積層型 PVC ゲルアクチュエータの 応用展開*

Application of a Stacked Layer PVC Gel Actuator

橋本 稔**

Minoru HASHIMOTO

Key words artificial muscle, soft actuator, electroactive polymer, robot, motion assist

1. はじめに

ソフトアクチュエータが次世代アクチュエータの一つとして注目されて久しいが、実用化された例は限られており、現在でも電磁力によるアクチュエータが主流である。近年、超高齢社会の進行の中で生活環境など人間の近くで作業するロボットや医療福祉機器の必要性が高まっている。このような機器では従来型のアクチュエータのような高精度・高剛性・高応答性よりは、むしろ人間との親和性や安全性を重視した、柔軟・軽量・静音なソフトアクチュエータが望まれる。この場合マッキベン型の空気圧人工筋が使用されることもあるが、空気圧源の重量が重く、また電磁弁の騒音などの問題がある。また、形状記憶合金を用いることも考えられるが、熱による駆動のため冷却時の応答性などに課題がある。

高分子材料は柔軟・軽量で加工性に優れることから、ソフトアクチュエータの候補として注目され、長年にわたって研究開発が進められてきた¹⁾。しかし、従来型のアクチュエータに匹敵する性能を有するものは開発途上にあるのが現状である。ソフトアクチュエータの社会的なニーズが高まってきている現在、高分子材料を用いたアクチュエータを実用段階まで引き上げる取り組みに力を入れる必要がある。

ソフトアクチュエータの駆動軸方向の粘弾性特性は、外力の大きな変動に対して、アクチュエータの安定性を保持し、振動を抑制するのに役に立つ電磁式アクチュエータでもフィードバック制御により柔軟な動きを生成することができるが、制御系が不安定になりやすく、アクチュエータそのものに備わっているパッシブな柔軟性が求められる。

駆動軸方向以外の柔軟性は、アクチュエータの周囲の形状に沿って変形することができ、コンパクトにシステムを構成するうえで有用である。とりわけ、人体にアクチュエータを取り付けるウェアラブルロボットの場合は、その表

面に沿って変形することのできるソフトアクチュエータが有用である。

ソフトアクチュエータが注目されるもう一つの理由は、軽量性である。実際、電磁式アクチュエータがコイルと磁石を用いて構成されるのに対して、高分子材料を用いたソフトアクチュエータは軽量である。単純には比べられないが、鉄鋼と高分子の比重の比は5:1程度になる。

人間の生活環境では静音・無音が望ましいが、電磁式アクチュエータの場合金属間の接触、衝突や振動さらには制御系の高周波ノイズのため、静音化はなかなか困難である。ソフトアクチュエータはその柔軟性のため駆動音はほとんどなく、制御系は高周波信号を必要としないので静音化が容易に達成されるものと考えられる。

以上のように人間の生活環境で動作するロボットや医療福祉機器では高分子材料を用いたソフトアクチュエータの実用化が極めて重要である。

本稿では、高分子アクチュエータの中でも可塑化ポリ塩化ビニル (PVC ゲル) の電場応答性を利用したソフトアクチュエータについて紹介したい。この駆動原理の解明は研究途上にあるが、電圧印加に伴う高分子ゲル内での電荷密度分布の変化によるものと考えられている。この PVC ゲルアクチュエータは、大気中で駆動が可能で、収縮率 10~20%、発生応力 15 kPa、応答性 7 Hz の特性を有するとともに、電圧の印加によりその剛性が一桁ほど増加するという、生体筋によく似た特性がある。この構造や基本特性などについては文献²⁾に記載したが、本稿ではその後の研究成果や応用例などを中心として紹介したい。

2. 積層型 PVC ゲルアクチュエータ

2.1 駆動原理

PVC に可塑剤としてアジピン酸ジブチル (DBA) を加えてテトラヒドロフランに溶解したものをシャーレにキャストして PVC ゲル膜を作製する。PVC と DBA の割合によりゲルの特性が変わるが、本稿で紹介する PVC ゲルは PVC : DBA = 1 : 4 のものを用いている。

PVC ゲルの電場応答のメカニズムは、電圧の印加によ

*原稿受付 2014 年 6 月 6 日

**信州大学大学院総合工学系研究科 (長野県上田市常田 3-15-1)

図 1 PVC ゲルの変形観察

図 2 PVC ゲル膜と高電荷密度層と FEM 解析

図 3 積層型 PVC ゲルアクチュエータの単位構造

り陽極近傍のゲル内に負電荷の高密度領域が現れ、陽極との静電的引力により陽極近傍のゲルが変形するのではないかと考えられている³⁾。電圧を除去すると静電気力は消失し、ゲルの有する弾性的特性により元の形状に復元するものと見られている。例えば、PVC ゲル膜を平板電極で挟み、電極間に電圧を印加すると、陽極表面に沿って PVC ゲルが変形する (図 1)。FEM の連成解析により高電荷密度層によるゲルの変形をシミュレーションすると、やはり陽極表面に沿ってゲルが這い出す変形が起こる (図 2)⁴⁾。

2.2 構造

この PVC ゲルの電場応答性を利用して伸縮するアクチュエータを構成するために、凹凸形状の陽極、PVC ゲル、陰極を積層する。凹凸形状の陽極として導電性を有するメッシュ状電極を使用してアクチュエータの単位構造を構成した様子を図 3 に示した。この単位構造に電圧を印加すると、メッシュ状陽極とゲルの界面でゲルが変形し、ゲルがメッシュ状電極の隙間に入り込み、厚さ方向に収縮する。電圧を除去すると元の形状に復元するため、このサイクルを繰り返すことで厚さ方向に伸縮する。この構造を積層することにより、大きな変位を得ることができる (図 4)。本稿で紹介するアクチュエータは、陽極としてメッシュサイズ #100 (線径 0.09 mm, 1 インチ当たり 100 本

図 4 積層型 PVC ゲルアクチュエータ

図 5 積層型 PVC ゲルアクチュエータの外観 (50×10×6 mm, 10 層)

のワイヤ) のステンレスメッシュを用い、陰極として厚さ 0.01 mm のステンレス箔を用いたものである。また、PVC ゲルの厚さは 0.2 mm 程度のものを用いている。

2.3 特性

作製した積層型 PVC ゲルアクチュエータの一例を図 5 に示した⁵⁾。積層数は 10 層、アクチュエータは長さ 50 mm, 幅 10 mm, 高さ 6 mm で、重量は約 5 g である。80 V から 400 V の電圧を印加して変位と回復応力と電流を測定した。変位はレーザー変位計を用いて測定した。回復応力は、アクチュエータに電圧を印加し、収縮させておいて、ロードセルをアクチュエータ表面に押し付けた後、電圧を除去し、形状回復するときの回復力を計測して得られるもので、アクチュエータの発生力に相当するものである。変位量 (収縮率)、回復応力、電流の測定結果をそれぞれ図 6~8 に示した。収縮変位は印加電圧に伴って増加し、印加電圧 400 V のとき、変位量 (収縮率) は 0.7 mm (11%) である。また発生力も電圧に伴って増加し、400 V の電圧印加時は約 14 kPa (7 N) であった。電流値も同様に印加電圧に伴って増加するが、400 V の電圧を与えたときの電流値は約 0.03 mA で、消費電力は 12 mW と小さい。

実用化において重要な耐久性を評価するために、2 Hz の正弦波状電圧を印加したところ、変位量は減少するものの 535 万回 (約 1 カ月間) の繰り返しにおいても駆動し続けることが確認された⁶⁾。耐久性という点でも、実用化に耐えられる特性を有していることが分かる。

また、ステンレス製のメッシュを用いた陽極の代わりに、芯材として樹脂を用い、その表面に金属を薄くメッキした電極でも、ほぼ同様の特性が得られ、このことはアクチュエータのさらなる柔軟性向上と軽量化に貢献できるものと考えられる⁷⁾。さらに、PVC ゲルの不織布をエレクトロスピニング装置で作製し、箔電極で挟むことにより大きな収縮率が得られており、これもアクチュエータの柔軟性と軽量化に貢献するものと思われる⁸⁾。

図6 変位量（収縮率）の印加電圧による変化

図7 発生応力の印加電圧による変化

図8 電流の印加電圧による変化

生体筋の特性は、収縮率 30%、発生応力 300 kPa、応答性 10 Hz といわれており、本アクチュエータの特性が発生応力において劣るものの生体筋に近づいていることがわかる。

3. 積層型 PVC ゲルアクチュエータの応用

この積層型 PVC ゲルアクチュエータの応用例として、筆者らが開発した小型ブレーキ、リンパ浮腫用マッサージ器、ロボティックウェアについて紹介する。

3.1 負作動型ブレーキ

積層型 PVC ゲルアクチュエータを用いた負作動型ブレーキ（図9）⁹⁾を開発した。電圧を除去したときに制動力を発生させて負荷の回転を止めるブレーキである。PVC ゲルアクチュエータは摩擦板の下に設置され、電圧の印加によりゲルアクチュエータが収縮し、摩擦板が離れ回転する。電圧除去によりゲルアクチュエータが元の形状に復元し、摩擦板が接触して制動力を発生する。このブレーキに

図9 直動アクチュエータと負作動型ブレーキ

図10 リンパ浮腫用マッサージ器

用いた PVC ゲルアクチュエータは外径 $\phi 50$ 、内径 $\phi 20$ の円環状で、高さは 12 mm で、積層数は 8 層である。印加電圧は 600 V で、そのときの電流値は 0.3 mA であった。この PVC ゲルブレーキは電磁ブレーキに比べ消費電力が 1/30 程度で、小型・軽量である。エスカレータやロボティックウェアなどのように、ブレーキにより急停止をすると人に危険な場合に、本ブレーキのようにソフトに制動力を発生できるものは有用ではないかと思われる。

3.2 リンパ浮腫用マッサージ器

乳癌・前立腺癌などの手術では、リンパ系の輸送機能に障害が生じ手足のむくみが生じる。このリンパ浮腫の発症を抑えるために、空気式マッサージ器が使用されているが、空気圧源の騒音や重量などの問題がある。そこで、PVC ゲルアクチュエータを用いてマッサージ器を作製した（図10）¹⁰⁾。アクチュエータをベルト上に並べて配置し、それを腕や脚の太さに合わせてリング状にして装着する。積層型 PVC ゲルアクチュエータが収縮した状態から元の形状に戻ろうとするときに手首や脚に圧力を加えることができる。

3.3 ロボティックウェア

電磁式アクチュエータを用いたロボティックウェアが開発されその応用研究が盛んに行われているが、アクチュエータの重量、騒音、剛性などにより装着者にとって装着感のよいものになっているとはいえない。前述したように積

図 11 ロボティックウェア

層型 PVC ゲルデバイスは、電圧印加により剛性が大きく増加する特性を有することから、この特性を利用して歩行をアシストするスパッツを開発した¹¹⁾。電圧印加のない剛性の低い状態で PVC ゲルを引き伸ばし、その後電圧を印加することにより PVC ゲルの剛性を上げ、そのときの収縮力を利用して装着者の運動をアシストするものである。

可変剛性 PVC ゲルデバイスは、縦横の大きさが 10 mm × 50 mm で、高さ 15 mm で、積層数 15 層で構成され、重さは 20 g である (図 11)。この PVC ゲルデバイスを 8 個用いて片足の運動アシストに用いた。この可変剛性スパッツに 7% 程度の伸びを与え、300 V を印加すると PVC ゲルデバイスの剛性変化でアシスト力を発生させることができる。歩行実験において、この PVC ゲルスパッツを用いることで筋活動量の減少がみられることを確認した。今後、両脚に PVC ゲルデバイスを取り付け、適切なタイミングで剛性を変化させることにより、より大きなアシスト力を発生させることが可能になるものと思われる。

4. お わ り に

人間の近くで動作するロボットや医療福祉機器において、ソフトアクチュエータの開発がキーテクノロジーとなることを述べた。高分子アクチュエータ研究の長い歴史の中で築かれてきた成果を基に、今こそ実用化に向けた研究が必要である。アクチュエータ開発には、材料、制御、製造技術など総合的な取り組みが必要で、大学の一研究室では力不足であり、産官学の連携によるソフトアクチュエータ開発の取り組みが望まれる。

高分子アクチュエータの中でも本稿で紹介した積層型 PVC ゲルアクチュエータは生体筋の特性に接近しており、実用化に近いレベルに達しているものと考えられる。今

後、発生応力の増大、印加電圧の低減などの基本特性の改善を進めるとともに、さまざまな機器への応用展開を試みるにより、超高齢社会を支える次世代アクチュエータとして発展させていきたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 長田義仁：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～，株式会社エス・ティー・エス出版，(2004)。
- 2) 橋本稔：Electroactive Polymer の応用，日本ロボット学会誌，**31**, 5 (2013) 457-460。
- 3) Md. Zulhash Uddin, M. Watanabe, H. Shirai and T. Hirai: Creeping and Novel Huge Bending of Plasticized PVC, Journal of Robotics and Mechatronics, **14**, 2 (2002) 118-123。
- 4) 安田圭吾，橋本稔：有限要素法による PVC ゲルの電場応答シミュレーション，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会，2A1-J05, (2014)。
- 5) 李毅，白井叔子，土屋陽一郎，安田圭吾，橋本稔：伸縮型 PVC ゲルアクチュエータの積層数と駆動特性，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会，2A1-K01, (2014)。
- 6) 鈴木彩，李毅，土屋陽一郎，橋本稔：収縮型 PVC ゲルアクチュエータの長時間繰り返し特性，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会，2A1-M02, (2014)。
- 7) 土屋陽一郎，白井叔子，春山聡美，安田圭吾，李毅，橋本稔：フレキシブルメッシュ電極を用いた PVC ゲルアクチュエータの駆動特性評価，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会，2A1-Q03, (2014)。
- 8) 所宏美，橋本稔：ナノファイバー技術を用いた PVC ゲルアクチュエータの開発，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会，2A1-M04, (2014)。
- 9) 橋本稔，柴垣南，平井利博：収縮型 PVC ゲルアクチュエータを用いた負作動型ブレーキの開発，日本ロボット学会誌，**29**, 8 (2011) 667-674。
- 10) 前田康博，橋本稔：PVC ゲルアクチュエータを用いたリンパ浮腫ケア用マッサージ器の開発，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 講演論文集，1P1-P02, (2011)。
- 11) Y. Maeda, Y. Li, K. Yasuda and M. Hashimoto: Development of Variable Stiffness Gel Spats for Walking Assistance, 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2013), (2013) 5404-5409。

橋本 稔

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，モーションアシスト，HRI などの研究に従事。日本機械学会，計測自動制御学会，日本ロボット学会，日本感性工学会，IEEE などの会員。