ノート

高出力の熱音響エンジンの開発

大野　宏*　大川原　真*　須貝　裕之**　平石　誠**　本多　章作***

Development of High Power Thermoacoustic Engine

OHNO Hiroshi*, OKAWARA Makoto*, SUGAI Hiroyuki**, HIRAISHI Makoto**
and HONDA Syosaku***

1. 緒　　言

管の中に入った細いパイプの束（蓄熱器）の両端に温度差を与えると，中の気体は不安定になり振動を始め音波が発生する。これは熱音響現象と呼ばれ，この現象を利用し熱から音波を発生させる装置が熱音響エンジンである。熱音響現象は，古くから知られていたが，熱力学や流体力学の発展とともに，音波が発生する原理が解明され，工場の未利用熱や太陽熱から音波を発生させる熱音響エンジンを利用し，冷熱や電気に変換して活用する技術の研究開発が盛んになっている[1]。

本研究では，熱音響エンジンの実用化を目的として，ループ状の進行波型熱音響エンジンを製作した。また，エンジンの数を増やし，多段型にして高出力化に取り組んだ。さらに，熱音響エンジンが熱源から離れていても，ヒートパイプで熱が輸送できれば音波が発生するか実験した。

2. 熱音響エンジンの概要

細いパイプの束である蓄熱器を管の中に入れ，この両端に温度差を与えると中の気体は不安定になり，振動を始め音波が発生する。この原理を図 1 に示す。細いパイプを取り出し，これを拡大して表示した。細いパイプの中の気体は，①加熱されて膨張し圧力が高くなり，②圧力の低い反対側に移動し，③ここで冷却されて収縮し圧力が下がり，④さらに右側の気体より圧力が下がるため押し返され，最初の位置に戻る。この気体の移動が振動源となって音波が発生する。この音波を発生させる装置が熱音響エンジンである。逆に蓄熱器に音波を当てると，粗密波として蓄熱器の中を気体は振動し，①細いパイプで強制的に収縮されて放熱し，②振動により反対側に移動し，③膨張して吸熱し，④振動により最初の位置に戻る。蓄熱器の片方で放熱し反対側で吸熱するため，その両端に温度差が発生する。

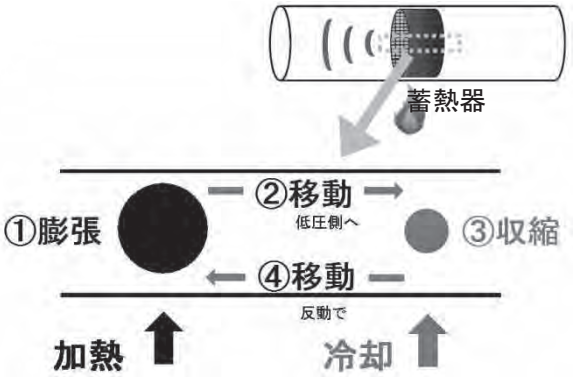

図 1　音波が発生する原理

3. 熱音響エンジンの製作と実験

3.1 進行波型熱音響エンジン

図 2 に製作した進行波型熱音響エンジンの外観を示す。管をループ状にし，発生する音波の腹と節は時間とともに移動するので，進行波型

*　下越技術支援センター
**　中越技術支援センター
***　素材応用技術支援センター

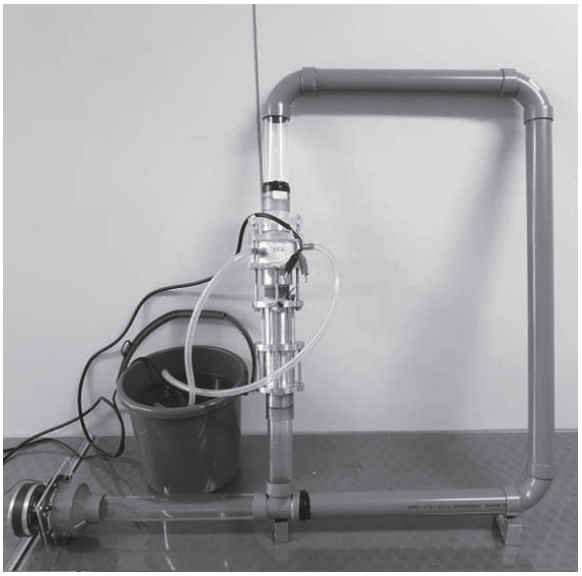

図 2　進行波型熱音響エンジン

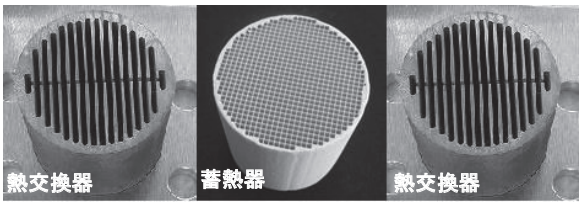

図 3　熱音響エンジン中心部

と呼ばれている。発生する音波の一部を出力として取り出しスピーカで発電させ，残りを熱音響エンジンに戻して増幅させる。音波を発生させる熱音響エンジン中心部は図 3 に示すように，直径 0.6mm の細いパイプの束の蓄熱器の両側にフィン式の熱交換器を設置し，一方を電熱線で加熱し，もう一方を循環水で冷却する。進行波型熱音響エンジンと，昨年度製作した直管式の定在波型熱音響エンジン [2]の発電電力を測定し比較した。その結果を図 4 に示す。縦軸に発電電力，横軸に加熱を開始してからの時間を示すが，300W の電熱線で加熱した。加熱を開始して 15 分後に蓄熱器の両端の温度差は，定在波型と進行波型で差があるものの約 200℃になった。この時，進行波型は定在波型の 2 倍の電力が得られた。熱音響エンジンの仕事 W は式（1）に示すとおり，発生する音波の圧力 P と流速 U とその位相差 θ，および管の断面積 A の積で表される [3]。

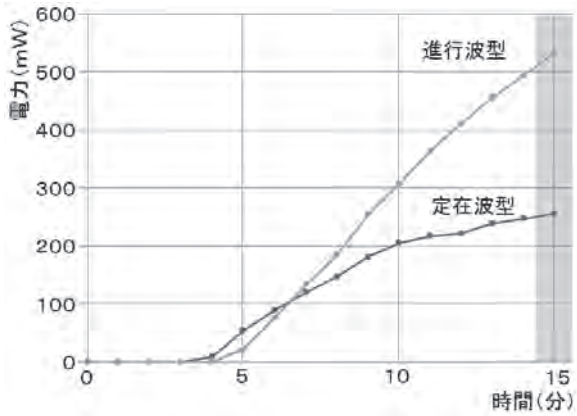

図 4　進行波型と定在波型の発電電力の比較

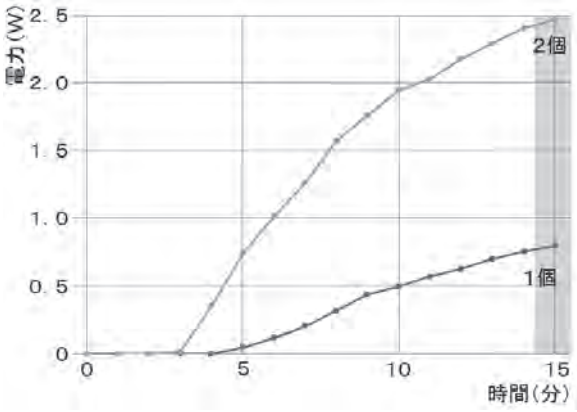

図 5　エンジン個数による発電電力の比較

$$W = \frac{1}{2} APU \cos\theta \quad (1)$$

直管の定在波型エンジンの音波の圧力と流速に位相差が生じ，ループ状の進行波型エンジンは両者の位相差がゼロになるため，後者の方が仕事は大きくなり，発電電力も大きくなる。

次に，進行波型熱音響エンジンでエンジンの数が 1 個と 2 個の時の発電電力を比較した。その結果を図 5 に示す。縦軸に発電電力，横軸に加熱を開始してからの時間を示す。各エンジンとも 400W の電熱線で加熱し，加熱を開始して 15 分後に蓄熱器の両端の温度差は，各エンジンで差があるものの約 280℃になった。エンジン 2 個の投入電力は 400W×2 の 800W で発電電力は 2 倍になると予想したが，15 分後の発電電力は 3 倍に増加した。当初の予想より発電電力が大きく増加したため，管内の圧力と流速

図 6　熱輸送実験装置

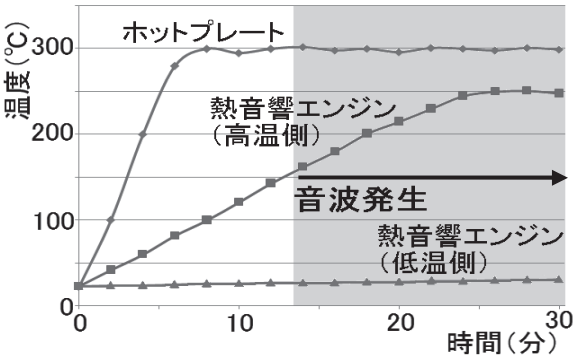

図 7　ホットプレートと熱音響エンジンの温度変化

を測定し詳しい解析を行う予定である。また，より出力を大きくするため 1MPa のヘリウムガスを封入したエンジンを設計し製作中である。ヘリウムは分子量が小さいため流速が早くなり，高圧にすることで出力が大きくなることが期待できる。

3.2　熱輸送実験

熱音響エンジンでは高温側熱交換器と熱源が離れている場合もあるが，熱を損失なく輸送できれば，音波を発生させることができる。昨年度ヒートパイプを使用した熱輸送装置 [4]を製作したが，今年度はこの先に熱音響エンジンを取り付け，音波が発生するか確認した。実験装置の外観を図 6 に示す。ホットプレートを熱源にして受熱板で集熱し，長さ 70cm のヒートパイプで右上の熱音響エンジンの高温側熱交換器に熱を輸送する。ヒートパイプは外部へ熱が逃げないよう断熱材を巻いた。ホットプレートは 300℃で温度上昇が停止する設定にした。動作させてからのプレートと熱音響エンジンの高温側熱交換器と低温側熱交換器の温度変化，音波の発生時間を図 7 に示す。ヒートパイプで熱が輸送されるが，熱音響エンジンの高温側熱交換器の温度はホットプレートに比べてゆっくりと上昇し，250℃で一定になった。熱音響エンジンの高温側熱交換器が 156℃まで上昇すると音波が発生し，熱音響エンジンを駆動させるための熱が輸送されていることを確認した。なお，この時の低温側熱交換器は 22℃で蓄熱器両端の温度差は 134℃であった。

4.　結　　言

(1) 進行波型熱音響エンジンを製作し，スピーカで発電させたところ，定在波型熱音響エンジンの 2 倍の電力が得られた。また，進行波型熱音響エンジンでエンジンの数を 1 個から 2 個に増やしたところ，発電電力は 3 倍になり，出力が大きくなった。

(2) ヒートパイプを使った熱輸送装置を製作し，熱源と熱音響エンジンが離れていても，これを駆動するために必要な熱が輸送されることを確認した。

参考文献

1）富永昭，“熱音響工学の基礎”，内田老鶴圃，1998，pp.9-11.

2）大野宏，平石誠，須貝裕之，本多章作，石井啓貴，“熱音響機関技術研究会報告”，新潟県工業技術研究報告書，No.44，2014，pp.64-66.

3）琵琶哲志，高尾景，“複数蓄熱器による音響パワー増幅”，低温工学，Vol.47，No.1，2012，pp.42-46.

4）大野宏，平石誠，須貝裕之，本多章作，石井啓貴，“高出力の熱音響機エンジンの開発”，新潟県工業技術研究報告書，No.44，2014，pp.35-38.