



光造形法を用いたマイクロマシニングに関する研究

大坪, 義一

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2001-04-27

(Date of Publication)

2008-02-26

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙2547

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2002547>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



神戸大学博士論文

光造形法を用いたマイクロマシニング
に関する研究

平成13年3月

大坪 義一

要 旨

近年、医療や産業の分野といった様々な分野でマイクロマシンの実現が期待されている。

医療の分野では、体内に小さな微小機械を挿入し、治療が困難である微細な血管に進入し、血管の内側から治療を行う方法が提案されている。この方法が実現すれば、薬を投与する箇所が病巣に限定されるため、健全な他の細胞を傷つけることも少なくなる。また手術をする際には、これまでは必要以上に人体を切り開いていたため、完全に治癒するまでに時間がかかった。マイクロマシンが実現すると切り開く箇所も小さくてすむようになり、このような問題点が解決され、患者の負担も大幅に減少するものと思われる。

産業の分野では、原子力発電所の細管点検用や宇宙探査用にマイクロマシンの実現が期待されている。原子力発電所の炉心内部には細管が集積しており、細管の亀裂や腐食を検出するために、これまで内視鏡などを用いて人の手によって1本1本点検がなされていた。そこで、細管内にマイクロマシンを挿入し、細管の亀裂や腐食箇所を検出する方法も検討されている。

宇宙探査用人工衛星を打ち上げるためには、現状では膨大な費用がかかる。また、打ち上げる物体は重さと大きさの制限を受ける。そこで、探査機能を持つマイクロマシンを無数にロケット内に載せておき、宇宙空間で放出する。1つ1つのマイクロマシンの探査能力は低くても、その数が無数にあると人工衛星1基程度の探査能力は実現できるものと思われる。

このようなマイクロマシンの実現のためには、駆動部やセンサの小型化、部品の集積化、エネルギーの供給方法など解決しなければならない技術的課題が数多く存在する。なかでも、それらの装置を実際に製作するための微細加工技術の確立を目指し、様々な加工法を用いて研究が行われている。

本論文ではマイクロマシンの製作方法として、光造形法に注目して研究を行った。光造形法は紫外線ビームを未硬化の樹脂表面上を走査し紫外線硬化樹脂を局所的に硬化させ、積層を繰り返すことで容易に3次元構造物の製作が可能な方法である。シリコンプロセスやシンクロトン放射光を利用したLIGAプロセスなどと比較すると、製作時間やコストの面で優れているため、マイクロマシンの加工法として注目されている。

本研究では、光造形法を用いてマイクロマシンを製作するために必要な技術開発ならびに、それを利用してマイクロアクチュエータ・センサの開発を行うことを目的とした。

以下に本論文の構成について述べる。

第2章では、まず光造形法の原理について述べ、光造形法の分類法としてビームの走査方法による分類、樹脂の供給方法の違いによる光造形装置の分類について述べた。また、現在の光造形法が抱える造形装置や樹脂の問題点についても触れた。さらに、光造形法と他のマイクロマシン技術の融合性について説明を行った。そして、光造形法の応用分野とし

て産業界，マイクロマシン，医療の分野で利用されている例を取り上げた。

第 3 章では，表面張力の影響や酸素阻害による未硬化層の影響を受けにくい内部硬化式光造形法の提案を行い，造形装置の設計・試作を行った。

樹脂の硬化形状を予測するために，樹脂内部の焦点近傍の 3 次元光量分布を求め，対物レンズの収差を考慮した場合と考慮しない場合について光量分布のシミュレーションを行った。硬化実験と比較した結果，収差を考慮したシミュレーションでは，露光時間，硬化高さ・幅ともに硬化実験の数倍のずれに収まった。このことより収差を考慮したシミュレーションでは，樹脂の硬化形状がほぼ推測できることが分かった。

次に，マイクロ構造物の製作を行った。試作した構造物は $84 \times 88 \mu\text{m}$ の領域に 1 辺 $6 \mu\text{m}$ の六角形のセル 39 個から構成されている。硬化単位は高さ $29 \mu\text{m}$ ，幅 $2.7 \mu\text{m}$ ，アスペクト比は 10.7 であった。この結果より従来の光造形法と比べて高分解能であることを示した。

これらのことから，提案した内部硬化式光造形法はマイクロマシンの製作方法として極めて有用な方法であることが示された。

第 4 章では，マイクロ構造物の製作時間の短縮を目指した平面露光型光造形装置の設計・試作を行った。第 3 章で述べた内部硬化式光造形法は自由液面法と規制液面法の両方の特長を兼ね備えているが，製作時間が長いという欠点がある。平面露光方式の光造形法としてはマスク方式が一般的であるが，本研究ではマスクを交換することなく任意の形状を樹脂表面へ転写可能な 1 列 5 本の光ファイバアレイとシャッタから構成される可変マスクを考案した。さらに，ファイバアレイ出射端の照度分布を求めることによりファイバアレイの可変マスクとしての可能性について検討した。最後に平面露光型造形装置の有用性を樹脂の硬化実験により確認した。

以上の結果を利用して装置を試作し，マイクロ構造物の試作を行った。試作した構造物は 1 辺 1.5mm ，高さ $500 \mu\text{m}$ ，積層数 3，1 層あたり 600 の硬化単位からなる星形の形状である。製作に要した時間は，1 点露光方式では 112 分かかったが，平面露光型光造形法を利用すると 58 分であった。製作する構造物の形状によって造形速度が依存するものの試作例に関して約 2 倍もの造形速度の向上を確認することができた。これにより，光ファイバアレイを用いた平面露光型光造形法が製作時間の短縮に効果があることを確認することができた。

第 5 章では，光造形法を用いてマイクロアクチュエータやセンサの設計，製作プロセスの確立，試作を行った。光造形法を用いてマイクロアクチュエータやマイクロセンサなどのマイクロ部品を製作する際には，樹脂に導電性がある方が有用なことが多い。そこで，樹脂に導電性を付与する方法について検討を行った。検討した方法は，樹脂表面に無電解めっき法を用いて金属を析出させる方法である。ABS 樹脂のめっき条件を参考にすることで，紫外線硬化樹脂上に Ni と Cu の析出が可能となった。紫外線硬化樹脂へ金属を析出させ

た例はあまりなく、樹脂の導電化や機械的特性の改善に大いに有用な手法といえる。また、紫外線硬化樹脂中に触媒金属である Pd を溶解することによって選択的に無電解めっきが行える方法を確立した。

導電性を付与した樹脂と普通の状態の樹脂を使い分けることで光造形法を用いてアクチュエータやセンサの製作を行う際に、樹脂の導電化を図れるばかりでなく、機械的性質も改善されることから設計の選択肢が拡がり、加工の自由度が広がるものと思われる。この成果は、マイクロマシンの開発といった分野だけではなく、デザインモデルやワーキングモデルを必要とする製造業の分野にも適用できる。

これまでに得られた成果を用いてマイクロ部品的设计・試作を行った。また新たに LIGA プロセスに類似した方法を開発し、高アスペクト比の金属構造体を得る方法について述べた。

試作を行ったマイクロ部品は、振動型接触センサ、3自由度静電型マイクロアクチュエータ、そして静電駆動型パルスモータである。なかでも、振動型接触センサのアクチュエータ部分として試作を行った3自由度静電駆動型アクチュエータは、x, y 軸回りの回転運動2自由度と z 軸方向の並進運動として1自由度の計3自由度を有している。並進運動時において180V を印加したとき、z 軸方向に $20\mu\text{m}$ 変位することを確認した。回転運動は、150V 印加時に x 軸回りに $-1.15 \times 10^{-2} \sim 4.24 \times 10^{-2} \text{deg}$, y 軸回りに $-2.58 \times 10^{-2} \sim 6.30 \times 10^{-2} \text{deg}$ 回転することを確認した。

第6章では、本論文の結論を述べた。本研究で開発した内部硬化式光造形法や平面露光型光造形装置はそのまま実機に搭載することで従来使用されてきたものより、高精度化や製作時間の向上が図れるものと考えられる。また、樹脂の表面に金属を析出させるプロセスを確立することによって、導電性や機械的特性の改善を試みた。樹脂表面に金属をめっきすることで機械的特性が改善されるため、実際の部品として機能するワーキングモデルとして使用することも可能であると思われる。そして、モデルにめっきを施すことによって実物に限りなく近い、質感、重量感を備えたモデルの製作が可能となった。

最後に光造形法を用いて、マイクロマシニングを行う際の今後の課題についてまとめておく。

(1) 内部硬化式光造形法

- 樹脂の内部応力の低減
- さらなる高分解能を目指して光学系の改良

(2) 平面露光型光造形法

- 分解能の向上
- さらに製作時間を短縮させるために2次元マスクの実現

(3) めっきプロセス

- 金属被膜の内部応力の低減
- 高アスペクト比を持つ鑄型への電鑄方法
- 安定なプロセスの確立

解決しなければならない問題は残っているが、本論文で提案した方法は、マイクロマシンの製作ばかりでなく、産業界の様々な用途に用いることができる。

本論文で提案した内部硬化式光造形法や平面露光型光造形法、そして樹脂表面へのめっきプロセスは光造形法を利用してマイクロ部品の製作を行う場合の一つの指針を与えうるものと確信する。

目次

1	緒論	5
2	光造形法の原理と応用	11
2.1	光造形法	11
2.1.1	光造形法の原理	11
2.1.2	光造形法の分類	14
2.2	光造形法における問題点と応用分野	18
2.2.1	造形装置の抱える問題点	18
2.2.2	樹脂の問題点	22
2.2.3	産業，医療分野への応用例	24
2.2.4	他のマイクロマシン技術との融合性	27
3	内部硬化式光造形法とその装置開発	29
3.1	はじめに	29
3.2	内部硬化式光造形法の原理	30
3.3	紫外線硬化樹脂の硬化特性	31
3.3.1	紫外線硬化樹脂の光透過・減衰特性	31
3.3.2	吸収係数と臨界硬化エネルギーの算出方法	32
3.3.3	樹脂の吸収係数と臨界硬化エネルギーの測定	33
3.4	内部硬化式光造形装置の設計と試作	37

3.5	樹脂硬化シミュレーションと実験	39
3.5.1	対物レンズの焦点近傍における3次元照度分布の推定	39
3.5.2	樹脂硬化シミュレーションモデル	42
3.5.3	無収差レンズによる硬化シミュレーション	44
3.5.4	収差を持つレンズによる硬化シミュレーション	47
3.5.5	樹脂硬化実験	52
3.6	マイクロ構造物の試作とその考察	55
3.7	まとめ	56
4	平面露光型光造形法とその装置開発	59
4.1	はじめに	59
4.2	平面露光型光造形法の原理	60
4.3	光ファイバ出射光の照度分布計算と硬化実験	63
4.3.1	照度分布の推定	63
4.3.2	照度分布検証実験	67
4.4	平面露光型光造形装置の設計と試作	70
4.5	マイクロ構造物の試作とその考察	72
4.6	まとめ	75
5	光造形法によるマイクロ部品的设计・試作	77
5.1	はじめに	77
5.2	光造形法によるマイクロ部品の試作プロセス	79
5.2.1	導電化樹脂を用いた方法	79
5.2.2	LIGA プロセスと類似した方法	89
5.3	振動型接触センサ	95
5.3.1	製作目的	95
5.3.2	アクチュエータの設計	97
5.3.3	製作プロセス	99

目次	3
5.3.4 試作例	100
5.3.5 考察	101
5.4 3自由度静電駆動型アクチュエータ	102
5.4.1 製作目的	102
5.4.2 アクチュエータの設計	103
5.4.3 製作プロセス	112
5.4.4 試作例	114
5.4.5 駆動実験	115
5.4.6 考察	118
5.5 静電駆動型パルスモータ	119
5.5.1 製作目的	119
5.5.2 アクチュエータの設計	122
5.5.3 製作プロセス	127
5.5.4 試作例	129
5.5.5 考察	130
5.6 進行波駆動型静電アクチュエータの設計	131
5.6.1 製作目的	131
5.6.2 アクチュエータの設計	133
5.6.3 製作プロセス	138
5.6.4 考察	140
6 結論	143
参考文献	147
本論文に関連する論文・講演ならびに特許出願	151
List of Figures	154

List of Tables

159

謝 辞

162

第1章

緒論

近年、医療や産業の分野といった様々な分野でマイクロマシンの実現が期待されている。

医療の分野では、映画「ミクロの決死圏」のように、体内に小さな微小機械を挿入し、治療が困難である微細な血管に進入し、血管の内側から治療を行う方法が提案されている。この方法が実現すれば、薬を投与する箇所が病巣に限定されるため、健全な他の細胞を傷つけることもなくなる。また手術をする際には、これまでは必要以上に人体を切り開いていたため、完全に治療するまでに時間がかかった。マイクロマシンが実現すると切り開く箇所も小さくてすむようになり、このような問題点が解決される。その結果として患者の負担も大幅に減少するものと思われる。この分野の例として、能動カテーテルやバイオテクノロジー分野で使用されるマイクロチャンバーの研究が盛んに行われている。さらには、 μ -TAS^{1,2)}やMIFS³⁾に代表される統合分析システムや化学集積回路の開発も行われている。

産業の分野では、原子力発電所の細管点検用や宇宙探査用にマイクロマシンの実現が期待されている。原子力発電所の復水器には細管が集積しており、細管の亀裂や腐食を検出するために、これまで内視鏡などを用いて人の手によって1本1本点検がなされていた。そこで、細管内にマイクロマシンを挿入し、細管の亀裂や腐食箇所を検出する方法も検討されている。

宇宙探査用人工衛星を打ち上げるためには、現状では膨大な費用がかかる。また、打ち上げる物体は重さと大きさの制限を受けるのが現状である。そこで、探査機能を持つマイクロマシンを無数にロケット内に載せておき、宇宙空間で放出する。1つ1つのマイクロマシンの探査能力は低くても、その数が無数にあると人工衛星1基程度の探査能力は実現できるものと思われる。

このような夢のようなマイクロマシンの実現のためには、駆動部やセンサの小型化、部品の集積化、エネルギーの供給方法など解決しなければならない技術的課題が数多く存在する。なかでも、それらの装置を実際に製作するための微細加工技術の確立を目指し、様々な加工法を用いて研究がなされている。

マイクロマシンの製作方法として注目されているものに圧電素子や形状記憶合金を利用したアクチュエータに代表される機械加工技術を利用したもの、半導体の製造プロセスを利用したシリコンプロセス⁴⁾、シンクロトロンからの放射光を利用したLIGAプロセス⁵⁾、そして紫外線硬化樹脂を用いて立体モデルを製作する光造形法があげられる。

従来の機械加工法を利用する方法は、三次元加工のうえ、高アスペクト比の構造物が得られ、素材の自由度も大きいという特長を有する。しかし、得られる構造物は比較的大きく、部品の組立作業が伴うという欠点がある。

シリコンプロセスは一度に大量の構造物を得ることができ、センサや制御回路といった電子回路との融合性に富むといった利点がある。この方法には、バルクマイクロマシニングとサーフェイスマイクロマシニングに分類される。バルクマイクロマシニングはシリコンウェハのエッチングの異方性を利用して、マイクロ構造物を得る方法である。細胞を分離するためのマイクロチャンバー⁶⁾や様々な製作例が報告されている。サーフェイスマシニングは、半導体の製作プロセスを利用する方法である。既存の半導体設備を使用することができ、製作プロセスも半導体製作で実績のあるプロセスをそのまま流用することができるため、マイクロマシンの製作方法として現在主流といえる。しかし、この方法は薄膜を積み重ねて構造物を製作するため、得られる構造物も2.5次元的なものとなり、アスペクト比も高いものは

望めない。

LIGA プロセスは、シンクロトロン放射光を用いてリソグラフィを行い、電鍍もしくはモールドイング行程をへて微細構造物を得る方法である。X線を使用しているため解像度が高く、100を越えるアスペクト比を得ることができるが、装置自身が大がかりで生産コストも高く、誰しものが容易に使用できる環境を実現するためには時間を必要とする。

光造形法は、紫外線硬化性樹脂に紫外線を照射することにより任意の立体モデルを得る技術⁷⁾である。高アスペクト比を持った3次元構造物を容易に得ることができる反面、素材の自由度がないという欠点を持つ。

Table 1.1 にマイクロマシンを製作する上での各製作方法の特徴を示しておく⁸⁾。

Table 1.1 Characteristics of various techniques to fabricate micromachines

	3D fabrication	Aspect ratio	Miniaturizing	Production cost		Selectivity of material	Fabrication time
				(Small)	(Large)		
Machining process	◎	○	×	◎	×	◎	◎
Semiconductor process	○	×	◎	×	◎	○	×
LIGA process	×	◎	◎	×	○	○	×
Stereolithography	◎	○	○	○	×	×	○

◎: Excellent ○: Good ×: Worse

本研究ではマイクロマシンの製作方法として、光造形法に注目して研究を行った。光造形法は紫外線ビームを樹脂表面上に走査し紫外線硬化樹脂を局所的に硬化させ、積層を繰り返すことで容易に3次元構造物の製作が可能な方法である。上述の加工法と比較すると、製作時間やコストの面で優れており、マイクロマシンの加工法として注目されている。光造形法を用いてマイクロマシンを製作する際に必要な技術の開発を行い、それをマイクロマシンの製作に応用することが本研究の目的である。

以下に本論文の構成について述べる。

第2章では、まず光造形法の原理について述べ、光造形法の分類法としてビームの走査方法による分類、樹脂の供給方法の違いによる光造形装置の分類について述べた。また、現在の光造形法が抱える造形装置や樹脂の問題点についても触れた。

さらに、光造形法と他のマイクロマシン技術の融合性について説明を行い、光造形法の応用分野として産業界、マイクロマシンや医療の分野で利用されている例を取り上げた。

第3章では、樹脂内部に集光することによって局所的に高エネルギー領域を作り出し、樹脂に照射するエネルギーによって硬化形状を規制する内部硬化式光造形法について提案を行った。提案した方法を実証するためにレンズから出射される紫外光の光量分布計算を行い、硬化形状の予測を試みた。そして、シミュレーションの結果と実際の硬化形状を比較することによってシミュレーションの妥当性を考察した。さらに、マイクロ構造物の試作を行い、提案した本方式が微細構造物の製作に適していることを示した。

第4章では、マイクロ構造物の製作時間の短縮を目指した平面露光型光造形装置の試作を試みた。第3章で述べた内部硬化式光造形法は自由液面法と規制液面法の両方の長を兼ね備えているが、製作時間が長いという欠点がある。平面露光方式の光造形法としてはマスク方式が一般的であるが、本研究ではマスクを交換することなく任意の形状を樹脂表面へ転写可能な1列5本のファイバアレイとシャッターから構成される可変マスクを考案した。さらに、ファイバアレイ出射端の照度分布を求めることによりファイバアレイの可変マスクとしての可能性について検討した。最後に平面露光型装置の有用性を樹脂の硬化実験により確認した。

第5章では、光造形法を用いてマイクロアクチュエータやマイクロセンサなどのマイクロ部品を製作する際には、樹脂に導電性がある方が有用なことが多いため、樹脂に導電性を付与する方法について検討を行った。検討した方法は、樹脂表面に無電解めっき法を用いて金属を析出させる方法である。ABS樹脂のめっき条件を参考にすることで、紫外線硬化樹脂上にニッケルと銅の析出が可能となった。また、無電解めっき法は等方的に金属の析出が起きる。そこで、選択的に金属を析出させる方法についても検討を行った。この結果から、光造形法の持つ加工物が樹脂に限定されるといった欠点が克服され、樹脂に導電性を付与するばかりでなく構造物の機械的特性も改善されるようになった。

次に、内部硬化式光造形法ならびに平面露光型光造形法や樹脂へのめっき法の確立などの成果を用いてマイクロ部品の試作を行った。そして、振動型接触センサ、3自由度静電型アクチュエータ、静電駆動型パルスモータについては設計ならびに試作を行い、進行波駆動型静電アクチュエータについては製作の困難さから設計のみを行った。試作を行った中でも x, y 軸回りの回転運動 2 自由度と z 軸方向の並進運動を 1 自由度を持つ 3 自由度静電駆動型アクチュエータは、180V を印加したとき、z 軸方向に $20\mu\text{m}$ 変位することを確認した。また、回転運動は、150V 印加時に x 軸回りに $-1.15 \times 10^{-2} \sim 4.24 \times 10^{-2}\text{deg}$, y 軸回りに $-2.58 \times 10^{-2} \sim 6.30 \times 10^{-2}\text{deg}$ 回転することを確認した。

第 6 章では、本論文の結論を述べた。

第2章

光造形法の原理と応用

この章では、まず光造形法の原理について述べ、ビームの走査法や樹脂の供給方法の違いによる光造形装置の分類について説明を行う。また、現在の光造形法における造形装置、樹脂に関わる問題点について述べる。さらに、光造形法と他のマイクロマシン技術の融合性について説明を行い、その応用分野について述べる。

2.1 光造形法

2.1.1 光造形法の原理

光を用いた加工法としては、フォトエッチングやレーザ加工が有名である。これらは光を用いて材料を加工する技術で、機械加工や電気加工に対応させて光加工と呼ばれる⁷⁾。光造形法とは、紫外線を照射することによって光化学反応により硬化する感光性高分子(紫外線硬化樹脂)を局所的に硬化させ、順次積層することで立体構造物を製作する技術である。

一般的には、機械加工や電気加工が被加工物を削ったり、熔融して加工する除去加工であるのに対して、光造形法は紫外線硬化樹脂から選択的に固形物を生成する付加加工である。そのため、工具摩耗に相当する問題点がなく、切削くずや振動、

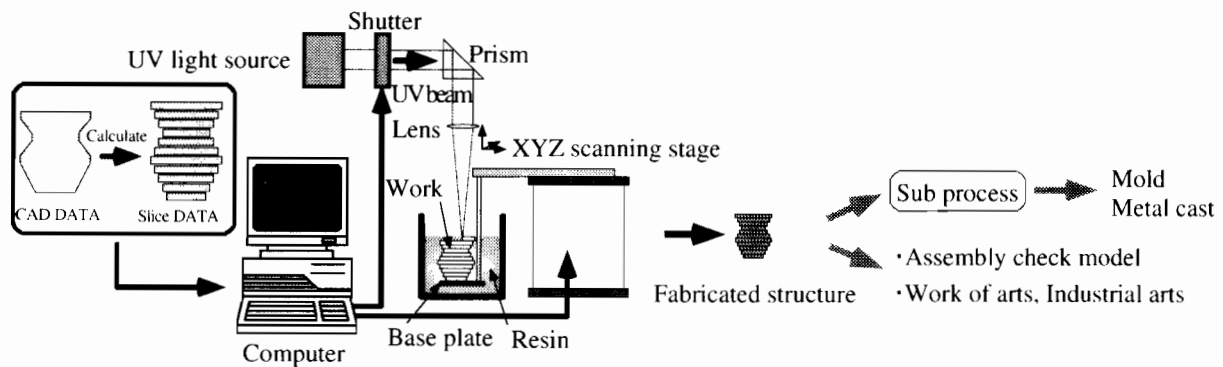


Fig. 2.1 Process flow of stereolithography

騒音も発生しない。

光造形法には、露光方法や光源の走査方法で分類すると多くの方法が存在し、用途に応じて使い分けられている。代表的な装置構成および造形プロセスを Fig. 2.1 に示す。図に示すように造形プロセスは、CAD で作成した所望の形状の 3 次元形状データを、水平方向に等間隔に切断した断面形状のデータ(スライスデータ)に変換し、ベースプレート上から 1 層ごとに順次硬化・積層させることにより立体構造を得るといった流れになる。実際には、必要な数だけ硬化・積層の行程を繰り返すことによって所望の 3 次元形状が得られる。光造形法により得られた樹脂製の構造物は強度的に不十分であるので、機械部品に直接利用することはできないが、形状の検討や部品相互の組み付けチェックのモデル、あるいは鋳型や金型を製作するための原型などとして利用されている。

Fig. 2.2 は、CAD データから光造形に使用するデータへの変換を、Fig. 2.3 は光造形法における露光・硬化と積層のプロセスを説明したものである。つぎに、Fig. 2.2, Fig. 2.3 をもとに構造物が作成されていくプロセスを示す。

1. CAD システム上で設計した所望の形状の数値データから、高さ方向に等間隔の水平面で切断したスライス図形のデータ P_1, P_2, \dots, P_N を作成する。このときの高さ方向のスライスの間隔を d とする (Fig. 2.2 参照)。

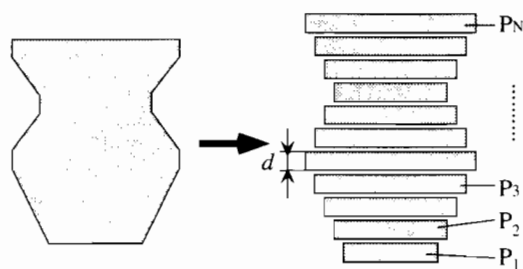


Fig. 2.2 Convert CAD data into slice data

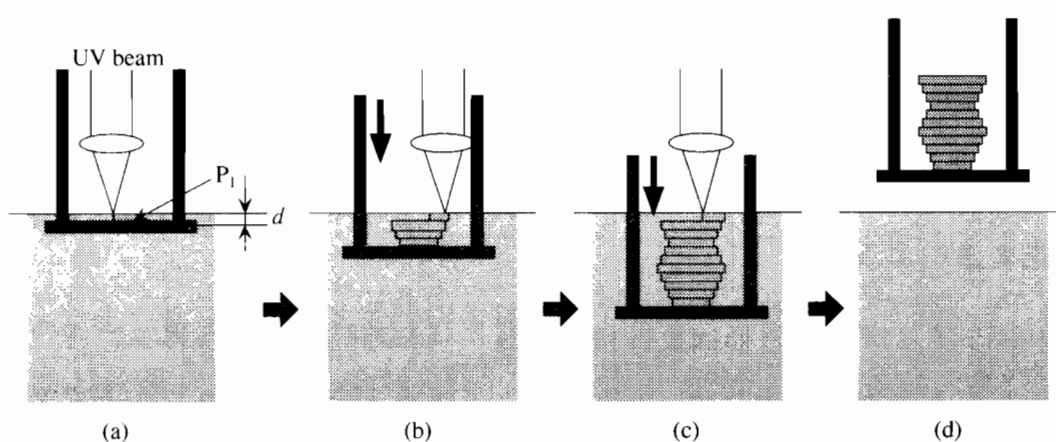


Fig. 2.3 Fabrication process of 3D structure with stereolithography

2. 紫外線硬化樹脂を満たした容器の中に、ベースプレートが樹脂表面から深さ d の位置にくるようにセットしておく。すなわち、ベースプレート上には厚さ d の樹脂層が形成されることになる。
3. スライス図形のデータから最下層の P_1 を用いて、そのデータに沿って紫外線ビームを液面に走査する。これにより厚みが d のスライスデータの形状が樹脂に転写される (Fig. 2.3-(a) 参照)。
4. ベースプレートを d だけ沈下させる。硬化した層の上に新たに厚さ d の樹脂層が形成される。
5. スライスデータの第2層 P_2 を取り出し、紫外線ビームの走査を行う。第2層

の硬化部分は第1層の硬化部分と接合される。

6. 第3層, 第4層, …, と全体の硬化が終了するまで, (4), (5)の手順を繰り返す (Fig. 2.3-(b),(c) 参照).
7. 全体の硬化が終了するとベースプレート上昇させて樹脂中より取り出し, 構造物をベースプレートから取り外す (Fig. 2.3-(d) 参照).

以上の手順をコンピュータを用いて自動的に行うことによって構造物の製作が可能となる。

2.1.2 光造形法の分類

ビーム走査法による分類⁷⁾

所望のスライスデータの形状を樹脂に転写するためには, 紫外線ビームの照射位置と樹脂表面とを相対運動させ, 樹脂表面上にビームを走査させる必要がある。この紫外線走査方式の代表的なものとしてXYプロッタ方式とガルバノミラー方式があげられる。Fig. 2.4にXYプロッタ方式とガルバノミラー方式の光造形装置の代表的な構成例を示す。

XYプロッタ方式では, NC制御のパルスステージを2組互いに直交させてX, Y軸方向に移動可能なように構成する。これによってビームの照射位置あるいはベースプレートを2軸移動することができる。この方式は, 市販の部品が容易に入手でき, 広い面積を高精度で走査することができる。

ガルバノミラー方式では, ガルバノミラーを直交させて用いる。この方式では, 樹脂の露光面での焦点補正や偏光ひずみ補正を光学的に行わなければならない。一般的に, XYプロッタ方式と比べて精度は劣るが, ベクタ走査が高速で行え, 装置が小型軽量であるという長所がある。

通常, 精度を必要とする場合には, XYプロッタ方式が, 高速造形を必要とする場合はガルバノミラー方式が用いられている。

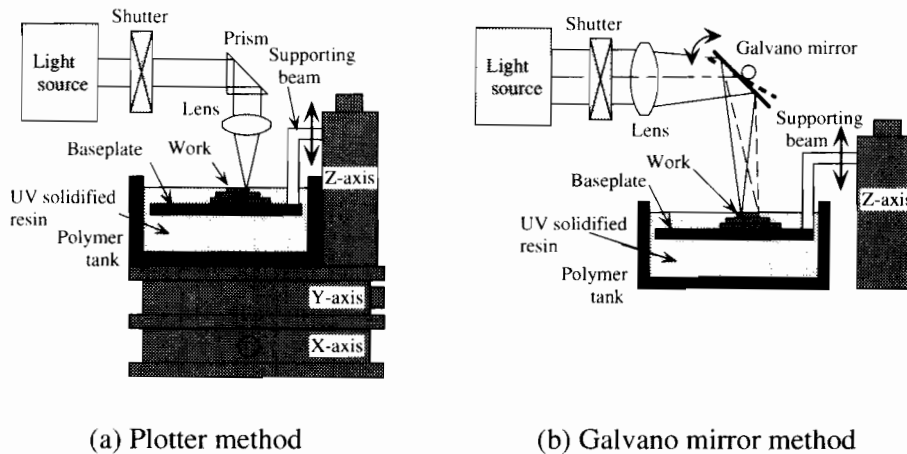


Fig. 2.4 Scanning method with XY plotter and with Galvano mirror

自由液面法と規制液面法⁷⁾

2.1.1 節で述べたように、光造形法では所望の3次元CADデータをスライスデータに変換し、1層ごとに順次硬化・積層させて構造物を製作するプロセスをたどる。このため、スライスデータの形状を樹脂に転写するために各層ごとに一定の厚みを持った硬化層を作ることになる。しかしながら、層の厚みが一定でないと作成された構造物も精度の悪いものになってしまう。Fig. 2.5 に代表的な硬化層の作成方式を示す。(a)の液追加法は、構造物を作成する土台となるベースプレートが樹脂容器の底に固定しておき、1層分の硬化ごとに樹脂を追加補給し硬化層を作り出す方法である。(b)の造形物沈下法は、十分に樹脂の入った容器の内部にベースプレートを沈めることにより1層分の硬化層を既硬化部分の上方に作り出す方法である。(c)上部照射法は紫外線を吸収しない透明の規制板を引き上げることによって既硬化部分の上方に硬化層を作り出す方法で、これとは逆に(d)の下部照射法はベースプレートを上昇させることによって下部の規制板と既硬化部分の間に硬化層を作り出す方法である。また、(e)の薄液層法は、(d)の下部照射法と似ているが、1層ごとに樹脂を注入し規制板と既硬化部分の間に硬化層を作り出す方法である。

自由液面法は、構造がシンプルでメンテナンスが容易である反面、紫外線硬化樹

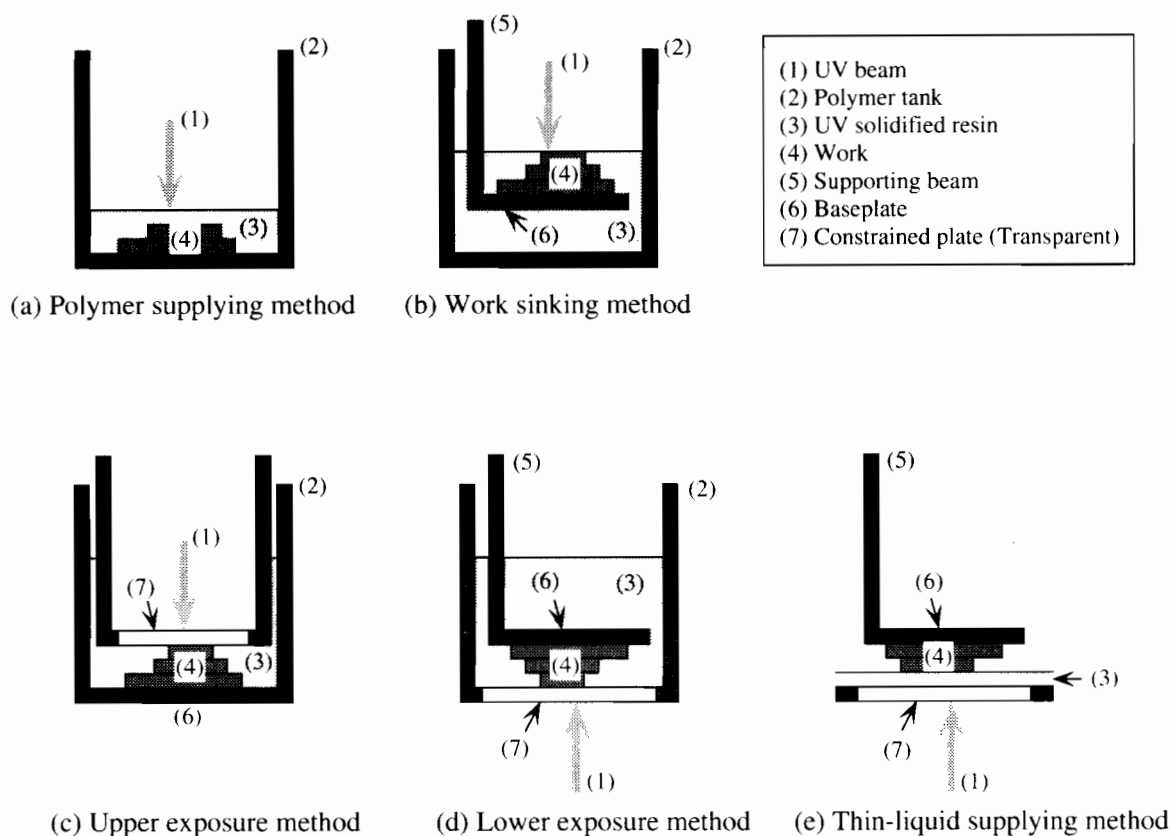


Fig. 2.5 Fabrication method of solidified layer

脂の粘性や表面張力などの影響で、硬化層が薄くなればなるほど液面の乱れが大きくなる。このため、Fig. 2.6 に示すように、樹脂の硬化が他層の硬化領域まで影響を与える”層飛び”と呼ばれる現象が発生する。また、空気との露出面では、酸素により樹脂の硬化が阻害される未硬化層を生じる。このため、自由液面法は精度をあまり要求されないモデル製作などに用いられる。

一方、規制液面法は装置の構造は複雑になるものの、規制板により高さ方向に均一な硬化層が得られ、容易に精度の高い構造物を製作できるという長所を有する。しかし、次層を硬化する際に、Fig. 2.7 に示すように構造物が規制板に付着して破損することがある。

このようにどちらの方式にも長所短所が存在するが、マイクロマシンの製作には精度の確保がしやすい規制液面法が用いられることが多い。

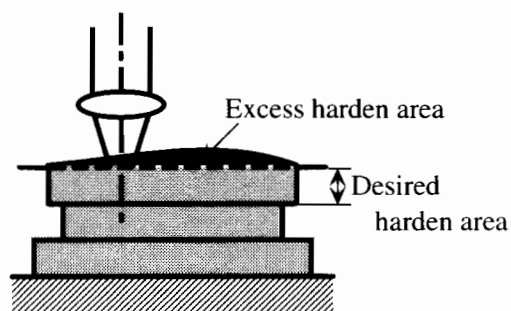


Fig. 2.6 Influence of shape accuracy by surface tension

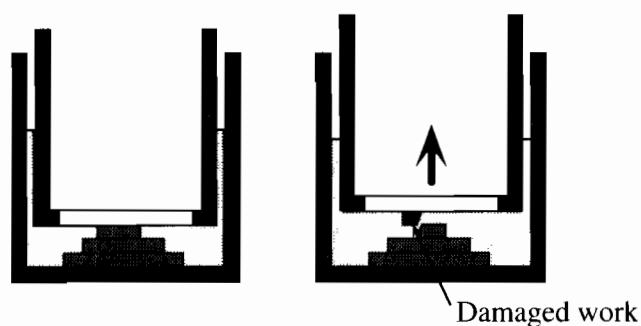


Fig. 2.7 Damaged structure by adherence to constrained plate

樹脂の硬化反応に起因する分類

一般的な光造形法では、1つの光子を吸収し、重合反応が進む1光子吸収タイプの硬化反応によって造形を行っている。

しかし、2つの光子を吸収して造形を行う2光子吸収タイプの光造形法が提案されている⁹⁾。この方法を用いると、紫外光に比べて半分のエネルギーをもつ近赤外の光源を使用することができる。紫外レーザや紫外光源といったコストの高いものから汎用性のある光源を使用することができるうえ、加工精度としてサブ・マイクロンという驚異的な値が報告されており、今後のマイクロマシンの製作方法の一つとして期待が寄せられている。

2.2 光造形法における問題点と応用分野

2.2.1 造形装置の抱える問題点

樹脂の最小硬化単位¹⁰⁾

光造形法では、樹脂の最小硬化単位ができあがった構造物の精度に大きく影響を与える。最小硬化単位が小さければ小さいほど、できあがる構造物の精度も高いものが得られる。一般的に光造形法において、最小硬化単位は水平面内と垂直面内では異なっていることが多い。

水平面内の精度は紫外線のビームをどこまで小さいスポットにできるかが精度を決定する。

光源から出た光は集束しても一点に集光せず、ある半径を持つビームウエストを形成する。Fig. 2.8のように光をレンズで集光したとき、集束したビームウエストにおけるビーム径 ω_2 は Eqn.(2.1) で表される。

$$\omega_2 = \frac{\omega_L^2}{1 + \left\{ \frac{\pi\omega_L^2}{\lambda R_2} \right\}^2} \quad (2.1)$$

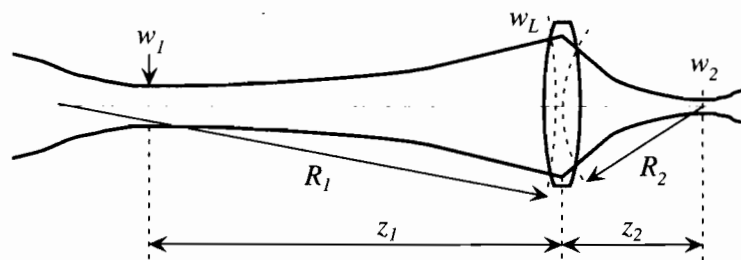


Fig. 2.8 Condensing beam by lens

またビームウエストの位置 z_2 は

$$z_2 = \frac{R_2}{1 + \left\{ \frac{\lambda R_2}{\pi\omega_L^2} \right\}^2} \quad (2.2)$$

ただし、 λ : ビームの波長、 w_L : レンズ面におけるビーム径、 R_2 : レンズ出射光の波面の曲率半径とする。光造形法ではビームウェストの位置を液面に置くため Eqn.(2.1) よりレンズ面でのビーム径 w_L が大きく、レンズによって集光された波面の曲率半径 R_2 が大きいほどビーム径は小さく集光でき、解像度がよくなることがわかる。

Fig. 2.9 はビームウェスト近傍のビームの挙動を表したものである。ビームはビームウェストから離れると Eqn.(2.3) で表される広がり角をもって広がっていく。

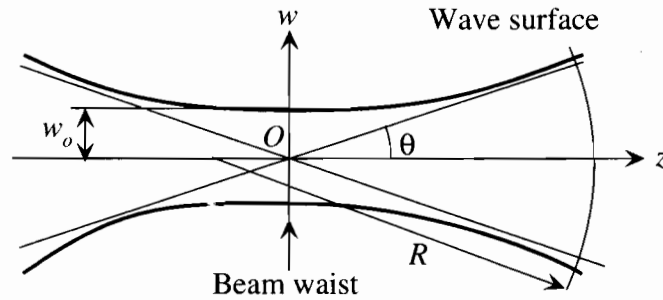


Fig. 2.9 Beam behavior neighborhood beam waist

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (w_0: \text{ビームウェストでのビーム径}) \quad (2.3)$$

実用的には、レンズ面におけるビームの半値幅を D_L とすると、レンズの焦点位置がビームウェストになるので、スポットの半径 r は、

$$r = \frac{0.44\lambda R_2}{D_L} \quad (2.4)$$

と表される。ここでは、 R_2 はレンズの焦点距離 f に等しい。 R_2/D_L はレンズの F ナンバに比例する。従って、 F ナンバの小さいレンズにより集光し、短波長の波長をもつ光源を用いれば解像度を高めることができる。

一方、垂直面内の解像度は、どれだけ薄い膜を形成できるかによって決定される。これを決定する要因は、積層厚みと樹脂の硬化厚みである。積層厚みは、自由液面法では未硬化液層を形成するリコータの性能によって決まる。これには、樹脂の粘度といった樹脂の特性が大きく影響を与える。規制液面法ではリコータの有無や、硬化層を引き剥がすときに発生する樹脂の変形など複雑な要因が存在する。

最小硬化厚み D_m は自由液面法では、樹脂の種類と露光量で決定されるが、だいたいテーブルの垂直移動量となる。

これに対して規制液面法では、

- 樹脂の硬化深さ
- 規制板に塗布できる最小樹脂厚さ

によって最小硬化厚みが決定される。

以上のように樹脂の最小硬化単位，すなわち解像度を決定する要因が水平面内と垂直面内では異なることがわかる。現実的な問題として解像度には限界があり，ビームウェスト以下の解像度を得ることは非常に難しいことが予想される。さらに，自由液面法と規制液面法の違いによって解像度を劣化させるメカニズムが異なることがわかる。

光走査による歪み¹⁰⁾

光造形法は光を走査することで造形物を製作していく。このため，光走査が不正確であると当然製作物の寸法精度が劣化する。光走査では，以下の点について気を配る必要がある。

1. 照射位置の正確さ
2. 照射位置の再現性
3. 樹脂液面の安定度

ガルバノミラー方式では走査角が電氣的に制御される。樹脂液面上では、

$$D_s = \theta_s \times L \quad (2.5)$$

で表される。ここで， D_s : 走査距離， θ_s : 走査角， L : 走査の中心位置と液面までの距離とした。Eqn.(2.5) が示すように液面までの高さが走査精度を決める重

要な因子となっている。また、液面でのビーム径も液面高さで変化するため、硬化幅にも影響を与える。

4. 走査機構の応答性・非線形性

実際の走査が走査指令に対して十分な応答速度を持っている必要がある。実際の走査が走査指令に対して十分な追従性を持っていないと曲線を露光するときに正確な描画ができない。

また、ガルバノミラー方式の場合、ミラーは駆動電流に比例して回転し、ビームの反射角が変化することにより偏向される。従って Fig. 2.10 に示すように、ミラーから液面への垂線の長さを L とし、偏向角 θ に対して液面上のビーム位置 x は、

$$x = L \tan \theta \quad (2.6)$$

と表される。 x は θ に比例しないから、偏向位置を位置データと対応づけるには Eqn.(2.6) を考慮してミラーを非線形に駆動しなければならない。ビーム走査はミラーを駆動することによって行われる。そのため、ミラーの制御が樹脂の形状精度に与える影響は大きい。従ってミラー駆動の非線形性特性は形状精度に大きく影響を与える要因となっている。

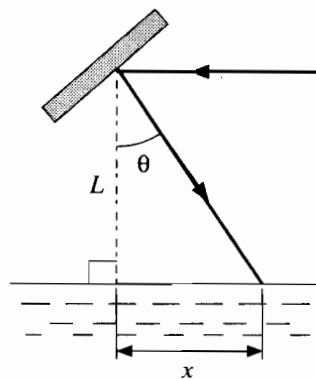


Fig. 2.10 Scanning distortion using a deflection mirror

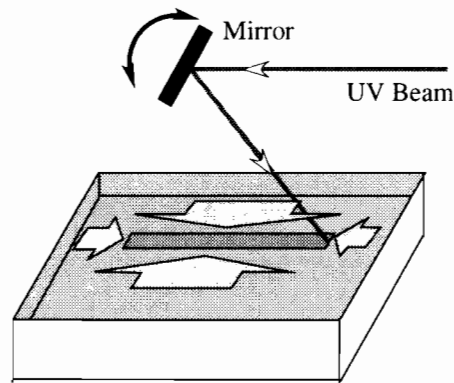


Fig. 2.11 Scanning of isolated objects

2.2.2 樹脂の問題点

硬化収縮による歪み¹⁰⁾

重合反応では、硬化収縮は本質的に避けることができない。そのため、樹脂は硬化時に収縮し、それに伴う変形が生じる。レーザービームで直接描画を行う場合、Fig. 2.11 に示すように固化部分と接触しないで液面を走査すると、硬化収縮が生じても周辺の樹脂が硬化部分に流れ込み補填されるため、走査方向の寸法誤差は発生しない。水平面内では収縮が走査方向に対して対称になるので、直線走査では歪みは発生しない。また鉛直面内でも反り変形は無視できる。

しかし、硬化した層に接触するように次層の硬化を行うと、鉛直方向の反りが発生する。この反りは、カール歪みとも呼ばれ、積層時の不均一な収縮のために発生する反りである。Fig. 2.12 にその発生の様子を図示する¹¹⁾。突出部の第1層形成時には反りは見られず、その上に第2層を形成するとき反りが発生する。上の層の未硬化の樹脂が下の既硬化層の樹脂に硬化しつつ接着する。その状態でさらに硬化すると上層が収縮し、下層に対して曲げモーメントが生じる。このため上下層同時に上方へ反り変形を伴う。

次に、広い範囲を均一に露光する場合を考える。Fig. 2.13 は全面をいっせいに露光した時の硬化収縮を表している。同図 (a) では支持するものが存在しない状態で

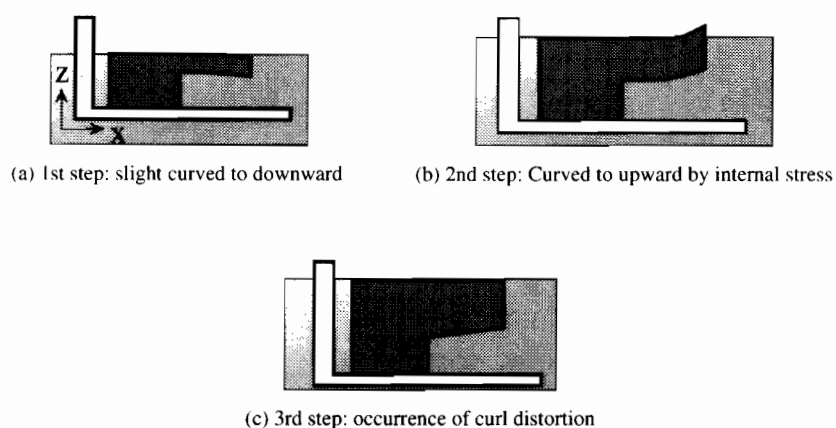


Fig. 2.12 Occurrence of curl distortion

一括露光したものである。まず最上部が硬化する。そのすぐ下側の樹脂はまだ流動

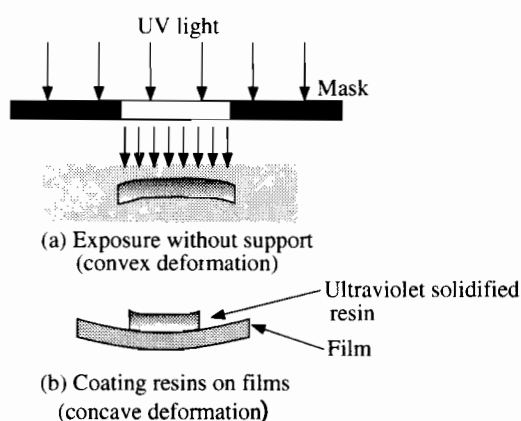


Fig. 2.13 Exposure to wide area

性があり、この時点では硬化部分と液体部分が混在する。さらに硬化を行うとカー
ル歪みの発生原因と同様の理由で全体が上に凸になるように変形する。

同図 (b) ではフィルムに塗布した場合の硬化する様子を示したものである。フィ
ルムを硬化層、樹脂を液体部と解釈すると、この場合にもカール歪みが発生する。
そして、下に凸になるように変形する。

このように樹脂の変形は光造形にとって非常に深刻な問題となっている。また、
樹脂の中には、酸素雰囲気中では重合反応が進みにくいタイプの樹脂が存在する。

この酸素阻害による未硬化層の影響も寸法精度に大きく影響するため注意が必要である。

2.2.3 産業、医療分野への応用例

光造形法を含む積層造形法は、CAD/CAM/CAEの発達する過程において、いかに効率よく製品開発を行うかという課題とともに発展を遂げてきた。今日の工業製品の形状は、直線形状から自由曲線の連続となり、製品の開発にとって3次元CADなしでは実現不可能となりつつある。従来のように木型や粘土を用いて製品の形状を再現していたのでは、コストも開発期間も膨大なものとなる。そこで、CADデータの確認、形状チェックのデザインモデルを作成する方法の一つとして、これまで光造形法は注目されていた。

光造形法の応用分野として代表的なものに、

1. 3次元CADの出力装置(3次元プロッタ)
2. マイクロマシン
3. 医療分野

があげられる。

また、使用されるモデルの機能で分類すると、

- CADデータの確認・形状チェックのためのデザインモデル
- 実用品の製造のための形状転写用モデル
- 機能チェック、組立時の干渉・組立チェックのためのワーキングモデル

に分類される。

3次元プロッタとしての光造形法¹⁰⁾

3次元CADを利用しない従来の方法では2次元の設計図を基に、熟練した職人が設計者の意図を読みとって、模型づくり(デザインモデル)を行っていた。設計が3次元CAD化へと進むにつれ、製品も複雑な自由曲面が多用されるようになったにも関わらず、モデルの確認はCRT画面上で行う方法しか存在しなかった。現実問題として、形状の確認や形状の修正には実際のモデルを用いて作業が進められることが多い。モデルの製作には、マシニングセンタなどを使用する切削加工が主であったが、加工できる形状に制約があった。光造形法は付加加工なので、形状の制約は受けないという利点がある。この優位性のため、光造形法はデザインモデルを製作する際の3次元形状の出力装置として用いられている。

デザインモデルでは形状のみが評価され、寸法精度はそれほど重要ではないが、実際に機能するワーキングモデルの場合には高い寸法精度と材質の特性が要求される。光硬化性樹脂は硬化時の収縮があるため造形物に歪みが生じ、その歪みが寸法精度に大きく影響を与える。寸法精度を高める手段として樹脂の硬化機構の解明や硬化収縮が小さい樹脂の開発といった材料方面からのアプローチのほか、造形方式の改良やビームのスキャン方法の改良などが行われている。実際に機能する部品を製作する場合、形状はもちろんのこと機械的な性質を満足する必要がある。ワーキングモデルの代表的な事例としてコネクタがあげられる。通常は金型加工でしか製造できない部品であるが、光造形法によって実装品として利用されている。

マイクロマシンへの応用

マイクロマシンの製造用として使用する場合には、他の用途より高い寸法精度が要求される。このため、マイクロマシンの製作には規制液面法が使用されることが多い^{12, 13, 15)}。この場合、成型品は単なるデザインモデルではなく、ワーキングモデルとして利用される。

実際に試作された例として、圧電素子の変形を利用して開閉するグリッパ¹³⁾や

柔突起状のマニピレータで物体を搬送するアクチュエータ¹⁴⁾があげられる。

また材料の改善方法として、界面活性剤の添加によって樹脂に導電性を与える方法¹⁵⁾も提案されている。あるいは、樹脂にセラミック粉末を混入し、セラミック複合材を作り、これを脱脂・焼結することにより微小なセラミック、または金属部品を製作する方法¹⁶⁾も試みられている。

医療分野への応用¹⁰⁾

医療分野への応用は近年、急速に利用が進んでいる。病院では、X線CTスキャンやMRIなどの画像診断装置が多数導入されており、それらのデータを造形装置に取り込み、実物に近いモデルを簡単に作成できる。こうしたモデルは、診断補助、手術検討用などに用いられる。

外科手術での応用例をあげる。骨を切断しなければならない場合、予めモデルを作成しておき、手術と同じ箇所をモデルにおいても切断する。切断した骨はチタン製のインプラント(人工骨)で改めて接続される。このインプラントは生体に副作用を起こすことなく軽量であるため、広く人工骨として利用されている。しかし、加工しにくいという欠点がある。従来、手術時に切開してから、インプラントの既製品を切断、曲げたりして最適な形状に仕上げていた。しかしながら、光造形法を利用して予めモデルを製作し、そのモデルを元にしてインプラントを加工しておけば、部品の精度は向上し、手術も簡単になり、手術時間も短縮されることから患者の負担も軽減されることになる。

光造形法を医療分野で使用する場合の問題点を以下にあげておく。

1. モデル製作の価格

モデル作成は現状では保険の対象外であるため、患者が負担するのが現状である。1つのモデルを製作する場合、15~20万円の原価となるため、精度をある程度まで下げてでもランニングコストの安い造形装置の開発が望まれている。

2. 画像診断装置とのデータの共有化

画像診断装置から得られる断層写真のデータは、その装置でしか使用できないことが多い。この制約のため、光造形技術は医療分野で深く浸透していないものと思われる。データの共有化を図り、データを共有するためのソフトウェアなどの環境を整えるべきである。

3. 人に優しい造形装置の開発

現状の、造形装置は騒音などは発生しないものの樹脂を扱うため独特の異臭が付きまとう。将来的には、病院内で造形作業が行えるよう、さらなる低騒音化や無臭化など、病院の環境に即した造形装置の開発が望まれる。

2.2.4 他のマイクロマシン技術との融合性

2.2.3 節で述べたように、光造形法を利用したマイクロマシンの開発はあまり例がない。これは、光硬化性樹脂の特性によるものだと考えられる。一般に樹脂に紫外線を照射すると重合反応により硬化反応が促進される。硬化した樹脂は耐薬品性に優れ、酸にもアルカリにも反応しにくい。これは、硬化した樹脂は薬品で融解することはできず、物理的に取り除かなければならないことを意味している。この点が、他のマイクロマシン技術と併用して光造形法が用いられていない理由である。

これからの開発が期待される他のマイクロマシン技術の融合例として、光造形法と半導体プロセスを融合した μ -TAS(Micro Total Analysis System)^{1, 2)} や MIFS³⁾ と呼ばれるマイクロ化学・生化学分析システムの開発があげられる。これらは、マイクロポンプやマイクロバルブといった機械式流体制御機構を持ち、微小流路中で連続的に混合/反応・分離、検出などの一連の作業を行うフロー型のマイクロシステムである。Fig. 2.14 に示す例のようにフローインジェクション分析を基盤とする μ -TAS は基板上に集積されたシステムで、サンプルインジェクタやサンプルの流れを制御するポンプおよび試薬との混合/反応器、成分分離部、センサ部から構成されているものが多い。通常、流路や反応路、ポンプなど機械的部品は光造形法を用いて製作をおこなう。一方、制御部や検出部などは、半導体プロセスを利用して製

作される。

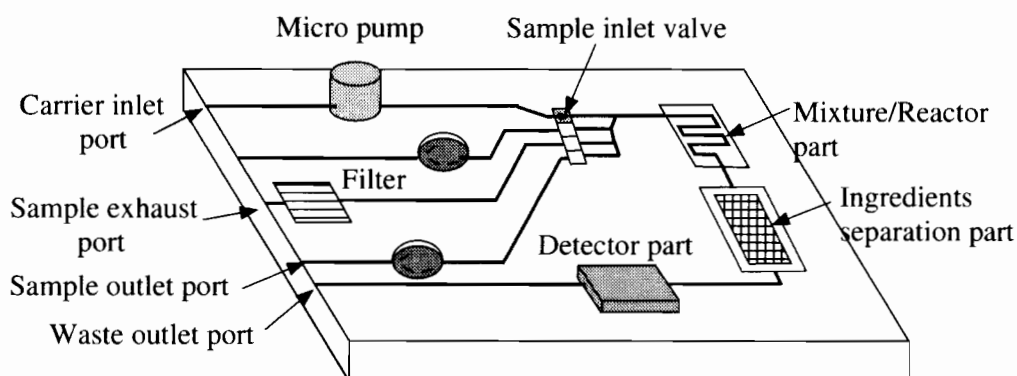


Fig. 2.14 Concept of micro total analysis system(μ -TAS)

光造形法を用いて μ -TAS や MIFS といった微小流体回路を製作する際には、

- 複雑な3次元微小流体回路の製作が可能
- 樹脂の耐薬品性が大きい
- 気密性が高い

といった光造形法の特徴を有効に利用することができる。このため、光造形法は半導体プロセスとともに、マイクロ化学・生化学分析システムの開発に使用されつつある。

第3章

内部硬化式光造形法とその装置開発

3.1 はじめに

本章では樹脂内部に集光することにより局所的に高エネルギー領域を作りだし、紫外線のエネルギーによって硬化形状を規制するという内部硬化式光造形法を提案した。提案した方式は層飛び現象の原因となる不均一な液面や、酸素阻害による未硬化層の影響に左右されないという特徴がある。設計・試作した造形装置は簡便性、コストの面から光源には、高圧水銀ランプを使用している。さらに、使用したレンズは市販の蛍光観察用対物レンズを用いている。しかしながら、この対物レンズには収差が存在しているため、微小構造物を製作するためには収差が樹脂の硬化形状に及ぼす影響を調査する必要がある。このように内部硬化式光造形法は紫外線の照射エネルギーと密接に関係しており、従来提案されている手法^{17, 18)}で硬化形状の推定を行うことは難しい。さらに構造物の表面形状を向上させるためには、硬化単位を小さくする必要がある。そのためには最も硬化単位が小さくなるように最適な照射エネルギーを樹脂に与える必要がある。そこで収差を考慮した光量分布シミュレーションを求め、硬化形状の予測を試みた。そして、シミュレーション結果と実際の硬化形状を比較することによってシミュレーションの妥当性を考察した。

最後にマイクロ構造物の試作を行い、本方式が微細構造物の作成に適しているこ

とを示した^{19, 20)}。

3.2 内部硬化式光造形法の原理

第2章で光造形法にはXYプロッタ方式とガルバノミラー方式、樹脂の硬化方法で分類すると自由液面法と規制液面法があることを述べた。光造形法を用いてマイクロマシンの製作を行う場合、高い加工精度が要求されるため、XYプロッタ方式と規制液面法の組合せが使用されることが多い。

自由液面法では、Fig. 3.1-(a)に示すように硬化層を薄くすれば薄くするほど、言い換えれば液表面近くで造形しようとする時、樹脂の粘性や表面張力の影響により液面の乱れが形状精度に大きく影響する。これは、同図-(b)に示すように液面と既硬化部分との距離を十分にとることで解決できる。

また、樹脂にはある一定量のエネルギー(臨界硬化エネルギー)を越えるエネルギーを与えないと硬化反応が始まらない、エネルギーの高いところから順に硬化していくという特性があることが知られている。

そこで本研究では、Fig. 3.1-(c)に示すように、樹脂液中に焦点を結ぶように光学系を設計し、樹脂液内部に局所的に高エネルギー領域をつくり、エネルギーによって樹脂の高さ方向の成長を規制する方法を考案した。

このように本提案方式は、造形装置の基本構造として自由液面法を採用しており、樹脂液中で硬化を行うため以下の利点を有している。

1. 造形装置の構造が単純でメンテナンスが容易
2. 表面張力による液面の乱れの影響が小さい
3. 樹脂の硬化を妨げる酸素阻害の影響が小さい
4. 規制板による構造物の破損が生じない

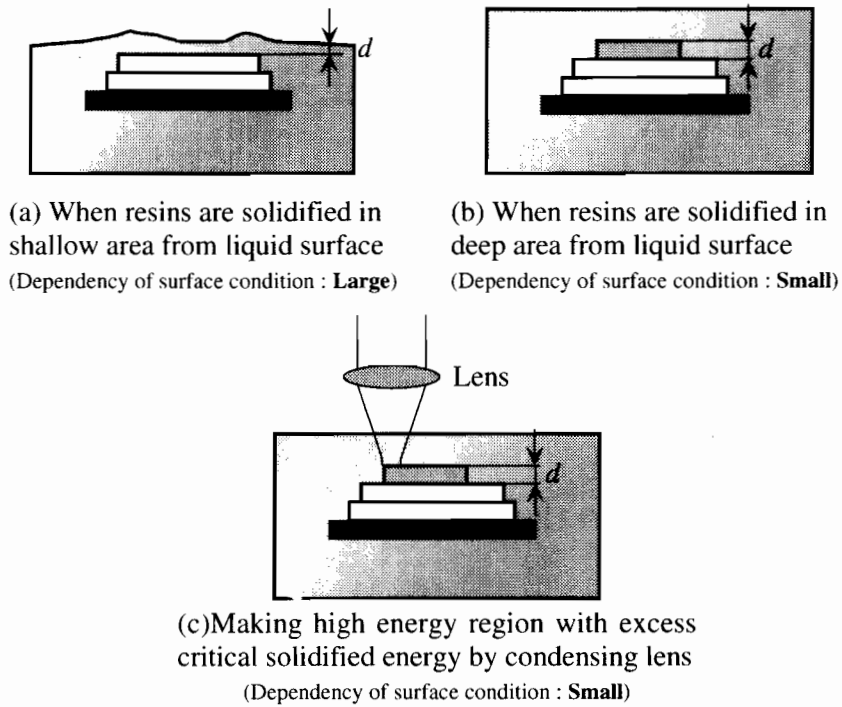


Fig. 3.1 Proposition of new type unconstrained surface method : Inside Harden Stereo Lithography method(IHSL)

3.3 紫外線硬化樹脂の硬化特性

提案する方法は，照射エネルギーによって樹脂の硬化を規制するものである．従って，その硬化形状は樹脂の特性に大きく依存する．そこで，本節では樹脂の透過・減衰特性，吸収係数と臨界硬化エネルギーの測定実験について述べる．

3.3.1 紫外線硬化樹脂の光透過・減衰特性

紫外線硬化樹脂における光の減衰は，入射した光と透過した光の照度の比を T として表すと

$$T = \frac{I_{out}}{I_{in}} \quad (3.1)$$

と表される²¹⁾．ここで， I_{in} :入射光の照度， I_{out} :透過光の照度とした．

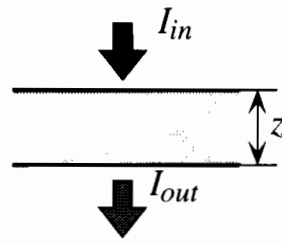


Fig. 3.2 Absorption of light by UV solidified resin

Fig. 3.2 に示すように、樹脂の厚さを z とすれば、以下の関係が成立する。

$$\ln T = \ln \frac{I_{out}}{I_{in}} = -\alpha z \quad (3.2)$$

これを Lambert-Berr の法則といい、 α を吸収係数と定義する。上式を変形すると樹脂に入射した光の照度は、

$$I_{out} = I_{in} e^{-\alpha z} \quad (3.3)$$

樹脂の厚さに対して対数的に減少していくことがわかる。

また、Eqn.(3.3) から樹脂を透過する光量 E は、露光時間 t とすると、

$$E = \int_0^t I_{out} dt = t \cdot I_{in} e^{-\alpha z} \quad (3.4)$$

と表される。

3.3.2 吸収係数と臨界硬化エネルギーの算出方法

紫外線硬化樹脂には、臨界硬化エネルギーを越えるエネルギーを照射しないと硬化しないという特性があるため、Lambert-Berr の法則による光の減衰の式を用いて臨界硬化エネルギーを求めることができる。

Fig. 3.3 に示すように、樹脂に均一な照度 I_{in} の平行光を入射した場合の露光時間と硬化深さについて考える。露光時間 t_g において、深さ z_g まで硬化したとき、臨界硬化エネルギーは E_g と求められ、次式で表される関係が成立する。

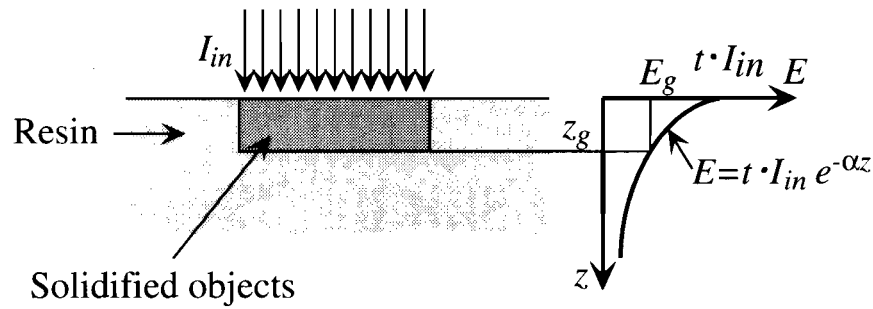


Fig. 3.3 Measuring method of absorption coefficient and critical solidified energy

$$E_g = t_g \cdot I_{in} e^{-\alpha z} \quad (3.5)$$

いま, E_g , I_{in} , α は一定のもとで z_g を求めると,

$$z_g = \frac{1}{\alpha} \left[\ln t_g - \ln \frac{E_g}{I_{in}} \right] \quad (3.6)$$

$$= A \ln t_g + B \quad (3.7)$$

となる. ここで, A , B は実験的に求めることができる定数で, それぞれ次の物理的意味を表す.

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{A} \\ E_g &= I_{in} e^{-\alpha B} \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

これにより, I_{in} と硬化深さ z を測定することによって, 吸収係数 α , 臨界硬化エネルギー E_g を求めることができる.

3.3.3 樹脂の吸収係数と臨界硬化エネルギーの測定

実験装置

Fig. 3.4 に示す装置を用いて樹脂の吸収係数と臨界硬化エネルギーの測定を行った. この装置では光源には, 高圧水銀ランプを使用しており, ランプハウスを出射した光はレンズ, ピンホール, シャッタ, プリズムを経て平行光として樹脂表面へ照

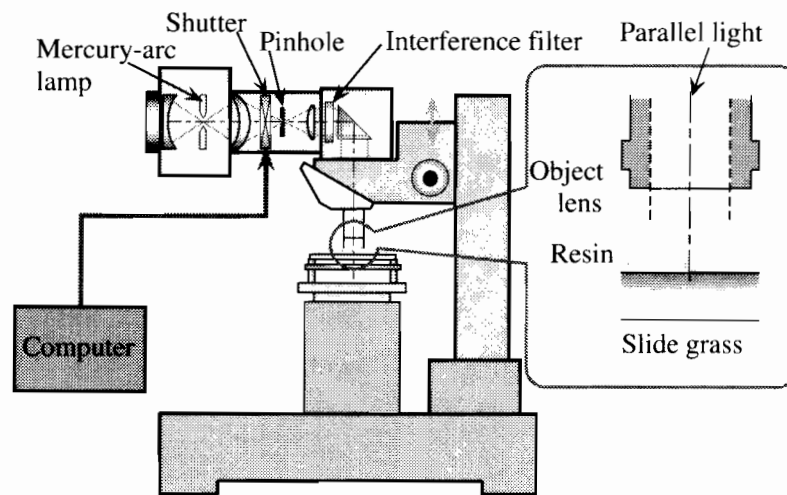


Fig. 3.4 Experimental apparatus which is used to measure absorption coefficient and critical solidified energy of resins

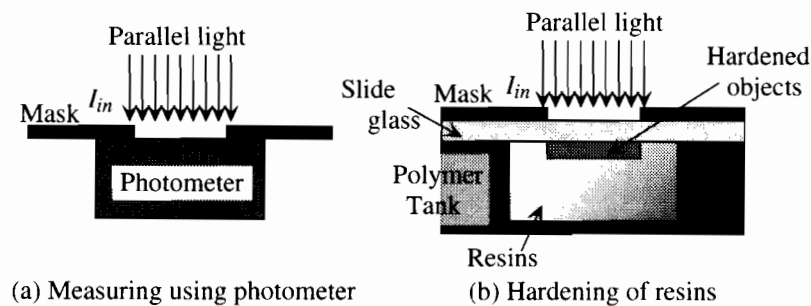


Fig. 3.5 Measuring method of polymer parameters

射される。厳密な光量を求める必要があるため、バンドパスフィルタを用いて、水銀ランプのピーク波長 365nm をもつ光のみを樹脂へ照射できるようになっている。

硬化深さと露光時間

硬化深さと露光時間の関係を調べるために、Fig. 3.5 に示すような方法で測定を行った。以下に測定手順を示す。

1. 円形マスクを通した入射光の照度をパワーメータを用いて Fig. 3.5-(a) に示すように測定する。

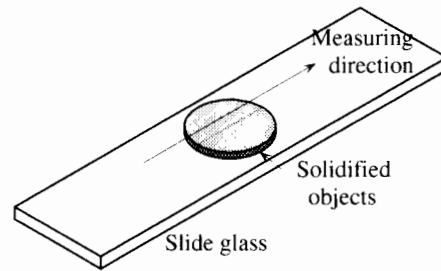


Fig. 3.6 Measuring method of solidified depth

2. Fig. 3.5-(b) のように、紫外線硬化樹脂を満たしスライドガラスを用いて密封した容器に、上方から照射する。その結果、硬化物はスライドガラスの裏側に固化する。これは、酸素阻害による樹脂の未硬化層による影響を低減するための処置である。

3. 露光後、容器からスライドガラスを取り外し、エタノールで洗浄する。

これらの手順を露光時間を変化させて繰り返し行う。

ただし、このときの入射光の照度 I_{in} は $4.3\text{W}/\text{m}^2$ であった。硬化物はスライドガラス裏側に固化するため、スライドガラスにおける光の吸収が問題となるが、これは予めスライドガラスのみの透過率を測定しておいた。その結果、スライドガラスの透過率は、0.916 と求められた。

一つの露光条件において試料は10枚作成し、Fig. 3.6 に示す方法で硬化深さを測定した。膜厚の測定箇所は硬化物の中心部分と中心から左右それぞれ2mm離れた位置で測定を行った。測定結果を Table 3.1 と Fig. 3.7 に示す。

吸収係数および臨界硬化エネルギーの算出

Fig. 3.7をもとに、樹脂の吸収係数および臨界硬化エネルギーの算出を行う。グラフより、Eqn.(3.9) の形で表される近似直線を求めると、回帰分析により

$$z = A \ln t + B \quad (3.9)$$

Table 3.1 Measurements of hardening depth

Exposure Time	Hardening depth [μm]						
	18sec	20sec	22sec	24sec	26sec	28sec	30sec
1	80.5	109.5	161.0	187.0	290.0	285.0	331.0
	57.5	71.5	121.0	158.0	250.0	260.0	351.0
	55.5	113.5	181.0	235.0	240.0	291.0	329.0
2	39.0	147.0	180.0	200.0	270.0	358.0	401.0
	25.0	116.5	141.0	181.0	281.0	345.0	362.0
	34.5	145.0	190.0	209.0	298.0	369.0	350.0
3	100.0	169.0	218.0	252.0	337.0	300.0	296.0
	100.0	174.0	201.0	208.0	290.0	306.0	329.0
	97.5	194.0	209.0	240.0	242.0	290.0	350.0
4	76.0	46.0	214.0	155.0	270.0	245.0	320.0
	32.5	22.5	222.0	170.0	250.0	272.0	343.0
	89.0	39.5	320.0	241.0	270.0	274.0	409.0
5	95.5	131.0	140.0	241.0	256.0	312.0	340.0
	96.0	99.5	141.0	249.0	280.0	272.0	320.0
	95.0	134.5	195.0	279.0	288.0	320.0	330.0
6	29.5	116.0	176.0	227.0	241.0	286.0	276.0
	9.5	103.0	143.0	220.0	220.0	281.0	394.0
	50.0	119.5	170.0	205.0	251.0	277.0	423.0
7	115.0	116.0	150.0	229.0	242.0	300.0	369.0
	85.0	108.0	137.0	194.0	235.0	275.0	386.0
	110.5	159.5	165.0	209.0	256.0	269.0	369.0
8	90.0	142.0	232.0	250.0	289.0	280.0	328.0
	30.0	118.5	162.0	242.0	296.0	320.0	318.0
	55.0	142.5	211.0	271.0	289.0	355.0	390.0
9	45.0	136.0	146.0	184.0	219.0	270.0	330.0
	16.0	77.0	111.0	169.0	206.0	264.0	310.0
	23.5	125.5	125.0	203.0	221.0	266.0	250.0
10	65.0	105.5	138.0	218.0	236.0	280.0	292.0
	35.0	91.0	115.0	185.0	228.0	271.0	296.0
	42.5	115.5	165.0	194.0	254.0	249.0	333.0
Average	62.5	116.3	172.7	213.5	259.8	291.4	340.8
Sample variance	995.6	1472.0	1932.6	1057.2	888.8	1016.5	1608.6
Standard deviation	31.0	37.7	43.2	32.0	29.3	31.3	39.4

$$z = 5.339 \times 10^{-4} \ln t - 1.487 \times 10^{-3} \quad (3.10)$$

と求められる。

これより、樹脂の吸収係数と臨界硬化エネルギーは、Eqn.(3.8) とスライドガラスによる吸収を考慮すると

$$\begin{cases} \alpha &= \frac{1}{A} = 1.866 \times 10^3 \text{ [m}^{-1}\text{]} \\ E_g &= 9.160 \times 10^{-1} \cdot I_{in} e^{-\alpha B} = 6.337 \times 10^1 \text{ [J/m}^2\text{]} \end{cases} \quad (3.11)$$

が得られる。

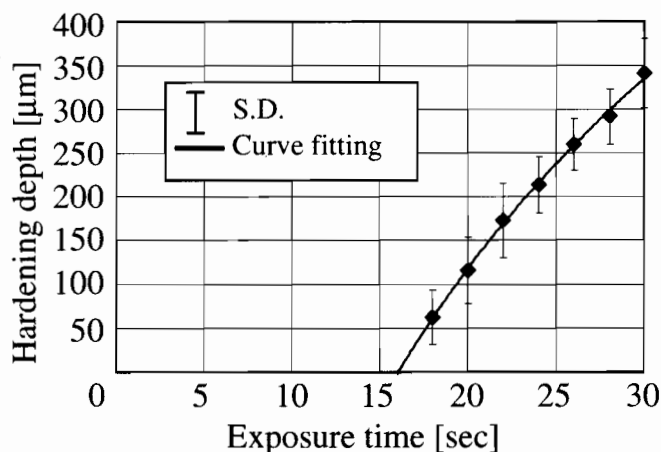


Fig. 3.7 Relationship between exposure time and hardening depth

3.4 内部硬化式光造形装置の設計と試作

本研究で提案する方法は、紫外線を樹脂液中で集光し選択的に硬化させる方法である。紫外線硬化樹脂は臨界硬化エネルギーを越える紫外光を照射しないと硬化反応が進行せず、硬化反応は高エネルギー領域から順次進行していくことはすでに述べた。内部硬化式光造形法は、樹脂のこの性質を利用している。

試作した実験装置は、レンズにより紫外線を集光することにより、樹脂液中に焦点を結ぶように設計を行った。従って樹脂液面上方では光量は小さく、樹脂液中の焦点近傍で光量が最も大きくなるように設定している。通常は、焦点位置にスライドガラスの表面を合わせ、スライドガラス上に構造物を製作していく。照射時間を制御することにより焦点近傍だけに臨界硬化エネルギーを越える領域を設定することで、最小の硬化単位を得ることができる。

Fig. 3.8 に試作した内部硬化式光造形法の概略を示す。装置の光学系ならびにフレームには市販の金属顕微鏡(オリンパス製, STM-5)を使用している。光源には、レーザ光に比べて安定で光ノイズが少なく保守、点検、コストの面でも優れた高圧水銀灯を使用している。光源から出射された紫外光はバンドパスフィルタによって単一波長(365nm)のみを取り出すようにしてある。これは、樹脂に照射するエネル

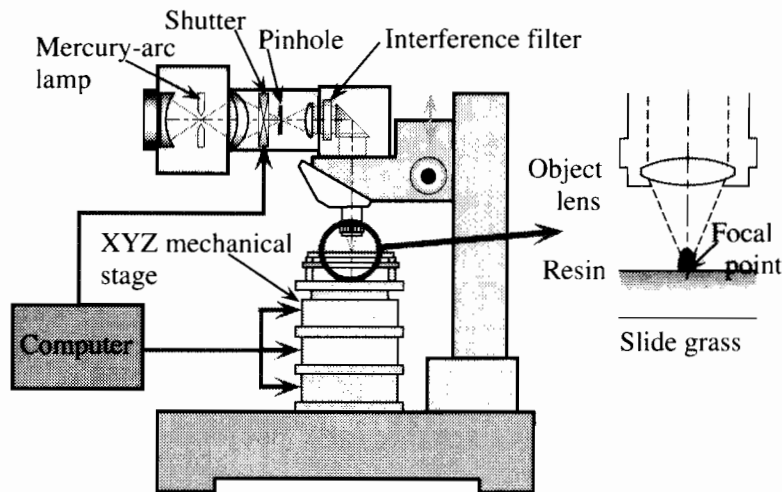


Fig. 3.8 Experimental apparatus for inside solidified type stereolithography

ギーを正確に測定するためである。紫外光を集光する対物レンズは市販の蛍光観察用(オリンパス製, UPLFL10×)のものを使用している。レンズを通った光は集光され, Fig. 3.8拡大部分のように液面下に高エネルギー領域を作る。本装置における紫外光の走査方法はXYプロッタ(NCテーブル)方式を採用しており, テーブルの移動, 紫外線の照射, テーブルの沈下といった工程を繰り返すことによって3次元形状を製作することができる。XYZ軸微動ステージ(中央精機製)と露光時間を制御するシャッター(COPAL製)はコンピュータを用いて制御を行っている。XYZ軸微動ステージはステッピングモータで駆動され, X,Y軸の分解能は $0.1\mu\text{m}/\text{pulse}$, Z軸の分解能は $0.5\mu\text{m}/\text{pulse}$ となっている。

本方式を用いると樹脂液中で硬化を行うため, 酸素による未硬化層の影響を除去できるばかりでなく, 層飛現象の原因となる表面張力による液面の乱れの影響も低減することができる。さらに, 自由液面方式であるため規制板による硬化物の破損がないという特徴を持つ。

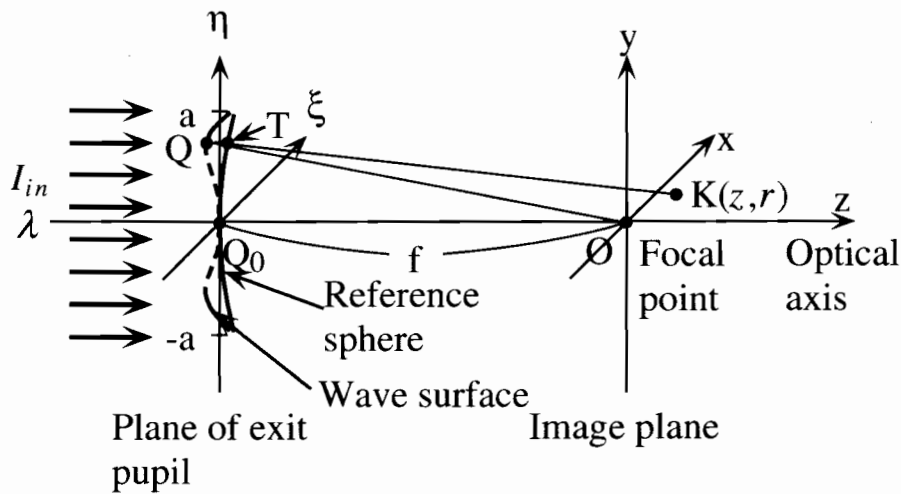


Fig. 3.9 Definition of optical system

3.5 樹脂硬化シミュレーションと実験

3.5.1 対物レンズの焦点近傍における3次元照度分布の推定

レンズは物体から出た光を焦点面上に結像するが、レンズの直径が有限であるために開口を通過した場合と同様に回折が生じる。ここでは回転対称な光学系に関して、光軸方向に進む波長 λ の平面波が焦点距離 f 、半径 a の円形開口のレンズに入射した場合の3次元照度分布を考える。

光学系のある任意の点 $K(x, y, z)$ における波の振幅 $U(K)$ は、Huygens-Fresnel の原理^{22, 23, 24)} から

$$U(K) = -\frac{i}{\lambda} \iint A(Q) \frac{e^{i\frac{2\pi}{\lambda}s}}{s} d\xi d\eta \quad (3.12)$$

と表される。ただし、Fig. 3.9 に示すように座標をとると、 $A(Q)$ は波面上の点 Q における光の振幅、 $s = \overline{QK}$ である。

ここで、 \overline{QK} が参照球面と交わる点を $T(T_x, T_y, T_z)$ とすると、

$$s = \overline{QK} = \overline{QT} + \overline{TK} = W + \overline{TK} \quad (3.13)$$

を表される．ここで， W は波面収差を表し， $W = \overline{QT}$ である．また \overline{TK} は次式で与えられる．

$$\overline{TK} = \sqrt{(x - T_x)^2 + (y - T_y)^2 + (z - T_z)^2} \quad (3.14)$$

そこで， T が $O(0,0,0)$ を中心とし，半径 f ($=\overline{Q_0O} = R$) の円上にあること，すなわち

$$T_x^2 + T_y^2 + T_z^2 = f^2 \quad (3.15)$$

を代入すれば，

$$\overline{TK} = \sqrt{f^2 + x^2 + y^2 + z^2 - 2(xT_x + yT_y + zT_z)} \quad (3.16)$$

となる．ここで， $|x|, |y|, |z| \ll f$ により第1次近似を求めると，

$$\overline{TK} \approx f + \frac{x^2 + y^2 + z^2}{2f} - \frac{xT_x + yT_y}{f} - \frac{z(T_x^2 + T_y^2)}{2f^2} \quad (3.17)$$

となる．

Eqn.(3.12) の被積分関数の分母は，積分中においてほとんど変化しないことから f で代表し積分の外に出し， $T_x \approx Q_x = \xi$, $T_y \approx Q_y = \eta$ とおけば，

$$U(x, y, z) = C \iint H(\xi, \eta) \exp[R(\xi, \eta)] d\xi d\eta \quad (3.18)$$

$$\text{ただし, } C = -i \frac{2\pi}{\lambda f} \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda} \left(f + z + \frac{x^2 + y^2 + z^2}{2f} \right) \right]$$

$$H(\xi, \eta) = A(\xi, \eta) \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda} W(\xi, \eta) \right]$$

$$R(\xi, \eta) = -\frac{2\pi}{\lambda f} \left\{ (x\xi + y\eta) + \frac{z(\xi^2 + \eta^2)}{2f} \right\}$$

となる．ここで， $H(\xi, \eta)$ を瞳関数と呼ぶ．

開口瞳は円形であるので，回転対称性より

$$\begin{cases} \xi = \rho \cos \varphi \\ \eta = \rho \sin \varphi \end{cases} \quad \begin{cases} x = r \cos \theta \\ y = r \sin \theta \end{cases} \quad (3.19)$$

とおける．

また簡単化のため、

$$A(\xi, \eta) \begin{cases} = 1 & \text{円形開口の内部} \\ = 0 & \text{それ以外} \end{cases} \quad (3.20)$$

とすると、Eqn.(3.18) は

$$\begin{aligned} U(z, r) &= C' \int_0^a \int_0^{2\pi} \exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ \frac{r\rho \cos(\theta - \varphi)}{f} + \frac{z\rho^2}{2f^2} + W(\rho) \right\} \right] \rho d\rho d\varphi \\ &= 2\pi C' \int_0^a J_0 \left(\frac{2\pi r\rho}{\lambda f} \right) \exp [R'(\rho)] \rho d\rho \end{aligned} \quad (3.21)$$

$$\text{ただし, } C' = -\frac{i}{\lambda f} \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ f + z + \frac{r^2 + z^2}{2f} \right\} \right]$$

$$R'(\rho) = -i \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ \frac{z\rho^2}{2f^2} + W(\rho) \right\}$$

となる。ここで、 J_n は n 次の Bessel 関数であり、次式のような

$$J_n(x) = \frac{(i)^{-n}}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp[ix \cos \alpha] \exp[in \alpha] d\alpha \quad (3.22)$$

関係がある。これより、照度 I は

$$I(z, r) = I_{in} |U(z, r)|^2 \quad (3.23)$$

で与えられる。ここで、 I_{in} は入射光の照度である。以上のことから単一レンズにより作られる3次元照度分布を導出することができる。

Lommel 関数を用いた展開

照度分布を数値計算で求める場合、Eqn.(3.21) を利用することで照度分布を求めることができる。しかし、無収差レンズを使用した際には、さらに展開することができる。光学系を無収差レンズと仮定した場合、波面収差関数 $W(\rho) = 0$ となる。また、無次元の変数 u, v を

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{a}{f} \right)^2 z \\ v &= \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{a}{f} \right) r \end{aligned} \right\} \quad (3.24)$$

Eqn.(3.24) によって定義すると, Eqn.(3.21) は

$$\begin{aligned} U(z, r) &= a^2 C'' \int_0^1 \int_0^{2\pi} \exp \left[-i \left\{ v\rho \cos(\varphi - \theta) + \frac{1}{2} u\rho^2 \right\} \right] \rho \, d\rho \, d\varphi \\ &= 2\pi a^2 C'' \int_0^1 J_0(v\rho) \exp \left[-\frac{1}{2} i u\rho^2 \right] \rho \, d\rho \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$\text{ただし, } C'' = -\frac{i}{\lambda f} \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ f + \frac{\lambda f^2}{2\pi a^2} u + \frac{\lambda^2 f}{8\pi^2 a^2} v^2 + \frac{\lambda^2 f^3}{8\pi^2 a^4} u^2 \right\} \right]$$

と変形できる.

いま, 次式からなる関数 (Lommel 関数) を定義する.

$$U_n(u, v) = \sum_{s=0}^{\infty} (-1)^s \left(\frac{u}{v} \right)^{n+2s} J_{n+2s}(v) \quad (3.26)$$

ここで, $J_{n+2s}(v)$ は $(n+2s)$ 次の Bessel 関数を表している. 従って, Eqn.(3.25) は次式のように簡略化することができる.

$$\begin{aligned} U(z, r) &= \pi a^2 C'' \left[\left\{ \frac{\cos \frac{1}{2}u}{\frac{1}{2}u} U_1(u, v) + \frac{\sin \frac{1}{2}u}{\frac{1}{2}u} U_2(u, v) \right\} \right. \\ &\quad \left. - i \left\{ \frac{\sin \frac{1}{2}u}{\frac{1}{2}u} U_1(u, v) - \frac{\cos \frac{1}{2}u}{\frac{1}{2}u} U_2(u, v) \right\} \right] \end{aligned} \quad (3.27)$$

3.5.2 樹脂硬化シミュレーションモデル

前節まででレンズによる光の回折現象について述べ, 焦点近傍の3次元照度分布の推定を行った. しかし, これは真空中で考えた一般的な場合であるので, 樹脂による吸収を考慮した焦点近傍の光量分布の算出と, 樹脂の硬化シミュレーションの場合について述べる.

シミュレーションを行うにあたり, 次のような仮定を採用する.

1. 光の散乱・反射の影響は無視する.
2. 光は空気中では減衰しない.
3. 光は樹脂中では, Lambert-Berr の法則に従い吸収される.

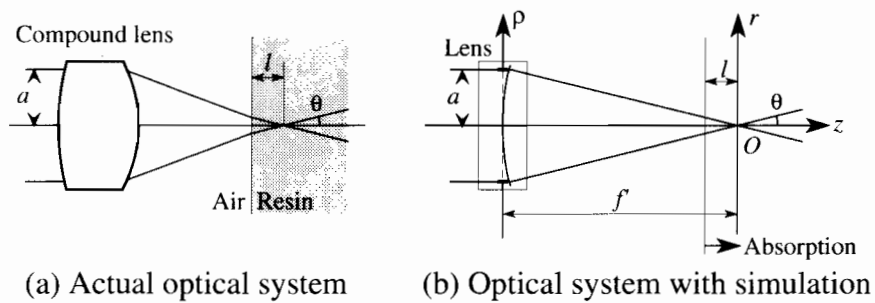


Fig. 3.10 Actual optical system and optical system model with simulation

4. 入射光は単色光で均一な照度の平面波とする.
5. 既硬化部分の影響は無視する.

レンズに関しては、実際の実験装置で使用しているものを扱い、Fig. 3.10 に示すようにモデル化を行った。

実際のレンズは Fig. 3.10-(a) に示すように、複数のレンズから構成される組合せレンズである。光はレンズ-空気境界面で屈折し、その後、空気-樹脂境界面で再び屈折して樹脂内に収束する。求めたいのは樹脂内部の焦点近傍の照度分布であるので、空気中の光の進行を考慮する必要はない。そこで、同図-(b) のように、実際のレンズと同じ半径 a の開口を持ち、周辺光とのなす角 θ が一致するような参照球面を考える。

使用したレンズの各パラメータとして、

- 開口数 NA
- 真空中の焦点距離 f
- 透過率 T_i

を与える。Eqn.(3.28) より開口半径 a は、空気の屈折率を $n_1 \approx 1$ とすると、

$$a = NA \frac{f}{n_1} \quad (3.28)$$

となる。

また、参照球面の半径 f' は、樹脂の屈折率を n_2 とすると、

$$f' = n_2 \frac{a}{\text{NA}} = f \frac{n_2}{n_1} \quad (3.29)$$

で与えられる。

この f' をレンズの焦点距離として 3.5 節で述べた方法で照度分布 $I(z, r)$ を推定する。

これに樹脂表面から焦点までの深さとして l を与え、Lambert-Berr の法則を適用すると、樹脂内部の光量分布 $E(z, r, t)$ は、

$$E(z, r, t) = t T I(z, r) e^{-\alpha(z+l)} \quad (3.30)$$

で求められる。ただし、 z 軸に関して $z \geq -l$ の範囲のみ計算を行うものとする。

いま、臨界硬化エネルギー E_g を超える部分が硬化するものとする、

$$E_g \leq E(z, r, t) \quad (3.31)$$

を満たす領域が硬化形状として求められる。

3.5.3 無収差レンズによる硬化シミュレーション

レンズを収差を生じない理想的なものとして仮定した場合の硬化シミュレーションを行った。シミュレーションは、Fig. 3.11 に示すように、スライドガラスに均一な厚さの樹脂を塗布し、樹脂-ガラス境界面上に焦点を合わせた場合の焦点近傍の光量分布を算出し、様々な露光条件を与えて硬化形状を推定した。

シミュレーション条件

シミュレーションを行う際に使用した各パラメータの値を Table 3.2 に示す。

ここで、吸収係数 α 、臨界硬化エネルギー E_g は、3.3.3 節で得られた結果を用いている。

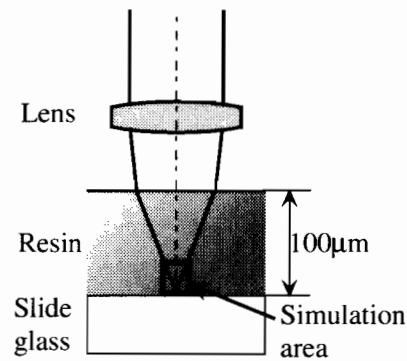


Fig. 3.11 Simulation area

Table 3.2 Parameters for simulation without wave aberration

Reflective index of air : n_1	1.0
Reflective index of resin: n_2	1.508
Absorption coefficient of resin : α	1866.01m^{-1}
Critical hardening energy : E_g	63.77 J/m^2
Thickness of resin : l	$100\mu\text{m}$
Numerical Aperture of a lens : NA	0.3
Radius of a lens : a	5.4mm
Transmittance of a lens : T_l	0.6
Intensity of a incident ray : I_{in}	0.21mW/m^2
Wave aberration function	$W(\rho) = 0$

シミュレーション結果

Fig. 3.12 にシミュレーション結果の一例を示す。図において、下側端面が焦点面であり、上方から光が照射されたものとしている。図中において白抜きの部分が硬化形状を示している。

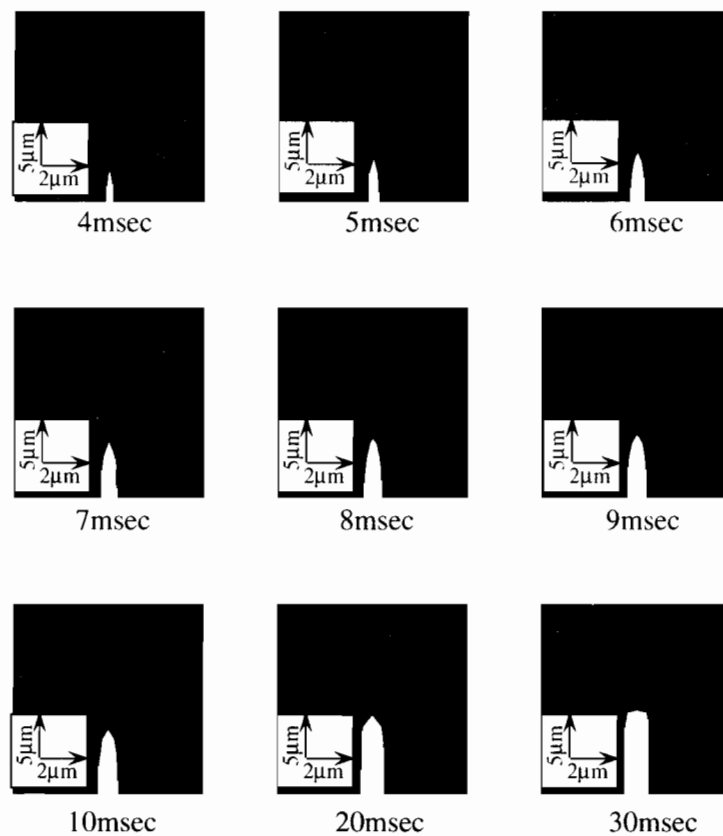


Fig. 3.12 Simulation results without wave aberration

シミュレーション結果の考察

シミュレーション結果を見ても明らかなように、レンズにより樹脂内部に局所的に高エネルギー領域を作り出すことで、樹脂を選択的に硬化可能であることがわかる。

また、シミュレーション結果から露光時間 40msec を越えると、光の回折の影響により硬化形状が不安定になることがわかった。Fig. 3.13 に露光時間 60msec の場合のシミュレーション結果を示す。

Fig. 3.12 より、構造物の高さ・幅・アスペクト比を測定し、グラフにしたものを Fig. 3.14 に示す。

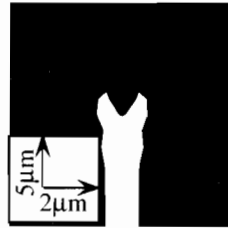


Fig. 3.13 Influence of over exposure (exposure time :60msec)

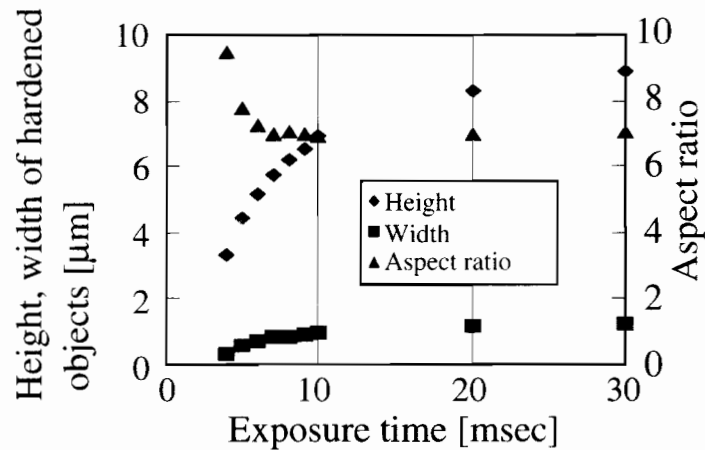


Fig. 3.14 Relationship between exposure time and height, width, aspect ratio, of solidified resin without wave aberration

グラフから、3～10msecで硬化が急激に進むことがわかる。また、最も硬化形状のアスペクト比が高くなる露光時間は、4msecであると予想される。

3.5.4 収差を持つレンズによる硬化シミュレーション

波面収差関数の導出

3.5.3節では、レンズに収差がない理想的な状態でシミュレーションを行った。しかし、後述する硬化実験で明らかにされるように、現実の硬化形状に比べて非常に異なるものとなった。

実際のレンズには、必ず収差が存在する。今回使用したレンズにおいて、可視光

域では収差補正がされているものの、紫外光域では、収差補正が行われていないので、収差を考慮したシミュレーションが必要である。

今回使用したレンズ(オリンパス製 UPLFL10×)メーカーの協力により、365nm の波長の光に対する光線追跡の資料をもとに、球面収差を求め波面収差への変換を行った。

Fig. 3.15 に提供された光線追跡ダイヤグラムを示す。

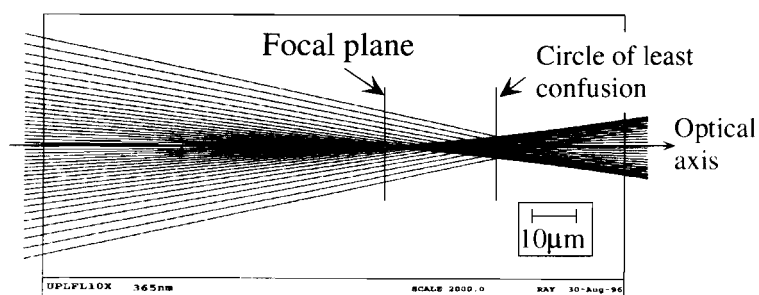


Fig. 3.15 Obtained spherical aberration using by ray tracing method

このダイヤグラムは、レンズの光軸方向に進む波長 365nm の平行光線を入射した場合の光線追跡を行ったものである。そこで、この図より波面収差 Δs を測定し、Fig. 3.16 に示すようなグラフを得た。

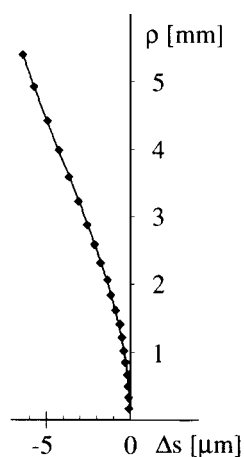


Fig. 3.16 Graph of spherical aberration

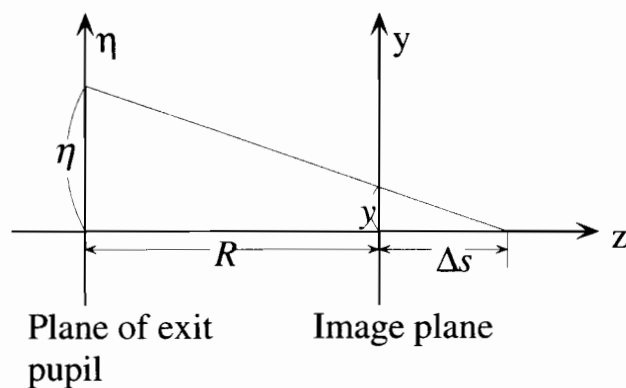


Fig. 3.17 Relationship between spherical aberration and wave aberration

このグラフより,

$$\Delta s(\rho) = A\rho^3 - B\rho^2 + C\rho \quad (3.32)$$

という形の近似直線を求めると,

$$\Delta s(\rho) = 3.682 \times 10^2 \rho^3 - 4.251 \rho^2 + 5.004 \times 10^{-4} \rho \quad (3.33)$$

と求めることができる。

光線追跡ダイヤグラムから波面収差関数を求める方法について述べる。波面収差 Δs と球面収差 W の関係は、Fig. 3.17 に示すように Δs と y の関係が、

$$y = \frac{\Delta s}{R + \Delta s} \eta \approx \frac{\Delta s}{R} \eta \quad (3.34)$$

となることから、波面収差関数が動径 $\rho (= \eta)$ にのみ依存する場合 (球面収差のみが生じる場合) は、

$$W(\rho) = \frac{1}{R^2} \int_0^a \{\Delta s(\rho)\} \rho d\rho \quad (3.35)$$

で求めることができる。

よって、波面収差関数 $W(\rho)$ は Eqn.(3.35) より、

$$W(\rho) = 9.994 \times 10^4 \rho^5 - 1.443 \times 10^3 \rho^4 + 2.264 \times 10^{-1} \rho^3 \quad (3.36)$$

と得られた。

Table 3.3 Parameters for simulation with wave aberration

Reflective index of air : n_1	1.0
Reflective index of resin: n_2	1.508
Absorption coefficient of resin : α	1866.01m^{-1}
Critical hardening energy : E_g	63.77 J/m^2
Thickness of resin : l	$100\mu\text{m}$
Numerical Aperture of a lens : NA	0.3
Radius of a lens : a	5.4mm
Transmittance of a lens : T_l	0.6
Intensity of a incident ray : I_{in}	0.21mW/m^2
Wave aberration function	$W(\rho) = 9.994 \times 10^4 \rho^5 - 1.443 \times 10^3 \rho^4$ $+ 2.264 \times 10^{-1} \rho^3$

Fig. 3.16 から明らかなように、光は焦点面ではなく最小錯乱面で最も収束していることがわかる。そこで、収差を考慮したシミュレーションでは、Fig. 3.11 に示すシミュレーション領域に対して、最小錯乱面を焦点面の代わりとしてシミュレーションを行った。

シミュレーション条件

Table 3.3 にシミュレーションで使用した各パラメータを示す。

ここで、吸収係数 α 、臨界硬化エネルギー E_g は、3.3.3 節で得られた値を用いている。

シミュレーション結果

Fig. 3.18 に硬化形状のシミュレーション結果の一例を示す。図において、下側端面が樹脂-ガラス境界面すなわち最小錯乱面であり、上方から光が照射されたものとしている。図中に白抜きの形状が硬化部分を表している。

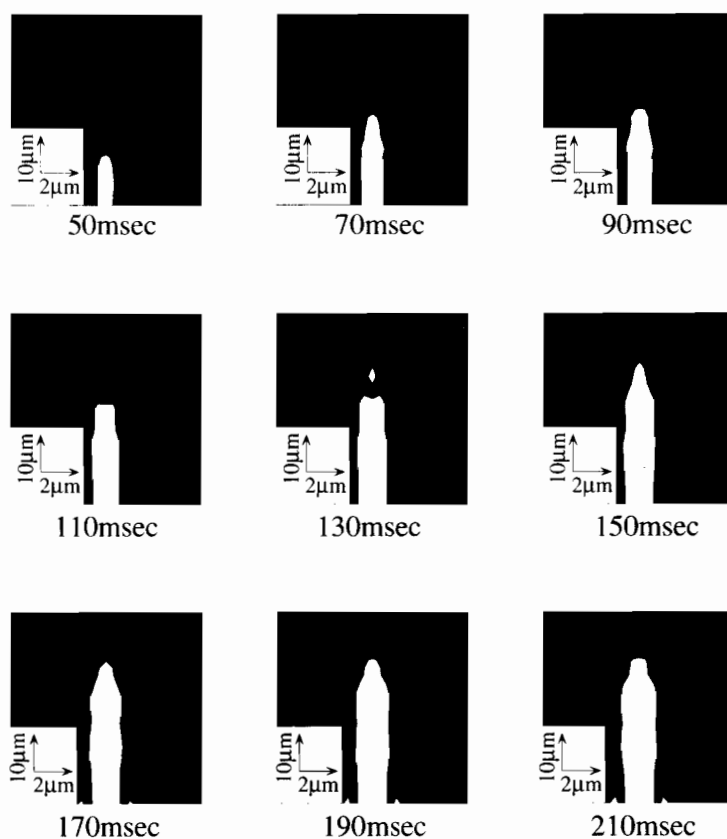


Fig. 3.18 Simulation results with wave aberration

シミュレーション結果の考察

収差を考慮しないシミュレーション結果と同様、樹脂を選択的に硬化できることが分かった。また、露光時間が長くなると、回折の影響が表れ、200msec を越えたあたりで、硬化形状が不安定になることが分かる。

Fig. 3.18 より構造物の高さ・幅・アスペクト比を測定し、グラフにしたものを Fig. 3.19 に示す。

グラフから、幅は露光時間が大きくなるにつれ滑らかに増加を示すが、高さ方向の硬化は一樣ではなく階段状に増加していることが分かる。これは、収差の影響によって照度分布が一樣ではなくうねりがあるためだと考えられる。最も硬化形状のアスペクト比が高くなる露光時間は、140msec であることが予測される。

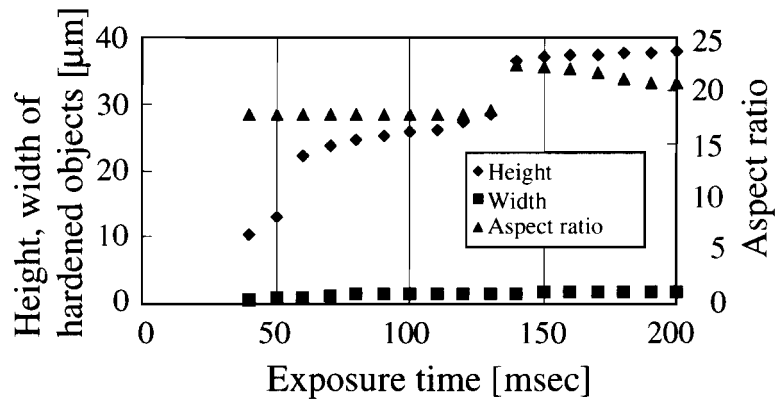


Fig. 3.19 Relationship between exposure time and height, width, aspect ratio, of solidified resin with wave aberration

3.5.5 樹脂硬化実験

実験方法

厚さ $100\mu\text{m}$ の樹脂を塗布したスライドガラスに、Fig. 3.20 に示すように、露光時間を $10\sim 200\text{msec}$ の間で 10msec 間隔で変化させ、ライン状の構造物を並べて製作した。露光は 200msec 側から露光時間を減少させる方向へ行った。実験装置は、Fig. 3.4 を用いて実験を行った。

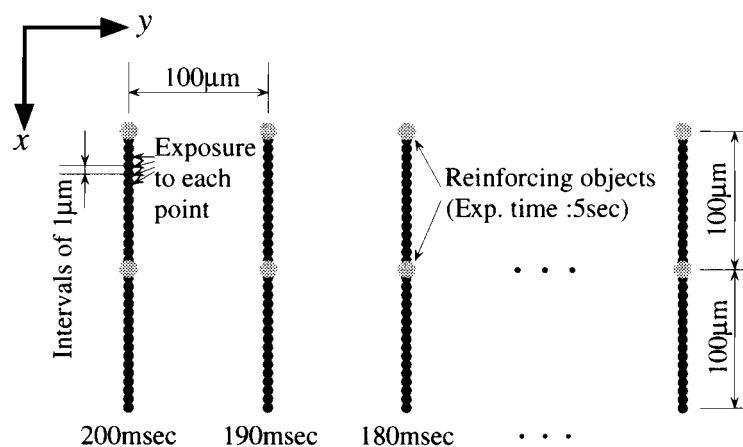


Fig. 3.20 Fabricated linear objects for solidified experiments

レンズは、シミュレーションで設定した値のものを使用し、入射光の照度などの各条件もシミュレーションの場合と同じ条件にした。

露光時間が短くなるにつれて構造物が不安定になり、樹脂洗浄中に剥離する恐れがあるため、Fig. 3.20 に示すように構造物の中央部および片側端点を 5sec で露光し補強材とした。

実験結果

Fig. 3.21-(a) に製作した構造物全体の SEM 写真を示す。また、同図-(b), (c), (d) には、一例としてそれぞれ 130msec, 160msec, 190msec の場合の拡大写真を示す。

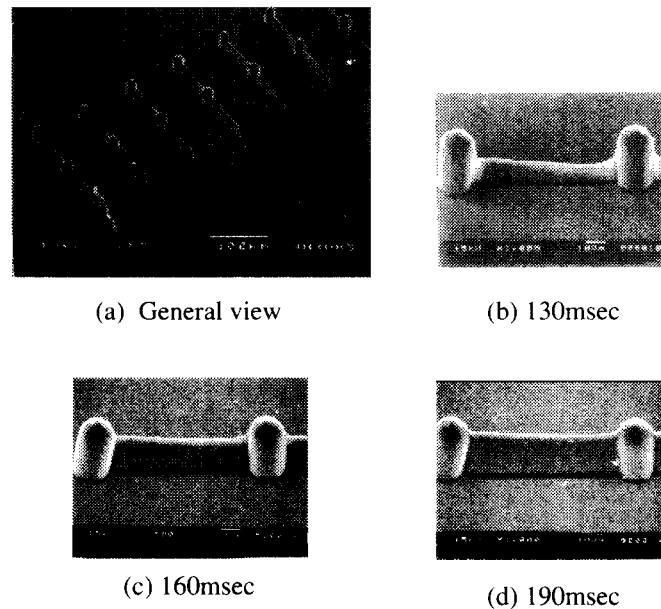


Fig. 3.21 SEM photograph of curing experiments

Fig. 3.21 に示した SEM 写真から見て分かるように、露光時間が長くなるにつれて構造物の高さが高くなっていくことが分かる。また、厚さ $100\mu\text{m}$ の樹脂を塗布したにも関わらず構造物の高さは露光時間が 200msec の場合、およそ $30\mu\text{m}$ である。このことから、樹脂内部に局所的に高エネルギー領域を作り出すことで、樹脂内部を選択的に硬化させ、液面に依存しない構造物を作成できることが確認できた。

製作し構造物の高さ・幅・アスペクト比を SEM 写真より測定したグラフを Fig. 3.22 に示す。

収差を考慮した場合と考慮した場合のシミュレーション結果および硬化実験の結果をまとめたものを Fig. 3.23 に示す。

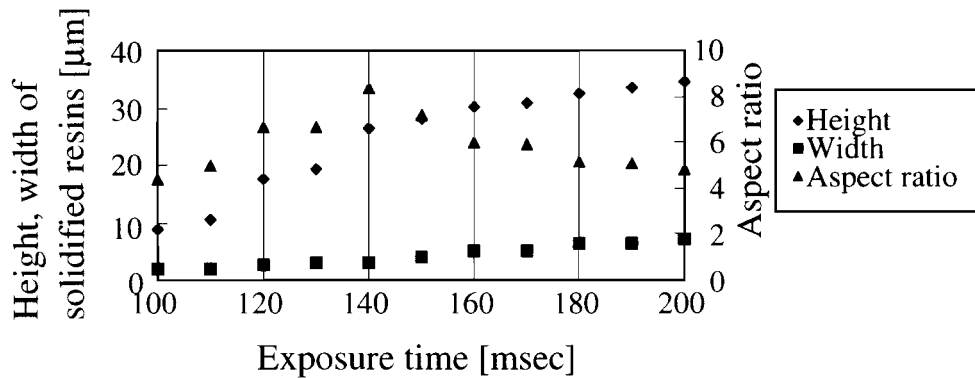


Fig. 3.22 Experimental results of height / width of solidified resins

収差を考慮しないシミュレーションにおいて、硬化を開始する露光時間が実験では 100msec であるのに対して、シミュレーションでは 4msec 前後で硬化が始まり、40msec を越えると回折の影響で硬化形状が不安定になることが分かった。硬化開始直後の形状もシミュレーション結果の方が実験結果より小さく、硬化の成長速度も急激に変化している。このことから、収差を考慮しないシミュレーションの結果は

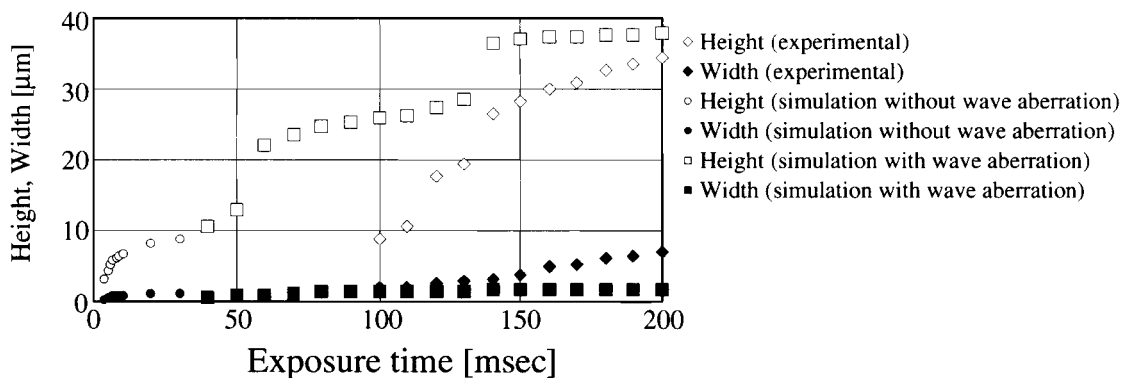


Fig. 3.23 Relationship between simulation and experimental results

実験結果と一致せず、実際の樹脂内部の光量分布を的確に表していないことが分かる。このことは、今回使用したレンズは理想的なレンズに比べてエネルギーが一点に集中せず、臨界硬化エネルギーを越える領域がある領域に分散していることを示唆している。

一方、レンズの収差を考慮したシミュレーションでは、露光時間、構造物の高さ・幅ともに硬化実験の結果と数倍程度のずれに収まっていることが分かる。このことより、収差を考慮したシミュレーションでは、樹脂の硬化形状がほぼ推測できるものと思われる。硬化開始直後の構造物の幅は、シミュレーション結果とほぼ一致しているが、露光時間が長くなるにつれて、シミュレーション結果よりも次第に大きくなっている。これは、今回シミュレーションを行う際に考慮しなかった樹脂の化学的な硬化反応によるものだと考えられる。このため、光量が臨界エネルギーに達していない部分にも硬化が促進され、シミュレーション結果と違った結果を示したものと考えられる。

3.6 マイクロ構造物の試作とその考察

露光時間が短いほど樹脂の最小硬化単位お小さいものが得られるが、硬化が不十分なために造形中に倒れたり、樹脂の硬化収縮による内部応力のため変形したりすることがある。従って、実際に構造物を製作する場合には、硬化単位が小さく、なおかつ、硬化が安定する露光条件を見いださなければならない。

シミュレーション結果をもとに Fig. 3.24 に示すマイクロ構造物の試作を行った。

縦横 $84 \times 88 \mu\text{m}$ の領域に一辺 $6 \mu\text{m}$ の六角形のセルが 39 個から構成されるハニカム構造を製作した。

Fig. 3.24-(a) 左側にある比較的大きな構造物は補強のためのものである。シミュレーションと硬化実験の結果をもとに露光時間を 220msec と設定したところ、硬化単位は高さ $29 \mu\text{m}$ 、幅 $2.7 \mu\text{m}$ 、アスペクト比は 10.7 と得られた。ただし、この硬化物は積層を行っておらず、1層のみの硬化を行った。このとき必要とした製作時間は約

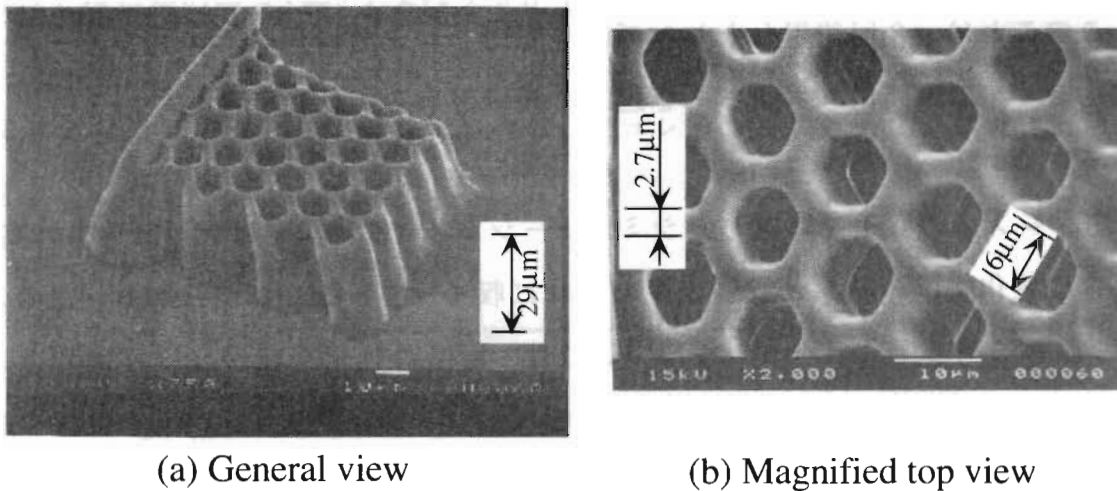


Fig. 3.24 SEM photographs of microstructures (honeycomb shape)

25分であった。

写真を見ると、造形物が左へ傾斜しているように見える。これは、樹脂の硬化収縮により変形したものである。積層されたマイクロ構造物を製作する場合には、このような内部応力による変形が大きな問題となる。従って、マイクロ構造物を製作する場合には、内部応力を低減する手法を検討しなければならない。

3.7 まとめ

表面張力の影響や酸素阻害による未硬化層の影響を受けにくい内部硬化式の光造形法を提案し、造形装置の設計・試作を行った。提案した方法は樹脂液中に紫外線を集光することにより樹脂を選択的に硬化させることができる。

樹脂の硬化形状を予測するために、樹脂内部の焦点近傍の3次元光量分布をもとめ、硬化形状を求めるシミュレーションを行った。これをレンズに生じる収差を考慮しない場合と考慮する場合について行った。

均一な膜厚を塗布したスライドガラス上で、露光時間を変化させることによりさらに、構造物の高さが変化することを硬化実験により明らかにした。このことから、

樹脂が樹脂液面下で選択的に硬化することを確認した。

つぎに、硬化実験の結果とシミュレーションの結果の比較を行った。収差を考慮しないシミュレーションの場合は、硬化が開始する露光時間自体が硬化実験と大きく異なった。また、硬化開始直後の形状もシミュレーション結果の方が実験結果よりも小さく、硬化の成長速度も急激であった。

一方、収差を考慮した場合では、露光時間、硬化高さ・幅ともに硬化実験の数倍のずれに収まった。このことより収差を考慮したシミュレーションでは、樹脂の硬化形状がほぼ推測できるものと思われる。実験結果の硬化開始直後の幅は、シミュレーション結果とほぼ一致しているが、露光時間が長くなるにつれて、シミュレーション結果よりも次第に大きくなっている。これは、樹脂の化学的な硬化反応によって光量が臨界エネルギーに達していない部分でも、硬化反応が進んだためだと考えられる。

シミュレーション結果と硬化実験から分かったことを以下に要約する。

- 高さ方向に関しては、樹脂の臨界硬化エネルギーを予め求めておくだけで硬化形状を予測することができる。
- 硬化形状は光量分布に依存するため、収差の小さな光学系を採用することでより高分解能のものが得られる。

さらに、微小構造物の製作を行った。試作したハニカム構造物は $84 \times 88 \mu\text{m}$ の領域に1辺 $6 \mu\text{m}$ の六角形のセル 39 個から構成されている。硬化単位は高さ $29 \mu\text{m}$ 、幅 $2.7 \mu\text{m}$ 、アスペクト比は 10.7 であった。この結果より従来法と比べて高分解能であることを示した。

これらのことから、提案した内部硬化式光造形法はマイクロマシンの製作方法として極めて有用な方法といえる。

硬化形状のシミュレーションにおいては、今後樹脂液中での光の散乱や重合反応を考慮したシミュレーションモデルを導入することによって、より精度の高い形状の予測が可能である。

第4章

平面露光型光造形法とその装置開発

4.1 はじめに

第3章では、自由液面法と規制液面法の特長を兼ね備えた内部硬化式光造形法の提案を行った。光造形法において高分解能を実現するためには樹脂の最小硬化単位を小さくする、積層膜厚を薄くするなどの方法が考えられる。

しかしながら、いずれの場合においても相対的に露光面積や露光回数が増大することになり、結果的に製作時間が長くなるという欠点を持つ。この欠点を克服するために高速で大量生産を目的としたファイバ・マルチビーム法が提案されている²⁵⁾。

本章では、製作時間の短縮を図るため平面露光型の光造形装置の設計・試作を行った。試作を行った装置はUV光源、シャッタ、1列5本のファイバアレイから構成されている。シャッタとファイバアレイは可変マスクとして使用する。提案する可変マスクはドットインパクトプリンタのヘッド部、光ファイバアレイから構成されており、可変マスク上の任意の形状を樹脂に転写することができる。さらに光ファイバ出射端の照度分布を求めることによりファイバアレイの可変マスクとしての可能性を検討し、本装置の有用性を樹脂の硬化実験によって確認した^{26, 27)}。

4.2 平面露光型光造形法の原理

Fig. 4.1 に示すように、従来の光造形法はレンズによって集光した光を、樹脂へ1点1点露光を行っていた。このため造形物の製作時間が長くなるという欠点を持っていた。そこで、この欠点を克服するために平面露光式の光造形法に注目した。

平面露光タイプの光造形法として一般的なものに、マスクを利用した方式(マスク法)があげられる。この方式は、予め所望の硬化形状のフォトマスクを製作しておき、そのフォトマスクに光を照射し、マスクを透過した光でもって、露光を行うものである。半導体の露光装置はマスク法が一般的で、リソグラフィ技術としてすでに確立されている。しかしながら、マスク法は製作する形状が複雑になればな

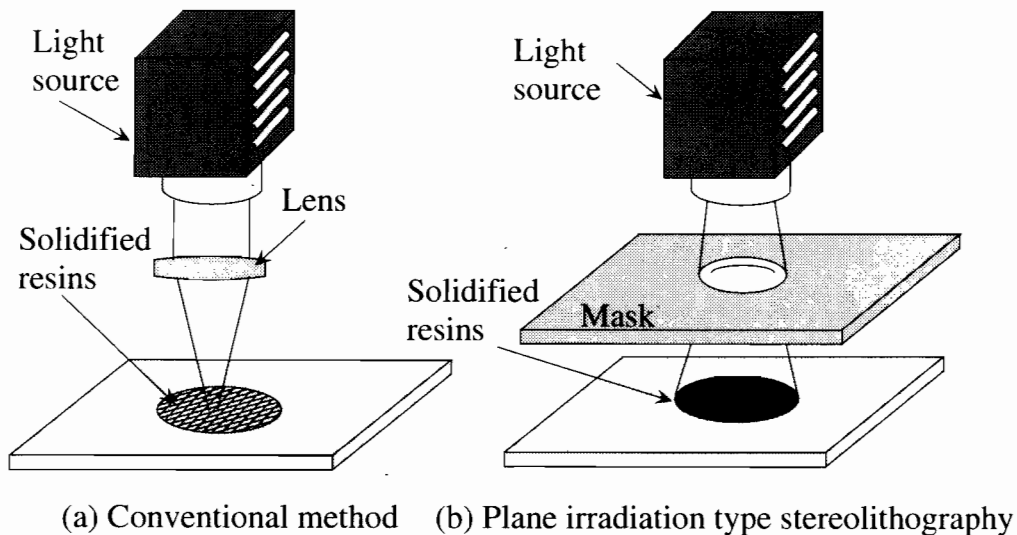


Fig. 4.1 Conventional stereolithography method and plane irradiation type stereolithography method

るほど用意しなければならないマスクの数が増えていくため、実用的ではない。

そこで、複数のマスクを使用することなく、自由に形状を変えることができるマスク(可変マスク)を用いて露光を行うことができれば、上記のような問題は解決する。従って、平面露光方式を実現するために解決しなければ重要な課題は、可変マスクの開発といえる。可変マスクの仕様を以下に示す。

- マスクの形状が容易に変えられること。
- 紫外線に対して劣化しないこと。
- 光の透過性がよいこと。
- マスク透過直後の光が回折の影響を受けにくいこと。

このような仕様の可変マスクとして、まずはじめに思いつくのは、液晶ディスプレイである。液晶は、2枚の偏光板の間に液晶が挟み込まれた構造となっている。液晶に電圧をかけることにより液晶の分子構造が変化することで光の透過・遮断をコントロールするデバイスである。一般的な液晶ディスプレイの場合、目に有害な紫外線を透過しないように偏光板部分において紫外線を吸収するようになっている。また、液晶自身が紫外線を吸収するため変質するという現象が起こった。このため、液晶を可変マスクとして採用することを断念した。

Fig. 4.2 に示すように、本研究で提案する可変マスクは、シャッタ部とファイバアレイ部から構成されている。シャッタ部は、光源からの光を透過・遮光する機能を持ち、透過・遮光する光の場所を制御することにより、ファイバアレイ上に投影される図形を任意に変化させることが可能である。ファイバアレイ部は、シャッタから透過した光、すなわち断面形状を樹脂上に露光する役割を担っている。提案する可変マスクの構造は、ファイバ1本に対しシャッタを1基、設置する予定である。従って、シャッタの数とファイバの数は同数となる。

元来、光ファイバは、効率よく光のエネルギーや信号を伝送するように製作されている。そのため、紫外線に対する劣化やファイバ内の光の吸収は考慮しなくてもいい。従って、可変マスクを構成する材料として、光ファイバーは適していると思われる。

ファイバアレイを用いた平面露光型光造形装置の解像度はファイバアレイの集積度によって決定される。従って、微小部品を製作するためには、できる限り径の小さいファイバを利用することで、ファイバアレイの集積度を高めなければならない。

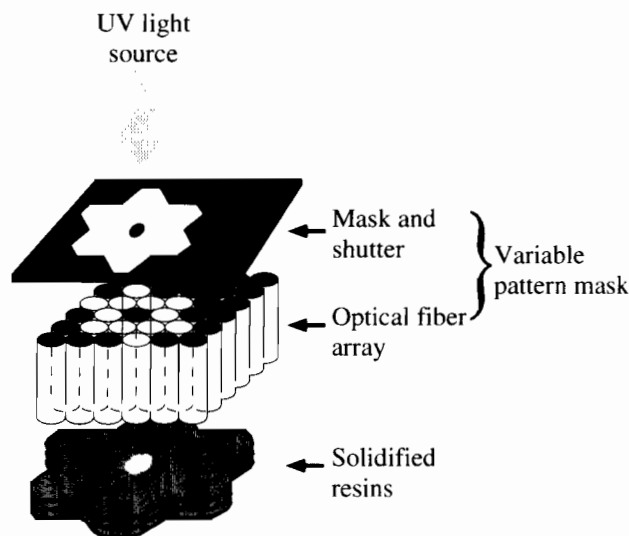


Fig. 4.2 Concept view of plane irradiation type stereolithography method

3次元の立体造形を行う場合には、1点1点露光を行っていた従来の光造形法と同様に、ある層の硬化が終わるとベースプレートを沈下させ、新たに樹脂層を補充し硬化させる。この繰り返しによって造形物を製作することが可能である。

平面露光方式の利点を以下に述べる。

- 平面形状を一度に露光するため、造形時間の短縮が図れる。
- 光を走査する必要がないため、NCテーブルやガルバノミラーといった高価な機器を使用しなくても良い。
- 広範囲を露光するため、中空構造を持つ構造物の製作も可能である。

本研究では、平面露光型光造形法の基礎的な研究として、可変マスクの基本的な構成要素である1列5本からなるファイバアレイを用いて実験を行った。1列5本からなるファイバアレイを平面上で走査することによって平面を露光していく。可変マスクを構成する単純な機構を用いて、どのくらい製作時間を短縮することができるのかを、照度分布計算と樹脂の硬化実験から検証を行った。

4.3 光ファイバ出射光の照度分布計算と硬化実験

第3章で述べたように樹脂の硬化形状は、照射される光の照度(光量)に依存する。そこで、可変マスクからの照度分布を光ファイバ式変位計の原理^{28, 29)}を利用して照度分布をもとめた。さらに、照度分布の結果を利用することでファイバアレイの最適設計を行った。

4.3.1 照度分布の推定

提案する光ファイバが可変マスクとして機能するか照度分布を求めることによって検討を行った。

照度分布を求める際、光ファイバ式変位計の原理を利用した。Fig. 4.3において、光ファイバ入射面に対して角度 ϕ を持った光線を入射すると出射端では角度 ϕ を持った光線が出射される。出射端面から距離 d 離れた場所での照度 I は、 0° から

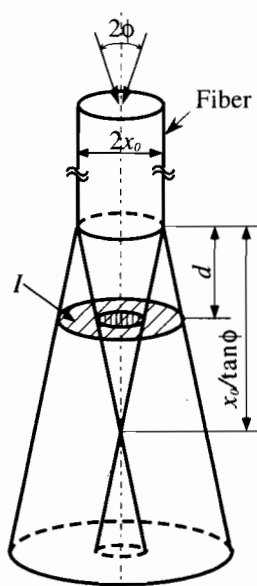


Fig. 4.3 Emission of ultraviolet rays from a fiber

ϕ_{max} までを n 等分した各角度における平均値を用いて表すものとする。次式のように表すことができる。

Table 4.1 Parameters for simulation

Core diameter of fiber	25 μm
Clad diameter of fiber	62.5 μm
Distance between fibers	125 μm
Angular aperture	5.6 $^\circ$
Number of divisions: n	23

(i) $k < 3$ なる関係が成立するとき、出射光の中央部が重なり合い、周辺部の2倍の照度となる。そのときの照度は Eqn.(4.1) で表される。

$$I = \frac{1}{n} \sum_{\phi=0^\circ}^{\phi_{max}} \frac{4I_o}{(k+1)(k^2-2k+5)} \quad (4.1)$$

ただし、 $k = \frac{2d \tan \phi}{x_0} + 1$

(ii) $k \geq 3$ なる関係が成立するときは、出射光は互いに重なり合うことがないため、中央部の照度は0となり、周辺部のみに光が出射され次式で表される。

$$I = \frac{1}{n} \sum_{\phi=0^\circ}^{\phi_{max}} \frac{I_o}{4(k-1)} \quad (4.2)$$

ここでファイバ出射端における照度を I_o 、ファイバのコア半径を x_0 とした。

シミュレーションに使用した諸定数を Table 4.1 にあげておく。

Fig. 4.4 にファイバ出射端からの距離 d を 300 ~ 1000 μm と変化させた場合の照度分布のシミュレーション結果を示す。シミュレーション結果を見ると $d=300\mu\text{m}$ において光の拡がり方はコア半径の約2倍、700 μm では約4倍に光が拡散していることが分かる。一方、照度は $d=300\mu\text{m}$ において出射端の約1/2倍に700 μm では1/4倍に減衰することが分かる。

しかし、シミュレーション結果をそのまま硬化実験に使用することはできない。得られた結果を硬化実験に用いるためには、このシミュレーション結果を何らかの方法で校正する必要がある。ここでは、Fig. 4.5 に示すようにスクリーン投影法を

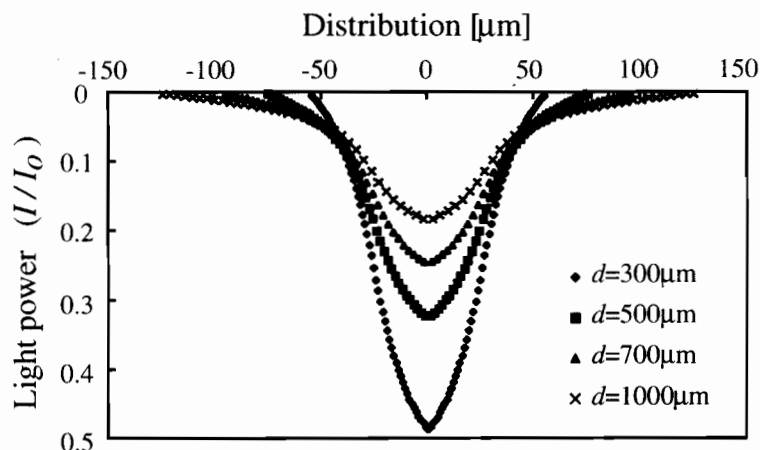


Fig. 4.4 Simulation results of light power distribution with an optical fiber

用いて実際の照度を求め、シミュレーション結果を較正することにした。光ファイバから出射された光をスクリーンに投影し、そのスクリーンに投影された映像をCCDカメラで読みとり、画像処理を行うことによって照度分布を求めた。

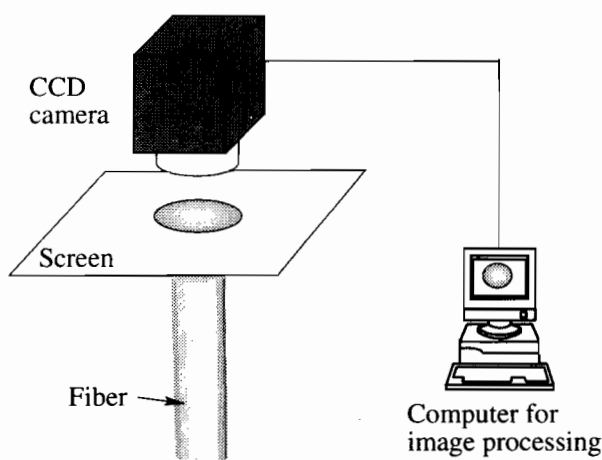


Fig. 4.5 Screen projection method

Fig. 4.6 にスクリーン投影法によって求められた照度分布を示す。ピーク値における照度比を比べると、 $d = 300\mu\text{m}$ の時、シミュレーション結果では 0.48、スクリーン投影法では 0.46 となる。同様に $d = 1000\mu\text{m}$ の時、シミュレーション結果では 0.18、スクリーン投影法によって求められた照度分布は 0.2 となり、良好な結果が得られ

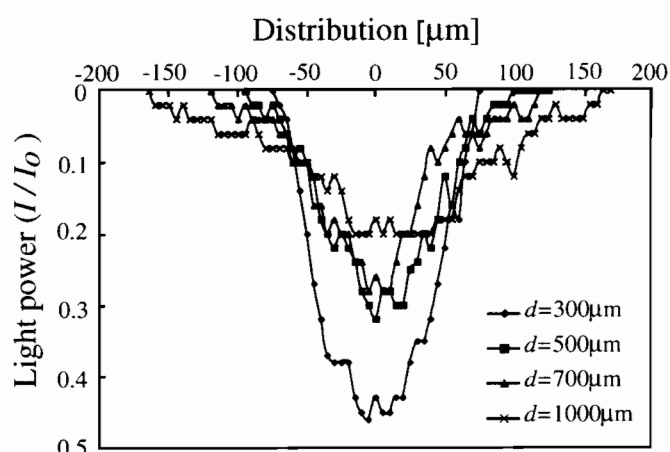


Fig. 4.6 Light power distribution using screen projection method (experimental value)

ていることが分かる。しかし、光の拡がり方は距離 d が大きくなるにつれてスクリーン投影法で測定した結果の方が大きい値を示している。これは出射された光がスクリーン表面で散乱し、実際より大きい拡がり方を示したものと思われる。これらの結果からシミュレーション結果は実際の照度分布と定性的に一致しているものと考えられる。この結果を利用して可変マスクの基本構成要素となる光ファイバを2本並べたときの照度分布のシミュレーション結果を Fig. 4.7 に示す。この時、ファイバのコア径を $25\mu\text{m}$ 、出射端からの距離を $300, 500, 1000\mu\text{m}$ とした。またファイバの中心間距離が小さいほど形成される構造物の表面形状は滑らかになることは容易に推測できる。そこで中心間距離は隣り合ったファイバが接している状態である $125\mu\text{m}$ とした。

シミュレーション結果から分かるように、2つの大きなピークを持つ波形が得られ、ピーク間隔はファイバの中心距離とほぼ一致している。

以上の結果から、照度、光の拡がり方とともに出射端からの距離 d に依存することが分かった。ここで樹脂に照射を行ったとき、硬化するかどうかを考察しておく。出射端からの距離が $1000\mu\text{m}$ の時、照度比のピーク値は 0.2 程度である。例えば、出射端の照度が 4.3 W/m^2 のとき、 $d = 1000\mu\text{m}$ の照度は 860 mW/m^2 となる。一般に光造形で用いられる樹脂は臨界硬化エネルギーを越える紫外光を照射しない

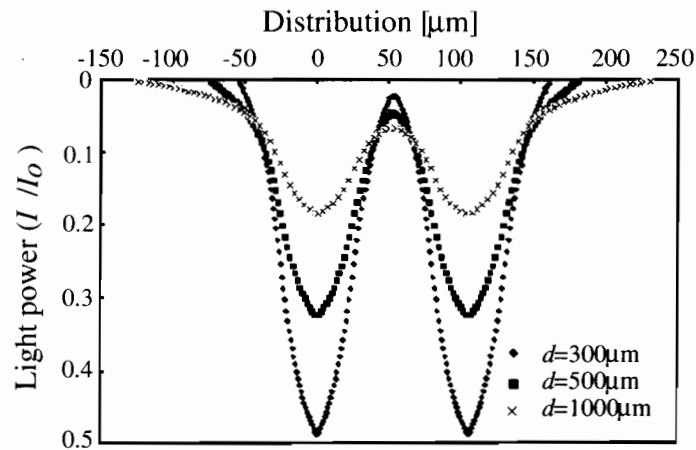


Fig. 4.7 Simulation results of light power distribution with 2 optical fibers in a line arrangement

と硬化しないことは、前述したとおりである。今回使用した紫外線硬化樹脂、日本合成ゴム製 SCR-300 において波長 365nm を照射したときの臨界硬化エネルギーは約 64 J/m^2 と分かっている。従って、 $d = 1000\mu\text{m}$ のとき、約 74 秒間照射することによって硬化するものと思われる。このことから光ファイバアレイが可変マスクとして使用可能であることが示された。

硬化物の造形精度を向上させるためには硬化単位を小さく、照度分布は一様な分布が望ましい。また、製作速度の向上を目指すためには高い照度が必要になる。従って、可変マスクの仕様としてファイバ中心間の距離を小さく、出射端からの距離を小さくすることが求められる。

4.3.2 照度分布検証実験

照度分布から樹脂の硬化形状を求めるために様々な手法が提案^{12, 15, 17, 18, 20)} されているが、樹脂の重合反応の適当なモデルや樹脂液中における光の散乱など、複雑な要因が樹脂の硬化形状には絡んでいるため、精度のよい結果が得られていないのが現状である。そこで、本節では実際に樹脂に光を照射することで樹脂を硬化さ

せ、その硬化形状をもとに可変マスクの設計を行うことにした。Fig. 4.8に硬化実験を行うために作成した実験装置の概略図を示す。光源から出た光はシャッタを通

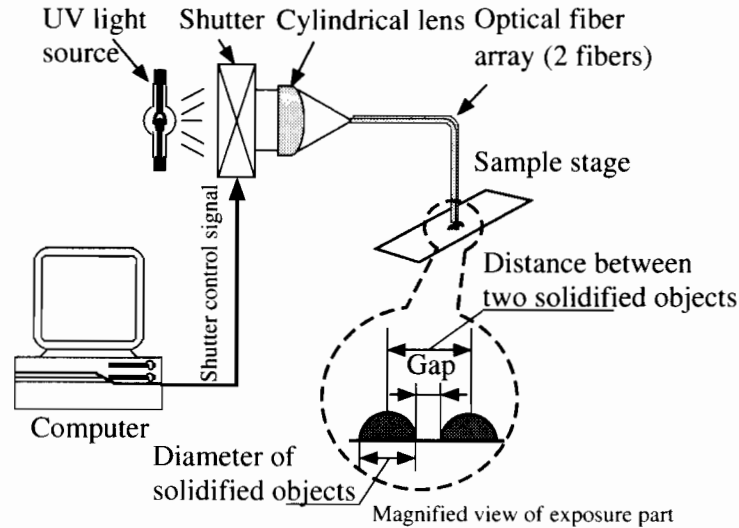


Fig. 4.8 Experimental setup for curing experiment

り、シリンドリカルレンズによってファイバ入射面で焦点を結ぶ。これはファイバに入射する照度を大きくし、露光時間を少しでも短縮するためである。また、コンピュータを用いてシャッタを制御することにより任意の露光量を設定することができる。ファイバを出射した光は試料台上の $100\mu\text{m}$ 厚の樹脂を硬化させる。Fig. 4.9に照射時間と硬化径の関係を表したグラフを示す。出射端からの距離 d が大きくなるにつれて、硬化径は増加する傾向にあることが分かる。また、ファイバへの入射光をシリンドリカルレンズにて集光したため照射時間は見積もった値よりも飛躍的に短くなっている。照射時間が1秒以下の場合、 d の変化によらず、露光不足のため未硬化部分が多く硬化形状がはっきりとしなかった。従って、硬化反応が十分に行われることと、製作時間を短縮するために露光時間を2秒と設定する。造形精度を向上させるためには硬化単位を小さくする必要があるため出射端から樹脂表面までの距離も $100\mu\text{m}$ と決定する。

このとき問題となるのは、樹脂の硬化形状である。隣り合ったファイバとの間隔が

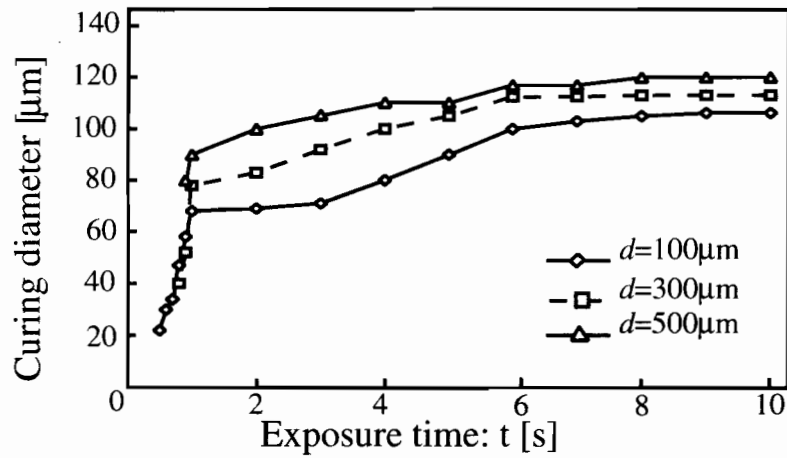


Fig. 4.9 Relationship between curing diameter and exposure time with 2 optical fibers in a line arrangement

125 μm であるのに対し，照射時間 2 秒，出射端からの距離 100 μm のとき，樹脂間の間隙は約 55 μm となる．このままでは硬化形状の表面に凹凸が生じるため，Fig. 4.10 に示すように分割露光を行うものとする．

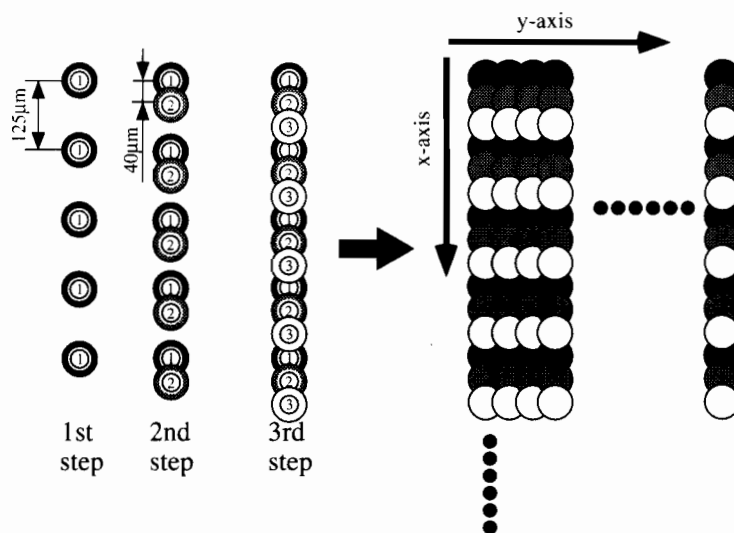


Fig. 4.10 Divided exposure method

まず最初に 125 μm 間隔で露光を行い，次に最初の位置から y 軸方向へ 40 μm 離れた位置へ露光する．最後に最初の位置から 80 μm 離れた位置へ露光することによっ

て平面形状を得ることができる。ここで、造形を行う際、x, y 方向のピッチを固定とせず、任意の値をとるようにすると造形物の分解能はさらに向上する。しかしながら、本章では提案を行った方法における造形速度の向上を確認することが主な目的であるため、x, y 方向ともに $40\mu\text{m}$ に固定とした。

4.4 平面露光型光造形装置の設計と試作

シミュレーションと硬化実験の結果をもとに平面露光型光造形装置の設計と試作を行った。平面露光型の光造形装置には、従来の1点露光型と違って以下のような設計上の留意点がある。

1. 1点露光型に比べて、照度の大きな光源を必要とする。
2. 広範囲を一度に硬化させるため、樹脂の硬化収縮による影響が大きい。
3. 紫外光がマスク透過直後(ファイバアレイ出射直後)に回折の影響を受けるため、高精度の造形物を製作することは難しい。

1点露光方式では、光源から出た光を光学系で集光することで、焦点近傍では非常に高い照度を得られた。しかし、提案する平面露光方式では、1つの光源をいくつもの点に分割するため、小さな照度しか得ることができない。これには、1つの光源から光を分割するのではなく多数の光源を用意するか、照度の大きな光源を用意する必要がある。また、2.2.2節で述べたように、広範囲を一度に露光しようとする硬化収縮によって変形を生じるため、硬化実験を通して収縮の小さな露光条件を求める必要がある。ファイバ出射端直後の回折の影響に対しては、ファイバの出射端と樹脂表面との距離をできる限り近づけることで、回折の影響をできるだけ小さくした。

Fig. 4.11 に平面露光型光造形装置の概略図を示す。光源にはレーザに比べてコストが安く、光ノイズが少ない水銀ランプを使用している。光源から出た光線は硬化

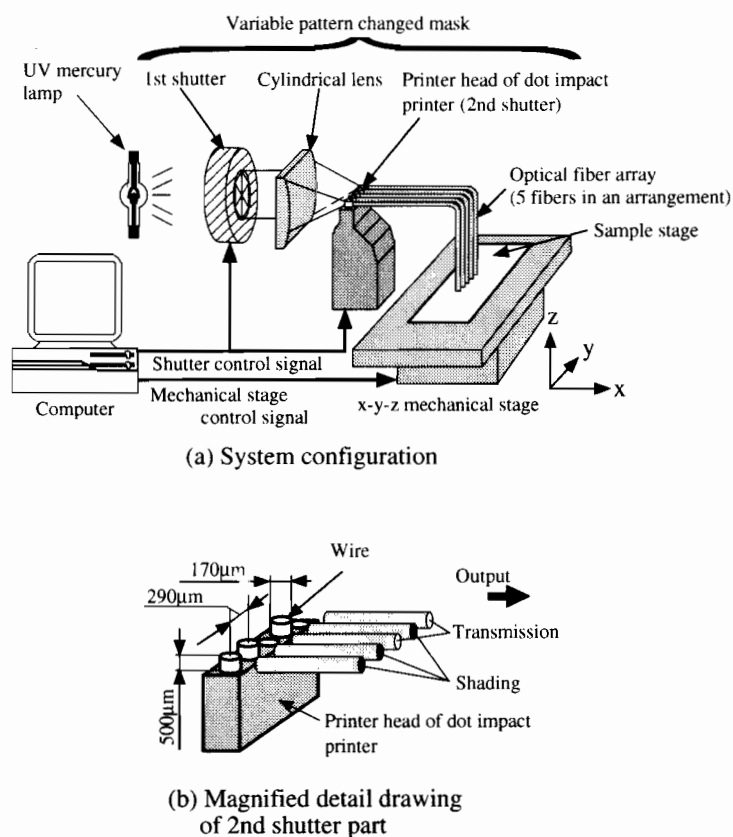


Fig. 4.11 Outline of plane irradiation type micro stereolithography equipment

実験の実験装置と同様，シリンドリカルレンズを経て，ファイバアレイ入射端面で焦点を結ぶよう光学系を設計した。

シャッタは1次シャッタと2次シャッタがある．可変マスクの心臓部となる2次シャッタにはシリアルドットプリンタのヘッド部を用いた．使用したプリンタヘッドは5Vの電圧を端子に印加することによってインパクトワイヤが4mm突き出す構造である．そのワイヤの突出によって光源からの紫外光を遮る．突出するワイヤの直径は $170\mu\text{m}$ ，ワイヤの中心間距離は $290\mu\text{m}$ と光ファイバのコア径より遙かに大きいため遮光するには十分といえる．今回は，このプリンタヘッドのワイヤを5ドット使い，5本のファイバアレイに接続し，2次シャッタとして採用した．そして，1次シャッタは2次シャッタが露光パターンを変更しているときに光源からの光を遮るために使用する．

ファイバアレイを通過した紫外光はファイバ端面から出射される。出射端は都内合ったファイバが接している状態，すなわちファイバの中心間距離が $125\mu\text{m}$ で5本並べて配置した。このシャッタ部からファイバアレイ部を本研究では可変マスク部と呼ぶことにする。また，前節で述べたように硬化物の表面に凹凸を生じさせないために微動ステージで x, y 軸方向にステージを移動させることによって分割露光を行う。出射端から樹脂表面までの距離は z 軸方向の微動ステージで $100\mu\text{m}$ を保つよう制御を行っている。

4.5 マイクロ構造物の試作とその考察

Fig. 4.12 にこのシステムを用いて製作した構造物の SEM 写真を示す。製作した

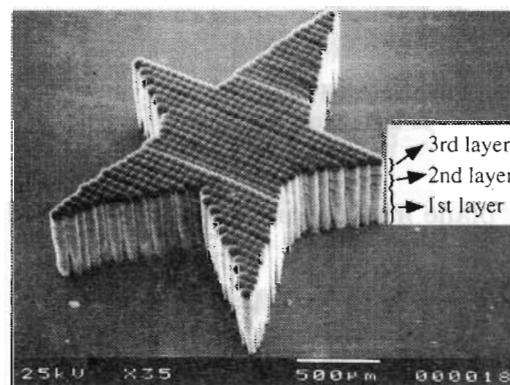


Fig. 4.12 SEM photograph of fabricated microstructure (shape of star)







構造物は1辺 1.5mm ，高さ $500\mu\text{m}$ からなる星形の構造物で1層あたり画素数 600 の点から構成されている。製作条件は出射端からの距離 $100\mu\text{m}$ ，露光時間 2 秒，積層数は 3 である。

写真を見ると1層目の積層厚さが約 $300\mu\text{m}$ に対して，2，3層目の厚さは約 $100\mu\text{m}$ となっている。これは提案する造形装置の積層方法に起因しているものと思われる。本造形装置は自由液面法を採用している。この方式を用いて積層する際，試料台を樹脂液中に沈下させて次層を塗布していく。使用している樹脂は撥水性が高く，第1

層目を塗布する際には、一度試料台全体を樹脂液中に沈めてから再び試料台をゆっくりと引き上げ、樹脂の厚さを調整しなければならない。このとき、表面張力の影響により樹脂の厚さが規定の $100\mu\text{m}$ とならず、約 $300\mu\text{m}$ もの樹脂が塗布されたものと思われる。一方、2層目以降はステージを沈下させるだけで希望の膜厚を塗布することができる。これが1層目の膜厚と2, 3層目の膜厚が異なる原因である。構造物の表面を見ると分割露光を行っているため表面に凹凸はあまり見られず、平坦な面が得られていることが分かる。

ここで、本システムにおける造形速度の向上を確認するために、1点露光方式と製作時間の比較を行った。この時、樹脂の硬化実験の際に使用した実験装置 (Fig. 4.8) を改良し、光ファイバ1本のみを用いるものとし、これを1点露光方式とする。実験の条件として、露光時間は2秒、ファイバ出射端から樹脂表面までの距離を $100\mu\text{m}$ 、積層数3、樹脂の膜厚を $100\mu\text{m}$ とした。さらに、光源、光学系、光ファイバは両者とも同じものを使用しているため、造形物の精度は両者とも同条件となり、結果として造形速度のみを比較の対象とすることができる。また、製作時間とは実際に構造物を製作する際に必要な露光時間と微動ステージの移動時間とし、造形物のデータ作成時間、造形物の洗浄やポストキュアに要する時間などは含まないものとする。

製作時間を比較すると1点露光方式では112分要したにも関わらず、平面露光方式では58分で製作することができた。平面露光方式では、ファイバを増やすことによって造形時における露光回数を減少し、造形速度を向上させることが目的である。しかしながら、ファイバを5本に増やしたにも関わらず、造形速度は2倍程度しか向上していないことが分かる。この原因を詳しく言及するため露光回数に注目した。Fig. 4.12に示した構造物の露光回数は、1点露光方式で600、平面露光方式で230であった。光ファイバを増やしたにも関わらず平面露光方式の露光回数は激減していないことが分かる。このことから露光回数が製作する構造物の形状に依存することが推測される。露光回数と構造物の形状の依存性を実証するために簡単なモデルを考えてみる。露光面積内に稠密な四角形、中空の四角形、稠密な三角形の1層の構造物を製作することを想定し、露光回数を求めると Fig. 4.13 のようになる。

Exposure Area	Shape	Size (unit: pixel)	Number of exposure	
			Plane irradiation type S.L.	Conventional S.L.
30×30 pixel		30 × 30	180	900
		Outer size: 30×30 Inner size: 16×16	180	644
		Base : 30 Height : 30	126	450
45×45 pixel		45×45	405	2025
		Outer size: 45×45 Inner size: 15×15	360	1800
		Base: 45 Height: 45	257	1013

(S.L.: Stereolithography)

Fig. 4.13 Dependence between numbers of exposure and shape of structures

この結果を見ると、露光面積に関わらず稠密な四角形と中空の四角形(45×45pixel)の露光回数は1点露光方式が平面露光方式に比べ5倍多いことが分かる。また、他の形状でも比較してみると約3.5~4倍の範囲で1点露光方式の方が平面露光方式と比べ露光回数が多いことが分かる。これは分割露光によってy方向の15画素分が1回の分割露光によって露光対象となるため、構造物の形状によってファイバアレイが無駄な走査を行っているためである。星形の構造物において1点露光方式と平面露光方式の露光回数の比をとると2.6倍となり、実際の製作時間の比の約2倍と一致しない。これは、微動ステージやシャッタの制御に時間遅れ等の要素が含まれるため、この差が生じたものと思われる。

試作例と露光回数のモデルの評価を通して、光ファイバを用いた平面露光型光造形装置は造形速度を2~5倍程度向上させることが推測される。このことから本システムが製作時間の短縮に大いに有用であることが分かる。

4.6 まとめ

光造形法の欠点である製作時間の問題を克服するため、製作時間の短縮を目的とした平面露光型光造形装置の設計・試作を行った。本装置は、光源、シャッタ、可変マスクから構成されている。提案した可変マスクはドットインパクトプリンタのヘッド、光ファイバアレイから構成されている。可変マスクの設計にあたっては、光ファイバ変位計の原理を利用してファイバから出射する紫外光の照度分布を求め、マスクとして有用であることを確認した。次に、樹脂の硬化実験から可変マスクの設計ならびに露光条件の設定を行った。

以上の結果を利用して装置を製作し、マイクロ構造物の試作を行った。試作した構造物は1辺1.5mm、高さ500 μ m、積層数3、1層あたり600の硬化単位からなる星形の形状である。製作に要した時間は、1点露光方式では112分かかったが、平面露光型光造形法を利用すると58分であった。製作する構造物の形状によって造形速度が依存するものの試作例に関して約2倍もの造形速度の向上を確認することができた。これにより、光ファイバアレイを用いた平面露光型光造形法が製作時間の短縮に適していることを確認することができた。

今後の課題として次の問題を克服することによってさらなる製作速度と造形精度の向上が望めるものと思われる。

- 2次元の可変マスク^{30, 31)}を製作することにより、製作時間が向上する。
- ファイバ出射端に縮小露光光学系を設けることにより、造形精度の向上を図る。

第5章

光造形法によるマイクロ部品的设计・試作

5.1 はじめに

第3章では新たに開発した高分解の内部硬化式光造形法，第4章では製作時間を短縮するために開発を行った平面露光型光造形法について述べた．光造形法は他のマイクロマシンの製作方法と比べて，任意の立体形状を作成可能であるという利点を持つ反面，加工物が樹脂に限定されるという欠点がある．アクチュエータやセンサを製作する上で，樹脂に導電性を付与することは必要不可欠である．樹脂にめっきを施すことにより，得られる構造物の機械的特性も自由に変化させることができるため，歯車や梁といった機械部品を設計する際に，制約を受けることが少なくなるものと思われる．

そこで，本章では無電解めっき法を用いて紫外線硬化樹脂に導電性の付与や樹脂の機械的性質の改善を目標とし，めっきプロセスの確立を目指した．無電解めっき法は液体中で金属を析出させるため，等方的に化学反応が進む．従って，スパッタリングや蒸着などの物理的成膜方法と違い，めっき液が接している部分全体に金属が析出することになる．アクチュエータやセンサを製作する場合，等方的に金属が析出すると製作プロセスに悪影響を与える場合がある．このため，選択的にめっきを施さなければならない場面が少なからず存在する．そこで，選択的に金属を析出

可能な無電解めっきプロセスを確立した³²⁾。めっきを行う金属は、配線材として一般的な銅、磁気材料としても使用可能であるニッケルを検討した。

樹脂にめっきを施す技術を確立したことによって機械的性質の改善、導電性の付与がもたらされた。従来よりも加工材の選択性は改善されたものの、他のマイクロマシンの製作方法と比較すると素材の自由度が低いことは否めない。そこで、高アスペクト比の金属構造体を得る方法としてLIGAプロセスに類似した方法も確立した¹⁵⁾。

次にこれまでの確立された手法を用いて実際にマイクロ部品の設計・試作を行った。設計・試作を行ったマイクロ部品は、振動型接触センサ³⁸⁾、3自由度静電駆動型アクチュエータ^{40, 41)}、静電駆動型パルスモータ^{36, 37)}、進行波駆動型静電アクチュエータ³⁶⁾である。ただし、進行波駆動型静電アクチュエータは製作が困難なことが予測されたため、設計のみを行った。以下にそれぞれの設計、製作プロセス、試作例について述べる。

5.2 光造形法によるマイクロ部品の試作プロセス

5.2.1 導電化樹脂を用いた方法

無電解めっきは電気めっきと同様に液体中で行われるものであるが、めっき金属の析出機構は全く異なっている。電気めっきは、外部から供給される電子が陰極において金属イオンを還元して金属を析出する作用を利用している。これに対して無電解めっきは、基板表面において起こる金属の自己触媒的な化学還元作用を利用するため外部電源の必要がない。このような析出機構の違いに起因して以下のような特長を持っている。

- 絶縁物、半導体、金属などめっきする素材を選ばない。
- 等方性めっきのため、基板の形状や寸法に無関係に均一な厚さのめっき層を得ることができる。電気めっきでは困難な鋭角や深い溝にも一様にめっきが行える。
- 結晶粒が微細、密度が高い、空孔(ポイド)が少ない。

また、電気めっきと比較すると次のような欠点がある。

- めっき液の寿命が短い。すなわち、めっき液の管理が面倒である。
- めっき速度が電気めっきより遅い。
- 電気めっきよりコストが高い。

めっき液の寿命が短いことや、電気めっきよりコストが高い点については研究開発や試作を行っている場合には、あまり問題とならない。電気めっきより析出速度が遅い問題点については、電気めっきと併用することでめっきの速度を向上させることができる。

このように、無電解めっき法には長所・短所がある。しかしながら、マイクロマシンの製作のように組立や後加工といった作業が非常に困難な場合、等方的に金属

が析出するという無電解めっきの最大の特長を生かすことで、製作プロセスの簡素化、合理化が図れるものと思われる。

めっき法の諸プロセス

(i) 等方性めっきの場合

紫外線硬化樹脂 (SCR-610:日本合成ゴム製) へのめっきプロセスは、ABS樹脂上へのめっきプロセスを参考に確立した^{33, 34, 35)}。

Table 5.1 に確立しためっきプロセスを示す。脱脂剤やめっき液などは市販されている無電解銅めっき液 (MCU-HS シリーズ, ワールドメタル製), 無電解ニッケルめっき液 (LINDEN シリーズ, ワールドメタル製) を使用することにした。Table 5.1 にあげためっき工程の中で主要な工程について説明を行う。

- 脱脂 (Process 1,3)

表面に付着している油脂などを除去すると同時に、エッチング液によるぬれ性を改善するために行う。脱脂液には、アルカリ性タイプと酸性タイプがあり、それぞれアルカリ性溶液または酸性溶液に界面活性剤が添加されたものである。めっき皮膜の品質に影響する。

- エッチング (Process 7)

セラミックスやプラスチック上へのめっきの密着性を向上させるために、エッチングを行う。この工程がめっき被膜の外観、品質に最も影響を与える。エッチング工程は素材表面に凹凸をつけ、アンカー（投錨）効果によって密着性を高める。凹凸をつける方法として、素地を化学的に溶解する方法や機械的に凹凸をつける方法があるが、一般的には化学的な手法が用いられる。実際には、密着性が高いめっき皮膜が得られるためクロム酸系のエッチング液を使用することが多い。

- 触媒化処理 (Process 11,12,13)

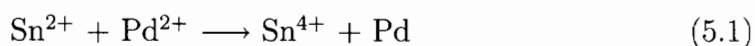
プラスチックあるいはセラミックスなど不導体の材料へめっきを施す場合

Table 5.1 Process flow for electroless plating (Ni, Cu)

No.	Process	Chemicals	Conditions
1	Alkaline degreasing	SA-Cleaner 50g/l (Worldmetal Co.)	52°C - 6min
2	Rinse with water		
3	Acid degreasing	L-505B 200ml/l (Worldmetal Co.)	R.T. - 2min
4	Rinse with water		
5	Rinse with acid	HC-55 50ml/l (Worldmetal Co.)	R.T. - 3min
6	Rinse with water		
7	Etching	Mixture of chromate	63°C - 5min
8	Rinse with water		
9	Neutralization	HCl 50ml/l	R.T. - 3min
10	Rinse with water		
11	Catalyst	PdCl ₂ 0.2g/l, SnCl ₂ 10g/l, HCl 200ml/l	R.T. - 10min
12	Rinse with water		
13	Accelerator	HCl 150ml/l	49°C - 5min
14	Rinse with water		
15	Electroless plating (Ni)	Linden 406-1 (Worldmetal Co.) Linden 406-2 (Worldmetal Co.) 406-1 : 406-2 : Water = 1:1:8	70°C
15	Electroless plating (Cu)	MCU-AHS (Worldmetal Co.) MCU-BHS (Worldmetal Co.) MCU-AHS : MCU-BHS : Water = 1:1:6	64°C
16	Rise with hot water		
17	Dipped to surflic acid	H ₂ SO ₄ 50ml/l	R.T. -3min
18	Rinse with water		
19	Drying in the air		

(R.T. : Room Temperature)

に、還元剤の酸化を開始させるため、素地表面に触媒金属粒子を析出させる。触媒作用を持つ金属として、Pd, Ag, Au, Ptがあるが、通常Pdを使用する。パラジウム粒子を素材の表面に析出させるために、2価のスズイオンを酸化して4価のスズイオンとすると同時に、パラジウムイオンをパラジウム金属イオン粒子に還元する方法が一般的である。



触媒化処理において素地表面で起こっていることを次に示す。

1. キャタリスト工程： Sn^{2+} - Pd^{2+} 錯体の吸着が起こる。
2. 水洗：吸着錯塩は加水分解し、スズは $\text{Sn}(\text{OH})\text{Cl}$ の沈殿物となる。これと4価のスズおよびパラジウム塩が共存している。
3. アクセレータ (促進剤)：沈殿していた第一スズ塩が溶解し、すでに錯塩状態ではなくなっていたパラジウム塩との酸化還元反応によって、金属パラジウムを生成する。

Table 5.1をもとにめっきの析出実験を行った。Fig. 5.1 に紫外線硬化樹脂で作成したテストピースの写真を示す。Fig. 5.2 に各工程の概略とそのときのテストピースの状態を示す。めっきプロセス終了後、テストピース上に Cu, Ni が析

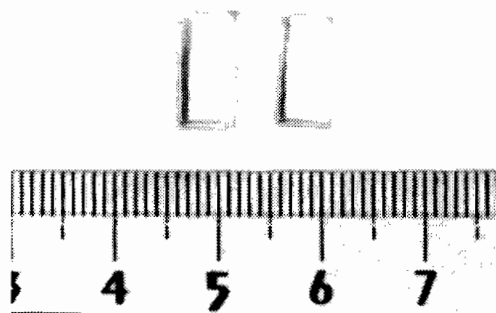


Fig. 5.1 Photograph of test pieces for deposition experiment of electroless plating

出していることが分かる。

しかし、ニッケルの方は金属光沢があるきれいなめっきが行えているにも関わらず、銅の方は金属光沢がない、くすんだ感じの析出となる。この原因として、脱脂不良や表面の過剰エッチングがあげられるが、脱脂やエッチングの条件をいろいろ変化させて行っても改善されることはなかった。

次に析出速度の測定を行った。テストピースは予め面積の半分が隠れるように粘着テープでマスキングを施しておき、めっきをしたところと素材だけのところで段差が生じるようにしておいた。析出時間を 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 時間としたときの析出膜厚を表面粗さ計を用いて測定した。

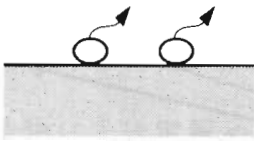
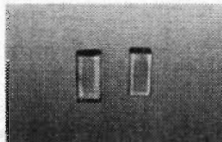
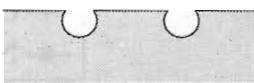
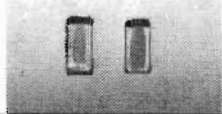
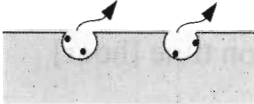
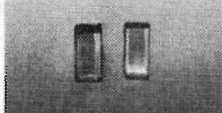
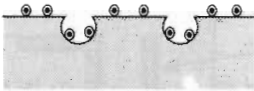
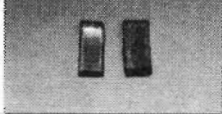
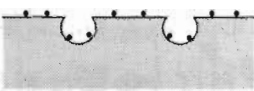
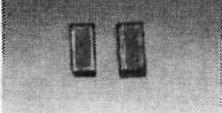

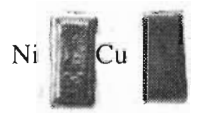
Process	Schematic diagram	Photograph
Degreasing	 Removing of grease, stain and fingerprints	
Etching	 Etching	
Neutralization	 Removing of Cr complex	
Catalyst	 Removing of Pd-Sn complex	
Accelerator	 Removing of Sn, and activation of Pd	
Electroless plating	 Deposition of Ni or Cu	

Fig. 5.2 State of test pieces for each process

Fig. 5.3 に測定した析出時間と膜厚の関係を示す。

ニッケルめっきの方は、析出時間と膜厚の関係がほぼ比例関係を示すのに対し、銅めっきの方では析出時間が1時間を超えたあたりで急激に析出速度が大きくなっている。一般的にニッケルめっき浴は比較的安定であるが、銅めっき浴は不安定であるといわれている。従って、この結果はめっき浴の安定性に起因するものと思われる。析出速度を求めると銅めっき浴、ニッケル浴ではそれぞれ $3.65\mu\text{m/h}$, $3.97\mu\text{m/h}$ と求められた。

(ii) 選択性めっきの場合

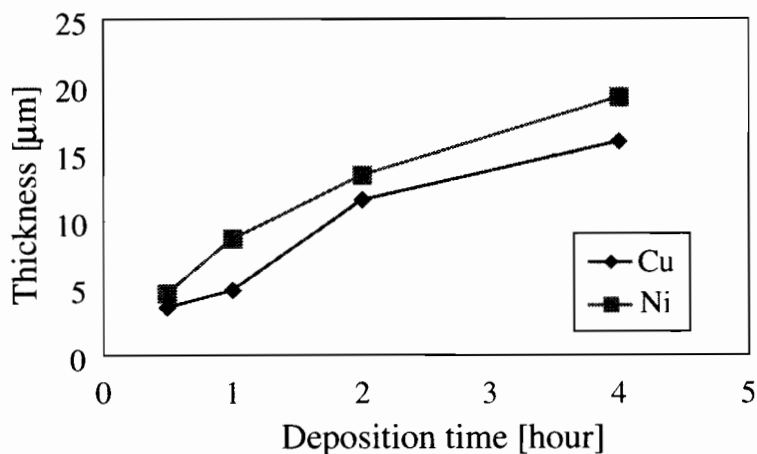


Fig. 5.3 Relationship between deposition time and thickness

Fig. 5.2 に示したように、不導体への無電解めっきの析出機構は、めっき素材に付着した触媒金属核からめっき析出反応が始まり、金属被膜が析出する。すなわち、触媒となる金属核が存在しなければ、金属は析出しないことがわかる。めっき素材である紫外線硬化樹脂中に触媒となる金属核が存在すればその箇所だけ金属が析出するものと思われる。そこで、樹脂液中に触媒となる Pd を混合したものと混合していない 2 種類の樹脂を用意し、選択的にめっきが行えるか確かめた。

実験をする際に、触媒となる Pd を樹脂へ混合する際に、次の 3 つの条件で実験を行った。

- (a) 紫外線硬化樹脂中に直接 Pd を混合する。
- (b) 紫外線硬化樹脂の希釈剤であるトルエンに Pd を混合し、その混合液を紫外線硬化樹脂へ混合する。
- (c) 金属である Pd を希塩酸で溶かして、その溶液を紫外線硬化樹脂へ混合する。

析出実験の手順を以下に説明する。

1. Pd を含まない紫外線硬化樹脂を用いて土台を製作する。
2. Fig. 5.4 に示すように，“卍”型の構造物を光造形法を用いて造形する。この時、使用する樹脂は Pd を含んだ紫外線硬化樹脂とする。
3. 製作した構造物に、無電解めっきの脱脂・エッチング・中和までの工程を行う。
4. 全体にめっきを施す。ただし、析出させる金属は析出が容易なニッケルとした。

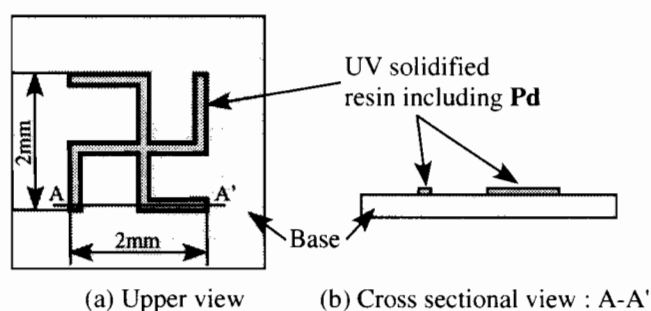


Fig. 5.4 Experiments of selectivity electroless plating

実験条件 (a) ~ (c) のうち、(b) の方法では、全く金属が析出しなかった。これは、トルエン中で Pd は溶解せずに混合液の状態が存在する。このため、時間とともに Pd 成分だけが容器の底に沈殿することになる。従って、樹脂にこの混合液を混ぜても樹脂液中に一様に Pd が存在しないため、金属が析出しなかったものと思われる。

実験条件 (a) で使用した樹脂を用いると、試料の所々には金属が析出するものの全体には析出することはなかった。混ぜる Pd の量を増やしていくと、樹脂中の Pd 粒子が紫外光を散乱させるため、硬化しにくいことも分かった。

実験条件 (c) で使用した樹脂では、Fig. 5.5 に示すように“卍”型のみを選択的にニッケルを析出させることができた。写真を見ると金属の析出が一様ではなく、ムラがあるものの選択的に金属を析出させることが可能となった。この



Fig. 5.5 Photograph of deposited metal “卍” shape structure using selectivity electroless plating method

技術を用いると金属の一般的なパターンニング工程である、レジスト塗布、露光、現像、金属の析出(蒸着)、パターンニング、レジスト剥離といった一連の作業工程の大部分を省略することができるため、マイクロマシンの製作プロセスをかなり簡素化することができるものと思われる。

この時のめっきの条件を Table 5.2 に示す。ただし、Table 5.2は、Table 5.1 と条件が異なっている箇所だけを抜き出したもので、記述がない工程は Table 5.1 の条件に従うものとする。この時、塩酸に混ぜた PdCl_2 の濃度は 0.4g/ml であった。

Table 5.2 Process of selectivity electroless plating

Process	Chemicals	Conditions
Alkaline degreasing	SA-Cleaner 50g/l (Worldmetal Co.)	52°C- 6min
Acid degreasing	L-505B 200ml/l (Worldmetal Co.)	R.T.- 3min
Etching	Mixture of chromate	63°C - 2min
Neutralization	HCl 50ml/l	R.T. - 3min
Electroless plating (Ni)	Linden 406-1 (Worldmetal Co.) Linden 406-2 (Worldmetal Co.) 406-1 : 406-2 : Water = 1:1:8	70°C

(R.T. : Room Temperature)

無電解めっき法を用いた試作プロセス

導電化された樹脂を用いてマイクロ部品を製作する方法について述べる。Fig. 5.6 に製作工程の概略を示す。図中の各工程についての詳細を以下に示す。

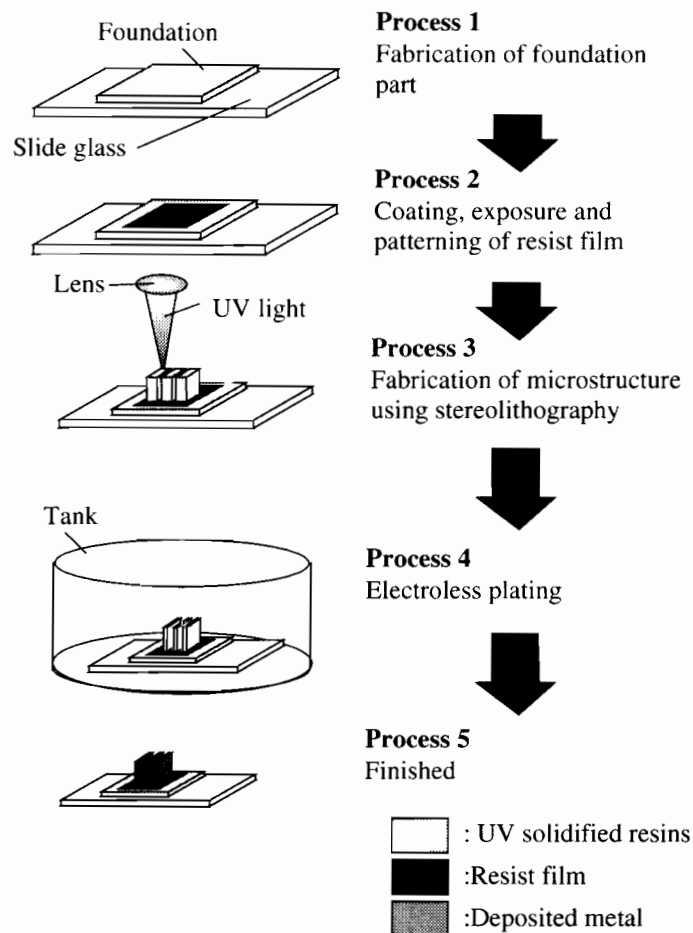


Fig. 5.6 Fabrication process with electroless plating

Process 1 : 土台部の製作

スライドガラス上にいきなりマイクロ構造物を製作すると、洗浄やめっきプロセス時に作用する表面張力や温度変化の影響により構造物が変形をする。この変形により、ひどいときにはスライドガラス上から構造物が剥離してしまうことがある。そこで、この変形を緩衝するために紫外

線硬化樹脂で最初に厚めの土台部を製作する。この土台部を作成しておくことでガラス-土台部、土台部-構造物の密着性も向上するため、構造物が剥離することは少なくなる。

Process 2: レジスト成膜プロセス

アクチュエータやセンサの下部電極を製作する際には、5.2.1 節で開発した選択的無電解めっき法を用いることにした。しかし、電解めっきの析出実験より選択的に金属が析出することは確認できたが、表面に一様に金属を析出させることはできなかった。表面に一様に金属が析出しないと、アクチュエータのように摺動部があるような構造物を製作する際、摩擦力の増大の原因となるためアクチュエータがうまく機能しない可能性がある。そこで、今回選択的無電解めっきプロセスをアクチュエータの製作プロセスに用いないことにした。

無電解めっきプロセスの代わりに採用した方法が、レジスト膜プロセスである。このプロセスは、金属を析出させたくないところを予めレジスト膜で覆っておき、めっきを行う方法である。無電解めっき液中にレジスト膜を浸けておいても、レジスト膜表面には金属は析出せず、紫外線硬化樹脂のみに金属が析出する。これは、今回開発した無電解めっきプロセスが紫外線硬化樹脂の用途に限られるため、このような選択性がある。今回使用したレジスト材 (OMR-800:日本合成ゴム製) の成膜条件を Table 5.3 に示す。

Process 3: 構造物の製作

内部硬化式光造形法もしくは、平面露光型光造形法を用いてマイクロ構造物の製作を行う。

Process 4: 無電解めっき

Table 5.1 で示しためっき条件に従い、無電解めっきを行う。本論文では、めっきの容易さを考慮し、ニッケルめっきを行うものとする。

Process 5 : 完成

洗浄した後，完成となる。

Table 5.3 Process flow of resist coating

No.	Process	Explaining of each process	Conditions
1	Ultrasonic cleaning	Removing of stain	3min
2	Coating of resist	Coating of resist uniformly by spinner	400r.p.m. -10sec + 1000r.p.m. - 10sec
3	Pre-baking	Evaporation including solvents of resist	80°C - 30min
4	Exposure	Hardening of resist	8sec
5	Developing	Developing of resist with developer	3sec
6	Rinse		30sec
7	Rinse with ethanol		Shaking slightly
8	Rinse with water		
9	Post-baking	Improving adhesive property between slide glass and resins	120°C - 30min

5.2.2 LIGA プロセスと類似した方法

電気めっきを利用した新プロセス

これまでは，樹脂の表面に金属を析出させる方法について検討を行ってきた。しかしながら，アクチュエータやセンサを設計する場合において，導電化した樹脂では所望の強度や弾性力を得ることができない場合があった。そこで，光造形法で製作したマイクロ構造物を鋳型として利用し，その鋳型の中に電気めっき法で金属を析出させる LIGA プロセスに類似した方法を検討した。LIGA プロセスは，シンクロトロン放射光を光源に X 線で硬化する PMMA というレジストを用いて高アスペクト比のマイクロ構造物を得る方法である。光源に X 線を使用しているため，直進性がたかく，光と違い波長が短いため高解像度であるという特長を持っている。露光した PMMA を鋳型にして電鍍を施すことによって高アスペクト比をもつ金属マイクロ構造体の製作例が報告されている。

無電解めっき法を採用せずに，電気めっきを採用した理由はアクチュエータやセ

ンサを製作する場合、高アスペクト比を持つ金属構造体の必要性が予想されたため、析出速度の速い電気めっきを採用することにした。ただし、電気めっきは無電解めっき法と異なり等方性めっきではないため、設計や製作がかなり限定される。

Fig. 5.7 に光造形法を用いて金属構造体を得る一般的な方法を示す。

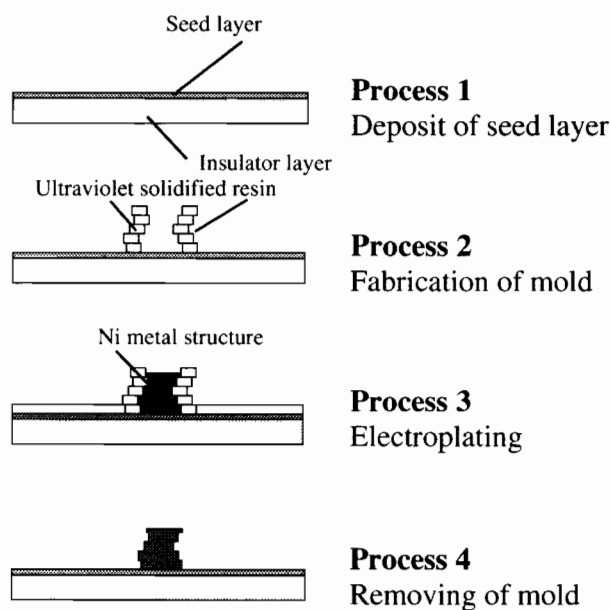


Fig. 5.7 Conventional method to obtain metal microstructure using stereolithography

Process 1

絶縁層，シード層からなる基板を用意する。絶縁層は金属を析出させたくない領域に電流を流さないための措置である。

Process 2

光造形法を用いて鋳型となるマイクロ構造物を製作する。この場合，使用する光造形法は内部硬化式，平面露光型と作成する構造物によって使い分けることになる。

Process 3

非めっき部分を紫外線硬化樹脂で覆い，マスキングを行う。その後，ワット浴

を用いて電鍍を行う。

Process 4

鋳型を除去することによって、所望の微小金属構造体が得られる。

しかし、このような工程は、水平面内のめっき部分の面積が急激に変化する Fig. 5.8 のような形状の場合、面積が変化する面で電流密度が一定とならず、析出金属がマッシュルーム状に盛り上がる現象が起これ、めっき不良の原因となる。

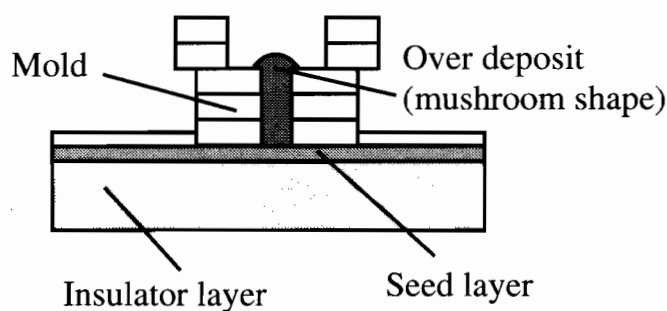


Fig. 5.8 Influence of over deposit

このように断面積が急激に変化する場合は、きめ細かく電流密度を制御する必要がある。実用上、この方法を用いて立体形状を作成する場合には断面積がなだらかに変化するものに限定される。

そこで次のような工程を提案する。提案する方法は、めっき部分が急激に変化する部分まで光造形法で鋳型を作り鋳型と同じ高さまでめっきを行う。そこで、一度めっきを中断し、鋳型およびめっき面にスパッタリングで新たにシード層を形成する。シード層を形成した後、再び光造形法で鋳型を製作し電鍍を行う。その改良した工程を Fig. 5.9 に示す。

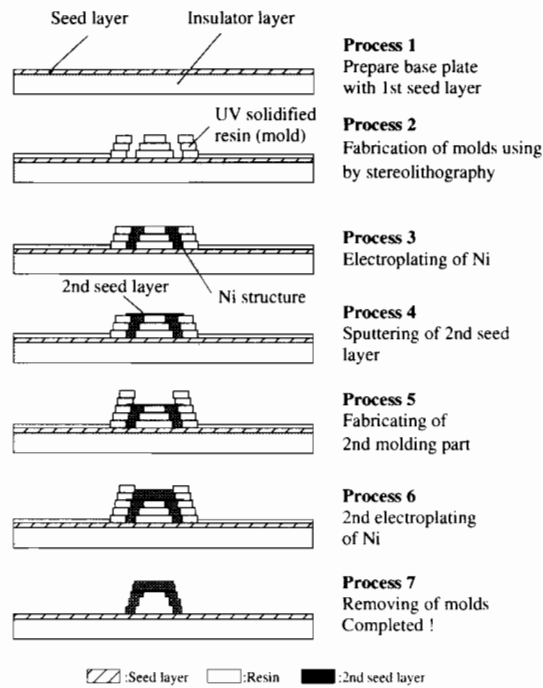


Fig. 5.9 Improved electroplating method to obtain metal microstructure using stereolithography

電気めっきにおける基礎特性

電気めっき法において金属の析出速度は、めっき浴に流す電流密度と密接な関係がある。前節で考案した方法は、両者の関係を正確に把握しておかなければ、マイクロ部品の製作を行うことは困難である。そこで、析出実験によって電流密度と析出速度の関係を確認した。

使用したニッケルワット浴の組成を Table 5.4 に示す。ただし、めっき浴の総量は 500ml とする。Table 5.4 を参考に建浴し、以下の手順で析出実験を行った。

1. 前処理された銅板上に鋳型となる高さ $100\mu\text{m}$ の構造物を光造形法によって作製する。また、めっき面積は 4mm^2 とする。構造物に未硬化のまま残った紫外線硬化樹脂をエタノールで洗浄する。
2. 構造物以外の非めっき部分に金属が析出しないように、紫外線硬化樹脂でマ

Table 5.4 Composite of Watt's bathe

Component of bathe	Quality [g/l]
NiSO ₄ · 6H ₂ O	240
NiCl ₂ · 6H ₂ O	45
H ₃ BO ₃	30

スキングを行う。

3. ニッケルめっき浴により電鍍を行う。なお、実験条件は電流密度 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 mA/mm² で行い、析出時間は、1, 2, 3 時間とした。

鋳型の作製を行う前に土台となる銅板に前処理を行う必要がある。前処理の工程を Table 5.5 に示す。

Table 5.5 Pretreatment process before fabricating molds

No.	Process	Chemicals	Conditions
1	Alkaline degreasing	SA-Cleaner 50g/l (Worldmetal Co.)	50°C - 3min
2	Rinse with water		
3	Acid degreasing	L-505B 200ml/l (Worldmetal Co.)	R.T. - 1min
4	Rinse with water		
5	Rinse with acid	HC-55 50ml/l (Worldmetal Co.)	R.T. - 1min
6	Rinse with water		

(R.T. : Room Temperature)

析出実験の結果を Fig. 5.10 に示す。

Fig. 5.10 を見ると、析出時間と析出高さは比例関係にあることが分かる。析出速度は、電流密度が 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6mA/mm² のとき、それぞれ 10, 24, 40, 55μm/h と求められる。実験では電流密度が 0.8mA/mm² のときも行ったが、電流密度が大きすぎたため表面性状が非常に悪く、析出高さを測定することは不可能であった。

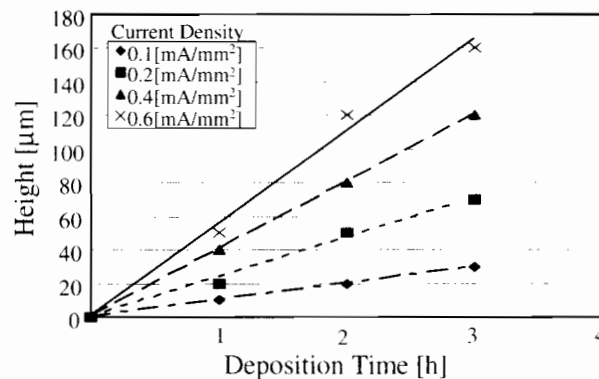


Fig. 5.10 Relationship between deposition time and height under variable density of current

次に、内部硬化式光造形装置を用いて鋳型を作製し、その中へニッケルを析出させる実験を行った。この実験は、ミクロな領域において、マクロな領域で求めためっき条件が適用できるかどうか確認することである。析出条件として、鋳型の大きさを $100 \times 100 \times 100 \mu\text{m}$ 、電流密度を 0.13, 0.26, 0.54, 0.82 mA/mm²、析出時間を 1 時間とした。そのときの SEM 写真を Fig. 5.11 に示す。図から分かるように電流密度が大きくなるにつれ、析出高さも高くなることが分かる。析出した金属構造体の上面を見ると、電流密度が小さいほど滑らかな表面性状が得られることが分かる。電流密度が 0.82 mA/mm² のときは、構造体の高さも均一とならず、表面性状も非常に悪い。

ここで、各電流密度における析出速度を求めると、電流密度が 0.13, 0.26, 0.54 mA/mm² のとき、それぞれ 7, 28, 58 μm/h となる。この値と Fig. 5.10 から得られた析出速度を比較すると、非常に近い値を示している。このことからミクロな領域においてもマクロな領域で得られためっき条件がそのまま適用できることが分かる。

析出した金属構造体の側面部に波打った形状が見受けられる。これは、光造形法で鋳型を作る際に、光の照射ピッチが粗かったため鋳型の表面に凹凸が生じ、その硬化形状がそのまま金属へ転写されたものと思われる。この結果は、さらに高精度な鋳型を用意することで、微小かつ高精度な金属構造体を製作可能であることを示

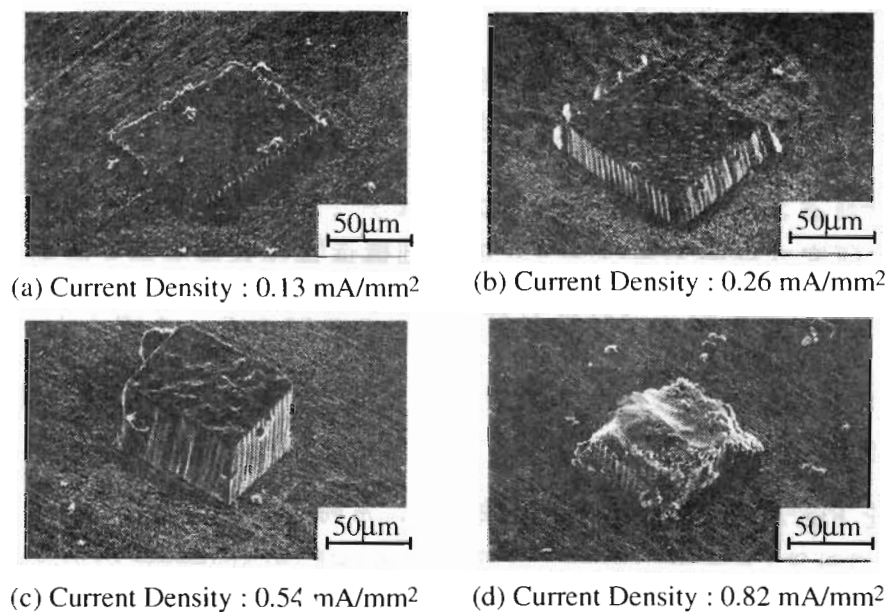


Fig. 5.11 SEM photographs of metal microstructure

峻している。しかしながら、本実験では、鋳型の断面積が 0.01mm^2 以下では金属を析出させることはできなかった。これは、めっき液の表面張力のため、鋳型の内部にめっき液が浸透しなかったものと考えられる。

析出実験の結果より、ミクロな領域でもマクロな領域で得られためっき条件をそのまま適用できることがわかった。また、表面性状を重視する場合は電流密度を低く設定し、析出速度を重視する場合は、 $0.6\text{mA}/\text{mm}^2$ 以下に電流密度を設定する必要があることがわかった。

5.3 振動型接触センサ

5.3.1 製作目的

現在、物体の表面形状を測定するために様々な原理のセンサの開発が行われている。センサは非接触式のものと同接触式のものに分類することができる。非接触式センサの多くは、光を用いて表面形状を測定しているものが多い。光を用いたセンサは非

接触式であるため測定物に変化をもたらすことがない，精度がいい，測定時間が短いなどいろいろな長所を有する．しかしながら，Fig. 3.24に示すようにアスペクト比の非常に高い微細構造物を測定する場合は，光が物体の底まで届かないため，表面形状を測定することが難しい．

そこで，本研究では高アスペクト比の微細構造物の表面形状を測定できるセンサの開発を目指した．本論文で試作を行ったセンサのイメージ図を Fig. 5.12 に示す．試作を行ったセンサは可動電極と固定電極から構成されており，アクチュエータ部とセンサ部を形成する．(同図-(a))．

検出原理を Fig. 5.12-(b) に示す．接触子は，常時アクチュエータによって振動している．いま，接触子が物体に接触していないとき，センサ部で検出される接触子と電極間の容量変化を C_1 とする．つぎに，接触子が物体に接したとき，接触子が物体と接触するために振動子の運動が妨げられる．この時，センサ部で検出される容量変化を C_2 とする．そして，接触の有無を C_1 と C_2 の容量変化の違いから読みとるものである．

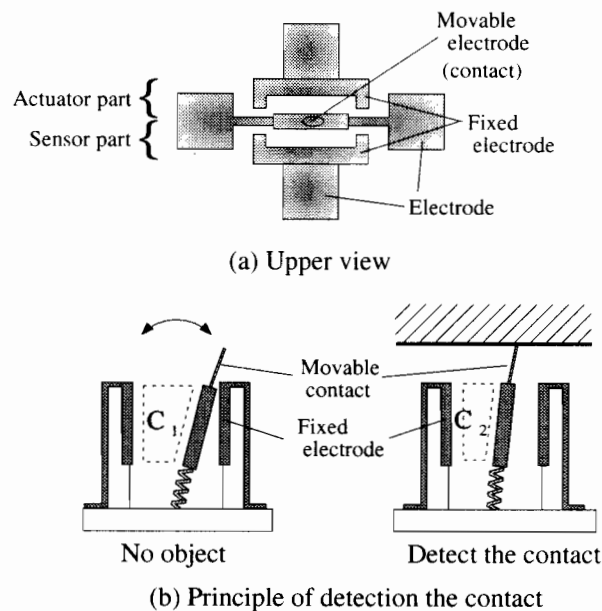


Fig. 5.12 Principle of detection the contact

5.3.2 アクチュエータの設計

気体中の2枚の電極間に電圧を印加する場合、印加電圧を徐々に上げていくとある電圧で放電が起こる。本論文で試作するセンサも構造的にこのような放電が起きる可能性がある。放電がおきると、それによる火花や過電流による破損や破壊の原因になる。そこで、電極間で放電を開始しない安全な印加電圧をパッシェン則³⁹⁾から検討した。

パッシェン則とは、気体の放電開始電圧と気体の圧力の関係をあらわしたもので、

$$V_s = \frac{E_s}{p} \times (pd) \quad (5.2)$$

と表される。従って、電極間の放電は気体の種類、気体の圧力 p 、電極間の距離 d 、によって決定される。ここで、放電開始電圧 V_s 、そのときの電場の強さ E_s をとした。

V_s の値は空気中で1気圧のとき、極小値 $d = 8\mu\text{m}$ 、 $V_s = 325\text{V}$ をとる。

Fig. 5.13 に可動電極の概略図を示す。

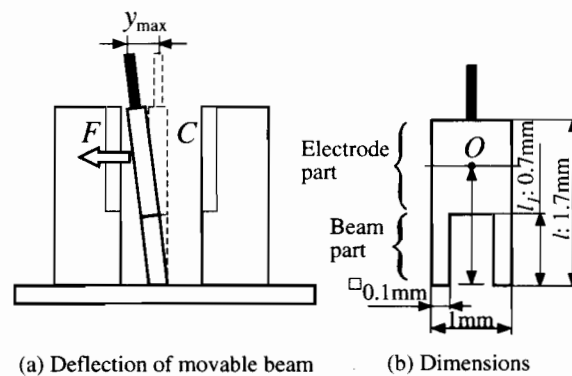


Fig. 5.13 General view of movable electrode part

電極に作用する静電力 F は、

$$F = \frac{\epsilon_0 S}{2} \left(\frac{V}{d} \right)^2 \quad (5.3)$$

と求められる。ただし、梁部の断面2次モーメントを I 、紫外線硬化樹脂の縦弾性係数を E_1 、真空中の誘電率を ϵ_0 、極板の面積を S 、印加電圧を V 、極板間の距離を d とする。

可動電極は、ある程度たわませる必要があるため、Fig. 5.13-(b) に示すように鳥居型の構造とした。また、電極を2本の足で支えるため、足が座屈しないように検討を行った。

検討する梁は、Euler の式を適用すると座屈荷重 W_k は、

$$W_k = 0.25 \cdot \frac{\pi^2 E_2 I}{l_1^2} \quad (5.4)$$

と求まる。

静電力は極板全体に作用するが、ここで可動電極の重心位置 O に集中的にかかるものとした。この時、可動電極の最大のたわみ y_{max} は、

$$y_{max} = \frac{Fl_2^2}{6E_2I}(3l - l_2) \quad (5.5)$$

ただし、極板にかかる静電力を F 、極板重心までの距離 l_2 、可動電極の全長 l 、ポストキュア後の樹脂の縦弾性係数 E_2 とする。

いま、各部の寸法を Table 5.6 に示すように定めると、印加電圧と可動電極のたわみ y_{max} の関係は Fig. 5.14 のようになる。

Table 5.6 Parameters for simulation

Beam length	l_1	0.7mm
width		0.1mm
thickness		0.1mm
Electrode length		1mm
width		1mm
thickness		0.1mm
Electrodes gap	d	200 μ m
Distance to Point O	l_2	1.2mm
Applied voltage	V	50V
Dielectric constant	ϵ_0	8.85 $\times 10^{-12}$ F/m
Young's modulus of resin (before post-cure)	E_1	110MPa
Young's modulus of resin (after post-cure)	E_2	150MPa

ここで、座屈荷重 W_k を求めると、 $W_k = 4.52 \times 10^{-3} \text{N}$ 、極板の荷重は $1.05 \mu\text{N}$ なので、自重によって梁部が座屈することはない。Fig. 5.14 から印加電圧が 50V のとき、

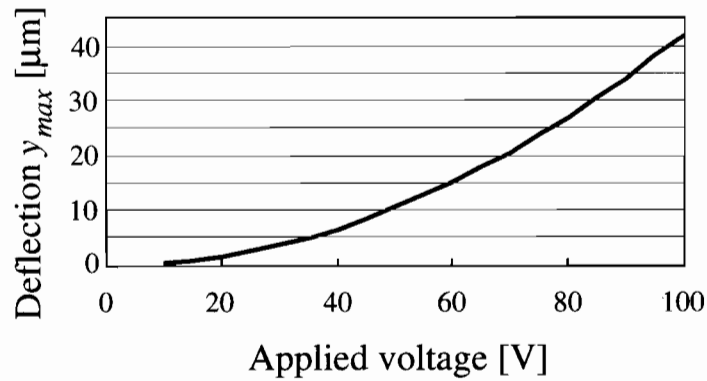


Fig. 5.14 Relationship between applied voltage and beam deflection

梁は $10 \mu\text{m}$ たわむ。

5.3.3 製作プロセス

Fig. 5.15 に振動型接触センサの製作工程を示す。

Process 1

紫外線硬化樹脂を用いてスライドガラス上に土台部分を作製する。土台を作る際には、マスク法を用いて土台の形状に露光を行う。

Process 2

レジスト膜を塗布し、下部電極と導線以外はめっきが析出しないようにマスクングを行う。

Process 3

内部硬化式光造形法を用いて、固定電極ならびに可動電極を製作する。

Process 4

Process 3 で仕上がったものを、そのまま無電解めっき浴の中へ入れる。5.2.1 節

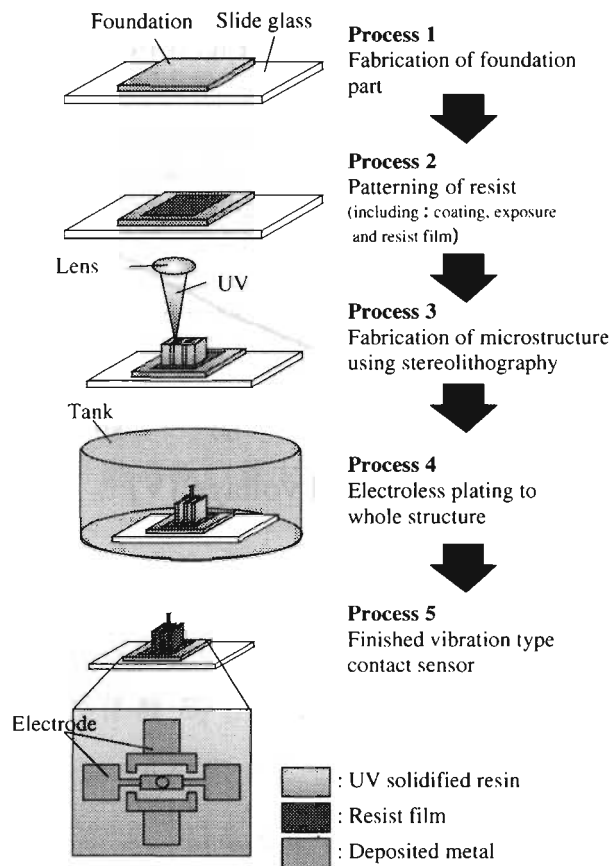


Fig. 5.15 Fabrication process of vibration type contact sensor

で述べたように、レジスト膜には金属が析出せず、紫外線硬化樹脂にのみ金属が析出するため、めっき液の中へつけておくだけで、必要な箇所のみ金属が析出する。

5.3.4 試作例

Fig. 5.16 に製作した振動型接触センサの SEM 写真を示す。Fig. 5.16-(a) は製作したセンサを真上から見たもので、(b) は斜め上から見た写真である。(c) は可動電極のみの SEM 写真を撮ったもので、鳥居型の可動電極が製作されていることが確認できる。これらの写真は、無電解めっきを行う前の写真ですべて表面は紫外線硬化樹脂である。

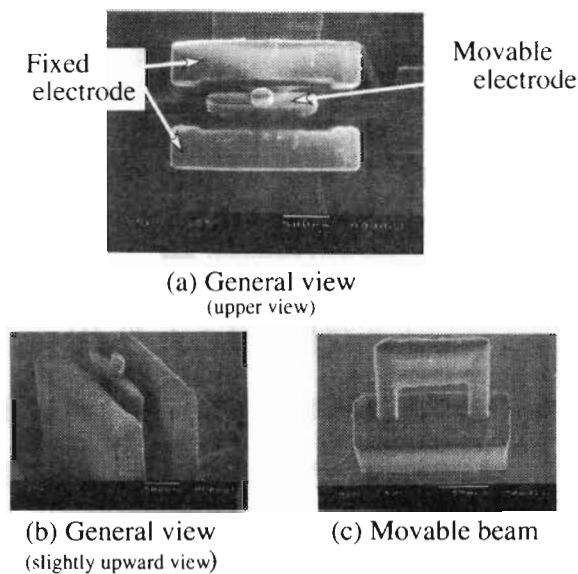


Fig. 5.16 SEM photographs of fabricated sensor

Fig. 5.16-(a) からセンサの大きさは $2 \times 1.4 \times 1.6\text{mm}$ 、可動電極の電極部は $1.2 \times 1.4 \times 1.6\text{mm}$ であった。また、固定電極と可動電極間の間隙は $200\mu\text{m}$ であった。設計通りの製作が行えていることが確認できた。

5.3.5 考察

無電解めっき終了後、完成したセンサのアクチュエータ部に電圧を印加してみた。しかしながら、固定電極と可動電極の間にある間隙のどこかで短絡するという現象が起こり駆動させることができなかった。これは、めっきの前処理工程で脱脂などの効果が十分でなく、間隙でめっきが異常成長したものと思われる。

また、水平面内には、めっきが簡単に施せるのに対して、固定極板上にはめっきが析出しにくいことがあった。このように高アスペクト比の構造物を製作する際には、細部までめっき液や脱脂液の浸透を確実に行わなければならないと金属が均一に析出しないことが分かった。

今後、めっき液の循環方法を改善して、水平面ばかりでなく垂直面にも均一に金属を析出させる技術を確立させる必要があるものと思われる。

5.4 3自由度静電駆動型アクチュエータ

5.4.1 製作目的

5.3節で製作した振動型接触センサは、高アスペクト比を持った構造をしていたため、めっき不良などの原因により、駆動させることができなかった。そこで、アスペクト比が小さいアクチュエータの試作を試みた^{40, 41)}。

試作を行ったアクチュエータの概要図を Fig. 5.17 に示す。今回、試作を行ったアクチュエータは、前節の振動型接触センサのアクチュエータ部として使用することを想定している。アクチュエータの下部電極はアクチュエータ底部に固定されてい

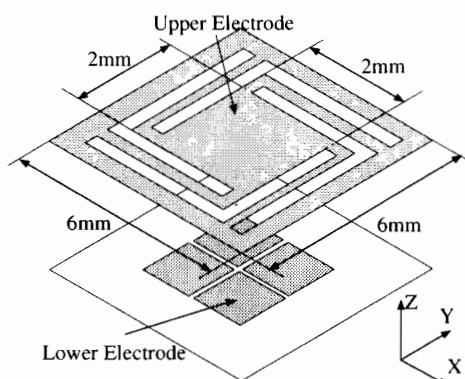


Fig. 5.17 Schematic figure of actuator

る。一方、上部電極は4本の梁で支持されており可動することができる。

また、下部電極は4つに分割されており、4箇所の電極に印加する電圧を変化させることによって3自由度の運動を有するアクチュエータとして機能する⁴²⁾。Fig. 5.18 に具体的な動作を示す。4つに分割された下部電極にすべてに同一の電圧を印加した場合、上部電極にはほぼ均一に静電力が加わるため、Z軸負方向へ並進運動を行う (Fig. 5.18-(a))。また、隣り合った2つの下部電極に電圧を印加した場合、上部電極の半分の領域に静電力が働くため、上部電極は回転運動を行う。隣り合った下部電極へ印加する電圧の組合せとして4つの場合が考えられ、それぞれX軸正負方

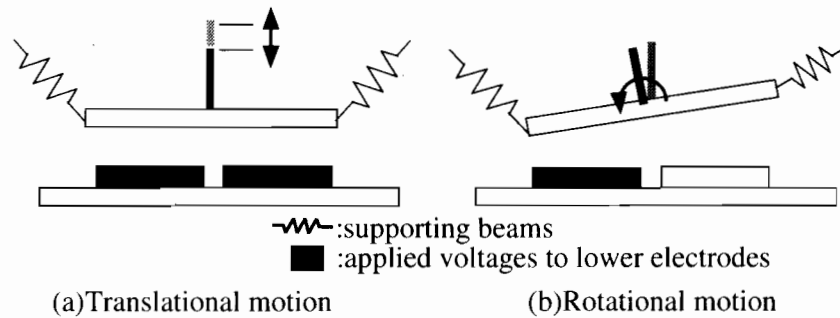


Fig. 5.18 3DOF motion of actuator

向，Y 軸正負方向に対応する．従って，製作したアクチュエータは並進運動として 1 自由度，回転運動として 2 自由度の計 3 自由度を持つことが分かる．

5.4.2 アクチュエータの設計

可動する上部電極は 4 本の梁によって支持されている．製作を行ったアクチュエータはこの梁の弾性力と静電力のつりあったところで上部電極が静止する．従って，アクチュエータの特性には梁の弾性力が大きく影響を及ぼす．そこで，梁の形状とたわみの関係を調べた．

はりの形状とたわみの関係

梁の形状とたわみの関係を調べるために，Fig. 5.19 に示す 3 通りの場合について印加電圧 V と上部電極のたわみ量 z をもとめた．また，3 通りの場合を比較するために，上部電極の面積 S ，また梁の横幅 a ，高さ b としたときの梁の断面形状を $a/b = 1$ となるように統一した．

(1) 梁形状 (a) の場合

梁形状 (a) の場合の梁 1 本分の概略図を Fig. 5.20 に示す．

Fig. 5.20 に示すように自由端 A，隅角 B より，それぞれ距離 x にある断面をとって考える．

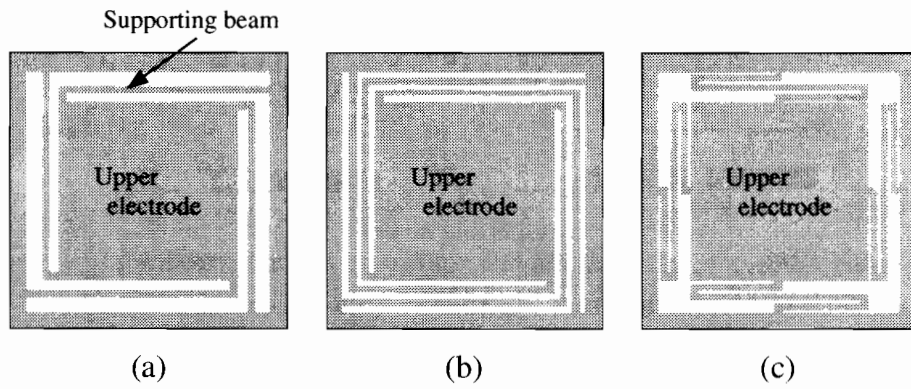


Fig. 5.19 Various supporting beam patterns

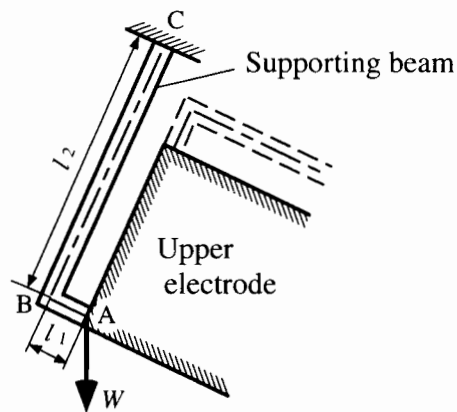


Fig. 5.20 Supporting beam model of pattern (a)

AB間の曲げモーメントは,

$$M_x = Wx \quad (5.6)$$

$$M_B = Wl_1 \quad (5.7)$$

AB間の捻りモーメントは,

$$T_x = 0 \quad (5.8)$$

BC間の曲げモーメントは,

$$M_x = Wx \quad (5.9)$$

$$M_B = Wl_2 \quad (5.10)$$

BC間の捻りモーメントは,

$$T_x = Wl_1 \quad (5.11)$$

よって, 曲げモーメントによって梁に貯えられる弾性エネルギー U_b は,

$$\begin{aligned} U_b &= \int \frac{M_x^2}{2EI} dx \\ &= \frac{1}{2EI} \left[\int_0^{l_1} (Wx)^2 dx + \int_0^{l_2} (Wx)^2 dx \right] \\ &= \frac{W^2}{6EI} (l_1^3 + l_2^3) \end{aligned} \quad (5.12)$$

また, 捻りモーメントによって梁に貯えられる弾性エネルギー U_t は,

$$U_t = \frac{W^2 l_1^2 l_2}{2GI_p} \quad (5.13)$$

ゆえに, 梁に貯えられる全弾性エネルギー U は,

$$\begin{aligned} U &= U_b + U_t \\ &= \frac{W^2}{6EI} (l_1^3 + l_2^3) + \frac{W^2}{2GI_p} l_1^2 l_2 \end{aligned} \quad (5.14)$$

従って, 上部電極のたわみ量 z は Castigliano の定理により,

$$\begin{aligned} z_a &= \frac{\partial U}{\partial W} \\ &= W \left[\frac{1}{3EI} (l_1^3 + l_2^3) + \frac{l_1^2 l_2}{GI_p} \right] \end{aligned} \quad (5.15)$$

ここで, 梁の断面は正方形 ($a/b = 1$ に設定) であるから, 曲げ剛性 EI は $Ea^4/12$ となり, 捻り剛性 GI_p は $k_1 a^4 G$ に置き換える必要がある. ただし, k_1 は捻りモーメントに関する定数であり, $a/b = 1$ では $k_1 = 0.1406$ となる. よって, たわみ量 z_a は,

$$z_a = W \left[\frac{4}{Ea^4} (l_1^3 + l_2^3) + \frac{l_1^2 l_2}{Gk_1 a^4} \right] \quad (5.16)$$

と求めることができる。

次に、電極間に発生する静電力 F_e を求めるには、Fig. 5.21に示すように上部電極のたわみ量 z が変化すると電極間の電気容量 C も変化することを考慮しなければならない。

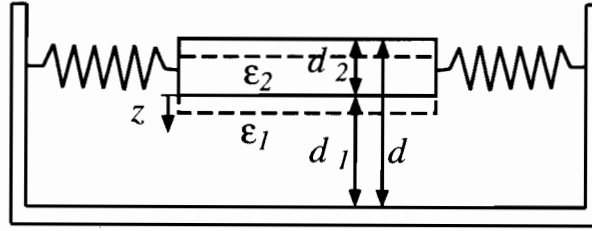


Fig. 5.21 Actuator model for simulation

まず、空気間の電気容量 C_1 は、

$$C_1 = \frac{\epsilon_1 \epsilon_0 S}{(d_1 - z)} \quad (5.17)$$

また、上部電極の電気容量 C_2 は、

$$C_2 = \frac{\epsilon_2 \epsilon_0 S}{d_2} \quad (5.18)$$

ここで、 ϵ_0 ：真空の誘電率、 ϵ_1 ：空気の比誘電率、 ϵ_2 ：上部電極(ポリウレタン樹脂)の比誘電率、 d_1 ：空気間距離(上部電極の自然たわみ量を考慮)、 d_2 ：上部電極の厚さとする。

Eqn.(5.17), Eqn.(5.18)より電極間の合成容量 C は次式で与えられる。

$$C = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_0 S}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 (d_1 - z)} \quad (5.19)$$

よって、静電力 F_e は Eqn.(5.20) で与えられる。

$$F_e = \frac{CV^2}{2(d-z)^2} \quad (5.20)$$

ここで、Fig. 5.20の A 点にかかる荷重 W は、梁 1 本分に加わる静電力に等しい。ゆえに、梁形状 (a) での静電力 F_e における上部電極のたわみ量 z_a は、次式で求められる。

$$z_a = \frac{F_e}{4} \left[\frac{4}{Ea^4} (l_1^3 + l_2^3) + \frac{l_1^2 l_2}{Gk_1 a^4} \right] \quad (5.21)$$

以下同様にして、梁形状 (b), (c) について行う。

(2) 梁形状 (b) の場合

梁形状 (b) の場合の梁 1 本分の概略図を Fig. 5.22に示す。

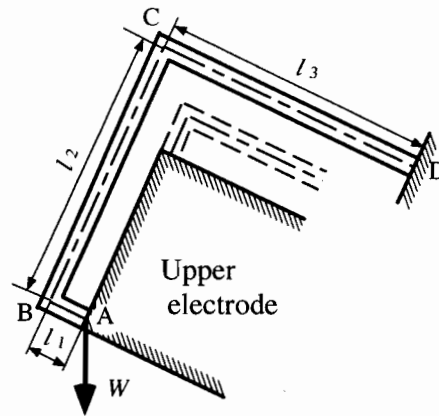


Fig. 5.22 Supporting beam model of pattern (b)

この時、梁形状 (b) での上部電極のたわみ量 z_b は、Eqn.(5.20) を考慮すると

$$z_b = \frac{F_e}{4} \left[\frac{4}{Ea^4} (l_1^3 + l_2^3 + l_3^3 + 3l_1^2 l_3 - 3l_1 l_3^2) + \frac{1}{Gk_1 a^4} (l_1^2 l_2 + l_2^2 l_3) \right] \quad (5.22)$$

と求めることができる。

梁形状 (c) の場合

梁形状 (c) の場合の梁 1 本分の概略図を Fig. 5.23に示す。

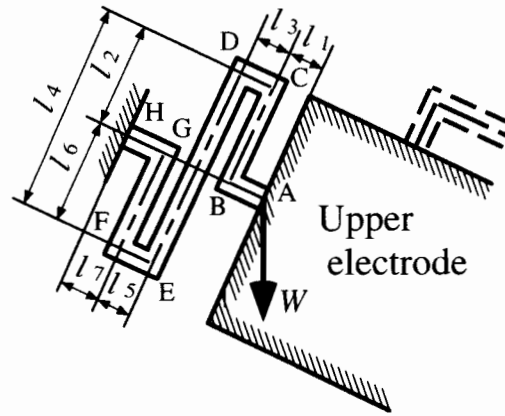


Fig. 5.23 Supporting beam model of pattern (c)

Eqn.(5.20) に示した静電力 F_e を考慮すると、梁形状 (c) での上部電極のたわみ量 z_c は、

$$z_c = \frac{F_e}{4} \left[\frac{4}{Ea^4}(A_1) + \frac{1}{Gk_1a^4}(A_2) \right] \quad (5.23)$$

と求めることができる。

ただし、

$$\begin{aligned} A_1 = & l_1^3 + l_2^3 + l_3^3 + l_4^3 + l_5^3 + l_6^3 + l_7^3 + 3l_1l_3(l_1 + l_3) + 3l_2l_4(l_2 - l_4) \\ & + 3l_5(l_1 + l_3)^2 + 3l_5^2(l_1 + l_3) + 3l_6(l_2 - l_4)^2 + 3l_6^2(l_2 - l_4) \\ & + 3l_7^2(-l_1 + l_3 + l_5) + 3l_7(l_1^2 + l_3^2 + l_5^2 - 2l_1l_3 - 2l_1l_5 + 2l_3l_5) \end{aligned} \quad (5.24)$$

$$\begin{aligned} A_2 = & l_1^2l_2 + l_2^2l_3 + (l_1 + l_3)^2l_4 + (l_4 - l_2)^2l_5 + (l_1 + l_3 + l_5)^2l_6 \\ & + (l_6 - l_4 + l_2)^2l_7 \end{aligned} \quad (5.25)$$

とする。

また、計算する上で必要となる梁の断面形状を決めるために樹脂 (SCR610) の硬化実験から、紫外線の照度 $12.0 \times 10^{-3} \text{W/m}^2$ 、露光時間 80msec にすると、樹脂の硬化高さが $30 \mu\text{m}$ になることが分かっているので、梁の形状寸法を $a = b = 30 \mu\text{m}$ に設定した。

以上のことから、3通りの梁形状における印加電圧 V と上部電極のたわみ量 z_a , z_b , z_c の関係を調べた。Table 5.7 に計算する上で必要な諸定数を示す。ここで、Table 5.7 に示す樹脂 (SCR610) の縦弾性係数 E 、樹脂のせん断弾性係数 G 、樹脂の密度の数値は、株式会社ディーメックのソリッドクリエータ用樹脂物性一覧表を参考にした。また、それぞれの梁の長さについて Table 5.8 に示す。

Table 5.7 Parameters

Young's modulus of resin (SCR610)	E	1200MPa
Shear modulus of resin	G	400MPa
Density of resin	ρ	1090kg/m ³
Area of upper electrode	S	6.40×10 ⁻⁷ m ²
Dielectric constant	ϵ_0	8.85×10 ⁻¹² F/m
Specific inductive capacity of air	ϵ_1	1.0006
Specific inductive capacity of polyurethan	ϵ_2	1.206
Initial gap	d_1	3.88×10 ⁻⁵ m
Thickness of upper electrode	d_2	3.00×10 ⁻⁵ m
Gap	$d(= d_1 + d_2)$	6.88×10 ⁻⁵ m

Table 5.8 Each beam length of various beam patterns

Beam pattern	(a)	(b)	(c)
l_1	1.00×10 ⁻⁴ m	1.00×10 ⁻⁴ m	8.00×10 ⁻⁵ m
l_2	1.09×10 ⁻³ m	1.00×10 ⁻³ m	4.00×10 ⁻⁴ m
l_3		1.20×10 ⁻³ m	7.00×10 ⁻⁵ m
l_4			8.00×10 ⁻⁴ m
l_5			7.00×10 ⁻⁵ m
l_6			4.00×10 ⁻⁴ m
l_7			8.00×10 ⁻⁵ m

Fig. 5.24に印加電圧とたわみ量の関係を示す。

Fig. 5.24 より梁形状 (c) では、たわみ量を得るために必要な印加電圧は他の2つに比べて高く、梁形状も複雑なことから製作することは困難であることが予想される。

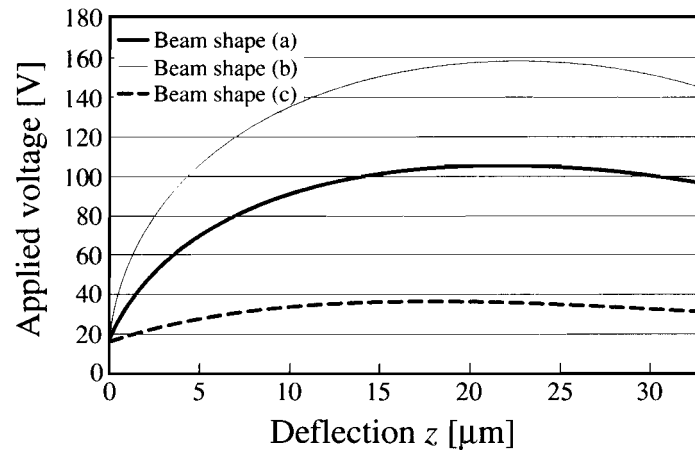


Fig. 5.24 Relationship between applied voltage and deflection of beam

次に梁形状 (b) では、印加電圧は 40V 未満と最も低いが、マイクロ光造形法を用いてこの梁形状を作製するには非常に長い製作時間がかかることが予想される。

梁形状 (a) は印加電圧が 100V 前後で十分に動作でき、製作時間の面からも有効であるので、本研究では梁形状 (a) を採用することにした。

梁の形状が決定したので、以下に具体的に設計を進める。今回製作したアクチュエータは製作の簡易化を考慮し、比較的大きなアクチュエータを製作することにした。アクチュエータ全体の大きさは、 $6 \times 6\text{mm}$ 、上部電極の大きさは、 $2 \times 2\text{mm}$ である。上部電極と下部電極のギャップは、 $50\mu\text{m}$ として設計を行った。

Fig. 5.25 の示すように梁の寸法を定めると、点 A に集中荷重 W がかった時の梁の撓み量 δ は Eqn.(5.22) より次式で求められる。

$$\delta = \frac{W}{ab^3} \left[\frac{4}{E} (l_1^3 + l_2^3) + \frac{1}{k_4 G} l_1^2 l_2 \right] \quad (5.26)$$

ここで、 a, b は梁の断面寸法、 l_1, l_2 は梁の長さ、 E : 縦弾性係数、 G : 横弾性係数、 k_4 : ねじりモーメントに関する係数で $a/b=20$ のとき $k_4=0.323$ となる。これから、梁 1 本あたりのばね定数 k は、

$$k = \frac{ab^3}{\frac{4}{E} (l_1^3 + l_2^3) + \frac{1}{k_4 G} l_1^2 l_2} \quad (5.27)$$

と求められる。

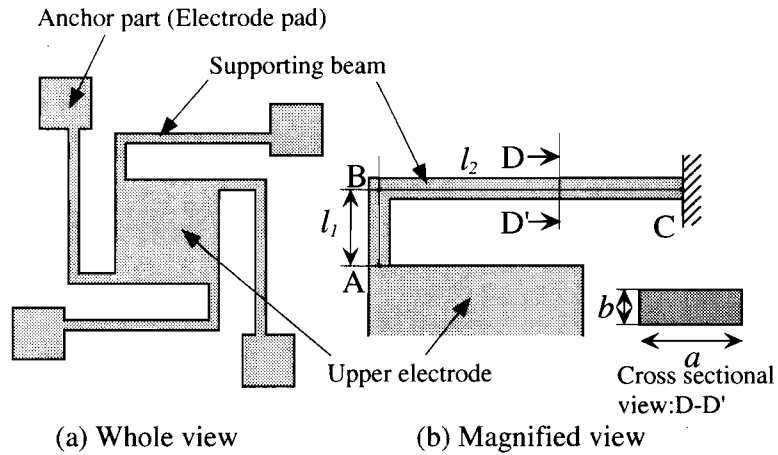


Fig. 5.25 Top view of supporting beams

同様にアクチュエータの各軸回りの回転角 θ は，上部電極の 1 辺の長さを l とするとモーメントの釣り合いから次式で与えられる．

$$\theta = \frac{F}{4kl} \quad (5.28)$$

Table 5.9 Dimensions of actuator

Beam length: l_1	800 μm
Beam length: l_2	2.9mm
Beam width: a	200 μm
Beam thickness: b	10 μm
Area of upper electrode	4mm ²
Upper electrode length: l	2mm
Electrode gap	50 μm

今，Table 5.9 に示す寸法を用いてアクチュエータを製作した場合，50 V を印加するとアクチュエータの変位は 16.5 μm となる．

また，各軸回りの回転角度は $\pm 1.18 \times 10^{-1}$ deg. と求められる．

5.4.3 製作プロセス

前述の金属の析出実験から析出する金属の状態は電流密度に大きく依存することが分かった。これは、言い換えると構造物の面積が急激に変化するような場合にめっき不良となる可能性がある。そのため、このアクチュエータは、Fig. 5.9 に示した方法で製作を進めることにした。

鋳型を製作する際には、梁の形状のように精度が要求される場所は内部硬化式光造形法を用いて鋳型の製作を行った。しかし、アンカー部分の電極パッドのように面積が広く、製作時間がかかる箇所は平面露光型光造形法^{30, 31)}を用いて露光を行い、鋳型の製作を行うことを想定している。しかしながら、現段階で平面露光型光造形法は造形精度に問題があるため、本論文ではマスク法を用いた。マスク法と光造形法を併用することによって鋳型の製作にかかる時間を大幅に短縮することができた。

以下にプロセスの詳細を示す。

Process 1

ベース基板となる感光基板を使用して、下部電極のパターニングを行う。

Process 2

アンカー部分の鋳型をマスク法を用いて製作する。鋳型の高さはアクチュエータの上部電極と下部電極のギャップ幅である $50\mu\text{m}$ とする。

Process 3

アンカー部分に電鍍を施す。電流密度 $0.16\text{mA}/\text{mm}^2$ で 180min 析出させることにより、厚さ $50\mu\text{m}$ の Ni 構造体が得られる。

Process 4

第2シード層 (厚さ 100~200nm) をスパッタリングによって形成する。

Process 5

スピンドクターを用いて紫外線硬化樹脂を厚さ $100\mu\text{m}$ 程度塗布し、光造形法を

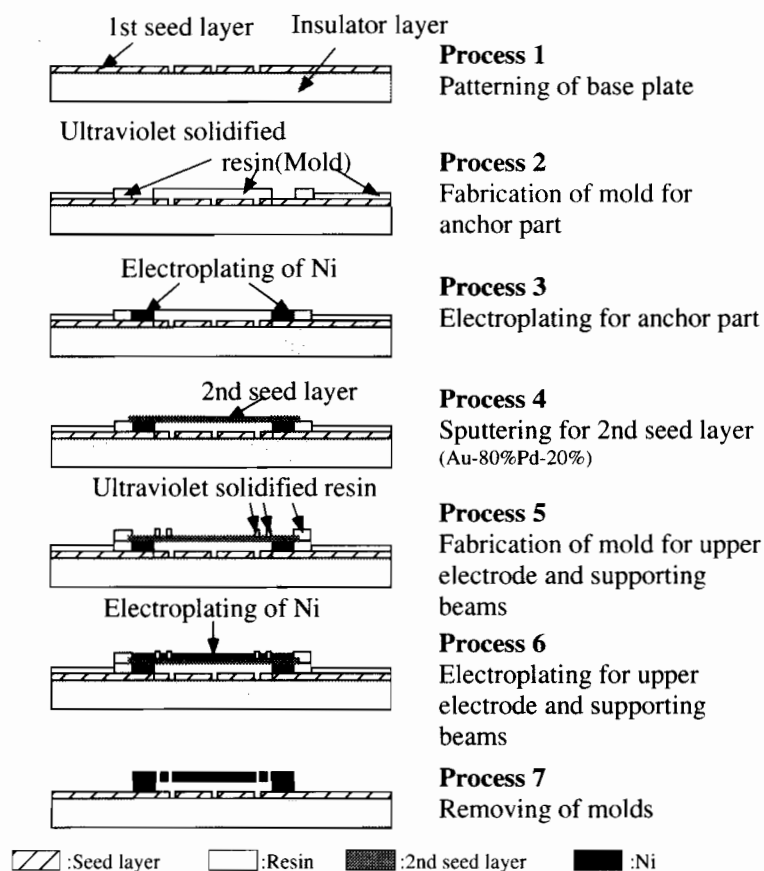


Fig. 5.26 Fabrication process

用いて上部電極ならびに梁部分の鋳型を新しく作成する。このとき、鋳型の高さは $10\mu\text{m}$ とする。

Process 6

上部電極ならびに梁部分の電鍍をおこなう。電流密度 $0.16\text{mA}/\text{mm}^2$ で 40min 析出させることにより厚さ $10\mu\text{m}$ の構造体を得られる。

Process 7

鋳型を除去する。

必要であれば、Process 4 から 6 を繰り返す。

5.4.4 試作例

Fig. 5.27 に各プロセスにおける SEM 写真を示す. 完成後の写真を見ると梁や上部

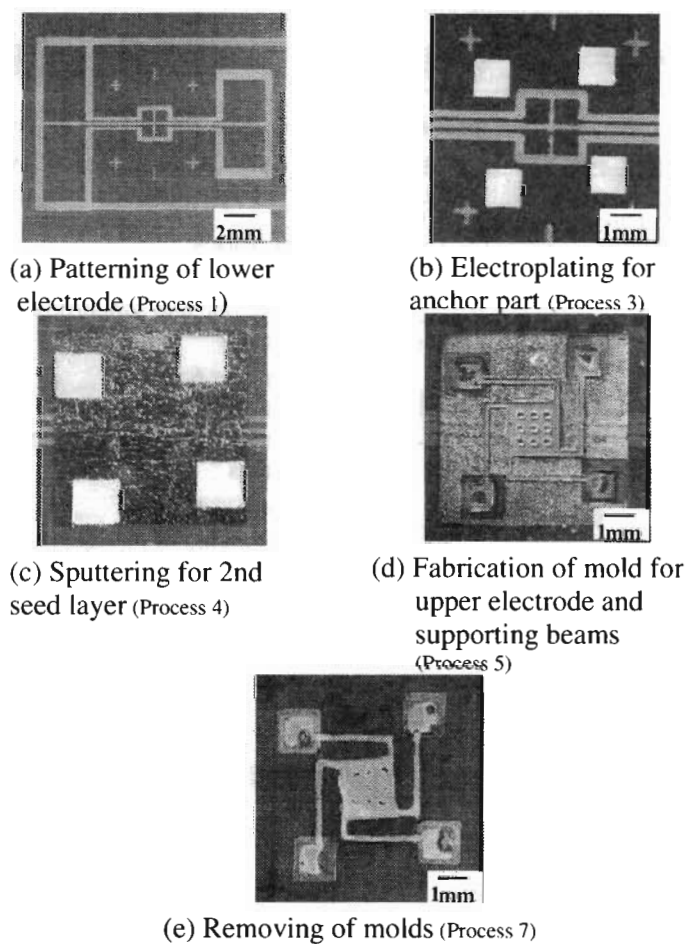


Fig. 5.27 SEM photographs of each fabrication process

電極の周囲にバリが見える. これは, ニッケルの析出量が鋳型の高さを超えたため, 過剰析出(オーバーデポジット)したものである. 析出速度を正確に制御するか, 鋳型除去直前のプロセスにおいて研磨をすることでこのバリの発生は低減できるものと思われる.

5.4.5 駆動実験

プロセスに従って実際に3自由度アクチュエータを試作し、Fig. 5.28に示す実験装置で並進運動と回転運動の特性を調べた。

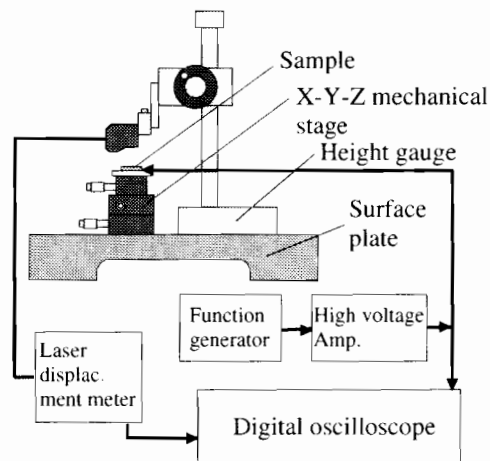


Fig. 5.28 Experimental apparatus

並進運動

(1) 静特性

上部電極を接地し、下部電極に電圧を印加する。また、印加電圧は直流電圧とし、その大きさは25～200Vの電圧を25Vおきに印加した。Fig. 5.29に上部電極の変位と印加電圧の関係を示す。Fig. 5.29より、印加電圧と変位の関係は2次曲線を描いていることが分かる。最大の変位は180Vの時、 $20\mu\text{m}$ が得られた。また、電圧の印加は200Vまで行ったが、180V以上の電圧をアクチュエータに印加したとき、上部電極が下部電極に接触し、アクチュエータとして機能しないことがわかった。設計では、50V印加したとき $16.5\mu\text{m}$ 変位するように設計を行ったが、実際には170V程度印加しないと設計値通りの変位を得ることができなかった。これは、ニッケルを析出させたときに生じる内部応力が原因で上部電極に反りが生じ、電極間ギャップが $200\mu\text{m}$ 程度になっているためだ

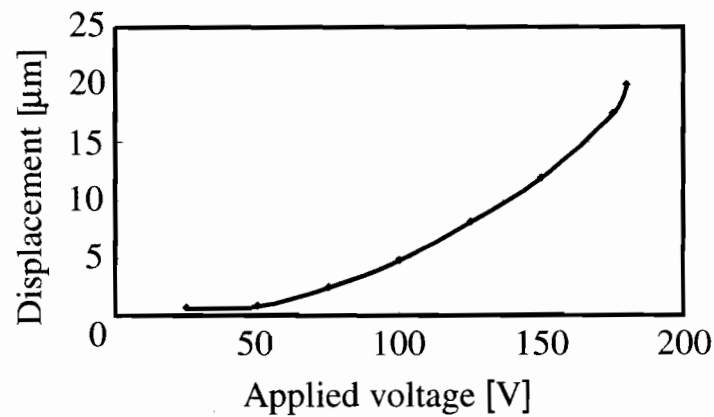


Fig. 5.29 Static characteristics of 3DOF actuator

と考えられる。

(2) 動特性

振幅 150V, 周波数 0.5~200Hz, デューティ比 50% の矩形波をアクチュエータに加えたときの特性を測定した。180Hz 付近にピークを持つことが Fig. 5.30 から

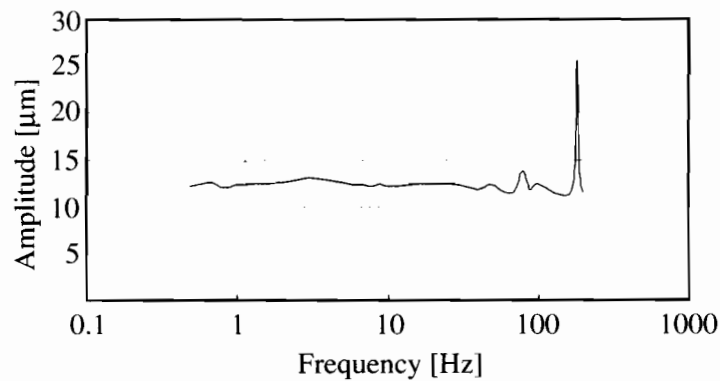


Fig. 5.30 Dynamic characteristics under applied voltage of 150V

わかる。設計から、梁の質量 $m=3.56 \times 10^{-7}$ kg, ばね定数 $k=4.29$ N/m が求まっているので、共振周波数 f_n を次式によって求めると、

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5.29)$$

176Hz と与えられる。この値は、実験結果と非常に一致している。このことから、設計通りのアクチュエータが製作できたものと考えられる。共振点での振幅は $26\mu\text{m}$ が得られ、その他の周波数領域では、約 $12\mu\text{m}$ と一定の振幅で振動することがわかった。

回転運動

回転運動の測定は隣り合う、電極に 150V を印加し、X 軸回り、Y 軸回りの回転角度を Fig. 5.28 示した実験装置を利用して測定を行った。レーザ変位計で回転角度を計測する方法は、Fig. 5.31 に示すように 2 点間の距離とその端点での変位を正確に測定し、Eqn.(5.30) から求めた。

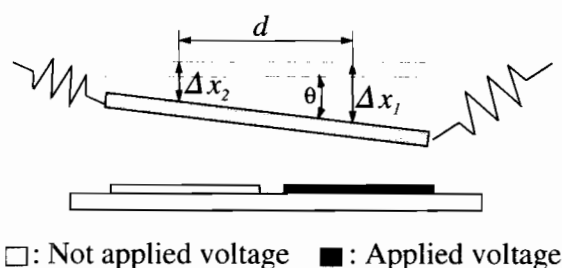


Fig. 5.31 Measurement method of rotation angle

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta x_2 - \Delta x_1}{d}\right) \quad (5.30)$$

計測には、光学式変位センサ (KEYENCE PA-1810) を用いた。Table 5.10 に回転運動の結果を示す。

Table 5.10 Rotational motion

	Rotation angle [$\times 10^{-2}$ deg]
X-axis	-1.15 ~ 4.24
Y-axis	-2.58 ~ 6.30

この結果を見ると、X軸方向とY軸方向の回転角度が対称ではなく、設計より小さい値を示していることがわかる。これは、並進運動の時と同様、上部電極に反りが生じたため電極間のギャップが一様でないためだと考えられる。

5.4.6 考察

光造形法を用いて鋳型を作成し、その鋳型へ金属を電気めっきによって析出し、マイクロアクチュエータを製作する方法を提案し、その方法を確立した。この方法は、従来製作が困難であった急激に断面積が変化する場合においても金属構造体を析出することができ、中空構造物も容易に製作可能という特徴を持っている。このプロセスの長所と短所を以下にあげておく。

- 長所
 - 急激な断面積の変化にも対応できる。
 - 梁やダイヤフラムのような中空構造も作成可能である。
 - 断面積が大きく変化するところで電鍍を中断するので電流密度の制御が行いやすい。
- 短所
 - アクチュエータをインラインプロセスによって製作できない。
 - 層が多くなるにつれ製作時間が増大する。
 - 析出速度を正確に把握しなければならない。

つぎに、3自由度静電型アクチュエータを製作し、提案した方法の有用性を確認した。製作したアクチュエータの特性を以下に示す。

- 静特性については、180Vを印加したとき最大変位 $20\mu\text{m}$ が得られることがわかった。しかし、それ以上の電圧では上部電極が下部電極と接触してしまい、アクチュエータとして機能しないことがわかった。

- 動特性については、180Hz 付近に共振点を持つことがわかった。そのときの振幅は 150V 印加した場合、 $26\mu\text{m}$ であった。これは、設計から得られる理論式の共振周波数の値と一致していたため、電極間の間隙が違う点をのぞいて、ほぼ設計通りのアクチュエータが製作できているものと思われる。
- 回転運動については、印加電圧が 150V のとき、X 軸方向: $-1.15 \times 10^{-2} \sim 4.24 \times 10^{-2}$ deg, Y 軸方向: $-2.58 \times 10^{-2} \sim 6.30 \times 10^{-2}$ deg 回転することがわかった。

今後の課題として、以下のようなものがあげられる。

- 試作したアクチュエータはニッケルを構造材として採用した。しかし、ニッケルはめっき時に生じる内部応力が大きく、そのため構造物が大きく変形することがある。これを低減するには、内部応力の小さなめっき条件を採用するか、析出させる金属を内部応力の小さいものに変更する必要があるものと思われる。
- 鋳型の断面積が小さくなると、めっき液が鋳型内部に浸透できず、めっき不良となるケースも多く見受けられた。この問題点を解決するためには、めっき液の表面張力を低くするような鋳型の構造やめっき液の循環方法を検討する必要がある。
- 提案した方法は、原理的にはさらなる 3 次元高アスペクト比の立体構造物の製作が可能である。今後は半導体プロセスとの差別化を図るために、提案した方法を用いて、より複雑な 3 次元構造物のマイクロアクチュエータやマイクロセンサを開発する予定である。

5.5 静電駆動型パルスモータ

5.5.1 製作目的

2 枚の平行平板電極に作用する静電力は、平行平板電極を互いに引き寄せ合うように垂直方向に働くものと、電極の重なり合う面積が大きくなるように水平方向に

働く力がある．この垂直方向に働く力を回転運動に変換することは，マイクロマシンを製作する上で非常に難しい課題である．そこで，水平方向に働く静電力を駆動源とするアクチュエータの試作を行った．試作を行ったアクチュエータは上部電極と下部電極の比が4:6となっている．この電極数の比の差によって静電力が常にある電極間で働いているため，回転が持続する．Fig. 5.32 に静電駆動型パルスモータのイメージ図を示す．

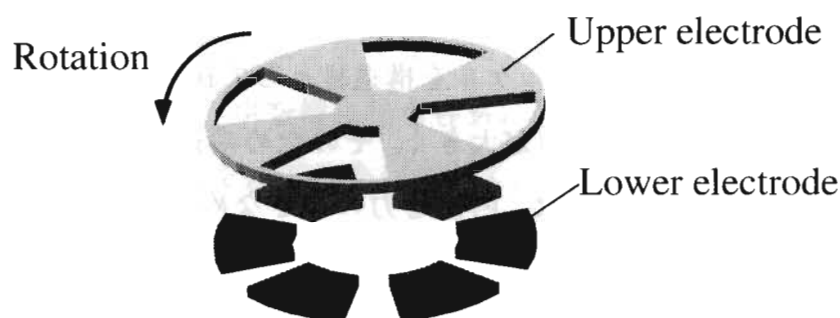


Fig. 5.32 Image view of electrostatic force driven pulse motor

Fig. 5.33 には，動作原理 (a) と実際の上部電極の動作 (b) を示した．

Fig. 5.33 -(a) に示すように，上部電極と下部電極に電圧を印加すると両極板は水平方向に静電力が発生する．そのため，上部電極であるロータは固定されていないため，下部電極との対向面積が増すように回転運動を行う．こうして，同図-(b) に示すように下部電極に順番に電圧を印加していけば上部電極は回転する．

このアクチュエータは，水平方向に発生する静電力を利用しているため，発生するトルクは極めて小さいものと思われる．従って，このアクチュエータで発生した力を歯車やリンク機構で力や変位を拡大したところで限界があるように思われる．

そこで，アクチュエータにかかる負荷が小さいものとして微小な光学機器のアクチュエータとして使用することを目的とした．例をあげるとロータの上にプリズムや鏡を設置して，ファイバからの光を切り替えたり，遮断を行う光スイッチなどへの応用を考えている．

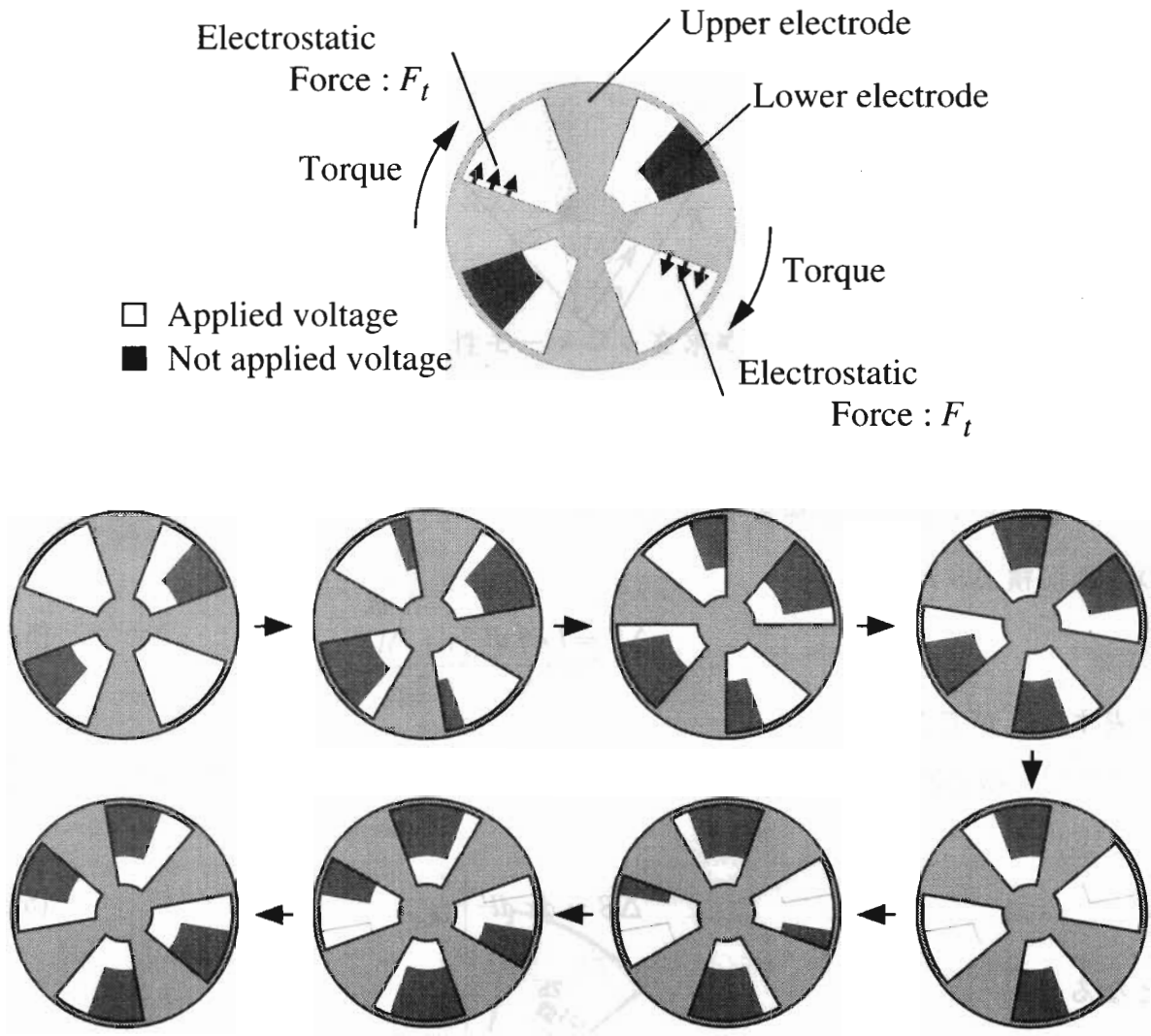


Fig. 5.33 Movement principle of electrostatic driven pulsed motor

5.5.2 アクチュエータの設計

モータの設計を行うために、1組の平行平板電極に働く静電力の大きさを求める。Fig. 5.34 に示した微小面積に働く静電力について考える。いま、半径方向のパラ

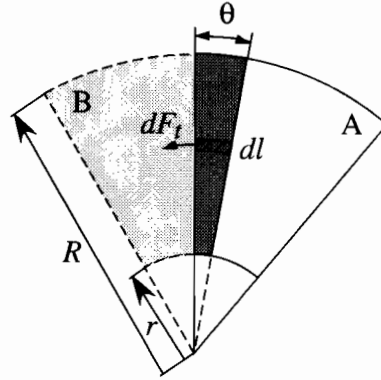


Fig. 5.34 Exerted electrostatic force on electorodes

メータを l とすると、電極板 A が $d\theta$ 回転したとき、電極の重なり合っている部分の増加面積 ΔS は、

$$\Delta S = l d\theta dl \quad (5.31)$$

と表すことができる。

ここで、微小角回転したときの弧の長さ $l d\theta$ を dx 平行移動したものとして近似すると、

$$\Delta S = dx dl \quad (5.32)$$

となる。

この時の平行平板電極に蓄えられる静電エネルギー U は、

$$U = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \epsilon \frac{S}{2} V^2 = \frac{\epsilon V^2 dl dx}{2z} \quad (5.33)$$

と求められ、そのときに働いた水平方向の力 dF_t は、

$$dF_t = \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\epsilon V^2 dl}{2z} \quad (5.34)$$

と求められる。

微小面積に働く静電力が求められたので増加面積全体に働く水平方向の静電力は、次式によって

$$F_t = \int_r^R dF_t = \int_r^R \frac{\varepsilon V^2}{2z} = \frac{\varepsilon(R-r)V^2}{2z} \quad (5.35)$$

与えられる。

次に、 F_t が作用する回転半径 k_t を求める。一般に回転体の慣性モーメントは回転体の質量 M 、回転半径を k とすると

$$I = Mk^2 \quad (5.36)$$

で与えられる。まず、ロータの慣性モーメントを求める。Fig. 5.35 において、点 O 回りの極慣性モーメント I_p は、ロータの厚さを h とすると、

$$\begin{aligned} I_p &= \int_0^\theta \int_{r_1}^R (l^2 \sin^2 \theta + l^2 \cos^2 \theta) \rho h l dl d\theta + \frac{1}{2} M_2 r_1^2 \\ &= \rho h \int_0^\theta \int_{r_1}^R l^3 dl d\theta + \frac{1}{2} M_2 r_1^2 \\ &= M_1 \cdot \frac{R^2 + r_1^2}{2} + \frac{1}{2} M_2 r_1^2 \end{aligned} \quad (5.37)$$

と求めることができる。ただし、ロータの質量を $M_1 = \pi \rho h (R^2 - r_1^2)$ 、 $M_2 = \pi \rho h r_1^2$

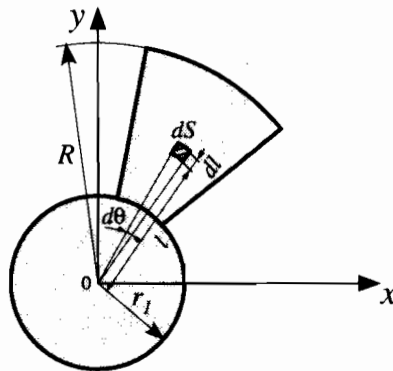


Fig. 5.35 Moment of inertia of rotor

とした。いま、 $I_p = (M_1 + M_2)k_t^2$ とおくと k_t は、

$$k_t = \sqrt{\frac{M_1 R^2 + (M_1 + M_2)r_1^2}{2(M_1 + M_2)}} \quad (5.38)$$

と求められる。

以上より、静電力によるモーメントは、

$$F_t \cdot k_t \cdot n = \frac{\varepsilon(R-r)V^2}{2z} \cdot \sqrt{\frac{M_1 R^2 + (M_1 + M_2)r_1^2}{2(M_1 + M_2)}} \cdot n \quad (5.39)$$

となる。ここで、 n は静電力が作用する有効電極の数とする。

次に、摩擦力によるモーメントを求める。この摩擦力は、ロータの自重によるものと、極板間に働く垂直方向の静電力に起因するものがある。

まず、垂直方向による静電力を求める。Fig. 5.36 に示した電極板 A と B の重なり合った部分の面積 S は、

$$S = \frac{(R^2 - r^2)}{2} \theta \quad (5.40)$$

と求められる。

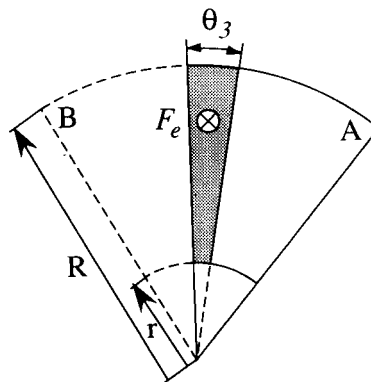


Fig. 5.36 Exerted normal electrostatic force on electrodes

よって、この部分に働く垂直方向の静電力 F_e は

$$F_e = \frac{\varepsilon S V^2}{2d^2} = \frac{\varepsilon (R^2 - r^2) \theta V^2}{4d^2} \quad (5.41)$$

次にロータの自重を求める。Fig. 5.37 に示すように各パラメータを定める。

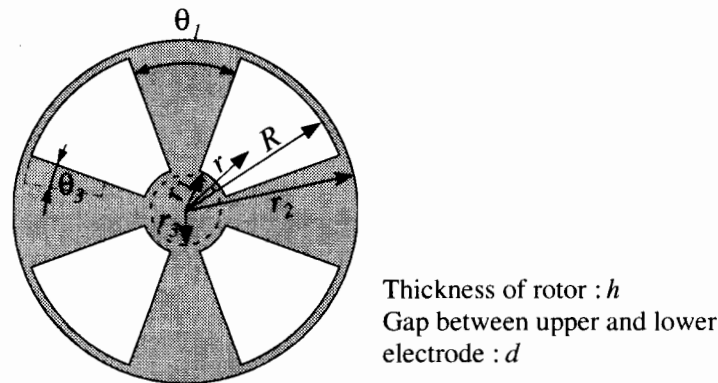


Fig. 5.37 Define of rotor parameters

まず、ロータの面積 S は、

$$S = \pi r_1^2 + \frac{(R^2 - r_1^2)}{2} \theta_1 \cdot N + \pi (r_2^2 - R^2) = \pi (r_1^2 + r_2^2 - R^2) + \frac{(R^2 - r_1^2)}{2} \theta_1 \cdot N \quad (5.42)$$

であるから、ロータの質量 M は、 $M = \rho S h$ と求められる。ここで、 N : 電極板の総数とした。

以上より垂直抗力 F_n は、次式で与えられる。

$$F_n = Mg + \frac{\varepsilon(R^2 - r_1^2) \theta_3 V^2 n}{4d^2} \quad (5.43)$$

ただし、 θ_3 は、電極の重なり具合を示す角度とした。故に、摩擦力によるモーメントは、次のように求められる。

$$\mu \cdot F_n \cdot k_n = \mu \left\{ Mg + \frac{\varepsilon(R^2 - r_1^2) \theta_3 V^2 n}{4d^2} \right\} r_3 \quad (5.44)$$

以上より、アクチュエータで発生するトルクを τ とすると、

$$\begin{aligned} \tau &= F_t \cdot k_t \cdot n - \mu \cdot F_n \cdot k_n \\ &= \frac{\varepsilon(R - r)V^2}{2d} \cdot \sqrt{\frac{M_1 R^2 + (M_1 + M_2)r_1^2}{2(M_1 + M_2)}} \cdot n \\ &\quad - \mu \left\{ Mg + \frac{\varepsilon(R^2 - r_1^2) \theta_3 V^2 n}{4d^2} \right\} r_3 \end{aligned} \quad (5.45)$$

が成り立ち、 $\tau > 0$ なる関係が成立するとき、アクチュエータは回転する。

Table 5.11 に示すように各パラメータを定め、印加電圧とトルクの関係を図 5.38 に示す。

Table 5.11 Dimensions of pulse motor

Radius	r	1.0mm
	R	1.8mm
	r_1	0.5mm
	r_2	2.0mm
	r_3	0.4mm
Thickness of rotor	h	30 μ m
Rotor angle	θ_1	40°
Angle of overlap area	θ_3	10°
Number of effective electrodes	n	2
Density of resin	ρ	1069kg/m ³
Coefficient of friction	μ	0.5
Gravitational acceleration	g	9.81m/s ²
Dielectric constant	ϵ	8.885 $\times 10^{-12}$ F/m

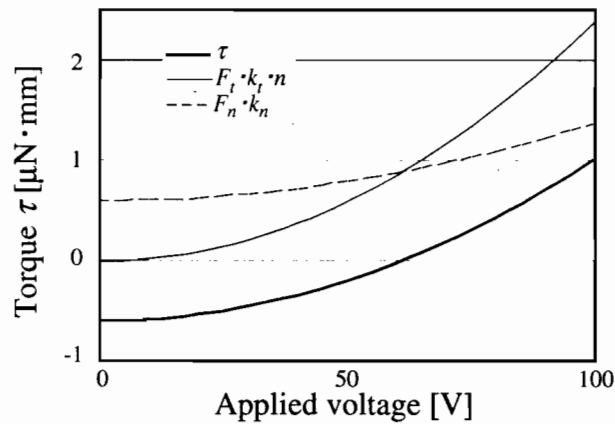


Fig. 5.38 Relationship between applied voltage and torque

Fig. 5.38 から、印加電圧が 60V 以上で静電力が摩擦力に勝り、回転するものと思われる。

5.5.3 製作プロセス

静電駆動型パルスモータの製作プロセスを Fig. 5.39 に示す。製作プロセスは、ステータを作るプロセスとロータを作るプロセスに分かれている。以下に各工程について説明を行う。

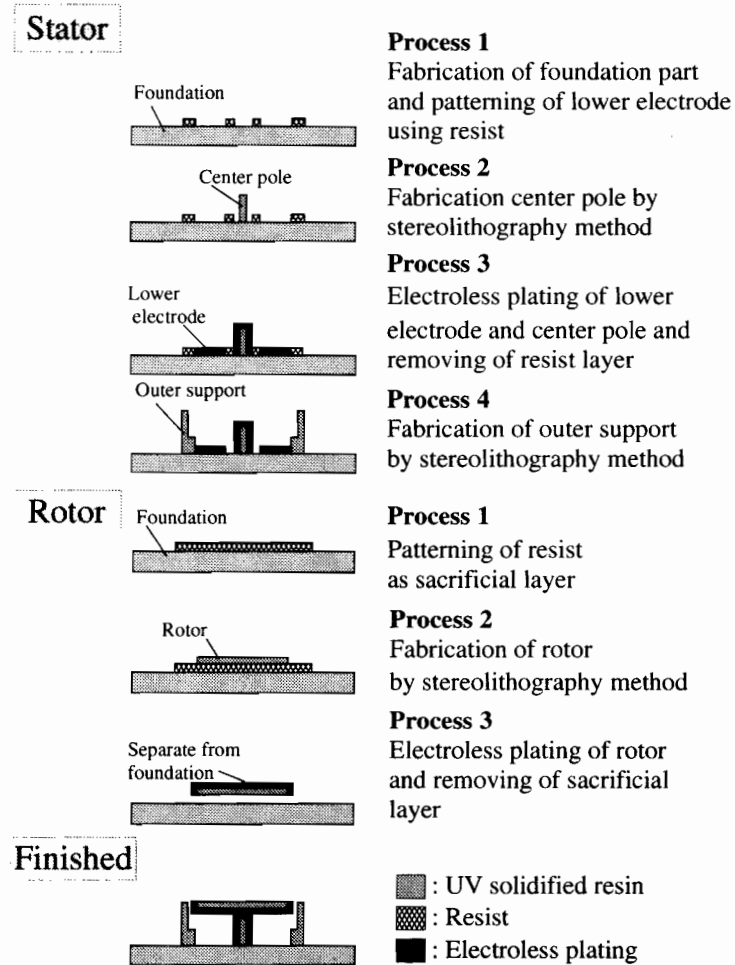


Fig. 5.39 Fabrication process of electrostatic driven pulse motor

1. ステータの製作工程

Process 1 十分に超音波洗浄を行ったスライドガラス上に紫外線硬化樹脂を塗布し、マスクを用いて土台を作製する。ここで、5.2.1 節から、紫外線硬化

樹脂には金属は析出するが、レジスト表面には金属が析出しにくいことが分かっているため、マスクを用いて下側電極の形にレジストをパターンニングを行う。ここでいう、パターンニングとはレジスト塗布、プリベーク、露光、現像、ポストベークの一連の作業を指すものとする。

Process 2 内部硬化式光造形法を用いて高さ $100\mu\text{m}$ の中心の支柱を作製する。この構造部は、ロータのサポートならびに電極の役目も果たしている。

Process 3 無電解めっきを用いて Process 1,2 で作製した紫外線硬化樹脂の表面にニッケルを成膜する。そしてアクチュエータ全体をトルエン中に浸し、レジスト膜を剥離する。

Process 4 内部硬化式光造形法を用いて、外側の支持構造物を製作する。この構造物は2層から構成され、1層目は高さ $80\mu\text{m}$ 、2層目は $150\mu\text{m}$ とする。この支持構造物は、ロータが回転するときのガイドレールの役割をする。

2. ロータの製作工程

Process 1 ロータを作製するための土台を作製する。その土台の上に犠牲層としてレジスト膜を塗布する。

Process 2 内部硬化式光造形法もしくは、平面露光型光造形法を用いて、Process 1 で作製したレジスト膜上にロータを作製する。このとき、ロータの厚さを $30\mu\text{m}$ とする。

Process 3 無電解めっき法を用いて、ロータの製作工程 Process 2 で製作したロータの表面にニッケルを析出させる。犠牲層として使用したレジスト層をトルエン液中で溶解させ、ロータを土台部分から分離する。

3. 完成

ステータ構造物の上に、ロータを載せて完成する。

5.5.4 試作例

Fig. 5.40 に主立った工程での写真を示す.

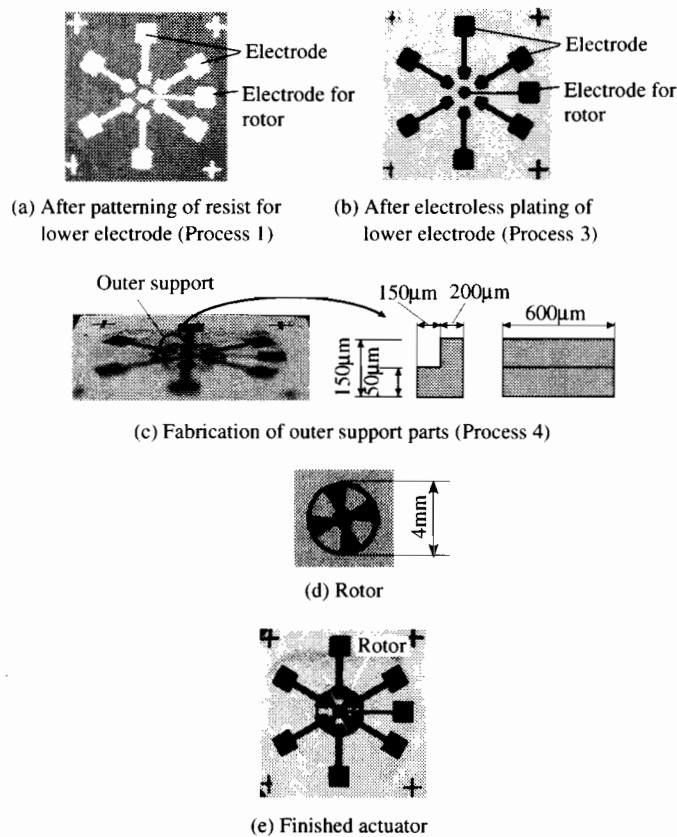


Fig. 5.40 Photographs of fabricated actuator

写真 (a) はステータの製作工程 Process 1 のレジストのパターニングを行った直後の下側電極の状態を表している。下側電極 6 箇所，ロータへの導通のための電極 1 箇所がパターニングされていることが分かる。これは，マスクを用いてパターニングを行った。

(b) はステータの製作工程 Process 3 の無電解めっき工程直後の写真である。下側電極がレジストのパターン通りに析出していることがわかる。

(c) は Process 4 直後の写真を示している。内部硬化式光造形法によってロータを支える支持構造体を作製されていることが確認できる。実際の構造体の寸法と外形

を写真右側に示した。

(d) 犠牲層の剥離までの工程を済ませ、完成したロータである。ロータの表（写真に写っている面）にニッケルが析出している。

(e) アクチュエータの完成写真を示す。写真 (d) のロータを写真 (c) の上に置く。このとき、配線をかねている中心にある支柱との導電性を確保するため、ロータを裏返して設置する。

5.5.5 考察

試作を行ったアクチュエータに電圧を印加した。極板間は互いに引き合い、ロータは1つの極板が重なり合うまで回転運動を行うが、連続した回転運動を得ることはできなかった。

この原因として、以下のことが考えられる。

- ロータの変形
- ロータとロータ支持部のクリアランス
- 摩擦力の見積もり違い

ロータの形は薄いフィルム上であるため、硬化収縮による変形の影響を受けやすい。現時点において、樹脂の硬化収縮による歪みを完全に除去することは難しい。そこで、犠牲層剥離ののち、2枚のスライドガラス上に挟み込み、ある程度の圧力をかけて保存する。こうすることによって変形を小さくすることができるものと思われる。

ロータとロータ支持部の間には、円周方向に間隙がある。ロータの直径よりわずかに大きいところで支持部がロータを支えることが一番理想的であるが、クリアランスの寸法精度が悪かったために、ロータが回転するさいに回転中心がずれてしまうことが分かった。その結果、ガイドからロータが外れ、摩擦が大きくなり回転が

持続しない。これは樹脂の収縮を考慮して各種の寸法を決定することで、クリアランスの調整が行えるものと思われる。

今回は、ロータとロータ支持部の摩擦係数を 0.5 と設定を行った。この値が妥当ではなかったことが考えられる。樹脂－金属間、異種金属間など各種の摩擦力をトライボロジ的な観点から調査する必要があるものと思われる。

今後以上のような、問題点を克服することによって、アクチュエータの回転運動が実現できるものと思われる。

5.6 進行波駆動型静電アクチュエータの設計

5.6.1 製作目的

これまでに開発がなされているマイクロアクチュエータの多くは、摩擦の影響をできる限り受けないように設計することで、回転力や推力を得ていた。マイクロアクチュエータを開発する場合、超音波モータのように摩擦を駆動力の発生源として利用することができれば、摩擦の影響を考慮しなくてもよいばかりでなく、その結果として出力の大きいアクチュエータの開発につながるものと考えた。そこで超音波モータの動作原理をもとにして以下に示す静電アクチュエータの設計を試みた。

Fig. 5.41にアクチュエータの概念図(同図-(a))と動作原理(同図-(b))を示す。Fig. 5.41-(b)は、ステータ1つ分の断面図を示しており、ステータは2組の下部電極と上部電極から構成され、それ自身が静電アクチュエータとなっている。

Fig. 5.41-(c)は、電圧を印加した電極と上部電極の動作を示しており、以下に詳しく述べる。

1. 2組ある下部電極のうち片方に電圧を印加すると、垂直方向に働く静電力のため、上部電極は梁を中心に時計方向に θ 回転しようとする((c)-(I))。この回転運動を水平面へ投射すると上部電極は、水平方向に δ 平行移動したものと見なせる。

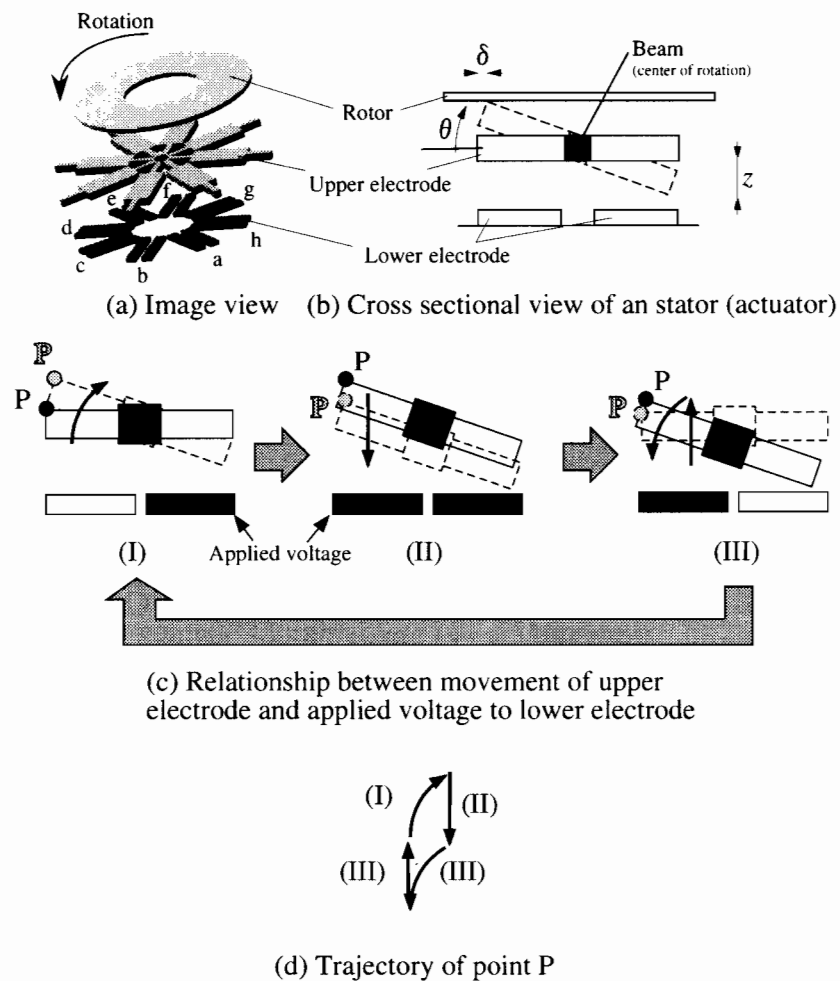


Fig. 5.41 Concept of traveling wave type microactuator

2. 上部電極の回転角度が最大になったとき，下側電極2組に同時に電圧を印加する．するとステータは下側電極に引き寄せられるように並進運動を行う ((c)-(II))．
3. 先ほど電圧を印加した電極とは異なった電極に電圧を印加する ((c)-(III))．並進運動と反時計方向の回転運動が合成される．

結局，上部電極の1点にPに注目して，その軌跡をたどると Fig. 5.41-(d) に示すように楕円運動描いていることが分かる．

この動作を行うアクチュエータをロータの円周上に複数設置してロータを回転さ

せる。

いま、周期 T を持つ 3 次波長の正弦波をアクチュエータに入力すると Fig. 5.42 に示すタイミングでステータを駆動することによってロータは回転を続けることができる。Fig. 5.42 はロータの円周上に複数配置されているステータ (a ~ h) を横に並

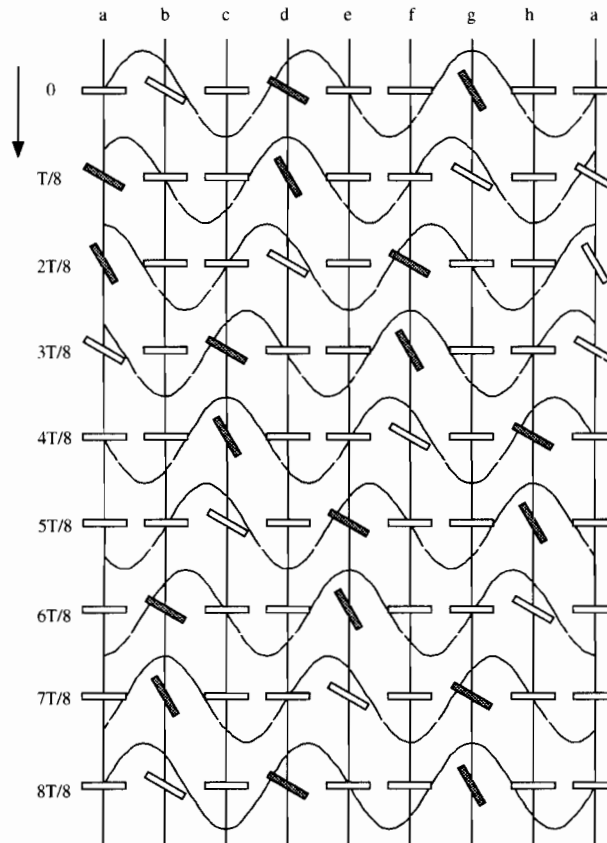


Fig. 5.42 Timing chart for driving stators

べたときのその動作を表しており、図中のハッチ部分の上部電極が駆動力として寄与していることを示す。図中の縦方向は時間軸とした。

5.6.2 アクチュエータの設計

静電力により上部電極は垂直方向のたわみと梁部を中心として回転運動を行う。この回転運動と電圧の関係を求めることでロータの移動量が分かる。いま、Fig. 5.43

のように各種パラメータを決定する。

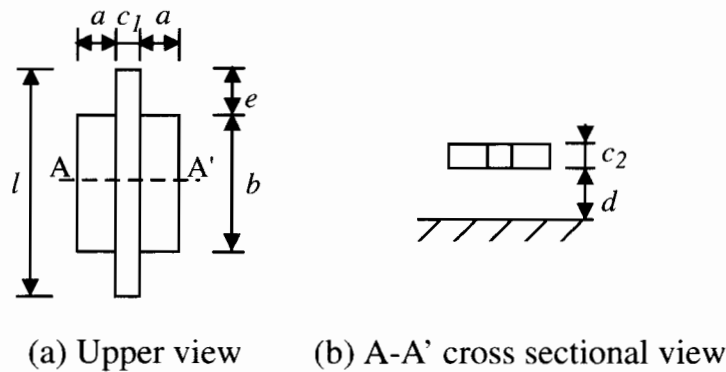


Fig. 5.43 Definition of upper electrode parameters

まず, Fig. 5.44 を参考に梁部のたわみを求める. 梁部のたわみは梁自身の質量によるたわみと電極板部の質量によるたわみに分けられる. いま, 梁部にかかる荷重を等分布荷重, 電極板部にかかる荷重を集中荷重として, 各部のたわみを求めると以下のようなになる. 梁の質量 m_1 は, 樹脂の密度を ρ とすると

$$m_1 = c_1 c_2 e \rho \quad (5.46)$$

で与えられる. また, 梁の質量による分布荷重 ω_1 は,

$$\omega_1 = c_1 c_2 \rho g \quad (5.47)$$

となる. 故に, 梁部の自重による梁のたわみ y_1 は,

$$y_1 = \frac{\omega_1}{24EI} \cdot 3e^4 = \frac{c_1 c_2 e^4 \rho g}{9EI} \quad (5.48)$$

と求められる. ここで, E : 縦弾性係数, I : 断面2次モーメントとする.

次に, 電極板の重さによるたわみを求める. 電極板の質量 m_2 は,

$$m_2 = b c_2 (2a + c_1) \rho \quad (5.49)$$

で与えられる. 電極板の質量による荷重は $W = m_2 g$ と求められる. 従って, 集中荷重 W による梁のたわみ y_2 は, 2本の梁で支えることを考慮すると,

$$y_2 = \frac{W/2}{6EI} \cdot 2e^3 = \frac{2bc_2(2a + c_1) e^3 \rho g}{3EI} \quad (5.50)$$

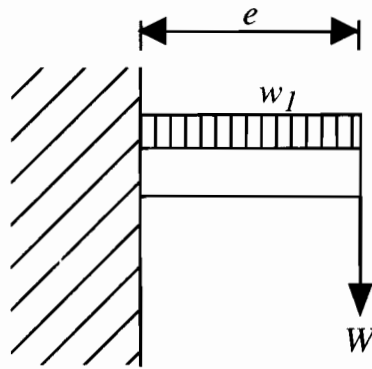


Fig. 5.44 Deflection of beam by its weight

と求められる。

従って、自重による梁のたわみ y_0 は、

$$y_0 = y_1 + y_2 = \frac{c_2 e^3 \rho g}{24EI} \{3c_1 e + 16b(2a + c_1)\} \quad (5.51)$$

上部電極と下部電極に電圧を印加すると、上部電極はねじれ、それに伴い弾性力を生じる。この様子をモデル化したものを Fig. 5.45 に示し、Fig. 5.46 に静電力の分布図を示す。

上部電極と下部電極に働く静電力は、

$$F_e = \frac{\epsilon abV^2}{2(d-z)^2} \quad (5.52)$$

となる。ここで、電極に印加する電圧を V 、電極間の間隙を d 、自重によるたわみを z 、 ϵ を空気中の誘電率とした。

梁部の静電力より発生するねじりモーメントによるねじれ角 θ は、

$$\theta = \frac{aF_e l}{2k_4 c_1 c_2^3 G} = \frac{\epsilon a^2 b l V^2}{4k_4 c_1 c_2^3 G (d-z)^2} \quad (5.53)$$

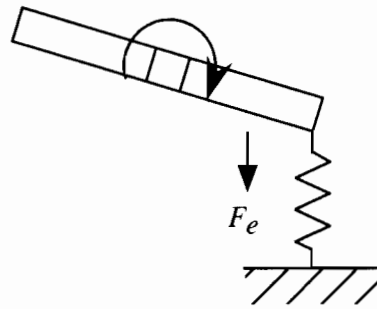


Fig. 5.45 Model of distorted beam

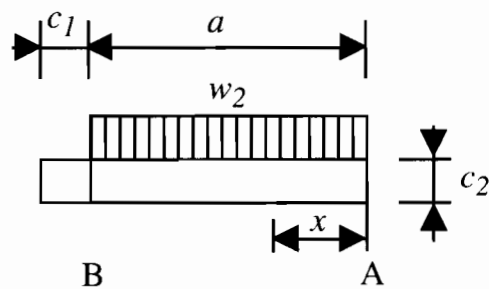


Fig. 5.46 Applied electrostatic force to upper electrode

と求められる。ここで、 k_4 は梁の断面形状によって決定される係数、 G : 樹脂のせん断弾性係数とする。

ここで、上部電極の垂直方向の移動量を z とすると、 $a \sin \theta = z$ なる関係が成立する。すると、 θ は次式で表すことができる。

$$\theta = \sin^{-1} \frac{z}{a} \quad (5.54)$$

Eqn.(5.53) と Eqn.(5.54) から、

$$F_e = \frac{2k_4 G c_1 c_2^3}{al} \sin^{-1} \frac{z}{a} \quad (5.55)$$

となる。

ここで、回転角度は微小で $\sin \theta \approx \theta$ と近似すると

$$z = a \sin^{-1} \theta \approx a \theta \approx a \sin^{-1} \frac{z}{a} \quad (5.56)$$

と求められる。

Eqn.(5.55) に $\frac{a}{a}$ をかけると、

$$F_e = \frac{2k_4 G c_1 c_2^3}{al} \sin^{-1} \frac{z}{a} \times \frac{a}{a} = \frac{2k_4 G c_1 c_2^3}{a^2 l} z \quad (5.57)$$

と変形することができる。

ここで、弾性係数を k とするとフックの法則から

$$k = \frac{F_e}{z} = \frac{2k_4 G c_1 c_2^3}{a^2 l} \quad (5.58)$$

となる。

自重による梁のたわみ: y_0 と静電力による梁のたわみ: z を考慮すると梁の弾性力は次式で表すことができる。

$$F = k(y_0 + z) \quad (5.59)$$

ロータが回転するためには、ロータと上部電極が接しなければならない。そのためには、梁自身のたわみによる変形量より静電力によって生じるねじれの変位の方が大きいことがもとめられる。すなわち、梁の弾性力 F と静電力 F_e の間に、 $F < F_e$ なる関係が成立しなければならない。Eqn.(5.59) によって求めた移動量と電圧の関係を Fig. 5.47 に示す。また、そのとき採用したアクチュエータのパラメータを Table 5.12 に示す。

Fig. 5.47 を見ると、印加電圧に対して変位が非常に小さいことが分かる。60V までは梁自身のたわみの影響により、アクチュエータは動作しないことが分かる。60V 以上の印加電圧では、 $F < F_e$ なる関係が成立するため、ロータは回転を始める。例えば、印加電圧 150V のとき、上部電極の 1 回の回転運動で得られる変位は 10nm である。今、100Hz の周波数の進行波をこのアクチュエータに入力したとき、その回転速度は 0.15 rpm と求められる。

Table 5.12 Dimensions of traveling wave type microactuator

Width of electrode : a	0.1mm
Length of electrode : b	0.8mm
Width of beam : c_1	30 μ m
Thickness of beam : c_2	30 μ m
Length of upper electrode : l	1mm
Length of beam : e	0.1mm
Gap between upper and lower electrode : d	30 μ m
Density of resin : ρ	1069kg/m ³
Young's modulus of resin : E	1.1 $\times 10^8$ N/m ²
Shear modulus of resin : G	1.5 $\times 10^8$ N/m ²
Coefficient k_4	3.12 $\times 10^{-1}$
Dielectric constant : ε	8.86 $\times 10^{-12}$ F/m

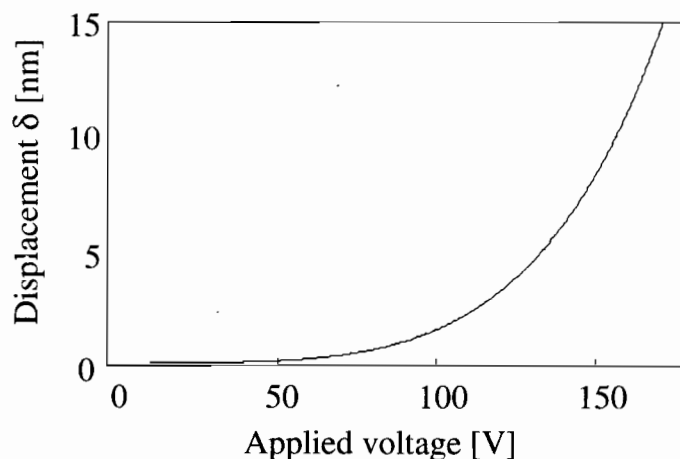


Fig. 5.47 Relationship between applied voltage and displacement of rotor

5.6.3 製作プロセス

進行波型アクチュエータの製作プロセスを Fig. 5.48 に示す。

ただし、図示しやすいようにステータ1個を用いてプロセスを示した。以下に各プロセスについて詳述する。

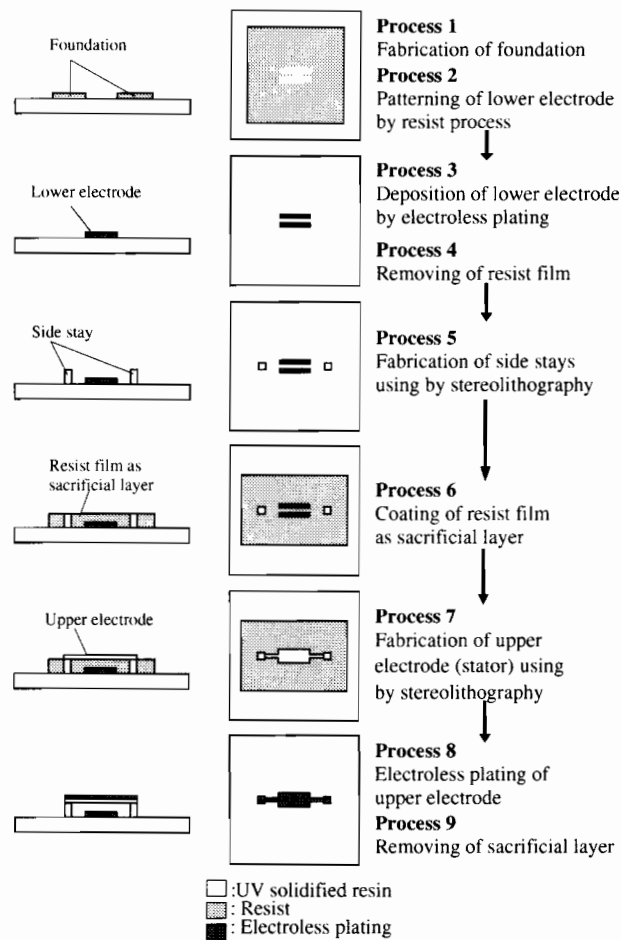


Fig. 5.48 Fabrication process of traveling wave type microactuator

Process 1,2

スライドガラス上に紫外線硬化樹脂の土台を作製する。この土台の上にマスクを用いて下部電極形状のレジスト膜を成膜する。

Process 3,4

無電解めっきを用いて下部電極の形状にニッケルを析出させる。めっき終了後、トルエンに浸けてレジストの剥離を行う。

Process 5

内部硬化式光造形法を用いて側面の支柱を作製する。側面部の高さは $30\mu\text{m}$ と

する。

Process 6

梁部，上部電極を作製するため，レジスト層を犠牲層として使用する．Process 1,2 のときと同様にレジスト膜を成膜する．犠牲層の厚さは，側面の支柱と同じ $30\mu\text{m}$ とする．

Process 7

内部硬化式光造形法を用いて，Process 6 で作製した犠牲層の上に，上部電極部を作製する．

Process 8,9

無電解めっきを行い，梁部，上部電極にニッケルを析出させる．そして，最後にトルエンに浸け，犠牲層を剥離することでアクチュエータは完成する．

5.6.4 考察

進行波駆動型のマイクロアクチュエータの設計を行った．Fig. 5.47 に示したように，印加電圧に対してロータの移動量がきわめて小さいことが分かる．例をあげると，150V のとき上部電極の1回の動作で 10nm の移動量が得られることが分かった．そこで，100Hz の周波数の進行波をこのアクチュエータに加えたとき，0.15rpm の回転数が得られることが分かる．

設計において，考案したマイクロアクチュエータは動作可能であることが分かった．しかしながら，上部電極の回転量が小さいため，ロータの移動量が非常に小さいことも分かった．単位時間あたりの移動量を上げるためには，上部電極の回転角を大きくするか，駆動周波数を高くする必要がある．

このアクチュエータはステータがそれ自身，静電アクチュエータを構成しているため，実際に試作を行う際，製作過程において歩留まりが非常に悪いことが予想される．また，設計の条件を変えても回転量が非常に小さいことから，今回このアク

チュエータは設計の段階でとどめ、試作は行わなかった。

第6章

結論

本論文では、マイクロマシンの製作方法として光造形法に注目して研究を進めてきた。光造形法を用いてマイクロマシンを製作するために必要な高分解能の内部硬化式光造形法の提案、製作時間を短縮を目的とした平面露光型光造形装置の試作をおこなった。さらに樹脂に導電性を付与するために樹脂表面へ金属を析出させる方法を確立した。そして、得られた結果を利用してマイクロ部品の試作を試みた。以下に各章の要約を示す。

第3章では、表面張力の影響や酸素阻害による未硬化層の影響を受けにくい内部硬化式光造形法の提案を行い、造形装置の設計・試作を行った。

樹脂の硬化形状を予測するために、樹脂内部の焦点近傍の3次元光量分布を求め、硬化形状を求めるシミュレーションを行った。硬化実験と比較した結果、収差を考慮したシミュレーションでは、露光時間、硬化高さ・幅ともに硬化実験の数倍のずれに収まった。このことより収差を考慮したシミュレーションでは、樹脂の硬化形状がほぼ推測できるものと思われる。

さらに、マイクロ構造物の製作を行った。試作したハニカム構造物は $84 \times 88 \mu\text{m}$ の領域に1辺 $6 \mu\text{m}$ の六角形のセル39個から構成されている。硬化単位は高さ $29 \mu\text{m}$ 、幅 $2.7 \mu\text{m}$ 、アスペクト比は10.7であった。この結果より従来法と比べて高分解能であることを示した。

これらのことから、提案した内部硬化式光造形法はマイクロマシンの製作方法として極めて有用な方法であることを示した。

第4章では、光造形法の欠点である製作時間の短縮を目的とした平面露光型光造形装置の設計・試作を行った。試作を行った装置は、光源、シャッタ、可変マスクから構成されている。提案した可変マスクはドットインパクトプリンタのヘッド、光ファイバアレイから構成されている。可変マスクの設計にあたっては、光ファイバ変位計の原理を利用してファイバから出射する紫外光の照度分布を求め、マスクとして有用であることを確認した。

以上の結果を利用して装置を試作し、マイクロ構造物の試作を行った。試作した構造物は1辺1.5mm、高さ500 μ m、積層数3、1層あたり600の硬化単位からなる星形の形状である。製作に要した時間は、1点露光方式では112分かかったが、平面露光型光造形法を利用すると58分であった。製作する構造物の形状によって造形速度が依存するものの試作例に関して約2倍もの造形速度の向上を確認することができた。これにより、光ファイバアレイを用いた平面露光型光造形法が製作時間の短縮に効果があることを確認することができた。

第5章では、無電解めっき法を用いて、紫外線硬化樹脂上に金属(Ni, Cu)を析出させる方法を確立した。紫外線硬化樹脂へ金属を析出させた例はあまりなく、樹脂の導電化や機械的特性の改善に大いに有用な手法といえる。次に、紫外線硬化樹脂中に触媒金属であるPdを溶解することによって選択的に無電解めっきが行える方法を確立した。

触媒化された樹脂と普通の状態の樹脂を使い分けることで光造形法を用いてアクチュエータやセンサの製作を行う際に、樹脂の導電化を図れるばかりでなく、機械的性質も改善されることから設計の選択肢が拡がり、加工の自由度が広がるものと思われる。この成果は、マイクロマシンの開発といった分野だけではなく、デザインモデルやワーキングモデルを必要とする製造業の分野にも適用できる。

これまでに得られた成果を用いてマイクロ部品的设计・試作を行った。また新たにLIGAプロセスに類似した方法を開発し、高アスペクト比の金属構造体を得る方

法について述べた。

試作を行ったマイクロ部品は、振動型接触センサ、3自由度静電型マイクロアクチュエータ、そして静電駆動型パルスモータである。なかでも、振動型接触センサのアクチュエータ部分として試作を行った3自由度静電駆動型アクチュエータは、x、y軸回りの回転運動2自由度とz軸方向の並進運動を1自由度の計3自由度を有している。並進運動時において180Vを印加したとき、z軸方向に $20\mu\text{m}$ 変位することを確認した。回転運動は、150V印加時にx軸回りに $-1.15 \times 10^{-2} \sim 4.24 \times 10^{-2}\text{deg}$ 、y軸回りに $-2.58 \times 10^{-2} \sim 6.30 \times 10^{-2}\text{deg}$ 回転することを確認した。

内部硬化式光造形法や平面露光型光造形法を利用してマイクロ部品の製作を行った。設計通りに動作したものもあるが、大半は動作確認を行うことができなかった。この原因として考えられることは、製作プロセスの安定性である。製作プロセスの安定性を左右する要因としては次のものが考えられる。

- 樹脂の硬化収縮に伴う変形
- めっき時における金属が析出する際に生じる内部応力

これらの内部応力を低減する方法の確立を目指すことによってアクチュエータやセンサの製作が容易に行えるものと思われる。

最後に光造形法を用いて、マイクロマシニングを行う際の今後の課題についてまとめおく。

(1) 内部硬化式光造形法

- 樹脂の内部応力の低減
- さらなる高分解能を目指して光学系の改良

(2) 平面露光型光造形法

- 分解能の向上
- さらに製作時間を短縮させるために2次元マスク^{30, 31)}の実現

(3) めっきプロセス

- 金属被膜の内部応力の低減
- 高アスペクト比を持つ鑄型への電鑄方法
- プロセスの安定性

解決しなければならない問題は多々あるが、本論文で提案した方法は、マイクロマシンの製作ばかりでなく、産業界の様々な用途に用いることができる。

内部硬化式光造形法や平面露光型光造形装置はそのまま実機に搭載することで従来使用されてきたものより、高精度化や製作時間の向上が図れるものと考えられる。また、樹脂の表面に金属をめっきすることで機械的特性が改善されるため、実際の部品として機能するワーキングモデルとして使用することも可能であると思われる。そして、モデルにめっきを施すことによって実物に限りなく近い、質感、重量感を備えたモデルの製作が可能になるものと思われる。

本論文で提案した内部硬化式光造形法や平面露光型光造形法、そして樹脂表面へのめっきプロセスは光造形法を利用してマイクロ部品の製作を行う場合の一つの指針を与えうるものと確信する。

参考文献

- 1) 梶山 智晴・富田 裕之・宮原 祐二: “超音波定在波による液中気泡の制御とその応用”, 電気学会論文誌 E, 119 巻, 10 号, pp.464-469 (平成 11 年)
- 2) 細川 和生・藤井 輝夫・遠藤 勲: “疎水性微細管ベントを用いた微量な液滴のハンドリング”, 電気学会論文誌 E, 119 巻, 10 号, pp.470-475 (平成 11 年)
- 3) 例えば生田 幸士・小嶋 俊介・坪井 昌宏・小形 司・深谷 有一郎: “大量生産型マイクロ光造形法の研究 -実証と化学集積回路の試作-”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'96 講演論文集, Vol.B, pp.1233-1236 (1996)
- 4) Behi, F., Mehregany, M. and Gabriel, K.J., : “A Microfabricated Three-Degree-of-Freedom Parallel Mechanism”, *Proc. of MEMS'90*, pp.159-165 (1990)
- 5) E.W.Becker et.al: “Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural heights by synchrotron radiation lithography, galvanofarming, and plastic molding (LIGA Process)”, *Microtron.Eng.*, 4, pp.35 (1986)
- 6) 佐藤 一雄ら: 「単結晶 Si の異方性エッチング技術」, 精密工学会誌, Vol.53, pp.849 (1987)
- 7) 丸谷 洋二・大川 和夫・早野 誠治, 齊藤 直一郎・中井 孝: 「光造形法 - レーザによる 3 次元プロッタ-」, 日刊工業新聞社 (1990)
- 8) 生田 幸士ほか: “3 次元マイクロファブ리케이션”, 第 10 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1213-1216 (1992)
- 9) S.Maruo and S.Kawata : “Two photon absorbed photopolymerization for three dimensional microfabrication”, *Proc. of IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, pp.169-174 (1997)
- 10) 中川 威雄・丸谷 洋二編著: 「積層造形システム-3 次元コピー技術の新展開」, 日刊工業新聞社 (1996)

- 11) 丸谷 洋二・中井 孝: 「レーザーリソグラフィーによる立体形状創成時における形状歪」, レーザー研究, 17, 5, pp.410-416 (1989)
- 12) K.Yamaguchi and T.Nakamoto: “Consideration on the Accuracy of Fabricating Microstructures using UV Laser Induced Polymerizations”, *5th Int. Symp. on Micro Machine and Human Science*, pp.171-176 (1994)
- 13) T.Takagi and N.Nakajima : “Architecture Combination by Photoforming Process”, *Proc. of IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, pp.211-216 (1994)
- 14) K.Suzumori, A.Koga and R.Haneda: “Microfabrication of Integrated FMAs using Stereo Lithography”, *Proc. of IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, pp.136-141 (1994)
- 15) K.Ikuta, K.Hirowatari and T.Ogata: “Three Dimensional Micro Integrated Fluid System(MIFS) Fabricated by Stereo Lithography”, *Proc. of IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, pp.1-6 (1994)
- 16) 単 学伝・高木 太郎・中島 尚正・横浜 正毅・柳沢 一向: “光造形法を応用したセラミック / 金属微小構造体の製法 (第1報) 製法の提案と基礎実験”, 1994年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.579-580 (1994)
- 17) 榎原 弘之・小島 真一・五十嵐 悟・斉藤 勝政: “光造形法の立体形成機構に関する研究 (第1報) 硬化単位形状の検討”, 精密工学会誌, 61, 1, pp.117-121 (1995)
- 18) 荻原 茂・古川 進・清弘 智昭・牧野 洋: “宝飾工芸品のためのレーザーリソグラフィ(第1報) 斜め照射の提案”, 精密工学会誌, 62, 11, pp.1587-1191 (1996)
- 19) 庄 浩司: 平成8年度近畿大学大学院工学研究科修士論文 “光造形法を用いた微小立体構造物の製作に関する研究” (平成9年)
- 20) 大坪 義一・山本 昌彦・田所 論・高森 年: “光造形法を用いた微小立体構造物の製作 (第1報) 内部硬化式光造形法の提案と樹脂の硬化形状シミュレーション”, 精密工学会誌, 64, 8, pp.1181-1185 (1998)

- 21) 永松 元太郎・乾 英夫: 「感光性高分子」, 高分子刊行会, pp.28-29 (平成2年)
- 22) 草川 徹: 「レンズ設計のための波面工学」, 東海大学出版, pp.1-23 (1986)
- 23) 石黒 浩三: 「基礎物理学選書 23 光学」, 裳華房, pp.40-42 (1993)
- 24) マックス・ボルン, エミル・ウォルフ: 「光学の原理 II」, 東海大学出版会, pp.652-669 (1991)
- 25) 深谷 有一郎・生田 幸士・小嶋 俊介: “3次元マイクロファブリケーションの研究(第7報)-大量生産型 IH プロセスを用いた光センサ型 MIFS の試作-”, 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集, Vol.1, pp.25-26 (1996)
- 26) 小林 智文: 平成8年度近畿大学大学院工学研究科修士論文 「光ファイバを用いた平面露光型光造形装置の開発」 (平成9年)
- 27) 大坪 義一・山本 昌彦・田所 諭・高森 年: “光ファイバを用いた平面露光型光造形装置の開発”, 電気学会論文誌 E, 119-E, 4, pp.247-252 (1999)
- 28) R.O.Cool and C.W.Hamm: “ Optic Lever Displacement Transfer “, Appl. Opt., 18, 19 (1979)
- 29) 森山 茂夫・内田 史彦・瀬谷 英一: “光ファイバ式微小変位計における反射率の自動補正”, 精密工学会誌, 53,10, pp.124-128 (1987)
- 30) 特開公 2000-254976, 「光造形装置」
- 31) 特開公 2000-272017, 「積層造形装置」
- 32) 内藤 光信: 平成8年度近畿大学卒業論文 「光造形法を用いたマイクロアクチュエータの開発 - 選択的無電解めっき法の確立 -」 (平成9年)
- 33) 岡村 寿郎・川岸 重光・神戸 徳蔵・鷹野 修: 「無電解めっきの応用」, 槇書店 (1991)
- 34) 社団法人日本化学学会: 「1億人の化学めっきとハイテク」, 大日本図書 (1992)
- 35) 電気鍍金研究会編: 「無電解めっき基礎と応用」, 日刊工業新聞社 (1994)

- 36) 新家 智彦: 平成10年度近畿大学卒業論文「光造形法を用いたマイクロアクチュエータの製作」(平成11年)
- 37) Kenichiro Suzuki and Hiroshi Tanigawa: "Single Crystal Silicon Rotational Micromotors", *Proc. of IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, pp.15-20 (1991)
- 38) 矢野 克彦: 平成9年度近畿大学卒業論文「光造形法を用いた振動型接触センサの開発」(平成10年)
- 39) 上田 寛編: 「静電気辞典」, 朝倉書店(1988)
- 40) 宮田 博: 平成10年度近畿大学大学院工学研究科修士論文「光造形法を用いたマイクロアクチュエータの製作」(平成11年)
- 41) 有澤 大治郎: 平成11年度近畿大学大学院工学研究科修士論文「光造形法を用いたマイクロアクチュエータとマイクロセンサの開発」(平成12年)
- 42) For Example, Toshio Fukuda et.al.: "Micro Electrostatic Actuator with Three Degrees of Freedom", *Proc. of IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems(MEMS'90)*, pp.153-158 (1990)

本論文に関連する論文・講演ならびに 特許出願

本論文に関連する論文・講演は次の通りである。

1. 大坪 義一, 田尻 和弘, 田所 諭, 高森 年: “マイクロマシニングによる静電型リニアアクチュエータの開発 -(第1報) アクチュエータの試作-”, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.733-734 (1993)
2. 大坪 義一, 橋寺 晋, 田所 諭, 高森 年: “マイクロマシニングによる静電型リニアアクチュエータの開発 -(第2報) 有限要素法による電界計算に基づくシミュレーション-”, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.735-736 (1993)
3. Yoshikazu Ohtsubo, Hirokazu Goto, Shin Hashitera, Kazuhiro Tajiri, Kohei Suzuki, Satoshi Tadokoro and Toshi Takamori: “Development of an Electrostatic Linear Actuator by Micromachining Processes”, Proc. of IECON'93, Vol.3, pp.1808-1813 (1993)
4. 庄 浩司, 大坪 義一, 山本 昌彦, 田所 諭, 高森 年: “光造形法を用いた微小立体構造物の製作に関する研究 (第1報) -樹脂の硬化形状のシミュレーションと検討-”, 精密工学会春季全国大会学術講演会講演論文集, pp.1121-1122 (1996)
5. 小林 智文, 大坪 義一, 山本 昌彦, 田所 諭, 高森 年: “光ファイバー用いた光造形装置の開発 (第1報) -光強度分布と樹脂の硬化特性-”, 精密工学会春季全国大会学術講演論文集, pp.983-984 (1996)

6. 梶松 由雄, 庄 浩司, 大坪 義一, 山本 昌彦, 田所 諭, 高森 年: “自由液面法によるマイクロ構造物の製作”, 第6回設計工学・システム部門講演会講演論文集, pp.4-5 (1996)
7. 庄 浩司, 大坪 義一, 山本 昌彦, 田所 諭, 高森 年: “光造形法を用いた微小立体構造物の製作に関する研究 (第2報) - 最適硬化エネルギーと樹脂の硬化形状 -”, 日本ロボット学会学術講演会講演集, pp.17-18 (1996)
8. 大坪 義一, 山本 昌彦: “光造形法の改良技術”, (株) シー・エム・シー月刊機能材料, Vol.17, No.2, pp.5-12 (1997)
9. 小林 智文, 大坪 義一, 山本 昌彦, 田所 諭, 高森 年: “光ファイバー用いた光造形装置の開発 (第2報) - 光ファイバを用いた光造形装置の製作 -”, 精密工学会春季全国大会学術講演論文集, pp.761-762 (1997)
10. 大坪 義一, 山本 昌彦, 田所 諭, 高森 年: “光造形法を用いたマイクロアクチュエータの製作”, 計測自動制御学会関西シンポジウム講演論文集, pp.45-48 (1997)
11. 宮田 博, 大坪 義一, 山本 昌彦, 田所 諭, 高森 年: “光造形法を用いたマイクロアクチュエータの製作”, 日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1079-1080 (1997)
12. 大坪 義一, 山本 昌彦, 田所 諭, 高森 年: “光造形法を用いた微小立体構造物の製作”, 型技術協会 第12回ラピッド・プロトタイピングシンポジウム講演予稿集, pp.40-45 (1997)
13. 大坪 義一, 山本 昌彦, 田所 諭, 高森 年: “光造形法を用いた微小立体構造物の製作 (第1報) - 内部硬化式光造形法の提案と樹脂の硬化形状のシミュレーション -”, 精密工学会誌, Vol.64, No.8, pp.1181-1185 (1998)
14. 有澤 大治郎, 大坪 義一, 山本 昌彦, 田所 諭, 高森 年: “光造形法を利用した高アスペクト比金属構造体の作成法の検討”, 日本ロボット学会学術

講演会予稿集, pp.275-276 (1998)

15. 秋山 聡太郎, 大坪 義一, 山本 昌彦, 田所 諭, 高森 年: “簡易印章作製機を用いた平面露光型光造形装置の開発”, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.66 (1998)
16. 大坪 義一, 山本 昌彦, 秋山 聡太郎, 田所 諭, 高森 年: “平面露光型光造形装置の開発”, 型技術協会 第15回ラピッド・プロトタイプングシンポジウム講演予稿集, pp.63-67 (1998)
17. 秋山 聡太郎, 大坪 義一, 山本 昌彦, 田所 諭, 高森 年: “簡易印章作製機を用いた平面露光型光造形装置の開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'99講演論文集 (CD-ROM), 講演番号 1P2-60-083 (1999)
18. 大坪 義一, 山本 昌彦, 田所 諭, 高森 年: “光ファイバを用いた平面露光型光造形装置の開発”, 電気学会論文誌 E, Vol.119-E, No.4, pp.247-253 (1999)
19. 大坪 義一, 山本 昌彦: “光造形法の微小部品への応用”, 先端加工学会学会誌, Vol.18, pp.41-48 (1999)
20. 大坪 義一, 有澤 大治郎, 山本 昌彦, 田所 諭, 高森 年: “光造形法を用いた3自由度静電型アクチュエータの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'00講演論文集 (CD-ROM), 講演番号 1P1-63-097 (2000)
21. 大坪 義一, 山本 昌彦, 田所 諭, 高森 年: “光造形法を用いた3自由度静電型アクチュエータの開発”, 先端加工学会 (投稿中)

本論文に関連する特許出願は次の通りである。

1. 大坪 義一, 山本 昌彦, 秋山 聡太郎, 高森 年, 田所 諭, 宮本 彰: “積層造形装置”, 出願中, 特開公 2000-272017
2. 大坪 義一, 山本 昌彦, 秋山 聡太郎, 高森 年, 田所 諭, 宮本 彰: “光造形装置”, 出願中, 特開公 2000-254976

List of Figures

2.1	Process flow of stereolithography	12
2.2	Convert CAD data into slice data	13
2.3	Fabrication process of 3D structure with stereolithography	13
2.4	Scanning method with XY plotter and with Galvano mirror	15
2.5	Fabrication method of solidified layer	16
2.6	Influence of shape accuracy by surface tension	17
2.7	Damaged structure by adherence to constrained plate	17
2.8	Condensing beam by lens	18
2.9	Beam behavior neighborhood beam waist	19
2.10	Scanning distortion using a deflection mirror	21
2.11	Scanning of isolated objects	22
2.12	Occurrence of curl distortion	23
2.13	Exposure to wide area	23
2.14	Concept of micro total analysis system(μ -TAS)	28
3.1	Proposition of new type unconstrained surface method : Inside Harden Stereo Lithography method(IHSL)	31
3.2	Absorption of light by UV solidified resin	32
3.3	Measuring method of absorption coefficient and critical solidified energy	33
3.4	Experimental apparatus which is used to measure absorption coefficient and critical solidified energy of resins	34

3.5	Measuring method of polymer parameters	34
3.6	Measuring method of solidified depth	35
3.7	Relationship between exposure time and hardening depth	37
3.8	Experimental apparatus for inside solidified type stereolithography	38
3.9	Definition of optical system	39
3.10	Actual optical system and optical system model with simulation	43
3.11	Simulation area	45
3.12	Simulation results without wave aberration	46
3.13	Influence of over exposure (exposure time :60msec)	47
3.14	Relationship between exposure time and height, width, aspect ratio, of solidified resin without wave aberration	47
3.15	Obtained spherical aberration using by ray tracing method	48
3.16	Graph of spherical aberration	48
3.17	Relationship between spherical aberration and wave aberration	49
3.18	Simulation results with wave aberration	51
3.19	Relationship between exposure time and height, width, aspect ratio, of solidified resin with wave aberration	52
3.20	Fabricated linear objects for solidified experiments	52
3.21	SEM photograph of curing experiments	53
3.22	Experimental results of height / width of solidified resins	54
3.23	Relationship between simulation and experimental results	54
3.24	SEM photographs of microstructures (honeycomb shape)	56
4.1	Conventional stereolithography method and plane irradiation type stereolithography method	60
4.2	Concept view of plane irradiation type stereolithography method	62
4.3	Emission of ultraviolet rays from a fiber	63
4.4	Simulation results of light power distribution with an optical fiber	65

List of Figures	157
4.5 Screen projection method	65
4.6 Light power distribution using screen projection method (experimental value)	66
4.7 Simulation results of light power distribution with 2 optical fibers in a line arrangement	67
4.8 Experimental setup for curing experiment	68
4.9 Relationship between between curing diameter and exposure time with 2 optical fibers in a line arrangement	69
4.10 Divided exposure method	69
4.11 Outline of plane irradiation type micro stereolithography equipment	71
4.12 SEM photograph of fabricated microstructure (shape of star)	72
4.13 Dependence between numbers of exposure and shape of structures	74
5.1 Photograph of test pieces for deposition experiment of electroless plating	82
5.2 State of test pieces for each process	83
5.3 Relationship between deposition time and thickness	84
5.4 Experiments of selectivity electroless plating	85
5.5 Photograph of deposited metal “卍” shape structure using selectivity elec- troless plating method	86
5.6 Fabrication process with electroless plating	87
5.7 Conventional method to obtain metal microstructure using stereolithography	90
5.8 Influence of over deposit	91
5.9 Improved elctroplating method to obtain metal microstructure using stere- olithography	92
5.10 Relationship between deposition time and height under variable density of current	94
5.11 SEM photographs of metal microstructure	95
5.12 Principle of detection the contact	96
5.13 General view of movable electrode part	97

5.14 Relationship between applied voltage and beam deflection	99
5.15 Fabrication process of vibration type contact sensor	100
5.16 SEM phtographs of fabricated sensor	101
5.17 Schematic figure of actuator	102
5.18 3DOF motion of actuator	103
5.19 Various supporting beam patterns	104
5.20 Supporting beam model of pattern (a)	104
5.21 Actuator model for simulation	106
5.22 Supporting beam model of pattern (b)	107
5.23 Supporting beam model of pattern (c)	108
5.24 Relationship between applied voltage and deflection of beam	110
5.25 Top view of supporting beams	111
5.26 Fabrication process	113
5.27 SEM photographs of each fabrication process	114
5.28 Experimental apparatus	115
5.29 Static characteristics of 3DOF actuator	116
5.30 Dynamic characteristics under applied voltage of 150V	116
5.31 Measurement method of rotation angle	117
5.32 Image view of electrostatic force driven pulse motor	120
5.33 Movement principle of electrostatic driven puluse motor	121
5.34 Exerted electrostatic force on electorodes	122
5.35 Moment of inartia of rotor	123
5.36 Exerted normal electrostatic force on electrodes	124
5.37 Define of rotor parameters	125
5.38 Relationship between applied voltage and torque	126
5.39 Fabrication process of electrostatic driven pulse motor	127
5.40 Photographs of fabricated actuator	129
5.41 Concept of traveling wave type microactuator	132

List of Figures	159
5.42 Timing chart for driving stators	133
5.43 Definition of upper electrode parameters	134
5.44 Deflection of beam by its weight	135
5.45 Model of distorted beam	136
5.46 Applied electrostatic force to upper electrode	136
5.47 Relationship between applied voltage and displacement of rotor	138
5.48 Fabrication process of traveling wave type microactuator	139

List of Tables

1.1	Characteristics of various techniques to fabricate micromachines	7
3.1	Measurements of hardening depth	36
3.2	Parameters for simulation without wave aberration	45
3.3	Parameters for simulation with wave aberration	50
4.1	Parameters for simulation	64
5.1	Process flow for electroless plating (Ni, Cu)	81
5.2	Process of selectivity electroless plating	86
5.3	Process flow of resist coating	89
5.4	Composite of Watt's bathe	93
5.5	Pretreatment process before fabricating molds	93
5.6	Prameters for simulation	98
5.7	Parameters	109
5.8	Each beam length of various beam patterns	109
5.9	Dimensions of actuator	111
5.10	Rotational motion	117
5.11	Dimensions of pulse motor	126
5.12	Dimensions of traveling wave type microactuator	138

謝 辞

本研究を始めるきっかけを与えていただいたばかりでなく、本論文をまとめる際、神戸大学 工学部 情報知能工学科 教授 高森 年先生には、終始多大なる御助言、励ましの言葉をいただきました。心より感謝いたします。

近畿大学 理工学部 機械工学科 教授 山本 昌彦先生には論文の添削ならびに研究の進め方など親身の指導をしていただきました。ここに心より感謝いたします。

本論文をまとめるにあたりまして、神戸大学 工学部 情報知能工学科 教授 峯本 工先生、多田 幸生先生には多くの意見を賜りました。厚く御礼申し上げます。

大学院の学生時代から今日まで論文の作成方法や学会での発表の方法など徹底的に指導していただきました神戸大学 工学部 情報知能工学科 助教授 田所 諭先生に厚く御礼申し上げます。

光造形装置の製作、シミュレーションプログラムの作成ならびに各種マイクロアクチュエータ・センサの製作におきまして、庄 浩司君(株式会社 松風)、小林 智文君(アマダ・エンジニアリング)、宮田 博君(島津製作所)、有澤 大治郎君(松下電器株式会社)、秋山 聡太郎君(東洋アルミ)、新家 智彦君(松下電器株式会社)に御協力いただきました。ここに心より御礼申し上げます。

生田 幸士先生(名古屋大学)、今村 正人氏(新東工業(株))、日浦 昭二氏(デンケンエンジニアリング(株))をはじめとして多くの方々に学会やシンポジウムにお

いて貴重な御意見を賜りました。ここに深く御礼申し上げます。

研究を進める上で激励の言葉や貴重な御助言をいただきました小林 滋先生(神戸高専), 前田 潔先生(海技大学校), 倉田 純一先生(関西大学)に厚く御礼申し上げます。

最後に, 青山 邑里先生を始めとする近畿大学 理工学部 機械工学科ならびに経営工学科の諸先生方には様々なご援助をいただきました。深く感謝いたします。