

氏名（本籍地）	呉 玉嬌
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博 甲 第 9781 号
学位授与年月日	令和 3年 3月 25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理解物質科学研究科
学位論文題目	Development of Paper Actuators with Conductive Polymer Film and Analysis of Actuation Properties (導電性高分子フィルムからなるペーパーアクチュエータの開発と駆動特性の解析)
主査	筑波大学 准教授(連携大学院) 博士(工学) 原 雄介
副査	筑波大学 教授 理学博士 齋藤 一弥
副査	筑波大学 教授(連携大学院) 博士(工学) 韓 立彪
副査	筑波大学 准教授(連携大学院) 博士(理学) 崔 準哲
副査	産業技術総合研究所 主任研究員 博士(工学) 南川 博之

## 論 文 の 要 旨

審査対象論文は、表面がマイナスチャージに帯電した導電性高分子(PEDOT/PSS)薄膜を電極として採用し、絶縁層としてプラスのチャージを有する水溶性高分子を薄膜に塗布してキャパシタタイプとしたソフトアクチュエータに関する研究について記述したものである。

第一章では金属など硬い素材で構成されたハードアクチュエータと、高分子などの柔らかい素材で構成されたソフトアクチュエータの違いについて詳細に述べた後に、研究対象となるソフトアクチュエータの研究開発することの重要性について述べている。第一章の最後の部分では、これまで論文等で公表されているソフトアクチュエータの研究結果を踏まえて、本研究が目標とするソフトアクチュエータの性能と研究計画が詳細に記載されている。

第二章においては、ソフトアクチュエータを構成する導電性高分子(PEDOT/PSS)電極を薄膜化するための検討が詳細に報告されている。採用した導電性高分子は水に溶けた状態で存在するため、薄膜化する際に溶媒に含有する気体の影響で、熱処理工程において導電性高分子薄膜に欠陥が生じる問題を報告している。本論文ではこの問題の解決方法として、熱処理前に導電性高分子溶液を十分に脱気することで、薄膜の欠陥形成を極めて少なくできることを報告している。また、熱処理する導電性高分子溶液の液量によって、薄膜の厚みをコントロール可能なことを報告している。本研究ではソフトアクチュエータとして広く活用可能なように、導電性高分子自体は自身で合成したオリジナルのものを使用せず、市

販されている汎用的な導電性高分子溶液を選択して実験を行っている。

第三章では導電性高分子薄膜を電極として採用したキャパシタタイプのソフトアクチュエータの評価手法について述べ、ソフトアクチュエータの厚みに対する変位への影響を詳細に調べた結果を報告している。また、アクチュエータの基本的な制御因子となる印加電圧と矩形波の周波数について、詳細に検討した結果について報告を行っている。本報告によって、ソフトアクチュエータの駆動変位は、膜厚に大きく影響を受けることが明らかになっている。

第四章においては、ソフトアクチュエータを繰り返し動作させると、その柔らかさが原因となりソフトアクチュエータが捻じれを起こす現象について報告している。このような現象は、同様の構造を持った他のソフトアクチュエータにおいても報告されており、その根本的な解決手法の提案が望まれていた。本論文では、安価な高分子ファイバーを用いることで簡便にソフトアクチュエータの駆動姿勢を制御可能な方法を新たに提案している。高分子ファイバーの設置間隔を変化させた時のアクチュエータの駆動姿勢に対する影響を評価し、最適なファイバー間隔を明らかにした。また、高分子ファイバーの間隔が与える駆動特性への影響についても詳細に報告した。

第五章においては、ソフトアクチュエータを空気中で駆動させる際の問題点について述べ、その解決方法を提案している。本研究で用いたソフトアクチュエータはその構造上、水を内部に含有することが必須となるが、現状の構造では水の揮発を防ぐことができていない。その解決方法として、高分子フィルムを用いてアクチュエータをカバーすることで水の揮発を抑える効果があることを示している。

第六章では、本研究の纏めについて述べている。

## 審 査 の 要 旨

[批評]

本論文は、高い導電率を有する導電性高分子 (PEDOT/PSS) 薄膜を電極として採用し、絶縁層としてプラスにチャージした水溶性高分子からなるキャパシタタイプのソフトアクチュエータに関する研究成果の詳細を纏めたものである。導電性高分子薄膜を作製する際に問題となっていた、溶液中に含まれる気泡に起因する薄膜内の欠陥形成について、調整時に十分に脱気することでその欠陥形成を大幅に抑えることが可能な知見を得ている。また、薄膜の作製温度について、その TGA 測定の結果から、最適な薄膜の形成手法について明らかにしている。さらに、作製時に溶液量を調整することによって、膜の厚みをコントロールする方法に対する知見を示し、電極の厚みと駆動変位の関係について詳細に報告している。アクチュエータの基本的な駆動制御因子である印加電圧と矩形波の周波数に対する、ソフトアクチュエータの駆動変位の関係についても、合わせて明らかにした。

このようなキャパシタタイプの薄いソフトアクチュエータは、空気中で駆動させるとその柔らかさを原因とし

て駆動中にアクチュエータ素子に捻じれが起こり、その駆動姿勢の簡便な制御方法の開発が望まれていた。本研究においては、このようなアクチュエータの致命的な問題を解決するため、細い高分子ファイバーを用いることで、簡便にソフトアクチュエータの駆動姿勢を制御する手法を新たに提案している。高分子ファイバーのソフトアクチュエータに入れる間隔を変化させ、その間隔と駆動姿勢の関係を明らかにした。高分子ファイバーのスペースを1mmもしくは2mmにすると、これまで問題となっていたソフトアクチュエータ素子が駆動中に捻じれてしまう問題を解決可能なことを報告している。さらに駆動姿勢の改善に成功した1mmおよび2mm間隔で高分子ファイバーを導入したソフトアクチュエータに関して、駆動変位の特性を明らかにしている。本研究は、同様の構造を有するソフトアクチュエータで問題となっていた捻じれの問題を、簡便な手法によって解決したことは評価に値する。本研究で得られた知見は、ソフトアクチュエータの応用と特性向上を実現する基礎的知見を与えるものであり、基礎／応用の両面から高い意義を有しており、ナノサイエンス・ナノテクノロジーの分野において高く評価される。

#### 〔最終試験結果〕

令和3年2月10日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

#### 〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。