ノート

高出力の熱音響エンジンの開発

大野　宏*　平石　誠**　須貝　裕之**　本多　章作***　石井　啓貴****

Development of High Power Theromo Acoustic Engine

OHNO Hiroshi*, HIRAISHI Makoto**, SUGAI Hiroyuki**, HONDA Syousaku*** and ISHII Hirotaka****

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，気体が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，熱から音波を発生させる熱音響エンジンを利用し，工場の未利用熱や太陽熱を，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。

本研究では，熱音響エンジンの実用化を目的として，高熱から音波を発生させる熱音響エンジンと，音波から温度差を発生させる装置を製作し評価した。また，熱音響エンジンが熱源から少し離れていても利用できるように熱輸送装置を製作した。さらに，熱音響エンジンをより高出力にする方法について検討した。

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音波が発生する。この原理を図 1 に示す。細いパイプの束から 1 本のパイプを取り出し，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って押し返され，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，気体は強制的に膨張・収縮され，蓄熱器の片方で吸熱し，もう一方では

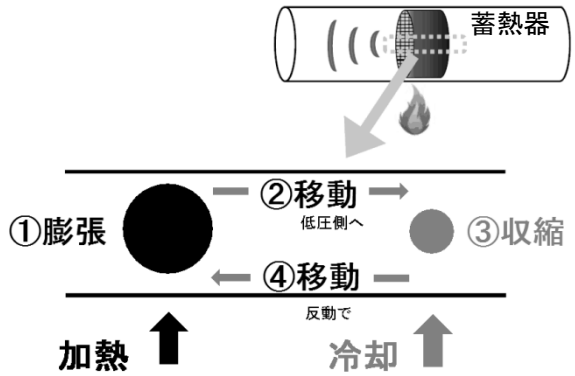

図 1　音波が発生する原理

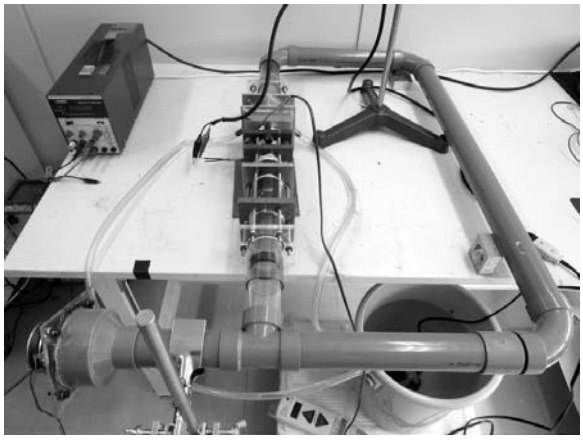

図 2　進行波型熱音響エンジン

*　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
****　企画管理室

放熱して温度差が発生する。

3.　熱音響エンジン

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。管をループ状にして，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する。エンジンの中心部を図 3 に示すが，蓄熱器と熱交換器から構成される。蓄熱器はセラミックス製で長さ 40mm，直径 40mm の円柱に直径 1mm の穴が多数開いている。熱交換器は長さ 40mm，直径 42mm の銅製円柱をワイヤーカットで加工し，多数のフィンがある。高温側熱交換器は周囲に電熱線を巻いて熱し，低温側熱交換は周囲に水を流して冷す。

まっすぐの管の一方だけを閉じて音波を発生させる定在波型熱音響エンジンでは，発生する音波の腹と節の位置が一定の定在波となり，ループ状の進行波型エンジンでは，発生する音波の腹と節の位置が移動する。後者は閉管で，より多くのエネルギーを取り出せる。進行波型熱音響エンジンでスピーカから出力される電力を測定したところ，15 分後に 200mW が得られた。

3.2　太陽熱熱音響エンジン

太陽熱も熱音響エンジンを駆動する熱源として十分であり，図 4 に示すとおり，パラボラ型反射鏡を使って太陽熱を集熱して動作させる熱音響エンジンを製作した。硼珪酸ガラス管を使用し，形状は円筒管で片側は閉じており，内径 16.8mm，長さ 400mm である。この中にスチールウール（太さ数十 μm の鉄繊維束）を丸めた蓄熱器を入れ，蓄熱器の片方を太陽熱で熱し，もう片方は水に濡らしたガーゼを付けて冷やす。パラボラ型反射鏡はアルミニウム製で，直径は 450mm，焦点距離は 150mm である。

蓄熱器を構成するスチールウールの密度，長さおよび管内における位置を変えて音波が発生するか調べた。その結果を表 1 に示す。スチー

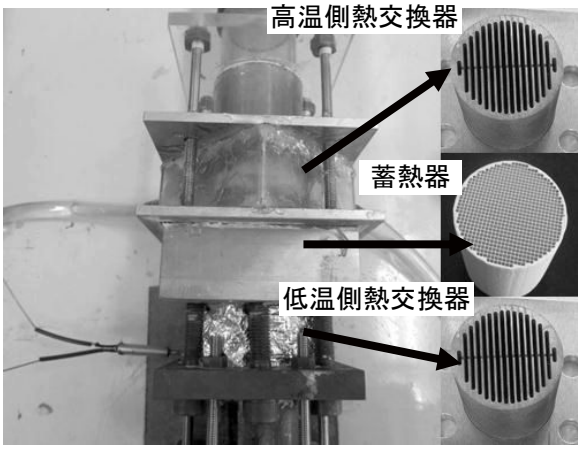

図 3　熱音響エンジンの中心部

図 4　太陽熱熱音響エンジン

表 1　音波が発生する原理

蓄熱器の構造・配置					
密度(kg/m^3)	長さ (mm)	配置（閉端～加熱端の距離）(mm)			
		200	100	50	25
10	70	△	△	×	×
	50	○	○	×	×
	30	○	○	×	×
20	70	○	◎	△	△
	50	◎	◎	○	△
	30	◎	◎	△	△
30	70	△	◎	△	×
	50	○	◎	○	△
	30	◎	◎	△	△
40	70	△	○	△	×
	50	△	◎	△	×
	30	△	◎	△	×
50	70	×	△	△	×
	50	×	△	△	×
	30	▲	○	△	×

評価区分	
	◎：太陽光入射面積１／３で発生
	○：太陽光入射面積１／２で発生
	△：太陽光入射面積２／３で発生
	▲：太陽光入射面積全面で発生
	×：太陽光入射面積全面で発生せず

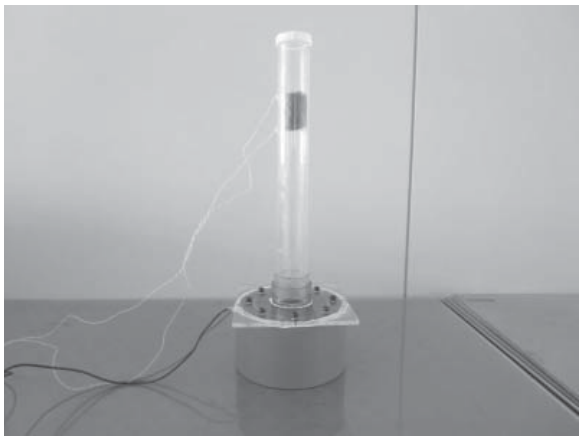

図 5　温度差発生装置

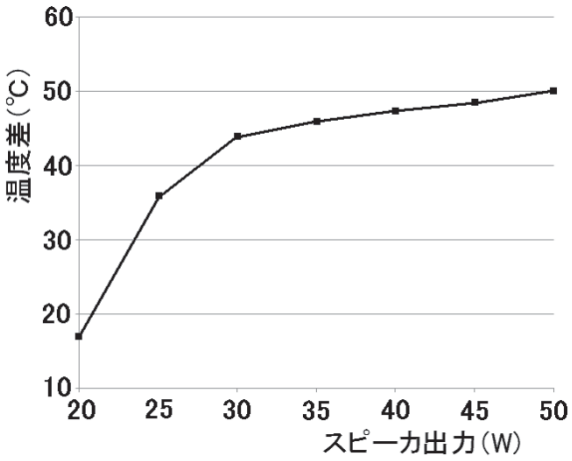

図 6　発生する温度差の測定結果

ルウールの密度が 20～30kg/m^3 でガラス管閉端から 100mm の位置に配置したとき，最も弱い太陽熱で音波が発生した。

4.　温度差発生装置

管内の蓄熱器の両端に温度差を与えると，中の気体が膨張・収縮して気体が振動し音波が発生するが，逆に蓄熱器に音波を当てると，気体は強制的に膨張・収縮され，蓄熱器の両端で吸熱反応と放熱反応が起きて温度差が発生する。

昨年度，最大出力 35W のスピーカを使い 46℃の温度差を発生させたが，今回，スピーカを最大出力 50W に交換した。製作した装置を図 5 に，温度差の測定結果を図 6 に示す。スピーカの出力を大きくすると温度差も大きくなるが，高温側から低温側へ熱が移動するため，発生する温度差の増加率は一定になる。

5.　熱輸送装置

熱音響エンジンでは高温側熱交換器を熱源に直づけすれば，損失なく熱を与えられるが，熱源によっては直づけできない場合もあり，50cm でも熱を輸送できればその用途は広がる。そのため，市販のヒートパイプを使ってどのくらいの熱を輸送できるか実験した。製作した熱輸送実験装置を図 7 に示す。市販のヒータを熱源に見立て，集熱板で集熱し長さ 70cm のヒートパイプで右上の熱交換器に熱を輸送する。熱交換

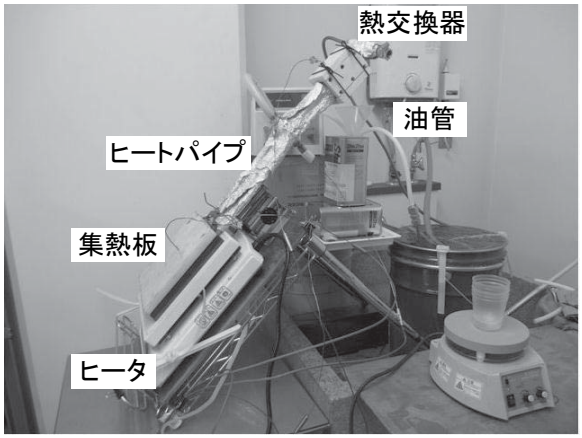

図 7　熱輸送実験装置

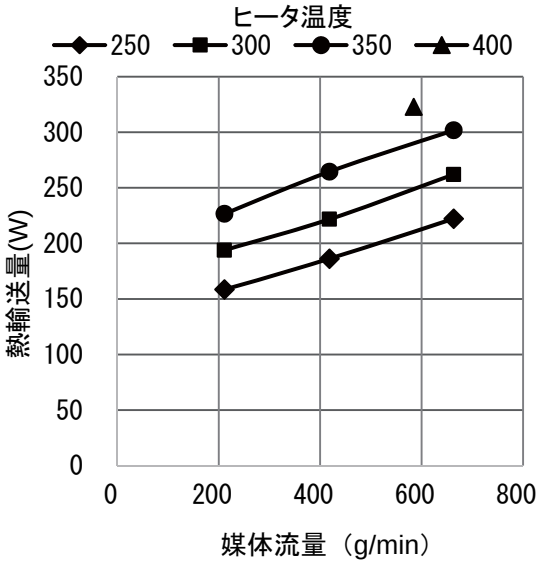

図 8　熱輸送実験の結果

機ではヒートパイプの熱を循環している油に熱交換し，油の温度上昇から輸送される熱量を測

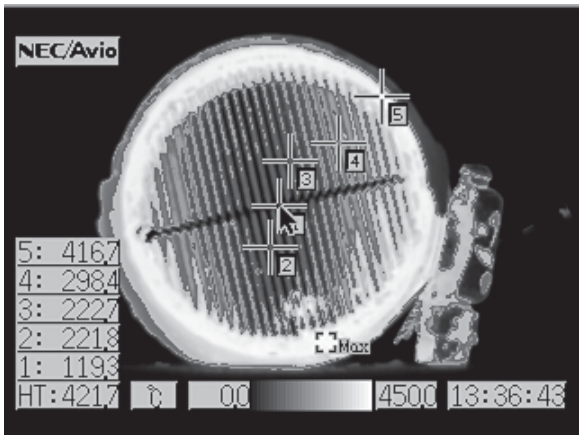

図 9　フィン式熱交換器の温度分布

定した。

ヒータの温度と油の流量を変えたときの輸送される熱量を図 8 に示す。ヒータの温度が 400℃では，使用したヒートポンプの制約から媒体流速 590g/min のみで測定した。熱交換器の熱輸送量は，ヒータの温度が高くなるほど多くなり，また，熱媒体の流量が大きくなるほど多くなる。先に述べた進行波型熱音響エンジンでは 300W の電熱線を高温側熱交換器に巻いて入熱しているが，同程度の熱量をヒートパイプで輸送できることを確認した。

6.　熱音響エンジンの高出力化

熱音響エンジンで音波を発生させるためには，蓄熱器のパイプの径と全体の管の長さが重要になる。また，パイプの径は，管内の圧力の大きさや使用する気体の分子量によっても最適値は異なる。ただ，数値計算方法が確立されたため，これに従ってパイプの径の値を決めれば，高出力の熱音響エンジンを製造できる。一方，蓄熱器の両端に熱を与える熱交換器は，フィン式のものが使われているが，外側から電熱線で加熱したときの熱交換器の温度分布を，日本アビオニクス（株）製熱画像装置 TVS-500EX で測定した。その結果を図 9 に示す。この図からもわかるとおり，熱交換器の外側と内側ではかなりの温度差があり，内部は十分加熱されていない。中まで熱が通る熱交換器ができれば，出力される音波は大きくなることが予想される。

7.　結　　言

(1)　電熱線で加熱し音波を発生させる進行波型熱音響エンジンと，スピーカで発電させる熱音響エンジンを製作し，蓄熱器の密度や位置を変えると音波が発生しやすくなることを確認した。

(2)　蓄熱器に音波を当てて温度差を発生させる装置を製作した。出力を上げると温度差は大きくなるが，ある程度まで大きくなると，逆方向に流れる熱が大きくなり，温度差の増加率は一定になる。

(3)　ヒートパイプを使った熱輸送装置を製作し，熱音響エンジンを駆動するために必要な熱輸送が可能なことがわかった。

(4)　熱交換器を改良し，管の内部まで熱が入るようになれば，より大きな音波を発生させることができると考えられる。

Ⅳ　資　　料

「図」および「表」の再掲（抜粋）

Ⅱ ノート

1．高出力の熱音響エンジンの開発

表1　音波が発生する原理（36ページ）

蓄熱器の構造・配置					
密度(kg/m^3)	長さ (mm)	配置（閉端～加熱端の距離）(mm)			
		200	100	50	25
10	70	△	△	×	×
	50	○	○	×	×
	30	○	○	×	×
20	70	○	◎	△	△
	50	◎	◎	○	△
	30	◎	◎	△	△
30	70	△	◎	△	×
	50	○	◎	○	△
	30	◎	◎	△	△
40	70	△	○	△	×
	50	△	◎	△	×
	30	△	◎	△	×
50	70	×	△	△	×
	50	×	△	△	×
	30	▲	○	△	×

評価区分	
	◎：太陽光入射面積１／３で発生
	○：太陽光入射面積１／２で発生
	△：太陽光入射面積２／３で発生
	▲：太陽光入射面積全面で発生
	×：太陽光入射面積全面で発生せず

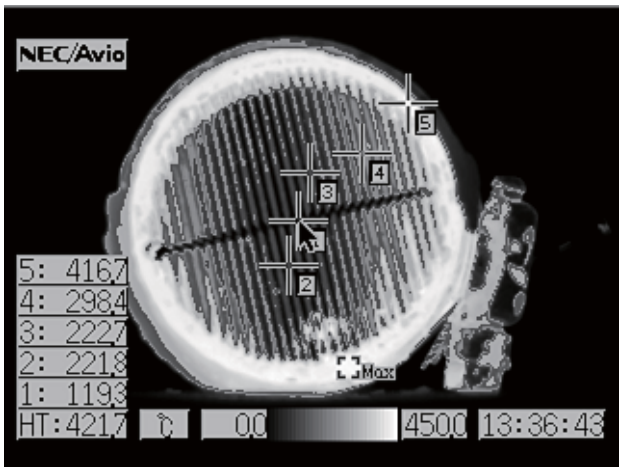

図9　フィン式熱交換器の温度分布
（38ページ）

4．ステンレス鋼の表面状態と材料特性に関する研究

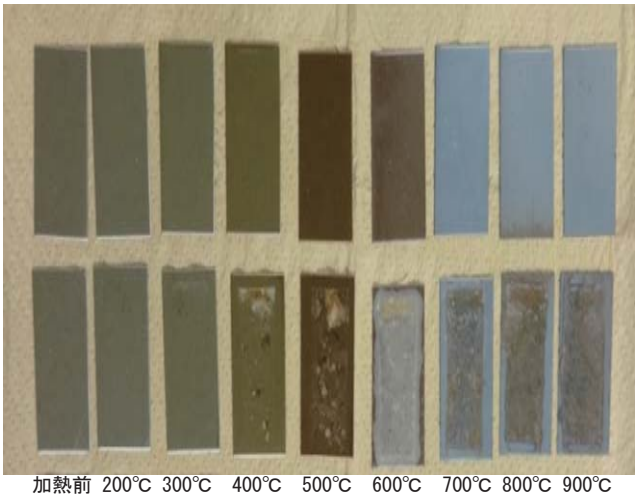

図1　複合サイクル試験結果
（上段：試験前，下段：試験後）
（46ページ）

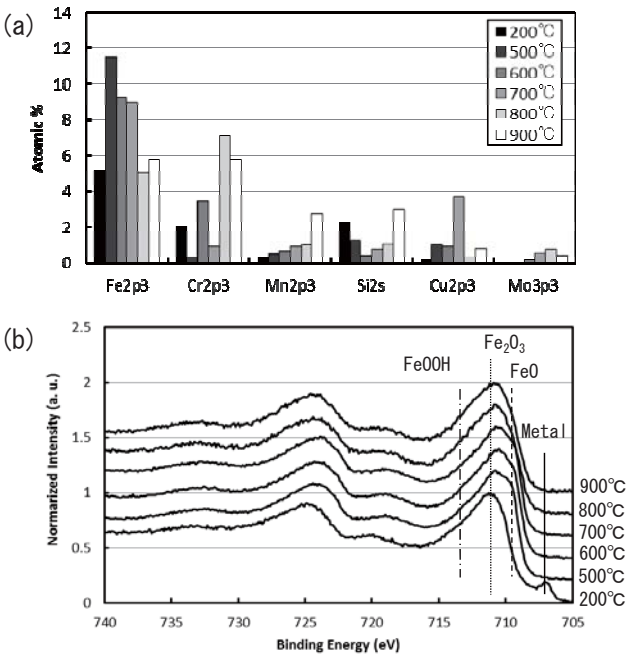

図2　XPSによる(a)組成と(b)Fe構造の
加熱による変化（46ページ）