セラミックナノ粒子混合樹脂を用いた 液晶マイクロ光造形法に関する研究*

李 東建** 三好隆志*** 高谷裕浩*** 河 兌坪*** 林 照剛***

Study on LCD Micro Stereolithography using Ceramic Nanoparticles Reinforced Photosensitive Resin

Dongkeon LEE, Takashi MIYOSHI, Yasuhiro TAKAYA, Taeho HA and Terutake HAYASHI

Ceramic nanoparticles reinforced photosensitive resins are developed by mixing ceramic nanoparticles (alumina-silica particles) with photosensitive resins uniformly to produce micro stereolithography parts with high mechanical properties. Micro Vickers hardness value is improved to 3.4 times higher than that of conventional photosensitive resins due to mixing the particles at the mixing rate of 50wt%. Also, the continuous laminating micro stereolithography method using grayscales as LCD mask images is proposed in order to reduce the surplus growth resulting from laminating with many layers and then enables to produce highly precise micro structures. Consequently, highly accurate micro bevel gears within maximum error rates of 3.6% are fabricated by using LCD mask with grayscales.

Key words: ceramic nanoparticles, photosensitive resin, micro stereolithography, grayscales, LCD mask

1. 緒 言

最近、マイクロメカニクス、マイクロロボット工学、MEMS などの多くの分野でマイクロ光造形技術の開発研究が活発に行なわれている^{1)~6)}。このようなマイクロ光造形技術の大部分は光硬化性樹脂のみでマイクロ部品を作製するので造形された光硬化部品の機械的強度が低いという短所を持っている。一方セラミック粒子を光硬化性樹脂に均一混合することによって 3 次元の光造形物を作製する様々な研究も行われている^{7)~10)}。しかしながら、これまでマイクロ造形物に対する造形精度や機械的強度を報告した事例は少ない。そこで本研究の目的は光硬化性樹脂にナノサイズのセラミック粒子を均一に混合することによって機械的強度の高い粒子混合樹脂を開発し、そのナノ粒子混合樹脂を用いて、液晶マスク面露光による 3 次元マイクロ光造形物を高速・高精度に作製することである。

本報では、特に造形精度に悪影響を与える余剰成長を抑制するために、液晶マスクにグレースケールを適用する手法を提案した。造形を行う形状として、代表的な機械要素部品であり、機械部品の造形に必要な基本要素形状を備え、余剰成長が発生しやすい穴や歯部形状を持つマイクロかさ歯車の形状を選定した。このようなかさ歯車形状の造形性を確認することで、歯や歯溝、傾斜、エッジ部など他の機械要素にも多くみられる基本的な形状の造形性を判断できる。そこで本研究では、余剰硬化のない高硬度で高精度なマイクロかさ歯車を作製することによって、セラミックナノ粒子混合樹脂を用いた連続積層による液晶マイクロ光造形法の有効性を検証したので報告する。

2. 液晶マスクを用いた連続積層マイクロ光造形法

液晶マスクを用いた連続積層マイクロ光造形法の実験装置の概略図を図 1 に示す。まず、作製したい 3 次元の形状、例えばマイクロかさ歯車を 3D-CAD プログラムでコンピュータ内に作成する。次にかさ歯車の 3D-CAD モデルを積層厚さと積層回数を考慮した多数の 2 次元の断面データに変換する。この断面データを液晶マスクの連続画像として使用する。

実験装置は均一照明系、液晶マスク、縮小光学系、積層ステージ(Z ステージ)などから構成されている。光源としては樹脂の硬化感度に合せて、波長 436nm に最も強いピークを持つ水銀キセノンランプを用いた。光源から出射した光はコリメートレンズ A で平行光線となり、2 枚の直交する偏光子に挟まれた液晶マスクの歯車画像を均一に照射する。その歯車画像が集光レンズ B、結像レンズ C(N.A.=0.3)によって樹脂容器のガラスプレート上で 16% に縮小されて結像する。歯車の断面データと Z ステージを同期させることで 1 層から最終層まで連続積層が可能になり、3 次元のマイクロかさ歯車が完成する。

本手法は液晶マスク面露光による同時露光のため従来の走査型光造形法より大幅に高速化が可能となり、また硬化中における樹脂変形が小さくなり、x, y 方向の走査がないため系統誤差が生じないなど多くの長所を持っている。なお、使用した液晶の構成要素は以下のである。

- ◆ ピクセルサイズ: $19.5 \times 19.5 \mu\text{m}^2$ (約 $1.5 \mu\text{m}$ の Black Matrix を含む)
- ◆ セル数: 1280×1024 pixels, 画面サイズ: $25.0 \times 20.0 \text{mm}^2$

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

* 原稿受付 平成 17 年 1 月 27 日

** 学生会員 大阪大学大学院 (吹田市山田丘 2-1)

*** 正 会 員 大阪大学大学院

3. セラミックナノ粒子混合樹脂の開発

連続積層マイクロ光造形で要求される粒子混合樹脂の特性として高硬度、造形可能な流動性および攪拌粒子の均一分散性を考慮する必要がある。粒子の含有率が高いほど高硬度の粒子混合樹脂を作製することができるが、その反面混合樹脂の粘度が上昇すると流動性が低下する。このような流動性の低下は連続積層における樹脂の円滑な供給を阻害するので光造形性を劣化させる原因になる。また粒子と樹脂の混合過程で、粒子の凝集体を分解できる剪断力より低い攪拌力で混合作製した粒子混合樹脂では、粒子の凝集体が残存することによって高精度な造形ができない。そこで高硬度、流動性および攪拌粒子の均一分散性を同時に満足する粒子混合樹脂の開発を行った。

3.1 実験試料および攪拌方法

本実験では、2種類の性質が異なる光硬化性樹脂に対して検証を行った。光硬化性樹脂として、単官能基および2官能基を持つ樹脂からなるウレタンアクリル系列樹脂(JSR(株), KC1042)と3官能基を持つ高官能基密度のモノマーが主成分である樹脂(JSR(株), KC1162)を用いた。樹脂の官能基数の違いは、樹脂の重合度に影響を与えると考えられる。

またセラミックナノ粒子(平均粒径 40~130nm)としては光硬化性樹脂(KC1042 樹脂の屈折率 1.5)に対する光透過率が高い、あるいは屈折率が低いジルコニア(屈折率 1.96)、アルミナ(屈折率 1.65)、シリカ(屈折率 1.46)、アルミナ-シリカの4種類の粒子を用いた。このようなナノ粒子混合樹脂を攪拌装置を用いて分散させ、その分散状態は光学顕微鏡により、拡散光を観察して調べた。均一分散では黄色の樹脂と白色の粒子がよく混合し、黄白色となるが、不均一分散の場合は黄色に白色が点在する配色になる。また、粒子含有率は質量百分率(wt%)を使用し、次の(1)式に基づいて算出した。

$$wt\% = \frac{M_P}{M_R + M_P} \times 100 \quad (1)$$

ただし、 M_R は光硬化性樹脂の質量(g)、 M_P はセラミック粒子の質量(g)である。

3.2 セラミック粒子の混合に対する流動性と分散性の比較

従来の研究では、粒子含有率を最大で 55wt%にしてマイクロ光硬化部品を作製していることから(アルミナ粒子利用、平均直径 500nm)⁹⁾、本研究でも粒子の最大含有率を 50wt%にして4種類の粒子を混合し、流動性および分散性を評価した。その評価結果を表1に示す。

表1から流動性が良い粒子混合樹脂はKC1162樹脂にアルミナ-シリカ粒子を混ぜた樹脂であり、4種類の粒子の中で一番良いことが分かった。次にアルミナ-シリカ粒子を用い、分散性が良好な粒子混合樹脂としてはKC1042樹脂であることが分かった。粒子の分散性がKC1162樹脂(粘度100mPa·s, 25℃)よりKC1042樹脂(1860mPa·s, 25℃)が良いことは、KC1042樹脂の粘度がKC1162樹脂の粘度より18.6倍も高いため、攪拌の時に粒子の凝集体が受ける剪断力が増し、粒子の分散力が向上することによって起因するものと考えられる。そこで、分散性と流動性を同時に向上させることを検討し、KC1162を主成分とし、KC1042樹脂を混合した樹脂を用いて粒子混合実験を行った。最終的には上記樹脂に50~55wt%までアルミナ-シリカ粒子を均一に混合することが可能であり、それぞれの樹脂を単独で用いる場合と比較して、分散性および流動性バランスがとれていることを確認し、

Table 1 Fluidity and dispersibility of nanoparticles reinforced resins (50wt %)

Resin	Fluidity				Dispersibility
	ZrO ₂ (41nm)	Al ₂ O ₃ (50nm)	SiO ₂ (130nm)	Al ₂ O ₃ -SiO ₂ (98nm)	Al ₂ O ₃ -SiO ₂ (98nm)
KC1042	×	×	×	△	○
KC1162	△	×	△	○	△

○ : Good, △: Poor, ×: impossible to mix

Fig.2 Micro Vickers hardness values according to mixing rates of two resins

KC1162とKC1042の混合樹脂を今後の実験に使用することとした。

3.3 混合光硬化性樹脂のマイクロビッカース硬度測定

二つの種類の光硬化性樹脂を一定比率で混合し、その化学的变化による硬度を評価するため、マイクロビッカース硬度実験結果を図2に示す。この時の加圧力は500g_fである。

図2からKC1042樹脂とKC1162樹脂がそれぞれ20wt%と80wt%に混合された複合光硬化性樹脂が最も高い硬度値(24.2HV)を持つことが分かった。このような硬度値の向上はアクリル官能基が異なる光硬化性樹脂の混合によって作られた樹脂のアクリル官能基の数が増え、樹脂の重合度が向上して硬度が上昇すると考えられる。

3.4 分散剤の影響

連続積層マイクロ光造形を実現するためにはより良い流動性を持つ粒子混合樹脂を開発する必要がある。本研究では疎水性ポリマーとリン酸エステルモノマー分散剤を一定比率で混ぜることによって粒子の均一分散性と流動性の向上を図った。様々な実験結果から分散剤を各々1.5wt%ずつ混ぜた粒子混合樹脂が粒子の均一分散性と流動性および高硬度を満足する結果が得られた。実際に分散剤の効果を評価するため、アルミナ-シリカ粒子(50wt%)と分散剤(3wt%)を複合光硬化性樹脂(47wt%)に攪拌させ、露光エネルギーと硬化深さの基礎実験を行った結果を図3に示す。なお、その時のマイクロビッカース硬度は40.1HV(加圧力500g_f)で、これまでの光硬化性樹脂(KC1042)の12.0HVより3.4倍高いものである。図3から分散剤を添加した粒子混合樹脂は添加しない樹脂より露光エネルギー25mJ/cm²付近でそれぞれ135μm, 104μmとなり、1.3倍ほど硬化深さが深い。これは分散剤を添加することによって粒子の分散性が良くなり、粒子混合樹脂内にある粒子の凝集体の全体的なサイズが小さくなったためと考えられる。図3のような粒子凝集体の大きさの分布と硬化深さの関係はX. Zhangらのモデルによって説明できる⁷⁾。

Fig.3 Cured depths on exposure energies and influence of dispersants

また露光エネルギーと硬化深さの関係はBeer-Lambert式から求めた一般式(2)から計算された。

$$C_d = D_p \ln(E/E_c) \quad (2)$$

ここで C_d は硬化深さ, D_p は透過深度, E は樹脂表面での露光エネルギー, E_c は樹脂の固有値である臨界エネルギーである。

以上のように流動性と分散性を考慮して開発したマイクロビッカース硬度の高いナノ粒子混合樹脂の成分を質量百分率で示すと下記の通りである。

- ◆ 粒子：アルミナシリカ粒子(50wt%)
- ◆ 樹脂：複合粒子混合樹脂(47wt%)
- ◆ 分散剤：疎水性ポリマー(1.5wt%)
- リン酸エステルモノマー分散剤(1.5wt%)

4. セラミックナノ粒子混合樹脂の造形性の評価

4.1 粒子混合樹脂の光硬化特性

粒子混合樹脂の光造形では入射光がセラミック粒子によって吸収および散乱され、硬化深さが減少し、その結果造形精度も低下して層間結合力を弱める可能性がある。このような現象は 12.04 mJ/cm^2 の露光エネルギーで歯車のマスク形状を一回露光で硬化させた図4と表2の実験結果から推察できる。本実験において、歯車形状の測定は、SEM観察像を用いた画像解析によって行い、対称形状を有する歯車形状について、各測定部位[歯車の全体直径(D)、中央穴径(d)と歯の幅(t)]についてそれぞれ計4カ所の測定を行い、その平均値を測定値とした。

すなわち、設計モデルAに対して、粒子混合樹脂Bの硬化形状は、樹脂のみCより、歯幅(t)で $23 \mu\text{m}$ 、全体直径(D)で $80 \mu\text{m}$ 小さくなり、逆に中央部の穴直径(d)は $28 \mu\text{m}$ 大きくなっている。このことは粒子混合樹脂の場合、硬化がまだ不完全であることを示しており、したがって粒子混合樹脂を用いて高精度な光造形を実現するためには樹脂のみの硬化に用いたエネルギーより高い露光エネルギーが必要である。

4.2 露光エネルギーによるマイクロかさ歯車の連続光造形特性

露光エネルギーの変化による造形精度を評価するため 103.5 mW/cm^2 の露光強度で1層の露光時間を変えて ($T_A=0.044 \text{ sec}$, $T_B=0.088 \text{ sec}$, $T_C=0.133 \text{ sec}$, $T_D=0.177 \text{ sec}$) 一回露光と50回連続積層露光によるマイクロかさ歯車光造形実験を行った。そのSEM観察像を図5に、また1回目と50回目の造形精度(%)を表3に

Fig.4 Cured depths and dimensions according to ceramic nanoparticles mixing

Table 2 Dimensions of fabricated each parts (Unit: μm)

	A	B	C
Tooth width (t)	179	133	156
Diameter (D)	1620	1540	1620
Hole diameter (d)	400	468	440

(A) 0.044sec/layer (B) 0.088sec/layer (C) 0.133sec/layer (D) 0.177sec/layer
[1st layer fabrication] Layer thickness $10 \mu\text{m}$, number of layer 1

[Laminating fabrication] Layer thickness $10 \mu\text{m}$, numbers of layer 50

Fig.5 Micro bevel gears fabricated by 1st layer and laminating

Table 3 Evaluation on processing accuracy and laminating possibility

Exposure No. energy (mJ/cm ²)		Error rates of cured parts (%)						Processing accuracy		Surplus growth	
		Diameter(D)		Tooth width(t)		Hole diameter(d)					
		1 st	50 th	1 st	50 th	1 st	50 th	1 st	50 th	tooth	hole
A	4.56	-1.9	-0.2	-13.4	-22.0	-8.5	-8.0	×	×	○	×
B	9.11	-0.6	+0.6	-1.1	-7.7	-0.75	-5.1	○	△	△	×
C	13.77	+0.6	+0.8	+1.1	+1.1	-0.5	-0.2	○	○	×	×
D	18.32	+1.2	+2.0	+10.6	+4.4	+7.25	+4.6	×	×	×	×

○: Excellent, △: Good, ×: Poor

示した。図5と表3の造形結果とその評価値から設計された液晶マスクの画像に対して高い精度を持った造形物はCの条件で作製された造形物(誤差率約±1%)であるが、Cの条件で連続積層した造形品は歯と歯の間に余剰物の生成がBの条件より多く観察され、中央部の穴にも余剰物が発生した。

余剰硬化の原因は、造形部以外の樹脂内部に散乱、透過する光である(図6)。これらの部分は、本来の造形部と異なり、直接露光されることはないため、単位時間あたりの露光量が少なく、短時間で臨界露光量を超えることはないため、すぐに硬化しない。しかし、積層を繰り返すなかで、露光部周辺の樹脂に露光

Fig. 6 Generation principle of surplus growth in micro fabrication

Fig. 7 Fabrication results according to moving distances of the z-stage

エネルギーが蓄積し、最終的には硬化するため造形物の表面で余剰成長を起こす。粒子混合樹脂は、通常の樹脂と比較して、高い粘性を持つため、造形部表面に付着した樹脂の流動が少なくこのような余剰成長が発生しやすい。

本実験装置では、いわゆる臨界露光エネルギーを超えない程度に光を吸収した半硬化の樹脂を Z ステージの移動による強制対流により取り除いている。また、Z ステージの移動量と速度を制御することにより、樹脂露光面と造形物表面間の狭い隙間に未硬化の樹脂を連続的に供給可能であり、高い粘性を持つ粒子混合樹脂を用いる場合についても、露光エネルギーの蓄積による余剰硬化を防ぐことができる。

具体的な半硬化の樹脂の除去および供給の手順を以下に述べる。まず、半硬化の樹脂を円滑に除去するため、樹脂容器中の Z ステージを大きく上昇させ、造形部表面に残る樹脂を除去する。次に粒子混合樹脂を強く圧縮し、露光面と造形物間のすきまに供給するため、ステージを大きく下げる。本手法ではこのような手順で、余剰硬化を低減し、造形性の向上を図っている。

4.3 ステージの移動による造形性

図 7 の歯車連続積層造形はステージの上昇量に伴う造形性の変化、すなわち余剰物の発生量を観察したものである。露光エネルギーが一番良好な造形精度を持つ表 3 の実験条件 C に近い値 13.8 mJ/cm^2 を用い、各層の硬化厚さは $10 \mu\text{m}$ であり、総計 50 回の連続積層造形を行った。A, B, C の移動量はそれぞれ上方向へは 1000, 2000, 3000 μm で、下方向へは 990, 1990, 2990 μm である。実験の結果から移動量が多いほど高粘度である粒子混合樹脂の円滑な供給ができ、 $10 \mu\text{m}$ の微小間隙でも均一な樹脂層の薄膜を形成することができる。このため、歯部の余剰物の生成は低減し、造形性は高くなるが、中央の穴部の余剰成長を抑制することは難しいことが分かった。

なお実験装置のステージの最大移動速度は 4 mm/s であり、総造形時間はそれぞれ A の場合は 11 分、B は 17 分、C は 25 分である。そこで中央穴部の余剰成長を制御し、造形性をさらに向上させるため、液晶マスクの露光エネルギーを部分的に調節できるグレースケールを用いる手法を提案し、その実験的検証を行った。

Fig. 8 The relationship of exposure intensities and grayscales

5. グレースケールの効果

5.1 グレースケールと露光強度との関係

グレースケールと露光強度の関係を調べるため光源出力を一定とし、液晶マスクに表示されるグレースケールを変化させながら露光面での露光強度を測定した。この時液晶の表示階調を白から黒色まで 0 から 255 の範囲で定義し、256 階調のグレースケールに設定した。

図 8 は、グレースケール 255 (透過率 100%) の露光強度を 1 として正規化した露光強度 I とグレースケール G_s の関係である。グレースケール 100 程度までは、グレースケールの値が増加しても露光強度は変化しないが、グレースケール 120 から 220 の範囲では、指数関数的に増加しており、下に示した式 (3) の指数関数の近似曲線と良く一致している。

$$I = k_1 \exp(k_2 G_s) \quad (3)$$

ただし、 k_1 , k_2 は定数で、その値は $k_1 = 9.2 \times 10^{-3}$, $k_2 = 19.5 \times 10^{-3}$ である。

5.2 グレースケールのマスク形状と濃淡割合による硬化特性

マイクロカサ歯車の造形において重要な形状である歯部と穴部に余剰物を抑制するためのグレースケールのマスク形状とその濃淡割合について検証実験を行った。

まず、グレースケールマスク形状の影響を検討するために、図 9 に示す 2 種類の形状を持つグレースケール (160 適用) マスクを用いて積層実験を行った。

図 9 の A は設計歯車形状を 85% に縮小して歯部にもグレースケールを考慮したマスクであり、B は穴部周辺のみ円形のグレースケールマスクを用いたものである。 13.8 mJ/cm^2 の露光エネルギーで、 $10 \mu\text{m}$ の積層厚さで 5 回連続積層した造形結果である。A の造形結果は B より歯部で余剰物の発生が少ない良好な造形性を示しており、このことから歯部にグレースケールを適用することによって余剰物発生の抑制効果があることが分かった。

図 10 は図 9A のグレースケールマスク形状を用いて、グレースケールを 140 から 180 まで 10 ステップづつ変化させたときの造形結果である。ここで縦軸は 5 回積層の総露光エネルギーの合算であり、横軸はグレースケールとそれに対応する透過率 (%) を示している。実験結果から光の透過率が低いグレースケール 140 と 150 では造形に必要な露光強度が低すぎるためグレースケール部分は造形されず、正常な造形が難しいことが分かった。

図 11 は図 10 と同じグレースケール (140, 160, 170, 180) に対

する総計 50 回の連続積層によるかさ歯車の造形結果である。

また 140 では穴部の造形ができず, 180 では穴部に大きい余剰成長が発生した。良好な造形性を示したグレースケール 160 と 170 の造形精度を比較および検討した結果を表 4 に示す。グレースケール 170 の場合, 最大誤差率は 2% 未満で, 造形精度が最も優れており, 図 9A の歯部に余剰成長が発生しなかったグレースケールマ

Fig.9 Fabrication results according to grayscale mask

Fig.10 Fabrication characteristics according to grayscales

Fig.11 Laminating fabrication results according to grayscales

Table 4 Evaluation on laminating fabrication results

Gray scale	Layer	Error rates of cured parts (%)			Processing accuracy	Surplus growth	
		Diameter(D)	Tooth width(t)	Hole diameter(d)		tooth	hole
160	1 st	-0.6	-2.2	-8.4	△		
	50 th	-0.6	-2.5	-3.7	△	△	×
170	1 st	-0.5	-1.1	-0.3	○		
	50 th	-0.2	-1.1	-1.7	○	○	×

○: Excellent, △: Good, ×: Poor

スク形状を用いて総計 50 回連続積層を行った。その結果, 歯部には余剰物が発生しないが, 穴部には余剰成長が発生することが分かった。

5.3 グレースケールマスクの検討と造形結果

穴部の余剰成長の発生を防ぎ, 歯部の造形精度が高いかさ歯車の積層造形を可能にするグレースケールマスクについて検討する。図 12 は, 図 3 と図 8 から求めたグレースケールと露光エネルギーおよび硬化深さの関係である。硬化深さはグレースケール 220 までほぼ直線的である。ここで, グレースケール 255(最大値)は 13.8 mJ/cm^2 に相当しており, これまでの実験から 1 層を高精度に造形できる露光エネルギーの値である。樹脂の硬化が可能な臨界露光エネルギー E_c は約 3 mJ/cm^2 であり, グレースケールの値としては 160 程度に相当する。本実験のように積層厚さが $10 \mu\text{m}$ の場合, 最低 3.5 mJ/cm^2 以上の露光エネルギー, すなわち 170 以上のグレースケールが必要となる。

また, グレースケール 200 では露光エネルギーは 7.1 mJ となり, $45 \mu\text{m}$ 程度の深さまで硬化することができ, 安定した積層造形が可能となる。しかし, 余分なエネルギーは余剰成長を引き起こす恐れがあるため, 穴部の余剰成長を低減するには, 170 以上 200 以下のグレースケールからなるマスクが適当と考えられる。

歯部のように照射面積が狭い不連続な凹凸領域は内部よりも高いグレースケールを設定したほうが安定した造形が可能となるため, 歯部の先端では 200 以上のグレースケールが推奨される。

以上のような考察から, 歯部では高く, 穴部近傍は低いグレースケールで, その値は最大 255, 最小 170 であり, 穴部の余剰成長を低減し, 歯部で高精度な造形を可能にするためには複数のグレースケールから構成されるマスクが必要と考えられる。そこで, 図 13 に示すような 4 種類のグレースケールマスクを用意した。グレースケールの構成はそれぞれ A は 255(歯部)-170(内部), B は 200(歯部)-170(内部), C と D は 200(歯部)-190(歯部)-170(内部)である。C と D は歯部のグレースケール 190 の面積が違い, D の画像は C の画像より歯部で入射光の透過率が高くなるように設計された液晶マスクである。

第 1 層から第 19 層までは歯部および穴部の造形性が良好なグレースケール 170(A) のマスク形状を用いて積層造形を行った。積層数が 20 以上に増えると余剰物が発生しやすくなるため, 第 20 層から第 50 層には濃淡割合の異なる B, C, D の液晶マスクを用いて積層造形を行った。この時の Z ステージ移動量は上方向に 5 mm , 一層の硬化深さは $10 \mu\text{m}$, 造形時間は 38 分である。B, C, D の液晶マスクを用いて造形を行った結果, いずれの場合も中央

Fig.12 Relationships among cured depths, grayscales and exposure energies

Fig.13 LCD mask images designed various grayscales

部の穴部に余剰成長がないマイクロかさ歯車を作製することができた。この造形結果から、中央の穴部に余剰成長を抑制するためには、外部(歯部)より内部(穴部)でグレースケールの濃度を低くし、その値は外部で200、内部で170程度が適当であり、30層の多数積層であっても積層内部で屈折散乱する光の強度を抑制する効果が認められた。

一方、歯部での造形精度は、グレースケールマスク B, C, Dで、それぞれの誤差率は9.1%, 4.3%, 3.6%であり、Dのグレースケールが最も良い造形精度を示した。この結果から、造形精度を高めるためにはグレースケールの階調は2階調より3階調のほうがよいこと、グレースケールを外部から順次低く設定すること、またその画像面積によっても造形精度は影響を受けることが分かった。

ここで、最も良好なグレースケールDで造形したかさ歯車の観察像とその1層目と50層目の誤差率を図14と表5にそれぞれ示す。余剰成長のない明瞭な穴および歯部を観察することができる。また、穴の誤差率は最も余剰成長が発生しやすい1層目で-0.3%であり、50層目においてもただか-0.6%であり直径400 μ mの穴が誤差-1.2 μ m-2.4 μ mの高い精度で造形が可能になった。

穴中心部の明るい点は、SEM観察時の金蒸着むらによるもので、樹脂の余剰硬化は穴中心部においては、発生していない。またグレースケールで露光した部分はポストキュア処理によって完全に硬化させるため、造形体内部と同様の機械的特性が得られる。

なお、各形状要素ごとに発生する余剰硬化は、基本的には露光エネルギーと硬化深さの関係から決定されるため、歯車以外の形状でも十分に応用が可能であり、将来的には、各要素形状が設定できればその形状に最適なグレースケールマスクが決定できるものと考えている。

6. 結 言

本研究から得られた結果をまとめると以下ようになる。

- (1) セラミックナノ粒子混合樹脂を用いた連続積層マイクロ光造形法を提案し、3次元のマイクロ造形を行う実験システムを構築した。
- (2) 平均粒径90nmのアルミナシリカ粒子を混合することで従来の光硬化性樹脂より、3.4倍高いマイクロビッカース硬度を有するセラミックナノ粒子混合樹脂を開発した。
- (3) 開発した混合樹脂は良好な分散性と流動性を共に満足しており、積層厚さ10 μ mで50層の連続積層が可能である。

Fig.14 The fabricated micro bevel gear by a layer thickness of 10 μ m

Table 5 Dimensions of the fabricated micro bevel gear

Layer	Error rates of cured parts (%)			Processing accuracy
	Diameter(D)	Tooth width(t)	Hole diameter(d)	
1 st	-0.5	-1.1	-0.3	○
50 th	-1.6	-3.6	-0.6	△

- (4) 1層の当りの露光時間はただか0.15sec程度であり、50層からなるマイクロかさ歯車を歯部と中央穴部で最大誤差3 μ mの精度で高速に造形できた。
- (5) 余剰成長のため、これまで難しかった穴部の造形を、グレースケールを用いることで、余剰成長を抑制し、直径400 μ mの穴を誤差約2 μ mの高い精度で造形することができ、グレースケールマスクの有効性を検証した。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、セラミックナノ粒子をご提供下さった(株)ホソカワ粉体技術研究所、および光硬化性樹脂をご提供下さったJSR(株)に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 特集・ラビッドプロトタイプングの最新動向, 精密工学会誌, **70**, 2 (2004) 163.
- 2) Vijay K. Varadan et al.: Microstereolithography and other fabrication techniques for 3D MEMS, John Wiley & Sons, West Sussex, (2001).
- 3) 丸谷洋二, 早野誠治, 今中 暁: 積層造形技術資料集, オプトニクス, (2002) 158.
- 4) A. Bertsch, H. Lorenz, P. Renaud: 3D Microfabrication by combing microstereolithography and thick resist UV lithography, Sensors and Actuators A, **73**, (1999) 14.
- 5) 林 照剛, 三好隆志, 高谷裕浩, 高橋 哲: 液晶マスクを用いた非積層マイクロ光造形法に関する研究(第1報), 精密工学会誌, **67**, 4, (2001) 628.
- 6) 西野秀昭, 三好隆志, 高谷裕浩, 高橋 哲, 林 照剛, 木村景一: 液晶マスクを用いた非積層マイクロ光造形法に関する研究(第2報), 精密工学会誌, **69**, 10, (2003) 1417.
- 7) C. sun, X. Zhang: The influences of the material properties on ceramic micro-stereolithography, Sensors and Actuators A, **101**, (2002) 364.
- 8) T. Chartier, C. Chartier, F. Doreau, M. Loiseau: Stereolithography of structural complex ceramic parts, J. of Materials Science, **37**, (2002) 3141.
- 9) S. Monneret, C. Provin, H. Le Gall, S. Corbel: Microfabrication of freedom and articulated alumina-based components, Microsystem Technologies **8** (2002) 368.
- 10) Michelle L Griffith, John W Halloran: Freedom fabrication of ceramics via stereolithography, J. Am. Ceram. Soc., **78**[10], (1996) 2601.