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

振動発電機を用いたエネルギー回収と投入による振動体振幅の制御

Control of vibration amplitude by generation and regeneration of energy using vibration energy harvester

長岡技術科学大学 大学院 工学研究科
機械創造工学専攻　15301385

著者氏名　稲田 千翔之

指導教員　小林 泰秀 准教授

平成31年2月1日

Abstract

1st, February, 2019

Control of vibration amplitude by generation and regeneration

of energy using vibration energy harvester

No. 15301385

INADA CHIKASHI

Department of Mechanical Engineering
Nagaoka University of Technology

Recently, energy harvesting technology has attracted much attention to solve energy problems. The technology is to recover energy from vibration, light, or heat sources, etc., converting it into electric power. By adopting it as a power supply for sensors and transmitters, self-powered comertial products have been realized for purpose of, e.g., remote sensing of environment without external power supply. Vibration-powered generator is a technology for converting vibration energy into electric power. In previous study, research is under way to apply vibration-powered generation mechanism to dumping vibration, but the purpose is to make the vibration amplitude to zero, and few studies aimed at maintaining constant non-zero amplitude. As a system with demand to keep constant non-zero amplitude, that is thermoacoustic power generation that generates electricity using thermoacoustic self oscillation phenomenon. This phenomenon can effectively utilize waste heat energy. However, self-oscillation may be stopped when the temperature and load of the heat source are greatly varied, and a mechanism for maintaining the pressure amplitude for stable energy use is practically necessary.

Therefore, to maintain the vibration amplitude of the vibrating body constant for vibration power generation, a feedback control system of a load that dynamically changes the load resistance connected to the vibration generator has been proposed. In the control system using the output of the PI controller driven by the deviation between the vibration amplitude of the vibrating body and the target value as the command value of the load resistance, the maximum amplitude which is achieved when the load resistance is 0 (short circuit) The amplitude of the vibrating body can be controlled to any desired value between the maximum amplitude and the minimum amplitude which is achieved when the load resistance is ∞ (open). However, the maximum amplitude depends on the amplitude of the vibration source. Even if it is short amount of time, the amplitude of the vibrating body can not be controlled to a large target value beyond the constraints imposed by the vibration source.

In this study, it is a final object to realize a control system that maintains the amplitude of vibrating body at the desired target value regardless of the amplitude of vibration source by recovering and storing energy when the amplitude of vibration source is large, and putting stored energy on the system when the amplitude of vibration source is small for exceeding temporarity the constant of vibration source. In this paper, we first simulate energy recovery and input by connecting an AC power supply to a vibration generator, propose control system using the output of PI controller driven by the deviation between the vibration amplitude and the target value as time-varying gain for generating the terminal voltage of the vibration generator from the drivesignal of vibration source. Experiment shows the effectiveness of this control system from the result that the positive and negative of the time-varying gain respectively correspond to the energy recovery from the vibration generator to the external power supply and the energy input from the external power supply.

Next, to construct a practical system. We consider a system that uses energy recovery by charging the capacitor. To dynamically change the charging current of capacitor, we propose steady-state oscillation control system. The output of PI controller driven by the deviation between amplitude of the vibrating body and its target value is set as a command value to the variable resistor connected in series to the capacitor. Experiment shows the effectiveness of control system. In experiment, it is tend to while the capacitor is full charged, vibration amplitude of the vibrating body approaching the target value and settle at the target value after approaching.

目 次

第 1 章　研究背景 **8**

第 2 章　抵抗によるエネルギー散逸のみを用いた振動体振幅の制御 (先行研究 [5]) の概要 **10**

2.1　実験装置 10

2.1.1　負荷抵抗のマニュアル調整 16

2.1.2　定常発振制御系の構成 17

2.2　実験結果 17

第 3 章　交流電源によるエネルギー回収・投入を用いた振動体振幅の制御 **22**

3.1　実験装置 22

3.1.1　装置構成 22

3.1.2　定常発振制御系の構成 24

3.1.3　確認実験 26

3.2　実験結果 28

第 4 章　コンデンサによるエネルギー回収を用いた振動体振幅の制御 **32**

4.1　実験装置 32

4.1.1　装置構成 32

4.1.2　コンデンサを用いた場合の応答 35

4.1.3　定常発振制御系の構成 40

4.2　実験結果 40

第 5 章　まとめ **59**

謝辞 **60**

研究業績 **62**

図 目 次

2.1 Setup of experimental apparatus 11

2.2 Experimental apparatus 12

2.3 Structure of vibrating body and generator 13

2.4 Vibrating body 14

2.5 Vibration generator 15

2.6 Variable load resistance circuit 15

2.7 Relation between resistance and voltage amplitude 16

2.8 Block diagram of experimental apparatus 17

2.9 Time response of $K_P 0, K_I 4$ 18

2.10 Time response of $K_P 0, K_I 4$ (Enlarged view) 18

2.11 Time response of $K_P 0, K_I 7$ 19

2.12 Closed-loop stability with experiment 20

3.1 Experimental apparatus 23

3.2 Block diagram of experimental apparatus 25

3.3 Circuit setup 26

3.4 v_0 and v_0' at $G(t) = 0.5$ 27

3.5 v_0 and v_0' at $G(t) = -0.5$ 27

3.6 Time response of X_0=0.02mm,K_P=10000,K_I=5000 29

3.7 Time response of X_0=0.02mm,K_P=10000,K_I=5000 (Enlarged view) 29

3.8 Time response of X_0=0.03mm,K_P=10000,K_I=5000 30

3.9 Time response of X_0=0.02mm,K_P=100,K_I=15000 31

3.10 Time response of X_0=0.03mm,K_P=100,K_I=17000 31

4.1 Experimental apparatus 33
4.2 Differential amplifier circuit 34
4.3 Circuit setup 36
4.4 Experimental result (Circuit setup (A to B)) 37
4.5 Experimental result (Circuit setup (A to C)) 38
4.6 Variable resistance 39
4.7 Block diagram of experimental apparatus 40
4.8 $K_P = 0, K_I = 0$[1] 42
4.9 $K_P = 0, K_I = 0$[2] 42
4.10 $K_P = 0, K_I = 0$(Enlarged view) 43
4.11 $K_P = 0, K_I = 0$[2] with LPF 43
4.12 $K_P = 0, K_I = 0$(Enlarged view) with LPF 44
4.13 Time response of K_P=1,K_I=6 46
4.14 Time response of K_P=1,K_I=6 47
4.15 Time response of K_P=1,K_I=6(Enlarged view) 47
4.16 Time response of $\hat{V_1}$ for K_P=1,K_I=6,8,10,15 48
4.17 Time response of K_P=1,K_I=8(Enlarged view) 49
4.18 Time response of K_P=1,K_I=8(Enlarged view) 49
4.19 Time response of K_P=1,K_I=10(Enlarged view) 50
4.20 Time response of K_P=1,K_I=10(Enlarged view) 50
4.21 Time response of K_P=1,K_I=15(Enlarged view) 51
4.22 Time response of K_P=1,K_I=15(Enlarged view) 51
4.23 circuit of Experimental apparatus 52
4.24 Time response of K_P=1,K_I=15,K_{I2}=0.1[1](Enlarged view) 54
4.25 Time response of K_P=1,K_I=15,K_{I2}=0.1[2](Enlarged view) 55
4.26 Time response of K_P=1,K_I=15,K_{I2}=0.3[1](Enlarged view) 55
4.27 Time response of K_P=1,K_I=15,K_{I2}=0.3[2](Enlarged view) 56
4.28 Comparison $\hat{V_1}$ 56

4.29 Comparison $R_S(t)$[1] 57
4.30 Comparison $R_S(t)$[2] 57
4.31 Comparison $R_S(t)$[3] 58

表 目 次

2.1 Experimental instruments 13

3.1 Experimental instruments 23

4.1 Experimental instruments 33

第1章　研究背景

エネルギー問題に対して最近，エネルギーハーベスティング技術 [1] が注目されている．これは，振動や光，熱など日常にあらゆる形で存在しているエネルギーを回収し，電力に変換する技術であり，センサーや発振器の電源として利用することで，外部からの電源供給のいらない実用的なシステムが構築できる．

振動発電は，振動エネルギーを電力に変換する技術である．従来研究では振動発電のメカニズムを応用し，制振する研究が行われている [2][3][4] が，振動振幅をゼロとすることが目的であり，ゼロでない振幅一定に維持することを目的とした研究は少ない．ゼロでない振幅一定に維持する需要のあるシステムとして，熱音響自励発振現象を利用した発電を行う熱音響発電があげられる．これは，廃熱エネルギーを有効利用できるシステムとして近年注目を集めている．ただし，熱源の温度や負荷の変動が大きいと自励発振が停止することがあり，安定したエネルギー利用のために圧力振幅を維持する機構が実用上必要である．

そこで振動発電を対象として，振動体の振動振幅を一定に維持するために，振動発電機に接続された負荷抵抗を動的に変化させる負荷のフィードバック制御系が提案されている [5]．振動体の振動振幅と目標値との偏差で駆動される PI（比例積分）補償器の出力を負荷抵抗の指令値として用いる制御系で，負荷抵抗が 0（短絡）の時に達成される最大振幅と，負荷抵抗が ∞（開放）のときに達成される最小振幅（ほぼゼロになる）の間の任意の目標値に振動体の振幅を制御できる．ただし最大振幅は振動源の振幅に依存しており，たとえ僅かな期間であっても，振動源による制約を超えて大きな目標値に振動体の振幅を制御することはできない．

本研究では，振動源の振幅が大きなときにエネルギーを回収・保存し，振動源の振幅が小さなときに保存したエネルギーを系に投入することで一時的に振動源の制約を超えることができ，その結果，振動源の振幅によらず所望の目標値に振動体の振幅を維持する制御系を実現することを最終目的とする．そのために本論文ではまず，エネルギーの回収と投入を振動発電機に交流電源を接続することで模擬し，振動振幅と目標値との偏差で駆動される PI 補償器の出力を振動源の駆動信号から振動発電機の端子電

圧を生成する際の時変ゲインとして用いる制御系を提案する．実験により，時変ゲインの正負がそれぞれ振動発電機から外部電源へのエネルギー回収，外部電源からのエネルギー投入に対応する結果から，本制御系の有効性を示す．

次に，実用的なシステムの構築のため，コンデンサの充電によるエネルギー回収を利用するシステムについて検討する．コンデンサの充電電流を動的に変化させるため，振動体の振幅とその目標値との偏差により駆動される PI 補償器の出力を，コンデンサに直列接続された可変抵抗器への指令値とする定常発振制御系を提案する．実験により，コンデンサの充電が十分に進むまで振動振幅は目標値に近づいていく，または近づいてから目標値で落ち着く傾向がみられることから，制御系の有効性を示す．

以上よりエネルギーの回収をしつつ振動振幅を所望の大きさ一定とする制御系の実現可能性を示す．

本論文の構成は次のとおりである．まず，次章において，抵抗によるエネルギー散逸のみを用いた定常発振制御 [5] の概要を述べるとともに，著者が行った，制御系の安定条件に関する実験結果について述べる．次に第 3 章において，交流電源によりエネルギー回収・投入を模擬した場合の振動体振幅の制御について述べ，さらに第 4 章において，コンデンサにより実際にエネルギー回収を行う場合について述べる．最後に第 5 章で本論文をまとめる．

第2章　抵抗によるエネルギー散逸のみを用いた振動体振幅の制御 (先行研究 [5]) の概要

本章では抵抗によるエネルギー散逸のみを用いた定常発振制御 [5] の概要を述べるとともに，著者が行った制御系の安定条件に関する実験結果について述べる．

2.1　実験装置

実験装置の構成図を Fig. 2.1，外観を Fig. 2.2，使用機器の仕様を Table 2.1 に示す．実験装置は，リニアモータ (外乱用アクチュエータ) の一定の変位加振により振動する，2 自由度のマス・バネ・ダンパ系で構成される．$w(t)$ はリニアモータの駆動信号，$R_S(t)$ は可変負荷抵抗 $R(t)$ の指示値，$v_1(t)$ はレーザー変位計による電圧信号である．また，$x_0(t)$，$x_1(t)$ は，それぞれリニアモータ，振動体の変位を表す．m_1，k_1 は，それぞれ振動体の質量，バネ定数を表し，m_2 は，発電機の質量である．i はコイルを流れる電流である．

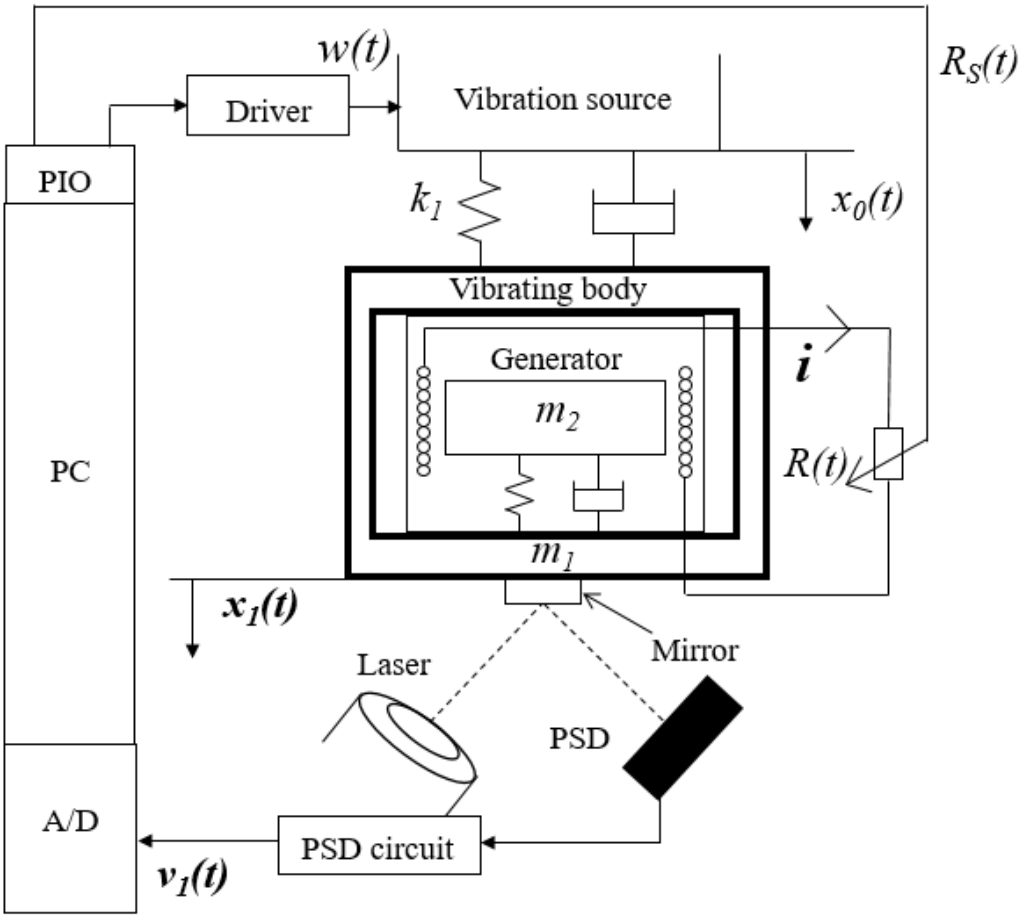

Fig. 2.1: Setup of experimental apparatus

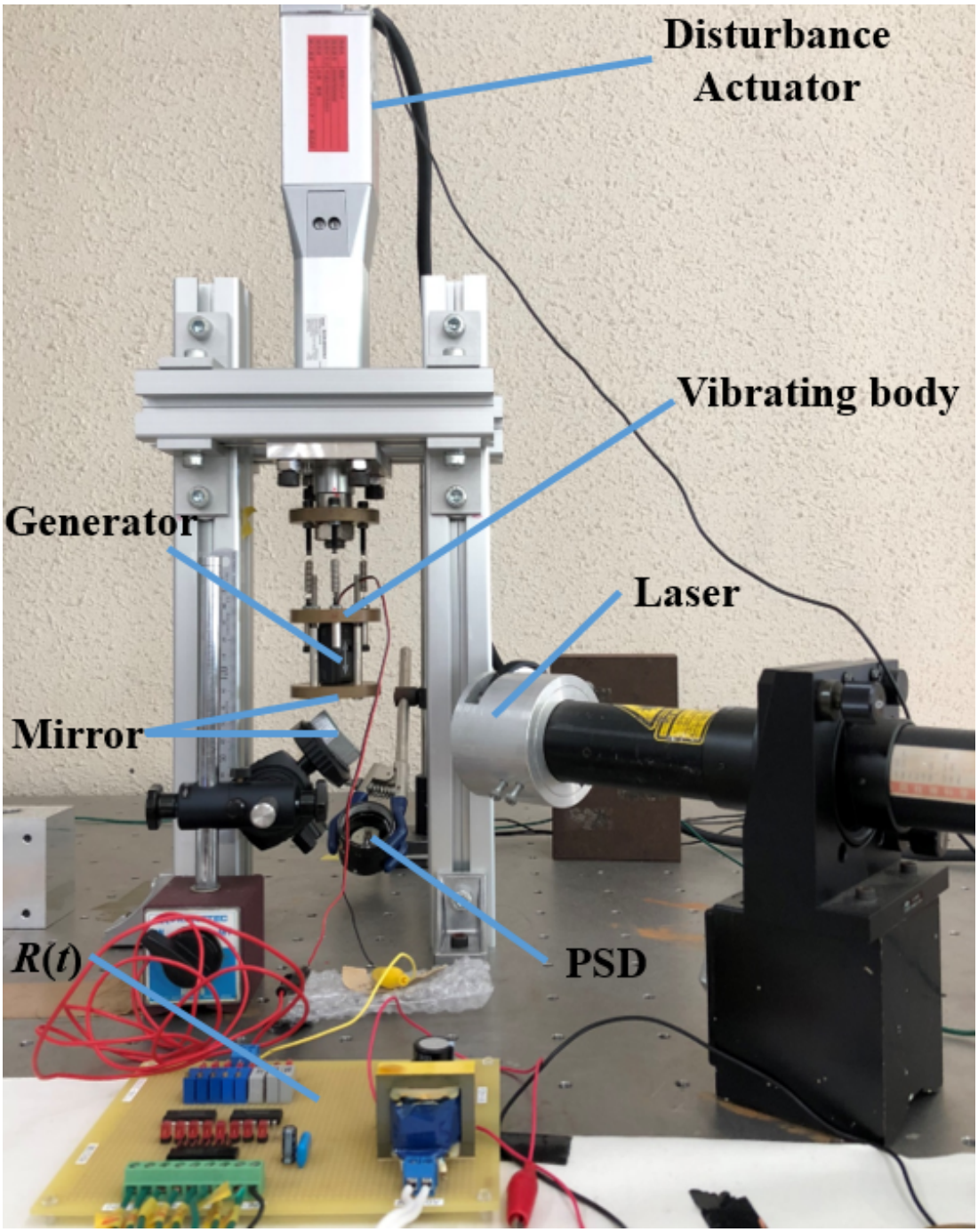

Fig. 2.2: Experimental apparatus

Table 2.1: Experimental instruments

PC	Dell Dimension 2400(RTLinux-3.2pre3)
A/D	Contec, AD12-16(PCI), 12bit, 10μs
PIO	Contec, PIO-32/32T(PCI), 32bit, 200ns
Distubance Actuator	Orientalmotor, EZC4D005M-A, Thrust 70N, Speed(max) 600mm/s
Driver	Orientalmotor, ESMC-C2
Laser	NEC, GLG5230
PSD	Hamamatsu Photonics, S3931
PSD Cicuit	Hamamatsu Photonics, C3683-01
Vibration generator	Star Micronics, EH12, 37×25×8mm, 5.39Hz(resonance)

リニアモータはステッピングモータで構成されており，位置決めの分解能は 0.01 mm である．リニアモータと振動体は引張バネを 3 つ用いて接続されており，発電機は振動体の中に挟み込むようにして取り付けられている (Fig. 2.3).

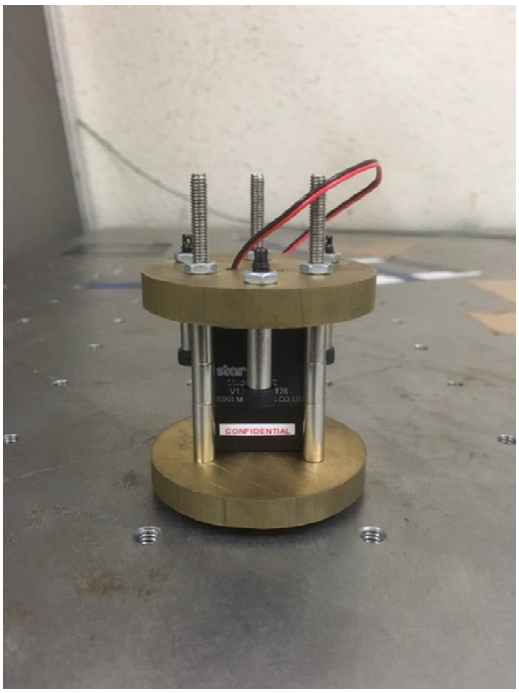

Fig. 2.3: Structure of vibrating body and generator

振動体，発電機，可変負荷抵抗器の外観を，それぞれ Fig. 2.4-2.6 に示す．発電機はスター精密製 (質量はおよそ $m_2 = 12.1$g) のものを使用しており，電磁誘導の法則に基づいて，内部の磁石が振動することでコイルとの相対運動により発電する (ムービング・マグネット)．振動体はその固有振動数が発電機のそれにほぼ一致するように質量 $m_1 = 332.5$g に調整されている．また，バネ定数は一つ $k_1 = 0.13$N/mm のものを用いた．可変負荷抵抗器は，PC (パソコン) から PIO (Parallel Input/Output) ボードを介して 8 ビットのディジタル信号 (0〜255 の指令値) で，約 400 Ω〜38 kΩ の間を変化させることができる．抵抗値は指令値と線形関係にある．振動体の振動測定にはレーザー変位計を用いており，レーザー光を鏡で屈曲させることにより，PSD (Position Sensitive Detector) で検出した電圧信号を A/D 変換して PC に取り込むことで振動変位を得ている．

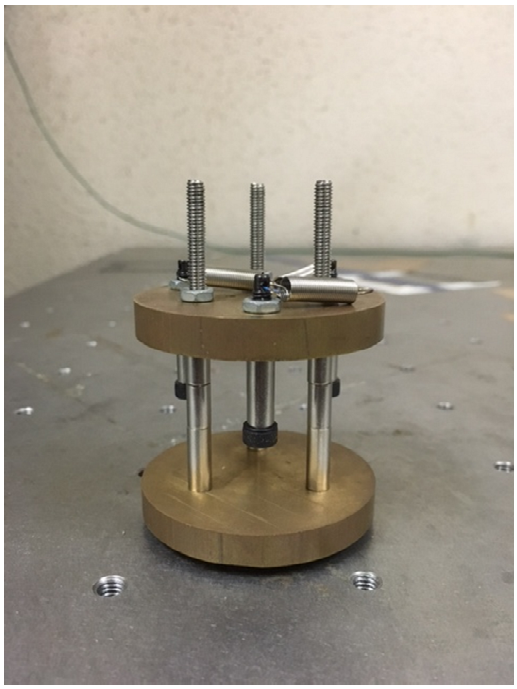

Fig. 2.4: Vibrating body

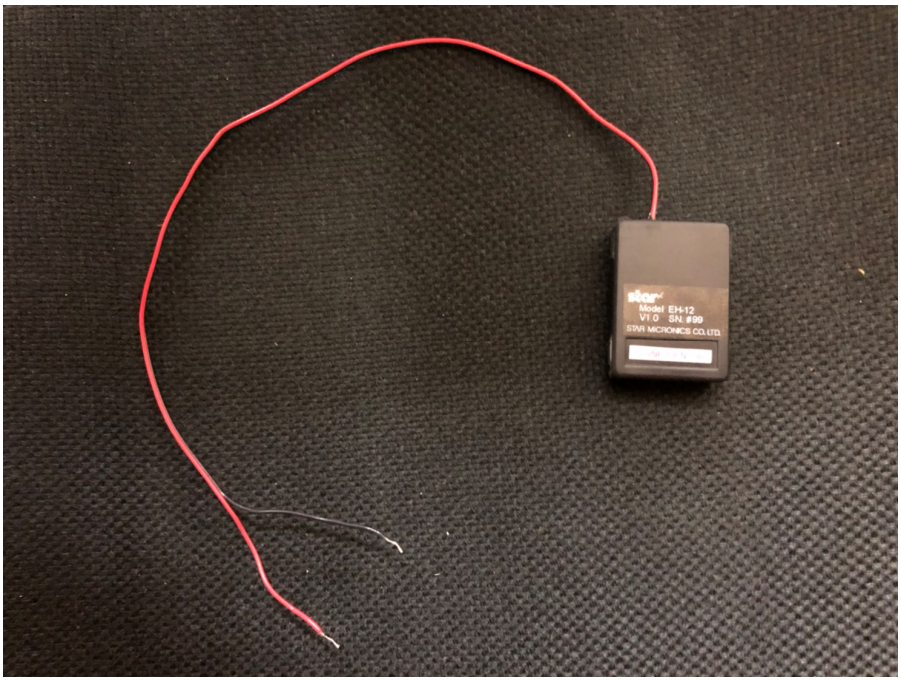

Fig. 2.5: Vibration generator

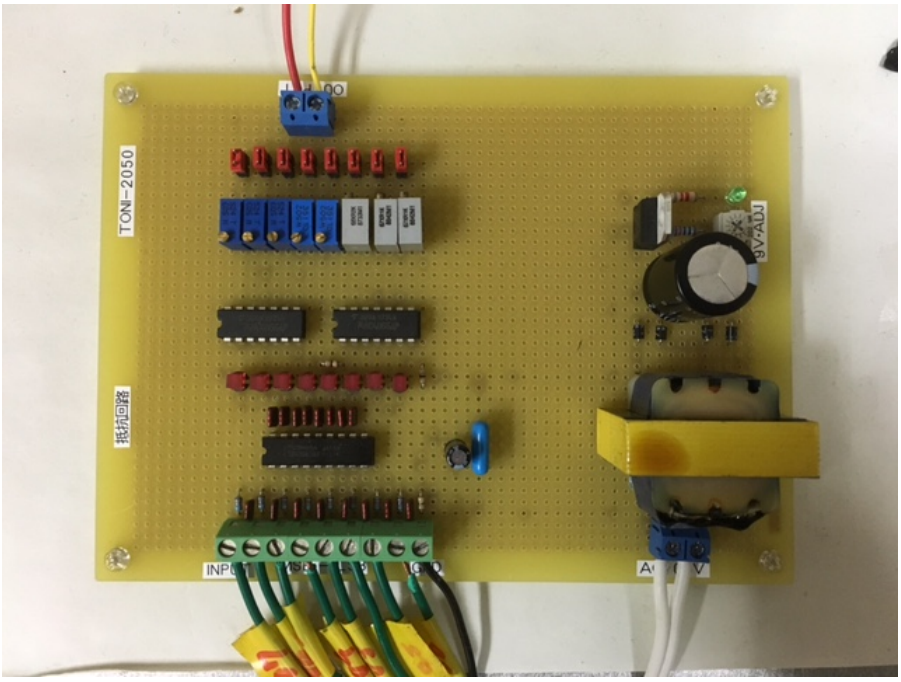

Fig. 2.6: Variable load resistance circuit

2.1.1 負荷抵抗のマニュアル調整

抵抗値のマニュアル調整をした際の振動体の振動振幅の結果について述べる．マニュアル調整した際の抵抗値と振動体の振動振幅の定常的な関係について Fig. 2.7 に示す．この実験に使用した振動発電機の仕様がその他の実験と異なるため，リニアモータの加振周波数は 5.24Hz としている．また，加振振幅は 0.02mm とした．図を見ると，$R = 0$ (短絡時) に近いほど振動振幅は大きくなり，逆に $R = \infty$ (開放時) に近いほど振動振幅は小さくなることがわかる．短絡時はコイルに電流が流れ，電気的な減衰が発電機内部のマスに発生するため，マスはほぼ静止すると考えられる．この結果，振動体の振動エネルギーは吸収されず，振動振幅は大きくなる．逆に，開放時は電気的な減衰はなく，振動体の振動エネルギーが発電機内部のマスに吸収されることより，振動振幅は小さくなる．したがって，その中間の負荷抵抗 R を設定すれば，所望の振動振幅が実現できると期待される．

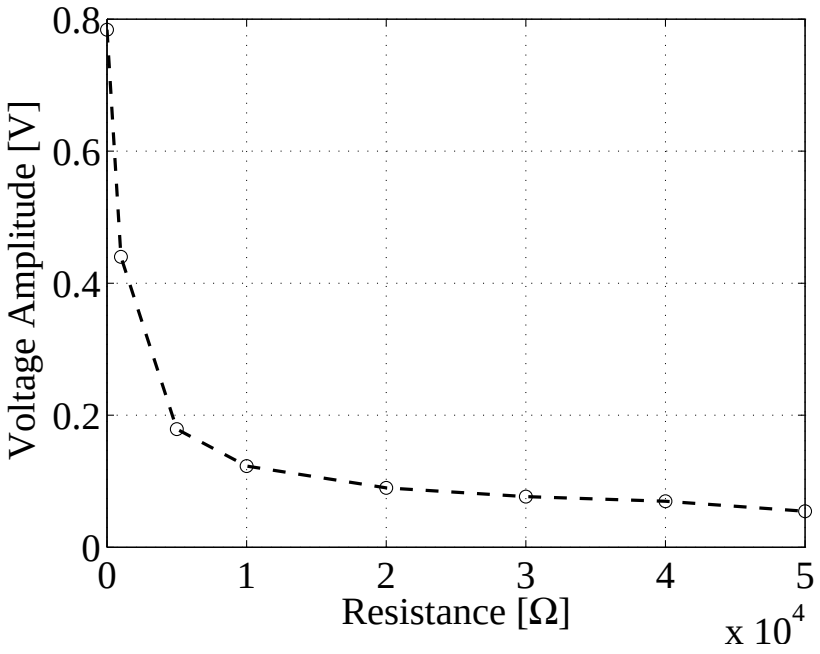

Fig. 2.7: Relation between resistance and voltage amplitude

2.1.2　定常発振制御系の構成

Fig. 2.8 に制御系のブロック線図を示す．$v_1(t)$ は振動体の変位 $x_1(t)$ に比例するため，振動体の変位振幅を目標値に制御する代わりに，$v_1(t)$ の振幅を目標値 V_1^* に制御することを考える．$v_1(t)$ を絶対値関数とローパスフィルタ（カットオフ角周波数 $\omega_f = 0.25$ rad/s） に通して平滑化した後，係数 $\pi/2$ を乗じることで推定振幅 $\hat{V}_1(t)$ を得る．目標値 V_1^* との差分を PI 補償器に入力し，PI 補償器の出力を指数関数に通して正数に変換し，それを可変負荷抵抗の指令値 $R_S(t)$ として使用する．

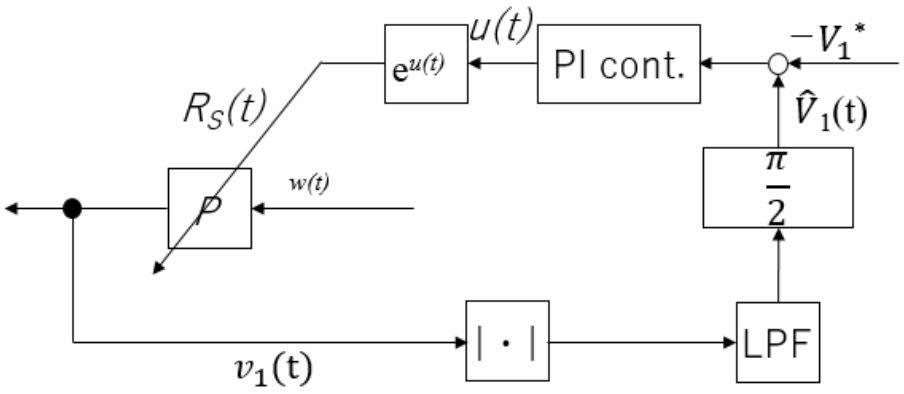

Fig. 2.8: Block diagram of experimental apparatus

2.2　実験結果

本章内で述べた装置と制御系を用いて振動体の振幅を目標値一定とする制御実験を行った結果について述べる．文献 [5] では PI 補償器の比例ゲインと積分ゲインに関して制御系が安定となる条件を実験的に調べるとともに，2 次および 4 次振動系モデルに基づいて安定条件を理論的に導出している．このうち本節では，比例・積分ゲインに関する制御系の安定条件を実験的に調査した結果について述べる．

リニアモータの駆動信号 $w(t)$ に与えられるリニアモータの加振振幅は 0.04mm，加振周波数は 5.16Hz である．リニアモータの駆動を開始した後，振動体の振動が定常状態になるまで約 5 分間待機したあと $t = 0$ で制御を開始する．また，振幅の目標値は 0.8V としている．安定な結果の一例を Fig. 2.9 に示す．またその最後の 1 秒間の拡大図を Fig. 2.10 に示す．不安定な結果を Fig. 2.11 に示す．赤線は振動体の変位，緑線は振動体の推定振幅，青線は可変抵抗への指示値を 50 分の 1 にして表示したもの，青の破線は振幅目標値を表したものである．

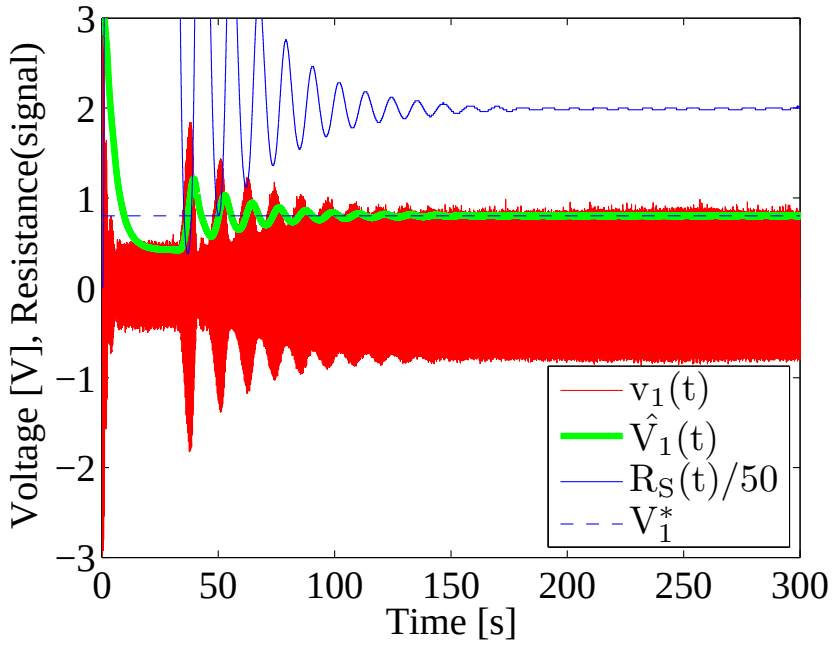

Fig. 2.9: Time response of K_P0, K_I4

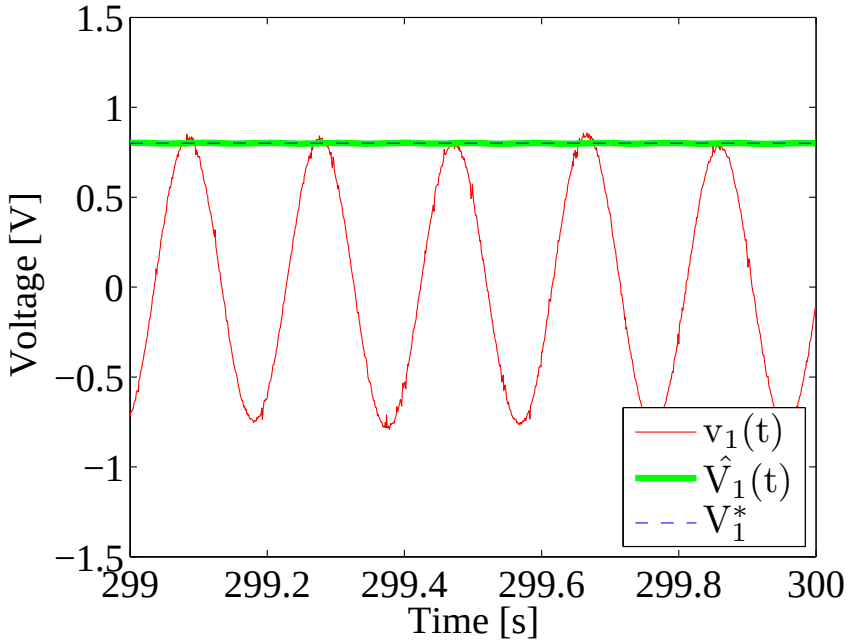

Fig. 2.10: Time response of K_P0, K_I4 (Enlarged view)

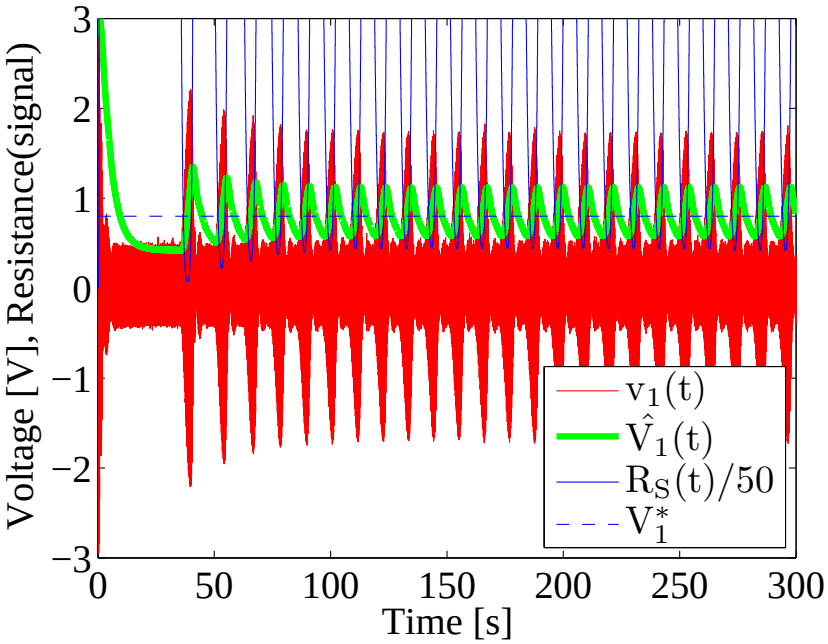

Fig. 2.11: Time response of K_P0, K_I7

Fig. 2.9 より，制御開始後，所望の振動振幅になるように抵抗値が自動調整され，130 秒付近で振動振幅が一定に落ち着いていることがわかる．さらに，Fig. 2.10 の拡大図より，振幅の大きさは目標値である 0.8V で収束していることがわかる．一方で Fig. 2.11 のように不安定な結果では，振幅は目標値付近で振動し，抵抗値も振動し続ける．

Fig. 2.12 に安定条件を調査した結果を示す．時刻 t=290〜300s における追従誤差 $\hat{V}_1(t) - V_1^*$ の L_2 ノルムが 0.1 未満となった場合を安定，それ以外を不安定と判定した．横軸の比例ゲイン K_P，縦軸の積分ゲイン K_I に対して，安定な結果が得られた場合は丸印，不安定な結果が得られた場合はバツ印が記載されている．特に，安定/不安定が変わる境界において，K_P と，K_I の刻みを 1.0 とし，安定/不安定の境界付近で詳細に実験を行った．実線は各 K_P における丸印とバツ印の中央値をその境界と仮定して最小二乗法により近似直線を引いたものである．直線が正の傾きを持つこと，$K_P = 0$ における切片 $K_I > 0$ を持つことがわかる．

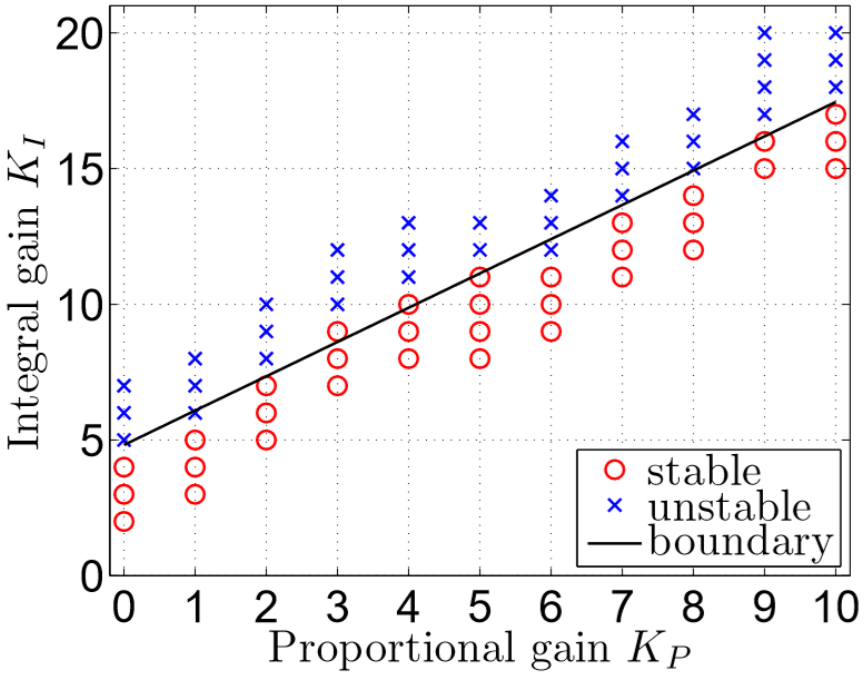

Fig. 2.12: Closed-loop stability with experiment

振動振幅が目標値で収束しているのは，抵抗値が短絡と開放の間で自動調整されているためである．ただし，振動体の振幅制御は振動体のエネルギーを抵抗器の変化によって調整することであり，また，抵抗はエネルギーの散逸のみ行えるものであるため，振動振幅の大きさは加振源の加振振幅によってその最大値が制限され，たとえ僅かな期間であっても，振動源による制約を超えて大きな目標値に振動体

の振幅を制御することはできない．このため，本研究では振動源の振幅が大きなときにエネルギーを回収・保存し，振動源の振幅が小さなときに保存したエネルギーを系に投入することで一時的に振動源の制約を超えることができ，その結果，振動源の振幅によらず所望の目標値に振動体の振幅を維持する制御系を実現することを最終目的とする．

第3章　交流電源によるエネルギー回収・投入を用いた振動体振幅の制御

3.1　実験装置

3.1.1　装置構成

エネルギー回収と投入を交流電源で模擬した実験装置の構成図を Fig. 3.1 に，装置を構成する主な機器の仕様をまとめたものを Table 3.1 に示す．実験装置は，第 2 章に記載した実験装置の可変負荷抵抗をパソコン (PC) に接続されたディジタル/アナログ変換器 (D/A)(出力電圧 $v_0(t)$) で置き換えたもので，本実験で消費される電力が小さいことからパワーアンプを介さずに D/A 変換器を直接交流電源としている．図中の $w(t)$ はリニアモータの駆動信号である．

パソコン (PC) から パラレル入出力 (PIO) ボードとドライバを介して，正弦波の駆動信号 $w(t)$

$$w(t) = X_0 \sin \omega_n t, \quad \omega_n = 2\pi f_0 \tag{3.1}$$

によりリニアモータを振動源として駆動する．ここで X_0 は振動源の振幅，f_0 は加振周波数である．

Table 3.1: Experimental instruments

PC	Dell Dimension 2400(RTLinux-3.2pre3)
A/D D/A	Contec, AD12-16(PCI) Contec, AD12-4(PCI) (12bit, ± 5V, 10μs)
PIO	Contec, PIO-32/32T(PCI), 32bit, 200ns
Disturbance Actuator	Orientalmotor, EZC4D005M-A Thrust 70N, Speed(max) 600mm/s
Driver	Orientalmotor, ESMC-C2
Laser	NEC, GLC5230
PSD	Hamamatsu Photonics, s3931
PSD Cicuit	Hamamatsu Photonics, C3683-01
Vibration generator	Star Micronics, EH12 37 × 25 × 8mm, 5.36Hz(resonance)

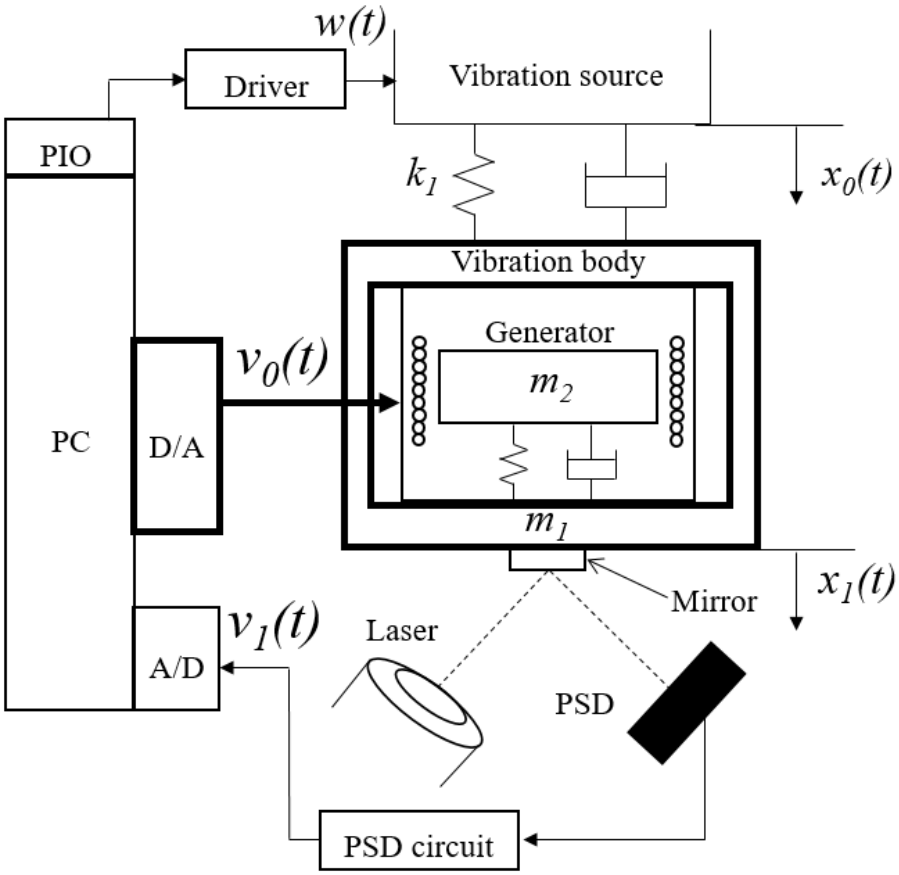

Fig. 3.1: Experimental apparatus

3.1.2 定常発振制御系の構成

本装置では簡単のため，(i) 振動源の駆動信号が利用可能で，(ii) 外部電源によるエネルギー投入が可能であるとする．(i) について，実用上は駆動信号が既知であることはほとんど無く，振動源の周波数を観測し，それに振動発電機の固有振動数を動的に追従させる必要がある．(ii) について，実用上は，振動源の振幅が大きいときにエネルギー回収・保存を行い，振動源の振幅が小さく目標値の維持が困難な場合に，保存したエネルギーを利用する機構が必要である．

制御系は振動体の変位電圧 $v_1(t)$ の振幅を目標値 V_1^* に制御することを考える．そのために，振動発電機に DA 出力信号 $v_0(t)$ を直結し，リニアモータの駆動信号 $w(t)$ を用いて $v_0(t)$ を

$$v_0(t) = G(t)w(t) \tag{3.2}$$

と生成する．ここで $G(t)$ は時変ゲインである．よって，本装置の目的は，$v_1(t)$ の振幅が目標値 V_1^* に近付くようにゲイン $G(t)$ を変化させることである．$G(t) \equiv 0$ の場合は振動発電機の端子は短絡され，端子開放時に比べて $v_1(t)$ の振幅は大きくなる．さらに，前述で述べた通り端子間に抵抗を接続すると抵抗値に応じた振幅が得られる．一方，$G(t)$ を正または負とした場合にどのような振幅が達成されるかは自明ではない．そこで $G(t)$ を定数として予備実験を行い，$G(t) \equiv 0$ のときの $v_1(t)$ の振幅に対して，

- $G(t)$ が正のときには $v_1(t)$ の振幅が小さくなる
- $G(t)$ が負のときには $v_1(t)$ の振幅が大きくなる

という結果を得た．すなわち本装置では，$G(t)$ の正負が，振動発電機に対するエネルギー回収・投入に対応すると考えられる．ただし，この関係は実験条件 (加振周波数，振動系及び振動発電機の共振周波数) に依存し，$G(t)$ の正または負が常に振動発電機によるエネルギー散逸または投入のどちらか一方を意味するとは限らないが，実験条件によらず少なくとも $G(t)$ の符号の逆転はエネルギーの回収と投入の切り換えを意味すると考えられる．

Fig. 3.2 に制御系のブロック線図を示す．$v_1(t)$ の振幅を目標値 V_1^* 一定とするようにゲイン $G(t)$ を変化させる定常発振制御系である．$v_1(t)$ を絶対値関数とローパスフィルタ（カットオフ角周波数 $\omega_f = 0.25$ rad/s）に通して平滑化した後，係数 $\pi/2$ を乗じることで推定振幅 $\hat{V}_1$ を得る．目標値 V_1^* との差分を PI 補償器に入力し，その出力そのものを時変ゲイン $G(t)$ として用いる．定常発振制御系は，熱音響エンジンの発振時の圧力振幅を目標値一定とするために文献 [6] で提案されたもので，そこでは圧

力センサの出力信号に PI 補償器の出力，すなわち時変ゲインを乗じたものを音源の駆動信号として用いている．ゲインの正負が音源によるエネルギー散逸・生成に対応し，比例ゲインと積分ゲインを適切に設定すれば，所望の圧力振幅が達成できることが示されている．

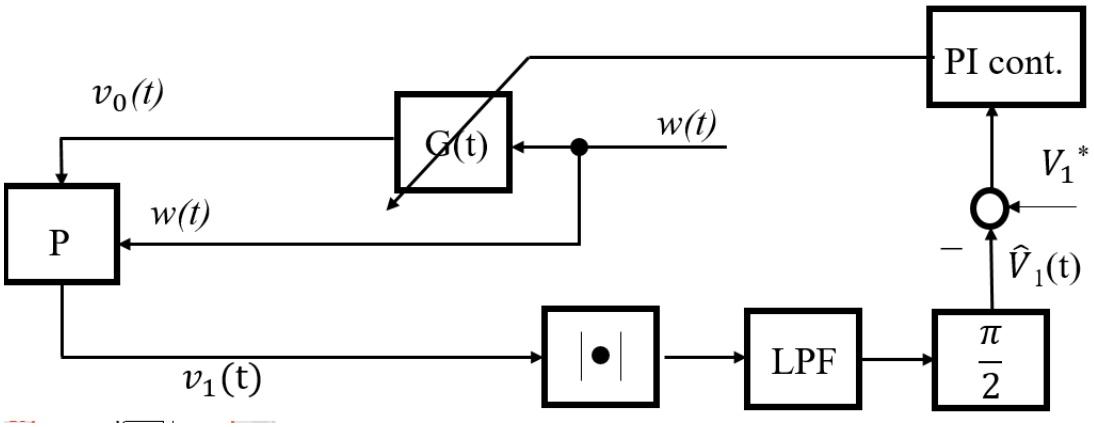

Fig. 3.2: Block diagram of experimental apparatus

3.1.3 確認実験

3 章にて記述する実験を行った後に，実際に回路上でもエネルギーの回収と投入の模擬が行われているか，実験によって確かめた．実験に使用した回路の構成を Fig. 3.3 に示す．電力の向きを検出するため，交流電源と振動発電機との間に抵抗 R = 1kΩ を接続し，$G(t)$ を正，または負の一定の値にしたときの交流源側の電圧 v_0(この実験の時は振動源の振幅 X_0 を使わずに $v_0(t) = G(t)\sin\omega_n t$ として出力している) と振動発電機側の電圧 v_0' をオシロスコープ (Tektronix THS710) を使って計測し，振動体の振動が定常状態になるまで待機したあとにオシロスコープの画面を撮影した．結果を Fig. 3.4，Fig. 3.5 に示す．Fig. 3.4 は $G(t)$ が正 ($G(t) \equiv 0.5$) のとき，Fig. 3.5 は $G(t)$ が負 ($G(t) \equiv -0.5$) のときの v_0 と v_0' をそれぞれ示している (v_0 と v_0' はどちらも縦軸一マス 0.5V で，同じスケールで表わしている).

v_0 と v_0' の波形は Fig. 3.4，Fig. 3.5 どちらの場合でもほぼ同相であることがわかる．また v_0 と v_0' の振幅の大きさを比べると Fig. 3.4 では v_0' のほうが大きく，Fig. 3.5 では v_0 のほうが大きくなっている．したがって，$v_1(t)$ の振幅が $G(t) \equiv 0$ のときよりも大きくなる ($G(t)$ が負) ときは電力の向きは PC 側から振動発電機側へ，$v_1(t)$ の振幅が $G(t) \equiv 0$ のときよりも小さくなる ($G(t)$ が正) ときは電力の向きは振動発電機側から PC 側へとなり，$v_1(t)$ の振幅の大，小に対応してエネルギーの投入と回収が交流電源により模擬できていることがわかった．

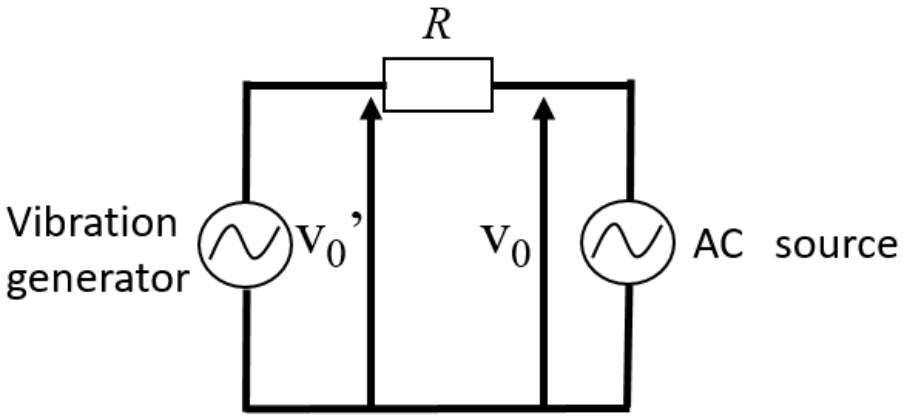

Fig. 3.3: Circuit setup

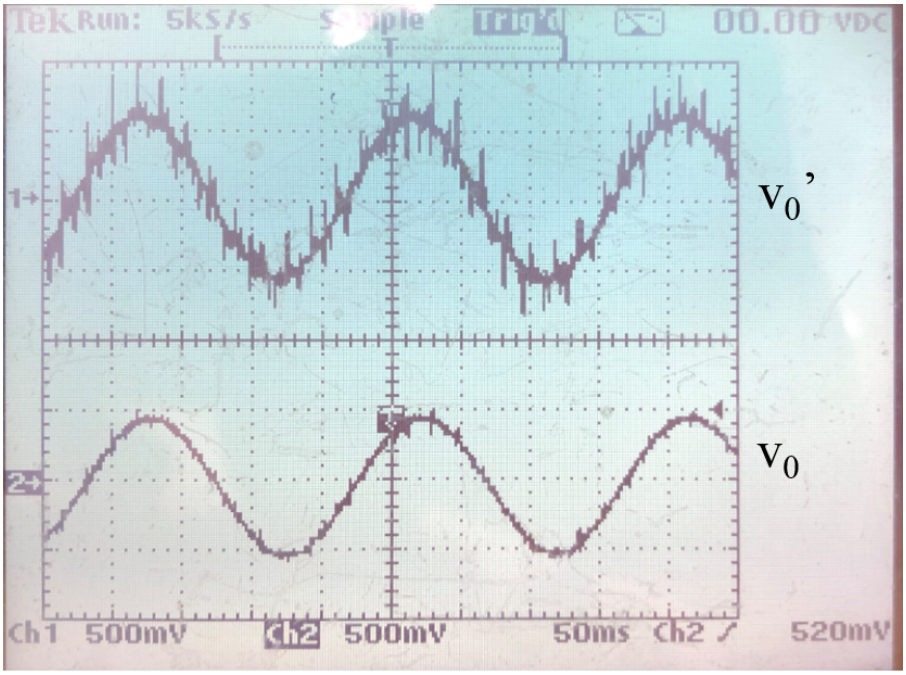

Fig. 3.4: v_0 and v_0' at $G(t) = 0.5$

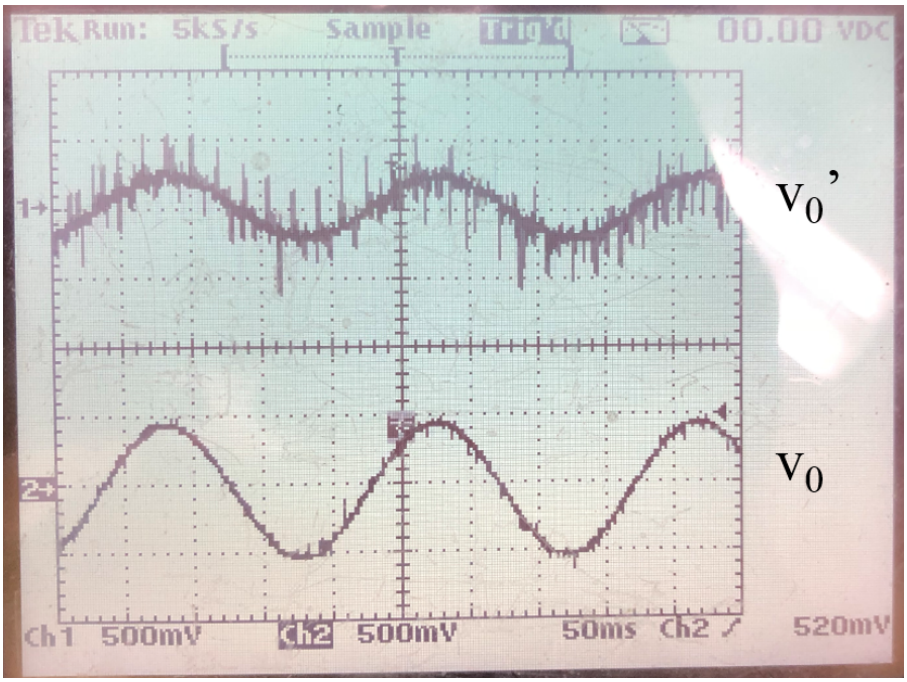

Fig. 3.5: v_0 and v_0' at $G(t) = -0.5$

3.2 実験結果

外部電源を使用しエネルギーの回収と投入を模擬したシステムについて，その実験結果を示す．その際に，振動体の振幅が目標値へ収束することを実験的に示す．加振周波数 f_0 は $f_0 = 5.16$ Hz である．実験では，試行錯誤的に決定した $K_P = 10000$，$K_I = 5000$ を用いる．また，振動源の振幅が変動することを考慮し，$X_0 = 0.02$mm，0.03mm の二通りを考える．それぞれの加振振幅において，制御無し ($G(t) \equiv 0$) で実験を行った結果，$v_1(t)$ の振幅はそれぞれ 約 1.3 V，約 2.2 V であった．そこで，両者の中間の値として目標値 $V_1^* = 1.8$ V とする．

$K_P = 10000$, $K_I = 5000$ の値は，2 章で示した実験で用いた値 ($K_P = 10$, $K_I = 10$ など) に比べると著しく大きい．この理由についてまず述べておく．本章で自動調整されるゲイン $G(t)$ は $v_0(t) = G(t)w(t)$ のように，リニアモータの駆動信号 $w(t) = X_0 \sin \omega_n t$ の係数として用いられる．ここで，X_0 の数値はメートル単位であり，例としてリニアモータの振幅を今回の実験で用いる 0.02mm とする場合は $X_0 = 0.00002$ となる．実際，予備実験として $G(t)$ を手動調整した結果，定常状態において，リニアモータの振幅が 0.02mm の場合，$G(t) = -16000$ のときに $v_1(t)$ の振幅が約 1.9 V となった．また，リニアモータの振幅が 0.03mm の場合，$G(t) = 16000$ のときに，$v_1(t)$ の振幅が約 1.6 V となった．このときの電圧 $v_0(t)$ の大きさを考えると，およそ 0.3V 程度となる．このため振幅の目標値 $V_1^* = 1.8$ V に制御するために，少なくとも $G(t) = 5000$ のような大きな値が必要になり，その結果 K_P，K_I の値が大きくなる．

Fig. 3.6 に加振振幅の小さい $X_0 = 0.02$ mm の時間応答を示す．赤線はレーザー変位計の変位電圧 $v_1(t)$，緑線はその推定振幅 $\hat{V_1}(t)$，青線は一万分の一倍した時変ゲイン $G(t)$ を示している．制御はリニアモータの駆動を開始した後，振動体の振動が定常状態になるまで待機し $t = 0$ で開始している．図より，制御開始後に時変ゲインが負の方向に大きくなるにつれて振動振幅が大きくなり，制御開始後約 30 秒で振幅が一定値に収束していることがわかる．Fig. 3.7 に Fig. 3.6 の実験終了時付近の拡大図を示す．赤線 $v_1(t)$ が約 5 Hz の正弦波状に振動していること，その振幅が目標値 1.8 V（青破線）に収束していることがわかる．Fig. 3.8 に加振振幅が大きい $X_0 = 0.03$ mm の時間応答を示す．Fig. 3.6 の結果とは逆に時変ゲインが正の方向に大きくなるにつれて振動振幅が小さくなり，制御開始後約 30 秒で振幅が目標値に収束していることがわかる．

2 章で述べたように，本装置では時変ゲイン $G(t)$ の正負が振動発電機によるエネルギー散逸・生成に対応している．このことから，構成した定常発振制御系により，加振振幅の大小によらず，エネルギー散逸と生成を適切に利用することによって振動体の振幅を目標値一定に制御することができたと言える．

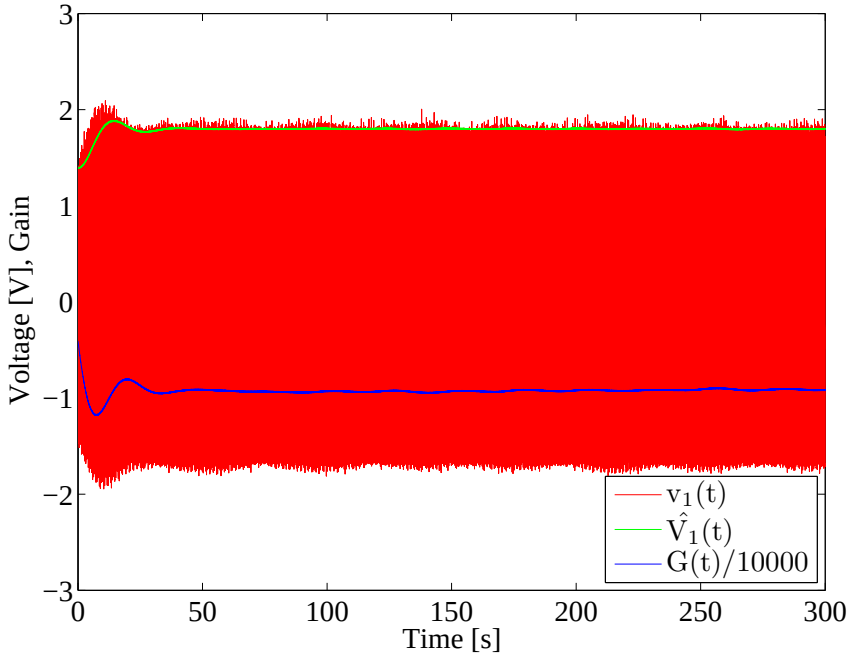

Fig. 3.6: Time response of X_0=0.02mm,K_P=10000,K_I=5000

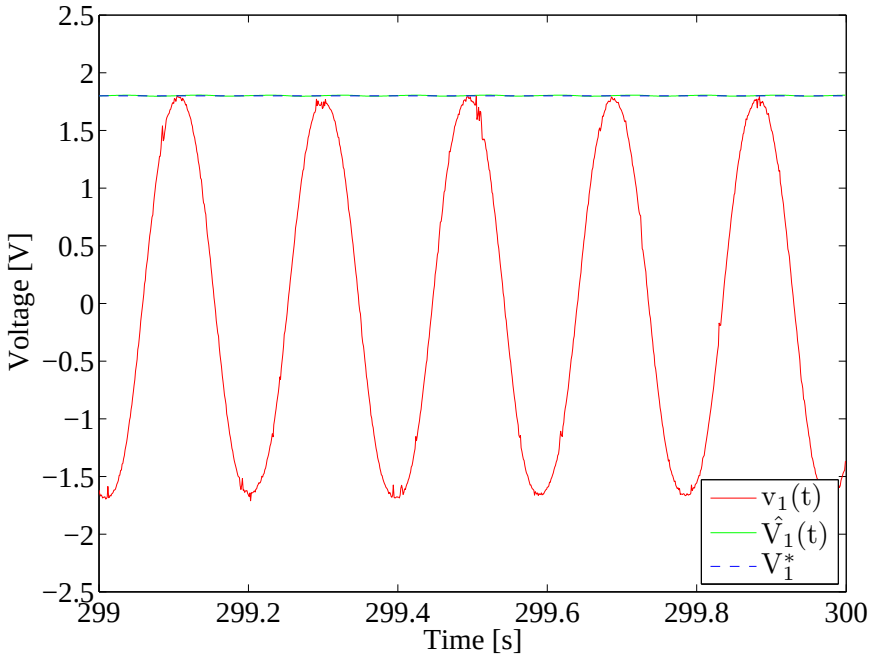

Fig. 3.7: Time response of X_0=0.02mm,K_P=10000,K_I=5000 (Enlarged view)

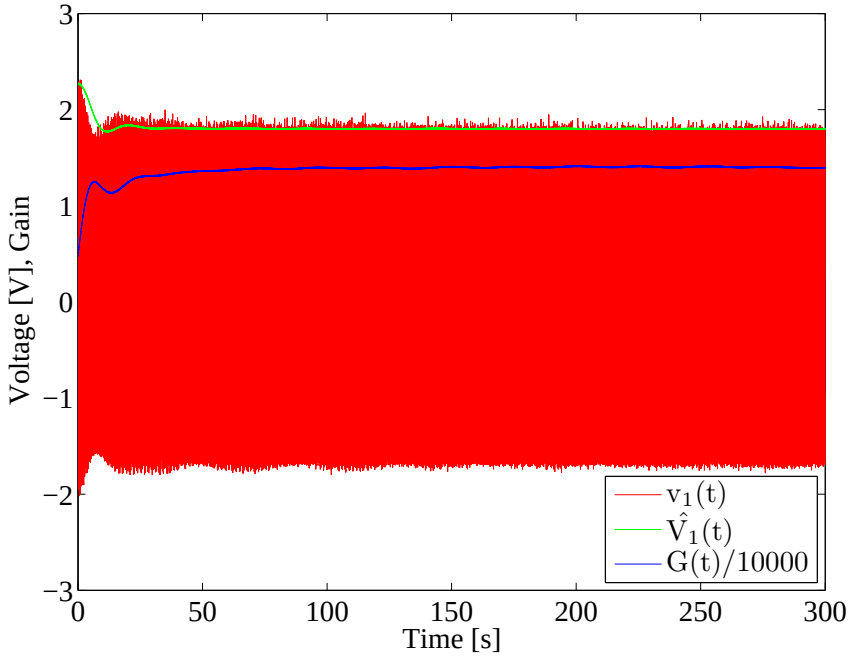

Fig. 3.8: Time response of X_0=0.03mm,K_P=10000,K_I=5000

続いて v_1 の振幅が目標値回りで振動する不安定な時間応答の例を Fig. 3.9， Fig. 3.10 に示す．K_P と K_I を試行錯誤で決定する際に得られた結果で，いずれも K_P よりも K_I を十分大きく設定した場合である．K_P よりも K_I を大きく設定した場合に不安定な時間応答が得られる結果は，対象は異なるが 2 章で示している安定条件や文献 [7] の熱音響自励発振現象に対して示されている安定条件に対して矛盾せず，このため本実験においても K_I が K_P より十分大きい場合に不安定な結果が得られると考えられる．

以上より，比例・積分ゲインを適切に設定すれば，定常発振制御系に基づいて振動発電機によるエネルギー散逸・生成を利用して，振動源の加振振幅によらず振動体の振幅を目標値一定に制御できることを示した．

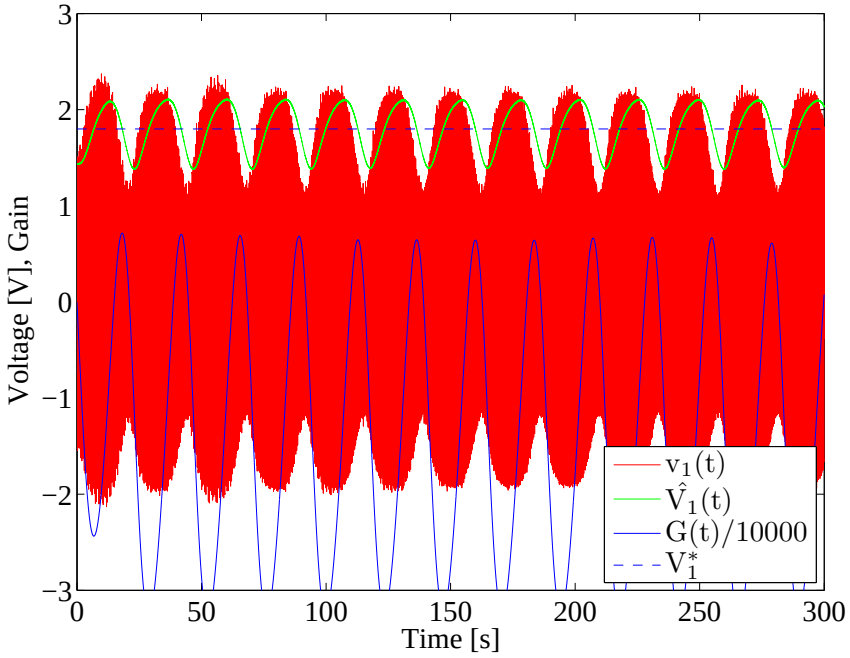

Fig. 3.9: Time response of X_0=0.02mm,K_P=100,K_I=15000

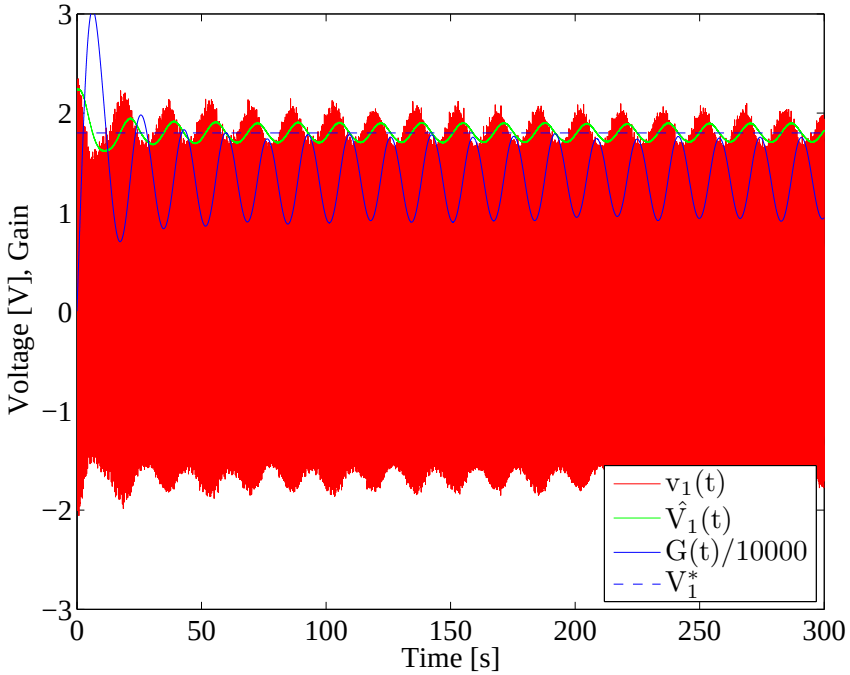

Fig. 3.10: Time response of X_0=0.03mm,K_P=100,K_I=17000

第4章　コンデンサによるエネルギー回収を用いた振動体振幅の制御

4.1　実験装置

4.1.1　装置構成

コンデンサを利用してエネルギー回収する実験装置の構成図を Fig. 4.1 に，装置を構成する主な機器の仕様をまとめたものを Table 4.1 に示す．実験装置は 3.1 節に示される実験装置の交流電源を，可変抵抗器やブリッジダイオード，コンデンサ等を含んだ回路に変更したものである．また，レーザー発生器と鏡と PSD（Position Sensitive Detector）の 3 つを用いていた振動体の変位計測系は，実験前にレーザーを PSD に入射させる作業に時間がかかり複雑で，これを単純化するため，CMOS タイプ マイクロレーザ測距センサ (Panasonic,HG-1030) に変更をした．$R_S(t)$ は可変負荷抵抗 $R(t)$ の指令信号，C はコンデンサ，V_c はコンデンサ両端の電圧を表す．抵抗は $R_1 = 1\mathrm{k}\Omega$ である．可変負荷抵抗器は，2 章と同じものを使用している．コンデンサ電圧 V_c はその端子両端を PC の AD ボードに接続し取得した．ただし，PC 側とグラウンドを分けるためその途中に差動増幅回路を導入している．その回路図を Fig. 4.2 に示す．図中の抵抗は全て $R = 100\mathrm{k}\Omega$ である．

Table 4.1: Experimental instruments

PC	Dell Dimension 2400(RTLinux-3.2pre3)
A/D	Contec, AD12-16(PCI) (12bit, 10μs)
PIO	Contec, PIO-32/32T(PCI), 32bit, 200ns
Disturbance Actuator	Orientalmotor, EZC4D005M-A Thrust 70N, Speed(max) 600mm/s
Driver	Orientalmotor, ESMC-C2
Laser	NEC, GLC5230
PSD	Hamamatsu Photonics, s3931
PSD Cicuit	Hamamatsu Photonics, C3683-01
Laser displacement sensor	panasonic, HG-1030
Vibration generator	Star Micronics, EH12 37 × 25 × 8mm, 5.36Hz(resonance)

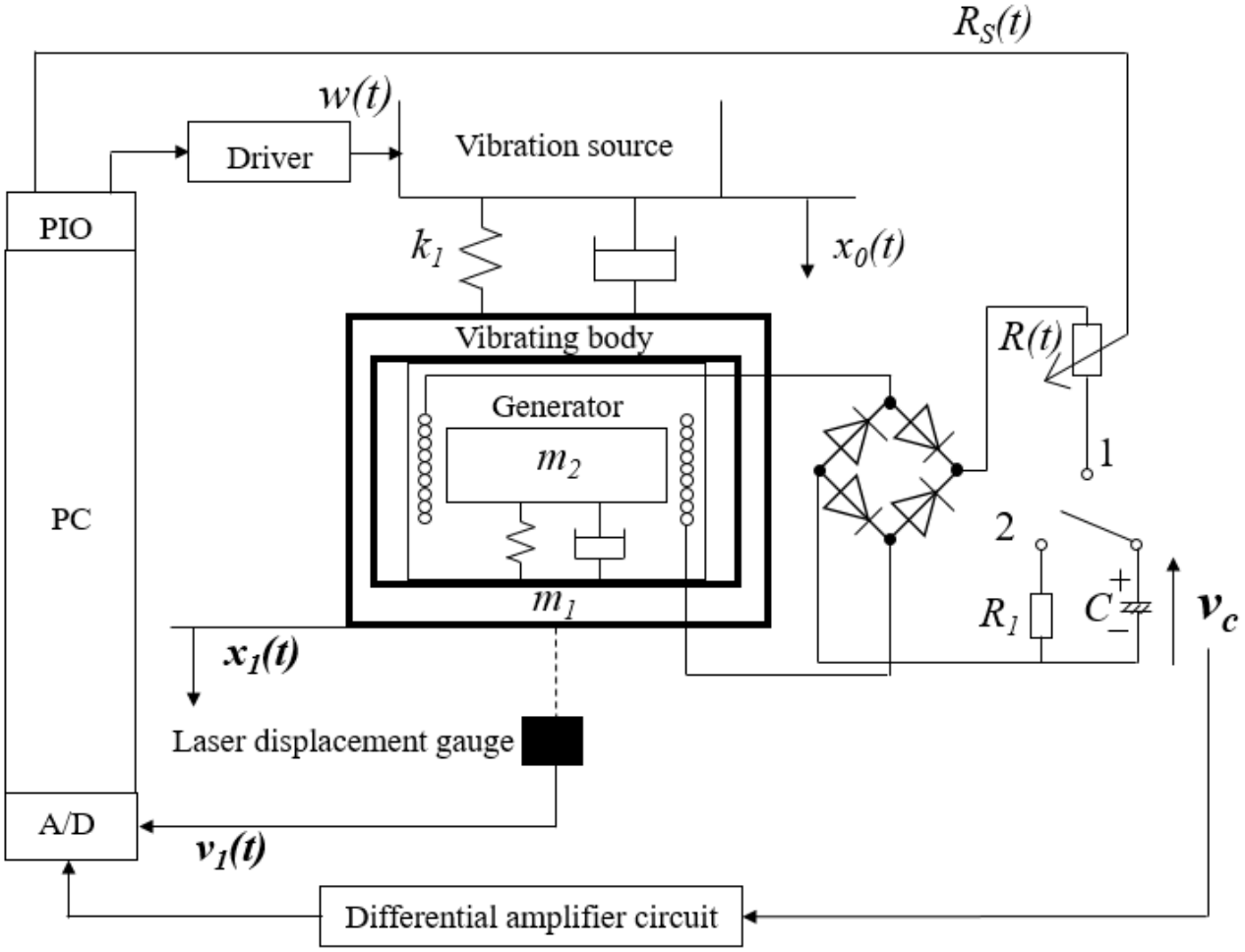

Fig. 4.1: Experimental apparatus

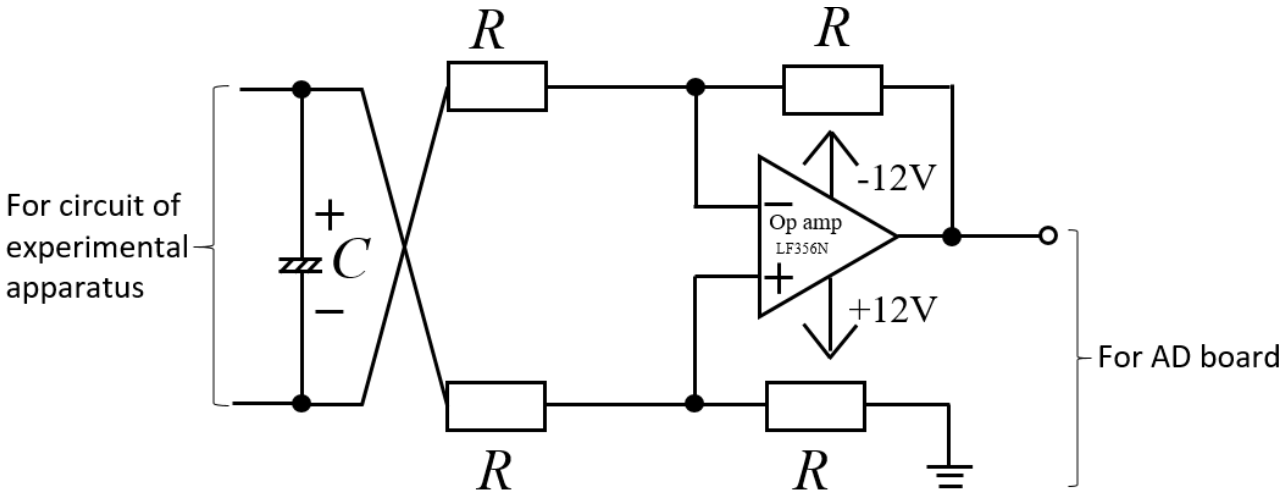

Fig. 4.2: Differential amplifier circuit

4.1.2　コンデンサを用いた場合の応答

第 2 章では振動発電機の端子間に抵抗を接続し，その抵抗値に応じた振動体振幅が得られている．このため，振動体振幅の大きさは発電機のコイルを流れる電流の大きさに相関があると考えられる．一方，本装置は，振動発電機で発生した電力がコンデンサに充電される際の充電電流を可変負荷抵抗で動的に変化させることで，発電機のコイルに流れる電流の大きさを調整し振動体振幅の制御を行おうとするものである．

この実現可能性について議論するため，抵抗値をマニュアル調整する予備実験を行った．予備実験では，振動体が振動源の振動によって揺れているとき，振動発電機に接続されているブリッジダイオードを含んだ回路が開放された状態 (Fig. 4.3(A)) からコンデンサを接続したとき (Fig. 4.3(B)) と，コンデンサと可変抵抗を直列に接続し (Fig. 4.3(C))，接続と同時に抵抗値をマニュアル調整したときの振動体振幅の応答を取得する．Fig. 4.3 の緑の破線で囲まれている部分は振動発電機，赤の点線で囲まれている部分はブリッジダイオードである．また，R' は可変抵抗 (ポテンショメータ)，C はコンデンサを表している．まず振動発電機に接続されているブリッジダイオードにコンデンサのみを接続した場合の振動体振幅の時間応答を Fig. 4.4 に示す．振動体変位の計測はリニアモータの駆動を開始した後，振動体の振動が定常状態になるまで待機してから行った．この実験で使用したコンデンサは 1100μF のものである．振動体に対する加振振幅は 0.05mm，加振周波数は 5.16Hz である．この実験は，前述した振動体の変位測定系に変更する前に行った実験で，第 2 章や第 3 章で示した装置に使われているものと同じものを使用している．

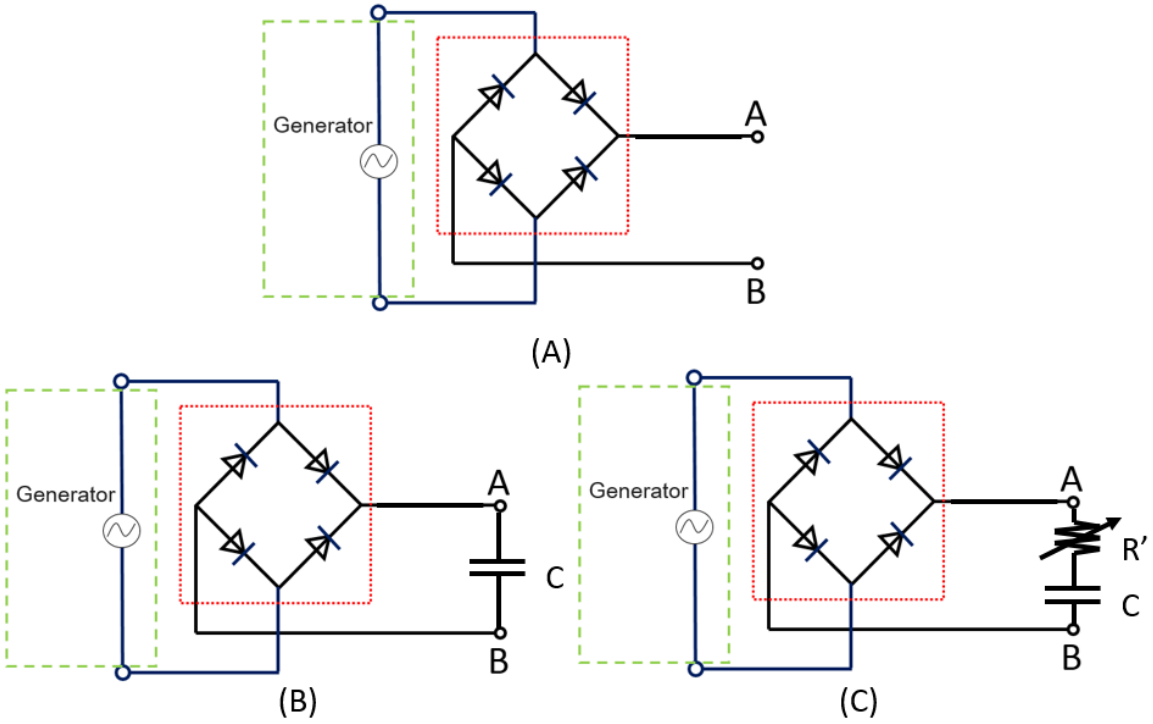

Fig. 4.3: Circuit setup

図中の赤線は振動体の変位電圧 v_1 を表し，緑の点線はその推定振幅 $\hat{V}_1$ を表す．コンデンサは Fig. 4.4 中の 20 秒の時点で端子 AB 間に接続した．第 2 章で述べたように，振動発電機のコイルに電流が流れると振動発電機内のマスの変動が抑制され，マスと振動体の相対変位が小さくなることによって発電機が振動体から吸収するエネルギーは減少する．Fig. 4.4 で 20 秒付近から振動体の振幅が大きくなっているのは，端子 AB 間に素子が接続され，電流が発電機のコイルに流れたためである．また，そこから徐々に振幅が小さくなっていき，50 秒付近から振幅がコンデンサ接続以前の大きさ程度に落ち着いているのは，コンデンサに電流が流れ，充電が進む過程で発電機のコイルを流れる電流が小さくなっていき，やがて電流が流れなくなる開放状態になるからであると考えられる．

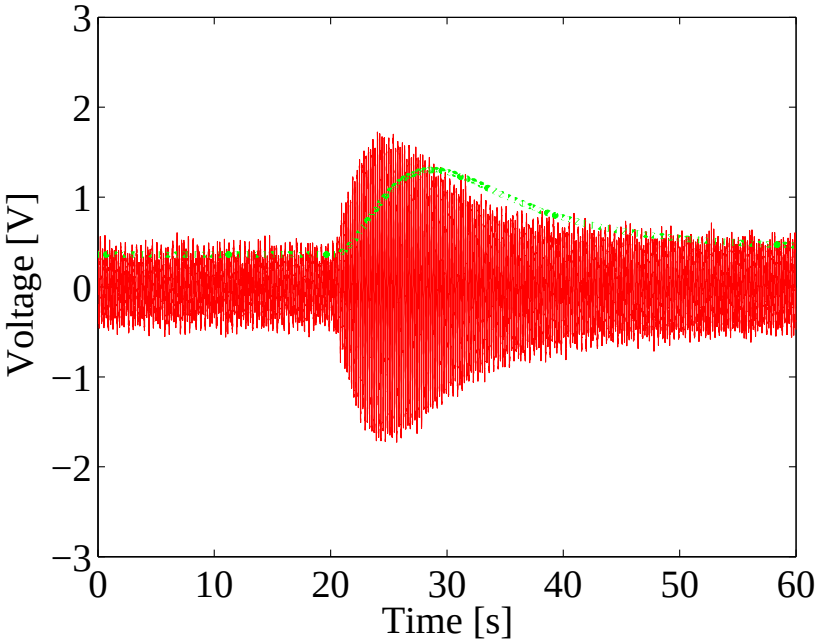

Fig. 4.4: Experimental result (Circuit setup (A to B))

次に Fig. 4.3(C) のようにコンデンサと可変抵抗を直列で接続し，抵抗値をマニュアル調整したときの振動体振幅の時間応答を Fig. 4.5 に示す．可変抵抗器には 20kΩ のポテンショメータを用いた (外観を Fig. 4.6 に示す).Fig. 4.5 中の 20 秒の時点でコンデンサと可変抵抗を端子 AB 間に接続した．また，接続時の可変抵抗器の値はその最大値 (20kΩ) であり，接続後 20 秒かけてできるだけ一定の速度になるように手動でゼロに変化させた．実験結果より，25 秒から 40 秒付近まで緩やかに振幅が上昇し，50 秒付近まで経過しても振幅がまだコンデンサ接続以前よりも大きいことがわかる．これは，抵抗値の回路を流れる電流が可変抵抗によって調整されること，それによってコンデンサの充電速度が緩やかになるためであると考えられる．

以上より，コンデンサに十分電荷がたまるまでの間であれば，抵抗値を操作し，流れる電流を調整することによって所望の振動振幅の実現が期待できる．

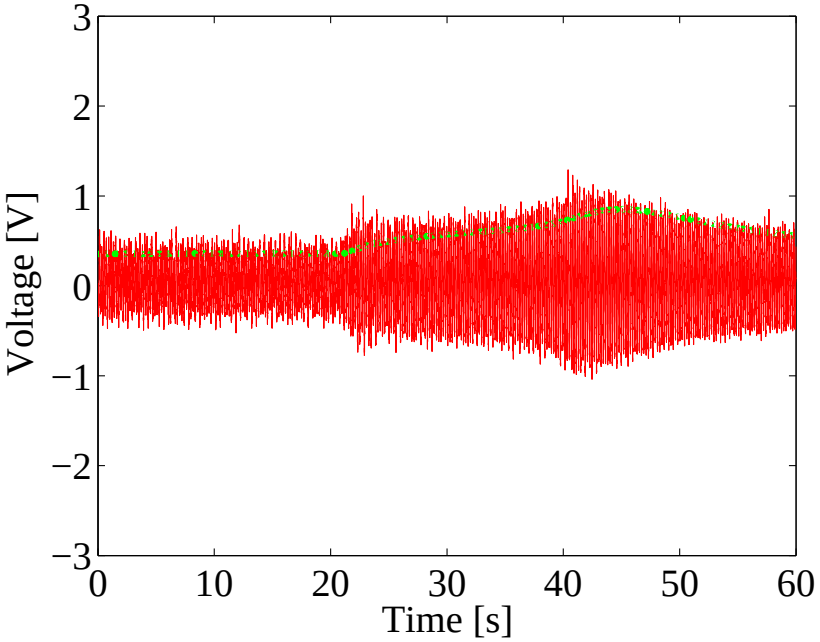

Fig. 4.5: Experimental result (Circuit setup (A to C))

Fig. 4.6: Variable resistance

4.1.3　定常発振制御系の構成

3.1.1 章の装置と同様に，v_1 は振動体の変位に比例するため，振動体の変位振幅を目標値に制御する代わりに，v_1 の振幅を目標値 V_1^* に制御することを考える．Fig. 4.7 に制御系のブロック線図を示す．v_1 の振幅を目標値 V_1^* 一定とするように抵抗指示値 $R_S(t)$ を動的に調整する負荷のフィードバック制御系である．

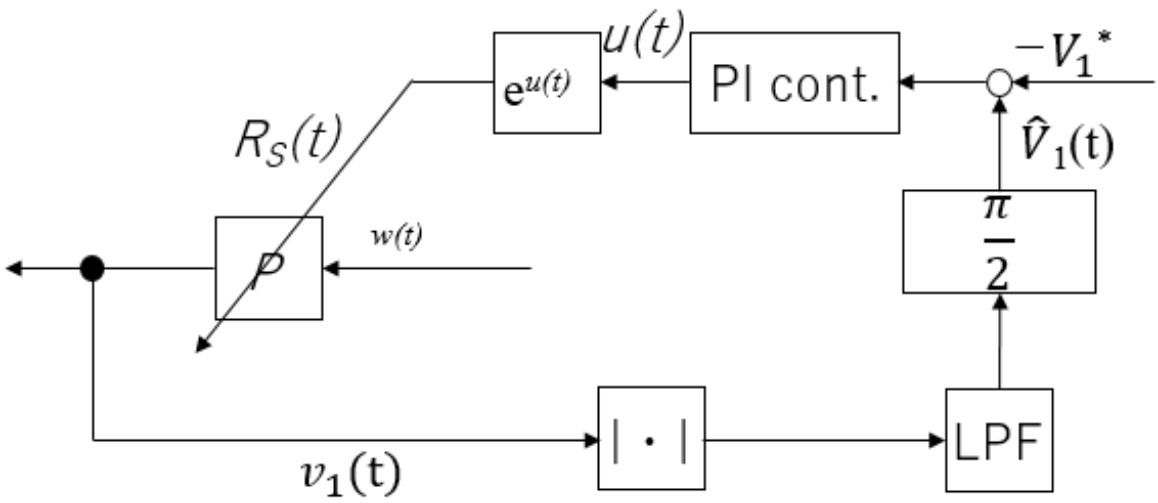

Fig. 4.7: Block diagram of experimental apparatus

4.2　実験結果

エネルギー回収をしつつ，振動振幅を一定にできることを実験的に示す．エネルギーの回収を行う素子としてコンデンサを使用する．制御はリニアモータの駆動を開始した後，振動体の振動が定常状態になるまで待機し，計測を始めてから 20 秒で開始している．コンデンサは端子両端を $R = 1\mathrm{k}\Omega$ の抵抗に接続し放電を行ってから，可変抵抗器と同時に，計測を始めてから 20 秒で接続している．使用したコンデンサは 6600μF で，加振振幅は 0.05mm，加振周波数は 5.16Hz である．実験結果を Fig. 4.9〜Fig. 4.15 に示す．赤線は振動体の変位，緑の線は振動体の推定振幅，青線は可変抵抗への指示値，またはコンデンサ両端の電圧 V_C を表している．青の破線は振幅の目標値を表したものである．振幅の目標値は 0.12V とした．

Fig. 4.8〜Fig. 4.10 は後の実験結果と比較するため”制御なし”の実験で，比例ゲイン $K_P = 0$，積分ゲイン $K_I = 0$ としたときの結果である．このとき，PI 補償器からの出力の値は常に $u \equiv 0$ となることから，$R_S(t)$ の値は常に $R_S(t) \equiv e^u = 1$ となる．コンデンサと抵抗を接続した直後である 20 秒付近で振動振幅は最大値に達し，その後徐々に振幅が小さくなっていることがわかる．一方で，コンデンサの電圧 V_C は 0 から約 0.9V まで上昇していることがわかる (また，後述するようにおよそ幅 0.1V のノイズがみられる)．この結果より，抵抗値の操作がなくても，振動体の振幅はコンデンサの充電が進むにつれて小さくなっていくことがわかる．コンデンサの電圧 V_C について述べる．Fig. 4.8 の拡大図である Fig. 4.10 より，約 0.9V の線から上下におよそ幅 0.1V で伸びている針状のものであることがわかる. このノイズのように見えるものは，実験開始前の状態 (加振なし，抵抗開放，コンデンサ放電済み) でも見られるため，本論文で V_C について述べるときはこれについて無視し，V_C はカットオフ角周波数 1rad/s のローパスフィルターによってフィルタ処理をした値を読み取る．V_C についてフィルタ処理を施した後を Fig. 4.11，Fig. 4.12 にそれぞれに桃色線で示す．

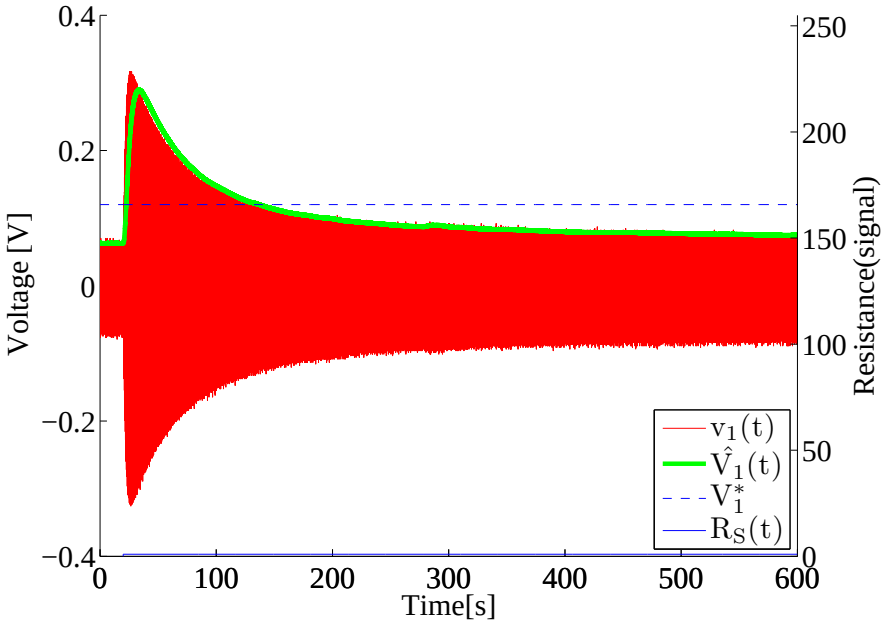

Fig. 4.8: $K_P = 0, K_I = 0$[1]

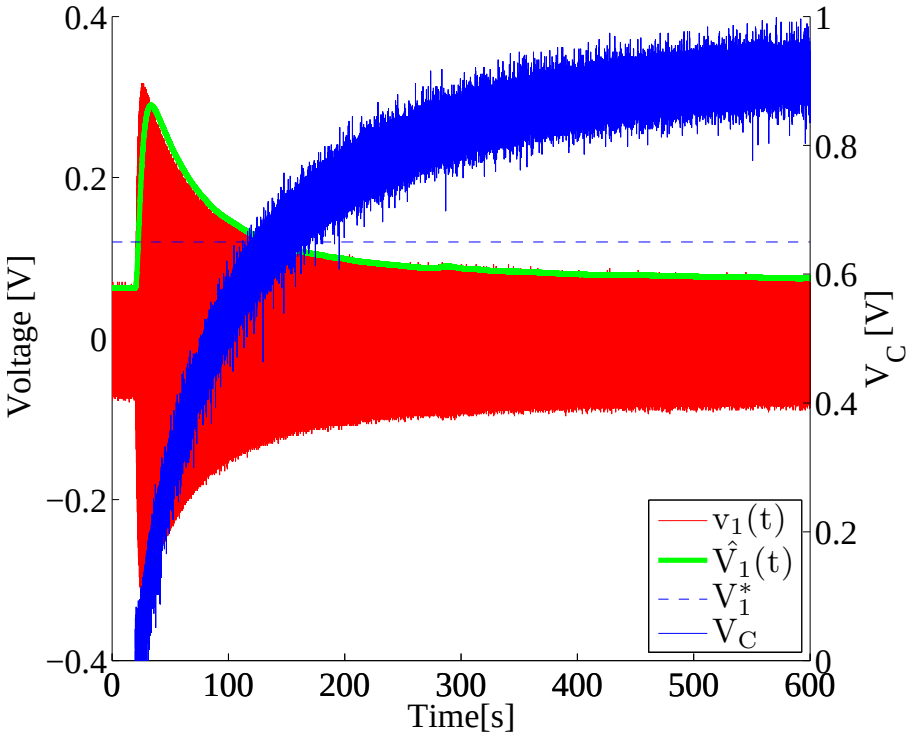

Fig. 4.9: $K_P = 0, K_I = 0$[2]

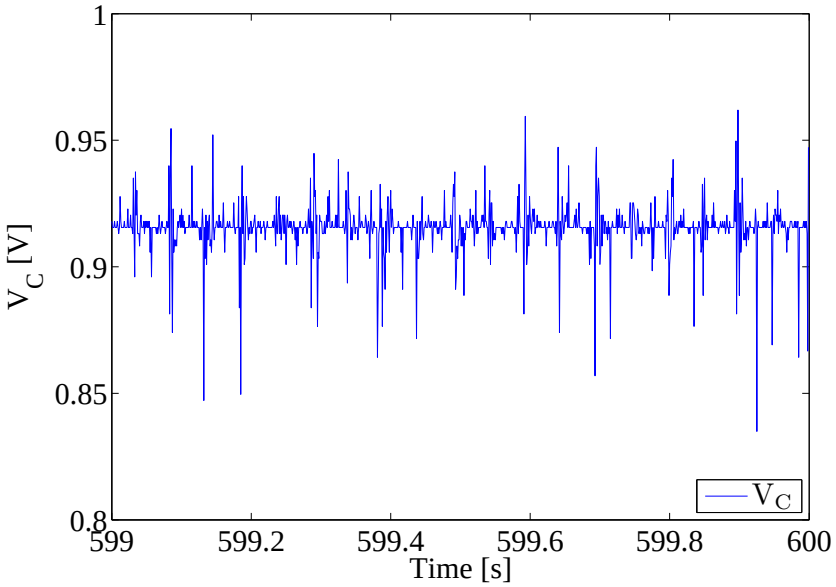

Fig. 4.10: $K_P = 0, K_I = 0$(Enlarged view)

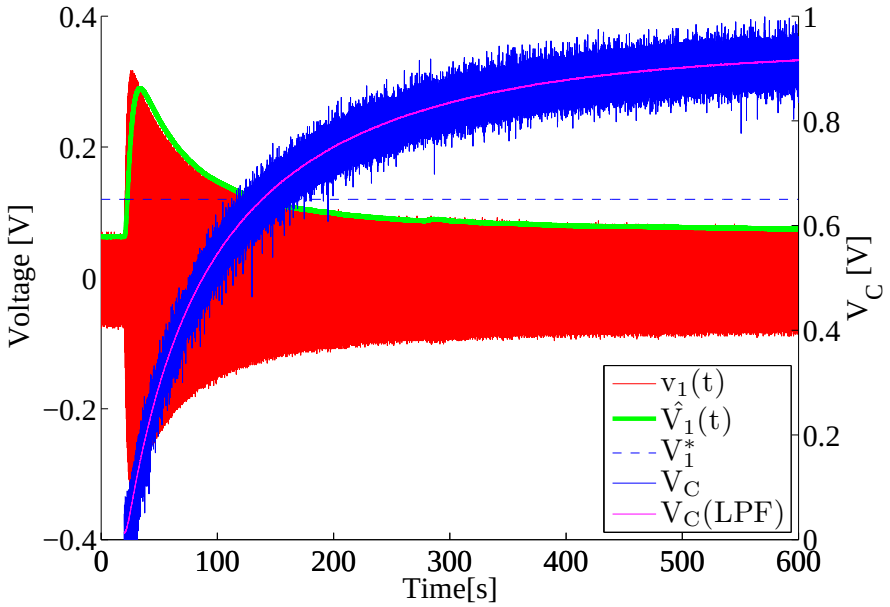

Fig. 4.11: $K_P = 0, K_I = 0$[2] with LPF

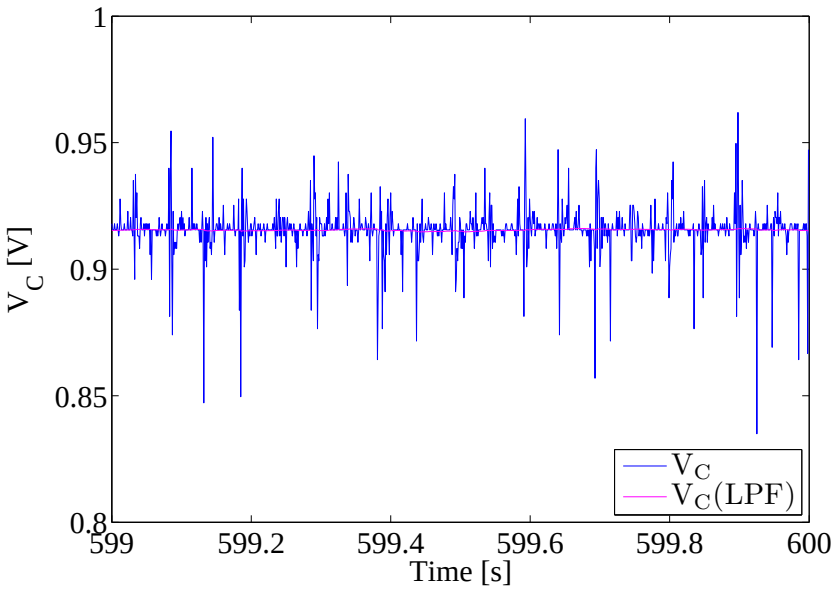

Fig. 4.12: $K_P = 0, K_I = 0$(Enlarged view) with LPF

次に，比例ゲインと，積分ゲインを変更し行った結果について述べる．Fig. 4.13〜Fig. 4.15 では比例ゲインと，積分ゲインはそれぞれ $K_P = 1$，$K_I = 6$ で実験を行っている．Fig. 4.13 より，70 秒付近から 200 秒付近まで，振動体の振幅がほぼ目標振幅一定で落ち着いていること，また 200 秒から振幅が目標値から離れていくように見える．抵抗指示値は 70 秒付近から徐々に低下していき，およそ 260 秒の時点でゼロになっている．また，Fig. 4.14 よりコンデンサの電圧は 70 秒付近からほぼ一定に上昇しているように見える．

一方で，Fig. 4.13〜Fig. 4.14 の拡大図である Fig. 4.15 を見ると，振動振幅は一瞬目標値付近に到達し，その後は徐々に右肩下がりで偏差を拡大していき，200 秒付近から偏差が拡大するスピードが増しているように見える．偏差を小さくするために積分ゲイン K_I を上げていった結果を Fig. 4.16 に示す．Fig. 4.16 より積分ゲイン K_I を上げると，全体的に振動体振幅が目標値に近づく傾向ある．一方で，振動振幅の右肩下がりに偏差を拡大する傾向は変わっておらず，偏差が拡大するスピードが途中からは増している傾向も同じである．

$K_I = 8, 10, 15$ での振動体振幅，コンデンサ電圧を重ねて示した図と，振動体振幅，抵抗指示値を重ねて示した図を，Fig. 4.17-Fig. 4.22 にそれぞれ示す．Fig. 4.17，Fig. 4.18 より，80 秒あたりから抵抗値が徐々に低下していき，250 秒付近でゼロになっている．振幅は 80 秒付近から徐々に目標値から遠ざかり，220 秒あたりからはそのスピードが早まる．また，220 秒あたりのコンデンサ電圧はおよそ 0.6V で，そこからもほぼ一定に上昇し続けている．これについては Fig. 4.19〜Fig. 4.22 においても同じような傾向が見られる．

ここまでに示した実験結果について振動発電機に接続された回路の模式図である Fig. 4.23 より考察を行う．時間が進むにつれて V_C が大きくなっていけば可変負荷抵抗の電圧 V_R は徐々に小さくなり，同時に，このときの抵抗値が一定なら電流も V_R とともに小さくなっていくと考えられる．Fig. 4.9，Fig. 4.8，Fig. 4.11 において V_C が大きくなるにつれて振動振幅が小さくなっていくのはこれに整合する．一方で抵抗値が一定でなく操作可能であれば，抵抗値を小さくしていけば電流の大きさを調整できると考えられる．K_P，K_I をそれぞれゼロより大きく設定した実験において，振動体の振幅を目標振幅付近に調整できたことはこれと整合する．振動体の振幅が徐々に目標振幅から遠ざかる現象は，コンデンサに充電される速度に対し，抵抗値を引き下げる速度が徐々に遅れていき，電流が徐々に下がり続けるからであると考えられる．さらに途中から振動振幅が目標値から離れるスピードが増加することについては，目標値から離れるスピードが増加した時点からも抵抗値はそれ以前と似たようなスピードで下がり続けていること，

そして V_C の大きさは増え続けている事から，振動発電機はある限界値を持つ定電力源であり，V_C が上昇していくことによってコンデンサに電流を流すために必要な電力が振動発電機の持つ電力の限界を迎えて，その影響によっても電流が下がり始めるからであると考えられる．また，Fig. 4.14 において振幅が目標値から離れていく 200 秒付近での V_C の大きさはおよそ 0.6V であった．さらに Fig. 4.17-Fig. 4.22 においても同じような傾向がみられることから，この電圧を迎えた時に．電力が限界値を迎えたことが考えられる．

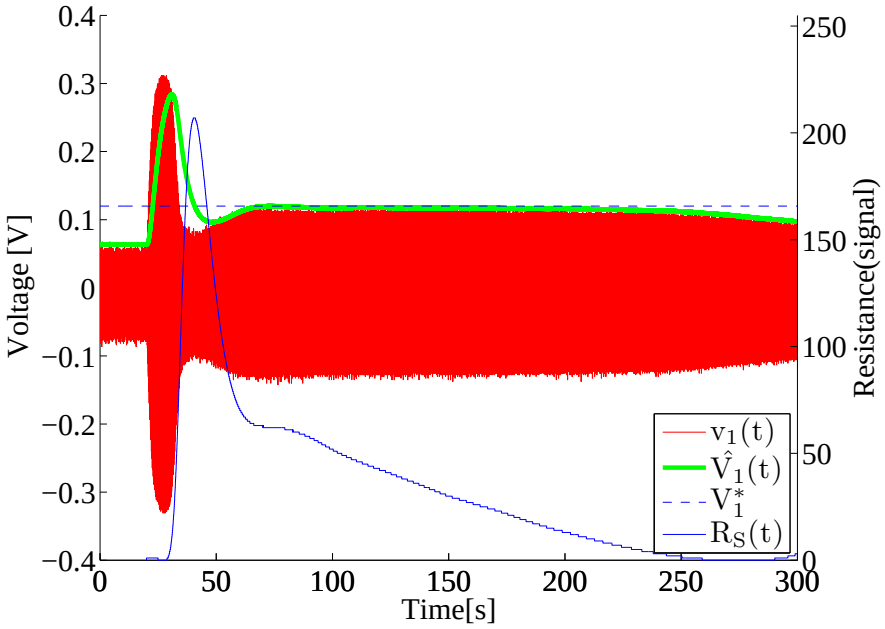

Fig. 4.13: Time response of K_P=1,K_I=6

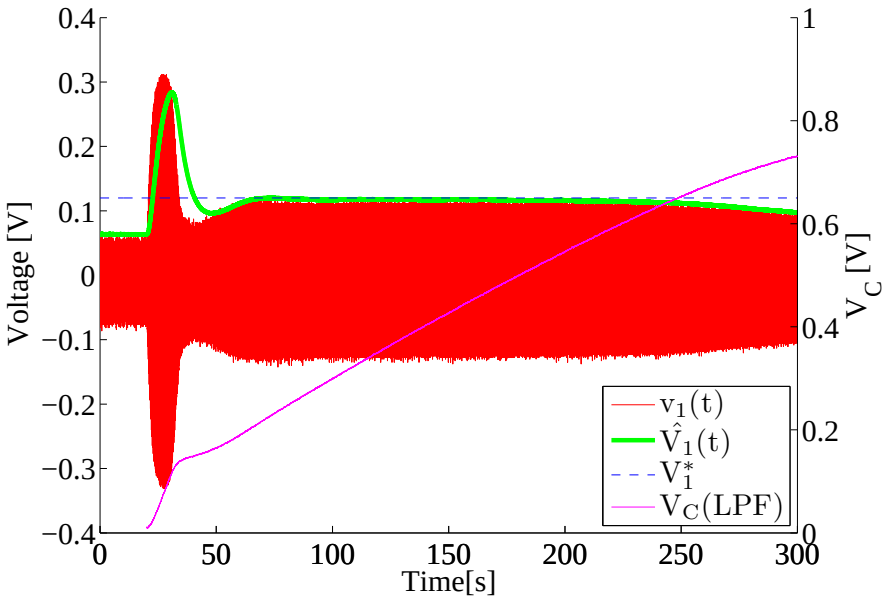

Fig. 4.14: Time response of K_P=1,K_I=6

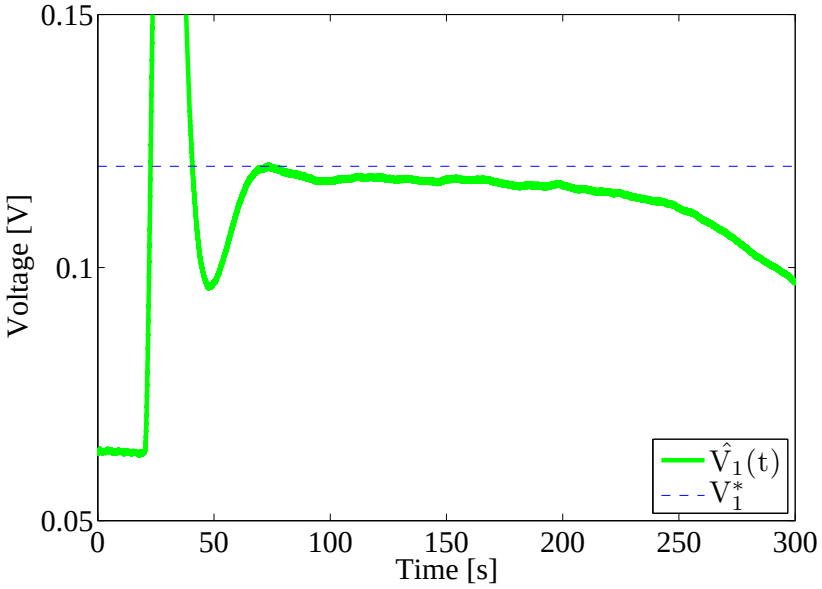

Fig. 4.15: Time response of K_P=1,K_I=6(Enlarged view)

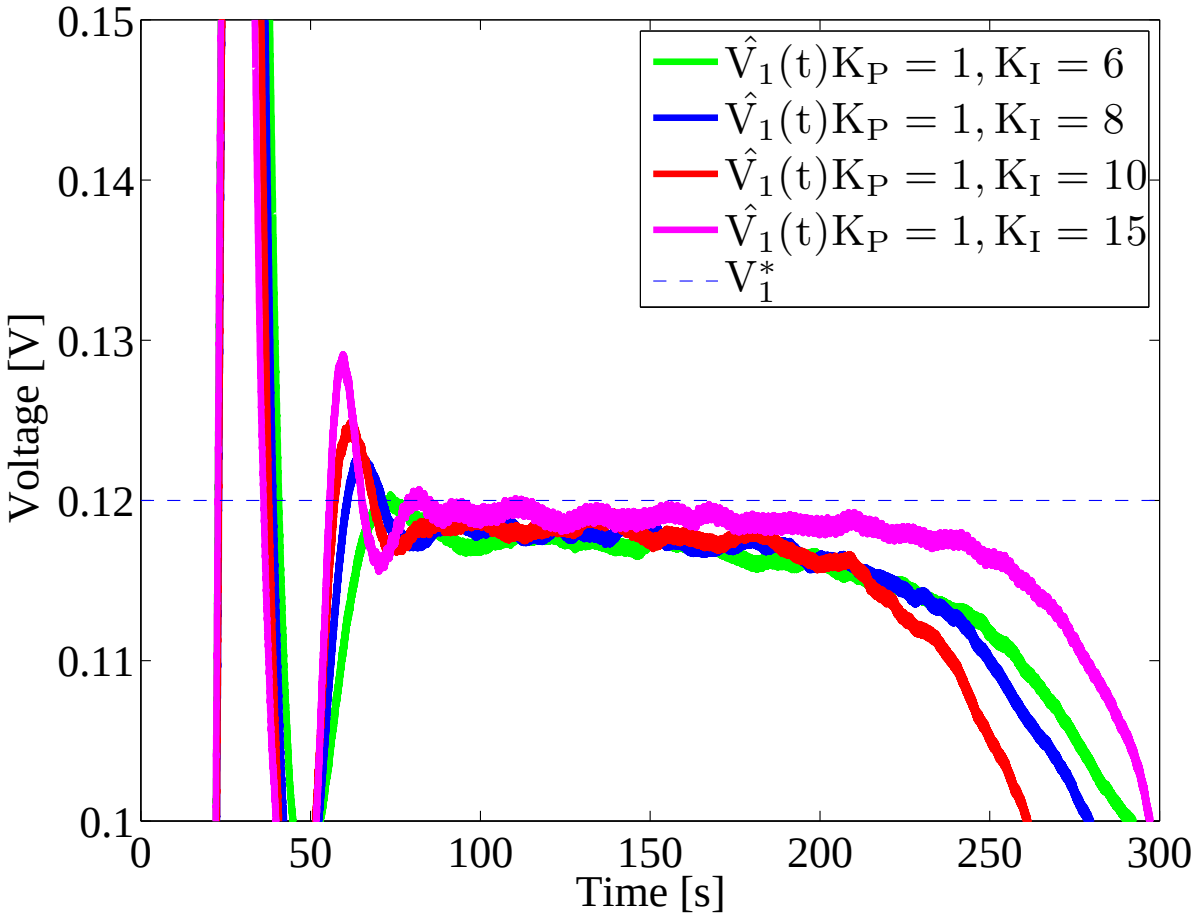

Fig. 4.16: Time response of $\hat{V}_1$ for K_P=1,K_I=6,8,10,15

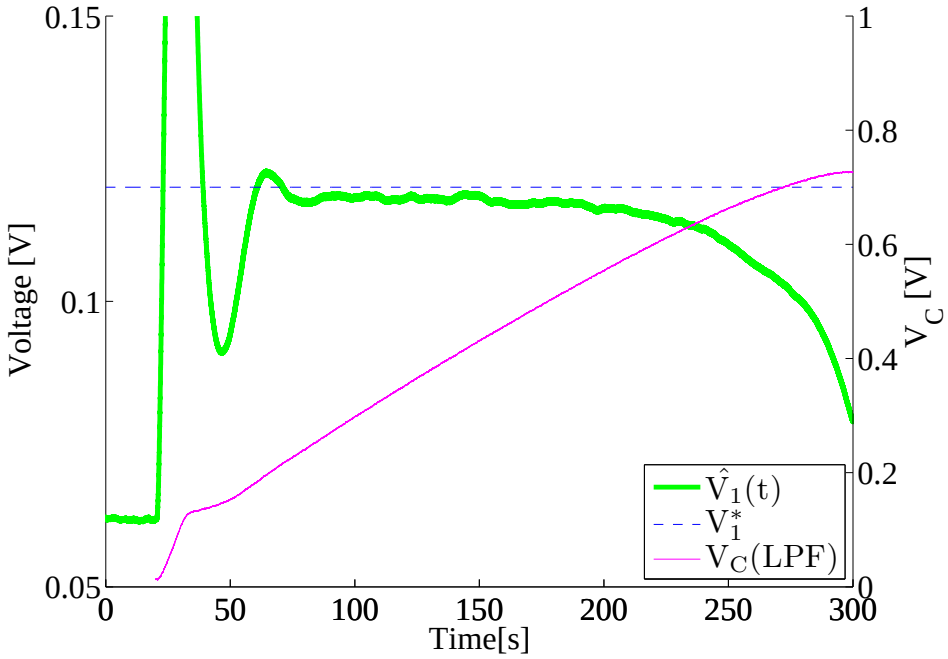

Fig. 4.17: Time response of K_P=1,K_I=8(Enlarged view)

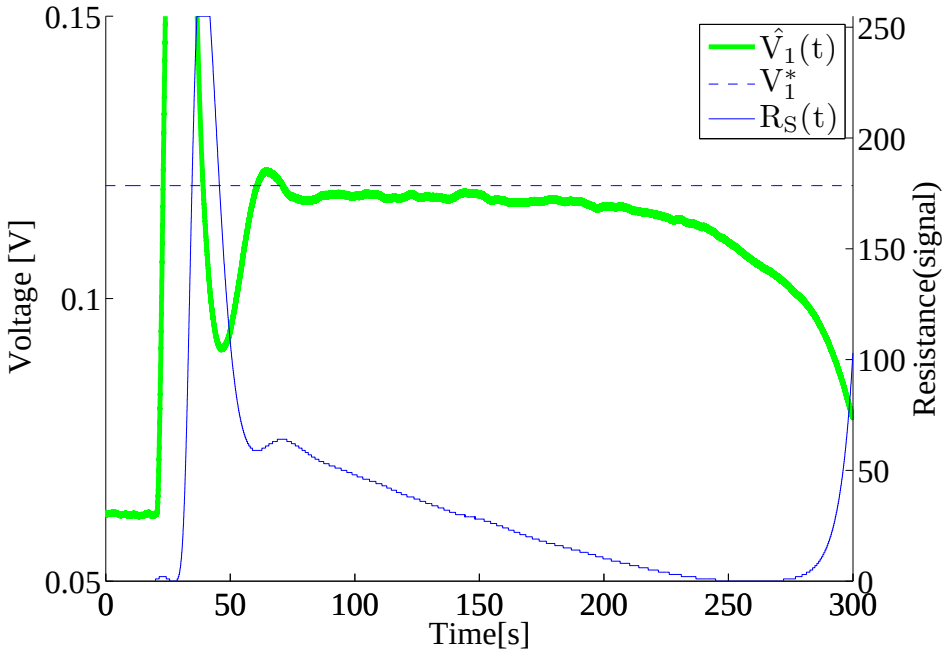

Fig. 4.18: Time response of K_P=1,K_I=8(Enlarged view)

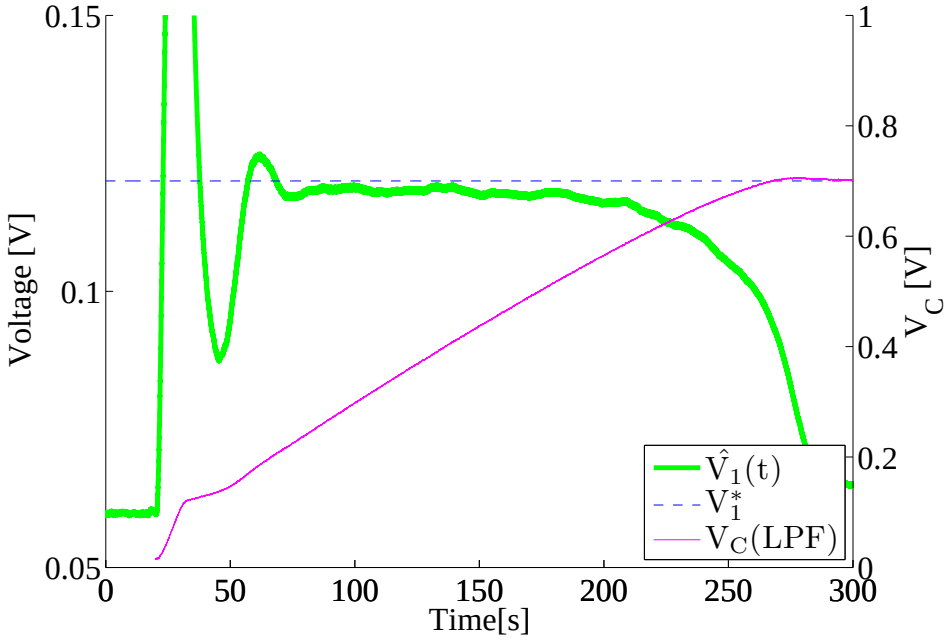

Fig. 4.19: Time response of K_P=1,K_I=10(Enlarged view)

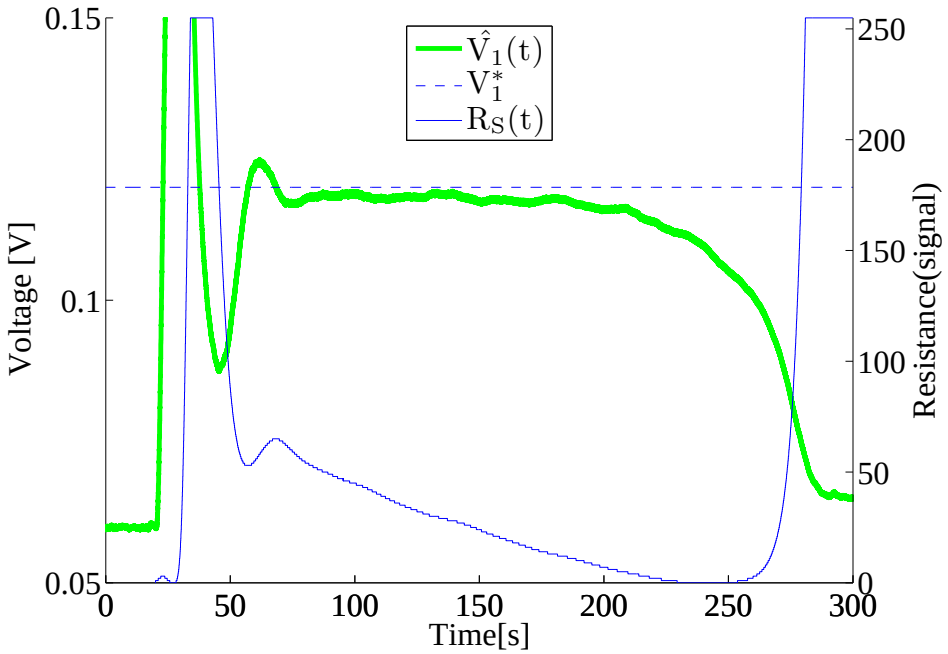

Fig. 4.20: Time response of K_P=1,K_I=10(Enlarged view)

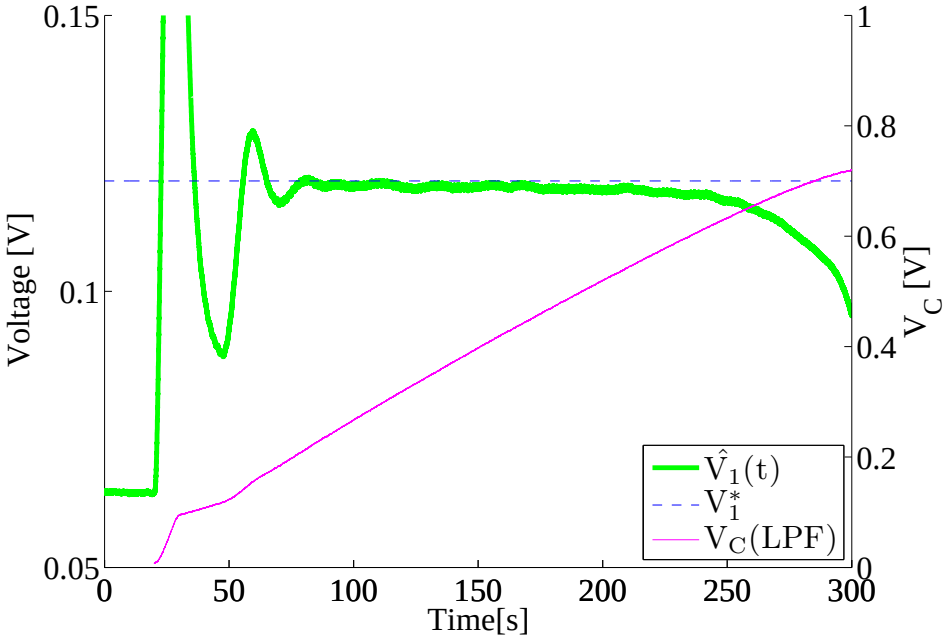

Fig. 4.21: Time response of K_P=1,K_I=15(Enlarged view)

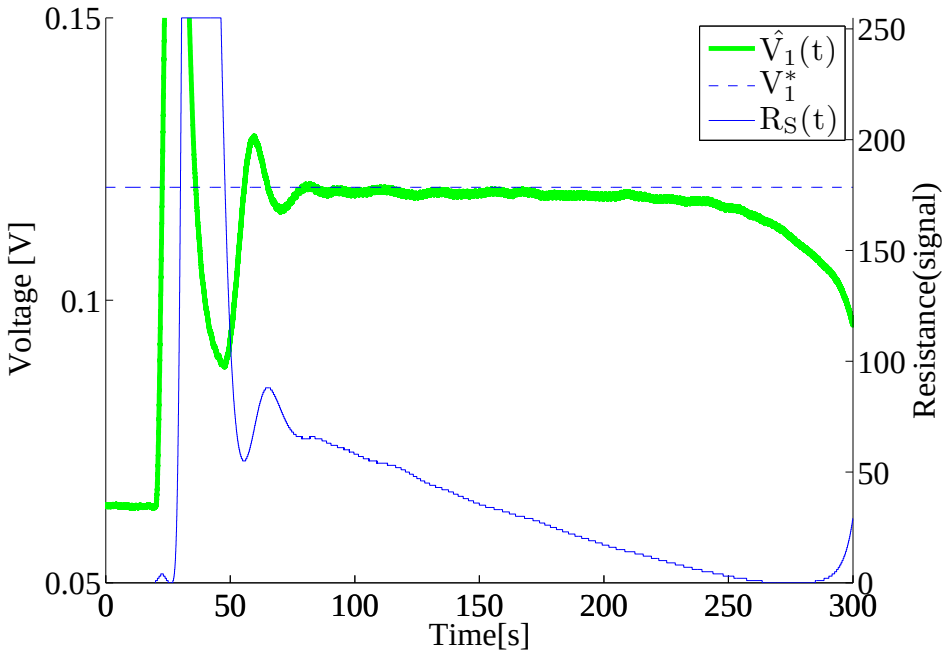

Fig. 4.22: Time response of K_P=1,K_I=15(Enlarged view)

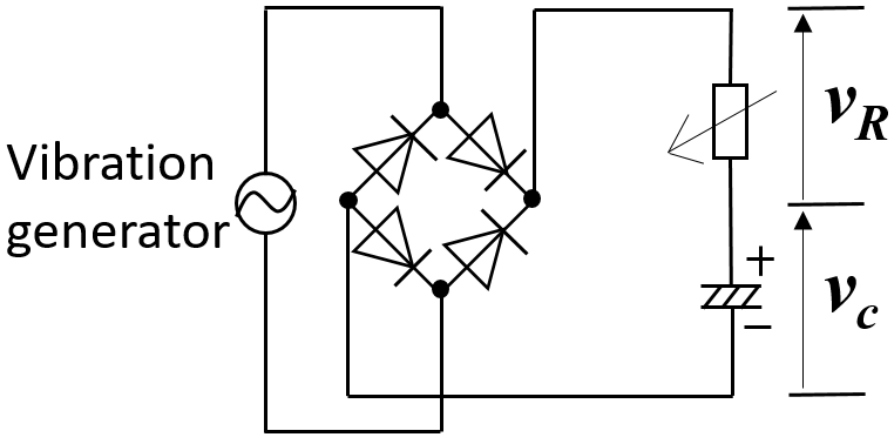

Fig. 4.23: circuit of Experimental apparatus

振動体の振幅が十分に目標値に追従できていない理由として，2 章で示されている実験の振動体の振動振幅は，時刻 t によって変化しない定数であり，対して本実験での振動体の振動振幅は，抵抗値を操作しなくても時間が経過するにつれて徐々に減少していく t の関数であるからだと考えられる．よって，ランプ状の目標値信号に対して 1 型のサーボ系 (PI 制御系) による定常偏差が 0 とはならないことと同様に，振動振幅に定常偏差が残っていると考えられる．そこで，PI 補償器に 2 重積分器を追加し，以下の式のようにして，新たに実験を行った．

$$u = K_P e + K_I \frac{e}{s} + K_{I2} \frac{e}{s^2} \tag{4.1}$$

ここで, u は PI 補償器の出力, e は偏差である．比例ゲインと, 積分ゲインはそれぞれ $K_P = 1$, $K_I = 15$ で, 新たに 2 重積分器のゲインを $K_{I2} = 0.1$ と設定し, 実験を行った．その実験結果を Fig. 4.24, Fig. 4.25 に示す．実験結果より，80 秒付近から振動体振幅は徐々に目標値に近づいていくように見える．さらに 2 重積分器のゲインを上げ $K_{I2} = 0.3$ とした実験結果を Fig. 4.26，Fig. 4.27 に示す. 振動体振幅が目標値に近づいていく傾向はより強くなり，近づいてから目標値で落ち着いてるように見える．振動体振幅が目標値に近づいていく傾向は 2 重の積分器を追加する以前の実験では見られなかった傾向である．2 重積分器あり無しを比較した Fig. 4.28 においてもその傾向の違いはよくわかる．2 重の積分器を追加する以前の実験で，振動体振幅が徐々に目標値から遠ざかる現象はコンデンサに充電される速度に抵抗値が十分に追従できていないからであると考えられることから，2 重の積分器を追加したことで見られる現象も，抵抗値の追従する速度による効果であると考えられる．この考察の妥当性を確かめるため，2 重積分器追加前後での抵抗指示値の比較を行った．結果を Fig. 4.29 に示す．

Fig. 4.29 において抵抗指示値がおおよそ一定に減少している範囲である 120 秒から 250 秒あたりを見比べてみると，途中までは線の傾きは同様で，200 秒あたりから徐々に，2 重積分器追加前の抵抗指示値の減少がより緩やかになっているように見える．2 重積分器のゲインを上げ $K_{I2} = 0.3$ とした結果と 2 重積分器追加前の $R_S(t)$ の傾向を比較した図を Fig. 4.30，Fig. 4.31 に示す，Fig. 4.31 では，抵抗指示値 $R_S(t)$ のおおよそ一定に減少している範囲での比較をしやすくするため，Fig. 4.30 での $K_P = 1$, $K_I = 15$ の結果を 16 秒分だけマイナス方向にシフトしている．Fig. 4.31 でも途中までは線の傾きは同様で，130 秒あたりから徐々に，2 重積分器追加前の抵抗指示値の減少がより緩やかになっているように見える．Fig. 4.29〜Fig. 4.31 の比較より．2 重積分器の追加によって振動体振幅が目標値に近づいていく現象は，2 重積分器後は追加前と比べて，抵抗指示値の減少する速度がより速い状態を維持するため

であると考えられる．一方で振動振幅が目標値から急に離れ始めるとき (Fig. 4.24〜Fig. 4.25 において 230 秒付近.Fig. 4.26〜Fig. 4.27 において 220 秒付近) のコンデンサ電圧は Fig. 4.24，Fig. 4.26 よりおよそ 0.6V で，これは 2 重積分器を追加する前の実験と同様な傾向である．以上の結果より，二重積分器を追加することで振動振幅は目標値に近づいていき，コンデンサ電圧がおよそ 0.6V に達するまでその傾向を維持，または目標値で落ち着く傾向がみられるため，したがって，充電が十分進むまでは振幅の制御が可能になると考えられる．

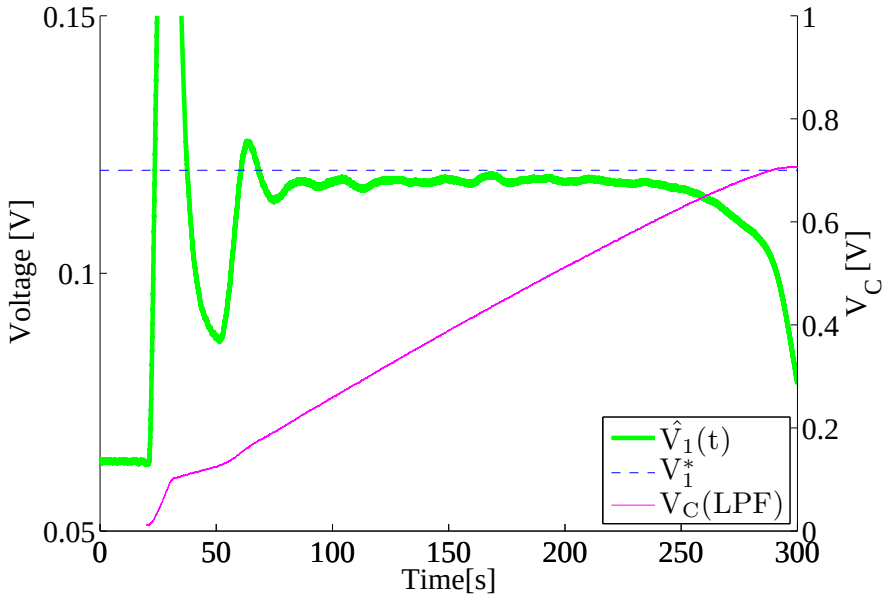

Fig. 4.24: Time response of K_P=1,K_I=15,K_{I2}=0.1[1](Enlarged view)

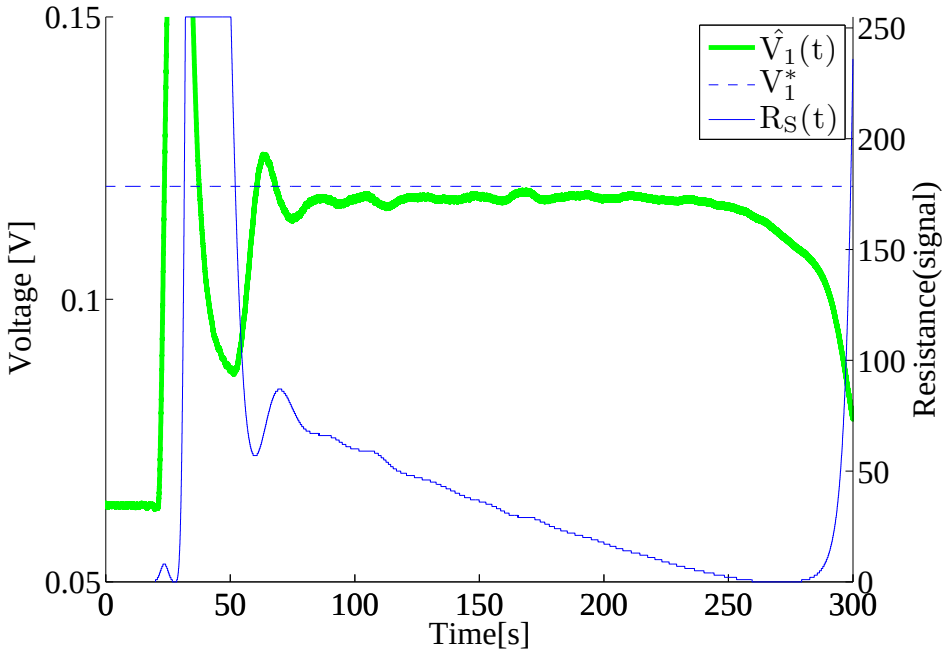

Fig. 4.25: Time response of K_P=1,K_I=15,K_{I2}=0.1[2](Enlarged view)

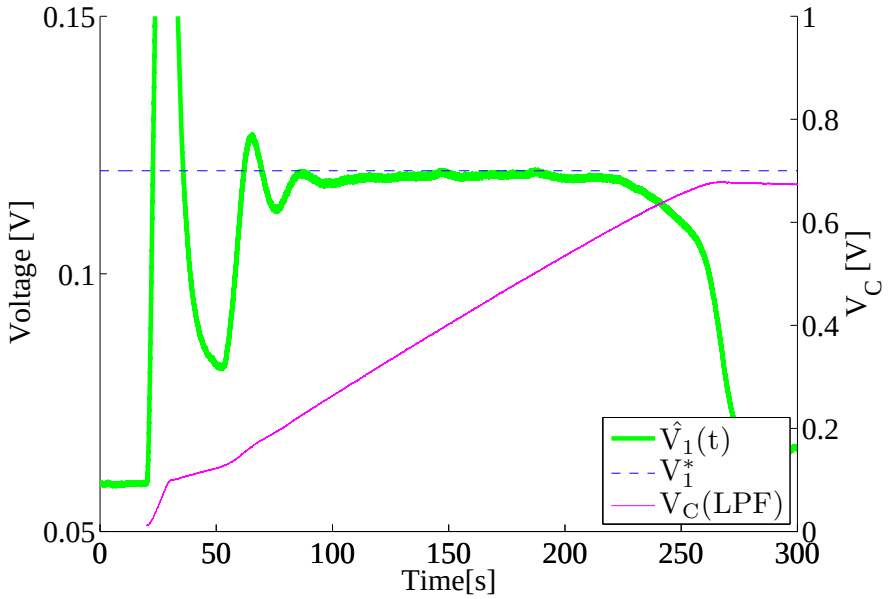

Fig. 4.26: Time response of K_P=1,K_I=15,K_{I2}=0.3[1](Enlarged view)

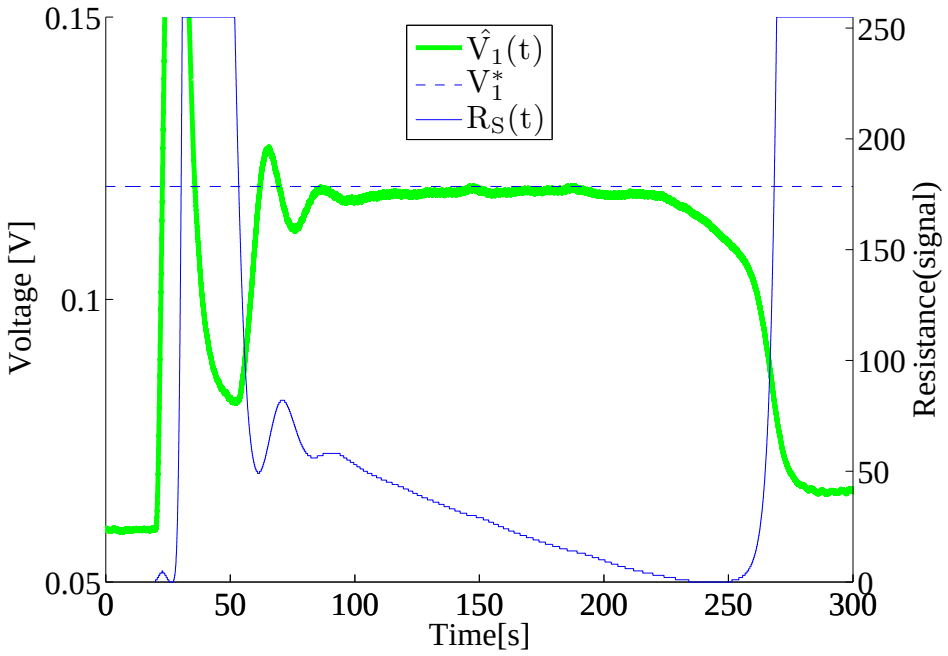

Fig. 4.27: Time response of K_P=1,K_I=15,K_{I2}=0.3[2](Enlarged view)

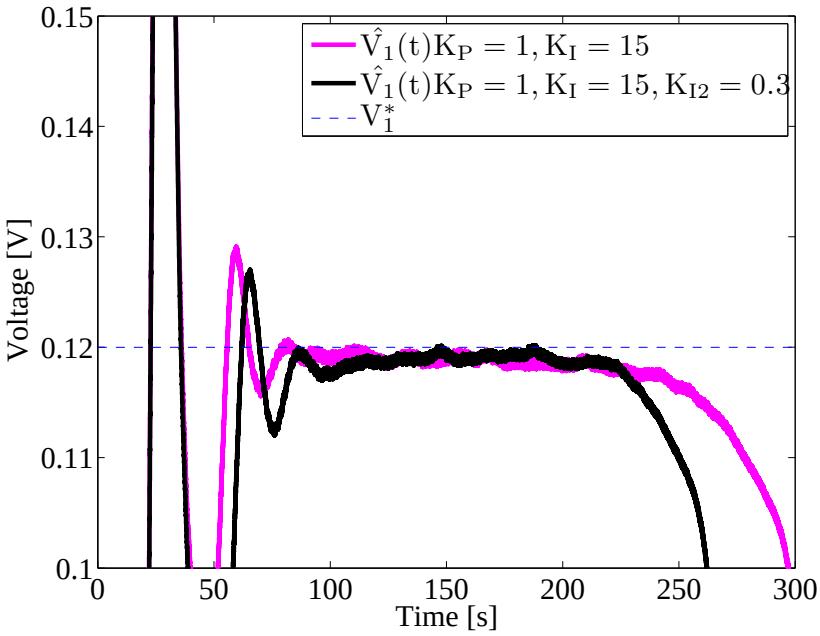

Fig. 4.28: Comparison $\hat{V}_1$

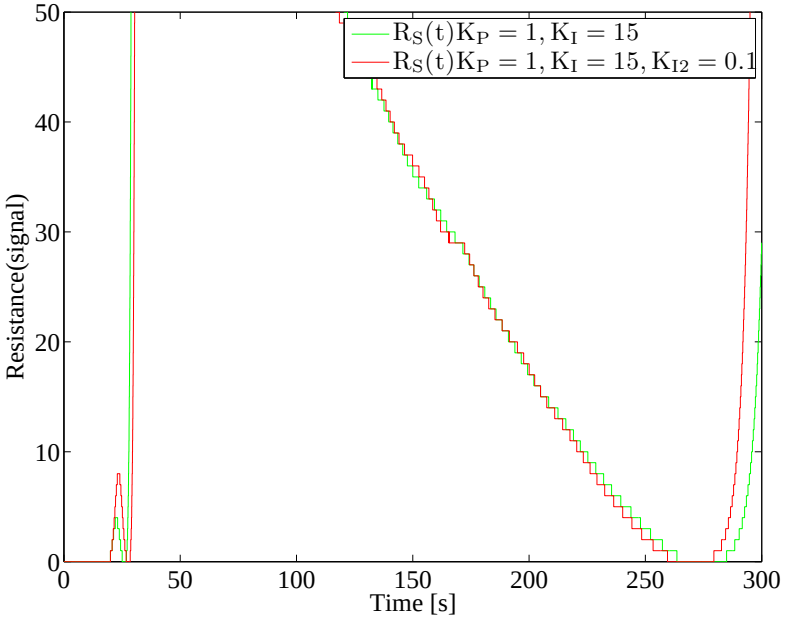

Fig. 4.29: Comparison $R_S(t)$[1]

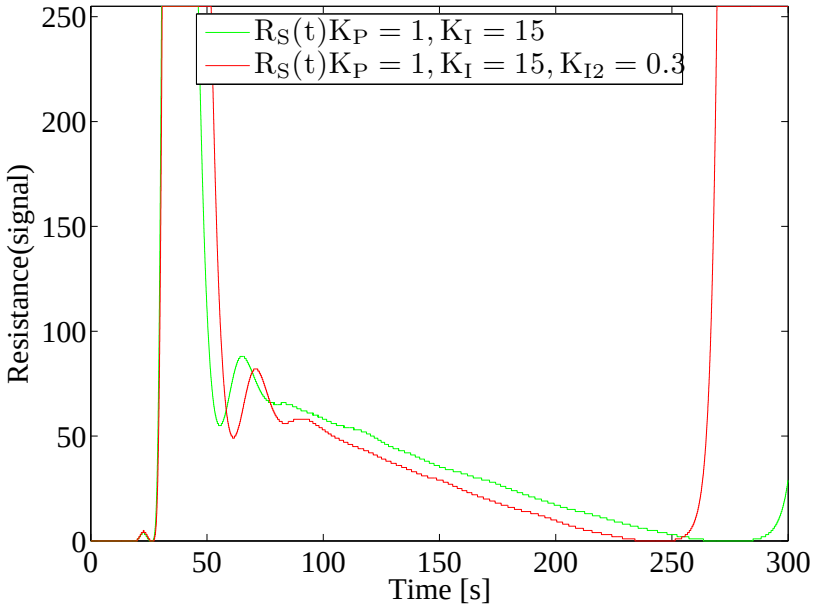

Fig. 4.30: Comparison $R_S(t)$[2]

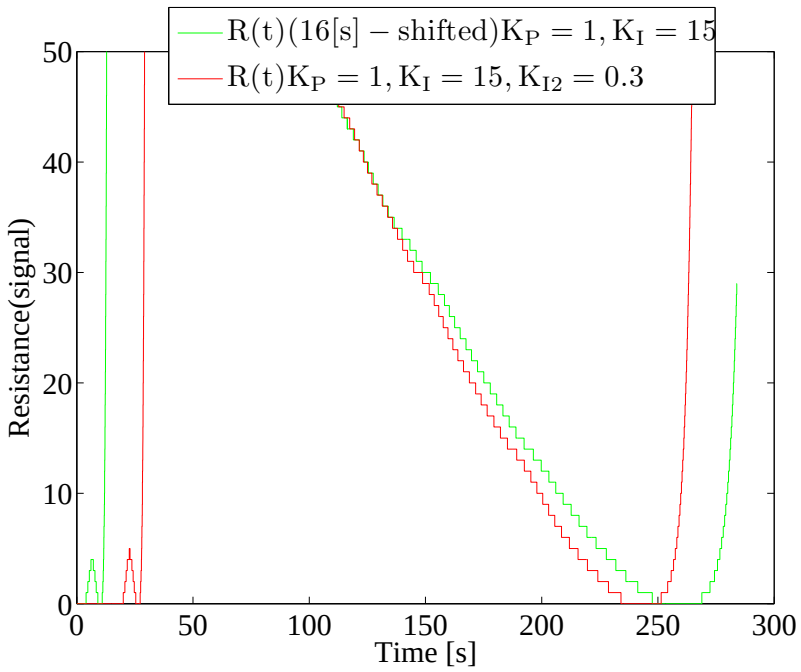

Fig. 4.31: Comparison $R_S(t)$[3]

第5章　まとめ

振動源の振幅が変動する場合を考慮して，振動体の振幅とその目標値との偏差により駆動されるPI補償器の出力を，振動源の駆動信号から振動発電機の端子電圧を生成する際の時変ゲインとして用いる制御系を構成した．実験により，PI補償器のゲイン K_P と K_I を適切に選べば振動体の振幅が目標値に収束すること，時変ゲインの正負がそれぞれ，振動発電機から外部電源へのエネルギー回収，外部電源から振動発電機へのエネルギー投入に対応することを示した．

より実用的なシステムとして，エネルギー回収を行いつつ振動振幅を制御することを検討した．コンデンサの充電電流を動的に変化させるために可変抵抗器を用いた．振動体の振幅とその目標値との偏差により駆動されるPI補償器の出力を，可変抵抗器への指令値とした定常発振制御系を用いた実験を行った．実験の結果，コンデンサの充電が十分に進むまで振動振幅は目標値に近づいていく，または近づいてから目標値で落ち着く傾向がみられることから，制御系の有効性を示した．以上よりエネルギーの回収をしつつ振動振幅を所望の大きさ一定とする制御系の実現可能性を示した．

今後の課題としては，コンデンサの着脱による充電電流の制御において抵抗を使わずに制御すること．回収したエネルギーを投入するシステムを実装すること．そして最終的に，振動源の振幅が大きいときにエネルギーを回収し保存，振幅が小さいときに保存したエネルギーを利用することにより，外部電源を使用しない実用的なシステムを構築することである．

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．また，振動発電機の購入の件におきまして，スター精密株式会社様よりご協力をいただきました．これら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．

参考文献

[1] 竹内敬治, ”エネルギーハーベスティングの最新動向”, 表面技術,Vol.67.No7(2016)

[2] Jae-Hong Jung, Tai-Hong Cheng, Il-Kwon Oh, ”Electromagnetic Synchronized Switch Damping for Vibration Control of Flexible Beams”, IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, Vol.17, No.6, pp1031-1038(2012)

[3] A.Gonzalez-Buelga, L.R.Clare, S.A.Neild, S.G.Burrow and D.J.Inman, ”An electromagnetic vibration absorber with harvesting and tuning capabilities”, Structural Control Health Monitoring, Vol.22, pp.1359-1372 (2015)

[4] Kimihiko Nakano, Yoshihiro Suda, Shigeki Nakadai, ”Self-Powered Active Vibration Control Using Continuous Control Input” JSME Internetional Journal, Series C, Vol.43, No.3, pp.726-731 (2000)

[5] 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)

[6] 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，73 巻，2 号， pp.93-99(2017)

[7] 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)

研究業績

国内学会 (講演発表者の氏名に〇印を付す)

1. 第 60 回 自動制御連合講演会

   ”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”

   〇永井 和貴，稲田 千翔之，小林 泰秀

   開催日：平成 29 年 11 月 10・11・12 日

2. 日本機械学会 北陸信越支部 第 55 期 総会・講演会

   ”振動発電機を用いたエネルギー散逸と生成による振動振幅の制御”

   〇稲田 千翔之，永井 和貴，小林 泰秀

   開催日：平成 30 年 3 月 3 日

査読付き論文リスト

1. システム制御情報学会論文誌

   ”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”

   〇永井 和貴，齋藤 浄，稲田 千翔之，小林 泰秀

   (投稿中)