

氏名(本籍)	鈴木 淳也(愛知県)
専攻	知能機械システム工学専攻
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第120号
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当者
学位授与の年月日	平成29年3月24日
学位論文題目	厚膜レジストを用いた磁気ポリマーコンポジットの特性評価とそのマイクロデバイス応用に関する研究
論文審査委員	(主査) 下川 房男 (副査) 石丸 伊知郎 (副査) 宮川 勇人 (副査) 鈴木 孝明

## 論文内容の要旨

微細加工向け材料としてのポリマーは加工容易性が高く、また、柔軟な機械特性をはじめとして、化学的・電氣的・熱的に特徴的な材料特性を持つことから、MEMS分野において注目されており、ポリマーをベースにMEMSデバイスを構成するPolymer MEMSや化学的特性や生体適合性を利用したmicro-Total Analysis SystemsやLab on a chip等へ応用されている。さらには、ポリマー自体の機械的特性の向上や機能性を付加させるためにポリマーマトリクス内へ無機材料を充填させたポリマーコンポジットが提案され、様々な特性を持ったポリマーコンポジットの研究が行われている。特にMEMS分野におけるポリマーコンポジットの有望な組み合わせのひとつとして、感光性ポリマーと磁性粒子が挙げられる。ポリマーの柔軟性と加工容易性、磁性粒子の磁化特性を一つの材料として扱うことが可能な磁気ポリマーコンポジットは、磁気応答MEMSデバイスにおける新たなセンサやアクチュエータとして期待されている。

本研究では、次世代のMEMSアクチュエータとして期待されている磁気ポリマーコンポジットの調製方法の検討から機械特性・磁気特性等を評価し、MEMSデバイスの応用に必要となる材料物性値を定量的に評価することでMEMS構造材料および磁気アクチュエータとしての妥当性について検討した。さらに、マイクロ流体システムの要素機構の一つであるマイクロバルブと、光偏向デバイスであるMEMSミラーの設計・試作・性能評価を実施した。MEMSデバイス設計では、機械特性評価で得られた材料物性値を適応させた磁気ポリマーコンポジットデバイスの設計手法の確立を行った。また、MEMSデバイスの試作と性能評価によって、様々な環境下やアクチュエータ形状、運用における汎用性およびMEMS分野における磁気アクチュエータとしての有用性・実用性について実証した。

本学位論文は磁気ポリマーコンポジットの材料物性評価とマイクロデバイス応用を中心

に、以下に示す6つの章で構成されている。

第1章では、マイクロデバイス分野におけるポリマー材料及びポリマーコンポジットの位置付けと報告例について概説し、本研究の背景と目的を述べた。

第2章は、提案する磁気ポリマーコンポジットの原理、主材料と微粒子材料の選定、調製方法について記した。

第3章では、調製した磁気ポリマーコンポジットの機械特性と磁気特性、UV加工特性について評価し、粒子含有量と機械的特性、磁気的特性についての関係を説明した。

第4章と第5章では、材料物性評価を行った磁気ポリマーコンポジットを磁気アクチュエータとした流体デバイスと光デバイスの試作・性能評価を実施することで磁気ポリマーコンポジットの有用性について検証した。

最後に、本研究のまとめを第6章にて述べた。

## 審査結果の要旨

ポリマー材料は、柔軟な加工性や軽量性、優れた機械的特性に加えて低コストと言ったポテンシャルを有するため、近年、MEMS(Micro Electromechanical Systems)分野においても、多くの報告がなされ、応用分野が広がりつつある。特に、ポリマーをベースに MEMS デバイスを構成する Polymer MEMS や、ポリマーの持つ化学的特性や生体適合性を最大限に利用した Micro-Total Analysis Systems、Lab on a chip への応用が期待されている。この中で、ポリマー自体の機械的特性の向上や機能性を付加させるために、ポリマーマトリクス内へ無機材料を充填させたポリマーコンポジットが提案され、殊にポリマーの柔軟性と加工容易性、磁性粒子の磁化特性を一つの材料として扱うことが可能な磁気ポリマーコンポジットは、磁気駆動型ポリマーMEMS デバイスにおける新たなセンサ材料やアクチュエータ材料としての可能性を秘めている。

本論文は、このような材料系に着目し、厚膜レジストとマイクロサイズの磁性粒子を組み合わせた磁気ポリマーコンポジット材料を新たに提案するとともに、材料をMEMSデバイスに応用する場合のプロセスインテグレーションを考慮してプロセス設計に資するための材料特性の評価と、これらを適応した磁気駆動型ポリマーMEMSデバイスの設計・製作・性能評価に関わる一連の結果から、材料の持つ有用性とそれを応用したマイクロデバイスのアクチュエータとしての優位性を実証したものである。

本学位論文は、磁気ポリマーコンポジットの材料物性評価とマイクロデバイスへの応用から成り、以下に示す六章で構成されている。

第一章では、マイクロデバイス分野におけるポリマー材料、及びポリマーコンポジットの位置付けと従来研究について概説し、本研究の背景と目的について述べられている。

第二章は、提案した磁気ポリマーコンポジットの原理を述べるとともに、主材料と微粒子材料の選定や調製方法等について、詳細に検討した結果について記述されている。

第三章では、調製した磁気ポリマーコンポジットの機械特性と磁気特性、UV加工特性について評価し、粒子含有量と機械的特性、磁気的特性等についての関係が詳述されており、提案した磁気ポリマーコンポジットが、MEMSデバイスの構造材料、及び磁気アクチュエータ材料として優れた特性を有していることが示されている。

第四章、第五章では、各々、材料物性評価を行った磁気ポリマーコンポジットを磁気アクチュエータとした流体デバイス（磁気駆動型マイクロバルブ）と、光デバイス（磁気吸引駆動型MEMSミラー）の製作・性能評価を行った結果を示し、簡便なアクチュエータ構造により、非接触、大変位駆動が可能なマイクロデバイスの実現性を検証した結果が述べられている。

第六章では、上記の結果を総括し、提案した磁気ポリマーコンポジットの有用性と、マイクロデバイスのアクチュエータとしての優位性についての結果が纏められている。

以上より、本論文は、新規性、発展性ともに高く評価できるものであり、本審査委員会は、申請者が香川大学大学院の博士（工学）の学位授与に値するものと判定した。尚、本学位論文の作成にあたり、学会論文誌への掲載論文3編、及び国際会議Proceedingsへの掲載論文2編を含む、これら複数の学術論文を発表している。研究成果は、いずれも独自に完成したものである。

## 最終試験結果の要旨

平成29年1月27日に公聴会、並びに最終試験を実施した。公聴会では、学位申請者が学位論文の内容に関する発表を実施した（1時間）。その後、口述試験として学位論文の内容に関わる審査委員の質疑に的確に答えることを求め、更に学位論文に関連した分野の専門知識を確認した（1時間）。いずれも審査員の質疑に対して、適切に回答がなされた。以下に、質疑に対する回答の一部を示す。

1) 磁気ポリマーコンポジットにおいて、磁性粒子内に存在する鉄分子の体積比の求め方は？

【回答】1 molあたりの分子量を求め、実際に利用した酸化鉄の質量から、その中に含まれる質量を推定し、鉄分子の体積比を算出している。

2) 磁性粒子の含有率を増やしていった場合、磁気特性には変化は現れないのか？

【回答】磁性粒子の含有率を増やしていった場合、磁性粒子間の距離が短くなるため、磁気特性に変化があると予測したが、実験した含有率の範囲では、磁気特性に大きな変化は見られなかった。

3) 磁気ポリマーコンポジットを用いた加工形状制御（垂直性、転写精度等）において、磁性粒子の存在自体は影響があるのか？

【回答】磁性粒子によって、レジスト内での空洞領域の発生や加工面側壁の荒れが見られており、材料の透過性だけでなく、構造や寸法自体にも影響を与えている。

4) 本研究の磁気吸引駆動型MEMSミラーの有望な応用先とその実用的な仕様は？

【回答】有望な応用先は、車載用レーザーレーダーへの応用である。仕様としては、光学偏向角度が20deg程度、外乱振動を考慮すると、駆動モードにおける共振周波数はKHzオーダーが必要と考えられる。

5) 磁気ポリマーコンポジットの特徴を踏まえ、実用的な観点から、本研究分野の将来展望をどのように捉えているか？

【回答】感光性ポリマーによる厚膜構造形成と加工容易性が、磁気駆動型ポリマーMEMSデバイスの大きな特徴である。厚膜構造による体積効果によって、磁気特性は大きくなるため、その特徴を十分に活かせる応用先が、今後とも重要と考えている。

上記の最終試験の結果を踏まえ、本審査委員会では、提出された学位請求論文が博士（工学）の学位に値するものであり、かつ審査請求者は専門領域に関する十分な学識と研究能力を有するものと判断した。以上より、本最終試験の評価を合格とする。