

熱音響現象を利用した発電についての研究

静岡県立科学技術高等学校

2年 市野 祥多 辻 登太

1 動機

私たちは、熱から音に変換する熱音響システムを「夢の扉」という番組で知り、興味を持った。今日では、音で冷却や発電を行うなどの大規模な利用が研究されている。そこで私たちは身近なものを使って熱音響現象を起こし、他のエネルギーに変換できないかと考え研究を始めた。

2 先行研究

熱音響現象として知られる現象にはレイヒ管やゆうれい試験管など様々な現象が挙げられ、近年、大学等では熱音響発電や熱音響エンジン、熱音響冷却システムなどの開発が進んでいる。

3 熱音響現象の説明

細い管内の空気中に、上部と下部で温度勾配をつくることで空気を膨張収縮させ、管内の空気に振動を与える。それが成長して自励振動となり、結果として与えた熱エネルギーの一部が音エネルギーに変換される。この現象を熱音響と呼ぶ。ゆうれい試験管は熱音響現象を起こす実験のひとつである。図1のように試験管内にスチールウールを詰め、試験管の回りに濡れたティッシュペーパーをスチールウールの真ん中より少し上から上部にかけて巻いて作る。試験管下部のスチールウール部を加熱することによって音が鳴る(図2)。

4 研究の目的

ゆうれい試験管を利用し熱音響現象で得られる音を電力に変換する。

5 条件整備のための実験

(1) 目的 効率よく音を発生させるための条件と、安定して音を鳴らし続けるための条件を模索する。

(2) 準備物 ・スチールウール・試験管(口径 1.50cm)・スタンド・濡れたティッシュペーパー・ガスバーナー・定規・音圧レベル測定器

(3) 実験方法

ア：手でスチールウールの密度を均等になるように気をつけて円柱状にし、スチールウールを試験管下部から 3 cm のところに下端がくるように詰める。スチールウールの下部から 2.5cm のところから幅 5 cm の濡れたティッシュペーパーを試験管に巻く(図1)。

イ：試験管の傾きは水平面に対して 45 度、ガスバーナーの炎の高さを 12cm で固定し、スチールウールの下部に当たるように配置して熱する。



図1.試験管の詳細



図2.ゆうれい試験管

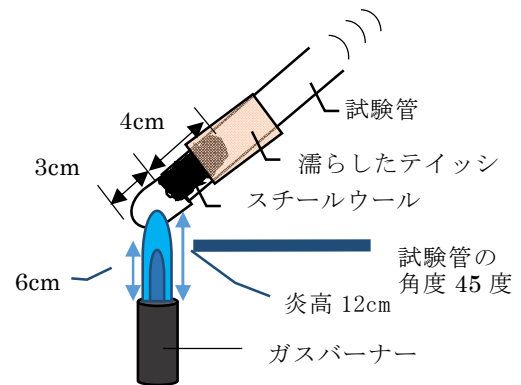


図3.実験方法

ウ：炎を試験管にあてると同時にストップウォッチのスイッチを押し、鳴り始めるまでの時間 (t1)、鳴っている時間 (t2)、音の大きさ (音圧レベル) を計測する。
 エ：スチールウールの質量を 0.2g~1.2g で 0.05g ずつ変化させア~ウの手順で実験を行う。その際、スチールウール円柱の長さは 4.0cm で固定する。

オ：スチールウール円柱の長さを 3.0~5.0cm で 0.5cm ずつ変化させてア~ウの手順で実験を行う。スチールウールの質量はエで求めた適正量に固定する。

(4) 実験結果

スチールウールの質量を変化させた実験では、発生音の大きさは図 4 より、0.3g 未満と 1.0g 以上では音圧レベルが小さく、0.3g と 0.9g では音圧レベルのばらつきが大きく、0.5g~0.7g の間で、110dB 程度の音圧レベルが得られ変動が少なかった。また、発音の継続性は、図 5 より、0.2~0.35g と 1.15g~1.2g の間では、鳴り始めるまでの時間が遅く、継続時間が短く、さらに、0.5~0.7g の間が、鳴り始めるまでの時間が早く、鳴っている時間が長い結果となった。試験管内でのスチールウール円柱の長さを変化させた実験では、スチールウールの質量を 0.55g に固定し、スチールウール円柱の長さを 3.0cm~5.0cm の範囲で変化させた結果、4.0cm で一番音圧レベルが高く (図 6)、鳴り始めが早く、鳴っている時間が長いほか、音が途切れないなど安定して音が発生することがわかった。

そこで、以降の実験では、スチールウールの質量を 0.55g、スチールウール円柱の長さを 4.0cm とすることにした。

6 音を電力に変換する実験

(1) 目的 ゆうれい試験管から発生する音を効率よく電力に変換するための条件を探す。

(2) 予備実験 音を電力に変換する方法としてはじめは圧電素子、自作のコイルを使ってはみたが電力はほとんど得られなかった。そこで発電方法を探したところ、ス

ピーカー発電を見つけ、この方法でなんとか電力が得られたがとても少量だった。そのため試行錯誤を繰り返したところ、プラスチックカップをスピーカーにつけると得られる電力が多くなることがわかった。

(3) 準備物 ・ゆうれい試験管・スピーカー・スタンド (2 個)・フレキシブルスタンド・プラスチックカップ (小・大)・ガスバーナー・デジタルテスター (2 個)・スタンド (2 個)・音圧レベル測定器

(4) 実験方法 音を電気に変換する方法としてスピーカーを使用した (図 7)。スピーカーにはテスターを 2 つ接続し、電流量 (mA) と電圧量 (mV) を同時に測定する。実験は、以下の 12 の条件を変えて行った。

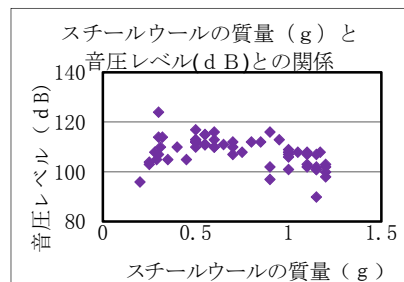


図 4.質量と音圧レベルの関係

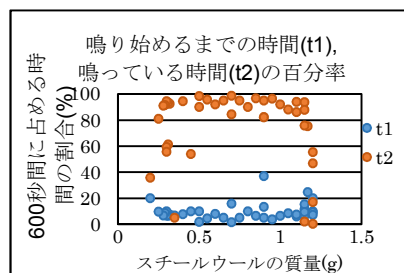


図 5.質量と t1,t2 の関係

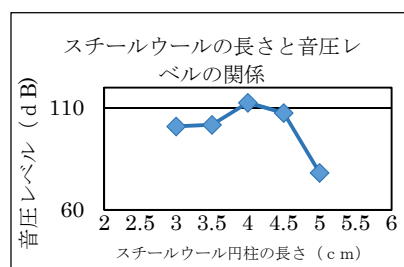


図 6.長さと言圧レベルの関係

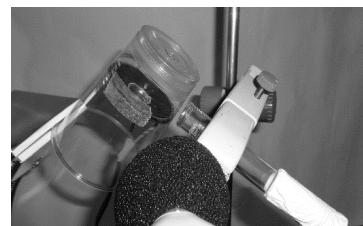


図 7.実験の様子

ア 実験 1 : 試験管の管口からスピーカーカップまでの距離

($d=0.5\text{cm}, 1\text{cm}, 1.5\text{cm}$)

イ 実験 2 : 時間における発電量の変動 (5秒おきに計測)

ウ 実験 3 : 試験管の管口に対するスピーカーの位置関係 (上部, 中部, 下部, 外部)

エ 実験 4 : 試験管の管口に対するカップとスピーカーの状態 (カップ有無など)

オ 実験 5 : カップの底からスピーカーまでの距離 ($l=3.0\sim 7.0\text{cm}$)

カ 実験 6 : カップの切り込みからスピーカーまでの距離 ($s=0\text{cm}\sim 1.5\text{cm}$)

キ 実験 7 : 試験管のサイズ変更

(口径 $1.27\text{cm}, 1.5\text{cm}, 1.83\text{cm}, 2.72\text{cm}$)

ク 実験 8 : 炎の大きさを変える ($12\text{cm}, 4\text{cm}, 3\text{cm}$)

ケ 実験 9 : 炎高 3cm において試験管の口径を変える

コ 実験 10 : 正方形穴と丸穴での最大変換効率の比較

サ 実験 11 : 試験管の傾きを変えた実験 (θ)

シ 実験 12 : 炎高 3cm 水平の時の条件

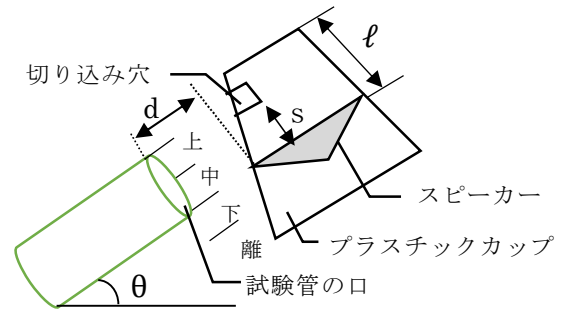


図 8. 各種の条件

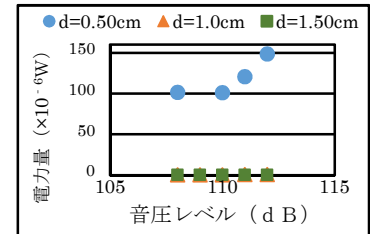


図 9. 試験管の管口からスピーカーまでの距離

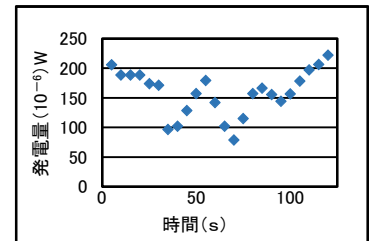


図 10. 発電量が時間ごとにおける変動

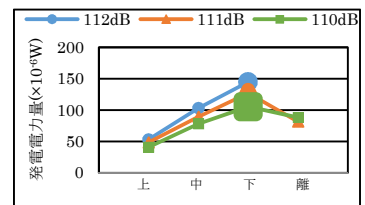


図 11. 試験管の管口に対するスピーカーの位置関係

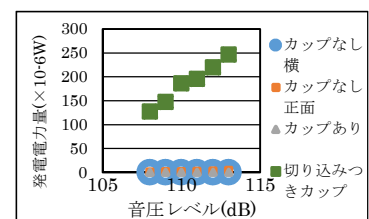


図 12. カップの有無と状態

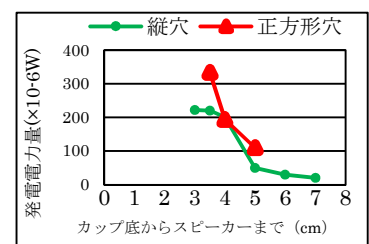


図 13. 正方形穴と縦穴の比較

(5) 実験結果と考察

ア : 試験管の管口とスピーカーが近い方が電力は大きな値を示した (図 9)。しかし、 0.5cm より近づけると音が消えてしまったためデータはとれなかった。試験管の口径 1.5cm の開口端補正を計算すると約 0.45cm となり、 0.5cm はちょうど共鳴音の腹のあたりとなるため、多くの電力が得られたのではないかと考えた。

イ : 時間経過に対して発電量は不安定である (図 10)。実験中の火の揺らぎやティッシュの乾燥などによって電力が落ちる様子が見られた。このことから、温度勾配が小さくなると電力減少を引き起こすと考えられる。

ウ : 試験管の管口に対するスピーカーの位置は、下部での発電量がどの音圧レベルでも多いことがわかる (図 11)。このことから、管口の端ぎりぎりにスピーカーが位置していることで、管口からの音を効率よく切り込みに取り入れていると考えた。

エ : 予備実験通り切り込みつきカップでの発電量が一番多く、他の条件に対して圧倒的な差であった (図 12)。また、スピーカーにカップをつけても切り込みがなければ電力はほとんど得られないことがわかる。これは空気の振動が中のスピーカーに直接伝わる通路が必要であると考察される。

オ： ℓ が短く、正方形穴の方が得られる発電量が大きくなった（図13）。なので、 ℓ をもっと近づければ発電量が上がるのかもしれない。しかし、カップ小が小さく3.0cmより近い距離で実験はできなかった。

カ：sを0cmから遠ざけるにつれ、発電量が少なくなっていた（図14）。このことから、スピーカーでの発電量が穴を通った回折波ではなく、直接伝わる音の振動で大きくなると考えられる。

キ：口径1.50cm、1.83cmのときに発電量は大きくなった。dが開口端補正に近かったため高い値を出したと考えた。そこで開口端補正に合わせた実験を行ったところ、全体的に変換効率は上がったが、口径1.27cmのときの発電量は得られなかった。その原因は、dが0.5cmより近いこと音圧レベルが下がってしまったことだと考えられる。逆にdを遠くさせすぎる口径2.72cmでは外に音の振動が漏れる量が多かったから変換効率が低くなったのではないのかと思われる。

ク：炎高を高くすると音圧レベルが上がるが、いくら炎高を高くしても音から電気への変換効率はあまり変化しなかった。スピーカーカップが電気に変換できる量には限度があるのかもしれない。

ケ：炎高3cmの火力は、口径1.50cm、1.83cmの時には適正であった。両者の発電量と比較すると、圧倒的に前者の方が発電量は大きい。その原因は、正方形穴の大きさが前者に内接する正方形の大きさと近いことであると考えた。

コ：ケの検証を行った。口径1.50cm、1.83cmでは口径2.72cmほどに差は出なかった（図15）。このことから、口径1.50cm、1.83cmのときは穴の形は面積的にさほど変わらないがため熱音響はないのではないだろうか。

サ：角度が上がるにつれて最大変換効率は低下していることがわかった（図16）。

シ：カップ小よりカップ大の時に、 ℓ が同じであるにもかかわらず変換効率が小さくなった（図17）。

7 エネルギー変換効率

(1) エネルギーの計算方法

(ア) 1秒当たりのガスの発熱量

火をつけない状態でガスバーナーから出るガスの噴出量を水上置換法で測定する。ガスは10秒間で測り、その値から1秒間当たりの噴出量平均を出し単位体積当たりの熱量をかけて発熱量とした（表1）。

(イ) 1秒当たりの音のエネルギー

実験では音圧レベルを測定した。音圧レベルを求める式を「音の基礎講座(財)」から引用し、式 $N=10 \times \log_{10}(I/I_0)$ を変形して音の強さを求める式とした。

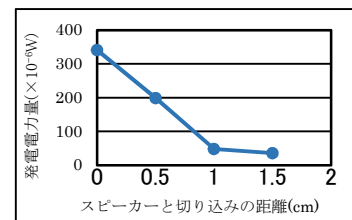


図14. スピーカーと切り込みの距離

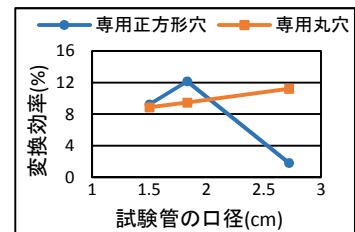


図15. 各口径における切り込み穴

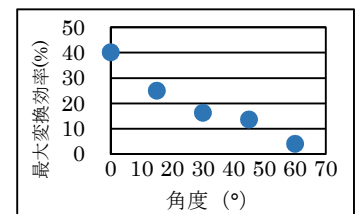


図16. 試験管の角度を変化

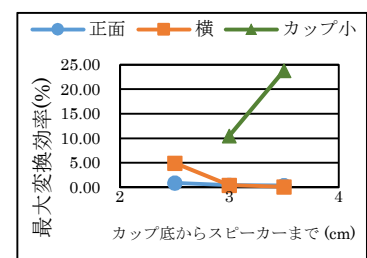


図17. カップ大小の比較
(カップ底からスピーカーまでの距離)

表1 炎高と発熱量

炎高 cm	1秒当たりの平均 ガス量	発熱量 (J)
12	13	5.80×10^2
4	0.98	43.7
3	0.5	22.21

[N: 音圧レベル(dB)、I: 音の強さ(W/m²)、I₀: 10⁻¹²(W/m²)、r: 試験管とデジタル騒音計との距離]しかし、音圧レベル測定はカップの側面で行っているためカップを付けずに正面で測定したときと比較した。すると $y = -0.051x + 6.00$ [x: 真横 3.5cm での音圧レベル(dB)、y: 音の強さの正面への変換倍率]の関係が得られたため、この結果を反映する工夫をした。さらに1m²あたりの仕事率に半径3.5cmの球の表面積をかけて1秒当たりのエネルギーの総量とした。

表2.エネルギー変換効率

(2) エネルギー変換効率

表2に各エネルギー間の変換効率をまとめた。ガスから音への変換効率は最大でも0.012%と低い値となった。音から電力への変換効率は最大で32%となったが、ガスから電力への変換効率が最大でも0.0038%というとても低い値になった。実験を振り返って、ガスから音へ、音から電力へのそれぞれについて変換効率が悪い要因として考えられるものを以下に挙げる。

炎高 (cm)	ガスの発熱量(W)	効率(%)	音のエネルギー (W)	効率 (%)	発電電力 (W)
12	580	0.00067	3.9×10^{-3}	15.15	6.0×10^{-4}
		0.0001			
4	44	0.01	4.4×10^{-3}	10.31	4.6×10^{-4}
		0.001			
3	22	0.012	2.6×10^{-3}	32.23	8.3×10^{-4}
		0.0038			

ガスから音への変換では、熱の大半が空気中へ放出してしまった。継続的に熱し続けていたためにガスの消費量が増えた。また、音から電気への変換では、音の大半が漏れてしまっている。カップの穴と試験管の管口との微妙な位置関係で音がうまくスピーカーに伝わらない。しかし、最大電力量を3cmの炎高で出すことができた。このことより、条件を整えればもう少し電力を上げることはできそうである。

(3) 断熱材を使った実験

上記のガスから音への問題点を解決しようと、断熱材を使った実験を行った。しかし、断熱材は下部にしか巻けないため上部から熱が出てしまい考えたような効果が得られないことがわかった。

8 まとめと今後の課題

今回の研究で電力は得られたが、とても効率が悪く実用化には程遠い結果となった。熱から変換される音が少なすぎたことから、ガスから音への変換効率を上げることに焦点を当てる必要もあると考えた。次は小さい仕組みで同様にいくつもの音源を集めることが可能か実験や蓄熱機を使った実験を試みたい。

9 参考文献

- 熱音響デバイス研究 東海大学長谷川研究室
<http://www.ed.u-tokai.ac.jp/thermoacoustic/research1.html>
- 熱音響技術研究 | SHIN-ICHI.ORG 坂本真一 <http://www.shin-ichi.org/ctt.html>
- Thermoacoustics 試験管で熱音響
<http://members.jcom.home.ne.jp/kobysh/experiment/acoustic/acoustic.html>
- 静岡ガスホームページ <http://www.shizuokagas.co.jp/>
- 音の基礎講座 (財) 建材試験センター, 建材試験情報
12'07 <http://members.jcom.home.ne.jp/kobysh/experiment/acoustic/acoustic.html>
- 熱音響発電 試験管熱音響スターリングでLEDの点灯に成功
<http://members.jcom.home.ne.jp/kobysh/experiment/TASE/generator.html>