

# 論文の内容の要旨

氏名：高 藤 美 泉

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：MEMS と積層セラミック技術を適用した微小化システムの研究開発

携帯通信機器の小型化はそれを構成する制御回路、電子部品、電源、アクチュエータの小型化あるいはその作製技術の発展により支えられている。小型素子作製技術の一つに積層セラミック技術と呼ばれる小型電子部品を作製する技術がある。これはシート状のセラミックに電極をスクリーン印刷法により形成し、積層することでセラミック内部に立体配線が可能となることから縦方向の集積化を得意とする。しかし、従来の手法では小型化に伴い印刷パターンの変形による短絡などが懸念されることから微細高アスペクト比パターンの形成が困難である。また、機能性材料であるセラミックを効果的に利用するには部品内部に異種材料を導入することが望ましいが、現段階ではシートレベルでの導入にとどまる。

電源やアクチュエータにおいては IC 作製技術を応用した微細加工技術である MEMS での研究・開発が進められている。フォトリソグラフィ技術によるパターンニングを行うことから微細パターンの形成が可能であり、さらに深堀エッチングにより高アスペクト比パターンの形成が可能なることから小型構造の実現が容易であるため横方向の集積化が得意である。しかし、平面構造を基本とする MEMS では高トルク・高出力が見込める電磁誘導方式に一般的に用いる、巻線のような三次元構造をもつ磁気回路の小型化が困難である。そのためスパイラル形状での検討が多くされているが、巻き数の増加が見込めないことや内部抵抗が高くなるといった課題が残る。一方、MEMS と組み合わせやすい圧電体によるアクチュエータではリニアアクチュエータや超音波モータなど実用化されているものも多いが、駆動方向に制限があることや消費電力が大きといった課題が残る。

また、MEMS 分野の一つとして医療分野などでの活躍が期待される MEMS マイクロロボットの研究も多く行われていることから自律化のためにはロボットに搭載可能なほど小型で高機能な電源やアクチュエータの開発が重要な課題である。

そこで、本論文では横方向の集積化に適した MEMS と縦方向の集積化に適した積層セラミック技術の互いの利点を統合することで新たな加工技術、新たなデバイスおよびシステムの研究開発を行うことを目的とした。

本論文は全 6 章から構成されており、以降に各章の概要を述べる。

## 第 1 章 序論

研究の背景と各技術に対する問題点を明らかにし、本研究の位置づけおよび目的について述べた。

## 第 2 章 MEMS と積層セラミック技術

本研究に用いた MEMS 工程と積層セラミック技術について述べた。また、研究に用いたセラミック材料について作製方法を交えて述べた。

## 第 3 章 感光性レジストフィルムを用いたセラミックシートの加工方法と応用

第 3 章では技術的融合の具体例として積層セラミック技術の一般的な工法であるシート工法を基本に、MEMS 工程の一つである微細パターンの形成が可能なフォトリソグラフィ工程を組み合わせた加工方法を提案した。提案した手法はフォトリソグラフィ工程でパターンニングが可能な感光性レジストフィルムを用いている。

この手法を用いることで一般的な電極形成方法であるスクリーン印刷法では困難であった高アスペクト比パターンの形成と、ドクターブレード法では困難であった異種材料パターンの同一層内へのパターンニングが可能なることを示した。高アスペクト比パターンにおいては表面パターンと埋め込みパターンの 2 種類において作製方法とパターンについて考察および比較を行った。これらの結果からパターンの断面積増加と内部抵抗の低下を示した。また、多数枚数積層を行うにはシート表面が平坦になる埋め込みパターンの方が適切であることを磁場解析の結果を含め示した。異種材料パターンの形成についてはテストパタ

ーンによる形成方法の検討と、非磁性材料パターンを導入した積層セラミックインダクタの作製を行った。これらの結果から感光性レジストフィルムを用いることで同一シートに異種材料パターンを形成する手法を確立したといえる。また、磁場解析の結果から異種材料パターンの形成は積層セラミックインダクタの特性向上に有効であることを明らかにした。

#### 第4章 積層セラミック磁気回路を用いたミリメートルスケール MEMS 電磁デバイス

第4章では小型電磁デバイスにおいてこれまで問題であった磁気回路の小型化を積層セラミック技術により解決した。具体例として積層セラミック磁気回路を用いた電磁誘導式 MEMS エアタービン発電機と積層セラミック磁気回路を用いた MEMS 電磁モータの開発を行った。

電磁誘導式 MEMS エアタービン発電機はタービン部分を MEMS によりシリコンで作製し、磁気回路を磁性材料であるフェライトを用いて作製した。発電機は圧搾空気によりタービンのロータを回転させ、ロータに接着した磁石が同時に回ることによって発電する界磁回転型を採用した。発電機は積層セラミック単相コイルを組み合わせた単相型 MEMS エアタービン発電機と、5mm 角の三相交流磁気回路を組み合わせた 5mm 角三相交流型 MEMS エアタービン発電機、金属永久磁石を用いた 10mm サイズの三相交流型 MEMS エアタービン発電機を作製しそれぞれ発電結果を得られた。また、磁気回路の形状やコイルパターン周辺の磁性体の配置が発電結果に影響を及ぼすことを明らかにした。

MEMS 電磁モータでは 11mm 角電磁モータと 4mm 角電磁モータの開発を行った。開発を行ったモータはロータおよび構造躯体をシリコンから作製し、フェライト中にヘリカル構造のコイルを形成した磁気回路を組み合わせて得た。開発したモータは 11mm 角モータでは筐体内部に 30 回巻の磁性コアをもったヘリカルコイルを 6 つ配置し、それぞれ対向するコイルを組み合わせた三相交流型とした磁気回路により  $480 \text{ min}^{-1}$  の回転数を得た。4mm モータでは筐体内部に 50 回巻の磁性コアをもったヘリカルコイルを 3 つ配置し、 $1080 \text{ min}^{-1}$  の回転数を得た。モータの回転では偏心運動が確認された。これはロータの回転軸を固定している孔のはめあいがすきまばめであるためだと確認した。また、モータに用いた磁気回路はそれぞれ独立したコイルを導線により配線をしているため接続部分で安定しないためだといえる。このことから積層セラミック磁気回路と MEMS を融合するためにシリコンウェハ上に接続パターン等を形成することで回転が安定すると考えられる。

以上2点の応用例から MEMS と積層セラミック技術を組み合わせることで小型電磁デバイスを得られることを示した。

#### 第5章 積層セラミック圧電素子を用いたインパクトタイプ MEMS ロータリーアクチュエータを搭載した MEMS マイクロロボット

第5章ではシリコンにより筐体を形成し、積層セラミック圧電素子を組み合わせることで小型アクチュエータの開発を行い、開発したアクチュエータをマイクロロボットに応用することで歩行動作を示す MEMS マイクロロボットを開発した。

インパクトタイプ MEMS ロータリーアクチュエータでは、インパクト機構に小型で発生力の大きい積層セラミック圧電素子を用いることで単純な機構のロータリーアクチュエータを開発した。材料の特性を活かした機構は小型化を可能にするが、形状記憶合金を用いたアクチュエータでは消費電力が高いことや応答性が低いことが問題であった。一方で応答性の高い圧電素子を用いたアクチュエータも駆動方向がリニアなものが多く、回転動作を示す超音波モータは高消費電力であるといった課題があった。そこで圧電素子を用いたインパクトタイプのロータリーアクチュエータの開発を行った。アクチュエータはロータをインパクトヘッドが圧電素子の振動によりたたく単純な機構であるが、安定した回転動作を得るためにロータにリムを形成し、ヘッドにリムをガイドとして固定できるようなバンプ形状を形成した。これにより外形寸法が  $1.0 \times 4.4 \times 3.2 \text{ mm}$  で  $60 \text{ min}^{-1}$  の安定した回転動作を示すアクチュエータを得た。また、開発したアクチュエータは医療分野などでの利用を期待されるミリメートルサイズの小型ロボット（マイクロロボット）のアクチュエータとして応用した。

マイクロロボットでは積層セラミック圧電素子を用いたアクチュエータを駆動源にすることで小型なロボット筐体をもつマイクロロボットを実現した。マイクロロボットは移動機構として昆虫を模倣した 6 脚歩行を採用し、歩行動作は脚部と組み合わせたリンク機構により生成した。これより幅 4.0 mm、奥行き 4.6 mm、高さ 3.6 mm、重さ 45 mg と小型で軽量なロボットを実現した。また、ロボットの制御は生物の神経細胞をアナログ電子回路で模倣したパルス形ハードウェアニューロンモデル（Pulse Type Hardware Neuron

Model: P-HNM) 回路を導入することで環境に適応した制御が可能となるため医療分野での活用だけでなく、ミツバチや蚕のような生物を利用した新たな産業を興すことが示唆された。開発したマイクロロボットは P-HNM 回路により 180 mm/min の移動速度を示した。しかし、ロボットには電源および駆動回路を搭載していないことから、今後自律化を行うために小型電源および駆動回路の IC 化が重要な課題である。

## 第 6 章 結論

本研究で得られた成果と今後の課題について述べた。また、本論文を通して MEMS と積層セラミック技術を適用することによりセラミックの新たなパターンニング方法、小型電源、小型アクチュエータ、マイクロロボットの実現が可能であることを明らかにした。