平成26年度
長岡技術科学大学
工学部 課題研究論文

# 圧電素子を用いた設置位置が移動可能なアクチュエータの製作と梁の振動制御への応用

A development of movile piezoelectric actuator for active vibration control of flexible beam

長岡技術科学大学　工学部
機械創造工学課程　13304486

著者氏名　島村健太

指導教員　小林泰秀 准教授

平成27年2月20日

# 目 次

**第 1 章　緒言** **5**

**第 2 章　柔軟梁のフィードフォワード外乱抑制制御系** **7**

2.1　フィードフォワード外乱抑制制御問題 . . . . . 7

2.2　実験装置 . . . . . 9

2.3　物理モデル . . . . . 14

**第 3 章　間接作用型圧電アクチュエータの製作と性能評価** **18**

3.1　アクチュエータの製作 . . . . . 18

3.2　アクチュエータの性能評価 . . . . . 20

3.2.1　アクチュエータ性能評価実験方法 . . . . . 21

3.2.2　アクチュエータの校正 . . . . . 24

**第 4 章　周波数応答実験結果の補正と物理モデルとの比較** **32**

4.1　周波数応答実験 . . . . . 32

4.2　センサの校正 . . . . . 36

4.2.1　エラーセンサの校正 . . . . . 36

4.2.2　リファレンスセンサの校正 . . . . . 39

4.3　周波数応答実験結果の補正 . . . . . 42

**第 5 章　結言** **44**

**参考文献** **45**

# 図 目 次


2.1 Feedforward disturbance attenuation control system of flexible beam . . . . . 7
2.2 Experimental apparatus . . . . . 10
2.3 Appearance of experimental apparatus . . . . . 10
2.4 Fixed end . . . . . 11
2.5 Piezoelectric device . . . . . 11
2.6 Reference sensor . . . . . 12
2.7 Error sensor . . . . . 12
2.8 Power amp . . . . . 13
2.9 Closed-loop system . . . . . 14

3.1 Stainless plate . . . . . 19
3.2 Indirectacting actuator . . . . . 20
3.3 Setting of actuator and sensor on cantilever . . . . . 21
3.4 Spring wrench . . . . . 22
3.5 Order of the fastening . . . . . 22
3.6 Input signal . . . . . 23
3.7 Output voltage of act1 . . . . . 24
3.8 Output voltage of act2 . . . . . 25
3.9 Output voltage of act3 . . . . . 26
3.10 Output voltage of act4 . . . . . 27
3.11 Output voltage of act5 . . . . . 28
3.12 Output voltage of act6 . . . . . 29
3.13 5th of act1(300-305[s]) . . . . . 30

4.1 Freqency responce of $G_{zw}$ . . . 33
4.2 Freqency responce of $G_{yw}$ . . . 33
4.3 Freqency responce of $G_{zu}$ . . . 34
4.4 Freqency responce of $G_{yu}$ . . . 34
4.5 Err.sensor calibration . . . 36
4.6 Err.sensor outputvoltagedisplacement(0-2[mm]) . . . 38
4.7 Err.sensor outputvoltagedisplacement(0-1[mm]) . . . 38
4.8 Ref.sensor calibration . . . 39
4.9 Ref.sensor outputvoltagedisplacement(0-2[mm]) . . . 41
4.10 Ref.sensor outputvoltagedisplacement(0-0.5[mm]) . . . 41
4.11 Freqency responce of $\hat{G}_{zw}$ . . . 42
4.12 Freqency responce of $\hat{G}_{yw}$ . . . 43
4.13 Freqency responce of $\hat{G}_{zu}$ . . . 43
4.14 Freqency responce of $\hat{G}_{yu}$ . . . 43

# 表 目 次

2.1 Experimental instruments . . . . . 9
2.2 Experimental parameter . . . . . 9

3.1 Calibration of act . . . . . 30

4.1 Err.sensor outputvoltagedisplacement(0-2[mm]) . . . . . 37
4.2 Err.sensor outputvoltagedisplacement(0-1[mm]) . . . . . 37
4.3 Ref.sensor outputvoltagedisplacement(0-2[mm]) . . . . . 40
4.4 Ref.sensor outputvoltagedisplacement(0-0.5[mm]) . . . . . 40

# 第1章　緒言

近年，宇宙構造物や産業用マニピュレータなどの大型構造物に軽量な薄肉の材料が用いられる．しかし，これらは柔軟低剛性な物理特性を有しているため容易に振動が発生する．梁の曲げ振動を抑制する制御系設計問題は，これまでに多く研究されている．その一つとして，波動吸収法の研究がある．波動吸収法はアクチュエータを複数配置し，進行波もしくは後退波を検出し，それらを除去する．伝播する波自体を制御するため多くの振動モードを制御可能となっている．

ダクト能動騒音制御の分野では，ダクト上流の騒音をリファレンスマイクで検出し，ダクト下流のエラーセンサにおける騒音が抑制されるように，ダクト中間の制御音源を駆動させる制御系をフィードフォワード能動騒音制御系と呼んでいる．一対の音源とそれらの距離に依存するむだ時間を組み合わせてダクトの一方向にのみ制御音を放射する指向性音源を構成することにより，開ループ系のフィードバックパスにおける位相遅れが増加すること，制御帯域におけるコントローラのゲインが下がること，小さな制御入力でよい制御性能が達成できることが実験的に示されている [1, 2, 3].

梁の外乱抑制制御系においても，同様にセンサとアクチュエータを配置した系はアクティブフィードフォワード制御系と呼ばれ，能動騒音制御の研究に動機付けられた研究がなされている．これに関して先行研究では，指向性音源の手法を片持ち梁の振動抑制系に適用し，物理モデルに基づき以下のことが示されている [4].

- 波の伝番速度が周波数に依存する曲げ振動に対しても指向性アクチュエータの効果が得られる.
- 指向性アクチュエータを用いることにより，制御アクチュエータと固定端の間に生じる定在波が抑制され，リファレンスセンサの位置に定在波の節が一致することに起因する補償器のピークゲインが抑制される．同じ理由で，外乱入力から制御入力および観測出力までのゲイン特性におけるピークゲインが抑制される.

しかし，指向性アクチュエータを使用した実験を行う場合，本来は特性の揃った一対のアクチュエータを使用することが望ましいが，先行研究においては同じ形・厚さの２枚の圧電素子を貼り付けただけ

のものを指向性アクチュエータとして実験を行っており，特性の確認は行っていない．また，周波数応答実験結果と物理モデルの次元を合わせていないため，同じ次元での比較を行っていない．特性の揃った指向性アクチュエータを用意し，周波数応答実験結果と物理モデルの次元を一致させるためにはアクチュエータの個体差の把握と，アクチュエーターが移動可能であることが条件となる．圧電素子を梁に直接接着することによりアクチュエータとして使用することがしばしば行われるが，この場合圧電素子単体で個体差を評価することが困難であること，一度接着したものを取り外して再利用することができないなどの問題点があり，指向性アクチュエータを構成することは困難である．

そこで本論文では，薄いステンレス板に圧電素子を貼り付け，それを梁にボルト締結してアクチュエータとして使用する，間接作用型圧電アクチュエータを提案する．梁にボルト固定するアクチュエータとしては積層型圧電素子を用いたモーメントアクチュエータが提案されている [5]．しかし，モーメントアクチュエータは積層型圧電素子を用いた立体型のアクチュエータであるため，それを梁に取り付けると単純な梁のモデルでの議論が困難であると考えられる．他にも柔軟梁を対象としたアクチュエータはいくか存在するが，移動可能で形が平坦なアクチュエータは知られていない [6, 7, 8]．これに対して本論文で提案するアクチュエータはステンレス板と圧電素子が梁の厚みに比べてとても薄く平坦であるため，単純な梁の物理モデルを用いた議論が可能と考えられる．

本論文の構成は次の通りである．まず第 2 章において柔軟梁のフィードフォワード外乱抑制制御系及び実験装置・物理モデルについて述べる．次に第 3 章で間接作用型圧電アクチュエータの製作と性能評価について述べる．最後に第 4 章で周波数応答実験結果の補正と物理モデルとの比較について述べる．梁の物理モデルと周波数応答実験結果を比較し，両者が概略一致することから両者の妥当性を示す．

# 第2章　柔軟梁のフィードフォワード外乱抑制制御系

本論文では，先行研究 [4] で用いられた片持ち梁とほぼ同じ構成の実験装置を使用する．そこで本章でその結果の概要について述べる．ただし，先行研究では圧電素子を梁に直接接着していたのに対し，本論文ではボルト締結して脱着可能なアクチュエータを用いる点が大きく異なる．

## 2.1　フィードフォワード外乱抑制制御問題

Fig.2.1 に長さ $L$ の柔軟梁におけるフィードフォワード外乱抑制制御系のブロック線図を示す．リファレンスセンサ (Ref. Sensor)，エラーセンサ (Err. Sensor) の出力信号を $y$(観測出力), $z$(評価出力) とし，左端からの距離を $l_y$, $l_z$ とする．外乱用アクチュエータ (ACT1)，制御用アクチュエータ (ACT2, ACT3) の駆動信号を $w$(外乱入力), $u$, $v$(制御入力) とし，左端からの距離を $l_w$, $l_u$, $l_v$ とする．本制御系の目的は，外乱入力 $w$ により梁に生じた曲げ振動を観測出力 $y$ の情報に基づき制御アクチュエータを駆動することで，エラーセンサにおける振動を低減させることである．図の右方向を下流，左方向を上流と呼ぶ．

制御用アクチュエータの駆動方法として次の三つの場合を考える:

Case (a)　無指向性アクチュエータ：$v(t) = 0$ として ACT2 のみを駆動する．

Case (b)　むだ時間型指向性アクチュエータ：ACT2 が上流へ放射する進行波を ACT3 が抑制するよう

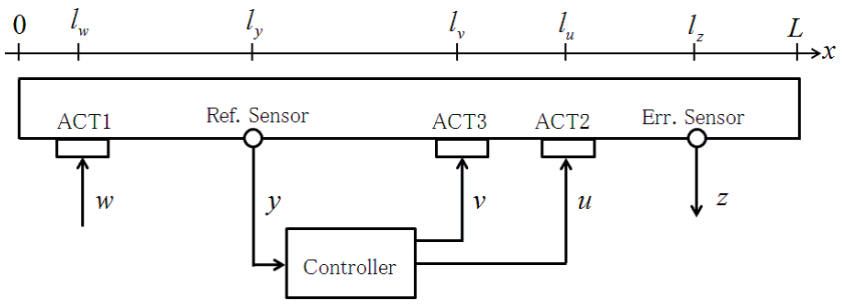



Fig. 2.1: Feedforward disturbance attenuation control system of flexible beam

に駆動する．

$$v(t) = -u(t - T_d), \quad T_d = \frac{L_d}{c(\omega_d)}, \quad L_d := l_u - l_v \tag{2.1}$$

ただし $c(\omega)$ は角周波数 $\omega$ の波の伝播速度である．上流へ放射される進行波を完全に相殺したい周波数 (角周波数) が $f_d$ ($\omega_d$) で与えられるとする．

Case (c) 周波数依存のむだ時間を用いた指向性アクチュエータ：次式を満足するように $u(t)$ から $v(t)$ を生成し，ACT2 が上流へ放射する進行波を ACT3 が完全に相殺するように駆動する．

$$v(j\omega) = -\Theta(j\omega)u(j\omega), \quad \Theta(j\omega) := e^{-jkL_d} \tag{2.2}$$

ただし，$k$ は波数であり，次式で定義される．

$$k := \frac{\omega}{c(\omega)} \tag{2.3}$$

梁の曲げ振動において，角周波数が $\omega$ の進行波の伝播速度は次式で与えられる．

$$c(\omega) = \left(\frac{EI}{\rho A}\right)^{\frac{1}{4}} \sqrt{\omega} = \left(\frac{Ea^2}{12\rho}\right)^{\frac{1}{4}} \sqrt{\omega} \tag{2.4}$$

ただし，$E$, $\rho$, $A$, $I$, $a$ はそれぞれ，梁のヤング率，密度，断面積，断面二次モーメント，厚みである．

ダクト能動騒音制御系では，制御用アクチュエータとして音源 (スピーカ) が用いられ，Case (b) で駆動される音源は Swinbanks の音源として知られる．この場合，音波の伝播速度は周波数に依存せず一定とみなせるため，Case (b), (c) は同一となる．すなわち，ダクトの一方 (Fig.2.1 の左側) に放射された各音源の音波は相殺され，もう一方にのみ音波を放射する指向性音源となる．ただし，音源間の距離を $L_d$，音速を $c_0$ とするとき，$T_d = L_d/c_0$ である．また，指向性音源を用いることにより制御性能が向上するなどの利点があることが知られている．これらの利点は，制御音源からリファレンスマイクまでの経路 (フィードバックパスと呼ぶ) における等価的な距離が延長されることによる．実際，制御音源とダクト開口端までの距離の二倍分延長されることが示されている．制御音源とリファレンスマイク間の距離が長いときに良い閉ループ性能が得られることも経験的に知られている．

一方，梁の曲げ波では波の伝播速度がその周波数に依存するため，上流方向の進行波を完全に相殺するために Case (c) の構成が採用される．この場合，信号 $v(t)$ と $u(t)$ の間には，Case (b) のような単純

な時間遅れの関係は成り立たず，$u(t)$ から $v(t)$ を構成するために $e^{-jkL_d}$ の周波数応答を近似する高次システムが必要となる．その結果，指向性アクチュエータを容易に実現できるとは限らない．

そこで先行研究 [4] では，梁の曲げ振動問題においても，むだ時間を用いた Case (b) の指向性アクチュエータを採用することを提案している．この場合，むだ時間は簡単にディジタル実装することができ，Case (c) よりも容易に指向性アクチュエータを実現できる．ただし，与えられた $f_d$ 以外の周波数において，ACT2 が直接上流に放射する進行波を ACT3 で完全に相殺することはできず，実際に指向性のある進行波を生成できるかどうかは自明ではない．

## 2.2 実験装置

Fig.2.1 のフィードフォワード外乱抑制制御系における Case (a) を実際に構成し，その実験装置の概略を Fig.2.2 に，概観を Fig.2.3 に，装置の諸元を Table 2.1 に示す．また，片持ち梁の物理的なパラメータは Table 2.2 に示す．

Table. 2.1: Experimental instruments

| | |
|---|---|
| Flexible beam | シンワ，長尺シルバー 1,000mm × 35mm × 1.5mm (SUS420j2) |
| Actuator | 圧電素子：富士セラミックス，C-6 45mm × 40mm × 0.5mm<br>ステンレス板：久宝金属製作所，75mm × 40mm × 0.3mm (SUS430) |
| Gap Sensor | 電子応用，AEC-5505 |
| Laser | NEC，GLG5230 |
| PSD | PSD：浜松ホトニクス，S3931<br>PSD 信号処理回路：浜松ホトニクス，C3683-01 |
| PC | Dell，Dimension 2400 |
| OS | Linux 2.4.22 (RTLinux-3.2pre3) |
| A/D | CONTEC，AD12-16(PCI) ± 10V 10$\mu$s |
| D/A | CONTEC，DA12-4(PCI) ± 5V 10$\mu$s |

Table. 2.2: Experimental parameter

| | |
|---|---|
| ヤング率 $E$ | $2.04 \times 10^{11}$[Pa] |
| 密度 $\rho$ | $7.78 \times 10^{3}$[kg/m$^3$] |
| 断面積 $A$ | $5.25 \times 10^{-5}$[m$^2$] |
| 断面二次モーメント $I$ | $9.84 \times 10^{-12}$[m$^4$] |

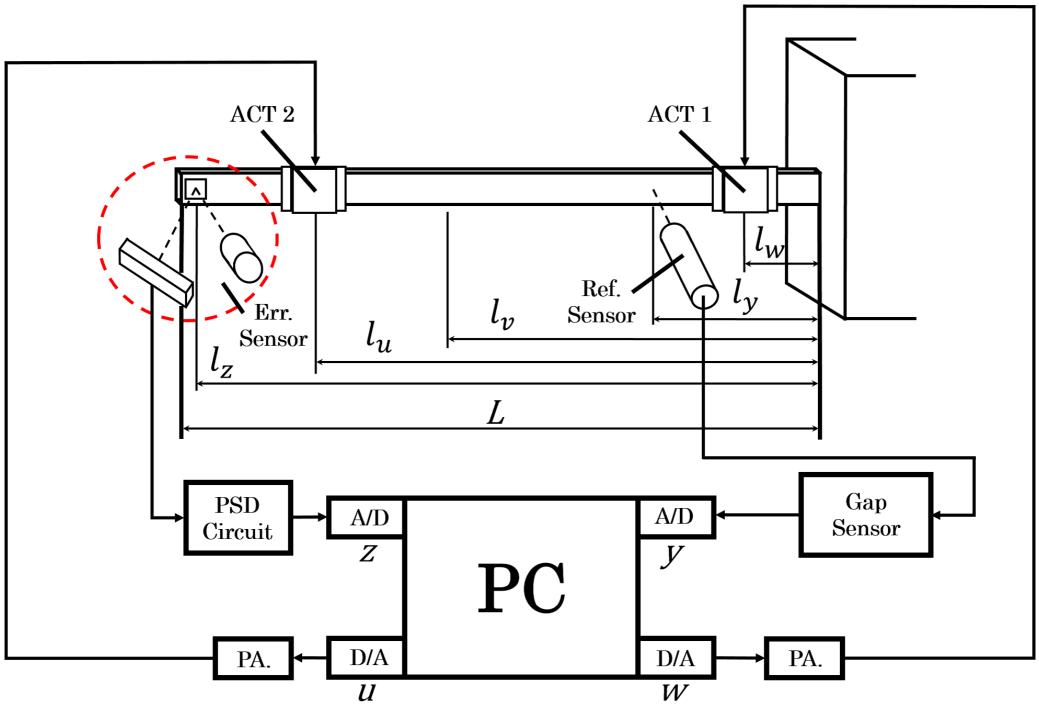



Fig. 2.2: Experimental apparatus

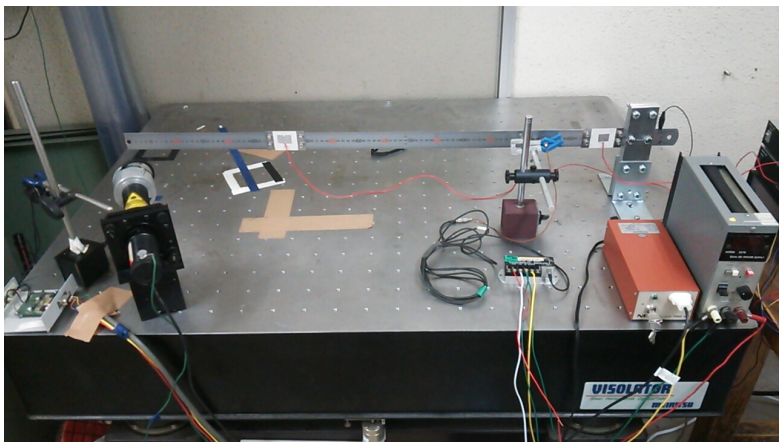


Fig. 2.3: Appearance of experimental apparatus

ステンレス製の長さ 1,000[mm]，幅 35[mm]，厚さ 1.5[mm] の長尺を Fig.2.4 のように防振台から高さ 135[mm] の位置に L 字アングルとアルミプレートで挟み込み，アルミプレートと長尺をボルト固定することで固定して長さ $L = 0.95$[m] の片持ち梁としている．梁の固定端側を上流，自由端側を下流と呼ぶ．

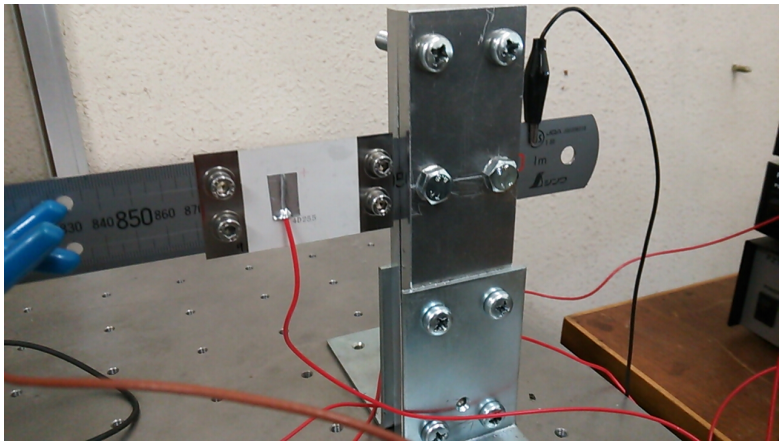


Fig. 2.4: Fixed end

振動生成用のアクチュエータは，長さ 75[mm]，幅 40[mm]，厚さ 0.3[mm] のステンレス板に，長さ 45[mm]，幅 40[mm]，厚さ 0.5[mm] の圧電素子（チタン酸ジルコン酸鉛）をエポキシ系接着剤を用いて貼り付け，アルミテープで導線を固定している．これを Fig.2.5 にようにボルトナットで固定することで梁に角変位を与える．それぞれ外乱用アクチュエータの ACT1 が $l_w = 0.04$[m]，制御用アクチュエータの ACT3 が $l_v = 0.38$[m]，ACT2 が $l_u = 0.64$[m] の位置に取り付けている。

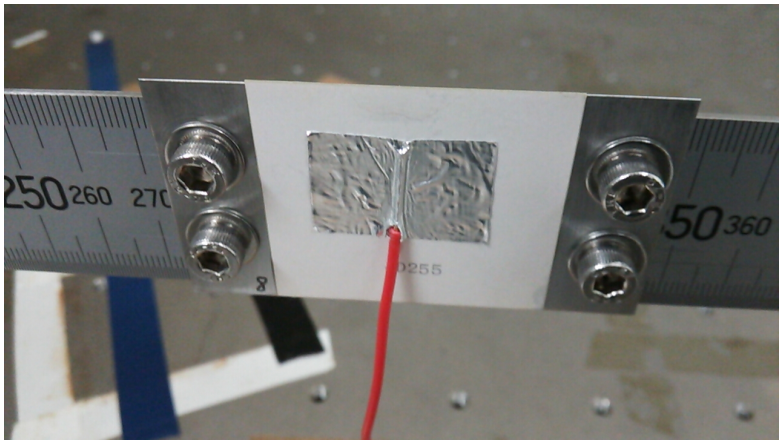


Fig. 2.5: Piezoelectric device

また，Ref.sensor として Fig.2.6 に示す渦電流式変位計，Err.sensor として Fig.2.7 に示すレーザー，鏡，PSD（Position Sensitive Detector）素子を用いた三角法で梁の振動を検出できる光学系を用いる．それぞれ，Ref.sensor は $l_y = 0.15$[m]，Err.sensor の鏡は $l_y = 0.945$[m] の位置に設置している．

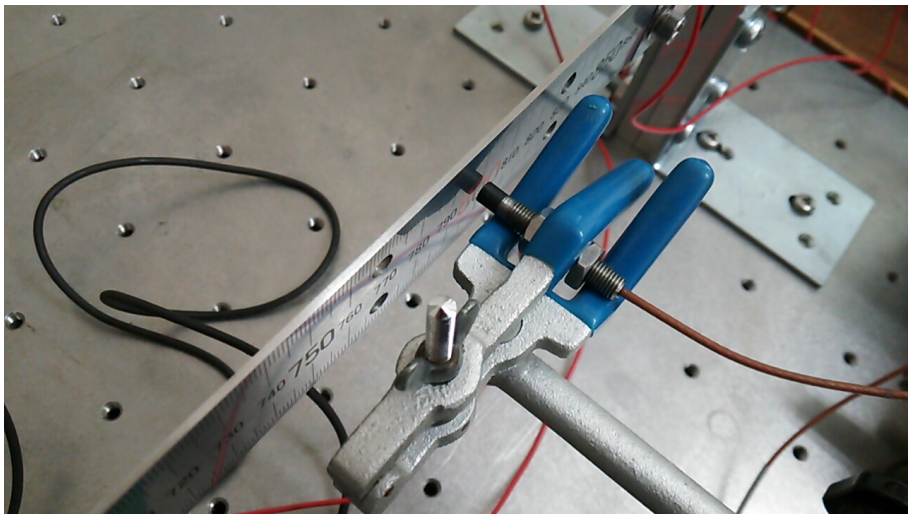


Fig. 2.6: Reference sensor

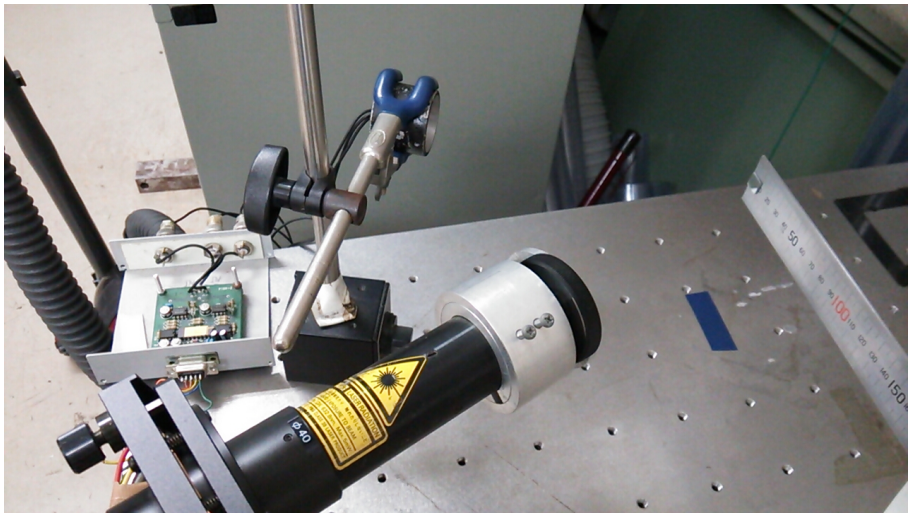


Fig. 2.7: Error sensor

各アクチュエータの駆動信号（$w, u$）は D/A コンバータから出力され，倍率 15 倍のパワーアンプ（amp）を通してアクチュエータが駆動される．また，各センサの出力信号（$z, y$）は A/D コンバータより入力され，$z$ は専用の Gap sensor を，$y$ も専用の PSD circuit を通して PC に入力される．

Fig. 2.8: Power amp

## 2.3 物理モデル

本節では，第 4 章において周波数応答実験の妥当性を検証する際に用いる物理モデルについて述べる．梁を Euler-Bernoulli 梁と仮定し，伝達マトリックス法に基づいて Fig.2.1 における開ループ系の周波数応答関数を導出する．導出の手続きは，先行研究 [4] と同様である．

Fig.2.1 の制御系において簡単のため，各アクチュエータの駆動信号は，その設置位置における梁の偏角に等しいと仮定する．また，各センサの出力信号は，その設置位置における梁のたわみに等しいと仮定する．Case (a) における制御入力は $u$ のみで，Case (b), (c) においても信号 $v$ は $u$ によって与えられるから，制御入力を改めて $u$ とすると Fig. 2.1 と等価なブロック線図を Fig. 2.9 のように書ける．ここで，$K$ は補償器，$G$ はプラントで，Case (a), (b), (c) に対応する周波数応答関数をそれぞれ，

$$G^a(j\omega) := \begin{bmatrix} G^a_{zw}(j\omega) & G^a_{zu}(j\omega) \\ G^a_{yw}(j\omega) & G^a_{yu}(j\omega) \end{bmatrix}, \quad G^b(j\omega) := \begin{bmatrix} G^b_{zw}(j\omega) & G^b_{zu}(j\omega) \\ G^b_{yw}(j\omega) & G^b_{yu}(j\omega) \end{bmatrix},$$

$$G^c(j\omega) := \begin{bmatrix} G^c_{zw}(j\omega) & G^c_{zu}(j\omega) \\ G^c_{yw}(j\omega) & G^c_{yu}(j\omega) \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

と表す．ただし，$G^a_{zw}(j\omega)$ は Case (a) の場合の $w$ から $z$ までの周波数応答関数であるとする (他も同様に定義する)．この周波数応答関数は，Fig. 2.1 の開ループ系によって定まる．実際，$\begin{bmatrix} w & u & v \end{bmatrix}^T$ から $\begin{bmatrix} z & y \end{bmatrix}^T$ までの開ループ周波数応答関数が

$$\begin{bmatrix} G_{zw}(j\omega) & G_{zu}(j\omega) & G_{zv}(j\omega) \\ G_{yw}(j\omega) & G_{yu}(j\omega) & G_{yv}(j\omega) \end{bmatrix}$$

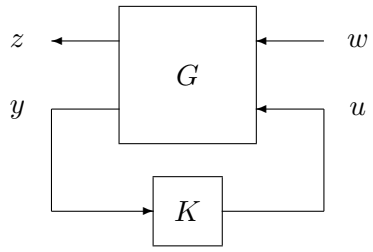



Fig. 2.9: Closed-loop system

で与えられるとすると次式が成り立つ．

$$G^a_{zw}(j\omega) = G^b_{zw}(j\omega) = G^c_{zw}(j\omega) = G_{zw}(j\omega), \quad G^a_{yw}(j\omega) = G^b_{yw}(j\omega) = G^c_{yw}(j\omega) = G_{yw}(j\omega) \tag{2.6}$$

$$G^a_{zu}(j\omega) = G_{zu}(j\omega), \quad G^b_{zu}(j\omega) = G_{zu}(j\omega) - e^{-j\omega T_d}G_{zv}(j\omega), \quad G^c_{zu}(j\omega) = G_{zu}(j\omega) - e^{-jkL_d}G_{zv}(j\omega) \tag{2.7}$$

$$G^a_{yu}(j\omega) = G_{yu}(j\omega), \quad G^b_{yu}(j\omega) = G_{yu}(j\omega) - e^{-j\omega T_d}G_{yv}(j\omega), \quad G^c_{yu}(j\omega) = G_{yu}(j\omega) - e^{-jkL_d}G_{yv}(j\omega) \tag{2.8}$$

よって，以下本章では，Fig. 2.1 の開ループ周波数応答関数を導出する．

Euler-Bernoulli 梁における運動方程式は次式で与えられる．

$$EI\frac{\partial^4\xi(x,t)}{\partial x^4} + \rho A\frac{\partial^2\xi(x,t)}{\partial t^2} = 0 \tag{2.9}$$

梁が角周波数 $\omega$ で調和振動しているものとし，$\xi(x,t) = \Re\xi(x)e^{j\omega t}$ と表すと次式が成り立つ．

$$\frac{d^4\xi(x)}{dx^4} + k^4\xi(x) = 0 \tag{2.10}$$

この一般解は次式で与えられる．

$$-\xi(x) = c_1e^{-jkx} + c_2e^{-kx} + c_3e^{jkx} + c_4e^{kx} \tag{2.11}$$

ここで右辺の第 1 項は $x$ が正の方向へ進む進行波，第 3 項は負の方向へ進む進行波であり，減衰することなくそれぞれの方向へ進む波に対応する．第 2 項および第 4 項はそれぞれ正，負の方向に進む減衰波であり，境界条件が変化する位置で生じ，境界からの距離に応じて減衰することからニアフィールド波と呼ばれる．

位置 $x$ における状態ベクトルを $\Xi(x) := \begin{bmatrix} -\xi(x) & \theta(x) & m(x)/EI & q(x)/EI \end{bmatrix}^T$ と定義する．ここで $\theta(x)$ はたわみ角，$m(x)$ は曲げモーメント，$q(x)$ は剪断力を表し，それぞれ次式で与えられる．

$$\theta(x) = \frac{\partial\xi(x)}{\partial x}, \quad \frac{m(x)}{EI} = \frac{\partial^2\xi(x)}{\partial x^2}, \quad \frac{q(x)}{EI} = \frac{\partial^3\xi(x)}{\partial x^3} \tag{2.12}$$

任意の位置 $x_a$, $x_b$ $(x_a < x_b)$ の間に外力が働かないとすると，$\Xi(x_a)$，$\Xi(x_b)$ に次の関係が成り立つ．

$$\Xi(x_b) = T(x_b - x_a)\Xi(x_a) \tag{2.13}$$

ここで $T(\delta)$ は伝達マトリクスであり，波数 $k$ と二点間の距離 $\delta$ によって次式で与えられる．

$$T(\delta) = \begin{bmatrix} t_1 & t_4 & t_3 & t_2 \\ k^4 t_2 & t_1 & t_4 & t_3 \\ k^4 t_3 & k^4 t_2 & t_1 & t_4 \\ k^4 t_4 & k^4 t_3 & k^4 t_2 & t_1 \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned} t_1(\delta) &:= \frac{e^{-jk\delta} + e^{-k\delta} + e^{jk\delta} + e^{k\delta}}{4}, \quad t_2(\delta) := \frac{-je^{-jk\delta} - e^{-k\delta} + je^{jk\delta} + e^{k\delta}}{4k^3} \\ t_3(\delta) &:= \frac{-e^{-jk\delta} + e^{-k\delta} - e^{jk\delta} + e^{k\delta}}{4k^2}, \quad t_4(\delta) := \frac{je^{-jk\delta} - e^{-k\delta} - je^{jk\delta} + e^{k\delta}}{4k} \end{aligned} \tag{2.14}$$

Fig. 2.1 の制御系において，ある 1 つ入力信号から，1 つの出力信号までの周波数応答を導出するために，アクチュエータとセンサが 1 個ずつ，それぞれ $x = x_a$, $x_s$ の位置に設置されているとする．アクチュエータはその設置位置において傾き角 $\theta_a$ を付加するものと仮定すると，自由端の状態ベクトル $\Xi(L)$ は固定端における状態ベクトル $\Xi(0)$ を使って次のように表される．

$$\Xi(L) = T(L)\Xi(0) + T(L - x_a)\Delta_{x_a}, \quad \Delta_{x_a} := \begin{bmatrix} 0 & \theta_a & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \tag{2.15}$$

ただし，梁の境界条件より次式が成り立つ．

$$\Xi(L) = \begin{bmatrix} -\xi(L) & \theta(L) & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad \Xi(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{m(0)}{EI} & \frac{q(0)}{EI} \end{bmatrix}^T \tag{2.16}$$

上式を式 (2.15) に代入して $m(0)$，$q(0)$ について解くと

$$\begin{bmatrix} \frac{m(0)}{EI} \\ \frac{q(0)}{EI} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} t_1(L) & t_4(L) \\ k^4 t_2(L) & t_1(L) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} k^4 t_2(L - x_a) \\ k^4 t_3(L - x_a) \end{bmatrix} \theta_a \tag{2.17}$$

となり，固定端における状態 $\Xi(0)$ が定まる．これを用いて，センサ位置における状態 $\Xi(x_s)$ が次式で

与えられる．

$$\Xi(x_s) = \begin{cases} T(x_s)\Xi(0) & (0 \le x_s \le x_a) \\ T(x_s)\Xi(0) + T(x_s - x_a)\Delta_{x_a} & (x_a \le x_s \le L) \end{cases} \tag{2.18}$$

センサの出力がその位置におけるたわみ $-\xi(x_s)$ であるとすると，アクチュエータの入力 $\theta_a$ から センサの出力 $-\xi(x_s)$ までの周波数応答関数 $G(x_s, x_a)(j\omega)$ が次のように与えられる．

$$G(x_s, x_a)(j\omega) := \begin{cases} G_{\mathrm{up}}(x_s, x_a)(j\omega)(0 \le x_s \le x_a) \\ := -\begin{bmatrix} t_3(x_s) & t_2(x_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1(L) & t_4(L) \\ k^4 t_2(L) & t_1(L) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} k^4 t_2(L - x_a) \\ k^4 t_3(L - x_a) \end{bmatrix} \\ G_{\mathrm{down}}(x_s, x_a)(j\omega)(x_a \le x_s \le L) \\ := G_{\mathrm{up}}(x_s, x_a)(j\omega) + t_4(x_s - x_a) \end{cases} \tag{2.19}$$

これを用いて，Fig. 2.1 の開ループ周波数応答関数が次のように定まる．

$$G_{zw}(j\omega) = G_{\mathrm{down}}(l_z, l_w)(j\omega), \quad G_{zu}(j\omega) = G_{\mathrm{down}}(l_z, l_u)(j\omega), \quad G_{zv}(j\omega) = G_{\mathrm{down}}(l_z, l_v)(j\omega) \tag{2.20}$$

$$G_{yw}(j\omega) = G_{\mathrm{down}}(l_y, l_w)(j\omega), \quad G_{yu}(j\omega) = G_{\mathrm{up}}(l_y, l_u)(j\omega), \quad G_{yv}(j\omega) = G_{\mathrm{up}}(l_y, l_v)(j\omega) \tag{2.21}$$

# 第3章　間接作用型圧電アクチュエータの製作と性能評価

## 3.1　アクチュエータの製作

間接作用型アクチュエータの作成手順を以下に示す.

1. Fig. 3.1 の加工図面を元に，ステンレス板を加工する.
2. ステンレス板と圧電素子の接着面を紙やすり (400 番以上) で軽く削り，脱脂スプレーで表面の汚れをふき取る.
3. エポキシ系の接着剤を圧電素子の接着面に薄く塗り，ステンレス板に貼り付ける.
4. ステンレス板と圧電素子を圧着させるために，上からおもり (約 5kg) を乗せて乾燥させる．以上の手順で作成したアクチュエータを Fig. 3.2 に示す．同じ手順で作成したアクチュエータにどれだけの個体差があるかを判断するために，6 枚のアクチュエータを用意した．次章でこれの性能評価を行う.

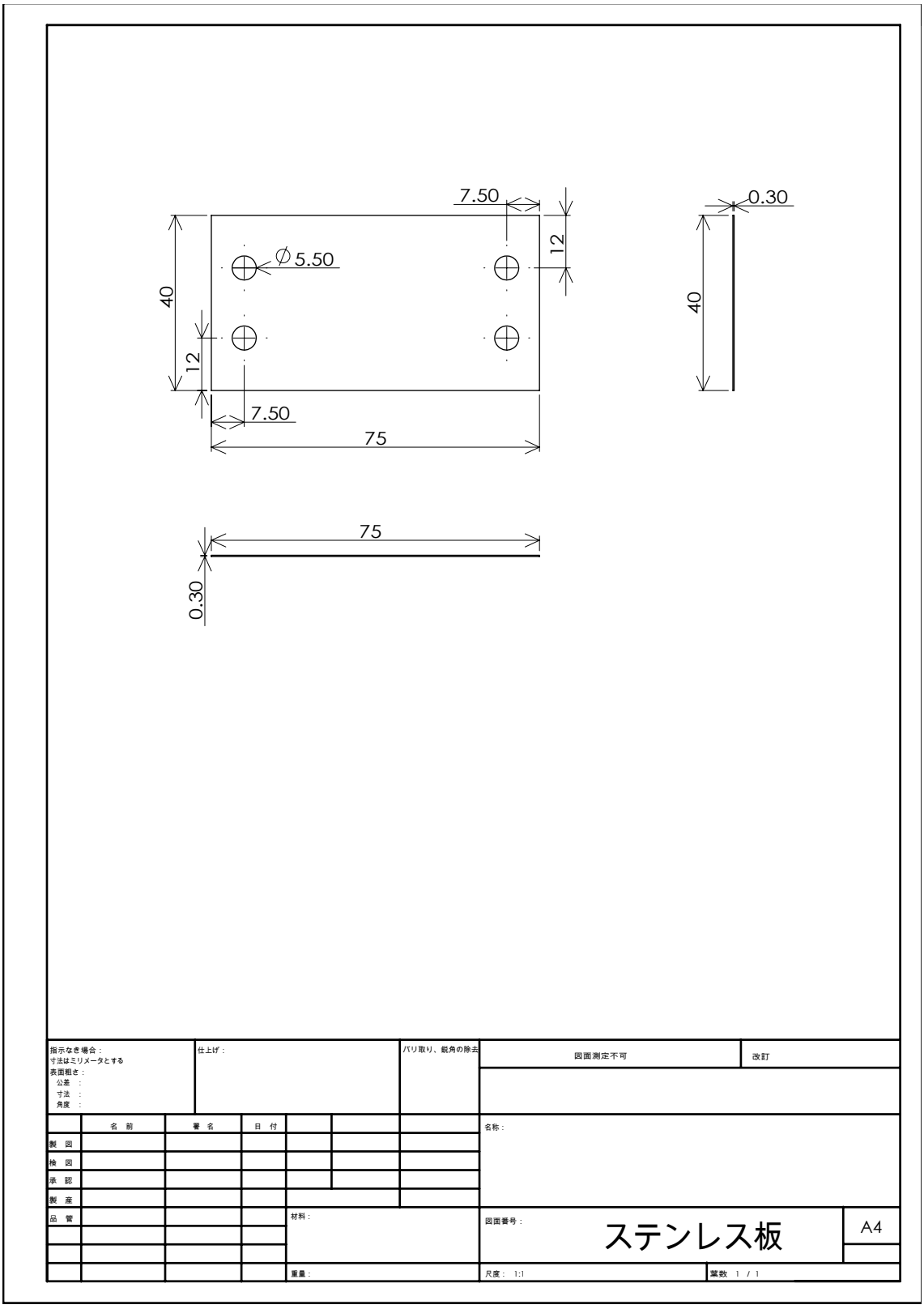



Fig. 3.1: Stainless plate

Fig. 3.2: Indirectacting actuator

## 3.2 アクチュエータの性能評価

物理モデルと周波数応答実験結果の次元を一致させるために，本節及び 4.2 でアクチュエータとセンサの校正実験を行う．

まず，物理モデルと周波数応答実験における周波数応答をそれぞれ $G_{\mathrm{model}}$, $G_{\mathrm{exp}}$ とおくと，これらは以下のように与えられる．

$$G_{\mathrm{model}} = \frac{\text{センサ位置の梁のたわみ [m]}}{\text{圧電素子の角変位 [rad]}} \tag{3.1}$$

$$G_{\mathrm{exp}} = \frac{\text{センサの出力電圧 [V]}}{\text{アクチュエータへの入力電圧 [V]}} \tag{3.2}$$

周波数応答実験の結果を物理モデルと同じ単位に変換するために，次のように換算する．

$$G_{\mathrm{exp}} \times \frac{\text{センサの換算係数 [m/V]}}{\text{アクチュエータの換算係数 [rad/V]}} = \frac{\text{センサ位置の梁のたわみ [m]}}{\text{圧電素子の角変位 [rad]}} \tag{3.3}$$

よって，アクチュエータ・センサの換算係数を求めれば，周波数応答結果の補正を行うことができる．

### 3.2.1 アクチュエータ性能評価実験方法

アクチュエータの性能評価を行うために以下の手順で単位印加電圧あたりのアクチュエータの角変位を測定した．

1. Fig. 3.3 の $x_a = 150$[mm] を中心に測定用のアクチュエータを取り付け，Fig. 3.4 のようにばねばかりとレンチを使用して 6.72[Nm] のトルクで Fig. 3.5 の順番に締結を行った．また，$x_s = 945$[mm] にレーザー変位計を設置する．

2. 圧電素子に Fig. 3.6 のようなステップ入力の電圧を印加した時の梁の変位をレーザー変位計で 1200 秒間測定し，A/D ボードから得られた出力電圧を 300 秒ごとに平均化する．

3. 測定終了後にアクチュエータを一度取り外し，1 の取り付け時と同じボルトの締め付け手順・締め付け応力で再度アクチュエータを取り付ける．

4. 2 と 3 を計 5 回繰り返す．

5. 平均化した出力電圧を，後述の 4.2 で計算したレーザーの換算係数を用いて梁のたわみに変換する．

6. センサ位置での梁のたわみとセンサ-アクチュエータ間距離から，アクチュエータの角変位を計算する．

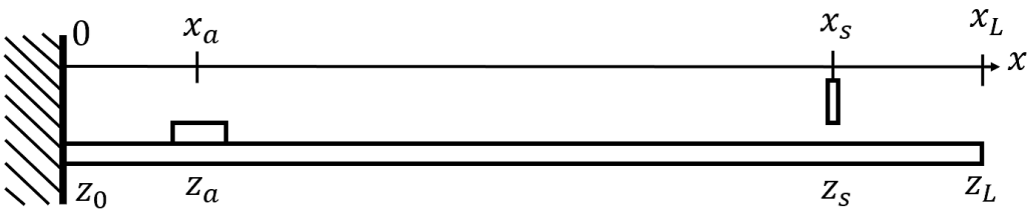



Fig. 3.3: Setting of actuator and sensor on cantilever

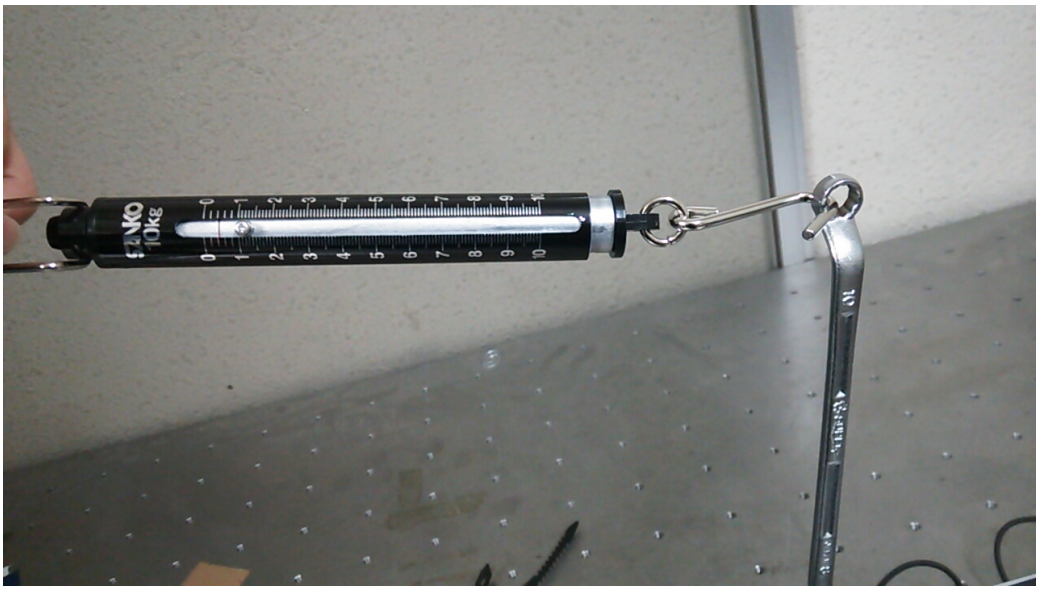


Fig. 3.4: Spring wrench

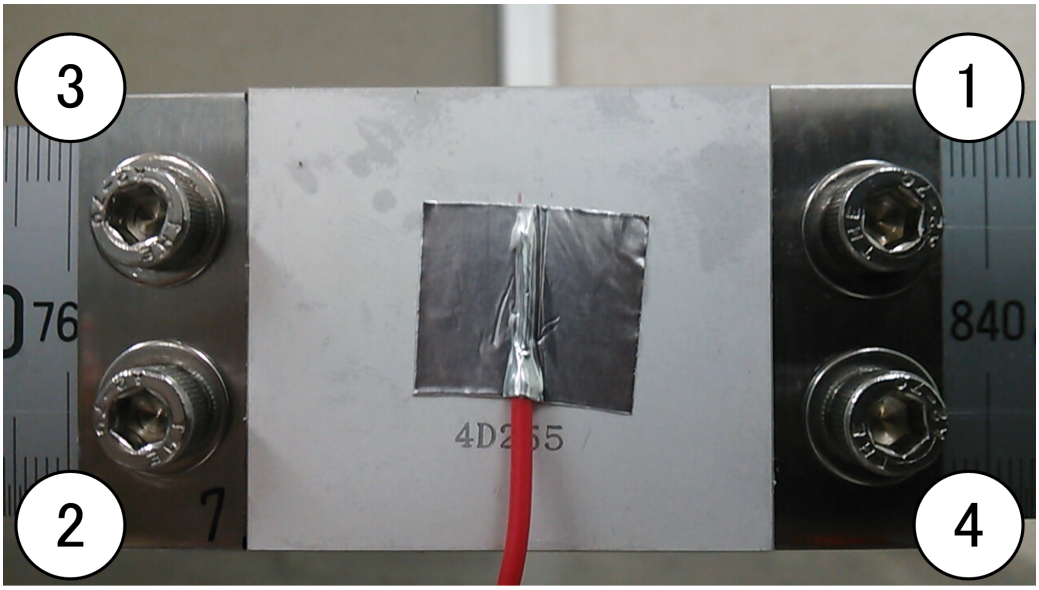



Fig. 3.5: Order of the fastening

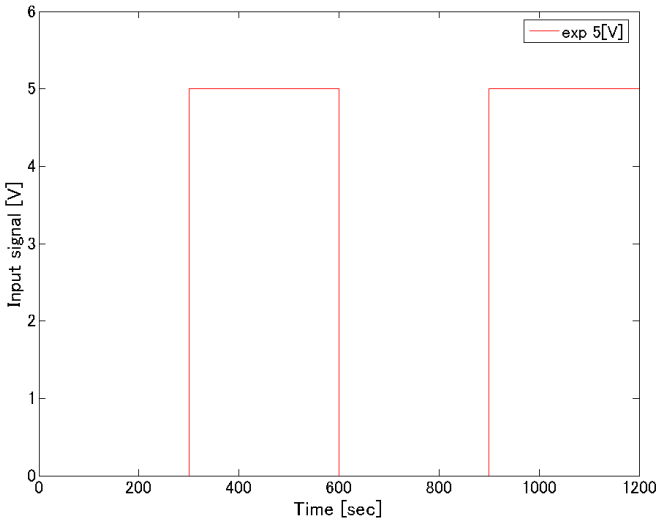



Fig. 3.6: Input signal

アクチュエータの角変位の計算方法を以下に示す．まず，アクチュエータとセンサ間の距離は，

$$L_{sa} = l_s - l_a \tag{3.4}$$

となる．次にアクチュエータに電圧が印加された時のセンサ位置での梁のたわみは，

$$\xi_s[m] = V_{out}[\mathrm{V}] \times \text{センサの換算係数 } [\mathrm{m/V}] \tag{3.5}$$

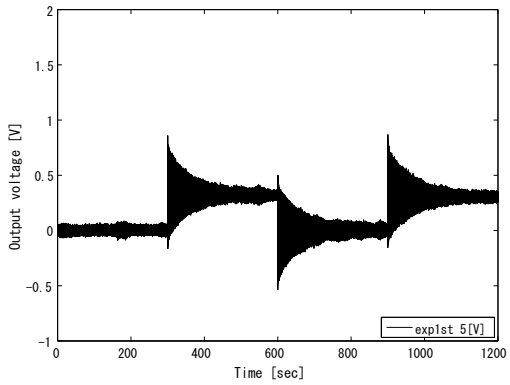
アクチュエータ・センサ間距離と梁のたわみから，アクチュエータが梁に与える変位角を計算すると

$$\theta_a[rad] = \tan^{-1}\frac{\xi_s}{L_{sa}}/2\pi \tag{3.6}$$

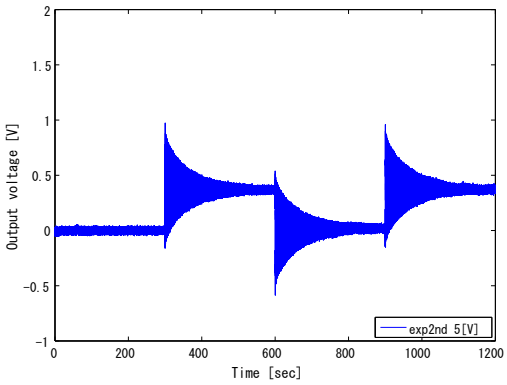
これをアクチュエータに印加した PC からの入力電圧 $V_{in}$ で割ると，入力電圧あたりのアクチュエータの変位角 [rad/V] を計算することが出来る．

### 3.2.2　アクチュエータの校正

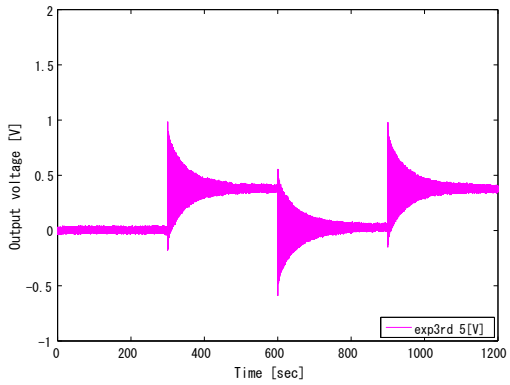
3.2.1 章で行った実験からアクチュエータの校正を行う．実際に測定した Fig. 3.6 のステップ入力に対する 5 回分のレーザー変位計の出力電圧と，出力電圧を平均値化したものを Fig. 3.7〜3.12 に示す．



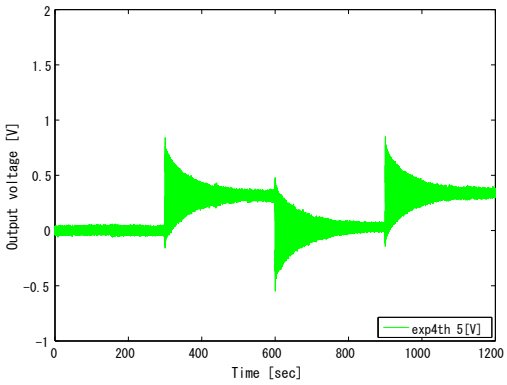

(a)1st of act1



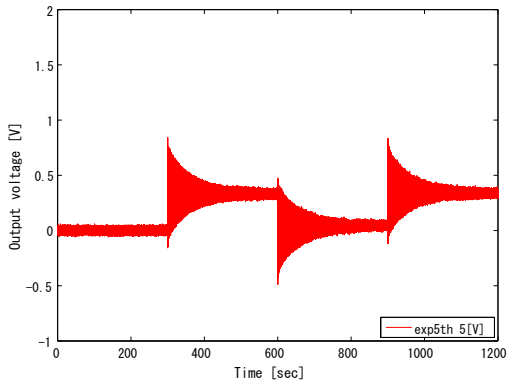

(b)2nd of act1



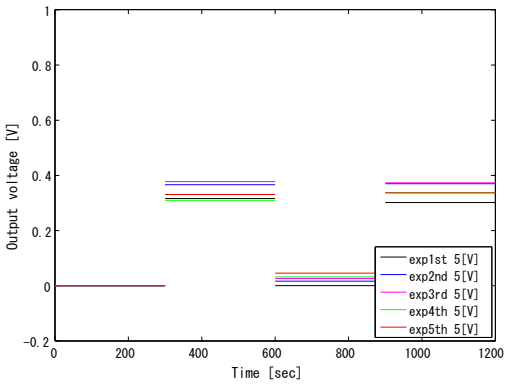

(c)3rd of act1




(d)4th of act1

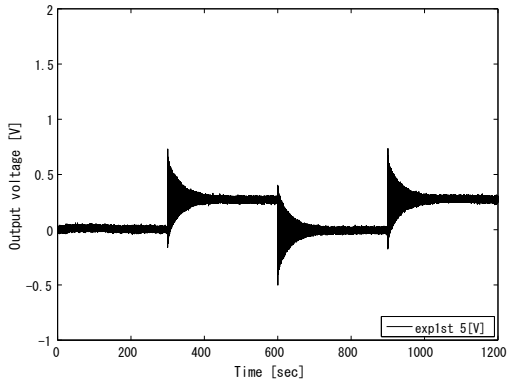



(e)5th of act1

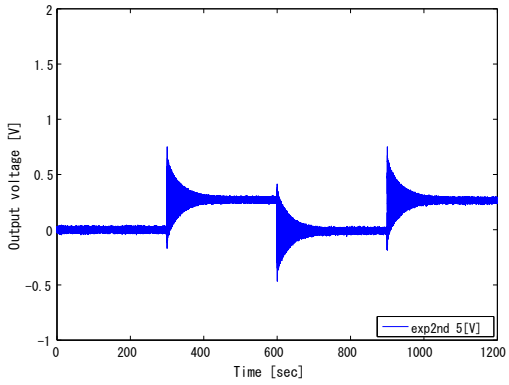



(f)Output average of act1

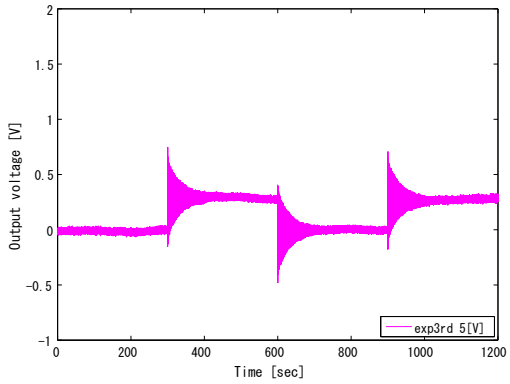
Fig. 3.7: Output voltage of act1



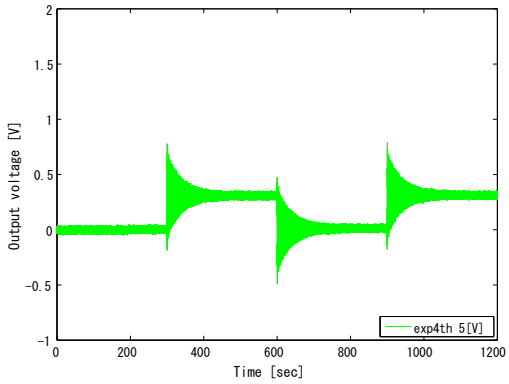

(a)1st of act2



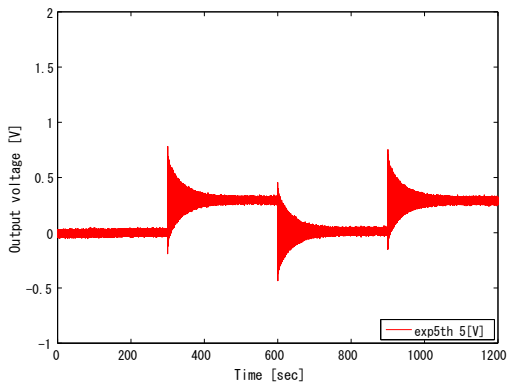

(b)2nd of act2



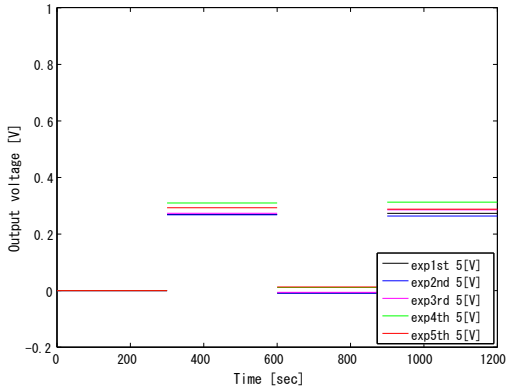

(c)3rd of act2




(d)4th of act2

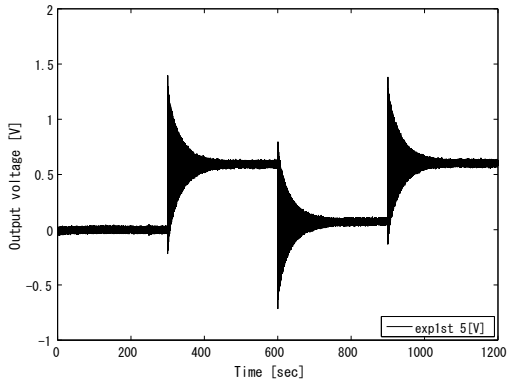



(e)5th of act2

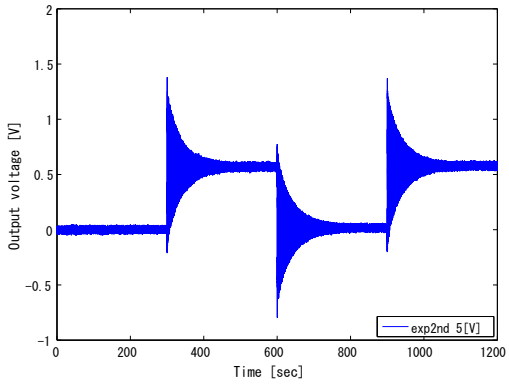



(f)Output average of act2

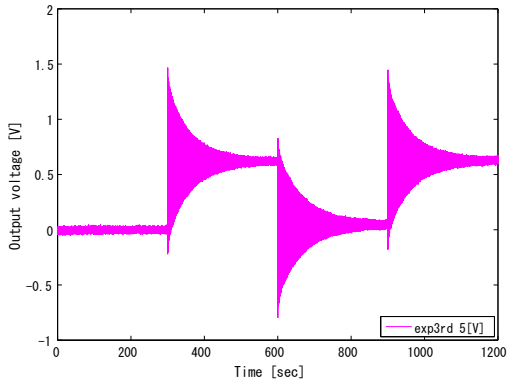
Fig. 3.8: Output voltage of act2



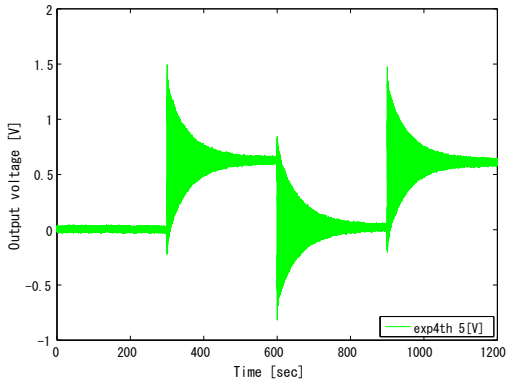

(a)1st of act3



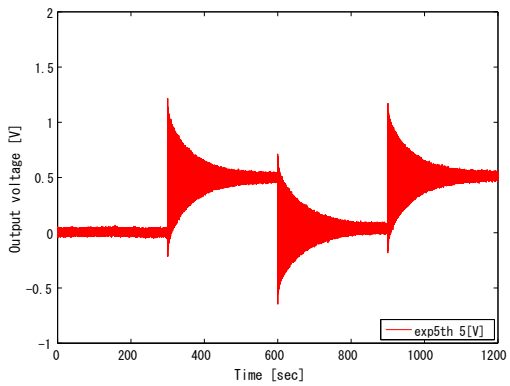

(b)2nd of act3



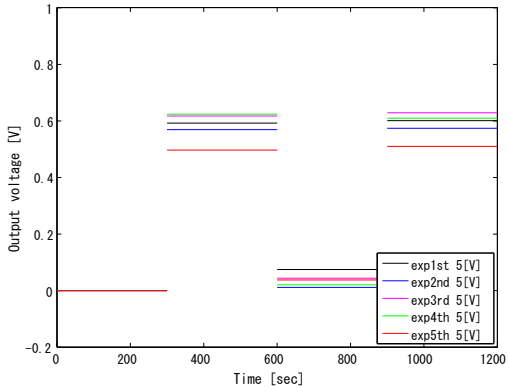

(c)3rd of act3




(d)4th of act3

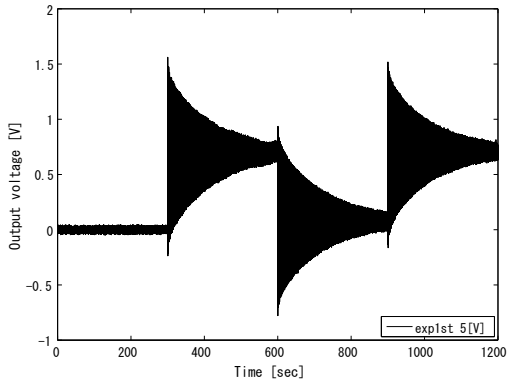



(e)5th of act3

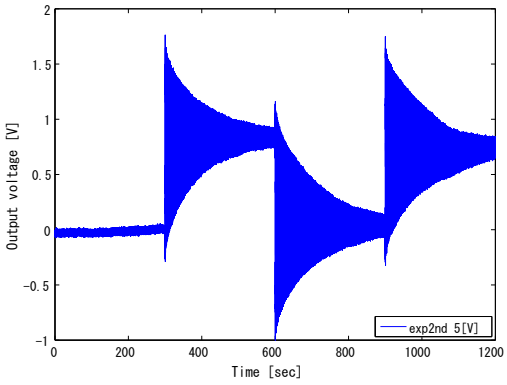



(f)Output average of act3

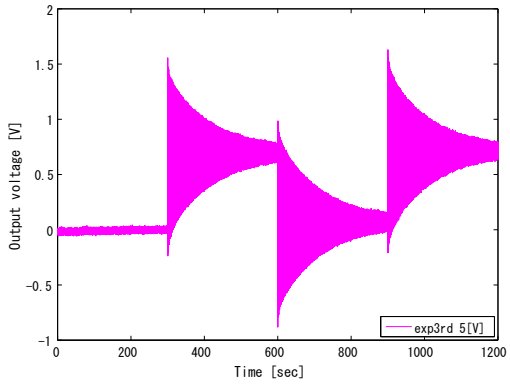
Fig. 3.9: Output voltage of act3



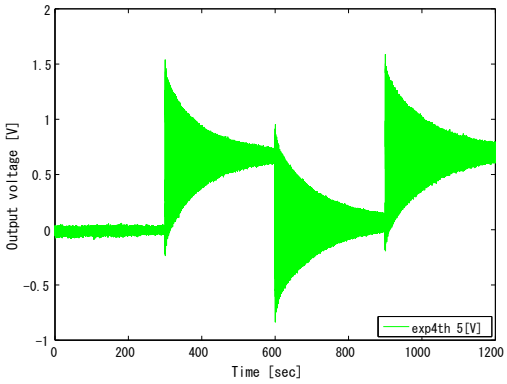

(a)1st of act4



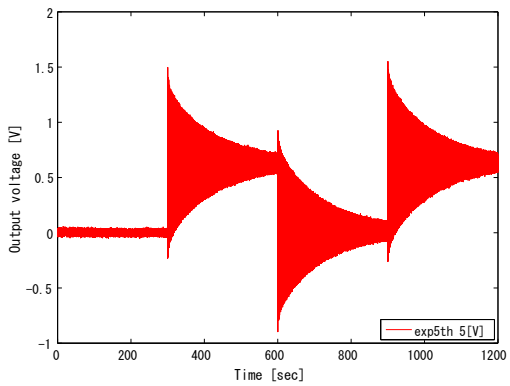

(b)2nd of act4



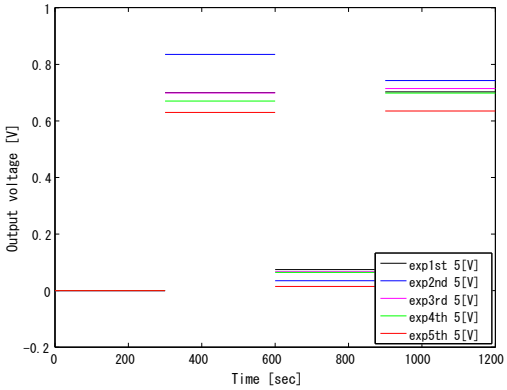

(c)3rd of act4




(d)4th of act4

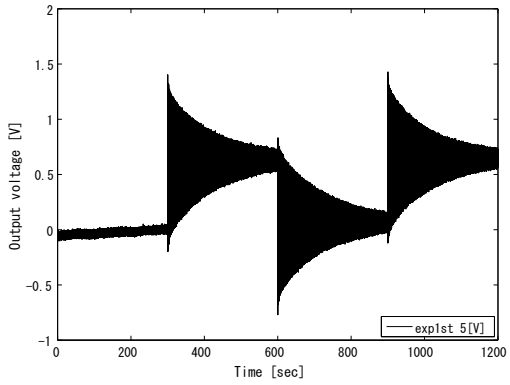



(e)5th of act4

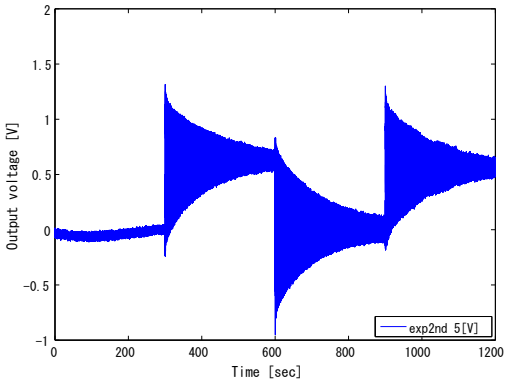



(f)Output average of act4

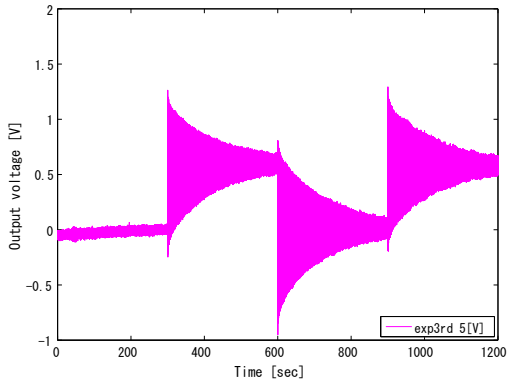
Fig. 3.10: Output voltage of act4



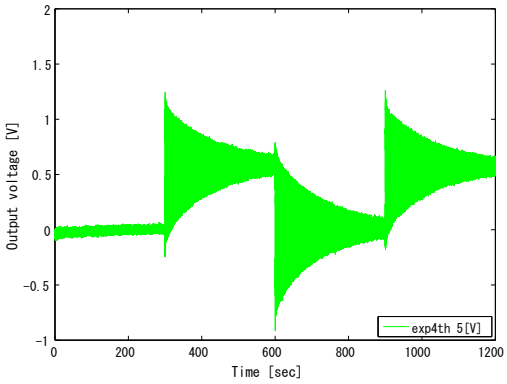

(a)1st of act5



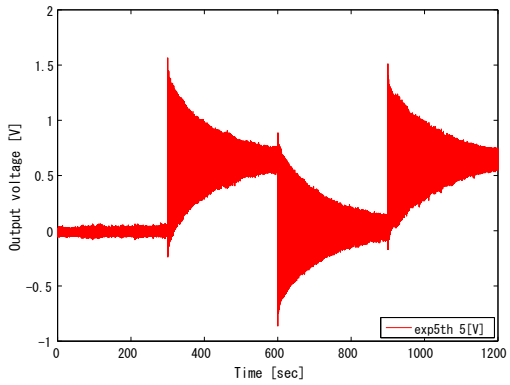

(b)2nd of act5



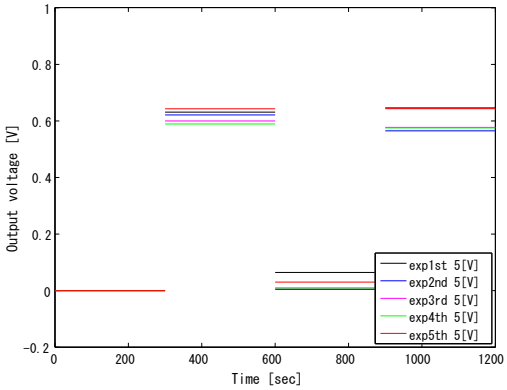

(c)3rd of act5




(d)4th of act5

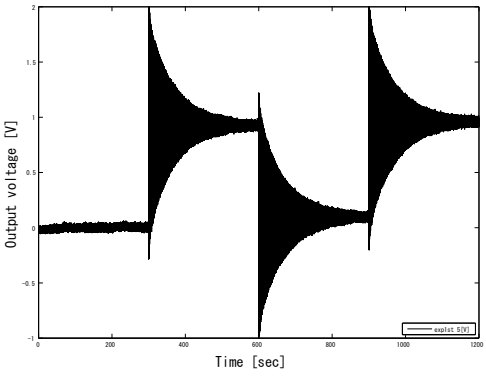



(e)5th of act5

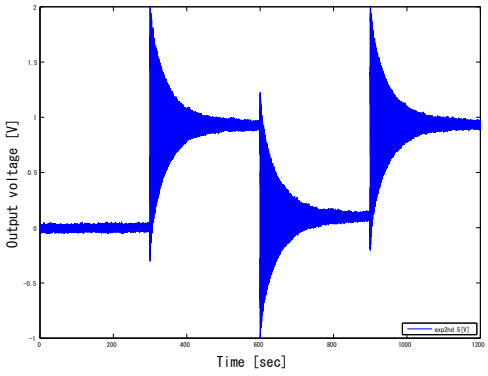



(f)Output average of act5

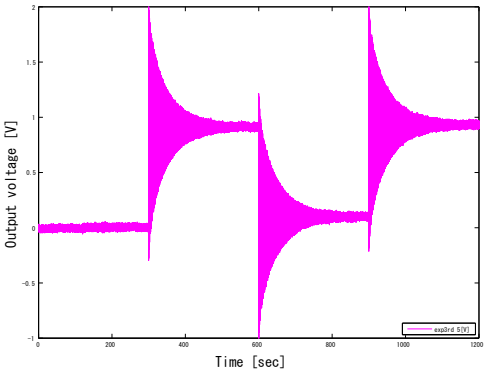
Fig. 3.11: Output voltage of act5



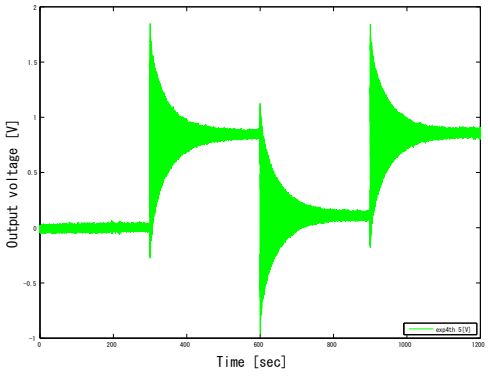

(a)1st of act6



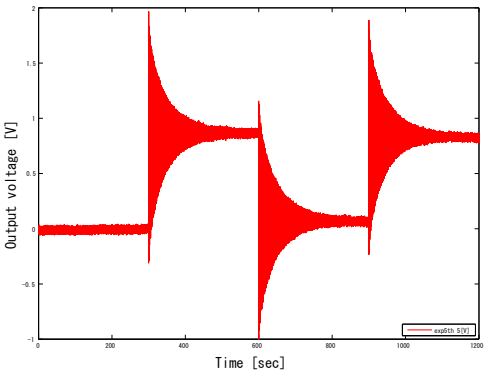

(b)2nd of act6



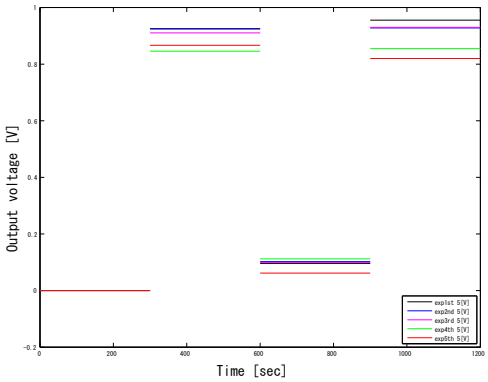

(c)3rd of act6




(d)4th of act6




(e)5th of act6




(a)Output average of act6

Fig. 3.12: Output voltage of act6

PC からの入力電圧 5[V] をアンプで 15 倍した 75[V] を圧電素子に印加した場合，Fig. 3.3 の長手方向に伸びるため，梁はセンサから遠ざかり Fig. 3.7〜3.12 のそれぞれの出力電圧のようにプラスの電圧が出力される．また，ステップ入力により急激に電圧が印加された結果，Fig. 3.13 のような 1 次モードの振動 (1 次共振周波数 1.51[Hz]) が励起されることが確認できる．

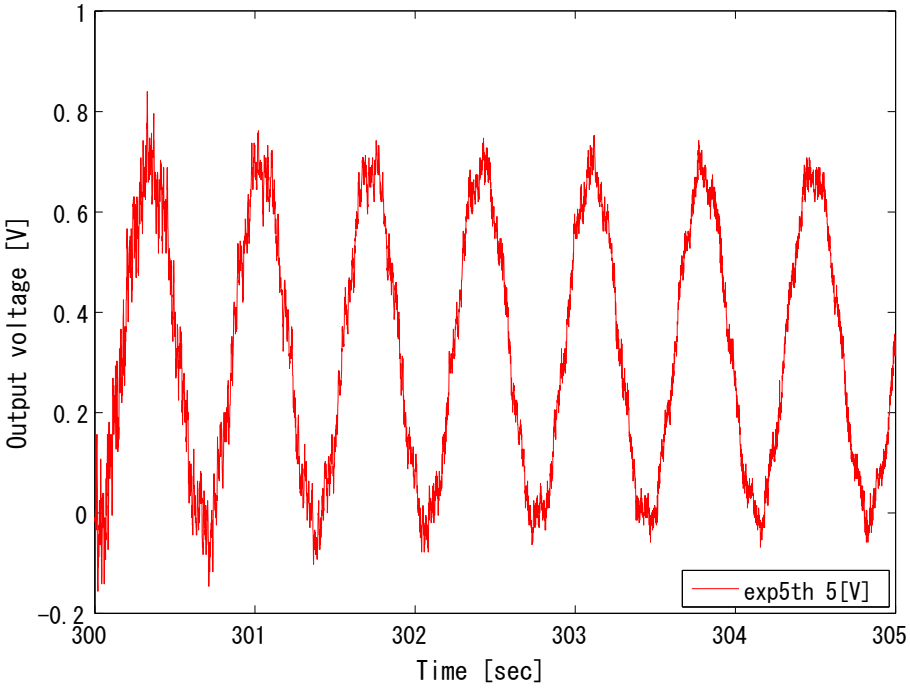



Fig. 3.13: 5th of act1(300-305[s])

6 枚のアクチュエータの校正結果を Table 3.1 に示す．

Table. 3.1: Calibration of act

| Act | 1st[V] | 2nd[V] | 3rd[V] | 4th[V] | 5th[V] | Average[V] | Displacement[m] | Angle[rad] | Angle par 1V[rad/V] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.324 | 0.373 | 0.380 | 0.318 | 0.335 | 0.346 | $1.19 \times 10^{-4}$ | $1.50 \times 10^{-4}$ | $3.00 \times 10^{-5}$ |
| 2 | 0.266 | 0.274 | 0.302 | 0.309 | 0.298 | 0.290 | $1.00 \times 10^{-4}$ | $1.26 \times 10^{-4}$ | $2.52 \times 10^{-5}$ |
| 3 | 0.590 | 0.567 | 0.618 | 0.621 | 0.521 | 0.578 | $1.99 \times 10^{-4}$ | $2.51 \times 10^{-4}$ | $5.01 \times 10^{-5}$ |
| 4 | 0.669 | 0.641 | 0.695 | 0.672 | 0.662 | 0.704 | $2.43 \times 10^{-4}$ | $3.06 \times 10^{-4}$ | $6.11 \times 10^{-5}$ |
| 5 | 0.641 | 0.660 | 0.604 | 0.586 | 0.650 | 0.628 | $2.17 \times 10^{-4}$ | $2.73 \times 10^{-4}$ | $5.45 \times 10^{-5}$ |
| 6 | 0.923 | 0.930 | 0.909 | 0.836 | 0.871 | 0.894 | $3.08 \times 10^{-4}$ | $3.88 \times 10^{-4}$ | $7.76 \times 10^{-5}$ |

それぞれのアクチュエータの性能を比較した結果，6 枚目のアクチュエータの性能が良いことがわかる．よって，外乱用アクチュエータ (Fig. 2.1 の ACT1) には 6 枚目のアクチュエータを使用し，換算係数は ACT1 $= 7.76 \times 10^{-5}$[rad/V] とする．また 5 枚目のアクチュエータを振動制御用アクチュエータとして使用し，換算係数は ACT2 $= 5.45 \times 10^{-5}$[rad/V] とする．指向性アクチュエータとして ACT3 を選定する場合には，Table 3.1 で 5 枚目のアクチュエータと性能が近い 4 枚目のアクチュエータを使用し，換算係数は ACT3 $= 6.11 \times 10^{-5}$[rad/V] とする．

Fig. 3.10 の 2 回目の結果等，実験開始 300 秒後と 900 秒後で圧電素子に電圧を印加した際の出力電圧に最大で約 0.1[V] のズレが見られる部分がある．これは圧電素子の逆圧電効果で梁に角変位を与えたときに生じる誤差であると考えられるので，1 度の実験で 2 回電圧を印加した時の平均出力電圧を Table 3.1 に示している．一度電圧を印加した後に出力電圧が 0[V] にならないのは圧電素子のゼロシフトによるものであり，この値は無視して実験開始 300 秒間を 0[V] とした時の 75[V] 印加時の出力電圧を校正に利用した．

Table 3.1 より，それぞれのアクチュエータにおける取り付け誤差による出力電圧の差が最小 $3.0 \times 10^{-3}$[V]，最大で $9.7 \times 10^{-2}$[V] 見られるものの，アクチュエータ同士の個体差が最小 $5.0 \times 10^{-2}$[V]，最大で 0.548[V] と大きいため，取り付け誤差は無視して 5 回分のデータを平均化した結果でアクチュエータの校正を行った．

# 第4章　周波数応答実験結果の補正と物理モデルとの比較

## 4.1　周波数応答実験

ここでは実際に Fig. 2.2 の実験装置で周波数応答実験を行い，物理モデルと比較する．

各アクチュエータ入力 $w, u$ から各センサ出力 $z, y$ までの周波数応答を得るための実験手順を以下に示す．

ACT1 から Err.Sensor までの伝達関数 $G_{zw}$，Ref.Sensor までの伝達関数 $G_{yw}$ は $u(t) = 0$, $v(t) = 0$ として $w(t)$ に振幅 0.2[V] の 1〜1000[Hz] の正弦波信号を入力して $z(t), y(t)$ より得る．周波数の間隔は対数目盛で 1〜1000[Hz] を 2000 分割としており，1 つの周波数に対して 10[s] 測定する．また，サンプリング周期 0.2[ms] で測定し，振動が落ち着くと仮定している 60[s] 以前のデータを切り捨て，残りのデータを振動の振幅と位相としている．同じように ACT2 から Err.sensor までの伝達関数 $G_{zu}$，Ref.Sensor までの伝達関数 $G_{yu}$ は $w(t) = 0, v(t) = 0$ として $u(t)$ に同様の正弦波入力を入力することで得られる．実験によって得られた周波数応答 $G_{zw}, G_{yw}, G_{zu}, G_{yu}$ とそれぞれ物理モデルと比較した結果を Fig. 4.1〜4.4 に示す．ただし，これまでの物理モデルの導出では減衰を考慮していないため，簡易的に減衰の効果を表現するため波数 $k$ を複素波数として次式のようにおく．

$$k = \frac{1}{\sqrt{\omega}} \left( \frac{\rho A}{EI} \right)^{\frac{1}{4}} - ja \tag{4.1}$$

ここで $a$ は $a = 0.01$ と選んだ．

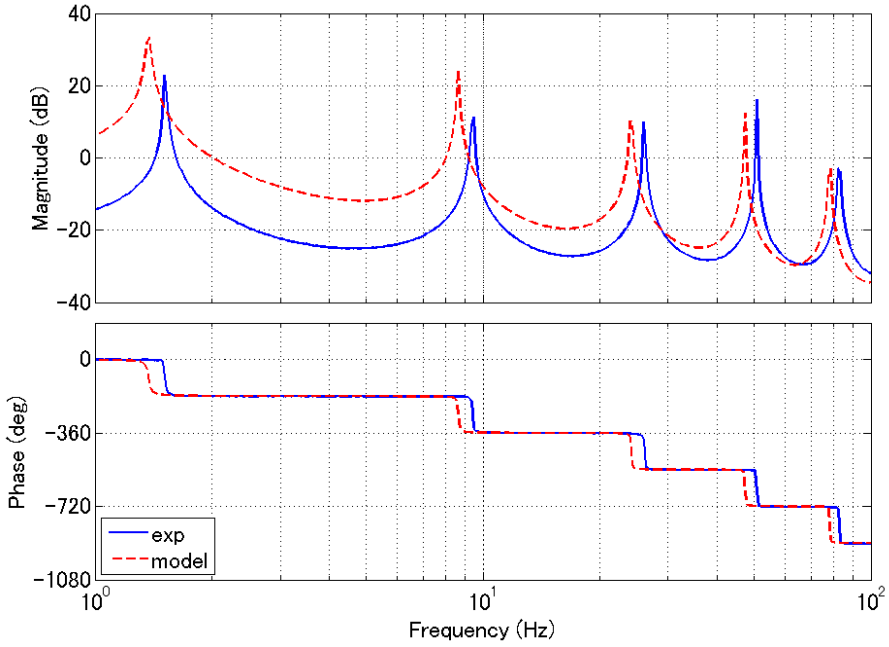



Fig. 4.1: Freqency responce of $G_{zw}$

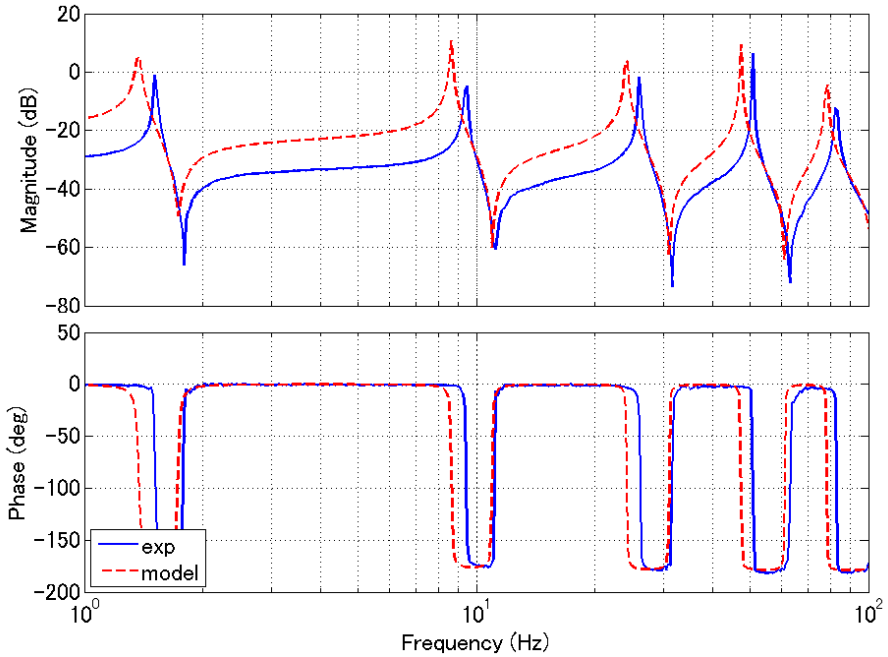



Fig. 4.2: Freqency responce of $G_{yw}$

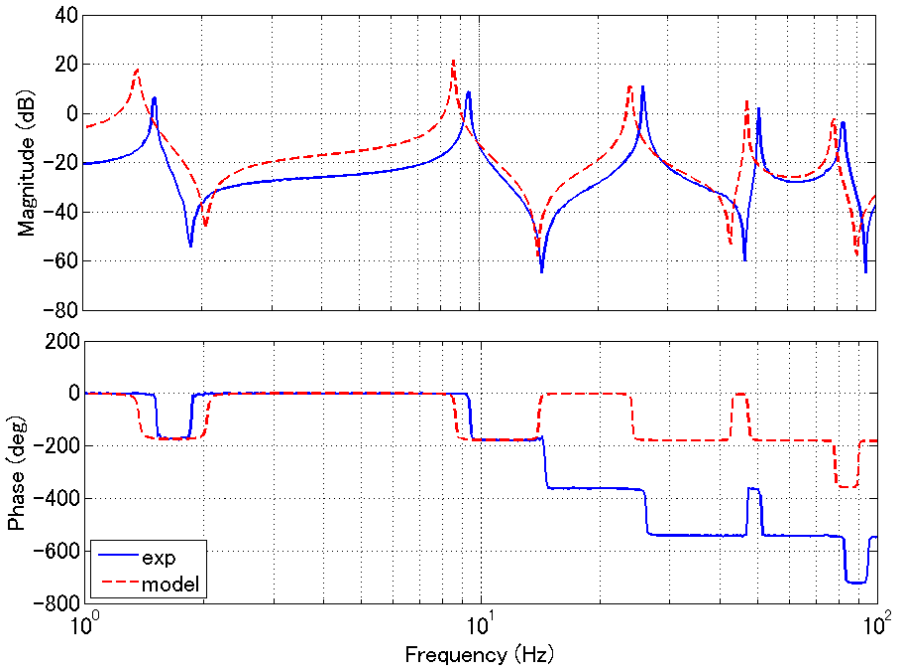



Fig. 4.3: Freqency responce of $G_{zu}$

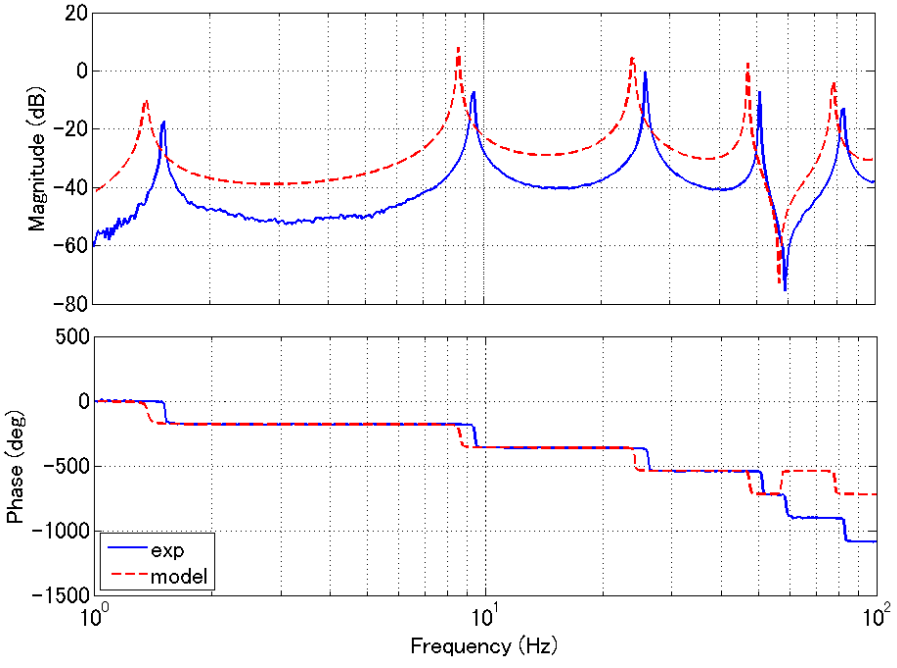



Fig. 4.4: Freqency responce of $G_{yu}$

それぞれの周波数応答において実線の実験結果と破線の物理モデルを比較すると，次のような違いが見られる．

- 実験結果と物理モデルのゲイン線図の形はよく似ていることが確認できる．しかし，物理モデルの各共振周波数は実験結果に比べて約 6〜10 %低くなっている．これは物理モデルでアクチュエータ取り付けによる梁の剛性の増加を考慮していないためだと考えられる．

- ゲイン線図において物理モデル対して実験結果が最大 20[dB] 程度下がっていることが確認できる．これは，物理モデルの次元が $G_{\mathrm{model}}$ =(センサ位置でのたわみ [m]/アクチュエータが与える角変位 [rad]) であるのに対し，実験結果の次元は $G_{\mathrm{exp}}$ =(センサの出力電圧 [V]/圧電素子への入力電圧 [V]) と異なっているためである．

第 3.2 節で述べた補正を行うことにより，物理モデルと実験における周波数応答の次元を一致させ，両者を直接比較する．そのためにアクチュエータだけでなく，センサの校正も必要である．そこで，次節においてセンサの校正について述べる．

## 4.2　センサの校正

本節では，周波数応答のゲインを計算する際にセンサの出力電圧をセンサ位置でのたわみに変換する換算係数を求めるためにセンサの校正を行う．

### 4.2.1　エラーセンサの校正

Err.Seosor の校正中の状態を Fig. 4.5 に，校正の手順を以下に示す．

1. マイクロメータの目盛りを 0mm にした状態で梁のレーザー変位計の測定位置（$l_w = 0.945[mm]$）に当てる。
2. マイクロメータを少しずつ押し出して，0.50mm 動かすごとにレーザー変位計の出力電圧をオシロスコープで確認し，2.0[mm] までの変位に対する出力電圧をグラフにする．
3. 変位と出力電圧の関係から，出力電圧を変位に変換する際の換算係数を計算する．

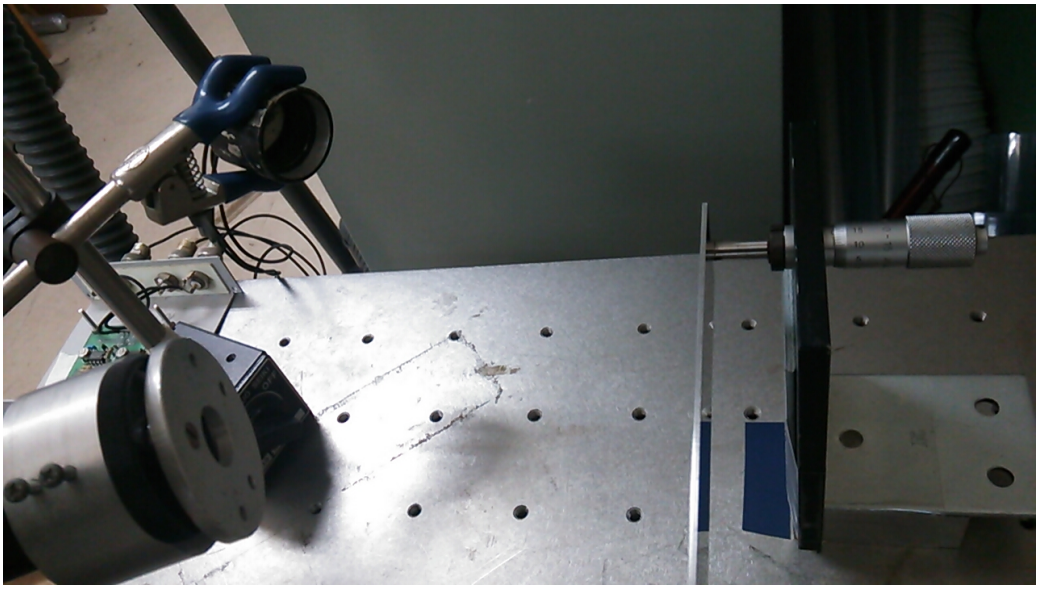


Fig. 4.5: Err.sensor calibration

マイクロメータを 2.0[mm] 動かした場合の結果を Table 4.1 に，グラフを Fig. 4.6 に示す．この時、レーザー変位計の変位と出力電圧の関係は 2.9[V/mm] であると計算できる．また、1.0[mm] まで 0.1[mm] 間隔で測定した場合の結果を Table 4.2 に，グラフにしたものを Fig. 4.7 に示す．こちらも変位と出力電圧の関係は 2.9[V/mm] であることから，現在使用しているレーザー変位計で出力電圧から変位を計算するための換算係数は $0.345 \times 10^{-3}$[m/V] となる．

Table. 4.1: Err.sensor outputvoltagedisplacement(0-2[mm])

| Displacement[mm] | Outputvoltage[V] |
|---|---|
| 0 | 0 |
| 0.5 | 1.5 |
| 1.0 | 2.9 |
| 1.5 | 4.4 |
| 2.0 | 5.8 |

Table. 4.2: Err.sensor outputvoltagedisplacement(0-1[mm])

| Displacement[mm] | Outputvoltage[V] |
|---|---|
| 0 | 0 |
| 0.1 | 0.29 |
| 0.2 | 0.58 |
| 0.3 | 0.87 |
| 0.4 | 1.16 |
| 0.5 | 1.45 |
| 0.6 | 1.74 |
| 0.7 | 2.03 |
| 0.8 | 2.32 |
| 0.9 | 2.61 |
| 1.0 | 2.90 |

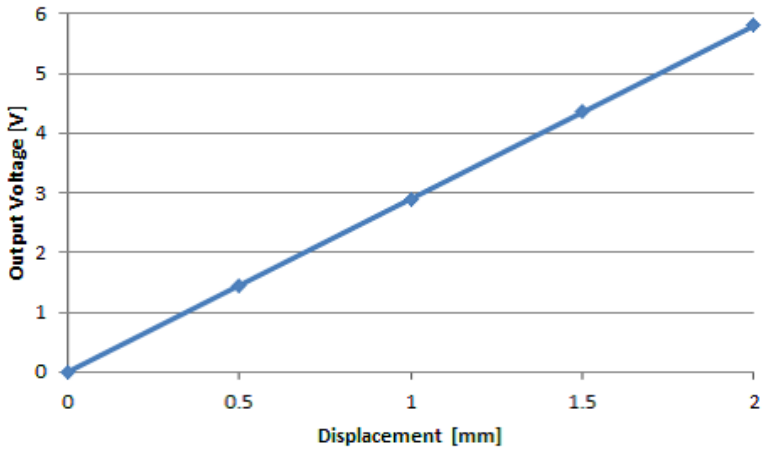



Fig. 4.6: Err.sensor outputvoltagedisplacement(0-2[mm])

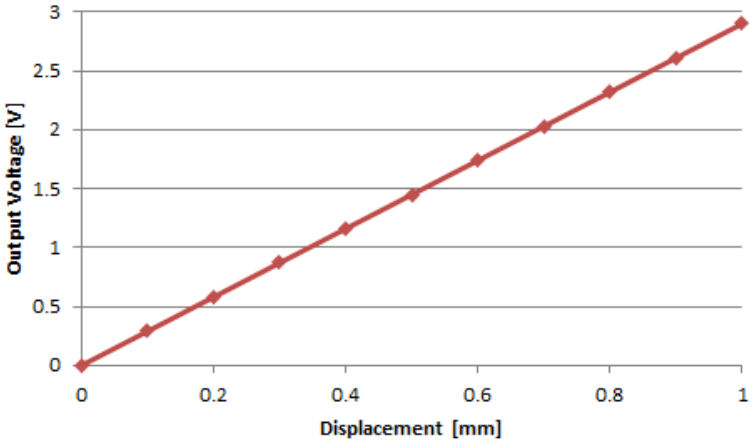



Fig. 4.7: Err.sensor outputvoltagedisplacement(0-1[mm])

### 4.2.2　リファレンスセンサの校正

Ref.Seosor の校正中の状態を Fig. 4.8 に，校正の手順を以下に示す．

1. マイクロメータを 0mm の目盛りから左に 2.0mm 動かした状態で梁の渦電流式変位計の測定位置（$l_y = 0.15[m]$）に当てる。また，Ref.sensor を梁に当てる．
2. マイクロメータを少しずつ戻して，0.50mm 戻すごとにレーザー変位計の出力電圧をオシロスコープで確認し，0[mm] までの変位に対する出力電圧をグラフにする．
3. 変位と出力電圧の関係から，出力電圧を変位に変換する際の換算係数を計算する．

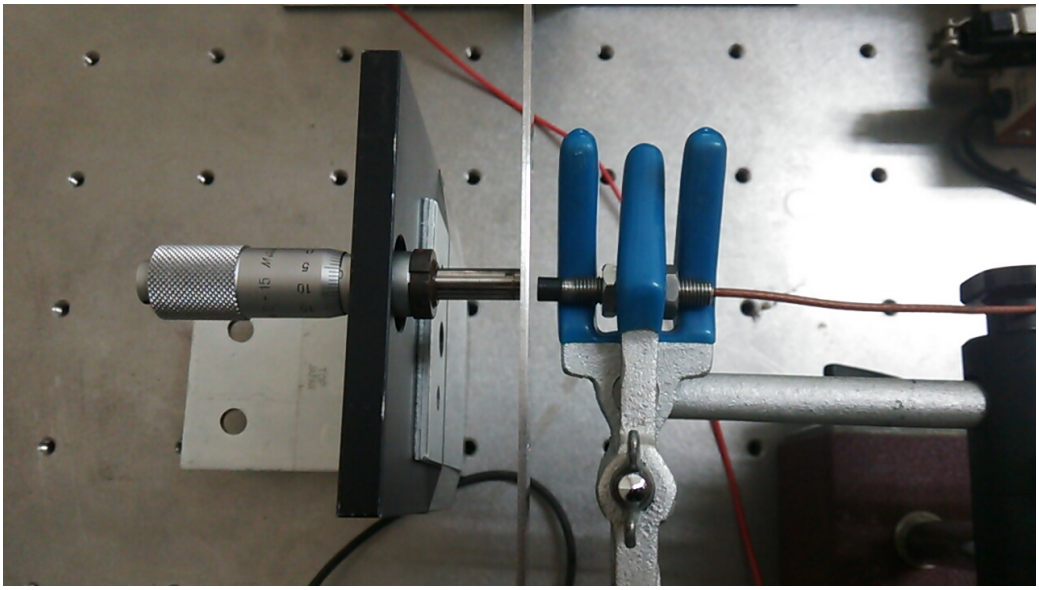


Fig. 4.8: Ref.sensor calibration

マイクロメータを 2.0[mm] 動かした場合の結果を Table 4.3 に，グラフを Fig. 4.9 に示す．この時、レーザー変位計の変位と出力電圧の関係は 5.0[V/mm] であると計算できる．また，0.5[mm] まで 0.05[mm] 間隔で測定した場合の結果を Table 4.4 に，グラフにしたものを Fig. 4.10 に示す．こちらは変位と出力電圧の関係は 4.92[V/mm] である．Ref.Sensor は測定する変位量が小さいのでこちらの結果を利用する．現在使用している渦電流式変位計で出力電圧から変位を計算するための換算係数は $0.201 \times 10^{-3}$[m/V] となる．

Table. 4.3: Ref.sensor outputvoltagedisplacement(0-2[mm])

| Displacement[mm] | OutputVoltage[V] |
|---|---|
| 0 | -5.0 |
| 0.25 | -3.8 |
| 0.50 | -2.5 |
| 0.75 | -1.3 |
| 1.00 | 0 |
| 1.25 | 1.2 |
| 1.50 | 2.5 |
| 1.75 | 3.7 |
| 2.00 | 5.0 |

Table. 4.4: Ref.sensor outputvoltagedisplacement(0-0.5[mm])

| Displacement[mm] | Outputvoltage[V] |
|---|---|
| 0 | 0 |
| 0.05 | 0.24 |
| 0.10 | 0.48 |
| 0.15 | 0.73 |
| 0.20 | 0.98 |
| 0.25 | 1.23 |
| 0.30 | 1.47 |
| 0.35 | 1.74 |
| 0.40 | 1.98 |
| 0.45 | 2.22 |
| 0.50 | 2.46 |

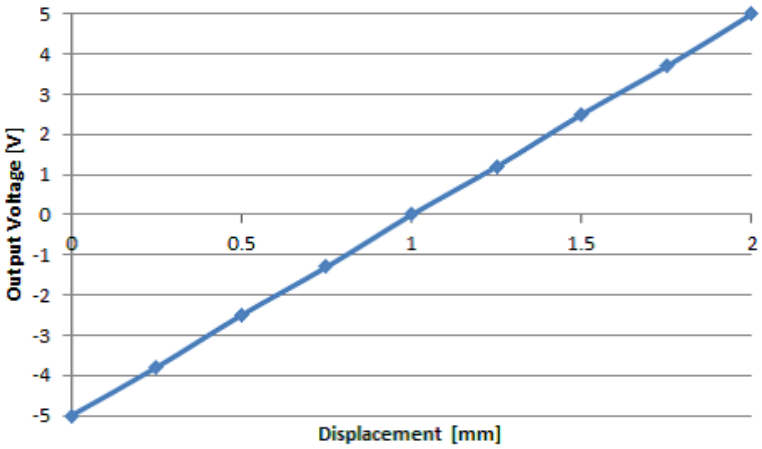



Fig. 4.9: Ref.sensor outputvoltagedisplacement(0-2[mm])

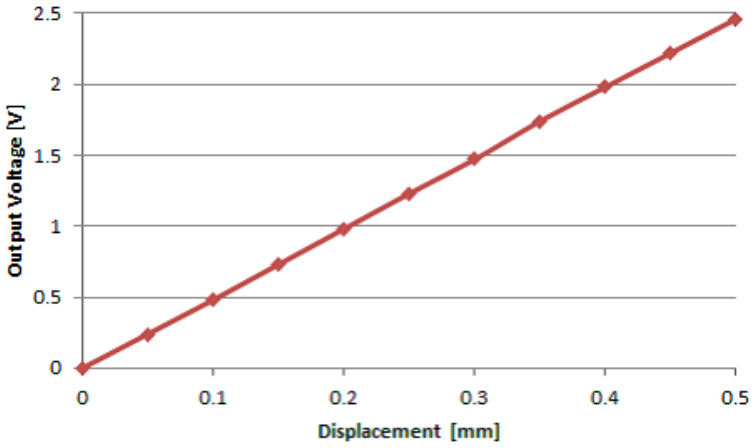



Fig. 4.10: Ref.sensor outputvoltagedisplacement(0-0.5[mm])

## 4.3 周波数応答実験結果の補正

3.2 および 4.2 で計算したセンサとアクチュエータの換算係数を用いて周波数応答実験結果を修正した．式 (3.3) より各伝達関数に対する係数を計算した結果，以下のようになった．

$$\hat{G}_{zw} = G_{zw} \times \frac{0.345 \times 10^{-3}}{7.74 \times 10^{-5}} = G_{zw} \times 4.46,\ \hat{G}_{yw} = G_{yw} \times \frac{0.201 \times 10^{-3}}{7.74 \times 10^{-5}} = G_{yw} \times 2.60$$
$$\hat{G}_{zu} = G_{zu} \times \frac{0.345 \times 10^{-3}}{5.46 \times 10^{-5}} = G_{zu} \times 6.32,\ \hat{G}_{yu} = G_{yu} \times \frac{0.201 \times 10^{-3}}{5.46 \times 10^{-5}} = G_{yu} \times 3.68$$

この係数を使用して周波数応答を修正した結果を Fig. 4.11〜4.14 に示す．修正後の実験結果が $G_{yw}$ 及び $G_{yu}$ では物理モデルと概略一致していることが確認でき，物理モデルの妥当性を示すことが出来る．$G_{zw}$ では 10[Hz] 以降の高周波域で実験結果のゲインの上昇が見られ，$G_{zu}$ については全体的にゲインが上昇していることが確認できる．全体的なゲインの上昇については理由がまだ判明していないが，高周波域でのゲインの上昇については使用しているレーザー変位計によるものではないかと考えられる．本来，レーザー変位計を使用する際には鏡に入るレーザーの入射角は常に同じでなければならないが，高周波になると梁の先端の角度が大きくなってしまいレーザーの入射角が変化することで出力電圧が大きくなりゲインが大きくなってしまうのではないかと考えられる．

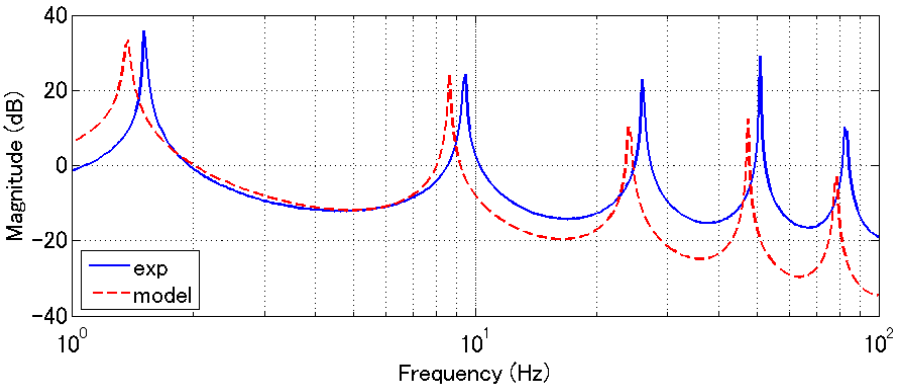



Fig. 4.11: Freqency responce of $\hat{G}_{zw}$

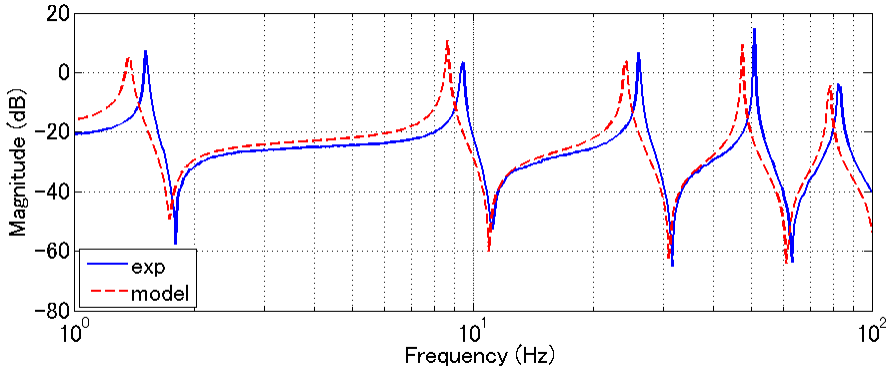



Fig. 4.12: Freqency responce of $\hat{G}_{yw}$

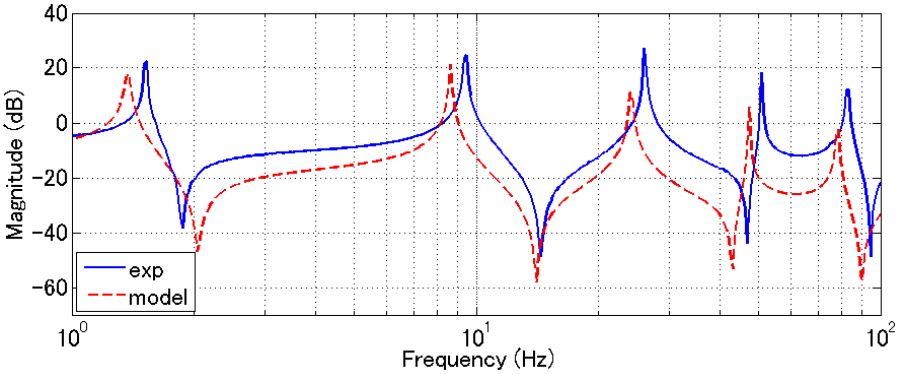



Fig. 4.13: Freqency responce of $\hat{G}_{zu}$

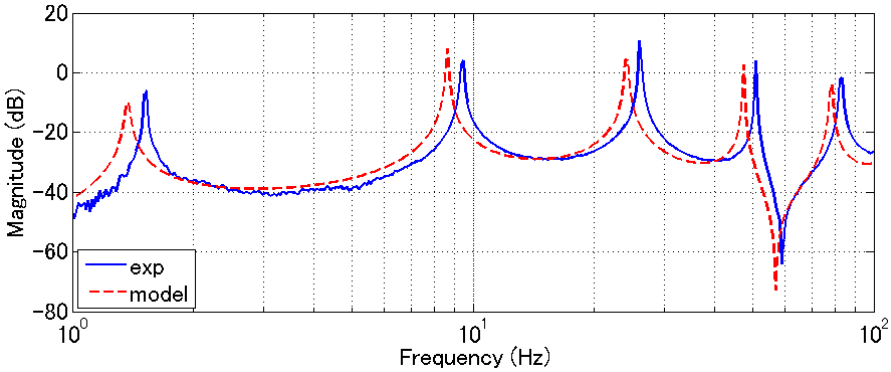



Fig. 4.14: Freqency responce of $\hat{G}_{yu}$

# 第5章　結言

本論文では，片持ち梁のフィードフォワード外乱抑制制御系において，制御対象の同定精度を向上し，指向性アクチュエータを実現するために，圧電素子を用いた設置位置が移動可能なアクチュエータを製作し，アクチュエータ及びセンサの校正実験を行った．その結果，以下の知見を得た．

- 圧電素子を張り付けたステンレス板を梁にボルト締結することにより，設置位置が移動可能なアクチュエータを構成した．アクチュエータが取り外し可能になったことで，梁の同じ位置で複数のアクチュエータの校正実験を行うことができる．

- 単位印加電圧あたりのアクチュエータが梁に与える角変位を測定することでアクチュエータの校正を行った結果，製作した 6 個のアクチュエータにおける取り付け誤差による出力電圧の差が最小 $3.0 \times 10^{-3}$[V]，最大で $9.7 \times 10^{-2}$[V] 見られるものの，アクチュエータ同士の個体差が最小 $5.0 \times 10^{-2}$[V]，最大で 0.548[V] と大きいため，製作したアクチュエータは実際に設置位置が移動可能なアクチュエータとして利用できる．
  校正係数が近い 2 つのアクチュエータを選定することにより，指向性アクチュエータを構成することが出来る．

- センサの出力電圧と梁のたわみを同時測定することでリファレンスセンサ及びエラーセンサの校正を行った結果，アクチュエータの校正結果とあわせて，周波数応答の次元 V/V を，物理モデルと同じ m/rad に換算し，両者を直接比較できるようにした．2 入力 2 出力の 4 つの周波数応答において，両者は概略一致した．エラーセンサを出力とする 2 つの周波数応答において，実験結果のゲインが高周波域で物理モデルより若干高くなっている原因は，梁の傾きにより PSD 上のレーザー光が傾きがない場合に比べて大きく振動するためと考えられる．

以上より，本論文で製作したアクチュエータと制御対象の同定手法を用いれば，従来物理モデルに基づいて報告されている指向性アクチュエータの効果を実験で検証することが可能となる．これを行うことが今後の課題である．

# 参考文献


[1] Y. Kobayashi and H. Fujioka: Active noise cancellation for ventilation ducts using a pair of loudspeakers by sampled-data $H_\infty$ optimization, *Advances in Acoustics and Vibration*, **2008**, doi=10.1155/2008/25394 (2008)

[2] Y. Kobayashi, H. Fujioka and N. Jinbo: A Control Source Structure of Single Loudspeaker and Rear Sound Interference for Inexpensive Active Noise Control, *Advances in Acoustics and Vibration*, **2010**, doi:10.1155/2010/730813 (2010)

[3] J. Winkler and S. J. Elliott: Adaptive control of broadband sound in ducts using a pair of loudspeakers, *Acustica*, **81**, 475/488 (1995)

[4] 西久保，小林:柔軟片持ち梁のフィードフォワード外乱抑制制御系におけるむだ時間型指向性アクチュエータの効果，日本機械学会論文集 (C 編)，**79**–807，4108/4120 (2013)

[5] 田中，菊島，黒田:モーメント要素による柔軟梁の波動制御，日本機械学会論文集 (C 編)， **58**–552，2403/2410(1992)

[6] 田中，菊島:分布定数系モード制御を規範とするポイントセンサ/アクチュエータ群によるモード制御とロバスト性，日本機械学会論文集 (C 編)，**63**–614，3472/3479 (1997)

[7] 米山，田中:導線性高分子を電極とする透明スマートフィルムアクチュエータ，日本機械学会論文集 (C 編)，**76**–768，2059/2065 (2010)

[8] 岩本，田中:柔軟はりにおける波動フィルタリング法に関する研究，日本機械学会論文集 (C 編)，**76**–768，2059/2065 2002)