


【基礎研究 (S)】

自己組織化人工筋肉によって実現する動的再構成可能ウエットロボティクスの創成

	研究代表者	大阪大学・工学研究科・教授 森島 圭祐 (もりしま けいすけ)	研究者番号:60359114
	研究課題情報	課題番号: 22H04951 キーワード: 動的再構成可能、ウエットロボティクス、自己組織化、人工筋肉、マイクロロボット	研究期間: 2022年度~2026年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか (研究の背景・目的)

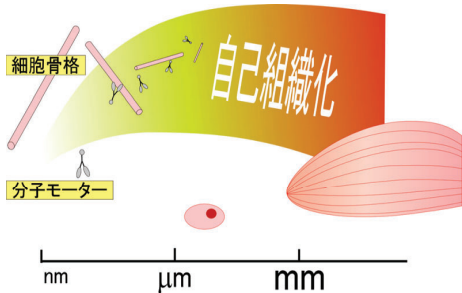
● 研究の全体像

アリのような昆虫、ミジンコのような微生物と同じぐらいの大きさ、あるいは、髪の毛の太さと同じぐらいの大きさで移動能力をもつマイクロロボット、特に柔軟な構造を持つマイクロロボットは、通常のロボットや人が入り込めない狭い場所での用途が期待されている。例えば、人の体の中を動き回って病気を診断したり治療したりする超小型ロボットや土壌や田んぼで環境の変化を観測する、自然に優しいマイクロロボットなど非常に幅広い応用の可能性があるものの、小さなボディにアクチュエータ、バッテリー、センサーなど様々な機械部品を組み込むことは困難で、高機能のマイクロロボット開発の障害となっている。従来では、通常、機械構造やアクチュエータ、バッテリー、センサーなどのマイクロロボットの構成部品である様々な部品は異なる場所で製造し、一つ一つ組み上げていくピッキング アンド プレース アセンブリによってマイクロロボットがつくられていた。この方法は時間と労力がかかり、また多くの制限があることが課題となっている。

これまで代表者の森島は、筋細胞の収縮能を利用する発想で、筋細胞駆動型のバイオアクチュエータを搭載した、電源を必要とせず化学エネルギーをエネルギー源とするマイクロロボットを開発してきた。(1)しかしながら、バイオアクチュエータとなる筋細胞の培養に数日かかってしまう、アセンブリが困難であるといった問題があった。

そこで、これまでのバイオアクチュエータとマイクロロボットの設計論を根本的に見直し、生体分子であるタンパク質の自己組織化プロセスを精密制御し、構造と機能が創発する自然界の生体デザインルールと簡便な製造及びアセンブル方法を融合することが本分野を開拓していく上で重要なチャレンジであることにたどりついた。

筋細胞が互いに融合分化し、サルコメアを自己組織化により形成し、収縮能をもつ筋肉組織となるような、細胞内部で起きているプロセスを人為的(cin vitro)環境下で形成し、マイクロロボットの駆動源として、ミリスケールサイズで大きい力を発生させる仕組みをどうすれば実現できるか、その仕組みを理論と実験の両面から解明すると同時に、独自の製造プロセス・アセンブル手法を新たに編み出すことで、全く新しいATP駆動型人工筋肉のデザインルール (図1) に基づく、動的再構成可能なマイクロロボット群を実現できると考えた。



新しい人工筋肉設計→分子から組み立てられた筋肉
「生体組織」ではなく「アクチュエータ」を作る

図1 ATP駆動型人工筋肉アセンブリのデザイン概念

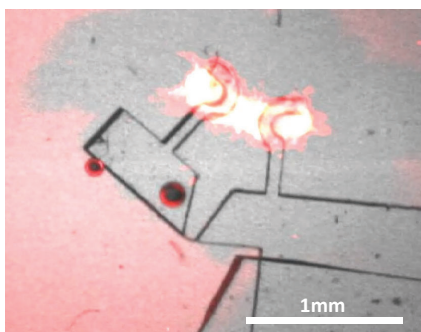


図2 生体分子人工筋肉の収縮実験

同時に、分子スケールからミリスケールレベルにまたがるマルチスケールでの自己組織化プロセスと様々な力学的な運動機能や自己集積、自己修復能を発現する根本メカニズムの探求という学術的「問い」が生まれた。平塚 (研究分担者)、新田 (研究分担者) グループと共同研究を開始し、基礎研究(A) (2017年度~2019年度) では、基礎的検討及び実験の結果 (図2) と理論モデルとの検証等をおこない、動作メカニズムの理解が少しずつ明らかになってきた。さらに、これまで人工物では困難であったマルチスケールでの動的再構成可能なマイクロロボットの実現、マイクロシステムのアセンブリ応用への展開の道筋も見えてきた。

本研究では、自然界における生体内システムの自己組織化プロセスに着想を得て、これまで研究開発してきたプリント可能な生体分子モーターからなる人工筋肉(2)に基づき、タンパク質と柔らかい生体適合性ゲルからなる構成部品をその場で加工・組み立てしてマイクロロボットを製造する方法を開発する。マイクロ流路内で、マスクレスリソグラフィにより、ハイドロゲル材料の機械的構造をプリントし、次に生体分子モーターからなる人工筋肉がハイドロゲル機構の狙った位置に直接プリントすることで、機構を駆動して目的の仕事をするマイクロロボットを設計製造する。提案するその場組み立て法により、マイクロロボットを迅速に次々と生産することが期待できる。

1. "Atmospheric-operable bioactuator powered by insect muscle packaged with medium, Yoshitake Akiyama, Toru Sakuma, Kei Funakoshi, Takayuki Hoshino, Kikuo Iwabuchi and Keisuke Morishima, *Lab Chip*, 13, 4870-4880, (2013).
2. "A printable active network actuator built from an engineered biomolecular motor", Takahiro Nitta, Yingzhe Wang, Zhao Du, Keisuke Morishima & Yuichi Hiratsuka, *Nature Materials* vol.20, pp.1149-1155 (2021)

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

これまで我々のグループだけでなく、世界の他グループが実現してきた生体材料からなるバイオアクチュエータは、いずれもATPによる化学エネルギー駆動であるが、生物の最小単位である細胞の筋収縮機能を利用したものが多く、細胞内部で発生する分子モーターの力学的相互作用が生み出す精密な機構をin vitroで大規模に集積化し、制御させたミリスケールサイズのハイブリッドデバイスは実現できていない。

本研究では、その集積化プロセス自体を人為的にin vitroでマイクロ流体操作や光造形による3Dプリンティングの発想により精密に制御し、ミリスケールサイズの全く新しいATP駆動型人工筋肉と、それをういたバイオアクチュエータ、マイクロロボットの運動を創製する基盤技術の確立と設計原理を明らかにすることを目的とし、これまで集積化不可能であった動的再構成可能な超小型マイクロロボットの製造設計論の構築に挑戦する。マイクロロボットを連続的に少量多品種製造し、その場でアクチュエータを集積化アセンブルできる、動的再構成可能マイクロロボットのフレキシブル生産システムの概念図を下図に示す。

自己組織化プロセスを理解し、駆動部品となるモータタンパク質を高効率で大量生産することが可能になり、マイクロ部品と自由自在にアセンブルすることが可能になれば、大規模自己集積化した分子モーターで駆動するマイクロロボットが実現できる。体内で稼働する機械は、いずれも何らかのエネルギー源を必要としており、その小型化や稼働時間が問題となっている。バイオアクチュエータとして、ATP駆動型の生体分子人工筋肉の特徴を利用することで、エネルギー源の問題を解決できる。将来的に様々な機能を付与した生体適合性ゲルによる3D印刷可能なマイクロロボットが、体内に長期間滞留してセンシングしたり診断したりすることが可能になり、人々に高度な健康医療技術を提供できる。デバイスのエネルギー源は生体で生産されるATPであるため、ほぼ無限に生産できる。医療応用だけでなくとどまらず、これまでのエネルギー消費型のモノづくりと全く発想の異なる革新的な省エネルギー型の新原理デバイスへの発展性が見込める。

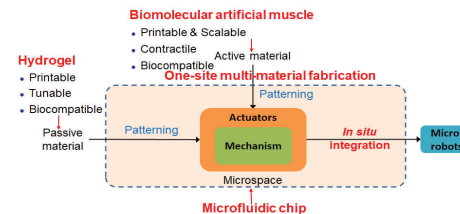


図2 モータータンパク質によるマイクロロボットその場集積化アセンブリ法の概念図

ホームページ等

<http://www-live.mech.eng.osaka-u.ac.jp>
E-mail: morishima@mech.eng.osaka-u.ac.jp

