導電性高分子(PPy)膜の電気化学・多孔質弾性曲げ挙動の
計算モデリング*都 井 裕^{*1}, 鄭 祐 尚^{*2}Computational Modeling of Electrochemical-Poroelastic
Bending Behaviors of Conducting Polymer (PPy) MembranesYutaka TOI^{*3} and Woo-Sang JUNG^{*3}Institute of Industrial Science, University of Tokyo,
4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505 Japan

The electrochemical-poroelastic bending behavior of conducting polymer actuators is an attractive feature, considering their potential applications such as artificial muscles or MEMS. In the present study, a computational modeling is presented for the bending behavior of polypyrrole-based actuators. The one-dimensional governing equation for the ionic transportation in electrolytes given by Tadokoro et al. is combined with the finite element modeling for the poroelastic behavior of polypyrroles considering the effect of finite deformation. The validity of the proposed model has been illustrated by comparing the computed results with experimental results in the literatures.

Key Words: Computational Mechanics, High Polymer Materials, Electrochemistry, Bending, Finite Element Method

1. 序

導電性高分子の一種であるポリピロール(Polypyrrole)を用いたアクチュエータはしなやかで軽量であり, 単位体積当たりの発生力やひずみが大きいため, 省スペース下でも大きい力や変形を得ることができる。さらに, 伸縮, 曲げ, ねじりなどのさまざまな運動を実現する機構設計が可能であり, 小形化が求められる MEMS や医用生体工学分野などで注目を集めている⁽¹⁾⁽²⁾。

ポリピロール膜に電圧を印加すると, 電解液あるいは固体電解質ゲル内のイオンは, 電気化学的ドーピング, すなわち酸化・還元により, 導電性高分子と結合・分離し, 内部体積変化を起こす。導電性高分子と酸化・還元反応するイオンをドーパントと呼び, 陽イオンドーパント(Li^+ など)と陰イオンドーパント(PF_6^- など)に分類される。結合されるドーパントの大きさや移動性によってアクチュエータの性能が大きく変わる⁽³⁾⁽⁴⁾。

Pei ら⁽⁵⁾ は, ポリピロール曲げアクチュエータに対し, 3 種類のドーパントを用いて実験を行い, 曲率変化に与える影響を調べた。Alici ら⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾ は, 陰イオン(PF_6^-) 駆動アクチュエータの曲げ挙動に対する実験を行い, その結果を近似的理論モデルによる解析結果と比較した。これらの例のように, ポリピロールアクチュエータに関する実験および理論的研究は活発に行われているが, ポリピロール曲げアクチュエータの電気化学・多孔質弾性挙動に対する有用な計算ツールはいまだ開発されていない。

本研究では, ポリピロールなどの導電性高分子を利用したアクチュエータの曲げ挙動に対し, 電気化学・多孔質弾性挙動に対する計算モデリングを構築し, 導電性高分子曲げアクチュエータの設計を支援するための計算ツールを開発することを目的とする。

具体的には, 電解液内で駆動するポリピロール曲げアクチュエータおよび高分子電解質ゲルを用いたポリピロール曲げアクチュエータに対し, Tadokoro ら⁽⁹⁾ による電解物中の一次元イオン輸送方程式と, Della Santa ら⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ および著者ら⁽¹²⁾ によるポリピロール膜の能動的電気化学・多孔質弾性挙動に対する定式化を組合わせた計算モデリングを構築する。ポリピロール膜の有限変形を考慮するため, 線形多孔質弾性モデル

* 原稿受付 2007 年 10 月 11 日。

^{*1} 正員, フェロー, 東京大学生産技術研究所(〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)。^{*2} 正員, 東京大学大学院工学系研究科・博士課程。
E-mail: toi@iis.u-tokyo.ac.jp

をラグランジュ法に基づいて、幾何学的非線形性を考慮した多孔質弾性モデルに拡張する。これらの支配方程式を有限要素法により離散化して、ポリピロール曲げアクチュエータの電気化学・多孔質弾性挙動に対する数値計算を行い、実験結果^{(5)~(8)}と比較することにより、その有用性を検証する。

以下、2章では導電性高分子アクチュエータの電気化学・多孔質弾性挙動に対する支配方程式、3章ではポリピロール曲げアクチュエータに対する計算モデリングと有限要素解析結果を示す。最後の4章は結論である。

2. 導電性高分子アクチュエータの 電気化学・多孔質弾性挙動に対する 支配方程式

2.1 多孔質弾性体の剛性方程式 ポリピロール・電解質系は、連続体近似の立場から二相系としてモデル化することができる⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。第一相は、多孔質弾性体であるポリママトリックス、第二相はポリママトリックスの空孔を充てんする電解質である。受動的な多孔質弾性挙動に対する多孔質弾性論に基づく平衡方程式は、次式により与えられる。

$$\frac{\partial \sigma_{ij}^s}{\partial x_j} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

$$\sigma_{ij}^s = \sigma_{ij}^s + \sigma_{ij}^f \quad \dots\dots\dots (2\cdot a)$$

$$\sigma_{ij}^s = \frac{E}{1+\nu} \epsilon_{ij}^s + \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} e^s \delta_{ij} \quad \dots\dots (2\cdot b)$$

$$\sigma_{ij}^f = -\beta P \delta_{ij} \quad \dots\dots\dots (2\cdot c)$$

である。式中、 σ_{ij}^s は全応力、 σ_{ij}^s は固体応力、 σ_{ij}^f は流体応力、 E はヤング率、 ν はポアソン比、 ϵ_{ij}^s は固体ひずみ、 e^s は固体の体積ひずみ、 δ_{ij} はクロネッカのデルタ、 β は空孔率、 P は圧力である。

外力成分を零と仮定すると、式(1)と等価な仮想仕事の原理は次式のように表される。

$$\int_{V_e} \delta(\{\epsilon\}^T + \{\Delta\epsilon\}^T)(\{\sigma^f\} + \{\Delta\sigma^f\}) dV = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $\{\epsilon\}$ は全ひずみベクトル、 $\{\sigma^f\}$ は全応力ベクトルであり、 δ は変分、 Δ は増分を表す。 V_e は有限要素領域である。

また、幾何学的非線形解析におけるグリーンひずみ増分は、次式のように表現される⁽¹³⁾。

$$\{\Delta\epsilon\} = \{\Delta e(u)\} + \{\Delta \bar{e}(\Delta u^2)\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\{\Delta e(u)\}$ は変位増分に関する線形項、 $\{\Delta \bar{e}(\Delta u^2)\}$ は変位増分に関する2次項を含む非線形のひずみ増分である。

式(4)を式(3)に代入し、増分量に関する3次以上の高次項を無視すると、次の増分形仮想仕事式を得る。

$$\int_{V_e} [\{\Delta e(u)\}^T \{\Delta\sigma^f\} + \delta \{\Delta \bar{e}(\Delta u^2)\}^T \{\sigma^f\}] dV = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

また、式(2・a)を式(5)に代入すると、次式を得る。

$$\begin{aligned} & \int_{V_e} (\{\Delta e(u)\}^T \{\Delta\sigma^s\} + \delta \{\Delta \bar{e}(\Delta u^2)\}^T \{\sigma^s\}) dV \\ & + \int_{V_e} (\{\Delta e(u)\}^T \{\Delta\sigma^f\} + \delta \{\Delta \bar{e}(\Delta u^2)\}^T \{\sigma^f\}) dV \\ & = 0 \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

式(6)は、次式のように書き換えられる。

$$\begin{aligned} & \int_{V_e} (\{\Delta e(u)\}^T \{\Delta\sigma^s\} + \delta \{\Delta \bar{e}(\Delta u^2)\}^T \{\sigma^s + \sigma^f\}) dV \\ & = - \int_{V_e} (\{\Delta e(u)\}^T \{\Delta\sigma^f\}) dV \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

2.2 圧力に対するポアソン方程式 Onsager 則

によれば、イオン流束 J と質量流束 V^f は、電気ポテンシャルこう配 $\nabla \phi$ 、圧力こう配 ∇P 、現象論的パラメータ K_{ij} を用いて、次式のように表現される⁽¹⁴⁾。

$$J = K_{11} \nabla \phi + K_{12} \nabla P \quad \dots\dots\dots (8\cdot a)$$

$$V^f = K_{21} \nabla \phi + K_{22} \nabla P \quad \dots\dots\dots (8\cdot b)$$

式(8・a)と式(8・b)の両辺の発散(divergence)をとり、 $\nabla^2 \phi$ を消去したうえで、次式の関係を用いる。

$$\text{div } V^f = \frac{\partial e^f}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 e^f は流体の体積ひずみである。さらに、受動的な多孔質弾性挙動に対するポアソン関係式

$$\frac{\partial e^f}{\partial t} = -\frac{(1-\beta)}{f} \nabla^2 P \quad \dots\dots\dots (10)$$

を参照し(ここに、 f はポリママトリックス・電解質間の摩擦係数)、Biot の連続式

$$\frac{\partial e^s}{\partial t} = -\frac{\beta}{1-\beta} \frac{\partial e^f}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (11)$$

を用いれば、電場中の導電性高分子内で発生する体積ひずみ速度と圧力の関係を表すポアソン方程式が、次式のように誘導される。

$$\frac{\partial e^s}{\partial t} = C_1 \frac{-\beta}{(1-\beta)} \nabla J + C_2 \frac{\beta}{f} \nabla^2 P \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 C_1 と C_2 は、式(8・a)と式(8・b)において導入された K_{ij} の関数、換言すれば K_{ij} に代わる現象論的パラメータである。 C_1 と C_2 は後述のように、能動的な多孔質弾性挙動(電気化学・多孔質弾性挙動)の実験結果と整合するように決定される。特に3・2節では、特定の電圧下で決定した値により他の電圧下でも良好な変形解が得られることが示され、本パラメータのある程度の一般性が示唆される。

2.3 体積ひずみ速度の発展方程式 受動的な多孔

質弾性挙動に対して成立する関係式

$$\frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\nabla^2 e^s = \beta \nabla^2 P \quad \dots\dots\dots (13)$$

に、式(12)を代入すると、電気化学・多孔質弾性挙動に対する体積ひずみの発展方程式として次式を得る。

$$L\nabla^2 e^s = \frac{1}{C_2} \frac{\partial e^s}{\partial t} + \frac{C_1}{C_2} \frac{\beta}{(1-\beta)} \nabla J \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここに、

$$L = \frac{(1-\nu)E}{f(1+\nu)(1-2\nu)} \quad \dots\dots\dots (15)$$

である。

2・4 イオン輸送方程式 導電性高分子アクチュエータに電圧を印加すると、電解液内のドーパント(陽)イオンに対し、陰極側へ電気力、陽極側へ粘性抵抗力と拡散力が働く。これらの力の釣り合い関係から、全電荷量 $Q(x, t)$ に関する次式の微分方程式が導かれる⁽⁹⁾。

$$\eta_1 \frac{\partial Q(x, t)}{\partial t} = kT \frac{\partial^2 Q(x, t)}{\partial x^2} - \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} \times \left\{ \frac{e}{\epsilon_e S_x} \left[\int_0^t i(\tau) d\tau + Q(x, t) - Q(x, 0) \right] \right\} \quad \dots\dots\dots (16)$$

初期条件と境界条件は、以下のとおりである⁽⁹⁾。

$$\{Q(x, 0)\} = N_a e S_x c_0 x \quad \dots\dots\dots (17 \cdot a)$$

$$\{Q(0, t)\} = 0$$

$$\{Q(d, t)\} = N_a e S_x c_0 d \quad \dots\dots\dots (17 \cdot b)$$

全電荷量 $Q(x, t)$ が求められると、次式から電荷密度 $c(x, t)$ が計算される。

$$Q(x, t) = N_a e S_x \int_0^x c(\xi, t) d\xi \quad \dots\dots\dots (18)$$

イオン輸送方程式に含まれる物理定数などの一覧を表1に示す。

2・5 計算条件および計算手順 導電性高分子膜の電気化学反応は複雑であり、導電性高分子膜内イオン移動は電解液内イオン移動とは異なるが、本研究で解析対象とするモデルにおいて導電性高分子膜は非常に薄いため、近似的に同様であると仮定する。また、モデル境界でイオンの流出およびモデル内化学的損失はなく、電解液あるいは固体高分子ゲル内イオンの総量は一定であると仮定する。電解液内イオン輸送解析は一次元、ポリピロールアクチュエータの電気化学・多孔質弾性挙動解析は三次元モデルを用いて計算を行った。

2・4節までの有限要素関係式を用いた、能動的電気化学・多孔質弾性挙動の計算手順は、次のとおりである。電気化学応答に関する一次元イオン輸送方程式(16)に対し、Galerkin法による有限要素定式化を行い、ポリピロール膜内の電荷密度変化を計算する。求められた電荷密度を用いて、式(14)および式(12)のGalerkin形式より、ポリピロール膜に発生する体積変化や圧力増分を計算する。さらに、計算された圧力増分を見掛けの外力とし、式(7)を用いて多孔質弾性挙動解析を行う。以上の手順を微小時間増分ごとに最終時間まで繰返す。なお、Galerkin有限要素定式化の詳細は、文献(12)と文献(15)を参照されたい。解析で用いた諸定数値を表2に示す。

3. ポリピロール曲げアクチュエータの有限要素解析

3・1 電解液内駆動するポリピロールアクチュエータ 図1のように、アクチュエータ本体内に作用電極(working electrode)があり、対向電極(counter electrode)が電解液内に位置するアクチュエータを電解液内駆動するアクチュエータと称する。アクチュエータ本体は、図2に示すように、ポリピロール、金およびポリエチレンの3層から成る。

作用電極に負の電圧を印加すると、電気化学的還元により、電解液内の陽イオン(Li^+)がポリピロールと結合して体積膨張が起こり、ポリエチレン方向に曲げ変形が発生する。逆に、作用電極側に正電圧を印加すると、 Li^+ イオンがポリピロール膜内から放出されて

Table 1 Material parameters for ion transport analysis

Coefficient of viscosity	$\eta = 1.18 \times 10^{-11} (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2)$
Boltzmann constant	$k = 1.380 \times 10^{-23} (\text{N} \cdot \text{m}/\text{K})$
Absolute temperature	$T = 293 (\text{K})$
Elemental charge	$e = 1.6 \times 10^{-19} (\text{C})$
Dielectric constant	$\epsilon_e = 2.8 \times 10^1 (\text{C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2)$
Time interval	$\Delta t = 5 \times 10^{-4} \text{ s}$
Space interval	$h = 5 \mu\text{m}$
Cross section area	$S_x = 57.6 \times 10^{-6} (\text{m}^2)$
Avogadro number	$N_a = 6.02 \times 10^{23} (/ \text{mol})$
Initial charge density	$c_0 = c(x, 0) = 1147 (\text{mol}/\text{m}^3)$

Table 2 Material parameters for poroelastic analysis

Friction coefficient	$f = 1.29 \times 10^{20} (\text{Nsm}^{-4})$
Porosity	$\beta = 0.108$
Elastic constants for PPy	$E_{\text{PPy}} = 1280 \text{ MPa}, \nu_{\text{PPy}} = 0.42$
Elastic constants for PE	$E_{\text{PE}} = 350 \text{ MPa}, \nu_{\text{PE}} = 0.38$
Elastic constants for gold	$E_{\text{Gold}} = 84000 \text{ MPa}, \nu_{\text{Gold}} = 0.42$

体積収縮が起こり、ポリピロール方向への曲げ変形が発生する。

電解液内における実際の電極間距離は、ポリピロール膜の厚さと比較して相当に長い。イオン密度の変化は電極近傍に限られるため、必ずしも実際の電極間距離を計算対象とする必要はない。図3では、必要な電極間距離の設定のため、電極間距離が電荷密度分布に与える影響を調べている。仮定した物理定数値を表1に示す。ポリピロール膜の厚さ(15 μm)を基準とし、電極間距離をその5倍、10倍、50倍、100倍にした場合の、電解液中における電荷密度分布を図3(a)に示す。図3(b)は、ポリピロール膜近傍の拡大図であり、電極間距離をポリピロール膜厚さの50倍以上に設定すれば、ポリピロール膜内の電荷密度分布は、十分に収束していることがわかる。

図4に示すような正負のステップ状の電流サイクル(振幅5 mA, 周期100 s)を受けた場合の応答解析を実施した。計算に用いた物理定数などを表1と表2に示

Fig. 1 Schematic diagram for PPy actuators working in liquid electrolyte

Fig. 2 Dimensions of PPy actuator working in liquid electrolyte

す。表2の力学的物理定数は、Della Santa らによる算定値を参照している⁽¹⁰⁾。また、式(12)と式(14)における係数は、実験結果⁽⁵⁾と整合するように、 $C_1=3.75 \times 10^{-4} \text{ mol}^3/\text{mol}$, $C_2=10^{-4}$ と仮定した。

図5は、アクチュエータ本体の曲率変化の時刻歴であり、解析結果と実験結果⁽⁶⁾がほぼ良好に対応していることがわかる。

(a) Charge density distributions at 50 s

(b) Enlarged portion near PPy layer at 50 s

Fig. 3 Effect of electrode distance on charge density distributions

Fig. 4 Current input

3・2 固体電解質ポリピロールアクチュエータ

固体電解質アクチュエータは、図6のように、ポリフッ化ビニリデン(PVDF)などのような高分子ゲル電解質や固体電解質にポリピロール膜を貼り合わせた接合体であり、空气中駆動を可能にしたアクチュエータである。

負の電圧が印加された陰極近傍では、 PF_6^- イオンが放出されることにより、ポリピロールの体積が収縮する。逆に、正の電圧が印加された陽極近傍では、 PF_6^- イオンが浸透することにより、ポリピロールの体積膨張が起こる。

本解析で用いたモデルの寸法および諸定数値をそれぞれ、図7と表3に示す。表3におけるヤング率⁽⁶⁾は、表2における値⁽¹⁰⁾と大きく異なっている。どち

らも文献からの引用値であり、詳細は不明であるが、弾性定数が電圧、周期、湿乾などの諸条件に大きく依存することの反映とも考えられる。図8は、印加電圧1Vの場合に計測された電流時刻歴であり⁽⁶⁾⁽⁷⁾、この電流時刻歴が式(16)における $i(t)$ に代入されて、イオン輸送方程式が解かれる。1V以外の電圧(0.25V, 0.5V, 0.75V)に対応する電流値は、1Vの場合の電流値に0.25, 0.5, 0.75を乗じた値を仮定した。また、式(12)と式(14)における係数は、1Vの場合の実験結果と整合するように、 $C_1=0.5\text{ m}^3/\text{mol}$, $C_2=28$ と仮定した。

図9に、電荷密度分布の時刻歴を示す。陽極近傍は、陰イオンの侵入により電荷密度が増加し、逆に陰極近傍は、陰イオンの放出により電荷密度が減少する。また、電荷密度変化率は5秒前後で頭打ちとなることがわかる。

Fig. 5 Time variation of curvature change

Fig. 6 Schematic diagram for PPy actuators working with solid-type electrolyte gels

Table 3 Material parameters for poroelastic analysis

Friction coefficient	$f = 1.29 \times 10^{20} (\text{Nsm}^{-4})$
Porosity	$\beta = 0.108$
Elastic constants for PPy	$E_{\text{PPy}} = 80\text{MPa}$, $\nu_{\text{PPy}} = 0.42$
Elastic constants for PVDF	$E_{\text{PVDF}} = 440\text{MPa}$, $\nu_{\text{PVDF}} = 0.412$

Fig. 7 Dimension of an actuator working with solid-type electrolyte gels

Fig. 8 Input current profile

図 10 では、電気化学・多孔質弾性解析で得られた曲げ応力分布を、同じ量の先端変位を発生させる集中荷重を端部に与えたモデル(力学モデル)における曲げ応力分布と比較している。電気化学・多孔質弾性モデルでは、ポリピロール膜内の曲げ応力が極めて大きく、その結果、同じ量の変位に対して大きい曲げモーメン

(a) Charge density distribution

(b) Time rate of charge density

Fig. 9 Electrochemical response

Fig. 10 Longitudinal stress distribution

トが発生することになる。

図 11 は、各電圧(0.25 V, 0.5 V, 0.75 V, 1 V)が加えられたときの曲げ変形形状である。有限変形を考慮したことにより、解析結果は実験結果^{(6)~(8)}と良好に対応している。

続いて、図 12 のような電圧・電流サイクルを受けるポリピロール曲げアクチュエータ(長さ 10 mm, 幅 1 mm, 厚さ 170 μm)の電気化学・多孔質弾性挙動をシミュレートした。電圧と軸方向変位(先端部)、電圧と横たわみ(先端部)の関係に対する解析結果をそれぞれ、図 13(a)(b)に示す。本解析では、ポリピロール膜の大変形がイオン輸送に及ぼす影響、電圧変動が弾性定数に及ぼす影響などを考慮していないため、解析結果と実験結果⁽⁸⁾には若干の相違が見られるが、総体的には両者は良好に対応しており、本研究で提案した計算モデルの有用性が確認される。

Fig. 11 Experimental and numerical bending deformations

Fig. 12 Cyclic voltammogram

(a) Axial displacement vs. voltage

(b) Lateral deflection vs. voltage

Fig. 13 Response of PPy bending actuator under cyclic voltage (between 1 V and -1 V)

4. 結 論

著者らによるポリピロール膜の能動的電気化学・多孔質弾性挙動に対する有限要素モデリングを、ラグランジュ法に基づき、幾何学的非線形性を考慮した多孔質弾性モデルに拡張した。さらに、ポリピロール曲げアクチュエータの電気化学・多孔質弾性曲げ挙動に対し、電解液中の一次元イオン輸送解析およびポリピロール膜の三次元有限変形多孔質弾性解析を組合わせた計算モデリングを構築した。

数値例として、電解液内で駆動するポリピロール曲げアクチュエータおよび固体電解質を利用したポリピロール曲げアクチュエータに対し、実験で測定された電流パターンを入力して、電気化学・多孔質弾性応答解析を行った。解析結果を実験結果^{(5)~(8)}と比較することにより、提案モデリングの有用性を実証した。

他の導電性高分子(ポリアニリン, ポリアセチレン

など)への応用, イオンの停留などの化学的損失を考慮したモデルへの拡張, イオン輸送方程式の多次元化などを今後の課題としたい。

文 献

- (1) Cortes, M. T. and Moreno, J. C., Artificial Muscles Based on Conducting Polymers, *e-Polymers*, No. 041 (2003), pp. 1-42.
- (2) Hara, S. et al., Artificial Muscles Based on Polypyrrol Actuators with Large Strain and Stress Induced Electrically, *Polymer Journal*, Vol. 36, No. 2 (2004), pp. 151-161.
- (3) Hutchison, A. S. et al., Development of Polypyrrole-Based Electromechanical Actuators, *Synthetic Metals*, Vol. 113 (2000), pp. 121-127.
- (4) Tanaka, A. et al., Improved Cathodic Expansions of Polypyrrole Films by Poly (2-methoxyaniline 5-sulfonate) Incorporation, *Thin Solid Films*, Vol. 499 (2006), pp. 179-184.
- (5) Pei, Q. and Ingnas, O., Electrochemical Muscles: Bending Strips Built from Conjugated Polymers, *Synthetic Metals*, Vol. 55, No. 77 (1993), pp. 3718-3723.
- (6) Alici, G. et al., Bending Modeling and Its Experimental Verification for Conducting Polymer Actuators Dedicated to Manipulation Applications, *Sensors and Actuators*, A 126 (2006), pp. 396-404.
- (7) Metz, P. et al., A Finite Element Model for Bending Behaviour of Conducting Polymer Electromechanical Actuators, *Sensors and Actuators*, A 130-131 (2006), pp. 1-11.
- (8) Alici, G. and Huynh, N. N., Towards Improving Positioning Accuracy of Conducting Polymer Actuators, *International Workshop on Advanced Motion Control*, (2006), pp. 478-483.
- (9) Tadokoro, S. et al., An Actuator Model of ICPF for Robotic Applications on the Basis of Physicochemical Hypotheses, *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2000-4), pp. 1340-1346.
- (10) Della Santa, A. et al., Passive Mechanical Properties of Polypyrrole Films: A Continuum, Poroelastic Model, *Material Science and Engineering*, C 5 (1997), pp. 101-109.
- (11) Della Santa, A. et al., Performance and Work Capacity of a Polypyrrole Conducting Polymer Linear Actuator, *Synthetic Metals*, Vol. 90 (1997), pp. 93-100.
- (12) Toi, Y. and Jung, W. -S., Finite Element Modeling of Electrochemical-Poroelastic Behaviors of Conducting Polymers, *Computers and Structures*, Vol. 85 (2007), pp. 1453-1460.
- (13) Japan Society of Mechanical Engineers ed., *Handbook of Computational Mechanics (Finite Element Method for Structures)*, (1998), pp. 102-127.
- (14) Katchalsky, A. and Curran, P. F., *Non-Equilibrium Thermodynamics in Biophysics*, (1967), p. 85.
- (15) Toi, Y. and Kang, S. -S., Finite Element Analysis of Two-Dimensional Electrochemical-Mechanical Response of Ionic Conducting Polymer-Metal composite Beams, *Computers and Structures*, Vol. 83 (2005), pp. 2573-2583.