

平成 26 年度卒業論文

微小シリコン片持ち梁の  
熱振動計測システムの改良

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

11E2011 大塚浩一郎

11E2014 鐘ヶ江 力

# 目次

第1章 緒言	3
第2章 使用した装置及び測定原理	4
2.1 シリコン片持ち梁	4
2.2 マイケルソン干渉計	4
2.2.1 原理	4
2.2.2 計測感度	6
2.3 フィードバック制御	7
2.4 FFT アナライザ(周波数解析装置)	8
2.5 同期検波器(ロックインアンプ)	8
2.6 加熱用半導体励起個体レーザー	9
2.7 真空排気装置	10
2.7.1 ロータリーポンプ	10
2.7.2 油拡散ポンプ	10
第3章 実験装置の改良	12
3.1 マイケルソン干渉計	12
3.1.1 マイケルソン干渉計の縮小	12
3.1.2 真空槽内の多段除振	14
3.2 衝撃吸収ゲルを用いた架台の除振簡便化	14
3.3 フィードバック回路の改良	16
第4章 実施実験	17
4.1 熱振動の計測	17
4.1.1 熱振幅理論計算	17

4.1.2	大気中での熱振動計測.....	18
4.1.3	熱振動の真空度依存性.....	18
4.2	アルミニウム蒸着のエッチング除去.....	21
4.2.1	アルミニウムのエッチング除去方法.....	21
4.2.2	アルミニウム蒸着の除去による熱振幅と $Q$ 値への影響.....	21
4.3	半導体励起個体レーザー加熱によるシリコン片持ち梁の熱振幅変化.....	23
4.3.1	アルミニウム蒸着のない梁の加熱実験.....	23
4.3.2	半導体励起個体レーザー加熱による異常熱振動の発生.....	25
第5章	結言.....	28
参考文献		
付録		

# 第 1 章 緒言

現在微小機械振動子は、加速度計、振動ジャイロ、原子間力顕微鏡などの超精密計測器に用いられている。しかし、物体は熱により常に振動しており、この熱雑音が計測限界の一つの要因となる。この熱雑音を抑制するために、精密な熱振動計測技術の確立が必要である。本研究では、この熱振動を限界まで抑制し量子力学における零点振動を計測することを目的とする。昨年度は、微小シリコン片持ち梁の熱振動の精密計測と制振に成功した。今年度は、より周波数の高い振動が計測できるよう、マイケルソン干渉計を用いた微小振動計測システムの改良を行った。

## 第 2 章 使用した装置及び測定原理

### 2.1 シリコン片持ち梁

本研究で使用した単結晶シリコン片持ち梁を図 2.1 に示す。OLYMPUS 製のシリコン片持ち梁(OMCL-AC240TS-C2)で、寸法はカタログ値より、長さ 240[ $\mu\text{m}$ ] 幅 30[ $\mu\text{m}$ ] 厚さ 3.2[ $\mu\text{m}$ ] ばね定数 0.9[N/m]~2.1[N/m]となっている。裏面には、厚さ約 0.1[ $\mu\text{m}$ ]のアルミニウムが蒸着されている。固有振動数は、55.9[kHz]~74.4[kHz]である。

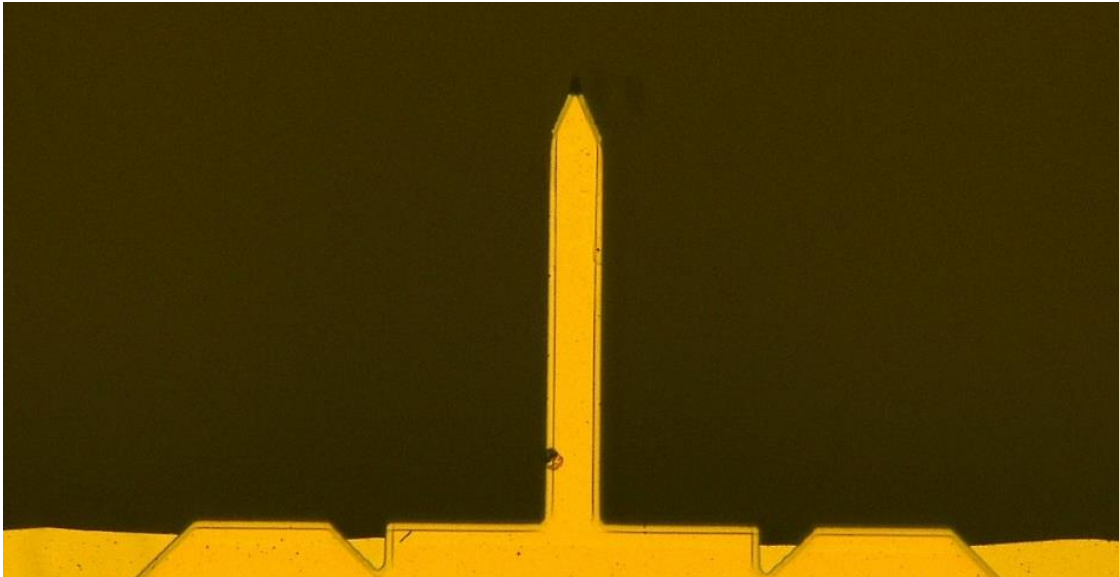


図 2.1 単結晶シリコン片持ち梁

### 2.2 マイケルソン干渉計

#### 2.2.1 原理

マイケルソン干渉計は、光の干渉を用いて物体の変位を計測する。構造は、レーザー発振機、半透ミラー、参照ミラー、測定ミラー、光検出器で構成されている。レーザー発振装置からの光が半透ミラーで二つに分かれ参照ミラーと測定ミラーに向かい、それぞれの反射光が半透ミラーで再び重なることで干渉し縞ができる。干渉縞は、光路の差(変位の二

倍の長さ)によって変化しその変化を光検出器で電圧信号に変換する。これにより、変位を計測することができる。マイケルソン干渉計の概略を図 2.2 に、実験に使用した計測システムの概略を図 2.4 に示す。

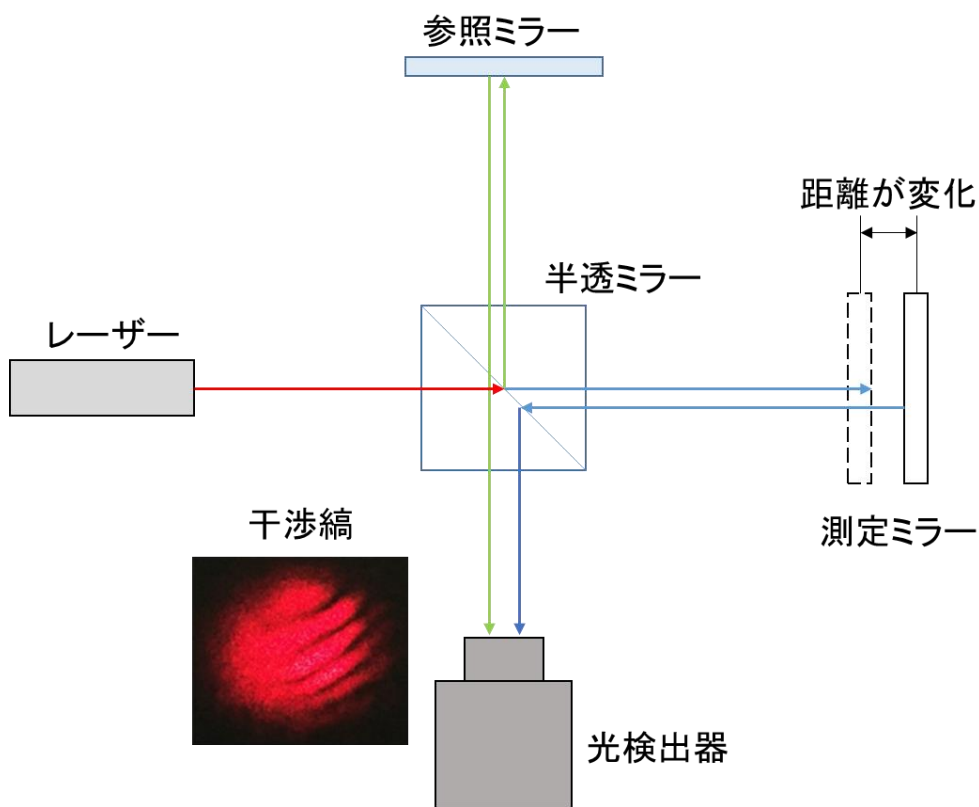


図 2.2 マイケルソン干渉計

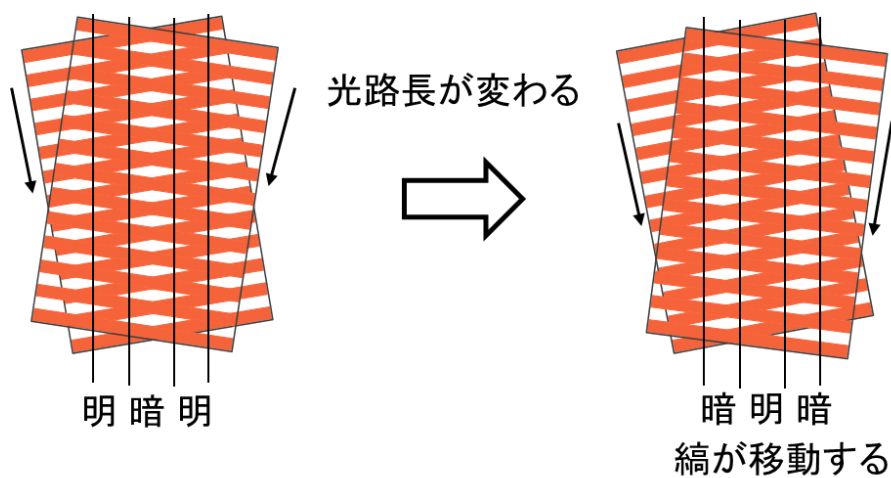


図 2.3 光路差の変化による干渉縞の移動

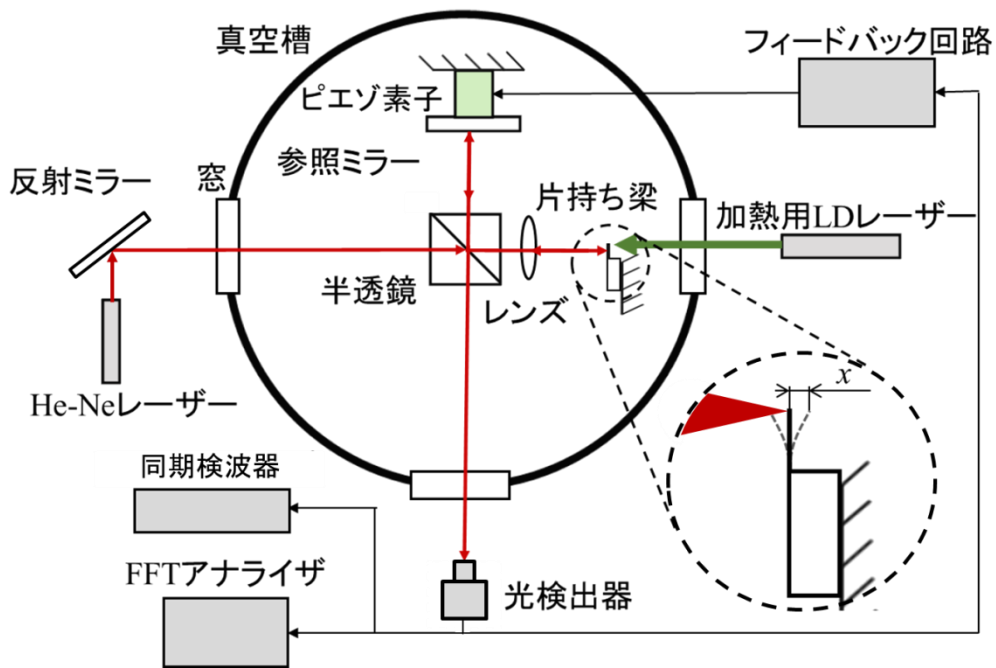


図 2.4 微小振動計測システム概略

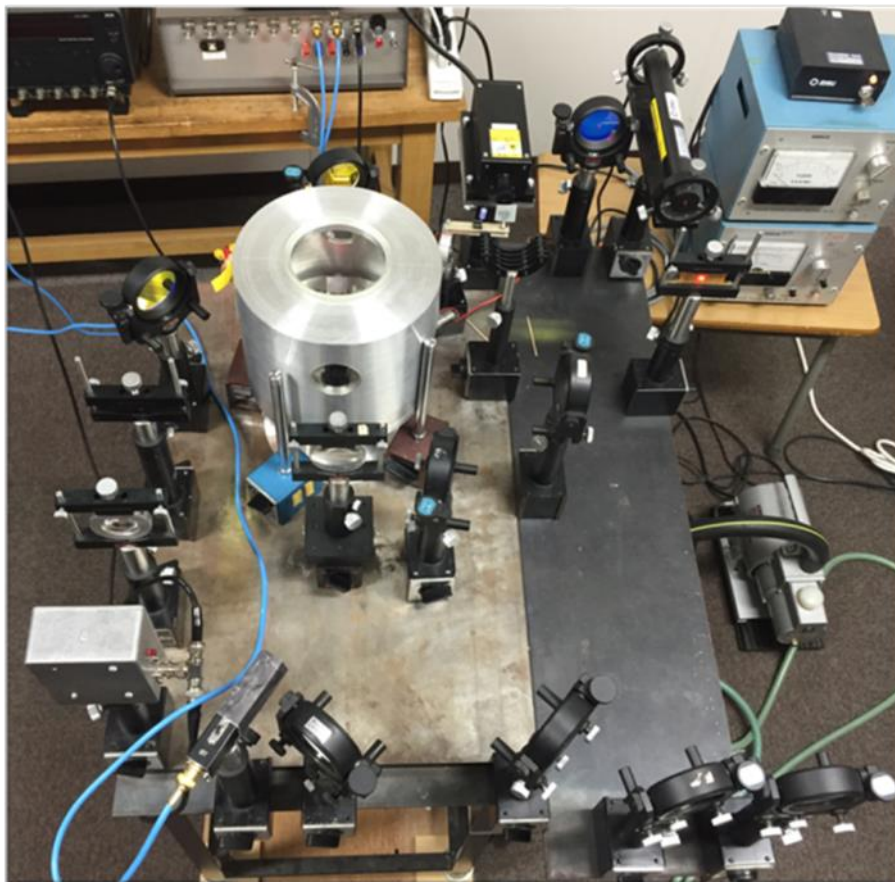


図 2.5 実際に使用した計測システム全体の概観

## 2.2.2 計測感度

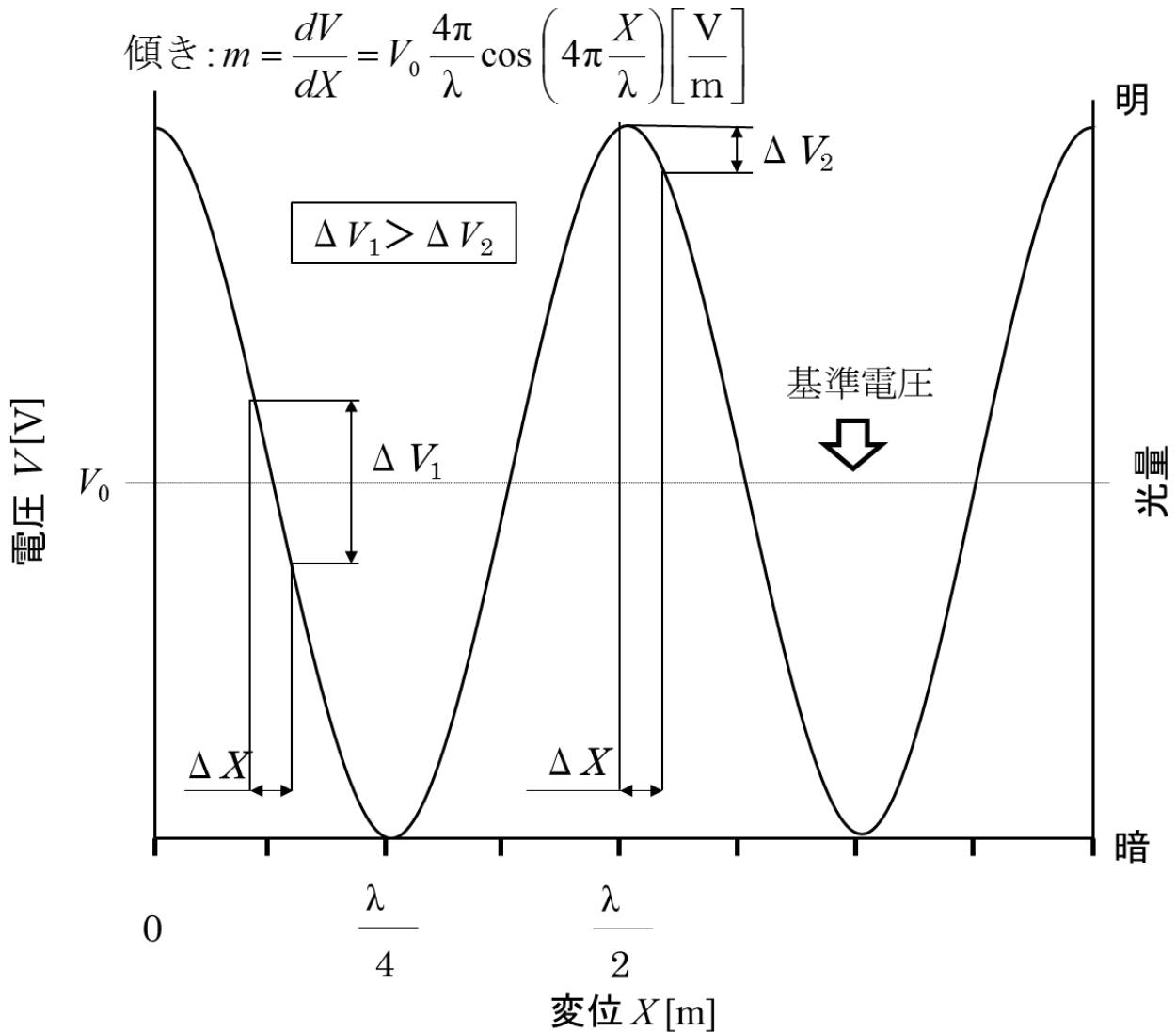


図 2.6 変位に対する感度の違い

計測感度は、計測する干渉縞位置で変わる。図 2.3 のように、光が干渉することで縞ができ、光路差が変化することで縞が変化する。例えば、片方のレーザー光が  $\Delta X$  移動したとする。この時、干渉縞の明暗が変化し、電圧は  $\Delta V$  変化する。この明暗と電圧の関係(感度曲線)を、図 2.6 に示す。光検出器の信号は、光が強いと電圧が高く弱いと低くなる。つまり、レーザー光の  $\lambda/4$  で明暗が変化する。He-Ne レーザーの波長は、 $\lambda = 632.8[\text{nm}]$  なので  $158.2[\text{nm}]$  で明暗が変化する。



この時、明暗の境目(基準電圧)での変位を計測した場合と一番明るい近で計測した場合では同じ変位  $\Delta X$  レーザー光が移動したとしても、前者の方が感度は高くなる。つまり、明暗の境目で計測すると最も感度が高くなる。干渉感度は、感度曲線の傾きを  $m$  とすると  $1/m$  [m/V] で求められる。

### 2.3 フィードバック制御

2.2.2 で述べたように、干渉縞の計測する位置で感度が変わる。その為、最も感度の高いところで計測できるようにフィードバック制御を行う。制御方法としては、光検出器からの信号と基準電圧との差が無くなるように参照ミラーについているピエゾ素子を駆動し、最も感度の高い場所に干渉縞を留める。また、発振が起こるのを防ぐ為に低周波ろ過回路をフィードバック制御回路に入れて高周波成分を遮断する。

### 2.4 FFT アナライザ(周波数解析装置)

フーリエ変換を行うことで、0~100[kHz]まで周波数毎のパワースペクトルを計測することができる。縦軸は電圧、横軸は周波数で表示される。横軸の分解能を良くするためには、計測する周波数範囲を狭くする必要がある。しかし、出力のピーク値も低下する。FFT の出力と同期検波器の出力を比較してみると、FFT の計測する周波数範囲が広い方が同期検波器と近い値になった。FFT の概観及び熱振動の典型的な波形を、図 2.7 に示す。

### 2.5 同期検波器(ロックインアンプ)

同期検波器は、設定した周波数と同じ周波数の成分を入力信号から検出し DC 成分として出力する。出力される信号は、入力信号  $\times$  (10[V]/測定レンジ[V]) で表示される。出力信号は、実効値で表示される。また、積分時間(時定数)を設定する必要がある。これは、何秒間で積分するかを設定するもので、時間が長ければ測定しているバンド幅が狭くなりノイズが減る。短ければバンド幅が広がりノイズが増える。同期検波器の概観を図 2.8 に示す。

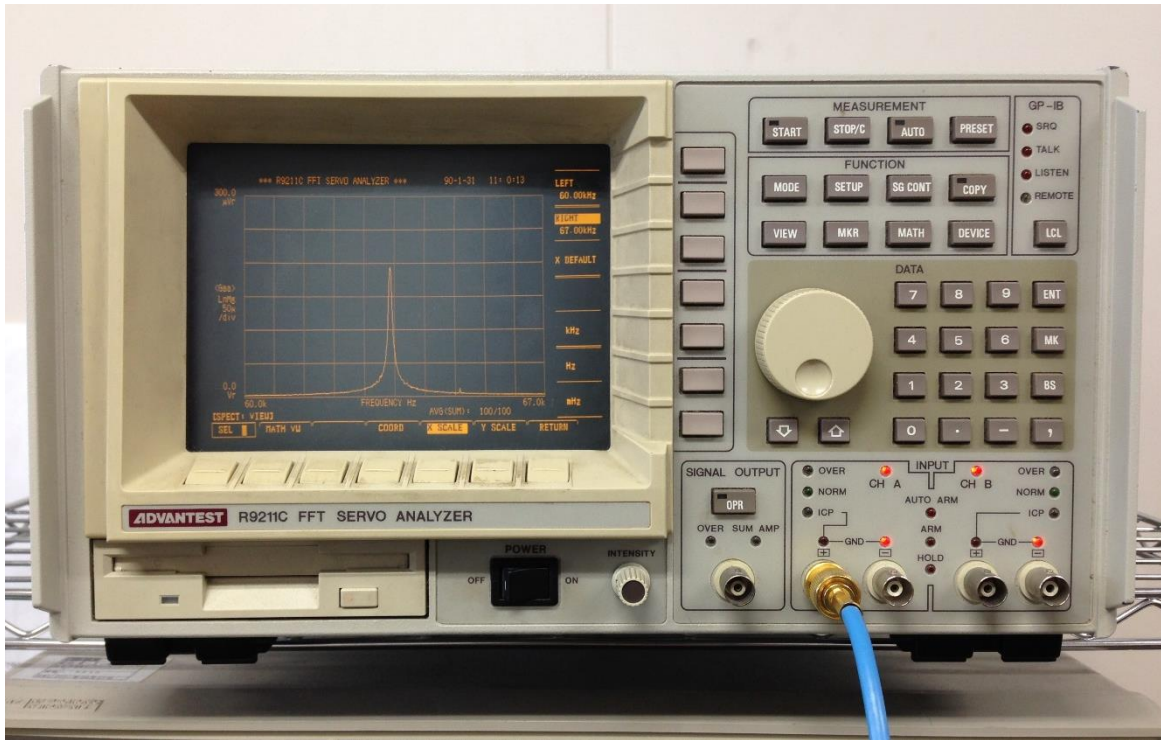


図 2.7 FFT アナライザの概観及び熱振動の典型的な波形

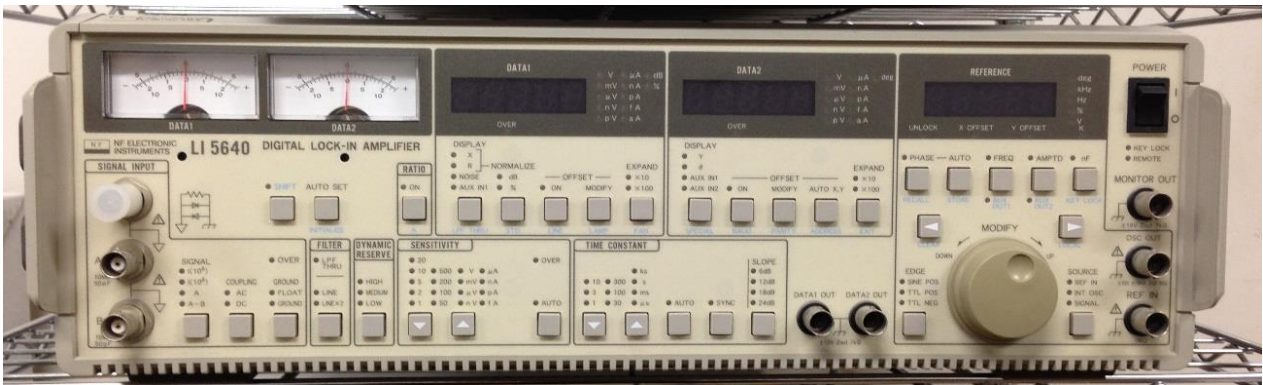


図 2.8 同期検波器の概観

## 2.6 加熱用半導体励起個体レーザー

梁の加熱実験には Changchun New Industries 社製の半導体励起個体レーザーを用いる。波長は 532 nm, 0~1.2W まで出力を変えることが出来る。レーザーの出力は表示されないが、励起源電流の電流値[A]が表示される。



図 2.9 加熱用 1.2W 緑色半導体励起個体レーザー

## 2.7 真空排気装置

### 2.7.1 ロータリーポンプ

ロータリーポンプを図 2.10 に示す。一般的な真空ポンプで、高真空にするための粗引きに用いる。最大で  $1.3 \times 10^{-1} \text{Pa}$  まで引くことができる。

### 2.7.2 油拡散ポンプ

油拡散ポンプを図 2.11 に示す。高真空まで引くことができ、最大  $1 \times 10^{-5} \text{Pa}$  まで引くことができる。改良前の真空槽では最大  $8 \times 10^{-3} [\text{Pa}]$  までしか引くことができなかったが、改良後の真空槽では、排気する体積が約 8 倍になったにも関わらず、約  $2 \times 10^{-3} [\text{Pa}]$  まで真空を引くことができた。





図 2.10 ロータリーポンプ概観



図 2.11 油拡散ポンプ概観

## 第3章 実験装置の改良

### 3.1 マイケルソン干渉計の改良

#### 3.1.1 マイケルソン干渉計の縮小

以前の装置は、シリコン片持ち梁のみ真空槽の中に入れていた。本研究では、アライメントのずれとノイズ軽減の為に真空槽容積の拡張、マイケルソン干渉計のサイズ縮小を行い全体が真空槽に入るよう改良した。

まず、真空槽を直径 90[mm]から直径 195[mm]に拡張。レーザーを入出させる窓も、2コから 90°毎の4コに増やした。また、容器内を確認する為に、真空槽の上部に直径 100[mm]の確認窓も取り付けた。

次に、梁のレーザー光を集光するレンズを、焦点距離 50[mm]の凸レンズからシグマ光機製の焦点距離 11.1[mm]の非球面マイクロレンズ( AGL2-7.2-11.11P )に変更した。焦点距離を短くすることでより集光径が小さくなる。また、非球面レンズを使用することで、球面収差やコマ収差を無くすことができる。レンズは半透鏡に貼り付けてある。

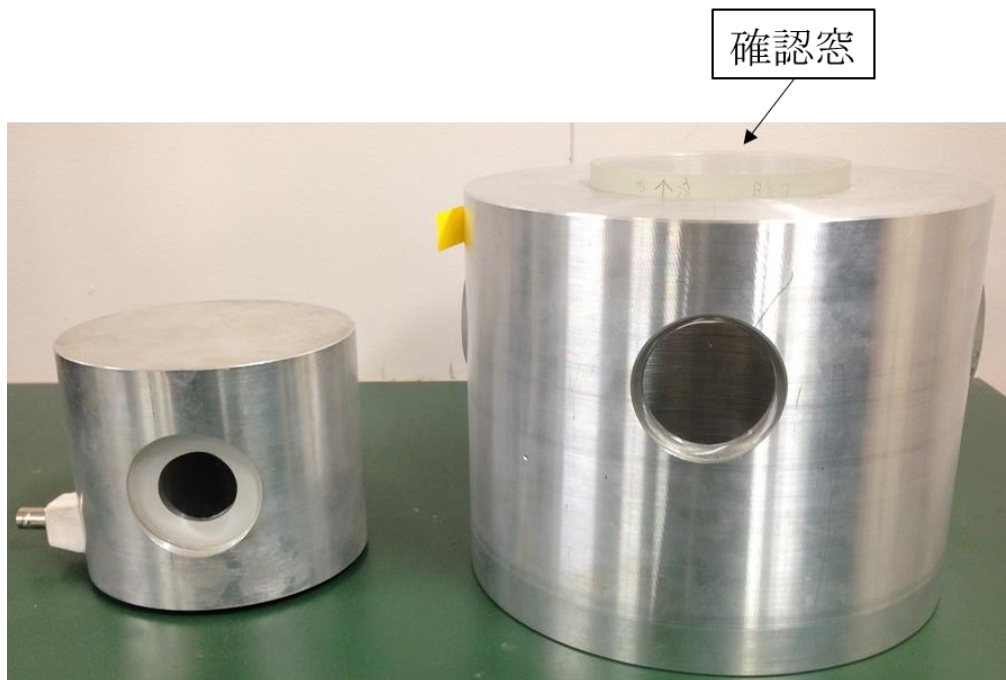
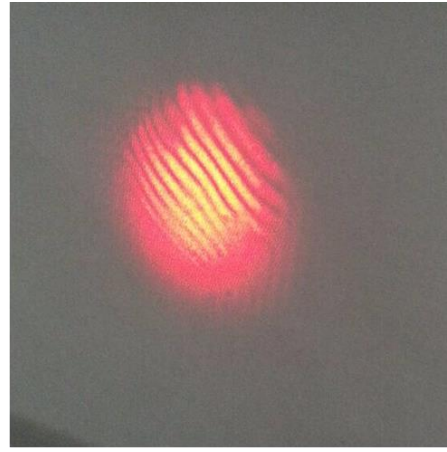


図 3.1 改良後と改良前の真空槽の大きさ比較



両凸レンズの干渉縞



非球面レンズの干渉縞

図 3.2 両凸レンズと非球面レンズでの干渉縞の比較

これらの改良により、マイケルソン干渉計を 1/3 程に縮小でき、装置全体を真空槽内に入れる事ができた。改良後のマイケルソン干渉計を図 3.3 に示す。半透鏡と片持ち梁は、アライメント調整を細かく行えるように一周 0.25[mm]で動く移動ステージに乗せている。

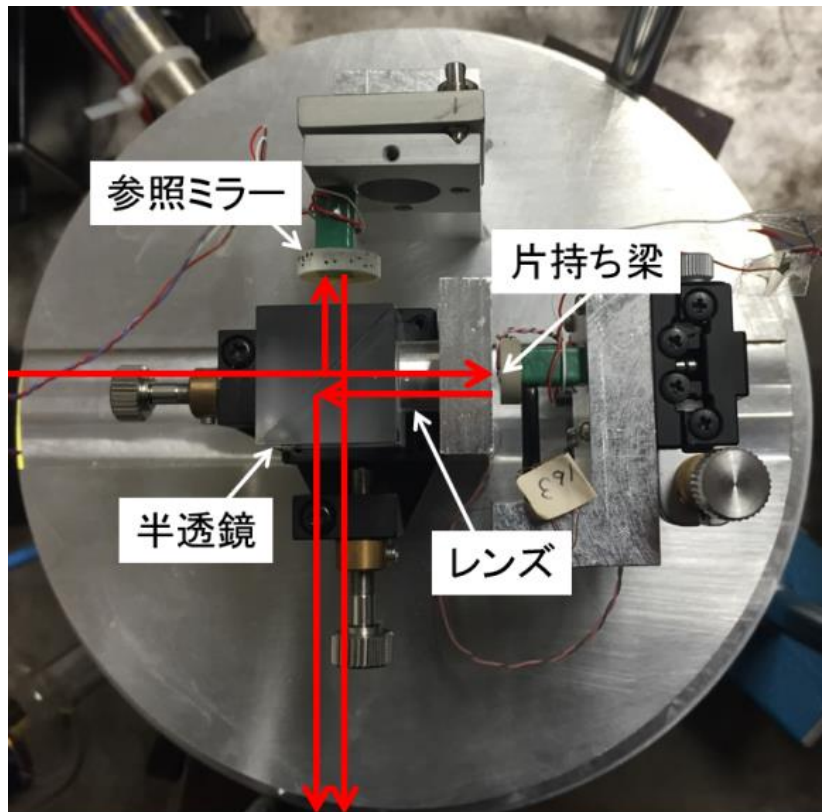


図 3.3 改良後のマイケルソン干渉計



### 3.1.2 真空槽内の多段除振

真空槽内のマイケルソン干渉計を乗せているアルミニウム台を二段にし、その間にエチレンプロピレンゴムを挟んで多段除振を行っている。

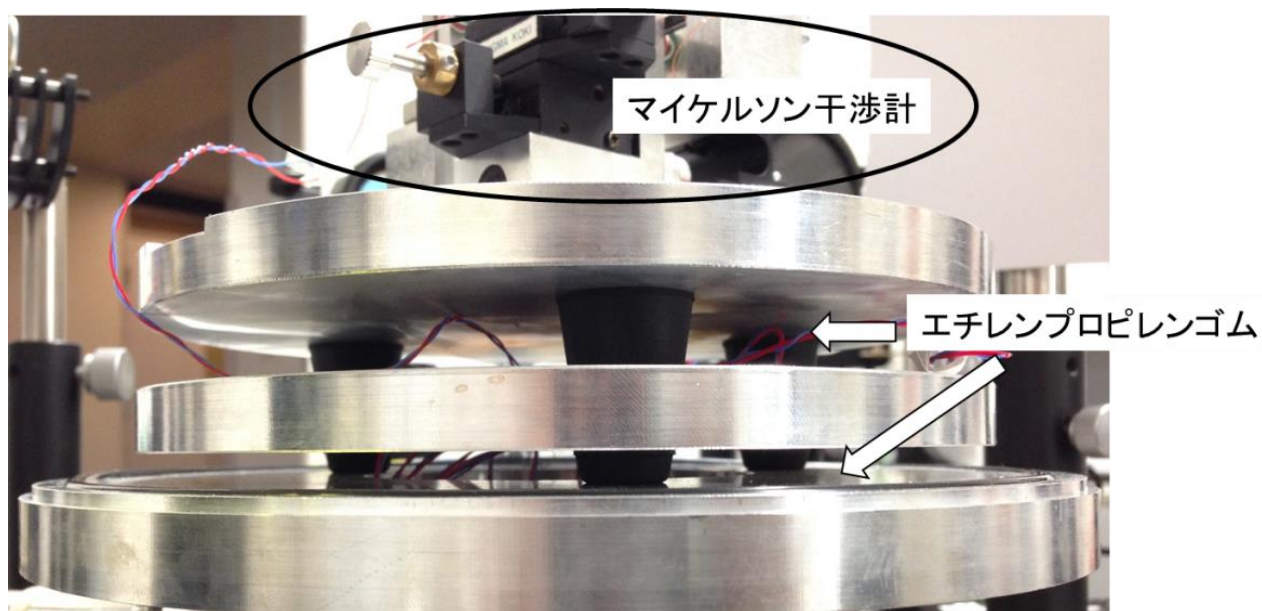


図 3.4 エチレンプロピレンゴムによる多段除振

### 3.2 衝撃吸収ゲルを用いた架台の除振簡便化

除振装置を空気ばねから衝撃吸収ゲルに変更した。これにより、空気ばねのように空気を入れ直す必要が無くなった。除振装置は、ソフトタイプとハードタイプのゲルを用いた二層構造になっている。ソフトタイプのゲルは、二枚重ねて使用している。この除振装置は、計測架台の足 4 本それぞれに設置している。ゲルには、ホームセンターで購入した耐震 GEL マット(ハードタイプ) 80 [mm] × 80 [mm] × 5 [mm] と、衝撃吸収パット(ソフトタイプ) 50 [mm] × 50 [mm] × 5 [mm] を使用している。除振装置を図 3.5 に示す。これまでの改良により、バックグラウンドノイズレベルを約 1/3 に減少させることができた。改良前と改良後のバックグラウンドノイズレベルの比較を図 3.6 に示す。

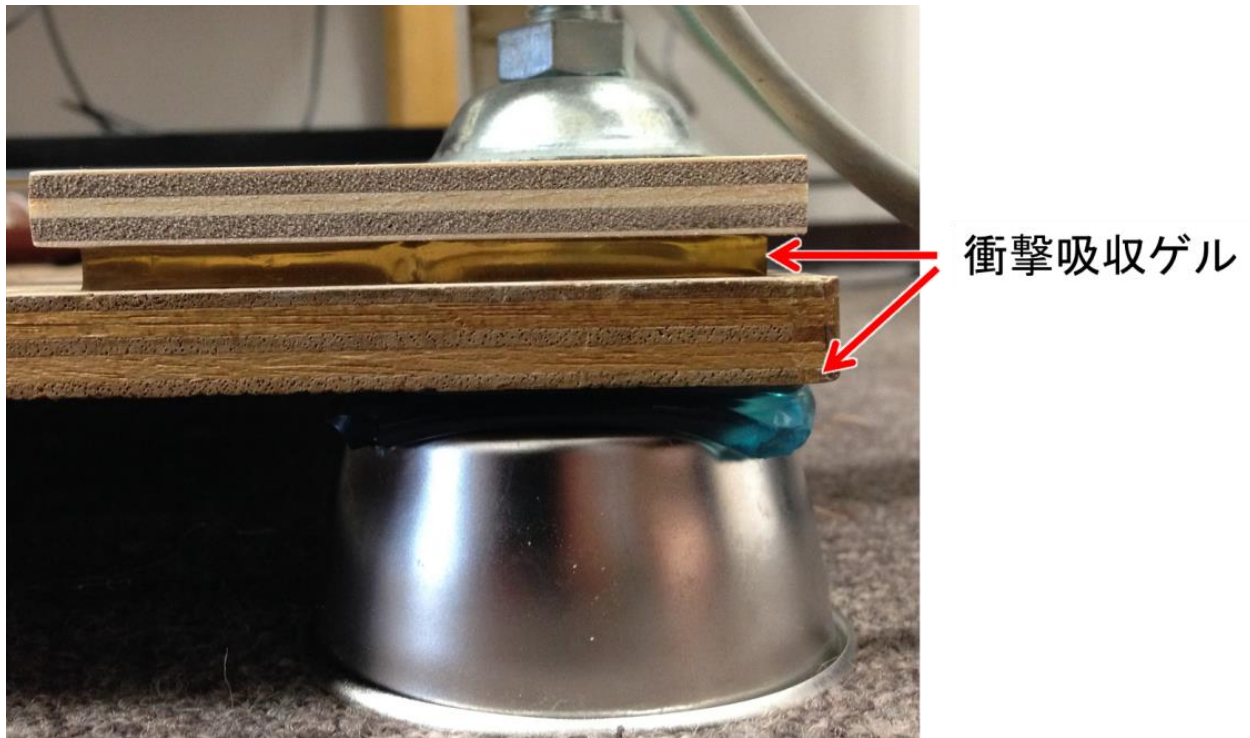


図 3.5 二層の衝撃吸収ゲルを用いた架台除振の簡便化

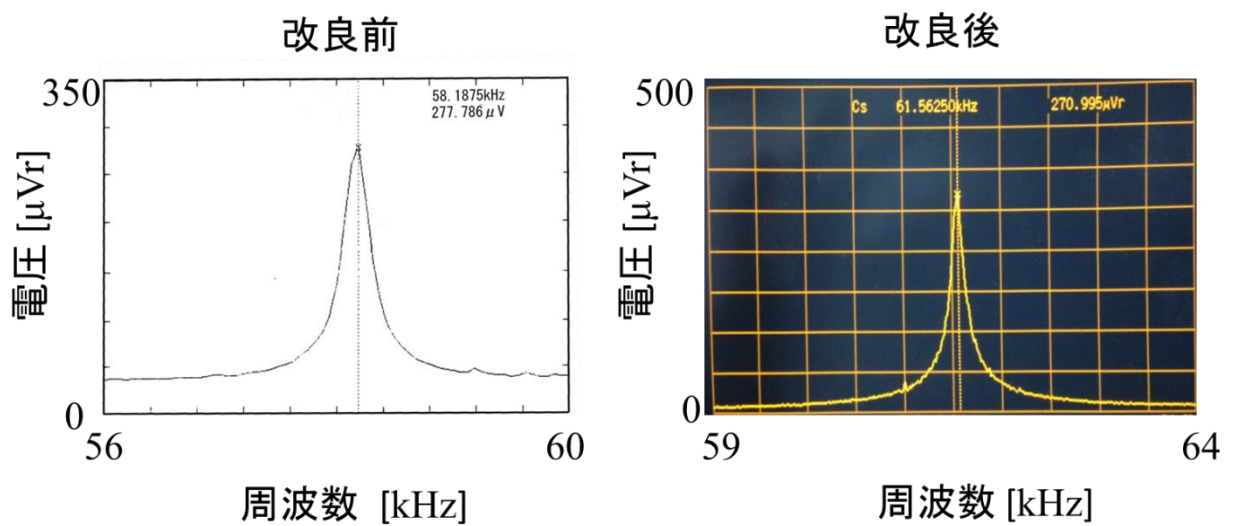


図 3.6 バックグラウンドノイズレベルの比較



### 3.3 フィードバック回路の改良

2.3 で述べたように、本実験では最も感度の高いところで計測できるように、ピエゾ素子を用いて参照ミラーのフィードバック制御を行っている。以前は、このフィードバック制御回路に 9V の電池を用いていた。しかし、電池を用いるとプラス電源とマイナス電源の消耗の差からオペアンプが正常に機能しなくなるという問題が発生した。そこで、今回は、電池ではなく  $\pm 15V$  の電源電圧を用いることで、プラス電源とマイナス電源の消耗の差を無くした。使用したフィードバック制御回路と光検出器の回路図を、図 3.8 に示す。光検出器のカットオフ周波数  $f_c$  は、約 100 [kHz] である。

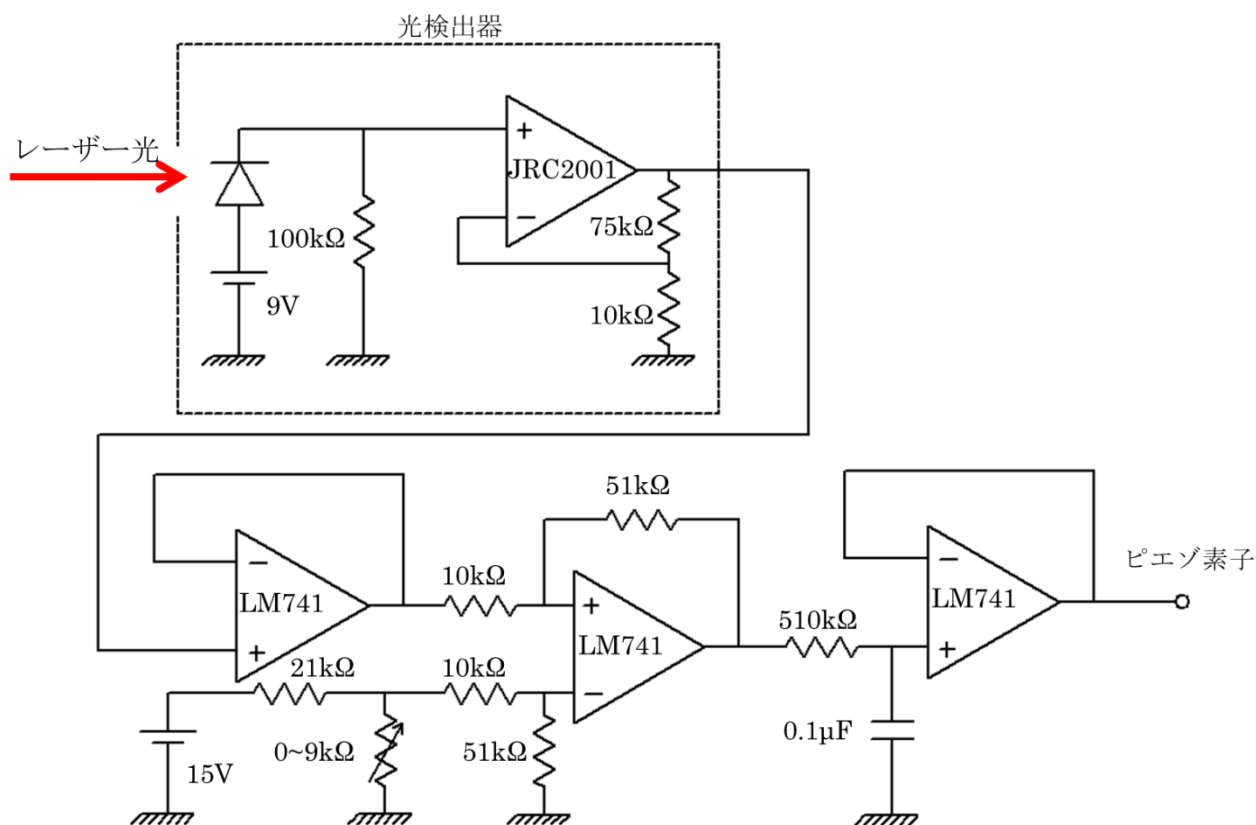


図 3.8 フィードバック制御回路

## 第 4 章 実施実験

### 4.1 熱振動の計測

#### 4.1.1 熱振幅理論計算

梁は、熱により常に振動している．本研究で用いた梁は、図 4.1 のような振動モードで振動している．

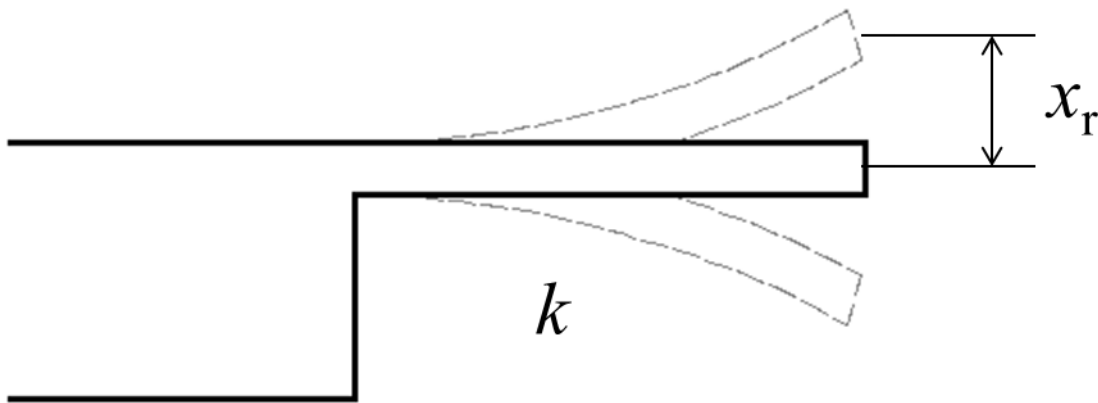


図 4.1 片持ち梁の振動

ここで、 $k$  はばね定数 [N/m]、 $x_r$  は熱振幅の実効値 [m] である．熱平衡状態のとき、統計力学のエネルギー等分配の法則より、振動の 1 自由度に対して  $1/2k_B T$  の熱エネルギーが分配される．この熱エネルギーと、ばねによる運動エネルギーの関係式より、

$$\frac{1}{2} k x_r^2 = \frac{1}{2} k_B T \quad (4-1)$$

となる．ここで  $k_B$  はボルツマン定数 [ $\text{m}^2 \cdot \text{kg}/(\text{s}^2 \cdot \text{K})$ ]、 $T$  は絶対温度[K]である．ここで、 $k = 2[\text{N}/\text{m}]$ 、 $k_B = 1.38 \times 10^{-23} [\text{m}^2 \cdot \text{kg}/(\text{s}^2 \cdot \text{K})]$ 、 $T = 300 [\text{K}]$  とすると、平均の熱振幅は、

$$x_r = \sqrt{\frac{k_B T}{k}} = \sqrt{\frac{1.38 \times 10^{-23} \times 300}{2}} \quad (4-2)$$

$$x_r = 4.5 \times 10^{-11} [\text{pm}] \quad (4-3)$$

となる。これより、熱振幅の実効値は約 50 [pm] と予想できる。

#### 4.1.2 大気中での熱振動計測

図 2.2 の計測システムを用いて大気中での熱振動を計測した。計測方法は、真空槽内のマイケルソン干渉計により検出した信号を FFT アナライザで解析する。マイケルソン干渉計のアライメントは、投影される梁の影を見ながら、移動ステージで焦点距離と梁の高さを調節する。計測時は光検出器からの信号をオシロスコープでモニターし、電圧の幅を確認する。この時、フィードバック制御回路で最大電圧と最小電圧の中心に来るように調整する。FFT で計測した熱振動の信号を図 4.1 に示す。梁の有無による信号の比較を行った。

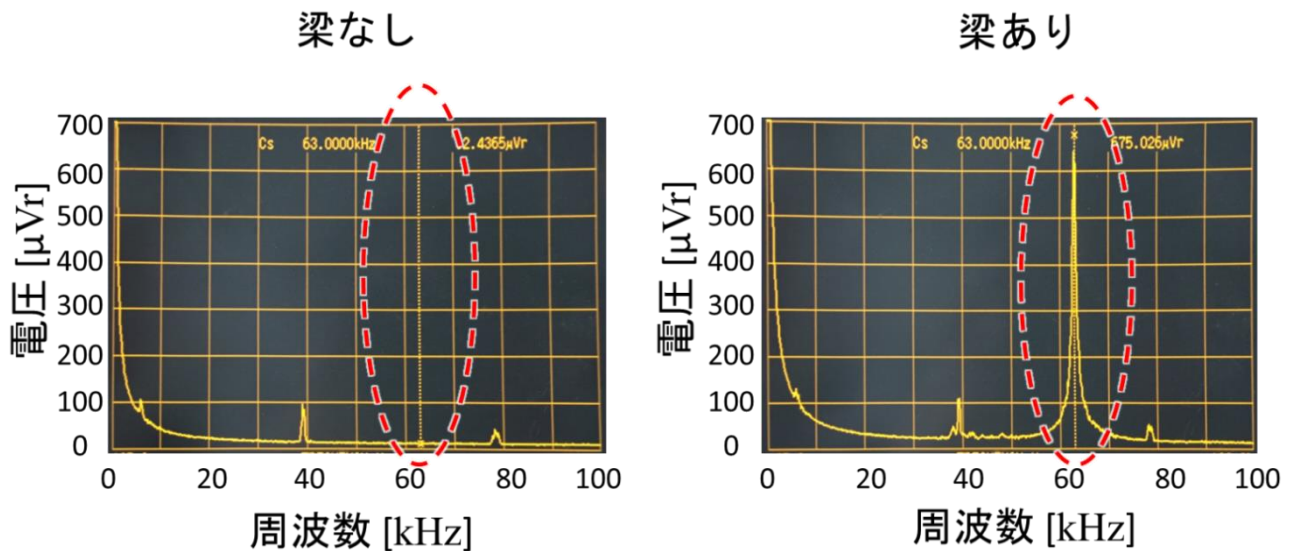


図 4.2 大気中での熱振動計測結果

梁があるときは、63 [kHz]辺りに熱振動の信号が確認できる。この信号を振幅に換算すると、約 20 [pm]となる。大気中では、理論値よりも振幅が小さくなった。

#### 4.1.3 熱振動の真空度依存性

4.1.2 の結果より大気中での熱振幅は、理論値よりも小さくなった。そこで、真空度を上げていくことで熱振幅がどのように変化するか計測した。この時、梁の  $Q$  値も同時に計測

した.  $Q$  値は, FFT アナライザを用いて解析した結果より算出した.  $Q$  値の計算には,

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f_0} [-] \quad (4-4)$$

を用いた.  $f_0$  [kHz]と $\Delta f_0$  [kHz]は図 4.3 のように求めた.

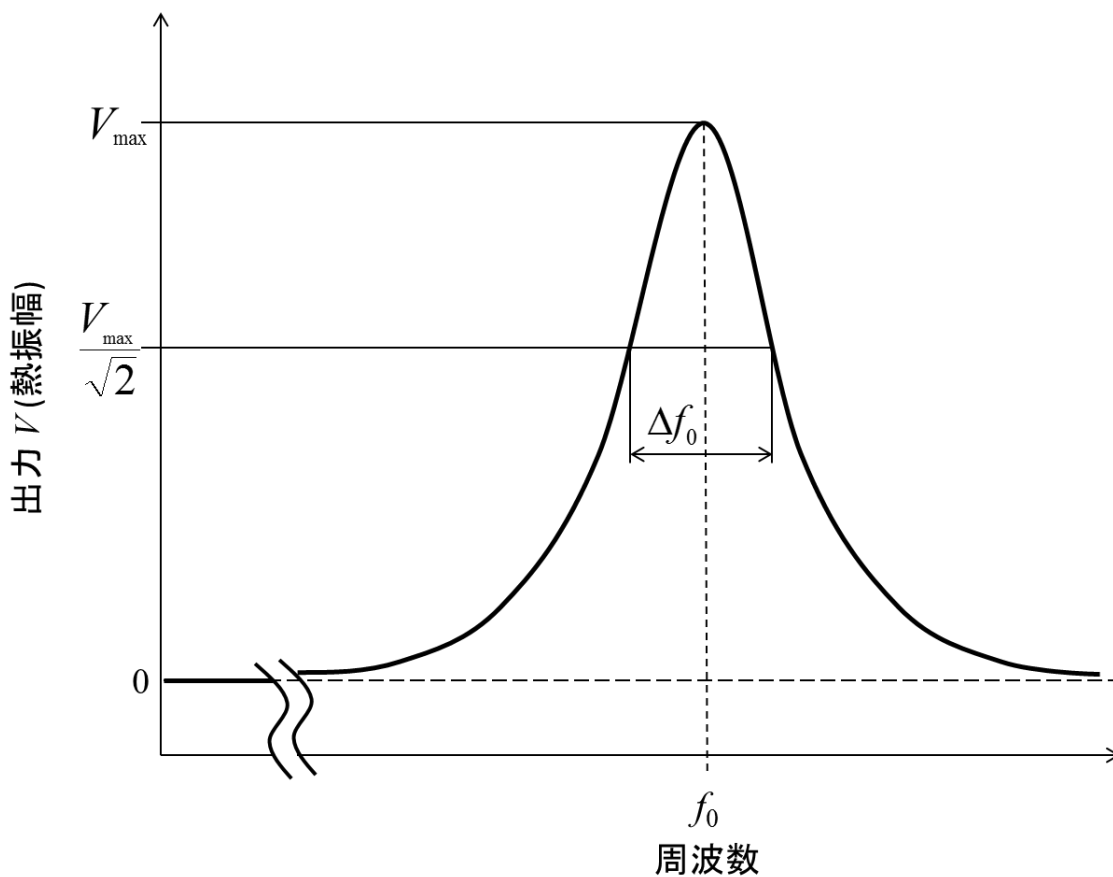


図 4.3  $Q$  値算出方法

$Q$  値を正確に計測する為には, FFT アナライザの横軸の分解能を上げる必要がある. しかし, 分解能を上げると電圧が下がってしまう. そこで,  $Q$  値を FFT で計測し, 振幅はロックインアンプを用いて計測した. 結果を, 図 4.4 に最高到達真空度での FFT 解析の結果を 図 4.5 に示す.

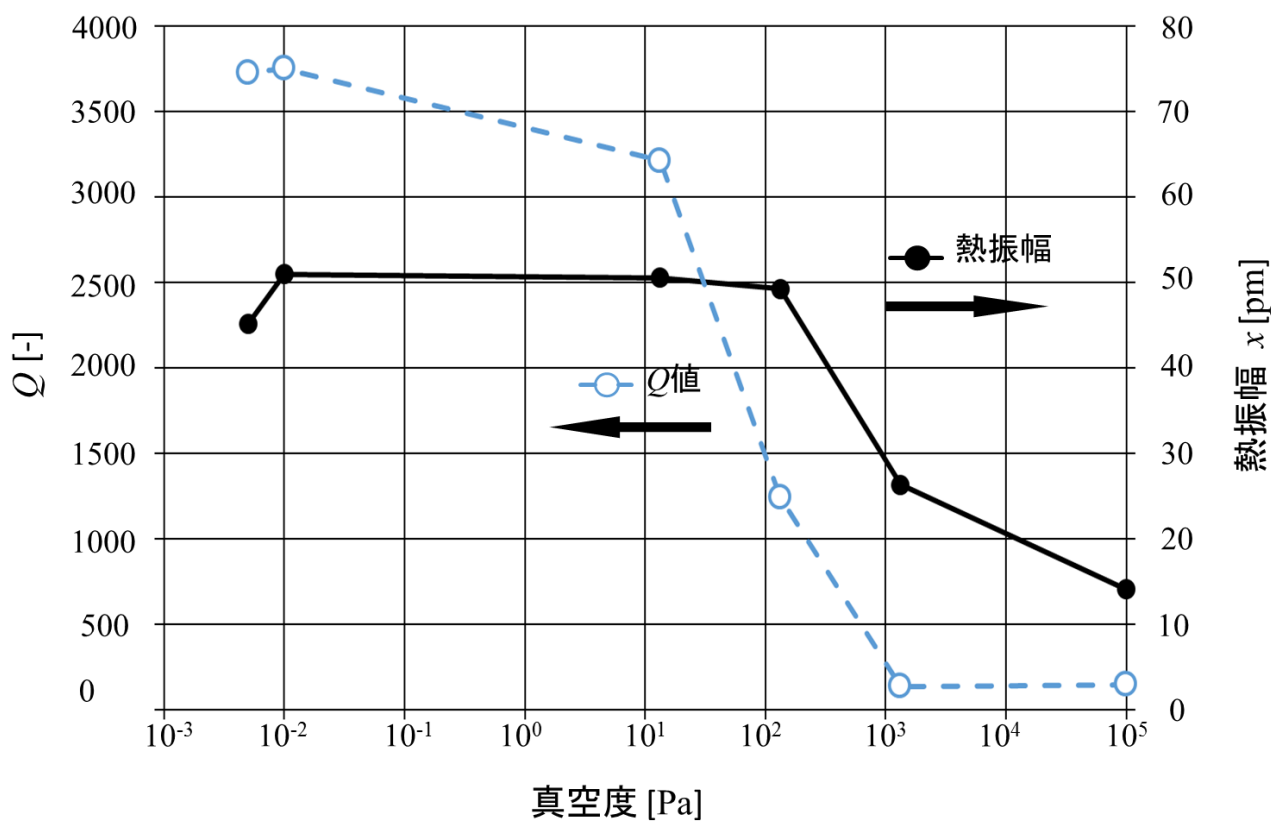


図 4.4 熱振幅と  $Q$  値の真空度依存性

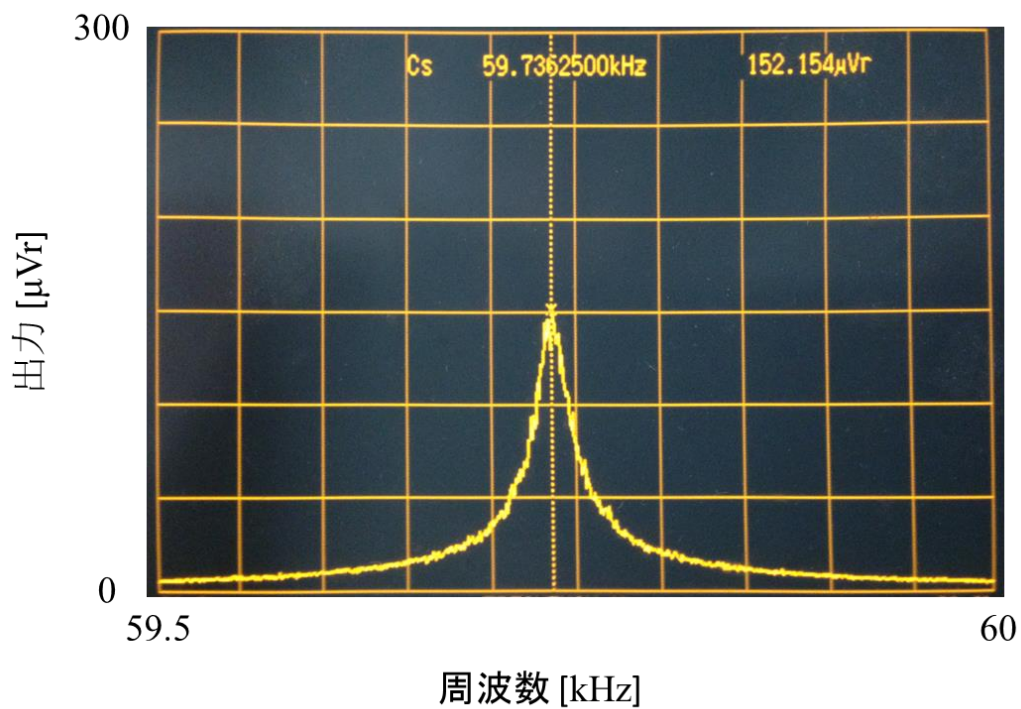


図 4.5 最高到達真空度( $5 \times 10^{-3}$  Pa)での FFT 解析結果 (100 回平均)

図 4.4 より、約  $1 \times 10^3$  [Pa] から振幅と  $Q$  値共に上昇が見られ、約 10 [Pa] で飽和が見られる。飽和した時の値は、振幅が約 50 [pm]、 $Q$  値が約 3800 [-] となっている。振幅は、理論値と近い値となった。

## 4.2 アルミニウム蒸着のエッチング除去

### 4.2.1 アルミニウムのエッチング方法

梁の裏面には、アルミニウムが蒸着されている。このアルミニウムのエッチング除去を行った。最初は、水酸化ナトリウムを用いて行った。しかし、水酸化ナトリウムはシリコンも溶かしてしまった。次に、リン酸エッチング液を用いてアルミニウムのエッチング除去を行った。梁を、室温で約 2 分間リン酸エッチング液に浸けることでアルミニウム蒸着を取り除く事ができた。また、アルミニウムが取り除かれていることを確認するために、電子線マイクロアナライザ(EPMA)を用いて梁の成分分析を行った。分析の結果を表 1. に示す。

表 1. 未エッチングの梁とエッチング済みの梁の成分比較

成分 WT[%]	アルミニウム	シリコン	炭素
梁			
未エッチング	5.591	92.147	2.262
エッチング済み	0	98.299	1.701

表 1 より、エッチング除去済みの梁にはアルミニウムの成分は検出されなかった。また、検出された炭素は、EPMA で分析する際梁を固定するために用いたカーボンシールのものだと考えられる。

### 4.2.2 アルミニウム蒸着の除去による熱振幅と $Q$ 値への影響

アルミニウム蒸着を除去することで、梁に影響があるかを調べた。ここで比較しているアルミニウム蒸着されている梁とされていない梁は、同じ種類のシリコン片持ち梁

(OMCL-AC240TS-C2) だが別の梁である。

まず、アルミニウムのない梁の真空度依存性を計測した。結果を図 4.5 に示す。図 4.5 より、図 4.4 のように約  $1 \times 10^3$  [Pa] から振幅と  $Q$  値の上昇が見られ、約 10 [Pa] で飽和が見られる。しかし、 $Q$  値は約 600 [-] と低い値になっている。次にアルミニウムの付いている梁とついていない梁の  $Q$  値の比較を行った。結果を図 4.6 に示す。大気中での  $Q$  値に差は見られないが、最大の  $Q$  値はアルミニウムが付いている梁の方が約 6 倍高くなっている。

以上より、エッチング除去を行った方が、 $Q$  値が低くなっていることが分かる。これは、エッチング除去の際梁表面に不純物が付着したためだと考えられる。また図 4.6 より梁の  $Q$  値は、大気中では空気の抵抗で決まり、真空度が高くなると梁本来の  $Q$  値が見えてくることが分かる。

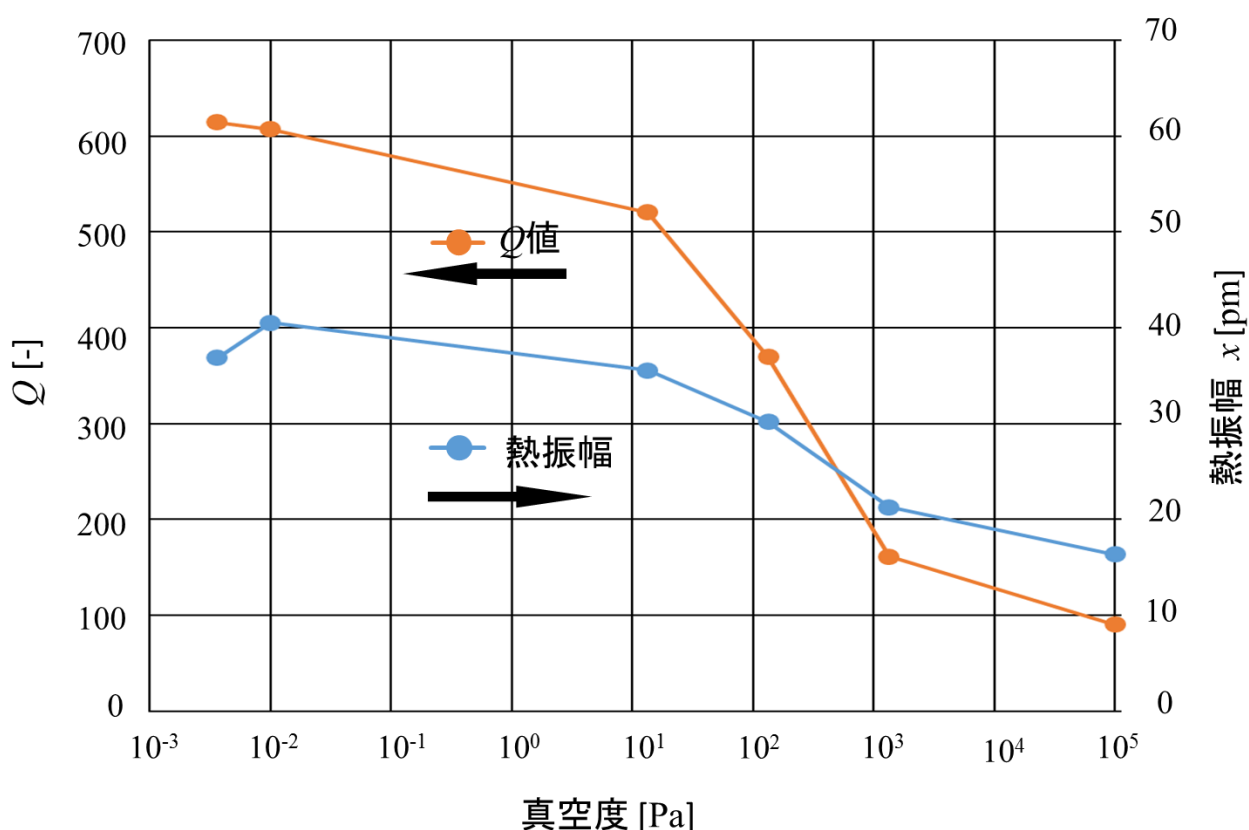


図 4.5 アルミニウム蒸着のない梁の真空度依存性

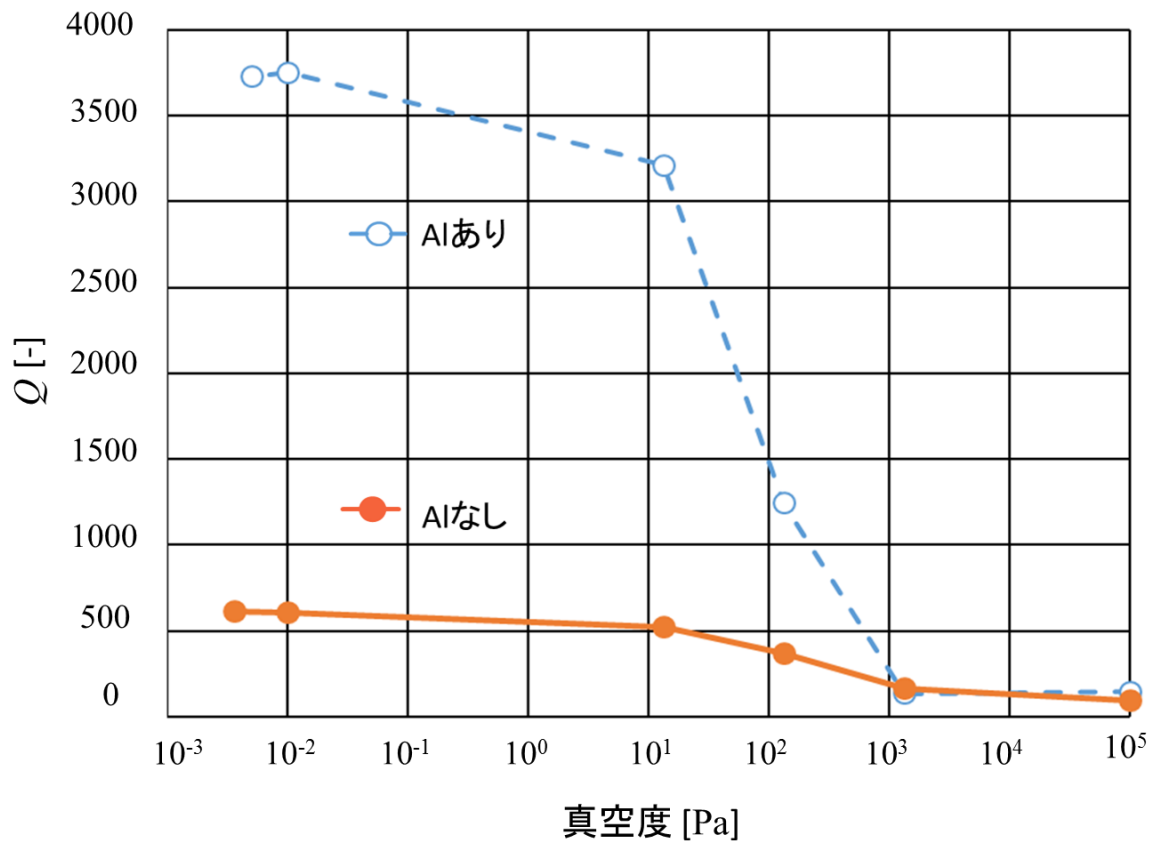


図 4.6 アルミニウムのある梁とない梁の  $Q$  値比較

### 4.3 半導体励起個体レーザー加熱によるシリコン片持ち梁の熱振幅変化

#### 4.3.1 アルミニウム蒸着のない梁の加熱実験

熱振幅は、式(1)より求められる。つまり、温度によってその振幅は変化する。本実験では、高真空中でエッチングした梁に半導体励起個体レーザーを照射し加熱を行い、振幅の変化を計測した。ただし、レーザーは梁全体に照射されており、実際に梁に照射されているレーザーの光量は、1割程度である。

実験方法は、照射しているレーザーの出力を 50mW ずつ増やし、そのときの熱振幅を、同期検波器を用いて計測する。結果を図 4.7 に示す。

図 4.7 より、レーザーの出力を上げることで温度が上がり、それに伴い熱振幅も増加していることが確認できた。しかし、250mW のレーザーを照射すると徐々に固有振動数が



高くなり、レーザー照射を行っていないとき 61.8 [kHz] であった梁の固有振動数は、約 15 分で 68.8 [kHz]まで増加した。これは、レーザーの熱により梁の先端が溶けたことにより起こったと考える。片持ち梁の支持部付近は、本体に近いので熱伝導により高温になりにくい。先端部分は高真空中なので熱が逃げにくい。そのため、梁の先端が溶け固有振動数が変化したと考えている。SEM により撮影した溶けた梁を図 4.8 に示す。

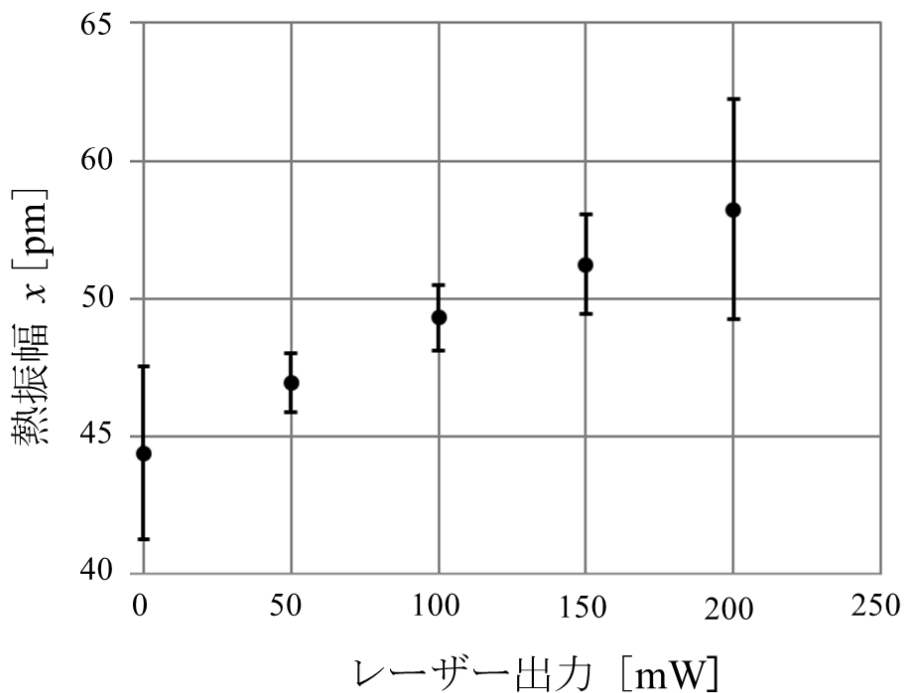


図 4.7 梁の加熱による熱振幅の上昇

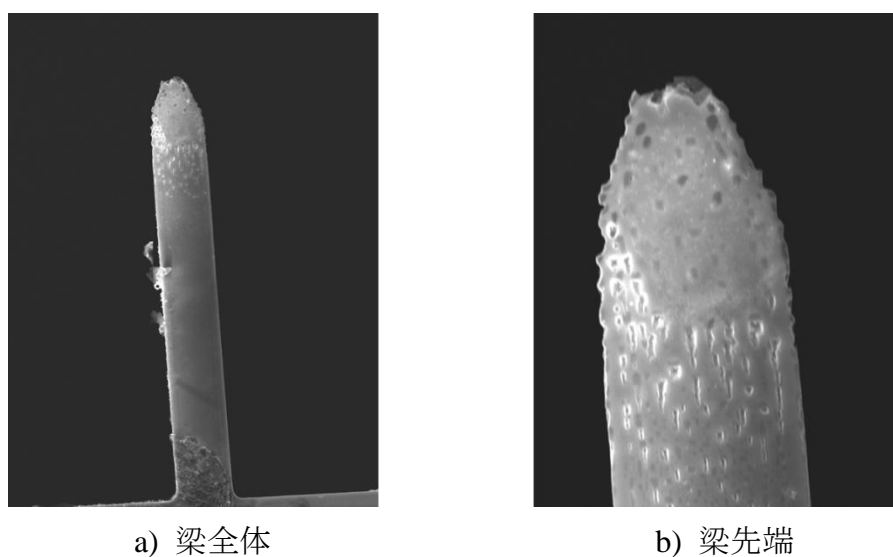


図 4.8 溶けた梁の SEM 像

### 4.3.2 半導体励起固体レーザー加熱による異常熱振動の発生

次にアルミニウム蒸着のある梁の加熱実験を行った。条件はアルミニウム蒸着のない梁と同様に高真空中で半導体励起固体レーザーを照射し加熱を行う。

実験方法は、照射しているレーザーの出力を手動で増やし、LabVIEWによってレーザー照射パワーと同期検波器による熱振幅の信号の変化を数値計測する。その制御プログラムを図 4.9 に示す。計測には National Instruments 社製の USB-6211 を用いる。CH1 にフォトディテクタ(光検出器)を接続しレーザー照射パワーを読み取り、CH2 に同期検波器と接続する。レーザーの出力は 0~1.8[A]までとする。これは、1.8[A]以上出力すると使用するフォトディテクタが飽和するためである。実際に照射されているパワーは正確には分からないが、1.8[A]のとき約 200mW であり、この 1 割程度なので約 20mW である。結果を図 4.10~4.13 に示す。

図 4.10 は手動でレーザーの出力を増加させたときの照射パワーをみたものであり、図 4.11 は図 4.10 と同時にみた同期検波器による熱振幅の信号である。これより組み替えると図 4.12 になり、ある出力でレーザーを当てると異常な熱振動が発生していることが分かる。計測後に加熱していない時の梁の共振周波数を確認したが、変化はみられなかった。

異常熱振動の原因としてフィードバック制御回路が影響しているのではないかと考え、フィードバック制御回路の電源を切り計測した。結果、図 4.13 より、異常な熱振動が確認できた。これよりフィードバック制御回路が影響していることはないと考え。また、出力を増加させた時と減少させた時ではほぼ同じ出力で異常な熱振動がでていた。

異常熱振動は、レーザーをレンズ集光させ焦点で梁に照射したときも発生した。また、異常な熱振動が起きているときの光検出器からの干渉感度を図 4.14 に示す。原因はまだ明らかになっていない。

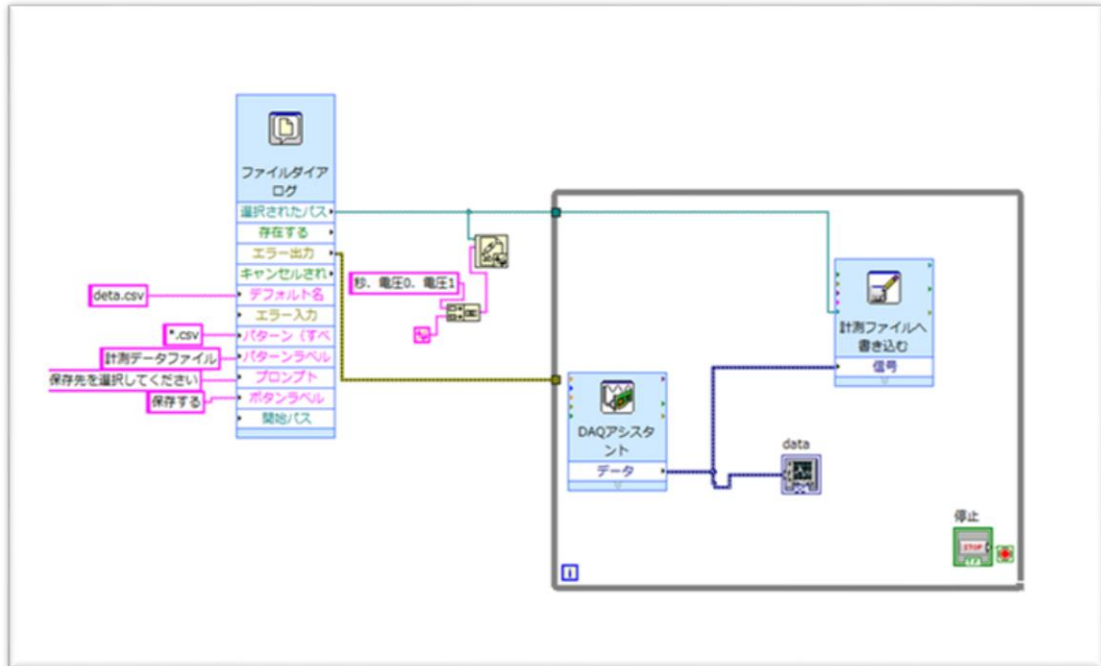


図 4.9 LabVIEW によるレーザー加熱実験用制御プログラム

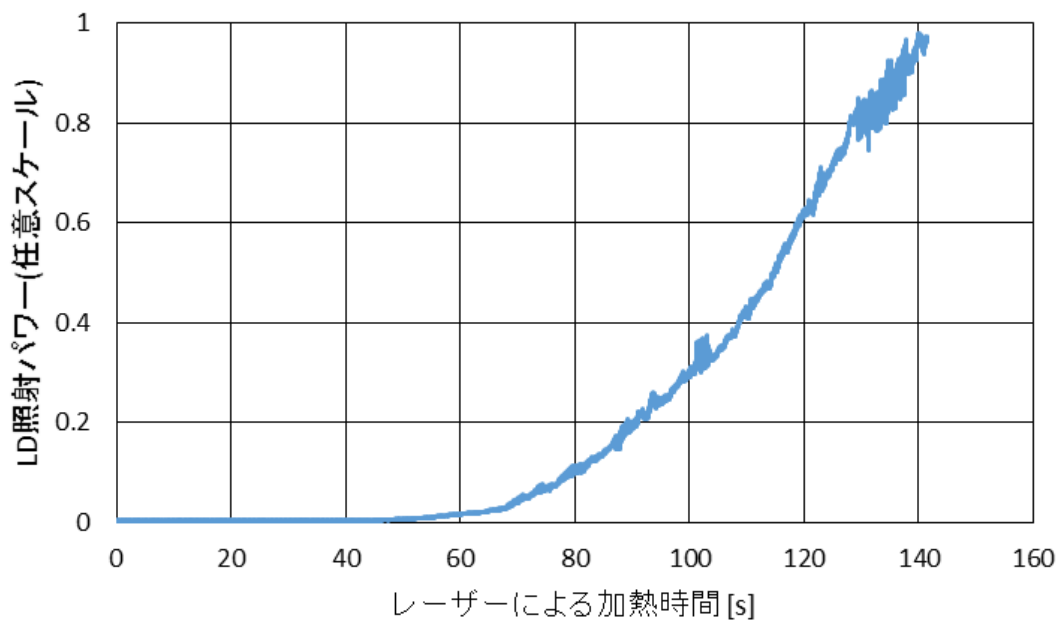


図 4.10 LD 照射パワー出力結果

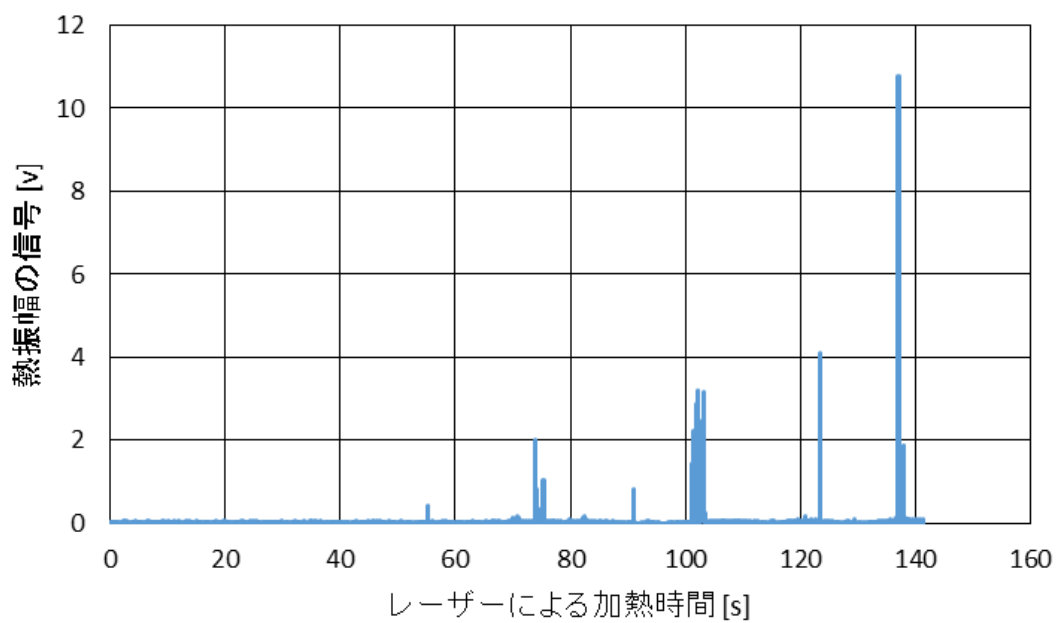


図 4.11 同期検波器による熱振幅の信号結果

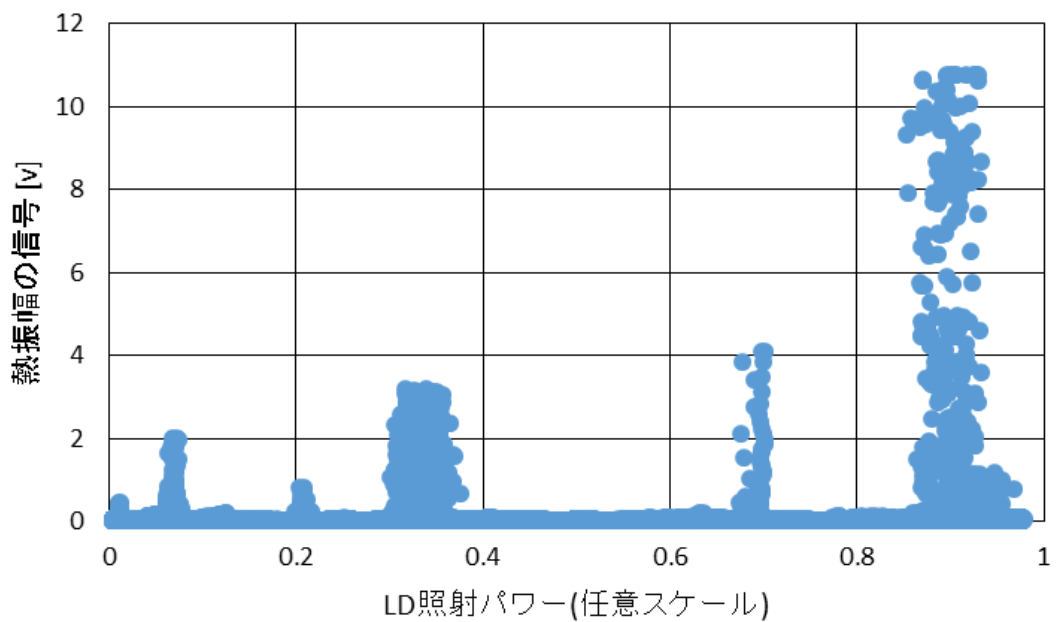
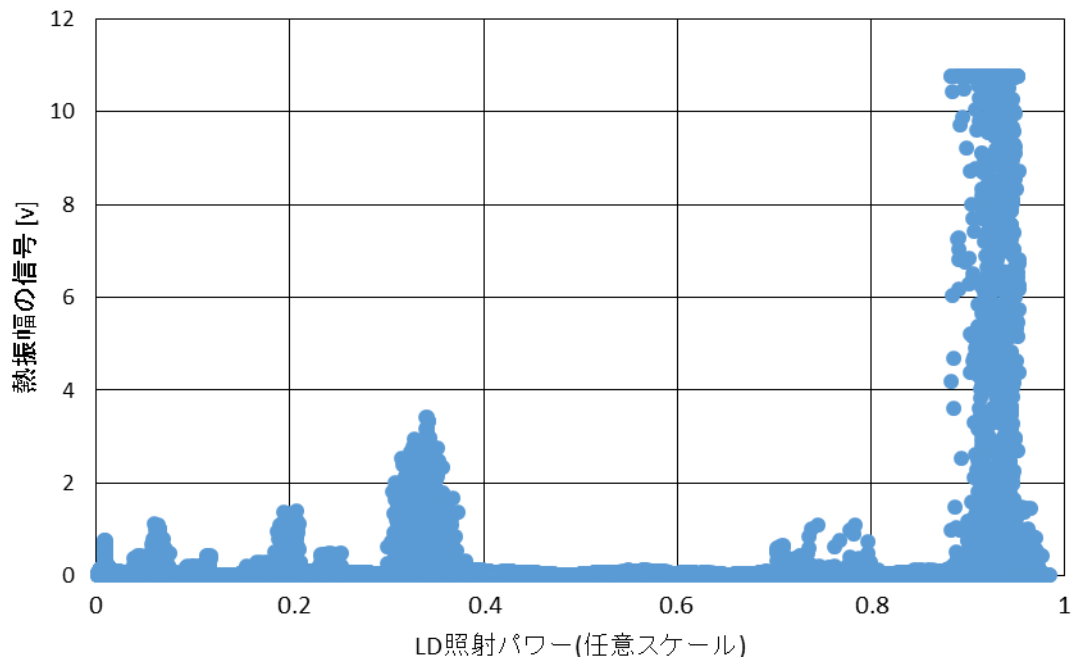
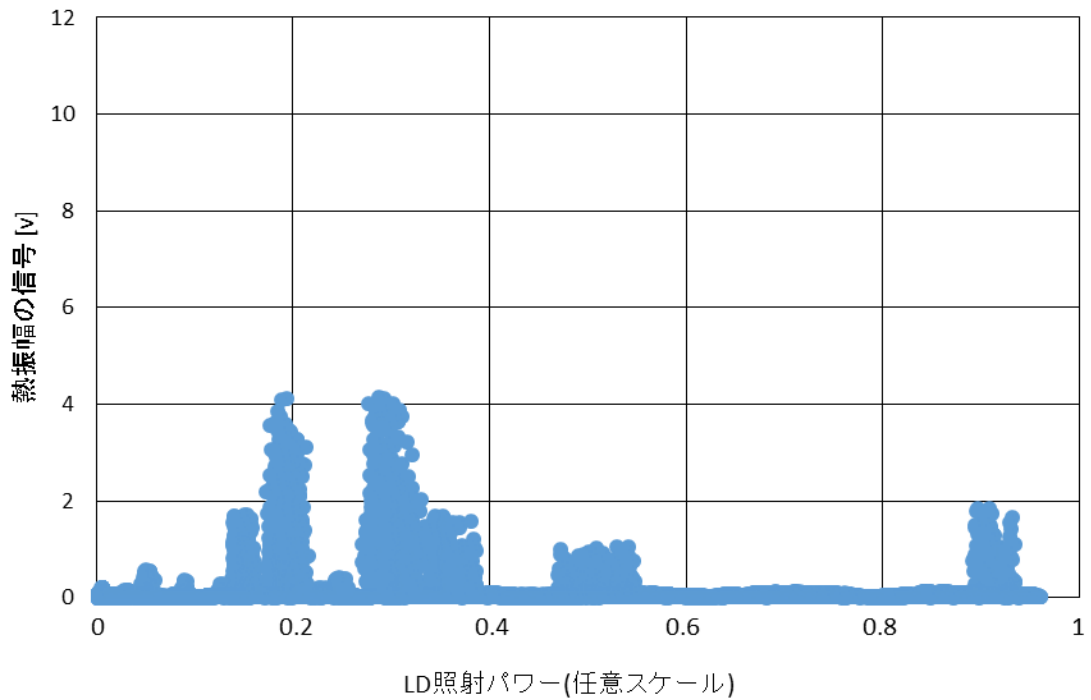


図 4.12 レーザー加熱による異常熱振動の発現



a) 0~1.8A までの出力増加



b) 1.8~0A までの出力減少

図 4.13 フィードバック制御回路なし時の異常熱振動の発現

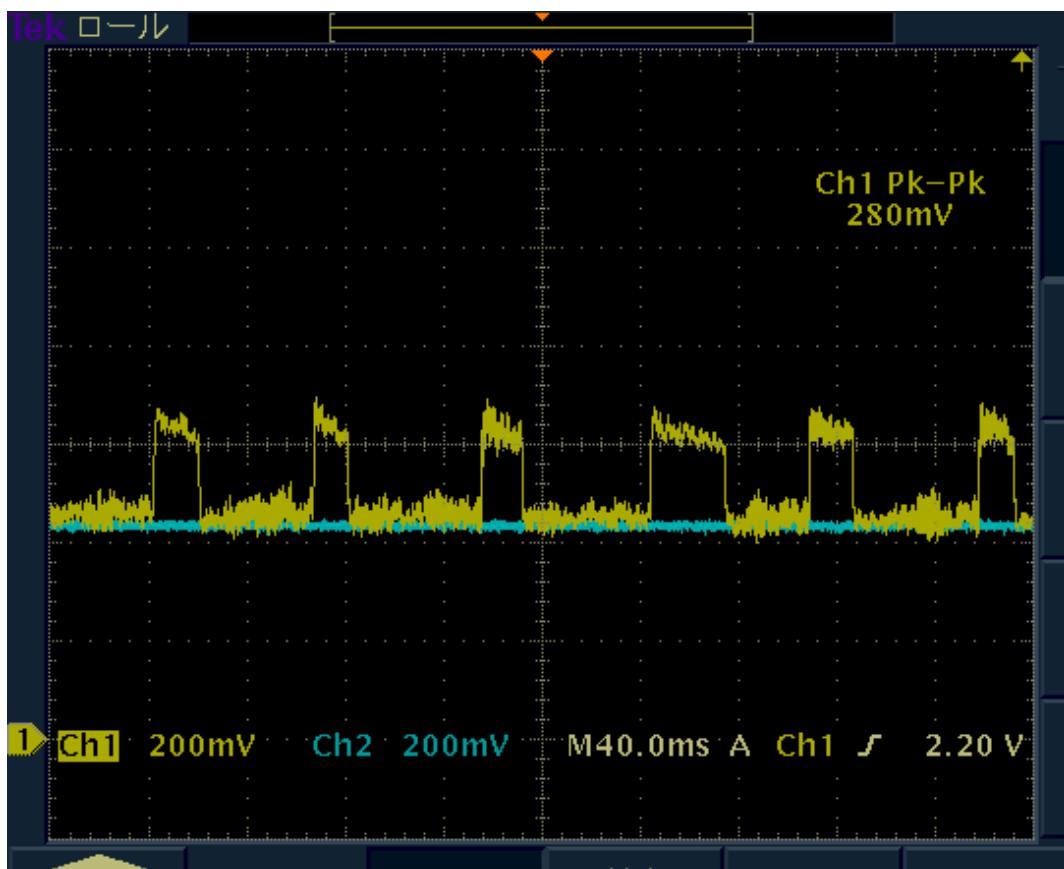


図 4.14 レーザー加熱による異常熱振動の典型的な波形(LD の励起電流一定)

## 第5章 結言

今回、微小シリコン片持ち梁の熱振動計測をより安定して行えるように、マイケルソン干渉計を用いた微小振動計測システムの改良を行った。マイケルソン干渉計を真空槽に入れることができた。また、ゴムによる多段除振、衝撃吸収ゲルによる計測架台の除振の簡便化ができた。これにより計測の安定性向上やバックグラウンドノイズを約 1/3 に低減することができた。

実際に熱振動の確認ができた。熱振動の計測実験では、大気中での熱振幅は約 20 [pm] となり理論値よりも小さくなったが、高真空中では熱振幅が約 50 [pm]、 $Q$  値が約 3800 [-] となり理論値と近い値となった。次にアルミニウム蒸着の除去を行い梁に影響があるか調べ、実験結果よりエッチング除去をした梁の  $Q$  値は約 600 [-] となり低くなった。これは、エッチング除去の際梁表面に不純物が付着したためだと考えられる。しかし、大気中での  $Q$  値はほぼ同じである。これより梁の  $Q$  値は、大気中では空気の抵抗で決まり、空気が無くなってくると梁本来の  $Q$  値が見えてくることが分かった。梁は約  $1 \times 10^3$  [Pa] から振幅と  $Q$  値の上昇が見られ、約 10 [Pa] で飽和が見られることが分かった。

半導体励起固体レーザーによる加熱実験では、式(1)により温度によって熱振幅が変化すると言える。エッチング除去した梁に加熱した。実験結果より、レーザーの出力を上げることで温度が上がり、それに伴い熱振幅も増加していることが確認できた。しかし、250mW のレーザーを当てると徐々に固有振動数が高くなり、レーザー照射を行っていないとき 61.8 [kHz] であった梁の固有振動数は、約 15 分で 68.8 [kHz] まで増加した。これは、レーザーの熱により梁の先端が溶けたことにより起こったと考える。片持ち梁の支持部付近は、本体に近いので熱伝導により高温になりにくい。先端部分は高真空中なので熱が逃げにくい。そのため、梁の先端が溶け固有振動数が変化したと考えている。次にアルミ

ニウム蒸着のある梁に加熱した。実験結果より、レーザーの出力を徐々に上げ加熱していったところ、ある出力でレーザーを当てると異常な熱振動が発生した。計測後に加熱していない時の梁の共振周波数を確認したが変化はみられなかった。異常熱振動の原因としてフィードバック制御回路が影響しているのではないかと考え、フィードバック制御回路の電源を切り計測した結果、異常な熱振動が確認できた。これよりフィードバック制御回路が影響していることはないと考え。また、出力を増加させた時と減少させた時ではほぼ同じ出力で異常な熱振動がでていたことが分かった。

今後の課題としては、異常な熱振動の原因を追究し明らかにすることがあると思う。システムの改良に成功したが高周波数の梁の計測が行えなかったので、計測できるか実験を試みる必要があると思う。



## 参考文献

- [1] 福岡工業大学知能機械工学科 平成 25 年度卒業論文 「微小シリコン片持ち梁熱振動の制震の研究」 堀江諒平, 森太士
- [2] 福岡工業大学知能機械工学科 平成 13 年度修士論文 「微小シリコン片持ち梁の熱振動の研究」 趙世濟
- [3] [https://www.onosokki.co.jp/HP-WK/c\\_support/newreport/dampingfactor/dampingfactor\\_1.htm](https://www.onosokki.co.jp/HP-WK/c_support/newreport/dampingfactor/dampingfactor_1.htm)
- [4] J. Yang, and T. Ono, M. Esashi, Surface effects and high quality factors in ultrathin single-crystal silicon cantilevers. *APPLIED PHYSICS LETTERS*, 23(2000)1-3
- [5] 小澤哲也: 「図解 LabVIEW データ収録プログラミング」 2008 発行 (森北出版), pp.119-121

## 謝辞

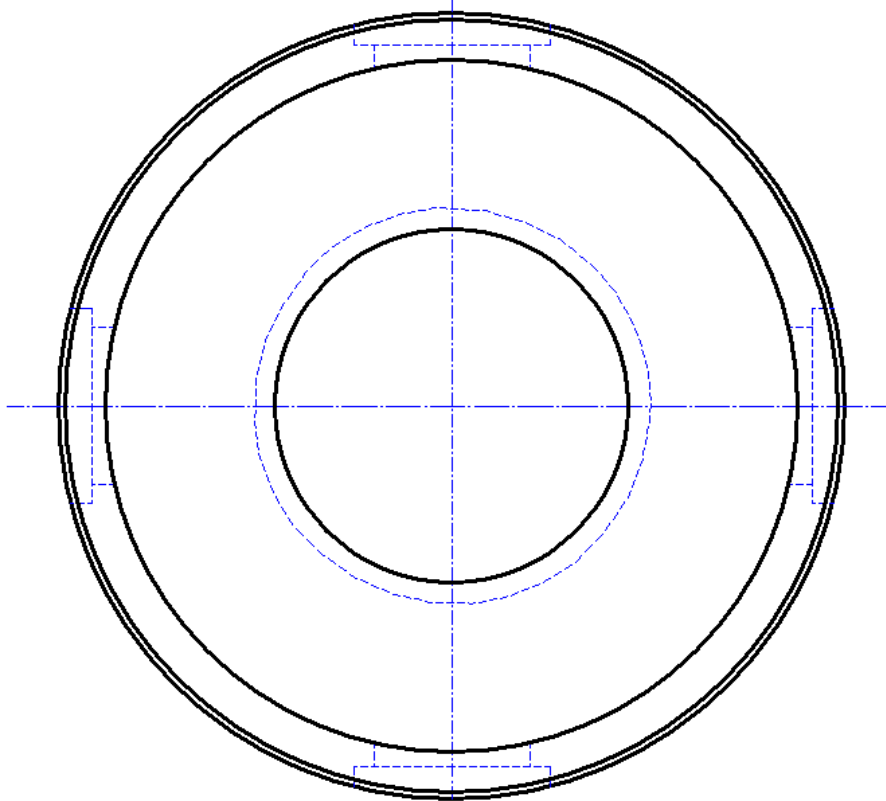
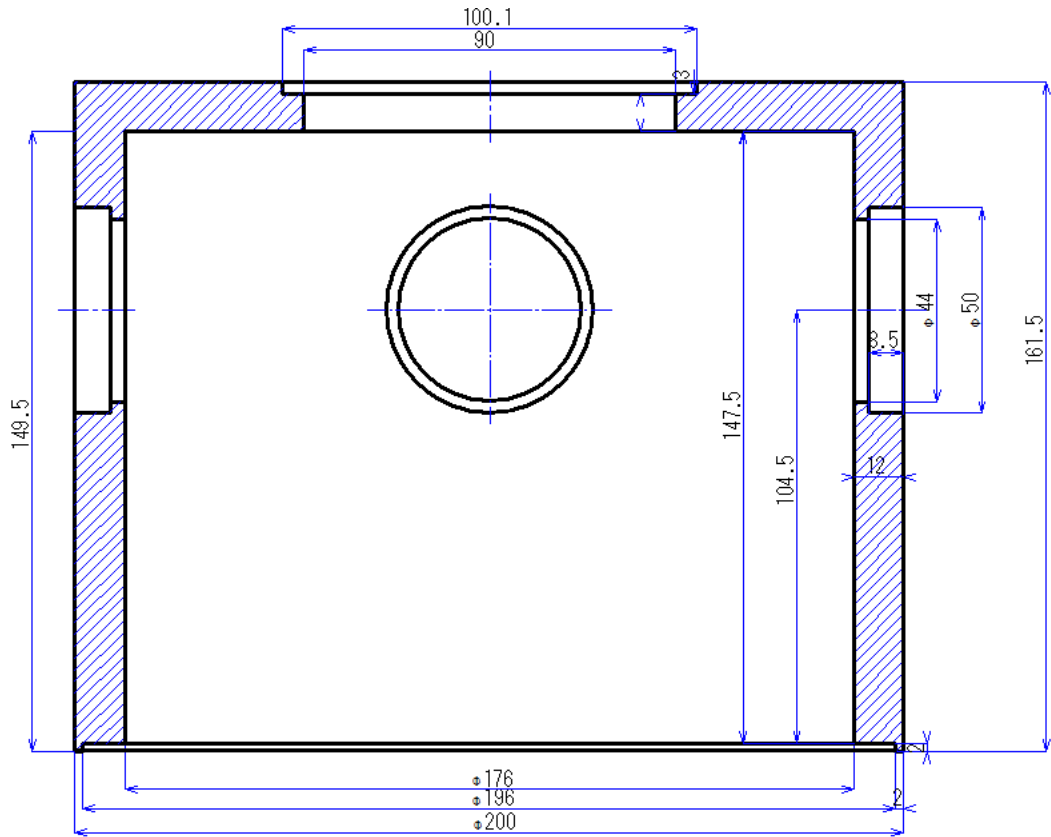
本研究を遂行するにあたり，終始御指導，御助言を賜りました河村良行教授に深く感謝の意を表します．また，熱振動計測システムの改良に当たり御協力頂きました工作センター，ものづくりセンターの平田隆一先生，大塚秀樹先生，飛松晋作先生，田中雄二先生および梁のエッチング除去の際に御協力して頂きましたエレクトロニクス研究所，電子情報工学科の田中秀司教授，藤山研究室の皆様にも深く感謝の意を表します．

# 付録

## 真空槽設計図

# 真空槽設計図

a) 真空槽容器



b)真空槽内の多段除振台

