

令和二年度  
長岡技術科学大学大学院 工学研究科  
修士課程 修士論文

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

Steady-state oscillation control of vibrator's amplitude by  
dynamically changing the charge/discharge cycle for  
capacitors connected to vibration energy harvester

令和3年1月29日

所属	機械創造工学専攻
氏名	柴崎 敬大
学籍番号	17304484
指導教員	小林泰秀 准教授



# Abstract

29 th, January, 2021

Steady-state oscillation control of vibrator's amplitude by  
dynamically changing the charge/discharge cycle for  
capacitors connected to vibration energy harvester

No. 17304434

SHIBASAKI Keita

Department of Mechanical Engineering  
Nagaoka University of Technology

In recent years, energy harvesting technology has been attracting attention in response to energy problems. This is a technology that collects and converts energy that exists in all forms in our daily lives, such as vibration, light, and heat, into electric power, and can be used as a power source for sensors and vibrators for environmental monitoring, creating a practical system that does not require an external power supply. Vibration generators is a technology that converts vibration generators into electric power through conversion processes such as piezoelectric, electromagnetic, and electrostatic. In the past, research has been conducted on vibration control of vibrator using vibration generators and on energy harvesting circuits to efficiently convert the power of vibration generators. The fact that the vibration amplitude of the vibrator changes due to energy harvesting and that the frequency of the vibration source is unknown and may not match the natural frequency of the generator has not been taken into consideration, and high power generation efficiency may not always be obtained.

The final objective of this research is to develop a vibration generator that maintains the maximum power generation efficiency by following the natural frequency of the vibrator to the frequency of the unknown vibration source. In this study, the frequency of the vibration source is assumed to be known and constant, and it is considered to match the natural frequency of the generator. Since the power generation efficiency depends on the vibration amplitude of the vibrator, we consider a control problem in which the vibration amplitude of the vibrator is set to a constant target value instead of maintaining the power generation efficiency. In the previous study, a steady-state oscillation control system for the vibrator amplitude was proposed, in which the load resistance connected to the vibrating generator was dynamically changed to keep the vibrator amplitude constant at the target value, and the stability conditions of the control system were theoretically derived. Next, a steady-state oscillation control system was proposed to maintain the vibrator amplitude at a constant target

value regardless of the amplitude of the vibration source by simulating the energy recovery and input by an AC power supply connected to the vibration generator. In addition, a steady-state oscillation control system was proposed that uses a capacitor connected to the vibrating generator to recover energy and dynamically changes the charging current according to the load resistance to achieve a more practical energy recovery system. However, since the load resistance is associated with energy dissipation, a method to utilize energy recovery without using a variable load resistance is necessary.

In this study, we propose a steady-state oscillation control system that dynamically changes the charge / discharge cycle of the capacitor in order to control the vibration amplitude of the vibrator without using a variable load resistor. To this end, we first propose a charge / discharge circuit that alternately charges two capacitors connected in parallel to the vibration generator. As a result of manual adjustment experiment of charge / discharge cycle, it is shown that there is a monotonous relationship between the charge / discharge cycle and the vibration amplitude of the vibrator (the vibration amplitude of the vibrator increases as the charge / discharge cycle is shortened). This relationship is the same as the relationship between the load resistance value of the previous study and the vibration amplitude of the vibrator. A constant control experiment was conducted. As a result, it is shown that the vibration amplitude of the vibrator becomes constant at the target value if the proportional gain  $K_P$  and the integrated gain  $K_I$  of the PI controller are properly selected.

Next, the stability conditions of the control system are investigated. It is shown that the boundary line between stable and unstable in the proportional gain  $K_P$  - integral gain  $K_I$  plane has a positive slope and intercept ( $K_P = 0, K_I > 0$ ), and that the lower (upper) side of the boundary line becomes stable (unstable). It is shown that In addition, the stable conditions for the target value were investigated experimentally by eigenvalue analysis. In the eigenvalue analysis, it is shown that the intercept and slope of the stable / unstable boundary line become smaller when the target value is set large. The experiment also shows that the intercept of the stable / unstable boundary becomes smaller when the target value is set large.



# 目次

第 1 章 研究背景	8
第 2 章 負荷抵抗を可変とする定常発振制御 [9]	10
2.1 実験概要	10
2.1.1 実験装置	10
2.1.2 負荷抵抗値と振動体振幅の関係	16
2.1.3 定常発振制御系の構成	17
2.1.4 安定/不安定の代表的な時間応答	17
2.1.5 比例ゲイン $K_P$ , 積分ゲイン $K_I$ に関する安定条件	20
2.2 安定性解析概要	21
第 3 章 コンデンサの充放電周期を可変とする定常発振制御の提案	23
3.1 発電機にコンデンサを接続した場合に流れる電流	23
3.2 コンデンサの充電時間と平均的な電流の関係	25
3.3 コンデンサの充放電回路の提案	27
3.4 充放電周期と振動体振幅の関係	30
3.5 充放電周期の手動調整実験	33
3.6 定常発振制御系の構成	37
3.7 実験結果	37
第 4 章 制御系の安定条件に関する調査	41
4.1 比例ゲイン $K_P$ , 積分ゲイン $K_I$ に関する安定条件	41
4.2 目標値に関する安定条件	43
4.2.1 固有値解析による調査	43
4.2.2 実験による調査	45

第 5 章 まとめ	47
5.1 結論 .....	47
謝辞	48
参考文献	49
研究業績	51

## 目 次

2.1	Setup of experimental apparatus . . . . .	11
2.2	Experimental apparatus . . . . .	13
2.3	Vibration generator . . . . .	14
2.4	Vibrator . . . . .	14
2.5	Structure of vibrator and 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 $K_P = 0.0, K_I = 4.0$ . . . . .	18
2.10	Time response of $K_P = 0.0, K_I = 7.0$ . . . . .	19
2.11	Closed-loop stability with experiment . . . . .	20
3.1	Bridge diode and capacitor circuit . . . . .	24
3.2	Time response of vibration amplitude . . . . .	24
3.3	Charging and discharging circuit . . . . .	26
3.4	Time response of $\hat{V}_1$ . . . . .	26
3.5	Experimental apparatus . . . . .	28
3.6	Time chart of photoswitch . . . . .	28
3.7	Charge/discharge circuit operation . . . . .	29
3.8	Time response of $\hat{V}_1$ . . . . .	31
3.9	RC circuit and charge/discharge circuit . . . . .	31
3.10	Charging current waveform . . . . .	32
3.11	Manual adjustment experiment results of $C = 47\mu\text{F}$ . . . . .	34
3.12	Charging current waveform . . . . .	35

3.13	Relation between $T_C(t)$ and voltage amplitude . . . . .	36
3.14	Block diagram of experimental apparatus . . . . .	37
3.15	Time responses of $K_P = 5.0$ and $K_I = 5.0$ . . . . .	39
3.16	Time responses of $K_P = 5.0$ and $K_I = 50.0$ . . . . .	40
4.1	Closed-loop stability with experiment . . . . .	42
4.2	Closed-loop stability with Eigenvalue analysis . . . . .	44
4.3	Closed-loop stability with experiment . . . . .	46

# 表 目 次

2.1	Experimental instruments . . . . .	12
4.1	Eigenvalue analysis parameters of forth-order plant . . . . .	43

# 第1章 研究背景

エネルギー問題に対して近年、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、環境モニタ用の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不要の実用的なシステムが構築できる。

振動発電は、圧電式・電磁式・静電式などの変換プロセスを通して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、振動発電機を利用し振動体を制振する研究 [2, 3, 4, 5, 6, 7]、振動発電機の電力を効率よく変換するエネルギーハーベスティング回路の研究 [8] などが行われているが、エネルギー回収により振動体の振動振幅が変化することや、振動源の周波数が未知で発電機の固有振動数と一致しない場合があることは考慮されておらず、常に高い発電効率が得られるとは限らない。

本研究の最終目的は、未知の振動源の周波数に振動体の固有振動数を追従させ、発電効率最大を維持する振動発電機の開発である。そのために本論文ではまず、振動源の周波数は既知かつ一定とし、発電機の固有振動数に一致する場合を考える。また、発電効率は振動体の振動振幅に依存するため、発電効率を維持する代わりに振動体の振動振幅を目標値一定とする制御問題を考える。文献 [9] では、振動体の振動振幅を目標値一定とするために振動発電機に接続された負荷抵抗を動的に可変とする振動体振幅の定常発振制御系が提案されるとともに、制御系の安定条件が理論的に導出された。文献 [10] では、エネルギーの回収・投入を振動発電機に接続された交流電源により模擬することで、振動源の振幅によらず振動体の振幅を目標値一定とする定常発振制御系が提案された。さらに文献 [11] では、エネルギー回収のより実用的なシステムを目指し、振動発電機に接続されたコンデンサによりエネルギー回収をしつつ、充電電流を負荷抵抗により動的に可変とする定常発振制御系が提案された。しかし、負荷抵抗はエネルギー散逸が伴うため可変負荷抵抗を用いずにエネルギー回収を利用する手法が必要である。

本論文では、可変負荷抵抗を用いずに振動体の振動振幅を制御するために、コンデンサの充放電周期を動的に可変とする定常発振制御系を提案する。実験により PI 補償器の比例ゲイン  $K_P$ 、積分ゲイン  $K_I$  を適切に選べば振動体の振動振幅が目標値一定となることを示す。また、制御系の安定条件に関す

る調査を行う。比例ゲイン  $K_P$ -積分ゲイン  $K_I$  平面における安定/不安定の境界線が、正の傾き、切片 ( $K_P = 0, K_I > 0$ ) を持つこと、境界線より下側 (上側) が安定 (不安定) になることを示す。次に、目標値を大きく設定すると安定/不安定の境界線の切片および傾きが小さくなることを示す。

本論文の構成は次の通りである。まず、第 2 章では先行研究 [9] の負荷抵抗を可変とする定常発振制御の実験結果および及び理論的に導出された制御系の安定条件について述べる。次に第 3 章では、著者が提案したコンデンサの充放電周期を可変とする定常発振制御の実験結果について述べ、さらに第 4 章では制御系の安定条件に関して調査した結果について述べる。最後に第 5 章でまとめる。

## 第2章 負荷抵抗を可変とする定常発振制御 [9]

本論文では、コンデンサの充放電周期を可変とする定常発振制御を実現するために先行研究 [9] で提案された定常発振制御の PI 補償器の出力を可変負荷抵抗の指令値からコンデンサの充放電周期に変更した。本章では、負荷抵抗を可変とする定常発振制御 [9] の実験結果および理論的に導出された制御系の安定条件について述べる。

### 2.1 実験概要

#### 2.1.1 実験装置

実験装置の構成図を Fig.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・ダンパ系と、その振動体 (マス) に取り付けられた振動発電機から構成されている。図中の  $w(t)$  はリニアモータの変位指令、 $R_S(t)$  は可変負荷抵抗  $R(t)$  の指令値、 $v_1(t)$  はレーザー変位計の出力信号である。また、 $x_0(t)$ 、 $x_1(t)$  は、それぞれリニアモータ、振動体の変位を示す。 $m_1$ 、 $k_1$ 、 $c_1$  は、それぞれ振動体の質量、バネ定数、減衰係数を示し、 $m_2$ 、 $k_2$ 、 $c_2$  は、それぞれ発電機の質量、バネ定数、減衰係数を示す。リニアモーターの変位指令  $w(t)$  は、PC (パソコン) から PIO (Parallel Input/Output) ボードとドライバを介して与える。レーザー変位計の出力信号  $v_1(t)$  は、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。



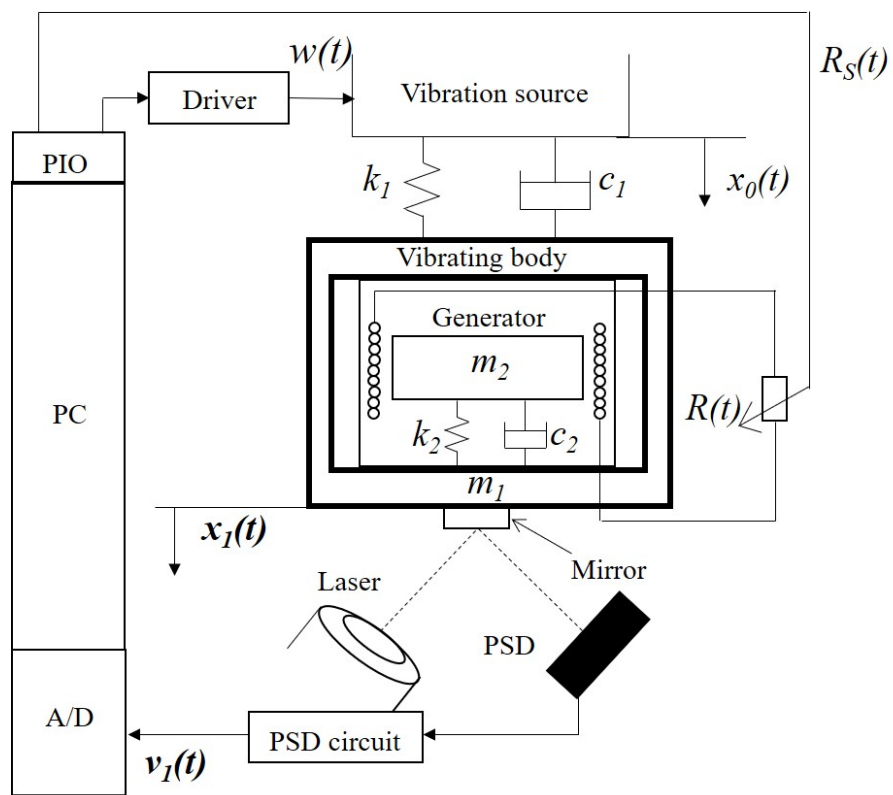


Fig. 2.1: Setup of experimental apparatus

使用機器の仕様を Table 2.1, 実験装置の外観を Fig. 2.2 に示す. 図中のリニアモータはアルミフレームを用いて固定されており, 振幅を変化させるときは1パルスあたり 0.01 mm 調整が可能な入力パルス数を変化させている. また, 振幅の下限値 0.00 mm~上限値 10.0 mm, 加振周波数の下限値 0.10 Hz~上限値 50.0 Hz の間を変化させることができる. 発電機の外観を Fig. 2.3 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). 振動体の外観を Fig. 2.4 に示す. 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. リニアモータと振動体は, バネ定数が 0.13 N/mm の引張バネを 3つ用いて接続されており, 発電機は振動体内部に挟み込むようにして取り付けられている (Fig. 2.5). 可変負荷抵抗の外観を Fig. 2.6 に示す. 可変負荷抵抗は, PC から PIO ボードを介して 8 ビットのデジタル信号 (0~255 の指令値) で約  $400\Omega \sim 38k\Omega$  の間を可変できる.

Table 2.1: Experimental instruments

PC	Dell Dimension 2400(RTLinux-3.2pre3)
A/D	Contec, AD12-16(PCI) (12bit, 10 $\mu$ s)
PIO	Contec, PIO-32/32T(PCI), 32bit, 200ns
Linear motor	Orientalmotor, EZC4D005M-A Thrust 70N, Speed(max) 600mm/s
Driver	Orientalmotor, ESMC-C2
Laser	NEC, GLC5230
PSD	Hamamatsu Photonics, S3931
PSD circuit	Hamamatsu Photonics, C3683-01
Vibration Generator	Star Micronics, EH12 37 $\times$ 25 $\times$ 8mm, 5.36Hz(resonance)

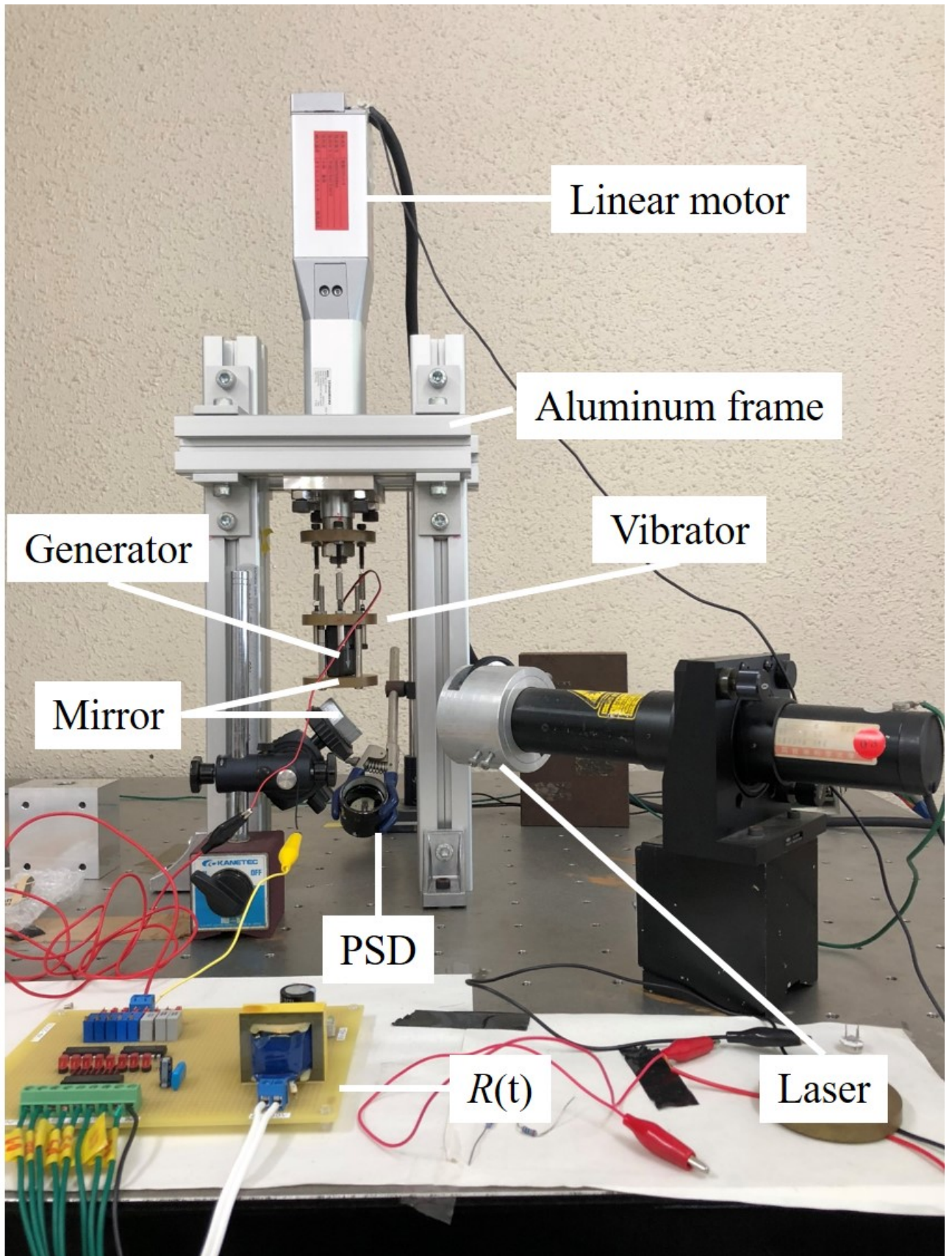


Fig. 2.2: Experimental apparatus

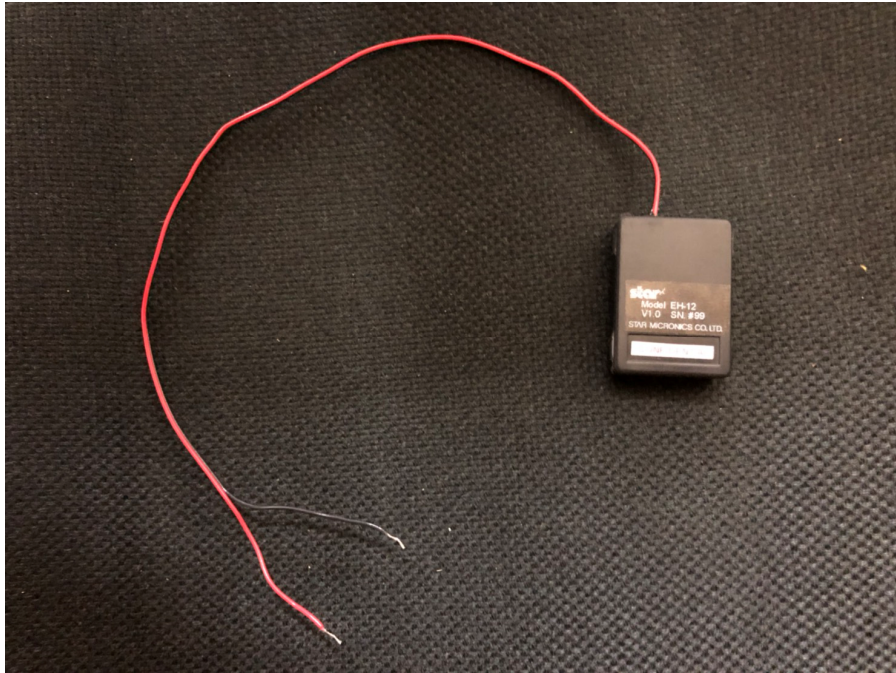


Fig. 2.3: Vibration generator

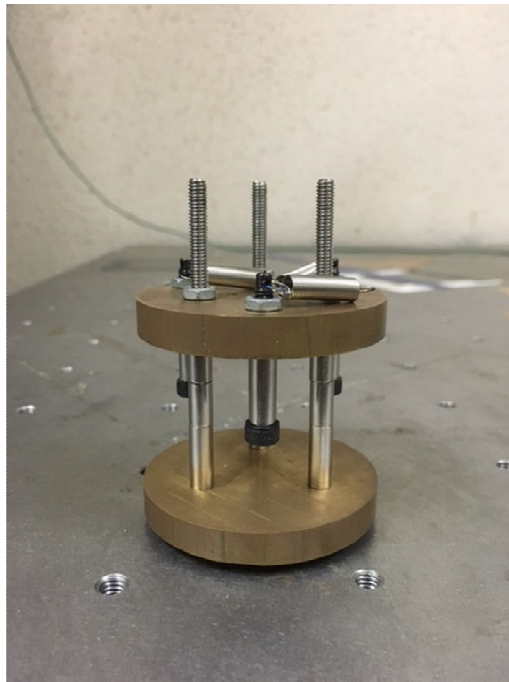


Fig. 2.4: Vibrator



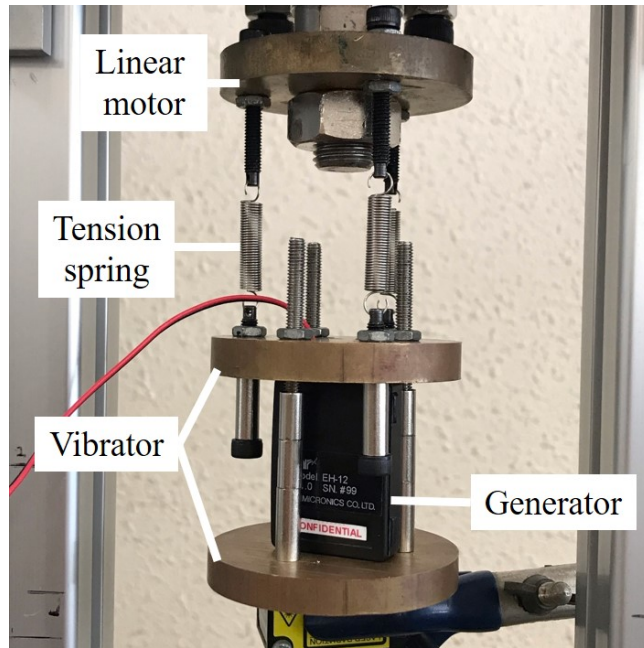


Fig. 2.5: Structure of vibrator and generator

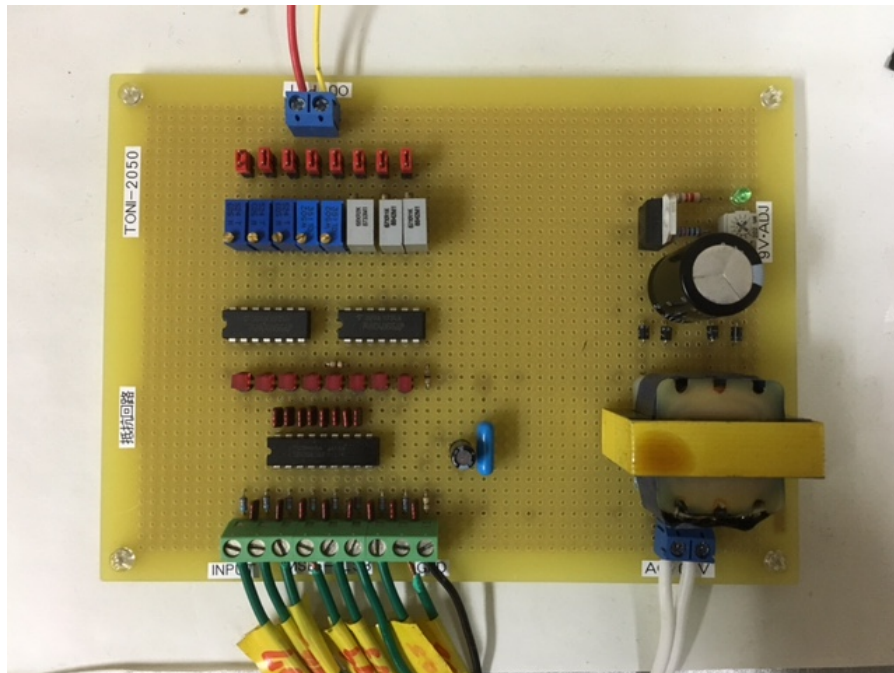


Fig. 2.6: Variable load resistance circuit

## 2.1.2 負荷抵抗値と振動体振幅の関係

負荷抵抗値を手動で一定とした際の負荷抵抗値と振動体の振動振幅の関係について述べる． Fig. 2.7 に負荷抵抗値と振動体の振動振幅の関係を示す． リニアモータの変位指令  $w(t)$  の振幅を 0.02mm, 加振周波数を 5.24Hz (発電機の質量分を含む系全体の共振周波数  $\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_1}{m_1 + m_2}}$ ) とされた． この実験に使用された発電機は第 2.1.1 節で述べた発電機の仕様と異なり  $m_2 = 20 \text{ g}$  のものを使用している． そのため、以降の実験では加振周波数を変更している． 図から負荷抵抗値と振動体の振動振幅には単調な関係 (負荷抵抗を小さくすると振動体の振動振幅が大きくなる) があることがわかる． これは、開放時 ( $R = \infty \Omega$ ) の場合、発電機内部のコイルに電流が流れなくなるため電氣的な減衰は発生せず、発電機内部のマスは動吸振器として作用し振動体の振動振幅は小さくなる． 逆に、短絡時 ( $R = 0 \Omega$ ) の場合、発電機内部のコイルに電流が流れるため電氣的な減衰が発生し、発電機内部のマスは振動体に対して相対的に固定され振動体の振動振幅は大きくなる． 両者の中間の負荷抵抗値を設定すると中間の振動振幅が得られる． したがって、負荷抵抗値を動的に調整すれば所望の振動振幅が実現できると考えられる．

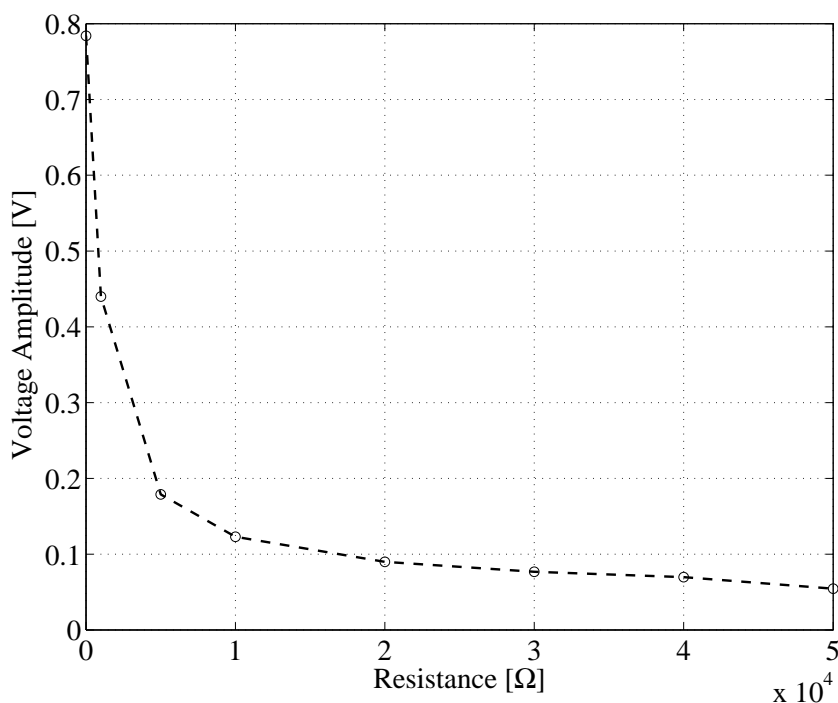


Fig. 2.7: Relation between resistance and voltage amplitude

### 2.1.3 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．レーザー変位計の出力信号  $v_1(t)$  を絶対値関数とローパスフィルタ（カットオフ角周波数  $\omega_f = 0.25 \text{ rad/s}$ ）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．推定振幅  $\hat{V}_1(t)$  とその目標値  $V_1^*$  との差分を PI 補償器に入力する．PI 補償器の出力  $u(t)$  は，指数関数に通すことで正数に変換され，それを可変負荷抵抗の指令値  $R_S(t)$  として用いる．

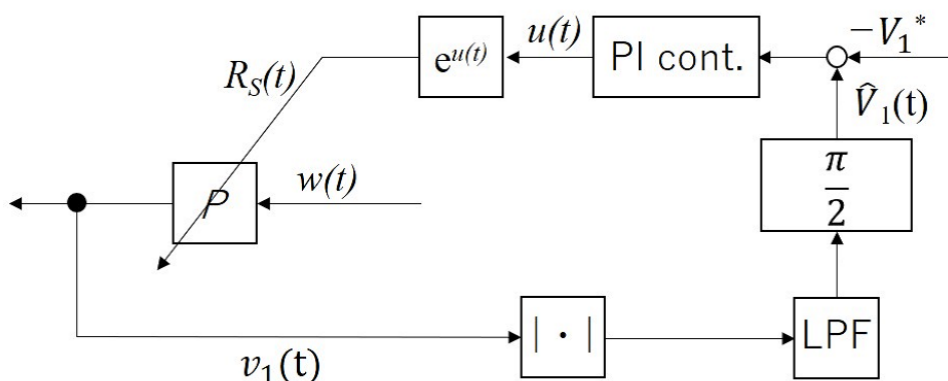
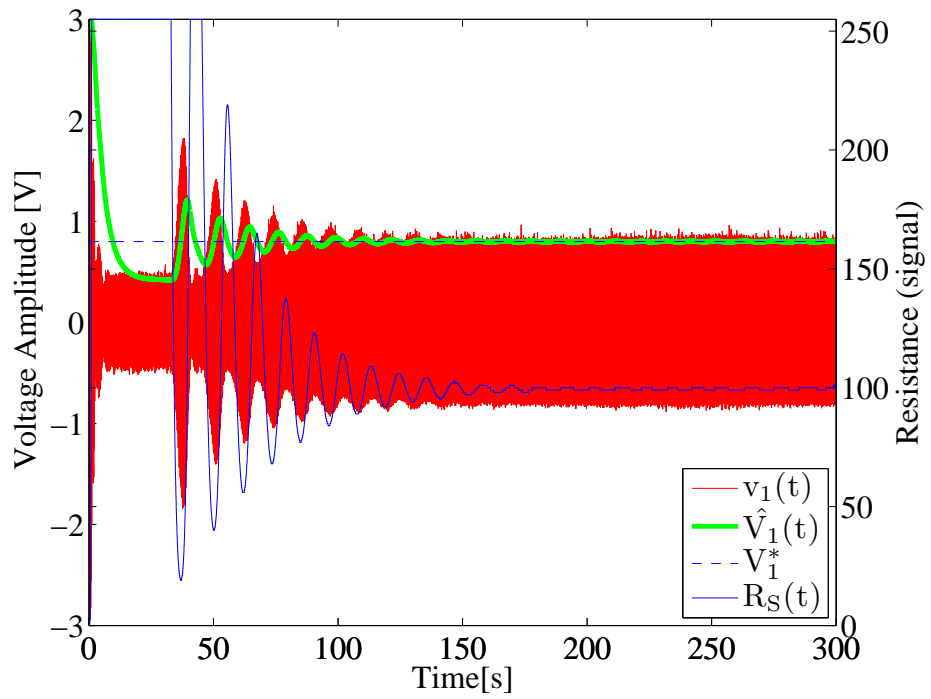


Fig. 2.8: Block diagram of experimental apparatus

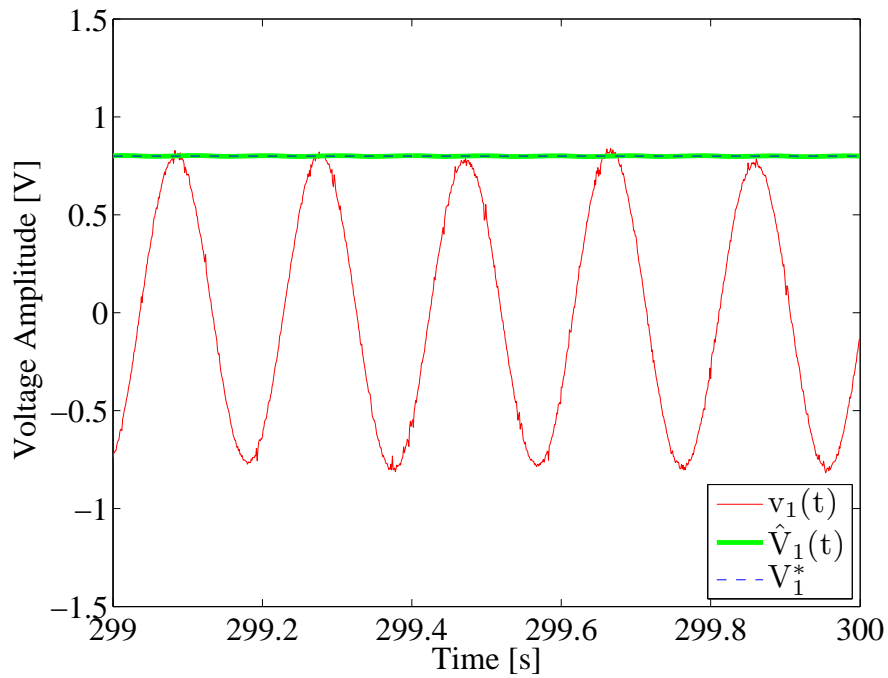
### 2.1.4 安定/不安定の代表的な時間応答

本章内で述べた装置と制御系を用いて振動体の振動振幅を目標値一定とする制御実験が行われた．その結果について述べる．リニアモータの変位指令  $w(t)$  の振幅を  $0.04\text{mm}$ ，加振周波数を  $5.16\text{Hz}$  とされた．目標値  $V_1^*$  は  $0.8\text{V}$  とされた．リニアモータの駆動を開始し振動体の振動振幅が定常状態に落ち着いた後，計測を始めてから  $t = 0 \text{ s}$  後に定常発振制御を開始された．

Fig. 2.9(a) に安定な結果が得られた際の代表的な時間応答を示す．比例・積分ゲインはそれぞれ  $K_P = 0.0$ ， $K_I = 4.0$  である．赤線はレーザー変位計の出力信号  $v_1(t)$ ，緑線はその推定振幅  $\hat{V}_1(t)$ ，青破線は目標値  $V_1^*$ ，青線は抵抗指令値  $R_S(t)$  を示す．制御開始 ( $t = 0 \text{ s}$ ) 後，抵抗指令値  $R_S(t)$  が自動調整され， $t = 150 \text{ s}$  後には推定振幅  $\hat{V}_1(t)$  は目標値一定となる様子が確認できる．また，Fig. 2.9(b) に示す拡大図 ( $t = 299 \sim 300 \text{ s}$  の間の応答) から，レーザー変位計の出力信号  $v_1(t)$  が  $0.8 \text{ V}$  に収束していることが確認できる．



(a) general view



(b) magnified view

Fig. 2.9: Time response of  $K_P = 0.0, K_I = 4.0$



Fig. 2.10 に不安定な結果が得られた際の代表的な時間応答を示す。比例・積分ゲインはそれぞれ  $K_P = 0.0$ ,  $K_I = 7.0$  である。比例ゲイン  $K_P$  に対して積分ゲイン  $K_I$  が比較的大きいとき抵抗指令値  $R_S(t)$  は振動し、推定振幅  $\hat{V}_1(t)$  も目標値周りで振動することが確認できる。

以上より、負荷抵抗を可変とする定常発振制御において PI 補償器の比例ゲイン  $K_P$ , 積分ゲイン  $K_I$  を適切に選べば振動体の振動振幅が目標値一定となることがわかる。

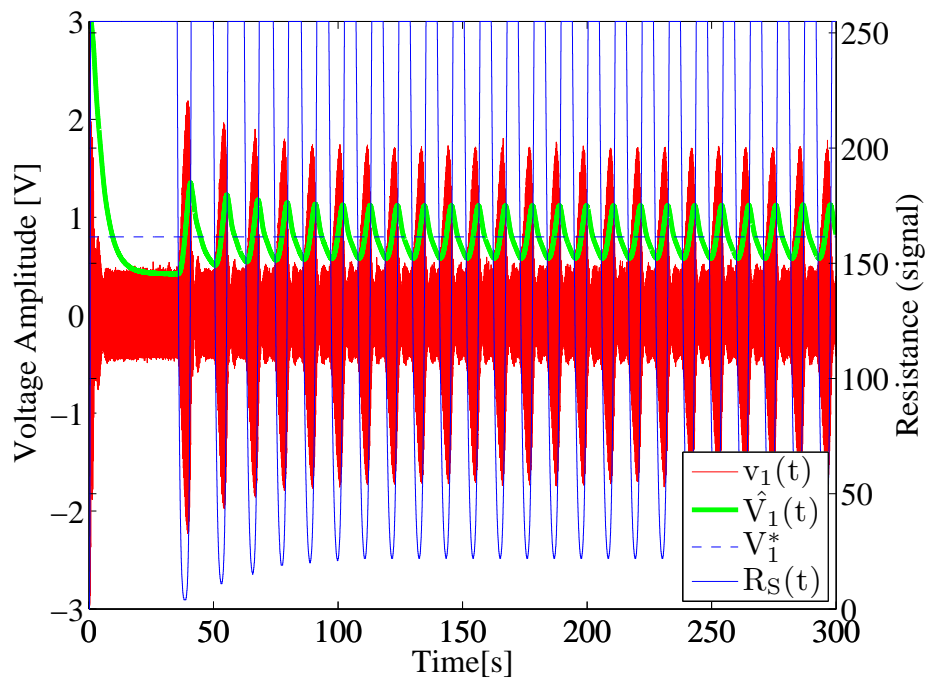


Fig. 2.10: Time response of  $K_P = 0.0$ ,  $K_I = 7.0$

### 2.1.5 比例ゲイン $K_P$ , 積分ゲイン $K_I$ に関する安定条件

比例ゲイン  $K_P$ , 積分ゲイン  $K_I$  に関する制御系の安定条件を実験的に調査された。その結果について述べる。Fig. 2.11 に比例ゲイン  $K_P$ , 積分ゲイン  $K_I$  に関する安定条件を詳細に調査された結果を示す。式 (2.1) に示す時刻  $t = 290 \sim 300$  s の間の追従誤差  $\hat{V}_1(t) - V_1^*$  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断された。図中の横軸の比例ゲイン  $K_P$ , 縦軸の積分ゲイン  $K_I$  に対して, 安定な場合は丸印, 不安定な場合はバツ印が記載されている。制御系が安定となる条件について理論的保証を与えるため比例ゲイン  $K_P$ , 積分ゲイン  $K_I$  の刻みを 1.0 とし詳細に調査された。実線は安定/不安定の境界線を示す。境界線の切片および傾きは安定から不安定に変わる間の中央値をその境界と仮定し最小二乗法を用いて算出された。図から, 安定/不安定の境界線は正の傾き, 切片 ( $K_P = 0, K_I > 0$ ) を持つこと, 境界線より下側 (上側) が安定 (不安定) になることがわかる。

$$L_2norm = \sqrt{(\hat{V}_1(290) - V_1^*)^2 + \dots + (\hat{V}_1(300) - V_1^*)^2} \quad (2.1)$$

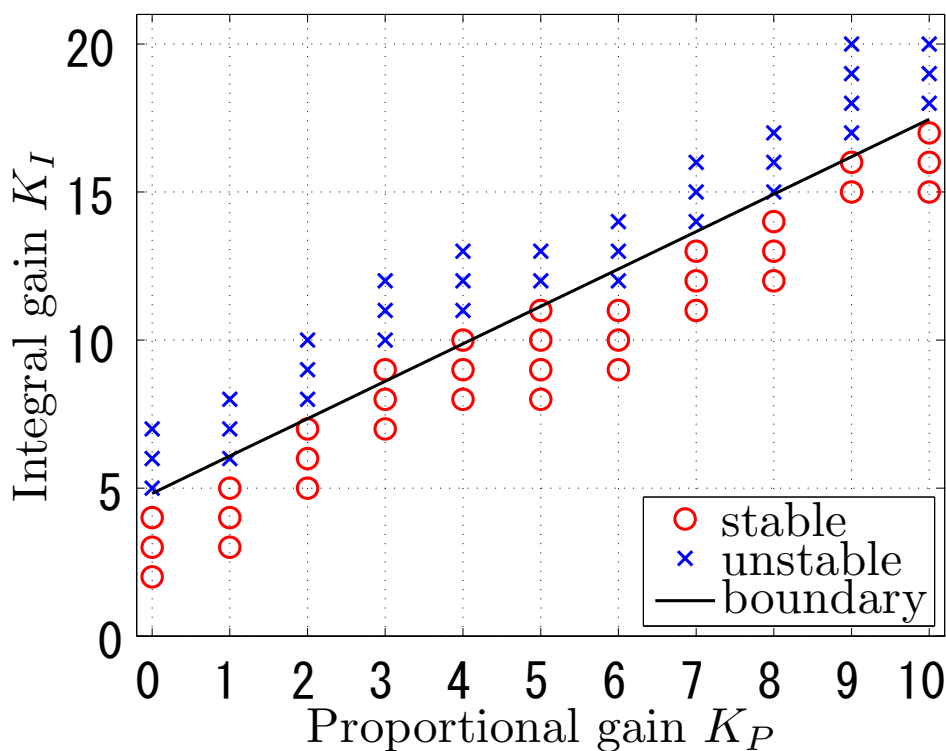


Fig. 2.11: Closed-loop stability with experiment

## 2.2 安定性解析概要

先行研究 [9] では、提案した制御系の安定条件が理論的に導出されている。本節では、その安定条件について述べる。提案した制御系は非線形システムであるが、状態変数  $\hat{x}$  を平衡点  $\hat{x} = \bar{x}$  周りで線形化し議論している。また、第 2.1 節では負荷抵抗値を可変とする制御系だが、負荷抵抗値は発電機のダンパの係数と相関があると考えられること、両者の厳密な関係は明らかではないことから、先行研究 [9] ではダンパの係数を可変とする制御系で議論していることに注意する。

振動体の減衰比  $\zeta_1 := \frac{c_1}{2\sqrt{m_1 k_1}}$  を定数、発電機の減衰比  $\zeta_2 := \frac{c_2}{2\sqrt{m_2 k_2}}$  を可変とする制御系において、式 (2.2) の行列の固有値の実部がすべて負の場合安定となる。ここで  $K_P$ ,  $K_I$  は PI 補償器の比例ゲイン、積分ゲイン、 $\omega_f$  はローパスフィルタのカットオフ角周波数、 $\omega_n$  は振動体と発電機の固有角振動数、 $\alpha := \frac{m_2}{m_1}$  は質量比、 $X_0$  は振動源の振幅、 $X_1^*$  は目標値を示す。先行研究 [9] では、制御系が安定となる比例ゲイン  $K_P$ 、積分ゲイン  $K_I$  について実験および式 (2.2) の固有値解析より検討し両者が整合することを報告している。しかし、式 (2.2) の行列内に含まれるそれ以外のパラメータに関する安定条件については検討されていない。

$$\hat{A}(\bar{x}) = \left[ \begin{array}{c} \left[ \begin{array}{cc} \operatorname{Re}\{M(\zeta_2^*)\} & -\operatorname{Im}\{M(\zeta_2^*)\} \\ \operatorname{Im}\{M(\zeta_2^*)\} & \operatorname{Re}\{M(\zeta_2^*)\} \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} \operatorname{Re} \left\{ \frac{\partial N}{\partial \zeta_2} \right\} \\ \operatorname{Im} \left\{ \frac{\partial N}{\partial \zeta_2} \right\} \end{array} \right] \Big|_{\zeta_2 = \zeta_2^*} \left[ \begin{array}{cc} X_0 \zeta_2^* & \left[ \begin{array}{cc} K_I & -\frac{\pi}{2} K_P \end{array} \right] \\ 0 & -\frac{\pi}{2} \\ 0 & -\omega_f \end{array} \right] \\ 0 \\ \frac{2\omega_f}{\pi X_1^*} \left[ \begin{array}{cccc} x_{r1}^* & 0 & x_{i1}^* & 0 \end{array} \right] \end{array} \right] \quad (2.2)$$

$$M(\zeta_2) := a \begin{bmatrix} b & c \\ e & f \end{bmatrix}$$

$$N(\zeta_2) := a \begin{bmatrix} d \\ g \end{bmatrix}$$

$$a := \frac{\omega_n}{2(\zeta_1 \zeta_2 - 1) + j2(\zeta_1 + \zeta_2 + \alpha \zeta_2)}$$

$$b := 2(\zeta_1 + \alpha \zeta_2) - j(\alpha + 2\zeta_1 \zeta_2)$$

$$c := -\alpha \zeta_2 + j\alpha$$

$$d := -2\zeta_1 + \zeta_2 + j(2\zeta_1 \zeta_2 + 1)$$

$$e := \zeta_1 - 2\zeta_2 + j$$

$$f := \zeta_2(\alpha + 2) - j2\zeta_1 \zeta_2$$

$$g := \zeta_2 + j2\zeta_1 \zeta_2$$

$$\zeta_2^* := \frac{2\alpha \zeta_1 Z + \alpha \sqrt{4\zeta_1^2 Z^2 + Z(1 - 4\zeta_1^2 Z - \alpha^2 Z)}}{2(1 - 4\zeta_1^2 Z - \alpha^2 Z)}$$

$$Z := \frac{1}{4\zeta_1^2 + 1} \left( \frac{X_1^*}{X_0} \right)^2$$

以上が、先行研究 [9] の負荷抵抗を可変とする定常発振制御の実験結果及び理論的に導出された制御系の安定条件である。可変負荷抵抗はエネルギー散逸を伴うため、第 3 章ではエネルギー回収を利用したコンデンサの充放電周期を可変とする定常発振制御を提案し、制御実験を行う。また、第 4 章では先行研究 [9] で検討されていない目標値に関する安定条件を式 (2.2) の固有値解析および実験から調査する。

## 第3章 コンデンサの充放電周期を可変とする定常発振制御の提案

### 3.1 発電機にコンデンサを接続した場合に流れる電流

第2章では、発電機に可変負荷抵抗を接続しその負荷抵抗値を動的に可変とすることで振動体の振動振幅が目標値一定となることを示した。本章では、エネルギー回収を利用するため発電機にコンデンサを接続する場合を考える。Fig.3.1の赤破線で囲んだように発電機にブリッジダイオードと  $C = 1100\mu\text{F}$  のコンデンサを接続した場合、振動体の振動振幅は Fig.3.2 に示す時間応答となる。リニアモータの変位指令  $w(t)$  の振幅を 0.05 mm, 加振周波数を 5.16 Hz とした。計測を始めてから  $t = 20$  s 後、発電機にコンデンサを接続している。赤線はレーザー変位計の出力信号  $v_1(t)$ , 緑線はその推定振幅  $\hat{V}_1$  を示す。 $t = 20$  s 付近から、推定振幅  $\hat{V}_1$  が大きくなるのは発電機内部のコイルに電流が流れたためで、時間が経つにつれて推定振幅  $\hat{V}_1$  が次第に小さくなるのはコンデンサの充電が進み流れる電流が小さくなったためと考えられる。以上より、コンデンサを用いて電流を調節できれば振動体の振動振幅を制御できると考える。

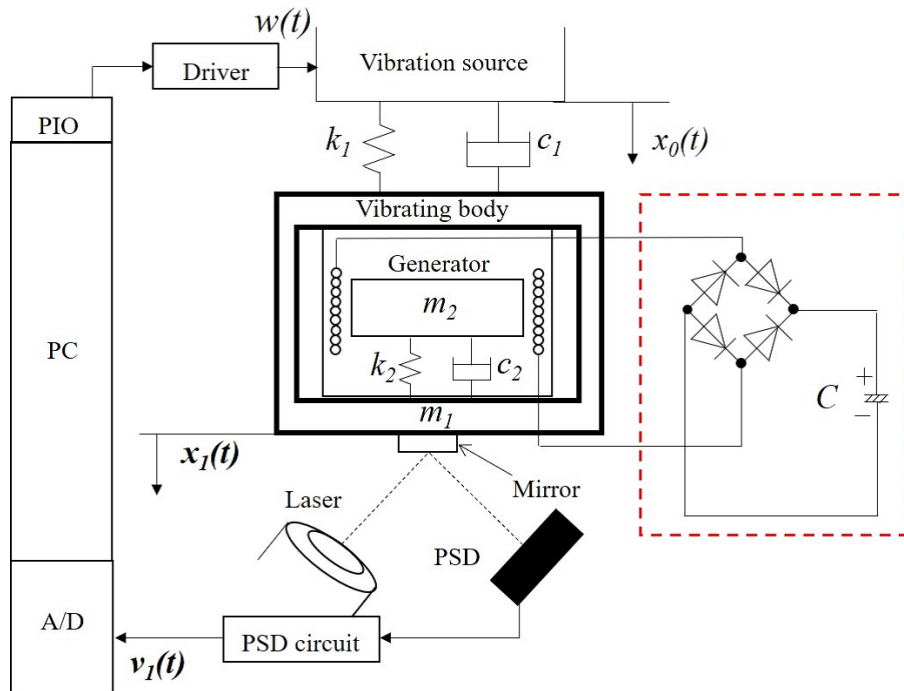


Fig. 3.1: Bridge diode and capacitor circuit

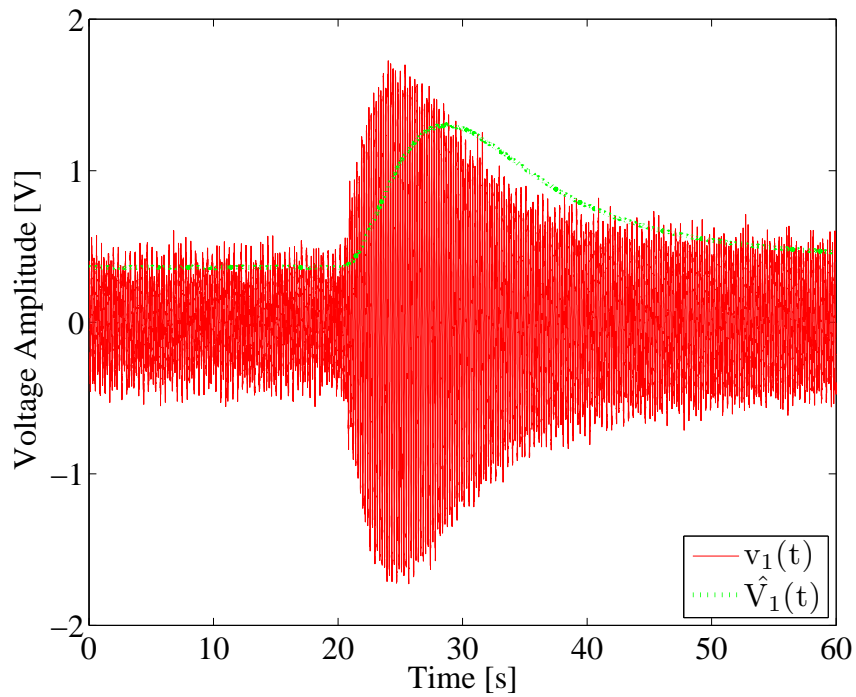


Fig. 3.2: Time response of vibration amplitude

## 3.2 コンデンサの充電時間と平均的な電流の関係

第3.1節から、コンデンサは充電が進むにつれて流れる電流が小さくなることを示した。そこで充電と放電を交互に繰り返すことで発電機内部のコイルに流れる電流を平均的に調節できると考えた。Fig.3.3の赤破線で囲んだ回路を用いてコンデンサの充電と放電を交互に繰り返す実験を行った。図中の  $R_c = 400\Omega$ ,  $R_d = 1k\Omega$  はそれぞれ充電及び放電用の抵抗,  $C = 9900\mu F$  はコンデンサ,  $SW1$ ,  $SW2$  はフォトスイッチを示す。本論文では,  $R_d$  による放電時のエネルギー散逸は, ユーザーによるエネルギーの有効利用を模擬するものとする。フォトスイッチ  $SW1$ ,  $SW2$  の *on/off* の時間指令は, PC から PIO ボードを介して与える。 $SW1$  が *on*,  $SW2$  が *off* の場合, コンデンサは発電機に接続し充電される。 $SW1$  が *off*,  $SW2$  が *on* の場合, コンデンサは放電用抵抗  $R_d$  に接続し放電される。この2つの動作を交互に繰り返す。レーザー発生器と鏡と PSD 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あったため, CMOS タイプマイクロレーザー測距センサ (Panasonic, HG-1030) に変更することで単純化した。Fig.3.4 にコンデンサの充電と放電を繰り返した際の推定振幅  $\hat{V}_1$  の時間応答を示す。リニアモータの変位指令  $w(t)$  の振幅を 0.05 mm, 加振周波数を 5.16 Hz とした。計測を始めてから  $t = 20$  s 後, コンデンサは発電機と放電用抵抗  $R_d$  に交互に接続し充電と放電を繰り返している。緑線, 青線, 赤線はそれぞれ充電時間と放電時間を 1 s と 19 s, 5 s と 15 s, 10 s と 10 s にした場合の推定振幅  $\hat{V}_1$  を示す。図から充電時間が長くなるにつれて推定振幅  $\hat{V}_1$  が大きくなるのがわかる。これは, 充電時間が長いほど発電機内部のコイルに流れる平均的な電流が大きくなり, 逆に充電時間が短いほど平均的な電流が小さくなるためと考えられる。以上より, コンデンサの充電時間によって平均的な電流の調節ができることがわかった。

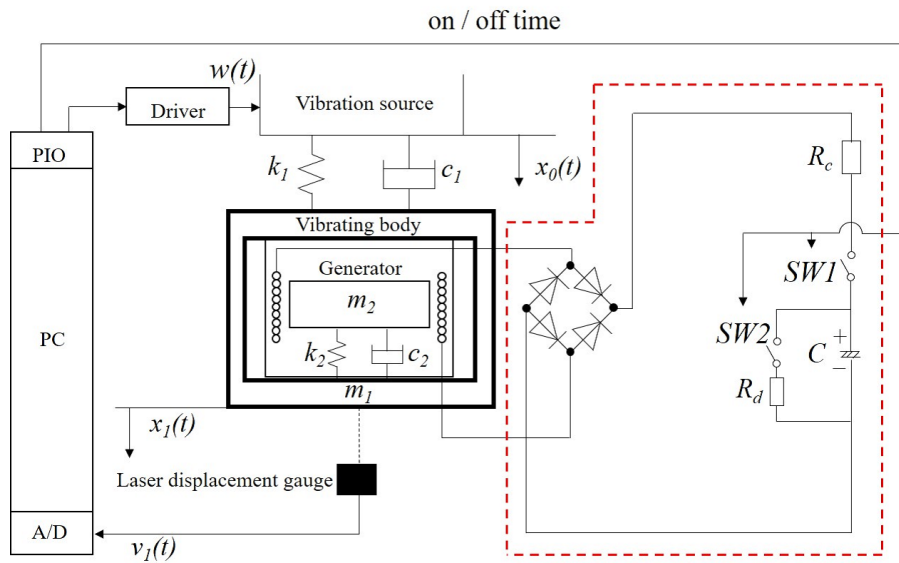


Fig. 3.3: Charging and discharging circuit

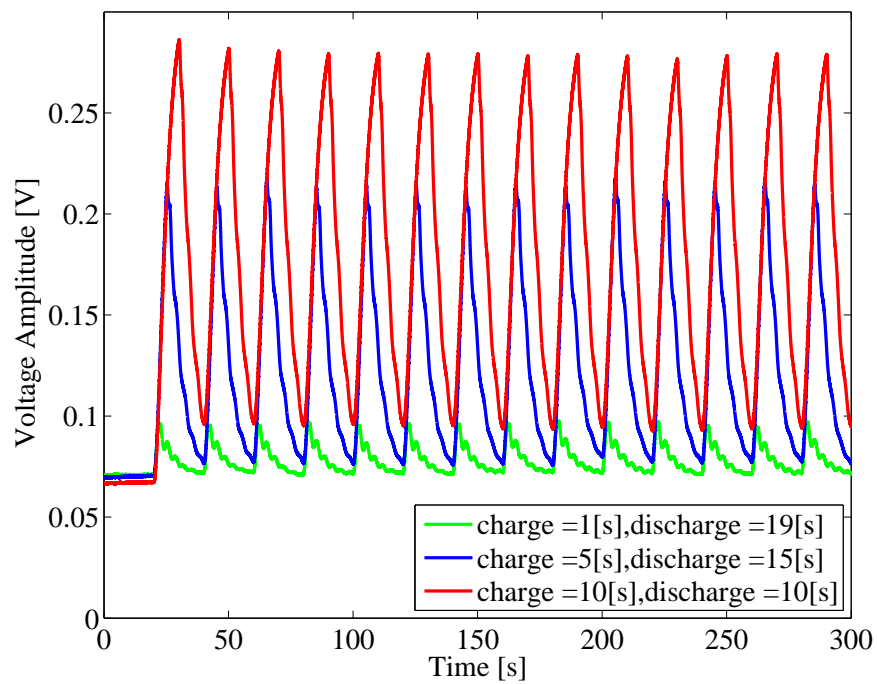


Fig. 3.4: Time response of  $\hat{V}_1$



### 3.3 コンデンサの充放電回路の提案

第3.2節から、コンデンサの充電時間によって平均的な電流が調節できることを示した。ただし、コンデンサは1つしか用いていないため放電している場合、発電機は開放となりエネルギー回収が行えない。そこで、Fig.3.5の赤破線で囲んだように2つのコンデンサを発電機に並列接続し、交互に充電することでエネルギー回収をし続ける充放電回路を提案する。本論文で使用する充放電周期とは、発電機に並列接続された2つのコンデンサの充電および放電周期を意味しており、充放電周期によって平均的な電流を調節する。図中の $T_C(t)$ は充放電周期、 $R_c = 400\Omega$ 、 $R_d = 270\Omega$ はそれぞれ充電及び放電用の抵抗、 $C_1$ 、 $C_2$ はコンデンサ、 $SW1\sim SW4$ はフォトスイッチを示す。フォトスイッチ $SW1\sim SW4$ はFig. 3.6のタイムチャートに従って動作する。Fig. 3.7に充放電回路の動作を示す。 $SW1$ と $SW4$ が $on$ 、 $SW2$ と $SW3$ が $off$ の場合 (Fig.3.7(a))、赤線のように $C_1$ は発電機に接続し充電、青線のように $C_2$ は $R_d$ に接続し放電される。逆に、 $SW1$ と $SW4$ が $off$ 、 $SW2$ と $SW3$ が $on$ の場合 (Fig.3.7(b))、青線のように $C_1$ は $R_d$ に接続し放電、赤線のように $C_2$ は発電機に接続し充電される。この2つの動作が交互に繰り返される。充放電周期 $T_C(t)$ はPCからPIOボードを介して下限値0.1 s～上限値2.0 sの間を変化させることができる。

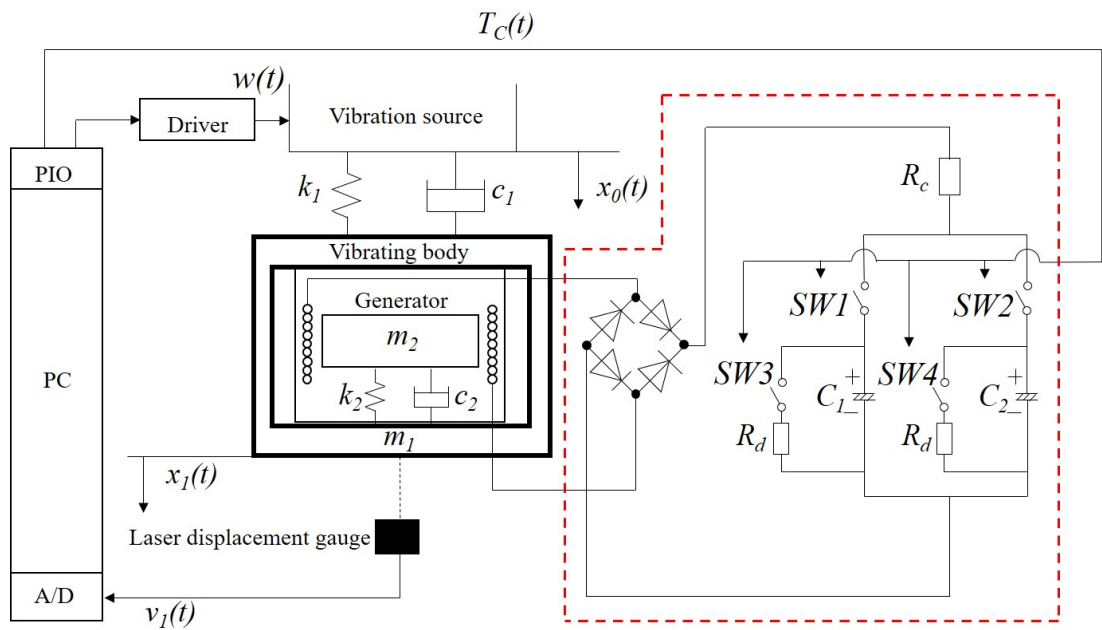


Fig. 3.5: Experimental apparatus

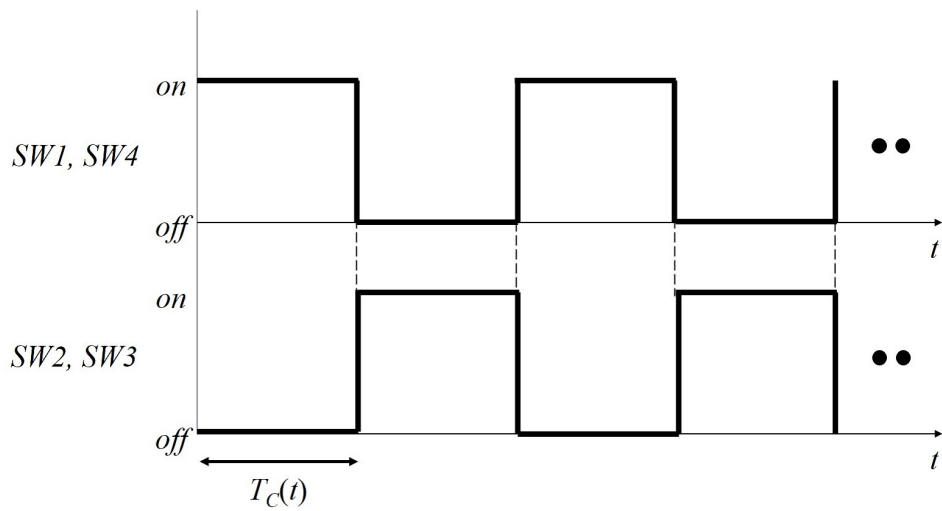
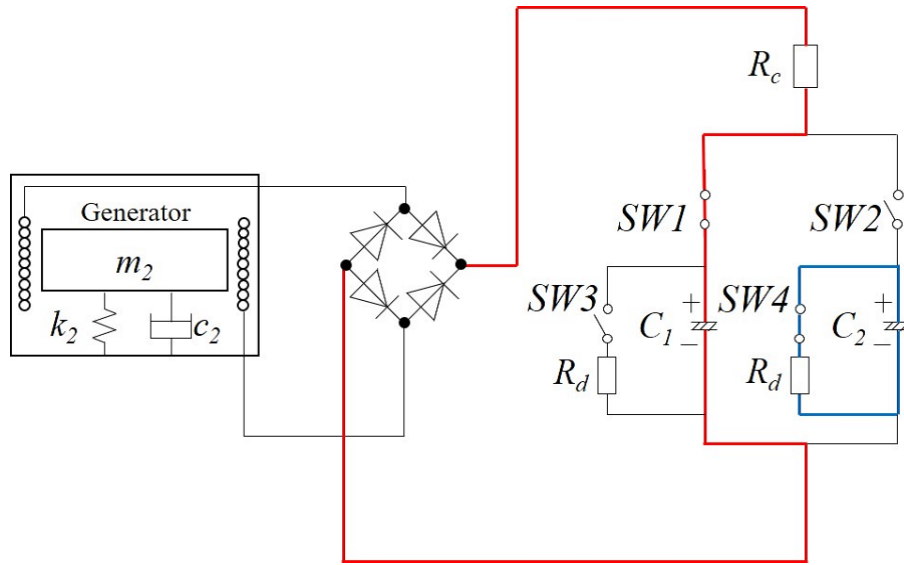
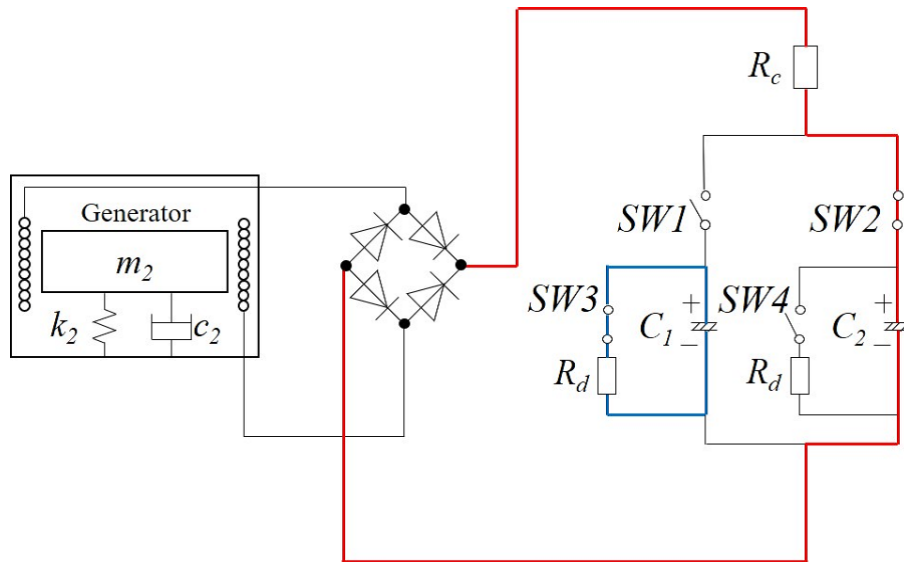


Fig. 3.6: Time chart of photoswitch



(a) Case  $SW1$ ,  $SW4$  is on and  $SW2$ ,  $SW3$  is off



(b) Case  $SW1$ ,  $SW4$  is off and  $SW2$ ,  $SW3$  is on

Fig. 3.7: Charge/discharge circuit operation

### 3.4 充放電周期と振動体振幅の関係

充放電周期  $T_C(t)$  を手動で一定とした際の充放電周期  $T_C(t)$  と振動体の振動振幅の関係について述べる。Fig. 3.8 に充放電周期  $T_C(t)$  を手動で一定とした際の推定振幅  $\hat{V}_1$  の時間応答を示す。リニアモータの変位指令  $w(t)$  の振幅を 0.05mm, 加振周波数を 5.16Hz としている。  $C = 3300\mu\text{F}$  のコンデンサを用いた。計測を始めてから  $t = 20$  s 後, 発電機に充放電回路を接続した。赤線, 緑線, 黒線はそれぞれ充放電周期  $T_C(t)$  を 1 s, 5 s, 10 s とした場合の推定振幅  $\hat{V}_1$  を示す。図から充放電周期  $T_C(t)$  を短くすると推定振幅  $\hat{V}_1$  は大きくなるのがわかる。これは以下のように考えられる。ここでは簡単のため, 交流電力源の発電機とブリッジダイオードをまとめたものを直流の定電圧源  $E$  として考える。定電圧源  $E$  に抵抗  $R_c$  とコンデンサ  $C$  を接続した場合 (Fig. 3.9 (A) ), 回路に流れる瞬時電流  $i$  は式 (3.1) で表され, Fig. 3.10 (A) に示す波形のように次第に小さくなる。次に定電圧源  $E$  に充放電回路を接続し, 一定の充放電周期  $T_C(t)$  で動作した場合 (Fig. 3.9 (B) ), 瞬時電流  $i$  は Fig. 3.10 (B-1) に示すようにのこぎり波状の波形となり, 黒破線に示す平均的な電流が流れると考えられる。充放電周期  $T_C(t)$  をさらに長くした場合, コンデンサの充電が進むため Fig. 3.10 (B-2) に示すように瞬時電流  $i$  の変化が大きくなり, Fig. 3.10 (B-1) と比べ平均的な電流は小さくなると考えられる。以上より, 充放電回路において充放電周期  $T_C(t)$  が短いほど平均的な電流は大きくなるため振動体の振動振幅は大きくなる。逆に, 充放電周期  $T_C(t)$  が長いほど平均的な電流は小さくなるため振動体の振動振幅は小さくなる。また, 充放電周期  $T_C(t)$  が長くなるにつれて推定振幅  $\hat{V}_1$  が山なりの波形になるのは, 瞬時電流  $i$  の変化が大きいためだと考えられる。以上より, 充放電周期  $T_C(t)$  を動的に調整すれば所望の振動振幅が実現できると考え手動調整実験を行った。

$$i = \frac{E}{R_c} \exp\left(-\frac{t}{CR_c}\right) \quad (3.1)$$

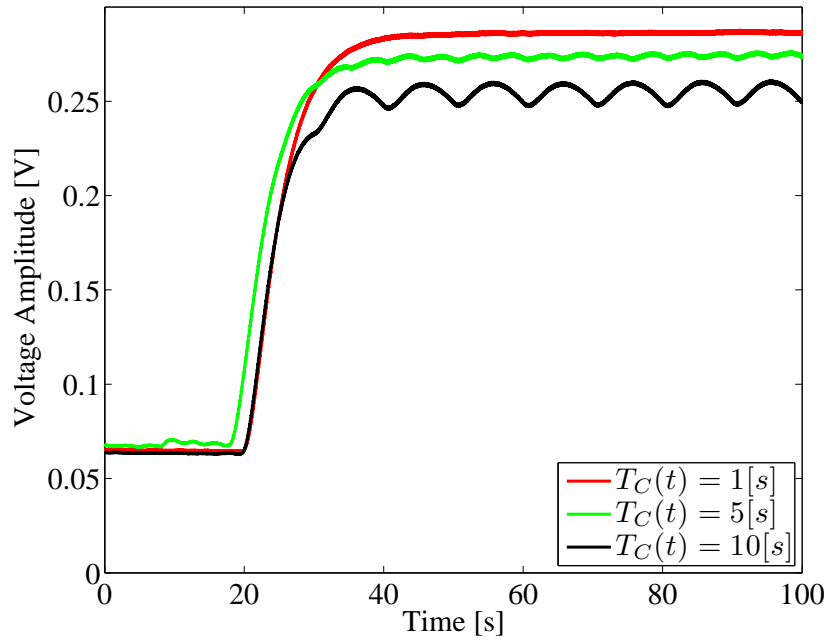


Fig. 3.8: Time response of  $\hat{V}_1$

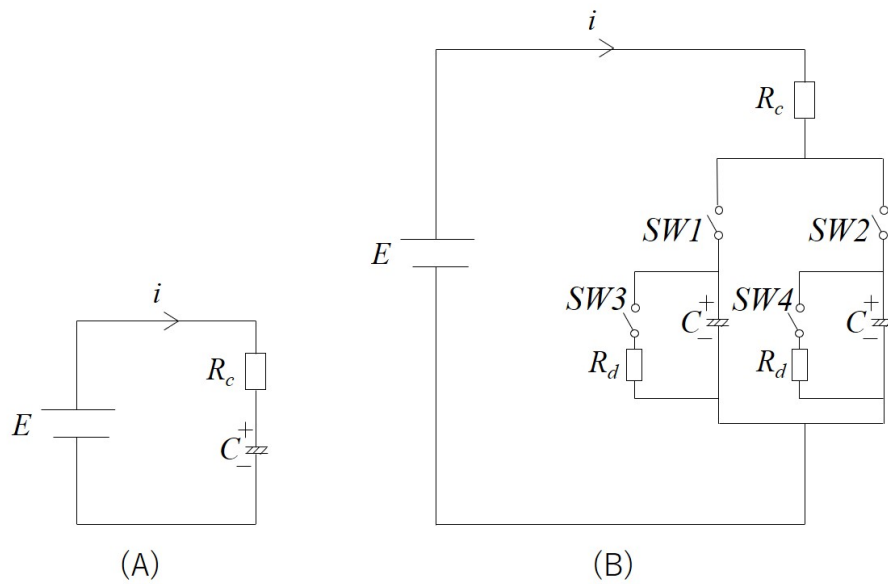


Fig. 3.9: RC circuit and charge/discharge circuit

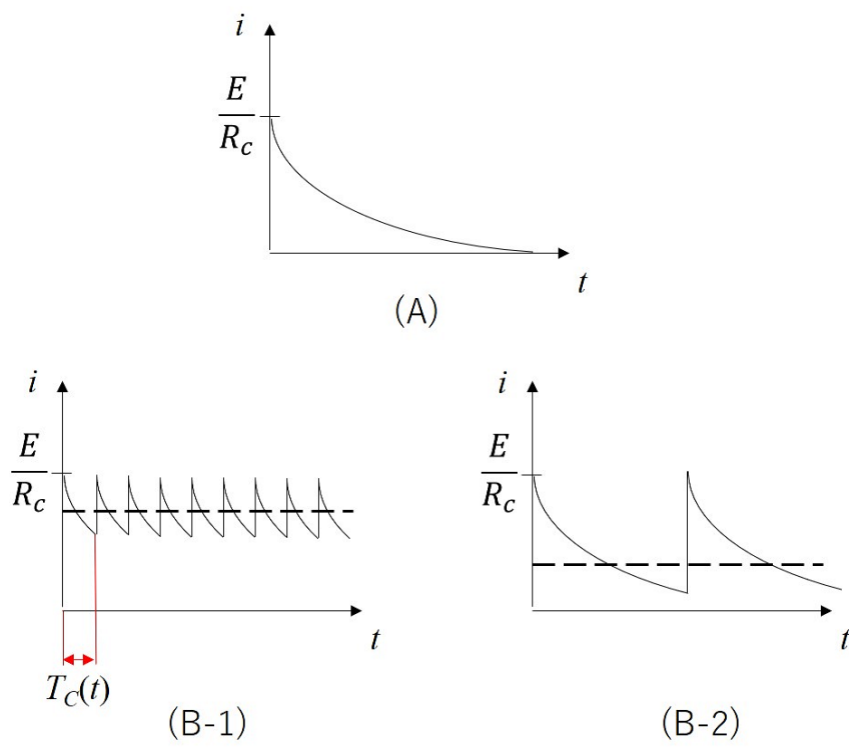
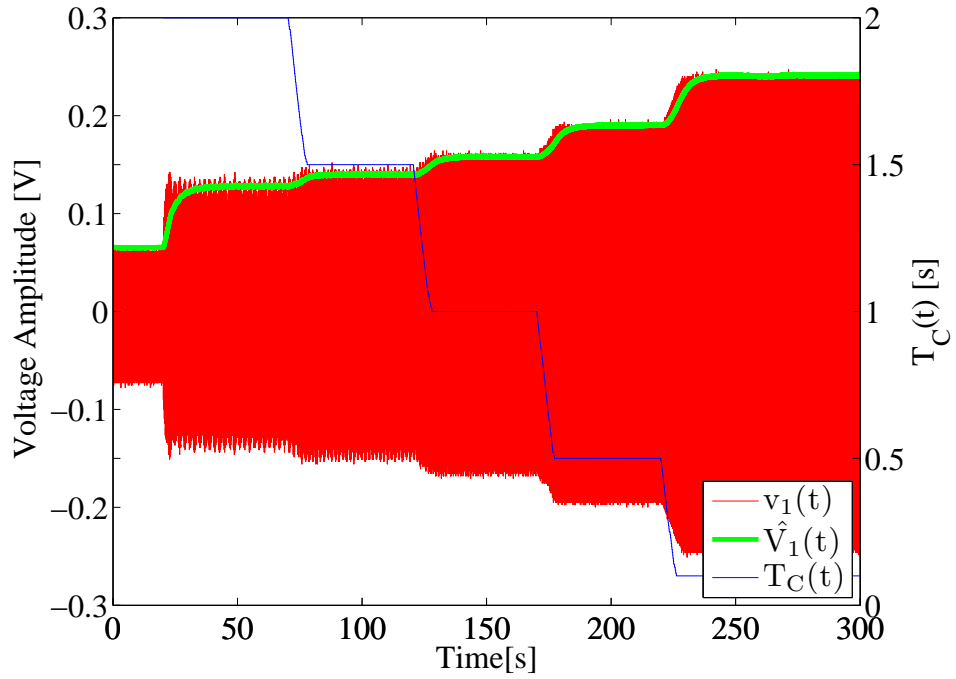


Fig. 3.10: Charging current waveform

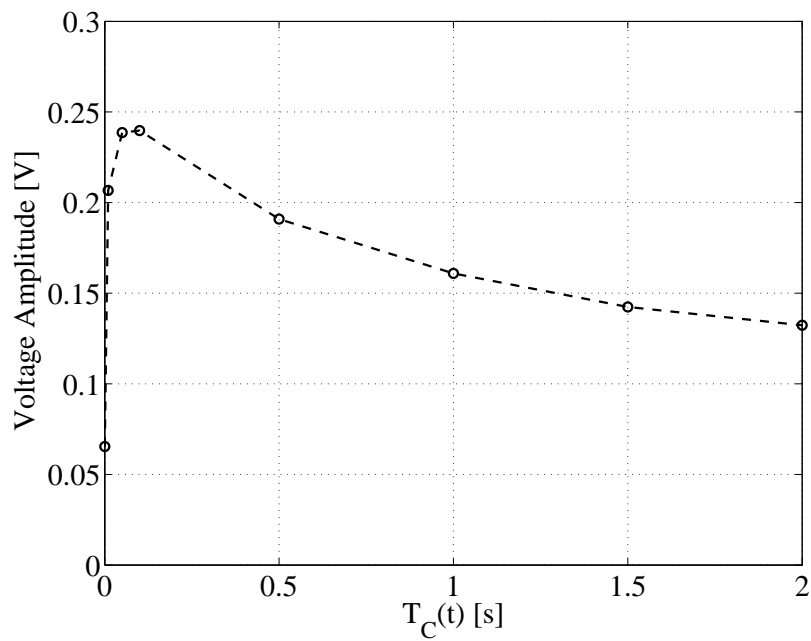
### 3.5 充放電周期の手動調整実験

充放電周期  $T_C(t)$  の手動調整実験をした際の充放電周期  $T_C(t)$  と振動体の振動振幅の関係について述べる。Fig. 3.11(a) に手動調整実験の時間応答を示す。リニアモータの変位指令  $w(t)$  の振幅を 0.05 mm, 加振周波数を 5.16 Hz とした。  $C = 47\mu\text{F}$  のコンデンサを用いた。赤線はレーザー変位計の出力信号  $v_1(t)$ , 緑線はその推定振幅  $\hat{V}_1$ , 青線は充放電周期  $T_C(t)$  を示す。手動調整開始 ( $t = 20$  s) 後, 発電機に充放電回路を接続し約 50 秒間隔で  $T_C(t)$  が次第に短くなるよう調節している。図から振動体の振動振幅は充放電周期  $T_C(t)$  が短くなるにつれて大きくなることがわかる。Fig. 3.11(b) に手動調整実験をした際の充放電周期  $T_C(t)$  と振動体の振動振幅の定常的な関係を示す。図から, 充放電周期  $T_C(t)$  と振動体の振動振幅には単調な関係 (充放電周期  $T_C(t)$  を短くすると振動体の振動振幅が大きくなる) があることがわかる。充放電周期  $T_C(t)$  が 0 s の場合, 発電機は充放電回路に接続されず開放となるため, 振動体の振動振幅は Fig. 3.11(a) の手動調整開始 ( $t = 20$  s) 前の振動振幅と同様な約 0.07 V となる。充放電周期  $T_C(t)$  が 0.1 s 以下は, 約 0.07 V に収束するように充放電周期  $T_C(t)$  を短くすると振動体の振動振幅が小さくなっているが原因は不明である。

充放電周期  $T_C(t)$  と振動体の振動振幅の関係は, 第 2 章の負荷抵抗値と振動体の振動振幅の関係と同様であるため, 第 2 章の定常発振制御の PI 補償器の出力を可変負荷抵抗の指令値  $R_S(t)$  から充放電周期  $T_C(t)$  に変更すれば充放電周期  $T_C(t)$  を動的に可変とすることで振動体の振動振幅を目標値一定に制御できると考えられる。



(a) Time response



(b) Relation between  $T_C(t)$  and voltage amplitude

Fig. 3.11: Manual adjustment experiment results of  $C = 47\mu\text{F}$



次に、コンデンサの静電容量を小さくすることで Fig. 3.11(b) の曲線は左に移動し、実験の計測時間を短縮できると考えられる。これは、第 3.4 節で述べたように、定電圧源  $E$  に充放電回路を接続し、一定の充放電周期  $T_C(t)$  で動作した場合 (Fig. 3.9 (B) ) , 瞬時電流  $i$  は Fig. 3.12 (A) に示すようにのこぎり波状の波形となり、黒破線に示す平均的な電流が流れると考えられる。充放電周期  $T_C(t)$  は一定で、コンデンサの静電容量を小さくした場合、Fig. 3.12 (B) のように瞬時電流  $i$  の減少する速度が速くなるため Fig. 3.12 (A) と比べ平均的な電流は小さくなると考えられる。以上より、充放電周期  $T_C(t)$  が一定でコンデンサの静電容量が小さいほど、平均的な電流は小さくなるため振動体の振動振幅は小さく Fig. 3.11(b) の曲線は左に移動すると考えられる。Fig. 3.13 に実際に静電容量を変えた際の充放電周期  $T_C(t)$  と振動体の振動振幅の定常的な関係を示す。赤点線、緑点線、青点線はそれぞれコンデンサの静電容量を  $C = 47\mu\text{F}$ ,  $C = 100\mu\text{F}$ ,  $C = 470\mu\text{F}$  で動調整実験を行ったときの結果である。図からコンデンサの静電容量が小さくなるにつれ曲線が左に移動していることがわかる。

所望の振動振幅とするのに必要な充放電周期  $T_C(t)$  が短いほど所望の振動振幅に収束する時間が短くなるため計測時間が短縮できる。そのため、以降の実験では  $C = 47\mu\text{F}$  のコンデンサを用いる。

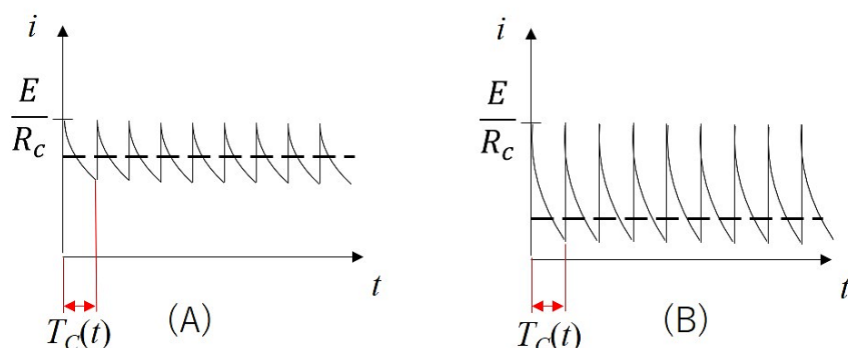


Fig. 3.12: Charging current waveform

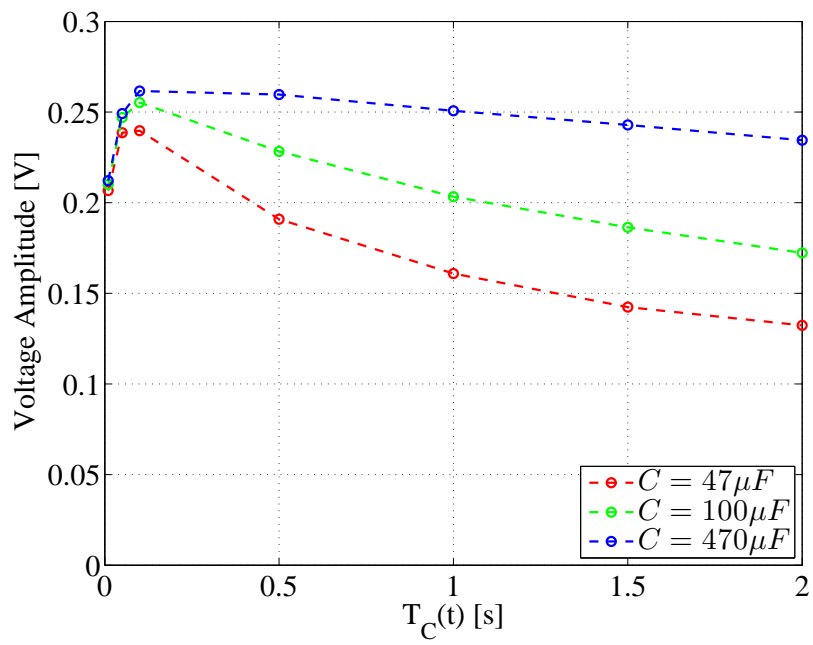


Fig. 3.13: Relation between  $T_C(t)$  and voltage amplitude

### 3.6 定常発振制御系の構成

制御系のブロック線図を Fig. 3.14 に示す. この制御系は, 第 2 章の定常発振制御系の PI 補償器の出力を可変負荷抵抗の指令値から充放電周期  $T_C(t)$  に変更した以外は同一である. レーザー変位計の出力信号  $v_1(t)$  を絶対値関数とローパスフィルタ (カットオフ角周波数  $\omega_f = 0.25\text{rad/s}$ ) 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. 推定振幅  $\hat{V}_1(t)$  とその目標値  $V_1^*$  との差分を PI 補償器に入力する. PI 補償器の出力  $u(t)$  は, 指数関数に通すことで正数に変換され, それを充放電周期  $T_C(t)$  として用いる.

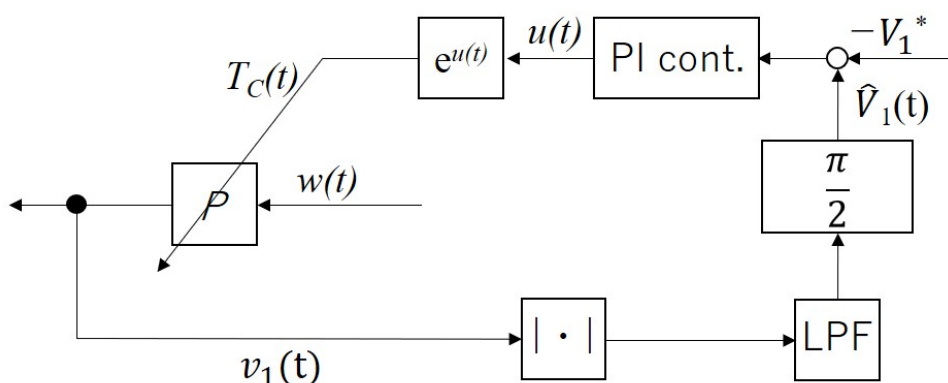


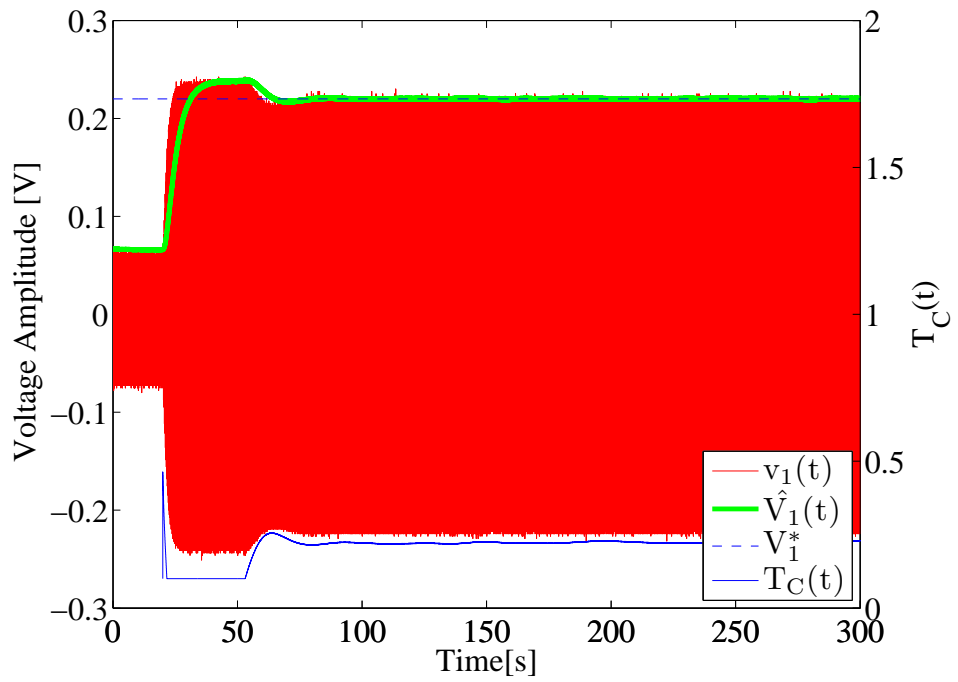
Fig. 3.14: Block diagram of experimental apparatus

### 3.7 実験結果

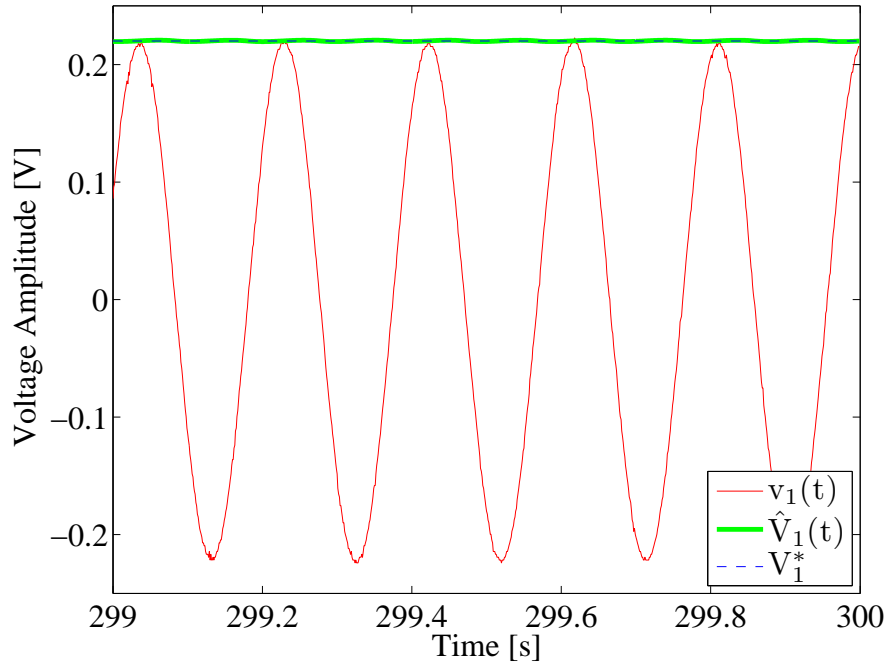
本章内で述べた装置と制御系を用いて振動体の振幅を目標値一定とする制御実験を行った. その結果について述べる. リニアモーターの変位指令  $w(t)$  の振幅を 0.05 mm, 加振周波数を 5.16 Hz とした. 目標値  $V_1^*$  は Fig. 3.13 から  $C = 47\mu\text{F}$  のコンデンサが設定した充放電周期  $T_C(t)$  の下限値 0.1 s ~ 2.0 s の間で実現可能な 0.22 V とした. リニアモーターの駆動を開始し振動体の振動振幅が定常状態に落ち着いた後, 計測を始めてから  $t = 20$  s 後に定常発振制御を開始している.

Fig. 3.15(a) に安定な結果が得られた際の代表的な時間応答を示す. 比例・積分ゲインはそれぞれ  $K_P = 5.0$ ,  $K_I = 5.0$  である. 赤線はレーザー変位計の出力信号  $v_1(t)$ , 緑線はその推定振幅  $\hat{V}_1(t)$ , 青破線は目標値  $V_1^*$ , 青線は充放電周期  $T_C(t)$  を示す. 制御開始 ( $t = 20$  s) 後, 充放電周期  $T_C(t)$  が自動調整され,  $t = 80$  s 後には推定振幅  $\hat{V}_1(t)$  は目標値一定となる様子が確認できる. また, Fig. 3.15(b) に示す

拡大図 ( $t = 299 \sim 300$  s の間の応答) から, レーザー変位計の出力信号  $v_1(t)$  が目標値 0.22 V に収束していることが確認できる.



(a) general view



(b) magnified view

Fig. 3.15: Time responses of  $K_P = 5.0$  and  $K_I = 5.0$

Fig. 3.16 に不安定な結果が得られた際の代表的な時間応答を示す。比例・積分ゲインはそれぞれ  $K_P = 5.0$ ,  $K_I = 50.0$  である。比例ゲイン  $K_P$  に対して積分ゲイン  $K_I$  が比較的大きいとき充放電周期  $T_C(t)$  は振動し、推定振幅  $\hat{V}_1(t)$  も目標値周りで振動することが確認できる。

以上より、コンデンサの充放電周期  $T_C(t)$  を動的に可変とする定常発振制御により、PI 補償器の比例ゲイン  $K_P$ , 積分ゲイン  $K_I$  を適切に選べば振動体の振動振幅を目標値一定にできることがわかった。

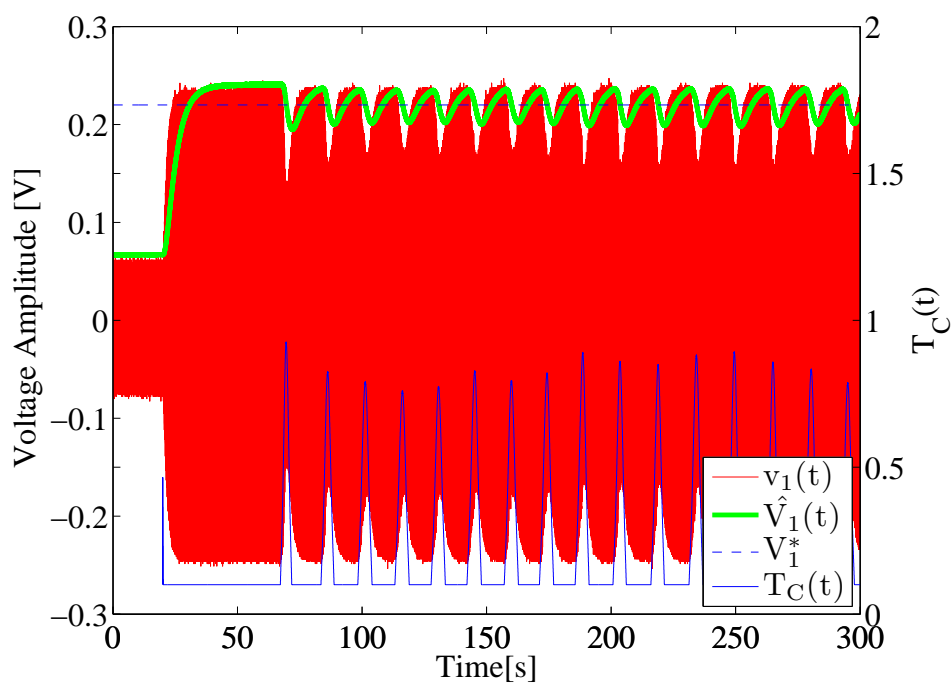


Fig. 3.16: Time responses of  $K_P = 5.0$  and  $K_I = 50.0$

## 第4章 制御系の安定条件に関する調査

本章では、第3章で提案した定常発振制御が安定となる条件を知るため、比例ゲイン  $K_P$ 、積分ゲイン  $K_I$ 、および目標値に関する安定条件について調査した。

### 4.1 比例ゲイン $K_P$ 、積分ゲイン $K_I$ に関する安定条件

第2章では、負荷抵抗を可変とする定常発振制御は比例ゲイン  $K_P$ -積分ゲイン  $K_I$  平面における安定/不安定の境界線が、正の傾き、切片 ( $K_P = 0, K_I > 0$ ) を持つこと、境界線より下側 (上側) が安定 (不安定) になることを示した。第3章で提案した定常発振制御系は、第2章の定常発振制御系のPI補償器の出力を可変負荷抵抗の指令値  $R_S(t)$  から充放電周期  $T_C(t)$  に変更した以外は同一であるため安定条件も同様になると考えられる。制御系が安定となる比例ゲイン  $K_P$ 、積分ゲイン  $K_I$  を知るため実験的に調査した。

比例ゲイン  $K_P$ 、積分ゲイン  $K_I$  に関する安定条件を詳細に調査した結果を Fig. 4.1 に示す。リニアモータの変位指令  $w(t)$  の振幅を 0.05mm、加振周波数を 5.16Hz とした。目標値  $V_1^*$  は 0.22V とした。安定/不安定の判別は、時刻  $t = 290 \sim 300$  s の間の追従誤差  $\hat{V}_1(t) - V_1^*$  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断した。図から、安定/不安定の境界線は正の傾き、切片 ( $K_P = 0, K_I > 0$ ) を持つこと、境界線より下側 (上側) が安定 (不安定) になることがわかる。また、図中の  $K_P = 2$ 、 $K_I = 24$  は不安定だが、安定/不安定の境界線の下側に位置するため本来は安定となる。このことから、境界線付近では再現性がないことが考えられる (再現性の向上は今後の課題としたい)。

以上より、制御系が安定となる比例ゲイン  $K_P$ 、積分ゲイン  $K_I$  を実験的に調査し、第2章と安定条件が同様になることがわかった。

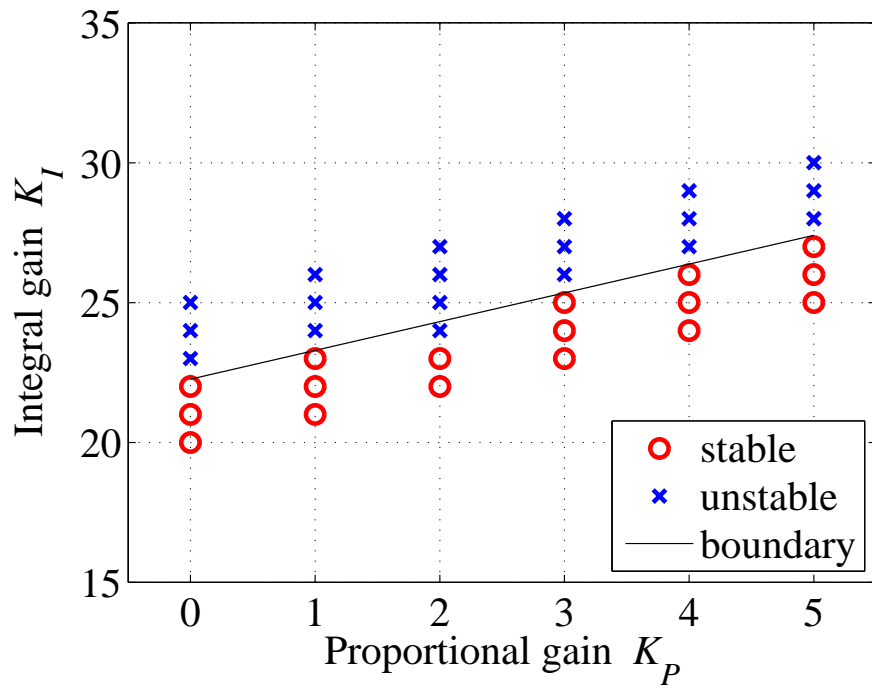


Fig. 4.1: Closed-loop stability with experiment



## 4.2 目標値に関する安定条件

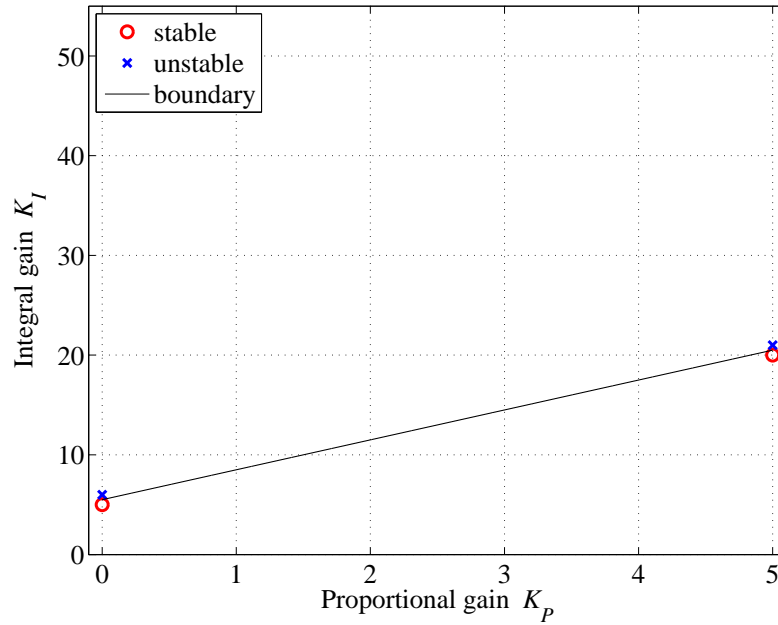
先行研究 [9] では，制御系が安定となる比例ゲイン  $K_P$ ，積分ゲイン  $K_I$  について実験および式 (2.2) の固有値解析より調査し両者が整合することを報告している．しかし，式 (2.2) の行列内に含まれるそれ以外のパラメーターに関する安定条件については検討されていない．そこで本論文では，目標値に関する安定条件について式 (2.2) の固有値解析および実験的に調査した．

### 4.2.1 固有値解析による調査

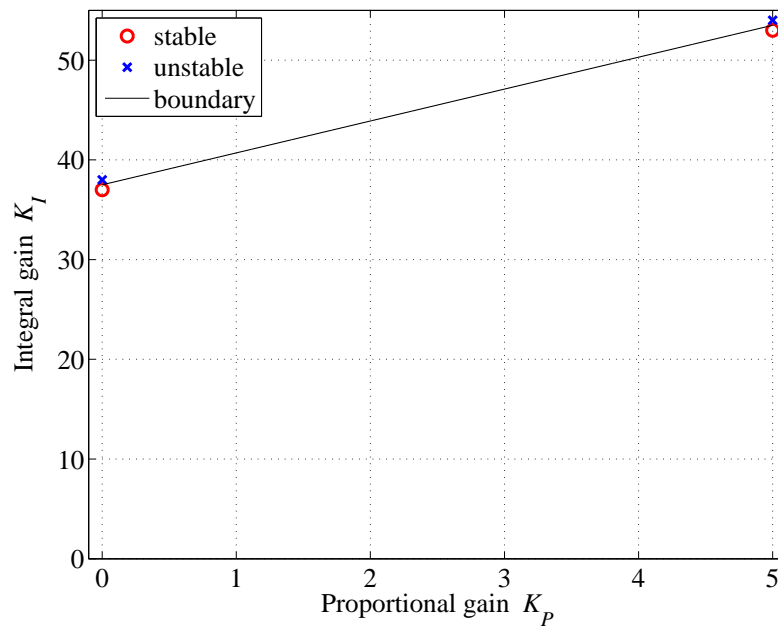
本項では，式 (2.2) の固有値解析を行い安定/不安定の境界線の切片および傾きの変化を確認する．固有値解析に使用したパラメーターを Table. 4.1 に示す．式 (2.2) の  $\frac{\partial N}{\partial \zeta_2}$  は刻み幅  $1 \times 10^{-10}$  で差分近似した．境界線の切片および傾きの変化を確認するため，各  $K_P$  の詳細な調査はせず比例ゲイン  $K_P$  は 0.0, 5.0 の 2 点のみ，積分ゲイン  $K_I$  の境界の刻みは 1.0 とした．Fig.4.2 に固有値解析の結果を示す．式 (2.2) の固有値の実部がすべて負ならば安定 (丸印)，それ以外は不安定 (バツ印) が記載されている．Fig. 4.2(a) から目標値が 1.0 の場合，境界線は  $K_I = 3.0K_P + 5.5$ ，Fig. 4.2(b) から目標値が 0.1 の場合，境界線は  $K_I = 3.2K_P + 37.5$  となる．このことから，目標値を大きく設定すると境界線の切片および傾きは小さくなることがわかった．また，切片は約 85 %，傾きは約 6 %減少しており，傾きの変化は小さいことがわかった．

Table 4.1: Eigenvalue analysis parameters of forth-order plant

case	$X_1^*$	$\zeta_1$	$\alpha$	$X_0$	$\omega_f$	$\frac{\omega_n}{2\pi}$
(a)	1.0	0.1	0.05	0.5	0.25	5
(b)	0.1					



(a)  $X_1^* = 1.0$



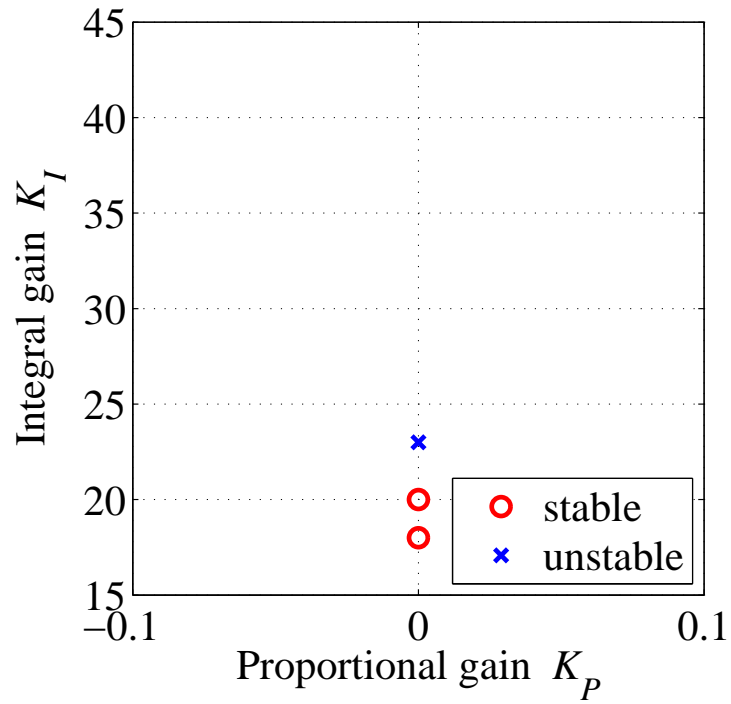
(b)  $X_1^* = 0.1$

Fig. 4.2: Closed-loop stability with Eigenvalue analysis

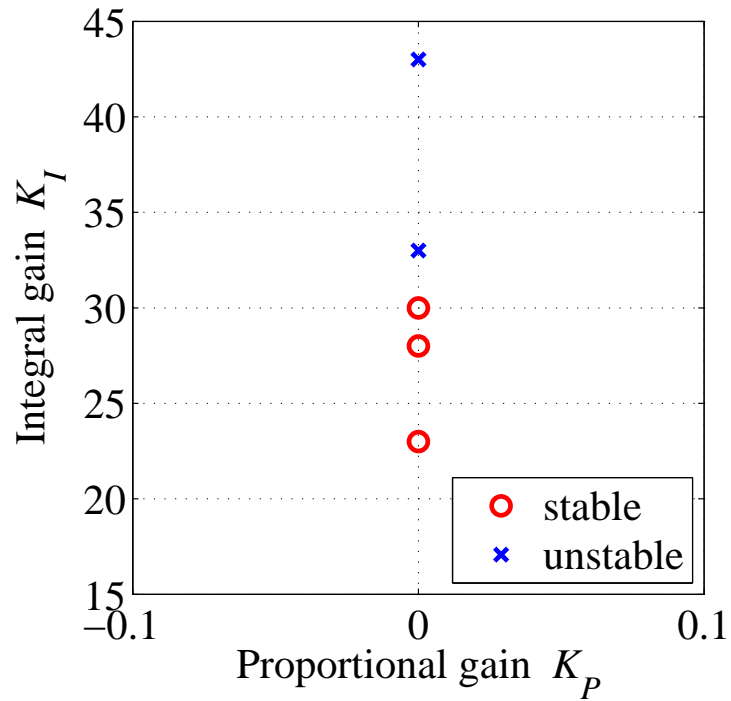
#### 4.2.2 実験による調査

本項では、目標値に関する安定条件を実験的に調査した結果について述べる。第 4.1 節から、実験は安定/不安定の境界線付近では再現性がないこと、第 4.2.1 項から境界線の傾きの変化は小さいことから傾きの変化については調査せず、切片の変化を大まかに調査した。目標値に関する安定条件を大まかに調査した結果を Fig.4.3 に示す。リニアモータの変位指令  $w(t)$  の振幅を 0.05mm、加振周波数を 5.16Hz とした。目標値は 0.22V, 0.18V とした。Fig. 4.3(a) から、目標値が 0.22V の場合、 $K_P = 0$  における境界は  $K_I = 20 \sim 23$  の間にあり、Fig. 4.3(b) から、目標値が 0.18V の場合、 $K_P = 0$  における境界は  $K_I = 30 \sim 33$  の間にあることがわかる。以上より、実験において目標値を大きく設定すると安定/不安定の境界線の切片が小さくなることがわかった。

本節では、目標値に関する安定条件を式 (2.2) の固有値解析および実験的に調査した。今後の課題は、第 3 章で提案した定常発振制御の実現可能性を示すために目標値を大きく設定すると安定/不安定の境界線の切片および傾きが小さくなるメカニズムを解明することである。



(a)  $V_1^* = 0.22$  V



(b)  $V_1^* = 0.18$  V

Fig. 4.3: Closed-loop stability with experiment

## 第5章 まとめ

### 5.1 結論

本論文では、振動発電機の発電効率を維持するために振動体の振動振幅を目標値一定とする制御問題において、エネルギー回収を利用するために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定常発振制御を提案した。

第3章では、エネルギー回収を利用し振動体の振動振幅を目標値一定とするために2つのコンデンサの充電を繰り返す充放電回路を提案した。充放電周期の手動調整実験をした結果、充放電周期と振動体の振動振幅には単調な関係(充放電周期を短くすると振動体の振動振幅が大きくなる)があることがわかった。これは、先行研究[9]の負荷抵抗値と振動体の振動振幅の関係と同様であるため、先行研究[9]の定常発振制御の出力の可変負荷抵抗の指令値から充放電周期に変更し振動体の振動振幅を目標値一定とする制御実験を行った。結果、PI補償器の比例ゲイン  $K_P$ 、積分ゲイン  $K_I$  を適切に選べば制御系が安定となることを示した。

第4章では、第3章で提案した制御系が安定となる条件を知るため安定条件について調査した。比例ゲイン  $K_P$ 、積分ゲイン  $K_I$  に関する安定条件を実験的に調査し、比例ゲイン  $K_P$ -積分ゲイン  $K_I$  平面における安定/不安定の境界線が、正の傾き、切片 ( $K_P = 0, K_I > 0$ ) を持つこと、境界線より下側(上側)が安定(不安定)になることを示した。次に、目標値に関する安定条件を固有値解析および実験的に調査した。固有値解析では目標値を大きく設定すると安定/不安定の境界線の切片および傾きが小さくなることを示した。また、実験では目標値を大きく設定すると安定/不安定の境界線の切片が小さくなることを示した。今後の課題は、本論文で提案した定常発振制御の実用可能性を示すために目標値を大きく設定すると安定/不安定の境界線の切片および傾きが小さくなるメカニズムを解明することである。

## 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．また，本研究を進めるにあたり実験装置の製作にご支援いただいた村山章平君に心より御礼申し上げます．

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感謝し，謝辞とさせていただきます．

## 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, No. 7 (2016)
- [2] Kimihiko NAKANO, Yoshihiro SUDA, Shigeki NAKADAI, Self-Powered Active Vibration Control Using Continuous Control Input, JSME International Journal, Series C, Vol. 43, No. 3, pp. 726-731 (2000)
- [3] Sang-soo kim, Yohji Okada, Vibration Resistance Type Energy Regenerative Damper Using Pulse Width Modulated Step-up Chopper, Vibration and Acoustics, Vol. 124, pp. 110-115 (2002)
- [4] Hui Shen, Jinhao Qiu, Hongli Ji, Kongjun Zhu, Marco Balsi, Ivan Giorigio, Frances Dell'Isola, A low-power circuit for piezoelectric vibration control by synchronized switching on voltage sources, Sensors and Actuators A 161, pp. 245-255 (2010)
- [5] Wen-ai Shen, Songye Zhu, You-lin Xu, An experimental study on self-powered vibration control and monitoring system using electromagnetic TMD and wireless sensors, Sensors and Actuators A 180, pp. 166-176 (2012)
- [6] 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, pp. 1031-1038 (2012)
- [7] Shiyong Li, Jun Xu, Xiaohui Pu, Tao Tao, Xuesong Mei, A novel design of a damping failure free energy-harvesting shock absorber system, Mechanical Systems and Signal Processing 132, pp. 640-653 (2019)
- [8] Xinping Cao, Wen-Jen Chiang, Ya-Chin King, Electromagnetic Energy Harvesting Circuit With Feedforward and Feedback DC-DC PWM Boost Converter for Vibration Power Generator System, IEEE TRANSACTION ON POWER ELECTRONICS, VOL. 22, NO. 2, pp. 679-685 (2007)

- [9] 永井 和貴, 斎藤 浄, 稲田 千翔之, 小林 泰秀, 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, システム制御情報学会論文誌, Vol. 32, No. 8, pp. 318-326 (2019)
- [10] 稲田 千翔之, 永井 和貴, 小林 泰秀, 振動発電機を用いたエネルギー散逸と生成による振動体振幅の制御, 日本機械学会 北陸信越支部 第 55 期 総会・講演会 (2018)
- [11] 稲田 千翔之, 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, 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 (2019)



# 研究業績

## 国内学会（講演発表者の氏名に○印を付す）

1. 日本機械学会 北陸信越支部 第57期 総会・講演会

”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”

○柴崎 敬大， 小林 泰秀

開催日：令和2年3月8日