

平成 30 年度卒業研究

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

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  
15E2056 久恒匠真

# 目次

第1章	緒言.....	1
第2章	本研究で使用了装置と原理.....	2
2.1	シリコン片持ち梁.....	2
2.2	イオンスパッタリング装置.....	2
2.3	オシロスコープ.....	3
2.4	FFTアナライザ.....	3
2.5	ファンクションジェネレータ.....	4
2.6	ロータリーポンプ.....	4
2.7	油拡散ポンプ.....	5
2.8	デジタル画像センサ.....	5
2.9	安定化回路.....	6
2.10	電離真空計.....	6
2.11	ピラニ真空計.....	7
2.12	He-Ne レーザー.....	7
2.13	可変アテネータ.....	8
2.14	デュアルチャンネルプログラマフィルタ.....	8
2.15	ローパスフィルタ.....	9
第3章	ファブリ・ペロー干渉計による熱振動計測.....	10
3.1	ファブ・リペロー干渉計.....	10
3.2	梁の熱振動計測.....	12
3.2.1	レイリー範囲内におけるFP干渉計の構築.....	12
3.2.2	FP干渉計における梁の熱振動計測システム.....	13
3.2.3	理論的な梁の熱振幅.....	14
3.2.4	梁の理論的冷却限界の算出.....	15
第4章	キャビティ冷却.....	16
4.1	キャビティ冷却.....	16
4.2	熱歪みによるキャビティ冷却の理論解析.....	18
4.2.1	複素振幅を用いた理論解析.....	20
4.3	キャビティ冷却の検証実験.....	21
第5章	熱歪み力によるキャビティ冷却の検証.....	23
5.1	熱歪み力によるキャビティ冷却検証システム.....	23
5.2	熱歪み力によるキャビティ冷却検証実験方法.....	23
5.3	熱歪み力によるキャビティ冷却検証実験結果.....	24
5.4	金蒸着時間変更におけるキャビティ冷却の検証.....	24

第 6 章	ハイブリット制振実験.....	27
6.1	ハイブリット制振システム.....	27
6.1.1	位相差とゲインの算出.....	28
6.2	機械的フィードバック制振理論解析.....	30
6.3	ハイブリット制振実験.....	34
6.3.1	ハイブリット制振実験 (金蒸着時間変更) .....	35
第 7 章	結言.....	37
参考文献	.....	38
謝辞	.....	39
付録	.....	40
	学会発表予稿原稿.....	45

# 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、機械振動子を用いている計測機器も含まれている。その機械振動子は、振動子の温度できまる微小な振動をしている。その微小な振動の事を熱振動という。精密振動計測においてはこの熱振動がノイズとなって計測の限界を決める1つの要因となる。この熱振動を極限まで抑えることで、将来的に精密振動計測のさらなる進化が期待できると考える。

本研究の最終的な目標は、マイクロ片持ち梁のもつ熱振動の制振限界を極める事である。熱振動を抑える方法としては、昨年は外力により梁の振動を抑制する方法を用いている。具体的に言うと、梁の土台に取り付けたPZTすなわち電歪素子により、梁の振動を打ち消す慣性力を生じさせ、梁の制振を行うというものである。

今年度は昨年とは異なり内力、具体的にレーザー照射によって発生する熱歪み力により梁の振動を抑制する方法でさらなる熱振動制振を目指した。

## 第 2 章 本研究で使用した装置と原理

### 2.1 微小シリコン片持ち梁

本研究で用いたマイクロ単結晶シリコン片持ち梁(OLYMPUS 社製 OMCL-AC240TN-C3)の SEM 像を図 2.1 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。ばね定数は約 2N/m，固有振動数は 60.0~90.0kHz と個体差がある。本研究では，梁表面のレーザー反射率を上げるため，後述するイオンスパッタ装置(日立製作所製，型番：E-1010)により，梁表面に金コートを実施してある。成膜条件は 180[s]である。

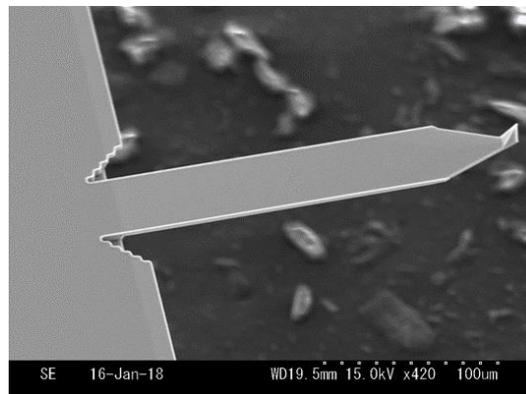


図 2.1 マイクロ単結晶シリコン片持ち梁

### 2.2 イオンスパッタ装置

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，成膜時間 180 秒の成膜条件のもとスパッタを行い，梁表面に金コートを実施した。



図 2.2 イオンスパッタ装置外観

## 2.3 オシロスコープ

オシロスコープの外観を図 2.3 に示す。オシロスコープは、目には見えない時間の経過と共に電気信号（電圧）が変化していく様子をリアルタイムで観測することのできる計測機器であり、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、干渉計の干渉特性を確認する際や感度調整を行う際に用いている。



図 2.3 オシロスコープ外観

## 2.4 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 2.4 に示す。FFT は、入力された信号に含まれる複雑な波形を複数の単純な  $\sin$  波と  $\cos$  波として扱い、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、梁の持つ熱振動を計測した。測定できる最小の単位あたりを指す周波数分解能は、 $125\mu\text{Hz}$ ~ $125\text{Hz}$  と広範囲に設定できる。



図 2.4 FFT アナライザ外観

## 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 WF1942)の外観を図 2.5 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、後述するハイブリット制振実験で使用する。



図 2.5 ファンクションジェネレーター外観

## 2.6 ロータリーポンプ

ロータリーポンプの外観を図 2.6 に示す。ロータリーポンプは高真空にするための粗びきや、油拡散ポンプの排圧に用いられる。最大で  $1.3 \times 10^{-1} \text{Pa}$  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 2.6 ロータリーポンプ外観

## 2.7 油拡散ポンプ

油拡散ポンプの外観を図 2.7 に示す。ロータリーポンプで 0.3Torr(約 4Pa)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蒸気となり、周囲の気体分子を圧縮、圧縮された空気を排気する事で高い真空状態を実現している。装置自体が非常に高温となり、焦げ付いたり周囲のチューブやパイプを焼いてしまう為、冷水パイプに水を流して冷却させる必要がある。



図 2.7 油拡散ポンプ

## 2.8 マルチカメラ対応超高速デジタル画像センサ

マルチカメラ対応超高速デジタル画像センサ CV-3000 シリーズ(KEYENCE 社製)の外観を図 2.8 に示す。CCD カメラ(CV-035)を接続して使用する事ができ、撮影している像から色認識、形状認識、濃淡、重心などを認識する。これにより追尾対象の座標や重心位置を数値データとして表す事が可能である。本研究ではビームスプリッタで分かれたレーザー光の重心を追従し正確にレーザー光を移動させる為に用いる。



図 2.8 マルチカメラ対応超高速デジタル画像センサ外観

## 2.9 安定化回路, 反転バッファ回路

安定化回路, 反転バッファ回路の外観を図 2.9 に示す. FP 干渉計の感度は動作点の位置によって変化する. そのため, 計測を行う場合に最も傾きが大きい位置で動作点を保つ必要がある. また, 反転バッファ回路も用いることで動作点を冷却側だけでなく加熱側にも合わせる事ができる.



図 2.9 安定化回路, 反転バッファ回路の外観

## 2.10 電離真空計

電離真空計の外観を図 2.10 に示す. 最大で  $1.0 \times 10^{-7}$  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  $6.7 \times 10^{-1}$  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  $6.7 \times 10^{-1}$  Pa 以下の時は使用できないため注意する必要がある.



図 2.10 電離真空計外観

## 2.11 ピラニ真空計

ピラニ真空計及び電離真空計の外観を図 2.21 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)へ二段階に分けて真空の引き具合を確認する。本研究では、電離真空計で測定できない  $6.7 \times 10^{-1}$ Pa 以下の真空度の測定に用いる。



図 2.11 ピラニ真空計外観

## 2.12 He-Ne レーザー装置

He-Ne レーザー装置の外観を図 2.12 に示す。本研究の干渉計の光源に用いられており、波長は 632.8nm、出力約 1mW の直線偏光である。

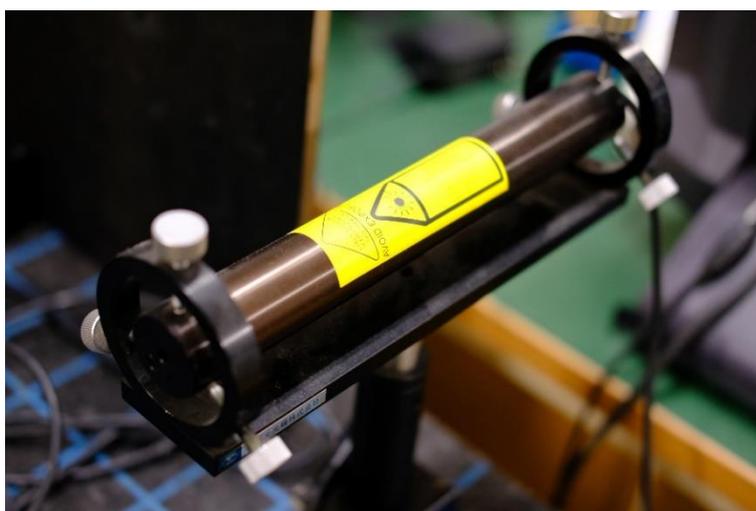


図 2.12 He-Ne レーザー外観

## 2.13 可変アテネータ

可変アテネータの外観を図 2.13 に示す。これにより、レーザーの光量を調節することが可能である。アテネータを回転させることで、透過するレーザー光量値が変化する。

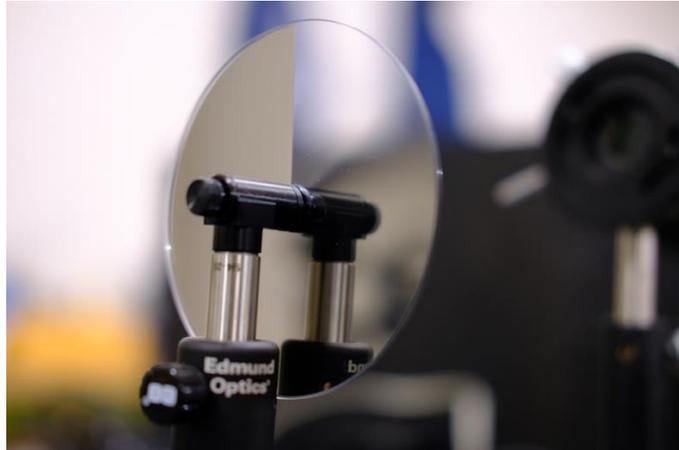


図 2.13 可変アテネータ外観

## 2.14 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 2.13 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)をそれぞれ独立して設定することができ、遮断(中心)周波数を HPF より LPF が高くなるように設定することで、任意の帯域幅のバンドパスフィルタを構成することができる。また、DCPF に干渉光の信号を入力し、フィルタに通すことで位相をずらすことができる。ロックインアンプに DCPF 通過後の信号を入力信号とし、APD からの干渉光の信号を参照信号とすることで、位相の調整を行った。梁の制振を行うにあたり、梁の振動に対して  $90^\circ$  遅らせた信号をフィードバックさせる必要がある。

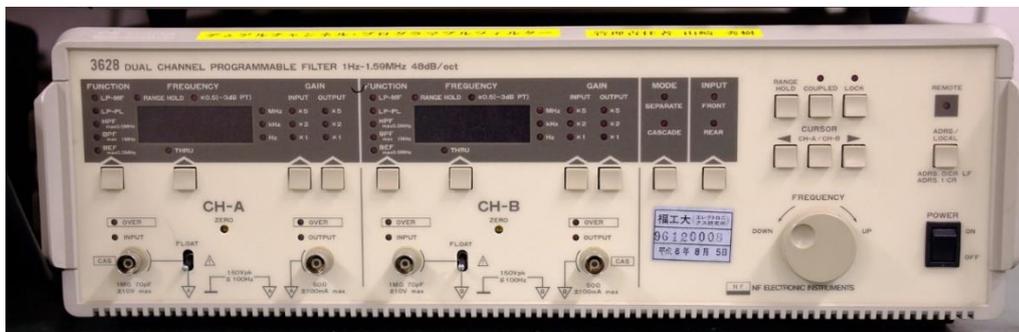


図 2.14 デュアルチャンネルプログラマブルフィルタ外観

## 2.15 ローパスフィルタ

ローパスフィルタの外観を図 2.15 に示す。ハイブリット制振を行う際に、DCPF だけでは位相を  $90^\circ$  遅れて出力させることはできなかった。そのため、LPF を用いて調整することにより正確に  $90^\circ$  遅らせた信号を出力することが可能となった。



図 2.15 ローパスフィルタ外観

## 第3章 ファブリ・ペロー干渉計

ファブリ・ペロー干渉計（以下 FP 干渉計）は重力波検出等に用いられる高感度な光干渉計である。梁の持つ熱振動を計測するにあたって、信号変化を大きく得られるファブリ・ペロー干渉計(以後、FP 干渉計)を用いた。

### 3.1 ファブリ・ペロー干渉計による熱振動計測

FP 干渉計の干渉特性を図 3.1 に示す。また FP 干渉計の概略を図 3.2 に示す。一对の透過ミラーにより構成される FP 干渉計は、ミラーにレーザー光が入る際に光が反射する反射光と同時に透過し、もう 1 枚のミラーによって反射する透過光が生じる。キャビティ長を変化させることで、それらの光が多重干渉し、干渉光に明暗が生じる。本研究では、一对のミラーの代わりに金コートで反射率を約 92%まで上げた梁と誘電体多層膜ミラー(前期は反射率約 85%、後期は反射率約 95%を使用)で FP 干渉計を構成した。

FP 干渉計によって生成された干渉光を光検出器で読み取り、電圧として変換された信号をオシロスコープでモニタリングすると図 3.3 で示すような干渉特性が得られる。FP 干渉計のよる干渉光反射率は一般的に次式で表される。

$$R_i = \frac{4R\sin^2(\delta/2)}{(R-1)^2 + 4R\sin^2(\delta/2)} \quad (3-1)$$

式(1)を用いると、干渉特性の最小値は 0%となる。今回は、反射率の異なる梁とミラーで FP 干渉計を構成するため、異なる反射率を用いた式を導出する。光の波は、オイラーの公式より表すことができる。オイラーの公式は

$$e^{i\delta} = \cos(\delta) + i\sin(\delta) \quad (3-2)$$

となり、

ミラーによって反射した光は、 $A_i$  を初めにミラーに入る際の光量、 $\sqrt{R}$ を電界の強さとした時に

$$A_r = A_i\sqrt{R}e^{i\delta} \quad (3-3)$$

と表せる。

FP 干渉計は、反射光と透過光が多重干渉しあうため、 $n$  回目の波の光量は、

$$A_{rn} = A_i(1 - R_1)\sqrt{R_2}(\sqrt{R_1R_2})^{n-1}e^{ni\delta} \quad (3-4)$$

となる。また、反射における干渉光は、

$$\sum_{n=0}^{\infty} A_{rn} = A_i \frac{(1 - R_1)\sqrt{R_2}e^{i\delta}}{1 - \sqrt{R_1 R_2}e^{i\delta}} + A_r \quad (3-5)$$

となり，干渉の比率を示す干渉強度率は，

$$\frac{A_r}{A_i} = \frac{\sqrt{R_2}e^{i\delta} - \sqrt{R_1}}{1 - \sqrt{R_1 R_2}e^{i\delta}} \quad (3-6)$$

オイラーの公式より，複素数における干渉強度率は，

$$\frac{A_r^*}{A_i^*} = \frac{\sqrt{R_2}e^{-i\delta} - \sqrt{R_1}}{1 - \sqrt{R_1 R_2}e^{-i\delta}} \quad (3-7)$$

と表せる．

よって，異なる反射率における FP 干渉計の干渉光反射率は次式で示すことができる．

$$R_I = \frac{A_r}{A_i} \times \frac{A_r^*}{A_i^*} = \frac{R_1 + R_2 - 2\cos\delta\sqrt{R_1 R_2}}{1 - 2\cos\delta\sqrt{R_1 R_2} + R_1 R_2} \quad (3-8)$$

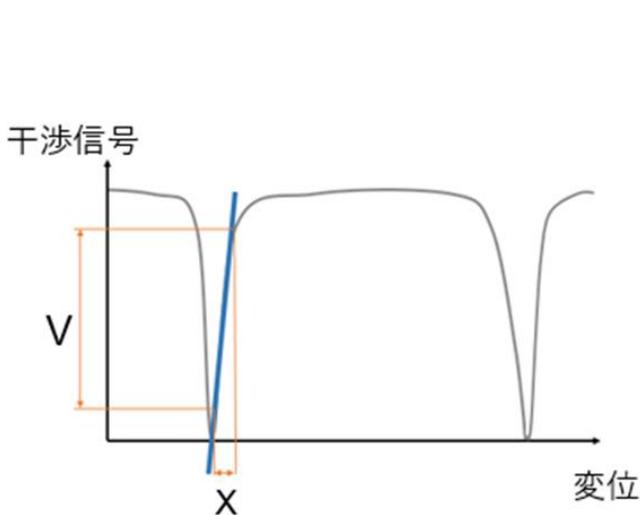


図 3.1 FP 干渉特性

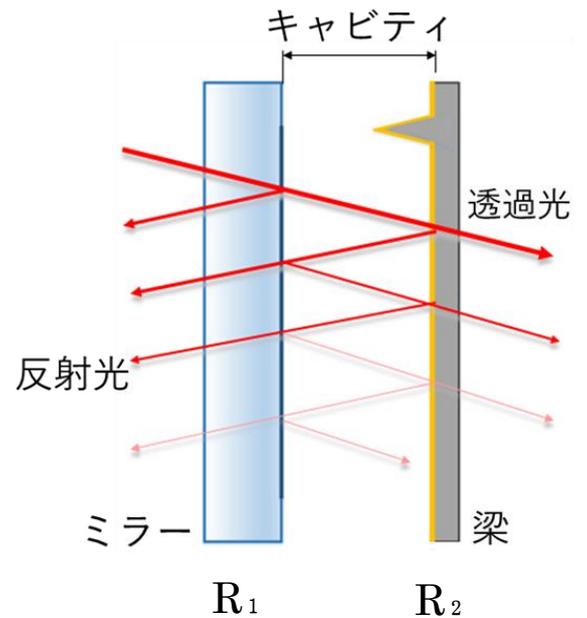


図 3.2 FP 干渉計による多重干渉

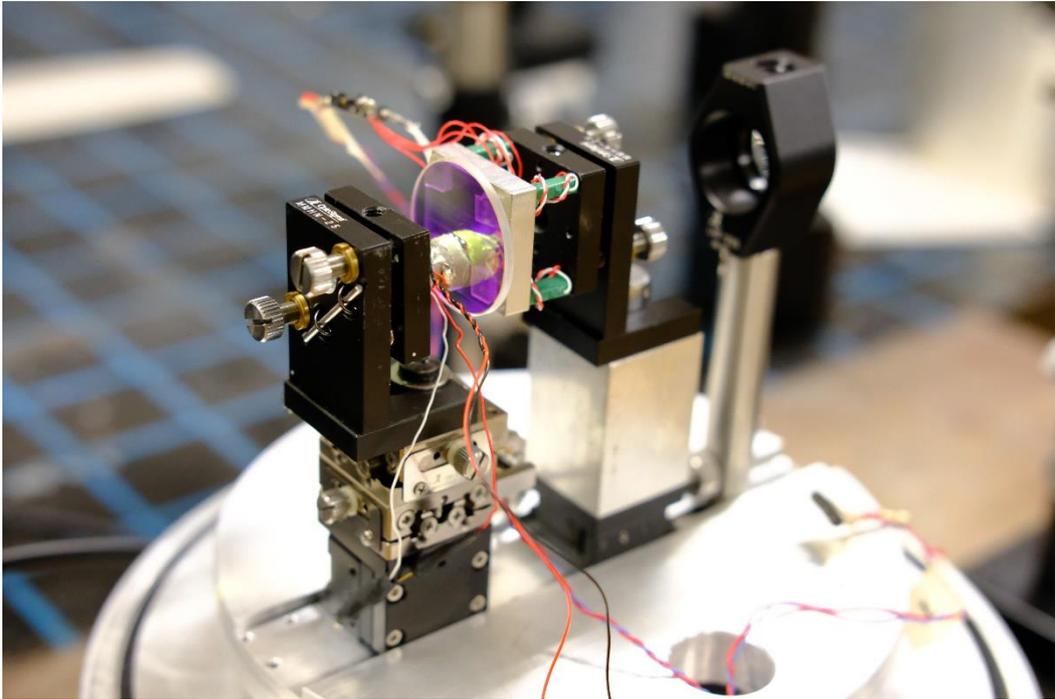


図 3.3 ファブリ・ペロー干渉計外観

## 3.2 梁の熱振動計測

### 3.2.1 レイリー範囲における FP 干渉計の構築

本研究では、干渉計の光源に He-Ne レーザーを用いている。梁の持つ熱振動を計測するには、レーザー光を梁の先端に当てる必要があるが、レーザー径は 6mm と梁の幅 40 $\mu\text{m}$  に比べて大きいため、レーザー光をレンズで集光させた。レーザーの集光径は次式で表すことができる。

$$d = \frac{4\lambda f}{\pi D} \quad (3-10)$$

$\lambda$  は He-Ne レーザーの波長、 $f$  はレンズの焦点距離、 $D$  はレーザーの集光前の直径を表している。ここで、 $\lambda=632.8\text{nm}$ 、 $f=80\text{mm}$ 、 $D=8\text{mm}$  とする。理論的なレーザー集光径は式(9)より計算すると、 $d=8\mu\text{m}$  となり、梁の幅 40 $\mu\text{m}$  よりも小さく、問題ないことが分かる。また、レンズで集光された光は焦点付近に達すると、ごく微小な範囲で球面波から平面波に変化する。この範囲をレイリー範囲といい、レイリー長は次式から理論的に求めることができる。

$$L = \frac{2d}{D/f} = \frac{2d}{F} \quad (3-11)$$

$d$  はレーザーの集光径,  $D$  はレーザーの集光前の直径,  $f$  はレンズの焦点距離,  $F$  は F 値を表している. ここで,  $d=8\mu\text{m}$ ,  $D=8\text{mm}$ ,  $f=80\text{mm}$  とする. 式(3-11)より計算すると, レイリー範囲  $L=80\mu\text{m}$  となる. 本研究では, このレイリー範囲において FP 干渉計を構成する必要があり, 非常に微小な範囲であることが分かる. レイリー範囲内で構成するためには, 梁, ミラー各々に位置調整用の装置が備わっており, アライメント調整により生成された干渉縞, および, ビームスプリッタに戻る光などを基に手動で梁とミラーの間隔を調整する必要がある.

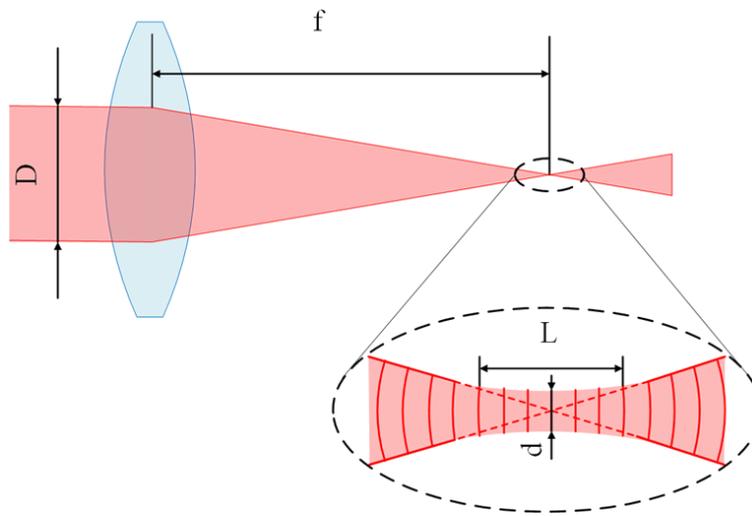


図 3.4 レイリー範囲の概要

### 3.2.2 FP 干渉計による熱振動計測システム

FP 干渉計による梁の熱振動計測システムの概略図を図 3.5 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. 干渉した光は再び戻り, ビームスプリッタを介して光検出器 (APD) で検出される. 検出された干渉光の信号は, オシロスコープ上で計測し, 干渉計の持つ干渉特性をここで読み取ることができる. 梁の熱振動を計測するにあたり, 最も干渉計の感度の良い箇所に梁の位置を調整する必要があるため, 安定化回路を用いて梁に取り付けられた積層圧電素子 (PZT) に電圧をかけ, 検出された干渉特性の高感度部にくるよう梁の位置を調整した. 調整後の干渉光を APD で再度読み取り, FFT で周波数解析を行うことで梁の持つ熱振動を計測した. 周波数解析をして得られた PSD を固有振動数付近で面積分することによって, 熱振動を算出した.

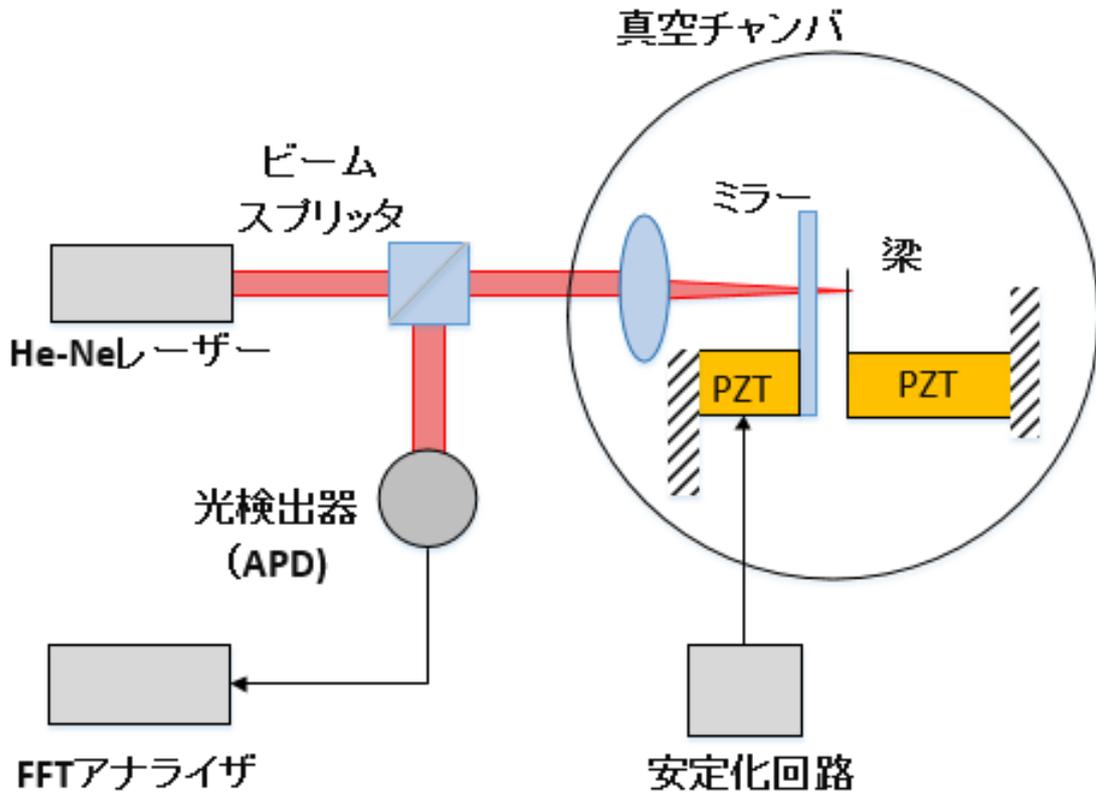


図 3.5 FP 干渉計による梁の熱振動計測システム

### 3.2.3 理論的な梁の熱振幅

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。

$$k_B T = U + K \quad (3-12)$$

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。

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。

$$\frac{1}{2}k_B T = U \quad (3-13)$$

$$\frac{1}{2}k_B T = K \quad (3-14)$$

式(13)は、バネによるエネルギーより

$$\frac{1}{2}k_B T = \frac{1}{2}k \langle x \rangle^2 \quad (3-15)$$

と表すことができる。式(14)を変形すると

$$\langle x \rangle = \sqrt{\frac{k_B T}{k}} \quad (3-16)$$

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(16)より梁の振幅の実効値は $\langle x \rangle \approx 45\text{pm}$  となる。これは、梁のもつ理論的な熱振幅となる。

### 3.2.4 梁の理論的冷却限界の算出

今回、先行研究を参考に微小片持ち梁の理論的冷却限界を算出した。片持ち梁の熱振動の振幅は式(3-1)より実効温度より求めることができる。理論的冷却限界は

$$T_{eff,min} = \frac{2T_0}{x_p(\omega)/x_n(\omega)} \quad (6-16)$$

で表すことができる[1].

ここで  $T_0$ は室温(300K),  $x_p(\omega)$ 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。後述するハイブリット制振実験で梁の理論的冷却限界を算出する。

## 第4章 キャビティ冷却

本研究ではレーザー照射による熱歪みによる内力により、梁の熱振動を制振している。これをキャビティ冷却とする。今回はキャビティ冷却の原理や理論解析について述べる。

### 4.1 キャビティ冷却

今回、FP 干渉計を用いて梁の振動計測したところ、図 4.1 に示すように共振カーブの部分が発振しており、梁の振動に影響を及ぼすことが判明した。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て振動計測を行う。図 4.2 に示すように高感度部は2つある。そのうち、キャビティ長が長い方で梁の振動が加振される加熱現象が起こり、キャビティ長が短い方で梁の振動が制振される冷却現象が起こることが確認された。

図 4.3 に示すように、今回計測した微小片持ち梁は表面に金コートを施しているため、金の薄膜とシリコンの二重構造（バイメタル, Bimetal）であり、微小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（光熱効果）。この光熱効果の熱伝導により微小片持ち梁の振動に対して位相が遅れて作用する。これにより、キャビティ長の加熱現象と冷却現象が引き起こされる。梁が加熱及び冷却した要因について、先行研究を参考にし、次のように考察した(3)(4)(5)。

梁は通常、熱振動しており、梁が振動するとミラーと梁の距離、つまりキャビティ長が変化する。図 4.4 に示すようにキャビティ長が変化すると、図 4.5 に示すように梁に伝わる光量が変わります。それにより、光の熱の変化が梁に伝わり梁が歪む力が生じる。また、その生じる力は熱伝導の関係で梁の振動と位相がずれることになり、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伴い起こるこ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。

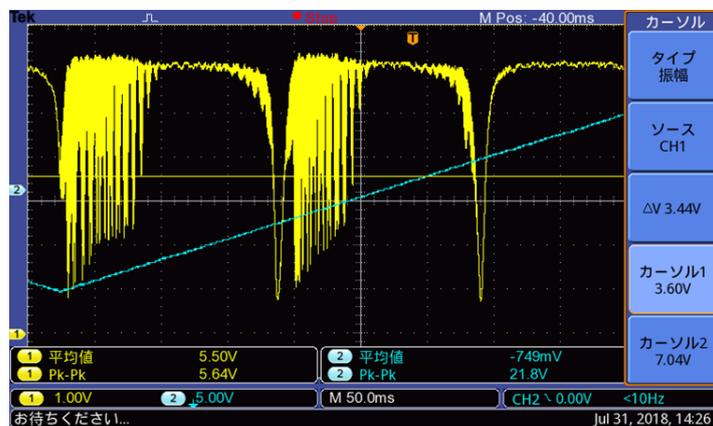


図 4.1 キャビティ冷却・加熱が確認された FP 干渉信号

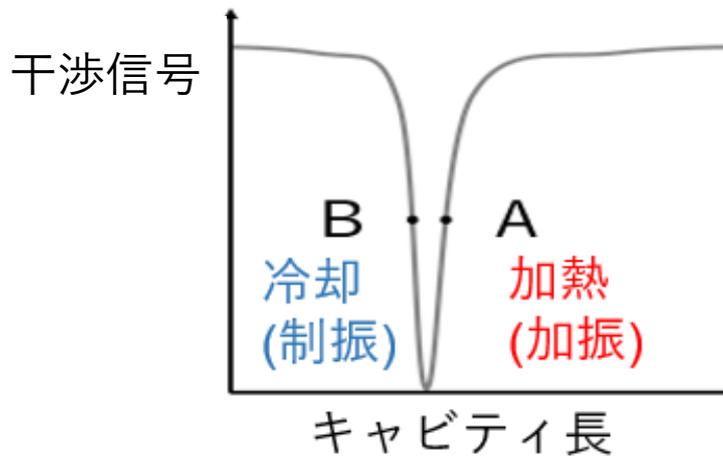


図 4.2 FP 干渉特性における加熱（加振）・冷却（制振）が起こる動作点

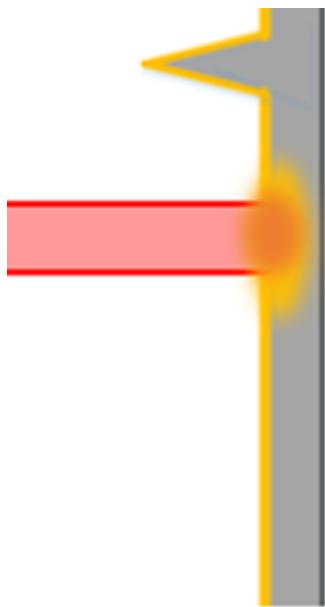


図 4.3 レーザー光による梁の熱膨張の概要

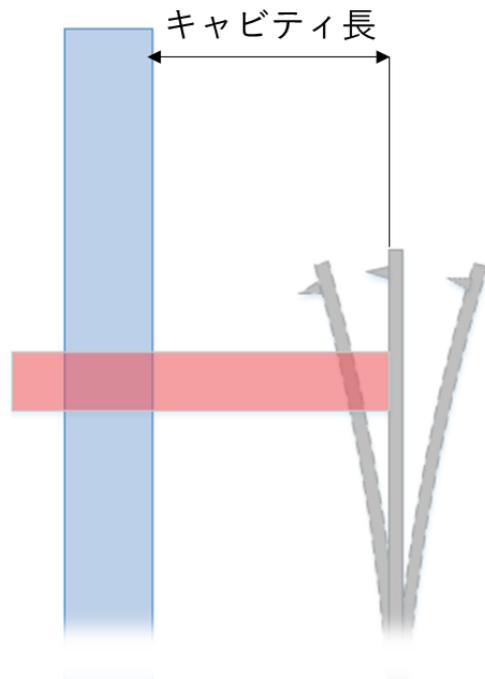


図 4.4 梁の熱振動とキャビティ長の変化

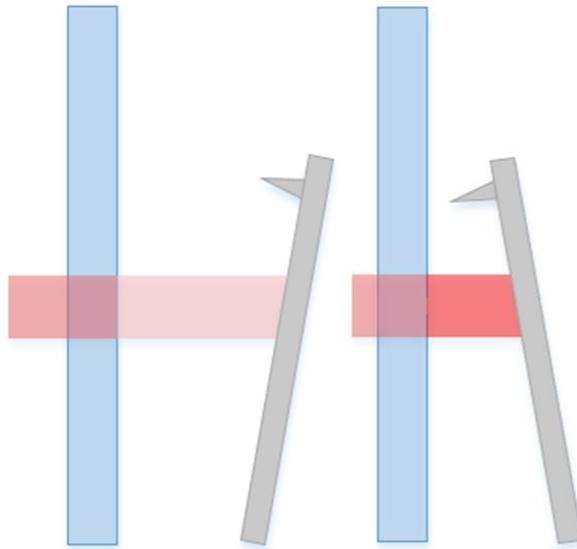


図 4.5 キャビティ長変化に伴う光量変化の概要

## 4.2 熱歪みによるキャビティ冷却の理論解析

熱歪み力によるキャビティ冷却の概要を図 4.6 に示す。キャビティ冷却は熱歪みが原因で、梁の表面がレーザー光の熱によって膨張し、熱歪み位置で梁が曲がると考え、理論解析を行った。微小片持ち梁は、一般的にマスばねダンパ系でモデル化する事が可能である。熱歪みによるキャビティ冷却の運動モデルを図 4.7 に示す。M を微小片持ち梁全体の等価質量、m をレーザーが当たっている箇所から先端にかけての微小片持ち梁の等価質量、 $\mu$  は減衰係数、k はばね定数とする。M-m, m についてそれぞれ運動方程式を立てると、

$$F(t) - f(t) = (M - m)\ddot{x}(t) + \mu\dot{x}(t) + kx(t) \quad (4-1)$$

$$F(t) = m(\ddot{x}(t) + \ddot{y}(t)) \quad (4-2)$$

となる。ここでの  $F(t)$  をマイクロ片持ち梁の熱振動を引き起こすランジュバン力、 $f(t)$  を M-m が m から受ける力、 $x$  を梁の根本からレーザー照射箇所までのマイクロ片持ち梁の微小振動振幅、 $y$  をレーザー照射箇所から梁の先端までのマイクロ片持ち梁の微小振動振幅とする。式(4-1)、式(4-2)を解くと、

$$F(t) = M\ddot{x}(t) + m\ddot{y}(t) + \mu\dot{x}(t) + kx(t) \quad (4.3)$$

と表すことが出来る。式(4-3)を解くことで熱歪み力の理論解析を行う。

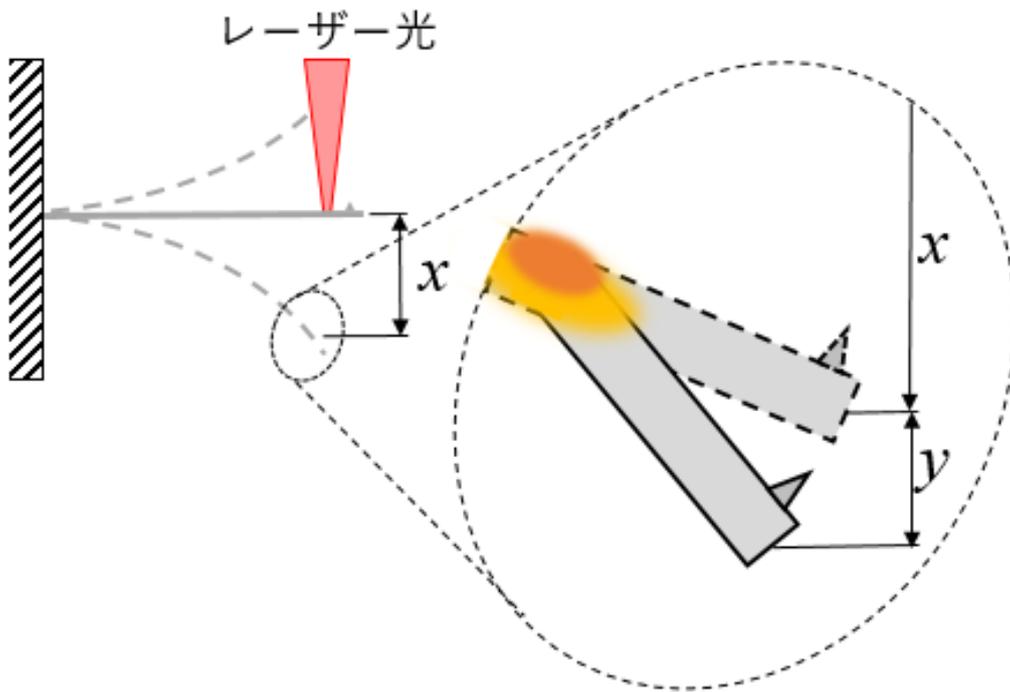


図 4.6 熱歪み力によるキャビティ冷却概要図

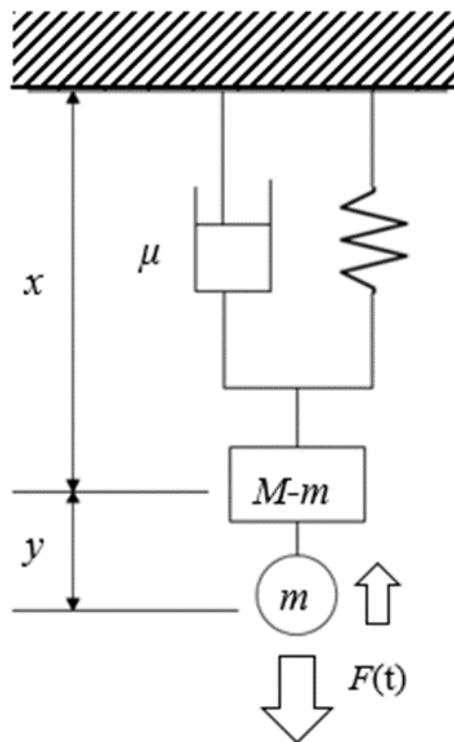


図 4.7 熱歪みによるキャビティ冷却の運動モデル

### 4.2.1 複素振幅を用いた理論解析

式(4-3)中の各値の複素振幅を考える事で解析を行う。位相を含む複素振幅を用いた、各値の周期的記述は、

$$F(t) = \hat{F}(\omega)e^{j\omega t} \quad (4.4)$$

$$x(t) = \hat{x}(\omega)e^{j\omega t} \quad (4.5)$$

$$y(t) = r_1 x(t)e^{j\phi} = r_1 \hat{x}(\omega)e^{j(\omega t + \phi)} \quad (4.6)$$

となる。ここで  $j$  は虚数単位、 $\omega$  は角周波数である。また、微小片持ち梁の品質係数(Q 値 : Quality factor)  $Q$ 、ならびにばね定数  $k$  は

$$Q = \frac{m\omega_0}{\mu} = \frac{\tau_0}{T} \approx \frac{\Delta\omega}{f_0} \quad (4-7)$$

$$k = m\omega_0^2 \quad (4-8)$$

で表される。ここで  $\omega_0$  は微小片持ち梁の固有各振動数、 $\mu$  は減衰係数、 $\tau_0$  は梁を励振し振幅が励振直後の振幅の  $1/e$  となるまでの時間 (時定数)、 $T$  は振動の周期、 $\Delta\omega$  はパワースペクトル密度の半値全幅(FWHM)であり、 $f_0$  は梁の固有振動数 ( $f_0 = \omega_0/2\pi$ ) である。式(4-4)-(4.8)を用いて式(4-3)を整理すると、

$$\hat{F}(\omega) = \hat{x}(\omega)(k - M\omega^2 + j\mu\omega - mr_1\omega^2 e^{j\phi}) \quad (4-9)$$

となる。したがって、実際の微小振動の複素振幅  $\hat{x}(\omega)$  は

$$\hat{x}(\omega) = \frac{\hat{F}(\omega)}{(k - M\omega^2) + j\mu\omega - mr_1\omega^2 e^{j\phi}} \quad (4-10)$$

となる。更に、 $\hat{x}(\omega)$  の共役複素数  $\bar{\hat{x}}(\omega)$  は、

$$\bar{\hat{x}}(\omega) = \frac{\bar{\hat{F}}(\omega)}{(k - M\omega^2) + j\mu\omega - mr_1\omega^2 e^{j\phi}} \quad (4-11)$$

となる。

実際のマイクロ片持ち梁の微小振動のパワースペクトル密度は、式(4-10)と式(4-11)をかけ合わせる事で得られるため、

$$x(\omega)^2 = \frac{F(\omega)^2}{M^2} \quad (4-12)$$

$$= \frac{F(\omega)^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{\omega\omega_0}{Q}\right)^2 + r^2\omega^4 - 2r\omega^2\{M(\omega_0^2 - \omega^2)\cos\phi + \frac{\omega\omega_0}{Q}\sin\phi\}}$$

ここで  $\phi = \frac{\pi}{2}$  ,  $r = \frac{m}{M}r_1$  とおく

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

となり、後述する機械的フィードバックの理論解析結果と同様の結果となった。R はレーザー光量  $r_1$  と熱歪み位置  $m/M$  の積である為、レーザー光量と熱歪み位置は機械的フィードバックのフィードバックゲインに相当するものである事が分かった。よって、キャビティ冷却と機械的フィードバックは同じようなメカニズムであることが分かった。

### 4.3 キャビティ冷却の検証実験

熱歪み理論解析の結果、レーザー光量が熱振動に影響を及ぼす事が分かった為、図 3.4 のキャビティ冷却検証装置でレーザー光量を変化させた際のレーザー光量とパワースペクトル密度の関係を検証した。真空度  $5 \times 10^{-3}$  (Pa), FP 感度 0.214(mV/pm), 反射率 85%の誘電体多層膜ミラーと、反射率約 90%の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する事によってパワースペクトルピーク値を求めた。また、この実験ではレーザー光量を 50[ $\mu$ w]から 1000[ $\mu$ w]の間で光量を変化させ、各値につき 5 回試行し標準誤差を求めた。熱歪みによるキャビティ冷却の検証実験の実験結果を図 4.5 に、熱歪みによるキャビティ冷却のレーザー光量変化によるパワースペクトルピーク値の関係を図 4.6 に示す。レーザー光量を増加させるとパワースペクトルピーク値が減少している事が確認された。更に、モデル化を行った熱歪みによるキャビティ冷却の理論式に適当な数値を当てはめ理論カーブを作成した所、このグラフの形と同じような傾向が得られた。このことから熱歪みの理論解析は概ね正しいといえる事が分かった。

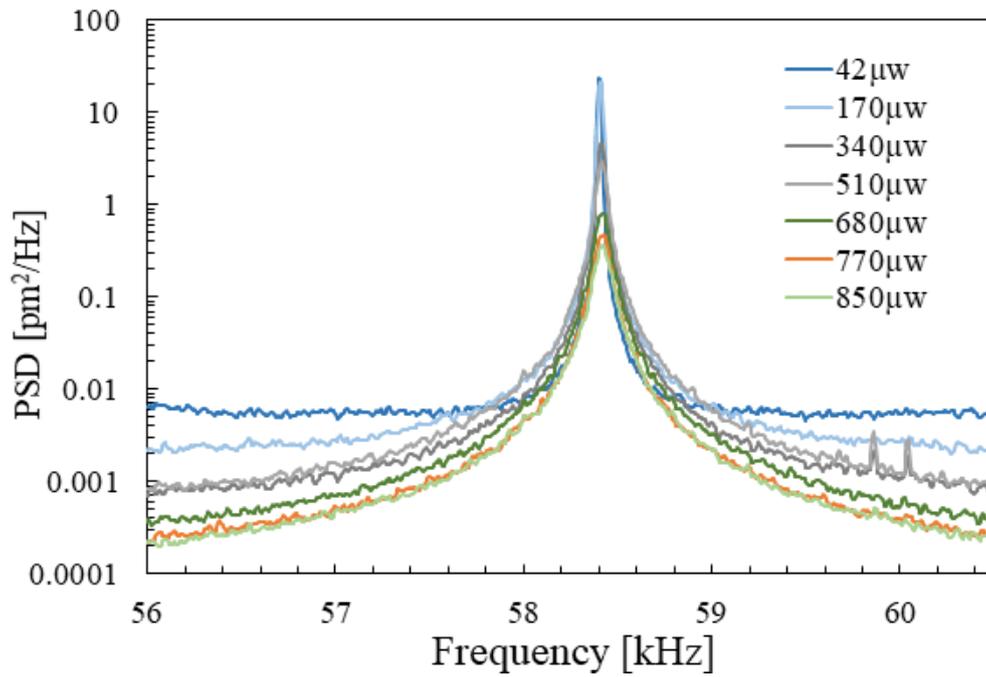


図 4.6 キャビティ冷却検証実験結果

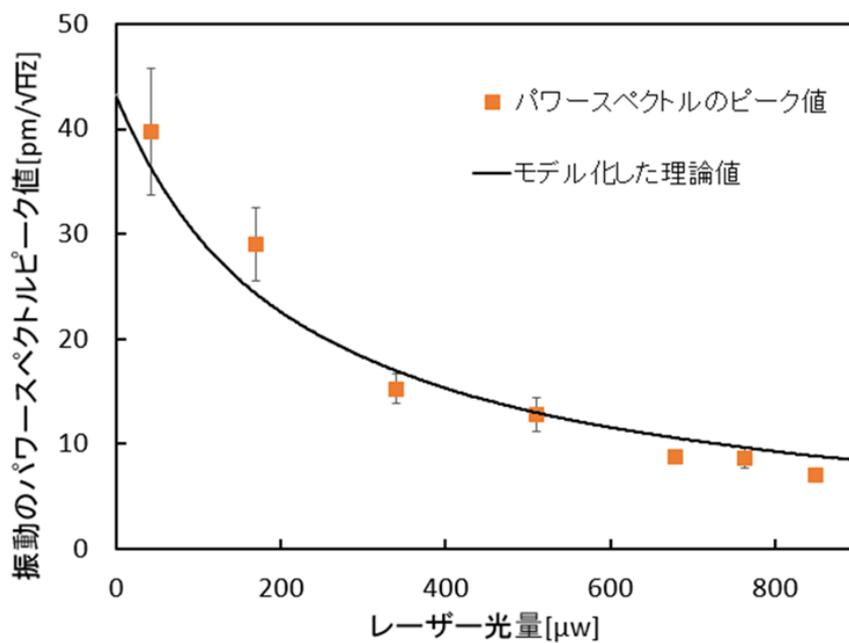


図 4.7 レーザー光量とパワースペクトルピーク値の関係

## 第5章 熱歪み力によるキャビティ冷却の検証

今回は熱歪み力によるキャビティ冷却の理論式について、レーザー光量や熱歪み位置を変更し、熱振動の推移について検証した。

### 5.1 熱歪み力によるキャビティ冷却検証システム

熱歪み力によるキャビティ冷却検証システムについて図 5.1 に示す。安定化回路を用いて微小 FP 干渉計の感度が最大になるように、キャビティ長を調整する。最大感度の FP 干渉光を光検出器で読み取り、信号を FFT アナライザへ送り周波数解析を行い、熱振動を算出する。レーザー光が梁にあたる位置の調節は、マルチカメラ対応超高速デジタル画像センサ(CV-3000)を用いてビームスプリッタで分かれた光の重心を追尾しながら熱歪みの発生位置を決めた。

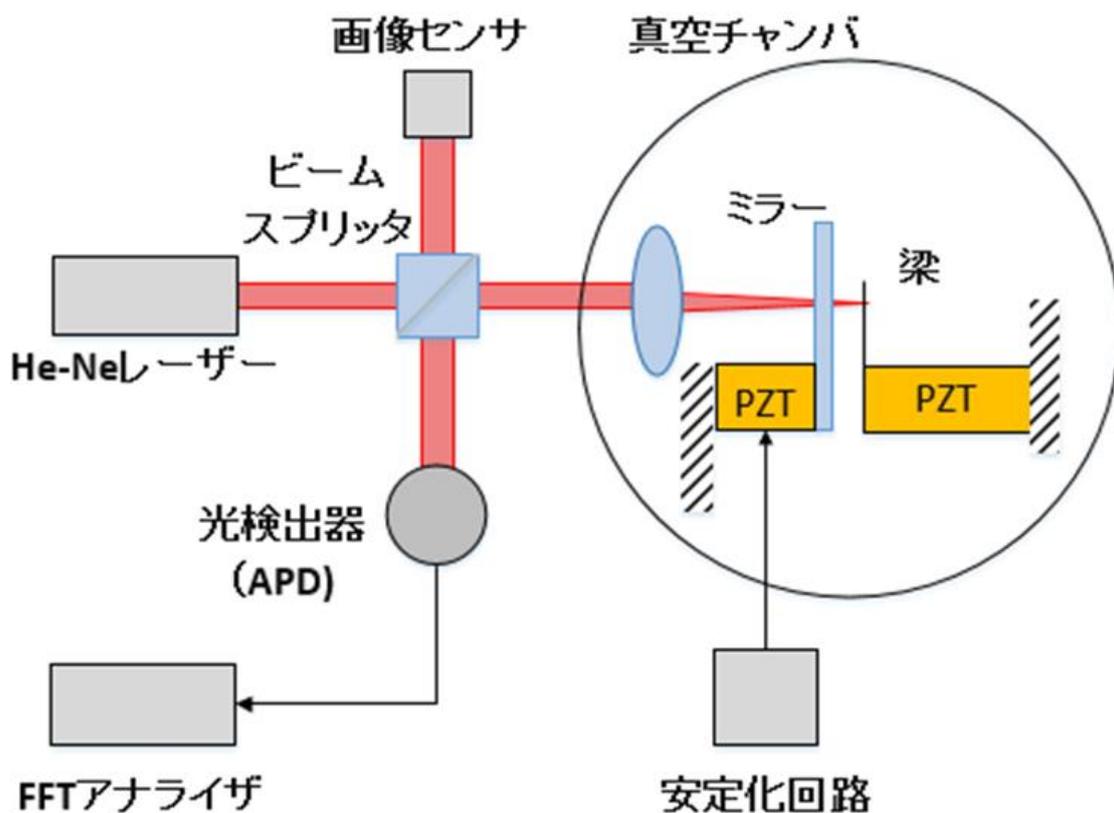


図 5.1 熱歪み力によるキャビティ冷却検証システム

## 5.2 熱歪み力によるキャビティ冷却検証実験方法

今回、熱歪み力の理論式を元に、熱歪みが発生する位置(m/M 値)や光量を変更して、梁の熱振動がどう推移するのかを調査する。熱歪みが発生する位置を精密に移動させる際にマルチカメラ対応型高速デジタル画像センサを使用する。マルチカメラ対応型高速デジタル画像センサのレーザー光の追従画面を図 5.2 に示す。焦点距離 8mm の CCD カメラで接写し、重心のズレは 5 回の平均値を求めた。結果的に  $5.6\mu\text{m}$  の間隔で梁の上を移動する事が可能となった。熱振幅を梁の先端から  $34\mu\text{m}$  で統一する為、1 次振動モードの片持ち梁の理論式を用いて、校正を行った。



図 5.2 マルチカメラ対応型高速デジタル画像センサのレーザー光の追従画面

## 5.3 熱歪み力によるキャビティ冷却検証実験結果

熱歪み力によるキャビティ冷却検証実験での熱歪み発生位置と熱振動振幅の関係を図 5.4 に示す。この実験結果により、光量が大きければ大きいほど熱振幅は小さくなり、熱歪みが起こる場所が梁の土台に近づくにつれ、熱振幅が小さくなる傾向が得られた。よって、微小片持ち梁の熱振動はレーザー光量と熱歪み位置に依存している事が判明した。

## 5.4 金蒸着時間変更におけるキャビティ冷却の検証

片持ち梁にはイオンスパッタリング装置にて 180[s]の金蒸着を行っているが、この金蒸着の時間を変化させた際のキャビティ冷却の検証を行った。図 5.5 に金蒸着時間 360[s]の梁による FP 干渉特性を示す。冷却側の感度が金蒸着時間 180[s]の梁よりも先

鋭的であることが判明した。

図 5.6 にキャビティ冷却における、金蒸着時間の変化による梁の振動のパワースペクトル密度の関係を示す。金蒸着時間が長いほど、パワースペクトルのピーク値は下がり、スペクトル幅は広がる傾向が得られた。今回は新たに 90[s],360[s]の金蒸着時間の微小片持ち梁を作成し、熱振幅を求めた。その結果は金蒸着時間 90[s]の梁の熱振幅が 24.4[pm]、360[s]の梁の熱振幅が 3.5[pm]となり、蒸着時間の増加により熱振幅の減少が確認された。よって蒸着厚さの増加はレーザー光量増加と同じような働きがあり、金蒸着の厚さは微小片持ち梁の熱振幅に影響を及ぼすことが判明した。

また、金蒸着時間 720[s]の梁と金蒸着時間 1400[s]の梁を作成した。金蒸着時間 720[s]の梁では先鋭的な干渉特性が得られたが、1440[s]の梁では干渉特性自体が得られなかった。

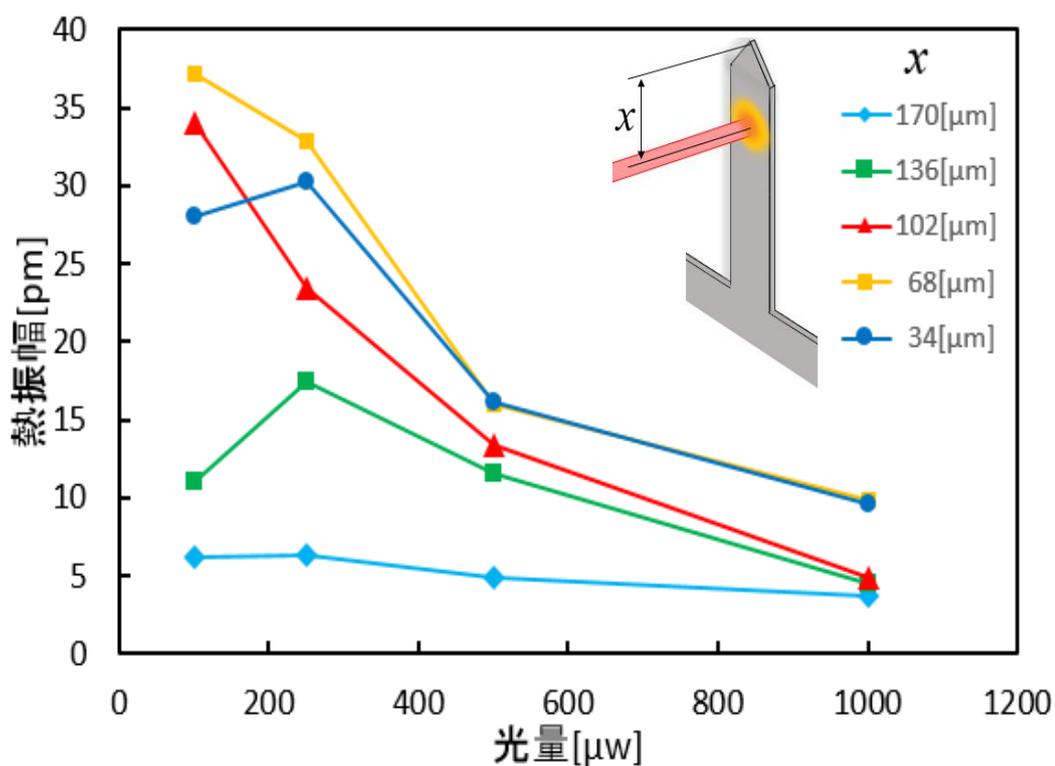


図 5.4 熱歪み発生位置におけるレーザー光量と熱振幅の関係

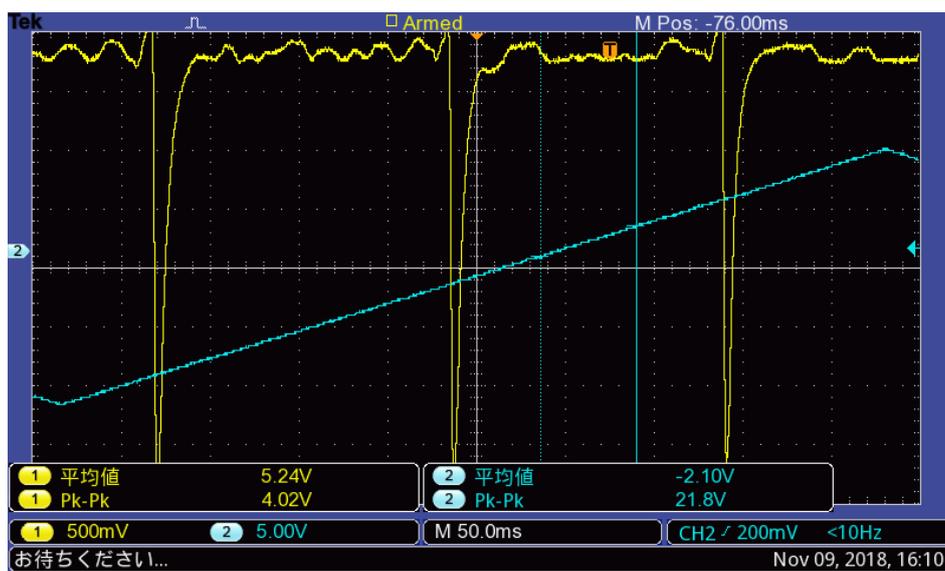


図 5.5 金蒸着時間 360 秒の FP 干渉特性

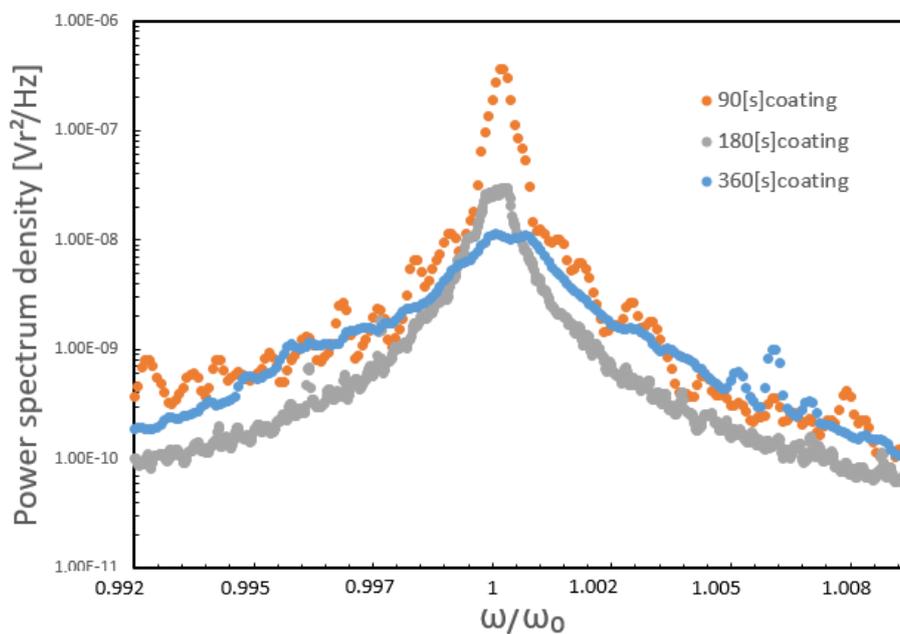


図 5.6 金蒸着時間によるパワースペクトル密度の比較

## 第6章 ハイブリット制振実験

微小片持ち梁の内力によるキャビティ冷却に加えて、昨年行ってきた外力による機械的フィードバック制振を同時に行う。この実験をハイブリット制振実験とする。

### 6.1 ハイブリット制振システム

微小片持ち梁のハイブリット制振システムについて、図 6.1 に示す。安定化回路を用いて FP 干渉計の感度が最大となるようにキャビティ長を調整する。干渉光を光検出器で読み取り、信号を FFT アナライザと DCPF(デュアルチャンネルプログラマブルフィルター)へ送る。干渉光信号は、DCPF に内蔵されている帯域通過フィルタと増幅器により、梁の固有振動数付近の信号のみ通過し、任意の倍率に増幅される。信号はさらに LPF (ローパスフィルター) により梁の固有振動数より換算する信号の位相から 90deg 遅れるように調節する。この信号を微小片持ち梁を支持する単層圧電素子へ印加する。単層圧電素子は微小片持ち梁の熱振動の位相から 90deg 遅れて振動する。この振動により梁の熱振動を打ち消す仕組みとなっている。フィードバックループゲイン  $g$  の大きさは DCPF 内の増幅器によって変えることができる。ゲインが大きすぎるために、梁が発振した場合はループ内に電気アテネータを挿入することで発振を抑えることが可能である。最終的に FFT アナライザにより信号を周波数解析することによって、制振を確認する。

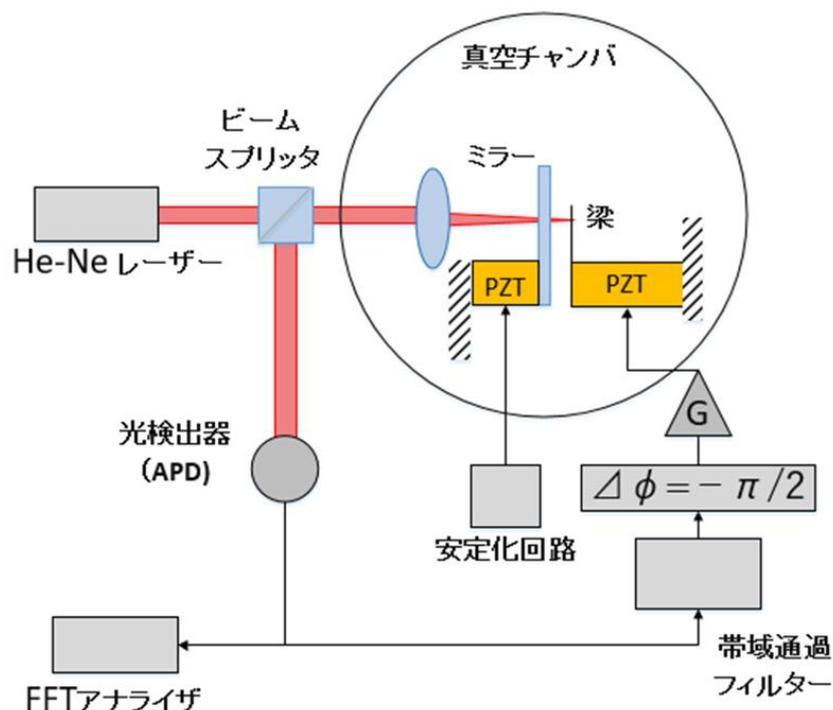


図 6.1 ハイブリット制振システム

### 6.1.1 位相差とゲインの算出

今回、ハイブリット制振実験を行うにあたって、位相を 90 度遅らせる必要がある。先行研究での位相の算出方法を改善した結果、位相差の値が異なっていることが分かった。位相差確認システムの概要を図 6.1.1 に示す。レーザー光を梁の先端に当て、梁の共振周波数付近の入力信号 (sin 波、75[kHz]、0.5[Vpp]) をファンクションジェネレータからオシロスコープの CH1 へ送り、これを元の信号とする。ファンクションジェネレータからの入力信号を、DCPF へ通し、位相が 90[deg]遅れるように調節し、その信号を梁に付いている単層圧電素子に印加する。その時の干渉信号を再び光検出器で読み取り、オシロスコープの CH2 へ送る。これを位相を 90 度遅らせた信号とする。オシロスコープでモニタリングをしつつ、DCPF で位相を調節して位相差を決定した。

また、ゲインの算出システムを図 6.1.2 に示す。レーザー光を梁の土台に当て、梁の共振周波数付近の入力信号 (sin 波、75[kHz]、0.5[Vpp]) をファンクションジェネレータから FFT アナライザの CH1 へ送り、これを元の信号とする。ファンクションジェネレータからの入力信号を、DCPF へ通し、DCPF の倍率を 1 にした後、位相が 90[deg]遅れるように調節し、その信号を梁に付いている単層圧電素子に印加する。その時の干渉信号を再び光検出器で読み取り、FFT アナライザの CH2 へ送る。その時の CH1 と CH2 の比により DCPF 倍率 1 のゲインを算出した。図 6.1.3 に DCPF 倍率とゲインの関係を示す。実際の比と倍率 1 のゲインに倍率をかけたものがほぼ同じ値を示したため、DCPF 倍率をかける事で全体のゲインを算出した。

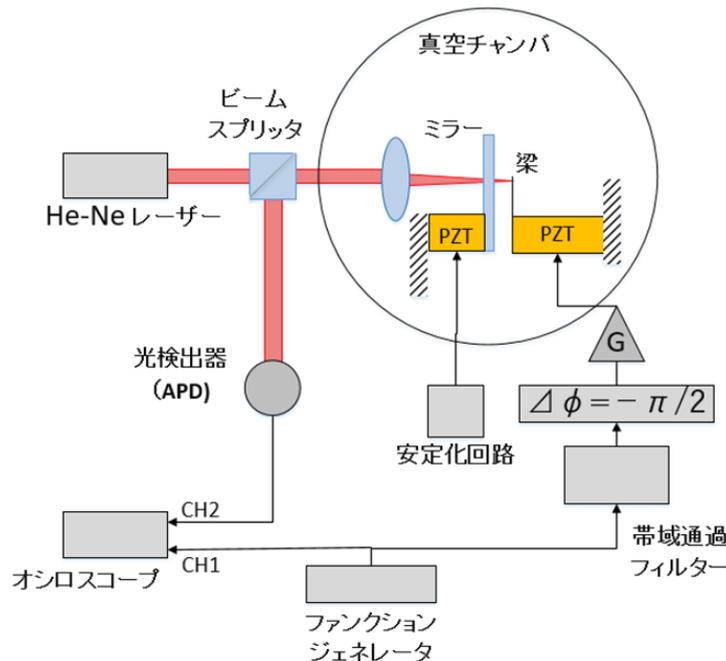


図 6.1.1 ハイブリット制振での位相差確認システム

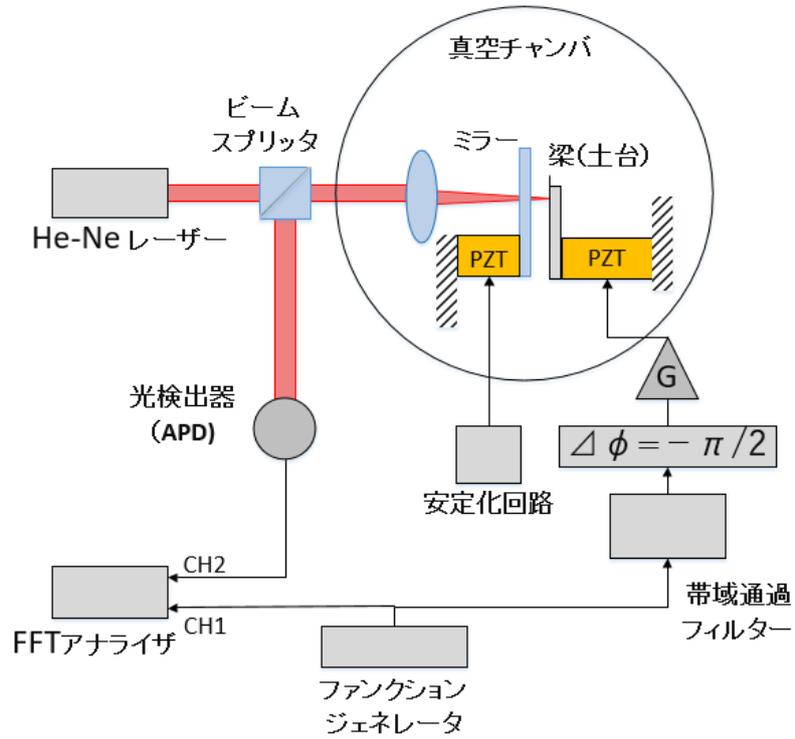


図 6.1.2 ゲイン  $g$  算出システム

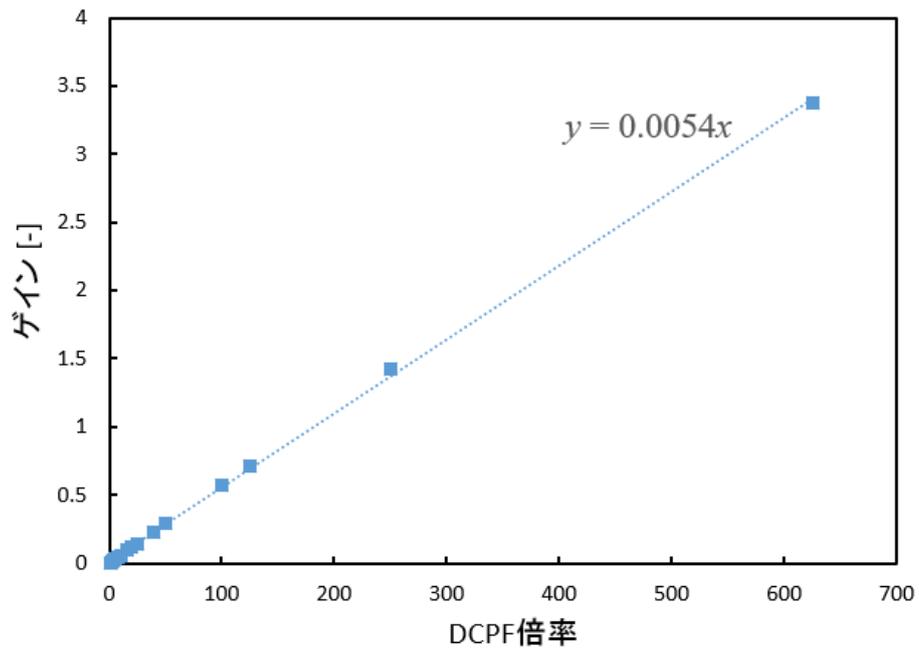


図 6.1.3 DCPF 倍率とゲインの関係

## 6.2 機械的フィードバック制振理論

片持ち梁の運動モデルを図 5.2 に示す。片持ち梁は、マスばねダンパ系でモデル化することができる。

$F(t)$ を、片持ち梁の微小振動を引き起こす力(熱振動の場合はランジュバン力)とする。 $x(t)$ を、計測された片持ち梁の微小振動振幅とする。 $y(t)$ を、片持ち梁の微小振動を打ち消すために梁に印加する振幅(今回は梁を支持する単層圧電素子の振幅)とする。 $x_n(t)$ を、計測系の持つノイズレベルとする。 $x_\phi(t)$ を、計測されたマイクロ片持ち梁の微小振動の位相を  $90^\circ$  遅らせ、圧電素子に印加することで生じる圧電素子の振幅とする。 $x_{n\phi}(t)$ を、圧電素子に印加される計測系のノイズによる圧電素子の振幅とする。 $g$ を、マイクロ片持ち梁へ印加するフィードバック冷却のループゲインとする。 $y(t)$ は、片持ち梁の微小振動を打ち消すために、圧電素子へ印加する振幅であるため、

$$y(t) = g\{x_\phi(t) + x_{n\phi}(t)\} \quad (6-1)$$

となる。また、片持ち梁をモデル化したマスばねダンパ系の運動方程式は、

$$F(t) = m\{\ddot{x}(t) + \dot{y}(t)\} + \mu\dot{x}(t) + kx(t) \quad (6-2)$$

で表すことができる。ただし、 $m$ は片持ち梁の等価質量、 $\mu$ は減衰係数、 $k$ はばね定数である。また、片持ち梁の振幅に対し、圧電素子の振幅は微小であるため、計測された $x(t)$ に含まれる $y(t)$ は無視できるものとする。式(5-2)に示す運動方程式を解くことで、片持ち梁の微小振動フィードバック制振の理論解析を行う。

式(5-2)中の各値の複素振幅を考えることで解析を進める。位相を含む複素振幅を用いた、各値の周期的記述は、

$$F(t) = \hat{F}(\omega)e^{j\omega t} \quad (6-3)$$

$$x(t) = \hat{x}(\omega)e^{j\omega t} \quad (6-4)$$

$$x_n(t) = \hat{x}_n(\omega)e^{j\omega t} \quad (6-5)$$

$$x_\phi(t) = \hat{x}(\omega)e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})} \quad (6-6)$$

$$x_{n\phi}(t) = \hat{x}_n(\omega)e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})} \quad (6-7)$$

となる。ここで、 $j$ は虚数単位、 $\omega$ は角周波数である。 $x(t)$ の一階微分、二階微分はそれぞれ、 $\dot{x}(t) = j\omega\hat{x}(\omega)e^{j\omega t}$ 、 $\ddot{x}(t) = -\omega^2\hat{x}(\omega)e^{j\omega t}$ となる。各値も同様に求めることができる。また、マイクロ片持ち梁の品質係数(Q値; Quality factor)  $Q$ 、ならびにばね定数 $k$ は、

$$Q = \frac{m\omega_0}{\mu} = \frac{\tau}{T} \approx \frac{\Delta\omega}{f_0} \quad (6-8)$$

$$k = m\omega_0^2 \quad (6-9)$$

で表される。ここで、 $\omega_0$ は片持ち梁の固有角振動数、 $\mu$ は減衰係数、 $\tau$ は梁を励振し振幅が励振直後の振幅の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(5-3)に示す微小振動を引き起こす力、ならびに式(5-5)に示す計測系のノイズレベルの間には相関関係はない(ランジュバン力はノイズレベルに影響を及ぼさず、ノイズレベルもランジュバン力に影響を及ぼさない)ものとする。式(5-1)、式(5-3)-(5-9)を用いることで式(5-2)を整理すると、

$$\begin{aligned} \hat{F}(\omega)e^{j\omega t} &= m\ddot{x}(t) + mg\ddot{x}_\varphi(t) + mg\ddot{x}_{n\varphi}(t) + \frac{m\omega_0}{Q}\dot{x}(t) + m\omega_0^2x(t) \\ &= -m\omega^2\hat{x}(\omega)e^{j\omega t} - mg\omega^2\hat{x}(\omega)e^{j\omega t}e^{j(-\frac{\pi}{2})} - mg\omega^2\hat{x}_n(\omega)e^{j\omega t}e^{j(-\frac{\pi}{2})} + \\ &\quad jm\frac{m\omega_0}{Q}\hat{x}(\omega)e^{j\omega t} + m\omega_0^2\hat{x}(\omega)e^{j\omega t} \\ \hat{F}(\omega) &= -m\omega^2\hat{x}(\omega) - mg\omega^2\hat{x}(\omega)e^{j(-\frac{\pi}{2})} - mg\omega^2\hat{x}_n(\omega)e^{j(-\frac{\pi}{2})} \\ &\quad + jm\frac{m\omega_0}{Q}\hat{x}(\omega) + m\omega_0^2\hat{x}(\omega) \end{aligned}$$

ここで、オイラーの公式より、

$$e^{j(-\frac{\pi}{2})} = \cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) + j\sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) = 0 - j = -j$$

となるため、

$$\hat{F}(\omega) = m\left\{-\omega^2\hat{x}(\omega) - g\omega^2\hat{x}(\omega)j - g\omega^2\hat{x}_n(\omega)j + j\frac{m\omega_0}{Q}\hat{x}(\omega) + \omega_0^2\hat{x}(\omega)\right\}$$

となる。したがって、実際の微小振動の複素振幅 $\hat{x}(\omega)$ は、

$$\hat{x}(\omega) = \frac{\hat{F}(\omega) - jg\omega^2\hat{x}_n(\omega)}{(\omega_0^2 - \omega^2) + j\left(g\omega^2 + \frac{\omega_0\omega}{Q}\right)} \quad (6-10)$$

となる。さらに、 $\hat{x}(\omega)$ の共役複素数 $\bar{\hat{x}}(\omega)$ は、

$$\bar{\hat{x}}(\omega) = \frac{\frac{\bar{F}(\omega)}{m} + jg\omega^2\bar{\hat{x}}_n(\omega)}{(\omega_0^2 - \omega^2) - j\left(g\omega^2 + \frac{\omega_0\omega}{Q}\right)} \quad (6-11)$$

となる。また、計測された片持ち梁の微小振動振幅は、実際の微小振動複素振幅 $\hat{x}(\omega)$ に計測系のノイズレベル複素振幅 $\hat{x}_n(\omega)$ を加えたものとなるため、

$$\hat{x}(\omega) + \hat{x}_n(\omega) = \frac{\frac{\hat{F}(\omega)}{m} - \left\{(\omega_0^2 - \omega^2) + j\frac{\omega_0\omega}{Q}\right\}\hat{x}_n(\omega)}{(\omega_0^2 - \omega^2) + j\left(g\omega^2 + \frac{\omega_0\omega}{Q}\right)} \quad (6-12)$$

となる。また、式(5-13)の共役複素数は、

$$\bar{\hat{x}}(\omega) + \bar{\hat{x}}_n(\omega) = \frac{\frac{\bar{F}(\omega)}{m} + \left\{(\omega_0^2 - \omega^2) + j\frac{\omega_0\omega}{Q}\right\}\bar{\hat{x}}_n(\omega)}{(\omega_0^2 - \omega^2) - j\left(g\omega^2 + \frac{\omega_0\omega}{Q}\right)} \quad (6-13)$$

となる。

実際の片持ち梁の微小振動のパワースペクトル密度は、式(5-10)と式(5-11)をかけ合わせることで得られるため、

$$|\hat{x}(\omega)|^2 = \left\{ \frac{\frac{1}{m^2}}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(g\omega^2 + \frac{\omega_0\omega}{Q}\right)^2} \right\} |\hat{F}(\omega)|^2 + \left\{ \frac{g^2\omega^4}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(g\omega^2 + \frac{\omega_0\omega}{Q}\right)^2} \right\} |\hat{x}_n(\omega)|^2 \quad (6-14)$$

となる。また、計測される片持ち梁の微小振動のパワースペクトル密度は、式(5-12)と式(5-13)をかけ合わせることで得られるため、

$$|\hat{x}(\omega) + \hat{x}_n(\omega)|^2 = \left\{ \frac{\frac{1}{m^2}}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(g\omega^2 + \frac{\omega_0\omega}{Q}\right)^2} \right\} |\hat{F}(\omega)|^2 + \left\{ \frac{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{\omega_0\omega}{Q}\right)^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(g\omega^2 + \frac{\omega_0\omega}{Q}\right)^2} \right\} |\hat{x}_n(\omega)|^2 \quad (6-15)$$

となる。

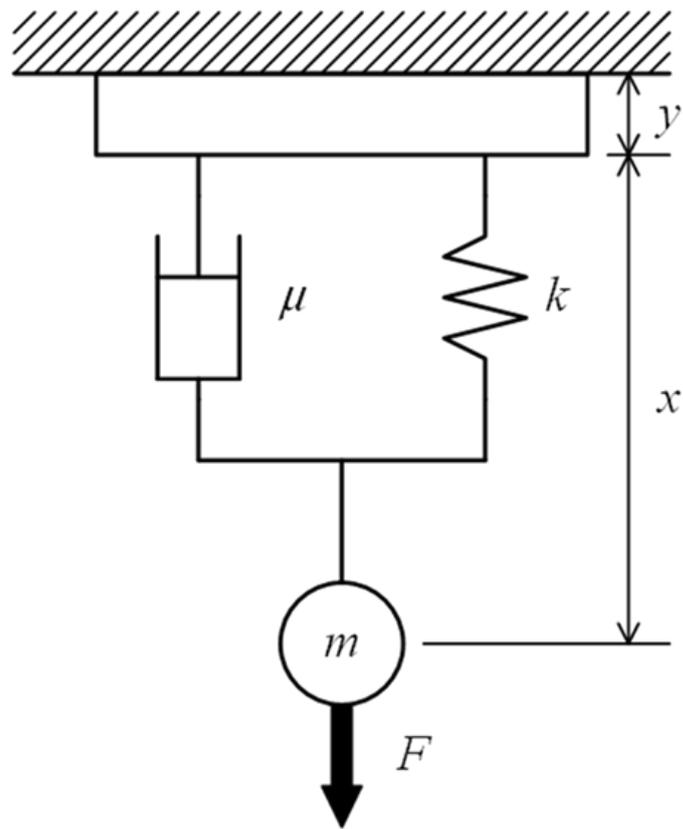


図 6.2 機械的フィードバック運動モデル

### 6.3 ハイブリット制振実験結果

今回キャビティ冷却が作用する範囲内でハイブリット制振を行い、梁の除去を試みた。ハイブリット制振実験結果を図 6.3、ハイブリット制振実験におけるゲインと熱振幅の関係を図 6.4 に示す。実験においてレーザー光量 1[mW]、真空度  $5 \times 10^{-3}$ [Pa]、FFT アナライザの分解能を 1.56[Hz]、平均回数 500 回で計測を行った。ゲインを増加させるにしたがって、片持ち梁の熱振幅の減少が見られ、ゲインが 0.1 を超えた際に信号が発振した。

また、先行研究により微小片持ち梁の理論上の制振限界を求めた。その結果は 7.6[pm]となり、キャビティ冷却での梁の制振限界を求めた結果は 2.2[pm]となった。これによりキャビティ冷却は冷凍機の冷却と同じような効果を持つことが分かった。キャビティ冷却のみ、すなわちゲイン 0 での熱振幅は、青い矢印で示すように、片持ち梁の制振限界に迫る 7.8[pm]まで制振された。そして、ハイブリット制振においては、キャビティ冷却での制振限界を大きく下回る 0.6[pm]まで制振された。

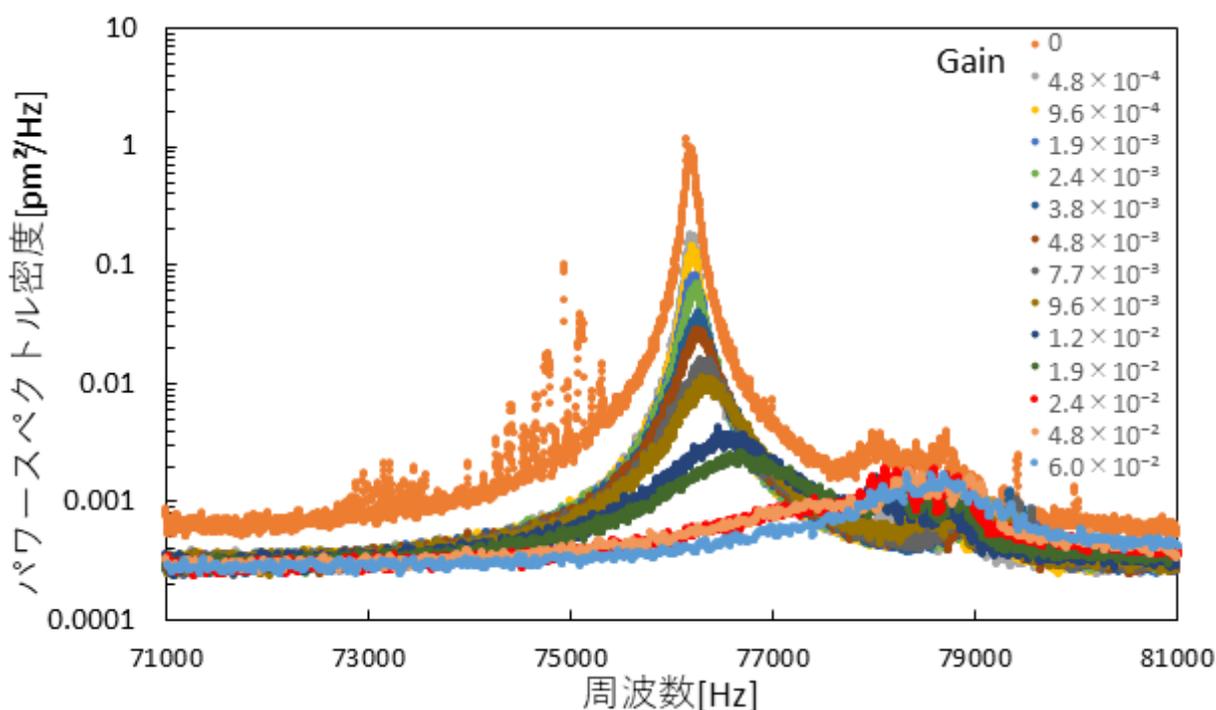


図 6.3 ハイブリット制振実験結果

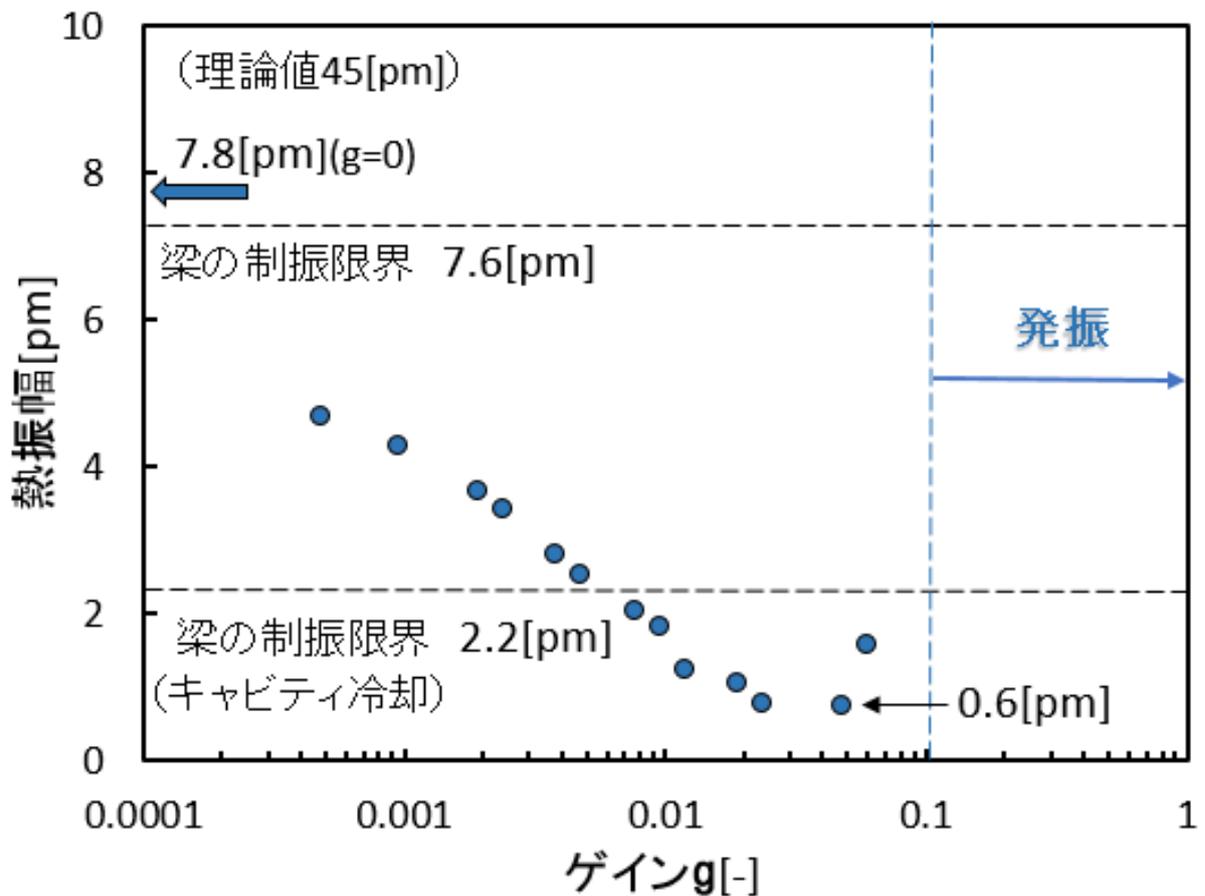


図 6.4 ゲインと熱振幅の関係

### 6.3.1 ハイブリット制振（梁の金蒸着時間 720 秒）

また、今回は金蒸着時間 720[s]（蒸着厚さ約 120[nm]）の微小片持ち梁でもハイブリット制振実験を行った。この実験においても、レーザー光量 1[mW]、真空度  $5 \times 10^{-3}$ [Pa]、FFT アナライザの分解能を 1.56[Hz]、平均回数 500 回で計測を行った。

梁の蒸着時間 720[s]におけるハイブリット制振実験結果を図 6.5、その時のゲインと熱振幅の関係を図 6.6 に示す。こちらもゲインを増加させるにしたがって、片持ち梁の熱振幅の減少が見られ、ゲインが 0.04 を超えた時信号が発振した。キャビティ冷却のみ（ゲイン 0）の時の梁の熱振幅は 180[s]の梁よりも低い 4.2[pm]となった。

よって金蒸着の厚さを変更した結果、キャビティ冷却のみでは効果を発揮したが、ハイブリット制振実験においてはあまり効果が発揮されない事が分かった。

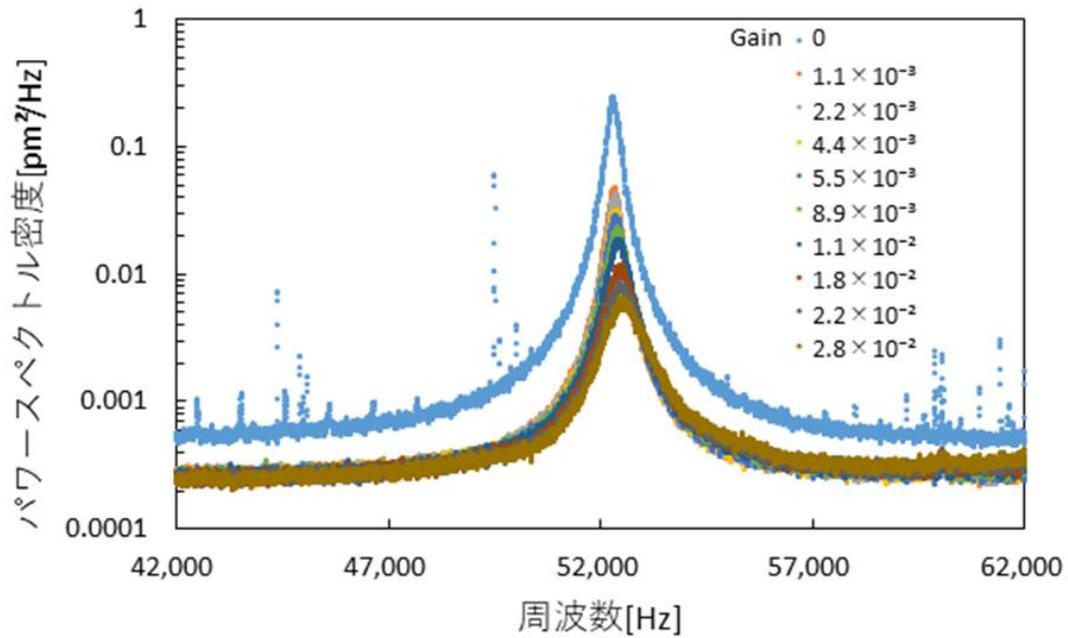


図 6.5 金蒸着時間 720[s]の梁でのハイブリット制振実験結果

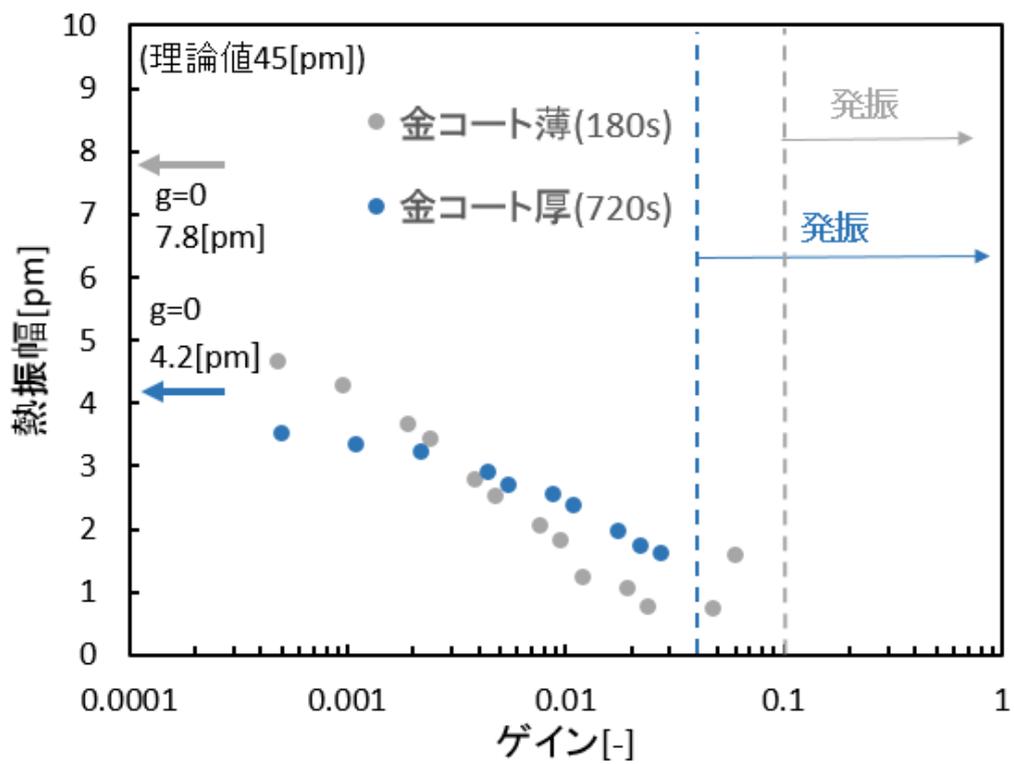


図 6.6 ゲインと熱振幅の関係

## 第七章 結言

FP 干渉計を用いて微小片持ち梁の熱振動計測を行った結果、梁の振動の加熱側と冷却側が確認できた。この現象は梁の金蒸着による熱伝導の遅れと He-Ne レーザーによる熱歪み力によるもので、理論解析や熱歪みによるキャビティ冷却の実験を行った結果、レーザー光量を上げてかつ梁の土台付近で熱歪みを発生させた場合が熱振動振幅は減少傾向にあることが分かった。

キャビティ冷却においてレーザー光量は機械的フィードバックのループゲインと同じものであることが判明し、キャビティ冷却と機械的フィードバックは同じようなメカニズムであることが判明した。キャビティ冷却においてレーザー光量、熱歪み発生位置、梁の金蒸着時間が熱振動に関係しており、キャビティ冷却では梁の制振限界近くまで制振された。キャビティ冷却と機械的フィードバックを組み合わせたハイブリット制振実験において、最終的に 0.6[pm]まで制振され、微小片持ち梁のキャビティ冷却での梁の制振限界である 2.2[pm]を超えた。

## 参考文献

- (1) 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
- (2) 今井秀和 平成 28 年度 卒業論文 微小シリコン片持ち梁の熱振動計測の高精度化
- (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
- (4) 丸林真也, 日野史也 平成 29 年度 卒業論文 ファブリ・ペロー干渉計による, 微小シリコン片持ち梁の熱振動制振の高度化
- (5) C. H. Metzger, K. Karrai, "Cavity cooling of a microlever", Nature, 432, pp.1002-1005, (2004)

## 謝辞

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

指導教員である河村教授には、研究について丁寧に熱心なご指導をして頂きました。また、レーザー学会への参加などの提案を頂き、大変良い経験を積ませて頂きました。

また、本学エレクトロニクス研究所の宋麗香氏には、イオンスパッタリング装置、SEM等の使用方法についてご指導頂きました。

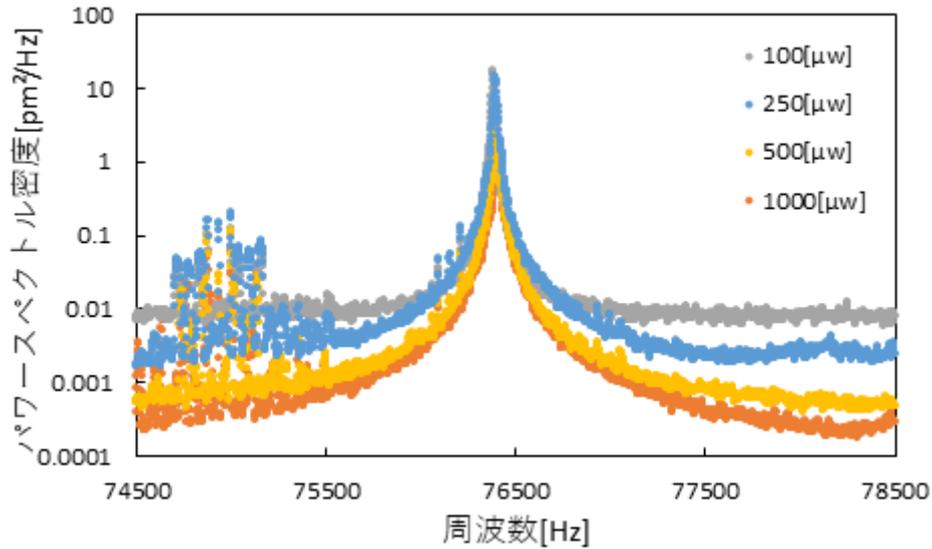
先輩方にも恵まれ、装置1つ1つの原理から丁寧に教えて頂き、本研究だけにとどまらない様々な知識を授けて頂きました。

研究室に在籍する皆さんにも、大変お世話になりました。ありがとうございました。

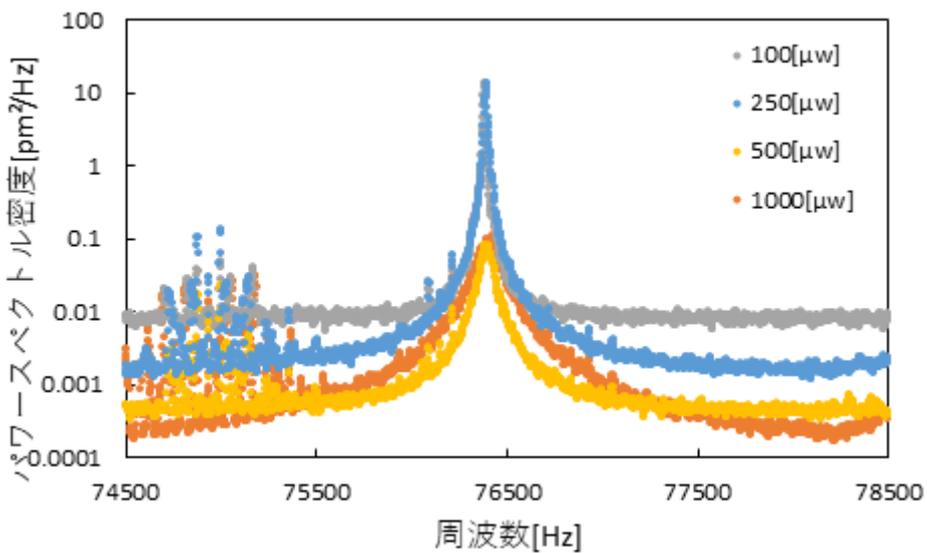
# 付録

## 1 熱歪み位置における光量と熱振幅の関係の元データ

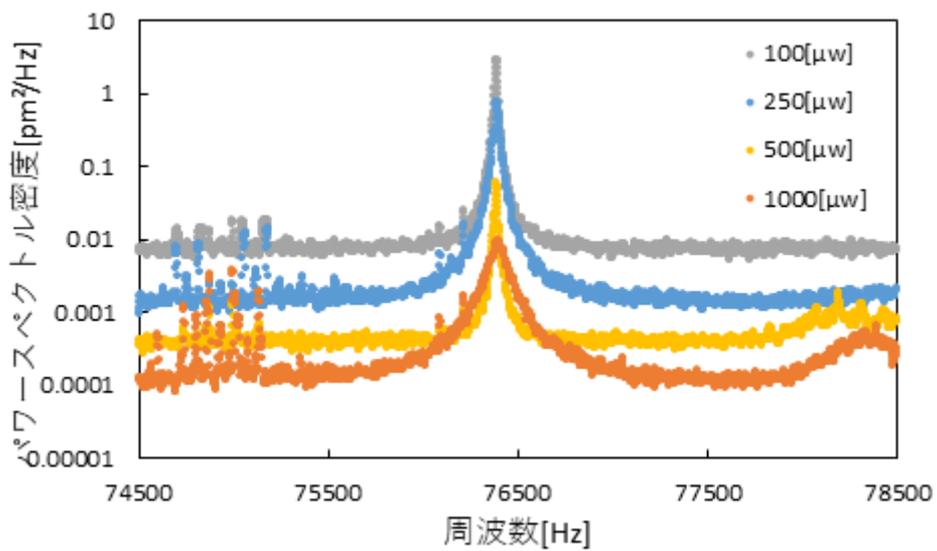
熱歪み発生位置における光量と熱振幅に用いた、各熱歪み位置での周波数とパワースペクトル密度の関係を示す。



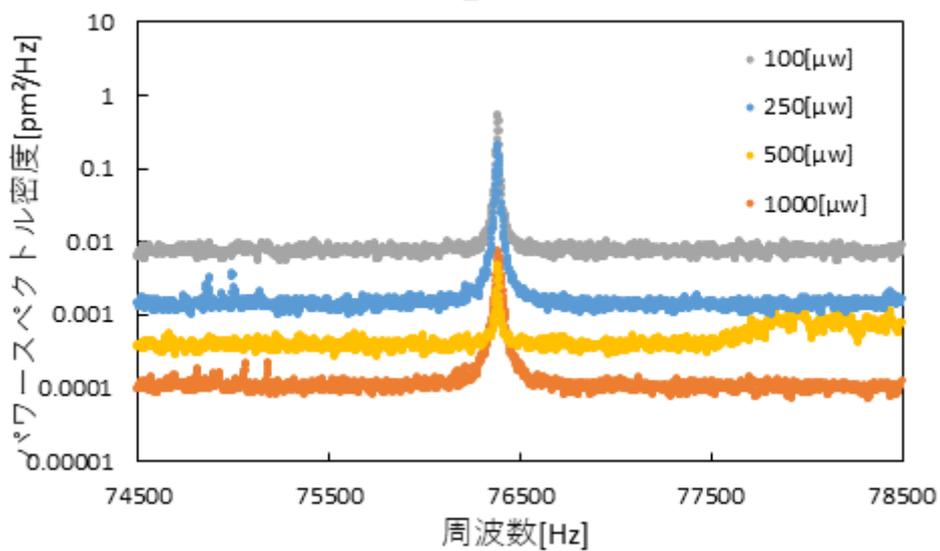
図付録1 先端から 34[ $\mu\text{m}$ ]の位置



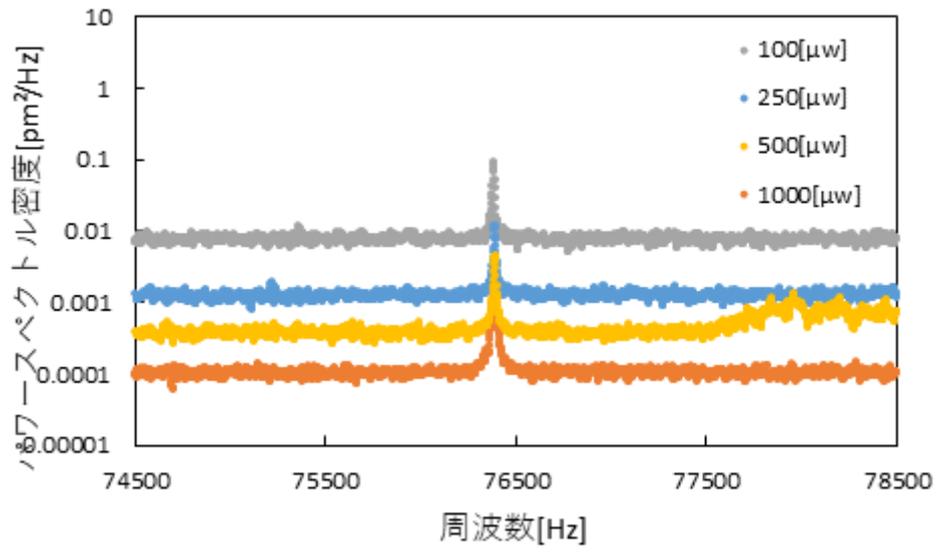
図付録2 先端から 68[ $\mu\text{m}$ ]の位置



図付録 3 先端から 102 $[\mu\text{m}]$ の位置



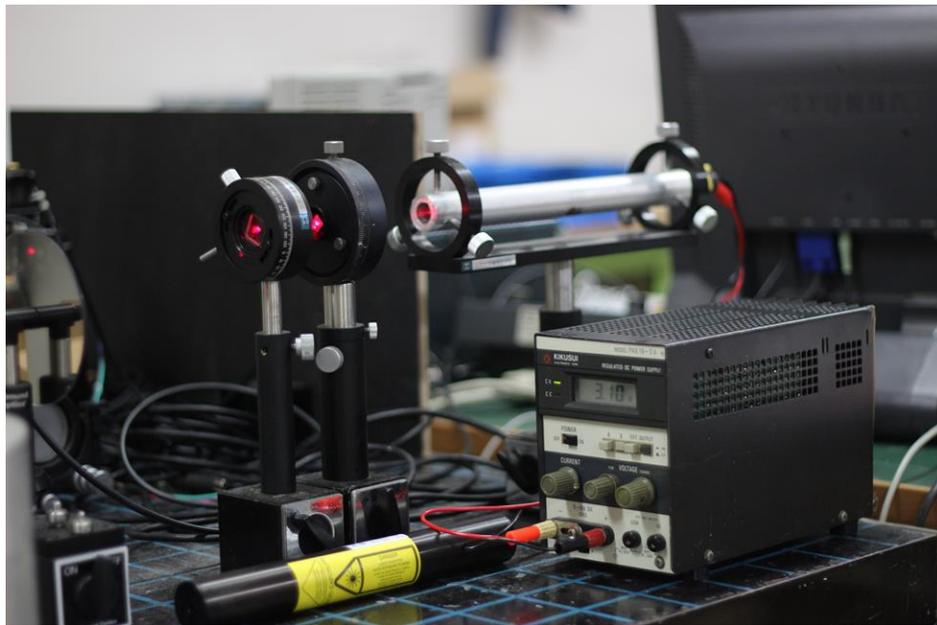
図付録 4 先端から 136 $[\mu\text{m}]$ の位置



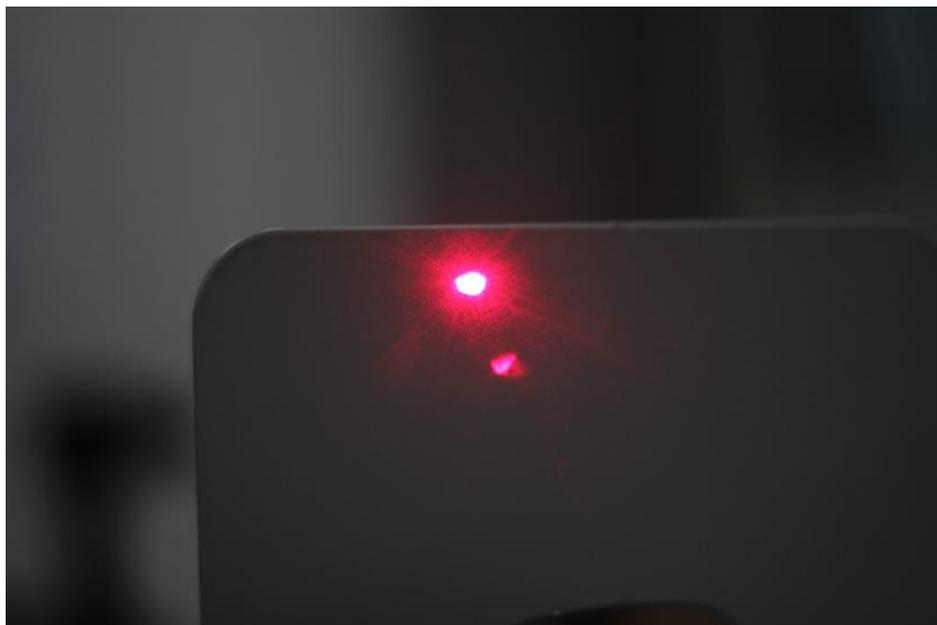
図付録5 先端から 170[μm]の位置

## 2 レーザーポインタによる FP 干渉の作成.

今回、光量を増加させるために、レーザーポインタを用いた。出力は約 18.7mW である。透過光を調べた結果 9.1mW で透過率が 50%である為、また、直線偏光ではないため、干渉が起きなかったと考えられる。



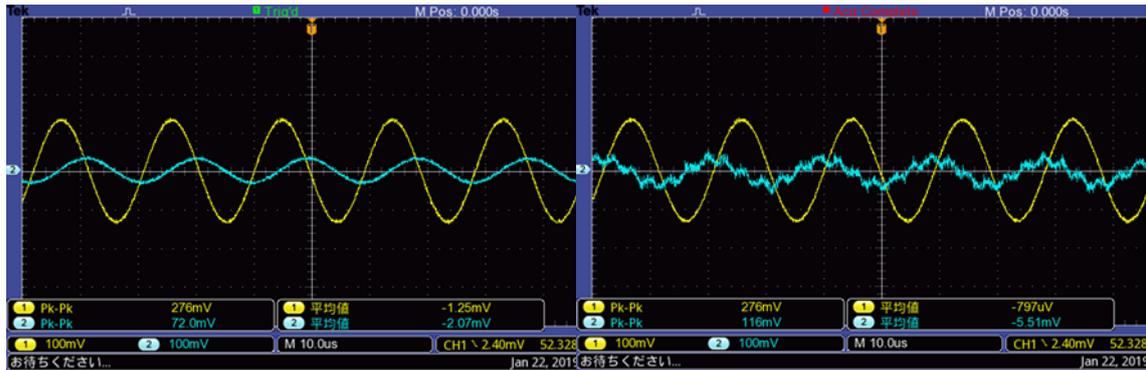
図付録 6 レーザーポインタの外観



図付録 7 レーザーポインタによる反射光

### 3 昨年の位相差との比較.

今回、ハイブリット制振実験を行うにあたって、位相を 90 度遅らせる必要がある。先行研究での位相の算出方法を改善した結果、位相差の値が異なっていることが分かった。

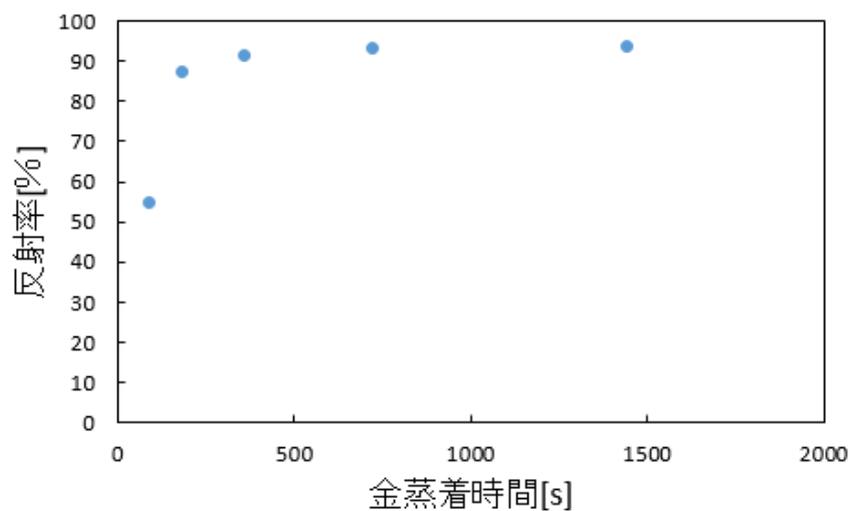


図付録 8 昨年の位相差

図付録 9 今年の位相差

### 4 梁金コーティング面の反射率の検証

各金蒸着時間における梁の金コーティング面の反射率を検証した。レーザー光を微小片持ち梁の土台で反射させ、フォトメータで読み取り、5回の平均で反射率を算出した。



図付録 10 金蒸着時間と反射率の関係

ファブリ・ペロー干渉計における微小片持ち梁熱振動のキャビティ冷却  
 Cavity cooling of the thermal vibration of a microcantilever  
 using a Fabri-Perot interferometer

○久恒 匠真, 小倉 亜利紗, 河村 良行 (福岡工業大学)

Takuma HISATSUNE, Arisa KOKURA, Yoshiyuki KAWAMURA  
 (Fukuoka Inst.of Tech)

本研究は原子間力顕微鏡や振動ジャイロなどに用いられるシリコン微小片持ち梁の熱振動を、熱的な冷却をせずに機械的フィードバック制振を行うことで取り除き、振動計測の限界を向上させる事を最終的な目的とする。近年の研究により計測系の持つノイズレベルが熱振動制振の限界を決定する主たる要因となることが明らかとなった。より高性能な制振を実現する為、計測器の感度を向上させ、信号とノイズの比(S/N)を上昇させる必要がある。本研究では高いフィネスを持つファブリ・ペロー干渉計(以下 FP)を用いて、高感度な熱振動の計測さらには制振する事を目的としている。FP 干渉計を用いた、マイクロ片持ち梁の微小振動システムの概要を図.1に示す。計測対象であるマイクロ片持ち梁は、長さ 240 $\mu\text{m}$ 、幅 24 $\mu\text{m}$ 、厚さ約 2.3 $\mu\text{m}$  であり、材質は単結晶シリコンである。梁と誘電体多層膜ミラーで FP 干渉計を構成し、梁の熱振動を計測した。干渉計の光源として、波長 632.8nm、出力約 1mW の直線偏光シングルモード He-Ne レーザーを用いた。梁の先端に局所的にレーザー光を当てる為、レンズを用いてレーザー光を集光し、キャビティがレイリー範囲内に入るように調整した。感度が最大となるようにキャビティ長を制御し、干渉光を周波数解析する事で、梁の微小振動の計測を実現した。本研究では、圧電素子に電圧を印加し、干渉特性の最高感度部にキャビティ長を調整して振動計測を行った。

FP 干渉特性で高感度部は 2 つあり、そのうちキャビティ長が長い方で梁の振動が加振される加振現象が起こり、キャビティ長が短い方で梁の振動が制振される冷却現象が起こる事が確認された。これらの現象を「キャビティ加熱」、「キャビティ冷却」とする。この原因としては、レーザー光による光熱効果により生じる「熱歪み力」が主な要因であると考えられる。これらの現象のモデル化とその解析に成功した。昨年までの研究では外力による制振で熱振動

の除去を試みていたが、本研究ではこの方法に加えてキャビティ冷却の効果を付加することによりさらに熱振動制振効果の向上を試みた。図 2 にレーザー誘起熱歪みによるキャビティ冷却を示す。解析結果及び実験結果の詳細は発表に譲る。

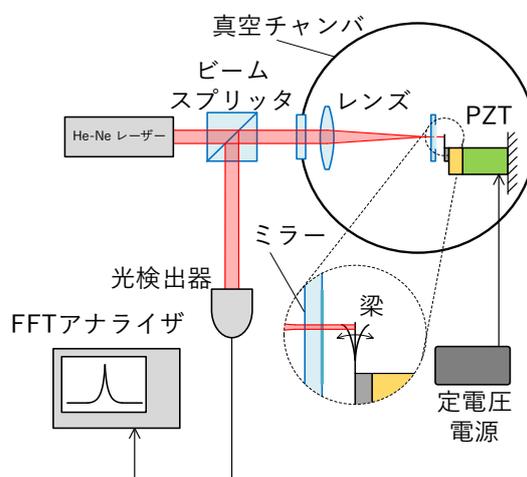


図 1 FP 干渉計を用いた熱振動計測システム

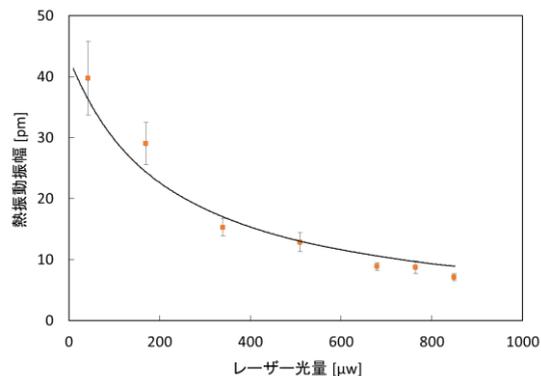


図 2 レーザー誘起熱歪みによるキャビティ冷却

参考文献

- [1] 辻家祐介「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」福岡工業大学院工学研究科知能機械工学専攻修士論文(2018)

