

冷却固化式光造形法に関する研究

(ゾルゲル変換樹脂と紫外光遮断層を用いた高自由度・高精度造形)

神 村 明 哉

博士論文

冷却固化式光造形法に関する研究

—ゾルゲル変換樹脂と紫外光遮断層を用いた
高自由度・高精度造形—

通し番号 1-234

平成 11 年 12 月 17 日提出

指導教官 村上 存 助教授

産業機械工学専攻 77064 神村 明哉

目次

第1章 序論.....	13
1.1 研究の背景.....	13
1.2 研究の目的.....	29
1.3 論文の構成.....	31
第2章 光造形法 (STEREOLITHOGRAPHY) の現状と課題.....	35
2.1 光造形法の露光方式, 積層方式による分類と検討.....	35
2.2 光造形法の特徴と適用事例, 課題.....	40
第3章 冷却固化式光造形法 (REFRIGERATIVE STEREOLITHOGRAPHY) の提案.....	42
3.1 冷却固化式光造形法の原理.....	42
3.2 冷却固化式光造形法の特徴.....	44
第4章 冷却固化式光造形用光硬化性樹脂の開発.....	46
4.1 一般光造形用光硬化性樹脂の現状.....	46
4.1.1 一般光造形用光硬化性樹脂の要求特性.....	46
4.1.2 光硬化の原理.....	48
4.1.3 開発動向.....	50
4.2 冷却固化式光造形用光硬化性樹脂の開発.....	51
4.2.1 冷却固化式光造形原理の検証実験.....	54
4.2.2 ゼルゲル変換型光硬化性樹脂の開発.....	59
第5章 光造形法における硬化物余剰成長問題の検討.....	67
5.1 光造形法における硬化物余剰成長問題と現状.....	67
5.2 余剰成長のメカニズムに関する理論的考察.....	68
5.2.1 単一硬化ラインの露光量分布計算.....	69
5.2.2 複数硬化ラインによる硬化層の露光量分布計算.....	70
5.2.3 硬化層積層時の露光量分布計算.....	71
5.3 硬化形状シミュレーション.....	71

5.4	最大余剰成長厚理論式の導出.....	75
5.5	造形実験による余剰成長厚の測定.....	77
5.5.1	透過深度、臨界露光量の測定.....	77
5.5.2	余剰成長厚の測定.....	78
5.5.3	最大余剰成長厚理論式の検証および考察.....	81
第6章	冷却固化式光造形法における紫外光遮断層の導入.....	85
6.1	紫外光遮断層の提案.....	85
6.2	基礎実験による紫外光遮断層の有効性の検証.....	87
6.3	紫外光遮断層に関する検討.....	89
6.3.1	紫外光遮断層の検討.....	89
6.3.2	紫外光遮断層導入による樹脂層内の露光量分布計算.....	93
第7章	ゾルゲル変換樹脂と紫外光遮断層を用いた冷却固化式光造形システムの設計・製作.....	110
7.1	造形システムハードウェア.....	110
7.2	造形システム制御.....	122
第8章	試作システムによるゾルゲル変換樹脂と紫外光遮断層を用いた冷却固化式光造形原理の検証.....	133
8.1	樹脂供給過程.....	133
8.1.1	樹脂供給時の樹脂面温度測定.....	134
8.1.2	樹脂供給時の積層樹脂層内温度測定.....	139
8.1.3	樹脂積層最小厚の測定.....	141
8.2	反射余剰成長問題の検証.....	144
8.3	反射余剰成長のXY面分解能への影響.....	147
8.4	造形実験による有効性の検証.....	153
8.5	一般光造形システムと紫外光遮断層を用いた冷却固化式光造形システムによる造形サンプルの比較検証.....	161
8.6	まとめ.....	166
第9章	冷却固化式光造形法によるマスク一括露光方式の可能性の検討.....	168
9.1	造形原理.....	168
9.2	マスク一括露光方式における硬化理論.....	172
9.3	造形基礎実験による可能性の検討.....	179

9.4 考察.....	186
第10章 考察.....	187
10.1 光造形法における造形時間，加工分解能，造形物サイズの相関に関する検討 187	
10.2 今後の課題.....	191
第11章 結論.....	193
発表文献.....	196
雑誌論文.....	196
口頭発表.....	196
特許.....	197
参考文献.....	198
謝辞.....	202
付録.....	203
■RP&M 技術.....	203
■制御回路.....	215
■造形システムソフトウェア.....	224
■造形手順.....	230

図目次

図 1.1 : RP&M 技術と光造形法技術体系図	15
図 1.2 : 一般光造形法の造形手順	16
図 1.3 : 自由液面式光造形法問題点体系図	19
図 1.4 : 造形形状による樹脂液位誤差	20
図 1.5 : 造形データ作成時のソフトウェア誤差	20
図 1.6 : 硬化物余剰成長の例	21
図 1.7 : 硬化物余剰成長写真	22
図 1.8 : Z オフセット手法	22
図 1.9 : 従来の光造形法におけるサポート, 硬化物余剰成長	24
図 1.10 : 従来の光造形法で造形困難な形状の例	25
図 1.11 : 光造形法におけるサポート例	25
図 1.12 : 硬化樹脂切削法造形プロセス	28
図 1.13 : 論文の構成	34
図 2.1 : 光造形法の露光方式	37
図 2.2 : レーザビーム露光方式 (左: ガルバノメータ方式, 右: XY プロッタ方式)	37
図 2.3 : ステレオリソグラフィ法の積層方式	39
図 2.4 : 規制液面方式におけるトラブル	39
図 3.1 : 冷却固化式光造形法概略図	43
図 3.2 : 冷却固化式光造形法 造形プロセス	44
図 4.1 : SCR-500 (汎用光硬化性樹脂), KC1026-8 (冷却固化式光造形用光硬化性樹脂), UV1214-15 (ゾルゲル変換型光硬化性樹脂) 各光硬化性樹脂の温度 vs 粘度 (縦 軸: 粘度 (cp), 横軸温度 (°C))	54

図 4.2 : 冷却固化式光造形法基礎実験用樹脂供給機構.....	56
図 4.3 : 冷却固化式光造形法基礎実験用冷却機構.....	57
図 4.4 : 冷却固化式光造形法基礎実験用装置写真.....	57
図 4.5 : 造形サンプル取り出し直前のグリーン体.....	58
図 4.6 : 基礎実験によって得られた造形サンプル.....	59
図 4.7 : ゼルゲル変換型光硬化性樹脂の原理.....	60
図 4.8 : 3 種類 A,B,C ゼルゲル変換型光硬化性樹脂のゼルゲル転移温度測定64	
図 4.9 : 3 種類 A,B,C ゼルゲル変換型光硬化性樹脂のゼル強度	64
図 4.10 : 3 種類 A,B,C ゼルゲル変換型光硬化性樹脂のゼル硬度	65
図 4.11 : SCR-500 (汎用光硬化性樹脂), KC1026-8 (冷却固化式光造形用光硬化性樹脂), UV1214-15 (ゼルゲル変換型光硬化性樹脂) 各光硬化性樹脂の温度 vs 粘度 (縦 軸 : 粘度 (cp) 対数表示, 横軸温度 (°C))	65
図 4.12 : UV1214-15 硬化深度曲線 (透過深度 : 278.74 μ m, 臨界露光量 : 8.5058mJ/cm ²)	66
図 5.1 : レーザビームスキャン.....	70
図 5.2 : シミュレーション実行画面.....	72
図 5.3 : シミュレーションによって得られた余剰成長の例.....	74
図 5.4 : 積層回数と硬化深さの関係の例.....	74
図 5.5 : 余剰成長厚と積層回数の関係.....	75
図 5.6 : ウインドウベイン手法.....	78
図 5.7 : SCR-950 のワーキングカーブ.....	78
図 5.8 : 3 次元 CAD で設計したステップ状サンプル (寸法 : 10mm \times 200mm \times 20 層)	79
図 5.9 : 得られたステップ状サンプル.....	80
図 5.10 : SCR-950 の余剰成長と積層回数の関係 (積層厚 50 μ m)	81
図 5.11 : SCR-950 の余剰成長厚と積層回数の関係 (積層厚 100 μ m)	81
図 5.12 : 最大余剰成長厚と平均照射量の関係 (積層厚 50,100,150 μ m)	83

図 6.1 : 紫外光遮断層導入による余剰成長防止手法の提案.....	87
図 6.2 : 紫外光遮断層基礎実験概略図.....	88
図 6.3 : 得られた造形物写真.....	89
図 6.4 : 超微粒子酸化チタンの 300~400nm 波長紫外光に対する透過率と一次粒子径の 関係.....	92
図 6.5 : インクジェットヘッドを用いた新冷却固化式光造形プロセス概略...	93
図 6.6 : 物体表面における反射, 吸収, 透過モデル.....	94
図 6.7 : 鏡面反射の幾何モデルと二等分法線ベクトル H.....	95
図 6.8 : 入射角によって変わる反射光の減衰係数 G.....	96
図 6.9 : マスク面における拡散・鏡面反射率測定.....	100
図 6.10 : 拡散反射および鏡面反射の強度分布.....	100
図 6.11 : 1 層 1 ライン硬化時の露光量分布計算概略.....	101
図 6.12 : 1 層 1 ライン硬化時のマスク面での露光量分布.....	101
図 6.13 : マスク面反射による 1 ライン露光量分布計算結果 (①マスク無し②マスク有 り, 平均照射量 $30\text{mJ}/\text{cm}^2$)	105
図 6.14 : マスク面反射による 1 ライン露光量分布計算結果 (③マスク無し④マスク有 り, 平均照射量 $7\text{mJ}/\text{cm}^2$)	105
図 6.15 : マスク面反射による 10 層積層硬化時の露光量分布計算結果 (⑤マスク無し⑥ マスク有り, 平均照射量 $120\text{mJ}/\text{cm}^2$)	106
図 6.16 : マスク面反射による 10 層積層硬化時の露光量分布計算結果 (⑦マスク無し⑧ マスク有り, 平均照射量 $31\text{mJ}/\text{cm}^2$)	106
図 6.17 : XY 方向微小クリアランスにおける反射余剰成長問題.....	107
図 6.18 : $300\mu\text{m}$ スリットシミュレーション結果.....	107
図 6.19 : $100\mu\text{m}$ スリットシミュレーション結果.....	108
図 6.20 : 紫外光波長に対する超微粒子酸化チタンの 1 次粒子径と反射率の関係	108
図 6.21 : 超微粒子酸化チタンを用いたマスク描画時の条件⑥による $100\mu\text{m}$ スリットシ ミュレーション結果.....	109

図 7.1 : 試作装置全体概略.....	111
図 7.2 : 装置全体写真.....	112
図 7.3 : XY プロッタ機構.....	114
図 7.4 : レーザビーム軌跡.....	116
図 7.5 : 音響光学変調器, 90° 全反射ミラー部写真.....	116
図 7.6 : XY プロッタキャリア原点位置におけるレーザビームパワー測定..	117
図 7.7 : コータ部写真.....	118
図 7.8 : 樹脂タンク, 供給パイプ部写真.....	119
図 7.9 : インクジェットヘッド概略図.....	120
図 7.10 : インクジェットヘッド.....	120
図 7.11 : XY 描画軌跡概略.....	123
図 7.12 : 制御プログラムにおける一層描画アルゴリズム.....	124
図 7.13 : 従来光造形システムレーザスキャニングパターンと試作システムレーザス キャニングパターン.....	126
図 7.14 : Z ステージ移動制御の速度・時間, 距離・時間の関係.....	129
図 7.15 : 樹脂供給制御概略.....	131
図 7.16 : XY スキャニング写真.....	132
図 8.1 : 樹脂供給概略図.....	134
図 8.2 : 樹脂供給時の供給面温度測定概略.....	136
図 8.3 : 樹脂供給面温度 vs 時間 (100 μ m 積層, 10cm/sec)	137
図 8.4 : 樹脂供給面温度 vs 時間 (100 μ m 積層, 1cm/sec)	137
図 8.5 : 樹脂供給面温度 vs 時間 (50 μ m 積層, 10cm/sec)	138
図 8.6 : 樹脂供給面温度 vs 時間 (50 μ m 積層, 1cm/sec)	138
図 8.7 : 樹脂供給時の供給樹脂の様子.....	139
図 8.8 : 樹脂供給時の積層樹脂層内温度測定結果 (リコート速度: 10cm/sec, 積層厚: 100 μ m)	140

図 8.9 : 樹脂供給時ピーク温度と積層数との関係.....	140
図 8.10 : 樹脂積層最小厚測定用ステップ状サンプル.....	142
図 8.11 : 50 μ m 積層のステップ高さと実際の積層厚	143
図 8.12 : 30 μ m 積層のステップ高さと実際の積層厚	143
図 8.13 : 20 μ m 積層のステップ高さと実際の積層厚	143
図 8.14 : 反射余剰成長検証サンプル.....	145
図 8.15 : 表 8.3 の条件により得られた造形物.....	145
図 8.16 : 新レーザスキャニング方式で得られたサンプル (左) と反射余剰成長サ ンプル (右) の比較.....	146
図 8.17 : 従来方式(a)と新レーザスキャニング方式(b)による感熱紙描画拡大写真	147
図 8.18 : XY 面分解能テストサンプル (単位 : mm)	150
図 8.19 : 造形サンプル (左 1mm 厚, 右 2mm 厚)	150
図 8.20 : 造形サンプル拡大写真 (厚さ 2mm, 左 : 従来方式, 右 : 新レーザスキャニ ング方式)	151
図 8.21 : 造形サンプル (厚さ 2mm, 左 : 新レーザスキャニング方式, 右 : 従来方式)	151
図 8.22 : ステップ状サンプル (単位 : mm)	152
図 8.23 : 造形サンプル拡大写真 (マスク有り)	152
図 8.24 : 積層数と穴径の関係.....	153
図 8.25 : ユニットモデルイメージ.....	155
図 8.26 : ユニットモデルカットモデル.....	155
図 8.27 : 造形直後の造形物.....	156
図 8.28 : ユニットモデル写真.....	156
図 8.30 : ユニットモデル寸法測定値 (括弧内が設計寸法)	157
図 8.31 : ギアボックスイメージ図.....	158
図 8.32 : ギアボックス設計仕様.....	158

図 8.33 : ギアボックスモデル写真.....	159
図 8.34 : ギアボックス測定寸法 (括弧内が設計寸法)	159
図 8.35 : 3 次元 CAD によるカラー造形サンプル外観 (単位 : mm)	161
図 8.36 : 得られたカラー造形物.....	161
図 8.37 : 一般光造形システムによって得られたサンプル (左 : ユニットモデル, 右 : ギアモデル)	163
図 8.38 : ユニットモデル (左) とギアモデル (右) の 100 μ m クリアランス部拡大写真	163
図 8.39 : 紫外光遮断層を用いた冷却固化式光造形システムによるユニットモデル拡大写真.....	164
図 8.40 : 造形物上面および底面拡大写真 (上 : 一般光造形システム, 下 : 紫外光遮断層を用いた冷却固化式光造形システム, 左 : 上面, 右 : 底面)	164
図 8.40 : 寸法測定箇所と設計寸法 (単位 : mm)	165
図 8.42 : 試作システムと一般光造形システムにおける XY 面 (上), 高さ方向 (下) で の各測定箇所寸法誤差.....	166
図 9.1 : ダイレクトマスク法原理図.....	171
図 9.2 : 微細なスリットにおける平行紫外光の回折現象モデル.....	172
図 9.3 : 各スリット幅における回折角と回折光強度の関係.....	173
図 9.4 : 平行光原理.....	174
図 9.5 : 平行紫外光による硬化モデル.....	175
図 9.6 : 光束収束領域, 拡大領域における硬化形状と硬化深度.....	177
図 9.7 : 光線収束向きの場合の各スリット幅における露光量 vs 深度.....	177
図 9.8 : 光線拡大向きの場合の各スリット幅における露光量 vs 深度.....	178
図 9.9 : 300 μ m 角穴, 300 μ m 幅スリットマスクによる一括露光実験 (表面拡大写真)	178
図 9.10 : 300 μ m 角穴マスクによる硬化形状断面拡大写真	178
図 9.11 : 一括露光造形システム.....	181
図 9.12 : 一括露光の様子.....	182

図 9.13 : ダイレクトマスク法基礎実験サンプル.....	182
図 9.14 : ダイレクトマスク法基礎実験サンプル写真 (上 : 全体, 下 : エッジ部拡大写真)	183
図 9.15 : 基礎実験サンプル測定寸法値 (単位 : mm)	184
図 9.16 : 滑車モデル (単位 : mm)	184
図 9.17 : 造形された滑車モデル.....	185
図 10.1 : 光造形システムによる造形物の各パラメータ.....	188
図 10.2 : 造形物体積と造形時間の関係.....	190
図 10.3 : ハッチ間隔と造形時間の関係.....	191
図 10.4 : 造形後の未硬化樹脂除去が困難な形状の例.....	192
図 10.5 : 硬化物・マスク面間のサポート力不足問題.....	192
図 1 : 粉末熔融焼結法の原理図.....	206
図 2 : 3Dプリンティング法原理図.....	207
図 3 : 3D クラディング法原理図.....	207
図 4 : LOM 法原理図.....	209
図 5 : インクジェット法原理図.....	210
図 6 : ガスデポジション法原理図.....	210
図 7 : FDM 原理図.....	211
図 8 : 試作システム制御概念図.....	216
図 9 : 制御集中管理ボード回路図.....	218
図 10 : 各種信号入出力ボード回路図.....	219
図 11 : パルスジェネレータによるパルス波形.....	221
図 12 : パルスジェネレータ回路図.....	222
図 13 : 熱電対アンプ回路.....	223
図 14 : “del” フォーマット内容.....	225
図 15 : スライサソフトログファイル内容.....	226

図 16 : スライサソフト実行画面.....	226
図 17 : マスク付加データ作成概略.....	227
図 18 : 造形システムソフトウェア実行画面.....	229
図 19 : CT データ操作画面	230

第1章 序論

1.1 研究の背景

現在製造業において、商品に対するユーザのニーズが多様化し、多品種少量生産および短納期化がますます求められている。製品の開発・製造には、設計・試作・生産・保全というプロセスが繰り返されるが、開発の期間を短縮するには、設計・試作間のフィードバックが迅速に行なわれる必要がある。現在、試作モデルとしては、設計途中で外観デザインを審査して最良のものを決定するためのモデル、部品相互の組付け状態をチェックするためのモデル、鋳型や金型を製作するための原型、倣い加工のための原型などがある。

これらの立体モデルは、一般に形状が複雑である。最近では、曲面を取り入れた設計が多いが、これは熟練者でなければ設計図を理解することさえ困難である。近年、CAMシステムが大変進歩してきているが、それでも限られた条件でしか立体形状の加工ができない。しかも、その活用には荒削りから仕上げ削りまでの各工程での段取り設定や工具の選択、切削条件の決定など、機械加工に関する深い知識が必要である。その上、加工物を固定するための治具なども工夫しなくてはならない。このような事情から、現在でも、大部分のモデルは専門技術者が長年の勘を頼りに手加工で製作されている。手加工では、モデル一つの製作時間は簡単なものでも1週間、複雑なものは数ヶ月を要する。また、現在、モデル製作技術者が不足してきており、今後、外観デザインや感性を大切に商品作りを進める上で、大きな問題になってきている。

一方で、CADシステムが普及し、設計の工数が格段に合理化された現在、企画から製品の市場投入に至る過程における時間的なボトルネックは、製品形状のチェックを行なうためのプロトタイプ製作であるのが現状である。デザインを重視する自動車や家庭用品では、金型を製作する工程の2倍の費用と時間を要する。

そこで近年、試作を迅速に行なう手段として、3次元CAD (Computer Aided Design) で設計された立体形状モデルから、比較的短時間で立体模型 (モックアップ) や型を製

作する、迅速試作 (RP&M: Rapid Prototyping and Manufacturing) 技術が国内外で注目されている。RP&M 技術を使用すれば、従来は不可能であった複雑な 3 次元形状を全自動で簡単に作製できる。この技術は、応用範囲が非常に広く、また新たに独自の加工・工作技術体系を形成するほど画期的でかつ将来性に富んでいる。

デザインの分野では、3 次元立体のスケッチをもとにして、この方法で立体モデルを作製して彩色すれば、組み合わせや曲面の複雑さから、従来は不可能であった造形が可能になる。これは、単なる 2 次元平面で表現される CG (Computer Graphics) の世界と現実の立体物とを結ぶ唯一の工作法を提供するものである。機械工作の分野では、プラスチックモデルの製作に止まらず、これを母型としてセラミックや金属の製品を製造する、新しい工作法が現在すでに実用化している[1][2][3][4][5]。医療分野では、NMR-CT や X 線 CT による画像から患者の骨格、歯、内臓などの実体模型を製作して、体内の状態をより正確に把握し、治療の参考にすることができる。また、患者本人に最適の義歯や人工骨を作製することができる[6][7][8][9][10]。バイオや化学の分野では、遺伝子や分子モデルを作製して、これと反応する分子や酵素などの設計に役立てることができる。

現在、図 1.1 に示すように、さまざまなタイプの RP&M 技術が実用化されている。(詳しい RP&M 技術に関する説明は付録参照) ここでは「光造形法 (Stereo Lithography)」[11][12][13]について説明する。光造形法は、その露光方式、また積層方式で大きく分類されるが、ここでは、現在 RP&M 用光造形法として一般的な、XY 走査型自由液面式光造形法について説明を行なう。

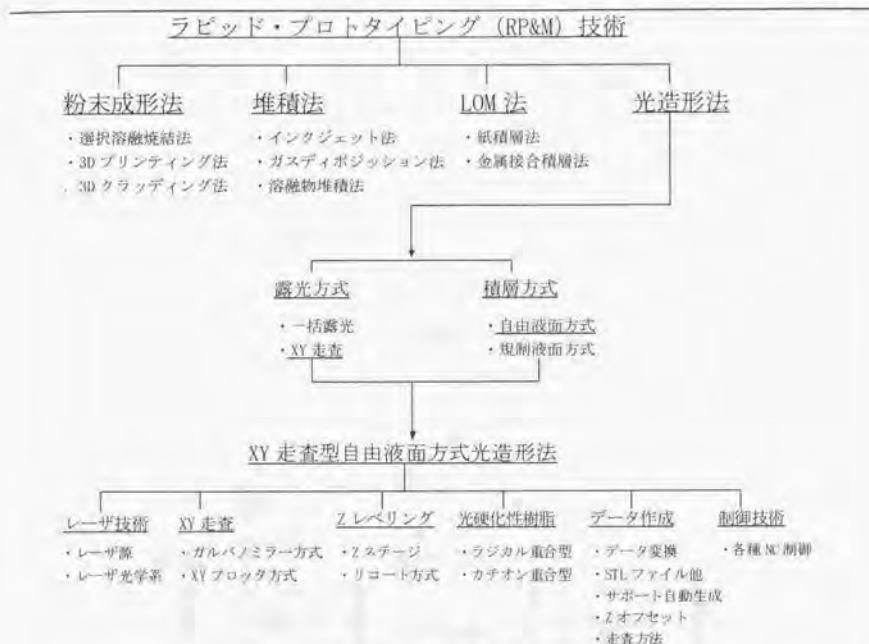


図1.1: RP&M 技術と光造形法技術体系図

光造形法では、ある波長の光に反応して硬化する「光硬化性樹脂」を材料とし、その薄層を形成した後で特定波長光を選択的に照射して硬化させ、積層していくことで3次元形状を得る。具体的な造形プロセスは、図 1.2 のようになる。

1. 作成しようとする立体形状を、3次元CAD等の入力支援ソフトウェアを用いてコンピュータに入力する。
2. 入力された形状データをコンピュータ上で一定方向に等間隔で切断し、その時に現れる各断面の形状をもとに、断面形状データ（スライスデータ）を作る。この段階で、造形過程において造形物を支持するサポートデータも生成する。サポートは、硬化時の造形物の反り上がりを防ぐ目的と、液体樹脂中における硬化物移動を防ぐ目的で造形物に付加して造形される。
3. 加工装置はコンピュータによって制御されており、コンピュータからの信号によって選択的に光を照射可能である。これによって先ほど作成した断面形状データに従って光硬化させ、スライスされた1層分の形状の板を作成する。

4. エレベータを1層分下げる。

5. 各層を順次積み重ねて作成していくことで、最終的に目的の立体形状を得る。

造形終了後、硬化した樹脂を樹脂層から取り出し、サポートを除去した後でアセトンやアルコール類で洗浄して未硬化樹脂を除去する。その後で、樹脂の硬化反応を完全に終えるため、造形物全体にさらに紫外光を照射して、加工終了となる。最後の紫外光照射作業は、後露光またはポストキュアと呼ばれている。

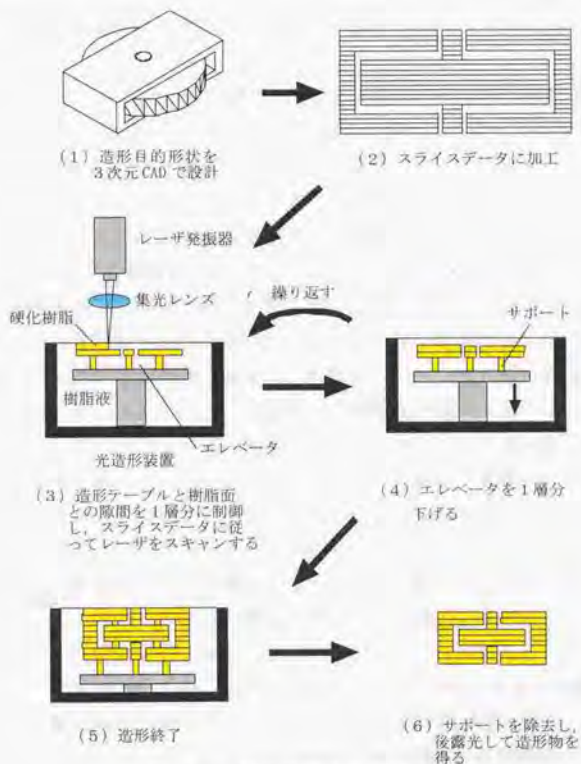


図1.2：一般光造形法の造形手順

以上のようなプロセスで造形を行なう光造形法は、高加工精度、高加工自由度、造形物の透明性、シンプルな装置構成、金型への転写が可能などの理由から、現在 RP&M 技術の中で代表的な手法となっている。光造形法を利用すれば、3次元CADで設計したモ

デルを他のどの RP&M 手法よりも、高精度に造形することが可能である。

図 1.1 に示すように、光造形法は、レーザ光化学、メカトロニクス、コンピュータ技術が有機的に融合した総合技術であるために、精度の良い造形を行なうためには、それぞれの要素技術に関して細かく分類し、検討を行なう必要がある。そこで、図 1.3 に、現在主流となっている自由液面式光造形法に関する問題点を体系的にまとめた、主要な問題点については、赤枠で示している。

光造形法における問題点を大きく分類すると、造形精度、造形自由度、樹脂特性の 3 つに分類できる。造形精度は、さらに、XY 面におけるもの、Z 方向におけるものに分類される。

まず、XY 面における造形精度は、露光を選択的に行なう機器の XY 位置決め誤差、加工分解能、ソフトウェア誤差、硬化収縮による誤差に影響される。この中で、XY 面における加工分解能誤差は、レーザパワー、走査速度、ビーム径に代表されるレーザ関連誤差と、また、一定レベルに保持されるべき樹脂面位置変動により、レーザビームの焦点位置が変化してしまうことによる硬化幅誤差に分けられる。レーザ走査技術は大変進歩してきており、この部分の誤差は小さくなってきているが、樹脂液位安定性に関しては、原理的に液体樹脂をリコートする際の前層における硬化形状によって、図 1.4 に示すような影響を受け、均一な積層が行なえない問題がある。図 1.4 (a) では、カップのような平面において縦じら形状が前層にある場合、次の層をリコートする際に樹脂の表面張力および固体液体間の固着力により、カップ縁部分で樹脂面が盛り上がりしてしまう問題がある。これは、トラップドボリュームと呼ばれ、光造形法における原理的な問題点とされている。また、図 1.4 (b) のような広い平板が前層にある場合、次層を供給した際に層厚および樹脂粘度、表面張力などの要因によって、樹脂が平板表面ではじかれてしまい、正確に樹脂を供給できない場合がある。この誤差は、XY 面においてだけではなく、Z 方向の加工分解能にも影響を与える。現在、この問題点に関して、各システムメーカーはさまざまな樹脂リコート方式を提案し、精度の良い均一な膜厚を実現しようと努力しているが、現状ではまだ完全に解決されていない[14][15]。

また、ソフトウェア誤差としては、図 1.5 に示すように、3 次元 CAD で設計したモデルを三角形パッチで置き換える際の誤差、またスライスを行なう際の誤差（量子化誤差）、スライス後のデータからレーザ走査パスを作成する際の誤差（走査軌跡トレランス誤差）がある。XY 面における造形精度に影響を与えるのは、走査軌跡トレランス誤差であるが、これに関しては、現在高精度にパスを作成することが可能となってきた[12]。XY 面における硬化収縮による誤差は、使用樹脂特性の改良、およびソフトウェアによるオフセット処理により解決されてきている。

Z 方向（高さ方向）の造形精度は、Z ステージ位置決め誤差、Z 方向加工分解能、樹脂

脂の硬化収縮による反り変形，ソフトウェア誤差に分類される。この中で，Z方向加工分解能誤差は，樹脂液表面張力問題と，硬化物余剰成長問題に分けられる。樹脂液表面張力問題は，上記したように，XY面加工分解能にも影響を与えるもので，同時に図1.4に示すように適切な積層が行なえない場合，高さ方向の分解能にも影響を与える。これに関しては，上記したように未だ解決されていない。

また，硬化物余剰成長については，光造形法では原理的に，層と層が接着するように積層造形を行なうので，1層の厚さを越えるようにレーザを照射しなくてはならず，積層を繰り返すうちにその累積透過光により，図1.6に示すように張り出した部分底面，高さ方向に垂直な丸穴上面，丸棒下面などには余剰な硬化成長が生じ，高さ方向分解能を低下させる原因となっている。実際の硬化余剰成長の例を図1.7に示す。このサンプルでは，高さ方向と垂直な方向に0.5mm厚の薄いスリットが9つあり，図1.7下の拡大写真のように，硬化物余剰成長の影響で，0.5mmのスリット厚が0.2mm~0.3mmまで小さくなってしまっている。このように，高さ方向と垂直な方向に薄いスリットが存在する場合，余剰成長厚が大きくなると，スリットの寸法が変化してしまう，または完全につぶれてしまう問題がある。このように，光造形法における硬化余剰成長問題は，高さ方向の精度において重要な問題となっており，現在ソフトウェア的な解決法であるZオフセット法が実用化されている[16]。この方法は，図1.8に示すように，造形前段階においてあらかじめスライスデータから余剰成長厚分を除去しておくことで，造形過程において硬化余剰成長が生じても，高さ方向の寸法精度に影響を与えないようにする方法である。しかし，どの程度余剰成長が生じるかは経験的に決められており，また，レーザパワーや走査速度のふらつきによる露光量誤差により，容易に影響を受けてしまう問題がある。この問題に関しては，本論文第5章において，詳しく検討することにする。

自由液面式光造形法における問題点体系図

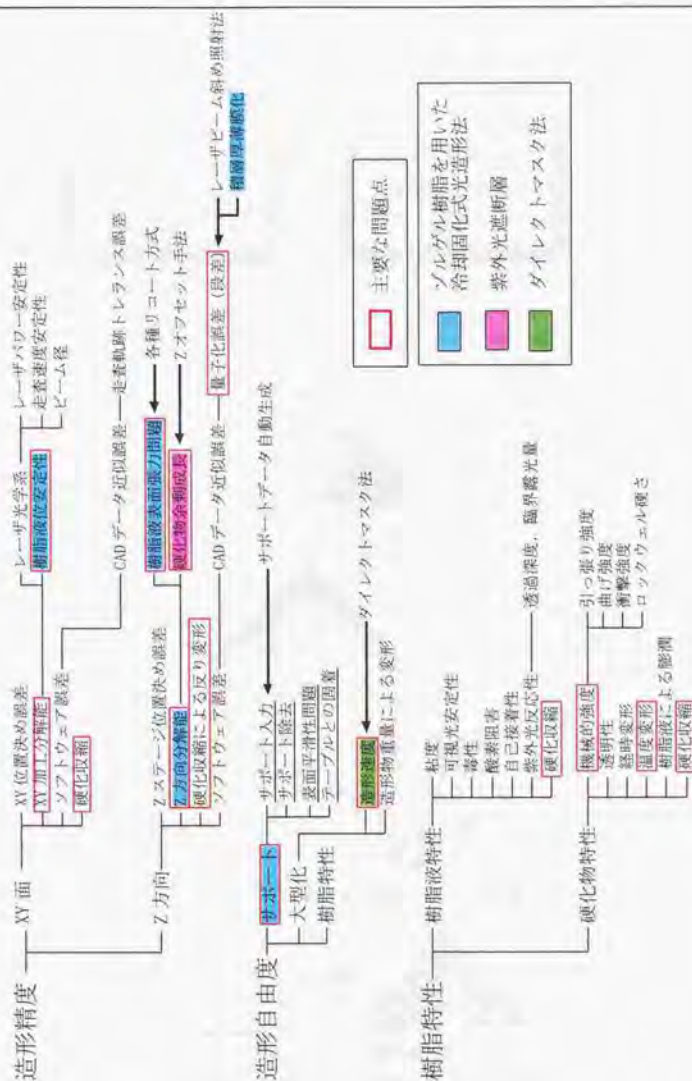
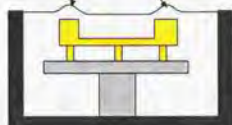


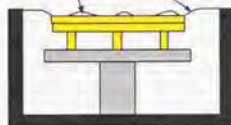
図13：自由液面式光造形法問題点体系図

カップ状の形状では、
リコート後にその縁部
分の樹脂が盛り上がる



(a) トラップドボリューム

広い平板が下面にある場合、
リコートしても平板表面で
樹脂をはじいてしまう



(b) 広域平板

図1.4：造形形状による樹脂液位膜差

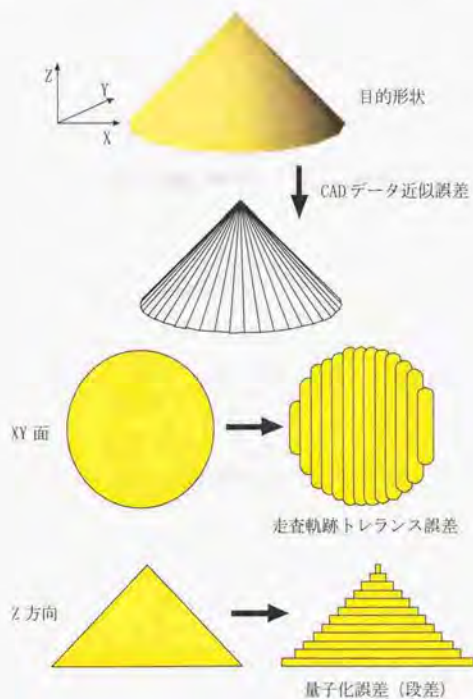


図1.5：造形データ作成時のソフトウェア誤差

次に、造形時における樹脂の硬化収縮についてだが、これは、各層をレーザーで露光する際に、その層内において、上部分は大きな露光量を受け大きく収縮し、下部分は露光量が小さいので収縮が少ないという層内不均一応力によって発生する。これも、高さ方向の精度に大きく影響を与えるが、現在、図 1.9 に示すようにサポート構造を造形物と一緒に造形することで、ある程度解決されている。Z 方向の造形精度に影響を与えるソフトウェア誤差としては、図 1.5 に示すように、ある積層厚ピッチでスライスデータを作成する際に生じる段差（量子化誤差）があげられる。この誤差は、原理的にすべての積層造形システムに共通な問題となっている。光造形法では、レーザービームを斜めに照射して、段差部分を補完する方法[17]や、積層厚を部分的に小さくすることで対処している。しかし、積層厚を小さくする場合、樹脂液表面張力の問題があり、現在 $50\mu\text{m}$ より薄い積層厚は困難とされている[12]。



(a) 張り出し部分下面



(b) 丸穴上面



(c) 丸棒下面

図1.6：硬化物余剰成長の例

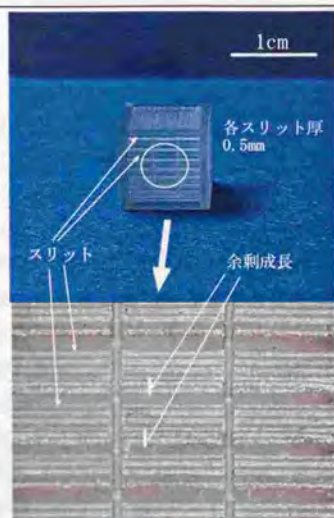


図1.7：硬化物余剰成長写真

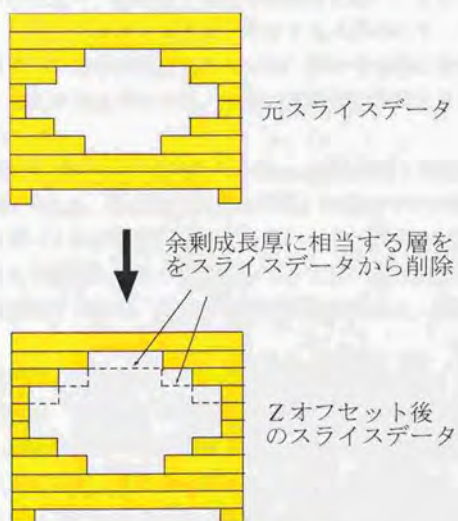


図1.8：Zオフセット手法

次に、光造形法における問題点において、一つの大きな要素となっている造形自由度に関して検討を行なう。まず、造形自由度を低下させる最も大きな要因としては、サポートがあげられる。サポートは前述のように、造形前のスライスデータ作成時に、あらかじめ反りの生じやすい張り出した部分や、造形過程において現れる孤立した部分を保持するために、その下面に配置して造形される。現在、スライスデータへのサポートの入力は、ある程度自動的に行なわれるようになってきている[18]が、まだ完全ではない。また、図 1.9 に示すようにサポートは造形物に直接付加されて造形されるので、造形後の取り出し時に、サポートがテーブルに固着しているために、力を加えると造形物本体が変形してしまう問題や、取り出し後の除去作業を行なわなくてはならない問題がある。サポートは、工具が入る位置にあれば除去可能であるが、図 1.10(a)の軸・軸受け間のような微小なクリアランスや、(b)のように造形物内に配置されている場合、除去することは困難、もしくは不可能である。さらに、サポートの除去の後が造形物に残り、表面平滑度が失われる問題がある。図 1.11 に実際のサポートの例を示す。この例では、タイヤ内ホイール部分は、全てサポートで埋め尽くされており、造形後に除去することができない。このように、サポートは、造形後の形状および自由度に大きな影響を与える。たとえば、図 1.11 を例にとると、設計者がタイヤを回転するように設計したとしても、造形後にサポート除去が行なえず、設計通りに造形を行なえない。また、設計者は、サポートを最小限に抑え、効率よく除去できるよう考慮する必要がある。さらに、図 1.10 に示すような形状では精度良い造形が困難であるため、設計する際に造形可能な形状の制限を受ける。つまり、現在の光造形法では、本来の設計者の意図を自由に造形形状に反映することができない。

また、現在の光造形法で得られる造形物の寸法は、造形速度と樹脂特性による影響で、最大でも 80cm 角程度である。造形速度が遅ければ、大型のモデルを造形する際には、膨大な造形時間、サポート除去時間が必要である。また、硬化物の強度が弱ければ、大型の造形物は自重により変形、もしくは破損してしまう。よって、造形自由度という点において、大型化を実現するには、さらなる造形速度の向上と、樹脂特性の改良が必要である。

次に、光造形法における問題点のもう一つの大きな要素である、光硬化性樹脂特性については、樹脂液特性と、硬化した後の硬化物特性について議論する必要がある。樹脂液の特性としては、硬化収縮が一番の問題となっている。また、硬化物特性としては、さまざまな機能テストモデル、また最終製品として耐えられるよう、機械的強度、熱変形温度が特に問題となっている。光硬化性樹脂については、第 4 章において詳しく説明する。

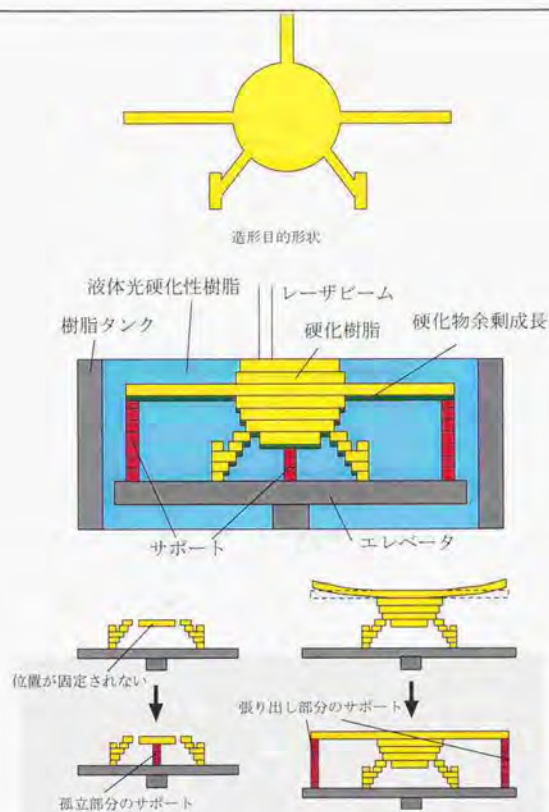


図1.9：従来の光造形法におけるサポート，硬化物余剰成長

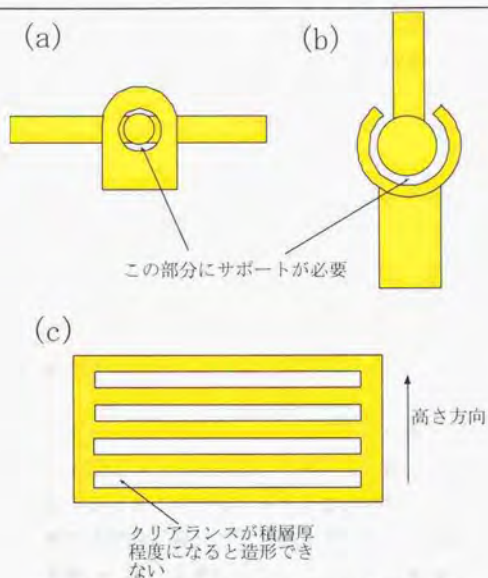


図1.10：従来の光造形法で造形困難な形状の例



図1.11：光造形法におけるサポート例

以上のように、現在の光造形法における問題点について体系化を行なったが、参考文献において、現在、問題点として広く取り上げられている順番に問題点を並べると、以下のようになる。

1. サポート問題
2. 樹脂強度および硬化時反り変形、造形後経時変形問題
3. 樹脂液表面張力問題
4. 造形物段差問題
5. 硬化物余剰成長問題（高さ方向精度）
6. 造形速度問題（レーザ走査方式）
7. 造形データ処理問題

本論文で解決しようとする主な問題点は、1のサポート問題、3の樹脂液表面張力問題、5の硬化物余剰成長問題についてである。サポート問題、樹脂液表面張力問題に関しては、本論文の第3章、第4章におけるゾルゲル変換樹脂と冷却固化式光造形法によって解決し、硬化物余剰成長問題に関しては、第5章において議論し、その解決方法として、第6章において冷却固化式光造形法における紫外光遮断層の導入を提案する。これらの項目は、図1.3において、水色とピンクで強調してある。図1.3では、階層の高い位置の問題点が解決すれば、それ以下はすべて解決されることを示している。本論文では、以上3つの、現在の光造形法における重要な問題点を解決するための方法の提案、検討を行なう。

さらに、本論文では、第9章において、上記6の造形速度問題を解決するために、冷却固化式光造形法におけるマスク一括露光方式の導入を提案し、その可能性について検証を行なう。以上2つの項目に関しては、図1.3において、緑色で強調して示している。

現在までに、上記1、3、5を解決する手法としては、キュービタル社のSGC（Solid Ground Cutting）硬化樹脂切削法が研究・開発されている[11]。図1.12にその造形プロセスを示す。

硬化樹脂切削法では、まず、光硬化性樹脂を層の台の上に平坦に引き伸ばす(a)、次に(b)の露光エリアに移動する。ここには、強力な紫外線ランプと光シャッター、そしてパターン・マスクが設置されている。薄く引き伸ばされた液体樹脂は、成型物の断面通りのパターン・マスクを通して露光を受けて硬化する。このパターン・マスクは、レーザプリンタ同様に、静電気を使用するイオノグラフィ技術（ionography technology）によって、最終的に作製する3次元成型物断面パターンに従って、ガラス板上に帯電させたトナー

によって作製される。次に、(c)でエアナイフによって硬化していない液体樹脂部分を取り除き、(d)で溶けたワックスを塗布する。ワックスが冷却して凝固した後、今度はフライカッターで余分なワックスと硬化樹脂を、設定した層の厚さまで切削する。最後に、切削後のカスを掃除機で吸い取る。こうして次の積層加工の準備が完了する。

積層した層が乗っている移動台は、加工するエリアからエリアに平行に移動するだけでなく、Z方向にも移動する。そして、新しい層を作製するときには、1層分だけ下に移動し、常に加工面の位置（高さ）を一定に保つ。

最終的には、熱を加えてワックスを溶かし、硬化樹脂成型物を取り出す。

この方式の利点としては、

- (1) 成型中の造形物は、常にワックスによって周りを固定されているので、自重による変形や潰れが防げる。さらに、孤立部分や張り出し部分にもサポートを入れる必要がない。
- (2) サポートが必要ないので、複数の造形物を空間的に配置し（nesting）、一度に造形することが可能である。
- (3) 高精度な光硬化性樹脂を使用でき、硬化時に生じる体積収縮を最小限に抑えることができる。また、層毎に異なる樹脂を塗布することで、造形物に様々な特性を持たせることが可能である。
- (4) 上層からの透過光は、ワックスによって遮られるので、硬化物余剰成長は生じない。
- (5) パターン・マスクによる露光なので、1層当たりの造形時間は一定であり、しかも高速である。

問題点としては、

- (1) パターン・マスクを通しての露光では、紫外光を完全に遮蔽できず、パターン通りの正確な硬化が行えない。また、露光面とマスクとの距離が離れているので、光の回折や、光源の平行度によって、細部のパターンが潰れてしまう。
- (2) 使用した液体樹脂は、わずかな漏れ光によって硬化しており、再利用不可能である。
- (3) 露光後の未硬化樹脂は、エアナイフでは完全に除くことはできず、細部のパターンは再現できない。また、硬化部境界には半硬化の樹脂が造形後も残っており、それが造形後のXY面およびZ方向の寸法精度を悪化させている。
- (4) 樹脂供給過程、露光、ワックス塗布過程、切削過程と、移動しながら加工を行なうので、造形時間がかかり、また装置が高価、大がかりなものになり、さらにフライカッターや掃除機の騒音も大きい。また、工程数の分だけ、造形精度を狂わせる要因が多い。

以上のように、硬化樹脂切削法では、サポートの問題、液体樹脂表面張力の問題、硬化物余剰成長の問題の解決方法を提案しているが、実際問題として、本来の光造形法が持つ造形精度は得られていない。その理由としては、硬化樹脂切削法のような、各層毎に液体樹脂の「塗布と除去」を繰り返す手法では、システムが複雑になるために、造形において誤差を引き起こす要因が多くなり、光造形法が持つ本来の高精度な造形は行なえないことが分かる。現在、この手法を用いた装置の生産は行なわれていない。

以上、高加工精度、高加工自由度と言われる光造形法にも、解決すべき問題点が数多くあり、これらの問題を解決することで初めて、本当の意味での高加工自由度、高加工精度な造形が実現できるようになる。それらが実現されれば、設計者のアイデアをそのまま形にすることができ、設計・生産プロセスにおいて大きな躍進が期待できる。現在、このような新たな手法の提案が強く望まれている。

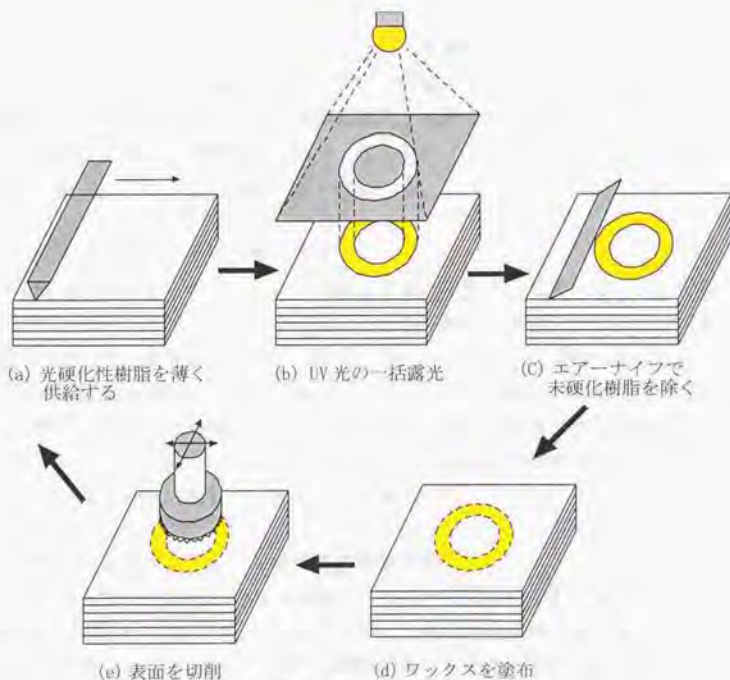


図1.12：硬化樹脂切削法造形プロセス

1.2 研究の目的

研究の背景で述べたように、現在様々な RP&M 技術が存在するが、設計者の自由な発想を、高加工自由度で高精度に実体化することが可能な RP&M 手段は未だ存在していない。その中で、高精度という面では光造形法が最も優れており、加えて、高加工自由度な造形手法を実現するには最も適した手法である。そこで、本研究では光造形法をベースに、3 次元 CAD で設計した高自由度な構造を、高精度に実現する RP&M 手法実現のための、様々な問題点の検討、現象の解析、解決策の提案、試作システムによる検証実験、新たなアプリケーションの提案を行なう。

具体的には、以下に示す内容について検討を行なう。

1. 冷却固化式光造形法の提案

光造形法において造形可能な形状を拡張し、高精度化を実現するために、まず、造形自由度を低下させる主原因であるサポート問題を解決し、同時に樹脂液表面張力問題を解決するための手段として、冷却固化式光造形法を提案する。この手法により、高精度に樹脂を供給、積層することができ、さらに、サポートを用いない高自由度な造形が可能となることを、実験により検証する。

2. ゼルゲル変換型光硬化性樹脂の開発

冷却固化式光造形法では、液体の光硬化性樹脂を使用して樹脂液中に造形を行なう従来の光造形法とは異なり、造形過程において、硬化物を保持できるように粘性の高い固体状の光硬化性樹脂を用いて造形を行なう必要があり、樹脂に要求される仕様は一般の光造形用光硬化性樹脂とは異なってくる。特に、樹脂の温度粘度特性が重要であり、本研究では、冷却固化式光造形用光硬化性樹脂に要求される樹脂の仕様を明らかにし、その仕様を満たす樹脂として、ゼルゲル変換型光硬化性樹脂の開発を行なう。また、その硬化特性に関して、測定・評価を行なう。

3. 冷却固化式光造形法における紫外光遮断層の導入

高さ方向の分解能を低下させる主原因となっている硬化物余剰成長問題について、その理論的な解析を行なう。その結果をもとに、造形過程における上層からの透過光を積極的に抑制し、高さ方向の分解能を積層厚まで向上させるための手段として、冷却固化式光造形法における紫外光遮断層の導入を提案し、基礎実験によりその有効性を検証する。また、紫外光遮断層を用いることによる樹脂層内露光量分布への影響を確

認するために、その理論的な解析を行なう。

4. ソルゲル変換樹脂と紫外光遮断層を用いた冷却固化式光造形システムの設計・製作と試作システムによる造形原理の有用性の検証

実際に、上記提案手法を用いた自動造形システムを設計・製作し、その試作システムを用いて、造形原理に関する検証実験を行ない、提案手法の有用性、有効性を検証する。また、一般光造形システムによるサンプルとの比較検証を行ない、本手法の従来の光造形法に対する優位性の検証を行なう。

5. 冷却固化式光造形法におけるマスク一括露光方式の可能性の検討

従来の光造形法において、レーザによる選択的露光方式と比べ、マスクによる一括露光方式は、精度の良いマスクを自動的に生成することが困難である、一括露光に使用する光源の光の平行度により、高精度なパターン転写が行えない、装置が大がかりになるなどの理由から、ほとんど注目されていないのが現状である。しかし、大がかりな装置を用いずに高精度なパターン転写が行なえれば、造形時間は飛躍的に短縮され、特に大型のモデル造形においてはその有用性が高い。そこで、本研究では、上記提案手法を応用した冷却固化式光造形法におけるマスク一括露光方式の導入を提案し、その可能性について、硬化理論を提示し、基礎実験による有用性の検証を行なう。

本研究では、以上5つの項目に関して検討、検証実験を行ない、光造形法における新たな技術的躍進の手段を研究開発することを目的とする。

1.3 論文の構成

本論文の構成について図 1.13 にまとめる。また、各章の内容については、以下で説明する。

第1章 序論

研究の背景では、RP&M 技術の代表的手法である光造形法の現在の問題点を体系化、個別に検討することで、本論文で目的とする造形可能形状の拡張、および高精度造形を実現するのに必要な各要素の抽出を行なう。また、研究の目的、論文の構成について述べる。

第2章 光造形法の現状と課題

光造形法の現状と課題として、現在実用化されている光造形システムについて、その露光方式、積層方式による分類を行ない、各方式の特徴、問題点について説明する。

第3章 冷却固化式光造形法の提案

第1章、第2章で抽出した光造形法の基本的な問題点のうち、サポート問題、樹脂液表面張力問題を解決するための手段として、冷却固化式光造形法を提案し、その造形原理、特徴について説明する。

第4章 冷却固化式光造形用光硬化性樹脂の開発

本論文で提案する冷却固化式光造形法に適した光硬化性樹脂の要求仕様について検討し、その仕様を満たす樹脂の開発過程、および得られたゾルゲル変換型光硬化性樹脂の特性について説明する。また、光硬化性樹脂の現状について、一般光造形用光硬化性樹脂の要求特性、硬化原理、開発動向についても言及する。

第5章 光造形法における硬化物余剰成長問題の検討

第1章、第2章で抽出した光造形法の基本的な問題点の一つである、上層からの透過光によって生じる硬化物底面での余剰成長問題について、どのように余剰成長が生じ、成長していくのかなど、その発生原理について、理論的なアプローチによる解析を行なう。

第6章 冷却固化式光造形法における紫外光遮断層の導入

第5章の硬化物余剰成長に関する理論的解析によって得られた知見をもとに、硬化物余剰成長を積極的に抑え、冷却固化式光造形法において高さ方向の分解能を積層厚まで向上させるための新しい手段の提案を行なう。また、基礎実験による提案手法の有効性、有用性の検証を行ない、さらに、紫外光遮断層表面での反射を考慮した積層樹脂層内の露光量分布シミュレーションにより、紫外光遮断層導入により生じる新たな硬化現象（反射余剰成長）に関して明らかにする。

第7章 ギルゲル変換樹脂と紫外光遮断層を用いた冷却固化式光造形システムの設計・製作

前章までに提案した、高自由度、高精度造形を実現するための手段である、ギルゲル変換型光硬化性樹脂と紫外光遮断層を用いた冷却固化式光造形プロセスを実現するための試作システムの設計・製作に関して、ハードウェア、およびその制御について説明する。

第8章 試作システムによるギルゲル変換樹脂と紫外光遮断層を用いた冷却固化式光造形原理の検証

この章では、従来の光造形プロセスとは異なる樹脂供給過程における、供給面および樹脂層内での温度変化の測定、試作システムにより積層可能な最小積層厚の測定、第6章のシミュレーションから得られた反射余剰成長現象の検証、またそのXY面分解能への影響の検証、提案手法の有用性確認のための造形実験について述べる。

第9章 冷却固化式光造形法によるマスク一括露光方式の可能性の検討

この章では、大型の造形物を造形する際に問題となる造形時間増大の問題を解決するために、新たに、紫外光遮断層を用いた冷却固化式光造形法を応用した、従来の一括露光方式とは異なるダイレクトマスク法(Direct Masking Method)を提案する。また、ダイレクトマスク法の造形原理、利点、硬化に関する理論について説明し、造形基礎実験による可能性の検証、評価から、今後の研究に対する指針を示す。

第10章 考察

考察として、光造形システムにおける造形時間、加工分解能、造形物サイズの相関に関して検討を行なう。また、本論文で設計・製作を行なった試作システムの今後の課題についてまとめる。

第11章 結論

結論として、本研究によって得られた知見および成果をまとめる。

付録

現在、実用化されているさまざまな RP&M 技術について、その造形原理、利点・問題点について個別に説明し、それぞれの技術の RP&M 分野における位置付けを行なう。また、第7章で記述していない、試作システムの設計・製作、ソフトウェアに関する詳細部分について説明する。

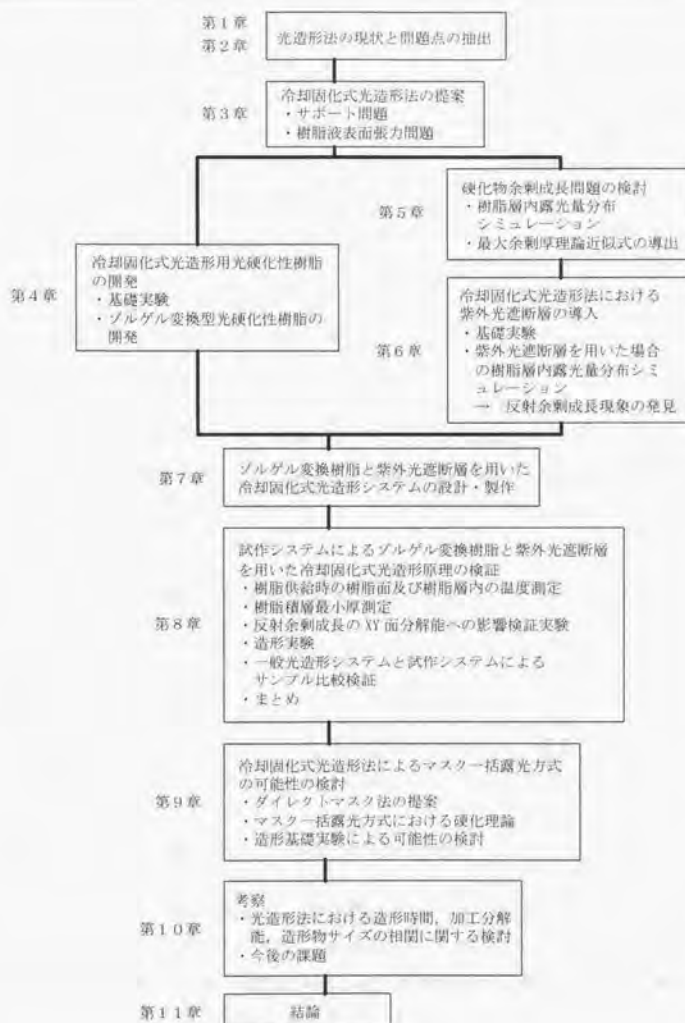


図1.13：論文の構成

第2章 光造形法 (Stereolithography) の現状と課題

光造形法は、光エネルギーによって光硬化性樹脂を選択的に硬化させて所望の立体形状を造形する加工法である。その過程において、光硬化性樹脂は、特定波長の光エネルギーを吸収して、粘潤な液体の状態から固形樹脂へと変化する。この光化学反応を選択的な露光により部分的に起こすことで、目的とする形状の加工物を作り出すことができる。通常の RP&M 用光造形システムでは、3次元立体形状の成型を行なうのに「積層造形法」を採用しているが、その露光方式、積層方式によって何種類かに分類できる。本章では、その各方式の特徴、問題点について説明し、最後に光造形法の現在の適用事例についてまとめる。

2.1 光造形法の露光方式、積層方式による分類と検討

(1) 露光方式による分類と検討

各層の断面形状を加工するために行なう描画露光の方式は、図 2.1 に示すように大きく分けて 2 種類に分かれる。以下で、その 2 種類の方式について個別に説明する。

・一括露光方式 (マスク露光方式: photomask patterning)

光学マスクを利用して断面形状を一度に露光する方法である。この方法は、描画工程と露光工程が独立しているため、それぞれを互いに干渉しない形で平行して処理すれば加工時間を短縮できる。また、断面形状によらず各層の加工時間が一定であるという特徴がある。しかし、以下のような欠点があげられる。

1. 一瞬で広範囲の露光を行なうので、硬化収縮時に生じる内部残留応力の逃げ場がなく、反り変形が生じやすい。
2. 高精度の光学マスクの描画が困難であり、多数のマスクを用意する必要がある。
3. マスクと露光面が離れているために、マスク端面での光の回折、および照射源が

らの光の平行度によって、細部のパターンがくずれてしまう。

4. 完全な平行光を得ることは不可能で、その結果XY面での造形精度が得られにくい。

光源としては、水銀ランプやクセノンランプが使用されている。これらのランプに使用されている放電灯の総出力は大きいですが、特定波長域の紫外光の占める割合は少ないため、これらのランプを使用して一括露光を行なうには、使用するランプの紫外光波長域に応じた光硬化性樹脂の開発が必要となる。さらに、放電部分は体積が大きく、また発光部分が互いに無関係な方向やタイミングで光波動を発生しているため、平行度、面均一度を得るには特殊な光学系が必要となる。

・逐次露光方式（走査露光方式：scan patterning）

露光ビームを走査して断面形状を描きながら露光を行なう方法である。この方法は、加工装置の構成や保守が簡単であり、多くの光造形装置で利用されている。露光ビームの走査のさせ方で、さらに細かく分類される。代表的なものには、露光ビームを加工物の外形に沿って走査させるベクタスキャン方式と、加工物に対して一定方向に平行に走査させるラスタスキャン方式がある。現在の光造形装置では、層毎にスキャンする方向を90°変えるラスタスキャン方式によって反り変形を抑える工夫がなされている。欠点としては、広い領域をスキャンするのに時間を要する点、またレーザを使用するためにその設置、保守にコストがかかる点があげられる。

露光ビームの走査方法には、図2.2に示すように、ガルバノミラーを用いたガルバノメータ方式と、XYプロッタ機構を用いたもの、ガルバノミラーとポリゴンミラーを併用したものがある。

図2.2左に示すガルバノメータ方式は、XY方向に回転するミラーにレーザビームを入射し、露光面に対してレーザビームを振るように走査する方法である。この方法は、走査速度を3m/sec程度まで上げることが可能だが、描画面の端でデフォーカス（焦点ぼけ）と位置誤差が発生する。デフォーカスは、ダイナミックフォーカスレンズを用いて偏光位置に合わせて焦点を加減する方法で補正できる。しかし、原理的に、描画面中央ではレーザ光は垂直入射するが、端では斜めとなり精度上問題がある。実用走査域は、30cm角程度である。

図2.2右に示すXYプロッタ方式は、レーザもしくはランプから光ファイバにより導いた紫外光を、レンズによって露光面に集光し、それをXYプロッタ機構により走査させる方式である。最高速度は、1m/sec程度と高速に走査することはできないが、位置によ

らず焦点位置がずれることがない，高分解能を実現可能などの利点があげられる．実用走査域は，1m 角程度である．

ポリゴンミラーとガルバノミラーを用いた方式は，XY ガルバノメータ方式のどちらかのミラーをポリゴンミラーによって置き換えたもので，一方の軸の走査を高精度に行なうことができる．走査はラスタースキャンのみとなる．走査速度は，1 m/sec 程度である．実用走査域は，50cm 角程度である．

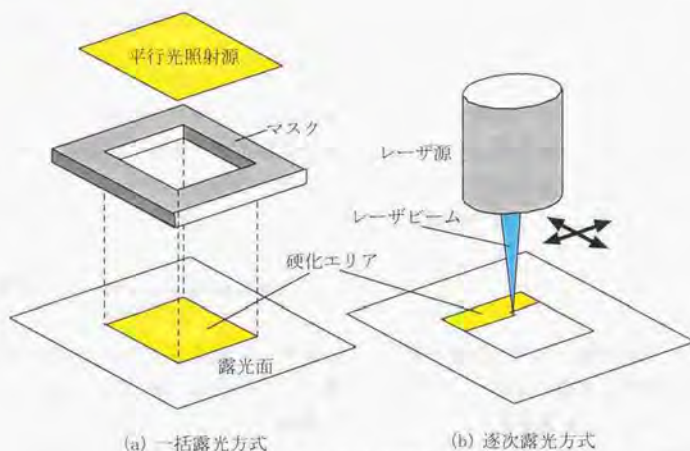


図2.1：光造形法の露光方式

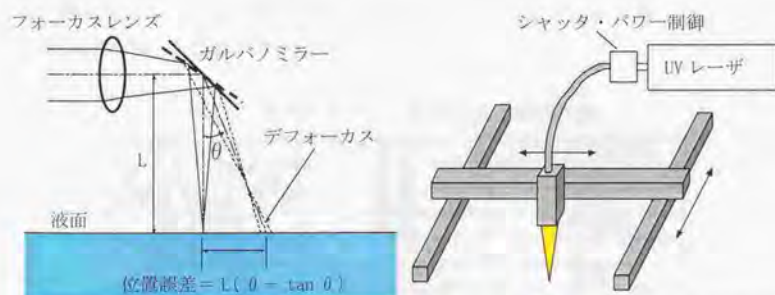


図2.2：レーザービーム露光方式（左：ガルバノメータ方式，右：XYプロッタ方式）

(2) 積層方式による分類と検討

立体形状を作成するためには樹脂の積層作業が必要となる。市販されている大半の光造形装置に用いられているのは、液状の樹脂で満たされた樹脂槽の中に加工物を作る「ステレオリソグラフィ法 (stereolithography)」である。

ステレオリソグラフィ法の加工装置は、露光対象となる樹脂表面の位置制御方法により、図 2.3 に示した 2 つの方式に分類される。

・規制液面方式 (constrained surface exposure)

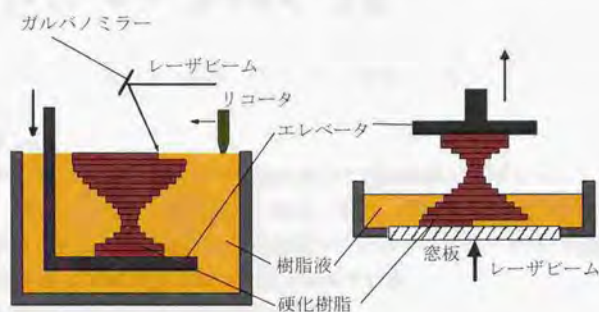
樹脂槽内のいずれかの壁面に「窓板」と呼ばれる透明な板を設置し、それを通して露光を行なう方法である。この方法では、高さ方向の加工精度が容易に保証されるが、硬化した樹脂が窓板側に固着して造形基盤側から剥がれてしまったり、微細な形状であれば破壊してしまうというトラブルが生じ易い (図 2.4)。この手法は、容易に高さ方向の解像度が得られるという理由から、主にマイクロ構造物の造形に応用されている[19]。

・自由液面方式 (free surface exposure)

樹脂槽に満たされた液状樹脂の、解放された自由な液面に対して露光を行なう方法である。この方法では、規制液面方式と比較して、硬化した樹脂が窓板に固着してしまう問題は起こらず、また将来造形物に樹脂以外の、たとえば金属部品などを組み込みたい時などに、材料の交換が容易にできるという利点がある。その一方で、第 1 章の研究の背景で述べたように、樹脂液表面張力の影響などで、厳密な層の厚さと表面精度を実現するのは困難である。さらに、自由液面方式では、露光に用いられる光が微弱である場合には、酸素などによる硬化進行の阻害を考慮しなければならない。表 2.1 に、自由液面方式と規制液面方式の優劣をまとめる。

表 2.1：自由液面方式と規制液面方式の比較

項目/方式	自由液面方式	規制液面方式
大型化への対応	容易	困難
高粘度樹脂の使用	困難	容易
積層機構	簡単	やや複雑
液位制御の必要性	あり	なし
液表面の平坦さ	(粘度による)	平坦
酸素阻害の影響	考慮すべき	なし
層の厚み	下限あり	下限なし



(a) 自由液面方式

(b) 規制液面方式

図2.3：ステレオリソグラフィ法の積層方式

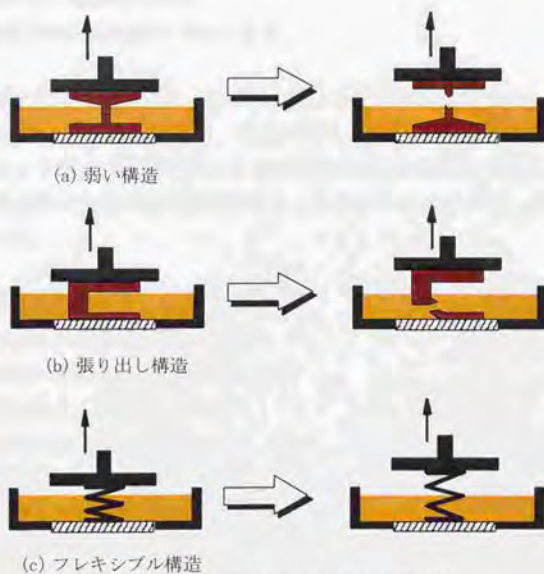


図2.4：規制液面方式におけるトラブル

2.2 光造形法の特徴と適用事例、課題

一般に光造形法には次のような加工法としての特徴がある。

1. 造形精度が高い。

レーザを用いた描画方式では、XY面においては短波長レーザビームのビーム径を絞ることで、数 μm 程度の分解能が得られる。また、高さ方向では、使用する樹脂の粘性、造形形状にもよるが、50 μm 程度が現システムで得られている。造形精度に関しては、現存する RP&M 技術において最も優れている。

2. 設計から実物の完成までの時間が短い。

3. 複雑な構造を一工程で作成することができる。

4. 加工が全て自動的に行なわれる。

5. 材料に無駄がなく経済的である。

6. 大がかりな廃棄物処理設備が不要である。

こういった利点に着目し、現在、国内外の数社が光造形装置を販売しているが、これらはいずれも RP&M 用のものであり、光造形法の RP&M 分野における地位は既に確立されていると言って良い。最近ではこうした利点が他の方面からも注目され、医療や工芸などの新たな分野で光造形法が利用されるようになってきている。以下に、具体的な例をいくつか示す。

- ・外科医療における術前シミュレーション[6]
- ・外科医療における人工骨用原型の作製[7]
- ・下顎の運動軌跡の可視化による異常発見[8]
- ・CADを利用した人工歯冠の作製[9]
- ・成形用金型や鋳造用鋳型の作製[28]
- ・CADを利用した宝飾工芸品の作製[29]
- ・立体地図を利用した大型建造物の建設計画
- ・考古学におけるレプリカの作製[30]
- ・立体芸術品や街路標識などの制作[31]
- ・マイクロマシン製作技術への応用[19][20][21][22]

以上のように新たな分野が開拓されるにつれ、光造形法に求められる仕様はますます厳しいものとなってきている。コンピュータシステムは今後とも一層低価格化と高性能

化が進行すると考えられるので、光造形システムがさらに普及するためには以下のような要素技術の発展が望まれる。

1. レーザ光源の低コスト化、非レーザ化
2. 機構部の低コスト化、既存の機構の流用
3. 装置開発のための機械技術の進歩
4. 3次元CADの入力手法の改良
5. モデル設計環境や加工シーケンスを開発するソフトウェア技術の発展
6. 各種の成形物、成形型を直接生成するための素材開発
7. 高精度化のための低収縮樹脂の開発
8. 高精度・高自由度造形のための新手法の開発

第3章 冷却固化式光造形法 (Refrigerative Stereolithography) の提案

本章では、従来の光造形法で問題となっていた造形可能形状を制限する主要原因であるサポート問題、および造形精度に影響を与える樹脂液表面張力問題を解決するための手段として、冷却固化式光造形法を提案し、その原理、特徴について説明する。

3.1 冷却固化式光造形法の原理

第1章の研究の背景で述べたように、サポートは、造形過程において現れる孤立した部分の移動を抑え、また層内の不均一な露光によって生じる張り出し部分などの反り変形を抑制するために、目的形状と共に造形する必要があり、造形自由度を低下させる主要原因となっている。また、材料として使用する光硬化性樹脂の樹脂液表面張力による不適切な積層が、造形精度を悪化させている。以上のような問題は、液体樹脂を使用しているために発生する。そこで、本論文では、積層した樹脂層を冷却して、流動性のない固体状にして造形を行なう方法を提案し、この方法を「冷却固化式光造形法[41]」と呼ぶことにする。

冷却固化式光造形法では、光硬化性樹脂を何らかの方法で冷却し、樹脂の粘性を上昇させ、固化状態にした状態で紫外光を照射、光硬化反応を選択的に生じさせ、再び積層・硬化を繰り返すことで立体造形を行なう。つまり、樹脂の温度による粘度変化と、紫外光照射による光硬化反応を利用して、造形を行なう。そうすることで、造形過程において、光硬化部分は周りを粘度の上昇した未硬化樹脂によって保持されるので、図3.1に示すように、孤立部分、張り出し部分にもサポートを付ける必要がなく、自由度の高い造形が可能となる。また、造形過程において、樹脂面は常に冷却固化状態にあるので、樹脂液表面張力の影響が最小限に抑えられ、造形形状によらず均一な積層が行なえる。本論文では、樹脂が冷却され、粘度が上昇し、硬化物が保持されている状態を「冷却固化」状態と呼ぶ。一方で、光重合反応によって固体状になるのは「光硬化」と呼ぶ。両

者は、固化するメカニズムが全く異なり、表現を明確に使い分けなければならない。冷却固化した樹脂は温度が上がると溶け出すが、光硬化した樹脂は溶け出すことはない。この性質によって、造形終了後に、造形目的形状のみを取り出すことが可能となる。

冷却固化式光造形法による造形プロセス概略を図 3.2 に示す。造形プロセスは以下のようになる。

- (a) 液状の光硬化性樹脂を 1 層分供給し、同時に平滑な面を作る。
- (b) 露光面を冷却し、供給した樹脂を冷却固化状態にする。
- (c) スライスデータに従って、選択的に露光する。
- (d) エレベータを 1 層分下げる。

以上(a)～(d)の操作を必要な回数だけ繰り返す。

- (e) 加温して、未硬化樹脂を融かし除去する。
- (f) 洗浄、後露光を行ない、目的形状を得る。

以上のようなプロセスを効率良く実現するには、なるべく常温に近い温度で冷却固化状態にあり、樹脂を供給する際には低粘度である光硬化性樹脂の開発が必要である。また、その樹脂に適した樹脂供給機構、冷却機構を新たに提案する必要がある。

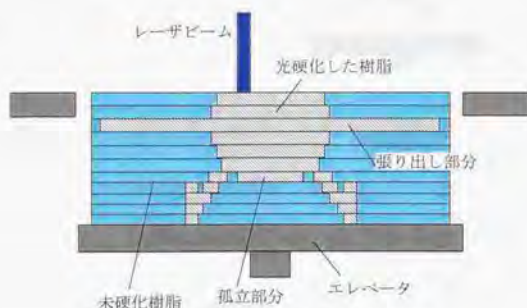


図3.1：冷却固化式光造形法概略図

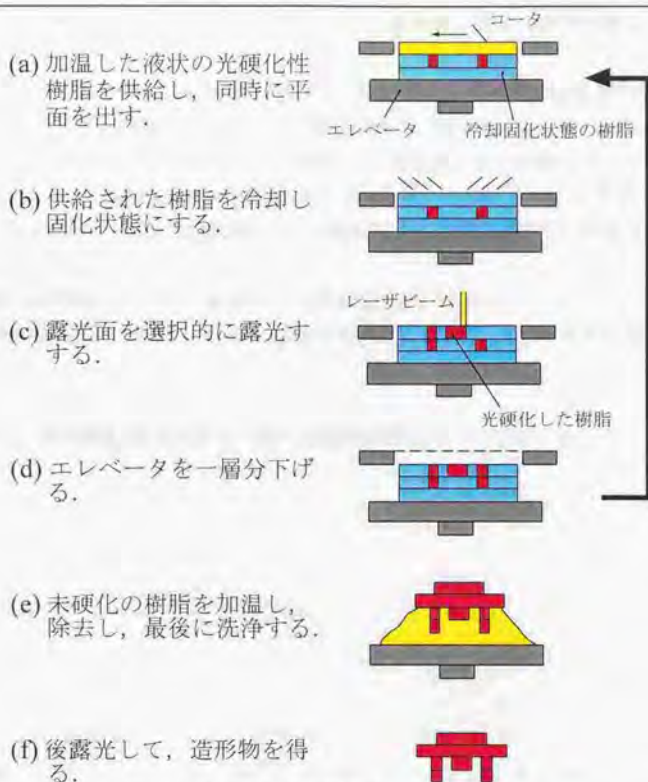


図3.2：冷却固化式光造形法 造形プロセス

3.2 冷却固化式光造形法の特徴

冷却固化式光造形法には、以下のような利点がある。

- (1) サポートが必要ないため、サポートの入力、除去という作業が省け、またサポートの跡がない綺麗な造形物が得られる。
- (2) 造形形状の自由度が高い。例えばジョイント形状のような可動部分を持つ構造も造形できる。
- (3) 自由液面式において、従来よりも露光面を高精度に制御できる。

- (4) 供給する樹脂を層単位で変化させることで、造形物に様々な特性を持たせることができる。
- (5) 露光面は常に冷却固化状態にあるので、露光面に対して付加処理を行なうことで、造形物に新たな特性を付与できる可能性がある。例えば、露光面に紫外光を遮断するマスクをプリントすることで、上層からの透過光による余剰成長をなくすことができる。この操作により、高さ方向の分解能を向上させることが可能である。
- (6) 造形を行なうのに余分な樹脂タンクが必要ない。必要な樹脂だけ造形テーブルに供給すれば良い。
- (7) 複数の造形物を空間的に配置し、一度に造形が行なえる。
- (8) 造形物最下層を造形テーブルに固着させる必要がなく、造形後容易に造形物を回収できる。

次章では、冷却固化式光造形法に適した樹脂の開発について述べる。

第4章 冷却固化式光造形用光硬化性樹脂の開発

本章では、冷却固化式光造形法用樹脂として要求される特性について検討を行ない、冷却固化式光造形原理を検証するための基礎実験により得られた知見をもとに、新たにゾルゲル変換型光硬化性樹脂の開発を行なう。

4.1 一般光造形用光硬化性樹脂の現状

本節では、一般光造形用光硬化性樹脂の現状として、その要求特性、光硬化の原理、また現在の光硬化性樹脂の開発動向について説明する。

4.1.1 一般光造形用光硬化性樹脂の要求特性

光造形システムでは、通常紫外線レーザーをコンピュータ制御で走査しながら液状の光硬化性樹脂を薄板状に固定して順次積層することで立体モデルを成形する。よって、材料として使用する樹脂特性が造形物の精度や加工性の大きな要因となっている。

造形時間、造形精度、機械的特性などの観点から、光造形用樹脂に要求される一般的な特性としては次のような項目があげられる[12]。

1. 樹脂粘度が低いこと

一般的な光造形システムでは、樹脂を積層供給する際に一度造形テーブルを深く沈めてから、液位レベルより一層分だけ低い位置にテーブルを戻し、その後でリコートを行なう。使用する樹脂の粘性が高い場合、一度深く下げたときに造形テーブルの中央まで樹脂が流れ込むのに時間がかかってしまう。それだけ、立体モデル造形の所用時間が長くなる。

2. 可視光下での樹脂の安定性が優れていること

光造形装置内の樹脂は長時間使用されるため、長期保存安定性が必要とされる。特に、作業温度での熱安定性、室内光下での光安定性が重要である。室内蛍光灯も弱い紫外線を放出しており、長時間樹脂に照射され続けた場合、そのエネルギー照射量が臨界露光量

を超え、樹脂の粘性が徐々に上昇する問題が考えられる。

3. 紫外線レーザによる反応性が高いこと

光硬化性樹脂は光エネルギーで重合反応するため、少ない露光量でも反応する樹脂が望ましい。光感度が高い樹脂であれば、少ない露光量で硬化させることができるため、弱い光源でもよく、また強い光源を使用すれば造形速度自体を向上させることが可能である。

4. 露光に対する硬化精度が優れていること

レーザ光照射に対する硬化形状の正確さは、造形物精度に大きな影響を与える。普通、照射面よりも硬化幅の範囲が少し拡大する傾向があるが、これができるだけ少ない樹脂が望ましい。

5. 硬化時の体積収縮率が小さいこと

樹脂の硬化収縮は造形物の形状歪みや精度に大きな影響を与える。一般に、光造形法では樹脂面に対して上方から露光を行なうため、露光面とそれ以下では吸収露光量が異なるため、硬化時の体積収縮が大きいとそこに応力を生じる。全く収縮を起こさない樹脂は不可能であるが、それを小さく抑えられれば、精度をさらに向上させることができる。

6. 酸素による硬化阻害が少ないこと

ラジカル重合型光硬化性樹脂は、空気中の酸素雰囲気下では光重合反応の阻害を受けやすい。これが原因で、硬化層間の接着力を低下させたり、造形物表面のべたつきを起こしやすい。よって、できるだけ酸素阻害を受けにくい樹脂が望ましい。

7. 自己接着性が良いこと

既硬化層とその次にくる樹脂硬化層間の接着性が悪いと、造形物全体の機械的強度が低下してしまう。

8. 後硬化が小さいこと

光照射後も硬化反応が進むことを後硬化、または暗反応という。硬化収縮率の大きい樹脂では、後硬化により造形物に歪みや割れが起こりやすい。特に、形状が複雑なモデルや、金型母型の作成では後硬化の少ない樹脂が望ましい。

9. 造形物の機械的強度が優れていること

大型の造形物の作製には自重による変形を防止するために、ある程度の機械的強度が必要になる。また、機能テストモデルなどの用途では一般の成形材料並の機械的特性が要求される。

光造形用樹脂では、以上のような樹脂特性が望まれている。樹脂の特性をより深く理解するために、4.1.2では光硬化性樹脂の光硬化の原理について説明する。

4.1.2 光硬化の原理

感光性樹脂を光反応による形態から分類すると、①光分解を利用したもの（光分解型）、②光架橋を利用したもの（光架橋型）、③光重合反応を利用したもの（光重合型）に分かれる[12]。本論文では、特に光重合型の樹脂について説明する。

光硬化性樹脂は重合形態から、ラジカル重合反応型とカチオン反応型に大別することができる。ここでは、代表的なラジカル重合型の反応機構について簡単に説明する[36]。

ラジカル重合型の光硬化性樹脂は、基本的には光重合性プレポリマー（M）、光重合性モノマー（M'）、光開始剤（I）、増感剤などから構成される。

① 開始反応：光硬化性樹脂に紫外線エネルギー（ $h\nu$ ）を照射すると、光開始剤（I）が活性化する。この活性化には主に次の3種類の方法がある。



ここで、Nはモノマー、 $I^+ \cdot$ はイオンラジカルを表す。

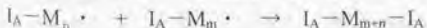
② 生長反応：開始反応で生成した活性ラジカル（たとえば $I_A \cdot$ ）が光硬化性プレポリマー（M）あるいはモノマー（M'）を活性化し、重合反応を生長させる。



③ 連鎖移動：生成ラジカルが他の分子（T）に移動して反応を開始する。



④ 停止反応：ラジカル同士が結合するか、重合性プレポリマー以外の分子と反応してラジカルが消滅して、重合反応が停止する。



また、光重合反応の重合速度は一般に次式で表される。

$$\text{重合速度 } R_p = K_p \sqrt{\frac{\epsilon \cdot f \cdot [c] \cdot I_0}{K_t}} [M]$$

- K_p : 生長反応の速度定数
 K_t : 停止反応の速度定数
 I : 光開始時の光吸収係数
 f : 開始反応が起こる割合
 $[c]$: 光開始剤の濃度
 I_0 : 紫外線の強度
 $[M]$: モノマー濃度

以上のように、光硬化技術は光エネルギーを用いるため、従来の熱硬化技術に比べた一般的な特徴としては次のような点があげられる。

1. 速硬化性

熱硬化型や溶剤乾燥型樹脂では長大な加熱乾燥炉が必要であるが、光硬化型は非常に短時間の照射時間、エネルギーですむので、硬化設備が小形化、省スペース化できる。また、生産性の向上や不良率の低減が可能である。

2. 低温硬化

少ない光エネルギーで重合反応や架橋反応が開始するので、比較的低温で硬化することが可能であり、熱に弱い基材にも適用できる。

3. 無溶剤型

反応性希釈剤で粘度調整するため、従来の溶剤型のように溶剤の回収や溶剤揮発による環境汚染などの問題が少ない。また、溶剤系に比べ1回の塗布で厚膜形成が可能である。

4. 硬化特性

硬化性樹脂の選択により、高硬度、耐摩耗性、耐薬品性、耐汚染性、耐ブロッキング性、可とう性、高光沢性など用途に応じた優れた硬化特性が得られる。

5. 省エネルギー

通常の加熱乾燥方式に比べ、光硬化方式はエネルギー効率がよく、かつ作業の開始、停止が容易に行なえ、省エネルギーになる。

6. 選択的硬化

光エネルギーは直進性があり、必要な部位にのみ照射できるため選択的硬化が行なえる。この特徴を利用して、フォトレジスト、光造形技術などへの応用がなされている。

以上が光硬化技術の長所であるが、短所としては次のような点があげられる。

1. 光透過が必須

光エネルギーは直進性があり、光の届かない部位では光反応が起こらない。よって、厚

膜の硬化には限界がある。また、顔料、染料、充填剤などを含有する場合には光透過が不十分となり厚膜形成の制約となる。また、光透過するために、深さ制御を厳密に行なうことが困難である。

2. 硬化時の収縮応力

光硬化性樹脂はきわめて短時間で高い架橋密度に反応するため、硬化時の体積収縮が大きくなり、硬化物に残る歪みが基材との付着性低下や剥離の原因になりやすい。

3. 光照射装置

従来の加熱乾燥装置の代わりに専用の光エネルギー照射装置が必要で、特にレーザーを用いる場合は、初期設備投資および維持費がかかる。

4. 安全衛生

光硬化性樹脂は原料として低分子モノマーを使用する場合があるため、皮膚刺激性、揮発性などの面から取扱いに配慮が必要である。

4.1.3 開発動向

現在市販されている光硬化性樹脂は、主にラジカル重合型とカチオン重合型の2種類である。

ラジカル重合型光硬化性樹脂には、不飽和ポリエステル系、アクリル系、エン・チオール系があるが、ここではアクリル系樹脂を中心に説明する。

アクリル系重合型プレポリマー（オリゴマー）は官能基としてアクリロイル基（ $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CO}-$ ）を有するベースレジンであり、骨格を構成する分子の構造により、ポリエステルアクリレート、ポリウレタンアクリレート、エポキシアクリレート、ポリエーテルアクリレートなどに分類できる。ポリウレタンアクリレート系樹脂は耐摩耗性、硬化性、強靱性、耐食性に優れており、成分組成比や骨格の種類を変えることで硬化物の硬度和柔軟性を容易に変えることができる。しかし、ポリウレタンアクリレート系樹脂は粘度が比較的高いものが多く、成型歪み性や解像精度に代表される造形精度が問題となっており、次に説明するカチオン重合型の光硬化性樹脂に変わりつつある[37]。

カチオン重合型の光硬化性樹脂は、前述のラジカル重合型光硬化性樹脂と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全く違うものを使用している。カチオン重合型光硬化性樹脂としては、エポキシ系樹脂、ビニルエーテル系化合物、環状エーテル系化合物などがあげられるが、ここでは最も汎用されているエポキシ系樹脂を中心に説明する。エポキシ系光硬化性樹脂は、成型歪み性や解像精度が優れており、樹脂粘性も低いため、高精細の光造形に適した材料であるが、その脆さが最大の欠点となっており、機能確認のための造形物が得られにく

い問題点がある[37]。そこで、最近エポキシ系樹脂の高精細さを有しながら、高靱性の得られる材料としてオキシセタン系光硬化性樹脂が注目されている。オキシセタンはエポキシ同様カチオン開環重合する事が古くから知られていたが、低コストの化合物合成法がなかったこと、エポキシの主な用途であるアミン硬化が進行しないこと、ならびにカチオン重合の成長速度と重合転化率が高いものの、開始速度がエポキシに比較して遅く、硬化速度が及ばないことから、最近まで工業化なされていなかった。近年、オキシセタンの合成技術が確立され、またオキシセタンとエポキシを混合することによって、カチオン重合の開始速度が向上し、かつオキシセタンの成長速度と重合転化率の高さを維持することができる事が発見され、実用化された。この樹脂は、機能材料として適用するのに必要な、成型歪みの良好性、解像精度と機械的物性、特に高い靱性に優れている。

以上に述べた光硬化性樹脂以外に、ゴム状に硬化する樹脂や、直接射出成形用型を造形することが可能な高耐熱性樹脂などが実用化され、それぞれの用途に利用されている。

次に、本研究で使用する冷却固化式光造形用光硬化性樹脂について述べる。

4.2 冷却固化式光造形用光硬化性樹脂の開発

4.1で一般光造形用光硬化性樹脂について説明したが、冷却固化式光造形法ではその造形原理上、一般光造形用光硬化性樹脂とは違った特性が要求される。冷却固化式光造形法に適した光硬化性樹脂の要求特性としては、以下のようなことがあげられる。

- (1) 常温で冷却固化状態にあり、供給する際には低粘度であること

冷却固化状態になる温度が常温よりも著しく低い、もしくは高い場合、樹脂を冷却固化状態に保つために、特別な設備が必要となりシステムが大がかりになる。また、樹脂が熔融状態で低粘度でなければ、樹脂を供給する際に下層に無理な力がかかってしまい、積層が正常に行なわれない可能性がある。

- (2) 樹脂の冷却固化状態と樹脂供給時の熔融状態間の遷移が狭い温度範囲で起こること
と（冷却固化状態と熔融状態間の特性が明らかに異なること）

一般の光硬化性樹脂を冷却していくと、徐々に粘性が増加していき、マイナス程度で冷却固化状態になる。たとえば、JSR（株）製のウレタン・アクリレート系光硬化性樹脂 SCR-500 では、完全な冷却固化状態にするには、約 -50°C まで冷却を行なわなくてはならない。このように冷却固化状態と樹脂熔融状態（一般光硬化性樹脂では常温）の温度差が大きい場合、樹脂を冷却し始めてから冷却固化状態にするまでに長い時間を必要とし、結果として造形時間が長くなってしまう。また、環境温

度の変化によって、樹脂の粘度がばらつき易く、造形精度に影響が出やすい。一方、冷却固化状態と熔融状態間の遷移が狭い温度範囲で生じる場合、つまり、樹脂特性が狭い温度範囲で急激に変化する場合は、環境温度がある一定温度以下にあれば冷却固化状態を保持することができるので、環境温度の変化による樹脂状態への影響は少なくすむ。また、樹脂供給時には、冷却固化状態の樹脂面に熔融した状態の樹脂を供給するわけだが、その際の樹脂面温度が冷却固化状態から熔融状態への転移温度より低ければ、造形物が変形したり、流れたりする問題はない。

(3) 冷却固化状態においても光硬化反応が阻害されないこと

一般光造形用光硬化性樹脂、SCR-500 (JSR 製) では約 -50°C で冷却固化状態に遷移し、この温度での光重合反応にはまず樹脂成分を活性化させるための一定の熱量が必要である。そのため、樹脂を硬化させるためには、硬化エネルギーに加え余分なエネルギーを必要とする。よって、冷却固化式光造形用光硬化性樹脂としては、冷却固化状態においても通常通り硬化反応を起こせるものが望ましい。

(4) 樹脂供給温度において、樹脂成分が揮発することなくその特性が長時間安定していること

一般光造形用光硬化性樹脂の中には、環境温度によっては、徐々に樹脂成分中のモノマーが揮発してしまうものや、エポキシ系樹脂のように環境中の水分によって特性が悪化するものがある。冷却固化式光造形用光硬化性樹脂として、常温において冷却固化状態が実現するのであれば、当然熔融状態にするには加温する必要がある。その温度で長時間特性を保持できる必要がある。

(5) 樹脂供給後、即座に冷却固化状態に移行すること

(2)とも関連して、樹脂の状態遷移が温度に対して緩やかに起こる場合、樹脂を供給してから冷却固化状態にするまでには、強制的な冷却を行わない限り、長い時間が必要である。そこで、冷却固化式光造形用光硬化性樹脂としては、樹脂の状態遷移が急激に起こることが要求される。

(6) 冷却固化状態では、硬化した部分の反り変形や移動を抑えるのに十分な強度があること

冷却固化状態の樹脂は、一般光造形法におけるサポートの役割があり、もし冷却固化状態での強度が低い場合、樹脂を硬化させる際の樹脂硬化収縮による反り変形を抑えることができず、造形精度が悪化する問題が考えられる。また、樹脂供給の際に圧力がかかった場合、前層までの硬化物が流れてしまう可能性がある。

(7) 造形後に、造形物内の微小領域から未硬化樹脂を容易に取り除けること

冷却固化式光造形法では、その利点として複数要素からなる機構を一体成型可能であるが、もし造形後に造形物内の微小な領域の未硬化樹脂を取り除けなければ、

後露光した際にその部分も一緒に硬化してしまい、複数要素を正確に一体成型できない問題がある。また、造形後の未硬化樹脂を取り除くのに手間を要する場合、それは一般光造形法における造形後のサポート除去と同じような意味でユーザーに負担がかかってしまい、冷却固化式光造形法の優位性が損なわれてしまう。

本研究では、上記の検討事項をもとに、冷却固化式光造形法に適した樹脂について開発・検討を行ってきた。従来の光造形用光硬化性樹脂では、上記のように、約 -50°C まで冷却しないと、冷却固化状態にすることができなかったために、冷却設備が大がかりになる問題があった。そこで、本研究では、まず冷却固化式光造形原理確認のための基礎実験用光硬化性樹脂として、JSR（株）の協力により冷却固化式光造形用光硬化性樹脂 KC1026-8 の開発を行なった[38]。

KC1026-8 は、ウレタンアクリレート系樹脂で、オリゴマーに固体状のモノマーを使用しており、それに希釈用のモノマー、および光開始剤を加えたものである。それらは、重量比で、67%、30%、3%混合されている。KC1026-8 は、図 4.1 に示すように約 95°C で供給可能な粘度（約 600cps）になり、約 -10°C で完全な冷却固化状態にすることができる[38]。汎用光硬化性樹脂 SCR-500（JSR 製）と比較してみると、粘度上昇が横軸において右側、つまり高温側にシフトしているのが確認できる。つまり、KC1026-8 の方がその分だけ冷却固化状態の温度も高いことを意味する。

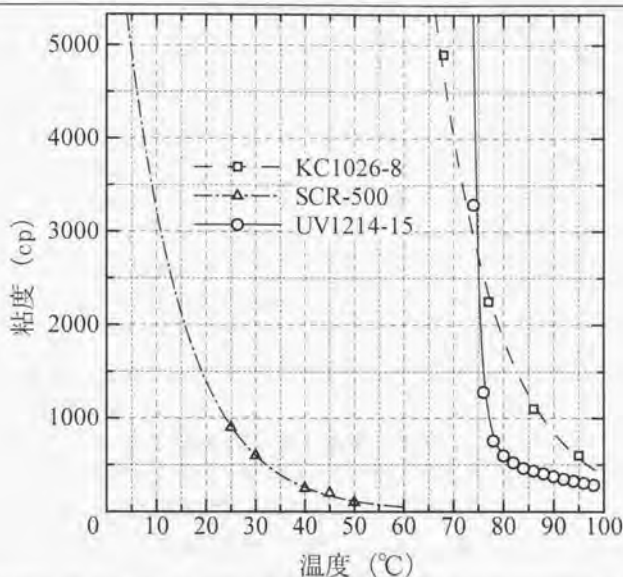


図4.1 : SCR-500 (汎用光硬化性樹脂), KC1026-8 (冷却固化式光造形用光硬化性樹脂), UV1214-15 (ゾルゲル変換型光硬化性樹脂) 各光硬化性樹脂の温度 vs 粘度 (縦軸: 粘度 (cp), 横軸温度 (°C))

4.2.1 冷却固化式光造形原理の検証実験

冷却固化式光造形原理の可能性を検証するために、市販の光造形システム (SCS-1000HD, SONY 製) 内に、独自の樹脂供給機構 (図 4.2), 冷却機構 (図 4.3) を組み込み、基礎実験を行なった。図 4.4に SCS-1000HD 内の写真を示す。

基礎実験用試作装置では、レーザのスキャニングおよび造形テーブルの移動は、光造形装置 (SCS-1000HD) によって、各層毎自動的に行なわれる。樹脂供給および樹脂の冷却は、光造形装置と同期を取りながら独自の制御プログラムに従って実行される。

基礎実験では、JSR (株) の協力により開発した、冷却固化式光造形用光硬化性樹脂 KC1026-8 を使用した。

樹脂は、加温された樹脂タンク内に配置されたポンプを駆動し、供給パイプによって、装置内のコートまで導かれる。ポンプを駆動しながらコートを移動させることで、造形テーブルに樹脂を平面供給することができる (図 4.2)。造形テーブルは、低温恒温槽か

らの冷却液の循環によって -10°C に冷却されている。また、樹脂層表面および側面は、液体窒素ガスを噴射することで冷却している（図 4.3）。また、樹脂面の温度は非接触放射温度計によって、常に測定しており、一定温度になるように間欠的に液体窒素のガスを噴射する仕組みになっている。

基礎実験用試作装置を用いて、実際に造形実験を行なった。造形実験のパラメータを表 4.1 に示す。図 4.5 に造形直後のサンプルグリーン体の写真を示す。この状態で、造形物を造形テーブルから取り出し、樹脂成分中の希釈用モノマーに浸し、加温しながら未硬化の樹脂を除いていく。実際に得られた造形サンプル 1, 2, 3 の写真を図 4.6 に示す。これらのサンプルは、それぞれ複数要素から構成されており、あらかじめそれらが接触しないように一定のクリアランスを設けて設計したものである。通常、このような複数要素からなる構造は、サポートが必要であるため、従来の光造形システムでは造形困難、もしくは造形不可能である。

冷却固化式光造形法を用いた基礎実験用試作装置を用いて、これらのサンプルが一体成型され、造形後、それぞれ自由に回転させることができた。つまり、冷却固化式光造形法、および冷却固化式光造形用光硬化性樹脂 KC1026-8 を用いて、サポートを使用せずに複数要素からなる自由度の高い造形が可能であることが確認された。しかし、図 4.6 の写真を見て分かるように、光造形本来の造形精度、表面平滑性は得られていない。その理由としては、以下のようなことがあげられる。

1. 冷却固化温度が約 -10°C で、常温よりも低いために、特別な冷却を行なう必要がある。また、基礎実験では、冷却域が大気に対して開放されていたために、冷却の不均一、霜の影響を避けることができず、結果として造形物の精度が悪化した。
2. 造形後に未硬化樹脂を除去するために、樹脂が流れ出す温度（約 80°C ）まで造形物を加温しなくてはならないが、硬化物の熱変形温度は約 70°C であり、結果として熱による造形物の変形が生じた。また、狭い領域の未硬化樹脂を除去することが困難であった。
3. 樹脂に対して IR テスト*を行なった結果、冷却固化状態 -10°C では樹脂成分中の固体モノマーはほとんど硬化反応はせず、希釈用モノマーが主に反応することが分かった。つまり、低温での硬化反応は十分ではなく、十分に反応させるには、大きな照射量（約 $900\text{mJ}/\text{cm}^2$ ）が必要であった。
4. 樹脂を供給温度、約 95°C に長時間保持しておくこと、熟重合により樹脂の粘性が徐々に上昇してしまう問題があった。
5. 造形物底面における硬化物余剰成長により、高さ方向の精度が悪化した。

以上のような理由から、まず造形中の温度不均一および霜の影響を防ぐために、冷却固化温度を少なくとも 0°C 以上に必要がある。そこで、樹脂成分中の固体モノマーの成分比を上げる方法を提案したが、図 4.1 から分かるように、KC1026-8 の温度粘度グラフは、汎用光硬化性樹脂 SCR-500 のグラフをそのまま $+65^{\circ}\text{C}$ 程度右に移動させた状態に酷似しており、温度に対する粘度の遷移の仕方はほぼ同程度であるので、このまま固体モノマーの成分比を増やしても、さらに樹脂供給時の温度が上昇してしまうために、これ以上の樹脂の調製は無理であるという結論が得られた。そこで、新たに、常温において冷却固化状態にすることが可能な光硬化性樹脂という点に主眼をおいて、新たな冷却固化式光造形用光硬化性樹脂の開発を行なった。

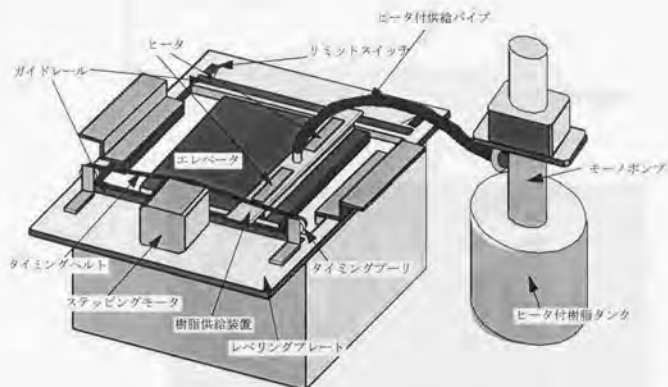


図4.2：冷却固化式光造形法基礎実験用樹脂供給機構

*IR テスト

IR テストとは、試料に赤外光波長の光を当てて、その反射波長を測定することで、その試料に含まれる成分を検査するテストのことをいう。

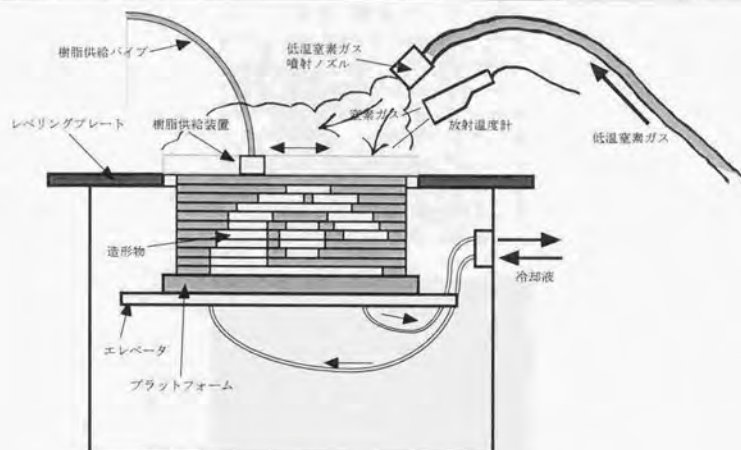


図4.3：冷却固化式光造形法基礎実験用冷却機構

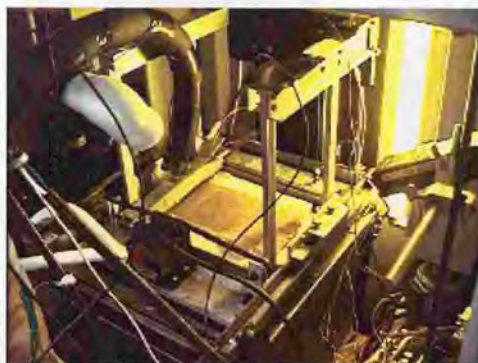


図4.4：冷却固化式光造形法基礎実験用装置写真

表4.1 : 基礎実験造形パラメータ

使用樹脂	KC1026-8
樹脂供給温度	95°C
樹脂冷却温度	-3°C
積層厚	0.1mm
レーザパワー	9mW
スキャン速度	12.1cm/sec
スキャン間隔	0.02mm
スキャン回数	3回



図4.5 : 造形サンプル取り出し直前のグリーン体



①ギアモデル
20 × 30 × 10mm



②回転板モデル
50 × 50 × 7mm



③ジンバルモデル
70 × 70 × 10mm

図4.6：基礎実験によって得られた造形サンプル

4.2.2 ゾルゲル変換型光硬化性樹脂の開発

上記の基礎実験用冷却固化式光造形用光硬化性樹脂 KC1026-8 の欠点を解決するべく、新たに、(株)クラレの協力により、常温（約 25℃）でゲル状態、約 80℃で低粘度ゾル状態に移転するゾルゲル変換型光硬化性樹脂を開発した。この光硬化性樹脂は、従来のウレタンアクリレート系光硬化性樹脂にゾルゲル変化成分を添加したもので、温度によってゾル状態、ゲル状態と可逆的に変化する特徴を持つ。図 4.7に、開発したゾルゲル変換型光硬化性樹脂の原理を示す。

ゾルゲル変換型光硬化性樹脂の光硬化成分は、常温で液体状態であり、温度に対する

樹脂の粘度特性は、そこに加えられたゾルゲル変化成分が強く影響する。常温では、樹脂成分中のゾルゲル変化成分、iso-PMMA, syn-PMMA の帯状分子が複雑に絡み合い3次元状の分子構造をとることで、樹脂はゲル状態にある。一方、樹脂の温度上昇に伴い、iso-PMMA, syn-PMMA 帯状分子がのびて、それぞれの束縛から開放されると、樹脂はゾル状態に転移する。この変化は温度に対して可逆的であり、温度調整によって自由に状態を変化させることができる。常温でこの樹脂を硬化させる場合、iso-PMMA, syn-PMMA 帯状分子が互いに絡みあった状態で、その隙間を埋めている光硬化成分が硬化反応を起こす。その際、ゾルゲル成分は全く硬化には寄与せず、その状態のまま硬化物内に織り込まれることになる。

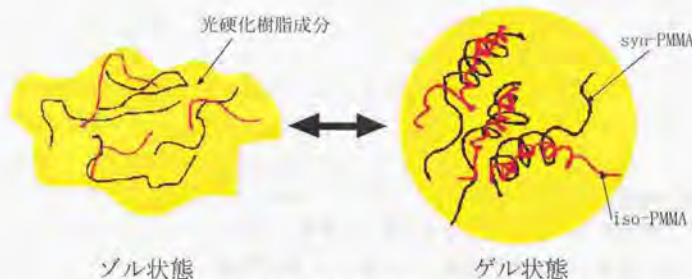


図4.7: ゾルゲル変換型光硬化性樹脂の原理

冷却固化式光造形用光硬化性樹脂として、十分な温度特性、常温でのゲル強度を持たせるために、市販の光硬化樹脂に重量比で何%のゾルゲル成分を添加した場合が最も適当かを調べるために、(株)クラレの協力で測定実験を行なった。測定実験では、ベースとなる光硬化成分を固定して、3種類の異なるゾルゲル成分(A, B, C)に対して、そのベースレジンへの添加量を変化させて、それぞれの樹脂のゾルゲル転移温度、ゲル強度、ゲル硬度を測定した。Aタイプでは、添加量を10%、15%、20%と変化させ、B, Cタイプでは、添加量をそれぞれ15%、20%、25%と変化させた場合を測定した。測定結果を、図4.8、図4.9、図4.10に示す((株)クラレ提供)。

樹脂のゾルゲル転移温度は、加温する幅を小さくするために、常温に近いものが理想である。図4.8のゾルゲル転移温度測定の結果では、Cタイプ、ゾルゲル成分比15%の樹脂が、ゾルゲル転移温度64℃で、一番常温に近い温度でゾル化することが分かる。一方で、冷却固化式光造形用光硬化性樹脂としては、常温における硬化時の硬化物の反り変形や移動を抑えるために、ある一定のゲル強度が必要である。実際に造形された反り変形のあるサンプルの曲げ強度から、少なくとも常温で500kPa以上の強度がないと硬化時

に造形物が反ってしまうことが分かっており、図 4.9の結果から、A タイプ 15%、B タイプ 20%、C タイプ 25%以上の樹脂が、ゲル強度約 650kPa でその条件を満たしていることが分かる。その中でも、B タイプ 20%のものが、最もゾルゲル転移温度が低い。図 4.10のゲル強度測定では、C タイプ 25%のものが最も大きい値を示しており、A タイプ 15%、B タイプ 20%のものは、近接した値を示している。

以上のような考察から、ゾルゲル転移温度、ゲル強度の点で、造形過程において B タイプ 20%のものが、最も冷却固化式光造形用光硬化性樹脂として適している。しかし、実際造形終了後に未硬化樹脂を除去する際に、造形物をトルエンに浸して 40~50℃程度に加熱するわけだが、その際、樹脂中のゾルゲル変化成分の添加量が多い場合、トルエンに接した部分の成分が溶けだしてしまい、結果として、造形物の表面精度が悪化してしまうことが、硬化実験によって分かった。つまり、硬化物強度を上げ、洗浄の際に造形物の変形、表面精度の悪化を防ぐためには、ゾルゲル成分比が小さい方が望ましい。以上の検討の結果、常温でのゲル強度が高く(約 650kPa)、ゾルゲル成分比が小さく(15%)、ゾルゲル転移温度が低い(約 80℃)樹脂として、A タイプ 15%のものを採用することに決定した。以下、この樹脂を UV1214-15 と呼ぶ。

UV1214-15 の温度と粘度の関係を図 4.11に示す。図 4.11のグラフは、温度に対する粘度の変化を分かりやすくするために、縦軸の粘度を対数表示したものである。

図 4.11のグラフにおいて、基礎実験用冷却固化式光造形用光硬化性樹脂 KC1026-8 と、ゾルゲル変換型光硬化性樹脂 UV1214-15 の温度に対する粘度変化を比較すると、KC1026-8 は温度に対して線形に粘度が上昇、つまり、通常の液体樹脂の温度に対する粘度変化を示しているのに対して、UV1214-15 では、通常の液体樹脂の粘度変化とは異なり、粘度が約 80℃を境に急激に上昇していることが確認できる。つまり、この点を境として樹脂の状態が急激に変化することを示している。メーカ((株)クラレ)の測定では、ゾル化点温度 89℃という結果が得られている。このように、非線形に粘度が変化する(粘度変化に温度しきい値が存在する)ことは、冷却固化式光造形用光硬化性樹脂として大変適していることを意味する。また、UV1214-15 の常温でのゲル強度は約 650kPa であり、硬化物の反り変形や移動を抑えるのに十分な強度を持っており、また約 100℃で、粘度は 280cp と低粘性であることが分かる。

次に、UV1214-15 の硬化特性について検討する。UV1214-15 は、ウレタン・アクリレート系の光硬化性樹脂をベースに、ゾルゲル変化成分を 15%重量比で添加したものである。そこで、ゾルゲル変化成分を添加したことによる硬化物物性への影響を、引張り強度、曲げ強度、ビッカース硬度について測定した。その結果を表 4.2に示す。表 4.2から、ゾルゲル変化成分を 15%添加することで、引張り強度、曲げ強度は向上しているが、明らかに靱性が低下していることが分かる。つまり、硬化物として脆い性質を示している。

また、ピッカース硬度値から、ゾルゲル変換成分を添加することで、表面の硬度が低下し、摩耗しやすくなることが分かる。透明性に関しては、ベースレジンの方は透明であるのに対して、UV1214-15では、乳白色をしている。これも、ゾルゲル成分の影響であると考えられる。以上から、ゾルゲル成分を添加することで、冷却固化式光造形用光硬化性樹脂としての温度特性は向上するが、硬化時の物性は低下することが分かる。

次に、表4.3に、一般光造形用光硬化性樹脂（SCR-500、SCR-751）、基礎実験用冷却固化式光造形用光硬化性樹脂（KC1026-8）、ゾルゲル変換型光硬化性樹脂（UV1214-15）の特性について、まとめる。

表4.2：UV1214-15とベースレジンの硬化物物性比較

硬化物物性		UV1214 ベースレジン	UV1214-15
破断伸び	%	22.1	11.7
破断強度	kgf/mm ²	1.79	2.15
曲げ破断伸び	%	23.8	8.3
曲げ強度	kgf/mm ²	2.43	6.42
ピッカース硬度	HV	4.85	3.97
透明性		透明	乳白色

表4.3：各種光硬化性樹脂物性比較

		一般光造形用光硬化性樹脂		冷却固化式光造形用光硬化性樹脂	
		SCR-500	SCR-751	KC1026-8	UV1214-15
製造元		JSR(株)	JSR(株)	JSR(株)	(株)クラレ
タイプ		ウレタン・アクリレート系	ゴム・エポキシ系	ウレタン・アクリレート系	ウレタン・アクリレート系
対応レーザ		He-Cd	He-Cd	He-Cd	He-Cd
破断伸び	%	17	15	11.2	11.7
破断強度	kgf/mm ²	7.43	7	8.8	2.15
密度 (25℃)	g/cm ³	1.2	1.14	1.22	1.23
粘度 (25℃)	cp	850	360	N/A	N/A
Ec	mJ/cm ²	0.8	15.64	N/A	8.5058
Dp	μm	68	108	N/A	279
冷却固化 温度	℃	-50	-65	-10	28
供給温度	℃	30	25	95	89

表 4.3 から、UV1214-15 は、どの光硬化性樹脂よりも、冷却固化式光造形用光硬化性樹脂としての温度特性に優れていることが分かる。つまり、常温で冷却固化状態にすることができ、供給温度も基礎実験に使用した KC1026-8 よりも低い（供給温度は、樹脂を供給する際に適当である、粘度が 600cp となる温度とする）。さらに、UV1214-15 では、KC1026-8 と異なり、ベースレジンが常温で液体状態であるので、ゾルゲル成分を溶解させるトルエンに浸すことで、容易に未硬化樹脂の洗浄を行なうことができる。

以上のように、UV1214-15 は、基礎実験における KC1026-8 の温度特性、未硬化樹脂除去の問題を解決していることが分かった。しかし、一方で、ゾルゲル変化成分が硬化後も樹脂中に残留するため、機械特性、硬化特性、透明性が低下してしまう問題がある。現段階では、硬化収縮率が小さく、高精細な造形が可能な、エポキシ系光硬化性樹脂をベースとしたゾルゲル変換型光硬化性樹脂は得られていないが、今後、エポキシ系光硬化性樹脂をベースとして、さらに、透過深度を抑えた樹脂の開発が必要である。

次に、UV1214-15 の造形性について検討を行なう。造形性では、樹脂の透過深度、および臨界露光量が問題となる。透過深度は、造形時のレーザービームの透過しやすさの指標で、臨界露光量は、樹脂の硬化しやすさの指標である。そこで、まず、露光量に対する硬化深さを示す、硬化深度曲線を求めた（図 4.12）。この求め方については、5.5.1 の透過深度、臨界露光量の測定で詳しく説明する。図 4.12 に示すように、UV1214-15 の透過深度は $278.74 \mu\text{m}$ 、臨界露光量は $8.5058 \text{mJ}/\text{cm}^2$ である。一般光造形用光硬化性樹脂として、エポキシ系光硬化性樹脂 SCR-751（JSR 製）の場合を例にあげると、透過深度は $108 \mu\text{m}$ 、臨界露光量は $15.64 \text{mJ}/\text{cm}^2$ であり、SCR-751 と比較すると、UV1214-15 の透過深度は倍以上、臨界露光量は半分以下である。このことは、一般光造形用光硬化性樹脂と比べて、一定の露光量の場合、より深く硬化することを示している。すなわち、光感度が高い樹脂であることを意味する。光感度が高いので、弱いレーザーパワーでも硬化反応が生じ、スキャン速度を上げ、造形速度を向上させることが可能であるが、一方で、UV1214-15 では透過深度が大きいために、深く光が入り過ぎる問題がある。つまり、レーザーパワーの揺らぎを考慮すると、深く光が透過してしまうということは、高さ方向の硬化厚を微妙に制御しにくい問題が生じる。

以上のように、開発したゾルゲル変換型光硬化性樹脂 UV1214-15 は、冷却固化式光造形用光硬化性樹脂としての温度特性に優れている反面、機械特性、造形性に多少問題があるが、本研究では、UV1214-15 を冷却固化式光造形用光硬化性樹脂として、以下で装置の設計・製作、造形実験を行なう。

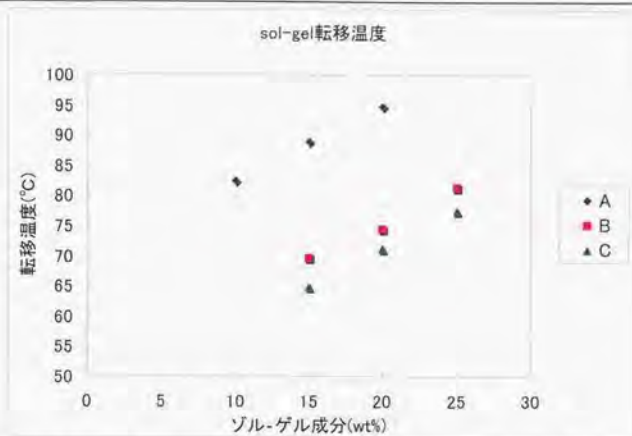


図4.8：3種類 A,B,C ゾルゲル変換型光硬化性樹脂のゾルゲル転移温度測定

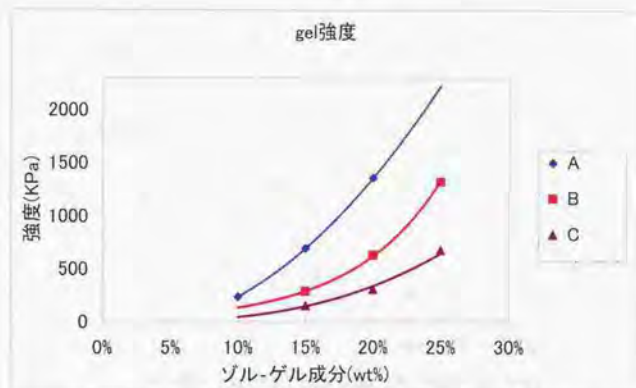


図4.9：3種類 A,B,C ゾルゲル変換型光硬化性樹脂のゲル強度

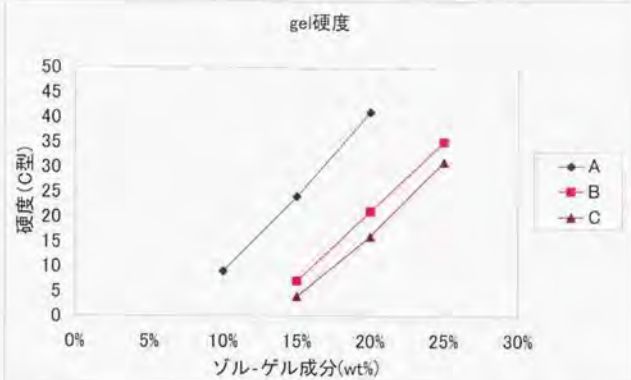


図4.10：3種類 A,B,C ゾルゲル変換型光硬化性樹脂のゲル硬度

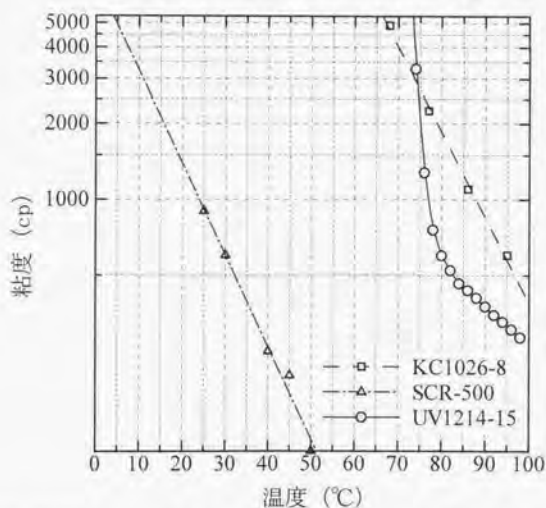


図4.11：SCR-500（汎用光硬化性樹脂），KC1026-8（冷却固化式光造形用光硬化性樹脂），UV1214-15（ゾルゲル変換型光硬化性樹脂）各光硬化性樹脂の温度 vs 粘度（縦軸：粘度（cp）対数表示，横軸温度（°C））

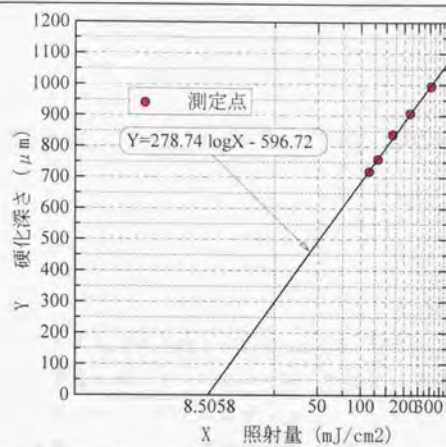


図4.12 : UV1214-15 硬化深度曲線 (透過深度 : 278.74 μ m, 臨界露光量 : 8.5058 mJ/cm²)

第5章 光造形法における硬化物余剰成長問題の検討

前章において、冷却固化式光造形原理を用いることで、サポートを使用せずに高自由度な造形が可能なが基礎実験により分かったが、樹脂の温度特性と、造形物底面に生じる硬化物余剰成長の問題点により、高精度な造形が行えない問題があった。樹脂の温度特性は、新たに開発したゾルゲル変換型光硬化性樹脂により、大きく向上することが分かったが、硬化物余剰成長問題に関しては、まだ解決されていない。そこで、本章では、硬化物余剰成長問題に関して、どのように余剰成長が生じ、成長していくのかなど、その発生原理を理解するために、理論的なアプローチによる解析を行なう。

5.1 光造形法における硬化物余剰成長問題と現状

光造形法では、光で硬化する光硬化性樹脂を薄く供給して、選択的に露光し光硬化させ、エレベータを一層分下げて、さらに樹脂を一層分供給するといったプロセスを繰り返すことで、3次元積層造形を行なう。この手法では、層と層を接着させる必要があり、必然的に積層厚以上の硬化深さになるように光を過剰照射しなくてはならない。そのため、硬化物底面では上層からの透過光による設計寸法以上の硬化物余剰成長が生じ、それが高さ方向の寸法誤差となっている[39][40]。この設計寸法と実際の硬化物厚さとの差を余剰成長厚と呼ぶ。現在、この余剰成長による高さ方向の誤差をなくすために、あらかじめスライスデータで硬化物底面にあたる部分を何層分かソフトウェア的に削除することで対処している。その際に何層分削除するかは、造形実験を繰り返すことで経験的に求められており、造形に使用する樹脂が同じであったとしても、レーザパワーの変化や、積層厚の変更の際には、実際に造形試験を行ない、余剰成長厚を測定し直しているのが現状である。一方で、余剰成長厚をシミュレーションして、その値によって自動的に造形スライスデータから余剰成長厚分を削除するソフトウェアの開発も行なわれている[16]。その研究では、余剰成長厚のシミュレーション結果を反映させることで、高さ方

向に垂直な直径 10mm の貫通丸穴で 1mm の寸法誤差を 0.1mm まで向上させることができたとしているが、余剰厚に関するシミュレーション結果と実際の測定結果では、数 100 μm 以上の誤差が見られる。

そこで、本研究では、レーザを用いて一定の露光量、ハッチ間隔で露光面をラスタースキャンし、硬化・積層を繰り返す際の硬化物底面における余剰成長に関して、より厳密的な理論的解析を行ない、様々な造形パラメータに対応した最大余剰成長厚を予測する理論式の導出を行なう。また、実験による測定結果と比較することで、その妥当性を評価・検証する。最大余剰成長厚を予測する理論式により、前もって造形時の各条件設定における余剰厚が予測できれば、造形条件の変更によらず高精度な造形が実現可能となる。さらに、造形過程において、余剰厚を考慮したレーザパワー可変制御を行なうといった、高度なレーザスキャニングも可能となることが期待できる。

光造形法において、硬化物の余剰成長は図 1.6 に示したように硬化形状の底面に生じる。実際、一層を硬化させる場合でも、すでに余剰成長は存在し、硬化厚は設計寸法よりも厚くなっている。さらに積層が繰り返されることで、硬化物底面では上層からの透過光により余剰成長が進行し、設計寸法との差は大きくなる。余剰成長厚がどの程度発生するかは、造形に使用する光硬化性樹脂の特性、およびレーザ波長、照射量、積層厚に左右される。そこで、何層積層および硬化を繰り返した場合に、どの程度の余剰成長が生じるかを、あらかじめ実験によって厳密に測定しておく必要がある。造形実験から、余剰成長厚はある程度積層が繰り返されると、一定のまま変化しないということが経験的に知られているが、その詳細は明らかになっていない。通常造形を行なう場合、図 1.8 に示した Z オフセット手法により、あらかじめ実験で測定した余剰成長厚分を、ソフトウェア的にスライスデータから削除して造形を行なう。こうしておくことで、実際に造形した際に、硬化物余剰成長が生じても高さ方向の寸法が保持される。しかし、細かなスリットが高さ方向に複数狭い間隔で存在する場合、削除することで上下のスリットが一体となってしまう場合も考えられる。また、余剰成長厚が積層厚と等しくない場合、スライスデータを加工してもスリット厚を設計寸法と等しく造形することは困難である。次節では、余剰成長に関するメカニズムについて理論的に考察する。

5.2 余剰成長のメカニズムに関する理論的考察

レーザを使用して造形を行なう場合、まずある一定のレーザパワー、走査速度で露光面を走査し、一本の様な硬化ラインを得る。さらに、その硬化ラインとわずかに重複するように次の硬化ラインを走査し、それを繰り返して面状の硬化層を作成する。さら

にそれを高さ方向に積層していくことで3次元立体を構成する。

光硬化性樹脂は、ある一定の露光量（臨界露光量：Critical Exposure）以下では光重合反応を起こさない。それは、樹脂内に含有される酸素を消費するのにある一定のエネルギーが消費されるからである。また、樹脂面に露光を行なった場合の、露光面下のある深さにおける露光量は、ランバート・ベールの法則に従う[11]。ランバート・ベールの法則により、露光面での露光量を E (mJ/cm^2)、深さを z (μm) としたとき、その深さでの露光量 $E(z)$ は、

$$E(z) = E \cdot \exp\left(-\frac{z}{D_p}\right) \quad (5.1)$$

で表される。 D_p (μm) は、透過深度 (Penetration Depth) と呼ばれ、露光量が露光面での照射量の $1/e$ に達する深さをいう。 e は、自然対数である。光硬化性樹脂の特性を表すのに、臨界露光量 (E_c (mJ/cm^2)) と透過深度 (D_p) が重要である。これらの値を元に、各条件における硬化深度、硬化幅などを計算することができる。

5.2.1 単一硬化ラインの露光量分布計算

一本の硬化ラインを描画する際の露光面下における露光量分布は、図 5.1 のようにレーザーの走査方向を x 軸正、深さ方向を z 軸正、露光面を z 原点にとると、ある x の位置における断面では、(5.2) 式のように計算される[11]。但し、レーザービームはガウス分布状であると仮定する。

$$E(y, z) = E_{\max} \cdot \exp\left(-2 \cdot \left(\frac{y}{W_0}\right)^2\right) \cdot \exp\left(-\frac{z}{D_p}\right) \quad (5.2)$$

$$E_{\max} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{P_L}{W_0 \cdot V_s} \right) \quad (5.3)$$

W_0 : Laser beam radius (μm)

P_L : Laser Power (mW)

V_s : Laser beam scanning speed (cm/sec)

樹脂の硬化は臨界露光量以上で生じるので、 $E(y, z) = E_c$ を解くことで、 yz 面における硬化境界が求められる。硬化境界は図 5.1 に示すように逆釣鐘状の形状をしている。

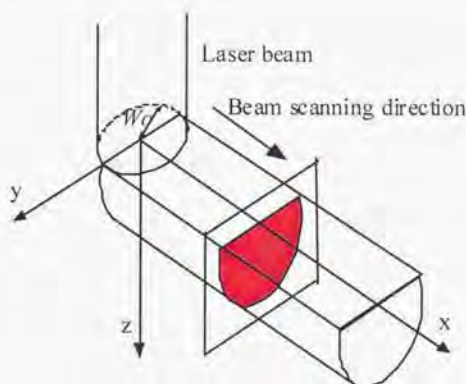


図5.1: レーザビームスキャン

5.2.2 複数硬化ラインによる硬化層の露光量分布計算

次に、硬化ラインを一定の間隔（ハッチ間隔： h_s （ μm ））で重複させた場合の硬化層における露光量分布について解析する。前提として、硬化ライン重複部分での露光量は、独立した硬化ラインを2本描画する際の露光量の和になるという原理を導入する[11]。レーザービームをラスタースキャンする場合、各硬化ラインの描画には時間差があるが、重複部分での硬化深さは、2本の硬化ラインが重複する際の露光量を一度に照射する場合と、一定時間をあけて同露光量を2回に分けて照射する場合とは同じになる。つまり露光量は時間によらず加算される。

各硬化ラインの露光量分布の式は、(5.2)式 y の部分を $y - mh_s$ で置き換えて、

$$E(y, z) = E_{\max} \cdot \exp\left(-2 \cdot \left(\frac{y - mh_s}{W_0}\right)^2\right) \cdot \exp\left(-\frac{z}{D_p}\right) \quad (5.4)$$

となる。(5.4)式は整数 m の値により各位置における硬化ラインの露光量分布を表す。よって、硬化層全体の露光量分布の式は、露光量加算の原理を用いて、

$$E(y, z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} E_{\max} \cdot \exp\left(-2 \cdot \left(\frac{y - mh_s}{W_0}\right)^2\right) \cdot \exp\left(-\frac{z}{D_p}\right) \quad (5.5)$$

となる。(5.5)式では m を $-\infty$ から $+\infty$ としているが、実際レーザービームの有効半径は、レーザーパワーの99.99%が集中する範囲を計算すると、 $2.146W_0$ で与えられる[11]ので、 $y=0$ を中心に \pm ビーム有効直径（約 $4.3W_0$ ）の範囲で計算すればよい。ビーム有効直径

以上のハッチ間隔で造形した場合、各硬化ラインはお互いにほとんど影響し合うことはない。つまり硬化層を形成するには、ハッチ間隔をビーム有効直径以下にする必要がある。しかし、実用的には造形物底面を平坦にするために、ハッチ間隔はビーム半径 W_0 よりも小さくしなければならない。

5.2.3 硬化層積層時の露光量分布計算

次に、硬化層の上に一定の積層厚 (L_T (μm)) で樹脂を供給し、硬化させ、それを何層か繰り返した場合の yz 面における露光量分布を計算する式を求める。この場合も、露光量加算の原理が有効である。

ℓ 層積層した場合、 $\ell-1$ 層までは上層からの透過光により露光量が加算される。 ℓ 層目は単一硬化層の場合と同様である。例えば、2層積層した場合、 $0 \leq z < L_T$ のとき露光量分布を表す式は(5.5)式で表され、 $L_T \leq z$ のときは、

$$E(y, z) = \sum_{y=-\infty}^{\infty} E_{\max} \cdot \exp(-2 \cdot (\frac{y - mh_s}{W_0})^2) \cdot \left\{ \exp(-\frac{z}{D_p}) + \exp(-\frac{z - L_T}{D_p}) \right\}$$

となる。2層目の露光量が1層目に加算されていることが式から分かる。以上を一般的な場合に拡張すると、

$$E(y, z) = \sum_{y=-\infty}^{\infty} \sum_{n=1}^k E_{\max} \cdot \exp(-2 \cdot (\frac{y - mh_s}{W_0})^2) \cdot \exp(-\frac{z - (n-1)L_T}{D_p}) \quad (5.6)$$

但し、 $0 \leq k-1 \leq \frac{z}{L_T} < k \leq \ell$

$$E(y, z) = \sum_{y=-\infty}^{\infty} \sum_{n=1}^{\ell} E_{\max} \cdot \exp(-2 \cdot (\frac{y - mh_s}{W_0})^2) \cdot \exp(-\frac{z - (n-1)L_T}{D_p}) \quad (5.7)$$

但し、 $\ell \leq \frac{z}{L_T}$

この場合も、硬化形状は $E(y, z) = E_c$ を解くことで得られる。また、最大硬化深度は $E(0, z) = E_c$ を満たす z を求めればよい。よって、余剰成長厚 Δs (μm)は、(5.7)式で $E(0, z_{\max}) = E_c$ を解いて、

$$\Delta s = z_{\max} - \ell \cdot L_T \quad (5.8)$$

で求まる。 $E(y, z) = E_c$ を満たす $y = f(z)$ の形の関数を求めるのは困難なので、本章では数値解析的に硬化形状を求めるプログラムを開発した。

5.3 硬化形状シミュレーション

(5.6)、(5.7)式を用いて、硬化形状をシミュレートするプログラムを作成した。このプ

プログラムの入力、出力は表 5.1 の通りである。また、図 5.2 に実際のシミュレーションプログラム実行画面写真を示す。

表 5.1 : シミュレーションプログラムパラメータと出力

パラメータ	出力
レーザパワー : P_L (mW)	平均照射量 (mJ/cm^2)
ビーム直径 : $2W_0$ (μm)	有効ビーム直径 (μm)
スキャン速度 : V_S (cm/sec)	最大硬化深度 (μm)
ハッチ間隔 : h_S (μm)	硬化幅 (μm)
層厚 : L_T (μm)	余剰成長厚 (μm)
積層回数 : I	露光量分布
臨界露光量 : E_C (mJ/cm^2)	
透過深度 : D_p (μm)	

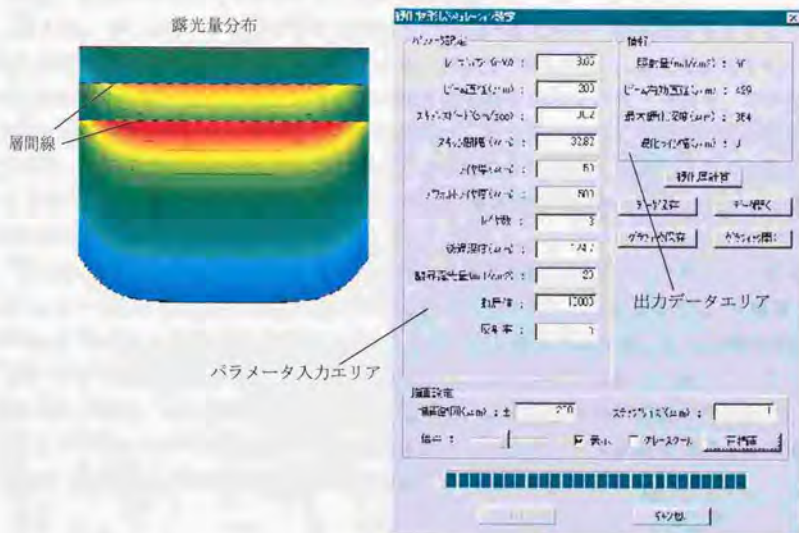


図 5.2 : シミュレーション実行画面

平均露光量は,

$$E_{av} = \frac{P_t}{V_s h_s} \quad (5.9)$$

有効ビーム直径は,

$$D = 4.292W_0 \quad (5.10)$$

最大硬化深度, 及び余剰成長厚, 露光量分布は(5.7)式より求まる. また, 硬化ライン幅は, ハッチ間隔がビーム有効直径よりも大きい場合に,

$$L_H = W_0 \sqrt{2 \ln \frac{E_{max}}{E_c}} \quad (5.11)$$

で求まる. (5.11)式より, 臨界露光量と1ライン硬化させた場合の硬化幅が分かれば, レーザビーム半径が計算で求められることが分かる.

図 5.3, 図 5.4 にシミュレーション結果の例を示す. 図 5.3 は, ハッチ間隔を $2W_0$, $0.6W_0$ として一層特定範囲だけ描画した場合の硬化形状, 露光量分布を示している. ハッチ間隔が(a) $2W_0$ の場合, 底面が凹凸になっており, ハッチ間隔をビーム半径以下(b) $0.6W_0$ にすると, 底面が滑らかになっていることが分かる.

図 5.4 は, 表 5.2 に示すパラメータで積層した場合の硬化形状, 露光量分布を示しており, 積層に伴う余剰成長の様子を確認できる. 図 5.3, 図 5.4 共に, 露光量が増すにつれて, 色が青から赤へ変化させている. 青が臨界露光量を示している. つまり, この位置が硬化境界を表している. また, 光硬化性樹脂は, 露光量によってその反応率が変化するので, 色が赤に近いほど反応が進行することになり, 結果として硬化収縮が大きくなる. つまり, 露光量分布の色がそのまま硬化物内部残留応力の指標となることが分かる. 色が赤に近いほど, 残留応力が大きい.

図 5.5 に表 5.2 のパラメータで計算した余剰成長厚と積層回数のグラフを示す. 黒丸がシミュレーションによって得られたデータである. グラフから分かるように, 8 層目(約 $127 \mu\text{m}$) 辺りから余剰成長が停止しており, それ以上積層を繰り返しても余剰成長は生じないという結果になった. これは, 造形実験による経験的な結果と一致している. 造形を行なう場合, この最大の余剰成長厚が重要で, この値が造形前に分かることで, スライスデータにおいて何層分データを削除すればいいか前もって決定することができる. そこで, 次節ではこの最大余剰成長厚を予測する理論式を(5.7)式より導出する.

表5.2 : シミュレーションパラメータ

	パラメータ値
P_L (mW)	8.2
$2W_0$ (μm)	176
V_S (cm/sec)	38.2
h_S (μm)	32.82
L_T (μm)	100
ℓ	5
E_C (mJ/cm ²)	20
D_P (μm)	124.7

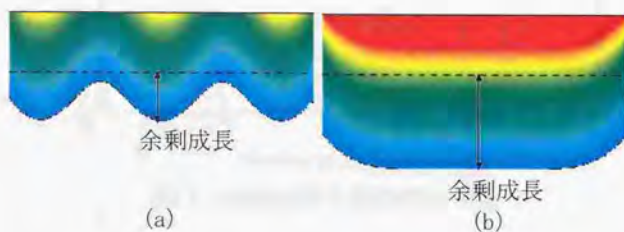


図5.3 : シミュレーションによって得られた余剰成長の例

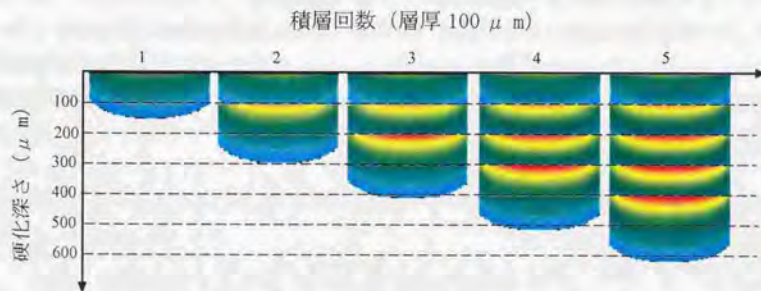
(a) ハッチ間隔 $2W_0$, 3 ライン, (b) ハッチ間隔 $0.6W_0$, 8 ライン

図5.4 : 積層回数と硬化深さの関係の例

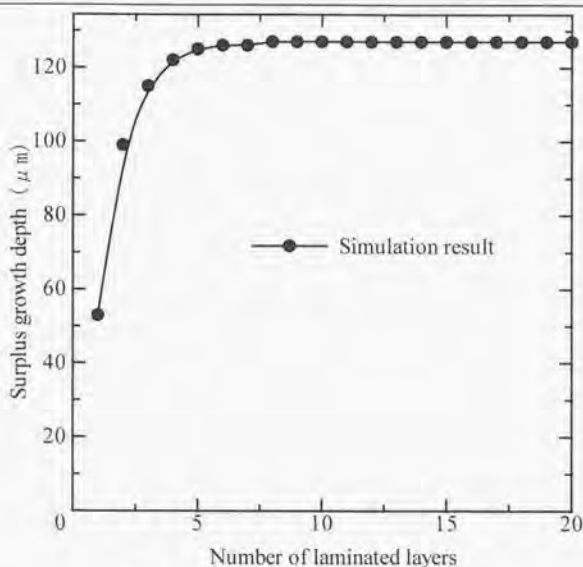


図5.5：余剰成長厚と積層回数との関係

5.4 最大余剰成長厚理論式の導出

シミュレーションにより、積層回数が増すと余剰成長は一定の値に収束することが分かった。それを最大余剰成長厚と呼ぶ。以下で、5.2.3で得られた(5.7)式を用いて、最大余剰成長厚の理論近似式を求める。

最大余剰成長厚は、(5.7)式において $y=0$ の点で得られる。そこで、まず $E(0, z)$ の近似式を求める。

$$\begin{aligned}
 E(0, z) &= \sum_{m=-\infty}^0 \sum_{n=1}^i E_{\max} \cdot \exp \left[-2 \cdot \left(\frac{h_s}{W_0} \right)^2 \cdot m^2 \right] \cdot \exp \left[-\frac{z - (n-1)L_f}{D_f} \right] \\
 &= E_{\max} \cdot \exp \left(-\frac{z}{D_f} \right) \cdot \sum_{n=0}^{i-1} \exp \left(\frac{n \cdot L_f}{D_f} \right) \cdot \sum_{m=-\infty}^0 \exp \left[-2 \left(\frac{h_s}{W_0} \right)^2 \cdot m^2 \right]
 \end{aligned}$$

ここで, $\sum_{n=0}^{l-1} \exp\left(\frac{n \cdot L_T}{D_p}\right) = \frac{\exp\left(\frac{\ell \cdot L_T}{D_p}\right) - 1}{\exp\left(\frac{L_T}{D_p}\right) - 1}$ となる.

また, $\int_0^\infty \exp(-\alpha x^2) dx = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}}$ という関係式から, $\alpha = \frac{2h_s^2}{W_0^2}$ とおくと,

$$\sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{W_0}{h_s} \text{ となる.}$$

よって, $\sum_{m=-\infty}^{\infty} \exp\left[-2\left(\frac{h_s}{W_0}\right)^2 \cdot m^2\right] \cong \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{W_0}{h_s}$ と近似される.

$$\text{したがって, } E(0, z) \cong \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_L}{W_0 V_S} \cdot \exp\left(-\frac{z}{D_p}\right) \cdot \frac{\exp\left(\frac{\ell \cdot L_T}{D_p}\right) - 1}{\exp\left(\frac{L_T}{D_p}\right) - 1} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{W_0}{h_s} \quad (5.12)$$

と近似できる. $E(0, z) = E_c$ として,

$$z = D_p \ln \left[\frac{P_L}{E_c V_S h_s} \cdot \frac{\exp\left(\frac{\ell \cdot L_T}{D_p}\right) - 1}{\exp\left(\frac{L_T}{D_p}\right) - 1} \right]$$

よって, 最大余剰成長厚 Δs は, 積層回数を無限大として

$$\begin{aligned} \Delta s &= \lim_{(\ell \rightarrow \infty)} (z - \ell \cdot L_T) \\ &= D_p \ln \frac{P_L}{E_c V_S h_s} - D_p \ln \left\{ \exp\left(\frac{L_T}{D_p}\right) - 1 \right\} \end{aligned} \quad (5.13)$$

と求められる. (5.13)式を見ると, 結果としてビーム半径 W_0 を含まない式になった. これは, ハッチ間隔がビーム半径よりも小さい範囲で, レーザパワー, スキャン速度, ハッチ間隔が同じであれば, 露光面でのビーム径によらず最大余剰成長厚が決定するということを示している.

次節では, 造形実験の結果と5.3でのシミュレーション及び5.4の最大余剰成長厚理論近似式との比較検討を行なう.

5.5 造形実験による余剰成長厚の測定

5.5.1 透過深度、臨界露光量の測定

余剰成長厚を測定するためのサンプル造形の前に、まず使用する樹脂の正確な透過深度、臨界露光量を測定しなくてはならない。今回の実験では、オキセタン系光硬化性樹脂 SCR-950 (JSR 株式会社製)、及び光造形装置 SCS-1000HD (D-MEC, SONY 製) を使用する。SCR-950 は、ゴム/オキセタン系の光硬化性樹脂で、設計波長は 325nm である。また、実験で使用する装置のレーザは、40mW、He-Cd レーザで、発振波長 325nm、また造形時のビーム直径は 176 μm である。

透過深度、臨界露光量を測定する手法としては、アメリカの 3D-Systems, Inc. が開発したウインドウペイン[11]という方法がよく知られている。この方法では、図 5.6 に示すように、レーザパワー、スキャン間隔を一定に保ち、スキャン速度を変化させてそれぞれ露光量の異なる複数の四角形を描画する。この際、スキャン間隔をビーム半径以下に設定することが重要である。その際得られる造形物が透明であることから、ウインドウペインと呼ばれている。この方法では、得られた複数の四角形の硬化厚を測定する。そして、対数グラフ横軸に平均露光量、縦軸にその硬化深さをプロットする。プロットされた各点は一直線上に並ぶ。このグラフをワーキングカーブと呼ぶ。一直線上に並ぶということは、ある露光量に対してその硬化深度が予測できるということである。硬化深度を $C_d(\mu\text{m})$ 、照射量を $E(\text{mJ}/\text{cm}^2)$ とすると硬化深度は以下のような式で計算される。

$$C_d = D_p \cdot \ln\left(\frac{E}{E_c}\right) \quad (5.14)$$

(5.13)式から分かるように、ワーキングカーブの直線の傾きが透過深度、x 軸との交点が臨界露光量となる。スキャン速度を変化させて四角形を描画した際のそれぞれの平均露光量は、(5.9)式を用いて計算できる。図 5.7 に測定した SCR-950 のワーキングカーブを示す。ワーキングカーブから求めた SCR-950 の臨界露光量、透過深度はそれぞれ、20(mJ/cm^2)、124.7(μm)となった。

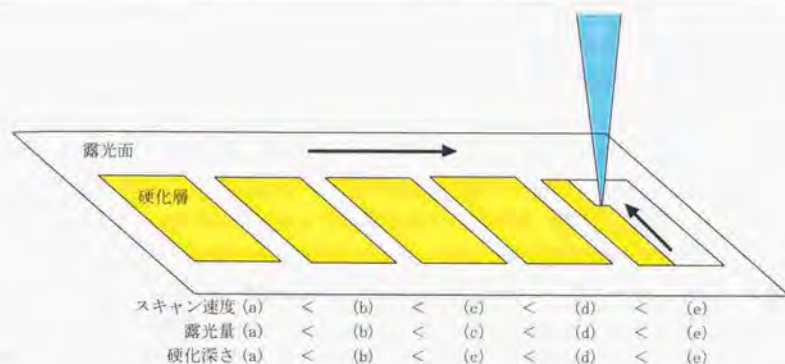


図5.6 : ウインドウペイン手法

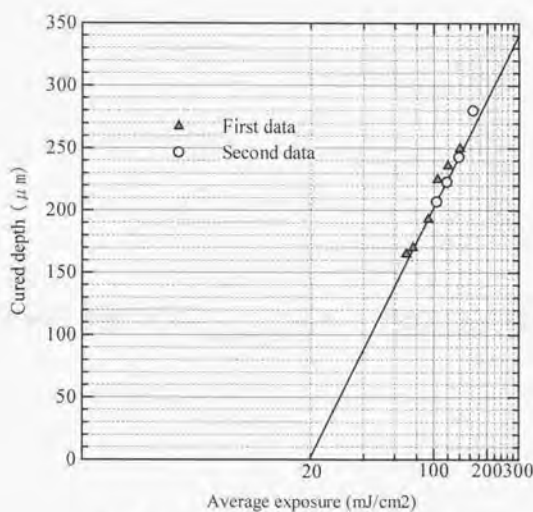


図5.7 : SCR-950 のワーキングカーブ

5.5.2 余剰成長厚の測定

余剰成長厚を測定するためのサンプルとして、図5.8のような階段状のサンプルを3次元CADで設計した。段の部分の寸法が $10 \times 10 \text{ mm}$ で、段の厚さが一層分ずつ厚くなって

いる。全部で20段あり、寸法は $10 \times 200 \text{ mm}$ である。このサンプルを用いて一段の厚さが $50 \mu\text{m}$ と $100 \mu\text{m}$ のものを造形した。そのときの造形パラメータを表5.3に示す。Sample2でレーザーパワーの値に範囲があるのは、アナログのパワーメータで測定した際にレーザーの出力が安定していなかったためである。レーザーの出力は、レーザーの使用時間、光学系への埃の付着、環境温度変化、湿度変化などにより影響を受け、値が変化する。また、レーザーが安定した状態でも、最大 $\pm 2 \sim 3\%$ 程度の変動がみられる。図5.9に実際に造形された積層厚 $50 \mu\text{m}$ の階段状サンプルの写真を示す。図5.10、図5.11に、造形したサンプルから測定した余剰成長厚データと、シミュレーション結果を同時にプロットしたグラフを示す。図5.10が $50 \mu\text{m}$ 積層のもので、図5.11が $100 \mu\text{m}$ 積層のものである。造形サンプルの測定は、分解能 $1 \mu\text{m}$ のマイクロメータを用いて各段10点ずつ測定し、平均した値から設計寸法厚を引いたものを余剰成長厚としている。



図5.8：3次元CADで設計したステップ状サンプル（寸法： $10 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 20$ 層）

表5.3 : 造形実験パラメータ

パラメータ	Sample 1	Sample 2
P_L (mW)	8.6	8.2~8.4
$2W_0$ (μm)	176	176
V_S (cm/sec)	38.2	38.2
h_S (μm)	32.82	32.82
L_T (μm)	50	100
ℓ	20	10
E_C (mJ/cm ²)	20.0	20.0
D_P (μm)	124.7	124.7

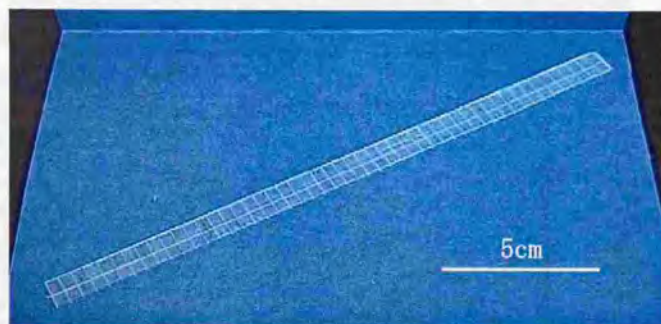


図5.9 : 得られたステップ状サンプル

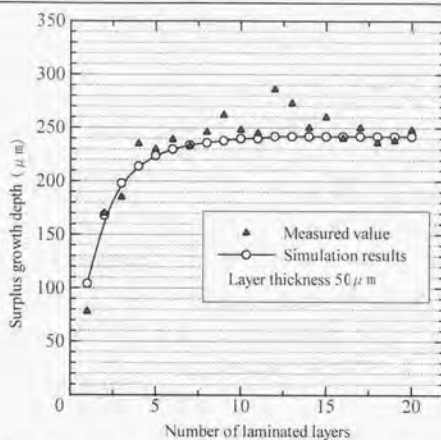


図5.10 : SCR-950 の余剰成長と積層回数の関係 (積層厚 50 μm)

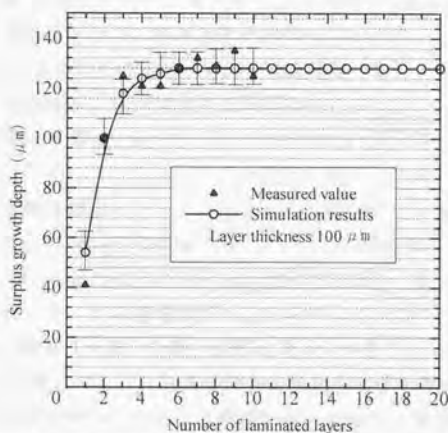


図5.11 : SCR-950 の余剰成長厚と積層回数関係 (積層厚 100 μm)

5.5.3 最大余剰成長厚理論式の検証および考察

積層厚が 50 μm のもの (図 5.10) では, 計算値と実測値の差が大きいところで 40 μm 程度となっているが, 大半はシミュレーションの結果と酷似している。誤差が大きい部分の原因として, 一つはレーザーパワーの不安定さがあげられる。レーザーパワーの不安定

きによる誤差は、レーザパワーのふらつきが測定では、通常 $\pm 0.1\text{mW}$ 程度あるので、それによる余剰成長厚のふらつきは $\pm 20\mu\text{m}$ 程度と計算される。また、誤差の原因の二つ目として、樹脂供給厚の不正確さがあげられる。通常の光造形装置では、一度硬化物を深く沈めてから一層分だけエレベータが下がった位置まで戻し、その後で樹脂をリコートする。その際、硬化物表面に乗る樹脂はその表面張力により盛り上がったたり、またはじいたりして、特に層厚が薄い場合、均一な供給厚を得ることは困難である。今回余剰成長厚に多少ばらつきが出たのも、この不均一な樹脂供給厚によるものと考えられる。また、図 5.10、図 5.11 で積層厚が $50\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ 両方とも、一層目の余剰成長厚が計算値よりも小さめになっているのは、一層目を描画する際は、真下が硬化物でなく自由液面であり、樹脂の硬化収縮によりラインが正確に描画できないためである。

積層厚が $100\mu\text{m}$ (図 5.11) のものでは、計算値と実測値の差は一層目で一番大きく $13\mu\text{m}$ 程度である。全体的に、ほぼ計算値と一致していると結論できる。レーザパワーの不安定さを考慮すると、ほとんどすべてが計算値の範囲内に入っていることが確認できる。

それぞれの最大余剰成長厚について、表 3 のパラメータと理論近似式(12)を用いて計算してみると、 $50\mu\text{m}$ 積層のものは、最大余剰成長厚 $\Delta s = 241.82\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ 積層のものは、 $\Delta s = 123.47\mu\text{m}$ となる。この値は、それぞれ実測値と数ミクロンの差で一致している。つまり、正確な透過深度、臨界露光量が与えられていれば、5.4 で導出した理論近似式を用いて、最大余剰成長厚が予測できることを示している。

また、図 5.10、図 5.11 のグラフから、ほぼ同程度の造形パラメータで造形したのにもかかわらず、最大余剰成長厚が $50\mu\text{m}$ と $100\mu\text{m}$ のもので倍近い差が生じていることが分かった。そこで、表 5.3 の $100\mu\text{m}$ 積層のパラメータで、積層厚を $50\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ 、 $150\mu\text{m}$ と変化させて造形した場合について、最大余剰成長厚が一層平均露光量とどのような関係にあるのか計算した。その結果を図 5.12 に示す。図 5.12 のグラフから一層平均露光量が同じであれば、積層厚が薄い程最大余剰成長厚が大きくなるという結果になった。その傾きは、 D_p 透過深度に等しく、各積層厚での最大余剰成長厚は一層平均露光量に対して、対数グラフで線形な関係にあることが分かる。つまり、ある平均照射量、積層厚での最大余剰厚が求まれば、違う照射量、同じ積層厚での最大余剰厚も、容易に計算できる。

本章で導出した最大余剰厚理論近似式では、硬化過程における樹脂の密度変化に伴う透過率の変化は考慮していない。厳密には、実際造形に使用する各々の樹脂に対して、ある照射量における、時間を含めた密度分布（硬化樹脂の時間による収縮度合い、硬化時の温度上昇・下降による膨張、収縮も考慮）を求める必要があり、その状態でのそれぞれの透過率をミクロな領域で計算して、マクロな領域まで拡張しなくてはならないが、

実験から、正確な透過深度、臨界露光量が与えられていれば、導出した理論近似式を用いて、最大余剰成長厚が実用的な範囲で予測できることが分かった。その理由としては、以下のようなことが考えられる。

1. 最大余剰厚が生じる10層程度の積層・硬化過程では、樹脂は依然半硬化状態にあり、透過率の変化が小さく理論値への影響が少ない。
2. 実験に使用した樹脂の積層厚に対する透過深度が浅く、既硬化層への透過の影響が小さい。

また、導出した最大余剰厚理論近似式では、測定によって求めた硬化深度曲線の線形領域で計算を行なっているのので、硬化時の自己焦点化、または不透明化が起こる樹脂、照射領域では、正確に最大余剰厚を計算できないことが考えられ、その場合には注意が必要である。

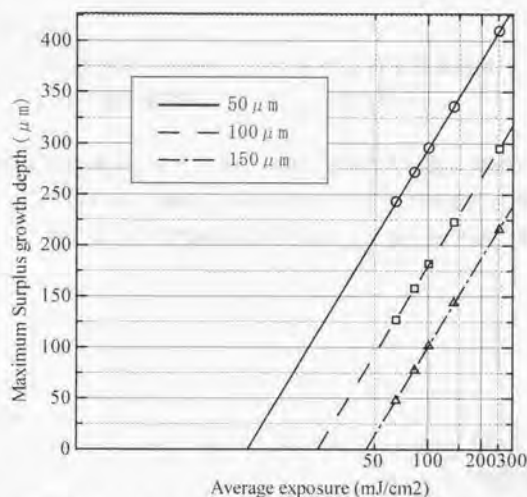


図5.12：最大余剰成長厚と平均照射量の関係（積層厚 50, 100, 150 μm ）

本章での成果を以下にまとめる。

- ・ 光造形法における硬化ラインの露光量分布を表す式を発展させて、硬化層及び、硬化層を積層した場合の露光量分布を計算する式を求めた。
- ・ 硬化層を積層した場合の露光量分布を求める式を用いて、様々な条件における硬化深度、露光量分布、最大余剰成長厚を求めるシミュレーションプログラムを作成した。
- ・ 最大余剰成長厚を計算する理論近似式を求め、造形実験による実測値との比較から、造形における実用的な範囲で、最大余剰厚を予測できることを確認した。

また、本章で明らかになったことを以下にまとめる。

- ・ 最大余剰成長厚を求める理論近似式の値に応じて、あらかじめスライスデータを加工したとしても、最大余剰成長厚が積層厚の整数倍になっていない限り、完全に高さ方向の分解能を積層厚まで上げることは困難である。
- ・ 最大余剰厚は、レーザパワーの揺らぎや、スキャン速度のふらつきによる不均一露光による影響を受け、厚さが変化してしまう。よって、露光量制御による最大余剰厚の調整には限界がある。
- ・ 液体の光硬化性樹脂を用いた光造形システムでは、樹脂液表面張力による影響を避けることは難しく、特に薄い積層厚ではそれが顕著に現れる。

以上から、硬化物余剰成長を抑え、高さ方向の分解能を厳密に積層厚まで向上させるためには、上層からの透過光を積極的に抑える新たな手法の提案が必要であることが分かった。そこで、次章では、硬化物余剰成長を抑制する新たな手法の提案を行なう。

第6章 冷却固化式光造形法における紫外光遮断層の導入

第5章で、上層からの透過光による硬化物底面での余剰成長について考察した結果、硬化物底面に生じる最大余剰成長厚を理論的に求めることが可能であることが分かった。これは、レーザパワー、スキャン速度、ハッチ間隔などのパラメータが分かれば、最大余剰成長厚を予測できることを示している。しかし同時に、従来の光造形システムにおけるスライスデータ生成の段階で、余剰成長厚分をデータから削除する場合、余剰成長厚が積層厚の整数倍になっていない限り、厳密に高さ方向の分解能を積層厚まで向上させることは不可能であるという結論が得られた。また、樹脂そのものに改良を加え、上層からの透過光を抑える方法も提案されているが、造形物の透明度が悪くなるなどの理由から実用化に至っていない。余剰成長が生じると、高さ方向に対して垂直に細かなスリットが存在する場合や、複数要素間の微小なクリアランスが存在する場合に、それらが正確に造形できない問題がある。

そこで、本章では冷却固化式光造形法において、余剰成長を積極的に抑え、高さ方向の分解能を積層厚まで向上させる新しい手法の提案を行なう。

6.1 紫外光遮断層の提案

硬化物底面における余剰成長は、硬化層が積層される際に、上層からの透過光によって最下層底面に生じる現象である。そこで、図6.1に示すように、上層からの透過光を抑えることが可能な紫外光遮断層（以下マスク）を硬化物底面に描画する方法を提案する。具体的には、余剰成長が生じると予想される層の前層を供給した後で、余剰成長が生じる部分に当たる樹脂面に直接、紫外光を遮断するマスクを描画し、さらに樹脂を一層分積層して、レーザによる描画を行なう。こうすることで、上層から透過してきた光は最後にマスク面で吸収または反射され、下層へは到達せずに余剰成長が抑えられる。

この手法は、従来の液体樹脂を使用している光造形システムへの応用は難しい。それ

は、たとえマスクを選択的に樹脂面に描画することができたとしても、次の層を積層する際のリコート時にマスクが流れてしまうからである。そこで、ここでは本手法を冷却固化式光造形法に応用する方法を検討する。冷却固化式光造形法では、造形過程において樹脂面は常に冷却固化した状態にあるので、後からその表面に付加的な処理を施すことが可能という利点がある。以下、冷却固化式光造形法における紫外光遮断層の導入として説明を行なう。

冷却固化式光造形法に紫外光遮断層を導入することで、以下のような利点が考えられる。

1. 硬化物余剰成長を積極的に抑制することで、高さ方向の精度、分解能を向上させることができる。
2. 従来の光造形システムにおける硬化物底面の凹凸をなくすることができる。
3. すべての透過した光はマスクによって反射、または吸収されるのでマスク上面において樹脂層は平均的に硬化し、造形物底面での描画による凹凸はキャンセルされることが予想される。
4. 上層からの余剰な透過光は、マスクによって遮断されるので、通常では行なえないようなレーザスキニングパターンも行なえる。
5. たとえば、造形時の硬化収縮による反り変形を抑えるために、レーザによる描画ラインが重ならないようにスキヤンを行なったとしても、積層を繰り返すうちにその隙間も透過光により硬化し、一方で、底面は上記したように平滑な面になる。従来の光造形法では、そのようなスキヤンを行なうと、底面での平滑性が失われてしまう、また、各硬化層が正確に造形されない問題が生じる。
6. マスク面での反射光により、各層内の上下不均一な露光分布が平均化され、内部応力が生じにくい。
7. 通常のレーザ描画は、上部より露光面に向かって行なわれるために、各層内において上方と下方では露光量分布に差が生じる。つまり、1層内において、上方の樹脂は良く硬化し、下方は十分に硬化していない状態になっている。これが、内部残留応力の原因となっており、造形時、および造形後の変形につながる。そこに、マスクによる反射光が下方から入射することで、一層内下方の樹脂も十分に硬化し、内部応力を緩和できる可能性がある。
8. マスク面において、反射ではなく光エネルギーの吸収現象の方が支配的な場合、上部より過剰な光エネルギーを投入でき、結果として、硬化樹脂層内を完全に硬化させることが可能となり、不均一応力を解消できる可能性がある。

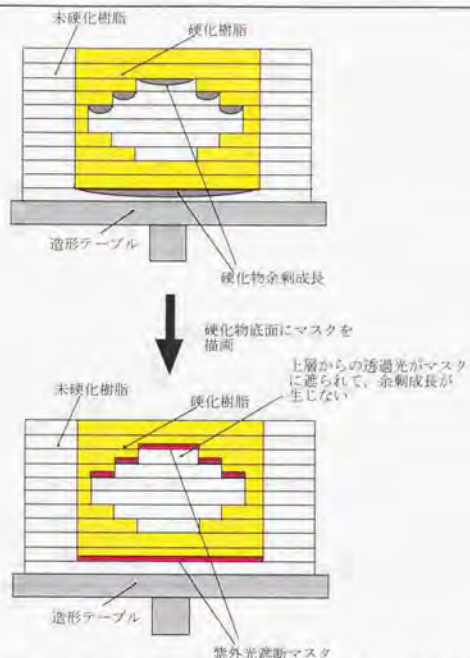


図6.1：紫外光遮断層導入による余剰成長防止手法の提案

6.2 基礎実験による紫外光遮断層の有効性の検証

前節で提案した、紫外光遮断層導入による硬化物余剰成長防止手法の有効性を確認するために、図 6.2 に示すような基礎実験を行なった。表 6.1 に本実験の造形パラメータを示す。

実験では、ゾルゲル変換型光硬化性樹脂 UV1214-15 を、まず複数層造形テーブルに積層し、その樹脂表面に市販のホワイトマスキングペンを用いて、直接マスクを描画した。その後、積層厚 $100\mu\text{m}$ で樹脂を供給していき、レーザーで描画・硬化させるプロセスを 10 回繰り返した。よって、高さ方向の設計寸法はちょうど 1mm になる。レーザー照射量は、余剰成長を観察しやすいように、通常一層を硬化させるのに必要な照射量より大きな値を設定した。

図6.3に実際に得られたサンプルの写真を示す。写真から分かるように、マスクを描画していない部分の厚さは1.760mmとなっているのに対して、マスクを描画した部分の厚さは0.998mmと設計寸法1mmに極めて近い値となった。寸法は、分解能 $1\mu\text{m}$ のマイクロメータを使用して測定した。

結果として、マスクのない部分では0.76mmの余剰成長が生じているのに対して、マスク描画部分では余剰成長が全く生じておらず、本手法により完全に余剰成長を抑えることができ、光造形法において高さ方向の分解能を積層厚まで高めることが可能ことが確認された。

表6.1：紫外光遮断層基礎実験パラメータ

レーザ照射量	301 (mJ/cm^2)
積層厚	100 (μm)
積層回数, 総積層厚 (μm)	10層, 1 (mm)
マスク描画方法	市販のホワイトマスキングペン (三菱ペイントマーカ) による手動描画
使用樹脂	UV1214-15 (ゾルゲル変換型光硬化性樹脂)

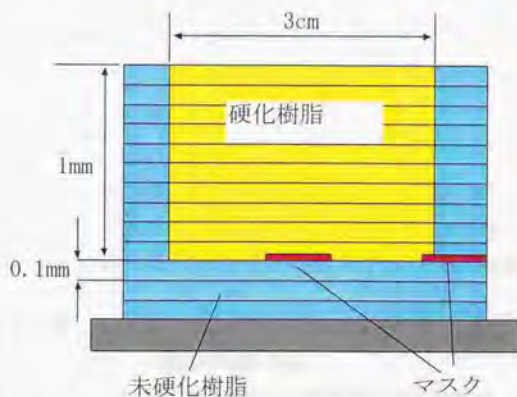


図6.2：紫外光遮断層基礎実験概略図

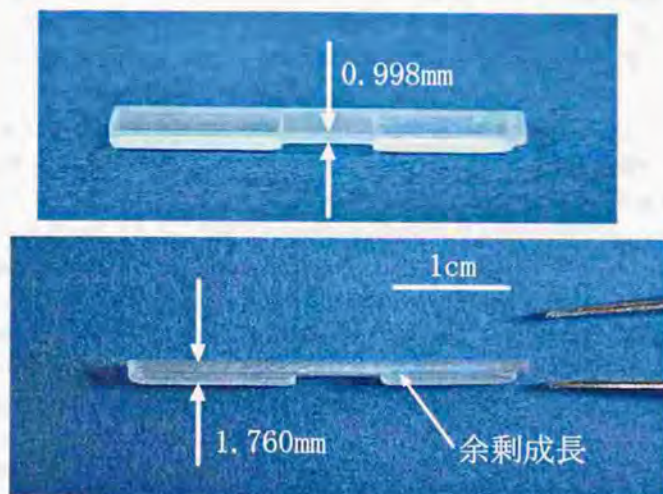


図6.3：得られた造形物写真

6.3 紫外光遮断層に関する検討

6.3.1 紫外光遮断層の検討

6.2の基礎実験により，冷却固化式光造形法に紫外光遮断層を導入することで，上層からの透過光を完全に抑え，高さ方向の分解能を積層厚まで向上させることが可能ことが分かった．そこで，本節では，さらに以下の項目について検討を行なう．

1. 紫外光遮断層に適した材料
2. 紫外光遮断層の樹脂面への選択的描画方法
3. 紫外光遮断層を描画して硬化させた場合の樹脂層の露光量分布
4. 紫外光遮断層の存在により生じる現象

まず，1，2の紫外光遮断層に適した材料，および描画方法についてだが，6.2の基礎実験では市販のホワイトマスキングペンを用いることで所望の効果をを得ることができた．

しかし、装置を自動化する際にペンを使用することは困難であり、実際問題として樹脂面と接触させなければならないので露光面精度にも影響を与える。また、ペンをういたマスク描画方法ではマスク厚を厳密に一定に制御することは難しい。そこで、本研究ではインクジェットヘッドを用いた描画方式を提案する。インクジェットヘッドを用いることで、非接触でしかも高精度なマスクを描画することが可能である。現在のインクジェット技術はプリンタ技術として大変進歩しており、現在最高 1400dpi 程度の描画を高速で行なうことが可能となってきた。1400dpi というのは、1 ドットの直径が約 18 μm という超微小径である。市販されている光造形システムのレーザビームのスポット径は約 200 μm であり、これと比較してもかなりの高分解能であることが分かる。

インクジェットヘッドを用いることで、必然的にマスク材はインクということになるが、通常のインクジェットプリンタに使用されているインクは染料系インクであり、紙に描画する目的で調製されているので、以下のような理由で、本研究のように樹脂面に直接描画する用途には向かない。

- (1) 染料系インクは樹脂面への定着性が悪い。(はじいてしまう)
- (2) 紫外光遮蔽能力が低い。
- (3) 耐候性が低い。

そこで、本研究では顔料系のインクを採用することにした。顔料は、耐候性、薬品性、溶剤性などの化学的性質や、可視光の選択吸収による発色などの光学的性質を示す。顔料による様々な光学的現象は、それぞれの顔料の化学組成や構造によってほとんど決まるといってよい。一方、光学的な物理作用は、粒子の大きさ、形、表面状態や密度の違いによって、色相、隠蔽力、着色力が変化し顔料の性質を左右している[42]。

紫外光遮蔽能力に優れた顔料としては、化粧品品の UV カットとしても使われる微粒子酸化チタンがあげられる。図 6.4 に微粒子酸化チタンを顔料濃度 3.3%、乾燥膜状で 5 μm となるように塗布した際の 300nm~400nm 波長の紫外光に対する遮蔽能と一次粒子径の関係を表したグラフを示す。図 6.4 から酸化チタンの紫外光波長光の遮断に関する吸収および散乱の寄与について、以下のようにまとめられる[43]。

波長：400nm；遮蔽のほとんどは散乱能による。

375nm；散乱、吸収の効果は同程度である。

350nm；吸収の効果が大きいが、散乱も無視できない。

300nm~325nm；ほとんど吸収の効果

また、紫外光遮蔽能については、UV-B 領域である 300nm 付近では、一次粒子径が小さくなるほど一方的に大きな遮蔽能を示し、UV-A 領域である 350nm 付近では、遮蔽能

が最大となる最適粒子径が存在する。

以上のように、微粒子酸化チタンをインクの材料として用いた場合、光造形で通常使用する 325nm 波長のレーザービームに対してほとんどが吸収の効果であり、優れた遮蔽能を示す。また、325nm 波長に対する反射率は 2% 以下となっている[43]。

以上のように、超微粒子酸化チタン (0.01~0.1 μm 径) を紫外光遮断マスク用インクとして調製できれば、可視光に対しては優れた透明性、紫外光に対しては優れた遮蔽能を与えることが可能である。しかし、現段階では、用途的に微粒子酸化チタンのみをインクジェット用インクとして分散したものは開発、市販されていない。そこで、本研究では、東洋インキ(株)の赤色顔料インクを紫外光遮断マスク用インクとして使用して実験を行なうことにする。

この赤色顔料インクは、使用するゾルゲル変換型光硬化性樹脂 (UV1214-15) に対して優れた定着性を示し、同時に 325nm 波長のレーザー光に対して優れた遮蔽能を示す。また、速乾性があり、インク定着まで時間を要しない利点がある。欠点としては、赤色であるために、造形物の可視光透明性が悪くなってしまうという点があげられる。

インクジェットヘッドを用いた実際の造形プロセスは、図 6.5 のようになる。以下にその手順を示す。

- (a) 加温したゾル状態の樹脂を一層分供給し、同時にコートにより平面を出す。その後、樹脂がゲル状態になるまで待つ。
 - (b) インクジェットヘッドを用いて、樹脂面に直接、硬化物余剰成長が生じる位置にマスクを描画する。
 - (c) レーザービームをスキャンして、選択的に硬化させる。
 - (d) エレベータを一層分下げる。
- 以上(a)~(d)を必要な層数分繰り返す。造形終了後に、
- (e) 未硬化樹脂をある程度除去した後、洗浄を行ない完全に除去する。
 - (f) 後露光して造形物を得る。

この方法では、インクジェットヘッドによるマスクの描画という付加的なプロセスが冷却固化式光造形プロセスに追加されており、いかに効率よくレーザービームのスキャンとインクジェットヘッドによるマスクの描画を行なうかが重要となる。また、樹脂面に描画されたインクによるマスク上に樹脂を供給する際に、マスクを崩すことなく樹脂を供給できるか、インクの樹脂面への定着性を考慮する必要がある。

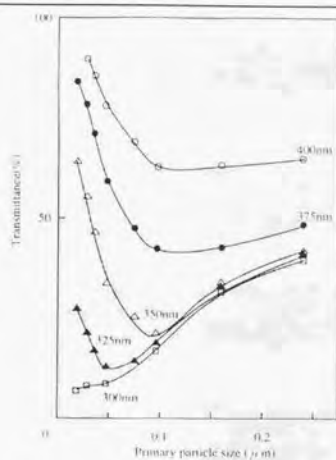


図6.4：超微粒子酸化チタンの300～400nm波長紫外光に対する透過率と一次粒子径の関係[43]

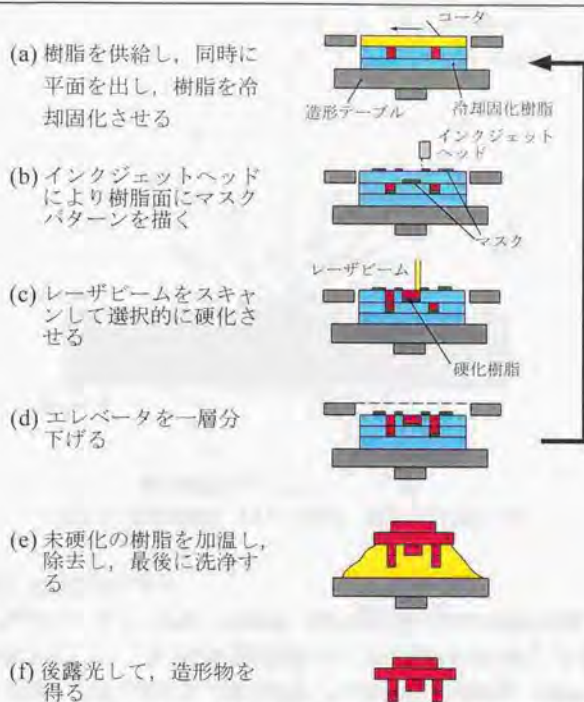


図6.5：インクジェットヘッドを用いた新冷却固化式光造形プロセス概略

6.3.2 紫外光遮断層導入による樹脂層内の露光量分布計算

次に、紫外光遮断層に関する前記検討項目3、4について、検討する。

紫外光遮断層を描画した場合の樹脂層内の露光量分布を求めるには、まず顔料インクによるマスク面での反射、吸収、透過について検討する必要がある。その結果を、5.3のシミュレーションプログラムに反映させて、紫外光遮断マスクを描画した際の樹脂層内露光量分布を求めることにする。

顔料インクによるマスク面を微細な粒子の集合した不透明物体表面と考える。直接光が物体表面に入射すると、物体の性質によって2種類の反射が生じる[44][45][46][47]。それらは、図6.6に示すように、①全方向に一樣に反射する拡散反射と、②入射光に対して正反射方向に反射する鏡面反射（多少散乱して広がるものもある）がある[44]。また、そ

の他に物体表面では光の吸収、透過が同時に生じる。露光量分布のシミュレーションを行なうには、①、②の反射現象をモデル化、すなわち数式モデルで表現する必要がある。

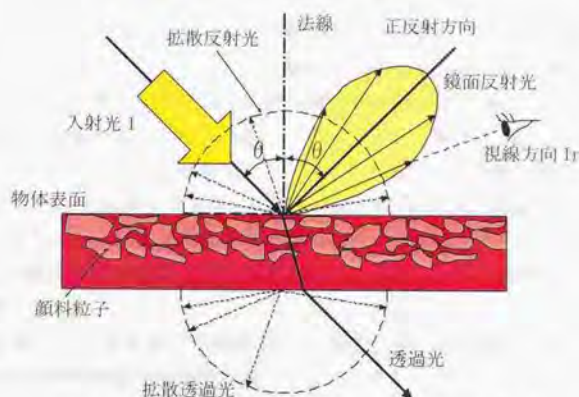


図6.6：物体表面における反射、吸収、透過モデル

① 拡散反射と拡散反射モデル

白墨、ゴム面などの表面へ入射した光は、表面の細かい粒子や繊維の集まりで反射、屈折、透過を繰り返すので、表面の反射光はランダムな方向の光の和となる。すなわち、どの方向から眺めても光の輝度が一樣になる。この反射を拡散反射（diffuse reflection）という。一般には、物体表面では正反射する光とランダム方向へ反射する拡散反射が混じった輝度分布になる。拡散反射光が色の主成分になる。

表面の粒子径が小さいほど拡散反射の割合が多くなる。また、粒子径が光の波長程度のときには、ほとんど拡散反射のみになり、これを完全拡散反射という。一般に、表面の単位面積当たりの入射光エネルギー量は、入射角の余弦に比例するので、反射光の輝度も入射角の余弦に比例する。これを、ランバールの法則（Lamber's law）という。したがって、拡散反射モデルは次式で与えられる。

$$I_d = I \cdot w_d \cdot \cos \theta \quad (6.1)$$

ただし、 I_d は拡散反射光輝度、 I は入射光輝度、 w_d は反射係数、 θ は入射角である。

② 鏡面反射と鏡面反射モデル

理想的な鏡や滑らかな金属表面では、入射光と反射光は面の法線に対し等しい角度、すなわち入射角と反射角は等しい。このとき反射光は正反射方向に反射する。これを鏡面反射（specular reflection）という。一般の不透明物体（紙、布、木材、プラスチックお

よびこれらに染料や顔料が混入、印刷、塗布されたものなど）でも鏡面反射は起こるが、表面の細かい凹凸などによって散乱されて広がる（図 6.6 参照）。

粗さを持つ面の鏡面反射モデルとして、フォン（Phong）のモデルが広く使われているが、フォンのモデルは光学的な意味づけが弱いので、本研究ではより精密な鏡面反射モデルであるブリン・クック・トーランス（Blinn, Cook and Torrance）の手法を用いる。

物体の面を、粗さを表す小さな凹凸を持つ微小面の集まりであると考え、これらの微小面は鏡面反射を行なうと考えられる。このことを、図 6.7 によって説明する。

入射光（単位ベクトル L ）と視線ベクトル（同じく E ）との垂直二等分線（同じく H ）を設定する。この H を法線ベクトルとする微小面が物体表面に多数存在すると考える。したがって、 H の分布は鏡面反射をする微小面の向きの分布を表す。同時にそれは、表面粗さによる鏡面反射光の輝度分布を表す。この分布が求まれば物体表面の鏡面反射光の輝度が計算できる。

H の分布を H と N のなす角 ξ の関数 $D(\xi)$ で表し、微小面勾配分布関数という。一般に次式で表される具体的な分布関数を用いる。

$$\text{ガウスの分布関数: } D(\xi) = C \cdot \exp\left(-\left(\frac{\xi}{m}\right)^2\right), \quad m = 0.2 \sim 0.7 \quad (6.2)$$

物体表面の微小面は小さな凹凸を持っているので、これに光が当たると、図 6.8 のように光の入射角と微小面との関わりによって、光が遮られる。

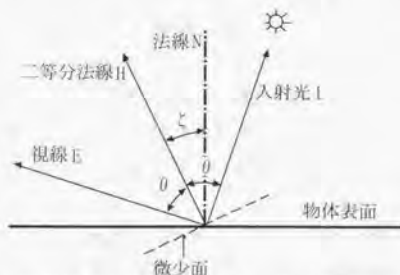
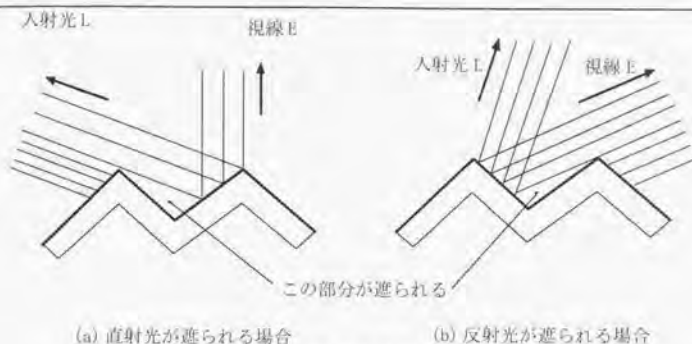


図 6.7: 鏡面反射の幾何モデルと二等分法線ベクトル H



(a) 直射光が遮られる場合

(b) 反射光が遮られる場合

図6.8: 入射角によって変わる反射光の減衰係数 G

図6.8(a)は、入射光が面に達する前に遮られ、図(b)は面から反射する光が遮られる場合である。図中(a)で、入射光方向から見える部分の割合、図(b)で、視線方向から見える面の割合をそれぞれ求めると、次式のようになる。 N , H , L , E はすべて単位ベクトルである。

$$(a): 2(N \cdot H)(N \cdot L) / (H \cdot E), \quad (b): 2(N \cdot H)(N \cdot E) / (H \cdot E) \quad (6.3)$$

式(6.3)の値が1より小さいとき、光が遮られるから、この値を入射角によって影響を受ける反射光の減衰率とみなすことができる。これを幾何学的減衰係数 G という。したがって、 G は式(6.3)の(a)と(b)、それに減衰のない1、3者の最小値をとって、次式で与えられる。

$$G = \min\{2(N \cdot H)(N \cdot L) / (H \cdot E), 2(N \cdot H)(N \cdot E) / (H \cdot E), 1\} \quad (6.4)$$

ここで、本研究で計算するモデルでは、入射光 L と物体表面の法線方向 N は一致しているの、(6.4)式は、以下のように書き換えられる。

$$G = \min\{2(N \cdot E), 1\} \quad (6.5)$$

さらに、入射角に応じた物体表面での反射率 $F(\theta)$ を導入する。光の反射は波長に左右されるので、波長に応じた反射率を求める必要がある。本研究のモデルでは、単波長(325nm)のレーザを使用することが前提であるので、このレーザ光に応じた反射率を用いる必要がある。反射率 $F(\theta)$ は、次式で表されるフレネル (Fresnel) の式を使う。

$$F(\theta) = \frac{1}{2} \left(\frac{g-c}{g+c} \right)^2 \left[1 + \left\{ \frac{c(g+c)-1}{c(g-c)+1} \right\}^2 \right] \quad (6.6)$$

ただし、 $c = \cos \theta = (H \cdot E) = (H \cdot L)$, $g^2 = n^2 + c^2 - 1$, 2θ : 法線と視線方向のなす角, n : 屈折率。

微小面勾配分布関数 $D(\zeta)$ 、幾何学的減衰係数 G 、および反射率 $F(\theta)$ を用いて、視線

に入る鏡面反射光の強度 I_r は次式で表される。ただし、今 $\xi = \theta$ である。

$$I_r = I(F(\theta)/\pi) D(\theta) G/\cos\beta \quad (6.7)$$

ただし、 β は面の法線ベクトル N と視線ベクトル E のなす角度で、今 2θ で表される。ここで、 $1/\cos\beta$ をかけているのは、視線と面のなす角度が小さくなると同一視角に対して見える微小面の数が $\cos\beta$ に反比例して増加するためである。

反射率 $F(\theta)$ の求め方は次のようにすればよい。入射角 θ が 0° の場合、各波長に対する反射率 $F(\theta=0)$ が与えられれば、 $\theta=0^\circ$ のとき $g=n$ であるから、各波長に対する n を求め、これをもとにして任意の入射角および波長に対する反射率を求めることができる。

よって、以上よりマスク面での反射光強度は、拡散反射と鏡面反射を考慮して、以下のように求められる。

$$I_r(\theta) = I(w_0 \cos\theta + (F(\theta)/\pi) D(\theta) G/\cos\beta) \quad (6.8)$$

次に、実際に赤色顔料インクによるマスク面での拡散反射係数、鏡面反射係数の測定を行なった。測定は図 6.9 に示すように、 $0.9\text{ cm} \times 0.9\text{ cm}$ の受光面を持つパワーメータを用いて、実際に造形に使用する He-Cd レーザを使用して測定した。

図中①の拡散反射測定では、レーザビームのマスク面照射中心から 1 cm の位置で測定を行なった。レーザビーム強度は 38.3 mW で、拡散反射の測定値は $40\text{ }\mu\text{ W}$ であった。そのうち、測定による環境光成分 $10\text{ }\mu\text{ W}$ を引いたものが $0.9 \times 0.9\text{ cm}$ の受光面が受け取った拡散反射成分である。この値からすべての拡散反射成分（半球分）を計算し求めた。

$$\text{拡散反射率} : 30 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{2\pi}{0.9^2} \cdot \frac{1}{38.3} = 6.076 \cdot 10^{-3}$$

一方、鏡面反射成分は、すべて受光部内に含まれるとして測定した結果、 3.0 mW となった。これから、環境光および拡散光成分を引くと、 2.96 mW となる。よって、鏡面反射率は、

$$\text{鏡面反射率} : \frac{2.96}{38.3} = 0.0773$$

と求められる。

この鏡面反射率測定では、実際の造形時のようにレーザビームをマスク面に対して垂直に入射してはいないが、文献[44]によると、入射角 θ が 90° に近ければ、 θ が 90° のときの鏡面反射率とほとんど差がないので、厳密ではないがこの測定値を鏡面反射率とする。

よって、式(6.6)の n の値は、 $n = \frac{1+\sqrt{0.0773}}{1-\sqrt{0.0773}} = 1.77$ となる。

これらの各反射率を式(6.8)に代入して、入射光を 1 とした場合の反射光強度を求める。図 6.10 のように計算される。図 6.10 は、原点に Z 軸正方向から入射した光の反射光強

度を $0 \leq \theta \leq \pi/2$ の範囲で計算し、それを YZ 面で表示している。また、計算では、式(6.2)のガウス分布関数で、実験による結果を踏まえて $m=0.2$ としている。マスク表面では、各点において図 6.10 のような鏡面反射と拡散反射が同時に起こる。次に、式(6.8)をどのようにシミュレーションプログラムに組み込むかについて検討する。

5.3 のシミュレーションプログラムでは、露光量の加法原理を用いて、1 層 1 ラインを描画した際の露光量分布を、複数ライン分足し合わせて、さらにそれを複数層分加算して最終的な露光量分布を計算した。紫外光遮断層での反射を考慮した積層樹脂層内露光量分布シミュレーションでは、マスクがない場合と同様に、1 層 1 ラインを描画した際の反射光による露光量分布と透過光による露光量分布を足し合わせ、さらに複数ライン、複数層へと拡張することで、積層樹脂層内の露光量分布を求める。図 6.11 に、1 層 1 ラインを描画した際の反射光を含めた露光量分布の求め方を示す。図 6.11 に示すように、層内の (y, z) 位置の露光量 (mJ/cm^2) は、レーザービームから直接透過してくる光による露光量と、マスク面すべてから反射してくる光による露光量との和になる。

透過光による露光量は、5.2.1 の式(5.2)、 $E(y, z) = E_{\max} \cdot \exp(-2 \cdot (\frac{y}{W_0})^2) \cdot \exp(-\frac{z}{D_p})$ で表さ

れる。また、マスク面での露光量分布は、(5.2)式の z に層厚を代入して得られ、図 6.12 のようになる。マスクがない場合は、臨界露光量線と露光量線との交点間が硬化する。

以上から、図 6.11 の (y, z) 位置における露光量は、5.2.1 の式(5.2)による透過露光量と、マスク面位置各点に式(6.8)の反射光の式を適用して、それらすべてを足し合わせたものになる。実際のシミュレーションでは、それを層内すべての点において計算し、さらに複数ライン分、複数層分を足し合わせていく。具体的には以下の式(6.9)～(6.13)で計算される。

$$E(y, z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=1}^k \left(E_{\max} \cdot \exp(-2 \cdot (\frac{y - mh_s}{W_0})^2) \cdot \exp(-\frac{z - (n-1)L_T}{D_p}) + E_R(y, z, m, n) \right) \quad (6.9)$$

ただし、 $0 \leq k-1 \leq \frac{z}{L_T} < k \leq \ell$

$$E_R(y, z, m, n) = \sum_{y_m=-\infty}^{\infty} E_{\max} \cdot \exp(-2 \cdot (\frac{y_m - mh_s}{W_0})^2) \cdot \exp(-\frac{(l-n)L_T - M_T}{D_p}) \cdot I(\theta) \cdot \exp\left\{-\frac{D(y, z, y_m, n)}{D_p}\right\} \quad (6.10)$$

ただし、 M_T : マスク厚

$$D(y, z, y_m, n) = \sqrt{(y - y_m)^2 + \{(l-n)L_T - z - M_T\}^2} \quad (6.11)$$

$$\theta = \text{ArcCos} \left(\frac{(l-n)L_z - z - M_T}{D(y, z, y_m)} \right) \quad (6.12)$$

$$I(\theta) = 1.0 \cdot \left(w_d \cos \theta + \frac{F(\theta/2)}{\pi} \cdot D(\theta/2) \cdot \frac{G(\theta)}{\cos \theta} \right) \quad (6.13)$$

シミュレーションでは、マスク上面までの露光量分布を計算し、マスク下面での計算は行なっていない。それは、実際のマスク描画によるレーザビーム露光実験から、マスク下へのレーザ光の透過は、マスク面によって完全に遮られるため、計算を行なう必要がないためである。

式(6.10)の $E_R(y, z)$ は、 (y, z) 位置における反射光による露光量の和を計算する関数である。式(6.10)中 M_T は、マスク厚を示している。光学顕微鏡によるマスク厚測定から、マスク描画直後はインク溶剤成分が残っており、 $20 \mu\text{m}$ 程度の厚みがあるが、すぐに揮発して、実際の造形時には $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 程度の厚みになることが分かった。よって、 M_T には $5 \mu\text{m}$ を代入する。

式(6.11)の $D(y, z, y_m)$ では、層内 (y, z) 位置とマスク面の $y=y_m$ 位置との距離を計算する。次に式(6.12)で、式(6.11)で求めた距離と層内 (y, z) 位置とマスク面間との距離から、 (y, z) 位置からマスク面の y_m 位置へ引いたベクトルとマスク面法線ベクトルとの余弦を計算し、そのなす角 θ を求める。ただし、 θ は便宜上、図 6.7 の N と E のなす角度とする。その θ を用いて、式(6.13)でその角度方向への反射率を計算する。以上を式(6.9)に代入することで、複数層積層した場合の露光量分布を求めることができる。コンピュータによる計算では、 ∞ は計算できないので、数値解析的に必要な範囲だけの計算を行なう。

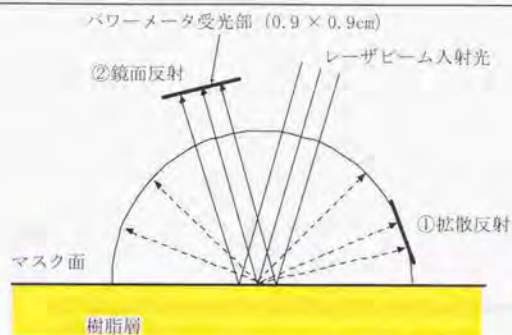


図6.9 : マスク面における拡散・鏡面反射率測定

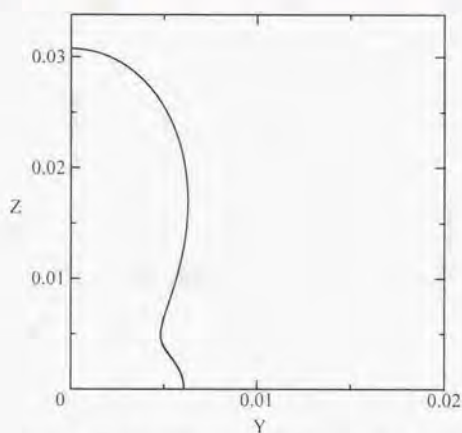


図6.10 : 拡散反射および鏡面反射の強度分布

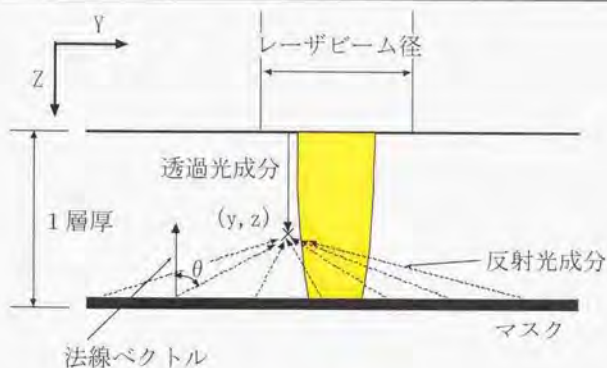


図6.11：1層1ライン硬化時の露光量分布計算概略

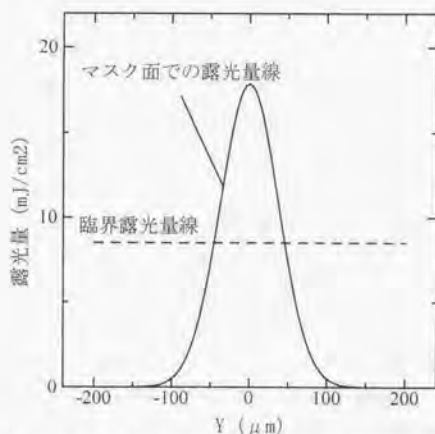


図6.12：1層1ライン硬化時のマスク面での露光量分布

式(6.9)～(6.13)をシミュレーションプログラムに取り込んで、実際にマスク描画時の露光量分布を求めるシミュレーションを行なった。シミュレーションでは、以下に示す条件で計算を行なった。使用樹脂は、UV1214-15として、透過深度 $278.7426 \mu\text{m}$ 、臨界露光量 $8.5058 \text{mJ}/\text{cm}^2$ として計算している。なお、⑤～⑧では、硬化物外周部についてシミュレーションを行なった。

- ①1層1ライン硬化, マスク無し, 照射量大
- ②1層1ライン硬化, マスク有り, 照射量大
- ③1層1ライン硬化, マスク無し, 照射量小
- ④1層1ライン硬化, マスク有り, 照射量小
- ⑤10層積層硬化, マスク無し, 照射量大
- ⑥10層積層硬化, マスク有り, 照射量大
- ⑦10層積層硬化, マスク無し, 照射量小
- ⑧10層積層硬化, マスク有り, 照射量小

それぞれのシミュレーション結果を図 6.13～図 6.16に示す。また、それぞれの描画条件、結果を表 6.2に示す。シミュレーション結果では、露光量によって青～赤の色をつけている。青がちょうど臨界露光量 $8,5058 \text{ mJ/cm}^2$ の境界で、露光量 30 mJ/cm^2 以上を赤としている。赤色以外の部分は、造形直後には硬化しているが、洗浄によって容易に溶けだしてしまう可能性があることが、基礎実験から分かっている。また、すべての露光量分布図は、縦横比 1 : 1 で表示している。

図 6.13の①、②は、1層1ラインを平均照射量 30 mJ/cm^2 で硬化させた場合の露光量分布（硬化形状）を示しているが、マスクがある場合②では、マスク面での反射光の影響で、中央部が盛り上がった形状になっている。また、硬化深さは一層分の厚さ $600 \mu\text{m}$ に抑えられていることが確認できる。

図 6.14の③、④は、1層1ラインを平均露光量 7 mJ/cm^2 で硬化させた場合の硬化形状を示している。③、④とも硬化深さが一層の厚さ $600 \mu\text{m}$ に到達していないが、マスクがある場合④の方が、マスクのない場合③よりも硬化深度がのびていることが確認できる。この結果から、マスク面での反射光の硬化形状に与える影響は大きいことが分かる。シミュレーションの妥当性を評価するために、この条件で実際に硬化実験を行なった。実験では、積層厚 $100 \mu\text{m}$ で数層積層した後に、マスクを描画し、その後さらに $6 \text{ 層 } 600 \mu\text{m}$ 分積層した。マスクのある部分と、マスクのない部分にそれぞれ表 6.2の③、④の条件で描画・露光を行なった。その結果は、③の条件では硬化深さが $437 \mu\text{m}$ 、④の条件が $351 \mu\text{m}$ となった。③の実験結果はシミュレーションとかなり近似しており、④もかなり近い値になった。④に関して硬化深さが浅くなっているのは、洗浄の際に臨界露光量付近の硬化物が多少溶けだしたためだと考えられる。このようにマスク面での反射を考慮したシミュレーションは、現実をよく反映していることが確認された。

図 6.15の⑤、⑥は、実際の造形と同様、レーザビームのスキャン間隔 $100 \mu\text{m}$ 、積層厚 $100 \mu\text{m}$ として、平均照射量として比較的大きな値 120 mJ/cm^2 で造形を行なった場合の硬化物側面における硬化形状を計算した結果である。通常のマスクがない場合の硬化物側

面の形状は、⑤のようにほぼ垂直になるが、マスクを描画した場合⑥では、図のように真横に張り出した形状になる結果が得られた。このような現象は、本方式でしか得られず、現在までに報告されていない。そこで、本論文ではこの形状のことを、「反射余剰成長」と呼ぶことにする。また、それと対応させて、従来の光造形法における透過光による余剰成長を「透過余剰成長」と呼ぶことにする。通常の光造形法では、硬化物底面に設計寸法以上の余剰硬化が生じるが、本方式では図のように硬化物底面ではなく、反射光により、それとは逆の位置に硬化物余剰成長が生じるので、反射余剰成長と呼ぶ。

反射余剰成長は、XY 方向の造形分解能に影響することが分かる。たとえば、図 6.17 に示すような軸・軸受けのような形状では、そのクリアランス部分に反射余剰成長が生じる可能性があり、隙間が硬化してしまうと造形後に軸を回転させることができなくなる。図 6.15 の⑥では、横方向の反射余剰成長厚は 1.2mm となっており、これがそのまますべて造形後に残るとすると、XY 方向において微小クリアランスは造形できないことになる。しかし、洗浄によって、実際に残る部分は $30\text{mJ}/\text{cm}^2$ 以上つまり、図において赤色部分だけである。よって、⑥の場合は約 $400\mu\text{m}$ の XY 方向における反射余剰成長部分が残ることになる。一方、平均照射量を $31\text{mJ}/\text{cm}^2$ と小さく設定して露光量分布計算を行なった図 6.16⑧の場合、赤色部分はマスクなし造形⑦の場合の垂直範囲内に入っており、造形後の洗浄によって、残りの反射余剰部分は流れてしまうと推測される。つまり、平均照射量が小さいと、当然反射光による反射余剰成長の影響も小さく抑えられることを示している。

実際、図 6.17 のような形状の場合は、軸と軸受け側のマスク面両方からの反射があり、軸・軸受け間クリアランス部の露光量はそれらを足し合わせたものになる。よって、単純に側面における反射余剰成長を抑える平均照射量よりも、さらに小さな照射量で露光を行なう必要がある。そこで、図 6.17 のような軸・軸受け構造のようなクリアランスではないが、造形物に $300\mu\text{m}$ と $100\mu\text{m}$ のスリットが XY 面に存在する場合の露光量分布を表 6.2 の⑧の条件で計算を行なった。図 6.18 が、 $300\mu\text{m}$ のスリットがある場合で、図 6.19 が $100\mu\text{m}$ の場合である。それぞれマスクを描画しない場合を左に表示している。

図 6.18、図 6.19 両方とも、底面にマスクを描画した場合、スリットが硬化樹脂によって埋まってしまっていることが確認できる。実際、洗浄を行なうと、赤色以外の部分は流れてしまうので、 $300\mu\text{m}$ の方は完全なスリットが得られる。一方、 $100\mu\text{m}$ の方は、赤色部分が中央にせり出しており、中央部分では、硬化した樹脂が除けない状態が予想される。また、完全に未硬化の樹脂でも形状によっては溶剤が進入しにくく除けない場合もある。

以上のように、マスク面における反射による反射余剰成長によって、細いスリットなどの形状では、中央部分が硬化してしまい、完全なスリットが造形されない可能性があ

ることが分かった。つまり、反射余剰成長は、XY 面における分解能に影響を与えることが分かる。しかし、表 6.2 の⑧の条件よりも、もう少し平均照射量を低めに設定する、もしくは、レーザビームのスキャン方式を改良することで、洗浄できる範囲であれば、細いスリットや微小なクリアランスも正確に造形できる可能性がある。これらの可能性については、第 8 章において検証することにする。

結論として、紫外光遮断マスクを用いることで、通常とは違う横方向への余剰成長が生じることが分かった。この反射余剰成長を避けるためには、なるべく紫外光反射率の低い、すなわち吸収率の大きい顔料をインクとして使用するか、もしくは、造形を行なう際の平均照射量を小さく設定し、しかも造形後の洗浄に耐えられるよう、輪郭をしっかり硬化させる新しいレーザスキャン方法を開発することが必要である。

最後に、前述した超微粒子酸化チタンをインクとして分散できた場合の、表 6.2 の⑥の条件で、10 層硬化させた場合の $100\mu\text{m}$ スリットのシミュレーションを行なった。超微粒子酸化チタンは、 325nm 波長に対しては、ほとんどが吸収の効果であり、 325nm 波長に対する鏡面反射率、拡散反射率を文献[43]、図 6.20 のグラフから概算すると、鏡面反射率 0.002 、拡散反射率 1.5×10^{-4} 程度と非常に小さな値になる。この値で、シミュレーションを行なった結果が図 6.21 である。図 6.21 では、同条件の赤色顔料インクによるマスクを比較して、全く反射余剰成長が生じておらず、 $100\mu\text{m}$ のスリットも完全に造形できることが分かる。反射余剰が生じないということは、過剰な光照射を行なうことが可能であり、各層毎に完全に硬化反応をさせることが可能であることを示している。

表 6.2: シミュレーション条件および結果

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
レーザパワー (mW)	12	12	12	12	12	12	12	12
ビーム直径 (μm)	140	140	140	140	140	140	140	140
スキャン速度 (cm/sec)	10	10	38	38	10	10	38	38
スキャン間隔 (μm)	400	400	400	400	100	100	100	100
レイヤ厚 (μm)	600	600	600	600	100	100	100	100
レイヤ数	1	1	1	1	10	10	10	10
平均照射量 (mJ/cm^2)	30	30	7	7	120	120	31	31
硬化深さ (μm)	798	600	436	580	N/A	600	N/A	600
マスク有り無し	無し	有り	無し	有り	無し	有り	無し	有り

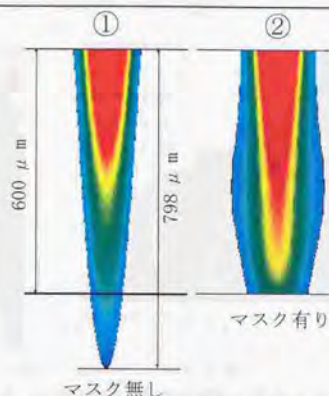


図6.13: マスク面反射による1ライン露光量分布計算結果 (①マスク無し②マスク有り, 平均照射量 $30\text{mJ}/\text{cm}^2$)

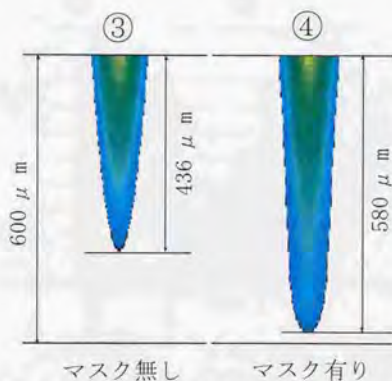
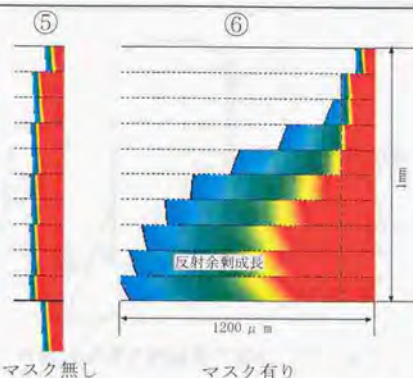


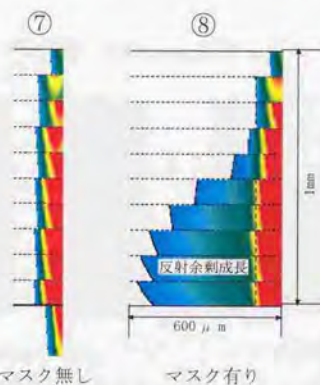
図6.14: マスク面反射による1ライン露光量分布計算結果 (③マスク無し④マスク有り, 平均照射量 $7\text{mJ}/\text{cm}^2$)



マスク無し

マスク有り

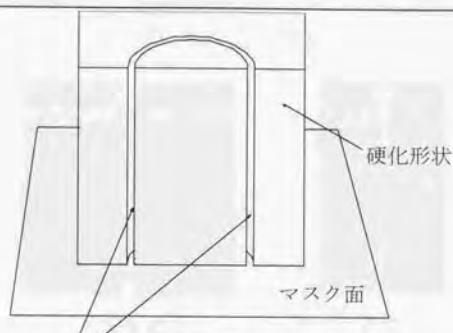
図6.15 : マスク面反射による 10 層積層硬化時の露光量分布計算結果 (⑤マスク無し⑥マスク有り, 平均照射量 $120\text{mJ}/\text{cm}^2$)



マスク無し

マスク有り

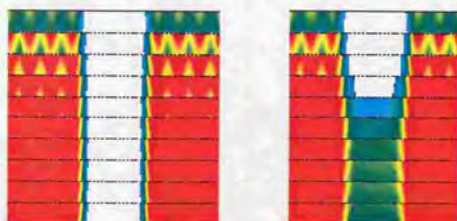
図6.16 : マスク面反射による 10 層積層硬化時の露光量分布計算結果 (⑦マスク無し⑧マスク有り, 平均照射量 $31\text{mJ}/\text{cm}^2$)



この部分が逆余剰成長で硬化してしまう
可能性がある

図6.17: XY 方向微小クリアランスにおける反射余剰成長問題

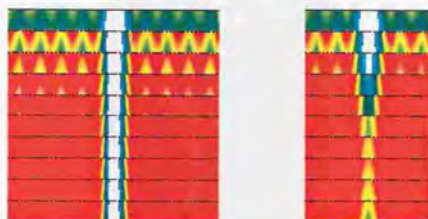
① 300 μm スリット



マスクなし

マスクあり

図6.18: 300 μm スリットシミュレーション結果

② 100 μm スリット

マスクなし

マスクあり

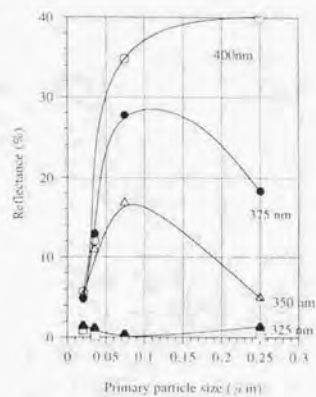
図6.19 : 100 μm スリットシミュレーション結果

図6.20 : 紫外光波長に対する超微粒子酸化チタンの1次粒子径と反射率の関係[43]

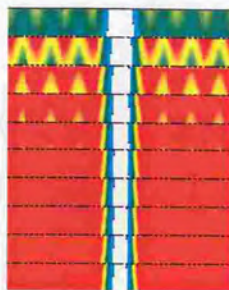


図6.21: 超微粒子酸化チタンを用いたマスク描画時の条件⑥による $100\mu\text{m}$ スリットシミュレーション結果

第7章 ギルゲル変換樹脂と紫外光遮断層を用いた 冷却固化式光造形システムの設計・製作

前章までに得られた知見をもとに、ギルゲル変換樹脂と冷却固化式光造形法の造形プロセスおよび、上層からの透過光を遮断する紫外光遮蔽マスクを作成する機構を実現するための、試作システムの設計・製作を行なう。試作システムでは、従来の光造形システムとは異なる樹脂供給方式、レーザスキャニング方式、紫外光遮断マスク描画方式を提案しており、それらを実現するために、様々な要素技術に関して検討を行なった。本章では、試作システムの設計・製作に関してハードウェアおよび、その制御に関して説明する。

7.1 造形システムハードウェア

本論文で提案する冷却固化式光造形システムでは、樹脂を精度良く露光面に供給するための樹脂供給機構、レーザビームおよびマスク描画用インクジェットヘッドを移動させるためのスキャニング機構、造形テーブルを上下させるZレベリング機構、レーザビームのパワー制御・シャッタリングを行なうレーザ光学系、インクジェットヘッド機構、またコンピュータの信号によりそれらの制御を行なう制御回路に関して、検討・設計・製作を行なった。図 7.1に装置全体の概略図を、図 7.2に装置写真を示す。以下で、その詳細について個別に説明する。

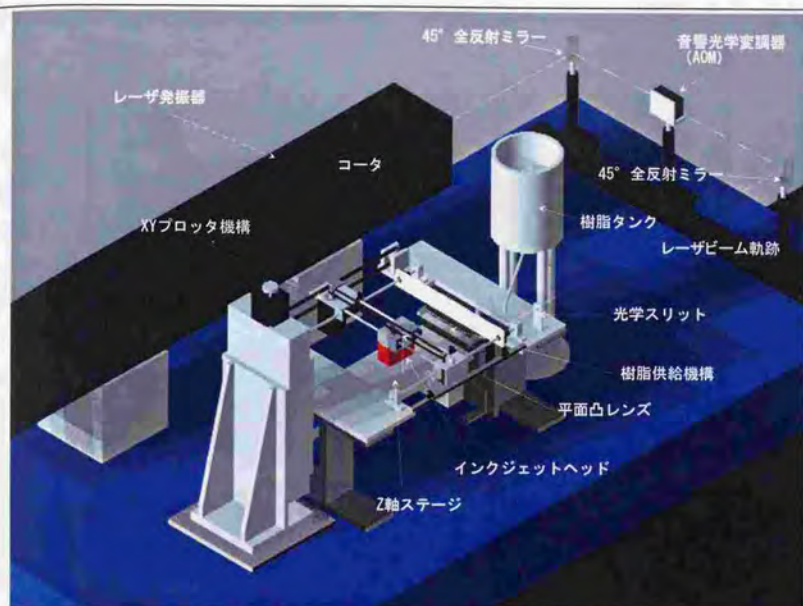


図7.1：試作装置全体概略



図7.2 : 装置全体写真

• XY スキャニング

レーザビームを走査する機構としては、現在 XY プロッタ方式、ガルバノメータ方式が主である。ガルバノメータ方式は、XY 用 2 つの光学ミラーの回転を AC サーボモータで制御し、露光面にビームを走査する方式だが、ビームを露光面に対してなるべく垂直に均等に照射するためには、焦点距離を大きく設定し、さらに焦点位置調整機構が必要など、装置として大がかりになってしまう。そこで、本システムでは比較的精度が良く、コンパクトに構成できる XY プロッタ方式を採用した。

XY プロッタ機構では、AC サーボモータに付けられたギア及びタイミングプーリを介してベルトを駆動し、X、Y 方向へ移動するキャリアを駆動する仕組みになっている。両軸の AC サーボモータには安川電機製の AC サーボモータ SGM-A3B314 を使用している。サーボモータは位置制御用ドライバを通じて PC に接続されており、PC からパルス出力によって、移動量を制御できる。モータドライバでは、入力パルス数およびパルス間隔に応じて、モータの回転速度、回転量を決定し、ドライバ内においてモータ接続のエンコーダ値を参照しながら PID 制御により位置決めを行なう。位置決めが完了したら、外部に位置決め完了信号を出力する。

表 7.1 にサーボモータ SGM-A3B314 の仕様を示す。この AC サーボモータには、A 相、B 相、Z 相のパルス出力が可能な、インクリメンタルエンコーダが接続されており、信

号はモータドライバに入力されている。ドライバ側で A 相, B 相, Z 相のパルス出力を使用することで, AC サーボモータの分解能 2048 パルス/1 周を 4 倍まで高めることが可能である。

X 軸, Y 軸方向にはそれぞれ 2 本のロッドがあり, それぞれのロッドには 1 つずつリニアプッシュハウジングユニットが取り付けられている。Y 軸方向の 2 つのハウジングユニットはアルミのプレートで固定されており, そのプレートにインクジェットヘッドがネジ止めされている。また, このプレート上面には平凸レンズ, 波長 325nm 用紫外線 45° 反射ミラーが配置され, レーザ光がこのレンズで集光され樹脂面に焦点を結ぶ仕組みになっている。これにより, インクジェットヘッドの描画とレーザスキャンを同時に行うことが可能である。このハウジングユニット, インクジェットヘッド, レンズから構成される XY プロッタキャリアにはタイミングベルトが固定されており, このベルトをモータで駆動することで, Y 軸方向に移動させることができる。

X 軸方向の 2 つのハウジングユニットには, それぞれ Y 軸方向の 2 本のロッドがつながっている。Y 軸方向に駆動するモータ部にベルトが固定されており, このベルトをモータで駆動することによって X 軸方向に移動する。X 軸のモータ軸に取り付けられた歯数 20 のギアは, 直径 60mm 歯数 120 のギアと噛み合っており, 1:6 に減速する。そして, 直径 26mm のプーリによってベルトが駆動される。これにより, X 軸方向は最高分解能 $3.3 \mu\text{m}$, 最大スキャンスピード約 2m/sec で移動可能である。Y 軸のモータ軸には直径 14mm のプーリが付けられており, プーリによってベルトが直接駆動される。これにより, Y 軸方向は分解能 $10.7 \mu\text{m}$, 最大スキャンスピード約 3m/sec で移動可能である。図 7.3 に, XY プロッタ部の写真を示す。

X 軸, Y 軸とも両側にフォトセンサが付けられており, 原点位置を数ミクロンの誤差範囲内で調整することが可能である。

表 7.1 : サーボモータ SGM-A3B314 の仕様

定格出力(W)	30
定格トルク(Kgf・cm)	0.974
瞬間最大トルク(Kgf・cm)	2.92
定格回転速度(r/min)	3000
最高回転速度(r/min)	4500
質量(kg)	0.3
励磁方式	永久磁石形

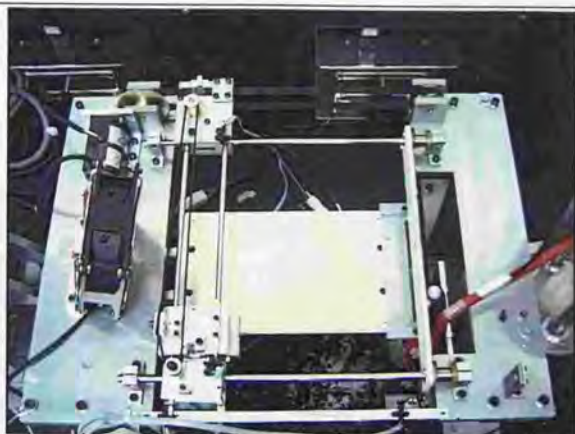


図7.3 : XYプロッタ機構

- Zレベリング

造形テーブルは、市販のZステージ（株）シグマ光機）に直接固定してある。表 7.2 に STM-120Z（株）シグマ光機製の仕様を示す。試作システムでは、Zステージの移動分解能を $2\mu\text{m}$ に設定してある。このZステージでは、ボールネジの回転にステッピングモータを使用しており、そのトルクを越えないようにテーブルの移動を加減速制御する必要がある。

表7.2 : STM-120Z仕様

移動量	120mm
1パルス移動量	0.002 (0.001)mm
位置決め精度	0.025mm
繰り返し位置決め精度	0.005mm
バックラッシュ	0.005mm
MAXスピード	20mm/sec

- レーザ光学系

試作システムでは、波長が 325nm, 40mW, He-Cd レーザを使用する。図 7.4に示すように、レーザ装置から出たレーザビームはまず、紫外域用 45° 全反射ミラーによって

90° に反射される (図 7.5)。その後、音響光学変調器 (AOM) を通過し、さらに全反射ミラーにより 90° 方向を変えて、光学スリットを通過する。その後、ミラーによる反射を2回繰り返し、XYプロッタキャリアに設置された直径8mmの平凸レンズで集光され、樹脂面に集光される。平凸レンズの角度および位置 (高さ) は、2本のネジで調整可能である。45° 全反射ミラーは、平行平面基板の片面に $\text{Al}+\text{MgF}_2$ をコーティングしたもので、波長が 325nm の 45° 入射光に対して反射率が 99% 以上である。平凸レンズは合成石英でできており、波長 546.1nm の入射光で、主点から焦点までの焦点距離 50mm、焦点距離公差 $\pm 1\%$ の仕様になっている。レーザの光路調整は、4つの平面ミラー、AOM 角度によって行なう。

AOM デバイスは、音響光学媒体として合成石英を使用しており、これにある周波数の電圧を加えることで、入射光を透過光、第1次回折光、第2次回折光に分離させる。レーザの描画では、AOM を通過した1次回折光をスリットで選択したものを使用する。レーザビームの ON/OFF、及びパワー調整は、AOM ドライバに直流電圧 (0 ~ 1 V) を加えることで制御できる。その最高切替周波数は 80MHz である。AOM は HOYA-SHOTT (株) 製の PR-A-159 を使用する。表 7.3 に PR-A-159 の基本仕様を示す。

レーザビームは、XYプロッタ機構によって、130×120mm の範囲でスキャンすることができる。また、レーザ装置から出るレーザ出力は 40~42mw 程度であり、樹脂面に照射される時点で 16~18mw 程度まで減衰する。また、図 7.6 に示すように XYプロッタキャリア原点位置に、レーザパワーを測定するパワーメータが設置されており、造形過程においてレーザパワーを測定可能である。造形過程において、レーザパワーを自動的に調整することで、厳密な露光量制御が可能となる。

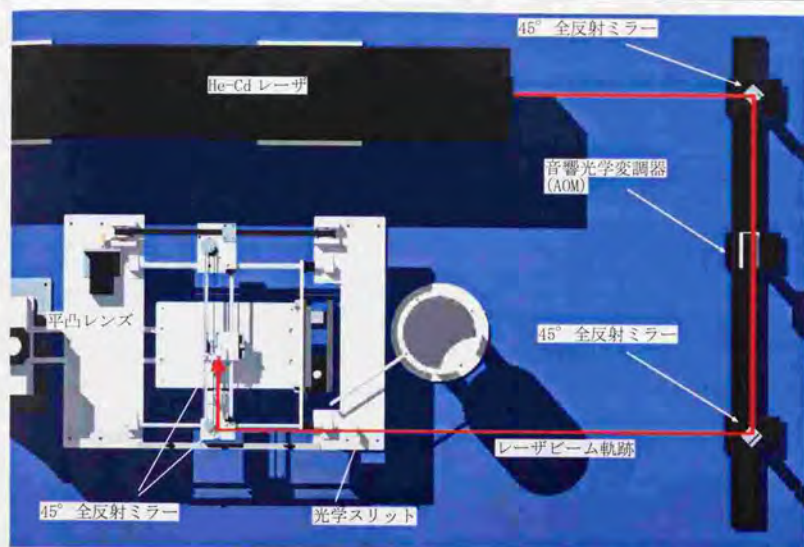


図7.4：レーザービーム軌跡

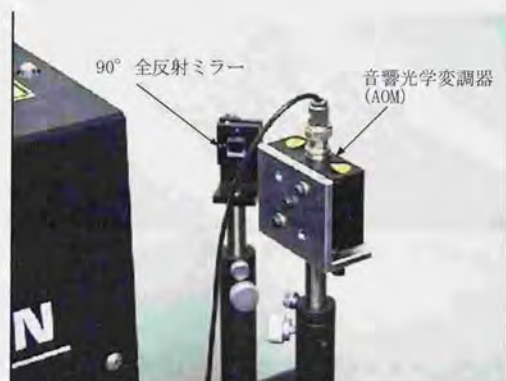


図7.5：音響光学変調器，90° 全反射ミラー部写真

表7.3 : PR-A-159 の定格・性能

NO	項目	定格・性能	備考
1	音響光学媒体	合成石英	
2	光波長	325nm	
3	有効ビーム径	1 mm	電極幅
4	駆動周波数	80MHz	
5	光透過率	95%以上	
6	最大回折効率	75%以上	ビーム径: $\phi 7.5 \pm 0.1 \text{ mm}$
7	消光比	30dB以上	
8	分離角	4.4mrad	
9	音速	5960m/sec	音響媒体
10	最大電気入力	2W	
11	最大レーザーパワー密度	0.5W/mm ²	
12	入力インピーダンス	50 Ω (V. S. W. R 1.5:1)	
13	入射光偏光条件	ベース面に垂直な直線偏光	
14	コネクタタイプ	BNC	



図7.6 : XYプロッタキャリア原点位置におけるレーザービームパワー測定

• 樹脂供給

樹脂供給部は、樹脂タンク、供給パイプ、樹脂供給ユニット、コータから構成される。すべての樹脂供給機構には、ヒータおよび白金測温センサが取り付けられており、温度調節器によって常に一定温度に温度制御される。ヒータには、(株)坂口電熱のサミコンヒータおよびシリコンゴムヒータを使用している。

樹脂タンクから流れてきた樹脂は、供給パイプを通り樹脂供給部に貯えられる。樹脂

供給部は、常に上面まで、加温された樹脂で満たされており、樹脂を露光面に供給する際には、樹脂供給ユニット接続の電磁弁を開くことで、樹脂タンクから供給部に必要な量の樹脂が供給され、樹脂供給ユニット上面に過剰な樹脂を押し出す。その溢れ出した樹脂をコータで掻き集め、造形テーブルに平面供給する。

コータは、X 軸ガイド丸棒に取り付けられた断熱材で出来た部分と、ステンレス製のブレードからなる。断熱材を使用した理由は、X 軸ガイド棒に熱を伝えないためである。ステンレス製ブレードは厚さが 1mm あり、精度よく樹脂を平面供給できるように、接触角を考慮して造形テーブルに対して 45° の角度をつけてある。図 7.7 に、コータ部の写真を、図 7.8 に樹脂タンク、供給パイプ部の写真を示す。

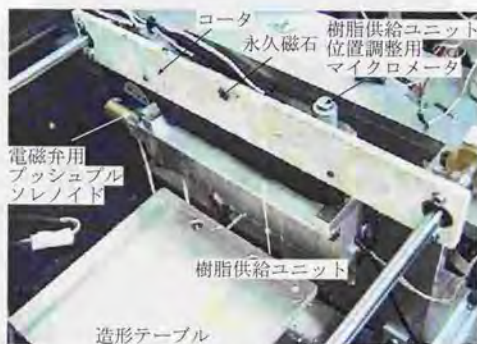


図7.7 : コータ部写真



図7.8：樹脂タンク，供給パイプ部写真

• インクジェットヘッド

インクジェットヘッドは、インクタンク、インク室、振動板、ピエゾ素子などから構成される。ピエゾは、図 7.9 に示すように、振動板から伸びたアルミ製の変位伝達棒に接触して固定されており、印加電圧により発生する長さ方向の変形で圧力を振動板、インクに伝え、ノズルからインク滴の吐出を実現している。振動板は、厚さ $80\mu\text{m}$ のステンレス製である。振動板下のインク室の高さは $300\mu\text{m}$ で設計してある。この値が重要で、これ以上高い場合、現在使用しているピエゾ、インクでは圧力波が効率よく伝搬せずに、インクを吐出できない。ノズル板は、厚さ $200\mu\text{m}$ のステンレス製で、中央に直径 $40\mu\text{m}$ の穴があいている。インク吐出を安定させるために、インク室側はテーパ状に加工してある。この穴は、マイクロ放電加工により成形した。試作したインクジェットヘッドより打ち出されたインクが樹脂面に定着した状態のドット径は約 $250\mu\text{m}$ である。図 7.9 に試作したインクジェットヘッドの概略図を、図 7.10 に写真を示す。

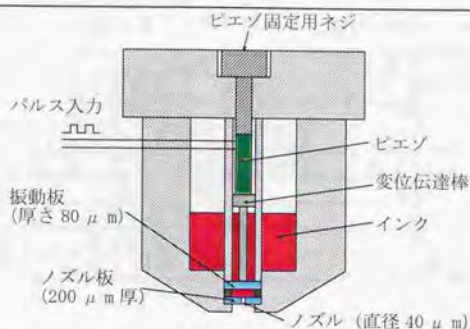


図7.9：インクジェットヘッド概略図

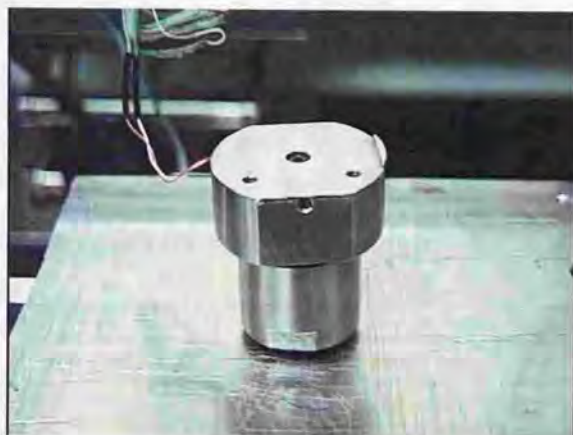


図7.10：インクジェットヘッド

本研究で作成した、インクジェットヘッドの主要構成要素を以下に示す。

・ピエゾ素子

使用したピエゾは、TOKIN 製の積層圧電アクチュエータ AE0203D08 で、大きさは $10 \times 3.5 \times 4.5 \text{ mm}$ である。積層圧電アクチュエータは、圧電縦効果を利用して電気エネルギーを変位や力などの機械的エネルギーに変換するセラミックス素子である。AE0203D08 基本仕様を表 7.4 に示す。

表7.4: 積層圧電アクチュエータ AE0203D08 の仕様

使用温度範囲 (°C)	-25 ~ +85
最大駆動電圧 (V. DC)	150
推奨駆動電圧 (V. DC)	100
変位量 (最大駆動電圧印加時)	9.1 ± 1.5
変位量 (推奨駆動電圧印加時)	6.1 ± 1.5
発生力 (N)	200
共振周波数 (kHz)	138
引っ張り強度 (N)	20
ヤング率 (N/m ²)	4.4 × 10 ¹⁰

・油性顔料インク

東洋インキ製造 (株) 製の油性インクをマスク用として使用する。このインクは、以下のような特徴を持っている。

1. 油性であり、材質を選ばず着色することができる。
2. 速乾性である。
3. 低粘性であり、インクヘッドから容易に打ち出すことができる。
4. 染料系のインクと違い、紫外光波長の遮蔽能に優れている。

表 7.5 に試作システムの設計仕様をまとめておく。

表7.5: 試作システム設計仕様

レーザー	40mW, He-Cdレーザー, 325nm
レーザーパワー制御	音響光学変調器 (AOM)
XYスキャニング	XYプロッタ方式 (ACサーボモータ駆動) 1方向スキャン (往復描画可能) 繰返し精度 ± 0.05mm XY分解能 (10, 25) μm 最高描画速度 50cm/sec
Zレベリング	Zステージ (ステッピングモータ駆動) 繰返し精度 ± 0.005mm 分解能 0.002 (0.001) mm
造形エリア	(120, 120, 100) mm
使用樹脂	ゾルゲル変換型光硬化性樹脂 UV1214-15 (株) クラレ
樹脂供給	リコート方式
インクジェットヘッド	ピエゾ方式 ノズル 1ノズル φ40 μm 最大駆動周波数 5kHz

7.2 造形システム制御

• XY スキャニング

XY スキャニングでは、レーザビームスキャニング、インクジェットヘッドによるマスク描画を同時に行なう。図 7.11 に、一層描画の際の描画軌跡概略を示す。図 7.11 に示すように、実際の描画では全層 X 方向にプロッタを送り、Y 方向に描画を行なう。また、Y 方向描画では、加減速領域を避けて等速領域で描画を行なっている。それは、レーザビームには加減速による慣性はなく、レーザを ON した位置を精度良く硬化させることが可能だが、インクジェットヘッドより打ち出されたインクは、加減速領域では慣性の影響を受けて、打ち出した位置と定着する位置が加速度によりばらついてしまう問題があるためである。また、インクによる描画は、レーザビームと違い、等速領域であってもインクノズルと樹脂面との距離、またその時の速度によって定着点に変化する。それは、等速領域であれば一様にずれるので、造形前にインク定着点とレーザビームの位置合わせを行なうことで対処している。

先に述べたように、XY スキャニングではレーザビームとインクジェットヘッドによる描画を同時に行なうので、図 7.11 における等速描画領域の長さは、実際の造形データ Y 方向距離にレーザビーム照射位置とインクジェットヘッドノズル位置の Y 方向ずれの分を足したものとなる。つまり、インクジェットヘッドの方が先に描画領域に進入するために、インクジェットヘッドが描画領域を通過した後もレーザビームがスキャンし終わるまで等速で移動しなくてはならない。レーザビーム照射位置とインクジェットヘッドノズル位置の X 方向のずれも、制御プログラムで処理することで、XY 方向双方の描画位置を厳密に合わせることが可能である。レーザビームによる硬化位置と、インクの定着点がずれた場合、精度良く紫外光を遮断することができないので、これらの位置は正確に合わせなくてはならない。

XY プロッタ機構では、ギアおよびプーリを介してベルトを駆動するので、必ずバックラッシュが存在する。そこで、図 7.11 の描画軌跡のように、必ず一方方向にだけ描画を行なうようにプロッタを制御することで、バックラッシュを完全にキャンセルし、Y 方向において位置精度の高い描画を実現している。X 方向に関しては、描画中は常に正方向に移動させるためにバックラッシュを考慮する必要はない。

レーザビームの ON/OFF とインク吐出は、位置制御で行なっている。制御プログラムでは、まず一層分のスライスデータを読み込んで、そこから 1 ライン毎のレーザビーム

位置とインク吐出位置を示す配列データに書き直す。そして、SMC（ステッピングモータコントロール）ボードに移動量、速度のパラメータを入力し、移動を開始する。移動を開始した XY プロッタキャリアは、制御とは独立して加速、等速、減速のパターンを描いて自走する。そこで、制御プログラム側ではプロッタキャリアの位置を、モータドライバからのエンコーダカウント値を参照して特定し、レーザビーム ON/OFF およびインク吐出の位置でそれぞれの処理を行なう。これを、等速描画領域の間繰り返し、1 ライン描画が終わると、X 軸正方向にスキャン間隔分移動させ、同時に Y 軸を描画原点位置に戻す。その後で、XY プロッタキャリアが指定位置まで移動したかどうかを、各モータドライバの位置決め完了信号を利用して確認する。以上を必要なラインだけ行ない、最後に XY プロッタキャリアを原点に戻す。図 7.12 に、一層描画のアルゴリズムをまとめる。

一層描画を行なうアルゴリズムを図 7.12 に示したが、本システムではさらに、紫外光遮断層方式の利点を活かして、従来の光造形システムにおける一層硬化時の内部残留応力を減少させ、反り変形を小さくする新たなレーザビームスキャン方式を実現している。これは、図 7.12 の点線部分でソフトウェア的に行なわれる。

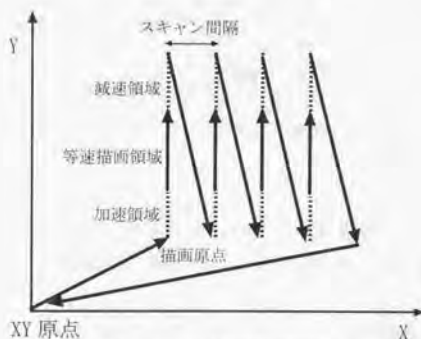


図7.11 : XY 描画軌跡概略

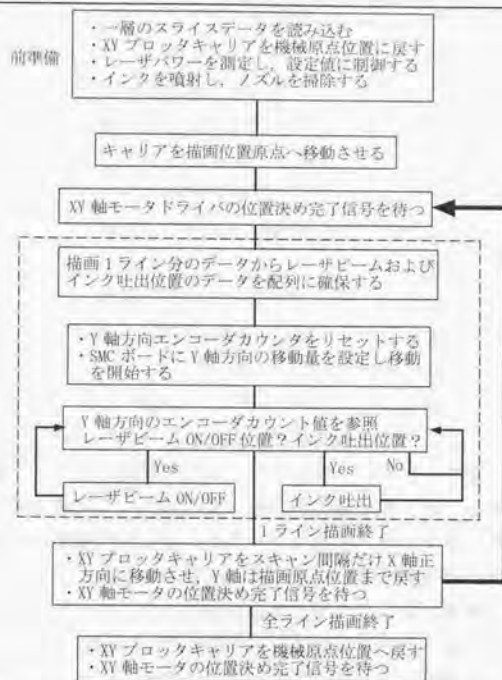


図7.12：制御プログラムにおける一層描画アルゴリズム

・レーザスキャニング新方式

この方式は、従来の光造形システムで行なわれている連続的なレーザビームスキャニングで生じる硬化時の内部残留応力を緩和し、反り変形を小さく抑えることを目的に開発した。

従来の光造形システムでは、図 7.13左上に示すように、各硬化ラインが多少重なるようにレーザビームを連続的にスキャンする。これを、偶数層、奇数層で 90° 向きを変えながら（クロスハッチ方式）造形を行なう。この方法では、ラインが交差する部分では照射量が大いため、それだけ大きく収縮を起こす。また、連続的にスキャンすることで、硬化時の応力の逃げ場がなく反り変形を起こしやすい。そこで、試作システムでは、図 7.13右上および下に示すようなパルス状のスキャニングパターンを提案する。

この方法では、一層内において輪郭部および造形物表面部では強いレーザパワーで連続的にスキャンを行ない、内部はレーザビームが真横とほとんど重ならない程度のレー

ザパワーでパルス状にスキャンを行なう。奇数層と偶数層では、描画開始位置がスキャン間隔の半分だけずれており、偶数層目において、ほとんど接触していないパルス状硬化形状間を埋めるように奇数層目の描画を行なう。こうすることで、各層を硬化させた後の残留応力は、パルス状硬化形状間で吸収されるので、結果として反り変形が小さくなる。通常の光造形システムでこのようなスキャンパターンで描画を行なうと、造形物底面に当たる面に凹凸が生じるが、試作システムでは造形物底面にマスクを描画しているので、その部分で上層からの透過光が遮断され、また平均化されるので平坦な面が得られる。

この方式の利点として、内部残留応力を緩和できること以外に、少ないレーザスキャンで、XY 面において倍の分解能が得られることがあげられる。例えば、図 7.13 左上に示す従来の光造形システムで、XY 面において倍の分解能を実現するには、スキャン間隔を半分にしなくてはならず、描画ライン数は倍になり、必然的に造形時間が長くなる。しかし、新方式では、通常のスキャン間隔で各層を描画したとしても、偶数層と奇数層で描画ライン位置がスキャン間隔の半分だけずれているので、結果として倍の分解能を実現できる。実際に、図 7.13 下を見ると、斜め線部分が滑らかに補間されていることが確認できる。もちろん造形データは、倍のデータ量を必要とする。偶数層と奇数層で描画位置がずれることにより高さ方向側面に凹凸が生じる問題が考えられるが、積層を繰り返すうちに透過光によってずれの部分も硬化するので、全く問題はない。また、本方式では、輪郭以外の内部は弱いレーザパワーで描画を行なうので、6.3.2 で問題となっていた余剰な露光による反射余剰成長を小さく抑えられる上、輪郭がしっかりと硬化した造形が行なえる利点がある。これについては、8.2 において検証する。

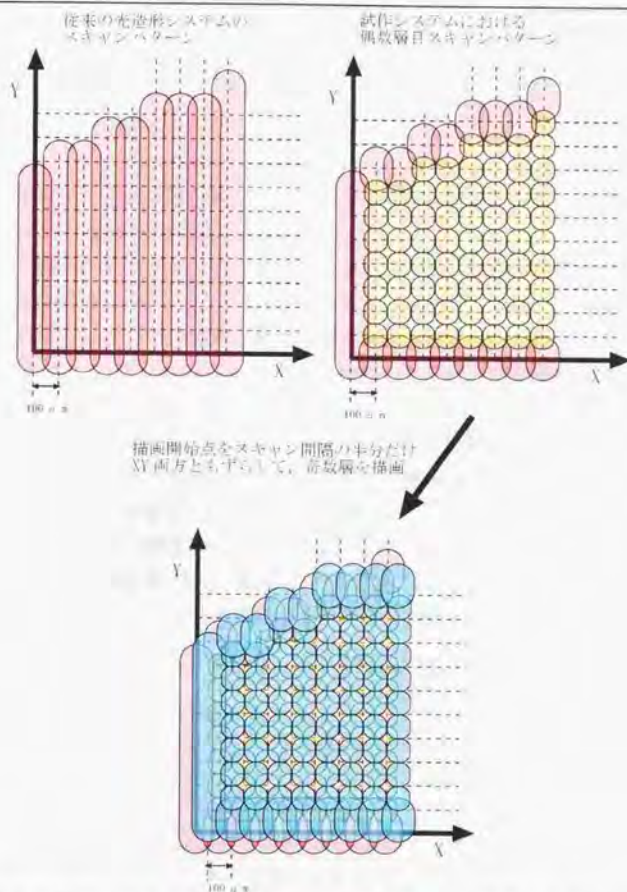


図7.13：従来光造形システムレーザスキャンパターンと試作システムレーザスキャンパターン

• Zレベリング

Zレベリングは、造形物高さ方向の精度を決める重要な要素である。7.1で述べたように、Zステージボールネジの駆動にはステッピングモータが使用されているので、モータのトルクを越えないようにステージ移動の加減速制御を行わなければならない。簡

単のために、図 7.14に示すようにステージ移動の加減速を等加速度運動と仮定する。Z ステージの移動は、制御用コンピュータから接続のデジタル IO ボードを介してパルスを送ることで行なう。設定では、1 パルス $2\mu\text{m}$ の移動である。そのパルス間隔によって、ステージの移動速度が変化する。Z ステージ移動において、モータがトルクを要するのは加減速領域であり、その領域において適切な加速が行なわれるようパルス間隔を求める計算式を求める。その式を制御プログラムに取り込むことで、モータのトルクを越えない Z ステージの加減速が可能となる。

図 7.14に、求めたい Z ステージ移動制御の速度・時間、距離・時間の関係のグラフを示す。図 7.14に示すように、Z ステージの移動は、等加速、等速、等減速パターンを描いて制御される。また、加速領域と減速領域の加速度の絶対値は等しいとする。移動距離が十分な場合は、上記のパターンで移動が制御できるが、移動距離が小さい場合、等加速、等減速しか現れない場合もあるので、その双方を含んだパルス間隔を求める制御式が必要となる。以下で、その制御式の求め方について説明する。

等速度領域では、パルス間隔は一定となるが、加速領域では、加速度に応じてパルス間隔が変化する。その間隔を、Z ステージドライバに出力するパルス数 x の関数 $w(x)$ とおく。今 Z ステージの移動量は 1 パルス $2\mu\text{m}$ なので、 x パルスでの移動量は $2x\mu\text{m}$ となる。Z ステージ移動制御では、各パルスを出力した後でこの関数分のウェイトを発生することで、図 7.14に示すような移動パターンを描かせることが可能である。図では、加減速は等加速度 a で行なわれるので、加速度領域での移動量は $\frac{1}{2}at^2$ で表される。今 x パルス出力するのに $t_x[\text{sec}]$ がかかるとすると、

$$2x = \frac{1}{2}at_x^2 \quad \therefore t_x = \sqrt{\frac{4x}{a}}$$

となり、

$$w(x) = t_x - t_{x-1} = \sqrt{\frac{4x}{a}} - \sqrt{\frac{4(x-1)}{a}} = \frac{2}{\sqrt{a}}(\sqrt{x} - \sqrt{x-1}) \quad \text{但し、} x \geq 1$$

とパルス間隔は求められる。

今、 $t_0[\text{sec}]$ で、最高速度 $v_{\text{max}}[\text{cm/sec}]$ に達するとすると、 $a = \frac{v_{\text{max}} \cdot 10^4}{t_0} [\mu\text{m}/\text{sec}^2]$ となる。

よって、 $x \geq 1$ で $w(x) = 0.02 \cdot \sqrt{\frac{t_0}{v_{\text{max}}}}(\sqrt{x} - \sqrt{x-1})$ となる。また、最高速度に達するまでに必要なパルス数を P_{max} とすると、

$$P_{\text{max}} = \frac{1}{2}at_0^2 / 2[\mu\text{m}/\text{pulse}] = \frac{v_{\text{max}} \cdot t_0 \cdot 10^4}{4} [\text{pulse}]$$

となる。

ここで、Z ステージの移動量を ℓ [μm] とすると、必要なパルス数は $\frac{\ell}{2}$ [pulse] である。

よって、 $\frac{\ell}{2} \geq 2P_{\max}$ であれば等速度領域が存在し、それ以外では等速度領域はなく、加減速領域のみとなる。よって、Z ステージ移動制御におけるパルス間隔 $w(x)$ は、以下のよう求められる。

$$\frac{\ell}{2} \geq 2P_{\max}, \quad 1 \leq x \leq P_{\max} \text{ のとき, } w(x) = 0.02 \sqrt{\frac{t_0}{v_{\max}}} (\sqrt{x} - \sqrt{x-1})$$

$$P_{\max} + 1 \leq x \leq \frac{\ell}{2} - P_{\max} \text{ のとき, } w(x) = 0.02 \sqrt{\frac{t_0}{v_{\max}}} (\sqrt{P_{\max}} - \sqrt{P_{\max}-1})$$

$$\frac{\ell}{2} - P_{\max} + 1 \leq x \leq \frac{\ell}{2} \text{ のとき, } w(x) = 0.02 \sqrt{\frac{t_0}{v_{\max}}} \left(\sqrt{\frac{\ell}{2} - x + 1} - \sqrt{\frac{\ell}{2} - x} \right)$$

$$\frac{\ell}{2} < 2P_{\max}, \quad 1 \leq x \leq \frac{\ell}{4} \text{ のとき, } w(x) = 0.02 \sqrt{\frac{t_0}{v_{\max}}} (\sqrt{x} - \sqrt{x-1})$$

$$\frac{\ell}{4} + 1 \leq x \leq \frac{\ell}{2} \text{ のとき, } w(x) = 0.02 \sqrt{\frac{t_0}{v_{\max}}} \left(\sqrt{\frac{\ell}{2} - x + 1} - \sqrt{\frac{\ell}{2} - x} \right)$$

現在の Z ステージ移動では、 $t_0=10[\text{sec}]$ 、 $v_{\max}=1 [\text{cm/sec}]$ に設定している。

Z ステージの移動制御でも XY スキャニング同様、バックラッシュを考慮する必要がある。Z ステージの移動では、正方向（造形テーブルが下方に動く向き）に動く場合を基準として、Z ステージを負方向に移動させ位置決めを行なう場合は、位置決め位置よりも $200 \mu\text{m}$ 程度大きめに負方向へ移動させ、再び $200 \mu\text{m}$ 正方向に戻すことで、バックラッシュをキャンセルし、正方向、下方どちらへ移動させる場合でも厳密な位置決めを行なっている。

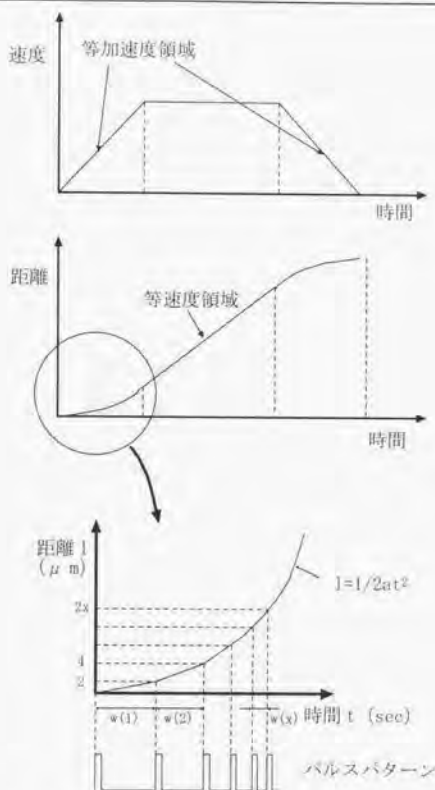


図7.14 : Zステージ移動制御の速度・時間, 距離・時間の関係

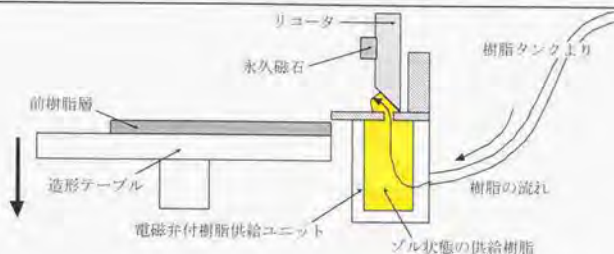
• 樹脂供給

樹脂供給制御は以下のように行なう。また、樹脂供給制御概略を図 7.15に示す。

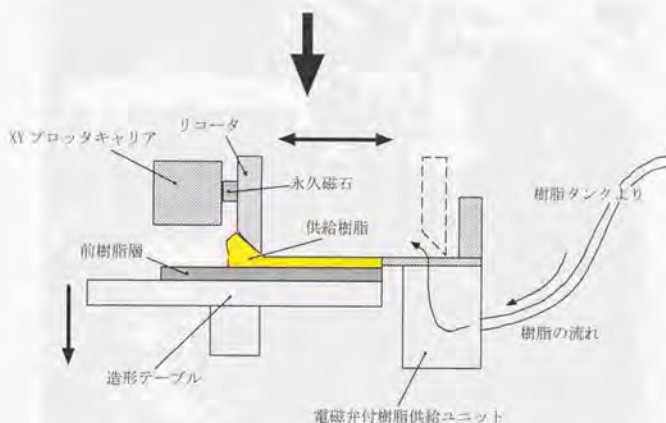
1. XYプロッタキャリアを原点へ戻す。
2. インクジェットヘッドと積層樹脂が接触しないように、造形テーブルを設定分 (2.5 mm) だけ下げる。
3. XYプロッタキャリアをコータ中央部永久磁石位置まで近づけ、キャリア側面と結合させる。

4. 樹脂供給設定時間だけ、樹脂供給機構部電磁弁を開き、樹脂を一層分だけコータブレード下面へ導く。
5. 造形テーブルを積層樹脂とコータブレード下面の隙間が積層厚になる位置まで戻す。
6. コータを結合したまま、キャリアをX軸負方向へ移動させ、樹脂を平面供給する。
7. 造形テーブルを設定分(2.5mm)だけ下げて、コータを定位置に戻すようにキャリアをX軸正方向へ移動させる。
8. キャリアをY軸負方向へ移動させ、キャリアとコータ前面永久磁石とを分離する。
9. キャリアをXY原点位置まで戻す。
10. 造形テーブルを設定分(2.5mm)だけ上げる。

以上のように、Zステージ、樹脂供給機構、XYプロッタを制御することで、樹脂を一定量精度良く樹脂面に供給することが可能である。この方法では、単なる永久磁石とそれと結合するXYプロッタキャリアの移動だけで、コータの着脱を行なっており、電磁石などを使用しなくて良いというメリットがある。



1. エレベータを1層分下げて、樹脂供給ユニットの電磁弁を開き、コートブレードの前に樹脂を押し出す。



2. XYプロッタキャリアをコートに近づけ永久磁石と連結し、そのままコートをX軸負方向へ移動させる。その後で造形テーブルを数ミリ下げ、コートを定位まで戻し、XYプロッタキャリアをY軸負方向へ移動させることで、コートを分離し、造形テーブルを戻す。

図7.15：樹脂供給制御概略

・ 造形プロセス制御

試作システムを用いた造形プロセス制御では、上記XYスキニング、Zレベリング、樹脂供給の各制御を組み合わせ、以下のように造形を行なう。

- (a) 造形テーブルを一層分下げる (Zレベリング制御)。

- (b) 樹脂を一層分精度良く供給する（樹脂供給制御）。
 - (c) 描画層のスライスデータを読み込み，レーザービームとインクジェットヘッドによる描画を行なう（XY スキャニング制御）。
- 以上(a)～(c)を総積層数分繰り返す。

図 7.16に，実際にレーザービームおよびインクジェットヘッドによる描画時の写真を示す。写真のように，造形過程においてマスクは直接樹脂面に描画される。



図7.16 : XY スキャニング写真

第8章 試作システムによるゾルゲル変換樹脂と紫外光遮断層を用いた冷却固化式光造形原理の検証

冷却固化式光造形手法では、従来の光造形法とは異なる特性を持つ光硬化性樹脂を使用するため、樹脂供給方法も独特であり、また、樹脂供給時の現象も従来とは異なる。さらに、冷却固化式光造形法に紫外光を遮断するマスクを導入することで、従来の光造形法では造形困難であった高さ方向の微小なクリアランスも高精度に造形可能である。そこで、本章では、前章で設計・製作を行なった紫外光遮断層を用いた冷却固化式光造形システムを用いて、本造形原理の検証、および本造形手法の有効性、有用性の検証を行なう。

8.1 樹脂供給過程

試作システムによる樹脂の供給過程は図 8.1 のようになる。まず、供給される光硬化性樹脂は、ゾル状態まで加温され樹脂タンクに蓄えられている。樹脂タンクと電磁弁付供給ユニットの間は、加温された供給パイプで接続されており、樹脂供給時には、まずエレベータを1層分下げて、コートブレード下面と前層との間がちょうど1層分になるように制御する。次に、供給供給ユニットの電磁弁を開き、樹脂タンクより流れてくるゾル状態の樹脂が、樹脂供給ユニットの上面に流れ込む。それをコートによって露光面へと送らそうに供給する。その後、供給された樹脂は、即座に空冷されゲル状態に変化する。

従来の光造形システムでは、液体の光硬化性樹脂を用いて造形を行なうので、前層に硬化物がある部分では液体の表面張力と固体（硬化物）の吸着力による影響で、正確な積層厚が得られない問題があった[19]。一方、冷却固化式光造形法では、前層までの層は冷却固化状態にあるので、そのような影響はなく、均一な膜厚が得られる。しかし、冷

却固化式光造形法の原理上、冷却して固化状態にある樹脂層の上に、新たに加温して溶解した状態の樹脂を供給しなくてはならないので、下層が供給層により再び溶解され、硬化物の移動、または変形の問題が考えられる。

そこで、本節では樹脂供給時の供給面温度測定、また、積層を繰り返した際の樹脂層内温度測定、および樹脂積層最小厚について試作システムを用いて実験を行ない、冷却固化式光造形法における樹脂供給に関する検証を行なう。

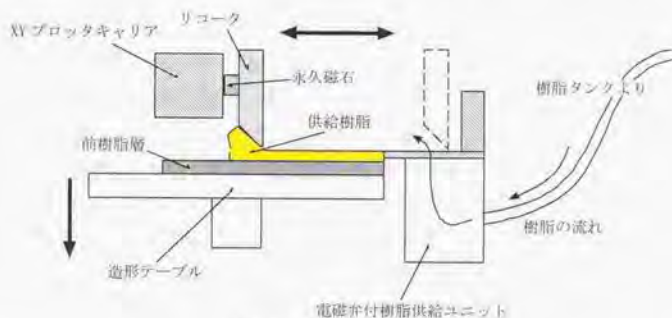


図8.1：樹脂供給概略図

8.1.1 樹脂供給時の樹脂面温度測定

樹脂供給時の供給面（前層上面）の温度がどのように変化するか、実際に熱電対を用いて温度測定実験を行なった。表 8.1に実験の条件を、図 8.2に実験概略を示す。

表 8.1に示すように、装置各部分の温度設定を行なった。供給パイプの温度が 77℃と低い値になっているのは、設定値よりも実際のパイプ内部の温度は高くなるからであり、実際の供給パイプ内部の温度は 90℃程度になっている。樹脂供給前の供給ユニット上面での樹脂温度は、供給ユニットの設定温度 93℃になっている。図 8.2に示す熱電対には先端部が 200 μ m 球の K 型微小熱電対を使用し、先端部上面が供給面表面と同じ高さになるように樹脂層に 8 箇所埋め込み配置する。熱電対からの信号は、付録図 13に示すアンプ回路を通して、コンピュータの AD ボードから直接電圧値を取り込む。コンピュータでは、樹脂供給を行なう制御を行ない、同時に 8 つの熱電対からの信号をリアルタイムに計測し、データを保存する。

実験では、積層厚を 50 μ m、100 μ m それぞれの場合に、リコート速度を 10cm/sec、1cm/sec と変化させて、計 4 回の測定を行なった。測定では、コート移動開始時から供給面の温度を 20msec 毎に測定し、500 回、10sec 分データを取り込んだ。また、通常の造

形では、樹脂供給時にファンを回して強制的に冷却を行なっているが、この実験では供給時はファンを使用し、供給後の冷却にはファンを使用せずに自然冷却とした。それぞれの温度測定結果を、図 8.3～図 8.6 に示す。

図 8.3～図 8.6 の測定結果から、初期樹脂面温度に多少差があるものの、供給面での最高温度は 57℃であることが分かる。これは、UVI214-15 のゾル化点温度 89℃よりも低く、樹脂供給の際に下層が溶融される心配がないことを示している。図 8.3～図 8.6 において、ある特定の熱電対位置での温度が高めに記録されているのは、樹脂面に熱電対を配置する際に、熱電対先端部が多少樹脂面より高い位置に配置されていたためである。

また、グラフから、コータの移動距離に伴い、供給面温度が指数的に下がっていることが分かる。実験から、樹脂供給の際に、樹脂はブレードに押されて図 8.7 のような状態にあり、樹脂表面が巻き込まれるように供給面に塗られていくことが分かっている。よって、コータの移動に伴い、ブレード面の樹脂量は減少していき、それだけ表面は冷却されやすく薄いゲル膜になっていることが考えられる。樹脂液の熱容量は大きいので、表面だけが冷却されゲル状態であり、内部はゾル状態のままである。この薄いゲル膜がそのまま供給面に巻き込まれていき、図 8.3～図 8.6 のような温度分布になると考えられる。このことは、積層厚が違っても同じリコート速度であれば、供給時の供給面温度がほとんど変化しないことから裏付けされる。つまり、積層厚に関係なく、樹脂が供給されるとき条件が同じであれば、同様の温度分布になることを意味している。

以上の考察から、この方式で塗布できる樹脂層の最小厚は、樹脂供給時のゲル膜の厚さに左右されることが分かる。樹脂供給時に生成されるゲル膜よりも薄い膜厚を供給しようとするれば、供給面に無理な力がかかり、正確な積層厚は得られない。例えば、環境温度が低く、強制的に冷却を行えば、当然ゲル膜厚も厚くなり、それが積層できる最小の膜厚となる。このゲル膜厚の直接測定、もしくは樹脂液の温度伝導率、比熱を直接測定し、ゲル膜厚を計算することは困難なので、8.1.3 で実際にどこまで薄く樹脂を供給できるか、実際に測定実験を行ない検証することにする。

供給後の樹脂は、環境温度との差によって、その冷め方が異なり、徐々に温度が下がっていきやがて一定に落ち着く。ファンを使わない自然冷却でも 10sec で常温近くまで温度が下がることが分かる。実際の造形制御では、樹脂供給後に自然冷却時間分をおいてから、次の描画を行なうよう制御している。

表8.1：樹脂供給時の樹脂面温度測定条件

環境温度	25.9℃
コータブレード	104℃
樹脂タンク内	110℃
供給ユニット	93℃
供給パイプ	77℃

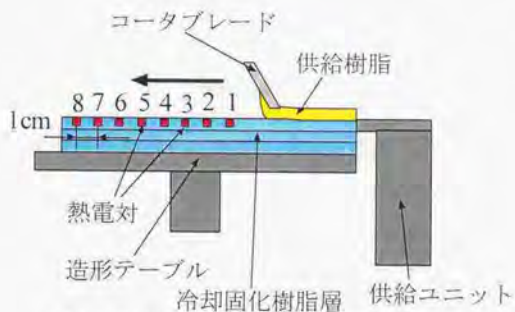


図8.2：樹脂供給時の供給面温度測定概略

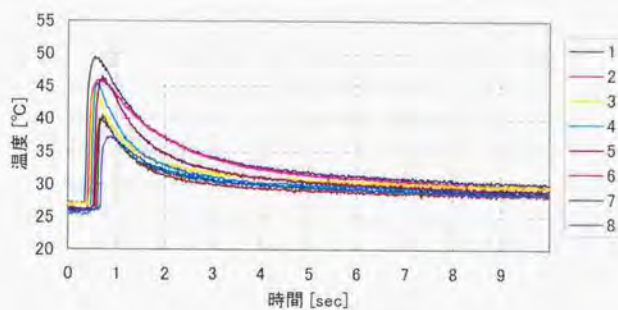


図8.3：樹脂供給面温度 vs 時間 (100 μ m 積層, 10cm/sec)

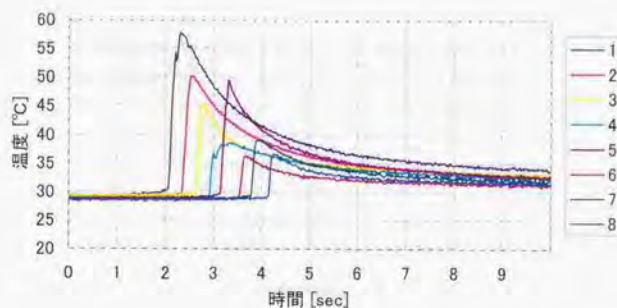


図8.4：樹脂供給面温度 vs 時間 (100 μ m 積層, 1cm/sec)

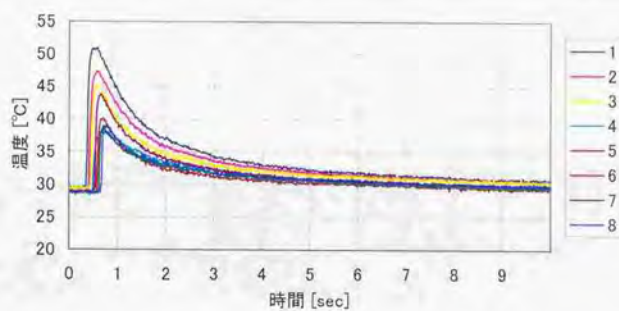


図8.5 : 樹脂供給面温度 vs 時間 ($50\mu\text{m}$ 積層, 10cm/sec)

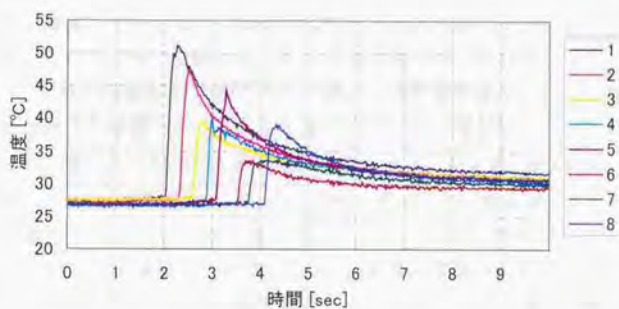


図8.6 : 樹脂供給面温度 vs 時間 ($50\mu\text{m}$ 積層, 1cm/sec)

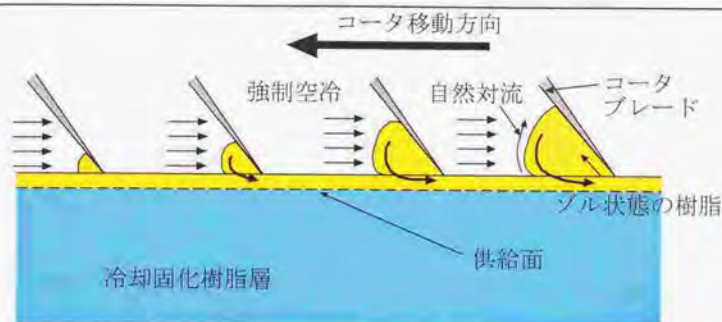


図8.7：樹脂供給時の供給樹脂の様子

8.1.2 樹脂供給時の積層樹脂層内温度測定

次に、樹脂を積層していく際に、積層樹脂層内における層表面の温度がどのように変化するのか測定を行なった。測定では、表 8.1 の温度設定で、リコート速度 10cm/sec、積層厚 100 μ m の条件で積層を 15 回繰り返した際の、積層樹脂層内における層表面に固定配置された熱電対 2 の位置での温度変化を測定した。この測定では、樹脂を供給する際に、供給面以下の層にどの程度熱が伝わるかを測定する。図 8.8 に測定結果を示す。

図 8.8 で、右 1～15 が積層数および、それぞれのグラフ中の色を表している。8 層目のデータは他と違い、大きめに出力されているので、エラーとして考慮しないことにする。図 8.8 から分かるように、積層数が増すにつれて、急激に樹脂層内部への熱の移動は小さくなるのが分かる。また、15 層積層することで、それ以下への層への熱の影響は無視できる範囲になることが分かる。この測定結果は、樹脂供給時における数秒間のデータをプロットしたものであり、実際、各層のレーザ描画を行なう際には、積層された樹脂層はすべて常温まで冷却された状態にある。

次に、積層樹脂層内のピーク温度がどのように変化していくか、図 8.8 から各積層回数時のピーク温度だけを抽出した。その結果が、図 8.9 である。図 8.9 から、1～3 層積層する段階で、指数的に伝熱の影響が小さくなっていることが分かる。つまり、樹脂を供給・積層する毎に、樹脂表面温度は常温まで戻るので、積層樹脂層内において、1 層目のピーク温度以上に樹脂層内温度が上昇することはないと結論できる。

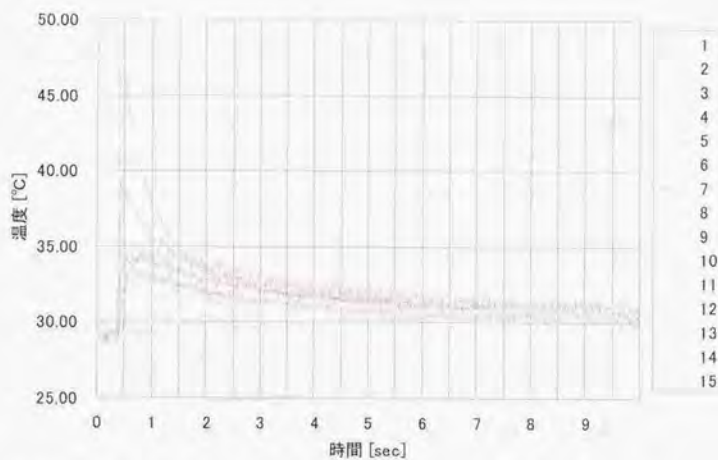


図8.8：樹脂供給時の積層樹脂層内温度測定結果（リコート速度：10cm/sec，積層厚：100 μm ）

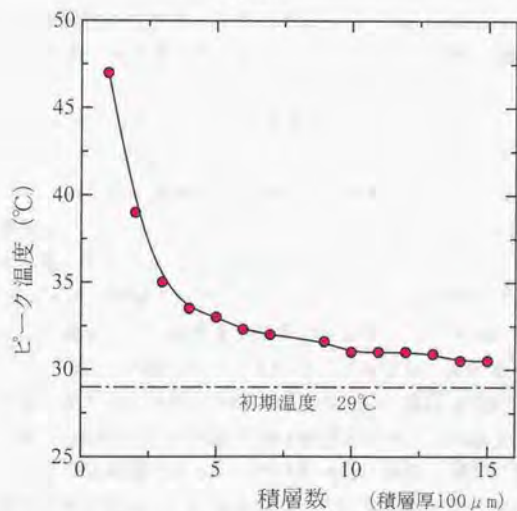


図8.9：樹脂供給時ピーク温度と積層数との関係

8.1.3 樹脂積層最小厚の測定

8.1.1で、積層できる樹脂層の最小厚は、樹脂供給時のコータブレードによって押される溶融状態樹脂表面のゲル膜厚によって決まると予測した。しかし、実際に実験によって樹脂供給時のゲル膜厚を測定するのは困難であるため、この測定実験では、樹脂の積層厚を $50\mu\text{m}$ 、 $30\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ と変化させ、積層・硬化を繰り返し、その後で実際にその積層厚を測定することで、試作システムにより積層可能な樹脂層の最小厚を求める。表 8.2 に、測定実験のパラメータを示す。

測定実験では、図 8.10 に示すようなステップ状のサンプルを実際に積層厚を変化させて造形する。図 8.10 のステップ状サンプルでは、各ステップの間隔が積層厚となっており、幅が $5\text{mm} \times 30\text{mm}$ 、全部で 10 段あり、各段の幅は 3mm となっている。また、10 段 10 層の下にさらに強度を増すために 5 層余計に設けてある。

測定は、各ステップの造形物下面からの高さを分解能 $1\mu\text{m}$ のマイクロメータで複数点測定しその平均を求め、各ステップ間の高さの差を実際得られる積層厚とする。造形物下面に硬化物余剰成長があると、各ステップの高さが正確に測定できないので、実験ではマスクを造形物下面に描画することで、硬化物余剰成長を完全に抑え、下面から各ステップ表面までの高さを正確に測定している。

図 8.11～図 8.13 に測定結果を示す。グラフでは、1 段から 10 段までのステップ高さ測定値と、その差である測定積層厚が示されている。また、理想的に積層された場合との誤差も同じグラフ内に示している。

図 8.11 の $50\mu\text{m}$ 積層厚、図 8.12 の $30\mu\text{m}$ 積層厚のものでは、それぞれ測定積層厚平均が、 $50.3\mu\text{m}$ 、 $29.6\mu\text{m}$ と設計通りに積層されていることが分かる。一方、図 8.13 の $20\mu\text{m}$ 積層厚のものは、理想的に積層された場合との誤差が大きくなっていることが確認できる。測定積層厚平均も $26.8\mu\text{m}$ で、 $20\mu\text{m}$ を越えて積層されており。また、各々のステップ高さを積層数で割った値は、平均すると $27.85\mu\text{m}$ となっている。つまり、積層する段階で既に $28\mu\text{m}$ 近く積層されていることが分かる。造形テーブルが、毎層 $20\mu\text{m}$ で正確に移動すると仮定すると、積層厚が毎層 $28\mu\text{m}$ ということは、コータが樹脂面に圧力をかけて押し下げながら供給を行なっていることになる。このことは、 $20\mu\text{m}$ 積層の場合、樹脂供給後の樹脂面が反射の加減で分かるぐらい波打っていることから確認できる。つまり、樹脂供給時のゲル膜厚が $28\mu\text{m}$ 近くあり、これ以上の薄い積層厚を得ることは、本システムでは困難であることが分かった。また、さらに薄い積層厚を得るためには、ゲル膜厚が薄くなるように制御しなくてはならないが、そのためにはコータブレードに押される供給樹脂表面温度を上げなくてはならず、樹脂表面だけをスポット的に加温するようなシステムが新たに必要となり、装置が大がかりになる問題が生じる。

また、スピンコートのような手法で樹脂を供給する場合も同様に、供給面に滴下された溶融樹脂表面に薄いゲル膜が生じ、それが供給面に巻き込まれるように延びていくため、同様の結果になることが予想される。

従来の光造形システムでは、液体樹脂を使用していたために、その表面張力および硬化物との固着力により、積層厚が薄くなると正確な積層が行なえない問題があった。現段階では、特定の硬化形状においてのみ積層厚が最高で $50\mu\text{m}$ 可能である。しかし、その厚さも一定ではなく、ばらつきがある。それと比較して本システムでは、どのような硬化形状であっても、 $30\mu\text{m}$ 厚までは均一膜厚で、精度良く積層できることが確認された。

表8.2：積層最小厚測定実験パラメータ

温度設定	コート	115°C
	樹脂タンク	100°C
	供給タンク	95°C
	供給パイプ	90°C
レーザー設定	レーザーパワー	9.6mW
	スキャン速度	40cm/sec
	スキャン間隔	$100\mu\text{m}$

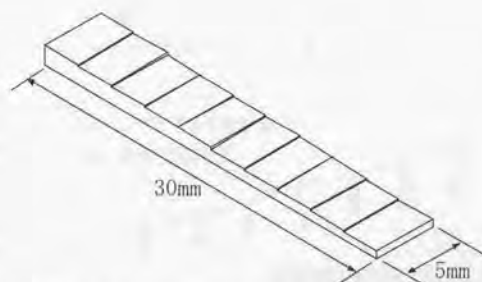
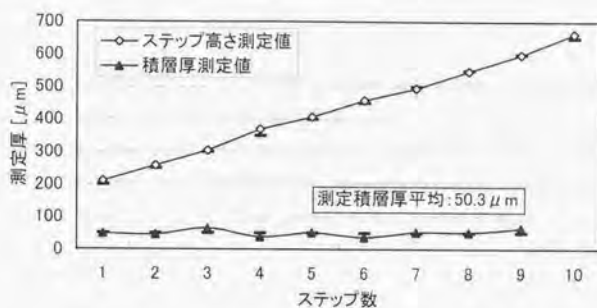
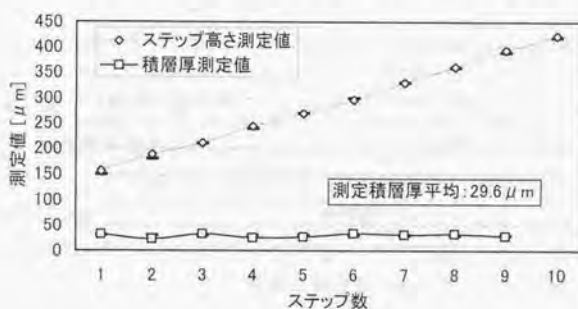
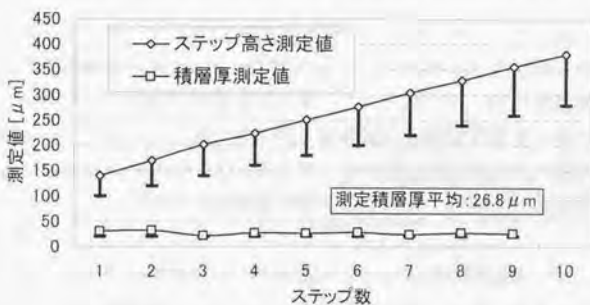


図8.10：樹脂積層最小厚測定用ステップ状サンプル

図8.11 : 50 μm 積層のステップ高さと実際の積層厚図8.12 : 30 μm 積層のステップ高さと実際の積層厚図8.13 : 20 μm 積層のステップ高さと実際の積層厚

8.2 反射余剰成長問題の検証

本節では、6.3.2で問題となったマスク面での反射による反射余剰成長について、実際に造形実験を行ない検証する。表 8.3に造形実験のパラメータを示す。

造形実験では、図 8.14に示すような直方体サンプルを造形した。このサンプルでは、下面にのみマスクを描画し、表 8.3の条件で、30層 3mm 分の積層・硬化を行なった。表 8.3の条件では、6.3.2のシミュレーション結果⑥よりも平均照射量が大きく、積層数も多いので、必ず側面に反射余剰成長が生じるはずである。図 8.15が実際に得られた造形物の写真である。得られた造形物の高さは、3.005mm と紫外光遮断マスクによって精度良く造形されているが、造形物側面には反射余剰成長が生じていることが確認できる。造形直後のサンプルでは、反射余剰成長がXY方向に2mm近くあったが、反射余剰成長部分の硬化は極めて脆いので、洗浄の際に流れてしまい、写真のように小さくなってしまった。しかし、残った部分の形を見るとシミュレーションで得られた形状をしていることが分かる。

次に、前章で述べた新レーザスキャニング方式で造形した場合のサンプルと、反射余剰成長サンプルの比較を図 8.16にしめす。また、その際の造形パラメータを表 8.4に示す。このレーザスキャニング方式では、輪郭内部ではレーザビームをデューティ比 50%でパルス状に照射しているので、トータルでの照射量は少なくなる。よって、図 8.16のように洗浄後には反射余剰成長が全く生じていないことが確認できる。表 8.5に、新レーザスキャニング方式によるサンプルと、反射余剰成長のあるサンプルの測定寸法値を示す。表 8.5から分かるように、新レーザスキャニング方式のものは、設計寸法通り造形されているが、反射余剰成長のあるサンプルでは、XY方向で約1mm、1.35mmの余剰を示している。

図 8.17に従来のレーザスキャニング方式と新レーザスキャニング方式を用いて、感熱紙に描画した際の顕微鏡写真を示す。写真のように、従来の方式では、同一層内において、常に一定のパワーで描画を行っており、この方法では、反射余剰成長が生じやすい。一方、新レーザスキャニング方式では、輪郭部は照射量が大きいので色が濃く、内部はパルス状のスキャンなので、トータルとしての照射量は小さく、色が薄い様子が確認できる。このようにレーザビーム描画を行なうことで、反射余剰成長を小さく抑えることが可能である。

以上の反射余剰成長検証実験から、照射量が大きい場合は造形物側面にマスク面からの反射光により、反射余剰成長が生じることが分かった。一方、新レーザスキャニング方式による表 8.1の造形パラメータでは、反射余剰成長が小さく抑えられ、XY面においても精度良く造形できることが確認された。

表8.3：反射余剰成長造形実験パラメータ

レーザパワー	11.4mW
スキャン速度	5cm/sec
スキャン間隔	100 μ m
描画デューティ比	100%
平均照射量	228mJ/cm ²
積層厚	100 μ m
総層数	30層, 3mm

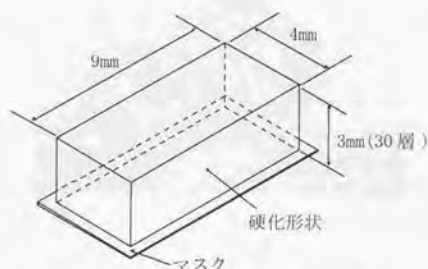


図8.14：反射余剰成長検証サンプル

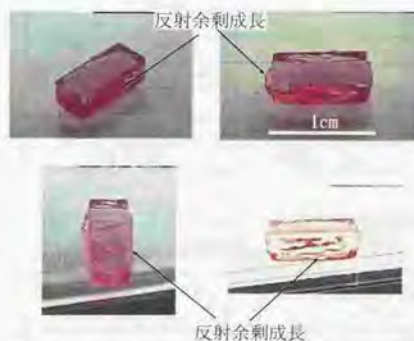


図8.15：表 8.3の条件により得られた造形物

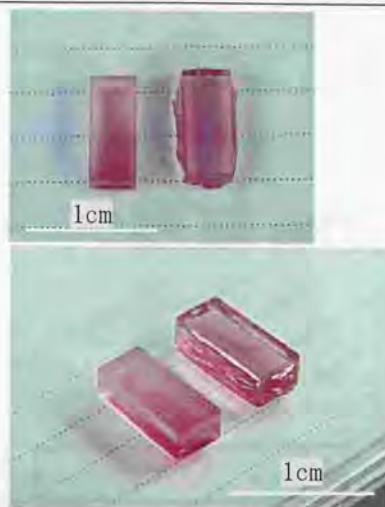


図8.16：新レーザスキャンニング方式で得られたサンプル（左）と反射余剰成長サンプル（右）の比較

表8.4：反射余剰の生じないレーザスキャンニングパラメータ

レーザパワー	9.6mW
ビーム直径	140 μ m
スキャン速度	40cm/sec
スキャン間隔	100 μ m
描画デューティ比	50%
平均照射量	24mJ/cm ²
積層厚	100 μ m
総層数	30層, 3mm

表8.5：新レーザスキャンニング方式によるサンプルと反射余剰成長のあるサンプルの寸法測定値

寸法値	新レーザスキャンニング方式によるサンプル	反射余剰成長のあるサンプル
幅X	9.031mm	1.040mm (MAX)
幅Y	3.988mm	5.350mm (MAX)
高さ	3.002mm	3.005mm

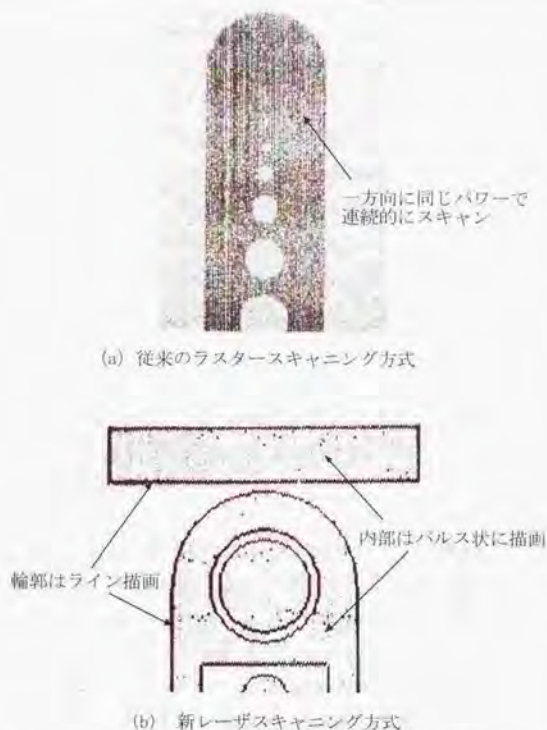


図8.17：従来方式(a)と新レーザースキャン方式(b)による感熱紙描画拡大写真

8.3 反射余剰成長のXY面分解能への影響

8.2で、反射余剰成長が6.3.2のシミュレーションで予測した通り、実際に生じることを確認した。本節では、図8.18のようなサンプルを造形することで、8.2の反射余剰成長問題とも関連して、反射余剰成長のXY面分解能への影響について検証するために、表8.4に示す造形パラメータで造形実験を行なった。

図8.18に示すサンプルでは、 $\phi 0.1 \sim \phi 2.0$ までの穴が板に垂直にあいており、造形実験では、サンプルの厚さを1.0mm、2.0mm、2種類のものを造形し、反射余剰成長の影響を受けた場合、どの穴径まで造形できるか確認する。また、マスクは最下層下に一回

だけ描画した。

図 8.19, 図 8.20, 図 8.21 が実際に得られたサンプルの写真である。図 8.19 の左の写真が、厚さ 1mm で造形したもので、右が厚さ 2mm で造形したものである。図 8.19 右の写真において、左のサンプルが新レーザスキャニング方式のもので、右が従来方式のものである。厚さ 1mm のものは、 $\phi 0.2$ の穴まで造形されたが、厚さ 2mm のものでは、 $\phi 0.5$ の穴までしか造形されなかった。 $\phi 0.3$, $\phi 0.2$ は、図 8.20 の拡大写真から分かるように、上下面において穴はあるものの、中央部分の樹脂を除くことができなかった。この理由としては、以下の 3 点が考えられる。

1. 1mm 厚のサンプルでは反射余剰成長が小さかったが、2mm 厚のサンプルでは反射余剰成長による影響が大きくなったために、中央部分まで完全硬化し、樹脂を除くことができなかった。
2. $\phi 0.3$, $\phi 0.2$, $\phi 0.1$ 程度の小さな穴径では、2mm 厚の中央部分までは溶剤が侵入しにくく、通常除ける範囲のものでも除くことができなかった。
3. 造形サンプル周辺部では反りが多少生じており、それによって上下間の穴の位置がずれたために、樹脂が除けなかった。

また、図 8.21 に厚さ 2mm で造形した新レーザスキャニング方式によるサンプルと、従来方式の比較写真を示す。写真から、新レーザスキャニング方式の方が反りが小さいことが確認できる。つまり、新レーザスキャニング方式を用いることで、樹脂硬化時の内部応力を緩和し、反り変形を小さく抑えることが可能である。

以上のように、2mm 厚のサンプルでは、反射余剰成長の影響により $\phi 0.5$ の穴までしか再現されなかった。そこで、反射余剰成長の影響で、積層厚が増加するにつれてどのように穴径が変化していくのか確かめるために、図 8.22 のようなステップ状のサンプルを造形した。このサンプルでは、各段に $\phi 1.0$, $\phi 0.5$, $\phi 0.3$ の貫通穴があいており、造形後にこの穴径を測定することで、反射余剰成長の穴径に対する影響を確認することができる。造形物の強度を増すために、まずベースとして積層厚 $100\mu\text{m}$ で 11 層分 (1.1mm) 積層・硬化させ、その後 9 段 (9 層) 分積層・硬化を行なう。造形実験では、最下層にマスクがある場合と、ない場合 2 種類を造形した。

図 8.23 に、マスクを描画した場合のサンプル拡大写真を示す。積層数の増加に伴い、 $\phi 0.3$ の穴径が徐々に小さくなっていく様子が確認できる。また、表 8.6 に各穴径の測定結果を、図 8.24 にそのグラフを示す。

図 8.24 のグラフから分かるように、下面にマスクを描画したものでは、 $\phi 1.0$, $\phi 0.5$, $\phi 0.3$ すべての穴が、積層数の増加に伴い、穴径が徐々に小さくなっているのが分かる。特に $\phi 0.3$ のものが反射余剰成長の影響が大きく、積層厚 1.9mm で穴が閉じてしまっ

いる。この場合も、上面は穴が開いているが、中央部下域では反射余剰成長による余剰硬化の影響により樹脂が完全に硬化してしまった。また、マスクがない場合と比べて、 $\phi 1.0$ 、 $\phi 0.5$ の穴も同様に、積層数の増加に伴い、穴径が小さくなっており、反射余剰成長の影響を受けていることが分かる。

しかし、積層厚が厚くなればなるほど反射余剰成長の影響が大きくなるわけではない。マスク面で反射した光は、第5章で考察したように、樹脂内を透過する際に徐々に減衰していくので、その限界が必ず存在する。つまり、ある厚さ以上では、穴径は変化しなくなる。表 8.6 から、 $\phi 1.0$ 、 $\phi 0.5$ の穴では、15 層以上では穴径がそれぞれ、0.95mm、0.47mm 近くで上下しており、穴径が変化しなくなっている。つまり、これが反射余剰成長による $\phi 1.0$ 、 $\phi 0.5$ の穴径への影響の限界であり、これ以上積層数を増加させた場合でも、 $\phi 1.0$ と $\phi 0.5$ の貫通穴はそのまま変化しないことが予想される。 $\phi 0.3$ の場合は、反射余剰成長の影響が限界に達する前に、穴中央部下域が閉じてしまうので、反射率の高い現在のマスク材では、 $\phi 0.3$ の穴を造形することは困難であることが分かった。

以上の造形実験から、現在使用しているマスク材の場合、表 8.4 の造形パラメータで、XY 面において $\phi 0.5$ の垂直貫通穴までは、積層数が増しても造形可能であることが分かった。XY プロッタ機構による XY 面描画分解能は、それぞれ $10\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$ であり、本来これらの分解能まで造形できるはずであるが、今回の実験では、レーザービームによるラインの硬化幅が $110\mu\text{m}$ 程度あり、スキャン間隔も $100\mu\text{m}$ であるため、それ以下の分解能は原理的に得られない。

そこで、以下に、本手法を用いて XY 面における高分解能を得るための方法をまとめる。

1. レーザのビーム径を絞り、さらにスキャン間隔も小さく設定する。

その際、当然平均照射量が増大するので、レーザーパワー、スキャン速度の再設定が必要である。

2. 反射余剰成長が生じる部分周辺において、レーザーパワーを小さく設定し、描画を行なう。
3. マスク材として、超微粒子酸化チタンを採用し、反射余剰成長を積極的に抑える。

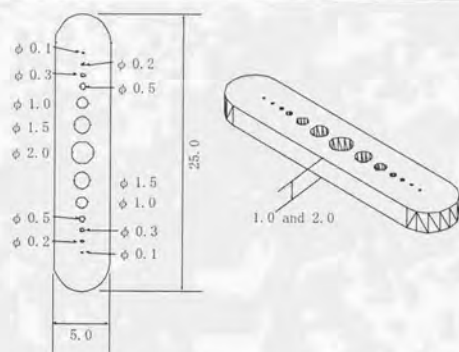


図8.18 : XY 面分解能テストサンプル (単位 : mm)

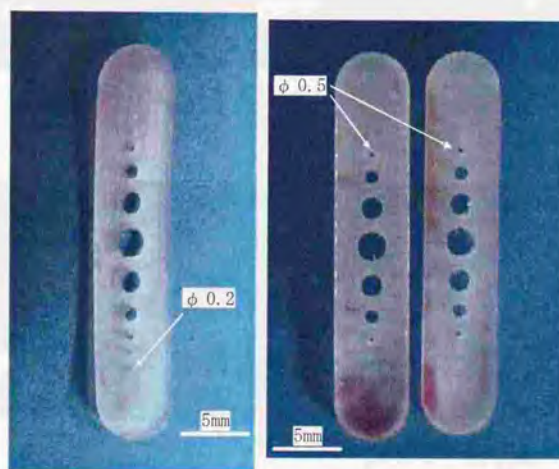


図8.19 : 造形サンプル (左 1mm 厚, 右 2mm 厚)

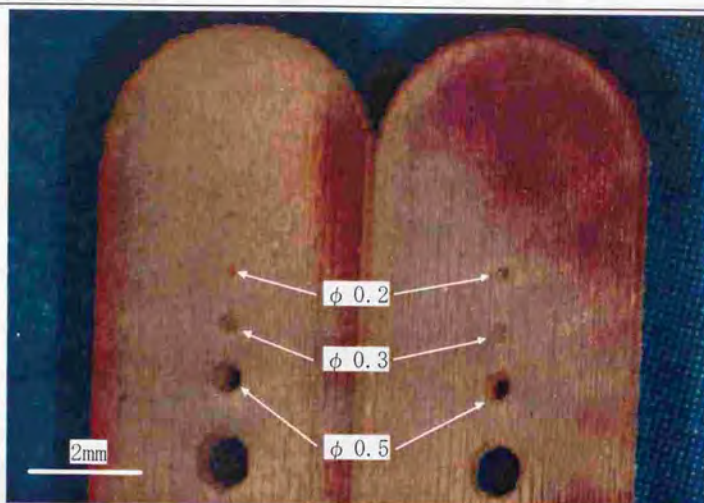


図8.20：造形サンプル拡大写真（厚さ 2mm，左：従来方式，右：新レーザスキャニング方式）



図8.21：造形サンプル（厚さ 2mm，左：新レーザスキャニング方式，右：従来方式）

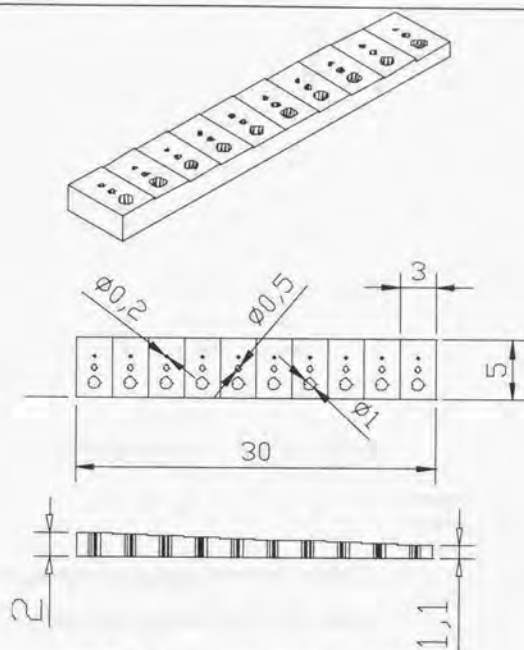


図8.22：ステップ状サンプル（単位：mm）

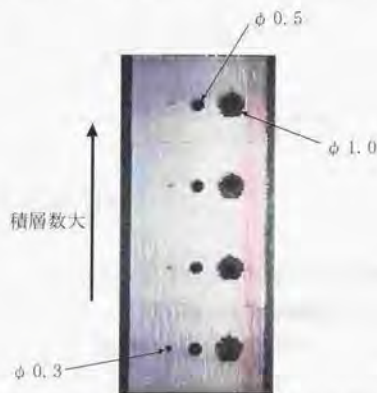


図8.23：造形サンプル拡大写真（マスク有り）

表8.6 : 穴径測定結果

積層数	マスク無し			マスク有り		
	$\phi 1$	$\phi 0.5$	$\phi 0.3$	$\phi 1$	$\phi 0.5$	$\phi 0.3$
11	0.997	0.501	0.314	1.003	0.486	0.296
12	0.986	0.488	0.31	0.996	0.495	0.297
13	0.991	0.495	0.301	1.004	0.495	0.284
14	0.985	0.487	0.319	0.983	0.486	0.257
15	1.005	0.482	0.312	0.954	0.469	0.19
16	0.98	0.485	0.322	0.955	0.473	0.165
17	1.003	0.505	0.318	0.959	0.464	0.113
18	1.001	0.489	0.326	0.943	0.474	0.064
19	1.02	0.505	0.312	0.958	0.474	0
20	0.989	0.488	0.324	0.954	0.467	0

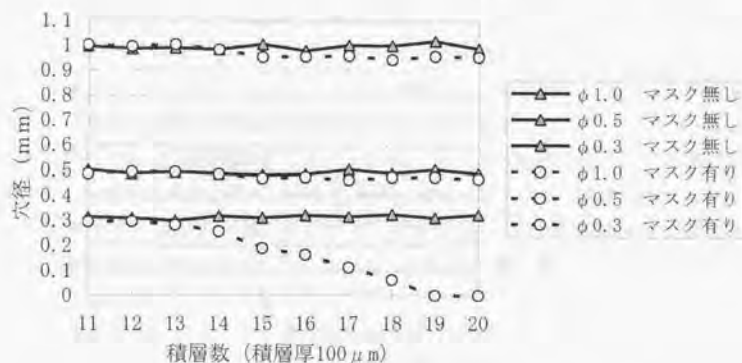


図8.24 : 積層数と穴径の関係

8.4 造形実験による有効性の検証

以上の検証実験で得られた知見をもとに造形パラメータを設定し、試作システムを用いて、複数要素からなるクリアランスの小さな構造を精度良く造形可能かどうか造形実験を行なった。以下の各サンプルは、表 8.4 の造形パラメータで造形した。

・ユニットモデル

図 8.25 に 3 次元 CAD で設計したサンプルイメージを、図 8.26 にそのカットモデルを示す。このモデルは、図 8.26 に示すように①、②、③の 3 つの異なる要素から構成され、①、②間の Y 方向クリアランスは $100\mu\text{m}$ 、①、②と③との高さ方向のクリアランスはそれぞれ $100\mu\text{m}$ 、また軸・軸受け間のクリアランスは $200\mu\text{m}$ となっている。また、このモデルでは、③の部分に板バネ機構を有しており、造形後に③に対して①、②がそれぞれ 90° 毎回転すると板バネ機構についている出っ張りが①、②の凹みに引っかかり固定される仕組みになっている。

実際に得られた造形直後の写真を図 8.27 に示す。この状態から、ある程度未硬化樹脂を除去した後で、トルエンに浸しながら超音波洗浄することによって、未硬化樹脂を細部まで除去し、その後で後露光することで目的造形物を得ることができる。得られた造形物の写真を図 8.28 に示す。写真で、赤色の部分はマスク面の跡である。長時間洗浄することでマスク材を完全に除くことが可能だが、長時間洗浄すると造形物本体部分も溶剤によって浸食されてしまうために、本造形実験では未硬化樹脂が除去された時点で洗浄を終了した。図 8.29 に示す各寸法測定結果から分かるように、クリアランス部分、全体寸法とも設計寸法との誤差数十ミクロンと精度よく造形されており、造形後に自由に動かすことができた。また、板バネ機構も正確に造形されており、洗浄直後の段階では、①、②の要素が 90° 回転する毎に固定することができた。しかし、何度も可動させているうちに、固定棒先端部が摩耗してしまった。これは、樹脂硬化時の強度不足によるもので、さらなる樹脂の改良が必要である。

このような微小クリアランスを有するアセンブリモデルは、従来の光造形システムでは造形不可能であり、本造形法の有効性、有用性を示している。



図8.25 : ユニットモデルイメージ

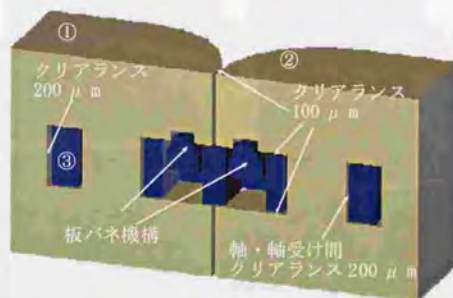


図8.26 : ユニットモデルカットモデル

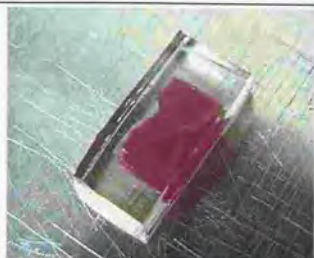


図8.27：造形直後の造形物

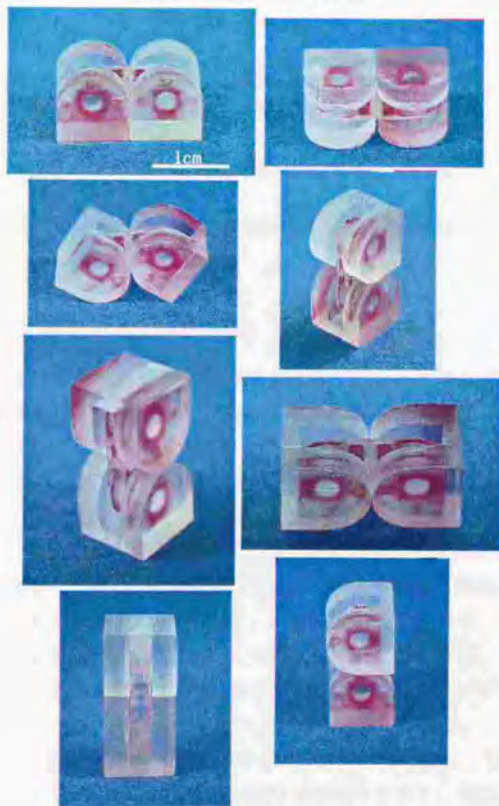


図8.28：ユニットモデル写真

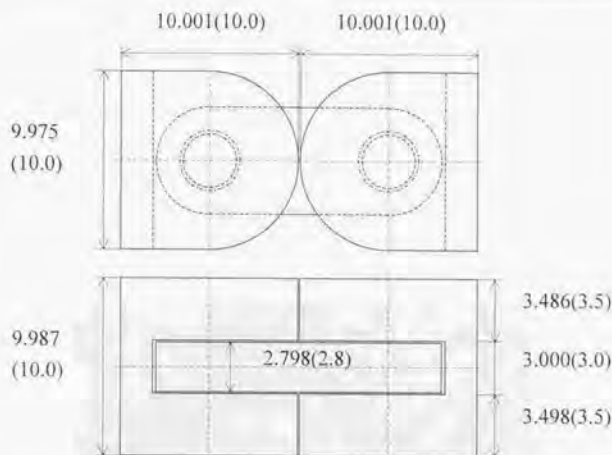


図8.29：ユニットモデル寸法測定値（括弧内が設計寸法）

・ギアボックスモデル

このモデルは、4つの異なる要素から構成されるギアボックスモデルである。このモデルのイメージを図8.30に示す。また、図8.31にギアボックスの設計仕様を示す。

図8.31に示すように、④のギアが入力軸（歯数8、直径4mm）、③のギアが出力軸（歯数12、直径6mm）になっており、同軸で減速比が4：9となるように設計している。②のギアは、二つのギア（上：歯数8、下：歯数12）が上下一体になるように設計しており、両方のギアが一緒に回転する。④のギアが回転すると、②の下ギアと噛み合っているため、減速比が2：3になる。さらに②の上ギアも同じ回転数で回転し、③のギアと噛み合っているため、さらに減速比2：3で伝達する。よって、トータルで、④のギアから③のギアへの伝達は、減速比4：9となる。以上のように、比較的コンパクトに同軸で減速が行なえるのが特徴である。各ギアは、インボリュートギアで圧力角 25° 、②の各ギア、および④は厚さ1.5mm、③は1.4mmで設計してある。

実際に造形して得られたサンプルの写真を図8.32に示す。また、寸法測定値を図8.33に示す。図8.33に示すように、ほとんどの箇所では誤差が小さく、精度良く造形されていることが分かる。このような微細な構造では、未硬化樹脂の除去が大変困難で、通常より長く溶剤による洗浄を行なう必要があり、表面精度、および造形物強度が悪化してし

もう問題がある。

得られたギアボックスモデルでは、正確な測定は行なっていないが、実際に入力軸を回転させると、出力軸がそれよりも遅く減速して回転することを確認した。しかし、使用した樹脂（UV1214-15）の硬化強度は弱く、何度も回転させているうちにギア表面が摩耗し、白く粉をふいたようになってしまった。この樹脂は、靱性は高いが、硬化強度が低いので、微細な構造の造形には向いていない。しかし、将来的に樹脂の硬化強度が増し、マスク用のインクとして超微粒子酸化チタンを用いたものが利用できれば、超微細な構造も造形できるようになると考えられる。



図8.30：ギアボックスイメージ図

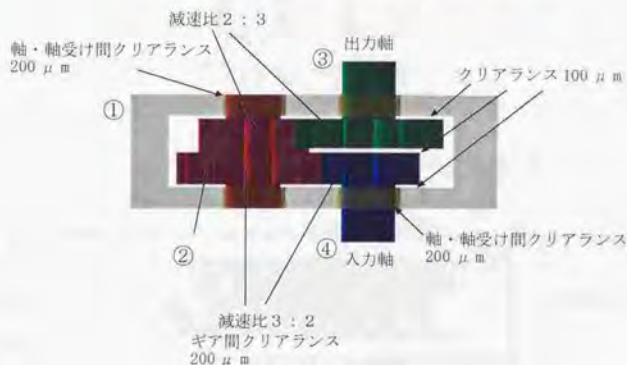


図8.31：ギアボックス設計仕様

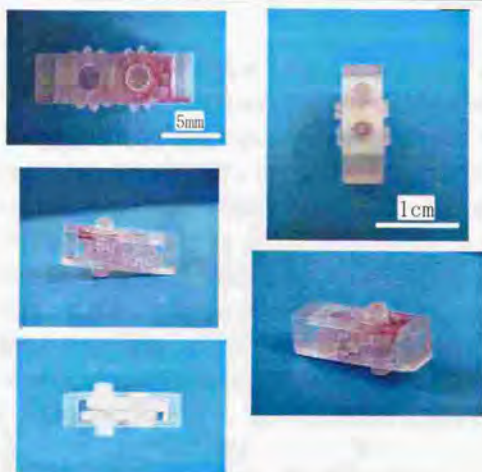


図8.32：ギアボックスモデル写真

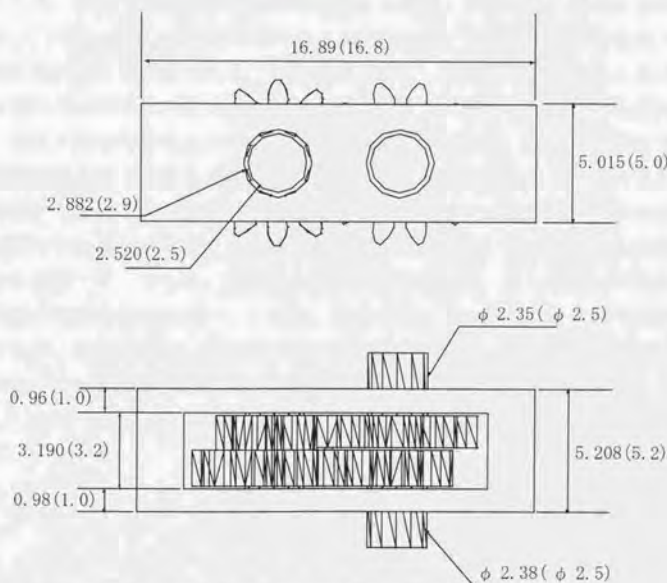


図8.33：ギアボックス測定寸法（括弧内が設計寸法）

・カラー造形

インクジェットヘッドによるマスクの描画を応用して、インクジェットによる特定パターンを硬化樹脂層の間に挟むように造形を行なうことで、透明な構造物内部に立体的にカラーパターンを配置することが可能である。この新たなアプリケーションを検証するために、図 8.34 のようなサンプルを造形した。このサンプルは、寸法が $30 \times 15 \times 6 \text{ mm}$ のもので、 $100 \mu\text{m}$ 積層厚で 60 回積層・硬化させた。途中、11~21 層目に "del" という文字をマスク用インクで描画した。また、図 8.35 に実際に得られたカラー造形物の写真を示す。写真のように、実際に透明な造形物内に 3 次元的着色配置された文字を確認できる。この用途としては、以下のようなことが考えられる。

1. 透明な造形物内の構造を認識しやすくするために、着色する。
2. CT 画像データから、特定部位を画像処理によって着色し、造形することで、手術箇所の目視による確認が可能であり、様々な医療分野に適用できる。

また、問題点として、着色されたインクは、層と層の間に挟まった状態にあるので、真横から観察した場合、その着色を確認しにくいことがあげられる。しかし、図 8.35 のサンプルでは、積層方向に対して垂直な方向から観察した場合も、着色を確認することができた。これは、視点と反対側の面から入射した光が、着色面間で反射を繰り返して、視点方向に放射されるためである。しかし、これは、視点側で観察される色は、視点と反対側の面へ入射する光の波長成分、およびその光量に影響されることを意味する。たとえば、視点と反対側の面へ入射する光が極端に少ない場合、視点側で放射される着色面での反射成分も少なくなり、暗くなってしまうことが予想される。このカラー造形法では、真横から少しでも角度をつけて観察する場合には全く問題ない。それは、着色面から直接反射する成分が視点まで届くからである。しかし、どの角度から観察しても同様に着色を確認でき、さらに、複数色を配置する場合には、層と層の間に着色する方式では、所望の硬化は得られない。これは、積層厚をさらに薄くすることで解消できる可能性があるが、現段階では、透明構造内の特定箇所の着色、もしくは、造形された透明部品へのマーキング用途への応用が限界である。

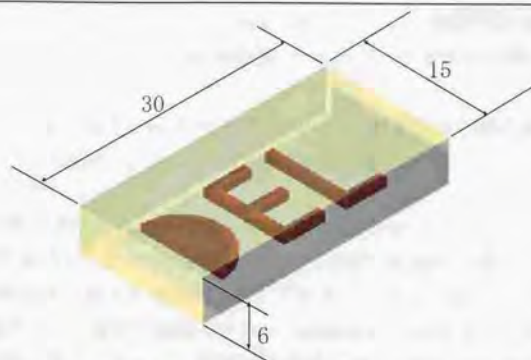


図8.34：3次元CADによるカラー造形サンプル外観（単位：mm）



図8.35：得られたカラー造形物

8.5 一般光造形システムと紫外光遮断層を用いた冷却固化式光造形システムによる造形サンプルの比較検証

紫外光遮断層を用いた冷却固化式光造形システム（以下、試作システム）と、一般光造形システムによる造形物の比較検証を行なった。比較検証では、比較に公正を期するために、以下に示す条件で比較を行なった。

1. 両システムで造形するサンプルは、前記のユニットモデルとギアモデルとする。

2. 高さ方向の加工精度確認のため、造形方向を同一にし、積層厚を $100\mu\text{m}$ とする。
3. XY 面での加工精度、および面精度確認のため、レーザスキャン間隔を $100\mu\text{m}$ とする。
4. 寸法測定には、分解能 $1\mu\text{m}$ のマイクロメータ、および測定顕微鏡を使用し、同一箇所において 5 点測定し、その平均値を寸法測定値とする。

図 8.36 に、一般光造形システムによって得られた、ユニットモデルとギアモデルの写真を示す。一般光造形システムでは、常温で液体の光硬化性樹脂を使用しているために、図のように造形物底面、高さ方向におけるクリアランス部分、張り出し・孤立部分には、サポートを必要とする。造形物底面のサポートは容易に除去することが可能だが、サポートの跡が残ってしまう。さらに、図 8.37 の高さ方向クリアランス部拡大写真から分かるように、ユニットモデル、ギアモデルにおける高さ方向の $100\mu\text{m}$ クリアランス部分は、余剰成長により埋まってしまっているのが確認できる。また、たとえ $100\mu\text{m}$ のクリアランス部が正確に造形されたとしても、その箇所のサポートは除去不可能である。つまり、このような高さ方向に微小クリアランスを持つアセンブリ構造は造形できないことが分かる。一方、本論文で提案する紫外光遮断層を用いた冷却固化式光造形手法では、サポートが必要なく、また紫外光遮断層により余剰成長が抑制されるので、図 8.38 のように正確にクリアランス部が造形されていることが確認できる。

次に、図 8.39 に一般光造形システムと試作システムによるユニットモデルの上面と底面の拡大写真を示す。写真から、一般光造形システムの方が透明性が高いことが分かる。試作システムによるサンプルは、乳白色であり、マスク材の跡が多少残っており、透明性は良くない。表面の平滑性を比べると、上面は両システムとも差がないが、底面では明らかな差が確認できる。一般光造形システムによるサンプル底面では、サポートの跡が残っており、また凹凸が見られる。さらに、液体の樹脂を使用するため、1 層目の硬化が造形物輪郭部で正確に行なわれていないことが確認できる。一方、試作システムによるサンプルでは、透明性は悪いが、サポートの跡がなく、さらに、紫外光を遮断するマスクによって、上層からの透過光が均一化されるために、底面においても平滑な面が得られている。

次に、一般光造形システムと試作システムにより得られたサンプルの寸法測定値の比較を行なう。一般光造形システムによるギアのサンプルでは、サポートが複雑であり、正確に測定が行なえなかったため、ここではユニットモデルについて、XY 面と高さ方向に分けて比較を行なう。その結果を表 8.7、図 8.41 に示す。表 8.7 の各測定箇所を、図 8.40 に示す。図 8.41 から、試作システムによるサンプルでは、XY 面、高さ方向双方とも、一般光造形システムによるサンプルよりも誤差が小さいことが分かる。XY 面においては、

露光方法は両システムとも同等なので、図 8.41上のように差が現れたのは、一般光造形システムで、XY 方向の位置決め調整が徹底していなかったためと考えられる。一方、高さ方向において、これだけの差が現れた理由としては、一般光造形システムでは硬化物余剰成長の影響で、 $100\mu\text{m}$ クリアランス部分がつぶれ、その他の部分についても余剰成長が生じていたためである。

以上から、紫外光遮断層を用いた冷却固化式光造形法により、一般光造形法で問題となっていた、サポートによる造形自由度の低下、硬化物余剰成長による高さ方向加工精度の悪化を解決し、高自由度で、高精度な造形が可能であることが確認された。

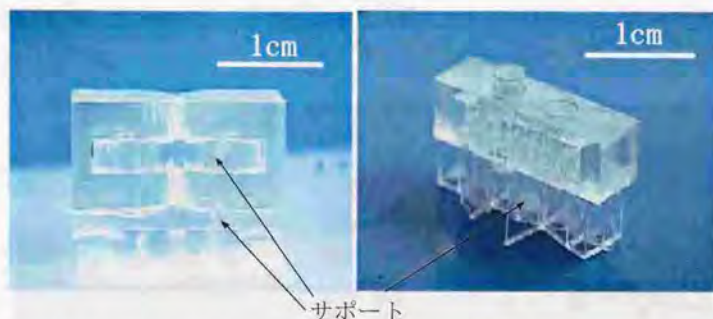


図8.36：一般光造形システムによって得られたサンプル（左：ユニットモデル、右：ギアモデル）

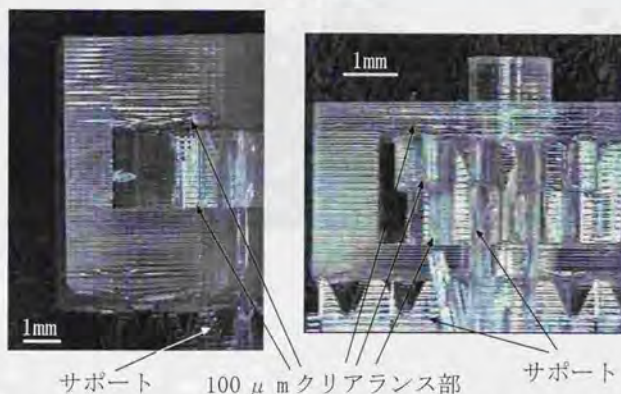


図8.37：ユニットモデル（左）とギアモデル（右）の $100\mu\text{m}$ クリアランス部拡大写真

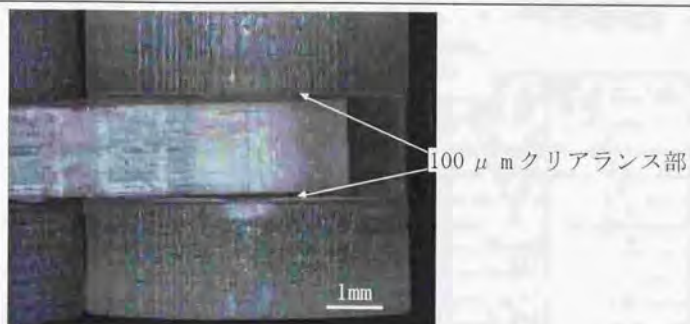


図8.38：紫外光遮断層を用いた冷却固化式光造形システムによるユニットモデル拡大写真

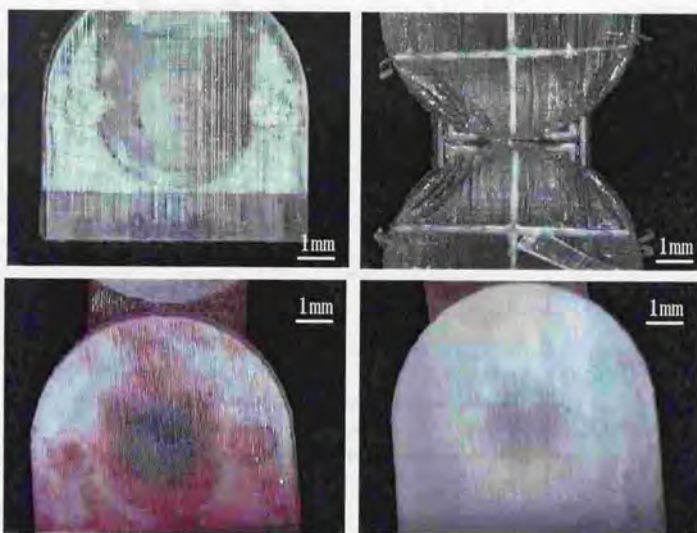


図8.39：造形物上面および底面拡大写真（上：一般光造形システム，下：紫外光遮断層を用いた冷却固化式光造形システム，左：上面，右：底面）

表8.7：試作システムと一般光造形システムによるユニットモデル寸法測定値（誤差は μ m単位，他はすべてmm単位）

ユニットモデル		試作システム		一般光造形システム	
測定箇所	設計寸法	測定値	誤差 (μm)	測定値	誤差 (μm)
①	10.000	10.001	1	10.119	119
②	10.000	10.001	1	10.037	37
③	10.000	9.976	24	9.84	160
④	10.000	9.975	25	9.8	200
⑤	10.000	9.987	13	10.23	230
⑥	3.500	3.498	2	3.641	141
⑦	3.000	3	0	3.024	24
⑧	3.500	3.486	14	3.561	61
⑨	2.800	2.798	2	3.024	224

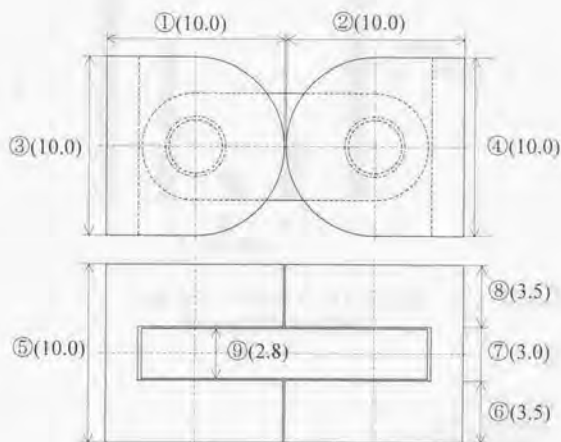


図8.40：寸法測定箇所と設計寸法（単位：mm）

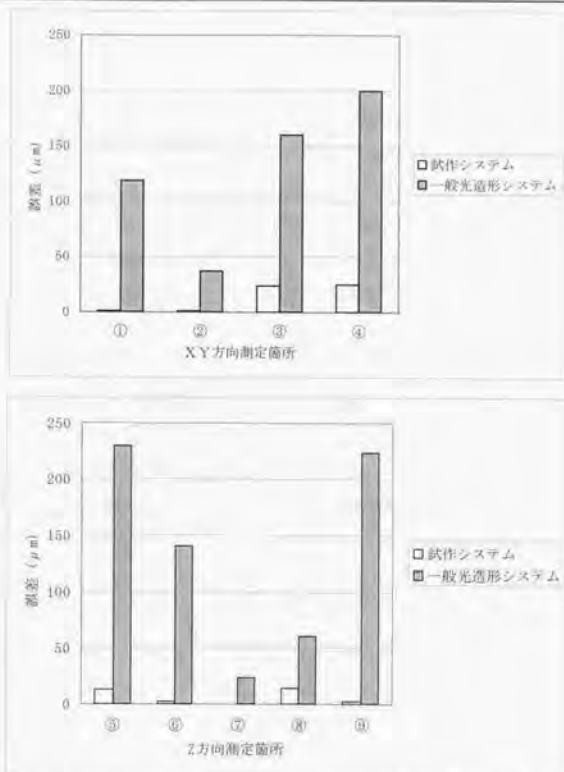


図8.41：試作システムと一般光造形システムにおけるXY面（上），高さ方向（下）での各測定箇所寸法誤差

8.6 まとめ

試作システムによる検証実験から，明らかになったことを以下にまとめる．

1. 樹脂供給時の供給面ピーク温度は 57°C であり，これはゾルゲル変換型光硬化性樹脂 UV1214-15 のゾル化点温度 89°C よりも低く，樹脂供給時に硬化物が移動したり，変形したりする問題はない．
2. 積層を繰り返した場合の樹脂層内部の温度は，樹脂供給時の供給面でのピーク温度 57°C を超えることはなく，樹脂供給時に樹脂層内において硬化物が移動したり，変

形したりすることはない。

3. 樹脂積層最小厚測定実験から、本システムでは、積層厚 $30\mu\text{m}$ まで、均一に精度良く積層が行なえる。
4. 6.3.2のシミュレーションで得られた反射余剰成長が実際に生じることを、造形実験により確認した。また、反射余剰成長が生じる条件、およびその形状はシミュレーションで得られた結果を良く反映している。
5. XY 面において、径の異なる複数の垂直貫通穴があるサンプルの造形実験から、反射余剰成長の影響で、積層数が増加するにつれて穴径が徐々に小さくなることが分かった。しかし、反射余剰成長による影響には限界があり、ある積層厚以上では、反射余剰成長厚は変化しなくなることが判明した。さらに、XY 面において高分解能を実現するための手法を提示した。
6. 新レーザスキャニング方式における、反射余剰成長、造形物の反り変形を小さく抑える造形パラメータを抽出した。
7. 紫外光遮断層を用いた冷却固化式光造形法により、従来の光造形法では造形困難な微小クリアランスを持つアセンブリ構造も、高精度に一体成型可能であることを定量的に示した。

第9章 冷却固化式光造形法によるマスク一括露光方式の可能性の検討

現在主流となっている RP 用光造形システムでは、レーザもしくは、紫外線ランプの光を集光して、XY 方向に走査することで、選択的露光を行なっている。しかし、この方法では、単一ビームにより露光を行なうので、造形物の占める体積に比例して、造形時間が増大し、さらに、XY 面での精度を向上させるには、ビームの走査間隔を小さく設定する必要があり、その際の造形時間は、走査間隔の逆数に比例して増大してしまう。つまり、ビーム走査による選択的露光方式では、精度を追求すれば、それだけ造形時間が増大する問題が存在する。これに関しては、第 10 章の考察において詳しく検討する。

一方、第 2 章で述べたように、光造形法では、他の露光方式として一括露光方式も提案されている。一括露光方式では、選択的露光を行なうためのマスクを生成し、一括で露光を行なうので、露光は層の描画面積に関係なく、一定時間で終了する。つまり、精度の良いマスクを高速・高精度に生成する手段があれば、大型の造形物を造形する場合、造形時間を飛躍的に短縮することが可能になる。そこで、本章では、ゾルゲル変換樹脂と紫外光遮断層を用いた冷却固化式光造形法を応用し、紫外光遮断層描画に用いていたインクジェットヘッドを用いて、全層に硬化させたい部分のネガマスクを描画し、一括露光することで 3 次元立体造形を行なう新たな手法の提案を行なう。

9.1 造形原理

第 7 章で設計・製作を行なった、紫外光遮断層を用いた冷却固化式光造形法では、紫外光遮断層を造形物において底面に当たる部分にだけ描画し、硬化物余剰成長を抑制するための手段として用いてきた。また、形状の描画には、レーザを使用し、選択的にラスタースキャンすることで、一層を硬化させ、さらに樹脂を積層、硬化を繰り返すことで立体造形を行なっていた。しかし、現システムでは、インクジェットヘッドを用いた紫外光遮断層の描画自体も、XY プロッタ機構により選択的に行なっている。つまり、レ

ーザを用いなくても、インクジェットヘッドとXYプロッタ機構だけで、選択的な描画が可能である。そこで、この原理を応用して、すべての層に対して、硬化させたい領域のネガマスクを描画し、平行紫外光光源を用いて一括露光することで3次元立体造形を行なう新たな手法を提案する。この手法を、本論文では「ダイレクトマスク法 (Direct Masking Method)」と呼ぶことにする。本手法を用いた造形プロセスを図9.1に示す。この方式の造形プロセスは以下のようになる。

- (1) 造形目的形状を3次元CADで設計。
- (2) スライスデータに加工。
- (3) 加温したゾル状態の樹脂を平面供給し、冷却固化状態(ゲル状態)になるまで待つ。
- (4) インクジェットヘッドを用いて、硬化させたい領域のネガマスクを露光面に直接描画する。
- (5) 平行紫外光光源を用いて一括露光を行ない、マスク以外の部分を選択的に硬化させる。上記(3)～(5)のプロセスを必要な層数だけ繰り返す。
- (6) 造形物を造形テーブルから取り出し、未硬化樹脂を除去、後露光する。

この方式の利点としては、以下のようなことがあげられる。

1. マスクを用いた一括露光方式なので、造形速度が速い。また、各層の造形時間が一定となる。
2. レーザによるスキャン方式と異なり、一括露光方式では、露光面を均一に硬化させることができ、同時に表面の平滑度が高くなる。
3. 冷却固化式光造形法をベースとしているので、サポートを用いずに、造形自由度の高い造形が行なえる。たとえば、複数要素からなる複雑な機構も一体成形可能である。
4. インクジェットヘッドを用いたマスク描画法では、多数の高分解能なノズルをコンパクトに集積することが可能であり、大きな領域も高速・高精度に描画できる。また、特別なスキャン機構も必要ない。レーザを用いた露光法では、ビームを多数集積することはシステムとして困難であり、またコストがかかる。
5. レーザを用いないので、装置全体としての保守費用が削減できる。また、装置を低コストに構成できる。
6. 造形過程において、ネガマスクは露光樹脂面に直接描画されるので、微細なパターンであっても、光の回折や平行紫外光光源の精度に影響されにくく、高精度にパターンを再現可能である。
7. 紫外光遮断層を用いた冷却固化式光造形法同様、硬化物余剰成長を完全に抑えるこ

とができ、高さ方向において高精度な造形が行なえる。

8. 現在のインクジェット技術は、大変進歩しており、容易に 1400dpi (18 μ m/ドット) 描画を実現可能である。現在のレーザを用いた XY 面における通常の加工単位は、約 200 μ m であり、それと比較しても大変高精度であることが分かる。
9. インクジェットヘッドを用いることで、各層においてマスク以外にフルカラーのパターンを描画することも可能であり、硬化樹脂でそのパターンを覆うように造形を行なえば、透明な造形物内の構造を認識し易くすることができる (カラー造形)。

以上が、ダイレクトマスク法の利点としてあげられるが、問題点としては以下のよう
なことが考えられる。

1. ネガマスクを描画した部分の樹脂の再利用は大変困難であり、高価な光硬化性樹脂が無駄になってしまう。
2. 一括露光領域が広ければ、マスク以外の部分も硬化してしまい、光硬化性樹脂が無駄になってしまう。
3. 紫外光を遮蔽し、同時に樹脂面に対して定着性の良いマスク用インクの調製が難しい。

以上のような問題点が考えられるが、1、2における造形樹脂の無駄は、技術的に最低限まで抑えることが可能である。その方法としては、以下のようなことが考えられる。

1. ネガマスクを描画する範囲を、可能な限り造形物各層の輪郭領域まで抑える。
2. 平行紫外光光源による一括露光領域を可変として、ネガマスクの輪郭領域内だけを露光できるように改良する。
3. 立体造形エリアに空きがある場合は、なるべく複数の造形物を空間的に配置して、一回で多数の造形を行なうようにする。

次節では、実際にダイレクトマスク法を用いて造形を行なう際の硬化に関する理論を説明する。

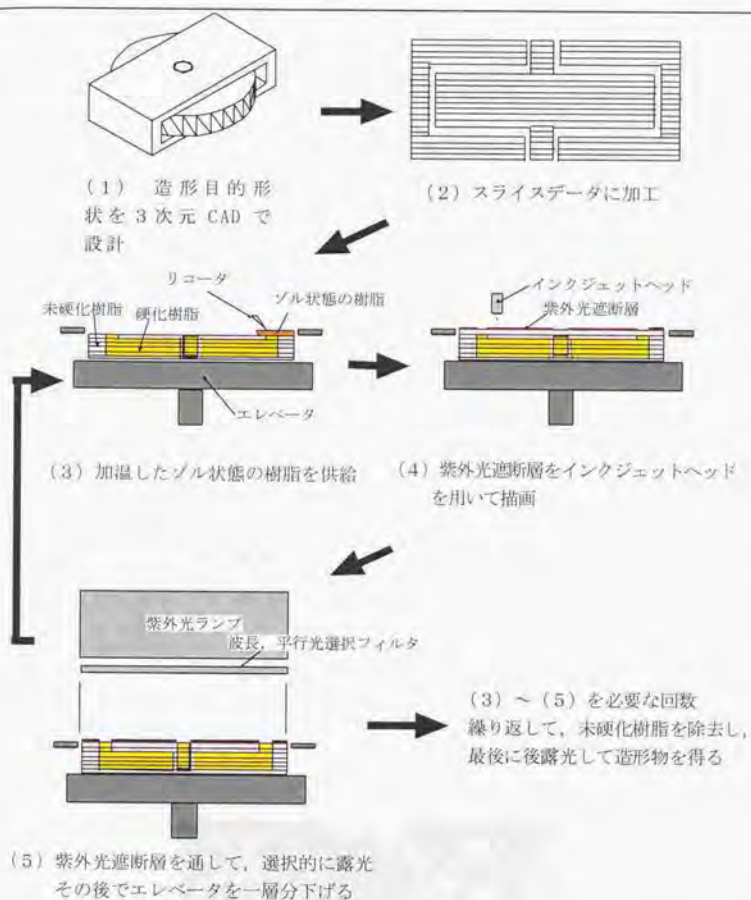


図9.1: ダイレクトマスク法原理図

9.2 マスク一括露光方式における硬化理論

ダイレクトマスク法では、露光を行なう樹脂面に直接マスクを描画し、平行紫外光光源を用いて一括露光を行なうので、XY面における描画分解能は、インクジェットヘッドによるマスクの描画分解能、平行紫外光光源の平行度、選択波長、およびマスク端面での回折影響によって決まる。まず、回折の影響について、以下で検討を行なう。

回折とは、光線が衝突のヘリの近くや、穴を通過するとき、直線の進路から曲がる現象をいう[49]。回折現象における光の強さは、ホイヘンスフレネルの原理によって、近似的に計算される。スリットに垂直にやってくる平行光束が干渉するときには、いろいろな方向の波の強さの分布は、

$$I_{\beta} = I_0 \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \beta\right)}{\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \beta\right)^2} \quad (10.1)$$

となる。ただし、 I_0 は入射光強度、 b はスリット幅、 β はスリット面に立てた垂線と、干渉光の進む向きとがなす角(図9.2)、 λ は光の波長である。

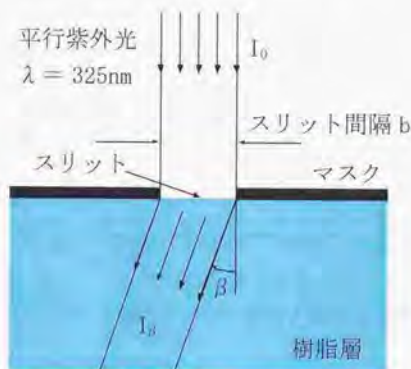


図9.2: 微細なスリットにおける平行紫外光の回折現象モデル

今、波長を光硬化性樹脂の設計波長325nmとして、マスクを用いて図9.2のように微細なスリットを描画した場合の回折について、(10.1)式を用いて計算を行なう。計算では、スリット幅 b を、波長 λ の1倍、5倍、10倍、30倍、50倍としたときの、回折角 β にお

けるそれぞれの回折光強度を入射光強度を1として求めた。その結果を、図9.3に示す。スリット幅 b が波長に対して大きくなるにつれて、回折の影響が小さくなっていることが確認できる。インクジェットヘッドを用いて、マスクを描画する場合、その分解能はインクドット径、および走査分解能による。今、走査分解能はインクドット径よりも小さく、高精度であると仮定すると、マスク面での描画分解能はインクドット径で決まる。将来的にダイレクトマスク法で、1400dpiのインクジェットヘッドを使用した場合、インクドット径は約 $18\mu\text{m}$ となる。その際、描画できる実用的なスリットの幅を $18\mu\text{m}$ とすると、それは325nm波長の約55倍あり、図9.3から、ほとんど回折の影響がない範囲にあることが分かる。つまり、一括露光に使用する紫外光の波長325nmであれば、回折の硬化形状に与える影響は無視できる程度にあり、高精度なマスクパターンを高精度に転写できる可能性があることを意味している。

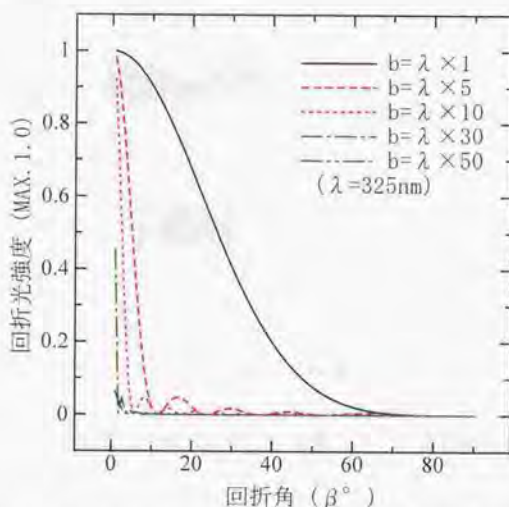


図9.3：各スリット幅における回折角と回折光強度の関係

次に、平行紫外光光源の平行度の硬化形状への影響を検討する。平行紫外光光源では、通常、方向性がばらばらな指向性のないランプの紫外光を、面強度を均一にするために石英などの結晶中を通過させた後、複数のレンズによる光学系により平行光へと加工する。しかし、完全な平行光を作り出すことは原理的に不可能で、レンズ焦点付近において $2^\circ \sim 5^\circ$ 程度の平行度を保証するものでしかない(図9.4)。つまり、焦点位置の上方

においては焦点へ向かって収束する向き、下方においては拡がる向きをしており、その幅が $2^\circ \sim 5^\circ$ 程度あるという意味である。また、本研究では、樹脂の設計波長 325nm を選択的に使用するため、レンズ系の下に波長選択フィルタを挿入する必要がある。

図 9.5 は、樹脂層表面に描画されたマスクを通して、平行紫外光を用いて樹脂を硬化させる場合の計算モデルを示している。図 9.5 では、紫外光光束が焦点へ向かって収束する位置にマスク面がある場合の例であり、この場合の拡がり角 θ_1 を正とする。また、ちょうど樹脂面位置における照射量を $E[\text{mJ}/\text{cm}^2]$ とし、マスクによる XY 面描画分解能を $b[\mu\text{m}]$ 角とする。 b は、 $20\mu\text{m}$ 程度とし、回折の影響を受けない間隔とする。また、 yz 軸を図のようにとり、原点を樹脂面スリット中心位置に取る。

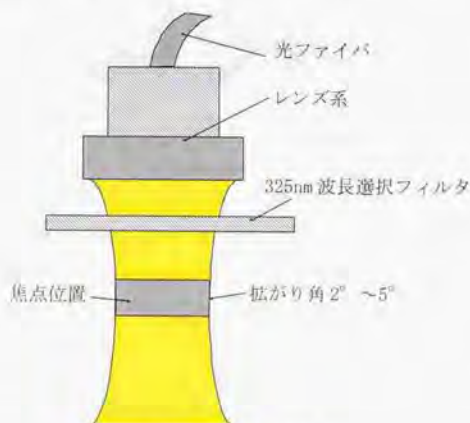


図9.4：平行光原理

$b[\mu\text{m}]$ 角のスリットを通過した後の距離 z の位置における露光量は、エネルギー保存の関係から、(10.2)式で求められる。

$$E(z) = E \cdot \frac{b^2}{(b - z \cdot \tan \theta_1)^2} \quad (10.2)$$

θ_1 : 拡がり角 (収束する場合を正)

(10.2)式では、光束が集束する向きの場合、距離に伴い単位面積当たりの照射量が増加し、光束が拡がる向きであれば減少することを表している。また、同じ条件で露光した場合、同じ深さであっても、 b の値によって露光量が異なることを示している。つまり、 $b[\mu\text{m}]$ 角のスリットに投入されたエネルギー量が保持されるので、 b の値が拡がり角に対し

て大きいほど拡がり角の露光量への影響は小さく、 b の値が小さいほど影響が大きくなることを示している。

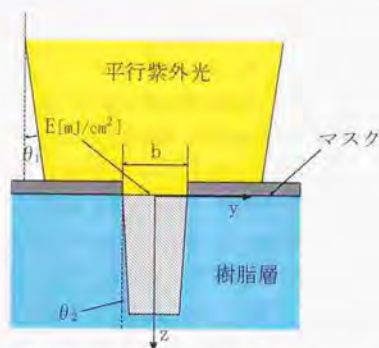


図9.5：平行紫外光による硬化モデル

実際に、樹脂面に描画されたマスクに対して露光を行なう場合、光束は樹脂面において屈折するので、樹脂層内における拡がり角 θ_2 は、(10.3)式のように計算される。

$$\begin{aligned}\sin \theta_2 &= \sin \theta_1 \cdot \frac{1}{n_{12}} \\ \therefore \theta_2 &= \arcsin \left(\frac{\sin \theta_1}{n_{12}} \right)\end{aligned}\quad (10.3)$$

n_{12} ：空気中から樹脂中への相対屈折率

また、樹脂中ではランバートベールの法則に従い露光量が減衰していくとすると、 (y, z) 位置における露光量は、(10.2)式に樹脂層内での減衰率をかけて、以下の(10.4)式で表される。

$$E(y, z) = E \cdot \frac{b^2}{(b - z \cdot \tan \theta_2)^2} \cdot \exp \left(-\frac{z}{D_p} \right)\quad (10.4)$$

ただし、 $|y| \leq \frac{b}{2} - z \cdot \tan \theta_2$ 、 D_p ：樹脂の透過深度

(10.4)式で、 $E(y, z) = E_c$ (臨界露光量) となる位置が硬化境界を表す。図 9.6 に、 $E = 12 \text{ mJ/cm}^2$ 、 $b = 150 \mu\text{m}$ 、 $n_{12} = 1.5$ 、 $\theta_1 = 5^\circ$ 、 $D_p = 278.75 \mu\text{m}$ 、 $E_c = 8.5058 \text{ mJ/cm}^2$ の場合の、光束が収束向き、拡大向きの双方についての樹脂層内露光量分布計算結果を示す。図 9.6 から分かるように、マスク一括露光による硬化形状は、レーザーによる逆釣鐘状の硬化形状と異なり、

底面が平面になる。光束が集束向きの位置で露光を行なう場合、深くなるにつれて幅が狭くなるのに対して、光束が拡大向きの場合には徐々に拡大する。また、同条件で露光しているのにも関わらず、硬化深度に大きな差が見られることが分かる。そこで、同条件で露光した場合の、各スリット幅 ($b=50\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$, $150\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$) における露光量と深度の関係について、双方の場合を計算した。その結果を、図 9.7 と図 9.8 に示す。図 9.7 と図 9.8 において、樹脂の硬化は臨界露光量以上で生じるので、臨界露光量線と各曲線との交点が硬化深度となる。光束が集束向きの位置での露光の場合、スリット幅が狭くなるにつれて、硬化深度が増すのに対して、拡大向きの場合はその逆であることが分かる。図 9.7 で、スリット幅 $50\mu\text{m}$ の場合、深くなるにつれて露光量が増加している。これは、光束が集束されることにより、より深い位置の方が露光量が大きくなるためである。その際、底面は平面でなく、先が尖った硬化形状になることが予想される。また、図 9.8 の光束拡大領域での露光では、あるスリット幅以上で硬化深度が一定に収束することがグラフから予測される。

次に、OHP シートに 1200dpi のレーザプリンタを用いて、 $300\mu\text{m}$ 角穴が複数あるマスクと、 $300\mu\text{m}$ 幅の細長いスリットが複数開いたマスクを描画し、そのマスクをゾルゲル変換型光硬化性樹脂による樹脂層表面に直接おいて、実際に平行紫外光光源を用いて一括露光実験を行なった。その結果を、図 9.9、図 9.10 に示す。図 9.9 は、一括露光された樹脂層表面の拡大写真である。測定顕微鏡による測定では、一括露光されたパターンの $300\mu\text{m}$ 部分の寸法は、 $300\mu\text{m} \pm 10\mu\text{m}$ の範囲にあり、高精度にパターンが転写されていることが分かった。つまり、回折の影響はない。また、図 9.10 の硬化形状断面拡大写真では、深さ方向に徐々に幅が狭くなっており、底面は平面になっている。この結果から、このパターンは光束収束領域において露光されたことが分かる。また、上記において計算した硬化形状 (図 9.6 左) をしていることが確認できる。

以上、マスク一括露光による硬化理論によって得られた知見を以下にまとめる。

1. インクジェットによる XY 面描画分解能が $20\mu\text{m}$ 程度であれば、波長 325nm において、回折の影響は無視できる範囲にある。
→ パターンの再現性が高い。
2. 紫外光光源焦点位置において、露光面が光束収束領域にある場合と、拡大領域にある場合では、硬化深度、硬化形状に大きな差が現れる。光源平行度による影響は大きい。
→ XY 面における加工分解能を向上させるには、収束位置で露光を行なった方がよい。
3. マスクによる一括露光方式では、マスクパターンにより硬化深度が異なる。

→ 光束収束領域で露光を行なう場合は、スリット幅が小さいほど硬化深度が深くなる。拡大領域で行なう場合は、スリット幅が大きいほど硬化深度が深くなり、ある幅以上では一定に収束する。

次節では、実際にダイレクトマスク法を用いた造形基礎実験について説明する。

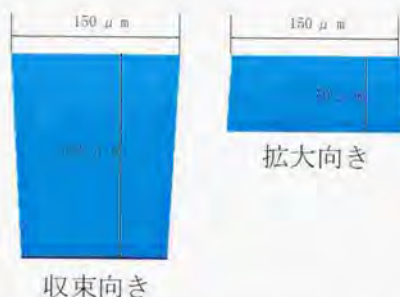


図9.6：光束収束領域，拡大領域における硬化形状と硬化深度

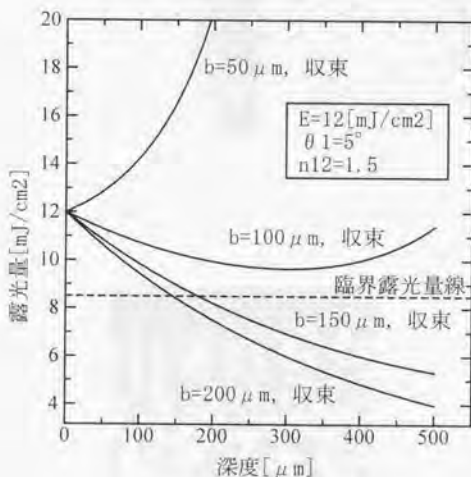


図9.7：光線収束向きの場合の各スリット幅における露光量 vs 深度

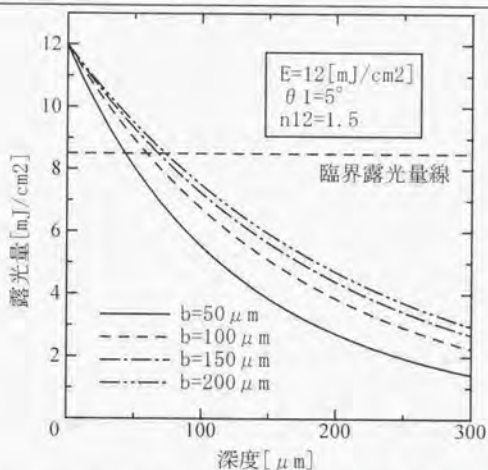


図9.8：光線拡大向きの場合の各スリット幅における露光量 vs 深度

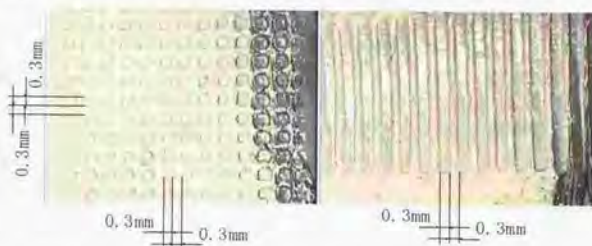


図9.9：300 μm 角穴，300 μm 幅スリットマスクによる一括露光実験（表面拡大写真）

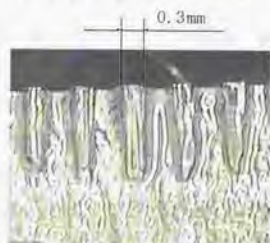


図9.10：300 μm 角穴マスクによる硬化形状断面拡大写真

9.3 造形基礎実験による可能性の検討

9.1 で示した利点を確認するため、ダイレクトマスク法を用いた基礎実験を行なった。基礎実験では、第7章で説明した造形システムに、別途平行紫外光光源を配置することで、造形を行なった。

平行紫外光光源には、東芝ライテック(株)の紫外光照射源 TOSCORE251 を使用して、付属の光ファイバによって、露光面上部へと導いた。表 9.1 に、紫外光照射源 TOSCORE251 の仕様をまとめる。また、図 9.11 に実際の一括露光システムを用いた造形時の写真を示す。ダイレクトマスク法を用いた造形システムでは、マスクの描画および樹脂供給は、第7章で試作した造形システムをそのまま使用しており、新たに平行光照射ファイバユニットを図 9.11 のように露光面から垂直方向に 90mm の位置に固定してシステムを構成している。造形時には、平行紫外光光源本体にシャッター ON/OFF の信号を送ることで、一定時間照射を行なう。図 9.12 に紫外光照射時の写真を示す。

・基礎実験

ダイレクトマスク法の基礎実験として、図 9.13 のような格子状サンプルを造形した。基礎実験の造形パラメータを表 9.2 に示す。ランプパワーは、パワーメータを使用して測定した。この照射量値は、全く波長選択を行っていないランプ波長領域全てを含んだ値である。

テストサンプルは、外形が $1 \times 1 \times 0.15\text{cm}$ で、底面 5 層 (0.5mm) の板の上に図 9.13 に示すような幅が 1mm と 0.5mm の格子を並べた。よって、深さ 1mm、1mm 角の穴が複数できる。図 9.14 に、実際に得られたサンプル写真、拡大写真を、図 9.15 に測定寸法値を示す。図 9.14 の全体写真では、幅が 1mm と 0.5mm の格子が描画されている様子が確認できるが、0.5mm 幅の格子のエッジ拡大写真では、インクの後が残っており、設計通りには造形できていないことが確認できる。また、寸法値からも、実際の設計幅よりも $100\mu\text{m}$ 近く小さく造形されていることが分かる。このように、設計寸法通りに造形できていない理由としては、以下のような点があげられる。

1. インクドット径が $200 \sim 300\mu\text{m}$ 程度あり、ドットを描画する間隔は、設計幅通りなので、インクドットの直径分幅が狭くなった。
2. 露光面から 1.5mm 程度の位置からインクの吐出が行なわれるので、インクが飛散

してしまい、正確な位置に定着しなかった。

以上のように、基礎実験によって得られたサンプルでは、正確な造形が行なえなかったが、これは原理的な問題ではなく、単純に自作インクジェットヘッドの性能によるものと考えられる。

また、得られたサンプルは、レーザーで描画したものよりも強度的な柔らかいものであった。これは、パワーメータで測定した照射量値がすべての波長域を含むものであり、樹脂の設計硬化波長 325nm 成分が少なかったためと考えられる。次に、実際に複数要素からなるアセンブリ構造の造形実験を行なった。

・造形実験

造形実験では、図 9.16 に示すような滑車モデルを表 9.2 の条件で造形した。このモデルでは、真ん中部分 $\phi 10$ の円板が回転できるように、軸・軸受け間クリアランス $200\mu\text{m}$ 、円板と上下のとのクリアランスが各 $100\mu\text{m}$ で設計してある。図 9.17 に実際に造形によって得られたモデルの写真を示す。

造形終了後に、滑車の中央部の円板は自由に回転させることができた。しかし、図 9.17 の写真をみて、全体的に寸法精度、表面平滑度が悪いことが分かる。この理由としては、以下のような点があげられる。

1. 自作インクジェットヘッドによるインクドット径が $200\sim 300\mu\text{m}$ と大きめであり、露光面との距離によって、インクが多少飛散してしまうために、正確なマスクが描画できなかった。
2. 使用した平行紫外光光源の波長が $220\sim 500\text{nm}$ あり、パワーメータで測定した照射量値に比べ、樹脂の設計硬化波長 325nm 成分が少なく、洗浄によって変形、表面精度が悪化した。

表9.1 : TOSCURE251 仕様

	仕様	備考
適合ランプ	ミラー一体型超高压水銀ランプ	
照射波長領域	220~500nm	365nmにピーク
平行度	ファイバ使用時, 焦点位置 (65mm~90mm) において, $\pm 2^\circ$	直射ユニット使用時は, $\pm 1 \sim 2^\circ$
面均一度	80%以上	
照射領域	20 \pm 5mm角	広領域用ファイバもある
ランプ寿命	Ave. 1000時間	
UV初期照度	4000mW/cm ² (at365nm) 以上	
光量調整	約1.5%ステップで0~100%調 光可能	
リモート	入力: 手動/リモート切り替 え, シャッター開閉, 光量調整 出力: ランプ点灯確認, ランプ 安定確認, ランプ交換確認, シャッター開閉確認	
シャッター	オートモード, 手動モード (ス テッピングモータ式)	最高シャッター速度: 10Hz

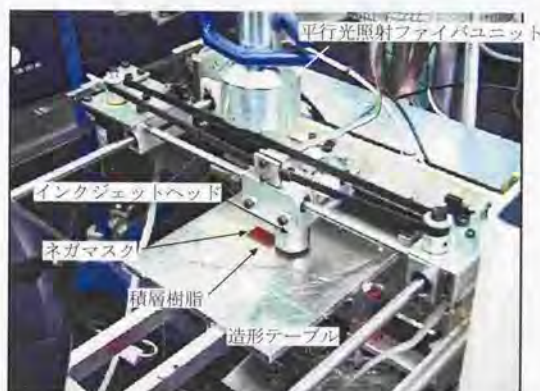


図9.11 : 一括露光造形システム

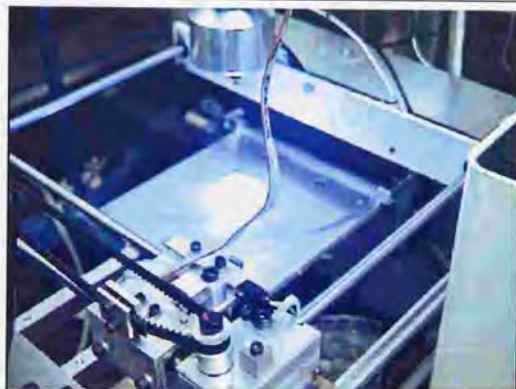


図9.12：一括露光の様子

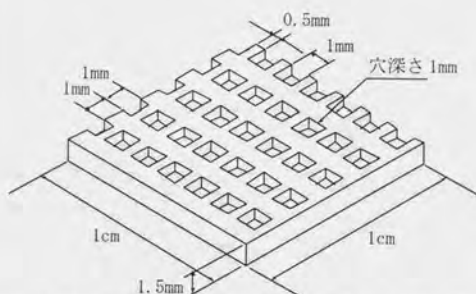


図9.13：ダイレクトマスク法基礎実験サンプル

表9.2：基礎実験照射条件

ランプパワー	408.64 mW/cm ²
一層照射時間	0.4 sec
照射量	163.2 mJ/cm ²
積層厚	100 μ m
使用樹脂	UV1214-15

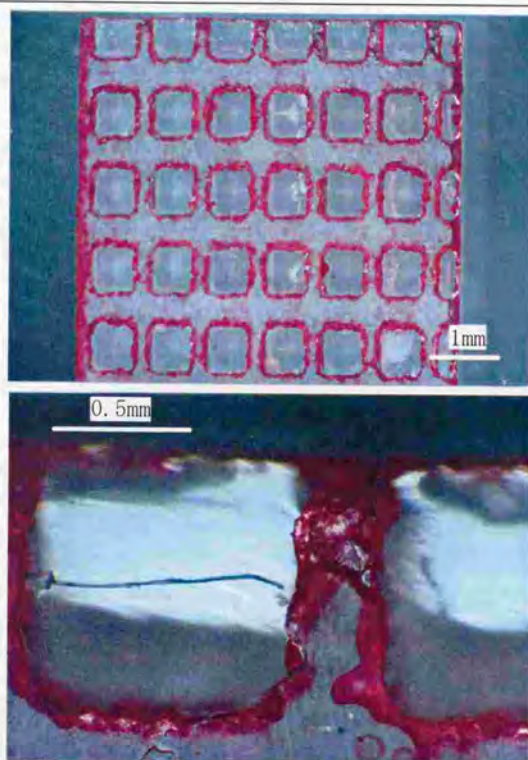


図9.14：ダイレクトマスク法基礎実験サンプル写真（上：全体，下：エッジ部拡大写真）

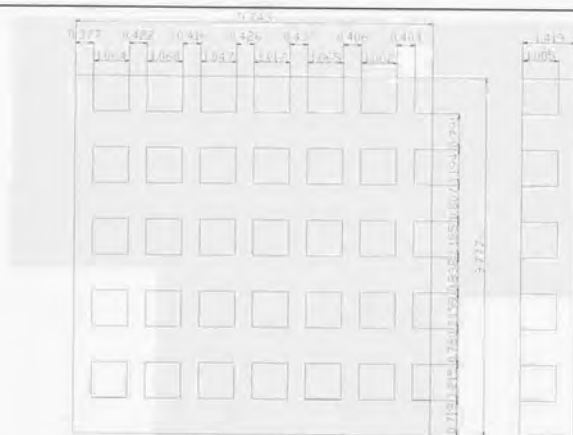


図9.15 : 基礎実験サンプル測定寸法値 (単位 : mm)

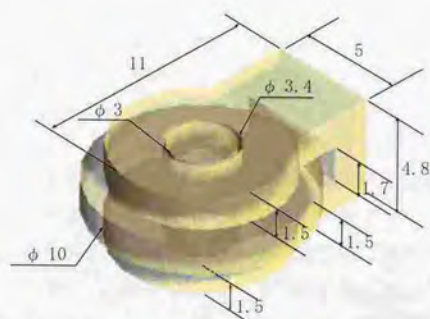


図9.16 : 滑車モデル (単位 : mm)



図9.17：造形された滑車モデル

9.4 考察

提案したダイレクトマスク法によって、原理的に、微小クリアランスを持つアセンブリ構造も一体成形可能であることが確認できた。しかし、現状ではレーザを用いた方法に比べ、造形精度に問題がある。今後、以下のような点についての研究・開発が必要である。

1. インクジェットヘッドの性能を向上させる。

一般光造形法と同程度のXY面加工分解能を実現するには、インク定着後のドット径が $100\mu\text{m}$ 程度である必要があり、少なくとも300dpi程度の描画分解能が必要である。また、インクドット径を一定にし、安定した吐出が行なわれなければならない。

2. 平行紫外光光源から導かれた平行光から、樹脂の設計硬化波長325nm成分だけを抽出するフィルタを通し、また十分な硬化が得られる照射量を確保しなければならない。
3. 赤色顔料インクでは、造形後の透明度が失われてしまうので、超微粒子酸化チタンを用いたマスク用のインクを調製する必要がある。
4. 樹脂の無駄を抑えるために、ネガマスク描画領域を、硬化させたい領域輪郭近くまで狭くし、また、平行紫外光の照射領域を変とし、ネガマスク部分だけを照射できるように改良する。
5. 高速描画が行なえるよう、インクジェットヘッドノズルの集積化を行なう。また、カラー造形も行なえるよう複数色を打ち出せるようにする。
6. ダイレクトマスク法では、レーザビームによる露光とは異なり、一括露光を行なうために、有限要素法などによる新たな反り解析が必要である。

第10章 考察

10.1 光造形法における造形時間、加工分解能、造形物サイズの相関に関する検討

現在一般的な RP 用光造形システムでは、レーザビームや、ランプから導いた光線を XY 方向に走査することで、1 層を選択的に硬化させ、さらに樹脂を積層することを繰り返して立体造形を行なう。よって、ある大きさを持つ造形物を造形する場合、造形物サイズが大きくなるとそれだけ多くの造形時間を必要とする。また、XY 面、高さ方向における加工分解能を向上させるためには、XY 面において、露光面におけるレーザのビーム径を絞り、さらにビーム走査による硬化ライン間に隙間が生じないようにそのハッチ間隔も小さく設定しなくてはならない。また、高さ方向では、積層厚を小さく設定する必要がある。しかし、そうすることで、造形時間はさらに増大することが直感的に把握できる。つまり、造形時間、加工分解能、造形物サイズには相関があることが予想される。そこで、本節では、造形時間、加工分解能、造形物サイズ間の関係を表す数式を求め、その相関に関して検討を行なう。

まず、造形を行なう目的造形物を図 10.1 に示すようにモデル化する。光造形システムによる造形時間は、すべての層を選択的にビームで走査するのに必要とされる時間 (T_{Scan} [sec]) と、各層を積層する際に必要とされる時間 (T_{Recon} [sec]) を足し合わせたものになる。

今、造形しようとする造形物形状の体積を V [cm^3]、その高さを H [cm]、積層厚を L_f [cm]、 n 層目の描画面積を $S(n)$ [cm^2] とすると、以下の式が成り立つ。

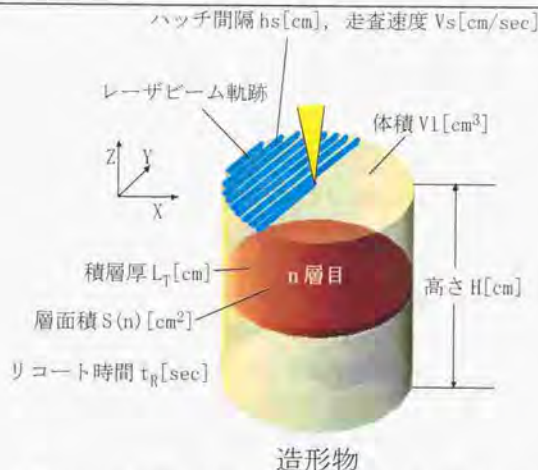


図10.1：光造形システムによる造形物の各パラメータ

$$V1 = \sum_{n=1}^{m \cdot H/L_T} S(n) \cdot L_T \quad \text{ただし, } H \geq L_T \quad \therefore \sum_{n=1}^{m \cdot H/L_T} S(n) = \frac{V1}{L_T} \quad (10.1)$$

$\sum_{n=1}^{m \cdot H/L_T} S(n)$ は、各層の描画面積をすべて足し合わせたものなので、レーザによる総描画面積は、 $\frac{V1}{L_T}$ で表される。今、レーザの走査速度を Vs [cm/sec]、ハッチ間隔を hs [cm] とすると、レーザによる総描画時間は、以下の式で求められる。

$$T_{Scm} = \frac{V1}{L_T} \cdot \frac{2}{hs} \cdot \frac{1}{Vs} \quad (10.2)$$

(10.2)式の右辺2項目において、2をかけているのは、レーザビームを走査する際には、通常バックラッシュを考慮して、単一方向のみに走査し往復描画は行なわないので、そのビームの戻り時間を計算に入れているためである。また、各層における輪郭走査時間、送り走査時間は、(10.2)式のレーザによる総描画時間に比べて微小であるので、ここでは考慮しない。

次に、樹脂を積層し、樹脂面が安定するのに要する時間を各層一定とし、 t_r [sec] とすると、全層では以下のように計算される。

$$T_{Recool} = \frac{H}{L_T} \cdot t_r \quad (10.3)$$

よって、トータルの造形時間は、以下の式で表される。

$$T_{\text{total}} = T_{\text{Recall}} + T_{\text{Scan}} = \frac{H}{L_T} \cdot t_r + \frac{2Vl}{L_T \cdot hs \cdot V_S} \quad (10.4)$$

(10.4)式が、造形時間、加工分解能、造形物サイズの相関を表す式である。

(10.4)式に右辺において、 T_{Recall} 、 T_{Scan} はそれぞれ独立したパラメータであるので、各変数の値によって、どちらが造形時間に対して支配的かが決定する。

$$T_{\text{Scan}} \geq T_{\text{Recall}} \quad \text{とすると、} \quad \frac{2Vl}{L_T \cdot hs \cdot V_S} \geq \frac{H}{L_T} \cdot t_r \quad \text{なので、} \quad Vl \geq \frac{H \cdot hs \cdot V_S \cdot t_r}{2} \quad \text{の関係が成}$$

り立つ。一般の光造形システムでは、通常 hs 、 V_S 、 t_r は最適な状態に調整されており、造形形状によって変化させることは少ない。つまり、造形時間に対して、 T_{Recall} 、 T_{Scan} のどちらが支配的かは、造形物体積とその高さによって決まる。具体的な値を示すと、通常、 $hs = 0.1\text{mm}$ 、 $V_S = 50\text{cm/sec}$ 、 $t_r = 30\text{sec}$ 程度であるので、 $Vl \geq 7.5H$ の範囲では、造形時間において、レーザビームの走査に要する時間の方が支配的になる。

まず、(10.4)式を用いて、造形物サイズと造形時間の相関に関して検討を行なう。今、造形精度を表すパラメータ L_T と hs 、また走査速度 V_S を定数とすると、造形物サイズを表すパラメータ Vl と H は、(10.4)式において、分子にあり次数はそれぞれ1であるので、造形物サイズに対して造形時間は線形であることが分かる。つまり、造形物サイズに比例して、造形時間が増大する。(図 10.2)。

次に、加工分解能と造形時間の相関に関して検討する。ここでは、造形物サイズのパラメータ Vl と H 、また走査速度 V_S を定数とすると、(10.4)式は、 $T_{\text{total}} = \frac{1}{L_T} (H \cdot t_r + \frac{2Vl}{hs \cdot V_S})$

と変形されるので、ハッチ間隔 hs が一定の場合、造形時間は、積層厚に反比例して増大することが分かる。つまり、積層厚を半分にすると、造形時間は単純に2倍になる。また、積層厚 L_T を一定とし、ハッチ間隔 hs を変数とした場合も同様に、ハッチ間隔に反比例して造形時間が増大する。造形精度を向上させる場合、積層厚、ハッチ間隔両方が変数となるので、その場合、(10.4)式において分母が2次となり、造形時間は2乗に反比例して増大していくことが分かる(図 10.3)。その際、造形速度を上げることで、造形時間を短縮できるが、積層厚、ハッチ間隔がそれぞれ半分になれば、造形時間を一定に保つには、造形速度を4倍まで上げなくてはならず、現在の走査技術的に大変困難である。つまり、単一レーザビームを走査する現在の多くの光造形システムでは、造形精度を向上させる場合、造形時間が2乗に反比例して増大する問題を解決することはできない。

そこで、第9章で提案した一括露光方式の場合について検討してみる。一括露光方式の場合、樹脂供給に要する時間 T_{Recall} は、逐次露光方式と同じである。つまり、積層厚に反比例して、造形時間が増大していく。露光時間に関しては、各層の一括露光に要す

る時間と、マスクを樹脂面に描画する時間が必要である。各層を一括露光する時間は、樹脂供給とマスク描画に要する時間に比べてはるかに小さいので、無視することができる。マスクを樹脂面に描画するのに必要な時間は、第9章で述べたインクジェット記録方式を採用する場合、ドット径、およびノズルの集積数に影響される。その際、ドット径が半分になることは、(10.4)式においてハッチ間隔 h_s が半分になることと同等、また、ノズルの集積数が倍になることは、(10.4)式において走査速度が倍になることと同等である。つまり、XY 面における加工分解能を向上させる場合、ドット径を小さくした分だけ、ノズルの集積数を上げれば、造形時間を一定に保つことができる。さらに、集積数を多くすることで、造形時間はそれに反比例して、短縮される。

以上のように、光造形法に一括露光方式を採用することで、ビーム走査による逐次露光方式と異なり、XY 面加工分解能の向上と造形時間の短縮を同時に実現できることが分かった。しかし、造形精度を考える場合、樹脂硬化時の反り変形や、樹脂液位安定性も影響するので、一括露光を行なう際の硬化層の反り変形解析を行ない、反りを最小限に抑えるための露光条件を求め、また同時に、硬化収縮率の小さな樹脂の開発が必要不可欠である。

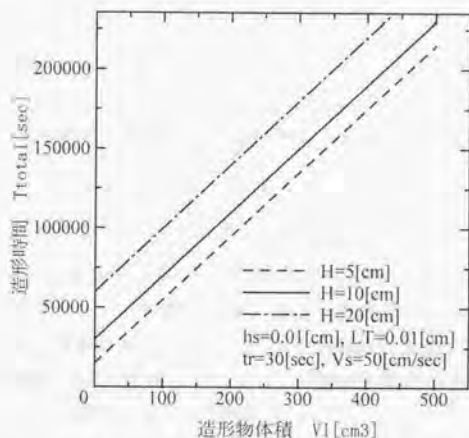


図10.2：造形物体積と造形時間の関係

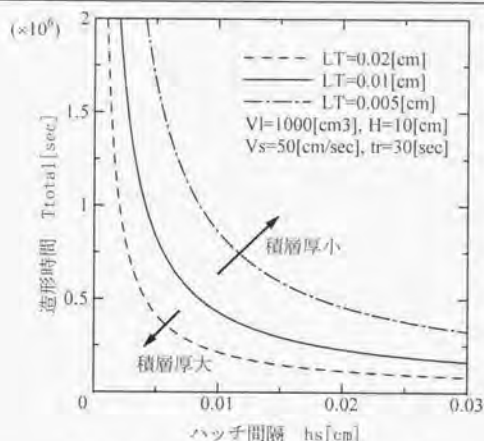


図10.3：ハッチ間隔と造形時間の関係

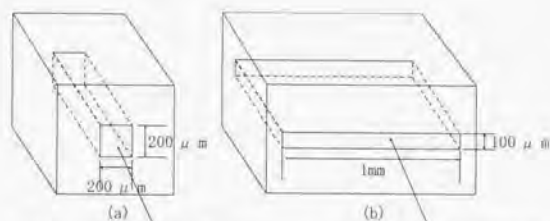
10.2 今後の課題

現在の、ゾルゲル変換樹脂と紫外光遮断層を用いた冷却固化式光造形システムの今後の課題を以下にまとめる。

1. 第7章で説明した試作システムでは、赤色顔料インクを用いてマスク面を描画していたため、マスク面での反射による余剰成長の影響により、XY面において分解能が低下し、また、マスクの色（赤色）が造形物底面に残ってしまい、透明度が悪くなってしまう問題がある。以上の、反射余剰成長問題、およびマスク面の可視光透明性問題は、6.3.2で述べたように、超微粒子酸化チタンを溶剤に分散したものをインクとして使用することで解決される。
2. 造形物から未硬化樹脂を除去する現在の洗浄方法では、溶剤（トルエン）との接触面積が小さい場合、未硬化樹脂を完全に除去できない。例えば、図10.4の(a)200 μm 角の角穴形状では、入り口付近の未硬化樹脂しか除けなかったのに対して、(b)では隙間が100 μm であるが横方向に長いので、除去することができた。つまり、溶剤との接触面積に比例して、除去効率が高くなる。また、洗浄を長時間（30分以上）行なうと、完全に硬化している造形物表面からゾルゲル変換成分が溶けだ

してしまい、表面の平滑度が失われ、さらに、造形物が軟化し、反りや変形の原因となってしまう。これらに関しては、今後ゾルゲル成分添加率の低い樹脂の開発、またその樹脂に適した洗浄方法の提案が必要である。

3. 使用樹脂 UVI214-15 の硬化強度は低く、特に微細な構造ではその形状を保持することが困難である。また、樹脂のレーザービームの透過深度が深く、厚い構造の場合、上層と下層での積算露光量に差が生じてしまう問題がある。そこで、エポキシ系光硬化性樹脂にゾルゲル変化成分を添加した、新たなゾルゲル樹脂の開発が必要である。
4. 図 10.5に示すように、現システムでは、マスク面と冷却固化状態の樹脂との接着力の弱さから、最下面におけるサポート力が弱く、結果としてマスク面と接触している面（最下面）が丸まってしまう問題がある。これに関しては、マスク材の検討と、樹脂のゲル状態でのサポート力強化が必要である。
5. 現在のインクジェットヘッドによる定着後のインクドット径は、 $200 \sim 300 \mu\text{m}$ 程度あり、レーザーによるライン硬化幅 $110 \mu\text{m}$ と比べて低分解能であるため、高精度なマスクの描画が行えない問題がある。そこで、描画分解能の高いインクジェットヘッドの開発が必要である。



この部分の未硬化樹脂は除きにくい この部分の未硬化樹脂は除ける

図10.4：造形後の未硬化樹脂除去が困難な形状の例

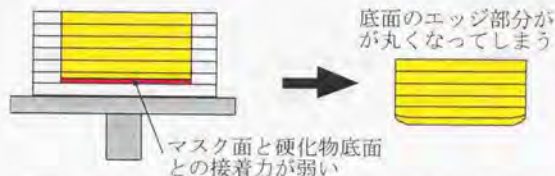


図10.5：硬化物・マスク面間のサポート力不足問題

第11章 結論

以下で、本論文で得られた知見、および成果についてまとめる。

1. 冷却固化式光造形法の提案

- 光造形法において造形可能な形状を拡張し、高精度化を実現するために、造形自由度を低下させる主原因であるサポート問題を解決し、同時に樹脂液表面張力問題を解決するための手段として、冷却固化式光造形法を提案した。

2. ゼルゲル変換型光硬化性樹脂の開発

- ゾル化点温度が 89℃であり、それ以上では低粘度なゾル状態、それ以下ではゲル状態に変化する、ゾルゲル成分を 15%重量比でウレタン・アクリレート系光硬化性樹脂に添加したゾルゲル変換樹脂 (UV1214-15) を開発した。
- UV1214-15 の常温 (25℃) でのゲル強度は約 650kPa であり、硬化時に反り変形を抑制するために十分な強度を有することを硬化実験による確認した。
- 約 100℃での粘度は 280cp と低粘性であり、約 80℃を境にそれ以下の温度では急激に粘性が上昇し、冷却固化式光造形用光硬化性樹脂として優れた温度粘度特性を有することを温度粘度測定により確認した。
- UV1214-15 の硬化物は、その成分中の光硬化性樹脂のみを硬化させた場合と比較して、破断強度、曲げ強度は上昇するが、延性が低くなり脆くなることが測定による分かった。また、硬化物の硬度も低下し、摩耗しやすくなる、硬化時に硬化物の色が透明から乳白色へと変化することが分かった。
- UV1214-15 の透過深度は 278.74 μm 、臨界露光量は 8.5058 mJ/cm^2 であり、325nm 波長の光に対して高感度であるが、透過深度が深いため、弱い光でも深く硬化してしまう問題があることが分かった。

3. 冷却固化式光造形法における紫外光遮断層の導入

- 高さ方向の分解能を低下させる主原因となっている硬化物余剰成長問題について、理論的な解析を行ない、そこで得られた知見をもとに、造形過程における上層から

の透過光を積極的に抑制し、高さ方向の分解能を積層厚まで向上させるための手段として、冷却固化式光造形法における紫外光遮断層の導入を提案した。

- 基礎実験により、紫外光遮断層を樹脂面に直接描画することで、硬化物余剰成長を抑制し、厚さ 1mm で設計した部分を 0.998mm と高精度に造形できることを確認した。
- 紫外光遮断層を用いることによる樹脂層内露光量分布への影響を確認するために、シミュレーションを行ない、新たに反射余剰成長現象を発見した。

4. ゼルゲル変換樹脂と紫外光遮断層を用いた冷却固化式光造形システムの設計・製作と試作システムによる造形原理の有用性の検証

- ゼルゲル変換樹脂と紫外光遮断層を用いた冷却固化式光造形法を用いた自動造形システムを開発した。
- 試作システムによる検証実験から、樹脂供給時の供給面ピーク温度は 57℃であり、これはゼルゲル変換型硬化性樹脂 UV1214-15 のゾル化点温度 89℃よりも低く、樹脂供給時に硬化物が移動したり、変形したりする問題はないことを確認した。
- 積層を繰り返した場合の樹脂層内部の温度は、樹脂供給時の供給面でのピーク温度 57℃を超えることはなく、樹脂供給時に樹脂層内においても硬化物が移動したり、変形したりすることはないことを確認した。
- 樹脂積層最小厚測定実験から、試作システムでは、樹脂液表面張力の影響が受けにくい、硬化形状によらず積層厚 30 μm まで均一に精度良く積層が行なえることを確認した。
- 造形実験により、6.3.2のシミュレーションで得られた反射余剰成長が実際に生じることを、造形実験により確認し、また、反射余剰成長が生じる条件、およびその形状はシミュレーションで得られた結果を反映していることを確認した。
- XY 面において、径の異なる複数の垂直貫通穴がある階段状のサンプルの造形実験から、反射余剰成長の影響で、積層数が増加するにつれて穴径が徐々に小さくなることが分かった。しかし、反射余剰成長による影響には限界があり、露光条件によって、ある積層厚以上では、反射余剰成長厚は変化しなくなることが判明した。
- 試作システムによるサンプル造形実験から、本手法を用いることで、高さ方向において 100 μm の微小なクリアランスを持つアセンブリ構造を、クリアランス部での寸法誤差が 2 μm と高精度に一体成型可能であることを確認した。
- 従来の光造形システムを用いて造形した同サンプルとの比較検証から、本手法を用いることで、サポートが必要なく、均一厚の積層が行なえ、また、硬化物余剰成長を抑制でき、結果として、造形自由度が高く、また、高さ方向において高精度な造

形が行なえることを定量的に示した。

5. 冷却固化式光造形法におけるマスク一括露光方式の可能性の検討

- 紫外光遮断層を用いた冷却固化式光造形法をさらに発展させた、紫外光遮断層を一括露光用のマスクとして用いるダイレクトマスク法を提案した。
- マスクの描画分解能が、露光に使用する波長の50倍程度（波長325nmでは、16.25 μm ）であれば、回折の影響が小さく、高精度にマスクを転写可能なことを理論的に示した。
- 一括露光を用いた基礎実験から、本手法を用いることで、実際にアセンブリ構造も一体成型可能なことを確認した。
- 第10章の考察において、マスク一括露光方式を用いれば、ビーム走査による逐次露光方式では大変困難である、XY面における造形精度向上と、造形時間の短縮を同時に実現可能なことを示した。

発表文献

雑誌論文

- [1] 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, No.606, pp.605-612, 1997.
- [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とその評価, (精密工学会誌掲載予定)
- [3] 神村明哉, 村上存, 中島尚正, 冷却固化式光造形法に関する研究 —ゾル-ゲル変換樹脂と紫外光遮断層を用いた高自由度・高精度造形—. (機械学会現在審査中)

口頭発表

- [1] 風間敦, 神村明哉, 村上存, 中島尚正, 冷却凝固式光造形法に関する研究, 第10回ラビッド・プロトタイピング・シンポジウム, 京都, pp.11-16, 1996.
- [2] 村上存, 神村明哉, 風間敦, 中島尚正, 冷却固化式光造形法の提案, 1996年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集(第2分冊), 水戸, pp.579-580, 1996.
- [3] 村上存, 神村明哉, 風間敦, 中島尚正, 冷却固化式光造形法の提案, 日本機械学会第6回設計工学・システム部門講演会講演論文集[No.96-45], 東京, pp.1-3, 1996.
- [4] 村上存, 神村明哉, 風間敦, 中島尚正, 冷却固化式光造形法の提案, 型技術ワークショップ'96 論文集, 大阪, 1996, pp.60-61.
- [5] 村上存, 神村明哉, 風間敦, 中島尚正, 冷却固化式光造形法の提案, 型技術, Vol.11, No.13, pp.60-61, 1996.

- [6] Tamotsu MURAKAMI, Akiya KAMIMURA and Naomasa NAKAJIMA, Refrigerative Stereolithography for Rapid Product Prototyping, Naoya IKAWA, Takeshi KISHINAMI, Fumihiko KIMURA (eds.), Rapid Product Development (Proceedings of the 8th International Conference on Production Engineering (8th ICPE)), Sapporo, Japan, pp.73-82, 1997.
- [7] Akiya KAMIMURA, Tamotsu MURAKAMI and Naomasa NAKAJIMA, Research on Refrigerative Stereolithography, Proceedings of RadTech Asia'97, RadTech Japan, Yokohama, Nov. 4-7, pp.614-617, 1997.
- [8] 神村明哉, 村上存, 中島尚正, 冷却固化式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, 神戸, p.209, 1997.
- [9] 神村明哉, 滝口雄一郎, 村上存, 中島尚正, 冷却固化式光造形法に関する研究, 日本機械学会第7回設計工学・システム部門講演会講演論文集 [No.97-69], 東京, pp.1-4, 1997.
- [10] 神村明哉, 村上存, 中島尚正, 冷却固化式光造形法に関する研究, 日本機械学会第75期通常総会講演会講演論文集(1) [No.98-1], 東京, pp.455-456, 1998.
- [11] 神村明哉, 村上存, 中島尚正, 冷却固化式光造形法に関する研究, 第14回ラビッド・プロトタイプング・シンポジウム, 岐阜, pp.35-40, 1998.
- [12] 神村明哉, 村上存, 中島尚正, 冷却固化式光造形法に関する研究, 日本機械学会第8回設計工学・システム部門講演会講演論文集[No.98-32], 東京, pp.45-48, 1998.
- [13] Akiya KAMIMURA, Tamotsu MURAKAMI and Naomasa NAKAJIMA, Refrigerative Stereolithography for Support-Free and Accurate Fabrication, Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium, SFF Symposium 1999, Austin, TX, August 9-11, pp.583-590, 1999.
- [14] 神村明哉, 村上存, 中島尚正, 冷却固化式光造形法を用いたサポートレス・高精度造形, 第17回ラビッド・プロトタイプング・シンポジウム, 横浜, pp.45-50, 1999.

特許

- [1] 光造形法, 特願平11-223096, 発明者 神村明哉, 村上存, 1999.8.5.

参考文献

- [1] 佐藤, 上田他, 光造形法を応用したセラミック体作製の試み, 第15回ラビッド・プロトタイピングシンポジウム講演資料, pp.71-74, 1998.
- [2] 西尾隆司, RPを利用した試作品づくりの生産改革, 第13回ラビッド・プロトタイピングシンポジウム講演資料, pp.21-24, 1997.
- [3] 松村正裕, CGソフトを用いたモデリング, 光造形そして石膏鑄造, 第13回ラビッド・プロトタイピングシンポジウム講演資料, pp.13-16, 1997.
- [4] 高橋実, 製造技術における応用事例, 第11回ラビッド・プロトタイピングシンポジウム講演資料, pp.40-44, 1996.
- [5] 山本敏彦, 宮崎弘, 光造形モデルをマスターとした新たな金型作り, 第11回ラビッドプロトタイピングシンポジウム講演資料, pp.10-13, 1996.
- [6] 小野一郎, 群司裕則, 金子文男, 片倉俊彦, 木村和衛, 八子恵子, 大河内幸夫, 相川通, Helical volume CTを用いた顎顔面骨の三次元表示法とその顔面骨折への臨床応用, 形成外科, Vol.35, No.9, pp.939-950, 1992.
- [7] 藤野豊美, シミュレーション外科における光造形法の利用, 第3回光造形システムシンポジウム資料, pp.45-48, 1992.
- [8] 小松孝雪, 齊藤華織, 増木英郎, 久恒泰宏, 木村朋義, 上田康夫, 内山洋一, 山口泰彦, 光造形システムを用いた下顎運動範囲の立体モデル化, 第90回日本補綴歯科学会学術大会講演論文集, 1993.
- [9] 上田康夫, 足田一洋, 齊藤比登志, 内山洋一, 光造形法システムを用いた歯冠形態の復元(CAM)に関する研究, 第19回日本歯科理工学会学術講演会講演論文集, 1993.
- [10] 萩原, 阿部他, 義肢ソケット作製のための計測造形システム第15回ラビッド・プロトタイピングシンポジウム講演資料, pp.37-40, 1998.

- [11] P.F.Jacobs, Rapid Prototyping & Manufacturing Fundamentals of Stereolithography, Society of Manufacturing Engineers, 1992.
- [12] 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次元プロッター, 日刊工業新聞社, 1990.
- [13] 中井, 丸谷, レーザリソグラフィによる立体モデル創成, 電子情報通信学会論文誌, J71-D(1988)416.
- [14] 斉藤直一郎, 新しいSOUP 光造形システムの紹介, 第14回ラピッド・プロトタイプリングシンポジウム講演資料, pp.9-12, 1998.
- [15] 佐藤声喜, 3D システムズ社 Rapid Prototyping System 最新情報の紹介, 第11回ラピッド・プロトタイプリングシンポジウム講演資料, pp.1-5, 1996.
- [16] 後藤, 小澤, 森谷, 遠藤, 太久保, 光造形法における寸法偏差と高精度化技術, 第5回光造形システムシンポジウム, pp.36-39, 1993.
- [17] 萩原茂, 斜め照射による高精度光造形システムの一手法, 第12回ラピッド・プロトタイプリングシンポジウム講演資料, pp.69-73, 1997.
- [18] 吉川浩一, 鈴木宏正, 木村文彦, 光造形法におけるサポート形状生成法, 1994年度精密工学会秋季大会 学術講演会講演論文集 第1分冊, pp.819-820, 1994.
- [19] 高木太郎, 中島尚正, 光造形法の高分解能化とそのマイクロマシン製作への応用に関する研究, 1994年度東京大学工学部学位論文, 1994.
- [20] 謝天宇, Micro Photoforming Fabrication with Free Hollow Surface Control, 博士論文, 1999.
- [21] Xie Tianyu, T. Murakami, N. Nakajima, Hollow Surface Control for Micro Photoforming Fabrication, Proceedings of Design & Systems Conference '98, JSME, pp.41-44, 1998.
- [22] 丸尾昭二, 河田聡, 近赤外光を用いたマイクロ光造形, 第13回ラピッド・プロトタイプリングシンポジウム講演資料, pp.44-48, 1997.
- [23] 中川威雄, 丸谷洋二, 積層造形システム 三次元コピー技術の新展開, 工業調査会, 1996.
- [24] 戸水晴夫, 光造形装置を用いた部品開発期間の短縮, 第8回ラピッドプロトタイプリングシンポジウム講演資料, pp.47-49, 1995.

- [25] 松岡賢二, オリンパスにおける光造形活用事例, 第8回ラビッドプロトタイプリングシンポジウム講演資料, pp.51-54, 1995.
- [26] 中沢弘, 石川光男, レーザ応用金属ラビッド・プロトタイプリング, 第11回ラビッドプロトタイプリングシンポジウム講演資料, pp.45-48, 1996.
- [27] 葛迫淳一, 控井幸朗, 田上英二郎, ハルブモールド用造形型の新技術開発, 山本敏彦, 宮崎弘, 光造形モデルをマスターとした新たな金型作り, 第11回ラビッドプロトタイプリングシンポジウム講演資料, pp.24-29, 1996.
- [28] 孟陽, 今村正人, 中川威雄ら, 3次元光造形モデルのロストワックス精密鋳造への適用, 1992年度精密工学会春季講演大会講演概要集, p.319, 1992.
- [29] 清水誠司, 阿部正人, 萩原茂, 中島俊, 古川進, 伊藤誠, 宝飾工芸品のCAD/CAMシステム, 第6回NICOGRAPH論文コンテスト論文集, pp.298-307, 1990.
- [30] 宮原健吾, 考古学におけるRPの応用について=画像計測とRPによるレプリカの作製-, 第15回ラビッド・プロトタイプリングシンポジウム講演資料, pp.41-46, 1998.
- [31] 大谷利勝, 鋳造用模型に用いられる光造形技術, 合成樹脂, Vol.36, No.10, pp.15-19, 1990.
- [32] 帯川利之, 吉野雅彦, 篠塚淳, 薄銅板を用いた積層造形, 第15回ラビッドプロトタイプリングシンポジウム講演会資料, pp.81-84, 1998.
- [33] Yi Shuping, Tamotsu Murakami, Naomasa Nakajima, Accuracy Study on Laminated Object Manufacturing for the Metallic Functional Parts with Complex Surface, Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium, 1999.
- [34] 山口勝美, 酒井克彦, メタルジェットによる3次元造形とドット結合強度, 第14回ラビッドプロトタイプリングシンポジウム講演会資料, pp.96-101, 1998.
- [35] J.J.Beaman, J.W.Baelow, D.L.Bourell, R.H.Crawford, H.L.Marcus, K.P.McAlea, Solid Freeform Fabrication: A New Direction in Manufacturing, Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [36] 加藤, 中原, UV硬化技術入門, 光分子刊行会(新高分子文庫21), 1984.
- [37] 光学材料事業部, 高靱性光造形用樹脂-デソライトSCR950-, JSRテクニカルレビュー, No.106, 1999.

- [38] 神村明哉, 村上存, 中島尚正, 冷却固化式光造形法に関する研究, 第14回ラビッド・プロトタイピング・シンポジウム, 岐阜, pp.35-40, 1998.
- [39] T. Watanabe, A. Matsumura, and T. Ukachi, Study on Spectral Sensitivity of Resins for Stereolithography, RadTech Asia'95, Guilin, Nov.20-24, Proc. 301-306, 1995.
- [40] 渡辺毅, 立体成型型用樹脂の成形精度向上について, RADTECH JAPAN ANNUAL REPORT No.8, pp.198-205, 1994.
- [41] 神村明哉, 冷却固化式光造形法に関する研究, 修士論文, 1997.
- [42] 重森義浩, 色と着色のはなし, 日刊工業新聞社, 1998.
- [43] 坂本正志, 奥田晴夫, 二又秀雄, 坂井章人, 飯田正紀, 酸化チタンの紫外線遮蔽能に及ぼす粒子径の影響, 色材, 68[4], pp.203-210, 1995.
- [44] 水上孝一, コンピュータグラフィックス—情報化社会と映像—, 朝倉書店, 1992.
- [45] 安居院猛, 中島正之, コンピュータグラフィックス, (株) 昭晃堂, 1993.
- [46] 川合慧, 基礎グラフィックス, (株) 昭晃堂, 1987.
- [47] J.D.FOLEY, A.VAN DAM, コンピュータ・グラフィックス, 日本コンピュータ協会, 1984.
- [48] 碓井稔, ミクロなインクを飛ばす, 日本機械学会誌, vol.100 No.943, 1997.
- [49] コシキン, シルクヴィチ, 物理便利辞典, 1984.

謝辞

本論文における試作システム開発の一部には、日本学術振興会特別研究員奨励費を使用しております。この場を借りて謝意を表します。

修士課程、博士課程における指導教官として、研究全般に対して多大なるご指導と適切なご助言を頂きました東京大学大学院工学系研究科産業機械工学専攻の村上存助教授に、深く感謝致します。また、研究に対する数々のご指導、ご助言を頂きました産業機械工学科の中島尚正教授、中尾政之助教授、機械情報工学科の吉本賢一教授、精密工学科の鈴木宏正助教授に、感謝申し上げます。

研究室の作業環境に關してお世話になりました及川和広技術官に、篤くお礼申し上げます。

冷却固化式光造形用光硬化性樹脂の開発にあたり、多大なる御協力を頂きました(株)クラレの石浦一成氏に深くお礼申し上げます。

造形実験において御協力頂きました(株)D-MECの三井宗洋氏、樹脂特性に関してご助言頂きましたJSR(株)の山村様、サンプル造形に御協力頂きました(株)NTTデータシーメットの徐毅氏に、深く感謝致します。

博士課程3年次において、研究のパートナーとして試作システムの開発、造形実験に協力してくれた設計工学研究室修士1年の中島功雄君に心より感謝します。また、造形データ作成ソフトの開発において御協力頂きました設計工学研究室の陳毓東氏に感謝します。本研究では、博士課程2年次までに研究のパートナーとして、風間敦君、滝口雄一朗君、永田幸司君に御協力頂きました。

本研究における試作システム実現において、良き相談者、また友人として数々のアドバイスを頂きました、(株)オリンパスの謝天宇氏に心から感謝致します。

最後に、研究室での研究生活において潤いを与えて下さった設計工学研究室スタッフの皆様へ深くお礼申し上げます。

1999年12月17日 神村 明哉

付録

■RP&M 技術

現在、RP&M 技術はさまざまなものが実用化され、広く設計・生産プロセスに取り入れられている[23]。RP&M 技術の主な用途をまとめると以下のようになる。

1. 形状確認への利用

設計図やコンピュータ CAD データをもとに、複雑な形状を持った成型品の実際の姿を正確にイメージすることは、経験豊富なエキスパートにとっても難しいことである。見えない位置にある穴、複雑な内部構造、曲線の組み合わせによる表面形状などが、正確な理解を妨げる。パーツを実際に成型し確認することは、設計上のエラーを発見し、修正するための優れた方法であり、国内外で数多く実際の生産プロセスの中に RP&M 技術が取り入れられている[24][25]。

2. 品質の検証への利用

製品の品質を向上させるために、試作による形状確認は必ず必要である。1つの設計を徹底的に検証するには、数多くの試作品が必要であり、それだけ多くのコストと時間がかかる。試作による形状確認が十分行なわれないまま、製造ラインに乗った場合、製品の品質、評価、そして市場シェアの低下を招くことになる。

RP&M 技術を用いれば、従来よりもかなり短時間で試作品を成型でき、設計サイクルの早い段階でエラーを発見することができ、製品品質の向上につながる。

3. 機能テスト用パーツ成型への応用

以上に述べた RP&M の用途としては製品のビジュアル化、品質の検証、設計プロセスの繰返し、最適化などに RP&M で成型したパーツをそのまま利用していた。しかし、

RP&M で成型したパーツではなく、最終製品と同じ材質で試作品を作ったり、ときには最終製品そのものを製作したりすることが一般的になってきた。この場合、作り方には2つの方法がある。適切な物性を持ったパーツを RP&M で直接作る場合[26]と、RP&M で作ったパーツを元型や金型にして、他の材料で作る場合[27]とである。

こうして作ったパーツは機能テストに利用される。RP&M で作った試作品をもとに、比較的安価にかつ短時間で機能テスト用パーツを作製する方法が、すでに数多く実用化されている。以下でその幾つかを紹介する。

- Silicone Room Temperature Vulcanizing (RTV ; シリコン樹脂を使った室温硬化法) モールドイング
- 真空キャストイング (注型) [5]
- 樹脂転換モールドイング
- アルミニウムと鉄のサンド・キャストイング
- Investment (流し込み) "flask", "shell"キャストイング (厚皮, 薄皮ロストワックス 鑄造)

RP&M 技術を用いた設計・生産プロセスは以下のようになる。

1. CAD 上で試作品を設計する。
2. RP&M で試作品を実際に成型する。
3. RP&M で成型した試作品を使ってエラーチェックを行なう。
4. 発見したエラーを CAD 上で修正する。
5. RP&M で試作品を再び成型し、検証する。
6. RP&M でデザインのバリエーションを作り、最適化を行なう。
7. RP&M 試作品を活用して、機能テスト用のモデルに転写する。
8. 機能テストを行なう。
9. 満足のいく結果が得られたら、実際の製造工程に進む。

以上のように、RP&M 技術を設計・生産プロセスに取り入れることで、そのプロセスを効率良く回転させることができ、大幅なコストダウンにつながる。また、同時に製品の品質も向上する。

以下で、現在実用化、または研究・開発中であるさまざまな RP&M 技術について、その原理、利点、問題点などを説明する。

現在の RP&M システムは、その原理によって大きく4つに分類できる。まず成型物を一層ずつ成型していく方法があり、これはさらに層追加型と層削除型に分類できる。層追加型というのは、成形材料を各層毎の形に成型し、それをすでに完成している層に追

加する方法である。また、層削除型とは、成型前の層を完成している層に固着させ、それから不要な部分を取り除く方法である。また、一層を一度に成型する方法と、点の連続 (Point by Point) として成型する方法にも分類できる。成型法の一つには成形材料をランダムに追加するものもある。しかし、この方法も厳密には積層方式に分類される。

1. 粉末成型法 (Powder Processing)

• 選択溶融焼結法 (Selective Laser Sintering)

この方法は、赤外レーザー光の熱で、粉末状の熱可塑性材料を融解・結合させて立体パーツを作る方法である。

まず、パウダー状の材料をローラーでならして薄い均一な層にする。次にパウダー表面にパーツの断面の形をレーザーで走査する。パウダーの材質が非晶質 (アモルファス) なら、レーザーの熱でパウダーの粒子が軟化して互いに結合し、密な固体を形成する。このプロセスを融解 (fusing) または焼結 (sintering) という。パウダーの材質が結晶性ならレーザーの熱でパウダーが溶けて液体になり、冷えると固まって固体になる。どちらの場合もレーザーの熱で成型を行なう。固化した層は固化していないパウダーに埋もれた形になる。全部の層の成型が終わったら、パウダーを取り除きパーツを取り出す。成型物作製のための作業空間には、不活性ガス (窒素、酸素濃度は 1~2% 以下) が満たされており、さらにパウダーの最上層が融解または溶解するぎりぎりの温度になるように加熱されている。図 1 に、この方法の原理図を示す。

この方法の利点は、次の通りである。

1. 造形中の成型物はパウダーによって保持されているので、サポートが必要ない。また、複数成型物を一度に造形可能である。
2. 材料の選択幅が広い。現在は、ポリカーボネート、ワックス、ナイロン、ゴム状の材料、その他強度の高いコンポジット材料、金属材料など、様々な材料が使用されており、最終製品を一工程で作製することができる。(Rapid Tooling)

一方、欠点は、次の通りである。

1. SLS に使用するパウダーの径が 80~120 ミクロン程度で、非晶質パウダーは原型をとどめる傾向にあり、パーツ表面が荒れてしまう。また、パウダー径以下の分解能は得られない。特に高さ方向において顕著である。
2. また、細かい形状では、パウダーを完全に除去できない、パウダーを材料として使

用するので、隙間の多い構造になりやすい。たとえば、ポリ塩化ビニル（PVC）を焼結した場合、密度はわずか60%程度である。

- さらに、パウダー同士を焼結して固着させる際に収縮が起こり、パーツの精度の悪化や反りが生じる。その収縮は材料によって異なり、また造形条件によっても異なるので、予測が難しい。

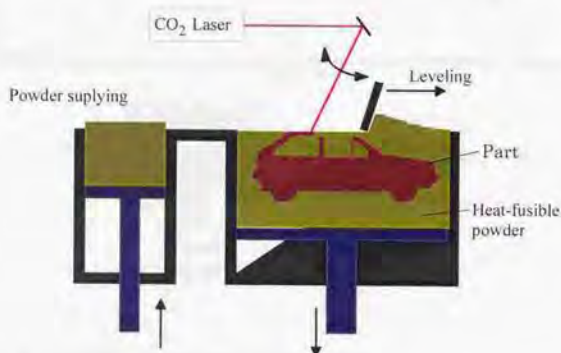


図1：粉末熔融焼結法の原理図

• 3Dプリンティング法 (Three Dimensional Printing)

3Dプリンティング法で使用する材料は、シリカやアルミナなどの難溶性のパウダーと液体コロイド状のシリカ結合剤である。これら難溶性のパウダーはインバーストメント鋳造プロセスで使用する材料である。この方法は、パウダーで作った薄い層（powder bed）に液状の結合材をインクジェットなどで吹き付けて微粒子を互いに接着させることを繰り返して、3次元モデルやインバーストメント鋳造用のセラミックモールドを作る。完成したモールドは炉で加熱して、粒子間の結合を強め、強度を高める。最後に結合していないパウダーを落として完成する。金属パウダーを使用する場合には、若干プロセスが異なり、積層成型が終了した段階で余分なパウダーを落とし、それから炉で加熱する。このとき、結合剤は燃えてなくなり、金属粉同士が焼結する。図2に3Dプリンティング法の原理図を示す。

この方式の利点としては、モールドが一工程で作製できる点にある。しかし、欠点として表面の仕上がりが非常に悪い、細かい形状からパウダーを除外できない、表面の不完全な仕上がりがそのまま鋳造された金属の成型物に反映してしまうなどがあげられる。

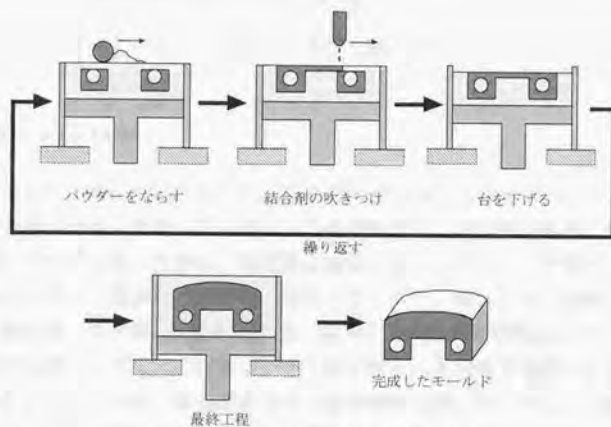


図2：3Dプリンティング法原理図

• 3Dクラディング法 (Three Dimensional Cladding)

3Dクラディング法では、図3に示すように赤外レーザで金属基質に溶融物溜まりを作り、その部分に材料となるパウダーを注入して、溶かすことで堆積させていくことで、3次元形状を得る。この方法も主に、直接最終製品を成型するラピッドツーリング目的で使用される。造形精度は、それほど高くない。

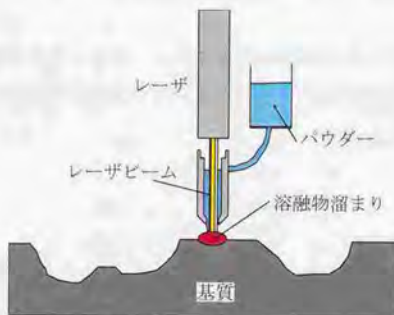


図3：3Dクラディング法原理図

2. LOM (Laminated Object Manufacturing) 法

この方法では、薄いシート状の材料を一層ずつ積み重ねていくことで、3次元形状を成型する。

● 紙積層法 (Sheet LOM)

シート材として、紙を用いたもので、CADデータに従って出力25Wもしくは50WのCO₂レーザを等高線状に走査して、紙シートを切断する。成型物を構成しない部分のシート材は細かくタイル状に分割し、作製後に除去する。このシートの裏面には熱活性接着剤が塗布してあり、適切な熱と圧力を加えると、シート材が上下に接着する。このような過程を繰り返して3次元成型物を得る。図4にLOM法の原理図を示す。

この方式の利点としては、成型物がシート材に囲まれた状態で造形されるので、サポートを必要としない、また、除去方式なので成型物の収縮、反りといった問題がない。欠点としては、タイル状に分割した余分な部分を取り除く作業が必要で、さらに細かい部分は除去できない点があげられる。

● 金属接合積層法 (Metal LOM)

この方法では、シート材として薄い金属板を使用する。金属板の切断には、高出力のCO₂レーザ、YAGレーザ、またはボールエンドミルなどを使用し、断面を作製し、それぞれの金属板を接着剤または低融点金属などで接着積層していくことで、3次元形状を得る。高さ方向の分解能はシートの厚さによる。

この方式の利点としては、直接金属成型品が得られる点にあるが、紙積層法と同様細かな形状は成型できない。また、金属板接着面強度が弱く、実用的な金属部品として利用することは難しい[32]。

この方式で、造形速度を向上させ、しかも金属板厚によらず高さ方向の精度を向上させる手法として、5軸に制御されたエンドミルを用いる方法も研究されている[33]。

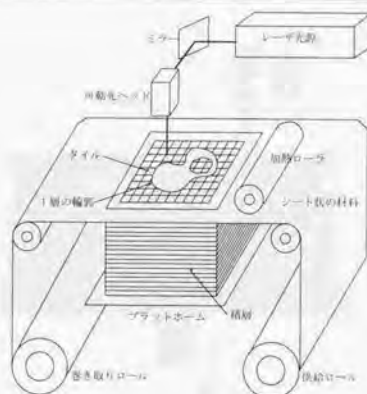


図4: LOM 法原理図

3. 堆積法 (Deposition Method)

この方法は、材料を直接堆積させながら、3次元形状を成型する方法である。

• インクジェット法 (Inkjets)

この方法では、材料の堆積にインクジェットヘッドを用いる。材料には、ワックスを使用し、通常、成型用ワックスと、サポート用ワックスの2種類を用いて成型を行なう。溶融したワックスをインクジェットヘッドから吐出し、それを堆積させて、3次元形状を成型する。成型用ワックスとサポート用ワックスの融点は異なり、造形終了後に一定温度に加温された液体に浸すことで、サポート用ワックスは除去される。この方式では、インクジェットヘッドを用いて造形を行なうので、成型速度が速く、また切削によって積層厚を制御することで、高さ方向の精度が高い。しかし、インクジェットヘッドでワックスを吐出するために、正確な吐出が行なわれない場合が多く、XY面、高さ方向ともに高精度は得られていない。図5にインクジェット法の原理図を示す。

この方式を用いた装置で、複数のノズルから材料を打ち出し、高速化を実現したものもある。また他に、現在研究中のもので、低融点金属をインクジェットで打ち出して堆積させていく方式があり、メタルジェット法と呼ばれている[34]。この方式で、 $35\mu\text{m}$ のノズルを使用し、 $8\mu\text{m}$ 径の超微粒子を吐出することに成功している。現段階では、インクジェットで打ち出せる金属には制限があるが、将来的に期待される方法である。

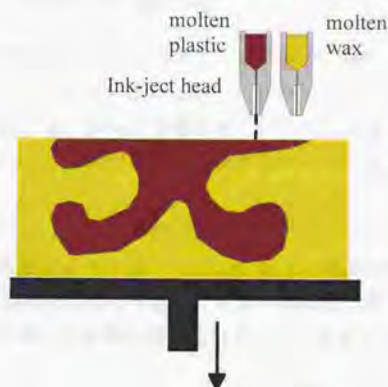


図5：インクジェット法原理図

- ガスディポジション法 (Gas Phase Deposition)

この方法は、固体や液体の材料を使用するのではなく、気体相を利用する方法で選択域レーザ堆積法 (Selective Area Laser Deposition) といわれている。この技術は、レーザ化学蒸気堆積法 (Laser Chemical Vapor Deposition) を一般化したものである。この方法では、図 6 のように、材料として炭素ガス (CH_4 , C_2H_2) を充満した密閉容器内にレーザをスキャンして、基質に直接、材料を堆積させる成型法である[35]。現在のところ、材料が限られており、またサポートも必要であり、特別な用途にしか使用されていない。

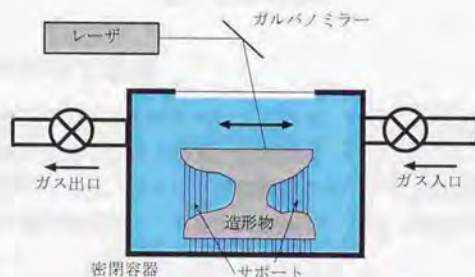


図6：ガスデポジション法原理図

● 熔融物堆積法 (Fused Deposition Modeling)

この方法では、熱可塑性樹脂やワックスなどの材料を、細いワイヤ状、もしくはペレット状で供給し、融点より少しだけ高く加熱した状態でノズルの先端から連続的に押し出しながらノズルを移動させ、材料を堆積させていくことで3次元形状を得る。通常、サポート材料と、成型材料の2種類を用いて造形を行なう。図7に熔融物堆積法の原理図を示す。

この方式の利点としては、様々な熱可塑性樹脂を材料として利用できる点があげられる。欠点としては、現段階でノズル径が $300\mu\text{m}$ 程度と描画分解能が低いこと、ノズルの移動に XY プロッタ機構を採用しており、大きい成型物を密に造形する場合、造形時間が膨大になること、サポート材料が除去しにくいことなどがあげられる。

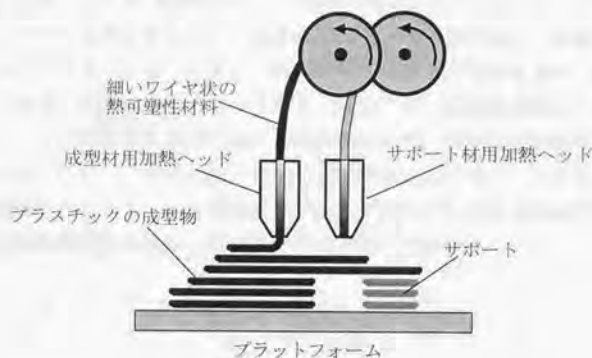


図7: FDM 原理図

4. RP&M 技術の現状と課題

以上、さまざまな RP&M 技術について、その原理、利点、欠点について説明した。表1に、各 RP&M 技術について、その方式、造形精度、材料、特徴、用途についてまとめておく。造形精度に関しては、様々な文献に記述されている造形物測定値から推察した値であり、各手法の造形装置によって多少異なってくるが、各造形手法の大まかな目安として載せてある。

本節では、各種 RP&M 加工法の立体モデル成型法としての適合性を考えてみる。評価の項目は、

1. エネルギー源が安価に入手できること。また、小形で長寿命、保守性が良好であること。

2. 層間の積層が容易，強固であり，全体が堅牢であること。
3. 素材の入手が容易で安価，かつ保存性が良く，無害であること。
4. 加工時に煙や悪臭など作業環境を悪化させないこと。
5. 処理の困難な廃棄物を生じないこと。
6. 準備工程，加工工程ともに短時間であること。
7. 大きなサイズのものまで作製できること。
8. 製作した立体構造物の寸法精度が良好で，表面の平滑度に優れていること。

表2は，機械加工も含めて上述した各 RP&M 方式を比較したものである。ほとんどの項目で，光造形法が優位性を示している。現在では，他の方式も研究・開発が進められ，光造形法に精度的に近づいてきているが，現状ではまだ不十分である。光造形法では，紫外光レーザを用いるため，装置全体として高価で大きなものになってしまうが，近年，固体パルスレーザの使用にともない，装置価格低下，保守費用低下，装置サイズ縮小など優位性が高まってきている。ただし，素材がプラスチックであるため，セラミックや金属に比べて強度，耐熱性の面で劣っている。海外では，直接最終製品を成型する，ラビッド・ツーリングが注目を浴びており，粉末成型法や，熔融物堆積法の装置がシェアを広げつつある。しかし，精度の面では全く光造形法には及ばず，しかも，光造形法における材料の問題点もセラミックや金属モデルへの転写という形で解決できるので，現段階では光造形法が優位性を保っていると言って良いだろう。

表1: 各 RP&M 技術の分類

分類	方式	造形精度 (仕上がり 時)	材料	特徴	用途
粉末成型法	選択溶融 焼結法	$\pm 200 \mu\text{m}$	ポリカーボ ネート, ワッ クス, ナイロ ン, 金属材料 など	粉末を加熱焼結, サ ポート不要, 造形物の 充填密度が低い, 表面 精度が悪い	ラビッドツーリング, モ デル, 消失模型, 金型, 鋳型, 金属部品など
	3Dプリン ティング法	$\pm 200 \mu\text{m}$	シリカ, アル ミナなど	インベストメント鋳造 用パウダーをインク ジェットによるバイン ダーで接着, 後で炉で 加熱	鋳型, モデルなど
	3Dク ラッディ ング法	$\pm 300 \mu\text{m}$	各種金属パウ ダー	レーザーで基質金属を溶 融し, 金属パウダーを 流し込み, 堆積させる	金属部品, ラビッドツー リング目的
LOM法	紙シート 積層法	$\pm 200 \mu\text{m}$	紙シート	紙シートを赤外レー ザで切断, 接着, 積層 していく	モデル, 木型
	金属シー ト積層法	$\pm 300 \mu\text{m}$	金属シート	金属シートをエキシマ レーザーやCO ₂ レーザ, ボールエンドミルなど で切断, 低融点金属で 接着, 積層していく	金属部品, モデルなど
堆積法	インク ジェット 法	$\pm 200 \mu\text{m}$	ワックス, 樹 脂	ワックス, 樹脂粒をイン クジェットで吐出, 堆積させていく	モデル, 消失模型など
	ガスデポ ジション 法	$\pm 80 \mu\text{m}$	炭素ガス (CH ₄ , C ₂ H ₂)	炭素ガスが充填した密 閉容器内に外部より レーザを照射し, 基質 に直接材料を堆積させ る	モデル
	溶融物堆 積法	$\pm 300 \mu\text{m}$	樹脂, ワッ クス	樹脂, ワックスなどを 溶融し, ノズルから連 続的に押し出して, 走 査しながら堆積させて いく	モデル, 消失模型など
光造形法	レーザス キャン方 式	$\pm 100 \mu\text{m}$	光硬化性樹脂	紫外光レーザーで樹脂面 を走査し, 選択的に硬 化, 積層させていく	モデル, ダイレクト型製 作, 消失模型など
	マスク 一括露光	$\pm 200 \mu\text{m}$	光硬化性樹 脂, ワックス	紫外光ランプで一括露 光, 未硬化樹脂を除 き, ワックスを塗布, 切削, 積層させていく	モデル, 消失模型など

表2: RP&M 技術の比較

項目		機械加工	粉末成型法	LOM法	堆積法	光造形法
精 度	仕 上 が	○	×→△	×	×	○
	り 時 精 し	○	×→△	×	×	○
ス ピ ー	準 備 時	×	×	×	△	○
	ド 加 工 時	△	△	×	×	○
価 格	装 置 価	○	×	△	×	△
	運 転 費	×	×	×	△	△
造 形 物	堅 牢 さ	○	×→△	○	○	△
	最 大 寸	○	×→△	×	×	○
素 材	選 択 の	○	×→△	○	×	×→△
	入 手 し	○	△	○	△	○
形 状 の	保 存 性	○	○	○	○	○
	自 由 度	×	△	○	×	○

■制御回路

ここでは、第7章において設計・製作を行なった紫外光遮断層を用いた冷却固化式光造形システムにおける制御回路部について解説する。図8に試作システムの制御概念図を示す。

図8に示すように、試作システムの制御は、制御用コンピュータからの信号で、制御集中管理ボード、各種信号入出力ボードを介して行なわれる。制御用コンピュータ接続のISAバス増設ユニットには、AD/DAボード（IBX-3507、（株）インターフェース）、デジタルIOボード（IBX-2792C、（株）インターフェース）、2軸ステッピングモータコントロールボード（SMC-7207、（株）インターフェース）が内蔵されており、制御用コンピュータからこれらのボードに信号を出力し、そこから制御集中管理ボードに信号が送られる。表3、表4に制御集中管理ボードおよび各種信号入出力ボードの入出力についてまとめておく。また、図9と図10に制御管理集中ボードおよび各種信号入出力ボードの回路図を示す。

回路図に示すように、制御集中管理ボードには、ISAバスユニット内のSMCボード、DIOボード、AD/DAボードからの信号が入力され、インターフェースポートを介して、各種信号入出力ボードに接続される。

SMCボードは、2軸補間タイプのステッピングモータコントロールボードで、XYプロッタのXY軸モータ制御に使用される。DIOボードのうち、DI部ではインターフェースポートを介して、XYプロッタのリミット信号、Zステージ原点リミット信号、XY軸用ACサーボモータ位置決め完了信号、緊急スイッチ信号を入力している。DO部では、XY軸駆動パルス信号、Zステージ駆動パルス信号、インクジェット吐出信号、レーザービームON/OFF信号、SCMボード選択信号、ファンON/OFF信号、樹脂供給ON/OFF信号をインターフェースポートに出力している。AD/DAボードのDA部は、AOMドライバへのアナログ信号、インクジェットヘッドリファレンス電圧信号を出力しており、AD部は、レーザーパワー測定値信号、熱電対からの温度測定値信号を入力している。

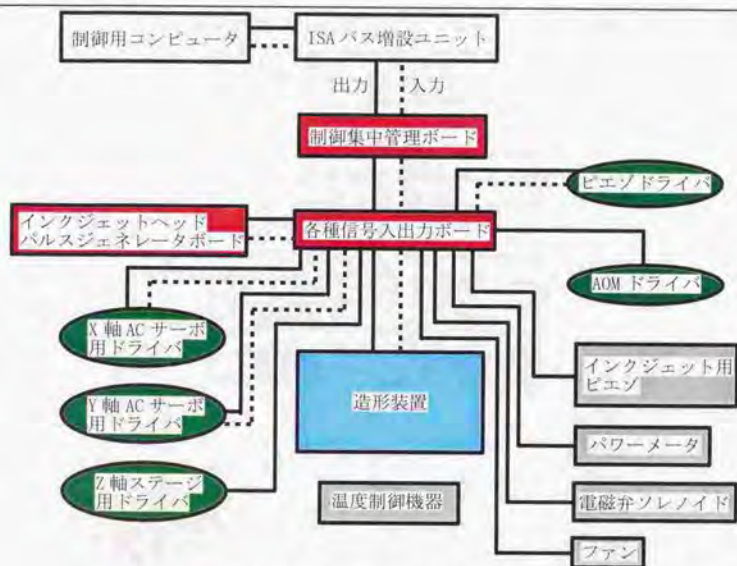


図8：試作システム制御概念図

表3：制御集中管理ボードインターフェース一覧

DAポート
インターフェースポート
DIポート
DOポート
Z軸ポート
SMCポート
AOMドライバ出力 (0~+1.1VDC)
PIEZO電源出力 (波形) ~5V
PIEZO電源入力 (波形) ~1.50VDC
GND (PIEZO)
1bitソケット
5VDC入力
制御系全体GND

表4：各種信号入出力ボードインターフェース一覧

インターフェースポート
リミット信号入力 (1~5)
X_Pulse 5pin
X_Encode 6Pin
Y_Pulse 5pin
Y_Encode 6Pin
インクジェット10Pin
DC+12V 2Pin
FAN DC12V 2pin
FAN AC100V 2Pin
樹脂タンクバルブ 2Pin
インクジェット掃除 2Pin
緊急停止スイッチ 2Pin

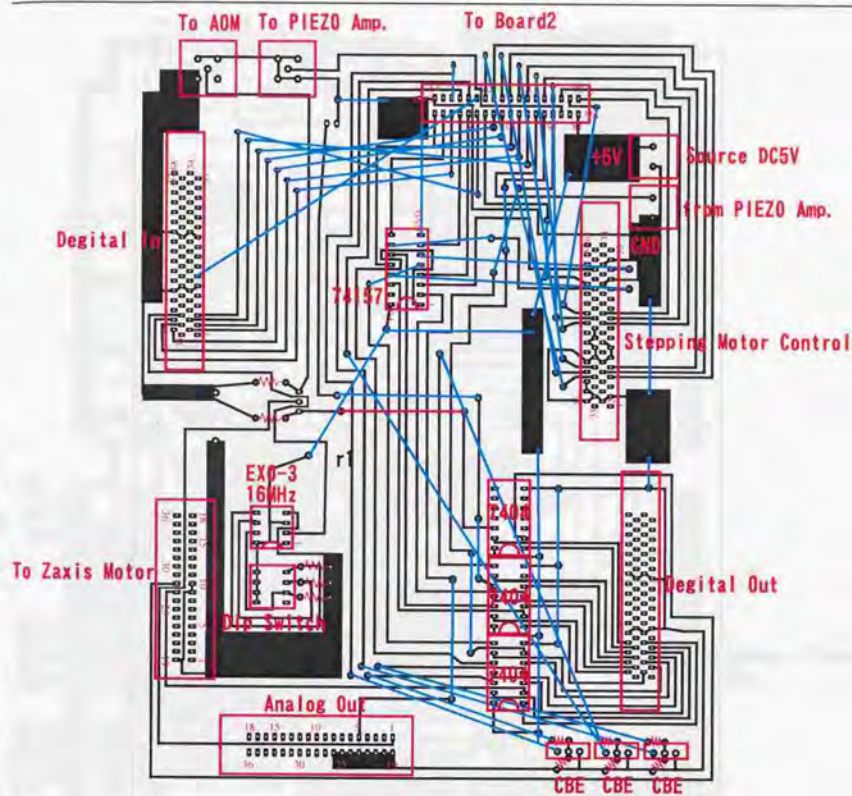


図9：制御集中管理ボード回路図

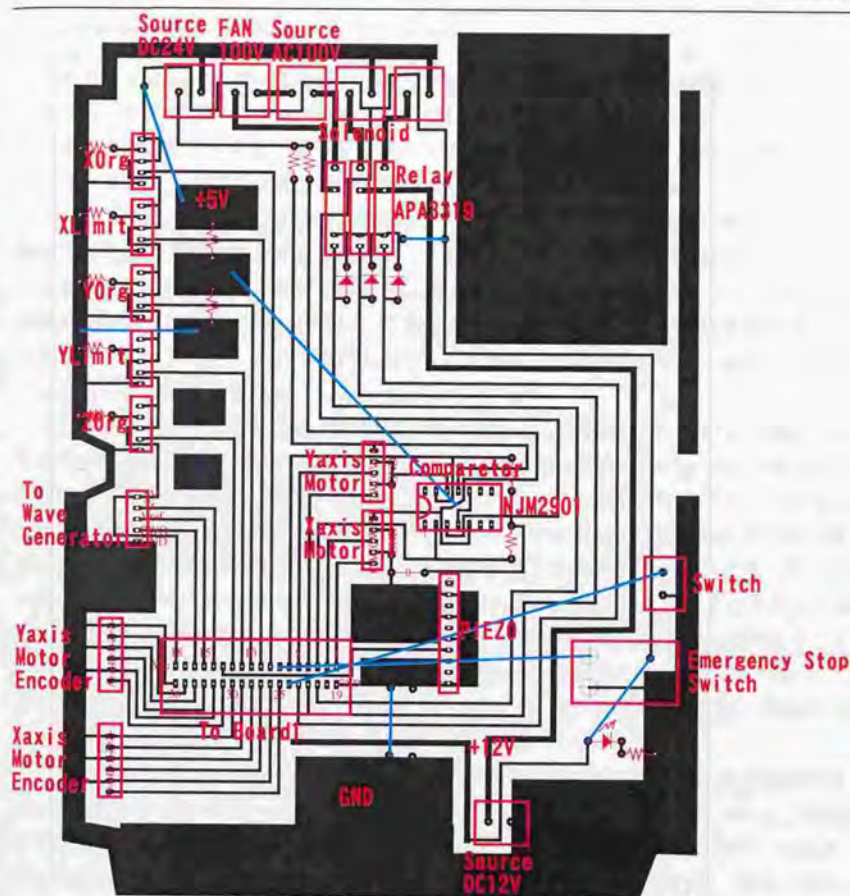


図10：各種信号入出力ボード回路図

・パルスジェネレータボード

パルスジェネレータボードでは、インクジェットヘッドのピエゾを駆動するパルスが発生する。より効率よくインクの吐出を行ない、またインクの液だれを防ぐために、図11のような波形を出力するパルスジェネレータボードを開発した。これは、(株)エプソンのインクジェットプリンタで実際に使用されている方法である[48]。

この波形では、ピエゾに常に基準電圧をかけておき、インクを吐出する際にまず一度電圧を滑らかに下げてインクを吸引する。そして、一気に電圧を吐出電圧まで上げ、インクを吐出する。さらに、電圧を滑らかに基準電圧まで持っていくことで、ノズル付近の余分なインクを吸引すると同時に、不足分のインクをインクタンクから吸引する。パルスジェネレータでは、1パルスの入力でこの波形を1周期分生成する。図12にパルスジェネレータの回路図を示す。

パルスジェネレータ回路では、まず出力したい波形を128(128バイト分)に分割して、そのデジタルデータをUVEP-ROM(D2716D)に書き込んでおく。パルス出力時には、制御コンピュータからのTTLレベルのトリガー1パルスにより、バイナリカウンタIC(4024)のカウンタがリセットされ、ディップスイッチによって設定された周波数で発振している水晶発振子からのパルス数により、バイナリカウンタのカウント値(アドレス)が増えていく。そのアドレス値をEP-ROMに入力することにより、そのアドレスに書かれたデータ(8bit)が8bit D-AコンバータIC(AD7524)に出力され、結果としてそのアドレスに書かれた1バイトのデータ値に応じた電圧が外部に出力される。それが、水晶発振子の周波数に応じて連続的に変化していくことで、所望の電圧波形1周期分が出力される。

次に、パルスジェネレータからの電圧波形をピエゾドライバに入力し、波形電圧を増幅して、インクジェットヘッド内のピエゾ素子に出力する。ピエゾドライバに入力される電圧波形は最高周波数5kHzであり、さらに128段階で電圧が変化するので、 $5\text{kHz} \times 128$ で640kHzのアナログ電圧値変化に追従できなくてはならない。表5に、(株)エコー電子のピエゾドライバ(ENP-151U)の仕様を示す。

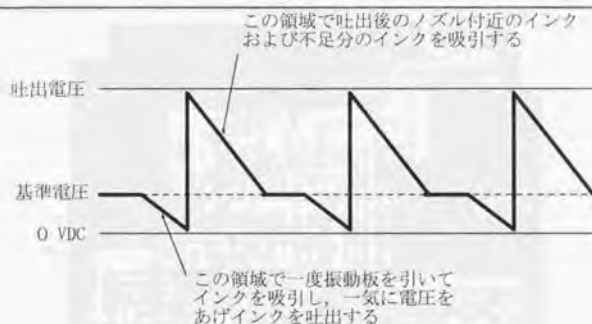


図11：パルスジェネレータによるパルス波形

表5：ピエゾドライバ ENP-151U 仕様

バイアス設定範囲	0~150V	
増幅帯域	DC~100kHz (-3dB)	100Ω 抵抗負荷 100V p-p 出力
入力電圧	±10V MAX	10Vの入力で、出力150V
入力インピーダンス	100 kΩ	
増幅度	25dB (15倍)	
出力安定度	0.0001/H ±0.0001/AC±10V	通電1時間後から
リップル雑音	5mVp-p以下	2μF容量負荷 BIAS電圧 100V
モニタ出力	1/10 MAX 15V	インピーダンス 10 kΩ
過電流保護開始電流	ピーク値 ±5A 平均値 2A	
電圧制限回路設定範囲	0~150V	
低速起動回路	約4秒	電源ON及びRESET時
入出力接栓及び端子台	制御信号入力 BNC-R型	出力端子 7.62mm ピッチ 端子台
所要電源	AC100V ±10% 50/60Hz 2A	
外形寸法及び重量	103mm (W) × 124mm (H) × 220mm (D)	約4.5kg

・ 熱電対アンプ回路

第8章の樹脂面温度測定に使用した、K型熱電対からの信号を温度に対応した電圧値に変換するアンプ回路図を示す。

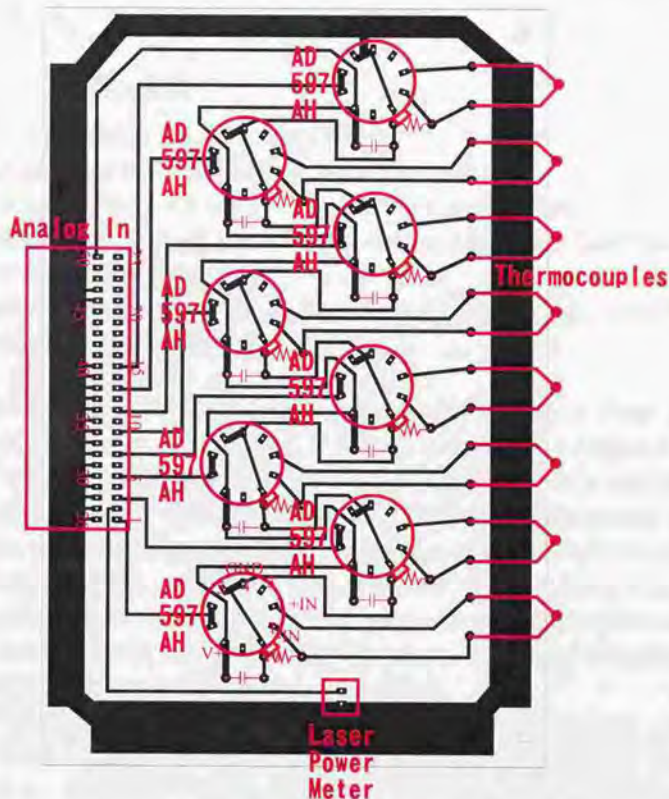


図13：熱電対アンプ回路

■造形システムソフトウェア

ここでは、第7章で設計・製作を行なった紫外光遮断層を用いた冷却固化式光造形システムに関するシステムソフトウェアについて解説する。

・造形データ作成・変換

造形データの作成は以下のような手順で行なう。

1. 3次元CADを用いて所望の形状をソリッドとして設計する。
2. 3次元CAD内で、ソリッドデータをSTLファイルに変換する。
3. 各層毎のスライスデータを作成するスライサソフトを用いて、“del”フォーマットのファイルに変換する。
4. 造形ソフトウェアに“del”フォーマットのファイルを読み込み、マスクデータを付加したデータへと加工する。

本研究では、試作システム専用の各層スライスデータフォーマット(“del”フォーマット)を新たに提案した。図14に“del”フォーマットの実際のデータ内容を示す。

“del”フォーマットは、各層毎のビットマップデータをランレングス手法で圧縮をかけたもので、テキストデータ形式である。図14、2行目のX100,100; Y100,100; Z100,100; というのは、それぞれX, Y, Z方向の最大ドット数、および分解能を示している。X100,100; では、Xの次の100がX方向最大ドット数を表しており、その次の100がX方向分解能(μm)を表している。つまり、データ上のX方向1ドットが、実際の造形では100 μm になる。このモデルでは、X, Y, Z方向すべて100ドット、100 μm 分解能なので、実際造形されたモデルのサイズは1cm \times 1cm \times 1cmになる。

L1;というのは、Lの次の数字がレイヤ番号を示している。L123;であれば、123層目のデータを示すことになる。その後の括弧内が、ビットマップをランレングスで圧縮したデータである。1100;では、1文字目の数字がそのドットの特性を示しており、その後の数字がそのライン方向の長さを示す。今、Y方向の最大ドット数が100に設定されているので、1100; がちょうど1ラインのデータを示しており、それが、X方向に100本描画される。ドットの特性は、0~9の数字で表され、0が何もない領域、1がレーザのみの描画にデフォルトで設定されており、2以降がユーザ設定となっている。例えば、2, 3, 4, 5にそれぞれシアン、マゼンタ、イエロー、黒の色を割り当てたとすると、このフォーマットで3次元立体内の色彩分布を表現することが可能である。試作システムでは、

レーザ描画以外にマスクのデータが必要なので、2の特性をマスクに割り当てている。

輪郭データ領域は、10.0,10.0,20.0,20.0のように、始点 $x1,y1$ 、終点 $x2,y2$ を記述していく。単位は μm である。

```
%"del" フォーマット
X100,100; Y100,100; Z100,100;
L1;
(
  %描画データ
  1100;1100;1100;1100;1100;1100;1100;1100;1100;1100;
  ⋮
  1100;1100;1100;1100;1100;1100;1100;1100;1100;1100;
  1100;1100;1100;1100;1100;1100;1100;1100;1100;1100;
  1100;1100;1100;1100;1100;1100;1100;1100;1100;1100;
)
(
  %輪郭データ
)
L2;
(
  1100;1100;1100;1100;1100;1100;1100;1100;1100;1100;
  ⋮
  1100;1100;1100;1100;1100;1100;1100;1100;1100;1100;
```

図14：：“del” フォーマット内容

次に、“del” フォーマットを作成するスライサソフトについて説明する。

このスライサソフトは、一般 RP システム用フォーマット (STL ファイル) を “del” フォーマットに変換するソフトで、研究室内で独自に開発した。このソフトは、STL ファイルを “del” フォーマットに変換するだけでなく、STL ファイルの立体表示などの機能を持つ。図 16にスライサソフトの実行中の画面を示す。このソフトでの “del” フォーマット作成手順は以下の通りである。

1. STL ファイル、または図 15のようなログファイルを読み込む。
2. XY 面分解能、Z 方向分解能 (積層厚)、Z 方向スライス開始位置を設定し、スライスを開始する。

ログファイルは、特性毎に STL ファイルを作成し、それを順番に記述したもので以下のようなテキストファイル形式である。File1.stl と File2.stl に重なる領域が存在する場合、後から記述した File2.stl が優先される。また、ファイル名の後の数字が特性の番号をしめしている。このファイルでは、File2.stl がレーザのみの描画領域になる。


```

File1.stl  3
File2.stl  1
File3.stl  4
File4.stl  2

```

図15：スライサソフトログファイル内容

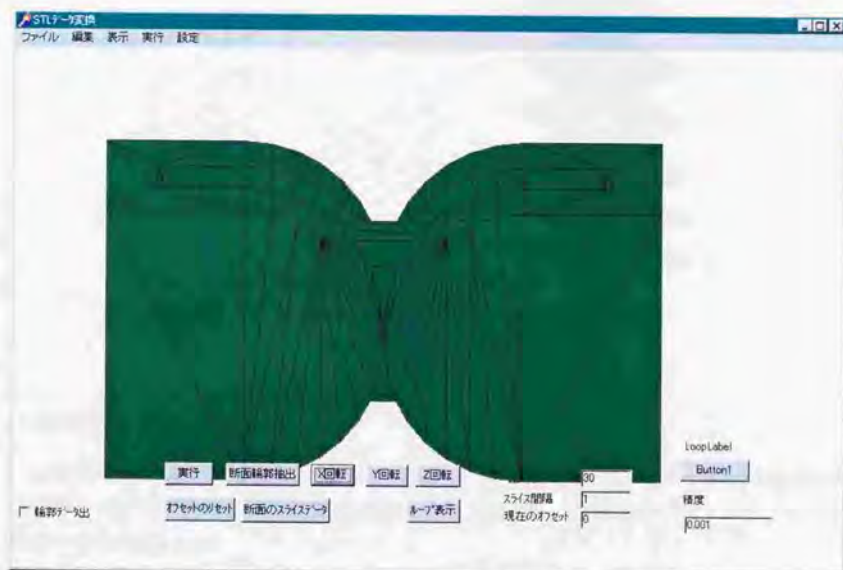


図16：スライサソフト実行画面

スライサソフトで変換された“del”フォーマットデータは、次項で述べる造形ソフトウェアに読み込まれ、硬化物余剰成長が生じる位置に自動的にマスクが挿入される。図17に、どのようにマスクが作成されるかを示したマスク作成概略図を示す。

図17において左が、スライサソフトでSTLファイルから変換された“del”フォーマットデータで、右がマスクを付与した“del”フォーマットデータである。このモデルは全5層で、3層目にスリットが入っているため、当然、造形物底面と3層目のスリット上面には硬化物余剰成長が生じる。そこで、造形ソフトウェアでは図17右のように、この部分に自動的にマスクデータを挿入し、底面マスク層を含めて全6層となる。マスク

を自動的に挿入するアルゴリズムは簡単で、現在探索している層の一つ上の層も同時に探索し、現在層が空白ドットで、一つ上の層の同位置がレーザ描画ドットに設定されていれば、現在層のドットにマスクの特性を付与すれば良い。

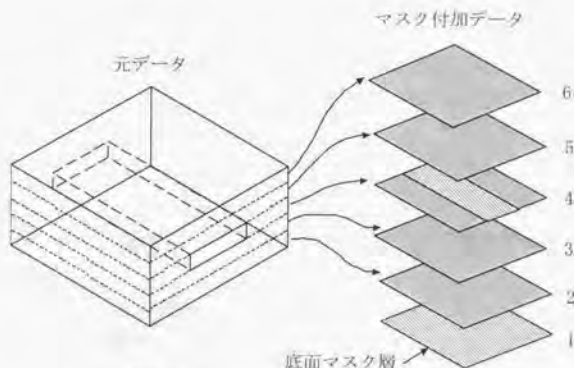


図17: マスク付加データ作成概略

・造形システムソフトウェア

本研究では、第7章で設計・製作した造形ハードウェアを制御し、造形を行なうための造形システムソフトウェアを独自に開発した。表6に、造形システムソフトウェアの機能一覧を示す。

表6の1～4の各設定では、造形に必要なパラメータの設定を行なう。表7に、造形に必要なパラメータおよびデフォルト値を示す。

表6の1のレーザパワー値は、10のスキャン速度、11のデューティ比とも関連して、造形時における樹脂の硬化形状に影響する。各層造形開始時に、1で設定したレーザパワー値に露光面レーザパワーが等しくなるように、AOMへの出力電圧が自動調整される。また、11のデューティ比は、9のY方向スキャン間隔をレーザビームでスキャンする際に、何%だけレーザをON状態に保つかを決める。この値によって、各ラインにおける硬化ドット間の重なり具合を調整可能である。値が小さ過ぎると、ラインは連続ではなく小さな硬化ドットが複数並ぶ状態になる。

2のインクジェットヘッドリファレンス電圧は、インクジェットヘッド内ピエゾ素子に送るパルスの振幅を決定する。マイナス方向に大きいとパルス振幅が大きくなる。た

だし、デフォルト値-6VDCがMaxである。

3のノズル・レーザビーム間距離は、造形時におけるインク定着点とレーザ描画位置を調整するパラメータである。

7の樹脂供給ON時間は、6のレイヤ厚とも関連して、一層を塗るだけの樹脂量を樹脂供給ユニットに送るための、電磁弁解放時間である。

8の描画原点は、実際に一層の描画を開始する座標を表す。

12、13は、一層内でマスクを厚くするために2回描画するかどうか、また造形物表面を滑らかにするためにレーザを2回描画するかどうかを設定する。これは、層毎に設定可能である。

実際の造形システムソフトウェア実行画面を図18に示す。図18左側領域が、層のスライスデータ表示エリアで、グレイ部分がレーザ描画領域、シアン部分がマスク描画領域を示している。図18右側領域は、造形運転の各パラメータ設定を行なうダイアログである。

図19の8のCTデータ操作機能では、DICOM形式のCTスライスデータを読み込み、画像処理を行なって造形用データへ変換することができる。図19に実際にCTスライスデータを加工している画面を示す。図19右のダイアログ内で、造形に必要な部分をCTスライス画像データから画像処理して抽出する設定を行なう。

表6：造形システムソフトウェア機能一覧

	機能	説明
1	XYプロッタ設定	キャリアの移動、原点調整、プロッタ関連パラメータの表示
2	レーザ設定	露光面レーザパワーの測定、造形時のレーザパワー設定
3	インクジェット設定	インクジェット出力電圧設定、インクジェット描画位置決め設定
4	樹脂供給設定	コートスピード、樹脂供給厚、樹脂供給時間設定
5	センサチェック	リミット・原点センサのチェック
6	Cd/Ec測定	使用樹脂の臨界露光量、透過深度測定設定
7	温度測定	樹脂面温度測定設定
8	CTデータ操作	医療用CTデータの読み込み、加工、変換
9	マスク自動作成	造形データを読み込み、マスクデータを自動作成
10	EP-ROM書き込み	インクジェットパルス波形を生成し、EP-ROMに書き込む
11	造形運転	造形運転に関する様々なパラメータ設定および造形実行
12	硬化形状シミュレーション	樹脂の硬化形状に関するパラメータ設定、およびシミュレーション実行

表7：造形に必要な各パラメータおよびデフォルト値

1	描画時レーザーパワー	10 [mW]
2	インクジェットヘッドリファレンス電	-6 [VDC]
3	ノズル・レーザービーム間距離 (X, Y)	(0, 227) [100 μ m]
4	エレベータ降下距離	2.5 [mm]
5	コート速度	10 [cm/sec]
6	レイヤ厚	100 [μ m]
7	樹脂供給ON時間	3 [sec]
8	描画原点 (X, Y)	(100, 60) [mm]
9	スキャン間隔 (X, Y)	(100, 100) [μ m]
10	スキャン速度	40 [cm/sec]
11	レーザービームデューティー比	60 [%]
12	各層 マスク 2回描画 ON/OFF	OFF
13	各層 レーザ 2回描画 ON/OFF	OFF

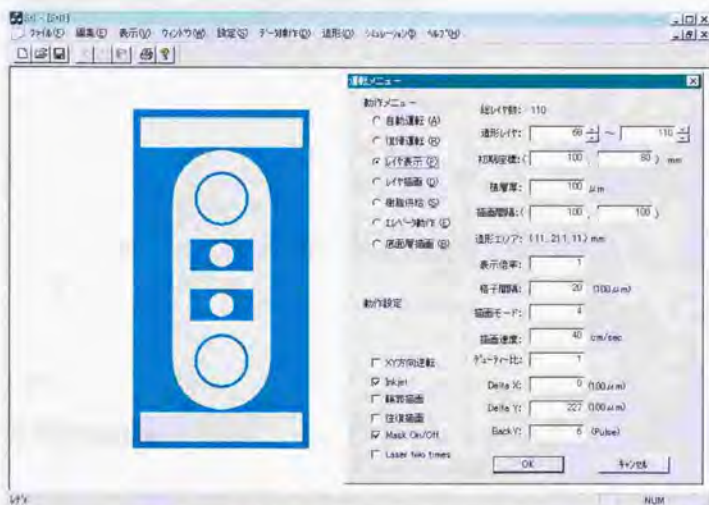


図18：造形システムソフトウェア実行画面

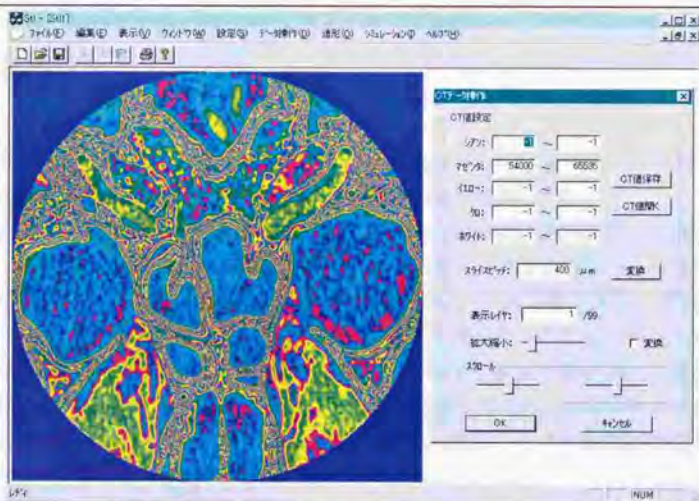


図19: CT データ操作画面

■造形手順

ここでは、第7章において設計・製作を行なった試作システムを用いて、造形を行なうための手順について説明する。

・造形準備

以下の手順で造形準備を行なう。

1. レーザ光学系の調整

レーザ光学系では、まず4つのミラーの角度調整を行ない、レーザビームを露光面まで導く。その際にXYプロッタキャリアを移動させ、すべての位置でレーザパワーが一定になるようにミラーの角度調整を行なう。次に、AOMの角度調整を行なう。AOMドライバにMAX電圧(1.1VDC)を出力し、AOMが作動した状態で、AOM本体入射窓と入射ビームとの角度を 90° から少しずつ大きくしていく。そして、光学スリット位置で第1次回折光の強度が最大になるようにパワーメータを見ながら角度を

調節する。そして、第1次回折光以外の分離光を遮断するように、スリット窓の調整を行なう。

2. 使用樹脂の加温

温度調節を行なう箇所は、樹脂タンク、樹脂供給パイプ、コート、樹脂供給ユニットの4つである。それぞれの温度調節器の設定温度を表8に示す。

温度を上げる際には、それぞれの箇所温度の上昇の仕方が異なるので注意が必要である。まず、樹脂タンクの設定温度を90℃に設定し、タンク全体が十分に暖まったのを確認してから、設定を100℃まで上げる。同時にコートの設定温度115℃を入力する。そのまま、タンク内の樹脂がほぼ完全に融けるまで待ってから、タンクに蓋をしてネジでしっかり固定する。次に、樹脂供給ユニットの設定温度を70℃、供給パイプを60℃に設定する。両方が十分暖まったことを確認してから、樹脂供給ユニットの温度設定を90℃まで上げる。最後に、造形開始直前に供給パイプの温度を80℃まで上げて、すべての温度が一定に落ち着くまで待つ。

使用樹脂の加温では、上記手順を守ることが重要である。手順を誤った場合、温度が急激に上昇し、特に温度上昇が激しい径の小さな金属パイプ内で、樹脂が熱重合し固まってしまう可能性がある。

表8：温度調節器温度設定値一覧

樹脂タンク	100℃
樹脂供給パイプ	80℃
コート	115℃
樹脂供給ユニット	90℃

3. その他

その他の造形準備として、インクジェットヘッドの掃除、ISAバスユニット、ピエゾドライバ、XYプロッタ用モータドライバ、Zステージドライバ、各種信号入出力ボード、電磁弁ソレノイド用電源の電源をONにすることがあげられる。すべて、造形ソフトウェアを起動する前に行なわなくてはならない。

・造形

まず、造形システムソフトウェアを起動する。起動したら、設定メニューの中のXYプロッタ設定ダイアログを開き、XYプロッタのイニシャライズを行なう。これは、プロッタキャリアの移動範囲の特定と、各種システムに関するイニシャライズを行なうので、

必ず造形前に一度は実行しなくてはならない。

次に、設定メニュー内のインクジェット設定ダイアログを開き、インクジェットテストチェックボックスをチェックし、インクジェットヘッドのテストを行なう。インクが出ていることを確認し、出ていない場合は MEK というラベルの溶剤に綿棒を浸して、ノズル部分を丁寧に掃除する。ここまで完了したら、ファイルメニュー内のインポートを選択し、造形データをシステムに読み込む。

造形の前準備として、造形テーブルにベースとなる樹脂を 1 mm 程度積層する。こうすることで、造形終了後に容易に造形物をテーブルから取り出すことができる。いきなり造形を開始した場合、造形物がテーブルに固着する可能性がある。

樹脂を造形テーブルに 1 mm 程度積層したら、次に造形データ 1 層目の底面マスク層を描画する。造形メニュー内の運転を選択し、運転ダイアログを開き、造形描画位置、その他各パラメータを設定する。1 層目を選択し、マスク ON チェックボックスにチェックを入れて、一層描画を実行する。マスクが完全に描画されていることを確認したら、描画開始層を 2 層目に設定し、自動運転を実行する。造形中はいつでも造形を停止できるので、樹脂供給が正確に行なわれない場合や、インクが吐出されない場合には、一度造形を止めて再度その層から造形をやり直すことができる。

樹脂の出方が悪い場合は、電磁弁が ON になってすぐに、各種信号入出力ボード上の赤いボタンを押し続けることで、電磁弁を開放状態に保つことができる。また、樹脂供給後に造形を終了したい場合も、同じ赤いボタンを押し続けることで、造形を終了させることができる。

・後処理 (Post Processing)

自動運転が終了し、造形完了のダイアログが表示されたら、すぐに造形を続行しない場合、樹脂供給パイプの温度設定を 60℃ まで下げる。

次に、造形物が造形されている樹脂層部分をカッターでカットし、造形テーブルから取り出す。図 8.27 に取り出し直後の造形物写真を示す。この際、レーザービーム漏れ光によって硬化したラインが造形物の上下にできているので、この部分も同時に樹脂層から除去しておく。残りの樹脂は、樹脂タンク内に戻し再利用可能である。

取り出した造形物を含む樹脂層から、造形物を傷つけないように未硬化部分になるべく除去する。その際トルエンを多少塗ると薄い部分は除去し易い。ある程度未硬化樹脂が除けたら、トルエン容器に造形物を浸して、そのまま超音波洗浄を行なう。トルエンを用いた超音波洗浄の際は、必ず空気清浄機を作動させておく。

クリアランスの小さな部分は、樹脂が融けだしにくいので、十分に洗浄時間をかけな

くてはならない。この時、トルエンの温度が超音波のエネルギーによって 40~50℃まで上昇する。これ以上上昇する場合は、トルエンを新しく入れ替えなくてはならない。温度が上昇し過ぎると、造形物の変形につながるので注意が必要である。

洗浄が完了したら、紫外線ランプを点灯し、造形物を回転させながら万遍なく後露光を行なう。

最後に、使用したトルエンは回収容器に回収する。

以上

通し番号 1-234完

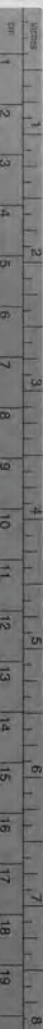
博士論文

平成 11 年 12 月 17 日提出

産業機械工学専攻

77064 神村 明哉





Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM Kodak

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black



Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

