

平成 25 年度卒業論文

微小シリコン片持ち梁熱振動の
制震の実験

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

10E1053 堀江諒平

10E2060 森 太士

目次

第 1 章. 緒言	3
第 2 章. 本実験で使用した装置および原理	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	5
2.3 フィードバック制御回路	7
2.3.1 減算増幅回路	7
2.3.2 ローパスフィルター	7
2.4 ピエゾ素子の校生実験	8
2.5 真空ポンプ	8
2.5.1 ロータリーポンプ	8
2.5.2 油拡散ポンプ	9
2.6 真空計	10
2.6.1 ピラニ真空計	10
2.6.2 電離真空計	10
2.7 FFT(周波数解析装置)	11
2.8 デュアルチャンネル・プログラマブルフィルタ(DCPF)	11
2.9 除震	12
2.9.1 ゴムボールを用いた簡易除震	12
2.9.2 ロータリーポンプからの振動の除震	12
2.9.3 真空容器内の除震	13
第 3 章. 熱振動の計測	14
3.1 片持ち梁の熱振動	14

3.2 热振动の理论计算	14
3.3 計測方法	15
3.4 計測結果	16
第4章. 热振动の制震	20
4.1 热振动の数値解析	20
4.2.ロックインアンプの自动同期信号に制震実験	22
4.2.1 実験装置	22
4.2.2 実験概要	25
4.2.3 実験結果及び問題点	26
4.3 帯域フィルターによる制震実験	26
4.3.1 実験装置	26
4.3.2 DCPF による位相シフト	29
4.3.3 実験結果及び考察	29
第5章. 結言	35

第1章. 緒言

熱により原子が振動する熱振動というものがあるため、どのような物体もわずかに振動している。熱振動は原子が振動しているため、通常、物体を絶対零度まで冷却し、原子の動きを止めなければ止めることはできない。そこで、本研究では、まず、微小シリコン片持ち梁の精密計測を行い、微小シリコン片持ち梁の熱振動を冷却以外の方法で止めることが出来ないか考え、熱振動と位相の違う、外部振動で片持ち梁を振動させ、熱振動を止める制震が可能かどうかの実験を行った。これが成功すれば、超高感度の振動計の開発や、計測装置の精度向上などに応用できると考えられる。

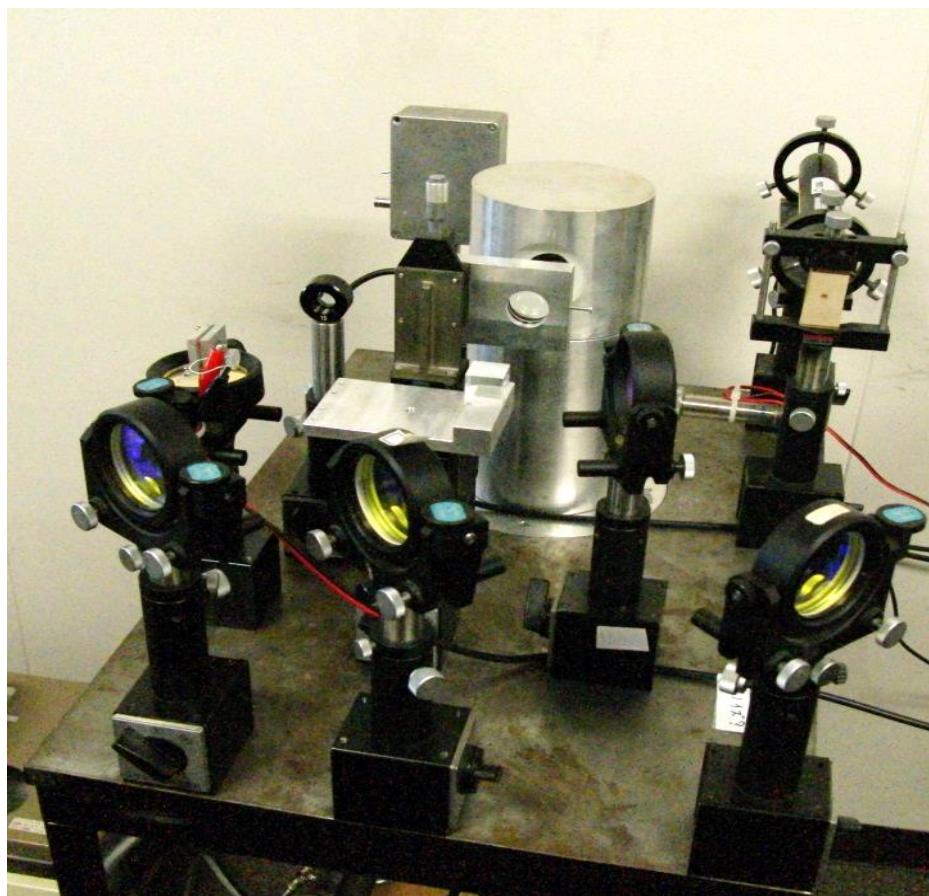


図 1-1 本研究で用いた実験装置

第2章. 本実験で使用した装置および原理

2.1 シリコン片持ち梁

本研究で使用した微小シリコン片持ちの拡大写真を図 2-1 に示す。寸法はカタログ値より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 2.7N/m 、実測より固有振動数 58.37kHz で熱振動により、常に振動し続けている。この固有振動数は片持ち梁の個体差によって多少異なり $40\text{kHz} \sim 70\text{kHz}$ である。

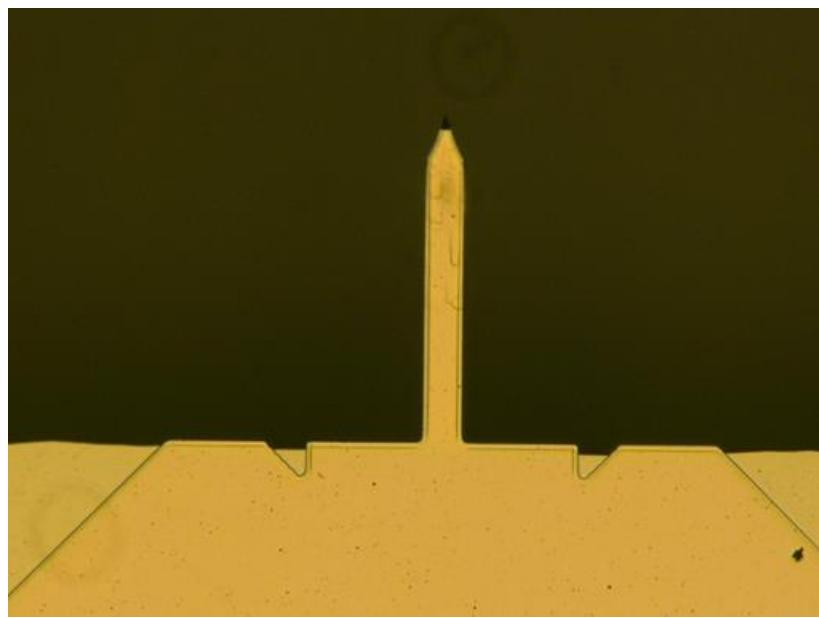


図 2-1 微小シリコン片持ち梁

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、レーザー発振器、半透鏡、参照ミラー、光検出器で構成されており、レーザー発振装置から出たレーザー光が半透鏡により 2 分割され、計測ミラーに、もう一方は参照ミラーに向かい、それぞれからの反射光が重なり合い干渉光ができる。それを光検出器で電圧信号に変換する。この干渉光は、二つの光の光路差の変化により明暗が変化する。この明暗の変化から微小な距離の変位を計測できる。

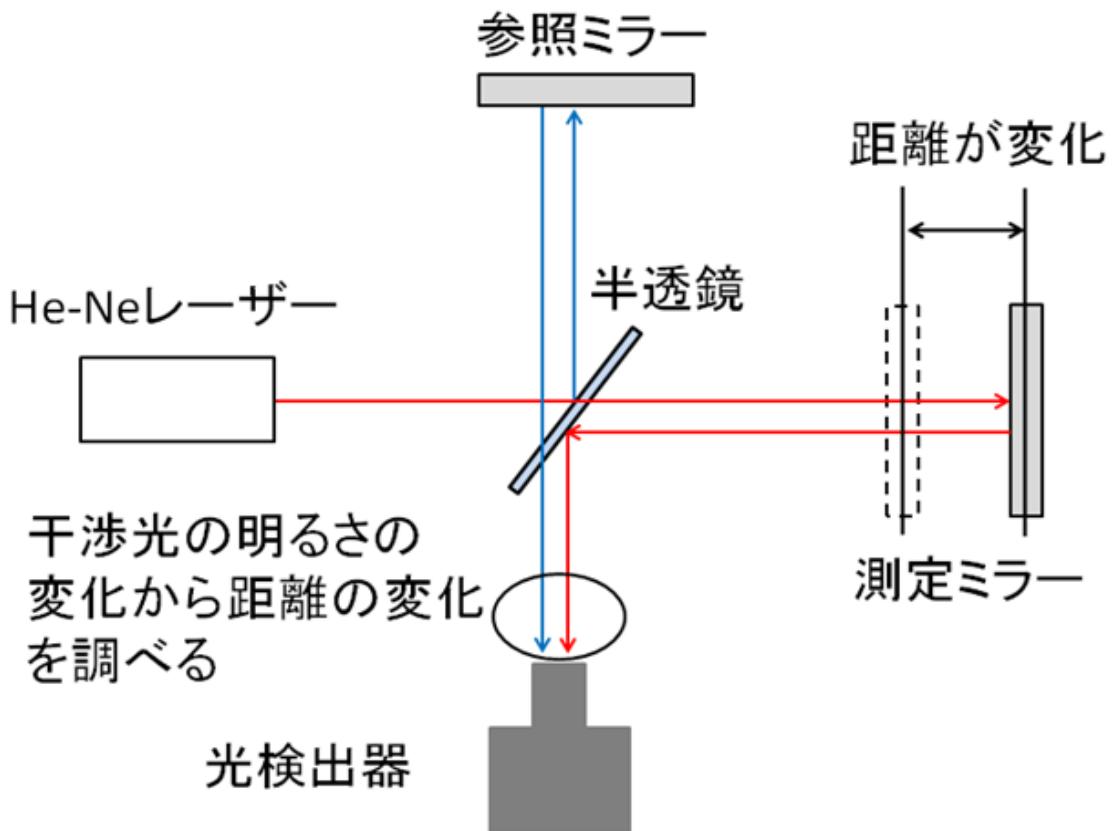


図 2-2 マイケルソン干渉計

2.2.2 計測感度

レーザー光の干渉光と計測感度について詳しく説明する。

上の図がレーザーの重なった時に出来る干渉縞を表した図 2-3 である

二本のレーザー光が重なることで干渉縞が出来る。片方のレーザー光が ΔX 動いたとすると、

干渉縞の明暗が変化し ΔV 電圧が変化する。この時の明暗と変位の関係を図 2-4 に示す。

先ほど説明した通り、レーザー光の光路差の変化によって干渉縞の明暗も変化する。この時光検出器の信号は、光が明るい所は電圧が高く、暗い所では電圧が低くなる。He-Ne レーザーの波長 $\lambda = 632.8\text{nm}$ なの $\frac{\lambda}{4}$ つまり 158.2nm の変位で光が最も明るいと所から暗いまで変化する。この時、光の中心辺りで変位を計測した場合と上辺りで計測した場合では同じ変位 Δx を計測したとしても、中心辺りの方が感度は高くなる。このため感度がもっとも良い

所に光が留まるように光検出器からの信号をフィードバック制御回路に通し、電圧をかけることで伸び縮みをするピエゾ素子しに出力し、参照ミラーの位置調整を行うことで最も感度の良い所に常に光の明暗を留めている。

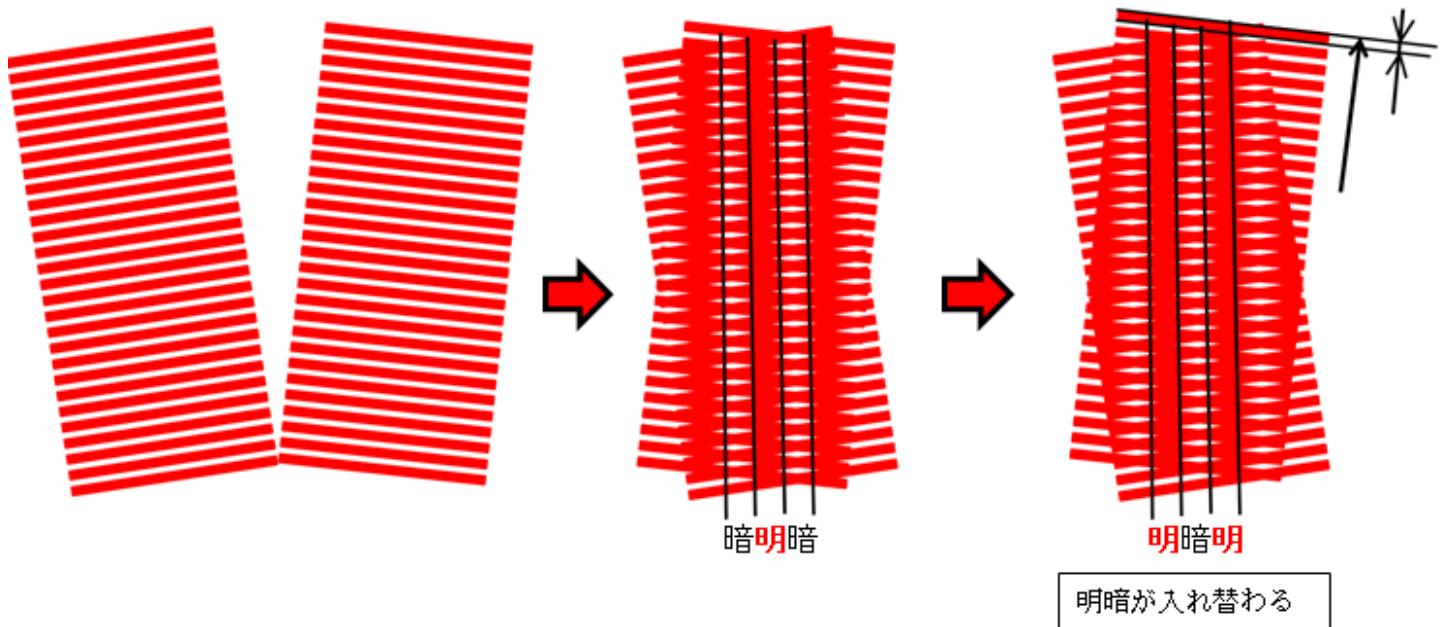


図 2-3 光路差の変化による干渉縞の移動

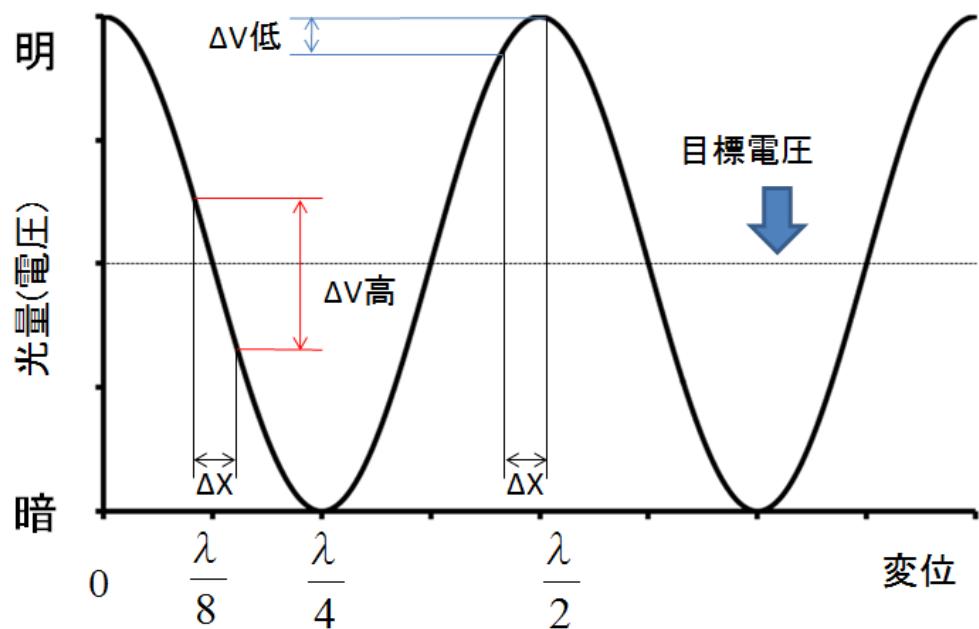


図 2-4 計測感度と変位と電圧

2.3 フィードバック制御回路

先ほど述べた検出感度の関係から干渉縞の明暗を最も感度の良い所に留めるためにフィードバック制御回路を自作した。回路図を図 2-5 に示す。

2.3.1 減算増幅回路

光検出器からの電圧信号を V_1 、予め設定した留めたい電圧を V_2 とすると、 $V_2 - V_1$ となり、留めたい電圧からの差を求める。 V_2 は、内部電池の電圧を利用しておらず、可変抵抗により調整する。この時そのままの電圧ではピエゾ素子に出力するには小さすぎるので同時に電圧の増幅も行っている。

2.3.2 ローパスフィルター

減算増幅回路からの電圧信号の高周波成分をローパスフィルターでカットする。これはそのまま信号を出力すると高周波の信号も制御てしまい、ピエゾ素子が発振してしまうことを防ぐためである。

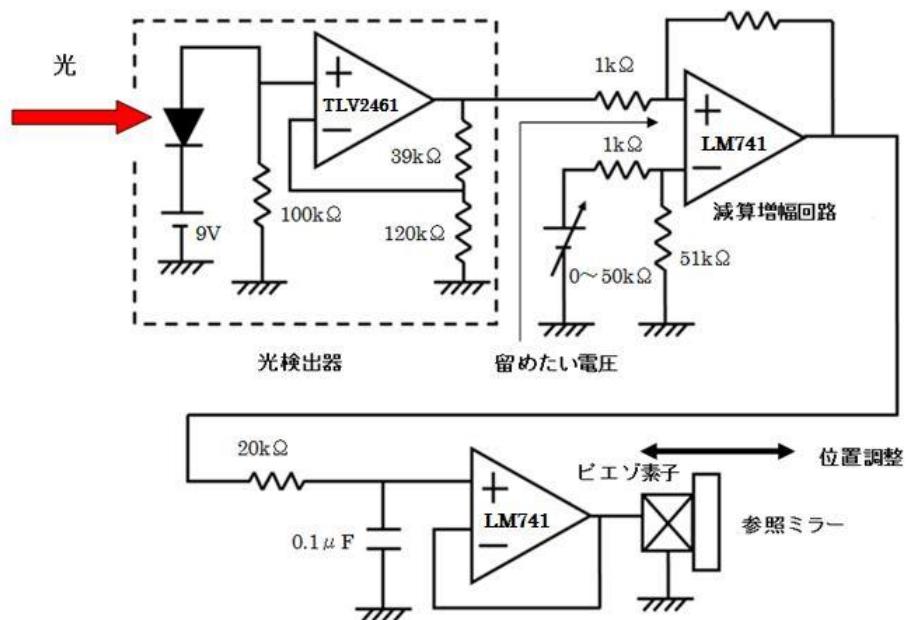


図 2-5 フィードバック制御回路

2.4 ピエゾ素子の校生実験

ピエゾ素子が電圧に比例して動作しているのかを調べるために、片持ち梁の支持台のピエゾ素子に 0V から 0.2mV ずつ 2mV まで電圧をかけ、レーザー光を片持ち梁の平面に当て、その変位をマイケルソン干渉計で計測し FFT で 30 回平均を行い解析した。その時のかけた電圧と変位を図 2-6 に示す。150V で 8 μm の変位で計算した理論値よりも変位は小さいが、その原因は、ピエゾの周波数応答や、カタログの変位と電圧の値は完全に比例ではなく、電圧が低いところでは小さくなっているためだと考えられる。しかし、電圧の大きさに変位が比例しているためピエゾ素子は正しく動作していると言える。

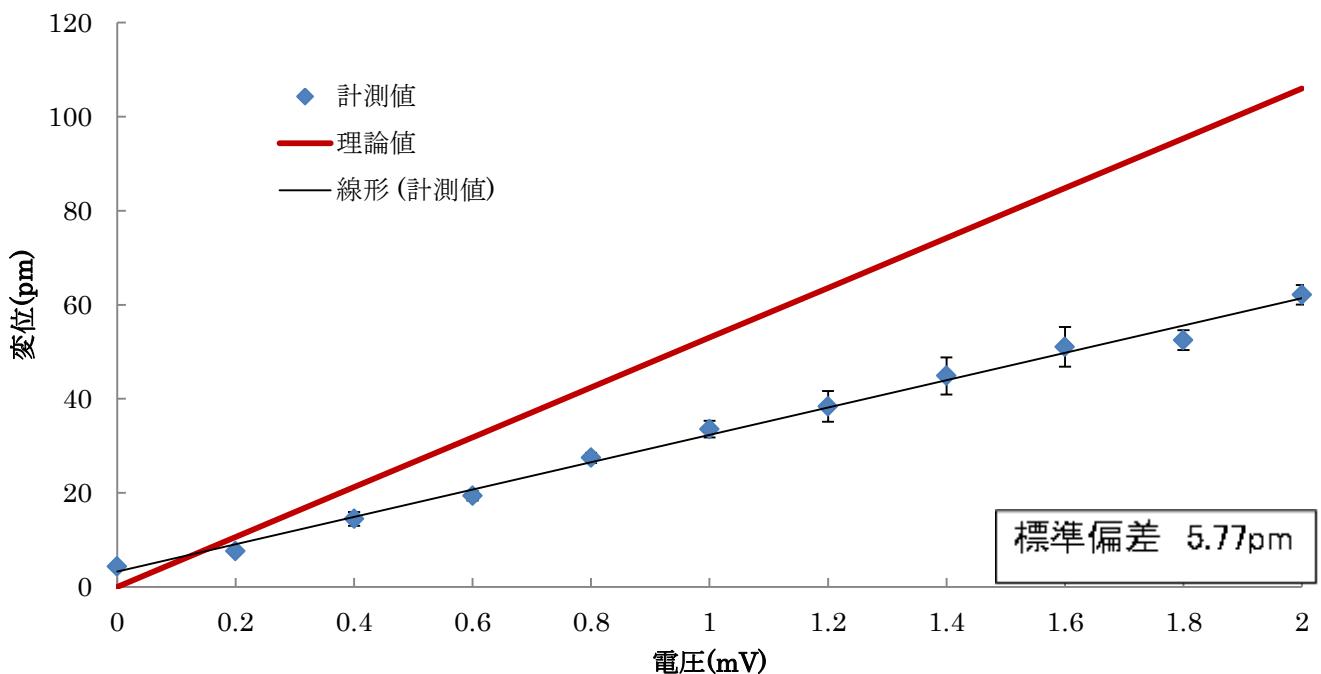


図 2-6 ピエゾ素子の電圧と変位の関係

2.5 真空ポンプ

2.5.1 ロータリーポンプ

このポンプは最も一般的な真空ポンプで高真空前の粗引きに用いる。操作は簡単だが、最大 $1.3 \times 10^{-1}\text{Pa}$ の真空度まで引くことができる。本実験では、最大の真空度は 30Pa であった。

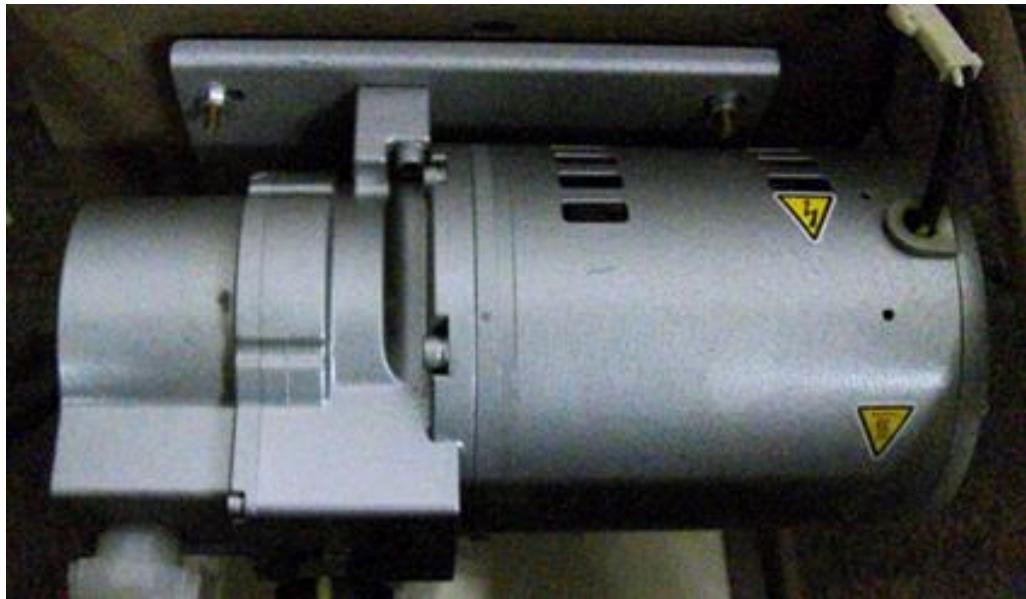


図 2-7 ロータリーポンプ

2.5.2 油拡散ポンプ

このポンプは油を熱する蒸気を利用して、常時ポンプを水で冷却しなければならないが、最大で 1×10^{-5} Pa の真空度まで引くことができる。本実験では、真空度は最大で 8×10^{-3} Pa であった。

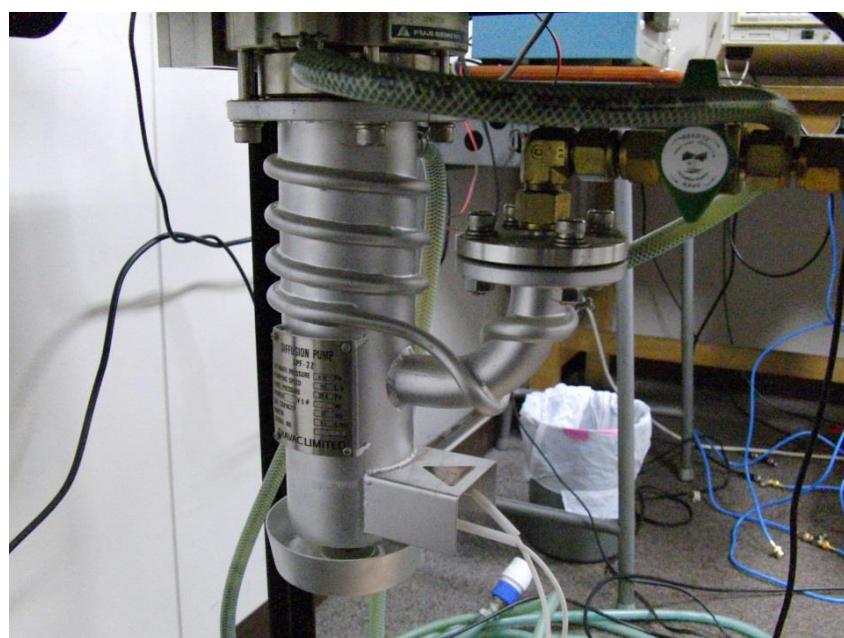


図 2-8 油拡散ポンプ

2.6 真空計

2.6.1 ピラニ真空計

低い真空度を計測するときに用いる。具体的には 400Pa～4Pa 程度の真空度を測ることができる。



図 2-9 ピラニ真空計

2.6.2 電離真空計

高い真空度を測るときに用いる。真空度があまり高くない時には使用できない。具体的には、 1×10^{-7} Pa～1.4Pa 程度まで測ることができる。



図 2-10 電離真空計

2.7 FFT(周波数解析装置)

この装置は縦軸電圧、横軸周波数で周波数ごとの電圧信号の大きさを測定できる。



図 2-11 FFT(周波数解析装置)

2.8 デュアルチャンネル・プログラマブルフィルタ(DCPF)

この装置は簡単に言えばフィルタ回路の役割をする装置である。CH1 と CH2 の二つのチャンネルがあり、それぞれカットオフ周波数の設定ができる。CH1 と 2 を内部で繋げる CASCADE モードと別々にする SEPARATE モードがある。CASCADE モードで内部を繋げて 2 重にフィルタをかけることもできるが、SEPARATE モードで CH1 の出力をそのまま CH2 に入力することで 2 重にフィルタを掛ける方法が最もバンド幅が狭くなる。本実験では熱振動からずれた信号をピエゾ素子に出力するために、CH1 と CH2 の周波数をうまく調整し元の信号からずらしたい位相分ずれるようにして実験を行った。



図 2-12 デュアルチャンネル・プログラマブルフィルタ

2.9 除震

2.9.1 ゴムボールを用いた簡易除震

マイケルソン干渉計全体をゴムボールで四隅を支えた木の板の上に乗せて簡単な除震を行っている。

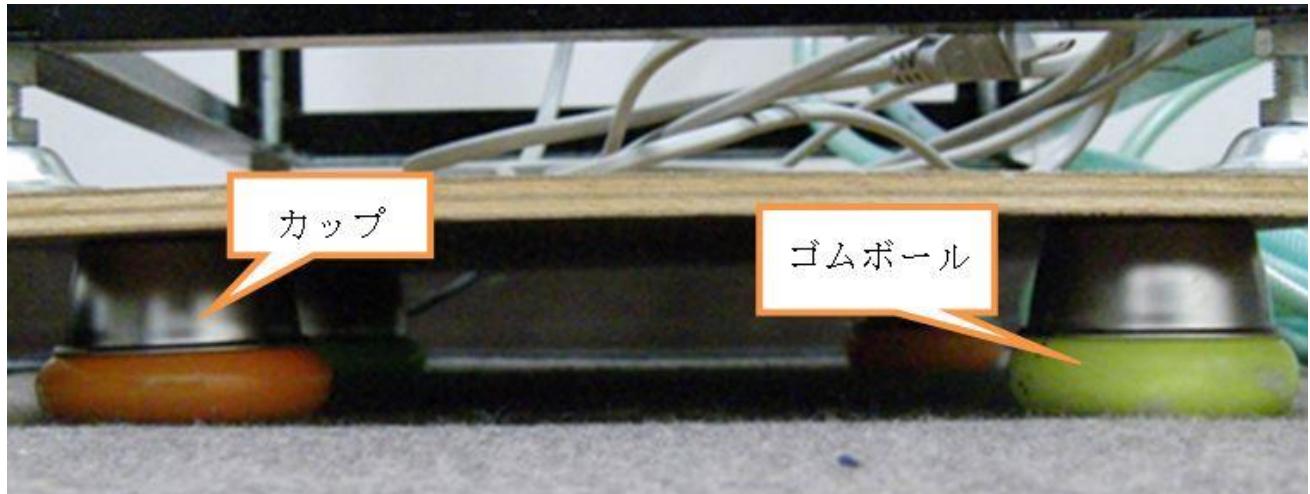


図 2-13 ゴムボールを用いた除震

2.9.2 ロータリーポンプからの振動の除震

ロータリーポンプの振動が真空ホースから伝わるのを避けるために、真空ホースを床に置かれた直径 25cm、厚さ 1.5cm の鉄製の円盤の重りに結束バンドで固定して除震を行っている。



図 2-14 真空ホースの除震

2.9.3 真空容器内の除震

真空容器内でゴムの上にアルミの円筒を乗せる簡単な除震を行っている。

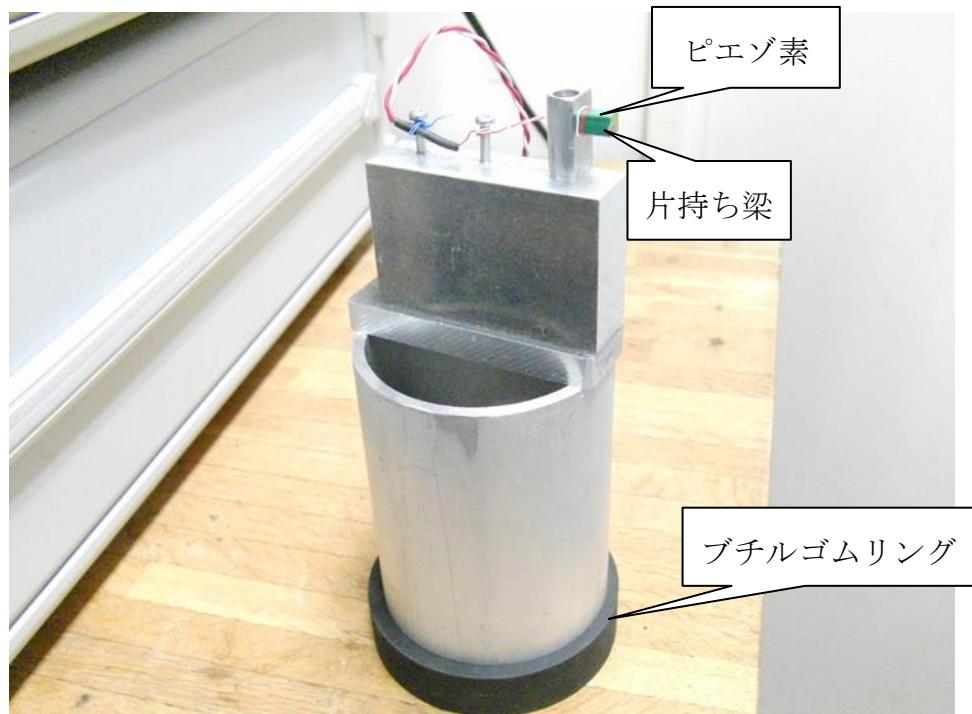


図 2-15 真空容器内の除震

第3章. 热振動の計測

3.1 片持ち梁の热振動

緒言でも述べた通り、すべての構造体は原子が振動する热振動というものがあり、どのような物体もわずかに振動し続けている。本研究で計測するのは热振動による原子の振動による微小シリコン片持ち梁の振幅を計測する。ここで述べる微小シリコン片持ち梁の热振動とは、この振幅のことである。片持ち梁の振動の様子のイメージ図を図 3-1 に示す。

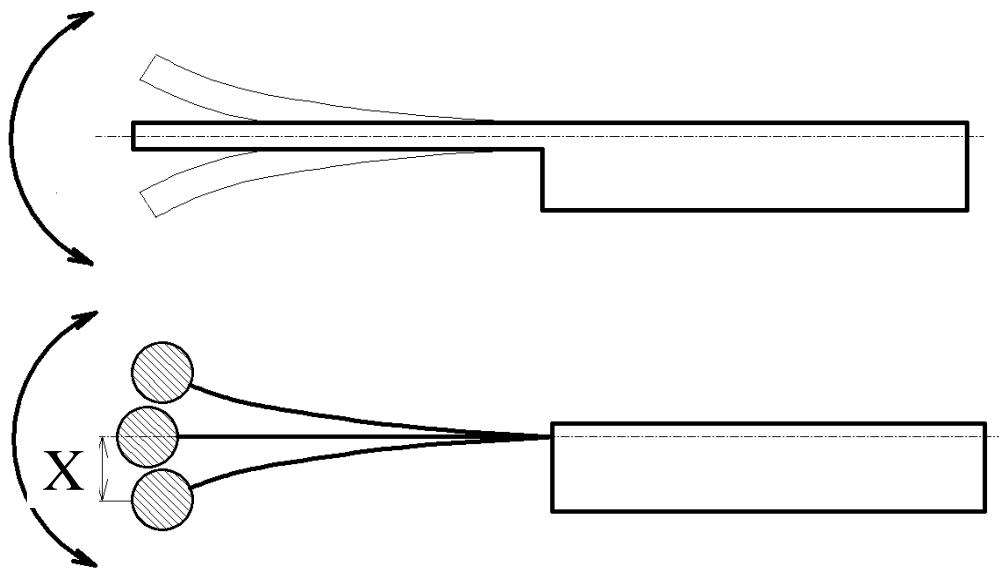


図 3-1 热振動のイメージ

3.2 热振動の理論計算

片持ち梁の热振動の理論計算を行った。

片持ち梁の先端にのみ質量 m があり梁をバネと仮定すると热エネルギーと振動エネルギーは等しくなるので、

$$\frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}K_B T \quad (3-1)$$

となる。ここで x は振幅、 k はばね定数、 K_B はボルツマン定数、 T はケルビン温度である。カタログ値よりばね定数 $k = 2.7$ [N/m]、ボルツマン定数 $K_B = 1.38 \times 10^{-23}$ [J/K] 室温を約 27°C として $T = 300$ [K] とする。この式で振幅を求める

$$x = \frac{\sqrt{K_B T}}{k} = \frac{\sqrt{1.38 \times 10^{-23} \times 300}}{2.7}$$

$$x = 3.9 \times 10^{-11} \text{ [m]}$$

となり、微小シリコン片持ち梁の熱振動は約 40 [pm] と予想される。

3.3 計測方法

図 3-2 に微小シリコン片持ち梁の熱振動を計測した実験装置の概略図を示す。主に 2 章で説明したマイケルソン干渉計で構成されており、そこで検出した信号を FFT で解析している。片持ち梁の振動を上手く検出するにはレーザー光を片持ち梁のちょうど良いところに当てなければならない。レーザー光はレンズによって集光されている。この際、レーザー光を当てた時の片持ち梁の影を壁に投影しその影を見ながらレンズの位置を調整し適切な箇所に当たるようにする。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、電圧の幅を確認し、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調整する。また、片持ち梁の Q 値を上げて熱振動を測りやすくするために、真空ポンプで真空容器内を真空状態にしている。

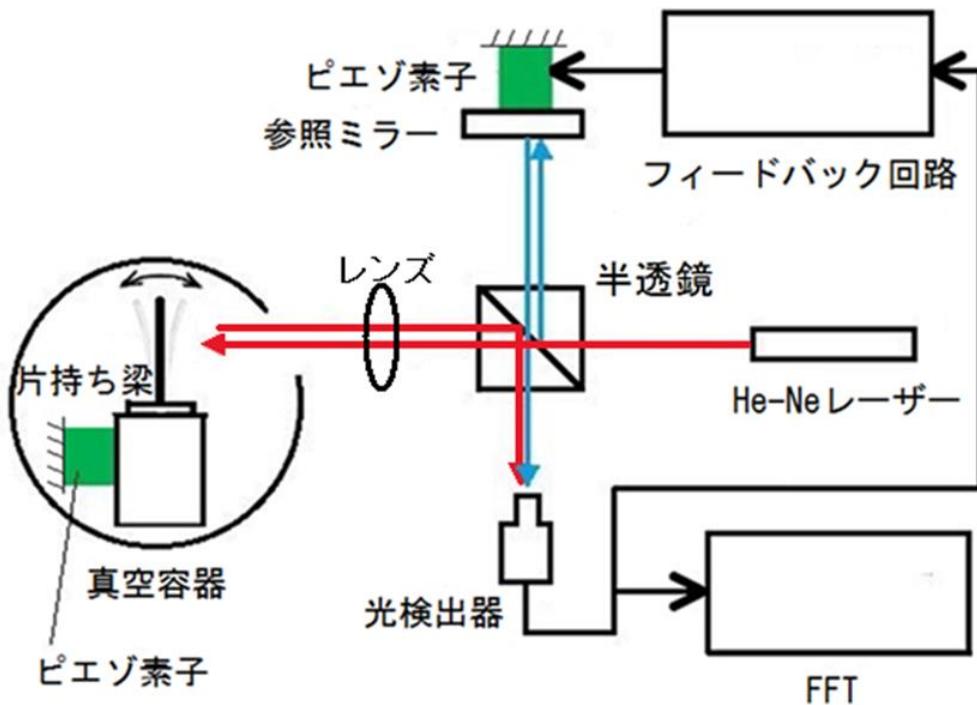


図 3-2 热振動測定実験装置概略

3.4 計測結果

ロータリーポンプのみの真空状態で FFT を用いて計測した熱振動の信号を示す。図 3-3 がレーザーOFFつまり光信号が全くない状態で、図 3-4 がレーザーON の熱振動計測時の光信号でそれぞれ 50 回平均を行っている。これを見ると 58kHz 辺りに熱振動の信号を確認できる。また、図 3-5 と図 3-6 と図 3-7 は信号の拡大したものであり、大気、ロータリーポンプと油拡散ポンプの真空状態である。それぞれ 2000 回平均を行っている。

また、電圧感度から振幅に換算するとこの時の熱振動の振幅は $2.6 \times 10^{-11} \text{m} = 26 \text{pm}$ となる。先ほど述べた理論値と比較すると、計測振幅は小さい。この原因として、理論値は片持ち梁先端の振幅を計算していることに対し、計測振幅は先端から少しずれてる点で計測しているため振幅が小さいのではないかと考えられる。

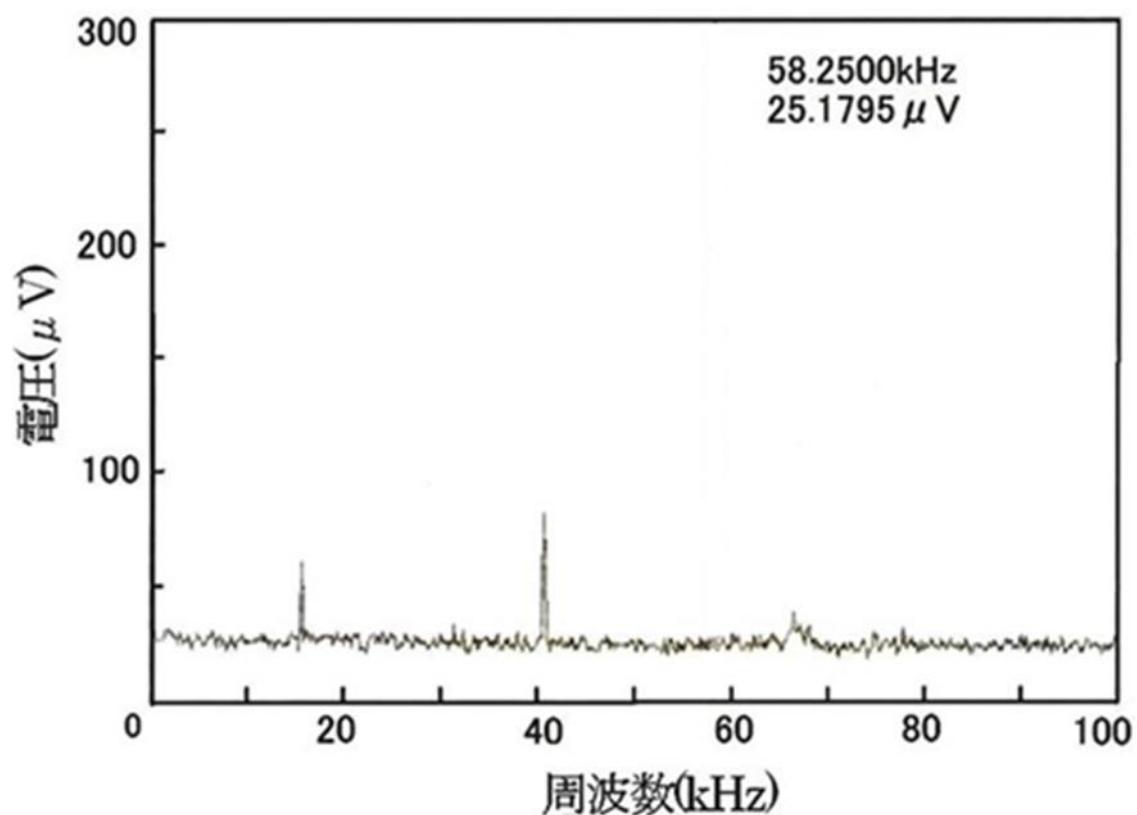


図 3-3 レーザーoff 時のパワースペクトラム

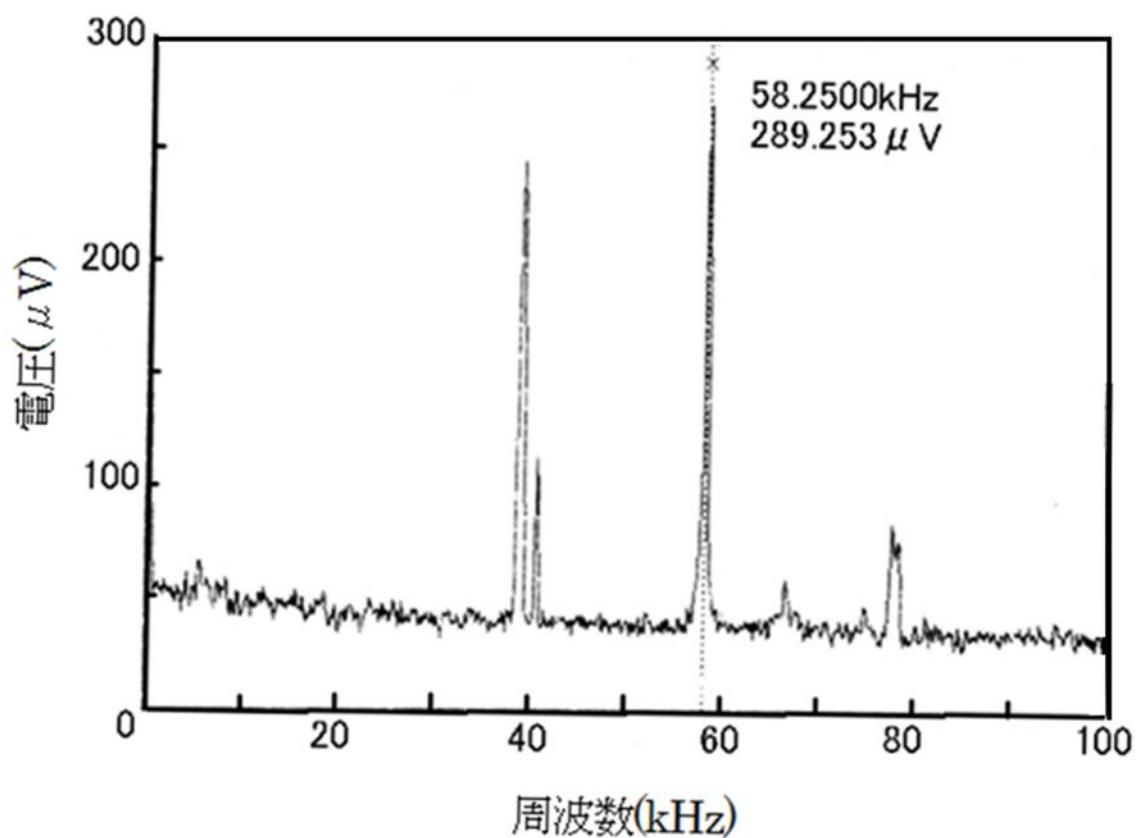


図 3-4 レーザーon 時の熱振動のパワースペクトラム

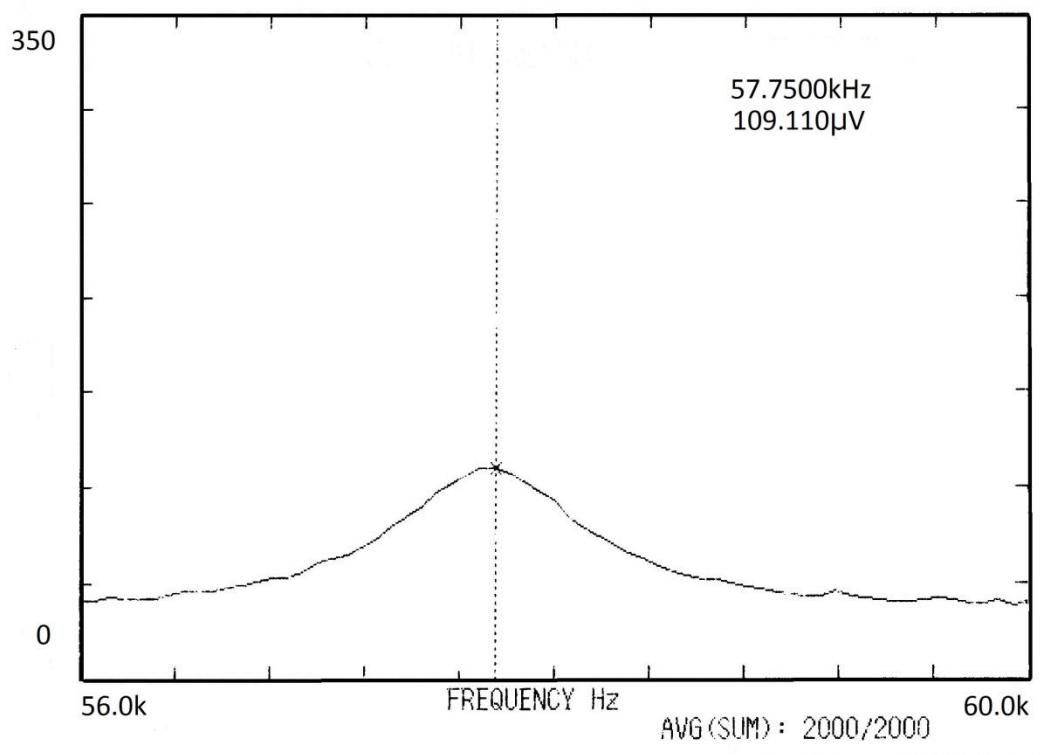


図 3-5 パワースペクトラム拡大 大気(0.1MPa)

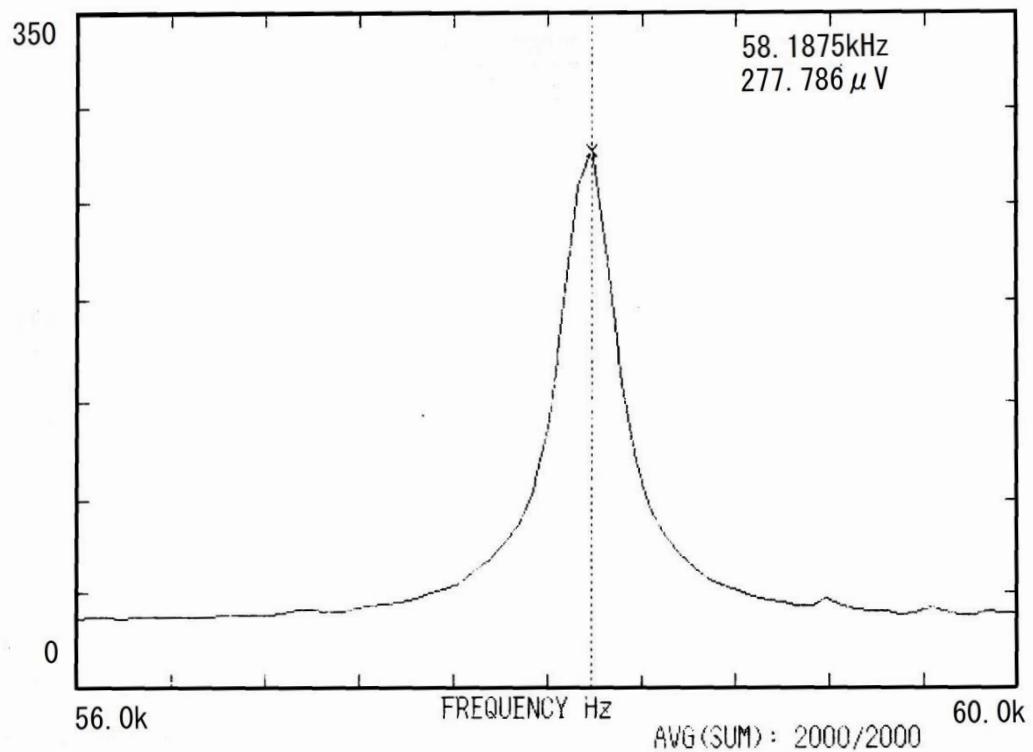


図 3-6 パワースペクトラム拡大 ロータリーポンプ排気(30Pa)

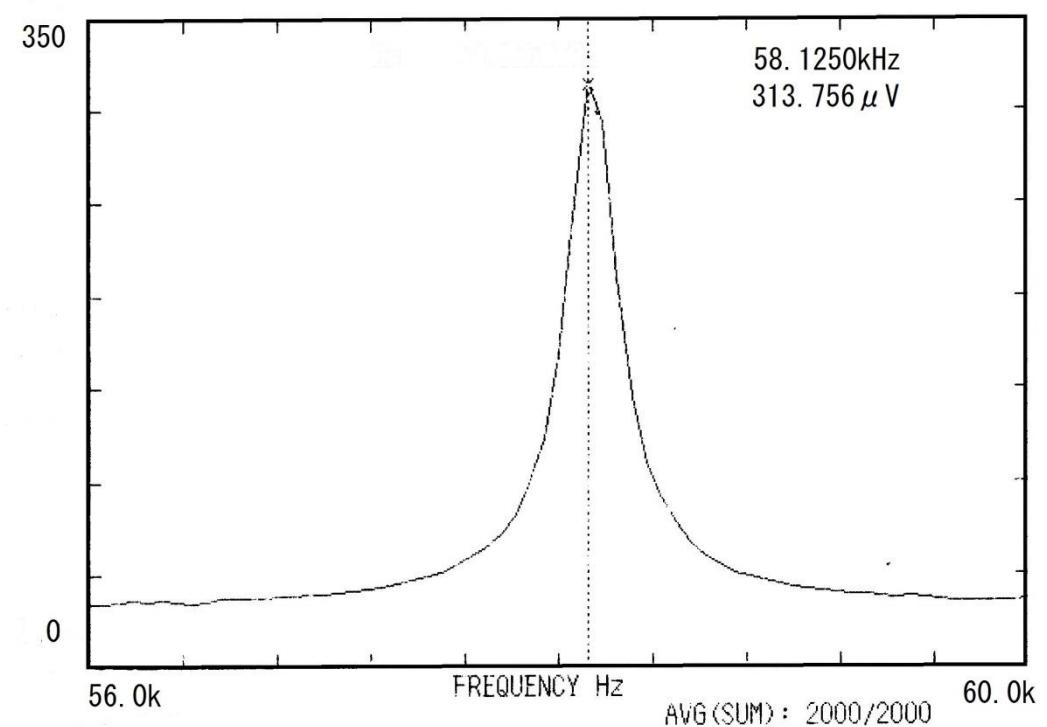


図 3-7 パワースペクトラム拡大 油拡散ポンプ排気(8×10^{-3} Pa)

第4章. 热振動の制震

4.1 热振動の数値解析

片持ち梁の热振動を数値解析するため図4-1に示すようにモデル化を行った。先端に等価荷重 m [kg]、ばね係数を k [N/m]、減衰項 μ [kgN/m] とおいた。また、热振動を外部振動として擬似的に再現した振幅を f_0 [kgN/s] としてある。

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4-1)$$

式(4-1)より

$$m = \frac{k}{\omega^2} \quad (4-2)$$

元の振幅から $\frac{1}{e}$ の振幅になるまでの減衰時間 τ ($= \frac{2m}{\mu}$) の間の振動回数を Q とすると

$$Q = \frac{\tau}{T} \quad (4-3)$$

T は振動の周期であり

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (4-4)$$

式(4-4)より

$$\mu = \frac{\sqrt{mk}}{\pi Q} \quad (4-5)$$

热振動を擬似的に再現した外力を f_0 とすると、1周期に外部から入るエネルギー f_0 と散逸するエネルギー $\mu\omega x_0$ は等しくなるため

$$f_0 = \omega\mu x_0 \quad (4-6)$$

となる。この時热振動の大きさを決める x_0 は計測した热振動の値 3.9×10^{-11} で計算している。このモデルを式で表すと、

$$mx'' + \mu(x - y)' + k(x - y) = f_0 \sin \omega t \quad (4-7)$$

ここで y を x から 90° ずらした時の解を求める

$$x = x_0 \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (4-8)$$

$$y = y_0 \sin \omega t \quad (4-9)$$

と表せる。また、 x の変位に対して y をどれくらい動いたかのループゲインを G とすると

$$G = \frac{y_0}{x_0} \quad (4-10)$$

となり、

$$\begin{aligned} x' &= \omega x_0 \cos(\omega t + 90^\circ) \\ &= -\omega x_0 \sin \omega t \\ &= -\omega \frac{y_0}{G} \sin \omega t \end{aligned} \quad (4-11)$$

式(4-5), (4-6)より

$$y = -\frac{G}{\omega} x' \quad (4-12)$$

となり、これを式(4-7)に代入すると

$$(m + \mu \frac{G}{\omega})x'' + (\mu + k \frac{G}{\omega})x' + kx = f_0 \sin \omega t \quad (4-13)$$

となる。今回はこの式を用いて *Mathematica* で、数値解析を行った。

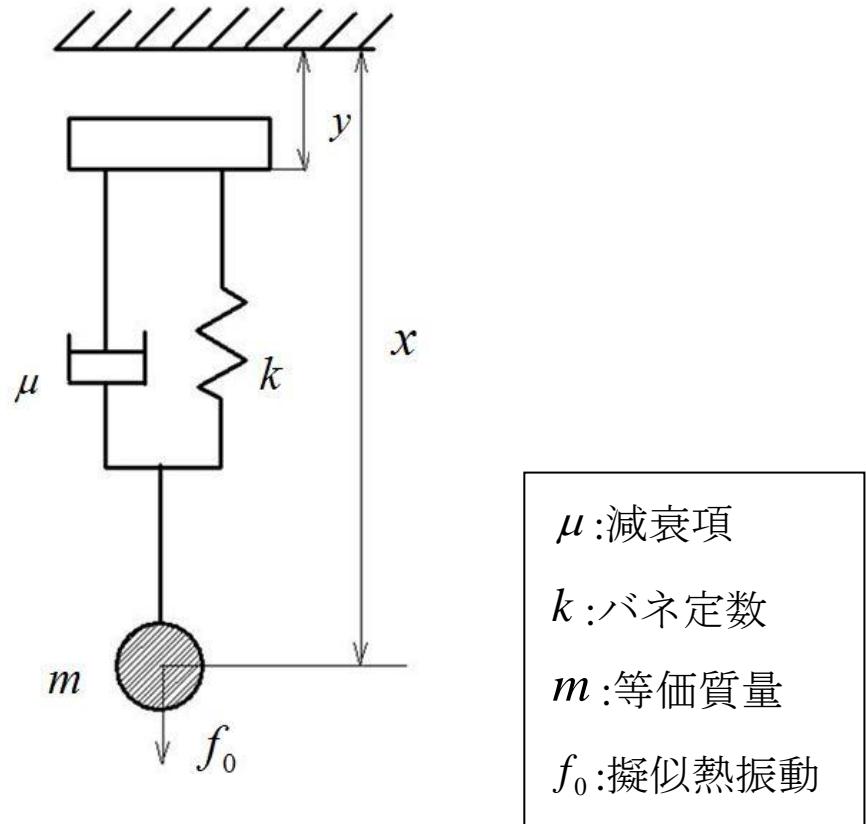


図 4-1 制震数値解析モデル

4.2.ロックインアンプの自動同期信号に制震実験

4.2.1 実験装置

4.2.1.1 ロックインアンプ

図 4.2 に示すロックインアンプは、参照信号で設定した周波数と同周波数の成分を入力信号から検出し計測する装置である。ロックインアンプは、実際の入力信号よりも感度の設定により大きい計測信号が出力される。この感度による倍率は、10 [V] /感度によって求められる。また、実際の電圧を調べるために、(計測電圧/感度の倍率) $\times \sqrt{2}$ と換算をする必要がある。そして、ロックインアンプの測定には時定数の設定がある。時定数は、何秒おきに計測を行うか設定するものである。時定数を大きく設定すると、ノイズは少ないが素早い変化を計測することができない。時定数を小さく設定すると、素早い変化を計測することができる。

きるがノイズが大きくなってしまう。そのため、計測に適切な時定数を設定する必要がある。

ロックインアンプを感度 $500 \mu\text{V}$ 、時定数 $500 \mu\text{s}$ の設定で、ロータリーポンプによる低真空状態で計測した片持ち梁の熱振動を図 4.3 に示す。この結果より計測電圧は約 $400 \text{ } [\mu\text{V}]$ のため、電圧感度から振幅に換算すると $4.0 \times 10^{-11} \text{ [m]} = 40 \text{ [pm]}$ 程度であることが分かる。



図 4.2 ロックインアンプ

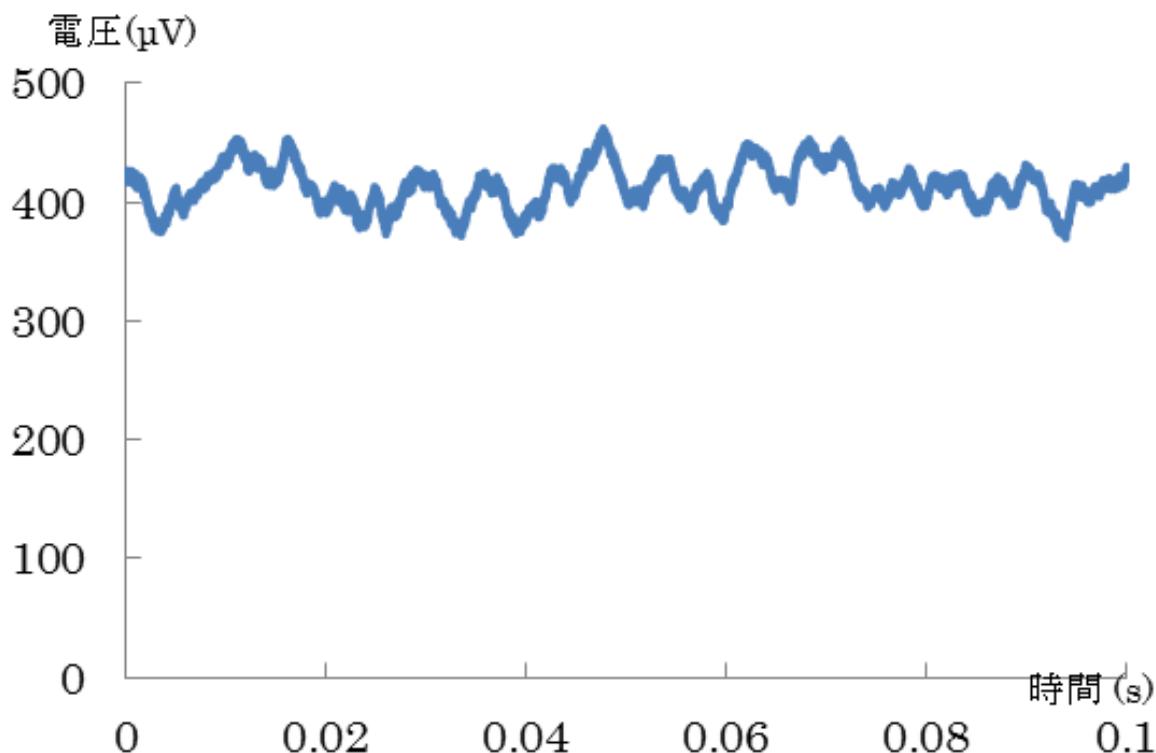


図 4.3 ロックインアンプによる熱振動の計測信号

4.2.1.2 乗算回路

乗算回路の回路図を図 4.4 に示す。乗算回路は、ふたつの波形を掛け合わせることができ。例として、振幅 0.5V、周波数 100Hz の矩形波と振幅 0.5V、周波数 1kHz の同位相の正弦波を掛け合わせたものを図 4.5 に示す。正弦波と矩形波を掛け合わせることで、矩形波が 0V のとき正弦波は出力されないが、矩形波が 1V のとき正弦波が出力されることがわかる。また、入力された正弦波 $V_{p-p\ in}$ は 1V であるのに対し、出力波形は 1/10 となるため $V_{p-p\ out}$ は 0.1V となっている。

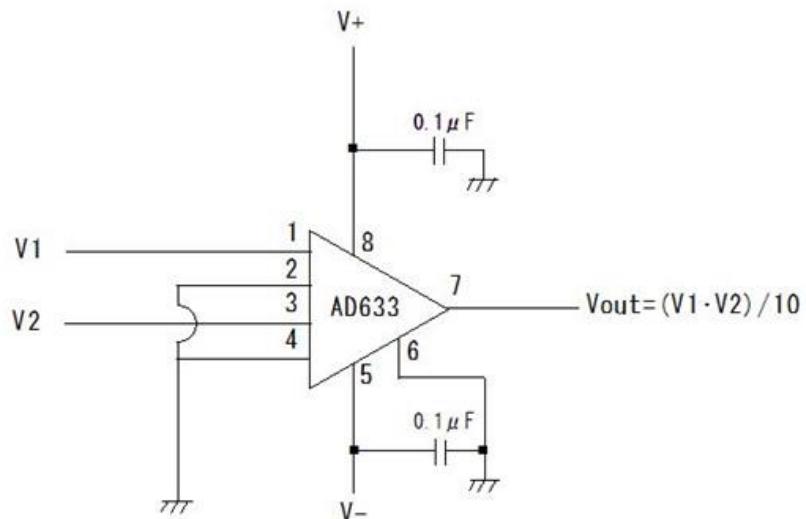


図 4.4 乗算回路

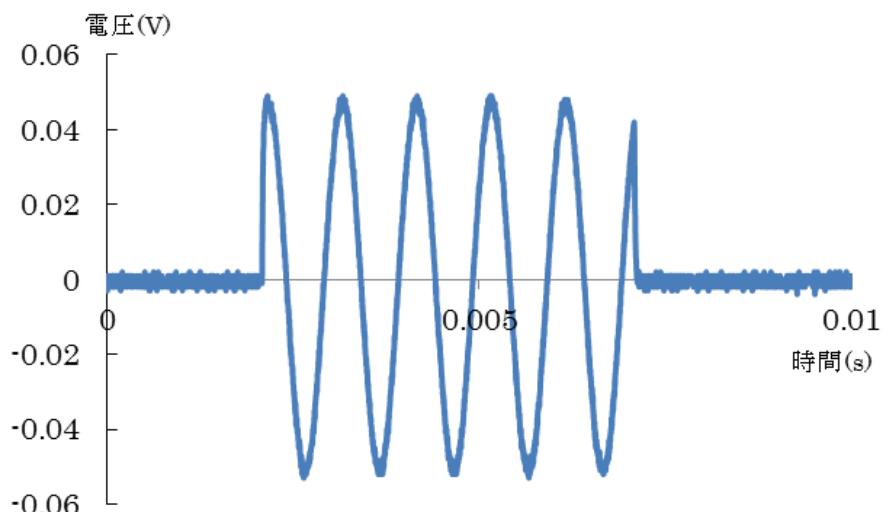


図 4.5 正弦波と矩形波の乗算波形

4.2.2 実験概要

ロックインアンプの参照信号には、入力信号に周波数、位相を自動で合わせる自動同期モードがある。また、入力信号から位相を自由に調節することができる。当初は、この機能を用いて制震を行うことを考えた。ロックインアンプの自動同期信号による制震実験概要を図4.6に示す。

まず、片持ち梁の計測信号をロックインアンプに入力する。ロックインアンプを自動同期モードにすることで、参照信号からは入力信号と周波数、位相の同じ信号が出力される。この自動同期信号とロックインアンプで計測する熱振動の振幅である R 信号を乗算回路によって掛け合わせる。この制震信号をピエゾ素子にかけることで、片持ち梁に外部振動を与えることで制震させる。また、乗算回路に R 信号が入力されているため片持ち梁の振幅が小さくなると制震信号も小さくなる。よって、熱振動がなくなると外部振動もなくなる。

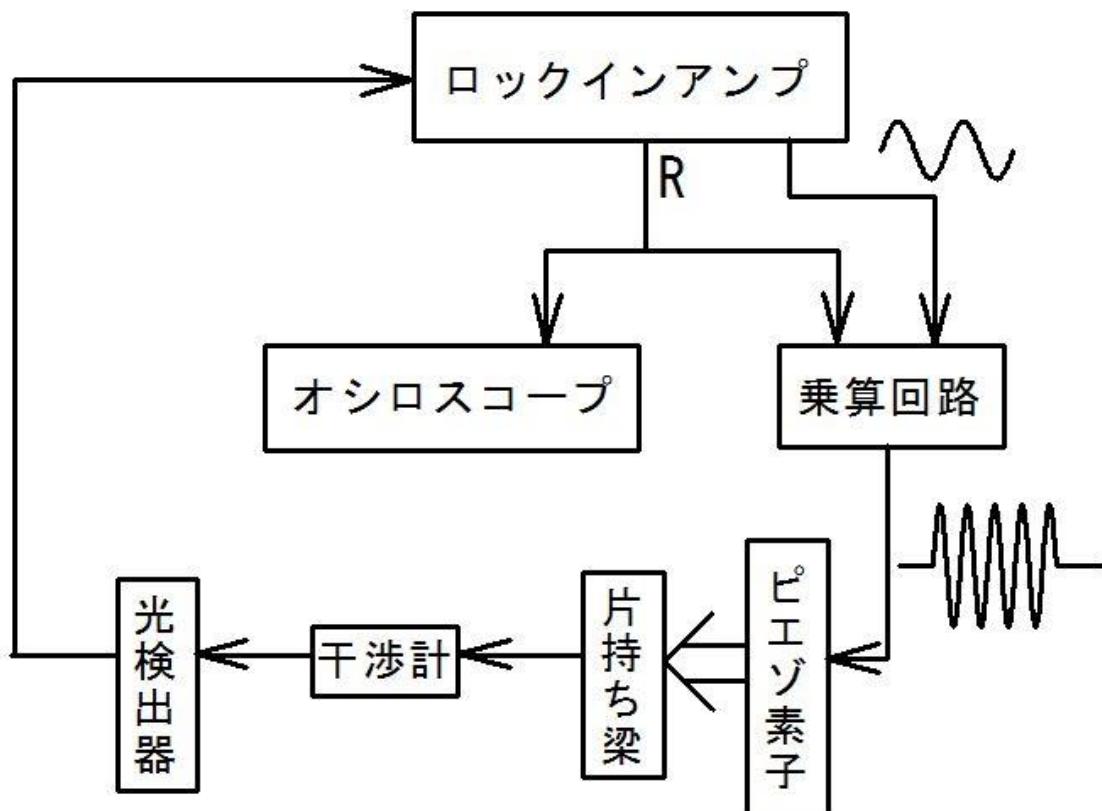


図 4.6 ロックインアンプによる制震実験概略

4.2.3 実験結果及び問題点

実験の結果、ロックインアンプを用いて片持ち梁の計測信号から自動同期信号を取り出すことができなかった。理由は計測信号から自動同期信号を取り出そうとすると、自動同期信号の周波数がぶれてしまい、周波数が変わるために **R** 信号のぶれが大きいため制震信号として使えなかつたためである。

今実験の問題点として、片持ち梁の計測信号が不規則な波形であったためだと考えられる。LED をファンクション・ジェネレータで、発光させた光信号を自動同期することはできた。また、ファンクション・ジェネレータの信号にアテネーターを使って片持ち梁による信号よりも小さくしたが自動同期することができた。このことから、片持ち梁の計測信号はファンクション・ジェネレータの信号のように整った信号ではないため自動同期できなかつたと考えられる。

4.3 帯域フィルターによる制震実験

4.3.1 実験装置

実験装置について、図 4-7 に示す。片持ち梁は接着剤でピエゾ素子の表面に貼り付けられており、真空容器側面に取り付けられた BNC 端子が導線でピエゾ素子に繋がっている。まず、片持ち梁の熱振動をマイケルソン干渉計で計測し、光検出器で電圧信号へ変換され、帯域フィルタに入力する。信号は帯域フィルタを通過することで、片持ち梁の固有振動数ではない不要なノイズが除去される。また、帯域フィルタの位相特性によって、入力信号と出力信号の間に位相差が生じる。これを利用し、位相を 0° から 360° まで変化させた。次の電圧減衰器によって、信号の電圧を小さくしゲイン調整をする。この熱振動より、ノイズを除去し、位相をずらし、ゲイン調整によって電圧の小さくなつた信号をピエゾ素子に入力する。よつて、ピエゾ素子は振動し、ピエゾ素子を支持台としている片持ち梁も振動する。片持ち

梁の熱振動をこの外部振動によって制震させる。また、外部振動は片持ち梁の熱振動が小さくなることで、信号も小さくなり、外部振動も小さくなる。そのため、熱振動がなくなると外部振動もなくなる。

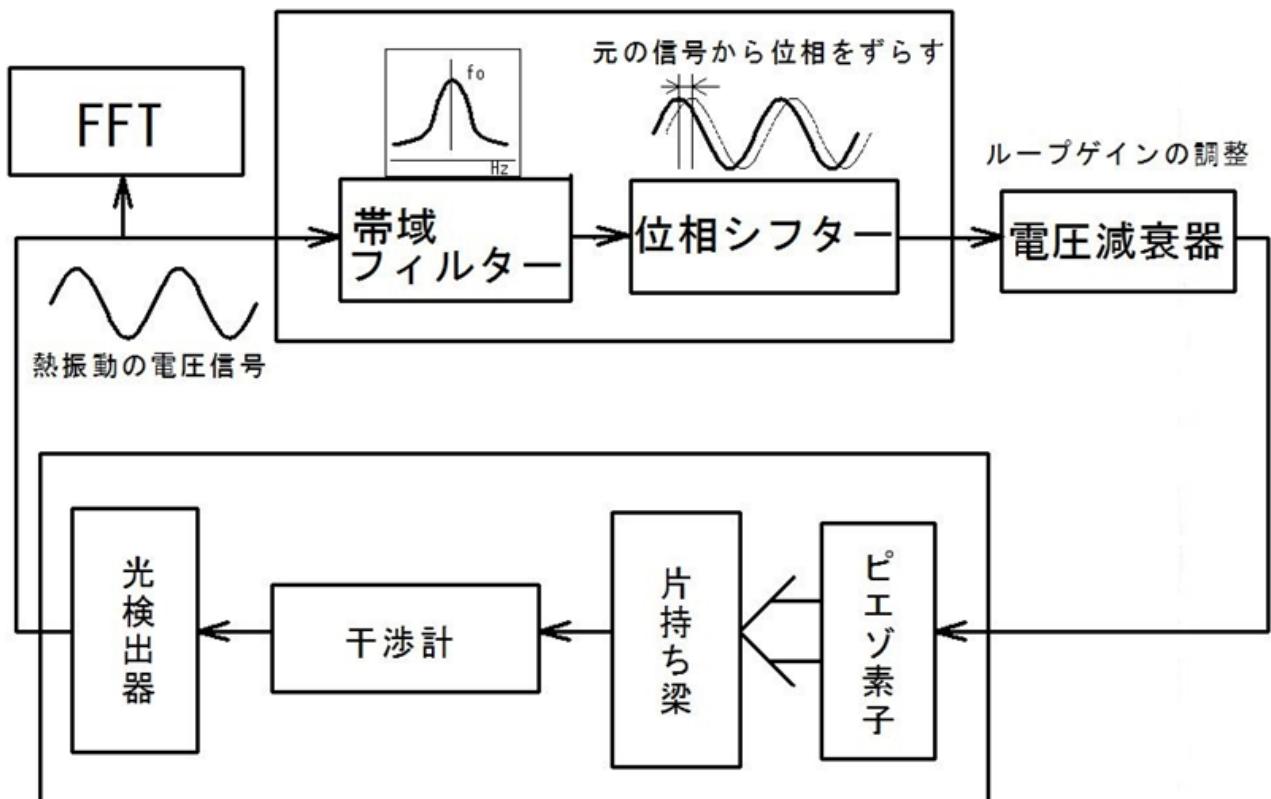


図 4-7 制震ループ概略

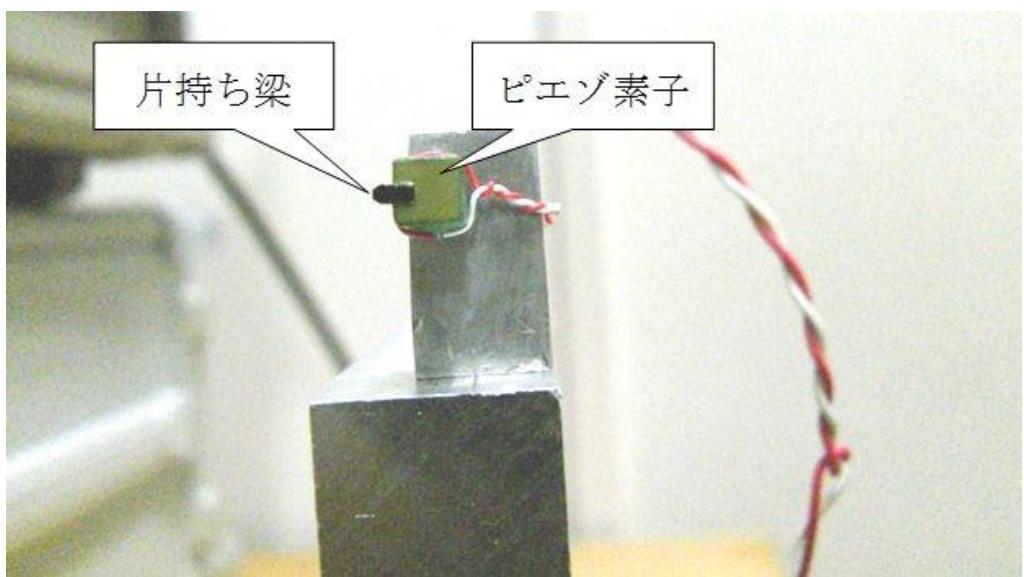


図 4-8 真空容器内の様子

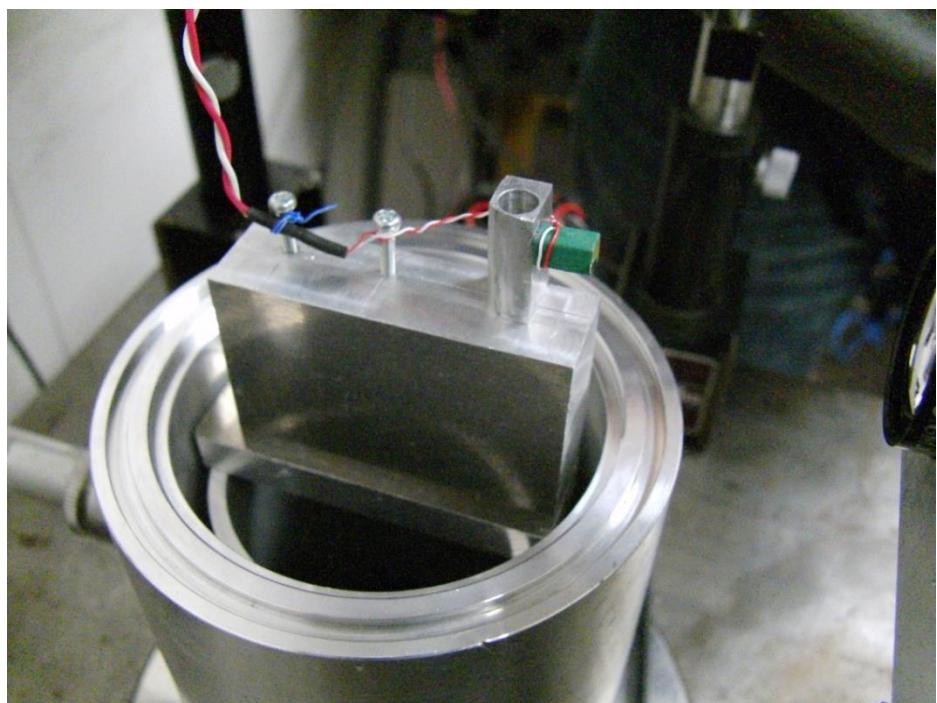


図 4-9 ピエゾ素子に接着した片持ち梁



図 4-10 真空容器カバー内の様子

4.3.2 DCPF による位相シフト

図 4-11 に示した方法で DCPF の CH1 と CH2 の周波数を変更していく、元の信号からのズレをオシロスコープで確認し CH1 と CH2 をどの値にすれば元の信号から何度ずれるかを調べた。

先にも述べた通り実験の際は DCPF を SEPARATE モードに設定し、CH1 の出力をそのまま CH2 の入力に繋げている。実際に実験で設定した数値を表 4-1 に示す。

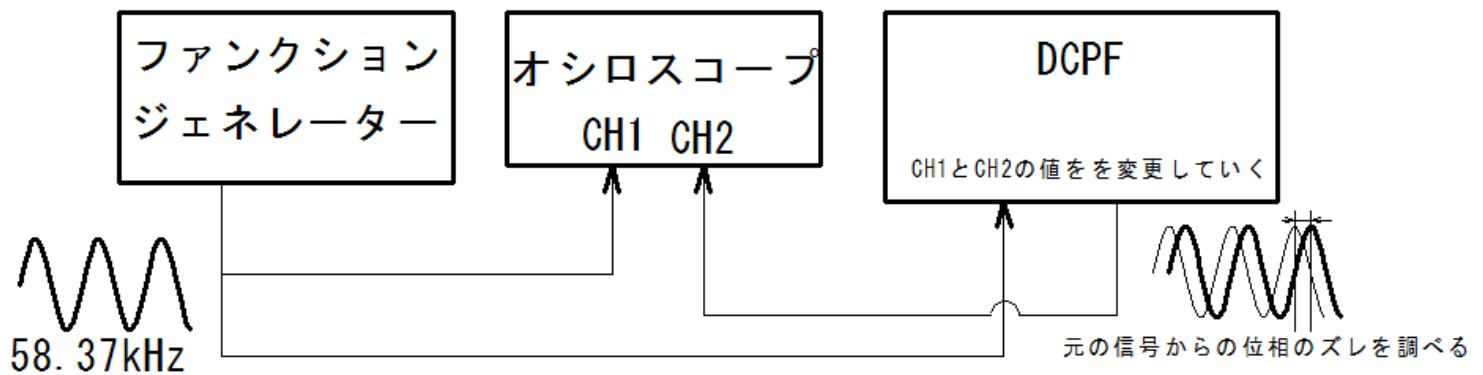


図 4-11 位相のズレを調べる実験の概略

4.3.3 実験結果及び考察

大気圧(0.1MPa)、低真空(30Pa)、高真空(8×10^{-3} Pa)での減衰比と位相の関係をループゲインで比較したグラフを図 4-12、4-13、4-14 に示す。また、位相 100°の点の真空度で比較した減速比とループゲインの関係を図 4-15 に示す。これらのグラフより、最も制震効果のあったのが位相 90°の点であることが確認できる。次に真空度ごとに比較する。大気圧は、最も制震されている点でも減衰比は約 1 程度である。このことから、大気圧の状態ではほとんど制震効果がないと分かる。これは、大気圧では Q 値が低いため外部振動による制震されにくいためであると考えられる。低真空・高真空の状態では、減衰比が 1 よりも小さくなつ

ているため制震効果があると言える。高真空と低真空を比較すると、高真空の方が全体的に減衰比は下回っているため真空度が低いほうが制震効果は高いことがわかる。

表 4-1 DCPF 設定周波数と位相

位相差	CH1(kHz)	CH2(kHz)
0°	60	60
20°	59	60
40°	58	64
60°	58	65
80°	53	64
100°	63	65
120°	53	64
140°	53	65
160°	52	58
180°	51	60
200°	52	60
220°	53	60
240°	53	61
260°	53	62
280°	53	63
300°	54	63
320°	58	60
340°	56	63

※CH1 と CH2 は入れ替えて同じ

図 4-16 は減衰比 2 を基準とした半値幅とループゲインの関係を高真空・低真空で比較したものである。このグラフより、高真空の方が低真空よりも半値幅が狭いことが分かる。これは、高真空の方が Q 値は高いため力の変化に敏感となるため発振しやすくなつたため半値幅が狭いと考えられる。

図 4-17、18、19 は減速比とループゲインの関係を位相 80° 、 100° の実験値と 4.1 に示した数値解析の結果をまとめたグラフである。数値解析の結果より、実験値と比較して同じような傾向が見られるため実験値は正しかったと言える。ただし、数値解析の結果は 0 に向かって減衰しているのに対し、実験値は約 0.3 以下には制震されなかった。この理由として、計測時に常に現れるノイズによって減衰比が 0.3 以下にならないのではないかと考えられる。

また、 Q 値ごとの数値解析の結果と比較することで実験時の Q 値を推測することができることが分かった。今回の場合、大気状態では Q 値 50 以下、ロータリーポンプ(30Pa)では Q 値 300 前後、油拡散ポンプ(8×10^{-3})の Q 値は約 500 前後であると推測できる。

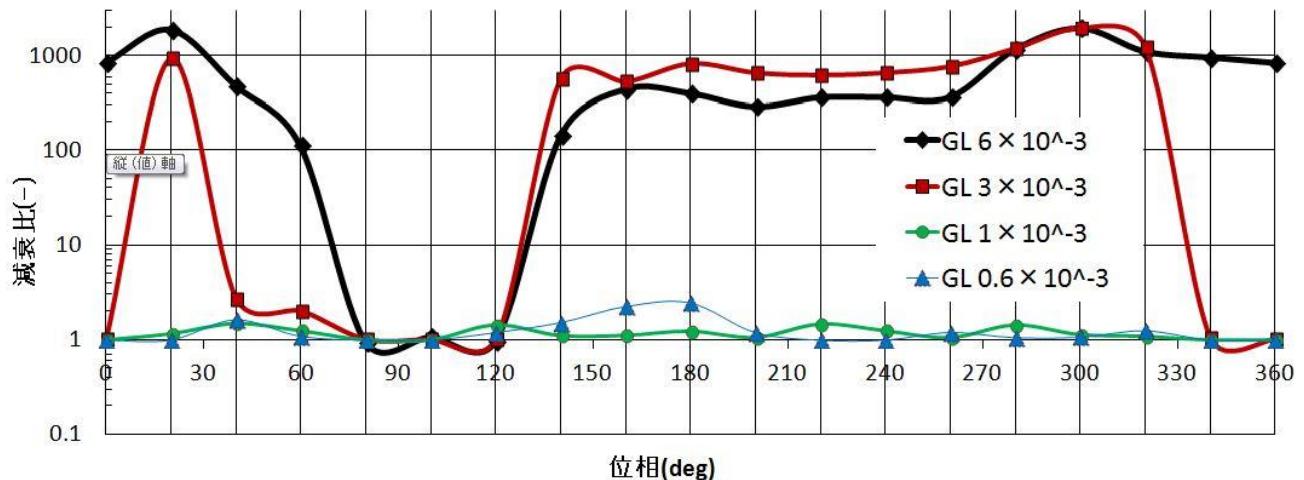


図 4-12 位相差と減衰比の関係 大気圧(0.1MPa)

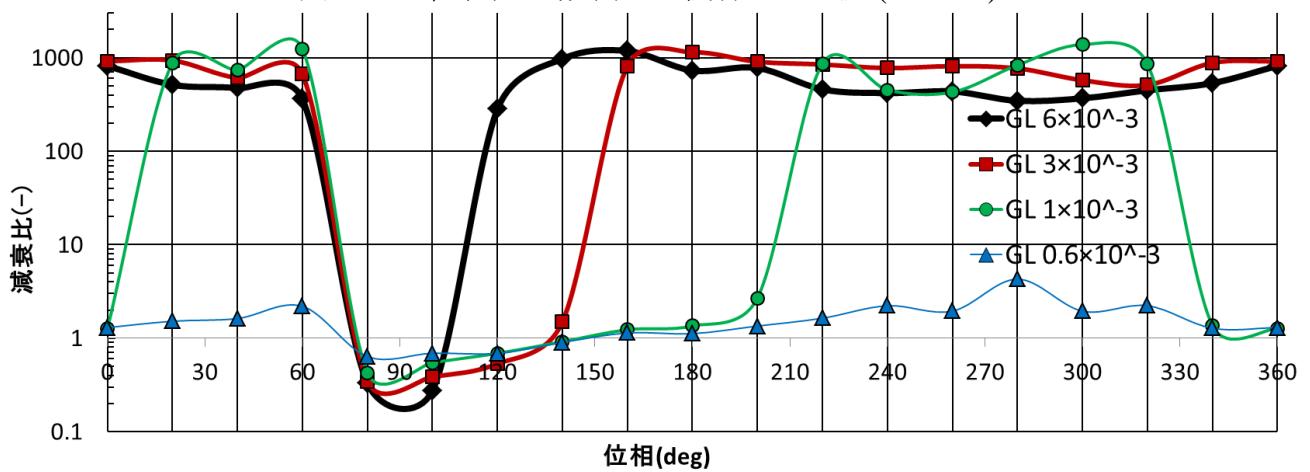


図 4-13 位相差と減衰比の関係 ロータリーポンプ(3Pa)

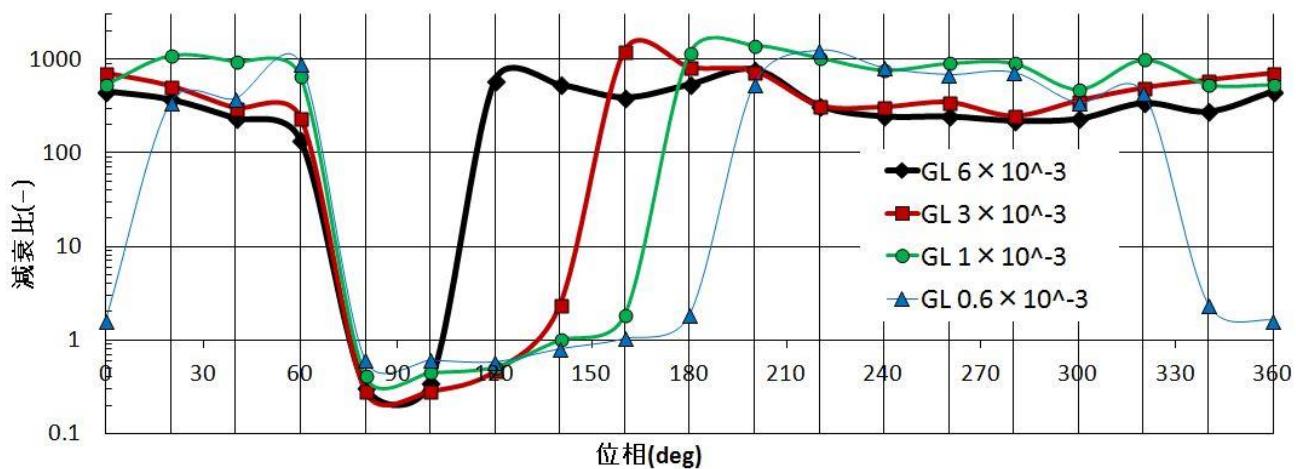


図 4-14 位相差と減衰比の関係 油拡散ポンプ $(8 \times 10^{-3} \text{Pa})$

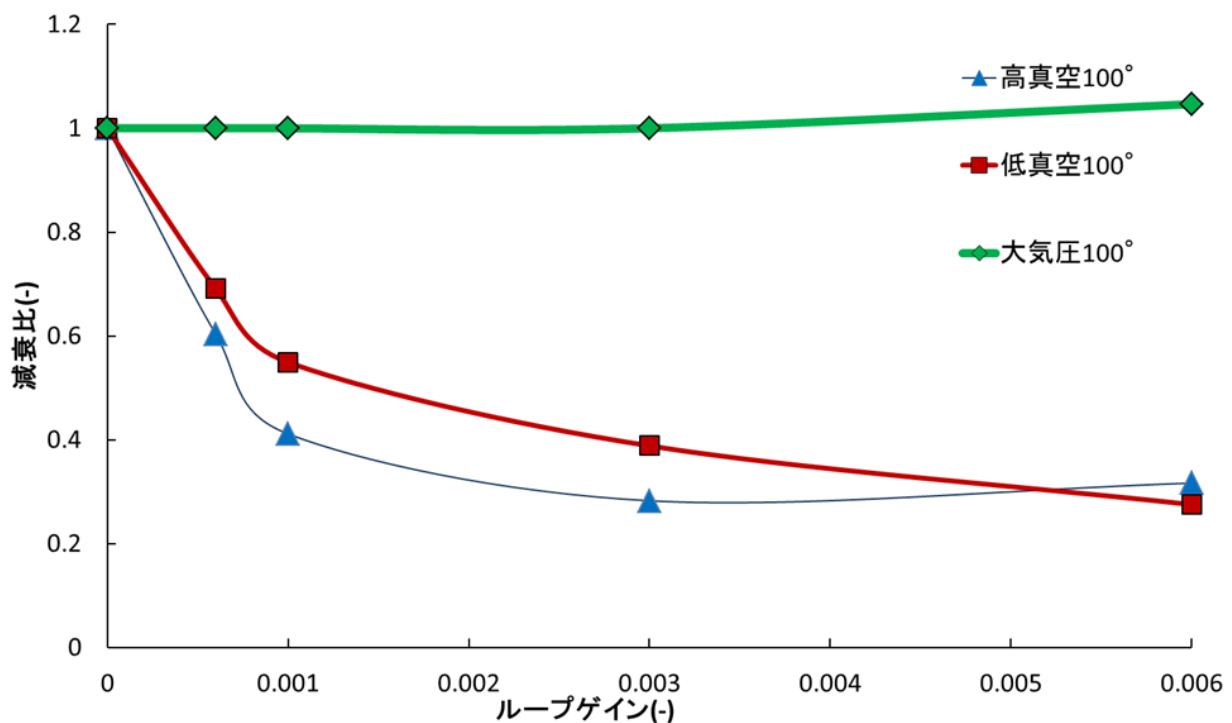


図 4-15 真空度と減衰比の関係

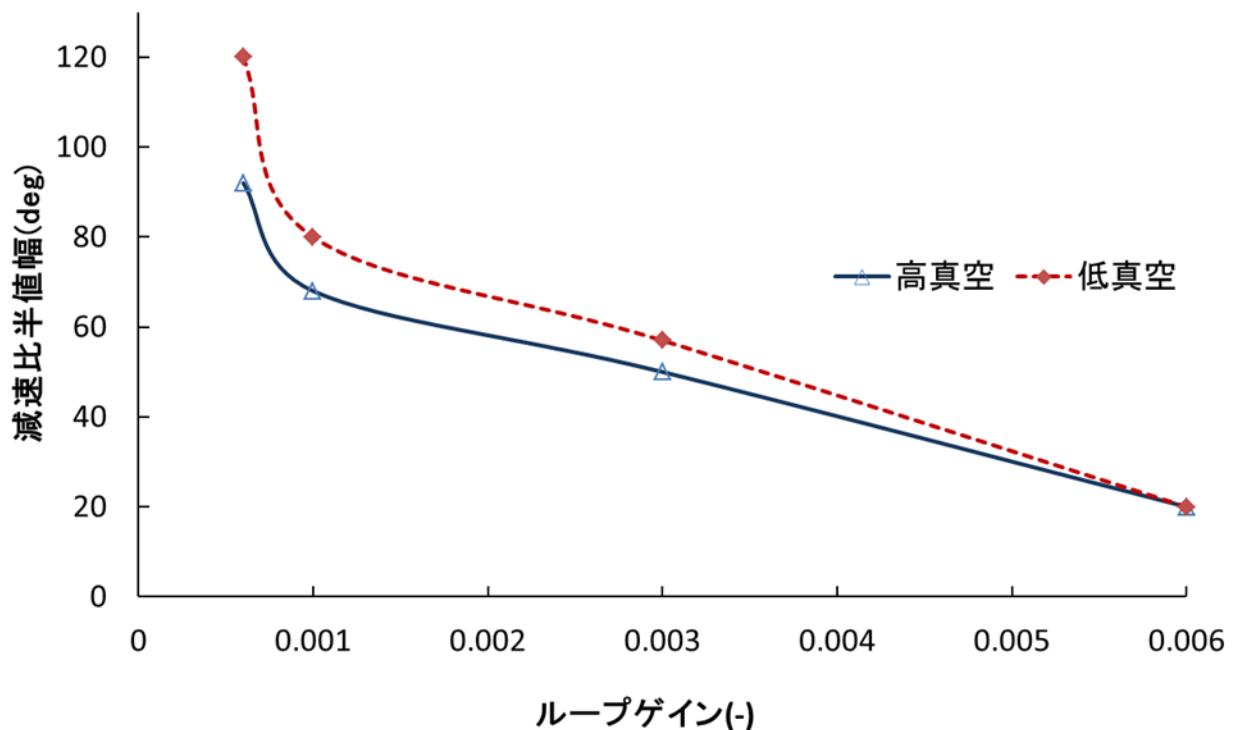


図 4-16 真空度と半値幅の関係

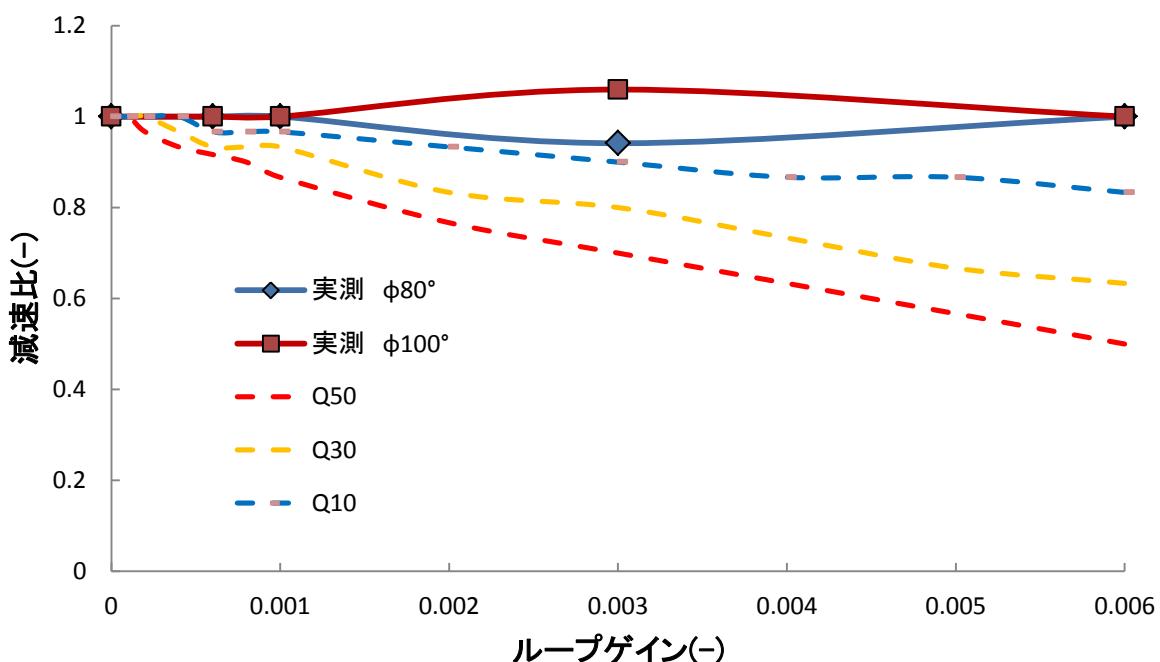


図 4-17 減衰比の実測値と理論値の比較(0.1MPa)

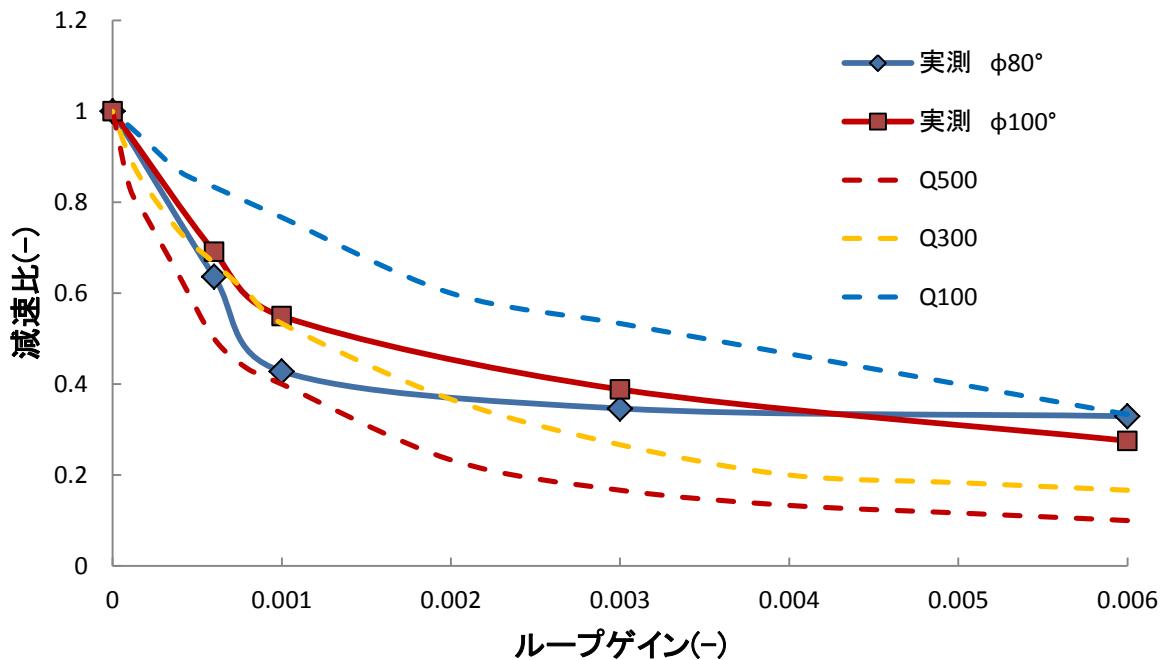


図 4-18 減衰比の実測値と理論値の比較(30Pa)

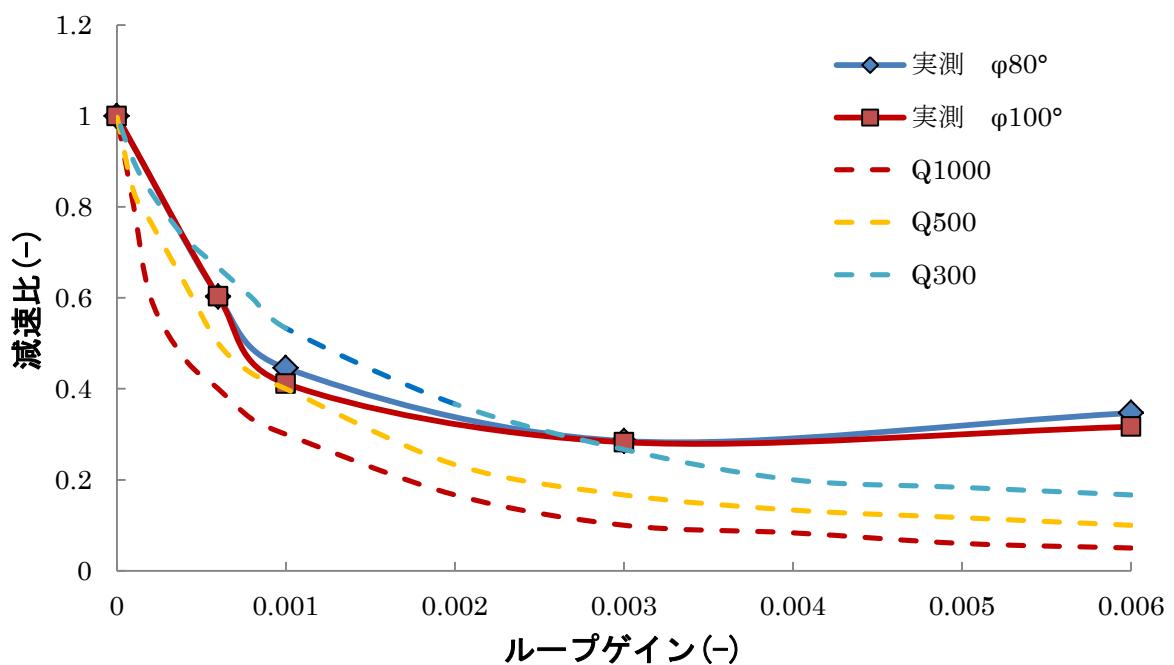


図 4-19 減衰比の実測値と理論値の比較(8×10^{-3} Pa)

第5章. 結言

今回、微小片持ち梁の熱振動の制振の研究を行う熱振動の測定を行うため、マイケルソン干渉計を用いた熱振動の計測システムを製作した。また、実際に熱振動の振幅を測定することができた。測定の結果、片持ち梁の熱振動の振幅は約 3.0×10^{-11} [m] ≈ 30 [pm] だと確認できた。

位相による熱振動の制震実験では、大気圧(0.1MPa)では Q 値が低いためほとんど制震されなかった。低真空(30Pa)、高真空(8×10^{-3} Pa)のとき、もとの熱振動よりも制震されていた。実験結果より位相が 90° ずれた点で最も制震効果があることが分かった。また、最大で熱振動の約 $1/4$ まで制震することができた。低真空、高真空で比較すると高真空の方が制震されていたため、真密度が高いほうが制震効果は高いことが分かった。低真空、高真空を半値幅で比較すると、高真空の方が半値幅は狭かった。これは、高真空の方が Q 値は高いため位相の変化による力の変化に敏感であると分かった。実験値と数値解析による理論値を比較すると、同じような傾向が確認できるため実験値は正しかったと言える。しかし、数値解析の結果では徐々に 0 まで制震されるのに対し、実験値では減速比 0.3 程度から制震されなくなった。この理由として、熱振動の計測時のノイズが制振を妨げているのではないかと考えられる。また、 Q 値ごとの数値解析と比較することで真密度の Q 値を推測することができる。実験結果より、高真空の Q 値は約 1000 程度であることが確認できた。

今後の課題として、測定感度を高めことがある。測定感度が上がることで、制震効果がより高まると考えられる。

参考文献

- 1) 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」 趙世済
- 2) 平成 9 年度 卒業論文 「レーザー干渉極小微小振幅計測法の精度向上に関する研究」
松本俊成 小島真一

謝辞

本研究を行うにあたり数々の御指導及び御助言を頂いた河村良行教授に深く感謝の意を表します。また、実験装置の製作に当たり協力していただいた工作センターの諸先生方々に深く感謝の意を表します。

付録

I . 数値解析に用いた Mathematica の式

II . Mathematica のスクリーンショット

付録

I. 数値解析に用いた **Mathematica** の式

$$k = 2.7$$

$$Q = 1000$$

$$m = k/\omega^2$$

$$\omega = 2\pi \times 58370$$

$$\mu = \text{Sqrt}[(k \times m)]/Q$$

$$\varphi = 0 \times \pi / 180$$

$$A = 0.006/\omega$$

$$B = 30 \times 10^{-9}$$

$$\text{sol} = \text{NDSolve}[\{(m + \mu \times A) \times x''[t] + (\mu + k \times A) \times x'[t] + k \times x[t] == \mu \times \omega \times B \times \text{Cos}[\omega \times t + \pi/2],$$

$$x[0] == 30 \times 10^{-9}, x'[0] == 0\}, \{x\}, \{t, 0, 0.02\},$$

$$\text{MaxSteps} \rightarrow \text{Infinity}]$$

$$\text{Plot}[\text{Evaluate}[x[t] /. \text{sol}], \{t, 0, 0.02\}]$$

II. Mathematica のスクリーンショット

