

氏名 (本籍)	LIN WENYI (中華人民共和国)
学位の種類	博士 (工学)
学位授与番号	乙第87号
学位授与日付	令和4年3月25日
専攻	工学専攻
学位論文題目	Deformation control of electroactive polymer in the dry environment (乾燥状態における電気活性高分子の変形制御)
学位論文審査委員	(主査) 教授 伊藤 聡 (副査) 教授 佐々木 実 准教授 玉川 浩久

### 論文内容の要旨

導電性高分子やエラストマー、カーボンナノチューブ、ナノバイオマシンなどは高分子材料でできていることによるソフトでフレキシブルであるなどの理由から電気駆動型アクチュエータとして注目されている。電気刺激駆動は制御性に優れることから、現在様々な EAP (electroactive polymer) アクチュエータが実用化に向けて検討されている。主にアクチュエータ利用目的として EAP が研究されるようになって数十年の年月が経ち、EAP の代表的な物として、ハイドロゲル、Ionic Polymer-Metal Composite (IPMC)、導電性高分子があげられる。これら EAP は基本的に溶媒を必要とする。これは「湿潤状態でも駆動可能という EAP の利点」ととらえられる一方で、「溶媒を扱うという手間」という問題点でもある。本研究では溶媒を極力使わない、基本的には乾燥、あるいは乾燥に近い状態での EAP のアクチュエータ利用を目的として複数種のアクチュエータの作製、性能評価を行った。本研究で対象とした EAP は大別すると以下の IPMC、CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer)、DEA (Dielectric Elastomer Actuator) の三種類である。

第1部では、基礎実験から Nafion IPMC アクチュエータの電気的特性と動的特性を解析し、印加電流に対する Nafion IPMC の曲率の振る舞いから、Nafion IPMC の屈曲が総賦与電荷量に大きく依存していることを確認した。また、入出力データに基づき、時間領域でシステム同定することでモデル化を行い、Nafion IPMC の動特性を捉えた数式モデルを作製し、導出した数式モデルを用いて逆システムを設計した。得られた逆システムを用いてフィードフォワード制御、賦与電荷量により推定した IPMC の曲率に基づいたフィードバック制御系とそれらを組み合わせた 2 自由度制御を行い、目標値に追従する有効性を確認した。また、制御系のロバスト性を検証するために、システムにステップ状外乱を入力した場合においても、目標値に追従することを確認し、これらの制御システムが、ロバスト性があることを確認している。

第2部においては、IPMC はアクチュエータ材料として魅力的な性質を備えているが、発生力が低いため、この問題を解決することを目的として、炭素繊維強化プラスチック CFRP を基盤材料としたアクチュエータの作製を行った。CFRP を、適切に選択した他種の高分子 (例えば PVC : Polyvinyl chloride) に貼り付けると可逆的な熱変形を示す曲げモードアクチュエータとしての振る舞いをする。本研究では、CFRP-PVC 板を接着したアクチュエータを作製し、電気刺激による CFRP のジュール熱で表面温度と曲率の関係を調べ、CFRP の曲率は表面温度に依存するほぼ線形な関係が得られた。さらに、双方向偏向可能な CFRP-Acryl 積層板アクチュエータを作製し、温水と冷水の両方の循環制御や冷却空気での強制冷却により、積層板に適切な温度制御が可能になり、双方向偏向アクチュエータの動作を実現することに成功している。

第3部においては、DEA (誘電エラストマアクチュエータ) の変形制御可能性について検討を行った。DEA は製作コストが安く、また電気エネルギーから機械エネルギーに変換する効率が非常に高いアクチュエータであり、DEA 面内方向の動作について様々な研究が行われているが、より複雑な変形動作をさせるため、垂直方向の動作も必要とされている。そこで、エポキシを使用して、DEA 接着部の活性部分を局所的に拘束し、拘束箇所と拘束されない箇所で発生した変形歪のミスマッチにより垂直方向動作可能なアクチュエータを作製し、電気刺激により垂直方向の変形量を調べ、垂直方向変形制御が可能かについて検討した。また、電気的モデルについて検証を行い、より優れた動的な特性を得るための印加電圧を導き出している。

## 論文審査結果の要旨

導電性高分子やエラストマー、カーボンナノチューブ、ナノバイオマシンなどは、高分子材料でできていることによるソフトでフレキシブルであるなどの理由から電気駆動型ソフトアクチュエータとして注目されている。本論文は溶媒を極力使わない、基本的には乾燥、あるいは乾燥に近い状態でのEAP (electroactive polymer) アクチュエータ利用を目的として複数のアクチュエータの作製、性能評価を行ったものである。

その一つとして、Ionic Polymer-Metal Composite (IPMC)をとりあげ、その電気的特性と機械的動特性を解析し、IPMCの屈曲と総賦与電荷量の関係から賦与電荷量により推定したIPMCの曲率に基づいたフィードバック制御系、逆システムを用いたフィードフォワード制御とそれらを組み合わせた2自由度制御系を用いて、目標値に追従する提案制御系の有効性を確認している。また、フィードバック制御系と2自由度制御系については、外乱に対するロバスト性があることを確認している。

二つ目としては、この種のアクチュエータの発生力不足を補う手段として、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) と適切に選択した他種の高分子 (PVC : Polyvinyl chloride) に貼り付けたバイモルフ型アクチュエータを提案し、その実現を試みたものである。電気刺激によるCFRPの曲率は表面温度に依存するほぼ線形な関係が得られている。また、温水と冷水の両方の循環制御や冷却空気で強制冷却することにより、バイモルフ積層板アクチュエータに対して適切な温度制御を可能にすることにより、双方向偏向アクチュエータの動作を実現している。

三つ目として、DEA (誘電エラストマアクチュエータ) の複雑な変形動作を実現するための多方向変形制御可能なアクチュエータを提案・作製した。また、電気的モデルについて検証を行い、より優れた動的な機械特性を得るための適切な印加電圧を導き出している。

以上、本論文は、EAPアクチュエータによるそれぞれの優れた特性・制御性を明らかにし、低コストで大量生産可能な人工筋肉などへの応用への可能性を明らかにしている。これらの研究知見は、学術上および産業技術への社会貢献に寄与できるものと判断し、審査委員会において、上記審査論文に関する事項について詳細かつ厳正な審査を行い、審査委員会議の結果、博士(工学)の学位請求論文として価値ある業績と認め、よって本論文は博士(工学)の学術論文として価値のあるものと認める。

## 最終試験結果の要旨

学位論文を構成する学術論文として査読のあるジャーナルに7編、学位論文の基礎となる学術論文に関する判定基準「学術論文が査読付き学会誌や論文集に最低5編掲載されていること」を満たしており、令和4年1月27日に学位論文の内容を中心として、またこれに関した事項について諮問を行った結果、応答も的確であり、合格と認める。

---

発表論文 (論文名, 著者, 掲載誌名, 巻号, ページ)

1. **Bending control of Nafion-based electroactive polymer actuator coated with multi-walled carbon nanotubes**  
Sensors and Actuators B 156 (2011) 375-382.  
Hirohisa Tamagawa, Wenyi Lin, Keiko Kikuchi, Minoru Sasaki
2. **Self-sensing control of Nafion-based ionic polymer-metal composite (IPMC) actuator in the extremely low humidity environment**  
Actuators 2013, 2, 74-85.  
Minoru Sasaki, Wenyi Lin, Hirohisa Tamagawa, Satoshi Ito and Keiko Kikuchi
3. **Electrical activation of thermo-responsive PVC-CFRP laminate actuators**  
Functional Materials Letters Vol. 4, No. 3 (2011) 305-308.  
HIROHISA TAMAGAWA, WENYI LIN and MINORU SASAKI
4. **Symmetric deflection of CFRP-based polymeric laminate**  
Advanced Engineering Forum Vols. 2-3 (2012) 966-971.  
Wenyi Lin, Minoru Sasaki, Hirohisa Tamagawa
5. **Electroactive thermo-responsive polymer actuator equipped with a built-in air pump cooling system**  
The Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics 2012, 20, 268-273.  
Hirohisa TAMAGAWA, Wenyi LIN, Shuzo INABA, Minoru SASAKI
6. **Large and symmetric deflection of Acryl plate-CFRP plate laminate actuator**  
International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 41 (2013) 51-58.  
Wenyi Lin, Minoru Sasaki and Hirohisa Tamagawa
7. **A simple technique for the DEA deformation control by the constraint impose using an adhesive**  
Academic Journal of Polymer Science Volume 5 Issue 2 - July 2021, 001-009.  
Fahmi Khairil, Wenyi Lin, Gakuji Nagai, Keishi Naito, Takahiro Nitta, Minoru Sasaki and Hirohisa Tamagawa