

# 104 共鳴管熱音響エンジンの開端形状と音圧変化

## Sound Pressure of Resonance Pipe Thermoacoustic Engine with Bell Mouth End

○正 戸倉郁夫 (室蘭工大) 黒木勝大 (新菱冷熱(株))  
山岡清彦 (函館ドック(株))

Ikuo TOKURA, Muroran Institute of Technology, Mizumoto 27-1, Muroran  
Katsuhiro KUROKI, Shinryo CO., INC  
Kiyohiko YAMAOKA, Hakodate Dock CO., LTD

Resonance pipe thermoacoustic engines was constructed and its performance was experimentally studied. Two types of stacks, laminated stainless plates and a bundle of ceramic pipes, were used in the experiment. Maximum sound pressure was obtained for a suitable length of the resonance pipe. Sound pressure was found to increase two times when the open end of the resonance pipe was changed to a bell mouth shape from a straight shape. Flow patterns of acoustic streaming at the open end of the pipe are also presented.

**Key Words:** Thermoacoustic engine, Resonance pipe, Sound pressure, Acoustic streaming

### 1. 緒言

共鳴管熱音響エンジンは、熱を直接気体の振動という仕事に変換する機械であり、可動部がないため、構造が簡単で信頼性の高いエンジンである。このエンジンの用途としては、まったく逆の原理で音波から温度差を生み出す現象を利用した冷凍機の動力源などが考えられる。本研究では、より高い音圧を発生する装置の開発を目指して、熱音響エンジンの試作を行った。そのエンジンの音圧特性と、共鳴管の開端形状の違いによる音圧変化、および開端近傍の熱音響流について報告する。

### 2. 実験装置および実験方法

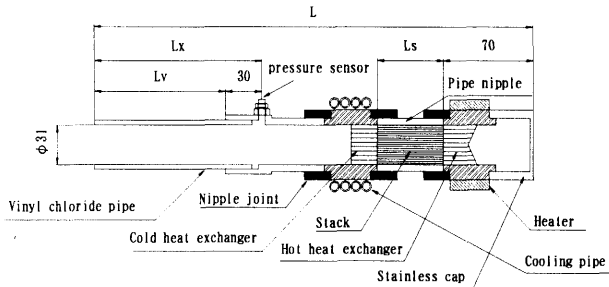


Fig.1 Experimental apparatus

Fig.1 に本実験で用いた一端閉の共鳴管熱音響エンジンの概略を示す<sup>(1)</sup>。装置は、高温側熱交換器、低温側熱交換器、スタック、および塩化ビニール円管 (内径 31mm) から構成されている。スタックには、金属のなかでも熱伝導率の低いステンレス板 (SUS304, 厚さ 0.15mm) を平行に並べたものと、セラミック管 (内径 2mm, 外径 3mm) を束ねたものの 2 種類を使用した。高温側熱交換器にはニッケル材 (直径 30mm, 長さ 25mm) に千鳥状に 2mm の穴を多数開けたもの、低温側熱交換器には銅管 (内径 2mm, 外形 3mm, 長さ 25mm) を束ねたものを使用した。高温側熱交換器の外周を電気ヒータ (最大 340W) で加熱し、低温側熱交換器の外周を 5℃ の恒温水を循環させて冷却した。

温度測定はクロメル-アルメル熱電対を用いて行ない、ヒータ、スタック高温側・低温側、実験室内の温度を測定した。また、発生した音波の圧力振幅は圧力変換器 (株共利電業, PGM-02KG) により測定し、閉端部での最大音圧に換算した。なお、実験は共鳴管を垂直に設置して実施した。

### 3. 実験方法および結果・考察

#### 3-1. スタック形状・材質の変化による音圧の変化

スタックの構造・材質の違いによる音圧変化について調べるため、ステンレス板 (Plate と略記) と、セラミック管 (Tube と略記) の両スタックの結果を比較する。それぞれのスタックの構造を Fig.2 に示す。

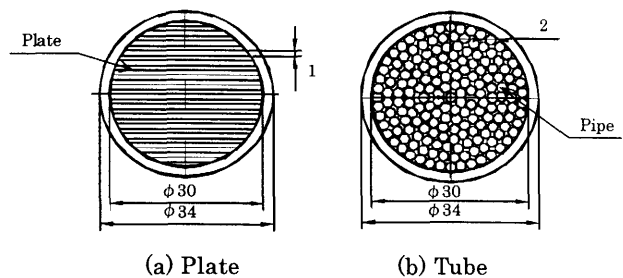


Fig.2 Structure of stack

スタック長を 60mm とし、開端側の塩化ビニール管を付け替えて装置全長 L を 430~980mm まで変化させたときの発生音圧 (ピーク値) を Fig.3 に示す (入力電力 189W)。

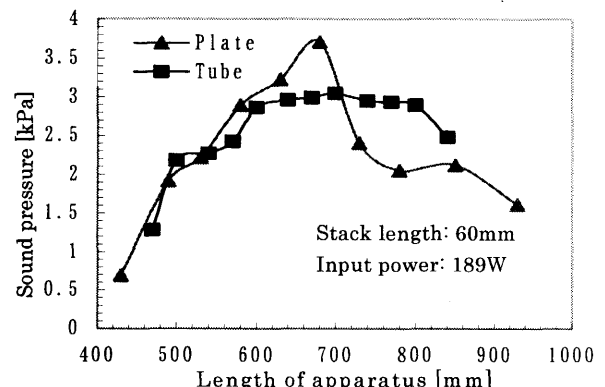


Fig.3 Sound pressure versus length of apparatus

発生音波の周波数は共鳴管の基本振動周波数と一致しており、最大音圧を示す共鳴管の周波数は約 129Hz となった。長さ 60mm のスタックでは、材質の違いによらず約 700mm の共鳴管が最大音圧を発生している。Fig.3 より、細かいパイプを束ねた構造よりも、薄い板を軸に平行に並べ

たスタックの方が音圧は約 0.7kPa 大きくなった。その原因として、作動流体の熱交換が増加したことが考えられる。薄板を平行に並べた構造の断面は、Fig.2 より、上下は板、左右は管壁の長方形になっている。作動流体の通過する総断面積は 625.2mm<sup>2</sup>、総周囲長さは 1270.4mm である。一方、細管を束ねた構造を考えると、直径 2mm の円の集合である。細管の本数は 88 本である。総断面積は 276.5mm<sup>2</sup>、総周囲長さは 552.9mm である。薄板の構造の方が、約 2.2 倍断面積が大きく、かつ、周囲長さが 2.3 倍長い。作動流体が振動できる面積は流路断面積が大きくなることにより増加する。また、周囲長さが長くなることにより、固体壁との熱交換が多くなる<sup>(2)</sup>。このことから、薄板を平行に並べた構造は、断面積、周囲長さ共に値が大きく、その結果、作動流体の振動の増幅を効率よく行なうことができ、音圧が増幅されたと推測される。

### 3-2. 開口端形状による音圧の変化

開口端の形状を Fig.4 に示すようなベルマウス形状に換え、そのスロート部長さ X を変化させたときの発生音圧の変化を Fig.5 に示す。実験条件は、Fig.4 のスロート部長さ X を 4~20mm まで変化させ、スタック長さ 60mm、装置全長 680mm、入力電力 189W で行なった。なお、スロート部長さ 0mm での値は直管形状の最大音圧を表わす。

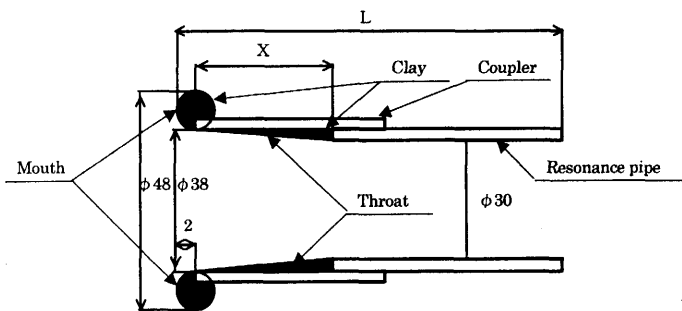


Fig.4 Shapes of mouth and throat

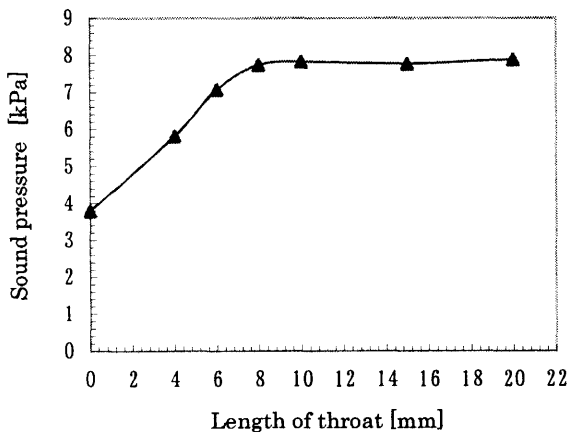


Fig.5 Sound pressure versus length of throat (入力電力 189W)

Fig.5 より、スロート部長さが 4mm~8mm までは音圧は増加しているが、それ以上では最大音圧の 7.8kPa に収束している。このことから、ベルマウス形状には最適なスロート長さがあることがわかる。また、直管形状の最大音圧は 3.2kPa、ベルマウス形状は 7.8kPa と、約 2 倍の音圧増加が得られた。このような開口端形状の変化による音圧増加は、ホーン楽器やメガホンなどの音圧増大と同じ効果によるものと考えられる。

### 3-3. 開口端における音響流の可視化

音波が発生すると、共鳴管内に音響流が誘起される<sup>(3)</sup>。開口端の形状を直管形状からベルマウス形状にすることで音圧が変化することから、流れの可視化を行ない開口端での音響流の変化をとの関連を調べた。

可視化方法には、ステアリン酸亜鉛を用いた注入トレーサ法<sup>(4)</sup>を使用した。実験方法は、熱音響エンジンを水平に設置し、開口端の上部から粉を振り落とす方法を用いた。実験条件は、スタック長さ 60mm、装置全長 680mm、入力電力 189W であり、共鳴管開口端の形状は直管形状とベルマウス形状の 2 種類について観察を行なった。

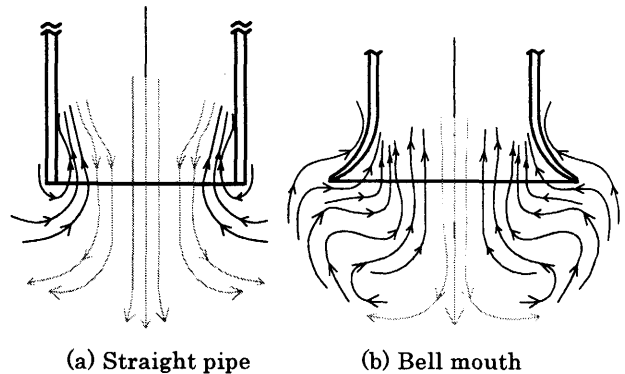


Fig.6 Flow patterns

Fig.6 は、ビデオ撮影により観察した粒子の流動模様を示した図である。これより、直管形状の場合は、吹き出し流れの速度が高く、また、その範囲も広いが、吸い込み流れの範囲は管壁のごく狭いに限られていることがわかった。ベルマウス形状場合は、吹き出し流れは管軸近傍に限られていてその速度も低い、他の大部分の位置では吸い込み流れとなっている。また、吐き出されたトレーサは大きく弧を描き管壁側から吸い込まれる様子が観察された。

以上の観察の結果、開口端での音響流の大略を示すことが出来たが、発生音圧とどのような関係があるかについては不明であり、今後の課題としたい。

### 4. 結言

- (1) 共鳴管熱音響エンジンは、スタックの長さに対応して、最大音圧を発生する最適な装置全長が存在する。
- (2) 開口端の形状がベルマウス形状の場合、発生音圧は直管形状の場合の約 2 倍に増加する。また、ベルマウス形状による音圧増加には最適なスロート長さがあり、それ以上スロート部を長くしても音圧に大きな変化は見られない。
- (3) 開口端付近の音響流の概要を示すことができた。

### 5. 参考文献

- (1) 山岡清彦：共鳴管熱音響エンジンに関する研究，平成 15 年度室蘭工業大学学士論文，(2004)。
- (2) G.W. Swift：Thermoacoustic engines, J. Acoust. Soc. Am., 84(4)(1988), p.1148.
- (3) L.D. Landau and E.M. Lifshitz：Fluid Mechanics, 2nd edition, Butterworth-Heinemann(1987), p.305.
- (4) 流れの可視化学会：新版流れの可視化ハンドブック，朝倉書店(1986)，p.157.