イオン導電性高分子アクチュエータの機能特性評価*

小林拓真^{*1}, 栗林武嗣^{*2}, 大宮正毅^{*3}

Evaluation of Properties of Ionic Polymer Metal Composite

Takuma KOBAYASHI, Takeshi KURIBAYASHI and Masaki OMIYA

^{*3}Department of Mechanical Engineering, Keio University,
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa 223-8522

We built up the way of fabricating ionic polymer metal composite (IPMC) actuator with palladium electrodes and evaluated the bending response under various solvents. We fabricated IPMC consisting of a thin Nafion[®] membrane, which is the film with fluorocarbon back-bones and mobile cations, sandwiched between two thin palladium plates. Its surface resistivity was $2.88 \pm 0.18 \Omega/\text{sq}$, and it has enough conductive property. We observed its cross section by using FE-SEM. As a result, palladium plates were evenly coated and its thickness was about 10 μm . Then, we evaluated the bending response under the various solvents. In the evaluation, we study the influence to bending response by cation forms and mol concentration. We used Li^+ , Na^+ and NH_4^+ as cation form and all of them were 1.0 mol/l. In terms of ionic radius, $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{NH}_4^+$. As mol concentration, we use 0.1 mol/l, 0.5 mol/l, 1.0 mol/l and all of them were Na^+ form. As a result, the bigger the ionic radius become, the larger bending response IPMC actuator showed, and the higher the ionic concentration become, the larger bending response IPMC actuator showed. Then, we conducted the modeling of IPMC actuator.

Key Words : High Polymer Materials, Composite Material, Deformation Characteristic, Soft Actuator, Artificial Muscle

1. 緒 言

イオン導電性高分子アクチュエータ(IPMC (=Ionic Polymer Metal Composite)アクチュエータ)は、イオン導電性高分子に電極を接合した接合体である。この接合体の電極間に電圧を印加すると、図1のように、陽イオン(カウンターイオン)が水分子を伴って陰極側へ移動し、その結果、両極の体積に偏りが生じて屈曲運動を示す。IPMC アクチュエータは、軽量で柔軟、湿潤な環境下で駆動、低電場で大きな変形、容易に小型化が可能といった特徴があるので、人工筋肉やMEMS センサへの応用が期待されている⁽¹⁾。現在、電極材料として金(Au)や白金(Pt)が用いられている⁽²⁾が、より安価であるパラジウム(Pd)を電極とした例はない。また、IPMC アクチュエータの使用環境(カ

Fig. 1 Principal of actuation of IPMC

Fig. 2 IPMC with palladium electrodes

Fig. 3 SEM photo of cross section of IPMC

Fig. 4 Schematic diagram of experimental system

^{*1}学生員, 慶應義塾大学大学院理工学研究科 (〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1)

^{*2}学生員, 慶應義塾大学理工学部

^{*3}正員, 慶應義塾大学理工学部

E-mail: oomiya@mech.keio.ac.jp

ウンターイオン、温度等)を種々変えたときの、変形特性についてはあまり明らかになっていないのが現状である⁽³⁾。しかし、水溶液中のカウンターイオンの種類や濃度が変われば、IPMC アクチュエータの駆動原理から、その変形特性が変化すると考えられる。そこで、本研究では、イオン導電性高分子として Nafion[®]膜を、電極として Pd を用いて IPMC アクチュエータを製作し、カウンターイオンが及ぼす、変形特性への影響に関して評価することを目的とする。

2. Pd めっきを施した IPMC の製作

2・1 製作方法 Nafion[®]膜に下処理を施し、その表面に Pd を無電解めっき法により成膜し、図 2 のような IPMC アクチュエータ (40×10 mm) を得た。

2・2 複合膜の評価 4 探針法により計測した表面抵抗率は、 $2.88 \pm 0.18 \Omega/\text{sq}$ (オームパスクエア) であった。また、SEM による断面観察の結果は図 3 のようになり、これから Pd は Nafion[®]膜の両側にほぼ均一にめっきされており、その膜厚は約 10 μm であることがわかった。各イオン種における複合膜の誘電率および体積膨張率を表 1 に占めす。これより、イオン半径が大きいほど誘電率、体積膨張率は小さくなる傾向にあることが分かった。また、各イオン種における引張試験の結果を表 2 に示す。これより、イオン半径が大きくなるほどヤング率、破断応力は小さくなる傾向にあることが分かった。

3. Pd めっきを施した IPMC アクチュエータの変形特性評価

電極に電圧を印加したときの、各イオン種における IPMC アクチュエータの先端変位を、図 4 のような実験系で計測した。陽イオンとしては、 Li^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ (イオン半径は、 $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{NH}_4^+$) を用い、濃度は全て 1 mol/l とした。

図 5 は、陽イオンとして Na^+ を用いた時の、時間に対する先端変位、電圧、電流の関係である。この図から、電圧印加時間に伴い先端変位が大きくなることがわかる。図 6 は、各イオン種における時間と先端変位の関係を比較した図である。イオン半径が大きくなるほど、先端変位の最大値は大きくなる傾向にある。これは、イオン半径が大きくなるほど両極側の体積の偏りが大きくなるためと考えられる。一方で、電圧印加直後の変位の

勾配は、ばらつきはあるが、イオン半径が小さいほど大きい傾向にあった。

次に、陽イオンとして Na^+ を用い、濃度を 0.1 mol/l、0.5 mol/l、1 mol/l の 3 種類用意して、それぞれに対して時間と先端変位との関係を調べた。図 7 にイオン濃度と先端変位との関係を示す。これより、濃度が大きいほど、先端変位の最大値は大きくなり、ばらつきはあるが、濃度が小さいほど電圧印加直後の変位の勾配が大きい傾向にあることがわかった。これは、イオン濃度が大きいほど、体積の偏りが大きくなるためだと考えられる。

Table 1 Ionic radius and dielectric constant and fractional increments of volume under several cation forms

Cation form	Ionic radius (Å)	dielectric constant (F/m)	fractional increments of volume(%)
Li^+	0.90	8.42	58.3
Na^+	1.16	7.50	53.3
NH_4^+	1.43	5.80	50.4

Table 2 Young's modulus, yield stress and tensile strength of IPMC under several cation forms

Cation form	Young's Modulus(MPa)	Yield stress (MPa)	Tensile stress(MPa)
dry	286	17.5	20.4
Li^+	125	4.8	8.1
Na^+	104	5.1	7.7
NH_4^+	92	5.0	5.2

Fig. 5 Time-variation of tip displacement and current for constant voltage (Na^+ , 1.0mol/l)

Fig. 6 Time-variation of tip displacement for constant voltage (3V) in Li^+ , Na^+ and NH_4^+ form

Fig. 7 Time-variation of tip displacement for constant voltage (3V) in Na^+ form (0.1, 0.5, 1.0mol/l)

Fig. 8 Comparison of experimental and theoretical value (cluster constant = 86.5)

5. IPMC アクチュエータの変形挙動のモデル化

電場下における IPMC アクチュエータの支配方程式とはりモデルを適用して、イオン種が及ぼす変形特性への影響を理論的に考察した。IPMC アクチュエータ変形時の曲率が一定であると仮定すると、IPMC アクチュエータの変形は片持ちはりの先端に曲げモーメント M が作用する場合と等価となる。このときの曲げモーメント M は、式(1)のように表わせる⁽⁴⁾。このようにして得られた曲げモーメント M を式(2)に代入することで、IPMC アクチュエータの先端の変位 w を求めた。

$$M \approx k_0 \kappa_e \phi_0 a h b \quad (1)$$

k_0 : クラスタ一定数, κ_e : 誘電率 [F/m]
 ϕ_0 : 電圧 [V], a : 定数
 $2h$: IPMC の厚さ [m], b : IPMC の幅 [m]

$$w = \frac{M}{2E_c I_e} l^2 \quad (2)$$

E_c : 電極部分のヤング率 [MPa]

I_e : 等価断面二次モーメント [m^4]

l : IPMC の長さ [m]

式(2)より求めた先端変位を図 8 に示す。これより、イオン半径が大きくなるほど、一定電圧に対する IPMC アクチュエータの先端変位は大きくなる傾向があることが分かった。これは、実験結果と一致し、イオン種が及ぼす変形特性への影響を理論的に裏付けことができたといえる。また、Nafion[®]膜内のクラスター半径も、変形特性に大きな影響を及ぼすことが分かった。

6. 結 言

本研究では、Pd めっきを施した IPMC アクチュエータを製作し、その変形特性のカウンターイオン依存性について検討した。さらに電場下における IPMC アクチュエータの支配方程式とはりモデルを適用して、イオン種が及ぼす変形特性への影響を考察した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) Pd めっきを施した IPMC アクチュエータの製作方法を確立した。
- (2) 陽イオンのイオン半径が大きいほど、またイオン濃度が大きいほど先端変位は大きい傾向にあった。
- (3) イオン半径が及ぼす変形特性への影響を理論的に裏付けることができた。

文 献

- (1) Y. Nagata, et al., Front Line of the development of Soft Actuator, (2004), pp. 76-94, NTS
- (2) Yoseph Bar-Cohen, Stewart Sherrit and Shyh-Shiuh Lih, Characterization of the Electrochemical Properties of EAP materials, Proceedings of EAPAD, SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, Newport, CA. Paper No. 4329-4343 (2001)
- (3) S. Nemat-Nasser and Yongxian Wu, Comparative experimental study of ionic polymer-metal composites with different backbone ionomers and in various cation forms, Journal of Applied Physics, 93, pp. 5255-5267 (2003)
- (4) S. Nemat-Nasser and J. Yu Li, Electrochemical response of ionic polymer-metal composites, Journal of Applied Physics, 87(2000)