

平成 23 年度 博 士 論 文

題 目

レーザーを使った光重合性マイクロ構造体の回転
- Rotational drive of micro-structures made of
photopolymerizable materials by using laser light -

指 導 教 員

古沢 浩 教授

著 者

学籍番号:1156018

伊藤 基巳紀

平成 24 年 2 月 14 日

高知工科大学大学院工学研究科基盤工学専攻
社会人特別コース

目次

第1章 序論.....	- 2 -
第2章 マイクロ光造形.....	- 4 -
2.1 多光子吸収過程.....	- 4 -
2.2 一光子吸収法と二光子吸収法.....	- 5 -
2.3 感光樹脂の特性と加工分解能.....	- 9 -
第3章 マイクロ光造形装置の作製.....	- 17 -
3.1 縮小光学系.....	- 17 -
3.2 開口数(NA: Numerical Aperture).....	- 19 -
3.3 回折限界.....	- 19 -
3.4 構成部品.....	- 21 -
3.5 制御プログラム.....	- 26 -
第4章 レーザートラップを用いた光回転駆動.....	- 28 -
4.1 レーザートラップの原理.....	- 28 -
4.2 レーザートラップの光学系.....	- 29 -
4.3 放射圧による回転の原理.....	- 31 -
4.4 円偏光による回転の原理.....	- 33 -
第5章 光放射圧による回転駆動.....	- 37 -
5.1 実験方法.....	- 37 -
5.2 結果と考察.....	- 37 -
第6章 円偏光による回転駆動.....	- 43 -
6.1 実験方法—光吸収物質による回転方式.....	- 44 -
6.2 結果と考察—光吸収物質による回転方式.....	- 45 -
6.3 実験方法—複屈折性による回転方式.....	- 46 -
6.4 結果と考察—複屈折性による回転方式.....	- 48 -
第7章 重合性液晶による回転法のマイクロギアへの応用.....	- 54 -
7.1 実験方法.....	- 54 -
7.2 結果と考察.....	- 54 -
第8章 結論.....	- 58 -
参考文献.....	- 60 -
付録A 重合性液晶の加工分解能の決定.....	- 62 -

第1章 序論

マイクロマシン(MEMS: Micro Electro Mechanical Systems) 技術は半導体の微細加工技術の応用によって、特に光学分野での応用が盛んに行われている。光操作による機械的動作が可能である高性能・高機能なデバイスの実現にはマイクロ化・高速化・高密度化・集積化が重要であるが、MEMS はこれを実現するために必要な役割を果たすと期待されている。その中に光マイクロマシンが挙げられ、さまざまな方法で光学的にマイクロ物体を回転させる研究が行われている。光マイクロマシンには光スイッチや光スキャナ、センサ等、他にも多くの分野があるが、本研究ではマイクロサイズの三次元光アクチュエータに注目した[1]。

光の持つ運動量や角運動量は極めて小さいため、それらが有効になるためには対象物がマイクロ・ナノスケールの物体でなければならない。そのため任意の形状のマイクロ物体を対象とするためにはマイクロ加工技術が要求される。フェムト秒レーザーを用いた二光子吸収過程を利用することにより、サブミクロンの空間分解能を持つ光造形を行えることが河田らによって実証された[2]。二光子吸収法を使ったマイクロ光造形は、近赤外超短パルスレーザー光を開口数の大きなレンズで光硬化性樹脂中に集光することによって行われる。非線形過程である二光子吸収の確率はレーザー光の焦点位置からの距離と共に急速に減少するので、硬化領域をサブミクロン領域に限定させることが可能である。

この手法と光トラッピング法（または光ピンセット法）を組み合わせ、光アクチュエータの研究が行われている[2-6]。表 1.1 に示すとおり、光アクチュエータの駆動源として、1) 光→電気→力、2) 光→化学→力、3) 光→熱→力等の光エネルギーが別のエネルギーを経由して力に変換される形態のものと、4) 光→力と直接力に変換するタイプがある [1]。

本研究では 4)の光エネルギーを直接運動エネルギーに変換するタイプの光アクチュエータの開発を試みた。光子のもつ運動量を利用すれば、風車型の構造体を作製すれば光の散乱や屈折を起こすことで回転トルクを構造体に与えることが可能である[7-12]。一方、円偏光は線形運動量だけでなく角運動量を持つことが、1936年に複屈折性を持つ水晶板を使って実証されて以来[13]、複屈折性を利用した回転駆動に関する研究が行われている[3, 14-18]。液晶も強い光学異方性をもつので、液晶ドロップレットに円偏光を照射した場合の回転特性が調べられている[19-24]。その後も、スピン角運動量や軌道角運動量を持つ光を吸収させることによってトルクを与える研究が行われてきた[25]。しかし吸収を利用した回転駆動の場合、光ビームによって角運動量だけでなく線形運動量も受け渡されるため、回転トルクを上げる目的で吸収率を上げると熱による損傷が生じたり、光トラッピングを同時に行うことが困難になったりする。

本論文では、次の3種類の構造体を作製し、光駆動の回転特性を調べた：1) 鏡面非対称性を持つマイクロ構造体に対する光放射圧を利用した回転、2) 光吸収物質を混入させたマイ

クロ構造体の円偏光ビームによる回転[12]、3) 光吸収物質を使用せず、光学異方性の高い重合性液晶を素材としたマイクロ構造体の複屈折性を利用した回転。

光放射圧を利用した回転では構造体境界面における全反射を利用する形状のものも作製し、従来の屈折を利用した回転と比較した。また円偏光ビームと光吸収物質を利用した回転では回転方向の切り替えが容易に行えることを示し、その回転周波数を測定した。液晶の光学異方性によって回転させる場合には、従来では対象が液晶ドロップレットに限られていたのに対して、本研究ではマイクロ光造形法を適用することにより作製した任意形状の回転体について、円偏光の回転トルクによる回転特性を調べ、回転トルクの算出や回転機構を考察した。[26-27]

これらの回転法の利点を総合的に評価した結果をもとに、マイクロギアを作製し円偏光ビームによる回転駆動を評価した[28]。本研究ではこのように新たな光アクチュエータを開発し、光マイクロマシン技術への応用可能性を示した。

表 1.1 それぞれの光アクチュエータの駆動源

	光	化学	熱	電気	磁力	力	例
1	○	→	→	○	→	○	光電変換素子の実装 光ひずみアクチュエータ
2	○	→	○	→	→	○	有機分子アクチュエータ
3	○	→	○	→	→	○	光熱振動子、ラジオメータ
	○	→	○	→	○	→	光熱ひずみアクチュエータ
	○	→	○	→	○	→	熱磁化制御アクチュエータ
4	○	→	→	→	→	○	光放射圧

第2章 マイクロ光造形

光造形法とは、感光樹脂に光を照射することにより造形物を作成する技術である。この光造形法には紫外光により一光子励起するものと、赤外光による二光子励起させるものがある。ただしサブミクロンの分解能で光造形を行うためには両者ともレーザー装置を使用し、ビームをレンズで集光する必要がある。このようにしてサブミクロンの分解能で行う光造形がマイクロ光造形法と呼ばれる。

2.1 多光子吸収過程

多光子吸収過程とは非線形光学現象の一つである。図 2.2.1 に示すように 2 光子吸収過程では角振動数 ω_2 の二つの光子を同時に吸収し二光子励起による非線形現象を起こさせるものである。これにより角振動数 $\omega_1=2\omega_2$ の一光子で励起する現象と同じ効果をもたらす。すなわち元の波長の 2 分の 1 の波長の光子が吸収されたのと同じになり吸収確率は光強度の 2 乗に比例する[6]。このため、二光子吸収の発生確率は非常に低いので、光子密度を高くしなければ二光子吸収を誘起することができない。二光子吸収を誘起するには数 kW 程度のピーク強度を有するレーザーを短焦点レンズで強く集光させ光子密度を時間的、空間的にも高くする必要がある。これは CW(continuous wave)レーザーでは不可能なので、時間的に光子密度の高いパルスレーザーを使用しなければならない。

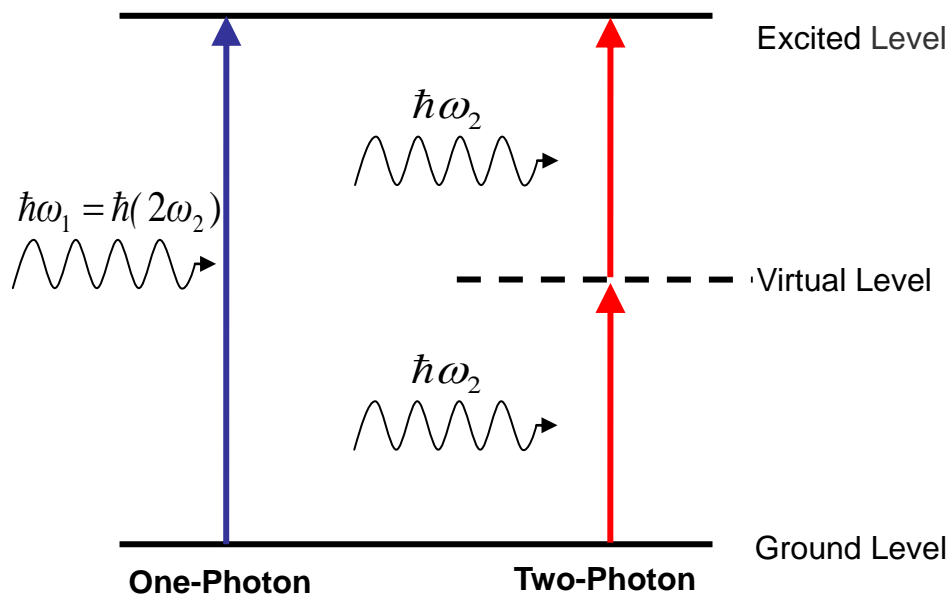


図 2.1.1 一光子吸収過程と二光子吸収過程

2.2 一光子吸収法と二光子吸収法

図 2.2.1、図 2.2.2 に示すような一光子吸収を用いた光造形法は、紫外線レーザーを用いてビームを対物レンズで集光しステージ表面の光硬化性樹脂を硬化させる。次にステージを高さ方向に移動させ、再びレーザービームを照射することで三次元構造物を造形していく(図 2.3.2)。

そのため樹脂の厚みで奥行き方向の加工分解能が制限され、また積層する樹脂の表面張力によって加工精度にばらつきが生じる。さらに加工分解能としてはレーザーの回折限界を超えて造形を行うことができない。

そのため、比較的大きなサブミリスケール程度の分解能を必要とする構造体に適している。この光造形は、製品化する前のデザイン段階で使用されることが多く、スケッチした物を形にする事によって、実際に使用するときの感触や重量感などイメージしづらい点を確認するために使用されている。

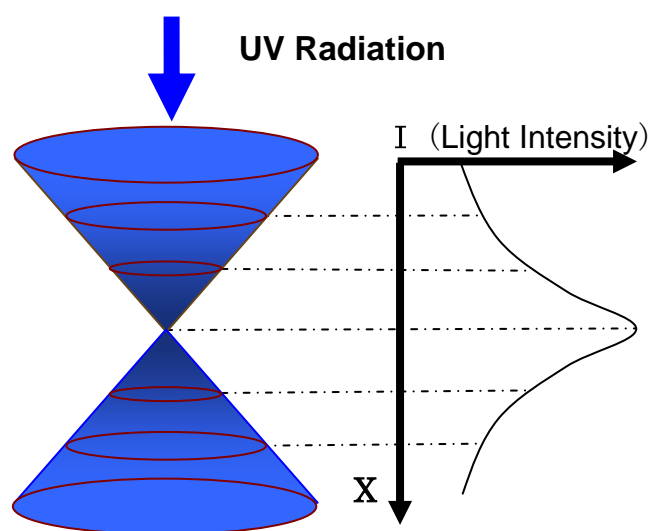


図 2.2.1 一光子吸収

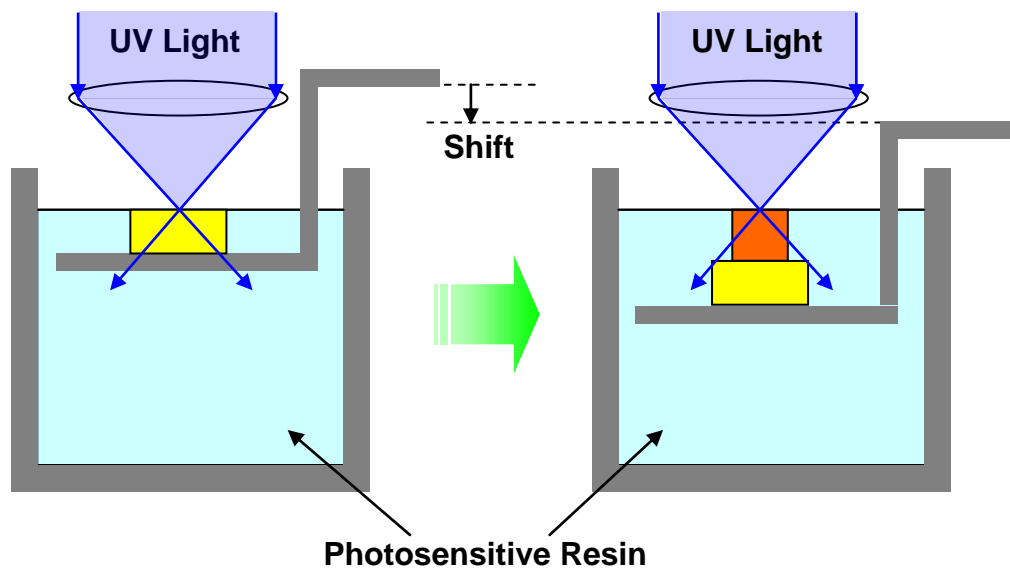


図 2.2.2 一光子光造形

一方、図 2.2.3、図 2.2.4 のような二光子吸収による光造形法を利用すれば、焦点位置付近のみで硬化が起こりそれ以外の場所では硬化しない。これは光を光子の流れと見たとき、二つの光子を同時に吸収する現象が起きるためである。照射された光子の二倍のエネルギーを持った一光子を吸収するのに相当する。このように焦点付近で照射光である近赤外レーザービームからの半波長の紫外光が得られることを利用する。そのため光硬化性樹脂内、つまり液体中で造形することができる。また二光子吸収の発生確率が光強度の二乗に比例するため、励起範囲が非常に狭く回折限界を超えた加工分解能で造形を行うことが可能となる。

まとめると一光子吸収法のように紫外光をレンズにて集光させただけでは回折限界を超えた造形は行えない。二光子吸収法を用いれば焦点付近のみのごく限られた狭い範囲で硬化が起こり、微細な造形が可能になる。また、本研究では作製した構造体を後にレーザートラップするため、樹脂中で硬化反応を起こすことが基板から構造体を剥がす手間、また技術必要としないため非常に重要となっている。このように一光子吸収法で問題となったことが二光子吸収法を使うことで解決する。

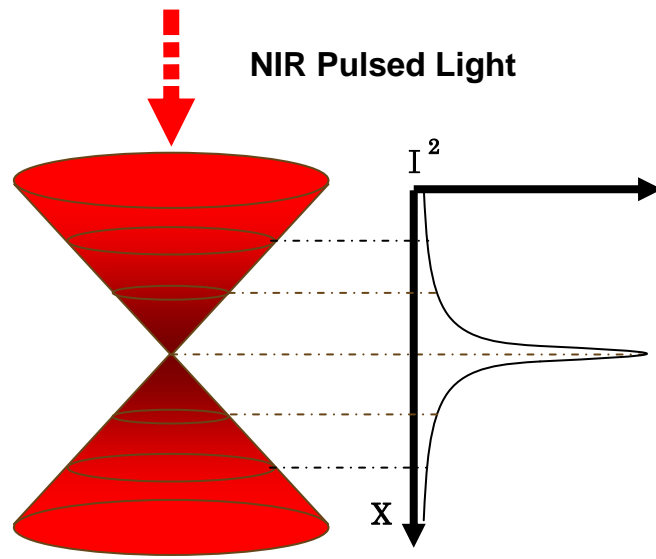


图 2.2.3 二光子吸收

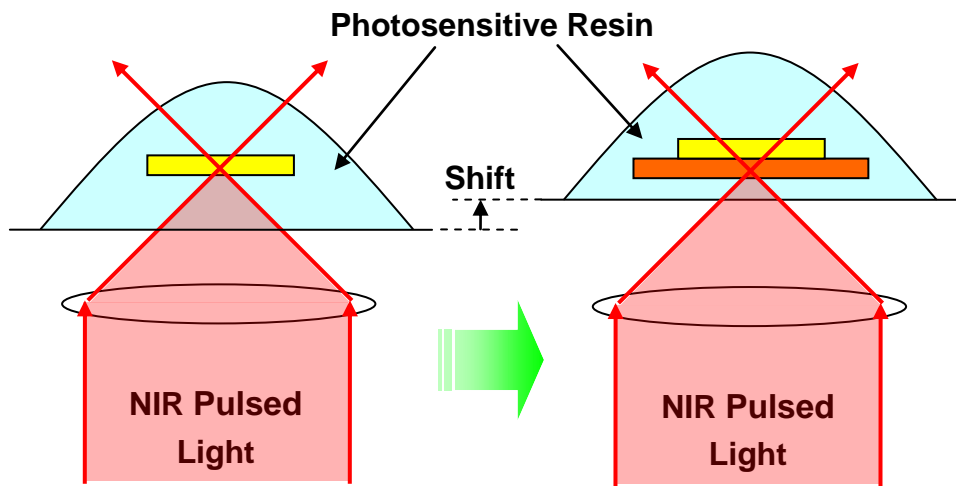


图 2.2.4 二光子吸收法

例として図 2.2.5 は本研究室で二光子吸収反応を利用して作製した、一つのセルの大きさが約 $10\mu\text{m}$ の蜂の巣型のマイクロ格子である。加工線幅は約 200nm 程度と、二光子吸収法を利用することにより微細な造形が可能となる。

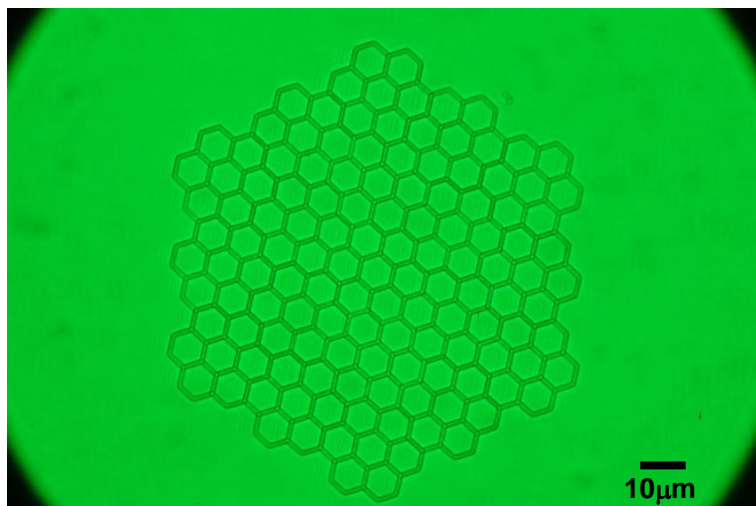


図 2.2.5 マイクロ光造形の例.一つのセルの大きさは約 $10\mu\text{m}$

2.3 感光樹脂の特性と加工分解能

本研究では 3 つの感光樹脂を使用している。作製した構造体の使用用途で使い分けを行っている。光硬化性樹脂は主にマイクロ模型作成用とし、フォトレジストはレーザートラップ対象物を作製する際に用いた。また、作製した構造体に複屈折性を持たせるためには重合性液晶を用いた。ここではこれらの感光樹脂の特性とマイクロ光造形法によって得られる加工分解能について説明する。二光子吸収の発生確率は光強度の二乗に比例するため、最高加工分解能を得るためには、光強度のみ変化させるのではなく走査速度も変化させる必要がある。

・光硬化性樹脂

本研究で使用した光硬化性樹脂 SCR701(株式会社ディーメック)はエポキシ系樹脂である。この樹脂は紫外パルスレーザーおよび Ar レーザー用に開発されている。

特徴として、

- 1, 薄肉造形が可能
- 2, 反り変形が極端に少ない
- 3, 寸法の経時変化も小さい

などがあげられる。

モノマー、オリゴマー、光重合開始剤、各種添加剤を主成分とし、図 2.3.1 のように紫外線を吸収することで液体から固体に変化する性質を持っている。

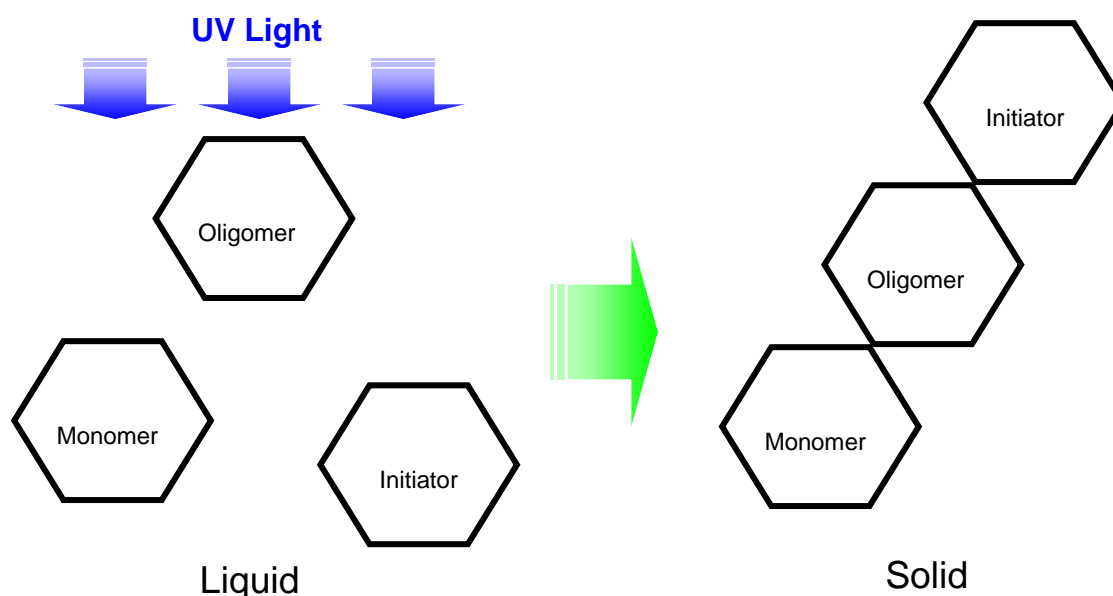


図 2.3.1 光硬化性樹脂の光硬化

分光光度計によって得られた光造形用感光樹脂 SCR701 の光吸収スペクトルを図 2.6.2 に示す。この結果よると本研究で用いるフェムト秒レーザーの波長 730nm あたりには吸収がないため硬化反応が起こらないことがわかる。しかしその半分の波長 365nm 付近では大きな吸収を持っているため、硬化反応を起こすことになる。したがって、この樹脂に近赤外光を照射した場合、二光子吸収が起きてはじめて樹脂が硬化することがわかる。

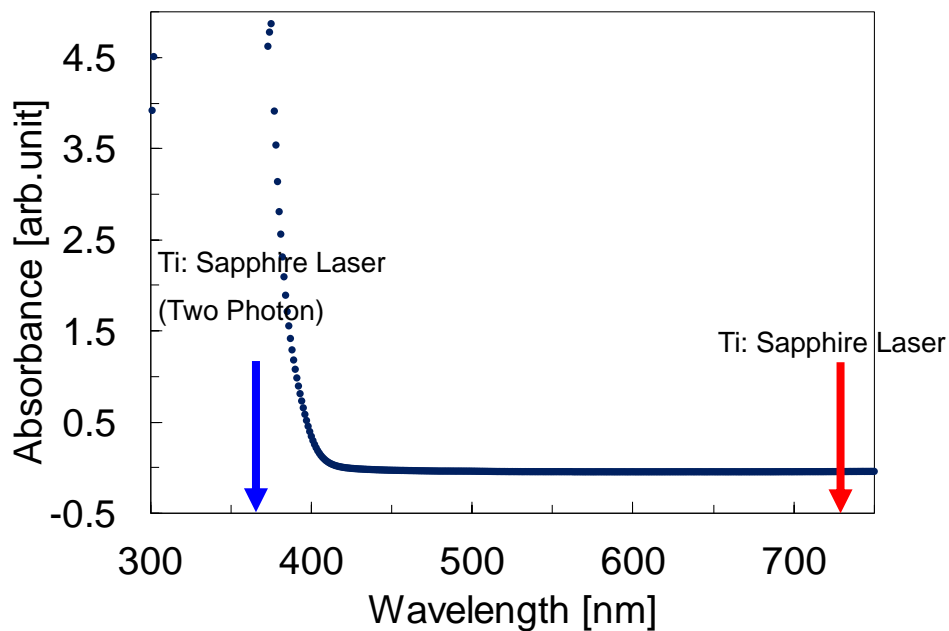


図 2.3.2 光硬化性樹脂 SCR701 の吸収スペクトル

次に、二光子吸収法によるマイクロ光造形装置に応用したこの樹脂の硬化線幅と硬化線高さのレーザーパワー依存性を図 2.3.3 に示す。最高加工分解能は 5mW 時のもので水平方向約 190nm、高さ方向約 230nm であった[30]。

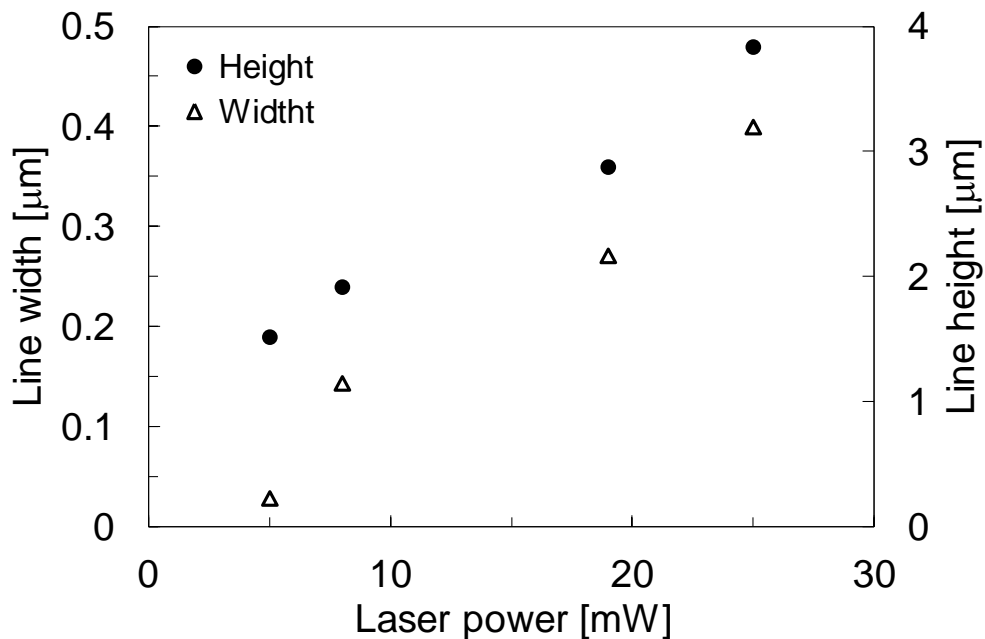


図 2.3.3 線幅・高さのレーザーパワー依存性

・フォトレジスト

フォトレジストとは、半導体ウェハー上に塗布し、ステッパーと呼ばれる露光装置を用いて、レチクルと呼ばれるフォトマスクに描かれた素子・回路のパターンを焼き付ける工程、フォトリソグラフィで使用する感光樹脂である。露光により不溶化するネガ型と、逆に可溶化するポジ型がある。実験では、化薬マイクロケム株式会社製の SU8-3000 シリーズを使用した。SU8-3000 シリーズはネガ型で高コントラストのエポキシ樹脂ベースのフォトレジストである。光エレクトロニクス分野において広く使用されており、超薄膜で、化学的及び熱的に安定が求められるマイクロマシンの作製や他のエレクトロニクス用に設計されている。

図2.3.4の吸収スペクトルにより光硬化性樹脂と同様、フェムト秒レーザーの波長730nmあたりには吸収がほとんどないのに対して、その半分の波長365nm 付近の紫外光では大きな吸収があることがわかる。したがって、このフォトレジストも同じ二光子吸収による光造形装置によって硬化が起きることがわかる。

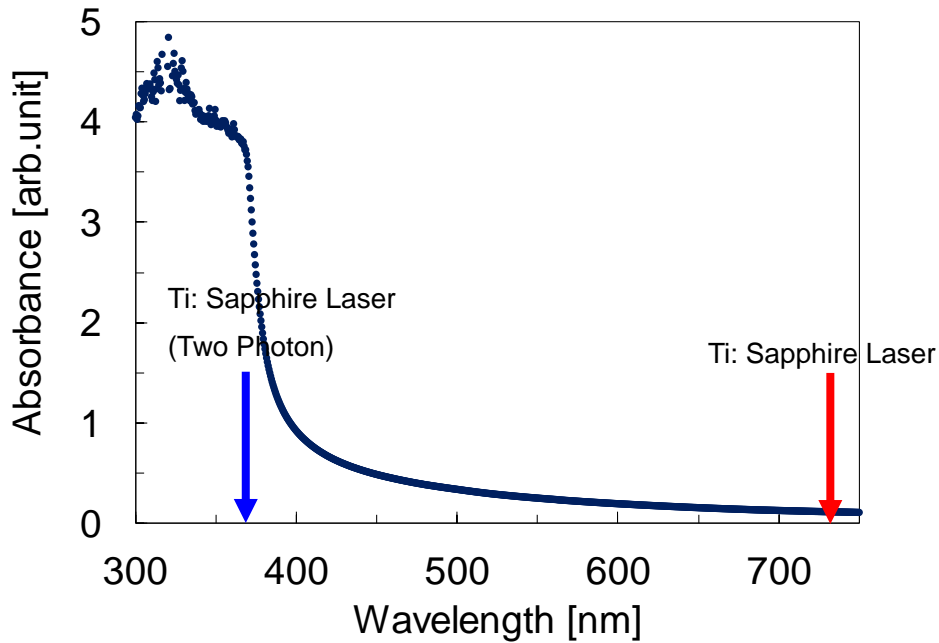


図 2.3.4 フォトレジストの吸収スペクトル

この樹脂を採用した経緯は光硬化性樹脂 SCR701 の取り扱いが非常に難しいという点である。SCR701 では、作製した物体が洗浄時に収縮するのを防ぐため一層に対して同じパターンで 5 回照射、ハードベイクとして 5 時間加温その後洗浄のプロセスで物体を作製する必要がある。しかしこの方法でも 6%の収縮現象があり、さらには 5 時間の長い加温時間が必要であることから取り扱いするには非常に注意が必要であった。

線幅のレーザーパワー依存性と走査速度依存性の測定結果を図 2.3.5 に、高さのレーザーパワー依存性と走査速度依存性の測定結果を図 2.3.6 に示しているが、これらの結果から SU8-3000 を用いた場合、レーザーパワーが 7mW で 345 μ m/s のときに最高加工分解能が得られ、そのときの線幅は約 340nm、高さは約 640nm であることがわかっている[31]。

加工分解能は SCR701 より劣るものの、作製時間が 5 時間から 30 分ほどに短縮できること、収縮率が 6%から 0%とまったく収縮現象が見られなくなること、作製した物体の大きさのばらつきが少なくなったなどの利点がある。また今回作製する構造体の駆動をすぐに確認することができるため、レーザートラップ用の構造体を作製する際には感光樹脂を SCR701 から SU8-3000 に変更した。

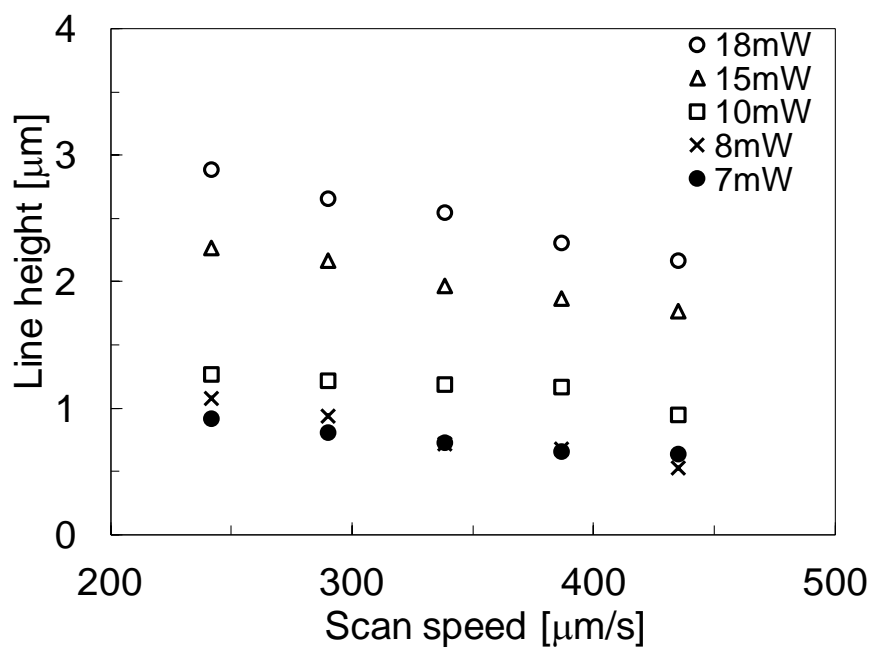


図 2.3.5 線幅のレーザーパワー依存性と走査速度依存性

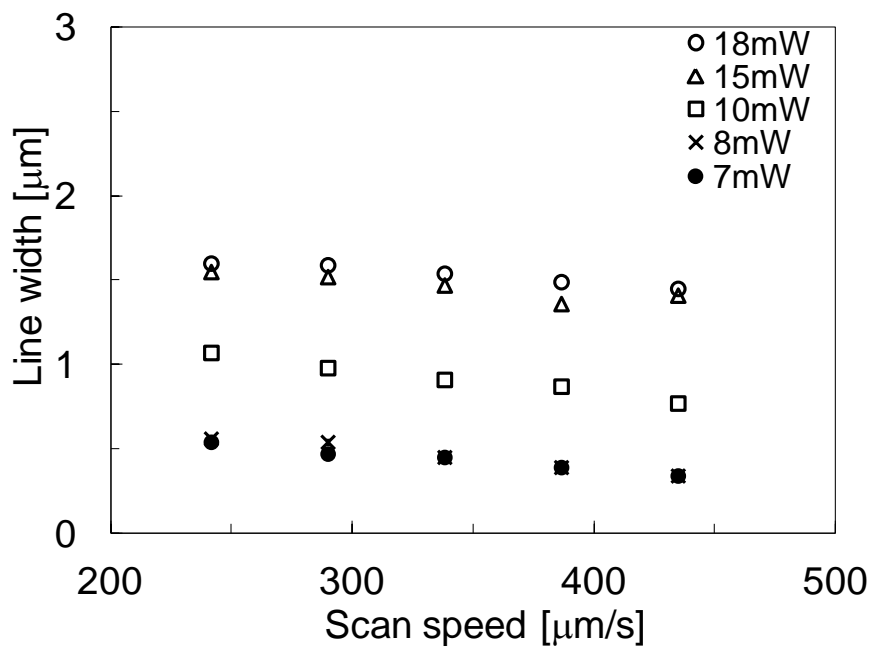


図 2.3.6 高さのレーザーパワー依存性と走査速度依存性

・重合性液晶

重合性液晶は紫外光で硬化する液晶であり、液晶の特徴も持っているため光硬化前にあらかじめ配向させておくことが可能である（図 2.3.9）。使用用途は、干渉現象を利用した色材や、液晶ディスプレイの光学フィルム、位相差フィルムや輝度向上フィルム（反射偏光板）、カラーフィルターとして使用されている。

今回はアクリル基をもつ図 2.3.7 のネマティック液晶モノマー(Paliocolor LC242, BASF)に光重合開始剤(Lucirin TPO, BASF)を約 4%混入させたものを用いた。この光重合開始剤を添加することで光硬化を起こす性質を持つようになる。

図2.3.8の吸収スペクトルにより他の樹脂と同様、フェムト秒レーザーの波長730nm あたりには吸収がほとんどないのに対して、その半分の波長365nm 付近の紫外光では大きな吸収があることがわかる。したがって、二光子吸収による光造形装置によって硬化が起きることがわかる。

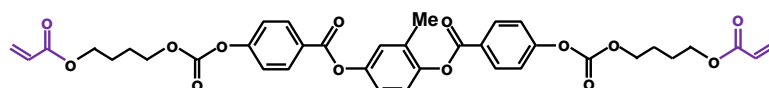


図 2.3.7 Paliocolor LC242 の分子構造式

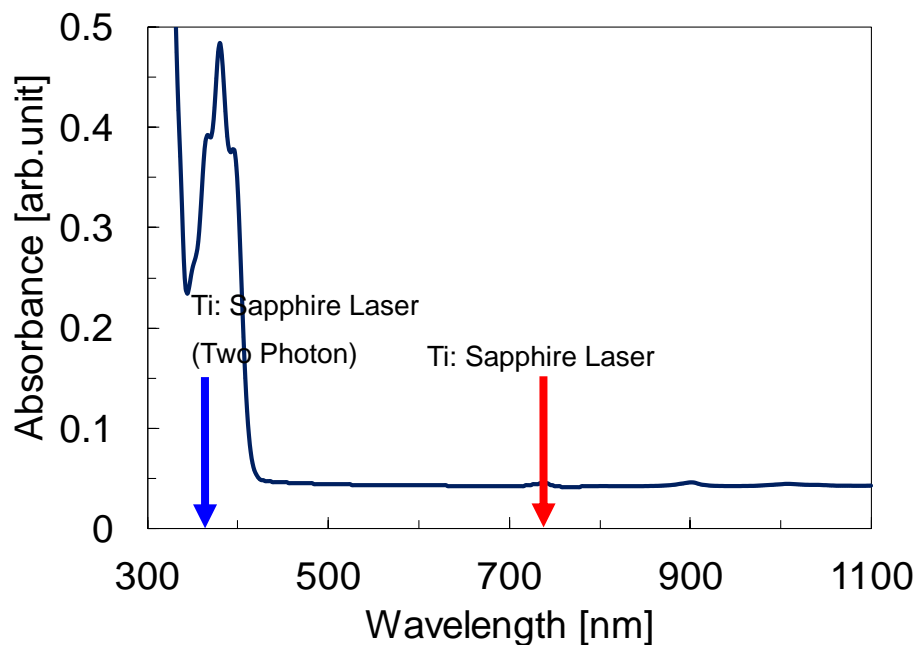


図 2.3.8 重合性液晶の吸収スペクトル

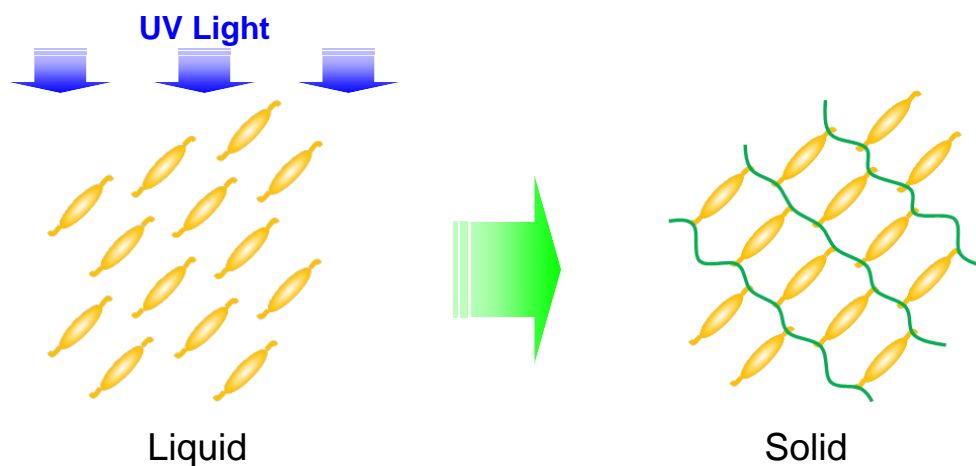


図 2.3.9 配向した液晶モノマーの光硬化イメージ

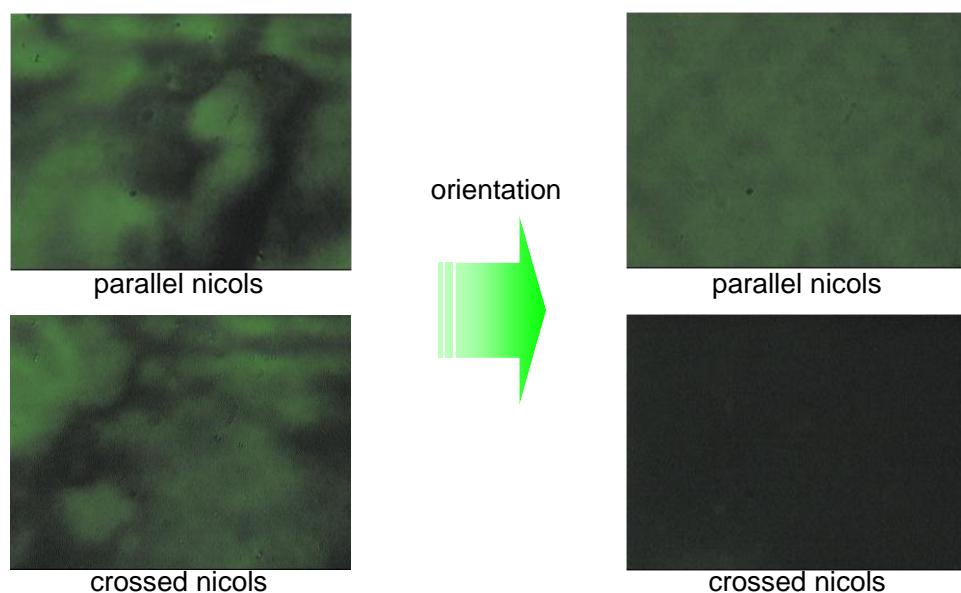


図 2.3.10 偏光顕微鏡で観測した配向前後の視野写真

液晶分子を決まった方向に配向させるため、ガラス基板上に塗布した PVA(ポリビニールアルコール)膜をラビング処理し、その上に重合性液晶を乗せて約 90°C に加熱した。この重合性液晶は常温では固体となるため、光加工直前に加熱する必要がある。これらの処理によって、液晶分子は配向膜に沿って配向することになる。図 2.3.10 の通り、配向の状態は偏光顕微鏡によって確認することができる。

ただしこの樹脂は本研究以前に二光子吸収を用いた光造形に応用された例がない[32]。そのため、それぞれの条件で作製した構造体について付録 A の通り、加工線幅と加工線高さ

を計測したものを、図 2.6.4 と図 2.6.5 に示す。この計測結果から最高加工分解能はレーザー強度 7.5mW 時、走査速度 384 $\mu\text{m/s}$ 時で、加工線幅：約 180nm、加工線高さ：約 320nm であり他の樹脂と同等である。

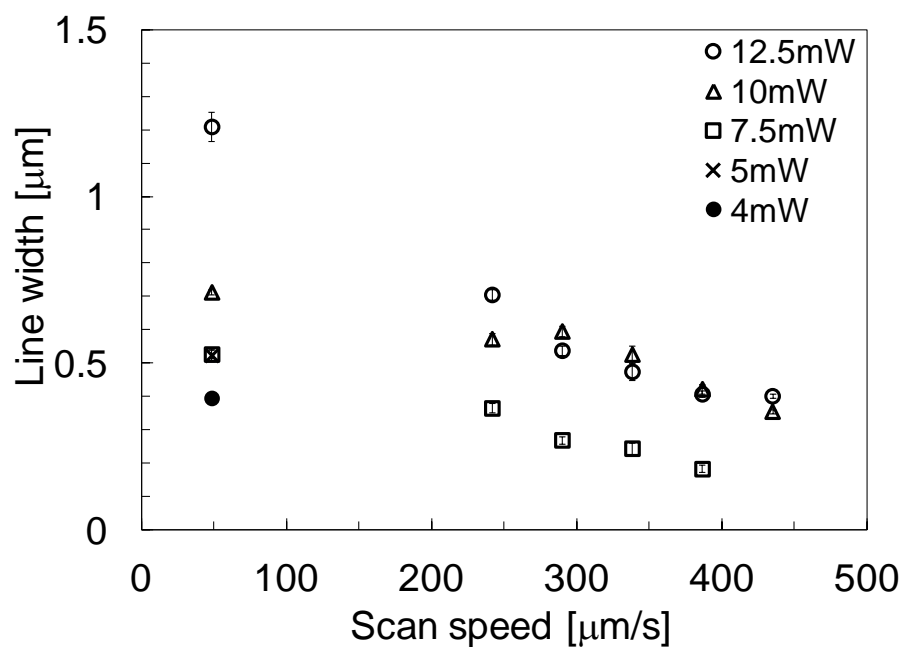


図 2.6.11 線幅のレーザーパワー依存性と走査速度依存性

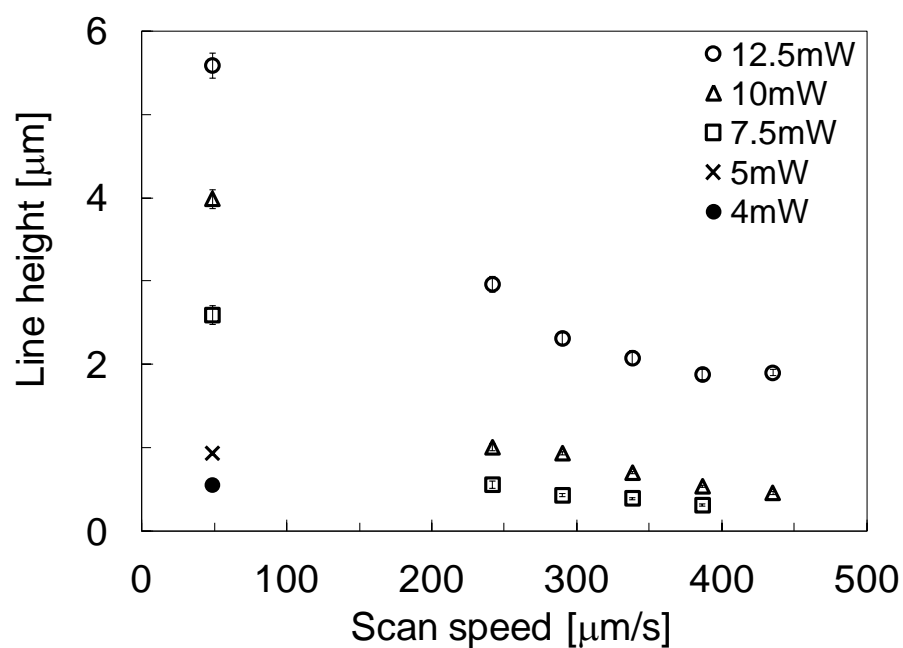


図 2.6.12 高さのレーザーパワー依存性と走査速度依存性

第3章 マイクロ光造形装置の作製

マイクロ光造形を行うための装置を、倒立顕微鏡を使用して作製した。この手法を用いた理由として、レーザートラップもレーザー装置を置き換えるだけでよいという点があるためである。本研究では二光子吸収を使用し集光点を電動ミラーによってスキャンするため、次のような縮小光学系を構成した。

3.1 縮小光学系

図 3.1.1 の写真は造形を行うために作製した装置の全体写真であり、図 3.1.2 と図 3.1.3 は光学系の詳細図である。

Mode-Locked Ti:サファイアレーザー(波長:730nm、パルス幅:130fs、繰り返し周波数:83MHz)から出た光を、スペーシャルフィルタを通すことにより造形に必要なのない部分を取り除き加工分解能を上げる。次に、二枚のレンズを通したあと、顕微鏡の対物レンズでサンプルに集光する。この二枚のレンズによりガルバノスキャナのミラーを対物レンズの顕微鏡側レンズ上に結像させることで、ガルバノスキャナを走査させてもレーザーの光束は顕微鏡側レンズ面から外れることがない。また、レーザー径を顕微鏡の対物レンズ径に合わせることで対物レンズのNAを最適にする効果がある。

図 3.1.2 と図 3.1.3 は光学系の詳細図である。

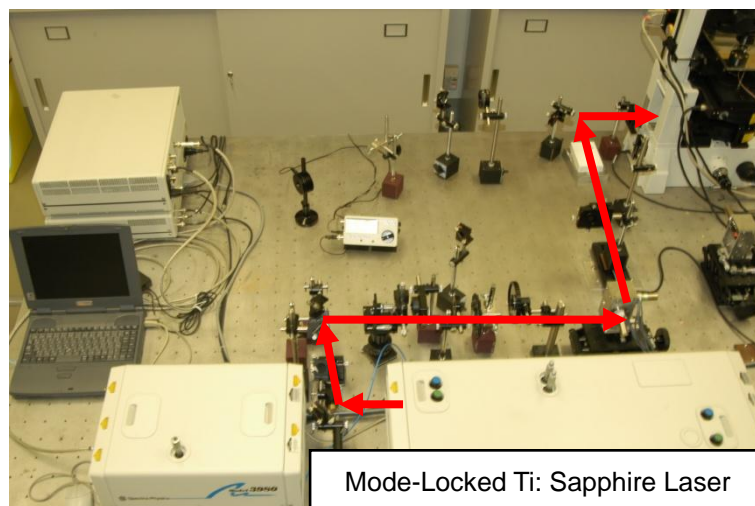


図 3.1.1 造形装置の全体写真

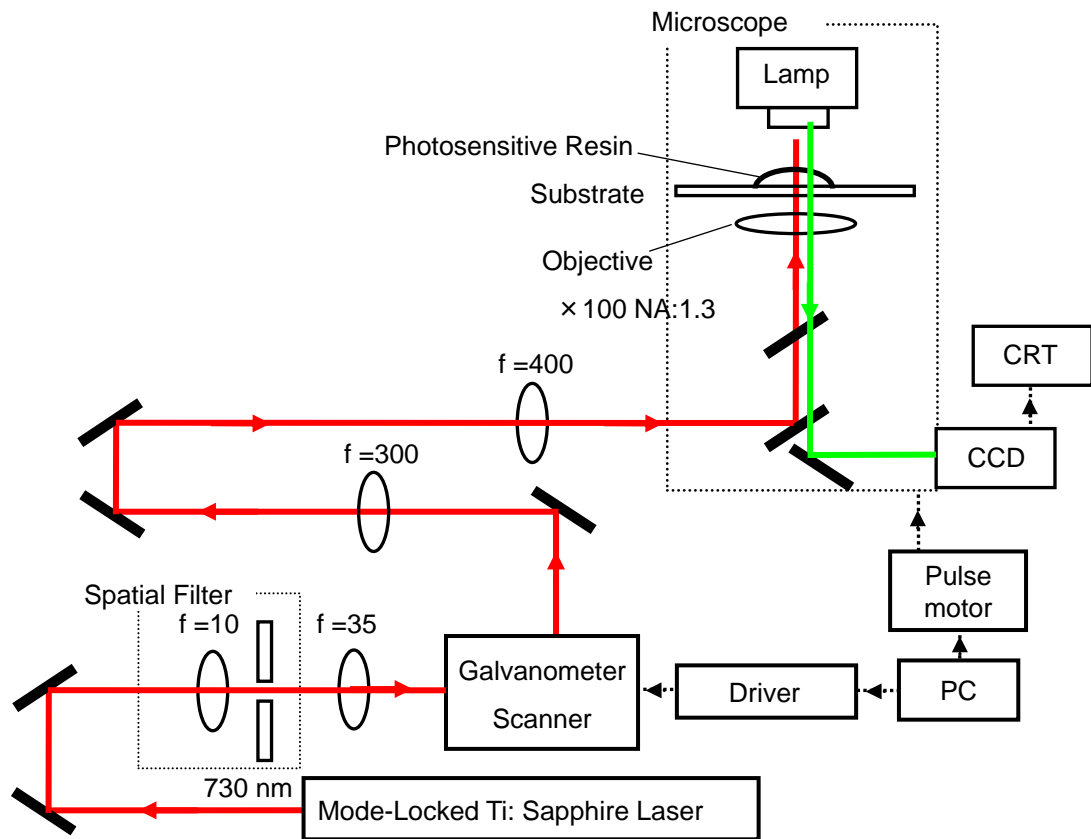


図 3.1.2 造形装置の略図

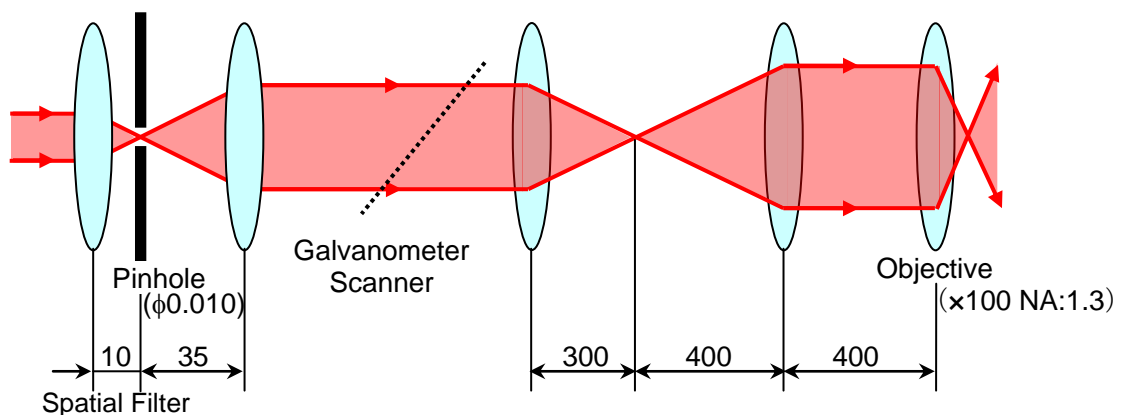


図 3.1.3 光学系の詳細図

3.2 開口数(NA: Numerical Aperture)

対物レンズの性能のひとつとして開口数(NA)があり、

$$NA = n \sin \theta \quad (2.4.1)$$

(n : 媒質の屈折率, θ : 光線がレンズの半径に対して張る角)

と定義され[33]、この研究では Z 方向の加工分解能を左右する大きな要因になる。

図 2.4.1 に示すようにこの値が大きいほど加工分解能が上がる。

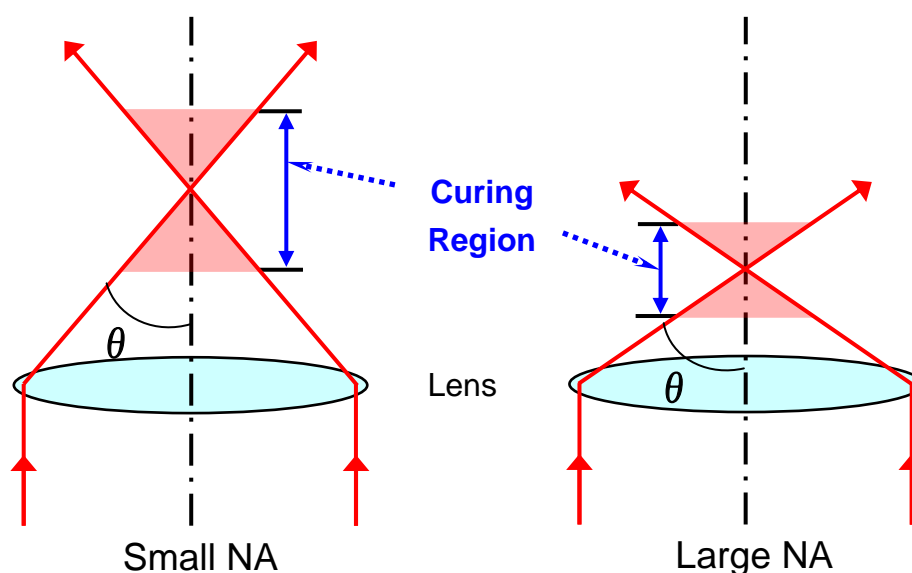


図 3.2.1 NA による加工分解能の差

今回使用した対物レンズは、開口数が 1.30(Plan Flour, 株式会社ニコン)であった。この対物レンズはイメージンオイルをレンズ部分に塗布することで開口数を適正化している。

3.3 回折限界

光を対物レンズなどで小さな点に集光させる時、その集光点の大きさの限界を回折限界と呼ぶ。回折限界とは次式で表される[33]。

$$\varepsilon \approx 0.61 \frac{\lambda}{n \sin \theta} \quad (3.3.1)$$

(ε :集光点の直径、 λ :波長)

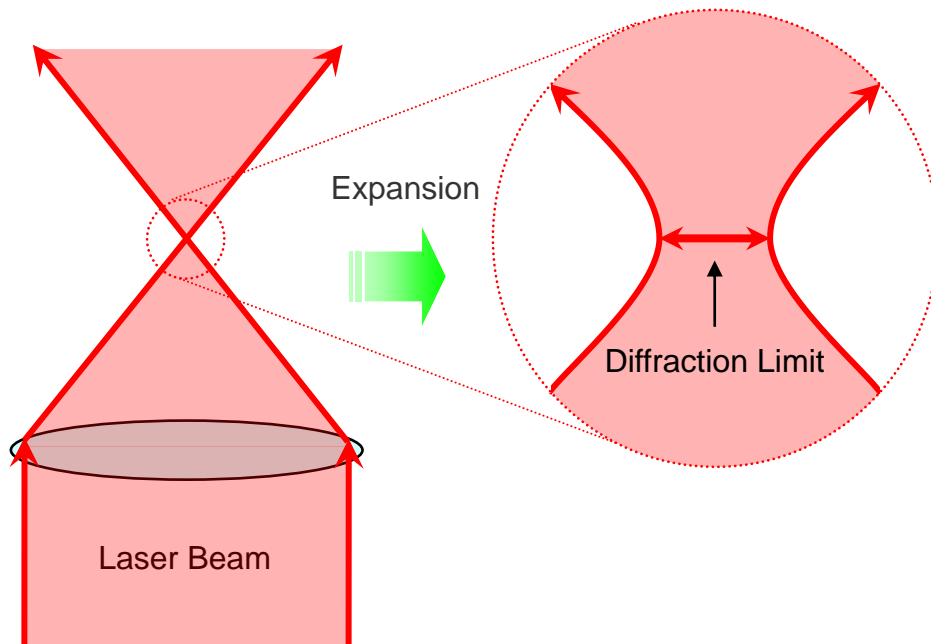


図 3.3.1 光の回折限界

つまり、レーザービームのように歯長や位相がそろった光をどれだけうまく集光したとしてもこの値を超える集光はできない。そのため紫外光を用いて感光樹脂を硬化させた場合、使用した波長以下の加工分解能を得ることはできない。

今回使用した近赤外波長 730nm の回折限界は

$$\varepsilon \approx 0.61 \frac{730[\text{nm}]}{1.30} \quad (3.3.2)$$

$$\approx 343\text{nm}$$

となる。しかし、二光子吸収を利用した場合の加工分解能は 2.6 で説明したとおり、この値を超えた加工分解能を得ることができる。

3.4 構成部品

本研究ではマイクロ光造形を用いるが、第 3 章で説明した光学系、またレーザートラップに欠かせない重要な役割を果たす代表的なレーザー装置や光学機器の特徴や利点について説明する。

・ Mode-Locked Ti:サファイアレーザー(フェムト秒レーザー)

この研究で使用した Mode-Locked Ti:サファイアレーザー(Tsunami, スペクトラ・フィジックス株式会社)について説明する(図 3.4.1)。まず励起光源(Millennia Vs, スペクトラ・フィジックス株式会社)内にある高出力 LD によって ND:YVO 結晶を励起させることにより、1064nm の光を作る。この光を非線形光学結晶である SHG 結晶に通すことにより第二高長波を発生させる。つまり最終的には高出力な 532nm の光を出力することとなり、Tsunami 内の Ti:サファイア結晶を励起させることになる。このフェムト秒レーザーは、モード同期により短パルス光を発生させており、表 3.4.1 に示すとおりパルス幅はフェムト秒オーダーと非常に短く、平均出力は小さいがピーク時の出力は非常に大きい。

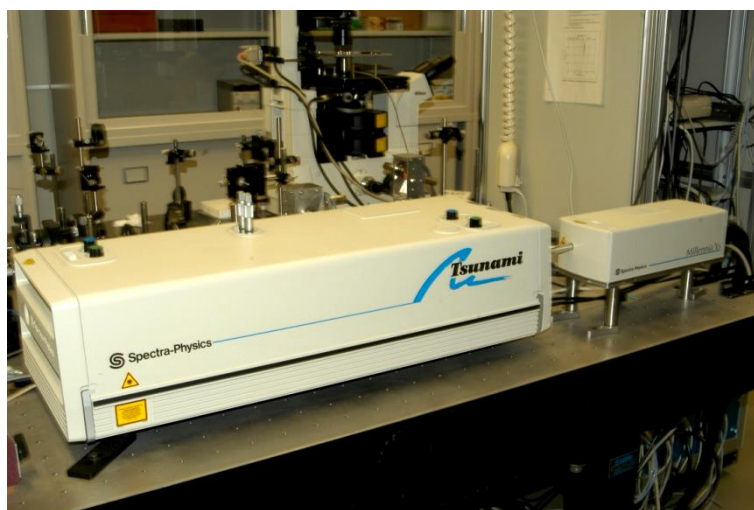


図 3.4.1 Mode-Locked Ti:サファイアレーザー

表 3.4.1 今回使用したフェムト秒レーザーの仕様

Pulse width [fs]	Pulse recurrence frequency [MHz]	Average power output [W]
130	83	1 (at 800nm)

例として表 3.4.1 に示す値で 1 パルス(P)あたりのパワーを計算する。平均パワー約 1W、パルス幅約 130fs の光が 1 秒間 8200 万発出力させているので、

$$P = \frac{1[\text{W}]}{130[\text{fs}] \cdot 83[\text{MHz}]} \quad (3.4.1)$$

と表され、1 パルスあたり約 93kW となる。つまり、このパルス光をレンズによって約 $1\mu\text{m}^2$ に集光したとすれば、約 $93\text{TW}/\text{mm}^2$ となり、時間的・空間的にも光子密度が非常に高くなることがわかる。このため、多光子吸収を発生させることが容易に行える。また、このようなレーザーを使用するとパルス幅が熱伝導の特性時間より短いため熱影響がほとんどない。これらの利点から高精度で微細な三次元構造物の作製に適していることがわかる。

本研究では非線形効果を利用するため、時間的に光子密度の高いこのレーザーが重要な役割を果たしている。

・倒立顕微鏡

今回使用した顕微鏡(エキリプスTE2000-U, 株式会社ニコン)を図3.2.2に示す。この倒立顕微鏡は、試料台となるガラス基板の間にイメージンオイルをつける高NAの対物レンズを使用することができ、高さ方向の加工分解能を高くすることができる。また感光樹脂とイメージンオイルが混ざるのを防ぐこともできる。この顕微鏡は、内部のダイクロイックミラーによりレーザー光を反射させることにより、対物レンズからレーザー光を照射する。観測用と加工用のレンズが同じなので、レーザー光を照射しながら観測することができ、本研究の光造形・光駆動には欠かせないものとなっている。

レーザービーム入射用のポートが二つあり、波長の違う光造形用のパルスレーザーとレーザートラップ用のCWレーザーを同時に照射することが可能である。そのため、光学系をくみ直したりしなくとも作製と捕捉の一連の操作を行うことが可能となっている。

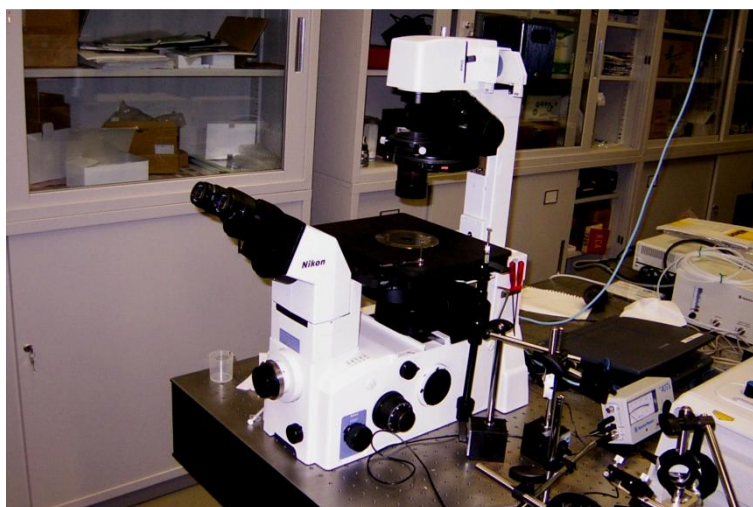


図 3.4.2 倒立顕微鏡

・ マイクロマニピュレータシステム

顕微鏡の微動ステージとして電動マイクロマニピュレータ(マイクロマニピュレータシステムM300シリーズ, 駿河精機株式会社)を使用した。このステージは簡単なマウス操作で自在にXY二方向をコントロールすることができる。作製する構造体はマイクロスケールなので、複数構造体を作製したり浮遊する物体を追尾したりするにはこのステージが最適である。

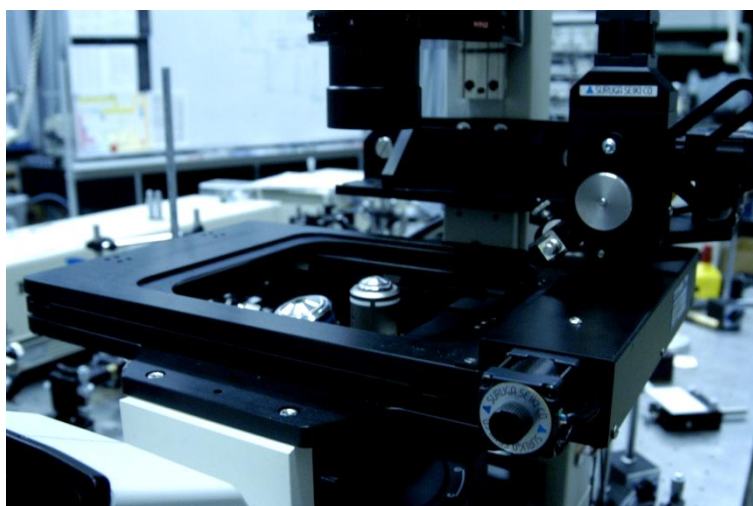


図 3.4.3 電動マイクロマニピュレータ

・スペーシャルフィルタを含む光学系

このフィルタはレーザービームの強度分布から不規則な変動を取り除くために非常に効果的である。今回はガルバノメータスキャナによってスキャンした二次元像を縮小光学系によって圧縮するため、解像度が格段に良くなるこのフィルタが必要不可欠であった。また造形で必要なレーザーパワーの微調整も図 3.2.4 向かって右側の円盤状の透過率可変のフィルタ(シグマ光機株式会社 反射型可変式 ND フィルタ)によって行えるため、樹脂に合わせて適正な光強度で加工が可能である。

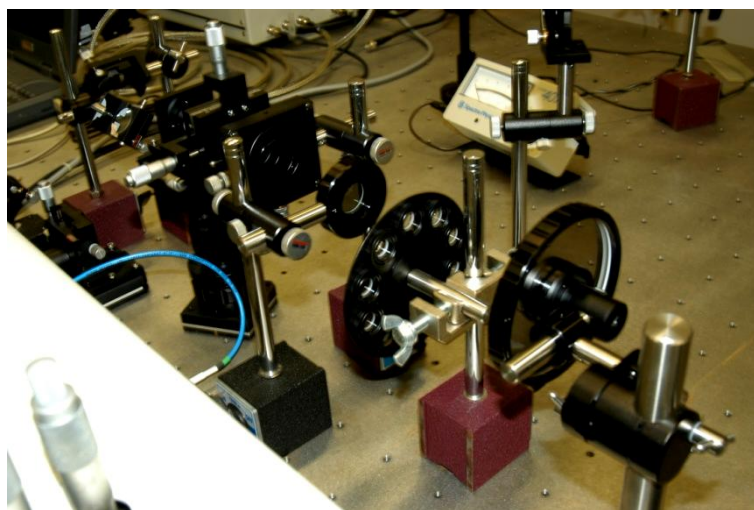


図 3.4.4 スペーシャルフィルタを含む光学系

・ガルバノメータスキャナ

クローズドループガルバノメータスキャナ(VM2000, ジーエスアイ・グループ・ジャパン株式会社), サーボドライバ(MiniSAX, ジーエスアイ・グループ・ジャパン株式会社), スキャンコントローラ(SC2000, ジーエスアイ・グループ・ジャパン株式会社)について説明する。このガルバノメータスキャナは、回転軸に取り付けたミラーを高速・高精度に走査・位置決めする光学スキャナである。スキャナ内部に搭載された位置センサから位置信号を出力し、サーボドライバはその信号をもとにミラー位置が入力指令位置に正確に追従するようモータドライブ制御する。図 3.2.5 はスキャナを囲むホルダーの写真である。

このスキャナをコンピュータにより制御するには RS232C 接続のスキャンコントローラを使用する。3.3 でも述べるが本研究ではこのスキャンコントローラを制御するために、図 3.2.6 のようなコントローラ・ドライバボックスの作製、プログラム開発を Visual Basic を使用しておこなっている。このコントローラ・ドライバボックスの特徴は、スキャナの動作が終了したことをシグナルとして取り出すことが可能になっている。これにより回転軸

に取り付けられたミラーは、コンピュータ制御により走査させることができ、スキャン終了を知らせるシグナルを発生させることができるため、本研究で作製する複雑な三次元構造物を作製することができる。

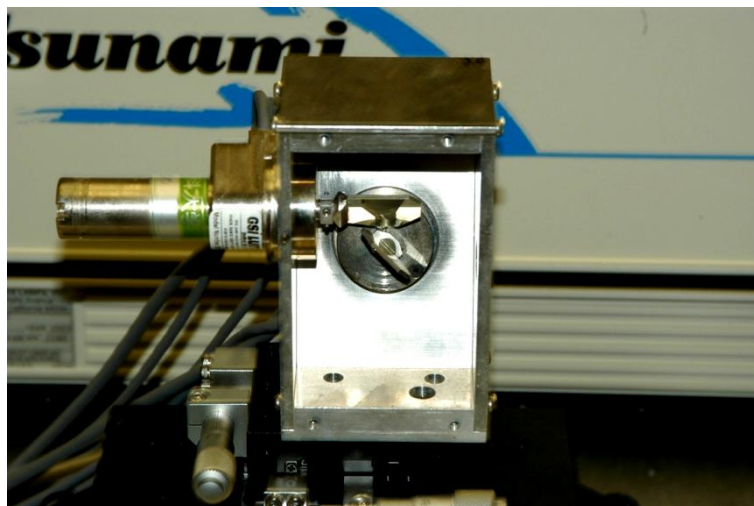


図 3.4.5 ガルバノメータスキャナとスキャナホルダ

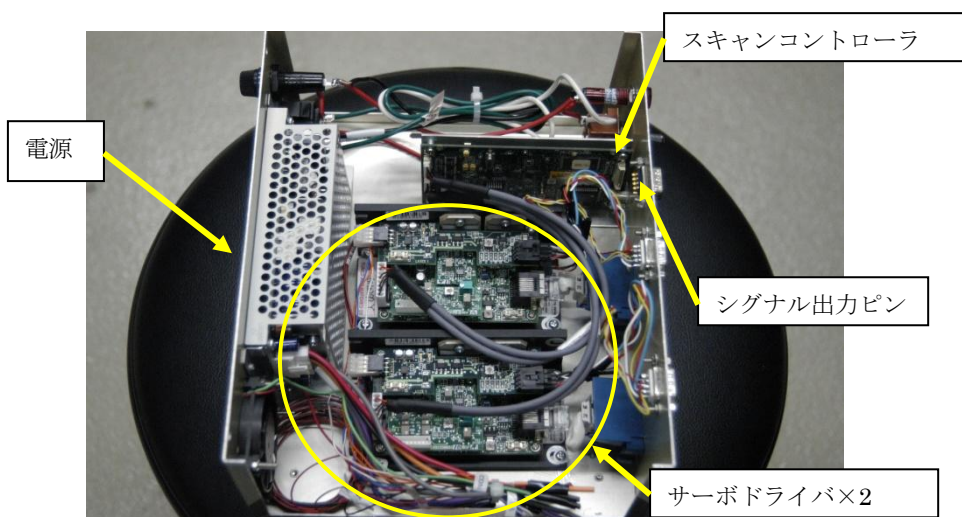


図 3.4.6 作製したスキャンコントローラ・サーボドライバボックス内部

・ ピント調節用パルスモーター

顕微鏡のピント調節用にパルスモーター(フォーカシングユニットMSS-FMC, 中央精機株式会社)を使用した。このパルスモーターは分解能 0.36° となっている。顕微鏡のピント調節ダイヤルが一回転 $100\mu\text{m}$ となっているため 100nm の分解能でピントを調節できる。光造形では対物レンズの集光点を移動させることによって硬化ポイントを移動させるので、この値が高さ方向の最高設定分解能となる。

このモーターの制御ユニットはRS232Cによって通信制御できるので、電動ミラーによって二次元にスキャンした後、自動的に高さ方向を移動させ、繰り返し硬化範囲を積層させることができる。



図 3.4.7 ピント調節用パルスモータシステム

3.3 制御プログラム

第 2 章でも述べたように二光子吸収を利用した光造形法で構造体を作製するには、ガルバノスキャナによる水平方向のレーザースキャンを行った後、パルスモータ(中央精機)により積層方向へ対物レンズの焦点を移動させ、再びガルバノスキャナによりレーザースキャンを行う必要がある。これを自動的に行えるように、ガルバノスキャナのスクリーンコントローラの機能拡張と制御プログラムの開発を行った。

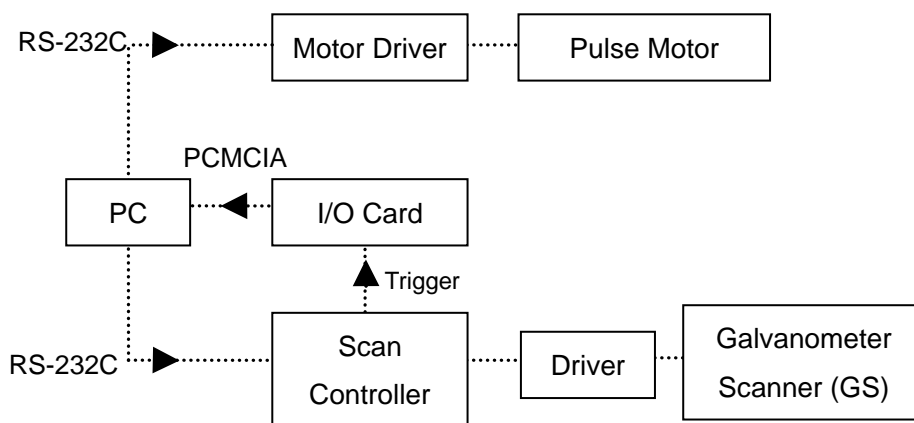


図 3.3.2 構成図

全体の流れとして図 3.3.2 に示すように、スキャンコントローラからのシグナルを PC カードスロットに接続した I/O カードでシグナルを検出し、そのタイミングでパルスモータドライバを制御する。ピント調整用のダイヤルにパルスモーターが取り付けられているため、焦点位置の高さ方向を制御することが可能となる。この手法により光硬化させた樹脂を簡便で、かつ高精度に積層させた。

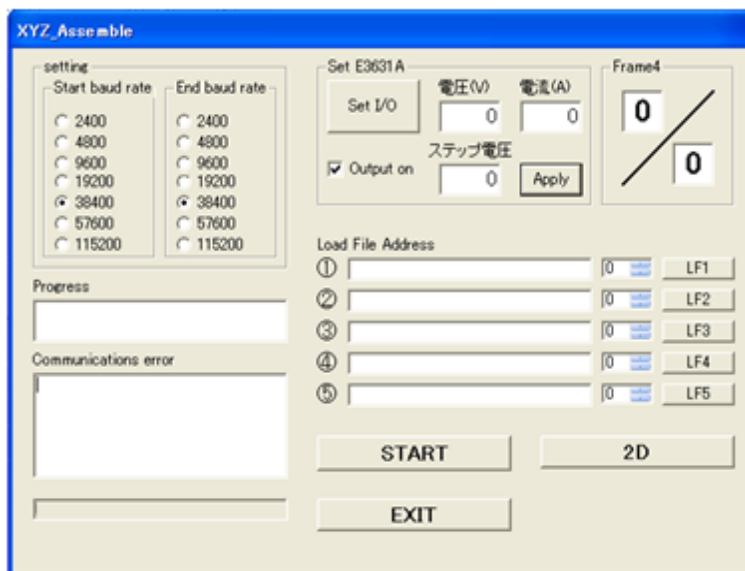


図 3.3.4 走査プログラムのコントロールパネル

第4章 レーザートラップを用いた光回転駆動

1970年にAshkinにより二本の対向レーザーによる誘電体微粒子のトラップが報告され、大きな開口数のレンズで回折限界まで集光したレーザービームによる新しいレーザートラップ法が開発された[33]。この手法は、物理学、生物学、医学などの分野で広く応用されている。今回、マイクロ構造物を捕捉する方法としてこのレーザートラップ法を選んだ。その理由は、光学系がマイクロ光造形装置と共通の部分が多いため扱いやすく、また対象物を非接触で捕捉できるため構造物を傷つけることがない。接触型のトラップ法では、接触した際に対象物が付着してしまい、扱いが難しいがレーザートラップ法ではレーザーをON・OFFすることで、任意の位置での着脱が容易である。これらの利点からこのトラップ法を使用した。

4.1 レーザートラップの原理

対物レンズで集光したレーザー光を球形微粒子に照射したときに発生する放射圧の原理を図4.1.1に示す。

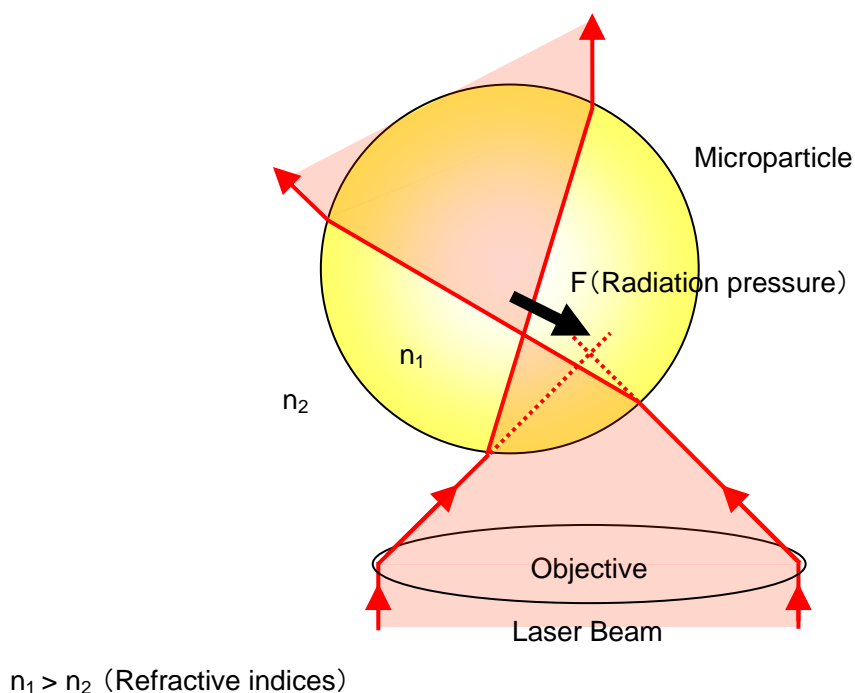


図 4.1.1 レーザートラップの原理

光子は進行方向に h/λ (h : プランクの定数, λ : 波長)の大きさの運動量を持つことが知られている。今レーザー光の焦点付近に微粒子があるものとする。レーザービームは、周囲の媒質と屈折率が異なる微粒子の表面で屈折し、進行方向が変化する。そのため、入射前後で光子の運動量が変化する。変化した運動量は、運動量保存則に従って微粒子に受け渡され、運動量の変化の総和が微粒子に力として働く。この光と微粒子の相互作用によって生じる力を放射圧と呼び、図 4.1.1 の矢印の方向、つまりエネルギー強度の高い焦点方向へ働く。

また、トラップ可能な粒子の最大寸法は入射するレーザーパワーに依存する[34]。

放射圧は n_1 (微粒子の屈折率) $>$ n_2 (周囲の媒質の屈折率) の場合、レーザー光の焦点方向へ働くため、微粒子は焦点付近に引き寄せられ、その力がブラウン運動を抑え、重力と釣り合う位置で三次元的に補足される。今回はレーザースポットを固定し、顕微鏡のステージを電動マイクロマニピュレータで二次元に動かすことでトラップ対象物を操作しているが、光造形装置と同様の光学系を組むことによって集光スポットを電動ミラーで走査すれば、微粒子を自在に操作するレーザーマニピュレーションも可能である。

4.2 レーザートラップの光学系

図 4.2.1 にレーザートラップを行うために作製した装置の全体写真、図 4.2.2 に光学系の簡略図を示す。

レーザートラップを行うために、波長 1064nm、レーザーパワー750mW の CW-YAG レーザー(LCS-DTL-322-750, Laser-Compact Co. Ltd)を用いた。このレーザービームを近赤外用の直線偏光板に通すことによって、余分な偏光成分を取り除いた。その後、ビームエキスパンダによって対物レンズの瞳の大きさに拡大した。今回、高出力なレーザー装置を使用している点や光造形用の光学系と共存させる必要があるため、無焦点であることまた全長が短くコンパクトに設置できるガリレオタイプのビームエキスパンダを使用した。

拡大したレーザービームを顕微鏡内のダイクロイックミラーによって導かれたレーザービームを顕微鏡の油浸対物レンズ ($NA=1.3$) により集光しマイクロ光造形で作製した微小物体に照射させて捕捉する。このダイクロイックミラーは約 900nm 以上の光を反射しそれ以下を透過させるため、造形用のレーザー波長 730nm の光路を妨げることなくトラップを行える。

円偏光ビームによって回転を行う際にはこの光路の間に 1/4 波長板を挿入し、直線偏光のレーザービームを円偏光に変換してトラップを行なった。

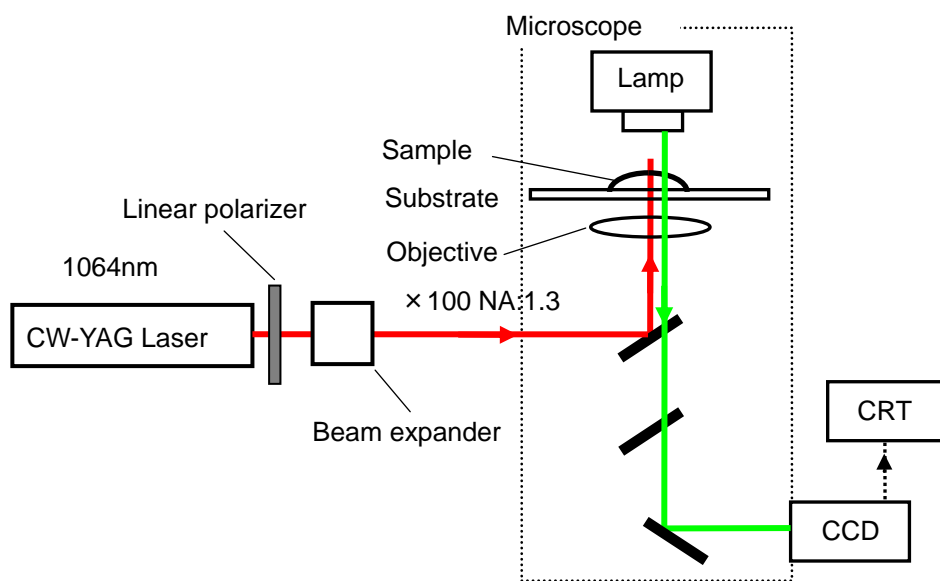


図 4.2.1 レーザートラップ装置

4.3 放射圧による回転の原理

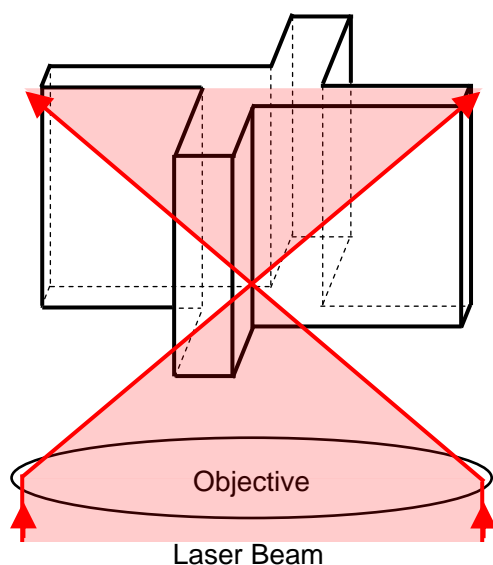


図 4.3.1 回転体のレーザートラップ

4.2 で述べたように、開口数の大きな対物レンズによってトラップを行うため、レンズに対して水平なベクトル成分を多く含む放射圧がかかることになる。この放射圧を利用することによって、微小物体を図 4.3.1 のようにレーザートラップすると同時に回転トルクを与える研究が報告されている。安定した回転駆動を行うためには、微小物体の断面形状が回転対称であり、鏡面非対称性を持たせる必要がある。すなわち、鏡面对称性を持つ形では回転トルクが発生しない。トラップした物体に回転トルクを発生させるためには物体に働く放射圧の方向が重要である。先ほども述べたように図 4.3.1 に示すような物体に紙面手前から集光されたレーザービームは、大きな開口数の対物レンズで絞られているため、物体の側面から射出する。側面での光の屈折により側面には放射圧が発生し回転トルクを発生する。この図 4.3.2 のような場合は、時計方向の回転トルクが働くことがわかる[1, 35]。

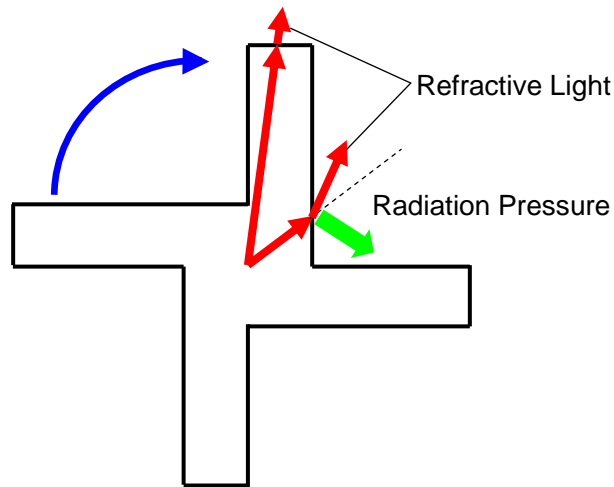


図 4.3.2 放射圧(屈折)による回転の原理

より回転トルクが与えられるように今回この屈折を利用した回転方式の改良を行った。屈折を利用した場合屈折に寄与した分のみのトルクになるため、本研究では全反射を利用した回転方式を考案した。

全反射を利用した形状に改良したものを図 5.3.1 に示す。回転体の材料である SU8 の屈折率と周りの媒質となる現像液の屈折率から全反射を起こす角度を計算し、この数値をプロペラ側面の形状設計に使用することになる。

全反射を起こす角度 θ_c は、 n_1 を構造体の屈折率、 n_2 を周りの媒質とした場合、

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (5.3.1)$$

となる。

構造体の素材 SU-8-3000 の屈折率は 1.7、周りの媒質となる現像液の屈折率 1.40 であることから、 θ_c は 55 度となる。 θ_c が 55 度以上であれば全反射を起こすので、プロペラ側面と中心から放射状に広がるレーザービームのなす角度を 60 度としてマイクロプロペラを設計した。

中心から放射状に広がるレーザービームがプロペラ側面で全反射し、反時計回りに回転することがわかる。

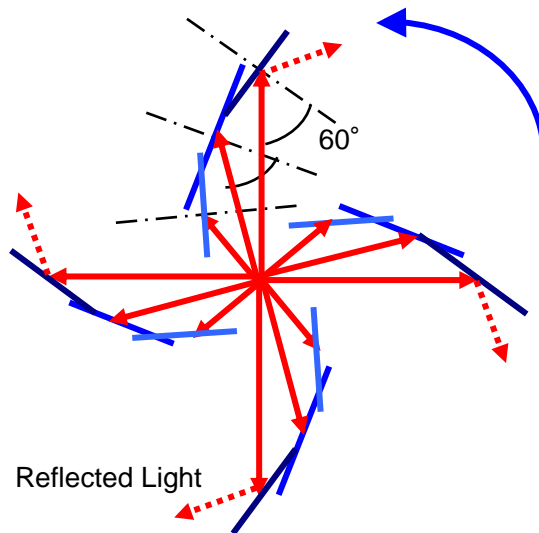


図 5.3.1 放射圧(全反射)による回転の原理

4.4 円偏光による回転の原理

4.3 で説明した放射圧による回転制御法は、微小物体の形状に制限があり、任意に回転方向を決定することができない。そこで、微小物体の形状に制限があまりない、円偏光を利用した回転方法がある。この手法では右円偏光と左円偏光の照射によって回転方向を決定することができる大きな利点がある。

偏光とは、電磁波であり光の波が規則的に振動しているものや、特定の方向に振動していることをいう。偏光の種類は楕円偏光を基準として、特定の条件下により直線偏光や円偏光となる[36]。

光が z 方向に伝播しているとすると、電界の xy 成分は以下のようになり偏光の波を表すことができる。

$$\begin{aligned}
 E_x &= A_{x0} \cos(\omega t - nk_0 z + \delta_{x0}) \\
 E_y &= A_{y0} \cos(\omega t - nk_0 z + \delta_{y0}) \\
 E_z &= 0
 \end{aligned}
 \tag{4.4.1}$$

ここで A_{j0} ($j=x,y$) は振幅、 δ_{j0} は初期位相とし、時間に依存しないものとする。また、 n は屈折率、 k_0 は真空中波数である。

上の式から時間と位置に依存する項を消去すると、電界ベクトルの端点は以下のような式になる。

$$\left(\frac{E_x}{A_{x0}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{A_{y0}}\right)^2 - 2\left(\frac{E_x}{A_{x0}}\right)\left(\frac{E_y}{A_{y0}}\right)\cos\delta_0 = \sin^2\delta_0 \quad (4.4.2)$$

$\delta_0 = \delta_{y0} - \delta_{x0}$ は x と y 成分間の相対位相差である。

次に直線偏光について説明する。直線偏光とは、ある特定の方向だけに光の波が振動している場合をいう。

式 4.4.1 で相対位相差が $\delta_0 = m\pi$ (m : 整数) のとき

$$\frac{E_y}{E_x} = (-1)^m \frac{A_{y0}}{A_{x0}} \quad (4.4.3)$$

となり、図 4.4.1 に示すように光の軌跡が振動面を進行方向から見たときに直線上を振動することになる。

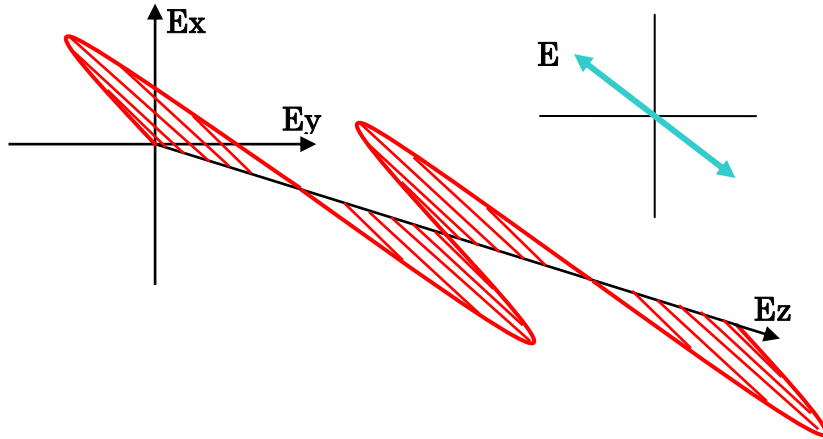


図 4.4.1 直線偏光の電場

円偏光とは x 成分と y 成分の位相差が $(2m'+1)\pi/2$ (m' : 整数) になり、電界ベクトルが回転する場合をいう。

式 4.4.1 で $A_{x0} = A_{y0} = A_0$, $\delta_0 = (2m'+1)\pi/2$ (m' : 整数) のとき

$$E_x^2 + E_y^2 = A_0^2 \quad (4.4.4)$$

となり、軌跡が図 4.4.2 に示すように電場の軌跡が振動面を進行方向から見たときに円を描くように振動することになる。 $\sin \delta > 0 (< 0)$ となるときを右(左)円偏光という。

本研究では、直線偏光のレーザービームを円偏光に変換するために 1/4 波長板を使用した。1/4 波長板とは、入射光線の x 成分と y 成分の電場に 1/4 波長の位相差を生じさせる機能をもった波長板である。レーザービームなどの直線偏光化された入射光線を、その振動方向が 1/4 波長板の光軸方向に対して、 $\theta = +45^\circ$ の角度で入射したとき、射出光線は右円偏光となる。逆に、 $\theta = -45^\circ$ の場合は左円偏光になる。また、入射する直線偏光の振動方向と、1/4 波長板の光軸方向との角度がそれら以外の場合は、楕円偏光となり、 $\theta = 0^\circ$ と 180° の場合にはそのまま直線偏光として射出する。

右円偏光と左円偏光の光線の軌跡を図 4.4.2 と図 4.4.3 に示す。

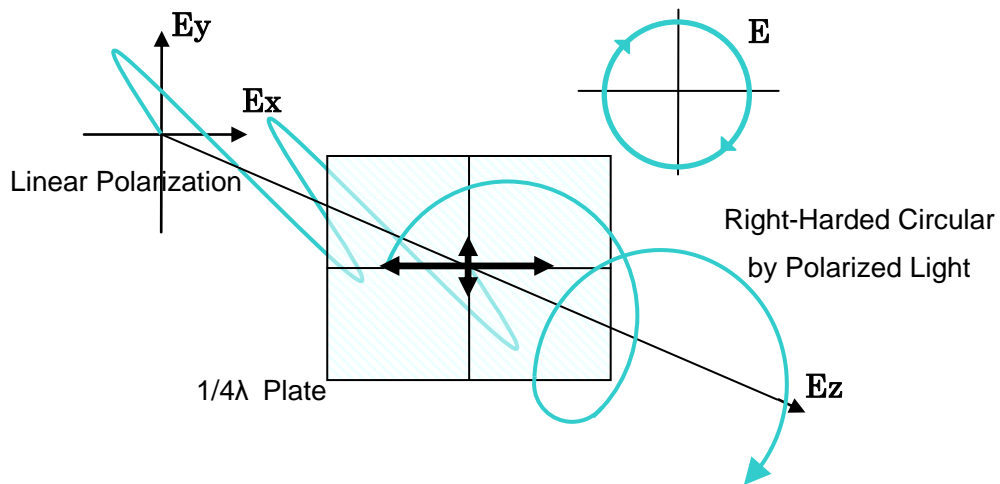


図 4.4.2 右円偏光 ($\theta = +45^\circ$)

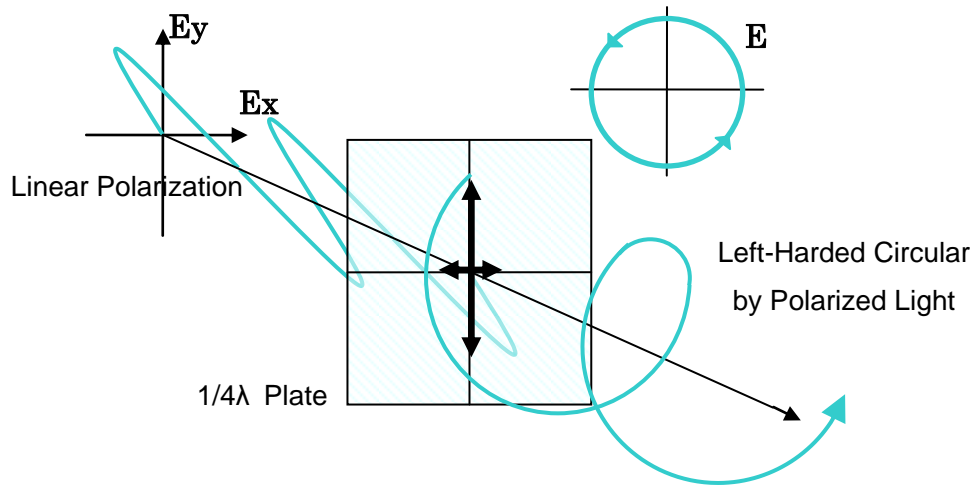


図 4.4.3 左円偏光 ($\theta = -45^\circ$)

ただしこの円偏光トルクを構造体を与えるためには、構造体が光を吸収するもしくは構造体が複屈折性を持っている必要がある。

第 5 章 光放射圧による回転駆動

第 2 章で述べたマイクロ光造形装置で微小物体を作製し、レーザートラップ装置によって捕捉と同時にマイクロ構造体を光放射圧によって回転させる実験を行った[29]。今回は屈折を利用した回転方式と全反射を利用した回転方式について回転周波数を計測し、本方式について考察を行った。両方式の違いを確認するために、ほぼ同サイズの構造体を作製した。

5.1 実験方法

まずガラス基板にスピコートしたフォトレジストを、オープンによって 100°C で 15 分加熱した。フォトレジストは残留溶媒を蒸発させるためにプリベークする必要がある。スピコートしたフォトレジストの厚みは約 60 μm であった。次にこのガラス基板を顕微鏡の試料台に置き二光子吸収を利用した光造形装置によって屈折を利用する従来形状、また改良した全反射型形状に露光した。造形サイズとしては後に回転の違いを比較できるように直径約 13 μm 、高方向約 10 μm とおおよそ同じサイズを設計した。その後、PEB(Post Exposure Bake)を 100°C で 7 分を行った。再び顕微鏡試料台にセットし現像液 (SU-8 Developer, 化薬マイクロケム株式会社) を注入し現像を行った。

現像が完了し、構造体が浮遊し始めたときに波長 1064nm の CW-YAG レーザーを照射してレーザートラップと共に回転駆動を行った。この様子を CCD カメラによって観察し、撮影された動画から回転周波数を求めた。

5.2 結果と考察

・屈折による回転方式

ガラス基板に固定されるように露光したものを SEM によって観測した。その結果を図 5.2.1 に示す。設計した構造体は直径約 13 μm 、高さ約 10 μm である。

次に同じ手順でこの構造体をガラス基板から離れた状態になるように露光し、現像段階で構造体が浮遊し始めたときレーザートラップすると同時に回転させた。実際に回転している様子を図 5.2.2 に示す。回転方向は 4.2 の理論の通りであった。

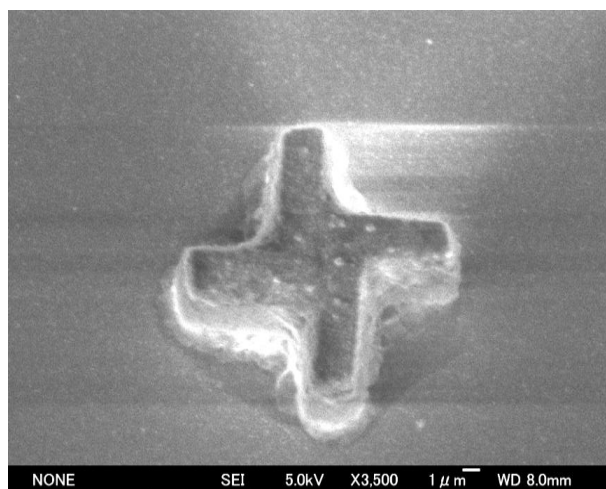


図 5.2.1 試作したマイクロプロペラ

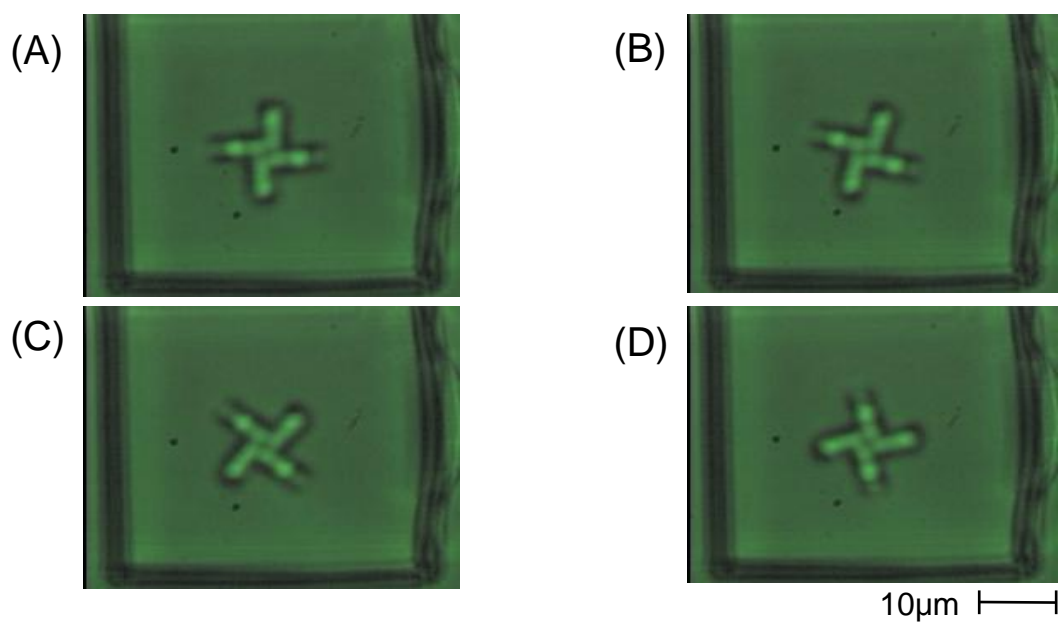


図 5.2.2 放射圧による微小物体回転の様子

このときの回転周波数はトラップレーザー光 150mW 時、現像液中で約 0.5Hz であった。この構造体の回転周波数は、与えられた放射圧によるトルクと媒質の粘性抵抗により決まると考えられる。このようにマイクロ光造形で微小な構造物を作製し、レーザートラップすることによってその構造体を回転させることが確認できた。

・全反射による回転方式

回転効率を上げるために、今回新たに全反射を利用した構造体形状に変えて実験をおこなった。4.3の原理の通り、全反射を利用した形状に改良したものを作製した。

実際に屈折型回転体と同じ手順で光造形法によって作製し、基板に固定した構造体のSEM写真を図5.3.2に示す。

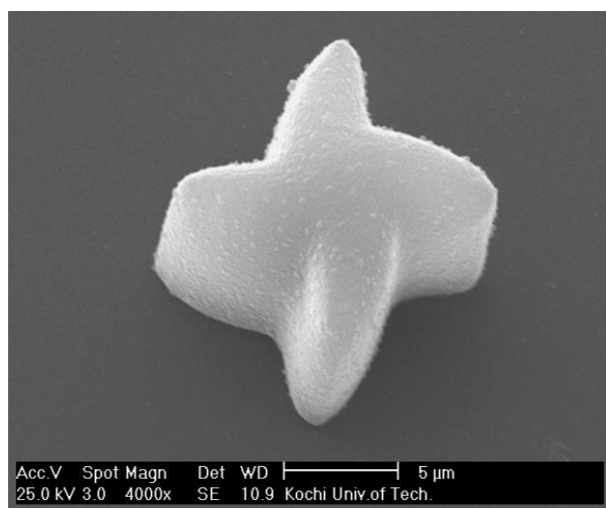


図 5.3.2 全反射法によって設計したマイクロ構造体の SEM 写真

次に構造体をレーザートラップによって回転駆動させた結果、明らかに回転速度が向上していることが確認できた。

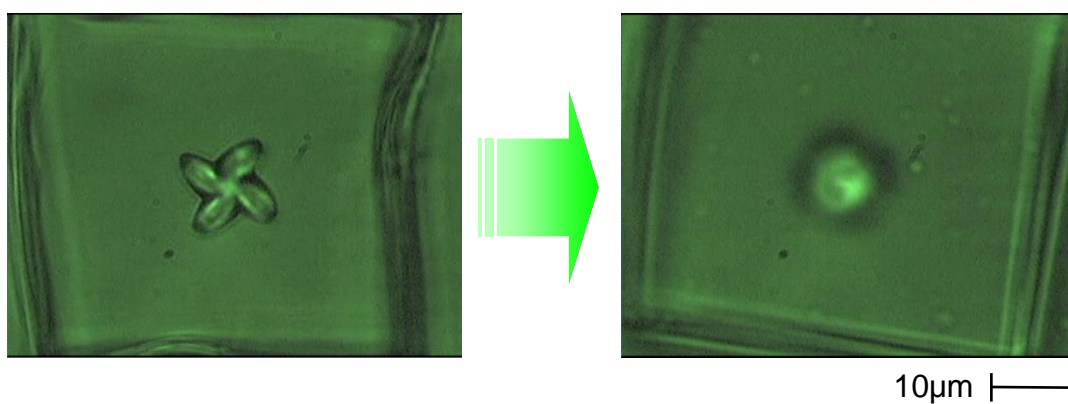


図5.3.2 全反射理論によるマイクロ構造体回転の様子

しかし回転周波数を計測しようとした結果、CCD カメラによって撮影を行ったものは、構造体が回転駆動している途中で回転方向が逆転して見える現象が起こり周波数を決定することができなかった。その理由は図 5.3.4 に示すとおり、1 フレームで 45 度以上回転してしまう場合では左回りに a 度回転したのか右に b 度回転したのか判別できないためである。つまりカメラで回転方向を特定できる範囲は 1 フレーム 1/8 回転以下である。標準の動画撮影では約 30fps であるので、次の回転速度より速いと回転方向を特定できない。

$$f = \frac{30(\text{fps})}{8} = 3.75 \text{ [Hz]} \quad (5.3.1)$$

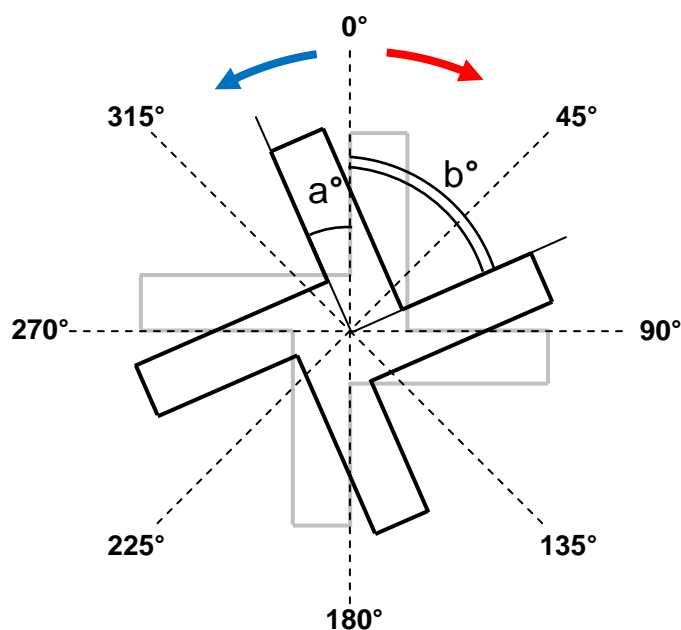


図 5.3.4 四枚羽プロペラがビデオ撮影時に 1 フレーム当たり 45 度以上回転する場合

つまり回転周波数がビデオカメラの検出限界を超えた場合、通常フォトマルやフォトダイオードなどの検出器が必要となる。しかし、浮遊する構造体を視覚的に追尾しなければならないため、今回は高速回転時の撮影用として高速 CMOS カメラ (PL-A774, PixeLINK) を使用した。

このカメラはフレームレートを自由に選択できる特徴があるため、取り込みフレームレートを 100fps にすることで測定可能な回転速度は、

$$f = \frac{100(\text{fps})}{8} = 12.5 \text{ [Hz]} \quad (5.3.2)$$

となる。

このように設定した高速 CMOS カメラによって回転周波数を計測した結果、現像液中で回転周波数が約 10Hz まで向上したことが確認できた。このときの回転周波数に対するレーザー強度の依存性を調査し、屈折型構造体のもと並べた結果を図 5.3.3 に示した。このようにレーザーパワーに対してリニアリティがあり、約 20 倍回転周波数が高くなっていることがわかる。また、NA の小さなレンズを使用した場合の物も同様に計測した結果、回転周波数も低くなる傾向が見られた。これは NA が小さくなることでビームの集光角が狭くなり、回転に寄与するトラップレーザー光の水平成分が少なくなった結果である。

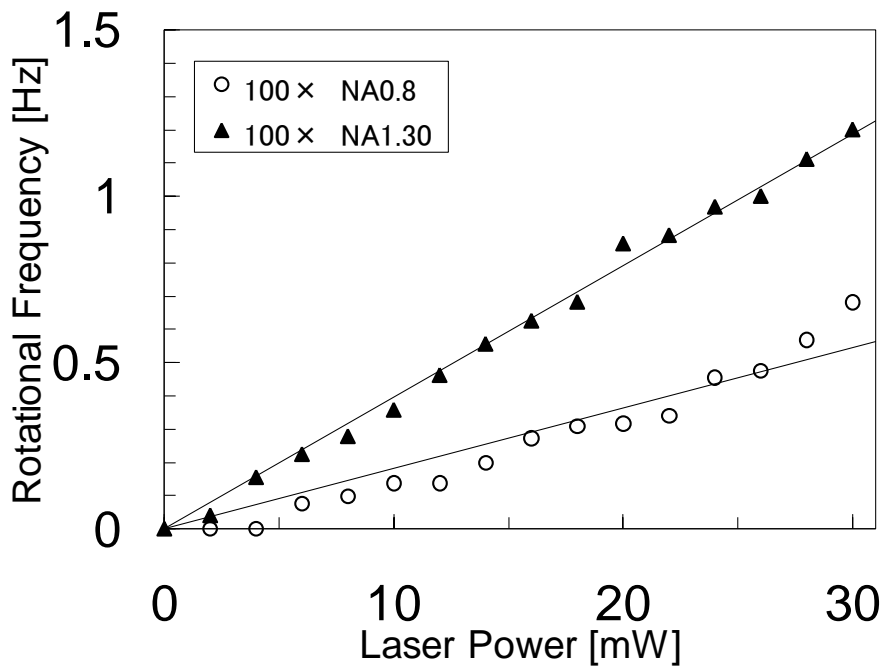


図5.3.3 全反射による回転のレーザーパワー依存性

これらの結果より、回転のメカニズムを知ることによって回転効率を向上させることができた。しかし第4章でも述べたように、この手法では回転方向が構造体の形状によって決定してしまうため、その都度それに応じて構造体形状を作製しなければならない。簡単に回転方向を切り替えることができない。回転方向を切り替える手法として浮田らによって正逆回転可能なダブル羽根光ミキサーが開発されている[37]。この手法は図5.3.4のように右回転する構造体と左回転する構造体を高さ方向に貼り合わせるという物である。確かにこれを用いれば回転方向の切り替えが行えるが、そのためにはトラップポイントを高さ方向にずらす必要がある。

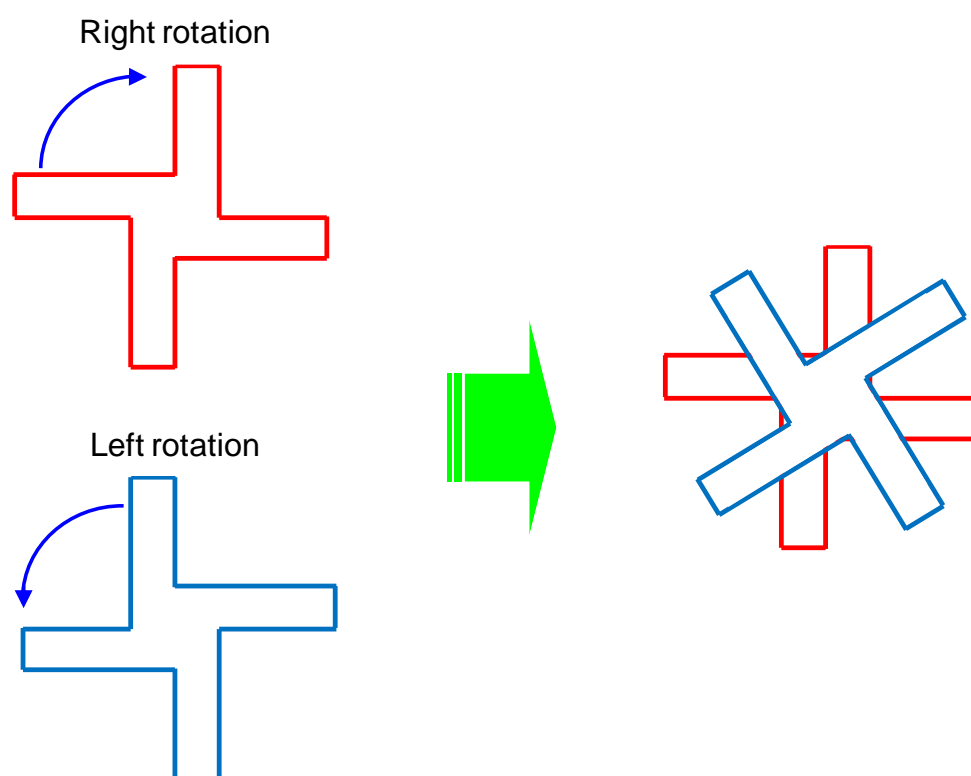


図5.3.4 正逆回転可能なダブル羽根光ミキサー

しかし溶液中に浮遊している構造体のトラップポイントをずらせば、その変化にあわせて構造体が移動してしまう。つまり構造体を含んだ溶液をガラス基板で挟み込むなどし、上下どちらかに接触させるしか方法はない。つまり構造体がガラス基板に接触しながら回転することになり、回転の効率が悪くなったり、回転方向切り替え時に回転が複雑になったりと欠点が多い。

このように光放射圧を利用した回転では様々な問題点があることがわかった。

第 6 章 円偏光による回転駆動

本研究では、円偏光の角運動量を受け渡す方法として光吸収による回転方式と光吸収を伴わない複屈折性による回転方式を行った。円偏光ビームを吸収させる方式では光吸収物質、ローダミン色素を用いた。この色素により吸収された一部のレーザートラップ光によって角運動量を受け渡されることになる。

また複屈折による回転方式では、配向させた重合性液晶を用いた。でも述べたように重合性液晶は光重合前であれば通常の液晶と同じく配向膜や電場によって配向させることが可能となっている。そのため配向させた後光重合を行えば、光学異方性を持ったポリマー(複屈折結晶)となり、厚みによって複屈折率の違う結晶となる。今回は回転駆動の他に、この複屈折性を持つことの確認も行った。

実験装置はレーザートラップ装置の光路へ 4 分の 1 波長の位相差板 (1/4 波長板) を挿入することで円偏光に変換した。このときのサンプル位置でのレーザーパワーは 180 mW であった。位相差板の光軸方向を直線偏光方向から 45° の傾きにすると円偏光に変換されるが、位相差板をさらに 90° 回転することで右から左、または左から右の円偏光に変換できる。右円偏光と左円偏光の角運動量の方法は逆であるため回転方向の制御は容易に行えることになる。複屈折を利用した回転では図 6.1 の通り直線偏光板二枚を観測光路の間に挿入することになる。

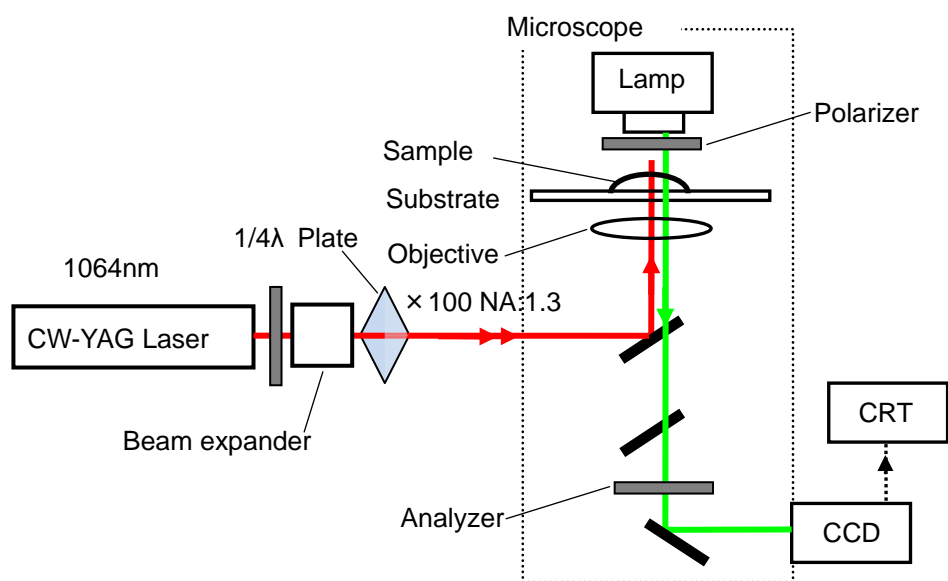


図 6.1 偏光顕微鏡を用いた円偏光レーザートラップ装置

6.1 実験方法—光吸収物質による回転方式

光吸収物質を混入したフォトレジストを、二光子吸収法により露光し作製したマイクロ構造体に現像液 SU-8 Developer を注入する。そして色素を励起することができる波長のレーザー光を 1/4 波長板を通し、構造体に照射することでトラップと同時に回転させる。その様子を CCD カメラで観察することで回転速度を測定する。また 1/4 波長板の操作で円偏光の向きを逆転させたとき、逆回転するのとも確認する。構造体の形状として放射圧による回転を起こさず純粋に円偏光の効果が見えるように、また回転している様子を確認するために構造体を $3 \times 3 \times 8 \mu\text{m}$ の直方体形状にしている。直線偏光でトラップを行い放射圧による回転を受けていないかを確認した後、円偏光駆動を行った。

今回は光吸収物質として、フォトレジスト SU-8-3000 にローダミン色素を混入したもので実験を行った。ローダミン色素とは、発光色素の一種で、緑色付近の波長の光を吸収することで、橙色に発光する分子である。本研究ではローダミン 610 (1 mol = 543.02 g) を使用した。ローダミン 610 の吸収スペクトルを図 6.2.1 に示す。

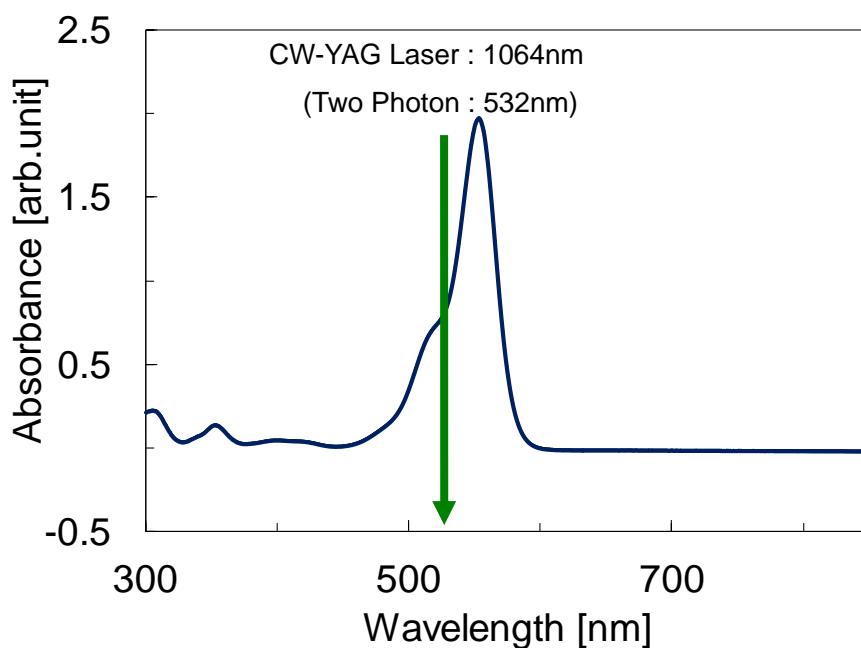


図 6.1.1 ローダミン 610 水溶液の吸収スペクトル

このローダミン色素はトラップレーザー1064nmの光には吸収が無い。しかし、このレーザー光で二光子吸収反応を起こせば、緑色532nmで励起したことに同じになる。これにより造形物に1064nmの円偏光のレーザー光を照射すれば、二光子を吸収により回転トルクを

発生させることができる。ただし、今回使用した Nd:YAG レーザーは連続波であるため、パルスレーザーのように光ピーク強度は強くない。そのため、二光子吸収反応が起こる確率はかなり低くなる。しかし開口数の大きな対物レンズで集光していることで空間的には光子密度が非常に高いため、何らかの確率が期待できる。しかも光の大部分はトラップに寄与しなければならないなどの理由から、本研究ではローダミン色素を混入させた。

6.2 結果と考察—光吸収物質による回転方式

トラップレーザー光を円偏光にし、構造体へ照射し回転させた様子を図 6.2.1 に示す。回転方向は右円偏光照射時には右回転、左円偏光照射時には左回転であった。このようにレーザートラップと同時に直線偏光では回転しなかった構造体が、円偏光によりの回転することと、円偏光の切り替えにより回転方向が逆転することを観測した。

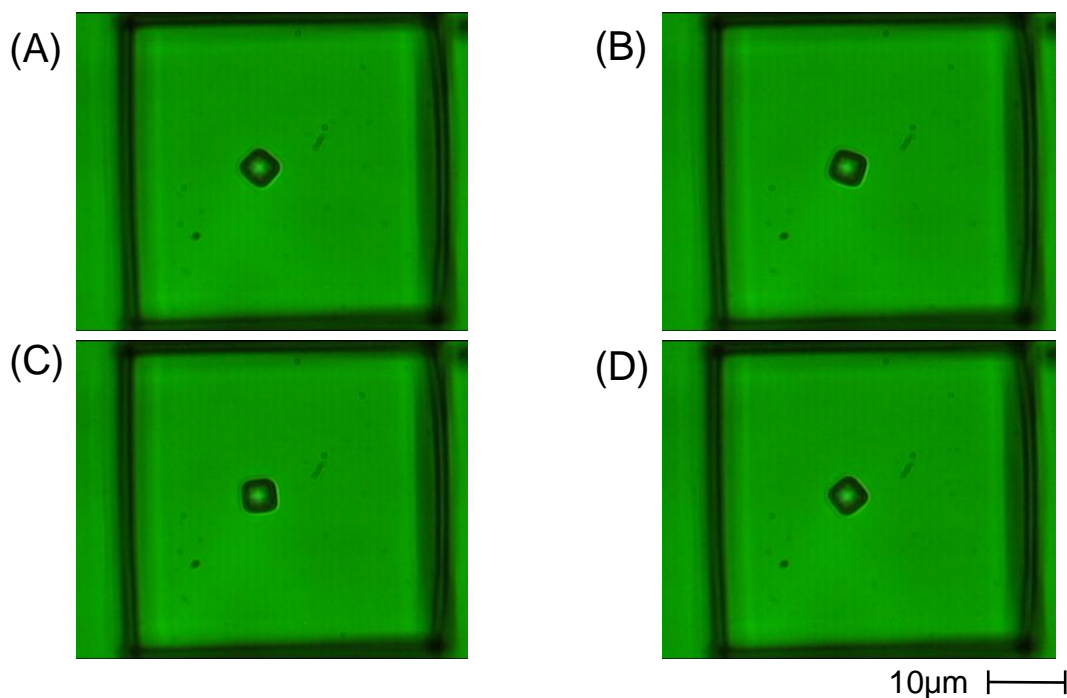


図 6.2.1 円偏光によるマイクロ構造体の回転(ローダミン濃度 : 1.84mMol/L)

このローダミンによる回転で、トラップレーザーのパワーとローダミンの濃度を変化させて実験を行った結果を図 6.2.2 に示す。このようにレーザーパワーを上げてゆき、光吸収物質の濃度を上げていけば吸収される円偏光ビームの割合が高くなり、回転周波数が高くなることがわかる。しかし光吸収物質が光造形時のレーザー光を吸収し発熱したり、レーザートラップ光を吸収しすぎてトラップから外れてしまったりすることから、あまり濃度

を高くすることができない。そのため光吸収物質にローダミンを用いた場合の限界濃度は濃度 18.4mMol/L であった。

以上のことから、光吸収物質を用いた円偏光による回転駆動法では、レーザーパワーとローダミン濃度を变化させることで回転周波数を調整できることがわかる。最高回転周波数は、濃度 18.4mMol/L、レーザーパワー150mW 時に 0.8Hz であった。

光吸収物質を混入した回転方式では回転方向の切り替えが容易に行え、また任意形状を回転の対象物として扱えるなどの利点があるが、この方式では光吸収物質に吸収された一部の円偏光ビームのみ回転に寄与するため、回転の効率が非常に悪いという欠点もあった。

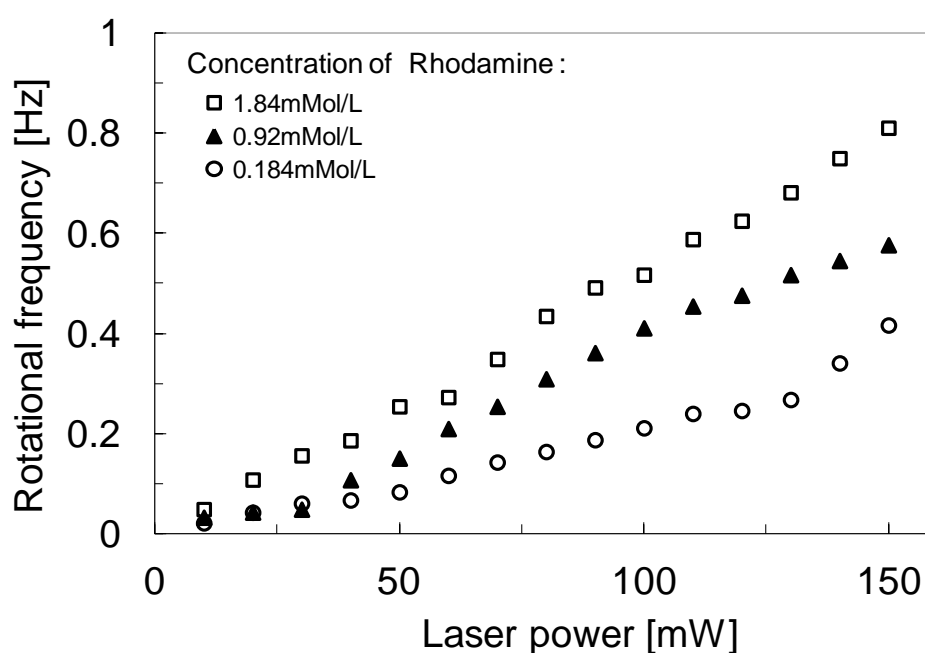


図 6.2.2 回転周波数とローダミン濃度・レーザーパワーの関係

6.3 実験方法—複屈折性による回転方式

次に吸収を伴わない回転方式である複屈折性を利用した回転に注目した。現在、国内外の研究においてトラップ対象物を液晶ドロップレットの研究が行われている。液晶ドロップレットを対象とすれば吸収を伴わない高効率な回転を行えると報告されている。しかし実デバイスに応用するには任意の形状にできないなどの制限がある。そこで本研究では光重合可能な液晶モノマーを使用した。で説明したように、この分子に光重合開始剤を添加することによって重合性液晶とした。この樹脂も紫外光の照射によって硬化するため、本研究で用いた近赤外レーザー光の波長 730 nm では硬化しないが、二光子吸収過程によつ

て励起することで硬化反応が起きる。液晶分子を決まった方向に配向させるため、ガラス基板上に塗布した PVA(ポリビニールアルコール)膜をラビング処理し、その上に重合性液晶を乗せて約 90°C に加熱した。この重合性液晶は常温では固体となるため、光加工直前に加熱する必要があった。これらの処理によって、液晶分子は配向膜に沿って配向することになる。

まずは今回用いた液晶構造体の複屈折性をより直接的に調べるために、構造体高さを 1 μm から 20 μm まで 1 μm 間隔で変えた一辺 20 μm の 20 個のマイクロ四角柱をガラス基板に密着して作製した。直線偏光のレーザー光 (1064 nm) をガラス板上に固定されたマイクロ四角柱のサンプルに照射し、透過光強度を直交ニコルの状態に設置した検光子を通して観測した。直線偏光方向は液晶の配向方向と 45° の角度をなすようにした。

次に回転特性の調査を行うため光造形後、硬化していない重合性液晶を酢酸エチルで洗浄すると同時に円偏光ビームでトラップし、酢酸エチルの媒質中で回転駆動を行った。回転に使用する実験装置は、光吸収物質を用いた実験と同様、を 1/4 波長板に通すことで円偏光に変換している。その他、顕微鏡の照明ランプに直線偏光フィルタを挿入し、高速 CMOS カメラの直前にそれと直交した検光子を挿入することで直交ニコル法によって観測される映像を記録した。作製した構造体は図 6.3.1 のイメージ図のように配向状態が凍結されているので、回転体を直交ニコルで観測した場合、図 6.3.2 に示すとおり配向軸(青矢印)が偏光子と検光子の軸(黒矢印)にそろった場合のみ観測光が透過することになる。つまり明るさの 4 周期分が 1 回転に対応することから回転速度を決定することができる。今回は放射圧による回転の影響を受けないように直径 5 μm の円柱型の構造体を回転体とした。また、複屈折性によって回転していることを確認するためにも様々な高さの円柱を作製し、回転周波数の比較また、複屈折性の確認を行った立方体の透過率強度の変化との比較を行った。

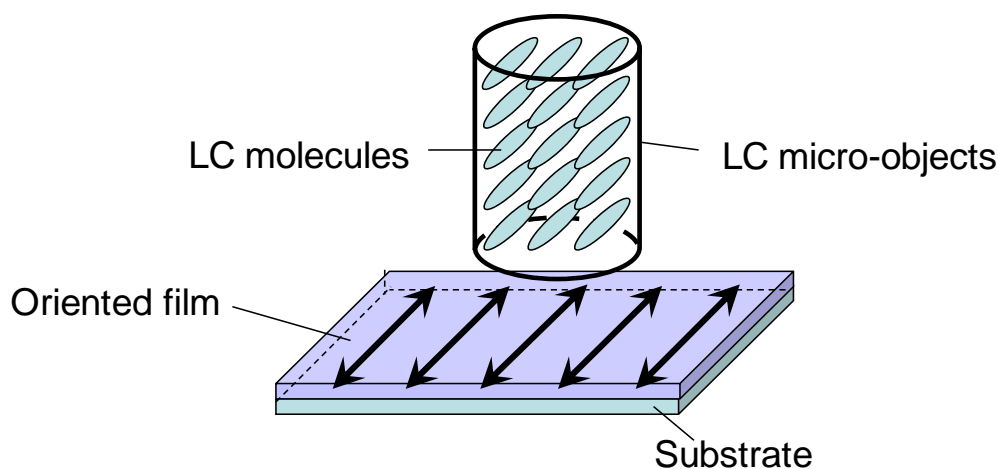


図 6.3.1 液晶分子の配向状態が凍結されマイクロ円柱が作製されるイメージ図

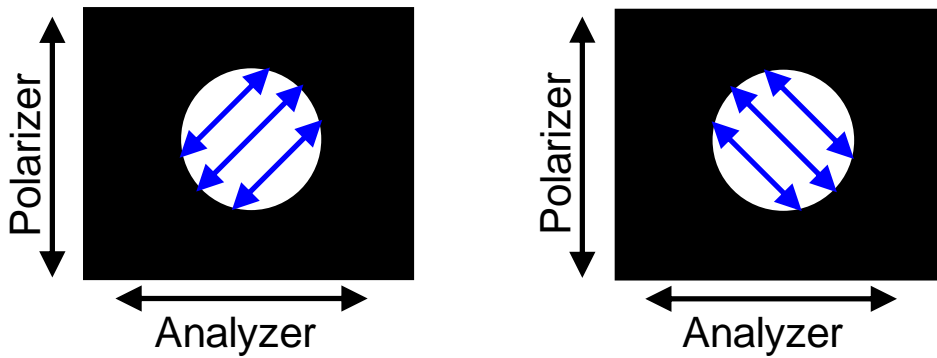


図 6.3.2 直交ニコル中で観測光が透過する条件

6.4 結果と考察—複屈折性による回転方式

様々な高さの立方体から透過率強度の結果を図 6.4.1 に示す。このように偏光顕微鏡を通過した光強度変化に周期性があることがわかった。複屈折性を持つ液晶の厚みが変わることによって進相軸と遅相軸の位相差が変化するためである。つまり作製した液晶構造体が複屈折性を持っていることを示している。

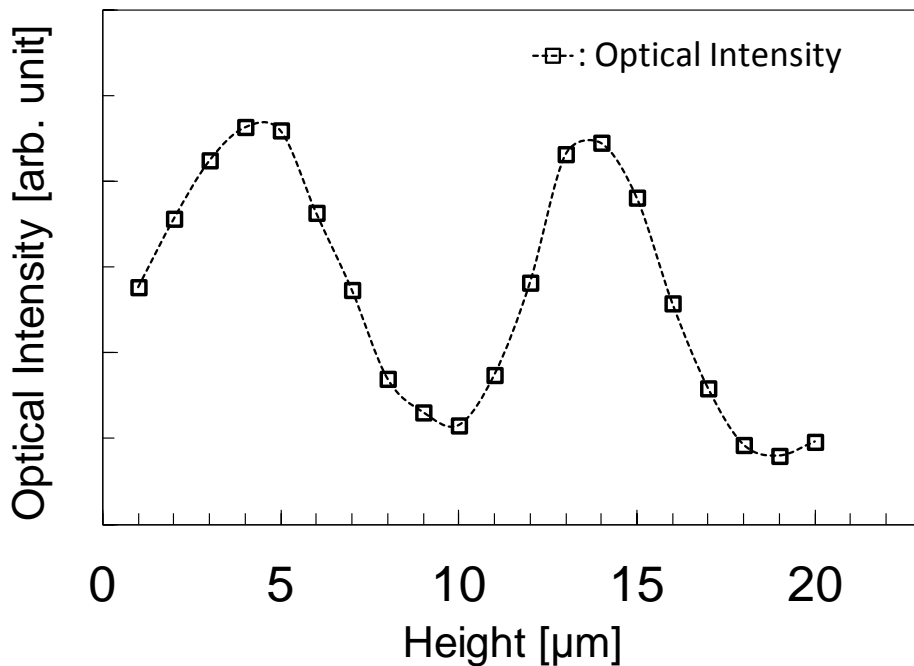


図 6.4.1 直交ニコルからの透過光強度

図 6.4.2 は実際に回転を行った円柱を SEM によって観測した物である。構造体形状を単純な円柱型とした理由は、後に回転トルクの見積もりを行うためである。円柱などを回転させ、記録される映像から回転周波数を測定することはできない。しかし 6.3 で説明したように、この円柱は配向膜によって液晶分子が配向した状態を保っているため透過光の周期が図 6.4.3 のように検出される。4 周期分で 1 回転となることを元に、円柱高さ $7\mu\text{m}$ と $14\mu\text{m}$ の回転周波数を、レーザーパワーを変えて回転周波数を測定した結果を図 6.4.4 に示す。

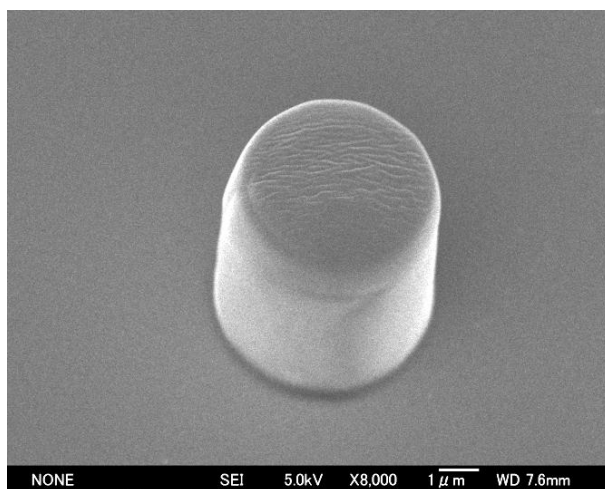


図 6.4.2 光造形によって硬化させた液晶構造体(円柱型)

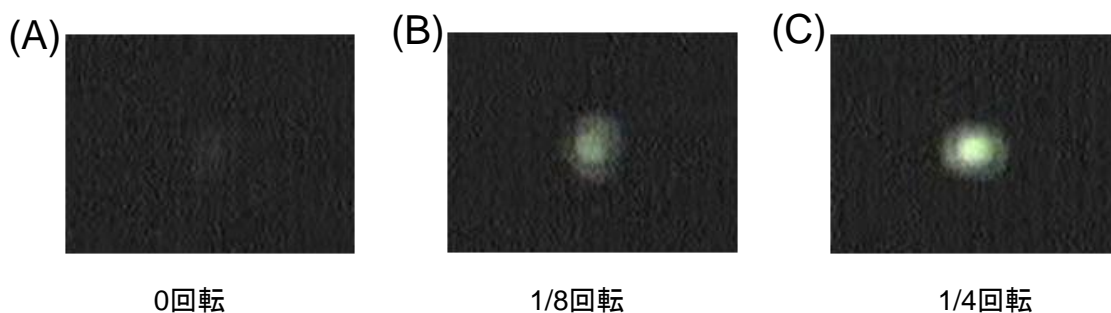


図 6.4.3 直交ニコルからの透過光強度の変化(回転時のカメラ画像)

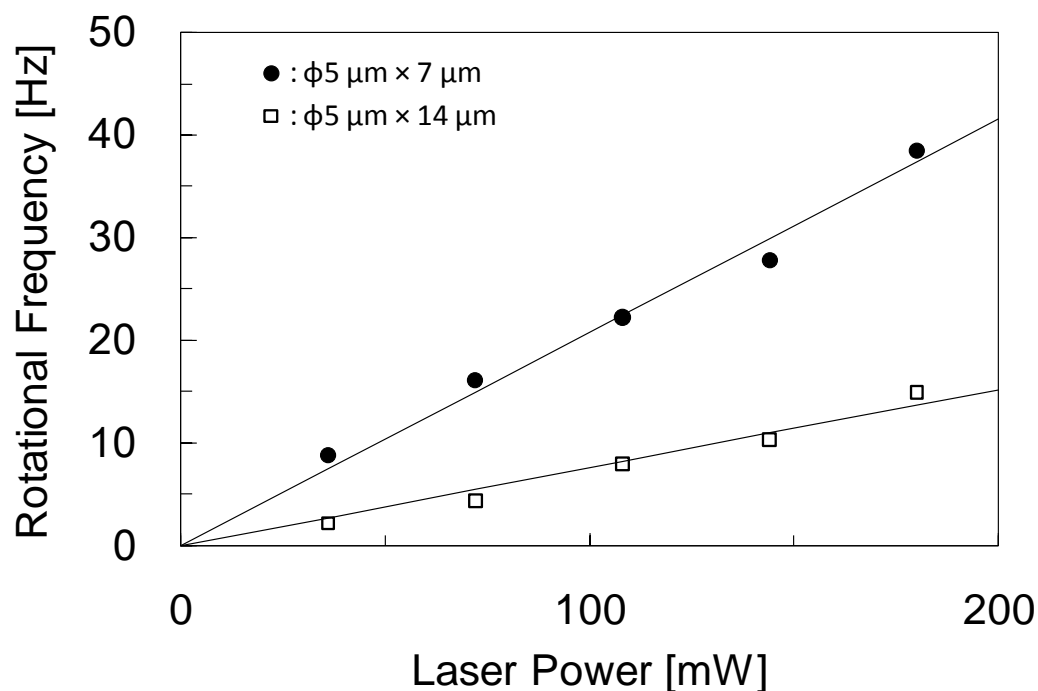


図 6.4.4 マイクロ円柱に対する回転速度のレーザー強度依存性

この実験条件の範囲ではレーザーパワーにほぼ比例していることが確認された。次にこの実験結果を元に円柱にかかる回転トルクの見積もりを行った。回転角速度 ω は、

$$\omega \text{ [rad/s]} = 1340 I \text{ [W]} \quad (4.4.1)$$

と表すことができる。

今回媒質に使用した酢酸エチルをニュートン流体と仮定した場合、回転による側面の単位面積あたりの粘性抵抗 f_v [N/m²] は $\mu\omega$ に等しいと近似できるので[38]、式 4.4.1 の結果と、酢酸エチルの粘性率として $\mu = 0.423 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ (at 25 °C) [39]とを用いると、

$$f_v = \mu\omega = 0.62I \quad (4.4.2)$$

である。ここでは無限に長い円柱の側面の単位面積あたりに働く粘性抵抗を f_v とした。円柱全体に媒質から働く粘性トルク τ_v は側面だけからの粘性トルクより大きいので、

$\tau_v >$ 側面だけからの粘性トルク

$$\begin{aligned}
&\approx f_v \times \text{円柱の側面積} \times \text{半径} && (4.4.3) \\
&= f_v (2\pi r^2 L) \\
&= 1.7 \times 10^{-16} I \text{ [N} \cdot \text{m]}
\end{aligned}$$

となる。ここで、円柱の半径として $r = 2.5 \mu\text{m}$ 、高さとして $L = 7 \mu\text{m}$ を代入した。

一方、円偏光ビームの持つ角運動量がすべてマイクロ円柱に移行すると仮定したときに、円柱が光から受けるトルクの大きさ τ_L は次のように見積れる。円偏光の1光子は $h/2\pi$ の角運動量を持つ。単位時間当たりの角運動量変化がトルクとなることから、 ν と λ をそれぞれレーザー光の周波数と波長、 c を光の速さとして、

$$\tau_L = \frac{I}{h\nu} \cdot \frac{h}{2\pi} = \frac{I\lambda}{2\pi c} = 5.6 \times 10^{-16} I \text{ [N} \cdot \text{m]} \quad (4.4.4)$$

となる。ただし、 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ とした。式 4.4.3 と式 4.4.4 の右辺がオーダー的に一致することから、円偏光のもつ角運動量は効率よく回転に移行していることが分かる。

図 6.4.5 には円柱の直径を $5 \mu\text{m}$ と固定して高さを $7 \sim 22 \mu\text{m}$ に変化させて回転速度を測定した結果を、また重合性液晶を配向膜によって配向させない場合の回転周波数を計測した結果も示している。

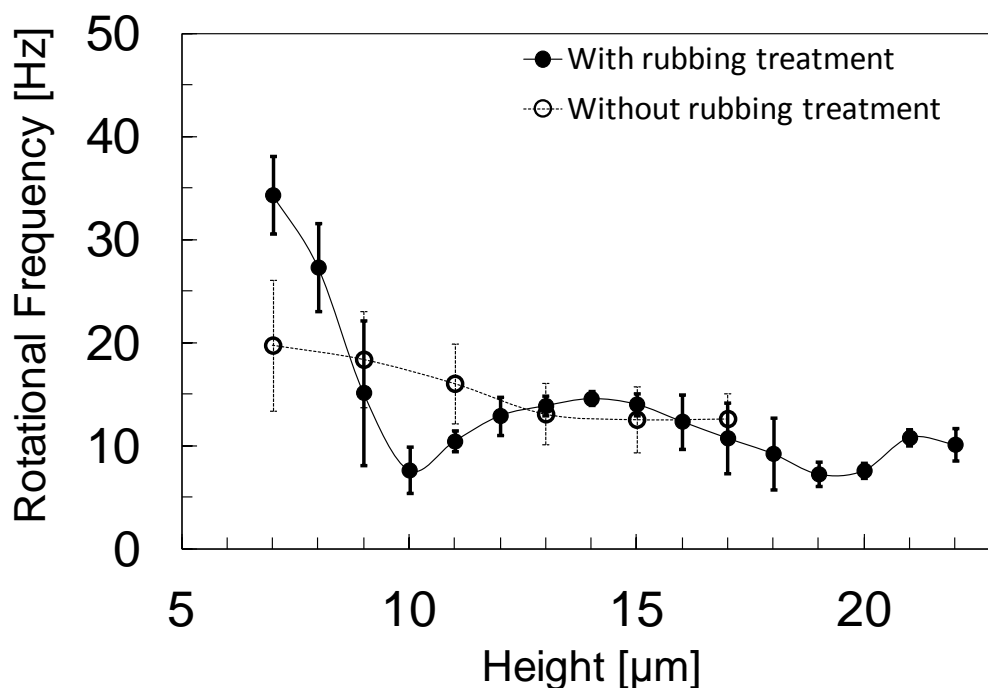


図 6.4.5 マイクロ円柱に対する回転速度の構造体高さ依存性

円柱の高さと共に回転速度は一様には変化せず、振動構造が現れている。振動の周期は約 $9\ \mu\text{m}$ である。液晶ドロップレットの光回転駆動でもドロップレットの直径の関数として見たときにこれと同様の振動構造が観測されている[40]。また重合性液晶を配向させない場合ではこのような周期が見られず、高さの変化にほぼ比例して変化する結果となった。

図 6.4.1 と図 6.4.5 を重ねたグラフが図 6.4.6 となる。

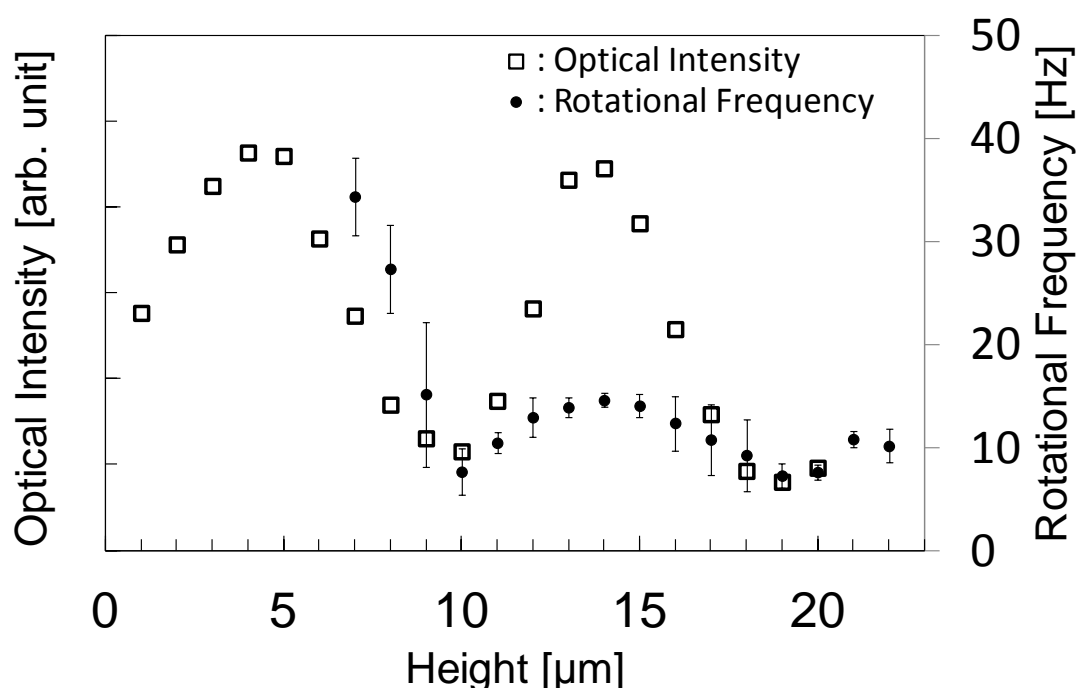


図 6.4.6 マイクロ円柱の回転周波数と構造体の直交ニコル中での透過光強度

このグラフから、透過光強度も高さの変化に対して振動構造を示していて、その周期 d は約 $9\ \mu\text{m}$ であり、回転速度に見られた振動周期と一致していた。

透過光強度は円柱の高さが $10\ \mu\text{m}$ と $19\ \mu\text{m}$ で極小になり、 $4.5\ \mu\text{m}$ と $14\ \mu\text{m}$ で極大になっている。極小になるのは入射直線偏光の方向がサンプル通過後に変っていない（位相は π ラジアン の整数倍だけ変化する）ことを意味しているのに対して、極大になるのはサンプル出射後の偏光方向が 90° だけ回転した（位相は $\pi/2$ の奇数倍だけ変化する）ことを意味する。位相が $\pi/2$ の奇数倍だけ変化する複屈折物質を円偏光が通過すれば円偏光は逆回転の円偏光に変換される。このときに円偏光の角運動量の変化が最大であるから角運動量保存則よりサンプルへの回転トルクも最大となり、回転周波数も最大となる。それに対して、位相が π の整数倍だけ変化する複屈折物質を円偏光が通過しても回転方向は変わら

ない。すなわち光子の角運動量変化はゼロである。この場合、サンプルに受け渡される回転トルクもゼロとなり回転周波数は最小となる。このようにして図 6.4.6 の 2 種類の振動周期の一致することが説明される。

円柱の中心軸に垂直な面内で配向方向に x 軸、それと垂直方向に y 軸を取る。 x 方向と y 方向の偏光に対する屈折率をそれぞれ n_x と n_y とすると、リターデーションは高さが $d=9$ μm のときに 1 波長に等しくなる。したがって、

$$|n_x - n_y| d = \lambda \quad (4.4.5)$$

の関係が成り立つから、 $\lambda = 1064$ nm として複屈折値は

$$|n_x - n_y| = 0.12 \quad (4.4.6)$$

となる。

一方、BASF 社の資料によると、本研究で使用した液晶の 589 nm 光に対する複屈折値は液晶状態で 0.1470 である[41]。ただし、これは重合前の複屈折値であるのに対して、我々の値は重合後のものである。また、一般に複屈折値は波長と共に小さくなる傾向がある。

第7章 重合性液晶による回転法のマイクロギアへの応用

次に光造形と円偏光による回転駆動の様々な分野への応用を考え、今回は直接力に変換するタイプの光マイクロマシンとして歯車型構造体を加工し、回転を行った。任意形状である二種類の歯の長さの歯車を回転させることによって、回転にどのような影響が現れるのかを観測することが目的である。

7.1 実験方法

歯車型構造体を重合性液晶の複屈折性の調査した結果を元に構造体高さ $10\mu\text{m}$ と $14\mu\text{m}$ で作製した。6.2の実験と同様、光造形後酢酸エチルによって硬化していない重合性液晶を洗中にレーザートラップし、同時に回転を行った。このとき直交ニコル法によって観測される映像を高速 CMOS カメラによって取り込み、回転周波数を決定した。これらを直径 $8\mu\text{m}$ (歯の長さ $1\mu\text{m}$)と直径 $10\mu\text{m}$ (歯の長さ $2\mu\text{m}$)について実験を行った。

7.2 結果と考察

図 7.2.1 は実際に回転を行った歯車型構造体を SEM によって観測した物である。そして表 7.2.1 は直径 $8\mu\text{m}$ (歯の長さ $1\mu\text{m}$)、高さ $7\mu\text{m}$ 、表 7.2.2 は高さ $14\mu\text{m}$ の回転周波数を、レーザーパワーを変えて回転周波数を測定した結果である。また 7.2.3 は直径 $10\mu\text{m}$ (歯の長さ $2\mu\text{m}$)、高さ $7\mu\text{m}$ 、7.2.4 は高さ $14\mu\text{m}$ の回転周波数を測定した結果である。

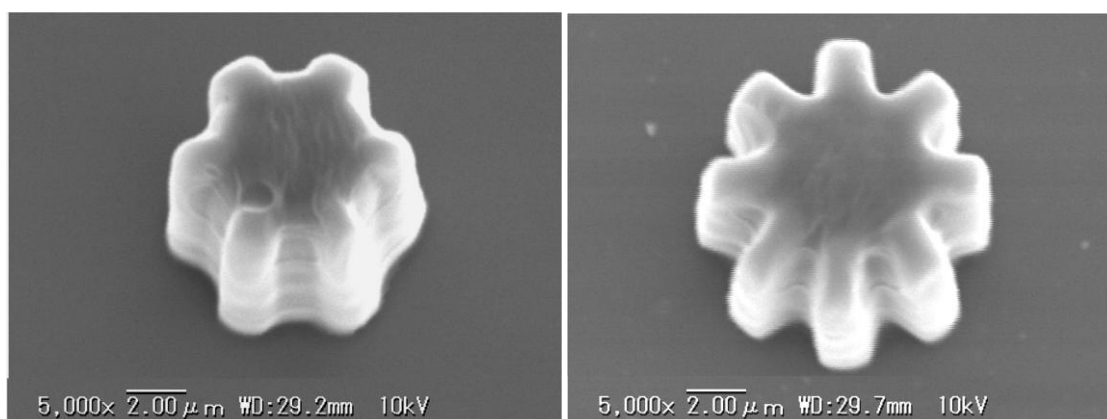


図 7.2.1 作製した二種類の歯長のマイクロギア

表 7.2.1 回転速度のレーザー強度依存性(歯長 1 μ m, 構造体高さ 10 μ m)

レーザー強度		①		②		③		平均	
設定値	実測値	Hz		Hz		Hz		Hz	
1100	180	8.85	-8.26	6.58	-6.85	9.09	-8.40	8.17	-7.84
700	115	5.43	-4.57	4.22	-4.39	5.88	-5.44	5.18	-4.80
300	49	2.83	-2.38	2.00	-2.09	2.82	-2.60	2.55	-2.36

表 7.2.2 回転速度のレーザー強度依存性(歯長 1 μ m, 構造体高さ 14 μ m)

レーザー強度		①		②		③		平均	
設定値	実測値	Hz		Hz		Hz		Hz	
1100	180	10.20	-9.01	10.00	-8.47	13.51	-12.16	11.24	-9.88
700	115	6.37	-5.81	6.24	-5.47	8.44	-7.85	7.02	-6.38
300	49	2.50	-2.45	2.45	-2.31	3.31	-3.31	2.75	-2.69

表 7.2.3 回転速度のレーザー強度依存性(歯長 2 μ m, 構造体高さ 10 μ m)

レーザー強度		①		②		③		平均	
設定値	実測値	Hz		Hz		Hz		Hz	
1100	180	3.64	-3.50	2.51	-2.49	1.96	-1.64	2.70	-2.54
700	115	2.60	-2.10	2.20	-1.78	1.00	-1.01	1.93	-1.63
300	49	1.11	-0.90	1.11	-0.97	0.33	-0.32	0.85	-0.73

表 7.2.4 回転速度のレーザー強度依存性(歯長 2 μ m, 構造体高さ 14 μ m)

レーザー強度		①		②		③		平均	
設定値	実測値	Hz		Hz		Hz		Hz	
1100	180	3.64	-3.86	4.29	-3.34	4.76	-2.91	4.23	-3.37
700	115	2.56	-2.33	2.45	-2.44	2.87	-2.00	2.63	-2.26
300	49	1.18	-1.20	1.25	-1.21	1.43	-1.11	1.29	-1.17

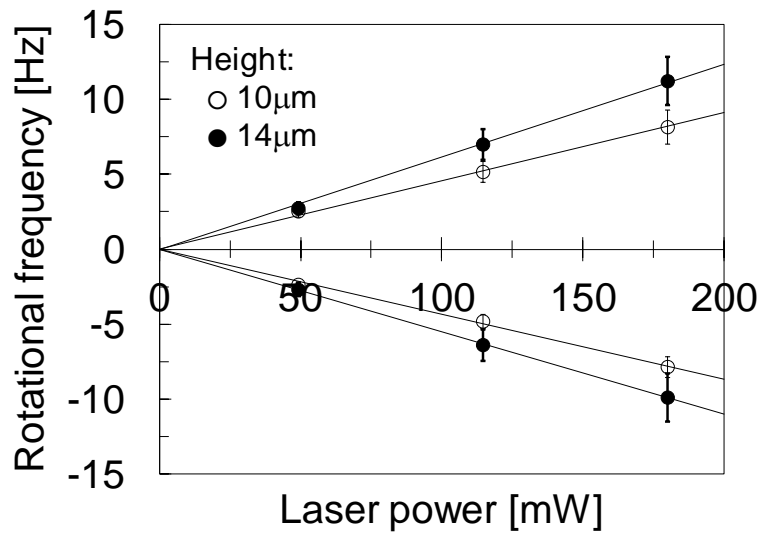


図 7.2.2 マイクロギア(歯長 1 μ m)の回転周波数

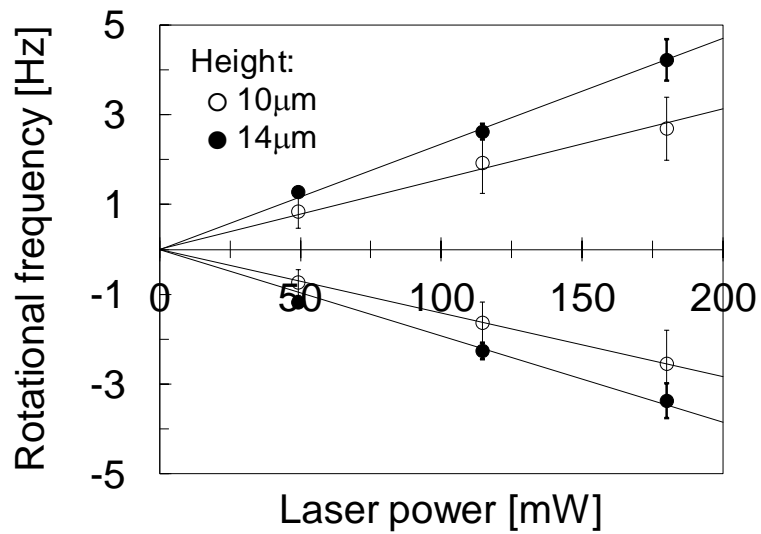


図 7.2.2 マイクロギア(歯長 2 μ m)の回転周波数

これらの結果をグラフ化したものが図 7.2.2 と図 7.2.3 である。このグラフから回転周波数はレーザー強度に比例していることがわかる。また、左右の回転とも同等の回転周波数となっていることから鏡面对称性の任意形状であれば、光放射圧による回転の影響が無いことも確認できた。

これらの歯車型構造体にかかる回転トルクを第 6 章で記述した算出方法によって見積もったものを表 7.2.1 に示す。ただし、このような任意形状の場合今回は平均半径を使用しトルクを算出した。

表 7.2.1 二種類のマイクロギアにかかる回転トルク

Microgear type		Mean frequency [Hz] at 180mW	Torque [pN μ m]
r [μ m]	h [μ m]		
4	14	11	127 <i>I</i>
	10	8	89 <i>I</i>
5	14	4	83 <i>I</i>
	10	3	44 <i>I</i>

この結果から半径を大きくすればトルクが減少することがわかる。また高さに関しては 14 μ m の高さでちょうど 1/2 波長ずれるため、10 μ m の物よりも回転トルクが大きくなっている。

第 8 章 結論

本研究では、マイクロマシンの要素技術であるマイクロ構造物を光造形法により製作し、レーザートラップと共に放射圧・円偏光を利用して回転駆動させる技術を開発した。二光子吸収過程を利用した光造形法により、サブミクロンの分解能で造形を行うことができた。

放射圧による光回転駆動では、全反射を利用したものに形状改良することによって、大幅に回転効率が向上することを示した。しかし、回転効率は NA が大きければ効率は高いものの、そのためには特殊な液浸対物レンズが必要となる。また回転方向が構造体の形状に依存してしまい、任意の形状に形成できないなどの欠点があった。

円偏光による光回転駆動では、光吸収物質ローダミン色素を混入させた構造物について色素の最適濃度の決定を行った。放射圧による回転と円偏光による回転を比べると、円偏光駆動法は回転方向を選択できるが、はるかに放射圧駆動法のほうが回転効率は高い。その理由として、放射圧方式では、ほとんどの光子が回転トルクに寄与するのに対して、円偏光方式では回転体に吸収される光子しか回転トルクに寄与しないためであると考えられる。

これらを解消するために複屈折素材の重合性液晶から成る回転体で円偏光による回転駆動を行った。重合性液晶の配向状態を凍結することで人工的な複屈折物体を作製し、その回転速度と媒質の粘性係数からトルクを見積もることで回転効率が高いことを証明した。一方、円偏光 1 光子が持つ角運動量が $h/2\pi$ であることから強度 $I[\text{W}]$ のレーザービームの持つ回転トルクを見積もると $5.6 \times 10^{-16}I [\text{N} \cdot \text{m}]$ であり、酢酸エチル液中でマイクロ円柱を回転させた場合のレーザー強度依存性から見積もった粘性トルクは $1.7 \times 10^{-16}I [\text{N} \cdot \text{m}]$ となった。つまり変換効率は約 30% となり、格段に効率が向上する結果となった。

この結果を元にマイクロ光造形によって作製した光エネルギーを直接運動エネルギーに変換するマイクロギアの光駆動（回転）を行ったが、任意形状の構造体に対しても回転方向の決定が行え、その特性も調査することができた。これらのことからこのような素材を用いて光による駆動（回転）を行うことで、微量液体の攪拌機や微小駆動機構のマイクロモーター、微小領域への試薬散布用のマイクロスプリンクラーなど、今後様々な場面で光が直接駆動源となる光アクチュエータの応用や研究が発展すると考えられる。

謝辞

本研究に対して貴重な助言と終始熱心・丁寧な御指導を賜りました古沢浩教授(高知工科大学環境理工学群)、木村正廣教授(高知工科大学名誉教授)に心から深く御礼を申し上げます。

また、本研究の審査をして頂きました成沢忠教授(高知工科大学環境理工学群)、八田章光教授(高知工科大学環境理工学群)、全卓樹教授(高知工科大学環境理工学群)に御礼申し上げます。

平成 24 年 2 月 14 日

高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻
博士後期課程 社会人特別コース
伊藤 基巳紀

参考文献

- [1] 澤田廉士, 羽根一博, 日暮栄治 : 「光マイクロマシン」 (オーム社, 2002).
- [2] S. Kawata, H. B. Sun, T. Tanaka, and K. Takada: *Nature* **412** (2001) 697.
- [3] E. Higurashi, R. Sawada, and T. Ito: *Phys. Rev. E* **59** (1999)3676.
- [4] E. Higurashi, R. Sawada, and T. Ito: *Appl. Phys. Lett.* **72** (1998) 2951.
- [5] P. Galajda and P. Ormos: *J. Opt. B* **4** (2002) 78.
- [6] 丸尾 昭二 : 日本物理学会誌 **60** (2005) 180.
- [7] E. Higurashi, H. Ukita, H. Tanaka, and O. Ohguchi: *Appl. Phys. Lett.* **64** (1994) 2209.
- [8] R. C. Gauthier: *Appl. Phys. Lett.* **67** (1995) 2269.
- [9] R. Gauthier: *Appl. Phys. Lett.* **69** (1996) 2015.
- [10] P. Galajda and P. Ormos: *Appl. Phys. Lett.* **78** (2001) 249.
- [11] P. Galajda and P. Ormos: *Appl. Phys. Lett.* **80** (2002) 4653.
- [12] 木村 正廣, 伊藤 基巳紀 : 光アライアンス **18** (2007) 25.
- [13] R. A. Beth: *Phys. Rev.* **50** (1936) 115.
- [14] B. Piccirillo and E. Santamato: *Phys. Rev. E* **69** (2004) 56613.
- [15] N. Ji, M. Liu, J. Zhou, and Z. Lin: *Opt. Express* **13** (2005) 5192.
- [16] M. Liu, N. Ji, Z. Lin, and S. Chui: *Phys. Rev. E* **72** (2005) 56610.
- [17] K. D. Wulff, D. G. Cole, and R. L. Clark: *Appl. Opt.* **47** (2008) 6428.
- [18] M. E. K. Friese, T. A. Nieminen, N. R. Heckenberg, and H. Rubinsztein-Dunlop: *Nature* **394** (1998) 348.
- [19] S. Juodkazis, S. Matsuo, N. Murazawa, I. Hasegawa, and H. Misawa: *Appl. Phys. Lett.* **82** (2003) 4657.
- [20] N. Murazawa, S. Juodkazis, and H. Misawa: *J. Phys. D* **38** (2005) 2923.
- [21] V. Jarutis, Y. Tanamura, and H. Misawa: *Europhys. Lett.* **73** (2006) 800.
- [22] N. Murazawa, S. Juodkazis, V. Jarutis, Y. Tanamura, and H. Misawa: *Europhys. Lett.* **73** (2006) 800.
- [23] N. Murazawa, S. Juodkazis, and H. Misawa: *Opt. Express* **14** (2006) 2481.
- [24] N. Murazawa, S. Juodkazis, Y. Tanamura, and H. Misawa: *Jap. J. Appl. Phys.* **45** (2006) 977.
- [25] E. Brasselet, N. Murazawa, S. Juodkazis, and H. Misawa: *Phys. Rev. E* **77** (2008) 41704.
- [26] 木村 正廣, 伊藤 基巳紀 : レーザー研究 **37** (2009) 694.
- [27] K. Ito and M. Kimura, *Jpn. J. App. Phys.* **49** (2010) 04020801.

- [28] K. Ito, Hiroshi Furusawa and M. Kimura: *Opt. Express* **20** (2012) 4254.
- [29] 伊藤基巳紀, 高知工科大学修士論文 (2006).
- [30] 高市智章, 高知工科大学修士論文 (2002).
- [31] 交久瀬大五, 高知工科大学修士論文 (2004).
- [32] 伊藤基巳紀, 木村正廣: 特許公開 2010-023129.
- [33] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm, and S. Chu: *Opt. Lett.*, **11** (1986) 228.
- [34] K. Sasaki, M. Koshioka, H. Misawa and H. Masuhara: *Appl. Phys. Lett.*, **60** (1992) 807.
- [35] E. Higurashi, *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **82**, 2772 (1997) 2772-2779.
- [36] 左貝潤一: 「光学の基礎」(コロナ社, 1997).
- [37] H. Ukita and H. Kawashima: *Appl. Opt.* **49** (2010) 1991.
- [38] 今井功: 「流体力学 (前編)」(裳華房, 1973) .
- [39] D. R. Lide: *Handbook of Chemistry and Physics 77th Edition* (CRC Press, 1996-1997).
- [40] T. Wood, H. Gleeson, M. Dickinson, and A. Wright: *Appl. Phys. Lett.* **84** (2004) 4292.
- [41] T. Yoshiki: private communication (2008).

付録 A 重合性液晶の加工分解能の決定

重合性液晶の加工分解能を調査するために図 A-1 の構造体を 5mW~12.5mW(2.5mW step) 各レーザーパワー、スキャンスピード 48 μ m/s の $\times 1$ & $\times 5$ ~9($\times 9$ より上はメカ的に不可)で作製した。

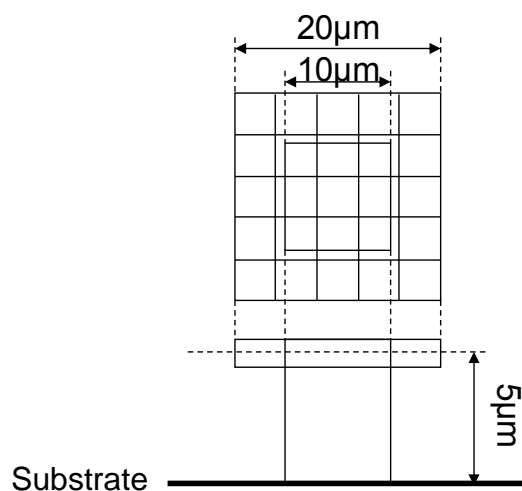


図 A-1 加工分解能調査用構造体

構造体作製の結果、表 A-1 となった。レーザーパワーとレーザー光走査速度変化の条件で観測された SEM 像を以下の表 A-2 に対応した図番号で示す。

この結果から、最小加工分解能は 7.5mW 時のスキャンスピード 384 μ m/s = 8 倍時で、

加工線幅：約 180nm

加工線高さ：約 320nm

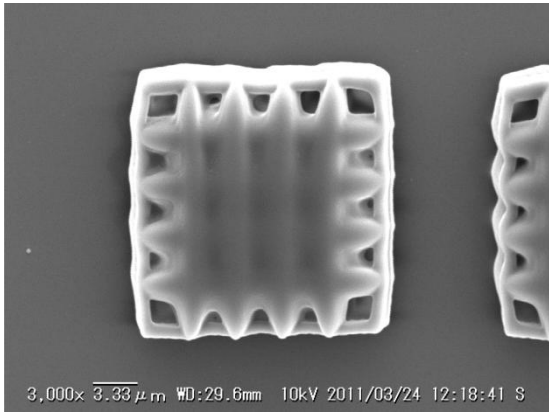
となった。

表 A-1 作製結果

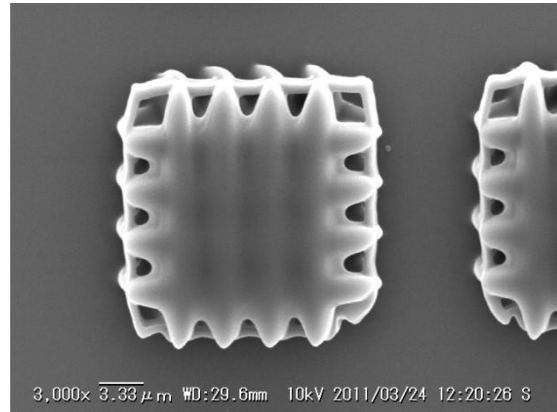
		速度(48 μ m/s)					
		1 倍	5 倍	6 倍	7 倍	8 倍	9 倍
レーザー パワー (mW)	2	×	-	-	-	-	-
	3	×	-	-	-	-	-
	4	○	-	-	-	-	-
	5	○	×	×	×	×	-
	7.5	○	○	○	○	○	×
	10	○	○	○	○	○	○
	12.5	○	○	○	○	○	○

表 A-2 SEM 画像対応表

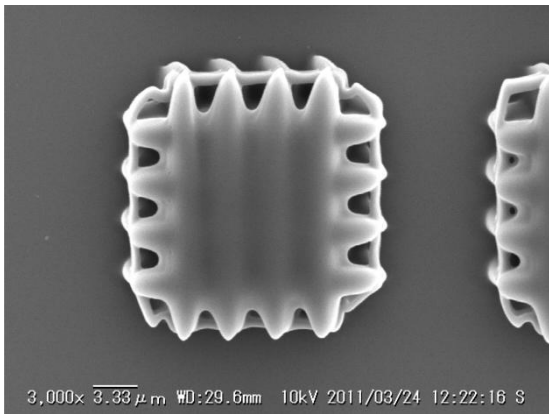
		画像番号		
		上面	拡大	45 度斜め(拡大)
レーザー パワー (mW)	4	A-6	A-11	A-16
	5	A-5	A-10	A-15
	7.5	A-4	A-9	A-14
	10	A-3	A-8	A-13
	12.5	A-2	A-7	A-12



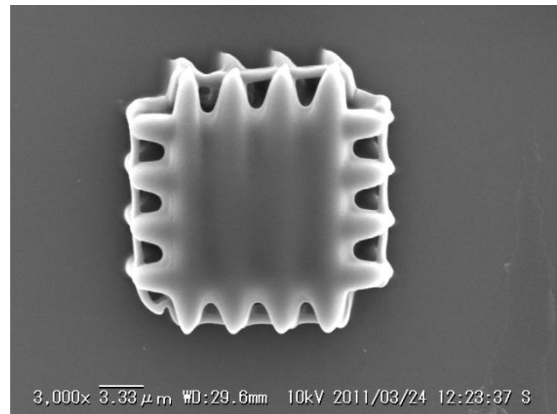
×1



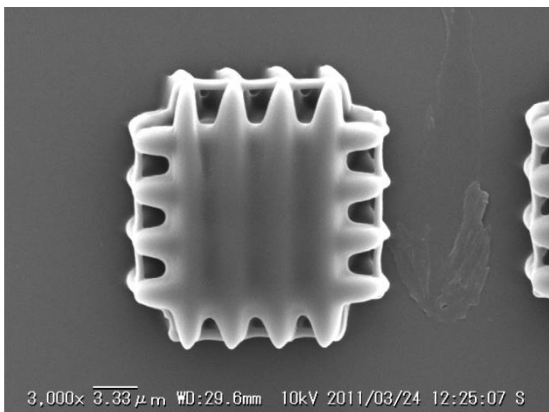
×5



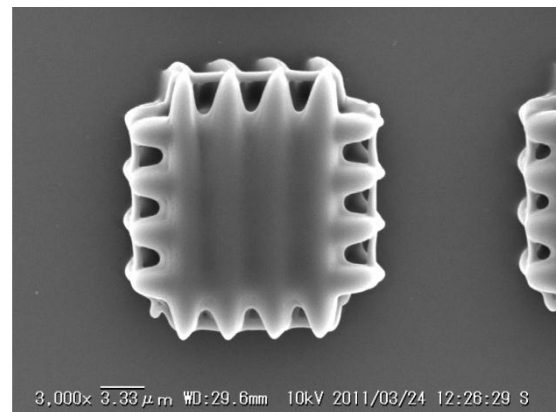
×6



×7

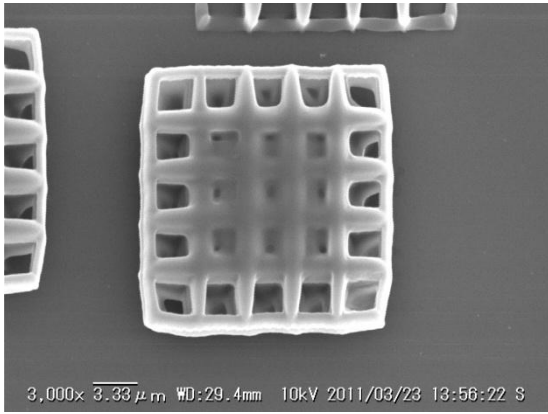


×8

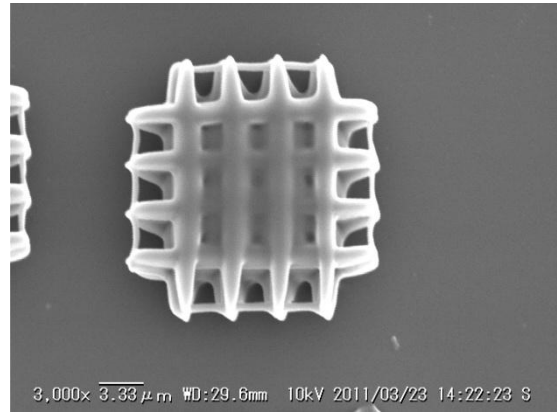


×9

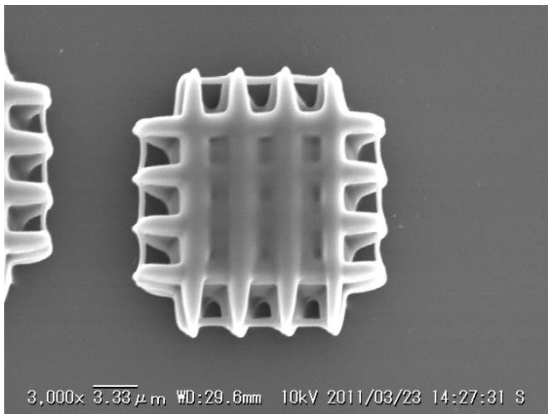
図 A-2 照射パワー12.5mW



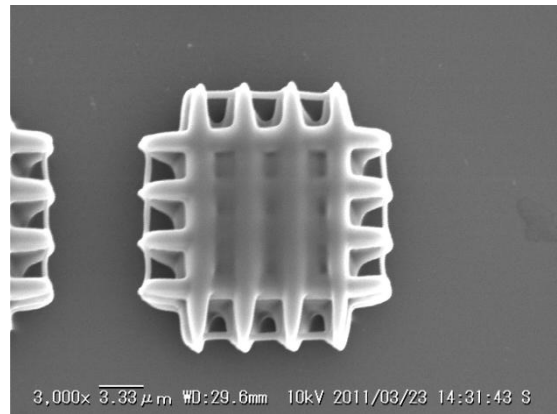
×1



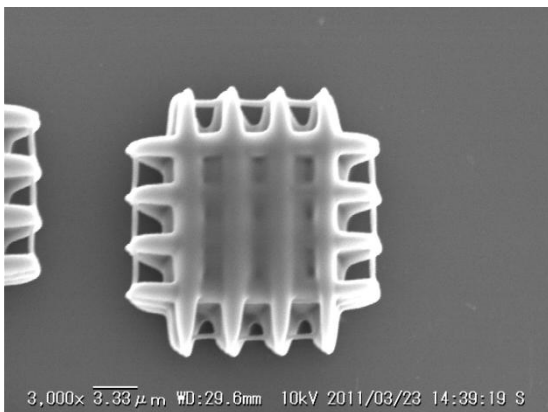
×5



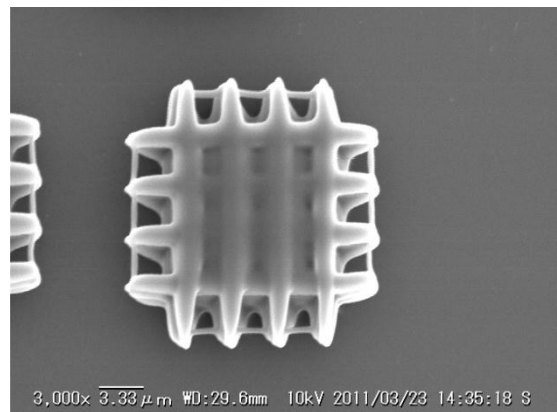
×6



×7

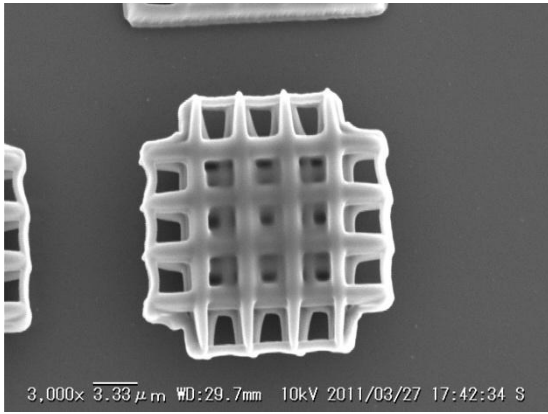


×8

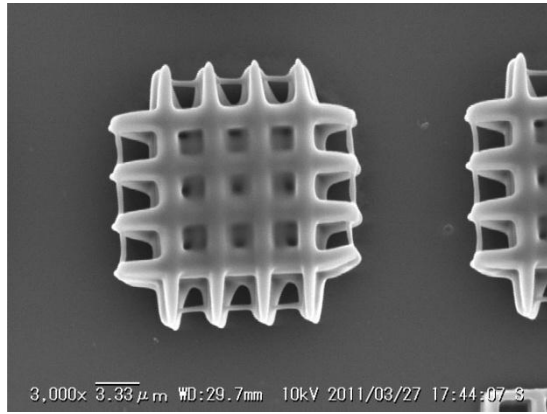


×9

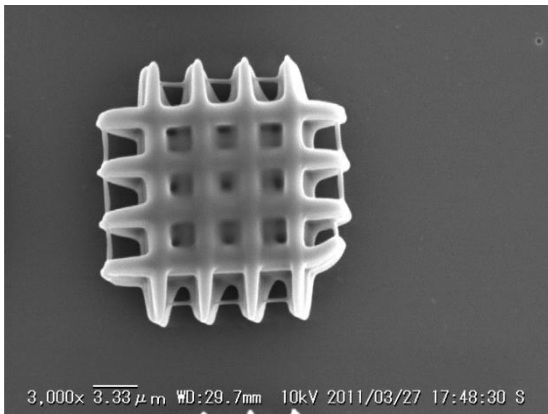
図 A-3 照射パワー10mW



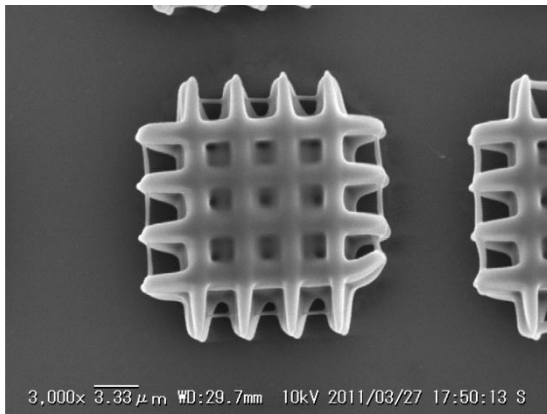
×1



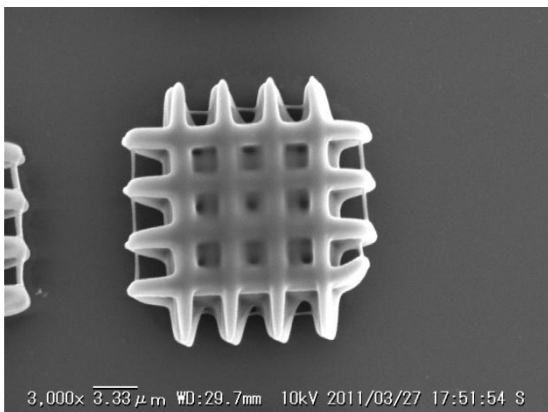
×5



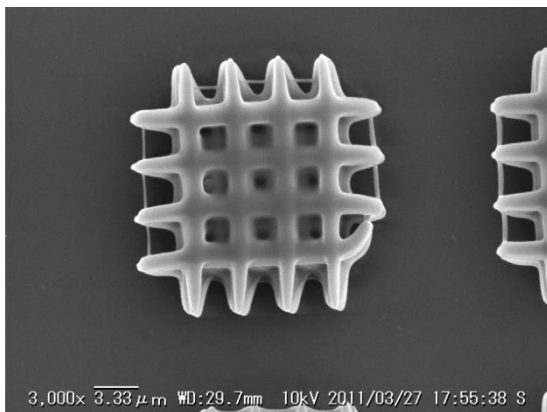
×6



×7

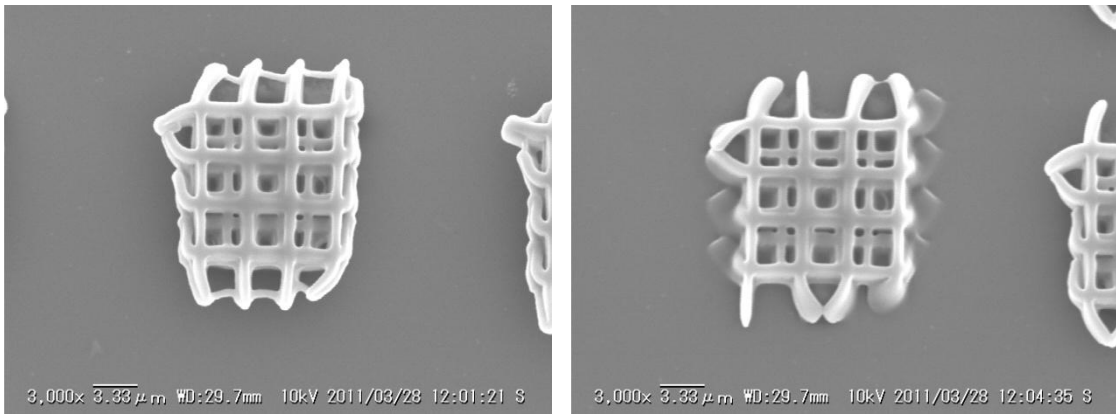


×8



×9

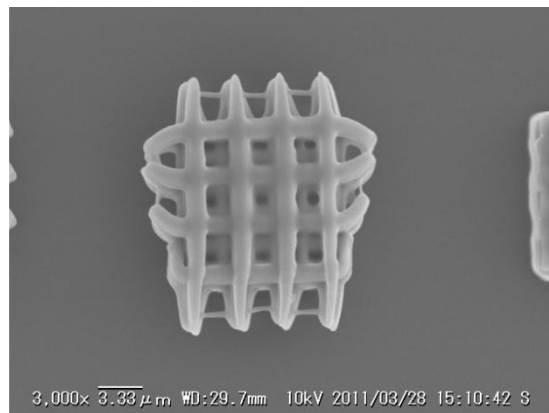
図 A-4 照射パワー7.5mW



×1

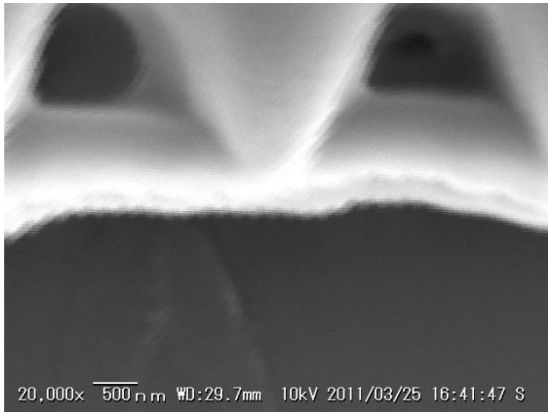
×5

図 A-5 照射パワー5mW

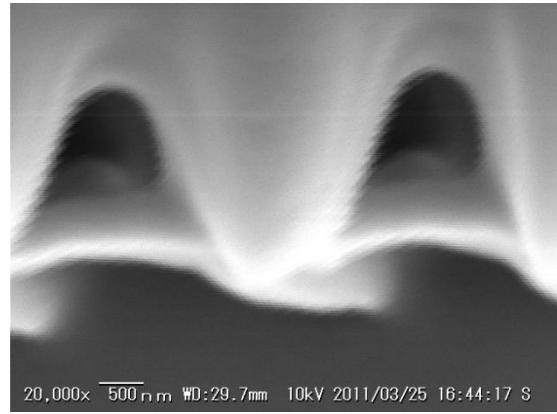


×1

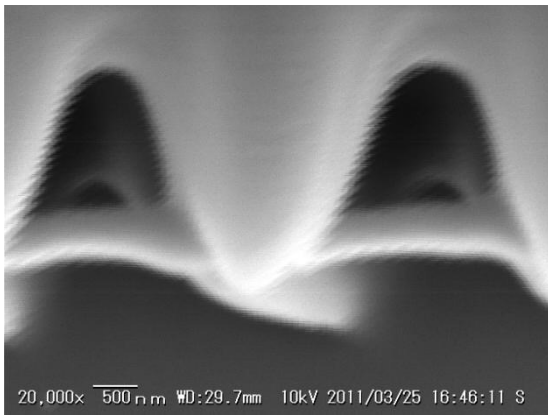
図 A-6 照射パワー4mW



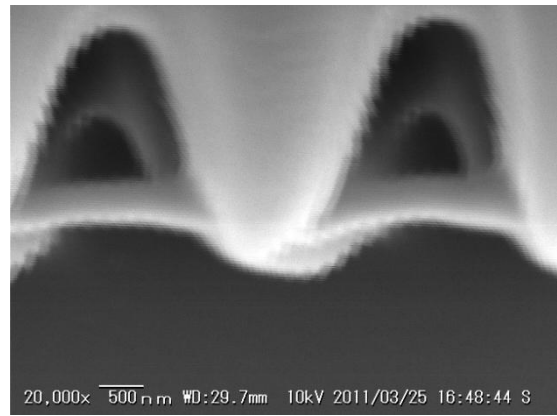
×1



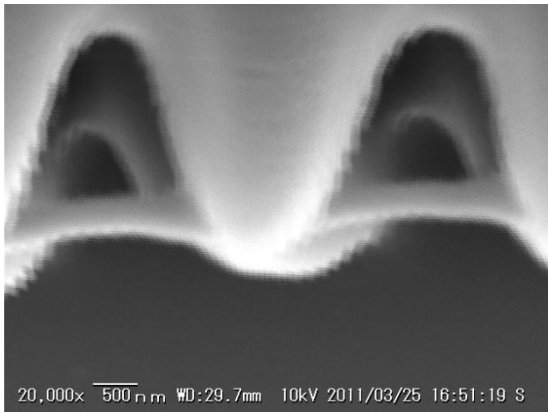
×5



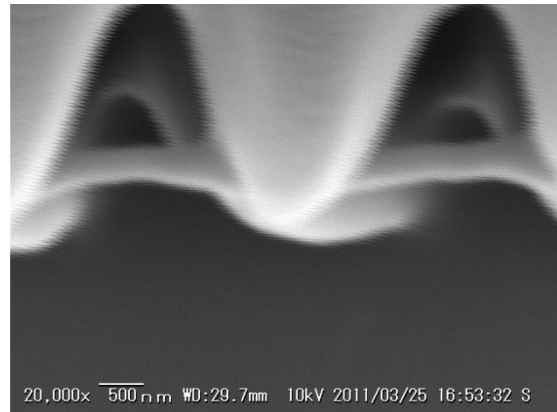
×6



×7

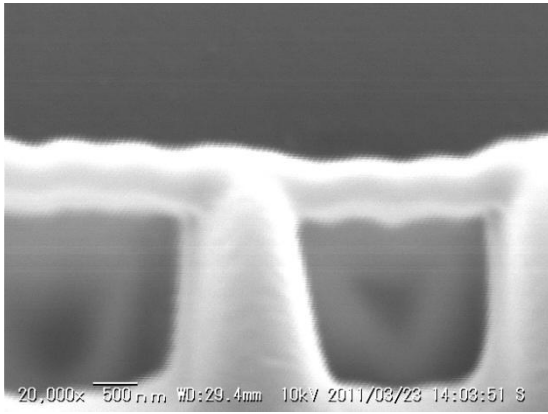


×8

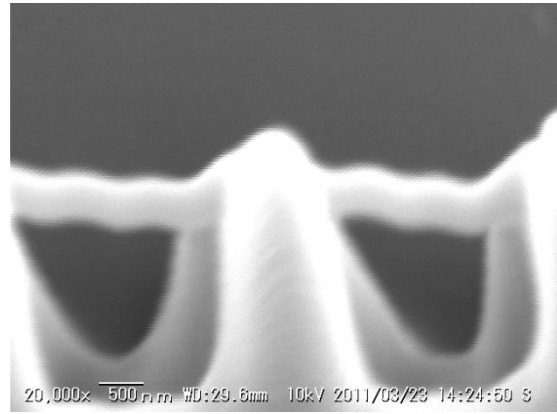


×9

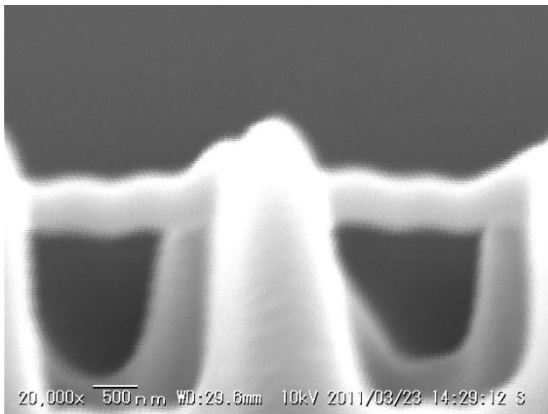
図 A-7 照射パワー12.5mW (拡大)



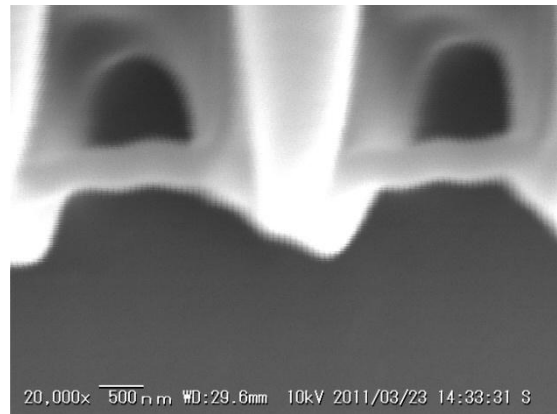
×1



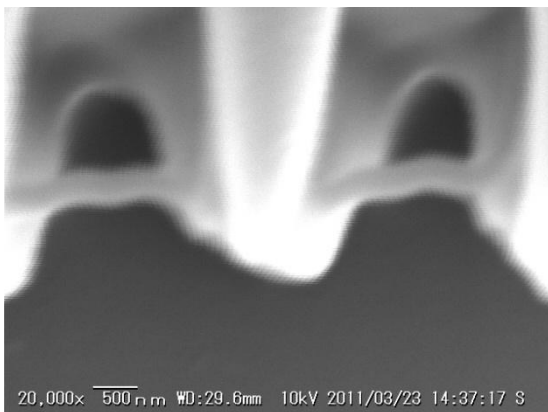
×5



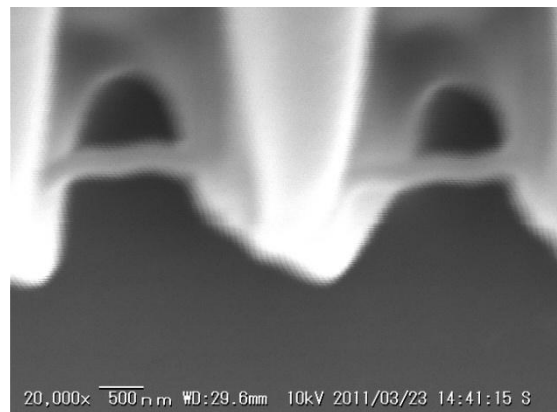
×6



×7

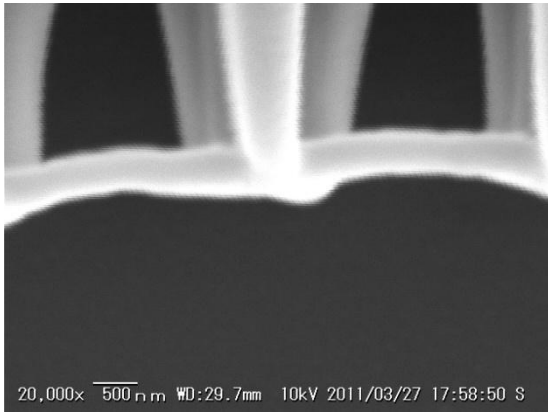


×8

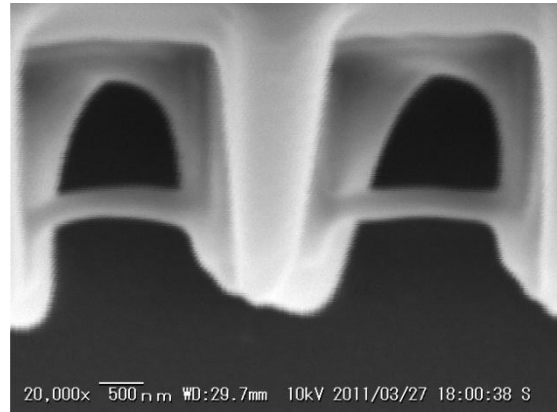


×9

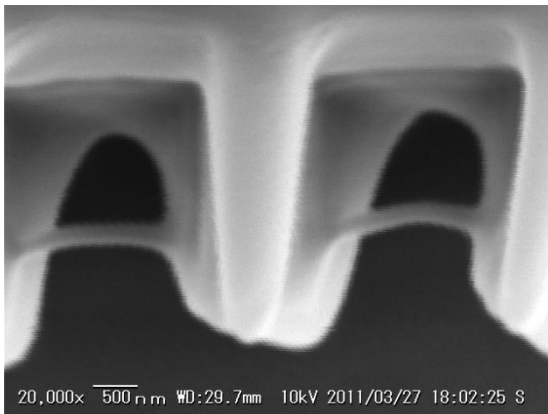
図 A-8 照射パワー10mW (拡大)



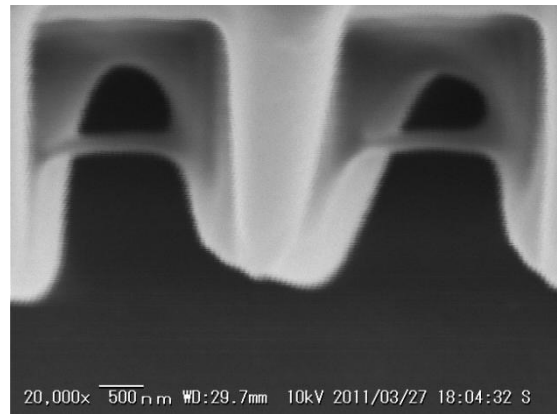
×1



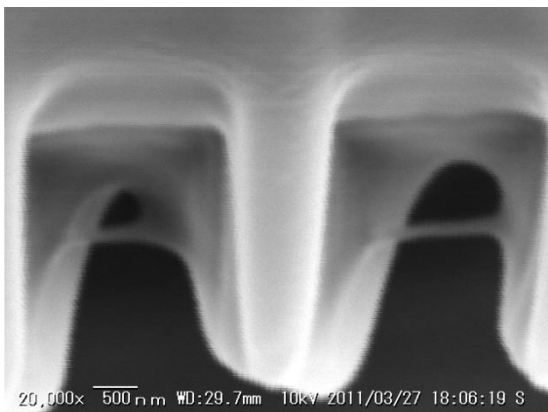
×5



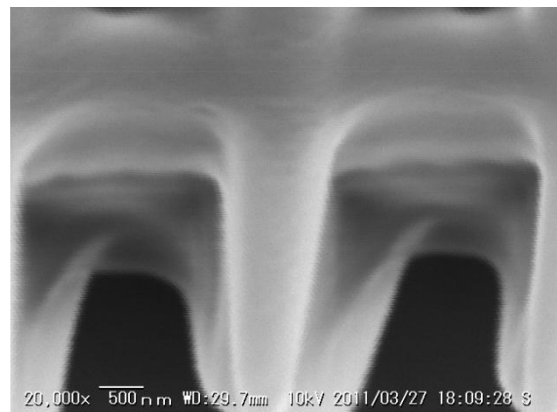
×6



×7

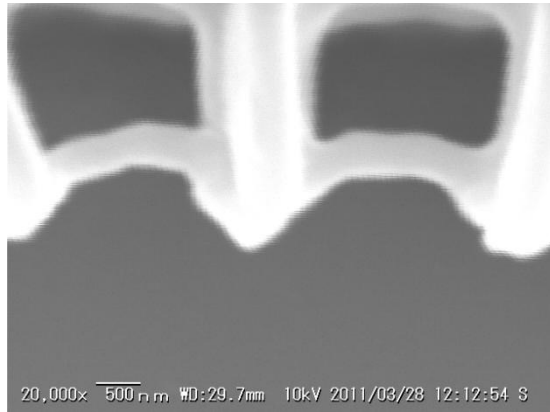


×8



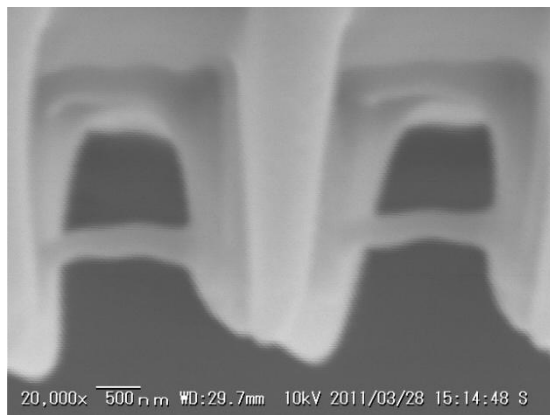
×9

図 A-9 照射パワー7.5mW (拡大)



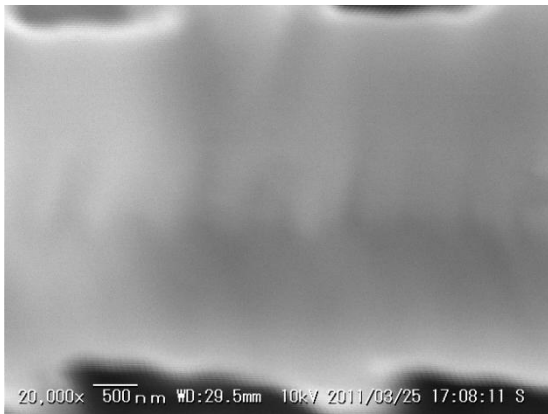
×1

図 A-10 照射パワー5mW (拡大)

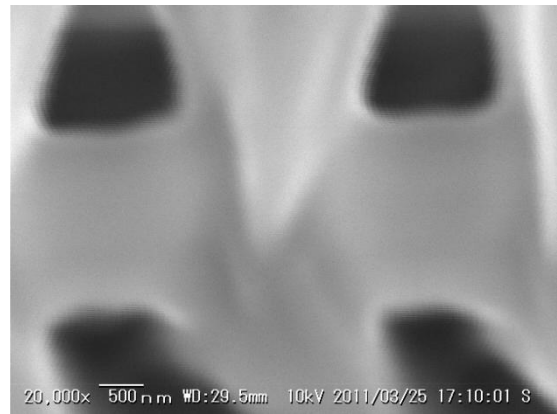


×1

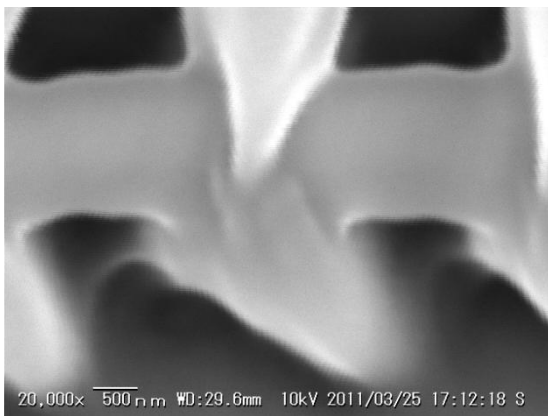
図 A-11 照射パワー4mW (拡大)



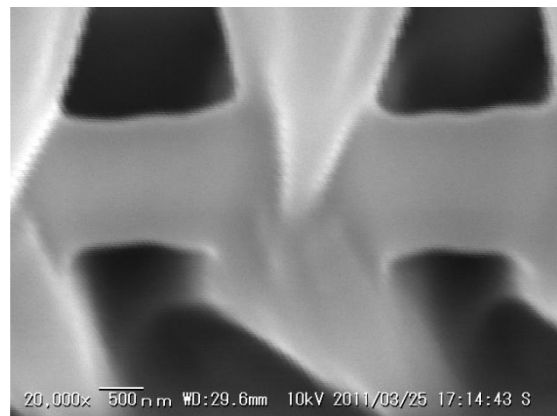
×1



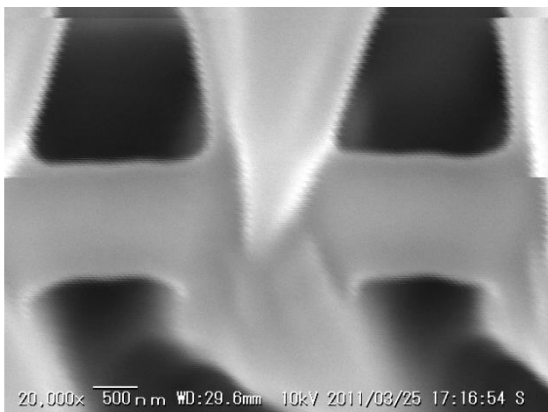
×5



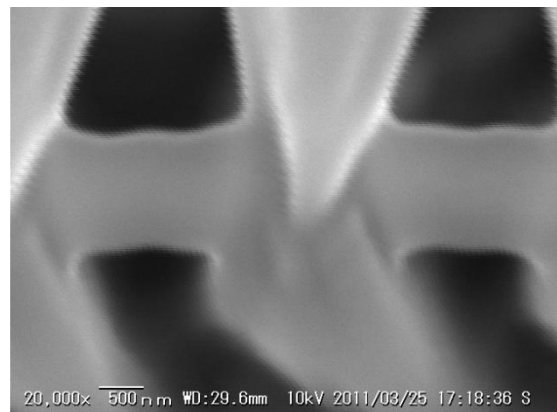
×6



×7

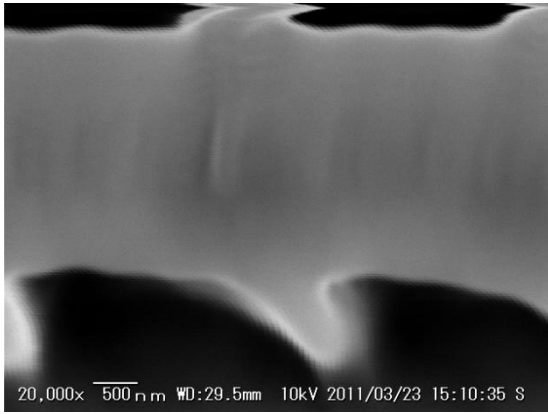


×8

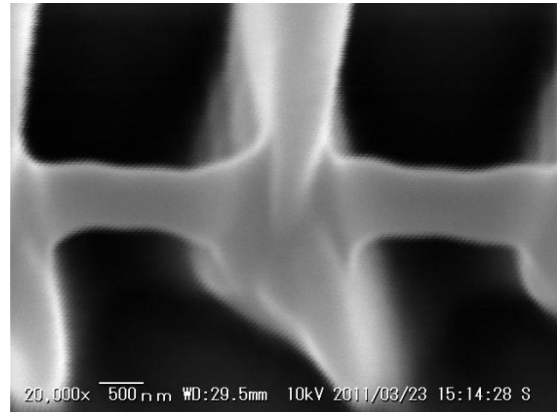


×9

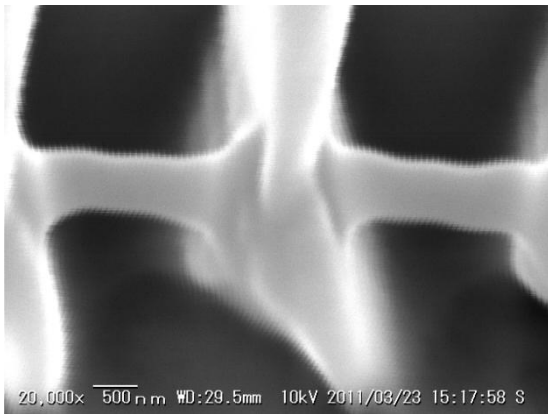
図 A-12 照射パワー12.5mW (45° 拡大)



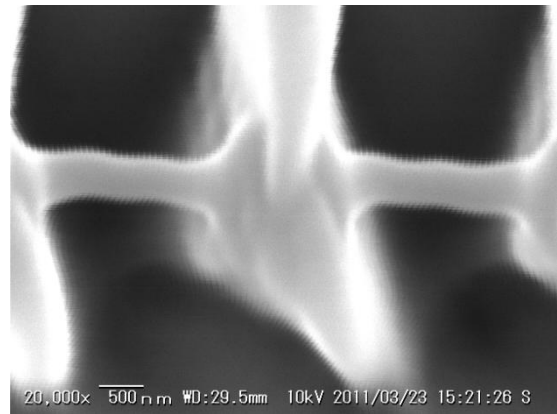
×1



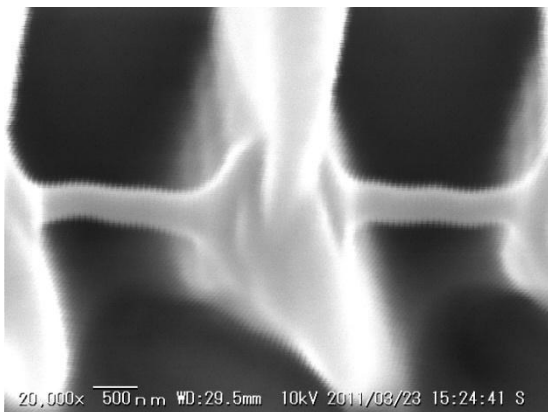
×5



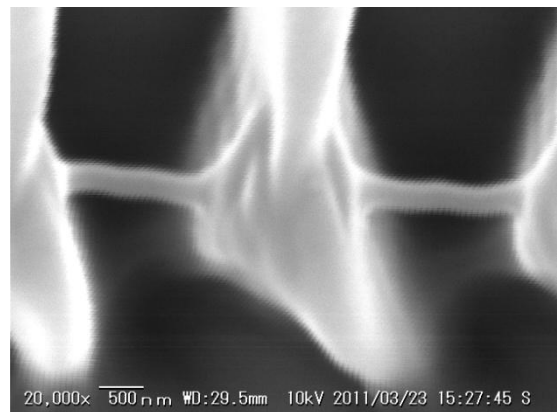
×6



×7

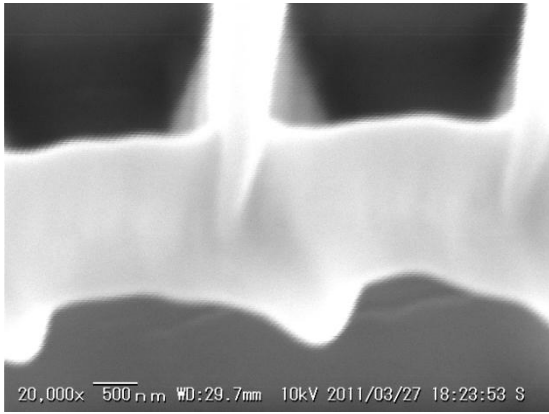


×8

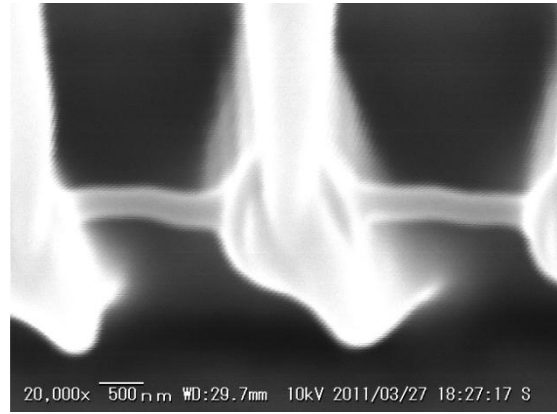


×9

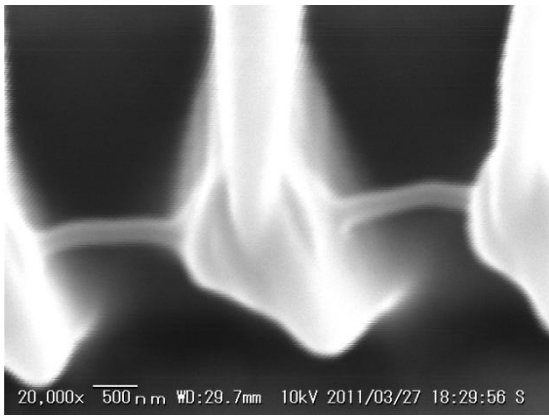
図 A-13 照射パワー10mW



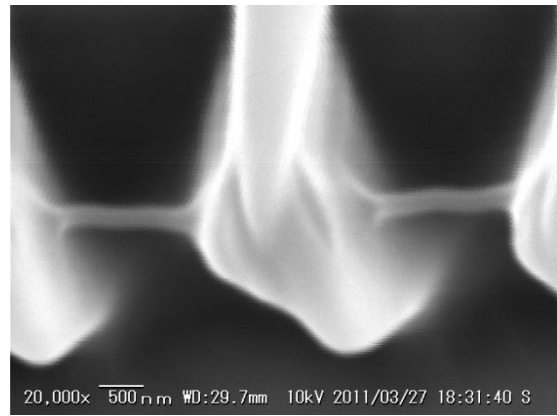
×1



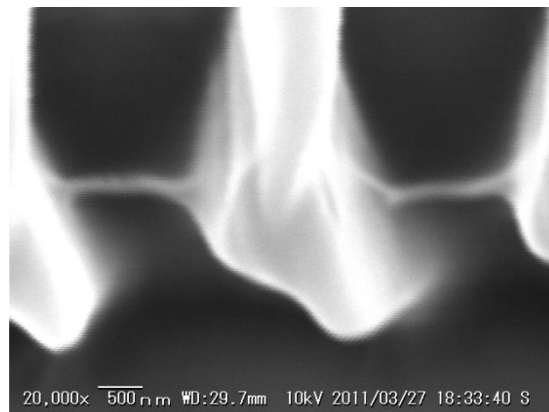
×5



×6



×7



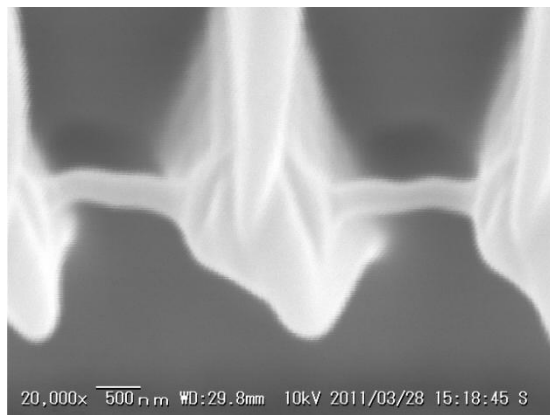
×8

図 A-14 照射パワー7.5mW (45° 拡大)



×1

図 A-15 照射パワー5mW



×1

図 A-16 照射パワー4mW