

# 熱音響エンジンを使って車、船を動かそう！

所属先 山梨大学大学院医工農学総合教育部  
工学専攻機械工学コース武田研究室

代表者氏名 村田 祐一  
小塚 達也 田中 裕大  
土屋 公俊 人見 和輝  
村松 範彦

## 1. 諸言

現在、化石燃料の枯渇が懸念され、新エネルギーを利用した技術開発が進む中、未利用エネルギーに注目が集まっている。未利用エネルギーとは河川水や下水の熱、氷雪熱、工場排熱、地下鉄や地下街の冷暖房排熱など、有効利用できる可能性があるにもかかわらず、これまで利用されてこなかったエネルギーの総称であり、小規模で全国各地に分散しているという特徴を有している。特に、工場や自動車等で使用されている消費エネルギーの内、約7割が排熱として廃棄されており、この熱を有効利用できれば、地球温暖化や資源の枯渇問題を解決する糸口になると考えられる。

排熱利用技術の一つに熱音響技術がある。これは、熱エネルギーと音エネルギーの相互変換を利用したもので、現在、熱音響現象の発電システムや冷却システムへの応用を試みる研究が進められている。

本提案では、熱音響現象を利用し、熱エネルギーから音エネルギーへの変換を行い、さらに音エネルギーから動力を得る装置を製作して、熱音響技術を検証した。

## 2. 実験に用いる装置及び原理

### 2.1 熱音響現象

熱音響現象とは音と熱が関わりあう現象であり、エネルギー変換とエネルギー輸送という2つの側面がある。一般的な音波の場合、音波が自由空間を伝搬するとき、音波の伝搬媒質である流体の圧縮・膨張のサイクルは非常に短く、また、近傍に熱の散逸要因がないため、流体は断熱的に変化する。熱音響現象を引き起こす音波の場合、音波がスタックの流路のような波長の3千分の1程度の狭い流路をゆっくり伝搬するとき、流体の圧縮・膨張のサイクルは長くなり、流体は等温的に変化する。スタックの流路壁と流体において熱交換が行われる。この熱交換によって音エネルギーならびに熱エネルギーのエネルギー変換、エネルギー輸送が行われる。この熱エネルギーや音エネルギーのエネルギー変換やエネルギー輸送が熱音響現象と呼ばれている。

熱音響機関の動作原理について説明する。Fig.1のようにパイプの中に小さな流路を持つパイプの束（蓄熱器）を設置する。蓄熱器の左端を冷却し、右側を加熱する。狭いパイプ

の中を音波が伝わる場合、蓄熱器の流路はとても狭いため、瞬間的に蓄熱器の壁温と気体温度を同じにすることができる。この蓄熱器に左から音波を入力すると、蓄熱器内の気体が振動する。この時、下記の熱力学サイクルが実行される。その結果入力した音波が増幅され蓄熱器右側から出力される。これが熱音響機関の動作原理である。

- 1→2：高温気体が振動により低温側に移動しながら放熱し、気体の温度が下がる。
- 2→3：気体の温度を変化させず壁に放熱し収縮する。
- 3→4：低温の気体が振動により高温側に移動しながら吸熱し、気体の温度が上昇する。
- 4→1：気体は温度を変化させず壁から吸熱し膨張する。

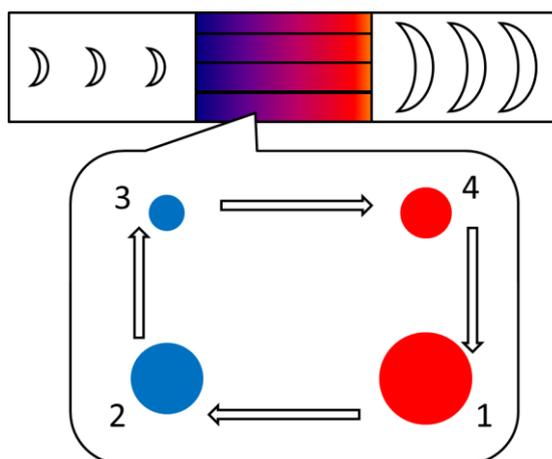


Fig.1 熱音響機関のサイクル

今回行った実験では試験管内にスチールウールをつめた熱音響エンジンを製作した。このシステムの熱力学的サイクルについて説明する。スチールウールの片端を加熱するとスチールウールに高温部と低温部の熱勾配ができる。スチールウール内部の気体が少しでも低温部に移動すると気体は冷却され、圧力が低下し、気体は収縮する。また、気体が高温部に移動すると加熱され、圧力が上昇し、気体は膨張する。気体は冷却→収縮→加熱→膨張のサイクルを繰り返す。気体がスチールウール内を行き来することで気体の膨張・収縮がゆれの復元力を増幅するように働くので、自励振動が始まり、最終的に試験管の長さの4分の1波長の音波が定常波を作り、気柱共鳴に近い振動となる。

## 2.2 圧電素子

水晶や特定の種類のセラミックなどに圧力や振動を加えることで生じるひずみに応じて、電圧が発生する現象を圧電効果という。また、逆に電圧をかけると物質が変形する現象を逆圧電効果という。これらの現象を示す物質は圧電体と呼ばれ、この現象を利用した受動素子のことを圧電素子という。圧電素子の基本的な構造は Fig.2 に示すように、圧電材料を2枚の電極で挟むだけの単純なものである。圧電材料の代表的なものとして圧電セラミック

スがあり、圧電セラミックスの中でも大きな圧電性を示すチタン酸ジルコン酸鉛 ( $\text{Pb}(\text{Zr} \cdot \text{Ti})\text{O}_3$ ) はペロブスカイト型といわれる結晶構造を持つ強誘電体で、最も汎用性の高い圧電材料の 1 つである。圧電材料に圧力をかけると格子状の結晶の中に配置されたイオンの位置のずれが、圧力を加えることによって大きくなり、結晶の一端がプラスの電気を帯び、もう一方の端がマイナスの電気を帯びる電気分極という現象が起こり、電圧が発生する。また、圧電材料に電圧をかけるとプラスイオンとマイナスイオンの中心が構造的にずれることで、かけた電圧に引っ張られてイオンが移動し、材料の結晶全体が収縮する。



Fig.2 圧電素子の構造

### 3. 実験の目的

本実験の目的は、熱音響現象を発生させて、発生した音波の振動を用いて圧電素子により発電させ、船もしくは車を動かすことである。(Fig.3 参照)

実験は、以下の手順で進めた。

- (1) 試験管とスチールウールを用いて熱音響現象を発生させる実験を行い、挿入するスチールウールの量や位置を変化させ、現象発生の有無、発生した場合は音波の音圧レベルを調べる。
- (2) 熱音響現象により発生した音波を用いて、圧電素子による発電実験を行う。

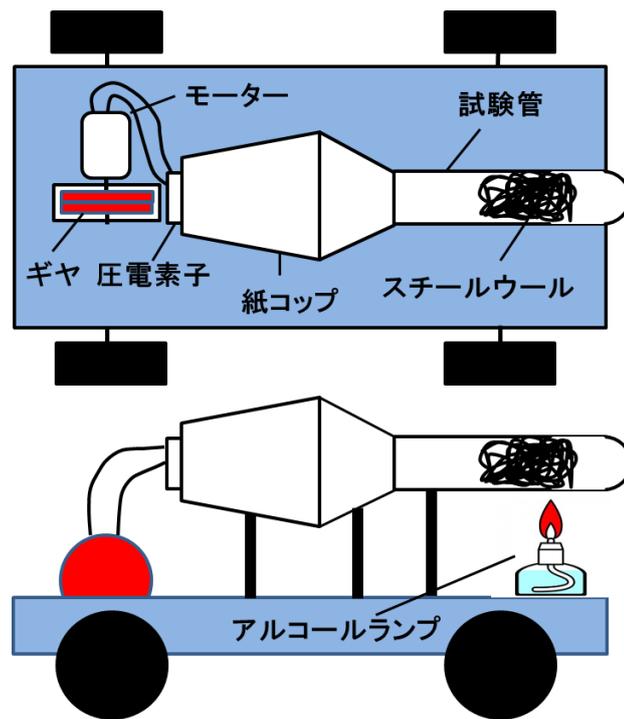


Fig.3 熱音響カー

#### 4. 試験管を用いた熱音響実験

##### 4.1 実験装置

本提案では、最終的に熱音響現象を発生させる装置を車や船のボディに乗せるため、装置部分は軽量である必要がある。そのため、熱音響現象を発生させるために必要な管の部分を試験管で、蓄熱器の部分をスチールウールで、熱源をアルコールランプとして実験を行った。試験管は Fig.4 に示すように 6 種類用意し、No.1~6 まで番号をつけた。それぞれの試験管の外径と長さを Table.1 に示す。また、スチールウールには市販のものを用いた。実験装置の概略を Fig.5 の写真に示す。スチールウールを挿入した試験管をスタンドを用いて固定し、スチールウールの端をアルコールランプを用いて加熱した。



Fig.4 試験管

Table.1 試験管の寸法

No.	長さ(mm)	外径(mm)
1	120	12
2	150	15
3	180	18
4	200	21
5	200	25
6	300	30

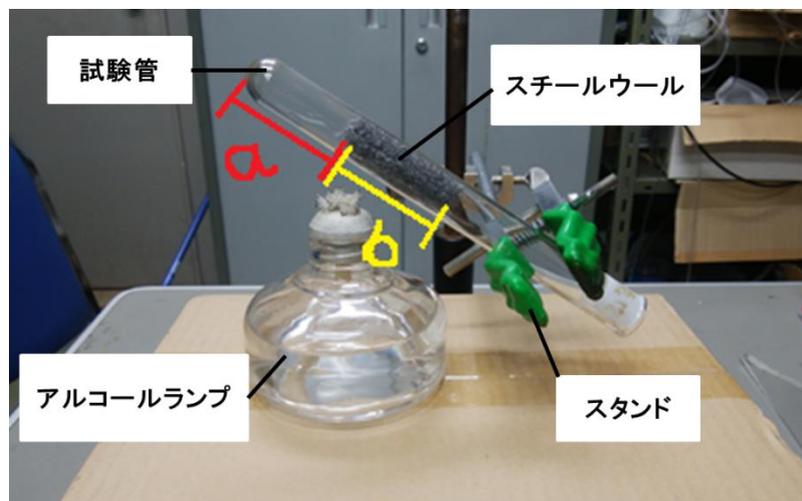


Fig.5 実験装置

## 4.2 実験方法

スチールウールの挿入する質量，挿入位置により発生した音波がどのように変化するかを調べるため，4つのパラメータを用いて実験条件を設定した．パラメータは，試験管のサイズ，挿入するスチールウールの質量(g)，Fig.5 の a に示される試験管底からの距離(mm)，b に示される挿入するスチールウールの長さ(mm)である．試験管の傾き角度は 30°とした．設定した実験条件に基づき，熱音響現象発生の有無，音波が発生した際には騒音計を用いて音圧レベルを調べた．騒音計は A 特性のものである．また，1つの実験条件につき実験は 2 回行った．それぞれの試験管における実験条件を Table.2 に示す．今回の実験では，スチールウール内に温度差を作ることが重要となるため，温度差を作りにくいスチールウール長が短い条件においては熱音響現象が発生しないと予想した．このことからスチールウール長の実験条件は 30mm 以上とした．逆にスチールウール長が長いとスチールウール内の温度勾配が緩やかとなって空気が振動するほどの温度差が得られないと予想されるため，60mm 以下とした．

Table.2 実験条件

No.	スチールウールの質量 (g)	試験管底からの距離 (mm)	スチールウールの長さ (mm)
1	0.3,0.4,0.5	10,20,30,40	30,40,50
2	0.4,0.5,0.6	10,20,30,40	30,40,50
3	0.5,0.6,0.7,0.8,0.9	10,20,30,40,50	30,40,50
4	0.7,0.8,0.9,1.0	30,40,50,60	30,40,50,60
5	1.0,1.1,1.2,1.3,1.4	30,40,50,60	30,40,50,60
6	1.3,1.4,1.5	30,40,50,60	30,40,50,60

## 4.3 実験結果

### 4.3.1 No.1 (長さ 120mm, 外径 12mm) 試験管

No.1 試験管はスチールウールの質量を 0.3~0.5g，試験管底からの距離を 10~40mm，スチールウールの長さを 30~50mm の条件で実験を行ったが，熱音響現象は発生しなかった．これは，試験管が小さいことにより，熱が短時間で低温部まで伝わり，温度差が生じなかったことによるものと考えている．

### 4.3.2 No.2 (長さ 150mm, 外径 15mm) 試験管

No.2 試験管はスチールウールの質量を 0.4~0.6g，試験管底からの距離を 10~40mm，スチールウールの長さを 30~50mm の条件で実験を行った．この条件ではスチールウールの重さが 0.4g，試験管底の隙間が 30mm，スチールウールの長さが 40mm の条件で熱音響現象の発

生を確認した。この時の音の大きさを騒音計で調べたところ 91.4dB であった。しかしながら、同じ条件で 2 回目の実験を行ったところ、熱音響現象は見られなかった。挿入するスチールウール以外の実験条件に相違がないことから、2 回の実験に使用したスチールウールを比べたところ、熱音響現象が発生しなかった場合のスチールウールは局所的に充てん率が様でない箇所が存在し、スチールウールの充てん率にばらつきが生じていた。そのため、熱音響現象が発生しなかったものと予想している。No.2 試験管においては、スチールウールの重さが 0.4g、試験管底の隙間が 30mm、スチールウールの長さが 40mm の条件が最も良い条件であると考えられるが、熱音響現象発生の有無にばらつきがある結果となった。

#### 4.3.3 No.3 (長さ 180mm, 外径 18mm) 試験管

No.3 試験管はスチールウールの質量を 0.5~0.9g、試験管底からの距離を 10~50mm、スチールウールの長さを 30~50mm の条件で実験を行った。この条件においては多くの熱音響現象の発生を確認できた。その条件と音圧レベルを Table.3 に示す。スチールウールの質量に関しては 0.9g 以外の条件において熱音響現象が発生した。0.9g スチールウールを挿入すると流動抵抗が大きくなるためと考えられる。音圧レベルの大小について試験管底からの距離に注目すると 30mm で熱音響現象が発生しなかった質量 0.5g 以外の条件では、底からの距離が 30mm の場合に音圧レベルが大きいことがわかる。スチールウールの長さについては、熱音響現象が発生した条件がほぼ 30,40mm であり、この 2 条件が最適ではないかと考えられる。

Table.3 No.3 試験管結果

条件： 質量[g]-距離[mm]-長さ[mm]	音圧レベル (dB)
0.5-40-30	92.6
0.5-40-40	94.1
0.5-50-30	93.9
0.6-40-30	87.2
0.6-50-30	93.9
0.7-30-40	95.4
0.7-40-30	85.2
0.7-40-40	90.4
0.7-50-30	90.3
0.8-30-30	96.5
0.8-30-40	96.2
0.8-30-50	91.8
0.8-40-40	88

#### 4.3.4 No.4 (長さ 200mm, 外径 21mm) 試験管

No.4 試験管はスチールウールの質量を 0.7~1.0g, 試験管底からの距離を 30~60mm, スチールウールの長さを 30~60mm の条件で実験を行った。試験管底からの距離を 30mm 以上とした理由は, No.1 から No.3 までの実験を行った結果, 試験管底からの距離が 10, 20mm の条件では一度も熱音響現象が発生しなかったことによる。No.4 の試験管においても熱音響現象が発生した。このときの試験条件と音圧レベルを Table.4 に示す。設定した質量の条件では 0.7~0.9g までの広い範囲で熱音響現象が確認できた。1.0g では熱音響現象が発生しなかったが, これは流動抵抗が大きくなったことによるものと考えている。スチールウールの長さについては, No.3 の時と同様にほぼ 30,40mm の条件で熱音響現象が発生しており, No.4 においてもこの 2 条件が最適であると考えている。また, スチールウールの質量が 0.8g, 試験管底からの距離が 40mm, スチールウールの長さが 30mm の条件において今回の熱音響実験全体の中で最も大きい 98.9dB の音波が発生した。

Table.4 No.4 試験管結果

条件： 質量[g]-隙間[mm]-長さ[mm]	音圧レベル (dB)
0.7-40-30	92.5
0.7-40-40	95.9
0.7-40-50	86.6
0.7-50-30	97.6
0.7-50-40	91.7
0.7-60-40	83.2
0.8-30-30	96.3
0.8-40-30	98.9
0.8-40-40	98.3
0.8-50-30	93.8
0.8-50-40	93.2
0.8-60-30	96
0.8-60-40	93.9
0.8-60-50	95.9
0.9-30-30	93
0.9-40-40	96.7
0.9-50-30	93.9
0.9-50-40	96.5
0.9-60-40	87.6
0.9-60-50	86.1

#### 4.3.5 No.5 (長さ 200mm, 外径 25mm) 試験管

No.5 試験管はスチールウールの質量を 1.0~1.4g, 試験管底からの距離を 30~60mm, スチールウールの長さを 30~60mm の条件で実験を行った. 熱音響現象が発生した条件とその時の音圧レベルを Table.5 に示す.

Table.5 No.5 試験管結果

条件 : 質量[g]-隙間[mm]-長さ[mm]	音圧レベル (dB)
1.2-40-30	93.1
1.3-50-50	92.2

#### 4.3.6 No.6 (長さ 200mm, 外径 30mm) 試験管

No.6 試験管はスチールウールの質量を 1.3~1.5g, 試験管底からの距離を 30~60mm, スチールウールの長さを 30~60mm の条件で実験を行った. しかしながら, この条件では熱音響現象の発生を確認することができなかった. これは, 最小の No.1 試験管の時とは逆に加熱部分が多いため, スチールウール内の温度差が緩やかになり, 熱音響現象が発生しなかったものと考えている.

#### 4.4 熱音響実験のまとめ

今回用意した 6 種類の試験管では, No.3 と No.4 以外はほとんど熱音響現象が発生した, あるいは熱音響現象が全く発生しなかったことから, No.3 と No.4 の試験管が圧電素子による発電に最適であると決定した. 以上の実験結果から, スチールウールの長さについては, 熱音響現象が発生した条件が 30 と 40mm の場合に集中しており, この 2 条件が最適であると考えた.

### 5. 圧電素子による発電実験

熱音響現象により発生した音波を用いて圧電素子による発電実験を実施した. 4 章の熱音響実験の結果から, No.3 と No.4 の試験管において高い音圧レベルが得られた条件で実験を行った. 使用した圧電素子を Fig.6 に示す. 左の円形の圧電素子を A, 右の長方形の圧電素子を B とする. それぞれの圧電素子の寸法を Table.6 に示す. また, Fig.6 のように圧電素子は紙コップの裏に貼り付け, 熱音響現象により発生した音波の振動を圧電素子へと伝える機構とした.

まず, 船への搭載を想定したモーターを用いて発電実験を行った. 使用したモーターを Fig.7 に示す. モーターの仕様は定格電圧 1.5V, 消費電流 500mA である. このモーターを用いて熱音響実験時に最も高い音圧レベルが得られた No.4 試験管を用いてスチールウール

の質量が 0.8g, 試験管底の隙間が 40mm, スチールウールの長さが 30mm の条件に対して Fig.8 のように実験を行った。その結果, 熱音響現象は発生し, 紙コップの振動は確認できたものの, モーターは駆動しなかった。他の実験条件についても実験したが, モーターの駆動を確認することができなかった。これはモーター駆動に必要な電力が得られなかったことによるものだと考えている。そこで, 低消費電力の LED を用いて圧電素子による発電電力がどの程度かを推定することにした。使用した LED を Fig.9 に示す。定格は 1.7~2.2V-5mA である。モーターの時と同様の実験条件で実験を行ったが, LED は点灯しなかった。この時の音圧レベルを調べたところ, 100dB 弱程度であった。そのため, 点灯に必要な音圧レベルを調べるため, 熱音響機構を用いずに人の声を用いて実験したところ, 120dB 近くの音圧レベルで LED が点灯した。このことから, 本実験で用いた試験管内で発生させた熱音響現象による音波では, 音圧レベルが不十分であり, モーターの駆動はもとより, 定格電圧-定格電力 1.7~2.2V-5mA の LED の点灯もできなかった。



Fig.6 圧電素子

Table.6 圧電素子の寸法

	寸法(mm)
A	35φ×0.58t
B	25×10×0.1t



Fig.7 モーター



Fig.8 実験の様子

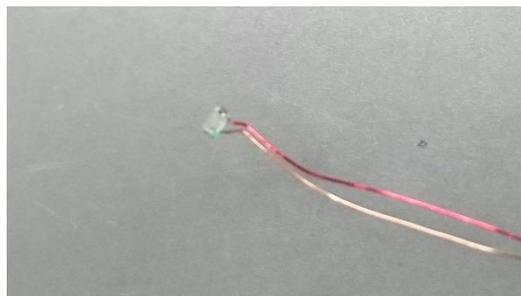


Fig.9 LED

## 6. 結論

本提案では、試験管とスチールウール、アルコールランプを用いた熱音響装置を製作し、発生した音波の振動を用いて圧電素子により発電させ、船もしくは車を動かすことを目的として実験を行った。その過程で得られた知見及び結果を以下に記す。

- (1) 寸法の異なる 6 種類の試験管を用いて熱音響実験を行ったところ、熱源にアルコールランプを使用した場合、試験管の寸法においては熱伝導、熱伝達の観点から長さ 180mm、外径 18mm の試験管、長さ 200mm、外径 21mm の試験管が最適であった。

- (2) スチールウールの長さについて、熱音響現象が発生した条件のほとんどが 30,40mm に集中しており、この 2 条件が最適である。
- (3) 同条件でも熱音響現象発生の有無が見られたが、これはスチールウール内の充てん率分布が均一でなかったことが原因であると考えている。熱音響現象を安定に発生させるためには、スチールウールの充てん率分布を一様とすることが重要である。
- (4) 本実験条件の範囲内で熱音響現象が発生した場合の音圧レベルを騒音計を用いて計測したところ、最大で 98.9dB であった。
- (5) 圧電素子を用いて発電実験を行ったが、定格電圧 1.5V、消費電流 500mA のモーターはもとより、定格電圧一定格電力 1.7~2.2V-5mA の LED も駆動させることができなかった。本実験条件の範囲内で発生させた熱音響現象による音波では圧電素子を変形させて十分な電力を得ることができなかった。
- (6) 今回、検討を行ったガラス管、スチールウール、圧電素子という組み合わせでは、熱音響現象の発生、圧電素子による電力の発生までは、実験により確認できたが、最終的な動力への変換という課題の達成には、出力が小さく動力への適用は困難であるということがわかった。実験装置を検討する早い段階で熱量と出力を試算し、必要な出力レベルを確認すべきであったと考えている。圧電素子による発電電力を増大させるためには、アルコールランプより火力の大きいガスバーナーなど熱源の検討、ガラスの試験管ではなく、例えば金属管などを用いた試験装置の検討が必要であった。

## 7. 謝辞

本実験は株式会社八光電機様より実験費の助成をいただきました。八光電機様には、伝熱分野の知識を深めるという観点から、熱の実験コンテストという貴重な場を設けて頂き深く感謝の意を表します。

また、本実験を行うにあたり適切なお助言を頂いた武田哲明教授、船谷俊平助教には、深く感謝いたします。そして、ご協力いただいた研究室の皆様に感謝の意を表します。