

審査の結果の要旨

氏名 柳 誠 元

本論文は、イオン性電気活性ポリマー（イオン性 EAP）を用いた力学センサを対象としている。低電圧駆動、発生力大、小型・軽量、柔軟・静音、空気中および水中駆動などの特長より、イオン性 EAP は、ロボット工学、MEMS あるいは医用分野におけるソフトアクチュエータ材料（人工筋肉材料）として注目を集めている。イオン性 EAP の応用は、機械的測度と電氣的測度に対するアクチュエータおよびセンサ機能、すなわち電圧から運動への変換および運動から電圧への変換機能に基づく。これらのアクチュエータおよびセンサ機能は単純な逆関係にはなく、センサモードにおいて発生する電圧は、同じ構造、同じ変位のアクチュエータモードにおいて負荷される電圧よりはるかに小さい。イオン性 EAP のアクチュエータおよびセンサ機能を解明するために、イオン性 EAP の解析モデルを構築する試みがいくつか見られるが、アクチュエータモデルに関する研究が先行しており、力学センサ挙動のシミュレーションは、ブラックボックスモデルによるもの以外にほとんど報告されていない。よって本研究では、イオン性 EAP を用いた力学センサの解析モデルの構築と数値シミュレーションを新規に試みている。

イオン性 EAP はりセンサが曲げモードで変形すると、はり断面において体積の膨張と収縮が起こる。これらの変形に抵抗することにより、固体マトリックスの内部応力、および固体マトリックスの空孔を満たす流体の圧力が発生する。この流体圧力により、収縮側から空孔流体が押し出され、膨張側に吸い込まれる。空孔流体の移動により、反力が次第に緩和する。同時に可動性イオンの移動により、電荷密度分布の瞬間的なアンバランスが生じ、電荷密度の勾配に起因して電気ポテンシャルの相違が生ずる。続いて可動性イオンの集中が拡散し、電気ポテンシャルが次第に減少して電荷の中和に至る。すなわち、イオン性 EAP を用いた力学センサは過渡応答挙動を呈し、反力と電気ポテンシャルは緩和とヒステリシス現象を示す。機械的刺激（変位）に反応して反力は瞬間的に発生し、変位が一定値を保つにもかかわらず、次第に低減する。電気ポテンシャルもまた、力学的反力とともに変化し、次第に緩和する。さらに、電気ポテンシャルのピーク値は反力の緩和過程において発生し、反力のピーク値に対して時間遅れを伴う。本論文では、前述のイオン性 EAP を用いた力学センサの応答機構に対して、以下のような計算モデリングと数値シミュレーションを行う。

本論文は 5 章で構成されている。1 章では、本論文の背景と既往の研究、すなわちイオン性 EAP を用いたアクチュエータと力学センサの既存モデリングについて説明した上で、本研究の目的および概要について述べている。

2 章では、イオン性 EAP の一種である導電性高分子（ポリピロール；PPy）を用いた力学センサの改良されたブラックボックスモデリングについて説明している。このセンサは PPy-Pt-PVDF-Pt-PPy の 5 層より成る片持ちはりである。まず、力学的入力に対するセンサの弾性変形応答を層分割チモシェンコはり理論で解析し、続く反力の緩和を、初期ひずみ法で理想化し、有限要素法で計算する。得られた軸方向応力から実験的關係式を用いて、電気ポテンシャルを求める。これらの計算結果は、シングルステップあるいはマルチステップの変位入力を受ける力学センサの実験結果と比較され、ある程度まで現象を定性的に再現することが示されている。

3 章では、前章でブラックボックスモデリングについて述べた、導電性高分子（ポリピロール；PPy）を用いた力学センサの、より精細な理論モデル、数値解析の定式化と計算例について論じている。すなわち、層分割チモシェンコはりモデル、Biot の多孔質弾性モデル、Darcy の流れモデル、Poisson-Nernst-Planck の輸送モデルを用い、厚さ方向と時間的に変化する固体応力、流体圧力、イオン輸送、電気ポテンシャルの連成を考慮して、有限要素法と差分法により、センサの過渡応答を計算する。実験的に観察される反力と電気ポテンシャルの緩和とヒステリシス現象が、定量的にも精確にシミュレートされている。合わせて高速化されたマルチステップ変位入力を受けるセンサの試計算を行った。

4 章では、イオン性 EAP の他の例である水和 IPMC（フレミオン・金板複合材）を用いた力学センサの理論モデル、数値解析の定式化と計算例について論じている。すなわち、導電性高分子を用いた力学センサに対して構築した前章のモデルを拡張し、水和による体積と力学剛性（ヤング率）の顕著な変化を考慮したモデリングを構築している。その結果、アクチュエータとはオーダの異なる小電圧の発生、緩和と時間遅れを伴う過渡応答が定量的に再現され、反力については実験結果と良好に対応することが確認された。

5 章は結論であり、本論文の成果と今後の展望についてまとめている。

以上を要するに、本論文ではイオン性 EAP を用いた力学センサに対し、連続体スケールの精細な計算モデリングを新規に構築し、文献で利用可能な片持ちはりタイプ of 簡単な力学センサに対する実験結果との比較により、提案モデリングの妥当性を検証した。本計算モデリングは、導電性高分子あるいは IPMC を用いた力学センサの設計と制御を支援する計算ツールの基本アルゴリズムとして、工学的に極めて有用と考えられる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。