

# 210 熱音響エンジンの発生音波に及ぼすスタック位置の影響

## The Influence of Stack Position on Sound Wave of Thermoacoustic Engine

○学 讃岐 奏 (室蘭工大) 正 戸倉 郁夫 (室蘭工大) 小川 徳哉 (室蘭工大)  
 Sou Sanuki, Ikuo Tokura, Noriya Ogawa,  
 Muroran Institute of Technology, Mizumoto27-1, Muroran, Hokkaidou

A thermoacoustic engine is a equipment which changes heat into acoustic sound. If this equipment is realized, it can be used as a power source of a thermoacoustic refrigerator. We made a resonance pipe engine and tried to verify its operation. A stack, which serves as a heat storage element, was inserted in a resonance pipe. Various attempts were made to produce stable acoustic sound, by changing total pipe length, stack position in the pipe, and temperature difference between the stack ends. Generation of unsteady acoustic sound was obtained when the beginning of cooling the high temperature stack. It is suggested by an experiment of that the suitable position of the stack is in between the displacement node and antinode of a sound wave.

*Key words:* A thermoacoustic engine, Stack position, Resonance pipe

### 1. 緒言

熱音響エンジンは、加熱によって、共鳴管内のスタックと呼ばれる蓄熱器に温度差を与えることで流体振動を発生させる、熱入力を音響出力に変換する装置である。この装置が実用化されれば、熱音響冷凍機などの動力源としての利用できることが考えられる。そこで、本研究では共鳴管型の熱音響エンジンを試作して、音響の発生を試みた。熱音響エンジンの効率的・定常的に作動させるための条件として、スタック(蓄熱器)の温度差や長さ、位置、装置の管全長が作動に関係を及ぼしていると考えられる。そこで、管全長やスタックの位置を変化させて実験を行ない、得られた発生音波の周波数特性から、熱音響エンジンを作動させるための最適な条件について考察した。

### 2. 作動原理

Fig.1(I)は、熱音響エンジンにおけるスタックに隣接する流体塊の変化と熱輸送を示している<sup>(1)</sup>。スタックの右側が閉端方向、左側が開端方向であり、1から4の流体塊の状態はFig.1(II)のサイクル線図に対応している。Fig.1(b)で示されている一連のサイクルを(a)から(d)の段階別に以下で述べる。

- (a) 流体塊が右に変位すると、圧力は高くなる。そのため、(a)の過程の流体塊は断熱的に圧縮される。(状態1→状態2)
- (b) (a)の過程の断熱圧縮後、状態2の流体塊の温度が、スタックの壁面温度  $T_w$  よりも低ければ、この過程では熱量  $dQ$  を受熱するので、流体塊の体積は膨張する。(状態2→状態3)
- (c) 流体塊が左へ変位すると圧力は低くなる。そのため、(c)の過程の流体塊は断熱的に膨張する。(状態3→状態4)
- (d) (c)の過程の断熱膨張後、状態4の流体塊の温度が、スタックの壁面温度  $T_w$  よりも高ければ、この過程では熱量  $dQ'$  を放熱するので、流体塊の体積は収縮する。(状態4→状態1)

以上のようなサイクルが連続的に行なわれることによって、熱の流れが仕事に変換されて、励起した振動流体の振動が増幅されて音波が発生することで熱音響エンジンが作動する。また、Fig.1(I)で示しているように、スタックの壁面温度  $T_w$  よりもサイクル中の状態4の温度  $T_4$  は高く、状態2の温度  $T_2$  は低くなければ流体塊の熱輸送は行なわず、仕事も発生しない。したがって、断熱圧縮およ

び膨張による温度差よりも、大きな温度差を与えるスタック壁面の温度勾配が必要である。

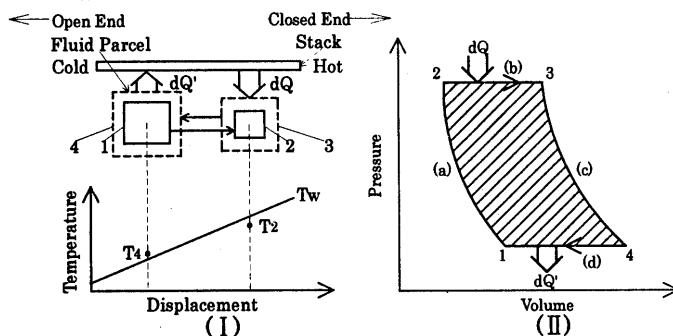


Fig.1 Temperature change and P-V diagram in a stack

### 3. 実験装置

Fig.2に実験装置の概要を示す。実験装置は全長  $L$  の一端が閉じた円筒構造になっており、内部にステンレスパイプ(外径4mm、肉厚0.5mm)を束ねて構成したスタックと、銅パイプ(外径3mm、肉厚0.5mm)で同様に構成された熱交換器を挿入している。閉端側の熱交換器を高温にするために、バンドヒーターを使用した。また、開端側の熱交換器を低温にするために、水冷によって冷却した。そして、実験装置を垂直に設置し、開端側を下に向けてすることで、空気の流れがスタックの温度勾配を増大させるようにしている。発生音波はマイクロフォンで収集してパーソナルコンピュータに取り込み、周波数特性を調べた。

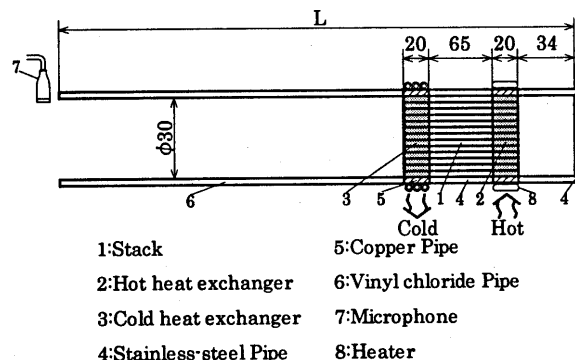
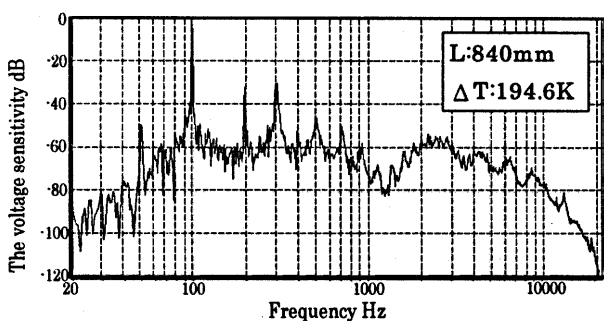


Fig.2 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

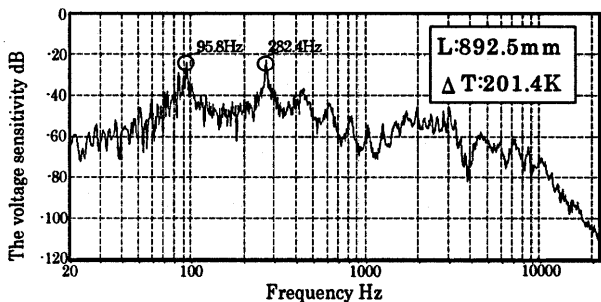
#### 4. 周波数特性

本実験では、閉端側の熱交換器を十分に加熱して急冷したところ、音が発生し始めるが、その後、スタックの温度差が時間的に減少し、やがて音が弱くなり消滅した。発生音の継続時間は数分程度であった。そして、装置の全長Lを変更していくと、共鳴周波数が100Hz付近で顕著な電圧感度の変動が確認された。その状態の周波数と電圧感度の関係をFig.3(a)に示す。ΔTはスタックの温度差である。

さらに、Fig.3(a)では100Hz間隔で高い電圧感度を示しているが、共鳴管内における定常波の音圧、および定常波の変位から共鳴する周波数の理論値を求めると200Hz間隔と算出される<sup>2)</sup>。この差異から、上記の状態では共鳴管による発生音波の増幅が十分に行なわれていないと考えられる。その原因はスタックの位置によるものと推察されるため、スタック自身も定常波を発生していると仮定してLを変更した結果をFig.3(b)に示す。



(a)



(b)

Fig.3 Spectra of sounds

上図の(a)(b)から、スタック自身の共鳴周波数(1620Hz)の電圧感度がはっきりと高い数値を示していないことから、スタック自身が共鳴振動を発生しているか確認するには至らなかった。

(b)を(a)と比較すると、高い電圧感度を示す間隔が100Hzから200Hzに推移したことから、共鳴管による発生音波の増幅効果は得られたと考えられる。さらに、(b)では最も単純な波形モード(1/4波長)である95.8Hzの電圧感度よりも、二次のモード(3/4波長)である282.4Hzの電圧感度の方が上回るため、スタックの最適位置を求めていくためには二次のモードの定常波を基準に考える必要がある。

#### 5. スタックの最適位置

本実験装置では、上記で述べたようなスタックの位置を変更しな

から最適位置を求めていくには装置の構造上困難なため、熱音響エンジンと同様に、熱音響自励振動によって作動するレイケ管による簡易実験を行なうことでスタックの最適位置、および発生音波の周波数特性の関連性を求めた。Fig.4はレイケ管(垂直に設置)における定常波の最も単純な波形モードの変位と、熱源の位置を示している。Fig.5はレイケ管の実験から得られた発生音波の電圧感度とスタック位置(管の端から測定)の関係を表したものである。

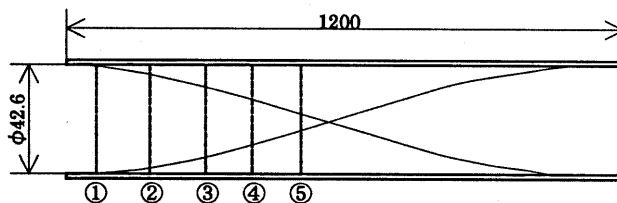


Fig.4 Displacement of Standing Wave in Rijke pipe

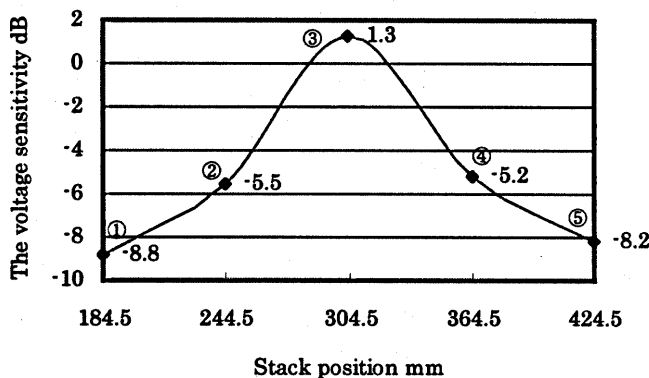


Fig.5 The voltage sensitivity difference by Stack position

Fig.5の結果から、定常波における変位の腹と節の位置における電圧感度の数値が低下していることが確認できた。このことから、現行の実験装置の熱源は閉端付近、すなわち変位の節に接近しているので音波の発生を困難にしていると考えられる。よって、これらの結果から熱音響エンジンにおいてもスタックの長さを短くし、定常波の変位における節と腹の中間位置にスタックを挿入すれば性能向上が期待できると考えられる。

#### 6. 結言

本実験ではスタックの位置が熱音響エンジンの発生音波に影響を及ぼしているとして考察を行なったが、現行の装置では定常的な作動には至っていないので、スタックの長さや挿入位置、装置の全長、スタックの温度差を保つための加熱方法などについて検討し、最適な条件を追加していく必要がある。

#### 参考文献

- (1) G.W.Swift, 『Thermoacoustic engines』, Acoustical Society of America, (1998).
- (2) 小橋豊, 基礎生物学4『音と音波』, 裳華房, (1969).