

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14214

研究課題名（和文）低沸点冷媒で駆動するMEMS超小型タービン発電機

研究課題名（英文）MEMS Micro Turbine Generator Driven by Low-Boiling-Point Refrigerant

研究代表者

金子 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） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は「100 以下の低品位な熱源で利用可能な循環型小型発電システムのための要素開発」であることから、小型化技術の一つである半導体製造技術を利用して発電システムを構成する機械部品の小型化を行った。また、低温排熱を利用するためにオーガニックランキンサイクルに利用される低沸点冷媒を作動流体に用いて発電システムにおけるタービンの回転実験や熱移動に関する解析を行った。この結果、タービン機構、流路、ボイラータンクにおいて1cm角程度のサイズを実現した。また、一つのシリコン構造体内部にこれらの要素を組み込んだモノリシック型発電システムについて設計と作製を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は交換作業が不要で持続的に利用可能な小型発電システムの開発を目的としている。これまでの環境発電の分野では主に振動エネルギーや太陽光エネルギーを利用した研究が多かったが、得られる電力や小型化における課題があった。このことから、従来の大規模発電に用いられる熱サイクルを1cm角程度の小型スケールで実現したことは今後の環境発電の発展に寄与できるといえる。また、狭小領域での流体の解析や熱解析については研究事例が少ないことから、シミュレーションと実現象の双方から解析を行う本研究の成果は学術的にも意義があるといえる。

研究成果の概要（英文）：Since the objective of this research is “development of elements for a circulating compact power generation system that can be used with low-grade heat sources below 100 degrees Celsius,” the mechanical components of the power generation system were miniaturized using semiconductor manufacturing technology, which is one of the miniaturization technologies. In addition, experiments on turbine rotation and analysis of heat transfer in the power generation system were conducted using a low-boiling-point refrigerant used in the organic Rankine cycle as the working fluid to utilize low-temperature waste heat. As a result, a size of about 1 cm square was achieved in the turbine mechanism, flow channel, and boiler tank. We also designed and fabricated a monolithic power generation system that incorporates these elements inside a single silicon structure.

研究分野：MEMS発電機

キーワード：発電システム 廃熱エネルギー オーガニックランキンサイクル MEMS 冷媒

## 1. 研究開始当初の背景

Society 5.0 で掲げられた「超スマート社会」の実現には情報技術の発展が必要不可欠となる。この基盤技術となる IoT (Internet of Things) は様々な物・事から情報を取得し、インターネットを介して情報のやり取りをすることによって新たなサービスや事業を創造することを目指している。このことから、IoT 化は産業分野だけにとどまらず人々の生活に密接にかかわる多くの分野で進められている。例えば日本国政府は IoT 技術を地域格差の解消とともに経済発展をも両立するその主要な手段として位置付けている。

IoT システムの情報収集には小型遠隔デバイスが必要であり、遠隔デバイスには必ず電源が必要となる。機器内部に組み込み主電源から供給される電力を利用することもできるが、頻繁に新規導入することのない製造装置や橋・トンネルといった電源の確保が難しい箇所での異常検知を目的としたものについては IoT システムのための小型電源が必要になる。一般的に用いられる小型電源として 2 次電池やボタン電池が挙げられる。これらはエネルギー密度が高く、多くの小型遠隔デバイスに用いられはじめている。しかし、電池を使用している限り交換作業が必要になり、このことが IoT 普及のボトルネックの一つになっている。そこで小型遠隔デバイス用電源としての要求をまとめると「交換作業を必要としないこと」「継続的に電源供給が可能であること」「小型・軽量かつ実用的な出力電力を実現できること」の 3 点となる。継続的な小型電源としてはすでに環境発電として多くの研究や実用化が進められている [1]。代表的なものでは腕時計などに用いられる振動発電機が挙げられるが、出力は nW から  $\mu$ W と小さい。遠隔デバイスではセンサーに mW クラスが必要なことから出力に課題が残る。一方、比較的大きな出力が期待される廃熱エネルギーを利用した環境発電では 300°C 以上の温度を必要とすることが多く小型発電システムとしては扱いが難しい。しかし、熱エネルギーについてはまだ未利用のエネルギーも多く、日本の産業分野における排ガス熱量のうち 100°C から 199°C の低品位な熱エネルギーは約 70% を占めるとされている [2]。また、電子機器内部では CPU の高温負荷時は 80°C 以上まで発熱する。熱サイクルによる発電として、水よりも沸点の低い低沸点冷媒を利用したオーガニックランキンサイクル (ORC) 発電機はすでに商用化されているが、機械加工を基本としておりサイズは小型なものでもメートルスケールとなる。熱を利用した小型発電システムとして、熱電素子による小型発電システムも研究されている [3] が、小型になるほど温度差を保つことが難しくなる。これらのことから、IoT 用遠隔デバイスのために小型かつ交換不要で廃熱を利用した小型発電システムの開発が必要であるといえる。

## 2. 研究の目的

本研究では 100°C 以下の低品位な熱源で利用可能な循環型小型発電システムのための要素開発を目的とする。システムの目標サイズは 1cm 角程度とし、IoT センサー類を駆動可能な 3mW の出力を得ることを目標としており、そのためには構成要素の小型化が重要となる。本研究では回転機構を含む機械部品に半導体製造技術を基本とした MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を適用し、立体配線が重要な磁気回路に積層セラミック電子素子作製技術を適用することで発電システムの小型化を図る。また、低品位な熱源を利用するため低沸点冷媒を利用することから、本報告では低沸点冷媒を作動流体とするための設計の最適化とマイクロ機構における作動流体の挙動解析を行う。

## 3. 研究の方法

1cm 角程度の循環型小型発電システムの構成要素であるタービン機構とボイラータンクの小型化・作動流体の流路形成に、MEMS 技術を採用する。MEMS 技術ではフォトリソグラフィ工程とエッチング技術によりシリコンへの微細加工が可能となる。冷媒の流路は通常銅などの熱伝導率の良いパイプ材料を用いるが、ここでは単結晶シリコンの高熱伝導を利用することで微細で熱伝導率をもつ小型構造を実現する。また、複雑な立体構造を得るために各シリコンウェハにパターンを形成し、積層することで 1cm 角程度の流路を含むタービン機構を設計・作製を行う。流路についてはシリコン内部に 3 次元方向に流路を形成する積層型と逆流を防ぐためのテスラバルブについて微細流路形成、有限要素法による流体解析、加熱実験を行う。作動流体に用いる低沸点冷媒は急激な膨張・圧縮によって相変化を引き起こすことから、有限要素法での流体解析と作製した微細流路での相変化について検討を行う。

開発した要素を集約したモノリシック構造の循環型発電システムの設計を行い、作製する。内部にタービン機構を組み込むために磁石を内蔵したタービン翼の開発も行う。開発したシステムについて、本年度はタービンの回転検証を行う。

## 4. 研究成果

### (1) 循環型発電システムにおける要素開発

循環型発電システムにおけるマイクロタービン、マイクロ流路について、流路をタービン回転機構の周辺に一体成型した構造の設計と作製を行った。得られた流路一体型タービンについて

図1に示す。作動流体として沸点 34°Cの低沸点冷媒をタービン機構に流入し、タービン機構の温度分布や排出時の冷媒の相変化を観察した。本実験では、流入側で温められ気相状態となった冷媒がタービン翼の収納されているケース部分に暴露され、さらに大気中に排出された際に断熱膨張で気液二相に変化している様子が観察された(図2)。また、これにより系全体が冷却され、液相となった冷媒により回転が抑制されることが明らかになった。流路一体型タービンの回転数の変化について図3に示す。排出された冷媒が気相を示していた時には最大で 76,923rpm であったが、液相に変化した際に回転数は最大 12,500rpm へと減少した。このとき、流入側は 80°Cの温水で冷媒の封入されている容器の加熱を行っていた。そこで、流路一体型のタービンについては排出される冷媒を回収する閉鎖系のシステムで流入・回転実験を行った。その結果、冷媒の顕著な相変化は見られず、回転数も安定していた。また、このとき加熱温度 80°Cで最大回転数が 113,207rpm を示し、回転動作が安定していることによる回転数の向上が確認された。以上の結果から冷媒の相変化は構造的にコントロールできることが示唆された。また、熱サイクルによる発電システムには復水器が必要であり、放熱は大きな課題であったことから、マイクロ構造を用いることで冷却が進みやすく、復水器の省略あるいは省スペース化が可能となると考えられる。また、開発したタービンについて磁性コアと巻線を組み合わせた三相の磁気回路を作製し、低沸点冷媒による発電を確認した。図4に出力電圧を示す。その結果、各相の負荷抵抗 0.5 Ωで最大回転数 109,090rpm で出力電力 968.5μVA を得た。

マイクロ流路についても同様に MEMS 技術とシリコン材料を用いて開発を行った。流路については 3 次元方向に流路を形成した積層型と平面方向に流路を配したテスラバルブ型の開発を行った。積層型流路はシリコン層に流路パターンと上下層の接続のためのビアを形成し、積層することでモノリシック構造のシリコン内部に 3 次元構造をもつ 1.0mm 幅の構造を得た。また、外形寸法は 6.0mm×10mm×3.7mm であった。また、低沸点冷媒を充填し外部から加熱・冷却を行い作動流体の移動と熱輸送について実験を行った。その結果、充填した積層型流路で加熱温度 40°C、冷却温度 20°C (室温) としたとき、吐出口から媒体の流出を確認できた。吐出された媒体は気液混合状態であり、サーモグラフィカメラでマイクロ流路の温度分布を確認したところ、作動流体がマイクロ流路内部に充填および流出している状態では高温側と低温側の温度差が維持されていた。これらの結果より、100°C以下の低温度帯でシリコンを用いたマイクロ流路でも媒体の相変化による作動流体の移動および熱輸送が可能であることを明らかにした。また、吐出口の圧力を実験により求めたところ、約 2.2kPa と理論値よりも小さくなった。これは排出口の損失によるものと考えられるため、今後はシステムを想定した測定環境を整える必要がある。一方で、流路の流体解析についてはテスラバルブについて最適形状を検討するために有限要素法により使用する低沸点冷媒の流体解析を微小領域において実施した。その結果、逆止弁の役割を示す最適形状が明らかになった。

低沸点冷媒の貯蔵と加熱をするためのボイラータンクについても 10mm 角程度の外形をもつ構造について設計・開発を行った。貯蔵タンク部分を外側から加熱するとタンク内部で相変化を起こす。その後、気相状態の低沸点冷媒を圧縮し運搬するための流路を経て外部に排出する構造とした。開発したタンクは内部に低沸点冷媒を貯蔵し加熱することで排出口からの気相での排出を確認した。また、貯蔵タンクに対して加熱する方向を変えることで排出量に差が出ることを流体解析と実験の双方から確認できた。開発したボイラータンクと上述した流路一体型タービンを組み合わせ、回転実験を行った。この結果、ボイラータンク加熱温度が 90°C以上で回転を確認し、110°Cのときタービンは最大回転数 4,310rpm を得た。

## (2) モノリシック構造をもつ循環型小型発電システムの検討

これまで開発を行ってきたタービン機構 (回転部)、ボイラータンク、流路についてモノリシ

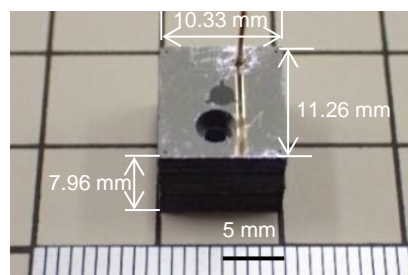


図1 流路一体型タービン

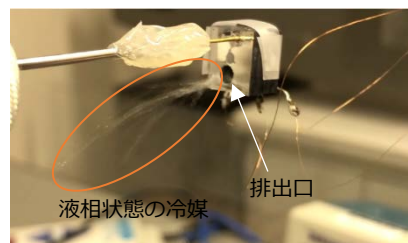


図2 液相排出の様子

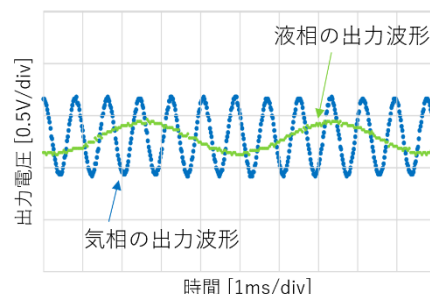


図3 回転数変化

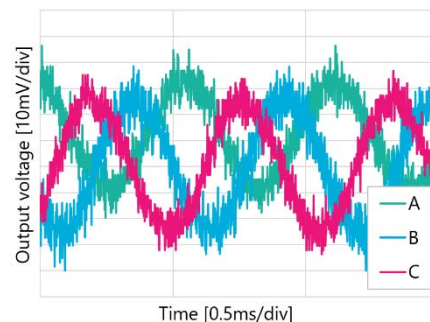


図4 巻き線三相磁気回路の出力電圧

ック構造内部に形成する一体化型の設計と作製を行った。この際にタービン構造についても低背化と磁石の内蔵化を行った。開発した低背・磁石内蔵型タービンについて外部より加熱した低沸点冷媒を流入し加熱温度が 82.9°C の時、約 50,000rpm を示した。研究期間を通して、小型循環型発電システムのシリコン化、タービン、流路、貯蔵部を含むボイラーの要素開発、さらにモノリシック構造での一体化の設計を行い、小型発電システムの実現性を示したといえる。

<引用文献>

- [1] S. P. Beeby, M. J. Tudor and N. M. White : “Energy harvesting vibration sources for microsystems applications”, Measurement Science and Technology, Vol.17, pp. R175–pp. R195 (2006)
- [2] 武田雅敏：「熱電薄膜を利用したフレキシブル熱電素子の開発 : 低温排熱からの電力回収の可能性」, 日本機械学会第4回マイクロ・ナノ工学シンポジウム講演論文集, pp. 37-38 (2012)
- [3] 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合技術開発センター, 「産業分野の排熱実態調査報告書」, (2019) (最終閲覧日: 2024年5月22日) chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.nedo.go.jp/content/100957934.pdf

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Minami Kaneko, Yuya Niki, Fumio Uchikoba
2. 発表標題 Development of MEMS Boiler Tank for Miniature ORC Power Generation System
3. 学会等名 9th International Conference on Sustainable Technology and Engineering 2023 (i-COSTE 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Minami Kaneko
2. 発表標題 Advanced Sensor & Microsystems Technology (MST)
3. 学会等名 International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology conference (IMPACT 2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 仁木雄哉, 阪本千紘, 金子美泉, 内木場文男
2. 発表標題 シリコン微細加工技術によるORC発電機の小型化
3. 学会等名 第33回マイクロエレクトロニクスシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Minami Kaneko, Yuya Niki, Kenji Takeda, Megumi Aibara, Fumio Uchikoba
2. 発表標題 Development of MEMS Flow Path for Miniature ,Waste Heat Utilization Generator
3. 学会等名 the 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Kaneko, K. Takeda, M. Aibara, F. Uchikoba
2. 発表標題 Development of MEMS Structures for Miniature Organic Rankine Cycle System
3. 学会等名 2022 International Conference on Electronics Packaging (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金子美泉, 仁木雄哉, 武田健嗣, 栗飯原萌, 内木場文男
2. 発表標題 ORC 発電システムのための流路一体型 MEMS タービンの評価
3. 学会等名 第14回 集積化MEMSシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 仁木雄哉, 阿部優希, 阪本千紘, 武田健嗣, 栗飯原萌, 金子美泉, 内木場文男
2. 発表標題 電子機器の廃熱利用を目的とした低沸点媒体とシリコンタービンによる有機ランキンサイクル発電機
3. 学会等名 MES2022 第32回マイクロエレクトロニクスシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Minami Kaneko, Yuya Kobayashi, Kenji Takeda, Megumi Aibara, Katsuyuki Tanaka, Fumio Uchikoba
2. 発表標題 Research and Development of MEMS Turbine Generator for Miniature Organic Rankine Cycle System
3. 学会等名 2021 IEEE 30th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金子美泉, 小林祐也, 仁木雄哉, 武田健嗣, 栗飯原萌, 内木場文男
2. 発表標題 熱回収を目的とした小型発電システムのためのマイクロ流路
3. 学会等名 第38回センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuya Kobayashi, Yuya Niki, Kenji Takeda, Megumi Aibara, Minami Kaneko, Fumio Uchikoba
2. 発表標題 Rotational Experiment of MEMS Turbine for Miniature Organic Rankin Cycle Generator
3. 学会等名 2021 IEEE 20th International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

日本大学 内木場・金子研究室 <a href="https://www.eme.cst.nihon-u.ac.jp/uchikoba/">https://www.eme.cst.nihon-u.ac.jp/uchikoba/</a>
---

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------