

307 共鳴管型熱音響冷凍機に関する実験的研究

An experimental study on resonance thermoacoustic refrigerator

○学 村上 元一 (室蘭工大) 学 石川 和久 (室蘭工大) 正 戸倉 郁夫 (室蘭工大)

Motoichi MURAKAMI, Muroran Institute of Technology, 27-1, Mizumoto-cho, Muroran 050-8585
Kazuhiisa ISHIKAWA, Muroran Institute of Technology, 27-1, Mizumoto-cho, Muroran 050-8585
Ikuo TOKURA, Muroran Institute of Technology, 27-1, Mizumoto-cho, Muroran 050-8585

Key Words: Resonance pipe, Heat transfer, Stack, Heat exchanger

1. 緒言

熱音響現象は、熱と音波が関わる現象である。広い空間を伝播する音波では、媒質である流体は断熱的にしか振動運動しないため、熱と音の間でエネルギー変換は起こらない。狭い空間を伝播する音波では、流路を形成する固体壁と振動流体の間で熱接触を考慮することにより、熱と音の間にエネルギー変換が起こる⁽¹⁾。

小型軽量で、環境にも良い共鳴管冷凍機であるが、共鳴管の形状やスタックの寸法などがヒートポンプに及ぼす影響が明らかになっていない。本研究は、共鳴管冷凍機を試作し、共鳴管内に挿入するスタックや熱交換器が冷凍性能にどのような影響を与えるか、また最大の冷却効果が得られるようなスタックの設置条件を実験的に求めることを目的としている。

2. 実験装置および実験方法

2-1. 実験装置

Fig.1 に実験装置の概略を示す。共鳴管冷凍機はスピーカー (音響振動源)、共鳴管、共鳴管内に挿入されるスタック、熱交換器からなる。全長 500mm、外径 40mm、内径 32mm の共鳴管 (銅管、アクリル管) の中にセラミック製のスタックを挿入し、一端にスピーカーを配置して開端とし、他端を閉止した。パーソナルコンピュータの信号発生ソフトから発せられる正弦波はプリメインアンプにより増幅され、スピーカーから音波として出力される。この時、銅-コンスタンタン熱電対を使用し、スタック両端の温度測定をする。

実験におけるスピーカーへの入力電力は約 10W、共鳴管へ入力する共鳴周波数は実験的に求めた 160Hz (基本モード)、温度測定は 30 秒ごとに行なった。

本実験においては、スタックの形状、挿入位置、熱交換器の形状がスタック両端に生じる温度差にどのような影響を与えるか検討する。

2-2. スタックおよび熱交換器の形状

スタックには薄板を格子状に配置したセラミックス製の超薄壁ハニセラム (日本碍子製) を用いた。ハニセラム格子状の壁の厚さは非常に薄い (新聞紙 1 枚よりもさらに薄い約 0.05mm)。ハニセラムの壁を薄くすると、同じ容積でも表面積をより広くとれるので、熱音響冷凍機の性能を向上することが期待できる。スタック形状は 2.5mil/900cps (内径 約 0.45mm)、4.3mil/600cps (内径 約 0.59mm)、3.5mil/400cps (内径 約 0.72mm) の 3 つ、スタック長さは 100mm である。ここで、1mil は 1/1000inch の壁厚、1cps は 1 インチ平方あたりの流路数が 1 つあることを示す。

スタックの流路内で起こる熱交換は、音波の媒体である流体の熱緩和時間 τ と角振動数の積で定義される無次元量 $\omega\tau$ によって決定される⁽²⁾。熱緩和時間 τ はスタックの内部の流路内径 r と流体の熱拡散率 α を使って $r^2/(2\alpha)$ で与えられる。 $\omega\tau$ をエントロピー変動の径方向分布には熱拡散率と角振動数で決まる特徴的長さ、つまり音波を担う振動流体の熱境界層厚さ $\delta = \sqrt{2\alpha/\omega}$ を使って表すと次のようになる。

$$\omega\tau = \left(\frac{r}{\delta}\right)^2 \quad (1)$$

つぎに、実験で使用した熱交換器の概略を Fig.2 に示す。熱交換器には銅管内部に銅メッシュを堆積した (Heat exchanger 1) と銅板を蛇腹状に設置した (Heat exchanger 2) 2 種類を用いた。銅メッシュは 20 メッシュ (線形 $\Phi 0.29\text{mm}$) で、スタックに平行になるように 5 枚堆積したものである。銅板の厚さは 0.20mm で長さは 20mm、スタックに平行になるように銅板の間隔を 2mm にしている。これらの熱交換器をスタックの低温側、高温側のそれぞれに配置した。

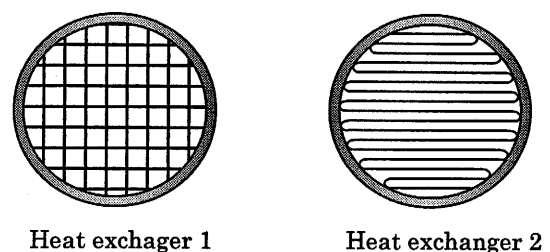


Fig.2 Heat exchanger

3. 実験結果および考察

3-1. スタックの設置位置の影響

スタックの設置位置が温度差の変化に及ぼす影響を検討するために、スタックの設置位置を 70mm と 250mm に変化させて実験を行なった。スタックの設置位置は共鳴管の閉止端からスタック中心までの距離である。つまり、スタック

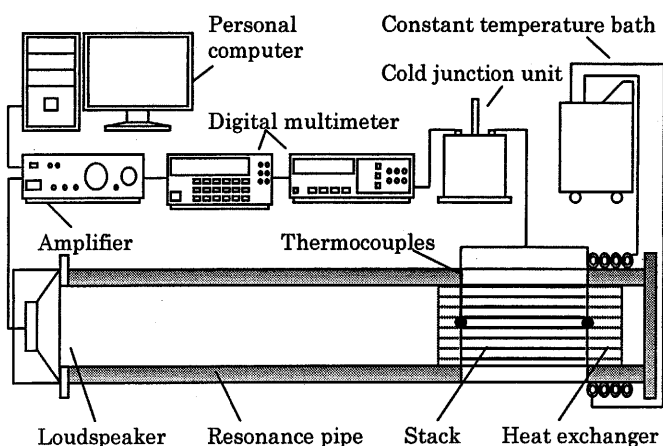


Fig.1 Experimental apparatus

の設置位置が 70mm のときは共鳴管の閉止端付近, 250mm のときは共鳴管の中央部付近である。挿入したスタックは 2.5mil/900cps, 100mm である。

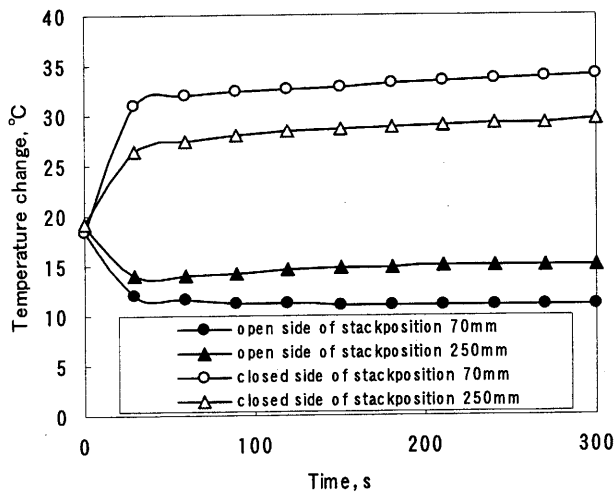


Fig.3 Effect of stack position

Fig.3 よりスタックを管中央部に設置した場合, 温度差は約 15°C で, 閉止端側に設置した場合は約 23°C である。一方で, スタックを閉止端側に設置した場合, 最大の温度降下は 9.3°C, 管中央部に設置した場合は約 5.1°C である。温度差, 温度降下ともスタックを閉止端付近に設置した場合に大きな値をとることが確認された。基本モードで振動を与えると閉止端に向かうにつれて管内の圧力振幅が増加していく, このために, 閉止端付近が最適なスタック設置位置になると考えられる。

3-2. スタック内の流路の影響

2.5mil/900cps, 4.3mil/600cps, 3.5mil/400cps, それぞれ 100mm の 3 種類のスタックを用いてスタック内の流路径が温度差の変化に及ぼす影響を検討した。スタックの設置位置は 70mm である。

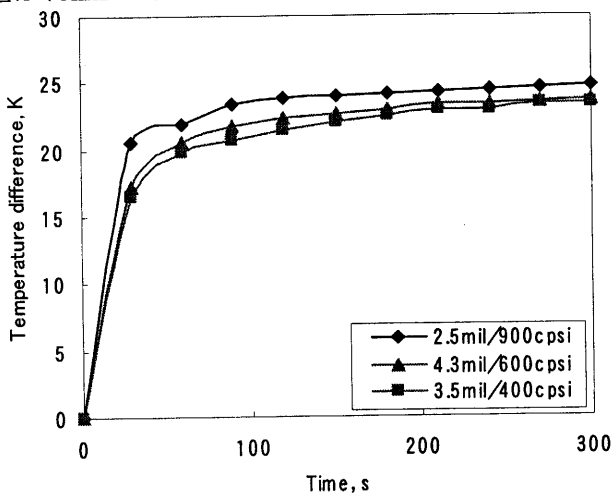


Fig.4 Effect of stack radius

Fig.4 より 2.5mil/900cps のスタックを用いた場合, 温度差は約 25°C となり, 最も温度差が大きいという結果が得られた。さらに, スタック内径が小さいほど温度差が大きい傾向があることがわかる。スタックの径が小さくなると, 圧力損失が増加すると考えられるが, 表面積が増加して熱輸送は効果的に行なわれる。しかし, どの径のスタックを用いた場合の温度差も僅差であり, ある程度小さな径のスタックであ

ればスタック径による影響は大きくないと推測できる。スタックを選定する際には, 無次元量 ωr に注目すれば良い。

3-3. 熱交換器の影響およびスタック高温側冷却の影響

Fig.2 に示した熱交換器をスタック高温側, 低温側に設置し, 高温側熱交換器を高温槽による冷却水で冷却する。そのときのスタック低温側の温度変化を測定し, スタック高温側の冷却がスタック低温側の温度降下に及ぼす影響を検討した。スタックは 2.5mil/900cps, 100mm。スタックの設置位置は閉止端から 70mm である。高温側の熱交換器は冷却水によって 5°C に保たれている。測定時間は管内気柱を振動させる直前, 振動させてから 30 秒毎の計 10 分間である。

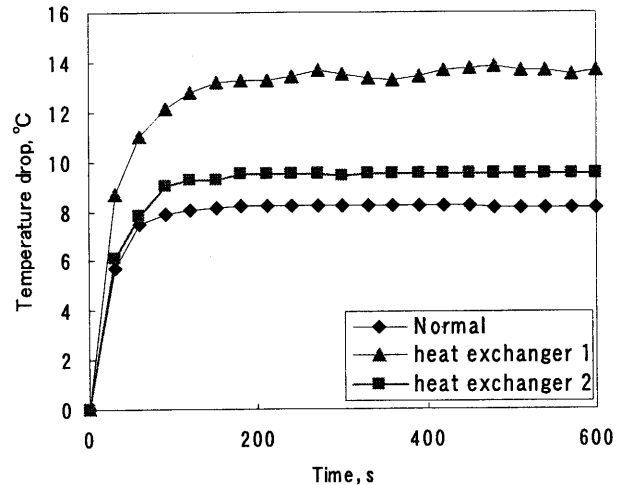


Fig.5 Effect of heat exchanger

Fig.5 より熱交換器を取り付けていない場合の温度降下の最大値は約 8°C, 熱交換器 (Heat exchanger 1) を取り付けた場合の温度降下の最大値は約 9°C である。熱交換器 (Heat exchanger 2) を取り付けた場合の温度降下の最大値は約 13°C である。熱交換器を取り付けたどちらの場合も通常の温度降下よりも大きな値を示した。熱交換器を取り付けた場合, スタックの高温側へ汲み上げた熱量を冷却水で除去できる。また, 熱交換器の内部構造によって冷却性能に大きな影響を与えることも確認できた。スタックと熱交換器の間隔は熱輸送に対して, 多大な影響を与える。この精度を高めて, より効果的な熱輸送を行なうことが今後の課題である。

4. 結言

共鳴管冷凍機の冷凍性能を向上させるため, スタックの設置位置の影響, スタック内の流路の影響, 熱交換器の影響およびスタック高温側冷却の影響について調べ, 以下の結果を得られた。

- 1) スタックを閉止端付近に設置した場合, 最大の温度差を得ることができた。
- 2) スタック径が小さいほど大きな温度差を得ることができた。
- 3) 共鳴管冷凍機において熱交換器の設置は有効であり, 本実験ではメッシュ状の熱交換器を用いた場合, 最大温度降下 13°C を得ることができた。

参考文献

- (1) 富永昭, 熱音響工学の基礎, pp1-2, 内田老鶴圃, (1998).
- (2) 琵琶哲志, 熱音響現象を使った新しい音響デバイス, 日本機械学会熱工学部門ニュースレター, (2003).