

ダブルループ型熱音響冷凍機の製作

○鷲見高雄¹⁾、琵琶哲志²⁾、上田祐樹²⁾、田代雄亮²⁾、涌井儀一²⁾、熊澤克芳¹⁾、小塚基樹¹⁾

¹⁾ 工学研究科・工学部技術部装置開発系技術系

²⁾ 名古屋大学大学院工学研究科

1 はじめに

熱から音が生ずる現象は、古くから知られているヘルムホルツ共鳴器と呼ばれるフラスコ状の共鳴器、レイケ管、釜なりなどがある。また外燃機関であるスターリングエンジンのほか、スターリング冷凍機やパルス管冷凍機など熱音響現象のひとつと考えられつつある。

広い空間を伝播する音波は、断熱的である。一方、「蓄熱器」と呼ばれる十分に狭い空間流路を通過するとき、流路の固体壁と音波を担う振動流体は熱交換をする。熱と音のからみ合う熱音響現象に対する研究が、本格化したのは最近のことで、ループ管^[1]、ループ管に共鳴管をつなげた系^[2,3]は熱音響スターリングエンジンとして動作することが報告されている。

今回、一方に熱音響原動機のループ管と他方に熱音響冷凍機用ループ管を共鳴管でつないだループ共鳴管ループという構成のダブルループ型の熱音響冷凍機を製作した。

2 装置の概略

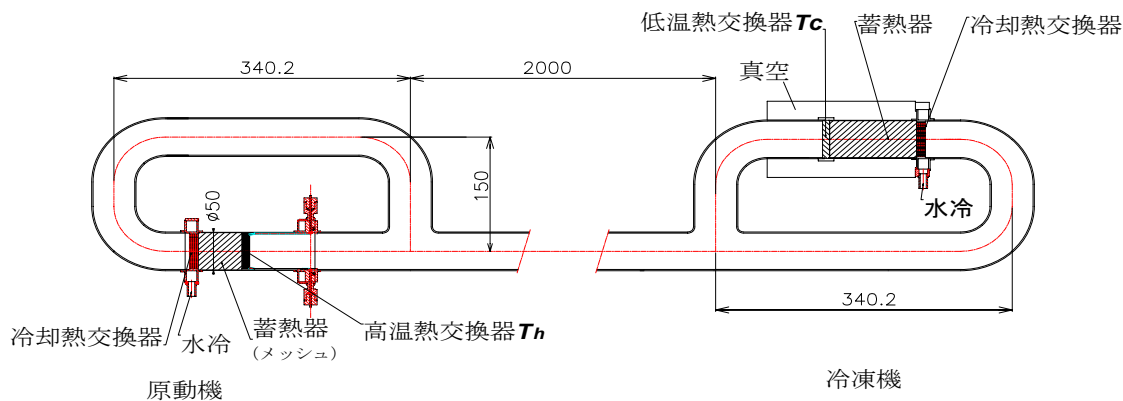


図1. ダブルループ型熱音響冷凍機外略図

図1に設計製作した熱音響冷凍機の概略図を示す。

両ループ管(周長約900mm)は、内径47.8mm、外径50.8mmのステンレス管(一部真鍮)をエルボで接続し、両ループを2.2mの共鳴管で連結した構造である。

原動機側ループ管には、高温・室温の熱交換器で挟んだ蓄熱器が配置されている。蓄熱器はステンレス製メッシュ(#60)を積層し、高温熱交換器(温度 T_H)としてシースヒータで加熱する。また、室温熱交換器は水冷され温度を一定に保つ。

冷凍機側ループ管内の蓄熱器も室温・低温の熱交換器で挟み込まれ、室温の熱交換器は原動機側と同様に水冷した。低温熱交換器(温度 T_C)は、真空断熱されている。

温度 T_H ・ T_C は、それぞれに接続されている熱電対で測定する。また、圧力は、冷凍機の共鳴管から450mmの位置に設けてある。アルゴン、ヘリウムおよびその混合気体を作動流体として封入する。

3 実験方法

熱音響原動機の高温度熱交換器ヒーターに通電し蓄熱器一端を熱する。そして、蓄熱器に温度勾配をつけていくとある一定以上の温度差で装置内部の流体は自励振動を発生する。発生した音波は、共鳴管を通して熱音響冷凍機の蓄熱器両端に温度勾配が生じ、ヒートポンプの機能が現れ低温熱交換器が冷却される。

実験のパラメータとして、1) 原動機蓄熱器の種類、2) 冷凍機蓄熱器の種類、3) 作動流体の平均圧力、4) 作動流体の混合割合、5) 共鳴管の長さなどが考えられる。

1) は、ステンレス製のメッシュ (#60) 積層長さ 40 mmとした。3) は、0.5MPa 以下とした。

4) は、粘性散逸を減らすため、プラントル数の小さいヘリウムとアルゴンの混合気体を使用した。その封入圧力や混合割合は温度 T_c が最小に、5) は装置内に生じる圧力振幅 P が最大となるように決定した^[4]。

2) 冷凍機蓄熱器の種類は、ステンレス製メッシュ (#24、#40、#60) をそれぞれ 50 mm積層したものと多数の正方流路で形成された長さ 50 mmのセラミックス製ハニカムについて、作動流体の平均圧力 (P_m) において入力熱量 (Q) を変え、高圧用圧力センサーを用いて圧力振幅 (P) と振動周波数を測定した。同時に、温度 T_H と T_c を JIS-SK 種熱電対で測定した。

4 実験結果

この冷凍機は、平均圧力 0.22MPa のアルゴンとヘリウムの混合気体 (混合比 15 対 85) を作動流体、冷凍機蓄熱器 (メッシュ #24) を使用した場合、入力熱量 Q がおよそ 80W の時、周波数 86.2Hz で動作し始める。

図 2・3 にダブルループ型熱音響冷凍機の性能を示す。図 2 は、高温熱交換器温度 T_H と圧力振幅 P を平均圧力 P_m で規格化して 2 乗したものを示している。図 3 は低温熱交換器温度 T_c を入力熱量の関数として示している。

温度 T_H は、入力熱量の増加とともに急上昇するが、380°C で自励振動が生ずると一旦少し下がり、発振前より徐々に上昇する。それに伴い圧力振幅 P が大きくなる。冷凍機低温熱交換器温度 T_c は、入力熱量 414W では -21.4°C に達した。

図 4 は、冷凍機用蓄熱器の種類、流路半径の異なるステンレス製メッシュ #24、#40、#60 とセラミックス製ハニカムを使用した場合の入力熱量に関する冷凍機温度である。

メッシュの方が良好な結果が得られた。 T_c は低く、流路を形成する固体壁と振動流体との熱交換は、ハニカムより良い。

ハニカムの流路 (一辺 0.61mm) は、その壁と熱交換する十分な狭さではない。それより広いメッシュ #24 (開き目 0.77mm) や #40 (開き目 0.42mm) がハニカム

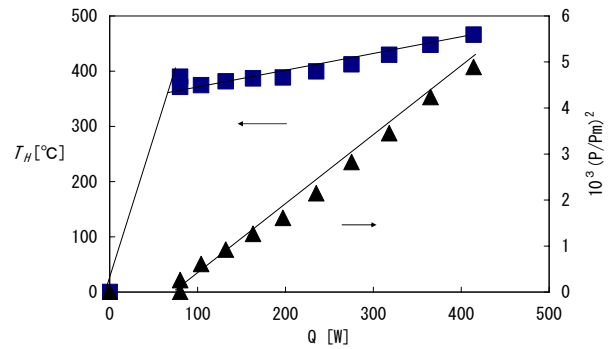


図 2. 原動機温度

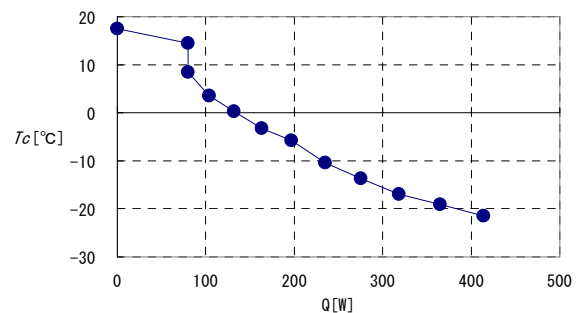


図 3. 冷凍機温度

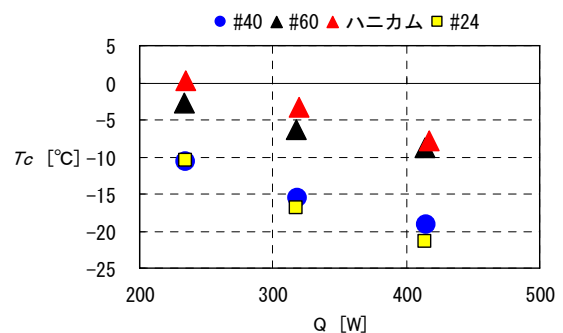


図 4. 蓄熱器と冷凍機温度

のようにそろった流路ではなく積層することにより流路が複雑になり、より熱交換されていると考える。

#24、#40 より流路の狭い#60（開き目 0.28mm）は、粘性散逸による損失が大きく到達温度が低下したと考える。それは、蓄熱器の積層する長さを短くして損失を軽減できる可能性があると考え、蓄熱器の長さについても今後検討していきたい。

図5は冷凍機の冷凍能力を示す。冷凍出力は、低温熱交換器の周りにヒーターを巻きつけ、通電し熱を加え徐々に T_c を上げて、ある温度に到達したときの加えている熱量を冷凍出力として測定した。

平均圧力 0.22MPa のアルゴンとヘリウムの混合気体（混合比 20 対 80）、共鳴管長さ 2.2m、冷凍機蓄熱器 #40 では、入力熱量 416W で圧力振幅 23kPa、冷凍温度 -16.9 度、0 度の冷凍出力は、8 W であった。

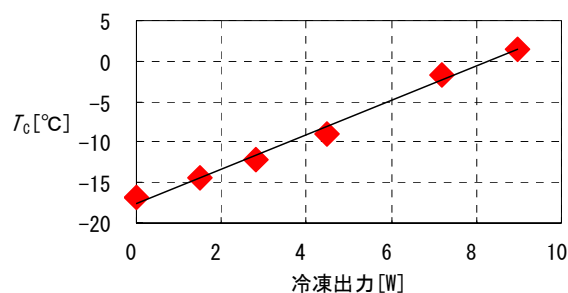


図5. 冷凍出力

5 まとめ

ダブルループ型熱音響冷凍機を製作し、直径 50.8 mm の管を用いた熱音響原動機と熱音響冷凍機を共鳴管で接続し音による熱輸送に成功した。平均圧力 0.22MPa で冷凍機到達温度は、-21.4°C であった。

今後は、原動機・冷凍機蓄熱器の種類や長さ、作動流体の圧力・混合比など最適化を行い、高効率の熱音響冷凍機の開発を行いたい。

この研究は、科学研究費補助金奨励研究によるものである。

参考文献

- [1] T.Yazaki, A.Iwata, T.Maekawa and A.Tominaga, PRL 81 (1998) 3128
- [2] S.Backhaus and G.W.Swift, Nature 399 (1999) 335
- [3] 上田祐樹, 琵琶哲志, 水谷宇一郎, 第 64 回低温工学・超伝導学会講演概要集 P30 (2001)
- [4] 鷲見高雄, 琵琶哲志, 第 65 回低温工学・超伝導学会講演概要集 P273 (2001)
- [5] 立花一志, et al, “大型熱音響冷凍機の開発”, 平成 14 年度東京大学総合技術研究会報告集, P4-4 -6 (2003)