

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：33401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17978

研究課題名(和文) 高次振動モードの抑制による大振幅熱音響自励振動の発生実験

研究課題名(英文) Experiments on the amplification of self-excited thermoacoustic oscillations by suppressing generations of higher harmonics

研究代表者

清水 大 (SHIMIZU, Dai)

福井工業大学・工学部・准教授

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)：ヘルムホルツ共鳴器による高次振動モードの抑制効果に着目し、直管型およびループ管型の熱音響エンジンにおいて、大振幅な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した。直管型では、共鳴器列を局部的に接続することにより、定在波型自励振動の超過圧を増幅できることが分かった。進行波成分を含む自励振動が発生するループ管型では、共鳴器列を全体に渡って接続することにより、熱音響孤立波(熱音響ソリトン)が自律的かつ継続的に発生することを明らかにした。また、共鳴器をループ中心に対して点対称な位置に1つずつ計2個接続することにより、大振幅な自励振動が発生することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Experiments are performed to generate self-excited thermoacoustic oscillations of higher amplitude by suppressing generations of higher harmonics. At the outset, the generations of thermoacoustic standing waves in a straight tube with closed ends are performed. It is found that, by connecting an array of Helmholtz resonators near the middle of the straight tube locally so as to annihilate the second harmonics, the amplitude of excess pressure grows more than 30 percent relative to the one without connecting the resonators. Next, the generations of thermoacoustic traveling waves in looped tubes are demonstrated. It is found that thermoacoustic traveling waves can be increased by locating a pair of resonators in point symmetry. It is also unveiled that a thermoacoustic solitary wave generates spontaneously and propagates endlessly in the looped tube by connecting an array of Helmholtz resonators throughout the tube.

研究分野：熱流体工学

キーワード：熱音響自励振動 ヘルムホルツ共鳴器列 熱音響孤立波 熱音響ソリトン 高次振動モード 衝撃波 エネルギーカスケード

1. 研究開始当初の背景

低温廃熱をエネルギー源として独りで音を発生させる熱音響自励振動を工学的に応用した熱音響エンジンの研究が近年盛んに行われている。これまで、様々な研究機関において熱音響エンジンもしくは熱音響冷凍機の高出力化や高効率化を目的とした研究がなされてきた。その多くは、管内に挿入するスタックの素材や位置、長さやハニカム構造の改良、スタックに温度勾配を課すための熱交換器やバッファチューブを含めた温度分布の改良、熱音響エンジンの多段化などにより発展を遂げてきた。また、臨界温度比を如何に低く抑えるかという観点からも多くの研究がなされている。これらの研究の成果として、現在では、高出力化や高効率化の一つの指標でもある自励振動の振幅が大気圧の10%程度の熱音響エンジンの構築が実験室レベルで可能である。しかしながら、その実用化に向けた更なる出力の増大を目指す時、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。このような非線形性の卓越による高次振動モードへのエネルギーの移動は、より有用な利用が期待される基本モードや低次モードで振動する音のエネルギー増幅を阻害し、更なる高出力化を困難なものにする。この高次振動モードへのエネルギーの移動を抑制する技術が待望される。

2. 研究の目的

ヘルムホルツ共鳴器による高次振動モードの抑制効果に着目し、大振幅な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。

急激な温度勾配や非一様な断面空隙率を有する熱音響エンジンに対して、一方向に伝播する等温下の進行波が衝撃波に発展することを抑制する効果が確認されたヘルムホルツ共鳴器列を応用し、その効果を明らかにする。非一様な音響インピーダンス下で発生する熱音響自励振動の高次振動モードの発生を共鳴器で抑制できることを実験で示す。

この方法の最大の利点は、これまで研究されてきた高効率化の多くの手法との併用が可能なことである。共鳴器の導入は管内を伝播する音の伝播速度に影響を与えることが予想されるものの、基本振動の波長や位相関係には余り影響を与えないことが予想される。これは、例えば、スタックの位置や温度分布等を最適化した既存の実験装置の構造は維持したまま、共鳴器を導入することが可能であることを意味する。既存の研究成果との相乗効果は、熱音響自励振動の更なる大振幅化を達成可能にすると期待され、その意義は非常に大きい。

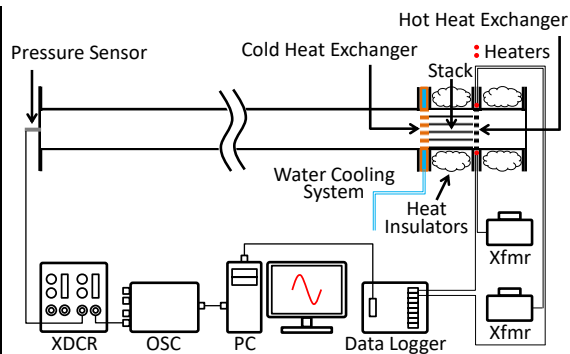


図1. 直管型熱音響エンジンの概略図 (清水(2016))

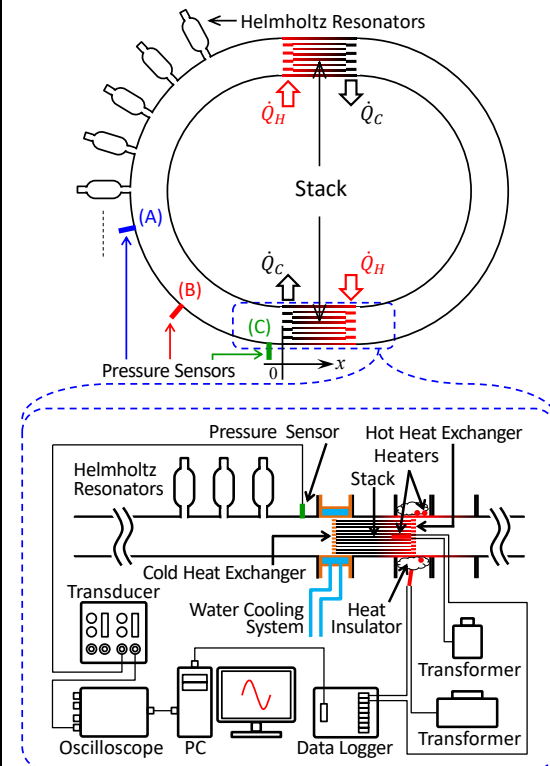


図2. ヘルムホルツ共鳴器を接続したループ管型熱音響エンジンの概略図 (Shimizu (2016))

3. 研究の方法

熱音響自励振動に対するヘルムホルツ共鳴器の効果を実験で明らかにするにあたり、注目度の高いループ管型熱音響エンジンに共鳴器を応用する前に、その構成要素の一つとして、構造が最も単純な直管型熱音響エンジンの設計・構築を進める(図1参照)。構築した直管型熱音響エンジンにヘルムホルツ共鳴器を接続することにより、共鳴器が定在波に対して高次振動モードへのエネルギー移動を抑制する効果があるか否かを実験で明らかにする。

次に、直管型熱音響エンジンをループ管に組み込み、ループ管型熱音響エンジンを構築し、進行波に対する共鳴器の効果明らかにする。これと並行して、既存のループ管型熱音響エンジンに対する共鳴器の効果を実験で明らかにする実験を行う(図2参照)。

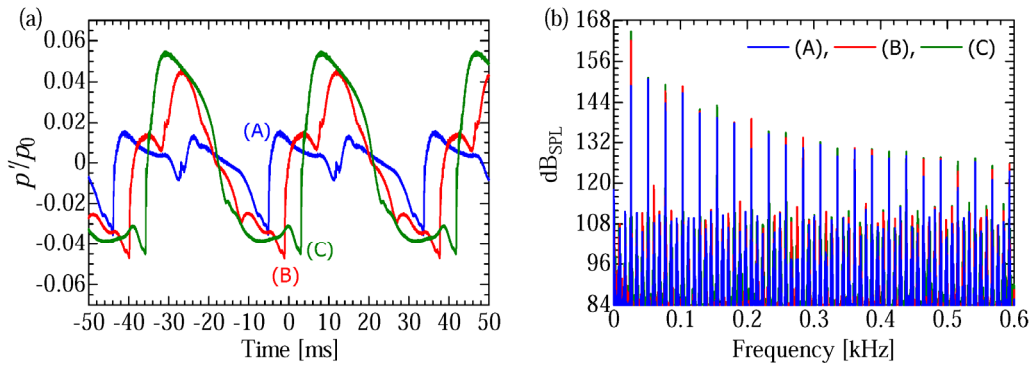


図 3. ループ管内で発生する熱音響自励振動の超過圧波形とスペクトル (Shimizu (2016))

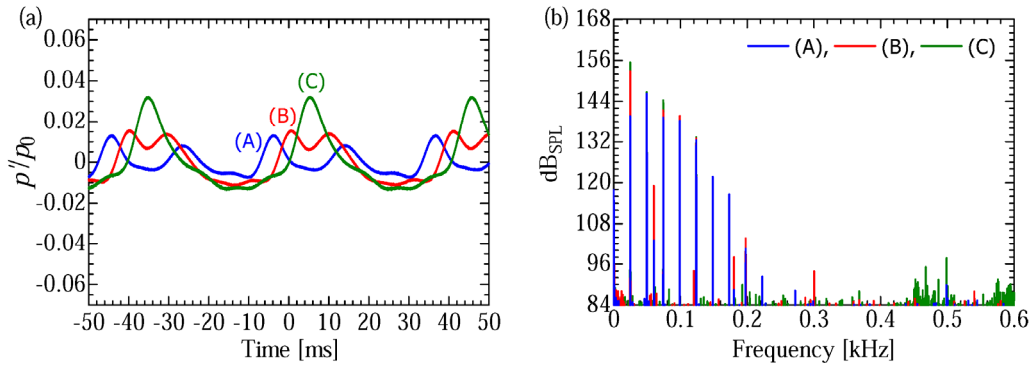


図 4. ヘルムホルツ共鳴器列を接続した場合の超過圧波形とスペクトル (Shimizu (2016))

共鳴器の効果を確認するためには、十分な非線形性を有する自励振動の発生を可能とする熱音響エンジンを構築する必要があることから、共鳴器を接続していない状態において発生する自励振動の圧力振幅が大気圧比 5 % 程度を超える実験装置の構築を目指して各種部材の設計・選定・加工作業を実施する。実験装置は、全長およびスタックの挿入位置を自由に変更できる構造とするため、フランジを両端に溶接した長さの異なるステンレス円管を複数組み合わせる構造を採用する。また、高温および低温の熱交換器は、それぞれ、ステンレス製の閉止フランジと銅板から、大型工作機械を用いた加工工作により製作する。スタックについては、セル数が大きいものが大振幅な自励振動の発生に関して基本的に有利であるが、セル数の増加は高速切断機等による加工を困難とすることから、加工が可能な 100 セルのものを採用する。

4. 研究成果

直管型熱音響エンジンにヘルムホルツ共鳴器を等間隔に接続し、共鳴器列が定在波に対して高次振動モードへのエネルギー移動を抑制する効果を示すことを実験により明らかにした。管内に発生する自励振動の超過圧は、共鳴器列を局部的に接続することにより増幅可能であることが分かった。自励振動の飽和時における超過圧は、低温側の閉端における peak-to-peak 値で 31.7% 増幅可能であることが明らかになった。共鳴器列を直管全体に渡って取り付け

た場合は、むしろ損失が増大し、自励振動の大振幅化には必ずしも有効でないことも明らかになった。

既存のループ管型熱音響エンジンに対して、管全体に渡って共鳴器列を取り付けたところ、高次振動モードの発生を抑制する効果が得られる一方で、直管の場合と同様に超過圧の大振幅化は確認されなかった (図 3, 図 4 参照)。しかしながら、管全体に渡って共鳴器列を接続することにより、熱音響効果に起因する孤立波 (熱音響孤立波) の自律的かつ継続的な発生が可能であることが明らかになった (図 3 ~ 図 5 参照)。この熱音響孤立波の発生に関する実験結果を学術論文にまとめ、出版した。

直管型熱音響エンジンを 2 つ組み合わせたループ管型熱音響エンジン (全長 3.4 m) において、ヘルムホルツ共鳴器を局部的に接続することにより、進行波成分を含む大振幅な熱音響自励振動が発生することを実験により明らかにした。共鳴器をループ中心に対して点对称な位置に 1 つずつ計 2 個接続することにより、大振幅な自励振動が発生することが分かった。これまでのところ、この方法により、低温熱交換器から 2 cm の位置における超過圧は、共鳴器を接続しない場合と比べて peak-to-peak 値で最大 42% 増幅することが分かった。この場合、基本振動モードの振幅そのものが増幅し、同時に測定した全ての位置 (低温熱交換器から 2 cm, 42 cm および 82 cm) において、振幅が増幅することが分かった。一方、共鳴器の接続位置によっては、むしろ

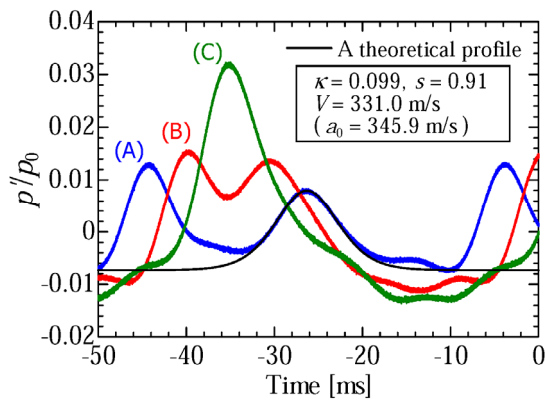


図5. 熱音響孤立波の理論波形と実験結果の比較 (Shimizu (2016))

減衰する場合があることも明らかとなった。この結果については今後も詳細な実験を継続する。

進行波成分を含む自励振動が発生するループ管型熱音響エンジンにおいて、共鳴器の接続による自励振動の増幅効果が確認された意義は非常に大きく、既存の技術との相乗効果が期待される。また、本研究の結果から、共鳴器を軸方向に共鳴器列として取り付けるだけでなく、特定の位置において円周方向に複数取り付けることによる大振幅化が期待されることから、引き続き共鳴器を応用した熱音響自励振動の大振幅化について研究を進める。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

Dai SHIMIZU and Nobumasa SUGIMOTO, “Autonomous generation of a thermoacoustic solitary wave in an air-filled tube,” Journal of Applied Physics, Vol. 120, 144901 1-6 (2016) 査読あり, DOI: 10.1063/1.4964331

Dai SHIMIZU, and Nobumasa SUGIMOTO, “Experiments on the acoustic solitary wave generated thermoacoustically in a looped tube,” Recent Developments in Nonlinear Acoustics, (AIP Conf. Proc. Vol. 1685,) 060004 1-2 (2015) 査読あり, DOI: 10.1063/1.4934429

清水大, “熱音響現象を応用した新奇な熱機関の開発”, 鯖江商工会議所鯖江商工会議所報, No. 667 p.6 (2015)

[学会発表](計6件)

野尻悟史, 大井捷平, 泉侯成, 清水大, “共鳴器による進行波型熱音響自励振動の増幅実験”, 日本機械学会 北陸信越学生会 第47回学生員卒業研究発表講演会, 2018/3/2, 福井工業大学(福井)

清水大, 杉本信正, “共鳴器列による定在波型熱音響自励振動の増幅”, 日本流体力学会 年会 2017, 2017/8/31, 東京理科大学(東京)

清水大, 杉本信正, “半波長管における熱音響自励振動におよぼす高温部の管の長さの影響”, 日本物理学会 第72回 年次大会, 2017/3/19, 大阪大学(大阪)

清水大, 杉本信正, “両端が閉じた直管における熱音響自励振動におよぼす管の室温部長さの影響”, 日本流体力学会 年会 2016, 2016/9/26, 名古屋工業大学(愛知)

清水大, “熱音響現象とその工学的応用”, 第57回北陸流体工学研究会, 2016/9/10, 金沢大学(石川)

清水大, 杉本信正, “熱音響ソリトンの発生実験”, 日本流体力学会 年会 2015, 2015/9/26, 東京工業大学(東京)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

清水 大 (SHIMIZU DAI)

福井工業大学・工学部機械工学科・准教授

研究者番号: 40448048