

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：32657

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760242

研究課題名(和文)IPMCのセンサ応答モデルの解明とセンサ・アクチュエータ統合系への応用

研究課題名(英文)Modeling of IPMC sensor and applications to sensor-actuator integrated systems

研究代表者

釜道 紀浩(Kamamichi, Norihiro)

東京電機大学・未来科学部・准教授

研究者番号：70435642

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円、(間接経費) 780,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、イオン導電性高分子・貴金属接合体(Ionic polymer-metal composite: IPMC)と呼ばれる機能性高分子材料のセンサ機能に着目し、その応答モデルの構築とアクチュエータ・センサ統合システムの応用を目的に研究を実施した。環境の湿度や高分子内部のカウンタイオンの違いによる応答特性変化を実験的に検証するとともに、Onsagerの方程式をベースにして応答モデルの構築を行った。また、曲げやねじりを測定するセンサシステム構築のための基礎的検証を行った。

研究成果の概要(英文)：In this research, we focus on the sensor function of ionic polymer-metal composite (IPMC), and aim to construct the response model and apply to the sensor-actuator integrated systems. The characteristics of the sensor were investigated experimentally with consideration of the influence of ambient humidity and the type of the counter-ions. The response model was derived based on the Onsager equation. Fundamental validation of sensor systems for measuring the bending and twisting was also conducted.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 知能機械学・機械システム

キーワード：センサ ソフトマテリアル 機能性高分子 モデリング イオン導電性高分子

1. 研究開始当初の背景

電気刺激に対して変形応答する電場応答性高分子材料 (Electro-active polymer: EAP) は、柔軟で軽量のソフトアクチュエータとして注目されている。生物のようなしなやかな動作をすることから「人工筋肉」とも呼ばれ、高分子の優れた成形性からも応用が期待されている。EAP 材料には、様々な種類が存在するが、その中でもイオン導電性高分子・貴金属接合体 (Ionic polymer-metal composite: IPMC) は実用レベルに近い材料であり、魚型ロボットのアクチュエータとして利用され、商品化された実績もある。

IPMC はイオン導電性樹脂の表面に金属を接合したものであり、1~2 V 程度の低電圧で屈曲変形する。このアクチュエータ機能とは逆に、変形に対して電気信号を出力するセンサ機能を有している。素子のサイズや組成にもよるが、通常の IPMC の場合、数 mV 程度の起電力を計測することができ、センサとして十分利用可能である。同一素子において、アクチュエータ機能とセンサ機能の双方を有していることから、柔軟で軽量な機能性高分子材料の特長を損なうことなくセンサ・アクチュエータの一体化やフィードバック制御系の構築が可能である。

しかしながら、センサの応答原理、モデルについては、いまだ十分に解明されてはいない。IPMC センサは空気中でも利用可能であると報告されているが、十分な解析は行われていない。さらに、一枚の IPMC 素子上で電極をパターンニングすることで、アクチュエータ部とセンサ部を同時に使用しようとした場合、アクチュエータの駆動電圧がセンサの測定信号へ電氣的に干渉する問題が発生する。

上記のように、センサとして利用する研究は、まだ発展途上であり、センサの応答モデリングや、センサ・アクチュエータ統合系を実現する上での解決すべき問題は多く残されている。センサ機能の研究が進み、特性が向上すれば、IPMC の応用範囲は格段に広がると予想される。

2. 研究の目的

本研究では、イオン導電性高分子・貴金属接合体 (IPMC) のセンサ機能に着目し、その応答モデルの構築とセンサ応用の検討を行う。アクチュエータの研究に比べて、センサに関する研究はいまだ解明すべき問題も多く存在するため、本研究において、センサ応答の原理の解明、モデリングに取り組むとともに、センサ・アクチュエータ統合系としての応用可能性を探る。

具体的には、センサ特性の解明のために実験的検証を行うとともに、応答のモデル化のため、物理・化学的観点からのホワイトボックスモデルを構築する。また、空気中の乾燥状態など、様々な環境条件でのセンサ特性の

解析、再現性の検証を行うとともに、力センサや面状センサ素子などへの応用を検討する。

3. 研究の方法

(1) センサ応答特性の実験的検証

湿度などの外部環境や高分子内部の含水率、カウンタイオンの種類を変化させて、応答特性を測定する。そのために、湿度を制御可能な恒湿容器内で応答特性を測定する実験環境を構築する。振動発生機 (加振器) により素子に変形を加え、発生した起電力を信号増幅器で増幅し、コンピュータや解析装置へ取り込む。周波数応答特性やステップ応答特性など、様々な入力条件による応答特性を実験的に検証する。

IPMC はイオン導電性高分子材料を使用しているため、湿度や温度など環境の条件によって、応答のダイナミクスが変化することが予想される。空気中の乾燥状態でもセンサとして機能することが報告されているが、乾燥状態と湿潤状態の応答特性の違いについてとくに検証を進める。

IPMC はイオン導電性樹脂に化学メッキを用いて、金属を接合して製作される。アクチュエータに関しては、この電極構造が応答特性に強く影響を与える。センサ応答における素子の電極構造の影響を検証するため、メッキ回数を変えた素子を準備し、応答特性の変化を検証する。

(2) センサ特性のモデル化

実験により得られる知見と、アクチュエータのモデリングで導入されている物理・化学的観点からのホワイトボックスモデリングの手法を元に、センサ応答特性のモデル化に取り組む。

アクチュエータのモデリングにおいて、物理原理 (電場応力拡散結合) に基づくモデルが提案されている。電気的特性と機械的特性の関係を表現する電気機械変換式を Onsager 方程式で表現するもので、このモデルを用いて有限要素法に基づいて数値解析した結果は実験とよく一致している。高分子膜内部のイオンと溶媒のダイナミクスを考慮したモデルであるが、この関係式を基に、センサの応答モデルを導出する。そして、湿潤状態と乾燥状態の双方において応答特性が表現可能であるか検証を行う。

(3) センサ・アクチュエータ応用の検討

IPMC のセンサとしての応用法として、従来は変形量のセンサとして利用されてきたが、高分子材料の柔軟性や成型性を活かした利用法を検討する。具体的には、力センサや面状センサ素子の実現可能性を検証するため、パターンニングした電極を有する 1 枚の素子で、曲げとねじりを同時に計測可能であるか検証を行う。

また、アクチュエータと組み合わせた場合の、統合システムとしての適用可能性を探る。

4. 研究成果

(1) センサ応答特性の実験的検証

乾燥状態と湿潤状態のセンサ応答について測定実験を行い、応答特性の違いを確認した。また、高分子内部のカウンティオン種の違いによる応答特性について検証を行うとともに、電極の構造(特性)に起因する電気インピーダンス特性の影響について確認した。

湿度変化による応答変化

構築した実験環境を用いて、環境の湿度を変化させた場合と、高分子内部のカウンティオンの種類を変えた場合のセンサ応答について周波数応答解析を行った。周波数特性の導出には、周波数解析装置を用い、スイープした正弦波入力に対する出力から各測定点におけるゲインと位相特性を測定した。電流計測した場合と、電圧計測した場合の比較を行うとともに、素子の電気インピーダンスについても測定を行った。

測定の結果、電流と電圧のどちらの計測方法においても、素子の乾燥と湿潤に関わらず十分に観測可能な信号が発生していることが確認された。また、湿度条件の違いにより周波数応答特性が異なることが確認された。低周波領域においては湿度が高い湿潤状態においては電流応答が変形量に対して微分特性となり、湿度が低い乾燥状態においては発生電流が変形量に比例する結果となった。高周波領域においては、高分子内のカウンティオンの種類によって特性が異なることが確認された。

電極構造による応答変化

電極のメッキ回数を変えて、電極構造(特性)の異なる素子を作製し、センサ応答を電気インピーダンス特性の関係を検証した。測定の結果、メッキ回数が増えることで素子の電気インピーダンス特性が変化し、センサの応答特性も変化することを確認した。

IPMCは通常、電極間の電気特性が容量性インピーダンス特性であり、その電気容量が大きいほどアクチュエータとしての応答性は向上する。これは、電極と電界質界面のフラクタル構造に起因するものである。センサとして検証した今回の実験でも、アクチュエータと同様の傾向となり、電極の構造に起因する容量性がセンサ応答にも強く寄与すると考えられる。

(2) センサ応答のモデル化

アクチュエータのモデリングに関する先行研究を基にして、高分子内部の応力分布と、イオンと溶媒の移動・拡散の結像モデルをベースに、センサ応答モデルを導出した。

Onsagerの方程式は、流体の流速、電流密度、電位、応力を、電気伝導度と浸透係数、電気浸透係数により関係づけた式である。本研究では、素子の変形量を入力とし、センサ素子の発生電流を出力とする伝達関数モデルを導出した。導出した応答モデルは、高分子の物理パラメータと電気インピーダンスに依存するモデルであり、乾燥と湿潤を問わずに適用可能である。湿度(含水率)変化に伴う、各パラメータの変化により、応答特性への変動を表わすことが可能である。

測定実験から得られた周波数応答特性と比較し、構築した応答モデルは実験値との差があるものの、湿度変化に伴う特性変動や周波数応答特性を再現できることを確認した。湿度(含水率)の変化に伴う、電気伝導度や浸透係数等のモデルパラメータの変動については、今後のさらなる検証が必要である。

(3) センサ・アクチュエータ応用の検討

1枚の素子において、曲げとねじりの情報を同時に測定するセンサシステムを構築するための基礎的検証を行った。表面電極部をパターンニングしたIPMC素子を作製し、空間的に分離された電極部で測定した信号から、それぞれの変形時の応答の違いを検証した。アクチュエータ利用についても、環境の変化による応答特性の変化について検証した。環境の湿度を変化させた際の、機械剛性と発生応力特性の変化について検証した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計7件)

田中俊哉, 神戸威人, 釜道紀浩, 「IPMCセンサのメッキ回数による応答特性変化の検証」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2014, 2014/5/27, 富山.

Y. Inoue and N. Kamamichi, "Force Control of Ionic Polymer-Metal Composite Actuators with Cellular Actuator Method," Proc. of SPIE, Smart Structures/NDE, Vol. 9056, 905636, 2014/3/11, San Diego, USA.

井上勇志郎, 釜道紀浩, 「セルラーアクチュエータの制御手法を用いたIPMCの制御」, 第31回日本ロボット学会学術講演会, 2L2-02, 2013/9/5, 東京.

釜道紀浩, 「高分子素材のアクチュエータ・センサ」, 第1回生物の優れた機能から着想を得た新しいものづくりシンポジウム, 招待講演, 2012/12/21, 京都.

柳裕太, 釜道紀浩, 「IPMCアクチュエータの動特性に対する湿度の影響」, 日本ロボット学会第30回記念学術講演会, 1C2-3, 2012/9/17, 北海道.

神戸威人, 釜道紀浩, 高木賢太郎, 石川潤, 「IPMC センサの周波数応答特性 IV: 応答特性に対する湿度の影響の検証」, 日本ロボット学会第 30 回記念学術講演会, 1C2-4, 2012/9/17, 北海道.

釜道紀浩, 神戸威人, 高木賢太郎, 石川潤, 「IPMC センサの周波数応答特性 III: 乾燥/湿潤状態での特性比較」, 計測自動制御学会第 12 回システムインテグレーション部門講演会, pp. 1567-1568, 2011/12/24, 京都.

〔図書〕(計 1 件)

N. Kamamichi, K. Takagi and S. Sano, " Modeling and Feedback Control of Electro-active Polymer Actuators, " Soft Actuators: Materials, Modeling, Applications, and Future Perspectives (Eds: K. Asaka and H. Okuzaki), Springer, 2014.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

釜道 紀浩 (KAMAMICHI NORIHIRO)
東京電機大学・未来科学部・准教授
研究者番号: 7 0 4 3 5 6 4 2

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし