OS11-7

強制駆動時の熱音響現象における冷却特性とスタックの流路半径の関係について

Study on relationship between cooling performance and channel radius of stack in thermoacoustics with compulsive driver.

○ 辻良行, 坂本眞一, 石野貴廣, 渡辺好章 (同志社大・工)

Yoshiyuki TSUJI, Shin-ichi SAKAMOTO, Takahiro ISHINO, Yoshiaki WATANABE
Doshisha University, 1-3 Tatara Miyakodani, Kyotanabe City, Kyoto

Key Words: Thermoacoustic, Heat exchange in the stack, Phase difference ϕ , Channel radius, Non-dimensional parameter $\omega\tau$

A purpose of this study is to realize more effective heat exchange in the stack. The focus of this report is relationship between phase difference ϕ (between sound pressure and particle velocity in resonance tube) and channel radius of the stack. Phase difference ϕ means the ratio of the standing wave and the traveling wave on the position in resonance tube. On the other hand a non-dimensional parameter $\omega\tau$ is determined by channel radius of the stack and resonant frequency. Thus, In this study, relationship between $\omega\tau$, phase difference ϕ , and cooling performance is discussed with χ' and χ'' that depend on $\omega\tau$. Therefore, result of this study indicates when $\omega\tau$ was determined, the insertion position of the stack can be estimated by $\omega\tau$.

1. はじめに

従来の冷却システムにはない, 魅力的な利点を有する新しい冷却システムとして, 熱音響現象を利用した冷却システムであるループ管がある^[1-4]. ループ管は, 駆動エネルギー源に廃熱の利用が可能であること, フロンなどの有害冷媒が不要であることなど, 多くの利点を有している. ループ管ではプライムムーバにおいて熱から音へのエネルギー変換によって音波を自励発振し, ヒートポンプにおいて音から熱へのエネルギー変換により冷却を行う. プライムムーバとヒートポンプには, 共に非常に細い流路を有するスタックが設置されている. 熱音響冷却システムでの音と熱の相互エネルギー変換には, このスタックでの熱交換が極めて重要となる.

これまでに, 特にヒートポンプに設置したスタックでの熱交換に注目し, ラウドスピーカなどのコンプレッションドライバを設置した共鳴管を用いて研究を行ってきた^[5]. その結果, 優れた冷却特性を得ることが可能なスタックの設置位置は, 流路半径の変化に伴い変化するという結果を得た. その要因として, 管内の音圧 P と粒子速度 U の位相差 ϕ が異なると, 熱交換の良好さが変化すると考えた.

そこで今回は, 流路半径の値とスタックでの熱交換の良好さを関係付ける $\omega\tau$ ^[1, 3, 6]を用いて, 計算から予測される熱交換の良好さと, 実際の実験で得られた冷却特性の比較および検討を行った.

2. 原理

ヒートポンプでの冷却は, スタックの流路内において, 流路壁面と流体が熱交換を行うことで実現される. ゆえに冷却には, 流路壁面と流体の間における効率的な熱交換が重要となる. このような固体壁面と流体との間における熱交換の良好さの指標となる無次元量として, 次式で表される $\omega\tau$ が知られている^[1, 3, 6].

$$\omega\tau = \omega \frac{r^2}{2\alpha} \quad (1)$$

ここで r は流路半径, α は温度伝導率, ω は角周波数である. (1)式より, $\omega\tau$ は流体および温度が一定の条件下では, 流路

半径と周波数のみに依存する値であることがわかる.

また, 音圧と粒子速度の位相差が 0° よりわずかに大きい位置にスタックを設置し, 進行波成分だけではなく定在波成分も利用することでより効率的に熱交換が行われ, 優れた冷却特性が得られるという報告がされている^[6, 7]. 共鳴管内の音波は定在波成分が支配的となるが, 散逸がある共鳴管の中央付近では, 音圧と粒子速度の位相差 ϕ は $+90^\circ$ から -90° に反転する. ゆえに, 位相差 ϕ が反転する過程では位相差 ϕ が 0° となる領域が存在し, この領域では進行波成分が支配的となる. つまり, 位相差 ϕ が 0° から 90° の間で変化する領域を, 選択的に利用することで熱交換が効率的に行われ, 冷却特性が向上すると考えられる. スタックで効率的な熱交換が行われるためには, この $\omega\tau$ と位相差 ϕ の関係を考える必要がある.

3. 測定系

測定系を Fig.1 に示す. 共鳴管のドライバ側を前方, 管端を後方と定義する. 共鳴管は内径が 0.042 m, 共鳴周波数を変化させるため, 全長が 8.02 m および 3.3 m で閉端のものを用いた. 管の全長を 1 波長として共鳴させるため, ドライバの駆動周波数はそれぞれ 42.5 Hz, 100 Hz とした. 駆動周波数が 42.5 Hz での測定は, $\omega\tau$ が 0.7, 0.9, 1.3 と小さい値を持つスタックでの冷却特性の変化の測定を目的としている. 一方, 駆動周波数が 100 Hz での測定は, $\omega\tau$ の値が 3.1, 7.9 と大きい値を持つスタックを設置した場合の, 冷却特性の変化の測定を目的としている.

Fig.1 Block diagram of measurement system.

冷却特性としては、スタック後方の温度低下をK型熱電対を用いて測定した。今後、スタック後方の位置をスタックの設置位置と定義する。また管内の音場を管内の音圧をPCB社製の水晶圧力センサで測定し、2点の音圧測定値を用いて、2点間の中間の位相差 ϕ を解析した^[8]

4. 測定結果

4-1 駆動周波数 42.5 Hz の場合での測定

測定結果をFig.2に示す。 $\omega\tau$ が0.9, 1.3のスタックでは、4.2 mの位置に設置した際に最も大きい温度低下を得た。しかし $\omega\tau$ が0.7の場合には、冷却特性の向上する位置がその他に比べ、管の前方寄りの4.1 mの位置に存在する結果を得た。

Fig.2 Temperature decrease as a function of stack position distance from the compressor.

4-2 駆動周波数 100 Hz の場合での測定

$\omega\tau$ が3.1の場合では、スタックの設置位置が1.85 mの場合に2.6 °Cと最も大きい温度低下を得た。また、1.85 mの位置に $\omega\tau$ が7.9のスタックを設置した場合には、1.9 °Cと小さい温度低下しか得ることができなかった。

5. 考察

$\omega\tau$ が固体壁面と流体との間での熱交換の良好さの指標となるのは、 χ' と χ'' というパラメータがFig.3のような $\omega\tau$ 依存性を有しているためである^{[1], [6]}。

Fig.3 χ' and χ'' as a function of $\omega\tau$.

ここで χ' は進行波成分による熱交換の割合を示し、 χ'' は定在波成分による熱交換の割合を示す値である。ゆえに、スタックの $\omega\tau$ をスタックの流路半径および周波数から求めることで、どのような音場において最も熱交換が良好に行われるかを把握することが可能となる。

今回用いた $\omega\tau$ の χ' と χ'' の値をTable 1に示す。まず、 $\omega\tau$ が0.7と0.9, 1.3の場合の χ' と χ'' を比較すると、 $\omega\tau$ が0.7の場合では χ' が非常に大きく χ'' が非常に小さい。すなわち、この場合では熱交換に寄与するのは進行波成分が支配的となり、定在波成分はほとんど熱交換に寄与しないと考えられる。一方 $\omega\tau$ が0.9, 1.3の場合では χ' が減少し χ'' が増加している。この場合では熱交換に定在波成分を利用可

能であり、熱交換がより良好に行われると考えられる。

Table 1 Relationship between $\omega\tau$ and χ' , χ'' , ϕ .

$\omega\tau$	0.7	0.9	1.3	3.1	7.9
χ'	0.96	0.94	0.88	0.61	0.34
χ''	0.17	0.21	0.27	0.37	0.25
ϕ	-15	-65	-65	-85	-85

また共鳴管の4.1 mと4.2 mの位置での位相差 ϕ の分布は、それぞれおよそ-15°と-65°であった。この位相差 ϕ は、0°に近い値であれば進行波成分が支配的であり、-90°もしくは90°に近い値であれば、定在波成分が支配的であることを示す。ゆえに4.1 mの位置では進行波成分が支配的となる熱交換が行われる。一方、4.2 mの位置では進行波成分は減少するが、定在波成分が熱交換に効果的に寄与すると考えられる。

次に、 $\omega\tau$ が3.1の場合に最も大きい温度低下を得た設置位置の位相差 ϕ はおよそ-85°である。ゆえに、この領域は定在波成分が支配的になっていると考えられる。またこの場合の χ' と χ'' の値を見ると、 χ'' はほぼ最大値を示しているため、熱交換には定在波成分の影響が支配的となると考えられる。

さらに $\omega\tau$ が7.9の場合の χ' と χ'' の値を見ると、双方の値が極めて小さくなっている。これは、進行波成分、定在波成分ともに熱交換に有効には寄与しないことを意味する。そのため、非常に小さい温度低下しか得ることができなかったと考えられる。

以上のことから、 $\omega\tau$ に依存する χ' と χ'' から把握可能となる熱交換に有効な音場と測定結果がよく一致しているといえる。

6. まとめ

$\omega\tau$ 依存性を有する χ' と χ'' を用いて、進行波成分による熱交換の割合と定在波成分による熱交換の割合を算出した。本研究で用いた $\omega\tau$ に対する χ' と χ'' の変化は、管内の位相差 ϕ の分布から考えられる熱交換に有効な音場の変化によく一致した。この結果より、熱交換に効果的なスタックの設置位置と音場を選択する1つの指標として $\omega\tau$ が利用できると思われる。

さらに χ' と χ'' が共に小さくなる $\omega\tau$ を持つスタックは、熱交換が効果的には行われなため、冷却特性が低下する。ゆえに $\omega\tau$ を求めた結果、 χ' と χ'' が共に小さくなる場合には、あらかじめ冷却特性の低下を推定することが可能である。

本研究は、文部科学省知的クラスター創成事業の一環として行った。

参考文献

- [1] 富永昭, “熱音響工学の基礎”, 内田老鶴圃, 1998
- [2] S. Backhaus, and G. Swift, Nature, Vol. 399, pp. 335-338, May, 1999
- [3] Y. Ueda, T. Biwa, U. Mizutani, and T. Yazaki, Appl. Phys. Lett., Vol. 81, No. 27, pp. 5252-5254, Dec. 2002
- [4] S. Sakamoto and Y. Watanabe, Acoust. Sci. & Tech. Vol. 27, No. 6, pp. 361-365, 2006.
- [5] 辻良行 他, 日本音響学会講演論文集(秋季), pp.999-1000, (2006)
- [6] 矢崎太一, ながれ 24, pp.395-404, (2005)
- [7] 吉田秀穂 他, 電子情報通信学会技術報告2Vol.106 No.28 pp.7-12.2006
- [8] Andrew M.Fusco et al, J. Acoust. Soc. Am. 91(4), (1992)