

令和元年6月19日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18055

研究課題名(和文) 積層セラミック磁気回路を用いたMEMS発電機の開発

研究課題名(英文) Development of MEMS Power Generator Using Multilayer Ceramic Magnetic Circuit

研究代表者

金子 美泉(高藤美泉)(KANEKO, Minami)

日本大学・理工学部・助教

研究者番号：30755418

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題の目的は「積層セラミック技術とMEMS技術を組み合わせることでこれまで困難であった小型な電磁誘導式発電機を開発する」ことにあった。研究成果として、積層セラミック技術による立体配線と磁性コアをもつ三相磁気回路と、MEMS工程で作製したボールベアリングとリム型ロータを導入した回転数290,000rpmのタービンを組み合わせた5mm程度の小型電磁誘導式発電機を開発した。発電結果として、圧搾窒素を0.3MPa、2.9l/minの条件で流入したとき約3mVA(負荷抵抗3Ω)の出力電力を得た。今後は開発した発電機をランキンサイクルと組み合わせることで小型な発電システムの開発を行う。

研究成果の学術的意義や社会的意義

シリコンフォトリソグラフィを基本とするMEMSと粉体やペーストなどを基本とする積層セラミック技術を組み合わせることの先例は少なく、学術的な特色であるといえる。また、5mm程度で巻線なしで立体配線をもつ電磁誘導式MEMS電磁デバイスは異例であり、実用化も見込める。また、これらの実例を示すことでMEMSと積層セラミックを融合した新たなデバイスの可能性を示唆することができたといえる。社会的意義としては近年注目が集まるIoTデバイスへ向けた小型電源としての活用が可能となると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research was "Development of a miniature electromagnetic induction type generator by combining with the multilayer ceramic technology and the MEMS process".

We developed the 5mm scale miniature power generator. The developed generator had the magnetic circuit with a three-dimensional structure coil pattern and a magnetic core fabricated by the multilayer ceramic technology, and the MEMS turbine with a miniature ball-bearing and a rim-type rotor that showed the rotational speed of 290,000 rpm.

The output power of the fabricated generator was 3 mVA (load resistance of 3 ohm) when the inlet nitrogen gas was 0.3 MPa and 2.9 l/min. In the future work, we develop the miniature power generation system that combined with the developed MEMS turbine generator and the Rankine cycle.

研究分野：微細化技術

キーワード：MEMS タービン 電磁誘導 積層セラミック 磁性体 小型化

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

研究開発当初の背景として、小型発電機の需要の高まりが挙げられた。PC やスマートフォンに代表されるような通信機器や、低侵襲医療や補助を目的とした医療機器においては小型化が重要である。従来では小型電源としてリチウムイオン二次電池やボタン電池が多く用いられている。特にリチウムイオン二次電池はエネルギー密度が高く、充放電により繰り返し利用できることから廃棄物が少ないという特徴がある。しかし、近年の通信機器では小型化だけでなく高機能化が求められることからより大容量の電池が必要になる。リチウム電池のエネルギー密度はすでに理論的限界に達しつつあることから新たな小型電源の開発が必要であるといえる。

小型電源の研究は様々な手法で行われているが、我々はシリコン材料を用いた MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) に着目した。微細加工技術のフォトリソグラフィプロセスを基本とした MEMS は IC 作製技術を応用した技術であり、微細平面構造を形成するのに適した分野である。また、IC と同じシリコン材料を用いていることから整合性が良いため小型センサなどに多く用いられている技術である。近年では機械部品として用いる研究も多く発表されており、発電等を目的としたパワーMEMS の分野で盛んに研究がなされている。MEMS は半導体作製技術を基礎としているため平面構造に微細パターンを形成することを得意とする。そのため MEMS 分野での発電機では平面構造との相性のよい静電方式が主流として用いられている。静電方式ではエレクトレットや圧電体など様々な材料を用いた研究などもされているが、電荷の飽和の問題や出力インピーダンスが高いことから発電機として大きな出力を得ることが難しいといったことが課題となっている。一方で、従来から実用化されているような大型の発電機においては電磁誘導方式が一般的に用いられている。MEMS においても実用的な出力が見込める電磁誘導方式を導入する研究が報告されているが、巻線構造を用いた磁気回路の小型化が困難であることや、立体構造を持つ磁気回路の形成が MEMS では達成困難であるといった課題がある。これに対し MEMS 分野では平面構造を基本とし、蒸着、メッキ等でシリコン上にスパイラル形状のコイルを形成する手法が多く試みられている。しかし、平面方向に展開するパターンは巻き数の増加と小型化の両立、内部抵抗の低抵抗化に課題が残っていた。

### <引用文献>

- A.H.Epstein、 Millimeter-Scale MEMS Gas Turbine Engines、 Proceedings of ASME Turbo Expo 2003 Power for Land, Sea and Air、 GT-2003-38866、 2003、 1-28
- I. V. Knyazev, V. Y. Dorzhiev, A. V. Gluhov and A. A. Panova Zohar、 Development and Manufacture of Electrostatic Capacitive Energy Harvesting Device、 15th INTERNATIONAL CONFERENCE ON MICRO/NANOTECHNOLOGIES AND ELECTRON DEVICES EDM 2014、 2014、 51-53
- F. Herrault, C. Ji and Mark G. Allen、 Ultraminaturized High-Speed Permanent-Magnet Generators for Milliwatt-Level Power Generation、 JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEM、 Vol.17、 No.6、 2008、 1376-1387

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、5mm 程度と小型な電磁誘導式発電機の研究開発を行うこととした。小型化においては発電機を構成する機械部品と磁気回路のそれぞれにおいて要素技術の確立が必要である。そこで、小型な機械部品をシリコンフォトリソグラフィプロセスを基本とした MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) で形成し、小型な磁気回路を粉末冶金技術の積層セラミック磁性素子を導入する。粉体を基本材料とした積層セラミック技術を用いることで巻線構造と同様の立体配線を行った小型磁気回路を実現し、従来の平面を基本とする MEMS では難しかった小型・高性能化の問題を解決する。また、磁性セラミックを用いることでコアの形成も可能となる。これら異なる二つの技術を組み合わせることで従来の MEMS 発電機では困難であった磁気デバイスの小型化と高効率化を実現する。具体的には小型電源として 5mm 程度の電磁誘導式 MEMS エアタービン発電機を開発し、発電実験を行うことを目的とした。

### 3. 研究の方法

それぞれ MEMS と積層セラミックの機構、構造、プロセスの各々について要素に分けて開発を行い、得られた研究成果を活用して電磁誘導式 MEMS 発電機の開発を行った。具体的には小型で高出力な発電機を得るために (1) MEMS 部品における回転機構と軸受け機構の検討、(2) タービンと磁気回路の一体化における磁束漏えい抑制のための形状最適化、(3) 磁気回路の高効率化の 3 つに着目し、それぞれの設計および試作、工程の確立を行った。以下にそれぞれの項目について方法を述べる。

#### (1) MEMS 部品における回転機構と軸受け機構の検討

MEMS 技術で作製するエアタービン部分は高アスペクト比ディープエッチングのボッシュプロセスを基本とした作製プロセスを用いて高精度形成を行った。これにより微小な構造部品として利用可能なシリコン部品を得る。また、タービンの高速回転を目的に、軸受け機構およびロータのタービン翼の構造について検討・試作を行った。試作したタービンは回転数、安定性について評価を行った。

## (2) 磁束漏えい抑制のための形状最適化

積層セラミック技術で形成する磁気回路において出力低下の原因の一つである磁束の漏えいを減少するために、磁気回路の形状と磁石に対する配置の設計を有限要素法により解析を行った。また、磁気回路と磁石のギャップが出力に大きく影響することがこれまでの研究で明らかとなっていることから、MEMS エアタービンと組み合わせる際の形状と距離も検討し、発電機全体の設計に反映した。

## (3) 磁気回路の高効率化

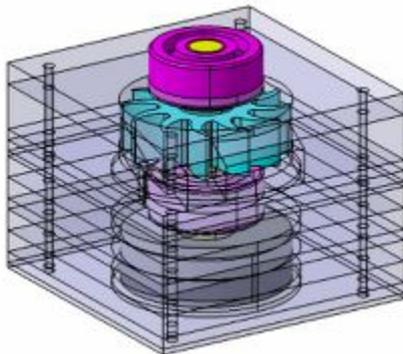
磁気回路の高効率化については単層コイル形状の磁気回路と三相コイル形状の磁気回路に分けて検討を行った。また、高速回転を実現することで影響が懸念されるコイルの抵抗についても磁性材料の透磁率やコイルの巻き数の検討を行った。

## 4. 研究成果

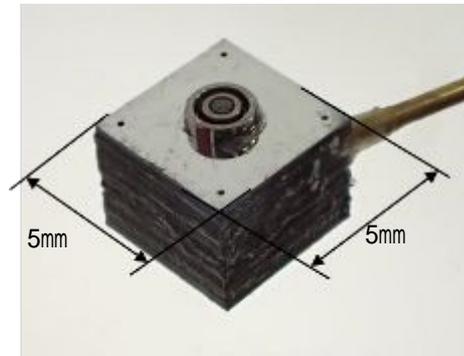
研究成果として下記にそれぞれの項目ごとに記載する。

### (1) MEMS 部品における回転機構と軸受け機構の検討

タービンについて高速回転化のために小型ボールベアリングを導入したエアタービンの設計・開発を行った。これまでの研究では軸受に空気軸受機構を用いていたが、空気軸受機構では回転時のロータが偏心運動を示すことから高速回転を抑制していると考えられたため、ボールベアリングを導入した機構の設計をすることで回転時の偏心運動を抑制した。これにより空気軸受けを用いたタービンでは 18,000 回転であったのに対し、ベアリングを導入したタービンでは同条件で 22,700 回転を得た。また、タービン翼の形状についても検討を行った。これまでの MEMS タービンにおいて一般的であった平面形状のタービン翼ではなく、リム形状のタービン翼の設計を行った。最終的な設計として、タービンの上部と内部に 2 か所ベアリングを配置し、ベアリングを介してリム型ロータとリング状の磁石を配置した構造とした。図 1 に作製したタービン、図 2 に回転実験のグラフを示す。タービン単体において、圧搾室素を用いて回転実験を行った結果、最大回転数は 0.3MPa、2.4ℓ/min の時 348,840rpm を得られた。



タービン模式図



作製したタービン

図 1 開発した MEMS タービン

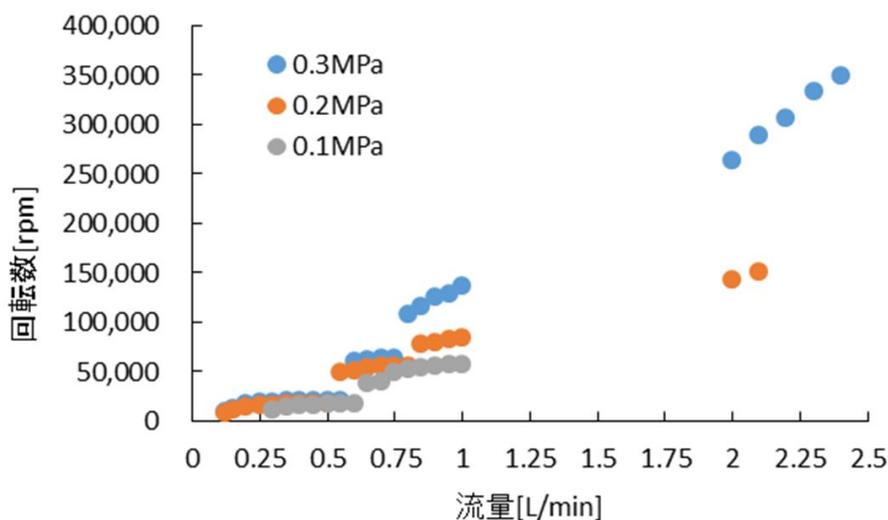


図 2 MEMS タービンの回転実験結果

## (2) 磁束漏えい抑制のための形状最適

タービンと磁気回路の一体化においての問題点は磁石と磁気回路間のギャップにおける磁束漏えいであった。本研究ではタービンにボールベアリングを導入し軸を介して磁石を接着している。このため磁石と磁気回路の位置関係を自由に設計することが可能となった。そこで、磁気回路形状について径方向に着磁した磁石と面方向に着磁した磁石の双方で設計・解析・検討を行った。径方向着磁の磁石についてはタービン下部から張り出した状態の磁石を取り囲むように磁気回路を配置する構造を検討した。また、面方向着磁の磁石についてはこれまでと同様に磁石下部に磁気回路を設置したが、流路を形成する必要がなくなったことからギャップをこれまでより狭くすることができた。それぞれの磁気回路の設計では磁束を効率よく取り込むためにコイル部だけでなく磁束を導入するような磁性材料の設計を行った。径方向着磁の磁石については囲い込み型磁気回路とし、磁石に対してコイル部まで磁束を誘導する凸形状の磁性体を形成した閉磁路とした。磁気回路とタービンを組み合わせて発電実験を行った結果、理論値の43%の出力にあたる出力電圧の206mV(負荷抵抗8 $\Omega$ )となった。有限要素法により磁束についてシミュレーションを行った結果、磁束を誘導する磁性体部分が磁石の円板形状に対して角柱の形状となっていることが原因と考えられた。そのため、磁石の形状に沿った曲面を持つ誘導部の形成が必要なることが明らかになった。

また、面方向着磁の磁石については磁石下部に形成する磁気回路を作製した。これについては磁石上部に漏洩する磁束を誘導するための磁性ヨークを磁石上部に取り付け、閉磁路に似た設計とした。設計した磁気回路について有限要素法による解析を行った結果、磁束が磁気回路に誘導されていることが確認された。また、空気軸受けでは磁石と磁気回路間のギャップが400 $\mu\text{m}$ 以上離れていたのに対して、130 $\mu\text{m}$ と近づけることに成功した。これにより磁束が効率よく導入されたと考えられる。

## (3) 磁気回路の高効率化

磁気回路の高効率化に関して単層型と三相型の2種類について検討を行った結果、単層型に比べて三相型の方が小型化・効率化に適していることが分かった。これは単層型では巻き数の増加に対する出力と抵抗となる直流抵抗値・インダクタンスのバランスが悪いことが考えられる。また、磁気回路について高速回転化にともない逆起電力の影響が懸念される。これまででも高周波に対応可能な透磁率900程度の低温焼成フェライト(Ni-Cu-Znフェライト)を用いていた。今後、例えば10倍程度の回転数向上を目指したとき、透磁率は100程度まで落とす必要があることが明らかになった。今後はこの検討も進めていく予定である。

## (4) 積層セラミック磁気回路を用いた電磁誘導式MEMS発電機

それぞれ作製したタービンと磁気回路を組み合わせて発電機として発電実験と回転実験を行った。図3に面方向着磁の磁石と三相磁気回路を組み合わせた発電機の写真、図4に負荷抵抗1k $\Omega$ を接続したときの発電結果を示す。作製した電磁誘導式MEMS発電機の寸法は6.17mm, 5.62mm, 7.12mmであり、重さは1.34gとなった。タービンは圧搾室素を0.3MPa, 2.90/minで流入したとき228,484rpmの最大回転数を得た。磁気回路はセラミックにフェライト、導体パターンに銀を用いた。コイルの巻き数は単層で27回巻、それぞれDC抵抗が0.85程度のものを3つ三相接続して磁気回路とした。図4の出力結果から三相で波形が出ていることが確認できた。また、出力電力は負荷抵抗3 $\Omega$ を接続したとき最大出力3.01mVAを得た。課題としては小型化することでタービン中の空気だまり等がロスになると考えられることから、作動流体の流入と排気について検討が必要である。

以上の結果より、これまで困難であった電磁誘導式発電機の小型化をMEMSと積層セラミックという異なる技術を組み合わせることで実現できたといえる。

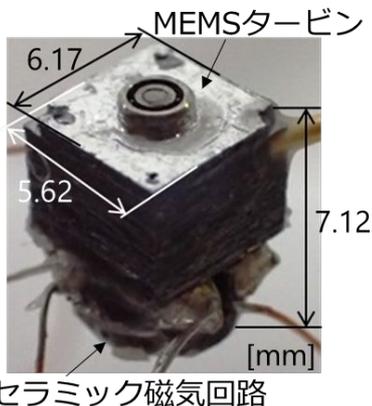


図3 MEMSタービン発電機



図4 作製した発電機の出力波形

また、研究を進めていくうえで小型発電機のユニット化が重要であることも明らかになった。そこで、今後は開発した MEMS タービン発電機を用いた小型ランキンサイクル発電機の開発を進める。これにともない、ランキンサイクルの流路部分を MEMS で作製する MEMS ヒートパイプについても今後研究を進める予定である。

## 5 . 主な発表論文等

### [ 雑誌論文 ] ( 計 4 件 )

K. Kudo, K. Ebisawa, K. Mishima, M. Takato, et.al., “ Development of MEMS Air Turbine Micro Generator with Ball Bearing Mechanism and Magnetic Material, ” Journal of Physics: Conference Series, Proceedings of 17th International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS 2017), 1052, online, 2018, 1-4 ( 査読有り )

URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1052/1/012090/pdf>

Minami Kaneko, Kazuya Kudo, et. al., “ Design and Fabrication of Electromagnetic Induction Type MEMS Generators with Ceramic Magnetic Circuit, ” 2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2018, 293-298 ( 査読有り )

DOI:10.23919/ICEP.2018.8374307

M. Kaneko, K. Mishima, K. Kudo, K. Ebisawa, K. Saito, F. Uchikoba, “ Development of Mountable Electromagnetic Induction Type MEMS Generator, ” Proceedings of 2018 International Conference on Electronics Packaging, 2018, 293-298 ( 査読なし )

DOI: 10.23919/ICEP.2018.8374307

K. Mishima, K. Kudo, M. Takato, K. Saito, F. Uchikoba, “ Development of Miniature Generator Combined with Magnetic Ceramic Material and Silicon Micro Air Turbine, ” Proceedings of the 12th Pacific Rim Conference on Ceramic and Glass Technology; Ceramic Transactions, 2018, 264, 87-98 ( 査読有り )

### [ 学会発表 ] ( 計 14 件 )

金子美泉, 工藤和也, 岡嶋航, 田中勝之, 内木場文男, “ 低沸点媒体を作動流体に用いた小型ランキンサイクル発電機の検討, ” 第 33 回 エレクトロニクス実装学会 春季講演大会, 2019

M. Kaneko, K. Kudo, K. Ebisawa, K. Tanaka and F. Uchikoba, “ MEMS power generator operated by fluorocarbon gas, ” Power MEMS 2018 Conference, 2018 ( 査読有り )

Minami Kaneko, Kazuya Kudo, Kazuki Ebisawa, Ken Saito, Katsuyuki Tanaka and Fumio Uchikoba, “ MEMS Air Turbine Generator with Ceramic Magnetic Circuit Aiming at Power Supply for IoT Edge Devices, ” The 5th International Conference of Competitive Materials and Technology Processes, 2018

金子美泉, 工藤和也, 海老澤和紀, 田中勝之, 内木場文男, “ 小型ランキンサイクルのための MEMS タービン発電機の開発, ” 第 35 回 「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 2018

Minami Kaneko, Kazuya Kudo, Kaito Mishima, Kazuki Ebisawa, Ken Saito, Fumio Uchikoba, “ Design and Fabrication of Electromagnetic Induction Type MEMS Generators with Ceramic Magnetic Circuit, ” 2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2018 ( 査読有り )

Minami Kaneko, Kaito Mishima, Kazuya Kudo, Kazuki Ebisawa, Ken Saito, Fumio Uchikoba, “ Development of mountable electromagnetic induction type MEMS generator, ” 2018 International Conference on Electronics Packaging and iMAPS All Asia Conference (ICEP-IAAC), 2018 ( アブストラクト査読有り )

金子美泉, 三島海斗, 工藤和也, 海老澤和紀, 佐村隆弘, 齊藤健, 内木場文男, “ ボールベアリングを導入した MEMS 電磁デバイスの開発と検討, ” 第 32 回エレクトロニクス実装学会 春季講演大会, 2018

K. Kudo, K. Ebisawa, K. Mishima, M. Takato, K. Saito, F. Uchikoba, “ Development of MEMS Air Turbine Micro Generator with Ball Bearing Mechanism and Magnetic Material, ” Power MEMS 2017 Conference, 2017 ( 査読有り )

金子美泉, 三島海斗, 工藤和也, 齊藤健, 内木場文男, “ 軸受機構を導入した電磁誘導式 MEMS 発電機のための積層セラミック磁気回路設計, ” 日本セラミックス協会 第 30 回秋季シンポジウム, 2017

三島海斗, 工藤和也, 金子美泉, 齊藤健, 内木場文男, “ 軸受け機構を導入した 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た 5mm 角サイズの電磁誘導式発電機, ” 電気学会平成 29 年度 E 部門総合研究会, 2017

Kaito Mishima, Kazuya Kudo, Minami Takato, Ken Saito, Fumio Uchikoba, “ Development of Miniature Generator Combined with Magnetic Ceramic Material and Silicon Micro Air Turbine, ” The 12th Pacific Rim Conference on Ceramic and Glass Technology, 2017

高藤美泉、三島海斗、工藤和也、齊藤健、内木場文男，“積層セラミック磁気回路を用いた電磁誘導式発電機の小型機構,” 日本セラミックス協会 2017 年年会, 2017  
Minami Takato, Kaito Mishima, Kazuya Kudo, Yuxuan Han, Ken Saito, Fumio Uchikoba,  
“ Monolithic Magnetic Circuit for MEMS Magnetic Device, ” the 42nd Annual Conference  
of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2016), 2016  
工藤和也、三島海斗、高藤美泉、齊藤健、内木場文男，“電磁 MEMS デバイスへ応用する積層セラミック磁気回路の開発,” 日本セラミックス協会第 29 回秋季シンポジウム, 2016

〔図書〕(計 1 件)

Minami Kaneko, Ken Saito and Fumio Uchikoba , IntechOpen, “ MEMS Sensors - Design and Application (Chapter 8), ” 2018, 171-188

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.eme.cst.nihon-u.ac.jp/~uchikoba/>

<http://kenkyu-web.cin.nihon-u.ac.jp/Profiles/119/0011839/profile.html>

6 . 研究組織

該当なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。