

福岡工業大学工学部知能機械工学科平成 28 年度卒業論文

紫外パルスレーザーにおける焦点距離調整法の開発
及びこれを用いた精密加工

13E1068 山持 寛也, 13E2014 荻田 和弥

指導教員 河村 良行 教授

目次

第 1 章	緒言	2
第 2 章	レーザーアブレーション	4
2. 1	レーザーアブレーション	
2. 2	蒸散の光	
第 3 章	実験装置	6
3. 1	実験装置の概要	
3. 2	三軸加工駆動装置	
3. 3	光電子増倍管	
3. 4	AD/DA 変換器	
3. 5	LabVIEW2009	
第 4 章	実験準備	
11		
4. 1	焦点距離調整の流れ	
4. 2	プログラム	
4. 3	レーザーアテネーター表示値とレーザーパワーの関係	
第 5 章	最小焦点位置検出実験	
17		
5. 1	実験方法	
5. 2	実験材料	
5. 3	ポリイミド樹脂での実験	
5. 4	グラファイトでの実験	
第 6 章	精密加工	
21		
6. 1	単結晶シリコン片持ち梁の加工	
6. 2	加工手順	
6. 3	加工結果	
6. 4	加工した梁の考察	
6. 5	梁の性能評価	

第7章	結言
31	
参考文献	
謝辞	
付録	

第1章

緒言

現在、レーザー技術は、私たちの生活になくてはならないものとなっている。レジで使われるバーコード読み取り機、CDやDVD、レーザープリンタなど、これらは全てレーザー技術を利用したものである。

レーザー光は単一の波長であり指向性が良いため、レンズを用いることで光を効率的に焦点へ集光させることができる。この特徴により、微小な面積に高密度のパワーが得られ、材料の微細加工が可能となっている。昨年度、微細加工を行うための焦点距離調整は、焦点距離と照射回数毎に試料に穴をあけ、SEMによる観察で穴の大きさを比較して、最も小さくなっている場所を焦点としていた。そのため、時間と手間がかかっていた。

本研究では、Nd:YAGレーザーの4倍高調波、材料を三軸方向に任意で位置を移動できる三軸加工駆動装置、かなり高い感度で光を検出できる光電子増倍管を用いて、最小集光径となる焦点を探す装置とプログラムを作成し、高精度の焦点距離調整を短時間で行えるようにした。そして、これを用いた微細加工として単結晶シリコン片持ち梁の加工を行った。

第2章

レーザーアブレーション

2. 1 レーザーアブレーション

レーザーアブレーションとは、レーザーを固体表面に、ある一定以上のパワーで照射したとき、対象物の分子及び原子が高いエネルギーを吸収し、分子や原子の振動が大きくなる。この振動のため、分子・原子間の結合が切断、結合し別の物質に変化し、爆発的に放出されるものである。この現象はレーザーの蒸散作用と呼ばれ、主に、レーザーの照射パワー(パワー密度)、照射時間(パルス幅)、加工物の材質に大きく依存し、その条件によってレーザーアブレーションの効果は大きく変化する。本研究では、レーザー光をレンズで集光させることでパワー密度を高め、レーザーアブレーションの効果を大きくする。

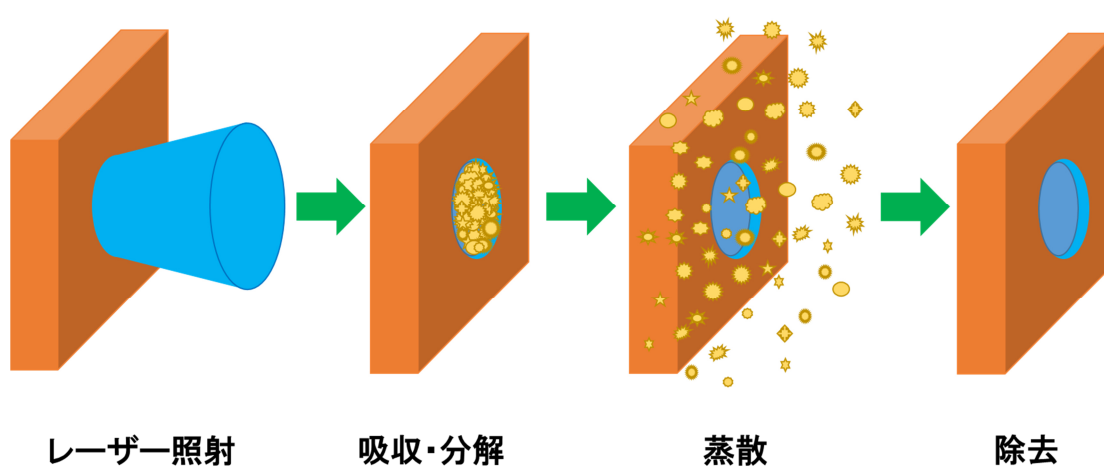


図 2-1 レーザーアブレーション原理

2. 2 蒸散の光

吸収されるエネルギーは分解に使われるが、一部は熱にも使われて蒸散時に発光する。パワー密度が高く蒸散が大きいときは光も大きく、パワー密度が低く蒸散が小さいときは光も小さい若しくは発光しない。つまり、光が最も大きくなる場所が焦点となる。今回の実験では蒸散の光から焦点を探す。

第3章

実験装置

3. 1 実験装置の概要

図3-1に実験装置の概要を示す。加工を行うレーザーは、波長が1064nmのNd:YAGレーザーを、KDP結晶を用いて高調波を発生させ、波長を4倍波の266nmに変換された紫外レーザーである。ミラーで反射させ紫外光より長い波長の光を減らしながら、ピンホールを通り、最終的に加工物へ導かれる。レーザー光は、焦点距離500mmと焦点距離50mm合成石英レンズを用いて集光させた。また、余分な光を遮断し、基本モードのみを取り出すためのピンホール(空間フィルタ)は直径50 μm を使用した。ピンホールホルダーは、光を中心に通すために手動で三軸方向に動かすことができる。

光電子増倍管を試料の正面に設置し、試料がレーザーで加工される時に発生する蒸散の光を検出している。装置全体を暗箱で覆うことで、外部からの余計な光はほとんど遮断されている。

全体の制御はパソコン上で実行したLabVIEWのプログラムでインターフェース(National Instruments社製USB-6009)を通じて三軸加工駆動装置とレーザー装置を制御し、光電子増倍管で検出した信号を集録している。三軸加工駆動装置の最小送り量は1 μm 、レーザー装置の繰り返し速度は10Hzで駆動させた。

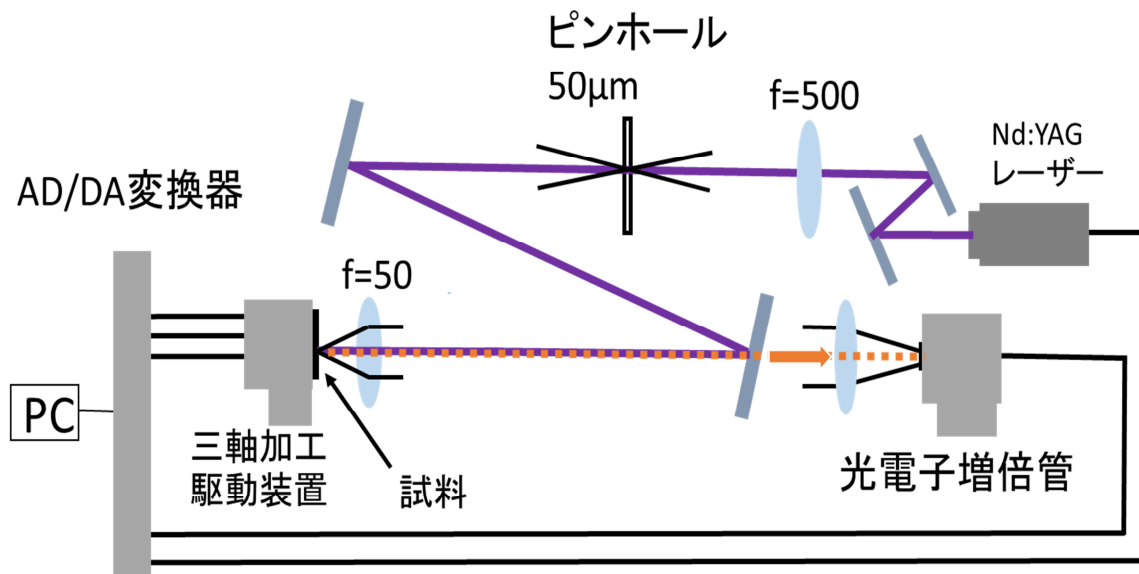


図3-1 実験装置の概略図

3. 2 三軸加工駆動装置

試料台は三軸加工台と図3-2のように装着できるようになっており、ネオジウム磁石を試料台と加工台に埋め込むことで毎回同じ位置に引き寄せあうようになっている。また、図3-3のようにネオジウム磁石の位置を少しずつ埋め込んである。そのため、数 μm の範囲でしかずれることはない。また、貫通加工をする際に反射光の影響を受けないようにするため、図5のように試料台の中心は取り外し可能となっている。

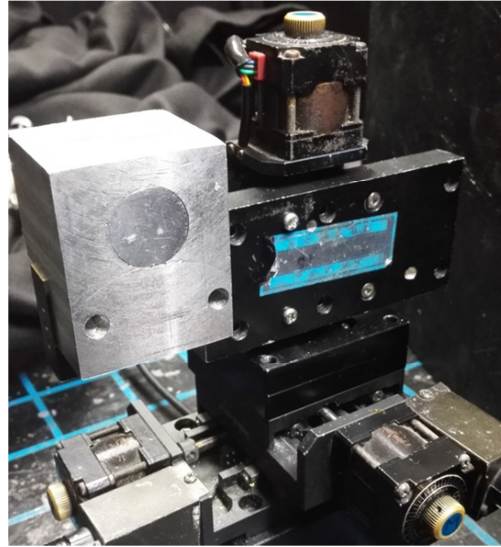
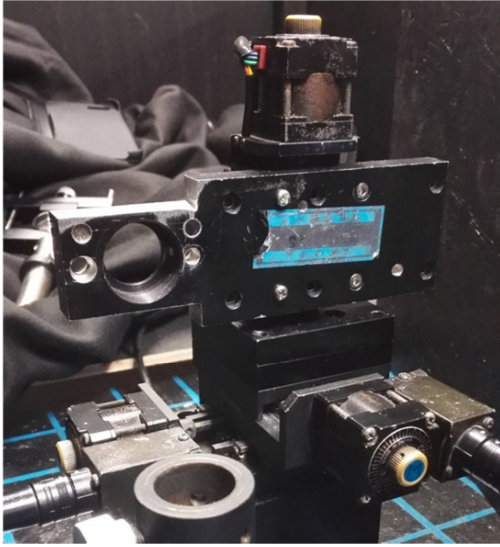


図 3-2 三軸加工台のみ(左)と試料台を装着した三軸加工台(右)

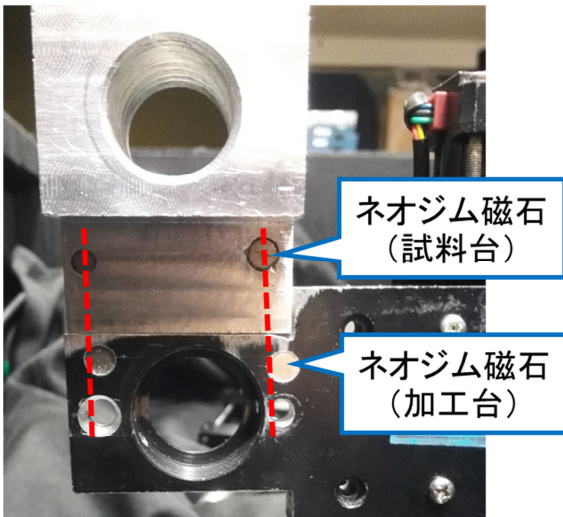


図 3-3 ネオジウム磁石の位置

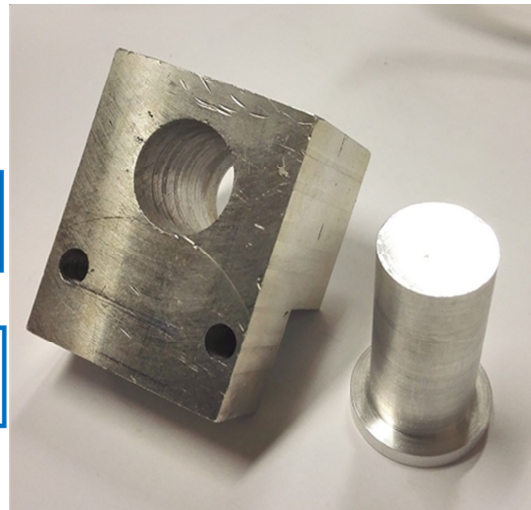


図 3-4 試料台(中心取り外し)

3. 3 光電子増倍管

蒸散の光は極微小なため、光の検出には光電子増倍管(浜松ホトニクス社製フォトマルチプライヤー)を使用した。光電子増倍管は光電効果を利用して光エネルギーを電気エネルギーに変換する光電管を基本に、電流増幅機能を付加した高感度光検出器である。感度を 0.5~1.1V に調整することができ、今回の実験では 1.1V で使用した。受光した光を約 3.0×10^6 倍する。受光部には色ガラスフィルター(o56)を貼り、約 560nm 以下の波長を遮断しているため、暗箱内で反射するレーザーそのものの光を通さず、レーザーによって材料が加工されたときに生じる蒸散の光を通すようになっている。

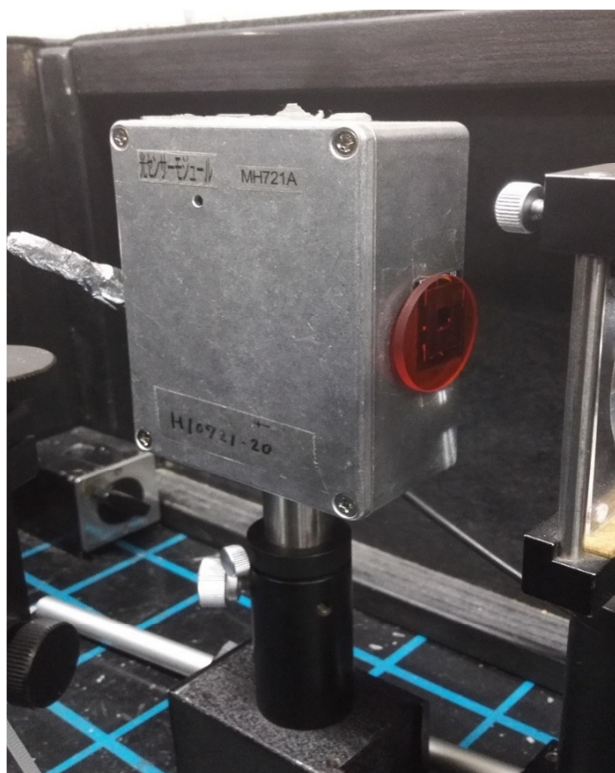


図 3-5 光電子増倍管

3. 4 AD/DA 変換器

図 3-6 と図 3-7 に AD/DA 変換器を示す. パソコンとインターフェースを USB で繋ぎ, LabVIEW で作成したプログラムの信号が, インターフェース, ドライバ, 三軸加工台もしくはレーザー装置へ繋がり駆動する. フォトマルチプライヤーからインターフェースに信号が入り, 電圧信号がパソコン上に保存される.



図 3-6 AD/DA 変換器の外観

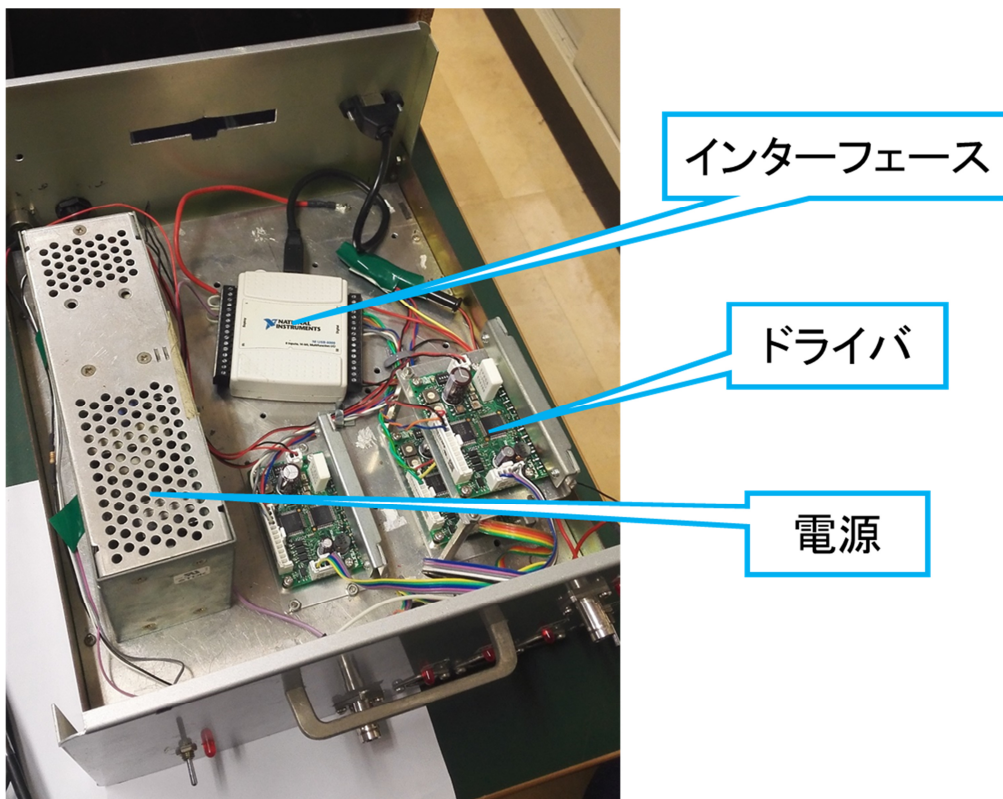


図 3-7 AD/DA 変換器の内観

3. 5 LabVIEW2009

LabVIEW2009 とは、National Instruments 社の製品であり、グラフィカルなプログラミングツールである。学科ライセンスを取っているため誰でも使うことが可能である。プログラミング言語を覚える必要はなく、絵を描くようにしてプログラムを作成できるため、非常に使いやすいプログラミングツールである。しかし、レーザー装置やモータを制御する際に、Windows を介して制御するため、プログラム実行中に他の操作をすると、信号が乱れ停止する場合がある。特に、Excel や Word, Power Point などはこれが起きやすい。そのため、プログラム実行中はパソコンに触ることができず、加工をしている間にデータ整理をすることが同じパソコンではできない。また、便利さの代償として、一つのアイコンで多くの操作を行えるため、処理が遅くなるという欠点がある。

第4章

実験準備

4. 1 焦点距離調整の流れ

焦点距離調整は、加工物が蒸散するときの光を使い行う。レーザーを試料に照射し、蒸散の光を検出・集録、レンズと加工台の距離を変えらるといふ一連の流れを繰り返す。最小集光径に近づくと光が大きくなり、離れると小さくなる。集録された蒸散の光の信号を比較することで、焦点の位置を把握することができる。また、常に、加工する場所を変え、フラットな面で計測を行う。

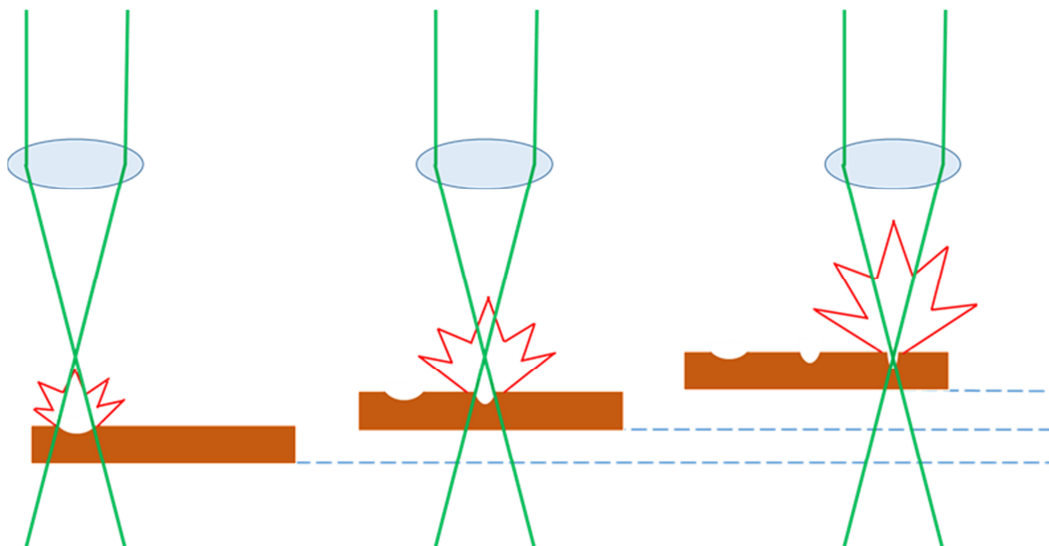


図 4-1 焦点距離の移動による蒸散の変化

4. 2 プログラム

レーザーとモータを制御、光電子増倍管からの信号を集録して、焦点を探すプログラムを LabVIEW2009 で作成した。図 4-2 に数値入力画面を示す。

まず、レーザーを 1 照射すると、集録プログラムに移行する。移行には約 15ms かかり、そのままでは蒸散の光信号の集録が間に合わないので、コンデンサを入れて信号を引き延ばしている。次に、加工台を右に入力値分ずらし加工する場所を変え、加工台を前に入力値分進めてレンズに近づける。そして、ここまでの動作を指定回数繰り返して、最後に元に位置に戻る。

測定されたデータをグラフ化し、大きな信号が検出された場所へ加工台を移動させて焦点を合わせる。



図 4-2 数値入力画面

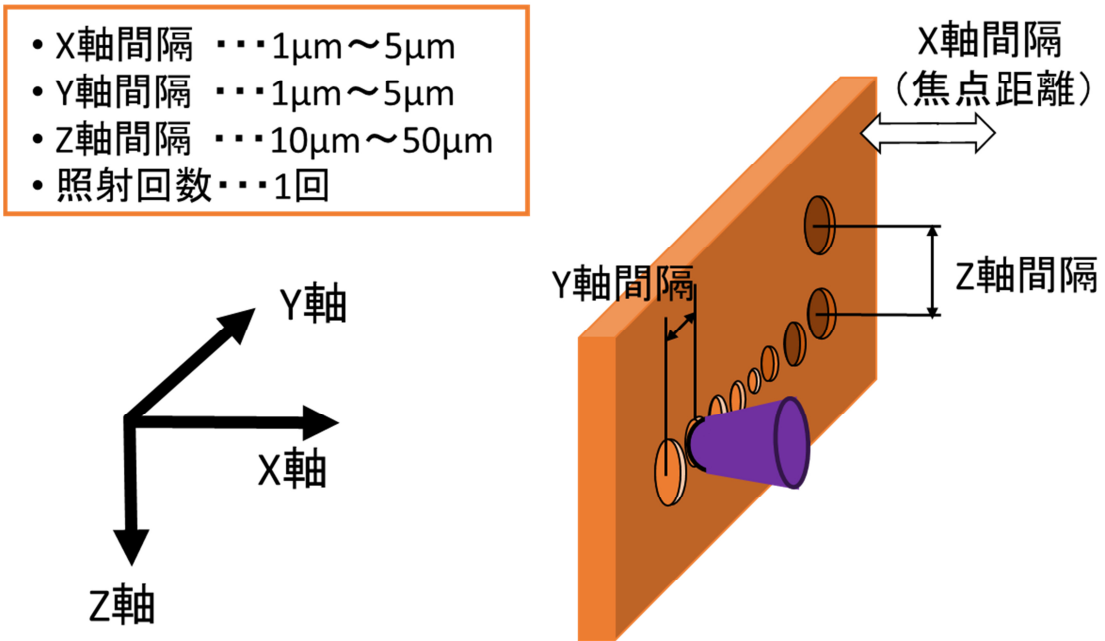


図 4-3 三軸加工台の制御プログラム

4. 3 レーザーアテネーター表示値とレーザーパワーの関係

レーザーパワーを調整する際、レーザーパワーそのものを変化させると急激に変化するため、Nd:YAG レーザーの外部コントローラ(図 4-5)でアテネーターを変化させて調整を行う。そこで、レーザーアテネーター表示値とレーザーパワーとの関係を調べるため $f=50$ の集光レンズの後方に光検出器(浜松ホトニクス社製 Si フォトダイオード)を設置し、アテネーターの表示値毎に電圧の測定を行い、計算によりエネルギーを求めた。

図 4-4 に示すように出力される信号は静電容量により引き延ばされて測定される。静電容量、受光感度がわかっているため、測定される最大電圧を見ることでレーザーパワーを求めることができる。また、信号の飽和を防ぐために 1%のアテネーター 2 つを光検出器の前に置いた。図 4-5 に関係図を示す。光検出器の受光感度は $0.13[A/W]$ のものを使用した。

受光感度 a は $0.13[A/W]$ である。静電容量 C は光検出器の $1200pF$ と同軸ケーブルの $200pF$ が並列でつながれているため、この合計の $1400pF$ である。

① エネルギー $E[J]$ は

$$E = P\tau \quad P: \text{電力}[w], \quad \tau: \text{時定数}[s] \quad 4-1$$

② 電力 $P[w]$ は

$$P = \frac{I}{a} \quad I: \text{電流}[A], \quad a: \text{受光感度}[A/W] \quad 4-2$$

③ 電流 $I[A]$ は

$$I = \frac{Q}{\tau} \quad Q: \text{電気量}[C] \quad 4-3$$

④ 電気量 $Q[C]$ は

$$Q = CV \quad C: \text{静電容量}[F], \quad V: \text{電圧}[V] \quad 4-4$$

でそれぞれ求めることができる。

②, ③, ④を①に代入すると

$$E = \frac{CV}{a} \quad 4-5$$

となる。この式について静電容量と受光感度はわかっているため、最大電圧を測定することでレーザーパワーの決定が行えることがわかる。また、光検出器の前方には

1%のアテネーターを二枚設置したため算出した値を 10000 倍したものがレーザーパワーである。

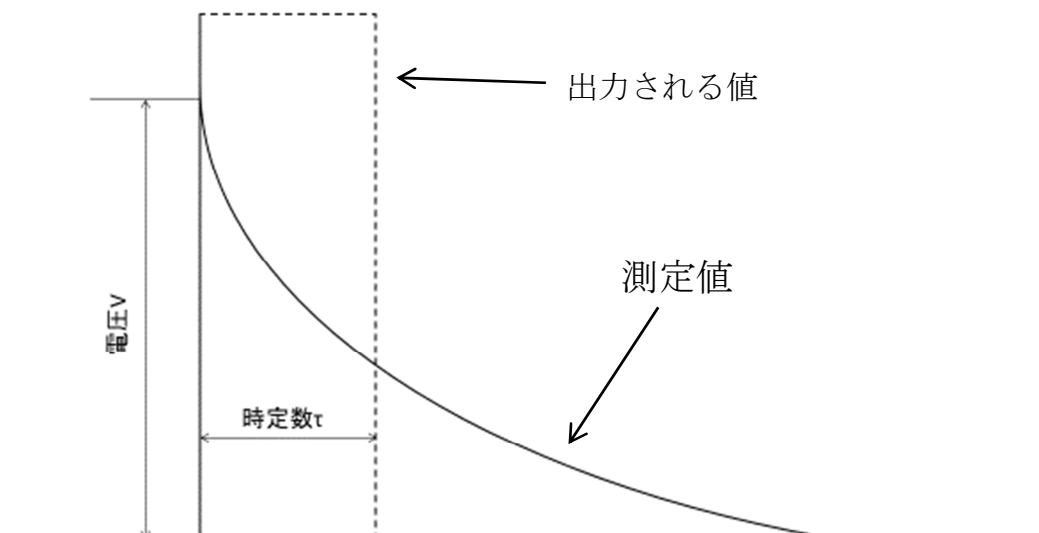


図 4-4 実際の信号と読み取られる信号



図 4-5 Nd:YAG レーザーの外部コントローラ

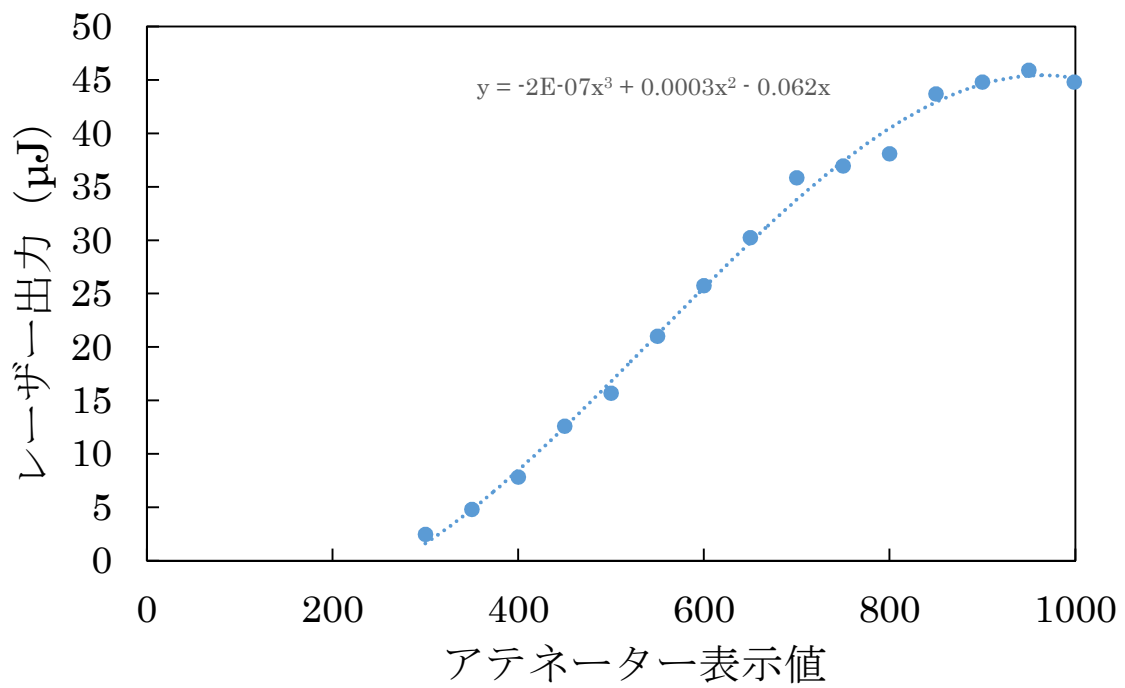


図4-6 集光レンズ(f=50)通過後のレーザーパワー

第 5 章

最小焦点位置検出実験

5. 1 実験方法

目視である程度の焦点を合わせたら，加工台をレンズから少し離して，前述のプログラムを使い，レーザーパワー毎に焦点付近の発光強度の変化を測定した．目視で合わせられない場合は，測定する範囲を長くする．

5. 2 実験材料

実験材料にポリイミド樹脂とグラファイトを採用した．ポリイミド樹脂は，液晶表示装置を駆動する IC 基盤やフレキシブルプリント回路基盤などに活用され，耐熱性が高く，摩擦や水分にも強い．耐薬品性や電気絶縁性，機械的強度にも優れた性質を持つ．本研究では，高温になっても溶けることなく粉のようになり除去されるという，蒸散に優れた性質に着目して使用した．グラファイトは，ポリイミド樹脂と比べ，紫外レーザー光をあまり吸収せず，エネルギーの多くが熱に使われるため発光が大きいという性質に着目し，ポリイミド樹脂と比較するために使用した．

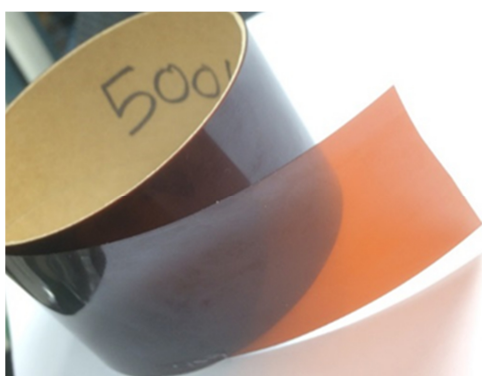


図 5-1 ポリイミド

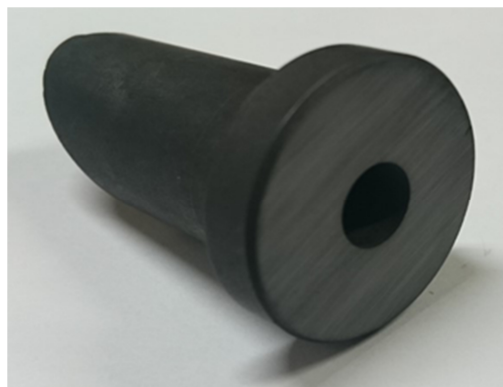


図 5-2 グラファイト(黒鉛)

5. 3 ポリイミド樹脂での実験

ポリイミド樹脂を加工したときの光の強度変化を図 5-3 に示す．レーザーパワーが高いときはグラフ中央付近の光信号が弱くなっている．この原因として，試料表面での高密度のプラズマの発生により，レーザーが反射されたことが考えられる．レーザーパワーが弱いときは綺麗な釣鐘型のグラフになっている．これを拡大したものを図 5-4 に示す．最小集光径に近づくほどパワー密度が高くなり，蒸散の光が大きくなり，離れると小さくなるため，このグラフのピーク値が最小集光径であるといえる．これらのことから，高密度のプラズマが発生しないレーザーパワーで測定を行う事で，そのピーク値から焦点距離を決定することができる．

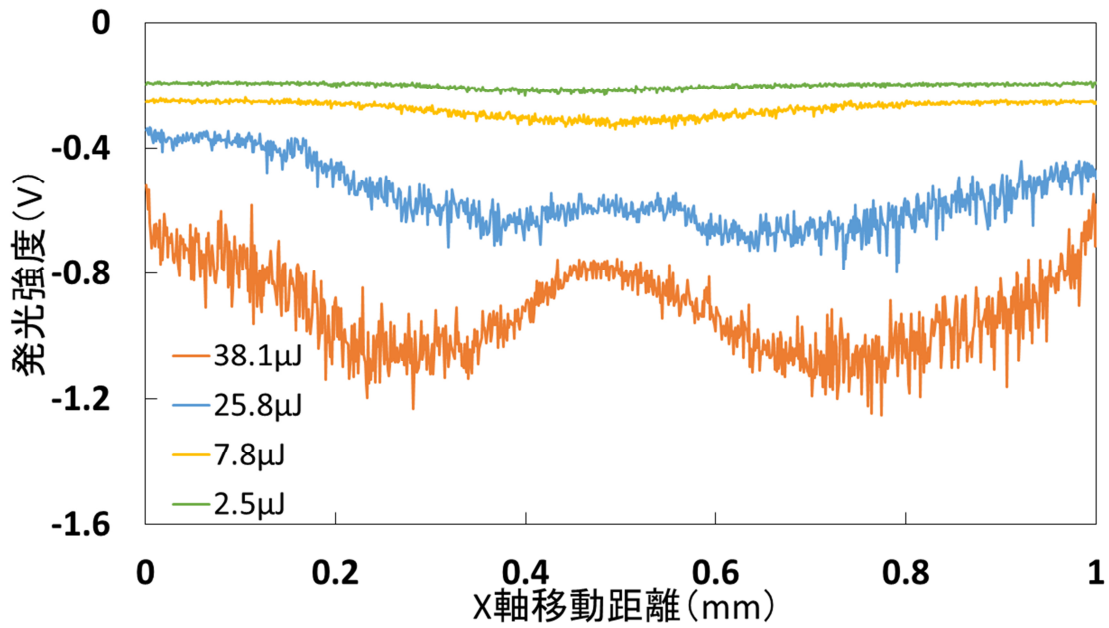


図 5-3 ポリイミド樹脂を加工した時の発光強度

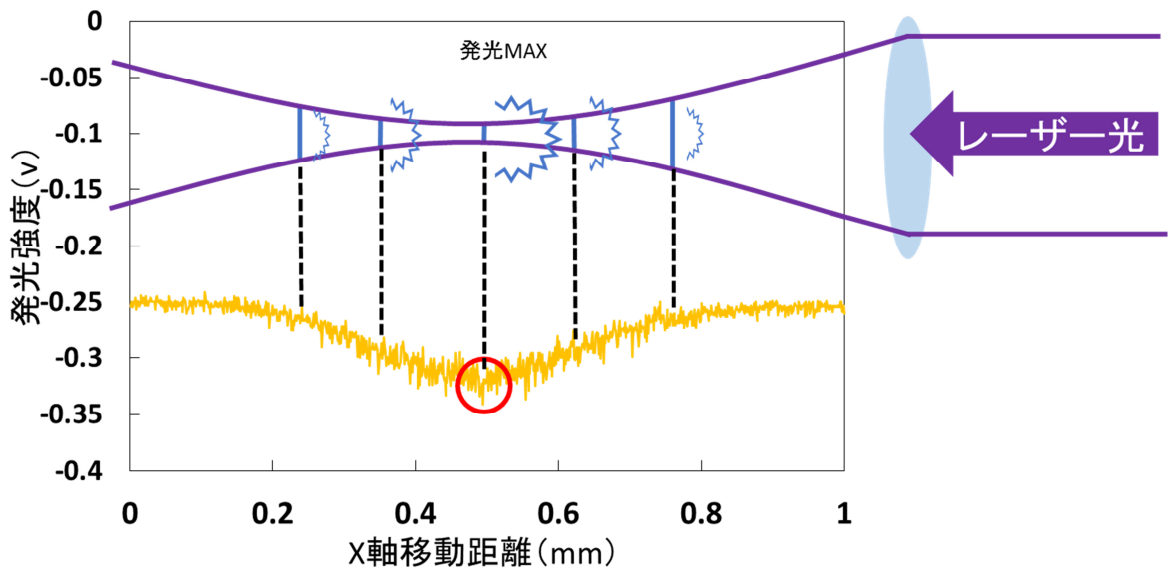


図 5-4 7.8μJ 時拡大

5. 4 グラファイトでの実験

グラファイトを加工したときの光の強度変化を図 5-5 に示す．山形のグラフにはなっているが，光信号が安定していない．これは，グラファイトの表面をサンドペーパー #4000 を使用して研磨したため，集光径より大きい約 $6\mu\text{m}$ の大きさの粒子による微小な凹凸により，光の当たり方に変化が生じたことが原因と考えられる．ポリイミド樹脂は

表面が平滑であるため、このようなことは起こらなかった。このことから、表面が平滑でないと正確な測定が行えないことがわかった。

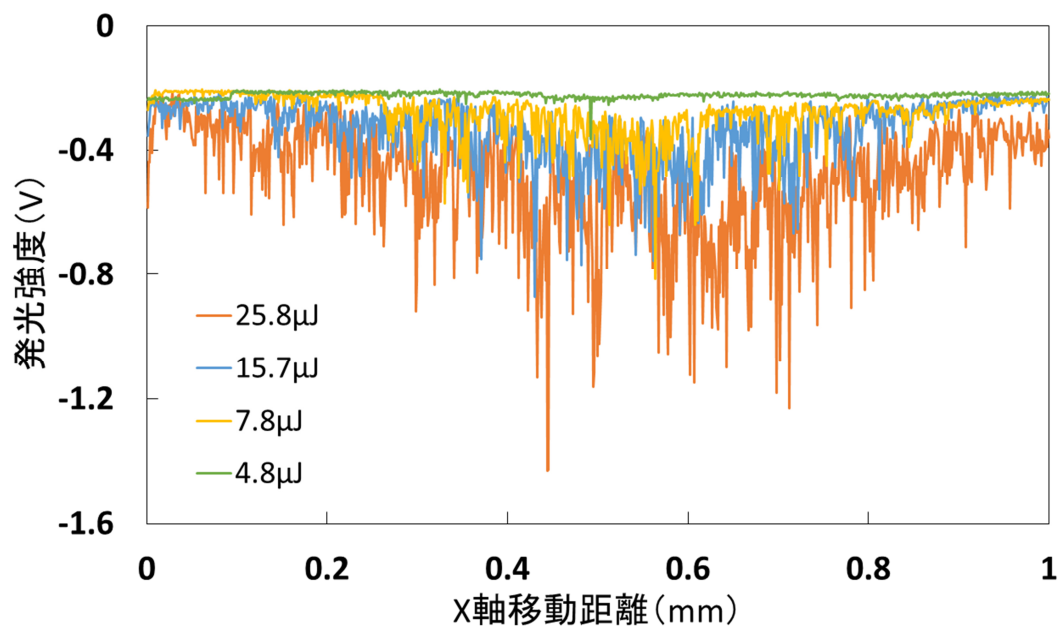


図 5-5 グラファイトを加工した時の発光強度

第6章

単結晶シリコン片持ち梁 の精密加工

6. 1 焦点付近における穴大きさ

単結晶シリコン片持ち梁に加工を行う前に梁の土台に1, 2, 4, 8, 16, 32, 64発づつレーザー照射を行い, 穴の大きさを確認した. 下図にSEMを使って穴の大きさをみたものを示す. 穴と穴の間隔は $100\mu\text{m}$ である. 穴の大きさは約 $8\mu\text{m}$ である.

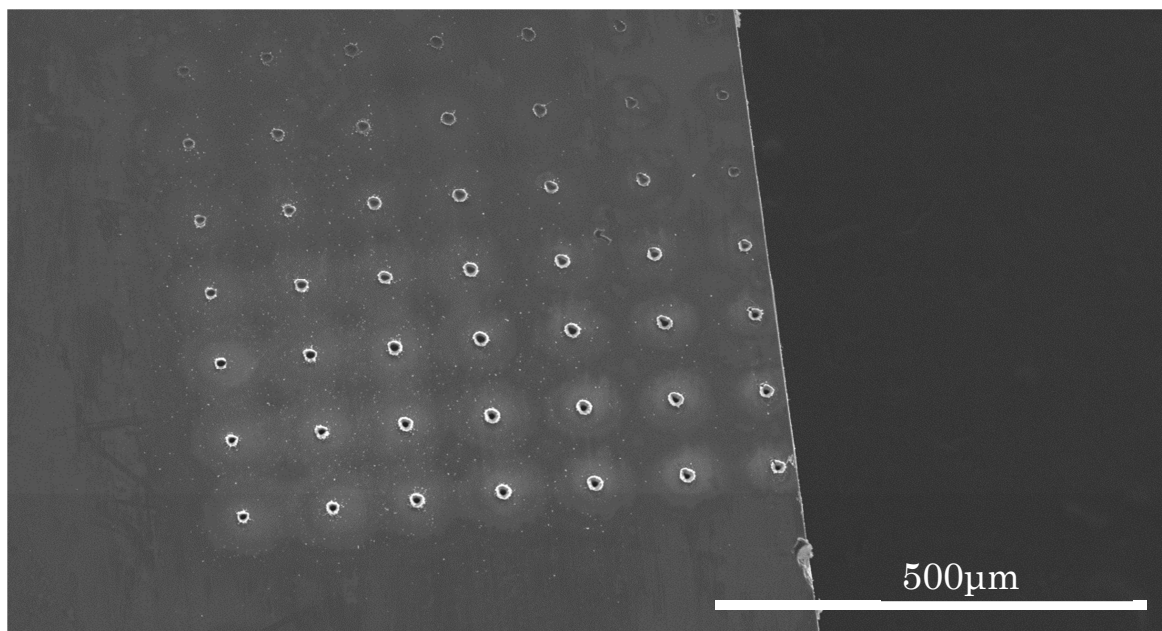


図 6-1 穴の大きさ比較

6. 2 単結晶シリコン片持ち梁の加工

今回作成した装置と焦点距離調整法を使い, 単結晶シリコン片持ち梁の精密加工を行えるか実験を行った. 単結晶シリコン片持ち梁の規格は, 幅 $40\mu\text{m}$, 高さ $230\mu\text{m}$, 厚さ $3\mu\text{m}$ である. 目標は梁の幅を半分の $20\mu\text{m}$ にすることである. ♪

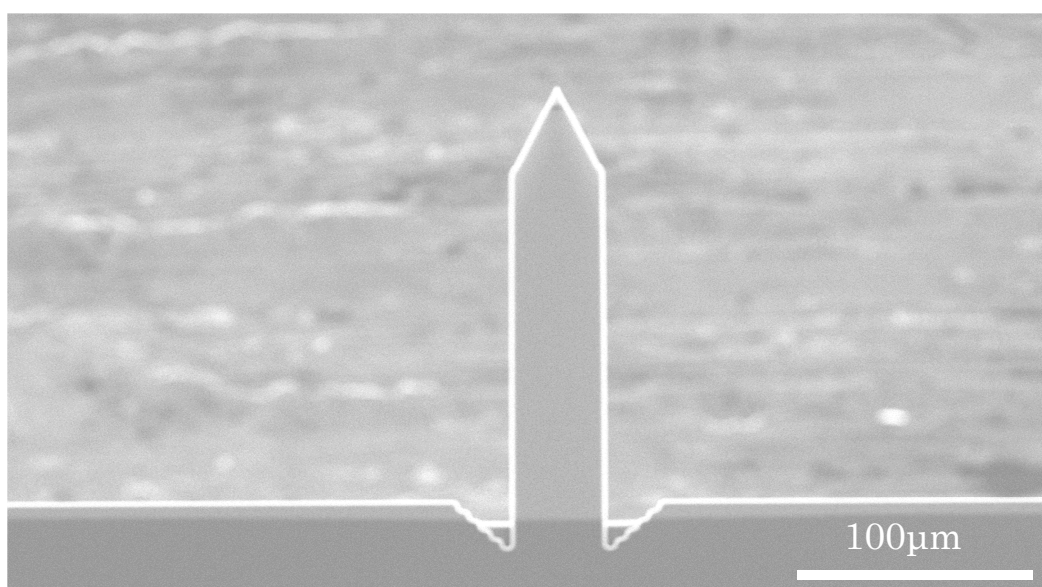


図 6-2 単結晶シリコン片持ち梁

6. 3 加工手順

① 焦点距離調整

梁と土台は同じレベルなので、シリコンの土台で今回作成した装置と焦点距離調整法を使い、焦点距離調整を行った。図 6-3 に示すようにシリコン片持ち梁の土台は、表面が平滑であり、閾値が高いため、高精度の焦点距離調整を行えた。

② 位置把握 (横)

レーザーを照射しながらシリコン土台を横断して光の信号を集録した。試料台とシリコン土台で信号が異なるため、シリコン土台の幅がどこからどこまでかを把握できる。規格と同じ長さになっているかを確認する。シリコン土台の幅は 1600mm である。

③ 位置把握 (高さ)

②と同様に今度は縦断させてシリコン土台の高さがどこまでかを把握する。この時、②のデータをもとに位置を調整し、シリコン土台の傾斜部と梁にレーザーが当たらないようにする。規格と同じ長さになっているか確認する。シリコン土台の高さは 3400mm である。

④ 位置把握 (梁)

③のデータをもとに位置を調整して梁を横断し、梁の位置を把握する。この時、梁が加工されないようにレーザーパワーを落とす。梁の幅 40 μ m と同じ長さか確認する。

⑤ 加工開始位置へ移動

④のデータをもとに加工開始位置へ移動させる。加工開始位置は梁の根元もしくは余裕をもって根元より少し下に設定する。穴の大きさが約 10 μ m であることを考慮して加工するラインを決める。

⑥ 加工

⑤の位置から 1~5 μ m 間隔、アテネーター400 でレーザーを照射していき、梁の先端より少し先まで行ったら、加工開始位置に戻る。この動作を数回繰り返す。

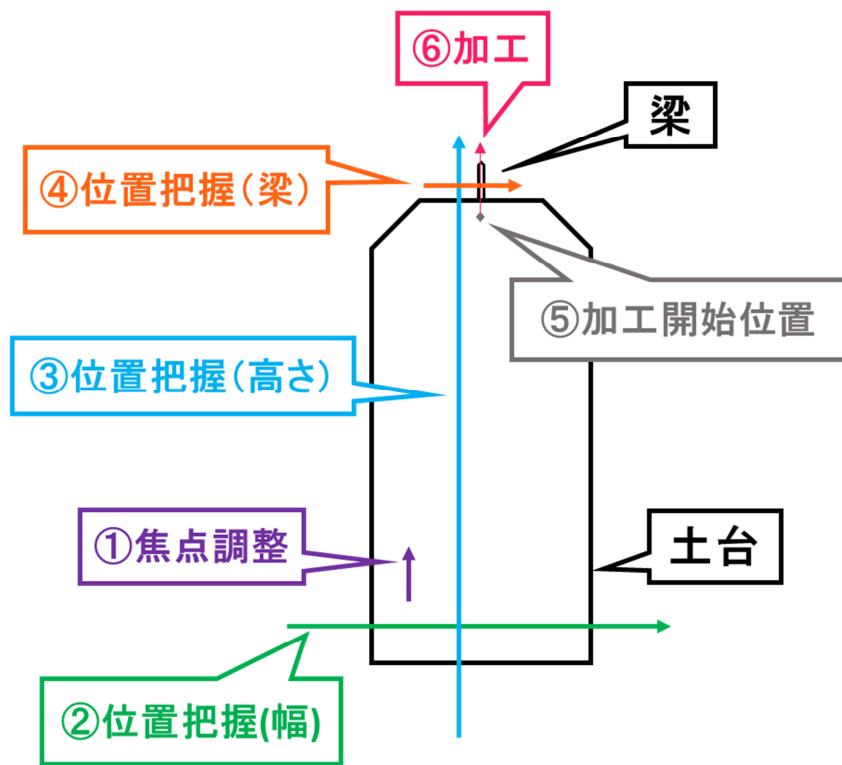


图 6-3 加工手順簡易図

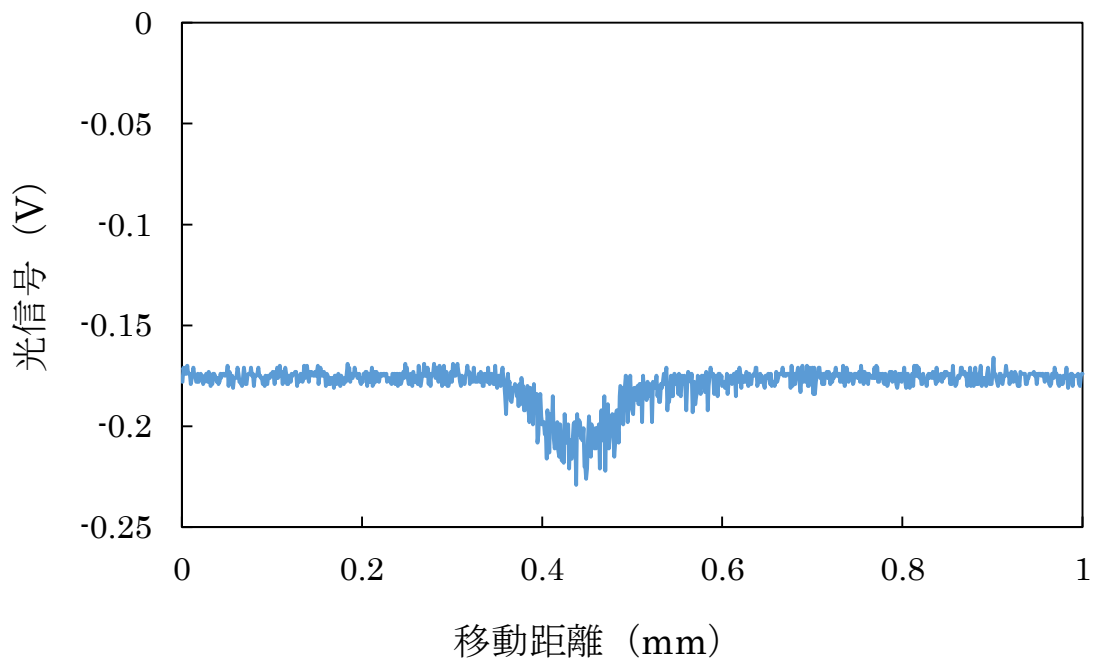


图 6-4 ①焦点距離調整

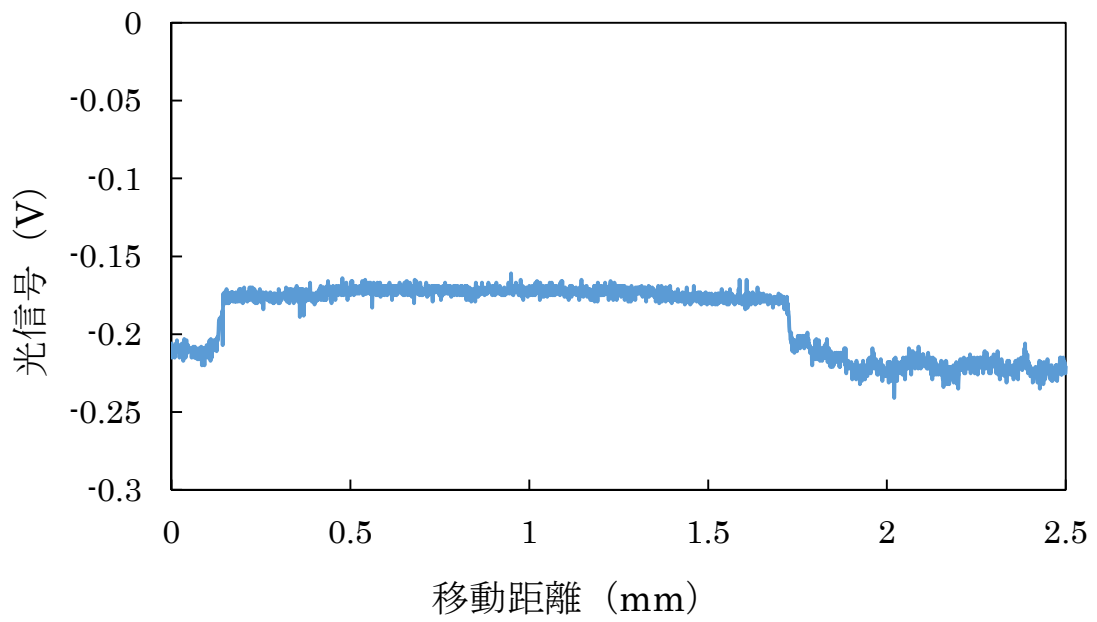


図 6-5 ②位置把握 (幅)

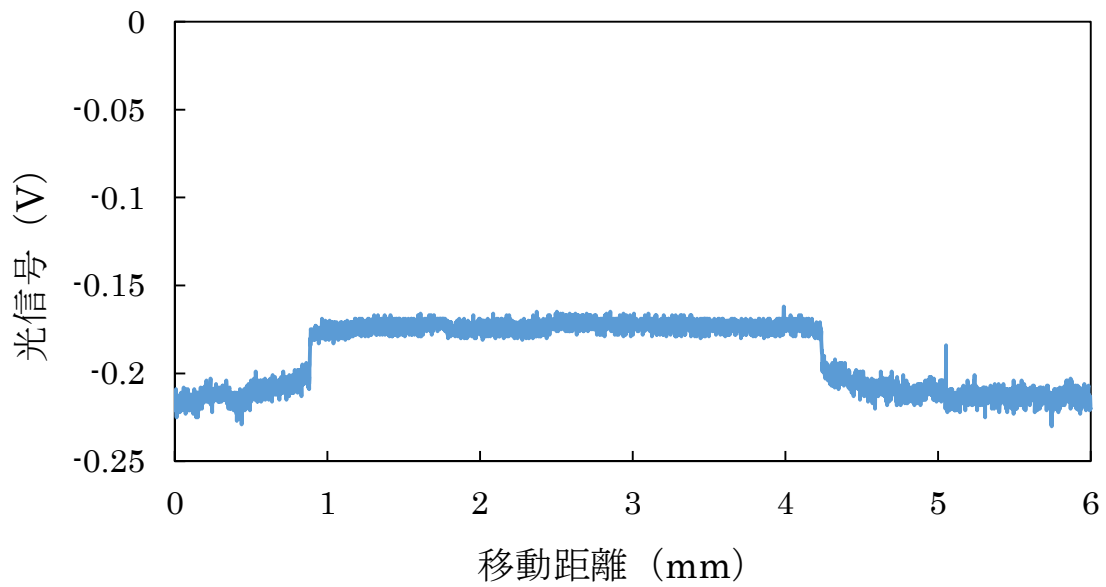


図 6-6 ③位置把握 (高さ)

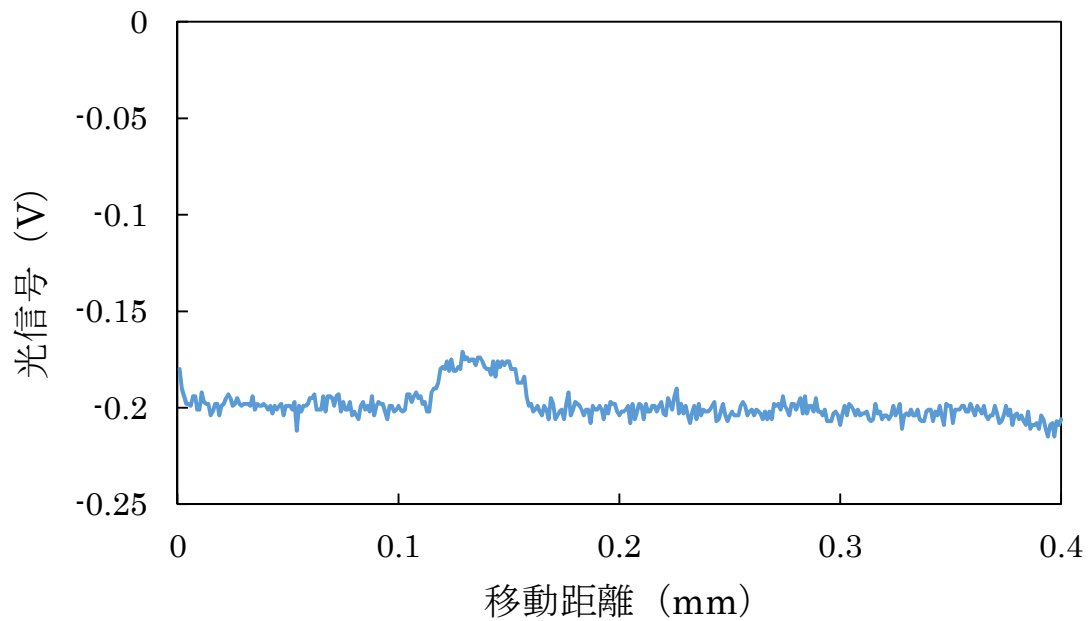


図 6-7 ④位置把握 (梁)

6. 4 加工結果

走査型電子顕微鏡(SEM)で観察した加工結果を図 6-8 に示す. 加工前と比べて約半分の $20\mu\text{m}$ 程の大きさに加工できた. また, 加工表面にはデブリや綿状のような物質が確認され, 蒸散時に付着したものと考えられる.

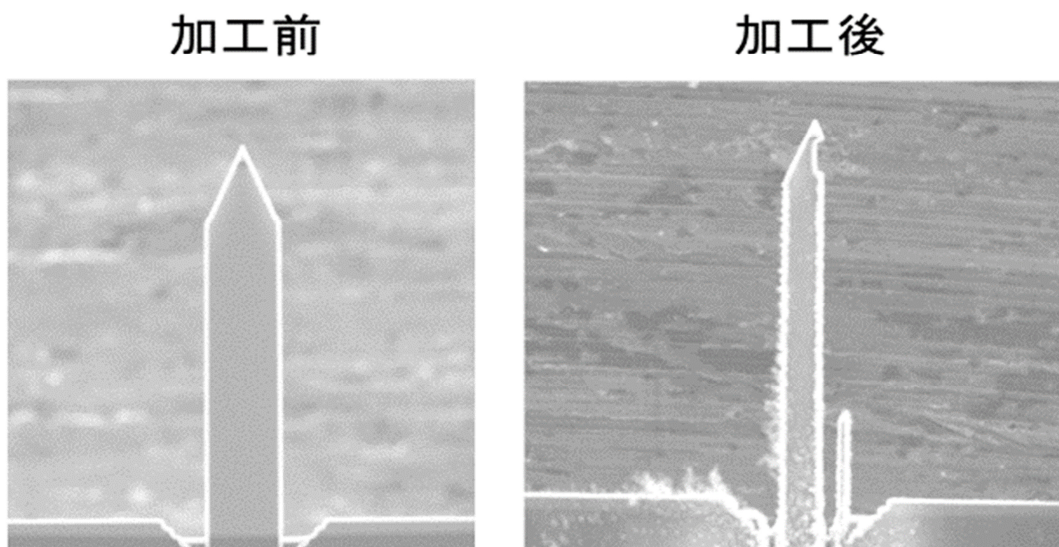


図 6-8 梁の比較図 (SEM)

6. 5 加工した梁の考察

前述にも示した通り，梁には綿状のようなものが付着していた．走査電子顕微鏡 (SEM) では，正確な観察(図 6-9)が行えなかったので，電解放出型走査電子顕微鏡 (FE-SEM) で観察した．図 6-10 に FE-SEM の観察結果を示す．付着しているものは綿状であった．これが，単結晶シリコンのままであるのか，それとも，空气中で加工したことで単結晶シリコンが変化したものであるか調べるため，Oxford Instruments 社製エネルギー分散型 X 線分光器 (EDS) と同社製のソフトウェア AZtec を用いて元素成分分析を行った．分析結果を図 6-11 に示す．C(炭素)は試料の接着に使用した導電性テープ成分である．残りの O(酸素)と Si(ケイ素)が綿状物質の主成分である．このことから，綿状物質はシリコンが酸化した酸化シリコンであると考えられる．

図 6-8 で加工した梁を見ると先端が凹んでいるのがわかる．これは，梁の先端が欠けているのか加工されているのかを見るため，拡大して観察を行った．拡大図を図 6-10 に示す．梁を見てみると先端が他に比べ薄くなっているがわかった．欠けているように思えたが拡大して見てみると加工が行われていた．この原因として，熱膨張によるズレが考えられた．加工台を駆動するときモータが発熱し，加工台全体に熱が伝わり，熱膨張により加工台がわずかにずれることで，複数回の照射で加工する厚い部分に対し，薄い部分は早めに加工されてしまい，わずかなズレが影響したと思われる．

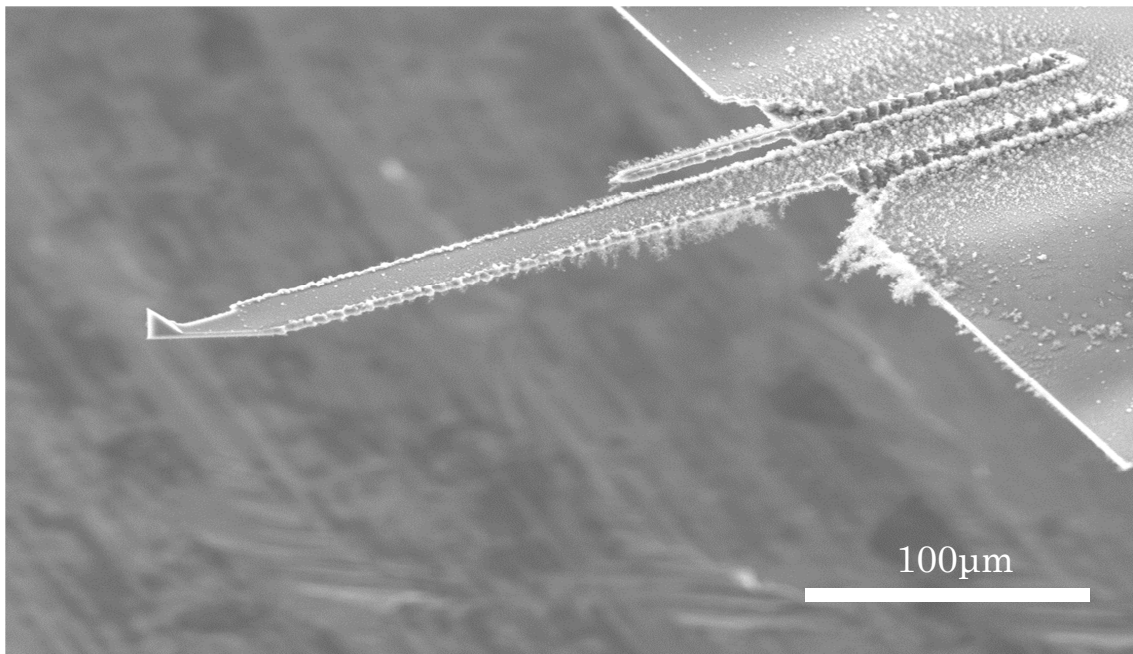


図 6-9 SEM による拡大図

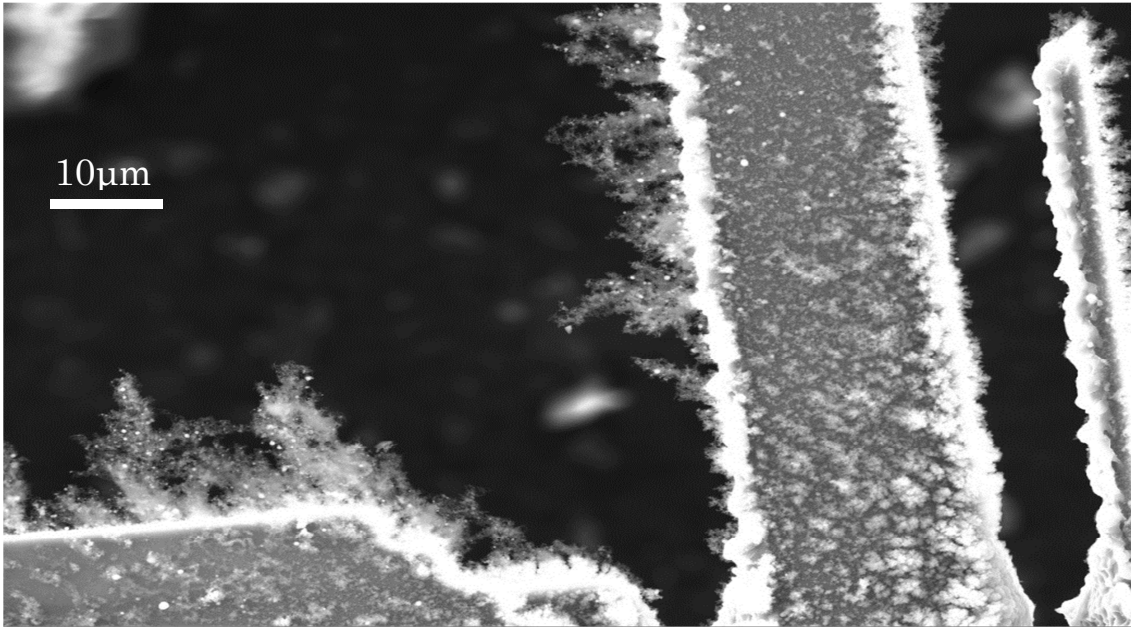


図 6-10 加工後の梁拡大 (FE-SEM)

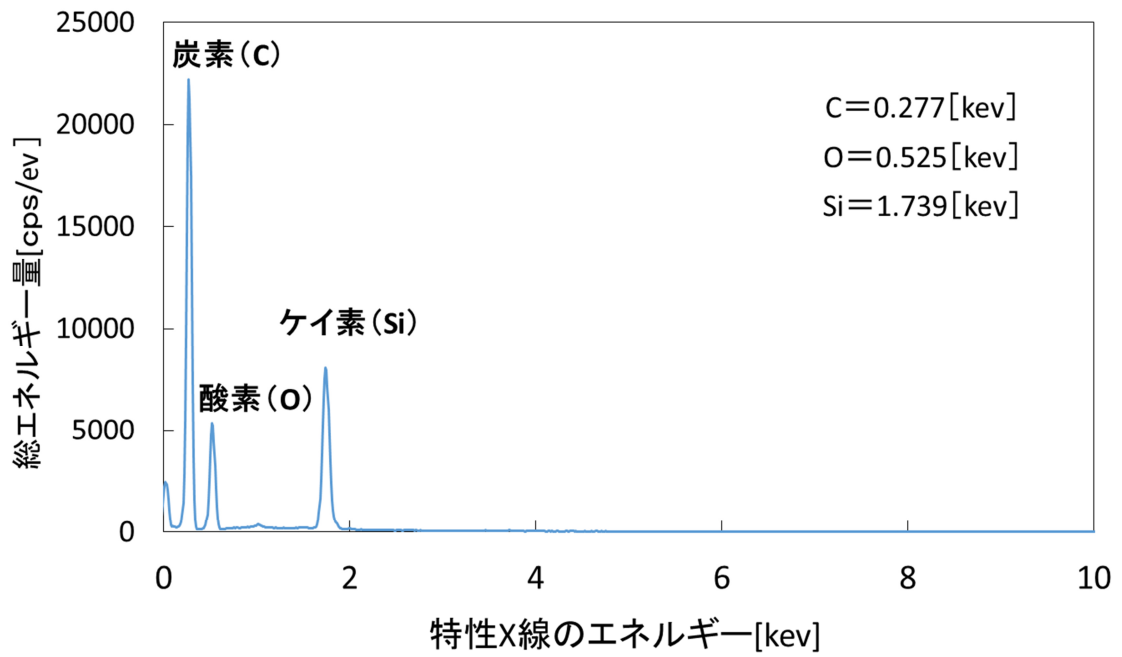


図 6-11 付着した物質の成分分析結果

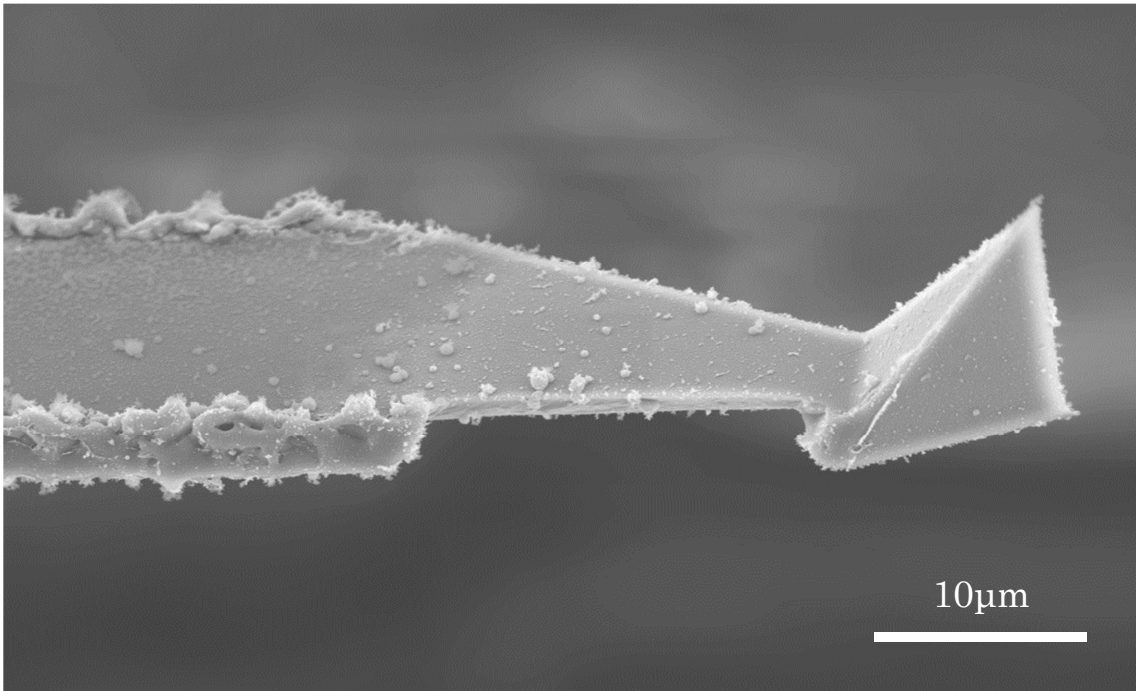


図 6-12 梁先端拡大 (FE-SEM)

6. 5 梁の性能評価

紫外パルスレーザーで加工したことで、熱により物質が変化し、単結晶シリコン片持ち梁の性能が劣化していないかを調べるため、真空中で固有振動数を測定した。その結果を図 6-9 に示す。結果として Q 値が大幅に減少していた。原因として、レーザー加工によって発生した熱がレーザーをあてた部分の周囲の単結晶シリコンを変化させ、熱変性層が生じたため、性能が劣化したと思われる。真空度は $5.0 \times 10^{-3} \text{Pa}$ で測定を行った。

Q 値とはエネルギーの減少に関する値である。この値が大きいほど振動が安定であるといえる。

Q 値の求め方は

$$\frac{\text{中心周波数 } f_0}{\text{半値幅}} = \text{Q 値}$$

である。下図 6-13 に求めるときに必要な部分についてを示す。

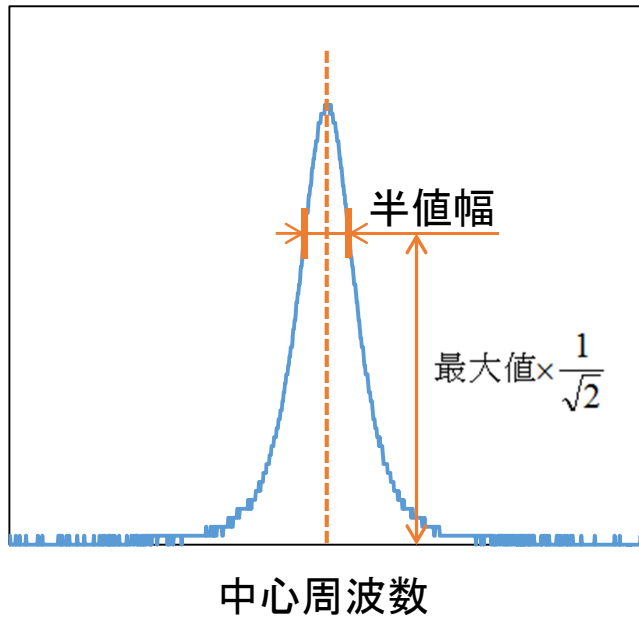


図 6-13 Q 値算出に必要な値のイメージ

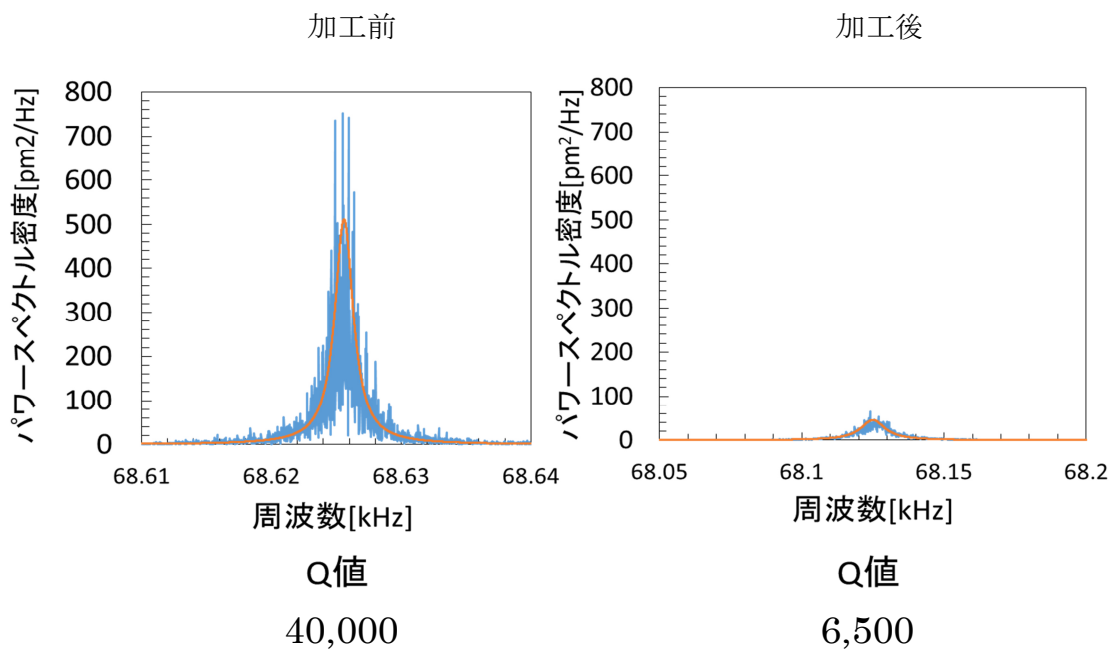


図 6-14 単結晶シリコンの熱振動比較

第 7 章

結言

- [1] 装置を改良し、焦点距離調整法を開発したことで、高精度の焦点距離調整を短時間で出来るようになった。
- [2] 改良した装置と焦点距離調整を使い、単結晶シリコン片持ち梁を加工することができた。
- [3] レーザー加工により単結晶シリコン片持ち梁の物質が変化し、性能が劣化した。

参考文献

- [1]吉本 隆司,「5 軸制御ステージによる微小ダイヤモンド工具の紫外パルスレーザー加工」,福岡工業大学大学院工学研究科平成 13 年度修士論文
- [2]吉井 啓太,「紫外パルスレーザーによる微小立体加工法に関する研究」,福岡工業大学大学院工学研究科平成 14 年度修士論文
- [3]久保 晃治, 田坂 隆晃,「紫外パルスレーザーによる加工精度の向上と応用」,福岡工業大学工学部知能機械工学科平成 27 年度卒業論文
- [4] 浜松ホトニクス Si フォトダイオード
<https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/category/3100/4001/4103/S1226-8BQ/index.html>
- [5]特性 X 線
http://www.jeol.co.jp/words/semterms/a-z_12.pdf

謝辞

本研究ならびに論文の作成に際し数々のご指導，ご助言，多大なご協力を頂いた河村良行教授に深く感謝の意を示します。また，院生の鐘ヶ江力さんと辻家祐介さん，及び研究室の皆様に深く感謝の意を示します。

また，SEM や FE-SEM 等の観察機器をお貸しく下さいましたエレクトロニクス研究室の方々に感謝の意を示します。

最後に本研究に対して適切なお助言を頂いた皆様に深く感謝の意を示します。

付録

I. 観察装置

・日立イオンスパッタ装置

イオンスパッタ装置は、導電性のない試料を走査型電子顕微鏡で観察する場合、試料表面の帯電による像障害を防止するため2~15nm程度を金属コーティングすることを目的としている。

導電性のない試料のため金属コーティング(金 Au)を行うことで走査型電子顕微鏡(SEM)、電解放出型走査電子顕微鏡(FESEM)で観察を行うことができる。



付録1. イオンスパッタ装置 E-1010

- ・ 走査型電子顕微鏡(SEM)

走査型電子顕微鏡(SEM)は 5kv~30kv で加速された電子線を光源として二次電子像及び反射電子像を 50 倍から 50000 倍の倍率で観測ができ、焦点距離調整は自動化されている。

特徴として試料台は水平方向の 2 軸について自動位置決めが可能のため試料交換時間が約 5 分と比較的短く、光学顕微鏡と比較して焦点深度が深いため、広い範囲にわたってピントのあった立体的な像を得ることができる。

ポリイミド樹脂, 単結晶シリコンの加工穴の大きさとアブレーションの観察するために用いた。



付録 2. 走査型電子顕微鏡 S-3000N

- ・電解放出型走査電子顕微鏡(FESEM)

FESEM は試料表面の形態観察を低倍率から高倍率まで幅広く観察でき、SEM より高倍率での観察が可能で、表面の凹凸状態や、組織の分布状態、結晶粒子の状態等の観察を行うことができる。

特徴としてナノスケールの凹凸画像の観察を行うことができ、表面分析、元素分析、断面試料炸裂装置(CP)を用いた断面分析を行うことができる。

加工穴の集光径と加工した単結晶シリコンの梁の形状観察、成分分析に用いた。



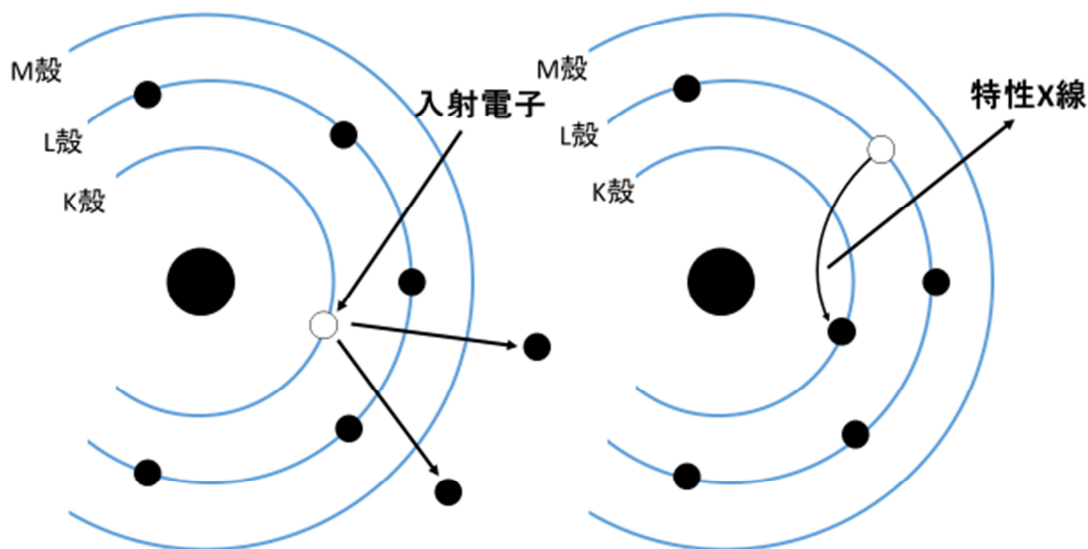
付録 3. 電解放出型走査電子顕微鏡 JSM-7100F

・ EDS-SEM による成分分析

単結晶シリコン片持梁の成分分析においてオックスフォード・インストゥルメンツ社製エネルギー分散型 X 線分光器走査型電子顕微鏡(EDS-SEM)で観察，同社製のソフトウェア AZtec を用いた成分分析を行った。

走査型電子顕微鏡 (SEM) にて画像観察する際，電子線を物質に照射すると蛍光 X 線が発生する．その中には元素固有の情報を持った特性 X 線が含まれている．これを半導体検出器のようなエネルギー分散型検出器にて検出し、そのエネルギーと強度を測定すると，物質を構成する元素を定性的に解析することが出来る．FESEM での高倍率観察中に試料の特定箇所をピンポイントで評価できるため， μm オーダーの微小領域分析が可能である．

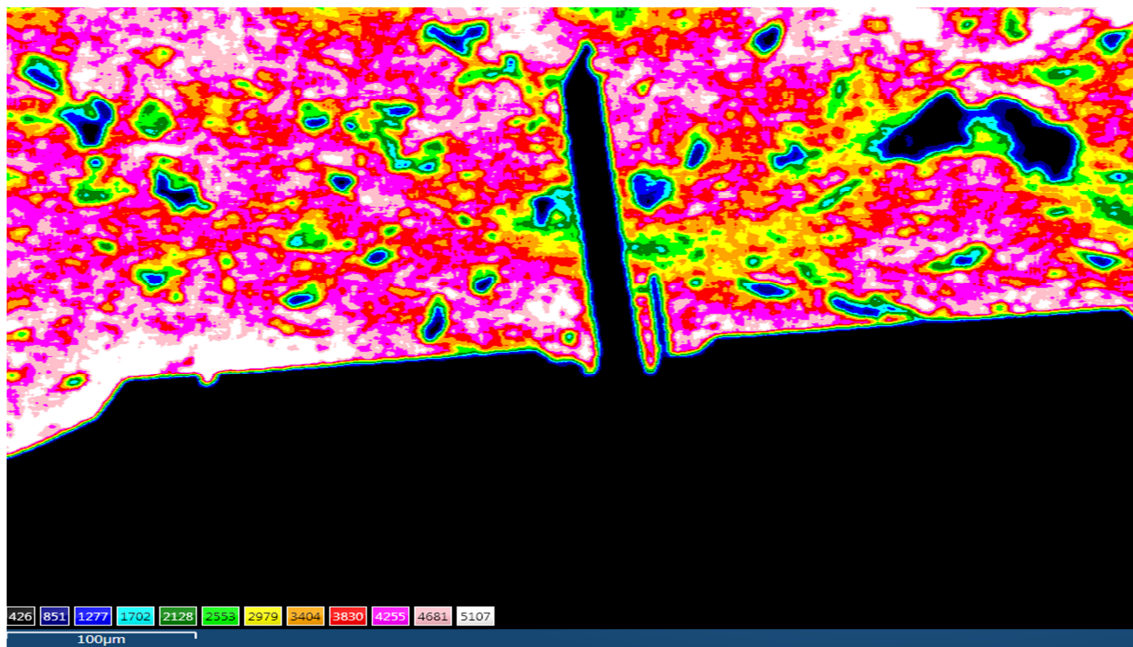
EDS の原理は試料に電子線を入射すると原子は入射電子によって内殻の電子が放出される．空位となった軌道にはよりエネルギー準位の高い外殻電子が基底状態に戻るが、この際に特性 X 線という原子固有のエネルギーを放出しながら戻る．EDS ではこの特性 X 線を観測することにより元素を特定する．



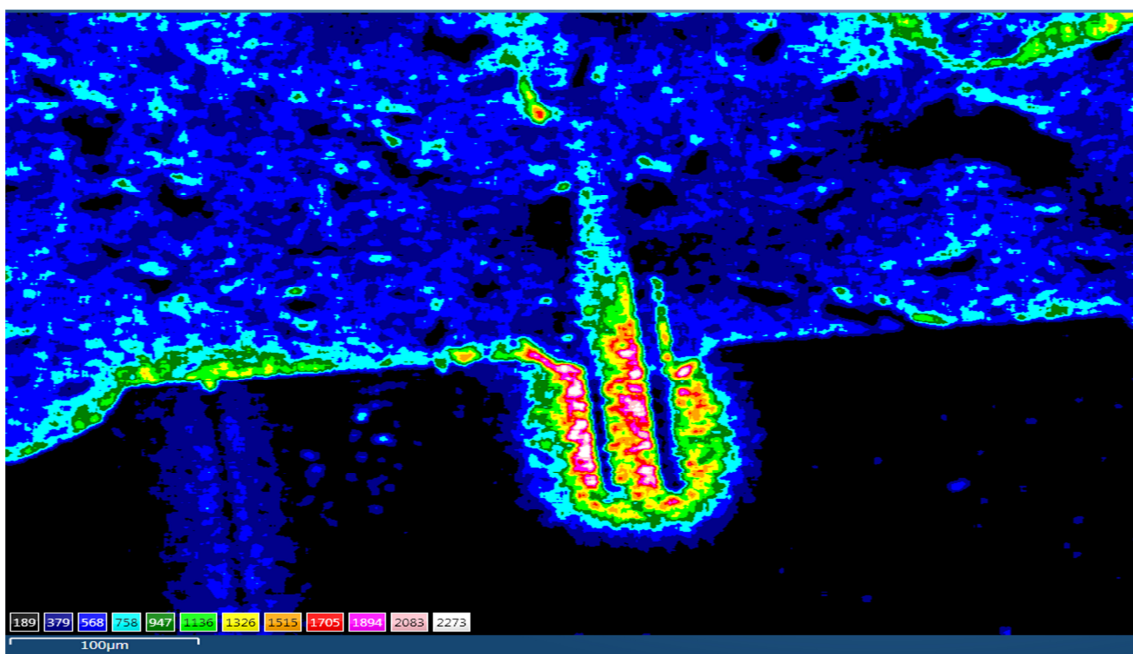
付録 4. 特性 X 線放出イメージ

・ EDS-SEM による成分分布図

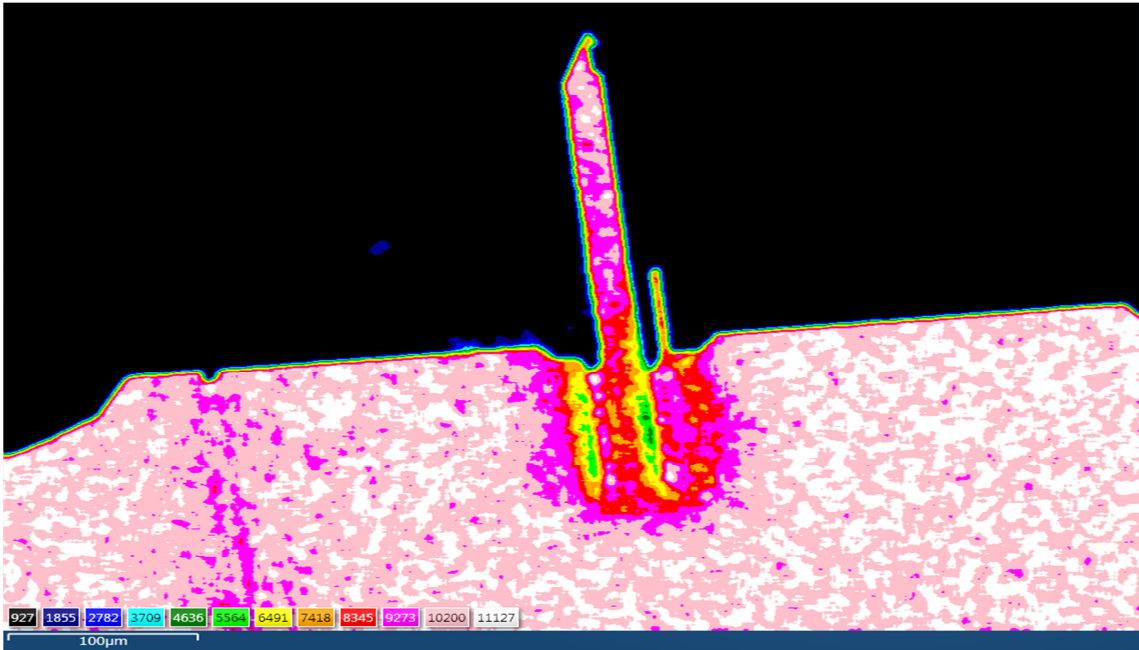
EDS-SEM を使用し、どの成分が場所によってどの程度存在するか分布図として確認を行った。下図にそれぞれの結果を示す。



付録 5. C(炭素)の成分分布図

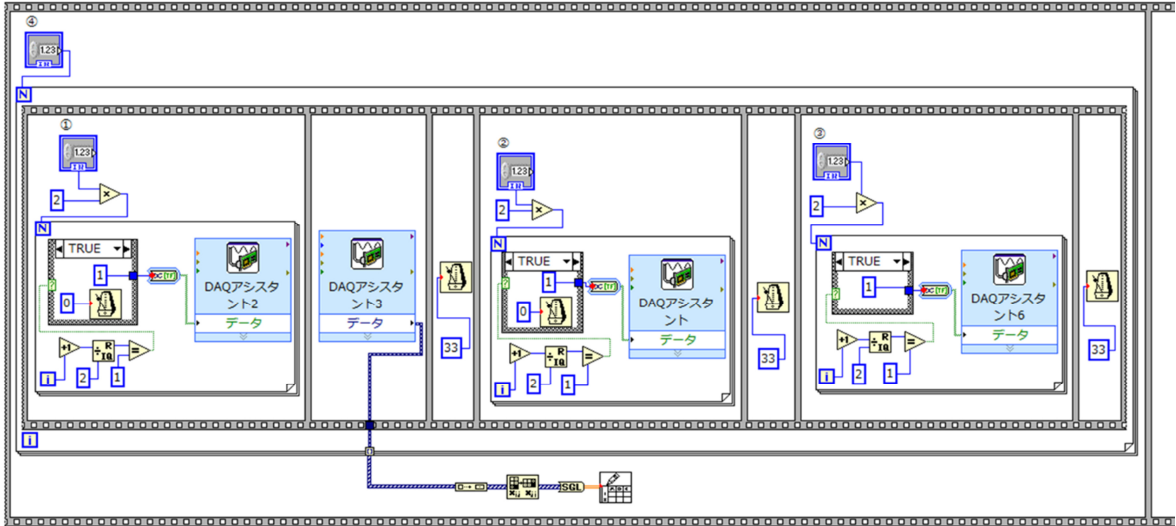


付録 6. O(酸素)の成分分布図

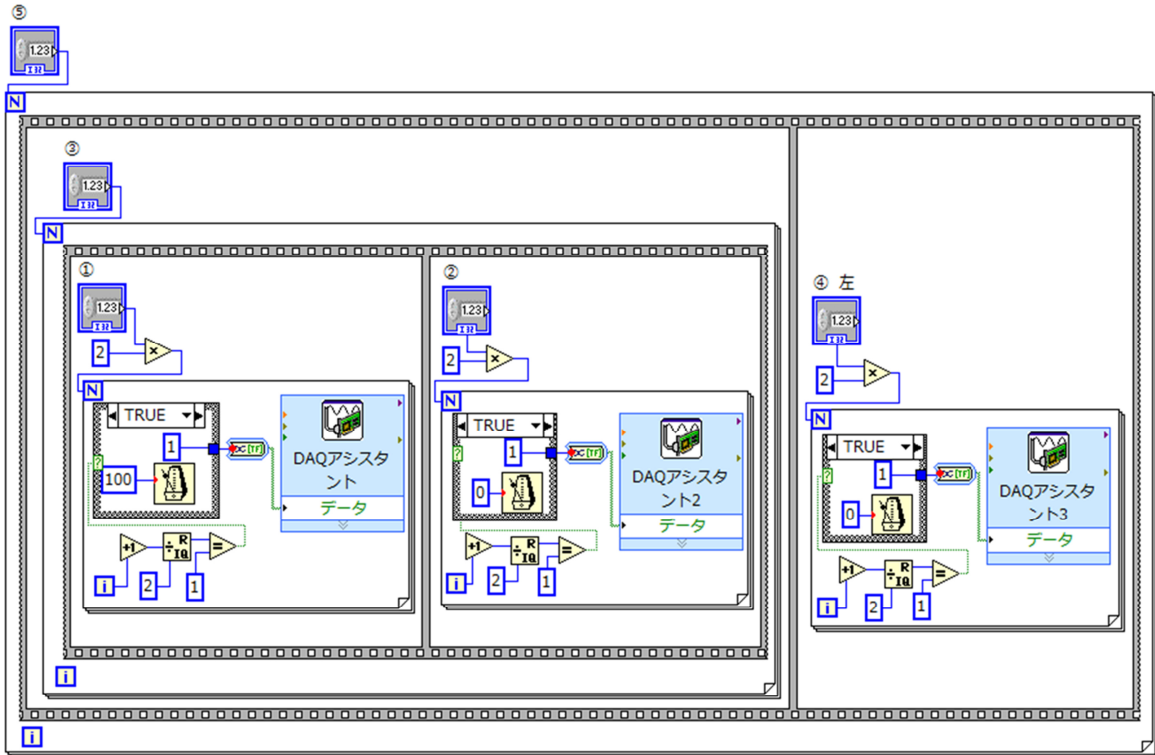


付録 7. Si(ケイ素)の成分分布図

II. LabVIEW のプログラム



付録 8. データ集録プログラム



付録 9. 単結晶シリコン片持ち梁加工プログラム

Ⅲ. 実験装置の全体図

