

平成 14 年度

卒業論文

# 2 光子吸収法による マイクロ光造形

高知工科大学知能機械システム工学科

光物性工学研究室

交久瀬 大五

# 目次

第1章 序論	1
第2章 マイクロ光造形の原理	
2・1 マイクロ光造形について	2
2・2 2光子吸収過程	3
2・3 対物レンズの開口数	6
2・4 回折限界	7
2・5 光硬化性樹脂	8
第3章 マイクロ光造形装置の作製	
3・1 光学系の作製	10
3・2 構成部品	12
第4章 マイクロ光造形装置の性能テスト	
4・1 パワーと線幅の関係	14
4・2 パワーと高さの関係	17
4・3 収縮率改善	19
4・3・1 加温効果	22
4・3・2 走査回数効果	28
4・3・3 走査回数効果 + 加温効果	31
第5章 マイクロ構造物の試作	34
第6章 結論	36
謝辞	37
参考文献	38

## 第1章 序論

ナノテクノロジーに関する研究が最近盛んに行われている。その範囲は工学だけではなく医療などさまざまな分野にも応用され始めている。

一方、Ti:Sapphire フェムト秒レーザーなどの高出力の超短パルスレーザー装置が開発され、比較的容易に2光子吸収を誘起できるようになった。<sup>(1)(2)</sup> このような背景から、2光子吸収を利用した光造形に関する研究が盛んに行われるようになった。そこで、本研究ではマイクロマシンの作製を目標に非線形現象の一つである2光子吸収効果を利用したマイクロ光造形装置の開発、マイクロマシンの作製するための基礎的技術の確立を目的に研究をおこなった。<sup>(3)(4)(5)</sup>

本論文は、第2章では、2光子吸収法の原理や1光子吸収法<sup>(6)</sup>より2光子吸収法を使う利点、回折限界や光硬化性樹脂の特性などを示す。第3章では、使用した実験装置の説明やマイクロ光造形装置の設計、開発を行った結果を示す。第4章では、第3章で開発した装置の性能テストとして、レーザーを走査した時の線状硬化物の線幅と厚みがレーザーパワーにどのように依存するかを調べた。また、未硬化樹脂の洗浄後の収縮現象を抑える目的で行った加温効果や走査回数変化による効果について測定した結果を示す。第5章では、第4章で確立した技術を利用して3次元マイクロ構造物を作製した結果を示す。最後に第6章では第2章から第5章まで行ってきたことをまとめ、本研究の課題や将来の展望を結論とする。

## 第2章 マイクロ光造形の原理

ここではマイクロ光造形の原理について説明する。2・1でマイクロ光造形について、2・2で2光子吸収過程、2・3で開口数、2・4で回折限界、2・5で光硬化性樹脂について示す。

### 2・1 マイクロ光造形について

光造形とは、光硬化性樹脂に紫外線をあてることにより樹脂を硬化させて造形を行う技術である。特にマイクロ光造形とは、近赤外レーザーを短焦点レンズで集光することで焦点位置でのみ2光子吸収により赤外光から紫外光に変化させ造形を行うことを言う。この方法により図2.1のような高精度で微細な構造物の作製が可能となる。

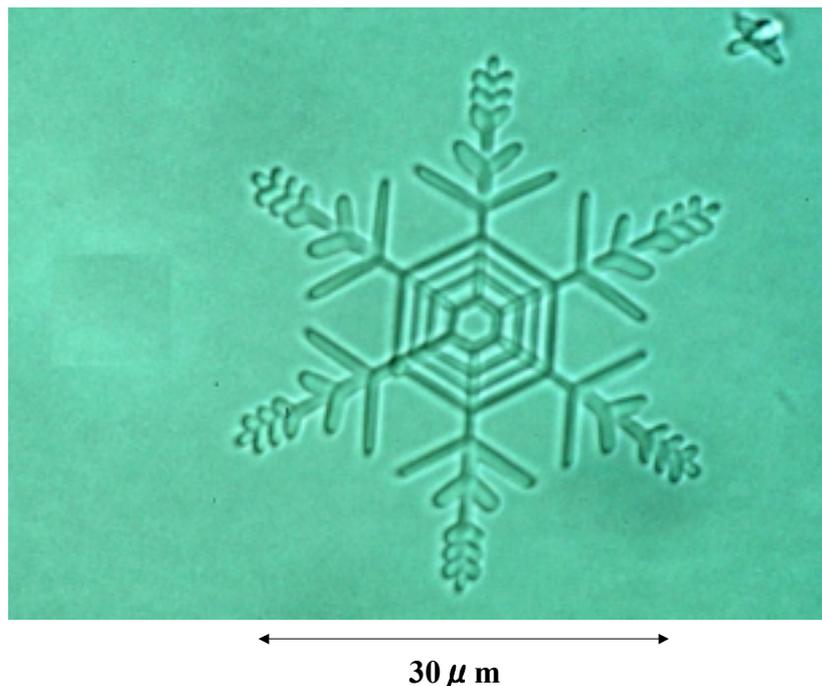


図 2.1 2光子吸収法で作った雪の結晶

## 2・2 2光子吸収過程

2光子吸収過程は非線形効果を利用した方法であるが、図 2.2.1 に示すように蛍光灯の光のような従来の光では仮想レベルに達したとしても極めて短い時間でもとの基底状態にもどるのに対して、2光子吸収過程では2つの光子を同時に吸収し2光子励起による非線形現象を起こさせるものである。これにより波長は半分になり光強度は2倍になる。ただし、2光子吸収の発生確率は非常に小さいので、光子密度を非常に高くしなければ2光子吸収を誘起することができない。したがって、2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近赤外パルスレーザー光をレンズで集光させる必要がある。

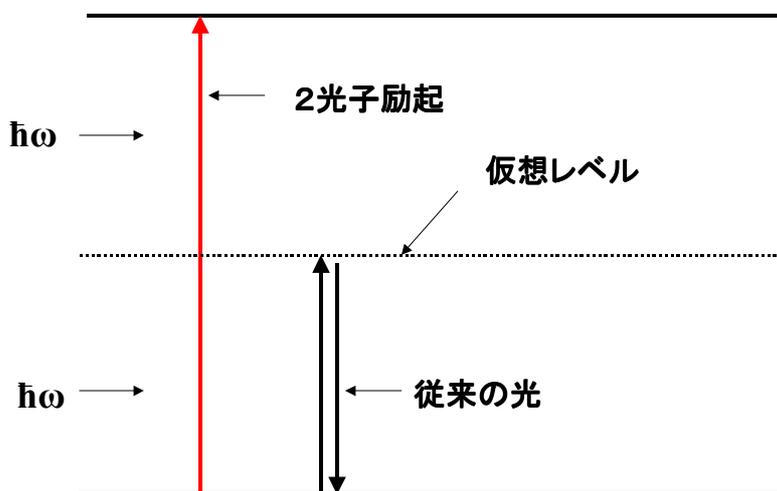


図 2.2.1 非線形効果

ここで、1光子吸収法より2光子吸収法を利用する利点について説明する。  
従来の1光子吸収法は図2.2.2のように紫外光のレーザーを使い対物レンズで集光する。そして、Zステージを移動させることで光硬化性樹脂の表面を硬化させて、それらを積層させることで3次元構造物を造形していた。このような方法を用いると下記のような問題が起きる。

- 積層する樹脂の厚みによって奥行き方向の加工分解能が制限される。
- 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。
- 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。

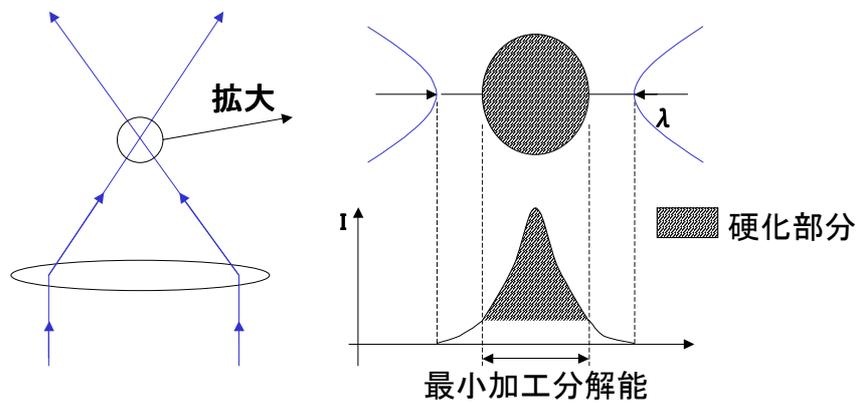


図 2.2.2 1光子吸収法

以上の理由より、サブマイクロメートルスケールの微細な加工が困難になる。

1光子吸収法より図 2.2.3 のような 2 光子吸収法を利用すれば，焦点位置のみ硬化しそれ以外は硬化しないので光硬化性樹脂内に構造物を作製することができる．また，2 光子吸収が起きる範囲が非常に小さく回折限界を超えた加工分解能で造形物を作成できるなど 1 光子吸収法で問題となったことが 2 光子吸収法を使うことで解決する．

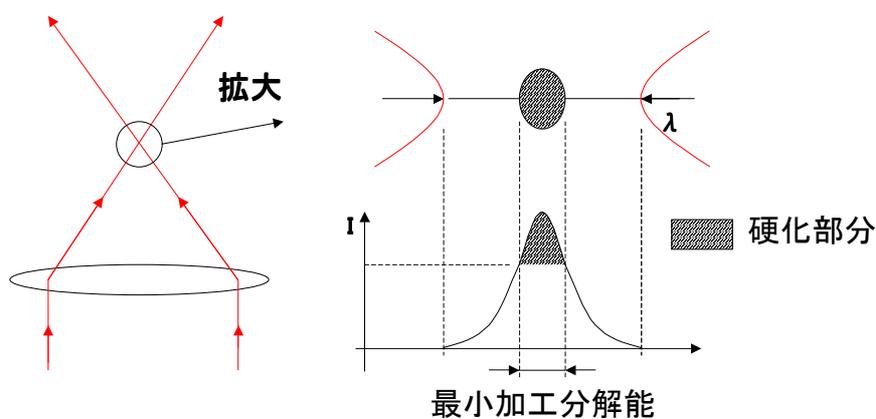


図 2.2.3 2 光子吸収法

また，3 光子，4 光子吸収法を利用することも比較的簡単でさらに加工分解能が向上する可能性を秘めており将来的にも有望である。(7)

### 2・3 対物レンズの開口数

対物レンズの性能のひとつとして開口数(NA)がある. NA とは Numerical Aperture の略で  $NA_0 = n \sin \theta$  (n:媒質の屈折率)と定義され,本研究ではZ方向の加工分解能を左右する大きな要因のひとつで,図 2.3 に示すようにこの値が大きいくほど加工分解能が上がる. (8) (9)

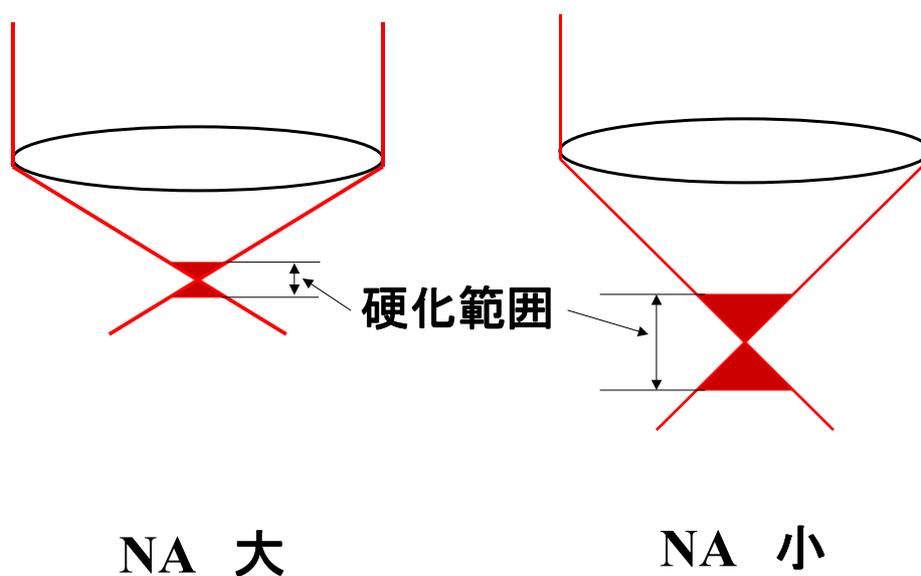


図 2.3 NA による加工分解能の差

今回使用した対物レンズは,開口数が 1.3(Plan Flour, Nikon 社製)を使用した. この対物レンズは油浸でイメージジョンオイルを塗布することで開口数を適正化している. (10)

## 2・4 回折限界

電磁波，光，X線，音波などの波動が媒質中を伝播するとき，障害物の幾何学的な影の部分に回り込んで伝播する現象を回折といい，ここでは図 2.4 に示すように光を対物レンズなどでごく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言う。(11)

一般に  $\delta = \frac{k}{(NA_o)}$  (  $\delta$ :集光点の直径， $k$ :コンデンサーの開口数と対物

レンズの開口数の比， $\lambda$ :波長， $NA$ :開口数) で表される。

また， $\frac{NA_o}{NA_c} = 1$  のとき  $\delta$  をレイリーの解像限界といい  $k = 0.61$  となる。

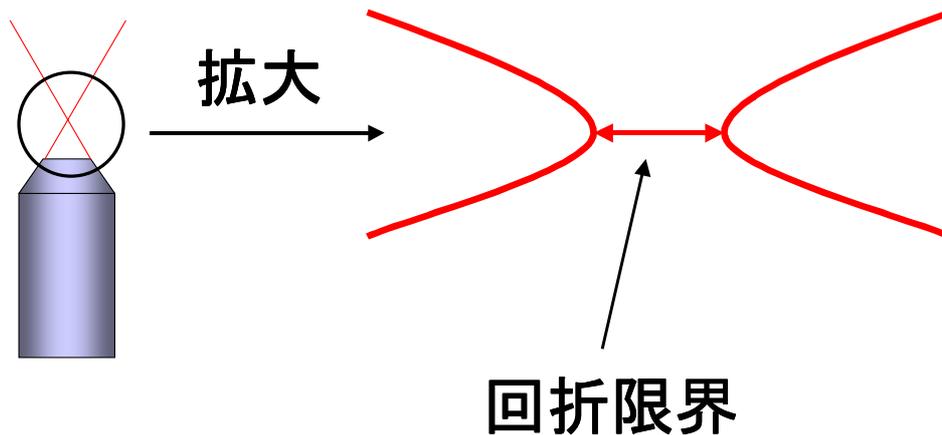


図 2.4 光の回折限界

## 2・5 光硬化性樹脂

本研究で使用した光硬化性樹脂は，SCR701((株)ディーメック社製)と呼ばれるエポキシ系汎用光造形樹脂でパルスレーザーおよびArレーザー用に開発されている。この樹脂の特徴として，薄肉造形が可能で反り変形が極端に少なく寸法の経時変化も小さいなどがあげられる。

成分は主にモノマー，オリゴマー，光重合開始剤，各種添加剤から構成されており図 2.5.1 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。

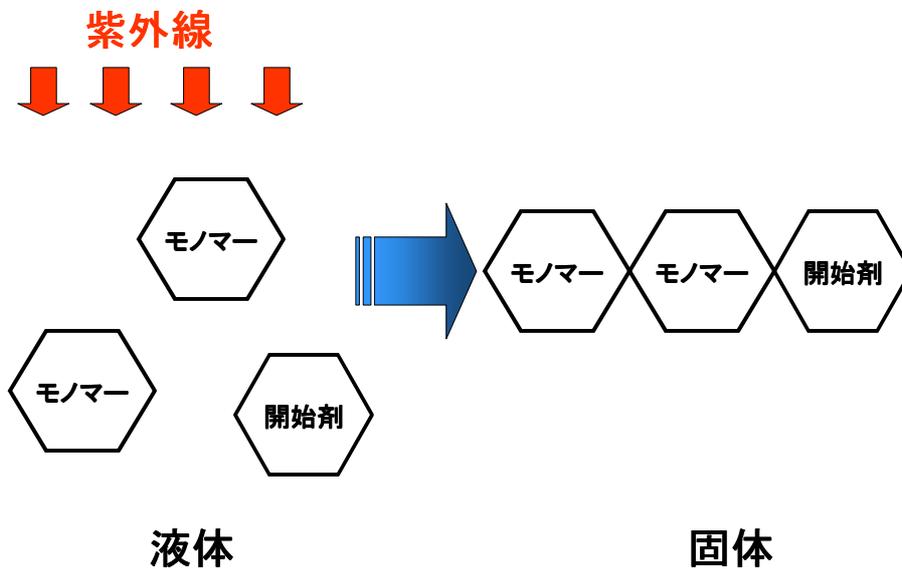


図 2.5.1 光硬化性樹脂

ここで，今回実験で使用した SCR701 の光吸収スペクトルを分光光度計で測定した結果を図 2.5.2 に示す。

Ti:Sapphire フェムト秒レーザーの波長である 710nm あたりの光には吸収がないのに対して，その半分の波長 355nm 付近では大きな吸収を持つことがわかる。したがって，この樹脂に近赤外光を照射させた場合 2 光子吸収によってのみ硬化することがわかる。

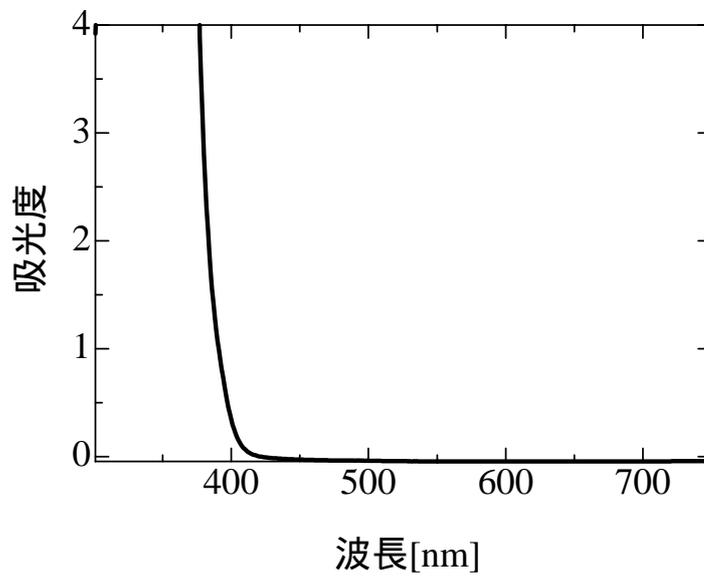


図 2.5.2 光硬化性樹脂の吸収スペクトル

また、SCR701 はラジカル重合系とカチオン重合系の混合物からできており、ラジカル重合系は反応速度が早く光量を増やすことで反応を進行させることができるが、酸素により禁止効果を受け硬化しづらくなる。カチオン重合系は反応速度が遅く完全硬化に時間がかかり、塩基成分が混ざると反応が停止する。

### 第3章 マイクロ光造形装置作製

3・1 ではマイクロ光造形を行う光学系の実験装置の作製，3・2 では造形装置の構成部品について示す。

#### 3・1 光学系の作製

図 3.1.1 は造形を行うために作製した装置の全体写真である。この装置の略図は図 3.1.2 に示す。

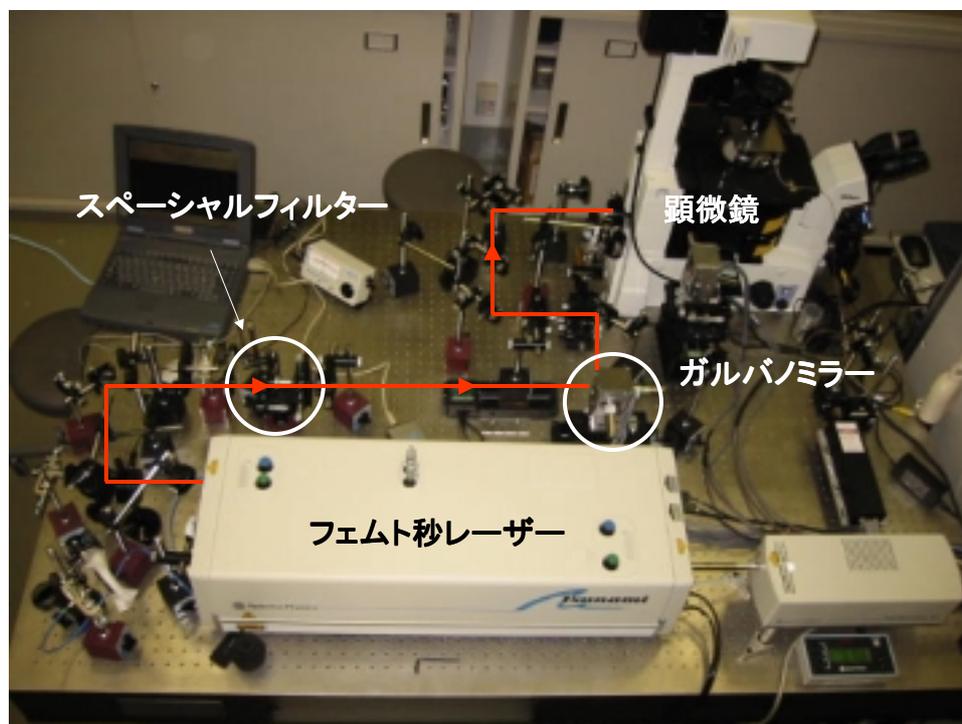


図 3.1.1 装置の全体写真

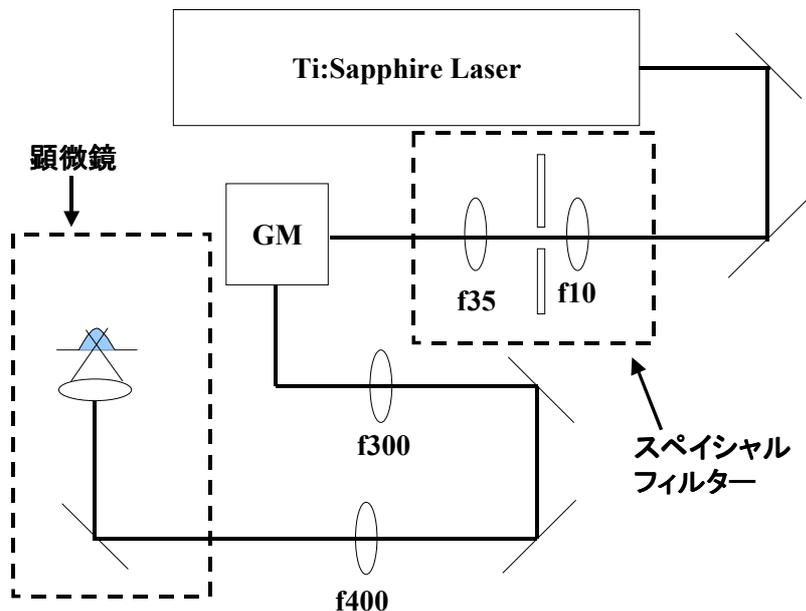


図 3.1.2 装置の略図

近赤外 Ti:Sapphire フェムト秒レーザー(波長:710nm , パルス幅:130fs , 繰り返し周波数:80MHz)から出た光はスペーシャルフィルターにより造形に必要な余分な光をカットし加工分解能を上げ ,f300 と f400 のレンズを通し対物レンズで集光する.

これら2つのレンズを使用する理由としてレンズを図 3.1.3 のように配置することにより1対のガルバノミラーと対物レンズのひとみを結像させることでガルバノミラーを走査させてもひとみから外れることなく造形が可能となる. また ,レーザーの径を対物レンズのひとみの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.

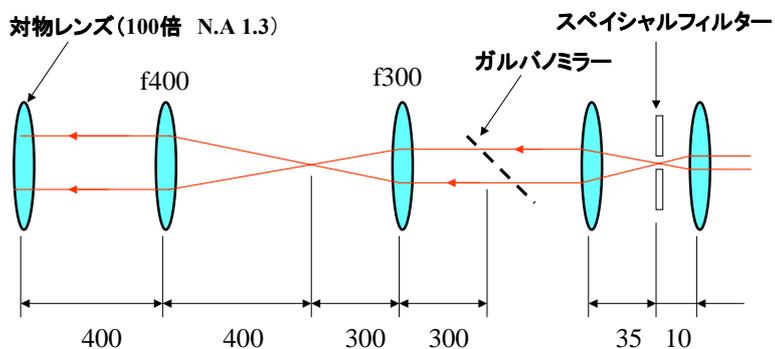


図 3.1.3 光学系の詳細図

### 3・2 構成部品

次に光学系を構成する部品について説明する。

本研究で使用した近赤外 Ti:Sapphire フェムト秒レーザー(Spectra-Physics社製 Tsunami , Millennia Vs)について説明する。図 3.2.1 にレーザーの写真を示す。このレーザーの特徴として平均出力は小さいがパルス幅はフェムト秒オーダーと非常に短く、ピーク出力は大きい。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くなるので、熱影響がほとんど現れない。<sup>(12)</sup> によって、高精度で小型の 3 次元構造物の作製が可能となる。

また、焦点位置のみ赤外光から紫外光に変化するため樹脂内に 3 次元構造物を作製することができる特徴がある。



図 3.2.1 Ti:Sapphire フェムト秒レーザー

Ti:Sapphire フェムト秒レーザーをはじめ半導体レーザーなど短パルス光を共振するレーザーの多くはモード同期により短パルス光を発生させている。

ガルバノミラー(GSI Lumonics 社製 SC2000)について説明する. 図 3.2.2 はガルバノミラーおよびミラーボックスの写真である. 1 対のミラーはコンピューターにより制御されておりプログラムで XY 方向の走査を自在に行うことが可能となる.

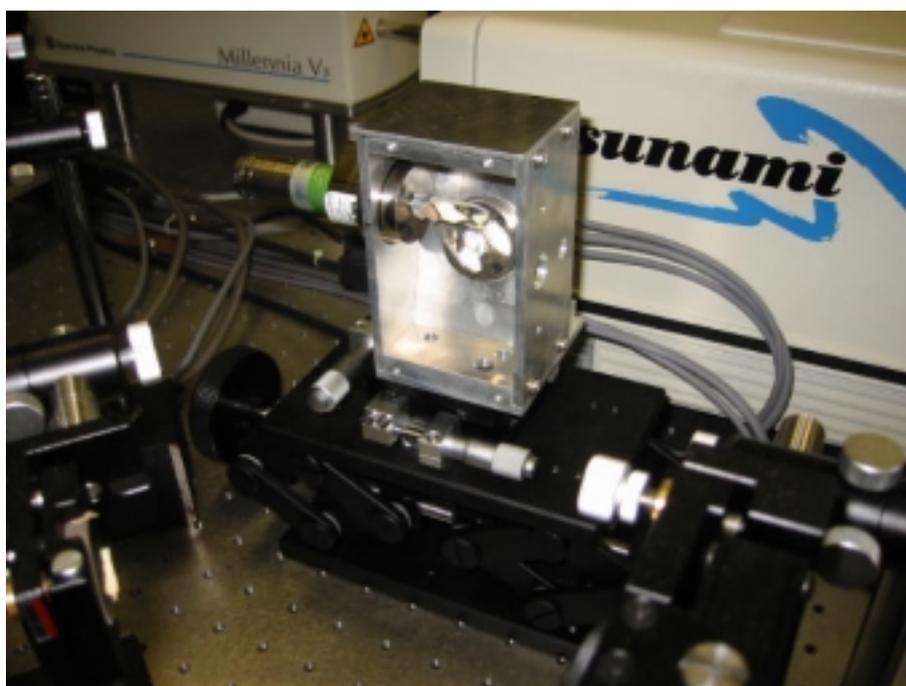


図 3.2.2 電動ミラー (ガルバノミラー)

## 第4章 マイクロ光造形装置の性能テスト

前章でマイクロ光造形装置ができたため、その装置の性能を調べる。4・1でパワーと線幅の関係、4・2でパワーと高さの関係、4・3で収縮現象について示す。

### 4・1 パワーと線幅の関係

パワーと線幅の関係を調べるために図4.1.1に示すサンプルを作製した。レーザー顕微鏡を用い計測した結果を表4.1.1、図4.1.2に示す。

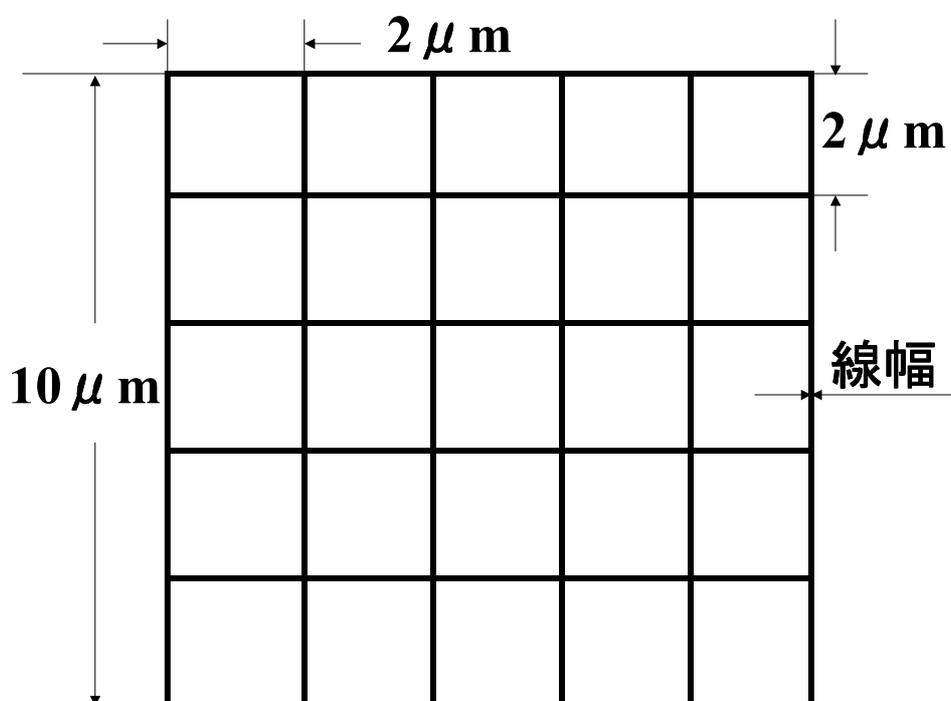


図 4.1.1 作製したサンプルの設計図

レーザーパワー [mW]	5	8	19	25
線幅 [nm]	190	240	360	480

表 4.1.1 パワーと線幅の関係

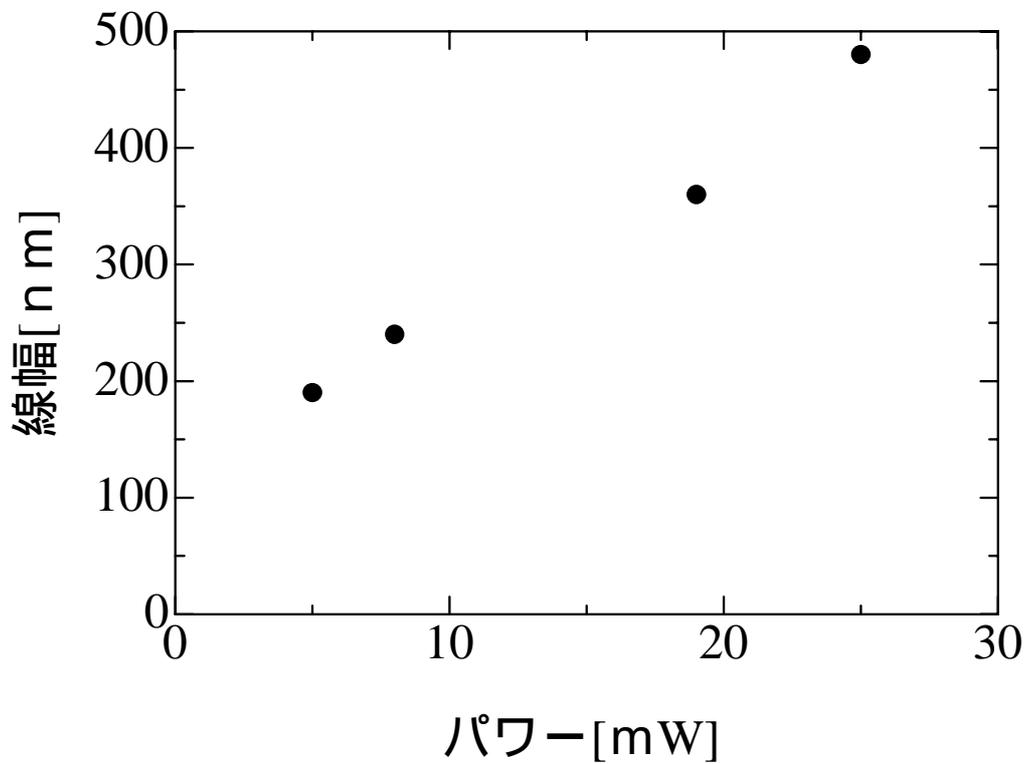


図 4.1.2 パワーと線幅の関係

レーザーパワーが3 4 mW より強くなると光量が多すぎて樹脂が急激な反応を起こし構造物を作製することができなかった. 逆にレーザーパワーを 5mW より落とすと光量が足りず樹脂を硬化させることができなかった.

これにより, 5mW のとき 190nm が最小加工分解能であると言える. この時の電子顕微鏡(SEM)で観察したサンプルを図 4.1.3, 図 4.1.4 に示す.

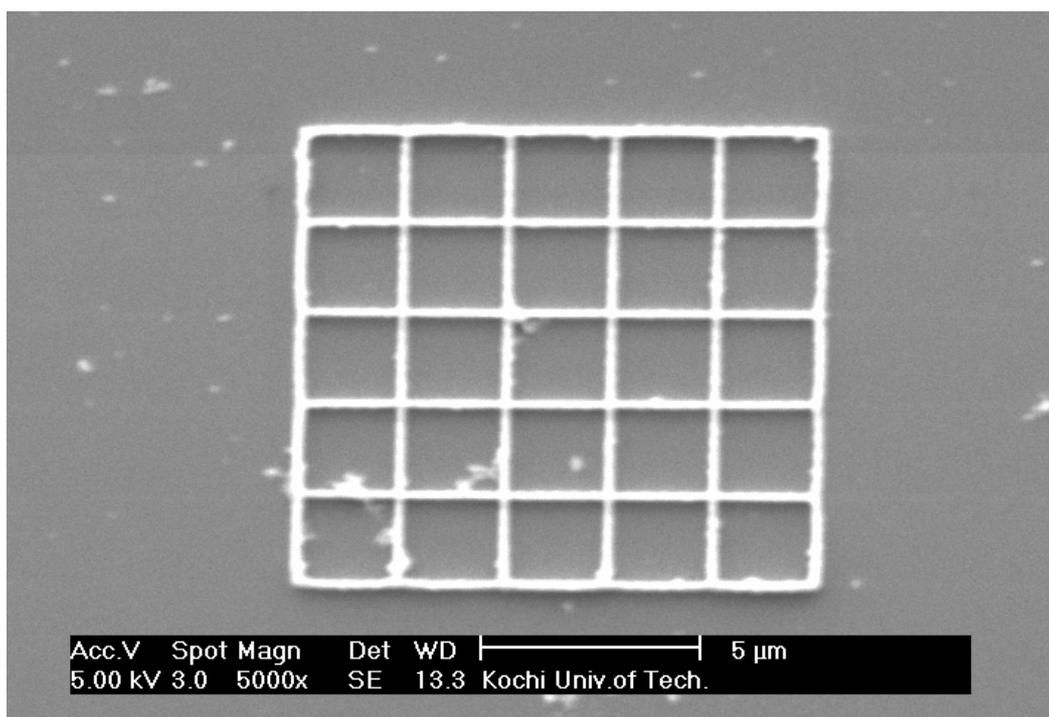


図 4.1.3 最小加工分解能で格子を作製した写真  
波長:710nm レーザーパワー:5mW 対物レンズ:100倍(NA 1.3) 倍率:5000倍

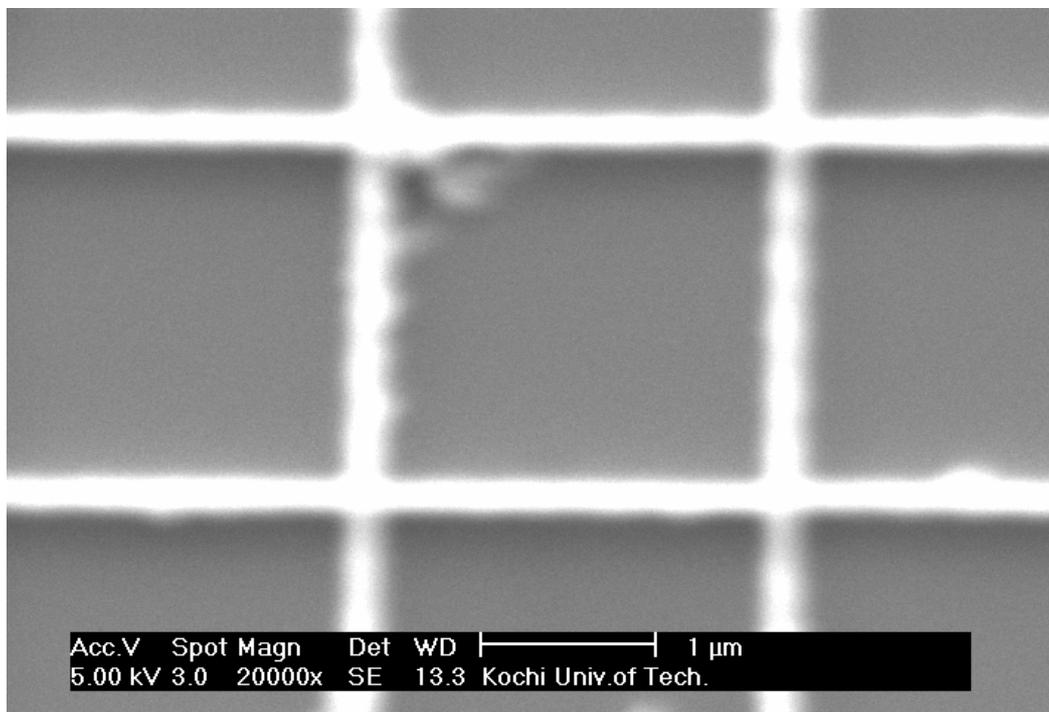


図 4.1.4 最小加工分解能で格子を作製した写真  
波長:710nm レーザーパワー:5mW 対物レンズ:100倍(NA 1.3) 倍率:20000倍

#### 4・2 パワーと高さの関係

パワーと高さの関係を調べるために，図 4.2.1 のサンプルを作製した．レーザー顕微鏡を用い計測した結果を表 4.2.1 ，図 4.2.2 に示す．

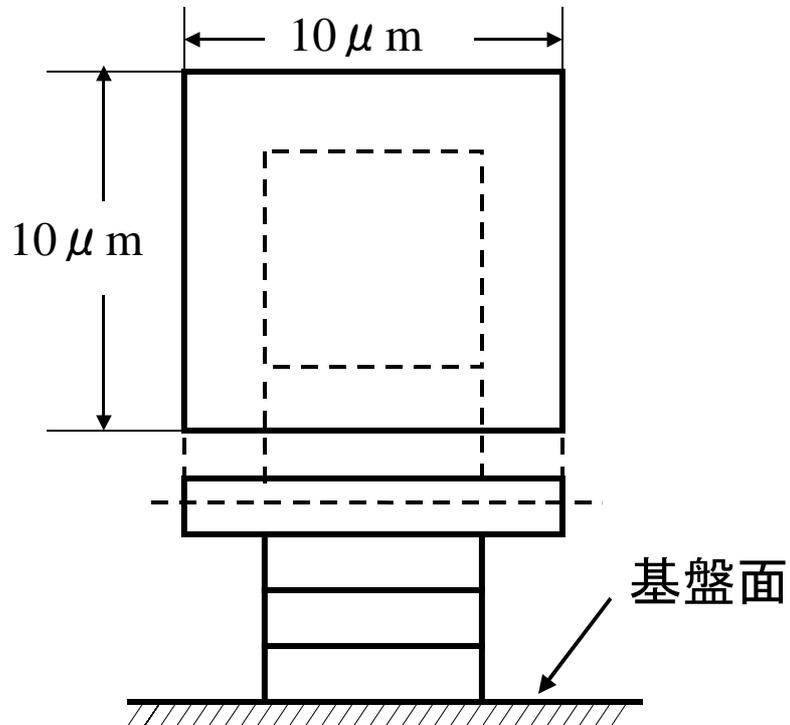


図 4.2.1 作製したサンプルの設計図

レーザーパワー [mW]	5	8	19	25
高さ [ $\mu\text{m}$ ]	0.23	1.15	2.17	3.2

表 4.2.1 パワーと高さの関係

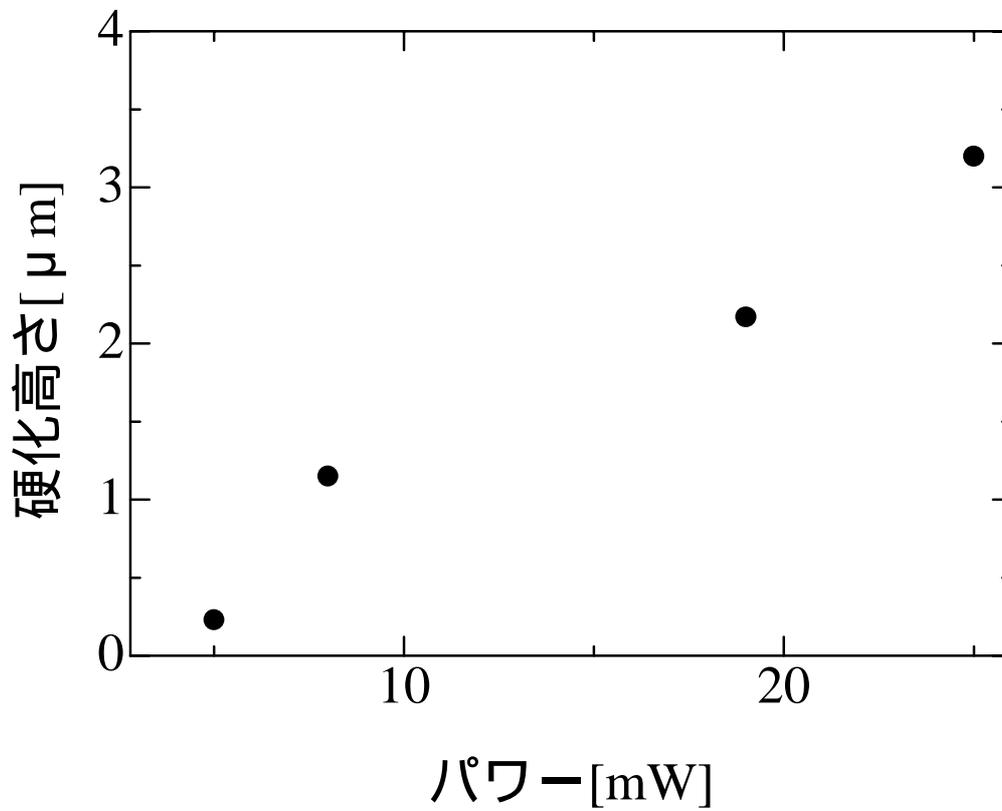


図 4.2.2 パワーと高さの関係

パワーと線幅の関係の時と同じくパワーが 5mW 以下, 34mW 以上の時は計測できなかった。

これにより, 5mW のとき 230nm が最小加工分解能と言える。

### 4・3 収縮率の改善

図 4.2.1 のサンプルを作製するとき ,加工分解能を上げるためにレーザー光の強度を下げる必要がある. しかし ,強度を下げるとエタノールで洗浄時に構造物が収縮する現象が起きた. 収縮する前のサンプルを図 4.3.1 , 収縮した後のサンプルを図 4.3.2 に示す.

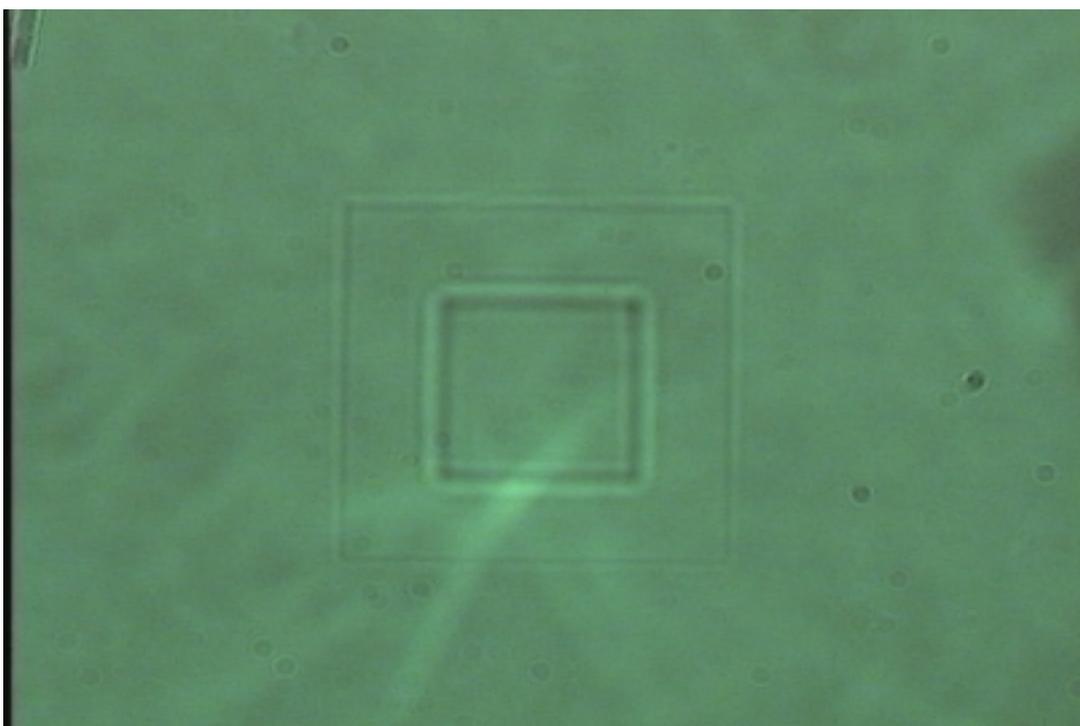


図 4.3.1 収縮前のサンプルの様子

波長:710nm レーザーパワー:9.5mW 対物レンズ:100倍(NA 1.3)

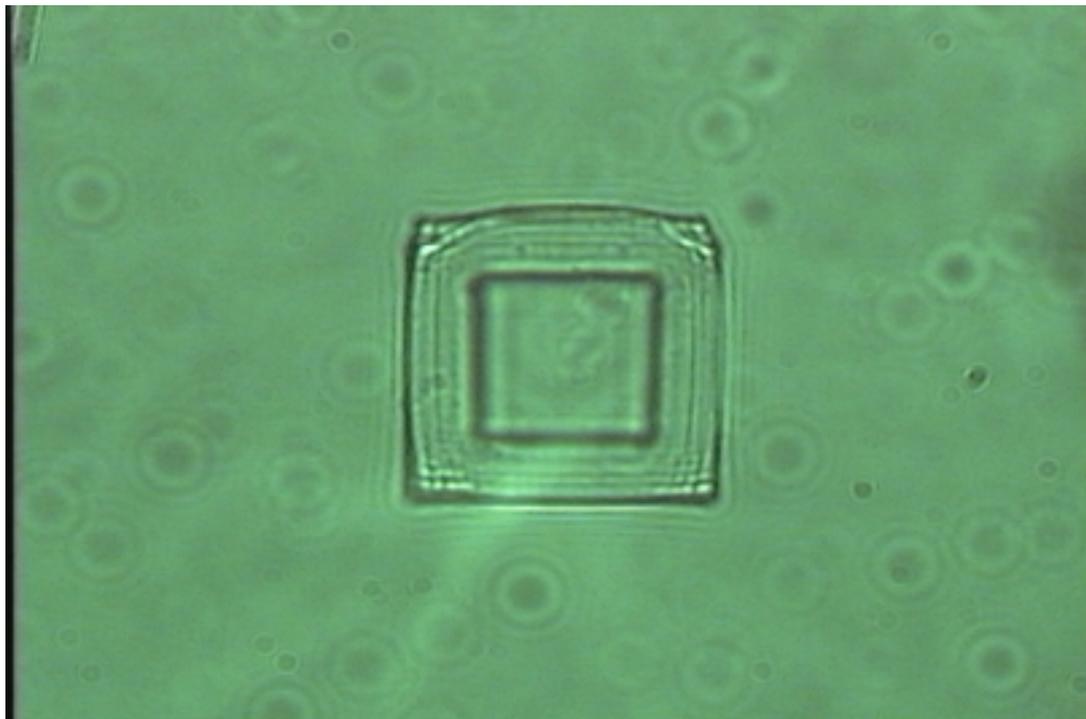


図 4.3.2 収縮後のサンプルの様子

波長:710nm レーザーパワー:9.5mW 対物レンズ:100倍(NA 1.3)

この原因として、光硬化性樹脂が硬化に必要な光量を十分に得ることができずに未硬化成分が抽出されて収縮すると考えられる。これを解決するためには光硬化性樹脂の重合反応を十分に促進させる必要がある。加工分解能を下げずに収縮を抑える方法として加温をする方法と同じパターンでの走査回数を増やすという2つの方法が考えられる。そこで、収縮率に対する加温効果と走査回数効果を調べるために図 4.3.3 のような構造物を作製し洗浄後のふたの部分をレーザー顕微鏡で計測した。

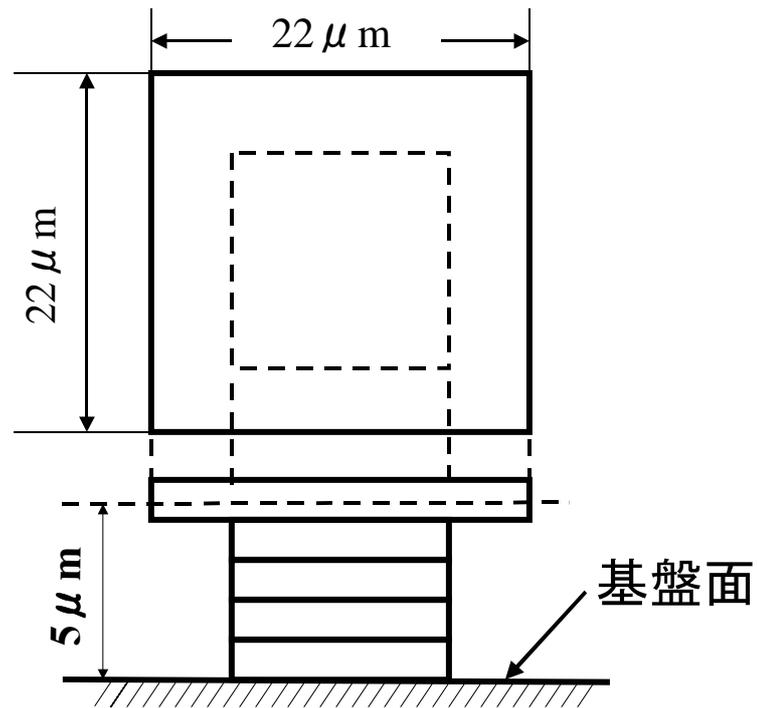


図 4.3.3 測定するために作製したサンプル

作製手順は、対物レンズの焦点の焦点を基盤面に合わせて  $1\ \mu\text{m}$  ずつ上げながら土台を作り最後にふたとなる構造物を作りそれをレーザー顕微鏡で計測することで収縮率を測る。

#### 4・3・1 加温効果

加温による効果について ~ まで条件を変化させて調べた。  
は加温効果と比較するために加温してないものを示す。

条件

加温	造形	加温 ( 3 時間 )	洗浄
加温	造形	加温 ( 5 時間 )	洗浄
加温	造形		洗浄
	造形	加温 ( 3 時間 )	洗浄
	造形	加温 ( 5 時間 )	洗浄
	造形		洗浄

波長.....710nm

パワー.....9mW

対物レンズ...100倍 (NA=1.3)

加温温度.....80°C

洗浄液.....エタノール(2.5ml)

測定装置.....レーザー顕微鏡(楠川研)

の 1 回目の結果を表 4.3.1 , 2 回目の結果を表 4.3.2  
の 1 回目の結果を表 4.3.3 , 2 回目の結果を表 4.3.4  
の 1 回目の結果を表 4.3.5 , 2 回目の結果を表 4.3.6  
の 1 回目の結果を表 4.3.7 , 2 回目の結果を表 4.3.8  
の 1 回目の結果を表 4.3.9 , 2 回目の結果を表 4.3.10  
の 1 回目の結果を表 4.3.11 , 2 回目の結果を表 4.3.12  
1 回目のまとめを表 4.3.13 , 2 回目のまとめを表 4.3.14

それぞれ示す。



加温 造形 加温 ( 3 時間 ) 洗淨

	横[ $\mu\text{m}$ ]	縦[ $\mu\text{m}$ ]	横/縦
1	21.6	21.4	1.01
2	17.6	17.5	1.01
3	16.9	17.2	0.98
4	15.6	16	0.98
5	16.8	16.5	1.02
6	16.9	17.2	0.98
7	15.7	15.9	0.99
8	16.2	15.9	1.02
9	16.9	16.6	1.02
10	16.8	16.6	1.01
平均	17.1	17.08	1
標準偏差	1.69	1.62	0.02
収縮率	24.8	24	

表 4.3.1 1 回目

加温 造形 加温 ( 3 時間 ) 洗淨

	横[ $\mu\text{m}$ ]	縦[ $\mu\text{m}$ ]	横/縦
1	21.4	23	0.93
2	20.8	21.1	0.99
3	20.1	20.1	1.00
4	19.2	18.4	1.04
5	17.9	18.2	0.98
6	17.8	18.1	0.98
7	17.5	16.9	1.04
8	17.5	17.2	1.02
9	17.6	17.3	1.02
10	17.6	17.6	0.99
平均	18.74	18.81	1.00
標準偏差	1.51	1.97	0.03
収縮率	17.6	16.3	

表 4.3.2 2 回目

加温 造形 加温 ( 5 時間 ) 洗淨

	横[ $\mu\text{m}$ ]	縦[ $\mu\text{m}$ ]	横/縦
1	20.5	20.4	1.00
2	16.5	16.2	1.02
3	16	16.2	0.99
4	17	17.2	0.99
5	16.5	16.6	0.99
6	16.2	16	1.01
7	16.6	16.5	1.01
8	17.2	17	1.01
9	16.2	15.1	1.07
10	16.5	16.5	1.00
平均	16.92	16.77	1.01
標準偏差	1.31	1.4	0.02
収縮率	25.6	25.4	

表 4.3.3 1 回目

加温 造形 加温 ( 5 時間 ) 洗淨

	横[ $\mu\text{m}$ ]	縦[ $\mu\text{m}$ ]	横/縦
1	23.9	23.5	1.02
2	20.5	21.3	0.96
3	19.5	19.4	1.01
4	18.9	18.4	1.03
5	17.8	17.8	1.00
6	18.2	17.5	1.04
7	17.5	16.8	1.04
8	17.5	17.2	1.02
9	17.8	17	1.05
10	17.6	16.9	1.04
平均	18.92	18.58	1.02
標準偏差	2.01	2.22	0.03
収縮率	19.8	17.3	

表 4.3.4 2 回目

加温 ( 3 時間 ) 造形 洗淨

	横[ $\mu\text{m}$ ]	縦[ $\mu\text{m}$ ]	横/縦
1	17.3	16.5	1.05
2	16.8	17.2	0.98
3	17.9	17.9	1.00
4	17.3	17.3	1.00
5	16.9	16.6	1.02
6	17.3	17.2	1.01
7	17.6	17.6	1.00
8	17	17	1.00
9	17	17.2	0.99
10	17.5	17.5	1.00
平均	17.26	17.2	1.00
標準偏差	0.34	0.43	0.02
収縮率	24.1	23.5	

表 4.3.5 1 回目

加温 ( 3 時間 ) 造形 洗淨

	横[ $\mu\text{m}$ ]	縦[ $\mu\text{m}$ ]	横/縦
1	21.8	21.4	1.02
2	20	20.4	0.98
3	17.5	17.5	1.00
4	17	16.8	1.01
5	17	16.8	1.01
6	18.1	17.2	1.05
7	17	16.6	1.02
8	16.6	16.7	0.99
9	16.6	16.8	0.99
10	17	17.2	0.99
平均	17.86	17.74	1.01
標準偏差	1.71	1.7	0.02
収縮率	21.5	21.1	

表 4.3.6 2 回目

造形 加温 ( 3 時間 ) 洗淨

	横[ $\mu\text{m}$ ]	縦[ $\mu\text{m}$ ]	横/縦
1	16.9	16.6	1.02
2	17.6	17.2	1.02
3	17.9	17.5	1.02
4	15.9	16.2	0.98
5	16	16.2	0.99
6	15.9	15.7	1.01
7	15.9	15.3	1.04
8	15.4	15.9	0.97
9	16.4	16.8	0.99
10	15.4	16	0.96
平均	16.35	16.34	1.00
標準偏差	0.87	0.68	0.03
収縮率	28.1	27.3	

表 4.3.7 1 回目

造形 加温 ( 3 時間 ) 洗淨

	横[ $\mu\text{m}$ ]	縦[ $\mu\text{m}$ ]	横/縦
1	17.6	17.5	1.01
2	16.9	17.5	0.97
3	17.9	17.6	1.02
4	17.8	17.8	1.00
5	17.5	17.3	1.01
6	17.9	17.5	1.02
7	17.2	17.2	1.00
8	17.3	17.3	1.00
9	17	17	1.00
10	17.6	17.5	1.01
平均	17.47	17.42	1.00
標準偏差	0.36	0.23	0.02
収縮率	23.2	22.5	

表 4.3.8 2 回目

造形 加温 ( 5 時間 ) 洗浄

	横 [ $\mu\text{m}$ ]	縦 [ $\mu\text{m}$ ]	横/縦
1	20	19.4	1.03
2	19.5	19.1	1.02
3	19.7	19.5	1.01
4	19.4	19.7	0.98
5	20	19.7	1.02
6	18.9	19.2	0.98
7	19.5	19.2	1.02
8	18.9	18.9	1.00
9	19.5	18.9	1.03
10	19.8	19.4	1.02
平均	19.52	19.3	1.01
標準偏差	0.39	0.29	0.02
収縮率	14.2	14.1	

表 4.3.9 1 回目

造形 加温 ( 5 時間 ) 洗浄

	横 [ $\mu\text{m}$ ]	縦 [ $\mu\text{m}$ ]	横/縦
1	19.5	19.5	1.00
2	19.7	19.4	1.02
3	20	19.8	1.01
4	20	20	1.00
5	20.4	19.5	1.05
6	19.1	19.4	0.98
7	19.2	18.9	1.02
8	19.5	19.2	1.02
9	19.5	19.4	1.01
10	20	19.5	1.03
平均	19.69	19.46	1.01
標準偏差	0.41	0.3	0.02
収縮率	13.4	13.4	

表 4.3.10 2 回目

造形 洗浄

	横	縦	横/縦
1	17.2	16.9	1.02
2	17.2	17.3	0.99
3	16.6	17.0	0.98
4	17.3	16.9	1.02
5	17.2	17.2	1.00
6	18.3	17.5	1.04
7	17.1	16.7	1.02
8	17.0	16.8	1.01
9	16.2	16.5	0.98
10	16.8	16.9	0.99
平均	17.1	17.0	1.01
標準偏差	0.5	0.3	0.02
収縮率	24.8	24.4	

表 4.3.11 1 回目

造形 洗浄

	横 [ $\mu\text{m}$ ]	縦 [ $\mu\text{m}$ ]	横/縦
1	17.6	17.6	1.00
2	17.2	17.2	1.00
3	17.2	17	1.01
4	17	16.9	1.01
5	17	16.9	1.01
6	17.2	17.6	0.98
7	16.6	17.2	0.97
8	19.8	16.6	1.01
9	16.9	16.8	1.01
10	17.2	16.8	1.02
平均	17.07	17.06	1.00
標準偏差	0.28	0.34	0.02
収縮率	24.9	24.1	

表 4.3.12 2 回目

まとめ

	平均[ $\mu\text{m}$ ]		比率[横/縦]	標準偏差[ $\mu\text{m}$ ]		収縮率[%]	
	横	縦		横	縦	横	縦
基準	22.74	22.48	1.01	0.23	0.13		
①	17.1	17.08	1.00	1.69	1.62	24.8	24
②	16.92	16.77	1.01	1.31	1.4	25.6	25.6
③	17.26	17.2	1.00	0.34	0.43	24.1	24.1
④	16.35	16.34	1.00	0.87	0.68	28.1	28.1
⑤	19.52	19.3	1.01	0.39	0.29	14.2	14.2
⑥	17.1	17.0	1.01	0.5	0.3	24.8	24.4

表 4.3.13 1回目

まとめ

	平均[ $\mu\text{m}$ ]		比率[横/縦]	標準偏差[ $\mu\text{m}$ ]		収縮率[%]	
	横	縦		横	縦	横	縦
基準	22.74	22.48	1.01				
①	18.74	18.81	1.00	1.51	1.97	17.6	16.3
②	18.92	18.58	1.01	2.01	2.22	16.8	17.3
③	17.86	17.74	1.01	17.10	1.70	21.5	21.1
④	17.47	17.42	1.00	0.36	0.23	23.2	22.5
⑤	19.69	19.46	1.01	0.41	0.30	13.4	13.4
⑥	17.07	17.06	1.00	0.28	0.34	24.9	24.1

表 4.3.14 2回目

から までの収縮率の関係を図 4.3.4 示す。

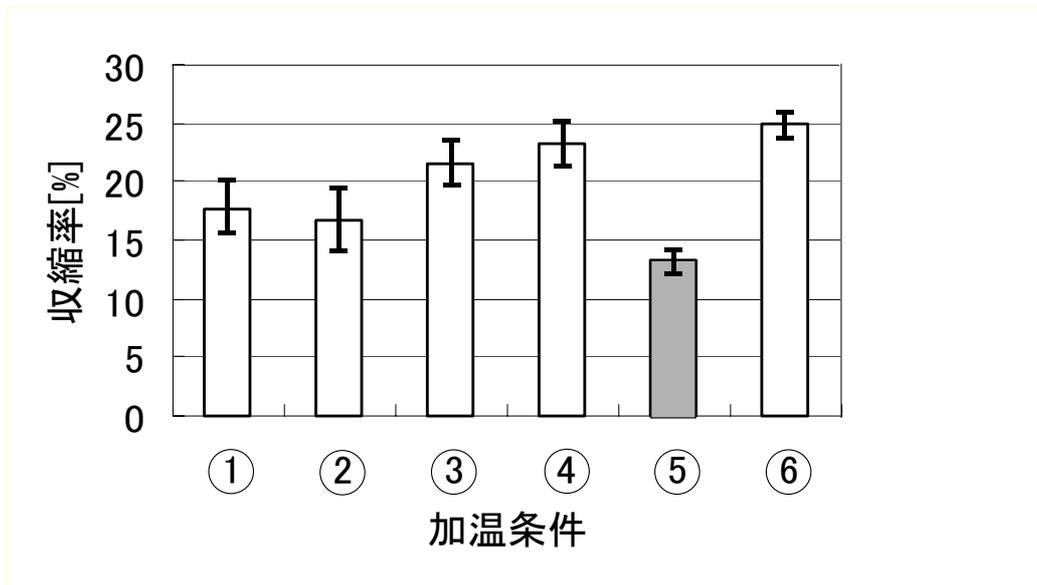


図 4.3.4 加温条件と収縮率の関係

のプロセスでの収縮率は 24%と大きいのに対して ~ のプロセスでは加温効果が見られた. その中でも が他と比べて収縮率を 13%まで抑えられ, ばらつきも少ないことがわかった. よって加温効果は造形 加温(5 時間) 洗浄が最適と言える.

### 4・3・2 走査回数効果

走査回数変化による効果について調べる。  
条件

波長……………710nm  
 パワー……………9mW  
 対物レンズ…100倍 (NA=1.3)  
 加温温度………80°C  
 洗浄液……………エタノール(2.5ml)  
 測定装置………レーザー顕微鏡(楠川研)

- 1 回走査の結果を表 4.3.15
- 3 回走査の結果を表 4.3.16
- 5 回走査の結果を表 4.3.17
- 7 回走査の結果を表 4.3.18
- まとめを表 4.3.19 にそれぞれ示す。

1 回走査

	横[ $\mu\text{m}$ ]	縦[ $\mu\text{m}$ ]	横/縦
1	17	17.2	0.99
2	16.5	17.2	0.96
3	16.5	16.5	1.00
4	16.5	16.9	0.98
5	16.3	17	0.96
平均	16.56	16.96	0.98
標準偏差	0.26	0.29	0.02
収縮率	27.7	26.6	-

表 4.3.15

3 回走査

	横[ $\mu\text{m}$ ]	縦[ $\mu\text{m}$ ]	横/縦
1	20.1	20.1	1.00
2	20.1	20	1.01
3	19.4	20	0.97
4	19.7	20.2	0.98
5	20	20.1	1.00
平均	19.86	20.08	0.99
標準偏差	0.30	0.08	0.02
収縮率	13.4	13.1	-

表 4.3.16

5 回走査

	横[ $\mu\text{m}$ ]	縦[ $\mu\text{m}$ ]	横/縦
1	20.8	20.7	1.00
2	20	20.4	0.98
3	20.2	20.8	0.97
4	20.2	20.8	0.97
5	20.1	20.4	0.99
平均	20.26	20.62	0.98
標準偏差	0.31	0.20	0.01
収縮率	11.6	10.8	-

表 4.3.17

7 回走査

	横[ $\mu\text{m}$ ]	縦[ $\mu\text{m}$ ]	横/縦
1	21	20.8	1.01
2	20.1	20.4	0.99
3	20	20.5	0.98
4	20.2	20.4	0.99
5	20.4	20.4	1.00
平均	20.34	20.5	0.99
標準偏差	0.40	0.17	0.01
収縮率	11.3	11.3	-

表 4.3.18

まとめ

	平均[ $\mu\text{m}$ ]		比率[横/縦]	標準偏差[ $\mu\text{m}$ ]		収縮率[%]	
	横	縦		横	縦	横	縦
基準	22.92	23.12	0.99	-		-	
1 回走査	16.56	16.96	0.98	0.26	0.29	27.7	26.6
3 回走査	19.86	20.08	0.99	0.3	0.08	13.4	13.1
5 回走査	20.26	20.62	0.98	0.31	0.2	11.6	10.8
7 回走査	20.34	20.5	0.99	0.4	0.17	11.3	11.3

表 4.3.19

図 4.3.5 に走査回数と収縮率の関係を示す。

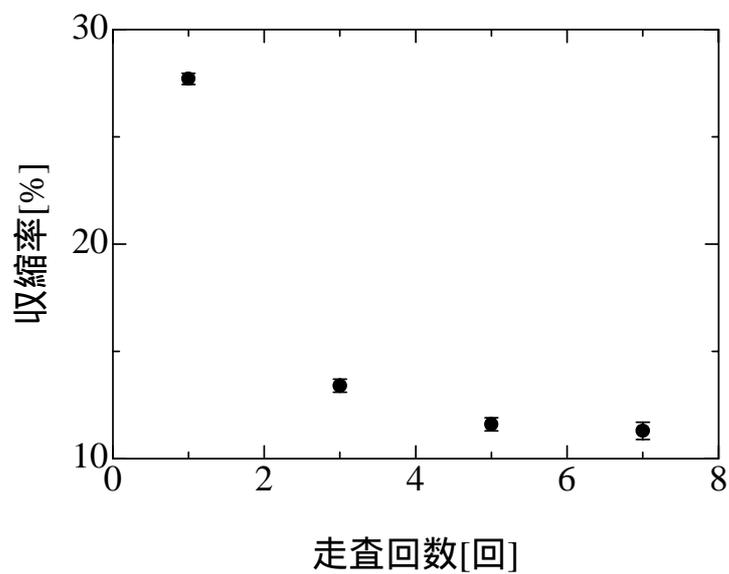


図 4.3.5 走査回数による収縮率の変化

以上のことからわかるように5回以上走査させても収縮率に対する大きな効果がないことがわかった。よって5回走査が最適と言える。

### 4・3・3 走査回数効果 + 加温効果

最後に 5 回走査 + 5 時間加温について調べる.

条件

波長.....710nm

パワー.....9mW

対物レンズ...100倍 (NA=1.3)

加温温度.....80°C

洗浄液.....エタノール(2.5ml)

測定装置.....レーザー顕微鏡(楠川研)

結果を表 4.3.20 に示す

5 回走査 + 5 時間加温

	横[ $\mu$ m]	縦[ $\mu$ m]	横/縦
1	21.8	22.3	0.98
2	21.3	22.3	0.96
3	21.6	22.3	0.97
4	21.4	22.1	0.97
5	21	21.7	0.97
6	21.6	22.4	0.96
7	21	21.4	0.98
8	21.4	21.6	0.99
9	20.8	21.8	0.95
10	20.5	21.3	0.96
平均	21.2	21.9	0.97
標準偏差	0.41	0.41	0.01
収縮率	7.3	5.2	

表 4.3.20

5 時間加温 , 5 回走査 , 5 回走査 + 5 時間加温の結果を比較すると表 4.3.21 になる。

	平均値		収縮率	
	横[ $\mu$ m]	縦[ $\mu$ m]	横[%]	縦[%]
5 時間加温	19.69	19.46	13.4	13.4
5 回走査	20.26	20.26	11.6	10.8
5 回走査+5 時間加温	21.24	21.92	7.3	5.2

表 4.3.21

以上のことから 5 回走査 5 時間加温 洗浄のプロセスが効果的であることがわかった。

1 回走査の場合の収縮率は 24%と大きいのに対して 5 回走査 + 5 時間加温した場合は 6%まで収縮率を抑えることができた。

最適でない条件で作製したサンプルの写真を図 4.3.6 に , 最適な条件で作製したサンプルを図 4.3.7 に示す。

両者を比べてみると大きさに明らかな違いが見られる。

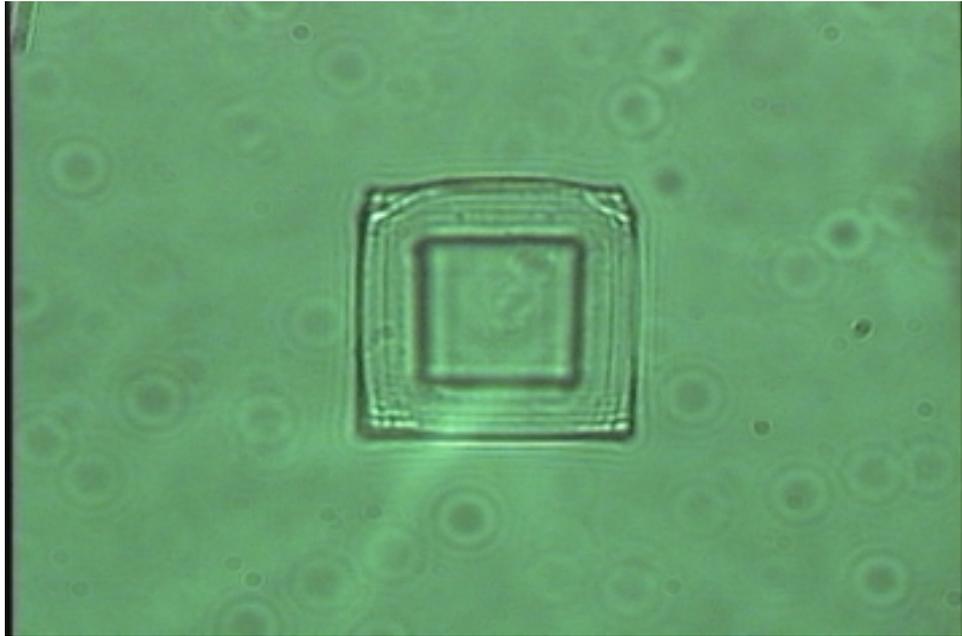


図 4.3.6 最適でない条件で作製したサンプル  
波長:710nm レーザーパワー:9.5mW 対物レンズ:100倍(NA 1.3)

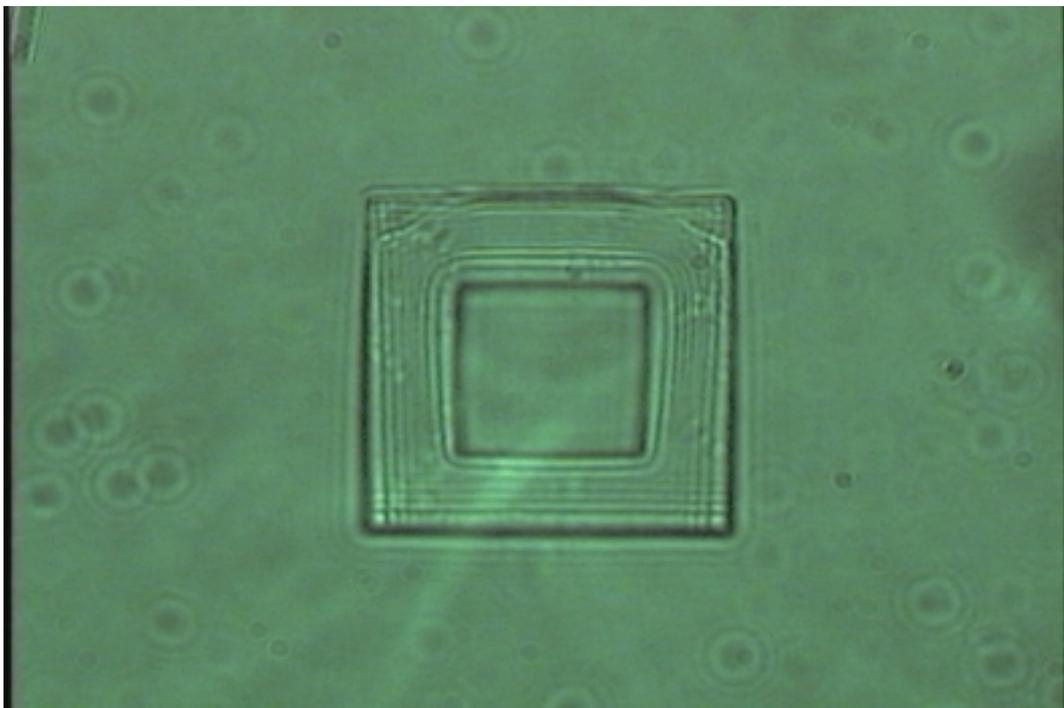


図 4.3.7 最適条件で作製したサンプル  
波長:710nm レーザーパワー:9.5mW 対物レンズ:100倍(NA 1.3)

## 第5章 3次元マイクロ構造物の試作

第4章で基礎的技術を確立できたため、ここでは3次元マイクロ構造物の作製を行った。

図5.1は、立方体の設計図である。はじめに土台を作りその上に平面を重ねることで立方体を作製した。

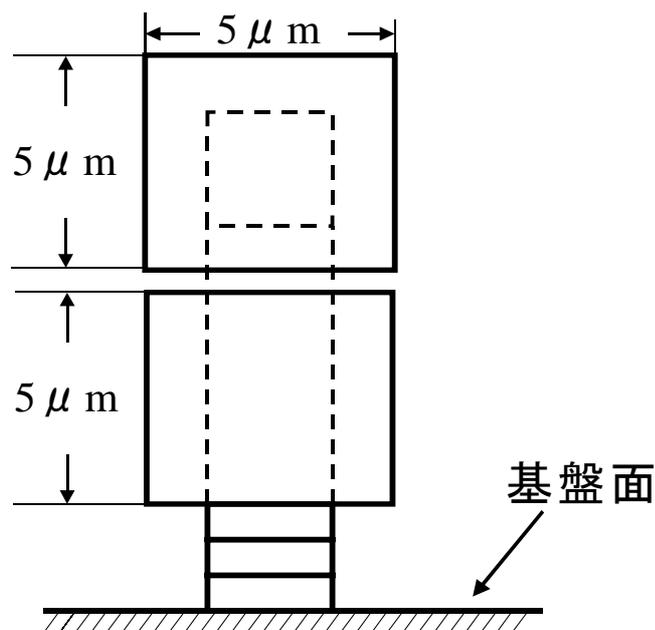


図 5.1 立方体の設計図

条件

波長 . . . . .  $710\ \text{nm}$

パワー . . . . .  $9\ \text{mW}$

走査速度 . . . . .  $42\ \mu\text{m/s}$

対物レンズ . . . . . 100倍 (NA.=1.3)

測定装置 . . . . . 電子顕微鏡 (SEM)

この立方体を電子顕微鏡 (SEM) で観察した写真を図 5.2 に示す。

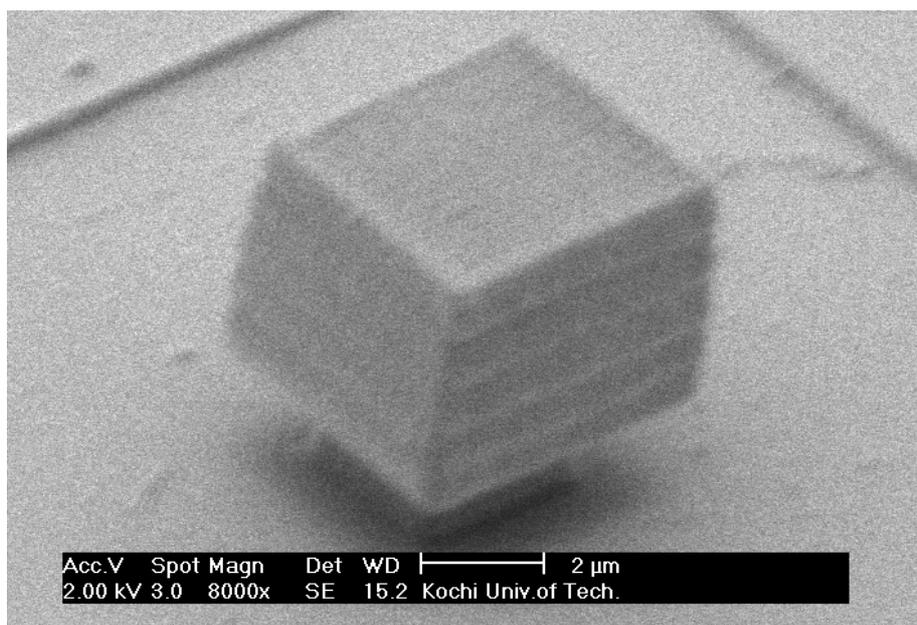


図 5.2 立方体を SEM で観察した写真

以上の結果から本実験装置で 3 次元構造物を作製することができた.

## 第6章 結論

本研究の目的である 2 光子吸収効果を利用したマイクロ光造形装置の開発、マイクロマシンを作製するための基礎的技術を確立することができた。

第 2 章では、1 光子吸収法に比べて 2 光子吸収法の優位性や将来性について示した。第 3 章では、マイクロ光造形装置の開発を行い装置を完成させた。第 4 章では、第 3 章で完成したマイクロ光造形装置の性能テストを行った。その結果最小加工分解能はパルスレーザーの平均強度が 5mW の時 X-Y 軸方向は 190nm、Z 軸方向は 230nm であることを示した。また、収縮率に関しては 5 回走査 5 時間加温 洗浄のプロセスをふむことで収縮率を 24% から 5% まで抑えることができた。第 5 章では、第 4 章で確立された技術により 3 次元マイクロ構造物の作製を行った。

本研究の今後の課題として X-Y-Z 軸方向の更なる加工分解能の向上や収縮率の改善を行う。また、可動構造物を作製して透明な微小物体に対物レンズで強く絞ったレーザー光を照射することで焦点付近にその微小物体を 3 次元的に捕捉できるレーザーマニピュレーション法<sup>(13)</sup>を利用し操作する予定である。

## 謝辞

本研究に対して終始熱心なご指導を賜りました高知工科大学知能機械システム工学科 木村 正廣教授に心から深く御礼を申し上げます。

貴重な助言とご指導をいただきました高知工科大学知能機械システム工学科 実験講師 戸名 正英氏に深く感謝しております。

また、本研究において電子顕微鏡(SEM)観察に際して高知工科大学知能機械システム工学科 河田 耕一教授、高知工科大学大学院知能機械システムコース 山岡 正和氏に、さらにレーザー顕微鏡観察に際して高知工科大学知能機械システム工学科 楠川 量啓助教授に御協力頂いたことを深く御礼を申し上げます。

そして共同研究者である高市 智章氏，日野聡一氏，竹井 攻氏に感謝しています。

## 参考文献

- (1) O.Nakamura , O plus E , vol. 20 No1(1998)949-954
- (2) S.Kawata , S.Maruo , O plus E , vol. 20 No2(1998)1044-1049
- (3) S.Kawata , *et al* , Nature , 412 (2001) 697
- (4) 河田 聡 , 田中 智一 光学 30 卷 4 号 (2001) 256-261
- (5) 日暮 栄治 レーザー研究 24 卷 11 号 (1996) 1169-1177
- (6) 丸谷 洋二 , 大川 和夫. 早野 誠治 , 斎藤 直一郎 , 中田 孝 「光造形法」  
日刊工業新聞社 (1990)
- (7) 光学 , 30 卷 , 4 号 , (2001) 258-259
- (8) Max Born , Emit Wolf , 光学の原理 東海大学出版会 (1998) 256
- (9) 宮本健郎 , 光学入門 岩波書店 (1995) 44 , 96
- (10) 石黒浩三 , 光学 裳華房 (1995) 128
- (11) 物理学辞典編集委員会 物理学辞典 倍風館 (2001)
- (12) レーザー加工学会誌 Vol.8 , No3 (2001) 11-12
- (13) 江頭 満 , 小林 幹彦 , 今野 武個志 , 新谷 紀雄 , 壇 武弘 , 長谷 正司 ,  
不動寺 浩 , 宮崎 英樹 「粒子集積化技術の世界」工業調査会 (2001)