

令和元年6月25日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04299

研究課題名(和文)フレキシブル電極を用いた積層型PVCゲルアクチュエータの開発

研究課題名(英文)Development of a multilayer PVC gel actuator using flexible electrodes

研究代表者

橋本 稔 (Hashimoto, Minoru)

信州大学・繊維学部・特任教授

研究者番号：60156297

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：ポリ塩化ビニル(PVC)ゲルとフレキシブル電極を用いた、生体筋と同等の特性を有するソフトアクチュエータの創製を目的として、フレキシブル電極の探索と試作アクチュエータの特性向上を実施した。フレキシブル電極は研究代表者らで開発したカーボンブラック(CB)含有PVCゲルを用いたことで、特性の安定化・低電圧化の効果が確認された。また、変位量向上のために可塑剤の組成調整やアクチュエータの積層数比較などを実施したところ、可塑剤含有量の増加と積層数の増大による変位量向上の効果が得られた。以上により、開発したソフトアクチュエータの特性改善のための基礎技術を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により開発を目指すアクチュエータは人間に対する高い親和性と柔軟性、軽量性、静音性を持ち、生体筋と同様の特性を有することから、医療・福祉分野をはじめとした幅広い分野で利用されることが期待される。本研究成果としてはソフトアクチュエータによる触覚ディスプレイへの応用を検討している。点字ディスプレイなどの福祉機器として社会・国民に発信できるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In order to develop a soft actuator using PVC gel that have properties equivalent to those of living muscle, we searched for flexible electrodes and the actuator characteristics were improved. By using the carbon black containing PVC for the flexible electrode, the effect of stabilizing the characteristics and lowering the applied voltage was confirmed. Moreover, the composition adjustment of a plasticizer and lamination comparison of an actuator were implemented, and the improvement of the displacement amount was performed by increasing the plasticizer content and the number of stacked layers. From the above, we could establish the basic technology for improving the characteristics of the developed soft actuator.

研究分野：ロボティクス

キーワード：ソフトアクチュエータ 人工筋肉 高分子ゲル フレキシブル電極

### 1. 研究開始当初の背景

近年、日本の65歳以上の高齢者数は人口の25%以上となり超高齢社会を迎えた。これを受けて医療・福祉分野へのロボットや機械システムの導入が進められている。これらの機器には人間に対する高い親和性、安全性が求められることから、電磁モーターに代わる次世代ソフトアクチュエータの開発が注目されている。

高分子材料の一つであるポリ塩化ビニル (PVC) を可塑化して作製した PVC ゲルは電圧印加により、陽極近傍で大変形を生じるとともに、良好な応答性を有することが知られている。本申請者らはこれに着目し、金属メッシュを陽極に用いて PVC ゲルを挟み、積層することにより大気中で収縮駆動するソフトアクチュエータを開発した。このアクチュエータは 400V 印加時に収縮率 10%、発生力 90kPa、応答性 9Hz という特性を有する。一方、生体筋の特性は収縮率 30%、発生力 0.3MPa、応答性 10Hz と言われており、本アクチュエータの低電圧化と発生力、伸縮率の増大が実現されれば生体筋と同仕様の人工筋肉が創製できる。

### 2. 研究の目的

生体筋のように伸縮し、生体筋と同等の特性を有するフレキシブルな人工筋肉の開発を目的とする。そのために、本研究ではメッシュ状の金属電極ではなくフレキシブルな電極を用いることにより、PVC ゲル本来の柔軟性や軽量性を損なうことなくアクチュエータを構成する。

### 3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、次の研究を実施する。導電性グリースを用いた積層型 PVC ゲルアクチュエータの構成と特性評価、フレキシブル電極の試作、新たに開発したフレキシブル電極を用いた積層型 PVC ゲルアクチュエータの開発の順で取り組み、最終的に生体筋特性との比較を行う。

#### (1) PVC ゲルの組成と駆動原理

PVC ゲルはポリ塩化ビニル (PVC) と可塑剤であるアジピン酸ジブチル (DBA) を溶媒のテトラヒドロフラン (THF) 中で混合し、乾燥させた後に得られる。このゲルは PVC と DBA の質量比により、特性を調節することができる。

金属電極を用いた場合の PVC ゲルの駆動原理を図 1 に示す。電圧を印加すると電荷が陰極からゲルに注入され、陽極に移動し蓄積する。これによりゲルは陽極近傍でクリープ変形を起こす。電圧を除去すると静電気力が消失し、ゲルの弾性で元の形状に戻る。

本研究では薄いフレキシブルな電極を用いて、電圧印加によって電極と PVC ゲルと一緒に変形する伸縮型アクチュエータを構築する。その際の駆動原理を図 2 に示す。フレキシブル電極で挟まれた PVC ゲルは、電圧印加によって陽極近傍のゲル内部に高電荷密度層が生成され、陽極側に沿ってクリープ変形を起こし陽極とともに面方向に変形し、アクチュエータが厚さ方向に収縮する (図 2(a))。同時に電極間で Maxwell 応力も働いているため、より大きな変位と応力が得られると考えられる。また、図 2(b) の様に積層することで、更に大きな変位を得ることができる。

#### (2) 導電性グリースを用いた積層型アクチュエータの構成と特性評価

フレキシブル電極として導電性グリースを用いて積層型 PVC ゲルアクチュエータを構成する。使用した PVC ゲルの膜厚は約 185  $\mu\text{m}$  で、この両面に導電性グリースを塗布して 20 層まで積層し、15mm x 15mm x 4.2mm の積層型アクチュエータを作製した (図 3)。質量は 0.91g であり、金属を使用した従来アクチュエータの約 40% であった。

変位量の測定は、レーザー変位計を用いて厚さ方向の変位量を測定し、電流値の計測は 1k  $\Omega$  の抵抗にかかる電圧を測定することで算出する。発生力測定では直接アクチュエータに負荷をかけ、電圧印加・除去時の力-変位の特性を測定した。応答性は周波数 0.1-10Hz 時の変位より算出したゲイン線図より求めた。

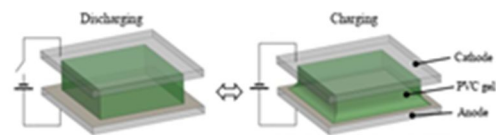


図 1 PVC ゲルの駆動原理

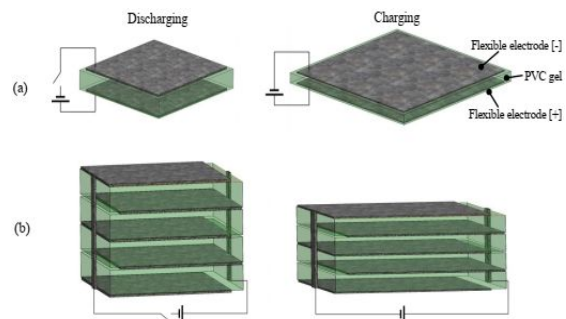


図 2 柔軟電極を用いた PVC ゲルアクチュエータの駆動原理



図 3 柔軟電極を用いた PVC ゲルアクチュエータ (20 層)

### (3)フレキシブル電極の試作

導電性グリースを用いた場合、周囲汚染や均一塗布が課題となり、特性の安定性や耐久性に影響する。本研究では、導電性グリースに代わるフレキシブル電極として、カーボンパーティクル (CB) 含有の PVC ゲルを作製する。成膜にはアプリケータを用いて厚さ約 30 μm の CB 含有 PVC ゲルを得る。

### (4) 新たに開発したフレキシブル電極を用いた積層型 PVC ゲルアクチュエータの開発

CB 含有 PVC ゲルを用いた積層型アクチュエータの特性評価を行う。導電性グリースと比較検討し、課題解消の後、生体筋との比較を行う。

## 4. 研究成果

### (1) 導電性グリースを用いた積層型アクチュエータの特性評価

導電性グリースをフレキシブル電極として用いた 20 層積層アクチュエータの特性評価結果を図 4 に示す。印加電圧 2.5kV 時のアクチュエータの伸縮率は約 8.3%、発生力は約 171kPa、応答性は約 7Hz であることが分かった。従来の金属製電極の積層型アクチュエータと比較すると、収縮率と応答性が同じ程度で発生力は約 90%増大、アクチュエータの厚さが約 19%減少と全体の重量は約 40%減少することが分かった。

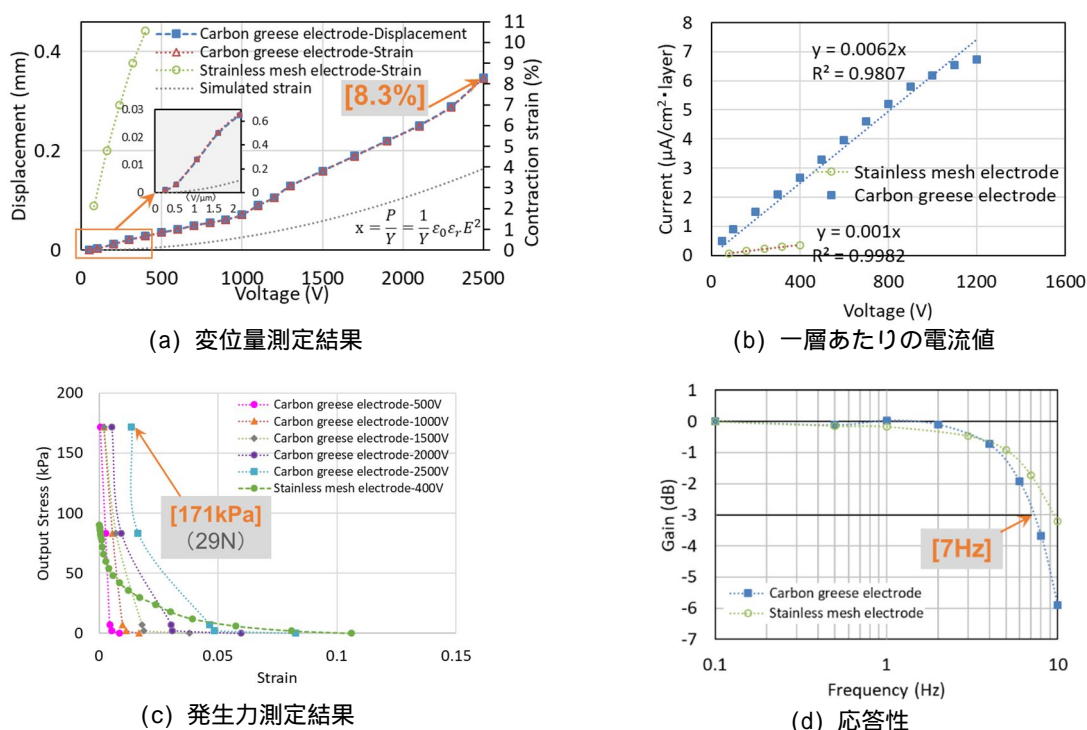


図 4 導電性グリースを用いた積層型アクチュエータの特性評価

### (2)フレキシブル電極の試作と特性評価

フレキシブル電極としては、PVC ゲルと親和性がよく、剥離しないものが好ましいことから、CB 含有の PVC ゲルを試作し、これをフレキシブル電極として 20 層の積層型アクチュエータを作製する (図 5)。

作製した CB 含有 PVC ゲルを用いた積層型アクチュエータの特性評価を実施し、グリース電極と比較した。その結果を図 6 に示す。図 6(a)に示すように、導電性グリースよりも CB 含有 PVC ゲルの方が収縮率が高い結果となった。

導電性グリースの課題の一つであった低電圧化に対しても CB 含有ゲルは有効であることが分かった。また、一層あたりの電流値は CB ゲルの方が高くなった (図 6(b))。図 6(c)にゲイン線図を示す。応答性は金属製電極 (SUS304) を用いた場合の 9Hz や導電性グリースを用いた場合の 7Hz と比較して、1.5Hz と劣る。その要因としてゲル同士の吸着力が挙げられる。PVC ゲルと電極との接触面積を安定させるため、親和性の高い PVC ゲルに CB を含有させたが、互いの吸着

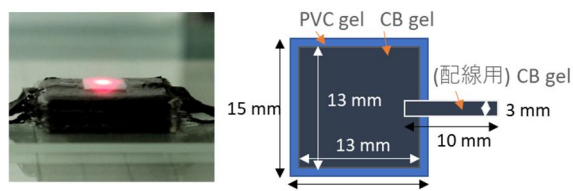


図 5 CB 含有 PVC ゲルを用いた積層型アクチュエータ (20 層)

力が働き、応答性に影響したと考えられる。

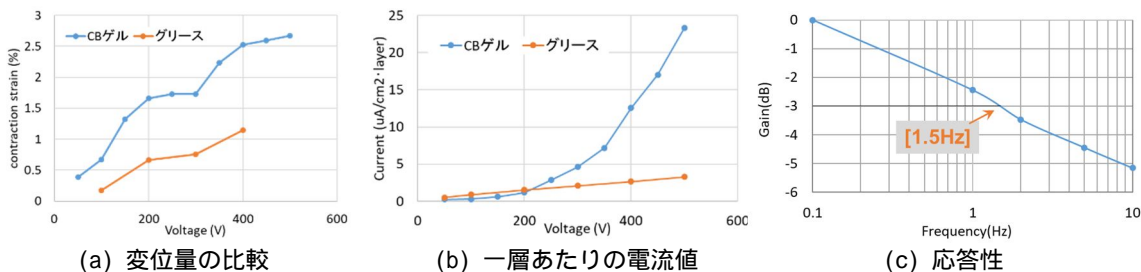


図6 CB含有PVCゲルを用いた積層型アクチュエータの特性評価結果

(3)フレキシブル電極を用いたPVCゲルアクチュエータの特性向上の検討

CB含有PVCゲルを用いることで特性が安定し、更に収縮率も向上することが確認された。しかし、未だ目標とした生体筋の特性に劣るため、その対策として本研究の過程で有効と考えられた積層数の増大、可塑剤比率の調整の二つの実験を実施した。

積層数の増大

収縮率の向上を目的として、CB含有PVCゲルを電極として用いた積層型アクチュエータを1-30層まで積層し、収縮率を比較した。結果を図7に示す。金属性電極を使用する従来のPVCゲルアクチュエータでは、積層数に依らず収縮率はいずれも約10%となるが、フレキシブル電極を用いた場合は、積層数が多いほど、収縮率が向上する結果となった。しかし、20層と33層では逆転しているため、積層数による特性向上には限界値があると考えられる。

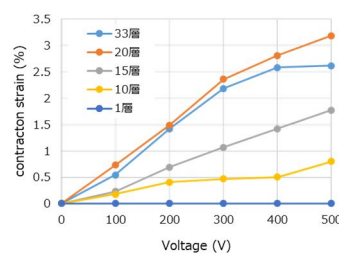


図7 積層数と収縮率

可塑剤比率の調整

PVCゲル液作製時のPVCと可塑剤の質量比をPVC:DBA=1:4, 1:6, 1:8で調整し、可塑剤比率と変位量の関係を調べた。結果を図8に示す。可塑剤比率が大きいほど、収縮率と電流値が増大した。また、CB含有PVCゲルにも同様の実験を実施したが、収縮率や電流値に違いは見られなかった。

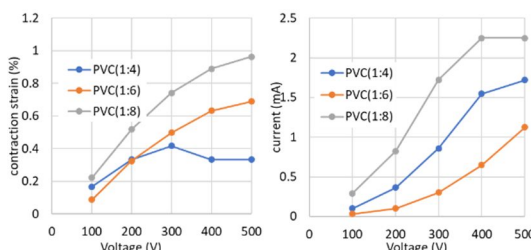


図8 可塑剤比と収縮率

(4)フレキシブル電極を用いたPVCゲルアクチュエータの応用

本研究で開発してきたPVCゲルアクチュエータは印加電圧2.5kV時の伸縮率約8.3%、発生力約171kPa、応答性約7Hzと生体筋のもつ収縮率30%、発生力0.3MPa、応答性10Hzという特性には至らなかったが、CB含有PVCゲルによる特性の安定化や低電圧化では有用な結果が得られ、また特性向上についても積層数の増大や可塑剤調整では効果が見られた。



今後はCB含有PVCゲルのCB濃度の調整を行い、フレキシブル電極の抵抗値を下げることや、PVCゲルの更なる薄膜化を実施するなどして特性向上を試みる。また、フレキシブル電極の塗布方法として導入したスクリーン印刷技術を生かし、均一で薄膜なフレキシブル電極を得る。さらに、印刷技術によってより緻密なソフトアクチュエータを作製し、それらを配列することで触覚ディスプレイへの応用を検討している。実際に5mmまで小型化したソフトアクチュエータを試作し、特性評価を実施した。結果を図9に示す。電極面積13×13mmのソフトアクチュエータと比較して、変位量の低下は確認されず、また対象と指先の相対的運動によってはヒトは数μmの凹凸を検知できることから、本研究成果の触覚ディスプレイへの応用を検討した。

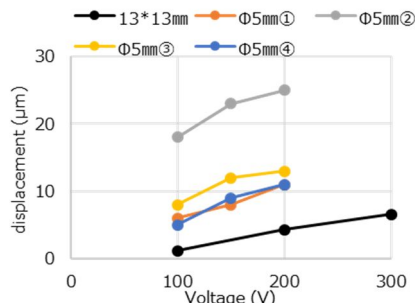


図9 ソフトアクチュエータの小型化

(5)触覚ディスプレイの試作

PVCゲルアクチュエータによって構成される触覚ディスプレイの有用性を検証するため、図10に示す試作機を作製した。

配列された小型アクチュエータはPVCゲル5×5mm、電極面積4×4mm、積層数3層とした。

陰極には厚さ 10  $\mu\text{m}$  の SUS 箔、陽極には厚さ 220  $\mu\text{m}$  の導電性メッシュを使用した。  
 また、試作機による呈示パターンの弁別試験を実施した。その結果、いずれの参加者も触知ピンで成す呈示パターンを読み取ることができた。  
 よって、PVC ゲルアクチュエータを用いることで、小型軽量・静音で高耐久性の優れた触覚ディスプレイの開発は充分に実現できると考えられる。

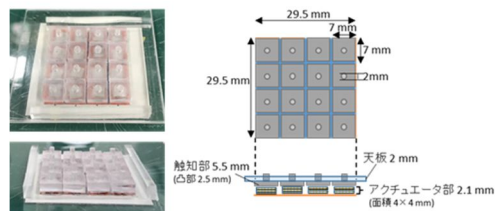


図 10 触覚ディスプレイの試作機

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Yi Li, Yanbiao Li, Minoru Hashimoto, Low-voltage planar PVC gel actuator with high performances Sensors and Actuators B: Chemical, Vol.282,482-489, 2019.

Yi Li, Minoru Hashimoto, A Novel Sheet Actuator using Plasticized PVC Gel and Flexible Electrodes, EAPAD 2017, edited by Yoseph Bar-Cohen, Proc. of SPIE Vol. 10163, 1016325.

〔学会発表〕(計 2 件)

鈴木 彩、橋本 稔、「PVC ゲルアクチュエータを用いた触覚ディスプレイの開発」第 19 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会、2018 年

李 毅、鈴木 彩、橋本 稔、「柔軟電極を用いた積層型 PVC ゲルアクチュエータの創製と特性評価」日本機械学会 2016 年次大会 S1510106 (2016.9.11-14)

〔図書〕(計 1 件)

橋本 稔、S&T 出版、ソフトアクチュエータの材料・構成・応用技術、2016 年 (P.148-155)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 3 件)

名称：誘電アクチュエータ

発明者：橋本 稔、李 毅、鈴木 彩

権利者：信州大学

種類：特許

番号：2016-112501

出願年：2016

国内外の別：国内

名称：ゲルアクチュエータ

発明者：橋本 稔、李 毅、鈴木 彩

権利者：信州大学

種類：特許

番号：2017-164069

出願年月日：2017

国内外の別：国内

名称：触覚デバイス

発明者：橋本 稔、鈴木 彩

権利者：信州大学

種類：特許

番号：2018-071911

出願年月日：2018

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.shinshu-u.ac.jp/faculty/textiles/chair/ht-lab/>

## 6 . 研究組織

(1) 研究分担者

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：鈴木 彩

ローマ字氏名：Aya Suzuki