

熱音響現象における温度変化の最適条件

愛媛県立松山南高等学校 松山南熱音響班

田中諒 村上聖音 指導教諭 露口 猛

1. はじめに

熱音響システムとは、熱音響現象によって熱エネルギーから音エネルギーへと変換し、その音によるエネルギー運搬を用いて温度差を作り、冷却または発電を行うシステムのことである。熱音響現象を利用した冷却システムにおいて、細い流路を作り、かつ熱をため込むスタックは、熱エネルギーと音エネルギーの変換を行うという非常に重要な役割を持っている。音波が狭い通路を通る際に、気体分子と壁がエネルギーのやり取りを行い、その課程で温度差を作る。このスタックのエネルギー変換効率を向上させることによって、冷却機能を向上することができる。先行研究においてスタックの寸法や材質等、様々な検討がなされている。私たちは、先行研究でほとんど触れられていないスタックの穴の形に着目した。定在波や分子の運動に確実に影響を与え得ることが予想される穴の形状と温度差の関係を調べた。

2. 本研究の目的と仮説

私たちは、スタックにおいてどのような条件が熱音響現象の効率化に影響するかに興味を持った。堀田ら(2009)や藤田ら(2005)をはじめとする報告によれば、温度変化量の最大化に最適なスタックの位置や長さ、穴の大きさについて解明されている[1][2][3][4]。しかし、スタックの穴の最適な形状については報告例がない。熱音響現象が気体分子とスタック壁との熱交換および気体分子の移動による熱輸送ならば、穴の形状(図2)は分子との接触回数等に影響すると我々は考えた。そこで、図1のような三角形、正方形、正六角形、円形の穴のスタックを作製し、穴の形状の違いによる温度変化量への影響を調べることにした。そして

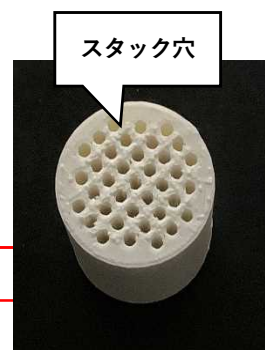


図1 スタックと穴の形状

「スタック穴の形状の対称性が高くなるほど温度差が大きくなる」という仮説を立て実験を行った。

3. 実験方法

(1) 実験装置及び基本的な測定法

図2, 3のようにアクリル製もしくは塩化ビニル製パイプの一端にスピーカーを接続する。パイプ内にスタックを設置し、下記の実験を行った。なお、本研究では、スタックの両端(図3のA端とB端)の温度が熱音響現象によって変化し、スタック両端に温度差が発生することに注目し、A・B端の温度差を測定、検証し、熱音響現象のスタックでの最適条件を探ることとした。



図2 実験装置



図3 パイプとスタック

手順は以下のとおりである。スピーカーの反対の端をフタでふさぎ、音を流す前のスタックのA・B端の温度を熱電対温度計で測った。熱電対はスタック両端に触れるギリギリの場所に設置した。気温から音速を求め、パイプの長さから定在波の波長を決め、3倍振動となる振動数の音を一定時間スピーカーから入れながら、熱電対度計A・B端の温度を測った。その計測時間中の最大温度変化値を計測値とした。以上を5回繰り返し、A端とB端の温度差の平均を測定値として用いた。

(2) 実験の種類

ア 実験1：温度差の時間変化の予備実験

スタックによる実験の前に、魚類飼育に使用するエアポンプの中のフィルターをスタックの代わりに用いて同様の実験を行い、温度差の時間変化の様子を調べた。また、この時にパイプの口(蓋部分)にガムテープを貼ることによるパイプ内の密閉性の増加の影響、時間経過における温度差の遷移を調べ、以降の実験の計測時間を決定した。

イ 実験2：3倍振動におけるスタックと温度差の関係

掘田ら[1]によって、温度差が効率的に発生するスタックの位置は閉口端から15 cmと報告されているが、我々の実験環境下で掘田らと異なる結果が得られてしまった場合、実験条件としてスタックの位置を再設定する必要が生じてしまう。そのため、我々の実験環境下でも同様の結果が得られるかどうか、確認した。パイプの中の三倍振動の定常波を節と腹、その中間で12分割して、11点それぞれで温度差を計測した。

ウ 実験3：スタック壁の表面積と温度差の関係

スタック穴の壁の表面積と温度差の関係を調べ、どのように影響するのかを調べた。穴は真円の前段階として正方形のものを使用し、穴の総面積数は同じで、穴の数を9・16・36個とした。穴の総面積数を統一することにより、穴の壁の表面積の変化による影響を調べた。

エ 実験4：スタック穴の形状と温度差の関係

端面の穴の形状が正多角形であるスタックを用いて、温度変化量と多角形の頂点数の関係を調べた。3Dモデル作成ツールのスペックから、正五角形の作成が困難であったため、スタックの穴の形状は、真円、正三角、正方形、六角形の4つを用意しそれぞれの温度変化を調べた(図4)。

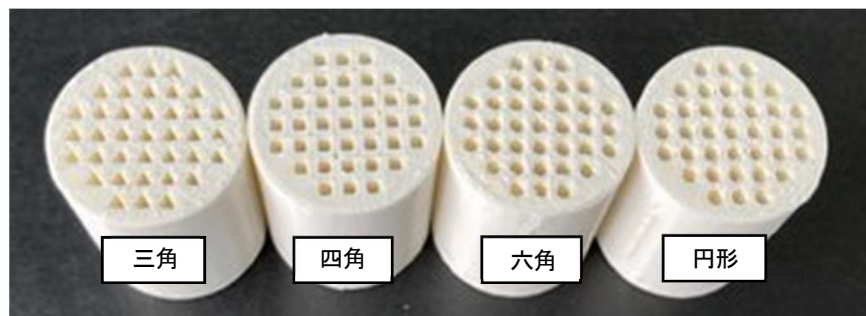


図4 スタック穴の形状

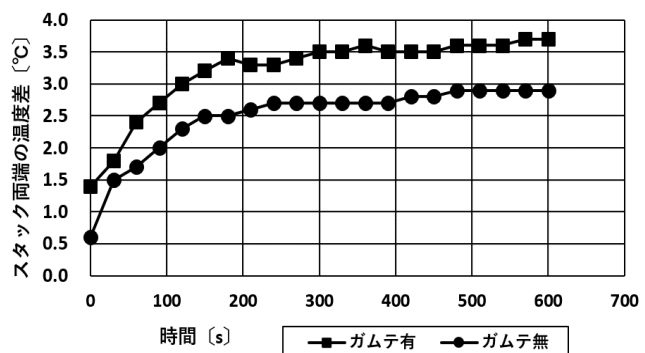


図5 温度差の時間変

4. 実験結果

(1) 実験1：温度差の時間変化の予備実験

図5にフィルターを使った場合のA・B端の温度差の時間変化を示す。ガムテ

有・無については、パイプの密閉性を高めるためにフタの部分にガムテープを貼ったか否かである。ガムテ有の方が温度差は大きく、効率がよいことが分かった。また、温度は200~300秒で安定し、その後の変化は少ないと見てよいと考えられる。そのため、今後の実験では音を鳴らし始めてから300秒間の温度差を、測定値として使った。

(2) 実験2：3倍振動におけるスタックの位置と温度差の関係

スタック位置と温度差の関係を図9に示す。腹と節の中間で温度変化が大きく(図6中②)なった。これは先行研究[1]とも一致する。よって以降の実験では、最も温度変化量の大きかった3倍振動定在波中の節と腹の中間にスタックを固定し、実験を進めた。

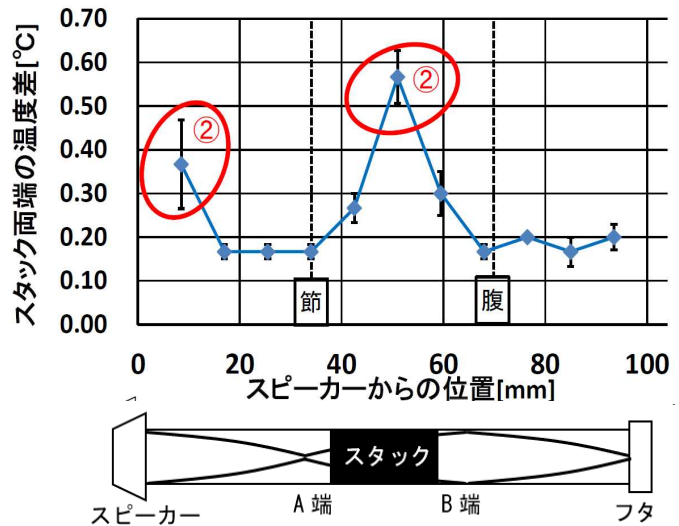


図6 スタック位置と温度差の関係

(3) 実験3：スタック穴の面積・スタック壁面積と温度差の関係

スタック穴壁面積とスタック両端温度差との関係は図7の通りである。

スタック穴壁の面積の増加に伴い温度差も増加することが分かった。パイプの内径が一定であり、スタック穴の細かさに限りがあるため多くのサンプルは取れなかった。グラフの形から穴壁面積と温度差は比例する、とは言い難く、一定値に近づきつつあるのかもしれない。

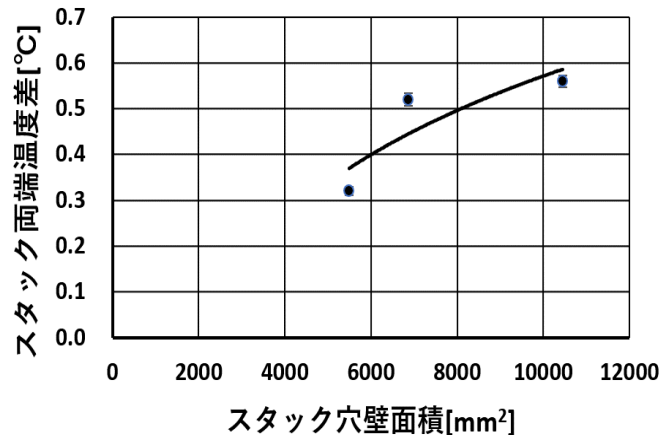


図7 スタック穴壁面積と温度差の関係

(4) 実験4：スタック穴の形状と温度差の関係

実験3までを踏まえ、スタック穴壁面積を統一し、穴の形状の異なるスタックを作成し実験を行った。穴壁の面積以外に、穴の数を統一し、配置も差異が無いようにした。スタックの長さについても同様である。実験結果を図8に示す。穴の形状の頂点が増えると、温度差も増加した。しかし、究極の多角形であるはずの円では大きく温度差が下がった。

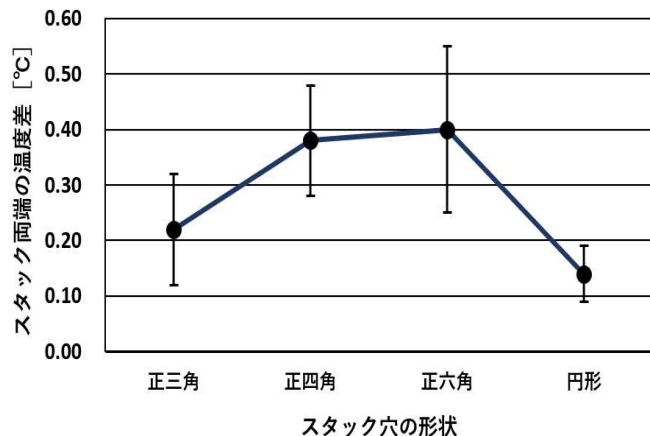


図8 穴形状と温度差の関係

5. 考察

(1) 実験1：温度差の時間変化の予備実験

温度差が発生し、その値が安定するまでに200~300秒かかった。これは、熱輸送が行われ温度差が生じ、周囲からの熱流入の差が一定の値に達するまでの時間と見ることができる。また、ガムテープで口を塞ぐことによって温度変化量が大きくなったことから、気密性を高めることが温度差増大につながるということが分かった。

(2) 実験2：3倍振動におけるスタックの位置と温度差の関係

節と腹の中間地点で温度差が最大であった。また、腹と節の中間に置いたスタックについて、ほかの2か所については温度変化量が小さいが、これはスピーカーという波源とフタとの距離がちょうど中間の位置がエネルギー変換に適していると考えられる。これは空気が高密度時にスタック管壁との熱交換が盛んに行われ、その後密度減少時に空気が移動し、熱輸送に関与するという熱音響現象のモデルと合致し、先行研究とも一致する。

(3) 実験3：スタック穴の面積・スタック穴壁面積と温度差の関係

スタック穴壁面積の増加に伴い温度差も増加したことから、スタック穴壁面積の増加に伴って気体分子とスタック壁面との接触回数が増え、壁面との熱交換量が増え、温度差が増大したと考えられる。今回は穴を小さくし、穴の数を増やすことで穴壁面積を増やした。その結果、温度差が増大した(図9)。今後、穴壁面積を限られた管の内径の中で、最大化したスタックを作ることによって、実用的な領域の温度変化が得られると期待している。

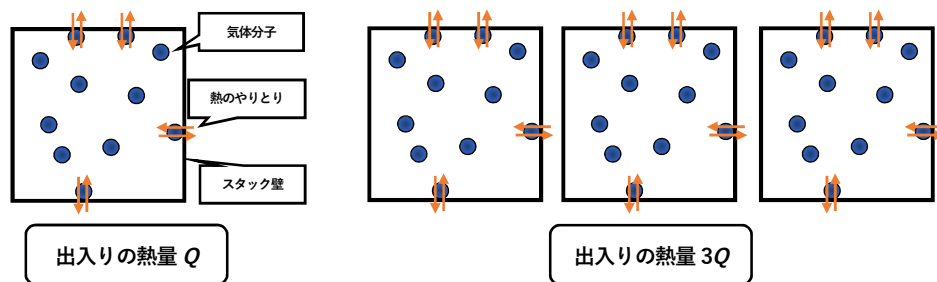


図9 スタック壁面積と温度差の関係

(4) 実験4：スタック穴の形状と温度差の関係

温度差の大きい穴の形状について共通することは、「角があり、なおかつ点対称」である。円形の温度差が小さかったことから、対称性が温度差に完全に関係しているとは言い難い。以上は、仮説「スタック穴の形状の対称性が高くなるほど温度差が大きくなる」と異なっており、仮説は誤りであったと言える。

以上より考えられることは次のようにまとめられる。

頂点数の増加に伴って、温度差が増えていることは認められた。多角形と円形の最大の違いは、角の有無である。角があることが熱交換・熱輸送に影響があると考えられる。例えば、気体分子の流体力学的な意味での流れが角の有無によって変わることは予想され、



図10 角と密度
(色の濃い部分が密度大)

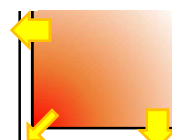


図11 分子と壁のエネルギーのやりとり

それが分子の密度(図10)、分子の壁とのエネルギーのやりとりの量の変化(図11)分子の壁との衝突頻度に影響を与えることがあるかもしれない。これは今後検討する必要があると考える。

6. まとめ

「スタック穴の形状の対称性が高くなるほど温度差が大きくなる」との仮説を立て、実験を行ったが、仮説は否定される結果となった。スタック位置による影響、スタック穴壁面積と穴体積の関係から測定条件を詰めていき実験4まで行ったが、穴の形状、特に角の有無について、理論も含めてさらに調べていく必要はあると考える。

7. 今後の展望

今後、実験結果の検証と確認を入念に行っていきたい。そもそも当初から温度差の値が小さい。温度差の値の小さいと、実験環境（外気温など）により生じる誤差の割合が増加することが予想され、実験結果の精度を低下させる恐れがある。先行研究では数度から数十度の温度差が生じることが報告されており、再度実験方法について練り直す必要がある。

これから考えられる実験装置の改良としては、次の通りである。

① 気密性の向上

フタをプラスチック板などで完全に接着し、一方は密閉性を完全に保障できる状態にする。現在は、アクリルパイプに測定用の穴を数多く開けており（図 12）、それをテープでフタをする状態であった。これを円錐形プラスチックによってしっかり塞ぐことなど行う。

② 断熱性の向上

温度差が外部との熱のやりとりによるものの可能性をなくすために、図 13 のような気泡シートでくるむ、などの工夫も必要と考える。

また、温度差の小さい原因としては、スタック穴数の不足、スタック壁面積の少なさ、等が考えられる。さまざまな条件にスタックを考えるとともに、実験1のフィルターのような、より表面積の大きくなる繊維状のものによる実験も行いたい。そしてその結果と合わせて考察していきたいと考えている。

8. 参考文献

- [1] 堀田浩平、坂本眞一、塚本大地、渡辺好章 “小型熱音響冷却システムにおける前兆変化とスタック特性の関係について(2009)
- [2] 藤田武、坂本眞一、吉田秀穂、今村陽祐、渡辺好章 “熱音響システムにおけるスタックの長さに関する基礎研究” (2005)
- [3] 畠沢政保、瀬尾宜時, “熱音響音波発生機の性能に及ぼすスタック位置の影響” (2002)
- [4] 坂本眞一 “はじめての熱音響” (2018)
- [5] 坂本眞一 “熱音響現象を用いたシステムの応用とその課題について” (2012)