

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 28 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06135

研究課題名(和文) 環境・負荷変動に共振特性を追従させる電力フィードバック進行波型熱音響発電機の開発

研究課題名(英文) Development of electricity-feedback traveling-wave thermoacoustic electric generator considering environmental and load variations by changing resonance characteristics

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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：ループ管型発電機の音響パワーの代わりに電力をフィードバックして自励発振する電力フィードバック進行波型熱音響発電機を世界で初めて実現した。そのために、熱音響コアが1段のシステムに対する従来の安定性解析手法を、多段コアの場合に拡張し、電力フィードバック部の直列抵抗値と発電電力の関係や、コイルによる発振余裕の拡大などが、安定性解析結果と発振実験で定性的に一致することを示した。負荷を動的に変化させるフィードバック制御により自励発振時の圧力振幅を目標値一定に維持できることを示した。

研究成果の概要(英文)：An electricity-feedback traveling-wave thermoacoustic electric generator has been first realized, which replaces the acoustic power feedback in the conventional looped-tube systems by the electricity feedback in the feedback circuit. To this end, the existing analysis method has been extended so that multistage cores are considered, and it has been demonstrated that the experimental and analysis results are consistent with each other, showing that the return power in the circuit increases as the resistance decreases, and the instability margin can be expanded by inserting a reactance in the electricity-feedback circuit. It has also been demonstrated that the steady-state oscillation pressure amplitude can be maintained at a desired value against environmental (temperature) variations by a proposed feedback control law which dynamically changes the load resistor.

研究分野：制御工学

キーワード：熱音響発電機 電力フィードバック 進行波型 ナイキストの安定判別 発振余裕の拡大 負荷のフィードバック制御

1. 研究開始当初の背景

従来の熱音響ループ管発電機では、(i)ループ管による音響系の共振とリニア発電機による機械系の共振により運転周波数は固定されており、不安定な熱源の利用や負荷変動への対処は困難である。より厳密には、音響系の共振周波数は温度変動により僅かに変化し、周波数固定の機械系では対処できない。また(ii)ループ管内が純粋な進行波音場とならず(定在波が生じ)効率が下がる問題がある。これは、熱入力で冷却を行う管熱音響冷凍機と共通の問題であり、これまで主に装置の最適設計(スタック設置位置、管路長など)による対処が行われているが、制御系設計問題としての検討はほとんど行われていない。

2. 研究の目的

音響パワーの代わりに電力をフィードバックさせて熱音響自励発振を行い、運転周波数を変化させることにより最大効率を維持する、環境や負荷変動の変化に対してロバストな電力フィードバック進行波型熱音響発電機を開発する。そのために機械的・電気的共振特性の可変機構を持つリニアモータ・共振回路を開発し、その可変機構を最適制御する適応制御則を構築する。

3. 研究の方法

(1)熱音響コアの多段接続による自励発振の検討：電力フィードバックを直結とした際に、両側のリニアモータの端子電圧が強め合うように、両者の端子を逆にしてフィードバック回路に接続する。両側のリニアモータ間を音波が反射する一次共振周波数がリニアモータの共振周波数に一致するように試行錯誤で $L=3.051$ とし、次の場合を考える：(i) コアの段数 $n=1$ 、 Z_1 と Z_2 は開放とし、 $Z_3=R$ 、負荷抵抗 $R(\quad)$ を $0, 4.7, 10, 47, 75, 120, 220, 470, 820, 1.5k, 2.0k, 4.7k, 1$ と変えて発振状況の解析及び実験を行う。；(ii) コアの段数 $n=2, 3, \sim 6$ 、 Z_1 と Z_2 は開放、 $Z_3 = 0, 1$ の二通りに対して解析及び実験を行う。段数によらずリニアモータ間の距離が一定となるように、直管の長さ L_{tube} は全長 L から(多段)コアの全長を差し引いた長さとする。

多段接続されたコアなど、因果的な複数のシステムの結合を chain-scattering 表現とスター積を用いて表現することにより、従来の、コア1段の場合の発振条件解析手法を多段コアの場合に拡張する。

(2)位相調整による自励発振の検討：リニアモータ間距離を変更した場合の安定性解析を行う。 $L_{tube}=0.871m$ から徐々に延長し、回路開放時、直結時のナイキスト軌跡を調べる。また、リニアモータ端子電圧 vs_1, vs_2 の位相差について、実験的に得られたコアおよびリニアモータの周波数応答と管路モデルに基づいて vs_1 から vs_2 までの周波数応答

(フィードバック回路を切り離し、 vs_1 の端子に交流電源を接続したときの、 vs_1 から vs_2 までの周波数応答)を導出し、位相差を調べる。

(3)電力フィードバックが臨界温度比に与える効果の検証：フィードバック回路の開放・直結時の二通りで臨界温度比の実測及び予測を行う。発電機の臨界温度比を予測するため、いくつかの取得されたコアの応答を内挿し、詳細な温度比毎の安定解析を行う。解析条件は(2)と同様。温度比を細かく変化させてコアの周波数応答 G_{core} を取得することは容易ではないため、代表的な温度 $TH = 200, 300, 400$ で取得した応答を用いて、その温度範囲内の応答を内挿補間し算出する。

(4)電力フィードバックが進行波圧力成分に与える効果の検証：多段コアが接続された場合の電力フィードバック型発電機の発振状況の解析手法を拡張し、コア部に流入・流出する各進行波圧力成分を算出する。そのために、ナイキスト軌跡が原点を通る臨界状態に対応する熱音響コアの周波数応答を、異なる温度 TH で取得した二つの応答から、その範囲内温度を線形的に内挿補間し算出する手法(3)より算出し、仮定された一箇所の進行波圧力成分に対する他の箇所におけるそれらを算出する。

(5)電力フィードバックにおける環送電力の解析：直列抵抗 $R(\quad)$ を $R=0$ から開放まで15通りに変えて発振実験を行う。抵抗値毎に定常状態に達した後、圧力センサの出力電圧 p_1, p_2 、リニアモータの端子電圧 vs_1, vs_2 をサンプリング周期 $0.2ms$ で10秒間記録する。これらの基本周波数成分 $f_1(R=220$ のみ振幅にうなりが観測された)における複素振幅を算出し、圧力センサ位置の音響パワー、フィードバック回路前後の電力及び消費電力算出する。

抵抗値 R 毎に得られたナイキスト軌跡に対して数値的な自動処理を行い、解析に用いた $30 \sim 200Hz$ の範囲で原点に対して軌跡が回転した角度、原点からの最短距離、その際の周波数等を算出し、発振実権の結果と比較する。

(6)電力フィードバック回路の調整による発振余裕の拡大：抵抗 $R = 0; 47$ とインダクタンス $XL = 0; 29$ mH を直列接続した四通りの ZL について実験及び解析を行う。定常状態に達するまで3分待った後、圧力センサの出力電圧、リニアモータの端子電圧を10秒間記録する。解析では、4通りの ZL に加えて、大きな変化をつけるため $XL=400mH$ の場合も検討する。

(7)電力フィードバック回路の調整による発振余裕の最大化：抵抗 $R = 74$ と六通りの

コイル(インダクタンス $X_L = 29; 133; 186; 203; 229; 355$ mH, 抵抗値 $R_L = 9.2; 18.1; 19.4; 20.5; 19.7; 20.4$)を直列接続した七通りの ZL について発振実験及び解析を行う。

(8)定常発振制御系の安定性解析：管内圧力の振幅とその目標値の偏差により駆動される PI (比例・積分)補償器に基づき,PI 補償器の出力信号そのものを,圧力センサの出力信号から音源の駆動信号を生成する際の時変係数として用いる定常発振制御系において,従来の平衡点回りの線形近似に基づく安定性解析に対して,リアプノフの安定定理に基づいて,線形近似を用いることなく非線形系の安定性を示す。

(9)圧力振幅を目標値一定とする負荷のフィードバック制御：まず,温度変動の無い場合に,負荷を動的に変化させることにより圧力振幅を目標値一定に維持する定常発振制御系の動作を実験的に検証する。次に,圧力振幅の目標値 380Pa 一定とし,高温側熱交換器の温度 TH を 300 から 290 まで 5 ずつ下げることにより温度変動を与えて制御実験を行う。

4. 研究成果

(1)熱音響コアの多段接続による自励発振の検討：多段接続された熱音響コアを持つ電力フィードバック型熱音響発電機に対して分割されたシステムの周波数応答に基づいてシステム全体の発振状況を予測する手法を示した。コア一段の場合の解析結果が実際の発振状況に整合することを実験的に示した。さらに,コアの段数を増やして解析を行い,段数が増えるほど進行波型の発電機に近づいていくことを示した。

(2)位相調整による自励発振の検討：発振実験の結果,管路延長により(i)強制加振後の端子電圧間の位相差がほぼ 0 となること,(ii)回路直結時に自励発振が生じ開放時は発振しないこと,さらに二つのセンサの出力差から自励発振時,コアが音波を増幅する方向の進行波成分の方が他方よりも大きいことを実験的に示した。ナイキストの安定判別に基づく安定解析より,(ii)の実験結果と整合する予測結果が得られた。またリアモータ端子電圧間の位相差を解析する手法を提案し,管路の延長によって位相差が小さくなるという(i)の結果に整合する結果が得られた。

(3)電力フィードバックが臨界温度比に与える効果の検証：発振実験の結果,(i)フィードバック回路直結時の方が低温度比で発振すること,(ii)回路直結・開放で発振周波数が異なり,直結時はリアモータの共振周波数に近い周波数で発振することを示した。ナ

イキストの安定判別を用いた安定解析に基づき,取得された異なる温度比のコアの周波数応答から,その温度比間の応答を補間し算出される各応答の妥当性を示した。さらに,それらの温度比毎の応答を用いた安定解析により,(i),(ii)に整合する結果を得た。

(4)電力フィードバックが進行波圧力成分に与える効果の検証：従来の安定性解析手法に基づき,定常発振状態における各部の進行波圧力成分を解析的に求める手法を提案した。ナイキスト軌跡が原点を通る臨界状態に対応する熱音響コアの周波数応答を,実験的に測定した異なる温度比に対する周波数応答の補間により構成し,仮定された一箇所の進行波圧力成分に対する他の箇所におけるそれらを算出した。回路直結時はコアの音波増幅方向の進行波成分が大きいこと,開放時はコアから出ていく方向の進行波成分が大きいこと,それらの結果は発振実験時の進行波成分の増幅方向に整合することを示し,提案解析手法の妥当性,並びに電力フィードバック接続によりシステムが進行波型に近づくことを示した。

(5)電力フィードバックにおける環送電力の解析：電力フィードバック型熱音響発電機において,フィードバック回路における直列抵抗値を変化させて環送電力の実測及び解析を行い,(i)抵抗値が小さいほど,コアが音波を増幅する方向に流れる環送電力が大きくなること;(ii)抵抗値によって発振周波数や端子電圧間の位相差が切り替わる現象がナイキスト軌跡で説明できることを示した。以上より,解析手法の妥当性及び電力フィードバックの有効性を示した。

(6)電力フィードバック回路の調整による発振余裕の拡大：電力フィードバック回路にコイルを挿入する効果を検討し,ナイキスト軌跡の発振余裕が拡大されること,発振周波数が低下する解析結果が得られた。実際に発振実験を行い,コイルの挿入によって音響パワーや環送電力が増加し,発振周波数が低下するという,定性的に解析に整合する結果が得られた。以上より,解析手法の妥当性及び発電機の性能を改善する可能性を示した。

(7)電力フィードバック回路の調整による発振余裕の最大化：発振余裕を最大化するリアクタンスを検討した結果,管内圧力振幅が最大となるリアクタンスが存在する可能性を発振実験により示した。また解析により,発振余裕が最大となるリアクタンスが存在することを示した。ただし,発振周波数とリアモータの効率は,実験と解析で異なる傾向を示しており,この解決が直近の課題である。

(8)定常発振制御系の安定性解析：熱音響システムの臨界温度比推定に定常発振制御系

を適用した際に制御系が安定となる理論的根拠を与えるため、単純な二次振動系モデルに基づく安定性解析を行った。比例ゲインが0のとき、システムの応答は初期値に依存する閉曲線を描き、それが変数分離形の微分方程式解として導出できることを利用して、圧力振幅に関する対数項を含むリアプノフ関数を構成した。この結果、これまで線形近似に基づいて平衡点が漸近安定となる条件として導出されていたPIゲインとローパスフィルタのカットオフ周波数に関する条件が大局的漸近安定条件であることを示した。

(9) 圧力振幅を目標値一定とする負荷のフィードバック制御：負荷抵抗を動的に変化させる定常発振制御系を構成し、熱源の温度が一定の場合、圧力振幅を与えられた異なる目標値に保持できることを示した。また、熱源の温度が変化する場合でも、ある与えられた一つの目標圧力振幅に圧力振幅が収束するように負荷抵抗が自動調整されることを実験により示した。

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)

篠田 将太郎, 小林 泰秀, 上田 祐樹, 熱音響コアの多段接続による電力フィードバック進行波型熱音響発電機の実現, 日本音響学会誌, vol.74, no.6, pp.313-321 (2018)

小林 泰秀, 梅本 康平, 中田 匠, 古澤 雅也, 山田 昇, リニアモータの電気-音響特性に基づく電力フィードバック型熱音響発電機の発振条件解析, 日本音響学会誌, vol.73, no.1, pp.12-20 (2017)

櫻井 一晃, 小林 泰秀, 中田 匠, 山田 昇, 定在波型熱音響エンジンの適応定常発振制御に基づく臨界温度比推定, 日本音響学会誌, vol.73, no.2, pp.93-99 (2017)

[学会発表](計20件)

井上 陽仁, 小林 泰秀, 温度変動に対して熱音響システムの圧力振幅を一定とする負荷のフィードバック制御, 日本機械学会北陸信越支部第55期総会・講演会, 2018年3月3日, 福井工業大学工学部

小林 泰秀, 熱音響システムに対する制御工学の応用, 第65回応用物理学会春季学術講演会, 2018年3月18日, 早稲田大学西早稲田キャンパス

小林 泰秀, 井上 陽仁, 電力フィードバック回路の調整による熱音響発電機の発振余裕の最大化, 日本音響学会 2018年春季研究発表会, 2018年3月15日, 日本工業大学

永井 和貴, 稲田 千翔之, 小林 泰秀, 振動体の振幅を一定とする振動発電機負荷のフィードバック制御系の安定性解析, 60回自動制御連合講演会, 2017年11月11日, 電気

通信大学

小林 泰秀, PI補償器の出力を時変係数とする定常発振制御系の安定性解析, 第60回自動制御連合講演会, 2017年11月11日, 電気通信大学

小林 泰秀, 井上 陽仁, 電力フィードバック回路の調整による熱音響発電機の発振余裕の拡大, 日本音響学会 2017年秋季研究発表会, 2017年9月25日, 愛媛大学城北キャンパス

篠田 将太郎, 小林 泰秀, 上田 祐樹, 電力フィードバック型熱音響発電機における環送電力の解析, 日本音響学会 2017年春季研究発表会, 2017年3月16日, 明治大学生田キャンパス

中田 匠, 小林 泰秀, 山田 昇, 圧力振幅を一定に保持するフィードバック制御に基づく熱音響コアの振幅依存性を考慮した周波数応答計測, 日本音響学会 2017年春季研究発表会, 2017年3月16日, 明治大学生田キャンパス

中田 匠, 小林 泰秀, 音響の周波数応答計測において圧力振幅を一定に保持するフィードバック制御と熱音響システムの安定性解析への応用, 第59回自動制御連合講演会, 2016年11月12日, 北九州国際会議場

篠田 将太郎, 小林 泰秀, 電力フィードバック型熱音響発電機の定常発振時進行波圧力成分の解析とフィードバック回路の効果, 第59回自動制御連合講演会, 2016年11月12日, 北九州国際会議場

永井 和貴, 齋藤 浄, 小林 泰秀, 振動体の振幅を一定とする振動発電機負荷のフィードバック制御, 第59回自動制御連合講演会, 2016年11月12日, 北九州国際会議場

中田 匠, 小林 泰秀, 山田 昇, 振幅依存性を考慮した熱音響コアの周波数応答計測に基づく定常発振時圧力振幅の推定, 日本音響学会 2016年秋季研究発表会, 2016年9月14日, 富山大学五福キャンパス

篠田 将太郎, 小林 泰秀, 電力フィードバック型熱音響発電機の臨界温度比測定とフィードバック回路の効果, 日本音響学会 2016年秋季研究発表会, 2016年9月14日, 富山大学五福キャンパス

篠田 将太郎, 小林 泰秀, 上田 祐樹, 電力フィードバック型熱音響発電機の位相調整, 日本音響学会 2016年春季研究発表会講演論文集, 2016年3月11日, 桐蔭横浜大学

Yasuhide Kobayashi, Kazuaki Sakurai, Noboru Yamada, Constant Energy Control by Time-Varying Gain for Steady-State Oscillation of Thermoacoustic Engines to Estimate Critical Temperature Ratio, 2016 American Control Conference, 2016年7月7日, Boston

小林 泰秀, 櫻井 一晃, 山田 昇, 臨界温度比推定のために熱音響エンジンを定常発振させる時変ゲインを用いた定エネルギー

制御系の安定性解析,第58回自動制御連合講演会,2015年11月15日,神戸大学工学部

篠田 将太郎,小林 泰秀,上田 祐樹,古澤 雅也,中田 匠,熱音響コアが多段接続された電力フィードバック進行波型発電機の発振条件解析及び実験,日本音響学会2015年秋季研究発表会,2015年9月17日,会津大学

小林 泰秀,中田 匠,山田 昇,熱音響自励発振における進行波圧力増幅率の振幅依存性と定常発振時圧力振幅の関係,日本音響学会2015年秋季研究発表会,2015年9月17日,会津大学

Yasuhide Kobayashi,Takumi Nakata,Noboru Yamada,A Nyquist based unified analysis method on spontaneous oscillation condition for thermoacoustic systems with application to standing- and traveling-wave engines, the 22nd International Congress on Sound and Vibration (ICSV22),2015年7月, Florence, Italy

Kazuaki Sakurai, Yasuhide Kobayashi, Noboru Yamada, Estimation of the critical temperature ratio for thermoacoustic engines based on adaptive control which maintains closed-loop system at stability limit, the 22nd International Congress on Sound and Vibration (ICSV22),2015年7月, Florence, Italy

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