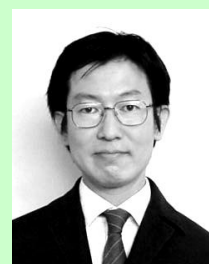


## DNA ナノエンジニアリングによる分子ロボティクスの創成

Development of Molecular Robotics  
Based on DNA Nanoengineering

村田 智 (MURATA SATOSHI)

東北大学・大学院工学研究科・教授



### 研究の概要

近年、「DNA ナノエンジニアリング」と呼ばれる新しい分子設計法が脚光を浴びている。DNA ナノエンジニアリングでは、DNA のハイブリダイゼーション反応を利用して、数ナノメートルから 100 ナノメートルサイズのいろいろな形状の分子を作り出すことが可能である。同様の反応により、ロジック演算などの情報処理も可能になっている。DNA 分子からなるセンサーやアクチュエータもつくられている。つまり、いわゆるロボットを構成するために必要な要素すべてを DNA 分子で作ることができるのである。本研究においては、DNA ナノエンジニアリングのアプローチにより、部品となる分子ひとつひとつを設計し、それをシステムとして組み立てて、さまざまな環境の変化に対し自律的に応答することのできる分子機械システム、すなわち「分子ロボット」を構築する方法の基盤を確立する。

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間情報学・知能ロボティクス

キーワード：自律分散システム、DNA ナノエンジニアリング、分子ロボティクス

### 1. 研究開始当初の背景

近年進展の著しい DNA ナノエンジニアリングのアプローチにより、部品となる分子ひとつひとつを設計し、それをシステムとして組み立てて、さまざまな環境の変化に対し自律的に応答することのできる分子機械システム、すなわち「分子ロボット」を構築することが可能になってきている。

### 2. 研究の目的

分子ロボットが外部の環境と作用するために、コンパートメントにインターフェース機能（容器の壁面を介して分子や情報をやり取りする機能）が必要になる。本研究では、インターフェース機能を持った DNA 分子デバイスを組み込んだコンパートメントを作製し、分子ロボットの基本機能を実証することを目的とする。

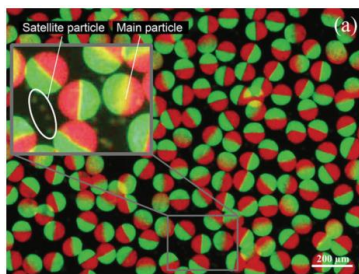
### 3. 研究の方法

マイクロサイズのゲルビーズの表面で DNA 構造を作製する技術を開発し、コンパートメントを作製する。さらにコンパートメントの DNA 構造と互換性を持たせたチャネル部品を埋め込むことにより、分子ロボットの基本部分をすべて DNA 分子で構成することを目指す。具体的には、次の4つの技術の開発に取り組む。

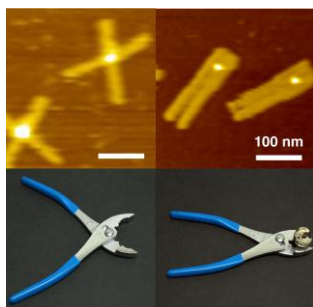
- (1)分子デバイスを格納するためのコンパートメントの作製技術
- (2)コンパートメントを介して分子入出力を行うインターフェースの実装技術
- (3)分子ロボット内部の反応を制御する技術および分子ロボット間の分子通信技術
- (4)分子通信による相互作用により、分子ロボット群が協調するためのルール設計

#### 4. これまでの成果

1)コンパートメント作製：耐熱性を光制御できる DNA ナノ構造体を用いたコンパートメント作製を目的とし、人工光クロスリンク分子を用いて耐熱性 DNA タイルの作製を行った。また、秒単位で光架橋可能なリンク分子を合成し、これを持ちいて、ゲル化およびゾル化が可逆的に光制御可能な DNA ゲルモチーフを開発した。これにより、DNA ゲルモチーフでもコンパートメントを作製できるという可能性が開けた。また、コンパートメント作製の基板（鋳型）となるハイドロゲルビーズ（球）の作製手法を確立した（下図）。



2)インターフェース実装：分子ロボットのインターフェースとして、DNA モチーフを自己集合させたリング状のチャンネル構造を開発中である。また、DNA オリガミによるどんでん返しチャンネルの作製に向けて、ナノスケールの構造変化がその機能に直結するナノメカニカル DNA オリガミデバイス（DNA オリガミペンチ）を構築した（下図）。



3)制御・通信：DNA 分子や RNA 分子を制御通信分子としたインターフェース実装を想定し、DNA や RNA 情報を選択的に補足し高効率で塩基情報を変換する手法、光や磁場に

よってミスマッチ DNA と目的の DNA を高感度で正確に見分ける手法などを開発した。また、分子ロボットのための制御方法として、マルチエージェント系の相互作用モデルを検討し、ロボットの内部状態を表すペトリネットモデルを構築した。

4) 協調ルール：疎水性基を導入してデザインした X 型 DNA 分子を用いて、細胞膜およびリポソーム膜表面に付着し、かつ脂質膜上でブラウン運動を行いながら機能する DNA ナノ構造を構築、評価した。実験の結果、この X 型 DNA 分子は、膜上で部品を交換し、近接する膜間を移動することが確認された。また、DNA ロボットの集団行動戦略形成のモデルとして、免疫ネットワークモデルのクローン選択アルゴリズムの DNA 演算による実装を行い、検証を進めている。

#### 5. 今後の計画

ビーズをベースとしたコンパートメント作製技術を完成させるとともに、DNA オリガミ等で作成したインターフェースのコンパートメントへの埋め込みを行う。また、計算系としてシグナル増幅によるコンパートメント分解等のデモを実装する。あわせて、多数の分子ロボットの群知能システムとしての振る舞いの解析も進めていく。

#### 6. これまでの発表論文等

S. Hamada, S. Murata, Theoretical Model of Substrate-Assisted Self-Assembly of DNA Nanostructures, *RSC Advances*, 2, 7406-7412 (2012)

K. Maeda, M. Takinoue, et al., “Controlled synthesis of 3D multi-compartmental particles with centrifuge-based microdroplet formation from a multi-barrelled capillary” *Adv. Mater.*, vol.24, pp.1340–1346 (2012)

A. Kuzuya, et al., Nanomechanical DNA origami ‘single-molecule beacons’ directly imaged by atomic force microscopy, *Nature Communications*, 1, 449 (2012)