

# 身体に適應するウェアラブルソフトマシンの検討

Examination of wearable soft machines that adapt to the body

阿部 壮真<sup>1</sup>, 小川 純<sup>2</sup>, 渡邊 洋輔<sup>2</sup>,  
 エムディ ナヒン イスラム ジブリ<sup>2</sup>, 川上 勝<sup>2</sup>, 古川 英光<sup>2</sup>

Shoma ABE<sup>1</sup>, Jun OGAWA<sup>2</sup>, Yosuke WATANABE<sup>2</sup>,

MD Nahin Islam SHIBLEE<sup>2</sup>, Masaru KAWAKAMI<sup>2</sup>, Hidemitsu FURUKAWA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>山形大学工学部

<sup>2</sup>山形大学大学院理工学研究科

<sup>1</sup>Faculty of Engineering, Yamagata University,

<sup>2</sup>Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University

## 【要約】

柔らかい材料や構造を扱うソフトマシン研究が注目されている。ソフトマシン研究のひとつに柔らかいウェアラブルデバイス開発があり、人体を保護し、生活を支援する画期的なツールとして導入が期待されている。本研究では、身体に適應する駆動状態で姿勢維持を行えるアクチュエータを目指す。さらに、アクチュエータの連結を切断により解除することで、駆動前の形態に修復される自己修復アクチュエータの作製を行う。また、アクチュエータ自身のスケールビリティを考慮することで、身体適應したアクチュエータになると期待される。

キーワード: ソフトアクチュエータ, モジュラーロボット, 自己修復, 異方性

## 【Abstract】

Soft machine research, which deals with soft materials and structures, is attracting attention. One of the soft machine researches is the development of soft wearable devices, which are expected to be introduced as a revolutionary tool to protect the human body and to support our daily life. In this research, we aim to develop an actuator that can maintain posture in a driving state that adapts to the body. Furthermore, we will fabricate a self-healing actuator that can be restored to its pre-drive configuration by disconnecting the actuator's linkage. The actuator is expected to be more adaptable to the body by considering the scalability of the actuator itself.

Keywords: soft actuator, modular robot, self-healing, anisotropic

## 1. 緒言

### 1.1 研究背景

近年、柔らかい材料や構造を包括的に統合し、柔らかさに起因する機能性を追究するソフトマシン研究が注目されている。ソフトマシン研究のひとつに位置付けられるウェアラブルソフトデバイスの開発では、身体を保護するために求められる機能性をもつソフト材料を身体の動作に適應するように構造化する方法が検証されている。<sup>[1][2]</sup>ここで一般的に耐久性の高いシリコンなどのソフト材料に起因するソフトデバイスは、設計段階で想定される動作に基づいて形状が決定される。そのため一度製作すれば破損しない限り、当初想定された機能を提供できる点で利点をもつ。一方で本稿はソフト材料がもつ柔らかさという冗長性から生じた想定されていない形態変化に着目する。例えば、人の指に沿って装着されるウェアラブルソフトデバイスの曲げ変形では、ソフト材料にしわが生まれる。このようなしわは身体の動きに即することで自然に発生した変形であり、本来想定していない変化である。ここでは、このようにウェアラブルデバイス側で身体の動作に適應して、設計された形態から別の適應形態に遷移でき、必要に応じて元の形態に復元できる機能性の開発を目指す。

### 1.2 研究目的

そこで本研究では、切断と修復を繰り返し行える性質をもつ自己修復ゲル材料を基に、身体の動作に適應した形態変化を許容するソフトアクチュエータを検討する。図1に本研究が目指すソフトアクチュエータの概念図と従来のソフトアクチュエータとの比較を示す。従来のソフトアクチュエータは、駆動時に必要な力をリリースす

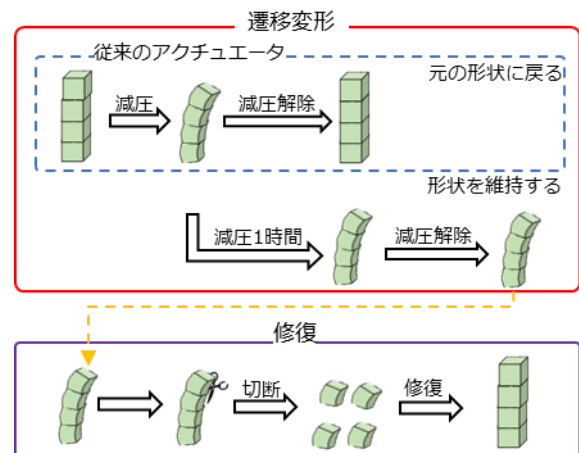


図1. 本研究のアクチュエータの概念図

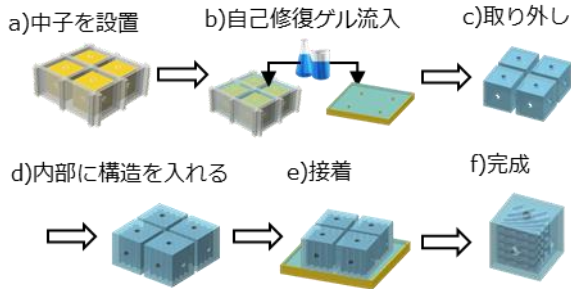


図 2. モジュール型ゲルブロックの作製法

ば、駆動前の形態に戻ることができる。<sup>[1][2]</sup>本研究が目指すソフトアクチュエータは、短時間の駆動では従来のアクチュエータと同様に駆動後にすぐ元の形態に復元できるが、長時間駆動状態が続くとその駆動形態に遷移することを目指す。加えて、図 1 に示すように別の形態遷移のあとに切断の手続きを行うことで、形態を修復できるかどうかを検討する。

## 2. 形態遷移型ゲルアクチュエータ

### 2.1 作製手順

本稿で提案する形態遷移型アクチュエータはモジュール型ゲルブロックを基本単位としており、モジュール単体あるいは連結し、除圧により駆動することができる。図 2 にモジュールの作製手順を示す。モジュール形状は厚み 2.0 mm の 24.0 mm 角の中空立方体である。はじめに、レーザーカットされたアクリルの仕切りに熱可塑性ポリウレタン (Thermoplastic polyurethane, TPU) で作製した中子を設置し、自己修復ゲルを流し込み、10 分間のキュアリングの手続きを行う。室温に自己修復ゲルを馴染ませることで、一面が解放された中空ブロック状の自己修復ゲルが完成する。次に解放面を封止するための蓋を作成する。ポリ乳酸 (Poly-Lactic Acid, PLA) 製蓋用の型に自己修復ゲルを流し込むことで封止用の自己修復ゲルができる。そして作成済みのゲルブロックに TPU 製の 3D 印刷型変形規定構造を内部に仕込み、解放面に封止用ゲルを配置することで、分離面が接合する自己修復性が発現し、形態遷移型ゲルアクチュエータが完成する。

### 2.2 3D 印刷型変形規定構造

このアクチュエータは 3D プリントで造形される内部構造をもつ。ゲル内部が真空圧縮されることで押し潰れ、内部構造が減圧されることで変形が生じる。この内部構造は並行するラインオブジェクトを交差角度  $\theta$  だけ回転させたものを交互に積層する井桁構造に基づいて 3D プリント可能な構造を採用している。この構造に設定したパラメータの設定と

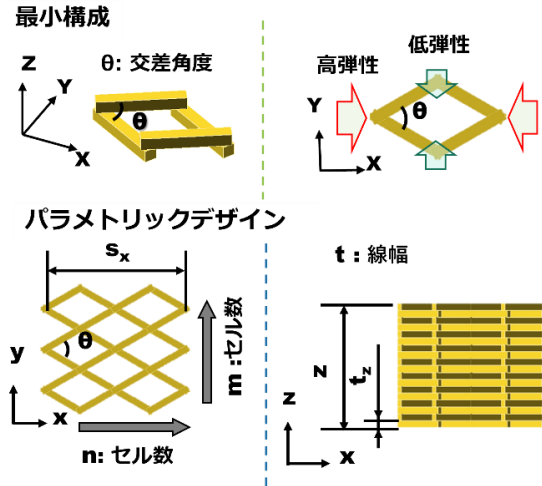


図 3. 内部構造のパラメトリックデザイン

モード	変形なし	1軸収縮	屈曲	せん断
構造				
変形				
$s_x$	19	19	17	-
$n$	3	3	3	4
$m$	3	5	5	5
$t$	0.5	0.5	0.5	0.5
$t_z$	2	2	2	2
$z$	19.5	19.5	19.5	19.5
$\theta$	90	60	30,45,60,75,100	60

図 4. 採用する変形規定構造

変形の様子を図 3 および図 4 に示す。

図 3 に示すようにこの構造は交差角度  $\theta$ 、最大格子幅  $s_x$ 、セル数  $m$  および  $n$ 、線幅  $t$ 、積層高  $t_z$ 、最大積層高  $z$  の 7 つの変数で構成される。モジュールの変形規定構造は「変形無し」、「収縮」、「屈曲」、「せん断変形」の 4 つの変形パターンを設計できる。「収縮」、「屈曲」、「せん断変形」は変形を可能にする柔軟さが必要であるため、TPU フィラメンを採用し、「変形無し」ではゲルケースの減圧でも屈曲が生じない硬度をもつポリ乳酸樹脂 (Poly-lactic acid, PLA) を材料に採用することで実現できる。そのため「変形無し」に関しては、材料依存のため、この構造自体に規定はない。これらの井桁構造の造形は、FDM 方式の 3D プリンタ (X-Pro, QIDI Tech 社) を使用している。



	封止プラグ	チューブコネクタ
形状		
接続位置	モジュール面	モジュール チューブ間
通気パス有無	×	○
材料	UV硬化性樹脂	
3Dプリンター	LCD 3D printer	

図 5.採用したコネクタ

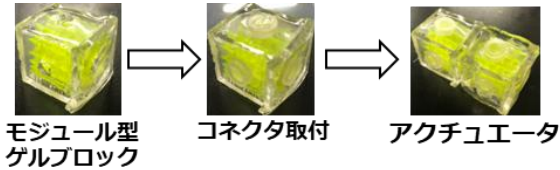


図 6.モジュールアセンブリ手順

### 2.3 3D プリントブルコネクタ

モジュール型ゲルブロックの開口部を塞ぐため、コネクタの設計もパラメトリックデザインされている。コネクタの基本形状は開口部よりわずかに大きい直径の円柱で、両端にはモジュールの壁面に引っかかるための円板を取り付けている形状に設計している。すべてのコネクタは、LCD方式の3Dプリント (ShuffleXL, Phrozen) を用いて UV 硬化性樹脂 (Clear/Black Resin, Wanhao) で造形している。図 5 に採用したコネクタを示す。コネクタには 2 種類存在し、封止プラグ、チューブコネクタがある。封止コネクタは、モジュールの開口部を他のゲルブロックと接続せずに塞ぐ役割をもつコネクタである。円柱部の厚さはモジュールの壁厚と同じであるため、空気が入らずに密閉することができる。チューブコネクタは、空気をシリコンチューブからモジュールに流入を行うためにシリコンチューブとモジュールを接続することのできるコネクタである。主にエアコンプレッサと接続する用途でのみ使用される。

### 2.4 アセンブリ手順

図 6 にアセンブリ手順を示す。開口部を封止プラグより塞ぎ、空気漏れが生じないようにする。その後、他のモジュールの開口部に合わせてモジュール同士を接着させる。5 分程経過すると、自己修復ゲルの特性である自己修復が生じ、モジュール同士が連結される。再アセンブリは接続している一面をハサミなどで切断することで実現できる。

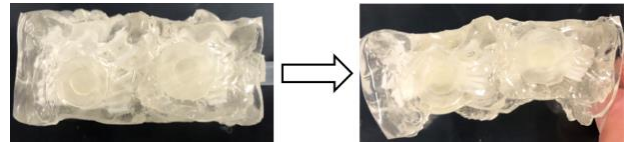


図 7.減圧駆動様子

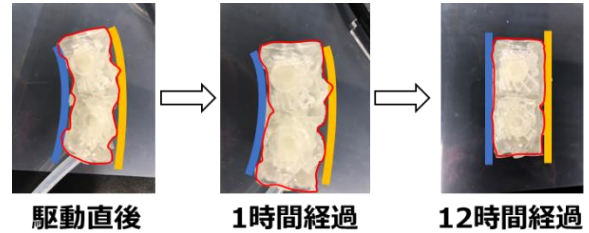


図 8. 変形維持時間推移

## 3. 結果

### 3.1 変形駆動および変形維持

遷移型内部に、屈曲の変形規定構造を仕込み変形駆動を行った。図 7 に駆動の様子を示す。内部の変形規定構造がゲルケースに押しつぶされしっかりとモジュール全体が屈曲の駆動をすることが確認した。

加えてアクチュエータが減圧により、どの程度形状を維持できるかの検証を行う。検証方法として、まず内部に屈曲の変形規定構造を仕込んだモジュール 2 つを用いて屈曲アクチュエータを作製する。その後、アクチュエータを 1 時間減圧し、圧力を解放してから 1 時間放置する。その状態からさらに 12 時間放置し、アクチュエータがどのように形態変化するかを観測する。図 8 に変形維持の時間推移の結果を示す。図 8 より、駆動直後ではしっかりと屈曲の変形が減圧を解錠しても維持、駆動後、アクチュエータの輪郭に皺のようなものが出来た。また、1 時間経過の際は、変形構造が多少変形している様相が観測された。12 時間経過後にはアクチュエータの屈曲角度は元の角度に復元している。この結果からこのアクチュエータの駆動直後は屈曲状態を維持しつつも、徐々に復元することが示された。この復元は内部構造の硬さに起因していると推測され、特に構造が内部からゲル面を押し返す力に依存すると考察される。

### 3.2 スケーラビリティ

ここでは、アクチュエータに採用する内部構造のスケーラビリティについて検討する。前節のように外壁の材料の選定やモジュール寸法のリスケールに応じて、変形に適した内部の変形規定構造のリスケールも必要となる。本研究では、収縮モデルの変形



表 1. 変形規定構造の圧縮試験結果

スケール	1/2 倍 (cells:2)	1/2 倍 (cells:3)	3/4 倍 (cells:2)	3/4 倍 (cells:3)	1 倍 (cells:3)	2 倍 (cells:3)	2 倍 (cells:6)
ヤング率[kPa]	76	299	24	72	29	17	30

規定構造を用いて、圧縮試験にて各スケールのヤン

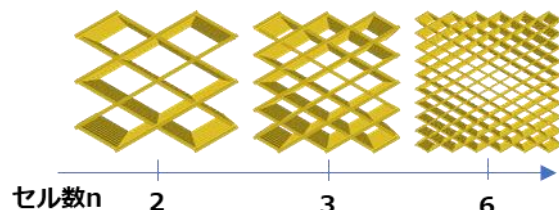


図 9. リスケールに合わせた変形規定構造

グ率を計算し、変形を維持出来る最適なスケールまた、セル数を確認する。図 9 にリスケールに合わせた変形規定構造、また、表 1 に各スケールのヤング率を示す。本稿で採用している格子数 ( $n : 3, m : 5$ ) の 29kPa が、自己修復ゲルのヤング率 32kPa 付近のため変形構造がゲル面を押して変形が維持されることが考えられる。しかし、スケールが上がり、セル数が減少すれば、ヤング率が 17kPa と自己修復ゲルのヤング率をかなり下回るため、変形駆動した時に変形維持が生じるのではないかと期待される。

#### 4. 考察

3.1 の結果より、今回は屈曲駆動を駆動させることに成功した。また、今回切断により再アセンブリする場合は、誤って切断しすぎモジュールの破損が生じたので、切込みや目印をつけモジュールを作成し、切断も視野に入れた設計を行い、不注意による破損を防ぐ必要がある。

また、形状維持を行う際、時間経過により、形状が元に戻った。これは、内部の変形規定構造がゲルケースのヤング率より高いことで、変形規定構造が内部で元の形に変形したことが考えられる。3.2 の結果の表 1 より、ヤング率のデータを元に、セル数を減少させることで、ヤング率をゲル面より低くすることで、変形維持を行うことが出来るのではないかと期待される。また、スケールが減少する際、ヤング率の数値では変形維持は困難であるが、セル数以外のパラメータを変更することでヤング率が減少し、スケールが減少した際でも、変形維持を行うことが出来るのではないかと考える。また、今回は屈曲のみで変形維持を行ったが、収縮やせん断変形の

場合は、変形維持を行っていないため、変形駆動による変形維持のしやすさを調査する必要がある。

#### 5. 結言

本稿では、自己修復ゲルを用いた駆動後の変形を維持し、切断により駆動前の形態に自己修復をおこない駆動を行う遷移型ゲルアクチュエータの作製の検討を行った。形態維持が少し発生し、人間が安定出来る姿勢の維持をサポートすることが出来ると期待される。

#### 謝辞

本研究の一部は科研費 JP18H05471, JP19H01122, JP21H04936, JP21K14040, JP22K17972, JSTOPERA, JPMJOP1844, ムーン ショット農林水産研究開発事業 (MS508, JPJ009237), 内閣府が進める「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第 2 期/フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」, 「官民による若手研究者発掘支援事業」(管理 法人: NEDO) によって支援を受けたものである。

#### 参考文献

- Zhao, H., Li, Y., Elsamadisi, A., Shepherd, R.: Scalable manufacturing of high force wearable soft actuators: Extreme Mechanics Letters, 3, 89-104 (2015)
- Anderson, I, A., Gisby, T, A., McKay, T, G., O'Brien, B, M., Calius, E, P.: Multi-functional dielectric elastomer artificial muscles for soft and smart machines: Journal of applied physics, 112 (4), (041101), (2012)
- Ogawa, J., Mori, T., Watanabe, Y., Kawakami, M., Shiblee, M. D. N. I., Furukawa, H.: MORI-A: Soft Vacuum-Actuated Module With 3D-Printable Deformation Structure. IEEE Robotics and Automation Letters, 7 (2), 2495-2502 (2022)
- Kriegman, S., Nasab, A. M., Shah, D., Steele, H., Branin, G., Levin, M., Bongard, J., Kramer-Bottiglio, R.: Scalable sim-to-real transfer of soft robot designs. In: 2020 3rd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), 359-366 (2020)