

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：33401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03863

研究課題名（和文）熱音響自励振動における管の曲率とスタック挿入位置の最適化による進行波成分の増幅

研究課題名（英文）Amplification of self-excited thermoacoustic traveling waves by effects of elbow curvature and stack positions

研究代表者

清水 大 (Shimizu, Dai)

福井工業大学・工学部・教授

研究者番号：40448048

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）： 曲管の曲率半径がわずかに異なる3つのループ管において、スタックや熱交換器および、パuffa管を含むエンジン部の取り付け位置をそれぞれ変更し、熱音響自励振動を発生させる実験を行った。全長とエンジン部を共通とすることにより、管の曲率とスタック挿入位置が自励振動に及ぼす影響を明らかにした。曲率半径の大きい曲管を用いることにより、エンジン部取り付け位置への超過圧pp値の依存性が劇的に低下し、含まれる定在波成分の少ない、より進行波に近い自励振動が発生することが分かった。また、曲率半径が小さい場合は、エンジン部の取り付け位置によって、2次振動モードの自励振動が発生する場合があることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の研究では、入手の容易さから、管の径と比較して曲率半径が極めて小さい90度エルボ管を用いた実験結果に基づいて議論が進められ、管の曲率が、自励振動に与える影響は議論されてこなかった。自励振動のpp値がスタックの挿入位置に依存することは知られていたが、管の曲率への依存性は注目されてこなかった。本研究により、発生する自励振動のpp値に加え、振動モードや含まれる定在波成分の割合も管の曲率に依存していることが明らかになった。進行波型の熱音響自励振動を応用した冷凍機や原動機では、進行波成分の増大や振動モードが出力の増大に直結することから、本研究成果は学術的意義に加え、社会的意義も非常に大きい。

研究成果の概要（英文）： Experiments are performed to investigate effects of elbow curvature and the location of the stack on self-excited thermoacoustic oscillations in an air-filled looped tube. The tube is composed of two curved sections and two straight sections. Use is made of three looped tubes having different curvatures with tube's total length along the centerline kept constant. Traveling-wave type of thermoacoustic oscillations are excited spontaneously by inserting a stack consisting of many square pores sandwiched between hot and cold heat exchangers to impose a steep temperature gradient along it. It is revealed that as the radius of curvature becomes small, the location of the stack has significant effects on onset of instability, amplitude, mode and spatial profiles of self-excited oscillations.

研究分野：熱音響工学

キーワード：熱音響自励振動 基本振動モード 2次振動モード 曲管 曲率半径 進行波 定在波成分

### 1. 研究開始当初の背景

低温廃熱を有効活用する熱音響自励振動は、新奇な原動機や冷凍機、発電機への応用が期待されている。特に注目される“熱して冷やす”熱音響式冷凍機は、原動機と冷凍機をループ管で一体化したシステムであり、進行波型の熱音響自励振動を利用する。従って、冷凍機においても、出力や効率の向上を目指して、スタックの改良や多段化により熱音響効果を増大させ、自励振動を大振幅化する研究が盛んに行われてきた。しかし、熱音響効果の増大は、音響インピーダンスの非一様性を高め、有効に活用されない定在波成分の増大も引き起こす。

定在波成分を減少させる方法として、管の径を部分的もしくは連続的に変化させることにより、スタックや熱交換器の挿入に起因する空隙率の非一様性や温度勾配による音響インピーダンスの非一様性を可能な限り相殺する方法や、自励振動の位相を制御する方法が提案されてきた。これらの研究において、最適なスタックの挿入位置が実験的に求められ、多くの場合、装置の対称性を崩す位置に挿入される。これは、曲管とスタックとの相対的な位置関係が、自励振動に含まれる成分や振幅に影響を与えることを意味し、実質的には、曲管における反射の影響が無視できないことを示唆している。しかしながら、曲管の改良や曲率の影響が議論されることはなく、管の曲率に着目して、自励振動を増幅させる試みは、未だ報告されていない。

### 2. 研究の目的

進行波型の音響自励振動において、管の曲率が自励振動に及ぼす影響を明らかにし、管の曲率とスタックの挿入位置を最適化することで定在波成分が抑制され、更なる進行波成分の増大が可能であることを実験により明らかにする。

従来の研究では、入手の容易さから、管の径と比較して曲率半径が極めて小さい  $90^\circ$  エルボ管を用いた実験結果に基づいて議論が進められ、管の曲率が、自励振動に与える影響は議論されてこなかった。一般に、曲管では渦の発生等により、力学的エネルギーの損失が生じることから、自励振動の増幅や進行波成分の増大に曲管が寄与することは考え難い。しかし、熱音響自励振動の場合、そもそも音響インピーダンスは一様でなく、曲管での損失に起因する反射波の位相や振幅によっては、スタックにおける媒質の変位や超過圧と流速の位相差が変化することが予想され、自励振動の増幅や進行波成分の増大が可能となることが期待される。本研究では、ここに着目し、管の曲率とスタックの挿入位置を最適化することにより、進行波型の熱音響自励振動における定在波成分の発生を抑制し、進行波成分の増大が可能であることを明らかにする。

### 3. 研究の方法

曲管の曲率半径が異なる3つのループ管において、スタックや熱交換器および、バッファ管を含むエンジン部の挿入位置をそれぞれ変更し、熱音響自励振動を発生させる実験を行う。全長とエンジン部を共通とすることにより、管の曲率とスタック挿入位置が自励振動に及ぼす影響を明らかにし、より多くの進行波成分を含む自励振動を発生させる方法を明らかにする。

これまで構築してきた進行波型熱音響エンジン(全長  $L = 3,378$  mm, 内径  $D = 56.5$  mm, エルボのセンター長  $L_c = 440$  mm, 参照: 図1)を基本として、実験装置の設計・構築を進める。スタック挿入位置の変更は、直管部にてエンジン部の接続位置  $x_E$  を変更することにより行う(参照: 図1, 2)。

これまでの装置は、共鳴器による自励振動の増幅効果を明らかにする目的で構築を進めてきたことから、直管部が短く、エンジン部の挿入可能な位置に限られる。そこで、長さ  $160$  mm のステンレス直管を新たに4個製作し、全長を  $640$  mm 長くした全長  $L = 4,024$  mm (全面ガasketの厚みも含む)の実験装置を構築する。また、曲率の異なる曲管の設計・製作を順次進めることにより、全長を共通とした、曲管の曲率のみが僅かに異なる3つの実験装置( $L_c = 360, 400, 440$  mm)を構築する。また、自励振動の非線形性を十分維持するため、より出力の高いエンジン部の設計・製作も進める。高出力化は、高温熱交換器に用いるカートリッジヒーターの高出力化により簡易的に行う。

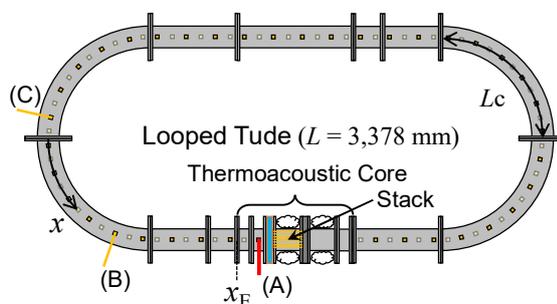


図1. 進行波型熱音響エンジンの概略図

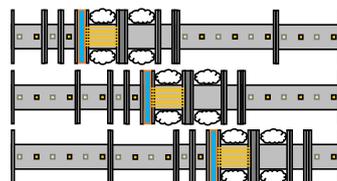


図2. エンジン部取り付け位置の概略図

#### 4. 研究成果

曲管の曲率半径がわずかに異なる3つのループ管において、スタックや熱交換器および、バッファ管を含むエンジン部の取り付け位置をそれぞれ変更し、熱音響自励振動を発生させる実験を行った。全長とエンジン部を共通とすることにより、管の曲率とスタック挿入位置が自励振動に及ぼす影響を明らかにした。

曲率半径の大きい曲管を用いることにより、エンジン部取り付け位置への  $pp$  値の依存性が劇的に低下し、含まれる定在波成分の少ない、より進行波に近い自励振動が発生することが分かった。一方、曲率半径が小さい場合は、エンジン部の取り付け位置によって、2次振動モードの自励振動が発生する場面があることが分かった。また、本研究の過程において、曲管の曲率半径によらず、2段階の発振が生じる場面もあることも分かってきた。以下に詳細を記す。

- 曲率半径の小さい曲管 ( $L_c = 360 \text{ mm}$ ) で構成されるループ管内に発生する熱音響自励振動は、その  $pp$  値がスタックを含むエンジン部の取り付け位置に大きく依存するだけでなく、全長やエンジン部の出力にも大きく依存することが分かった。また、曲率半径の大きい曲管 ( $L_c = 440 \text{ mm}$ ) を用いた場合と比べ、振幅が顕著に大きくなる場面がある一方で、自励振動に含まれる進行波成分の割合は低下することが明らかになった。
- 曲率半径が大きい場合、エンジン部の取り付け位置によらず、 $pp$  値は概ね一定な値となり、定在波成分の少ない進行波に近い基本振動モードの自励振動が発生することが分かった。曲率半径が中間の  $L_c = 400 \text{ mm}$  の場合、 $pp$  値はエンジン部の取り付け位置に依存するものの、いずれの位置においても基本振動モードの自励振動が発生することが分かった。曲率半径が小さい場合、発生した自励振動が飽和に至らずに時間の経過と共に減衰・消滅するエンジン部取り付け位置を境にして、低温熱交換器側が曲管に近くなる場合には基本振動モードの自励振動が発生し、高温熱交換器側が曲管に近くなる場合には、定在波成分が多く含まれる2次振動モードの自励振動が発生することが分かった。
- 各ループ管において、各振動モードの  $pp$  値が最大となるエンジン部取り付け位置における超過圧の空間分布を明らかにした。これにより、曲率半径が小さい場合、2次振動モードの自励振動に多くの定在波成分が含まれ、基本振動モードの自励振動にも比較的多くの定在波成分が含まれることが分かった。また、曲率半径が小さくかつ基本振動モードの自励振動が発生する場合、低温熱交換器に近い圧力センサにおいて超過圧が飽和に達しても、高温熱交換器に近い圧力センサでは、超過圧の大きな変動が継続することが分かった。
- 曲管の曲率半径によらず、エンジン部の取り付け位置によっては、2段階の発振が生じる場面もあることが分かった。また、1段階および2段階の発振開始時間は、管の曲率半径とエンジン部の取り付け位置の両方に依存することが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Dai SHIMIZU, Nobumasa SUGIMOTO	4. 巻 48
2. 論文標題 Numerical simulation of a heat flow due to thermoacoustic oscillations in a looped tube	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. Mtgs. Acoust.	6. 最初と最後の頁 045008 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1121/2.0001653	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nobumasa SUGIMOTO and Dai SHIMIZU	4. 巻 155 (1)
2. 論文標題 A computational method for a thermoacoustic boundary layer in a gas-filled tube	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The Journal of the Acoustical Society of Americ	6. 最初と最後の頁 98-113
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1121/10.0023970	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 清水大, 杉本信正
2. 発表標題 ループ管における熱音響自励振動に及ぼす管の曲率と入力パワーの影響
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清水大
2. 発表標題 熱音響現象の工学的応用
3. 学会等名 令和3年度FUT公開講座
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清水大, 杉本信正
2. 発表標題 ループ管における熱音響振動による熱流の数値計算
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野尻佳佑, 金田一希, 水尻大耀, 清水大
2. 発表標題 定在波型熱音響自励振動の高調波に及ぼすスタック位置の影響
3. 学会等名 日本機械学会 北陸信越支部 2023年合同講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清水大, 杉本信正
2. 発表標題 ループ管における熱音響振動による熱流の数値計算
3. 学会等名 非線形音響研究会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清水大, 杉本信正
2. 発表標題 熱音響自励振動を利用したエネルギー・ハーベスティング
3. 学会等名 日本機械学会 2023年度年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清水大, 杉本信正
2. 発表標題 熱音響自励振動を利用したウエルズタービンによるエネルギー・ハーベスティング
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清水大, 杉本信正
2. 発表標題 ループ管における熱音響自励振動に及ぼす曲管部の曲率の影響
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 杉本信正, 清水大
2. 発表標題 熱音響境界層の外縁速度の計算法
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野尻佳佑, 清水大
2. 発表標題 定在波型熱音響自励振動によるウエルズタービンの駆動実験
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部 2024年合同講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 清水大, 杉本信正
2. 発表標題 熱音響自励振動を利用したウエルズタービンによるエネルギー・ハーベスティング
3. 学会等名 非線形音響研究会2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 清水大, 野尻 佳佑, 杉本信正
2. 発表標題 共鳴器を用いたループ管内の振動モード制御による熱音響発電の出力増大
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 杉本信正, 清水大
2. 発表標題 ループ管路における熱音響不安定と二段階飽和現象
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2024
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	杉本 信正  (Sugimoto Nobumasa)  (20116049)	大阪大学・大学院工学研究科・招へい教授   (14401)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	矢野 猛  (Yano Takeru)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関