

イオン交換ポリマーメタル複合体による 人工筋肉用アクチュエータ

伊原 正, 中村 太郎, 筏 義人

鈴鹿医療科学大学 医用工学部 臨床工学科

はじめに

人工筋肉は、生体の筋肉の代替組織として能動的に動くアクチュエータ素子を備えた構造体である。人工筋肉開発では高分子ゲルを熱・溶媒・光・電気などの刺激に応答させて膨潤・収縮されるメカノケミカルアクチュエータ、圧電素子を応用したアクチュエータなどが試みられてきた¹⁾。また、弾性ポリマー材料を用いた人工筋肉材料で 100 psi 以上の力を発生するものも開発されている²⁾。

イオン交換ポリマーメタル複合体 (IPMC) は、水で膨潤した高分子電解質膜に金属電極をめっき接合したメカノケミカル・アクチュエータ材料である。これは、ゲルや圧電素子、弾性ポリマーなどに比べ、低電圧で大きな変位を発生し、生体の筋組織と同様に容量性および抵抗性素子として湿度の高い環境で効率よく動作する特徴があり、医療用のマイクロアクチュエータ素材として応用が進められている。ここでは、イオン交換ポリマーメタル複合体の動作特性と医療用アクチュエータと人工筋肉への応用について述べる。

高分子電解質自体の機械化学的変性は、Kuhn³⁾ らによって 1940 年代から研究が始められたが、荷電した

電解質ポリマーの電気浸透圧現象による変位・歪発生⁴⁾の理論的解析は 1970 年代から Grodzinsky, Melcher⁴⁾ らによって始められた。高分子電解質は、イオングループを分子構造に持ち、これが溶液中で電荷と結合・解離する性質を有する。Katchalsky⁵⁾ らは、ポリイオンと呼ばれる電荷が 10^{10} V/m オーダの強い電界を作り、高分子電解質の電気機械変性の本質が外部電界との相互作用とともに内部の電場構造による作用が寄与していることを明らかにした。特に高分子電解質ネットワークの間質部が溶液性イオンで充たされた場合、外部電界によるその構造内のイオンの誘電性の移動によってマクロ分子ネットワークの変位を引き起こす。産業技術総合研究所の安積らは、人工筋肉としてのイオンポリマーゲルのマイクロエレクトロメカニクスモデルを報告している。

IPMC は、白金・金などの貴金属を構造に有するイオン交換膜で、水などの極性溶液を大量に吸収する特性があり、センサーとしてもアクチュエータとしてもその特性が注目されている素材であり、基礎研究が進んでいる。Shahinpoor らの予備研究では、IPMC が 10% 以上アクチュエーション変位を示し、4-7 V の印加電圧により数 msec のオーダーで 10-30 MPa の力

を発生することが判明している。また、2 V 以上の電圧を印加した時、陽極側に曲げられ、電圧を上げるに従って変位が大きくなる。交流電圧が印加された場合は、振子運動を起こし、また変位のレベルが電圧のみでなく、周波数および材料の水含有率にも依存するため、制御の可能な人工心筋のアクチュエータとして最適な材料である。これらの成果をふまえ、心筋の再生を補助する代替構造物として、再生までの期間の心臓のポンプ機能を代行し、心筋再生とともに消退する人工心筋の開発を目的とした人工心筋のアクチュエータ用ポリマー素材を開発し、機械特性を測定して実用可能性を検討したいと考える。

イオン交換ポリマーメタル複合体 (IPMC) の作成

IPMC は、パーフルオロスルホン酸膜の両面に金メッキを施し、短冊状に裁断して作成する。膜状に成型された製品（デュボン社製 Nafion117、膜厚 200 μm ）または粒子（デュボン社製 Nafion Resin R-1100）からプレス加工によって任意形状の膜を成型する。パーフルオロスルホン酸はフッ素樹脂の高分子鎖の側鎖にスルホン酸基が付いた構造をもつ。

その後、塩化ジクロロフェナントロリン金(III) $[\text{Au}(\text{phen})\text{Cl}_2]\text{Cl}$ に浸潤し、イオン交換反応で金錯イオンを吸着させる。金層の厚さは約 2 μm で片面当り 3 mg/cm^2 に相当する。金を吸着させた膜を亜硫酸ナトリウム (Na_2SO_3) で還元して膜の内部に取り込まれた金イオンを外側に析出する。これによって膜の両面に

金めっきを施すことが可能となる。めっきされた IPMC は、任意形状に裁断することが可能である。(図 1)

イオン交換ポリマーメタル複合体 (IPMC) の動作特性

IPMC 膜に 1-5 V の電界を加えると、膜の片側で引張歪が、反対側で圧縮歪が生ずる。これによりイオン交換ポリマーメタル複合体は、瞬時に陽極側に彎曲する。また、電極電圧が交互に変動する方形波電圧または三角波電圧を加えると、膜は両側に屈曲運動をする。この時、変位は電圧にほぼ比例し、どの部分でもほぼ同じ曲率で円弧状に湾曲する。ピークの立ち上がりまでの所要時間は約 15 msec である。

このように応答速度が速いことが IPMC の特徴で、空気中では 200 Hz 程度までの周波数にも追従して動作する。一方、含水性のポリマーであるため、長時間空気中で動作させることはできない。また、水中でも 2 V 程度までの電圧であれば、電気分解は生ぜず、ガスは発生しないが、5 V 以上の電圧では水中で動作させるとガスが発生し、空気中で動作させた場合、焼け焦げることがある。また 1 kHz 以上の信号には追従できない。

膜を短冊状に裁断して水中に片持ち支持し、接合膜の両面に取り付けられた白金リード線間に 1-5 V の方形波電圧を加えると、試験片はアノード側に彎曲する。この時発生する張力をアイソトニックトランスデューサおよびアイソメトリックトランスデューサを用いて測定した。幅 5 mm、長さ 20 mm の IPMC の試験片の発生する張力は 2.0 V の方形波電圧を印加した際、ピーク値で 0.5 gf であった。(図 2) これは応力にして約 50 Pa に相当する。健康人安静時血圧に相当する 120 mmHg の圧は約 16000 Pa であるので、この圧を発生するためには、理論的には IPMC 膜を 18 層重畳すればよい。重畳する IPMC 膜の接合材の厚みを考慮しても、7.2 mm 程度の厚みで圧発生が可能である。発生応力は電界にも比例するが、溶液中で作動するアクチュエータであるため、分極を防ぐため、印加電圧を

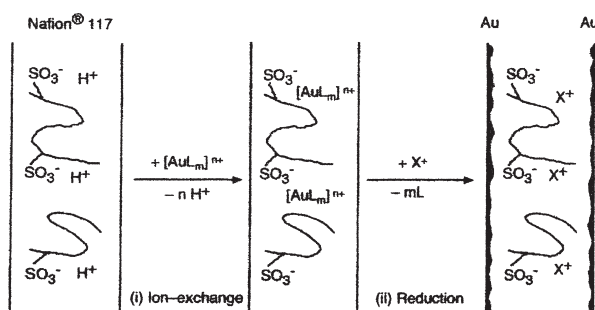


図 1 陽イオン交換による IPMC の作成

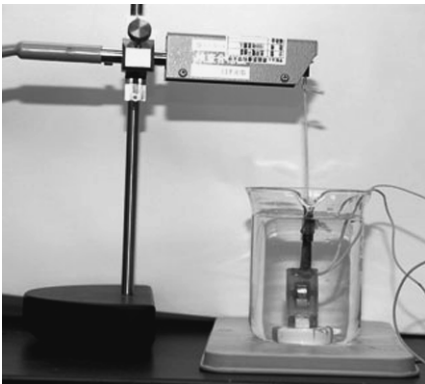


図2 アイソメトリックトランスデューサによる IPMC の等尺性張力測定

上げることは困難である。しかし、膜の重ね合わせにより、心筋層に相当する厚みで、心室内圧相当の圧の発生が可能であることが示された。

IPMC の動作メカニズムとモデル

IPMC 膜は、膜内のイオンが電界によって移動によって、膜の片側で引張歪が、反対側で圧縮歪が生ずると考えられている。すなわち膜内の陽イオン（ナトリウム）が電界によって陰極側に移動するが、このときポリマー内の水分子を伴って移動し、陰極側が移動した水分子で膨潤、陽極側が退縮して陽極側に屈曲すると考えられている。また、表面電荷の相互作用によるメカニズムも考えられている。（図3）

イオンポリマーメタル複合体の屈曲変位特性は、水分子の流れ J を流体圧 P_m の勾配と印加電圧による電流 j の項で下記のようにモデル化されている。（図4）

$$J = -k_m \frac{\partial P_m}{\partial x} + \frac{\phi k j}{F}$$

すなわち、電界 ϕ による項と浸透圧 P_m による項の2種類の駆動力で水分子の移動が起こると考えられる。

このモデルを基本に、屈曲変位特性は屈曲前の曲率 R_0 と屈曲後の曲率 R を使って下記のようにモデル化される⁷⁾。

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} = \frac{\frac{2d^3}{9} \frac{1}{1+H_{eq}} \frac{\phi k j}{F D_m} E_m \left[1 - \exp \left[- \left(\frac{1}{2d} \pi \right)^2 D_m t \right] \right] + M}{Q}$$

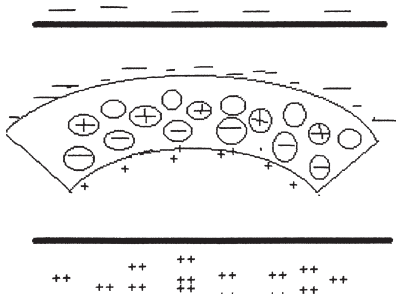


図3 IPMC 膜内の電界とイオンの模式図

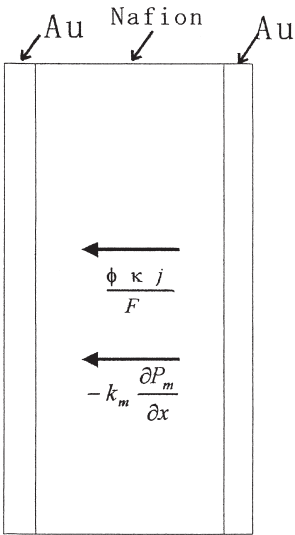


図4 IPMC 膜内の2種の駆動力

このモデルによれば、変位の特性は電流 j に直接依存するが、変位特性の実験値を理論値と比較したところ、きわめて良好な一致を見ることが示されている。すなわち、変位特性は電圧よりも電流に依存することが解明された。

一方、発生張力に関しては、まだ実験値と良好な一致を示すモデルもなく、また実験方法そのものも試行錯誤されている段階である。

de Gennes らは、電流密度 J と水分子の流れ Q を Onsanger の式

$$J = \sigma E - L_{12} \nabla p$$
$$Q = L_{21} E - K \nabla p$$

を元にモデル化し、変位のない条件での発生トルクを

下記のようにモデル化した。

$$\Gamma = \frac{B}{kY} \nabla p = \frac{1}{12} \frac{1-2\sigma_p}{1-\sigma_p} \frac{Lh^3}{K} E$$

我々のアイソメトリックトランスデューサによる IPMC の等尺性張力測定結果では、発生応力は 3 V までは直線的に増加するが、3 V 以上では、増加が見られなくなった。(図 5) しかし、2 枚の膜を使用した場合、5 V まで直線的な増加が得られた。一方、アイソトニックトランスデューサを用いた等張性変位測定では 1~5 V の範囲でほぼ直線的に増加し、2 枚の膜を平行に使用した場合も、変位の値は減少するが、直線的な増加が得られた。これらの結果は、イオンポリマーメタル複合体の動作が電流密度に依存することを確認できる結果と考えられる。(図 6)

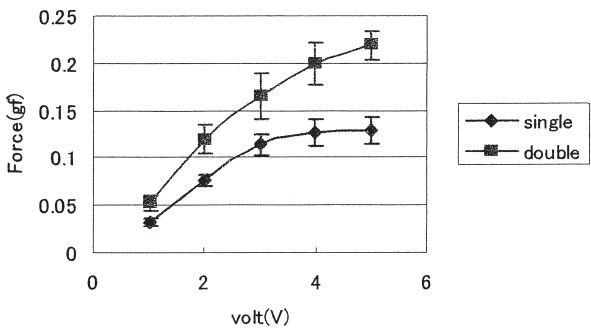


図 5 IPMC の等尺性張力測定結果

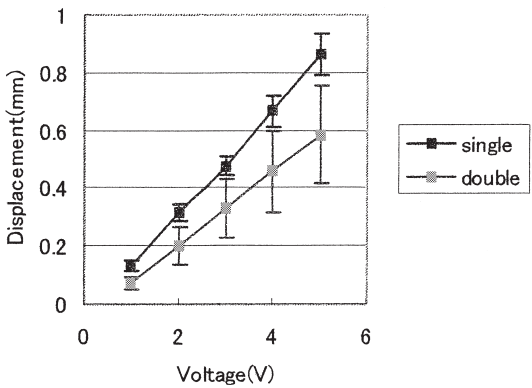


図 6 IPMC の等張性変位測定結果

IPMC の応用技術

IPMC の応用技術として実用化がすすめられているものに、能動カテーテルがある。脳血管，冠動脈へのカテーテルインターベンションの際にカテーテルを正しい患部にポジショニングをおこなうことが極めて重要であるが，従来のカテーテルでは術者の手技が熟練されないと手術時間が長時間になり，また場合によっては事故につながってしまっていた。能動カテーテルは血管に導入されたカテーテルの向きを任意に変え，進行方向を正しく制御できる画期的なカテーテルになると期待されている。具体的には IPMC 膜を細く成形したものを 4 枚カテーテルに貼り合わせ，カテーテル先端が任意の方向に 60° ずつ傾くよう設計されている。

一方，NASA ではその軽量で早い応答性を生かして火星探査機のワイパーへの応用が考えられている。

我々は，管腔臓器の補助，具体的には大動脈などの人工血管，人工消化管，人工肛門，人工気管支などへの実用を目的とした応用を研究している。また，心筋の再生を補助する代替構造物として，再生までの期間の心臓のポンプ機能を代行し，心筋再生とともに消退する人工心筋の開発を考えている。

生体用アクチュエータ，人工筋肉の研究は海外でも高く注目を集めており，Scientific American 2003 年 10 月号でも「Artificial Muscle」として特集された。また，Biomimetics, Artificial Muscles & Nano-Bio との名称で新たに学会が 2003 年に発足した。国内でも，計測自動制御学会にソフトマテリアル機能応用調査研究会という分科会が発足し，産業技術総合研究所，理化学研究所を中心に最前線の研究者が研究成果を報告し，また意見交換を行っている。

ま と め

イオンポリマーメタル複合体 (IPMC) は，低電圧で大きな変位・張力を発生し，湿度の高い環境で効率よく動作するアクティブアクチュエータ (能動駆動素子) である。このアクチュエータは，生体の筋組織と同様

に容量性および抵抗性素子として動作し、能動カテーターや人工筋肉への応用が試みられている。

イオンポリマーメタル複合体は、優れた応答時間特性、可制御性を非常に低い電圧で可能にするが、発生応力が小さいことが実用化の最大の妨げになっている。我々は、イオンポリマーメタル複合体の発生応力、支持応力を向上するため、市販の Nafion 膜にはない厚さのアクチュエータ用膜の試作を行っている。

人工血管による心機能補助は、心臓全体の再生に至るまでにも、生体心筋の収縮・拡張機能を直接代替する機能性アクチュエータの開発により、従来の心不全の循環補助、例えば大動脈バルーンポンピング (IABP) を用いた、左心補助装置 (LVAD) などの、生体機能代行装置と別の方法により、心機能を補助する手段を提供するという点で他に類例を見ないものである。

脳死後心臓移植が日本でも進められているが、重症心不全患者の治療は最終的には移植以外に手段が無いのが現状である。人工心臓の開発は、体内埋込み型人工心臓に実用の目途が立ち、近年大きな進歩を遂げたが、患者自身の心臓と交換して機能させるものであり、患者の心筋再生が可能であれば最も望ましい手段である。細胞レベルでの心筋再生の可能性は既に確認されており、心筋再生の足場となる生体材料が開発されれば臓器としての心臓再生も可能と考えられる。一方、心臓の場合は再生までの間、ポンプ機能を維持する必要がある。機能性アクチュエータとして優れた特性を有するイオンポリマーメタル複合体 (IPMC) の開発を進めることにより、現在心不全患者に適用されている補助人工心臓が適用できない小児や体格の小さい患者さんへの応用も可能になると考えられる。

イオンポリマーメタル複合体による人工心筋実用化の見通しが明らかになれば、開発された技術は人工心筋のみならず、骨格筋や下顎骨を動かす咬筋・側頭筋、目を閉じる眼輪筋など他の筋肉の機能を代行し、再生を補助する機能材料としての応用が広がると考えられる。さらに、センサとして心筋収縮力のモニタ、リハビリテーション中の筋力モニタなどの用途、マイクロ

マシンとしての用途も考えられる。

謝 辞

本稿は、科学研究費基盤研究(C)(平成 12 年度～平成 15 年度)「イオンポリマーメタル複合体を用いた人工心筋開発の基礎研究」(課題番号:12680852)の補助を受けて行われた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Danilo E. De Rossi (Ed.) Polymer Gels: Fundamentals and Biomedical Applications, Plenum Press, 1991
- 2) <http://www.erg.sri.com/automation/actuators.html>
- 3) Kuhn, W., Hargitay, B., Katchalsky, A., Eisenberg, H.: Reversible dilation and contraction by changing the state of ionization of high-polymer acid networks, Nature, 165, 514-516, 1950.
- 4) Grodzinsky, A. J., Melcher, J. R.: Electromechanical transduction with charged polyelectrolyte membranes, IEEE Trans. Biomed. Engr., 23 (6), 421-433, 1976.
- 5) Katchalsky, A.: Rapid swelling and deswelling of reversible gels of polymeric acids by ionization, Experientia, V, 319-320, 1949.
- 6) Tadashi Ihara, Tatsuki Nakamura, Taro Nakamura, Yoshito Ikada, Kinji Asaka, Naoko Fujiwara, Keisuke Oguro: Isotonic Tension and Isometric Displacement Measurement of a Solid Polymer Electrolyte Membrane-Gold, Proceedings of the first International Congress on Biomimetics and Artificial Muscle, 1, 2002.
- 7) 伊原正, 筏義人, 増田竜樹, 中村太郎, 小黒啓介, 安積欣志, 藤原直子: イオンポリマーメタル複合体の等尺性発生張力と等張性変位の測定, 第 42 回日本 ME 学会大会論文集, 2003
- 8) 中村太郎, 伊原正, 筏義人, 増田竜樹, 小黒啓介, 安積欣志, 藤原直子: イオンポリマーメタル複合体

- 駆動回路の基礎研究, 第 42 回日本 ME 学会大会論文集, 2003
- 9) 小黒啓介: 高分子電解質膜によるアクチュエータ。生体材料。Vol 16, No 2, 100-105, 1998
- 10) Kinji Asaka & Keisuke Oguro: Bending of polyelectrolyte membrane platinum composites by electric stimuli. Part II. Response kinetics, J. Electroanalytical Chemistry, 480, 186-198, 2000.
- 11) Kwang J Kim and Mohsen Shahinpoor: Ionic polymer-metal composites: II. Manufacturing techniques. Smart Mater. Struct. 12, 65-79, 2003.
- 12) Kazuo. Onishi, Shingo. Sewa, Kinji. Asaka, Naoko. Fujiwara., Keisuke. Oguro: The effects of counter ions on characterization and performance of a solid polymer electrolyte actuator: Electrochimica Acta 46 1233-1241 2001.
- 13) Kinji. Asaka, Naoko. Fujiwara, Keisuke. Oguro, Kazuo. Onishi, Shingo. Sewa: State of water and ionic conductivity of solid polymer electrolyte membrane in relation to polymer actuators: Journal of electroanalytical chemistry 505 24-32 2001.
- 14) Naoko. Fujiwara, Kenji. Asaka, Yasuo. Nishimura, Keisuke. Oguro, and Eiichi. Torikai: Preparation of Gold-Solid Polymer Electrolyte Composites As Electric Stimuli-Responsive Materials: Vol 12, No 6, 1750-1754, 2000.
- 15) Tae-Geun Noh, Yongsug Tak, Jae-Do Nam, Hyoukryeol Choi: Electrochemical characterization of polymer actuator with large interfacial area: Electrochimica Acta 47 2341-2346 2002.
- 16) M. Shahinpoor, Y. Bar-Cohen, T. Xue, J. O. Simpson and J. Smith: Ionic Polymer-Metal Composites (IPMC) As Biomimetic Sensors and Actuators: Smart Structures and Materials. 1-17, 1998
- 17) 1998
- 17) 山下真司 田所論 高森年: ICPF アクチュエータの特性とモデル化 第 11 報: 屈曲メカニズムの仮説に基づくモデル: 日本機械学会 [No. 99-9] ロボティクス・メカトロニクス講演会 '99 講演論文集 1 P 1-46-072(1)
- 18) P. G. de Gennes, Ko Okumura, M. Shahinpoor, K. J. Kim: Mechanoelectric effects in ionic gels: Europhysics Letters-Vol. 50, no4, pp. 513-518, 2000.
- 19) Kazuo. Onishi, Shingo. Sewa, Kinji. Asaka, Naoko. Fujiwara, Keisuke. Oguro: Morphology of electrodes and bending response of the polymer electrolyte actuator: Electrochimica Acta 46, 737-743, 2000.
- 20) Naoko. Fujiwara, Kinji. Asaka, Yasuo. Mizumura, Keisuke. Oguro, Eiichi. Torikai: Preparation of Gold-Solid Polymer Electrolyte Composites As Electric Stimuli-Responsive Materials: Chem. Mater 12, 1750-1754, 2000.
- 21) Masasi. Konoyo, Kazunobu. Akazawa, Satoshi. Tadokoro, Toshi. Takamori: ICPF based wearable tactile feeling display considering active touch: 日本バーチャルリアリティ学会第 7 回大会論文集, 445-448, 2002
- 22) Sia Nemat-Nassera and Jiang Yu Li: Electromechanical response of ionic polymer-metal composites: JOURNAL OF APPLIED PHYSICS VOLUME 87, NUMBER 7 3321-3331.
- 23) de Gennes P. G., Okumura K., Shahinpoor M. & Kim, K. J. : Mechanoelectric effects in ionic gels. Europhys. Lett. 50, 513-518, 2000.
- 24) 三宅仁: 人工筋肉: 人工臓器 Vol 27, No. 5, 648-689, 1998

Mechanoelectric Actuator for Artificial Muscle by Ion Polymer Metal Compound

Tadashi IHARA, Taro NAKAMURA, Yoshito IKADA

Department of Clinical Engineering, Faculty of Medical Engineering, Suzuka University of Medical Science

Key Words: actuator, polymer, artificial muscle, tension, graft

Abstract

Reported in this review is the characteristic feature and possible medical application of ion polymer metal compound (IPMC) as a new type of mechanoelectric actuator for artificial muscles. Brief history of its development, manufacturing method, and the measured response are included in this review. IPMC plays an important role as future artificial muscle device with its fast response, low-voltage drivability, safety, and ease of molding.