

414 音波を利用した熱移動に関する基礎的研究

Basical study of thermo transfer device using a thermoacoustical phenomenon

○ 正 松本大樹 (室蘭工大) 正 斉当建一 (室蘭工大) 宋 明宣 (室蘭工大院)
伊藤 健 (室蘭工大院) 白石 健介 (室蘭工大)

Hiroki MATSUMOTO, Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizumoto-cho, Muroran-shi, Hokkaido

Ken-ichi SAITOH, Myonson Son, Ken Itoh, Kensuke Shiraishi, Muroran Institute of Technology

This paper deals with the performance test for a prototype model of resonance-tube-type cooling device. In the experiment, it is examined that effects of the stack shape, stack length, stack position, operating frequency and operating sound levels on the cooling capability. Results of the experiment show that the temperature change of stack suddenly happened just after the output from sound source and it becomes fixed afterward. In addition, there is the most suitable stack position by a difference of the stack shape, stack length.

Key Words: Thermoacoustics Phenomenon, Resonance-Tube-Type Cooling Device, Stack

1 緒言

熱音響管は閉止管内の音響定在波を利用して熱エネルギーを取り出す装置である。音波は空気粒子を振動させるが、ある検査体積を考えると、それは断熱的に収縮膨張を繰り返すことになる。この熱音響強制振動現象を利用した装置に共鳴管冷凍機がある。この冷凍機は、音響振動源(スピーカー等)、音響管、音響管の中に挿入するスタックから構成され、小型軽量、構造の単純さ、摺動部がないなどの理由により高い信頼性能を持つという利点がある。

本研究では、この共鳴管冷凍機を試作し、スタック(蓄熱器)の形状・寸法および、挿入位置についてスタック両端の温度差の変化を測定する。これらの測定結果を比較して冷凍機の冷却性能へ及ぼす影響を調べ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 実験装置を図1に示す。実験装置は、音源であるダイナミックスピーカー、全長500mmの銅管(外径35.92mm、内径32.12mm)からなり、銅管の一端にスピーカーを配置し、他端を閉じたものである。管内には、図2のような格子状の空間を有するセラミック製のスタック挿入する。スピーカーは、シグナルジェネレータから出力された正弦波により駆動され、管内に定在波を発生させる。温度計測は、スタック両端に設置したK型熱電対を用いて15秒間隔で行われる。スピーカーへの入力電力は15Wで一定とした。なお本実験で用いる閉止管の共鳴周波数を実験で求めたところ、156Hz(1次)、498Hz(2次)となっており、それぞれの共鳴周波数において実験を行った。

実験においては、スタック形状、寸法および挿入位置を変化させ、スタック両端に生じる温度差に対する影響を検討する。

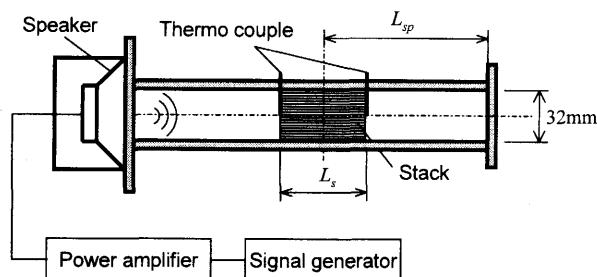


Fig.1 Experimental apparatus.

2.2 スタック形状 スタックには、図2に示すような格子形状の流路を持つセラミック(日本ガイシ製)を用いている。スタックの種類は格子を構成する流路寸法、壁厚および長さ(L_s)により決定され、表1のように呼ぶこととする。ここで、1milは1/1000 inchの壁厚、1cpsは1インチ平方あたりの流路数が1のことである。例えばA1のスタックの場合は、2.5mil/900cpsであるので、壁厚が2.5milで1インチに900個の流路がある格子形状で長さが50mmのスタックとなる。

なお、流路面積は2.5mil/900cps, 6.5mil/400cps, 4.3mil/400cps, 3.5mil/400cpsの順で小さい。

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_a と角周波数 ω の積で定義される無次元量 $\omega\tau_a$ によって決定される。熱緩和時間 τ は、蓄熱器の内部の流路半径 r_0 と流体の熱拡散率 α ($21.1 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$)より、

$$\tau_a \equiv \frac{r_0^2}{2\alpha} \quad (1)$$

で与えられ、音波を伴う振動流体の熱境界層の厚さ

$$\delta_a = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \quad (2)$$

を用いると、 $\omega\tau_a$ は、

Table 1 Classification table of stacks

Stack \ L_s	50 mm	100 mm	150 mm
2.5 mil/900cps	A1	A2	A3
6.5 mil/400cps	B1	B2	B3
4.3 mil/400cps	C1	C2	C3
3.5 mil/400cps	D1	D2	D3

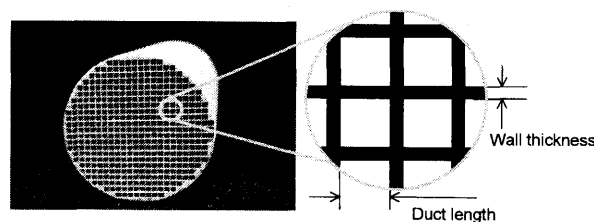


Fig.2 A photograph of a stack

Table 2 Dimensionless number of $\omega\tau_\alpha$

Stack	Frequency [Hz]	
	156	498
2.5 mil/900cps	2.7	8.6
6.5 mil/400cps	8.1	25.9
4.3 mil/400cps	7.8	25.0
3.5 mil/400cps	7.1	22.6

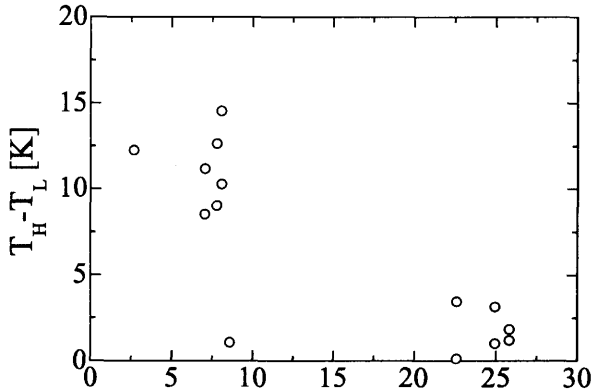


Fig.3 A plot of temperature difference vs $\omega\tau$

$$\omega\tau_\alpha = \left(\frac{r_0}{\delta_\alpha}\right)^2 \quad (3)$$

とできる。本実験で用いるスタックの $\omega\tau_\alpha$ は、 $f = 156\text{Hz}$ のときは、表2のように、2.7から7.1、 $f = 498\text{Hz}$ のとき8.6から22.6となる。

3 実験結果および考察

共鳴管冷凍機の性能の検討に関しては、スタックの両端の温度差を計測することによって明らかにする。

ここで、初期温度を T_I として、低温側の温度を T_L 、高温側の温度を T_H とする。スピーカー内に定在波を発生させると、音響管のスタックのスピーカー側が初期温度 (T_I) より低下し、スタックの閉止端側が初期温度より上昇する。低温側と高温側との差を温度差 ($T_H - T_L$ [K]) として、以下の実験結果は初期温度からの変化量である温度差によって示すこととする。

本研究で用いた様々なスタックと駆動音波の周波数の違いにより、温度差が出る場合とでない場合の両方が見られた。スタックの挿入位置を駆動音波の波長のおよそ 1/8 の位置とした場合に生じる温度差を、無次元数 $\omega\tau_\alpha$ で整理した結果を図3に示す。この図より $\omega\tau_\alpha$ が 10 以下においては大きな温度差が生じる結果となっていることがわかる。逆に $\omega\tau_\alpha$ が大きくなると、温度差が小さくなり、熱移動が出来なくなっていることがわかる。

3.1 駆動周波数の違いの影響 図4に駆動周波数が異なる場合のスタック両端で生じる温度差の時間変化について示す。スタックは 156Hz の駆動周波数では D3 のスタック、498Hz では A1 のスタックであり、 $\omega\tau_\alpha$ がほぼ同じ値のスタックを用いた。挿入位置は D3 が $L_{sp} = 250\text{mm}$ 、A1 が 83mm であり、双方とも駆動音波の波長のおよそ 1/8 の位置とした。さらに、スタックの長さは、駆動周波数の音波の波長との比を等しくするように選択した。図4を見ると明らかなように、いずれも温度変化は音波出力開始 (0sec) 直後から起こり、約 60[s] 後にはほぼ一定温度となっていることがわかる。また、周波数が低い 159Hz の 1 次共鳴周波数を用いた場合の方が、温度差が大きく現れて

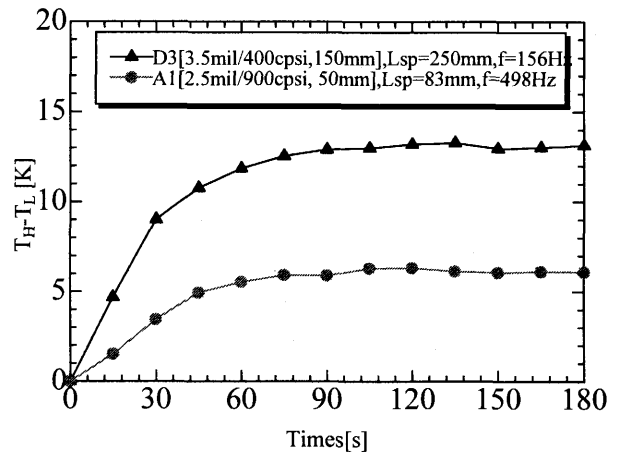


Fig.4 A plot of variations in temperature difference

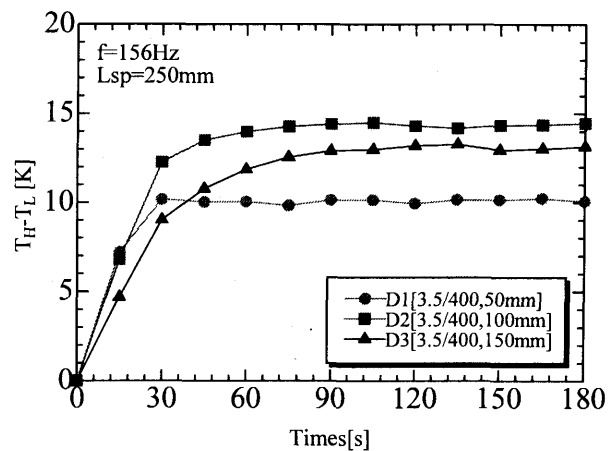


Fig.5 A plot of variations in temperature difference

おり、スタック両端で最大 10[K] の温度差を生じている。なお、2 次の共鳴周波数である 498Hz において、D3 のスタックを用いた場合には温度差は得られなかった。この場合には $\omega\tau_\alpha$ は非常に大きいことから、エントロピー変動が小さくなること予測され、流体とスタック間の熱交換を行うことができなかつたと考えられる。

このことから、同一の $\omega\tau_\alpha$ を有するスタック両端の温度差を大きくする為には、駆動周波数は低い方が適当であると考えられるため、以後 159Hz の周波数を用いて、スタックの長さ、種類および挿入位置について検討を行う。

3.2 スタックの長さによる違い スタックの長さが温度差の変化に及ぼす影響を検討するために、スタックを D1, D2, D3 に変えて実験を行った。駆動周波数は 156Hz、スタック位置 L_{sp} は 250mm ($1/8\lambda$: λ は音波の波長) である。実験結果を図5に示す。図5を見ると、スタックが D1 の時よりも D2 の時のほうが温度差は大きくなっている。これはスタックを長くすることにより作動流体と接する面積が大きくなり熱交換可能な領域が増加するためであると考えられる。しかし D3 ($L_s=150\text{mm}$) のスタックでは温度差が小さくなっている。これは、スタックを長くすることにより熱交換できる面積は増加するが、逆に作動流体の抵抗が増えて圧力損失が増加するためと考えられる。

3.3 スタック内の流路幅の違い つぎに、流路幅の影響を検討する。スタック内の流路数は B~D で同じ 400cps であり、1 インチ平方あたりで 400 個の流路を有している。このとき、壁厚が厚くなると流路が狭くなり、比較の対象とすることができる

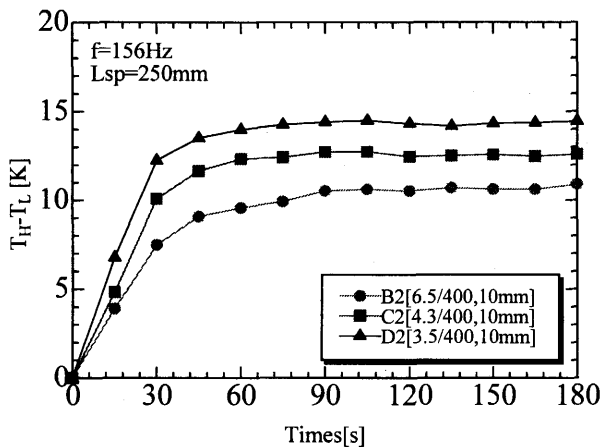


Fig.6 A plot of variations in temperature difference

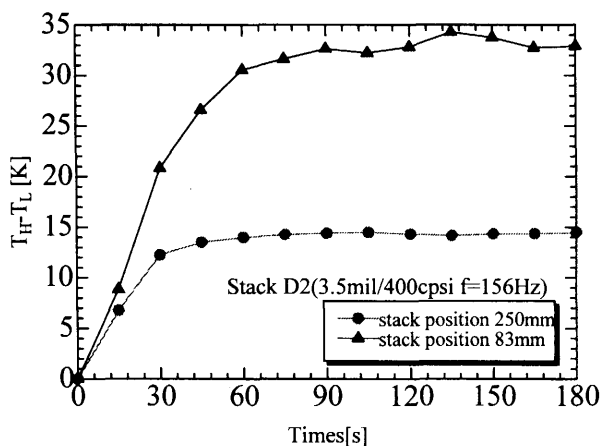


Fig.7 A plot of variations in temperature difference

と考えることができる。そこで、スタックの長さが $L_s=100\text{mm}$ と同じで、流路寸法が異なる B2,C2,D2 を挿入位置 $L_{sp}=250\text{mm}$ に挿入し、駆動周波数 156Hz で駆動する。

図 6 よりこの条件では温度差は D2 のスタックが一番良い結果が得られた。壁厚を薄くしていくことにより熱交換可能な面積の増加、作動流体の抵抗が減少することで、時間変化による温度差は流路半径が狭い時と比べ大きくなっていると考えられる。

3.4 挿入位置による違い 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、 $L_{sp}=83\text{mm}$ に変化させ実験を行った。スタックは最も温度差の出た D2 を使用する。スタック閉止端側と開口端側の温度差の時間変化を図 7 に示し、 $L_{sp}=250\text{mm}$ の場合と比較する。駆動周波数 159Hz での波長は音速を 340.1m/s とすると、 2.1m であり、その 8 分の 1 で 0.267mm である。すなわち、 $L_{sp}=250\text{mm}$ の位置では、閉止端から波長の $1/8$ 程度に挿入されているが、 83mm では、2 次の共鳴周波数である 498Hz の $1/8$ 波長の位置となっている。

図 7 を見ると、閉止端側にスタックを挿入した場合の方が温度差が大きくなっていることが明らかであり、最大で $34[\text{K}]$ の温度差が生じている。

一般にスタックの挿入位置は $1/8$ 波長の位置が適切といわれているが、今回の実験ではさらに閉止端側に近い位置で最大の温度差を示した。この原因については明らかではなく、今後の検討課題としたい。

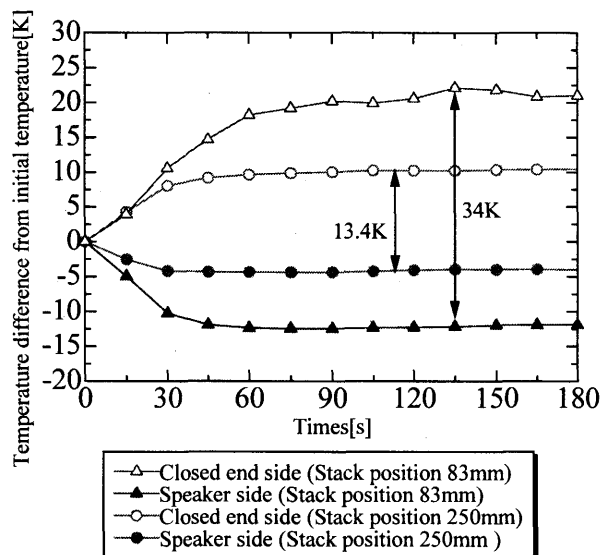


Fig.8 A plot of variations in temperature difference

4 結言

共鳴管型冷凍機を試作し、スタックの形状・寸法および、挿入位置について検討を行った結果、以下のことが明らかとなった。

1. スタック両端の温度変化は音源からの出力直後に急激に起こり、その後一定の値に収束する。
2. 最大の温度差を生じたスタック形状は、D2(3.5/400, 100mm)であった。
3. セラミック製スタックを用いた結果、15W の入力電力で駆動した場合に 34K の温度差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, 内田老鶴圃,1998
- (2) 琵琶哲志, 熱音響現象とそのエネルギー変換機構, 機械学会講習会資料, No.01-19,2001,p1-5