

けでなく、広範囲の pH 領域 (2.0<pH<8.0) の溶液中でも駆動可能であることから、新機能性材料として注目されている。これまでに、導電性高分子によるソフトアクチュエータの主な駆動メカニズムである電解伸縮特性（イオンの出入りによる体積変化）については、欧州や米国の大学および国立研究所を中心に研究が行われてきた。その結果、線（短冊）状のソフトアクチュエータの電解伸縮による伸縮率、発生力、応答速度、pH 依存性などの電気化学的基礎特性やソフトアクチュエータの一次元／二次元的変形（単純な伸縮／屈曲運動）が明らかにされてきた。しかしながら、実用化技術を考慮した様々な形状への展開、また、機械工学的視点からの設計・開発および力学的評価がなされていなかった。

(2) 申請者は、これまでに以下のことを明らかにしてきた。

- ① 各種導電性高分子によるソフトアクチュエータの電解伸縮特性などの電気化学的特性およびその力学的特性（発生力、変形量）
- ② 実用化技術への展開およびその工学的応用を目指したリング／リップ／面状など様々な形状のソフトアクチュエータの設計法の確立
- ③ チューブ状および袋状のソフトアクチュエータの実現
- ④ 開閉運動するソフトアクチュエータを開発し、その蠕動運動を駆動源としたマイクロポンプの開発

(3) 特に、マイクロポンプは、チューブの蠕動運動を実現しており、バルブを要することのないシンプルな構造である。また、既存のマイクロポンプに比べ、微小流量（流量：0.1 - 50 $\mu\text{l}/\text{min}$ ）を高分解能で送液可能であり、水に比べて 400 倍の粘性のグリセリンでさえ水と同等の流量およびヘッドで輸送可能である。さらには、そのエネルギー消費率は、既存のマイクロポンプの約 1/10 であり、高効率のバルブレスマイクロポンプの開発を実現した。これまでに実用化技術への展開がなされていなかったソフトアクチュエータの様々な形状の作製技術の確立とその工学的応用により、実用化技術への可能性が十分にあることを見出してきた。

(4) しかしながら、心臓や腸、血管のような形状の収縮運動やねじり運動などの三次元的変形は困難であるという課題が残されている。チューブや袋のねじり運動、さらには位相差を与えた蠕動運動を実現

すれば、高粘性流体の送液も可能となり、これまでのマイクロポンプの問題点である複雑な構造（バルブ要）と高粘性流体への対応を打破することが可能となる。電解伸縮のメカニズムには、イオンの出入り以外に、 π 電子の非局在化（分子構造の剛直化）も寄与しているがこの寄与による変形を妨げている要因が導電性高分子の分子構造や高次構造にある。電解伸縮による変形の方向が固定化されるために、三次元的な変形が困難となる。そのため、異方性のある変形が可能となる最適な設計手法を確立し、電解伸縮による変形を最大限に発揮できるソフトアクチュエータを設計する必要がある。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、導電性高分子ソフトアクチュエータの変形の拡大化とその三次元的変形の実現を目指し、ソフトアクチュエータの分子構造や高次構造とその変形の関連性を明らかにする。重合度が高く、直鎖構造の支持電解質およびドーパントによる変形の拡大化を行う。得られた結果を基盤とし、チューブ状ソフトアクチュエータのねじり運動を実現し、そのねじり運動によるマイクロポンプへの応用とその性能評価を行う。すなわち、人工心臓などの人工臓器開発のための基礎研究である。

(2) 具体的には、以下のことを明らかにする。

- ① 導電性高分子ソフトアクチュエータの構造の最適化とその変形の拡大化（重合度が高く、直鎖構造の支持電解質およびドーパントによる導電性高分子ソフトアクチュエータの電気化学的特性評価とその変形の異方性と変形メカニズムの解明）
- ② アニオン／カチオン駆動のソフトアクチュエータの立体構造配置による三次元的変形の実現とその耐久性の評価とその最適条件（チューブのねじり運動の実現とその定量的評価、チューブのねじりの蠕動運動を駆動源としたマイクロポンプの創製とその性能評価）

3. 研究の方法

(1) 電解重合法によりチューブ状の導電性高分子ソフトアクチュエータの作製し、ねじり運動の最適化設計法の確立を目指した。本研究では、アニオン駆動層とカチオ

ン駆動層が接合したバイモルフ層のソフトアクチュエータを基準に研究を進めてきた。その中で、指示電解質とドーパントの組み合わせ（重合度や直鎖構造を考慮）も重要となった。そのため、最適なねじり運動を実現するこれらの組み合わせ、さらには、アニオン駆動層とカチオン駆動層の配置やこれらに対するスリットの位置の最適化設計による変形の拡大化について調べた。特に、チューブの軸方向に対するバイモルフ層の螺旋角とスリットの効果について調べた。これらのことから、十分なねじり運動を実現するためのチューブの最適化設計法を確立した。

- (2) また、このチューブのねじり運動を駆動源としたマイクロポンプを構築し、その基礎性能について調べた。チューブのねじり運動により送液される流体の流量および圧力ヘッドを測定し、流量と圧力の性能を示すPQ線図により評価する。また、これまでに開発した開閉運動するソフトアクチュエータを駆動源とするマイクロポンプの特性と比較を行った。

4. 研究成果

- (1) チューブ状のカチオン駆動層 (PPy.DBs) にアニオン駆動層 (PPy.TFSI) を螺旋状に接合 (バイモルフ構造) した導電性高分子ソフトアクチュエータを図1に示す。その長さおよび直径はそれぞれ60mmおよび8mmである。また、チューブの軸方向に対するバイモルフ構造の螺旋角は60度である。

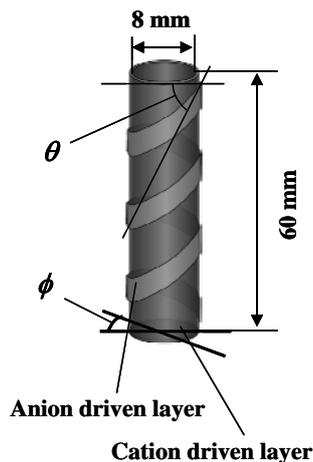


図1 カチオン駆動層にアニオン駆動層を螺旋状に接合したチューブ状導電性高分子ソフトアクチュエータ

- (2) この時のチューブのねじり運動を図2に示す。チューブは十分なねじり運動を実現し、その最大ねじり角は60度であった。また、チューブの両端固定時には、ねじり角が非常に小さくなったために、バイモルフ層間にスリットを設けたが、その効果は小さいことも明らかになった。カチオン駆動層およびアニオン駆動層にそれぞれPPy.DBsおよびPPy.TFSIを用い、1.0MのLiTFSI水/PCの混合溶液中で駆動させた場合に、最大のねじり運動を実現し、電気化学的にも安定な運動となった。

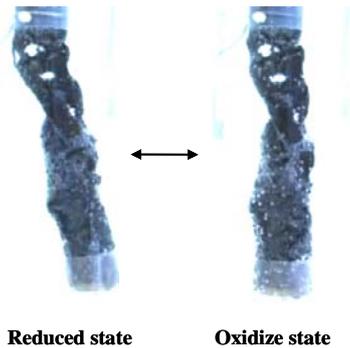


図2 チューブ状導電性高分子ソフトアクチュエータのねじり運動 (ねじり角60度)

- (3) チューブの両端固定時での大きなねじり運動を実現するために、図3に示すように、チューブ状のアニオン駆動層 (PPy.TFSI) にカチオン駆動層 (PPy.DBs) を接合したバイモルフ構造のチューブ状導電性高分子ソフトアクチュエータを作成した。その長さおよび直径はそれぞれ60mmおよび4mmであり、その構造は、2つの直線と1つのV字状のバイモルフ層を形成している。

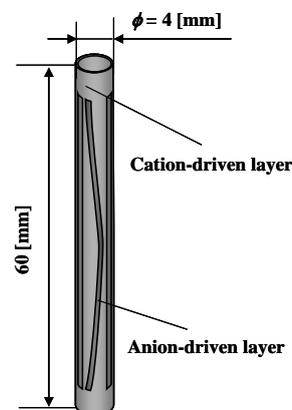
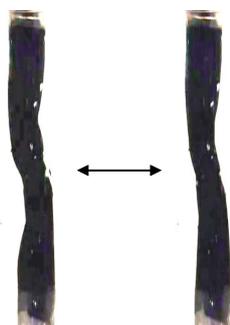


図3 2つの直線と1つのV字状のバイモルフ層をなすチューブ状導電性高分子ソフトアクチュエータ

- (4) 図4に示すように、チューブの両端を固定した場合でも、チューブの最大ねじり角90度を実現した。特に、アスペクト比が大きい場合に、そのねじり運動が大きくなることがわかった。



Reduced state Oxidized state

図4 チューブ状導電性高分子ソフトアクチュエータのねじり運動（ねじり角90度）

- (5) このねじり運動するチューブ状ソフトアクチュエータを駆動源としたマイクロポンプを図5に示すように、構築した。チューブのねじり運動により、内部の流体を逆流することなく、一方向に輸送することが可能であった。

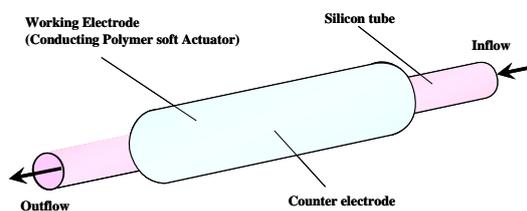


図5 ねじり運動するチューブ状導電性高分子ソフトアクチュエータを駆動源とするマイクロポンプ

- (6) ねじり運動するチューブ状ソフトアクチュエータを駆動源としたマイクロポンプのP-Q線図を図6に示す。マイクロポンプの最大圧力ヘッドは4.9 [kPa]、流量は0.8-7.6 [$\mu\text{l}/\text{min}$]であった。これまでに構築した開閉運動するソフトアクチュエータを駆動源とするマイクロポンプと同等の圧力ヘッドを得ながら、10.0 [$\mu\text{l}/\text{min}$]以下の微小流量域で高精度な流量の実現が可能となった。

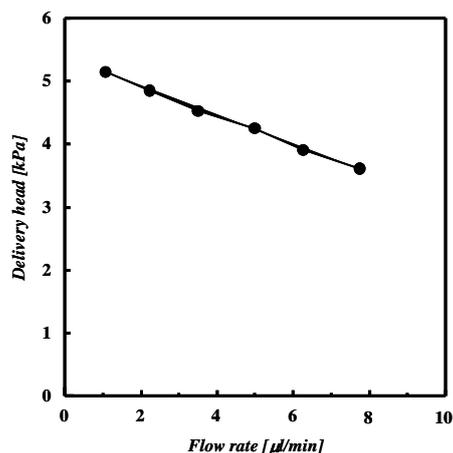


図6 ねじり運動するチューブ状導電性高分子ソフトアクチュエータを駆動源とするマイクロポンプのP-Q線図

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 2 件）

- ① Yoshitaka Naka, Masaki Fuchiwaki, Kazuhiro Tanaka, A Micro Pump Driven by a Polypyrrole-based Conducting Polymer Soft Actuator, Polymer International, 査読有, 59-3, 2010, 352-356
- ② Masaki Fuchiwaki, Kazuhiro Tanaka, Keiichi Kaneto, Planate conducting polymer actuator based on polypyrrole and its application, Sensors and Actuators A : Physical, 査読有, 150-2, 2009, 272-276

〔学会発表〕（計 8 件）

- ① Masaki Fuchiwaki, Yoshitaka Naka, Kazuhiro Tanaka, Characteristics of a Valve-Less Micro Pump Driven by a Polypyrrole-based Conducting Polymer Soft Actuator, 5th World Congress on Biomimetics, Artificial Muscles and Nano-Bio, 2009年11月27日, 大阪府
- ② Masaki Fuchiwaki, Yoshitaka Naka, Kazuhiro Tanaka, Performance of a Micro Pump driven by Conducting Polymer Soft Actuator based on Polypyrrole, International Conference on Functionalized and Sensing Materials (FuSeM 2009), 2009年12月8日, タイ・バンコク
- ③ Yoshitaka Naka, Masaki Fuchiwaki, Kazuhiro Tanaka, A micro pump driven by conducting polymer soft actuator based on polypyrrole, ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, FEDSM2009, 2009年8月3日, アメリカ・コロラド・バイル
- ④ Yoshitaka Naka, Masaki Fuchiwaki and Kazuhiro Tanaka, Characteristic of Micro Pump Driven by Conducting Polymer Soft

Actuator, ASME Fluids Engineering Division Summer Conference, 2008年8月13日, アメリカ・フロリダ・ジャクソンビル

- ⑤ Yoshitaka Naka, Masaki Fuchiwaki and Kazuhiro Tanaka, A Micro Pump Driven by Conducting Polymer Soft Actuator with Open/Close movement, The Seventh JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 2008年10月15日, 北海道札幌市
- ⑥ Yoshitaka Naka, Masaki Fuchiwaki and Kazuhiro Tanaka, Characteristics of a Micro Pump using Conducting Polymer Soft Actuator, The 25th Sensor Symposium, 2008年11月22日, 沖縄県那覇市
- ⑦ 中喜隆, 澗脇正樹, 田中和博, 開閉運動する導電性高分子ソフトアクチュエータを駆動源とするマイクロポンプの基礎特性, 秋季第69回応用物理学会学術講演会, 2008年9月3日, 愛知県・中部大学
- ⑧ 中喜隆, 澗脇正樹, 田中和博, 開閉/収縮運動する導電性高分子ソフトアクチュエータとそのマイクロポンプへの応用, 日本機械学会 2008年度年次大会, 2008年8月5日, 神奈川県横浜国立大学

[その他]

ホームページ等

<http://www.vortex.mse.kyutech.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

澗脇 正樹

九州工業大学・大学院情報工学研究院・

准教授

研究者番号：60346864