

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04193

研究課題名(和文) セミアクティブ音響ダイオードによ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 by using semi-active acoustic diode

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：電力フィードバック進行波型熱音響発電機において、フィードバック回路にフォトリレーを導入し、発電電圧に同期させて電力が逆流する瞬間に回路を開放することが、自励発振に与える効果を検討した結果、定在波型の発振モードでは進行波型の発振モードが現れ圧力振幅と瞬時電圧にうなりが生じること、電力及び音響パワーが増加することから、定在波型の発振から進行波型に近づく効果があること、うなりが生じる負荷抵抗の範囲が拡大することから、発振余裕が拡大する効果があることを示した。提案する定常発振制御について、制御系が安定となる理論的保証を与えると共に、電力フィードバック部の負荷の制御に応用しその有用性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

エネルギー問題に対処する有効な選択肢の一つとして熱音響システムは近年、一般にも認知されつつあるが、不安定な発振現象を安定化する機構の研究開発は進んでいない。本研究成果はスイッチングの機構により電力フィードバックの原理とこれを用いたシステムの実用性を高めるもので、熱音響システムの実用化に貢献する社会的意義がある。定常発振制御に関する成果は、従来の制御工学にはない、発振現象を安定化する制御手法としての学術的意義がある。

研究成果の概要(英文)：For practical use of the traveling-wave electricity-feedback thermoacoustic generator, a switching mechanism by photo relays is introduced in the feedback circuit to experimentally investigate the effect of blocking the instantaneous backward power transmission by periodically opening the feedback circuit synchronizing with the generated voltage. Experimental results demonstrate that a traveling-wave mode appears when the switching is activated during the standing-wave mode self-excited oscillation, resulting a beat in the pressure amplitude and voltage as well as increase in the power and acoustic power, which concludes the instantaneous backward power blocking has a effect to transfer the system from the standing-wave to traveling-wave mode self-excited oscillation.

研究分野：制御工学

キーワード：スイッチングによる電力フィードバック部の非対称化 熱音響発電機の発振余裕の拡大 定常発振制御に基づく熱音響自励発振の安定化

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

従来のループ管進行波型熱音響発電機に対して、音響パワーの代わりに電力をフィードバックさせる電力フィードバック進行波型熱音響発電機が実現され、実際に電力を介してエネルギーがループすることで熱音響自励発振が生じ発電する原理が実証されたが、(i)定在波も利用することに起因して導波管が長い(全長約 6m)ことと、(ii)管壁の散逸をカバーするために熱音響コアの段数が多い(5 段)ことから、システムの実用上問題があった。特に(i)の要因として、電力フィードバック部はループ管と同様に、両方向の進行波に対して対称な特性を持つことが考えられるため、この解決策としてスイッチング素子などを用いた電力伝送の単方向化または、リニア発電機を含めた全体を音響ダイオードとすることの効果を検証する必要があった。

2. 研究の目的

定在波の制約から完全にフリーな電力フィードバック進行波型熱音響発電機を実現するために、特定周波数(通過周波数)の進行波音波を一方に低減衰で伝播させるセミアクティブ音響ダイオードを開発し、熱音響コアが増幅する方向の進行波音波のみを通過させ、通過周波数を目標値に制御する回路素子の制御則を開発し、温度及び負荷変動に対して高効率を維持する。具体的には、電力フィードバック回路にダイオードを導入し、リニア発電機の交流電圧に同期してスイッチングすることで送電方向を単方向化し、ナイキスト軌跡上で臨界点から最も離れた点を回転させて負の実軸上に一致させる、開ループ系に対する位相シフトを導入する。

3. 研究の方法

(1) 電力フィードバック部の非対称化が発振モードに与える効果

直流電力が流れる方向はダイオードで制御できるが、交流電力の方向制御はダイオードだけでは実現できない(極性が変化するため)。そこで当初は、自励発振の周期に同期させて半導体スイッチで二つのダイオードを on/off させることで電力の方向制御を実現する予定であったが、ダイオードの順方向抵抗が無視できないことが分かったため、スイッチのみで電力の方向を制御する方式に変更した。具体的には on 抵抗の小さいフォトリレーを用いることとした。

フィードバック回路内にスイッチを設けて音響パワーが減少する方向に流れる瞬時電力を遮断することで、瞬時電力が流れる方向を一方(非対称)にすることが熱音響発電機の発振モードに与える効果を調べる。フォトリレーの両端に抵抗 R_1 と R_2 (R_1 は PC から 8 ビットデジタル信号で 0~255 を 1 刻みで指令できる可変抵抗器)を設置し、この抵抗器の両側の電圧を A/D 変換することで瞬時電力を算出する。まず、瞬時電力の逆流の有無及び進行波型と定在波型の発振モードにおける瞬時電力の逆流の大きさを測定する。次に、フォトリレーを動作させ、瞬時電力の変化を調べる。PC からフォトリレーへの指令は、低温側リニア発電機の端子電圧 (v_1) のゼロクロスに同期させ、ゼロクロスからスイッチを off にする時間と on にする時間を指令する。二つの抵抗値は共に 110Ω としてスイッチングによる制御なし、ありの順で実験を行う。抵抗値はスイッチングの効果を見やすくするため、進行波型と定在波型の発振モードが切り替わる抵抗値を探索した後、その抵抗値から 10Ω ほど大きくし定在波型の発振モードとなるように決定する。スイッチングの条件は電圧 v_1 のゼロクロスから 12ms 後に 5ms だけ off とし(PC から off 指令の後に直ちに on 指令を与えた場合の最短の遮断時間)、実験ごとに圧力振幅が定常になるまで 3 分間待った後、そのまま 10 秒間、サンプリング周期 0.25ms で抵抗の端子電圧、導波管内の圧力振幅、PC からフォトリレーへの指令を同時記録する。

(2) 非対称化による遮断時間が環送電力に与える効果

スイッチングの遮断時間がフォトリレーのターンオン時間の 5ms より短縮できず、音響パワーを増幅させる方向(正方向)に流れる瞬時電力も遮断する問題があったため、フォトリレーを二つ並列接続して一つのスイッチとして用いることで遮断時間を短縮する手法を提案し、遮断時間が環送電力に与える効果を実験的に検討する。具体的には、遮断時間 t_s を 0 (非対称化無し)、2, 3, 4, 5ms と設定し、高温側熱交換器の温度 T_H は 300 , 低温側熱交換器の温度 T_C は 10 一定、抵抗値は $R_1=70\Omega$ 、 $R_2=47\Omega$ とし、5 通りの t_s について複数回繰り返し実験を行う。実験毎に圧力振幅が定常になるまで 3 分間待った後、そのまま 10 秒間、サンプリング周期 0.25ms で抵抗の端子電圧、導波管内の圧力振幅、PC からフォトリレーへの指令を同時記録する。実験データより、定在波型モードの発振周波数を含む 30~40Hz で最大の周波数成分 f_1 、 f_1 の周波数成分における音響パワー I_{c1} 、進行波型モードの発振周波数を含む 40~50Hz で最大の周波数成分 f_2 、 f_2 の周波数成分における音響パワー I_{c2} 、環送電力 P_1 (低温側リニア発電機に入力される電力)、端子電力 P_2 (高温側リニア発電機の出力電力)、消費電力 $P_R=R_2 \cdot P_1$ を算出する。

(3) 電力フィードバック部の非対称化が発振余裕に与える効果

本実験装置において進行波型の発振モードが現れる負荷抵抗の許容範囲が広がることは、発振余裕が広がることを意味する。そこで電力フィードバック回路の非対称化が与えるうなりが

生じる負荷抵抗の許容範囲を検討する。 T_H は300、 T_C は10一定とし、まず、スイッチング無しで抵抗値 $R_1=47\Omega$ 固定とし、負荷抵抗値の合計 R_1+R_2 を187, 137, 117, 97, 87, 77, 67, 57, 48 Ω の順で変化させる。次に $t_s = 2ms$ で同じ抵抗値の順で変化させ、各抵抗値ごとに圧力振幅が定常になるまで5分間待った後、そのまま10秒間、サンプリング周期0.25msで発電機の端子電圧 V_{s1}, V_{s2}, V_1, V_2 , 圧力振幅 p_1, p_2 を取得し、PCからフォトリレーへの指令を同時記録する。また、この実験でうなりが現れる負荷抵抗が87付近だったため、117, 87, 57, 48の順でスイッチングなし、ありと2回繰り返し、計6通りの実験を行う。音響パワー I_{c1}, I_{c2} を算出し、抵抗値に対する音響パワーの関係から、非対称化が発振余裕に与える効果を示す。

(4)発振余裕を最大化する電力フィードバック回路の調整手法の開発

本発電機に二つ存在する発振モードの決定要因が未解明のため、並行して電力フィードバック部の調整を実験的に検討する。具体的には、温度変動に対して発電電力を最大化する負荷のフィードバック制御を行うために、廃熱源の温度変動に対して(i)定常発振制御及び(ii)極値探索制御に基づいて発電機の負荷を動的に調整する制御系を構成し、その妥当性を実験的に検証する。

(5)定常発振制御系の安定性解析及び熱音響自励発振条件の推定への応用

上記の負荷のフィードバック制御系など、定常発振制御系の安定性の理論的保証を与えるため、二次振動系モデルに基づき安定性解析を行う。また、制御手法の有用性を示すため、熱音響システムの周波数応答計測に応用できることを実験的に検討する。

(6)発振モードの決定要因に関する検討

本実験装置の自励発振における定在波型及び進行波型の二つの発振モードの発振周波数が単純な管路モデルと音速から成る理論値と定量的に大きく異なる原因について、(i)リニア発電機の端面を単純な閉端モデルに置き換え、(ii)コア部の2入力2出力の周波数応答のうち一部を0とおくことで T_C 側の反射特性のみ利用する等、単純化した安定性解析を行い検討する。

(7)電力フィードバック発電機の実用性・信頼性向上

リニア発電機のボイスコイルを従来の水平から垂直方向に、市販スピーカからボイスコイルアクチュエータに変更し、エルボを介してコア部・管路部と接続することで、発電機の位置決めを簡易化を図る。長期間の網羅的な実験データに基づき定量的評価を行うために空調を導入すると共に、ヒーター電源(二値制御)を無段階の電圧制御に置き換え、実験環境を改善する。

4. 研究成果

(1)電力フィードバック部の非対称化が発振モードに与える効果検証

フォトリレーを一つ用いて、音響パワーを減少させる方向に流れる瞬時電力を遮断することが発電機の発振モードに与える効果として、定在波型の発振モードでは進行波型の発振モードと同じ周波数が現れ圧力振幅と瞬時電圧にうなりが生じることを実験的に示した。

(2)非対称化による遮断時間が環送電力に与える効果検証

T_H 側の瞬時電力 $P_2(t)$ の逆流に合わせて遮断時間を設定すると、環送電力が最も大きくなることを実験的に示した。また、フィードバック回路の非対称化により、正方向の音響パワーが増加することから、エネルギー的観点からも定在波型の発振モードから進行波型の発振モードへ近づいていることを示した。

(3)電力フィードバック部の非対称化が発振余裕に与える効果

電力フィードバック回路の非対称化が与えるうなりが生じる負荷抵抗の範囲(発振余裕)への効果を検討した結果、発振余裕が拡大することを実験的に示した。

(4)発振余裕を最大化する電力フィードバック回路の調整手法の開発

電力フィードバック部の負荷抵抗値を自動調整する定常発振制御を行った結果、(i)熱源の温度が一定、さらに熱源の温度が変化した場合に、圧力振幅を与えられた目標値一定となるように負荷抵抗が自動調整されること、極値探索制御を行った結果、(ii)制御系のパラメータ(フィルタ係数、摂動の振幅と周波数)の調整法を示し、熱源の温度が一定の場合、負荷を動的に変化させることで発電電力を最大化できることを実験的に示した。

(5)定常発振制御系の安定性解析及び熱音響自励発振条件の推定への応用

二次振動系モデルに基づき安定性解析を行った結果、制御系の比例・積分ゲインに関する安定領域が実験と理論で定性的に一致する結果を得た。熱音響コアの振幅依存性を考慮した周波数応答計測及び、熱音響システムの臨界温度比推定に応用できることを実験的に示した。具体的には、測定管路長の共振を利用することにより小型の加振器で大振幅加振を行い振幅依存性が取得できること、開ループ系のゲインに代えて位相を調整することでも定常発振制御ができること、閉ループ系を不安定化させることで正弦波の参照信号を用いずに管路長に応じて発振周波

数を自動決定し大振幅下で周波数応答計測が行えること等を示した。

(6)発振モードの決定要因に関する検討

定在波型モードにおける発振周波数及び安定性解析による推定値には、コア部の低温側端面とリニアモータ間で音波が往復する共振が支配的であり、この結果単純な管路長と音速に基づく理論値に対して発振周波数が高くなることを明らかにした。

(7)電力フィードバック発電機の実用性・信頼性向上

リニア発電機における永久磁石の位置決めが不要となり発電機が発振に至るまでの時間が大幅に短縮化されるとともに、発電電圧、圧力振幅、発振周波数等の再現性が向上した。リニア発電機の電力-音響パワー変換効率が改善されたことにより発振可能なコアの段数が5段から4段に低減した。

<引用文献>

井上 陽仁, 小林 泰秀, 温度変動に対して熱音響システムの出力を制御する負荷のフィードバック制御系の構成, 日本音響学会誌, vol.77(2021) 掲載決定

小林 諒也, 廣川 楽, 小林 泰秀, 管路長による共振を利用して発振周波数を自動決定する大振幅音響計測制御機構に基づく熱音響自励発振時圧力振幅の推定, 日本音響学会 2020 年秋季研究発表会講演論文集, 2020 年 9 月 9 日, 講演番号 1-10-8

竹村 元気, 小林 諒也, 小林 泰秀, 振幅依存性を考慮した熱音響コアの周波数応答関数行列計測と自励発振時圧力振幅の推定, 日本音響学会 2020 年秋季研究発表会講演論文集, 2020 年 9 月 9 日, 講演番号 1-10-9

小林 泰秀, 開ループ位相の動的な調整により振動振幅を目標値一定とする定常発振制御系の安定性解析, 第 62 回自動制御連合講演会, 2019 年 11 月 9 日, 講演番号 1H4-05

萩原 佑斗, 小林 泰秀, 電力フィードバック型熱音響発電機における電力フィードバック部の遮断時間が環送電力に与える効果, 日本音響学会 2019 年秋季研究発表会講演論文集, pp.103-104, 2019 年 9 月 6 日, 講演番号 3-11-19

小林 諒也, 小林 泰秀, 測定管路長による共振を利用した定常発振制御に基づく振幅依存の周波数応答計測と熱音響自励発振時圧力振幅の推定, 日本音響学会 2019 年秋季研究発表会講演論文集, pp.105-106, 2019 年 9 月 6 日, 講演番号 3-11-20

廣本 太郎, 小林 泰秀, 定常発振制御を用いた周波数応答計測に基づく熱音響コアの振幅依存性と自励発振時圧力の推定, 日本音響学会 2019 年春季研究発表会講演論文集, pp.101-102, 2019 年 3 月 6 日, 講演番号 2-4-17

萩原 佑斗, 小林 泰秀, 電力フィードバック進行波型熱音響発電機における電力フィードバック部の非対称化が与える発振モードへの効果, 日本音響学会 2019 年春季研究発表会講演論文集, pp.99-100, 2019 年 3 月 6 日, 講演番号 2-4-16

小林 泰秀, 周波数応答の出力振幅を目標値一定とするために入力振幅をフィードバック制御する定常発振制御系の安定性解析, 第 61 回自動制御連合講演会, 2018 年 11 月 18 日, pp.1121-1127, 講演番号 7D5

小林 泰秀, 中田 匠, 廣本 太郎, 定常発振制御に基づく振幅依存性を考慮した周波数応答計測と熱音響自励発振時圧力の推定, 日本音響学会 2018 年秋季研究発表会講演論文集, pp.67-68, 2018 年 9 月 12 日, 講演番号 1-7-1

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 31
2. 論文標題 比例積分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	5. 発行年 2018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 385/391
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 -

1. 著者名 永井 和貴、齋藤 浄、稲田 千翔之、小林 泰秀	4. 巻 32
2. 論文標題 振動体の振幅を目標値一定とする振動発電機負荷のフィードバック制御	5. 発行年 2019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 318/326
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 -

1. 著者名 井上 陽仁、小林 泰秀	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 温度変動に対して熱音響システムの出力を制御する負荷のフィードバック制御系の構成	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本音響学会誌	6. 最初と最後の頁 印刷中
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14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小林 諒也、廣川 凜、小林 泰秀
2. 発表標題 管路長による共振を利用して発振周波数を自動決定する大振幅音響計測制御機構に基づく熱音響自励発振時圧力振幅の推定
3. 学会等名 日本音響学会2020年秋季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹村 元気、小林 諒也、小林 泰秀
2. 発表標題 振幅依存性を考慮した熱音響コアの周波数応答関数行列計測と自励発振時圧力振幅の推定
3. 学会等名 日本音響学会2020年秋季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 萩原 佑斗、小林 泰秀
2. 発表標題 電力フィードバック型熱音響発電機における電力フィードバック部の遮断時間が環送電力に与える効果
3. 学会等名 日本音響学会2019年秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林 諒也、小林 泰秀
2. 発表標題 測定管路長による共振を利用した定常発振制御に基づく振幅依存の周波数応答計測と熱音響自励発振時圧力振幅の推定
3. 学会等名 日本音響学会2019年秋季研究発表会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林 泰秀
2. 発表標題 開ループ位相の動的な調整により振動振幅を目標値一定とする定常発振制御系の安定性解析"
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柴崎 敬大、小林 泰秀
2. 発表標題 振動発電機に接続されたコンデンサの充放電周期を動的に可変とする振動体振幅の定常発振制御
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部第57期総会・講演会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林 諒也、廣川 楽、小林 泰秀
2. 発表標題 熱音響システムの周波数応答計測における定常発振制御を用いた発振周波数の決定
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部第57期総会・講演会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 馬場 一貴、小林 泰秀
2. 発表標題 定常発振制御に基づくループ管進行波型熱音響システムの臨界温度比推定における音源位置の効果
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部第57期総会・講演会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 廣本 太郎、小林 泰秀
2. 発表標題 定常発振制御を用いた周波数応答計測に基づく熱音響コアの振幅依存性と自励発振時圧力の推定
3. 学会等名 日本音響学会2019年春季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋原 佑斗、小林 泰秀
2. 発表標題 電力フィードバック進行波型熱音響発電機における電力フィードバック部の非対称化が与える発振モードへの効果
3. 学会等名 日本音響学会2019年春季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林 泰秀
2. 発表標題 周波数応答の出力振幅を目標値一定とするために入力振幅をフィードバック制御する定常発振制御系の安定性解析
3. 学会等名 第61回自動制御連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林 泰秀、中田匠、廣本太郎
2. 発表標題 定常発振制御に基づく振幅依存性を考慮した周波数応答計測と熱音響自励発振時圧力の推定
3. 学会等名 日本音響学会2018年秋季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 馬場 一貴、小林 泰秀
2. 発表標題 定常発振制御に基づくループ管進行波型熱音響エンジンの臨界温度比推定
3. 学会等名 日本音響学会2018年秋季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井上 陽仁、小林 泰秀
2. 発表標題 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とエネルギー変換効率に与える効果
3. 学会等名 日本音響学会2018年秋季研究発表会
4. 発表年 2018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
連携研究者	山田 昇 (Yamada Noboru) (90321976)	長岡技術科学大学・工学研究科・教授 (13102)	

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