

人工筋肉に向けた積層型ポリマーアクチュエータ

Multilayered Polymer Actuator for Artificial Muscles

生嶋 君 弥
Kimiya Ikushima

ジョン ステファン
Stephen John

小 野 敦
Atsushi Ono

長光 左千男
Sachio Nagamitsu

要 旨

家庭用ロボットへの応用を目指した人工筋肉を実現するために、単位質量当たり大きな仕事を発生できる積層型ポリマーアクチュエータを開発した。安全性の観点から、低電圧で駆動できる導電性高分子を用いたポリマーアクチュエータを使用し、導電性高分子膜とイオン液体を含むセパレータ膜とを交互に積層することにより、コンパクトで大出力可能な構造を実現した。この結果、0.5 Hzの伸縮駆動において、単位質量当たりの仕事量は従来比で2桁向上して導電性高分子アクチュエータでは最高の0.92 J/kgを実現した。

Abstract

To achieve a light, flexible artificial muscle that can be applied to housework robots, we developed a multilayered polymer actuator that is able to generate large work output with a compact structure. We used a conducting polymer actuator that can be driven by low electric voltage for safety, and a compact structure was achieved while keeping a large output by alternately stacking the conducting polymer films and separator films that include an ionic liquid. As a result, the generated work output per unit mass reached 0.92 J/kg, a two-digit improvement compared with the past, at a frequency of 0.5 Hz for expansion and contraction actuation.

1. はじめに

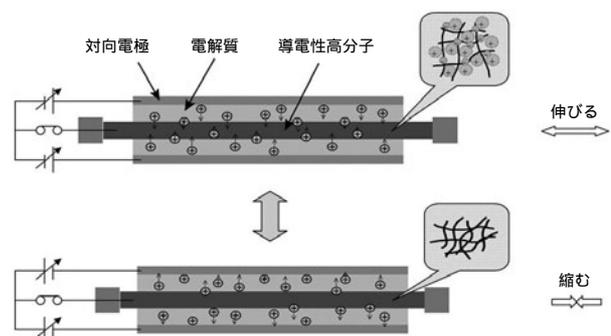
近年、介護、家事支援などを行う家庭用ロボットが開発されている。従来の電磁モータを利用する産業用ロボットは作業を正確に行えるが、重くて硬い構造のために人間にとって危険な存在である。このために、家庭用ロボットでは安全性の要求から人間の筋肉に近い柔軟で軽量の人工筋肉アクチュエータの実現が期待されている。高分子材料（ポリマー材料）は金属に比べて軽量・柔軟の特徴をもち、ポリマー材料を用いた人工筋肉アクチュエータが研究されている¹⁾。

ポリマーアクチュエータはその駆動原理に基づいて主に2つのカテゴリに分類される。1つのカテゴリは電界駆動タイプのものであり、高い応答速度のメリットはあるが、高い電圧を必要とするため安全性の観点から家庭用ロボットには適さない。もう1つのカテゴリはイオン駆動タイプのものであり、数ボルトの電圧で駆動できるため安全である特徴をもち、イオン駆動タイプのポリマーアクチュエータの代表的な例として、高分子ゲルにカーボンナノチューブを分散させた構造をもつアクチュエータ²⁾、イオン導電性高分子アクチュエータ³⁾、導電性高分子アクチュエータ⁴⁾などが提案されており、これらにおいてはポリマーに電氣的刺激を与えたときのイオンの移動によって駆動を行う。高分子ゲルアクチュエータとイオン導電性高分子アクチュエータは発生力が小さいのに対して、導電性高分子アクチュエータは発生力が大きく、導電性高分子自体がもつ発生応力が生体の筋肉を上回る

ため、人工筋肉アクチュエータとして期待されている⁵⁾。しかし、導電性高分子アクチュエータはこれまで、駆動に必要な電解液や対向電極が大きくなるために、アクチュエータ全体における単位質量当たりの発生仕事量が小さいという課題があった。そこで筆者らは、導電性高分子を人工筋肉へ応用するために、単位質量当たりの仕事量が大きい特徴をもつ積層型ポリマーアクチュエータを開発した。

2. 導電性高分子アクチュエータの駆動原理

第1図に示すように、導電性高分子アクチュエータは、一般的にイオンを含む電解液内部に導電性高分子と対向電極が配置された構造である。そして、対向電極と導電性高分子との間に電圧を印加することによって、導電性



第1図 導電性高分子アクチュエータの駆動原理

Fig. 1 Actuation mechanism of conducting polymer actuators

高分子が伸縮を行う。導電性高分子が伸縮するメカニズムは、加えられた電界によって嵩（かさ）高いイオンが高分子鎖の間に挿入および離脱することが主な原因であると理解されている⁶⁾。

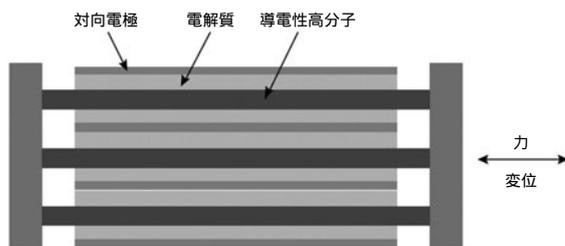
3. 単位質量当たりの発生仕事量向上に関する課題

導電性高分子アクチュエータを駆動するためには、イオンを供給する電解液と、電解液に電圧を印加するための対向電極が必要である。一方、アクチュエータとして力を外部に出力する部分は導電性高分子であるため、単位質量当たりの発生仕事量を大きくするためには対向電極と電解液の部分を小さくすることが非常に重要である。しかしながら、電解液の体積を小さくして対向電極と導電性高分子を接近させた場合、両者の間で電氣的短絡が生じてアクチュエータの動作を阻害するという問題があった。

家庭用ロボットなどにおける人工筋肉を実現するためには、単位質量当たりの発生仕事量が哺乳類の生体筋肉と同程度以上であることが望ましい。哺乳類の生体筋肉のひずみ率は約20%，発生応力は約0.1 MPa，単位体積当たりの仕事量は20 kJ/m³であることが知られており⁵⁾，これらから単位質量あたりの仕事量は19 J/kgと計算される。これに対して、従来の電解液内で動作する導電性高分子アクチュエータでは、電解液や対向電極の小型化に限界があり、単位質量あたりの仕事量は生体筋肉に比べて4桁以上小さかった⁷⁾。

4. 積層型ポリマーアクチュエータの開発

導電性高分子を用いたポリマーアクチュエータをコンパクトな構造にするために、筆者らは、第2図に示すように導電性高分子膜と電解質が互いに接近した形で積層された構造のアクチュエータを開発した。



第2図 積層型ポリマーアクチュエータの構造
Fig. 2 Structure of multilayered polymer actuator

4.1 高導電率・高強度のポリピロール膜の作製

代表的な導電性高分子であるポリピロールを電解重合の方法を用いて製膜した。導電率と機械強度の向上のために電解重合の条件の最適化を行った。電解液としては、Propylene carbonate (PC) に 0.06 M pyrrole, 0.06 M Tetrabutylammonium hexafluorophosphate (TBA-PF6), 1 %/vol H₂Oを溶解した溶液を用いて、-28 °Cの温度で、0.05 mA/cm²の電流密度で18時間、電解重合を行った⁶⁾。この結果、第1表に示すように電気特性と機械特性に優れたポリピロール膜を作製できた。

第1表 ポリピロール膜の特性

Table 1 Characteristics of polypyrrole film

膜厚		10-15 μm
電気特性	導電率	200-300 S/cm
	ヤング率	1.2 GPa
機械特性	破断強度	53 MPa
	破断ひずみ	25 %

4.2 短絡と摩擦ロスを防止できる準ドライ積層構造

単位質量当たりの発生仕事量を向上するためには、導電性高分子膜と対向電極とを接近させてコンパクトにしなければならない。この場合、導電性高分子膜と対向電極との電氣的短絡が生じる可能性がある。特に柔軟で軽量の人工筋肉アクチュエータにおいては電極間が圧迫される場合があるために、電氣的短絡の危険性が増す。このため、セパレータ膜などの絶縁材料を挿入することが必須である。

電気二重層キャパシタなどで使用されるセパレータ膜は、必要最小限の膜厚によって電極間の短絡を防止できて、しかもイオンの移動を阻害しない構造となっている。このため、柔軟で軽量の導電性高分子アクチュエータを実現するための絶縁材料としてはこのようなセパレータ膜が最適だと考えられる。しかしながら、セパレータ膜を導電性高分子膜に直接接触させた場合、摩擦のために伸縮動作が大きく阻害されるという問題があった。この問題のために、これまでコンパクトな構造で仕事量大きい導電性高分子アクチュエータを実現することはできなかった。

筆者らはこの問題を解決するために、電解液にプラスチックの14 μm - 50 μm の球体微粒子（マイクロビーズ）を混入する独自の方法により、導電性高分子膜とセパレータ膜との間の摩擦を大幅に軽減し、コンパクトな構造で大出力の導電性高分子アクチュエータの実現に成功した。

電解液はイオン液体の1-ethyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethanesulfonyl) imide (EMI-TFSI) を使用した。

イオン液体は蒸気圧が非常に小さい特徴をもつ⁸⁾。マイクロビーズ入りイオン液体を含浸したセパレータ膜を電解質として用いることにより、簡易な封止構造と最小限の電解液から構成される準ドライ構造の積層ポリマーアクチュエータを実現した。

4.3 アクチュエータの試作

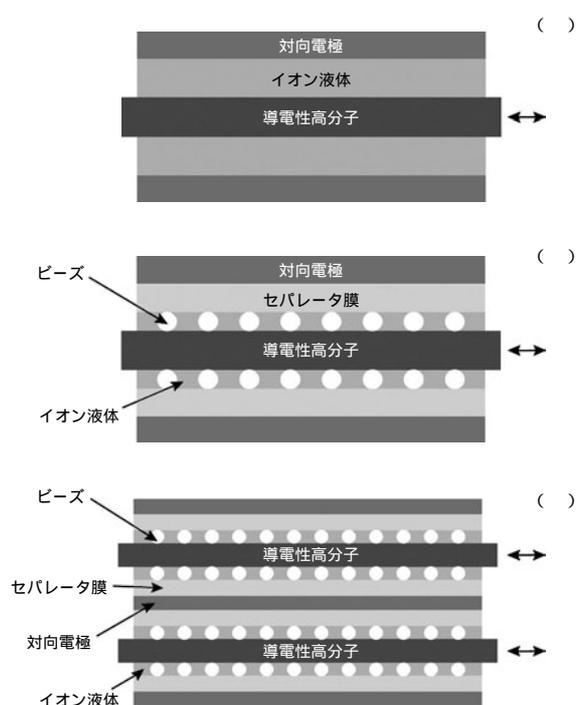
従来の電解液内で動作するアクチュエータとの特性比較と、積層による発生仕事量向上の効果を確認するために、第3図に示す3種類の構造のアクチュエータを試作した。

(i) イオン液体中の単層アクチュエータ（従来構造）

作用電極として伸縮するポリピロール膜の両端を把持して、イオン液体で満たされた容器内に設置した。一端は固定し、もう一端はリニアガイドで水平方向に自由に移動できるようにした。ポリピロール膜から上下に5 mm だけ離れた位置に2枚の対向電極を固定した。ポリピロール膜は6 mm（幅）×42 mm（長さ）の矩形形状のものを使用した。対向電極は長さ25 mmのものを使用した。

(ii) 準ドライ単層アクチュエータ（新構造）

対向電極基板とセパレータ膜を重ねて、その上に充分な量のビーズ入りイオン液体をたらした。次に、ポリピロール膜を接触させて、その上面に再度、充分な量のビーズ入りイオン液体をたらした。最後に、セパレータ膜と対向電



第3図 試作を行ったポリマーアクチュエータ

Fig. 3 Fabricated polymer actuators

極を乗せて上部から押さえつけた状態で使用した。ポリピロール膜と対向電極は(i)と同じ大きさのものを使用した。
(iii) 準ドライ積層アクチュエータ（新構造）

作用電極として伸縮するポリピロール膜を複数積層して、その両端を粘着銅箔テープで接着した後、クランプではさんで固定した。次に作用電極の層間および上下の位置にポリピロール膜からなる対向電極を接触させた。そして、電極間にセパレータ膜を挿入し、作用電極とセパレータ膜の間に十分な量のビーズ入りイオン液体をたらした。積層数は2層、3層、9層の3条件を試作し、上部から荷重を行った状態で使用した。ポリピロール膜は幅6 mm（2層、3層の場合）、および、幅3 mm（9層の場合）のものを使用した。対向電極は長さ25 mmのものを使用した。

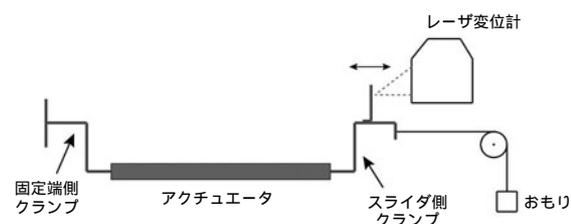
なお、いずれも電極には白金箔を接触させて配線した。

5. 駆動試験評価

上記3種類のアクチュエータの駆動実験を行い、駆動特性と単位質量当たりの仕事量の評価を行った。

5.1 駆動条件

±1.5 Vの矩形波を作用電極と対向電極との間に印加して駆動を行った。まず基本的な駆動特性を調べるために、(i)と(ii)のアクチュエータにおいて一端に10 gのおもりをつるした状態で駆動を行い、0.1 Hz～10 Hzの範囲で周波数を変化させた。次に積層数と仕事量との関係を知るために、(iii)のアクチュエータにおいて、おもりの重さを5 g～300 gで変化させて0.5 Hzの周波数で駆動を行った。ポリピロール膜の厚さが10 μm厚と仮定すると10 gのおもりをつるした状態の内部応力は1.6 MPaである。適当な回数の伸縮動作を行い動作が安定してから実験を行った。第4図に示すように、レーザー変位計でアクチュエータの変位を計測し、変位の大きさを対向電極の長さ（25 mm）で割ることによってひずみ率を計算した。すべての駆動実験は室温で行った。

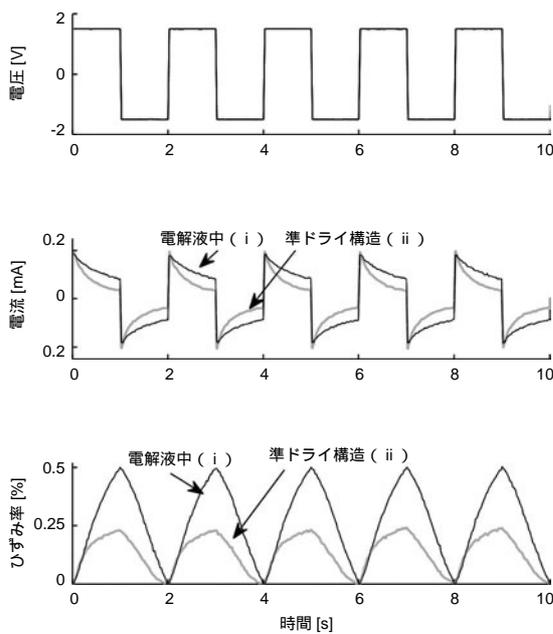


第4図 ポリマーアクチュエータの駆動方法

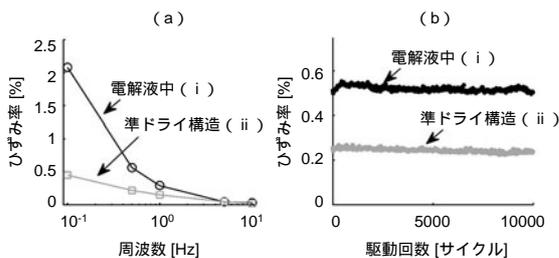
Fig. 4 Actuation method of polymer actuators

5.2 単層アクチュエータの特性評価

液体中単層アクチュエータ (i) と準ドライ単層アクチュエータ (ii) についてその特性を評価した。それぞれアクチュエータについて1.5 V, 0.5 Hzで10000回駆動を行い、その後、各周波数での駆動実験を行った。第5図に示すように、(i) と (ii) のひずみ率はそれぞれおよそ0.5%、0.2%であった。(i) の場合に比べて(ii) のひずみ率が約40%に減少しているが、これはセパレータ膜と膜との摩擦の影響と考えられる。1周期における平均の消費電力は(i) と(ii) のそれぞれで180 mW, 120 mWであった。第6図(a)に示すように0.1 Hzのひずみ率は(i) と(ii) のそれぞれでおよそ2.1%、0.4%が得られた。第6図(b)に示すように、10000回駆動において両アクチュエータで安定した動作が行われた。なお、準ドライ単層アクチュエータにおいてマイクロピーズを使用し



第5図 単層アクチュエータの駆動特性
Fig. 5 Actuation performance of single layer actuators



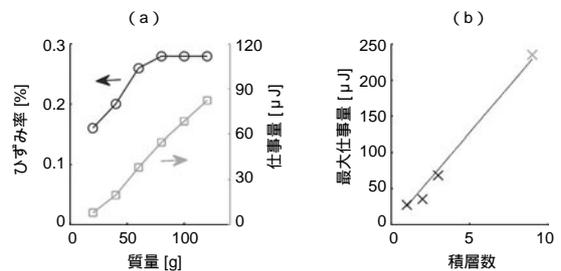
第6図 単層アクチュエータの周波数特性および耐久性
Fig. 6 Frequency characteristics and durability of single layer actuators

なかった場合のひずみ率は0.1%未満であり、マイクロピーズによる摩擦低減の効果が大きいことが確認できた。

5.3 積層アクチュエータの特性評価

第7図は、積層アクチュエータ (iii) の動作特性を示す。第7図(a)は、3層構造アクチュエータの1.5 V, 0.5 Hzの駆動実験において、おもりの重さを変化させたときの、伸縮動作のひずみ率および仕事量の変化を示す図である。図からわかるようにおもりの重さを大きくするほど仕事量は大きくなった。おもりの重さが小さいときには、ポリピロール膜の微妙な長さの違いから膜の一部が緩んで動作の一部が外部に伝わらなかったのに対して、おもりの重さが大きいときには、膜に適当な張力が加わって伸縮動作が効率よく外部に伝わったものと考えられる。ただし、おもりの重さが120 gのときには、アクチュエータの長さが時間とともに単調に増加する現象(クリープ現象)が顕著に観察された。そこで、安定して動作させるためには、おもりの重さの上限は約100 gであると考えられる。このときのアクチュエータの仕事量は約69 μ Jである。

同様の実験を9層の積層構造についても行ったところ、クリープが起こらない範囲で、300 gのおもりに対して40 μ mの伸縮動作を行うことができた。このときの仕事量は120 μ Jである。第7図(b)は、同様の実験における積層数と仕事量との関係を示す図である。ただし、9層構造においてはポリピロール膜の幅を6 mmに換算して示した。図から積層数にほぼ比例して発生仕事量が増加することがわかる。なお、積層アクチュエータにおいても単層アクチュエータと同等に10000回駆動での安定動作が予想されるが、10000回以上の駆動を含めて積層アクチュエータにおける詳細な耐久性の評価は今後の課題である。



第7図 積層アクチュエータの駆動特性
Fig. 7 Actuation performance of multilayered actuators

5.4 単位質量当たりの仕事量に関する考察

試作したアクチュエータの0.5 Hz駆動における仕事量をアクチュエータの駆動にかかわる有効部分の質量で割ることによって、単位質量当たりの仕事量を計算して比

較を行った。なお、対向電極に垂直な方向から見たときに対向電極およびポリピロール膜と重なる部分に存在する対向電極、ポリピロール膜、電解液、セパレータをアクチュエータの有効部分と考えた。

試作した積層アクチュエータの1層当たりの厚さは約130 μm であり、9層構造におけるアクチュエータの有効部分の体積はおよそ86 mm^3 と計算できる。この結果、0.5 Hz駆動における単位質量当たりの仕事量は0.92 J/kgと計算される。これに対して試作した液体中アクチュエータでの値は 1.7×10^{-3} J/kgであり非常に小さい。以上の考察から、準ドライ積層アクチュエータの単位質量当たりの仕事量は、液体中アクチュエータと比較すると約500倍に増加していることがわかる。この値は導電性高分子アクチュエータにおいて最高の値である。

6. 今後の展望

準ドライ構造のアクチュエータは、液体中アクチュエータ比べて振幅が約40%に減少しているが、たとえば摩擦が小さいゲル構造の電解質を使用することなどで機械ロスを小さくして仕事量を向上できると考えられる。また、電解質の厚さを作用電極と同じ厚さまで低減しても駆動可能と考えられて、この場合、単位質量当たりの仕事量を約4 J/kgまで増加できる。さらに、たとえば0.1 Hzの駆動条件では単位質量当たりの仕事量は約8 J/kgまで増加可能と予想される。

以上から、今後、膜厚や駆動条件を最適化することによって、単位質量当たりの仕事量を生体筋肉の19 J/kgと同等のレベルまで向上可能と考えられる。

7. まとめ

筆者らは、家庭用ロボットなどに適用できる人工筋肉を実現するために導電性高分子を用いた積層型ポリマーアクチュエータを開発した。このアクチュエータは、導電性高分子膜とイオン液体を含浸したセパレータ膜とが交互に積層した準ドライ構造であり、大幅な小型コンパクト化を実現している。駆動実験の結果、準ドライ単層アクチュエータにおいては1万回の耐久試験でも安定した駆動特性を示した。また、準ドライ積層アクチュエータにおいては単位質量当たりの仕事量は0.92 J/kgであり、電解液中で駆動する従来構造のアクチュエータと比較すると約500倍に増加した。

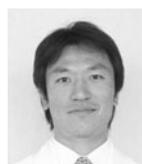
今後、イオン液体層の厚さを小さくするなどの工夫を加えることにより単位質量当たりの仕事量を生体筋肉と同等のレベルにまで向上可能と予想されるので、家庭用ロボッ

トなどに使用される人工筋肉に有望だと考えられる。単位質量当たりの仕事量の向上に加えて、耐久性や制御性や消費電力を含めた詳細な評価が今後の課題である。

参考文献

- 1) Bar-Cohen Y. (ed) : Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles, reality, potential and challenges. (SPIE Press), p.22 (2004).
- 2) T. Fukushima, et al. : Fully plastic actuator through layer-by-layer casting with ionic-liquid-based bucky gel. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 44, Issue 16, pp.2410-2413 (2005).
- 3) K. Oguro, et al. : Bending of an ion-conducting polymer film-electrode composite by an electric stimulus at low voltage. *Trans. J. Micromach. Soc.* 5, pp.27-30 (1992).
- 4) M. R. Gandhi, et al. : Mechanism of electromechanical actuation in polypyrrole. *Synth. Met.*, 73, pp.247-256 (1995).
- 5) J. D. Madden, et al. : The relation of conducting polymer actuator material properties to performance. *IEEE J. Ocean. Eng.*, 29, No.3, pp.696-705 (2004).
- 6) 長田義仁 他 : ソフトアクチュエータ開発の最前線 (エヌ・ティー・エス) p.53 (2004).
- 7) K. Ikushima, et al. : A practical multilayered conducting polymer actuator with scalable work output. *Smart Mater. Struct.*, 18, No.9, p.095022 (2009).
- 8) T. Sugimoto, et al. : Ionic liquid electrolyte systems based on bis(fluorosulfonyl)imide for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 189, pp.802-805 (2009).

著者紹介



生嶋君弥 Kimiya Ikushima
パナソニック エレクトロニックデバイス (株)
Panasonic Electronic Devices Co., Ltd.
2000年11月～2010年3月 先端技術研究所に所属



ジョン ステファン Stephen John
先端技術研究所
Advanced Technology Research Labs.
博士 (Mechatronics)



小野 敦 Atsushi Ono
先端技術研究所
Advanced Technology Research Labs.



長光左千男 Sachio Nagamitsu
先端技術研究所
Advanced Technology Research Labs.
博士 (情報学)