C-21

積層セラミック磁気回路を用いたマイクロロボット用 MEMS 電磁モータの研究開発

Research and Development of MEMS Electromagnetic Motor for Micro Robot Using Multilayer Ceramic Magnetic Circuit

○多田峻己[1]，佐村隆弘[2]，高藤美泉[3]，齊藤健[3]，内木場文男[3]
*Shunki Tada[1], Takahiro Samura[2], Minami Takato[3], Ken Saito[3], Fumio Uchikoba[3]

Abstract: This paper proposes an electromagnetic motor that combined with a MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) process and a multilayer ceramic technology. The developed magnetic motor was realized a downsizing without winding wire coil magnetic circuit by using the multilayer ceramic technology. This technology that has been used for a miniature electric element can form the miniature three-dimensional structure coil with the magnetic core. In this paper, two kinds the MEMS electromagnetic motor were fabricated, and these motors were compared the rotational speed about the different control systems (a waveform generator and a driving circuit).The rotary speed of the fabricated MEMS motor was 480 to 4200 rpm.

１．はじめに

科学技術の発展に伴い，携帯通信機器や PC，医療機器などの小型化が進んでおり，例えば医療分野では低侵襲性のカプセル内視鏡が活用されている[1]．しかしながら，この内視鏡は動力を持たないため自由に撮影箇所を変えることができない．そこで自走可能な小型機器としてマイクロロボットの開発が必要である．マイクロロボットとは，ミリメートル以下の機構をもつ小型ロボットとなる．マイクロロボットには小型のアクチュエータが必要であり，形状記憶合金や静電モータ，圧電モータ，電磁モータ等が研究されている[2]．高効率かつ発生力が高いモータとして電磁モータが挙げられる．小型電磁モータを作製する技術として MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)工程が注目されている．MEMS は半導体製造プロセスを基にした微細加工部品を作製する技術でサブミリメータサイズの構造を高精度に作製することが可能である．しかし，MEMS では電磁モータに必要な立体的な磁気回路の作製が困難である．そこで，小型の磁気回路を作製する技術として積層セラミック技術に注目した．積層セラミック技術とは，導電性ペーストを用いて配線パターンを印刷したセラミックシートを積層し焼成することで小型な三次元配線を形成する技術である．本研究では，マイクロロボット実現のために積層セラミック技術を MEMS パーツに組み合わせることで，小型な MEMS 電磁モータの実現を目指す．また，セラミック材料として，磁性材料と絶縁材料の 2 種類を検討した．

２．MEMS 電磁モータの設計

MEMS 電磁モータにはブラシレス DC モータを採用した．また，構造は磁石とロータが対向したアキシャルギャップ式を採用した．Figure 1 に MEMS 電磁モータの模式図を，Figure 2 に断面の模式図を示す．モータの構造躯体はシリコンウェハを原料に，MEMS 技術を用いて作製した．磁気回路には磁性材料のフェライトと絶縁材料の LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics) を用いた．また，配線パターンには低抵抗の銀ペーストを用いた．

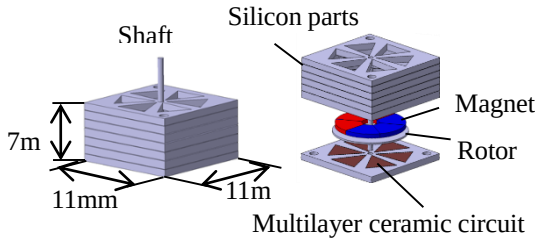

Figure 1. Structure of the 11mm MEMS motor

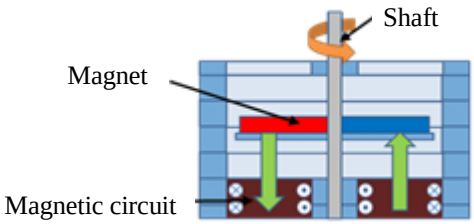

Figure 2. Cross-sectional image of the MEMS motor

外径寸法は縦 11mm 幅 11mm の正方形で高さ 7mm とし，シリコンパーツ内部に磁気回路及び永久磁石を接着したロータを内蔵する設計とした．磁気回路とロータ間にはフェライトは 800μm，LTCC は 100μm 程度のギャップを設ける．構造躯体は全体で 7 層からなり，磁気回路固定層に 1 層，ロータ固定層に 5 層，軸保持層に 1 層とした．ロータには外径 8mm 内径 2mm 厚さ 0.5mm で表面磁束密度 1.4 T の 2 極のリング状ネオジム

１：日大理工・精機　２：日大理工・院（前）　３：日大理工・教員・精機

磁石を接着した．軸には非磁性のオーステナイト系ステンレス鋼を用いた．磁気回路にはコイルの巻き数が 30 回巻の積層セラミックコイルを 6 個作製し 60 度ごとに配置された磁気回路固定層のスロット部分にはめ込むことで磁気回路とした．また，磁気回路は隣り合うコイルを並列に接続することで各相の配置が 120 度ごとに異なる 3 スロット構造とし，2 極 3 スロットの三相駆動同期モータとした．各相の配線はスター結線とした．

２．１．積層セラミック磁気回路

フェライトは酸化鉄を主成分とするフェリ磁性酸化物である．優れた磁性特性を持ち，他の金属製磁性体に比べ電気抵抗が高いため高周波域などで使用される．磁気回路に磁性体コアとして導入することで磁束を集中し性能向上させる．しかし，磁石を引力が働くためローターと磁気回路の間にギャップを設ける必要がある．

LTCC は低温同時焼成セラミックと呼ばれるアルミナーガラスセラミックであり，透磁率は低いが絶縁体として積層基板等に多く用いられる．どちらの材料も 900℃程度の低温で焼成可能なことから銅や銀といった低い融点を持つ低電気抵抗の金属を配線パターンに使用することが可能である．

２．２．MEMS 電磁モータの回転実験

MEMS 電磁モータの回転実験は磁気回路にウェーブフォームジェネレータで所定の三相交流電圧を印加し行った．駆動方式は正弦波駆動とした．

LTCC 磁気回路と組み合わせたモータはさらに外部駆動回路を用いて実験を行った．駆動回路を用いた回転実験には回転検出のためホール IC を用い，設計は上面にロータの回転検出のため，各層の磁気回路の間にくるようにホール IC を合計 3 つ配置した．

３．結果および考察

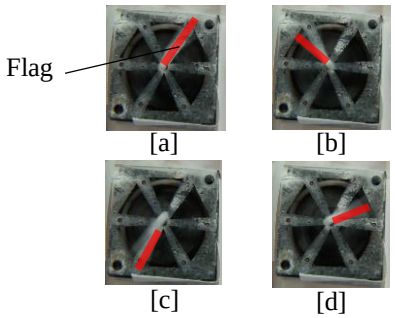

Figure 3. Rotary operation of the MEMS motor

Figure 3 に作製した MEMS 電磁モータの回転動作を示す．図は 0.03 秒ごとの回転動作であり，赤線は回転軸に取り付けたフラッグの位置を示す．MEMS 電磁モータはフェライト磁気回路及び LTCC 磁気回路ともに周波数 8Hz で 0.42V の電圧を印可したときに回転動作を示した．同期モータの特性より MEMS 電磁モータの回転数は 480rpm であると考えられる．また，磁気回路の平均内部抵抗値 1.50Ω より各相の消費電流は 0.28A、またモータ全体の消費電流は 0.84A であり，入力電力は約 176mW であった．

ホール IC を配置した LTCC 磁気回路を組み合わせた MEMS 電磁モータを駆動回路を用いて回転実験を行った結果，回転数は 480~4200rpm となった．最高回転数 4200rpm 時の交流電流の周波数は 70Hz 印加電圧 2.1Ｖとなった．ホール IC で回転を検出しロータの回転に対して適切な磁界を発生させることで制御なしの状態と比較して高回転数を得られた．しかし、回転運動では偏心が確認されたことから、フェライト磁気回路では磁性体を両側に配置する設計を、LTCC 回路では軸受機構を導入するといった改善が必要である．

４．まとめ

積層セラミック磁気回路と MEMS 技術を組み合わせた 11mm 角の電磁モータを作製した。積層セラミック技術を用いることで巻線加工を行わず 30 回巻の小型なモータ用磁気回路が得られた．作製した電磁モータをウェーブフォームジェネレータに接続して回転実験を行った結果，印加電圧 0.42Ｖのとき回転数 480rpm を示した．駆動回路で制御した場合，印加電圧 2.1V で回転数 4200rpm を示した．今後 MEMS 電磁モータを用いたマイクロロボットの開発を行う．

５．参考文献

[1] 大塚尚武「カプセル内視鏡の現状と課題」電子情通信学会誌 Vol.96，No.6，2013
[2] 鈴木康一，川原伸章「マイクロアクチュエータ」電学論 E Vol.122，No.12，　p555-559，2012

謝辞

本研究は，日本大学のマイクロ機能デバイス研究センターの支援を受けました．