

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 15 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04105

研究課題名（和文）定常発振制御に基づく熱音響システム・シミュレータの開発

研究課題名（英文）Development of thermoacoustic system simulator based on steady-state oscillation control

研究代表者

小林 泰秀 (Kobayashi, Yasuhide)

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50272860

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）：模擬管路部の開発：熱音響コアの高温側に接続された管路部も合わせてコア部とする1入出力系の場合、目標とする管路部の誤差を最小化するH ∞ 制御系設計問題に帰着させて補償器設計を行う手法を提案し、管路長に応じてコアと組み合わせたシステムが実際の発振可否及び周波数を概ね再現することを実験的に示した。

コアの周波数応答関数行列計測手法の開発：コアの片側を進行波音場かつ圧力振幅を目標値とする定常発振制御系の安定性解析を行い制御系のパラメータ決定に関して理論的保証を与えると共に同手法で取得した周波数応答関数行列に基づいてコア両側に接続される管路部モデルと合わせて発振可否、周波数、圧力振幅を推定する手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱音響システムに関する研究は応用物理学的なものがほとんどで、物理モデルの誤差を考慮した研究は少ない。本研究成果は、モデル化が困難な場合でもその周波数応答計測に基づいてシステム全体の発振予測を可能とするもので、熱音響システムの実用可能性を高める社会的意義がある。

制御工学の応用において振動現象は通常抑制対象であり、熱音響システムや振動発電など共振の維持・促進への応用はほとんどない。定常発振制御系の安定性に理論的保証を与えることは、この点で制御工学分野の発展に貢献する学術的意義がある。

研究成果の概要（英文）：Development of simulated tubes: for SISO system where the connected tube to the high temperature side of the thermoacoustic core is included as core section, controller design method is proposed by reducing it to the H ∞ control system design where the error between the target tube and simulated one is minimized. It is experimentally demonstrated that thermoacoustic engine combined with the core and tubes can roughly reproduce the actual oscillation condition observed with the actual engine.

Development of a frequency response measurement control method for core: The closed-loop stability of the steady-state oscillation control system is theoretically analyzed with simple resonance model, then an estimation method of oscillation condition is developed based on the measured frequency response function matrix of the core by maintaining one side of the core to be traveling wave sound field and the pressure amplitude to be the target value, using the steady-state oscillation control.

研究分野：制御工学

キーワード：定常発振制御 ロバスト制御 H ∞ 制御系設計 模擬管路部 進行波音場制御 周波数応答関数行列計測手法

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

圧力振幅を目標値に保持する定常発振制御に基づいて、一端に既知の管路が接続された 1 入出力系の熱音響コア部に対し、振幅依存性を考慮した周波数応答計測を行う手法が提案され、得られた周波数応答に基づいて熱音響システムの自励発振周波数と圧力振幅を推定できることが実験的に示されていたが、測定系の管路長が固定されていることからその(i)共振・反共振特性を考慮した制御系設計が困難(周波数範囲が狭い)、(ii)反共振周波数において大振幅加振が可能な大規模音源が必要、(iii)任意の導波管が接続された 2 入出力系としての熱音響コアの応答を計測する技術が未知という問題があった。この解決のために、定常発振制御系に対して(i)共振・反共振特性を考慮した安定性解析、(ii)所望の発振モードを選択するフィルタを含む補償器設計、(iii)熱音響コア両側の制御系を協調させる制御技術、すなわち共振を維持する制御技術の可能性を検証する必要があった。

2. 研究の目的

熱音響コアの両側に接続される管路を模擬することで、任意のシステムにおける熱音響コアの動作を実現する熱音響システム・シミュレータの開発を目的とする(直接的には、模擬管路部の開発が課題であるが、熱音響コア部の周波数応答計測に基づく発振状況の推定についても検討する)。すなわち、(i)測定管路長の共振特性を理論的に考慮する二次振動系に基づく安定性解析を行い周波数範囲を拡大する。次に(ii)加振周波数の代わりに管路長を掃引することで常に共振を利用し小規模音源で大振幅加振をしつつ周波数応答計測を行う手法を開発する。さらに(iii)一端の反射を抑制しコア片側を進行波音場とすることで、両側に任意の管路が接続されるより一般的な 2 入出力系の熱音響コア部に対し、模擬管路部の構成手法及び熱音響コア部の周波数応答計測手法を拡張する。

3. 研究の方法

(1)熱音響コア部の周波数応答関数行列計測手法の開発

コア部の片側を進行波音場かつ目標圧力振幅に保ちつつ周波数応答計測を行う手法において、音源の駆動信号から各圧力センサの出力信号までの周波数応答が同時計測可能であることに着目し、高温側の管路部を接続したときに低温側に入射する進行波圧力成分(B2)から放射される進行波圧力成分(A2)までの周波数応答を、B2の振幅をパラメータとして算出する手法を検討する。

(2)能動音場制御による進行波音場制御性能の向上

進行波音場を構成するために当初用いていたサイレンサーによる受動音場制御の吸音性能を向上させるため、能動音場制御手法の適用を検討する。

(3)共振掃引型周波数応答計測系(開ループ型)の補償器構成手法の開発

共振周波数においてPIゲインを調整すればその他の周波数でも定常発振制御系が安定となるという経験則の妥当性を検討するために、単純な二次遅れ系に基づく制御対象の場合の制御系の安定条件をシミュレーション及び安定性解析により検討する。

(4)計測制御実験環境の改善と管路長可変音響計測系の開発

高温側及び低温側の設定温度が一定の状況下で残る圧力変動を抑制するため、ヒータ及びチラーの改善を検討する。実験の利便性向上のため、温度制御系を圧力計測系と共に上位PCに組み込む。管内の平板を可動とする従来の管路長可変機構におけるシールの問題を解決するため、水面を測定管路長の端面とする構成を検討する。

(5)熱音響システム・シミュレータ(能動音響制御系による模擬管路部)の開発

発振周波数も含めたシステムの挙動を再現(シミュレート)するために、高温側管路部もコア部に含めた上でコア部の低温側に入射する進行波圧力成分B2から放射される進行波圧力成分A2までの1入出力系に対して、A2からB2までの管路部の周波数特性を能動的に模擬する模擬管路部を設計する。具体的には、模擬管路部が目標とする管路の特性に一致するよう逆算された補償器の周波数応答を有限次元近似する従来手法に対して、閉ループ系の安定性を考慮しかつ目標とする特性との誤差を最小化するロバスト制御(H制御)系設計に基づいて補償器設計を行う。

(6)共振状態を維持する制御手法の評価及び信頼性向上

本研究課題の基幹技術である、信号の振幅を目標値一定とする定常発振制御(提案手法)について、正弦波を目標値とする目標値追従制御(従来手法)に対する有用性・信頼性を数値シミュレーション及び安定性解析により検討する。また、進行波音場の能動制御系において、制御音源の振幅及び位相を自動制御するために極値探索制御を組み合わせる制御手法を検討する。

4. 研究成果

(1) 熱音響コア部の周波数応答関数行列計測手法の開発

進行波音場かつ圧力振幅が目標値に制御された低温側の進行波圧力成分(B1)をパラメータとする周波数応答をスプライン補間によりB2の振幅をパラメータとする周波数応答に変換することで、高温側の管路部モデルと合わせてB2からA2までの周波数応答をB2の振幅をパラメータとして算出できることを示した。これを改めて高温側の管路部も含めた1入出力系のコア部の周波数応答とみなすことで、先行研究の1入出力系に対する推定手法を用いて発振時の圧力振幅を推定する手法を開発した。

(2) 能動騒音制御による進行波音場制御性能の向上

コア部の両側に数kPaの大振幅加振が可能な大規模加振器を設置し能動騒音制御の手法を用いることで反射波を数Paまで抑制できることを示した。さらに定常発振制御を組み合わせることで、コア部の片側を能動的に進行波音場としかつ圧力振幅を目標値とできることを実験的に示した。

(3) 共振掃引型周波数応答計測系(開ループ型)の補償器構成手法の開発

制御系のPIゲインの平面における安定領域は加振周波数に依存する双曲線で決まること、対象とする全周波数帯域において制御系が安定となる共通のPIゲインが存在すること、適当な近似に基づき共通のPIゲインを構成する手法を示した。これにより、共振周波数においてPIゲインを調整する経験則が理論的に妥当であることを示した。

(4) 計測制御実験環境の改善と管路長可変音響計測系の開発

圧力変動の主要因としてPWMによるon/off制御式ヒータに起因する数秒周期の温度変動を疑い、PCからの電圧値指令が可能な直流安定化電源を導入し、ヒータの印加電圧を無段階で制御する構成に改善した結果、高温側の改善で圧力変動が低減される効果は限定的であることが分かったため、冷却水の温度制御精度向上のため低温恒温水循環装置を導入すると共に、同一金属の複数箇所の温度計測が可能な温度計を導入しスタック端面に熱電対を追加し温度計測系の精度を向上させた。定在波型熱音響エンジンの壁面を水面で置き換えたシステムが元と同程度の周波数で発振すること、水面にフロート板を設置することで圧力振幅の低下が抑制されること、レーザー変位計で振動板の速度を計測することで気柱端面の速度が計測できることを示した。

(5) 熱音響システム・シミュレータ(能動音響制御系による模擬管路部)の開発

目標とする管路部として無限長管路及び一端が閉端の有限長管路の二通りを考え、従来手法では無限長管路を模擬する場合に制御系が不安定となること(本来反射が無いため発振しないはずだが、安定性の保証は無く実際に発振した)を実験的に示した。これに対して、目標とする管路部の周波数応答 R_{cl} に対して評価出力 $z=R_{cl} \times A_2 - B_2$ を最小化するH_∞制御系設計問題に帰着して模擬管路部を設計する手法を提案し、提案手法を用いると管路長に応じて熱音響コアと組み合わせたシステムが実際の発振可否(無限長管路は発振しない)と発振周波数を概ね再現することを実験的に示した。さらにこの手法を一般の2入出力系の場合に拡張し、2入出力の補償器を1入力2出力の補償器2つの設計問題に帰着することで進行波型熱音響システムの模擬管路部を設計する手法を開発した。

(6) 共振状態を維持する制御手法の改善と応用

正弦波の目標値に対する目標値追従制御系として正弦波の内部モデルに基づく目標値追従制御系を従来手法とし、従来手法では制御対象の位相(符号)を反転すると制御系が不安定となるが、提案手法では符号によらず制御が可能である利点があること、従来手法より長いむだ時間を許容することを数値シミュレーションで実証すると共に安定性解析により理論的に示した。制御音源の振幅と位相それぞれに対してコアに入射する進行波圧力成分の振幅を最小化する極値探索制御系を構成することで進行波音場の能動制御が可能であることを実験的に示した。また、振動発電機の共振制御において、極値探索制御を用いれば共振周波数を振動源の加振周波数に追従できること、制御系のパラメータに関する定量的な安定条件を理論的・実験的に明らかにした。

< 引用文献 >

小林 泰秀, 共振を含む周波数応答計測のための定常発振制御系の安定性解析, システム制御情報学会論文誌, vol.36, no.9, pp.306--315 (2023)

渡辺 大貴, 小林 泰秀, 制御対象の積分特性を考慮した極値探索制御, 第66回自動制御連合講演会, pp.658--663, セッション ID:1G3-5, 2023年10月7日

村田 逸平, 小林 泰秀, 出力振幅を目標値一定とする周波数応答計測制御系のむだ時間に対する安定性, 第66回自動制御連合講演会, pp.130--134, セッション ID:1D1-5, 2023年10月7日

佐藤 涼, 小林 泰秀, 音響計測管路内における二次経路に依存しない進行波音場制御, 第66

回自動制御連合講演会, pp.162--167, セッション ID:1E1-4, 2023年10月7日

佐藤 勝矢, 小林 泰秀, 制御系設計に基づく音響境界条件の能動制御を用いた模擬管路部の構成, 第66回自動制御連合講演会, pp.156--161, セッション ID:1E1-3, 2023年10月7日

渡辺 大貴, 小林 泰秀, 摂動信号のDuty比を可変とする極値探索制御に基づく振動発電機の共振周波数の追従, 第65回自動制御連合講演会, pp.1067--1073, セッション ID:2A2-5, 2022年11月13日

村田 逸平, 小林 泰秀, 定常発振制御に基づく周波数応答計測制御系の位相余裕, 第65回自動制御連合講演会, pp.956--959, セッション ID:2H1-1, 2022年11月13日

佐藤 涼, 小林 泰秀, 極値探索制御を用いた音響計測管路内の進行波音場制御, 第65回自動制御連合講演会, pp.1325--1329, セッション ID:2A3-1, 2022年11月13日

小林 泰秀, 共振を含む周波数応答計測のための定常発振制御系の安定性解析, 第64回自動制御連合講演会, pp.541--545, セッション ID:1E3-1, 2021年11月13日

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1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 小林 泰秀	4. 巻 36
2. 論文標題 共振を含む周波数応答計測のための定常発振制御系の安定性解析	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 システム制御情報学会論文誌	6. 最初と最後の頁 306-315
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 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8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 渡辺 大貴 and 小林 泰秀
2. 発表標題 制御対象の積分特性を考慮した極値探索制御
3. 学会等名 第66回自動制御連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 村田 逸平 and 小林 泰秀
2. 発表標題 出力振幅を目標値一定とする周波数応答計測制御系のむだ時間に対する安定性
3. 学会等名 第66回自動制御連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤 涼 and 小林 泰秀
2. 発表標題 音響計測管路内における二次経路に依存しない進行波音場制御
3. 学会等名 第66回自動制御連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤 勝矢 and 小林 泰秀
2. 発表標題 制御系設計に基づく音響境界条件の能動制御を用いた模擬管路部の構成
3. 学会等名 第66回自動制御連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡辺 大貴 and 小林 泰秀
2. 発表標題 摂動信号のDuty比を可変とする極値探索制御に基づく振動発電機の共振周波数の追従
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村田 逸平 and 小林 泰秀
2. 発表標題 定常発振制御に基づく周波数応答計測制御系の位相余裕
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤 涼 and 小林 泰秀
2. 発表標題 極値探索制御を用いた音響計測管路内の進行波音場制御
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小林泰秀
2. 発表標題 共振を含む周波数応答計測のための定常発振制御系の安定性解析
3. 学会等名 第64回自動制御連合講演会
4. 発表年 2021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
---------------------------	-----------------------	----

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