OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

| | |
|---|---|
| Title | 液晶マスクを用いた非積層マイクロ光造形法に関する研究 |
| Author(s) | 林, 照剛 |
| Citation | 大阪大学, 2001, 博士論文 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://doi.org/10.11501/3184365 |
| rights | |
| Note | |

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

# 液晶マスクを用いた
# 非積層マイクロ光造形法に関する研究

2000年12月

林　照剛

# 液晶マスクを用いた
# 非積層マイクロ光造形法に関する研究

2000年12月

林　照剛

# 目　次


第１章　緒論……1

１．１　研究の背景……1

１．２　従来の研究……7

１．３　本研究の目的と論文の概要……15

参考文献……19

第２章　ホログラフィ光造形法……26

２．１　ホログラフィ光造形法の特徴……26

２．２　ホログラフィ光造形法の概念と原理……27

２．２．１　位相共役波の基本概念……27

２．２．２　位相共役波の性質……29

２．２．３　位相共役波の発生方法……31

２．３　樹脂硬化現象の基礎的シミュレーション解析……33

２．３．１　シミュレーションモデル……33

２．３．２　シミュレーション基礎式……35

２．３．３　シミュレーション結果と考察……37

２．４　ホログラフィ光造形装置……40

２．５　位相共役波結像点位置検出実験……50

２．５．１　実験方法……50

２．５．２　実験結果及び考察……52

２．６　位相共役波による樹脂硬化基礎実験……52

２．６．１　位相共役波の結像点位置と硬化形状の対応……55

２．６．２　実験結果と考察……55

２．６．３　モデル位置移動による硬化形状の変化……58

２．６．４　実験結果と考察……59

２．６．５　試料面走査による硬化形状の変化……59

２．６．６　実験結果と考察……62

２．７　結言と今後の課題……64

２．７．１　今後の課題と考察……64

２．７．２　将来の展望……65

２．７．３　結言……66

参考文献……67

第３章　液晶マスクを用いた非積層マイクロ光造形原理……68
３．１　本研究の特徴……68
３．２　光硬化性樹脂の硬化原理……69
３．２．１　樹脂硬化のプロセス……70
３．２．２　ランバートの法則と樹脂の硬化深さの関係……75
３．３　濃淡画像による非積層造形……78
３．３．１　液晶マスクの動作原理……80
３．３．２　濃淡画像による非積層造形原理……82
３．４　動画像による非積層造形……85
３．４．１　動画像露光による樹脂露光量の制御……85
３．４．２　動画像露光による非積層造形原理……86
参考文献……90

第４章　基礎特性実験……91
４．１　樹脂硬化特性（ワーキングカーブ）実験……91
４．１．１　実験装置および実験条件……91
４．１．２　樹脂硬化特性評価方法……96
４．１．３　臨界露光量と樹脂および透過深度の測定結果……98
４．１．４　樹脂硬化特性と硬化深さの関係……103
４．２　液晶マスク透過特性実験……103
４．２．１　実験装置および実験条件……104
４．２．２　透過率測定実験……104
４．２．３　液晶マスク透過率測定結果……107
４．２．４　液晶マスク透過特性と使用可能表示階調……107
４．３　樹脂硬化深さ制御実験……109
４．３．１　実験装置および実験条件……109
４．３．２　樹脂硬化深さ制御方法……110
４．３．３　硬化深さ制御結果……110
４．３．４　深さ方向分解能……112
４．４　横分解能実験……112
４．４．１　実験装置および実験条件……112
４．４．２　横分解能評価方法……114
４．４．３　横分解能評価結果……114
４．４．４　横分解能特性と縮小倍率の関係……116
４．５　結言……117

参考文献……118

第５章　濃淡画像による非積層造形実験……119
５．１　濃淡画像実験装置……119
５．１．１　実験装置……120
５．１．２　液晶ディスプレイ駆動方式に関する考察……122
５．２　実験方法……123
５．３　２値画像による２次元造形……124
５．３．１　実験条件……124
５．３．２　２値画像造形結果……124
５．３．３　考察……127
５．４　濃淡画像による非積層３次元造形……134
５．４．１　実験条件……134
５．４．２　濃淡画像造形結果……134
５．４．３　考察……135
５．５　液晶マスクによる非積層造形の精度に関する考察……138
５．５．１　２値画像造形の造形精度……138
５．５．２　濃淡画像造形の造形精度とその問題点……138
５．６　結言……139
参考文献……141

第６章　動画像による非積層造形実験……142
６．１　動画像露光光造形装置……142
６．１．１　均一照明光学系……147
６．１．２　造形部……147
６．２　動画像造形基礎実験……148
６．２．１　動画像露光実験（駆動制御なし）……150
６．２．２　積層造形基礎実験（駆動制御を行った場合）…156
６．３　動画像による非積層造形実験……160
６．３．１　基礎的形状の造形……160
６．３．２　オーバハング形状の造形……161
６．４　考察……169
６．４．１　動画像造形の精度……170
６．５　結言……172

第７章　時間差領域差分法(FDTD)による樹脂内部の電磁場解析･174
７．１　FDTD法の原理･･･174
７．１．１　マクスウェル方程式の空間領域での差分化･･･175
７．１．２　時間領域における差分化･･･176
７．１．３　吸収境界条件･･･179
７．１．４　３次元ＦＤＴＤ法･･･190
７．２　樹脂内部の電磁場解析および樹脂硬化現象解析アルゴリズム･･･197
７．２．１　電界，磁界の計算(STEP1,2)･･･198
７．２．２　露光量の計算(STEP3)･･･198
７．２．３　樹脂に蓄積されるエネルギの計算(STEP4)･･･207
７．２．４　硬化反応率の計算(STEP5)･･･209
７．２．５　パラメータのアップデート(STEP6)･･･209
７．３　液晶マスク露光による硬化現象の解析･･･212
７．３．１　基準領域（１ピクセル）の解析モデル･･･212
７．３．２　電磁場分布および硬化現象解析結果（２次元）･213
７．３．３　横分解能実験結果との照合･･･213
７．４　３次元電磁場解析シミュレーション･･･218
７．４．１　２次元解析結果拡張方法･･･218
７．４．２　３次元FDTD結果との比較･･･220
７．５　結言･･･226
参考文献･･･227

第８章　結論･･･228

関連論文，口頭発表･･･232

謝辞･･･234

# 第１章
# 緒論

## １．１　研究の背景

１８世紀中頃（１７３３年）ケイによって織布過程が改善され，１８世紀末（１７７９年）にワットの蒸気機関を動力としたクロンプトンのミュール紡績機が発明されると綿布の生産量は飛躍的に増大した．いわゆる産業革命の幕開けである．その後工業は著しい発展を遂げ，１９世紀末（１８８６年）にはガソリン自動車がカール・ベンツとゴットリープ・ダイムラーによって発明され，２０世紀初頭（１９０３年）には初の動力飛行がライト兄弟によって実現された．２０世紀中頃（１９４８年）にはトランジスタがショックレー，バーディーン，ブラッテンらによって発明され，１９６１年には有人宇宙飛行が実現され，１９６９年に人類はついに月に至った．これら工業技術発展の歴史は，人類がその限界に挑んだ歴史でもあった．２１世紀を目前にした現在，工業は更なる発展の道を模索し，新たな限界を打ち破る挑戦が続けられている．

発展を続ける工業の中で，近年注目されている技術の一つにマイクロマシン技術［１－１］がある．マイクロマシン基盤技術は微小化をキーワードとした新しい工業技術であり，省資源，省エネルギー，省スペースの他にも様々な利点が期待されている．また，機械のダウンサイジング（小型化）の極限がマイクロマシンであり，その実現に向けて研究が進められている．マイクロマシンの実現により，医療分野ではマイクロマシンを遠隔操作し，マイクロ外科手術による体内の治療が行われ，工業分野では，機械要素の高集積化から機械の知能化が促進され，自力で学習し，破損個所をも修復できる機械が製作されることも予想される．これら既成の概念を打ち破るいわば工業の進化ともいうべき革新がもたらされるとき，人類も新たなる進化の第一歩を踏み出せるのではないだろうか？

マイクロマシンが工業の革新を促すとの考えから，その早急な実現が望まれており，マイクロ部品の製造，組み立て，制御，エネルギー供給等の分野で精

力的な研究がすすめられている．その中で先導的な役割を果たしているのは，基礎的な機械要素の製作，および製作した機械要素の強度や機能を検証する研究である．マイクロマシンの実現には３次元構造を持つマイクロ機械要素の製作が不可欠であり，近年のLIGAプロセス［１－２］に代表されるような超微細加工技術の進歩に伴い様々な成果が得られている．代表的なマイクロ加工技術としては，LIGAプロセスの他にマイクロ放電加工，マイクロレーザ加工，マイクロ超音波加工，マイクロ切削加工，マイクロ研削加工，マイクロモールディング，マイクロ光造形法等が挙げられ［１－３］，それぞれの技術には以下のような特徴がある．

（１）　LIGAプロセス［１－４］

LIGAプロセスは，X線を使った深いリソグラフィと電鋳で高アスペクト比のマイクロ構造を作る方法である．直径１００［μm］以下のマイクロ歯車や線幅５［μm］以下の微小配線を行った例が報告されており［１－４］，高い精度の造形が可能であるが，製造装置の規模が大きく造形手順が複雑である問題がある．

（２）　マイクロ放電加工［１－５］［１－６］［１－７］［１－８］

マイクロ放電加工は，従来の放電加工に微小電極を用い微小エネルギー放電技術によって微細加工を行う技術であり，微細穴の加工が可能となる．この手法では余，増沢，藤野らによって全長５００［μm］程度の車のモデルの製作を行った例［１－５］や正木，藤野，増沢らによって直径３００［μm］のインボリュート歯車の製作を行った例［１－８］等が報告されている．

（３）　マイクロレーザ加工［１－９］［１－１０］

マイクロレーザ加工では，レーザのスポット径を絞り込むことにより直径１０［μm］程度の微細穴の加工が実現できる．また，Nolte, Chichkov, Wellingらによってフェムト秒レーザによる高精度な加工を行った例も報告されており［１－９］，この研究では，近接場光学顕微鏡を応用することで光の波長を下回る横分解能を実現している．

（４）　マイクロ超音波加工［１－１１］［１－１６］

マイクロ超音波加工は，高い振動数で工具を振動させ工具形状に試料を研磨する除去加工のひとつでガラスやセラミックやシリコン等の加工に適している．

（5）　マイクロ切削加工［1－12］［1－13］

マイクロ切削加工は，従来の切削加工の加工精度を向上させて微細加工を行う技術である．島田，井川，田中らによって報告された分子動力学によるシミュレーションの結果から1［nm］単位の加工も可能となることが示唆されている．

（6）　マイクロモールディング［1－14］［1－15］［1－16］［1－17］

マイクロモールディングは，液状化した材料を型に流し込んで所望の形状を持ったマイクロ部品を得る加工である．金型を用いて圧縮，トランスファー，射出，ブロー等の手段により材料を所望の形にする．アルミナ等の素材を高速に成形できるのが特徴である．

（7）　マイクロ研削加工［1－18］［1－19］［1－20］

マイクロ研削加工は，マイクロピンやマイクロ溝の加工に利用されている．工具の大きさではなく，工具の厚さが加工分解能を決定することが知られている．また，通常の研削と異なりマイクロ研削では粒子径が加工精度に大きな影響をあたえるため，サブミクロンオーダーのダイヤモンド粒子等が求められている．

（8）　マイクロ光造形法［1－21］［1－22］［1－26］

光造形法は，光の照射を受けることにより3次元的に架橋反応を起こす樹脂を用い，レーザ走査と積層により3次元形状を造形する手法である．その他の手法に比べて複雑な3次元形状を小規模な装置で造形できることが特徴である．マイクロ光造形法は，微細領域での硬化制御によりマイクロ3次元形状の造形を行う．

本論文は，微小機械要素の製作技術の一つに挙げられるマイクロ光造形法による微細構造物造形に関する研究である．そこで以下に光造形法による3次元造形研究の背景を記し，その後にマイクロマシニングと光造形法の関連について述べる．

光造形法は，1970年末から1980年初頭にかけて，それぞれ小玉秀男［1－23］，Alan J. Herbert，丸谷洋二［1－24］，Charles W. Hull［1－25］らによって同時期に考案された3次元造形技術である．この技術

は，１９８７年に3DSystem社により世界で初めて実用化された光造形装置（SLA-1）が発表されて以来急速な発展を遂げ，型技術，デザイン，医療，マイクロマシニング等様々な分野に応用されている．

光造形法の特徴は，コンピューター上で作成された設計データから迅速に３次元造形を行えることであり，このような特徴を持つ技術はラピッドプロトタイピング［１－２６］と総称され，試作目的以外にも評価モデル作製のための簡易型作製等に利用されている．光造形法の他に代表的なラピッドプロトタイピング技術を挙げると，微粒子を高出力$CO_2$レーザによって焼結させるSLS (selective laser sintering)，紙のシート状の材料を高出力$CO_2$レーザで裁断するLOM ( laminated object manufacturing)，糸状に引き延ばした熱可塑性材料を用いてレーザを用いずに造形を行うFDM(fused deposition modeling)，マスクを用いて樹脂層を露光しワックスを塗布後平坦にし再び樹脂層を塗布し３次元形状を得るSGC(solid ground cutting technology)等がある［１－２６］．これらのラピッドプロトタイピング技術は，多品種少量生産や商品開発サイクルの高速化に対する要望を満たし，短期間で広い範囲に渡って普及することとなった．また，材料にセラミックや金属等を用いて簡易型作製等を行う高速３次元造形技術は，ラピッドツーリングと呼ばれ金属部品の製造や射出成形型の製造に用いられるようになってきている．

ラピッドプロトタイピング技術の普及により，設計から生産ラインを準備するまでに必要とされていた数ヶ月の期間は数週間に短縮され，生産プロセスの効率化が推進された．また，ラピッドプロトタイピング・ツーリング技術は，複雑な３次元形状を完全に自動化されたプロセスによって造形できること，工具摩耗や切削くず，騒音および振動の発生の問題を生じない等の優れた利点を持っている．さらに，コンピューター上で作成された設計データをネットワークを通じて共有すれば，開発作業を全世界で分担して行うことも可能となる．もし，このラピッドプロトタイピング技術を用いてマイクロ３次元形状が造形できれば，マイクロマシン開発の生産性を大幅に向上させられる利点がある．

そこで，マイクロ形状の造形が可能なラピッドプロトタイピング技術として注目されているのが光造形法，つまりマイクロ光造形法である．マイクロ光造形法により，前述のラピッドプロトタイピングの利点を持つ微細構造造形が行える．マイクロ光造形法をLIGAプロセス等の他のマイクロ構造造形手法と比較すると，設計形状の変更等が容易であり，小規模な装置で複雑な３次元形状を造形できる等の利便性に優れている．ただし，マイクロ光造形法には，精密

機械部品の造形には精度が不十分で，使用可能な材料が光硬化性樹脂に制限されること等の問題点がある．以下に現在までに行われている光造形法による造形物の高精度化と微小化に関連した研究について述べる．

光造形法によって造形される物体の精度は，様々な要因が複雑に関連して決定されている．すなわち，樹脂の要因，レーザ光学系・走査系の要因，ソフトウェアの要因等である．樹脂の要因としては，樹脂の収縮，変形硬化特性等が挙げられ，レーザ光学系・走査系の要因としては，走査速度，走査機構の安定性やレーザの走査方法等が挙げられる．ソフトウェアの要因としては，三角形のメッシュによって表現される断面データに情報を変換する際の変換精度，サポートの作成の有無やその位置，走査経路等が挙げられる．光造形の高精度化にはこれらの問題点を解決する必要があり，下記のような研究が行われている．

光硬化性樹脂の収縮や変形について，Eschlらは樹脂の重合反応中の変形の解析を行い，変形量や内部応力を求めた結果に関する報告を行っており［１－２７］，田中らは熱の影響について，動的な硬化収縮モデルを構築し樹脂の硬化収縮現象を解析した結果について報告している［１－２８］．これらの解析結果に基づいて樹脂硬化時や硬化後の変形の影響を明らかにし，造形精度の向上を図ることができる．

ソフトウェアの問題では，鈴木らが評価モデルのための滑らかな表面をもつ三角パッチをあてはめる手法に関する報告を行っている［１－２９］［１－３０］．久保らは，従来手法よりも滑らかに表面形状を表現できるNURBS曲線を利用したモデルの構築に関する報告を行っている［１－３１］．J.Ahnらは，３次元モデルのパッチデータへの変換を高速化するアルゴリズムを提案している．３次元モデルからパッチデータへの変換精度を向上させれば設計したモデル形状に忠実なモデルの造形が行える．また，変換速度をあげればより複雑なモデルの造形が容易になる．

レーザ光学系・走査系の問題について中川は，理化学研究所で開発されたLEDアレイを用いた走査法および，Link Seed System社で開発されたDMD (degital mirror device)を用いた面露光型光造形装置等について述べている［１－３２］．服部らは，ホログラムの実像再生を利用した光造形法についての報告を行っている［１－３３］．佐藤らは，エキシマレーザを用いた光造形

装置の光学系について検討を加え，基礎特性についての報告を行っている［１－３４］［１－３５］．これらの研究により，造形の高速化や新たな光源の利用が検討されている．

光造形法による造形物の表面精度向上を目的とした研究には，楢原らによって報告された引き上げ照射によって層間の段差による表面粗さの軽減に関するもの等がある［１－３６］［１－３７］［１－３８］［１－３９］［１－４０］［１－４１］［１－４２］．また，志波，楢原らは積層造形法の高精度化を目的とした加工誤差評価システムについての提案とそのシステムの評価を行っている［１－４３］．D.Duttaらは，光造形法を始めとする積層法の曲面領域での積層厚さを最適化するアルゴリズムを提案し，表面精度の向上を図っている［１－４４］．A.S.Novacらは，積層法の層厚さの最適化問題に取り組み，造形形状の精度向上についての解析を行っている［１－４５］．

さらに，光造形法ではその材料が光硬化性樹脂に制限されることから，造形される物体の強度が課題となる．中本らは，マイクロ構造を造形するための光硬化性樹脂にウィスカーを混入することで造形物の強度向上効果と硬化収縮の抑制に効果があったと報告している［１－４６］［１－４７］．単，高木らは，光造形法を応用し樹脂にセラミック粉末を混入し，硬化させた後に焼結を行うことでセラミックマイクロ構造体の造形を行った結果について報告している［１－４８］．

また，金属材料等を利用できるマイクロ構造の高速造形手法もいくつか報告されている．金属材料を用い高強度な物体の造形を行うマイクロラピッドツーリング技術としては，山口らがインクジェットノズルから溶融メタルを射出し，造形することで金属材料で高精度かつ高速な造形を行う手法について報告している［１－４９］［１－５０］［１－５１］［１－５２］．前川らは金属とバインダをまぜシート状にし，YAGレーザを照射して焼結させることにより金属材料による高速マイクロ３次元造形に成功している［１－５３］［１－５４］．Y.P.Kathuriaは，Nd-YAGレーザを用いたSLS (selective laser sintering)によるマイクロ構造の造形について述べている［１－５５］．また，国枝らは，放電加工を応用し３次元造形手法を提案し，金属素材を用いた微細加工を行っている［１－５６］．比較的，大きな形状の造形として，阿部，小坂田らは医療目的にチタン粉末を用いて歯冠や骨のモデルを造形した結果について報告している［１－５７］［１－５８］．他にも数多くの高速３次元造形

手法が報告されているが，微小領域での３次元造形を対象としないものについては，本論文ではふれないものとする．これらの例では，材料が光硬化性樹脂に制限されず，金属材料等の利用が可能となる点が優れている．

これまでに述べたようにマイクロラピッドプロトタイピング・ツーリング技術は，マイクロマシン基盤技術としての重要性を増してきており，その実現にむけて様々な微細加工技術の研究が行われている．なかでも，マイクロ光造形法は，高速かつ高精度に複雑な３次元形状を造形しうる新しい造形手段として注目されており，近年の造形精度の向上と材料の光硬化性樹脂の改良により急速な発展を遂げてきている．マイクロ光造形による高速３次元微細加工の実現によって，マイクロマシン設計や生産の効率化が図られることから，現在研究の段階にあるマイクロマシンの実用化において大きな役割を果たすと考えられる．

## １．２　従来の研究

前節でも述べたように，マイクロ光造形法によるマイクロ構造物造形の実現に対する要望は大きく，現在までに数多くのマイクロ光造形法が提案されている．本節では，現在までに行われている様々なマイクロ光造形法の特徴について表１．１にその一部について要約し，以下に簡潔に説明する．これまでに提案されたマイクロ光造形手法では，独自のレーザ光学系・走査光学系を用いてマイクロ構造の造形に適した露光方法を実現している．

光造形法では，レーザ等の光源を用いて光硬化性樹脂を硬化させ，３次元形状を造形する．樹脂の露光方法は大きく２種類に分類され，それぞれ，走査露光法，および面露光法と呼ばれている．図１．１(a)に示すように，走査露光法は収束レーザビームを走査することで所望の領域を露光し，図１．１(b)に示すように面露光法はマスクを均一に照明しその透過光によって樹脂面全体を露光する．

また，３次元形状の造形方法も，薄い２次元層を形成し層を積み重ねて３次元形状を造形する積層法と，積層を行わずに樹脂内部で３次元的に樹脂の硬化反応を制御する非積層法の２種類に分類される．

露光方法が２種類，３次元形状の造形方法が２種類に分類されるのでそれぞれを組み合わせれば，光造形法を計４種類に分類できる．これをそれぞれ，走査露光積層型，走査露光非積層型，面露光積層型，面露光非積層型光造形法と

表1.1 主なマイクロ光造形技術

| 造形方式 | 造形原理 | 特徴 | 使用樹脂 |
|---|---|---|---|
| 走査露光積層型<br>(点露光)<br><br>走査露光積層型<br>(点露光／面露光) | DVD光ヘッドによる卓上型光造形装置[1-63]<br><br>冷却固化式光造形法<br>[1-64],[1-65] | スピナー方式による厚さ数$\mu$mの層の生成による厚さ方向分解能の向上，ＤＶＤヘッドの利用による装置の小型化.<br><br>樹脂を冷却硬化し，光を露光するためサポートのいらない造形が可能．冷却硬化樹脂上に紫外光吸収インクでマスクを描画すれば，面露光造形も可能. | 可視感光樹脂<br>(アクリレート系)<br><br>紫外線硬化樹脂<br>(相転移可能)（ゲル⇔固体)<br>(ウレタンアクリレート系) |
| 面露光積層型<br>(面露光) | 液晶ディスプレイを動的マスクにもちいたマイクロ光造形法[1-66] | 液晶ディスプレイをパターン変更の可能な動的マスクとして利用し波長515nmの光により，マイクロギヤ等の造形を行う. | 可視感光樹脂<br>(アクリレート系) |
| 走査露光非積層型<br>(点露光) | 内部硬化マイクロ光造形法<br>[1-69]<br><br>２光子吸収を利用した３次元微小立体構造の形成<br>[1-70]<br><br>樹脂液中のバブルを用いた３次元露光[1-72],[1-73] | 透過性の高い波長442nmの微弱な光を集光して，焦点付近のみで樹脂を硬化．高い分解能で樹脂内部での３次元的な走査を実現.<br><br>２光子吸収現象を利用し，焦点付近のみで樹脂を硬化させる．サブミクロンオーダーでの分解能を実現.<br><br>樹脂中にパイプを入れ気泡を生成し，その気泡から光を照射することで，樹脂内部の３次元的走査を実現. | 紫外線硬化樹脂<br>(ウレタンアクリレート系)<br><br>紫外線硬化樹脂<br>(ウレタンアクリレート系，<br>エポキシ系)<br><br>紫外線硬化樹脂<br>(ラジカル重合系) |
| 面露光非積層型<br>(面露光) | 液晶マスクを用いた非積層マイクロ光造形法* | 液晶マスクに，濃淡画像や動画像を出力し波長488nmの可視光により樹脂内部の硬化現象を制御し微細構造を高速かつ高精度に造形する | 可視感光樹脂<br>(ウレタンアクリレート系) |

＊本研究

呼ぶものとする．以下にこれまでに提案されているマイクロ光造形法を分類し，その特徴について述べる．

（1）走査露光積層型

走査露光積層型のマイクロ光造形法は，一般的にSLAとして知られる手法を高精度化したものである．造形手順の概略を図1．2に示す．まず，薄い僧正の光硬化性樹脂に2次元断面をレーザ走査によって描画する．次に作成した2次元断面の上に新たな樹脂層を形成し，再びレーザ走査によって新たな断面を描画する．このプロセスを繰り返すことで3次元形状を造形する．この場合マイクロ構造物を造形するには，高精度な走査光学系を用いて薄い樹脂層に2次元断面を描画する必要がある．また，収束ビームのスポット径によって最小硬化単位が定まるのでスポット径を小さく保つことも重要である．

高木，中島らは，光造形によって小型形状の造形を行うに当たって，樹脂の硬化現象の理論的な解析と実験装置の試作を行っている［1－59］．造形を行うに当たっては，液面の高さを一定に保つために規制液面法［1－60］を採用し，波長325［nm］のHe-Cdレーザを光源に用いている．さらに，シミュレーションによって樹脂の硬化形状と収束ビームの焦点位置の関係を明らかにしその実験的な検証を行い，タービンやくし状のパターンを造形し，10［μm］の横分解能を実現している．

生田らは，光造形によってマイクロ構造を造形しモールディングと組み合わせて金属のマイクロ構造を得る手法を提案し，マイクロ構造の造形を行っている［1－61］．試作された装置は規制液面法を採用しており，100×100×1000［μm］の曲がりパイプや直径50［μm］，高さ250［μm］のマイクロコイル等を造形した結果について報告している．

林，後藤らは，光造形によってマイクロ部品の加工を行うための高精度光造形装置の設計と試作を行っている［1－62］．高精度な造形を行うためには加工パラメータとなるレーザパワーとレーザ走査速度，レーザビーム幅の変動を押さえることが重要であるとして，音響光学素子を用いて光強度を検出し光強度の変動を抑制する機構，およびステージ位置をフィードバック制御して速度変動を抑制する機構を試作した装置に内包し，レーザビーム径の変動を押さえるために規制液面法を採用し，樹脂を配置するステージの真直度を向上させている．試作した装置を用いて一辺100［μm］の立方体や直径100［μm］，高さ100［μm］の円柱を造形した結果，高さ方向誤差では6．0～7．6［μm］，横方向誤差は2．4～7．6［μm］の誤差とな

ることを報告している．

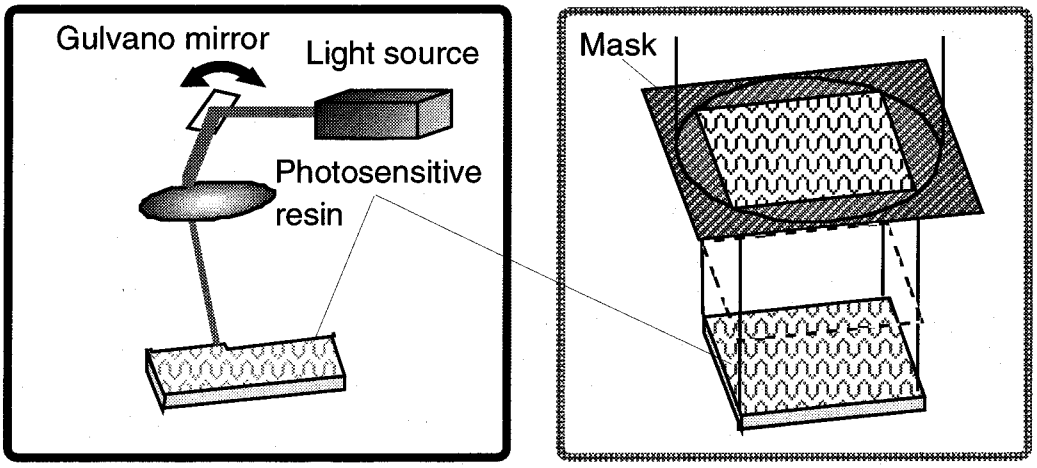
浮田，冨村は，ＤＶＤヘッドによる卓上型光造形装置を試作し，マイクロ構造の造形を試みている［１－６３］．DVD用光ヘッドを用いて横方向の高分解能と低価格小型装置を実現し，遠心力で広げた厚さ数［μm］の樹脂を露光することによって積層膜の厚さで定まる深さ方向の分解能の向上を図っている．試作した装置を用いて一辺３０［μm］の正方形や直径３０［μm］の円を薄さ２［μm］の層に描画し，深さ方向に２［μm］，横方向に１［μm］の分解能を実現し，微小羽根車の造形を行った結果について報告している．

村上，神村らは，冷却固化式光造形法を提案し，冷却固化式光造形装置の試作，および造形実験を行った結果について報告している［１－６４］．この手法では，薄くのばした樹脂の層を冷却凝固させてから収束レーザビームで露光し樹脂を固化させる．この過程を繰り返した後，最後に加熱して未固化樹脂を融かして除去することにより目的の形状を得る．冷却凝固した樹脂がサポートの役割を果たすため，液状の樹脂を硬化させて造形を行う際に必要となるサポートが不要となり，孤立形状やオーバハング形状の造形が容易である．また，サポートを取り外す際の誤差が発生せず，高精度な造形が可能となる．さらに，硬化樹脂層に平坦化処理を施せば高精度な平面の積層が行える可能性がある．この手法によって幅２０mm，高さ６mmのシーソーをサポートなしに造形したと報告している．

これらの方法によって，従来手法と比べて高精度な造形が可能となるが，積層法に起因する層間の段差による誤差や走査光学系に起因する誤差を取り除くことはできない．そのため，層を薄くし，高精度な走査光学系の制御を行うことが，マイクロ構造の造形には不可欠となる．多くの手法で規制液面法が用いられているのは，層の表面を均一にし層の厚さを薄く保つのに規制液面法が適しているためである．しかし，一層当たりの厚さを薄くすれば３次元形状を造形する際の積層回数が増加するため，造形時間と造形精度がトレードオフの関係となることも積層走査型光造形法の問題点として指摘されている．

（２）　面露光積層型

面露光積層型の光造形法は，走査露光積層型の光造形法の収束レーザビームによる走査露光をマスクによる面露光に置き換えたものである．造形手順の概略を図１．３に示す．まず，２次元断面形状を表すマスクを作成し，均一照明を用いて樹脂層を一括露光する．次に新たな断面形状のマスクを作成し，再び樹脂層の形成と露光を繰り返す．面露光積層型の光造形法では，断面形状毎に




(a) Scanning method (b) Mask exposure method

図1.1 走査露光法と面露光法

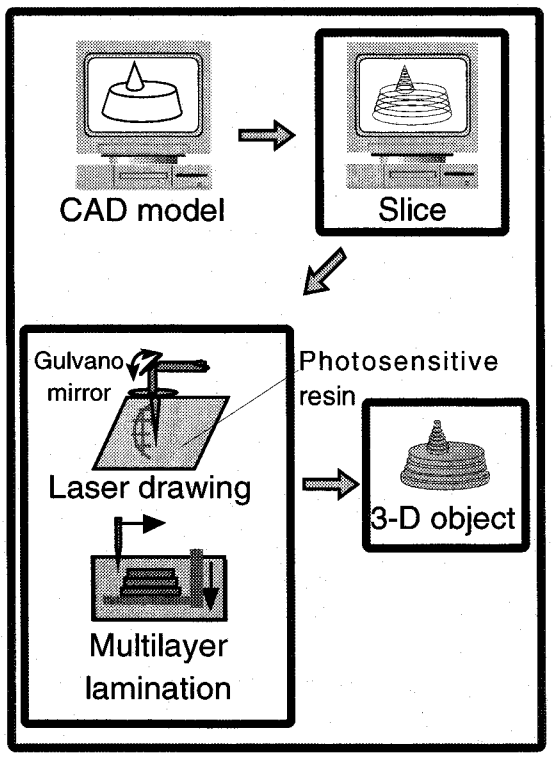



図1.2 走査積層型光造形法

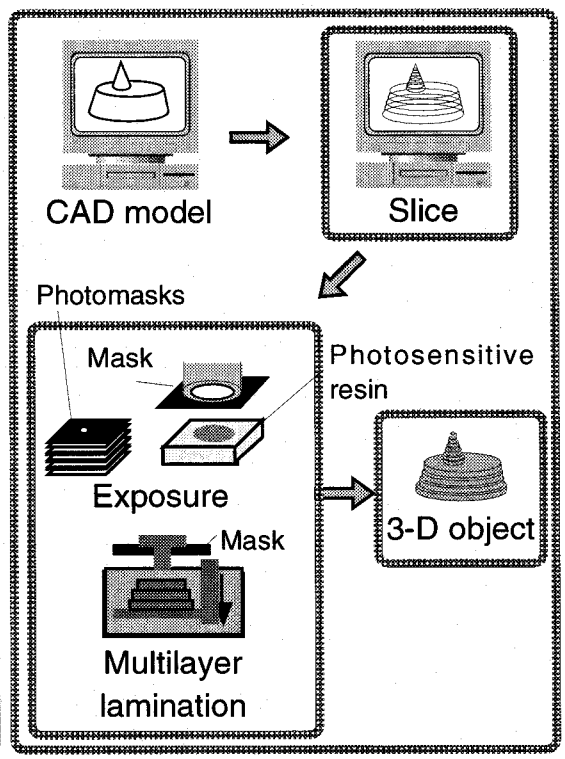



図1.3 面露光積層型光造形法

複数のマスクを作成する必要があり，またマスクの位置調整も困難である．そのため単純な形状の造形に限れば，造形精度と造形速度は走査露光積層型に勝り，マイクロ構造物の造形に適していると言えるが，複雑なマイクロ構造物を造形する場合には造形できる形状の自由度が制限される．面露光積層型によって複雑な３次元形状を造形するには，上記のマスク作成およびマスク位置調整の問題を解決する必要があり，下記の手法によりその解決が図られている．

村上らは，前述の冷却固化式光造形法の露光プロセスに改善を加えて面露光を行っている［１－６５］．その造形手順の概要は以下の通りである．まず，上述した場合と同様に，薄くのばした樹脂層を冷却凝固させ固化した樹脂層を形成する．次に，固化した樹脂層の表面に紫外光を吸収するインクとインクジェットノズルを用いて，断面パターンを描画する．描画後樹脂層を紫外ランプで露光すればインクによる遮光層以外の部分が露光され樹脂が硬化する．上記のプロセスを繰り返すことで３次元形状が造形できる．層の上にマスクパターンを直接描画するため，マスク作成は容易でマスク位置も任意に設定可能であり，面露光法の課題である造形の自由度を確保することができる．遮光層を形成して余剰硬化を防ぐことから深さ方向の造形精度が向上し，さらに層状に直接パターンを描画して露光することから，通常のマスク露光や走査方式に比べて高い横分解能で造形が行える可能性を示唆している．

A.Bertschらは，液晶ディスプレイを可変マスクとして用いた面露光積層型光造形法を提案している［１－６６］．この手法は，マスクパターンを液晶ディスプレイ上に出力し，液晶ディスプレイを透過した光によって樹脂層を露光する．この手法では，マスクパターンの変更が容易でマスク位置調整の問題も生じない．直径７００［$\mu$m］から１８００［$\mu$m］の歯車を造形した結果について報告している．

また，液晶ディスプレイを用いた面露光積層型光造形法として，新野らは液晶プロジェクタを光源に用いた光造形法について，実験装置の試作と造形速度，造形精度の評価を行ったと報告している［１－６７］．S.Venturaらは液晶ディスプレイや他の投影システムを用いてセラミック粉末を含んだ光硬化性樹脂を硬化させ，その後焼結させることでセラミックの３次元構造物を造形する手法を提案している［１－６８］．上記の手法はマイクロ構造の造形を目的とはしていないが，面露光の露光マスクに液晶ディスプレイを用いれば，任意の断面形状マスクを準備できるため複雑な３次元形状を容易に造形できる利点があることを示唆している．

面露光積層型の造形は，マスクによる面露光を行うため収束ビームの走査を行わずに造形することができる．そのため，高速な造形が可能で，しかも走査光学系を必要としないため造形精度も高い．一方，複雑な形状を造形するには上述したマスク作成や位置あわせに関する問題が存在し，任意形状を造形し得るマスクを準備するために様々な手法が提案されている．また，（1）でも述べた積層プロセスに起因する問題の根本的な解決が困難であることは，走査露光積層型の光造形法と共通である．

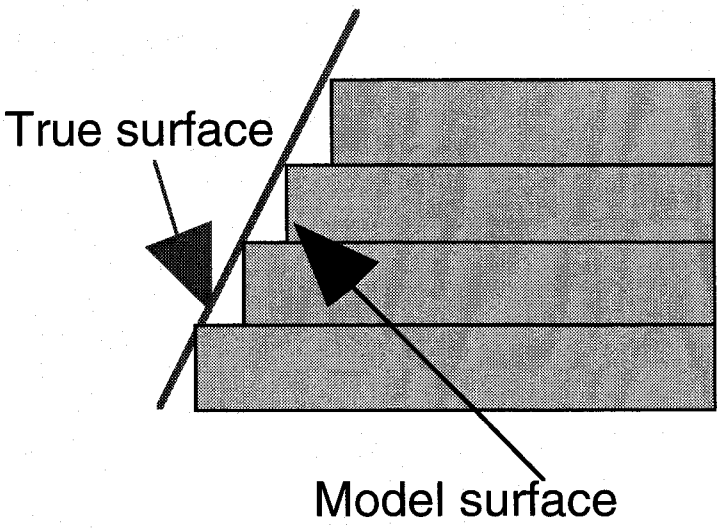
（3）走査非積層型

（1），（2）で述べた手法は積層型に分類され，薄い層を積み重ね積層により3次元形状を造形するため，積層プロセスに起因する問題点の根本的な解決は困難である．その代表的な問題が，図1．4に示すような層間の段差による誤差や層厚さと造形時間の関係である．これらの問題を解決するため，樹脂液中で3次元的な走査露光を行い，硬化反応を制御して3次元形状を造形する手法等が提案されている．

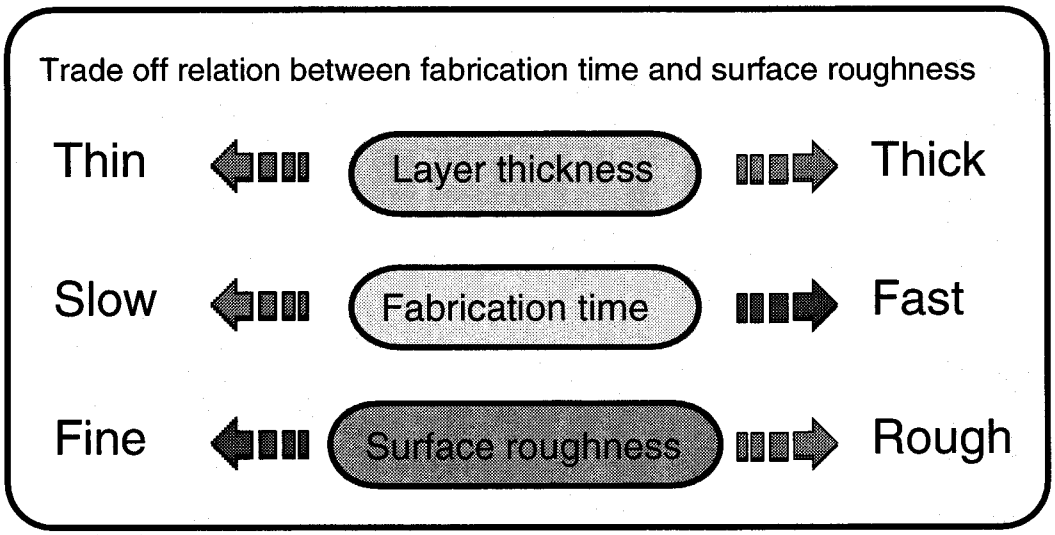
丸尾，生田らは内部硬化式の光造形法を提案し，実験装置の試作と造形実験を行ったと報告している［1－69］．収束ビームを樹脂液中で3次元的に走査し3次元形状の造形を行うこの手法では，透過率の高い波長442［nm］のHe-Cdレーザを光源とし，高い開口数(N.A.:1.0または1.3）の対物レンズによって集光し，焦点近傍でのエネルギー密度を上昇させている．造形には微弱な光を用いているため，エネルギー密度の高い焦点付近で樹脂を選択的に硬化させることができる．この手法によって外径47［$\mu$m］の歯車が約20分で造形可能であることを報告している．

丸尾，河田，生田らは，収束ビームを樹脂液中で3次元的に走査し3次元形状の造形を行う手法として，2光子吸収を用いたサブミクロンの解像度をもつ光造形法を提案している［1－70］［1－71］．上記の手法との違いは2光子吸収という非線形光学現象を樹脂の露光に応用している点である．2光子吸収という現象は電場の2乗に比例して起こるため収束ビームの焦点近傍のみで樹脂が硬化する．また，強度分布の2乗に比例するためビームのスポット径以下の高い分解能を得ることができる．この手法によって，直径14［$\mu$m］の歯車を造形した結果や0．2～0．28［$\mu$m］の横分解能を確認した結果等について報告している．

丸谷らは，3次元的な露光経路を実現する光造形法としてバブル造形法を提案している［1－72］［1－73］．この手法では，樹脂液面下にパイプを




(a) Stair-case effect




(b) Trade off relation

図1.4 積層型光造形法の問題点

挿入しパイプ内部の気圧を高めて気泡をその先端に形成する．レーザ光をパイプ上方から照射し気泡の下端で樹脂を露光すれば，パイプ先端の気泡とともに露光点を移動させることで，樹脂内部で露光点の移動軌跡に従って樹脂が硬化する．同手法によって直径２５［mm］の螺旋構造を造形し，その螺旋構造の斜面に段差は生じないことを実験的に確認している．

大坪らは，樹脂内部での硬化現象のシミュレーションを行い内部硬化式光造形法を提案している［１－７４］．この研究では，露光時間を変化させることによって樹脂の硬化形状を制御し，樹脂液中で造形を行うことで不均一な液面や酸素阻害による影響を除去し，高精度な造形が行えることを示唆している．

走査非積層型の光造形法では，積層型造形法で問題となる層間の段差による誤差の問題を克服することができる．また，樹脂液中で造形を行うため樹脂の表面状態の影響を受けずに造形を行えるほか，断面毎に層を形成する必要がないため造形時間も短縮される．しかし，面露光型の光造形法と比較すると造形速度が遅く，走査光学系に起因する誤差が生じる問題がある．

（４）　面露光非積層型

面露光非積層型光造形法は，面露光により樹脂内部の硬化現象を制御し積層を行わずに３次元形状の造形を行う手法である．面露光非積層型に分類される光造形法に関する研究は本論文第２章で述べるホログラフィ光造形法［１－７５］［１－７６］および，本研究の主題である液晶マスクによる非積層マイクロ光造形法があり，その詳細については本論文全体を通じて説明する．

## １．３　本研究の目的と論文の概要

マイクロ加工技術は数多く存在するが，装置が大規模で造形に複雑な手順を必要とすることから，マイクロ３次元構造物の造形には多大な費用と時間および労力が必要とされる．また，作成できる形状に対する制約も多い．そのなかで，ラピッドプロトタイピング・ツーリングは，小規模な装置で容易に複雑な３次元構造の造形が行えることから，マイクロマシンの新たな生産手段として注目されている．

本研究は，マイクロマシン開発，および生産の効率化のためラピッドプロトタイピング・ツーリングの利点を持つマイクロ光造形法を提案し，マイクロ３次元構造物を高速に，しかも高精度に造形することを目的としている．そこ

で，マイクロ構造物を造形するために非積層面露光型光造形法を提案し，基礎的な造形装置の試作を行い，同手法の実現性を検証する．本手法の用途としては，マイクロ部品の製造やマイクロ試作モデルの造形等が挙げられる．

本研究で行った非積層面露光型光造形法は走査露光積層型の光造形法と比較して以下の（1）～（4）の有利な特徴を持つ．
（1）単位面積当たりの露光に要する時間が大幅に短い．
（2）マスクによる面露光プロセスは，露光の過程で機械駆動制御を必要とせず，露光プロセスで高い精度，分解能で樹脂の露光が可能である．
（3）2次元断面の積層により生じる層間の段差による誤差が発生しない．
（4）積層回数に比例した造形時間の増加が起こらない．

しかしながら，非積層面露光型光造形法の実現には，
（1）走査型露光と同等の自由度をもつ面露光装置の実現
（2）断面の積層によらない3次元モデルの定義方法の確立
（3）樹脂内部での硬化現象の制御
の3点が課題となる．

そこで，上記の課題を克服し，高速・高精度なマイクロ光造形を実現するために液晶マスクを用いた非積層マイクロ光造形法およびホログラフィ光造形法に関する研究を行た．本研究の概要を以下に述べる．本研究は液晶マスクを用いた非積層マイクロ光造形法に関する研究を主に行ったものであり，本論文の本文は2章から7章までの6章で構成され，序論と結論を加えた合計8章からなる．以下に各章の概要を示し，本論文の内容を整理する．

## 第2章　ホログラフィ光造形法

非積層面露光型光造形法として提案したホログラフィ光造形法について述べ，基礎的な実験結果およびその特徴と問題点を示す．この研究では，樹脂液中での硬化現象を理論的に解析し，基礎実験によってその解析結果を検証する．本章では，樹脂内部で非積層造形を行う場合の課題点を示し，ホログラフィ光造形法の将来の展望について述べる．

### 第３章　液晶マスクを用いた非積層マイクロ光造形原理

液晶マスクを用いた面露光により非積層造形を行う基本原理について述べる．また，濃淡画像を用いた非積層造形，および動画像を用いた非積層造形について，それぞれの３次元形状造形過程を解説し，本研究の特徴を示す．

### 第４章　基礎特性実験

液晶マスクによる面露光造形に必要となる基礎特性を調べる実験を行い，樹脂の硬化特性や液晶ディスプレイの光透過特性等を明らかにする．調べた基本特性は，樹脂液中での硬化特性，液晶マスクの光透過特性と表示階調の関係，液晶マスクの表示階調により露光量を調節した時の樹脂硬化特性，液晶マスク露光による造形の横分解能である．この基礎実験の結果は第５章，第６章の造形実験の基本となる．

### 第５章　濃淡画像による非積層造形実験

試作した濃淡画像による非積層造形装置の構成，および液晶マスクに濃淡画像を出力して行った非積層造形実験の結果について述べ，濃淡画像による非積層造形の利点および問題点についてまとめる．液晶マスクに出力した濃淡画像は，パターンの形状がｘ，ｙ軸方向の情報，パターンの表示階調がｚ軸方向の情報にそれぞれ対応し１枚のマスクパターンで３次元の形状を表現している．

### 第６章　動画像による非積層造形実験

試作した動画像による非積層造形装置の構成，および実験装置の機能を検証するために行った基礎実験について述べる．また，液晶マスクに動画像を出力して行った動画像による非積層造形実験の結果について述べ，動画像による非積層造形の妥当性，問題点についてまとめる．ここでいう動画像とは連続して高速に切り替わっていく静止画像を意味する．この連続して変化する動画像を用いて３次元形状の断面を連続的に液晶マスク上に出力しながらベースプレートを駆動制御することによって，オーバハング形状を持つ３次元形状の造形を試みる．

## 第７章　時間差領域差分法(FDTD)による樹脂内部の電磁場解析

液晶マスクによる面露光造形の高精度化を図るため，微小領域における樹脂内部の硬化現象を理論的に解析する．そのため，時間差領域差分法（FDTD法）を用いた樹脂内部の電磁場解析により樹脂硬化現象を可視化するシミュレータを構築する．また，構築したシミュレータにより過渡的な樹脂硬化過程を可視化し，基礎的な樹脂硬化現象を解析する．さらに，液晶マスクによる露光を行った場合の横分解能を評価を行い，液晶マスクによるマイクロ光造形法の高精度化についての検討を行う．

## 参考文献


[1－1] 特集／マイクロマシン, 日本機械工学会誌, Vol.97, No.905, (1994), 252.

[1－2] マイクロマシン技術専門用語v1.0, 財団法人マイクロマシンセンター, (1998), 71.

[1－3] T.Masuzawa, State of the Art of Micromachining, Annals of the CIRP, Keynote paper, Vol.49., 2, (2000), 5.

[1－4] K.D.Wise, K.Najafi, Microfabrication Techniques for Integrated Sensors and Microsystems, Science, Vol.254, (1991), 1335.

[1－5] Z.Y.Yu, T.Masuzawa, M.Fujino, Micro-EDM for three dimensional cavities -development of uniform wear method-, Annals of the CIRP, Vol.47.,1, (1998), 169.

[1－6] K.Furutani, Y.Ito, T.Sata, A new process of additive and removal machining by EDM with a thin electrode, Annals of the CIRP, Vol.49.,1, (2000), 123.

[1－7] K.P.Rajurkar, Z.Y.Yu, 3D Micro-EDMusing CAD/CAM, Annals of the CIRP, Vol.49.,1, (2000), 127.

[1－8] 正木健, 藤野正俊, 増沢隆久, 放電加工による微細穴およびマイクロ３次元形状加工, 型技術ワークショップ’９６ in 大阪 論文集, (1996), 88.

[1－9] S.Nolte, B.N.Chichkov, H.Welling, Y.Shani, K.Lieberman H.Terkel, Nanostructuiring with spatially localized femtosecond laser pulses, Optics Letters, Vol.24, 13, (1999), 914.

[1－10] T. Masuzawa, J.Olde-Benneker, J.J.C.Eindhoven, A new method for three dimensional excimer laser micromachining, Hole Area Modulation (HAM), Annals of the CIRP, Vol.49.,1, (2000), 139.

[1－11] K.Egashira, T.Masuzawa, Microultrasonic Machining by the Application of Workpiece Vibration, Annals of the CIRP, Vol.1, (1999), 131.

[1－12] F.Z.Fang, L.J.Chen, Ultra-precision cutting for ZKN7 glass, Annals of the CIRP, Vol.49.,1, (2000), 17.

[1－13] S.Shimada, H.Tanaka, N.Ikawa, Atomistic Mechanism of Surface Generation in Micromachining of Monocrystalline Silicon, Proc. of 1st EUSPEN Conference, Bremen, Vol.1, (1999) 230.

[1－14] V.Piotter, T.Benzler, T.Hanemann, H.Wöllmer, J.Haußelt,

Manufacturing of Microparts by Micro Molding Techniques, Proc. of 1st. EUSPEN Conference, Bremen, Vol.1, (1999) 494.

[1－15] Th.Schaller, M.Heckele, R.Ruprecht, K.Schubert, Microfabrication of a Mold Insert of Hardened Steel And First Molding Results, Proc. of the fourteenth Annual Meeting, ASPE, Monterey, (1999), 224.

[1－16] E.M.Kjær, B.B.Johansen, H.H.Sørensen, Micro Injection Moulding, Proc. of the 1st. EUSPEN Topical Conference on Fabrication and Metrology in Nanotechnology, Copenhagen, Vol.1, (2000) 259.

[1－17] V.Piotter, T.Benzler, K.Mueller, R.Rupercht, J.Hausselt, Micro Injection Molding of Components for Microsystems, Proc. of the 1st euspen Topical Conference on Fabrication and Metrology in Nanotechnology, Copenhagen, Vol.1, (2000), 182.

[1－18] H.Onikura, O.Ohnishi, Y.Take, Fabrication of Micro Carbide Tools by Ultrasonic Vibration grinding, Annals of the CIRP, Vol.49.,1, (2000), 257.

[1－19] H.Kato, K.Shintani, H.Hanyu, Cutting Performance of CVD Diamond Coated Tool in Machining of Green Body of Silicon Nitride Ceramics -Wear Mechanism of Diamond Coated Tool to the Milling Operation-, Proc. of the fourteenth Annual Meeting ASPE, Monterey, (1999) 111.

[1－20] 松井伸介, 斉藤忠男, 渡邊純二, 大平文和, 小藪国夫, 竹内儀男, 遊離微粒子加工を援用したマイクロ形状加工技術の開発 （第1報） - 加工原理と光通信部品への摘要 -, 精密工学会誌, Vol.64, 1, (1998), 162.

[1－21] 丸谷洋二, 大川和夫, 早野誠治, 斉藤直一郎, 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)

[1－22] P.F.Jacobs著, T.H.Pang, 島田洋 訳, 高速三次元成形の基礎, 原著 Rapid Prototyping & Manufacturitng, 日経BP出版社, (1993)

[1－23] 小玉秀男, 立体造形装置, 特願昭５５－４８２１０, (1981) 517.

[1－24] 丸谷洋二, 光学的造形法, 特願昭５９－１０５３５５, (1985) 73.

[1－25] C.W. Hull, 三次元の物体を作成する方法と装置, 特願昭６０－１７３３４７, (1987) 453.

[1－26] P.F.Jacobs, Stereolithography and other RP&M Technologies, from Rapid Prototyping to Rapid Tooling, ASME Press, NewYork, (1996) 9~14.

[1－27] J.Eschl, K.H.Dusel, P.Eyerer, Simulation of the Mechanical Behavior

of Stereolithography Resins During the Curing Process, Proc. of the seventh International Conference on Rapid Prototyping, San Francisco, (1997), 157.

[1－28] F.Tanaka, M.Morooka, T.Kishinami, H.Narahara, Thermal Distortion Analysis During Photopolymerization in Stereolithography, Proc. of the eighth International Conference on Rapid Prototyping, Tokyo, (2000), 87.

[1－29] H.Suzuki, Direct Refinement of Rapid Prototyping Models Using LSF Subdivision Scheme, Proc. of the eighth International Conference on Rapid Prototyping, Tokyo, (2000), 26.

[1－30] 桜井勇亮, 鈴木宏正, 金井崇, 木村文彦, 頂点オフセットによる三角形メッシュのシェリング - 光造形データ作成への応用 -, 精密工学会誌, Vol.64, 6, (1998), 835.

[1－31] H.Kubo, H.Nakashima Creating Model Data Using Direct Nurbs Manipulation Methods Ideal for Rapid Prototyping, Proc. of the eighth International Conference on Rapid Prototyping, Tokyo, (2000), 32.

[1－32] T.Nakagawa, Rapid Prototyping in Japan, Proc. of the eighth International Conference on Rapid Prototyping, Tokyo, (2000), 1.

[1－33] 服部肇, 竹尾隆, 八木竜之介, 内田悦行, ホログラムの実像再生を利用した光造形, 型技術ワークショップ’９６ in 大阪 論文集, 型技術, Vol.11, 13, (1996) 58.

[1－34] 佐藤三郎, 横川一男, 島田純一, 猪原哲, 石嶺真佐志, 山部長兵衛, 後藤達美, KrFエキシマレーザを用いた光造形の基礎的研究(II), 型技術ワークショップ’９６ in 大阪 論文集, 型技術, Vol.11, 13, (1996) 58.

[1－35] S.Satoh, T.Tanaka, S.Ihara, C.Yamabe, Stereo-Lithography with XeCl Excimer Lamp, Proc. of the eighth International Conference on Rapid Prototyping, Tokyo, (2000), 178.

[1－36] H.Narahara, H.Suzuki, K.Saito, Surface Fidelity Solid-Image Fabrication Process for Next Generation RP System, Proc. of the eighth International Conference on Rapid Prototyping, Tokyo, (2000), 105.

[1－37] 楢原弘之, 斉藤勝政, 光造形用樹脂の定量比較を目的とした硬化特性パラメータに関する研究, 精密工学会誌, Vol.59, 11, (1993), 1803.

[１－３８] 楢原弘之, 斉藤勝政, 光造形法における感光性樹脂の硬化形状解析 -硬化臨界値の測定-, 精密工学会誌, Vol.59, 9, (1993),1477.

[１－３９] 楢原弘之, 斉藤勝政, 光造形法における光学解析 -レーザパワー密度分布の同定手法-, 精密工学会誌, Vol.60, 8, (1994)

[１－４０] 楢原弘之, 斉藤勝政, 光造形法におけるレーザ光学系の理論解析, 精密工学会誌, Vol.60, 7, (1994), 994.

[１－４１] 楢原弘之, 斉藤勝政, 光造形法による複合立体模型の面精度向上に関する研究（第１報） -引上げ照射法の提案 -, 精密工学会誌, Vol.61, 2, (1995), 233.

[１－４２] 楢原弘之, 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, Vol.61, 1, (1995), 117.

[１－４３] 志波義勝, 楢原弘之, 鈴木裕, 積層造形法の高精度化を目的とした加工誤差評価システム, 型技術者会議２０００, (2000), 168.

[１－４４] D.Dutta, P. Kulkarni, Improving Surface Quality and Throughput in Layered Manufactuirng by Adaptive Slicing, Proc. of the seventh International Conference on Rapid Prototyping, San Francisco, (1997), 94.

[１－４５] A.S.Novac, C.H.Lee, C.L.Thomas, Automated Technique for Adaptive Slicing in Layered Manufacturing, Proc. of the seventh International Conference on Rapid Prototyping, San Francisco, (1997),85.

[１－４６] 中本剛, 山口勝美, 土屋隆俊, 方位制御したウィスカーで強化したマイクロ光造形部品の強度の検討, １９９９年度精密工学会春季大会講演論文集, 東京 (1999), 720.

[１－４７] T.Nakamoto, K.Yamaguchi, Unidirectional Whisker Reinforced Micro Part by Laser Photolithography, Proc. of the eighth International Conference on Rapid Prototyping, Tokyo, (2000), 131.

[１－４８] 単学伝, 高木太郎, 柳沢一向, 中島尚正, 光造形法を応用したセラミック微小構造体の製法 （第１報） - 製法の提案と光造形実験 -, 精密工学会誌, Vol.61, 3, (1995), 420.

[１－４９] 山口勝美, 酒井克彦, 平山孝雄, 山中隆, メタルジェットによる三次元構造体の造形, 精密工学会誌, Vol.64, 10, (1998), 1497.

[１－５０] 山口勝美, 酒井克彦, 山崎真明, メタルジェットによる三次元構造体の造形 （第２報） - メタルドットの結合力の測定, 精密工学会誌, Vol.65, 11, (1999), 1639.

[1－51] K.Yamaguchi, K.Sakai, Generation of 3D Microstructure by Metal Jet, Proc. of the eighth International Conference on Rapid Prototyping, Tokyo, (2000), 219.

[1－52] K.Yamaguchi, K.Sakai, Three-dimensional Microforming by Metal Jet, Proc. of the fourteenth Annual Meeting, ASPE, Monterey, (1999), 53.

[1－53] 前川克廣, 小倉慧, 大島郁也, 横山雄一, グリーンテープを用いたレーザマイクロ積層造形法, 精密工学会誌, Vol.64, 9, (1998), 1340.

[1－54] Y.Yokoyama, K.Maekawa, I.Ohshima, Fabrication of Miniature Mechanical And Electrical Parts From Powders Using Greentape Laser Sintering Method, Proc. of the eighth International Conference on Rapid Prototyping, Tokyo, (2000), 213.

[1－55] Y.P.Kathuria, Laser Assisted Metal Rapid Prototyping in Micro-Domein, Proc. of the eighth International Conference on Rapid Prototyping, Tokyo, (2000), 160.

[1－56] M.Kunieda, R.Katoh, Y.Mori, Rapid Prototyping by Selective Electrodeposition Using Electrolyte Jet, Annals of the CIRP, Vol.47, 1, (1998), 161.

[1－57] F.Abe, K.Osakada, Y.Kitamura, M.Matsumoto, M.Shiomi, Manufacturing of Titanium Parts for Medical Purposes by Selective Laser Melting, Proc. of the eighth International Conference on Rapid Prototyping, Tokyo, (2000), 288.

[1－58] 阿部史枝, 小坂田宏造, 吉留彰宏, 金属のラピッドプロトタイピング, 型技術ワークショップ’９６ in 大阪 論文集, 型技術, Vol.11, 13, 54.

[1－59] T.Takagi, N.Nakajima, Photofoming Applied to Fine Machining, Proc of IEEE International Workshop in Micro Electro Mechanical System (MEMS 93), (1993) 173.

[1－60] 丸谷洋二, 大川和夫, 早野誠治, 斉藤直一郎, 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), 80.

[1－61] K.Ikuta, K.Hirowatari, Real Three Dimensional Micro Fabrication Using Stereo Lithography And Metal Molding, Proc. of IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical System (MEMS '93), (1993), 42.

[１－６２] 林辰憲, 後藤崇之, 浅野伸, 保科良祐, 光造形によるマイクロ部品加工, １９９９年度精密工学会秋季大会講演論文集, 仙台 (1999), 7.

[１－６３] 浮田宏生, 冨村明彦, DVD光ヘッドによる卓上型光造形装置と高分解硬化特性, 精密工学会誌, VOl.65, 9, (1999), 1360.

[１－６４] 村上存, 神村明哉, 風間敦, 中島尚正, 冷却凝固式光造形法に関する研究, 日本機械学会論文集（Ｃ編）, Vol.63, 606, (1997) 605.

[１－６５] T.Murakami, A.Kamimura, N.Nakajima, Refrigerative Stereolithography Using Direct Masking, Proc. of the eighth International Conference on Rapid Prototyping, Tokyo, (2000), 184.

[１－６６] A.Bertsch, S.Zissi, J.Y.Jezequel, S.Corbel, J.C.Andre, Microstereophotolithography using a liquid crystal display as dynamic mask-generator, Microsystem Technologies, 3, (1997), 42.

[１－６７] 新野俊樹, 液晶プロジェクタを光源に用いた光造形の検討, １９９９年度精密工学会秋季大会講演論文集, 東京 (1999), 10.

[１－６８] S.C.Ventura, S.C.Narang, S.Sharma, J.Stotts, D.Annavajjula, C.Liu, L.Ho, S.J.Lombardo, A.Hardy, M.Mngaudis, L.Groseclose, Direct Photo Shaping A New SFF Process for Ceramic Components, Proc. of the seventh International Conference on Rapid Prototyping, San Francisco, (1997), 271.

[１－６９] S.Maruo, K.Ikuta, Inner Curable Microstereolithography for Movable Microstructures, Proc. of the eighth International Conference on Rapid Prototyping, Tokyo, (2000), 195.

[１－７０] S.Maruo, O.Nakamura, S.Kawata, Three-dimensional Microfabrication with Two-photon-absobed photopolymerization, Optics Letters, Vol.22, 2, (1997), 132.

[１－７１] Two-photon Micro Stereolithography with Submicron Resolution - Fabrication of a freely movable mechanism -, Proc. of the eighth International Conference on Rapid Prototyping, Tokyo, (2000), 195.

[１－７２] Y.Marutani, T.Kamitani, 3-Dimensional Exposure Using an Air Bubble in the Resin, Proc. of the seventh International Conference on Rapid Prototyping, San Francisco, (1997), 213.

[１－７３] 丸谷洋二, 樹脂液中のバブルを用いた３次元露光経路の実現, 第１２回ラピッドプロトタイピングシンポジウム, 大阪, (1997), 77.

[１－７４] 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, 8, (1998), 1181.

［１－７５］　林照剛, 位相共役光によるホログラフィ光造形法に関する基礎的研究, 修士論文, (1998)

［１－７６］　木村寛, BSO位相共役素子を用いたホログラフィー光造形法の基礎的研究, 修士論文, (2000)

# 第2章

# ホログラフィ光造形法 [2－1], [2－2]

第２章では，面露光非積層型の光造形法として提案したホログラフィ光造形法について論じる．ホログラフィ光造形法の実現性を検討するために，基礎的なシミュレーションにより樹脂内部の硬化現象を解析し，また試作したホログラフィ光造形装置による樹脂硬化基礎実験を行った．さらに，基礎実験から明らかになったホログラフィ光造形法実現への課題について詳細に述べる．

## ２．１　ホログラフィ光造形法の特徴

ホログラフィ光造形法は，次の３つの特徴を有している．

（１）３次元形状をホログラフィ再生像によって表現する．
（２）再生するホログラフィ像を実時間で変更できる．
（３）ホログラフィ像を用いて光硬化性樹脂を一括露光し，樹脂液中で３次元形状を造形する．

（１）で示したように，３次元形状をホログラフィ再生像によって表現するため，３次元モデルのデータを積層型造形法の断面データに変換する際の誤差や積層面間の段差による誤差が発生しない．

また（２）で示したように，ホログラフィ像の再生を実時間で行うため，ホログラフィ再生像を自由に変更できることから任意形状の造形に対応できる．

さらに（３）で示したように，樹脂液中にホログラフィ再生像を結像させることによって，走査，積層を行わない非走査，非積層の露光を実現できる．したがって，露光に走査光学系や積層装置などの機械装置を必要とせず，露光，積層が繰り返されない一括面露光による造形が行える．その結果，露光に要する時間の短縮，および造形精度の向上が可能となる．

## ２．２　ホログラフィ光造形法の概念と原理

ホログラフィ光造形法の概念を以下に述べる．ホログラフィ光造形法は，ホログラフィ再生像を用いて光硬化性樹脂を硬化させ，３次元形状の造形を行う手法である．光の位相情報と強度情報を記録したホログラムを用いて空間上に３次元像を再生した時，ホログラフィ再生像の結像点は図２．１(b)に示すように周辺の光が一点に集光した焦点となる．したがって，結像点の単位面積当たりの光強度がその周辺に比べて高くなることから，光強度の強い点によって描かれる３次元像を得ることができる．このホログラフィ像を樹脂中に再生し，各結像点において選択的に感光性樹脂を硬化させれば所望の３次元形状を得ることができる．

本研究では，３次元ホログラフィ像の再生のために図２．１に示すように位相共役波を発生させている．位相共役波の基本的な性質から３次元モデルと共役な位置での位相共役波は３次元ホログラフィ再生像と等価となる［２－３］．したがって，位相共役波は実時間ホログラフィ再生技術としても知られている．位相共役波の発生には一般に写真乾板の代わりに珪酸ビスマス($Bi_{12}SiO_{20}$以下BSO)，チタン酸バリウム($BaTiO_3$以下BT)等の非線形光学素子［２－４］が用いられており，写真乾板の現像・再生のプロセスを経ずに実時間で３次元像を再生することができる．

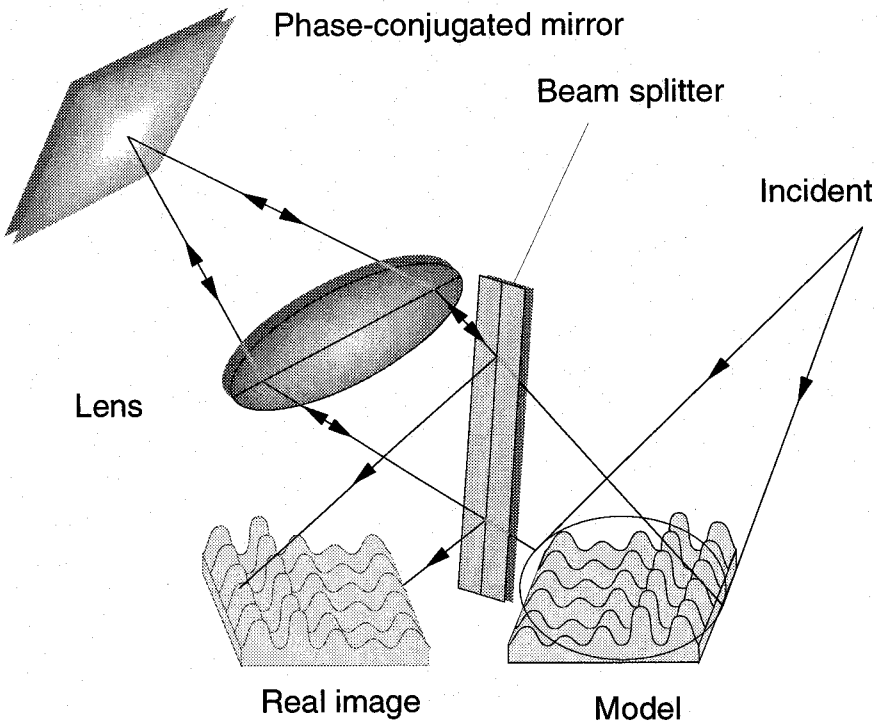
### ２．２．１　位相共役波の基本概念［２－５］

レーザ光によりひきおこされたコヒーレントな非線形過程を用いて，ある複素振幅の光に対して位相の空間情報が反転した別の光が作り出せる．このような性質を有する光を位相共役波（phase-conjugate wave）と称する．

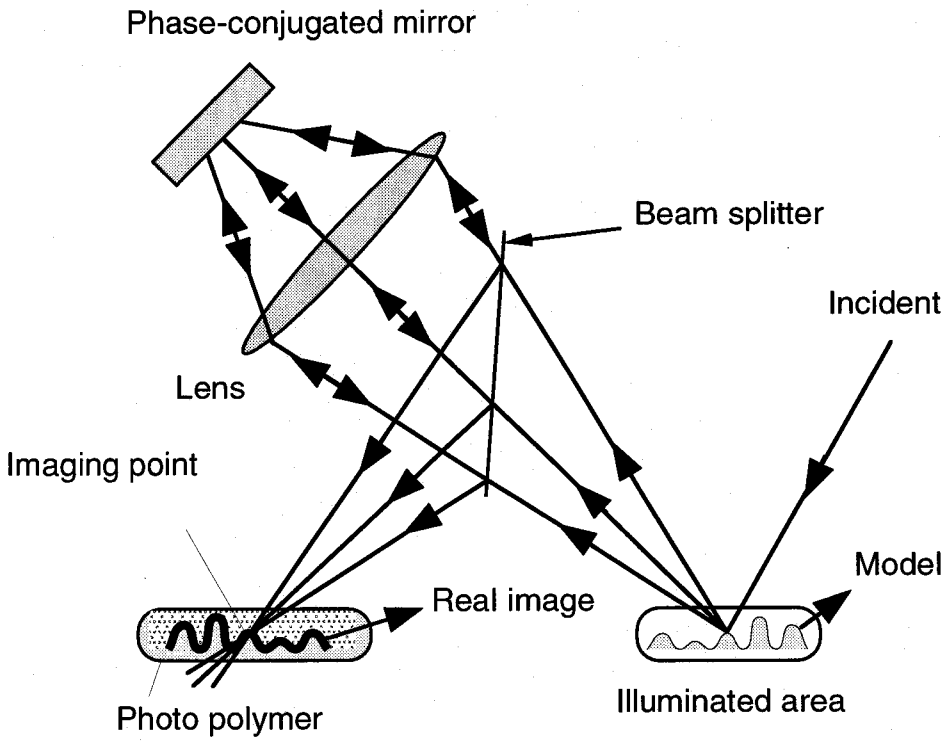
位相共役波の基本概念と性質について以下に述べる．簡単のため周波数$\omega$，伝搬方向$+z$の単色平面波（プローブ波）$E_p(\mathbf{r},t)$が入射したと考え，これを次式で表す．

$$\begin{aligned} E_p(\mathbf{r},t) &= 1/2\,A_p(x,y)\exp\left[i\left(\omega t - k_p z\right)\right] + c.c. \\ &= 1/2\,\phi_p(\mathbf{r})\exp(i\omega t) + c.c. \end{aligned} \qquad (2-1)$$

ただし，$A_p(x,y)$は位相項に比べ空間的にゆっくり変化する複素振幅，$k_p$は入射波の$z$方向波数，$\mathbf{r}$は空間座標ベクトルであり，$c.c.$は直前の式の複素共役を




(a) ホログラフィ実像形成の仕組み




(b) 結像点の光強度分布と樹脂の配置

図2.1 ホログラフィ光造形の原理

とることを意味する．$\phi_p(\mathbf{r})$には空間情報のみならず，偏光情報も含まれているとする．この光波に対する出射光を

$$E_c(\mathbf{r},t) = 1/2\,A_c(x,y)\exp\left[i(\omega t - k_c z)\right] + c.c. \\ = 1/2\,\phi_c(\mathbf{r})\exp(i\omega t) + c.c. \qquad (2-2)$$

で表す．ただし，$k_c$は出射光の$z$方向波数である．ここで$\phi_c(\mathbf{r}) = \phi_p^*(\mathbf{r})$即ち$A_c = A_p^*$かつ$k_c = k_p$が満たされるならば，出射波$E_c$は入射波$E_p$の位相共役波であるという［2－6］．式（2－1)と（2－2）を比較すると，入・出射波は伝搬方向を含めて空間座標に依存した部分が互いに複素共役の関係にあることがわかる．また，

$$E_c(\mathbf{r},t) = E_p(\mathbf{r},-t) \qquad (2-3)$$

が成立する．これは，波面の形はそのままで時間軸だけが反転されていることを意味しており位相共役波は時間反転波とも呼ばれる．また，上記の位相共役の関係を満たす2つの波はあたかも鏡で反射したように振る舞うので，入射光と出射光の関係をブラックボックス的に考え位相共役波を発生させる非線形光学媒質を位相共役鏡(phase-conjugate mirror)と呼ぶ．

### 2．2．2　位相共役波の性質［2－5］

位相共役波の性質を理解するため，平面波が位相物体を通過したときの様子を図2．2に示す．平面波が位相物体を通過すると，図2．2に示すように屈折率の高いところを伝搬してきた中央部は周辺部に比べて位相が遅れる．この波を通常の鏡に入射させると，鏡は伝搬方向を鏡面で折り返した方向に変える作用を持つから，図2．2(a)に示すように，反射波面3は2と凹凸が逆になる．これを再び同じ位相物体に通すと，中央部の位相遅れは2倍となる．一方，波面2を位相共役鏡に入射させると，式（2－3）からわかるように，反射波3は波面の形がそのままで伝搬方向だけが反転する．この波を再び同じ位相物体に通すと，中央部の位相が遅れ，この位相遅れはガラスの往復で打ち消し合う．このように位相共役波の特徴の一つとして空間的な位相補正作用があり，様々な分野に応用されている．その一つが本研究で利用している実時間ホログラフィの再生であり位相共役波の空間的な位相補正作用を利用して3次元

モデルと共役な位置にホログラフィ像を再生している．

### 2．2．3　位相共役波の発生方法

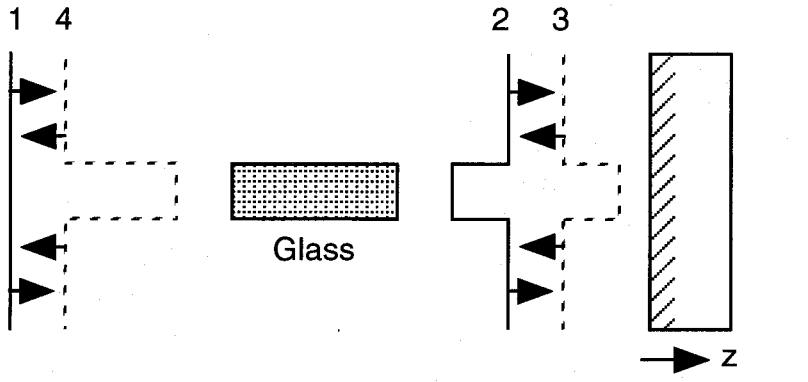
位相共役波を用いて実時間ホログラフィ像を再生するには，微弱な物体波から位相共役波を発生させる必要がある．そこで，微弱な物体波に対して位相共役波を発生させられる光誘起屈折率効果（フォトリフラクティブ効果）を利用した縮退４光波混合を用いる．これは，３次の光非線形感受率$\chi^{(3)}$を有する媒質に，等しい周波数$\omega$の２つのポンプ波を対向させて入射させ，さらに周波数$\omega$の第３の光（プローブ波）を入射させることで，同じ周波数$\omega$の位相共役波をプローブ波と逆向きに発生させるというものである．

以下に縮退４光波混合による位相共役波の発生原理を述べる．同一周波数$\omega$を持つ２つの縮退４光波混合における光学配置を図２．３のようにとる．さらに同一周波数$\omega$の２つのポンプ波$E_f$，$E_b$を対向させて光非線形媒質に入射させる．さらに，同一周波数$\omega$のプローブ波$E_p$を，$E_f$の側から同じ媒質に入射させる．このとき，これら３光波でできる光非線形分極（複素振幅）は，等方性媒質の場合，各光波の電場の複素振幅ベクトルを$A_j$として次のように表せる．

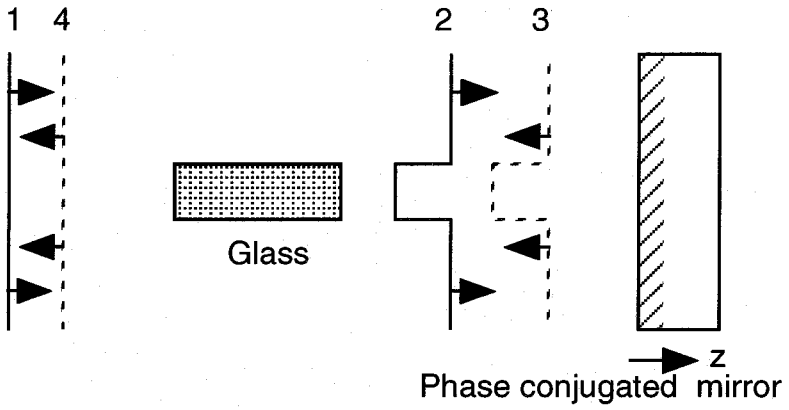
$$P_c^{(3)} = A\left(A_f \bullet A_p^*\right)A_b + A\left(A_b \bullet A_p^*\right)A_f + 2C\left(A_f \bullet A_b\right)A_p^* \qquad (2-4)$$

式（２－４）の第１項は，前進ポンプ波$E_f$とプローブ波$E_p$により空間回折格子（時間的には定常過程）ができ，後進ポンプ波$E_b$がブラッグ回折されて，新しい信号光$E_c(\propto E_p^*)$を発生させる過程を表す．第２項は後進ポンプ波とプローブ波により回折格子ができ，前進ポンプ波が回折される効果を表している．このときは，見かけ上$E_f$が媒質で反射され$E_c$に変換されている．BSOのような非線形光学媒質によるフォトリフラクティブ効果の場合，図２．４に示すように$E_f$と$E_p$の干渉縞の強度分布に応じて，図２．４(a)のバンド輸送モデルにしたがって電子の移動と再結合がおき，これによって生じた空間電場に対応した屈折率変化の分布が生じることにより回折格子が形成される．

この回折格子の形成過程について述べる．まず，干渉縞の明るい点では光エネルギが供給され，電子が伝導帯に励起され移動する．この時，ドナー準位にあるサイトと移動した電子が再結合することにより，空間電荷分布の疎密が生じる．すると，図２．４(b)に示すように電荷分布の疎密によって生じる空間電

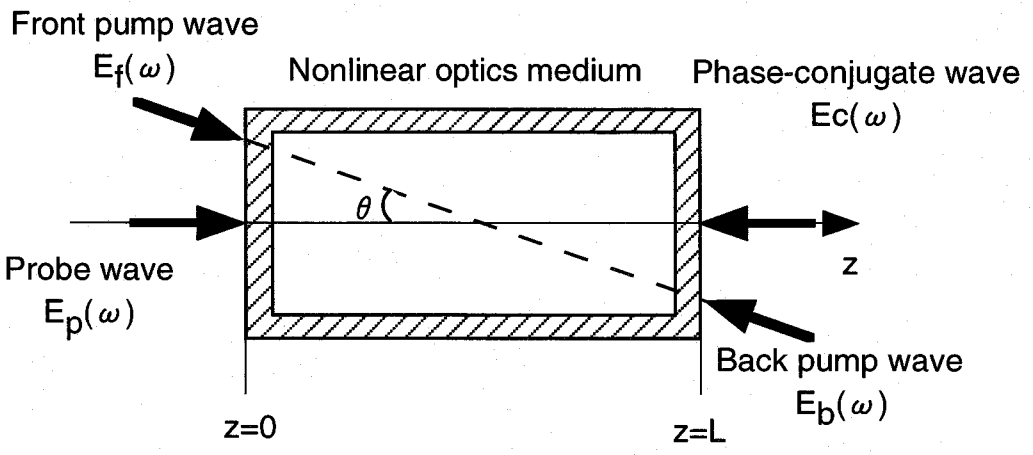



(a) 通常の鏡での反射



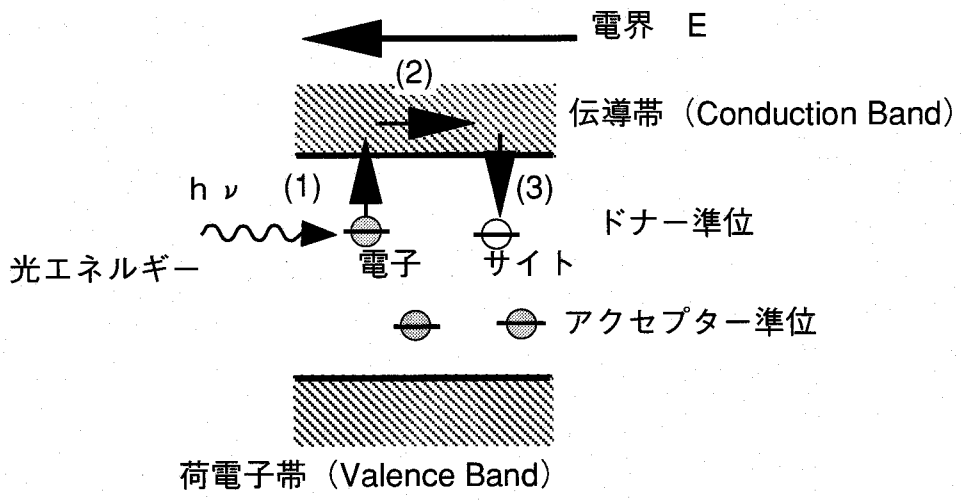

(b) 位相共役鏡での反射

図2.2 位相共役波による位相歪み補正
1:ガラスへの入射前の波面，2:ガラス透過後の波面，
3:鏡で反射後の波面，4:再びガラスを透過した後の波面

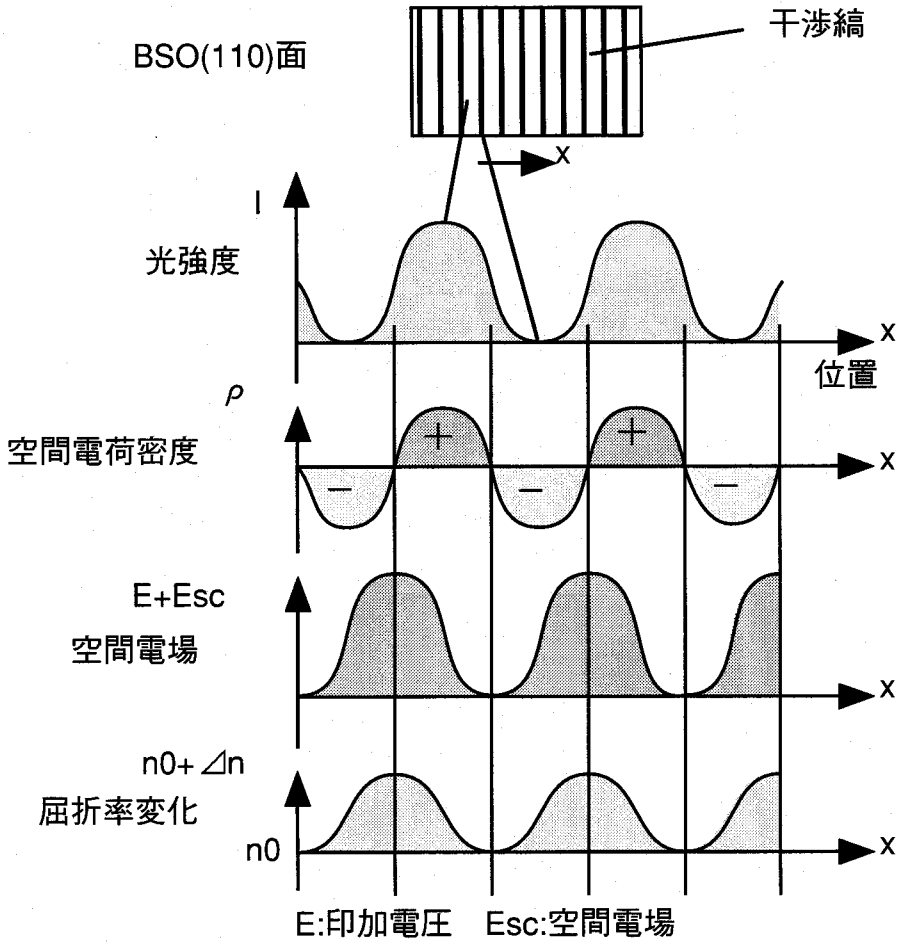



$\omega$ ：各光波の周波数
$\theta$ ：媒質内でプローブ光と前進ポンプ光がなす角度

図2.3 縮退 4 光波混合による光ビーム配置




(a) 光誘起屈折率効果におけるバンド輸送モデル




$n_0$:屈折率　⊿n:屈折率変化

(b) 空間電荷密度と結晶内部の屈折率変化の関係

図2.4 フォトリフラクティブ効果による回折格子形成過程

場の変化が起こり，Pockels効果により媒質の屈折率が変化し，回折格子が形成される．空間電場の分布が空間電荷の分布に対して１／２π遅れているのは，空間電場の変化率が空間電荷分布に比例するためである．

媒質中の屈折率変化は各光波の空間電場の振幅比に依存し，光結合強度は光強度の合計に比例しない．したがって強度の弱い光であっても，位相共役波を発生させることができる．これらの過程ではプローブ波と両ポンプ波の偏光が直交していれば，位相共役波が発生しない．一方，式（２－４）の第３項は２つのポンプ波が周波数２$\omega$で変調されており，プローブ波がこの時間的回折格子で回折され，位相共役波が発生する．したがって，プローブ波の偏光が両ポンプ波に対して直交しているときでも位相共役波が発生する．この効果には異なる準位間のコヒーレンスが関係しており，２光子遷移での強い共鳴などを除いては，通常は無視しうる程度である．

以上のようにして位相共役波が発生するが，式（２－４）の第１項および第２項はホログラフィ技術によってホログラムで回折される光波の式に対応する．したがって，縮退４光波混合によって位相共役波はホログラフィと等価であるといえる．ホログラフィが記録と再生を分離して２段階でホログラフィ像を再生するのに対し，非線形光学素子を用いた位相共役波の発生では記録と再生を同時に行うことができることから，縮退４光波混合による位相共役波は実時間ホログラフィーであると言える．

## ２．３　樹脂硬化現象の基礎的シミュレーション解析

ホログラフィ光造形により３次元形状を造形するには，樹脂液中でホログラフィ再生像の各結像点がその周辺の点よりも先に硬化する必要がある．そこで本節では樹脂内部に結像した点とその周辺の樹脂硬化現象を基礎的なシミュレーションによって解析する．

### ２．３．１　シミュレーションモデル

位相共役波によるホログラフィ再生像の結像点は，ガウス分布を持つレーザ光をレンズにより樹脂内部に集光した光の焦点と同様とみなせる．そこで図２．５に示す光学的配置をモデル化し樹脂硬化現象を解析する．本シミュレーションではガウス分布をもつ波長４８８［nm］の$Ar^+$レーザを使用し，焦点距離$f$＝５０［mm］，開口半径$R$＝２５［mm］の集光レンズによって，屈折

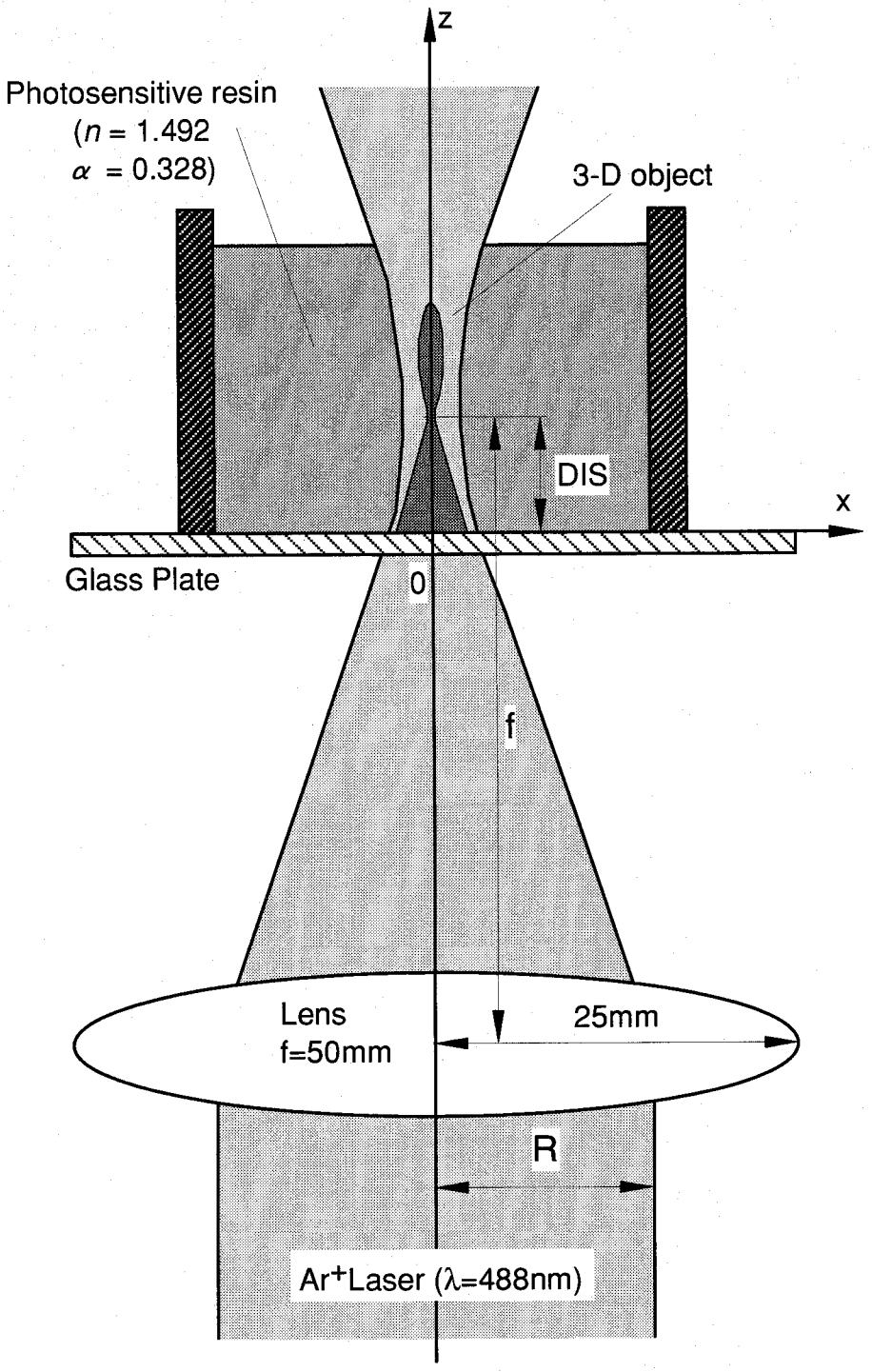



図2.5 硬化シミュレーションモデル

率$n$＝１．４９２，吸収率$\alpha$＝０．３２８の光硬化性樹脂内に焦点を結ぶ状態をモデル化している．また$x$軸を集光レーザの移動軸，$y$軸をガラスプレートと樹脂の境界，光軸を$z$軸とする．

## ２．３．２　シミュレーション基礎式

上記のシミュレーションモデルから基礎式を以下のように導出する．

$Ar^+$レーザのビーム径を$R$，レンズの焦点距離を$f$とすると集光角$\theta$の正弦は式（２－５）となる［２－７］．

$$\sin\theta = \frac{R}{\sqrt{R^2 + f^2}} \qquad (2-5)$$

屈折率$n$の樹脂中に焦点を結ぶようにしたとき，開口数$NA$は式（２－６）となる．

$$NA = n\sin\theta \qquad (2-6)$$

$Ar^+$レーザの波長を$\lambda$とすると，焦点位置のビーム半径$R_m$は式（２－７）となる．

$$R_m = \frac{\lambda}{\pi \cdot NA} \qquad (2-7)$$

入射光強度を$I_0$，ガラスプレートから焦点位置までの距離を$DIS$，ガラスプレートと樹脂との境界を$y$軸，光軸を$z$軸とすると，ガウス分布を持つ$Ar^+$レーザのスポット半径$r(z)$は式（２－８）となる．

$$r(z) = R_m\sqrt{1 + \left\{\frac{\lambda(z - DIS)}{\pi R_m{}^2}\right\}^2} \qquad (2-8)$$

樹脂の影響を考慮しない場合，レーザ強度を$P$［mW/cm$^2$］とすると光強度分布は式（２－９）となる．

$$I_p(x,y,z)=\frac{2P}{\pi r(z)^2}\exp\left[-\frac{2(x^2+y^2)}{r(z)^2}\right] \qquad (2-9)$$

吸収率が$\alpha$となる樹脂中における光強度分布は，ランバートの法則より式（２－１０）となる．

$$I(x,y,z)=I_p(x,y,z)\exp[-\alpha z] \qquad (2-10)$$

ここから図２．５の定点による硬化断面形状を表す基礎式を導出する．臨界露光量$E_c$を超える光エネルギが与えられた部分から樹脂は硬化することから，樹脂の硬化条件は式（２－１１）となる．

$$E_c=\int_0^t I(x,y,z)d\tau \qquad (2-11)$$

以上の式から樹脂硬化断面の形状は式（２－１２）を満たす$y$，$z$の関数で与えられる．

$$y(z)=\frac{r(z)}{\sqrt{2}}\sqrt{\ln\left(\frac{2Pt}{\pi E_c r(z)^2}\right)-\alpha z} \qquad (2-12)$$

さらに式（２－１２）を変形すると，樹脂の硬化に必要な時間は式（２－１３）となる．

$$t_0=\frac{E_c\lambda^2(f^2+R^2)}{2\pi Pn^2R^2}\exp[\alpha DIS] \qquad (2-13)$$

次にビームが一定速度$v$［mm/s］で，直線上（$x$軸上）を描画する場合を考える．基礎式を以下のように導出する．式（２－１０）までは定点が硬化する場合と同様の式を用いる．樹脂中の点に照射される露光量$E$は描画時間$t$［s］についての式（２－１４）の積分で表される．

$$E(x,y,z)=\int_{-\infty}^{+\infty} I(x-vt,y,z)dt \qquad (2-14)$$

臨界露光量$E_c$を超える光エネルギが与えられた部分から樹脂は硬化することから，式（２－１４）を計算して，樹脂の硬化断面形状は式（２－１５）を満たす$y$と$z$の関数で与えられる［２－８］．

$$y(z)=\frac{r(z)}{\sqrt{2}}\sqrt{\ln\left(\sqrt{\frac{2}{\pi}}\cdot\frac{P}{E_c r(z)v}\right)-\alpha z} \qquad (2-15)$$

硬化物の最大硬化深さ$z_{max}$を求めるのにニュートン・ラプソン法を用いた．$z_{max}$が$y=0$の時の$z$の値であるから，式（２－１５）から式（２－１６）で表せる$f(z)$を得る．

$$f(z)=\ln\left(\sqrt{\frac{2}{\pi}}\cdot\frac{P}{E_c R_m v}\right)-\frac{1}{4}\ln\left\{1+\left(\frac{\lambda(z-DIS)}{\pi R_m^2}\right)^2\right\}-\alpha z \qquad (2-16)$$

さらに式（２－１６）に$z$に関する微分を行えば式（２－１７）で表せる$\frac{df(z)}{dz}$を得る．

$$\frac{df(z)}{dz}=\frac{1}{2}\frac{DIS-z}{(DIS-z)^2+\left(\pi R_m{}^2/\lambda\right)^2}-\alpha \qquad (2-17)$$

この手法は区間縮小法の一種で，$z$の関数である$f(z)$とその微分$\frac{df(z)}{dz}$に関する式（２－１８）の$z_{max}(n)$に$z_{max}$の予想値を代入し，得られた$z_{max}(n+1)$で$z_{max}(n)$を更新し続けることで収束値として$z_{max}$を得ることができる．

$$z_{max}(n+1)=z_{max}(n)-\frac{f(z_{max}(n))}{f'(z_{max}(n))} \qquad (2-18)$$

### ２．３．３　シミュレーション結果と考察

シミュレーションに用いた数値は以下の通りである．

波長　　：　$\lambda$＝４８８［nm］
入射光強度　　：　$I_0$＝０．００６［mW/mm$^2$］（測定値）
吸収率（減衰率）　：　$\alpha$＝０．３２８［Abs］（測定値）
樹脂の屈折率　　：　$n$＝１．４９２（測定値）
臨界露光量：　　：　$E_c$＝７．０［mJ/mm$^2$ s］（測定値）

(1) 定点での硬化形状

樹脂中の焦点位置がある一点に固定され，露光時間のみが変化した時の硬化物の成長について検討する．図２．６に露光時間$t$＝８０，１６０，２４０，３２０，４００［s］の場合の硬化物の成長の様子を示す．樹脂中の焦点位置$DIS$は，ガラスプレートから０．５，１．０，１．５［mm］の３点を選択した．この範囲において樹脂が硬化可能であることは，基礎実験によって確認している．この結果で重要な点は下記の３点である．

① 焦点位置から硬化が開始されるため，硬化物がガラスプレートに付着するには，樹脂の硬化開始後ある一定以上の露光時間が必要である．
② 硬化物のウェスト部より上方で余剰硬化物は必ず生じる．
③ 硬化物のウェスト部と焦点位置は一致する．

①は，シミュレーションと同様の条件で行った樹脂硬化基礎実験において，ある露光時間が経過したときに，突然大きな硬化物が得られる現象を検証するものである．③は，造形するモデルの３次元位相情報を再現する位相共役波の焦点位置が，樹脂硬化形状に対応する可能性を示唆している．また，②の焦点位置上方の硬化物は余剰硬化物となり，造形時の誤差の原因となる．

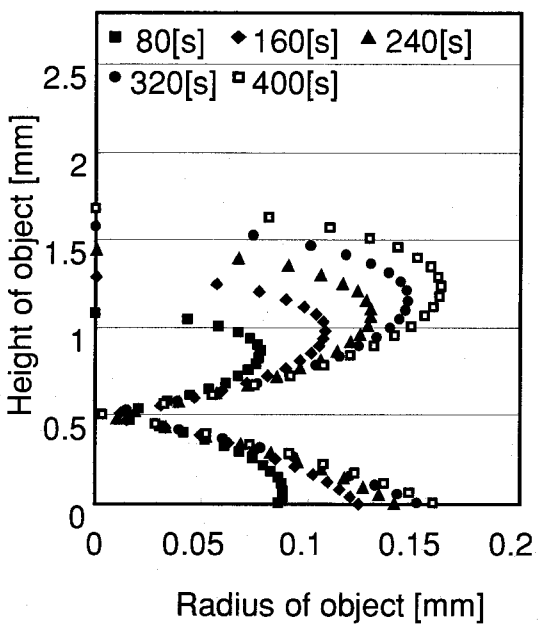
(2)　走査を行った場合の硬化形状

試料表面を走査すると，樹脂液中を位相共役波の焦点位置が３次元的に移動することになる．この状態をモデル化して硬化物の断面形状を計算機シミュレーションにより解析した．

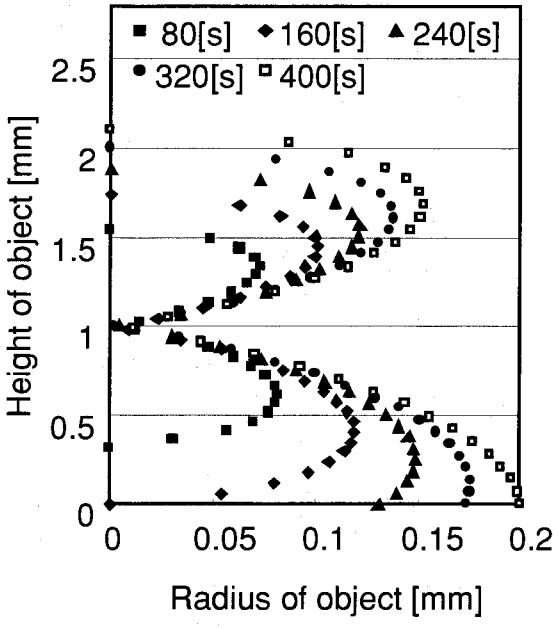
入力パラメータを下記に示す．

走査速度　　：　$v$＝０．０５［mm/s］（実験値）
走査回数　　：　$m$＝８，１１，１４
焦点位置　　：　$DIS$＝０．２，０．７，１．２［mm］

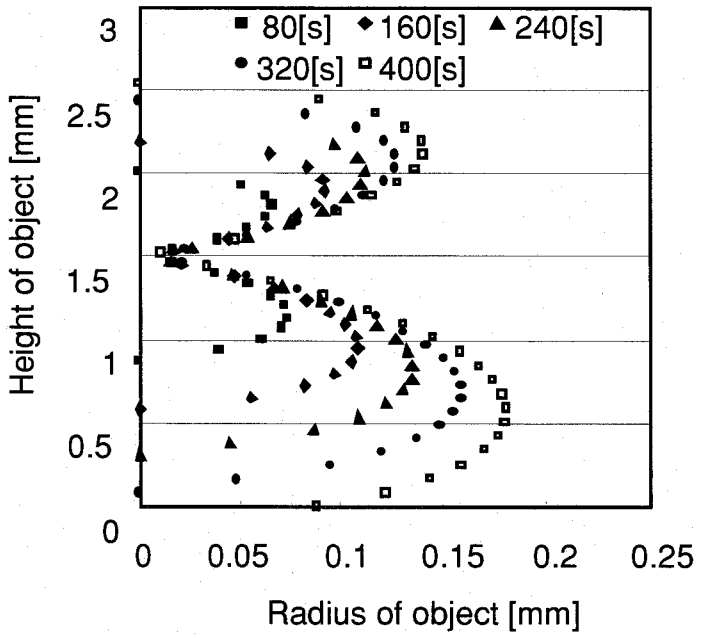
走査速度・走査回数は後に述べる基礎実験の値に基づいて決定した．




(a) DIS=0.5




(b) DIS=1.0




(c) DIS=1.5

図2.6 硬化時間による硬化物の成長

図２．７(a)，(b)，(c)にそれぞれ焦点位置 $DIS$＝０．２，０．７，１．２［mm］における硬化物の形状と走査回数の関係を示す．

これらの結果は，試料表面を集光レーザにより走査して，試料の２次元的なプロファイルを造形できる可能性を示唆している．

以上の基礎的なシミュレーション結果から光硬化性樹脂内部にホログラフィの３次元再生像を結像させ結像点を硬化させることで３次元形状を造形できる可能性を示唆した．

## ２．４　ホログラフィ光造形装置

２．２．２節で行ったシミュレーション結果を実験的に検証するため，位相共役波によるホログラフィ光造形装置を構築した．位相共役波を発生させるための光学配置として，本節では，対向励起形配置(counterpropagating-pump geometry)と自己励起形配置(self-pumped geometry)で，位相共役波を発生させることを検討し，基礎実験を行っている．

（１）　対向励起形配置(counterpropagating-pump geometry)

縮退４光波混合と呼ばれる位相共役波を発生させるための基本配置は図２．８(a)に示す対向励起形である．光源から光非線形媒質までの各光路による光路長差は，光源のコヒーレンス長さ以内に保たれる．

（２）　自己励起形配置(self-pumped geometry)

チタン酸バリウム（BT）などの内部利得の高い光非線形媒質を使用した場合には，特に独立のポンプ波を用いないときでも，散乱光の働きにより自発的に回折格子を形成し，位相整合条件を自動的に満たして位相共役波が発生する場合がある．これを自己励起形と呼ぶ．本実験で用いた光学配置は，図２．８(b)の媒質内部反射形である．

実験装置構成要素，モデルとして用いた試料，光硬化性樹脂の詳細を記す．

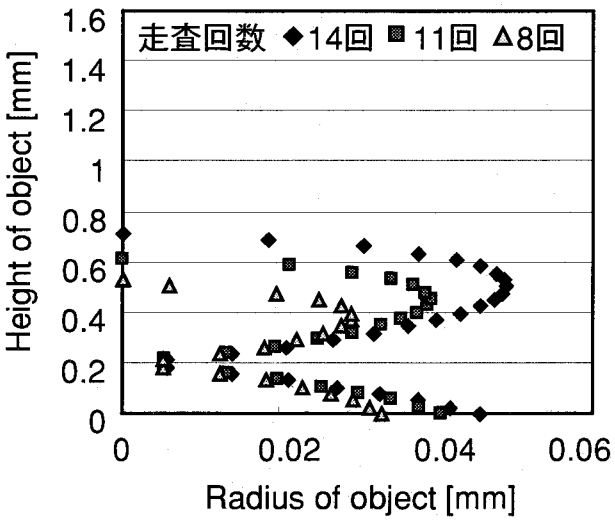
(a)　実験装置構成要素

Ar+ レーザ：　　Spectra-Physics製　BeamLok2060-4s

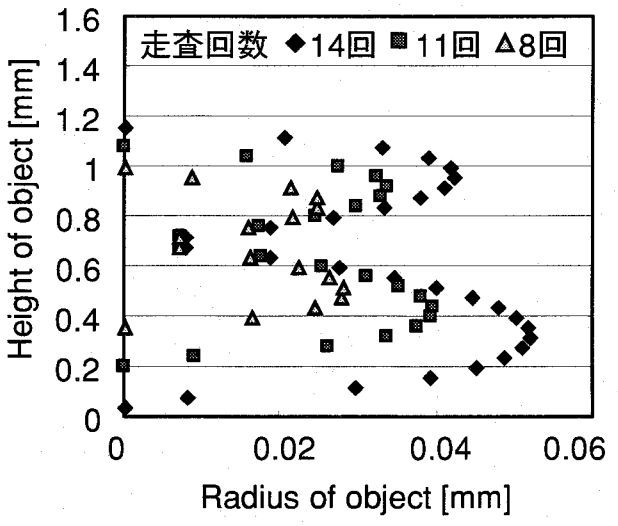
NDフィルター(1,10,20,50％)：　シグマ光機株式会社製

（MAN-25-1, MAN-25-　10,　MAN-25-20, MAN-25-50）

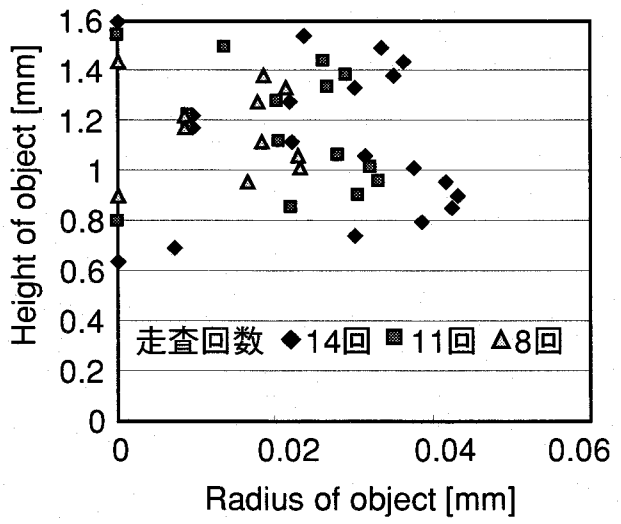
ミラー：　シグマ光機株式会社製（TFA-50C08-10,TFA-15S03-10）




(a) DIS=0.2mm




(b) DIS=0.7mm




(c) DIS=1.2mm

図2.7 走査による硬化物の成長

ハーフミラー：　シグマ光機株式会社製　　(PSCH-50C08-10W-550)
プレートハーフミラー
レンズ：　シグマ光機株式会社製　焦点距離　250［mm］, 50［mm］
x,y,z, $\theta$ の各種ステージ：　　シグマ光機株式会社製

BSO結晶：　　日本ガイシ株式会社製（図２．９）
チタン酸バリウム結晶：　　フジクラ株式会社製（図２．１０）
結晶保持ホルダー：　　材質　テフロン（ポリテトラフルオロエチレン）
直流高圧電源：　松定プレシジョン・ディバイセズ株式会社製　(HB-10P)
多出力直流安定化電源：　　KIKUSUI製　(PMC-18-2A)

x,zステージ（マイクロメーター付き）：　　シグマ光機株式会社製
カバーガラス（樹脂ベースとして利用）：　マツナミ製　(461-01)
光硬化性樹脂：　日本合成ゴム株式会社製　(KC-1042)
　　デンケンエンジニアリング株式会社　(Kayarad DF803F)

ＣＣＤカメラ：　SONY製　Model：XC-77RR-CE
PC：　　DELL製　OptiPlex GXpro
パワーメーター：　スペクトラフィジックス社製　MODEL 404 Specifications

光学顕微鏡：　Nikon製　LSI検査顕微鏡　オプチフォト-200
対物マイクロメータ
SEM：　JEOL製　JSM-5800A SCANNING MICROSCOPE

(b-1)　BSO結晶に関する諸値

実験に用いたBSO（珪酸ビスマス：$Bi_{12}SiO_{20}$）素子を図２．９に示す．BSO素子に関する詳細は以下の通りである．

| | |
|---|---|
| 化学組成 | $Bi_{12}SiO_{20}$ |
| 形状 | 10 × 10× 3　［mm］(直方体) |
| 結晶構造 | 体心立方晶，点群 23 |
| 格子定数 | $10.3 \times 10^{-10}$　［m］ |
| 屈折率 | 2.53 |
| 比誘電率 | 56　(100［kHz］) |
| 比抵抗率 | 1014　［Ωcm］　(暗状態) |
| | 108［Ωcm］($\lambda$=488［nm］,3.5［mW/cm2］) |

| | |
|---|---|
| 電気光学係数 r41 | $5 \times 10^{-12}$ [m/V]　(633 [nm]) |
| 透過波長域 | 450～750 [nm] |
| 吸収係数 | 0.3 [$cm^{-1}$] |

(b-2)　$BaTiO_3$結晶に関する諸値とその特性

実験に用いたチタン酸バリウム（BT）結晶を図２．１０に示す．BT結晶に関する詳細は以下の通りである．

| | |
|---|---|
| 化学組成 | $BaTiO_3$ |
| 形状 | 4.24×4.67×3.41 [mm] |
| 結晶構造 | 正方晶 |
| 温度範囲 | 5～130 [℃] |
| 結晶方位 | 主軸方位 |
| 表面仕上げ | 鏡面 |
| 添加元素 | なし |
| ポーリング処理 | 単分域化処理 |

(c)　光硬化性樹脂

本実験では可視光で硬化する２種類の樹脂について，基礎実験によりその硬化特性を調べた．その結果，光に対する感度に優れているのが①の樹脂，液の透明度が高く，光がより深くまで透過するのが②の樹脂であることがわかった．ホログラフィ光造形では樹脂中に位相共役波を結像させるために，透過性の高い②のKC-1042を用いることとした．以下に参考として光硬化性樹脂の物性値を示す．

① KAYARAD DF-803N

SLP専用可視光硬化型樹脂(2液混合タイプ)

デンケンエンジニアリング株式会社製

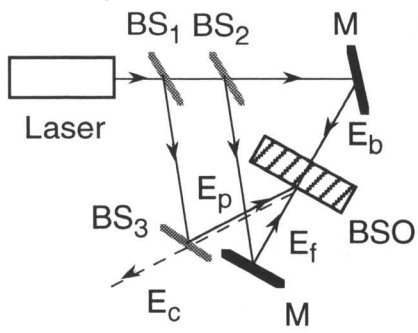
・樹脂の種類：　アクリレート樹脂

・液物性：

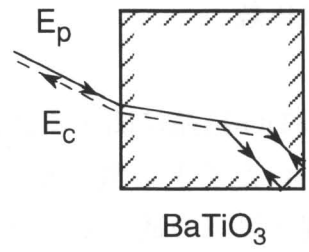
| | |
|---|---|
| 粘度 [CPS/25℃] | 190 |
| 液比重 [25℃] | 1.11 |
| 表面張力 [DYNE/cm] | 23 |

・力学特性：

| | |
|---|---|
| 引張弾性率 [$kg/mm^2$] | 27.0 |




(a) 対向励起形
(Counterpropagating-pump geometry)

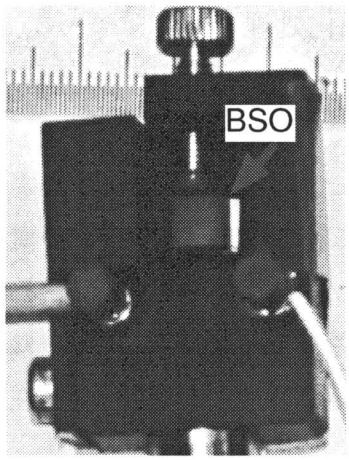



(b) 自己励起形（媒質内部反射形）
(Self-pumped geometry)

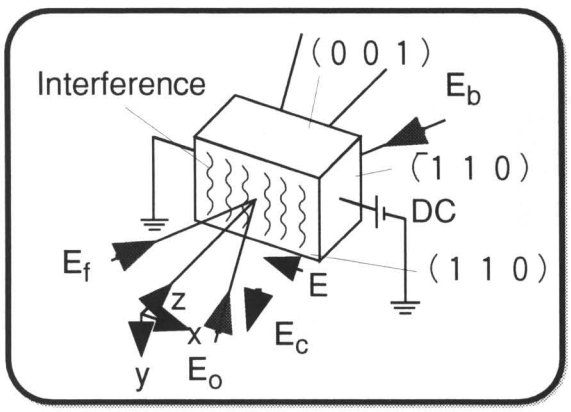
$E_f$ :Front pump wave
$E_b$ :Back pump wave
$E_c$ :Phase-conjugate wave

BS:Beam spliter
M :Mirror

図2.8 縮退 4 光波混合の各種光学配置

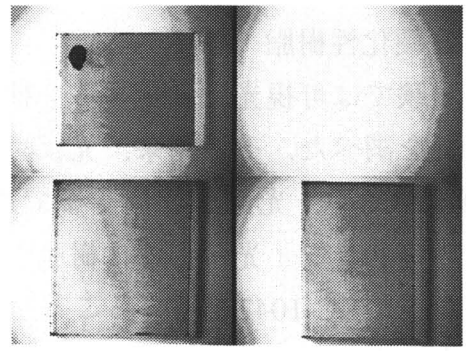



(a) BSO素子

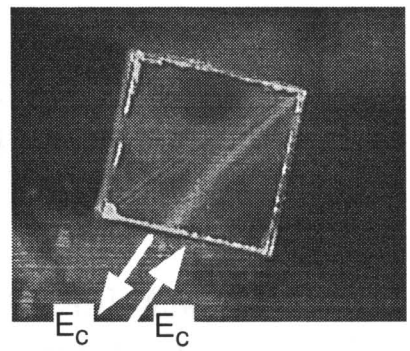



(b) 素子の光学的配置

図2.9 BSO素子とその光学的配置



(a) BT結晶




(b) 自己励起発振による
位相共役波発生

図2.10　BT結晶の外観

| | |
|---|---|
| 引張強度［kg/mm$^2$］ | 2.0 |
| 破断伸び［%］ | 17.2 |
| 曲げ弾性率［kg/mm$^2$］ | 31.4 |
| 曲げ強度［kg/mm$^2$］ | 1.90 |

・熱特性

| | |
|---|---|
| 熱膨張係数［RT～200℃］ | 1.3×10$^{-4}$ |
| ガラス転移点［℃］ | 75 |

② KC-1042

可視光硬化型光造形用樹脂

日本合成ゴム株式会社製

・樹脂の種類　　ウレタンアクリレート系

・液物性

| | |
|---|---|
| 粘度［cps@25℃］ | 1700 |
| 密度［g/cc@25℃］ | 1.08 |

・力学特性

| | |
|---|---|
| 引張弾性率［kg/mm$^2$］ | 120 |
| 引張強度［kg/mm$^2$］ | 4.0 |
| 破断伸び［%］ | 40 |
| 曲げ弾性率［kg/mm$^2$］ | 114（参考値） |
| 曲げ強度［kg/mm$^2$］ | 3.6（参考値） |

・熱的特性

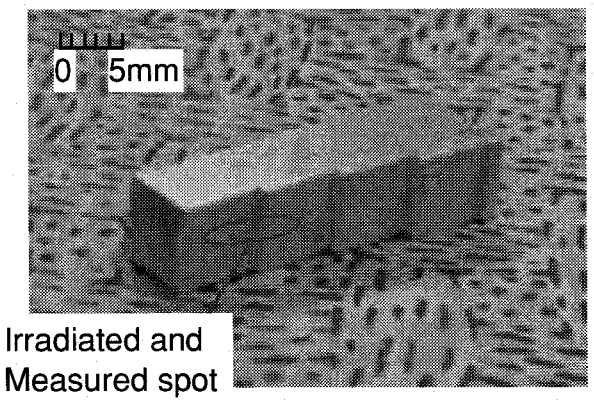
| | |
|---|---|
| 線膨張係数［℃$^{-1}$］ | 1.1×10$^{-4}$ |
| tan$\delta$ピーク温度［℃］ | 110 |
| 熱変形温度［℃］ | 44（参考値） |

(d)　造形試料形状

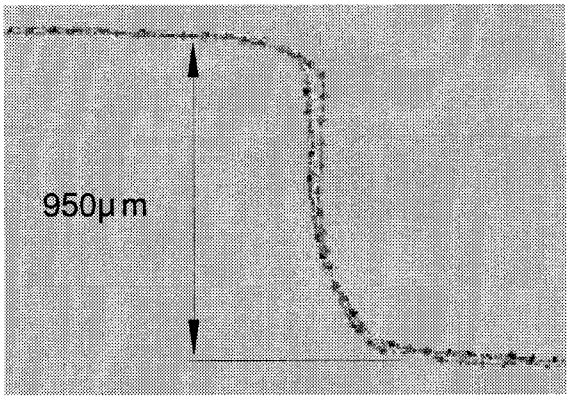
造形試料の写真を図２．１１に示す．ホログラフィ光造形により高さ方向に変化する形状が造形可能であることを確認するために，約1mmの高さの差があるステップ形状を有した金属片に，白色の塗装をほどこした試料を作成した．

(e)実験装置の構成

位相共役素子に直線偏光のコヒーレント光を物体波として入射させ，位相共役波の発生の有無を確認する基礎実験では，BSO素子を用いた対抗励起型配置，およびBT結晶を用いた自己励起型配置の両者で位相共役波の発生を確認し




(a) 階段状試料写真




(b) 断面の光リング式センサによる計測結果

図2.11 階段状試料

た．BT結晶を用いて自己励起形配置で位相共役波を発生させる場合，光学系の構築が容易であり，位相共役波の反射率(回折効率)が非常に高く，強い強度の位相共役波が得られた．

次に，試料表面で散乱する光を物体波として入射させ位相共役波の発生の有無を確認する基礎実験では，BSO素子を用いた対抗励起型配置で位相共役波の発生が確認されたが，BT結晶を用いた自己励起型配置でその発生を確認することはできなかった．

これらの基礎実験の結果，散乱光などの強度が弱く非直線偏光の光を物体波とする場合は，自己励起形配置による位相共役波の発生が困難であることが判明した．この場合，BT結晶の持つ高い回折効率等の利点が活用できない．また，結晶の成長が困難で大きなサイズのBT結晶の製造が難しいことや，BT結晶に入射させる光の入射角の選択幅が狭いことから，広い範囲に渡って物体の実像を記録再生することは困難である．

したがって，本実験ではBSO素子を用いた対向励起形配置の実験装置を採用した．図２．１２，図２．１３にそれぞれその実験装置の模式図および写真を示す．

以下に光学系の基本的なしくみについて述べる．

① 入射光をポンプ波と物体照明光に分ける．
② ポンプ波を前進ポンプ波と後進ポンプ波に分け，BSO素子に対向させて入射させる．
③ 物体照明光により照明された試料表面の位相情報をもつ物体波をBSO素子に入射させる．
④ ポンプ波とプローブ波によって，BSO結晶が励起され，位相共役波が発生する．
⑤ 位相共役波によって，樹脂中に実像が再生され樹脂硬化反応が起こる．

$Ar^+$レーザを光源とするレーザビームは，ビームスプリッタ(BS1)によって物体照明光とポンプ波に分けられる．次にBSO素子を励起する側に進む光はビームスプリッタ(BS2)によって前進ポンプ波(Wf)と後進ポンプ波(Wb)に分けられる．前進ポンプ波と後進ポンプ波はそれぞれミラー(M1,M2)で反射され，BSO素子に対向するように入射させられる．レンズ(L1)によって集光され，エネルギ密度を高められた物体照明光は，造形試料を照明し物体波($W_o$)となる散乱波を生じる．ここで発生した物体波は，レンズ(L2)によって集光されBSO素子に

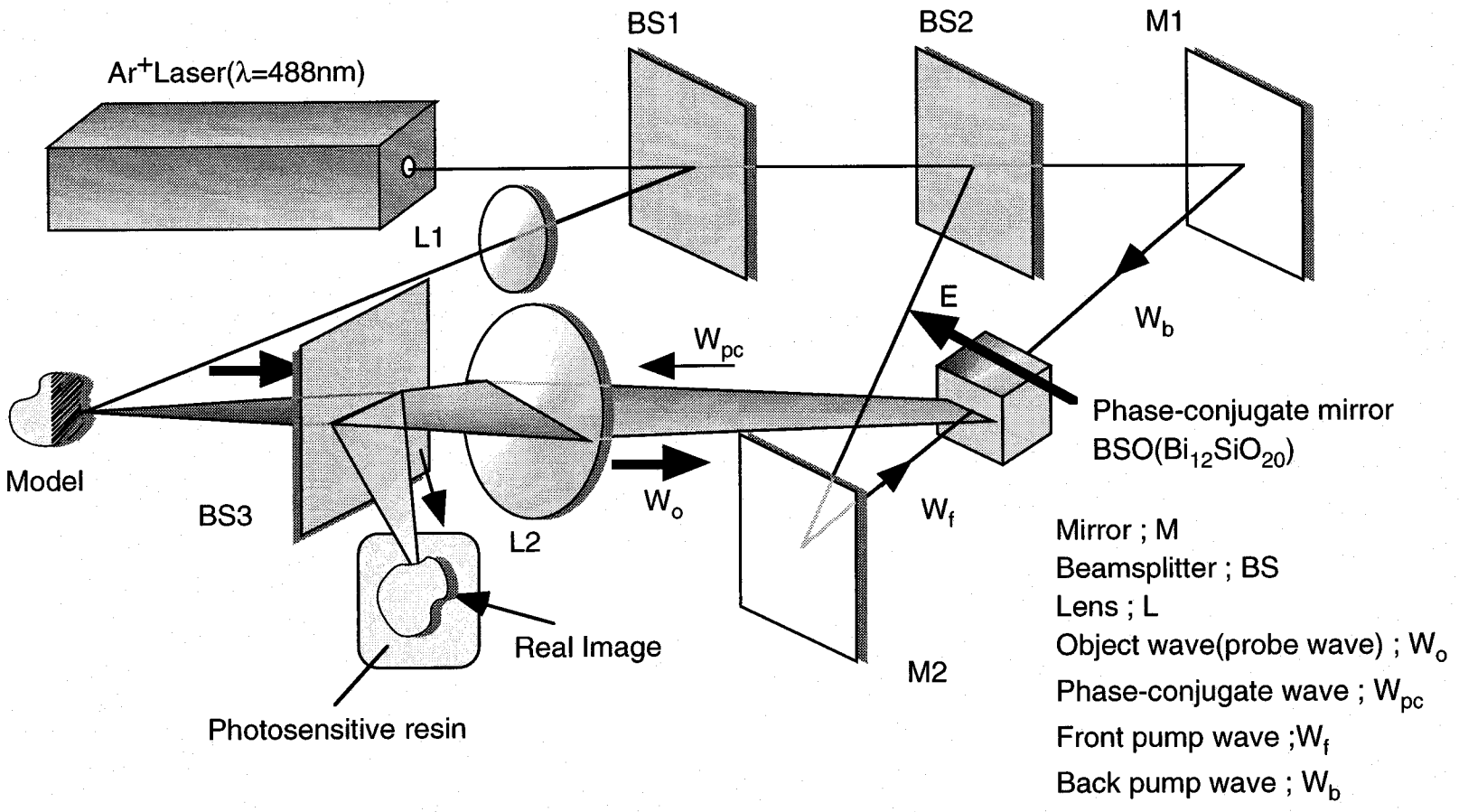
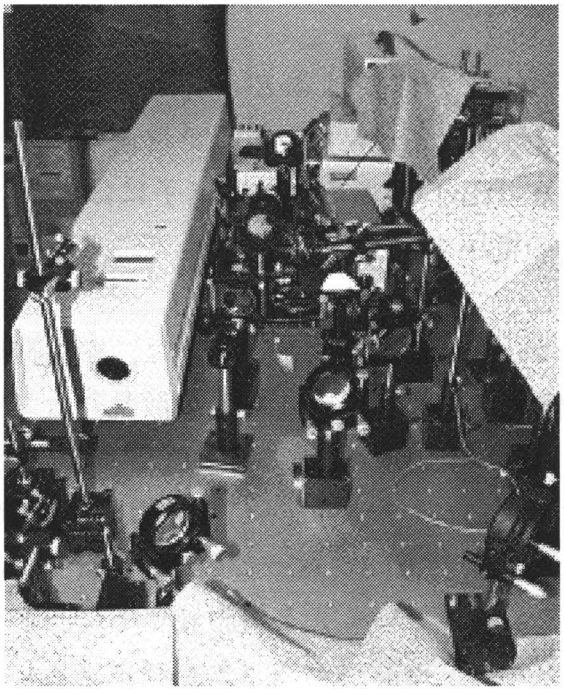
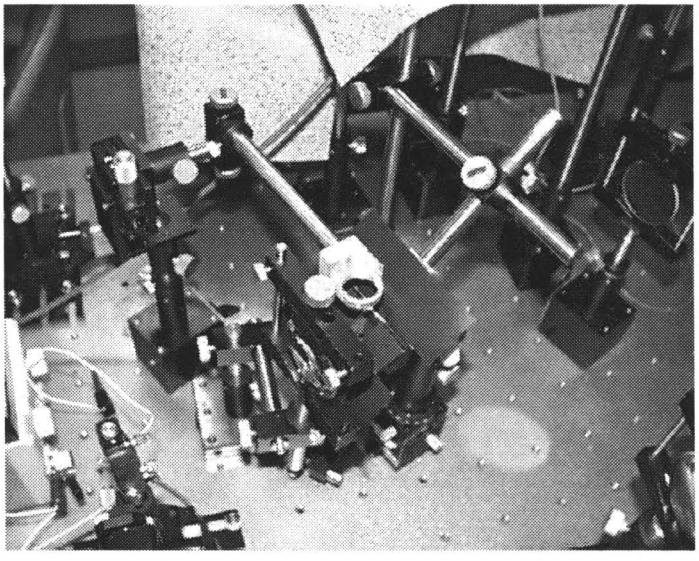



図2.12 ホログラフィ光造形光学系の構成



(a) 装置全体



(b)　樹脂槽部分

図2.13 実験装置写真

プローブ波として入射する．前進ポンプ波，後進ポンプ波，プローブ波が，BSO素子に入射すると，BSO素子は位相共役鏡として働き，プローブ波の位相共役波を発生させる．

実験に使用した$Ar^+$レーザの波長は４８８［nm］であり，ビーム強度は約１６０［mW］から最大２．３［W］の範囲で設定可能である．このレーザの可干渉距離は，約８０［cm］である．BSO素子には回折効率向上のため，３［kV］から５［kV］の電圧を印加している．

さらに樹脂造形部について述べる．図２．１４は，樹脂造形部を真横から見たものである．図中①側にある試料(model)表面で散乱したプローブ波($W_o$)は，ビームスプリッタ(BS3)を透過して，②側にある位相共役鏡(BSO素子)へと向かう．位相共役鏡で反射されたプローブ波($W_o$)の位相共役波($W_{pc}$)は，物体波の波面を再現しながら，もと来た方向へ返っていき，ビームスプリッタ(BS3)によって試料の方へそのまま返っていく光と樹脂硬化部に向かう光とに分けられる．樹脂硬化部に向かう光は，樹脂ベース（カバーガラス）上に配置してある樹脂液中で結像し樹脂を硬化させる．

## ２．５　位相共役波結像点位置検出実験

位相共役波の再生精度は，ホログラフィ光造形の精度を決定する重要な要因である．位相共役波の再生精度は，モデル表面の集光照射位置と位相共役波の結像点位置の対応の精度によって決まる．そこで，CCDエリアセンサで位相共役波を撮影してその結像点位置を観察し，モデル表面の集光照射位置と位相共役波の結像点位置の対応関係を調べる．

### ２．５．１　実験方法

樹脂液中に形成される位相共役波による３次元再生像を観察するために，図２．１２において光硬化性樹脂が配置される位相共役波の結像点位置にCCDエリアセンサを配置して観察光学系を構築する．この時，使用した試料（Model）は階段状試料（図２．１１）であり，その平坦部に集光した$Ar^+$レーザを照射して，位相共役波による再生像を観察する．

まず，階段状試料を照明し位相共役波を発生させる．次に，CCDエリアセンサを再生像結像系の光軸方向にゆっくりと移動させながら，位相共役波による

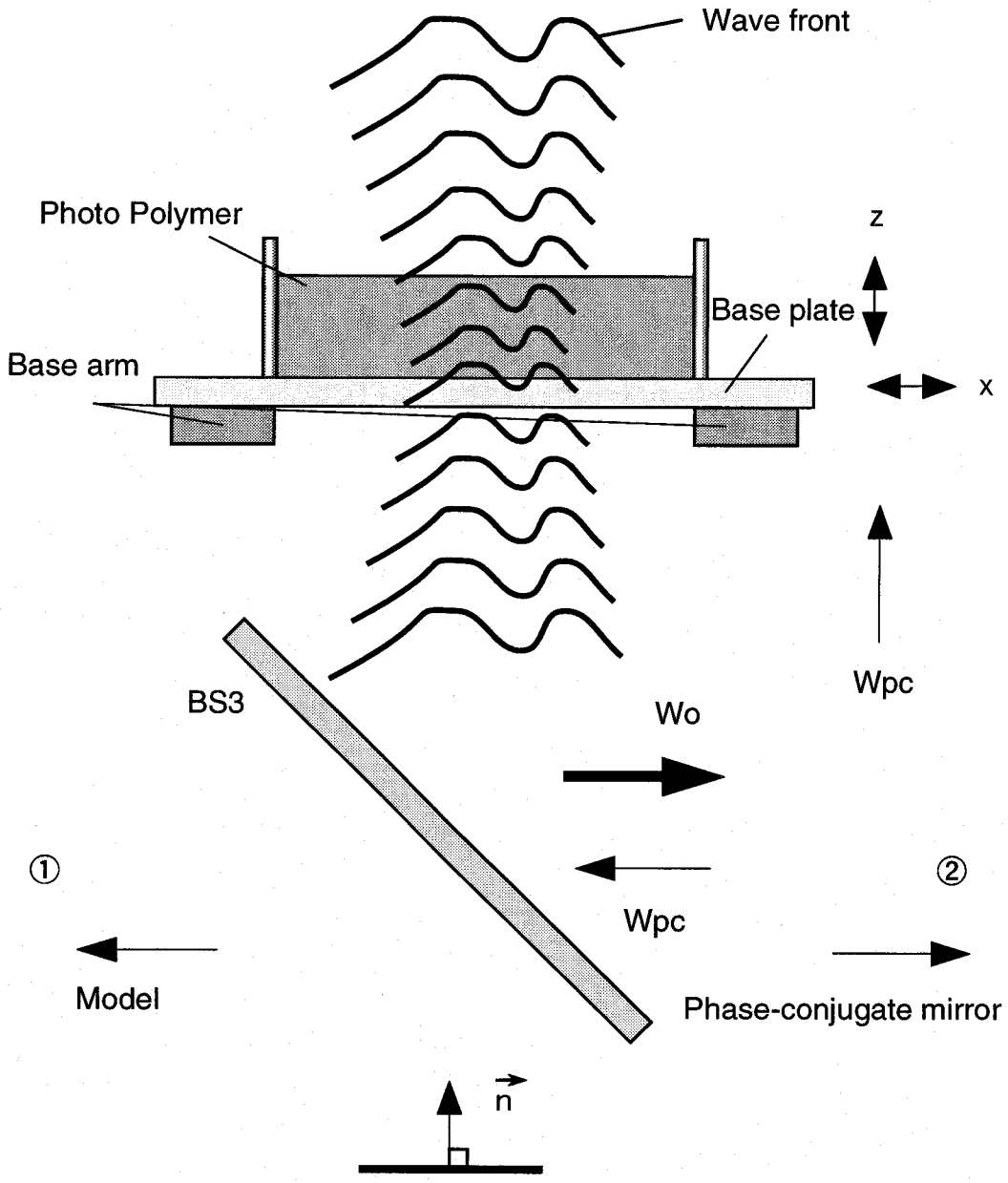



図2.14 光学系樹脂硬化部(真横からの断面)

再生像を観察する．そして再生像の直径が最小となる時に，そのステージ位置を試料表面の結像点位置として記録する．さらに試料位置をプローブ波光軸方向に１［mm］間隔で移動させて，計５点でそれぞれで同様の方法により結像点位置を測定する．

位相共役波の結像点位置，およびデフォーカス位置にあるCCDエリアセンサの観察結果を図２．１５(a)，(b)，(c)にそれぞれ示す．また図２．１５(d)に位相共役波の結像点位置と試料位置の関係を示す．

次に，階段状試料の段差上面と下面及び段差部分の位相共役波再生像を観察し，再生像の結像点位置と試料形状の対応関係を調べる．図２．１６に示すようにまず段差から約０．５［mm］離れた地点の上面平坦部（Mini-Mirrorに近い側）にレーザを照射し．CCD側のステージ位置を調節して位相共役波の結像点位置を検出・記録する．その後同様の測定を段差部と，下面平坦部の段差から約１［mm］離れた地点でも行い，計３回この操作を繰り返している．なおレーザ照射位置の移動は，ミラーの$\theta$ステージを回転して行った．図２．１７にレーザ照射光焦点位置の模式図，および位相共役波結像点位置の測定結果を示す．

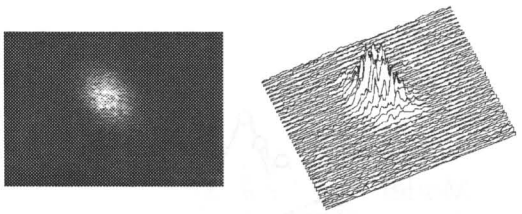
### ２．５．２　実験結果及び考察

図２．１５(d)に示すように，試料位置と位相共役波の結像点位置の間には線形な対応関係が見られた．これらの実験により位相共役波が，０．５［mm］以下の深さ方向分解能を有することが確認できた．

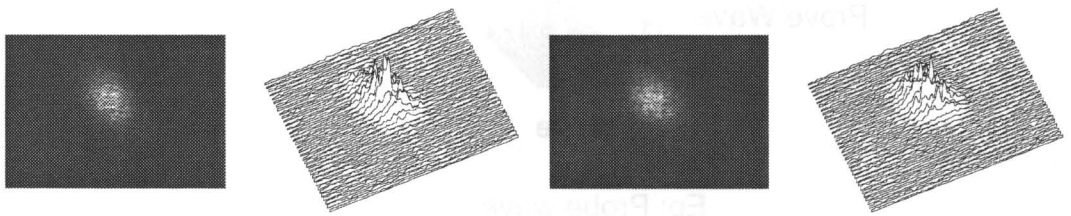
また，試料の段差部にレーザを照射した時に，段差の上段，下段両方で位相共役波が試料表面位置に対応する位置で結像する様子が観察できた．ただし，段差の下段側のCCD像は広範囲に広がる傾向がみられた．これは試料表面に照射されるレーザのスポット径が，段差位置によって変化したことが原因と考えられる．図２．１７の位相共役波の結像点位置の測定結果から，試料形状が位相共役波によって再生されていることがわかる．また特に段差状試料の下段では，結像点位置の分布にばらつきが認められるが，これは試料の取り付け位置誤差の影響であると考えられる．

## ２．６　位相共役波による樹脂硬化基礎実験

本節では，図２．１２および図２．１３に示した実験装置を用いて樹脂硬化基礎実験を行う．基礎実験の結果を元に樹脂の硬化形状と造形試料形状の対応

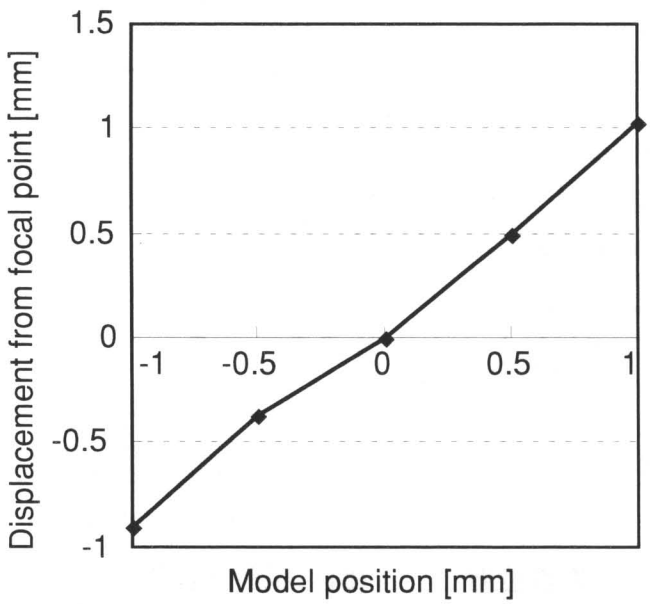


(a)　焦点位置の像
Mean density:62.00
Standard deviation:23.05
Integrated density:-34



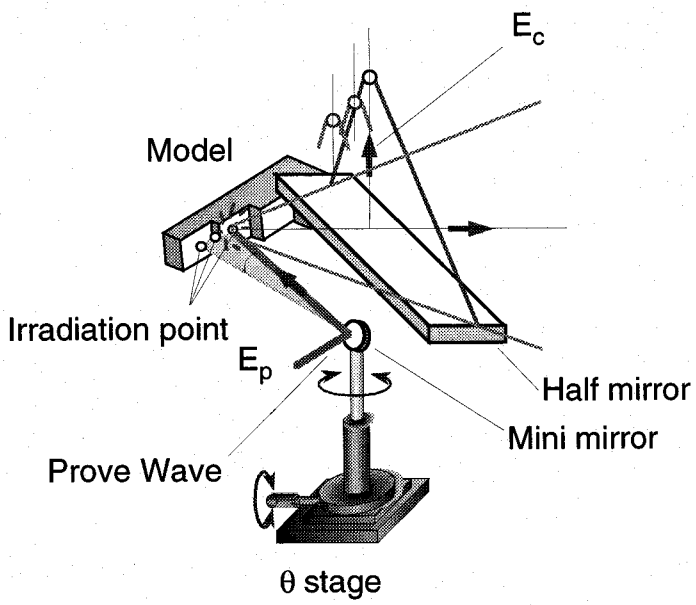
(b)　上方デフォーカス像(+0.1mm)
Mean density:59.88
Standard deviation:15.68
Integrated density:-1832

(c)　下方デフォーカス像(-0.1mm)
Mean density:59.96
Standard deviation:23.05
Integrated density:-658




(d) 試料位置と位相共役波結像位置の関係

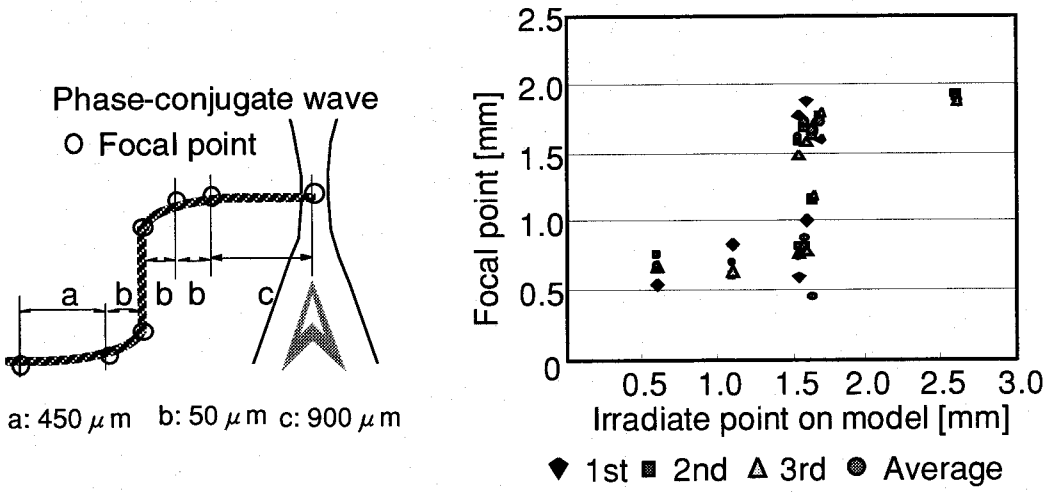
図2.15 位相共役波のCCDモニタ像および
位相共役波結像位置検出精度




Ep: Probe wave

Ec: Phase-conjugate wave

図2.16　試料照射部の詳細図




(a)　レーザ照射光焦点位置

(b)　試料表面照射位置と
位相共役波結像位置の関係

図2.17　試料形状と位相共役波結像位置の関係

関係を調べ，２．３節のシミュレーション結果を検証する．

### ２．６．１　位相共役波の結像点位置と硬化形状の対応

位相共役波の結像点位置と硬化形状の対応を調べるために，樹脂内部で位相共役波の結像点位置が変化した場合の硬化現象を再現する．そこで，樹脂槽ステージ位置を移動し，樹脂液中の位相共役波の結像点位置を相対的に変化させて，各結像点での樹脂硬化形状を評価する．実験方法は以下の通りである．

① 位相共役波の結像点位置に樹脂槽ステージ位置を調節する．
② 樹脂槽ステージ位置をマイクロメータから読みとり記録する．
③ ②の位置で露光時間1，1.5，2，2.5，3［s］で樹脂を硬化させる．
④ エアダスターを用いて未硬化樹脂を除去し，エタノール洗浄を行う．
⑤ ポストキュアを行う．
⑥ 図２．１８(a)のように基準位置および$z$軸をとり，Z=+0.3, +0.6, +0.9, -0.3, -0.6［mm］の計６点でそれぞれ③～⑤の手順を繰り返す．

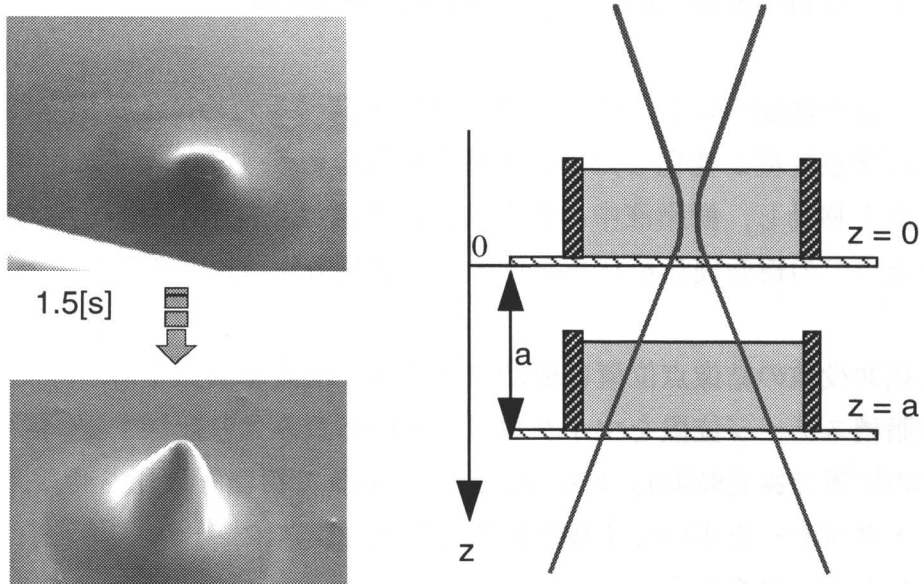
露光条件は，$Ar^+$レーザの出力が１．０［W］，この時，位相共役波の強度は０．６［$\mu$W］である．

### ２．６．２　実験結果と考察

樹脂硬化形状を光学顕微鏡で観察し，顕微鏡の微動ステージ目盛りを用いてその形状を測定した．図２．１８(b)に各露光時間毎の樹脂硬化形状の写真を示す．また，露光時間毎の樹脂槽位置と硬化物高さおよび硬化物の底面直径の関係をそれぞれ図２．１９(a)，(b)に示す．なお硬化物の底面直径は１目盛り１０［$\mu$m］のマイクロメータを用いて測定した．

図２．１８(b)に示した硬化形状は全て円錐形であり，シミュレーション結果に一致しない．これは焦点位置より上方の硬化物の欠落，もしくは焦点位置で上方硬化物が垂れ下がることが原因と考えられる．また，図２．１９(a)より樹脂槽位置を０．９［mm］動かしても，硬化物高さは約０．１［mm］程度しか変化せず，硬化物のくびれ位置は焦点位置と一致する計算機シミュレーションの結果と矛盾する．

図２．１９(a)から樹脂槽ステージ位置が移動すれば，樹脂液中の位相共役波の結像点位置が相対的に変化し，それに対応して樹脂硬化物の高さが変化する

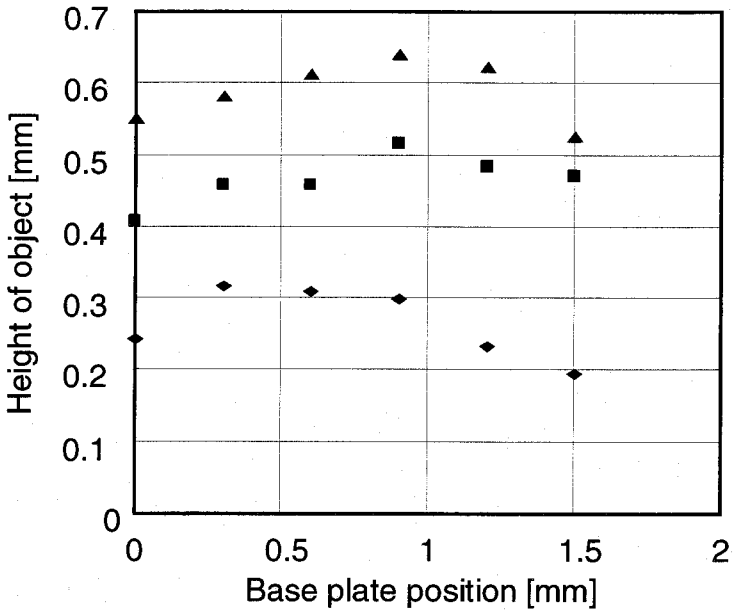



(a) ベースプレート位置

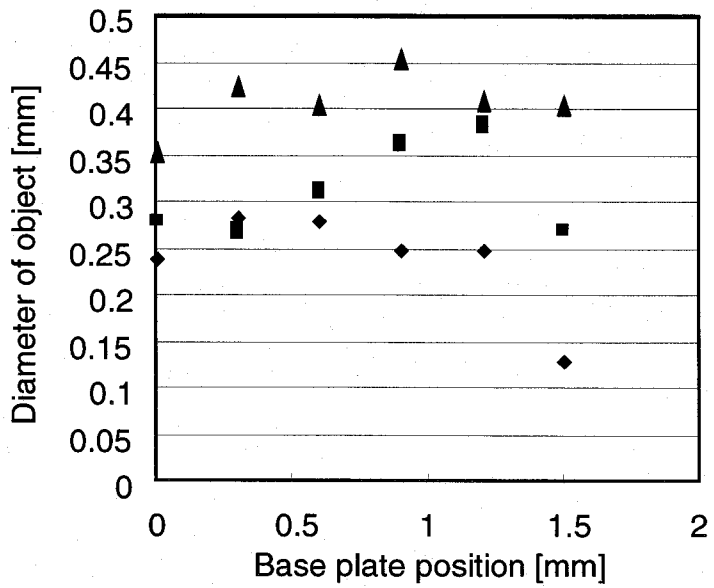



(b) 樹脂硬化形状

図2.18 樹脂硬化形状の変化




(a) 樹脂槽位置と硬化物高さの関係




(b) 樹脂槽位置と硬化物直径の関係

硬化時間 ◆2[s] ■2.5[s] ▲3[s]

図2.19 樹脂槽位置と硬化物高さおよび硬化物直径の関係

ことがわかる．しかし，樹脂槽ステージ位置$z$の値が０．６［mm］より大きければ，露光時間２［s］の系列で樹脂硬化物の高さが樹脂槽のステージ位置の変化に対応しなくなり，樹脂槽ステージ位置$z$の値が０．９［mm］より大きければ，露光時間２．５［s］と３［s］の系列で樹脂硬化物の高さが樹脂槽のステージ位置の変化に対応しなくなる．つまり位相共役波の結像点位置と樹脂硬化形状が対応するのは，ある一定の範囲に限られることがわかる．また，図２．１９(b)より，露光時間の増加に伴って硬化物底面直径が増加する傾向が見られるが，樹脂槽ステージ位置$z$の値が増加すると逆に硬化物底面直径は減少する．

樹脂硬化時に位相共役波焦点位置上方の硬化物が欠落したり，垂れ下がるのは，位相共役波の強度不足が原因と考えられる．発生した位相共役波の強度が微弱な場合，樹脂を硬化させるために長時間の露光が必要となる．長時間の露光を行えば樹脂が流動し，樹脂硬化部分が沈降することにより樹脂硬化物高さの値に誤差が生じる．また，非線形光学素子に形成される電場が周期的な変化により，位相共役波の強度が周期的に変動する現象が観察されており，これらの樹脂流動の影響や位相共役波の周期的な変化が２．３節のシミュレーションの条件に含まれていないことが，シミュレーション結果に実験結果と合致しない点があった原因と考えられる．

### ２．６．３　モデル位置移動による硬化形状の変化

２．６．１節の実験で樹脂槽ステージ位置を移動させた場合，樹脂硬化形状が位相共役波結像点位置の相対的変化に対応するという結果を得た．そこで本節では試料位置を移動し，樹脂液中の位相共役波の結像点位置を実際に変化させ，樹脂の硬化形状と試料位置の対応関係を調べる．実験方法は以下の通りである．試料および実験装置は２．６．１節の実験と同様である．試料位置をX軸ステージを用いて光軸に沿って０．２［mm］刻みで動かしていく．各地点で硬化実験を行い硬化物の形状を評価する．

① ２．６．１節の実験の①，②の手順を行う．
② 試料位置を集光レンズから光軸に沿って0.5[mm]遠ざける．
③ 0.2[mm]間隔で試料を集光レンズに近づけ，各点で樹脂を硬化させる．
④ ２．６．１節の実験の④，⑤の手順を行う．

## ２．６．４　実験結果と考察

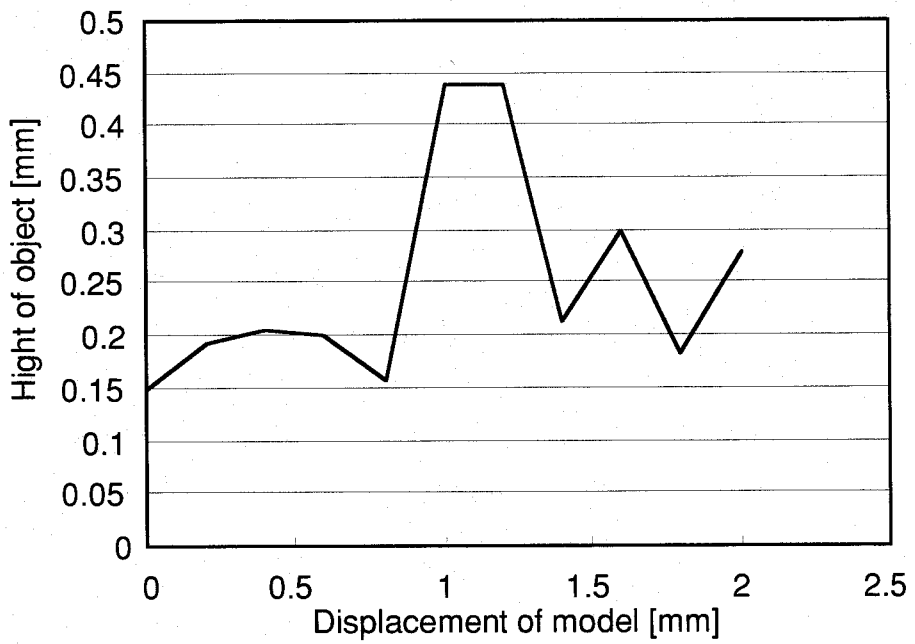
試料の移動変位と硬化物高さの関係を図２．２０(a)に示す．また，硬化形状のSEM写真を図２．２１に示す．樹脂液中に位相共役波の結像点がある場合，硬化形状は結像点位置の移動に伴って変化している（図２．２１[1]）．しかし位相共役波の結像点が樹脂層の外側にある場合，樹脂硬化形状は図２．２１[3]のようになる．また位相共役波の結像点位置が露光面ガラスプレートのあまりに上方にあると，単位面積あたりの光強度が低下し，図２．２１[2]に示すように結像点位置に対応した硬化物が得られないことがわかる．次に試料位置と硬化物底面直径の関係を図２．２０(b)に示す．硬化物直径は，ほぼ試料位置の高さに比例して変化している．

図２．２０によると試料位置が０～１．０［mm］では[2]の現象が，１．０～１．４［mm］では[1]の現象が，１．４～２．０［mm］では[3]の現象が起こっていると思われる．実際に樹脂を硬化させる場合は，常に[1]の現象が起こり得る配置で実験を行う必要がある．樹脂硬化形状の底面部の直径に注目すると，[1]の場合焦点位置がベースプレート下方に移動するにつれて大きくなっていく．この傾向はシミュレーション結果と一致する．

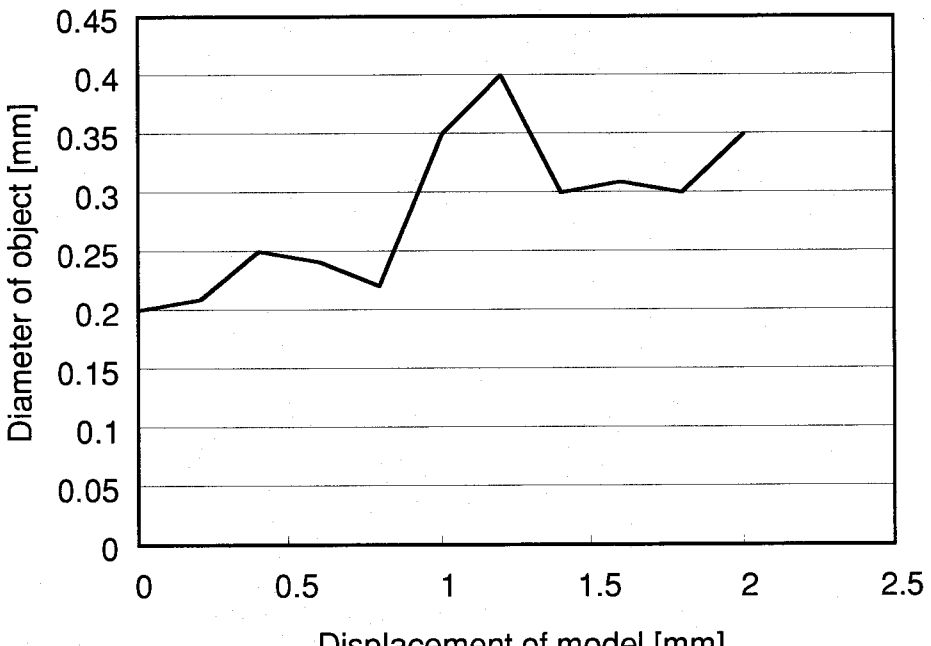
## ２．６．５　試料面走査による硬化形状の変化

図２．１２に示した実験装置の試料位置に階段状試料を配置し，段差状試料表面の上段，および下段で各２点ずつ計４点を選び，試料表面の４点の位相共役波再生像による樹脂硬化実験を行った．この時，試料表面で発生した散乱光の位相情報の変化によって位相共役波の樹脂内焦点位置が変化する．この実験により，試料表面を走査照明して試料形状が造形できるかどうかを検討する．そこで，図２．１６に示したMini mirrorを回転させて試料表面の４点を照明し，各点で散乱する光を物体波としてBSO結晶に入射させる．実験方法は以下の通りである．

① 試料のハーフミラー側の平面（上段）の約１［mm］間隔で並んだ２点を照明し，位相共役波を発生させる．
② 上記の2点で樹脂硬化実験を行う．
③ 試料のハーフミラーから遠い側の平面（下段）の約１［mm］間隔で並んだ２点を照明し，位相共役波を発生させる．
④ 上記の２点で樹脂硬化実験を行う．




(a) 試料位置と硬化物高さの関係




(b) 試料位置と硬化物直径の関係

図2.20 試料位置の変化に伴う硬化物形状変化

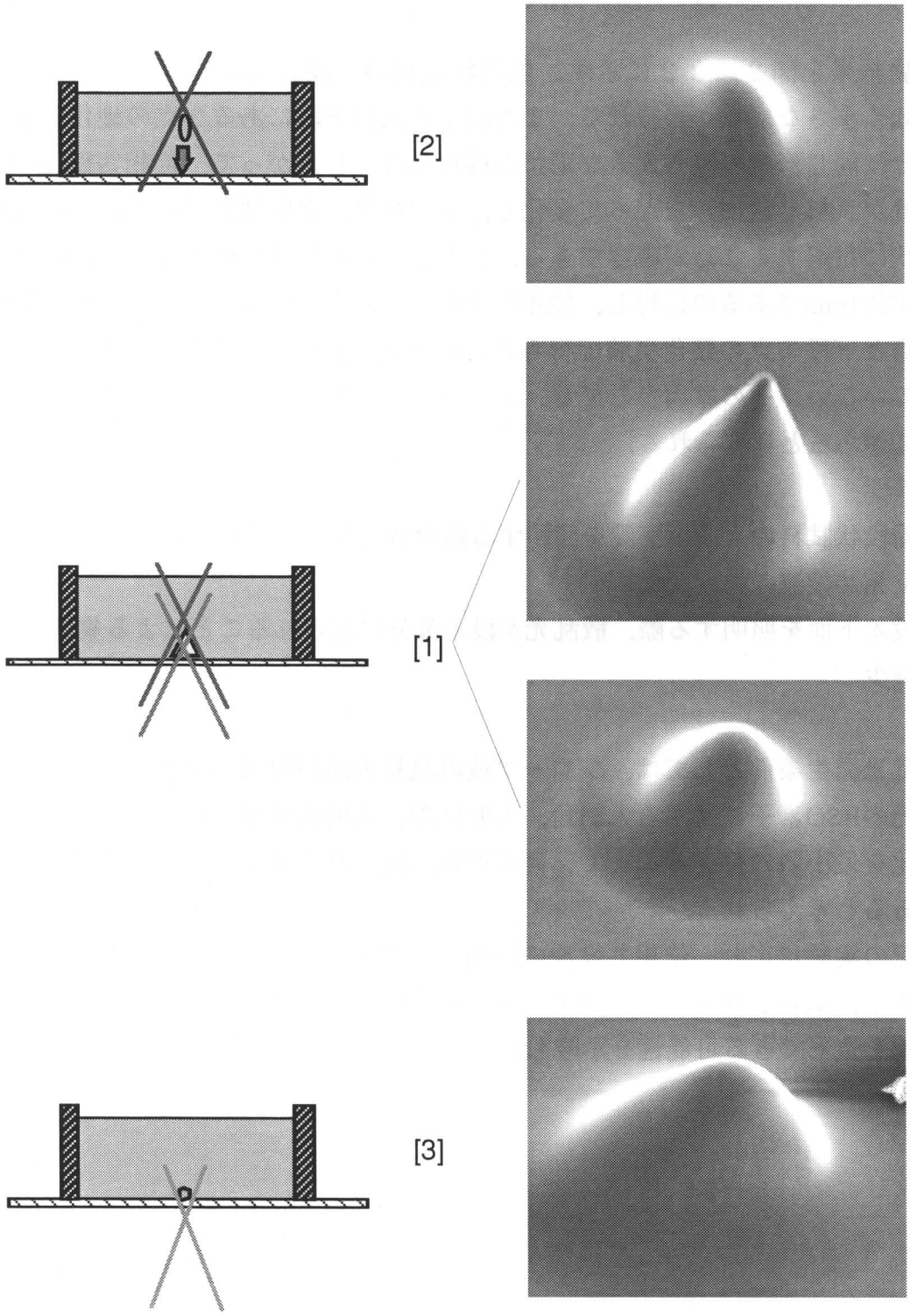



図2.21　硬化物のSEM写真（番号[1],[2],[3]は本文および模式図に対応）
[1] ベースプレート近傍に焦点位置移がある場合.
[2] ベースプレートと焦点位置の間隔が大きい場合.
[3] ベースプレートの下側に焦点がある場合.

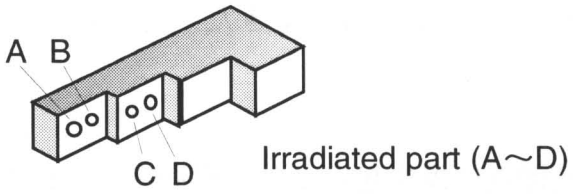
## ２．６．６　実験結果と考察

実験結果を図２．２２に示す．段差状試料の上段にある２点の硬化実験では，低く小さな形状が得られる．また段差状試料下段にある２点の硬化実験では，ほぼ同じ形状の高く大きな形状が得られる．したがって，位相共役波の結像位置が試料形状にしたがって変化し，その結果，樹脂硬化形状が段差状試料の形状に対応することが確認できる．しかし，段差状試料の上段と下段の高さの差が約1mmであるのに対し，段差状試料上段の点の硬化実験で得られた樹脂硬化物と下段の点の硬化実験で得られた樹脂硬化物の高さの差は約0.4mmと一致していない．その原因として２．６．２節の考察で述べた原因の他，下記の①，②があると考えられる．

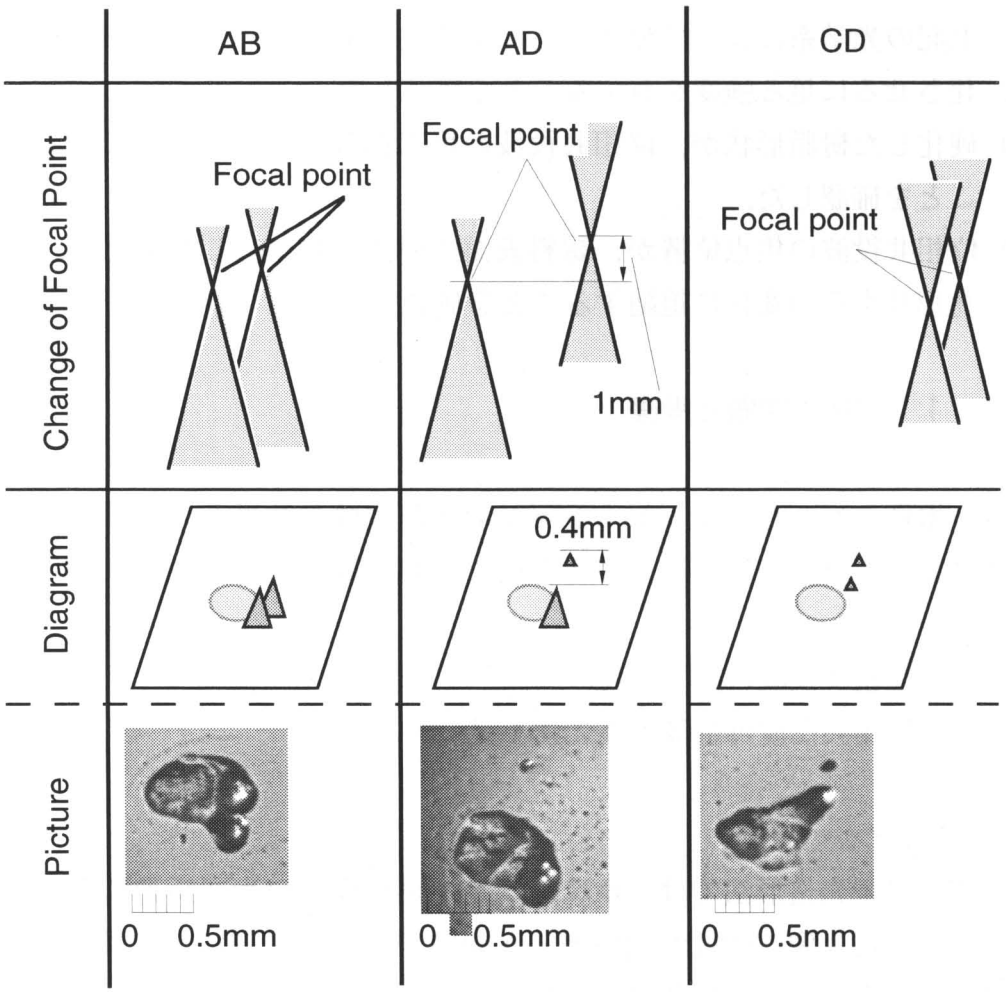
① 階段状試料の上段・下段を照明する際の散乱光発生条件の変化に起因する位相共役波の強度変化．
② 段差下面を照明する際，散乱光が段差部分に遮られることによる集光量の減少．

散乱光発生条件としては，プローブ波の試料表面照射部のスポット径，集光散乱光のBSO素子に対する入射角，入射位置，入射面積があげられる．これらの変化を最小限に抑えることで，硬化形状に見られる誤差を軽減することが可能であると考えられる．

上記の実験により，位相共役波の位相情報の変化に硬化形状が対応することを確認し，試料表面をプローブ波により走査すれば，試料表面の２次元プロファイルを造形できる可能性を示唆した．




(a) 照射位置




(b)　硬化物およびその模式図

図2.22 光位相情報の変化による焦点位置移動に対応した硬化形状の変化

## 2．7　結言と今後の課題

本章では位相共役波によるホログラフィ光造形法の実現性を，基礎的なシミュレーションと実験によって検討してきた．得られた成果を以下にまとめる．

（1）位相共役波の結像点位置を起点として樹脂硬化開始されることを樹脂硬化現象のシミュレーション解析により示した．
（2）BSO素子を用いた位相共役波再生光学系を用いて3次元形状の実時間記録・再生が可能であることを実験的に確認した．
（3）上記の光学系によって発生させた位相共役波が，その結像点で樹脂を硬化させるに足る強度を有することを確認した．
（4）硬化した樹脂形状が，位相共役波の焦点位置の変化に対応して変化することを確認した．
（5）位相共役波の焦点位置が，試料表面の照明位置に応じて変化し，樹脂硬化形状もその変化に追随することを確認した．

### 2．7．1　今後の課題と考察

また，本章で行ったシミュレーションおよび実験の結果から，ホログラフィ再生像による3次元造形を行うには下記に示す問題があることが判明した．

（1）’　位相共役波の強度不足
（2）’　位相共役波再生像の集光角不足

・（1）’について

ホログラフィ光造形法では，ホログラフィ再生像が一次回折光によって得られることから再生像の強度が低いという問題がある．さらに，位相共役鏡となるBSO素子に入射させる物体波は試料表面で散乱した光であるため，物体波の強度は試料を照明する光の強度と比較すると著しく低下する．微弱な物体波によって位相共役波を発生させることから，位相共役波により樹脂を硬化させるには長時間の露光が必要となる．長時間の露光による造形を行う場合，露光中に再生像の揺らぎや樹脂の流動の影響を受けやすいことから高精度な造形が困難となる．

また，樹脂を硬化させるのに十分な強度を持つ位相共役波を得るには，試料

表面を照明する光の単位面積あたりの強度を高める必要がある．本実験光学系で十分な強度の位相共役波を得るためには，試料表面の照明範囲を直径１［mm］以内に抑える必要があった．この場合，例えば１［$cm^3$］程度の３次元形状を造形する際に，試料表面を照明するには集光レーザを走査する必要が生じる．試料表面の走査を行えば，造形時間の増加，造形精度の劣化の原因となり，走査光学系や照明条件の変化に起因する問題が生じると考えられる．したがってホログラフィ光造形法の実現には，位相共役波強度の大幅な向上が必要であると考えられる．

・（２）’について

本章の基礎実験では，位相共役波の焦点のみが硬化する現象を実験的に確認することはできなかった．その原因として結像する位相共役波の集光角が小さいことが挙げられる．物体表面で散乱する光を集光するレンズの直径やBSO結晶の大きさ等に制限され位相共役波の集光角が小さくなるため，焦点位置と焦点近傍との光強度の差が小さくなり，位相共役波の焦点だけではなくその周辺を含めて樹脂が硬化してしまうこととなる．

## ２．７．２　将来の展望

BSO素子を用いる場合，その結晶の大きさと回折効率の限界から焦点のみで高い強度を持つホログラフィ再生像を得ることは困難である．チタン酸バリウム（BT）結晶を用いて，自己励起型配置の光学系を構築し光硬化性樹脂を硬化させれば，高い強度の位相共役光によって樹脂を短時間に硬化させることができる［２－１］が，散乱光を物体波としてBT結晶に入射させた場合は入射光の入射角度が制限され，非直線偏光の光に対して回折効率が低下することから十分な強度の位相共役波は得られない．

したがって，BSO素子，およびBT結晶を用いたホログラフィ光造形法による３次元非積層造形の実現は困難であるといえる．しかし，ホログラフィ光造形法実現の可能性を示唆する基礎実験の結果がいくつか得られていることから，新たな非線形光学素子の開発，もしくはBSO素子，およびBT結晶の回折効率や結晶サイズの改善が実現したときに，再び本手法による３次元造形の可否について検討する必要があると思われる．

また，BT結晶は直線偏光の入射光に対しては高い位相共役波発生効率を示すことから，計算機ホログラム記録素子としての利用が考えられる．計算機シミュレーションによってモデル形状の３次元位相情報を有する干渉縞を求め，

得られた干渉縞を集光レーザビームによってBT結晶内に記録する．このようにして作成した計算機ホログラムを直線偏光の光で読み出せば，高い強度のホログラフィ再生像が得られることとなる．この再生像によって樹脂を硬化させれば，ホログラフィ光造形法による非積層光造形が実現する可能性がある．

### ２．７．３　結言

ホログラフィ光造形法による非積層光造形の早急な実現は困難であるが，本章で述べたように従来の光造形法の持つ問題点の解決には，樹脂液中で３次元形状を造形する手法が有効である．もし，樹脂内部の硬化現象を制御する非積層面露光型光造形法が実現すれば，マイクロ光造形法によるマイクロ形状の高速且つ高精度な造形の実現が可能となる．

そこで，樹脂内部の硬化現象を制御可能なマイクロ光造形法として，液晶マスクを用いた非積層マイクロ光造形法を提案し，同手法の実現を目指した研究を行うこととし，第３章から第７章ではその詳細について述べる．

## 参考文献


[２－１] 林照剛, 位相共役光によるホログラフィ光造形法に関する基礎的研究, 大阪大学大学院産業機械工学専攻修士論文, (1998)

[２－２] 木村寛, BSO位相共役素子を用いたホログラフィー光造形法の基礎的研究, 大阪大学大学院機械システム工学専攻修士論文, (1999)

[２－３] 鈴木正根, 実践ホログラフィ技術 ディスプレイ，干渉計測，光学素子，情報機器への応用 , オプトロニクス社, (1993), 19.

[２－４] Pochi Yeh, 訳者　富田康生, 北山研一, フォトリフラクティブ非線形工学, 丸善, (1995)

[２－５] 左貝潤一, 位相共役光学, 朝倉書店, (1990), 5.

[２－６] D.M.Pepper, Nonlinear optical phase conjugation, Opt.Eng. Vol.21, (1982), 156.

[２－７] 恩田一, レーザビーム描画における露光線幅の制御（第２報）-デフォーカスによる線幅制御, 精密工学会誌, Vol.65, 8, (1998), 1158.

[２－８] 山口勝美, 中本剛, Petros ABRAHA KARYAWAN, 伊藤昭, 紫外線感光樹脂を使ったマイクロストラクチュアの製造（第３報，集束
ビーム描画法による硬化特性, 日本機械学会論文集(C編), Vol.61, 581, (1995), 305.

# 第３章
# 液晶マスクを用いた非積層マイクロ光造形原理

第３章では，本研究の主題である液晶マスクを用いた非積層マイクロ光造形法の特徴とその造形原理について述べる．面露光非積層型光造形法として提案した液晶マスクを用いた非積層マイクロ光造形法の特徴は，液晶ディスプレイを面露光の可変マスクとして用いることである．

## ３．１　本研究の特徴

本手法では，（１）高速（２）高精度（３）高自由度な３次元造形を実現するために，液晶マスクを用いた面露光による非積層造形を行う．ここでいう液晶マスクとは面露光マスクとして機能する液晶ディスプレイと２枚の偏光子を組み合わせたものを意味し，以下の記述もこれにならうものとする．液晶マスクを用いた非積層マイクロ光造形法は，下記の３つの特徴を持っている．

（１）液晶マスクによる面露光造形
（２）濃淡画像による非積層造形
（３）動画像による非積層造形

液晶マスクによる面露光プロセスは，走査光学系，積層装置を必要としないため高速かつ高精度な造形を実現できる．また，液晶マスクはマスクパターンの変更が容易であり，一枚のマスクで様々な形状を造形することができる．つまり，液晶マスクの利用により従来の面露光法の問題点であった複数のマスク作成やマスク位置調整の問題を解決し，自由度の高い面露光が実現できる．したがって，液晶マスクによる面露光は面露光の高精度さに加えて高い造形の自由度を持ち，走査露光と面露光の２つの長所を併せ持った露光プロセスといえる．

また，液晶マスクは従来の面露光マスクにない大きな特徴を有している．液

晶マスクは，２値画像の他に濃淡画像や動画像を液晶マスク上に出力できる．したがって，通常の２値画像による露光の他，濃淡画像や動画像を利用した露光プロセスが実現できる．これが，（２），（３）の特徴として示した濃淡画像および動画像による非積層造形に利用できる．濃淡画像の表示階調によって造形形状の高さ情報を表現すれば，一括面露光によって樹脂の硬化深さを制御することができる．本論文でいう濃淡画像は，この２次元画像に濃淡情報を加えて３次元形状を表現した画像を意味する．また，動画像により露光領域を高速に切り替えながら樹脂を露光することも可能である．このような，濃淡画像や動画像を利用した露光プロセスにより，積層法に起因する階段状の誤差に関する問題や造形時間と表面粗さがトレードオフの関係となる問題の解決も可能となる．したがって，濃淡画像や動画像を利用した露光プロセスにより，造形時間の更なる短縮や造形物の表面精度の向上が見込まれる．

ここで，濃淡画像を用いた非積層造形と動画像を用いた非積層造形のそれぞれの特徴についてまとめる．

濃淡画像を用いた造形では，３次元形状を一枚の濃淡画像で表現し樹脂液中での硬化反応を制御することで３次元形状を造形する．したがって，一括面露光による造形が可能となり，高速な３次元形状造形が実現できる．しかし，造形できる形状は深さ方向に単純な形状に限られ，濃淡画像で表現できないオーバハングを持つ形状の造形に課題を有する．

動画像を用いた造形では，３次元形状を表示画像が高速に変化していく動画像によって表現する．動画像を表示しながら樹脂を露光するため，濃淡画像による造形と比較すると造形時間は増加するが，モデル断面を連続的に変化させながら造形を行うために，濃淡画像では不可能なオーバハング形状の造形が可能となる．

用途に応じて２つの造形法を使い分け，単純な形状は濃淡画像を用いて造形し，複雑な形状は動画像を用いて造形すれば様々な形状の造形に対応できると考えられる．

## ３．２　光硬化性樹脂の硬化原理［１－２１］［３－１］

本節では，第２章で省略した光硬化性樹脂の硬化原理について述べる．光硬

化性樹脂は光造形法におけるキーコンポーネントであり，光硬化性樹脂の硬化原理や基本的な硬化特性は，後に述べる濃淡画像および動画像による３次元形状の造形原理を理解するために必要となる．そこでまず，樹脂硬化のプロセスについて触れ，その後基本的な樹脂の硬化特性について述べる．

### ３．２．１　樹脂硬化のプロセス

光硬化性樹脂は比較的粘性の高い液状の高分子化合物である．光硬化性樹脂は”オリゴマー”と呼ばれる比較的粘度の高い高分子（プラスチック）と全体の粘度を低下させて流動性を高めるための反応性希釈剤（モノマー）および，光に反応して縮重合のトリガー役を担う光（重合）開始剤から形成されている．

光重合反応には，カチオン重合型とラジカル重合型の反応がある．アクリレート系，エン・チオール系の樹脂はラジカル重合型の反応により硬化し，エポキシ系の樹脂はカチオン重合型の反応によって硬化する．表３．１にウレタン系の樹脂とエポキシ系樹脂の特性比較を示す．エポキシ系のカチオン重合型の樹脂とアクリレート系のラジカル重合型の樹脂では基本的な反応メカニズムが異なり，プレポリマーや反応性モノマーおよび光開始剤はラジカル系とはまったく異なるものを使用する．前項で述べたように，光開始剤が光照射によってラジカル化し，モノマーの２重結合に作用して重合反応が起きる．光開始剤の活性を高めるため増感剤を添加することもある．増感剤はアミン系が多いが単独では光に対する活性が無く，光開始剤と一緒に使用すると効果がある．本研究では，可視光での硬化特性が優れているアクリレート系の樹脂を用いた．

次に樹脂硬化のメカニズムについて述べる．一般に分子に光を照射した場合，格子のエネルギーがあるレベル以上であるとその中の電子の軌道が変化して分子は反応性になる．さらに格子のエネルギーが高いときには電子が飛び出して分子がイオンになったり，あるいは解離してしまう．光開始剤の分解はこのような光反応を利用している．

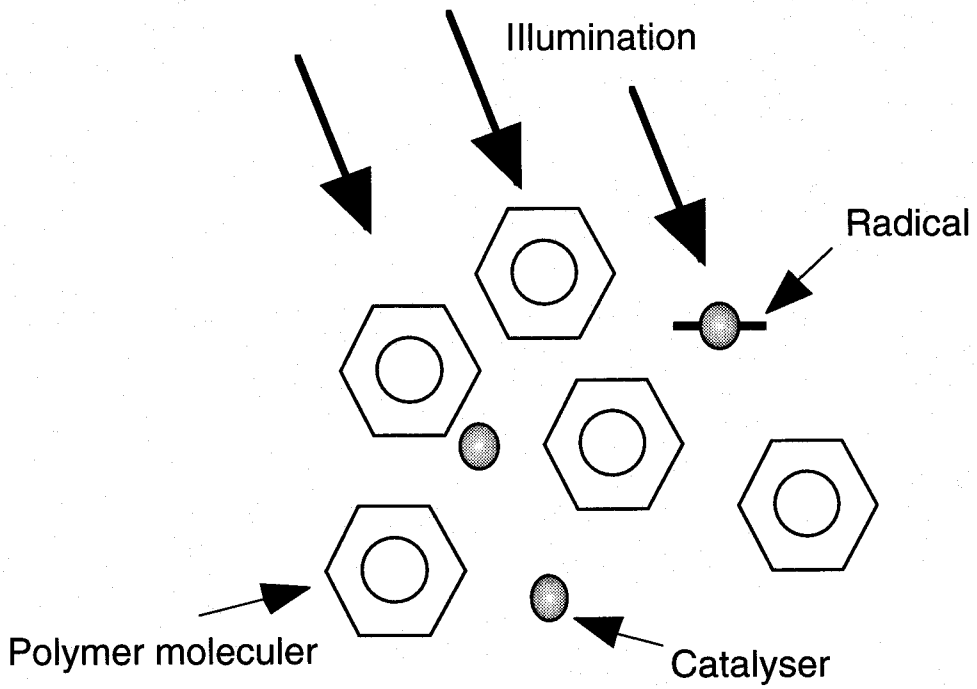
光硬化性樹脂に光が照射されると，光硬化は図３．１のように進行する．

① 開始反応

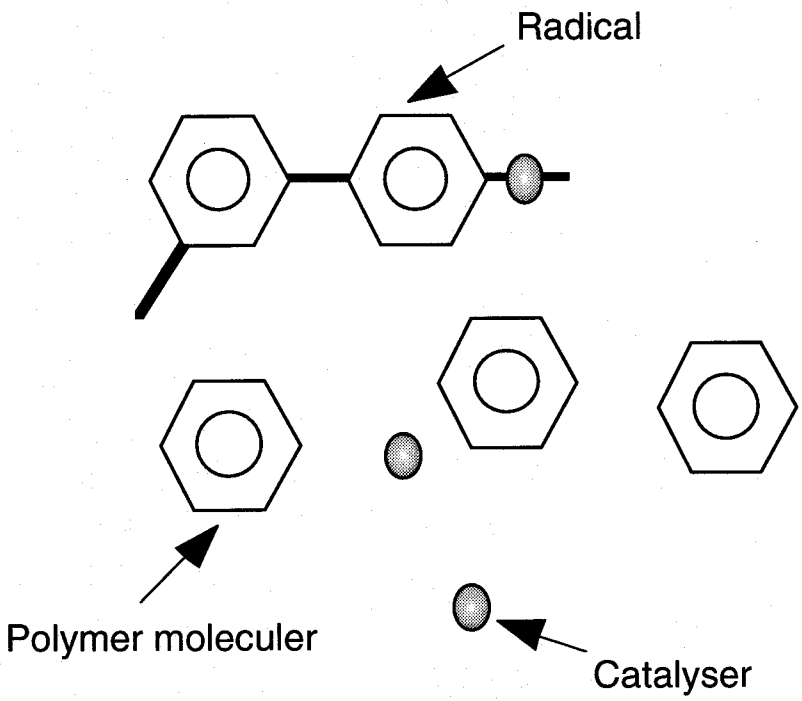
光照射によって光開始剤(catalyser)が分解してラジカルになる．ラジカ

表3.1 ウレタン系およびエポキシ系樹脂の特性比較

| | ウレタン系 | エポキシ系 |
|---|---|---|
| 官能基 | アクリル<br>N-ビニル | エポキシ |
| 活性種 | ラジカル | カチオン |
| 樹脂液 | | |
| 感度 | 高い | 低い |
| 粘度 | 高い | 低い |
| 樹脂液安定性 | 高い | 水分，湿度に弱い |
| 造形物 | | |
| 解像度 | 高い | 低い |
| 膨潤 | 大きい | 小さい |
| 反り変形 | 大きい | 小さい |
| 経時変形 | 大きい | 小さい |
| 力学特性 | 良好，靭性あり | 脆い，高湿度下で軟化 |
| 安全性 | 皮膚刺激性あり | 変異原性有り |




(a)　光照射によるラジカル発生




(b)　ラジカル反応の進行

図3.1　　光硬化反応のしくみ

ルは，電子が一つ不足した状態の分子で，その付近にある分子と容易に結合（化合）する性質を持っている．ラジカルと分子が結合してできた分子も普通はラジカルとなる．

② プレポリマーの活性化

オリゴマーあるいはモノマーがラジカルと化合して，一段階大きなラジカル分子になる．

③ 成長反応

さらにこのラジカルが他のオリゴマーやモノマーと化合してさらに大きなラジカルに成長する．

④ 停止反応

ラジカルが相互に結合したり，あるいは反応性でない分子と結合すると成長したラジカルは通常の非反応性のプラスチック分子となる．ここでラジカル重合反応は停止する．

このように光が照射された部分の各所で分子相互の結合が起こり，３次元網目構造を形成する．３次元網目構造が形成されるとき，その内部にはポリマーが絡め込められ分子が巨大化して樹脂が固化する．ただし，ラジカル重合が連鎖する回数は有限であるから，光開始剤の光分解は十分に行われねばならない．すなわち十分な露光を行わねば硬化が不十分となる．光開始剤の分解効率は光吸収率によって表現される．光子のエネルギーは光波長に反比例するから，一般には紫外域で高い吸収率を示す．本研究で使用した樹脂は，特別に可視光領域（$\lambda=488$ [nm]）で高く安定した吸収率を示すように調整されており，可視光によって樹脂を硬化させられる．

また，樹脂の硬化現象に重要な影響を与える光の波長と樹脂の硬化深さの関係について述べる．樹脂は，光開始剤が光照射によって分解されラジカル化することで硬化反応を起こす．したがって樹脂の感光特性は，光開始剤の光吸収率の影響を受ける．前述したように，光子のエネルギーは光波長に反比例する．本研究で用いた樹脂は，可視光領域で感光するように調合されている．KC-1042の分光感度曲線を図３．２に示す．図に示す臨界露光量$E_c$は，照明された領域の凝固量が全体の1%を越えるときの露光量である．この図から波長５００［nm］以下で光造形に十分な感光特性を有していることがわかる．

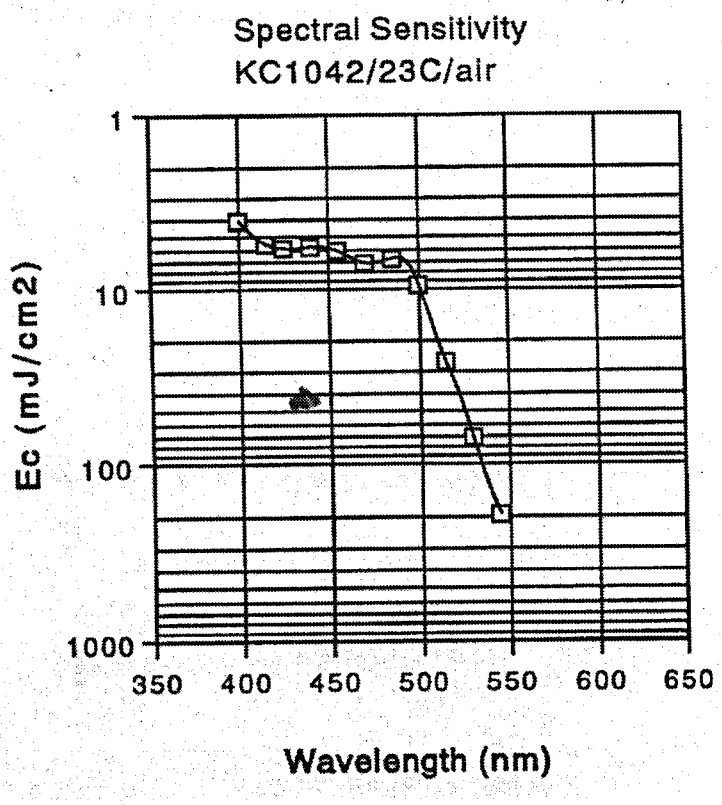



図3.2 KC1042の分光感度曲線

### 3．2．2　ランバートの法則と樹脂の硬化深さの関係

ランバートの法則によると，溶液の中を通過する光の強度は媒質中を透過した距離にしたがって指数関数的に低下する（図3．3）［3－2］．いま，図3．4に示すように，ある波長の単色光の強度を$I_0$［mW/cm$^2$］としたとき，この光がある物質の$c$［mol/l］の中を$l$［cm］通過したとき，その強度が$I$［mW/cm$^2$］に低下したとする．ここで$A$を式（3－1）のように定義すると

$$A = \log_{10}(I_0/I) \qquad (3-1)$$

モル吸光係数$\varepsilon$［l/mol·cm］は式（3－2）で定義される．

$$A = \varepsilon lc \qquad (3-2)$$

ここで式（3－2）を$I$について解けば

$$I = I_0 \exp[-2.302\varepsilon lc] \qquad (3-3)$$

となり，光が媒質中を透過した距離に対して光強度が指数関数的に減少するというランバートの法則が成り立つ．したがって，光開始剤の反応量は式（3－3）から求められる光強度をもとに予測することができる．

ここで，樹脂の硬化深さを導出する式を式（3－3）から導出する．まず，光硬化性樹脂のある一点を強度$I_0$［mW/cm$^2$］の光で露光する場合について考える．ここで，使用する樹脂の単位面積あたりの光吸収係数$\alpha$［1/cm］を

$$\alpha = 2.302c\varepsilon \qquad (3-4)$$

と定義すると，式（3－3）は

$$I = I_0 \exp[-\alpha l] \qquad (3-5)$$

と表せる．したがって，樹脂の露光面から$d$［cm］液中に進んだ点での光強度$I_0$［mW/cm$^2$］は$I_0 \exp[-\alpha d]$［mW/cm$^2$］となる．もし光硬化性樹脂を光強度

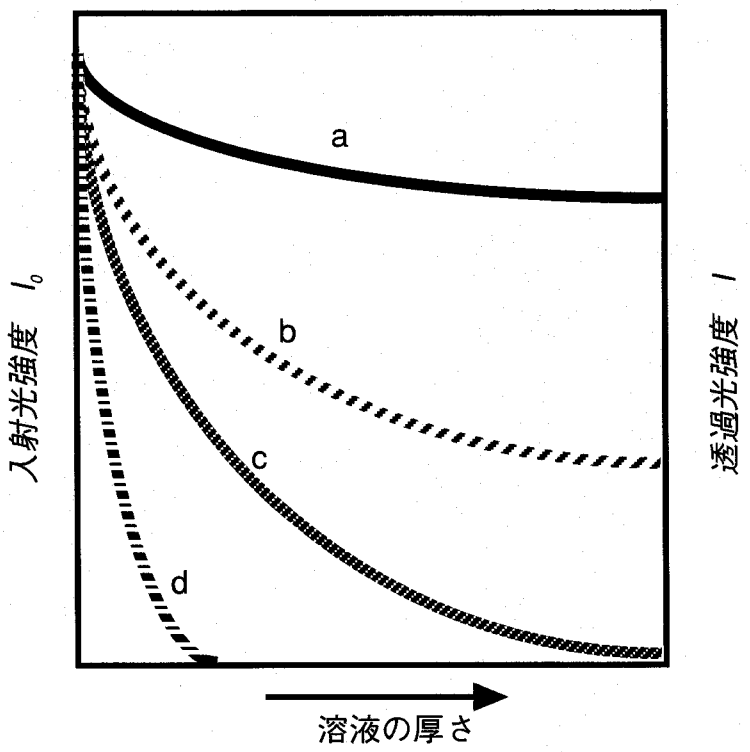



図3.3 Beert-Lambertの法則

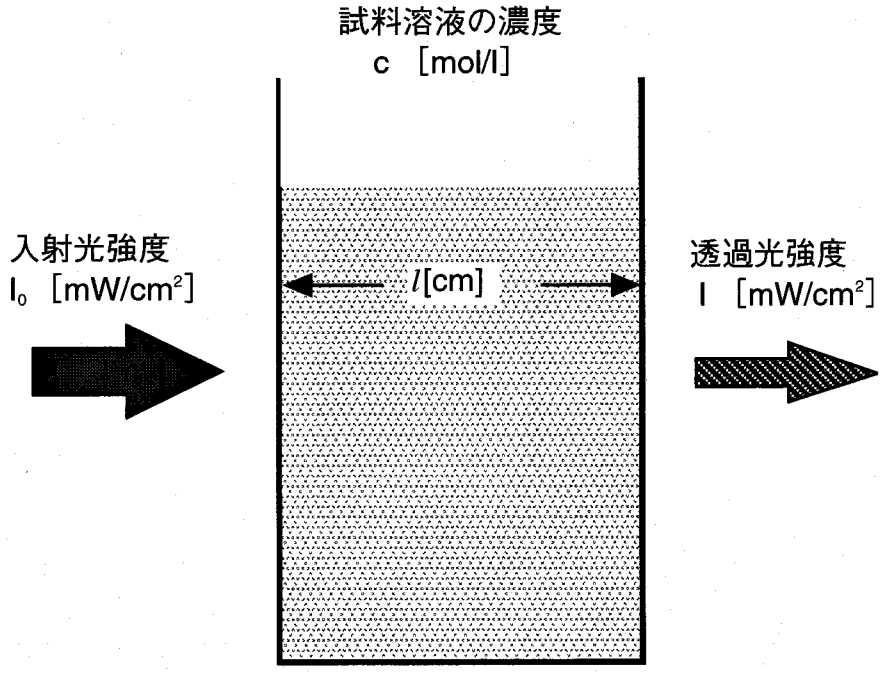



図3.4 モル吸光係数の定義

$I_0$［mW/cm$^2$］で$t$［s］露光すれば，深さ$d$［cm］の点での露光量は$I_0\exp[-\alpha d]\cdot t$［mJ/cm$^2$］となる．ここで，樹脂の臨界露光量を$E_c$［mJ/cm$^2$］とし，深さ$d$［cm］の点での露光量を$E$［mJ/cm$^2$］とすると，

$$E \geq E_c \qquad (3-6)$$

という条件が満たされたときに樹脂が硬化する．したがって露光面での露光量を$E_0$とすると

$$E_0 = I_0 t \qquad (3-7)$$

と表せることから

$$E = E_0 \exp[-\alpha d] \qquad (3-8)$$

という関係が成り立つ．

ここで，式（3－6）の関係が満たされるとすると

$$0 \leq E_c \leq E_0 \exp[-\alpha d] \qquad (3-9)$$

となることから以下の式（3－10）が導出される．

$$d \leq \frac{1}{\alpha}\ln(E_0/E_c) \qquad (3-10)$$

式（3－10）は，樹脂露光面に$E_0$［mJ/cm$^2$］光を照射すると樹脂が$d$［cm］の深さまで硬化することを意味し，本論文では以後式（3－11）で表される$d$の最大値を硬化深さ$C_d$［cm］と呼ぶ．

$$d = \frac{1}{\alpha}\ln(E_0/E_c) \qquad (3-11)$$

ここで，$1/\alpha$という係数は一般に$D_p$［cm］（透過深度）と呼ばれており，

式（３－１１）は，

$$C_d = D_p \ln\left(E_0/E_c\right) \qquad (3-12)$$

と表される．式（３－１２）は，樹脂の硬化特性を求めるための硬化深度曲線（Working Curve)の導出に利用されており，露光量と樹脂固有のパラメータである$D_p$［cm］と樹脂の臨界露光量$E_c$［mJ/cm$^2$］の値が既知であれば，露光量$E_0$［mJ/cm$^2$］と硬化深さ$C_d$［cm］の関係を求めることができる．

式（３－１２）において，$E_0$［mJ/cm$^2$］を$x$，$y$の関数$E_0(x,y)$で表せば，任意の強度分布を持った光で樹脂を面露光した場合について硬化深さを算出する式が導出できる．したがって，露光面での露光量分布が$E_0(x,y)$となる場合，光硬化性樹脂の硬化深さを$C_d(x,y)$とおけば，式（３－１３）によって硬化表面形状を表すことができる．

$$C_d(x,y) = D_p \ln\left(E_0(x,y)/E_c\right) \qquad (3-13)$$

以上のようにして，ランバートの法則から面露光を行った場合の露光量と硬化深さの関係を導出することができる．

ただし，光開始剤が露光によって透明化を起こしてしまう場合や，硬化した樹脂が光学的に不均質で，光を乱反射してしまう場合には樹脂の光吸収特性は必ずしもランバートの法則に従わない．したがって，樹脂が透明化した場合には，硬化深さは式（３－１３）で予測されたものよりも深くなり，光硬化性樹脂が充填剤などを含んで不均質だと，透過レーザ光が乱反射され拡散を生じるため硬化深さはさは式（３－１３）で予測されたものよりも浅くなる．

## ３．３　濃淡画像による非積層造形

最初に，濃淡画像による非積層造形の概念について述べる．濃淡画像による非積層造形プロセスを図３．５に示す．造形の手順は以下の通りである．

① ３次元CADデータの高さ情報を濃淡の階調で表される濃淡データに置き換え，３次元CADデータを２次元画像に濃淡情報を加えて３次元形状を表現する濃淡画像に変換する．
② 作成した３次元濃淡画像を，液晶マスク上に出力する．

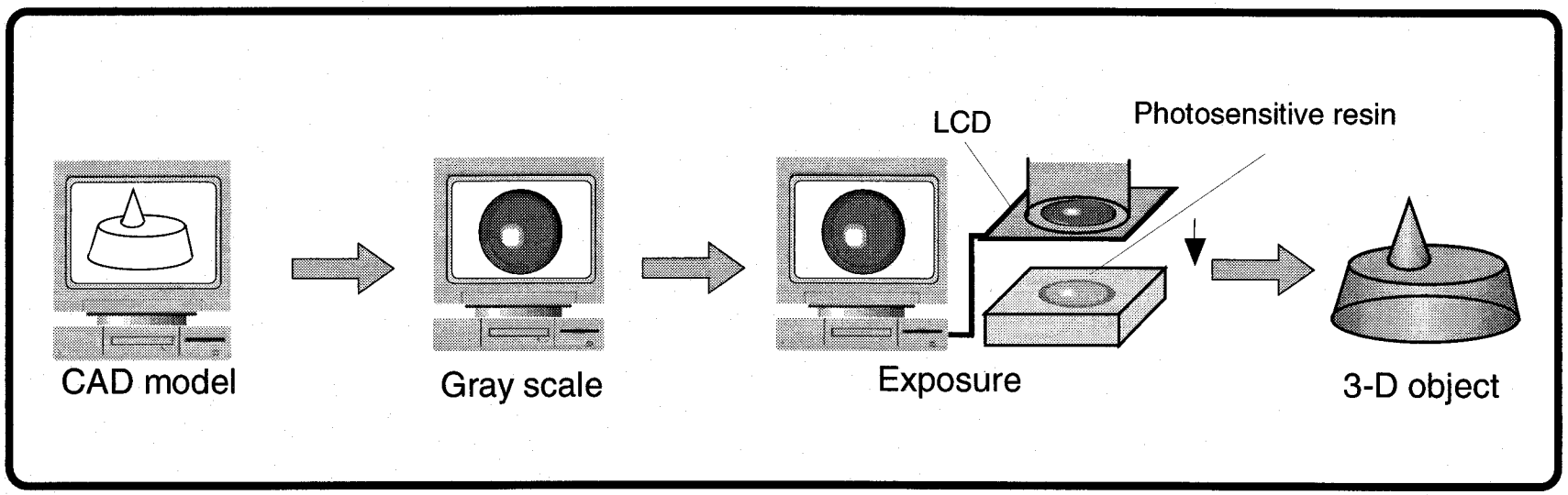



図3.5 濃淡画像による非積層造形プロセス

③ 液晶マスクを均一な強度分布を持つレーザー光で照明する．
④ 濃淡画像の結像位置に配置された光硬化性樹脂上にマスクパターンを結像させる．
⑤ 一定時間の露光を行って３次元的に樹脂を硬化させる．

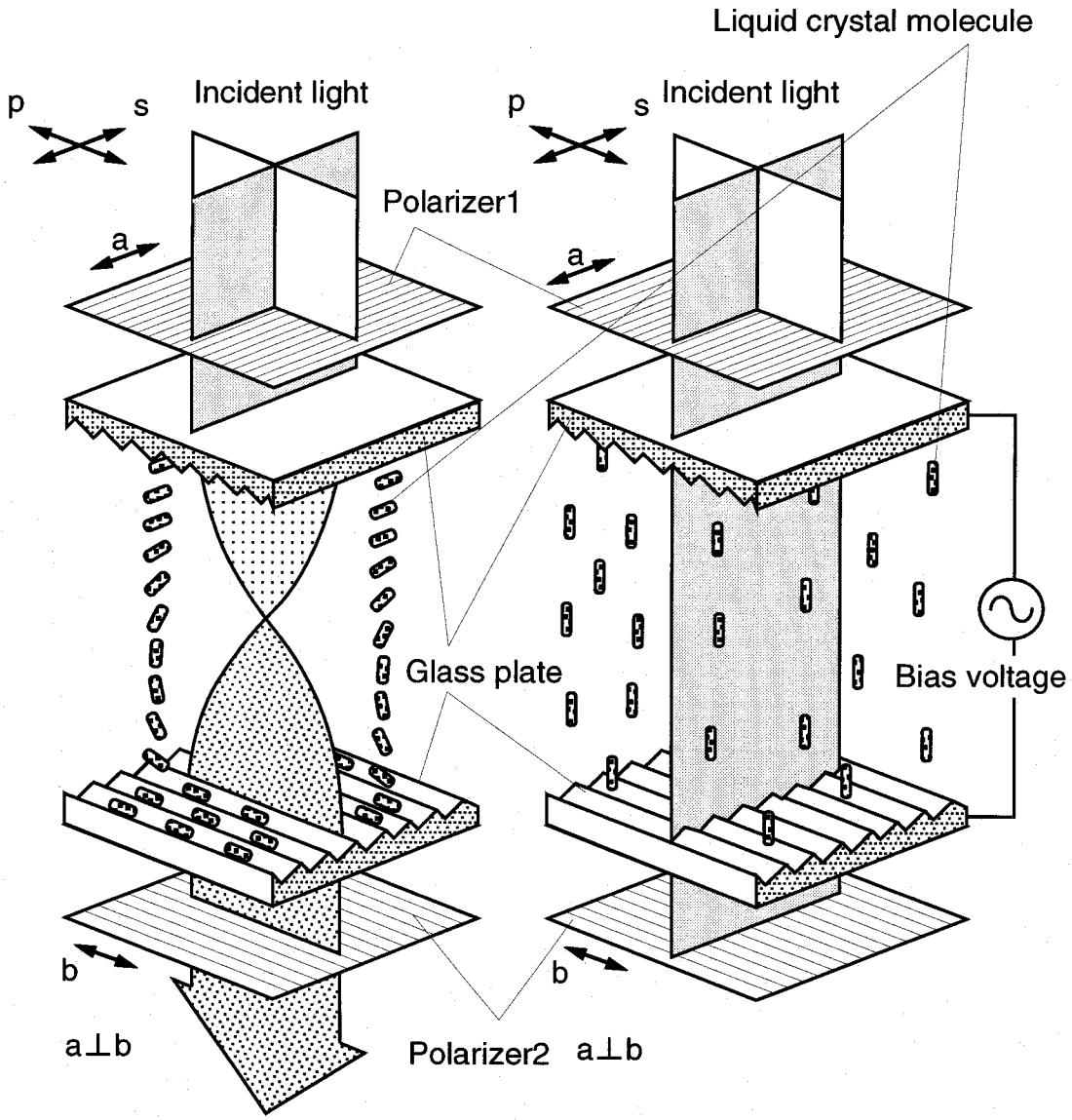
液晶マスクを透過した光は強度変調され，濃淡画像の表示階調に対応した強度分布を持っている．したがって，濃淡の情報は光硬化性樹脂上では光の疎密として再現されており，この光の疎密に対応して光硬化性樹脂液中で樹脂の硬化反応が進行し，積層することなしに樹脂を３次元的に硬化させられる．以上のようにして，濃淡画像を用いた非積層造形が行える．

### ３．３．１　液晶マスクの動作原理

前節でランバートの法則から導出した式（３－１３）により，光硬化性樹脂に与えられる露光量分布から硬化樹脂の表面形状を求めることができる．露光量が決定されれば，硬化樹脂の表面形状に当たる$C_d(x,y)$は一意に定まるため，任意の露光量分布$E_0(x,y)$を樹脂に与えることができれば，式（３－１３）の関係にしたがって硬化樹脂の表面形状を決定することができる．本手法では，光硬化性樹脂に任意の露光量分布$E_0(x,y)$を与えるために，液晶マスクに濃淡画像を出力し，濃淡画像によって樹脂に与える露光量を制御する．そこで，濃淡画像によって露光量を制御する液晶マスクの動作原理を以下に示す．

液晶マスクによる面露光では，液晶マスクをある均一な強度を持つ光で液晶マスクを照明する．濃淡画像によって露光量を制御するには，この均一な強度分布を持つ光が液晶マスクを透過する際に，濃淡画像の濃淡表示階調に従った強度分布を与えればよい．そこで，液晶マスクには光強度変調フィルターとしての役割が求められる．

ここで，液晶マスクの動作原理について簡単に述べる．液晶マスクとして利用可能な液晶ディスプレイには，１０以上の動作原理に基づくものがある［３－３］［３－４］．本研究で使用したTFT(thin film transistor)駆動液晶ディスプレイ（TFT LCD)はTN型に分類されるため，以下にTN(twisted nematic)型の液晶ディスプレイの動作原理について述べる．図３．６に，TN型の液晶の動作原理を示す．図３．６(a)，図３．６(b)は，それぞれ電圧非印加時および印加時の液晶セルの状態を示している．




(a)　光透過（電圧印加なし）　　(b)　光遮断（電圧印加）

図3.6 液晶ディスプレイの動作原理［３－５］

図３．６(a)に示すように電圧を印加しない場合は，液晶分子はそれぞれ上下のガラスプレート上の配向膜の近傍では，配向方向に沿って一方向に配列されている．この時液晶分子の配向方向は，溶媒の中で上側のガラスプレートから下側のガラスプレートに至るまでの間に９０°回転している．まず，第１の偏光子(Polarizer1)に光が入射すると，入射光のｓ偏光成分が偏光子によって遮断されｐ偏光成分は液晶分子を透過する．

液晶分子は異方性媒質であり，分子の方向によって屈折率が異なる．このとき液晶分子が混入されている溶媒の屈折率と光の進行方向に対する液晶分子の屈折率が異なるため，光が液晶中を透過する際に，光波の振動成分に位相差が生じる．その結果，入射光の偏光は下側のガラスプレートに到達するまでに９０°回転する．第２の偏光子(Polarizer2)は，光を遮光軸がPolarizer1と直交するように配置されているので，入射光はPolarizer2を透過する．

一方，図３．６(b)に示すように電圧を印加した場合は，液晶分子の配列方向がそれぞれ電極に直交する．この時，溶媒と入射光の進行方向に対する液晶の屈折率は一致するために，透過光波の振動成分に位相差は生じない．したがって，入射光の偏光方向（ｐ偏光）はせず，Polarizer2を透過する際に全ての光が遮断される．

以上のように，TN型の液晶では，電圧印加のあるなしによって液晶分子の配列方向を変化させ，透過光の偏光方向の回転量を制御する．入射光の偏光方向の回転量を印加電圧によって制御し，２枚の偏光子によって液晶セルを透過する光の偏光成分を選択すれば，液晶セルは印加電圧によって透過光の強度を調節するフィルターの役割を果たす．

液晶ディスプレイは，それぞれ独立して動作する液晶セルを縦横に並べて形成されている．１つの液晶セルが液晶ディスプレイの一画素に相当することから，液晶ディスプレイを液晶マスクとして用いれば，各画素ごとに透過光の強度を調節することができる．各液晶セルごとの印加電圧は液晶マスク上に表示される濃淡の階調によって決定されるので，もし液晶マスクに濃淡画像を出力すれば，濃淡画像の各点の表示階調から透過光強度が決定される．

### ３．３．２　濃淡画像による非積層造形原理

ここで，濃淡画像による３次元形状造形の過程を以下に述べる．
濃淡画像によってある形状$F(x,y,z)$を造形する場合，図３．７に示す過程を経て３次元形状が造形される．３次元CADで作成された造形形状データ$F(x,y,z)$

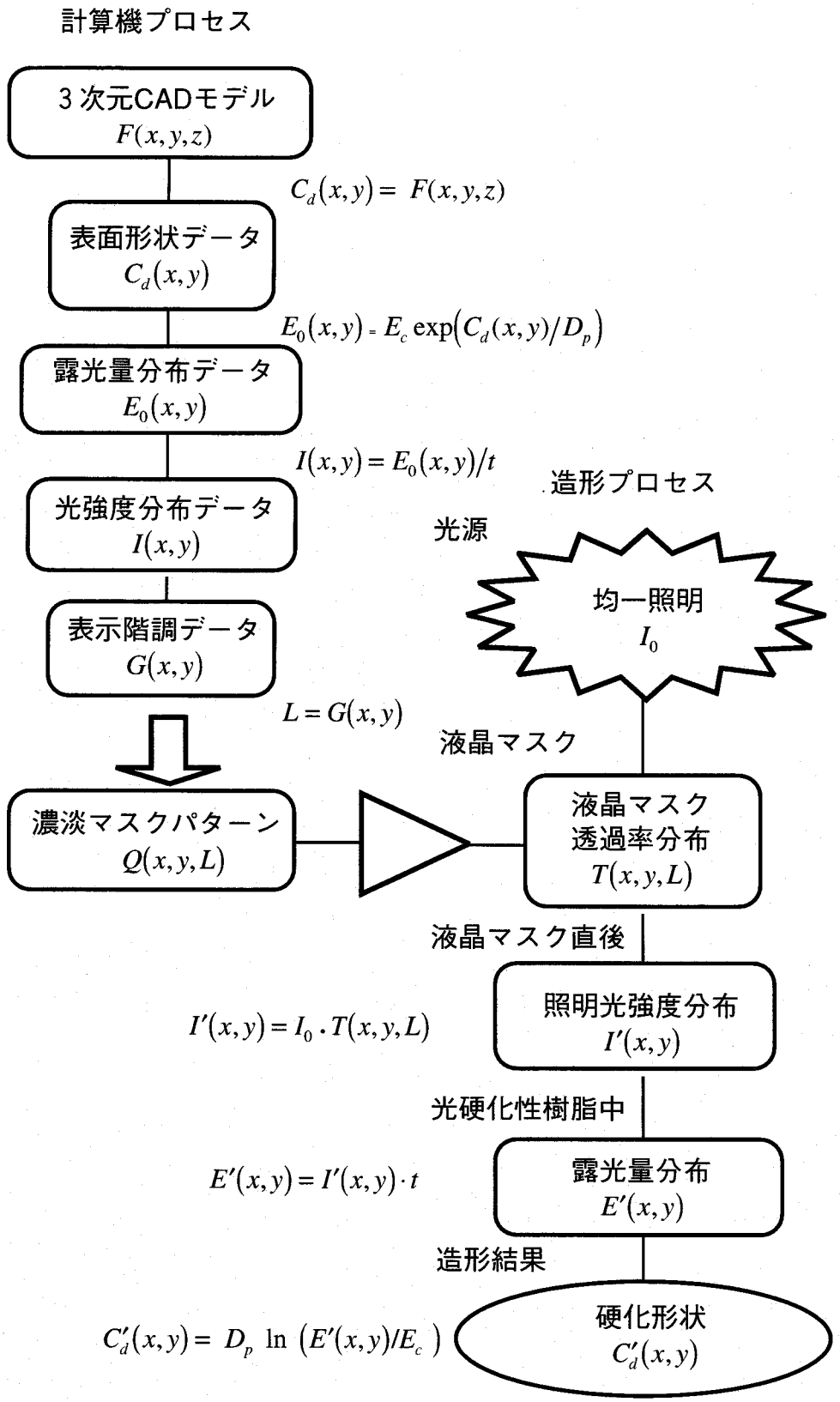



図3.7 濃淡画像による非積層造形過程

は，表面形状データ $C_d(x,y)$ に変換される．この表面形状データ $C_d(x,y)$ を式（３－１４）に代入すれば，造形に必要とされる樹脂露光面での露光量分布 $E_0(x,y)$ が算出できる．

$$E_0(x,y) = E_c \exp\left[C_d(x,y)/D_p\right] \qquad (3-14)$$

そして，露光面での光強度分布 $I(x,y)$ は，樹脂の露光時間を $t$ [s] とすると

$$I(x,y) = E_0(x,y)/t \qquad (3-15)$$

となる．この強度分布データをもとに濃淡画像の表示階調分布 $G(x,y)$ が決定される．ここで，表示階調分布 $G(x,y)$ を $L = G(x,y)$ と置きかえれば，３次元形状データ $F(x,y,z)$ を元に作成される濃淡画像は $Q(x,y,L)$ と表すことができる．

濃淡画像 $Q(x,y,L)$ が液晶マスク上に出力されると，液晶マスクの透過率は $T(x,y,L)$ の分布を持つ．この液晶マスクを均一な強度の光 $I_0$ [mW/cm$^2$] で照明する場合，液晶マスクを透過後の照明光強度分布 $I'(x,y)$ は式（３－１６）となるので，液晶マスクに濃淡画像 $Q(x,y,L)$ を出力して $t$ [s] 間面露光を行った場合の露光面での露光量分布は式（３－１７）として求められる．

$$I'(x,y) = I_0 \cdot T(x,y,L) \qquad (3-16)$$

$$E'(x,y) = I'(x,y) \cdot t \qquad (3-17)$$

つまり，光硬化性樹脂に所望の露光量分布 $E'(x,y)$ を与えるためには，液晶マスクに濃淡画像 $Q(x,y,L)$ を出力し，液晶マスクの透過率 $T(x,y)$ を表示階調 $L$ によって制御し，光硬化性樹脂を強度分布 $I'(x,y)$ の光で露光する．この時，樹脂の硬化表面形状 $C'_d(x,y,L)$ は式（３－１８）の関係に従う．

$$C'_d(x,y,L) = D_p \ln\left(E'(x,y)/E_c\right) \qquad (3-18)$$

以上のようにして，式（３－１３）の関係をもとに３次元形状データ $F(x,y,z)$ から濃淡画像，所望の硬化表面形状 $C'_d(x,y,L)$ を得ることができる．１

回の面露光によって得られる形状$C'_d(x,y,L)$は，それぞれ$x$，$y$，$L$の３つのパラメータから決定される３次元形状であることから，積層を行わずに３次元形状の造形が行えることとなる．

## ３．４　動画像による非積層造形

液晶マスクには，濃淡画像の他に動画像が出力できる．液晶マスクに動画像を出力して樹脂を露光する動画像露光を行えば，濃淡画像によるものと同様に樹脂に所望の露光量分布を与えて非積層造形を行うことも可能である．濃淡画像および動画像による非積層造形を行えば，造形速度および造形精度の向上が見込まれる．

しかし，この場合造形できる形状が，例えば円錐のような順方向に変化していくような形状に限られ，オーバハング形状などの造形が行えないという問題がある．この問題の解決のために動画像露光プロセスを利用した新たな造形プロセスを提案する．

従来の積層型光造形法は，断面化した３次元形状を各層ごとに造形するために内部構造を含めた複雑な形状を造形できる利点がある．しかし，第１章で述べたように，３次元形状を積層して造形する際に生じる階段状の誤差により造形物の表面精度が劣化する．積層する層の厚さをできる限り薄くすれば表面精度の劣化を軽減することができるが，層厚さが薄くなると３次元形状の造形に必要とされる積層回数が大幅に増加する．したがって，造形物の表面精度を向上させるために層厚さを減少させれば，積層回数の増加によって造形時間が大幅に増大することになる．

造形時間を増大させずに造形精度を向上させるためには，造形時間が積層回数に比例して増大しない造形プロセスが必要となる．動画像による露光を行えば，液晶マスクに出力する３次元形状の断面を連続的に切り替えながら樹脂を露光して連続的な積層造形を行うことができる．この連続的な積層造形プロセスでは，造形時間が積層回数に比例しない造形を行うことができる．さらに，積層法の特徴を活かして複雑な３次元形状の造形を行うことも可能である．

本論文では，これら２つの動画像露光による３次元形状造形プロセスを総称して動画像による非積層造形と呼び，その詳細について以下に述べる．

### ３．４．１　動画像露光による樹脂露光量の制御

動画像を液晶マスクに出力して行う樹脂露光量制御について述べる．一例と

して図３．８(a)，(b)，(c)に示す３種類のマスクパターンを切り替えながら樹脂を露光した場合について考える．液晶マスクを均一強度の光で照明し，パターンA，パターンB，パターンCを一定間隔で切り替えて光硬化性樹脂を露光すると，樹脂の露光領域がマスクパターンの変化に伴って連続的に変化していく．すべてのマスクパターンの露光が終了すると，露光された領域は図３．８(d)のように，露光回数によって$\alpha$から$\delta$に分類される．

露光中樹脂が流動しなければ，マスクパターンの変化に伴って露光される領域が変化しても露光されたエネルギは樹脂に蓄積される．つまり，露光回数の増加は，樹脂の露光時間すなわち露光量の増加を意味する．したがって，動画像露光によって光硬化性樹脂の露光領域と露光回数を制御すれば，$x$，$y$平面内の任意の点で光硬化性樹脂の露光量を自由に変化させられる．

したがって，濃淡画像による造形の場合と同様に式（３－１３）によって所望の形状を造形することが可能である．

### ３．４．２　動画像による非積層造形原理

動画像露光には高速表示が可能な液晶マスクが不可欠であり，本研究ではTFT型液晶ディスプレイを液晶マスクとして利用する．アクティブマトリクス型液晶ディスプレイの代表格であるTFT型液晶ディスプレイは，薄いフィルム状のトランジスタを用いて各セルを制御するため高速描画が可能であり，連続して出力画像を切り替える動画像露光が実現できる．

３．４．１節で述べたように，動画像を用いて静的に配置された樹脂を露光すれば，光硬化性樹脂の露光量を制御して３次元形状を造形することができる．しかし，濃淡画像による造形の場合と同様に造形できる形状が制限される問題がある．

もし３次元形状の断面を液晶マスクに連続的に出力し，露光面に未露光の樹脂を供給しながら連続的な露光を行えば，断続的であった積層プロセスを連続して行うことができる．連続的な積層プロセスでは，従来の積層法と異なり未露光の樹脂層が連続的に露光面上に形成される．したがって，動画像を用いて３次元形状断面を連続的に露光すれば，樹脂層の形成と露光を断続的に繰り返すことなしに３次元形状が造形できる．本論文では前節で説明した動画像による非積層造形プロセスに加えて，この連続的な積層プロセスも動画像による非積層造形プロセスと呼ぶ．

図３．９に，動画像による非積層造形過程の概念を示す．まず造形する３次

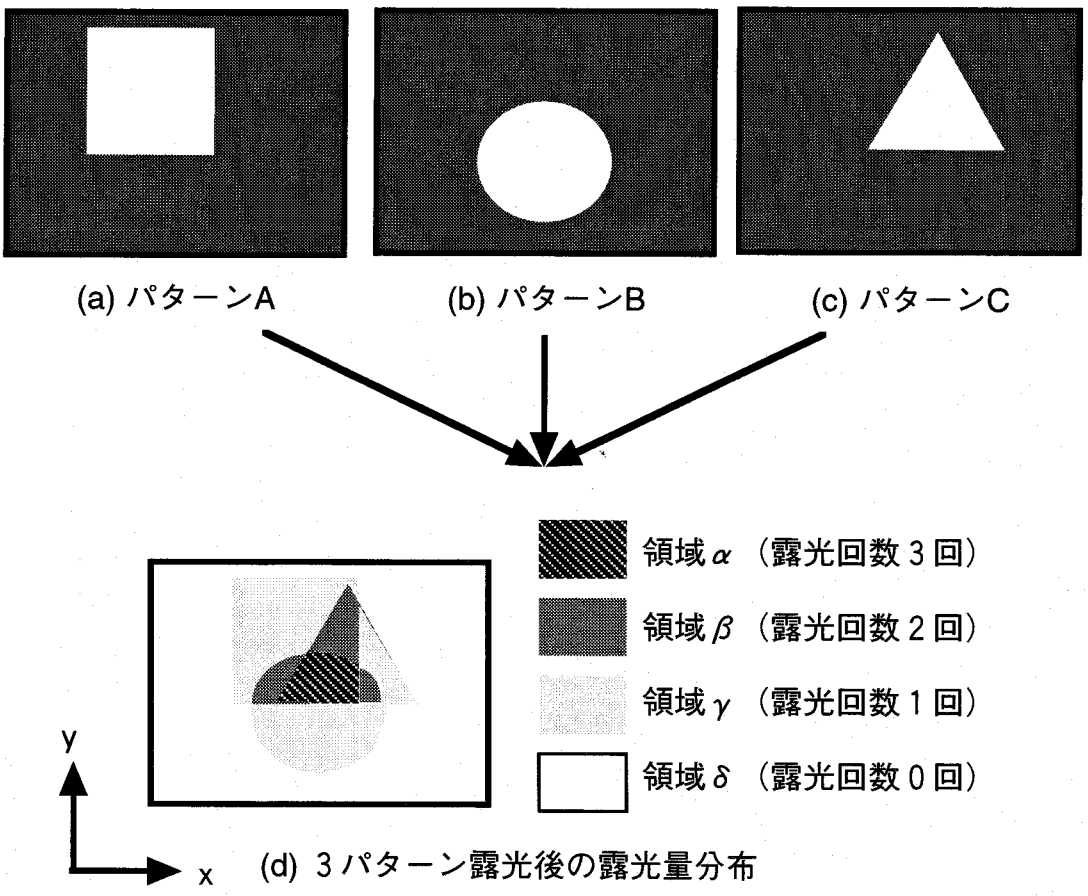



図3.8 動画像露光による露光量制御

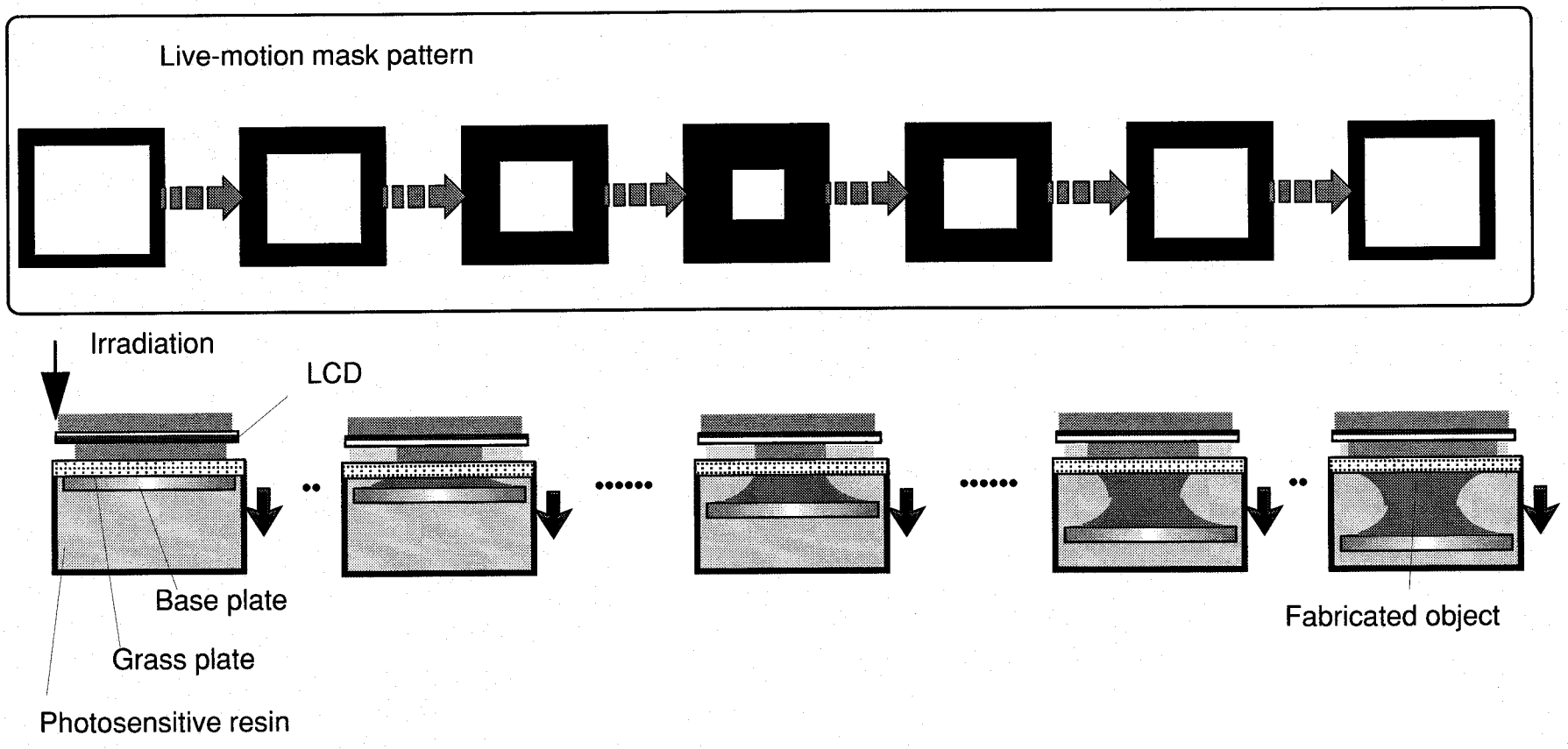



図3.9 動画像による非積層造形プロセス

元形状を断面化し，その断面を連続的に表示する動画像を作成する．この動画像による露光を行えば，樹脂上では３次元形状の各断面が連続して露光される．さらに，このマスクパターンの変化に同期させて，ベースプレート位置を連続的に移動させる．ベースプレート位置が移動すれば硬化した樹脂と液面を規制するガラスプレートの間に間隙が生じ，そこに未露光の樹脂が流れ込む．新たに流入した未露光の樹脂は，液晶マスクに出力されている断面形状にしたがって硬化することとなり，マスクパターンの変化に伴って次々と新たな断面形状が造形されていく．以上のようにして，断面の露光と新たな樹脂層の形成を連続的に行って３次元形状を造形するために，図中にも示しているようなオーバハング形状の造形も可能となる．

動画像を液晶マスクに出力して面露光を行えば，断面全体を一括露光できる．さらに，マスクパターンの切り替えの際も露光を中断する必要がないので，造形する断面を切り替えながら連続的な露光を行うことができる．また，造形中は常時液晶マスクを透過した光によって樹脂が露光されていることから，光硬化性樹脂はその瞬間に液晶マスクに出力されている断面形状にしたがって露光面で硬化する．したがって，従来の積層型光造形法に比べて高速に３次元形状を造形できる．その詳細について以下に述べる．

走査積層型光造形法では造形時間は造形形状の体積に比例したが，動画像を用いた非積層造形プロセスでは造形時間は造形形状の高さに比例する．なぜなら，動画像を用いた非積層造形プロセスでは断面の形状や面積にかかわらず一枚の断面を一回の露光で硬化させることができ，積層型造形法で一層ごとに必要とされる走査描画や樹脂層の形成の過程を含まないためである．

サンプリング断面数（積層回数）が増加すれば，一回の造形あたりの露光回数は増加する．しかし，硬化させる層の厚さが薄くなることから一層の硬化に必要となる露光時間は短くなる．また，サンプリング断面数が減少すれば，露光回数は減少するが硬化させる層の厚さが厚くなり，一層の硬化に必要となる露光時間も増加する．したがって，造形に必要な時間は全体で考えればサンプリングした断面の数にかかわらず一定となる．

これは，造形する形状の高さが等しければ，層間の段差による誤差を軽減するために積層する層の厚さを薄くしても，造形時間が変化しないことを意味する．つまり，従来の積層法で見られた積層する層の厚さと造形時間が反比例する問題は生じない．したがって，動画像露光を利用すればサンプリング断面数を増やしても造形時間は増加せず，高速かつ高精度な造形が可能になると考えられる．

**参考文献**


［３－１］　山岡亞夫, 森田浩, 感光性樹脂, 共立出版, (1988)

［３－２］　杉森彰, 光化学, 裳華房, (1998), 16.

［３－３］　液晶若手研究会編, 液晶ディスプレイの最先端 -LCD開発の基礎から２１世紀展望まで, シグマ出版, (1996), 2.

［３－４］　内田龍男, 次世代液晶ディスプレイ技術, 工業調査会, (1994), 12.

［３－５］　液晶ディスプレイ「フラットパネルディスプレイ最前線」, シャープ先端技術ライブラリー, Vol.1, (1989), 49.

# 第４章
# 基礎特性実験

第４章では，光硬化性樹脂の硬化特性や液晶マスクの光透過特性等を調べた基礎特性実験について述べる．まず，樹脂硬化特性を評価するパラメータである臨界露光量$E_c$と透過深度$D_p$を実験によって求め，さらに，液晶マスクの透過率を測定した．また，濃淡画像による露光を行った場合の深さ方向の分解能，および液晶マスクによる面露光造形の横分解能を評価した．

## ４．１　樹脂硬化特性実験

樹脂硬化に関係するパラメータを測定すれば，光硬化性樹脂の硬化特性を評価できる．そこで本実験では，光造形装置の光源となる波長４８８［nm］の光に対する臨界露光量$E_c$［mJ/cm$^2$］と透過深度$D_p$［$\mu$m］を求める．これらの値が与えられれば，式（３－１３）によって示される露光量と樹脂の硬化深さの関係に基づいて樹脂の硬化深さを制御し，積層することなしに３次元形状の造形が行える．

### ４．１．１　実験装置および実験条件

図４．１に実験装置の構成を示す．Ar$^+$レーザ（$\lambda$＝４８８［nm］）を光源とする光は，対物レンズ，回転拡散板，およびレンズからなるビーム強度均一化光学系によってそのビーム径を拡大され，均一な強度で矩形開口全体を照明する．拡散板を通過したレーザ光は通常スペックルノイズを生じるが，拡散板が回転することによってスペックルノイズが平均化され，その強度が均一化される．また，単位面積当たりの露光量を正確に求めるために矩形開口の面積を正確に測定する必要があるので，正方形開口パターンを出力した液晶マスクを矩形開口として利用した．液晶マスクの利用により開口の面積を１ピクセル単位で設定できる．

まず，液晶マスクに一辺が３３０ピクセルの正方形を出力する．液晶マスクの

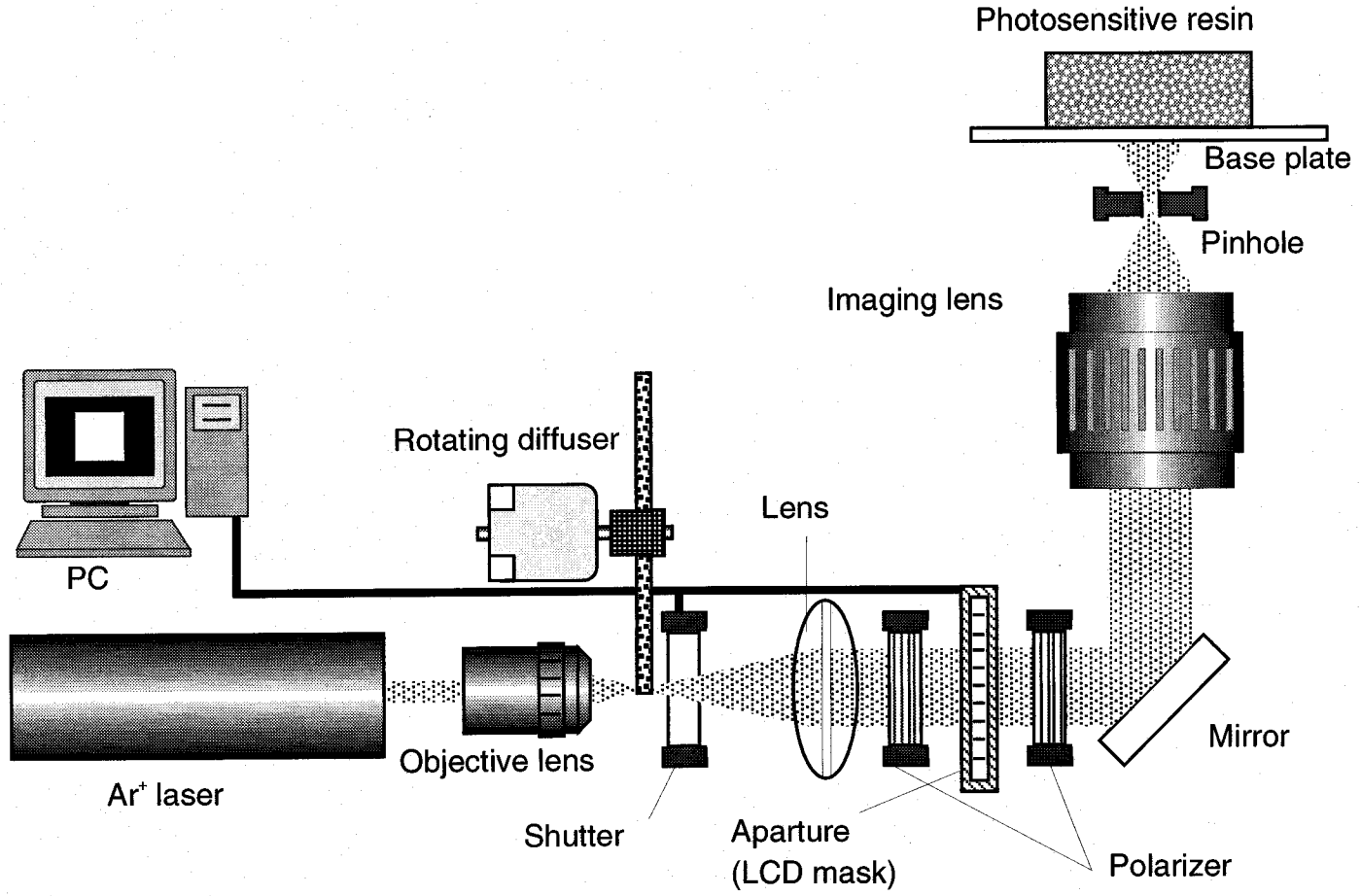



図4.1 樹脂硬化特性実験装置

ピクセルサイズは３３×３３［μm］であり，液晶マスク上では１辺が１０．８９［mm］の正方形開口となる．均一な照明によって２枚の偏光板と液晶ディスプレイからなる液晶マスクが照明されると，液晶マスク上の正方形開口を光が透過し，ピンホールによってノイズ光が取り除かれてベースプレート上に結像する．ベースプレート上に結像する正方形開口は，結像レンズによって２７％に縮小されて露光面積は８．６５［$mm^2$］となる．樹脂の露光面には常に十分な量の光硬化性樹脂が満たされており，露光面で樹脂が硬化する．また，本研究では日本合成ゴム株式会社製KC-1042を使用した．この樹脂は下記の特徴を有する．

① $Ar^+$レーザの波長λ＝４８８［nm］の可視光で良好な硬化特性を有する．
② 微弱な強度の光に対しても樹脂の硬化が起こる．
③ 奥行き方向の造形が行えるように，一定の深さまで光が透過する．
④ 高い粘性を有し，樹脂中で硬化物が流動しにくい．

使用した樹脂の詳細な物性値については，２．３節に記載されたものを参照されたい．

下記に今回の実験に用いた装置の一覧を示す．第２章の実験および第４章～第６章の実験では，特に表記が無い限り下記の実験装置を使用するものとする．

Ar+ レーザ：

Spectra-Physics製　BeamLok2060-4s

| | |
|---|---|
| 波長： | λ＝488.0[nm] |
| ビーム径： | 1.66[mm](λ＝488.0[nm]) |
| | 1.7[mm](λ＝514.5[nm]) |
| ビーム広がり角： | 0.44[mrad](λ＝488.0[nm]) |
| | 0.45[mrad](λ＝514.5[nm]) |
| 発振モード： | TEM00MODE |

Visible Single Line Power

液晶ディスプレイ：

Epson製　TFT型液晶

| | |
|---|---|
| ピクセル数： | 800×600[pixel] |

ピクセルサイズ：　33×33[μm]
画面サイズ：　26.4×20.0[mm]

ミラー：（丸形，正方形）
シグマ光機株式会社製　（TFA-50C08-10,TFA-15S03-10）
材質：　パイレックス,BK7
面精度：　λ／10
平行度：　3分以内
コーティング：　Al + $MgF_2$
直径：　50[ mm]
厚さ：　8 [mm]

ミラーホルダー：
シグマ光機株式会社製（マイクロメータつき，マイクロメータなし）

対物レンズ：
Nikon製　×１０

レンズ：
シグマ光機株式会社製
焦点距離：　f=250[mm](L1), f=50[mm](L2)）

x,y,z,θの各種ステージ：
シグマ光機株式会社製

多出力直流安定化電源：
KIKUSUI製　（PMC-18-2A）
出力電圧：　0 ～ 18 [Vdc]
入力電圧：　100 [Vac]

x,y,θステージ：
シグマ光機株式会社製

x,zステージ：
シグマ光機株式会社製（マイクロメーター付き）

電動zステージ：
シグマ光機株式会社製　Mini-60Z
移動量：　20[mm]
1パルス移動量：　0.5[μm]
繰り返し位置決め精度：　2[μm]
バックラッシュ：　5[μm]
最大移動速度：　4[mm/sec]

電動ステージコントローラ：

| | |
|---|---|
| シグマ光機株式会社製 | Mark102 |
| 制御軸数： | ２軸（同期制御可能） |
| 設定移動量： | 999999999パルス |
| 最大表示範囲： | ８桁（符号，小数点を含む） |
| 最小駆動周波数： | 20[kPPS] |
| 加減速時間： | 0～1000[ms] |
| リミットセンサ： | ノーマルクローズ(Mini系ステージ) |
| 原点検出方式： | MINI方式 |
| DC電源： | ホトセンサ用電源内蔵 |
| | 電圧ＤＣ[24V/5V]（100[Ω]直列抵抗） |
| | ２軸独立切替 |
| | 定格電流100[mA] |

電磁シヤッター：

| | |
|---|---|
| シグマ光機株式会社製 | （Σ-65G） |
| 解放時間： | 8～65534[msec]の範囲で1[msec]単位で任意の時間に設定することが可能. |
| 解放時間誤差： | + 3[msec] + 設定時間の0.01[%]（中心部） |
| | - 5[msec] （周辺部） |

カバーガラス（樹脂ベースとして利用）

| | |
|---|---|
| マツナミ製 (461-01) | |
| サイズ： | 24×24[mm] |
| 厚さ： | 0.12～0.17[mm] |

ＣＣＤカメラ：

| | |
|---|---|
| SONY製 Model XC-77RR-CE | |
| ピクセルサイズ： | 11×11[μm] |

PC：

EPSON製 TYPE-HX

パワーメーター：

| | |
|---|---|
| Spectra-Physics製 | MODEL 404 Specifications |
| Spertral Sensitivity ： | Flat to ±15[%] from 450 to 900[nm] |
| Input Acceptance angle： | ±5° |
| | |
| Newport製 測定部 | High-Power Detectors 818T-10 |
| Spectral Range： | 0.25 to 11[μm] |

Maximum Average Power Density ： 26[kW/cm$^2$]

Minimum Detectable power： 1[mW]

制御部 Power/Energy Meter Model 1825-C

PHIR製 PD200

Spectral range ： 400-1100[nm]

Power measurement ranges： 199.9, 19.9, 1.999[mW],

199.9, 19.99, 1.999[$\mu$W]

光学顕微鏡：

Nikon製 LSI検査顕微鏡 オプチフォト-200

SEM：

JEOL製 JSM-5800A SCANNING MICROSCOPE

可視光硬化型光造形用樹脂：

日本合成ゴム株式会社製 KC1042（詳細な物性値は２．４節(c)の記述を参照）

実験条件を以下に示す．レーザの出力範囲を８５［mW］～１．２［W］として，樹脂露光面での光強度を０．１～２．５［mW］の範囲で変化させた．露光時間は４［s］間であり，上述した電磁シャッターΣ-65Gを利用して設定した．実験に使用した光硬化性樹脂KC1042は，可視光に反応するため実験中は日光や照明光の光を暗幕によって遮断し，暗い室内で実験を行った．作業中の照明には，赤色照明を利用し照明光による樹脂の硬化を防いだ．また，入射光強度の測定では，光強度の調整後３０分程度が経過した時の入射光強度を測定値としている．

### ４．１．２ 樹脂硬化特性評価方法

光硬化性樹脂の臨界露光量と透過深度を測定する方法について以下に述べる．3D System社が開発した樹脂硬化特性の性能テスト法にウィンドウペイン（WINDOWPANE™）がある［４－１］．ウィンドウペインは，ガウス分布のレーザビームで樹脂液面を走査して樹脂を硬化させる場合に，樹脂の硬化ラインの硬化深さを高い精度と再現性で測定する方法である．この方法では，レーザ出力，レーザ走査間隔を一定に保ち，走査速度を変化させてそれぞれ露光量のことなる四角形を描画し，得られた複数の四角形の硬化深さを測定する［４－２］．測定した硬化深さと単位面積当たりの露光量をそれぞれを片対数

グラフの縦軸と横軸にプロットすれば，プロットされた点は直線上に並ぶこととなる．この直線のことをワーキングカーブと呼び，そのワーキングカーブの$x$切片が臨界露光量$E_c$［mJ/cm$^2$］となり，その直線の傾きが透過深度$D_p$［$\mu$m］となる．

面露光を行った場合の樹脂硬化深さの測定にこのウィンドウペインを応用し，臨界露光量$E_c$［mJ/cm$^2$］と透過深度$D_p$［$\mu$m］を求める．本実験ではレーザービームを走査して四角形を描画する代わりに，矩形開口を用いた面露光により樹脂を硬化させ，硬化した四角形の厚さつまり硬化深さを測定する．また，ウィンドウペインでは，走査をしながらレーザ出力を変化させ露光量を制御することが困難であるため，走査速度つまり露光時間を変化させて露光量を制御する．これに対して本実験では，面露光を行うためレーザ出力による露光量制御が可能となる．そこで，露光時間ではなくレーザ出力を変化させて露光量を調節している．

本実験で測定の信頼性を向上させるには，矩形開口を照明するビームの強度分布を均一化する必要がある．均一な強度の光で樹脂を露光すれば，硬化した樹脂の高さ平均を求めて樹脂の硬化深さを精度良く測定できる．具体的な実験手順を以下に示す．

① 光源からでた光のビーム径を拡大し，その強度を均一化する．
② 均一化した光のプロファイルを測定する．
③ ビーム強度均一化光学系の調整を行って①，②の手順を繰り返し均一な強度の照明光を作り出す．
④ 液晶マスクに矩形開口を出力し，単位面積当たりの光強度を測定する．
⑤ 露光面に結像した矩形開口により樹脂を露光する．
⑥ 未硬化樹脂をエアブラシなどで丁寧に取り除く．

未硬化樹脂を取り除く際に，グリーン状態の樹脂を削り取らないようにエアブラシなどで未硬化樹脂を除去し，その後エタノールに硬化面を浸しさらにエアブラシで未硬化樹脂が溶融したエタノールごと除去し洗浄する．

⑦ 硬化した樹脂にポストキュア処理をほどこす．
⑧ マイクロメータを用いて，硬化樹脂層の厚さを測定する．
⑨ 露光面積と露光光強度，露光時間を測定する．

測定を行ったらレーザ出力を調節して露光量を変化させ，再び一連の手順を繰り返して硬化深さの測定を行う．また測定後は使用した樹脂を廃棄し，各測定毎に未露光の樹脂を用いて測定を行った．

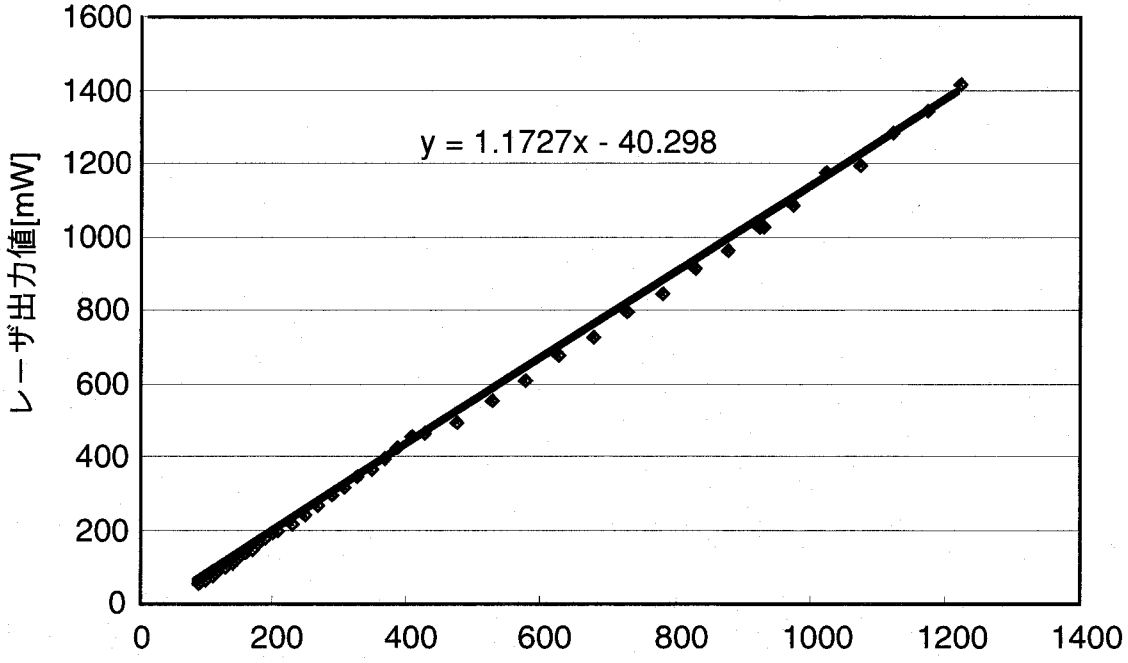
### 4．1．3　臨界露光量および透過深度の測定結果

臨界露光量$E_c$［mJ/cm$^2$］と透過深度$D_p$［$\mu$m］を求めるには，露光面の光強度を正確に測定し，樹脂に与えられる露光量を求める必要がある．そのためにレーザ出力値に関する校正を行う．まず，レーザを出射面と露光面にそれぞれパワーメータを配置し，出力光の強度を測定する．レーザの出力を示すデジタルメータの値とレーザ出射面の光強度，および露光面で測定した光強度の関係を図４．２に示す．図４．２からデジタルメータの値とレーザ出力の値は一致しないことが確認できる．しかし両者はほぼ線形関係にありデジタルメータの値をこの関係から補正すれば，レーザ出力値を求めることができる．

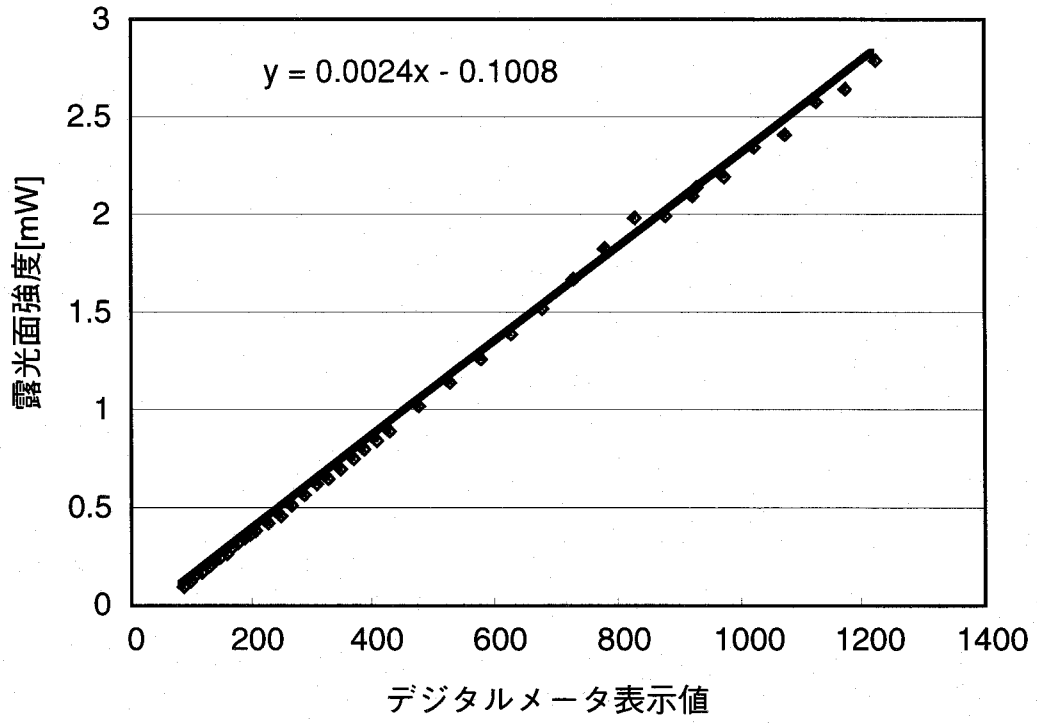
ただし，図４．２(a)，(b)からわかるようにデジタルメータの値が３００および１０００の点を境界としてデジタルメータの表示値とレーザ出力の値にそれまでと異なる傾向が見られる．これは，レーザの出力レンジを切り替えたために生じるレーザ出力の変化が原因であると考えられる．したがって，実際に実験を行う際には，パワーメータの各測定レンジごとにレーザ出射面での光強度と露光面での光強度を測定し，これらの測定値を基にそれぞれのレンジで出力値の校正を行い露光量を調節した．その測定結果を図４．３(a)～図４．３(d)に示した．

レーザ出力校正後に測定した樹脂の硬化深さと露光量の関係を図４．４に示す．図４．４に示した結果は，露光面での光強度を測定した後に樹脂を露光して硬化深さの測定を行ったものである．この場合，樹脂の配置作業等に長い時間を要することから，露光面光強度の測定後樹脂を露光するまでにレーザー強度が変動し，算出した露光量と樹脂の実際の露光量が異なるという問題が生じた．その結果，レーザ強度が不安定になる１．０［W］前後の出力時に測定値にばらつきが見られた．図４．４で，ワーキングカーブの傾きがほぼ一定であるのに対してｙ切片の値が実験によって大きく異なるのは，この１．０［W］前後の出力時のレーザ強度変動が原因と考えられる．

そこで，レーザ強度が安定してから樹脂を露光し，樹脂の露光直後に光強度を測定し，その測定値から樹脂の露光量を算出して，樹脂の硬化特性（ワーキングカーブ）を求めた．その結果を図４．５に示す．この場合，図４．４の測

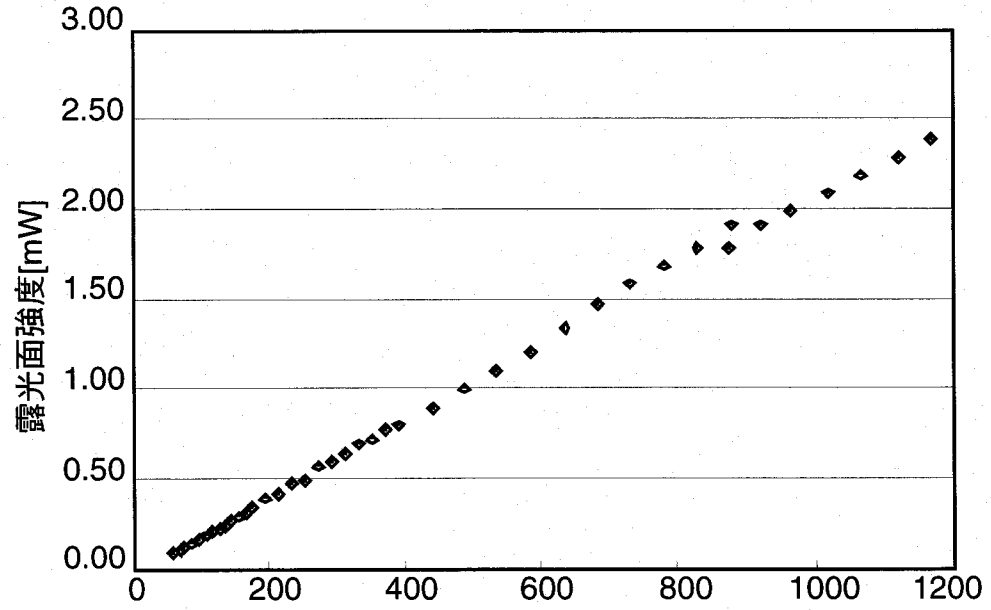



(a) レーザ出力とデジタルメータの関係

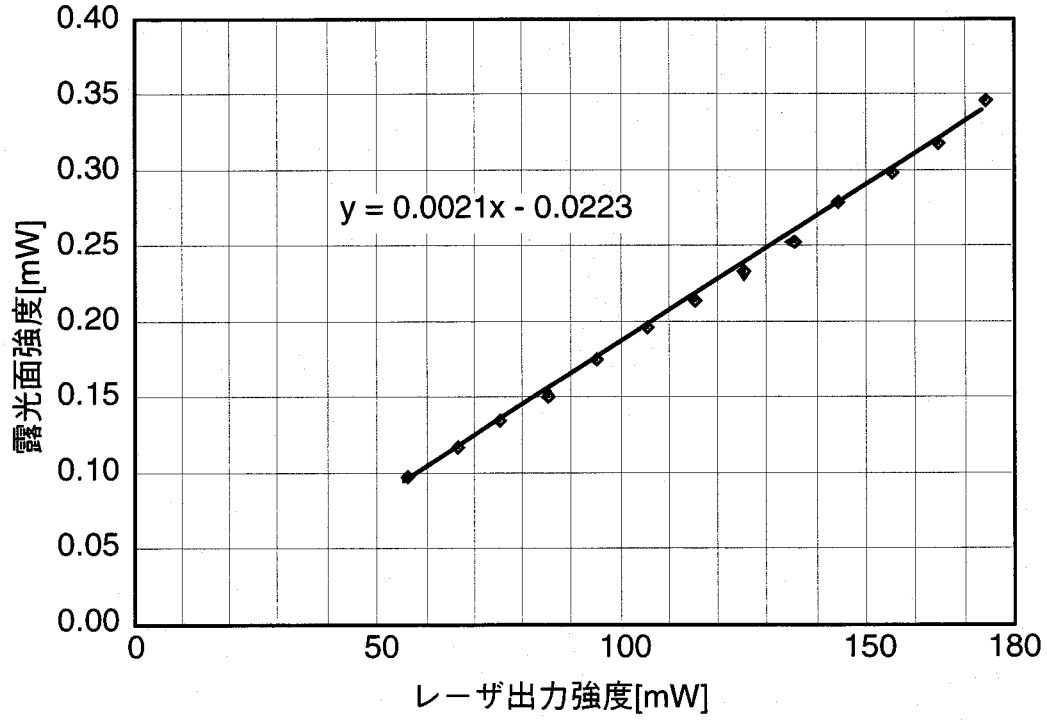



(b) 露光面強度とデジタルメータの関係

図4.2 レーザ出力補正直線

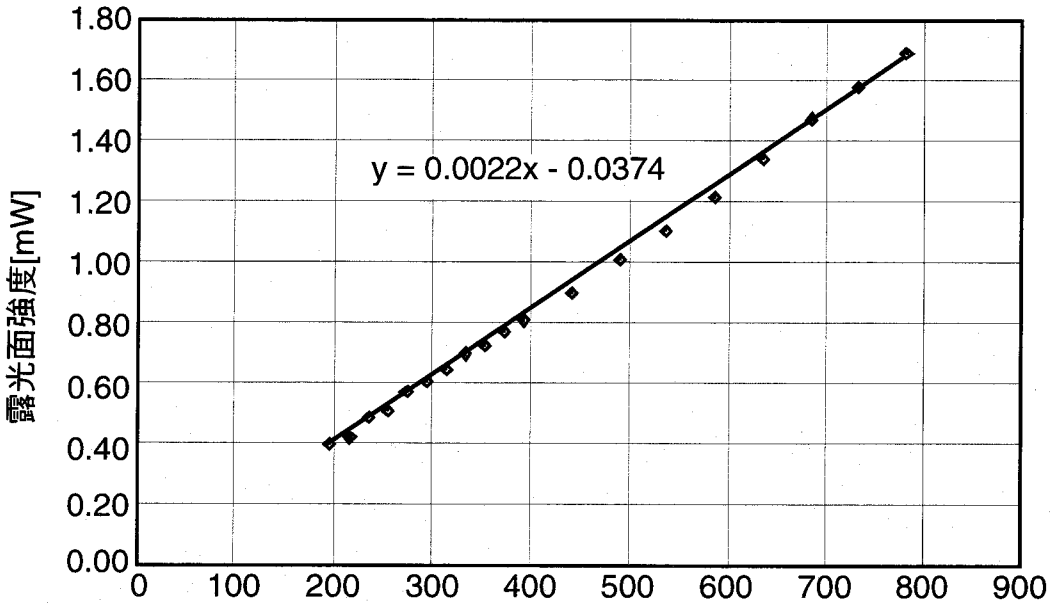



(a) 全てのレンジにおける出力強度と露光面強度の関係

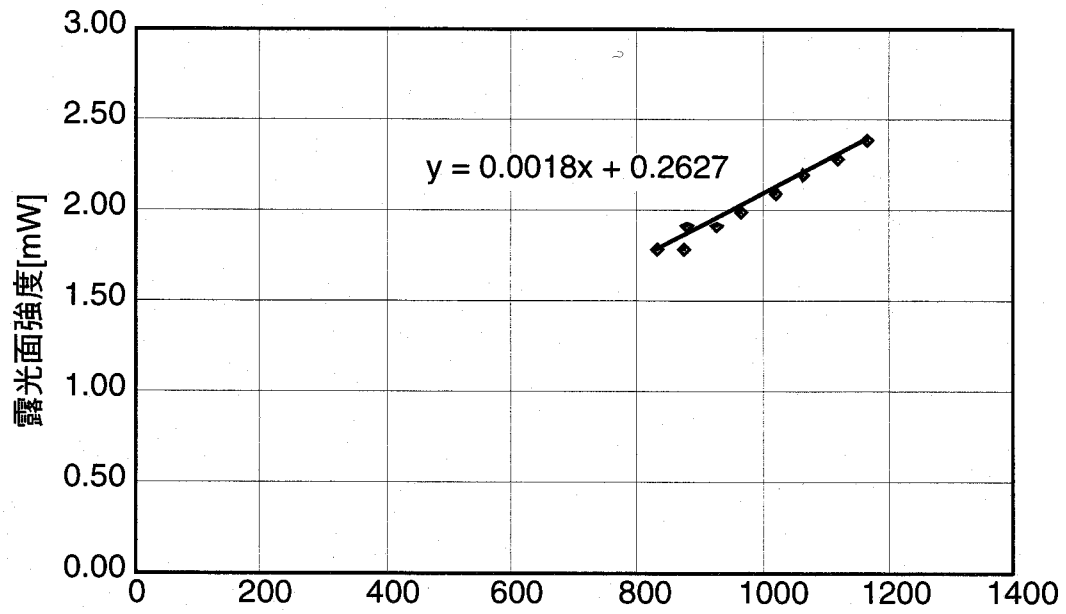



(b) 測定レンジMAX0.5[mW]の場合

図4.3 レーザ出力補正直線




(c) 測定レンジMAX2.0[mW]の場合




(d) 測定レンジMAX5.0[mW]の場合

図4.3 レーザ出力補正直線

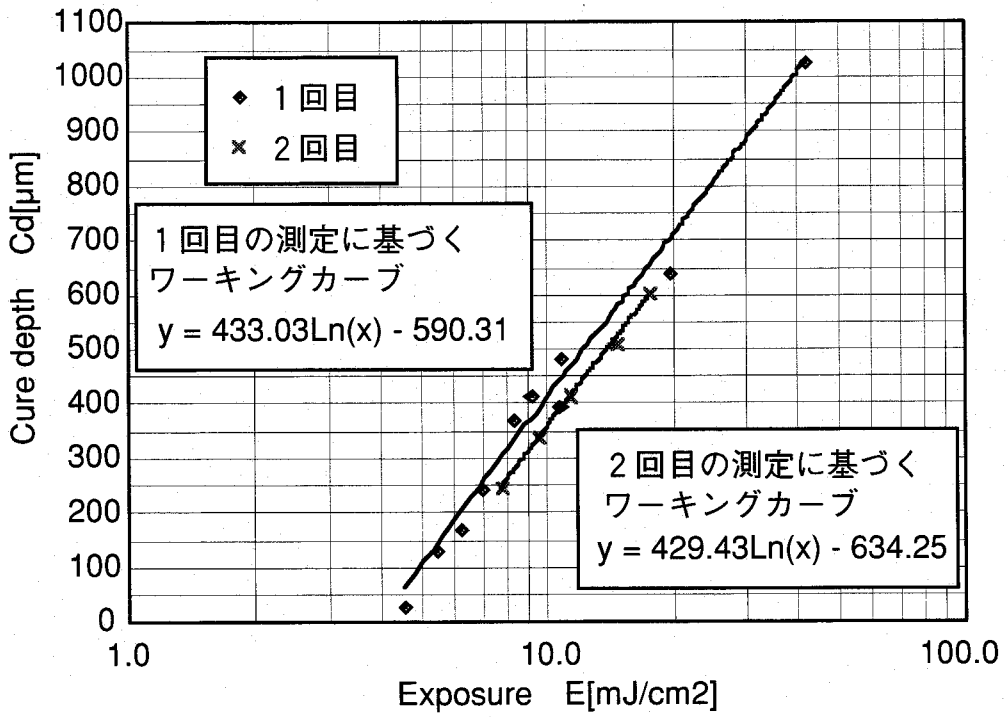



図4.4 露光量と硬化深さとの関係

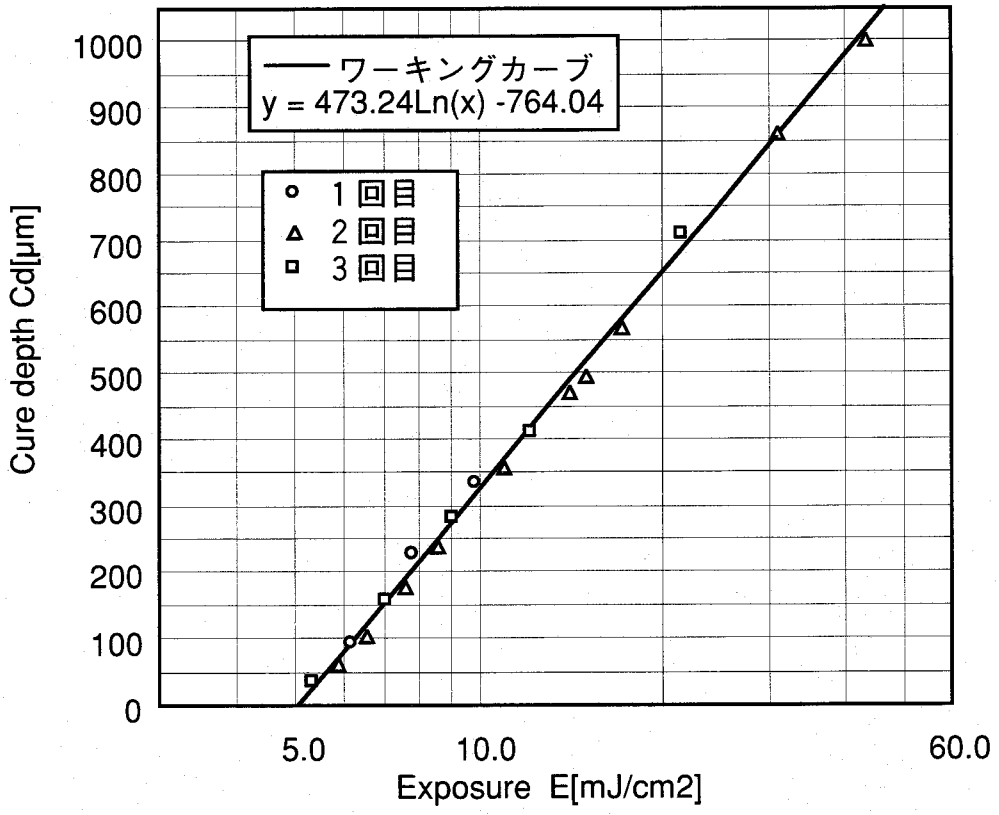



図4.5 露光量と硬化深さとの関係

定結果と比較すると測定値のばらつきを示す$R^2$値が小さくなり直線上に測定値が並んでいる．そこで，図４．５に示したワーキングカーブを基に透過深度$D_p$［$\mu$m］と臨界露光量$E_c$［mJ/cm$^2$］を求める．

式（３－１３）より透過深度$D_p$［$\mu$m］はワーキングカーブの傾きに相当し，$C_d=0$となるときの露光量が臨界露光量$E_c$［mJ/cm$^2$］に相当する．そこで，図４．５におけるワーキングカーブの傾きと$x$切片の値をそれぞれ求め，臨界露光量$E_c=5.0$［mJ/cm$^2$］と透過深度$D_p=473.2$［$\mu$m］という樹脂の硬化特性値を得た．以上の実験から，露光量と硬化深さをプロットした点が一直線上に並ぶことが確認され，実験に使用した光硬化性樹脂KC1042において，ランバートの法則が成立することがわかる．

### ４．１．４　樹脂硬化特性と硬化深さの関係

上記の実験で得られた樹脂の硬化特性値には大きな特徴がある．一般的に使用されている光硬化性樹脂の特性値と今回の実験で得られた樹脂の硬化特性値を比較すると，臨界露光量は現在使用されている樹脂の中でも最も小さく，透過深度は紫外光用樹脂のそれと比較すると２倍以上大きい［４－３］．

臨界露光量$E_c$の値は，光硬化性樹脂KC1042の波長４８８［nm］の光に対する感度が高いことを示し，透過深度$D_p$の値は，波長４８８［nm］の可視光がKC1042を透過する際の減衰が少なく，樹脂内部まで深く硬化することを示している．臨界露光量が小さく透過深度が高いことは，露光量の微妙な変化に対して樹脂の硬化深さ変化が大きくなることを意味している．つまり，露光量に誤差が生じると造形の際の精度に大きな影響をあたえることとなり，精度の良い造形を行うためには露光量の正確な制御が不可欠となる．

## ４．２　液晶マスク透過特性実験

液晶マスクの特徴は，表示する濃淡の階調を増減させればその透過率を変化させられることである．本節では波長４８８［nm］の$Ar^+$レーザに対する液晶マスクの光透過特性を評価するために，液晶マスクの表示階調を変化させてその各階調ごとの透過率を測定した結果について述べる．

### ４．２．１　実験装置および実験条件

本実験で用いたマスク透過率測定光学系を図４．６に示す．コリメータによって光源から出た光のビーム径を拡大し，強度を均一化して均一照明光を創り出している．液晶マスクは，液晶ディスプレイ(LCD)の前後に光の吸収軸が互いに直交するように２枚の偏光板（Polarizer1, Polarizer2)を配置して構成されている．光強度は，液晶マスクを透過した光をレンズ(Lens2)によって集光した後，パワーメータによって測定される．本実験で使用したパワーメータはSpectraphysics社のMODEL404 Specificationsであり，波長４８８［nm］の光に対する校正が行われている．

実験条件を以下に示す．液晶マスク面全体を照明する入射光の強度は，６００［mW］とした．使用した液晶ディスプレイは，エプソン製の８００×６００ピクセルのTFT液晶である．その画面サイズは１．３インチ，ピクセルサイズは３３×３３［$\mu$m］である．図４．７に使用した液晶ディスプレイの写真と１ピクセルの形状の拡大図を示す．基準強度の測定に使用した矩形開口，および液晶マスクに出力した矩形開口の面積は共に５．６［$cm^2$］である．

### ４．２．２　透過率測定実験

実験方法は，以下の通りである．まず，透過率を算出するための基準強度を測定する．最初に矩形開口を準備し，図４．６の液晶ディスプレイの代わりに配置する．次に偏光子２(Polarizer2)の光吸収軸方向を偏光子１(Polaraizer1)と同一方向に揃える．以上のような光学系を構成すれば，偏光子１(Polaraizer1)を透過した光は直線偏光となり，その偏光方向が変えられない限り偏光子２(Polarizer2)を透過可能である．これら２枚の偏光子の間に，矩形開口を配置しても偏光方向は変化しないことから，開口を通過した光の全強度をパワーメータによって測定することができる．この時の光強度を基準強度として，液晶マスクの透過率を算出する．

次に，各表示階調ごとのマスク透過率を測定する．液晶に表示可能な階調は２５６段階あり，今回の実験では０から２５５まで５階調刻みで透過率の測定を行った．各表示階調ごとのマスク透過率測定は図４．６の光学系で行う．基準強度を測定したときと同一強度の照明で液晶マスクを照らし，液晶マスクを

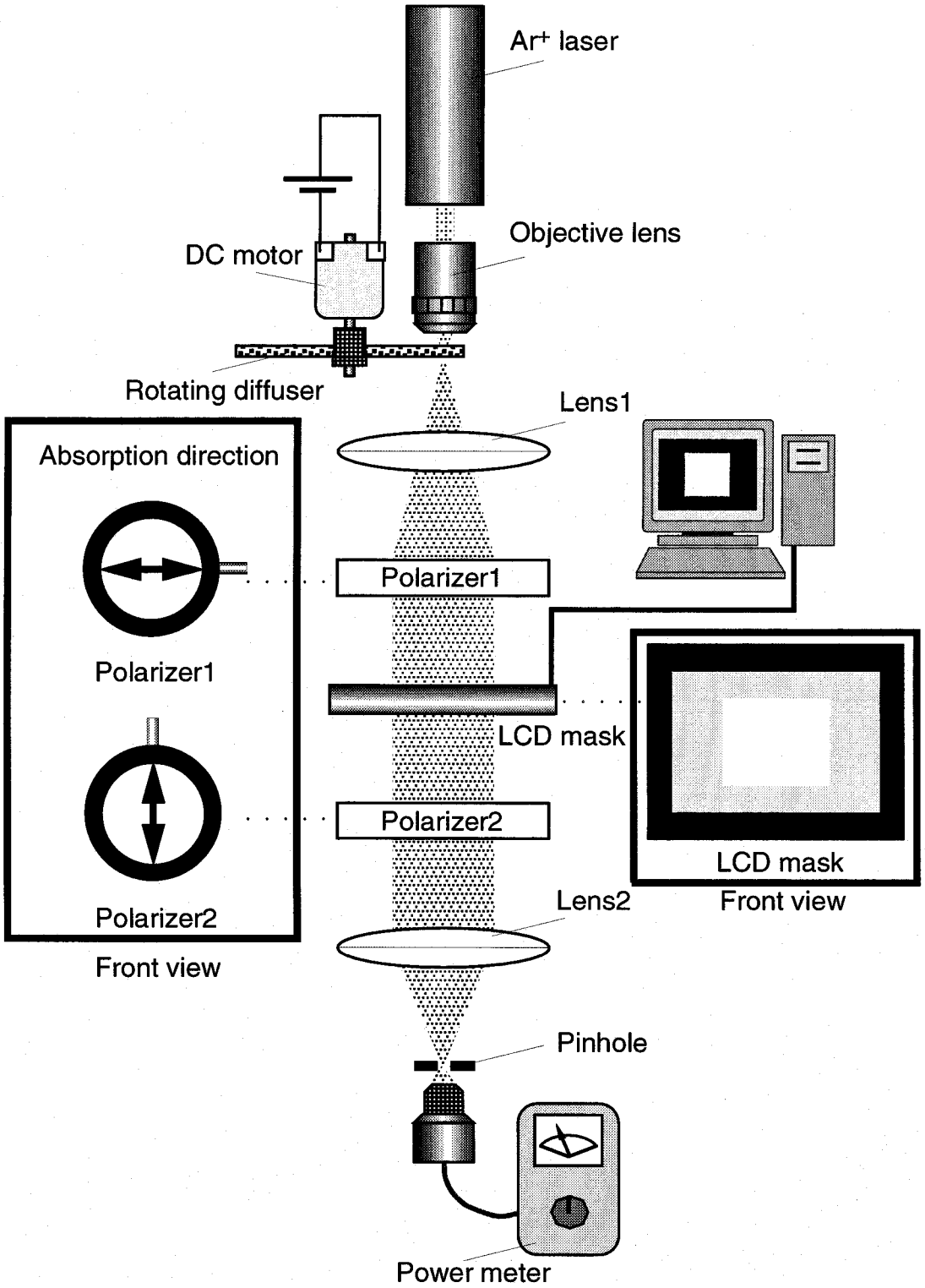
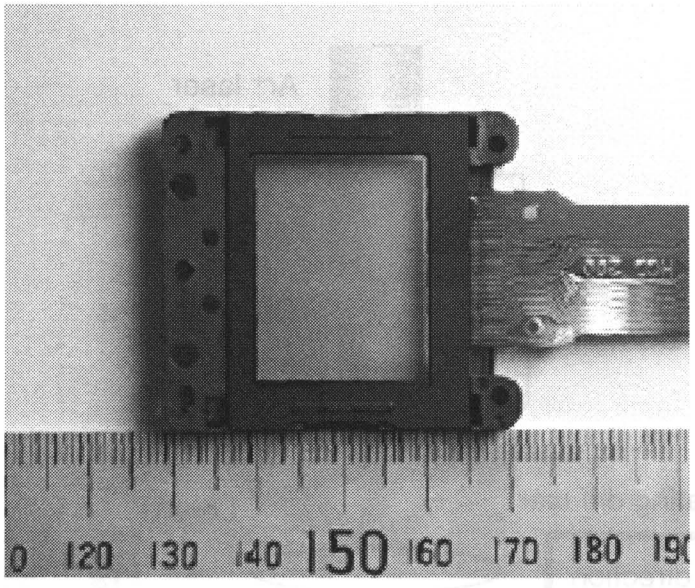
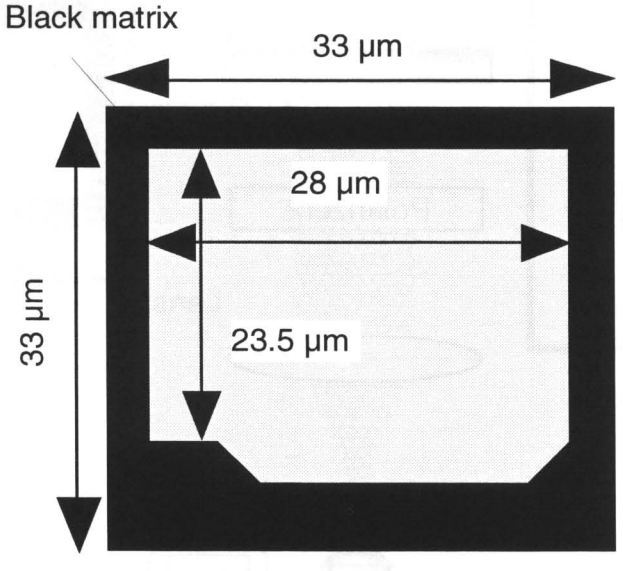



図4.6 透過率測定実験光学系




(a) TFT-LCD(1.3 inch)




(b) Pixel size

図4.7 使用液晶パネルと 1 画素の拡大図

透過した光の強度を測定する．液晶マスク上には，基準強度の測定に用いた開口と同じ大きさの矩形開口が出力される．液晶マスクを透過した光の測定に当たっては以下のことに注意する．液晶マスクをレーザ光で照明すると回折現象が生じる．１次以降の回折光はマスクパターンを結像させる際に像の精度に悪影響を与える原因となるため，微細構造を造形する際には０次光のみが利用される．したがって，今回はマスクの透過率を測定するに当たってパワーメータの前にピンホールを配置し，０次回折光の強度を測定し液晶マスクの透過率を算出する．

この時，先に測定した基準強度を$I_{st}$［mW/cm$^2$］とし，液晶マスクの表示階調が$x$（$0 \leqq x \leqq 255$）である時の光強度の測定値を$I(x)$［mW/cm$^2$］とおいて，液晶マスクの透過率$T(x)$［%］を式（４－１）で定義する．

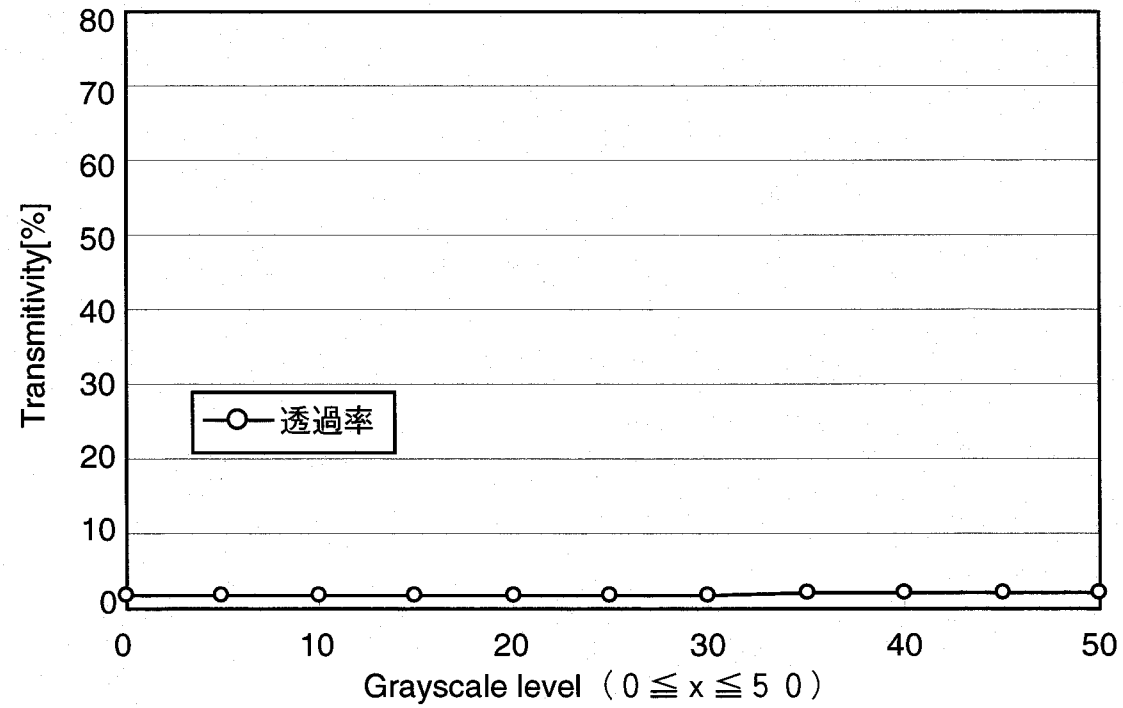
$$T(x)=100\cdot I(x)/I_{st} \qquad (4-1)$$

### ４．２．３　液晶マスク透過率測定結果

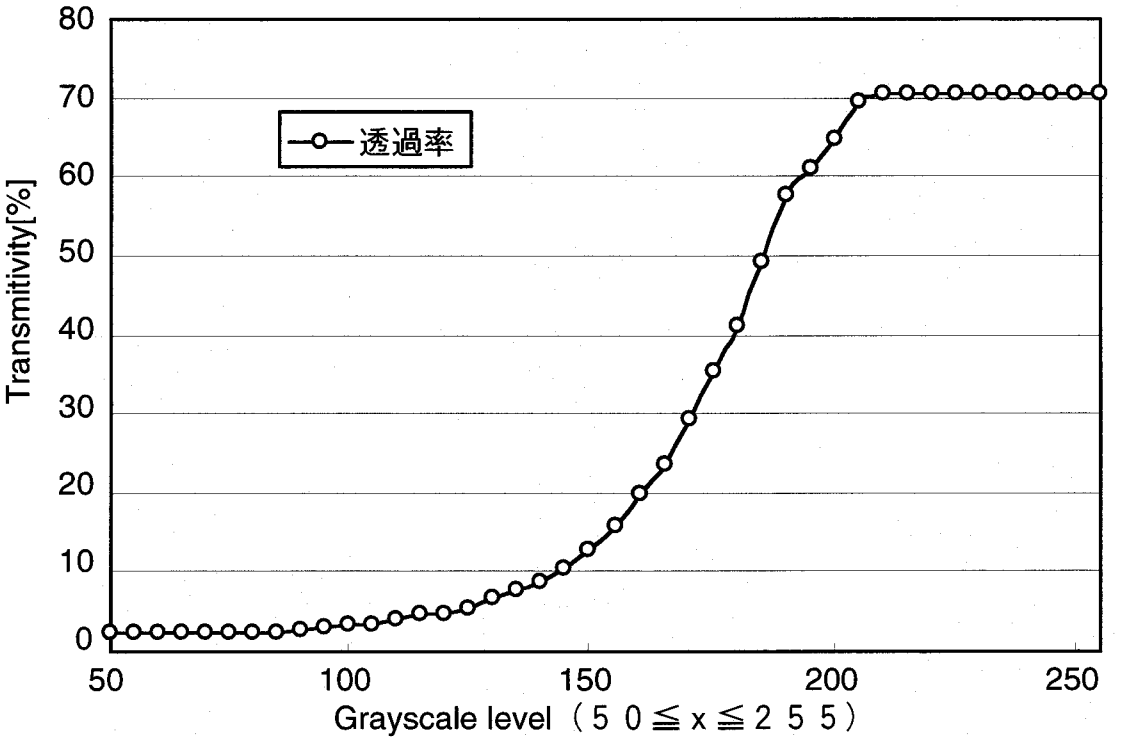
矩形開口を透過した光を測定した結果，基準強度の測定値は８．５［mW］であった．これを単位面積当たりの強度に直すと１．５［mW/cm$^2$］となる．この基準強度の測定結果と表示階調を変えながら測定した液晶マスク透過光の強度から，式（４－１）で定義される液晶マスクの光透過率を算出する．図４．８に，今回測定した液晶マスクの表示階調ごとの透過率を示す．図４．８(a)，(b)にそれぞれ表示階調が０～５０の時，および表示階調が５０～２５５の時の液晶マスクの透過率を示す．液晶マスクの光透過率は，白色表示にあたる表示階調が２５５の時に最大となり，黒色表示に相当する表示階調が０の時に約２％となる．液晶マスクの透過率は，表示階調が０～１００の範囲ではほとんど変化せず，表示階調が１００を越えてから表示階調の増加に伴って顕著に上昇し始める．表示階調が２２０を越えてから再び透過率は一定値をとるようになり，透過率の最大値は７０．６％となった．

### ４．２．４　液晶マスク透過特性と使用可能表示階調

波長４８８［nm］の光に対して，表示階調が１００以下および２２０以上の範囲では液晶マスクの透過率はほとんど変化しない．したがって，濃淡表示階




(a) 0から50階調までの光透過率




(b) 50から255階調までの光透過率

図4.8 液晶マスクの表示階調と光透過率の関係

調を利用して液晶マスクの透過率を制御するには，表示階調が１００～２２０の範囲の１２０階調を利用するのが適当である．この範囲では，濃淡階調の増加に伴いマスク透過率は大きく増加している．したがって，３次元座標データの高さ情報を濃淡の階調に対応させて濃淡画像を作成すれば，液晶マスクを用いた面露光による樹脂露光量制御が行える．

また，表示階調が０の点でも２％程度の透過率があるが，これは透過光強度測定の際散乱光などのノイズ光の強度を検出していることが原因と考えられる．液晶表示階調が高くなれば透過光強度が強くなることから，散乱光ノイズが大きくなることが予想される．したがって，濃淡マスクによる露光を行う場合には散乱光等のノイズを取り除く対策が必要となる．しかし，散乱光によって与えられる露光量は樹脂の臨界露光量に比べて微弱であり，通常の造形ではその影響を無視できる範囲である．そして散乱光の影響を無視すれば，液晶マスクのコントラストは十分高く，波長４８８nmの光に対する可変露光マスクとして十分使用可能であると言える．また，マスク透過率の最大値が７０％程度となっているのは，液晶ディスプレイの各ピクセルごとに設けられた配線部分がBM (Black Matrix) と呼ばれる遮光層で覆われているためであると考えられる．図４．７から液晶１ピクセル当たりの透過面積は全体の約６５％であり，数パーセント程度の散乱光ノイズの影響を考慮に入れると，７０％という透過率の値は妥当であると考えられる．

以上の実験から，１２０階調を利用した濃淡データの生成が可能であることを確認し，液晶マスクがコントラストの高い濃淡露光マスクとして利用可能であることを実験的に検証した．

## ４．３　樹脂硬化深さ制御実験

濃淡画像を用いた非積層造形法では，液晶マスクによって照明光の強度を変化させて露光量制御を行っている．そこで，濃淡階調表示を利用した樹脂の硬化深さ制御の可能性を実験的に検証するために液晶マスクの表示階調と樹脂の硬化深さの関係を調べた．

### ４．３．１　実験装置および実験条件

本実験では，図４．１の実験装置を利用して樹脂の硬化深さ制御を行ってい

る．ただし，本実験では出力されるマスクパターンの矩形開口の表示階調を１００～２２０の範囲で調節する．また，樹脂の硬化反応が樹脂液中で行われるように十分な量の樹脂をベースプレート上に供給する点は４．１節の硬化特性実験と同様である．実験条件を以下に示す．レーザ出力強度は３００［mW］であり，露光時間は２０［s］である．

### ４．３．２　樹脂硬化深さ制御方法

本実験では，液晶マスクを用いて樹脂露光面での光強度を制御する．そのため液晶マスクを照明する光の強度を一定に保ち，液晶マスクに出力されている矩形開口の表示階調を徐々に変化させていく．実験方法を以下に示す．まず液晶マスク上に矩形開口を出力し，露光面での光強度を測定する．この測定結果を基に，単位面積当たりの光強度と露光時間から単位面積当たりの露光量$E$［mJ/cm$^2$］を求める．露光量を求めた後，露光面に樹脂を配置し樹脂を硬化させる．樹脂の硬化および樹脂の硬化深さ測定の手順については４．１．２節で述べたものと同様である．本実験では，レーザ出力を変化させる代わりに矩形開口の表示階調を変化させる．そこで，矩形開口の表示階調が１００～２２０まで5階調刻みで変化するマスクパターンを液晶マスクに順に出力し，露光量の測定と硬化深さの測定を１００～２２０階調の範囲で繰り返す．硬化深さの測定は3回行い，その平均値を樹脂硬化深さの測定値とした．露光量と樹脂の硬化深さの測定では，露光面での光強度プロファイルを測定して強度の最大値を求め光強度の測定値とし，樹脂の硬化深さの測定では深さの最大値を硬化深さの測定値とした．

### ４．３．３　硬化深さ制御結果

図４．９に，樹脂の硬化深さと液晶マスクの表示階調，および$E/E_c$と液晶マスク表示階調の関係を示す．$E/E_c$は樹脂の露光量$E$［mJ/cm$^2$］を臨界露光量$E_c$［mJ/cm$^2$］で規格化したパラメータであり，式（３－１３）から硬化深さを導出する際に必要となる．図４．９から，液晶表示階調の増加に伴って$E/E_c$が指数関数的に増加することがわかる．これに対して，樹脂の硬化深さは液晶表示階調の増加に対してほぼ線形に増加しており，両者の関係は式（３－１３）とほぼ一致する．また，表示階調が１００増加する間に，樹脂の硬化深さは約２［mm］増加しているので，１階調当たり約２０［$\mu$m］の制御が可能であ

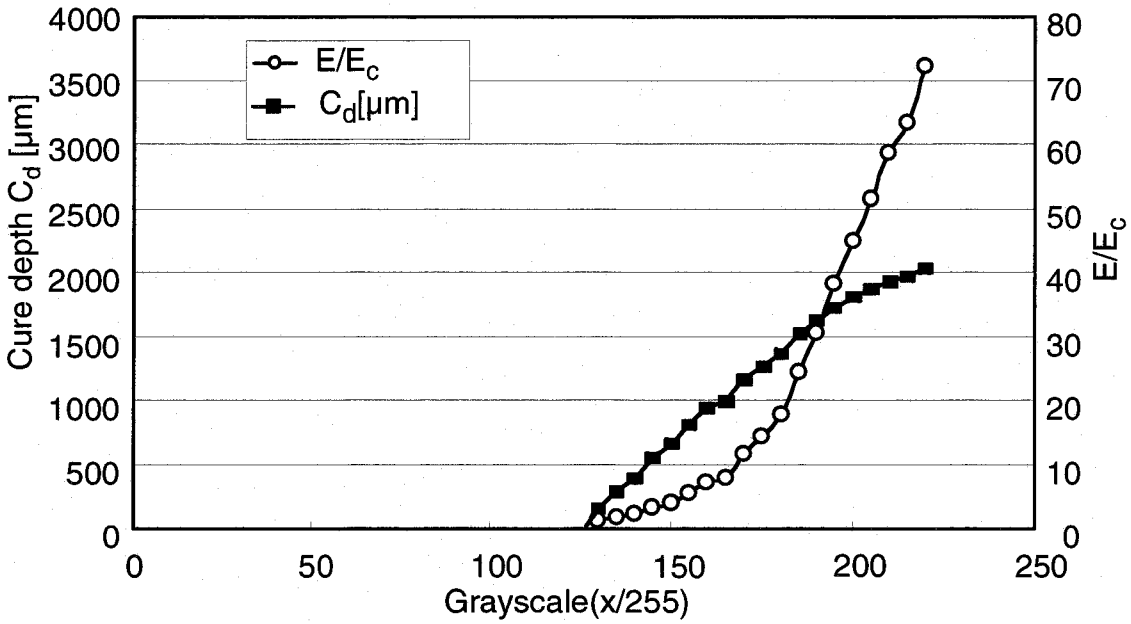



図4.9 硬化深さおよび$E/E_c$と表示階調の関係

ると考えられる．

### ４．３．４　深さ方向分解能

濃淡画像による非積層造形では深さ方向の分解能は，露光量の変化幅によって定まる．つまり，図４．８の透過率曲線の傾きが小さければ，１階調当たりの露光量変化が小さくなり深さ方向の分解能が向上する．深さ方向の分解能を向上させるには，透過率曲線の傾きの小さな範囲を利用する，利用可能な表示階調数を増加させるなどの方法が考えられる．例えば，２枚の液晶ディスプレイを組み合わせて液晶マスクを構成するなどの方法をとれば，現在の光学系を利用して表示階調数を増加させ深さ方向の分解能を向上させることが可能になると考えられる．

## ４．４　横分解能実験

本手法で造形形状の横分解能は，液晶マスクの横分解能の他，露光に用いる縮小光学系の縮小倍率や光硬化性樹脂の最小硬化単位によって決まると考えられる．

液晶マスクの横分解能は，液晶ディスプレイのピクセルサイズによって決定される．縮小光学系の縮小倍率を小さくすれば，液晶マスクの一画素によって硬化する樹脂の領域が小さくなり，造形の横分解能は樹脂の最小硬化単位によって定まると考えられる．そこで，テストパターンを造形して造形の横分解能を評価し，さらに横分解能を決定する要因について検討する．

### ４．４．１　実験装置および実験条件

横分解能評価実験では図４．１と同一の装置を使用した．樹脂露光面には，２枚のガラスプレートで挟んだ薄い層状の光硬化性樹脂を配置し実験を行っている．また，図４．１０に示す微弱照明光で樹脂の硬化状態を観察可能な顕微鏡を構成し，未露光の樹脂液中の造形テストパターンを観察する．高感度なCCDエリアセンサを受光部に利用するため，未硬化樹脂の反応を進行させない微弱な照明で樹脂硬化状態を観察することができる．観察光学系の照明光強度は使用した樹脂の臨界露光量の１／１０００以下であることから，１０００［s］以上の観察が可能ということになる．実験条件を以下に示す．レーザ出力強度は３００［mW］であり，露光時間は０．５～２［s］，縮小光

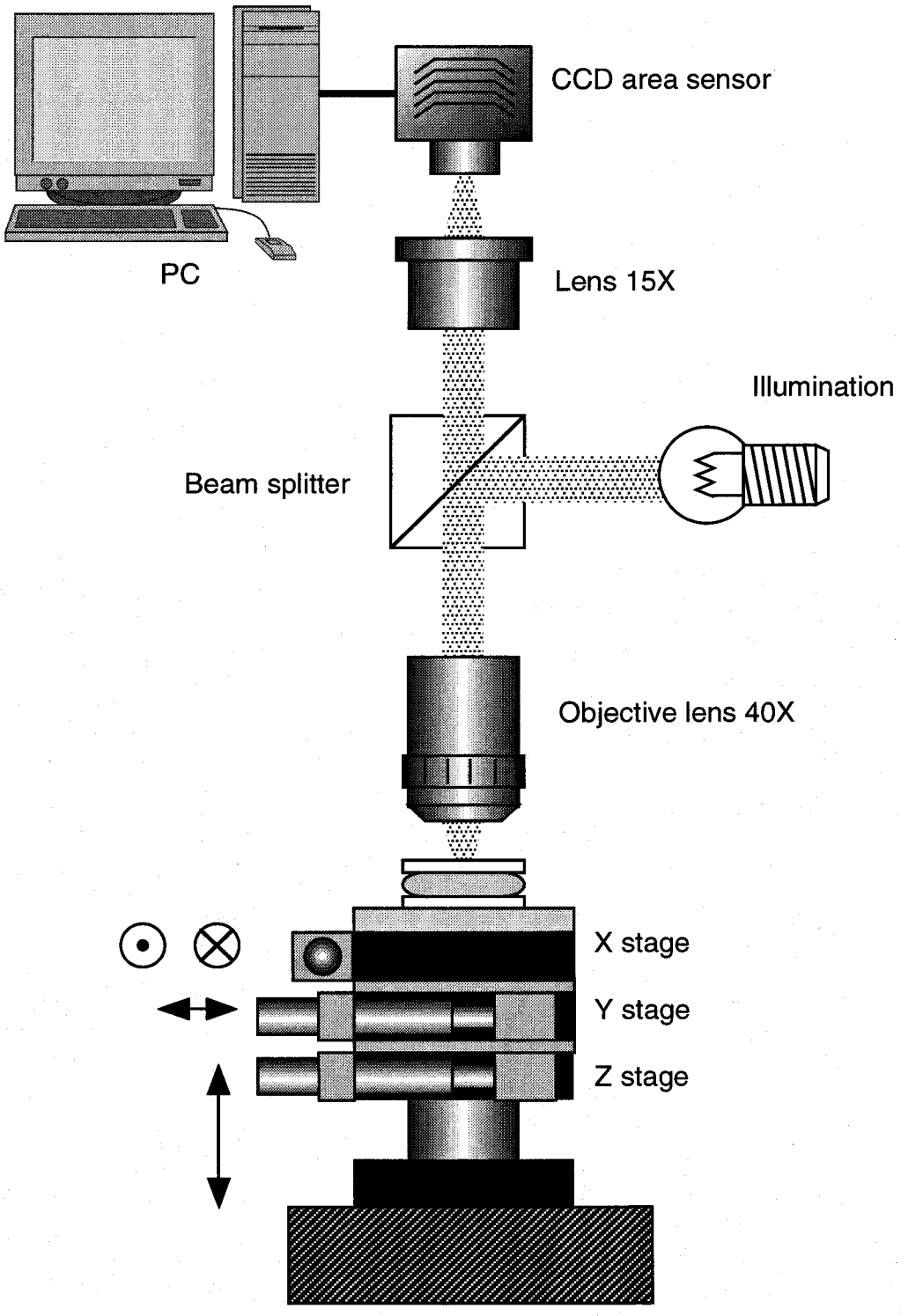

CCD area sensor
PC
Lens 15X
Illumination
Beam splitter
Objective lens 40X
X stage
Y stage
Z stage

図4.10 観察光学系

学系の縮小倍率は１００％～２７％である．

### ４．４．２　横分解能評価方法

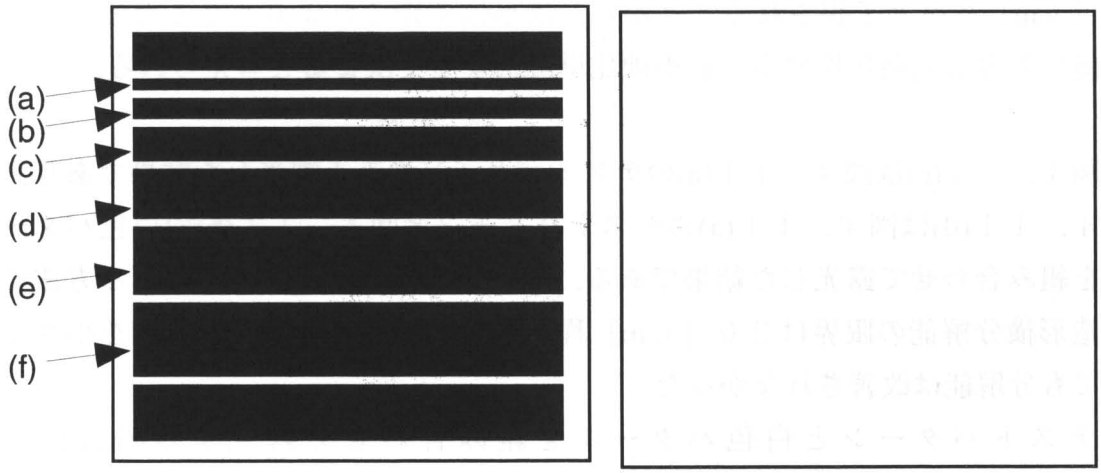
造形の横分解能を評価するために，図４．１１(a)に示すテストパターンを液晶マスクに出力しテストパターンの造形を行った．出力したマスクパターンは，線幅１ピクセルの白線が７本描かれたものである．７本の白線の間隔はそれぞれ１～６ピクセルであり，上から順にその間隔が１ピクセルずつ増加している．テストパターンの１ピクセルは，液晶マスク上では３３［$\mu$m］に相当する．　テストパターンの造形手順を以下に述べる．まず，テストパターンを液晶マスク上に出力し，樹脂露光面に縮小光学系を用いて結像させて樹脂を露光する．テストパターンが露光されると，２枚のガラスプレートに挟まれた薄い層状の光硬化性樹脂が硬化してテストパターンが造形される．縮小光学系の縮小倍率は，結像用のレンズ位置や結像レンズの焦点距離を変えて１００％～２７％の範囲で変化させられる．

さらに，造形したテストパターンを図４．１０の観察用光学系を用いて観察し，造形の横分解能を評価する．分解能評価の判断基準は，硬化した２本の白線の間隔が判別できるか否かとする．

テストパターンの露光方法は２種類あり，ひとつは図４．１１(a)のテストパターンのみを露光する方法であり，もうひとつは，図４．１１(b)の白色パターンによって露光面全体に光エネルギを供給してから図４．１１(a)のテストパターンを露光する方法である．

### ４．４．３　横分解能評価結果

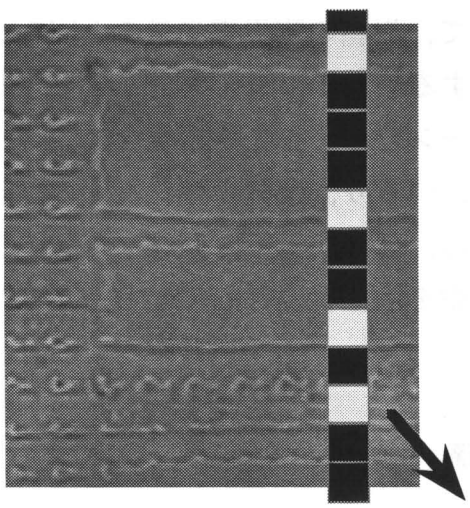
図４．１１(c)と図４．１１(d)に，縮小光学系の縮小倍率を変えて造形した２種類のテストパターンを示す．図４．１１(c)に示した縮小倍率１００％の縮小光学系を用いて造形したテストパターンでは，造形の横分解能は１ピクセルまで確認できることから造形の横分解能は３３［$\mu$m］である．１００％の縮小光学系では，線間隔をこれ以上狭められないため横分解能の限界は３３［$\mu$m］ということになる．また，図４．１１(d)に示した縮小倍率４０％の縮小光学系によって造形したテストパターンでも１ピクセルの間隔で２本の白線が造形できることが確認できる．したがって，４０％の縮小光学系を用いた場合，造形の横分解能は１３［$\mu$m］となる．現在までに，２７％の縮小光学系を用いて９［$\mu$m］の横分解能を実現できることが実験によって確認できている．




Line width (White) 1pixel
Clearance (Black) 1~6pixel

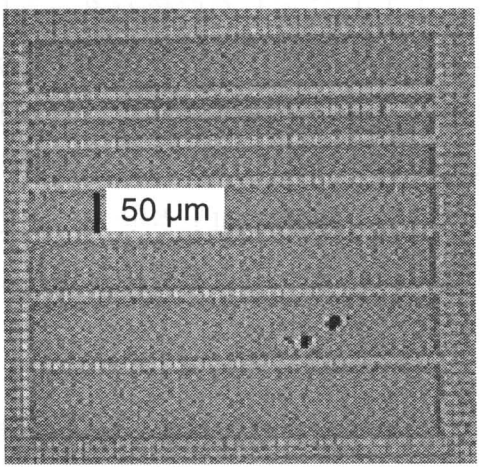
(a) Test pattern

(b) White pattern



Resolution
30 X 30 μm

(c) 100%




Resolution
13 X 13 μm

(d) 40%

図 4.11 横分解能評価テストパターン

使用した光硬化性樹脂は，その最小硬化単位が数［$\mu$m］程度であることから，もし，縮小光学系の縮小倍率をさらに減少させれば，より分解能が向上することが見込まれる．１０％の縮小光学系を使用した場合の造形の横分解能は３［$\mu$m］程度と予想されることから，縮小倍率がこれより小さくなると横分解能の限界は光硬化性樹脂の最小硬化単位によって決まると考えられる．

図４．１１(c)は図４．１１(a)のテストパターンのみを露光した結果であり，図４．１１(d)は図４．１１(a)のテストパターンと図４．１１(b)の白色パターンを組み合わせて露光した結果である．テストパターンのみを露光する方法では造形横分解能の限界は３０［$\mu$m］程度であり，光学系の縮小倍率を小さくしても分解能は改善されなかった．

テストパターンと白色パターンを組み合わせて露光する場合は，３０［$\mu$m］以下の横分解能が実現できる．テストパターンと白色パターンの露光を組み合わせることによって造形の横分解能が向上するのは，ラジカル化した高分子や光開始剤の横方向への拡散を軽減できること原因であると思われる．テストパターンの露光時間が増加すれば，ラジカル基が拡散して硬化反応が予期しない方向に進行することとなり造形の横分解能を低下させる．そこで図４．１１(b)に示した白色パターンによって，樹脂の臨界露光量を上回らない光エネルギを供給して樹脂を活性化状態とする．ここに図４．１１(a)に示したテストパターンを露光すれば，テストパターンだけを露光する場合に比べて短い露光時間でテストパターンを造形できる．つまり，余分な硬化反応の拡散を防いで，横分解能を向上させることができる．したがって，微細な形状の造形を行うには，あらかじめ樹脂を露光して樹脂を活性状態としてから造形を行えばよいことがわかった．

### ４．４．４　横分解能特性と縮小倍率の関係

露光量が超過し過露光の状態で造形されたテストパターンでは，縮小倍率が同一であっても分解能が低下する結果が確認されたことから，精度の高い造形を行うためには適切な露光量を設定して造形を行う必要がある．適切な露光量で造形を行えば，造形の横分解能は液晶のピクセルサイズと縮小光学系の縮小倍率によって決定される．縮小倍率が１０％以下になるような縮小光学系を用いて造形を行えば，造形の横分解能は樹脂の最小硬化単位によって決まることが予想される．また，液晶ディスプレイの製造技術が進歩により液晶マスクのピクセルサイズが微細化すれば，同一縮小倍率であっても現在よりさらに分解

能の高い造形が実現可能となる．この場合も，造形の分解能を決定する要因は樹脂の最小硬化単位となると考えられることから，今後，光硬化性樹脂が改良されることによってサブミクロンオーダーの横分解能の実現も可能になると考えられる．

## 4．5　結言

本章では基礎特性実験を行って，造形実験を行うために必要な樹脂の硬化特性や液晶マスクの透過特性を調べ，造形の横分解能を評価した．これらの実験から以下のことを明らかにした．

（1）波長４８８［nm］の光に対する光硬化性樹脂(KC1042)の硬化特性を表す物性値として臨界露光量 $E_c$ = ５．０［mJ/cm$^2$］，透過深度 $D_p$=４７３．２［$\mu$m］を求め，また，これらの値を用いてランバートの法則に基づく露光量による硬化深さ制御が行えることを確認した．
（2）液晶マスクが波長４８８［nm］の光に対して約１００階調が利用可能な高コントラストの可変濃淡マスクとして機能することを確認した．
（3）液晶マスクの各表示階調に対する透過率を示す透過率特性曲線を求め，液晶マスクの表示階調の増減に対応してその透過率を０～７０［%］の範囲で変化させられることを示した．
（4）液晶マスクの濃淡階調表示を利用して透過率特性曲線を元に所望の露光量分布を樹脂に与え，樹脂の硬化深さを制御できることを確認した．
（5）テストパターンを造形して造形の横分解能を評価し，構築した縮小光学系の縮小倍率１００～３０［%］の範囲では，造形の横分解能が液晶マスクのピクセルサイズと縮小光学系の縮小倍率によって決まり，樹脂の最小硬化単位の影響を受けないことを確認した．

以上のことから，液晶マスクによる面露光光造形の妥当性，および濃淡画像による非積層造形の妥当性を検証した．また，本手法により横分解能１０［$\mu$m］以下の造形が行える可能性を示唆した．縮小光学系および光硬化性樹脂の改良が進めば，サブミクロンオーダーの分解能で造形が行える可能性があり，今後これらの点についてさらなる検討を加える必要がある．

## 参考文献


［４－１］ P.F.Jacobs著, T.H.Pang, 島田洋 訳, 高速三次元成形の基礎, 原著 Rapid Prototyping & Manufacturitng, 日経BP出版社, (1993), 258.

［４－２］ 神村明哉, 村上存, 中島尚正, 光造形法における硬化物余剰成長の理論的解析および実験による評価, 精密工学会誌, Vol.66, 7, (2000), 1056.

［４－３］ 平成１１年度　RP最新技術動向と現状技術レベル調査研究報告書, 財団法人　素形材センター, 研究調査報告No.550, (2000), 46-55.

# 第５章

# 濃淡画像による非積層造形実験

第５章では，濃淡画像を用いた非積層造形実験とその結果について述べる．濃淡画像による非積層造形を行えば，光造形の造形精度，造形速度の改善が期待される．そこで本実験では，試作した濃淡画像による非積層光造形装置により基礎的な形状の造形を行う．本実験の目的は，濃淡画像を用いた非積層造形の造形精度，造形可能な形状および造形に要する時間などを評価し，本手法による非積層３次元造形の実現性を実験的に検証することである．

## ５．１　濃淡画像実験装置

本研究では，レーザを光源の高いエネルギ密度を活かして高速な造形を行う．また，単色光源は色収差などを生じず樹脂の硬化を均一に行えることから高精度な造形が可能である．一方，均一な強度で液晶マスクを照明するには干渉による影響，スペックルノイズなどの影響を取り除く必要がある．また，液晶マスク透過後に液晶ディスプレイで生じる回折光や干渉なども露光面での不均一な光強度分布の原因となる．本実験装置では，均一照明光学系や結像光学系の工夫によりこれらの問題を解決している．

また，レーザを光源として液晶マスクによる面露光を行う場合，液晶マスクの損傷が問題となる．液晶マスクによる露光を行う場合，紫外光源を用いて液晶マスクによる面露光造形を行えば液晶マスクが損傷することから，光造形に一般的に使用される紫外光源は利用できない．本研究では，液晶マスクが損傷する問題を解決するために波長４８８［nm］の$Ar^+$レーザを使用する．第４章の基礎特性実験で，波長４８８［nm］の$Ar^+$レーザを用いて液晶マスクを長時間照明しても液晶マスクが損傷しなかったことから，$Ar^+$レーザを液晶マスクの照明光として使用できる．さらに，波長４８８［nm］の光に対して高い感度を有する樹脂を使用することによって，$Ar^+$レーザを用いた液晶マスクによる面露光造形が実現可能となる．

## ５．１．１　実験装置

実験装置の概要について以下に述べる．濃淡画像による非積層造形装置を図５．１に示す．$TEM_{00}$Modeで発振する波長４８８［nm］の$Ar^+$レーザを光源とするガウス分布の光は，均一照明光学系（Beam homogenizer)を経て均一強度の照明光となる．均一な照明によって液晶マスク (LCD mask)を照明し，液晶マスク上に出力されたマスクパターンは造形部(Fabrication)の樹脂露光面で結像する．露光時間，および出力画像は制御部のPCから直接制御可能である．

均一照明光学系は，対物レンズ，ピンホール，およびレンズから成るコリメータによって構成されている．回転拡散板を利用しても光強度を均一化することができるが，拡散板を使用すれば偏光面に乱れが生じ液晶マスクに表示される濃淡の階調に対するコントラストが低下する．本実験では表示階調に対するコントラストを確保する必要があるため，コリメータによって構成される均一照明光学系を構築した．この均一照明光学系では２枚のレンズを組み合わせてビーム径を拡大し，ガウス分布の中心付近で液晶マスクを均一に照明する．ピンホールを使用してレーザのスペックルノイズなどを除去し，できるだけ広範囲を均一な強度の光で照明している．図５．１(b)にガウス分布の入射光のビームプロファイルを示す．

液晶マスクの前後には，それぞれ液晶ディスプレイの配向方向，およびそれに直行する方向に吸収軸をもった偏光子が配置されている．高いコントラストを持つ液晶マスクを構成するには，液晶マスクに電圧が印加されていない状態で透過光強度が最大となるように偏光子を配置する必要がある．したがって，液晶マスクの前後に配置される偏光子の吸収軸方向は液晶ディスプレイの配向方向によって定まり，上記の配置によって最も高いコントラストが実現できる．光の利用効率をより高めるには，入射光の偏光面を第一の偏光子の吸収軸に直交させればよい．入射光の偏光面を最適化することで，第一の偏光子による入射光の吸収を最小限に抑えることができる．そこで，本実験装置では１／２λ板を使って入射光の偏光面を最適な方向に回転させている．また，使用した液晶ディスプレイは第４章の実験で使用したEpson社製のピクセルサイズ３３×３３［$\mu$m］，画面サイズ８００×６００ピクセルのTFT型液晶である．

液晶マスクに出力されたマスクパターンは，造形装置(Fabrication)の露光面に

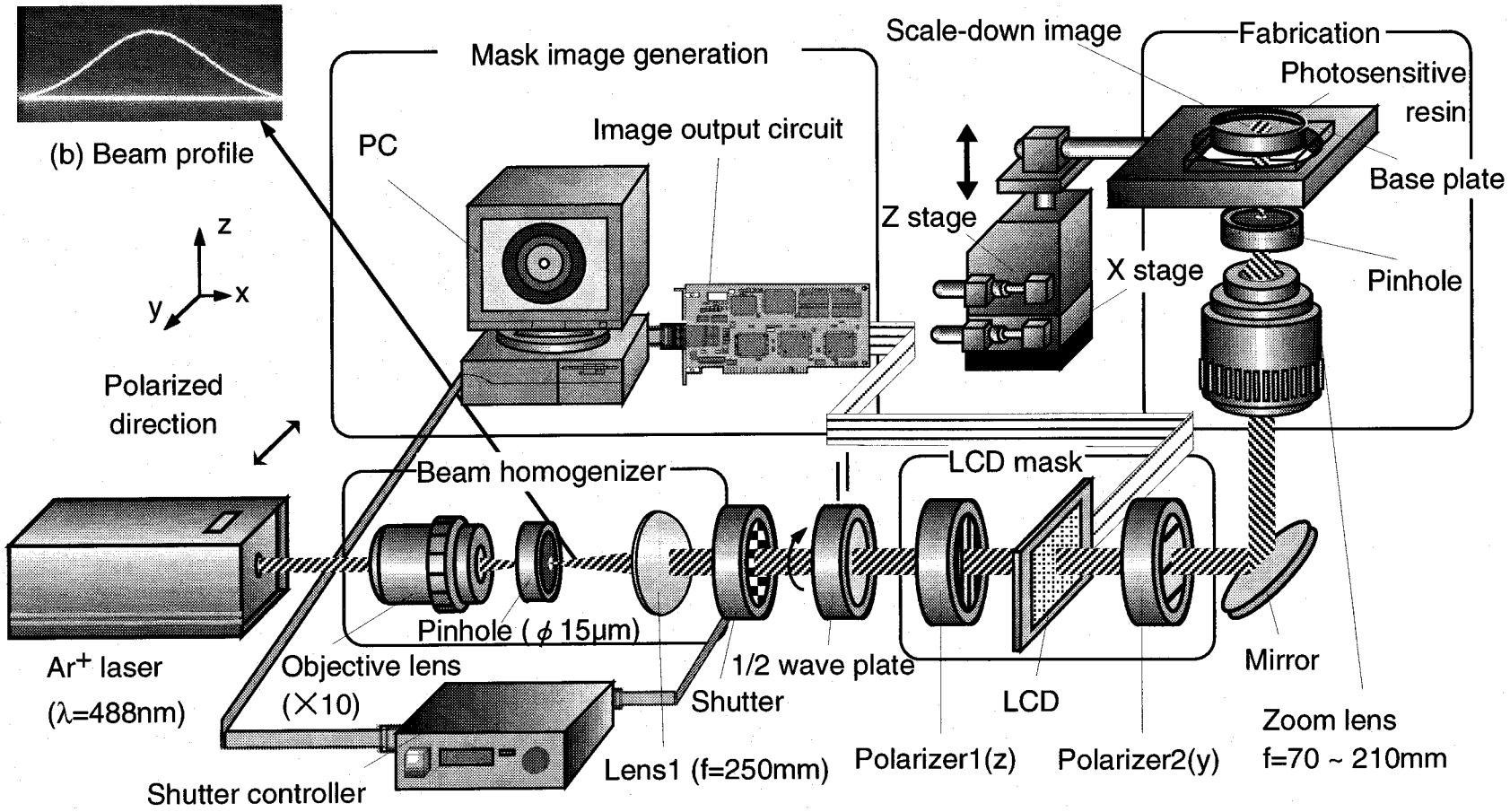



図5.1 濃淡画像による非積層造形装置

投影され結像する．投影されたパターンを結像させるために，焦点距離を７０［mm］から２１０［mm］まで自由に設定できるズームレンズを用いた．したがって，本装置では像の縮小倍率をレンズの焦点距離によって調節することができる．また，結像面の前には直径１［mm］のピンホールを配置し，液晶マスクで生じる２次以上の回折光および散乱光ノイズを除去している．ベースプレート位置の調整は１目盛り１０［$\mu$m］のZステージを用いて行い，ベースプレートの上面が結像面と重なるように配置した．

制御部では，液晶マスクに出力されるマスクパターンと露光時間をコントロールしている．露光時間は８［ms］から６５．５３４［s］の範囲で１［ms］単位で設定可能であり，露光時間の制御に使用した電磁シャッターをはじめとする実験装置の詳細の一覧については第４章に記述した．出力するマスクパターンのサイズは８００×６００ピクセルであり，使用した階調は１００～２２０階調である．使用する表示階調の範囲は４．２節の基礎実験の結果にもとづいて決定した．使用した画像出力回路はVESA 800-6 (60Hz: Dot clock = 40MHz)に対応しており，PCからの画像出力は上記の信号規格に準ずるものを使用した．

### ５．１．２　液晶ディスプレイ駆動方式に関する考察

本実験装置を構築するに当たって，アクティブマトリクス方式のTFT型液晶と駆動方式の異なる液晶素子を利用することを検討した．現在さまざまな駆動方式の液晶素子が研究開発されているが，なかでも単純マトリクス駆動のSTN型液晶および光の散乱を利用する分散型液晶の一つである高分子分散型液晶(PDLC)［５－１］［５－２］をその候補とした．

STN型液晶は駆動原理はTFT型液晶と共通であるが，コストが安くTFT型液晶同様高精細な点がすぐれている．しかしながら，実際にSTN型液晶を使用し第４章に示したようないくつかの基礎実験を行った結果，TFT型液晶ディスプレイと比較すると中間調の表示に問題があり応答速度が遅いことが判明した．したがって，濃淡画像や動画像を出力する本手法での利用は適当ではないとの結論を得た．

高分子分散型液晶(LCPC)は，偏光板を必要としないため光の利用効率が高く，良くコリメートされた光を利用すれば高いコントラストが期待できる．こ

れらの利点は，$Ar^+$レーザを光源とする本実験に適していると考えられるが，TFT型液晶ディスプレイと比較するとピクセルサイズが大きいという問題があり，マイクロ構造の造形を行うには不適当であった．しかしながら，ピクセルサイズの他に大きな問題はなく，今後高精細な高分子分散型液晶ディスプレイが開発されれば高分子分散型液晶をマイクロ光造形に利用することも可能であると思われる．また本手法の対象を拡大し，小型形状の造形を行う場合に高分子分散型液晶を利用することも考えられる．

現在入手できる代表的な液晶素子を用いて比較検討を行った結果，濃淡画像および動画像を用いて微細構造の造形を行う場合TFT型液晶ディスプレイが最適であることを確認した．

## ５．２　実験方法

実験方法を以下に示す．光源のレーザは下記の手順を行う間常に発振しているものとする．

① 出力するマスクパターンをPC上で作成する．
② 作成したマスクパターンを液晶マスク上に出力する．
③ シャッターの開放時間（露光時間）を設定する．
④ 露光面に樹脂を配置する．
⑤ シャッターを開放し，樹脂を露光する．
⑥ 硬化した樹脂を取り出し，エアブラシによって大部分の未硬化樹脂をとりのぞく．
⑦ 濃度９９．９％のエタノールで硬化樹脂表面に付着した未硬化樹脂を洗浄して取り除く．
⑧ 造形した試料を顕微鏡，走査型電子顕微鏡(SEM)などで観察する．

SEMによる観察を行う場合は，イオンスパッターによって試料表面に金蒸着処理を行う．２値画像による造形と濃淡画像による造形では，出力するマスクパターンの種類が異なる．また，２値画像による造形では，樹脂の廃棄量を減少させるため２枚のガラスプレートの間に厚さ１００［$\mu$m］から数［mm］の樹脂層を形成し露光面に配置する．層厚さの調整はスペーサーによって行う．したがって，造形形状の高さはここで形成した樹脂層の厚さによって決まる．ここで使用したガラスプレートは厚さ１２０～１７０［$\mu$m］のカバーガ

ラスである．濃淡画像による造形の場合は厚さ２［mm］以上の樹脂層を樹脂露光面に配置し，樹脂液中で硬化反応が進行し露光量によって造形形状の高さが決まる．

## ５．３　２値画像による２次元造形

### ５．３．１　実験条件

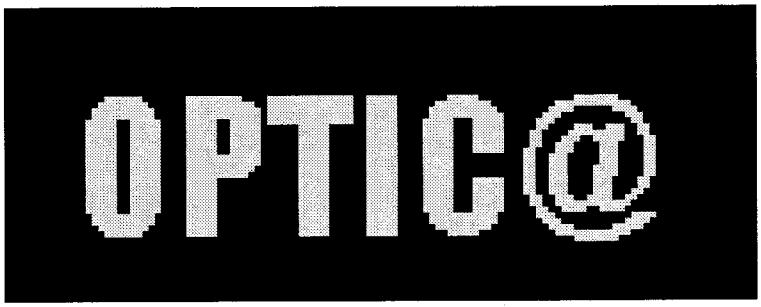
上記の実験装置を用いて，液晶マスクに２値画像を出力し深さ方向に一様な形状の造形を行った．本実験の目的は基礎的なマイクロ形状の造形を行い，液晶マスク光造形法の有効性を確認することである．２値画像を用いた造形では，深さ方向に一様な３次元形状の造形が行える．

実験条件を以下に示す．レーザ出力強度は１００［mW］，露光面強度は１３．６［mW/cm$^2$］，造形時間は１～４［s］間である．造形に用いたマスクパターンは８００×６００ピクセルであり１ピクセルあたりの大きさは液晶マスクのピクセルサイズと等しく３３×３３［$\mu$m］である．また，造形形状の高さは１００［$\mu$m］～２［mm］である．

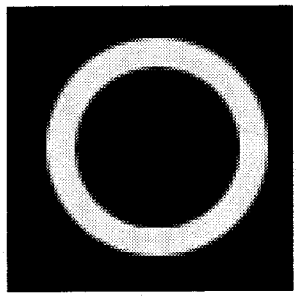
### ５．３．２　２値画像造形結果

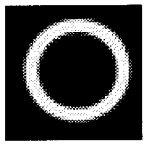
２値画像を用いた造形実験では，リング，歯車，アルファベット，マイクロチューブを造形する．これらの形状は，図５．２に示すような２値画像マスクパターンを液晶マスクに出力して樹脂を露光することによって造形されている．図５．２(a)にアルファベットの造形のためのマスクパターンを示す．ここに示したマスクパターンは，８００×６００ピクセルのうちの１２０×５０ピクセルの領域を示している．図５．２(b)，および図５．２(c)は，それぞれリング，およびマイクロチューブを造形するためのマスクパターンである．図５．２(b)は８０×８０ピクセルの領域，図５．２(c)は４０×４０ピクセルの領域を表している．図５．２(d)は，平歯車形状の造形に用いたマスクパターンで，２５０×１７０ピクセルの領域を表している．図５．２に示した領域の外側は黒一色の表示となり，８００×６００ピクセルの領域のマスクパターンが液晶マスク上に出力されている．

図５．３(a)，図５．３(b)，および図５．３(c)にそれぞれマイクロチューブ，文字，および歯車の造形結果を示す．マスクパターンの縮小倍率はすべて

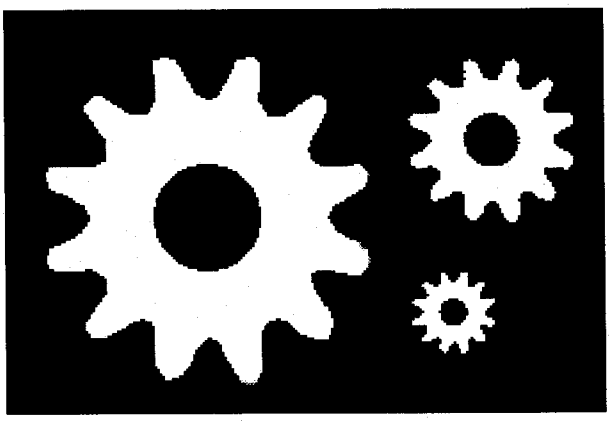



(a) Optic（１２０×５０ピクセル）



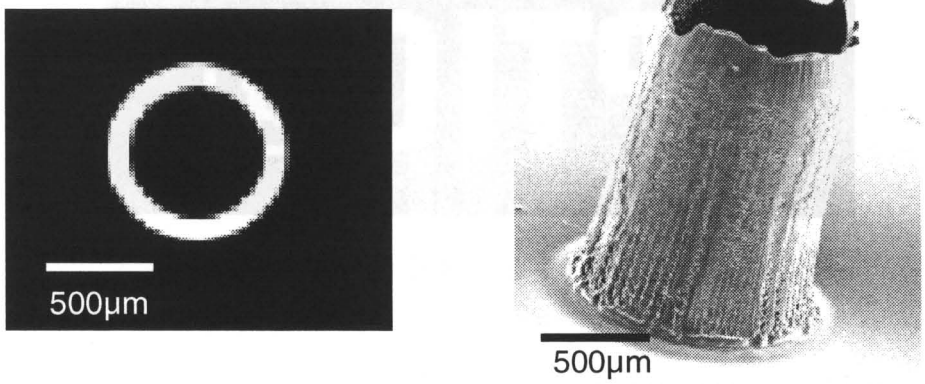


(b) リング（大８０×８０ピクセル） (c) リング（小40×40ピクセル）

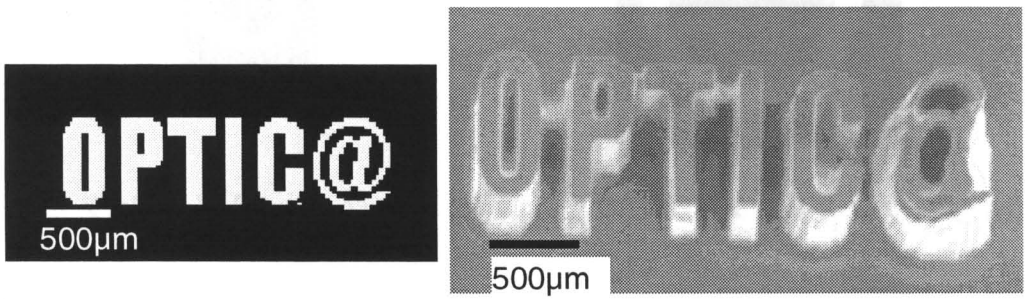


(d) ３種類の歯車（大，中，小）（２５０×１７０ピクセル）

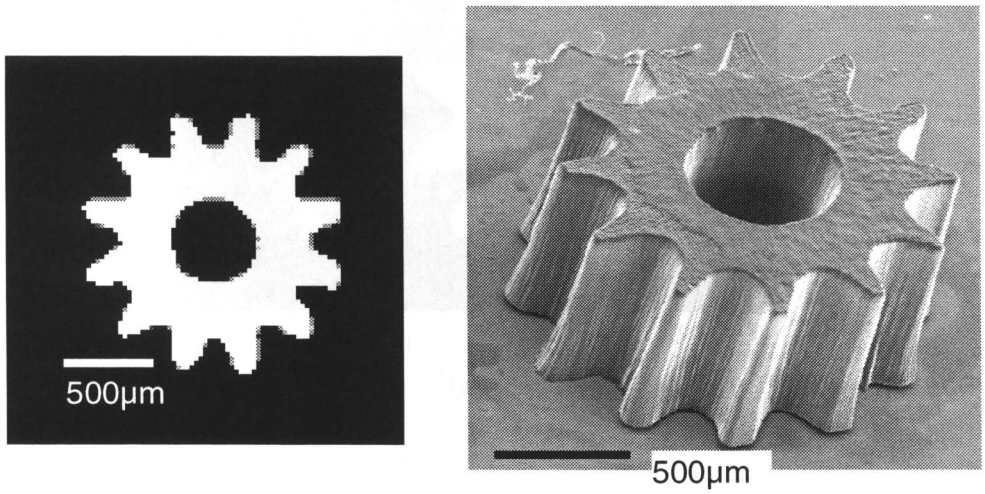
図5.2 ２値画像マスクパターン




(a) チューブ




(b) アルファベット




(c) 歯車形状

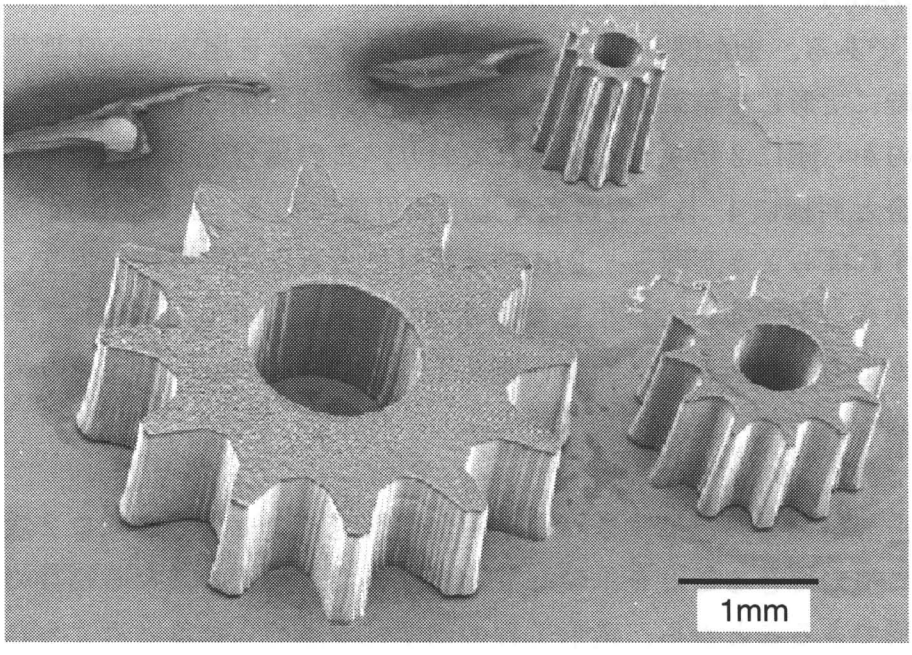
図5.3 2値画像造形結果

１００％で，露光時間は４［s］である．図５．３(a)に示したマイクロチューブの直径は１［mm］，長さは２［mm］である．チューブの壁厚は１００［μm］であり，マイクロチューブの上端面には欠損個所が見られる．図５．３(b)に示したアルファベットはOPTIC@という文字を造形したものである．６種類の文字が同時に造形されており，文字の高さは２［mm］，線幅は１００［μm］である．すべての文字が鮮明に造形されているが@という文字のみ外周が変形していることが確認できる．さらに，図５．３(c)に示した歯車形状は，外径１．５［mm］，歯底円直径は１［mm］であり，その厚さは１［mm］である．また図５．２(d)のマスクパターンを用いて，３種類の歯車形状を同時に造形した結果を図５．３(d)に示す．３種類の歯車形状の大きさは小さいものから順に２倍ずつ拡大されており，この場合も１つの歯車形状を造形する場合と同様に４［s］の露光で造形が可能である．図５．３(c)の歯車形状と比較すればちょうど図５．２(d)の２番目に大きな歯車形状が図５．３(c)に相当する大きさとなる．一番小さな歯車形状の歯幅は８０［μm］であり，歯底円直径が５００［μm］となる．歯車の厚さは１［mm］で３つの歯車形状で共通である．

上記の造形結果は，液晶マスクを用いた面露光プロセスで多様な２次元的形状を高速に造形できることを示唆している．また，形状の異なる複数の部品を同時に造形できることから，造形工程の効率化が進められると考えられる．以上の実験から液晶マスクによる面露光プロセスで，多様な形状を自由に選択して造形できることや，複数の形状を同時に造形できることを確認した．

### ５．３．３　考察

図５．３(a)に示したマイクロチューブの上端面の形状に欠損が見られるが，これは露光面から離れたチューブの上端面で樹脂の露光量が不足することが原因と考えられる．本手法では露光面に液晶マスク上のマスクパターンを投影して結像させることで樹脂を露光しているため，露光面から離れた領域では露光量が不足して硬化した樹脂の強度が低下する．そのため，マイクロチューブの外壁のように微細な線で描かれた形状では，洗浄の際に上端面が浸食され形状の欠損が生じる．また，マイクロチューブのような曲線形状の場合は，曲線をピクセルの集合として描画する際に不連続な点が生じることがあり，不連続な点では線幅が変化する．線幅が想定したものよりも細くなれば造形した形状の強度が低下し，直線的な文字を造形した場合に比べて洗浄時の浸食の影響が大




(d) 3 種類の歯車の同時造形結果

図5.3 2 値画像造形結果

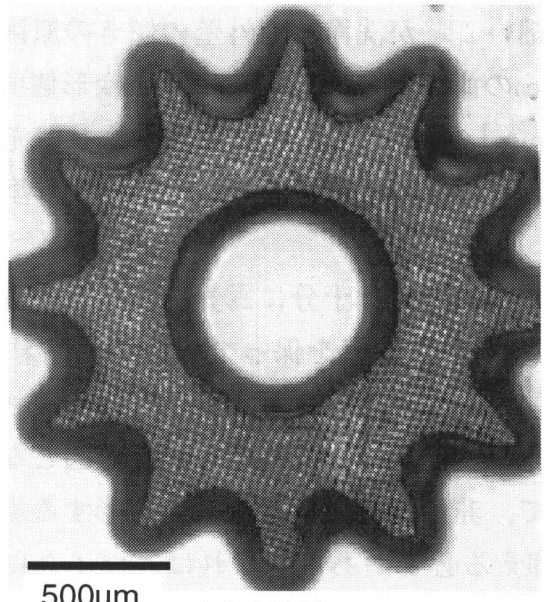
きくなったと思われる．図５．３(b)に示したアルファベットの造形でも，@の線幅が他の文字よりも細いことが洗浄時の外壁の傾きの原因となったと考えられる．一方，図５．３(c)の歯車形状の造形では特に変形個所はみられない．これは歯車の厚さが１［mm］と薄く，上端面でも十分な露光が行われており洗浄による変形や浸食の影響を受けにくかったためであると考えられる．

洗浄の際の変形を防ぐには樹脂を十分に露光することが重要である．上記の結果から，一回の露光で十分な強度を保って硬化させられる樹脂の厚さは２［mm］程度であると言える．露光面の光強度を強めればさらに厚さを増すことも可能であるが，露光量の超過は横分解能低下の原因となり高精度な造形を困難にする．したがって，非積層で３次元形状を造形する場合は造形形状の高さを２［mm］以内に抑える必要がある．これは，マイクロ形状の造形には十分な大きさであると言える．

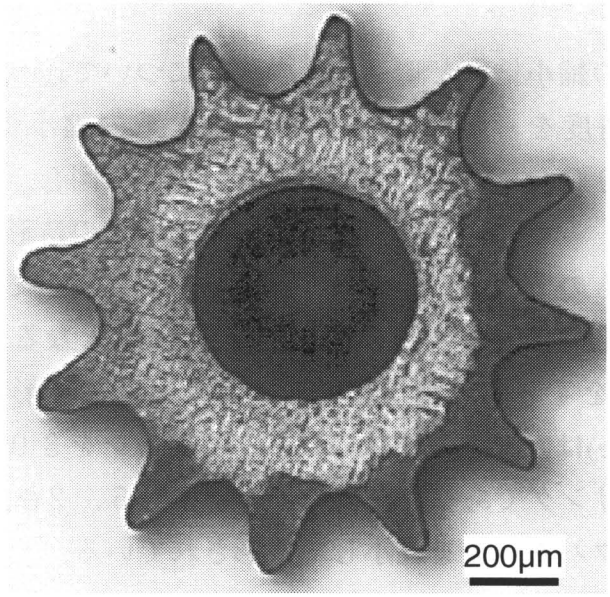
次に，縮小光学系の縮小倍率と造形精度の関係について述べる．縮小露光を行った場合の造形精度を評価するために，光学系の縮小倍率をそれぞれ３０%，４０%，１００%に変化させて造形を行った．図５．４にその結果を示す．図５．４(a)は，縮小倍率が１００%での歯車形状の造形結果を光学顕微鏡によって観察したものである．つまり，液晶マスクに対して等倍で造形がおこなわれており，造形の横分解能は３３×３３［$\mu$m］となる．図５．４(b)は同じマスクパターンを４０%に縮小露光して造形した歯車形状の観察像である．さらに図５．４(c)は，リング形状のマスクパターンを３０%に縮小露光して造形したマイクロリングである．左側のリングは図５．２(b)，右側のリングは図５．２(c)のマスクパターンを縮小して造形されている．

縮小倍率１００%の場合は，造形形状表面に格子状の縞模様が観測され，また造形した形状の外周にも不連続な点が見られる．縮小倍率を４０%にして造形を行った場合は，造形形状表面に見られた格子状の縞模様は改善され，アウトライン精度も向上していることが確認できる．さらに，縮小倍率を３０%にしてリング形状の造形を行った場合には，平坦で高品質な表面を持つ形状の造形が可能であり，線幅５０$\mu$mのリングが造形できることから高い形状精度が達成されていると言える．

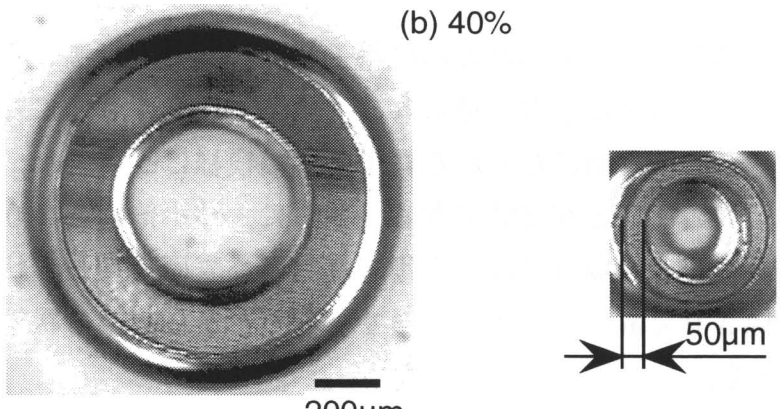
上記の造形結果から縮小光学系の縮小倍率が，造形精度に大きな影響を与えることがわかる．第４章でも述べたように縮小倍率は造形の横分解能に直接




(a) 100%




(b) 40%



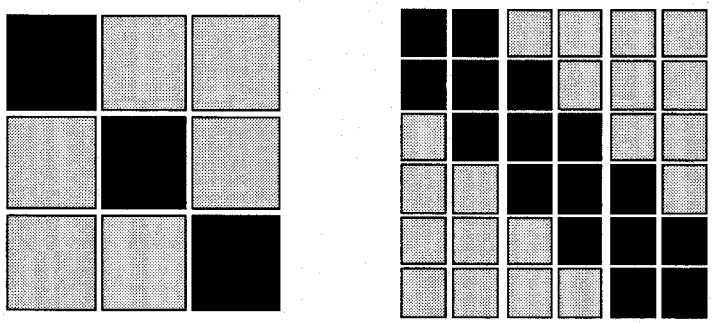

(c) 30%

図5.4 縮小率の異なる場合の造形結果

関係する要素となる．本実験光学系では，液晶マスクのピクセルサイズに縮小倍率をかけたものが造形の横分解能となる．図５．５(a)に示すように液晶マスクに出力されたマスクパターンを縮小して露光すれば，露光面では単位面積あたりのピクセル数が増加する．単位面積当たりのピクセル数が増加すれば，同じ形状を造形する場合でも，アウトライン精度が高くなり造形精度が向上する．図５．５(b)および図５．５(c)に，それぞれ樹脂露光面で同じ大きさを持つが縮小倍率の異なるマスクパターン像を示す．これらのマスクパターン像からマスクパターンを縮小すれば露光面で結像したマスクパターンのアウトライン精度が向上することが確認できる．

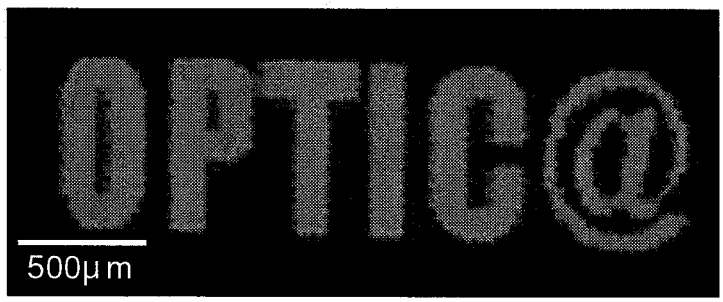
１００％の縮小倍率を持つ縮小光学系を用いて露光を行えば，造形の横分解能は液晶のピクセルサイズと同じ３３×３３［$\mu$m］となる．この分解能で１辺１００［$\mu$m］の形状を造形しようとすれば３×３ピクセルで形状を描画する必要があり複雑な形状の造形は困難である．もし４０％の縮小光学系を用いれば横分解能は約１３×１３［$\mu$m］となり，３０％の縮小光学系を用いれば約１０×１０［$\mu$m］となる．例えば１［mm］の形状を造形する場合は１００×１００ピクセルの領域で形状を描画できるので，比較的複雑な形状の造形も可能である．実際に造形を行うに当たって造形形状の大きさの１／１００程度の分解能が確保できれば高精度な造形が実現できることから，マイクロ形状の造形には１０×１０［$\mu$m］以下の横分解能が必要とされる．液晶マスクのピクセルサイズは，今後の液晶ディスプレイの製造技術の進歩に伴い１０×１０［$\mu$m］程度まで改良されることが予想されている．この場合，１０％の縮小光学系と組み合わせることにより１$\mu$mの横分解能が，１０％以下の縮小光学系と組み合わせればサブミクロンオーダーの分解能の実現も見込まれる．

また，縮小倍率と面精度の関係について以下に述べる．図５．６に液晶マスク露光像の光強度プロファイルを示す．図５．６(a)に示すように液晶マスクにはBM(Black Matrix)という遮光層が配線部分に設けられているため，周期的な光強度分布が観察される．図５．６(b)に液晶マスクに出力したマスクパターン像とその拡大図，図５．６(c)に結像したマスクパターンのCCDカメラによる撮影像とその光強度プロファイルを示す．出力したパターンは３０３×３０３ピクセルの白色の正方形のなかに５×５ピクセルの黒色の正方形が描かれたものである．CCD撮影像およびビームプロファイルから１ピクセルごとに光強度が周期的に変動していることが確認できる．この光強度の周期的な変動が造形に

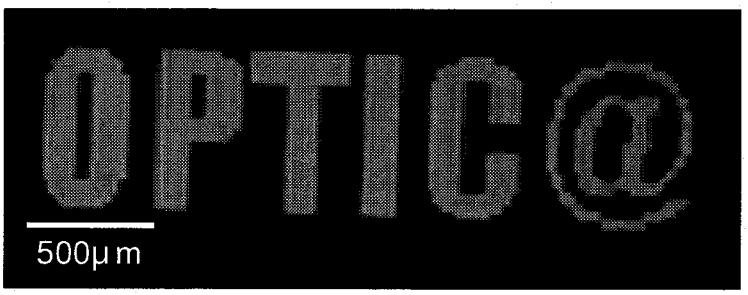


縮小倍率100%　　縮小倍率50%

(a) アウトライン精度とピクセル数の関係

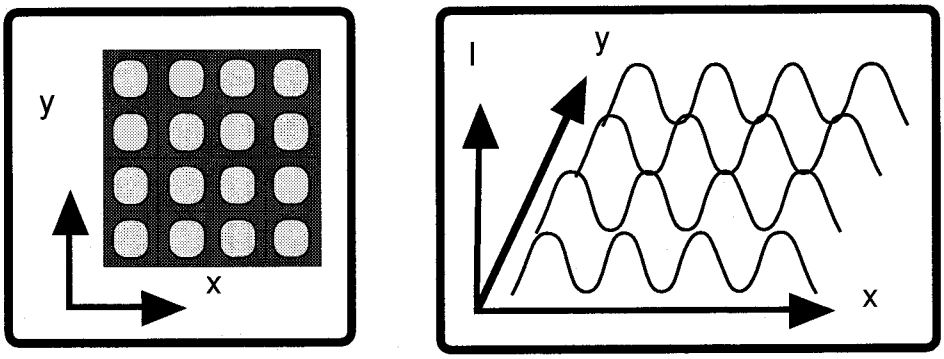



(b)露光面CCD撮影像 （縮小倍率１００%）
（パターンサイズ変化なし）

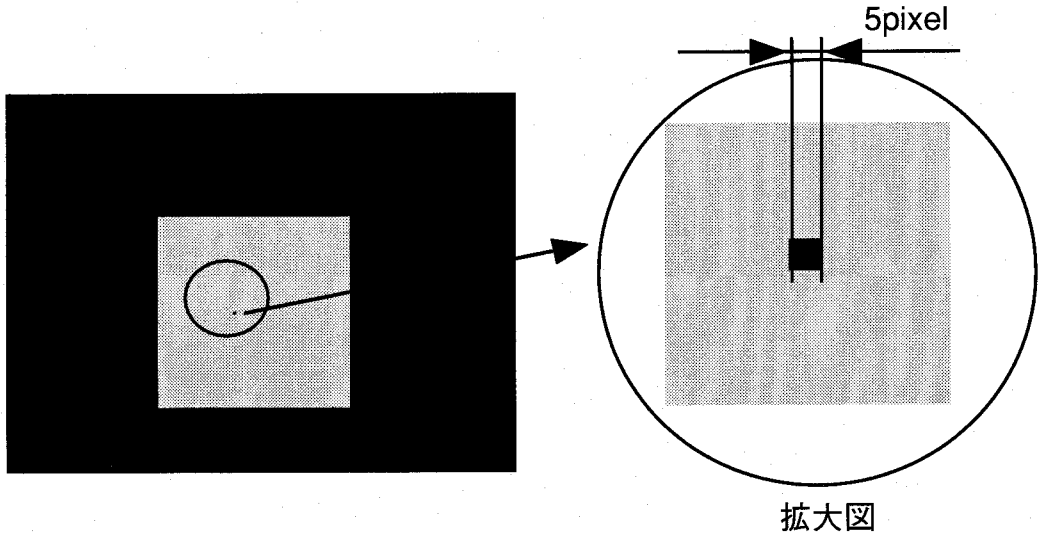



(c)露光面CCD撮影像 （縮小倍率４０%）
（パターンサイズ２．５倍［ピクセル数6.25倍］）

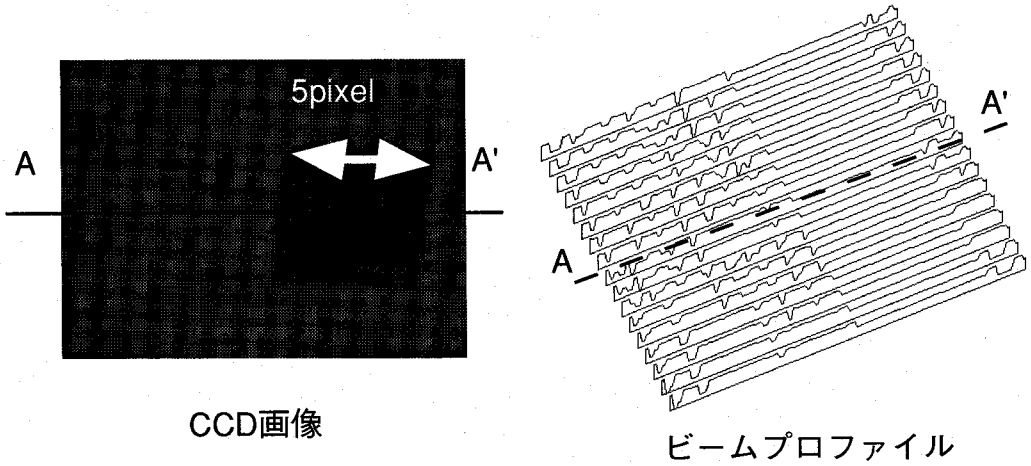
図5.5 形状精度と縮小率の関係




(a) 露光面強度分布




(b) 出力マスクパターン




(c) 露光面像

図5.6 露光面光強度プロファイル

おける表面粗さの原因となっていると考えられる．この遮光層が原因となる表面粗さは，光学系による縮小によってその影響が軽減される．縮小露光によって単位面積あたりのピクセル数が増加すればその領域での光強度の変化も平均化され一様なものとなり，縮小光学系の縮小倍率を向上させれば形状精度だけではなく面精度の改善も見込まれる．

縮小倍率を小さくする利点は形状精度と面精度の向上であるが，一方で造形できる形状の大きさが制限される問題もある．例えば３０％の縮小を行って横分解能１０［$\mu$m］程度の造形を行う場合は造形可能な形状は液晶マスクの面積の３０％に当たる約８×６［mm］以下のものに制限されることになる．したがって，液晶マスクによる面露光ではピクセルサイズが小さく，画面サイズの大きな液晶の使用，つまり出来るだけ画素数の多い液晶を使用することが望ましい．

## ５．４　濃淡画像による非積層３次元造形

### ５．４．１　実験条件

２値画像による造形実験により２次元的なマイクロ構造の造形が確認できたので，次に濃淡マスクを用いて深さ方向に変化する３次元構造の造形を試みる．２５６階調で表現される濃淡画像による造形では，露光量をマスクパターンの表示階調によって制御し３次元形状を造形する．濃淡画像による非積層３次元造形が実現できれば，積層型光造形法でみられた階段状の誤差の問題を軽減することができる．実験方法は２値画像造形の場合と同様である．ただし，酸素による硬化阻害が樹脂内部の硬化反応に影響を及ぼさないために，２枚のガラスプレートの間に形成する樹脂層の厚さは造形する形状の高さを十分に上回るものとする．

実験条件を以下に示す．レーザ出力強度は５００［mW］，露光時間は２［s］である．マスクパターンに使用した表示階調は１５０から２００までの５０階調である．マスクパターンの縮小倍率は３２％である．

### ５．４．２　濃淡画像造形結果

図５．７(a)に示したような濃淡画像を液晶マスクに出力し，ピラミッド形状を造形した．図５．７のマスクパターンは正方形の外部の階調が０，外周部の

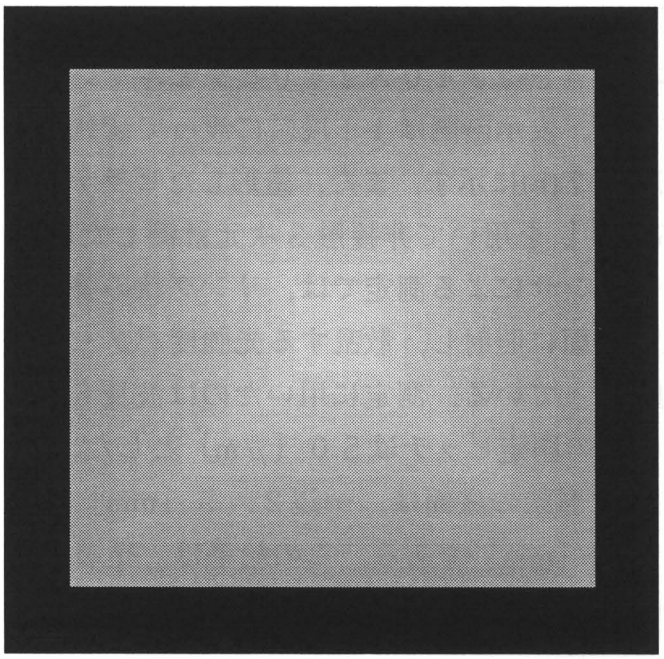
階調が１５０であり，正方形中心部にいたるまで徐々にその階調が増加している．図５．７に示した正方形の外部の黒い領域を含めた大きさが３００×３００ピクセル，中心部に描かれた正方形の大きさは４０×４０ピクセル，正方形全体の大きさは２４０×２４０ピクセルである．正方形は同心状に１１個描かれており，表示階調は１１段階に渡って変化している．造形形状のSEM観察像を図５．７(b)に示す．また，造形したピラミッド形状を光リング式変位センサ［５－３］を用いて非接触３次元計測した結果を図５．８に示す．光リング式変位センサによる測定では，リング状の強度分布を持つ集光レーザービームを試料表面に照射し，散乱する光強度パターンから変位情報を読みとり非接触計測を行っている．測定に用いたのは波長６３３［nm］のHe-Neレーザであり，センサの測定ピッチは５０［$\mu$m］とした．

造形したピラミッド形状の底面は，一辺２．５［mm］の正方形でありピラミッドの高さは１．５［mm］である．この結果は，積層を行わずに深さ方向に変化する形状の造形が可能であることを示している．

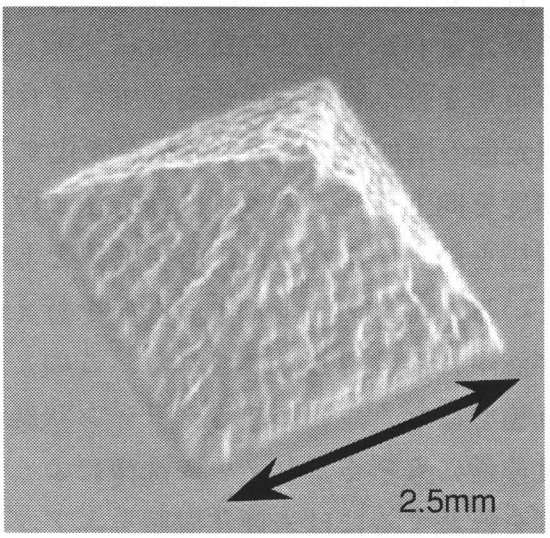
### ５．４．３　考察

濃淡画像による造形を行う場合，表面粗さの原因として主に洗浄時の浸食と露光時の照度むらの影響の２つが考えられる．洗浄時に樹脂表面が浸食されるのは，造形形状表面の露光量が露光面での露光量に比較して少なくなるためである．濃淡画像による造形を行う場合，造形物の強度を増すために露光面光強度を増加させれば，露光量の増加に伴い造形形状が変化する．

したがって，造形精度を向上させるには，洗浄方法に改良を加える必要がある．現在は，未露光樹脂を除去するために，有機溶媒として純度９９．９％のエタノールを使用している．エタノールによる洗浄を行えば，硬化樹脂表面に付着した未硬化樹脂が液中に溶けだし除去される．このとき，硬化樹脂の表面の硬化反応率は１００％ではなく，いわゆるグリーン状態とよばれる状態にある．この状態の樹脂は非常にもろくエタノール洗浄によって浸食されやすい．できるだけ浸食の影響を軽減するには未硬化樹脂をエアブラシなどで取り除くようにし，エタノールによる洗浄時間を最小限にとどめる必要がある．また，未硬化樹脂の臨海露光量を超えない程度にポストキュアを行い硬化形状表面の強化を行った後，エタノールによる洗浄を行えば，硬化表面の浸食の影響を低減させる効果があると考えられる．また，エタノールによる洗浄では，洗浄後樹脂が膨潤する事実が指摘されており他の洗浄用有機溶媒の使用も視野に入れて今後検討する必要がある．

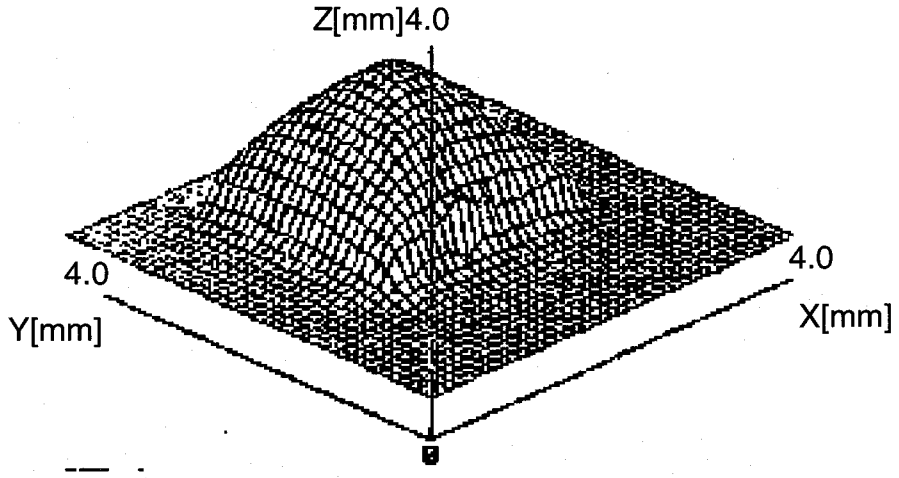


(a) 液晶マスク出力濃淡画像（３００×３００ピクセル）

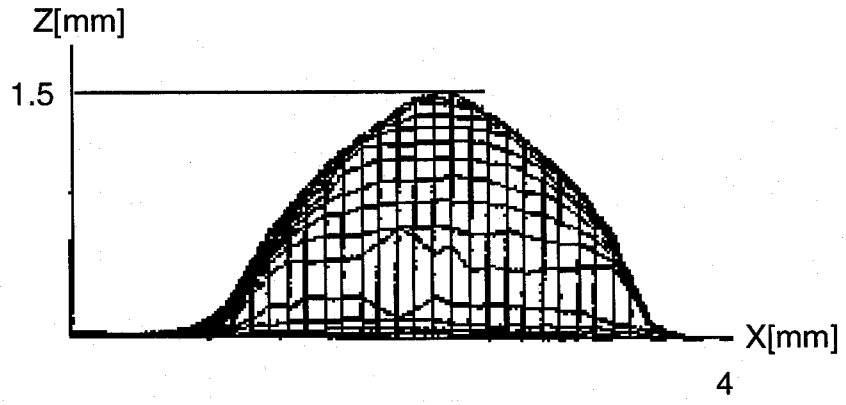



(b) ピラミッド形状（SEM観察像）

図5.7 液晶マスク出力濃淡画像とその造形結果




(a) 3 次元表示




(b) x-z断面 (Y=2.2)

図5.8 光リング式変位センサによる測定結果

## ５．５　液晶マスクによる非積層造形に関する考察

これまでの基礎実験の結果，樹脂液中で微細な形状が造形できている場合でも，洗浄を行う際に形状が破壊される例が数多く観察された．特にマイクロ形状の造形を行う場合，その傾向が顕著に現れる．マイクロ形状の洗浄時に形状が破壊されやすいのは，樹脂の粘性が原因であると考えられる．造形形状の大きさが小さくなるにしたがって，洗浄の際に樹脂の粘性によって加わる力の割合が大きくなり形状の破壊が起こりやすくなる．したがって，マイクロ形状の造形には粘性の小さな樹脂を使用することが肝要となる．以上のことから，マイクロ構造造形を行う場合は，洗浄プロセスの改良と同時に硬化した樹脂強度の増強も重要な課題となると思われる．造形精度向上のためには，横分解能および深さ方向分解能をそれぞれ向上させるだけでなく，粘性が小さく硬化時の強度が高い樹脂を用いる必要があると言える．

また，照度むらによる表面粗さの問題を解決するには，均一照明光学系の改良，結像光学系の改良を行う必要がある．また，より開口率が高く，ピクセルサイズの小さい液晶マスクを使用することも効果的である．

### ５．５．１　２値画像造形の造形精度

２値画像による造形の場合，横分解能は液晶マスクの横分解能と縮小光学系の縮小倍率によって定まり，高さ方向分解能は樹脂層厚さによって定まる．さらに，表面粗さは露光量の大小によってその決定要因が異なる．通常，表面粗さは液晶マスクのピクセルサイズと縮小光学系の縮小倍率によって決まる．しかし，樹脂の硬化深さが樹脂層を挟む２枚のガラスプレートの間隔を上回るように樹脂を露光すれば，表面粗さは樹脂層の両面を規制するガラス面の表面粗さによって決まる．この場合，余分に樹脂が露光されていることから，露光後の洗浄の際に浸食の影響を受けにくい．しかし，樹脂露光量が大きくなりすぎれば，横方向に余剰硬化が進行し横分解能が低下すると考えられる．

### ５．５．２　濃淡画像造形の造形精度とその問題点

濃淡画像による造形の場合，造形形状表面すなわち樹脂の硬化領域と未硬化領域の境界面では樹脂の露光量が臨界露光量に等しくなる．一方，露光面では樹脂の露光量が臨界露光量を上回り，樹脂の硬化領域が露光面から離れれば離れるほど，その点での露光量が露光面での露光量に比較して小さくなることは

避けられない．この露光量分布のむらは樹脂が収縮する際に生じる形状誤差の原因となることが考えられるので，できるだけ均一に樹脂を硬化させることが高精度な造形を行う上で不可欠となる．本実験では波長４８８［nm］の$Ar^+$レーザ光源を使用しているために樹脂内部まで光が深く透過し，吸収性の高い紫外光等を光源とした場合に比べ樹脂を均一に硬化させられる．また，樹脂内部まで光が透過することから，アスペクト比の高い形状の造形も実現できる．しかし，樹脂内部まで光が透過すれば，樹脂内部の気泡による散乱等を引き起こし形状誤差の原因となることも考えられ，波長４８８［nm］の光に対して過度に透過深度が高くない樹脂を使用することが重要である．

また，濃淡画像による造形では，オーバハングを持つ形状の造形が行えない問題がある．この問題の解決には動画像露光による造形が必要となることから，その詳細については次章で述べる．

## ５．６　結言

本章では，濃淡画像による非積層造形装置を構築し，２値画像および濃淡画像を用いて非積層造形実験を行った．これらの実験により，濃淡画像による非積層造形プロセスによるマイクロ形状造形の実現性を検討した．以下に本章で明らかにした事項について述べる．

（１）液晶マスクを用いた光造形装置を構築し，液晶マスクに出力する画像を変更することで一枚の液晶マスクから多様な形状を造形できることを確認した．

（２）２値画像を用いて，露光時間４［s］で壁厚１００［$\mu$m］，高さ２［mm］のマイクロチューブや外径１．５［mm］の平歯車などの基礎的なマイクロ形状の造形が可能であることを確認した．

（３）線幅１００$\mu$mの"OPTIC@"という６文字のアルファベット文字や３種類の大きさの異なる歯車形状を同時に造形し，多様な形状に対して複数の異なる形状を同時に造形できる液晶マスク面露光の利点を示した．

（４）結像光学系の縮小倍率を変化させてリング形状や歯車形状の造形を行い，造形の横分解能が液晶マスクのピクセルサイズと光学系の縮小倍率によって決まることを確認し，さらに縮小倍率が造形形状の表面精度や形状精度に与える影響について検討した．

（５）濃淡画像を用いた一括面露光により深さ方向に一様に変化する底辺２．５［mm］，高さ１．５［mm］のピラミッド形状を２［s］間で積

層せずに造形し，濃淡階調表示による露光量制御を行って3次元形状が高速かつ高精度に造形可能であることを確認した．

濃淡画像によるマイクロ形状の造形は，AFM等の3次元測定データの可視化などの用途に利用できると考えられる．しかし，濃淡画像による造形では造形形状表面で露光量が不足するために，洗浄時に樹脂の強度不足を原因とする浸食や欠けを生じる．これらの問題の解決には，光硬化性樹脂の露光条件を検討する必要がある．そのために樹脂硬化現象の理論的な解析を行ったのでその詳細について第7章で述べる．また，オーバハング形状の造形を行うには動画像を用いた光造形法についても研究を進める必要があり，第6章でその詳細について述べる．

## 参考文献


［５－１］　内田龍男, 次世代液晶ディスプレイ技術, 工業調査会, (1994), 217.

［５－２］　林照剛, 三好隆志, 高谷裕浩, 高橋哲, 位相共役光による三次元造形に関する研究（第一報）- 液晶濃淡画像の硬化特性 -, 1999年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1999), 719.

［５－３］　三好隆志, 高谷裕浩, 滝澤暢, 福沢亮太, 三次元自由曲面の非接触形状測定センサの開発研究（第３報）, 精密工学会誌, Vol.61, 2, (1995), 258.

# 第６章

# 動画像による非積層造形実験

第６章では，動画像を用いた非積層造形実験の結果について述べる．動画像による非積層造形では，濃淡画像による非積層造形と同様に任意の露光量分布を樹脂に与えて３次元形状を造形できる．また，動画像露光を利用すればオーバハング形状などの複雑な３次元形状を造形することも可能となる．そこで試作した装置により基礎的な形状の造形実験を行って，液晶マスクを用いた光造形装置の開発に必要となる基礎特性を調べ，本手法の実現性を検討する．

## ６．１　動画像露光光造形装置

本実験で，液晶に入力したビデオ信号（Vesa800-6）の具体的な仕様を表６．１に示す．使用する液晶マスクのピクセル数はダミーの画素も含めて８１２×６１２ピクセルであることから，入力信号の仕様と液晶マスクのピクセル数から１［s］あたりの画面描画回数を求めると約８０回となり，また一画面を描画するのに要する時間は１２．５［ms］となる．このようにTFT型液晶に代表されるアクティブマトリクス型液晶(AM-LCD)では，各ピクセルごとに設けられたトランジスタによってバイアス電圧を制御できるので，画面サイズが大きな液晶でも高いコントラストと高速な描画が実現できる．

１［s］あたり８０回の描画が可能であることは，１［s］あたり８０コマの動画像の表示が可能であることを意味する．１コマに１層をわりあてて動画像を用いて連続的な積層造形を行う場合，層の厚さつまり高さ方向の分解能を１［$\mu$m］とすると，１［s］間に８０［$\mu$m］が造形可能となる．

また，動画像によるオーバハング形状の造形を行うために図５．１に示した実験装置の一部を改造した．動画像露光を利用してオーバハング形状の造形を行うには，液晶マスクに出力するパターンの変化に同期させて，未露光の樹脂を露光面に連続して供給する必要がある．そのため，露光面に樹脂を連続供給しながら樹脂を露光できる実験装置を構築する必要があり，露光面に樹脂を連続供給可能な２種類の露光方式について検討を行った．一つは上方露光式，も

表6.1 ビデオ入力信号仕様

| Input signal | Vesa800 - 6 |
|---|---|
| 垂直同期周波数<br>VSF | 3 8 [KHz] |
| 水平同期周波数<br>HSF | 6 0 [Hz] |
| 動作クロック周波数<br>DCF | 4 0 [MHz] |

VSF: vertical sync frequency

HSF: horizontal sync frequency

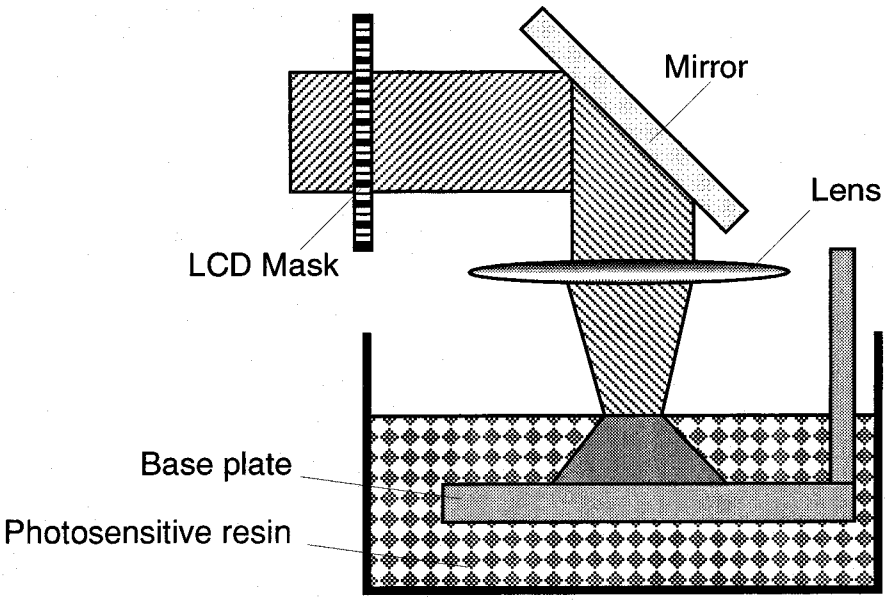
DCF: Dot clock frequency

う一つは下方露光式である．

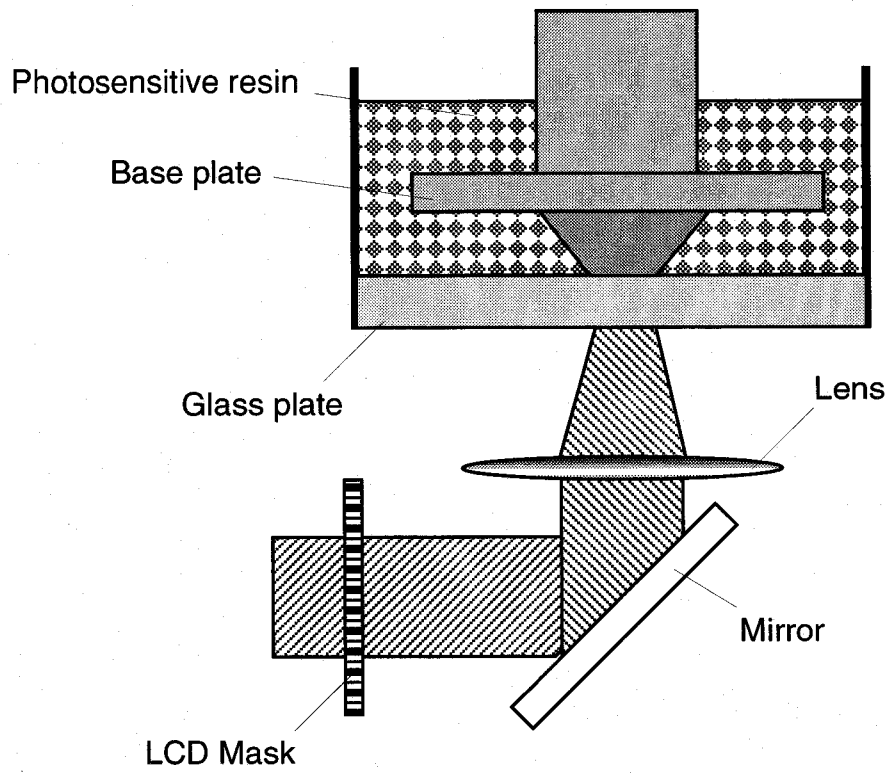
図６．１(a)に示す下方露光方式（自由液面方式）では，通常ブレードと呼ばれる部品を用いて余剰樹脂を表面から除去し薄い層状に液面を成形する．しかし，本手法では樹脂供給と露光が連続して行われるためブレードを使用した液面成形プロセスを行うことはできない．したがって，大気圧により樹脂層の厚さが均一になるのを待って液面を平坦化することになる．この場合，樹脂表面が平坦になるまでの時間は緩和時間とよばれるパラメータによって決まる．このパラメータは光硬化性樹脂の粘性の増加に伴って大きな値をとる．したがって，通常の光硬化性樹脂では薄い樹脂層の形成に長時間を必要とする．また，表面張力の影響などもあり薄い樹脂層を形成することは大変困難である．これらの問題点は粘性の小さな樹脂を使用によって解決されると考えられる．そこで自由液面方式による実験装置を試作し基礎形状の造形を行ったが，粘性の小さな樹脂を使用した場合でも，短時間に薄い樹脂層を形成することは困難であることがわかった．また，この方式では樹脂液面を平坦に保つことが困難であり，下方露光法式では露光面に樹脂を連続供給できる樹脂の露光部が構築できないと判断した．

これに対し図６．１(b)に示す上方露光式（規制液面方式）では，露光面で樹脂の表面がガラスプレートによって規制された状態となる．そのため，液面の成形精度が高く，薄く平坦な樹脂層を形成することができると考えられる．しかし，硬化樹脂が樹脂液面を規制するガラスプレートに付着し，破壊が生じるなどの問題点も報告されている．動画像による露光を行う場合，前述したように造形中に層形成のために露光プロセスを中断しないことから，規制液面方式で動画像による造形を行うにはガラス面に硬化樹脂が付着する問題の解決が必要となる．この問題を解決すれば，規制液面方式では樹脂表面がガラスプレートによって規制されているため液面の成形精度が高く，樹脂の緩和時間に関わらず短時間に薄い樹脂層を形成することができる．また，硬化した樹脂がベースプレート位置の移動に伴って速やかにガラスプレートから剥離すれば，樹脂を連続的に供給しながら動画像による露光を行うことができる．このため，自由液面方式では困難であった高速造形が実現できる．

本実験装置では以上の利点を持つ上方露光式を採用し，図６．２に示す実験装置を試作した．




(a) 下方露光式（自由液面方式）




(b) 上方露光式（規制液面方式）

図6.1 2種類の露光方式

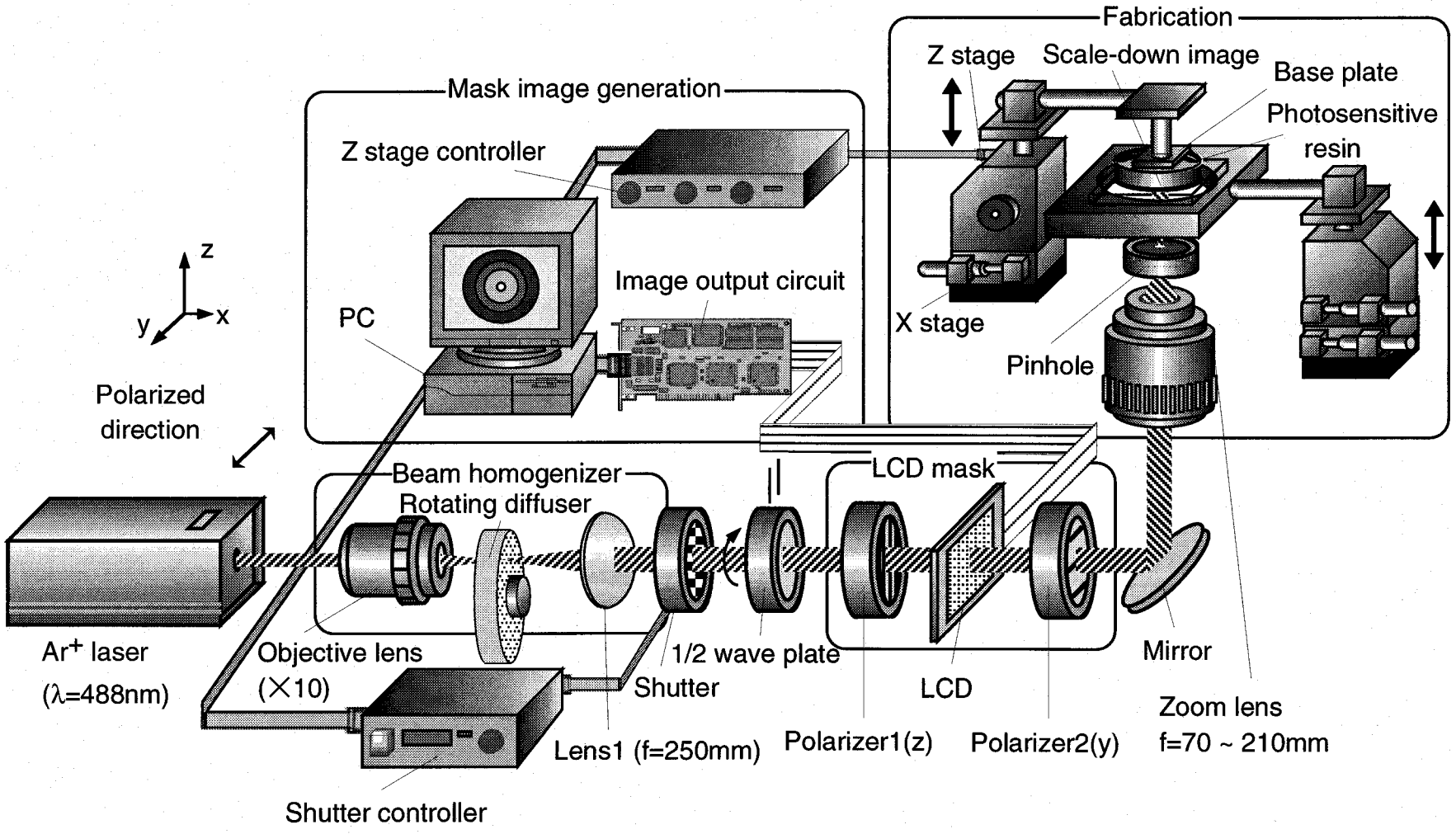



図6.2 動画像造形実験装置

### 6．1．1　均一照明光学系

均一照明光学系 (Beam homogenizer) について以下に述べる．濃淡画像による造形では，液晶マスクの表示階調に対する光透過率コントラストの高さが造形精度を定める重要な要因となっていた．そのため，均一化されたビームプロファイルを持つ光で液晶マスクを照明し，液晶マスクの配向方向に平行な成分で形成される直線偏光の光をマスクに入射させた．

一方，動画像による造形では回転拡散板を利用した均一照明光学系を使用する．回転拡散板の使用により入射光の偏光はランダム偏光となることから液晶マスクのコントラストおよびビームの利用効率は低下する．しかし，動画像による造形で利用されるのは基本的に２値画像であることから，液晶マスクのコントラストが低下しても造形の精度に与える影響は少ない．

ここでいう回転拡散板とは，直流モータと直流電源に接続された高速で回転可能な拡散板のことを意味する．拡散板を回転させることによってスペックルノイズなどによって生じる照度むらが平均化され，単位時間平均では均一な強度分布を持つ照明を作り出せる．

回転拡散板を利用した均一照明光学系は，２つの利点を有している．第一の利点は，照明光の干渉性を低減できることである．拡散板を通過した光は，通常のレーザ光源と比較して著しく干渉性が低下する．そのため，回折や干渉などに起因するノイズの発生を抑える効果がある．第二の利点は，広い領域を均一に照明できることである．ガウス分布の中心部分を利用した均一照明光学系では周辺部分の光強度が低下することは避けられず，利用可能な照明領域は中心付近の狭い領域に限られていた．しかし，回転拡散板を通過した光は広い角度で拡散するため，広い領域で光強度を均一化できる．そのため，液晶マスクの照明領域を図５．１の光学系に比べて広げることができる．液晶マスクの照明領域が広がればマスクパターンの表示可能範囲が拡大できる．したがって，動画像露光を行う場合は回転拡散板を利用した均一照明光学系の利用が望ましい．

### 6．1．2　造形部

造形部について述べる．構築した実験装置は，マスクパターンの変化に同期させてベースプレート位置を移動して，樹脂を露光面に連続供給する機能を持

つ．まず，造形部は上述したように上方露光式（規制液面法）で，造形部の底面のガラスプレートには厚さ１．２［mm］のスライドガラスを使用している．造形部の詳細を図６．３に示す．

液晶マスクを透過した光はMirrorによって進行方向を上方に変化させられる．Zoom lensによって集光された光は，ピンホールによって０次光以外の成分が取り除かれる．ガラスプレート位置はガラスプレート上面で０次光が結像するように調節される．ベースプレート位置はPCに直結したZstage controller (Mark102) によって０．５［$\mu$m］ステップの制御が可能である．

ベースプレート位置が上方に移動すると生じた空間に未露光の樹脂が流入し，露光面に新たに樹脂が供給される．上方露光方式では，硬化した樹脂と同量の樹脂を供給し続ければ，露光面は常に未硬化の樹脂が満たされることとなり，連続して新たな断面が造形できる．つまり，下方露光方式と異なり造形形状の高さは樹脂槽の深さに制限されない．また，樹脂が露光面全体を覆っていれば連続して造形が可能であることから，大量の樹脂を樹脂槽に準備する必要はない．これは廃棄される樹脂が少なくなることを意味し，対環境的にも対費用的にも優れている．

また，供給された樹脂の液面形状は樹脂槽の底板となるガラスプレートの表面形状に従うため，硬化した樹脂の表面粗さはガラスプレートの表面粗さによって定まる．本実験装置では硬化した樹脂と底面ガラスプレートの癒着を防ぐためガラスプレート表面に撥水コーティング処理を施した．コーティング材としては市販されているシリコン，アルコールからなる弱酸性のものを用いた．硬化樹脂と底面ガラスプレートの癒着は表面粗さや形状精度劣化の原因となるため，コーティングの有無は造形精度に大きな影響を与える．

ベースプレート位置および露光時間すなわちシャッターの開放時間はPCから直接制御可能である．液晶マスクに出力する画像に連動させてベースプレート位置を制御するのがこの造形部の特徴である．

## ６．２　動画像造形基礎実験

動画像を用いた非積層造形では，液晶マスクのマスクパターンを変化させて露光を行いながらベースプレートの駆動制御を行い３次元形状を造形する．そこでまず，動画像による露光が行えることを確認し，次にベースプレートの駆

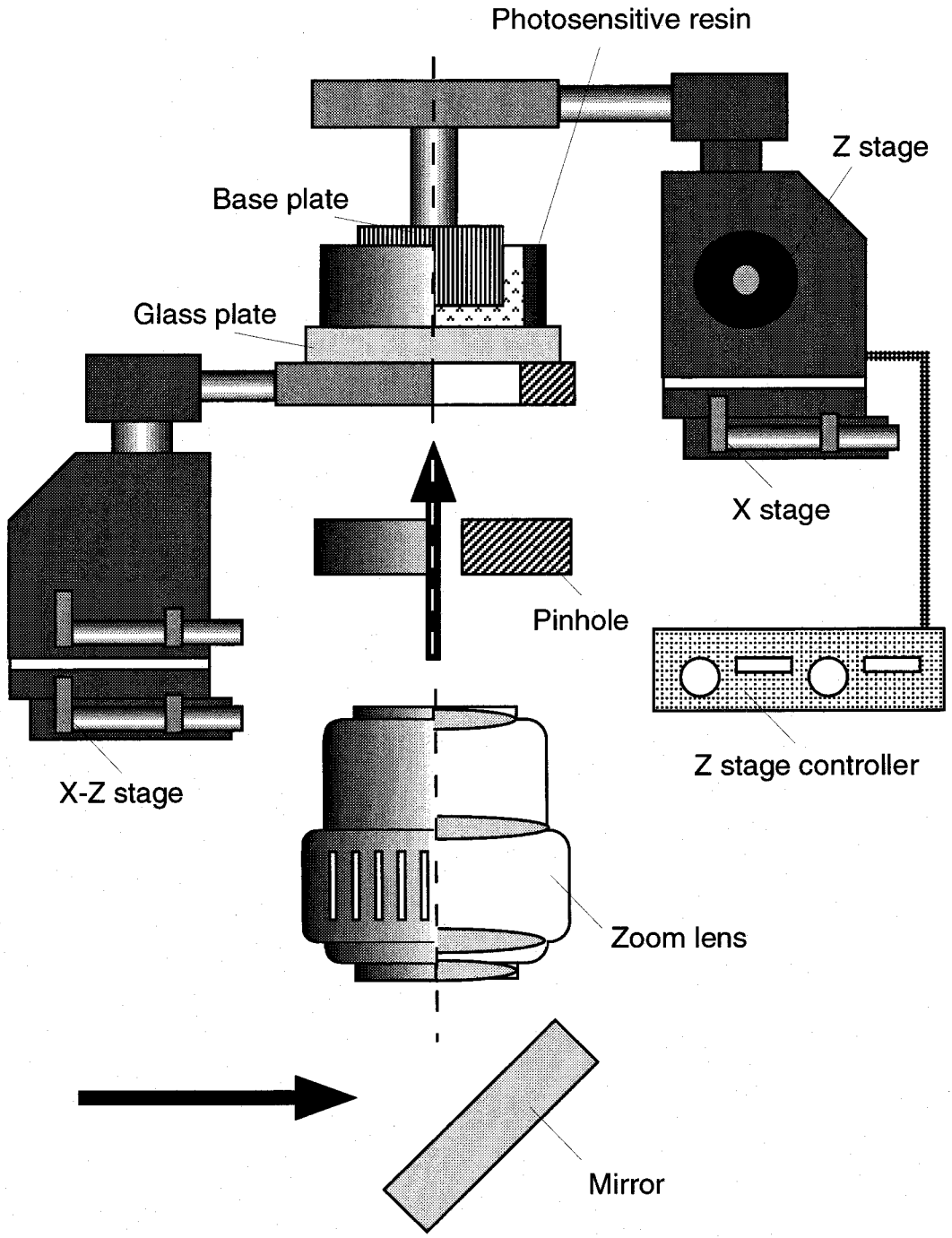

Photosensitive resin
Z stage
Base plate
Glass plate
X stage
Pinhole
Z stage controller
X-Z stage
Zoom lens
Mirror

図6.3 造形部の詳細

動制御を試みて積層造形を行い，構築した実験装置および樹脂の露光条件について検討を加える．

### ６．２．１　動画像露光造形実験（駆動制御なし）

液晶マスクに動画像を出力して動画像による露光が行えることを確認するために，動画像による非積層造形を試みた．ここでいう動画像による非積層造形は，濃淡画像による非積層造形と同様に樹脂に与える露光量を制御して樹脂の硬化深さを決定し，深さ方向に変化する３次元形状を積層せずに造形するものである．濃淡画像による非積層造形との違いは，静的な画像による露光ではなく，液晶マスクに連続的に切り替わる動画像を出力して樹脂を露光する点である．

(a)　動画像を用いた露光量制御実験方法

使用した実験装置は図６．２の装置からベースプレートと電動Zステージからなる駆動部を取り除いたものである．使用した光硬化性樹脂は，第４章の基礎実験で硬化特性を調べたKC1042である．試料の交換を容易にするために，X-Zステージに接続された樹脂層支持台の上にカバーガラスを配置し，カバーガラス上に樹脂層を形成し造形を行う．

動画像を用いて樹脂を露光すれば，３．４．１節で述べたように，連続的に切り替わるマスクパターンを露光して樹脂の露光量を制御し，樹脂の硬化深さ制御が行える．そこで，動画像露光によって深さ方向に変化するピラミッド形状の非積層造形を試みたので，その実験方法について以下に述べる．

① 図６．４(a)に示した１２枚のマスクパターンを準備する．
② 硬化させる樹脂として２枚のカバーガラスにはさまれた厚さ５［mm］の樹脂層を用意し結像面に配置する．
③ 液晶マスクを均一な強度分布の光で照明する．
④ 液晶マスク上に用意した１２枚のマスクパターンを１［s］あたり１２コマで連続出力する．
⑤ 一連の動画像を３回繰り返して合計３［s］間露光し樹脂を硬化させる．
⑥ ２枚のガラスプレートに挟まれた試料を取り出し，未硬化樹脂を洗浄に

よって取り除く．

⑦　造形した形状をSEM等で観察する．

上記の手順で造形を行えば，図６．４(b)に示すように各露光領域で露光回数すなわち露光時間に応じて樹脂に与えられる露光量が変化する．そして，与えられた露光量分布にしたがって，ランバートの法則から図６．４(c)に示すピラミッド形状が造形できると考えられる．

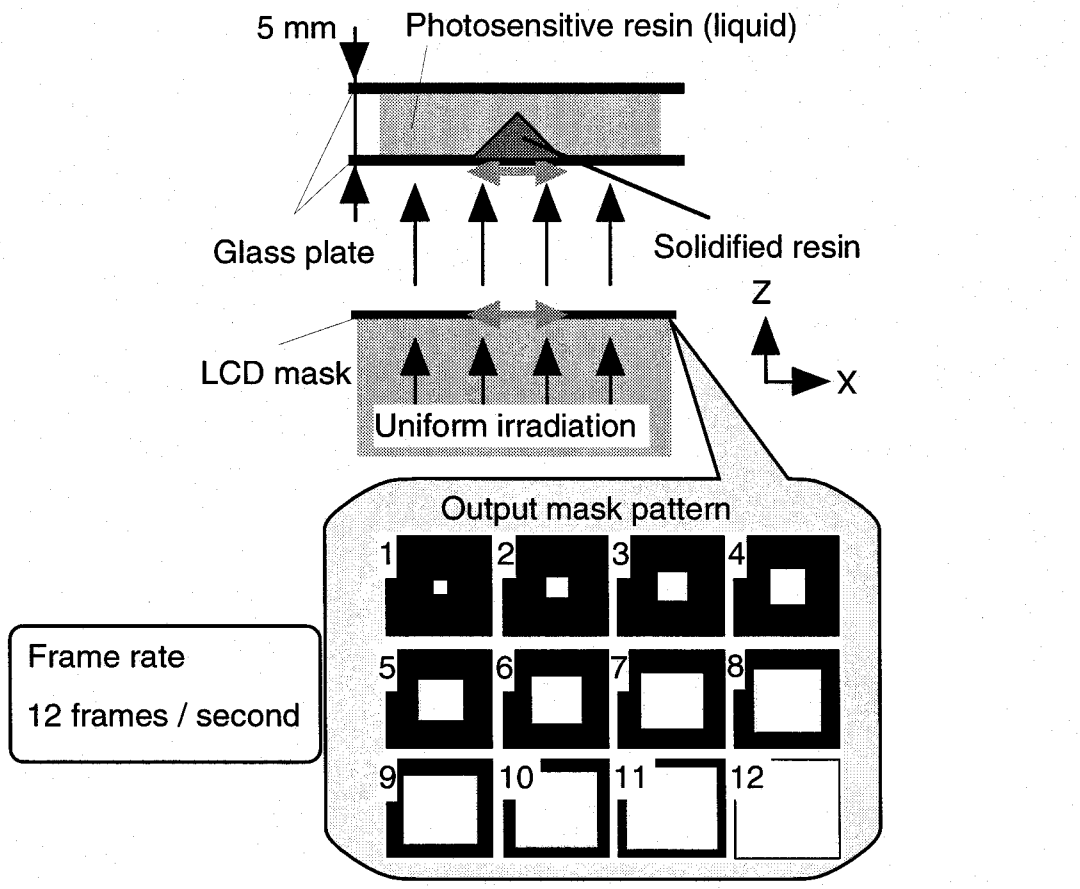
(b)　実験条件

本実験で用いた縮小光学系の縮小倍率は２７％である．レーザ出力強度は１１２［mW］，露光面における単位面積当たりの光強度は２．６２［mW/cm$^2$］である．露光面光強度は出力強度の１／１０００程度となるが，単位面積当たりの光強度では上記の値となり樹脂を硬化させるために十分な強度である．また，基礎的な造形形状としてピラミッド形状，およびかさ歯車形状を造形することとした．ピラミッド形状を表す動画像は１２枚のマスクパターンからなり，かさ歯車動画像は２３枚のマスクパターンによって形成されている．図６．４(a)，図６．５にそれぞれピラミッド形状およびかさ歯車形状造形のためのマスクパターンを示す．

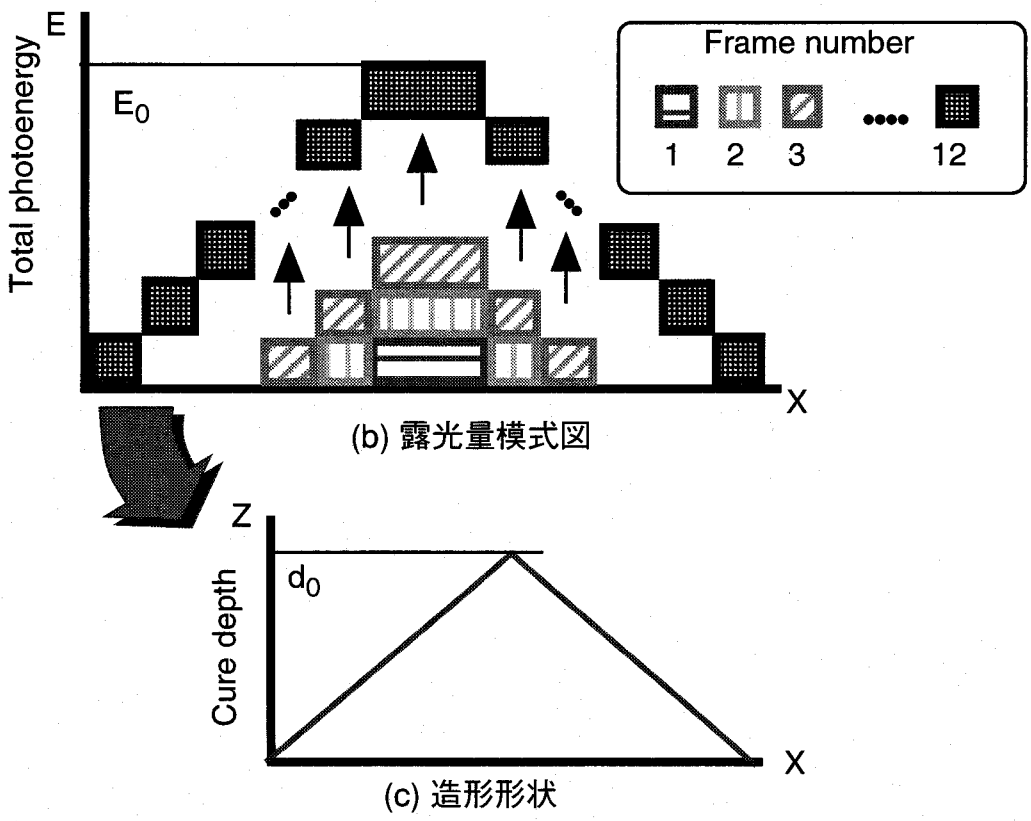
ピラミッド形状を造形する場合の露光時間は３［s］である．１コマあたり１／１２［s］の表示を行い，１２コマからなる計１［s］間の動画像を作成し，この動画像を液晶マスクに３回繰り返し表示して３［s］間樹脂を露光する．かさ歯車を造形する場合は２３コマからなる計５．０１［s］間の動画像を作成し，この動画像を３回繰り返して１５［s］間樹脂を露光している．動画像を３回露光して造形を行っているのは，単位時間あたりの表示コマ数を多くするためであり，この実験によって高速に切り替わる動画像露光の硬化特性を調べる．

(c)　実験結果

動画像露光によるピラミッド形状の非積層造形結果を図６．６(a)に示す．比較のために濃淡画像によるピラミッド形状の非積層造形結果を図６．６(b)に示す．これら２つの形状は共に３［s］間で造形されている．動画像の切り替え速度は上述したように１［s］あたり１２コマである．さらに，図６．６(c)に




(a) 造形部概略図




(b) 露光量模式図

(c) 造形形状

図6.4 動画像露光による露光量制御模式図

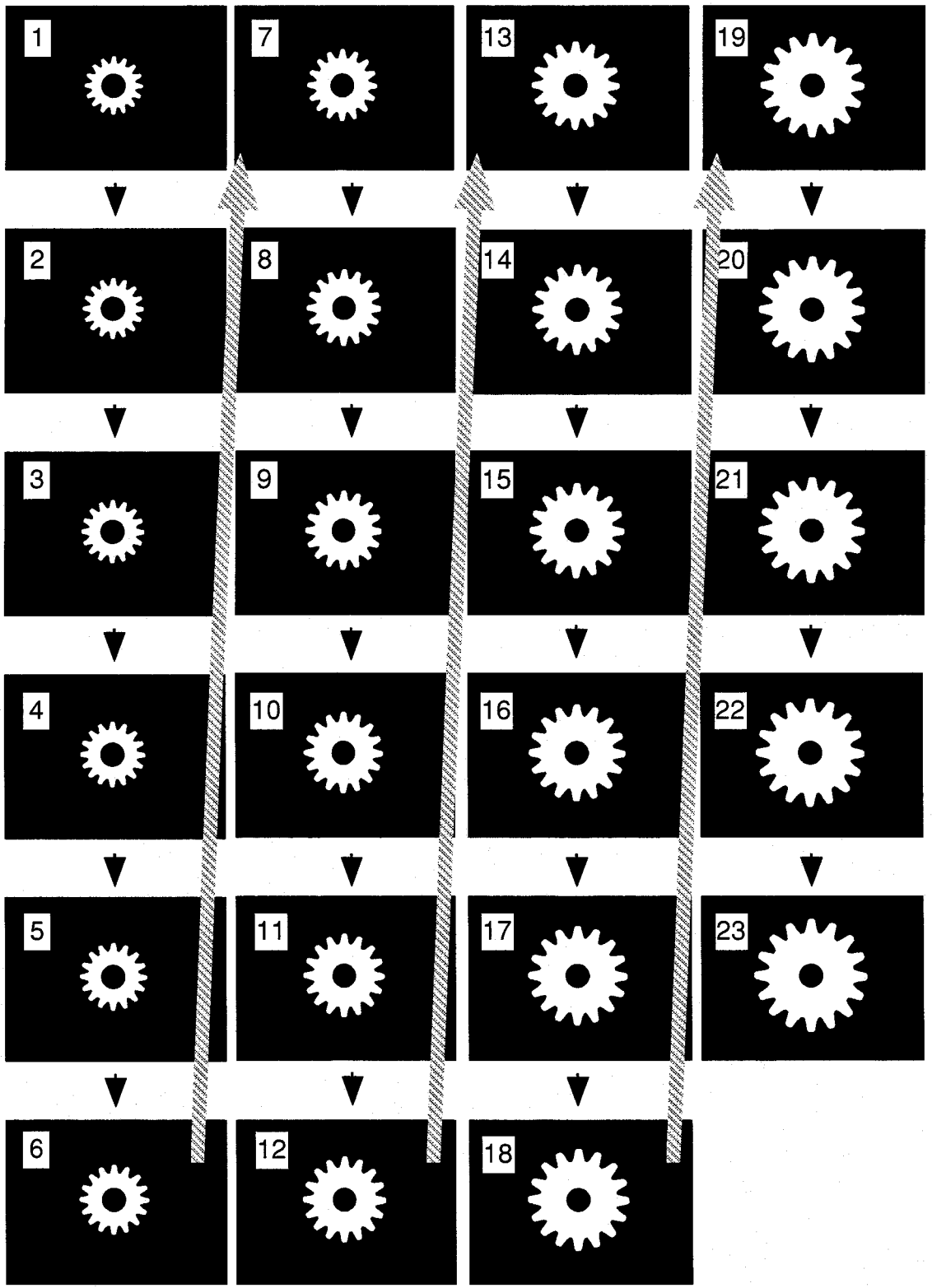



図6.5 かさ歯車造形用マスクパターン

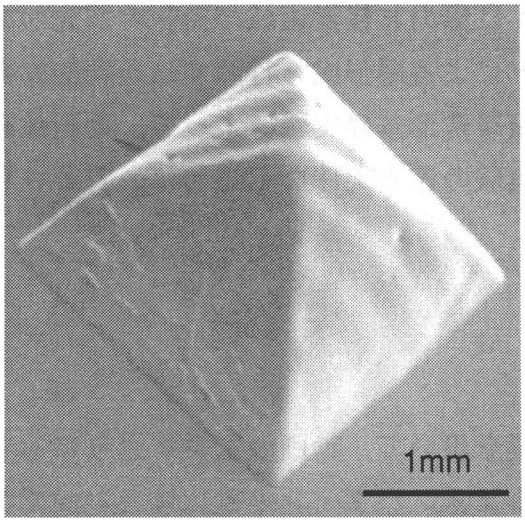
は１２枚の画像を５．８４［s］間で表示し，この表示を３回繰り返して計１７．５２［s］で造形を行ったピラミッド形状を示している．前者と比較すると形状表面に階段状の誤差がみられることが確認できる．また，動画像の切り替え速度をさらに遅くし，繰り返し回数を１回にして造形したピラミッド形状では，図６．５(c)に示すように階段状の誤差がさらに大きくなることも確認できた．

動画像による非積層造形を行う場合，動画の切り替え速度が低下すると階段状の誤差が顕著になる傾向が見られる．したがって，滑らかな表面を持つ形状を造形するには，画像を高速に切り替えればよい．図６．６(d)に高速に切り替わる動画像による露光を行って造形したかさ歯車のSEM観察像を示す．図６．６(d)の観察像から平均表示速度４．６［frame/s］となる動画像露光によって造形したかさ歯車形状において，滑らかな表面の造形が可能であることが確認できる．図６．６(a)～(d)の造形結果は全て金蒸着を行った後，SEM観察を行った結果であることをここに付記しておく．

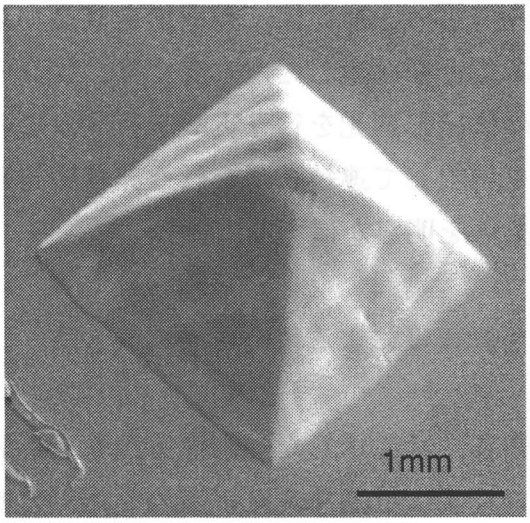
(d)　考察

図６．６(a)と図６．６(b)から濃淡画像および動画像を用いた露光によりほぼ同一のピラミッド形状が造形できることが確認できる．このことは，濃淡画像と同様に動画像によっても，所望の領域を露光して樹脂の露光量を制御する非積層造形が行えることを示している．また，１２［frame/s］で切り替わる動画像を用いてピラミッド形状が造形できることは，高速な動画像露光による３次元形状の造形が実現する可能性を示唆している．また図６．６(d)のかさ歯車形状が造形できることから，動画像露光を用いた非積層造形でも微細形状の造形が行えることを示した．

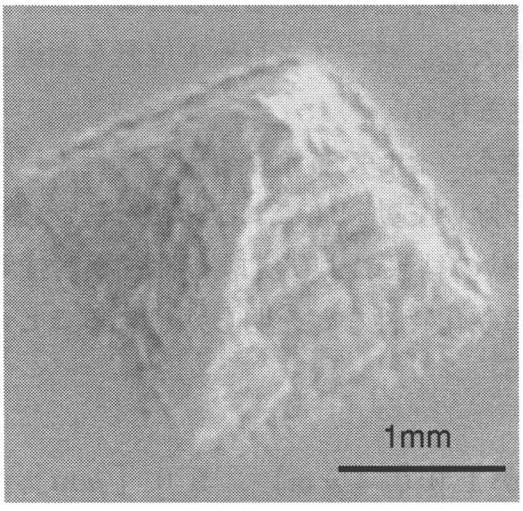
図６．６(a)と図６．６(c)の結果を比較すると動画像の切り替え速度が高速なほど表面精度が向上するという結果がみられる．動画像による露光では，マスクパターンの切り替えが高速であれば，樹脂が完全に硬化する前に次のパターンが露光され露光された樹脂が周辺に拡散されることが考えられる．露光された樹脂が拡散されることによって露光量が平均化され滑らかな表面が形成されていると考えられる．しかし，１２枚のマスクパターンによって造形されたピラミッド形状では，パターンの変化が急峻であり段差状誤差が生じやすい．したがって動画像によって露光量を制御し非積層造形を行う場合は，できる限り多くの断面のマスクパターンを準備し，高速に切り替わる動画像による露光を



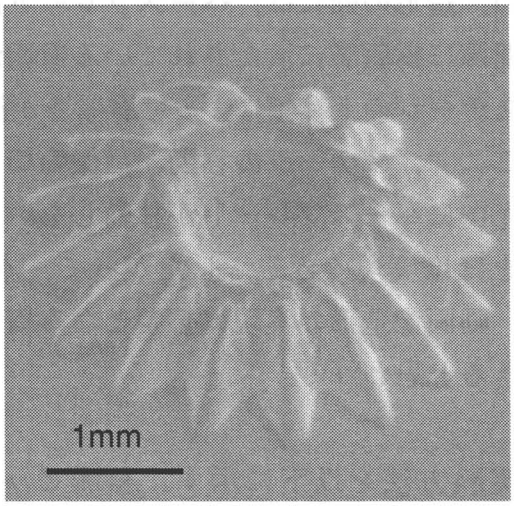

(a) ピラミッド形状（高速動画像）




(b) ピラミッド形状（濃淡画像）




(c) ピラミッド形状（低速動画像）




(d) かさ歯車（高速動画像）

図6.6 動画像露光による非積層造形結果

行うことが肝要となる．

### ６．２．２　積層造形基礎実験（駆動制御を行った場合）

６．２．１節では，動画像を液晶マスクに出力し任意領域で樹脂の露光ができることを確認した．本節では，ブレードによる層形成を行わずに連続的に樹脂の供給と露光を行う実験を行う．この積層造形基礎実験によって，動画像露光を利用して連続積層を行う非積層造形実験の露光条件など造形に必要とされる条件を明らかにする．

(a)　動画像による積層造形実験方法

図６．２に示した動画像露光光造形装置を用いて，動画像をコマ送りにして１コマずつ液晶マスクに出力し，出力するマスクパターンの変化に合わせてベースプレート位置を一段階ずつ引き上げて積層造形を行った．この実験では一般的な積層法と異なり，その造形過程にブレードを用いた層形成の過程を含まない．造形の際には，ベースプレート位置が引き上げられることによってできた間隙に樹脂層に満たされている樹脂が流入し，ベースプレート位置を制御するステージの上昇幅によって層厚さが決定される．

ここで，ステージの移動，画像の切り替え，そして露光を連続して行えば，露光中にベースプレートが移動しない点を除いて動画像による非積層造形の状態をほぼ実現できる．したがって，本実験の結果および実験条件を検討すれば，動画像造形の実現に必要となる樹脂の硬化特性などを明らかにすることができると思われる．

実験方法を以下に示す．積層ピッチが１００［$\mu$m］，５０［$\mu$m］，１０［$\mu$m］の場合について下記の手順でピラミッド形状の造形を行った．

① 設計形状を元に，動画像を構成する一連のマスクパターンを造形ピッチに合わせて必要な枚数だけ作成する．
② 硬化した樹脂が液面を規制するガラスプレートに癒着することを防ぐため，ガラスプレートの露光面にコーティング処理を施す．
③ 樹脂層に樹脂を供給する．
④ 液晶マスクに第１のマスクパターンを出力する．
⑤ ベースプレートを１ピッチ分引き上げる．

⑥ レーザを出力し樹脂を露光する.
⑦ レーザ出力を停止する.
⑧ 次のマスクパターンを液晶に出力する.
⑨ ⑤～⑧の手順を繰り返して３次元形状を造形する.

また造形が終了した後以下の手順により造形した試料を観察した.

⑩ 硬化した樹脂を取り出し，エアブラシによって大部分の未硬化樹脂を取り除く.
⑪ 濃度９９．９％のエタノールで硬化樹脂表面に付着した未硬化樹脂を洗浄して取り除く.
⑫ 造形した試料を顕微鏡，走査型電子顕微鏡(SEM)などで観察する.

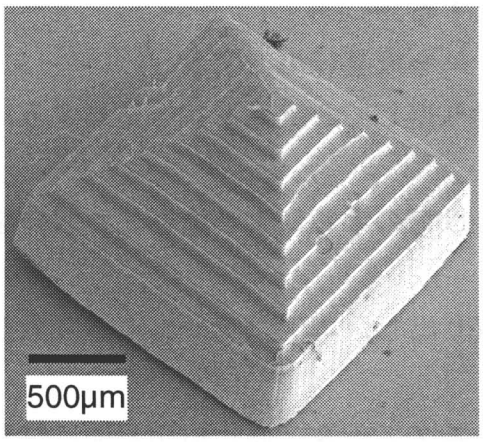
(b) 実験条件

レーザ出力強度を１２０～２００［mW］として，積層ピッチが１００［$\mu$m］，５０［$\mu$m］，１０［$\mu$m］となる場合についてピラミッド形状の造形を行った．各積層ピッチの造形を行ったときの露光面での光強度はそれぞれ３．４［mW/cm$^2$］，２．８８［mW/cm$^2$］，３．９［mW/cm$^2$］とした．一層あたりの露光時間は４［s］である．積層数は積層ピッチ１００［$\mu$m］のもので９層，５０［$\mu$m］のもので１８層で，それぞれ高さ９００［$\mu$m］の形状の造形を行っている．積層ピッチ１０［$\mu$m］の場合は，１００層からなる鋭利な先端をもつ高さ１［mm］のピラミッド形状を造形している.

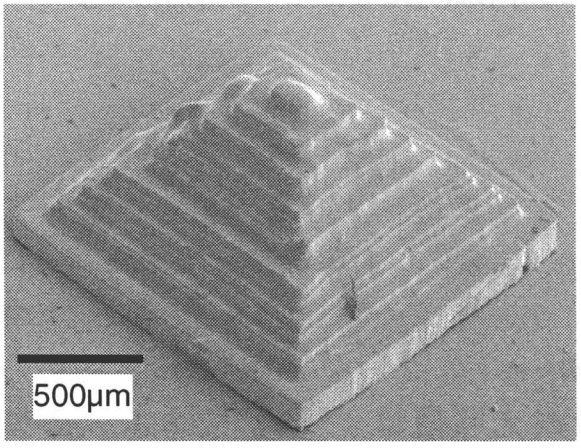
また，造形回数３０回を目安に露光面のガラスプレートにコーティング処理を行った．コーティング処理を繰り返して行わない場合は，ガラスプレートに硬化樹脂が癒着する現象が見られる.

(c) 実験結果と考察

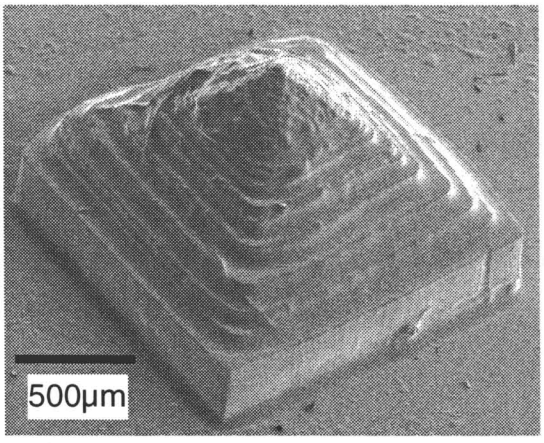
図６．７(a)，(b)，(c)にそれぞれ積層ピッチ１００［$\mu$m］，５０［$\mu$m］，１０［$\mu$m］で造形したピラミッド形状を示す．図６．７(a)は，ベースとして硬化させた樹脂の上に９回積層を行った結果である．ピラミッド底面から頂点までの高さが９００［$\mu$m］である．一辺の長さは約２［mm］である．下から一段目はベース部とつながっているためその厚さが他の層と異なっている.




(a) 積層ピッチ 100[μm]




(b) 積層ピッチ 50[μm]




(c) 積層ピッチ 10[μm]

図6.7　積層造形によるピラミッド形状造形例

この実験結果から，樹脂の供給，層形成，露光という一連の造形プロセスを連続して行って３次元形状を造形できることが確認できる．この結果は，動画像露光による非積層３次元造形の可能性を示唆している．

また，図６．７(b)は積層ピッチを図６．７(a)の１／２にしてピラミッド形状を造形した結果である．積層ピッチを５０［μm］にし，積層回数を１８回とすることで高さ９００［μm］のピラミッド形状を造形している．大きな９段の形状が確認でき，それぞれの段が２層で形成されている．各層毎に形成される正方形間隔が均等でないのは，マスクパターン上の正方形開口が等間隔でないためである．上記の結果から，層ピッチ５０［μm］の積層造形が可能であることが確認できる．

さらに，図６．７(c)は積層ピッチ１０［μm］で１００層を積層した結果である．ピラミッド頂点付近では滑らかな表面が造形されているが，ピラミッド下部には段差があり層飛び現象が発生していると思われる．層飛び現象は積層ピッチが小さくなったときに見られる現象で，本実験装置で露光面で硬化した樹脂がガラスプレートと癒着した場合に生じる．もし，樹脂とガラス面が癒着したままベースプレートに引き付けられれば，ベースプレートとガラスプレートの間に新たに樹脂が供給されず，その層の造形が行えないこととなる．これを層飛び現象と呼んでいる．この状態でベースプレート位置がさらに引き上げられると，ガラスプレートと樹脂は剥離し２層分以上の厚さの樹脂層が形成されることとなる．この層飛び現象は誤差の要因となるため，層飛び現象が生じる場合の露光量などの実験条件について検討を加える必要がある．

ピラミッド上部では層飛び現象が観測されないことから，硬化樹脂とガラスプレートの接触面積が層飛び現象の発生に関係していると思われる．接触面積が大きくなると，樹脂とガラスプレート間に働く力が大きくなり層飛び現象が発生すると思われる．したがって，層飛び現象を防ぐには造形形状を小さなものに限定する，ガラスプレートのコーティング処理を改良し樹脂とガラスプレートを剥離しやすくするといった対策を採ればよいと思われる．また，適切な露光量と動画の切り替え速度を設定すれば，露光面でガラスプレートに樹脂が固着する力を軽減して層飛び現象を防ぐことができると考えられる．

以上のことから層飛び現象により積層ピッチが減少しても形状精度がしない場合があることが明らかとなった．積層ピッチを小さくして，高精度に３次元形状の造形を行うには層飛び現象を防ぐことが重要である．

## 6．3　動画像による非積層造形実験（駆動制御を行った場合）

本節では，動画像を高速に切り替えながらベースプレート位置を連続的に変化させて動画像による非積層造形実験を行う．３．４．２節で述べたように造形時間は造形形状の断面サンプリング数ではなく造形形状の高さに比例するので，小さな積層ピッチで深さ方向分解能を向上させて造形が行える．

本節では，前節の実験で用いた実験装置を利用して動画像を用いた非積層造形実験を行ったのでその結果について述べる．

### 6．3．1　基礎的形状の造形

(a)　実験方法

ベースプレート位置を駆動制御しながら動画像露光を行って，単純なピラミッド形状を造形した．実験方法を以下に示す．

① 設計形状を元に，動画像マスクパターンを作成する．
② 造形前に液面を規制するガラスプレートに硬化樹脂の癒着を防ぐためのコーティング処理を施す．
③ 樹脂層に樹脂を供給する．
④ レーザを出力する．
⑤ 液晶マスクに動画像を出力する．
⑥ ベースプレートの移動を開始する．
⑦ ６．２．２節(a)の⑩～⑫の手順を行う．

PCを利用したGPIB制御により⑤，⑥の動画像出力とベースプレート移動のタイミングを調節し両者を同期させる．また，液晶マスクに動画像が表示されていない場合は，液晶マスクは黒色表示となり光を遮断している．つまり，液晶マスクに表示される動画像はシャッターの役目も果たしており，動画像が表示されている間だけ樹脂を露光することができる．

(b)　実験条件

実験条件を以下に示す．造形時のレーザ出力は４００［mW］，露光面での光強度は８．６２［mW/cm$^2$］である．また，ベースプレート位置を制御する

ステージの移動速度は１６［μm/s］とした．動画を造形するために用いたマスクパターンのサンプリング断面数は１００である．動画像の切り替え速度は１コマあたり０．６[s]であり，動画像の露光時間は１［min］である．また，積層造形の場合と同様に造形前にコーティング処理を行っている．

(c)　実験結果と考察

図６．８に造形したピラミッド形状を示す．造形したピラミッド形状では，積層造形を行った場合に比べて段差による誤差が軽減されていることが確認できる．

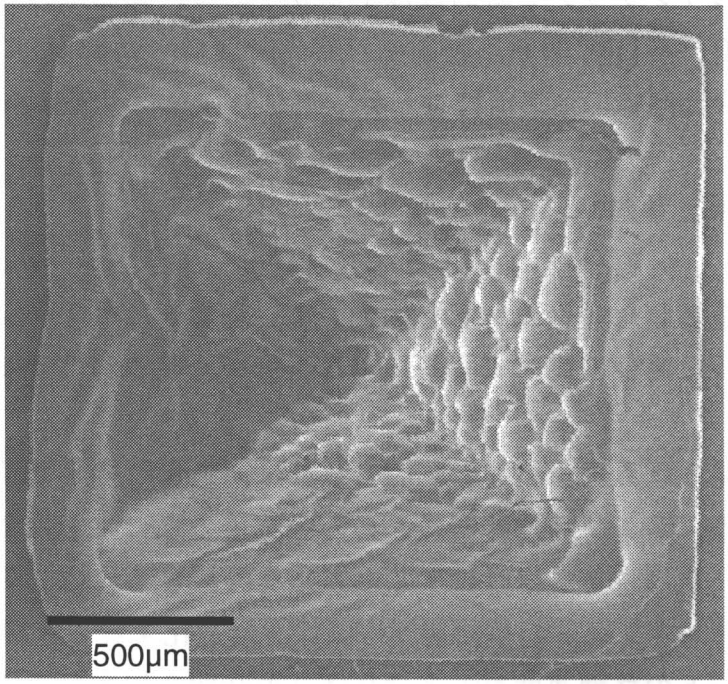
造形形状に見られる表面粗さの原因としては，造形時の形状誤差，樹脂の洗浄で生じる誤差，およびSEM観察のための金蒸着の際に生じた蒸着むらの３つが考えられる．造形時と洗浄時に生じる誤差を軽減するには，単位時間あたりの露光量とベースプレートの移動速度の関係を最適化することが重要である．

ベースプレートの移動速度が大きければ造形時間を短縮できるが，移動速度が大きすぎれば，樹脂が硬化してベースプレートに固着する前に新たな樹脂が供給されることとなる．この場合，造形物は露光面ガラスプレート上で硬化することから，連続的に樹脂を供給して３次元形状を行えない．また，移動速度が小さすぎれば，樹脂が長時間露光され露光量が超過する．この場合はガラスプレートと硬化した樹脂が癒着し，層飛び現象が発生することから造形精度が低下する．

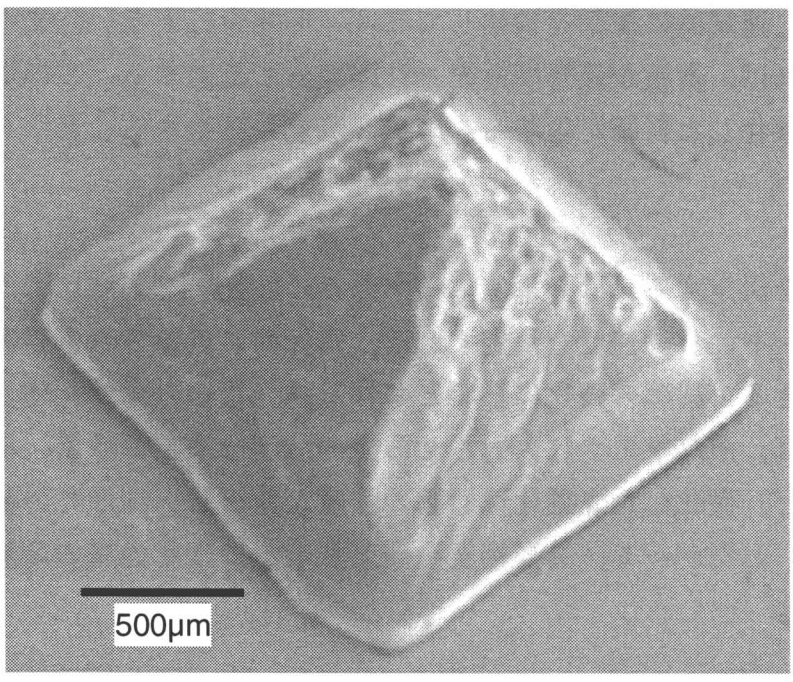
露光条件を決定するには，単位体積あたりの露光量を基準に考えればよい．ベースプレートの移動速度を決定すれば，露光面に供給される樹脂の量を求めることができる．樹脂の硬化に必要とされる露光量から単位体積当たりの露光量を求めれば，液晶マスクに入射させる光の強度を決定できる．樹脂の露光量が不足すると，硬化した光硬化性樹脂の強度が低下し，洗浄時の破損，欠損の原因となる．したがって，造形精度を向上させるには露光量の最適化が不可欠である．

### ６．３．２　オーバハング形状の造形

ここで，オーバハング形状の造形を試みて，動画像露光によって複雑な構造を持つ形状の造形を行う場合の課題について検討する．




(a) 正面図




(b) 全体像

図6.8 動画像非積層造形結果

(a)　実験方法

実験方法は６．３．１節の(a)と同様である．ただし出力する動画像がオーバハング形状に対応したものとなっている．

(b)　実験条件

造形時のレーザ出力は１４０～４００［mW］である．また，露光面での光強度を２．１０～８．６２［mW/cm$^2$］として造形実験を行っている．ベースプレート位置を制御するステージの移動速度は１６［$\mu$m/s］である．造形するオーバハング形状を図６．９(a)に示す．設計した形状のサンプリング断面数は２００である．Aのピラミッド部分のサンプリング断面数が７０，Bのウェスト部分のサンプリング断面数が６０，Cのオーバハング部分のサンプリング断面数は７０である．画像の切り替え速度は通常一枚あたり０．６[s]であり，オーバハング形状の造形に要する時間は２［min］である．

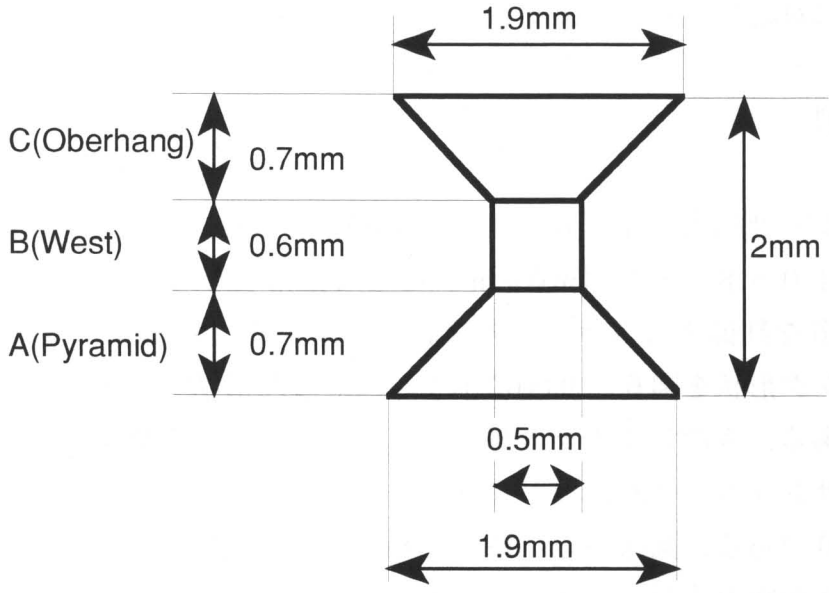
(c)　実験結果

露光面光強度が８．６２［mW/cm$^2$］の場合は，造形した形状は直方体になりウェスト部分の造形を確認できなかった．その原因として，図６．９(a)に示したBのウェスト部分が，過度の露光によって余剰硬化した樹脂によって埋まったことが考えられる．そこで，露光量を減らしてオーバハング形状の造形を行った結果を図６．９(b)および(c)に示す．

図６．９(b)は，レーザ出力を２１５［mW］，露光面光強度を３．９３［mW/cm$^2$］とした時の造形結果であり，図６．９(c)はレーザ出力を１３９［mW］，露光面での光強度を２．２８［mW/cm$^2$］とした時の造形結果である．

Cのオーバハング部を造形する際，露光量を減少させて余剰硬化を防ぐためにサンプリングした断面のマスクパターンと光を遮断する黒色マスクパターンを交互に出力している．黒色マスクパターンの出力時間は０．５７［s］，断面マスクパターンの出力時間は０．０３［s］とし，計０．６［s］で１つのサンプリング断面の表示を行っている．

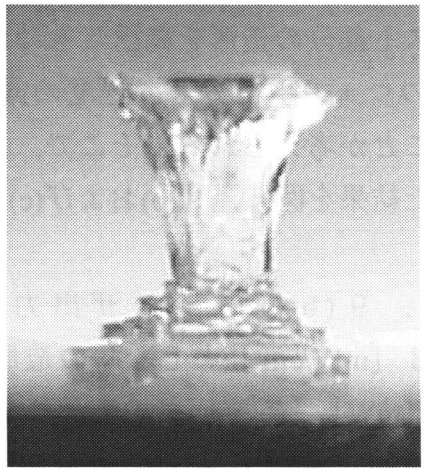
オーバハング部を造形する際の露光量を減少させることによって，図６．９(c)に示したウェスト部を持つ形状が造形できるようになった．この実




(a) 設計形状



(b)



(c)

図6.9 オーバハング形状の造形例

験結果は，露光条件が最適化されればウェスト部を持つ形状を造形できることを示唆している．

(d)　オーバハング形状造形時の樹脂硬化現象と層飛び現象

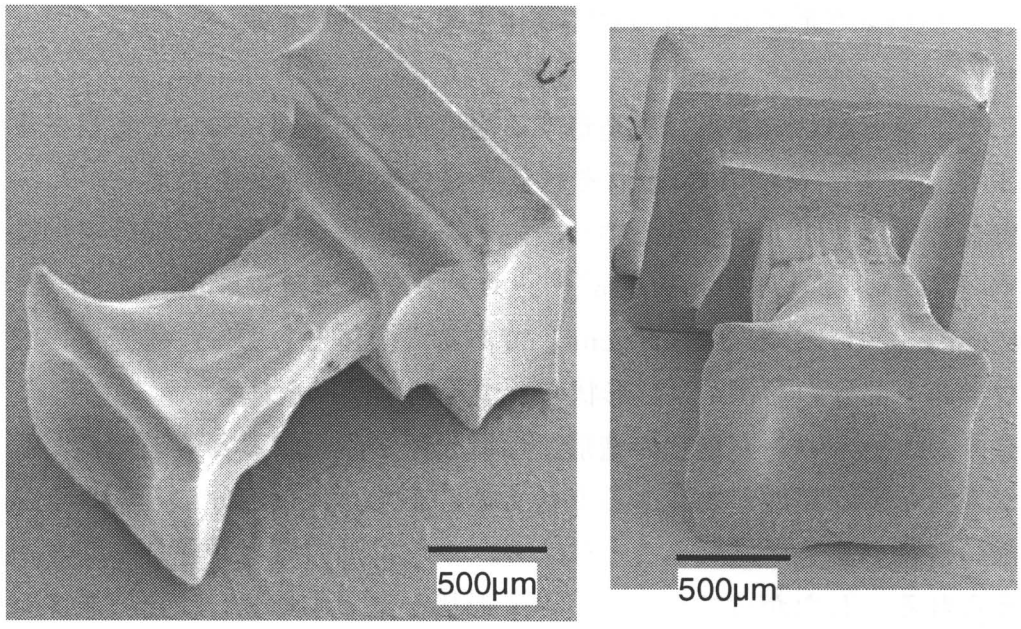
ここで，オーバハング形状を造形する場合の露光条件について考察する．図６．１０(a)，(b)，(c)，(d)にそれぞれ露光量を変えて造形したオーバハング形状のSEM観察像を示す．これらのオーバハング形状を造形する際の樹脂露光量はそれぞれ０．１１４［mW/cm$^2$］，０．０７９［mW/cm$^2$］，０．０７４［mW/cm$^2$］，０．２６２［mW/cm$^2$］である．全体としては，露光量の減少と共にウェスト部分の形状が設計形状に近づく傾向がみられる．

つまり，オーバハング形状の造形では露光量が超過すると透過光による余剰硬化が進行し形状精度が悪化すると言える．また，天頂部分にみられる窪みは中央部に樹脂の流入が遅れることにより，中央付近の硬化が遅れることが原因と考えられる．したがってオーバハング形状を造形する場合はベースプレートを低速で移動して，低い粘性の樹脂を用いて造形を行う必要がある．

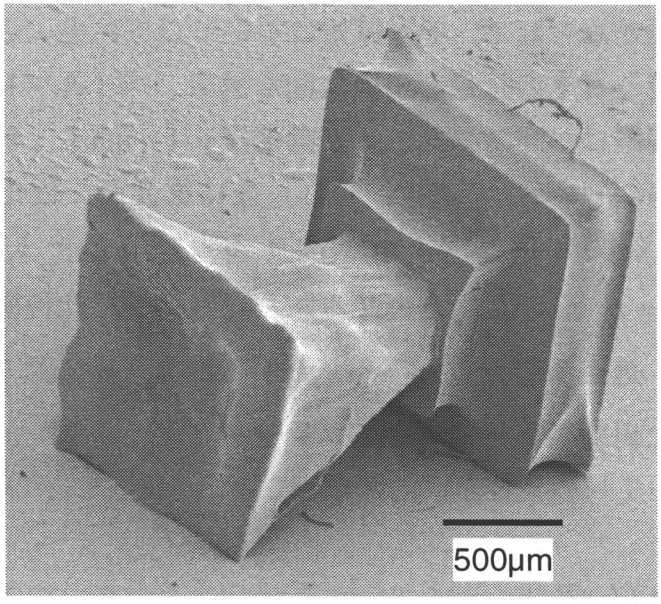
これらの造形結果では，図６．９(a)に示したAのピラミッド部分の造形において段差状の誤差がみられる．その原因について以下に述べる．図６．１１(a)に動画像造形を行うときの造形部の模式図を示す．ベースプレートと露光面ガラスプレートの間隔はベースプレート移動速度$v$［$\mu$m/s］と経過時間$t$［s］の積$v\cdot t$［$\mu$m］で表される．ここで，$t$［s］後に露光面で硬化する樹脂の高さ$C_d$は，露光面光強度を$I$［mW/cm$^2$］とすると式（３－１３）の露光量を$E=I\cdot t$として$C_d=D_p\ln(I\cdot t/E_c)$と表せる．ただし，光硬化性樹脂の臨界硬化量を$E_c$［mJ/cm$^2$］，透過深度を$D_p$［$\mu$m］とする．もし露光面での光強度が不足すれば，硬化した樹脂の高さはガラスプレートとベースプレートの間隔よりも低くなり式（６－１）の条件を満たさないこととなる．

$$v\cdot t \le D_p \ln\left(I\cdot t/E_c\right) \qquad (6-1)$$

この場合，露光面ガラスプレート上で硬化した樹脂はベースプレートに固着しないために，ベースプレートが移動しても露光面には新たな樹脂が供給されない．したがって，３次元形状断面の露光と露光面への樹脂の供給を連続的に行う動画像による非積層造形は実現しない．したがって，式（６－１）は動画

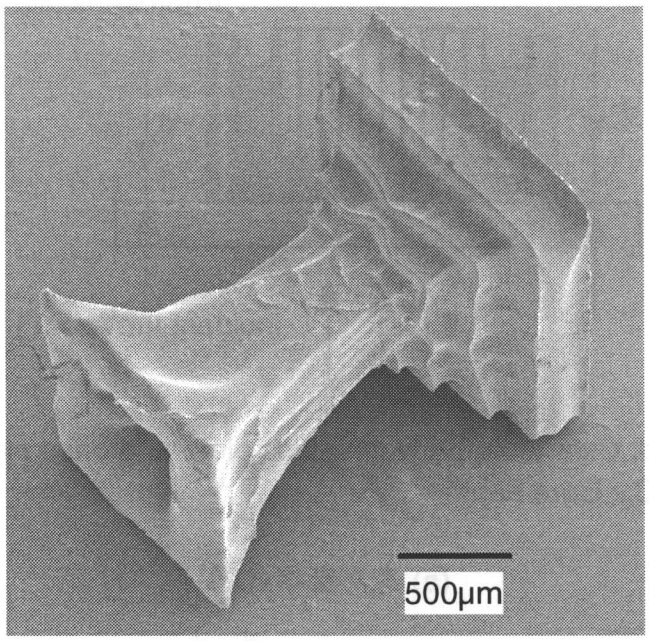



(a)

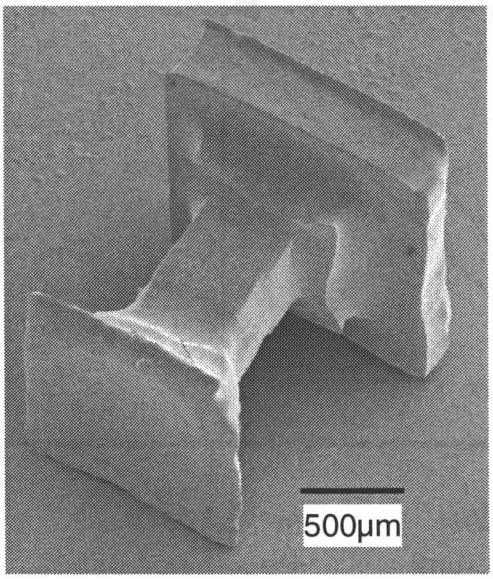



(b)

図6.10 オーバハング形状のSEM観察像（その１）

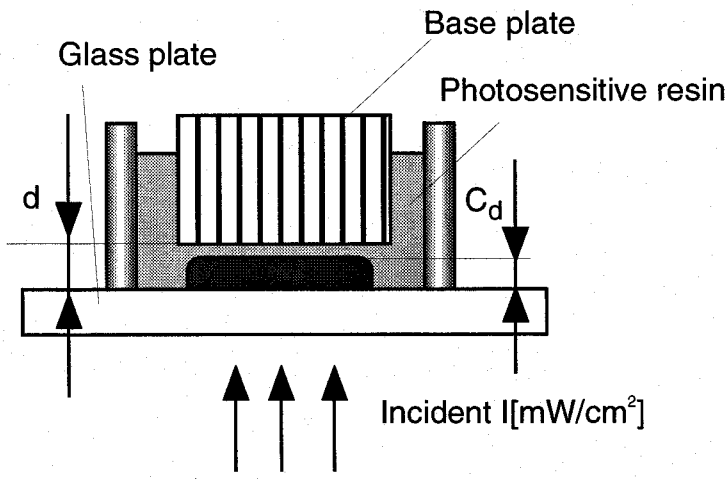



(c)



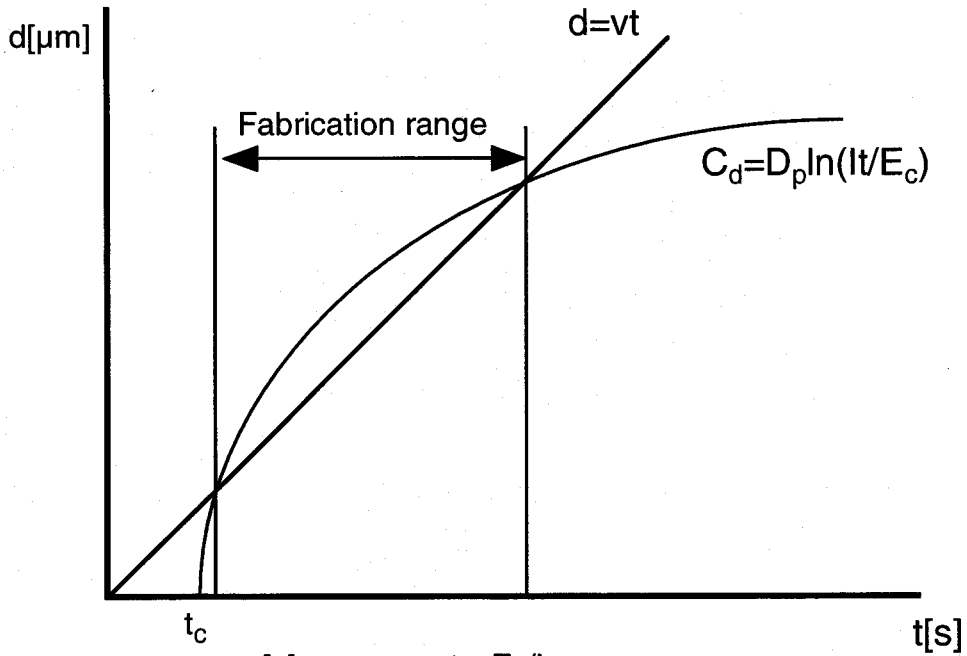

(d)

図6.10 オーバハング形状のSEM観察像（その２）




d; Clearance between glass plate and base plate
$C_d$; Cure depth

(a) 造形部模式図




| | |
|---|---|
| $t_c$[s] | ; $t_c=E_c/I$ |
| $D_p$[μm] | ; Penetration depth |
| $E_c$[mJ/cm$^2$] | ; Critical exposure |
| I[mW/cm$^2$] | ; Light intensity |
| $C_d$[μm] | ; Cure depth |
| v[m/s] | ; Base plate movement speed |

(b) 露光量とベースプレートとガラスプレートの間隔

図6.11 ステージ速度と層厚さの関係

像による非積層造形プロセスが成立するための必要条件となる．また，サンプリングした断面を全て造形するためには，動画像の１コマあたりの表示時間つまり一コマあたりの露光時間を$\Delta t$［s］とすれば

$$v \cdot \Delta t \leq D_p \ln \left( I \cdot \Delta t / E_c \right) \qquad (6．2)$$

を満たすように露光面光強度$I$［mW/cm$^2$］およびベースプレート移動速度$v$［$\mu$m/s］を定める必要がある．このとき，造形の高さ方向の分解能は$v \cdot \Delta t$［$\mu$m］となる．したがって（６．２）が動画像造形における最適な露光条件を導出する条件式となる．

例えばオーバハング形状の造形では，露光量が超過すると余剰硬化によりウェスト部の造形が行えないため，図６．８に示したピラミッド形状を造形する場合と比較すると露光量を１／４程度としている．この時，式（６．２）の条件が満たされないことが考えられる．しかし，複数断面の露光が行われたときに式（６．１）の条件が満たされれば，露光面に樹脂が供給され新たな断面が造形されることとなる．

この場合，露光面に樹脂が供給されるのは数層毎となることから，３次元形状の造形も断続的になり，サンプリングした断面の一部が造形されないことになる．つまり樹脂の硬化，固着，硬化樹脂のガラスプレートからの剥離，新たな樹脂の供給というプロセスが断続的になり階段状の誤差が生じると考えられる．

つまり，オーバハング形状造形時に見られる階段状の誤差は露光量不足が原因であり，６．３．１節においてピラミッド形状を造形した時のように露光量が超過しガラスプレートと硬化樹脂が癒着することから生じる層飛び現象とは別個のものである．

また，オーバハング部分の造形では造形プロセスが断続的になっても，露光された光エネルギは樹脂に蓄積され，蓄積された光エネルギによって樹脂が余剰硬化する．この場合，樹脂の硬化深さは露光量によってきまることから，６．２．１に示した動画像による非積層造形と同様の造形プロセスで段差のない形状の造形が行われていると考えられる．

## ６．４　考察

液晶マスクに出力された静止画像は，厳密に考えれば同一のマスクパターン

を繰り返し同じ位置に高速に再描画したものである．つまり静止画像と動画像の違いは出力されるマスクパターンの時間的な変化の有無のみである．つまり，液晶マスクに出力される動画像と静止画像は共通する性質を持ち，基本的な硬化特性などは静止画像の場合と同様と考えることができる．したがって，液晶マスクによる面露光では常に動画像による造形が行われていると考えることができる．

この動画像露光を利用すれば，露光量を制御して非積層造形を行える．また，造形時間を増加させずに積層ピッチを小さくして階段状の誤差を軽減したり，オーバハング形状の造形を行うことができる．基礎実験の結果から，動画像露光プロセスにより基礎的な形状が造形できることを確認したが，複雑な形状の造形を行うにはさらなる精度の向上が必要となる．そこで以下に動画像を用いた造形の精度を決定する要因について考察する．

### ６．４．１　動画像造形の精度

．ガラス面から硬化樹脂が剥離する際の形状の破壊

露光面に樹脂を連続供給しながら動画像露光を行って３次元形状を造形する場合，造形精度に大きな影響を与える要因として考えられるのは，露光面ガラスプレートと硬化した樹脂の間に働く力である．本実験では規制液面法による造形を行うため，硬化した樹脂がガラスプレートから剥離する際に大きな力が加わり形状が破壊される．規制液面法による光造形でもこの問題は報告されており，ガラスプレートをコーティング処理してガラス面と樹脂硬化面の間に加わる力を軽減するなどの対策が採られている．

本研究でも露光面のコーティング処理を行っているが，動画像による造形では，樹脂の硬化，ガラス面からの剥離というプロセスが連続して繰り返されることからコーティングの効果が劣化しやすい．そのため，より高精度な造形を行うには，コーティング効果が強くしかもその効果が長時間持続するもの，例えばフッ素系のコーティング剤を使用する必要がある．フッ素系のコーティング剤はガラス面との親和性が高く，波長４８８［nm］の光に対する吸収率や使用樹脂との反応性に問題がなければ露光面ガラスプレートのコーティングに適していると考えられる．

また，硬化する樹脂の強度を向上させれば剥離の際の破壊を抑えることができる．硬化樹脂強度向上のためには，光吸収率のよい樹脂を使用する，樹脂を着色し光を吸収しやすくして樹脂の反応率を上げる等の対策が考えられる．

・露光量の超過，あるいは不足

層飛びや横方向への余剰硬化等の誤差を生む現象の多くは露光量の超過を原因とする．例えばピラミッド形状を積層ピッチ１０［$\mu$m］で造形した場合は，露光量が超過したことから硬化した樹脂が速やかにガラスプレートから剥離しなくなり，露光面に新たに樹脂が流入しないことから層飛び現象を起こした．また，露光量が不足すれば樹脂の反応率が低下し，破壊や欠損が生じやすくなる．したがって，式（６．２）によって求められる露光量を大きく上回らない範囲で露光量を定める必要がある．オーバハング形状を造形する場合は，透過光による余剰硬化が発生しやすいことから露光量の最適化はさらに重要となる．

・散乱光による露光範囲の拡大

露光面に樹脂を連続供給しながら動画像露光を行って３次元形状を造形する場合，基礎実験で得られた樹脂の臨界露光量よりも少ない露光量で樹脂が硬化する傾向がみられた．その原因の一つとしてベースプレート面で反射する光の影響が挙げられる．

露光面光強度と露光時間から露光量を算出して造形実験の露光条件を決定するため，ベースプレートで反射し樹脂内部に散乱する光によって樹脂全体に光エネルギが供給されると，通常より少ない露光量で樹脂が硬化してしまう．樹脂内部に散乱する光の影響により，露光領域以外にも樹脂の硬化が拡散し形状誤差の原因となる．この問題の解決には，透過深度の低い樹脂を用いて樹脂内部に光が透過することを防ぐことが効果的であると考えられる．

・樹脂流動の影響

樹脂流動の影響も造形誤差の原因として挙げられる．特に露光面に樹脂を連続供給する造形では，ベースプレートの移動に伴い露光中に樹脂が流動するためその影響は大きくなる．未硬化の樹脂が流動すると硬化領域の拡散や変形などの原因となる．露光された樹脂が硬化するまでに流動することを防ぐには強い光で樹脂を瞬時に硬化させる必要がある．また，ベースプレートの移動速度を可能な限り低くして，樹脂流動の速度を低下させることも有効である．

・透過光による樹脂の余剰硬化

オーバハング形状の造形では，透過光による樹脂の余剰硬化のためにオーバハング部分の下側で形状精度が低下する．これは，光源に透過性の高い波長４８８［nm］の$Ar^+$レーザを使用しているためである．そこで，オーバハング

形状の造形精度を向上させるには露光量の超過を防ぎ，着色した樹脂の使用によって光の透過を極力おさえて樹脂の余分な硬化を防ぐ必要がある．

以下に，樹脂の露光量制御に有効な露光方法を提案する．４．４節では，横分解能を向上させるために白色露光と２値画像露光を組み合わせてマスクに出力することで，白色露光によりあらかじめ樹脂の臨界露光量に近い光エネルギを樹脂に与え，その後すぐに２値画像を露光することで瞬間的に所望の領域だけを硬化させることに成功している．これは，造形精度向上のために最適な露光量を樹脂に与える場合に，有効な露光方法であると考えられる．

この方法を応用し，２値画像と白色画像を組み合わせた動画像を出力することによって，あらかじめ露光面に光エネルギを均等に与え，サンプリング断面を表す２値画像パターンの出力後すぐに樹脂を硬化させるようにする．その結果見かけ上は図６．１１の$E_c$すなわち$t_c$の値が小さくなり，高さ方向分解能$v\cdot\Delta t$を向上させることができる．この時，樹脂を着色し透過深度を極力抑えることでオーバハング形状の造形での高さ方向分解能を向上させれば，すべての形状に対応した高精度な造形が可能となると考えられる．この時オーバハング部分の造形に濃淡画像を利用した露光を行えば，段差状の誤差を軽減しさらなる精度向上を図ることができると思われる．

## ６．５　結言

本章では，試作した動画像による非積層造形装置を用いて，動画像露光を行う造形プロセスの実現性について検討した．まず，動画像露光による露光量制御を行って非積層造形を試み，動画像露光の実現性を検討した．さらにベースプレート位置を駆動制御して樹脂を連続的に露光面に供給しながら，動画像を用いて３次元形状の断面を連続的に露光して，基礎的な形状およびオーバハング形状の造形実験を行った．以下に本章で明らかにした事項について述べる．

（１）試作した実験装置を用いて動画像による露光を行い，樹脂に与える露光量を制御して基礎的なピラミッド形状や微細なかさ歯車形状を積層せずに造形できることを確認した．これにより，動画像露光により所望の露光量を樹脂に与えられることを確認し，連続的に変化する動画像を露光しながらベースプレート位置を駆動制御することで，オーバハング形状の造形が行える可能性を示唆した．

（２）動画像を露光しながら樹脂を露光面に連続供給し，断面形状を連続して

造形するプロセスの実現性を検討するため，基礎的なピラミッド形状を造形した．

（3）動画像を露光しながら樹脂を露光面に連続供給する造形プロセスにおいて，造形精度の決定要因を考察し，同プロセスにおける最適な露光条件を定式化した．

（4）動画像を露光しながら樹脂を露光面に連続供給する造形プロセスによって，ウェスト部を持つ基礎的なオーバハング形状を造形できることを確認した．

本章で行った基礎実験により動画像による非積層造形実現には，流動する樹脂に対し最適な露光量を与え速やかに樹脂を硬化させる必要があることが判明した．動画像による非積層造形における最適な露光条件は，式（6．2）によって表されることから，動画像の1コマあたりの表示速度，およびベースプレート位置制御ステージの移動速度が決定されれば，露光条件が求められる．

オーバハング形状の造形には改善すべき点が多いが，露光量を最適化して，着色した樹脂を露光することで，樹脂の余剰硬化を軽減すれば，複雑なオーバハング形状が造形できると考えられる．

また，第5章で述べた，濃淡画像を露光して任意の露光量分布を樹脂に与える手法を応用すれば，濃淡画像を連続的に出力する動画像露光によって，樹脂に与える露光量分布を自由に制御できる．例えば，露光された樹脂の硬化状態の変化に応じてその都度露光量を変化させることも可能である．

濃淡画像を連続的に出力する動画像露光は，動的な露光量制御によって3次元形状を造形する手法である．従来の面露光法や走査露光法では，樹脂露光面全体に任意の露光量分布を動的に与えて造形を行うことはできないことから，従来にない高精度な造形が実現できる可能性がある．

濃淡画像を連続的に出力する動画像露光プロセスの実現と本章で述べた課題の克服が本研究の今後の課題となる．

# 第７章

# 時間差領域差分法(FDTD)による樹脂内部の電磁場解析

光造形法の造形精度向上のためには，樹脂内部を透過する光の挙動を求め，光硬化性樹脂の硬化現象を解析する必要がある．しかし，樹脂内部を透過する光はエネルギ吸収や屈折率変化の影響を受けるため，樹脂内部の微小領域における光の挙動を正確に知ることは困難である．上記の課題を克服するため，電磁場の高精度な解析手法としてよく知られている時間差領域差分法（finite-difference-time-domain method 以後FDTD法）［７－１］を用いて樹脂内部の電磁場を計算し，光硬化性樹脂の硬化現象解析を行う．本研究では，Alfred Wongらによって開発されたTEMPEST［７－２］とよばれる３次元FDTD法のプログラムを元に，光硬化性樹脂内部の電磁場および樹脂硬化量を可視化するシミュレータを構築し，樹脂内部の硬化現象を解析する．本シミュレーションの目的は，樹脂内部の硬化現象を解析し光造形法の造形精度向上に必要となる露光条件などを明らかにすることである．

## ７．１　FDTD法の原理

これまで，光波の電磁場解析の分野では主に光波の時間領域の挙動を無視して解析する手法が用いられてきた．すなわち，光の波動の表記から時間に依存する項を省いたものであり，これが許されるのは電磁波が正弦的な振動をしている場合のみである．

これに対して，電磁場の逐次的な時間変化をシミュレートする数値解析法としてFDTD法がある．１９６６年にK.S.Yeeによってその基本概念が提案されており，分散性，非線形性を含む様々な媒質や，一般的な形状の対象物体に適用可能である．FDTD法では時間領域の計算を行い，任意の場所での電磁場の時間変化を把握できることから，非定常状態や過渡現象の解析に特に威力を発揮する．そのためFDTD法は，電磁場解析やアンテナ解析などの分野［７－３］で活用されているが，光学の分野では対象となる構造の大きさや対象物の間隔が使用する電磁波の波長と比較して大きいため，計算時間と記憶容量の負担が

大きくなりその普及が妨げられていた．しかし，近年の計算機技術の進歩により，光学の分野でもFDTD法による電磁場解析が行われるようになってきている［7－2］．

従来の光硬化シミュレーションの研究にはベクトルモデルによる計算方法［7－4］などがあるが，電磁場の時間変化を把握できることが動画像や濃淡画像の造形において重要となることから，本研究ではFDTD法による光硬化シミュレータを構築し樹脂の硬化現象を解析することとした．光硬化性樹脂に光が照射されると，入射した光は樹脂に吸収され，また光を吸収して硬化が進行した樹脂の屈折率は変化する．つまり，その硬化状態によって樹脂内部のパラメータが逐次変化していく．FDTD法は，この時間と共に変化する樹脂の硬化状態と屈折率に応じて任意地点の電磁場変化を解析できることから，光硬化性樹脂の硬化現象解析に適している．

### 7．1．1　マクスウェル方程式の空間領域での差分化［7－1］

マクスウェル方程式を2次元領域で差分化する過程を以下に示す．自由空間におけるTEz偏波の波に対するマクスウェル方程式を考える．この場合，マクスウェルの回転方程式を方向成分表示し，$E_z$は0であることを仮定すると，次の3つの方程式が得られる．

$$\varepsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial y} \qquad \square \qquad (7-1)$$

$$\varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial x} \qquad \bigcirc \qquad (7-2)$$

$$\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \qquad \times \qquad (7-3)$$

この場合，$\Delta x \Delta y$のセル構成を示す図7．1，および図7．2を参考にするとそれぞれの方程式は2点間の中央差分によって表すことができる．すなわち，式（7－1）で表される$\partial E_x/\partial t$（□値）は$\partial H_z/\partial t$（×値）の中央差分によって示され，式（7－2）で表される$\partial E_y/\partial t$（○値）は同様に$\partial H_z/\partial t$（×値）で，さらに$\partial H_z/\partial t$（×値）は$\partial E_y/\partial t$（○値）と$\partial E_x/\partial t$（□値）のそれぞれの中央差分で示されることがわかる．

このような考えから次のような1つのセルを考えてみる．ここで，各ポイン

トの座標は一般性を持たせるために次式のように定義する．

$$E_x\left(i+\frac{1}{2},j\right)=E_x \qquad \left[x=\left(i+\frac{1}{2}\right)\Delta x, y=j\Delta y\right] \tag{7－4}$$

このように表すと前述した式（7－1）～（7－3）で表される方程式の差分化は次のように表すことができる．

$$\varepsilon_0\frac{\partial E_x\left(i+1/2,j\right)}{\partial t}=\frac{H_z\left(i+1/2,j+1/2\right)-H_z\left(i+1/2,j-1/2\right)}{\Delta y} \tag{7－5}$$

$$\varepsilon_0\frac{\partial E_y\left(i,j+1/2\right)}{\partial t}=\frac{H_z\left(i+1/2,j+1/2\right)-H_z\left(i-1/2,j+1/2\right)}{\Delta x} \tag{7－6}$$

$$\mu_0\frac{\partial H_z\left(i+1/2,j+1/2\right)}{\partial t}=\frac{E_x\left(i+1/2,j+1\right)-E_x\left(i+1/2,j\right)}{\Delta y}-\frac{E_y\left(i+1,j+1/2\right)-E_y\left(i,j+1/2\right)}{\Delta x} \tag{7－7}$$

## 7．1．2　時間領域における差分化［7－1］

マクスウェルの方程式は，$\partial\mathbf{E}/\partial t$および$\partial\mathbf{H}/\partial t$の項を含み時間に依存している．そこで，時間領域まで拡張して差分化するために電磁場の各方向成分について次のように時間の定義を行うことにする．

$$E_x^n=E_x\left(t=t_0+n\Delta t\right) \tag{7－8}$$

$\Delta t$　：　時間ステップ
$n$　：　繰り返し回数
$t_0$　：　基準となる時間

そしてこの定義を用いると，時間領域の中間差分によりマクスウェルの方程式は次のように表される．

$$\varepsilon_0\frac{\partial\mathbf{E}^{n-½}}{\partial t}\approx\varepsilon_0\frac{\mathbf{E}^n-\mathbf{E}^{n-1}}{\Delta t}=\nabla\times\mathbf{H}^{n-½} \tag{7－9}$$

$$\mathbf{E}^n = \mathbf{E}^{n-1} + \frac{\Delta t}{\varepsilon_0}\nabla \times \mathbf{H}^{n-\frac{1}{2}} \qquad (7-10)$$

$$\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}^n}{\partial t} \approx \mu_0 \frac{\mathbf{H}^{n+\frac{1}{2}} - \mathbf{H}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = -\nabla \times \mathbf{E}^n \qquad (7-11)$$

$$\mathbf{H}^{n+\frac{1}{2}} = \mathbf{H}^{n-\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{\mu_0}\nabla \times \mathbf{E}^n \qquad (7-12)$$

この式の意味するところを図７．３を用いて説明すると仮に$n$回目に計算された電場$\mathbf{E}^n$はその１周期前の$\mathbf{E}^{n-1}$とその半周期前の$\mathbf{H}^{n-\frac{1}{2}}$によって計算され，またそれに対応する磁場$\mathbf{H}^{n+\frac{1}{2}}$は$\mathbf{E}^n$と$\mathbf{H}^{n-\frac{1}{2}}$によって計算されることを示している．

さらに，今までは電流源$\mathbf{J}$が存在しない場合を論じたが，電流源が存在する場合，マクスウェルの方程式は次式のように表される．

$$\varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}^{n-\frac{1}{2}}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{H}^{n-\frac{1}{2}} - \mathbf{J}^{n-\frac{1}{2}} \qquad (7-13)$$

そして上式を$E_x$成分について差分化してみると，次式のように表される．

$$\begin{aligned} &\varepsilon_0 \frac{E_x^n(i+\tfrac{1}{2},j) - E_x^{n-1}(i+\tfrac{1}{2},j)}{\Delta t} \\ &= \frac{H_z^{n-\frac{1}{2}}(i+\tfrac{1}{2},j+\tfrac{1}{2}) - H_z^{n-\frac{1}{2}}(i+\tfrac{1}{2},j-\tfrac{1}{2})}{\Delta y} \\ &- J_x^{n-\frac{1}{2}}(i+\tfrac{1}{2},j) \end{aligned} \qquad (7-14)$$

このようにして，マクスウェル方程式は電流源$\mathbf{J}$も含めて時間と空間領域において差分式として表すことができることがわかる．また，損失のある領域（電気伝導率$\sigma$が有限）においては，マクスウェルの方程式は次のようになる．

$$\varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}^{n-\frac{1}{2}}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{H}^{n-\frac{1}{2}} - \sigma \mathbf{E}^{n-\frac{1}{2}} \qquad (7-15)$$

さらにこれを時間で差分化すると次のように表され

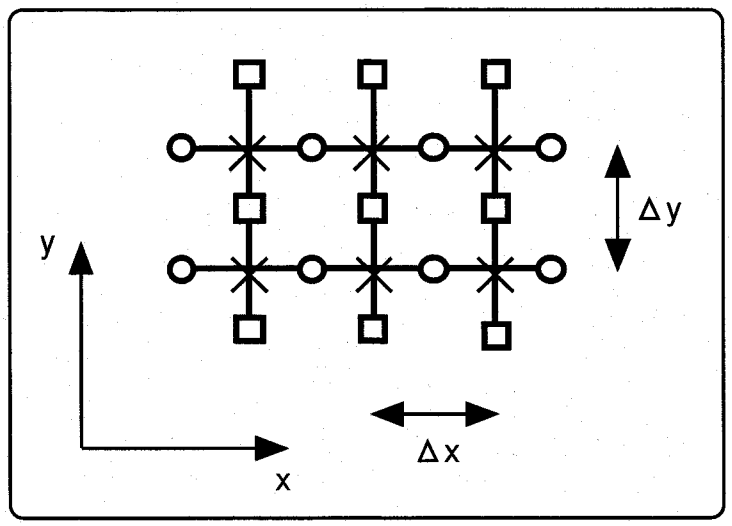



図7.1 2次元問題における解析モデル

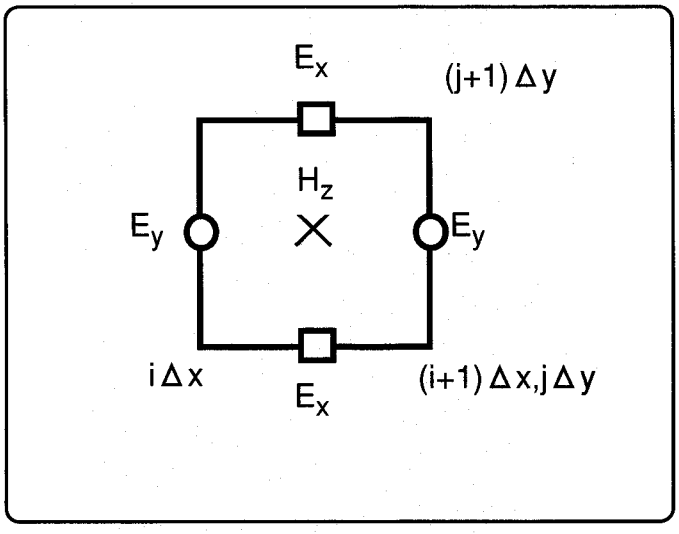



図7.2 一般的なセル構成

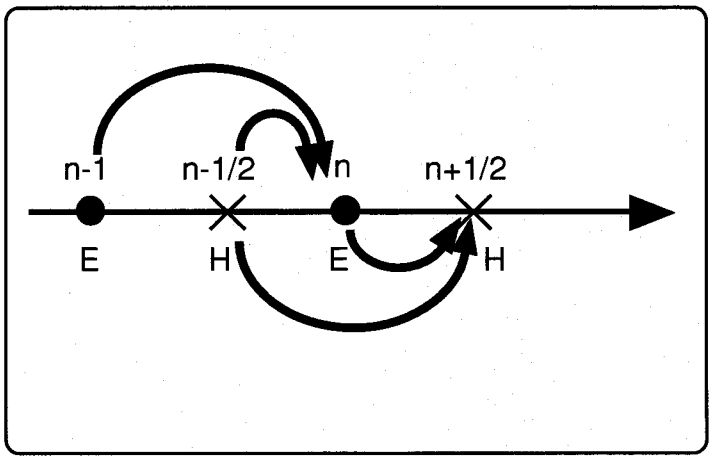



図7.3 電界と磁界の時間との関係

$$\varepsilon_0\left(\frac{\mathbf{E}^n-\mathbf{E}^{n-1}}{\Delta t}\right)=\nabla\times\mathbf{H}^{n-\frac{1}{2}}-\sigma\left(\frac{\mathbf{E}^n+\mathbf{E}^{n-1}}{2}\right) \qquad (7-16)$$

この結果を$\mathbf{E}^n$について整理すると次式が得られる．

$$\mathbf{E}^n=\left(\frac{1-\sigma\Delta t/2\varepsilon_0}{1+\sigma\Delta t/2\varepsilon_0}\right)\mathbf{E}^{n-1}+\left(\frac{1}{1+\sigma\Delta t/2\varepsilon_0}\right)\left(\frac{\Delta t}{\varepsilon_0}\right)\nabla\times\mathbf{H}^{n-\frac{1}{2}} \qquad (7-17)$$

### 7．1．3　吸収境界条件［7－3］

FDTD法では解析領域の境界の定義方法によって，シミュレーションの精度が大きく変化する．単純な境界条件としてはPEC（Perfect Electric Conductor）条件とPMC（Perfect Magnetic Conductor）条件があり，それぞれその境界面が金属のような完全導体の場合に境界に平行な電場成分および磁場成分を0とすることによって達成できる．しかし，本研究では解析領域が完全導体で取り囲まれているような閉領域の問題以外に，解析領域に自由空間や一部に誘電体が挿入された場合の取り扱いが必要となる．ここで自由空間のような解法領域の問題を扱う場合には，図7．4に示すように解析領域を仮想的な境界で閉じておく必要がある．この仮想的な境界を吸収境界（absorbing boundary）といい，その条件を吸収境界条件（absorbing boundary condition）という．吸収境界ではYeeのアルゴリズムが使えないため，特別な取り扱いが必要となる．吸収境界条件は数多く提案されているが［7－3］，本実験では，一般的によく使われており精度が最良であるPML境界条件を用いて解析領域を定義している．以下にPML吸収境界条件について述べる．

BerengerのPML吸収境界条件は，必要とする計算機メモリは増加するものの，現在のところ最も有効な吸収境界条件である．PMLの基本概念を理解するために図7．5のように真空中から平面波が垂直に入射する場合を考える．真空中の波動インピーダンス$Z_0$，媒質中のインピーダンス$Z$は，それぞれ，

$$\left.\begin{aligned}Z_0&=\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\\ Z&=\sqrt{\frac{\mu+\sigma^*/j\omega}{\varepsilon+\sigma/j\omega}}\end{aligned}\right\} \qquad (7-18)$$

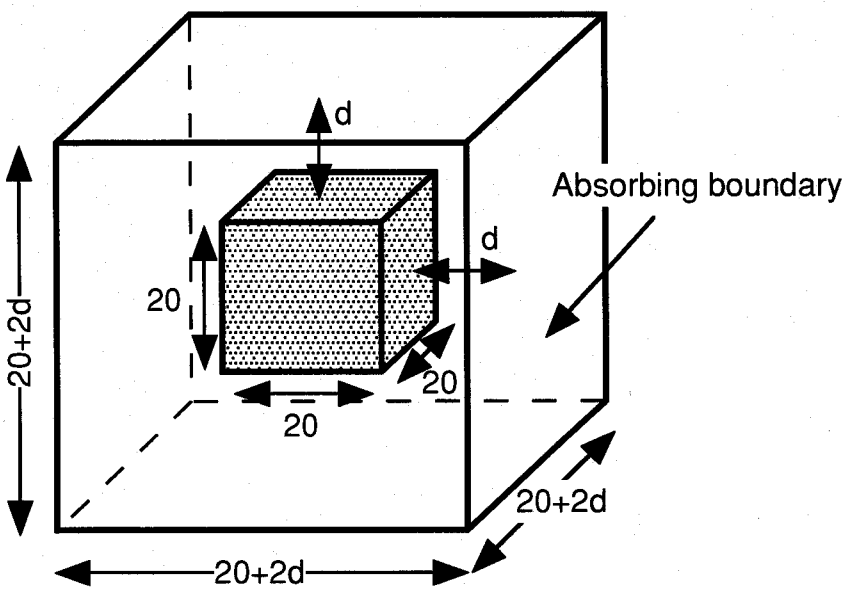



図7.4　吸収境界までの距離とセル数

で与えられるから，インピーダンスマッチング条件，$Z_0 = Z$すなわち

$$\frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma^*}{\mu_0} \qquad (7-19)$$

を満たせば周波数に関係なく反射係数は0になり，電磁波は反射なしで媒質に浸透し，$\sigma$，$\sigma^*$を十分大きくすればすぐに減衰する．ここで$\sigma$は電気伝導率，$\sigma^*$は磁気伝導率である．このような媒質で解析領域を囲めば，反射光ノイズによる影響を受けないシミュレーション解析を行える．しかし，斜め入射の場合には式（7－19）の条件が満たされたとしても反射係数は0とはならない．そこで，Berengerが考案した斜め入射に対しても式（7－18）が満たされるような媒質をPMLと呼ぶ．

a)　TE-PML

本節では，簡単のため2次元領域の無損失媒質に対するPML吸収境界条件について述べる．図7．6のようにz成分の磁場を持つ平面波が入射した場合の反射係数$R$は

$$R = \frac{Z\cos\theta_i - Z_0\cos\phi}{Z\cos\theta_i + Z_0\cos\phi} \qquad (7-20)$$

で与えられるから，$R=0$となるためには，式（7－18）のインピーダンスマッチング条件を満足し，かつ入射角$\theta_i$と屈折角$\phi$が等しくなるような仮想媒質を考えればよい．

まずx軸に垂直な方向のPML媒質について考える．PML媒質内でx方向の電気伝導率を$\sigma_x$，磁気伝導率を$\sigma_x^*$，y方向の電気伝導率を$\sigma_y$，磁気伝導率を$\sigma_y^*$とおく．またx方向に進む磁場のz成分を$H_{zx}$，y方向に進む磁場のz成分を$H_{zy}$とおくとPML媒質内でx方向に進む平面波は，

$$\left.\begin{aligned} \mu\frac{\partial H_{zx}}{\partial t} + \sigma_x^* H_{zx} &= -\frac{\partial E_y}{\partial x} \\ \varepsilon\frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma_x E_y &= -\frac{\partial H_z}{\partial x} \end{aligned}\right\} \qquad (7-21)$$

と表される．またPML媒質内でy方向に進む平面波は

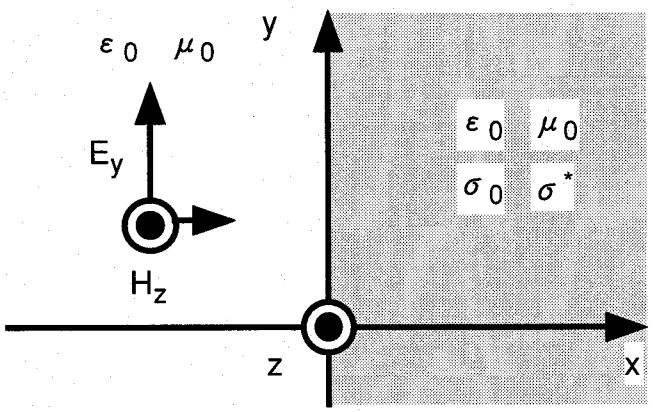



図7.5 磁気損失を持つ媒質への平面波の直接入射

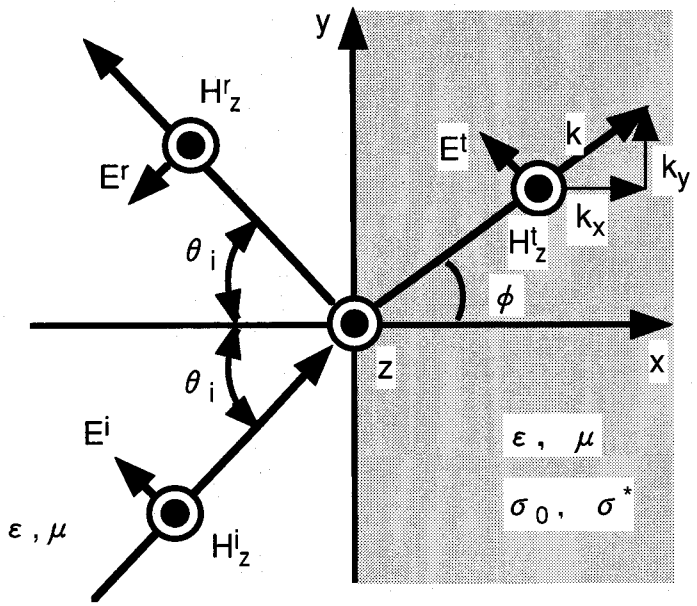



図7.6 TE平面波の斜め入射

$$\left.\begin{aligned}\mu\frac{\partial H_{zy}}{\partial t}+\sigma_y^* H_{zy}&=\frac{\partial E_x}{\partial y}\\ \varepsilon\frac{\partial E_x}{\partial t}+\sigma_y E_x&=\frac{\partial H_z}{\partial y}\end{aligned}\right\} \qquad (7-22)$$

と表される．ここで，z方向の磁場は式（７－２３）のようにx方向およびy方向に進行する平面波の和によって表されるものとする．

$$H_z = H_{zx} + H_{zy} \qquad (7-23)$$

また，y軸に垂直な方向のPML媒質についても同様に考えると，y方向に進む平面波および，x方向に進む平面波はそれぞれ式（７－２４），（７－２５）のように表される．この場合も式（７－２３）は成立する．

$$\left.\begin{aligned}\mu\frac{\partial H_{zy}}{\partial t}+\sigma_y^* H_{zy}&=\frac{\partial E_x}{\partial y}\\ \varepsilon\frac{\partial E_x}{\partial t}+\sigma_y E_x&=\frac{\partial H_z}{\partial y}\end{aligned}\right\} \qquad (7-24)$$

$$\left.\begin{aligned}\mu\frac{\partial H_{zx}}{\partial t}+\sigma_x^* H_{zx}&=-\frac{\partial E_y}{\partial x}\\ \varepsilon\frac{\partial E_y}{\partial t}+\sigma_x E_y&=-\frac{\partial H_z}{\partial x}\end{aligned}\right\} \qquad (7-25)$$

ここで，通常の損失性媒質では，$\sigma_x=\sigma_y=\sigma$，$\sigma_x^*=\sigma_y^*=0$となるから式（７－２１），（７－２２）は

$$\left.\begin{aligned}\mu\frac{\partial H_{zx}}{\partial t}&=-\frac{\partial E_y}{\partial x}\\ \varepsilon\frac{\partial E_y}{\partial t}+\sigma E_y&=-\frac{\partial H_z}{\partial x}\end{aligned}\right\} \qquad (7-21)'$$

$$\left.\begin{aligned}\mu\frac{\partial H_{zy}}{\partial t}&=\frac{\partial E_x}{\partial y}\\ \varepsilon\frac{\partial E_x}{\partial t}+\sigma E_x&=\frac{\partial H_z}{\partial y}\end{aligned}\right\} \qquad (7-22)'$$

と表せ，同様に式（７－２４）は式（７－２２）’に，式（７－２５）は式（７－２１）’の形に変形できる．したがって，式（７－２１）’，式（７－２２）’をまとめると

$$\left.\begin{aligned}
&\varepsilon\frac{\partial E_x}{\partial t}+\sigma E_x=\frac{\partial H_z}{\partial y}\\
&\varepsilon\frac{\partial E_y}{\partial t}+\sigma E_y=-\frac{\partial H_z}{\partial x}\\
&\mu\left(\frac{\partial H_{zx}}{\partial t}+\frac{\partial H_{zy}}{\partial t}\right)=\frac{\partial E_x}{\partial y}-\frac{\partial E_y}{\partial x}
\end{aligned}\right\} \qquad (7-26)$$

となり，FDTD法では，これらの媒質で解析領域を囲むことになるからそれらが重なる部分では，式（７－２６）が成立することとなる．ここで式（７－２３）より$H_z$が与えられていることから，式（７－２６）は最終的に式（７－２６）’という形で表されることとなる．

$$\left.\begin{aligned}
&\varepsilon\frac{\partial E_x}{\partial t}+\sigma E_x=\frac{\partial H_z}{\partial y}\\
&\varepsilon\frac{\partial E_y}{\partial t}+\sigma E_y=-\frac{\partial H_z}{\partial x}\\
&\mu\frac{\partial H_z}{\partial t}=\frac{\partial E_x}{\partial y}-\frac{\partial E_y}{\partial x}
\end{aligned}\right\} \qquad (7-26)'$$

これはマクスウェル方程式と式（７－２７）と等価な形となる．

$$\left.\begin{aligned}
&\nabla\times\mathbf{H}=\varepsilon\frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t}+\sigma\mathbf{E}\\
&\nabla\times\mathbf{E}=-\mu\frac{\partial\mathbf{H}}{\partial t}
\end{aligned}\right\} \qquad (7-27)$$

ただしPML媒質の場合，式（７－２３）のように磁場成分がｘ方向およびｙ方向にそれぞれ独立して伝搬するように分離した点が，通常の場合と異なっている．

ここで，平面波がPML媒質中をどのように伝搬するかを解析する．図７．７

のように電場$E_y$がｙ軸に対して$\phi$だけ傾いているとすると，電磁場は周波数領域で

$$\left.\begin{aligned} E_x &= -E_0 \sin\phi \exp\left[-j\left(k_x x + k_y y\right)\right] \\ E_y &= E_0 \cos\phi \exp\left[-j\left(k_x x + k_y y\right)\right] \end{aligned}\right\} \qquad (7-28)$$

$$\begin{aligned} H_z &= H_0 \exp\left[-j\left(k_x x + k_y y\right)\right] \\ &= \left(H_{zx0} + H_{zy0}\right)\exp\left[-j\left(k_x x + k_y y\right)\right] \end{aligned} \qquad (7-29)$$

で与えられる．ここで，式（７－２８）と式（７－２９）で表される磁場のｘ方向に進行する磁場成分を式（７－２１）に代入し，式（７－２８）と式（７－２９）で表される磁場のｙ方向に進行する磁場成分を式（７－２２）に代入すると

$$\left.\begin{aligned} H_{zx0} &= \frac{k_x}{\omega\mu_x^*} E_0 \cos\phi \\ H_{zy0} &= \frac{k_y}{\omega\mu_y^*} E_0 \sin\phi \end{aligned}\right\} \qquad (7-30)$$

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_x^* \cos\phi &= \frac{k_x}{\omega^2}\left(\frac{k_x}{\mu_x^*}\cos\phi + \frac{k_y}{\mu_y^*}\sin\phi\right) \\ \varepsilon_y^* \sin\phi &= \frac{k_y}{\omega^2}\left(\frac{k_x}{\mu_x^*}\cos\phi + \frac{k_y}{\mu_y^*}\sin\phi\right) \end{aligned}\right\} \qquad (7-31)$$

を得る．ただし$i = x, y$に対して

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_i^* &= \varepsilon + \frac{\sigma_i}{j\omega} \\ \mu_i^* &= \mu + \frac{\sigma_i^*}{j\omega} \end{aligned}\right\} \qquad (7-32)$$

である．さらに式（７－３１）より

$$\frac{\varepsilon_y^* \sin\phi}{\varepsilon_x^* \cos\phi} = \frac{k_y}{k_x} \qquad (7-33)$$

であるから，式（７－３３）を式（７－３１）に代入し，$k_x$，$k_y$を求めると

$$\left.\begin{aligned} k_x &= \frac{\omega}{Y}\varepsilon_x^* \cos\phi \\ k_y &= \frac{\omega}{Y}\varepsilon_y^* \sin\phi \end{aligned}\right\} \qquad (7-34)$$

となる．ただし，

$$\left.\begin{aligned} Y &= \sqrt{Y_x^2 \cos^2\phi + Y_y^2 \sin^2\phi} \\ Y_x &= \sqrt{\frac{\varepsilon_x^*}{\mu_x^*}}\ ,\ Y_y^* = \sqrt{\frac{\varepsilon_y^*}{\mu_y^*}} \end{aligned}\right\} \qquad (7-35)$$

である．式（７－３４）を式（７－３０）に代入し$H_0$を求めると

$$H_0 = H_{zx0} + H_{zy0} = YE_0 \qquad (7-36)$$

となるから，PML媒質中の波動インピーダンスは，

$$Z = \frac{E_0}{H_0} = \frac{1}{Y} \qquad (7-37)$$

となる．したがって$Y$はPML媒質中の波動アドミタンスである．これが解析領域中の波動インピーダンス$Z_0$と等しくなるためには式（７－３８）に示す．

$$Y_x^2 = \frac{1}{Z_0^2}\ ,\ Y_y^2 = \frac{1}{Z_0^2} \qquad (7-38)$$

ｘ，ｙ方向に独立なインピーダンスマッチングが成立すればよい．式（７－３８）は式（７－３５），（７－３１）より，ｘ，ｙに対して

$$\mu+\frac{\sigma_i^*}{j\omega}\Big/\varepsilon+\frac{\sigma_i}{j\omega}=\mu/\varepsilon \ (\mathrm{i}=\mathrm{x},\mathrm{y}) \qquad (7-39)$$

であるから，電気伝導率と磁気伝導率の間に

$$\frac{\sigma_x}{\varepsilon}=\frac{\sigma_x^*}{\mu},\ \frac{\sigma_y}{\varepsilon}=\frac{\sigma_y^*}{\mu} \qquad (7-40)$$

なる関係が成立すれば，PML媒質中の波動インピーダンスは周波数や角度$\phi$に依存せず自由空間の波動インピーダンス$Z_0$と等しくなる．つまり式（7－19）に示したインピーダンスマッチング条件が満たされることとなる．また，式（7－40）においてx軸に垂直なPML媒質に平面波が入射する場合は$\sigma_y=\sigma_y^*=0$，y軸に垂直なPML媒質に入射する場合は$\sigma_x=\sigma_x^*=0$となり，それぞれマッチング条件は簡単になる．

PML媒質中の波数$k_x$，$k_y$は式（7－32），（7－34）より

$$\left.\begin{aligned}k_x&=\left(\frac{\omega}{c}-j\frac{\sigma_x}{\varepsilon c}\right)\cos\phi\\ k_y&=\left(\frac{\omega}{c}-j\frac{\sigma_y}{\varepsilon c}\right)\sin\phi\end{aligned}\right\} \qquad (7-41)$$

となるから，電磁場の任意の成分$\Psi$は

$$\begin{aligned}\Psi=\Psi_0\exp\left[-j\frac{\omega}{c}(x\cos\phi+y\sin\phi)\right]\cdot\\ \exp\left[-\frac{\sigma_x\cos\phi}{\varepsilon c}x\right]\cdot\exp\left[-\frac{\sigma_y\sin\phi}{\varepsilon c}y\right]\end{aligned} \qquad (7-42)$$

となる．すなわちPML媒質内の波はx，y方向に指数関数的に減衰しながら光速で伝搬していくことがわかる．

式（7－40）のインピーダンスマッチング条件が満たされれば任意の入射角，周波数で反射係数が0となり吸収境界としてPML媒質を利用できる．しかしFDTD法の吸収境界とするにはPML媒質を有限の厚さでうち切らなければならず，この場合PML媒質の外壁でも反射が生じる．これを避けるために実際の計算ではPMLを数層積層し，徐々に損失を大きくすることによって電磁場を十

分に減衰させるようにする．こうすることで最外壁を完全電気壁もしくは完全磁気壁で囲むことができる．

以上の議論をもとにPML吸収境界と各領域での電気伝導率，磁気伝導率を示したのが図７．８である．図７．８を式で表すと，

$$\sigma_x = \begin{cases} \sigma_{\max}\left[\dfrac{L\Delta x - x}{L\Delta x}\right]^M & ; x < L\Delta x \\ 0 & ; L\Delta x < x < (NX - L - 1)L\Delta x \\ \sigma_{\max}\left[\dfrac{x - (NX - L - 1)L\Delta x}{L\Delta x}\right]^M & ; x > L\Delta x \end{cases} \quad (7-4\ 3a)$$

$$\sigma_y = \begin{cases} \sigma_{\max}\left[\dfrac{L\Delta y - y}{L\Delta y}\right]^M & ; y < L\Delta y \\ 0 & ; L\Delta y < y < (NX - L - 1)L\Delta y \\ \sigma_{\max}\left[\dfrac{y - (NX - L - 1)L\Delta y}{L\Delta y}\right]^M & ; y > L\Delta y \end{cases} \quad (7-4\ 3b)$$

$$\left.\begin{aligned} \sigma_x^* &= \frac{\mu}{\varepsilon}\sigma_x \\ \sigma_y^* &= \frac{\mu}{\varepsilon}\sigma_y \end{aligned}\right\} \quad (7-4\ 3c)$$

となる．ここで$L$はPML層の数$\sigma_{\max}$は外壁での導電率，$M$は導電率の分布を与える次数である．

b)　TM-PML

ここで，電場がｚ方向成分$E_z$だけで，磁場がｘ，ｙ成分$H_x$，$H_y$を持つTM波の場合は，TE波の電場と磁場が入れ替わった場合であるから同様に考えることができる．基本となる式は

$$\left.\begin{aligned} \mu\frac{\partial H_x}{\partial t} + \sigma_y^* H_x &= -\frac{\partial E_z}{\partial y} \\ \mu\frac{\partial H_y}{\partial t} + \sigma_x^* H_y &= \frac{\partial E_z}{\partial x} \end{aligned}\right\} \quad (7-4\ 4a)$$

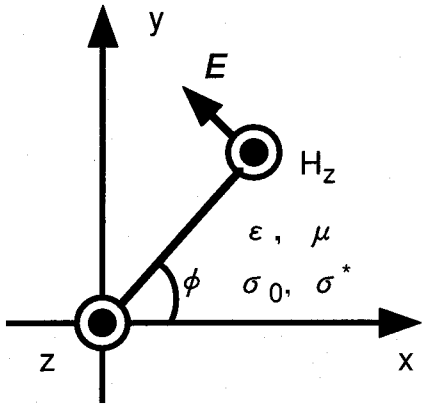



図7.7 PML媒質中の平面波

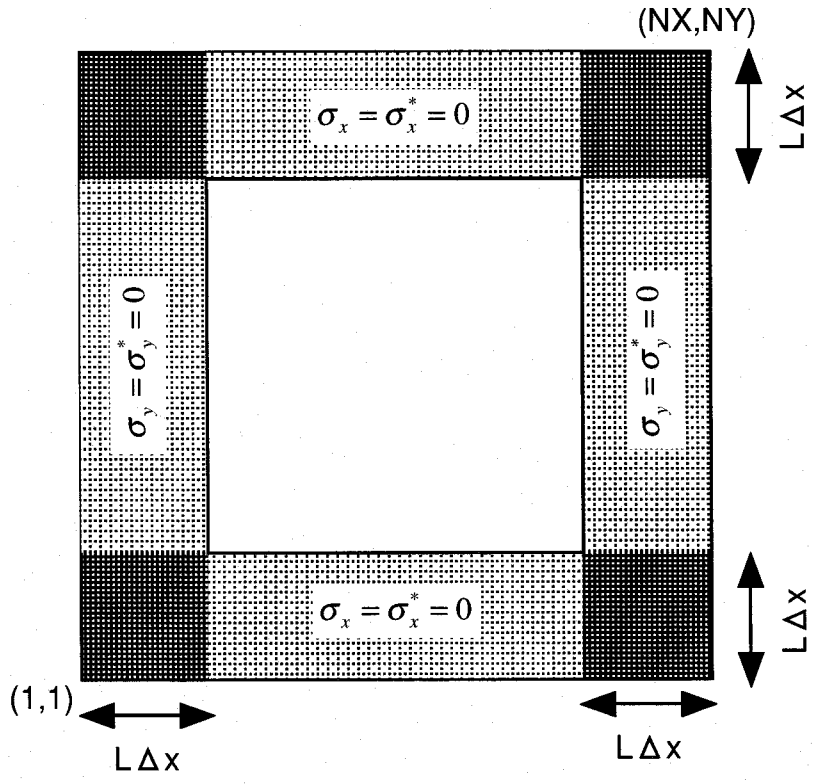



図7.8 PML吸収境界

$$\left.\begin{aligned}\varepsilon\frac{\partial E_{zx}}{\partial t}+\sigma_x E_{zx}&=\frac{\partial H_y}{\partial x}\\ \varepsilon\frac{\partial E_{zy}}{\partial t}+\sigma_y E_{zy}&=-\frac{\partial H_x}{\partial y}\end{aligned}\right\} \qquad (7-44b)$$

$$E_z = E_{zx} + E_{zy} \qquad (7-44c)$$

TE波の場合と同様にTM波のマッチング条件は式（７－４０）となる．

## ７．１．４　３次元ＦＤＴＤ法［７－１］［７－３］

樹脂内部の電磁場を解析するには，前節までに述べた２次元FDTD法およびPML条件を３次元に拡張する必要がある．そこで本節ではその基礎となるアルゴリズムと３次元に拡張したPML吸収境界について述べる．

(a)　３次元における有限差分アルゴリズム

等方的な媒質中ではマクスウェル方程式は式（７－２７）のように書かれる．これらのベクトル方程式は直交座標系では次の６つのスカラー方程式によって表される．

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial H_x}{\partial t}&=\frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial E_y}{\partial z}-\frac{\partial E_z}{\partial y}\right)\\ \frac{\partial H_y}{\partial t}&=\frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial E_z}{\partial x}-\frac{\partial E_x}{\partial z}\right)\\ \frac{\partial H_z}{\partial t}&=\frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial E_x}{\partial y}-\frac{\partial E_y}{\partial x}\right)\end{aligned}\right\} \qquad (7-45)$$

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial E_x}{\partial t}&=\frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\partial H_z}{\partial y}-\frac{\partial E_y}{\partial z}-\sigma E_x\right)\\ \frac{\partial E_y}{\partial t}&=\frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\partial H_x}{\partial z}-\frac{\partial E_z}{\partial x}-\sigma E_y\right)\\ \frac{\partial E_z}{\partial t}&=\frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\partial H_y}{\partial x}-\frac{\partial E_x}{\partial y}-\sigma E_z\right)\end{aligned}\right\} \qquad (7-46)$$

今，任意の座標位置（i,j,k）（但しi,j,kは整数），時間ステップ$n$における関数$F$を

$$F^n(i,j,k)=F(i\Delta x,j\Delta y,k\Delta z,n\Delta t) \qquad (7-47)$$

と定義すると，中央差分を用いて２次の項まで考慮した空間・時間差分は次のように表される．

$$\frac{\partial F^n(i,j,k)}{\partial x}=\frac{F^n\left(i+\frac{1}{2},j,k\right)-F^n\left(i-\frac{1}{2},j,k\right)}{\Delta x}+O\left(\Delta x^2\right) \qquad (7-48)$$

$$\frac{\partial F^n(i,j,k)}{\partial t}=\frac{F^n\left(i+\frac{1}{2},j,k\right)-F^n\left(i-\frac{1}{2},j,k\right)}{\Delta t}+O\left(\Delta t^2\right) \qquad (7-49)$$

ここでは，空間差分のｘのみについて表したがｙ，ｚについても同様である．ここで電場，磁場を３次元的に組み合わせたセル構成を図７．９に示す．これが３次元FDTD法で用いられる電場，磁場の基本的配置である．

式（７－４７）のFをEあるいはHと考えた時，図７．９に示されるような電場磁場の配置を考慮して式（７－４５），（７－４６）の空間差分式を表現することができる．また，時間に関する差分は式（７－４９）のように半ステップだけ進んだ時間と遅れた時間での値から求められる．したがって式（７－４５），（７－４６）は有限差分近似を使って次のように表現される．

$$\begin{aligned}&H_x^{n+1/2}(i,j+1/2,k+1/2)\\&=H_x^{n-1/2}(i,j+1/2,k+1/2)\\&+\frac{\Delta t}{\mu(i,j+1/2,k+1/2)}\left[\frac{E_y^n(i,j+1/2,k+1)-E_y^n(i,j+1/2,k)}{\Delta z}\right.\\&\left.+\frac{E_z^n(i,j,k+1/2)-E_z^n(i,j+1,k+1/2)}{\Delta y}\right]\end{aligned} \qquad (7-50a)$$

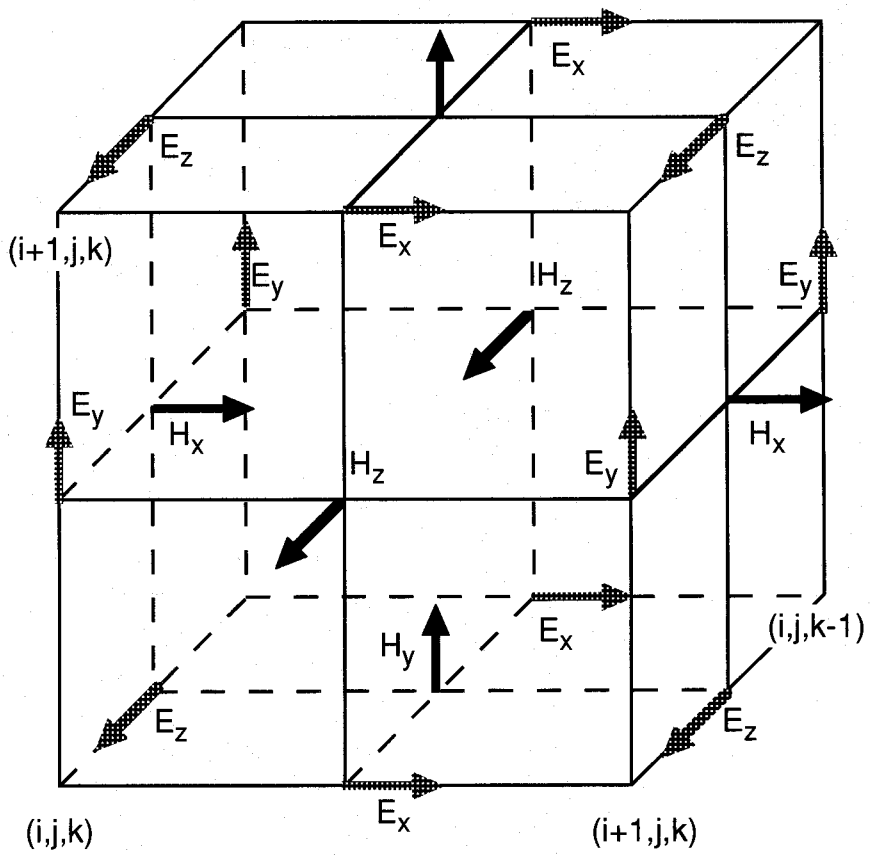



図7.9 3次元FDTD法の電界，磁界の配置

$$H_y^{n+1/2}(i+1/2,j,k+1/2)$$
$$= H_y^{n-1/2}(i+1/2,j,k+1/2)$$
$$+\frac{\Delta t}{\mu(i+1/2,j,k+1/2)}\left[\frac{E_z^n(i,j+1/2,k+1)-E_z^n(i,j+1/2,k)}{\Delta x}\right.$$
$$\left.+\frac{E_x^n(i+1/2,j,k)-E_x^n(i+1/2,j,k+1)}{\Delta z}\right] \qquad (7-50b)$$

$$H_z^{n+1/2}(i+1/2,j+1/2,k)$$
$$= H_z^{n-1/2}(i+1/2,j+1/2,k)$$
$$+\frac{\Delta t}{\mu(i+1/2,j+1/2,k)}\left[\frac{E_x^n(i+1/2,j+1,k)-E_x^n(i+1/2,j,k)}{\Delta y}\right.$$
$$\left.+\frac{E_y^n(i,j+1/2,k)-E_y^n(i+1,j+1/2,k)}{\Delta x}\right] \qquad (7-50c)$$

$$E_x^{n+1}(i+1/2,j,k)$$
$$=\left[1-\frac{\sigma(i+1/2,j,k)\Delta t}{\varepsilon(i+1/2,j,k)}\right]E_x^n(i+1/2,j,k)+$$
$$\frac{\Delta t}{\varepsilon\left(i+\frac{1}{2},j,k\right)}\left[\frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k\right)-H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k\right)}{\Delta y}\right.$$
$$\left.+\frac{H_y^{n+1/2}(i+1/2,j,k-1/2)-H_y^{n+1/2}(i+1/2,j,k+1/2)}{\Delta z}\right] \qquad (7-51a)$$

$$E_y^{n+1}(i,j+1/2,k)$$
$$=\left[1-\frac{\sigma(i,j+1/2,k)\Delta t}{\varepsilon(i,j+1/2,k)}\right]E_y^n(i,j+1/2,k)+$$
$$\frac{\Delta t}{\varepsilon\left(i,j+\frac{1}{2},k\right)}\left[\frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}\right)-H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i,j+\frac{1}{2},k-\frac{1}{2}\right)}{\Delta z}\right.$$
$$\left.+\frac{H_z^{n+1/2}\left(i-1/2,j+\frac{1}{2},k\right)-H_z^{n+1/2}(i+1/2,j+1/2,k)}{\Delta x}\right] \qquad (7-51b)$$

$$
\begin{aligned}
&E_z^{n+1}(i,j,k+1/2)\\
&=\left[1-\frac{\sigma(i,j,k+1/2)\Delta t}{\varepsilon(i,j,k+1/2)}\right]E_z^n(i,j,k+1/2)+\\
&\frac{\Delta t}{\varepsilon\left(i,j,k+\frac{1}{2}\right)}\left[\frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}\right)-H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i-\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}\right)}{\Delta x}\right.\\
&\left.+\frac{H_x^{n+1/2}(i,j-1/2,k+1/2)-H_x^{n+1/2}(i,j+1/2,k+1/2)}{\Delta y}\right]
\end{aligned}
\qquad (7-51c)
$$

式（７－５０），（７－５１）と図７．９から時間ステップが$n+1/2$での磁場はその半ステップ前の電場と１ステップ前の磁場から，$n+1$での電場は半ステップ前の磁場と１ステップ前での電場からそれぞれ計算できることがわかる．

また，計算結果の正確さを保つため，空間の増分値Δｘ，Δｙ，Δｚが波長に比べて十分に小さく（λ／１０）なければならない．また，有限差分の項の安定性のためには時間増分Δｔが次の条件を満たす必要がある．

$$
v_{\max}\Delta t \le \left(\frac{1}{\Delta x^2}+\frac{1}{\Delta y^2}+\frac{1}{\Delta z^2}\right)^{-1/2} \qquad (7-52)
$$

ここで$v_{\max}$は解析モデル中で使われる電磁波の最大位相速度であり，Δｔの値はこの条件を満たす範囲内で設定すればよい．

(b)　３次元PML

３次元のPMLは７．１．３節で述べたTE波およびTM波のPMLの合成となる．そこで電場と磁場のすべての成分を次のように２つのサブコンポーネントに分ける．

$$
\left.\begin{aligned}
E_x &= E_{xy}+E_{xz}\\
E_y &= E_{yx}+E_{yz}\\
E_z &= E_{zx}+E_{zy}
\end{aligned}\right\} \qquad (7-53)
$$

$$\left.\begin{aligned} H_x &= H_{xy} + H_{xz} \\ H_y &= H_{yx} + H_{yz} \\ H_z &= H_{zx} + H_{zy} \end{aligned}\right\} \qquad (7-54)$$

このときPML内部の基本式は１２個となり，

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon\frac{\partial E_{xy}}{\partial t} + \sigma_y E_{xy} &= \frac{\partial H_z}{\partial y} \\ \varepsilon\frac{\partial E_{xz}}{\partial t} + \sigma_z E_{xz} &= -\frac{\partial H_y}{\partial z} \end{aligned}\right\} \qquad (7-55a)$$

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon\frac{\partial E_{yz}}{\partial t} + \sigma_z E_{yz} &= \frac{\partial H_x}{\partial z} \\ \varepsilon\frac{\partial E_{yx}}{\partial t} + \sigma_x E_{yx} &= -\frac{\partial H_z}{\partial x} \end{aligned}\right\} \qquad (7-55b)$$

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon\frac{\partial E_{zx}}{\partial t} + \sigma_x E_{zx} &= \frac{\partial H_y}{\partial x} \\ \varepsilon\frac{\partial E_{zy}}{\partial t} + \sigma_y E_{zy} &= -\frac{\partial H_x}{\partial y} \end{aligned}\right\} \qquad (7-55c)$$

$$\left.\begin{aligned} \mu\frac{\partial H_{xy}}{\partial t} + \sigma_y^* H_{xy} &= -\frac{\partial E_z}{\partial y} \\ \mu\frac{\partial H_{xz}}{\partial t} + \sigma_z^* H_{xz} &= \frac{\partial E_y}{\partial z} \end{aligned}\right\} \qquad (7-56a)$$

$$\left.\begin{aligned} \mu\frac{\partial H_{yz}}{\partial t} + \sigma_z^* H_{yz} &= -\frac{\partial E_x}{\partial z} \\ \mu\frac{\partial H_{yx}}{\partial t} + \sigma_x^* H_{yx} &= \frac{\partial E_z}{\partial x} \end{aligned}\right\} \qquad (7-56b)$$

$$\left.\begin{aligned} \mu\frac{\partial H_{zx}}{\partial t} + \sigma_x^* H_{zx} &= -\frac{\partial E_y}{\partial x} \\ \mu\frac{\partial H_{zy}}{\partial t} + \sigma_y^* H_{zy} &= \frac{\partial E_x}{\partial y} \end{aligned}\right\} \qquad (7-56c)$$

となる．マッチング条件は，

$$\left.\begin{aligned}\frac{\sigma_x}{\varepsilon}&=\frac{\sigma_x^*}{\mu}\\ \frac{\sigma_y}{\varepsilon}&=\frac{\sigma_y^*}{\mu}\\ \frac{\sigma_z}{\varepsilon}&=\frac{\sigma_z^*}{\mu}\end{aligned}\right\} \qquad (7-57)$$

である．ただしx軸に垂直な面に対しては$\sigma_y=\sigma_z=0$，y軸に垂直な面に対しては$\sigma_x=\sigma_z=0$，z軸に垂直な面に対しては$\sigma_x=\sigma_y=0$である．

ここでPML吸収境界をFDTD法に組み入れるためには，式（7－55），式（7－56）をFDTD法の形式に書き直しておく必要がある．ここで，PML媒質内部では電磁場が指数関数的に減衰するが，この現象はマクスウェル方程式を時間，空間領域で差分化して電磁場の応答を求めるYeeアルゴリズムを用いた計算結果とほとんど一致することが知られている．したがってPML媒質中でも7．1．1節および7．1．2節で述べたようなYeeアルゴリズムがそのまま適用できる．しかし，PML媒質中では基本式が異なることからPML媒質中の電磁場の定式化を行う．

式（7－55a）の第1式の場合，$t=(n-1/2)\Delta t$とすると

$$\frac{E_{xy}^n-E_{xy}^{n-1}}{\Delta t}=\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial H_z^{n-1/2}}{\partial y}-\frac{\sigma_y}{\varepsilon}E_{xy}^{n-1/2} \qquad (7-58)$$

となるから，右辺第2項を$\sigma_y\left(E_{xy}^n-E_{xy}^{n-1}\right)/(2\varepsilon)$と置き換え，さらに$E_{xy}$が$E_x$と同じ位置に配置されることを考えて，右辺第1項のyに関する微分も(i+1/2,j,k)で行い，$E_{xy}$について整理すると

$$\begin{aligned}E_{xy}^n\left(i+\frac{1}{2},j,k\right)=&\frac{1-\sigma_y(j)\Delta t/2\varepsilon}{1+\sigma_y(j)\Delta t/2\varepsilon}E_{xy}^{n-1}\left(i+\frac{1}{2},j,k\right)\\ &+\frac{\Delta t/\varepsilon}{1+\sigma_y(j)\Delta t/2\varepsilon}\frac{1}{\Delta y}\left\{H_z^{n-1/2}\left(i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k\right)\right.\\ &\left.-H_z^{n-1/2}\left(i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k\right)\right\}\end{aligned} \qquad (7-59)$$

を得る．ただし$\sigma_y$はｙ方向にのみ変化するので$\sigma_y(j)$とした．磁場に関しても同様に定式化が行え，例えば式（７－５６c）の第１式は式（７－５７）を用いると，

$$\frac{H_{zx}^{n+1/2}-H_{zx}^{n-1/2}}{\Delta t}=\frac{1}{\mu}\frac{\partial E_y^n}{\partial x}-\frac{\sigma_x}{\varepsilon}H_{zx}^n \qquad (7-60)$$

となる．電場の場合との類似から第２項を$\sigma_x\left(H_{zx}^{n+1/2}-H_{zx}^{n-1/2}\right)/(2\varepsilon)$で置き換え，右辺第１項の微分も$H_{zx}$と同じ位置で微分して$H_{zx}$についてまとめると

$$\begin{aligned}&H_{zx}^{n-1/2}\left(i+1/2,j+1/2,k\right)\\&=\frac{1-\sigma_x\left(i+1/2\right)\Delta t/2\varepsilon}{1+\sigma_x\left(i+1/2\right)\Delta t/2\varepsilon}H_{zx}^{n-1/2}\left(i+1/2,j+1/2,k\right)\\&-\frac{\Delta t/\mu}{1+\sigma_x\left(i+1/2\right)\Delta t/2\varepsilon}\frac{1}{\Delta x}\left\{E_y^n\left(i+1,j+1/2,k\right)\right.\\&\left.-E_y^n\left(i,j+1/2,k\right)\right\}\end{aligned} \qquad (7-61)$$

となる．他の成分についても同様に定式化できる．

## ７．２　樹脂内部の電磁場解析および樹脂硬化現象解析アルゴリズム

７．１節で述べた３次元FDTD法を用いて電磁場解析および樹脂硬化現象解析を行う．TEMPEST［７－２］とよばれる３次元FDTD法のプログラムを元に電磁場解析を行い，電磁場の解析結果から樹脂露光量を求め，樹脂硬化量と樹脂内部の電磁場を可視化するシミュレータを構築した．本シミュレータの特徴は，樹脂の露光量から光硬化性樹脂の屈折率の値を求め，その値を元に樹脂内部の電磁場を計算することで，樹脂の時間的に変化する過渡的な硬化現象を可視化し解析できることである．図７．１０にSTEP1～STEP6の６段階で構成される樹脂内部の電磁場と光硬化性樹脂の硬化量を解析するアルゴリズムを示す．

## ７．２．１　電場，磁場の計算(STEP1,2) ［７－１］

ＳＴＥＰ１では，ＦＤＴＤ法を用いて電場および磁場の計算を行う．式（７－５０），（７－５１）および図７．９に示されるように電場と磁場は各成分がそれぞれ異なる位置に定義される．しかしながら，プログラム中では$y_{j+1/2}$などの半端な座標指定ができないことから，こうした数値が全て整数で表されるよう座標の置き換えをする必要がある．これらの座標の置き換えを表７．１に示す．

STEP2では定常状態の判定を行う．このシミュレーションでは，系が定常状態にあるかどうかの判定を電場および磁場の数値の変動幅をもとに行っている．７．１節で述べたようにFDTD法では２次元および３次元の計算を行うとき解析領域全体をそれぞれ微小な正方形および立方体に分割して行っている．この微小な正方形および立方体で表される計算領域の構成要素を以後セルと呼ぶ．定常状態の判定では，解析領域全体で各セル毎に計算された電場の値と１周期前の電場の値の和と差をとり，両者の比が２％以上となるセルの数をカウントする．３周期にわたってその数が０であればこの系が定常状態にあると判定する．

系が定常状態である場合，続けてSTEP3の露光量の計算を始める．一方で，系が定常とならない場合はそのまま電場，磁場の計算を続行する．

## ７．２．２　露光量の計算(STEP3) ［７－５］

STEP3では，STEP1で計算した電場・磁場の値を元に各格子に照射された光の露光量を計算する．各セル毎に電場の値から導出される光エネルギがそのセルの露光量となる．そこで，各セルにおける光エネルギの導出過程を以下に述べる．

(b-1)　真空中

まず始めに，真空中の光エネルギについて考える．真空中ではマクスウェルの方程式は

$$\nabla\times\mathbf{E}=-\mu_0\frac{\partial\mathbf{H}}{\partial t},\qquad \nabla\bullet\mathbf{E}=0 \qquad (7-62)$$

$$\nabla\times\mathbf{H}=\varepsilon_0\frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t},\qquad \nabla\bullet\mathbf{H}=0 \qquad (7-63)$$

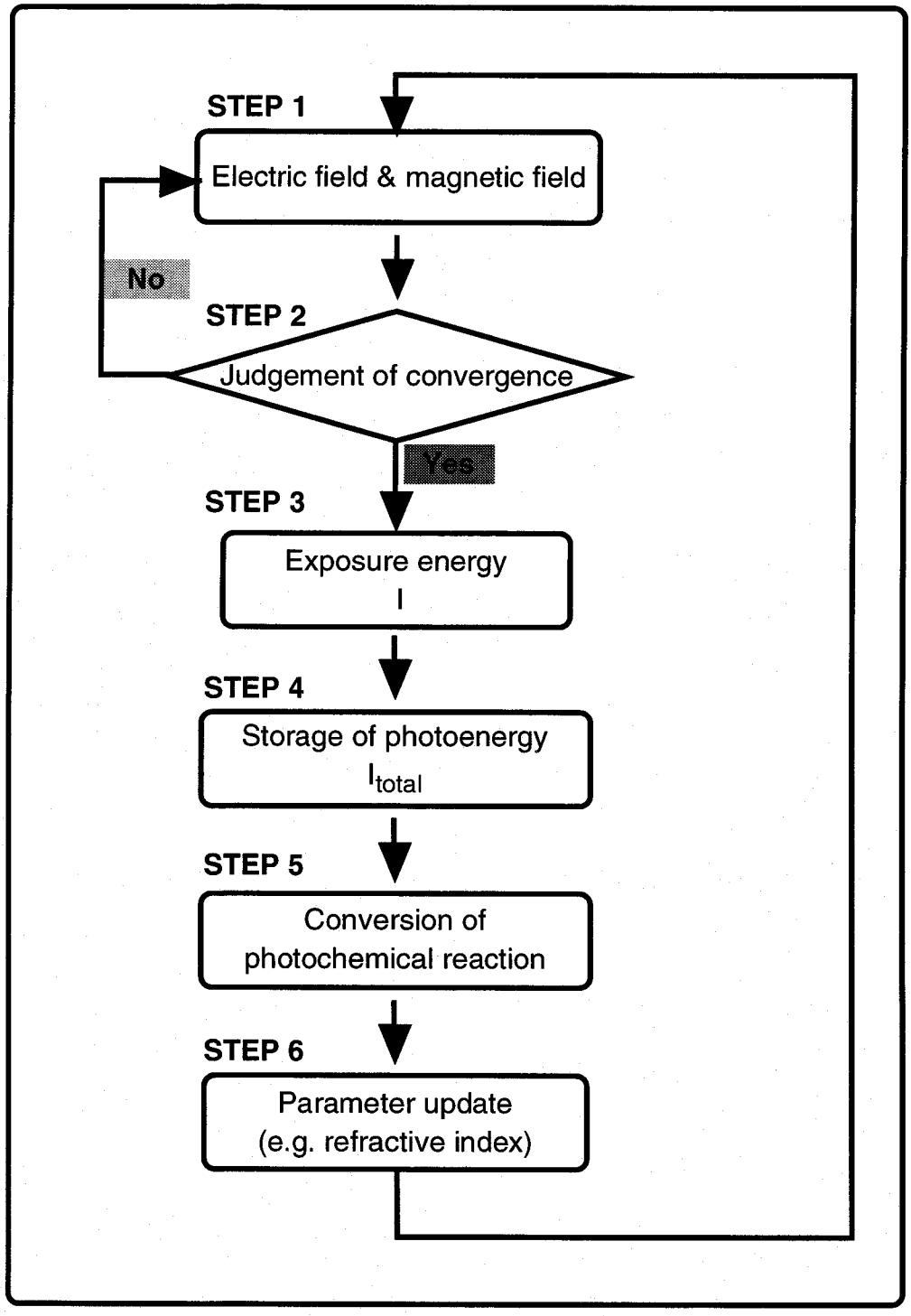



図7.10 樹脂硬化シミュレーションアルゴリズム

表7.1 座標の位置修正に関する変換表

| Original | Modified | Limits on modified |
|---|---|---|
| $H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(x_i, y_{j+1/2}, z_k\right)$ | $H_x^n(i,j,k)$ | i = 1 , ⋯ , imax<br>j = 1 , ⋯ , jmax-1<br>k= 1 , ⋯ , kmax-1 |
| $H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(x_{i+1/2}, y_j, z_k\right)$ | $H_y^n(i,j,k)$ | i = 1 , ⋯ , imax-1<br>j = 1 , ⋯ , jmax<br>k= 1 , ⋯ , kmax-1 |
| $H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(x_{i+1/2}, y_{j+1/2}, z_{k+1/2}\right)$ | $H_z^n(i,j,k)$ | i = 1 , ⋯ , imax-1<br>j = 1 , ⋯ , jmax-1<br>k= 1 , ⋯ , kmax |
| $E_x^n\left(x_{i+1/2}, y_j, z_{k+1/2}\right)$ | $E_x^n(i,j,k)$ | i = 1 , ⋯ , imax-1<br>j = 1 , ⋯ , jmax<br>k= 1 , ⋯ , kmax |
| $E_y^n\left(x_i, y_{j+1/2}, z_{k+1/2}\right)$ | $E_y^n(i,j,k)$ | i = 1 , ⋯ , imax<br>j = 1 , ⋯ , jmax-1<br>k= 1 , ⋯ , kmax |
| $E_z^n\left(x_i, y_j, z_k\right)$ | $E_z^n(i,j,k)$ | i = 1 , ⋯ , imax<br>j = 1 , ⋯ , jmax<br>k= 1 , ⋯ , kmax-1 |

と表せる．式（７－６２）の両辺に$\nabla$をかけると左辺は，

$$\nabla\times\nabla\times\mathbf{E}=\nabla(\nabla\bullet\mathbf{E})-\nabla^2\mathbf{E}$$
$$=-\nabla^2\mathbf{E} \qquad (7-64)$$

一方，右辺は

$$\nabla\times\left(-\mu_0\frac{\partial\mathbf{H}}{\partial t}\right)=-\mu_0\nabla\times\frac{\partial\mathbf{H}}{\partial t}$$
$$=-\mu_0\frac{\partial}{\partial t}\nabla\times\mathbf{H}$$
$$=-\mu_0\frac{\partial}{\partial t}\varepsilon_0\frac{\partial}{\partial t}\mathbf{E}$$
$$=-\mu_0\varepsilon_0\frac{\partial^2}{\partial t^2}\mathbf{E} \qquad (7-65)$$

となるから，式（７－６２）は

$$\nabla^2\mathbf{E}=\left(\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}\right)^2\frac{\partial^2}{\partial t^2}\mathbf{E}$$
$$=\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\mathbf{E} \qquad \left(\text{ｺ}\ \sqrt{\mu_0\varepsilon_0}=1/c\right) \qquad (7-66)$$

となり，電場Ｅについての波動方程式が導ける．また，式（７－６３）を同様に変形すれば磁場Ｈに関しての波動方程式が導ける．

この波動方程式を満たす最も簡単な解である

$$\left.\begin{aligned}\mathbf{E}&=\mathbf{E}_0\exp[j(\mathbf{k}\bullet\mathbf{r}-\omega t)]\\ \mathbf{H}&=\mathbf{H}_0\exp[j(\mathbf{k}\bullet\mathbf{r}-\omega t)]\end{aligned}\right\} \qquad (7-67)$$

なる平面波を考え（$\mathbf{E}_0$，$\mathbf{H}_0$は複素振幅），これを式（７－６２），（７－６３）にそれぞれ代入すると式（７－６２）の左辺は

$$\nabla\times\mathbf{E}=\nabla\times\mathbf{E}_0\exp[j(\mathbf{k}\bullet\mathbf{r}-\omega t)] \qquad (7-68)$$

ここで，

$$\nabla \times \mathbf{E}_0 \exp[j\mathbf{k} \bullet \mathbf{r}] = j\mathbf{k} \times \mathbf{E}_0 \exp[j\mathbf{k} \bullet \mathbf{r}] \qquad (7-69)$$

となるので，式（７－６８）は

$$\nabla \times \mathbf{E}_0 \exp[j(\mathbf{k} \bullet \mathbf{r} - \omega t)] = j\mathbf{k} \times \mathbf{E}_0 \exp[j(\mathbf{k} \bullet \mathbf{r} - \omega t)]$$
$$= j\mathbf{k} \times \mathbf{E} \qquad (7-70)$$

一方，式（７－６２）の右辺は

$$-\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\mu_0(-j\omega)\mathbf{H}$$
$$= j\mu_0 \omega \mathbf{H} \qquad (7-71)$$

したがって，

$$\mathbf{k} \times \mathbf{E} = \mu_0 \omega \mathbf{H} \qquad (7-72a)$$

式（７－６３）についても同様にして

$$\mathbf{k} \times \mathbf{H} = -\varepsilon_0 \omega \mathbf{E} \qquad (7-72b)$$

**E**，**H**，**k**は互いに直交することを考慮して式（７－７２a），（７－７２b）から

$$\frac{|\mathbf{E}|}{|\mathbf{H}|} = \frac{|\mathbf{H}|}{|\mathbf{E}|} \cdot \frac{\mu_0}{\varepsilon_0} \qquad (7-73)$$

よって

$$\frac{|\mathbf{E}|}{|\mathbf{H}|} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \equiv Z_0 \qquad (7-74)$$

$Z_0$は真空の放射インピーダンスと呼ばれる．また，ガウスの法則より電磁場

の単位面積あたりのエネルギは，

$$U=\frac{1}{2}\left(\varepsilon_0|\mathbf{E}|^2+\mu_0|\mathbf{H}|^2\right) \qquad (7-75)$$

ここでポインティングベクトルを

$$\mathbf{S}=\mathbf{E}\times\mathbf{H} \qquad (7-76)$$

として，式（7－62），（7－63）より

$$\begin{aligned}\nabla\bullet\mathbf{S}&=\nabla\bullet\mathbf{E}\times\mathbf{H}\\&=\mathbf{H}\bullet(\nabla\times\mathbf{E})-\mathbf{E}\bullet(\nabla\times\mathbf{H})\\&=\mathbf{H}\bullet\left(-\mu_0\frac{\partial\mathbf{H}}{\partial t}\right)-\mathbf{E}\bullet\left(\varepsilon_0\frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t}\right)\end{aligned} \qquad (7-77)$$

式（7－75）より

$$\frac{\partial U}{\partial t}=\varepsilon_0\mathbf{E}\bullet\frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t}+\mu_0\mathbf{H}\bullet\frac{\partial\mathbf{H}}{\partial t} \qquad (7-78)$$

式（7－77）と式（7－78）の両辺をそれぞれ足し合わせると

$$\nabla\bullet\mathbf{S}+\frac{\partial U}{\partial t}=0 \qquad (7-79)$$

この式は連続の方程式であり，ベクトル**S**の方向に放射エネルギが流れることを示している．

$$\frac{\partial U}{\partial t}=-\nabla\bullet\mathbf{S} \qquad (7-80)$$

ここで式（7－80）より，|**S**|は単位時間あたりに単位面積を通過するエネルギとなる．式（7－76）より

$$
\begin{aligned}
|\mathbf{S}| &= |\mathbf{E}||\mathbf{H}|\sin(\angle EH) \\
&= |\mathbf{E}|\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}|\mathbf{E}| \\
&= \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}|\mathbf{E}|^2 \\
&= \varepsilon_0 c|\mathbf{E}|^2
\end{aligned}
\qquad (7-81)
$$

となることから，これを１サイクルにわたって平均したものを考え，これをサイクル平均強度$I$とすると

$$
I = \frac{1}{2}\varepsilon_0 c|\mathbf{E}|^2 \qquad (7-82)
$$

となる．これが，電場から求められる各セルにおける露光量となる．

(b-2)　等方的で均質な媒質がある場合

次に物質がある場合について考える．ただし物質は均質であり光学的に等方的であるとする．さらにマクスウェル方程式において電荷密度および電流密度の時間変化がない場合すなわち，

$$
\rho_t = 0\ ,\ \mathrm{J_t} = 0 \qquad (7-83)
$$

の場合について考える．光硬化性樹脂については単位セル内部で均一であり，光学的に均一であると仮定し上記の条件を満たすものとしている．ここで屈折率$n$は

$$
n \equiv \frac{c}{v} = \frac{\sqrt{\varepsilon\mu}}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} \qquad (7-84)
$$

と定義されているので，

$$
\varepsilon = \kappa_e\varepsilon_0\ ,\ \mu = \kappa_m\mu_0 \qquad (7-85)
$$

（ただし$\kappa_e$は比誘電率，$\kappa_m$は比透磁率）とすると

$$n \equiv \frac{c}{v} = \sqrt{\kappa_e \kappa_m} \qquad (7-86)$$

ここで光では$\kappa_m \fallingdotseq 1$より

$$\mu = \mu_0 , \qquad \therefore n = \sqrt{\kappa_e} \qquad (7-87)$$

となることから，物質は比誘電率$\kappa_e$を通してのみ電磁波の伝搬とかかわることになる．分極を$\mathbf{P}$として単位行列を$\mathbf{I}$とすると，$\varepsilon \mathbf{I} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$と表せるので

$$\begin{aligned} &\kappa_e \varepsilon_0 \mathbf{E} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \\ &\Leftrightarrow \kappa_e \mathbf{I} = \mathbf{I} + \frac{\mathbf{P}}{\varepsilon_0 \mathbf{E}} \\ &\Leftrightarrow (\kappa_e - 1)\mathbf{I} = \frac{\mathbf{P}}{\varepsilon_0 \mathbf{E}} \equiv \chi \mathbf{I} \end{aligned} \qquad (7-88)$$

ここで，$\chi$は電気感受率と呼ばれ，$\omega$の関数である．電場$\mathbf{E}$が振動した場合，それによって誘起される分極$\mathbf{P}$も同じ振動数となるが，同じ位相で振動するとは限らない．よって$\chi$は一般に複素数で表される．

$$\chi = \chi' + j\chi'' \qquad (7-89)$$

$\chi$が複素数であることは

$$\kappa_e = 1 + \chi' = \left(kc/\omega\right)^2 \qquad (7-90)$$

の関係より，$kc/\omega$が複素数であることを意味する．ここで

$$kc/\omega = \eta + j\kappa \qquad (7-91)$$

として，$\eta$，$k$をそれぞれ屈折率，消衰係数と呼ぶ．今z方向に進む光について考えると，式（7－67）に式（7－79）を代入して式（7－92）と式（7－93）で表せる．

$$E_z = E_0 \exp\left[ j\left\{ \frac{\omega}{c}(\eta + j\kappa)z - \omega t \right\} \right]$$

$$= E_0 \exp\left[ j\omega\left( \frac{\eta}{c}z - t \right) - \frac{\omega\kappa}{c}z \right] \qquad (7-92)$$

$$H_z = H_0 \exp\left[ j\omega\left( \frac{\eta}{c}z - t \right) - \frac{\omega\kappa}{c}z \right] \qquad (7-93)$$

式（７－２７）に式（７－８３）の条件を適用して，誘電率$\varepsilon$，透磁率$\mu$の物質中でのマクスウェル方程式のｚ方向成分は以下のように表されるので

$$(\nabla \times \mathbf{E})_z = -\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} \qquad (7-94)$$

$$(\nabla \times \mathbf{H})_z = \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} \qquad (7-95)$$

真空中の場合と同様にインピーダンスＺを求めると，次式のようになる．

$$Z = \frac{|H_z|}{|E_z|} = \left( \frac{\mu}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= \left( \frac{\mu_0}{\kappa_e \varepsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= \left( \frac{\mu_0}{\varepsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\kappa_e}}$$

$$= \left( \frac{\mu_0}{\varepsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\eta + j\kappa} \qquad (7-96)$$

よって単位時間に単位面積をよぎるエネルギすなわち露光量$I$は

$$I = \frac{|E_z|^2}{2Z} \qquad (7-97)$$

となる．インピーダンスＺの大きさは

$$|Z| = \left(\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\sqrt{\eta^2+\kappa^2}} = \frac{1}{\varepsilon_0 c\sqrt{\eta^2+\kappa^2}} \qquad (7-98)$$

ここで$\eta >> \kappa$より式（７－９８）をマクローリン展開すると

$$|Z| = \frac{1}{\varepsilon_0 c\eta\left(1+\frac{\kappa}{2\eta}\right)} \qquad (7-99)$$

式（７－９７）に式（７－９９）を代入すると以下のようになる．

$$I = \frac{|E_z|^2 \varepsilon_0 c\eta\left(1+\frac{\kappa}{2\eta}\right)}{2} \qquad (7-100)$$

### ７．２．３　樹脂に蓄積されるエネルギの計算(STEP4)

STEP3で計算された露光量をもとに，STEP4では樹脂に蓄積されるエネルギを計算する．７．１．４節で述べたように有限差分の項の安定性のためには時間増分$\Delta t$が式（７－５２）を満たす必要がある．そこで式（７－５２）を満たす$\Delta t$を$\Delta t_0$とすると，シミュレーションにおける光波の１周期の分割数*periodstep*は

$$periodstep \geq \frac{2\pi}{\omega \cdot \Delta t_0} = \frac{\lambda}{c\Delta t_0} = \frac{1.63\times10^{-15}}{\Delta t_0} \qquad (7-101)$$

なる条件を満たす最小の４の倍数となる．ただし波長λおよび光速ｃはそれぞれ４８８［nm］，３．０×１０$^{8}$［m/s］とする．*periodstep*が４の倍数となるのは正弦波の変曲点の位置で波を分割し位相情報を回復できるようにするためである．上記のようにして求めた*periodstep*を

$$\Delta t = \frac{\lambda}{c \cdot periodstep} \qquad (7-102)$$

に代入すると電場および磁場の計算に用いられる時間増分$\Delta t$［s］を求めることができる．この時，露光時間を$t$［s］とすると電磁場の計算回数を$N$は$N = t/\Delta t$となるが，あまり$N$を大きく取りすぎると境界条件の不完全性から系が不安定になる可能性がある．

第４章の実験で求めた$E_c$［mJ/cm$^2$］の値から本実験装置で樹脂の硬化が始まるまでの時間は１［s］のオーダーとなる．この場合，樹脂の硬化シミュレーションでは，式（７－５２）から求めた$\Delta t$を用いて樹脂の硬化シミュレーションを行うと$N$の値が非常におおきくなり，上で述べたように境界条件の不完全性から系が発散してしまう．

しかし，実際には定常状態に達した電場，磁場は樹脂の屈折率などのパラメータが変化しない限りその状態を保つと考えられる．そこで，系が安定した時点で電場磁場の計算をいったん停止し次に樹脂の屈折率などのパラメータが変更されるまでは，電場の状態が変化しないものとみなす．時間が経過し樹脂の露光が始まれば，樹脂の屈折率等のパラメータが変更されることから再びSTEP1の電場，磁場の計算が再開される．この時，STEP1の計算が開始されてからiサイクル目の電場の値を$E_i$，定常状態での電場の値を$E_{static}$，定常状態に達した時の$N$の値を$N_{static}$とするとSTEP1～STEP6を１回ループする間に樹脂に蓄えられるエネルギ$I_{store}$［mJ/cm$^2$］は式（７－１００）より

$$I_{store} \approx \frac{|E_{static}|^2 \varepsilon_0 c \eta \left(1 + \frac{\kappa}{2\eta}\right)}{2} \Delta t \cdot (N - N_{static}) + \sum_1^{N_{static}} I \Delta t \qquad (7-103)$$

で表せる．

実際に式（７－５２）の有限差分の項の安定性より求めた$\Delta t$のオーダーは$10^{-15}$であることから，１［s］のオーダーで樹脂の硬化現象を解析するためには$N$の値が$10^{15}$回のオーダーとなる．しかし，$N_{static}$の値は高々$10^4$のオーダーであることから，式（７－１０３）の第２，第３項を無視して

$$I_{total} \approx \frac{|E_{static}|^2 \varepsilon_0 c\eta\left(1+\frac{\kappa}{2\eta}\right)}{2}\Delta t \cdot N \qquad (7-104)$$

としてSTEP1およびSTEP2の電場，磁場の計算と定常状態の判定が繰り返されるごとに蓄積されるエネルギをもとめ，それらを加算して最終的に樹脂に蓄積された光の露光量$I_{total}$［mJ/cm$^2$］を計算する．

### 7．2．4　硬化反応率の計算(STEP5)

STEP5では露光量の値に応じて変化する樹脂の屈折率等のパラメータを求めるため，樹脂の光重合反応率つまり硬化反応率を計算する．図7．11に硬化反応率と露光量$I_{total}$の関係を示す．この関係は，樹脂に光を実際に照射することによって得られた測定値である．このグラフを6領域に分割して各領域で直線近似し，露光量$I_{total}$［mJ/cm$^2$］と樹脂の光重合反応率つまり硬化反応率C%を以下の式（7－105）として定義した．

$$\begin{aligned}
I_{total} &\le 2.23 && \Rightarrow C = 0 \\
2.23 < I_{total} &\le 6.25 && \Rightarrow C = 8.5074 I_{total} - 18.97 \\
6.25 < I_{total} &\le 12.5 && \Rightarrow C = 0.928 I_{total} + 28.4 \\
12.5 < I_{total} &\le 24.78 && \Rightarrow C = 0.472 I_{total} + 34.9 \\
24.78 < I_{total} &\le 256 && \Rightarrow C = 0.2379 I_{total} + 39.1 \\
256 < I_{total} && && \Rightarrow C = 100
\end{aligned} \qquad (7-105)$$

### 7．2．5　パラメータのアップデート(STEP6)

STEP5で求めた硬化反応率を元に樹脂の屈折率$\eta$と消衰係数$\kappa$の値を更新し，再び電磁場の計算を開始する．式（7－105）の硬化反応率C%から樹脂の複素屈折率$(\eta + i\kappa)$を以下のように求めた．

$$\left.\begin{aligned}
\eta &= \frac{C}{100}\cdot\eta_{solid} + \left(1-\frac{C}{100}\right)\cdot\eta_{liquid} \\
\kappa &= \frac{C}{100}\cdot\kappa_{solid} + \left(1-\frac{C}{100}\right)\cdot\kappa_{liquid}
\end{aligned}\right\} \qquad (7-106)$$

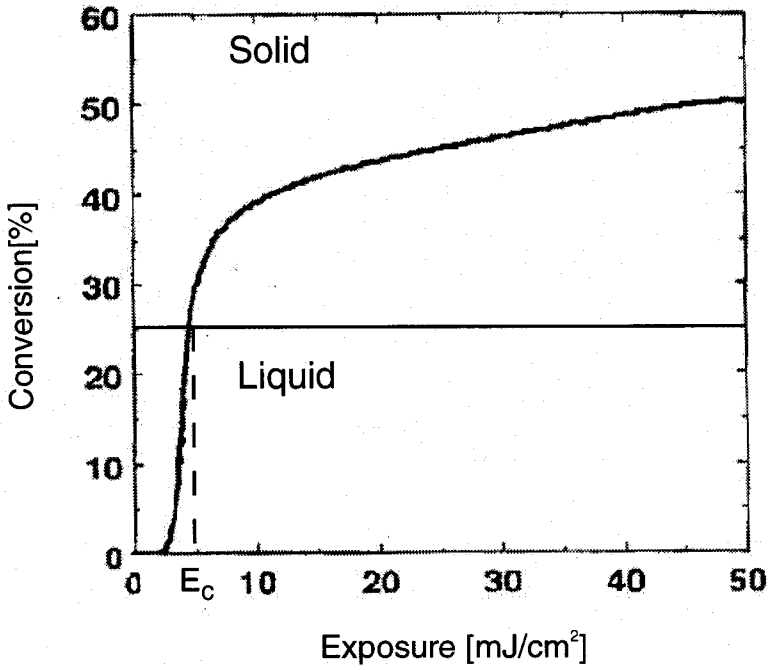



図7.11 総露光量と反応率の関係

ここで$\eta_{solid}$，$\eta_{liquid}$はそれぞれ固体樹脂および未露光の液体樹脂の屈折率を，$\kappa_{solid}$，$\kappa_{liquid}$はそれぞれ固体樹脂および未露光の液体樹脂の消衰係数を表している．

$\eta_{solid}$，$\eta_{liquid}$は，固体および液体の樹脂の屈折率であるが，$\kappa_{solid}$，$\kappa_{liquid}$については一般的に与えられていない光硬化性樹脂の物性値である．そこで，光硬化性樹脂の吸収率*Absorbance*を測定し$\kappa_{solid}$および$\kappa_{liquid}$を導出する仮定について述べる．

７．２．２節で述べたように物質中を通る光の屈折率は複素数で表され，その実部を屈折率$\eta$，虚数部を消衰係数$\kappa$と呼ぶ．式(７－９２）より，$\eta$は波の位相速度を決め，一方$\kappa$は振幅の大きさを波の進行距離とともに減衰させる働きをすることがわかる．この場合，サイクル平均強度は，

$$I(z)=I(0)\exp[-\alpha z] \qquad (7-107)$$

と書くことができ$\alpha=2\omega\kappa/c$は吸収係数と呼ばれる．ここで樹脂の吸収率*Absorbance*は以下のように定義されており，分光光度計による測定が可能である．

$$Absorbance=-\log\left(\frac{I(z)}{I(0)}\right) \qquad (7-108)$$

ここで，式（７－１０８）に式（７－１０７）を代入すると

$$\kappa=\frac{2.3\cdot Absorbance\cdot c}{2\omega z}=\frac{2.3\cdot Absorbance\cdot \lambda}{4\pi z} \qquad (7-109)$$

となり液体樹脂と固体樹脂の*Absorbance*の測定値から$\kappa_{solid}$および$\kappa_{liquid}$を導出できる．

以上のような過程で$\eta_{solid}$，$\eta_{liquid}$，$\kappa_{solid}$，$\kappa_{liquid}$を式（７－１０６）に代入し樹脂の複素屈折率$\eta+i\kappa$というパラメータを更新する．ここで，上記のSTEP1～STEP6までの計算を繰り返し，設定した露光時間が経過した時点で計算を終了し，電磁場および樹脂の硬化状態を計算結果として出力する．

## ７．３　液晶マスク露光による硬化現象の解析

光硬化性樹脂内部の硬化現象を解析するために，７．２節で述べたアルゴリズムを用いて計算機シミュレーションを行った．本節では，造形の基本硬化単位となる液晶マスクの１ピクセルを透過した光によって露光される樹脂の硬化現象に注目し，解析モデルを構築した．１ピクセルを透過した光によって露光される樹脂内部の電場分布ならびに樹脂硬化量を可視化し，樹脂硬化現象を解析する．さらに，液晶マスクによる露光を行った時の横分解能を評価するシミュレーション解析によって，第４章の横分解能実験におけるテストパターンの造形結果を検証した．

### ７．３．１　基準ピクセル領域解析モデル

本シミュレーションで使用した基準ピクセル領域解析モデルを図７．１２に示す．このモデルは，ピクセルサイズ３３×３３［$\mu$m］の液晶マスクを３６％に縮小したときに，液晶マスクの１ピクセルを透過した光によって露光される樹脂領域をモデル化したものである．解析領域全体の大きさは１４×１００［$\mu$m］であり，１２×９８［$\mu$m］の樹脂領域の周辺を厚さ１［$\mu$m］のPML吸収境界層で囲んでいる．このシミュレーションモデルにより，造形精度に最も大きな影響をあたえると思われる深さ９８［$\mu$m］までの樹脂硬化現象及び樹脂内部の電磁場の解析を行っている．このモデルではセルの１辺の長さは０．０５［$\mu$m］とし，また時間ステップ$\Delta t$は０．０２［s］として解析領域を定義している．

また，第４章の図４．７(b)に示すように本研究で使用した液晶マスクでは，一辺３３［$\mu$m］の液晶画素の両端部で合計５［$\mu$m］の部分がBM(Black matrix)で覆われている．したがって，基準ピクセル領域解析モデルでは，光の入射領域を樹脂領域中心部の１０［$\mu$m］とし，両端の１［$\mu$m］の領域では光の入射を制限している．

露光条件は光源の波長が４８８［nm］，露光面強度が４［mW/cm$^2$］である．光源の波長は光造形装置に用いられている$Ar^+$レーザのものであり，露光面強度は実験中に測定された露光量をもとに決定している．TN型液晶を透過した光は直線偏光となるため，入射光はx軸方向の直線偏光としている．また樹脂の物性として，硬化した樹脂の屈折率$\eta_{solid}$を１．５９０，消衰係数$\kappa_{solid}$を０．８２３×１０$^{-5}$，液体の未露光樹脂の屈折率$\eta_{liquid}$を１．４９１，消衰係数

$\kappa_{liquid}$を０．５２７×１０$^{-5}$とする．

### ７．３．２　電磁場分布および硬化現象解析結果（２次元）

本節では，基準ピクセル領域解析モデルを用いて樹脂内部の電磁場および硬化現象を２次元領域で解析した結果について述べる．図７．１３(a)に硬化時間０．２～１．０［s］における樹脂硬化量分布の解析結果を示す．また，図７．１３(b)に樹脂内部の電場の解析結果の一例を示す．ここで，図７．１３(a)のConvesionゲージは樹脂の硬化反応率を色の濃淡により表しており，図７．１３(b)のゲージは電場の解析結果における電場の値を示している．上記の結果を含め以後全ての結果では，Conversionゲージで３０％を越えた領域を硬化状態と見なし樹脂の硬化領域を定義している．

図７．１３(a)から樹脂の硬化反応が時間の経過とともに進行する様子が観察できる．また，露光面光強度４［mW/cm$^2$］で１［s］間樹脂を露光する場合，樹脂の硬化は隣接するピクセルの影響を受けないことが確認できる．さらに，x方向の樹脂硬化領域が露光面から遠ざかるにしたがって小さくなる傾向は，実験中に観察される現象と定性的に一致している．また，均一強度の光で樹脂を露光する場合にも，樹脂の硬化量に干渉の影響が原因と思われるむらが生じることが明らかとなった．これは，樹脂硬化収縮の原因の一つになっていると考えられる．以上の解析結果から，２次元領域の解析によって，過渡的な樹脂硬化現象を可視化し露光時間毎に樹脂の硬化領域および硬化の程度を確認できることを示した．

### ７．３．３　横分解能実験結果との照合

本節では液晶マスクによる露光を行った場合の造形の横分解能評価を行ったので，その結果について述べる．また，解析結果から求めた横分解能の値と第４章で行った横分解能実験の結果を照合し，本シミュレータの妥当性を検証する．横分解能評価のために構築したシミュレーションモデルについて以下に述べる．図７．１４(a)に３６％にマスクパターンを縮小して露光する場合のシミュレーションモデルを示す．このモデルは，液晶マスクの１列に並んだ７ピクセルを透過した光によって露光される深さ１０［$\mu$m］の樹脂層をモデル化したものであり，ピクセルの点灯状態はOff-On-Off-On-Off-Off-Onとしている．

また，図７．１４(b)に９％にマスクパターンを縮小して露光する場合のシミュレーションモデルを示す．このモデルは液晶マスクの１列に並んだ１１ピ

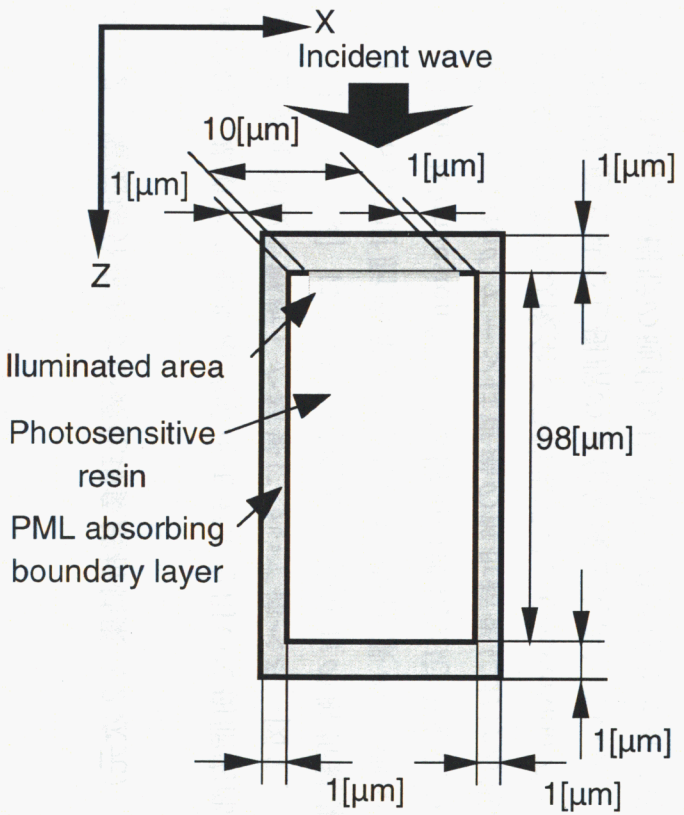
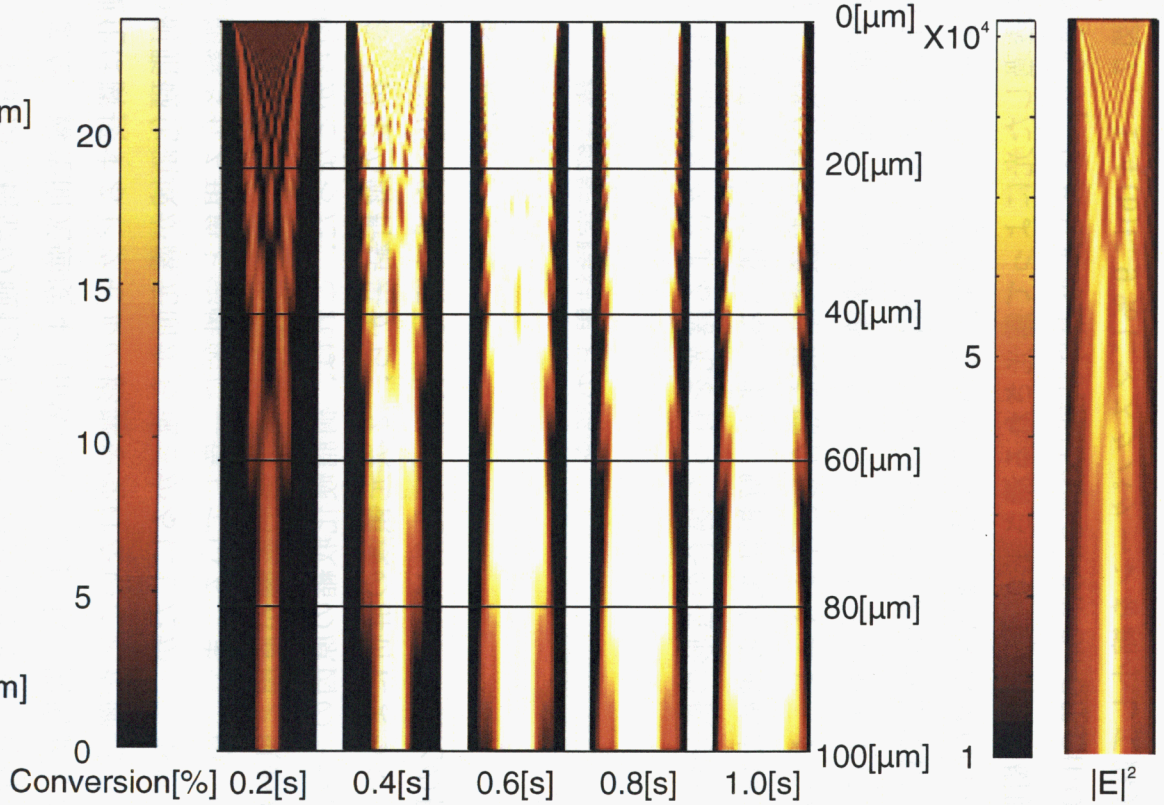



図7.12 基本領域解析モデル（２次元）




(a) 樹脂硬化量　　(b) 電場の分布

図7.13 樹脂硬化量および電磁場の解析結果

クセルを透過した光によって露光される深さ１０［$\mu$m］の樹脂層をモデル化したものであり，ピクセルの点灯状態はOff-On-Off-On-Off-Off-On-Off-Off-Off-Onとしている．

(a)　硬化現象解析結果（縮小倍率３６％）

図７．１４(a)のモデルを用いて，液晶マスク上に図７．１５(f)で示したようなテストパターンを出力し，３６％の縮小露光を行った場合の樹脂の硬化現象を解析する．この時，露光面光強度は４［mW/cm$^2$］，露光時間は４［s］とした．図７．１５(a)～(e)に露光時間０．２～４［s］における樹脂の硬化量の解析結果を示す．入射光波はｚ軸の正方向に進行する．これらの結果から，露光時間の増加と共に樹脂の硬化が横方向に広がっていく過程が確認できる．また４［s］間の露光で点灯ピクセルによって挟まれた１ピクセル分の領域Aを越えて樹脂の硬化が進行しないことから，３６％に縮小した液晶マスクの１画素の大きさすなわち１２［$\mu$m］がこの時の液晶マスクによる面露光の造形横分解能となることが確認できる．４．４．３節の図４．１１(d)にある４０％の縮小光学系におけるテストパターン造形の結果とこの解析結果を照合すると，実験的に確認した４０％縮小光学系における造形横分解能が１３［$\mu$m］であり，３６％の縮小光学系による樹脂硬化現象の解析結果とよく合致している．

さらにこれらの解析結果から，露光直後は樹脂の硬化形状が山形となるが，露光時間の増加と共に横方向に広がりをみせ，最終的にはBM(Black matrix)で覆われた領域についても樹脂を硬化させられることが確認できた．したがって，樹脂露光量を適切に設定してやれば造形時の表面精度を大きく向上させられることを示唆した．

これらの解析結果と実験結果の照合を行った結果，本シミュレータを用いて２次元領域で樹脂の硬化領域や樹脂硬化の過程を可視化し，樹脂の硬化現象を解析できることを示した．

(b)　硬化現象解析結果（縮小倍率９％）

本シミュレーションでは，過渡的な樹脂硬化の過程を可視化して樹脂の硬化現象を解析できる．そこで，図７．１４(b)に示したモデルを用いて液晶マスク上に図７．１６(g)で示したようなテストパターンを出力し，９％に縮小露光したときの樹脂の硬化の過程を調べ，横分解能３［$\mu$m］の造形の可能性について検討する．この時，露光面光強度は４［mW/cm$^2$］，露光時間は４［s］とし

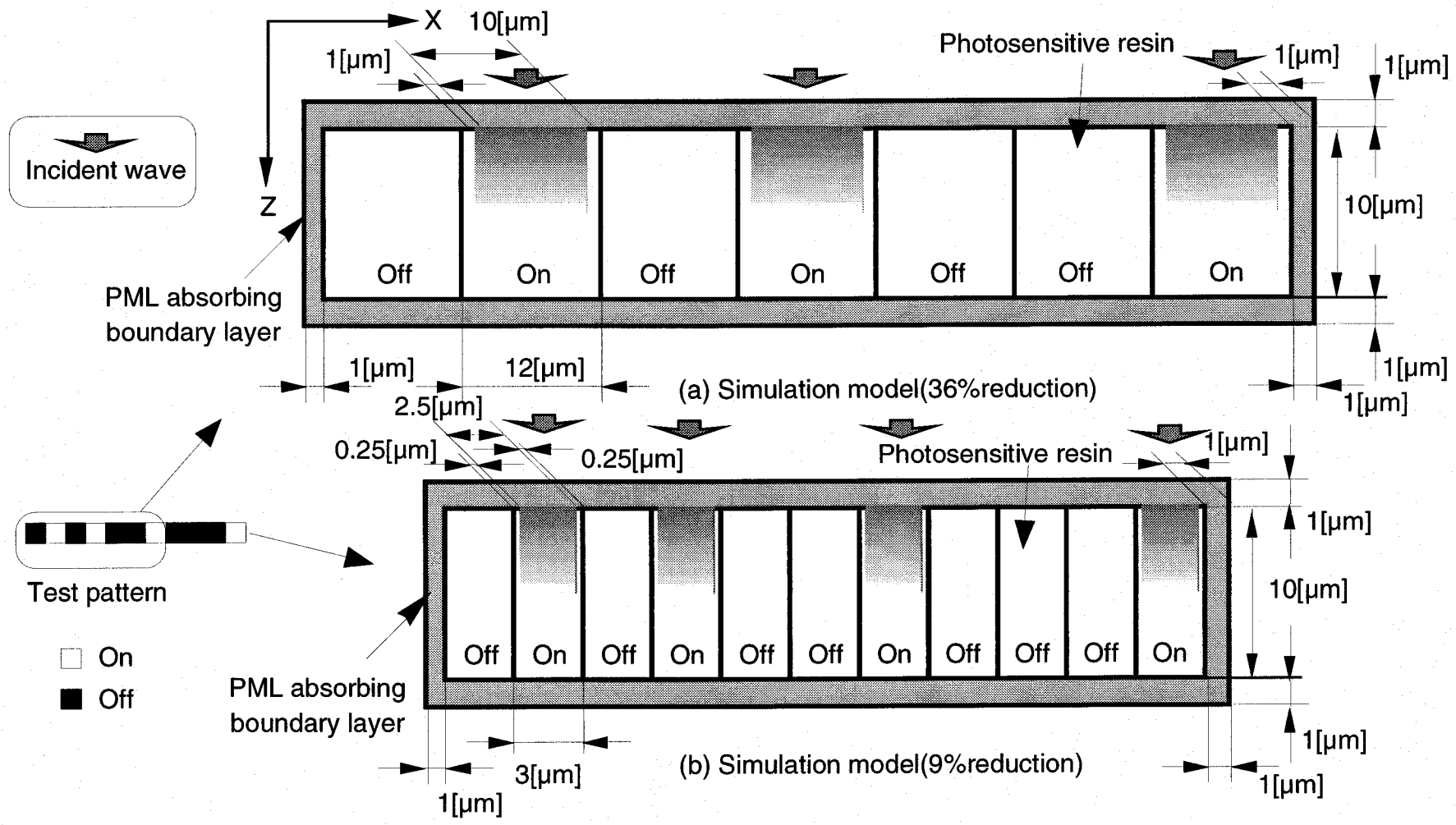



図7.14 テストパターン露光の解析モデル

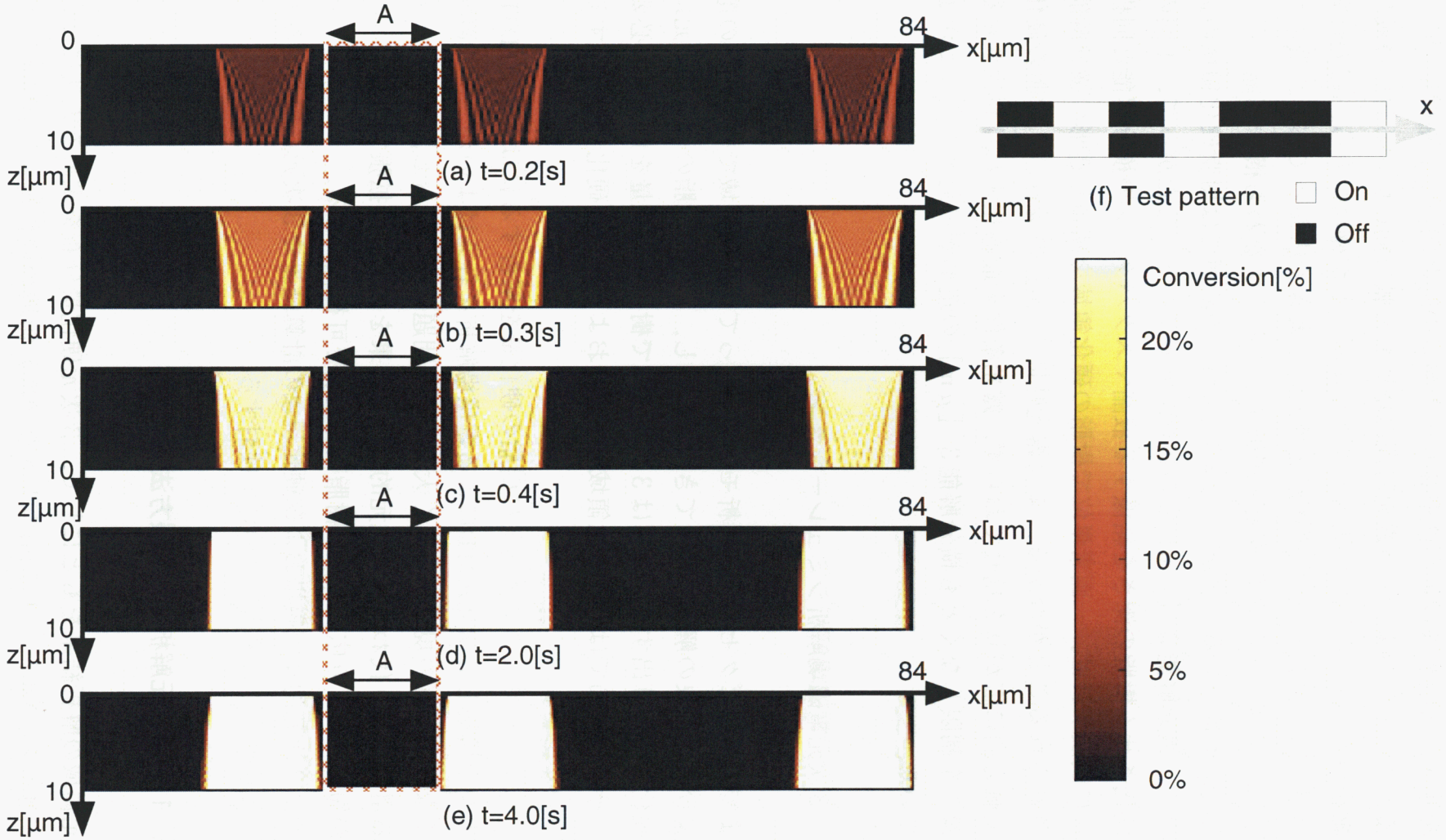



図7.15 テストパターン露光による樹脂硬化進行過程(縮小倍率３６％)

た．図７．１６(a)～(f)に露光時間０．２～４［s］における樹脂の硬化量の解析結果を示す．入射光波は縮小倍率３６％の解析の時と同様にｚ軸の正方向に進行する．これらの結果から，露光時間の増加とｘ軸方向に広がる樹脂の硬化領域が縮小倍率３６％の場合に比べて大きくなることが確認できる．露光時間４［s］の場合は，樹脂の硬化領域がｘ軸方向に大きく広がっており，液晶マスクの１ピクセル単位で硬化領域を制御すること，すなわち横分解能３［$\mu$m］の実現は困難である．しかし，$z=3$［$\mu$m］の断面では樹脂硬化領域の拡散は少なく，横分解能３［$\mu$m］での造形が可能である．したがって，１回の露光で硬化させる樹脂の深さを結像する液晶マスクパターンの横分解能と同程度の深さに制限すれば，一画素単位で樹脂の硬化領域を制御し造形の横分解能を向上させられることがわかる．また露光時間１［s］の場合は，樹脂の硬化領域はｘ軸方向に広がりを見せておらず，露光条件を最適化すれば硬化させる樹脂の深さを制限しなくとも横分解能３［$\mu$m］の造形が可能となることが示唆されている．

## ７．４　３次元電磁場解析シミュレーション

これまで，基準ピクセル領域解析モデルを使って２次元領域で樹脂内部の電磁場および硬化現象の解析を行ってきた．しかし，実際に樹脂の硬化量を元に樹脂の硬化形状を算出する場合には３次元領域で樹脂の硬化量を解析する必要がある．そこで本節では，３次元領域で電磁場および樹脂の硬化量を解析する手法について述べる．

本シミュレータにより３次元的に樹脂の硬化量を解析するには３次元FDTD解析モデルを構築し３次元FDTDによる電磁場解析を行えばよいが，解析領域が大きくなると計算の規模が著しく大きくなる問題がある．もし，３次元モデルによる計算を行う代わりに２次元的な解析結果を３次元に拡張できれば，計算時間が短縮されより広い領域で樹脂硬化現象を可視化できる．

そこで，２次元的な電磁場および硬化現象の計算結果を３次元に拡張する方法について述べ，その妥当性について検討する．

### ７．４．１　２次元解析結果拡張方法

２次元領域の解析結果をもとにして，３次元硬化量分布を求める方法について以下に述べる．図７．１７(a)のような３次元領域の硬化現象解析を行う場合，光の入射面をｘ－ｙ平面とすると光源の照射量分布，および樹脂の硬化状

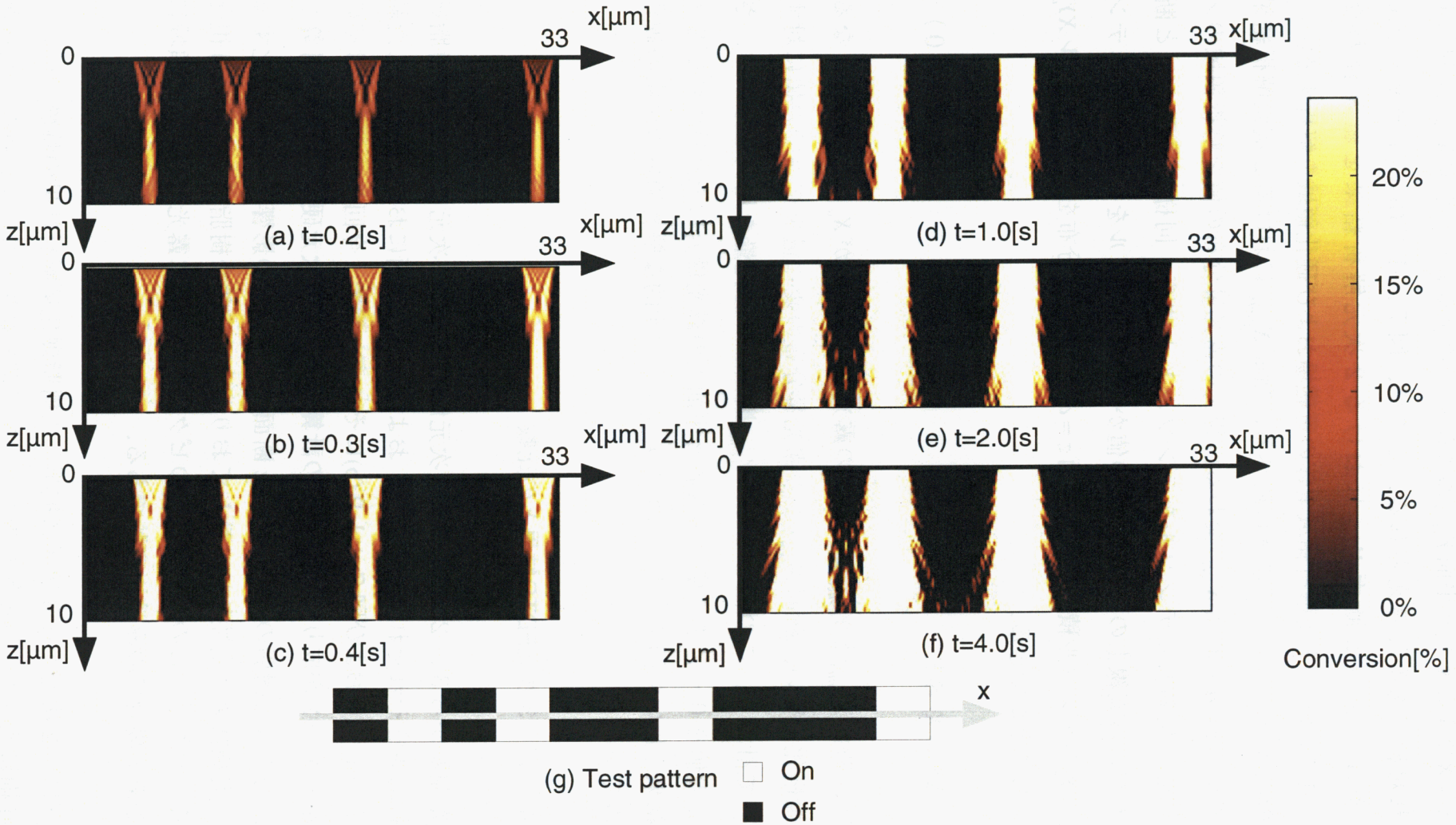



図7.16 テストパターン露光による樹脂硬化進行過程(縮小倍率 9 %)

態は$x=X/2$なるｙ－ｚ平面$Y_{center}$および$y=Y/2$なるｘ－ｚ平面$X_{center}$に対してそれぞれ対称であると考えられる．そこで，図７．１７(b)に示すｙ－ｚ断面$X_{center}$およびｘ－ｚ断面$Y_{center}$における２次元解析結果を組み合わせて図７．１７(a)の３次元解析領域全体の電磁場および硬化領域を解析する．

その計算方法について以下に述べる．断面$X_{center}$における２次元解析結果において平面$z=a$と断面$X_{center}$交わる直線上の露光量分布の値を解析領域のノード番号順に配列したテンソルをテンソル$X_a$とする．同様に平面$z=a$と断面$Y_{center}$が交わる直線上の露光量分布の値からなるテンソルを$Y_a$とするときテンソル$X_a$と$Y_a$のテンソル積をとれば平面$z=a$上の露光量分布を表すテンソル$XY_a$を計算することができる．

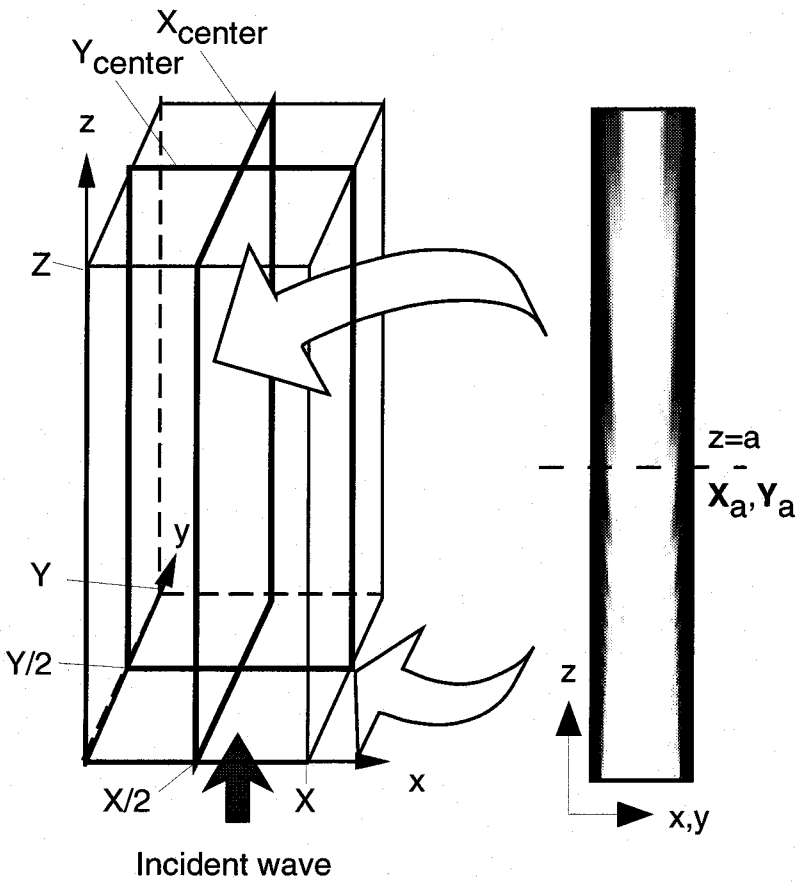
$$XY_a = X_a \otimes Y_a \qquad (7-110)$$

この時，断面$X_{center}$と$Y_{center}$の交点での露光量分布の値が$X_a$と$Y_a$で等しくなるように規格化を行い，断面$X_{center}$上の露光量分布の変化量を交点での値に対する比として計算し，この値をもとに$Y_{center}$断面上の露光量を比例配分する．さらに，ｚの値を０～Ｚまで変化させ各ｚ平面上の露光量分布を計算すれば２次元解析結果を用いて図７．１８に示すような３次元的な解析領域の樹脂の硬化量を求めている．

### ７．４．２　３次元FDTD結果との比較

露光開始から３．２［s］後の２次元解析結果を３次元に拡張した樹脂硬化量解析結果をそれぞれｙ－ｚ断面，およびｘ－ｙ断面において可視化した結果を図７．１９(a)および図７．１９(b)にそれぞれ示す．今回のモデルではその対称性から$X_a=Y_a$が成り立つので$X_a$の計算結果から３次元硬化量分布を計算している．得られる樹脂の硬化形状やｚ断面上では回折の影響を受けて硬化する傾向は，実験結果と定性的に一致しており，３次元的な樹脂硬化領域の可視化が行える．ただし，この手法は液晶のピクセルのように露光条件や露光領域に対称性がある場合にのみ適用可能である．

以下に，２次元から３次元に拡張した樹脂硬化量解析結果の特徴についてさらに詳細に述べる．以後簡単のため２次元解析結果を３次元に拡張した樹脂硬




(a) 3-D simulation model (b) 2-D simulation result

図7.17 3次元への拡張方法模式図

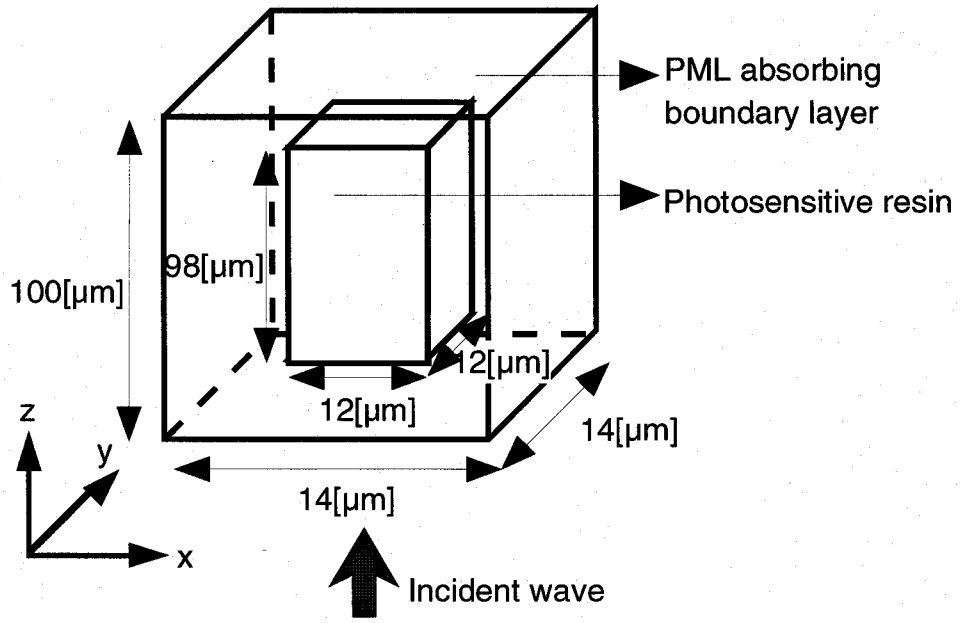
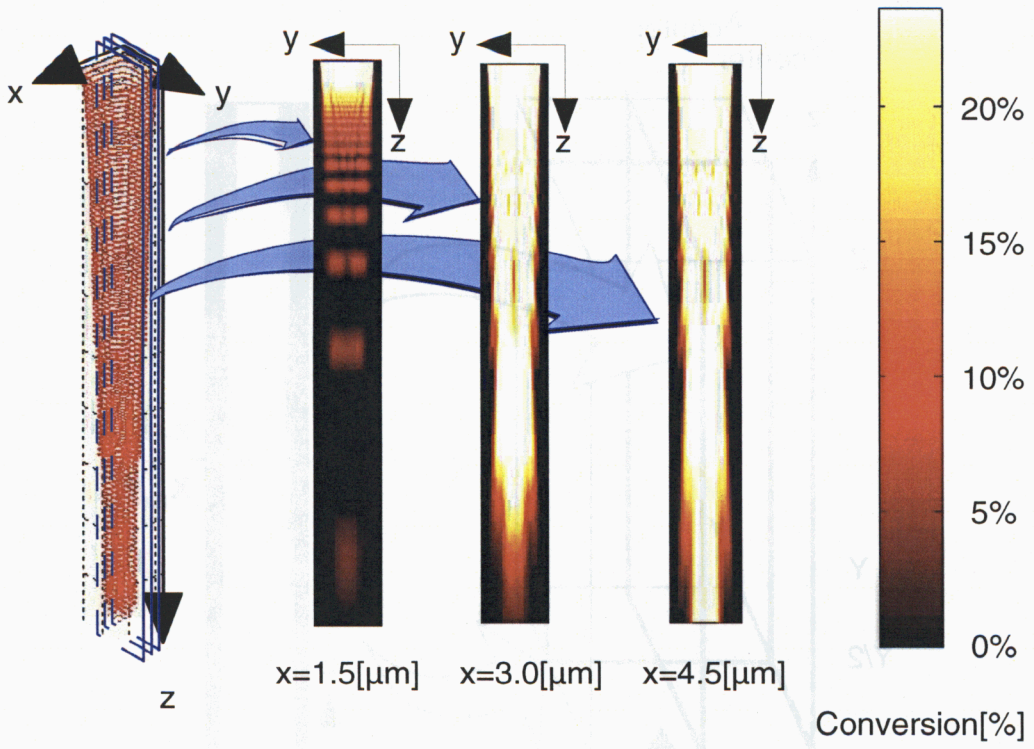
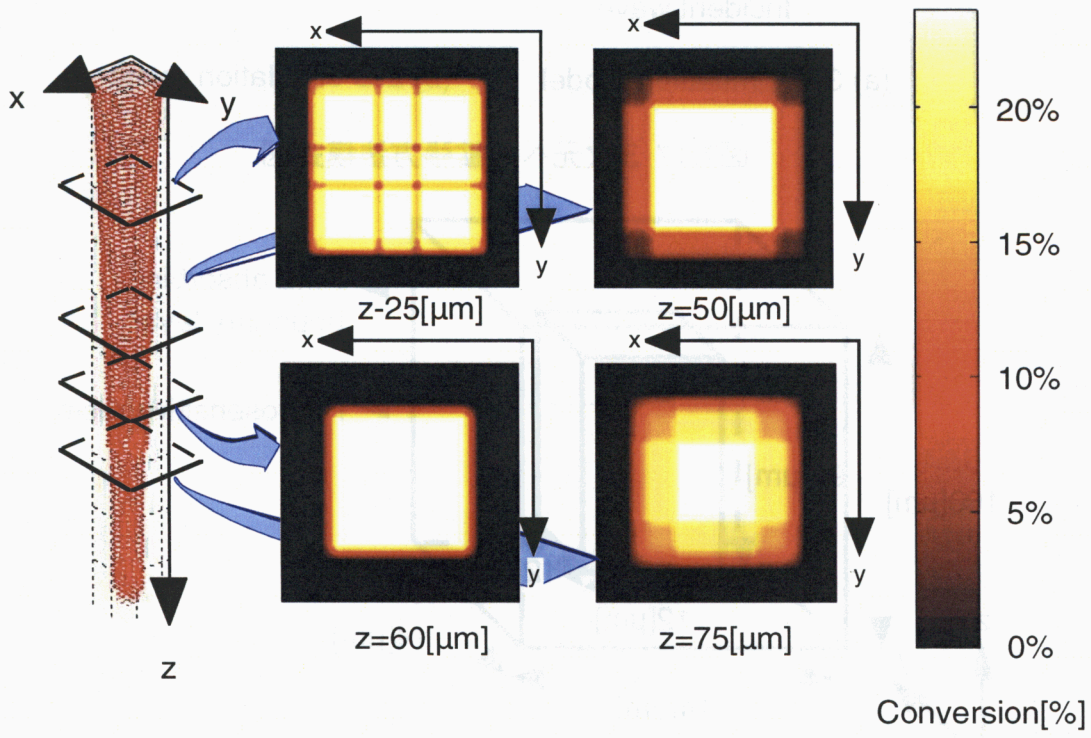



図7.18 3次元FDTD解析モデル




(a) y-z断面における樹脂硬化量分布




(b) x-y断面における樹脂硬化量分布

図7.19 3次元樹脂硬化量分布解析結果

化量解析結果を拡張３次元解析結果，３次元FDTDによって３次元領域で樹脂硬化量を解析した結果を３次元FDTD解析結果と呼ぶ．

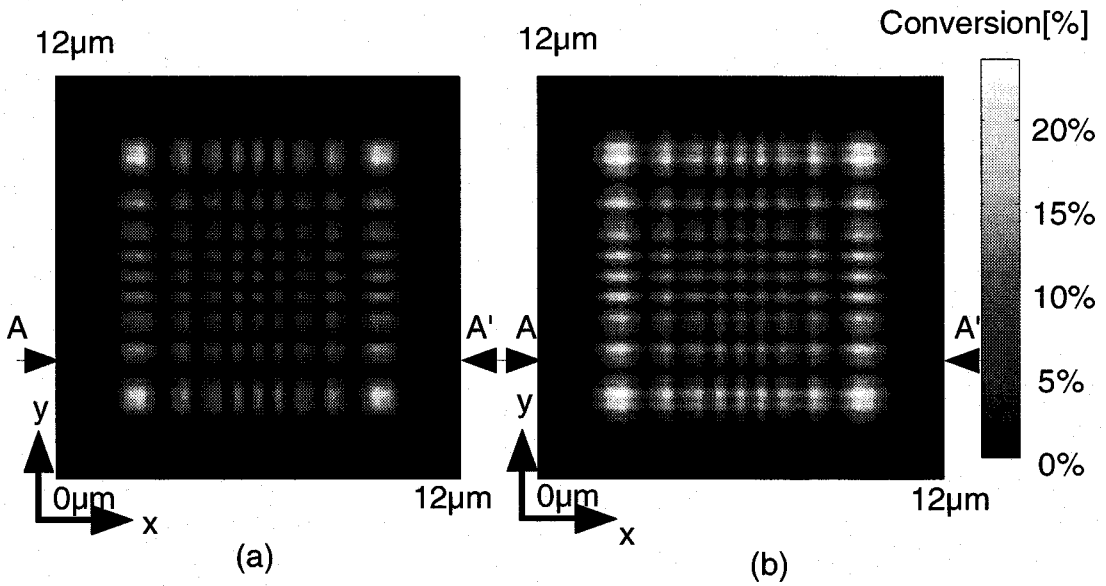
図７．２０(a)に上記の手法を用いて拡張３次元解析結果を示す．出力した結果は露光開始から０．２［s］後の光の入射面を$z=0$［$\mu$m］とした時，$z=7.5$［$\mu$m］なるｘ－ｙ断面上の樹脂硬化量分布である．ただしｚ軸は光の進行方向にとるものとする．以後，ｚ軸およびｚの値に基づく表記は上記の仮定を満たすものとする．

また，図７．２０(b)に実際に３次元FDTDにおいて図７．１８に示すような解析モデルの樹脂領域を$0\leq z\leq 10$［$\mu$m］に設定し直して解析した結果を示す．解析を行った条件および断面の位置は図７．２０(a)のものと同様である．両者を比較すると樹脂硬化量の分布に共通した特徴が表れていることがわかる．

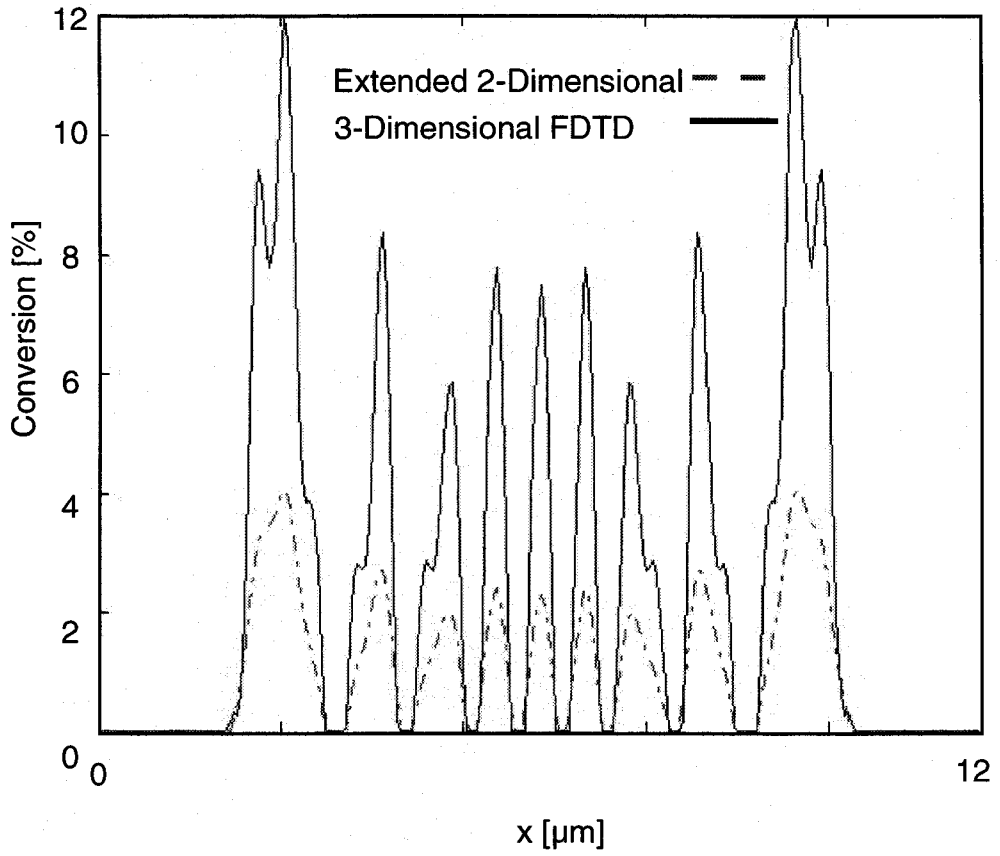
さらに拡張３次元解析結果と３次元FDTD解析結果の詳細な比較を行うため$z=7.5$［$\mu$m］なる平面上で$y=3$［$\mu$m］を満たす直線A-A'上の樹脂硬化量を比較した結果を図７．２０(c)に示す．図中の実線の値が３次元FDTD解析結果を示し，図中の破線の値が拡張３次元解析結果を示す．図７．２０(c)から軸方向の露光量分布の変動周期などの特徴は両者とも良く一致している．また，A-A'以外に$y=1.5$［$\mu$m］，$y=5$［$\mu$m］の断面上でも軸方向の特徴については共通した傾向がみられることが確認でき，解析するｘ－ｙ断面が異なる場合についても同様の傾向がみられている．

しかし，図７．２０(c)で樹脂硬化量の大きさを比較すると３次元FDTD解析結果が拡張３次元解析結果に比べて２倍程度大きな値をとっていることがわかる．また，解析するｘ－ｙ断面の位置を変更し$z=8$［$\mu$m］，$z=9$［$\mu$m］なる２つの断面上で露光から０．２［s］経過したときの解析領域中央の樹脂硬化量分布を比較した結果を図７．２１(a)，図７．２１(b)に示す．図中の破線，実線それぞれが示す値は図７．２０(c)と同様である．これらの結果を比較すると，樹脂硬化量については解析する断面によって樹脂硬化量の差に開きが生じたり，３次元FDTD解析結果と拡張３次元解析結果で露光量の値が逆転する場合もあることがわかる．このため，拡張３次元解析結果は，樹脂硬化量のｘ－ｙ断面上分布をよく再現しているが，樹脂硬化量については必ずしも一致しないことがわかる．

以上のことから，拡張３次元解析結果は３次元FDTD結果との比較によりｘ－ｚ断面における樹脂硬化量分布の特徴をよく表していることから３次元領域の樹脂硬化領域を簡単に可視化する用途に利用できると思われる．




(a) (b)



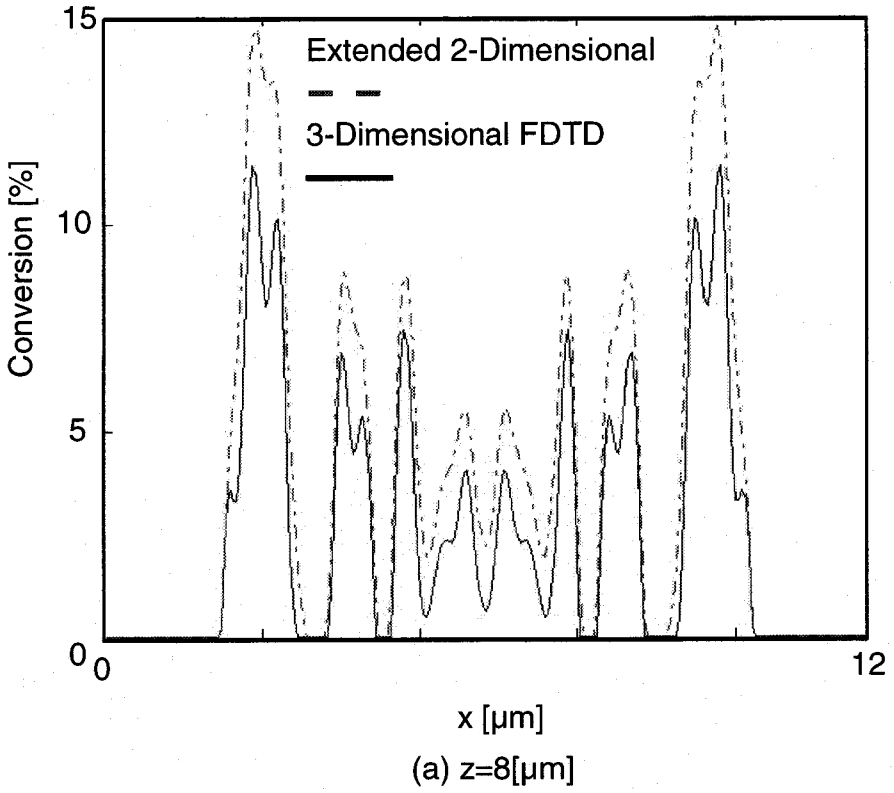

(c)

(a) 2 ― 3 次元拡張プロセスによる計算結果(z=7.5[μm])

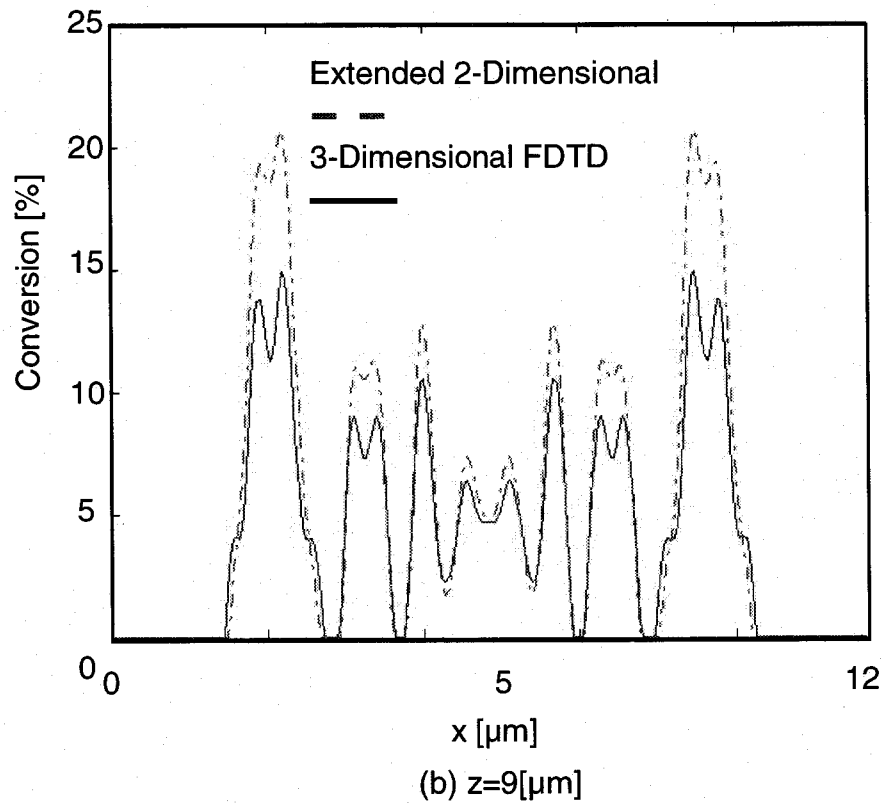
(b) 3 次元FDTDによる計算結果z=7.5[μm])

(c) A-A'上の樹脂硬化量分布(y=3[μm])

図7.20 2 ― 3 次元拡張による解析結果と 3 次元FDTD解析結果の比較




(a) z=8[μm]




(b) z=9[μm]

図7.21 2つのx-y断面上での樹脂硬化量の比較

## ７．５　結言

本章では，FDTD法を用いて樹脂内部の電磁場および樹脂硬化の過程を可視化し，液晶マスクによる露光を行った場合の樹脂内部の硬化現象を解析した．樹脂の硬化現象解析結果から得られた成果をまとめると以下のようになる．

（１）１ピクセルを透過した光によって露光される樹脂の硬化現象を解析するために，基準ピクセル領域解析モデルを構築した．この領域で硬化する樹脂が，液晶マスクによる面露光造形の基本硬化単位となる．

（２）基準ピクセル領域解析モデルを用いて樹脂硬化の過程や樹脂内部の硬化量を可視化し，樹脂内部の電場，および過渡的な樹脂の硬化現象を解析した．

（３）液晶マスクによる造形の横分解能を評価し，シミュレーション解析により得られた造形横分解能の値と第４章で実験的に求めた横分解能の値を照合し，両者がよく合致することから本シミュレーションの妥当性を検証した．

（４）縮小光学系の縮小倍率を９％とした時の樹脂硬化領域を可視化し，横分解能３［$\mu$m］での造形の可能性を示唆した．また，横分解能を向上させるためには，一回の露光で硬化させる樹脂の硬化深さを横分解能程度の値にする必要があることを確認した．

（５）２次元的な樹脂硬化量分布の計算結果から３次元的な樹脂の硬化領域を求める方法を提案し，３次元FDTD法による計算結果と比較した結果，ｘ－ｙ断面の露光量分布の特徴において，良好な合致がみられることを確認した．同手法により３次元的な樹脂硬化進行の過程を広い領域で可視化し，樹脂の硬化現象解析を行える可能性を示唆した．

## 参考文献


［７－１］　橋本修, 阿部琢美, ＦＤＴＤ時間領域差分法入門, 森北出版株式会社, (1996)

［７－２］　Alfred Kwok-Kit WOng, Rigorous Three-Dimensional Time-Domain Finite-Difference Electromagnetic Simulation, College of Engineering University of California, Berkley,Electro Research Laboratory, Memorandom No. UCB/ERL M94/69, September, (1994)

［７－３］　宇野亨, FDTD法による電磁場およびアンテナ解析, コロナ社, (1998), 59. 80-101.

［７－４］　小松雅也, 光リソグラフィ変形シミュレーション, 光学, Vol.21, 10, (1992) 736.

［７－５］　櫛田孝司, 量子光学, 朝倉書店, (1981),17-20.

# 第8章
# 結論

本研究は，３次元微細形状を高速且つ高精度に造形するために，液晶マスクを用いた非積層マイクロ光造形法を提案したものである．その実現のため，基礎特性として樹脂の硬化特性や液晶マスクの光透過特性等を調べ，また，試作した濃淡画像および動画像を用いた非積層光造形装置を用いて基礎的形状を造形し，本手法による非積層造形の実現性を検討した．さらに，造形精度向上のためFDTD法を用いて樹脂硬化現象を可視化するシミュレータを構築し，液晶マスクによる露光が行われた場合について，樹脂内部の硬化現象を理論的に解析した．

以下に本研究で得られた結論を総括する．

第１章では，本研究の背景ならびに従来の研究をまとめ，マイクロ光造形技術の必要性を述べ，非積層面露光型光造形法について検討を加えた．この造形法は，走査露光積層型の光造形法と比較して以下の（１）～（４）の有利な特徴を持つ．

（１）単位面積あたりの露光に要する時間が大幅に短い．

（２）マスクによる面露光プロセスは，露光の過程で機械駆動制御を必要とせず，高い精度，分解能で樹脂の露光が可能である．

（３）２次元断面の積層により生じる層間の段差による誤差が発生しない．

（４）積層回数に比例した造形時間の増加が起こらない．

このような特徴を持つ非積層面露光型マイクロ光造形法の実現を目的とした研究を行うこととし，その実現のために解決するべき課題として以下の［１］～［３］を挙げた．

［１］走査型露光と同等の自由度をもつ面露光装置の実現

［２］断面の積層によらない３次元モデルの定義方法の確立

［３］樹脂内部での硬化現象の制御

さらに，これら［１］～［３］の課題を克服し，高速・高精度なマイクロ光造形の実現を目指したホログラフィ光造形法，および液晶マスクを用いた非積層マイクロ光造形法について，その研究の概要を示した．

第２章では，非積層面露光型光造形法として提案したホログラフィ光造形法の基本原理について論じた．また，基礎的な樹脂硬化現象解析シミュレーションを行い，樹脂内部で結像する点光源による樹脂の硬化現象を調べた．さらに，位相共役波によるホログラフィ再生像の３次元的な結像特性，および樹脂硬化現象の基礎特性について，試作した実験装置を用いて実験的に調べた結果について述べ，以下のことを明らかにした．

（１）実験的に測定された樹脂物性値を用いて，露光量と樹脂硬化量の関係から樹脂内部の硬化現象解析シミュレーションを行い，樹脂内部で結像する結像点の近傍から樹脂の硬化が開始されることを示した．

（２）位相共役波の結像位置を検出する実験により，位相共役波によるホログラフィ再生像の結像点位置が試料表面の形状に対応して変化すること，すなわち３次元的な像の記録・再生が実時間で行われていることを確認した．

（３）位相共役波の結像位置と樹脂硬化形状の対応関係を調べ，走査露光による試料形状の３次元的な複製の造形の可能性を検討した．また，３次元形状を一括面露光によって造形する場合，その結像点のみで高い強度を持つ位相共役波を発生させる必要があり，その実現にはホログラフィ像の回折効率や位相共役素子の大きさ等に起因する問題があることを示した．

第３章では，液晶マスクを用いた非積層マイクロ光造形原理として，濃淡画像による非積層造形過程，および動画像を利用した非積層造形過程について論じた．その内容を以下にまとめる．

（１）濃淡画像による非積層造形と動画像による非積層造形の特徴を比較し，濃淡画像による非積層造形プロセスは非オーバハング形状の高速な造形に適し，樹脂を露光面に連続供給しながら動画像による露光を行う造形プロセスは，オーバハング部分を持つような複雑な３次元構造の造形に適していることを述べた．

（２）ランバートの法則から導出できる露光量と樹脂硬化深さの関係を利用すれば，樹脂に与える露光量から樹脂硬化深さの制御が可能であり，液晶マスクの濃淡階調表示を利用し，露光面で任意の露光量分布を形成することで３次元形状を非積層で造形できることを述べた．

（３）動画像を露光しながら樹脂を露光面に連続供給して，断面形状を連続的に造形する動画像露光非積層造形プロセスを提案し，同プロセスでは積層造形において各層の造形を行うごとに必要とされる層形成の手順が造形過程に含まれないため，短時間で高精度な造形が可能となることを述べた．

第４章では，樹脂の硬化特性，液晶マスクの光透過特性を調べ，液晶マスク露光による面露光の横分解能の評価を行って，以下のことを明らかにした．

（１）波長４８８［nm］の光に対する光硬化性樹脂（KC1042）の物性値を測定し，臨界露光量$E_c$として５．０［mJ/cm$^2$］，透過深度$D_p$として４７３．２［$\mu$m］の測定値を得た．また，これらの値を用いてランバートの法則に基づく露光量による硬化深さ制御が行えることを確認した．

（２）波長４８８［nm］の光に対して液晶マスクの光透過特性を調べ，液晶マスクが波長４８８［nm］の光に対して約１００階調が利用可能な高コントラストの可変濃淡マスクとして機能することを確認した．また液晶マスクの透過率特性曲線を求め，液晶マスクの表示階調の増減に対応してその透過率を０～７０［%］の範囲で変化させられることを示した．

（３）液晶マスクの濃淡階調表示を利用して透過率特性曲線を基に所望の露光量分布を樹脂に与え，樹脂の硬化深さを制御できることを確認した．

（４）テストパターンを造形して造形の横分解能を評価し，縮小光学系の縮小倍率が１００～３０［%］である場合は，造形の横分解能が液晶マスクのピクセルサイズと縮小光学系の縮小倍率によって決まり，樹脂の最小硬化単位の影響を受けないことを確認した．

第５章では，液晶マスクを用いた非積層光造形装置を構築し，濃淡画像を用いて非積層造形を行いマイクロ形状造形の可能性を実験的に検証し，以下のことを明らかにした．

（１）２値画像を用いて，露光時間４［s］で壁厚１００［$\mu$m］，高さ２［mm］のマイクロチューブや外径１．５［mm］の平歯車などの基礎的なマイクロ形状の造形が可能であることを確認した．

（２）線幅１００$\mu$mの"OPTIC@"という６文字のアルファベット文字や３種類の大きさの異なる歯車形状を同時に造形し，多様な形状に対して複数の異なる形状を同時に造形できる液晶マスク面露光の利点を確認した．

（３）結像光学系の縮小倍率を変化させてリング形状や歯車形状の造形を行い，造形の横分解能が液晶マスクのピクセルサイズと光学系の縮小倍率によって決まることを確認し，さらに縮小倍率が造形形状の表面精度や形状精度に与える影響について検討した．

（４）濃淡画像を用いた一括面露光により深さ方向に一様に変化する底辺２．５［mm］，高さ１．５［mm］のピラミッド形状を２［s］間で積層せずに造形し，濃淡階調表示による露光量制御を行って３次元形状が高速かつ高精度に造形可能であることを確認した．

第6章では，動画像露光を行って樹脂露光量を制御し，動画像を用いる露光プロセスの実現性について検討した．また，動画像を露光しながらベースプレート位置を駆動制御して樹脂を露光面に連続供給し，連続的な断面形状造形実験を行った．これらの実験によってピラミッド形状などの基礎的な形状を造形し，以下のことを明らかにした．

（1）動画像を液晶マスクに出力して動画像露光を行い，樹脂に与える露光量を制御してピラミッド形状やかさ歯車形状を積層せずに造形できることを確認した．これにより，動画像露光により樹脂に所望の露光量を与えられることを確認し，連続的に変化する動画像を露光しながらベースプレート位置を駆動制御することで，オーバハング形状の造形が行える可能性を示唆した．

（2）動画像を露光しながら樹脂を露光面に連続供給し，断面形状を連続して造形するプロセスの実現性を検討するため，基礎的なピラミッド形状を造形した．また，同プロセスにおいて造形精度を決定する要因について考察し，最適な露光条件を定式化した．

（3）動画像を露光しながら樹脂を露光面に連続供給する造形プロセスによって，ウェスト部を持つ基礎的なオーバハング形状を造形できることを確認した．

（4）濃淡画像を連続的に出力する動画像造形で，任意の露光量分布を動的に樹脂に与えることを検討し，将来の造形精度向上の可能性を示唆した．

第7章では，液晶マスクを用いた面露光造形の高精度化のため，FDTD法を用いた樹脂内部の電磁場および樹脂硬化量解析シミュレータを構築し，基本的な樹脂硬化現象を解析した結果，以下のことを明らかにした．

（1）基準ピクセル領域解析モデルを用いたシミュレーションを行い，樹脂内部で硬化反応が進行する過程やその時の樹脂硬化量分布を可視化し，液晶マスクのピクセルを透過した光による樹脂の硬化現象を解析した．

（2）液晶マスクによる造形の横分解能を評価し，シミュレーション解析により得られた造形横分解能の値と第4章で実験的に求めた横分解能の値を照合し，両者がよく合致することから本シミュレーションの妥当性を検証した．さらに，横分解能3［$\mu$m］の造形が可能であることを示唆した．

（3）2次元的な樹脂硬化量分布の計算結果から3次元的な樹脂の硬化領域を求める方法を提案し，3次元FDTD法による計算結果と比較した結果，x－y断面の露光量分布の特徴において，良好な合致がみられることを確認した．同手法により3次元的な樹脂硬化進行の過程を広い領域で可視化し，樹脂の硬化現象解析を行える可能性を示唆した．

# 関連論文，国際会議および口頭発表

## 関連論文

［1］林 照剛, 三好 隆志, 高谷 裕浩, 高橋 哲 ： 液晶マスクを用いた非積層マイクロ光造形法に関する研究 -濃淡画像による非積層造形-, 精密工学会誌, 投稿中, （校閲終了）

## 国際会議

［1］Terutake Hayashi, Takashi Miyoshi, Yasuhiro Takaya, Satoru Takahashi：DIRECT 3D FORMING USING TFT LCD MASK, The 8th International Conference on Rapid Prototyping, Tokyo, June, (2000), 172-177.

［2］Terutake Hayashi, Takashi Miyoshi, Yasuhiro Takaya, Satoru Takahashi：Nonlaminate micro stereolithography using TFT LCD, 1st Euspen Topical Conference on Fabrication and Metrology in Nanotechnology, Copenhagen May, vol.1, ( 2000), 98-106.

## 口頭発表

［1］林 照剛, 三好 隆志, 高谷 裕浩, 高橋 哲：液晶を用いた非積層マイクロ光造形法の研究, 日本機械学会２０００年度年次大会講演論文集, Vol.3, 00-1, (2000), 507-508.

［2］林 照剛, 三好 隆志, 高谷 裕浩, 高橋 哲： 液晶マスクを用いた非積層光造形法に関する研究, 型技術, vol.15, 8, (2000), 52-53.

［3］林 照剛, 三好 隆志, 高谷 裕浩, 高橋 哲： TFT液晶を用いた一体光造形法に関する研究（第2報） - 液晶動画像による連続形状創成 -, 2000年度精密工学会春期大会学術講演会講演論文集, (2000), 79.

［4］林 照剛, 三好 隆志, 高谷 裕浩, 高橋 哲： TFT液晶を用いた一体光造形法に関する研究, 1999年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1999), 9.

［5］林 照剛, 三好 隆志, 高谷 裕浩, 高橋 哲： 位相共役光による三次元造形に関する研究（第一報） - 液晶濃淡画像の硬化特性 -, 1999年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1999), 719.

［6］林 照剛, 三好 隆志, 高谷 裕浩, 高橋 哲： 位相共役光を用いた光造形法に関する基礎的研究 - 液晶画像の利用-, 1998年度精密工学会秋季大会学術

講演会講演論文集, (1998), 61.
[7] 林 照剛, 三好 隆志, 高谷 裕浩, 高橋 哲：位相共役素子を用いたホログラフィ光造形法に関する研究（第二報）- 像形成の基本原理 -, 1998年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1998), 409.
[8] 林 照剛, 三好 隆志, 高谷 裕浩, 高橋 哲：位相共役素子を用いたホログラフィ光造形法に関する研究, 1997年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1997), 205.

# 謝辞

本研究を遂行するに当たり，始終懇切な御指導と御鞭撻を賜りました指導教官の大阪大学大学院工学研究科教授 三好 隆志 博士に謹んで心から感謝の意を表し厚く御礼申し上げます．

また，本研究を遂行し，本論文をまとめるに当たって，貴重な御助言と懇切な御指導を賜りました大阪大学大学院工学研究科教授 花﨑 伸作 博士，澁谷 陽二 博士，同助教授 高谷 裕浩 博士に深く感謝し，厚く御礼申し上げます．

本研究を進めるに当たって有益な御助言と暖かい激励を賜り，公私に渡ってお世話になりました大阪大学大学院工学研究科助手 高橋 哲 氏に深く心から感謝します．

また，光硬化性樹脂を御提供頂くに当たり多大なる御助力を頂きましたJSR株式会社 渡邉 毅 氏，山村 哲也 氏に深く感謝し，厚く御礼申し上げます．

また，実験に協力して頂きました 木村 寛 君，白鳥 わか子さん，西野 秀昭 君，試料の測定に御助力を頂きました李 瑞埈氏に深く感謝し，厚く御礼申し上げます．

三好研究室に在籍した6年間，知的な刺激と暖かな笑いに満ちあふれる充実した環境に恵まれて心豊かに研究が行えましたことを，過去に三好研究室に在籍した卒業生の方々，そして現在三好研究室に在籍している学生の皆様に深く心から感謝します．

また，本研究の一部は平成１２年度文部省科学研究費補助金（基盤研究(B)(2)）の助成を受けて行われたことを付記し，感謝の意を示します．

最後に，暖かい愛情で私を支えてくれた私の父，母，弟に深く心から感謝します．