

報告日： 2023 年 4 月 31 日

報告者： 横浜国立大学 工学研究院

特任教員（助教）

向井 理

1. 研究概要

（和文）

(1) マルチマテリアル光造形法を用いたマイクロゲルアクチュエータの開発

(2) 職名 向井 理、横浜国立大学 工学研究院 特任教員（助教）

(3) 研究概要

従来、アクチュエーターには硬い材料が主に利用されてきたが、軽量性、形状適応性、受動力学制御性、接触角応力分散性が高いことから柔らかい材料から構成されるソフトアクチュエーターが注目されている。ソフトアクチュエーターの中でもゲルアクチュエーターは材料自体が流体アクチュエーターにおけるポンプや制御装置の働きをするため、構造がシンプルでありマイクロ系への応用が期待される。しかしながら、従来ゲルアクチュエーターは、材料を高精度に加工することが困難であり、2次元的なシンプルなアクチュエーターしか作製されてこなかった。これに対して、研究代表者らのグループは、最も高精細な 3D プリント技術である光造形法に適用可能な光応答性ゲル材料の開発に取り組み、光造形によって高精度な 3D 造形ができるゲル材料を開発した。また、再生医療に重要とされるメカノバイオロジーへの適用するため細胞培養条件で駆動可能なゲル材料の作成に成功した。さらに、このゲル構造体に銀ナノ粒子を内包させて、赤色レーザー光でアクチュエーターのアームごとに個別に遠隔駆動できることも確認した。

(4) 光造形、3D プリント、刺激応答性ゲル、ソフトアクチュエーター

（英文）

(1) Development of gel microactuators using multi-material stereolithography

(2) Masaru Mukai,

Specially Appointed Assistant Professor, Yokohama National University,

(3) Summary

Hard materials have been mainly used for actuators in the past, but soft actuators composed of soft materials are attracting attention because of their light weight, shape adaptability, passive mechanical controllability, and high contact angle stress dispersion. In particular, gel actuators are expected to be applied to microscopic systems due to their simple structure, because the

material itself acts as a pump and controller in fluid actuators. However, gel actuators have been fabricated only as simple two-dimensional actuators due to the lack of technology for high-precision processing of the material. In contrast, the principal investigator's group has been working on the development of photocurable gel materials for gel actuators that can be applied to stereolithography, the most precise 3D printing technology, and has demonstrated that high-precision 3D fabrication is possible with the gel material by stereolithography. We have also succeeded in creating a gel material that can be driven under cell culture conditions in order to apply it to mechanobiology, which is considered important for regenerative medicine. In addition, it was also confirmed that each arm of the actuator can be remotely driven by red laser light by encapsulating silver nanoparticles in the 3D gel structure.

(4) Stereolithography, 3D printing, Stimuli-response gel, Soft actuator

2. 本研究の意義、特色

本研究は、新規なゲル材料の開発と造形・駆動装置の開発という異分野融合研究であり、学際的かつ先駆的な研究である。具体的には、材料の観点から高精細な 3D 造形が可能でかつ、再生医療に重要とされるメカノバイオロジーへの適応可能な細胞環境下で駆動し、かつ光硬化性のヒドロゲル化剤を開発に成功した。また、造形・駆動装置の観点から、赤色レーザーを直接照射または集光して造形物に照射することでマイクロゲルアクチュエーター全体の駆動およびアームの個別駆動といった制御が可能であることを明らかにした。

3. 実施した研究の具体的内容、結果

光で遠隔操作可能なマイクロゲルアクチュエーターの開発

本研究で刺激応答性ゲルとして用いるポリ (*N*-イソプロピルアクリルアミド) pNIPAm ゲルは主に熱に対して収縮するヒドロゲルとして知られている。我々は、局所的な加熱を可能にし、微細な駆動を可能とするために造形物中に銀ナノ粒子を作成することで、赤色レーザー照射により局所的な加熱が可能なゲルを作成した。具体的には、造形樹脂中に硝酸銀を混合し光還元により造形物中に銀ナノ粒子を形成した(図 1)。その結果、作成した局所加熱装置により赤色レーザーが照射された造形物の発熱を熱画像計測によって確認できた。

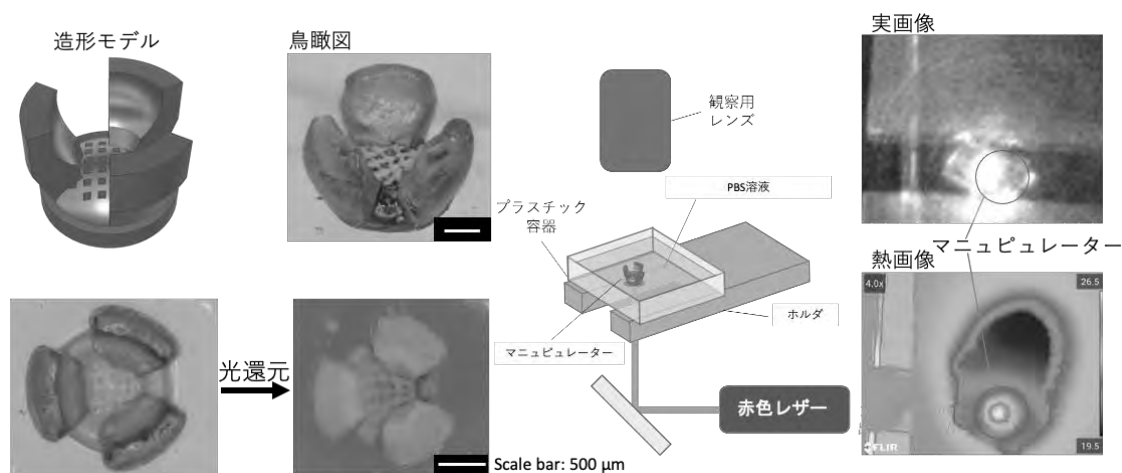


図 1 銀ナノ粒子を複合化したマイクロゲルアクチュエーターおよび赤色レーザーによる局所加熱装置の概略図

細胞培養化で駆動可能な光硬化性ヒドロゲルの開発

ソフトアクチュエーター[鈴森ら, 日本ロボット学会誌, 37, 26(2019)]は、軽量性、形状適応性、受動力学制御性、接触角応力分散性が高いことから、ソフトロボティクスの駆動源として医療、福祉、バイオ分野への応用が期待されている。特に、近年では、細胞や組織に機械的な刺激を与えることでどのような影響が及ぼすのかを解明するためのメカノバイオロジー[Wang et al., Biomech. Model. Mechanobiol. 5, 1, (2006)]が、細胞の分化に重要な因子であることから、ソフトロボティクスを用いた医療分野への応用も期待されている。しかしながら、当初のゲル材料では 20℃付近で光を照射することで駆動は可能なものの、細胞培養条件下である 37℃では光を照射しても駆動することができなかった。これは、pNIPAmゲルは 20℃では光照射に伴う収縮が可能であるが、37℃ではすでに収縮しきっており、さらに光により加熱されても大きな変化が起こらないためであると考えられる。そのため、pNIPAmゲルの収縮領域を高温側にシフトさせる目的で、イオン性アクリルアミドであるアクリルアミド-2-メチルプロパンスルホン酸(AMPS)を光硬化性樹脂に混合して用いた。その結果、温度に対する膨潤収縮率を高温側にシフトできることが確認された(図2)。さらに、調整した光硬化性ゲル化剤を用いてアクチュエーターを作成したところ 37℃で駆動することが確認された。

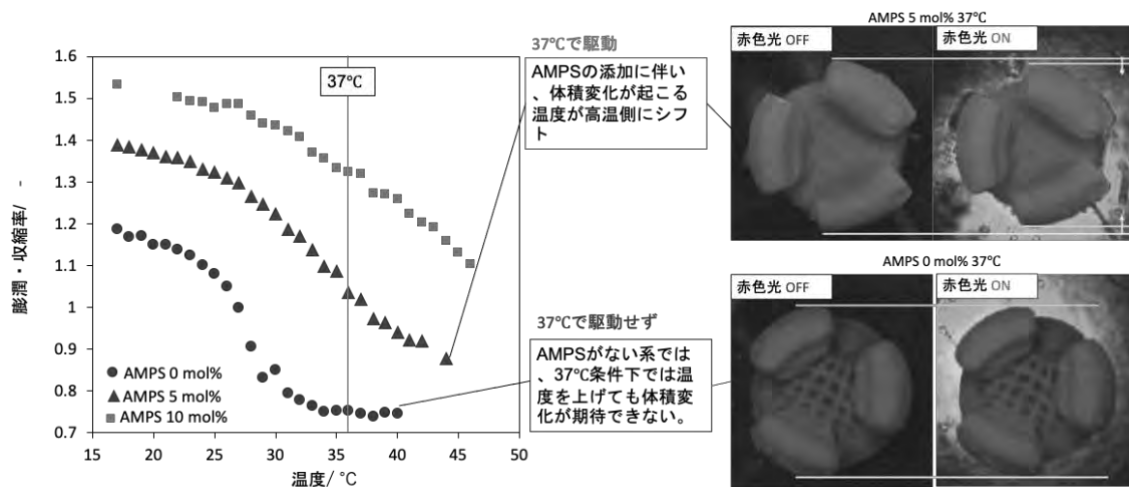


図2 AMPS添加に伴う膨潤収縮挙動の変化とマイクロゲルアクチュエーターの駆動

構造最適化手法を用いたマイクロゲルアクチュエーターの開発

膨潤・収縮が等方的に生じると仮定して、東京大学の山田崇恭准教授の協力を得て、構造最適化手法によって設計したアクチュエーターを実際に造形し、高精細にモデル形状を再現した造形物が得られた(図3)。しかしながら、赤色レーザー照射によってアクチュエーターの駆動は観察できなかった。これは、膨潤・収縮が等方的に生じるという仮定が成立していない可能性があり、基板との接着面近傍は膨潤・収縮が抑制されることや、発熱などを考慮に入れる必要がある。なお、マルチマテリアル造形も試みたが温度に対する応答性が異なるため歪んでしまい高精度な造形は困難であった。今後、異なる特性の材料を高精度にマルチマテリアル造形するための形状補正技術を検討する。

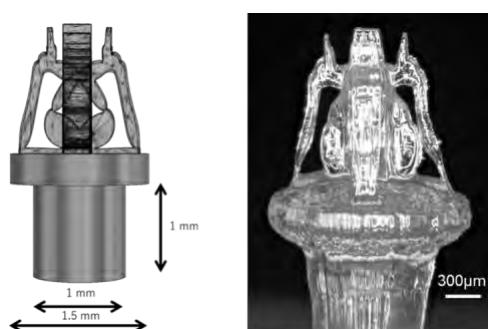


図3 構造最適化によって設計された造形物のCADモデル（左）および造形物の写真

アクチュエーターを遠隔操作するシステムの開発

アクチュエーターの駆動方法としては、まずは造形物全体に赤色レーザーを照射することで、アクチュエーター全体の駆動を実現したが、より高度なアクチュエーターの駆動にはアクチュエーターの所望の箇所を個別に制御する必要がある。そこで、赤色レーザーを集光

し、造形したアーム部に焦点を合わせたところ腕 1 本 1 本を個別に制御できることが明らかとなった(図 4)。



図 4 マイクロアクチュエーターの全体(左)および部分的な(右)駆動

4. 本研究を実施したグループに属する主な研究者の氏名、職名

向井理, 横浜国立大学 工学研究院 特任教員 (助教)

丸尾昭二, 横浜国立大学 工学研究院 教授

5. 研究実施時期

2022 年 4 月 1 日から 2023 年 3 月 31 日まで

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

向井理, 盛一志仁, 丸尾昭二, 光で遠隔操作可能な 3D プリンテッド・マイクロマニピュレーターの開発, 電気学会センサ・マイクロマシン部門大会 第 39 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム、アスティ徳島、L-249、2022/11/14-16.

7. 内外における関連研究の状況

光造形法によってマイクロゲルアクチュエーターを構築する方法として、刺激応答性ゲルを用いて、光による局所加熱によりゲルを駆動させた例が Hipper らによって報告されている [Hipper et al., *Nat. Commun.* 10, 232 (2019)]。しかしながら、彼らの造形物は片持ち梁のような平面的なシンプルな構造体であり、本研究で作成したような複雑な 3D 構造体を用いたアクチュエーターは、申請者が知る限りいまだに達成されていない。

8. 今後の発展に対する希望

マルチマテリアル造形および構造最適化手法については、実施した研究結果のようにシ

ンプルな仮定の元に設計を行ったために、計算結果と異なりアクチュエーターの駆動を実証できなかった。また、マルチマテリアルについても造形後の洗浄等の処理によりゲル環境が変化してしまい、想定する設計モデルとは異なる造形物となったしまった。今後は、マルチマテリアル造形における形状補正技術の導入や、アクチュエーターの有限要素構造解析などの手法を取り入れることで、より精度の高いマルチマテリアル造形や構造最適化手法の改善が期待される。