

令和元年度卒業論文

マイクロ片持ち梁の熱振動制振特性
の測定とその解析

指導教員 河村良行 教授

福岡工業大学工学部知能機械工学科

16E2003 石田恵一

16E2015 上寺洋司

目次

第 1 章 緒言	1
第 2 章 本実験で使用した装置	2
2.1 真空槽内のファブリ・ペロー干渉計に用いた装置	2
2.1.1 マイクロ単結晶シリコン梁	2
2.1.2 圧電素子	2
2.1.3 ロータリーポンプ	3
2.1.4 油拡散ポンプ	3
2.1.5 ピラニ真空計	4
2.1.6 電離真空計	4
2.2 計測装置	5
2.2.1 FFT アナライザ	5
2.2.2 光検出器	5
2.2.3 フォトメーター	6
2.2.4 オシロスコープ	6
2.2.5 ファンクションジェネレータ	7
2.3 制御装置	7
2.3.1 定電圧電源	7
2.3.2 デュアルチャンネルプログラマブルフィルタ	8
2.4 光学系	8

2.4.1	He-Ne レーザー装置	8
2.4.2	可変光アテネータ	9
2.4.3	ビームスプリッタ	9
2.4.4	1/4 波長板	9
2.4.5	偏光板	10
2.4.6	ビームエキスパンダ	10
第 3 章 キャビティ冷却		11
第 4 章 フィードバック制振実験		13
4.1	金コーティングの方法	14
4.2	丸ピエゾの感度校正	15
4.3	熱振幅の実験値の算出方法	18
4.4	レーザー光量変化による熱振幅	19
4.5	理想的な梁の熱振幅	20
4.6	パワースペクトル密度の理論計算較	21
4.7	パワースペクトル密度の理論と実験の比	22
4.8	熱振幅の実験値と理論値の比較	24
4.9	金の厚みの変化による熱振幅の比較	25
4.10	梁の理論的冷却限界	27
第 5 章 まとめ		28
参考文献		29

謝辞	30
付録	31
1. イオンスパッタ装置	31
2. FE-SEM	32

第1章 緒言

近年、精密計測機器はますます高度化しており、多くの科学や技術の発展に寄与している。その中には、原子間力顕微鏡や振動ジャイロといった精密計測機器は微小機械振動子を用いている。微小機械振動子は常に熱振動しているので、それがノイズとなり正確な計測を妨げる。精密な計測を行うためには、極限まで制振する必要がある。熱振動を極限まで抑えることで、精密計測機器の高度化を実現することが可能だと考えられる。

今回は微小片持ち梁の金のコーティング厚さを変えることで、キャビティダンピングの効果による制振の研究を行った。

第2章 本実験で使用した装置

2.1 真空槽内のファブリ・ペロー干渉計に用いた装置

2.1.1 マイクロ単結晶シリコン片持ち梁

本研究で熱振動を抑制する対象となるマイクロ単結晶シリコン片持ち梁(OLYMPUS 社製 OMCL-AC240TN-C3)を図 2.1.1 に示す. 寸法はカタログ値より, 長さ $240\mu\text{m}$, 幅 $40\mu\text{m}$, 厚さ $2.3\mu\text{m}$, 材質は単結晶シリコンである. ばね定数は 2N/m , 固有振動数は $52\sim 61\text{kHz}$ である. 本研究では, 梁表面のレーザー反射率を上げるため, イオンスパッタ装置(日立製作所製, 型番: E-1010)により, 梁にカプトンを被せて梁の付け根から先端付近に金コーティングを施した.

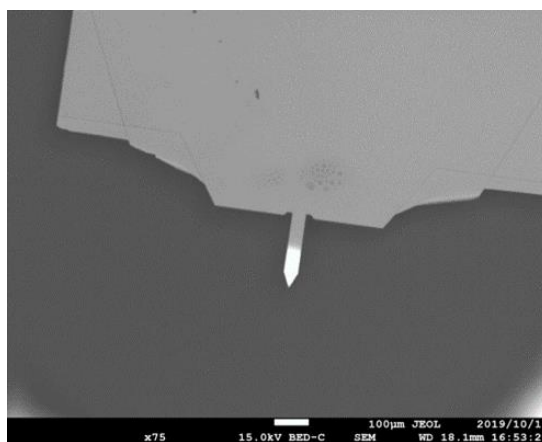


図 2.1.1 先端付近に金コーティングを施した片持ち梁

2.1.2 圧電素子

本研究で用いた圧電素子は単層圧電素子と積層圧電素子の2種類である. 積層圧電素子はキャビティ長の調整に用い, 単層圧電素子はフィードバック制振のために用いる.

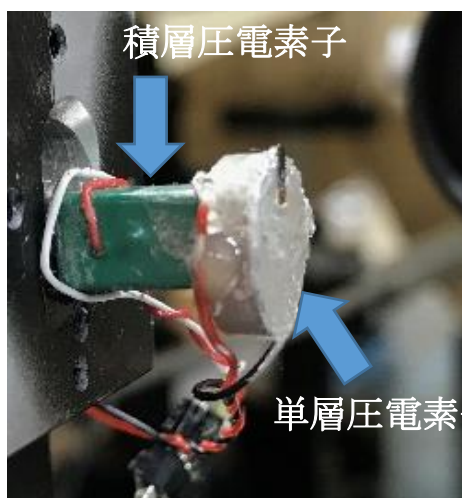


図 2.1.2 圧電素子

2.1.3 ロータリーポンプ

ロータリーポンプの外観を図 2.1.3 に示す。ロータリーポンプは高真空にする為の粗びきや油拡散ポンプの排圧に用いられる。最大で 1.3×10^{-1} Paまで引くことができ、本実験では真空の引き始めから使用する。



図 2.1.3 ロータリーポンプ

2.1.4 油拡散ポンプ

油拡散ポンプの外観図を図 2.1.4 に示す。ロータリーポンプで 0.3Torr まで引いた後、ロータリーポンプは稼働させたまま油拡散ポンプを用いる。油拡散ポンプは装置下部にあるヒーターにより、熱せられたオイルがジェット状の蒸気となって、周囲の気体分子を圧縮、圧縮された空気を排気することで高い真空状態にすることができる。油拡散ポンプを使用する際は、装置自体が高温となるので必ず冷却パイプに水を流す。水を流さないと過熱状態になり、周囲のパイプやチューブを焼いてしまう危険性があるので注意が必要である。



図 2.1.4 油拡散ポンプ

2.1.5 ピラニ真空計

ピラニ真空計の外観を図 2.1.5 に示す。真空の引き始めから約 1.33Pa までの真空度を測定する際に用いる。H(High)から L(Low)へ 2 段階に分けて真空の引き具合を確認する。



図 2.1.5 ピラニ真空計

2.1.6 電離真空計

電離真空計の外観を図 2.1.6 に示す。最大で 1.0×10^{-7} Paまでの高い真空度を測定することができる。ただし、真空度が 6.7×10^{-1} Pa以下の時に電離真空計のゲージ部のスイッチを入れるとフィラメントが切れてしまう可能性がある。そのため、真空度が 6.7×10^{-1} Pa以下の時は使用できないため注意する必要がある。それまでは、ピラニ真空計で真空度を測定する。



図 2.1.6 電離真空計

2.2 計測装置

2.2.1 FFT アナライザ

高速フーリエ変換器(FFTアナライザ, Fast Fourier Transform, 小野測器 社製 CF-9400 以後, FFT)の外観を図 2.2.1 に示す. FFT は入力された波形を適当な時間分で区切る. その波形が無限に繰り返される信号として仮定し, フーリエ変換を行うことで周波数解析を行う. 計測画面では, 縦軸を周波数成分の大きさを表すスペクトル, 横軸を周波数として解析を行う. 本研究では, 後述する干渉光の電圧信号を FFT に入力し, 周波数解析することにより, 梁の熱振動を計測した. 測定できる最小の単位あたりを指す周波数分解能は, $125\mu\text{Hz}$ ~ 125Hz と広範囲に設定できる.



図 2.2.1 FFT アナライザ

2.2.2 光検出器

光検出器の外観を図 2.2.2 に示す. 光検出器とは, 光を電気の信号として変換する装置である.



図 2.2.2 光検出器

2.2.3 フォトメーター

フォトメーターの外観を図 2.2.3 に示す. 光量を電気信号に変え, 数値化できる機器.



図 2.2.3 フォトメーター

2.2.4 オシロスコープ

オシロスコープの外観を図 2.2.4 に示す。オシロスコープは、目に見えない電圧の変化をリアルタイムで見ることができ、基本的に測定画面の縦軸を電圧、横軸を時間として入力された信号の波形を出力する。本研究では主に干渉計の干渉特性の確認や感度の調整を行うために使用する。



図 2.2.4 オシロスコープ

2.2.5 ファンクションジェネレータ

ファンクションジェネレータ(エヌエフ回路設計ブロック 社製 FG-121B)の外観を
図 2.3.1 に示す. 任意の周波数や波形を持つ交流電圧信号を生成, 出力することができる.
本研究では積層圧電素子に電圧を印加し, 梁の位置調整するために使用する.



図 2.3.1 ファンクションジェネレータ

2.3 制御装置

2.3.1 定電圧電源

定電圧電源(KENWOOD 社製 PW36-1.5AD)の外観を図 2.3.2 に示す. 電圧を最大
36V までかけることができ, 最小で 0.01V 単位の調整が可能. 本研究では干渉計の高感
度部に調整する際のフィードバック時に用いる.



図 2.3.2 定電圧電源

2.3.2 デュアルチャンネルプログラマブルフィルタ

デュアルチャンネルプログラマブルフィルタ(DCPF, エヌエフ回路設計ブロック 社
製 3628)の外観を図 2.2.5 に示す. 低周波数成分のみを通すローパスフィルタ(LPF)と高

周波数成分のみを通すハイパスフィルタ (HPF) をそれぞれ設定することで、梁の固有振動数付近の信号のみ通すことができる。また、2つのチャンネルで周波数を設定することによって入力信号と出力信号の位相をずらすことができる。



図 2.2.5 デュアルチャンネルプログラマブルフィルタ

2.4 光学系

2.4.1 He-Ne レーザー装置

He-Ne レーザーの外観を図 2.4.1 に示す。干渉計の光源に用いられており、波長は 632.8nm、出力約 1mW である。直線偏光である。レーザー光の直径は約 1mm である。



図 2.4.1 He-Ne レーザー

2.4.2 可変光アテネータ

可変アテネータの外観を図 2.4.2 に示す。レーザーの光量を調節することができる。アテネータを回すことでレーザー光量値が変わる。(透過率 0.01%~91.2%)



図 2.4.2 可変光アテネータ

2.4.3 ビームスプリッタ

ビームスプリッタの外観を図 2.4.3 に示す。レーザー光を 2 つに分割する装置である。ビームスプリッタに入射した光の一部は反射し、一部は透過する。

2.4.4 1/4 波長板

入射した光の位相差を 90 度ずらし、直線偏光を円偏光に変える光学素子である。



図 2.4.3 ビームスプリッタ

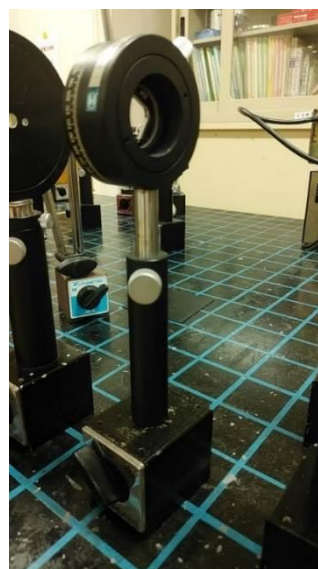


図 2.4.4 1/4 波長板

2.4.5 偏光板

光学での「偏光子」の1つである。特定の角度に偏光した光のみを透過させる。

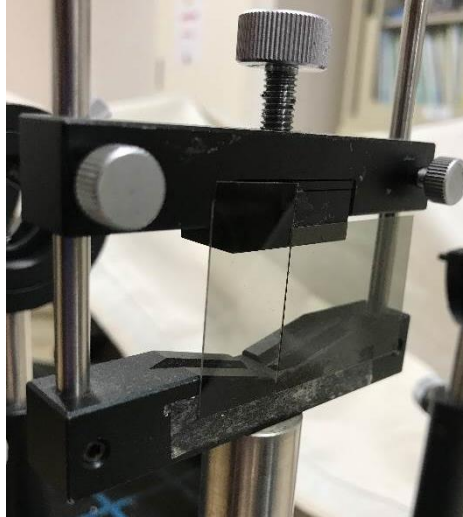


図 2.4.5 偏光板

2.4.6 ビームエキスパンダ

ビームエキスパンダの外観を図 2.4.5 に示す。ビームエキスパンダを用いることで射出されたレーザー光の直径を約 2mm に拡大することができる。



図 2.4.6 ビームエキスパンダ

第3章 キャビティ冷却

本研究では、干渉特性の高感度部にキャビティ長を調整し、梁の振動計測を行う。図 3.1 に示すように高感度部は2つある。そのうち、干渉カーブが負のところでは梁が発振される加熱現象が起こり、干渉カーブが正のところでは梁が制振される冷却現象が起こることが図 3.2 に示すように確認された。これらの現象をそれぞれキャビティ加熱、キャビティ冷却とする。

キャビティ冷却と加熱は、干渉計の光源となる He-Ne レーザーの一部がマイクロ片持ち梁の表面の金に吸収され熱となることで引き起こされる。今回計測した片持ち梁は先端に金コーティングしているため、金の薄膜とシリコンの二重構造である。片持ち梁表面の金はレーザーの吸収によって加熱され、膨張する。この光熱効果によって加熱現象と冷却現象が起こる。

梁は通常熱振動しており、その振動で梁とミラーの距離、つまりキャビティ長が変化する。図 3.3 のようにキャビティ長が変化すると梁の表面に生じる干渉光量が変化する。光量が変化すると梁に伝わる熱が変化し、梁が歪む力が生じる。これを熱歪みとする。また、この生じる力は熱伝導の関係で梁の振動と位相が遅れて伝わることで、位相が進むと加熱現象、位相が遅れると冷却現象が起こる。キャビティ長の変化によって起こる2つの現象をキャビティ加熱とキャビティ冷却とする。この現象はFP干渉計の計測感度が高く、キャビティ長に対する光量の変化が大きいため、起こったと考えられる。

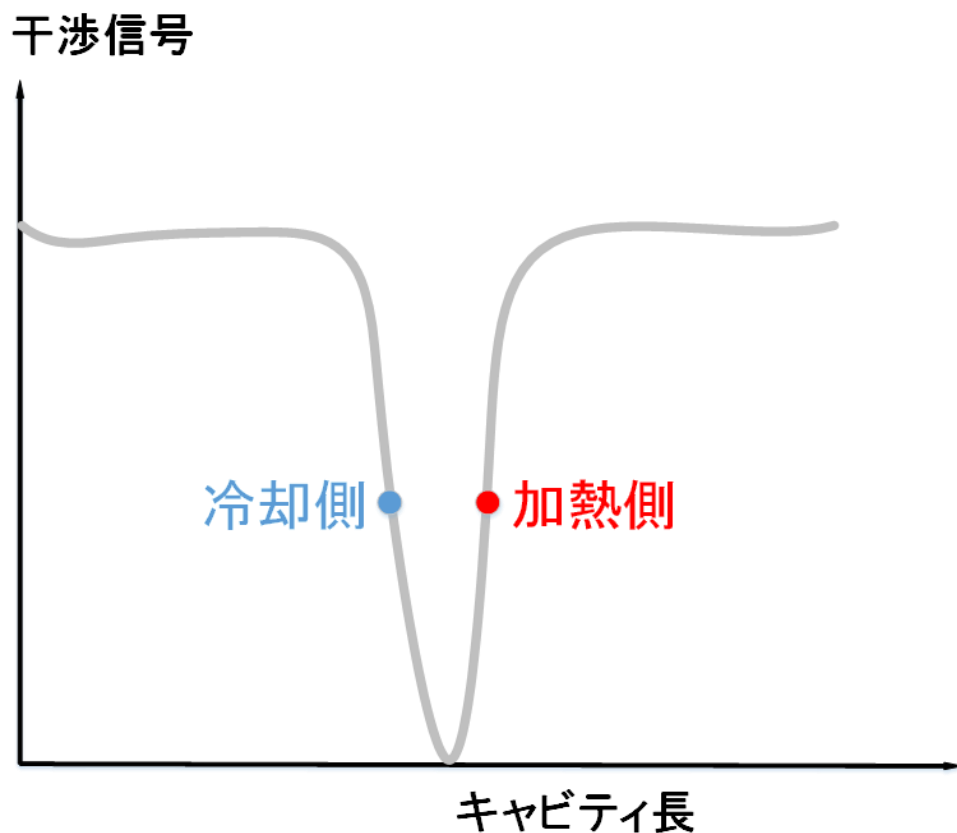


図 3.1 FP 干渉特性

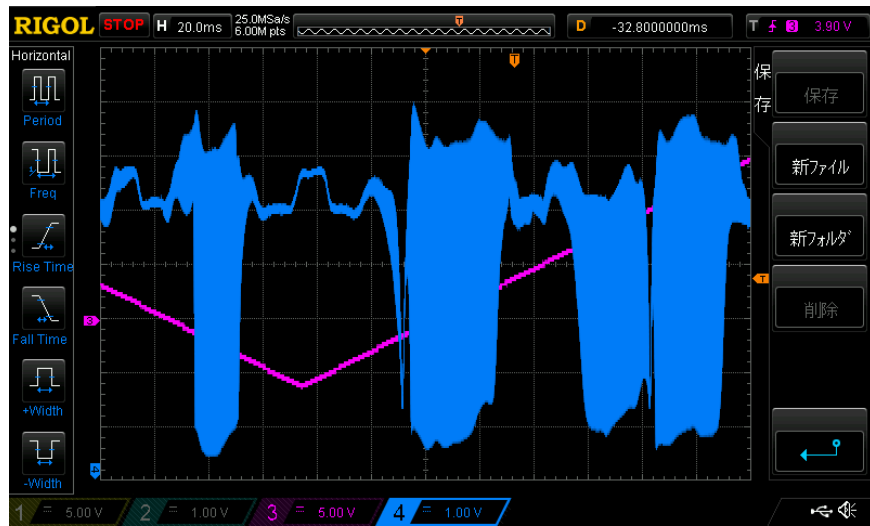


図 3.2 加熱・冷却現象の確認

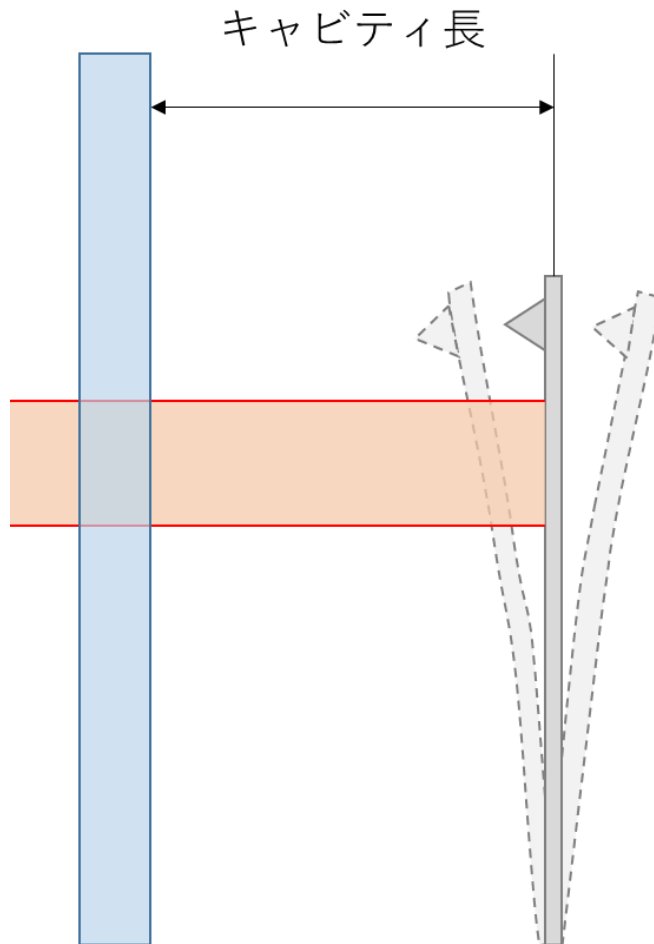


図 3.3 梁の熱振動とキャビティ長の変化

第4章 フィードバック制振実験

ファブリ・ペロー干渉計による、フィードバック制振システムについて説明する。フィードバック制振システムの概要図を図4.1に示す。

He-Ne レーザーから出たレーザー光はビームスプリッタを通過後、レンズにより集光され真空状態にあるFP干渉計で干渉する。

干渉した光は再びビームスプリッタを通り、光検出器で読み取る。光検出器で読み取った後、増幅器付きフィルターに通す。低周波数と高周波数をそれぞれ設定し、梁の固有振動数付近の信号のみ通す。さらに位相を90度ずらし、フィードバックループゲインをかけた信号を単層圧電素子に電圧を印加させる。それによって梁の熱振動を抑える。最終的にFFTアナライザによって読み取った信号を周波数解析することで、熱振動を算出する。

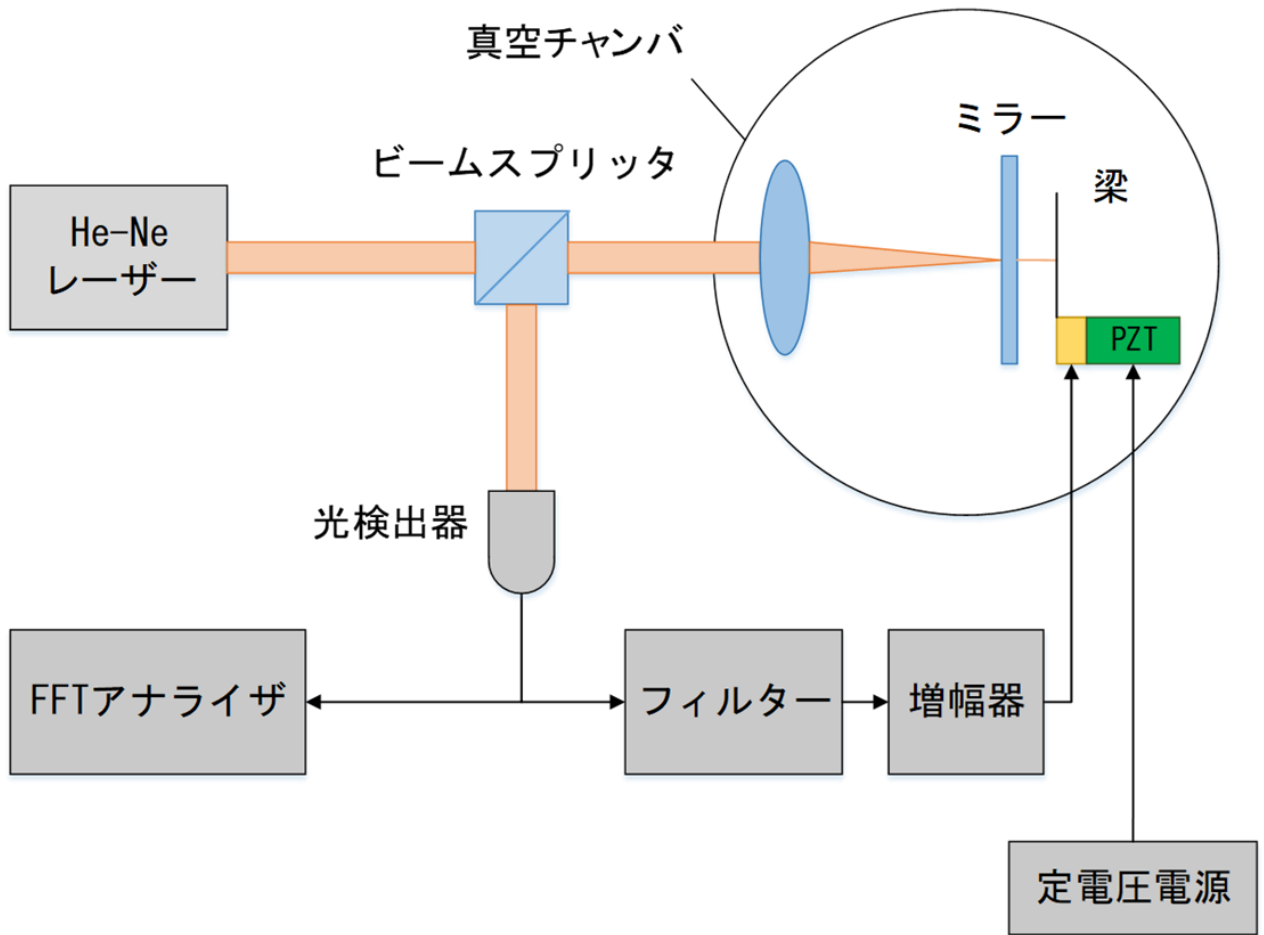


図 4.1 フィードバック制振システムの概要

スコープ上での x 軸の座標である。上記から半波長は 397p である。これから $0.3164[\mu\text{m}]/397[\text{p}]=0.000797[\mu\text{m}/\text{p}]$ であることが分かる。

図 4.1.2 は図 4.1.1 の動作点近くを拡大したものである。図 4.1.1 と同様に縦軸に電圧横軸にポイントを取ったものである。線形近似式により、傾きは $0.0677\text{V}/\text{p}$ であることがわかる。したがって干渉計の感度は

$$0.0677[\text{V}/\text{p}]/0.000797[\mu\text{m}/\text{p}]=84.9[\text{V}/\mu\text{m}]$$
である。

長ピエゾの感度を算出する場合、オシロスコープに反映されている干渉信号より、半波長($0.3164\mu\text{m}$)あたり $10[\text{V}]$ 移動しているのを確認した。よって長ピエゾの感度は $31.6[\text{V}/\mu\text{m}]$ であることが分かる。

丸ピエゾの感度を算出する際、FFT とファンクションジェネレータを用いた。長ピエゾと丸ピエゾにそれぞれ 2.56mV 、 10V 電圧をかけた。長ピエゾに 10V 電圧をかけた場合、信号が発振し、FFT でピーク値を読み取ることができなかつたので、 2.56mV のように小さい電圧をかけた。更に、補正を行った。丸ピエゾの感度を算出する際に用いる各値を表 1 に示す。

長ピエゾに 10V 電圧をかけた時、求めるピーク値を x とおくと、

$$\begin{aligned}x &= 3 \times 10^{-5}[\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}] \times \frac{10[\text{V}]}{2.56 \times 10^{-3}[\text{V}]} \\ &= 0.117[\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}] \\ &= 1.17 \times 10^{-1}[\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}]\end{aligned}$$

となる。

そして、丸ピエゾの感度を y とおくと、

$$\begin{aligned}y &= 3.16 \times 10^{-2}[\mu\text{m}/\text{V}] \times \frac{1.0 \times 10^{-4}[\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}]}{1.17 \times 10^{-1}[\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}]} \\ &= 0.000027[\mu\text{m}/\text{V}] \\ &= 2.7 \times 10^{-5}[\mu\text{m}/\text{V}]\end{aligned}$$

となる。
これが丸ピエゾの感度の値である。

表 1 感度計算で用いた各値

	丸ピエゾ	長ピエゾ
感度 [$\mu\text{m}/\text{V}$]	2.7×10^{-5}	3.16×10^{-2}
電圧 [V]	10	2.56×10^{-3}
ピーク値 [$\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$]	1.0×10^{-4}	3×10^{-5}

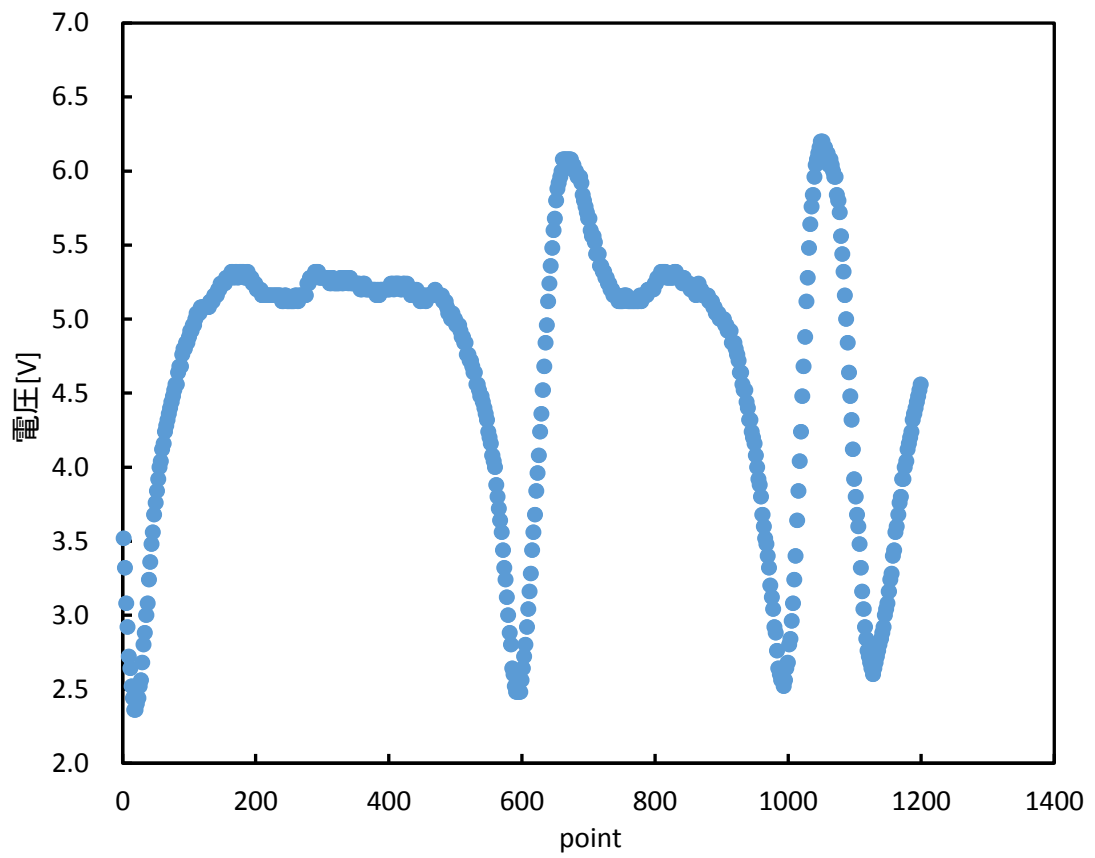


図 4.1.2 FP 金コーティング 360 秒における干渉特性

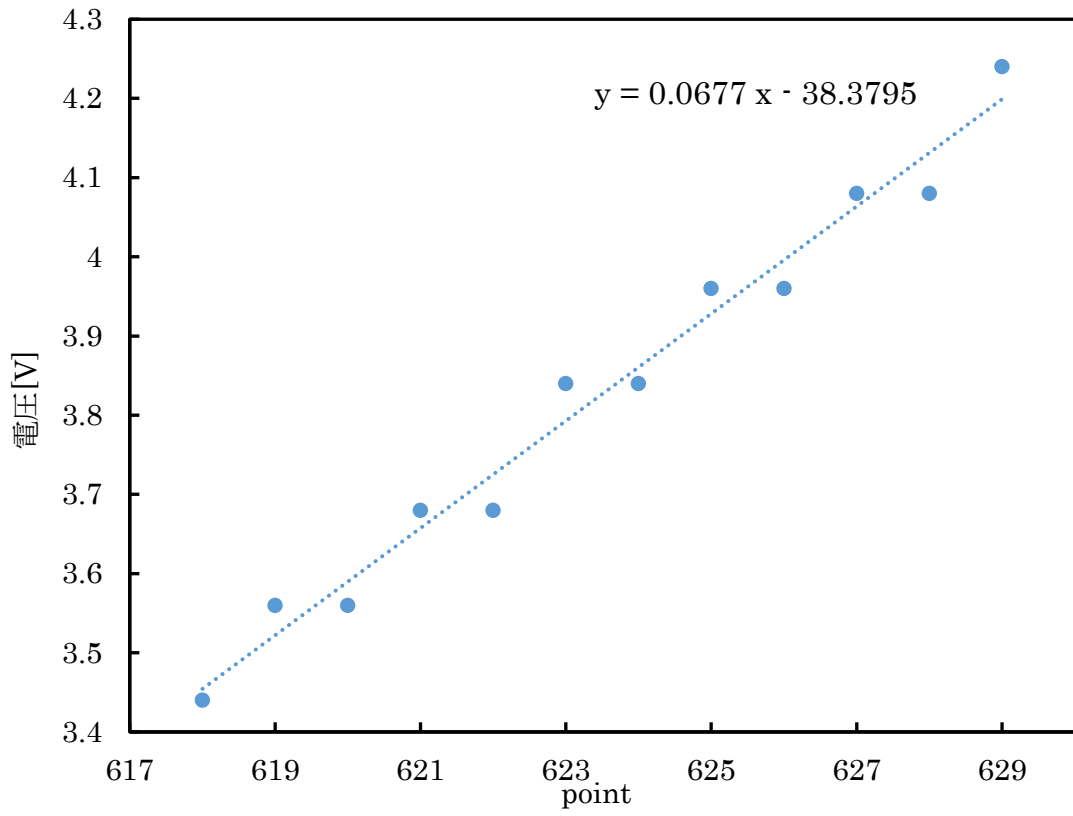
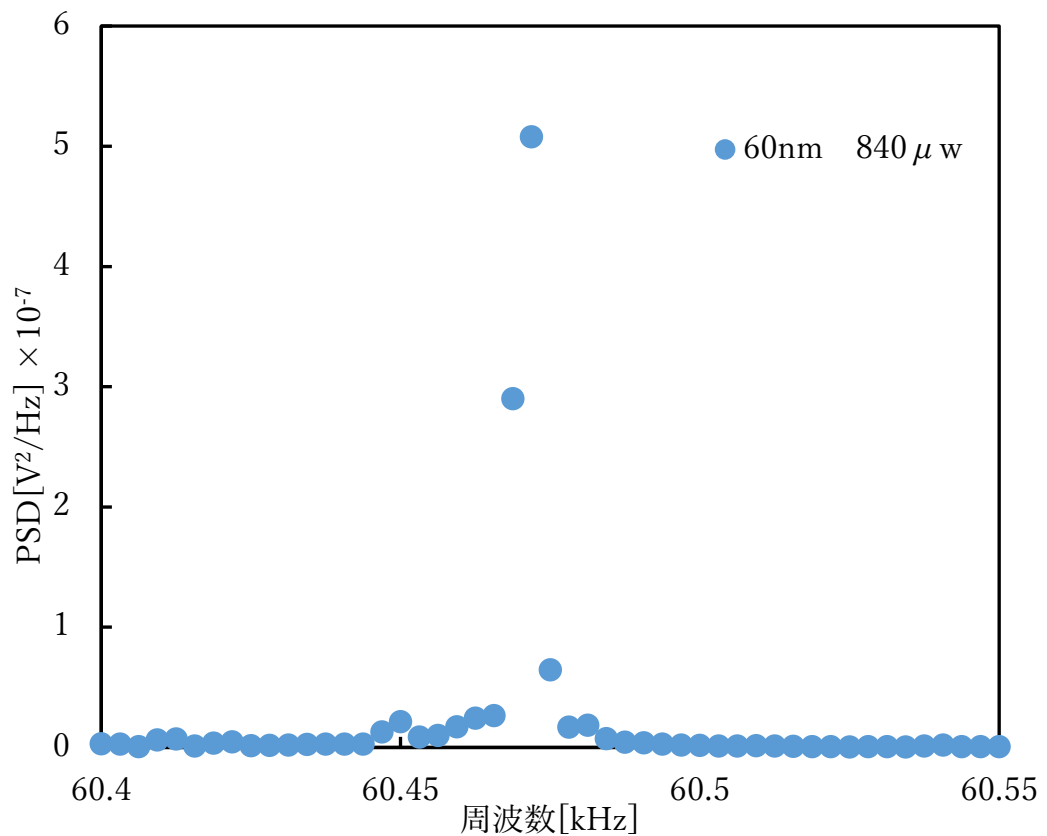


図 4.1.3 618p から 629p までの近似線



4.3 熱振幅の実験値の算出方法

図 4.3 熱振幅の実験値

図 4.3 は，4.2 章の時の熱振幅の実験値のグラフである．ピークの値がこの梁の固有振動数である．まず，周波数範囲 60.40kHz～60.55kHz での高さの合計を求めると $1.1 \times 10^{-6} [\text{V}^2/\text{Hz}]$ となる．この値に次にデータ点の周波数間隔 $3.125 [\text{Hz}]$ をかけると， $3.26 \times 10^{-6} [\text{V}^2]$ となり，さらに 2 乗を外すと $1.81 \times 10^{-3} [\text{V}]$ となる．これが実効値電圧になる．

熱振幅を算出する際に用いた式は

$$\text{熱振幅} [\mu\text{m}] = \frac{\text{実効値電圧} [\text{V}]}{\text{感度} [\text{V}/\mu\text{m}]}$$

となり，各値を上式に代入すると，

$$\text{熱振幅} = \frac{1.81 \times 10^{-3}}{84.9} = 2.1 \times 10^{-5}$$

となり、熱振幅は 21pm となる。

周波数範囲 [kHz]	60.40~60.55
干渉計の感度 [V/μm]	84.9
分解能 [Hz]	3.125
総和 [V ² /Hz]	1.1 × 10 ⁻⁶

4.4 レーザー光量変化による熱振幅

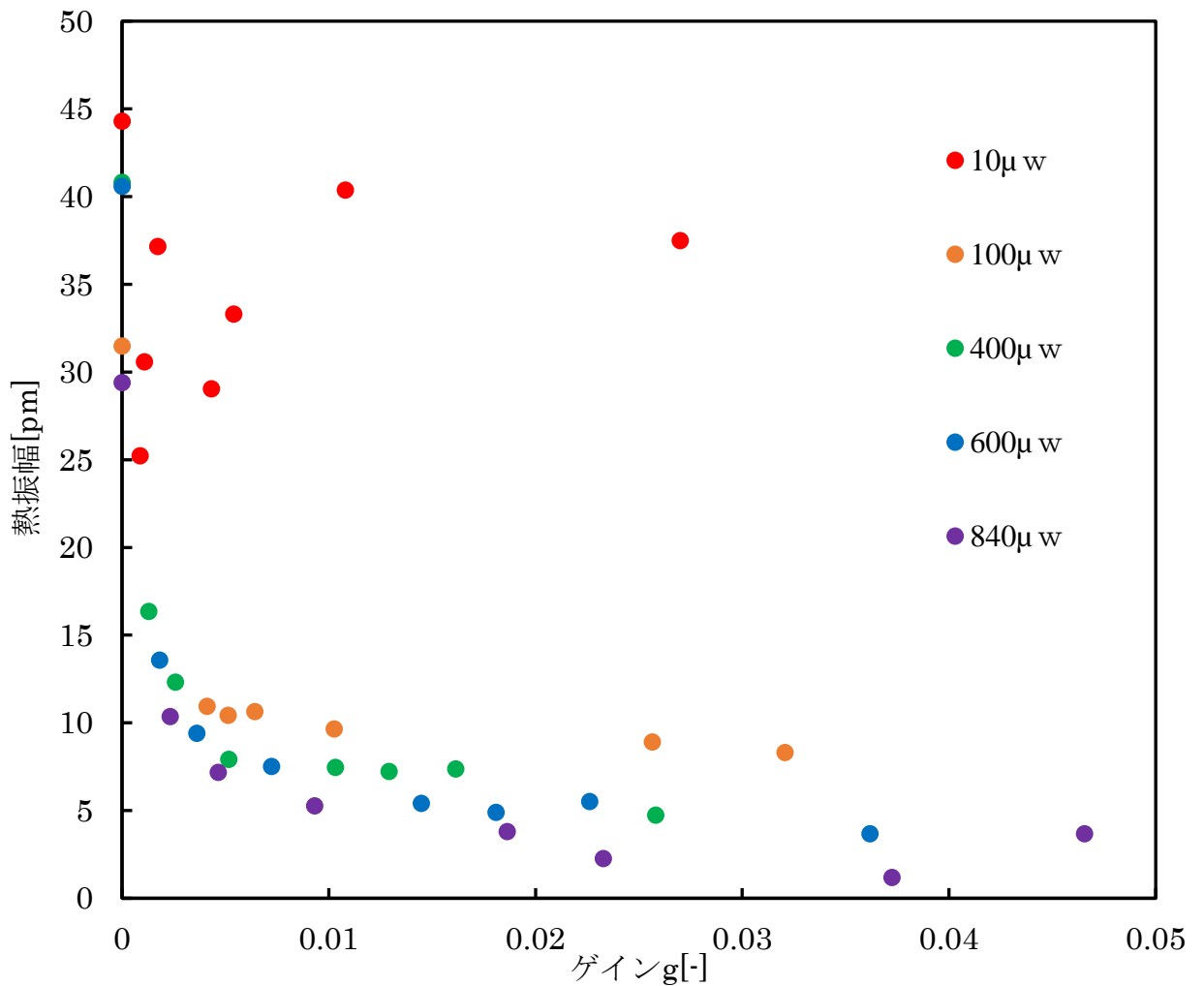


図 4.4 光量変化における熱振幅とループゲインの関係

レーザー光量を変化させた際のレーザー光量とループゲインの関係を検証した。真空度 3×10^{-3} [Pa], FP 感度 0.016~0.862 [mV/pm], 反射率 88% の誘電体多層膜ミラーと, 360 [s] 先端を金コーティング(金の厚み 60nm) したマイクロ片持ち梁の先端でキャビティを構成した。干渉光を光検出器で測定し, その信号を FFT アナライザで周波数解析をすることによって熱振幅を求めた。FFT アナライザとはフーリエ変換をして熱振幅を計測する機器である。また, この実験ではレーザー光量を 10 [μw] から 840 [μw] の間で光量を変化させ, 各光量によりループゲインを求めた。

レーザー光量が 10 [μw], 100 [μw], 400 [μw], 600 [μw], 840 [μw] の時のマイクロ片持ち梁の振動の熱振幅とゲインの関係を図 4.3 に示す。レーザー光量を増加させると熱振幅が減少していることが確認できた。

4.5 理想的な梁の熱振幅

梁は通常、外部からの外的影響を無視した状態においても主に熱振動の現象により、微小ではあるが振動している。

まずは、振動に影響を及ぼす熱振動以外の要因を最小限に抑えるために、真空状態において梁を含む FP 干渉計を構成している。また、この熱振動による振動を抑える際、実際に熱振動が抑えられているかを示す指標が必要となる。そのため、エネルギー等分配の法則より梁の熱振幅を求めることができる。微小な粒子によって運ばれる熱エネルギー $k_B T$ は、ポテンシャルエネルギー U と運動エネルギー K の和によって、以下のように求めることができる。

$$k_B T = U + K$$

ただし、 k_B はボルツマン定数、 T は絶対温度とし、ポテンシャルエネルギー U は、バネによるエネルギーから求めることができる。

統計力学のエネルギー等分配の法則から、理想的な系の熱平衡状態において、1 自由度あたりに平均で $\frac{1}{2} k_B T$ の運動エネルギーが割り振られると考えるとそれぞれ次式で表せる。

$$\frac{1}{2} k_B T = U \tag{4-1}$$

$$\frac{1}{2} k_B T = K \tag{4-2}$$

式(4-1)はバネによるエネルギーより

$$\frac{1}{2}k_B T = \frac{1}{2}k\langle x \rangle^2 \quad (4-3)$$

と表すことができる。

式(4-3)を変形すると

$$\langle x \rangle = \sqrt{\frac{k_B T}{k}} \quad (4-4)$$

となる。

$k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{m}^2 \cdot \text{kg}/(\text{s}^2 \cdot \text{K})$, $T=300\text{K}$, バネ定数 $k=2\text{Nm}$ とすると式(4-4)より梁の振幅値は $\langle x \rangle \cong 45\text{pm}$ となる。これは梁のもつ理論的な熱振幅である。

4.6 パワースペクトル密度の理論計算

片持ち梁の運動モデルを図 4.5 に示す。片持ち梁を質点だと考えると、バネマスダンパ系と仮定することができる。よって運動方程式は

$$F(t) = m\{\ddot{x}(t) + \dot{y}(t)\} + \mu\dot{x}(t) + kx(t) \quad (4-5)$$

と表すことができる。

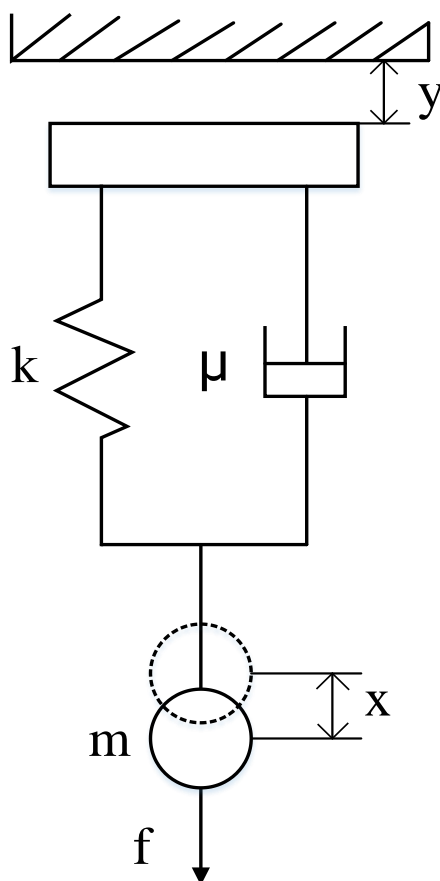


図 4.5 片持ち梁の運動モデル

$f(t)$ は片持ち梁の熱振動を引き起こす力（ランジュバン力）、 $x(t)$ は片持ち梁の変位、

$y(t) = gx_{\Delta\theta}(t)$ は単層圧電素子の変位, $x_{\Delta\theta}(t)$ は単層圧電素子に電圧をかけたときの梁の変位, g はフィードバックループゲイン, m は等価質量, μ は減衰係数, k はばね定数である. 今回はノイズレベルを除いた. 式(4-5)に示す運動方程式を解くことで片持ち梁のフィードバック制振の理論解析を行う.

式(4-5)中の各値を, 三角関数を用いて表すと

$$f(t) = f \sin(\omega t) \quad (4-6)$$

$$x(t) = x \sin(\omega t) \quad (4-7)$$

$$x_{\Delta\theta}(t) = x \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (4-8)$$

となる. ここで ω は角周波数である. $x(t)$ の一階微分, 二階微分はそれぞれ, $\dot{x}(t) = x\omega \cos(\omega t)$, $\ddot{x}(t) = -x\omega^2 \sin(\omega t)$ となる. またマイクロ片持ち梁の品質係数(Q 値; Quality factor) Q , ならびにバネ定数 k は

$$Q = \frac{m\omega_0}{\mu} = \frac{\tau_0}{T} \approx \frac{\Delta\omega}{f_0} \quad (4-9)$$

$$k = m\omega_0^2 \quad (4-10)$$

で表される. ここで, ω_0 は片持ち梁の固有角振動数, μ は減衰係数, τ_0 は梁を励振し振幅が励振値の $1/e$ となるまでの時間(時定数, 減衰時間), T は振動の周期(固有振動数の逆数), $\Delta\omega$ はパワースペクトル密度の半値全幅(FWHM)であり(パワー(2乗)でないスペクトル密度の場合は $1/\sqrt{2}$ 全幅), f_0 は梁の固有振動数($f_0 = \omega_0/2\pi$)である.

式(4-6)-(4-8), 式(4-9)-(4-10)を用いることで式(4-5)を整理すると,

$$\begin{aligned} f \sin(\omega t) &= m\{-x\omega^2 \sin(\omega t) + gx\omega^2 \cos(\omega t)\} + \mu x\omega \cos(\omega t) + kx \sin(\omega t) \\ &= x\{(-m\omega^2 + k) \sin(\omega t) + (mg\omega^2 + \mu\omega) \cos(\omega t)\} \end{aligned}$$

ここで三角関数の合成($a \sin \theta + b \cos \theta = \sqrt{a^2 + b^2} \sin(\theta + \alpha)$)を用いると,

$$f \sin(\omega t) = x\sqrt{(-m\omega^2 + k)^2 + (mg\omega^2 + \mu\omega)^2} \sin(\omega t + \alpha)$$

となる。ここで $\alpha = 0$ とし、 $\sin(\omega t)$ を無視すると

$$\begin{aligned} f \sin(\omega t) &= x\sqrt{(-m\omega^2 + k)^2 + (mg\omega^2 + \mu\omega)^2} \sin(\omega t) \\ f &= x \sqrt{(-m\omega^2 + m\omega_0^2)^2 + \left(mg\omega^2 + \frac{m\omega_0\omega}{Q}\right)^2} \\ &= xm \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2) + \left(g\omega^2 + \frac{\omega_0\omega}{Q}\right)^2} \\ \frac{f}{m} &= x \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2) + \left(g\omega^2 + \frac{\omega_0\omega}{Q}\right)^2} \end{aligned} \tag{4-11}$$

となる。式(4-11)をマイクロ片持ち梁の熱振幅 x について解くと,

$$x = \frac{\left(\frac{f}{m}\right)}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2) + \left(g\omega^2 + \frac{\omega_0\omega}{Q}\right)^2}} \tag{4-12}$$

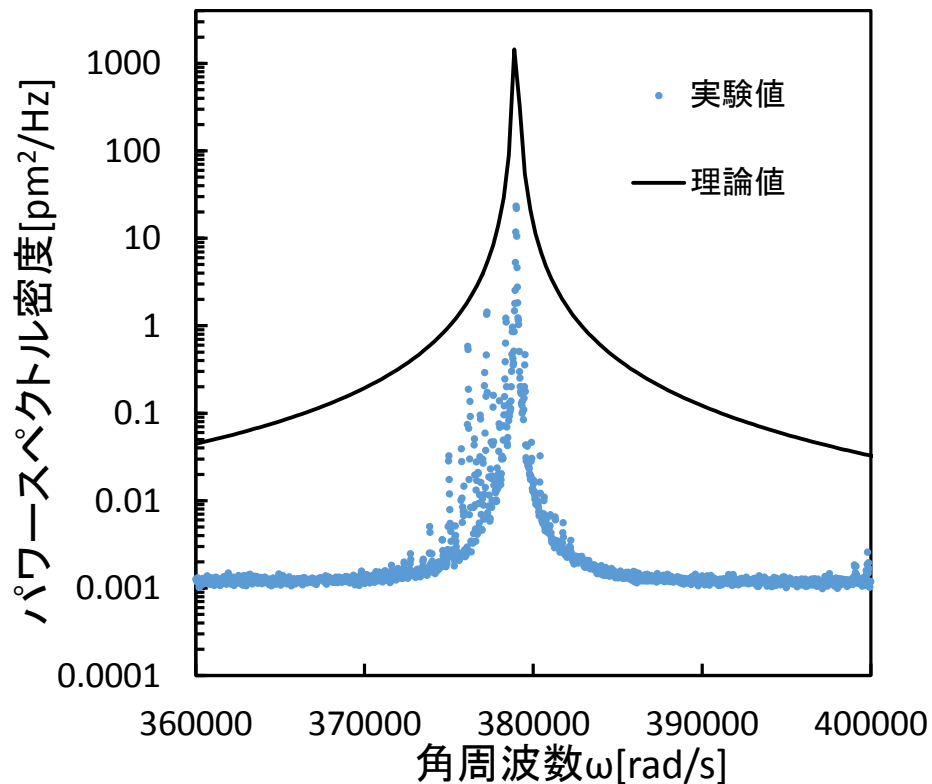
となる。したがって、マイクロ片持ち梁の熱振動のパワースペクトル密度は,

$$x^2 = \frac{\left(\frac{f}{m}\right)^2}{(\omega_0^2 - \omega^2) + \left(g\omega^2 + \frac{\omega_0\omega}{Q}\right)^2} \quad (4-13)$$

と求められる。

4.7 パワースペクトル密度の理論と実験の比較

パワースペクトル密度と角周波数の関係を図 4.7.1 に示す。パワースペクトル密度とは本実験において、周波数ごとの熱振幅の二乗の大きさのことをいう。グラフの山なりの部分は梁の各固有振動数である。レーザー光量が $840\mu\text{w}$ で梁の半分より上(梁の付け根から



$120\mu\text{m}$ 以降)に金の厚みを 30nm にした。梁に対面するミラーは反射率 88% の物を用いた。

ゲインがゼロの時のキャビティ制振の実験値とキャビティ制振なしの理論値を比較した。

梁の熱振幅が 45pm に対して、実験値は約 19pm であった。

図 4.7.1 パワースペクトル密度と角周波数の関係

このことより (1/2) 以上熱振幅が制振されていることが分かった。キャビティ制振なしの理論値のパワースペクトル密度のピーク値を 1/61 することで、実験値のグラフと重ねた。つまりキャビティ制振が 61 倍働いていることが分かる。

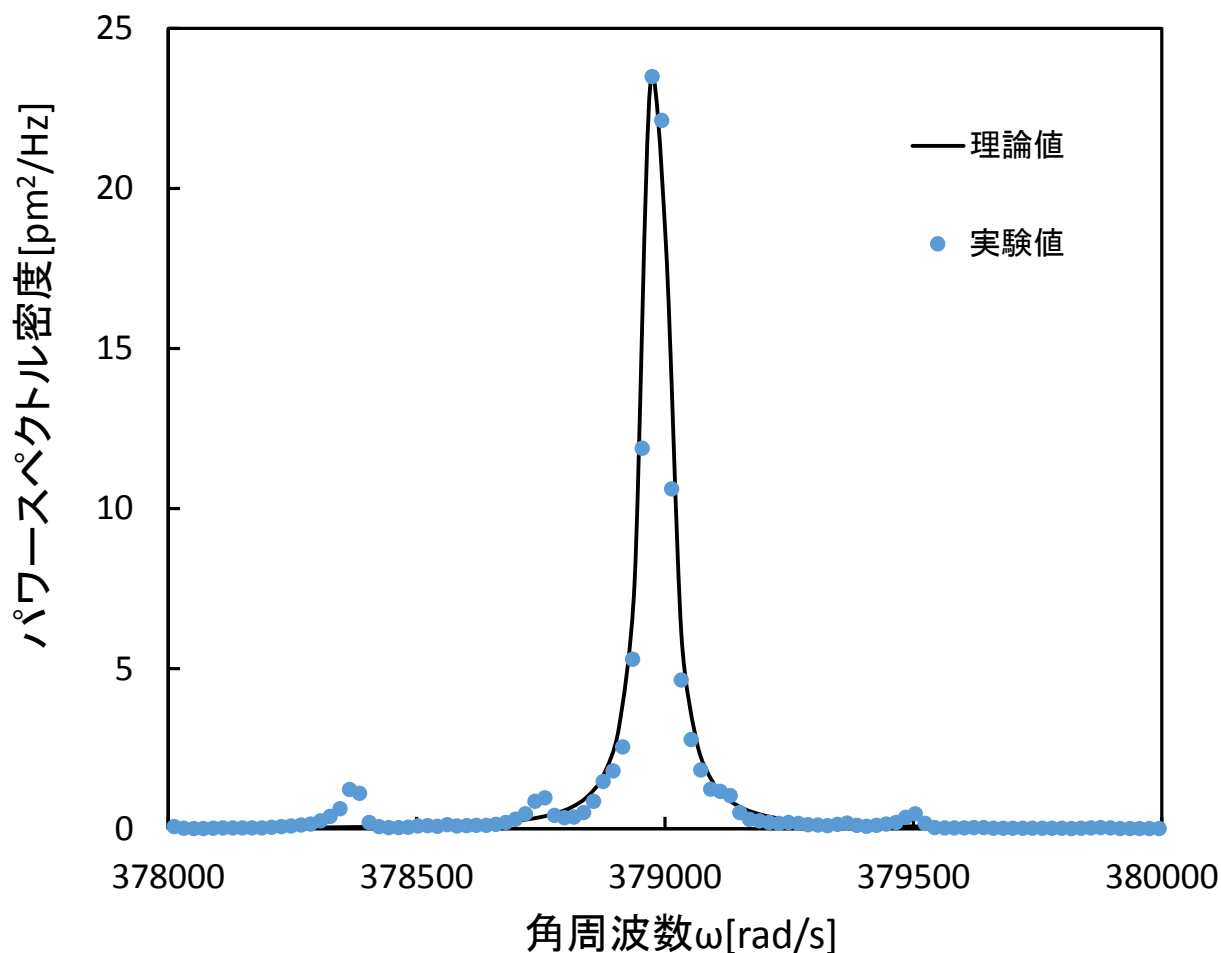


図 4.7.2 キャビティ制振の度合い

4.8 熱振幅の実験値と理論値の比較

光量は最大の $840\mu\text{w}$ で実験を行った。梁に対面するミラーは反射率88%の物を用いた。30nm, 60nm の二つの厚みで梁に金コーティングを施した。30nm の金の反射率は84%であった。

それぞれ、実験値を5回平均した値と標準偏差を示している。薄青色の線は30nm, 暖色の線は60nm の理論曲線である。ゲインがゼロの時のQ値は30nm が6500, 60nm が15000であった。30nm の理論曲線が60nm より全体的に低くなっているのはQ値によるものであると考えた。

二つの厚みともに実験値が理論値とほぼ一致した。またゲインがゼロの実験値に着目すると、60nm より30nm が制振されていることが分かる。

この原因はミラーと梁の反射率によるものだと考えた。対面するミラーの反射率88%に対して、30nm は84%である。ミラーの反射率は30nm の約1.04倍である。これに対して60nm は30nm の2倍の厚みがあり、反射率も数倍あるはずである。これにより60nm とミラー間の反射率も数倍異なっている。

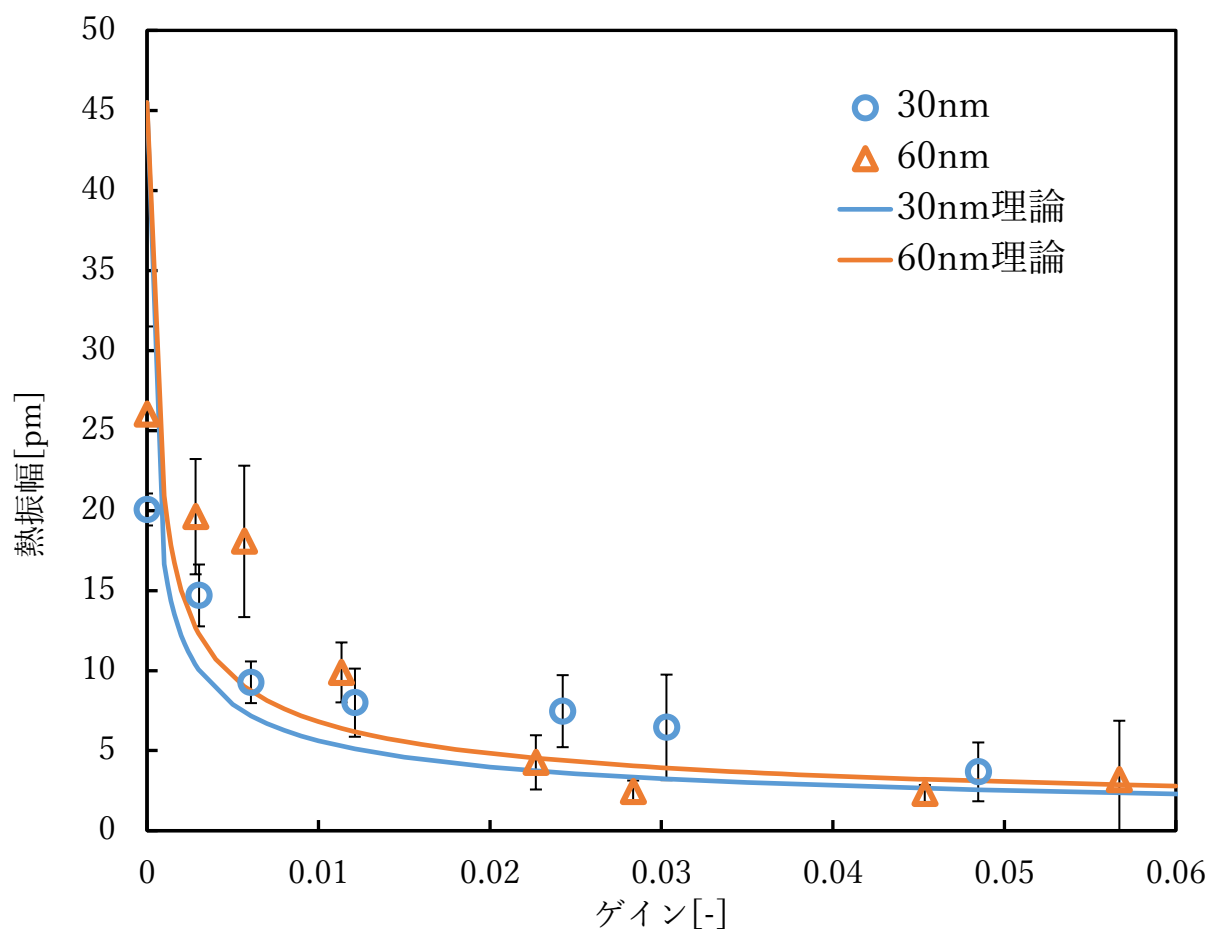


図 4.8 金の厚みによる，熱振幅の実験値と理論値の比較

4.9 金の厚みの変化による熱振幅の比較

グラフは縦軸に金コーティングした梁の熱振幅，横軸にゲインを取った．実験値は 5 回データを取り，平均した値である．また，標準偏差も求めた．30nm，60nm，90nm の厚みでそれぞれ梁の半分より上に金コーティングを施した．梁に対面するミラーは 30nm，90nm が 88%，60nm が 92% を用いた．光量は最大の 840 μ w で行った．光量を最大にしたのは光量が大きいほど梁の熱振動を抑えられると考えたからである．

ゲインがゼロの時に着目すると 30nm が 20pm, 60nm が 26pm, 90nm が 9pm となっている。理論熱振幅が 45pm に対して熱振幅が制振されていることが分かる。ゲインは 0.02 ~0.04 の間に 60nm 金コーティングした梁が約 2.5pm となっている。90nm はゲインを細かく取れなかったためその区間の熱振幅は取ることができなかったが、実際は 2.5pm よりも制振されていると考えた。それを踏まえて考えると金の厚みが厚くなるほど、熱振幅が小さくなっていることが分かる。また標準偏差も金の厚みが厚いほど小さくなっていることが分かる。

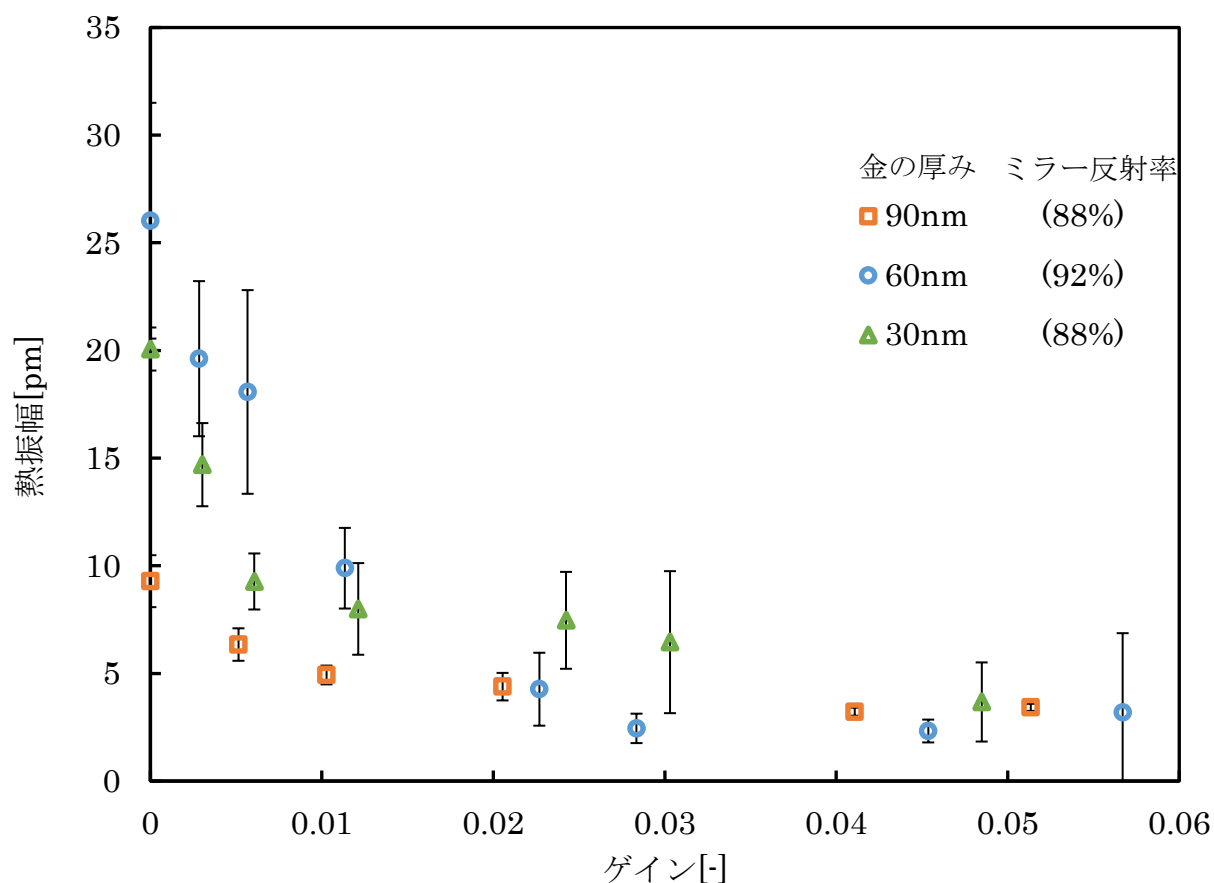


図 4.9 金の厚み変化による熱振幅の比較

4.10 梁の理論的冷却限界

微小片持ち梁の実効温度は、式(4-4)より熱振動の振幅から求めることができる。理論的冷却限界の式は

$$T_{eff,min} = \frac{2T_0}{\sqrt{|x_p(\omega)|^2 / |x_n(\omega)|^2}} \quad (4-14)$$

で表すことができる。ここで、 T_0 は室温、 $x_p(\omega)$ は熱振動信号のパワースペクトル密度のピーク値、 $x_n(\omega)$ は熱振動信号のパワースペクトル密度のノイズレベルの値である。

これより、ハイブリッド制振実験で梁の理論的冷却限界を算出する。図 4.9 の実験結果から得られた 30~60nm の冷却限界は、それぞれ以下の結果となった。

30nm がゲイン 0 の時の熱振幅 12.8[pm]より、24.09[K]となった。そして、実効温度 24.09[K]のときの梁の振幅の実効値は 7.51[pm]となった。30nm の実験値の熱振幅の最小値は 2.37pm である。実験値が冷却限界より制振されていることが分かる。

60nm がゲイン 0 の時の熱振幅 25.79[pm]より、98.57[K]となった。そして、実効温度 98.57[K]のときの梁の振幅の実効値は 8.32[pm]となった。60nm の実験値の熱振幅の最小値は 2.32pm である。実験値が冷却限界より制振されていることが分かる。

90nm がゲイン 0 の時の熱振幅 8.92[pm]より, 11.78[K]となった。そして, 実効温度 20.67[K]のときの梁の振幅の実効値は 5.08[pm]となった。90nm の実験値の熱振幅の最小値は 3.10pm である。実験値が冷却限界より制振されていることが分かる。

以上から金の厚み 30~90nm の実験値の熱振幅は冷却限界より制振されたことが分かる。

5章 まとめ

はじめに、梁の半分より上に、金コーティングをすることで従来より制振されるだろうと考えた。

まず、梁表面に施した金コーティングが厚くなるほど熱振幅が制振されたことが分かった。次に、熱振幅の実験値は理論値と冷却限界より制振されたことが判明した。

実験結果からやはり、梁の半分より上を金コーティングしたことにより、キャビティ制振が起こりやすくなったことが分かった。

参考文献

- (1) 久恒匠真 平成 30 年度 卒業論文 ファブリ・ペロー干渉計における微小片持ち梁のキャビティ冷却による熱振動制振
- (2) 鐘ヶ江力 平成 28 年度 修士論文 フィードバック冷却を用いたマイクロ片持ち梁の熱振動の制御
- (3) 辻家祐介 平成 29 年度 修士論文 機械振動子の量子的零点振動計測を目的とした微小ファブリ・ペロー干渉計の開発

謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方々にご協力頂き、改めて感謝申し上げます。誠にありがとうございました。

本研究でのご指導、助言を頂いた指導教員の河村良行教授にこの場をお借りして、感謝申し上げます。

本学エレクトロニクス研究所の宋麗香氏には、イオンスパッタ装置や FE-SEM の使用方法のご指導を頂きました。誠にありがとうございました。

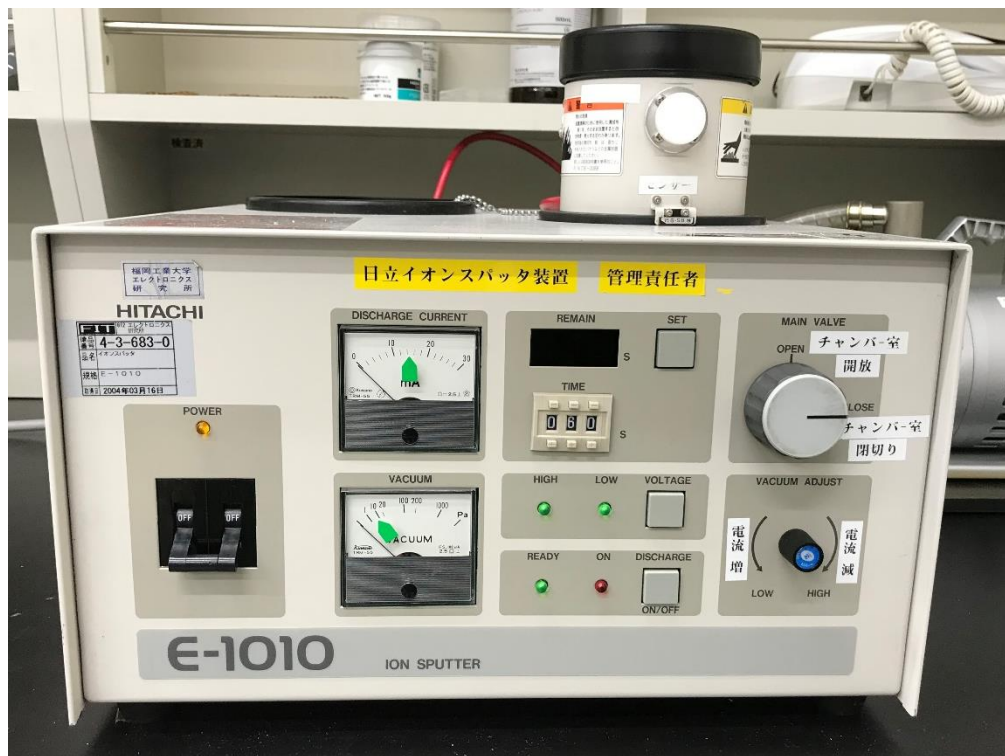
そして、学生生活を支えてくれた家族に心から感謝申し上げます。

最後に、河村良行教授をはじめ、研究室の皆様、大変お世話になりました。

付録

1. イオンスパッタ装置

イオンスパッタ装置(日立製作所製, 型番: E-1010)の外観を図付録1に示す. イオンスパッタ装置は最も多く使われているコーティング装置の一つで, コーティングしたい金属を陰極として約6~7Paの低真空中で放電させると, 生成されたプラスイオンが陰極に入射して, 金属をスパッタする. スパッタされた金属は試料の表面にコーティングされる. 本研究では, 放電流約25mA, 加工容器内真空度約5~6Pa, 金コーティングの厚み30nm, 60nm, 90nmの成膜条件のもとスパッタを行い, 梁表面の先端付近に金コーティングを施した.



図付録1 イオンスパッタ装置

2. 電界放出形走査電子顕微鏡 (FE-SEM)

FE-SEM(日本電子株式会社製, JSM-7100F/TTL)の外観を図付録2に示す。FE-SEMは金属, セラミック, 半導体など固体材料を分析する非常に広範囲にわたる分野で利用されている。本装置は試料表面に加速した電子を照射し, その反射の様子を画像化することによって, 高倍率で試料表面の形状を観察する。試料に衝突させるための電子の発生には, 電界放出形の電子銃を用いているため, さらに高倍率・高解像度の観察が可能である。本研究では, 先端付近に金コーティングを施した梁を観察するために使用した。



図付録2 電界放出形走査電子顕微鏡 (FE-SEM)

