

小型ランキンサイクル用熱交換器の製作と評価

Construction and Evaluation of the Heat Exchanger for Downsizing Rankine Cycle

○河野峻祐¹, 田中勝之²*Shunsuke Kono¹, Katsuyuki Tanaka²

Abstract: In this research, the heat exchanger for downsizing Rankine cycle is constructed and evaluated. The heat exchanger made by 3D printer is wearable size of 100mm*200mm*30mm. The performance of this heat exchanger was 21W and 35.5W/m²·K. In addition, the capacity for turbine in Rankine cycle system can be estimated to be 0.3 W. It will be suitable for MEMS turbine.

1. はじめに

IoT デバイスの増加に伴う電力不足の解消および災害時での新たな小型発電機の開発を目的とし、本研究は、IoT デバイスのための超スマート発電機の研究開発を目的としている。発電方法は、低品位な熱エネルギーを利用したオーガニックランキンサイクル (ORC) とする。本報では、超スマート発電機の熱交換器部分の開発を担当し、3D プリンタで、低品位な熱源である人体の体温レベルで作動するウェアラブルな熱交換器の開発を行い、性能評価を行なった。

2. 製作した熱交換器

図1に製作した熱交換器を示す。熱交換器の大きさは、実際に背中に装着して使用することを踏まえ、厚さ30mm、横100mm、高さ200mmとし、肉厚を5mmとした。内容積は、縦20mm、最大高さ180mmとなり、質量は232gである。熱交換器に使用した主な物質は、markforged社のOnyxである。Onyxは、強靱なナイロンに微小なカーボンを加え強化した素材である。

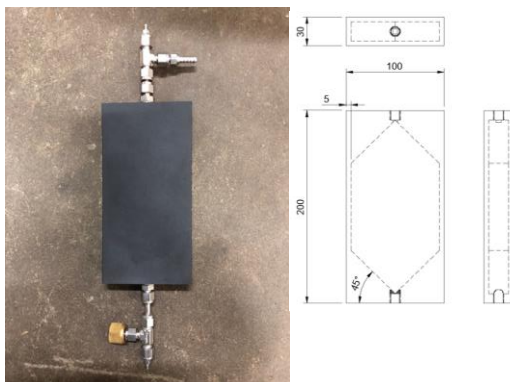


Figure 1. Figure of produced heat exchanger

3. 熱交換器の評価実験

図2に熱交換器の評価装置の概略図を示す。①での恒

温槽で⑤の熱交換器内に作動流体を循環させる。熱交換器の入り口と出口に熱電対を取り付け温度の測定をする。出口側に流量計を取り付け作動流体の流量を測定する。また、出口側に弁を取り付け流量の調整を行なった。②の恒温槽で水槽内の温度を調整し、一定温度になるようにする。実験方法として、冷媒での評価の前に作動流体を水として、評価をした。冷媒での評価実験で使用する冷媒は、HFE7000とする。評価方法は、20°Cの空气中に凝縮された飽和液に見立てた水を0.6l/minで流し、水槽内における熱交換器の周囲は、恒温槽を用い体温に見立てた、37°Cとした。この時の熱交換器の入り口温度と出口温度から、温度差を測定し熱量を算出し、評価を行った。

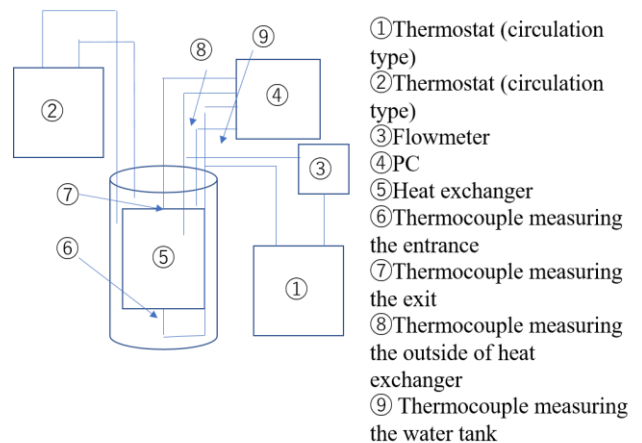


Figure 2. Schematic diagram of experimental set up

4. 結果

はじめに空气中で作動流体 20°Cの水を流した後に水槽内に熱交換器を入れた。図3に実験の結果を示す。図3は、そのときの評価実験の時間における入り口温度と出口温度の図である。入れた瞬間の挙動は不安定であったが、安定してからは、入口温度より出口温度の方が0.5K高くなり熱交換ができたことが確認できる。その結果から熱量 Q [W]を求めた。

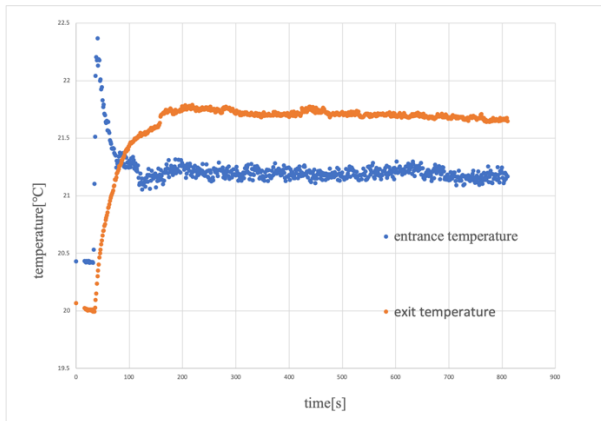


Figure 3. Temperature distribution of entrance and exit temperature of the heat exchanger

式(1)に単位時間あたりの熱量の式を示す。

$$Q=mc\Delta T \quad (1)$$

Q は熱量を表し, m は質量流量 $0.6\text{l}/\text{min}$, c は 20°C の水での比熱 $4.183\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ とし, ΔT は温度差である. 式(1)から, 熱交換器の吸熱量は 21W となった. また, レイノルズ数を導出した. 式(2)にレイノルズ数の式を示す.

$$Re=(U \cdot x)/\nu \quad (2)$$

Re はレイノルズ数を表し, U は質量流量 $0.6\text{l}/\text{min}$ であり, 内容積の面積 0.0018m^2 から流速は $0.006\text{m}/\text{s}$ である. 代表長さ x には厚さ 0.02m を, ν は水 20°C の動粘性係数 $1.00 \cdot 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ とした. これより, レイノルズ数は, 式(2)から 120 と算出した. これは極めて低速な層流であると考えられる. また, 熱交換器自体の熱通過率は, 熱交換器を水槽に入れてから測定された水槽内温度 36.4°C と入り口と出口温度の中間温度 22.4°C から式(3)で算出した.

$$K=Q/(A \cdot \Delta T) \quad (3)$$

ここで Q は, 熱量 21W , A は熱交換器両面を使用するため, 0.04m^2 であり水槽内との温度差 ΔT は, 14K である. 式(3)より熱通過率は $35.5\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ となった. 水での強制対流における参考文献値^[1] ($100\sim 15000$) と比べると最小値よりも低いが, レイノルズ数から極めて低速な層流であることを考慮すると, 実験値は妥当な値であると考えられる. 熱交換器は熱伝達が支配的であり, 3D プリントの材料である Onyx が樹脂で熱伝導が悪い素材ではあるが熱交換器としての役割が果たせると考えられる. 実際の使用では, 沸騰熱伝達となり, 今回の場合よりも 10 倍ほ

ど大きくなると見込まれ, 熱交換量は増えると推測する.

最後に, 本実験結果の熱交換量を用いた場合のタービンで得られうる性能を評価した. サイクルは, 蒸発温度を体温の 37°C , 凝縮温度を常温の 20°C で, 作動流体に沸点が約 34°C の HFE7000 を想定した. サイクルの循環量は, 蒸発器における熱交換量から式(4)で算出できる.

$$G=Q/h_1 \quad (4)$$

Q は, 熱量 21W , $G\text{kg}/\text{s}$ は, 質量流量であり, h_1 は HFE7000 が 20°C の飽和液から 37°C の飽和蒸気になるために必要なエンタルピーであり, $154\text{kJ}/\text{kg}$ である. この結果, 質量流量 G は $0.14\text{g}/\text{s}$ となった. また, タービンによって膨張して得られるエンタルピーは, 37°C の飽和蒸気が 20°C の飽和蒸気圧まで断熱膨張するときの等エントロピー変化の条件で 26.8°C の過熱蒸気になるので, そのときの熱落差 h_2 は $2\text{kJ}/\text{kg}$ となるので, タービンの出力は式(5)で求められる.

$$P=G \cdot h_2 \quad (5)$$

P はタービン出力で 0.3W となり, タービンの設計をこの情報を基におこなうことになる.

5. まとめ

本研究では, 以下の結果が得られた.

1. 3D プリントでウェアラブルな熱交換器を製作し, 作動流体を循環水で熱交換器を評価したところ, 熱交換量は 21W であった.
2. 熱交換器の熱通過率は, $35.5\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ となり, 一般的な強制対流の文献値と比べ, 小さい値であったが, レイノルズ数が低く, 妥当な値であり, 熱交換器としての機能は果たせることが確認できた.
3. 熱交換器の性能から使用可能なタービンの性能を算出し, 0.3W であった.

今後はランキンサイクル用作動流体を用いて沸騰熱伝達のモードで性能評価をおこなう予定である.

参考文献

- [1] JP ホールマン著平田賢監修:伝熱工学<上>, pp.13,1993

謝辞

本研究は, 平成 30 年度日本大学理工学部理工学研究所先導研究推進助成金の援助を受けました(プロジェクト題目:IoT デバイスのための低品位な熱源を利用した超スマート発電機の研究開発). ここに, 感謝の意を表します.