

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月15日現在

機関番号：32665
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22560254
 研究課題名（和文） 積層セラミック磁気回路を用いた小型電磁誘導型MEMS発電機の研究開発
 研究課題名（英文） Research and Development of MEMS Miniaturized Inductive Power Generator with Multilayer Ceramic Magnetic Circuit
 研究代表者
 内木場 文男（UCHIKOBA FUMIO）
 日本大学・理工学部・教授
 研究者番号：60366557

研究成果の概要（和文）：異種技術分野である MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）と積層セラミック技術を組み合わせることによって、ミリメートルサイズの超小型エアタービン発電機を開発した。エアタービン部分は MEMS 技術を用い電磁誘導回路には積層セラミック技術を用いた。とくに磁気回路の検討を行い、漏洩磁束の抑制と導体抵抗の低減に成功した。スピンドル型エアタービンと組み合わせ最大出力 1.53mVA を得た。

研究成果の概要（英文）：Combining different technical field of MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）and multilayer ceramic system, miniaturized air turbine generators of millimeter size was developed. MEMS and multilayer technologies were adopted to the air turbine part and electromagnetic induction part, respectively. We achieved low leak magnetic flux and low internal resistance by developing the multilayer magnetic circuit. The maximum power was 1.53mVA when a spindle air turbine was used with the developed magnetic circuit.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、知能機械学・機械システム

キーワード：マイクロ・ナノメカトロニクス、MEMS、積層セラミック、発電機

1. 研究開始当初の背景

シリコンウエハーのフォトリソグラフィ技術をベースとした MEMS はさまざまな研究展開があり、発電等を目的とするいわゆるパワーMEMSも盛んに研究がされている。MEMS はもともとシリコンのプレーナー技術を基礎としているために、シンプルな平面

構造を基本として、平面に微細構造を施すことが比較的容易である。そのため、発電素子においてはいくつか提案されている方式のなかでも平面構造と相性のいい静電方式が初期段階から検討されてきた。エレクトレット、あるいは、圧電体、それぞれの材料を用いる研究も行われている。

しかしながら、エネルギー変換において、大きな出力を得るためには大きな電流を取り出すことが望ましく、従来からあるたとえば商用発電機では磁性体コアを組み合わせた電磁誘導方式が採用されているのは周知のことである。

MEMS 発電機においても磁性コアを用いた電磁誘導型が適用できるのであれば大きな出力を得ることが期待できる。また、磁性体を用いることによって、磁束を磁性体内部に集中させることができるので、磁束を取り巻く導体の長さを短くすることができ、発電機の導体抵抗を小さくすることができる。その結果、大きな電力をとりだすことにつながる。

一方で、積層セラミック技術は電子部品を製作する技術の一つであるが、粉末冶金技術をベースとしており、フォトリソグラフィをベースとする MEMS とは大きく技術分野が異なる。積層セラミック技術においては酸化磁性体であるフェライトセラミックの内部に螺旋構造の内部導体を形成した積層セラミックインダクターがすでに実用化されている。フェライト粉末を有機バインダーとともにシート状に成型し、スルーホールを形成する。その後、銀粉末を含有する導体ペーストを所定の形状にスクリーン印刷によって形成する。導体の印刷されたシートを所定枚数圧着積層し、その後、焼成処理をすることによって、内部に螺旋導体の配されたセラミックインダクターを得ることができる。

我々は、2004 年度より従来の電池よりも小型で高出力の電源を探索し、MEMS 技術をもちいて圧搾空気で稼動するエアタービンの開発を行ってきた。2007 年に至り、シリコン 7 層の構成とし、設計寸法に対して 1 μm 以下の高加工精度を実現することによって、3mm 角のエアタービンにおいて高速回転に成功した。2008 年には磁性コアを用いず、導線の巻回によって、微弱ではあるが電力の変換に成功をした。このときの出力は理論値の 600 分の 1 程度であり、磁性コアを用いないため磁束が漏れることが大きな原因であった。

2. 研究の目的

以上を踏まえて、本研究においては、MEMS の分野とは一般に関係の乏しい積層セラミック磁性素子技術を導入し、複雑な異形コアと銅線の螺旋構造を実現し、商用発電機と同様な電磁誘導方式を 3mm 程度の立方体の小型 MEMS 発電機に適用、実現することとした。

3. 研究の方法

(1) 電磁誘導式 MEMS エアタービン発電機的设计および作製

MEMS エアタービン発電機は、磁石が回転することで磁界を変化させる界磁回転式電磁誘導型発電機とした。図 1 に MEMS 発電機の概略図と断面図を示す。磁石の磁束を取り込みやすくするために磁石と磁気回路とのギャップが小さくなるように設計した。また、発電機は圧搾空気によりロータを回転させるエアタービンとその下部にコイルパターンを配線した積層セラミック磁気回路を配置し構成した。

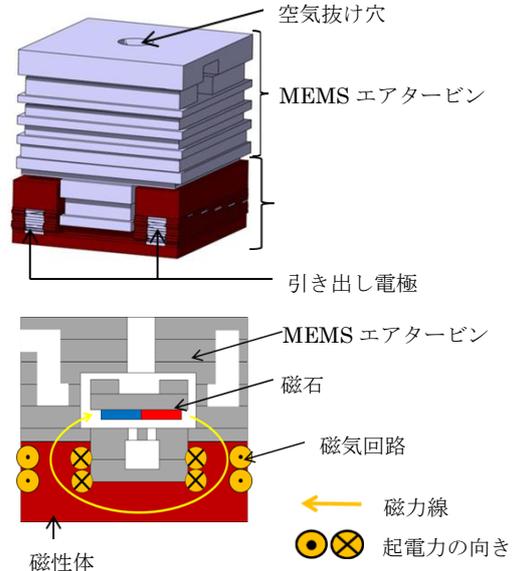


図 1 発電機の概略図および断面図

MEMS エアタービンの構造図を図 2 に示す。MEMS エアタービンはシリコン基板にフォトリソグラフィプロセスを施すことで作製した。全 7 層で構成し、上部を回転駆動用の空気流路、下部を空気軸受用の流路とした。MEMS エアタービンの中心部には半円ごとに着磁したサマリウムコバルト磁石を接着したロータを配置した。

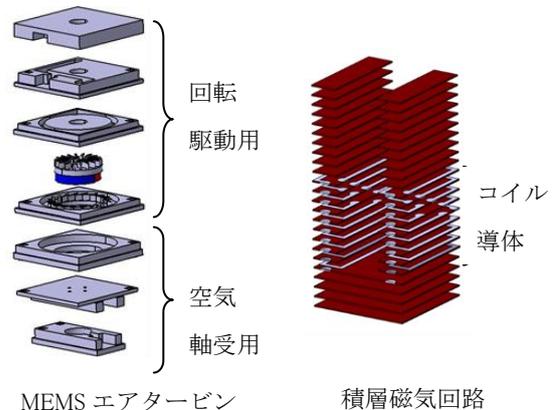


図 2 MEMS エアタービンと積層セラミック磁気回路の構造図

積層セラミック磁気回路は積層セラミック技術の一つであるシート工法を用いて作製した。磁性材料には900°C程度で焼成可能な比透磁率900のNiCuZnフェライトを用いた。内部導体の形成には抵抗の低い銀を用いた。外形寸法は3.5×3.5×1.2mmとした。磁気回路は全24層で構成し、コイル配線を施した層が10層と、磁束の通路としてコイル上部に10層、下部に4層の磁性体層を配置した。磁気回路は、9回巻を左右2ヶ所に配置し、計18回巻とした。コイルを馬蹄型になるように左右に配置することにより磁石とのギャップを少なくした。

磁気回路の作製に当たっては、まず、混合したフェライト粉体を用いてセラミックシートを形成するための泥状のスラリーを作製した。スラリーは混合したフェライト粉体、分散剤、可塑剤、有機溶剤を投入してボールミル法を用いて24時間混合した後、バインダを投入して24時間混合し完成とした。次に剥離フィルムの上にドクターブレード法を用いてスラリーをシート状に形成した。得られたシートに上下層の導通をとるためのスルーホールを形成し、スクリーン印刷法を用いて銀ペーストによる配線およびスルーホールへの充填を行った。作製したセラミックシートを1インチ角にダイシングを行い、一軸熱プレスと1インチダイスを使用して積層・圧着の工程を経たのち、磁性体層、コイルパターン層でそれぞれ設計したサイズにダイシングを行った。各層を積層、圧着の工程を繰り返して馬蹄型磁気回路を形成した。作製した磁気回路を焼成し、積層セラミック磁気回路の完成とした。エアタービンと磁気回路を組み合わせた発電機の外観を図3に示す。

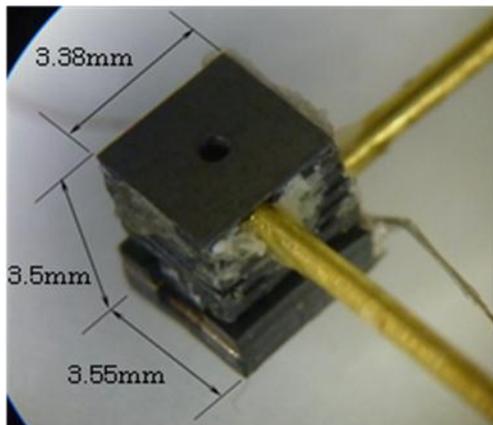


図3 エアタービン発電機の外観

(2) 発電評価

① MEMS エアタービン発電機の発電結果

作製したMEMSエアタービンと積層セラミック磁気回路を組み合わせ発電評価を行った。MEMS発電機の外観寸法は3.55×3.38×

3.5mmであった。発電実験はまず回転駆動用圧縮空気を注入し、その後、流量計を用いて空気軸受用のガスを注入してロータを上昇させて回転させた。測定は積層セラミック磁気回路に負荷抵抗20Ωを接続し、オシロスコープで波形を計測した。回転数はオシロスコープから読み取り、その値はガスの圧力により変化した。窒素ガスが0.28MPaのとき回転数は約58000rpmに達し、最短周期は1.04msとわかった。出力電圧は6.2mVで最大、出力電力は1.92μVAを得た。これは概算値の19%であった。

(3) 磁気回路の改良と評価

磁気回路を詳細に検討するために二段馬蹄形の磁気回路を作製した。図4に概略図を示す。馬蹄型コイル上層部にさらに磁性層を積層した二段型とした。積層層は全40層で、コイルパターンとして外周縁付近に銀配線を施し、コイルは左右2ヶ所に配置した。それぞれ12回巻の計24回巻とした。この形状では磁石を取り囲む様に磁性体を配置することで、より多くの磁束が取り込めると考えられる。設計寸法は3.5×3.5×2.0mmとした。図5に磁気回路の外観写真を示す。

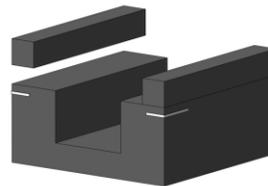


図4 二段馬蹄型積層磁気回路の概略図

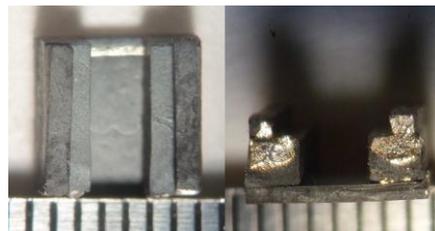


図5 二段馬蹄形積層磁気回路の外観写真

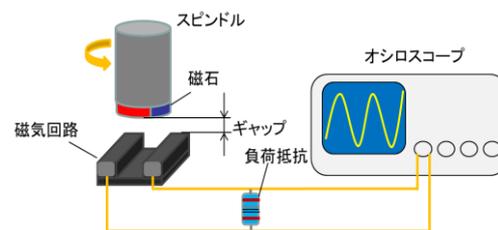


図6 積層磁気回路の発電評価

発電実験は回転数 38000rpm のスピンドルに永久磁石を取り付け、磁気回路と磁石とのギャップを 100 μm とし、負荷抵抗を変化させ、オシロスコープで波形を計測した。実験の配置図を図 6 に示す。磁気回路のインダクタンスは 6.33kHz (38000rpm) の時 8.17 μH で直流内部抵抗は 0.528 Ω だった。負荷抵抗 0.512 Ω を接続した際に、電圧 28mV を得た。最大出力は 1.53mVA であった。

(4) 発電に対する考察

作製した MEMS エアタービン発電機の出力の概算においては磁石の磁束がすべてコイルに入ると仮定をしており、磁気回路の形状を考慮すると漏洩磁束が多く存在し、出力の損失を招いていると考えられる。そこで有限要素法を用いて磁場解析を行った。有限要素法を用いた磁場解析の結果を図 7 に示す。馬蹄形磁気回路は磁石上部からの磁束漏洩が多く確認でき、磁石近傍で短いループがあり、コイルを通過しないことによって、発電に寄与しない磁束があることが確認できる。このため出力の概算値が 19% であった大きな原因だと考えられる。

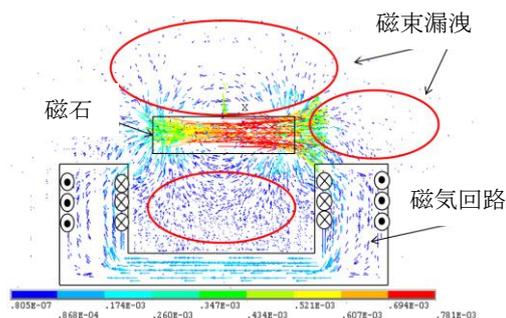


図 7 馬蹄形磁気回路の有限要素法による磁場解析

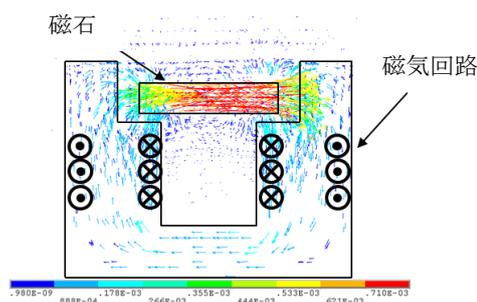


図 8 二段馬蹄形磁気回路の有限要素法による磁場解析

また、二段型の積層セラミック磁気回路の解析結果を図 8 に示す。単純な馬蹄形の積層セラミック磁気回路と比べると、二段型の方がより多くの磁束を取り込んでいることがわかる。これは二段型の磁性体が磁石を囲むように配置されているため磁束を漏れるこ

となく磁気回路に取り込んでいることから二段型のほうが高い出力が得られ、発電機の出力を上げるためには磁束を多く磁気回路に取り入れることが重要であると考えられる。

4. 研究成果

MEMS エアタービン発電機を作製し、空気圧 0.28MPa のとき最大回転数は約 58000rpm、出力電圧は 6.2mV、出力電力は 1.92 μVA という結果を得た。また、より高出力を目指して磁気回路の詳細な検討を行った。その結果、十分に低い内部抵抗 0.528 Ω を示し、最大出力 1.53mVA を得た。有限要素法を用いた解析から二段型の磁性体の形状をとることによってより多くの磁束を取り込むことができ、その結果、高い出力を得ることができたとかかった。

以上の結果は、3mm 角程度の非常に小さな発電素子において、数 mW クラスの発電を行える可能性を示している。現在は圧搾エアを外部から注入するという素子内部で完結をしていない発電方式であるが、たとえば、熱源と熱媒体を用いて、一種のランキンサイクルを形成することによって完結した発電システムを構築することができる。この場合、10mm 角程度の形状になることが見込まれ、体積比エネルギー効率を考えた場合、非常に有効な超小型電源が提供できると考えられる。これが実用になった場合、たとえば、小型電池の代替への道が開ける。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① M. Takato, A. Kenmochi, T. Fujino, K. Saito, F. Uchikoba, Patterning Technology of Ferrite and Insulating Material in a Single Layer of the Multilayer Ceramic Device, *New Journal of Glass and Ceramics*, 査読有, vol.2, 2012, pp.105-110, <http://dx.doi.org/10.4236/njgc.2012.23015>
- ② A. Iizuka, M. Takato, M. Kaneko, T. Nishi, K. Saito, F. Uchikoba, Millimeter Scale MEMS Air Turbine Generator by Winding Wire and Multilayer Magnetic Ceramic Circuit, *Modern Mechanical Engineering*, 査読有, vol.2, 2012, pp.41-46, <http://dx.doi.org/10.4236/mme.2012.22006>
- ③ A. Iiduka, K. Ishigaki, Y. Takikawa, T. Ohse, K. Saito and F. Uchikoba, Development of the Electromagnetic

Induction Type Micro Air Turbine Generator Using MEMS and Multilayer Ceramic Technology, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 査読有, vol.18, 2011, 09235, <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/18/9/092035>

日本大学・理工学部・教授
研究者番号：60366557

〔学会発表〕(計7件)

① 金子真人、遠藤弘彬、片山晃、高藤美泉、齊藤健、内木場文男、電磁誘導式 MEMS エアタービン発電機に用いる積層磁気回路についての検討、第27回エレクトロニクス実装学会春季講演大会、2013年03月13日～2013年03月15日、東北大学(仙台)

② M. Takato, A. Iizuka, M. Kaneko, T. Nishi, K. Saito, F. Uchikoba, Multilayer Magnetic Circuit for Millimeter Scale MEMS Air Turbine Generator, 2nd International Conference on Competitive Materials and Technology Process, 2012年10月08日～2012年10月12日、ミシュコルツ(ハンガリー)

③ 飯塚茜、高藤美泉、金子真人、西達也、藤野敏樹、見持亜樹、内木場文男、多層セラミックの異型成形と電磁誘導 MEMS 発電機への応用、セラミックス基礎科学討論会第50回記念大会、2012.1.13、(東京)

④ 飯塚茜、千葉城治、高藤美泉、齊藤健、内木場文男、積層セラミック技術を応用した MEMS マイクロ発電機の開発、平成23年度電気学会マイクロマシン・センサシステム研究会、2011.7.1、東工大(東京)電気学会優秀論文発表A賞(IEEJ Excellent Presentation Award)

⑤ M. Takato and F. Uchikoba, Patterning of Different Materials Inside LTCC Green Sheet Using Photo Resist Film, 2011 International Conference on Electronics Packaging, 2011.4.15, (奈良)

⑥ A. Iiduka, K. Ishigaki, Y. Takikawa, T. Ohse, K. Saito, F. Uchikoba, Development of the Electromagnetic Induction Type Micro Air Turbine Generator Using MEMS and Multilayer Ceramic Technology, ICC 3rd International Congress on Ceramics, 2010年11月16日、(大阪)

⑦ 飯塚茜、石垣克磨、滝川勇介、大瀬智昭、齊藤健、内木場文男、MEMS とセラミック磁性体を用いた超小型電磁誘導式エアタービン発電機の開発、マイクロエレクトロニクスシンポジウム MES2010、2010年9月10日、立命館大学(滋賀)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内木場 文男 (UCHIKOBA FUMIO)