

令和 3 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：2018～2020

課題番号：18K03938

研究課題名（和文）大型共鳴器の局所接続による熱音響自励振動の大振幅化実験

研究課題名（英文）Amplification of thermoacoustic oscillations by locally connected large resonators

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） 3,400,000 円

研究成果の概要（和文）：大型共鳴器の局所接続により、定在波型、進行波型を問わず、熱音響自励振動を大振幅化できることを明らかにした。従来の共鳴器列では困難であった特定の振動モード、とりわけ2次振動モードの発生を顕著に抑制し、より高次の振動モードへのエネルギーカスケードを根本から断ち切ることにより、熱音響自励振動を大振幅化できることを実験により明らかにした。共鳴器の固有振動数を自励振動の2次振動モードの振動数により近づけた実験では、共鳴器を取り付けない場合と比べた超過圧の増幅率の最大値がむしろ低下することが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、大型の共鳴器を局所的に接続することにより、特定の振動モード、とりわけ2次振動モードの発生を顕著に抑制することでエネルギーカスケードを根本から断ち切り、熱音響自励振動の大振幅化が可能であることを明らかにした。この方法は、スタックの改良や多段化等により大振幅化を達成してきた既存手法との共存が可能であり、更なる大振幅化が期待される。また、共鳴器列の場合とは異なり、装置の一部に対してのみ共鳴器を接続可能とする構造を付加するだけで良いことから、既存手法との親和性が高く、応用範囲が非常に広いことが期待される。

研究成果の概要（英文）：Experiments are performed to demonstrate amplifications of thermoacoustic oscillations in air-filled tubes by connecting large Helmholtz resonators locally. In comparison with the case without the resonators, it is found that, not only standing waves excited in straight tubes but also traveling waves excited in looped tubes, thermoacoustic oscillations are amplified by connecting Helmholtz resonators locally. Unlike the cases connecting an array of Helmholtz resonators, the generation of particular harmonic oscillations, especially the second-harmonic oscillations, is suppressed significantly so that the energy cascade to higher harmonic oscillations is suppressed fundamentally by connecting Helmholtz resonators locally.

研究分野：流体工学

キーワード：熱音響自励振動 大振幅 ヘルムホルツ共鳴器 局所接続 2次振動モード エネルギーカスケード

1. 研究開始当初の背景

熱音響自励振動は、熱をエネルギー源として、音が独り独りに発生する不思議な現象である。その発生には管軸方向の急激な温度勾配が重要であり、必ずしも高温熱源を必要としないことから、熱音響エンジンは、低温廃熱をエネルギー源として活用できる未来の熱機関として、待望されている。これまで、様々な研究機関において熱音響エンジンの高出力化や高効率化、臨界温度比の低減を目的とした研究がなされてきた。いずれの場合も、管内に挿入するスタックと呼ばれるハニカム構造体を高温と低温の熱交換器で挟み込み、急激な温度勾配を課すことにより、自励振動が発生する。スタックの材質や長さ、セル数や空隙率、温度分布などの改良に加え、挿入位置の最適化や多段化により、現在では自励振動の振幅が大気圧の 10 % を超える熱音響エンジンが構築されている。しかしながら、実用化に向けた更なる出力の増大化を目指す、非線形性による様々な現象が出現し、とりわけ、衝撃波の発生という新たな問題に直面する。衝撃波の発生はエネルギー損失を増大させ、入力が増大に見合うだけの出力の増大を困難にする。衝撃波は基本振動モードから高次振動モードへのエネルギーカスケードにより発生することから、これを抑制する技術が待望される。

これまで、我々の研究グループでは、共鳴器列の分散効果が様々な高次振動モードの発生を抑制することにより、定在波型の熱音響自励振動を大振幅化できることを示してきた。また、進行波型の熱音響自励振動に共鳴器列を応用することにより、非線形であるにもかかわらず波形を維持しながら伝播する“熱音響孤立波”が、自律的かつ絶え間なく発生することも実験により示した。しかしながら、共鳴器列は、管軸方向へ等間隔に接続された多数の共鳴器により構成され、共鳴器の固有振動数や接続間隔に従って様々な高次振動モードの発生を抑制する一方、特定の振動モードのみを抑制することは必然的に難しい。また、共鳴器列は摩擦損失を増大させることから、本来、基本振動に対しても抑制的に作用する。実際、進行波の場合、共鳴器列の効果による基本振動の増幅は未だ報告されていない。

2. 研究の目的

大型共鳴器の局所接続によるエネルギーカスケードの抑制効果に着目し、大振幅の熱音響自励振動を発生させる新しい方法を実験により明らかにする。本研究では、熱音響自励振動に含まれる様々な高次振動モードの発生を抑制することが確認されたヘルムホルツ共鳴器列による分散効果を発展させ、熱音響エンジンに大型の共鳴器を局所的に接続する実験を行う。これにより、共鳴器列では困難であった特定の高次振動モード、とりわけ 2 次振動モードの発生を顕著に抑制し、より高次の振動モードへのエネルギーカスケードを根本から断ち切ることで、自励振動を大振幅化できることを実験で明らかにする。

本研究では、共鳴器の局所接続により、両端が閉じた直管内に発生する定在波型の熱音響自励振動だけでなく、ループ管内で発生する進行波型の熱音響自励振動も大振幅化できることを明らかにする。

3. 研究の方法

共鳴器の局所接続により、まず、定在波型熱音響自励振動を大振幅化できるか否かを明らかにする。また、2 次振動モードの顕著な抑制が、より高次の振動モードへのエネルギーカスケードを抑制することにより、自励振動の大振幅化が達成されることを明らかにする。次に、進行波型熱音響自励振動を大振幅化できるか否かを明らかにする。

初年度は、当初予定していた 3 つの装置(円周方向に等間隔に空けた横穴の数が 6, 8, 10 個の装置(参照: 図 1))に加え、加工が困難と思われた最大 12 個の共鳴器を局所的に接続可能な装置の設計・製作も行った。これにより、円周方向の対称性を保ちながら共鳴器の接続数を連続的に 0 個から 6 個まで変更可能とし、6 個以降は 2 個ずつ接続数を増やすことにより、最大 12

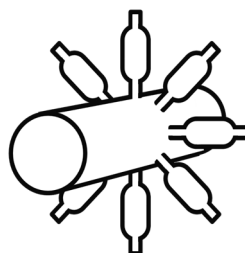


図 1 . 周方向に最大 8 個の共鳴器を局所的に接続可能な装置の概略図

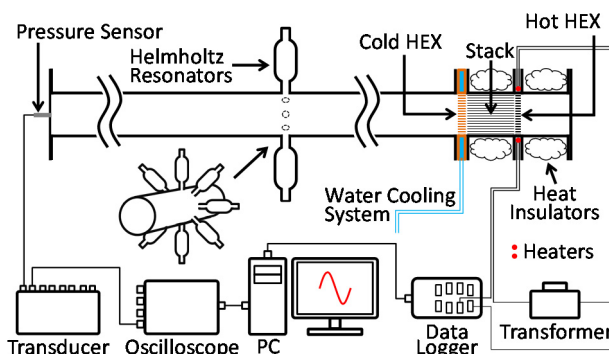


図 2 . 管中央付近の周方向に共鳴器を局所接続した直管の概略図

個まで円周方向の対称性を保ちながら共鳴器を接続できる装置を構築した。また、これらの装置を任意な位置へ組み込むことを可能とするため、実験装置本体を構成するステンレス管を組み直すための新たなステンレス管の設計・製作を進めた。軸方向長さの異なる短い管を複数製作することにより、軸方向に関して上記装置の取り付け位置を数 cm 単位で変更できる構造とした。また、従来よりも全長を短くすることにより、相対的に大型の共鳴器を接続する効果を評価できる実験装置を構築した（参照：図 2）。

令和元年度は、平成 30 年度に構築を進めた定在波型熱音響エンジンにおいて実験を行った（参照：図 2）。共鳴器を管中央付近の周方向に局所接続することにより、自励振動に含まれる特定の振動モード、とりわけ 2 次振動モードの発生が顕著に抑制され、熱音響自励振動の大振幅化が可能であることが分かった。局所接続による特定の振動モードの顕著な抑制が、より高次の振動モードへのエネルギーカスケードを抑制することにより、基本振動の振幅そのものを増幅できることが分かった。局所接続では、周方向に共鳴器を接続するため、接続できる共鳴器の数は物理的に限られる。本実験では、実験装置の全長を短くすることで共鳴器を相対的に大型化することにより、限られた接続数でも基本振動の増幅が可能であることを明らかにした。また、装置の全長を更に短くすることで共鳴器の更なる大型化を図り、共鳴器の固有振動数が自励振動の 2 次高調波の周波数により近い実験も行った。この場合、局所接続による自励振動の大振幅化は同様に可能であるが、増幅率の最大値はむしろ低下することが分かった。

令和 2 年度は、ループ管の対称な位置 2 カ所に共鳴器の局所接続を可能とする装置 1 対を挿入した進行波型熱音響エンジンにおいて実験を行った（参照：図 3）。共鳴器の局所接続は、定在波成分の発生および高次振動モードへのエネルギーカスケードを抑制し、進行波型においても自励振動の大振幅化に有効であることを明らかにした。しかしながら、接続数の増加は、むしろ進行波成分の減衰を引き起こし、多くとも 2 対の共鳴器を局所接続した場合に増幅率が最大となることが分かった。また、進行波型では、共鳴器とスタックの相対的な位置関係が同じであっても、スタックと曲管の位置関係によっては、自励振動が減衰する場合もあることが分かった。これを踏まえ、曲率の異なる曲管で構成されるループ管において実験を実施したところ、発生する自励振動の振幅が曲管の曲率に依存することが分かってきた。そこで今後は、共鳴器による増幅効果に加え、曲管の曲率が熱音響自励振動に与える影響について研究を進める。

4. 研究成果

大型共鳴器の局所接続により、定在波型、進行波型を問わず、熱音響自励振動の大振幅化が可能であることを明らかにした。従来の共鳴器列では困難であった特定の振動モード、とりわけ 2 次振動モードの発生を顕著に抑制し、より高次の振動モードへのエネルギーカスケードを根本から断ち切ることににより、熱音響自励振動を大振幅化できることを実験により明らかにした。共鳴器の固有振動数を自励振動の 2 次振動モードの振動数により近づけた実験では、共鳴器を取り付けない場合と比べた超過圧の増幅率の最大値がむしろ低下することが分かった。

本研究では、実験装置の一部のみを局所接続可能とすることにより、これまで用いてきた共鳴器列による熱音響自励振動の増幅方法と同等もしくはそれ以上の増幅効果が得られることを明らかにした。その意義は非常に大きく、既存の技術との相乗効果がより一層期待される。

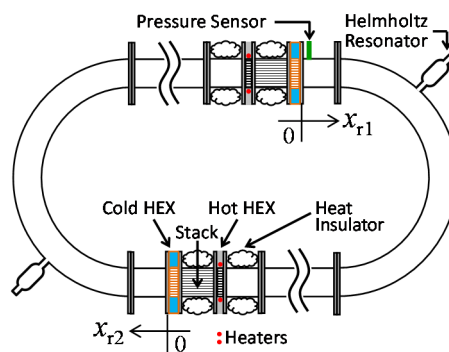


図 3. スタックおよび共鳴器の一対を対称な位置に接続したループ管の概略図

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1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, Takuya IWAMATSU, and Nobumasa SUGIMOTO	4. 巻 34
2. 論文標題 Numerical simulations of thermoacoustic oscillations in a looped tube by asymptotic theories for thickness of diffusion layers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of Meetings on Acoustics (POMA)	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1121/2.0000888	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 杉本信正, 清水大	4. 巻 2153
2. 論文標題 温度勾配のある細管内の熱音響現象の線形および非線形理論	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 数理解析研究所講究録	6. 最初と最後の頁 207-221
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 清水大, 杉本信正	4. 巻 32
2. 論文標題 熱音響システムにおける衝撃波の発生と抑制 =ヘルムホルツ共鳴器による衝撃波の抑制と熱音響自励振動=	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 超音波TECHNO	6. 最初と最後の頁 6-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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5件（うち招待講演 1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 熱音響システムにおける非線形現象 衝撃波の発生と抑制
3. 学会等名 日本音響学会2019年秋季研究発表会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清水大, 杉本信正
2. 発表標題 共鳴器の局所接続による定在波型熱音響自励振動の増幅
3. 学会等名 日本流体力学会 年会 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清水大, 杉本信正
2. 発表標題 曲率半径の異なるループ管における熱音響自励振動の発生実験
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 清水大, 杉本信正
2. 発表標題 拡散層厚さに対する漸近理論による熱音響振動発生の数値シミュレーション
3. 学会等名 日本流体力学会年会 2018
4. 発表年 2018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管の曲率の影響
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Nobumasa Sugimoto and Dai Shimizu	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 376
3. 書名 Applied Wave Mathematics II (eds. A. Berezovski, T. Soomere)	

〔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・工学研究科・招へい教授 (14401)	

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
---------	---------