

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 熱音響班 2020

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を音エネルギーに変換し、変換された音エネルギーを用いて冷却または発電を行うシステムのことである。廃熱を有効活用する手段の一つとして研究されている分野でもある。熱音響現象を利用した冷却システムであるループ管において、細い流路である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おり、スタックの最適化によって温度変化を最適化できるのではないかと考えた。

2. 本研究の目的

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、適切なスタックの位置や長さ、穴の大きさについては解明されている^{[1][2][3][4]}。しかし、温度変化に影響するスタックの穴の形状については未知の状態であり、この形状について研究することとした。

3. 仮説

熱音響現象はスタック壁面と気体分子の衝突による熱交換と、気体分子の移動によっておこる現象である。そのため気体分子のスタック壁面への衝突し易さが動くことが温度変化にも影響するのではと考えた。以上により

「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。

4. 実験方法

(1) 実験装置及び基本的な測定法

図1・図2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2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端の温度差を測定することで熱音響現象の最適度を測ることとした。

ア 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る。

イ 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、熱電対温度計A・B端の温度を一定時間測る。

ウ ア・イを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。



図1 実験装置



図2 パイプとスタック

(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。

イ 実験 2：3倍振動におけるスタックと温度差の関係

先行研究によって、温度差が効率的に発生するスタックの位置は分かっているが、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。

ウ 実験 3：スタック穴の面積・スタック壁の表面積と温度差の関係

スタック穴の面積・穴の壁の表面積と温度差の関係を調べ、どちらが温度差に影響がより大きいのかを調べた。穴は真円の前段階として正方形のものを使用。図3のように、穴の総面積数は同じで、穴の数を9・16・36個とした。

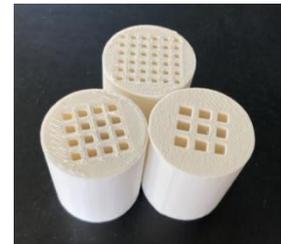


図3 スタックの穴の数

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、温度差と多角形の頂点数の関係を調べた。

5. 実験結果

(1) 実験 1：温度差の時間変化の予備実験

図4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巻いたかどうかを示す。

ガムテープ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秒後の温度差を、測定値として使うこととした。

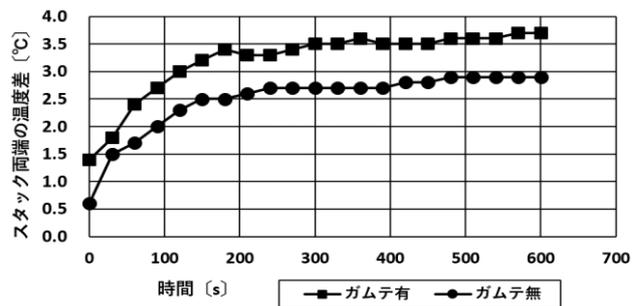


図4 温度差の時間変化

(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5に示す。腹と節の中間で温度変化最大(図中②)となった。これは先行研究[1]とも一致する。よって以降の実験では、3倍振動定在波中の節と腹の中間にスタックを固定し、実験を進めることとした。

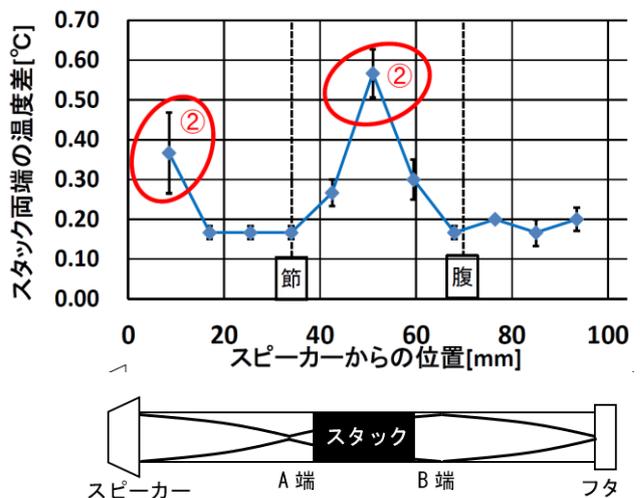


図5 スタック位置と温度差の関係

(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

スタック穴表面積とスタック壁面積との関係は図6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。(図中③)パイプの内径と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が、グラフの形から穴壁面積と温度差は比例しておらず、一定値に近づきつつあるのかもしれない。

(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(図7)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、温度差も増加している。しかし、究極の多角形である円では大きく温度差が下がってしまった。なお、五角形については3Dモデル製作ソフトの関係で作成が困難であったため、今回は見送りとした。

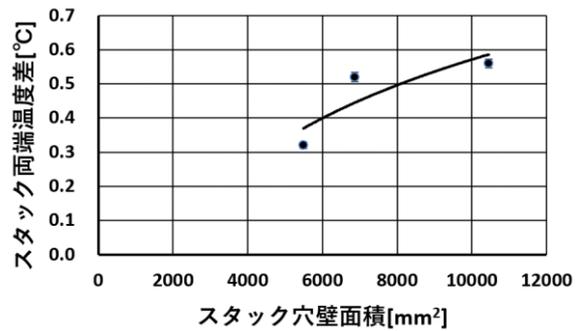


図6 スタック穴壁面積と温度差の関係

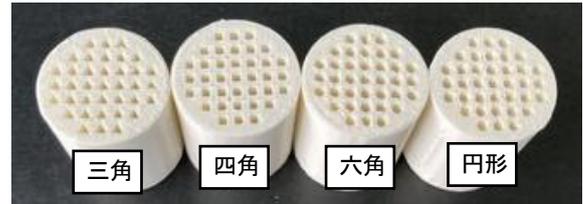


図7 スタック穴形状の違い

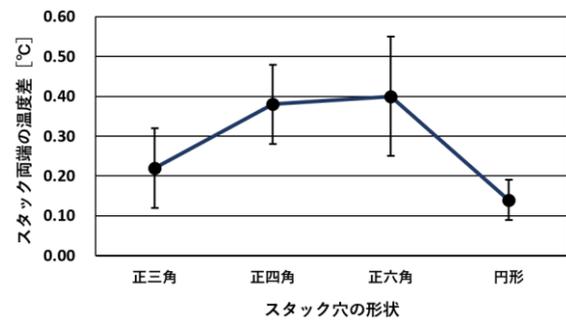


図8 穴形状と温度差の関係

6. 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、周囲からの熱流入と平衡状態に達するまでの時間と見ることができる。断熱がより厳密に行われ、もしくは大量の熱交換・熱輸送が起こった場合は、瞬時に熱平衡状態に達するものと考えられる。

(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。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する。先行研究の結果とも一致しており、我々の測定系が先行研究のものと近いものを構築できている証左ではないかと考えられる。

(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、壁面との熱交換が盛んになり、温度差が増大していると考えられる。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。ということは、穴壁面積を最大限増やすことで温度差が増大すると考えられ、そのようなスタック作製が今後求められる。

(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。これは仮説「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。もっとも、五角形、七角形以降の図形について検証できていないため、その点は今後の課題である。

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。頂点の数の増加に伴って、温度差が増えていることは認められたので、次の可能性が考えられる。

- ① 温度差にはスタック穴壁面積のみが関係し、スタック穴の形は無関係である。三角・四角・六角の差は、実験環境の変化による影響と考えられる。
- ② 多角形と円形では、角の有無が違う。角があることが熱交換・熱輸送に影響があるのかもしれない。いずれにしても、もっと測定回数を増やし、精度を上げることで違った傾向が見られる可能性がある。

7. 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、穴の形状は温度変化に影響しない可能性も考えられた。角の有無について検討する必要もあると考える。

8. 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。先行研究では数℃から数十℃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。温度差の小さい原因としては、機密性、スタック穴の大きさ、スタック壁面積の少なさ、等が考えられる。その検討には、実験1のフィルターでの結果が示唆しているものを生かしたいと考えている。

9. 参考文献

- [1] 堀田浩平、坂本眞一、塚本大地、渡辺好章(2009) “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”
- [2] 藤田武、坂本眞一、吉田秀穂、今村陽祐、渡辺好章(2005) “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”
- [3] 梶沢政保、瀬尾宜時 (2002) “熱音響音波発生機の性能に及ぼすスタック位置の影響”
- [4] 坂本眞一(2018) “はじめての熱音響”