

様式 C-19

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月31日現在

機関番号：14701

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560261

研究課題名（和文）

電子導電性高分子アクチュエータを用いた能動カテーテルの開発

研究課題名（英文）

Development of an active catheter using a conductive polymer actuator

研究代表者

土谷 茂樹 (TSUCHITANI SHIGEKI)

和歌山大学・システム工学部・教授

研究者番号：30283956

研究成果の概要（和文）：

低侵襲医療で多用されるカテーテルは操作が難しく、電気的な屈曲操作可能な能動カテーテルが望まれる。本研究では電子導電性高分子アクチュエータを樹脂細管に集積化した能動カテーテルを試作した。同高分子の一種のポリピロール (PPy) は低電圧印加で大きな伸縮と応力発生を示し、微細化が容易である。試作カテーテルは、シリコン細管（直径1mm）、同細管の4側面に設けた金とPPyの積層膜、細管を被覆するPPy駆動用電解質ゲルから成る。細管の対向するPPy間に電圧を印加し、曲率半径23.5mmの屈曲動作を達成した。

研究成果の概要（英文）：

Catheter is a tube that is inserted into a body cavity, duct or vessel and one of the major instruments for the minimal invasive surgery. However, special skills are necessary to operate conventional catheters. So, active catheters, whose bending motion are controllable electrically by actuators integrated with the catheter tube, are highly desired in the medical field. We have developed an active catheter using a conductive polymer actuator driven in air. Polypyrrole (PPy) was used as the actuator. The fabricated active catheter consists of a silicone tube (outer diameter: 1.0mm), four thin film electrodes of gold formed around the tube, four PPy films deposited on each gold electrode, and an electrolyte gel layer covering the PPy films. When the voltage was applied between the opposing PPys of the catheter, the bending motion with the minimum radius of curvature of 23.5mm was performed in air.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：

科研費の分科・細目：機械工学、知能機械学・機械システム

キーワード：アクチュエータ、高分子アクチュエータ、ソフトアクチュエータ、導電性高分子、ポリピロール、カテーテル、能動カテーテル

1. 研究開始当初の背景

近年、医療現場では低侵襲検査・治療を目

的にカテーテル（血管、消化器や尿道などに挿入し、検査・治療のために用いられるチューブやガイドワイヤー）が多用されている。心臓内などで用いられる一部のカテーテルでは、シャフトに内蔵したワイヤーを体外から牽引することで先端部を屈曲制御する。しかし、構造が複雑なため細くすることが難しい。また、ワイヤーの牽引で座屈しないようシャフトを比較的硬くする必要があり、体内で安全に使える場所が限られる。先端にアクチュエータを搭載し、能動的に動けるようにすることで、体内の曲がりくねった箇所でも、その動作を体外から制御できる。アクチュエータの構成を工夫することで屈曲動作のほか、ねじれ回転運動や伸縮動作など様々な動きを実現できる。いくつかの方式の「能動カテーテル」が提案されているが、各々課題を有しており、まだ実用化に至っていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、能動カテーテル特に「電子導電性高分子」をアクチュエータとするマイクロ能動カテーテルを開発することにある。電子導電性高分子アクチュエータは、1~2V 程度の低電圧で 10%以上の伸縮率と生体筋の 100 倍程度の発生応力 (>20MPa) が得られ、またマイクロ化が容易なことから、小型（細管化）かつ低電圧駆動で大きな屈曲角が得られる能動カテーテルを実現できる可能性を有する。

3. 研究の方法

アクチュエータ用電子導電性高分子として化学的に安定なポリピロール (PPy と略す) を使用した。

研究過程は、「設計」、「要素技術の開発」→「第1次試作、評価・課題抽出」→「要素技術の改良・改良設計」→「第2次試作」→「評価」からなる。

「設計」では、有限要素法解析ソフト用いたカテーテル構造、寸法及び材料定数の最適化を行い、さらに材料の選定と製作プロセスの設計を行った。

「要素技術の開発」では、カテーテル作製上予想される諸技術課題の解決を図った。

これら要素技術を組み合わせることで能動カテーテルの第1次試作を行い、試作カテーテルの動作特性の評価を行って改良が必要な点や問題点を抽出した。さらに、評価結果に基づき要素技術の改良、構造、寸法、材料と製作プロセスの改良設計を行った。

その後、カテーテルの第2次試作を行い、その評価を行って実用化に向けさらなる課題を抽出し、改良・解決策の提案を行った。

4. 研究成果

平成21年度は能動カテーテル作製のための要素プロセスすなわち、(1)カテーテルの構成材料である樹脂表面への PPy 電解重合

用の低剛性薄膜電極の形成、(2)同電極をフォトリソグラフィ加工するための露光装置の開発、(3)薄膜電極への高伸縮、高発生力 PPy の電解重合、(4)PPy 駆動用の電解質ゲルの開発、を行った。得られた成果は次の通りである（各番号は上記要素プロセスと対応）。

(1) 塩化鉄や硫酸鉄を用いた酸化重合法（無電解重合法の一つ）によりシリコン樹脂表面に高付着力の PPy 膜が形成できると共に、同 PPy 膜上にアクチュエータ用 PPy が電解重合でき、この PPy の伸縮によりシリコン樹脂の屈曲動作が確認できた。(2) マイクロ光造形装置を改良し、微小スポット光の走査機構及びカテーテル用樹脂チューブの回転機構を設け、チューブ表面のレーザ露光装置を作製した。(3) 各種導電性薄膜上に PPy 膜を電解重合で形成して伸縮率の評価を行い、伸縮率が同薄膜のシート抵抗に依存しシート抵抗が小さいほど伸縮率が大きいことを見出した。(4) ゲル化剤にメチルセルロース、電解質に塩化ナトリウムを用いてゲル電解質を作り、これと PPy を積層してバイモルフ型アクチュエータを作製し、アクチュエータの屈曲動作を確認した。

平成22年度は要素技術の完成度向上、有限要素法解析による構造・材質の設計、カテーテルの第1次試作と評価、要素技術の改良と改良設計を目指した。樹脂細管（直径 0.5mm のシリコンチューブ）表面に PPy の電解重合用電極として金属より低剛性の導電性高分子（ポリチオフェン系）膜を形成し、同膜上への PPy の重合を確認した。そして、チューブ側面にポリチオフェン膜と PPy 膜を積層したカテーテルを作製し、電解質溶液中でチューブの屈曲動作を確認した。同じく低剛性電極としてカーボンナノチューブをゲル化した導電材料を試み、同ゲル上に PPy を電解重合すると共に、シリコン板/導電性ゲル/PPy のトリモルフ型アクチュエータを作製し、電解質溶液中で屈曲動作を確認した。また、チューブ表面での重合用電極パターン化のため専用のレーザフォトリソグラフィ装置を開発し、これを用いシリコン樹脂上に目標とする 50 μ m 以下の線幅のフォトレジストパターンが形成できた。PPy 駆動用電解質として PPy の長寿命駆動が期待できるイオン液体を使用することとし、空气中駆動化のためイオン液体をゲル化した。同ゲル膜を2枚の PPy 膜で挟んだトリモルフ型アクチュエータを作製し、空气中でその屈曲動作を確認すると共に、塩化ナトリウムを含むメチルセルロースゲルを用いた場合より駆動回数が向上することが分かった。

平成23年度は、(1)カテーテル作製のための要素技術の完成度向上、(2)樹脂細管表面への高精度 PPy パターンの形成、(3)能動

カテーテルの第2次試作、(4)試作カテーテルの評価と課題抽出、を目指した。低剛性、高導電性で樹脂細管への密着性に優れた PPy 電解重合用電極の形成が要素技術上の課題であるため、シリコン樹脂細管(直径 1mm)表面にスパッタ法と無電解めっき法により金薄膜を形成すると共に、同薄膜上への PPy の電解重合に成功した。さらに、エキシマレーザ加工装置を用いてシリコン樹脂細管全周に形成した金と PPy の積層膜を部分的に除去し、細管の軸方向に幅 150 μ m の分離溝を形成することで、樹脂細管の4側面に PPy アクチュエータを形成することに成功した。次に有限要素法解析を用いてアクチュエータ駆動時のカテーテルの屈曲変位を計算し、目標とする屈曲曲率半径(20~30mm)が達成可能な樹脂細管の直径と金電極の厚み求めた。その後、シリコン樹脂細管(外径 1mm、内径 0.5mm)表面に設けた4分割した PPy アクチュエータを駆動用電解質ゲルで被覆し、能動カテーテルを試作した。試作したカテーテルの対向する PPy 間に 10 μ A の直流電流を流すことにより金電極および PPy の剥離が無く曲率半径 23.5mm の屈曲動作が得られた。また、 $\pm 10\mu$ A, 15MHz の矩形電流の印加により、繰り返し屈曲動作も確認できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- ① C. Koshimizu, T. Ohta, T. Matsudo, S. Tsuchitani, M. Ito, Simultaneous In situ Measurement of Silicon Substrate Temperature and Silicon Dioxide Film Thickness during Plasma Etching of Silicon Dioxide Using Low-Coherence Interferometry and Silicon Dioxide Film Thickness during Plasma Etching of Silicon Dioxide Using Low-Coherence Interferometry, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **51**, pp. 046201-1-046201-6 (2012).
- ② K. Kikuchi, T. Sakamoto, S. Tsuchitani, and K. Asaka, Comparative study of bending characteristics of ionic polymer actuators containing ionic liquids for modeling actuation, *J. Appl. Phys.*, **109**, 073505-1-11 (2011).
- ③ K. Kikuchi, M. Miwa and S. Tsuchitani, Operation Characteristics of Ionic Polymer-Metal Composite using Ionic Liquids, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **1134**, 43-48 (2009).
- ④ S. Tsuchitani, K. Chikatani and K. Kikuchi, Bilayer Microactuator of Two Kinds of Polypyrroles Doped with Different Dopants, *Mater. Res. Soc. Symp.*

Proc., **1134**, 55-60 (2009).

- ⑤ K. Kikuchi and S. Tsuchitani, Nafion[®]-based Polymer Actuators with Ionic Liquids as Solvent Ion-exchanged at Room Temperature, *J. Appl. Phys.*, **106**, 053519-1-053519-8 (2009).
- [学会発表] (計27件)
- ① 福原佑樹, 土谷茂樹, 菊地邦友, 幹浩文, PVDF-HFP 多孔質体を駆動電解質として用いた空気中駆動型アクチュエータの開発, 日本機械学会関西支部関西学生会平成 23 年度学生員卒業研究発表講演会 (2012.3) 大阪.
 - ② 谷口智久, 菊地邦友, 幹浩文, 土谷茂樹, プラズマ照射によるイオン交換膜の改質を用いたイオン導電性高分子アクチュエータのパターン電極の作製と評価, 日本機械学会関西支部関西学生会平成 23 年度学生員卒業研究発表講演会 (2012.3) 大阪.
 - ③ Y. Hanayama, S. Tsuchitani and K. Kikuchi, Development of an Active Micro Catheter Using a Conducting Polymer Actuator and Silicone Tube, 2011 IEEE/SICE Int. Symp. System Integration (SII2011) (2011.12) 京都.
 - ④ 金壯憲, 中村佳寛, 岡本正臣, 菊地邦友, 幹浩文, 土谷茂樹, 安積欣志, IPMC の電気機械特性に与えるイオン交換時の溶媒の影響, 第 12 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 (SI2011) (2011.12) 京都.
 - ⑤ 谷口智久, 清水一平, 菊地邦友, 幹浩文, 土谷茂樹, 安積欣志, IPMC における SF6 プラズマを用いた電極のパターンめっきの作製と評価, 第 12 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 (SI2011) (2011.12) 京都.
 - ⑥ S. Tsuchitani, M. Okamoto and K. Kikuchi, Equivalent Circuit and Its Effects on Actuation of Flemion-based IPMC, 6th World Congress on Biomimetics, Artificial Muscles and Nano-Bio (2011.10) Cergy-Pontoise, Paris (France).
 - ⑦ K. Kikuchi, S. Tsuchitani and I. Shimizu, Formation of a patterned electrode for ion conductive polymer actuator using a plasma treatment method as a MEMS technology, Euro EAP 2011: 1st Int. Conf. Electromechanically Active Polymer transducers and artificial muscles (2011.6) Pisa (Italy).
 - ⑧ M. Okamoto, S. Tsuchitani and K. Kikuchi, Electromechanical properties of Flemion-based ionic polymer actuators ion-exchanged with ionic liquids, Euro EAP 2011: 1st Int. Conf.

Electromechanically Active Polymer transducers and artificial muscles (2011.6) Pisa (Italy).

- ⑨花山由宇, 菊地邦友, 土谷茂樹, 導電性高分子アクチュエータを用いた能動マイクロカテーテルの開発, ROBOMEC 2011 IN OKAYAMA (2011.5) 岡山.
- ⑩菊地邦友, 清水一平, 土谷茂樹, 多自由度イオン導電性高分子アクチュエータの開発, ROBOMEC 2011 IN OKAYAMA (2011.5) 岡山.
- ⑪豊嶋隆延, 菊地邦友, 土谷茂樹, ポリピロロールとバッキーゲルを用いたバイモルフアクチュエータの動作特性評価, 日本機械学会関西支部第 86 期定時総会講演 (2011.3) 京都.
- ⑫小田慧, 土谷茂樹, 菊地邦友, IPMC を用いたセルフセンシングアクチュエータの開発, 日本機械学会関西学生会平成 22 年度学生員卒業研究発表講演会 (2011.3) 京都.
- ⑬中村佳寛, 土谷茂樹, 菊地邦友, イオン導電性高分子金属接合体 (IPMC) の性能向上, 日本機械学会関西学生会平成 22 年度学生員卒業研究発表講演会 (2011.3) 京都.
- ⑭金龍一, 土谷茂樹, 菊地邦友, イオン液体を用いたポリピロロールの空气中駆動, 日本機械学会関西学生会平成 22 年度学生員卒業研究発表講演会 (2011.3) 京都.
- ⑮池野一輝, 土谷茂樹, 菊地邦友, 円筒露光装置の作製と精度の向上, 日本機械学会関西学生会平成 22 年度学生員卒業研究発表講演会 (2011.3) 京都.
- ⑯M. Okamoto, K. Kikuchi and S. Tsuchitani, Evaluation of Operating Characteristics of Flemion®-based IPMC with Ionic Liquids Operated in Water, 2010 IEEE/SICE Int. Symp. System Integration (2010.12) Sendai (Japan).
- ⑰I. Shimizu, K. Kikuchi and S. Tsuchitani, Fabrication of Ionic Polymer-Metal Actuator of Microcantilever Type, 2010 IEEE/SICE Int. Symp. System Integration (2010.12) Sendai (Japan).
- ⑱K. Kikuchi, S. Tsuchitani and I. Shimizu, Fabrication of a Planer-type Ionic Polymer Actuator Fabricated with MEMS Technology, 2010 MRS Fall Meeting, (2010.11) Boston (USA).
- ⑲岡本真臣, 土谷茂樹, 菊地邦友, Flemion を用いたイオン液体系 IPMC の動作特性評価, 第 28 回日本ロボット学会学術講演会 (2010.9) 名古屋.
- ⑳花山由宇, 土谷茂樹, 菊地邦友, 樹脂表面への無電解重合によるポリピロロール膜の形成, 関西学生会平成 21 年度学生員卒業研究発表講演会 (2010.3) 神戸.
- ㉑平岡太吾, 菊地邦友, 土谷茂樹, MEMS 技術

を用いたイオン導電性高分子アクチュエータのマイクロ化に関する研究, 日本機械学会関西支部第 85 期定時総会講演会 (2010.3) 神戸.

- ㉒岡本真臣, 土谷茂樹, 菊地邦友, Flemion 膜を用いた高発生力 IPMC の作製, 日本機械学会関西支部第 85 期定時総会講演会 (2010.3) 神戸.
- ㉓S. Tsuchitani, K. Kikuchi, D. Hiraoka, and I. Shimizu, Ionic Conductive Polymer Actuators Fabricated using MEMS Technology, 4th Conf. Artificial Muscle (2009.11) Osaka (Japan)
- ㉔豊嶋隆延, 菊地邦友, 土谷茂樹, ポリピロロールアクチュエータの空气中動作, 第 14 回 知能メカトロニクスワークショップ (2009.9) 和歌山.
- ㉕杉戸亮, 豊嶋隆延, 菊地邦友, 土谷茂樹, 各種電極上に成膜したポリピロロールの電気・機械的特性, 第 14 回 知能メカトロニクスワークショップ (2009.9) 和歌山.
- ㉖T. Yokota, K. Maeda, K. Kikuchi, and S. Tsuchitani, Development of an Active Micro Catheter Using a Polymer Actuator, ICROS-SICE Int. Joint Conf. 2009, (2009.8) Fukuoka (Japan).
- ㉗K. Kikuchi and S. Tsuchitani, Effects of Environmental Humidity on Electrical Properties of Ionic Polymer-Metal Composite with Ionic Liquid, ICROS-SICE Int. Joint Conf. 2009, (2009.8) Fukuoka (Japan).

[図書] (計 1 件)

- ①監修: 長田義仁, 田口隆久, シーエムシー出版, 未来を動かすソフトアクチュエータ—高分子・生体材料を中心とした研究開発— (2010) 337 ページ (内 p34-40 担当)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

土谷 茂樹 (TSUCHITANI SHIGEKI)
和歌山大学・システム工学部・教授
研究者番号: 30283956

(2) 研究分担者

幹 浩文 (HAN HIROBUMI)
和歌山大学・システム工学部・助教
研究者番号: 20403363
菊地 邦友 (KIKUCHI KUNITOMO)
和歌山大学・システム工学部・助教
研究者番号: 20588058