

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560523

研究課題名(和文) ループ管熱音響冷凍機における定在波抑制制御装置の開発

研究課題名(英文) Active control system for standing wave attenuation in looped-tube-type thermoacoustic refrigerator

研究代表者

小林 泰秀 (Kobayashi, Yasuhide)

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号：50272860

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：ロバスト制御に基づき管内の一方向の進行波を抑制する能動騒音制御系を提案しループ管熱音響システムに組み合わせることにより、システムが自励発振し易くなることをナイキストの安定判別に基づき示している。また定在波型熱音響エンジンにおいて、管内音圧を目標値に追従させるフィードバック制御系を構成することにより、温度勾配や熱源の変動に対して管内音圧を安定化できることを示している。

研究成果の概要(英文)：In this study, an active noise control system which attenuates a single traveling wave in duct is proposed. It is shown based on Nyquist stability criterion that a looped-tube-type thermoacoustic system becomes easier to make spontaneous oscillation by combining the proposed system. It is also shown that the pressure amplitude in tube can be stabilized against temperature gradient and/or thermal source fluctuation by feedback control of pressure in a standing-wave-type thermoacoustic engine.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・システム工学

キーワード：熱音響自励発振現象 ループ管熱音響冷凍機 フィードバック制御 指向性音源・センサ 能動騒音制御
定在波抑制制御 ロバスト制御

1. 研究開始当初の背景

従来の熱音響ループ管冷凍機には(i)熱音響自励振動が定常状態へ到達するまでの挙動が不安定で時間がかかること、(ii)ループ管中に定在波が残り進行波に比べて効率が落ちるといった問題がある。(i)に対してスピーカで強制加振して定常状態までの時間を短縮する手法が提案されている。(ii)に対して管の形状変更などで対処する研究が行われている。しかし、スピーカとフィードバック制御を用いてこれらの問題に対処する研究はこれまでに進んでいない。

2. 研究の目的

ループ管熱音響冷凍機において、(i)熱源の変動に対して熱音響自励振動が安定的に持続するようにフィードバック制御する手法を提案する。また、(ii)エネルギー変換効率が低下する原因である定在波をフィードバック制御により抑制し、進行波に補正することにより、システムの冷凍能力を向上・小型化する技術を開発することを目的とする。このフィードバック制御系の設計問題は、音響工学・制御工学におけるダクト能動騒音制御問題の一種とみなすことができるため、音響制御技術を応用して対処する。

3. 研究の方法

(1)ループ管予備実験装置の製作と定在波抑制制御の基本性能検証

内径約 10cm の塩ビ管を用いて周長約 3m のループ管を構成し、スピーカを二つ設置し進行波発生用の音源とする：それぞれの駆動信号を w, v とし、 $v(t) = -w(t - \tau)$ をスピーカ間の距離に応じたむだ時間とすることで、指向性音源を構成する。この音源は電力入力によりループ管中に音波を生じるプライムムバ(実際のシステムでは熱入力)としての役割と、ループ管内の定在波を抑制するための制御音源を兼ねる。

進行波を検出するため二つの圧力センサを用いて指向性センサを構成する：センサの出力を z, y とすると、 $e(t) = z(t) - y(t - \tau)$ を圧力センサ間の距離に応じたむだ時間、とすることで、完全な進行波音場の場合に $e = 0$ を出力するセンサとなる。

スタックあり/なしの場合について周波数応答実験を行い、ロバスト制御に基づき管内に生じる定在波を最小化する制御系設計を行いその効果を検証する。

(2)ループ管熱音響冷凍機(従来システム)の製作と発振条件の検討

ハニカムセラミックスのケーシング、高温側熱交換器、低温側熱交換器を設計・製作し、厚み 1mm、内径約 50mm のステンレス製のサニタリー管を接続して周長約 3m のループ管を構成する。

ヒートポンプ(冷却部)なしで自励発振が生じる高温側温度 T_H と低温側温度 T_C の条件

を把握する。

スピーカを設置し、自励発振に与える影響を検討する。

(3)音響管の入出力特性測定に基づく熱音響自励発振条件の実験的把握

ループ管の発振条件をコア部(二つの熱交換器とスタック)、その他塩ビ管のパーツ毎に分け、それぞれの入出力特性を実験的に把握し、それらを組み合わせることにより、系全体の発振条件を把握する。単純な管の入出力特性はほぼ理論的に計算できるため、管路長さを変えた実験を行うことなく、基本パーツの入出力性を組み合わせることで発振する/しないの予測を行う。

一方向の進行波を抑制する仮想的な管の入出力特性に基づき、定在波抑制がループ管熱音響自励発振に与える効果を検討する。

(4)フィードバック制御に基づく定在波型エンジンにおける熱音響自励発振の安定化

長さ約 0.8m でステンレス製の定在波型熱音響エンジン(直管にプライムムバ、マイク、スピーカ各 1 個を設置したもの)に対して、ロバスト制御に基づいてマイクの出力電圧を目標値に追従させるフィードバック制御系を構成する。

温度勾配と熱源の変動(ヒータのオン・オフ)に対する制御系の安定化可能性を検討する。

(5)ループ管熱音響冷凍機に対する定在波抑制制御系の構成と開ループ制御実験

プライムムバ用のコア部と同様にヒートポンプ(冷却部)用の熱音響コア部を製作し、両者の間に定在波抑制制御部(スピーカ 2 個とその両側に圧力センサ 2 個ずつ)を 1 組ずつ設置し、塩ビ管でループ状に接続して制御系ハードウェアを組み込んだループ管熱音響冷凍機を構成する。ループ管全長は、予め自励発振を確認できたステンレス管の装置(ただしヒートポンプなし)に合わせる。

管内の一方向の進行波を抑制するように、二つのスピーカの駆動信号をマニュアル調整し、その効果を実験的に検討する。

4. 研究成果

(1)ループ管予備実験装置の製作と定在波抑制制御の基本性能検証

まず、スタックなしの状態、スピーカ駆動信号の位相を調整して管内に生じる進行波・定在波の比率を調べた。管内でマイクを移動させて音圧分布を測定するとともに、管内に発砲スチロールビーズをまき、クントの実験の原理で音圧分布の可視化を行った。その結果、パワーアンプの個体差、ループ管の曲がり部分(エルボ)における乱流の問題があり、物理モデルとの整合性が十分でないことがわかった。この状態でもロバスト制御系設計はできるため、この問題の解決は後に回

し、先に制御系設計に進んだ。

補償器の設計仕様 = 定在波の抑制を、センサ出力 e をできるだけ小さくすることととらえ、スピーカの駆動信号を補正する補償器を設計した。すなわち、一方のスピーカの駆動信号 v を $v+u$ とし、センサ出力 y から補正項 u を生成するフィードバック補償器を、 w から e までの閉ループ系の H ノルムを最小化する H 制御問題を解いて求めた。目標値信号の周波数をループ管の一次共振周波数 (約 90Hz) として制御実験を行った結果、実際に e が小さくなる応答が得られたが、スタック (cpi 値 1200) 両端の温度差 (最大 2) は、制御なしの方が大きかった。 z, y 自体の振幅を小さくするような制御系となったこと、スタックの両側で音響パワーが変化することを考慮していなかった点が原因と考えられる。

パワーアンプキットを市販品に交換・周波数応答の測定を行いチャンネル間個体差の問題を改善できること、ループ管の曲がり部分の曲率を大きくすることにより、物理モデルと実験結果の整合性が改善されることを確認した。

(2) ループ管熱音響冷凍機 (従来システム) の製作と発振条件の検討

厚み 1mm のフィンを有する銅製の熱交換機を 2 個製作し、スタック 1 個、ヒータ、チラーを取り付け、プライムムーバとした。スタックを収める部分、圧力センサ、スピーカを収める部分を別ユニットに分け、クランプで接続するようにした。ヒータで加熱し熱音響自励発振が生じることを確認した。スピーカを取り付け LED および抵抗を接続することにより、LED が点灯することを確認した。ループ管内は純粋な進行波音場ではなく、定在波成分が優勢であること、スピーカを取り付け位置によって定在波の節・腹の位置や、自励発振自体が生じない場合もあることがわかった。この原因は、スピーカ表面の音響インピーダンスに依存すると考えられる。理論的に自励発振現象を予測することが困難と考えられたため、今後の実験手順を次の二つに分けることとした。

(i) ループ管の発振条件については、パーツ毎に入出力特性を実験的に把握して、それを組み合わせることにより、系全体の発振条件を判定する。

(ii) 自励発振の安定化については、まず定在波型エンジンを用いて検討を行う。

(3) 音響管の入出力特性測定に基づく熱音響自励発振条件の実験的把握

任意の音響管の入出力測定を行うため、内径 50mm、全長約 1m の塩ビ管の端にスピーカを一つ設置し、距離約 0.5m 離して圧力センサを二つ設置した。これを 2 組製作し、長さが既知の直管 (何も設置していない塩ビ管) の左右に接続することによって、周波数応答

実験を行い直管の入出力特性を得た。これと物理モデルを比較した結果、圧力センサ間の距離によって定まる周波数帯域 (= 指向性センサの周波数帯域、約 50 ~ 200(Hz)) において、実験結果が物理モデルとほぼ一致することを確認した。ただし、圧力センサを相互に取り替え、締め付けトルクを一定とすることにより、圧力センサの校正を行った。

次に直管をプライムムーバに取り替え、温度勾配を 4 通りに変えて (T_c は約 20 度一定、 T_h を摂氏 100 度、200 度、280 度) 実験した結果、従来知られている結果 [Guedra et al, J. Acoust. Soc. Am., 139(1), pp.145-152 (2011)] に整合したことから、測定方法の妥当性を確認した。また、温度勾配がないときに、管内が進行波音場となるような左右のスピーカの駆動条件が、指向性音源の条件 (一方の駆動信号をスピーカ間の距離分の時間遅らせて他方を駆動する) にほぼ一致することを確認した。

得られたプライムムーバの入出力特性を用いて、実験で自励発振を確認している全長約 1m の定在波型エンジンの発振条件が正しく予測できるかどうか検討を行った: まず、熱音響分野で従来行われている発振条件の判定 [上記の文献と同じ] が、適当なブロック線図の等価変換を行ったシステムに対するナイキストの安定判別条件と等価であることを確認した。これに基づき、プライムムーバの T_h 側に閉端の音響インピーダンスを接続し、 T_c 側に実験と同程度の長さの直管 (一端開口) の音響インピーダンスを接続したシステムに対してナイキストの安定判別を行った結果、実験と同じ条件で発振という判定となり、プライムムーバを逆にした場合には発振しないという判定結果となる、という適当な結果が得られた。

さらに、実験で自励発振を確認できていない全長約 3m、プライムムーバのみ設置 (ヒートポンプなし) した塩ビ管製のループ管熱音響エンジンの発振条件の検討を行った: プライムムーバを取り外したループ管部分の入出力特性を測定し、プライムムーバの入出力特性と組み合わせることにより、実験を行った全ての温度勾配において、発振しないという結果が得られた。次に、定在波抑制を模擬するように、ループ管の入出力特性に、一方向 (T_c から T_h 方向に向う、スタックが音響パワーを増幅する方向と逆方向) の進行波が抑制されるような係数 (1 未満) をかけると、プライムムーバと接続した際、温度勾配が大きな場合 ($T_h=280$ 度および 200 度) には熱音響自励発振が生じるという予測結果が得られた。これは、理想的な状況で、ループ管熱音響システムが共振し易くなるという定在波抑制制御の効果を示している。さらに、上記入出力特性を測定した実験装置を用いて、管内の一方向の進行波を抑制する能動騒音制御系をロバスト制御に基づいて設計し、これが動作したときの制御系を含む管の出入

力特性を算出した。これをプライムムーバの入出力特性と組み合わせることにより、熱音響自励発振の判別を行った結果、 $T_H=280$ 度および 200 度 のとき自励発振が生じるという予測結果が得られた。これは上記の理想的な状況に整合しており、実際にループ管中で定在波抑制を行うことの効果を示している。上記結果の一部は、日本音響学会 2014 年秋季研究発表会で報告する予定である。

(4) 定在波型エンジンの熱音響自励発振に対するフィードバック制御による安定化

スピーカの駆動信号から圧力センサの出力電圧までを制御対象ととらえ、温度勾配を変えて周波数応答実験を行った結果、温度勾配が大きくなるにつれて共振周波数が高くなり、ピークゲインが大きくなるという結果が得られた。この動特性変化は大きく、時不変の補償器で全ての温度勾配を考慮することは困難と考えられたため、温度勾配毎に補償器設計を行った。圧力センサ出力の目標値を、自励発振時(スタックの温度勾配が最大)のものとして設定して制御実験を行った結果、スタックの温度勾配が大きくなるにつれて同じ目標値に追従させるために必要なスピーカの消費電力が小さくなることがわかった。

さらに、音響パワーが計測できるように圧力センサを 2 個、約 60cm 離して設置し、管の全長を約 1.3m に延長して、スタック側に取り付けた圧力センサの出力電圧を 0 (完全消音) とするフィードバック制御系を構成した。ただし、フィードバック補償器は、ゲインと位相のマニュアル調整とした。スピーカが消費する電力も同時計測した結果、温度勾配によらずスピーカの消費電力がほぼ 0 で完全消音を達成できることがわかった。一方、センサ出力の目標値を数通りに変えた場合についても実験を行い、温度勾配とスピーカの消費電力の関係は、目標値をパラメータとするほぼ直線になること、その直線は自励発振が開始される臨界温度勾配でほぼスピーカ消費電力 0 となって交わることがわかった。この結果については、日本音響学会 2014 年秋季研究発表会で報告する予定である。

(5) ループ管熱音響冷凍機に対する定在波抑制制御系の構成と開ループ制御実験

まず開ループ制御なしの場合には、自励発振が生じなかった。これは、(3)の発振予測結果とも整合する(使用したスタックは長さ 55mm、600cpi および 1200cpi)。次に、一方のスピーカの駆動信号振幅を一定とし、コア前後の正・逆方向の音響パワーの振幅を 2 センサ法によりリアルタイムで算出・確認しながら、 T_C 、 T_H 方向の音響パワーの振幅が最大となるように他方の振幅および位相を手動調整する開ループ制御実験を行った。この結果、温度勾配が大きくなるにつれて(T_C は約 20 度、 T_H を摂氏 100 度、 200 度、 280 度と変えた) T_C 、 T_H 方向の音響パワーが温度勾配な

しに対してそれぞれ約 1.7、3.0、4.2 倍に増幅された。ただし、逆向きの音響パワー振幅を手動調整で 0 とすることはできなかった(特に T_H が 280 度の場合は T_C 、 T_H 方向の約 8 割が残った)。開ループ制御ではスピーカの駆動信号を音圧と独立に生成しており、音圧をフィードバックすることによって一方向の進行波が抑制できることが考えられる。

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)

[学会発表](計 6 件)

角島 悠太、小林 泰秀、山田 昇、熱音響エンジンの共鳴現象に対するフィードバック制御の効果、第 56 回自動制御連合講演会、2013 年 11 月 17 日、新潟大学工学部

小林 泰秀、山田 昇、電力フィードバック進行波型熱音響発電システムの検討、日本音響学会 2013 年春季研究発表会、2013 年 3 月 13 日、東京工科大学

角島 悠太、小林 泰秀、山田 昇、定在波型熱音響エンジンの共鳴現象に対するフィードバック制御の効果、日本音響学会 2012 年秋季研究発表会、2012 年 9 月 21 日、信州大学工学部

小林 泰秀、角島 悠太、山田 昇、スタック両端に音源を持つ熱音響発電システムの効率、日本音響学会 2012 年秋季研究発表会、2012 年 9 月 21 日、信州大学工学部

小林 泰秀、及川 康平、山田 昇、フィードバック制御に基づく熱音響発電システムの検討、日本音響学会 2012 年春季研究発表会、2012 年 3 月 14 日、神奈川大学 横浜キャンパス

及川 康平、小林 泰秀、山田 昇、ロバスト能動騒音制御に基づくループ管熱音響システムにおける定在波抑制制御の効果、日本音響学会 2011 年秋季研究発表会、2011 年 9 月 20 日、島根大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 泰秀 (KOBAYASHI, Yasuhide)

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号：50272860

(2) 連携研究者

山田 昇 (YAMADA, Noboru)

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号：90321976