

令和 5 年 5 月 2 日現在

機関番号：32641
研究種目：挑戦的研究（萌芽）
研究期間：2021～2022
課題番号：21K18703
研究課題名（和文）合体・分解型多機能マイクロゲルロボットの創製

研究課題名（英文）Multi-functional micromodular robot

研究代表者

早川 健（Hayakawa, Takeshi）

中央大学・理工学部・准教授

研究者番号：70759266

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、マイクロゲルをソフトアクチュエータとして搭載したロボットに、分子認識機能を利用した合体・分解機能を付与し、単純な構造のロボットを合体させることで多機能を創発する「合体・分解型多機能マイクロゲルロボット」の提案を行った。分子認識機能を利用するための分子ペアとして、シクロデキストリンとアゾベンゼンを利用し、それをPNIPAAmに混合した状態で架橋することにより、温度変化により膨張・収縮が可能で、紫外線と可視光を照射することにより合体・分解が切り換えられるロボットの作製に成功した。また、作製したロボットを用いて合体・分解を行い、ロボットを蠕動運動で移動させることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、マイクロスケールの合体・分解型ロボットを提案している。マイクロスケールのロボットの大きな課題として、その機能化をどう行うか、というものがある。本提案は、その課題解決を行うためのアプローチであり、さらに複数の機能を切り替え可能な可能性を示しており、マイクロロボットの実用化に向けた大きな役割を担うものであると考えられる。

研究成果の概要（英文）：We propose micromodular robot based on assembly/ disassembly functions employing a molecular recognition. We have used stimuli responsive hydrogel as soft microactuators and succeeded in realizing hydrogel microrobot actuated by PNIPAAm, thermoresponsive hydrogel. In this study, we integrate cyclodextrin (CD) and azobenzen as a molecular recognition pair. We mixed the CD and azobenzen to PNIPAAm and succeeded in fabricating micropattern having the molecular recognition function. By using this microactuator, hydrogels can be assembled by irradiating UV light and disassembled by irradiating visible light. We succeeded in fabricating microrobot integrating this hydrogel actuator and drive it with irradiating laser to control its temperature. Also, we succeeded in assembly and disassembly of the robot with irradiating UV or visible light. We demonstrated peristaltic motion with assembled robot and showed that the assembled robot can move faster than a single modular robot.

研究分野：知能機械

キーワード：マイクロロボット ハイドロゲル 微細操作 バイオミメティクス PNIPAAm 分子認識

1. 研究開始当初の背景

近年、 μm ~ mm サイズのソフトマイクロロボットが多数提案されているが、これらのロボットは電磁場などの外場を用いて駆動を行うため、ロボットに搭載されたソフトアクチュエータの変形形状を制御するのが難しく、単純な機能しか有していなかった。従って、いかに機能化を行うか、という点がソフトマイクロロボットの重大な課題であった。

2. 研究の目的

そこで本研究では、マイクロゲルをソフトアクチュエータとして搭載したロボットに、分子認識機能を利用した合体・分解機能を付与し、単純な構造のロボットを合体することで多機能を創発する「合体・分解型多機能マイクロゲルロボット」の実現を目的とする。

3. 研究の方法

はじめに、提案するマイクロゲルロボットのコンセプトを説明する。このロボットの構成要素として **I. 移動** と **II. 合体・分解** の2つの機能を有する基本ユニットからなる (図1 (a))。それぞれの機能とそれを実現する方法について、以下で説明する。

■ **I. 移動** : マイクロゲルロボットの基本ユニットの1つ目の機能として、移動機能を有する。このユニットはソフトアクチュエータである温度応答性ハイドロゲル (PNIPAAm) と、その支持構造からなる。このゲルは水中で駆動可能で、低温 (32°C 以下) で周囲の水を吸収して膨張し、高温 (32°C 以上) で水を放出して収縮するため、この体積変化をアクチュエータの変位として利用可能である。作製したロボットの駆動方法としては、ゲルに光吸収材料を混ぜて光を照射することで加熱し、ゲルの収縮・駆動を行う。

■ **II. 合体・分解** : このロボットに合体・分解機能を付与するために、分子認識技術を利用する。分子認識とは、特定の分子ペアのみ選択的に結合する性質であり、本研究では光を照射することで分子構造が変わるフォトクロミック材料を分子認識のペアとして使用することで、光照射によって合体・分解を制御可能なマイクロロボットを実現する。先行研究として、可視光を照射することで分子が結合し、紫外線を照射することで分子の結合が外れる分子設計を行い、 mm サイズのマクロな部品の接着・剥離を行うという技術が報告されている (山口ら, Nat. Commun. 2012)。この技術を参考にし、分子認識機能を持つアゾベンゼンと α -シクロデキストリン (α -CD) を、ロボットのアクチュエータである PNIPAAm もしくは支持構造に混合し、可視光・紫外線を照射することで、基本ユニットの合体・分解を制御可能なロボットを実現する (図2)。

以上のように、I. 移動機能を有するユニットを II. 合体・分解することにより、例えば効率よく移動可能な蠕動運動型マイクロロボットや細胞把持用マイクログリッパーなど、様々な機能を持つマイクロロボットを合体して組み立てることが可能となる (図1 (b))。また、これらのロボットは作業を終えた後には可視光を照射して分解可能であり、作業空間内で再利用可能なため、状況に応じて必要な機能を持つロボットをその場で作製することが可能である。

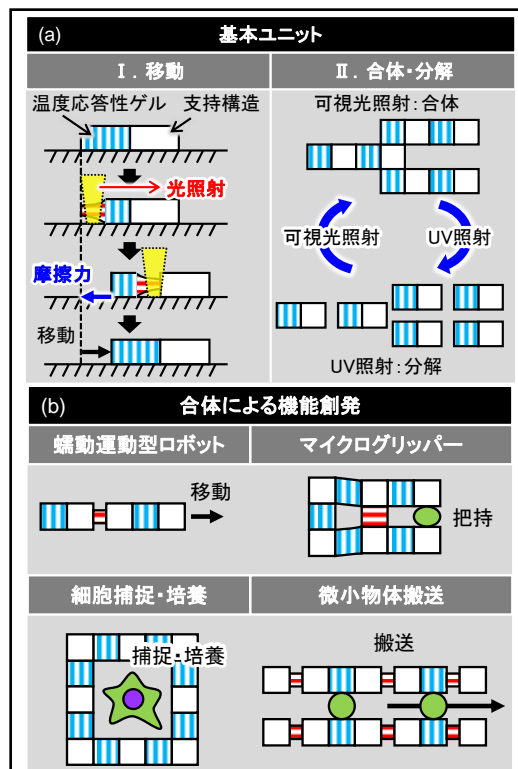


図1 提案するロボットのコンセプト (a)合体・分解機能, (b) 応用

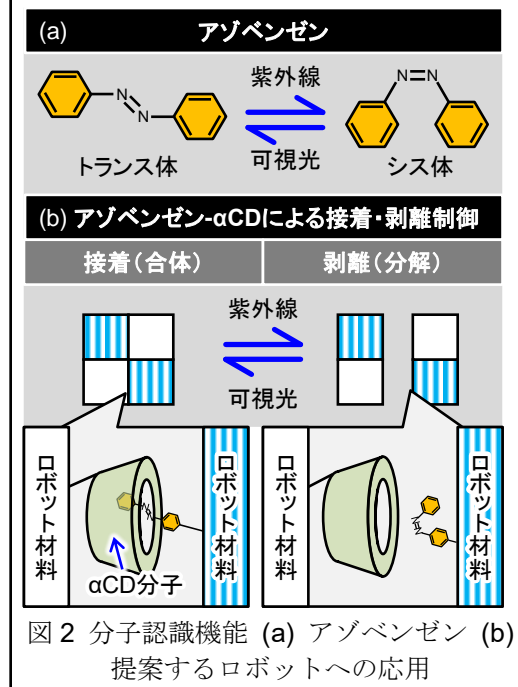


図2 分子認識機能 (a) アゾベンゼン (b) 提案するロボットへの応用

4. 研究成果

モジュール単体の駆動

まず、ロボットの基本構成ユニットであるモジュールの作製を行った。ロボットの作製には微細加工プロセスを用い、作製したロボットを剥離するために犠牲層プロセスを使用した。犠牲層としては、水に可溶で有機溶剤に不溶であるデキストランを用いる。犠牲層の上におもりとなるフォトレジストの SU-8 (SU-8 3010, 日本化薬) とグラフェンを混合した微細加工可能な温度応答性ゲルである PNIPAAm (Bioresist®, 日産化学) をそれぞれパターニングすることでモジュールの作製を行う。図 3 に作製したモジュールの顕微鏡写真を示す。

次に、作製したロボットの駆動を行った。自作の倒立顕微鏡上にガルバノミラーを用いたレーザー走査系を構築した。駆動用の光源には 1064 nm の近赤外レーザーを用いる。作製したロボットの一部にラインレーザーを照射し PNIPAAm を収縮させる。その後、そのラインを走査することで PNIPAAm の収縮範囲を移動させる。その際に生じたモジュールとガラス基板との摩擦により駆動を行う。単体のモジュールに光を走査することにより、は図 3 のようにレーザー光のスキヤニングにより膨張・収縮し、移動を行うことに成功した。3 つのモジュールに対して複数回スキヤニングを行った結果、1 サイクルで平均 39 μm の前進を行うことに成功した。

モジュールの合体および駆動

ロボットに合体・分解機能を付与するために、ロボットのアクチュエータである PNIPAAm の架橋前の材料に、アゾベンゼンと α -シクロデキストリン (αCD) を混合して 2 タイプのロボットモジュールを作製した。PNIPAAm を光架橋する際にこれらの材料を混合し、その後作製プロセスは通常のロボットの作製と同様に行った。作製された αCD ゲルとアゾベンゼンゲルを図 4 に示す。なお、それぞれのロボットを顕微鏡視野中で区別するために、 αCD のみに SU-8 のおもりを付けてある。

次に、作製したロボットを移動させ、それぞれのロボットの一部を重ねて接触させた状態で可視光を照射し、ロボットを合体させた。この状態で振動や水流を与えてもロボットが剥離しなかったため、合体していることを確認できた。また、この合体した状態のロボットに、レーザー光を走査することで合体したロボットの駆動を行った。光走査により、図 4 (c), (d) のように光の走査方向に移動を行うことに成功した。このロボットは 1 サイクルの光照射で約 108 μm 前進を行った。これはモジュール単体時の約 3 倍の移動量となり、モジュールを合体させることでロボットの移動効率を高めることができたと考えられる。

以上、合体・分解型ロボットの作製・駆動・合体を行うことに成功した。今後は、より様々な応用に取り組んでいくとともに、接着力の測定を行い、合体・分解型マイクロロボットの設計論構築に取り組む予定である。

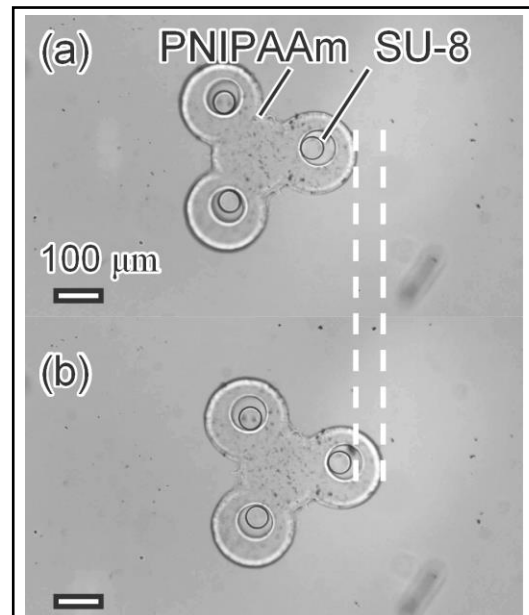


図 3 ロボットの基本ユニット (モジュール) 単体の移動。
(a) 光走査前, (b) 光走査後

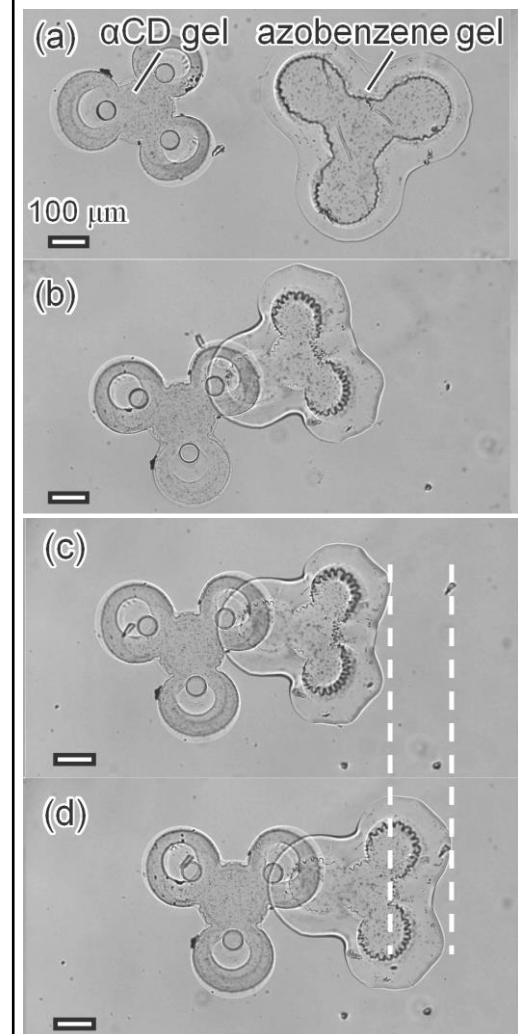


図 4 ロボットの合体 (a) 合体前, (b) 合体後, (c) 合体したロボットの光走査前, (d) 光走査後

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Wada Hiroki, Koike Yuha, Yokoyama Yoshiyuki, Hayakawa Takeshi	4. 巻 39
2. 論文標題 Evaluation of Three-dimensional Shape and Drive Characteristics of On-chip Gel Actuator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Robotics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 565～568
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7210/jrsj.39.565	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 Koike Yuha, Wada Hiroki, Kodera Shunnosuke, Yokoyama Yoshiyuki, Hayakawa Takeshi	4. 巻 39
2. 論文標題 The System of Parallel Cell Manipulation by using Integrated Gel Actuator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Robotics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 673～676
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7210/jrsj.39.673	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 Kodera Shunnosuke, Koike Yuha, Yokoyama Yoshiyuki, Hayakawa Takeshi	4. 巻 40
2. 論文標題 Drive of Peristaltic Micro-Gel Robot by Using Laser Irradiation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Robotics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 83～86
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7210/jrsj.40.83	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 Koike Yuha, Kodera Shunnosuke, Yokoyama Yoshiyuki, Hayakawa Takeshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Real-time irradiation system using patterned light to actuate light-driven on-chip gel actuators	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ROBOMECH Journal	6. 最初と最後の頁 1～10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40648-022-00220-0	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 -

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 Hiroki Wada, Yuha Koike, Yoshiyuki Yokoyama, Takeshi Hayakawa
2. 発表標題 3D DEFORMATION OF THERMORESPONSIVE GEL ACTUATOR UNDER MECHANICAL CONSTRAINTS
3. 学会等名 The 25th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (MicroTAS 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuha Koike, Hiroki Wada, Shunnosuke Kodera, Yoshiyuki Yokoyama, Takeshi Hayakawa
2. 発表標題 MANIPULATION OF MULTIPLE CELLS BASED ON A FLUID RESISTANCE CONTROL BY USING INTEGRATED GEL ACTUATORS
3. 学会等名 The 25th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (MicroTAS 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Natsuki WATANABE, Yoshiyuki YOKOYAMA, Takeshi HAYAKAWA
2. 発表標題 Adhesion Control of Microgel Robot Based on a Molecular Recognition
3. 学会等名 IEEE 32th International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shunnosuke KODERA, Yuha KOIKE, Yoshiyuki YOKOYAMA, Takeshi HAYAKAWA
2. 発表標題 Laser Scanning Drive of Peristaltic Micro-Gelrobot
3. 学会等名 IEEE 32th International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 Yuha Koike, Hiroki Wada, Yoshiyuki Yokoyama, Takeshi Hayakawa
2 . 発表標題 Flow Control toward Parallel Cell Manipulations by Using Integrated Gel Actuators
3 . 学会等名 IEEE 32th International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS 2021) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Hiroki Wada, Yuha Koike, Yoshiyuki Yokoyama, Takeshi Hayakawa
2 . 発表標題 Non-Uniform Swelling of Gel Actuator Made from Temperature Responsible Gel under Mechanical Constraint
3 . 学会等名 IEEE 32th International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS 2021) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Natsuki WATANABE, Shunnosuke KODERA, Yuha KOIKE, Yoshiyuki YOKOYAMA, Takeshi HAYAKAWA
2 . 発表標題 Fabrication of reconfigurable modular microgel robot
3 . 学会等名 Pacifichem 2021: A Creative Vision for the Future (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Shunnosuke Kodera, tomoki watanabe, Yuha Koike, Yoshiyuki Yokoyama, Takeshi Hayakawa
2 . 発表標題 Soft Microrobot Driven by Using Graphene-Mixed Gel Actuator
3 . 学会等名 Pacifichem 2021: A Creative Vision for the Future (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroki Wada, Yuha Koike, Yoshiyuki Yokoyama, Takeshi Hayakawa
2. 発表標題 Analyses of deformation of light driven on-chip gel actuators
3. 学会等名 Pacifichem 2021: A Creative Vision for the Future (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuha Koike, Hiroki Wada, Yoshiyuki Yokoyama, Takeshi Hayakawa
2. 発表標題 Integration of light-driven hydrogel actuator for on-chip cell manipulations
3. 学会等名 Pacifichem 2021: A Creative Vision for the Future (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小池 優巴, 和田 紘樹, 小寺 駿之亮, 横山 義之, 早川 健
2. 発表標題 細胞操作の並列化に向けた集積型光駆動ゲルアクチュエータ
3. 学会等名 化学とマイクロ・ナノシステム学会第43回研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和田 紘樹, 小池 優巴, 横山 義之, 早川 健
2. 発表標題 機械的拘束下におけるオンチップゲルアクチュエータの三次元変形形状解析
3. 学会等名 化学とマイクロ・ナノシステム学会第43回研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和田 紘樹, 小池 優巴, 横山 義之, 早川 健
2. 発表標題 拘束下におけるゲルアクチュエータの形状評価と細胞操作応用
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2 0 2 1 (ROBOMECH2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小池優巴, 和田紘樹, 小寺駿之亮, 横山義之, 早川健
2. 発表標題 集積型光駆動ゲルアクチュエータを用いた細胞操作の並列化
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2 0 2 1 (ROBOMECH2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小寺 駿之亮, 横山 義之, 早川 健
2. 発表標題 ソフトアクチュエータを用いた蠕動運動型マイクロゲルロボットの駆動
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2 0 2 1 (ROBOMECH2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊 夏生, 小寺 駿之亮, 小池 優巴, 横山 義之, 早川 健
2. 発表標題 合体・分解型マイクロゲルロボットの検討
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2 0 2 1 (ROBOMECH2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和田 紘樹, 小池 優巴, 横山 義之, 早川 健
2. 発表標題 細胞操作への応用を目指した機械拘束付与ゲルアクチュエータ
3. 学会等名 化学とマイクロ・ナノシステム学会第44回研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小池 優巴, 和田 紘樹, 横山 義之, 早川 健
2. 発表標題 細胞操作に向けた集積型光駆動ゲルアクチュエータによる流体制御
3. 学会等名 化学とマイクロ・ナノシステム学会第44回研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊 夏生, 小寺 駿之亮, 小池 優巴, 横山 義之, 早川 健
2. 発表標題 合体・分解型マイクロゲルロボットの作製
3. 学会等名 第39回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小寺駿之亮, 小池優巴, 横山義之, 早川健
2. 発表標題 レーザー照射を用いた蠕動運動型マイクロゲルロボットの駆動
3. 学会等名 第39回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2021)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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