技術立国のほか生き残るすべのない我が国としては、今まさに起こりつつあるこのパラダイムシフトを先取りしていくことが必要不可欠であり、そのための新しい学術領域の確立、またそのための人材育成が急務となっている。

本新学術領域「感覚と知能を備えた分子ロボットの創成」において、我々は、種々の分子デバイスを統合することにより、分子レベルにおけるロボット構築の方法論を開拓する。ここでいう「ロボット」とは、広い意味で、センサーにより外部環境から情報を獲得し、その情報を処理し、その結果に応じて環境に対して働きかける「自律的システム」と定義できる。システムを環境から区別し、これらの構成要素を一体化するためのボディ（構造体）も必要である。「分子ロボット」は構成要素がすべて分子レベルのデバイスで実現されたシステムである。そのために、感覚、知能、運動、構造といった分子ロボットに必要な要素技術を開発するだけでなく、これらを統合させる技術の開発が必要になる。

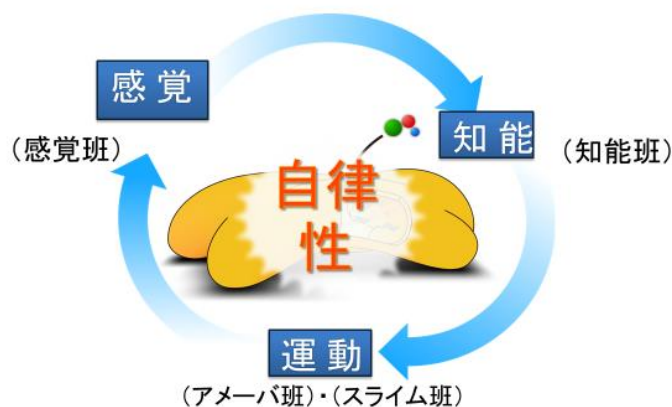
ここで、我が国の化学は世界的に見ても極めて高い水準にあり、さまざまな分子デバイスの研究が進んでいることが、この新しい学術分野を推進するうえで大きな利点となっている。また世界の学問の趨勢として、タンパク質モーターや脂質 2 重膜などの生体分子の動作原理の解明により、さまざまな生体分子のエンジニアリングが可能になってきている。さらに、近年急激に進展している DNA ナノテクノロジーは核酸のハイブリダイゼーション反応を基本に極めて複雑な分子シ

ステムの構築を可能にしつつある。本学術領域では、これらの学術的・技術的成果をシステム工学・情報工学の方法論によって統合することで、分子システム構築の方法論を一段上の階層に引き上げ、分子レベルでの設計原理に基づいて自己集合した分子システムにより望みの動的挙動を実現する「分子ロボティクス（分子ロボット工学）」を創成する。

■研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、これまでの成果）

さまざまな分子デバイスが開発されているにもかかわらず、これらをシステム化することが困難なのはなぜか？ それは、多数の分子デバイスの動作（化学反応）を同一の時空間内で組み合わせることが難しいからである。つまり、多種類の化学反応が同じ場所で同時に進行しているとき、望みの反応だけを確実に起こし、さらに、そのような反応で意味のあるネットワークをつくるのが極めて困難だからである。この問題の解決の糸口になったのが、DNA による分子計算の概念である。すなわち、DNA のハイブリダイゼーション反応の特異性を用いることにより、さまざまな化学反応を組み合わせることが可能となる。萩谷（本領域代表者）は、その黎明期から研究を始め、以来、未来開拓学術推進事業「分子コンピュータの理論と構築」（1996-2000 年）、CREST「多相的分子インタラクションによる大容量メモリの構築」（2001-6 年）、特定領域研究「分子プログラミング」（2002-6 年）と、我が国におけるこの分野の研究を常に先導してきた。また、分子計算の進展とほぼ並行して、DNA のもつプログラム性をナノスケールのものづくりに生かす方向の研究も行われており、「DNA ナノテクノロジー」と呼ばれている。この分野では、DNA タイル（1998 年）、DNA オリガミ（2006 年）など新しいナノ構造の構築技術が次々に開発されている。さらにここ数年、DNA 計算デバイスと DNA ナノ構造を組み合わせる分子サイズのロボットをつくる研究が

分子ロボットの3要素



進んでおり、DNA を素材として設計可能な分子システムの複雑性（システムの含む塩基数）は、ムーアの法則に従って指数的に増大している。

■分子ロボットの進化シナリオ

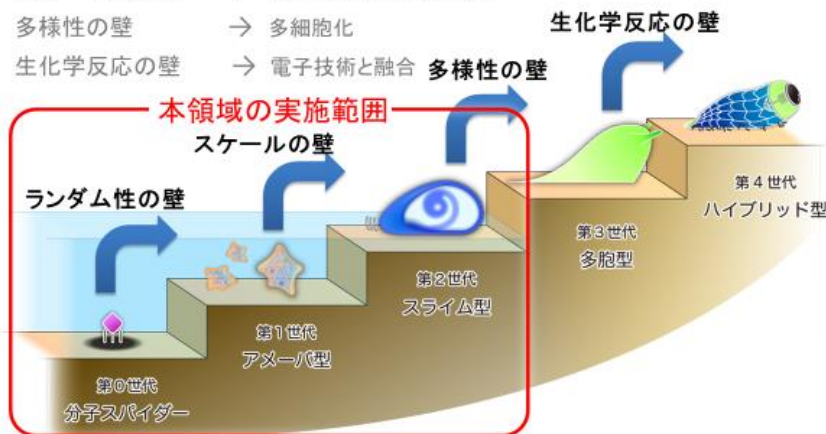
我々は、領域の立案にあたって、以下に述べるような分子ロボットの進化シナリオを提案し、本領域の位置づけを明確化した。分子ロボットと呼べる最初のもは、DNA オリガミの上に作られた経路の上を酵素反応をもちいて歩行する Molecular Spider (Stojanovic 2006, Yan 2010) と呼ばれるものである。この種のロボットは基本的に単分子であるため、これ以上の機能を付与することは難しい（第0世代）。この限界を乗り越えるために、ミクロンサイズの単一の容器（コンポーネント）を人工的に合成し、その中に情報処理や運動のための分子デバイス群を統合することで、単分子反応のランダム性を逃れ、反応速度論に基づく決定的な機能設計が可能になる。これを**第一世代の分子ロボット（アメーバ型分子ロボット）**と呼ぶ。さらに、機能性の高分子ゲルを素材として反応場をスケールアップし、その上に発現する非均質な時空間的發展の中でさまざまな分子デバイス群を動作させることにより、走性のような異方性を必要とする機能の発現が可能になる。これを**第二世代の分子ロボット（スライム型分子ロボット）**と呼ぶ。その次の第三世代の分子ロボットでは、異なる機能をプログラムしたコンパートメントを多数合体させ、単一胞では不可能な複雑性が実現される（**多胞型分子ロボット**）。第四世代の分子ロボットでは、人工的な化学反応系としてプログラムされる分子ロボットが電子デバイスと融合することにより、生化学的な反応の限界を突破する（**ハイブリッド型分子ロボット**）。本学術領域の目的は、このような**分子ロボティクスの発展ビジョン**へ道筋をつけ、ボトムアップ的なものづくりへ向かう技術革新を加速・先導することである。

分子レベルでナノ構造を構築し、さらにそれにダイナミズムを与えることによって自律的なロボットを構築しようとする分子ロボティクスの研究は、学術の発展の中で、極めて自然なステップととらえることができる。この研究の中核となるボトムアップ手法による人工物構築の手法は、ものづくりの方法論の根幹にかかわり、ものづくり全体を大きく転換させるインパクトを持つと考えられる。こうした技術はいずれ産業や社会へ深く広く波及していくことになる。比較的実現が近いと考えられるのは医療分野であり、分子ロボティクス技術を応用した知能化ドラッグデリバリーや、人工筋肉などの研究がすでに始まっている。また環境分野では、分子ロボットによる動植物体内の環境モニタリングなどが考えられている。化学・エネルギー分野では、ナノ構造とたんぱく質酵素をシステム化することによる有用物質産生が検討されている。分子レベルの時空間パターン生成技術は、脳と電子デバイスを接続する新しい超並列インタフェースの開発につながる

ことが期待される。

分子ロボットの進化シナリオ

- ・ **ランダム性の壁** → コンパートメント化(リボソーム)
- ・ **スケールの壁** → 反応拡散場(ゲル)
- ・ **多様性の壁** → 多細胞化
- ・ **生化学反応の壁** → 電子技術と融合



社会的価値

分子ロボティクス 産業への波及効果

<p>医療分野</p> <p>知能化ドラッグデリバリー 高度な診断・投薬ロジックをプログラムした DDS ナノロボット</p> <p>細胞内医療 細胞内に常駐して生命活動を安定化する分子ロボット</p> <p>人工細胞・人工臓器・人工筋肉 臓器発生・形成過程を分子ロボットで誘導</p>	<p>環境分野</p> <p>環境モニタリング 微量物質の空間分布情報を分子ロボで探索</p> <p>生体内モニタリング 生物体内の insitu モニタリング, サンプリング</p> <p>環境浄化 有害物質を分子ロボで回収・濃縮・除去</p>
<p>デバイス分野</p> <p>分子-電子ハイブリッド集積回路 分子レベルで設計されたデバイスを半導体回路に組み込んで高機能化</p> <p>高分子デバイス 分子ロボの自己組織化能力を使ってゲルを微細ハタリングして機能化</p> <p>人工脳 上記を用いた新原理ウェットコンピュータ</p>	<p>化学・エネルギー分野</p> <p>人工光合成 光合成反応中心の再構築による光エネルギーの固定化</p> <p>人工酵素 分子ロボによる高効率かつ環境に負荷をかけない物質合成</p>

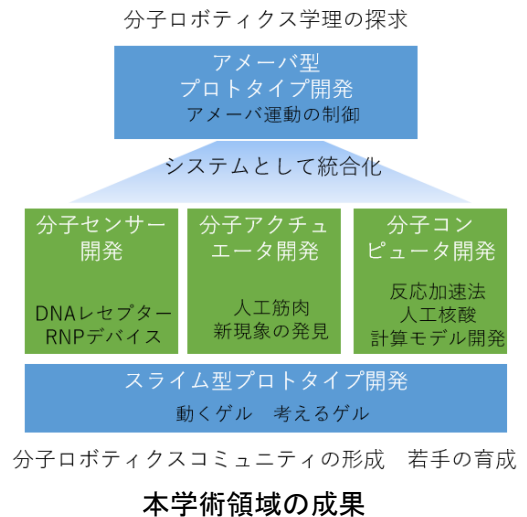
2. 研究領域の設定目的の達成度（3 ページ以内）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らしての達成度合いについて、具体的に記述してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目ごとの状況も記述してください。

■本新学術領域の目的

本領域の目的は、分子ロボットに必要な、センサー、プロセッサ（コンピュータ）、アクチュエータ、筐体、およびそれらの設計・製作・統合・制御にかかわる技術を開発することであり、前述の進化シナリオにおいて、第一世代のアメーバ型分子ロボットのプロトタイプ開発および第2世代のスライム型分子ロボットに必要な基盤技術を開発することに集約される。そして、プロトタイプ開発、基盤技術開発および各要素技術の基礎研究を展開することを通して、「分子ロボティクス（分子ロボット工学）」と呼ぶべき新しい学術分野を創成することを、本領域の最終的な目的とした。

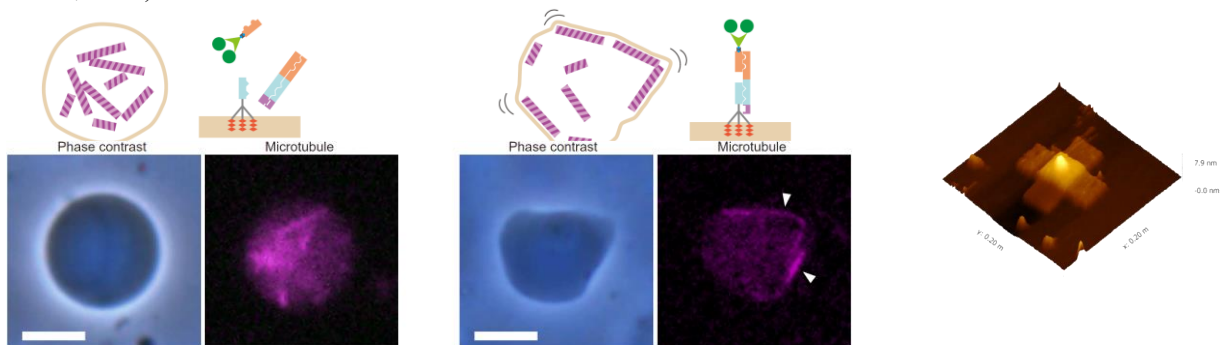
以上の目的を達成するために本領域では、感覚班、知能班、アメーバ班、スライム班の四つの計画研究を組織し、以下に述べるように、アメーバ型プロトタイプの開発、基盤技術（分子センサー・分子アクチュエータ・分子コンピュータ）の研究、スライム型プロトタイプ要素技術の研究開発を進めた。同時に、本報告書全体で述べているように、中核となる学理の探求、多様な専門分野の研究者から成る分子ロボティクス・コミュニティの形成および若手研究者の育成を進め、分子ロボティクス領域を立ち上げることに成功した。



■アメーバ型プロトタイプの開発（研究項目 C01）

自律的に動作するアメーバ型分子ロボットとして、人工膜の容器であるリポソームを分子ロボットの筐体（シャーシ）とし、分子センサー・分子アクチュエータ・分子コンピュータをリポソーム内に封入したアメーバ型プロトタイプを開発した。分子ロボットとして統合するためには、全ての分子デバイスが同一条件下で動作しなくてはならない。このために、分子ロボットの外部から与えられるシグナルをとらえて筐体内部に伝える分子センサー、分子ロボットを変形・運動させるための分子アクチュエータ、分子センサーがとらえたシグナルを適切に選別・増幅し分子アクチュエータを制御するための分子コンピュータを新たに開発した。また、分子ロボットとしての統合化を実現するために、リポソームに多種類の分子デバイスを高密度に封入する技術および様々な分子デバイスを同時に駆動可能な溶液条件とアセンブリプロトコルを開発した。最終年度においては、統合技術の成果として、自律的に動作し光刺激によりリポソームの変形を動的に制御する実験に成功した。

アメーバ型プロトタイプの開発は、アメーバ班を中心に本領域全体が一丸となって取り組んだ。具体的には、アメーバ班が保有する技術でリポソーム内に微小管・分子モータを高密度で封入し、感覚班が持つ光応答性分子センサーでDNAシグナルを生成し、知能班およびスライム班が保有するDNAコンピューティング技術を利用したDNAクラッチで微小管とリポソームの着脱を制御することに成功した。下左図のようにDNAクラッチが外れた状態ではキネシンと膜が乖離しているが、下中図のようにクラッチが入るとキネシンと膜が結合し、この上を微小管が滑り運動を行うことによりリポソームが変形する (Sato Y, *Science Robotics*, 2017)。なおDNAクラッチを制御するDNAシグナルは光刺激によってリポソーム内に生成される。



光シグナルにตอบสนองして変形運動を始めるアメーバ型分子ロボット

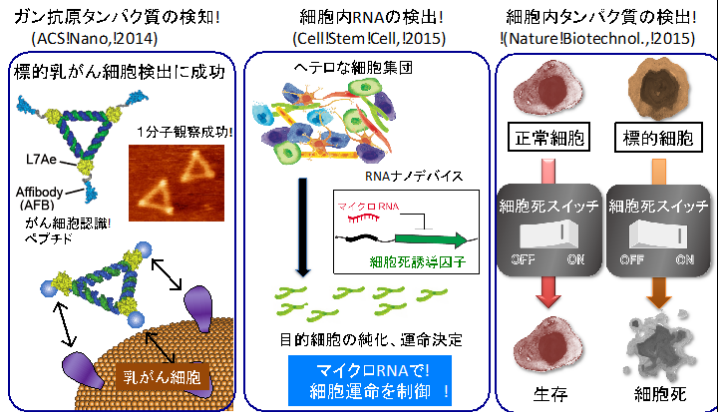
DNAレセプター

また、アメーバプロトタイプに組み込み可能な分子デバイスとしては感覚班が開発した十字型DNAセンサー（上右図）や知能班が開発したDNA増幅回路があり、現在統合化のためのチューニングを進めている。十字型DNAセンサーはリポソーム膜面上に格子集合体を形成するので、これを用いてリポソーム中に十分

な濃度で任意のDNAシグナルを入力することが期待できる。さらに、DNA増幅回路が導入できればDNAシグナルを等温下で30分以内に1000倍以上増幅することが可能であり、時間差で異なるDNAシグナルを増幅することも期待できる。以上のように、この項目は計画通りに達成することができた。

■分子センサーの研究開発（研究項目A01）

分子ロボットに「感覚」を持たせるため、一分子レベルでの「検出」、「増幅」、「変換」機能をもつ分子デバイスを開発することを目的とした。DNAオリガミやRNAナノ構造を用いることで、一定のノイズ存在下でセンシング対象となる複数の分子を多元的に検出し、知能班の開発する情報処理システムへの入力情報を提供することを目指した。感覚班では、この目的に沿って分子ロボットの感覚を実現するセンサーの開発に取り組んだ。DNAオリガミを活用して、膜外で二つのパーツが結合すると膜内にシグナルを伝達する人工DNAレセプターに加えて、膜面上で格子集合体を形成する十字型DNA構造体を開発した。後者は、リポソーム膜面上へのセンシングデバイス埋め込み技術として活用することができる。また、感覚班の目標である「一定のノイズ存在下でセンシング対象となる複数の分子を多元的に検出」する分子デバイスの開発に関しては、DNA、マイクロRNA、タンパク質といった複数の入力分子を人工DNAオリガミ/RNAナノ構造体で検知し、その情報をシグナル増幅することに成功した。さらに当初の研究計画にはなかったが、RNAナノ構造体デバイスが生きた細胞の内外環境という、様々な生体分子が混在する強いノイズの下で機能するか検討した結果、がん細胞の表面環境（抗原）を検知するRNAナノデバイス(Osada E, *ACS Nano*, 2014), iPS細胞やがん細胞で活性化するマイクロRNAを検知し、これらの細胞の運命を制御するデバイス(Miki K, *Cell Stem Cell*, 2015, Wroblewska L, *Nature Biotechnology*, 2015), がん細胞やiPS細胞に内在するタンパク質を検知し、駆動する人工RNAデバイス(Kawasaki S, *Nucleic Acid Res.*, 2017, Shibata T, *Nature Communications*, 審査中)の開発に成功した。以上のように、研究計画以上の顕著な成果をあげることができた。

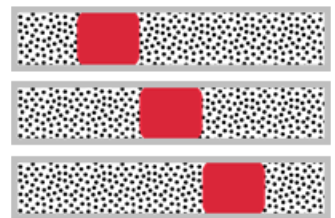


!!細胞内外でシグナルを検知する機能するRNAナノ構造体の構築!

がん細胞の表面環境（抗原）を検知するRNAナノデバイス(Osada E, *ACS Nano*, 2014), iPS細胞やがん細胞で活性化するマイクロRNAを検知し、これらの細胞の運命を制御するデバイス(Miki K, *Cell Stem Cell*, 2015, Wroblewska L, *Nature Biotechnology*, 2015), がん細胞やiPS細胞に内在するタンパク質を検知し、駆動する人工RNAデバイス(Kawasaki S, *Nucleic Acid Res.*, 2017, Shibata T, *Nature Communications*, 審査中)の開発に成功した。以上のように、研究計画以上の顕著な成果をあげることができた。

■分子アクチュエータの研究開発（研究項目C01, D01）

アメーバ班ではアメーバ型プロトタイプを開発する一方で、分子運動アクチュエータの高度化にも取り組み、リポソーム表面に結合した光応答性ペプチドが切断され重合することにより並進するリポソームや、光によってアクチン繊維が捕食動作を行うリポソームを創出した。さらに、DNAナノ技術を用いてアクチュエータを高度化することにより、DNAで制御可能な微小管の分子集団運動(Inoue D, *Nature Comm.*, 2016)や微小管の凝集による人工筋肉プロトタイプを実現する段階にまで至った。



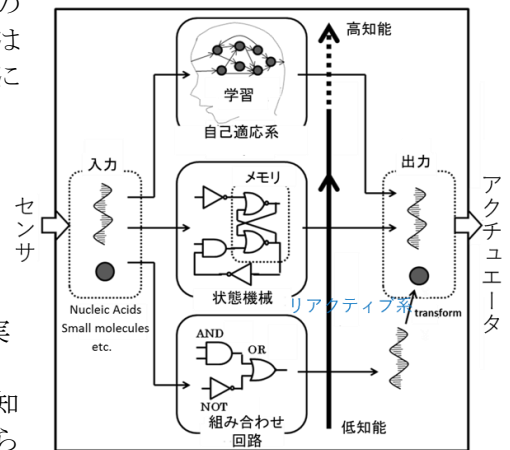
一次元ゾル空間中を移動するゲル

一方、スライム班では「動くゲル」を目指して各種のゲルアクチュエータの開発を行った。たとえば、触媒として安価なフェロインを用いる新規BZ反応駆動ポリマーゲルを開発した。さらに、一次元反応拡散場におけるゲルゾル相転移を、DNAコンピューティングを用いて制御することにより、ゲル塊を一次元的に移動させることに成功した（上右図）。これは反応拡散場による分子ロボットのスケール拡大というスライム班の研究方向に沿ったものであり、「動くDNAゲル」を実現するというスライム班の短期目標を達成することにもなった。以上のように、この項目は全体として計画通りの達成があり、特に人工筋肉プロトタイプにおいて計画以上の達成があった。

■分子コンピュータの研究開発（研究項目B01）

分子ロボットの「知能中枢」となる、核酸反応をベースとした情報処理システムを構築することを目的とした。このために、高速かつ安定に動作する基本演算素子を開発するとともに、過去の状態を記憶するメモリ素子と、現在の入力情報と記憶に基づいて次の状態を決定する計算機構（オートマトン）を実現することを目指した。

以上の目的を達成するため、知能班を中心に分子ロボットの知能に関する研究を行った。分子ロボットの知能は、センサーから入った情報を処理してアクチュエータを制御する化学反応回路



分子ロボットの知能

により実現される。前項の図の下から上に向かって描かれているように、単純な組み合わせ回路から始めて、環境に連続的に応答するリアクティブな回路、さらに状態やクロックを有する回路（オートマトン）の開発を行い (Hagiya M, *TCS*, 2016), 最終的に学習や適応の能力を有する回路の研究を進めた。

組み合わせ回路の実装では DNA の光架橋反応によって 20 倍以上の高速化を達成した。また、30 分で 1000 倍の増幅を行う等温回路は、複数の出力シグナルを時間差で生成する回路に発展した。さらに、微小管が織りなす分子集団運動を実時間で可視化するシミュレーションシステムを開発した。

以上に加えて実装技術における成果としては、スライム班による人工核酸系の開発が特筆に価する。DNA と独立に（クロストークなしに）稼働する化学反応回路を実現するとともに、DNA と相互作用する人工核酸の創製にも成功した。

化学反応による学習や適応の可能性に関しては、自己強化系と呼ぶ仮想的な反応系の研究を進めクラスタリングや経路探索などが行えることを示した。さらにより高い知能の可能性を探求するために、分子ロボットの群による集団的な知能（群知能）の計算モデルに関する研究を進めた。特に、オートマトンとして振る舞うゲルのカプセルやビーズが格子状に多数集合した分散計算モデル「ゲルオートマトン」の提案とその理論的な解析を行った。以下で述べるようにスライム型プロトタイプは、このゲルオートマトンを制御アーキテクチャとして開発された。一方、アメーバ班では、微小管の分子集団運動が発現する空間パターンを解析するために、分子集団運動の数理モデルを構築した。数理モデルのシミュレーションを GPU によって高速化する技術も併せて開発し、実時間の可視化が可能となった (Gutmann G, *NGC*, 2017)。

以上で述べた各種の計算モデルを包含する普遍的な分散計算モデルに関する研究も進めた (Fujinaga N, *SIAM*, 2015)。特に、群の中の分子ロボットの状態の有無および匿名性と群の計算能力に関する理論的な知見を得た。また、分子ロボットによる群知能と通常のロボット・群ロボットとの間の本質的に差異に関する情報学的な考察を進め、分子ロボットの世界においては、環境・情報・ロボットが三位一体となるという考え方に到達した。これは将来的に分子ロボットが工学上のパラダイムシフトを起こすことを示唆している。

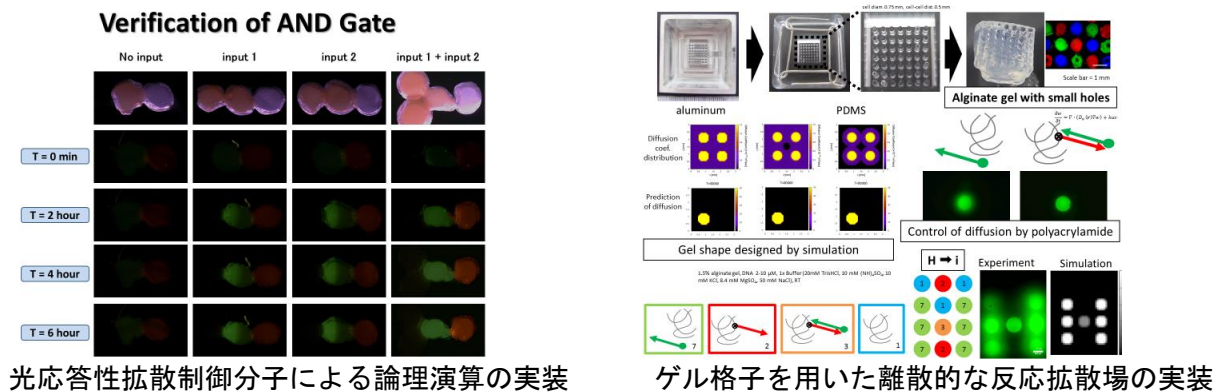
以上のように、実装から理論に亘る諸研究を通して、この項目は計画通りに達成できた。なお、人工核酸の研究は計画以上のものである。

■スライム型ロボットのための基盤技術の開発（研究項目D01）

分子アクチュエータの項で述べたように、ゲルゾル相転移を、DNA コンピューティングを用いて制御することにより「動くゲル」を実現することに成功した。また、二次元のゲル反応拡散場を制御することも試み、ポロノイ図などの空間パターンを形成した。このように、高分子ゲルを素材として反応場をスケールアップし、単純な動きやパターンを実現することはできた。しかし、スライム型分子ロボットとして、非均質な時空間的發展の中でさまざまな分子デバイス群を動作させるためには、ゲルゾル空間中で複雑な時空間パターンをプログラムできなければならない。これは「考えるゲル」を実現することに相当する。

そこでスライム班では「動くゲル」の次のステップとして「考えるゲル」の実現を目指し、ゲルゾル空間を離散化する研究を進めた。これは、連続場のプログラムは難解であると同時に汎用性に欠けると判断したからである。（この研究方向については中間評価の際に報告し一定の評価を得ている。）そこで、スライム型の制御アーキテクチャとして「ゲルオートマトン」を提案し、上述したように理論モデルにより計算万能性などを確認するとともに、実装モデルの開発をいくつかのスケールで並行して進めた。マイクロゲルビーズ間の通信、ミリスケールゲルカプセルへの実装などの成果が得られ、さらにサブミリ、ミクロナスケールのシステムについても実装技術の開発が進んだ。

下左図のように、DNA 反応回路を封入したミリスケールゲルカプセルを接触させ、DNA 分子を拡散させることによって論理ゲートを実現した。また、下右図のようにゲル上に作成したサブミリスケールの小孔に多種の DNA 反応回路を封入することにより、時空間パターンをプログラムすることに成功した。これらの研究を総じてこの項目は計画通りに達成できた。



3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1 ページ以内）

研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するために講じた対応策等について具体的に記述してください。また、組織変更を行った場合は、変更による効果についても記述してください。

問題点1：システム化に向けた問題意識をどう共有するか

対策：本領域は、理論系から実験系まで、多種多様なバックグラウンドをもつ研究者から組織されているため、それぞれがもつ分子ロボットのイメージがバラバラであり、問題意識の統一を図る必要があった。そこで、**領域代表のリーダーシップ**の下で、分子ロボティクスの意義、特にシステム化の重要性が繰り返し説かれ、問題意識・目的意識がメンバー全員によく共有されるに至った。

問題点2：全国に分散した研究組織をどう統一するか

対策：総括班の小長谷が、東工大の田町キャンパスにオフィスおよび実験スペース（3単位）を確保し、これを**新学術領域「分子ロボティクス」田町オフィス**として各種の班会議、学会、講習会の場所として運用した。さらに、主要メンバーに**TV会議システム**を導入して総括班会議を隔週で（3年目からは毎週定時に）行い、諸問題に対するタイムリーな対応を可能とした。この体制により、研究進捗等に問題が生じた場合には、関係者を含む拡大総括班会議を開催し、ボトルネック解消にあたることができた。

総括班メンバーにより、それぞれ担当の計画班および公募班メンバーをすべて訪問する**サイトビジット**を実施した。これにより個々の研究者の研究環境や研究リソースを把握することができ、また領域内の他の研究者を紹介して共同研究を促すなど、人的ネットワーク構築に大きな効果があった。

問題点3：ノウハウや素材をどう共有するか

対策：総括班の主導により、システム化の鍵となる、実験プロトコルのようなノウハウや、特殊な合成分子などの素材を、領域内で共有化することに努めた。ノウハウの共有としては、たとえば、アメーバ型分子ロボットのボディとなるリポソームの作製方法がある。領域発足時は、研究者ごとに異なるプロトコルを用いてリポソームを作製していたが、システム化を進める上では、プロトコルを統一したうえで、それを改良していく必要がある。そこで、アメーバ型分子ロボに最も適した作製法として、公募班の豊田らにより開発された遠心沈降法を採用し、**リポソーム作製技術の講習会**（ブートキャンプ）を実施してノウハウを共有した。結果として、ここからさまざまな研究が進展した。リポソームに高濃度かつ多種類の分子種を封入する技術はアメーバ型分子ロボットの開発に本質的な貢献をなすとともに、計画班の瀧口らの光によるアクチン分子モーターの繰り返し収縮などの全く新しい現象の発見に結び付いた。このほか、瀧ノ上のマイクロゲルビーズ作製技術や、DNA オリガミの設計技術などについても、領域内で共有されるか、その技術を得意とする研究者と協力できる体制がつけられた。

素材の共有としては、計画班の浅沼や藤本らの開発した光応答人工塩基や、計画班の松浦らの機能性ペプチド、計画班の葛谷による修飾核酸等の**分子ライブラリ**も広く領域内に提供され、これらの分子がアメーバ型、スライム型ロボットの要素技術として組み込まれた。また、公募班の川野が開発した人工膜を用いた**分子チャネルの微細電流測定法**は、多くのメンバーにより導入され、川野をハブとして、多数の共同研究が行われるに至った。公募班の根本らは、この技術を用いて膜チャネル機能をもつペプチドを発見し、ベンチャー企業を設立した。

組織の変更とその効果について

発足当初、各研究班が有機的に連携するための組織編成として、システム化に際して、特に班間で協力することが必要な下記の項目について、あえて当該項目の担当者を協力先の計画班に配置した。

○感覚班⇔知能班：一分子レベルの感覚信号を DNA 分子回路で処理できる濃度まで増幅する技術開発。

○感覚班⇔アメーバ班：膜面を介した分子入力デバイスの技術開発。

○知能班⇔アメーバ班：DNA 分子回路の出力最終段で、分子モーター群を駆動するに十分な濃度の分子を出力する技術開発。

○感覚班⇔スライム班：ゲル中に分子回路系を実装・保持する技術開発。

しかし、実際に研究を始めてみると、必ずしも期待したシナジー効果の出ないものもあり、本来所属すべき研究班に所属を変更した。具体的には、感覚班の鈴木（抽象反応系の理論）を知能班に移したのと、知能班の原（高分子化学）をスライム班に移したのがこれにあたる。変更後に、鈴木はNASA との共同研究に発展する成果を得、原は、高分子ゲルパターンニングで将来につながる成果を出すなど、組織変更の効果があった。

4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況（2 ページ以内）

審査結果の所見及び中間評価において指摘を受けた事項があった場合には、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。

<審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況>

採択時審査所見は以下のようなものであった。【本研究領域は、情報工学および科学の研究者が集合し、ロボット工学の方法論を取り入れて、分子系をシステム化し、従来の方法論では達成しえない人工分子システムである分子ロボットの実現を目指している。次世代機能性化学材料の観点から、今後の画期的な進展が期待される内容であり、学問上も、重要性があると評価できる。分子デバイス、分子ロボティクスを推進する潮流は世界的に高まっており、本提案は時宜を得た提案である。日本において分子デバイスは化学、ナノサイエンスなどそれぞれの分野において発展しつつあるが、先導的な概念と気鋭の研究者が集結することによって、波及性の高い新たな学問分野に発展させることが望まれる。】

以上の所見に対応するために、発足後すぐに具体的な短期目標を設定し、メンバーの目的意識を統一するとともに、活発な班内、班間連携ができるようなネットワーク構築を行った。また総括班メンバーにより全研究者のサイトビジットを実施し、研究リソース、ポテンシャルを把握し、必要な支援や連携の示唆を行った。

<中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況>

■システム統合化について

本新学術領域は、個別の材料やデバイスを統合してシステムとして組み上げることに重点を置いておいている。中間評価の段階では、材料やデバイスの開発は順調に進んでいたものの、統合化への進捗は遅く、中間評価においてもその点に関連する指摘をいただいた。具体的には領域全体に対しては【従来の研究体制から出られない『知能』『感覚』班と、集積型のアメーバ、スライム班の連携をどう展開し、目的とする分子センサーロボットの構築を図るか本研究領域の見せ場である。】というコメントがあった。また、アメーバ班に対してはさらに【本新学術研究領域の目玉とも言える班である。アメーバ型ロボットの構築を目指している。（中略）プロトタイプ分子ロボット実現のために今後一層の努力を期待したい。】というコメントがあった。

以上のコメントに応えるため、統合化に向けて組織的に対応することにより、技術的な課題を解決する努力を重ねた。具体的には、平成 26 年度後半から平成 27 年度にかけて、アメーバ班を中心に、本領域全体の研究者が参加するミーティングを頻繁に開催して、アメーバ型分子ロボットに本領域全体の技術を統合するための技術的な調整を進めた。ミーティングには TV 会議を活用し、関係する研究者が漏れなく参加できるようにした。技術的な課題の大きなものとして、分子デバイスごとにバッファー条件が異なることがあった。この課題は一朝一夕に解決できるものではないが、各分子デバイスの稼働条件を少しずつ歩みよらせて、部品となるすべての分子デバイスが稼働できる条件を求めた。

最終的に、研究領域の設定目的の達成度において述べたように、アメーバ型プロトタイプの開発に成功した。

■感覚班のセンサーの活用について

感覚班に対しては【班内の基盤技術の質の高さは認められるが、これをどのように全体でボトムアップで研究して行くのか、まとめあげるかを明確にする必要がある。RNA ナノ構造体、人工レセプターなどどうまくアメーバ、スライム班と呼応することを期待する。】というコメントがあった。これに応えるため、人工レセプターをアメーバ型ロボットに組み込むための研究を進めた。

■システム統合化に向けた領域運営について

新領域内の共同研究を効果的に推進することによってシステム統合化を達成するためには、各研究室の活動を詳細に把握しておく必要がある。領域全体に対して【ラボビジットは手間がかかると思われるが、どのように領域研究を推進するうえで有効であるのかを明らかにして頂きたい。】とコメントがあったが、ラボビジットで各研究室のポテンシャル（現在取り組んでいる研究テーマ、スタッフや学生の数、所有設備、予算等）を事前に把握したことで、総括班から関連研究者を紹介するなど、領域内の研究者ネットワ

ークづくりが行えたことや、システム化のボトルネック解消についても、適切な布陣で取り組むことができたなど、大きな効果があり、当領域にとっては必須であったと考える。

総じて【何らかの分子ロボットと言えるものに到達してほしく、また期待している.】との領域全体へのコメントに答えるべく、全領域が一丸となってアメーバ型分子ロボットの開発を進めた。上述したように、微小管とリポソームの着脱を DNA コンピューティングで制御することに成功し、アメーバ型プロトタイプを実現することができた。

■スライム班の研究方向について

スライム班には、ゲルオートマトンに関して【報告書にあるように、隔壁のゾル化は出来てもゲル化は難しいとの結論を得ている。それによって方向性を少し変えて挑戦中であるが、最終的な結論に足るには少し時間が必要と理解した。困難な問題の解決に向けており、大きな成果を期待したい.】というコメントがあった。このコメントはスライム班の研究方向の変更に一定の評価を与えるものと解釈し、ゲルオートマトンの研究を推進した。特にこのコメントに答えるため、隔壁のゾル化とゲル化によらずに、拡散に基づく実装技術の開発を進め、実際にミリスケールのゲルカプセルとサブミリスケールの小孔による実装が大きく進展した。またスライム班は、ゲルゾル相転移によりゲル塊を一次元的に移動させるという短期目標を達成することにも成功した。こうしたスライム班の一連の研究を通して、分子ロボットとは何かという問題を深く考えることになり、環境-情報媒体-ロボットを統一的な分子システムとして見るという新しいロボティクスの視点を得るに至った。

■知能班の進捗の遅れについて

知能班に対しては進捗の遅れが指摘され、短期目標（高速反応演算素子の開発および 1000 倍の高濃度化を達成する増幅回路の実装）に関する報告書の記載も明確でないとのコメントがあった。確かに、中間報告書の記載が明確ではないところがあり、これが誤解を生んだと考えられる。研究領域の設定目的の達成度において述べたように、実際には、この時既に DNA 反応の高速化も 1000 倍の増幅も達成していた。中間評価以後も、知能班では分子ロボットの知能のさらなる高度化に挑戦した。

5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）[研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理する]

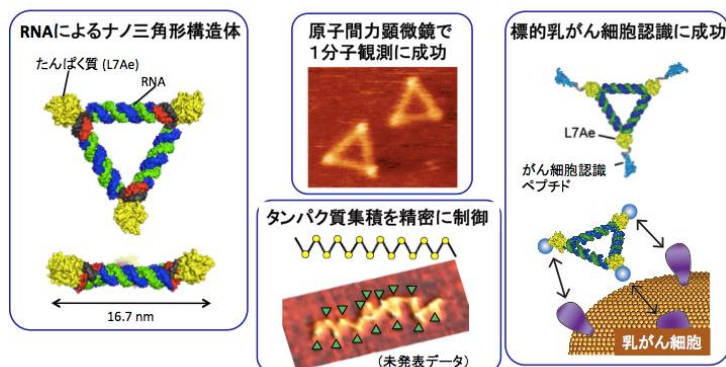
（3 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

■A01 感覚班：核酸ナノ構造を活用した多元分子情報変換デバイスの創成

A01 計画齊藤・遠藤 細胞内外の生体分子シグナルを検知する機能性 RNA ナノデバイスの構築：感覚班代表者の齊藤は、細胞内外の環境を検知して作動する RNA 型分子ロボットの構築を行い、細胞内でタンパク質やマイクロ RNA の情報を検知してその運命を制御できる RNA ナノデバイスの開発に成功した。

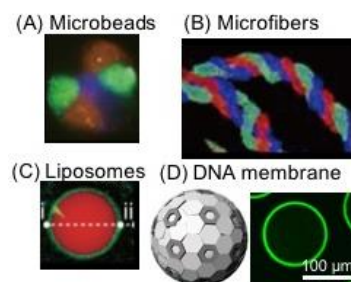
この RNA ナノデバイスは、細胞内シグナルをナノサイズの距離に集積することで、細胞運命を精密に制御できる。さらに、iPS 細胞や標的細胞内の環境を検知して、その内部状態に応じて特異的に機能する RNA ナノデバイスの開発にも成功した。すなわち、生きた細胞内で感覚シグナルを検知し、作動する RNA 型分子ロボットのプロトタイプが創出できた。このように細胞内外で機能する RNA 分子ロボットは、再生医療や分子治療など、今後様々な応用が期待できる。



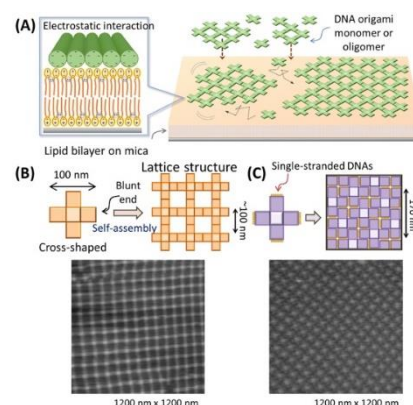
ACS Nano., 2014.)

RNA-タンパクナノ構造体によるがん細胞検知

A01 計画瀧ノ上・C01 公募柳澤 感覚を搭載するための分子ロボットのボディの構築：分子ロボットの自律的な運動や環境情報のセンシングには、空間的に非対称なボディやボディ界面への機能性分子の集積が重要であるため、マイクロサイズで非対称な構造を生成する手法を開発した。具体的には、プロペラ型マイクロゲル粒子、鞭毛様らせんファイバー、人工細胞膜小胞（リポソーム）を構築した。また、膜自体を DNA オリガミで構築した細胞型の DNA 分子ロボットの開発も行った。リポソーム内でのタンパク質合成反応、AFM 画像の取得、カプセルの界面張力物性、孔のイオン電流計測など様々な実験に関して計画班および複数の公募班とのメンバーとの協力により実現できた。（右図. (A) 非対称マイクロビーズ (Sci. Rep., 2016). (B) らせんマイクロファイバー (Soft Matter, 2017, 表紙). (C) 内外非対称膜リポソーム (ChemBioChem, 2015). (D) DNA 膜カプセル (Proc. microTAS, 2016, PNAS Accepted).)



A01 計画遠藤・B01 計画野村他 脂質二重膜上での DNA オリガミ構造体の自己集合：本研究では、DNA オリガミ構造体の集合と解離を脂質二重膜上で高速 AFM によって動的に可視化した。自己集合によってマイクロメートルサイズの格子集合体を作製でき、配向がそろった格子集合体に成長する様子が観察された。また、十字構造、三角形や六角形のオリガミ構造体を用いてパッキングによる規則的な集合体が形成された。本研究で開発した方法は、様々な DNA 構造体の 2 次元結晶化などに応用も可能であり、脂質膜からなる分子ロボットの表面にも展開可能である。（右図. (A) マイカ上に展開した脂質二重膜上での DNA オリガミ構造体の自己集合. (B) 十字型 DNA オリガミの格子構造への自己集合. (C) パッキングによる十字型の集合体. Nature Commun., 2015.)

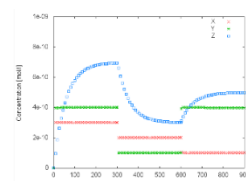


■B01 知能班：知能分子ロボット実現に向けた化学反応回路の設計と構築

B01 計画小林・A01 計画鈴木 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。なお、知能班の鈴木は、この研究を NASA Astrobiology Institute との共同研究に発展させている。

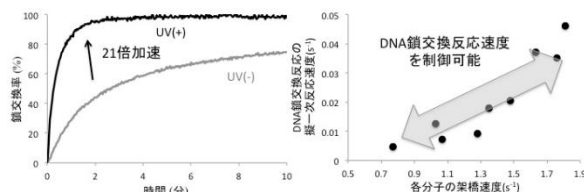
B01 計画小宮・C01 計画野村他 分子ロボットのセンサーと知能、知能とアクチュエータの間をつなぐインターフェースとして、分子濃度ギャップを克服するための DNA シグナル増幅回路を設計した。具体的には、DNA ポリメラーゼ伸長反応と制限酵素を用いた多段階状態遷移機構を利用して、濃度ギャップを克服する高速な増幅回路を構築した。その結果、30分で1000倍の増幅に成功した（論文執筆中）。この成果は、センサー班、アメーバ班とのプロトタイプ構築に大きく貢献した。

定数ゲートを入力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

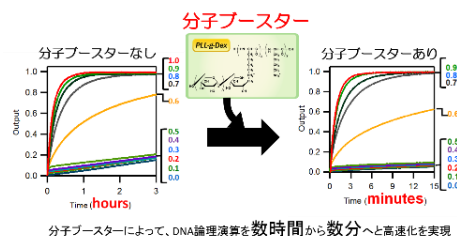


B01 計画小林・D01 計画萩谷他 分子ロボットを制御する分子コンピュータに要求される特性として、リアクティブ性、状態をもつこと、ハイブリッド性、永続性が重要であることを議論した（TCS, 2016）。特に、リアクティブ性をもつアナログ回路を設計する方法論を考案した（WSSR, 2014）。また、その結果、テイラー展開で近似可能な関数であれば、その関数値の正負で分類するタスクをアナログ回路を用いて近似的に実装できることを理論的に示した（論文執筆中）。

B01 計画藤本・小林 DNA 鎖交換反応は化学反応回路の構築に必須の反応であるが、その反応速度のボトルネックは多段階の平衡反応を含むブランチマ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-シアノビニルカルバゾール(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し高速化する方法を考案した。FRET を用い反応を追跡したところ、DNA 鎖交換反応を 21 倍加速できることを見出した。さらに、光架橋反応を変化させることにより鎖交換速度を制御できることを見出した。本研究は、藤本と小林により特許申請に至っている（特願 2013-133163）。



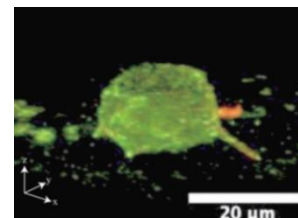
B01 公募嶋田・B01 計画小林 ポリリシンにデキストランをグラフトさせたカチオン性グラフト高分子分子ブースターを用いることで、DNA 論理ゲートの高速化を試みた。DNA 論理ゲートに使われている素反応である toehold 伸介型 DNA 鎖交換反応に対して、分子ブースターを添加したところ、60 倍の加速効果を示した。実際に Winfree らによって報告されている DNA 閾値ゲートに対して分子ブースターを添加したところ、数時間必要であった演算を僅か数分で完了させることができた（論文執筆中）。



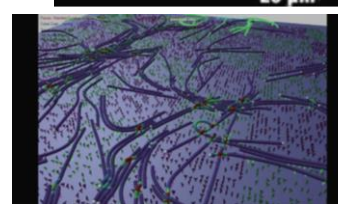
B01 公募中茎・D01 計画村田 分子ロボットの制御システムの設計論を構築するため、対象とする DNA 鎖の濃度を指定した濃度に制御する問題に取り組んだ。比較器をベースとした制御器に増幅器を組み合わせることにより、制御目標が達成されることを理論とシミュレーションにより示した。（SICE J, 2015）

■C01 アメーバ班：アメーバ型分子ロボット実現のための要素技術開発とその統合

C01 野村・平塚他・D01 公募豊田 光刺激によりリポソームの変形を動的に制御できるアメーバ型プロトタイプを開発した。（Science Robotics, 2017, 野村他）。リポソーム内に生体分子を高密度で封入し、外界からの刺激を感知し、DNA コンピュータで運動を制御するというアメーバ型分子ロボットの基本コンセプトが実現可能であることを実証した。本研究はアメーバ班を中心に感覚班、知能班、スライム班が持つそれぞれの要素技術を統合した。

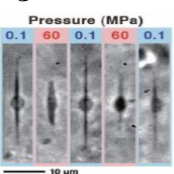
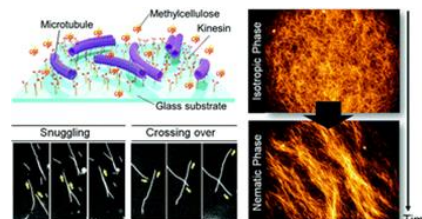


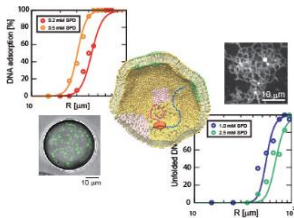
C01 小長谷・角五・C01 公募上野 複数の汎用グラフィックプロセッサを用いて微小管集団が織りなす運動パターン創発に成功した（New Generation Computing, 2017, Konagaya）。微小管などの生体分子を粒子の列として表現し、粒子間の相互作用をレナードジョーンズポテンシャルで計算することで、リング形成を創発した。このことは、分子ロボットの設計に必要な大規模分子間相互作用を実時間で可視化シミュレーションすることができることを示唆している。



C01 瀧口・C01 公募豊田 微小管を高密度に封入したリポソームの水圧を変えることで突起の長短を繰り返し変形させることに成功した（Langmuir, 2016, Takiguchi）。高圧力（60MPa）では数十秒の間に微小管が崩壊し、標準気圧相当（0.1MPa）で突起が短くなり、減圧すると元の形状に復元した。この過程は繰り返し行なえ、微小管の重合脱重合による分子ロボット運動が実現可能であることを示唆している。

C01 瀧口・小長谷・野村 微小管滑走運動においては微小管同士の反発力により独立に運動するため、通常はランダムな動きとなる。メチルセルロースや PEG 等をリンカーとして導入することで、多数の微小管が集合し、ストリーム状に集団運動を行うことを実証した（RSC Advance, 2017, Kakugo）。





C01 公募濱田 リポソーム内に DNA を封入し, DNA 分子が膜への吸着・脱吸着やフォールディング・案フォールディング 状態を変化させることでリポソーム構造ダイナミクスを変化させることに成功した (*Physical Review E*, 2015, Hamada). さらに, 膜面への分子モータの装着を行い, 流動性のある膜上における微小管の運動解析を行ない, DNA を用いてリポソーム構造ダイナミクスが操作可能であることを実証した.

C01 公募下川 粗視化シミュレーションの荷電不飽和脂質と中性飽和脂質の組み合わせによる膜孔の自発的な形成実験結果を再現することに成功した (*Physical Review E*, 2016, Shimokawa). 実験では観察できなかった荷電脂質が膜孔の縁に局在し安定化する機構をシミュレーションで解明できることを示唆している.

■D01 スライム班：構造化ゲルと化学反応場の協働による運動創発

D01 計画有村 「動くゲル」として, フェロインを触媒とする BZ ポリマーゲルを開発し, キャピラリー内に充填した BZ ゲルの振動的な収縮により 1 次元クリープ運動を取出すことに成功した (*Chem.Comm.*, 2014).

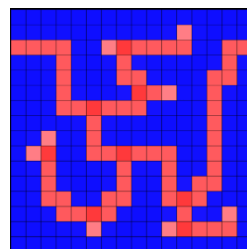
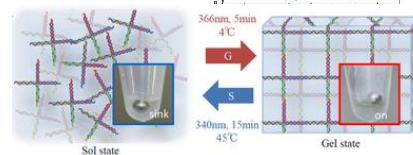
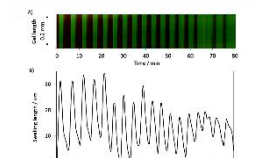
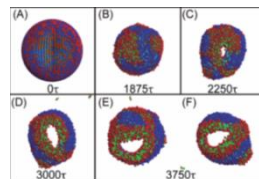
D01 計画村田 B01 計画藤本 「動くゲル」として, 知能班の藤本の光応答塩基をもちいたゲルモチーフを設計し, 波長の異なる UV 光を交互に照射することで, 繰り返しゲルゾル相転移が可能な DNA ゲルを開発した (*ChemBioChem.*, 2016).

D01 計画萩谷・菅原・村田・D01 公募磯川・B01 公募大下 「考えるゲル」の基盤として, 離散化ゲル空間の反応拡散場を定式化し, 状態が離散化した反応セルごとに自然に離散化する条件を求めた (*New Generation Computing*, 2017). さらに, 反応拡散による計算場の計算能力を調べ, 万能性を確認した (*UCNC*, 2016, *AUTOMATA*, 2017). これらの研究により連続反応場で, 離散的時空間演算をプログラムするゲルオートマトンの理論的基盤が確立した.

D01 計画浅沼 DNA の分子構造のうち, バックボーンあたる部分を改変することにより, 核酸様の相補配列認識能力を持ちながら, DNA とはハイブリダイズしない人工核酸を開発した. これを用いることにより, 従来の分子計算システムと共存し, かつ互いに相互作用のない直交計算システムが可能となる (*Chem.Comm.*, 2015).

D01 計画菅原・D01 公募清水 単純なダイナミクスを組み込んだ群ロボットの集団的な振る舞いについて検討し, 集団の一部のロボットや壊れているロボットを環境変化に活用することで集団としての合理的な行動ができる仕組みを提案した. このことからロボットとロボットの置かれた環境, またそれらの間の情報のやり取りを同等に考える新しいロボティクス観が導かれた (論文準備中).

D01 公募澤井 生物粘菌の運動観察実験の知見に基づき, 細胞群レベルの意思決定機構の設計原理を提案した (*PLoS Comp. Biol.*, 2013).



6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

- 論文の場合、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に*印を付してください。
- 別添の「(2) 発表論文」の融合研究論文として整理した論文については、冒頭に◎を付してください。
- 補助条件に定められたとおり、本研究課題に係り交付を受けて行った研究の成果であることを表示したもの（論文等の場合は謝辞に課題番号を含め記載したもの）について記載したものについては、冒頭に▲を付してください（前項と重複する場合は、「◎▲・・・」と記載してください。）。
- 一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

■X01 総括班：分子ロボティクスの支援と広報（査読有 2 件、査読無 0 件）

ポジションペーパー 総括班メンバーにより分子ロボティクスの概念や進展をまとめた論文を出版した。

◎▲Murata S, Konagaya A, Kobayashi S, Saito H, *Hagiya M. Molecular Robotics: A New Paradigm for Artifacts, *New Generation Computing*, **31**, 27-45, 2013.

◎▲Hagiya M, Konagaya A, Kobayashi S, Saito H, *Murata S. Molecular robots with sensors and intelligence. *Accounts Chemical Research*, **47**, 6, 1681-1690. 2014.

領域会議および公開シンポジウム 領域メンバー全員の出席する領域会議を計 9 回行った（2012 年 9 月 10 日、12 月 15-16 日、2013 年 4 月 13 日、5 月 25-26 日、8 月 24-25 日、2014 年 3 月 14-16 日、2015 年 3 月 10-12 日、2016 年 3 月 14-16 日、2017 年 3 月 11-13 日）。新学術領域分子ロボティクス公開シンポジウム（CBI 学会と共催）を年 1 回、10 月頃に東京船堀タワーホールで開催した。また、2017 年 7 月 15 日には東京で最終公開シンポジウムを開催する予定である。

主催シンポジウム等 分子ロボティクス研究会を計 19 回開催した（2013 年 2, 4, 6, 7 月、2014 年 1, 4, 5, 6, 12 月、2015 年 1, 5, 6, 7, 12 月、2016 年 1, 5, 6, 7 月、2017 年 1 月）。このほか、IEEE-NEMS2016（2016 年 4 月 18 日、松島大観荘）、および DNA20（2014 年 9 月 26 日、京都大学）において、国際公開シンポジウム International Symposium on Molecular Robotics を主催した。IWNC2016（秋田国際大学）でも国際シンポジウムを開催した。生命医薬情報学連合大会(2012 年 10 月 25 日)、日本生物物理学会（新学術分子ロボティクスシンポジウム 2013 年 10 月 28-30 日、2014 年 9 月 27 日）、細胞を創る研究会、人工知能学会（SIGMBI）等においても、企画シンポジウムを多数開催した。このほか分子ロボティクス若手の会も活動をはじめている（2015 年 6 月 5 日、8 月 1 日、2016 年 2 月 20 日、8 月 20 日）。

ホームページ 新学術領域「分子ロボティクス」HP (<http://www.molbot.org>) を設け、領域で得られた成果、研究会等のお知らせ、トピックスなど、最新情報を広く発信しつづけている。

ニュースレター 一般の方、大学研究者、官公庁、企業向けの情報発信として、年 4 回のペースでニュースレターを発行した（1～21 号まで）。ニュースレターは領域ホームページでも閲覧可能である。

アウトリーチ活動 2011 年から年一回開催されている学部学生を対象とする国際生体分子デザインコンペティション (BIOMOD) の支援を行っている。この大会には、毎年日本から 5 チーム前後が参加しており、領域メンバーのオーガナイズで国内予選を主催するなど、積極的にコミットしている。高校生を対象とした講習会、ひらめき☆ときめきサイエンス「DNA オリガミを作って遊ぼう」を毎年田町オフィスで実施し、好評を博している（2015 年 8 月 7 日、2016 年 8 月 5 日）。また、最終年度には、一般誌「現代化学」誌上で、DNA ナノテク・分子ロボティクスの連載解説を行った。このほか、企業向けには、MEMS 展、ナノ・マイクロビジネス展などに毎年ブースを出展し、領域の成果をアピールした（ナノ・マイクロビジネス展：2013 年 7 月 3-5 日、2014 年 4 月 23-25 日、2015 年 4 月 22-24 日、ナノテクノロジー EXPO2016：2016 年 1 月 27-29 日、MEMS 展：2016 年 9 月 14-16 日）。

■A01 感覚班：核酸ナノ構造を活用した多元分子情報変換デバイスの創成

計画班論文（査読有 71 件、査読無 6 件）

◎▲Yasuda S, Hayakawa M, Onoe H, *Takinoue M. Twisting microfluidics in a planetary centrifuge, *Soft Matter*, **13**(11), 2141-2147 (2017). (論文誌表紙でハイライト)

◎▲Ishikawa D, Suzuki Y, Kurokawa C, Ohara M, Morita M, Yanagisawa M, Kawano R, Endo M, *Takinoue M, “Self-Assembled Microcapsule of Amphiphilic Janus DNA Nanoplates at the Water-Oil Interface”, *Proc. microTAS*, 116-117, (2016). (計画班・複数の公募班との共著論文)

◎▲Endo K, Hayashi K, *Saito H. High-resolution Identification and Separation of Living Cell Types by Multiple microRNA-responsive Synthetic mRNAs. *Sci. Rep.* **6**, 21991, 2016.

◎Parr CJC, Katayama S, Miki K, Kuang Y, Yoshida Y, Morizane A, Takahashi J, Yamanaka S, *Saito H. MicroRNA-

- 302 switch to identify and eliminate undifferentiated human pluripotent stem cells, *Sci. Rep.* **6**, 32532, 2016.
- ◎▲Hayakawa M, Onoe H, Nagai KH, *Takinoue M. Complex-shaped three-dimensional multi-compartmental microparticles generated by diffusional and Marangoni microflows in centrifugally discharged droplets. *Sci. Rep.* **6**, 20793. 2016.
- ◎Wroblewska L, Kitada T, Endo K, Siciliano V, Stillo B, *Saito H, *Weiss R. Mammalian synthetic circuits with RNA binding proteins for RNA-only delivery. *Nature biotechnology.* **33**(8): 839-841. 2015.
- ◎▲Suzuki Y, *Endo M, *Sugiyama H, Lipid bilayer-supported two-dimensional self-assembly of DNA origami nanostructures. *Nature Communications*, **6**, 8052 (2015).
- ◎▲Endo M, Takeuchi Y, Suzuki Y, Emura T, Hidaka K, Wang F, Willner I, Sugiyama H. Single-Molecule Visualization of the Zn²⁺-Dependent DNAzyme Functions. *Angewandte Chemie, International Edition.* **54**: 10550-10554. 2015.
- ◎▲Endo M, Xing X, Zhou X, Emura T, Hidaka K, Tuesuwan B, Sugiyama H. Single-Molecule Manipulation of the Duplex Formation and Dissociation at the G-quadruplex/ i-motif Site in the DNA Nanostructure. *ACS Nano.*, **9**:9922-9929. 2015.
- ◎▲Morita M, Onoe H, Yanagisawa M, Ito H, Ichikawa M, Fujiwara K, Saito H, Takinoue M. Droplet-Shooting and Size-Filtration (DSSF) Method for Synthesis of Cell-Sized Liposomes with Controlled Lipid Compositions. *Chembiochem*, **16**, 2029-2035. 2015. (計画班内・複数の公募班との共著論文)
- ◎▲Yamashita H, Morita M, Sugiura H, Fujiwara K, Onoe H, *Takinoue M. Generation of Monodisperse Cell-Sized Microdroplets using a Centrifuge-Based Axisymmetric Co-Flowing Microfluidic Device. *J. Biosci. Bioeng.*, **116**, 492-495. 2015. (計画班・公募班との共著論文)
- ◎▲Osada E, Suzuki Y, Hidaka K, Ohno H, Sugiyama H, Endo M, Saito H. Engineering RNA-protein complexes with different shapes for imaging and therapeutic applications. *ACS Nano.* **8**(8):8130-40. 2014. (計画班内の共著論文)
- ◎▲Suzuki Y, *Endo M, Yang Y, *Sugiyama H, Dynamic Assembly/Disassembly Processes of Photoresponsive DNA Origami Nanostructures Directly Visualized on a Lipid Membrane Surface. *J. Am. Chem. Soc.* **136**, 1714-1717 (2014).
- ◎▲Rajendran A, *Endo M, Hidaka K, Shimada N, Maruyama A, *Sugiyama H. A lock-and-key mechanism for the controllable fabrication of DNA origami structures. *Chem Commun.*, **50**(63):8743-6. 2014. (計画・公募の共著)
- ◎Endo K, Hayashi K, *Inoue T, *Saito H. A versatile cis-acting inverter module for synthetic translational switches, *Nat. Commun.* **4**, 2393, 2013.
- 公募班論文(査読有 21 件, 査読無 19 件)
- ◎▲Ohara M, Takanoue M, *Kawano R, Nanopore Logic Operation with DNA to RNA Transcription in a Droplet System, *ACS Synth. Biol.*, in press, 2017 (DOI: 10.1021/acssynbio.7b00101). (計画班・公募班の共著論文)
- ◎▲Hiratani M, Ohara M, *Kawano R. Amplification and quantification of an antisense oligonucleotide from target microRNA using programmable DNA and a biological nanopore, *Anal Chem.* **89**(4), 2312-2317, 2017
- ◎▲Kobayashi S, Terai T, Yoshikawa Y, Ohkawa R, Ebihara M, Hayashi M, Takiguchi K, *Nemoto N. In vitro Selection of Random Peptides against Artificial Lipid Bilayers: A Potential Tool to Immobilize Molecules on Membranes, *Chem. Commun.*, **53**, 3458-3461, 2017 (計画班・公募班の共著論文)
- ◎▲*Kawano R, Horike N, Hijikata Y, Kondo M, Carné-Sánchez A, Larpent P, Ikemura S, Osaki T, Kamiya K, Kitagawa S, *Takeuchi S, *Furukawa S. Metal-organic cuboctahedra for synthetic ion channels with multiple conductance states, *Chem (Cell press)*, **2**(3), 393-403, 2017
- ◎▲Yasuga H, Kawano R, Takinoue M, Tsuji Y, Osaki T, Kamiya K, Miki N, *Takeuchi S. Logic Gate Operation by DNA Translocation through Biological Nanopores. *PLOS ONE.* **11**, e0149667. 2016. (計画・公募班の共著論文)
- ▲*Yanagisawa M, Nigorikawa S, Sakaue T, Fujiwara K, *Tokita M. Multiple patterns of polymer gels in microspheres due to the interplay among phase separation, wetting, and gelation, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **111**, 15894-15899, 2014. (複数の公募班の共著論文)

■B01 知能班：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

計画班論文(査読有 32 件, 査読無 4 件)

- ▲ *Yasuhiro Suzuki, Rie Taniguchi, Molecular Artificial Intelligence by using DNA reactions, *Proceedings of International Conference on Artificial Life and Robotics*, 591-594, 2017
- ◎▲ *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
- ◎▲ *J. A. Rose, K. Komiya, S. Kobayashi, Engineering multistate DNA molecules: a tunable thermal band-pass filter, *Micro & Nano Letters*, **11**, No. 10, 2016, pp. 595-601, DOI: 10.1049/mnl.2016.0345
- ◎▲ *J. A. Rose, K. Komiya, 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), 2016, (6 pages), DOI: 10.1109/NEMS.2016.7758205

▲ *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* (accepted).

▲ Nakamura S, Kawabata H, Fujimoto K. Sequence-specific DNA photo-splitting of 3-cyanovinylcarbazole using DNA strand displacement, *ChemBioChem*, **17**, 1499-1503, 2016. DOI:10.1002/cbic.201600236

▲ Shigetaka Nakamura, Hayato Kawabata, Hodaka Muramatsu, and *Kenzo Fujimoto, Effect of 5-substitution of uracil base in DNA photo-cross-linking using 3-cyanovinylcarbazole, *Chem. Lett.*, **45**, 2016, 887-889.

◎▲ *K. Komiya, M. Yamamura, Cascading DNA Generation Reaction for Controlling DNA Nanomachines at a Physiological Temperature, *New Generation Computing*, **33**, 3, 2015, pp. 213-229, DOI: 10.1007/s00354-015-0304-5

▲ Takashi Sakamoto, Minako Ooe and *Kenzo Fujimoto, Critical Effect of Base Pairing of Target Pyrimidine on the Inter-strand Photo-cross-linking of DNA via 3-Cyanovinylcarbazole Nucleoside, *Bioconjug. Chem.*, **26**, 2015, 1475-1478, DOI: 10.1021/acs.bioconjchem.5b00352.

▲ Shigetaka Nakamura and *Kenzo Fujimoto, Photo-cross-linking using trifluorothymidine and 3-cyanovinylcarbazole induced large shifted 19F MR signal, *Chem. Commun.*, **51**, 2015, 11765-11768, DOI: 10.1039/C5CC02972D.

▲ Takashi Sakamoto, Yuya Tanaka and *Kenzo Fujimoto, DNA Photo-cross-linking using 3-Cyanovinylcarbazole Modified Oligonucleotide with Threoninol Linker, *Org. Lett.*, **17**, 2015, 936-939, DOI:10.1021/acs.orglett.5b00035.

◎▲ *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*), 2014, 147-157, DOI: 10.1109/SRDSW.2014.7468414 招待講演.

▲ *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.*, **135**, 2013, 16161-16167, DOI: 10.1021/ja406965f.

◎ 藤本健造, 中村重孝, 橋本浩寿, 小林聡, 特許出願, 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:権利者:北陸先端科学技術大学院大学, 電気通信大学, 特願 2013-133163, 出願年月日:平成 25 年 6 月 25 日

公募班論文 (査読有 31 件, 査読無 10 件)

▲ Azuma S, Owaki K, Shinohara N, Sugie T. Performance Analysis of Chemotaxis Controllers: Which Has Better Chemotaxis Controller, Escherichia coli or Paramecium caudatum? *IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics*, **13**, No. 4, pp. 730-741. 2016. DOI:10.1109/TCBB.2015.2474397

▲ Nakakuki T, Imura J. Molecular Governor: DNA Feedback Regulator for Molecular Robotics, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, **9**(2), 60-69, 2016. DOI:10.9746/jcmsi.9.60

▲ Nakakuki T. A multifunctional controller realized by biochemical reactions, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, **8** (2), 99-107, 2015. DOI:http://doi.org/10.9746/jcmsi.8.99

▲ Shimada N, Song W, Maruyama A. DNA strand exchange reaction activated by cationic comb-type copolymers having ureido groups, *Biomater. Sci.* **2**, 1480-1485, 2014. DOI: 10.1039/c4bm00207e

■C01 アメーバ班 : アメーバ型分子ロボット実現のための要素技術開発とその統合

計画班論文 (査読有 30 件, 査読無 2 件)

◎▲ Yusuke Sato, Yuichi Hiratsuka, Ibuki Kawamata, Satoshi Murata and *Shin-ichiro M. Nomura: Micrometer-sized molecular robot changes its shape in response to signal molecules, *Science Robotics*, **2** (4), eaal3735 (2017). DOI: 10.1126/scirobotics.aal3735 (計画班間連携論文)

◎▲ Greg Gutmann, Daisuke Inoue, Akira Kakugo, *Akihiko Konagaya: Parallel Interaction Detection Algorithms for a Particle-based Live Controlled Real-time Microtubule Gliding Simulation System Accelerated by GPGPU, *J. of New Generation Computing (NGC)*, **35** (2), 157-180 (2017). DOI: 10.1007/s00354-017-0011-5

◎▲ Ito M, Kabir AMR, Islam MS, Inoue D, Wada S, Sada K, Konagaya A, *Kakugo A. Mechanical Oscillation of Dynamic Microtubule Rings, *RSC Adv.* **6**, 69149-69155 (2016). DOI: 10.1039/c6ra16613j

▲ Masahito Hayashi, Masayoshi Nishiyama, Yuki Kazayama, Taro Toyota, Yoshie Harada, *Kingo Takiguchi: Reversible Morphological Control of Tubulin-Encapsulating Giant Liposomes by Hydrostatic Pressure, *Langmuir*, **32**, 3794-3802 (2016). DOI: 10.1021/acs.langmuir.6b00799 (計画班・公募班の共著論文)

◎▲ D Inoue, T Nitta, R Kabir, K Sada, JP Gong, A Konagaya, *A Kakugo: Sensing surface mechanical deformation

using active probes driven by motor proteins, *Nature Communications*, **7**:12557, (2016)

◎▲D Inoue, B Mahmot, AMR Kabir, TI Farhana, K Tokuraku, K Sada, A Konagaya, *A Kakugo: Depletion force induced collective motion of microtubules driven by kinesin, *Nanoscale*, **7**, 18054–18061 (2015)

▲M Furutani, A Uemura, A Shigenaga, C Komiya, A Otaka, *K Matsuura: A photoinduced growth system of peptide nanofibres addressed by DNA hybridization, *Chem. Commun.*, **51**, 8020-8022 (2015).

◎▲Han Y, Hara A, Kuzuya A, Watanabe R, Ohya Y, *Konagaya A. Automatic Recognition of DNA Pliers in Atomic Force Microscopy Images. *New Generation Computing*, **33**: 253-270 (2015). DOI:10.1007/s00354-015-0305-4.

公募班論文 (査読有 47 件, 査読無 1 件)

◎▲C Kurokawa, K Fujiwara, M Morita, I Kawamata, S Murata, M Takinoue, *M Yanagisawa, DNA cytoskeleton for stabilizing artificial cells, *Proc. Nat. Ac. Sci.* (accepted). (複数の公募班および複数の計画班の共著論文)

▲*Ikeda M, Kabumoto M. Chemically Caged Nucleic Acids, *Chem. Lett*, **46**(5), 634-640 (2016).

▲*Ikeda M, Kamimura M, Hayakawa Y, Shibata A, Kitade Y. Reduction-responsive guanine incorporated into G-quadruplex-forming DNA, *ChemBioChem*. **17**, 1304-1307 (2016).

▲Okamoto R, Shimokawa N, Komura S. Nano-domain formation in charged membranes: Beyond the Debye-Huckel approximation, *Europhysics Letters*, **114**, 28002, 1-6, 2016. DOI: 10.1209/0295-5075/114/28002

▲Sakamoto T, Hasegawa D, Fujimoto K. Simultaneous detection of single-nucleotide polymorphisms in a DNA bulge structure using fluorinmodified bisbenzimidazole derivative, *Analyst*, **141**, 1214-1217 (2016). (計画班・公募班の共著論文)

▲*T. Hamada, R. Fujimoto, S. F. Shimobayashi, M. Ichikawa, *M. Takagi: Molecular behavior of DNA in a cell-sized compartment coated by lipids. *Phys. Rev. E*, **91**, 062717 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevE.91.062717

◎▲Hiroki Himeno, Hiroaki Ito, Yuji Higuchi, Tsutomu Hamada, *Naofumi Shimokawa, Masahiro Takagi: Coupling between pore formation and phase separation in charged lipid membranes, *Phys. Rev. E* **92**, 062713 (2015).

▲M Ikeda, T Tanida, T Yoshii, K Kurotani, S Onogi, K Urayama, *I Hamachi: Installing logic-gate responses to a variety of biological substances in supramolecular hydrogel–enzyme hybrids, *Nature Chemistry*, **6**, 511–518 (2014).

◎▲Shimokawa N, Himeno H, Hamada T, Takagi M, Komura S, Andelman D. Phase diagrams and ordering in charged membranes: Binary mixtures of charged and neutral lipids, *J. Physical Chemistry B*, **120**, 6358-6367 (2016).

■D01 スライム班：構造化ゲルと化学反応場の協働による運動創発

計画班論文 (査読有 48 件, 査読無 3 件)

◎▲Takabatake F, Kawamata I, Sugawara K, *Murata S. Discretization of Chemical Reactions in a Periodic Cellular Space, *New Generation Computing*, **1**-11, 2017. DOI: 10.1007/s00354-017-0009-z

◎▲Hagiya M, Aubert-Kato N, Wang S, Kobayashi S. Molecular computers for molecular robots as hybrid systems. *Theoretical Computer Science*. **632**: 4–20. 2016. DOI:10.1016/j.tcs.2015.11.002. (計画班間連携論文)

◎▲I. Kawamata, S Yoshizawa, F Takabatake, K Sugawara, S Murata, Discrete DNA Reaction-Diffusion Model for Implementing Simple Cellular Automaton, *Proc. UCNC 2016*, Manchester(UK), 2016 年 7 月 11~15 日

◎▲T. Isokawa, F. Peper, I. Kawamata, N. Matsui, S. Murata, M. Hagiya, Universal Totalistic Asynchronous Cellular Automaton and Its Possible Implementation by DNA, *Proc. UCNC 2016*, Manchester(UK), 2016 年 7 月 11~15 日

◎▲Kandatsu D, Cervantes-Salguero K, Kawamata I, Hamada S, Nomura SM, Fujimoto K, *Murata S. Reversible Gel-Sol Transition of Photo-Responsive DNA Gel, *ChemBioChem*, **17**(12), 1118–1121, 2016. (計画班間連携論文)

▲Nakasone Y, Ooi H, Kamiya Y, Asanuma H, Terazima M. Dynamics of Inter-DNA Chain Interaction of Photoresponsive DNA, *J. Am. Chem. Soc.* **138**, 9001-9004, 2016. DOI: 10.1021/jacs.6b02525

◎▲Bastakoti BP, Li Y, Imura M, Miyamoto N, Nakato T, Sasaki T, Yamauchi Y. Polymeric Micelle Assembly with Inorganic Nanosheets for Construction of Mesoporous Architectures with Crystallized Walls. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **54**: 4222-4225, 2015. DOI:10.1002/anie.201410942. PMID:25737396

◎▲Hagiya M, Aubert-Kato N, Wang S, Kobayashi S. Molecular computers for molecular robots as hybrid systems. *Theoretical Computer Science*, 2015. DOI: 10.1016/j.tcs.2015.11.002. (計画班間連携論文)

▲Murayama K, Kashida H, Asanuma H. Acyclic L-Threoninol Nucleic Acid (L-aTNA) with Suitable Structural Rigidity Cross-pairs with DNA and RNA. *Chem. Commun.*, **51**:6500-6503, 2015. DOI: 10.1039/c4cc09244a

▲Sugawara K, Doi Y. Collective Construction of Dynamic Structure Initiated by Semi-Active Blocks. *Proc. 2015 IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 428-433. 2015. DOI:10.1109/IROS.2015.7353408

◎▲Wang S, Imai K, Hagiya M. An Approach to Constructing and Simulating Block Cellular Automata by Gellular

Automata. *Third International Symposium on Computing and Networking (CANDAR)*. 442-448. 2015.

▲ Arimura T, Mukai M. Self-Oscillating Gel Actuator Driven by Ferrocene. *Chem. Communications*, **50**: 5861-5863, 2014.

◎ Aubert N, Mosca C, Fujii T, Hagiya M, Rondelez Y. Computer Assisted Design for Scaling Up Systems based on DNA Reaction Networks. *Journal of the Royal Society Interface*, **11**, 2014. PMID: 24451393 (国際共著論文)

◎ Aubert N, Rondelez Y, Fujii T, Hagiya M. Enforcing delays in DNA computing systems. *Natural Computing*. **13**: 559-572, 2014. DOI:10.1007/s11047-014-9450-9 (国際共著論文)

▲ Hara Y, Mayama H, Yamaguchi Y, Fujimoto K. Activation energy of the Belousov-Zhabotinsky reaction in a gel with Fe(bpy)₃ catalyst. *Chemistry Letters*, **43**(5): 673-675, 2014. DOI:10.1246/cl131175 計画・公募連携

▲ Kamiya Y, Asanuma H. Light-driven DNA nanomachine with a photoresponsive molecular engine. *Accounts of Chemical Research*, **47**(6): 1663-1672. 2014. PMID: 24617966

宮元展義, 山本伸也, 宮原屋淳史, 無機ナノシート分散液, 及び無機ナノシート分散液の製造方法, 特願 2014-18987, 出願日 2014 年 2 月 4 日 (国内特許).

公募班論文 (査読有 40, 査読無 22 件)

▲ Fujimoto K, Sawai S. A design principle of group-level decision making in cell populations. *PLoS Comp. Biol.* **9**(6), e1003110, 2013. DOI:10.1371/journal.pcbi.1003110

▲ Mori M, Isokawa T, Peper F, Matsui N. Swarm Networks in Brownian Environments, *New Generation Computing*, **33**(3), 297-318, 2015. DOI:10.1007/s00354-015-0303-6

◎ ▲ Isokawa T, Pepper F, Kawamata I, Matsui N, Murata S, Hagiya M. Discrete DNA Reaction-Diffusion Model for Implementing Simple Cellular Automaton, *Lecture Notes in Computer Science UCNC 2016*, 168-181, 2016. DOI:10.1007/978-3-319-41312-9_14 (計画班・公募班の共著論文)

◎ ▲ Isokawa T, Pepper F, Kawamata I, Matsui N, Murata S, Hagiya M. Universal Totalistic Asynchronous Cellular Automaton and Its Possible Implementation by DNA, *Lecture Notes in Computer Science UCNC 2016*, 182-195, 2016. DOI:10.1007/978-3-319-41312-9_15 (計画班・公募班の共著論文)

領域関係者の受賞 2016 年: 日本学術振興会賞 齋藤博英 (計画 A01), 日本化学会学術賞 松浦和則 (計画 C01), 高分子学会学術賞 角五彰 (計画 C01), 2015 年: 文部科学大臣表彰科学技術賞 藤本健造 (計画 B01), 文部科学大臣表彰若手科学者賞 池田将 (公募), 同 原雄介 (計画 D01), 高分子学会賞 浅沼浩之 (計画 D01), 2014 年度: 日本学生支援機構優秀学生顕彰大賞 橋田典子 (BIOMOD 参加学生), 2013 年度: ナイスステップな研究者 古川英光 (公募) ほか

新聞報道等 瀧口金吾 (計画 C01) 中日新聞: 人工分子伸び縮み実証 (2016 年 4 月 12 日), 野村 M. 慎一郎 (計画 C01) BS フジ: ガリレオ X 人工生命〜研究最前線 生命はどこから生命なのか? (2016 年 10 月 9 日), 川野竜司 (公募) 日経産業新聞: がん分泌物迅速検出 東京農工大が新技術 (2016 年 10 月 19 日), 小長谷明彦 (計画 C01) 日刊工業新聞: ロボ化研究日本で着々 (2016 年 10 月 31 日), 中荃 隆 (公募) 毎日新聞: ダイガク走る (2016 年 11 月 18 日), 小宮 健 (計画 B01) 日経産業新聞: マイクロ RNA 簡単検出 (2016 年 12 月 1 日), 小笠原慎治 (公募) 日経産業新聞: 遺伝子の働きを光で自在に制御 (2017 年 1 月), 小笠原慎治 (公募) 日経バイオテク: 北大の小笠原氏、光で遺伝子発現の翻訳過程を ON/OFF 制御 (2017 年 3 月 27 日), 藤本健造 (計画 B01) 東京新聞: 遺伝子配列の違いを秒単位で解析 (2015 年 10 月 16 日), 池田 将 (公募) 日本経済新聞等: 血中の病気の目印反応し溶ける (2014 年 5 月 6 日), 古川英光 (公募) 朝日新聞: 透明で丈夫な形状記憶ゲル眼内レンズなどに応用へ (2013 年 10 月 3 日), 古川英光 (公募) TBS: 「朝ズバッ！」白内障患者に希望? 新素材レンズとは (2013 年 11 月 7 日), 齋藤博英 (計画 A01) 日経産業新聞: 京大が技術, 人工 RNA スイッチに特定たんぱく質の量調節, がん治療応用見込む (2013 年 2 月 4 日) ほか

書籍 教科書: 分子ロボティクス研究会編, 「DNA 分子デザインのすべて〜BIOMOD 虎の巻」(CBI 出版, 224 ページ, 米国の BIOMOD 実行委員会から英訳版を出版予定), 「現代化学」誌上連載「DNA ナノテクノロジー〜構造をつくり, 計算し, ナノロボットを動かす」(全 9 回, 2016 年 4 月〜12 月号), 浅沼浩之, 樫田啓, 神谷由紀子共著, 生体材料科学—基礎と応用—, コロナ社, 2015 年, 174 ページ, 小林聡, 萩谷昌己, 横森貴共著, 自然計算へのいざない, 近代科学社, 2015 年, 210 ページほか

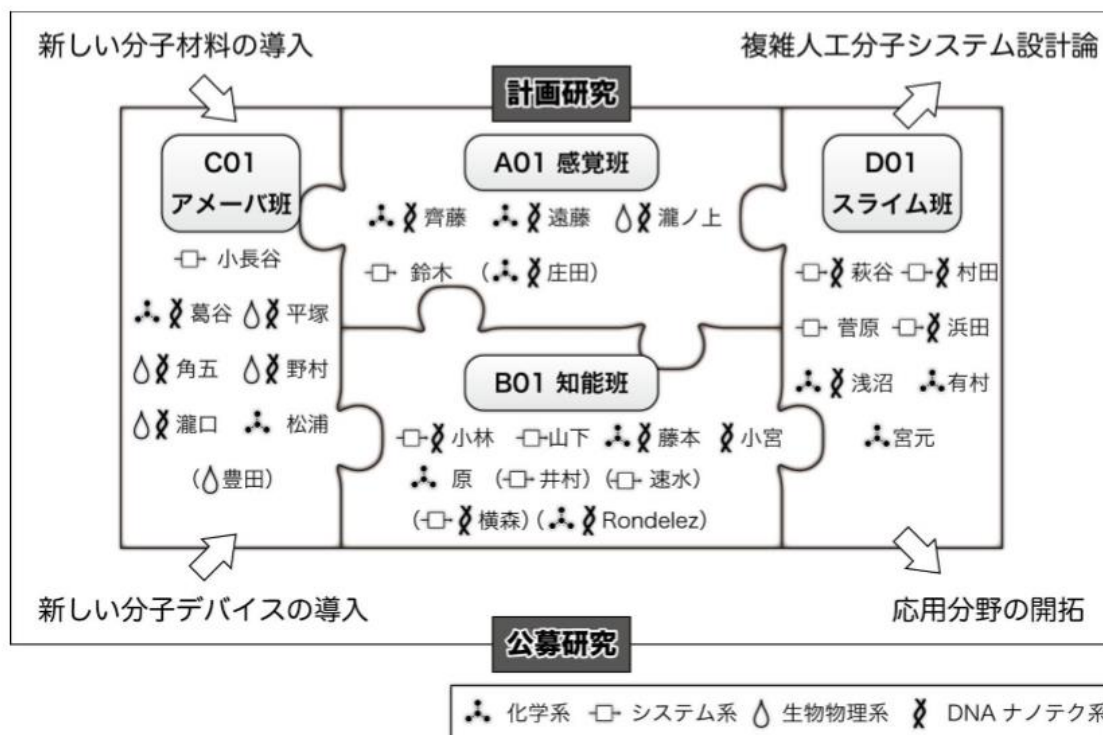
7. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2 ページ以内）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、総括班研究課題の活動状況も含め、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

■研究目的に適したプロジェクト型の研究体制

本新学術領域では、アメーバ型分子ロボットのプロトタイプ開発およびスライム型分子ロボットの基盤技術開発の2つのプロジェクトに効果的に取り組むための班構成をとっている。本領域は、これら2つのプロジェクトを直接担当するアメーバ班およびスライム班と、これらのプロジェクトに必要な感覚（センシング）および知能（プロセッシング）という2つの要素技術を開発する感覚班と知能班の4つの計画班から構成される。いずれの班も、「分子のシステムを組み立てる」という本領域の目的に沿って、システム工学系、化学系、DNAナノテク系、生物物理系といった異分野の研究者で構成されているため、班内外の整合性を常に意識しながら研究に取り組む必要がある。このため、アメーバ、スライムおよび知能の計画班の代表者はシステム工学系・情報工学系の研究者が務めることにより、システム化を強く意識した研究体制とした。

各計画班における研究はそれぞれが分子ロボットシステムまたはそのサブシステムの構築を目指すという意味で本質的にプロジェクト的であり、また他の研究班のプロジェクトとも必然的に連携しなければならない構造となっている。したがって、たとえ班内の研究であってもシステム化という方向性の下での共同研究がほとんどを占めることとなり、領域全体として極めて活発に学際的研究が推進された。



分子ロボティクス領域の研究組織

■公募研究との有機的な連携について

公募研究については、計画班のプロジェクトを補完する、あるいは計画班のプロジェクトにない領域に研究を広げるための研究として位置付けた。公募研究の採択に当たっては、審査員の先生方と協議の上、理論系と実験系のバランスに配慮した選択を行った。また、前期公募研究、後期公募研究とともに、発足時に領域の研究理念や研究内容を説明するための領域会議を開催した。あわせて、どのような共同研究が可能か、誰の研究に興味があるかなどのアンケートを実施して、情報共有、研究ネットワークの構築に努めた。

これらの取り組みが奏功し、領域会議や研究会、個別の場を通して、数多くの共同研究が自然に立ち上がった。実際、公募班の根本は、2016年8月に、自身のペプチド設計技術と、知能班の藤本の光応答塩基、およびアメーバ班の野村らのリポソーム作製技術を組み合わせ、機能性バイオ分子デザインのベンチャー企業（株）Epsilon Molecular Engineering (EME)を設立している。また、公募班の川野が開発した人工膜を用いた分子チャネルの微細電流測定法は、多くのメンバーにより導入され、川野をハブとして、多数の共同研究が行われるに至っている。

■総括班を中心とした取り組み

発足当初、特に実験系の研究者には、システム化の重要性をよく理解しない人がいたが、**領域代表のリーダーシップ**の下、その重要性が繰り返し説かれ、システム工学としての分子ロボティクスの問題意識・目的意識がメンバー全員によく共有されるに至った。また、領域のメンバーが計画班、公募班といった所属、あるいは教員、PD、学生といった身分にかかわらず、**自由闊達に議論を行うコミュニティとしての雰囲気**を醸成するように努めた。(こういったコミュニティの雰囲気に関する感想は、評価者や学術調査官からも寄せられている。)

計画班の小長谷は、東工大の田町キャンパスにオフィスおよび実験スペース(3単位)を確保し、これを**新学術領域「分子ロボティクス」の田町オフィス**として各種の班会議、学会、講習会の場所として運用した。実験スペースには、**領域共用の原子間力顕微鏡(AFM)**を設置し、共同研究および学生の教育に役立てた。さらに、主要メンバーに**TV会議システム**を導入し、**総括班会議をほぼ毎週定時に行う**ことにより、諸問題に対するタイムリーな対応が可能となった。たとえば、研究進捗やメンバー配置について問題が生じた場合には、関係者を含む拡大総括班会議を開催し、ボトルネック解消、問題解決にあたることができた。

総括班メンバーにより、2年目と4年目に、それぞれ担当の計画班および公募班メンバーをすべて訪問する**サイトビジット**を実施した。手間はかかったが、個々の研究者の研究環境や研究リソースを把握することができ、また領域内の他の研究者を紹介して共同研究を促すなど、**人的ネットワーク構築**に大きな効果があった。このほかにも、評価者の先生方や、分子機械の新海征治先生や高分子科学の長田義仁先生などの著名な先生方を訪問し、それぞれ有益なアドバイスをいただくことができた。

総括班の主導により、システム化の鍵となる、実験プロトコル、DNAナノ構造設計法、部品ライブラリの共通化などに取り組んだ。特に、公募班の豊田らにより開発された遠心沈降法による**リポソーム作製技術の講習会**(ブートキャンプ)は複数回開催され、この方法を用いることで、さまざまな研究が進展した。リポソームに高濃度かつ多種類の分子種を封入する技術はアメーバ型分子ロボットの開発に本質的な貢献をなすとともに、計画班の瀧口らの光によるアクチン分子モータの繰り返し収縮などの全く新しい現象の発見に結び付いた。計画班の浅沼や藤本らの開発した光応答人工塩基や、計画班の松浦らの機能性ペプチド等の**分子ライブラリ**も広く領域内に提供され、アメーバ型、スライム型ロボットの要素技術として組み込まれた。

最終年度、計画班の野村らによってアメーバ型分子ロボットは**凍結乾燥キット化**され、領域メンバーに配布された。これにより、原理上、いつでも、どこでも、だれでも、アメーバ型分子ロボプロトタイプを用いた実験が可能になった。実際に、複数のメンバーのラボで動作確認実験が行われた。これは、**分子ロボット標準プロトタイプモデル**の整備へ向けた第一歩である。

年1回3月に**領域会議**を開催し、計画、公募の全メンバーが研究進捗を報告するとともに、ポスドクや学生も交えて未来の分子ロボティクスについてブレインストーミングを行うなどの活動を行った。また、若手や学生にもポスター発表の場を設けて、優秀な発表には奨励賞を与えるなどして、若手研究者の育成に努めた。その結果として、「**分子ロボティクス若手の会**」が結成され、助教、PD、大学院生レベルの研究コミュニティが作られるに至った。

このほか、領域のメンバーにより、数多くの**研究会**、**オーガナイズドセッション**、**学会シンポジウム**等が企画され、**国際会議も招致**した。この中には、DNA分子計算分野で最高峰とされるDNAコンピューティングと分子プログラミング国際会議(DNA20, 京都大学、計画班の齋藤が実行委員長、村田・小林がプログラム委員長)やIEEE-NEMS国際会議での国際公開シンポジウムも含まれる。このほか、**専門家向けのポジションペーパー**(Murata, *New Generation Computing* 2013, Hagiya, *Acc. Chem. Res.*, 2014)を出版して、国際学会にも日本の分子ロボティクスコミュニティをアピールしている。国内の学術界に向けては、日本化学会「**30年後の化学の夢**」、JST俯瞰報告書(ナノテク分野)、NEDO先導調査、日本学術会議マスタープランなどで、分子ロボティクス関連企画を提案し、採用されている。

8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用，研究費の効果的使用を含む.）（1 ページ以内）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について記述してください（総括班における設備共用等への取組の状況を含む.）.

■総括班

共用 AFM(原子間力顕微鏡). DNA オリガミの自動認識等の研究用途だけでなく，学生プロジェクト (BIOMOD) や，ひらめき☆ときめきサイエンス「DNA オリガミで遊ぼう」の高校生向けの実習等のアウトリーチ活動にも活用した. また，TV 会議システムを総括班メンバーおよび主なメンバーに導入した. これにより，毎週総括班会議を開催することが可能になり，領域としてタイムリーな意思決定が行えた. また，各班の班会議にも活用され，領域内の円滑な意思疎通に役立った.

■感覚班

RNA ナノデバイスによるシグナル検知実験のため，マルチ検出モード・マイクロプレートリーダー（京大，齊藤）を購入した. 細胞内外で感覚を検知する RNA 分子ロボットの構築に貢献した. DNA オリガミ構造体を観察するため，Fast Scan 原子間力顕微鏡 (AFM)（京大，遠藤）を購入した. 本研究と共同研究に使用し，研究の進展に大きく貢献した. マイクロ加工に必要なデジタルマイクロスコプや高さ測定顕微鏡（東工大，瀧ノ上）を購入した. マイクロ加工により作製したマイクロ流体デバイスやマイクロビーズ等は複数の計画班および公募班の共同研究先に提供され共同研究の進展に貢献した.

■知能班

リアルタイム PCR 解析システム（東工大，小宮）は，DNA ポリメラーゼ伸長反応を利用して状態遷移を行うモジュール化した化学反応回路の構築と検証，および DNA シグナル増幅回路の構築と検証におけるデータを取得した主要機器であり，本装置の導入によって論文発表等の成果につながった. 共焦点顕微鏡（北陸先端大，藤本）は，細胞内及び人工細胞（リポソーム）内における光架橋反応を用いた DNA 計算の高速化に関する実験に使用しており，この高速化された光架橋反応を用いることで配列選択的にオリゴ核酸をリポソーム内に導入させることにも成功している. 生体マテリアル粘弾性測定装置（東工大，小宮）の導入により，スライム型分子ロボットの要素技術である，架橋部分を DNA で構成したハイドロゲルの動作特性の計測が可能となり，応答動作の詳細なデータを取得することで分子ロボットのプロトタイプ構築研究が進展した. 蛍光位相差顕微鏡一式（東工大，小宮）は，分子ロボットのプロトタイプ創製において必須となる，分子濃度ギャップを克服するための DNA シグナル増幅回路の動作検証においてデータを取得した主要機器であり，本装置の導入によってプロトタイプの構築が可能となった. 嫌気チャンバー（東工大，小宮）の導入により，分子ロボットの構築に用いる各要素反応について，通常の機器を用いた測定では不可能な嫌気条件下での反応を評価することが可能となった. その結果，化学反応回路等の機能を向上させるための知見を得ることができた.

■アミーバ班

高性能 MALDI-TOF/MS（関西大学，葛谷）は化学修飾を施した DNA を同定するために取得した主要機器であり，本装置の導入により微小管と結合可能な DNA 鎖の創生に成功した. 小型超遠心機一式，ChemiDoc MP システム一式およびパッチクランプ用増幅器一式（東北大学，野村）は分子デバイスを分離精製するために導入した主要機器であり，本装置の導入により分子ロボットプロトタイプを作成することができた. 高速液体クロマトグラフィーシステム一式，倒立顕微鏡ビデオシステムおよび蛍光マイクロプレートリーダー（鳥取大学，松浦）はペプチドを用いた分子ロボットデバイスの作成のために取得した主要機器であり，これによりペプチドを用いたリポソームアクチュエータの開発に成功した. 小型超遠心機 ローター一式およびライフサイエンス用新型光源は（JAIST，平塚）は分子ロボットデバイスを開発するために取得した主要機器であり，これにより光応答性分子人工筋肉の開発に成功した. デジタルカメラ一式，LED3 波長セット，顕微鏡用加湿冷却チャンバーおよび超低温フリーザー（北海道大学，角五）は微小管の動作確認に必要な主要機器であり，これを取得することにより光応答性 DNA を用いた微小管集団運動の観測に成功した. HD ビデオ会議システム一式（東工大，小長谷）は班員の連絡用に導入した. 実験台一式および Multimode AFM 用位置決め CCD カメラ（東工大，小長谷）は高速 AFM を活用するための設備および装置であり，DNA オリガミの観測ならびに DNA オリガミ画像解析ソフトウェアの開発に活用した.

■スライム班

原子間力顕微鏡（東北大学，村田）は，DNA モチーフおよび DNA ゲルの最適設計のために導入し，温度調節機能を使って，アニーリングによる自己集合プロセスのデータ取得に活用している. 走査型プローブ顕微鏡（福岡工大，宮元）は，無機ナノ材料を内包したゲルアクチュエータの評価のために活用している. 高性能蛍光顕微鏡（名古屋大学，浅沼）は，光応答性ゲルマイクロビーズの特性評価などに使用し，機能性ゲルを用いた新しい DDS の開発に活用している.

・研究費の使用状況

(1) 主要な物品明細(計画研究において購入した主要な物品(設備・備品等. 実績報告書の「主要な物品明細書」欄に記載したもの.)について, 金額の大きい順に, 枠内に収まる範囲で記載してください.)

年度	品名	仕様・性能等	数量	単価(円)	金額(円)	設置(使用)研究機関	
24	高性能MALDITOF/MS	ブルカーmicroflex-KC	1	15,750,000	15,750,000	関西大学	
	原子力間力顕微鏡	JPK NanoWizard3	1	10,794,000	10,794,000	東北大学	
	走査型プローブ顕微鏡	SII ナノテク NanoNaviReals	1	9,030,000	9,030,000	福岡工業大学	
	高性能蛍光顕微鏡	オプトサイエンス	1	6,168,855	6,168,855	名古屋大学	
	小形超遠心機	himac CS-GXII	1	4,810,785	4,810,785	東北大学	
	高速液体クロマトグラフィーシステム	島津 Prominence 分取システム	1	4,498,200	4,498,200	鳥取大学	
	マルチモードリーダー	パーキンエルマー	1	4,488,750	4,488,750	名古屋大学	
	レーザ回折式粒子径分布測定装置	竹田理化学工業	1	3,999,975	3,999,975	産業技術総合研究所	
	小型超遠心機 ローター一式	日立工機 CS100FNX、S100AT4、S50A	1	3,990,000	3,990,000	北陸先端科学技術大学院大学	
	リアルタイムPCR解析システム	バイオ・ラッド CFX96 Touch	1	3,675,000	3,675,000	東京工業大学	
	自動示差熱・熱重量同時測定装置	竹田理化学工業	1	3,499,996	3,499,996	産業技術総合研究所	
	HD ビデオ会議システム 一式	84型4K対応液晶テレビ付 PCS-XT80	1	2,996,700	2,996,700	東京工業大学	
	ナノファイバー製造装置	メック NANON-06	1	2,745,750	2,745,750	産業技術総合研究所	
	共焦点顕微鏡	Nikon C2-SH Ready	1	2,604,000	2,604,000	北陸先端科学技術大学院大学	
	走査型プローブ顕微鏡用データシステム	Data Station for NanoScope	1	2,100,000	2,100,000	東京大学	
	実験台 一式	柯エンタル技研	1	2,079,315	2,079,315	東京工業大学	
	デジタルカメラ	DC-152Q-CR-FIHS	1	2,050,650	2,050,650	北海道大学	
	25	生体-マテリアル粘弾性測定装置(解析ソフト除く)	メイワフォーシス QCMD E1	1	8,997,450	8,997,450	東京工業大学
		共焦点レーザー顕微鏡	ニコン AIR+Ti-E, 488nm レーザー, ハイブリッドスキャナ	1	7,980,000	7,980,000	福岡工業大学
		デジタルカメラ一式	NIT70950	1	2,404,332	2,404,332	北海道大学
パッチクランプ用増幅器一式		MolecularDevices 社 Axopacth200B	1	2,343,600	2,343,600	東北大学	
26	蛍光位相差顕微鏡一式	ライカマイクロシステムズ・DMi8	1	4,784,400	4,784,400	東京工業大学	
	ライフサイエンス用新型光源	OPL-SPX-LEOPARD 一式	1	2,988,580	2,988,580	北陸先端科学技術大学院大学	
	倒立型リサーチ顕微鏡	オリンパス IX73 Iポート 一式	1	2,607,390	2,607,390	産業技術総合研究所	
	顕微鏡用加湿冷却チャンバー	INUC-Kri - A15B(HUver)	1	2,494,800	2,494,800	北海道大学	
	嫌気チャンバー	セントラル科学貿易 コンセプト400	1	4,147,200	4,147,200	東京工業大学	
27	蛍光マイクロプレートリーダー	日立 MTP-900Lab, 恒温機能付	1	2,322,000	2,322,000	鳥取大学	

(2) 計画研究における支出のうち、旅費、人件費・謝金、その他の主要なものについて、年度ごと、費目別に、金額の大きい順に使途、金額、研究上必要な理由等を具体的に記述してください。

感) 感覚班, 知) 知能班, ア) アメーバ班, ス) スライム班

【平成24年度】

・旅費

感) 89,560円 鶴岡市先端研究西行支援センター 研究会参加旅費。

知) 52,0130円 (山下): 国際会議 DISC 2012 参加旅費, 分子ロボットの形状形成に関する研究成果発表, 情報収集のため。

ア) 600,300円(2012/11/02~11/07) BIOMOD2012に参加するため。

ス) 490,560円 Pittcon2013 参加旅費 (2013/3/16~3/23 有村) 研究発表を行い, 専門家との意見交換を行うため。

・人件費・謝金

感) 4047,756円 研究員の雇用

知) 150,000円 (山下): 分散協調処理に関する専門知識の提供に対する謝金, (理由) 分散モデルに関する研究を推進するため (リバプール大学の Leszek Antoni Gasieniec 教授に対する謝金. (2013.1.7-1.11 合計25時間))。

ア) 400,000円 アメーバ班の事務処理のために事務員を2名雇用。

ス) 1,681,765円 契約職員給与 (産業技術総合研究所・11月~3月分) スライム班の研究遂行のため。

・その他

知) 661,500円 (藤本): 共焦点レーザー顕微鏡システムリース料 (1ヶ月分), (理由) 反応回路の高性能化に関する実験を実施するため。

ス) 652,658円 実験室室料 (東京大学) スライム班実験に使用のため。

【平成25年度】

・旅費

知) 335,710円 (小宮): 国際会議 DNA 2013 参加旅費, (理由) 反応回路のインタフェースに関する成果発表および情報収集のため。

ア) 325,730円(2013/11/01~11/08) BIOMOD2013に参加のため。

ス) 506,350円 ECAL, SARSSI 参加旅費 (2014/9/1~9/22 Aubert) 研究発表を行うため。

・人件費・謝金

感) 433,596円 研究員の雇用のため。

知) 2,834,559円 (山下): 研究員雇用, (理由) 分散計算モデルとしての分子ロボットの計算モデルに関する研究の推進のため。

ア) 4,770,000円 DNA オリガミの画像処理のために博士研究員を雇用のため。

ス) 4,185,160円 契約職員給与 (産業技術総合研究所・4月~3月分) 実験者雇用のため。

・その他

知) 661,500円 X 12 か月 (藤本): 共焦点レーザー顕微鏡システムリース料, (理由) 反応回路の高性能化に関する実験を実施するため。

ア) 270,000円 田町TV会議回線、フレッツ光 分子ロボティクス拠点にてTV会議システムを利用のため。

ス) 860,000円 実験室室料 (東京大学) スライム班実験に使用のため。

【平成26年度】

・旅費

知) 135,750円 (H26.12.15 決済) (小宮): 国際会議 DNA20 および国内会議第52回生物物理学会年会参加旅費, (理由) 反応回路のインタフェースに関する研究の成果発表および情報収集のため。

ア) 142,150円 国際会議 DNA20, BSJ2014 参加旅費のため。

ス) 571,598円 Origins2014, OQL2014 招聘旅費 (2015/7/4~7/14 Luisi) 共同研究および情報収集のため。

・人件費・謝金

感) 4,333,596円 研究員の雇用のため。

知) 3,820,772円 (山下): 研究員雇用, (理由) 分散計算モデルとしての分子ロボットの計算モデルに関する研究の推進のため。

ア) 1,060,000円 田町CICに搬入した高速AFMを稼働させるために技術員を1名雇用するため。

ス) 4,853,824円 契約職員給与 (産業技術総合研究所・4月~3月分) 実験者雇用のため。

・その他

感)

知) 63,832円 (山下): WSSR2014の学会参加費, (理由) 分子ロボットのための分散計算モデルに関する成果発表と情報収集のため。

ア) 270,000円 田町TV会議回線、フレッツ光 分子ロボティクス拠点にてTV会議システムを利用するため。

ス) 2,150,000円 実験室室料 (東京大学) スライム班実験に使用のため。

【平成27年度】

・旅費

知) 366,086 円 (山下) : 国際会議 SSS2015 参加旅費, (理由) 分子ロボットのための分散計算モデルに関する成果発表と情報収集のため.

ス) 341,530 円 Euroclay2015 参加旅費 (2016/7/4~12 宮元) 研究発表を行うため.

・人件費・謝金

感) 6,416,473 円 研究員の雇用のため.

知) 5,426,368 円 (藤本) : 研究員雇用, (理由) 反応回路の高性能化に関する研究を推進するため.

4,453,056 円 (小宮) : 技術補佐員雇用, (理由) 反応回路のインタフェースに関する研究を推進するため.

ア) 1,460,000 円 田町 CIC に搬入した高速 AFM を稼働させるために技術員を 1 名雇用のため.

ス) 4,408,300 円 契約職員給与 (産業技術総合研究所・4 月~3 月分) スライム班の研究遂行のため.

・その他

知) 498,960 円 (藤本) : HPLC ソフトウェアバージョンアップ作業, (理由) 反応回路の高性能化に関する実験の高度な解析作業を行うため.

ア) 270,000 円 田町 TV 会議回線、フレッツ光 分子ロボティクス拠点にて TV 会議システムを利用するため.

ス) 182,078 円 Theoretical Comp. Sc. 掲載料 (萩谷) 研究成果発表のため.

【平成28年度】

・旅費

感) 353,240 円 ルートヴィヒ・マクシミリアン大学における共同研究打ち合わせのため.

知) 319,142 円 [H28/11/6-11/12 の旅費] (山下), 国際会議 SSS 2016 参加旅費, (理由) 分子ロボットのための分散計算モデルに関する成果発表と情報収集のため.

ア) 71,240 円 IEEE-NEMS2016 参加旅費

ス) 370,100 円 FNANO 参加旅費 (2016/4/10~16 田中) 研究発表を行うため.

・人件費・謝金

感) 48,202,884 円 研究員の雇用のため.

知) 7,516,800 円 (小宮) : 技術補佐員および博士研究員雇用, (理由) 反応回路のインタフェースに関する研究を推進するため.

5,171,942 円 (藤本) : 研究員雇用, (理由) 反応回路の高性能化に関する研究を推進するため.

・その他

54,600 円 (鈴木) : 論文掲載料, (理由) 反応回路の知能化に関連する研究発表のため.

ア) 1,460,000 円 田町 CIC に搬入した高速 AFM を稼働させるために技術員を 1 名雇用

ス) 4,384,475 円 契約職員給与 (産業技術総合研究所・4 月~3 月分) スライム班の研究遂行のため.

・その他

感) 413,640 円 TECAN モノクロメーター方式プレートリーダー M1000 の修理のため.

ア) 270,000 円 田町 TV 会議回線、フレッツ光 分子ロボティクス拠点にて TV 会議システムを利用するため.

ス) 85,000 円 IEEE-NEMS2016 参加費 (村田) 研究発表を行うため.

(3) 最終年度 (平成27年度) の研究費の繰越しを行った計画研究がある場合は, その内容を記述してください.

該当しない.

9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1 ページ以内）

研究領域の研究成果が、当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果などについて記述してください。

■当該学問分野に与えたインパクトや波及効果

新学術領域「分子ロボティクス」は世界に先駆けて「分子ロボット」の概念を提唱し、その研究コミュニティをいち早く立ち上げたという意味で、国際的にも注目されている。実際、領域代表の萩谷は FNANO 等の国際会議において、この分野を紹介する基調講演を行ったり、分子プログラミングプロジェクトトリートや、ヨーロッパにおける分子プログラミング関係者のクローズドワークショップに招聘されたりするなど、分子ロボティクスに対する海外からの関心の高さに応えてきた。また事務担当の村田は、国際分子デザインコンペティション (BIOMOD) のボードメンバーとなり、日本語で執筆したこの分野の学生向け教科書「DNA 分子デザインのすべて」の英訳版を企画するなど、普及啓もう活動においても国際的な役割を果たしている。

国内においては、日本化学会、日本生物物理学会、CBI 学会、情報処理学会、細胞を創る研究会、ロ日本ロボット学会、計測自動制御学会等で、領域メンバーを中心として企画シンポジウム、オーガナイズドセッション、講習会等を多数開催したことにより、分子ロボティクスの概念が次第に浸透してきている。このことは、「分子ロボティクス」が、JST 俯瞰報告書や、NEDO 先導調査など、政府関係の調査対象になっていることからもうかがえる。また、本領域のメンバーを中心として提案した「分子ロボティクス・イニシアティブ」は、日本学術会議マスタープランに採択されている。

「分子ロボティクス」をキーワードとして、NEDO (計画班小長谷)、基盤研究 (S) (計画班齊藤) 等の大型研究費や、JST 関連予算 (計画班小長谷) を獲得している。また、先にも述べたように、本領域の公募-計画の共同研究からベンチャー設立に至った例 (公募班根本と計画班藤本ら) や、計画班の研究者 (鈴木泰博) による NASA との共同研究の事例も出ている。

■学術への波及効果

・化学に対して

化学分野に対する分子ロボティクスの貢献としては、ボトムアップ的に分子のシステムを構築する分子ロボティクスが超分子化学において新たな分野として定着したことが大きい。分子ロボティクスの目指す、1) 分子演算処理 (コンピューティング)、2) メカニカルな動作、3) 構造体の構築といった目標は、有機化学や生体機能関連化学においても、新たな研究目標となっている。

・生物物理学に対して

生物物理学では、近年、細胞のような自律的な分子システムを、構成分子一つ一つから組み上げる研究 (人工細胞の構築) が盛んに行われ、細胞のモデル研究等に利用されている。本新学術領域の成果の一つであるアメーバ型の分子ロボットは、自律運動可能で外部制御が可能な人工細胞の構築という、今まで困難であった問題が解決できることを示したという意義があった。分子ロボティクスは、こうした新規技術・新規概念の提供を通して、生物物理学全般にインパクトを与えている。

・生物学・医学に対して

生物学分野に対する分子ロボティクスの貢献としては、生体複合分子を模倣した核酸ナノ構造体による細胞、生命システム制御の可能性を見出したことが挙げられる。また、人工脂質膜上に DNA ナノ構造を自己集合させる新技術を開発し、将来的な細胞への人工 DNA レセプター装着の道が拓けた (*Nature Com.*, 2015, 遠藤)。さらに、標的がん細胞に結合し、機能性 RNA をデリバリーできる RNA ナノ構造体の作製にも成功し (*ACS Nano.*, 2014, 齋藤)、これに基づいて、がん細胞や iPS 細胞内の環境を検知し、その運命を特異的に制御できる RNA ナノロボットの構築に成功している (特許申請済)。これらは、将来、細胞制御型分子ロボットとして、医学分野へ大きな寄与をすることが期待できる。

・システム・情報学に対して

システム・情報学に対する分子ロボティクスの貢献としては、制御工学の中に分子反応システム設計論という新しい分野を確立したこと、分散計算やセルオートマトンにおいて、分子による実装を前提とする新しい制御理論・システム工学分野を拓いたこと、また群ロボットの研究に対して新しい概念を提供したことなどが挙げられる。

■産業への波及効果

分子ロボティクスは医療、環境、エネルギー、デバイスといったさまざまな産業へ波及効果をもたらす新しい学術分野である (10 ページの図参照)。本新学術領域により、分子デバイスのシステム化の可能性が具体的に示されたことにより、今後、具体的な応用テーマに向けた研究開発が加速していくと考えられる。実際に、本領域からのスピナウトとして、人工筋肉、糖尿病治療分子ロボット、RNA 分子ロボットによる細胞操作等のプロジェクトがすでに始まっている。また、DNA や RNA との選択的な相互作用を設計可能な直交核酸の開発や、分子デバイス GPU を用いた複雑大規模分子シミュレーション技術といった、より汎用性の高い技術も本領域から生まれており、今後の展開が期待される。

10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況（1ページ以内）

研究領域内での若手研究者育成の取組及び参画した若手研究者（※）の研究終了後の動向等を記述してください。

※研究代表者・研究分担者・連携研究者・研究協力者として参画した若手研究者を指します。

博士課程学生の進路

助教 4名（東北大学，名古屋大学，東京工業大学，福島県立医科大学）
特任助教 1名（東京工業大学）
特任研究員 1名（大阪大学）
学振特別研究員 2名（大阪大学，理化学研究所）
ポスドク 2名（東京大学，福岡工業大学）
ほか

ポスドクの進路

講師 1名（上海大学）
助教 4名（大阪大学，岡山大学，北陸先端大学院大学，東京理科大学）
特任助教 2名（御茶ノ水大学，首都大学東京）
ポスドク 9名（東京大学2名，京都大学，東京工業大学，千葉大学，理科学研究所2名，
リーハイ大学，UPJV）
企業研究者 7名
ほか

研究者の昇進

教授（40代） 7名（京都大学，東北大学，山形大学，岐阜大学，富山大学，富山県立大学，
東北学院大学）
准教授（30代） 3名（東京工業大学，奈良先端大学院大学，甲南大学）
特任准教授 1名（東京農工大学）

11. 総括班評価者による評価（2ページ以内）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

■東京大学 中島秀之先生（情報）

アンビシャスなプロジェクトであった。分子レベルのロボットを作るという目標もそうであるが、ロボットというのは単なる機械ではなく、ある程度の知能を有するものとして定義されている。分子レベルで動き回るだけなら実現可能だとは思っていたし、そのようなシステムはプロジェクトの初期からいくつか実現されていたが、この知能の部分が大きな問題であると考えていた。

複雑さのレベルにおいて、フォンノイマン型コンピュータのような、プログラムを内蔵したものは考え難い。ならば環境の利用しかならうと考え、私が話す機会には、その示唆を続けてきた。ただ、環境の利用と言っても簡単なものではないし、どのような形になるのかは私自身見えていなかった。正直あまり期待はしていなかったのだが、それは見事に（良い意味で）裏切られた。

分子レベルのシステムと環境との関係について大変興味深い概念提案があった。我々が通常目にする、つまり人間の大きさレベルの世界に於いては、ロボットなどの主体と環境というのは見た目には明らかに違う存在である。ただし、動作レベルにおいてはそれらが繋がっており、両者の相互作用が重要であると考えている。これに対し分子レベルでは両者の差がそもそも見えない。システム自体が環境とのカップリングの上にはしか成立していない。この、概念的発見は大変重要なものであり、具体的に作り出された数々の分子ロボットと共に、その理論的バックグラウンドを与えることが期待される。

■東京大学 藤井輝夫先生（工学）

新学術領域研究の最大の特徴は、多分野にわたる研究者が参加し、ある共通の目標や問題意識の下にそれぞれの専門性をぶつけ合う中で相互の理解が深まっていくにつれ、新たな分野が形成されていくことにある。また、大学院生を含む若手研究者がそうした新分野形成のプロセスに主体的に関わり、これを体験することが極めて重要である。その意味で、本領域研究は大変素晴らしい領域運営がなされてきたものと言える。総括班の主導により、領域全体としての意識共有のために、領域会議のみならず、TV会議等も含めた大小の会合やニュースレターの発行等、またラボビジットを行うなど、多大なる努力が払われてきた。また60件にのぼる公募研究等を通じて、領域として打ち出してきた新しいコンセプトを共有する研究者コミュニティをさらに広げるに至っている。

研究のアウトカムにおいても、当初はかなりの困難が予見されたが、研究期間の終盤にはアメーバ型プロトタイプが実現され、センシング・コンピューテーション・アクチュエーションによって構成される「ロボット」としての分子システムの一つの可能性が示された。このことは、今後この分野の発展の方向性を考える上でも大変重要なステップがクリアされたと言ってよい。領域会議等には、多数の若手研究者や大学院生が参加してきており、彼らがこうした新しい分野が形成されていく重要な局面を目撃・経験したことは将来の我が国の学術の発展にとっても極めて大きい意義があると考えている。

■京都大学 浜地 格先生（生物/化学）

ロボット工学と分子化学という、日本の学会活動では通常出会うことが極めて稀な研究分野の融合によって、自律性を持った分子システム・材料を構築しようとする「分子ロボティクス」は、まさに新学術領域らしい研究提案であった。この5年間の活動は、萩谷領域代表の柔軟で強いリーダーシップのもと、学術的な成果だけでなく人材交流・（新分野の新世代）育成といった観点からもとてもユニークな試みが為されたと評価したい。折しも昨年のノーベル化学賞は「分子マシン」という研究テーマに贈られたが、知能・情報処理能力と自律性を備えた分子マシンが分子ロボットであり、この学術領域では分子マシンのその先を見据えた提案と活動が始められていたと見ることもできる。この分野が黎明期であることに疑いは

ないが、新学術領域研究で提唱されたコンセプトが、真に新しい学術領域を形成するために、ここに参集した研究者が多く、研究者を巻き込んで大きな流れを創られることを期待したい。

■東京大学 藤田 誠先生（化学/物理）

情報学、化学、生物、物理、生物物理学等の多岐の分野にわたる学際領域で新たな学術を創成する研究が行われ、当初の想定を超える数々の成果が得られている。これからの学術分野創成においては情報学をどれだけ取り入れることができるかが一つの鍵を握ると言っても過言ではないが、その意味でも、新学術領域研究の先駆的な成功例が示されており、新学術領域研究にふさわしい、すぐれた領域研究が行われたと言える。特に静的な構造に機能を求めるのではなく、「動き」をもつ構造体、すなわち分子ロボットを標的としたことはこの領域研究における素晴らしい着想であり、アメーバ型分子ロボットなど、過去に例をみない作動原理の「動く材料」の実現が示されたことは注目に値する。また、学術分野として創成期であるにもかかわらず、医療、環境、デバイス、化学・エネルギー分野に大きな波及効果が期待できることもこの研究の特徴である。分子ロボットの進化のシナリオに沿って、今後この分野がどこまで発展するかは未知数であるが、さらなる発展を期待してやまない。

■東京女子医科大学 大和雅之先生（医療応用）

参加メンバーの個々の研究成果は、もちろん国際的に高く評価されるものとして、多数公刊されているとともに定期的に開催された公開シンポジウムでは参加者を交えた活発な議論の対象となった。新しい時代と科学を牽引するものとして新学術領域研究の趣旨にも適合し、高く評価できる。さらに特筆すべきは、領域代表、各班班長の肌理細かいマネジメントとその成果としての若手の成長である。多くの若手研究者が、自ら大型研究プロジェクトを率いるに足るまでに成長し、将来の当該分野を率先して先導していくものと期待される。最後に一点、難を述べるとすれば、国内全国の大学に分散する形で研究体制が組み立てられたためか、海外との交流が弱く感じられたことであるかもしれない。類似の研究を展開する海外の拠点との情報交換、人材交流のより強力な推進を残された課題として挙げておきたい。