

# 細管内振動流を用いた蒸気サイクルに関する研究

## Research on Rankine cycle with oscillating flow in a micro tube

菅野 普 (東京大)

韓 榮培 (東京大)

鹿園 直毅 (東京大)

八束 真一 (デンソー)

新山 泰徳 (デンソー)

福田 健太郎 (デンソー)

A simple Rankine cycle using oscillating flow in a micro tube is investigated. The present cycle consists of heating, adiabatic and cooling sections with same inner diameter, and working fluid oscillates between heating and cooling sections. Pressure volume ( $P - V$ ) diagrams are obtained for tubes with inner diameters of 0.5, 1.0, and 2.0 mm. Heating temperatures are 200, 230, 260°C and cooling temperature is 80°C, respectively. The frequency of engine is varied from  $f = 2$  to 20 rps. Work can be effectively obtained with this simple and micro engine.

*Keywords: Micro tube, Boiling, Condensation, Rankine cycle*

### 1. 緒言

震災や化石燃料価格高騰等を背景に、エネルギー有効利用への機運が一層高まっている。現在のエネルギー利用は、燃焼による熱を経由した仕事や熱利用がほとんどであるが、数百度以下の熱はエクセルギー率が低いため、給湯以外の利用は必ずしも進んでいない。低温域でも適用可能な低コストでコンパクトな熱機関の開発が望まれている中、Yatsuzuka & Hagiwara [1]は、振動二相流を用いた新しい蒸気サイクルを提案している。本サイクルは閉じた管の軸方向に加熱部と冷却部を設け、加熱部での沸騰と冷却部での凝縮を繰り返す振動現象を仕事として取り出すものである。その特性は、沸騰や凝縮の伝熱特性に支配されており、その詳細な現象解明が必要であるが、一般に気液二相流は激しい気液界面変動を伴うため、その評価には大きな困難が伴う。一方、細管内二相流においては表面張力が支配的となるため、気液界面変動が抑制され、現象理解と設計が容易になる可能性がある。また、細管内熱伝達は、主として液膜からの蒸発及び凝縮によるので、液膜厚さが熱伝達率を決定する重要なパラメータとなる[2]。従って、この液膜厚さの非定常特性を明らかにすることが本質的に重要となる。

本研究では、振動二相流蒸気サイクルの基本特性を明らかにすることを目的に、内径 0.5 - 2.0 mm の細管内振動流を用いた蒸気サイクルの性能を実験的に評価した。

### 2. 実験手法

#### 2.1 実験装置

図 1 に実験装置の概略を示す。本実験装置はテストセクションであるガラス製細管とピストンおよびシリンダを垂直に配置し、上から順に、加熱部、断熱部、冷却部、ピストン-シリンダ、クランクから構成されている。本実験では、ピストンを用いてテストセクション内部の作動流体に正弦波状の往復流れを与え、

流動様式の観察および圧力変化を測定した。図 2 に、テストセクションの写真を示す。加熱部内で沸騰した作動流体は、ピストンの移動に伴いガラス製円管のテストセクションを通して冷却部に流入する。作動流体は冷却部で凝縮し、加熱部へ戻る。加熱部はアルミニウム製ブロックとし、内部の蒸発器の形状は内径と同形の円管とした。加熱は、加熱ブロックに装着したバンドヒーターで行い、温度調節器を用いて加熱部内壁面温度を一定に保った。断熱部はテストセクションと同軸のガラス製円管を外側に配置し、テストセクションとの隙間をシールして対流による放熱損失を抑制した。冷却部は、テストセクションと同軸のガラス管を配置し、テストセクションと外側ガラス管との間に冷却水を流した。凝縮は、冷却器の中だけで生じるように冷却器の長さを決定した。冷却水は恒温槽で温度制御を行い、ポンプで流量を制御し循環させた。作動流体には水を用い、圧力は冷却部の出口近傍で計測した。ピストンの位相と圧力から  $P - V$  線図を描き、図示仕事を算出した。

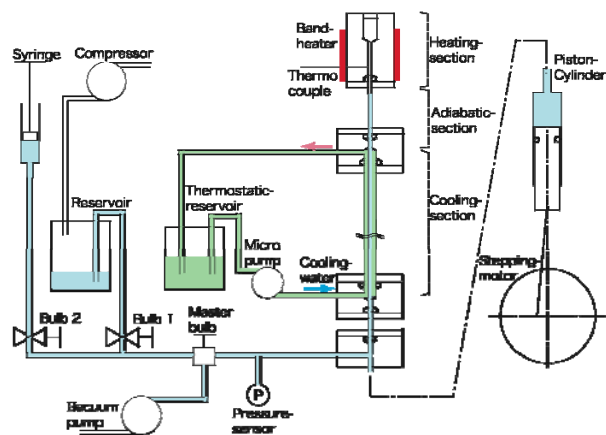


Fig. 1 Schematic of the experimental setup



Fig. 2 Test section

## 2.2 実験パラメータ

表 1 に実験パラメータを示す。ガラス管は、内径 0.5, 1.0, 2.0mm の三種類を用いた。加熱部温度は  $T_{\text{heat}} = 200 \sim 260^\circ\text{C}$ , 冷却水温度は  $T_{\text{cool}} = 80^\circ\text{C}$ , 凝縮が生じる冷却部の全行程容積に占める割合は  $R_{\text{cool}} = 44 \sim 62\%$ , 圧縮比は  $\varepsilon = 1.7 \sim 5.6$ , 駆動周波数は  $f = 2 \sim 20 \text{ Hz}$  である。

Table 1 Experimental parameter

|                            |                   |               |
|----------------------------|-------------------|---------------|
| 管内径 [mm]                   | $D_i$             | 0.5, 1.0, 2.0 |
| 加熱部温度 [ $^\circ\text{C}$ ] | $T_{\text{heat}}$ | 200~260       |
| 冷却水温度 [ $^\circ\text{C}$ ] | $T_{\text{cool}}$ | 80            |
| 凝縮容積比 [%]                  | $R_{\text{cool}}$ | 44~62         |
| 圧縮比 [-]                    | $\varepsilon$     | 1.7~5.6       |
| 駆動周波数 [rps]                | $f$               | 2~20          |

## 3. 実験結果

図 3 に、内径  $D_i = 1.0 \text{ mm}$ , 加熱部温度  $T_{\text{heat}} = 230^\circ\text{C}$ , 冷却水温度  $T_{\text{cool}} = 80^\circ\text{C}$ , 凝縮部容積比  $R_{\text{cool}} = 44\%$ , 圧縮比  $\varepsilon = 5.6$  の場合の  $P-V$  線図を示す。内径 1mm と非常に細い径の単管を用いたサイクルにおいて、図示仕事が取れることが確認できた。駆動周波数が低い場合は、上死点近傍で圧力が急上昇し、その後膨張過程で圧力が急激に減少して、圧縮過程では圧力が低いまま保たれた。駆動周波数の増加に伴い、加熱部内での圧力増加に遅れが生じ、また冷却部での圧力低下が生じにくく、膨張過程での圧力が全体的に高くなる結果となった。低駆動周波数では加熱部内での過熱解除による沸騰が支配的であるが、高駆動周波数では膨張過程で過熱部に残った液膜からの蒸発が支配的になるためと考えられる。また、高駆動周波数で圧力が増加するのは、作動流体のレイノルズ数が増加して管内に生じる液膜が厚くなり蒸発量が増加したこと[2], 熱伝達がサイクル周波数に対し相対的に悪化したため凝縮の不足が生じたためと考えられる。

図 4 に、加熱部温度  $T_{\text{heat}} = 230^\circ\text{C}$ , 冷却水温度  $T_{\text{cool}} = 80^\circ\text{C}$ , 凝縮容積比  $R_{\text{cool}} = 44\%$ , 圧縮比  $\varepsilon = 5.6$  の場合の図示仕事の駆動周波数依存性を示す。内径が大きいほどテストセクションの断面積が大きいため、図示仕事が大きくなる。また、図示仕事は 10 rps 程度までは増加し、それ以降では減少に転じている。内径 1mm のサイクルにおいて最大 1W 程度、内径 2mm のサイクルにおいて最大 3W 程度の仕事が取れることが確認できた。

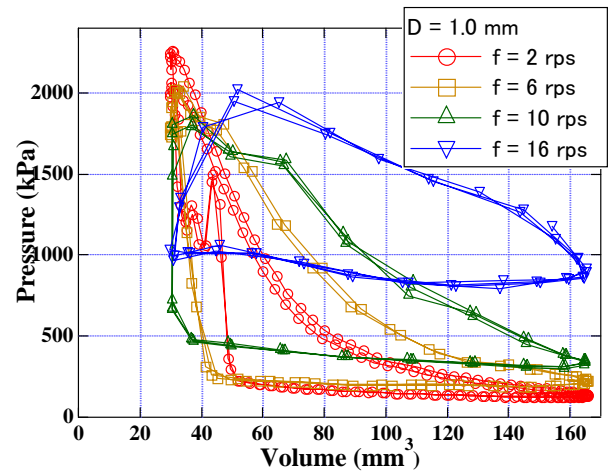


Fig. 3  $P-V$  diagram ( $D_i = 1 \text{ mm}$ ,  $T_{\text{heat}} = 230^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{cool}} = 80^\circ\text{C}$ ,  $R_{\text{cool}} = 44\%$ ,  $\varepsilon = 5.6$ )

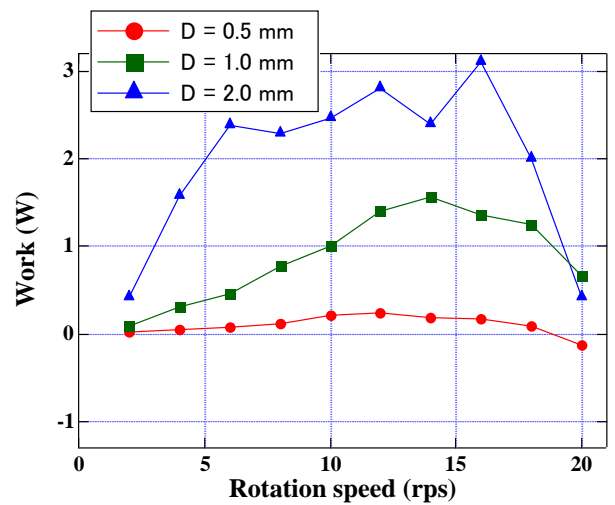


Fig. 4 Work ( $D_i = 1 \text{ mm}$ ,  $T_{\text{heat}} = 230^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{cool}} = 80^\circ\text{C}$ ,  $R_{\text{cool}} = 44\%$ ,  $\varepsilon = 5.6$ )

## 4. 結論

本研究では細管内振動流を用いた蒸気サイクルの実験及び計算を行い、以下の知見を得た。

1. 駆動周波数が低い場合は、上死点近傍で圧力が急上昇し、その後膨張過程で圧力が急激に減少して、圧縮過程では圧力が低いまま保たれた
2. 図示仕事は 10 rps 程度までは増加し、それ以降では減少に転じる
3. 内径 1mm のサイクルにおいて最大 1W 程度、内径 2mm のサイクルにおいて最大 3W 程度の仕事が取れることが確認できた。

## 参考文献

- [1] S. Yatsuzuka & Y. Hagiwara, United States Patent, US6931852 B2, 2006.
- [2] Y. Han and N. Shiakzono, Measurement of the liquid film thickness in micro tube slug flow, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 30, 2009, 842-853.