収縮型PVCゲルアクチュエータの構造と駆動特性

山 野 美 咲* 小 川 尚 希* 橋 本 稔*
高 崎 緑* 平 井 利 博*

Structure and Characteristics of a Contraction Type PVC Gel Actuator

Misaki Yamano*, Naoki Ogawa*, Minoru Hashimoto*,
Midori Takasaki* and Toshihiro Hirai*

A poly vinyl chloride (PVC) gel actuator shows great potential for use as an artificial muscle because of such positive characteristics as movement in the air, large deformation, and being light in weight. A bending type actuator using PVC gel was studied previously [3]. In order to construct an artificial muscle it is necessary to compose an actuator which has the characteristics of contraction type deformation. In this study we propose an electrode arrangement for the PVC gel actuator. Also, we investigate the characteristics of the proposed actuator experimentally and show the effectiveness of the actuator as an artificial muscle. The proposed actuator has a layered structure using mesh type electrodes. The experimental results showed that the contraction rate of the actuator was about 13%, the response rate was 7 [Hz], and the output force was about 3 [kPa]. The characteristics of the PVC gel actuator are shown to be very effective for constructing an artificial muscle.

Key Words: Actuator, Artificial Muscle, PVC-gel, Mesh Electrode, Layered Structure

1. は じ め に

高分子材料は軽量・柔軟で加工性に優れることから、人工筋肉の候補として注目され、活発な研究が行われている。しかし、これらは溶液中でのみ駆動可能であるものや、屈曲変形のみ可能であるものが多く、筋肉のように収縮させようとする変位量が少ないなど課題が残されている。

人工筋肉としての条件は、人間の筋肉の特性と近似している、もしくはこれを上回る特性を有していることが望ましいと考えられる。人間の筋肉は収縮率約 30%、発生応力 0.3 [MPa]、応答性 10 [Hz] といわれている [1]。高分子材料を用いた収縮型アクチュエータの例として導電性高分子 [2] と誘電性エラストマ [2] が挙げられる。前者は収縮率と発生応力に優れるが応答性が低く、後者は発生応力と応答性に優れるが収縮率が小さいなど一長一短があり、生体筋のような特性を有する高分子アクチュエータはいまだ研究開発の途上にある。

一方、平井らによって研究されている PVC ゲルアクチュエータ [3] は収縮率と応答性がよいという特徴を持つ。また、一般にゲルは溶媒の継続的な供給が必要だが、可塑剤を含む PVC ゲルはその必要がないため空気中での動作が可能で、電場を駆動

要因とすることから比較的制御しやすいという特徴がある。このような利点を持つことから、PVC ゲルを用いた屈曲変形、レンズ型変形に関する研究 [3]~[5] が行われてきた。しかし人工筋肉を構成するためには、収縮変形を実現することが必要である。そこで、本論文では PVC ゲルの収縮駆動により人工筋肉を創製することを目指し、その構造と駆動特性を明らかにする。単層構造での駆動特性に加え、より大きい変位を得るために積層構造のアクチュエータを作製し、その駆動特性について調べた。

本論文の構成は次のとおりである。次の章において PVC ゲルの作製方法、弾性率、屈曲変形メカニズムを説明する。3 章において収縮型 PVC ゲルアクチュエータの構造を提案し、4 章で単層構造の基本的な駆動特性を明らかにし、5 章では積層構造の駆動特性を示す。6 章で実験結果に対する考察を行い、7 章において本論文をまとめる。

2. PVC ゲルアクチュエータ

2.1 PVC ゲルの作製

これまで、PVC ゲルはポリ塩化ビニル、可塑剤としてフタル酸ジブチル (DBP)、溶媒としてテトラヒドロフラン (THF) を用いてきた [6]。しかし、可塑剤として DBP を用いると、正極に対する粘着力が大きく電圧除去時の応答性が低いという問題があった。そのため、本研究では可塑剤としてより粘着性の低いアジピン酸ジブチル (DBA) を用いた。PVC ゲルの作製法は次のとおりである。PVC に DBA を加えて THF に溶解す

原稿受付 2008 年 12 月 19 日

*信州大学

*Shinshu University

■ 本論文は有用性で評価されました。

る。PVC が完全に溶解したら、溶液をテフロンシャーレにキャストし、水平な場所におき数日間放置する。THF が完全に蒸発したらゲルを取り出し適当な大きさに切り出して使用する。アクチュエータの組成としては PVC と DBA の重量比を 10:40 から 10:110 の間で調整する。

2.2 PVC ゲルの弾性率

PVC ゲルの弾性率はアクチュエータの特性を決める基礎特性であることから、引張り試験により弾性率を測定した。試料の組成は PVC:DBA=10:90 (DBA90) と 10:110 (DBA110) のものを用いた。長さ 30 [mm]、幅 10 [mm]、膜厚 1,000~1,600 [μm] の試料を用い、引張り速度 20 [mm/min]、チャック間距離 20 [mm] の試験条件で引張り試験を行った。DBA90 と DBA110 の試料についてそれぞれ 7 回の引張り試験を行い、弾性率の最大のものと最小のものを除いて平均弾性率を求めた。弾性率は PVC に可塑剤が 9 倍入っている DBA90 が 7.3 [kPa]、可塑剤が 11 倍入っている DBA110 で 3.4 [kPa] であった。可塑剤の添加により弾性率の低下が見られた。

2.3 PVC ゲルの屈曲変形のメカニズム

屈曲型 PVC ゲルアクチュエータを用いて PVC ゲルの屈曲変形のメカニズムについて説明する。屈曲型 PVC ゲルアクチュエータの概観とモデル図をそれぞれ Fig. 1 と Fig. 2 に示す。Fig. 1 より電場を与えることにより 90 [deg] 以上の屈曲変形を生成されることが分かる。このアクチュエータは板状の PVC ゲルが両側から電極に挟まれている。電荷が電極の負極からゲルに注入されると正極に移動し、放電により消失する。正極で放電する前に電荷は正極付近に蓄積され、ゲルの正極表面への静電氣的付着を促進する。これにより、正極付近でゲルのクリープ変形がおこり、ゲルは折れ曲がる (Fig. 2)。ゲルで誘発された変形は単純な屈曲ではなく、屈曲はクリープ変形によって誘発され正電極の先端に集中する。電場を除去するとゲルの正極

への粘着性は放電により消失し、ゲルは本来備わっている弾性により元の形状に戻る。また電場の増加によりゲルの変形量は増大する [3]。

3. 収縮型アクチュエータの構造

2 章で述べた PVC ゲルの屈曲変形のメカニズムを考慮して収縮駆動を可能とするアクチュエータ構成法を提案する。最初に基礎実験としてメッシュ状電極を正極とした PVC ゲルを作製した。PVC ゲルは電圧を印加すると、正極上に這い出して変形する特性を持つことから、正極としてメッシュ状の電極を用いた。ガラス板の上にアルミニウムテープを負極として貼り付け PVC ゲルをのせ、正極にステンレスメッシュをかぶせた試料を作製した。

この試料に、超高抵抗/微小電流計 (R8340A, ADVAN-TEST) を用い、1,000 [V] の電圧を印加した。観察は光学顕微鏡 (オリンパス (株), BX50) と CCD デジタルカメラ (オリンパス (株), DP70) を使用した。Fig. 3 はこの試料に電場を印加する前 (a)、電場を印加したとき (b) の様子を真上から観察したものである。クリープ変形によりメッシュ状の正極に向かって PVC ゲルが這い出してきている様子が分かる。これにより、両電極間の距離が減少し、厚さが薄くなる。

この特性を利用した収縮型アクチュエータの構造を Fig. 4 に示す。メッシュ状正極の両側をゲルで挟むことにより、電圧印加時にゲルがメッシュの隙間に引き寄せられて全体として収縮する。電圧を除去するとゲルの弾性により元の形状に戻る。この基本構造を積層させることにより、変位量を増大させ収縮型アクチュエータとして動作させる。

Fig. 1 Overview of a bending action

Fig. 2 Bending mechanism of PVC

Fig. 3 Response to electric field (a) discharge (b) charge

Fig. 4 Schematic drawing of the PVC gel actuator

4. 単層構造の駆動特性

提案した収縮型 PVC ゲルアクチュエータの基本的な駆動特性を明らかにするために、基本単位構造の試料を作製し、駆動実験を行った。Fig. 5 に実験に用いたアクチュエータ試料の構造を示した。負極にステンレス箔（厚さ 0.008 [mm]）、正極にステンレスメッシュの電極を用い、PVC ゲルは縦 10 [mm]、横 10 [mm]、膜厚 0.6~0.9 [mm] を用いた。ガラス板の上にステンレスメッシュを固定し、PVC ゲルを重ねてその上にステンレス箔をのせた。正極のステンレスメッシュはガラス板に固定しやすく 20 [mm] × 30 [mm] の大きさにした。

4.1 変位特性

駆動特性の評価のために、正極のメッシュサイズや印加電場により、アクチュエータの厚さ方向の変位量がどのように変化するかを調べた。変位計測にはレーザー式変位計測器（KEYENCE, LK-G30）を用いた。

試料として DBA110 を用い、印加電場 600 [V/mm] で、メッシュサイズが 20 の場合の計測結果を Fig. 6 に示す。メッシュサイズは 1 インチ当たりのワイヤの本数で表されている。したがって、メッシュサイズの小さなものほど粗いメッシュとなる。電場印加により 0.15 [mm] の変位量が得られていることが分かる。また、同じ条件でメッシュサイズのみを変えて変位量を測定した。実験に用いたメッシュのメッシュサイズとメッシュ内の隙間の体積、変位量の関係を Fig. 7 に示す。メッシュサイズが小さくなるにつれて変位量は増加している。メッシュサイズの小さいものほど隙間の体積は大きいことから変位量はメッシュの隙間の体積に依存すると考えられる。

次に DBA90 と DBA110 を用い、印加電場を 270~1,800 [V/mm] の範囲で 4 段階に調整して実験を行った。正極のメッシュサイズは 20（厚さ 0.4 [mm]）である。このときの印加

Fig. 5 Schematic drawing of a single layer model

Fig. 6 Displacement (DBA110, 20 [mesh], 600 [V/mm])

電場と変位量との関係を Fig. 8 に示す。電場の増加に伴い変位量は増していることが分かる。DBA110 の場合、1,100 [V/mm] 印加時に 0.18 [mm] の変位が発生した。これはアクチュエータ全体の厚さの約 13%にあたる。また、DBA90 と DBA110 の変位量を比較してみると、DBA110 のほうが変位量がわずかに大きく、可塑剤である DBA の増加により変位量が増していることが分かる。また 1,700 [V/mm] までは放電や短絡なく変位した。

Fig. 9 に DBA100 に 1,100 [V/mm] 印加時の電流の変化を超高抵抗/微小電流計（R8340A, ADVANTEST）を用いて計測した結果を示した。正極のメッシュサイズは 20 である。電流値は電場の増加とともに大きくなるが、1,100 [V/mm] の印加時で最高 30 [μA] 程度になっており、かなり効率が良いことが分かる。電力はこのとき 0.03 [W] となった。

4.2 発生応力

単層構造の PVC ゲルアクチュエータの発生応力を測定した。電場印加時に PVC ゲルと負極の間に引力が発生しないため、外部からの引張り力により PVC ゲルと負極は剥離する。これを防

Fig. 7 Relationship between displacement and volume of mesh hole (DBA110)

Fig. 8 Relationship between displacement and dc field (DBA90, DBA110)

Fig. 9 Current (DBA110, 20 [mesh], 1,100 [V/mm])

ぐため、負極を PVC ゲルで覆った。さらに、負極のステンレス板 (厚さ 0.2 [mm]) 上に樹脂棒を接着し、軸継手を用いてロードセル T-1 (NEC 三栄社製) と継いだ。正極にステンレスメッシュ (メッシュサイズ 20) を用いた。試料の大きさは縦 10 [mm]、横 10 [mm]、膜厚 0.6 [mm] である。印加電場が 1,250 [V/mm] のときの DBA90 の発生応力を Fig. 10 に示す。約 1.0 [kPa] の発生応力が得られていることが分かる。また、印加する電場による発生応力の変化を DBA90 と DBA110 について測定した。Fig. 11 にその結果を示した。電圧が大きいほど発生応力が増加している。印加電場 1,660 [V/mm] の場合、DBA90 で最大約 1.3 [kPa]、DBA110 で 1.1 [kPa] の発生応力が確認できた。可塑剤である DBA の減少により、発生応力が増加することが分かった。

4.3 応答性

本アクチュエータの応答性を明らかにするために周波数応答の実験を行った。アクチュエータに加える電圧を 500 [V] として電源の ON-OFF を繰り返した。ON-OFF の周波数を 0.1~10 [Hz] の間で変化させ、そのときの変位の振幅を測定した。

DBA90 と DBA110 の変位のゲイン線図を Fig. 12 に示した。

Fig. 10 Output contraction stress (DBA110, 1,250 [V/mm], 20 [mesh])

Fig. 11 Relationship between contraction stress and dc field

Fig. 12 Gain diagram in displacement (DBA90, DBA110)

-3 [dB] になるまでのバンド幅は、DBA90 で 3 [Hz]、DBA110 で 1 [Hz] となっていることが分かる。DBA110 に比べ DBA90 のほうがやや良好な応答性がみられた。これは可塑剤の含有量が少ないほど弾性率が上がることに起因していると思われる。

5. 積層構造の駆動特性

変位量を増大させるために、提案した基本構造を 10 層積層したアクチュエータを作製し、その駆動特性を調べた。また、可塑剤である DBA の量を DBA40、DBA60、DBA80 と単層構造に比べ減少させて、応答性の向上を試みた。

Fig. 13 に多層 PVC ゲルアクチュエータの構造を示した。各電極と両側の電極端子をステンレスワイヤで結線して多層構造アクチュエータを作製した。作製したアクチュエータの概観を Fig. 14 に示した。ゲル試料 (20 [mm] 角、膜厚約 0.4 [mm]、10 枚) と、負極 (ステンレス箔、厚さ 0.008 [mm])、正極 (ステンレス網状電極、メッシュサイズ 20、ワイヤ径 0.19 [mm]、厚さ 0.4 [mm]) をそれぞれ 5 枚用いて、全高 8.5 [mm] のアクチュエータを作製した。

5.1 変位特性

Fig. 15 に変位量と電場の強さの関係を示す。DBA40 の場合、1,200 [V/mm] の電場を与えたとき、最大変位は約 1.0 [mm] であり、アクチュエータ全高の約 12% の収縮率になる。ゲルの組成は異なるもののほぼ同条件 (正極 20 [mesh]、電場 1,100 [V/mm]) の単層構造の実験結果では収縮率が 13% 程度、変位量が約 0.18 [mm] であった。このことから単層と多層で収縮率は同程度で、変位量は基本構造を重ねた分増加していることが分かる。また、単層構造の結果と同様に、DBA の増加により、収縮率がわずかに増大する傾向にあることが分かった。

5.2 発生応力

発生応力と印加電場の関係を Fig. 16 に示す。DBA40 の場

Fig. 13 Schematic drawing of the layered PVC gel actuator

Fig. 14 Picture of a ten-layer PVC gel actuator

Fig. 15 Relationship between contraction rate and dc field

Fig. 16 Relationship between contraction stress and dc field

Fig. 17 Gain diagram in displacement

合 1,800 [V/mm] の電場を与えたとき、発生応力は約 2.9 [kPa] であった。また、単層構造と同じく、DBA の量が減少するに従って発生応力が增大することが分かった。

5.3 応答性

DBA80, DBA60, DBA40 を用いたアクチュエータの、変位のゲイン線図を Fig. 17 に示す。印加電圧は 500 [V] である。DBA40 の場合 -3 [dB] でのバンド幅が 7 [Hz] で、PVC に対する可塑剤の含有が少ないものほど応答性がよいことが分かった。

5.4 繰り返し特性

DBA60 のアクチュエータに関して、0 [V]~500 [V] のパルス (2 [Hz]) を 2,000 [s] 間与え、継続的に動作させたときの変位量の結果を Fig. 18 に示す。試験における最初の 5 [s] 間の変位と最後の 5 [s] 間の変位の様子を示した。4,000 サイクルの繰り返しに対して、変位の減衰がないことが分かった。

5.5 印加電場とアクチュエータ剛性

印加電場とアクチュエータ剛性の関係を調べた。各印加電場において微小な強制変位を加え、そのときの反力を計測し、ア

Fig. 18 Characteristic of displacement in repetition (DBA60)

Fig. 19 Actuator stiffness and dc field (DBA40)

Fig. 20 Relationship between displacement and loaded stress

Fig. 21 PVC gel actuator with a load

クチュエータ剛性を求めた。Fig. 19 に DBA40 の結果を示した。生体筋では筋活動量に伴い粘弾性が増すことが知られており [7]、これと同様に印加電場を増すことにより剛性が增大していることが分かる。Fig. 20 に 800 [V/mm] の電場を与えたときの負荷応力と変位の関係を示した。負荷応力と変位はほぼ比例している。

5.6 負荷時の応答性

積層型 PVC ゲルアクチュエータ (DBA60) に約 4.5 [kPa] の負荷を与えて駆動実験を行った (Fig. 21)。1,000 [V/mm] の印加電場の結果を Fig. 22 に示した。約 4.5 [kPa] の負荷を加えた場合でも約 0.5 [mm] の変位が確認できた。

Table 1 Comparison of contraction and expansion type actuator

	Contraction	Expansion	Force	Response	DC field
Piezoelectric Element		---	++	++	1V/ μm
Shape Memory Alloy	-		++	---	0.1V/mm
Conducting Polymer	+		+	-	1V/mm
Dielectric Elastomer		-	+	++	100V/ μm
PVC Gel	+		-	+	1V/ μm

Fig. 22 Displacement of PVC gel actuator (DBA60) with a load

6. 考 察

提案した収縮型 PVC ゲルアクチュエータの特性はおおむね収縮率 13%, 発生応力 3 [kPa], 応答性 7 [Hz] となることが分かった。応答性については生体筋のものと同レベルに達しているものと考えられる。収縮率は生体筋に比べて半分程度であるが、電場印加に伴い、メッシュ電極が PVC ゲルの侵入で隙間なく埋めつくされていることを考慮すると、電極の形状を適切に設計することにより、収縮率を生体筋により近づけることが可能であると考えられる。発生応力については生体筋の 1/100 程度になっており、これを増大させることが、本アクチュエータの特性改善にとって最も重要である。この方策としては、PVC ゲルの組成により発生応力が変化することから、可塑剤である DBA の量を減少させ、PVC ゲルの弾性率を上げることが考えられる。また、印加電場をさらに大きくすることも発生応力増大につながるものと考えられる。これらの課題を達成することにより、生体筋と同程度の特性を有する人工筋肉の創製が期待できる。

機能材料を用いた従来の収縮型アクチュエータと本アクチュエータの特性を比較し、Table 1 に示した。圧電素子 [8] は応答性と発生応力という点では優れた特性を有する反面、収縮率が小さく、変位の増大が困難である。一方、形状記憶合金 [9] [10] は発生応力が生体筋の 10 倍程度と高いが、温度変化により動作するため応答性の改善が難しく、また収縮率も 2% 程度で大きな変位量を得にくい。導電性高分子を用いたアクチュエータ [2] は、低電場駆動という特徴を有し、収縮率、発生応力は生体筋と同程度の特性を有するが応答性が劣る。誘電エラストマを用いた収縮型アクチュエータ [2] は、応答性と発生応力に優れるが、電場印加時に伸張し、収縮する生体筋とは反対の動きとなる。また変位量が小さく印加電場も極めて高いという問題がある。以上のように、どのアクチュエータも一長一短があり、生体筋の特性に匹敵するものは存在しない。こうしたなかで、本研究で提案した収縮型 PVC ゲルアクチュエータは、発生応力が生体筋に比べ劣るものの、収縮率、応答性ではほぼ同程度の特性を

有しており、上述したように今後多くの特性改善が見込まれることから、人工筋肉として有望なアクチュエータである。アクチュエータを拮抗型に配置して関節を駆動させたり、顔ロボットの皮膚の下に配置して表情演出に用いることが考えられる。

7. お わ り に

メッシュ電極を正極とした収縮型 PVC ゲルアクチュエータの構成法を提案し、その駆動特性を単層構造と多層構造を用いた駆動実験により明らかにした。その結果、収縮率 13%, 発生応力 3 [kPa], 応答性 7 [Hz] の特性が得られた。印加電場を大きくすることにより生体筋のようにその剛性が増加することも分かった。また、可塑剤である DBA の含有量が減少するほど弾性率は増加し、収縮率が減少する反面、発生応力が増大し、応答性が向上した。印加電場は大きいものの、電流は数十 [μA] のオーダーで効率のよいアクチュエータである。以上により、大収縮率を有し、応答性のよい収縮型アクチュエータを実現できたと考える。

今後、電極形状の改善、ゲル組成の探索を行うことにより、生体筋の特性に近い人工筋肉の創製が期待される。

謝 辞 本研究は、長野上田地域知的クラスター創成事業（第 II 期）において（株）ハーモニック・ドライブ・システムズ社の協力を得て実施したものです。ここに深く感謝致します。

参 考 文 献

- [1] 金藤敬一：“高分子アクチュエータ”，高分子，vol.55, no.12, pp.956-960, 2006.
- [2] 長田義仁 編：ソフトアクチュエータ開発の最前線—人工筋肉の実現をめざして—，エヌ・ティー・エス，2004.
- [3] Md. Z. Uddin, M. Watanabe, H. Shirai and T. Hirai: “Creeping and Novel Huge Bending of Plasticized PVC,” Journal of Robotics and Mechatronics, vol.14, no.2, pp.161-166, 2002.
- [4] 藤井勝哉，荻原孝文，平井利博，木下健：“PVC ゲルのクリープ変形に及ぼす可塑剤の影響”，Polymer Preprints, Japan, vol.55, no.2, pp.4557-4558, 2006.
- [5] 荻原孝文，藤井勝哉，平井利博，木下健：“DBP 含有 PVC ゲルのクリープ変形を利用した人工臓”，Polymer Preprints, Japan, vol.55, no.2, pp.4559-4560, 2006.
- [6] 山野美咲，橋本稔，平井利博，高崎緑：“PVC ゲルアクチュエータの変形特性”，第 8 回（社）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論文集，pp.219-220, 2007.
- [7] 梶山 他：“収縮反射に着目したヒトの上肢位置制御機構の解析”，バイオメカニズム 4, pp.59-68, 1978.
- [8] 古屋泰文，今泉伸夫，樋口俊郎 監修：未来型アクチュエータ材料・デバイス，シーエムシー出版，2006.
- [9] 舟久保康康 編：形状記憶合金，産業図書，1984.
- [10] M. Hashimoto, M. Takeda, H. Sagawa, I. Chiba and K. Sato: “Application of Shape Memory Alloy to Robotic Actuators,” J. of Robotic Systems, vol.2, no.1, pp.3-25, 1985.

山野美咲 (Misaki Yamano)

2008 年信州大学繊維学部感性工学科卒業。同年同大学大学院工学系研究科入学，現在に至る。
(日本ロボット学会学生会員)

小川尚希 (Naoki Ogawa)

2008 年信州大学繊維学部機能機械学科卒業。同年同大学大学院工学系研究科入学，現在に至る。日本機械学会学生会員。

橋本 稔 (Minoru Hashimoto)

1982 年東京大学大学院工学系研究科博士課程退学。同年電気通信大学短期大学部助手，1987 年電気通信大学電気通信学部助手，1988 年鹿児島大学工学部助教授，1999 年信州大学繊維学部教授。1985 年米国ペンシルベニア大学客員研究員，工学博士。高分子アクチュエータ，HRI，モーションアシストなどの研究に従事。日本機械学会，計測自動制御学会，日本感性工学会，IEEE などの会員。
(日本ロボット学会正会員)

高崎 緑 (Midori Takasaki)

1997 年信州大学繊維学部繊維システム工学科卒業。2002 年東京工業大学大学院理工学研究科有機材料工学専攻博士後期課程修了後，カネボウ合繊株式会社入社，2004 年信州大学 SVBL 博士研究員，2007 年信州大学 SVBL 助教，現在に至る。高機能材料に関する研究等に従事。繊維学会，高分子学会，プラスチック成形加工学会などの会員。

平井利博 (Toshihiro Hirai)

1970 年信州大学繊維学部繊維工業化学科卒業。1976 年大阪府立大学大学院工学研究科博士課程応用化学専攻修了。1976 年米国 Tulane 大学医学部生化学教室講師を経て，1979 年信州大学繊維学部助手，1996 年信州大学繊維学部教授。高分子ゲルなどの駆動材料への応用に関する研究に従事。米国化学会，日本化学会，高分子学会，繊維学会，日本機械学会などの正会員。