T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	3次元任意形状IPMCアクチュエータの成膜の試み
Title(English)	An attempt on manufacture of designable 3D shape IPMC actuator
著者(和文)	小平暁雄, 安積欣志, 堀内哲也, 難波江裕之, 遠藤玄, 鈴森康一
Authors(English)	Akio Kodaira, Kinji Asaka, Tetsuya Horiuchi, Hiroyuki Nabae, Gen Endo, Koichi Suzumori
出典(和文)	ロボティクス・メカトロニクス講演会2018 予稿集, Vol. , No. , pp.
Citation(English)	Proceedings of the 2018 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Vol. , No. , pp.
発行日 / Pub. date	2018, 6

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

3 次元任意形状 IPMC アクチュエータの成膜の試み

An attempt on manufacture of designable 3D shape IPMC actuator

○学　小平　暁雄（東工大）　正　安積　欣志（産総研）　正　堀内　哲也（産総研）
正　難波江　裕之（東工大）　正　遠藤　玄（東工大）　正　鈴森　康一（東工大）

Akio KODAIRA, Tokyo Institute of Technology, kodaira.a.aa@m.titech.ac.jp
Kinji ASAKA, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
Tetsuya HORIUCHI, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
Hiroyuki NABAE, Tokyo Institute of Technology
Gen ENDO, Tokyo Institute of Technology
Koichi SUZUMORI, Tokyo Institute of Technology

Ionic Polymer metal composite (IPMC) actuator is an important soft actuator. Favorable properties include high responsiveness, the capacity to be driven by low voltage, high durability and operability in water. It has promising potential for biomimetic engineering. However almost all of the commercially available IPMCs are flat films and that limits the potential of IPMC actuators for biomimetic applications. To enhance the IPMC's potential for biomimetics, in this paper we propose a fabrication method for a designable 3D shape IPMC actuator. In experimental evaluation, manufactured IPMC actuators showed approximately the same flexural properties as commercially available IPMC actuators and manufactured IPMC actuators were superior to commercially available IPMC actuators in resonant gain.

Key Words: IPMC, Polymer actuator, Soft actuator

1.　緒言

近年，ソフトアクチュエータとして高分子アクチュエータの研究が盛んに行われている．イオン交換膜と電極の接合体である，Ionic Polymer Metal Composite(IPMC)アクチュエータは代表的な高分子アクチュエータの一つであり，電圧を印加すると屈曲運動を行うという現象が 1992 年に小黒らによって発見された [1]．IPMC アクチュエータは数 V の低電圧で駆動することが出来るにも関わらず，高い応答速度を持ち，さらには高応答感度，水中動作可能，そして高耐久性といった多くの優れた特徴を持つ．これらの特徴を有することから，ヘビ型や魚型など様々な生物模倣ロボットへの応用も研究されている [2] [3]．しかし，現状の生物模倣ロボットは平坦な矩形 IPMC アクチュエータを組み合わせることによって構成されており，形状の自由度はあまり高いとは言えない．また，多自由度のロボットを製作する際には複数の IPMC アクチュエータを組み合わせる必要があるため，システムの複雑化と大型化が懸念される．小型かつ複雑な形状を持つ生物模倣ロボットを実現するためには，これらの問題点を克服する必要がある．

そこで本稿では，任意の 3 次元形状を有した IPMC アクチュエータを実現するために，キャスト法および多層スプレーコート法を用いたイオン交換膜の成膜法を提案する．さらに，提案手法を用いて実際に試作した IPMC アクチュエータの性能を実験的に検証することで，生物模倣システムやマイクロメカニズム等への応用の可能性を示すことを目的とする．

2.　薄膜 IPMC の成膜プロセス

2.1 キャスト法による成膜プロセス

任意の 2 次元形状および凹型の 3 次元形状に沿って膜を生成する方法としてキャスト法が挙げられる．本稿では，IPMC を構成するイオン交換膜には Nafion 膜を用いるため，キャスト液として 5%Nafion 分散溶液 DE520CS type(和光純薬)を使用し，以下の 4 つの手順に沿ってキャスト法を行った．図 1 に製作プロセスの模式図を示す．

①テフロンの型(図 2(a))にキャスト液を滴下する
②50℃で乾燥させ分散溶液中の有機溶媒を蒸発させ成膜する
③100℃で 2 時間加熱処理をし，膜を水に対して不溶化させる
④不溶化した Nafion 膜を型から剥離する

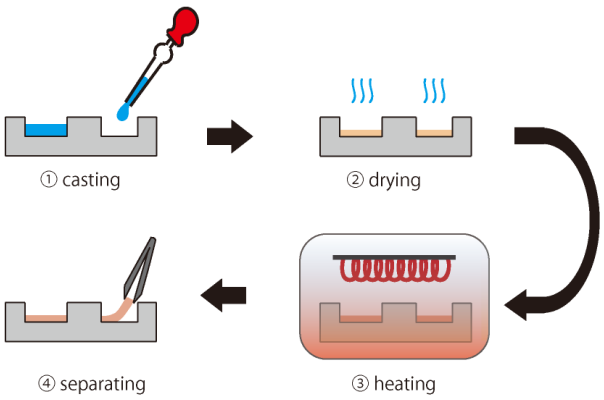
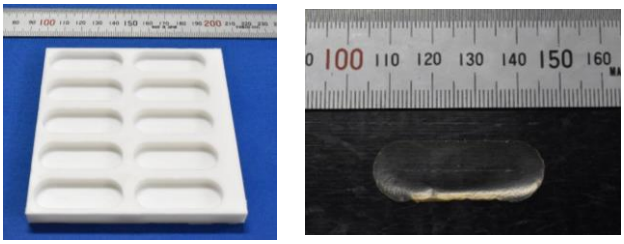


Fig. 1 Process of cast method



(a) Elliptic Teflon mold　　(b) Elliptic Naflon membrane made by cast method

Fig. 2 Elliptic Teflon mold

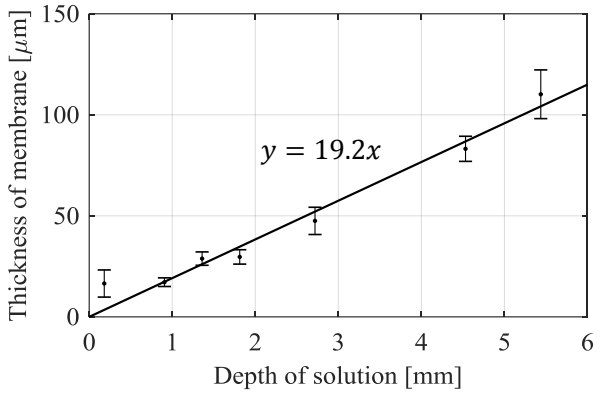


Fig. 3 Depth of solution vs Thickness of membrane

以上の手順を用いて実際に製作した Nafion 膜を図 2(b)に示す．キャスト法によって成膜した Nafion 膜は図 2(a)で示した型の形状を再現していることが確認出来た．

滴下したキャスト液の深さに対する膜厚の関係は図 3 のようになり，線形性を有していることがわかる．テフロン型のキャストに使用する部分の表面積をA [cm^2],目的の膜厚をt [μm]とした場合，キャストに必要な Nafion 分散溶液の容量V [ml]は式 (1)のように計算することが出来る．

$$V = \frac{A \times t}{192} \text{ [ml]} \tag{1}$$

2.2 多層スプレーコート法による成膜プロセス

任意の 2 次元形状と凹型の 3 次元形状に加え，凸型の 3 次元形状にも沿って膜を生成出来るようにするために，Nafion 分散溶液をスプレーを用いて型にコーティングする多層スプレーコート法を提案する．多層スプレーコート法もキャスト法と同様に 4 つの手順に沿って行った(図 4).

①テフロンの型に満遍なく Nafion 分散溶液をスプレーでコーティングする
②50℃で乾燥させ分散溶液中の有機溶媒を蒸発させ成膜する
③100℃で 2 時間加熱処理をし，膜を水に対して不溶化させる
④不溶化した Nafion 膜を型から剥離する

ただし，1 度のスプレーコートで生成する膜厚は非常薄いため，膜を型から損傷せずに剥離することが出来る厚さとなるまで①と②の工程を繰り返す必要がある．①と②の工程を繰り返した回数をスプレーの塗布回数と呼ぶ．このスプレーの塗布回数と生成する膜厚との関係を図 6 に示した．スプレーの塗布回数が増加すると共に場所ごとの膜厚のばらつきは大きくなるが，膜厚の平均値t [μm]とスプレーの塗布回数Nは式(2)で示す関係となった．

$$t = 11.0N \text{ [μm]} \tag{2}$$

曲率が異なる 6 種類の球面を有するテフロンの型(図 5(a))に対して 10 回の多層スプレーコートを施した場合に生成出来た Nafion のシートを図 5(b)に示す．

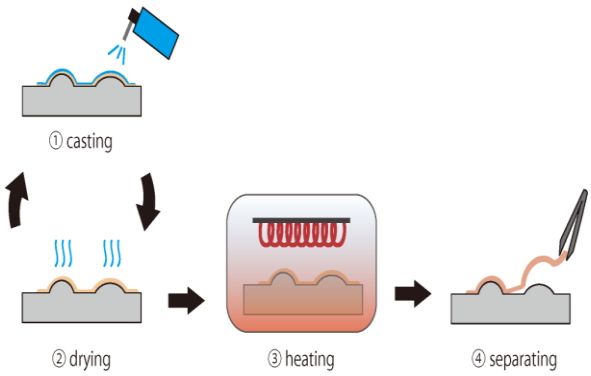
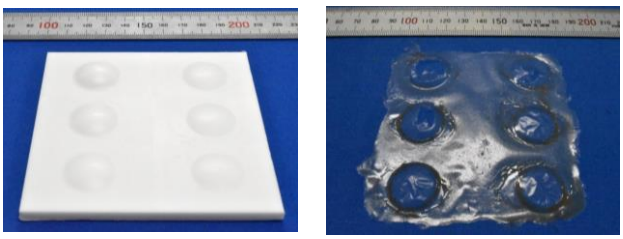


Fig. 4 Process of spray coat method



(a) Spherical Teflon　　(b) Nafion sheet made by spray coating method

Fig. 5 Spherical Teflon mold

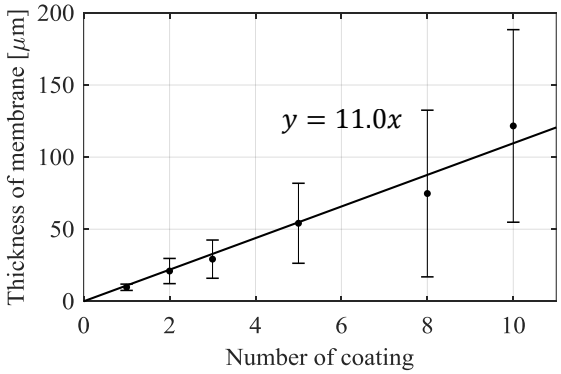


Fig. 6 Number of coating vs Thickness of membrane

2.2 無電解メッキプロセス

キャスト法およびスプレーコート法によって生成した Nafion 膜への電極の接合は，安積らが開発した金を用いた無電解メッキ [4]によって行った．本稿では以下の 3 つの手順を繰り返すことで IPMC の表面抵抗が任意の 2 点間で数 Ω程度と，十分に低くなるまで金電極を形成した．

①金錯体溶液に Nafion 膜を浸し膜内部へ金錯体を吸着させる
②吸着後の膜を還元剤溶液に浸し膜表面に金を析出させる
③還元剤溶液から膜を取り出し純水によって洗浄した後表面抵抗を測定する

Table 1 Specifications of rectangle IPMC actuators

	Length [mm]	Width [mm]	Thickness [μm]
Developed IPMC	13	5	50
ERI's IPMC	13	5	170

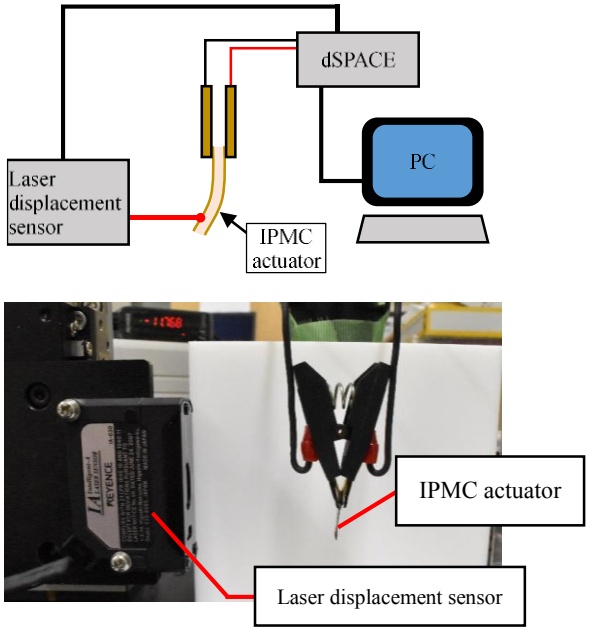


Fig. 7 The schematic layout of the experimental setup

無電解メッキの直後は，IPMC の端部を介して表と裏面の電極が導通した状態となっている．そのため，端面に形成された金をその縁ごと切除することにより導通を解消し，IPMC を動作可能な状態にする．

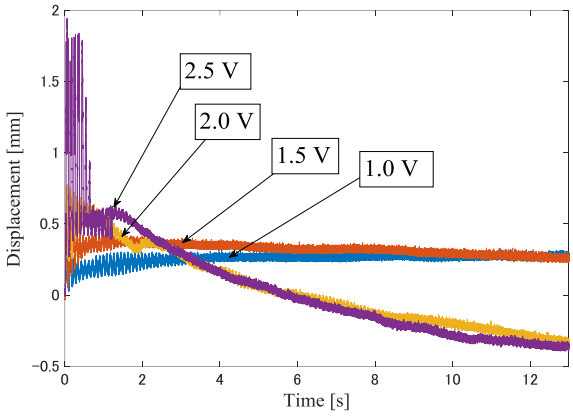
3. 薄膜 IPMC の動特性

3.1 実験システム

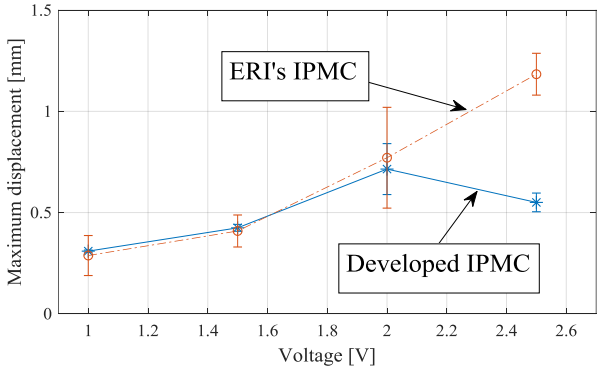
試作した IPMC アクチュエータおよび性能比較に用いた Environmental Robots Inc.が販売している IPMC アクチュエータの諸元を Table.1 に示す．使用した IPMC の試験片は試作品と市販品ともに矩形状のものであり，両電極クリップを用いて垂直下向きに垂らすように一端を 3 mm ほど把持し，さらに把持した部分から 9 mm ほど離れた位置の変位をレーザー変位計によって測定した(図 7)．レーザー変位計の出力電圧の測定と記録，さらには IPMC アクチュエータへ入力するステップ電圧および正弦波電圧の制御は dSPACE によって行った．

3.2 ステップ応答

矩形 IPMC アクチュエータにステップ電圧を印加した際の応答図 8 に示す．図 8(a)は試作 IPMC に 1 V~2.5 V までの 4 種類のステップ電圧を印加した時の変位の時間変化であり，2 V 以上のステップ電圧を印加した場合は，時間経過と共に変位



(a) Step response of IPMC actuators



(b) Comparative evaluation of commercially available IPMC actuator and developed IPMC actuator

Fig. 8 Experimated evaluation of developes IPMC actuator

が負の方向へと移行していく緩和現象が確認できた．また，変位が負の方向へ移行した後はステップ電圧の印加を止めても変位の残留が生じ，それ以降の IPMC アクチュエータの動作に影響を及ぼした．図 8(b)は各ステップ電圧に対する最大変位の関係である．本稿で試験に使用した試作 IPMC アクチュエータと市販の IPMC アクチュエータとでは膜厚に差があるため，同一の断面二次モーメントに対する曲げ応力を比較することは出来ないが，変位量のみを比較した場合 2 V までのステップ電圧に対して試作品は市販品と同程度の変位を生じることが確認できた．また，2.5 V のステップ電圧に対して試作した IPMC アクチュエータの変位が低下しているのは，先述した残留変位の影響のためである．

以上の結果より，試作した薄膜 IPMC アクチュエータは市販の IPMC アクチュエータと同程度の性能を有することが確認できたが，駆動およびシステムの構築に際しては緩和特性について十分に注意する必要がある．

3.2 周波数応答

試作品および市販品の IPMC アクチュエータに周波数の異なる片側振幅 1.5 V の正弦波電圧を印加し，周波数応答を測定した．実験により得られたボード線図を図 9 に示す．共振周波

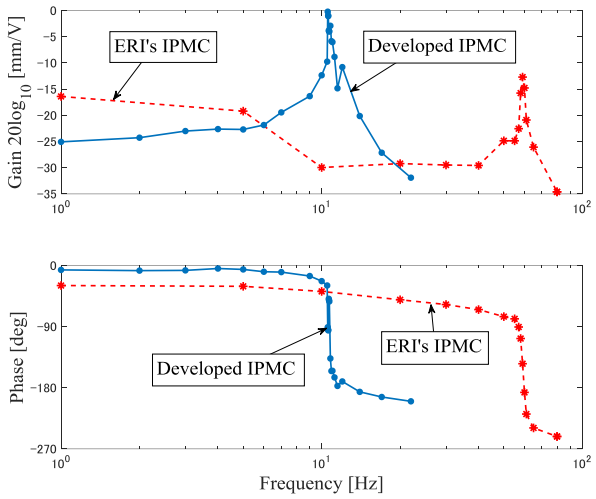


Fig. 9 Frequency characteristics of IPMC actuator

Fig. 10 Butterfly robot (butterfly shaped IPMC actuator)

数においては市販の IPMC アクチュエータの方が高い帯域を持つが，共振ゲインに関しては試作した IPMC アクチュエータが市販の IPMC アクチュエータを上回ることが確認出来た．これにより，薄膜 IPMC アクチュエータの共振を用いた駆動手法の有用性が示唆される．

4. 結言

本稿では，任意 3 次元形状薄膜 IPMC を製作するためのプロセス確立を目的として，キャスト法とスプレーコート法を元にした手法を提案した．キャスト法に関してはキャスト液の深さと膜厚との関係，多層スプレーコート法に関しては塗布回数と膜厚との関係についてそれぞれ検証を行った．また，試作した IPMC アクチュエータの基礎的な動作試験を行い，屈曲特性において市販のものと同等の性能を有することを確認した．さらに共振を利用した薄膜 IPMC アクチュエータの駆動手法の可能性についても示した．

今後の展望として，提案した 3 次元任意形状 IPMC アクチュエータの成膜法を用いて図 10 に示す蝶型のような複雑形状を有した薄膜ソフトロボット [5]の製作を行う．さらに，共振を利用した各翅の駆動制御を行うことで，より自由度の高い生物模倣ロボットの応用例を示す．

参考文献

[1] K. Oguro, H. Takenaka , Y. Kawami, “Actuator element”. United State 特許番号: 5,268,082, 7 12 1993.

[2] M. Aureli, V. Kopman and M. Porfiri, "Free-Locomotion of Underwater Vehicles Actuated by Ionic Polymer Metal Composites," IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, VOL. 15, NO. 4, AUGUST, 2010.

[3] N. Yoshihiro, T. Kentaro, M. Toshiharu, L. Zhi-Wei and A. Kinji, "Increase of Bending Response in IPMC Dynamics Given Uniform Input I: Analysis of Bending Response of Snake-Like Swimming Robot using IPMC," The 23th Annual Conference of THE ROBOTICS SOCIETY OF JAPAN, 2005.

[4] Fujiwara, Naoko and Asaka, Kinji and Nishimura, Yasuo and Oguro, Keisuke and Torikai, Eiichi, “Preparation of gold- solid polymer electrolyte composites as electric stimuli-responsive materials,” Chemistry of materials,12, 1750-1754, 2000.

[5] 小平　暁雄，安積　欣志，堀内　哲也，難波江　裕之，遠藤　玄，鈴森　康一，“立体形状 IPMC 成膜プロセスによる蝶型ロボットの試作,” Robomech2018, 2018 発表予定.