

## 小型シリコン ORC 発電システムにおける MEMS ボイラーの開発 Development of MEMS Boiler in Compact Silicon ORC Power Generation System

○仁木雄哉<sup>1</sup>, 阪本千紘<sup>1</sup>, 内田結愛伽<sup>2</sup>, 内木場文男<sup>3</sup>, 金子美泉<sup>3</sup>

\*Yuya Niki<sup>1</sup>, Chihiro Sakamoto<sup>1</sup>, Yumeka Uchida<sup>2</sup>, Fumio Uchikoba<sup>3</sup>, Minami Kaneko<sup>3</sup>

**Abstract:** A boiler for a miniature organic Rankine cycle (ORC) generator is developed. A power source of Internet of Things (IoT) devices requires a miniaturize and high output power. Therefore, the focus is on a miniaturization of the ORC generator, which use low-temperature waste heat and can be expected to produce high output. In this paper, the compact boiler as one of the components was fabricated by using a silicon microfabrication technology. A low-boiling-point material was used as the working fluid, and a discharge pressure of 2.222 kPa was obtained at a heating temperature of 82.1°C.

### 1. 緒言

センサ技術の発展や AI の高性能化によりモノ同士がインターネットを介して情報・制御のやりとりをする Internet of Things (IoT) 化が急速に進んでいる。現在 IoT デバイスの駆動用電源にはリチウムイオン二次電池等が利用されており、充電や交換作業が必要となっている。そこで、IoT デバイスの駆動用電源として交換作業を必要とせず、センサ等の駆動が可能な小型発電機が求められている。

小型発電機として、振動や太陽光、地熱等の環境中の微小エネルギーを利用するエネルギーハーベスタ発電機の研究が注目されている<sup>[1]</sup>。その中でも振動を利用した静電式や、圧力を利用した圧電式の発電機は、極小平面構造の形成が可能なシリコン微細加工技術である Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) 技術との相性が良いことから、多くの研究報告がなされている<sup>[2][3]</sup>。しかしながら、静電式や圧電式の発電機は、IoT デバイスへの常時電力供給を目的としておらず、出力電力は小さいことから、小型で高出力な電源の開発が重要である。

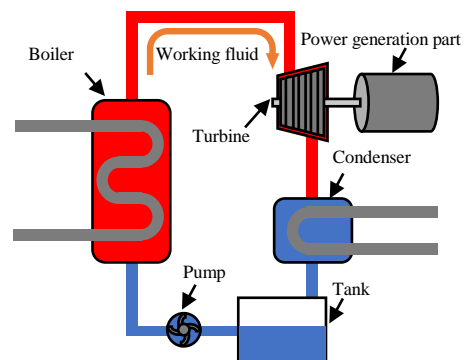
そこで、有機ランキンサイクル (Organic Rankine Cycle : ORC) 発電システムに着目した。火力発電などで用いるランキンサイクルが作動流体に水を用いるのに対し、ORC は低沸点媒体を用いるため廃熱利用が可能になる。また、蒸気圧に耐え得るのに必要な耐圧や機械強度を低く抑えることができることから、従来のランキンサイクル発電機に比べ構造として小型になる。また、発電方式に電磁誘導式を使用しており、出力インピーダンスがコイルの抵抗値となるため、高出力な電力を取り出しやすい利点がある。しかしながら、一般的に機械加工であり、工場等の廃熱を利用すること

から、市場に出ているものはメートルサイズであり、IoT デバイスの電源として用いるには大きすぎる。

そこで、我々は MEMS 技術を用いた ORC 発電システムの開発に注目した。これまで、3mVA 程度の発電量を目指し、10 mm 角程度のシリコンタービンと巻線コイルにより発電実験を行い、968.52  $\mu$ VA の出力を得た<sup>[4]</sup>。本研究では、小型 ORC 発電機の実現に向けて、作動流体の貯蔵及び運搬機能を一体化した MEMS ボイラーの開発を目的とした。

### 2. MEMS ボイラー

本研究はセンチメートルスケールでの ORC 発電システムの開発を目標としている。Figure 1 に目標とするシステムの概略図を示す。ORC 発電システムは、タービン、発電部 (磁気回路)、凝縮器、タンク、給水ポンプ、ボイラーからなる。



**Figure 1.** Schematic illustration of miniature organic Rankine cycle generation system

開発するボイラーは、ORC 発電システムにおけるタンクとボイラーを担う。ボイラーは、流入口と回収口が形成されており、MEMS タービンと組み合わせる設計となっている。

Figure 2 (a)に、ボイラーの模式図を示す。Figure 2 (b)に、ボイラー内部図を示す。ボイラーの機能としては、貯蔵部に液相時の低沸点媒体を貯め、圧縮部で気相時の低沸点媒体の圧力を高めてタービンへ流入することができる。Figure 3 に作製したボイラーの外観を示す。MEMS 技術でパターンを形成したシリコンをシアノアクリレート系樹脂で接着し積層することで 8mm(長さ)、10mm(幅)、4.5mm(高さ)と小型な構造となる。流入口は直径 0.65mm, 回収口は直径 3.3mm, 貯蔵部の容量は 100mm<sup>3</sup>とする。

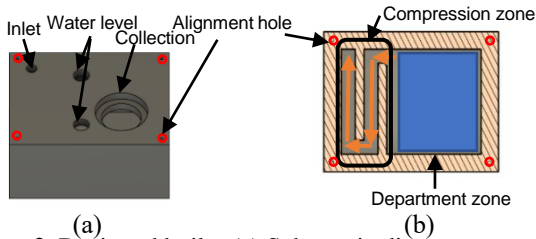


Figure 2. Designed boiler (a) Schematic diagram (b) Inside the boiler

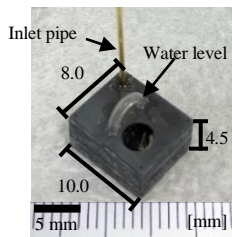


Figure 3. Photograph of the fabricated boiler

### 3. 吐出圧力測定実験

MEMS ボイラー内部に形成した圧縮部による、低沸点媒体の吐出圧力を測定する実験を行う。実験は、ボイラーに低沸点媒体を充填し、セラミックヒーターにより加熱した温水で外部からボイラーを加熱する。回収口にアクリル樹脂製の蓋をして、流入管上部にアクリル樹脂製の重りを乗せる。重りの浮上によりボイラーの吐出圧力を測定する。Figure 4 に実験の模式図を示す。

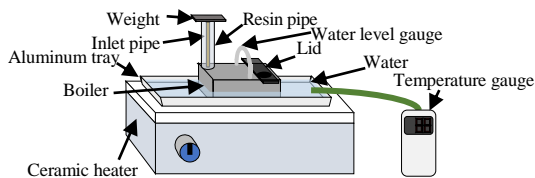


Figure 4. Discharge pressure experiment

### 4. 結果および考察

MEMS ボイラーによる吐出圧力測定実験の観察図を Figure 5 に示す。加熱温度 82.1℃で 0.0329g の重りが浮上した。流入管の直径は 0.43mm であるため垂直方向に対する圧力は 2.222kPa と考えられる。この結果より、ミリメートルスケールのボイラー内部で低沸点媒体が

気相に変化し膨張したことが確認できた。しかし、低沸点媒体を 80℃に加熱したときの気相時の圧力が 260kPa<sup>[4]</sup>であることから、大気圧を 101kPa とすると直径 0.43mm の流入管では 2.354g は持ち上げられる計算となる。これは、ボイラーから排出された際に低沸点媒体が断熱膨張により液相に変化したことが原因と考えられる。そこで今後は、ボイラーの流入管出口まで加熱し、気相状態で低沸点媒体を排出させ測定を行う。



Figure 5. Discharge confirmation

### 5. 結言

本研究では、小型 ORC 発電機の実現のため、MEMS 技術を利用しシリコン材料を基本とした MEMS ボイラーを設計・開発した。開発したボイラーは吐出圧力実験より、加熱温度 82.1℃で圧力 2.222kPa を得た。

今後、小型 ORC 発電機実現に向けて流入管から気相を吐出できるボイラーの構造の検討、MEMS タービンとボイラーによるサイクルの検討を行っていく。

### 6. 謝辞

本研究は日本大学マイクロ機能デバイス研究センター、日本大学理工学部理工学研究所先導研究推進助成金および令和5年度日本大学理工学研究所プロジェクト研究助成金の支援を受けた。また、科研費 21K14214 の助成を受けたものである。

### 7. 参考文献

- [1] S. P. Beeby, M. J. Tudor, and N. M. White: "Energy harvesting vibration sources for microsystems applications," Measurement Science and Technology, Vol. 17, No. 12, pp. R175-R195, 2006
- [2] 鈴木雄二: 「エレクトレットを用いた静電誘導型 MEMS 発電器」, 日本 AEM 学会誌, Vol.22, No.3, pp. 361-367, 2014
- [3] 神野伊策: 「振動エネルギーによる環境発電(振動発電)」, 表面技術, Vol. 67, No.7, pp. 348-352, 2016
- [4] 仁木雄哉ほか: 「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」, MES2022 第 32 回マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集, pp. 103-106, 2022