解説

高分子アクチュエータ

Polymer Actuators

安 積 欣 志* *独立行政法人産業技術総合研究所関西センター

Kinji Asaka* *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Kansai Center

1. 高分子アクチュエータとは

本稿では高分子アクチュエータの基本構成、原理、作製・加工法、応用について述べる。ここで述べる高分子アクチュエータとは、高分子材料、あるいは高分子材料と金属など他の材料の複合体からなる、材料自体が何らかの刺激に対して応答して変形することを利用するアクチュエータ材料のことをさし、特にロボティクスなどに応用が容易な電圧駆動のものを対象とする。現在研究されている電圧駆動型の高分子アクチュエータは、強誘電体ポリマー [1] やシリコン、ポリアリレンなどのエラストマー [2] あるいはオルガノゲル [3] などの電歪現象を利用したもの、またポリアニリン、ポリピロール、ポリチオフェンなどの導電性ポリマーの酸化還元状態の違いによる膨潤収縮現象を利用したもの [4]、またイオン導電性高分子内のイオン移動による応力発生を利用したもの [5] などである。

これらの高分子アクチュエータは、次世代アクチュエータの中でも高分子でできているという特徴から、加工性に優れ、軽量で小型化が容易であり、センサや構造材料と一体化して任意の形状に成型可能であるという特徴がある。また、応答性も優れ、かつ生き物のように柔軟に動くことから、ヒューマノイドロボットや医療・福祉用あるいはレスキュー用などの人間協調の動きを必要とするロボットのアクチュエータとして開発が期待されている。本報ではこの高分子アクチュエータについて、現在開発が進んでいるイオン導電性高分子・金属複合体、電歪高分子、導電性ポリマーに焦点を絞り、その基本構成、原理、作製・加工法、応用について述べる。

2. 高分子アクチュエータの基本構成と原理

電圧あるいは電流駆動型の高分子アクチュエータは図1に示すように、イオン導電体あるいは誘電体が電子導電体にはさまれた構造をもつ電気化学素子である。この3個の

層がすべて固体からなる全固体型の素子が、デバイス化において都合がよい。これらの構成は様々な固体電気化学プロセスに共通したものであり、材料も似通っている。すなわち、高分子アクチュエータは電池、燃料電池、キャパシター、電解プロセス、化学センサなどの固体電気化学プロセスファミリーの一種であり、材料技術や、加工技術もそれら電気化学で蓄積された技術を利用することができ、アクチュエータ材料の性能向上と、またこれら電気化学プロセスとの一体化によるシステム化が可能である。

現在、実用化に近いところまで開発が進んでいる高分子アクチュエータ材料はイオン導電性高分子、電子導電性高分子、電歪型ポリマーの3種である。イオン導電性高分子 (Ionic conductive polymer gel film: ICPF) は図2(A)の基本構成をもつ。イオン導電性高分子に金属を無電解メッキ法で接合した接合体として、初めて変形応答するので、イオン導電性高分子金属複合体 (Ionic polymer metal composite: IPMC) とも呼ばれる。イオン導電性高分子は通常、フッ素系のイオン交換樹脂を用いる。また、金属は金 [6] や白金 [7] などの貴金属を用いるが、銅 [8]、アルミ [9] を用いた報告もある。卑金属を用いた場合は金属が酸化しないようにする必要がある。応答の原理は、電圧を加えたときに、高分子内のイオンが移動する際、樹脂内の溶媒も移動し、その効果で応力が発生することによる [10]。応答特性は、低電圧駆動 (3 [V] 以下) で応答速度が比較的速く (10 [ms])、

図1 高分子アクチュエータの一般的構成の模式図

原稿受付 2003年7月2日

キーワード: Polymer Actuators, Artificial Muscles, Soft Actuators

*〒563-8577 池田市緑丘1-8-31

*Ikeda-shi, Osaka

図2 イオン導電性高分子・金属複合体(A), 電子導電性高分子(B), 誘電体(電歪)ポリマー(C)を用いた高分子アクチュエータシステムの模式図

変形も大きい。また、複合材料の機械的、あるいは熱、化学的耐久性も優れており、その点では扱いやすい。ただ、変形は基本的に屈曲運動であり、高出力の素子設計は難しい。また応答原理として、素子が膨潤している必要がある。

電子導電性ポリマーをアクチュエータに利用するシステムとしては、図2(B)のような構成がある。導電性ポリマーをアクチュエータとして用いるアイデアは、Baughmanによって提案され[11]、その後、いくつかのポリマーでデバ

イスが試作された[12]~[14]。導電性ポリマーは電子導電体であり、構成としてイオン導電体を必要とする。イオン導電体としては、接合の問題から、発表されている研究の多くは電解質溶液を用いているが、固体電解質を用いた研究の報告もある[15]。それらは、ポリマーリチウム電池などに用いられているゲル電解質を用いて、空中で作動する素子の開発を目指している。応答原理は導電性ポリマーの酸化還元状態の違いにより、電解質中からイオンがドーピング、デドーピングされることによって、導電性ポリマーが膨潤収縮を行うことを利用するものである[16]。電子導電性ポリマーも電気化学反応に基づいた原理から、低電圧駆動(2[V]以下)であり、また導電性ポリマーの伸縮を利用すると、高出力(数[MPa])、高ひずみ率(数%)のアクチュエータを設計することが可能である。ただ、応答速度は遅く(数秒)、また基本的に電解質が必要なことから、現在の技術では、システムに溶媒が必要である。

電歪型ポリマーは図2(C)のような構成をもつ。エラストマーなどの弾性誘電体[2]、あるいはある種のフッ素系樹脂などの強誘電体[1]にカーボン、金などの電極を接合したものである。応答原理は電圧を加えたときに両電極間にたまる電荷間に働く静電引力と、ポリマーの弾性力のバランスによる。電歪現象であるので、応答は電圧の2乗に比例し、また、電気化学反応を基礎とする他の2種のものに比べて駆動電圧は大きく、典型的には、1[μm]当たり、50[V]以上の電圧が必要である[1][2]。応答性能は優れており、シリコンを用いた研究では高ひずみ率(32%)、高出力(1[MPa])、速い応答速度([kHz])を示す。応答原理として溶媒を必要としないので、空中での作動が可能である。

3. 高分子アクチュエータの作製と加工

高分子アクチュエータの一般的な作製、加工法のスキームを図3に示す。ポリマーの成型・加工、電極形成、パターンニング、システム化の組み立て工程なしのファブリケーション工程を確立することが望まれる。この中でアクチュエータの特性上、重要と思われるポイントは電極形成である。それぞれのアクチュエータ技術に応じた電極形成技術が開発されている。ここでは我々が開発を行った、IPMCへの電極形成技術について少し詳しく述べる。

IPMCはその原理からも分かるように電流制御の素子であり、応答速度が電流値に比例する[10]。したがって、接合電極として必要な性質は、表面および接合部分の電気抵抗が低いこと、また有効電極面積を大きくすることにより、単位面積当たりに電荷を充電できる指標である電気二重層容量を大きくすることである。そのような要件を満たす電極構造として、図4の電子顕微鏡写真に示したような、樹脂中に金属電極が食い込んだデンドライト構造をした接合電極を形成することにより、応答感度を大きくすることが

可能である[17].

図5に, そのようにして作製したIPMCのステップ電圧に対する変形応答における, CCD イメージの連続写真と, そのとき流れる電流, および画像解析により求めた曲率のグラフを示す. IPMCの駆動電圧は通常3 [V] 以下であり, そのとき流れる電流は, 電極・イオン導電性高分子界面における電気二重層への充電電流が主なものである. 連続写真から分かるように最大変位に達する応答速度は, 通常0.1 [s] 以内であり, また, 曲率も大きい.

他の原理の高分子アクチュエータにおいてはまったく異なった構造の電極が有効であり, 例えば, エラストマーを

図3 高分子アクチュエータの作製, 加工法のスキーム

図4 イオン導電性高分子 (Dupont 社製 Nafion) へ金を無電解メッキ法で接合した接合体断面の走査型電顕写真, デンドライト状の電極構造の形成

図5 イオン導電性高分子 (旭硝子製 Flemion)・金接合体に2.5 [V] の矩形波電圧を加えたときの変形応答の CCD カメラ観測による連続写真, および画像解析から求めた曲率と同時に測定した電流, 電圧の時間依存性

用いた電歪素子の電極においては、駆動原理としてほとんど電流が流れないので、電極としては比較的高抵抗のものでも使用できる。問題となるのは大きな歪みに追随できるのび特性であり、様々な構造が提案されている [2] [18]。以上のように、電気駆動の高分子アクチュエータ技術においては電極形成の技術が素子開発の大きなポイントの一つといえる。

4. 高分子アクチュエータの応用

高分子アクチュエータは現在多く用いられている、回転運動を原理とする電磁モータと運動の形態が異なり、材料の伸縮、屈曲などの変形を原理とするものである。また、すでに述べたように様々な形への成型が比較的容易である。以上のことから、高分子アクチュエータを応用するに当たっては今までのアクチュエータで適用できないようなロボットに対する新しいデザインの研究が必要であることは明らかであり、すでに研究例もある。ここでは運動の形態に注目して、主にIPMCアクチュエータの応用例について述べる。

IPMCの基本的な変形応答は屈曲である。ポリマーの成型、あるいは電極のパターニングにより、屈曲の応答を様々なモードの運動に変換し（図6参照）、応用を試みた研究を紹介する。

基本的なフィルムの屈曲応答を利用した例としては、NASA, JPLによる小惑星探査用ロボットナノローバーの赤外線カメラのワイパーの研究がある [19]。宇宙での応用のために、水で膨潤している必要のあるIPMC素子をコーティングし、乾燥を防いだ。水中での適用例では、郭らによる水中魚様ロボットの推進用ひれへの一連の応用研究がある [20]。また、水中ロボットについては最近、高分子アクチュエータの事業化を目的として設立されたベンチャー企業イーメックス社により、観賞用として商品化されている [21]。また、郭らは、このフィルムの屈曲応答をダイヤフラムとして用い、マイクロポンプ作製の研究も行っている [22]。

田所らは図6に示すようなパターン電極を行うことで、楕円運動が可能な素子を作製した [23]。この運動はおおのの電極の電圧を制御することで、様々な動きが可能である。またこの素子を平面上に多数、並べることで、対象物を任意の方向に搬送することのできる搬送装置 [24] や、触覚が周波数によって変化する触覚ディスプレイ [25] への応用を行った。さらに、同様の素子をたすき掛けにすることにより、その先端を三次元方向に動かすことのできる素子を作製し、生物細胞のハンドリングなどを目的とした、マイクロマニピュレータの試作 [26] を行った。瀬和らはチューブ状のイオン導電性高分子に4本の電極を形成し、回転して360度の方向に動かすことのできる素子を作製し、カテーテルの先端にこのアクチュエータをつけることによって、体

図6 IPMCアクチュエータの各種運動形態と応用

外からカテーテル先端の方向を制御することのできる能動カテーテルのシステムを開発している [27]。

山北ら [28] は比較的厚いフィルム状のIPMCをセロハンなどの薄いフィルムでつなぎ、その素子を直列、並列につなぎ合わせることで、屈曲運動を伸縮運動（直動高分子アクチュエータ）に変換した。アクチュエータの制御無しで2足歩行することのできる有名な受動歩行器に、この直動高分子アクチュエータを人工筋肉として用いることにより、歩行の安定化を図るのが目的である。

エラストマーアクチュエータについても同様な工夫によりロボット技術への応用研究がなされている [29] [30]。

5. これからの展望

以上、高分子アクチュエータの現状について応用研究例を中心に紹介した。現在は、まだ材料開発が必要であり、特に信頼性、コストの問題により、電磁モータ等の既存のアクチュエータの置き換えとしての用途は難しいと考えられるが、新しい用途、例えば、マイクロ領域におけるソフトマニピュレーションや、介護支援ロボットなどの人間協調の動きが必要とされるロボットのアクチュエータには十分実用あるいは実験的に試用に耐えるレベルに達しているとい

える。多くのロボットシステム研究者がこのアクチュエータを用いたシステム化を試みられることにより、材料研究の問題点も明らかとなり、より性能のいい実用的な高分子アクチュエータ材料の開発が進むことが期待される。ロボットシステム研究者と材料研究者の協力により、真の意味での人工筋肉システムによるロボットが完成されることが期待される。

参 考 文 献

- [1] Q. M. Zhang, V. Bharti and X. Zhao: "Giant electrostriction and relaxor ferroelectric behavior in electron-irradiated poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) copolymer," *Science*, vol.280, pp.2101-2104, 1998.
- [2] R. E. Pelrine, R. D. Kornbluh and J. P. Joseph: "Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation," *Sensors and Actuators A*, vol.64, pp.77-85, 1998.
- [3] 平井: "電場・磁場応答性を有する高分子ゲル", *材料科学*, vol.32, no.2, pp.59-63, 1995.
- [4] R. H. Baughman: "Conducting polymer artificial muscles," *Synth. Metals*, vol.78, pp.339-353, 1996.
- [5] 小黒, 川見, 竹中: "イオン導電性高分子—電極接合体の低電圧刺激による屈曲", *J. Micromachine Soc.*, vol.5, pp.27-30, 1992.
- [6] N. Fujiwara, K. Asaka, Y. Nishimura, K. Oguro and E. Torikai: "Preparation and gold-soid polymer electrolyte composites as electric stimuli-responsive materials," *Chem. Materials*, vol.12, pp.1750-1754, 2000.
- [7] K. Asaka, K. Oguro, Y. Nishimura, M. Mizuhata and H. Takekawa: "Bending of polyelectrolyte-platinum composites by electric stimuli I- response characteristics to various waveforms," *Polymer J.*, vol.27, pp.436-440, 1995.
- [8] M. Uchida and M. Taya: "Solid polymer electrolyte actuator using electrode reaction," *Polymer*, vol.42, pp.9281-9285, 2001.
- [9] T.-G. Noh, Y. Tak, J.-D. Nam and H. Choi: "Electrochemical characterization of polymer actuator with large interfacial area," *Electrochim. Acta*, vol.47, pp.2341-2346, 2002.
- [10] K. Asaka and K. Oguro: "Bending of polyelectrolyte membrane platinum composites by electric stimuli, Part II. Response kinetics," *J. Electroanal. Chem.*, vol.480, pp.186-198, 2000.
- [11] R. H. Baughman: "Conducting polymers in redox devices and intelligent materials systems," *Makromol. Chem., Macromol. Symp.*, vol.51, pp.193-215, 1991.
- [12] T. F. Otero, E. Angulo, J. Rodriguez and C. Santamaria: "Electrochemomechanical properties from a bilayer: polypyrrole/non-conducting and flexible material—artificial muscle," *J. of Electroanal. Chem.*, vol.341, pp.369-375, 1992.
- [13] Q. Pei and O. Inganas: "Electrochemical muscles: bending strips built from conjugated polymers," *Synth. Metals*, vol.55-57, pp.3718-3723, 1993.
- [14] K. Kaneto, Y. Sonoda, Y. Min and A. G. MacDiarmid: "Artificial muscle": Electromechanical actuators using polyaniline films," *Synth. Met.*, vol.71, pp.2211-2212, 1995.
- [15] J. M. Sansinena, V. Olazabal, T. F. Otero, C. N. Polo da Fonseca and M.-A. De Paoli: "A solid state artificial muscle based on polypyrrole and a solid polymeric electrolyte working in air," *Chem. Commun.*, pp.2217-2218, 1997.
- [16] 金藤敬一, 金子昌充, 高嶋授: "有機高分子で人工筋肉を造る", *応用物理*, vol.65, pp.803-810, 1996.
- [17] K. Onishi, S. Sewa, K. Asaka, N. Fujiwara and K. Oguro: "Morphology of electrodes and bending response of the polymer electrolyte actuator," *Electrochim. Acta*, vol.46, pp.737-743, 2001.
- [18] M. Watanabe, H. Shirai and T. Hirai: "Wrinkled polypyrrole electrode for electroactive polymer actuators," *J. of Applied Physics*, vol.92, pp.4631-4637, 2002.
- [19] Y. Bar-Cohen: "EAP used to develop a dust-wiper for MUSES-CN mission to an asteroid," *EAP newsletter* (<http://ndeaa.jpl.nasa.gov/nasa-nde/lommas/eap/WW-EAP-Newsletter.html>), vol.1, no.1, pp.6-7, 1999.
- [20] S. Guo, T. Fukuda and K. Asaka: "A new type of fish-like underwater microrobot," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol.8, pp.136-141, 2003.
- [21] Eamex Co. Ltd.: <http://www.eamex.co.jp/>
- [22] S. Guo, X. Chen, T. Fukuda and K. Oguro: "A New Type of Micropump for Medical Application," *International Conference on Advanced Mechatronics (ICAM'98)*, pp.318-323, 1998.
- [23] S. Tadokoro, T. Murakami, S. Fujii, R. Kanno, M. Hattori and T. Takamori: "An elliptic friction drive element using ICPF (ionic conducting polymer gel film) actuator," *IEEE Control Systems*, vol.17, no.3, pp.60-68, 1997.
- [24] S. Tadokoro, S. Fujii, M. Fushimi, R. Kanno, T. Kimura, T. Takamori and K. Oguro: "Development of a distributed actuation device consisting of soft gel actuator elements," *Proc. of the 1998 IEEE International conf. On Robotics and Automation*, pp.2155-2160, Leuven, Belgium, 1998.
- [25] M. Konyo, S. Tadokoro, T. Takamori and K. Oguro: "Artificial tactile feel display using soft gel actuators," *Proc. of IEEE International Conf. On Robotics and Automation*, pp.3416-3421, 2000.
- [26] S. Tadokoro, S. Yamagami, M. Ozawa, T. Kimura, T. Takamori and K. Oguro: "Multi-DOF device for soft micromanipulation consisting of soft gel actuator elements," *Proc. of IEEE International Conf. On Robotics and Automation*, pp.2177-2182, 1999.
- [27] K. Oguro, N. Fujiwara, K. Asaka, K. Onishi and S. Sewa: "Polymer electrolyte actuator with gold electrodes," *Proc. of the SPIE's Electroactive Polymer Actuators and Devices Conf.*, vol.3669, pp.64-71, Newport Beach, USA, March 1-2, 1999.
- [28] M. Yamakita, N. Kamamichi, Y. Kaneda, K. Asaka and Z. W. Luo: "Development of linear artificial muscle actuator using ionic polymer for biped walking robots," *EAP newsletter* (<http://ndeaa.jpl.nasa.gov/nasa-nde/lommas/eap/WW-EAP-Newsletter.html>), vol.4, no.2, pp.6-7, 2002.
- [29] R. Kornbluh, R. Pelrine, Q. Pei, S. Oh and J. Joseph: "Ultra-high Strain Response of Field-Actuated Elastomeric Polymers," *Proc. of the SPIE's Electroactive Polymer Actuators and Devices Conf.*, vol.3987, pp.51-64, Newport Beach, USA, March 6-8, 2000.
- [30] R. Pelrine, R. Kornbluh, Q. Pei, S. Stanford, S. Oh and J. Eckler: "Dielectric elastomer artificial muscle actuators: Toward biomimetic motion," *Proc. of the SPIE's Electroactive Polymer Actuators and Devices Conf.*, vol.4695, pp.126-137, San Diego, USA, March 18-21, 2002.

安積欣志 (Kinji Asaka)

安積欣志 (Kinji Asaka)

1986年京都大学理学研究科修士課程化学専攻修了。理学博士。1986年京都大学化学研究所教務職, 1993年通産省工技院大阪工業技術試験所入所。現在, 独立行政法人産業技術総合研究所, 主任研究員。界面電気化学, 誘電体, ソフト機能材料などの研究に従事。高分子学会, 日本膜学会, 計測自動制御学会会員。