

エバネッセント光を利用した ナノ光造形法に関する研究 (第1報) *

— 造形基本特性の理論的・実験的検討 —

梶原優介** 稲月友一*** 高橋 哲† 高増 潔†

Study of Nano-Stereolithography Using Evanescent Light (1st report)
- Theoretical and Experimental Analyses -

Yusuke KAJIHARA, Yuichi INAZUKI, Satoru TAKAHASHI and Kiyoshi TAKAMASU

Micro-fabrication technologies have recently developed dramatically and fabrication methods have become much-needed with which devices on the order of micrometer can be fabricated precisely. In particular, methods of fabricating MEMS and microscopic optical devices as typified by a photonic crystal are in huge demand. In this study, we propose a novel stereolithography method using evanescent light instead of propagating light to realize a 100-nanometer resolution. With this method, we intend to establish the nano-stereolithography with higher accuracy and flexibility. In the first report, we carry out theoretical and experimental analyses to verify the feasibility of the method. The analyses show that evanescent light energy is sufficient for curing photosensitive resin and that it is possible to fabricate micro three-dimensional objects with a 100-nanometer resolution by laminating resin layers cured by evanescent light exposure.

Key words: nano-stereolithography, photosensitive resin, propagating light, evanescent light, 3D fabrication

1. 緒 言

半導体産業の急激な発展に伴い、マイクロメートルスケールの微小機械要素や微小光学素子の創製を目指して、マイクロマシンング技術の研究・開発が盛んに行われている¹⁾²⁾。特に、マイクロギヤなどの微小機械要素や、フォトリソ結晶³⁾に代表される微小光学素子のような、サブマイクロメートルオーダーの加工分解能を要する三次元構造創製技術への需要が非常に高まってきており、集束イオンビームを利用したマイクロ加工⁴⁾や光造形法を応用したマイクロ造形技術などが提案され、研究が進められている。

光造形法は、ビームスポット走査やマスク変調による面露光により液状の光硬化性樹脂に対してレーザを照射し、樹脂を硬化させることによって所望の構造を創製する方法である^{5)~12)}。近年は微細加工分野にも応用されており、ビームスポット走査型においては、多光子吸収を利用してサブマイクロメートルの分解能を実現した例⁹⁾¹⁰⁾が報告されている。またビーム走査系を必要とせず、生産性の高い一括面露光型マイクロ光造形法¹¹⁾¹²⁾は、mmスケールの領域に対して分解能数 μm が実現しており注目を集めている。しかし、前者は三次元ビーム走査を行うという特性上、造形時間が長く、造形領域が $10\mu\text{m}$ 程度に限定されるという問題を残し、後者は露光時の透過伝搬光などの影響によって、サブマイクロメートルオーダーの分解能実現が困難であった。

両手法の問題点を解決するため、本研究では、高分解能で光強度分布制御が可能なエバネッセント光を一括面露光型マイクロ光造形法の露光エネルギーとして適用することを提案し、生産性が高く、サブマイクロメートルの造形分解能を持つ新しい微小構造創製法の確立を目指す。

提案法においてサブマイクロメートルオーダーの造形分解能を実現するためには、基盤となる一括面露光型マイクロ光造形法が樹脂層の積層を繰り返すという特性上、各樹脂層の厚さに相当する単位積層厚さ（縦分解能）の検討が不可欠である。

本報では、まず樹脂にエバネッセント光を露光した場合の樹脂硬化モデルを構築して、単位積層厚さの理論解析を行う。次に理論解析結果に基づいてエバネッセント光による樹脂露光基礎実験を行い、エバネッセント光のエネルギーが樹脂硬化に充足すること、及び単位積層厚さの制御性を確認する。最後に、高さ方向に対して高精度で位置決めが可能な露光樹脂引き上げ実験装置を試作し、三次元造形における積層プロセスの確立において不可欠な露光樹脂引き上げ実験を試み、提案法の有効性を検討したので報告する。

2. エバネッセント光を利用したナノ光造形法

2.1 エバネッセント光

高屈折率媒質から低屈折率媒質へ光が入射する場合、界面において反射光と屈折光が発生する。入射角を大きくするに従って屈折角も大きくなり、臨界角を超えると屈折光成分が消滅して反射光のみ発生する。この現象が全反射であり、低屈折率媒質側に透過伝搬光は存在しない。

しかし微視的には図1に示すように、低屈折媒質側にも光の波長程度の領域に局在した光エネルギーが存在する。このエネルギーがエバネッセント光である。エバネッセント光のエネルギーは低屈折率媒質側において、界面から離れるに従い指数関数的に減少する。例えば入射光波長が 488nm の

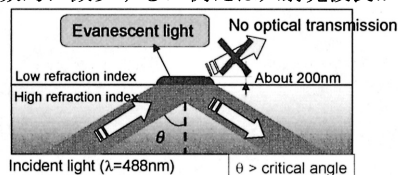


Fig.1 Characteristic of evanescent light

* 原稿受付 平成18年2月17日

** 学生会員 東京大学大学院 (東京都文京区本郷7-3-1)

*** 学生会員 東京大学大学院 (現、大日本印刷(株)電子デバイス研究所; 埼玉県上福岡市福岡2-2-1)

† 正会員 東京大学大学院

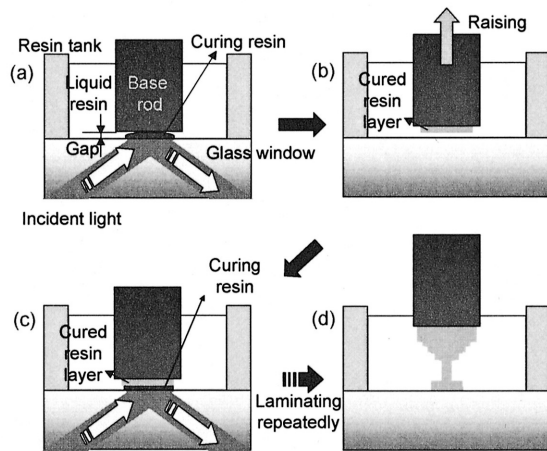


Fig.2 Schematic diagram of Nano-stereolithography using evanescent light

場合、エバネッセント光の存在領域は、界面から 200nm 程度である。

2.2 エバネッセント光を利用したナノ光造形法の提案

前述のように、一括面露光型マイクロ光造形法は面内一括して露光するため生産性に優れている。しかし従来のように伝搬光を露光エネルギーとして利用する場合、樹脂硬化面（露光面）における硬化樹脂方向への透過伝搬光が余剰成長の要因となり、サブマイクロメートルの分解能を実現するのは困難であった。

本研究では、図1における高屈折率媒質として一括面露光型マイクロ光造形法の規制界面を形成する透明ガラス基板を当てはめ、低屈折率媒質として光硬化性樹脂を導入することにより、エバネッセント光を樹脂硬化面での露光エネルギーとして利用する手法を提案する。エバネッセント光はエネルギーが波長程度の領域に局在するため、一層毎の硬化厚さとして、サブマイクロメートルオーダーの縦分解能が期待される。

2.3 エバネッセント光を利用したナノ光造形法の原理

提案法を概念図を図2に示す。まず引き上げロッドをガラス基板に近づけ、単位積層厚さに相当するギャップを作る(a)。ビームを臨界角以上の角度で入射すると、ガラス基板と樹脂の界面においてエバネッセント光が発生し、露光エネルギーによりギャップ内の樹脂が硬化される（以下エバネッセント光による露光をエバネッセント露光と呼ぶ）。次にロッドに付着した硬化樹脂をガラス基板から剥離して引き上げ、樹脂タンク内の液体樹脂を露光面に充填させる(b)。その後またエバネッセント露光によりギャップ内の液体樹脂を硬化する(c)。以上の繰り返しにより所望の形状を得るのがエバネッセント光を利用したナノ光造形法である(d)。

提案法はエネルギー局在特性を有しているエバネッセント光と、生産性の高い一括面露光型光造形法¹²⁾を融合させたものになっており、層毎にビーム形状を変化させることで、複雑な構造を持つ三次元形状の創製が期待される。

エバネッセント露光を利用した場合に期待される効果を、伝搬光露光の場合と比較して図3に示す。伝搬光露光の場合、露光時の透過伝搬光や散乱の影響のため、サブマイクロメートルの縦分解能実現は難しく、また透過伝搬光によって余剰成長が生じるためオーバーハング構造の創製が困難である。一方エバネッセント露光の場合、微小領域に局在するエネルギーのみで造形を行うので、単位積層厚さをサブマイクロメートルオーダーで設定でき、また余剰成長も生じないことからオーバーハング構造の創製も可能であ

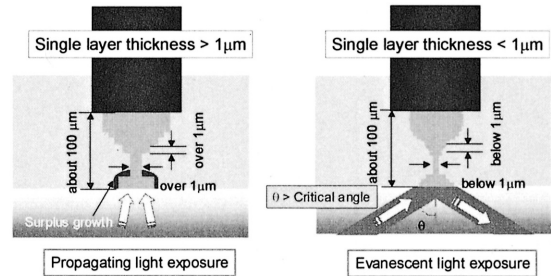


Fig.3 Comparison between propagating light and evanescent light exposure

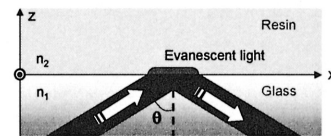


Fig.4 Definition of parameters for theoretical analysis

ることが予測される。加えて、エバネッセント光の実効波長は高屈折率媒質の伝搬波長に準ずる特性から、横分解能も伝搬光露光時より小さくなるのが期待される。

3. 単位積層厚さの理論的解析¹³⁾

3.1 エバネッセント光の電場成分の解析

本章では、エバネッセント光の局在エネルギーの電場成分から、硬化樹脂の単位積層厚さを理論的に解析する。

高屈折率媒質（ガラス基板）から低屈折率媒質（樹脂）に対して臨界角以上の角度で光が入射する場合を想定し、図4のように座標軸を定める。入射光波長を λ_0 、入射角を θ 、角振動数を ω 、時間を t 、高屈折率媒質、低屈折率媒質の屈折率を n_1, n_2 、低屈折率媒質内の光の波数を k_2 、S偏光、P偏光における入射光の振幅成分を A_s, A_p とおくと、エバネッセント光の電場成分 E_x, E_y, E_z は、Maxwell方程式を展開することにより次のように表現できる¹⁴⁾。S偏光；

$$E_y = 2A_s \cos \frac{\delta_z}{2} \exp(i\omega t + \frac{\delta_z}{2}) \cdot \exp(-\frac{z}{2Z_{ev}}) \cdot \exp(-ik_2 x \frac{n_1}{n_2} \sin \theta) \quad (1)$$

$$\left(\text{但し, } Z_{ev} = \frac{\lambda_0}{4\pi n_2 \sqrt{(n_1/n_2)^2 \sin^2 \theta - 1}} \cdot \cos \frac{\delta_z}{2} = \frac{(n_1/n_2) \cos \theta}{\sqrt{(n_1/n_2)^2 - 1}} \right)$$

$$E_x = E_z = 0$$

P偏光；

$$E_x = -2A_p \left(\frac{n_1}{n_2} \right) \sin \theta \cos \frac{\delta_p}{2} \exp(i\omega t + \frac{\delta_p}{2}) \cdot \exp(-\frac{z}{2Z_{ev}}) \cdot \exp(-ik_2 x \frac{n_1}{n_2} \sin \theta) \quad (2)$$

$$\left(\text{但し, } \cos \frac{\delta_p}{2} = \frac{\cos \theta}{\sqrt{(n_1/n_2)^2 - 1} \sqrt{(n_1/n_2)^2 + 1} \sin^2 \theta - 1} \right)$$

$$E_y = 0$$

$$E_z = -2A_p \cos \theta \sin \frac{\delta_p}{2} \exp(i\omega t + \frac{\delta_p}{2}) \cdot \exp(-\frac{z}{2Z_{ev}}) \cdot \exp(-ik_2 x \frac{n_1}{n_2} \sin \theta) \quad (3)$$

$$\left(\text{但し, } \sin \frac{\delta_p}{2} = \frac{(n_1/n_2) \sqrt{(n_1/n_2)^2 \sin^2 \theta - 1}}{\sqrt{(n_1/n_2)^2 - 1} \sqrt{(n_1/n_2)^2 + 1} \sin^2 \theta - 1} \right)$$

上式から、P偏光、S偏光によらず、エバネッセント光はx方向に進行するが、z方向においてはzが増加すると共に強度が指数関数的に減少することが分かる。つまりエバネッセント光は界面近傍に局在するエネルギーであり、低屈折率媒質側で指数関数的に電場成分が減少する。エバネッセント光の減衰項を β とすると、

$$\beta = \frac{1}{Z_{ev}} = \frac{4\pi n_2 \sqrt{(n_1/n_2)^2 \sin^2 \theta - 1}}{\lambda_0} \quad (4)$$

と表現できる。

3.2 エバネッセント露光における単位積層厚さの解析

本解析においては、エバネッセント露光における樹脂硬化現象が、樹脂による光吸収も考慮したエバネッセント光エネルギーにより発現するというモデルを構築する。構築モデルにおいて、エバネッセント露光時における樹脂内部の光エネルギー $U(z)$ は、入射光の光エネルギーを U_0 、 U_0 に対する樹脂側 ($z=0$) のエネルギー強度比を $\tau(\theta)$ 、樹脂の吸収係数を α とおき、エバネッセント光の減衰に関する式と光の吸収に関する Lambert-Beer の法則を合わせると以下のように記述される。

$$U(z) = \tau(\theta) U_0 \exp(-\alpha z) \exp(-2\beta z) \quad (5)$$

式(5)の指数項のうち、前者は樹脂による吸収項であり、後者はエバネッセント光の減衰項である。

$\tau(\theta)$ は式(1)~(3)から、S、P 偏光に対してそれぞれ、

$$\text{S偏光 ; } \tau(\theta) = 4 \cos^2 \frac{\delta_s}{2} \quad (6)$$

$$\text{P偏光 ; } \tau(\theta) = 4 \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^4 \sin^2 \theta \cos^2 \frac{\delta_p}{2} + 4 \cos^2 \theta \sin^2 \frac{\delta_p}{2} \quad (7)$$

と表現される。例えば、 θ , λ_0 , n_1 , n_2 がそれぞれ 68° , 488nm , 1.78 , 1.51 である場合、 $\tau(\theta)$ は S 偏光のとき 1.88 、P 偏光のとき 2.51 であり、S 偏光に対して P 偏光のほうが、露光エネルギーが大きくなることが分かる。

U_0 のエネルギーを持つ光が樹脂に露光された場合(以下、 U_0 を露光量と呼ぶ)、そのエネルギーによって樹脂が硬化される厚さが単位積層厚さ (C_d) である。また樹脂が硬化開始する露光量を臨界露光量 (U_c) と呼ぶ。 U_0 のエネルギーで界面に入射した光エネルギーは、樹脂内部で減衰してエネルギーが U_c となる厚さまで樹脂を硬化する。つまり $z=C_d$ において $U(z)=U_c$ になるので

$$U_c = \tau(\theta) U_0 \exp(-\alpha C_d) \exp(-2\beta C_d) \quad (8)$$

と表され、これを解くと以下の式が導かれる。

$$C_d = \frac{1}{\alpha + 2\beta} \ln \frac{\tau(\theta) U_0}{U_c} \quad (9)$$

ここにおいて、光造形法において使用される光硬化性樹脂の吸収係数 α は一般的に $10^2 \sim 10^3 [1/\text{cm}]$ であるが、光硬化性樹脂をエバネッセント光で露光する場合におけるパラメータを代入すると、 β は $10^6 [1/\text{cm}]$ 程度のオーダーとなる。これより $\alpha \ll 2\beta$ となるため、積層単位厚さの解析において、樹脂による吸収はほとんど影響がなく、エバネッセント光の減衰が支配的となる。つまり式 (9) は、

$$C_d = \frac{1}{\alpha + 2\beta} \ln \frac{\tau(\theta) U_0}{U_c} \approx \frac{1}{2\beta} \ln \frac{\tau(\theta) U_0}{U_c} \quad (10)$$

と表現できる。

以上より整理すれば、提案するエバネッセント露光における単位積層厚さ C_d は、

$$C_d = \frac{\lambda_0}{4\pi n_2 \sqrt{(n_1/n_2)^2 \sin^2 \theta - 1}} \cdot \ln \left(\frac{\tau(\theta) U_0}{U_c} \right) \quad (11)$$

と導かれる。

3.3 エバネッセント露光における単位積層厚さの解析結果
本節では導出した式(11)に基づき、エバネッセント露光における単位積層厚さの解析を行う。図5に、エバネッセント

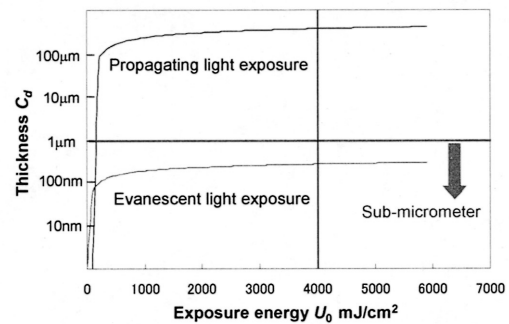


Fig.5 Resin thickness cured by propagating and evanescent light

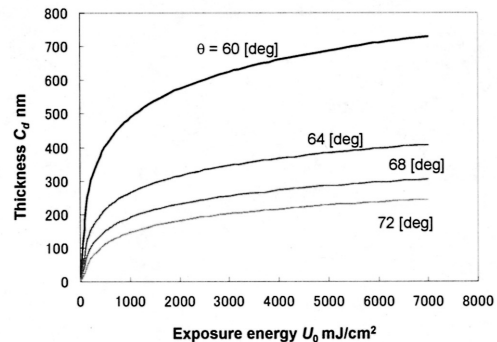


Fig.6 Relation of resin thickness to exposure energy of evanescent light

露光時の露光量と単位積層厚さの関係を示す。偏光は P とし、 n_1 , n_2 , θ , U_c , λ_0 , α をそれぞれ 1.78 , 1.51 , 68° , $100\text{mJ}/\text{cm}^2$, 488nm , 100cm^{-1} とした。比較のため、同条件 (θ のみ 45°) における伝搬光露光時の単位積層厚さと共に示す。

図5より、エバネッセント露光においても、樹脂硬化のエネルギーが充足することが分かる。伝搬光露光と比較すると、例えば U_0 が $4000\text{mJ}/\text{cm}^2$ の場合において、伝搬光露光は単位積層厚さが $100\mu\text{m}$ を超えるのに対して、エバネッセント露光は $1\mu\text{m}$ 以下となる。この結果からも、提案法においてサブマイクロメートルオーダー積層の実現が可能であることが分かる。

次に、エバネッセント露光において入射角を変化させた場合の、露光量と単位積層厚さとの関係を図6に示す。入射角以外の条件は図5と同様にした。このグラフから、入射角が臨界角 (57.4°) に近づくほど単位積層厚さが大きくなり、厚さが $1\mu\text{m}$ に近づくことが分かる。また入射角を大きくするほど単位積層厚さは小さくなり、例えば入射角が 70° を超えると 200nm 程度となる。

以上の解析結果から、エバネッセント光を露光エネルギーとして利用する光造形法において、露光エネルギーが樹脂硬化に充足すること、また入射角と露光量を適切にコントロールすることにより、サブマイクロメートルオーダーで単位積層厚さを制御できる可能性があることが示された。

4. エバネッセント光による樹脂露光基礎実験

4.1 実験方法

前章で理論的に導かれた知見を実験的に検証するため、全反射プリズムを用いたエバネッセント露光光学系を構築し、樹脂露光基礎実験を行った。ここでは特に、エバネッセント露光による樹脂硬化可能性、並びに偏光及び露光量と硬化厚さの関係について検証した。

図7に構築したエバネッセント露光光学系の概念図を示す。レーザの波長は488nmで、光硬化性樹脂は青色レーザに対して感度を持つウレタンアクリレート系のKC1042(JSR(株), $U_c=5\text{mJ/cm}^2$)を用いた。プリズムは、樹脂に対して液体時($n=1.49$)でも硬化時($n=1.59$)でも臨界角以上の入射角を保つために、高屈折率($n=1.78$)を有する硝材STIH-11のものを採用した。プリズム、イメージンオイル、カバーガラスは同じ屈折率のものを使用して屈折率整合を行うことで、1つの全反射媒体として扱える。

入射ビームは臨界角以上の角度で樹脂に対して入射してカバーガラス上部で全反射し、その領域に発生するエバネッセント光によって樹脂が露光される。ビームはP偏光で入射させた。入射ビーム径は0.7mmであるため、長半径1.9mm、短半径0.7mm程度の楕円形の領域にエバネッセント光が露光される。比較として、入射角45°の伝搬光による樹脂露光も行った。この場合、露光される領域は長半径1.0mm、短半径0.7mm程度の楕円形になる。また伝搬光、エバネッセント光とも90mW/cm²において45秒入射した。この場合 U_c は共に約4000mJ/cm²となる。

4.2 実験結果

図8(a)は伝搬光露光で硬化した樹脂の光学顕微鏡像である。顕微鏡の焦点深度を利用した評価から、硬化樹脂の厚さが100μm以上であることが分かった。図8(b)はエバネッセント露光領域の光学顕微鏡像であり、楕円形状の極薄層が確認できる。極薄層の領域はエバネッセント露光領域にほぼ対応しており、顕微鏡の焦点深度を利用した評価から、厚さが1μm以下であることが分かった。以上の知見から、この極薄層がエバネッセント露光による硬化樹脂であると判断した。

より詳細な評価を行うため、エバネッセント露光による硬化樹脂を白色干渉計(ZYGO(株), NewView5000)によって計測した。図9(a)は三次元像であり、図9(b)は図9(a)点線部における断面のプロファイルである。計測の結果、エバネッセント露光による硬化樹脂の厚さは最大で220nm程度であった。硬化樹脂表面のPV値は25nm以下であり、樹脂表面の平坦度が高いことが分かる。なお、本計測においては、解析時の薄膜干渉の影響を取り除くため、サンプルにはAuを約50nm蒸着した。

以上より、エバネッセント露光が、従来の一括面露光型マイクロ光造形法と同じ露光量においても樹脂硬化に対して充足すること、また単位積層厚さが1μm以下になることが実験的に確認された。

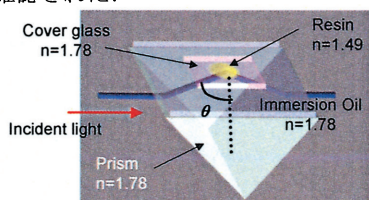
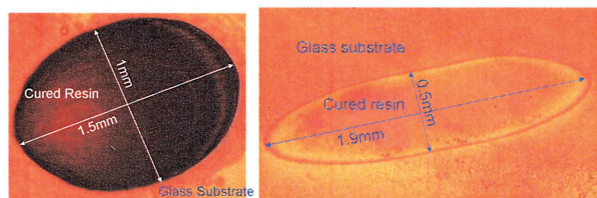
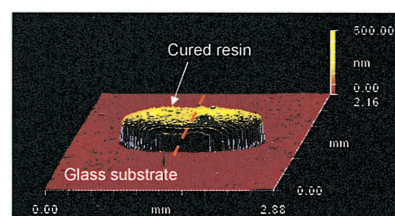


Fig.7 Experimental apparatus of curing resin using evanescent light

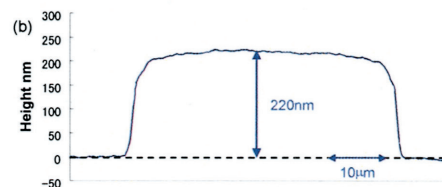


(a) Resin cured by propagating light (b) Resin cured by evanescent light

Fig.8 Photographs of cured resin



(a) 3D profile of cured resin



(b) Section profile of cured resin

Fig.9 Interferometer analysis of cured resin cured by evanescent light

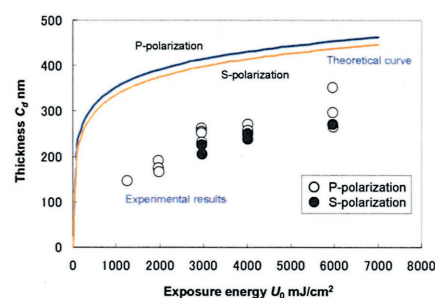


Fig.10 Resin thickness of theoretical analysis and experimental result cured by evanescent light

4.3 偏光及び露光量と単位積層厚さの関係

エバネッセント露光における単位積層厚さの特性を実験的に検討するため、偏光、露光量を変化させて硬化樹脂の厚さを評価した。 U_c 以外の実験条件は4.1節と同様である。

図10は露光量と単位積層厚さの関係をプロットしたグラフであり、理論曲線と共に示した。単位積層厚さの実験値は理論曲線と同様に露光量が増加するに従って増加し、P偏光による単位積層厚さはS偏光のものより大きくなる傾向を示した。以上から、理論的に予測されたように、単位積層厚さがサブマイクロメートルオーダーで制御できることが確認できた。

実験値が理論値の60%程度となっているが、これは前章における解析が静的モデルによるものであったのに対し、実際は樹脂が硬化するに従って物性値が変化することなどが原因であると考えられ、今後、実験的な知見も考慮した新しい理論解析モデルの構築が必要である。

5. エバネッセント露光樹脂の引き上げ実験

5.1 エバネッセント露光樹脂の引き上げ実験装置¹⁵⁾

エバネッセント露光による三次元光造形法を確立させるにあたり、積層プロセスの確立は非常に大きな要素となる。そのためには、ギャップ内の露光樹脂をガラス基板から剥離して引き上げ可能であることの確認が不可欠であり、検証のためエバネッセント露光樹脂引き上げ実験装置を試作して引き上げ実験を試みた。

試作した引き上げ装置の模式図を図11に示す。光源は波長488nmの半導体レーザを用い、樹脂はKC1042を使用した。ビームスプリッタによりビームを2分割し、一方を伝搬光露光用、他

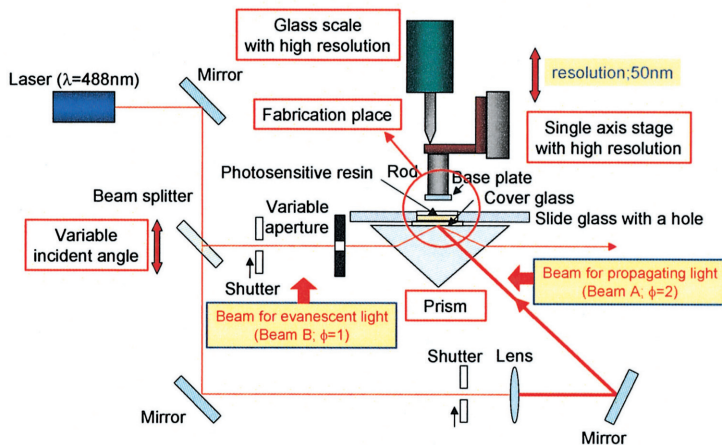


Fig.11 Nano-Stereolithography system with a high refractive index prism

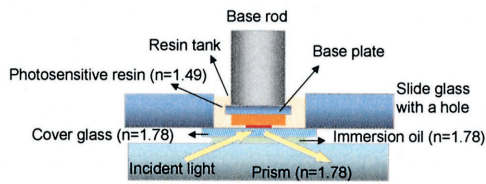


Fig.12 Closeup of fabrication place

方をエバネッセント露光用として用いる。両ビームはシャッターによる切り替えが可能である。エバネッセント露光用ビームはアパチャーで径を絞り、露光領域を変化できる。引き上げユニットは、分解能 50nm を持つ精密位置決めステージを使用することにより、サブマイクロメートル分解能での引き上げが可能である。なお、ガラススケール（株）ミットヨ、LGH-110）を導入することにより、ステージの位置が 10nm オーダで確認可能な構成とした。

露光部の拡大図を図 12 に示す。露光部は、穴あきスライドガラスの開口を樹脂タンクとして利用した構成となっている。4.1 節同様、プリズム、イマージョンオイル、カバーガラスは同じ屈折率 ($n=1.78$) のものを使用し、1つの全反射媒体として扱う。なお、カバーガラス上面には、樹脂の剥離性を高めるために、従来法^{12) 13)}と同様にシリコン系撥水剤を塗布した。

5.2 実験方法

本実験ではエバネッセント露光樹脂の引き上げ可能性の実験的検証に焦点を絞り、以下の手順で実験を行った。

- 1) 伝搬光露光用ビームにより、厚さ 100 μm 程度の土台樹脂層を造形する
- 2) エバネッセント露光により、土台とカバーガラスによるギャップ内の液体樹脂を硬化する
- 3) エバネッセント露光による硬化樹脂が土台に積層された形で引き上げられるかを確認する

エバネッセント露光用ビームは入射角 68° 、P 偏光で入射し、露光量は伝搬光露光、エバネッセント露光ともに 4000mJ/cm² に設定した。なお、カバーガラスとしては露光領域において PV 値 5nm 程度と平坦度の高いものを使用した。

5.3 実験結果

引き上げた樹脂を、露光側から照明した光学顕微鏡像を図 13 に示す。ガラス基板の上部に土台の樹脂層が観察でき、その上部

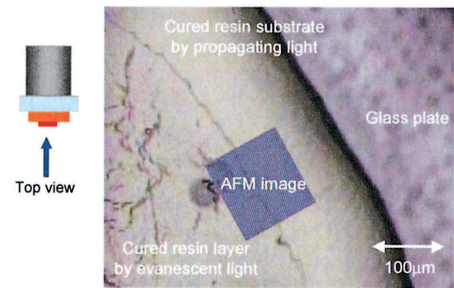


Fig.13 Optical microscope image of laminated resin cured by evanescent light

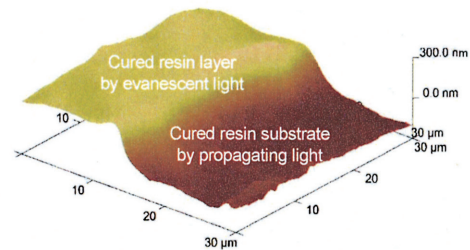


Fig.14 AFM image of laminated resin cured by evanescent light

にエバネッセント露光により硬化した樹脂層が積層している形状が確認された。図 14 はエバネッセント露光による硬化樹脂のエッジ部分（図 13 の囲み部分）を AFM により解析した三次元像である。AFM 解析の結果、エバネッセント露光による硬化樹脂の積層厚さは約 200nm であり、サブマイクロメートルオーダでの積層が確認された。

6. 結 言

本報では、高精度かつ生産性の高い三次元光造形法確立へ向け、エバネッセント光を利用したマイクロ光造形法を提案し、提案法における造形基本特性の理論的・実験的検討を行った。結果をまとめると以下になる。

- 1) エバネッセント光のエネルギー減衰とともに樹脂の光エネルギー吸収が起こるというモデルを構築し、Maxwell 方程式と Lambert-Beer の法則を展開することにより単位積層厚さを定式化した。
- 2) 上記の解析結果に一括面露光型光造形法における一般的なパラメータを代入した結果、エバネッセント露光のエネルギーが樹脂硬化に対して充足すること、入射角、偏光及び露光量を変化させることにより単位積層厚さがサブマイクロメートルオーダで制御可能であることが導かれた。
- 3) 全反射プリズムを利用した光学系により樹脂に対して、 68° の入射角でエバネッセント露光を行ったところ、伝搬光露光と同じ露光量（約 4000mJ/cm²）においてサブマイクロメートルの厚さで硬化した樹脂が確認できた。白色干渉計による評価の結果、硬化樹脂層の厚さは 220nm 程度であった。
- 4) 理論解析同様に、露光量、偏光を変化させることにより単位積層厚さのサブマイクロメートルオーダで制御可能であることが実験的に確認された。
- 5) 積層プロセスの確立へ向け必要不可欠な硬化樹脂引き上げプロセス確認のため、屈折率 1.78 を有する高屈折プリズム及び分解能 50nm の精密位置決めステージを使用した硬化樹脂引き上げ装置を設計・構築した。
- 6) 試作した硬化樹脂引き上げ装置を用いて硬化樹脂引き上げ実

験を行った結果、エバネッセント露光により約 200nm の厚さで硬化された樹脂の引き上げが確認できた。

今後は機能的な三次元構造創製を目的として、引き上げ装置に結像系を導入し、面内構造の創製技術及び多層積層技術の確立を目指す。

謝 辞

本研究の一部は、財団法人「三豊科学技術振興協会」助成、及び平成 16 年度～平成 17 年度科学研究費補助金萌芽研究 (課題番号 16656049) により、行われたことを記して御礼申し上げます。また、実験用光硬化性樹脂を提供下さった大阪大学・三好高谷研究室、JSR 株式会社に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) N.Miyano, K.Tagaya, K.Kawase, K.Ameyama, and S.Sugiyama : Fabrication of alloy and ceramic microstructures by LIGA-MA-SPS process, *Sensors and Actuators A*, **108**, (2003) 250.
- 2) M.Bender, M.Otto, B.Hadam, B.Vratzov, B.Spangenberg, and H.Kurz : Fabrication of Nanostructures using a UV-based imprint technique, *Microelectronic Engineering*, **53**, (2000) 233.
- 3) J.D.Joannopoulos, P.R.Villeneuve and S. Fan : Photonic Crystals, *Solid State Communications*, **102**, 2-3(1997) 165.
- 4) 松井真二, 皆藤孝, 藤田淳一, 石田真彦, 落合幸徳 : 集束イオンビームによる超微細立体構造形成技術, *精密工学会誌*, **67**, 9 (2001) 1412.
- 5) 例えば, 丸山洋二, 早野誠治, 今中暎 : 積層造形技術資料集, オプトロニクス社 (2002).
- 6) 山口勝美, 中本剛 : 光造形による形状創成, *精密工学会誌*, **61**, 10 (1995) 1385.
- 7) 浮田宏生, 富村明彦 : DVD 光ヘッドによる卓上型光造形装置と高分解硬化特性, *精密工学会誌*, (1999) 1360.
- 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, *機械学会論文集 (C 編)*, **66**, 649 (2000) 303.
- 9) S.Kawata, H.B.Sun, T.Tanaka, and K.Takada : Finer features for functional microdevices, *Nature*, **412** (2001) 697.
- 10) V.Mizeikis, H.B.Sun, A.Marcinkevicius, J.Nishii, S.Matsuo, S. Joudkasis, and H.Misawa : Femtosecond laser micro-fabrication for tailoring photonic crystals in resins and silica, *Journal of Photochemistry and Photobiology A*, **145**, (2001) 41-47.
- 11) 林照剛, 三好隆志, 高谷裕浩, 高橋哲 : 液晶マスクを用いた非積層光造形法に関する研究 (第1報), *精密工学会誌*, **67**, 4 (2001) 628.
- 12) 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光造形法に関する研究 (第2報), *精密工学会誌*, **69**, 10 (2003) 1417.
- 13) 梶原優介, 稲月友一, 高橋哲, 高増潔 : エバネッセント光を利用したナノ光造形法の研究 (第2報), *精密工学会秋季大会講演論文集*, (2003) 1415.
- 14) 例えば, 鶴田匡夫 : 応用光学 I, 培風館 (1990).
- 15) Y.Kajihara, Y.Inazuki, S.Takahashi, and K.Takamasu : Study of Nano-Stereolithography Using Evanescent Light, *Proc. of ASPE Annual Meeting*, (2004) 14.