ゆうれい試験管における熱音響現象

研究者
井口朋美　高嶋那奈　西村七海　横山珠実

指導教諭
北原　勉　先生

要旨

熱音響現象とは,気体の振動を通じて熱と音の相互作用が生じる現象で,「熱から音」「音から熱」への変換ができる.管にスタックと呼ばれる細い流路の通った部品を入れ,その管に音や熱を加えることで現象が発生する.熱音響現象を用いた発電は,原理的に高効率でエネルギー転換が可能であるとされ,現在研究が進んでいる.私たちは,熱音響現象の一種,「ゆうれい試験管」を研究に用いた.これはスチールウールなどをスタックとして入れた試験管の一端を熱し温度差を作ると,気柱共鳴が引き起こされ,閉管の基本振動の音が発生するという実験である.目的はゆうれい試験管において発生する音を大きくすること,音の発生率を上げること,どの要因がどの結果に影響するかを見つけることとした.

実験を行う際の試験管の角度がどれだけ音の持続時間や発生率,音の大きさなどに影響するかを調べた.発生率に関しては,45°,0°が 225°に比べ高いという結果になった.また,音の大きさは 45°が最も大きくなった.その他,45°は音の発生までの時間が短く,持続時間が短いという特徴があり,0°は持続時間が長く,断続的に鳴る回数が多いという特徴があった.これらのことから,何度も実験をする必要がある場合は,音の発生が早い 45°が適していると考えた.また,断続的に鳴る現象を研究する場合,現象を長時間観察する必要がある場合は 0°が適していると考えた.これらの違いが生まれる理由は,「スタックの一端に加わる温かい空気が上昇する力の向きが,気柱共鳴を引き起こす振動の向きにどう干渉するか」であると考えている.また,発生率にはスタックの詰め方,火の位置も大きく関わることもわかった.試験管と平行な方向に大きな空洞があると現象は発生しない.スタックを詰める際には,横から確認するだけでなく,試験管の口から見て空洞がないことを確認する必要がある.火の位置に関しては,スタックの端に最も熱い部分である火の先端が当たるように実験を行うことが重要である.

Abstract

Thermoacoustic phenomenon is a phenomenon in which the interaction of heat and sound occurs through the vibration of gas, and it is possible to convert heat to sound and sound to heat. The phenomenon occurs when sound and heat are applied to the tube. In principle, power generation using thermoacoustic phenomena is considered to be a highly efficient energy conversion method, and research is currently underway. used a type of thermoacoustic phenomenon, the ``Yurei test tube'', in their research. Heating one end of a test tube containing a stack of steel wool to create a temperature difference causes air column resonance, causing the tube to close. The purpose of this experiment was to make the sound generated in a test tube louder, to increase the rate of sound generation, and to find out which factors influence which results.

We investigated how much the angle of the test tube during the experiment affects the duration, occurrence rate, and loudness of the sound. As for the occurrence rate, it was found that 45° and 0° are higher than 225°. The results showed that the loudness of the sound was greatest at 45°.In addition, 45° has the characteristics that the time until the sound is generated is short and the duration is short, while 0° is characterized by a long duration, it was characterized by a large number of intermittent sounds. Based on these facts, we thought that 45°, where the sound occurs quickly, would be suitable if it is necessary to conduct many experiments. We thought that 0° would be appropriate if we needed to observe the phenomenon for a long time. The reason for these differences is that ``the rising force of warm air applied to one end of the stack We believe that how the orientation interferes with the direction of the vibrations that cause air column resonance. We also found that the occurrence rate is greatly influenced by the way the stack is packed and the position of the flame. Parallel to the test tube If there is a large cavity in the direction of It is important to conduct the experiment so that the hottest part of the flame, the tip of the flame, hits the edge of the stack.

1　緒言

昨今,地球温暖化などの要因から,再生可能エネルギーが注目を浴びている.熱音響現象を利用した熱音響発電は,排熱を利用できる,機械のメンテナンスがしやすいなどの様々なメリットを持つ.

熱音響現象とは,管の中にスタックと呼ばれる細い流路の通った部品を入れ,管を加熱し音エネルギーを発生させる,または逆に音波を管に入れて熱エネルギーを発生させる現象のことである.私たちは,音と熱が相互に作用するという点に興味を持ち,これを研究テーマに選んだ.この熱音響現象は近年研究が進んでおり,高校生の研究でも,スタックの性質を調べる,微量の発電を行うなど様々な実験が見受けられる.

私たちはまず「音から熱」の実験を行ったが,高校にある設備ではごく僅かな熱の変化を測ることができなかった.そのため「熱から音」の現象に着目し,試験管とスチールウールで熱音響現象を発生させることができる
「ゆうれい試験管」という実験を用いて研究を行った.

ゆうれい試験管・・・
試験管の中に入れたスタックの一端をしばらく加熱すると,「ボー」という音が鳴る.
・こういった音が鳴る理由
加熱によってできるスタックの両端の温度差により,スタック内の空気が膨張と収縮を繰り返す.それによって管の中の空気全体が振動し,その振動が十分な大きさになると閉管の気柱共鳴が引き起こされる.このようにして試験管の長さに応じた基本振動の音が発生する.

2　研究の目的

近年,熱音響現象を利用した発電や冷却の機械の開発が進んでいる.熱音響冷却ではループした管を用いて熱から音,音から熱の変換を繰り返してエネルギーを増幅させる.そのため,種々の条件を変えて熱音響現象で発生する音を大きくすることはその際取り出せるエネルギーを増やすことに繋がる.

また,ゆうれい試験管での実験は高校生レベルで熱音響現象を研究する際非常によく用いられる手法である.熱音響現象は音が発生しないことには何も調べられない.そのため,より安定して熱音響現象を発生させる方法を探す必要がある.また,どういった要因がどの結果に影響するかを見つければ様々な実験が行いやすくなる.

これらの理由から,今回の実験の目的は
①ゆうれい試験管において発生する音を大きくすること
②音の発生率を上げること
③ゆうれい試験管においてどういった要因がどの結果に影響するかを見つけることとした.

3　実験

＊基本的な実験方法

実験用具

試験管（口径 16mm,長さ 16cm）
スチールウール　マッチ　氷水
ガスバーナー　キッチンペーパー
騒音計（アプリを使用）　温度計

方法

(1)以下のような試験管を作成する.
長さ 4cm のスチールウールを試験管の底から 3cm の場所に詰める.
4cm 幅に切ったキッチンペーパーを試験管の底から 5cm のところに巻く[1].

(2)試験管の口から,近いほうのスタックの端までを氷水で 7℃台まで冷やす[1].

(3) 試験管の角度[2]を調節し,ガスバーナーの火の放出口から 6cm 離れた所にスタックが位置するよう設置して熱する.

(4)音が鳴った場合,鳴り終わるまで,または所定の時間まで観察する.また以下のものを測定する.
・気温
・湿度
・鳴り始めた時のスタックの両端の温度
・鳴るまでにかかった時間
・鳴っていた時間
・鳴り終わりのスタックの端と端の温度
・音の大きさ

5 分以内に鳴らなかった場合,加熱をやめ,以下のものを測定する.
・気温
・湿度
・始めと終わりのスタックの両端の温度

[1] 温度差を形成しやすくするため
[2] 試験管の底を原点とし,試験管の口を回転させて作られた角度

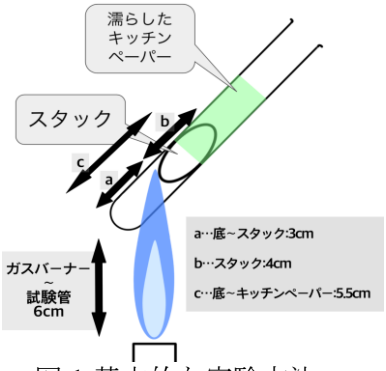

図 1:基本的な実験方法

３－１　音の発生の確認

３－１－１　目的
　熱音響現象を実際に発生させる.

３－１－２　方法
　前述の＊基本的な実験方法　の通り行う.
試行のため定めていない条件がある.
火の大きさは 12cm とした.また,角度は写真 1 のように 45°とした.

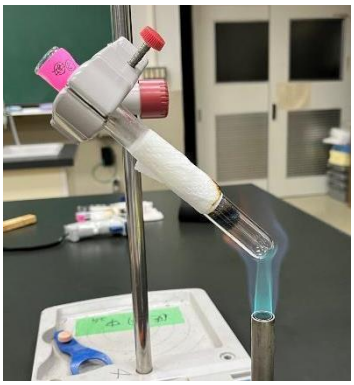
写真 1

３－１－３　結果
　15 本中 3 本の試験管で音が発生した（20%）.

３－１－４　考察
　音の発生率が低かった原因は以下の 3 つであると考えられる.

⑴スチールウールの質量が試験管に対して適していなかった.
⑵火が弱かったことによって,音が発生するために必要な温度差を作れていなかった.
⑶スチールウールが酸化されたことによって,酸化した分流路がふさがり,スタックとして機能しなかった.

３－２　火の強さとスチールウールの酸化による発生率について

３－２－１　目的
　３－１－４考察　先行研究を調べたところ３－１－４考察のような要因があっても熱音響現象は発生するということがわかった.しかし火の強さやスチールウールの酸化は発生率に関わると考えたため,対照実験を行うことにした.スチールウールの質量を調べて統一して実験を行う.
・火の強さ
・スチールウールの酸化
が熱音響現象の発生率にどう影響するかを調べる.

３－２－２　方法
⑴スチールウールの質量を 0.55g とし,加熱する試験管を作成する.また,試験管の角度は実験１と同様に 45°とする.
⑵以下のように条件を変えて実験を行う.
　A①～⑩…火の長さ 15cm,通常スタック[3]
　B⑪～⑳…火の長さ 6cm,通常スタック
　C㉑～㉚…火の長さ 15cm,酸化スタック[4]
⑶ABC それぞれの条件を 10 回ずつ行う.

３－２－３　仮説
　A は条件を先行研究と揃えた.また,先行研究で低温でも音が発生した,酸化しているスタックでも鳴ったという資料があるため 3 種類の試験管は音が鳴ると予想する.

３－２－４　結果
A（先行研究通り）

番号	音の大きさ（dB）	鳴った回数（回）
②	71	1
③	70	1
⑥	71	1
⑦	72	6
⑧	70	4
⑨	72	1
⑩	72	1
平均	71.1	2.1

[3] 酸化させていないスチールウール
[4] 全体を完全に酸化させたスチールウール
酸化後が 0.55g になるよう調整

C（酸化スタック）

番号	音の大きさ（dB）	鳴った回数（回）
㉗	70	1
㉙	67	3
平均	68.5	2.0

表 1：音が発生した試験管の音の大きさ,鳴った回数とその平均

A の試験管は 10 本中 7 本鳴った.
B の試験管は 1 本も音が鳴らなかった.
C の試験管は 10 本中 2 本鳴った.

３－２－５　考察

A

鳴らなかった試験管のスタックには,写真 2 のように上から見ると空洞が空いていたため,スタックとしての機能に支障をきたしたから鳴らなかったと考える.

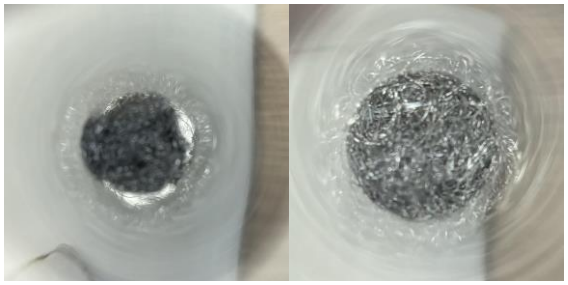

写真 2：
（左）音が鳴らなかった試験管のスタック
（右）音が鳴った試験管のスタック

B

ガスバーナーの火を弱めたことで,ゆっくり加熱され，加熱部が十分な熱さになるより早く熱がスタックの反対側に移動してしまい温度差が形成されなかった可能性，また火が弱かったため，加熱部が 5 分以内に十分に熱されず現象の発生に必要な温度差が形成されなかった可能性を考える.

C

写真 3 のように巻いていたキッチンペーパーに焦げがないため火を当てる位置が試験管の底に寄ってしまい,温度差が 5 分以内に形成されず,鳴らなかったと考える.

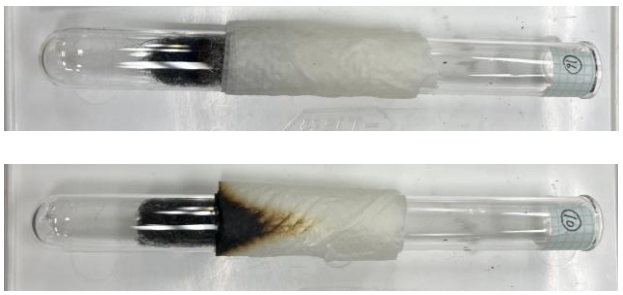

写真 3：
（上）音が鳴らなかった試験管
（下）音が鳴った試験管

キッチンペーパーが焦げていたのに鳴らなかったものは,A で鳴らなかった試験管のスタックと同様にスタックに空洞があった.そのため音が鳴らなかったと考える.
以上の理由から C の試験管は鳴らなかったと考えられるため,スタックの酸化がどのように音の発生に関わるかは調べられなかった.

しかし,A の試験管のうち,加熱後にスタックの大部分が酸化したものもそのまま鳴り続けていたため,大きな影響を与えているとは考えにくい.

３－３　試験管の角度

３－３－１　目的

実験 2 では,火の強さが強いほうが発生率が高く,スタックの酸化はあまり影響しないことがわかった.つまり,音の発生の有無には温度差の形成が大きく寄与すると考えられる.
そのため冷却と加熱以外にも温度差の形成にかかわる要素があるのではないかと考え,試験管の角度を変えることにした.

３－３－２　方法

⑴以下のような条件で試験管を作成する.
・スチールウールの質量は 0.55g
・試験管とスタックの間に空洞を作らないようにスタックを試験管に詰める.
・火の長さは 15cm
⑵写真 4 のように,試験管の角度を変えて実験を行う．もともと 45°で実験していたため,45°ずつ回転させて比較することにした.

0°　試験管 1～10

90°　試験管 11～20

225°　試験管 21～30

写真 4：各角度の試験管

90°の反対 270°（加熱部分が上）はガスバーナーで加熱する関係上不可能だったので行っていない.

⑶それぞれの条件は 10 回ずつ行う.

３－３－３　仮説

暖かい空気は上に向かうので,加熱部分を上にすると暖まった気体が加熱部分に留まる.それにより温かい空気がスタックの反対側に移動しにくいため,温度差が長く保たれると考えられる.そのため,加熱部分が上である 225°が最も温度差を保ちやすいと考える.したがって,音の発生率,音が鳴る時間の長さともに 225°>0°>45°>90°になると予想する.

３－３－４　結果

90°の試験管はガスバーナーの火がキッチンペーパーに燃え移り実験を行うことが危険だったため,測定を行わなかった.

0°（水平）

番号	鳴るまでの時間 (s)	鳴っていた時間 (s)	大きさ (dB)	鳴った回数 (回)
1	34	＞566	73	1
2	55	532	72	1
3	74 16 6	26 457 ＞21	75 73 ?	3
平均 合計		＞504	74	
4	66	＞534	74	1
5	175 216 19 50 17	9 16 9 40 ＞49	72 72 73 73 72	5
平均 合計		＞123	72.4	
6	86 241	10 ＞263	56 72	2
平均 合計		＞273	64	
7	70 10 26 11 37 41 14 103 8	30 2 71 28 11 17 2 9 ＞110	74 ? 70 70 69 70 ? ? 73	9
平均 合計		＞336	71	
8				0
9	147 181	9 256	67 73	2

平均 合計		265	70	
10 平均 合計	84 10 74	393 3 ＞36 ＞432	71 72 71.5	3
平均	87.9	396	71.3	3.0

225°（加熱部分が上）

番号	鳴るまでの時間(s)	鳴っていた時間(s)	大きさ(dB)	鳴った回数(回)
21 平均 合計	58 37	203 ＞302 ＞505	75 74 74.5	2
22				0
23				0
24	44	＞556	79	1
25				0
26				0
27	88	＞512	70	1
28	71	＞529	71	1
29				0
30 平均 合計	63 15 9	277 98 ＞138 ＞513	72 73 74 73	3
平均	64.8	523	73.5	1.6

表 2：音が鳴るまでの時間,音が鳴っていた時間,音の大きさ,音の鳴った回数とその平均

＊平均とは・・・

・「最初に音が発生するまでの時間」の平均

・「一本の試験管で鳴っていた時間の合計」の平均

・「一本の試験管での最大 dB の平均」の平均

いずれの項目も「鳴った時にどのように現象が発生するか」を調べるための指標であるので,鳴っていない試験管は平均に入れていない.

全体で 10 分経った時点で計測を止めた.その時点でまだ音が鳴っていた試験管には,鳴っていた時間とその合計時間に＞をつけている.

実験 3 まとめ

角度	鳴るまでの時間(s)	鳴っていた時間(s)	大きさ(dB)	鳴った回数(回)	発生率(%)
225°	64.8	523	73.5	1.6	50
0°	87.9	396	71.3	3.0	90
45°(実験 2A)	68.0		71.1	2.1	70

表 3：音が鳴るまでの時間,音の鳴っていた時間,音の大きさ,音の鳴った回数の平均値と発生率

※実験 2－A では音の発生率のみを調べたため 10 分が経過する前に測定を止めた試験管があったので,鳴っていた時間の値は比較に使用しない.

0°の試験管では,10 本中 9 本鳴った.

鳴った 9 本のうち 8 本が断続的に鳴った.

225°の試験管では,10 本中 5 本鳴った.

鳴った 5 本に関しては,断続的に鳴る場合も 2 回あったが,合計の鳴っていた時間の平均は 523 秒(8 分 43 秒)と 0°の平均 396 秒(6 分 36 秒)を大きく上回っている.

３－３－５　考察

この実験では,火を当てる位置の基準が班員内で統一できておらず,225°の実験の際火を当てた位置がややスタックから遠かった可能性がある.それによって鳴らない試験管が他の角度と比べて多くなったのではないかと考える.

また,225°の試験管の鳴った時間が長くなったことにおいては,

0°の鳴っていた時間の平均と大きな差ができたことから,

仮説通り「温かい空気が熱している側に留まり,温度差が長く保たれた」からだと考えられる.

３－４　火の当て方を統一し角度の再実験

３－４－１　目的

実験３で不備があったと考えられるため,火の当てる位置を統一し再び実験３の仮説を検証する.音の発生率を上げる.

３－４－２　方法

実験３の方法に加えて,スタックの端に火の先端が直接当たるようにガスバーナーを設置する.時間の都合上加熱開始から 15 分経った時点で加熱,測定をやめる.

測定する試験管の角度は以下の通りである.（詳しくは,実験３の方法参照）

・225°（試験管 401～410）
・0°　（試験管 411～420）
・45°（試験管 421～430）

３－４－３　仮説

実験３と同様の理由から,加熱部分が上である 225°が最も温度差を保ちやすいと考える.そのため音の発生率,音が鳴る時間の長さともに 225°>0°>45°になると予想する.

３－４－４　結果

225°（加熱部分が上）

番号	鳴るまでの時間(s)	鳴っていた時間(s)	大きさ(dB)	鳴った回数(回)
401	74 23	610 162	72 73	2
平均 合計		772	72.5	
402	48	＞852	78	1
403				0
404	64 15	14 ＞807	74 73	2
平均 合計		＞821	73.5	
405	60	＞840	75	1
406				0
407	98 41	16 493	69 73	2
平均 合計		509	71	
408	55 11	725 ＞109	72 72	2
平均 合計		＞834	72	
409	53	＞847	73	1
410	56	300	72	1
平均	63.5	721.9	73.4	1.5

0°（水平）

番号	鳴るまでの時間(s)	鳴っていた時間(s)	大きさ(dB)	鳴った回数(回)
411	38	＞862	72	1
412	47	＞853	72	1
413	60	＞840	71	1
414	45	＞855	75	1
415	92 3 50	9 27 ＞719	62 62 71	3
平均 合計		＞755	65	
416	49 30	342 ＞479	73 72	2
平均 合計		＞821	72.5	
417	60 155 60	197 187 11	71 67 65	5

平均 合計	70 36	9 96 500	65 66 66.8	
418	62	＞838	71	1
419 平均 合計	59 60 9 8 47 18	540 7 6 3 99 7 662	73 66 62 60 65.25	6
420	57	＞843	73	1
平均	56.9	782.9	70.3	2.2

45°（加熱部分が下）

番号	鳴るまでの時間(s)	鳴っていた時間(s)	大きさ(dB	鳴った回数(回)
421	63	180	75	1
422 平均 合計	145 14	50 85 135	72 71 71.5	2
423	50	683	74	1
424	32	197	72	1
425	20	266	74	1
426	32	258	77	1
427	24	231	78	1
428	40	700	72	1
429	32	440	74	1
430	33	769	73	1
平均	47.1	385.9	74.1	1.1

表 4：角度毎の音が鳴るまでの時間,音が鳴っていた時間,音の大きさ,音の鳴った回数とその平均

※平均のとり方は表 2 と同様.

全体で 15 分経った時点で計測を止めた.その時点でまだ音が鳴っていた試験管には,鳴っていた時間とその合計時間に＞をつけている.

実験 4 まとめ

角度	鳴るまでの時間(s)	鳴っていた時間(s)	大きさ(dB)	鳴った回数(回)	発生率(%)
225°	63.5	721.9	73.4	1.5	80
0°	56.9	782.9	70.3	2.2	100
45°	47.1	385.9	74.1	1.1	100

表 5：各角度の鳴るまでの時間,鳴っていた時間,音の大きさ,音の鳴った回数の平均値と発生率

225°：
- 加熱後約 50 秒～1 分 10 秒で鳴り始め,最も発生が遅い.
- 15 分中 12 分ほど鳴っている.
- dB の平均は約 73dB で二番目に大きい.
- 鳴ったもののうち 50%は一度途切れて再度鳴り始めた.2 回を超えたものはなかった.
- 鳴らなかった試験管があり,他二つに比べ発生率が低い.

0°：
- 加熱後約 40 秒～1 分で鳴り始める.
- 15 分中 13 分ほど鳴っており,持続時間はこの中で最も長い.
- dB の平均は約 70dB で最も低い.
- 断続的,つまり途中で途切れることが多くあり,1 本の試験管で 5 回以上鳴るものもあった.
- 発生率は高く,音が鳴った.

45°：
- 加熱後約 20 秒～50 秒で鳴り始め,最も発生が早い.

・この三つの角度の中では最も鳴っている時間が短く,鳴り始めてから 7 分半程度で鳴り終わる.
・dB の平均は約 74dB で最も高い.
・音が途中で途切れることが少なく,1 本の試験管で 1 回しか鳴らないことが多かった.
・発生率は高く,音が鳴った.

３－４－５　考察

⑴鳴るまでの時間（225°＞0°＞45°）

※試験管に並行な方向の空気の振動が,気柱共鳴で自励振動を引き起こすのに十分な大きさになれば音が鳴ると考える.

・45°
空気の収縮,膨張による空気の振動の方向と,温かい空気の移動が一致している.

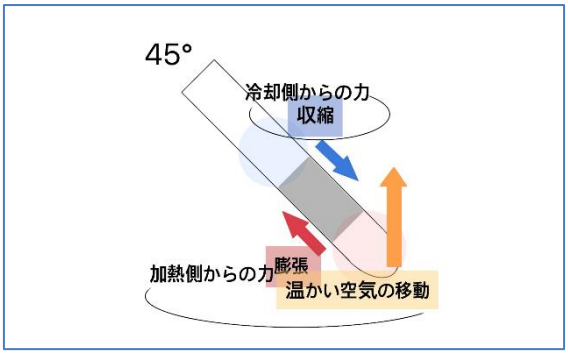

図 2

・0°
温かい空気の移動が収縮,膨張の向きと垂直である.

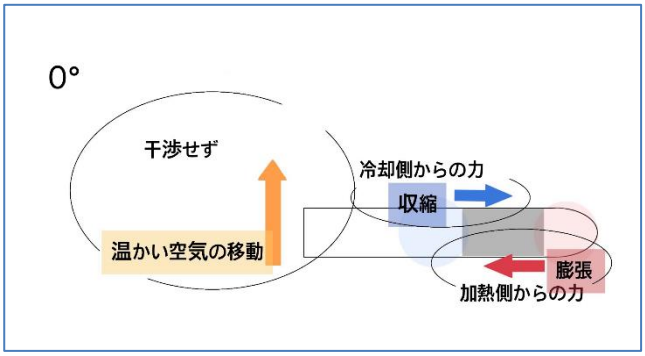

図 3

・225°
温かい空気の移動の方向が収縮,膨張の向きと逆である.

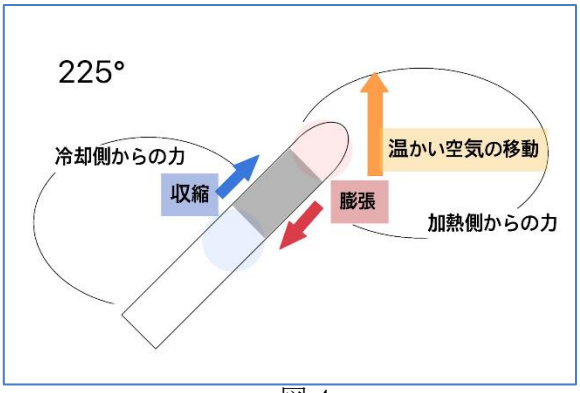

図 4

以上のことから 45°の時には気柱共鳴を起こしやすく,0°では干渉がなく,また 225°では逆に気柱共鳴を引き起こすために必要な振動の大きさに達するのが遅くなる.そのためこのような結果になったのではないかと考えた.

⑵鳴っている時間の長さ　(0°＞225°＞45°)

温度差が保たれている時間が長ければ長い時間鳴ると考えられる.

・45°
温かい空気の移動により,温度差が失われるのが早い可能性がある.
・225°
温かい空気の移動がしづらいため,45°よりは温度差が保ちやすかった可能性がある.

・0°
考察はできなかった.

⑶音の大きさ（45°＞225°＞0°）

※波の振幅の大きさが音の大きさであることから,振動を起こす力が大きいほど大きな音になると考える.

・変えた条件である角度と関係なく,図 5 のように,⑷断続的に鳴った回数　と強い負の相関がある.（相関係数：-0.763）

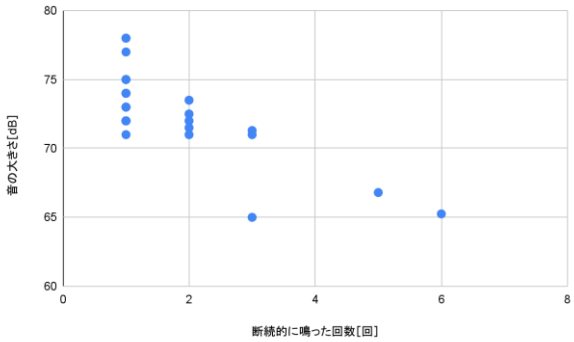

図 5：断続的に鳴った回数(回)と音の大きさ(dB)の関係

この結果には,測定方法が大きく影響を及ぼしてしまった.自励振動が引き起こされ音が鳴るとき,次第に音が大きくなり,その後次第に音が小さくなって音が消える.それにより,数秒で音が消える場合には音が大きくならずにdB の測定が終わり,最大値が小さくなる.断続的に鳴る回数が多い場合,最大値の平均値が下がり,一本あたりの平均の dB も小さくなっていると考えられる.

・45°
考察⑴鳴るまでの時間　で述べたことと同じ理由で振動を起こす力が大きいことから最も大きい音が鳴った可能性がある.

・0°
断続的に鳴る回数が他の二つと比べ多いため,dB の平均値が低くなった.長時間鳴っているときの dB を見ると,他の角度と同じような大きさに鳴っている.

・225°
45°,0°が以上の理由で上のような結果になったため,二番目に音が大きいという結果になったのではないかと考えられる.

⑷一本の試験管で音が断続的に鳴った回数
(0°＞225°＞45°)
※「自励振動が『温度差がなくなる』以外の理由で一時的に止まり,また何かしらの要因で再開する」ということが繰り返されることで,断続的に鳴る回数が増えると考える.

・45°
考察⑴鳴るまでの時間　で述べたとおり,45°で気柱共鳴を引き起こしやすい環境が常にあるとすれば,温度差がある限り止まることなく鳴り続けやすいため断続的にはならないのではないかと考える.

・0°
考察できなかった.

・225°
考察できなかった.

⑸音の発生率(0°=45°＞225°)
・225°の試験管の発生率が 0°や 45°に比べて低くなった原因として 225°という角度が発生に関わっていると考えられる.
考察⑴鳴るまでの時間　で述べた要因から,気柱共鳴を引き起こすために必要な振動の大きさに達することが 0°,45°に比べて難しく,発生率が低くなったのではないかと考えられる.

４　結論
４－１　音を大きくする方法（目的①）
⑴
実験 4 より,今回実験を行った三つの角度のうちでは 45°が最も適していると考えられる.

４－２　発生率を高める方法（目的②）
⑴
・0.55g のスチールウールスタック
・試験管の底から 3cm の位置,スタック自体の長さ 4cm
という条件は,データをとった実験全 95 回のうち 54 回（約 57%）（角度のみを変えた実験全 50 回中では 42 本（84%））で熱音響効果を発生させることができている.
先行研究で調べられたこの二つの条件は,「口径 16mm, 長さ 16cm」の試験管で熱音響現象を発生させるのに一定の適性を持っていると考えられる.
⑵
スタックの詰め方においては,
「空洞が無いかどうかを確認する際,横からだけでなく上から見て穴が空いていないか確認する」という手法を取り入れてからの実験では,50 回中 42 回（84%）鳴るという成果を得ることができた.（それまでの実験 45 回では 12 回（約 27%）,他の鳴りづらい要素を取り除いた実験 2－A でも 10 回中 7 回（70%）である.）
この手法は有効であると考えられる.
⑶
火の位置に関しては,
「スタックの端に,火の先端（1 番熱い部分）が当たる」くらいで実験を行うと,発生率は安定する（30 本中 28 本,約 93.3%）.
試験管に火が触れることでやや先端がずれるので,それも考慮した位置あたりに配置し火の当たり具合を確認しながら実験を行うのが良いと考えられる.
⑷
角度に関しては,実験 4 より,225°よりは
45°と 0°で行うことが適しているのではないかと考えられる.

４－３試験管の角度と熱音響現象の関係
（目的③）
３－４－５より,
45°：
音の発生までがこの三つの角度の中で最も早いため,何度も試行しやすい.

0°：
音の発生を長い時間観察する場合,また,断続的に鳴る現象を観察する場合はこの角度が適して

いると考えられる.

5　展望

⑴

４－１－２の⑴の条件が今実験で使用した試験管以外の口径,長さの試験管に対応するかは不明である.
もし対応するなら,
スタックの長さは
「試験管の長さ×1/4」cm,
スタックの中心の位置は
試験管の底から「試験管の長さ×0.3125」cm,スチールウールの重さは
「試験管に入る水の重さ×約 0.01651」g,
という比率になる.
他のサイズの試験管でこの比率を守って実験した際,似たようなデータが出るのか確認したい.

⑵

断続的に音が鳴る理由に関して,詳しく根本的な考察ができなかった.
角度の他にも様々な条件を変えることで,断続的に鳴りやすくなる条件,鳴った状態が持続しやすい条件などを見つけて比較することで調べてみたい.

⑶

今研究では,設備の都合上,火の温度が測れなかったためやむを得ず火の長さを統一するという方法をとったが,火の長さを統一することで火の温度は一定になっていたのかどうか不明である.
火の温度の測り方など,統一するための方法を探したい.

6　引用

・試験管で熱音響
http://www.kob-sc.uh-oh.jp/experiment/acoustic/acoustic.html
・熱音響現象を利用した発電についての研究
https://gakusyu.shizuoka-c.ed.jp/science/sonota/ronnbunshu/h28/163090.pdf
・第 3 回 HAKKO 熱の実験コンテスト 最終報告書
https://www.bing.com/ck/a?!
・直管内の熱音響自励振動の実験
NASJ_2019_06.pdf (uec.ac.jp)
・公益社団法人　日本冷凍空調学会
日本冷凍空調学会 (jsrae.or.jp)
・日本音響学会誌 62 巻 2 号
2_62_KJ00004018765.jpg (827×1170) (jst.go.jp)2006
・熱音響 FAQ
熱音響 FAQ (tohoku.ac.jp)
・日本経済新聞
「熱」を「音」に　エネルギー機器の概念変える「熱音響」 - 日本経済新聞 (nikkei.com)
・HASEGAWA/KUZUU/SENGA LAB.
熱音響デバイス研究 -東海大学 長谷川・葛生・千賀研究室- (u-tokai.ac.jp)
・定在波熱音響システムにおけるスタック内過熱によるエネルギー変換促進
Promotion of Energy Conversion by Heating Inside Stack in Standing-Wave Thermoacoustic-System (jst.go.jp)
・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
・さけぶ試験管　野沢北高校令和 4 年度理数科課題研究報告書
・熱音響冷却装置の製作と冷却原理の考察　倉敷天城
・未来博士工房 成果報告会　熱音響現象を利用した発電に関する研究　日本大学理工学部電気工学科

・熱音響現象における温度変化の最適条件 - 一般社団

・ゆうれい試験管　おもしろ実験・製作室　小林義行（茨城県立高校理科教諭）（科学工作館）

・試験管で熱音響　おもしろ実験・製作室　小林義行（茨城県立高校理科教諭）（科学工作館）

・熱音響の話　no+e pp 丸

・釜鳴り現象の解明と応用　2003 年 10 月研究報告土浦工業高校理科研究部

・熱音響現象を利用した円筒管内複合音波の選択的増幅　経田僚昭，多田幸生，飯田祐也