

平成30年度
長岡技術科学大学 大学院
工学研究科 修士論文

温度変動に対して熱音響システムの効率を 最大化する負荷のフィードバック制御

Feedback control of thermoacoustic system's load which maximizes
efficiency for temperature variation

長岡技術科学大学 大学院 工学研究科
機械創造工学専攻 15301483

著者氏名 井上陽仁

指導教員 小林泰秀 准教授

平成31年2月1日

Abstract

1st,February,2019

Feedback control of thermoacoustic system's load which maximizes efficiency
for temperature variation

No.15301483

INOUE Akihito

Department of Mechanical Engineering
Nagaoka University of Technology

There has been application of thermoacoustic phenomenon as a mean to recover and use relatively-low-temperature waste heat energy from automobiles and factories. By applying a temperature gradient to both sides of a heat regenerator having narrow flow channels installed in a tube, sound waves in the tube are amplified and a resonance phenomenon occurs. The pressure amplitude during spontaneous oscillation of the thermoacoustic system utilizing this phenomenon varies due to the temperature variation of the heat source when the load is constant. When pressure amplitude greatly decreases, spontaneous oscillation stops which results in system shutdown. In addition, because the operating frequency is fixed due to the resonance of the acoustic system depending on the tube length of the system, there is a problem that the energy conversion efficiency of the thermoacoustic system is lowered due to the temperature variation of the heat source. In many researches, the minimum temperature ratio at which spontaneous oscillation occurs has been studied for system evaluation and improvement, however, there has been few report which deal with the temperature variation of the heat source. In this paper, in order to solve these problems, we propose a method to maintain the spontaneous oscillation of thermoacoustic system as a constant value and maintain maximum efficiency against temperature variation.

In this research, we propose a thermoacoustic generator which can obtain electric power by giving the linear generator the air column vibration inside the tube caused by thermoacoustic spontaneous oscillation. When the load resistance constituting the electric circuit of the generator approaches from an open circuit to the short circuit, the pressure amplitude in the tube rises. Therefore, when the pressure amplitude decreases due to the temperature decrease, it is conceivable to reduce the load resistance to maintain the pressure amplitude constant and to maintain spontaneous oscillation. There is related research that steady-state oscillation control that controls the oscillation amplitude of the oscillator to a constant value according to the output of the PI controller thereby dynamically adjusting the load resistance connected to the vibration generator. However, it has not been applied to thermoacoustic systems. On the other hand, the relation between the efficiency and the load resistance value gives a convex outline. Extremum seeking control has been proposed that maximizes the output

for variation in the flow rate of the low temperature side heat exchange cooling water by mechanically and dynamically adjusting the acoustic load connected to the thermoacoustic system . However, it has not been applied to the control of the electrical load of the thermoacoustic generator. In this research, in order to realize a method to (i) maintain spontaneous oscillation constant in the thermoacoustic system against temperature variation of the waste heat source or (ii) maintain maximum efficiency, load of thermoacoustic generator a control system that dynamically adjusts was constructed, and the following results were obtained.

(i) steady-state oscillation control that maintains the pressure amplitude constant at the target value
Experiments showed that the load resistance is automatically adjusted so that the pressure amplitude becomes the given target value when the temperature of the heat source is constant and the temperature of the heat source changes. Since the power input to the heater decreases (increases) when the pressure amplitude decreases (increases) by automatic control, the change in the load resistance (increase / decrease) appears as a change (decrease / increase) in power to keep the temperature difference constant to the regenerator.

(ii) Extremum seeking control for maximizing generated power

Since the change in the resistance value at power generation efficiency (= generated power / input power) at (i) appears relatively large in the generated power, maximization of generated power was examined instead of maximizing power generation efficiency. Experimentally, parameters of the extremum seeking control system (filter coefficient, perturbation amplitude and frequency) were determined. We showed that when the temperature of the heat source is constant, the generated power can be maximized by dynamically changing the load. When the initial value of the resistance value is smaller (larger) than the resistance value giving the maximum efficiency, it has been shown that the resistance value is automatically adjusted (decreased) by the extremum value search control.

In summary, it was shown that feasibility of feedback control of load maximizing efficiency of thermoacoustic system in this paper.

目次

第1章 緒言	8
第2章 熱音響現象について	10
第3章 実験装置	11
3.1 熱音響コアの構成	12
3.2 リニアモータの構成	14
3.3 電力フィードバック進行波型熱音響発電機の構成	16
3.3.1 電力フィードバック進行波型熱音響発電機と実験装置の構成	17
3.3.2 熱音響コアに入力する投入電流の測定系の構成	17
3.4 熱音響システムの負荷に対する出力の関係	19
第4章 熱音響システムの圧力振幅を一定とする定常発振制御	22
4.1 熱音響システムの負荷と圧力振幅の関係	22
4.2 定常発振制御系の構成	23
4.3 温度変動無しの場合の圧力振幅制御実験	24
4.4 温度変動に対する圧力振幅制御実験	25
4.5 制御適用前後のエネルギー変換効率	27
第5章 熱音響システムの効率を最大とする極値探索制御	28
5.1 実験装置の変更	29
5.1.1 塩ビ管から金属管への置き換え	29
5.1.2 圧力センサの変更と追加	29
5.2 推定発電電力 \hat{P}_R の算出	30
5.3 熱音響システムの負荷と発電電力の関係	32

5.4	極値探索制御 ESC (Extremum Seeking Control) 系の構成	36
5.4.1	極値探索制御系の原理	36
5.4.2	極値探索制御系のブロック線図	37
5.5	極値探索制御のパラメータの決定	39
5.5.1	摂動させた入力に対する出力の位相	39
5.6	温度変動無しの場合の発電電力最大化制御実験	41
第 6 章	結言	43
第 7 章	今後の課題	44
	謝辞	45
	参考文献	46
	研究業績	48

目 次

3.1	Photograph of thermoacoustic core	13
3.2	Photograph of stack	13
3.3	Photograph of linear motor	14
3.4	Photograph of voice coil	15
3.5	Electricity-feedback traveling-wave thermoacoustic electric generator with 5-stage cores	16
3.6	Photograph of linear motor	17
3.7	Photograph of linear motor	18
3.8	Relation between resistance and pressure amplitude	20
3.9	Relation between resistance and generation power	21
4.1	Block diagram of the pressure amplitude control system	22
4.2	Block diagram of the pressure amplitude control system	23
4.3	Time responses of control experiment(p , \hat{P} , R for $T_H=300$ °C)	24
4.4	Time responses of control experiment(\hat{P} for temperature change)	25
4.5	Time responses of control experiment(R for temperature change)	26
5.1	Time responses of generated power for resistance change $f_{lpr}=0.1\text{Hz}$	30
5.2	Time responses of generated power for resistance change $f_{lpr}=1\text{Hz}$	31
5.3	Time responses of generated power for resistance change	32
5.4	Time responses of generated power and pressure amplitude for $R=5 \Omega$	33
5.5	Relation between resistance and generated power	34
5.6	Block diagram of the extremum seeking control system[文献 [15] より参照し一部加筆修正]	36
5.7	Block diagram of the extremum seeking control system	37
5.8	Phase between resistance and generated power for $f_p = 0.1\text{Hz}$	39

5.9	Phase between resistance and generated power for $f_p = 0.01\text{Hz}$	40
5.10	Time response of extremum seeking control experiment($R = 20 \Omega_{\text{start}}$)	41
5.11	Time response of extremum seeking control experiment($R= 80 \Omega_{\text{start}}$)	42

表 目 次

3.1	Experimental equipment	11
4.1	Pressure control experimental results	27

第1章 緒言

未利用のまま環境中に捨てられてきた、自動車や工場からの比較的低温度の廃熱を回収・利用する手段の一つとして熱音響現象の応用が注目されている [1]。管内に設置した細かな流路を持つ円筒型の蓄熱器 (以後スタックと呼ぶ) の両側に高温側・低温側の熱交換器を設置し、スタックに温度勾配を与えることで管内の音波が増幅され共振現象が生じる。この現象を熱音響自励発振と呼ぶ。この現象を利用する熱音響システムには、発電機 [2] やエンジン [3]、冷凍機 [4] がある。

熱音響システムの自励発振時の圧力振幅は、負荷が一定の場合、熱源の温度変動により変動する。圧力振幅が大きく低下すると自励発振が停止しシステムが機能しなくなる。また、システムの管路長に依存する音響系の共振により動作周波数が固定されているため、熱源の温度変化により、スタックのエネルギー変換効率が低下する問題がある。温度変動に関係する問題は、廃熱を利用するシステムのため実用上避けて通れない。多くの研究ではシステムの評価や改善設計のための指標として臨界温度比 (自励発振が生じる最小の温度比 = 高温側温度/低温側温度) を実験もしくは解析により求めている [3] が、廃熱の温度変動に対処する熱音響システムの研究は充分ではない。本研究は、これらの問題を解決するために、温度変動に対して熱音響システムの自励発振を維持もしくは効率を最大に維持する手法を提案する。

熱音響発電機では、熱音響自励発振により生じる管内の気柱振動をリニア発電機に与えることで、電力が得られる。熱音響コア (スタック、高温側及び低温側熱交換から構成される) とループ状の管路から構成されるループ管進行波型熱音響発電機は、直管から構成される定在波型に比べ、熱-音波のエネルギー変換効率が低い利点があることが知られている。しかし、管路長に依存する音響系の共振とリニア発電機可動部の固有振動に依存する機械系の共振により動作周波数が固定されているため、熱源の温度変化により効率が低下する問題がある。これに対して本研究では、当研究グループで研究を進めている電力フィードバック進行波型熱音響発電機 [2],[5] を利用する。これは熱音響コアの両側にリニア発電機を設置し、ループ管進行波型発電機における音響パワーのフィードバックを電力のフィードバックに置き換えたシステムで、電力フィードバック部の電気回路の定数を動的に変化させることにより、上記の問題に対処でき、発電機の小型化も期待できる。本論文ではこの電気回路を構成する負荷抵抗を動的に

変化させることで温度変動の問題に対処することを考える。

電力フィードバック部の負荷抵抗が開放から短絡状態に近づくと管内の圧力振幅は上昇する [2]。よって熱源の温度変動，特に廃熱源の温度低下を受けて管内の圧力振幅が低下したとき，負荷抵抗を減少させることにより圧力振幅を一定に保ち，自励発振を維持することが考えられる。圧力振幅の目標値と現在の圧力振幅の偏差がわかれば負荷抵抗値の増減により，圧力振幅を目標値一定に制御可能であると予想できる。このように負荷を動的に可変とする研究には，PI 補償器の出力に応じて振動発電機に接続される負荷抵抗値を動的に調整することにより振動体の振動振幅を目標値一定に制御する定常発振制御がある [6]。しかし，熱音響システムに対しての応用は行われていない。そこで本論文では第 4 章で，温度変動に対して圧力振幅が目標値一定となるように負荷を動的に調整する定常発振制御を行う。その結果，熱源の温度変動が無い場合に圧力振幅が目標値一定とできることを実験的に示す。さらに温度変動がある場合でも，圧力振幅が目標値一定となるように負荷抵抗が定常発振制御系により調整されることを示す。

一方，効率に着目すると，電力フィードバック部の負荷抵抗を短絡から開放状態まで変化させて負荷-効率特性を得たとき，効率と負荷抵抗値の関係は凸型の概形を描く [2]。熱音響発電機を最大効率で稼働させるために，リニア発電機の負荷を静的に調整することで熱音響発電機のエンジン（熱音響コアと管で構成される）とリニア発電機の接合部における音響インピーダンスマッチングが行われている [7]。さらに，熱音響システムに接続される音響的負荷をアクチュエータにより容積を機械的に調整可能な共振器を用いて動的に調整することで，低温側熱交換用冷却水の流量の変動に対して出力を最大化する極値探索制御（Extremum Seeking Control）が提案されている [8]。

しかし，発電機の電氣的負荷の制御には応用されていない。そこで，本論文では第 5 章で，負荷抵抗を動的に調整して効率が最大となるように極値探索制御を用いる。ただし，本装置における発電電力に対してヒータへの投入電力は抵抗値によらず大きく変動しないため，ここでは簡単のため発電電力の最大化を考える。熱源の温度変動の無い場合に発電電力が最大化されるように負荷が動的に調整されることを実験的に示す。

第2章 熱音響現象について

熱音響エンジンは、熱音響現象を利用した外燃機関である。熱音響コアと共鳴管によって構成される。一般に、自由空間内を音波が伝搬するとき、作動流体や周囲物との熱交換は行われず、断熱圧縮変化となる。一方で、スタックのような極めて狭い流路内を音波が伝搬するとき、スタック内の流路壁近傍の流体は等温圧縮変化となる。ゆえに流路壁と作動流体との熱交換が行われ、熱流と音響パワーの相互変換が生じる。このような熱エネルギーと音エネルギーの相互エネルギー変換現象を、熱音響現象と呼ぶ [9].

熱音響現象は歴史上、古くから確認されている。1850年、Soundhauss によって丸底フラスコ形状の管（Soundhauss 管）に対して丸底部分を加熱し続けると自励発振が生じる現象が報告され、1859年には、Rijke によって円筒管を垂直に立て、全長の下から四分の一の位置に金網を設置しこの部分を加熱することで共鳴が生じる Rijke 管が報告されている [10]. また日本においても、江戸時代の読本作品にも登場する「吉備津の釜」が同様の現象として報告されている [11].

熱音響システムは、熱力学サイクル的にはスターリングエンジンと等しく、発振が生じることで引き起こされる気柱振動がスターリングエンジンにおけるピストンの役割を担う [12]. また外燃機関であり使用する熱源を選ばず、200~300℃の比較的低温で動作可能なため、工場や自動車からの廃熱の回収・利用が期待されている。スターリングエンジンに比べ、熱音響エンジンは単純な共鳴管とスタック、熱交換器から成るため低コストで構成可能なメリットを持つ。また効率面でも、1999年に Backhauss らによってカルノー効率の41%を達成する進行波型熱音響エンジン [13] が開発されており、低コストで開発できかつ廃熱駆動できる熱機関として、高い潜在性を持つ技術として注目されている。

熱音響システムは一般に、生じた音響パワーをもう一つのスタックに与えることで生じる温度勾配を利用して冷却を行う熱音響冷凍機 [4], 音響パワーをスピーカ（電気-音響相互変換器）に与えて電力に変換する熱音響発電機 [14] に用いられる。熱音響システムに対して制御工学を応用した例は少なく、温度変動に対して電氣的負荷を調整して最大効率を維持する手法は検討されていない。本研究では制御工学を応用して、熱音響システムの効率を最大化する負荷のフィードバック制御を提供することを目的としている。

第3章 実験装置

本章では電力フィードバック型熱音響発電機の構成概要について説明する。各使用機器の仕様をまとめたものを Table 3.1 に示す。3.1~3.2 節では熱音響コアと呼ぶ、熱と音波エネルギーの相互変換を行うためのユニット、電力と音波エネルギーの相互変換を行うリニアモータ（本装置ではリニア発電機としても扱う）について説明する。3.3 節で電力フィードバック型熱音響発電機の機能について説明する。

Table 3.1: Experimental equipment

Stack	NGK INSULATORS honey-comb ceramics (600 cpi, $l = 55\text{mm}$, $\phi = 50\text{mm}$)
Power Amp.	YAMAHA P1000S
PC	Dell PowerEdge840 (RTAI3.6.1/Linux kernel 2.6.20.21)
A/D, D/A	CONTEC AD12-16 (PCI) , DA12-4 (PCI) (12bit, $\pm 5\text{ V}$, $10\mu\text{ sec}$)
Thermometer	ANRITSU HPD-2232
Cartridge heater	HAKKO HLE2101 (100W) $\times 20$
Thermo cont.	HAKKO DGC2330 (200V Three phase power supply)
Pressure sens.	NAGANO KEIKI KP15(Chapter4) PCB 106B51(Chapter5)
Bellows	IRIE KOKEN NS151-1 ($l = 17\text{mm}$, $\phi = 51\text{mm}$, $k = 7.13\text{N/mm}$)
Linear motor	FOSTEX FW208N
Oscilloscope	LeCroy W wave Jet 324A (200MHz)
Chiller	EYELA NCC-1110
Current Sens.	MSYSTEM M2CEC-1505-R2

3.1 熱音響コアの構成

熱音響コアの外観を Fig. 3.1 に示す。コア部の全長 $L_{\text{core}} = 436\text{mm}$ で、厚み 0.1mm のステンレス管、直径 50mm ・長さ 55mm で約 1mm の細管流路を持つハニカムセラミックス製のスタック (外観を Fig. 3.2 に示す)、中央右の高温側熱交換器一個、両側の低温側熱交換器二個と塩ビフランジなどから構成される。右側の低温側熱交換器はスタックの片端面の冷却用、左側の低温側熱交換器は左側の塩ビ管の保護用に設置されている。左右の低温側熱交換機に塩ビ製フランジが設置され管路と接続される。高温側熱交換器は隙間 1mm 、幅 10mm のフィンを持つ銅製の正方形ブロックで、四辺に挿入された四本のカートリッジヒータで加熱されサーモコントローラによって温度調整される。低温側熱交換器は隙間 1mm 、幅 5mm のフィンを持つ銅製の正方形ブロックで、ブロックに接続されたホースを介した循環水で冷却されチラー装置によって温度調整される。熱交換器の表面温度 T_H と T_C は熱電対により測定される。スタック壁面上を T_H から T_C へ図の右方向へ向かう熱流と釣り合い、図の左方向へ向かう音波の音響パワーが増幅される。

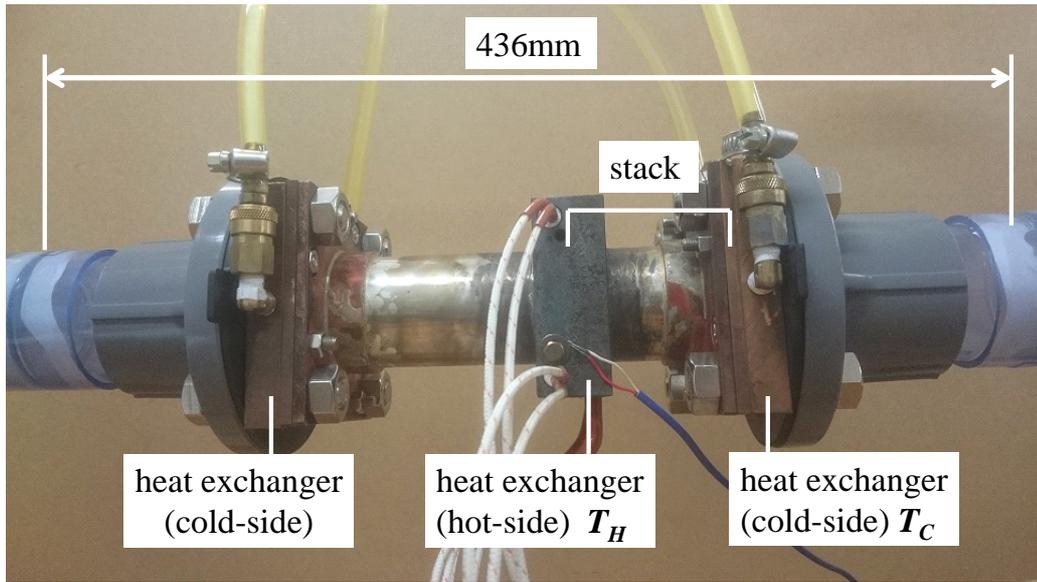


Fig. 3.1: Photograph of thermoacoustic core



Fig. 3.2: Photograph of stack

3.2 リニアモータの構成

リニアモータの外観を Fig. 3.3 に示す。リニアモータは市販のスピーカからダンパとコーン紙を取り除き永久磁石とボイスコイルを分離し、Fig. 3.4 のようにボイスコイルとベローズを組み合わせたものから構成される。ベローズは端面がアクリル製の円盤で接着され、その円盤を介してボイスコイルに接続される。分離された永久磁石は、ボイスコイル間のギャップ・位置調整のため、xyz ステージ上に設置される。リニアモータの機械共振周波数は 45Hz である。リニアモータ開端からアクリル円盤までの距離は 396mm である。電力フィードバック進行波型発電機中のリニアモータは、電力フィードバック機能のために電気-音変換を行うリニア発電機としても機能する。

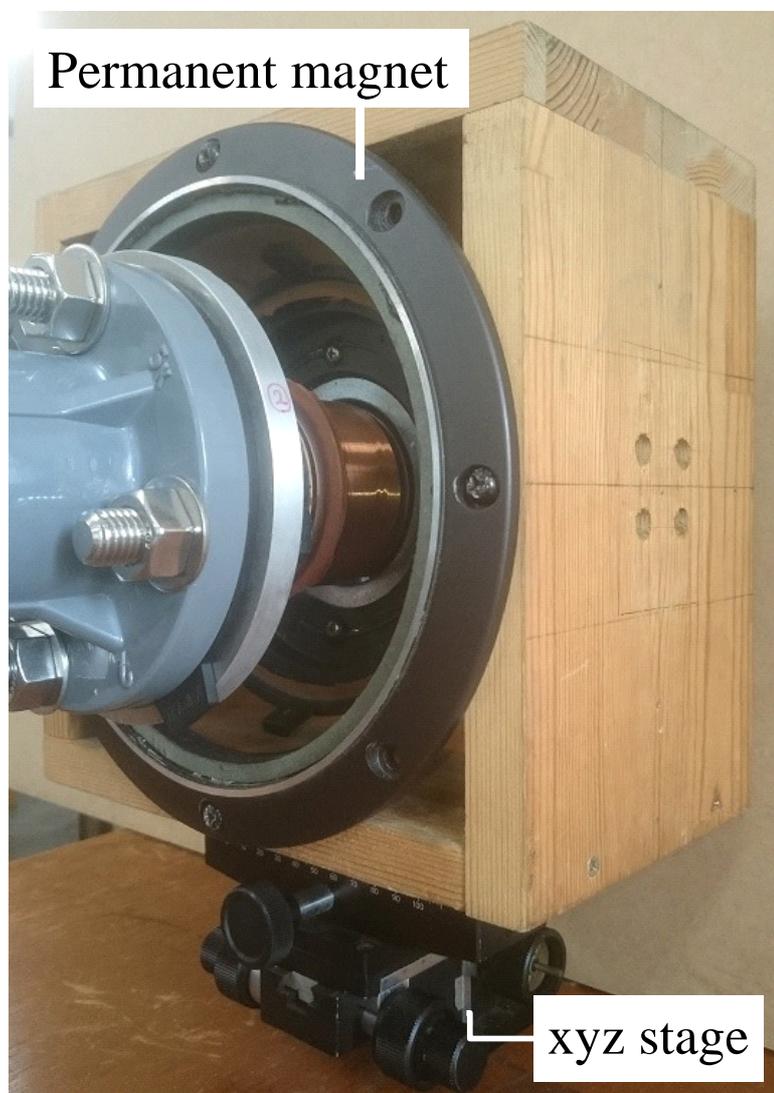


Fig. 3.3: Photograph of linear motor

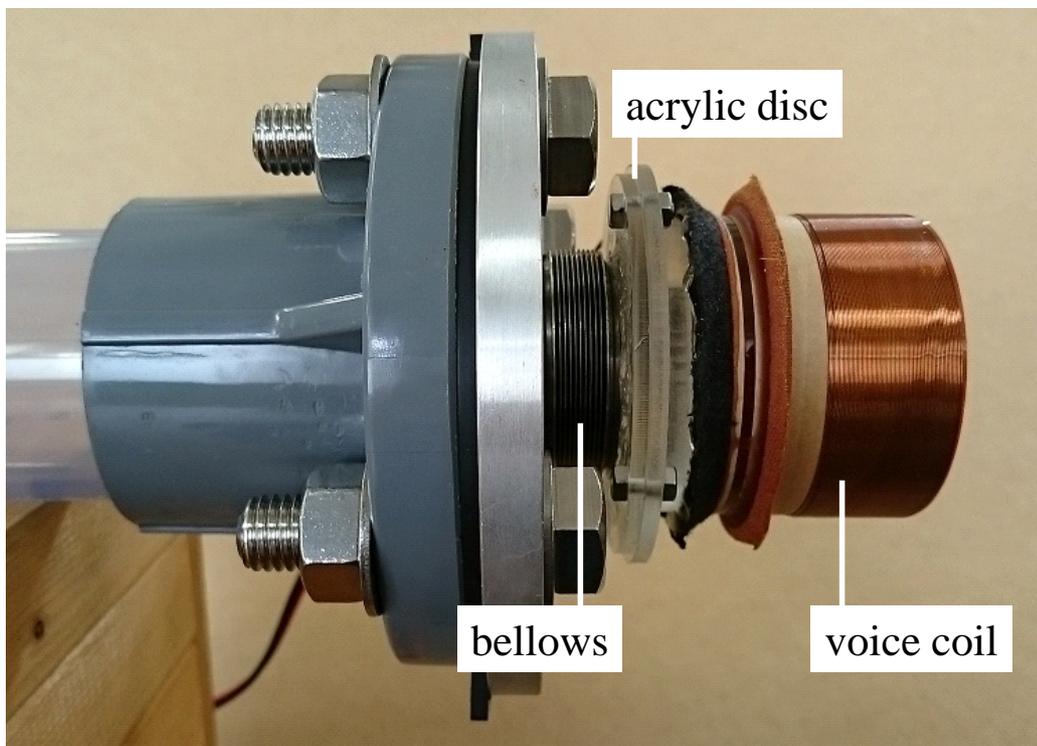


Fig. 3.4: Photograph of voice coil

3.3 電力フィードバック進行波型熱音響発電機の構成

実験装置概要を Fig. 3.5 に示す. 4章で扱う実験装置構成は文献 [2] と同様である. 一方, 5章で扱う実験装置構成は一部を変更して用いる. (詳細は5章で説明する) 5段直結に接続された熱音響コアの両側に前述したリニアモータが設置され, 塩ビ管で連結される. 電力フィードバック回路を短絡とした際に, 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される. コア部によって増幅された音響パワーを受けリニアモータ H_2 が発電し, 発電した電力がフィードバック回路を経由し図の右方向にフィードバックされ H_1 へと送電される. フィードバック回路には負荷抵抗 R が直列に接続される. 管路には二つの圧力センサ p_1, p_2 が距離 $l = 871\text{mm}$ の間隔で設置される. p_1 はリニアモータから $\Delta l = 34\text{mm}$ の位置に設置される. 圧力センサの出力電圧 p_1 を A/D 変換しパソコンに取り込み推定圧力振幅を得る. また図中の I は圧力センサ位置の音響パワー, I_C, I_H はリニアモータ端部の音響パワー, p_{s1}, p_{s2} はフィードバック回路を循環する電力を表す. 本研究において図中の負荷抵抗 R は可変抵抗器で, 定常発振制御または極値探索制御により動的に調整される. 可変抵抗器はパソコンからのデジタル信号 R_s ($0 \sim 120$ の指令値) により $0 \sim 120 \Omega$ の範囲を 1Ω 刻みで調整できる.

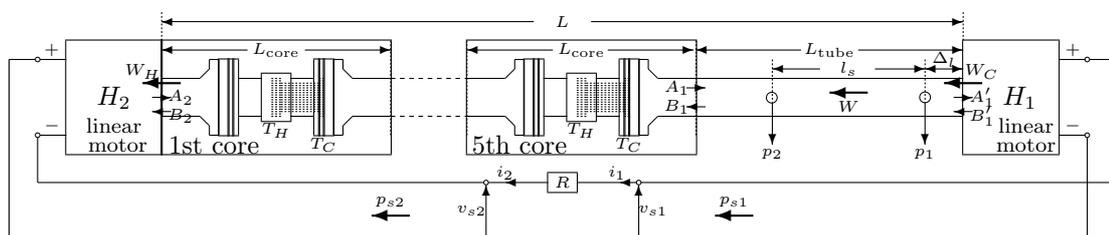


Fig. 3.5: Electricity-feedback traveling-wave thermoacoustic electric generator with 5-stage cores

3.3.1 電力フィードバック進行波型熱音響発電機と実験装置の構成

実験装置の電圧，圧力測定系を Fig. 3.6 に示す．

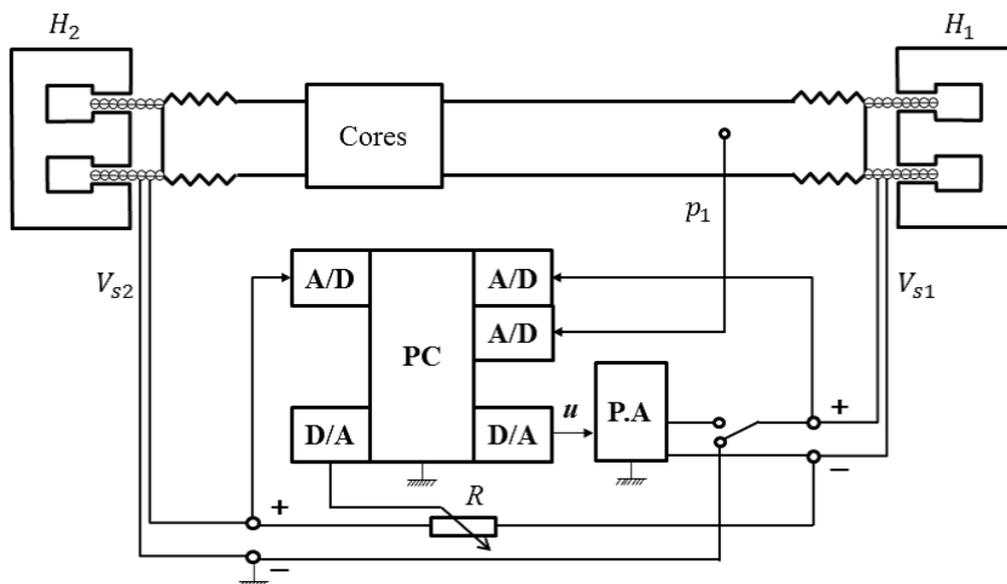


Fig. 3.6: Photograph of linear motor

熱音響発電機の発電電力は負荷抵抗値 R における瞬時消費電力 p_R として以下の式のように定義される．

$$i = i_1 = i_2 = \frac{v_{s1} - v_{s2}}{R}, \quad p_{s1} = v_{s1}i, \quad p_{s2} = v_{s2}i, \quad p_R = p_{s1} - p_{s2} \quad (3.1)$$

i は装置の電気回路中を流れる電流， v_{s1}, v_{s2} はそれぞれリニアモータ H_1 と H_2 の端子間電圧， p_{s1}, p_{s2} はそれぞれリニアモータ H_1 と H_2 で生じている電力である．

3.3.2 熱音響コアに入力する投入電流の測定系の構成

本研究では発電機の効率 η_{h-e} を以下のように定義する．

$$\eta_{h-e} = \frac{P_R}{W_{\text{total}}} \quad (3.2)$$

ここで， P_R は平均電力， W_{total} は熱源を模したヒータへの平均投入電力である．装置の効率を算出するためにヒータへの投入電力の測定系を Fig. 3.7 に示す．

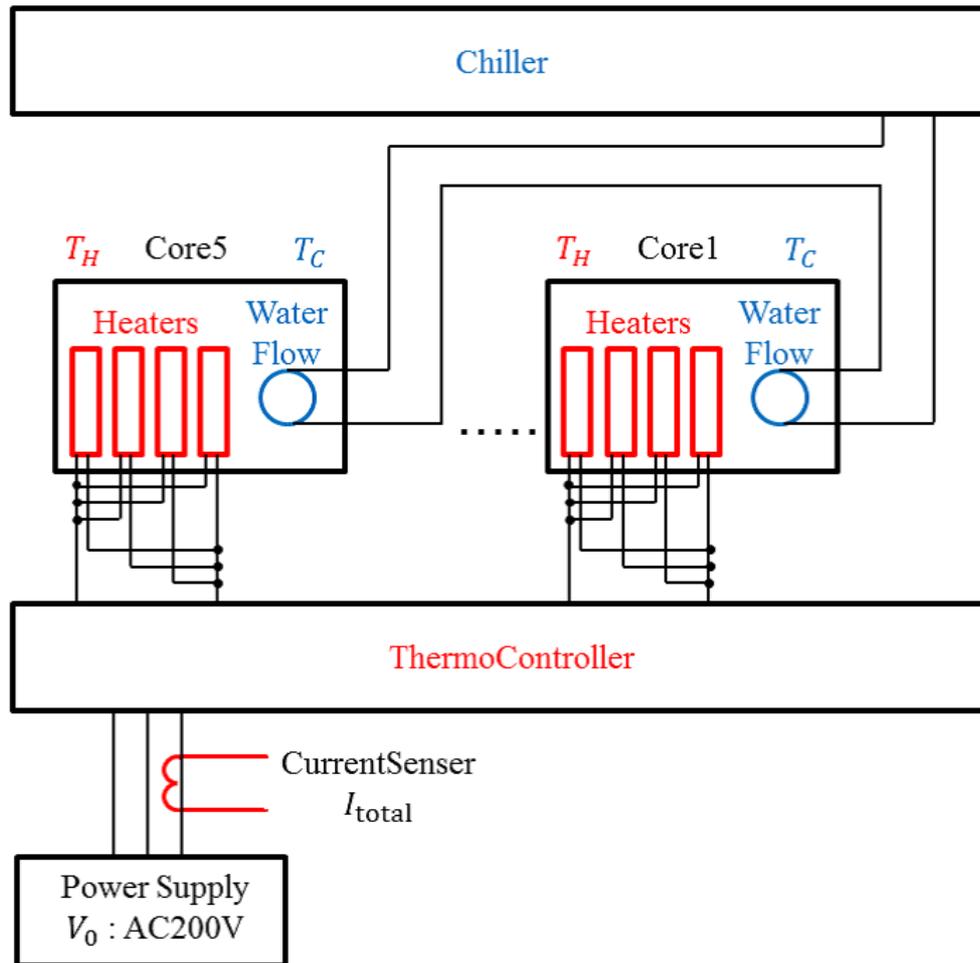


Fig. 3.7: Photograph of linear motor

5つのコアに挿入されたカートリッジヒータへ流される電流は、温度が一定となるようにサーモコントローラ（3相 200V 電源駆動）により約 2 秒周期で PWM 制御される。サーモコントローラの 3 相電源の内、1 相分の電流を測定しヒータへの投入電力を算出する。ヒータへの平均投入電力は 3 相電力であるため式 (3.3) で定義される。

$$W_{\text{total}} = \sqrt{3}V_0I_{\text{total}} \quad (3.3)$$

具体的にはヒータへの瞬時投入電流 i_{total} を電流センサで測定して、ローパスフィルタに通し平均電流 I_{total} を得る。なおサーモコントローラの電源電圧 V_0 は 200 V の商用電源を用いており 200 V 一定とする。

3.4 熱音響システムの負荷に対する出力の関係

電力フィードバック進行波型熱音響発電機の負荷の動的な制御を行うために、本節ではまず抵抗値を静的に手動で調整した際の結果について述べる。文献 [2] の発電機に接続された電気回路中の負荷抵抗 R と圧力振幅、および発電電力の関係を Fig. 3.8 と Fig. 3.9 に示す。ここで、効率 η_{h-e} の分母であるヒータへの投入電力 W_{total} を一定としている。そのため、負荷-効率の関係は負荷-発電電力の関係としてもグラフの概形は変化しないため、負荷-発電電力の関係を示した。ただし、今回の実験装置で利用する可変抵抗器の抵抗範囲が $R=0\sim 120\ \Omega$ であるため、この範囲で抵抗値を調整した結果を示す。 T_H は $300\ ^\circ\text{C}$ 、 T_C は $10\ ^\circ\text{C}$ 一定としていた。

Fig. 3.8 を見ると、 $R=0\ \Omega$ (短絡時) に近いほど圧力振幅は小さくなり、逆に $R = 120\ \Omega$ に近いほど圧力振幅は大きくなる傾向がある。 $R=0, 4.7, 10\ \Omega$ では上記の傾向から外れるが、後述する実験で用いた抵抗値の範囲では短絡から開放状態に近づくと熱音響システムの圧力振幅は低下する傾向が見られる。よって、圧力振幅の目標値と現在の圧力振幅との差がわかれば、負荷抵抗 R を調整する方向がわかり、圧力振幅を目標値に制御できることが期待できる。

一方、Fig. 3.9 を見ると $R=0\ \Omega$ (短絡時) から $R=120\ \Omega$ の間に発電電力が最大となる抵抗値がある。したがって、その負荷抵抗 R が設定でき、ヒータへの投入電力の変化がわかれば効率の最大化が実現できると期待できる。

本実験装置の構成上、ボイスコイルと永久磁石は実験を行うごとに位置決めをする必要があり、またその再現性は高くない。そのため、負荷と圧力振幅および発電電力の定量的な関係はリニアモータの調整を行うたびに変わっていく。以降では、関係が変わらないことを第4章の第1節および第5章の第2節で実験的に確認してから制御実験に進む。

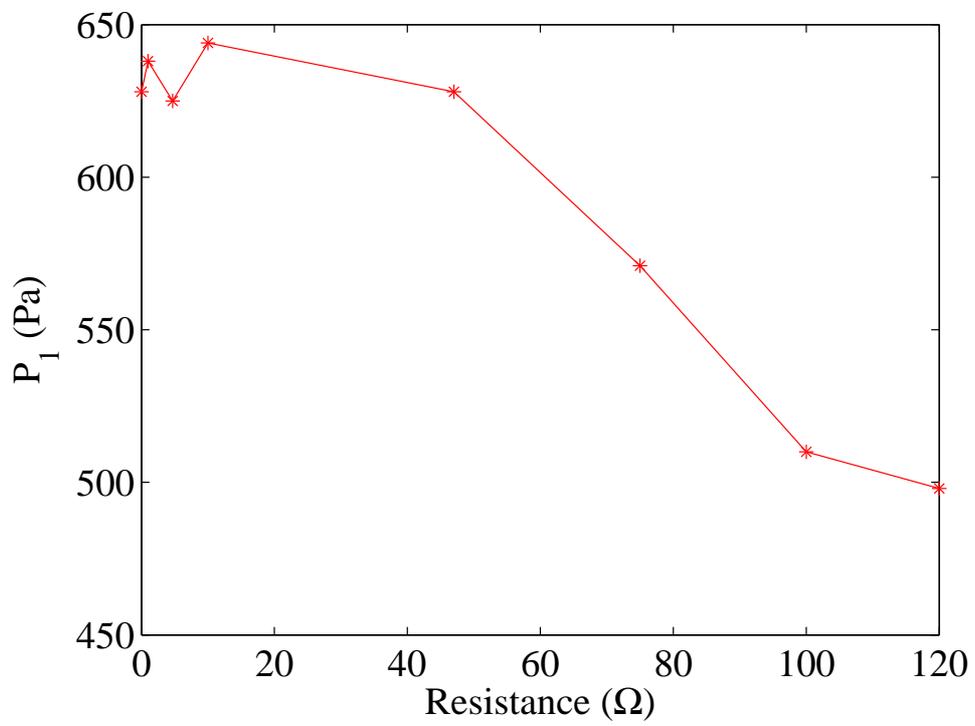


Fig. 3.8: Relation between resistance and pressure amplitude

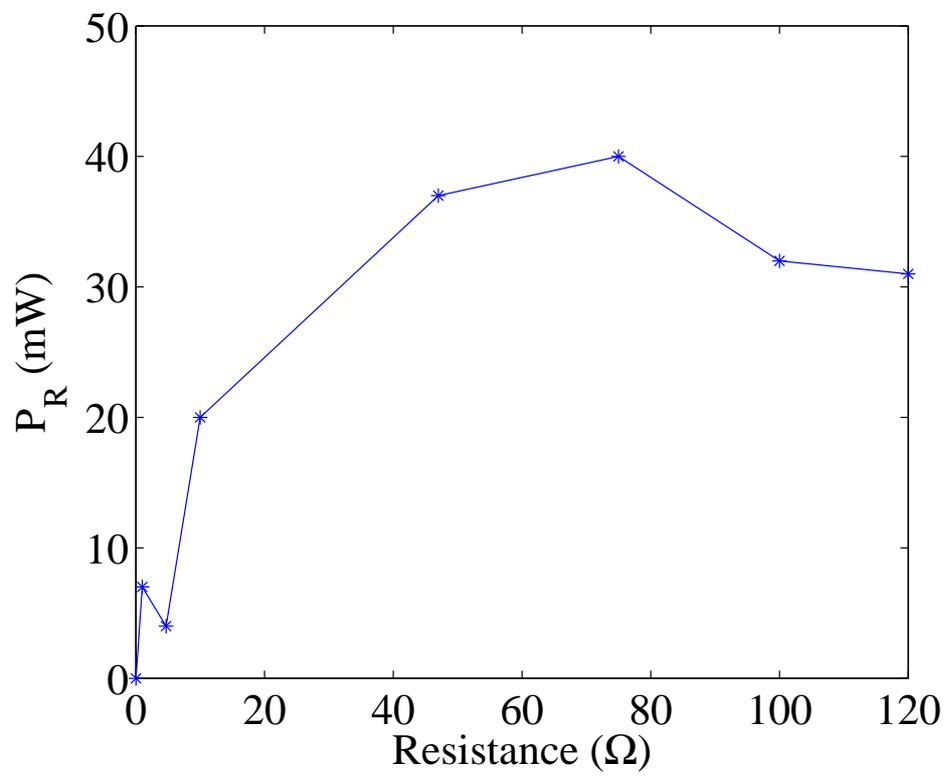


Fig. 3.9: Relation between resistance and generation power

第4章 熱音響システムの圧力振幅を一定とする定常発振制御

4.1 熱音響システムの負荷と圧力振幅の関係

圧力振幅の定常発振制御を行うために、本節ではまず抵抗値を手動で調整したときの圧力振幅との関係について述べる。負荷-圧力振幅の関係を示すグラフを Fig. 4.1 に示す。

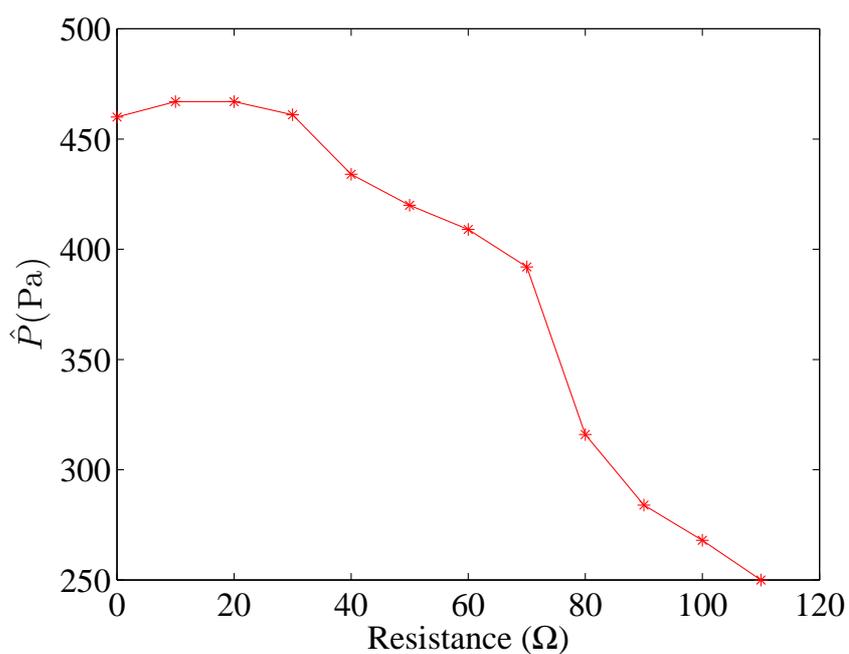


Fig. 4.1: Block diagram of the pressure amplitude control system

Fig. 4.1 より抵抗値の範囲では短絡から開放状態に近づくとき熱音響システムの圧力振幅は低下する傾向が見られる。この傾向は3章の Fig. 3.8 と同様である。よって、圧力振幅の目標値と現在の圧力振幅との差がわかれば、負荷抵抗 R を調整する方向がわかり、圧力振幅を目標値に制御できることが期待できる。

4.2 定常発振制御系の構成

Fig. 4.2 に本章で用いた圧力振幅を目標値一定とする制御系のブロック線図を示す。

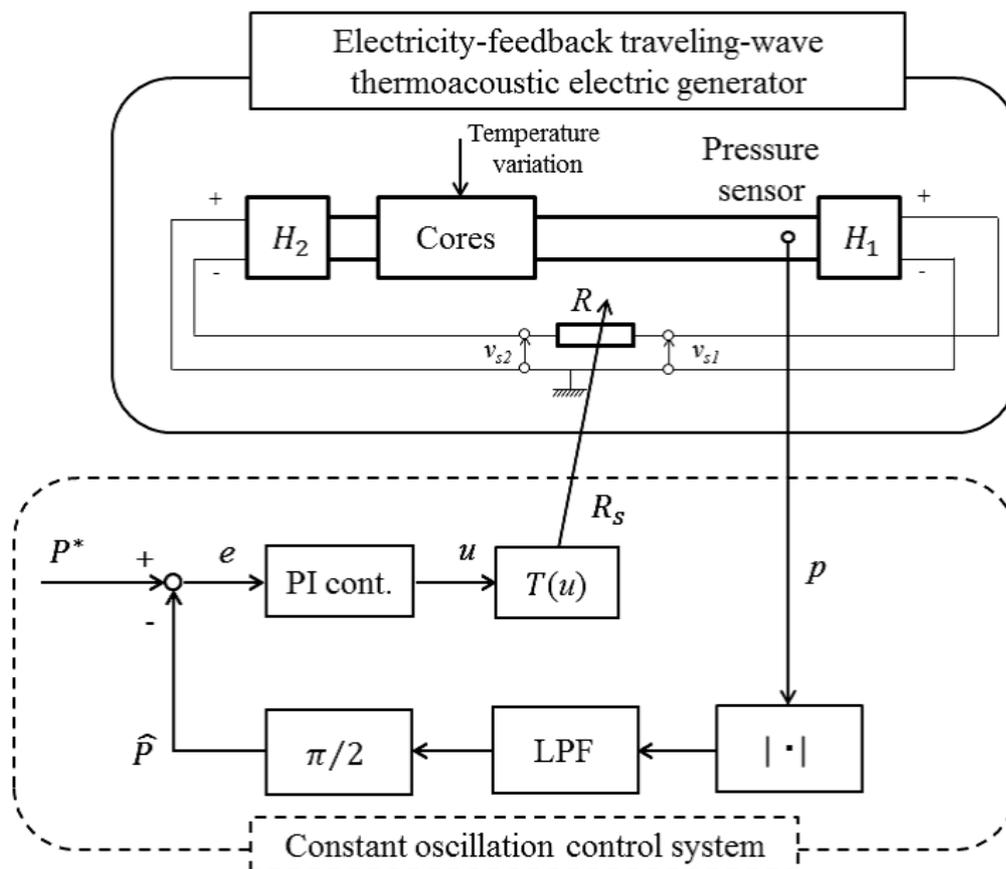


Fig. 4.2: Block diagram of the pressure amplitude control system

上部の実線部が Fig. 3.5 の発電機に対応する。下部の破線部が圧力信号 p の振幅を目標値 P^* 一定とするように負荷抵抗 R を可変とする定常発振制御系である。圧力センサの信号 p を絶対値関数とローパスフィルタ（カットオフ周波数 1rad/s ）に通して平滑化した値に $\pi/2$ を乗じることで、圧力振幅の推定値 \hat{P} を得る。目標値 P^* と推定値 \hat{P} との差分を PI 補償器に入力し、その出力 u を用いて、抵抗値の指令値 $R_s = T(u) := \frac{120(\tan^{-1}(u) + \frac{\pi}{2})}{\pi}$ を得る。Fig. 4.2 中の負荷抵抗 R はパソコンからのデジタル信号 $R_s(0 \sim 120$ の指令値) により $0 \sim 120 \Omega$ の範囲を 1Ω 刻みで変化できる。

4.3 温度変動無しの場合の圧力振幅制御実験

まず、予備実験として温度変動の無い場合に定常発振制御系の動作を検証する。 T_H は $300\text{ }^\circ\text{C}$ 、 T_C は $10\text{ }^\circ\text{C}$ 一定とし、圧力振幅の目標値 $P^* = 370\text{Pa}$ として実験を行った。比例ゲイン K_P と積分ゲイン K_I はそれぞれ 0.04 、 0.03 とした。抵抗値 R は 40Ω 、制御無しで実験を開始し、圧力振幅が定常状態となるまで3分間待った後、そのまま50秒間制御無し、200秒間制御有りで合計250秒間、サンプリング周期 0.25ms でデータを記録した。Fig. 4.3 に実験結果を示す。赤線は圧力センサの出力信号 p 、緑の点線は圧力振幅の推定値 \hat{P} 、青線は負荷抵抗 R 、黒の破線は圧力振幅の目標値 P^* を示している。図より、 $t = 50\text{s}$ の制御開始時に R が初期値 40Ω から圧力振幅を低下させる方向に増加しており、目標値に応じて制御系が自動的に抵抗値を適切な値に調節していることがわかる。

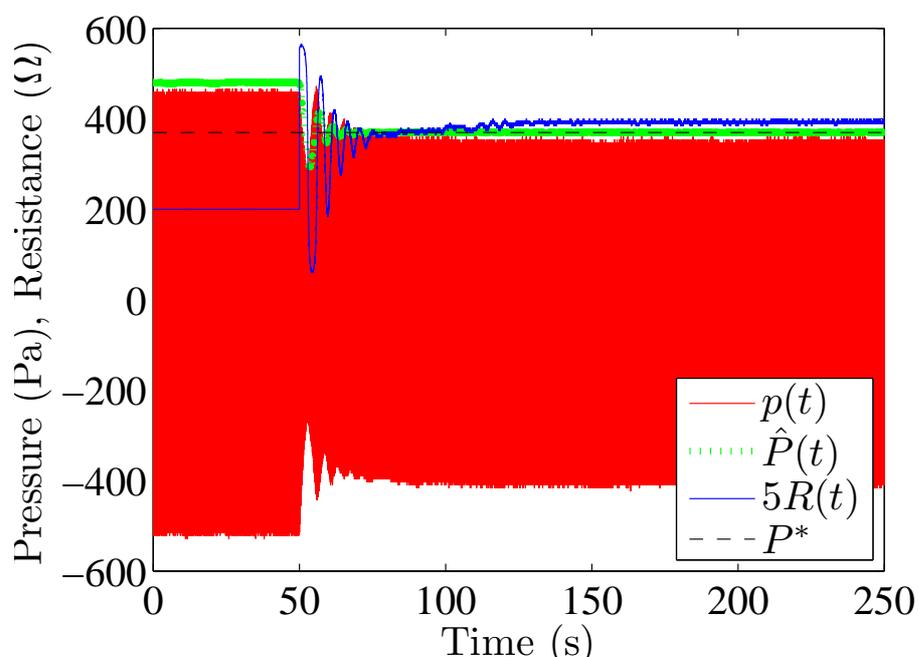


Fig. 4.3: Time responses of control experiment(p , \hat{P} , R for $T_H=300\text{ }^\circ\text{C}$)

4.4 温度変動に対する圧力振幅制御実験

目標値 $P^* = 370\text{Pa}$ 一定とし, T_H を $300\text{ }^\circ\text{C}$ から $290\text{ }^\circ\text{C}$ まで $5\text{ }^\circ\text{C}$ ずつ下げることにより温度変動を与え, 他は前節と同様に制御実験を行った. 結果を Fig. 4.4 に示す. それぞれの温度に対する \hat{P} , P^* (黒破線) を示している. 赤線は $300\text{ }^\circ\text{C}$, 緑線は $295\text{ }^\circ\text{C}$, 青線は $290\text{ }^\circ\text{C}$ の時間応答である. 図より, 前節と同様に圧力振幅が目標値の 370Pa 一定に保持されていることがわかる. 同じ実験で得られた R を Fig. 4.5 に示す. 図より, R の収束値は $T_H = 300\text{ }^\circ\text{C}$, $295\text{ }^\circ\text{C}$, $290\text{ }^\circ\text{C}$ それぞれに対して約 78Ω , 54Ω , 31Ω となっており, 温度が低くなるほど圧力振幅が小さくなるのを制御系が R を調整することで対処していることがわかる.

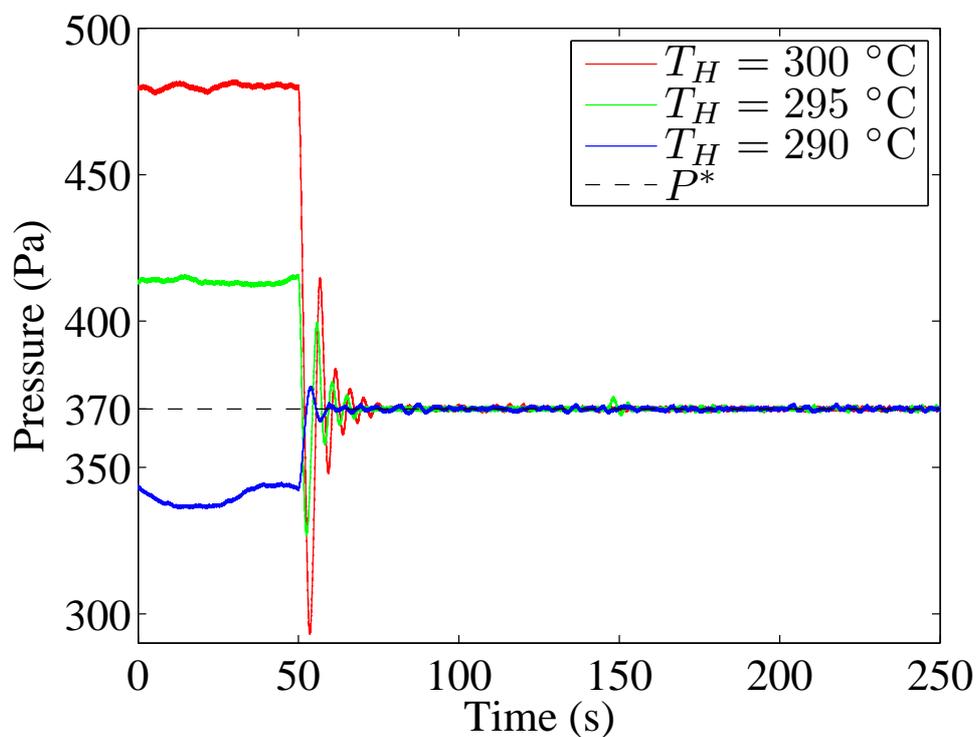


Fig. 4.4: Time responses of control experiment(\hat{P} for temperature change)

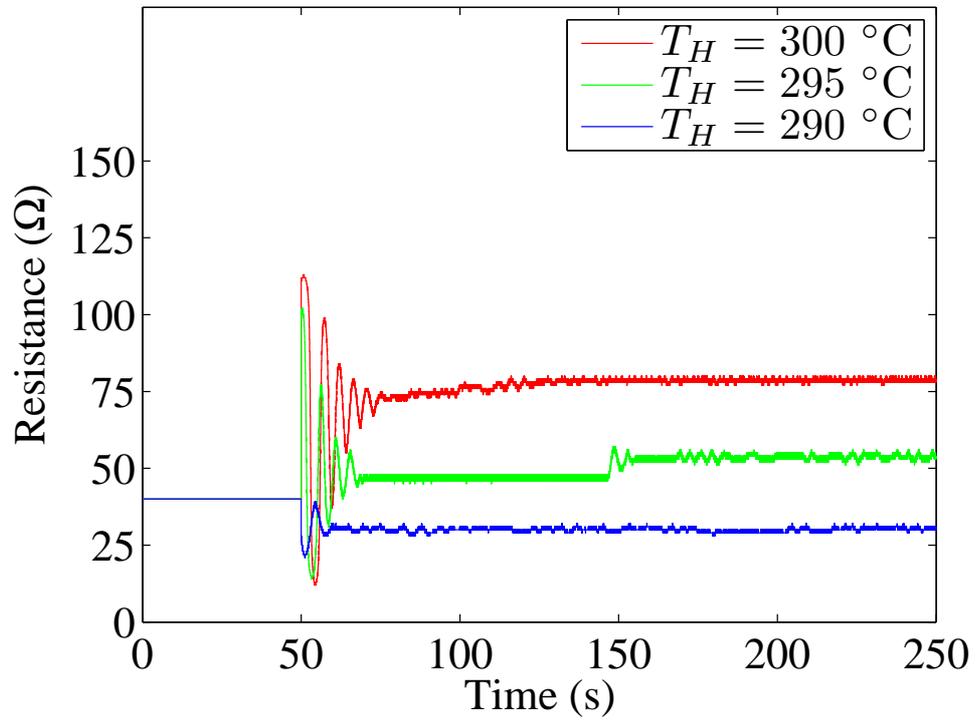


Fig. 4.5: Time responses of control experiment(R for temperature change)

4.5 制御適用前後のエネルギー変換効率

効率最大化制御の検討のために、前節の実験時に計測したヒータへの投入電力及び抵抗の消費電力を用いて、定常発振制御で調整された抵抗値がエネルギー変換効率に与える効果を示す。Table 4.1 に制御適用前後のヒータへの平均投入電力 \bar{W}_{total} 、平均発電電力 \bar{P}_R 、熱から電力へのエネルギー変換効率 $\bar{\eta}_{h-e}$ を示す。ヒータの電源電圧 $V_0 = 200 \text{ V}$ を用いて 3 章の式 (3.1),(3.2),(3.3) で算出した。ただし、 \bar{W}_{total} などの上部線は時間応答取得開始後（制御適用前）または時間応答取得終了直前（制御適用後）のそれぞれ 40 秒間の平均値を表す。

まず \bar{W}_{total} に注目すると、300, 295 °C のときは制御適用後に適用前に比べて減少しているが、290 °C のときは増加している。これは、300, 295 °C のときは制御により \hat{P} の減少に伴い、スタック中の T_C から T_H 方向の音響パワーが減少した結果、 T_H を維持するために必要な投入熱量が減少したと考えられる。一方、290 °C のときは制御により \hat{P} の増大に伴い、スタック中の音響パワーが増大した結果、 T_H を維持するために必要な投入熱量が増大したと考えられる。 \bar{P}_R は、温度によらず制御適用後に適用前より減少したことがわかる。文献 [2] では抵抗 R を 0Ω から開放まで静的に変化させたときの抵抗の消費電力が $47\sim 75\Omega$ 付近で最大となることが報告されている。本実験では R を制御系により動的に調整しているが、その変化は遅く、同文献のように消費電力が最大となる抵抗値が存在し、それが本実験では 40Ω 付近であったと考えられる。

Table 4.1: Pressure control experimental results

	T_H (°C)	R (Ω)	\hat{P} (Pa)	\bar{W}_{total} (W)	\bar{P}_R (mW)	$\bar{\eta}_{h-e}$ (%)
No Cont.	300	40	480	961	60.2	0.00626
	295	40	416	921	47.7	0.00518
	290	40	342	885	35.5	0.00401
Cont.	300	78	370	944	49.5	0.00524
	295	54	370	915	45.4	0.00496
	290	31	370	887	34.5	0.00389

第5章 熱音響システムの効率を最大とする極値探索 制御

温度変動に対して効率を最大とするために、最大効率を探索しながら負荷を調整する制御系を構築することが必要である。そこで本章では、入力と出力の関係が凸型となるシステムの極値（凸部）を探索して、極値付近に入力を自動調整する極値探索制御 [15] を利用する。

極値探索制御は、太陽光電池から得られる最大発電電力を最大化するための電気回路の調整などの応用がある [16]。熱音響システムに対しても、接続される音響的負荷をアクチュエータにより容積を機械的に調整可能な共振器により動的に調整することで、低温側熱交換用冷却水の流量の変動に対して出力を最大化することに利用されている [8]。そこで、本章では熱音響発電機の効率の最大化を目指して電氣的負荷を調整する手法として、極値探索制御を適用し、熱音響発電機に適用するための制御系のパラメータの調整法を検討する。発電効率（=発電電力/投入電力）における抵抗値の変化は発電電力に比較的大きく現れるため、発電効率を最大化する代わりに簡単化のため発電電力を最大化する問題を扱う。

5.1 実験装置の変更

本章では管の内壁における音波のエネルギーの散逸を低減するために、電力フィードバック進行波型熱音響発電機の塩ビ管を金属管に置き換えた実験装置を使用する。

5.1.1 塩ビ管から金属管への置き換え

市販のステンレス管のサニタリー管を用いて、3章で示した Fig. 3.5 から管の長さが大きく変わらないように塩ビ管を置き換えた。実験装置を変更しても抵抗値を手動で調整したときの発電電力との関係が凸型であることを本章では確認する。

5.1.2 圧力センサの変更と追加

本章で扱う電力フィードバック進行波型熱音響発電機ではリニアモータ H_2 側に圧力センサが2つ p_3, p_4 として追加されているが本章で追加した圧力センサを使うことはない。また、4つすべての圧力センサを Table 3.1 で示した PCB 社製の 106B51 圧力センサへ交換した。4章までに用いていた圧力の長野計器社製の KP15 に比べて測定圧力の分解能が小さくなった。実験で取得する圧力は4章までの装置と同様で p_1 の位置の圧力センサを利用する。実験装置を変更しても抵抗値を手動で調整したときの発電電力との関係が凸型であることを本章ではまず確認する。

5.2 推定発電電力 \hat{P}_R の算出

抵抗値を手動で調整したときの発電電力との関係を述べるための予備実験として、まず定常的な発電電力を算出するローパスフィルタのカットオフ周波数 f_{lpr} を決定する。4章では瞬時電力 p_R の40秒間分の時間応答を算術平均した平均発電電力 \bar{P}_R を利用していた。極値探索制御では、入力の変動に対する出力の変動位相を見て極値を探索するため、入力に対して定常的な発電電力（これを推定発電電力 \hat{P}_R とする）が必要である。本章では、 \hat{P}_R を算出するために瞬時電力をローパスフィルタを通して平滑化する。 \hat{P}_R を得るためにはローパスフィルタのカットオフ周波数は出来るだけ低く設定し、平滑化の程度を強くして定常的な発電電力を得る必要がある。まず最初に \hat{P}_R を算出するローパスフィルタのカットオフ周波数 f_{lpr} を0.1Hzとして負荷抵抗 R を変動させた結果を Fig. 5.1 に示す。変動の中心となる抵抗 R_0 は $20\ \Omega$ として、変動振幅 a_p を $3\ \Omega$ 、周波数 f_p は0.1Hzを与えた。

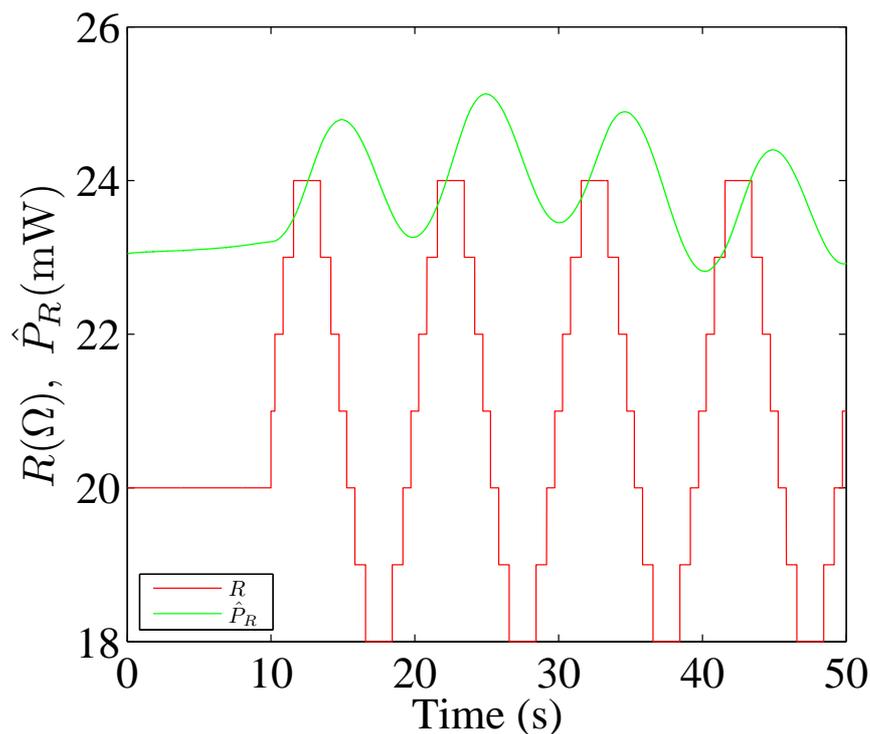


Fig. 5.1: Time responses of generated power for resistance change $f_{lpr}=0.1\text{Hz}$

Fig. 5.1 より抵抗 R は、変動の中心の抵抗値 R_0 が変動後に $21\ \Omega$ へ変化しているがこれは制御系により変化した結果ではなく、 R を変動させる式で小数点以下を考慮した際の繰り上がりによる誤差である。ただし、入力の変動に対する出力の変動の位相を見る実験において、変動中心値の小さなずれが位相に

及ぼす影響は小さいと考えられる。推定発電電力 \hat{P}_R は R の摂動に対して 3 秒程度遅れている。3 章で示した文献 [2] の負荷抵抗-発電電力の関係 (Fig. 3.9) から R_0 が 20Ω 付近では、もし動的な遅れがないとすれば、 R の摂動に対して \hat{P}_R は同相の摂動となるはずである。にもかかわらず同相とならないのは使用したローパスフィルタのカットオフ周波数が低いために摂動に対して平滑化が遅れていると考える。そこで、摂動の振幅、周波数は変えずに、ローパスフィルタのカットオフ周波数を f_p を 1Hz として R を摂動させた結果を Fig. 5.2 に示す。

推定発電電力 \hat{P}_R は R の摂動に対して同相となっている。よって、これ以降の実験では、以上の試行錯誤の結果よりローパスフィルタ (カットオフ周波数 1Hz) を通して推定発電電力 \hat{P}_R を得る。さらに制御対象の速応性を改善するためにより高いカットオフ周波数を検討することは今後の課題とする。

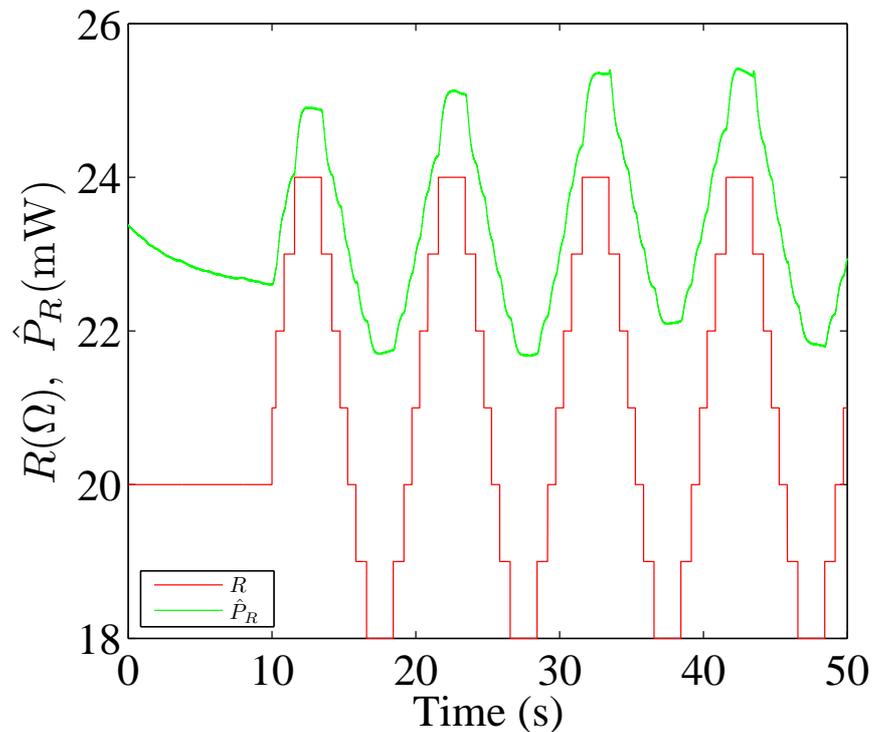


Fig. 5.2: Time responses of generated power for resistance change $f_{lpr}=1\text{Hz}$

5.3 熱音響システムの負荷と発電電力の関係

極値探索制御を行うために、本章ではまず抵抗値を手動で調整したときの発電電力と抵抗値の関係について述べる。電力フィードバック進行波型熱音響発電機に接続された電気回路が短絡から開放状態となるように回路中の負荷抵抗値を充分ゆっくり大きくして負荷-効率特性を得ることで、効率と負荷抵抗値の準静的な関係が凸型となることを確認する。発電機に接続された電気回路中の負荷抵抗 R を 5, 20, 40, 60, 70, 80, 90 Ω 一定にしたときの推定発電電力 \hat{P}_R の時間応答を Fig. 5.3 に示す。 R は初期値 0 Ω として、時間応答の取得開始後に手動により約 20 秒以内に上記で挙げた R まで変化させている。

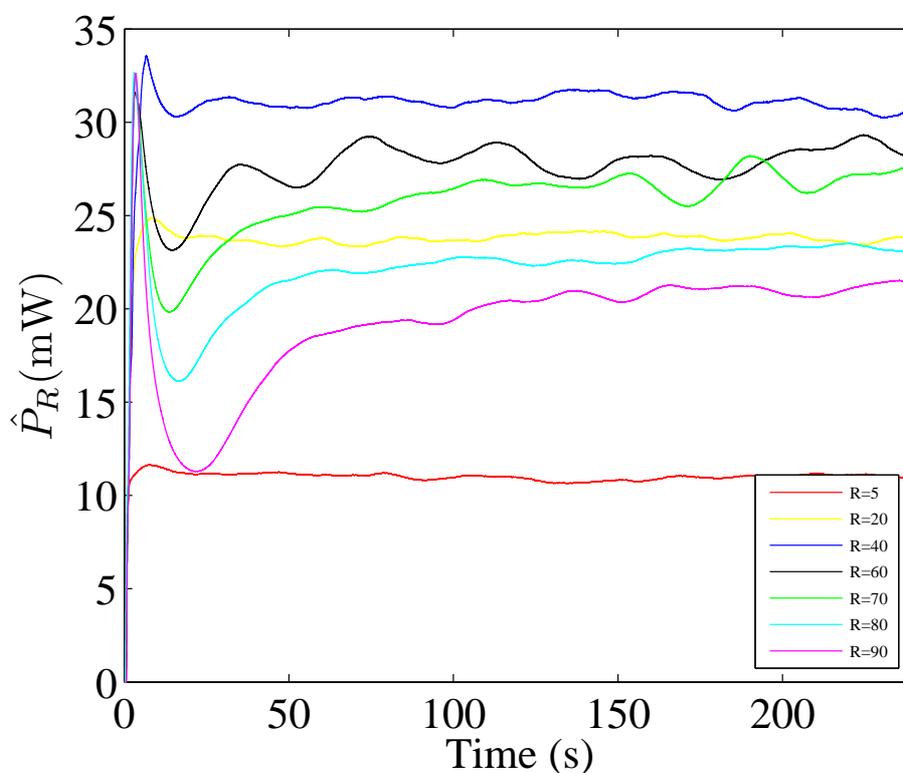


Fig. 5.3: Time responses of generated power for resistance change

Fig. 5.3 より R 変更後の値が大きいほど $t = 50$ 秒付近の \hat{P}_R の過渡的な低下が大きい. 抵抗値一定にかかわらず時間応答取得終了の $t = 240$ 秒までに \hat{P}_R は定常状態となっていないように見える. Fig. 5.3 の $R = 5 \Omega$ にしたときの \hat{P}_R と推定圧力振幅 \hat{P} を Fig. 5.4 に示す. この時の \hat{P} は算出のための係数に, 実験装置金属管への換装前の圧力センサの係数を用いており, 実際の圧力振幅は算出されていない. しかし, 掛けられた係数が異なるのみだけで算出された \hat{P} は実際の圧力振幅の変動に比例するデータとして利用できる.

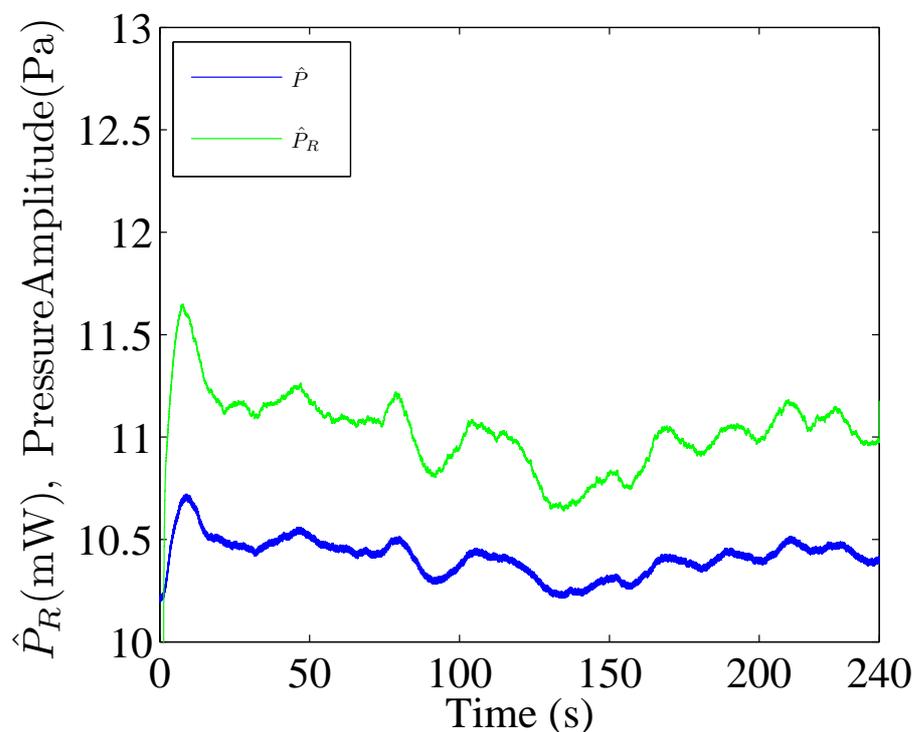


Fig. 5.4: Time responses of generated power and pressure amplitude for $R=5 \Omega$

Fig. 5.4 より圧力信号と発電電力の揺らぎは相関があることがわかる. 2つの信号は異なるセンサから得られていることから発電電力の揺らぎは現実の現象を捉えており、電力計測の際の誤差に起因するものではないと言える. この圧力信号の揺らぎの原因としては熱音響コアの温度を保つチラーもしくはサーモコントローラの温度制御の精度と制御周期が考えられる. 実際, 高温側熱交換器の温度 T_H と低温側熱交換器 T_C には約 $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 程度の変動を確認している. チラーの制御周期は不明であるが, サーモコントローラの温度制御の周期は2秒である. 極値探索制御を行う上で入力信号に与える摂動以外に, 揺らぎなどの摂動が発生していることは好ましくない. しかし, R に対して定常的な発電電力が得られるように摂動の周波数を充分低くすれば出力に入力の摂動に同期した成分は現れると期待できる.

Fig. 5.4 における時間応答で $t = 240$ 秒以降は \hat{P}_R が約 2mW 変動しているが, それ以上の大きさの変動はしていないことを実験時に PC のディスプレイに表示された \hat{P}_R の数値を目視で30分ほど確認した. そこで, 揺らぎを含む負荷-発電電力の関係を示すグラフを Fig. 5.5 に示す. 前述の \hat{P}_R が約 2mW 程度の変動をシステムが定常である閾値として, $t = 100\sim 240$ 秒の \hat{P}_R の変動を示す.

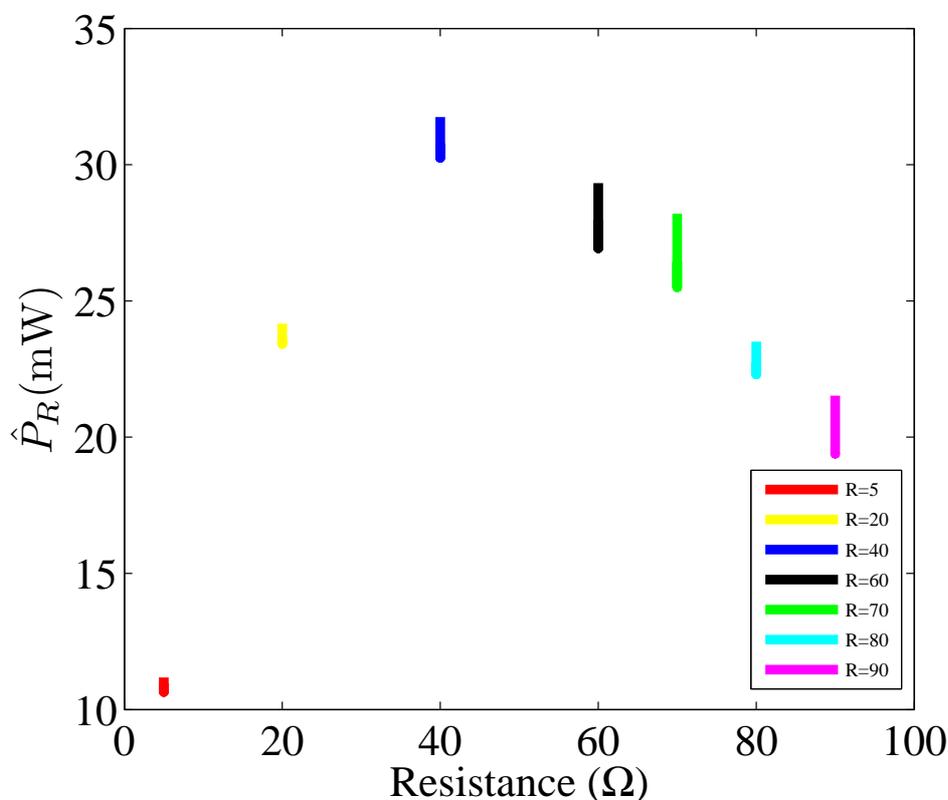


Fig. 5.5: Relation between resistance and generated power

Fig. 5.5 より横軸 R に対して縦軸 \hat{P}_R の関係は揺らぎを含むがおおよそ凸型を描くことがわかる. この傾向は 3 章の Fig. 3.9 と同様である. よって実験装置を塩ビ管から金属管へ変更しても抵抗値を手動で調整したときの発電電力との関係が凸型であることが確認でき, 極値探索制御を行える

5.4 極値探索制御 ESC (Extremum Seeking Control) 系の構成

5.4.1 極値探索制御系の原理

極値探索制御の原理を Fig. 5.6 に示す.

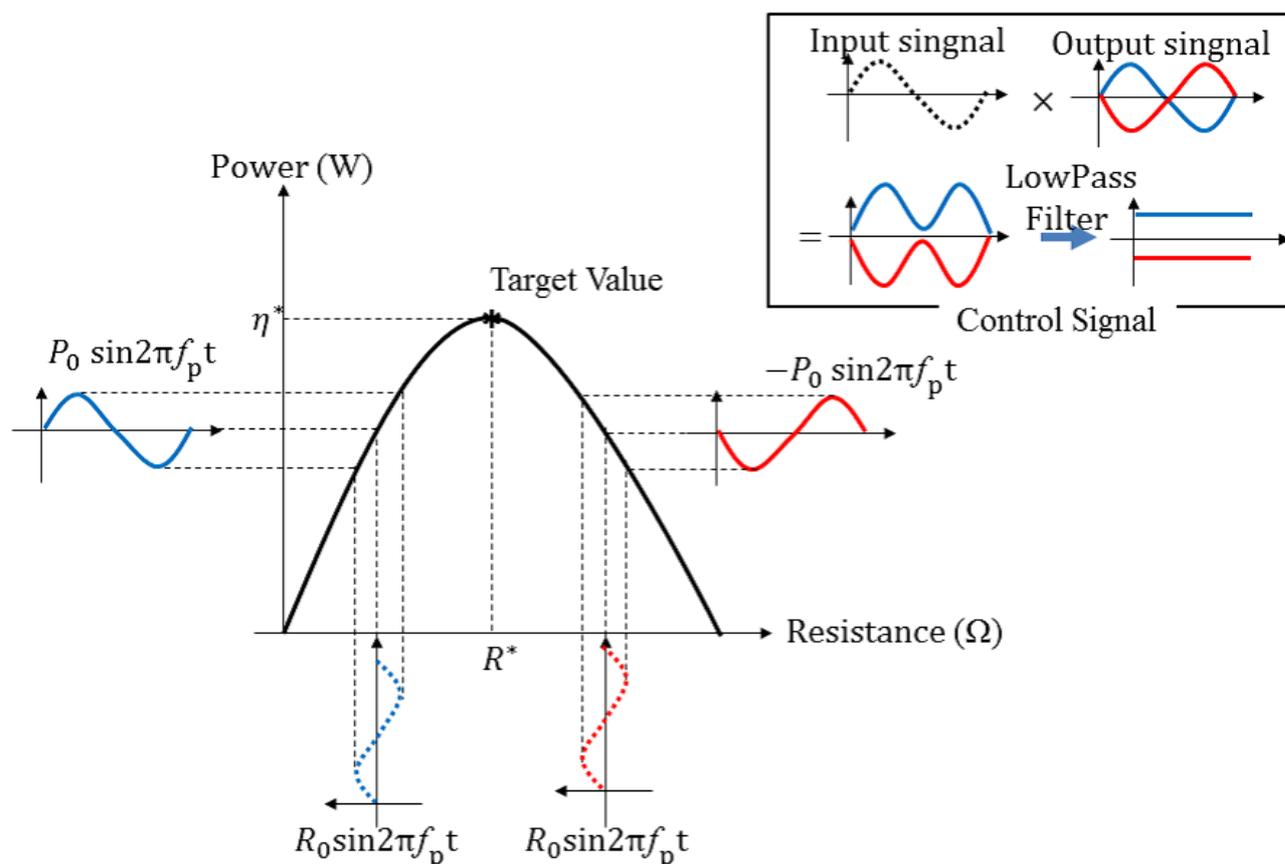


Fig. 5.6: Block diagram of the extremum seeking control system[文献 [15] より参照し一部加筆修正]

極値探索制御では、Fig. 5.6 のような凸型の入出力特性を持つシステムにおいて最大値を達成するために入力を調整する制御系である。入力（抵抗値）をある値周りで摂動させると出力（効率）もその摂動成分をもって変動する。入力を十分に遅く（低い周波数）で摂動させれば、出力は入力に対して図中に示す凸型の入出力特性の凸部の左側では同相、右側では逆相となる。入力の正弦波信号と出力を掛け合わせて平均をとれば同相と逆相に対応してそれぞれ正もしくは負の信号が得られる。よってこの信号を用いて入力信号の中心値を変更することにより、中心値を凸部に近づけることができる。

5.4.2 極値探索制御系のブロック線図

Fig. 5.7 に本章で用いた発電電力を最大化する極値探索制御系のブロック線図を示す.

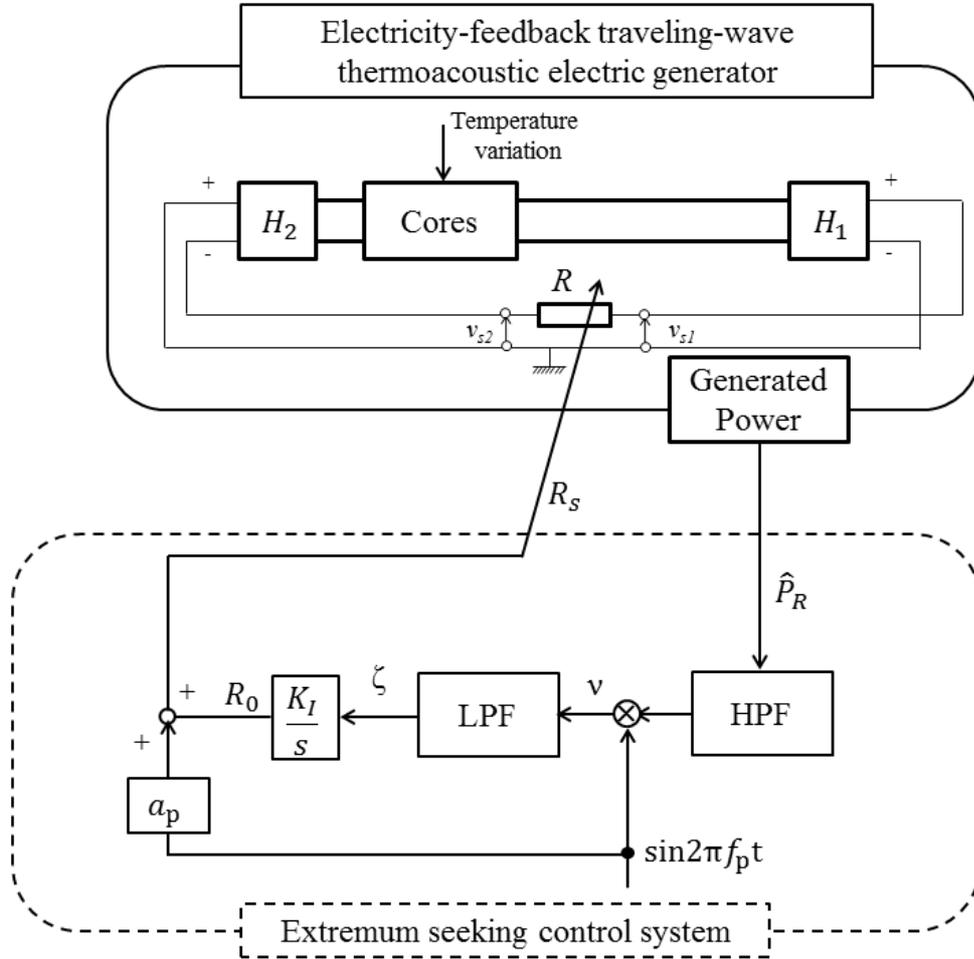


Fig. 5.7: Block diagram of the extremum seeking control system

Fig. 5.7 の制御系において、定常発振制御系の Fig. 4.2 と同様に実線部が Fig. 3.5 の発電機に対応する。抵抗値 R を摂動の中心の抵抗値 R_0 周りで振幅 a_p 、周波数 f_p の正弦波で摂動させる。摂動入力 は熱音響システムを通して推定発電電力 \hat{P}_R の摂動となって現れる。推定発電電力 \hat{P}_R は、3 章の式 (3.1) で算出した瞬時電力 p_R をカットオフ周波数 f_{lpr} のローパスフィルタで平滑化した信号である。 \hat{P}_R の直流成分をカットオフ周波数 f_h のハイパスフィルタでカットし、 \hat{P}_R の摂動成分を取り出す。 \hat{P}_R の摂動成分と R の摂動信号を乗じた信号 ν はカットオフ周波数 f_l のローパスフィルタで平滑化され、 ζ を得る。 ζ は、凸部の左側であれば正の値、右側であれば負の値となる。この正負の値を積分ゲイン K_I の積分器に通した信号を R の摂動信号へ足し合わせるにより、 R は摂動しながらその中央値は発電電力を最

大化する方向へ調整される.

この制御系を実際に発電電力を最大化するように動作するためには, 本熱音響システムに合わせて以下のパラメータを調整する必要がある.

- 摂動信号の振幅 a_p , 周波数 f_p
- ローパスフィルタとハイパスフィルタのカットオフ周波数 f_l, f_h
- 積分ゲイン K_I

極値探索制御のアルゴリズムより, 出力に現れる入力摂動成分を捉える必要があるため以下の式が成り立つ必要がある。

$$f_p > f_l, \quad f_h \quad (5.1)$$

ただし, できるだけ速い温度変動に対応するため, システムの応答性などを実験で求めて, 上記パラメータの具体的な値を決める必要がある.

5.5 極値探索制御のパラメータの決定

本章で実験的な試行錯誤を行い極値探索制御の各パラメータを実験的に決定する。

5.5.1 摂動させた入力に対する出力の位相

前節より横軸 R に対して縦軸 \hat{P}_R の関係は揺らぎを含めてもおおよそ凸型を描くことがわかった。本節では R の摂動に対して \hat{P}_R が凸部の左側では同相の摂動、右側では逆相となる摂動振幅と周波数を試行錯誤により求める。まず、Fig. 5.1 の結果を得るのに用いた、摂動振幅 $a_p=3 \Omega$ 、周波数 $f_p=0.1\text{Hz}$ を用いた。実験結果を Fig. 5.8 に示す。 R_0 は初期値 $20,60,80 \Omega$ の3種類とした。

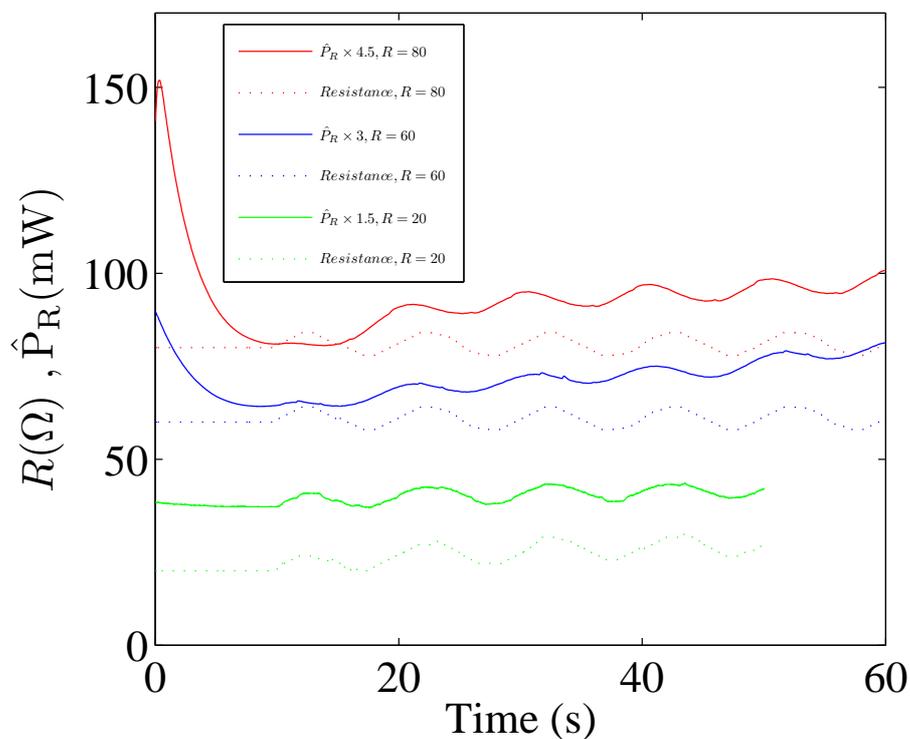


Fig. 5.8: Phase between resistance and generated power for $f_p = 0.1\text{Hz}$

Fig. 5.8 より $R_0 = 20 \Omega$ では、 R の摂動に対して \hat{P}_R は同相である。($R_0 = 20 \Omega$ の時間応答のみ、極値探索制御が働いているため抵抗値が徐々に大きくなっている。) $R_0 = 60, 80 \Omega$ では R の摂動に対して \hat{P}_R は逆相よりも同相に近い。Fig. 5.5 から $R_0 = 60, 80 \Omega$ は凸部の右側であるため、 \hat{P}_R が R の摂動に対して逆相となっていなければ制御系がピークを探索するように動くことはできない。よって、摂動の周期をさらに長く設定することで、 $R_0 = 60, 80 \Omega$ のときの入力と出力の波形が逆相に近づけることを考える。そこで、摂動振幅は $a_p = 3 \Omega$ のままで摂動周波数を 0.01Hz に低くして、負荷抵抗値 R を摂動させた結果を Fig. 5.9 に示す。 R_0 は Fig. 5.8 で入力と出力の逆相であることを確認できなかった $60, 80 \Omega$ の2種類のみで行った。 $R_0 = 20 \Omega$ での実験は行っていないが、周波数を低くしたことで \hat{P}_R はより定常状態に近くなる。そのため、摂動周波数 0.1Hz で同相であった $R_0 = 20 \Omega$ の \hat{P}_R は 0.01Hz でも同相の関係を保つと考えられる。

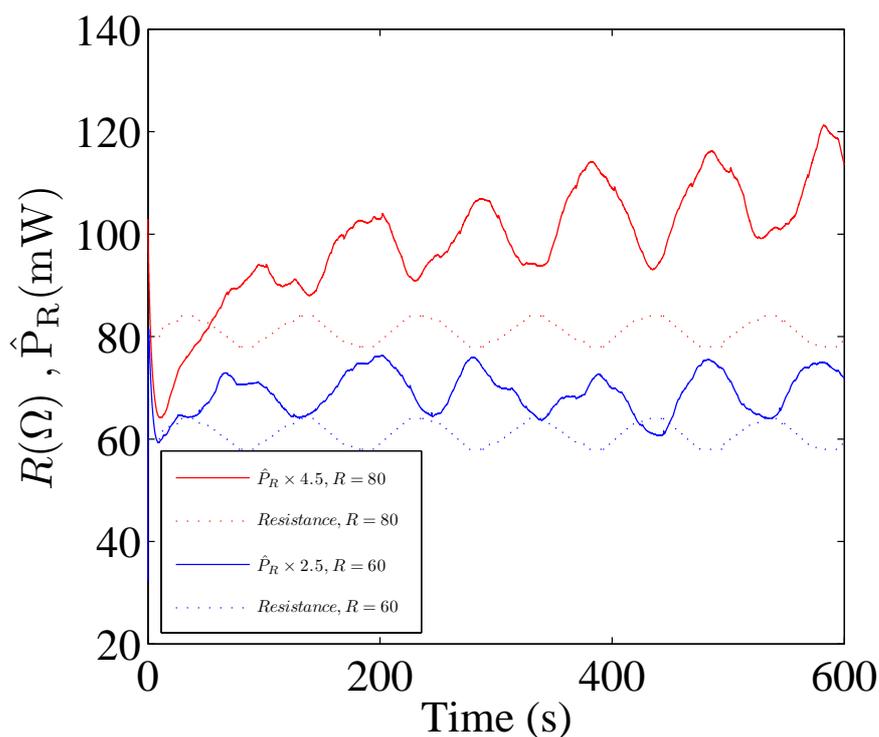


Fig. 5.9: Phase between resistance and generated power for $f_p = 0.01\text{Hz}$

$R_0 = 60, 80 \Omega$ で R の摂動に対して \hat{P}_R は逆相である。これらの実験により極値探索制御の摂動の周波数は 0.01Hz であれば、入力と出力は入出力特性の凸部の左側で同相、右側で逆相になることがわかった。実用上、出力電力における摂動に小さく抑えるためにできるだけ小さな振幅を用いることが望ましいが、この検討は今後の課題とし、このまま $a_p = 3 \Omega$ として極値探索制御実験を行う。

5.6 温度変動無しの場合の発電電力最大化制御実験

前節より摂動振幅 a_p を 3Ω 、周波数 f_p を 0.01Hz として摂動を与えた時に、入力に対して出力は凸部の左側では同相の摂動、凸部の右側では逆相となることがわかり、熱音響発電機に対して極値探索制御を行うための前提条件の一つが整った。ローパスフィルタとハイパスフィルタのカットオフ周波数 f_l, f_h は式 (5.1) の条件を満たし、摂動成分を抽出できるようにそれぞれ 0.001Hz とした。また、積分ゲイン K_I は 1 とした。本節では、 R の初期値をピークの左側、右側に設定して、極値探索制御で抵抗値が実際に発電電力が大きくなるように自動調整されるか実験を行った。Fig. 5.10 はピークの左側 ($R = 20 \Omega$) から極値探索制御を行った結果で、Fig. 5.11 は右側 ($R = 80 \Omega$) からの制御結果である。

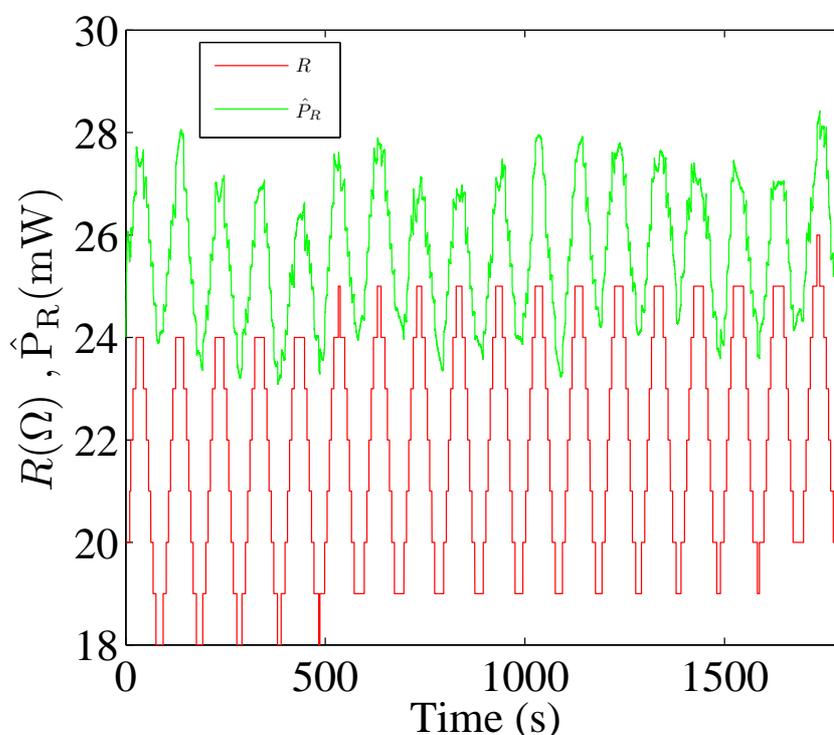


Fig. 5.10: Time response of extremum seeking control experiment ($R = 20 \Omega$ start)

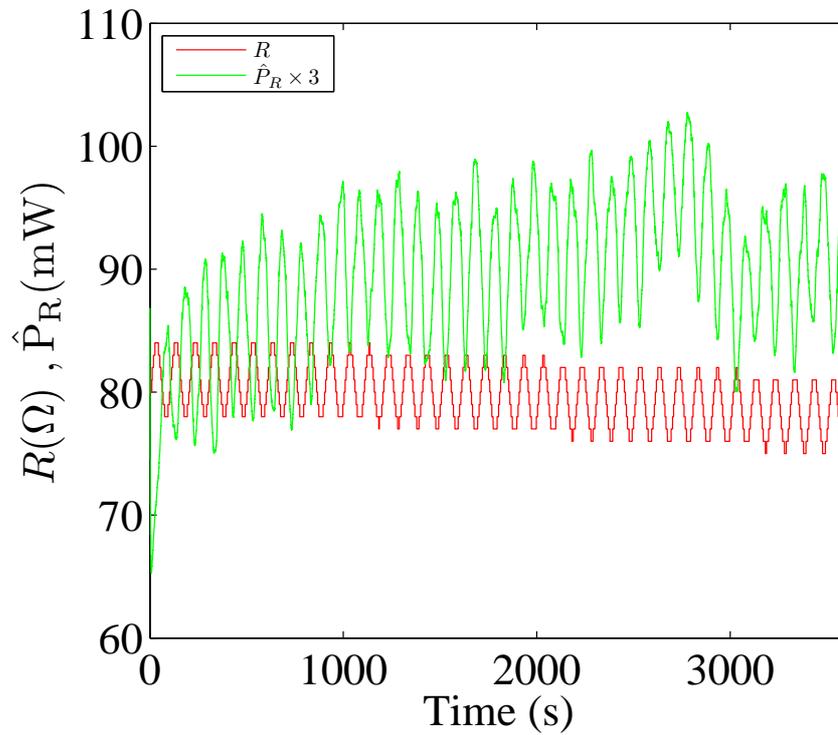


Fig. 5.11: Time response of extremum seeking control experiment ($R = 80 \Omega$ start)

Fig. 5.10 よりピークの左側の抵抗値 ($R = 20 \Omega$) からピークに向かうように R_0 が 2Ω 程度増加していることがわかる。ピークの左側であることから R の摂動と \hat{P}_R の摂動はほとんど同相である。摂動中心の抵抗値が 2Ω 程度大きくなったことにより、推定発電電力 \hat{P}_R わずかに上がっているように見える。

Fig. 5.11 よりピークの右側の抵抗値 ($R = 80 \Omega$) からピークに向かうように摂動中心の抵抗値 2Ω 程度減少していることがわかる。発電電力はピークの左側であることから R の摂動と \hat{P}_R の摂動はほとんど逆相である。抵抗値の初期値が最大効率を与える抵抗値より小さい (大きい) 場合に、極値探索制御により抵抗値が大きく (小さく) 自動調整されることがわかった。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示した。

第6章 結言

本論文では、廃熱源の温度変動に対して熱音響システムの自励発振を維持もしくは効率を最大に維持する手法を実現するために、電力フィードバック進行波型熱音響発電機の負荷を動的に調整することで、(i) 圧力振幅を目標値一定とする定常発振制御と (ii) 発電電力を最大化する極値探索制御を行い、以下の結果を得た。

(i) について、第4章において温度変動に対して負荷を動的に変化させることで圧力振幅を目標値一定とできることを示した。まず、熱源の温度が一定の場合、圧力振幅を与えられた目標値一定にできることを示した。次に、熱源の温度が変化した場合でも、圧力振幅を与えられた一つの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を実験により示した。さらに、ヒータへの投入電力及び負荷抵抗での消費電力を計測し、自動制御により圧力振幅が減少（増加）したときにはヒータへの投入電力は減少（増加）することから、負荷抵抗の変化（増加/減少）が蓄熱器に与える温度差を一定に維持するための電力の変化（減少/増加）として現れることを示した。

(ii) について、第5章において熱源の温度が一定の場合に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示した。発電効率（=発電電力/投入電力）における抵抗値の変化は発電電力に比較的大きく現れるため、発電効率を最大化する代わりに発電電力の最大化を検討した。実験的に極値探索制御系のパラメータ（フィルタ係数、摂動の振幅と周波数）を決定した。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示した。抵抗値の初期値が最大発電電力を与える抵抗値より小さい（大きい）場合に、極値探索制御により抵抗値が大きく（小さく）自動調整されることを示した。

以上より、本論文では、熱音響システムの効率を最大化する負荷のフィードバック制御の実現可能性を示した。

第7章 今後の課題

今後の課題として、以下の2点が挙げられる。

- 温度変動に対して極値探索制御
- 熱音響システムにおける圧力振幅と効率を考慮した際の制御目標値の設定

極値探索制御が温度変動に対して利用可能であることを示していないため、熱源の温度が変化した場合でも、抵抗値の初期値が最大効率を与える抵抗値より小さい（大きい）場合に、極値探索制御により抵抗値が大きく（小さく）自動調整されることを実験により示す。

本論文では、温度変動に対して熱音響システムの自励発振を維持、また温度一定の場合で効率を最大に維持する手法をそれぞれ提案した。実用上では熱音響システムの自励発振を維持、効率を最大に維持することは同時に達成できることがユーザにとって望ましい。まずは、熱音響システムの温度変動がある場合の最大効率と圧力振幅の関係について明らかにする必要がある。

謝辞

本研究を遂行するにあたり，終始手厚いご指導ご鞭撻を賜りました，本学 機械系 小林泰秀准教授に深く感謝の意を表します。

本実験で使用した，可変抵抗器を製作いただいたダブル技研株式会社 鬼山武行氏に感謝いたします。この実験装置なしでは，本実験を遂行することは不可能でした。心から御礼申し上げます。本研究は科学研究費助成事業基盤研究 (C) (課題番号:18K04193) の助成を受けた。ここに謝意を表します。

最後となりますが，日々のゼミを通じて多くの知識や示唆をいただいた小林研究室の皆様に感謝し，謝辞とさせていただきます。

参考文献

- [1] 富永 昭, “熱音響工学の基礎”, 内田老鶴圃 (1998).
- [2] 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, 74-6, pp.313-323 (2018) .
- [3] 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測定”, 日本音響学会誌, 73-2, pp.93-99(2017)
- [4] 矢崎太一, 上田祐樹, 琵琶哲志, “音を利用して冷やす方法-熱音響冷凍機の原理と試作”, 日本音響学会誌, 62, pp.128-133 (2006)
- [5] 小林 泰秀, 梅本 康平, 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自励発振条件解析”, 日本音響学会誌, 73, pp12-20, (2017) .
- [6] 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”, 第60回自動制御連合講演会 (2017) .
- [7] KaiWang, JieZhang, NingZhang et al., “Acoustic matching of traveling-wave thermoacoustic electric generator”, Applied Thermal Engineering, Volume102, pp.272-282 (2016) .
- [8] Yaoyu Li, Member, Mario A. Rotea, George T.-C. Chiu, Luc G. Mongeau, Charles Clarkson, In-Su Paek, “Extremum Seeking Control of a Tunable Thermoacoustic Cooler”, IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, 13-4, pp.527-536 (2005).
- [9] 坂本眞一, “はじめての熱音響”, 日本音響学会誌, 74-6, pp.326-329 (2018) .
- [10] 矢崎 太一, “熱音響現象の理解と応用を目指して”, 数理解析研究所講究録, 1483, pp100-111, (2006) .
- [11] <http://www.kibitujinja.com/>

- [12] 矢崎 太一, “熱音響現象と Stirling エンジン - エンジンを理解するための新しい概念”, 低温工学, 43, pp.509-516, (2008) .
- [13] S. Backhaus, G.W.Swift, “ A thermoacoustic Stirling heat engine ”, *Nature*, 399, pp.335-338 (1999).
- [14] S.Backhaus, E.Tward, M.Petach, “ Traveling-wave thermoacoustic electric generator ”, *Applied Physics Letters*, 85, pp.1085-1087 (2004) .
- [15] Hadi Malek, YangQuan Chen, “ Fractional Order Extremum Seeking Control:Performance and Stability Analysis”, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, 25-10, pp.2531-2540 (2010).
- [16] Steven L. Brunton, Clarence W. Rowley, Sanjeev R. Kulkarni, “ Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Optimization Using Ripple-Based Extremum Seeking Control ”, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, 25-10, pp.2531-2540 (2010).

研究業績

学会発表リスト (口頭発表)

(講演発表者の氏名に○印, 著者に下線を付す)

1. 日本音響学会 2017 年秋季研究発表会

”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”

○小林 泰秀, 井上 陽仁

開催日：平成 29 年 9 月 25・26・27 日

2. 日本機械学会 北陸信越支部 第 55 期総会・講演会

”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”

○井上 陽仁, 小林 泰秀

開催日：平成 30 年 3 月 3 日

3. 日本音響学会 2018 年春季研究発表会

”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”

○小林 泰秀, 井上 陽仁

開催日：平成 30 年 3 月 13・14・15 日

4. 日本音響学会 2018 年秋季研究発表会

”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”

○井上 陽仁, 小林 泰秀

開催日：平成 30 年 9 月 12・13・14 日