

全方位多光束エバネッセント波一括制御型

マイクロ光造形装置の開発

東京大学 先端科学技術研究センター
教授 高橋 哲

(平成 29 年度 一般研究開発助成 AF-2017234)

キーワード：エバネッセント波，微細機能構造，マイクロ光造形

1. 研究の目的と背景

表面の物理的寄与が相対的に大きくなる昆虫等小生物の表面は、極めて優れた機能界面となっていることが知られている¹⁻³⁾。撥水、防曇、防滴、防塵などの自浄作用のある力学的機能の他、例えば、視覚器官表面（複眼表面、単眼表面など）においては、視覚利用波長帯全域に亘り、広い角度入射光波を器官に取り込むことができるなど、極限まで追求された光学機能が付与されており、このような機能構造表面の人工的プロセス法の確立が求められている。これらの微細構造はサブ波長以下のサイズ単位を有するため、一般的な自由空間伝搬光を媒体としたレーザ加工法では構造創製能力の微細性限界のため、創製困難な問題があった。

そのため、エバネッセント光特有の局在界面フォトンエネルギー場を精密制御し、ナノ加工エネルギーとして活用するエバネッセント露光型マイクロ光造形法において、複数光束のエバネッセント波干渉⁴⁾により生じる界面近傍微細強度分布を利用することで、従来手法では困難であった面内一括加工によるサブ波長微細構造からなる光学機能素子形状の創製を目指す。特に本申請研究においては、多光束エバネッセント波で生成可能な複雑な微細構造分布を可視化可能な数値シミュレータを構築するとともに、簡単なフィルタ交換だけで全方位多光束エバネッセント波干渉を実現可能な一括制御型マイクロ光造形装置の開発を目指した。

2. 研究方法、結果

2.1 エバネッセント波

2つの屈折率の異なる媒質間で、高屈折率側から低屈折率側に入射した光は、一部は低屈折率側に透過し、残りは境界面で反射する。光の入射角が2つの媒質の屈折率に依存するある臨界角以上になると、透過光は無くなり、全ての光が反射する全反射が起こる。この際、境界面には電場振幅が存在するため、低屈折率媒質側に電磁気的エネルギーの染み出しが生じている。この染み出したエネルギーがエバネッセント光である（図1）。この光は境界面からの距離に対し指数関数的に減衰し、およそ波長程度の領域に局在する。エバネッセント光の境界面での電場 E 、マクスウェル方程式とスネルの法則を用いて次のように記述される。

$$E = A \exp\left(i\omega t - \frac{z}{Z_{ev}} - ikx n_1 \sin \theta\right) \quad (1)$$
$$\left(Z_{ev} = \frac{\lambda_0}{2\pi n_2} \sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta - 1}\right)$$

ここで、境界面と直交する軸を z 軸、境界面と光線面の交わる軸を x 軸ととる。 A 、 ω 、 t はそれぞれ電場の振幅、角振動数、時間を表す。波長は λ 、波数は k で表されている。 m_1 、 m_2 はそれぞれ高屈折率側と低屈折率側の屈折率を示している。 θ は入射角である。

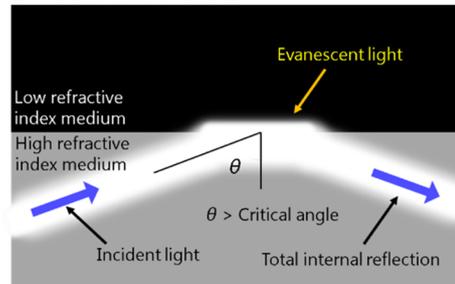


図1. エバネッセント光

2.2 エバネッセント波干渉による構造造形例

エバネッセント光の染み出す低屈折率側を光硬化性樹脂で満たすことにより、厚さ数百ナノメートルの薄膜を造形することが可能である。この際境界面において、複数の光束を干渉させながら入射することで、特定の強度分布が生じ、それに応じた硬化形状を持つ造形物が得られる。図2は2光束干渉エバネッセント波による造形例⁵⁾である。2光束の干渉では定在波が生じ、波状の造形物が得られる。光束数を増やすことにより、高さの異なる凹凸構造を有する複雑構造の造形が可能となる。構造の自由度は向上する一方で、入射条件の場合の数は膨大になり、条件に対する構造の推定はより困難になる。

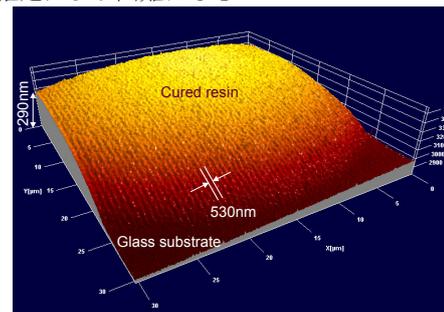


図2. 定在エバネッセント波造形の AFM 像⁵⁾

2・3 多光束エバネッセント波干渉シミュレーション

前節の問題を解決するために、多光束でのエバネッセント波干渉時に期待される造形形状を可視化可能な数値シミュレータを、マクスウェル方程式および樹脂硬化閾値に基づき構築する。解析座標系を図3に示す(ここでは3光束の干渉を例に取っている)。入射角を θ とし、 x 軸正方向からの z 軸まわりの角度を ϕ とした。それぞれの光束の電場の式を(2)式のように定義した。これは、(1)式を3次元に拡張させたものである。

$$\vec{E} = \vec{P} A \exp\{-i(\omega t - \vec{k}_1 \cdot \vec{r} + \epsilon)\}$$

$$\vec{P} = \begin{pmatrix} \sin \phi \\ \cos \phi \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{k}_1 = \begin{pmatrix} kn_1 \sin \theta \cos \phi \\ kn_1 \sin \theta \sin \phi \\ k \sqrt{n_2^2 - (n_1 \sin \theta)^2} \end{pmatrix}, \vec{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、 \vec{P} ：偏光ベクトル、 \vec{k}_1 ：高屈折率媒質中の波数ベクトル、 \vec{r} ：位置ベクトル、 c ：光速、 λ ：波長、 ω ：角周波数、 ϵ ：初期位相、 A ：電場振幅、 k ：真空中の波数、 n_1, n_2 ：屈折率($n_1 > n_2$)である。これを xy 平面で干渉させるため、光束1から光束3までの電場 $\vec{E}_1 \sim \vec{E}_3$ を(3)、(4)式のように、重ね合わせて、その強度分布の時間平均を計算した。 τ は周期である。光硬化性樹脂の硬化閾値 C を設定し、(5)式のような判定を行い、これを越えた部分を硬化部として3次元空間に可視化した。

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 \quad (3)$$

$$\langle I \rangle_t = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau (\vec{E} \cdot \vec{E}) dt \quad (4)$$

$$\langle I \rangle_t \geq C \quad (5)$$

図4に一例として、3光束干渉シミュレーション時の結果(S偏光の時)を示す。実際の実験状況を考慮して、波長、および、屈折率(高・低)は、それぞれ488nm、1.78、1.50に設定した。各光束の入射条件としては、入射角、方位角、電場振幅、初期位相の4つのパラメータが存在するが、ここでは最も形状に大きな影響を与える方位角による違いを示した。すなわち、入射角は 70° に固定、電場振幅は一定、初期位相は0として、3本の光線の方位角(ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3)変動の影響を可視化したものである。

図5、図6は3光束干渉造形とそれを構成する2光束干渉造形要素の出力結果について、溝部分にラインを引いて並べたものである。図5において、(0, 30, 60)の3光束干渉は、2光束干渉である(0, 30)、(0, 60)そして(30, 60)すなわち(0, 30)を 30° 回転させたものの組み合わせとなっているのが分かる。図6において、(0, 120, 240)の3光束干渉は、2光束干渉である(0, 120)、(120, 240)、(240, 360)すなわち(0, 120)を 120° ずつ回転させたものの組み合わせとなっている。シミュレーションによって得られた様々な出力結果の観察から、3光束以上の複雑な干渉造形形状でも、2光束干渉による単純な造形形状要素の組み合わせで整理できることが確認された。

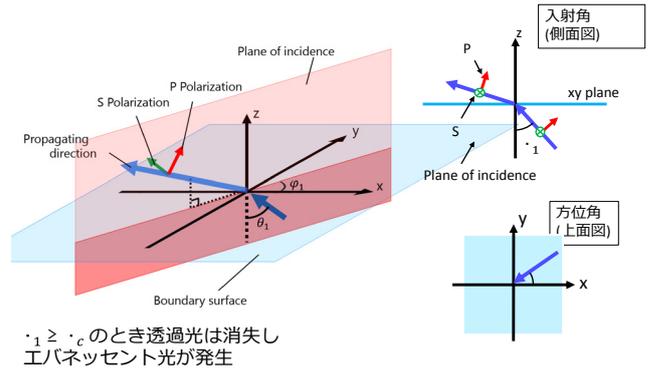


図3. 多光束干渉シミュレーション解析の座標系

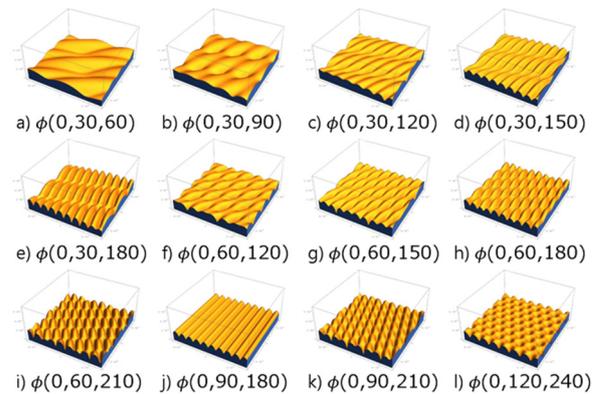


図4. 3光束干渉シミュレーション (S偏光)

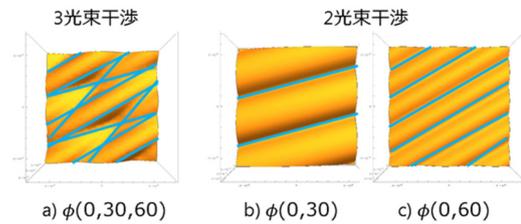


図5. 3光束干渉(0, 30, 60)と2光束干渉

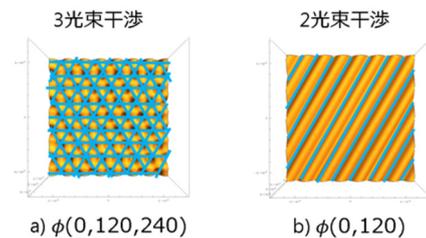


図6. 3光束干渉(0, 120, 240)と2光束干渉

図7は、複雑構造造形の一例である。8光束の干渉例(0,30,90,120,180,210,270,300)を示している。狭角2光束を1セットとし、このセットを4方位から入射した形態と解釈することができる。入射偏光により異なった形態で複雑な三次元構造を形成できることが分かる。偏光に関しては、光束ごとに変化させることも可能であり、よりバリエーションの多い形状形成が期待できる。

2・4 全方位多光束エバネッセント波一括制御型マイクロ光造形装置

図 8 に、高 NA 対物レンズと空間周波数フィルタによる一括全方位多光束入射の概念図を示す。高 NA 対物レンズの場合、固体浸対物レンズの屈折率を、樹脂の屈折率より大きくすることで、露光面に対して全反射角度となる入射角度の設定が可能となる。この際、対物レンズの後ろ側焦点面における点光源は、露光面において、斜め入射する一光束に対応するため、(臨海角度相当径より外側の)外縁部において、任意位置に複数の点光源を配置することで、全方位からの任意多光束干渉を実現可能である。ダイナミックな光変調素子を配置することで、多光束干渉の時系列変動制御も可能である。今回は基礎実験として静的な開口フィルタを配置することで任意の全方位多光束エバネッセント波生成を実現し、実際に光硬化性樹脂による微細構造造形を試みた。

図 9 は、上述の一括全方位多光束入射コンセプトに基づいた全方位多光束エバネッセント波一括制御型マイクロ光造形装置の全体構成図⁶⁾ならびに開発装置写真である。光源には波長 488 nm の光励起半導体レーザを用いる。このレーザの線幅は 1.5 MHz 未満であり、コヒーレンス長換算では 200 m である。本研究における干渉造形に対しては十分なコヒーレンス性を持っている。これをシングルモード光ファイバに入射し、ファイバの射出光を点光源とみなして光学系に入れる。使用したファイバのコア径に相当する MOD (Mode Field Diameter) は $2.5 - 3.4 \mu\text{m}$ であり、NA は 0.12 - 0.14 である。

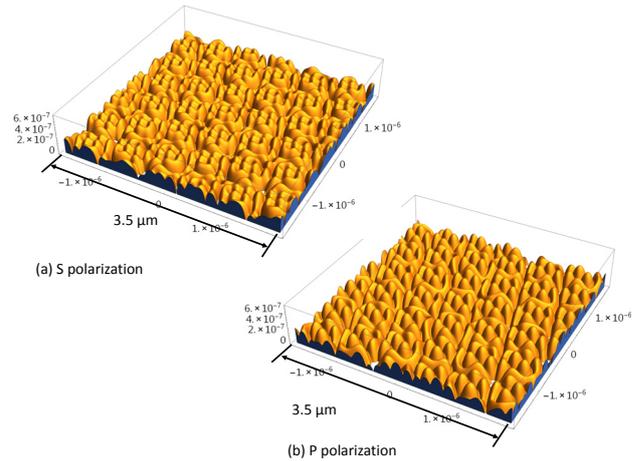


図 7. 8 光束干渉, ϕ (0,30,90,120,180,210,270,300)
(a) S 偏光, (b) P 偏光

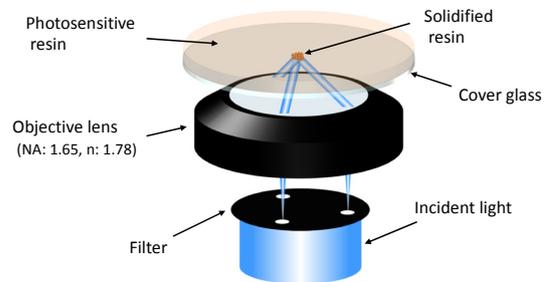
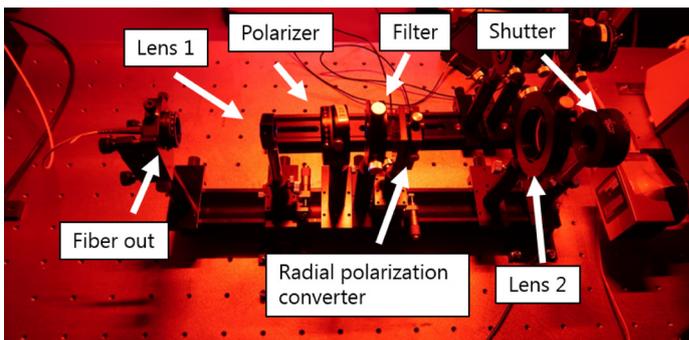
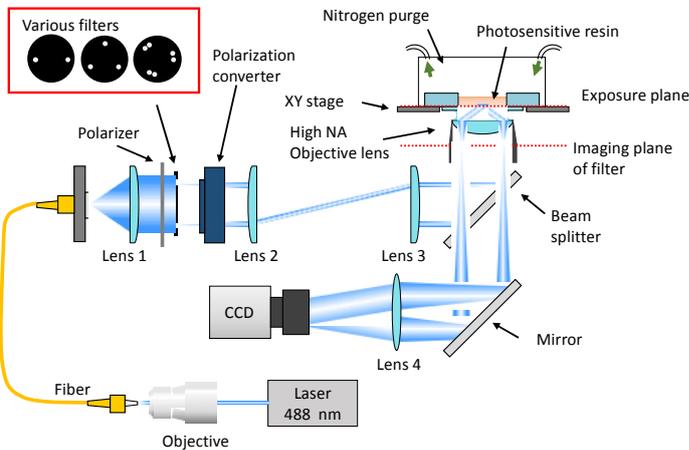
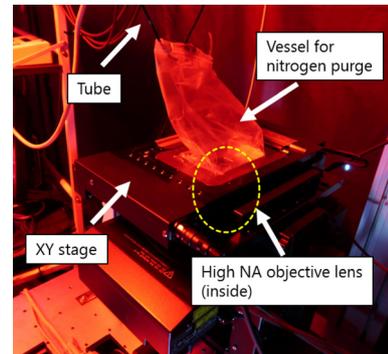


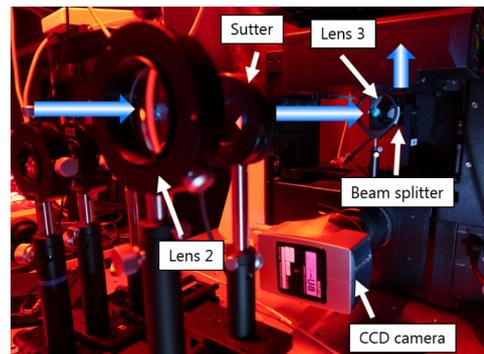
図 8. 空間周波数フィルタによる一括全方位多光束入射



光学系前半部



露光機構部



光学系後半部

図 9. 開発した全方位多光束エバネッセント波一括制御型マイクロ光造形装置

ファイバ射出光からの光はレンズ1でコリメートし、偏光子を通してフィルタに入射する。このフィルタのピンホール（開口 $120\ \mu\text{m}$ ）から広がる準球面波が、ラジアル偏光素子を通して偏光制御され、最終的に対物レンズを通過して準平面波として露光面に入射する。フィルタ位置と対物レンズ内部の後ろ側焦平面が共役の関係にあるのと同時に、ファイバ射出口位置、そしてレンズ2とレンズ3の中間地点、および露光面が共役の関係になる。露光量の制御はシャッターを用いて行う。また樹脂を乗せるカバーガラスはその位置をXYステージで制御することができ、カバーガラス上の位置を動かしつつ、一回露光するごとに条件を変化させることができる。

2・5 全方位多光束エバネッセント波のインプロセス観察

図9の実験装置は、露光面に対して、無限遠補正型の顕微システムを実装しており、露光面上の強度分布をインプロセスで光学的拡大観察することができる。図10は、2光束干渉時のエバネッセント光強度分布のインプロセス観察像であり、2光束間の相対的な方位角変動が干渉縞強度分布に及ぼす影響を調べたものである。左がS偏光入射時、右がP偏光入射時のものである。方位角差の広がり（20, 30, 60度）とともに、理論通りに、干渉縞の向きおよび間隔が変動（870, 580, 300 nm）し、またP偏光に比べ、S偏光時はコントラストが低下する。図11は、6光束および8光束のとき（方位角条件は、それぞれ左に記載）の観察像である。それぞれ下には、シミュレーション結果を比較のため示している。インプロセス観察光学系の光学的解像力およびCCDピクセルサイズの関係で、微細分布の詳細比較は困難であるが、マクロな構造分布としては、多光束においてもシミュレーション結果に対応した強度分布が生成されていることが分かる。

2・6 全方位多光束エバネッセント波一括露光実験

開発装置を用いて光硬化性樹脂の微細構造形成を試みた。ここでは、光硬化性樹脂として、ウレタンアクリレートオリゴマーに可視域反応性光重合開始剤を混合したものをを用いた。硬化造物は、原子間力顕微鏡でトポグラフィ像を計測し、構造に含まれる周期成分を二次元フーリエ変換することで抽出した。図12, 13はそれぞれ、6光束エバネッセント波干渉（0, 20, 120, 140, 240, 260）および8光束エバネッセント波干渉（0, 30, 90, 120, 180, 210, 270, 300）を一括露光させた際に、得られた樹脂硬化物の結果である。2光束3方位入射干渉による結果（図12）については、トポグラフィ像からも明らかであるが、フーリエ変換像においても6つの輝点、すなわち3方向の干渉縞が観察できた。それぞれの縞間隔は860 nm, 870 nm, 890 nmであり、これは対向角 20° の干渉縞間隔である871 nmと一致する。ただし、より対向角 120° や 140° といったより大きい対向角による狭い間隔の干渉縞については確認できなかった。

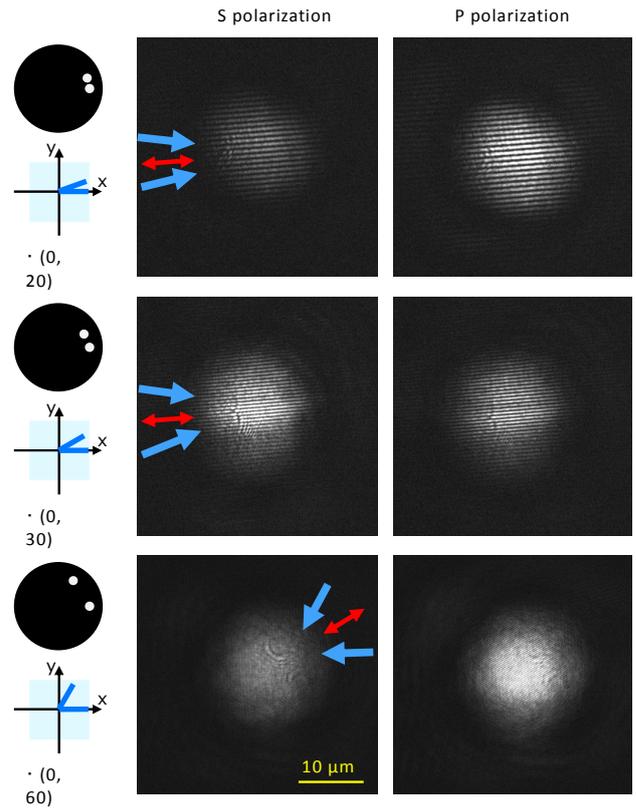


図10. 2光束干渉によるエバネッセント光強度分布のインプロセス観察（方位角の違い）[S偏光入射とP偏光入射]

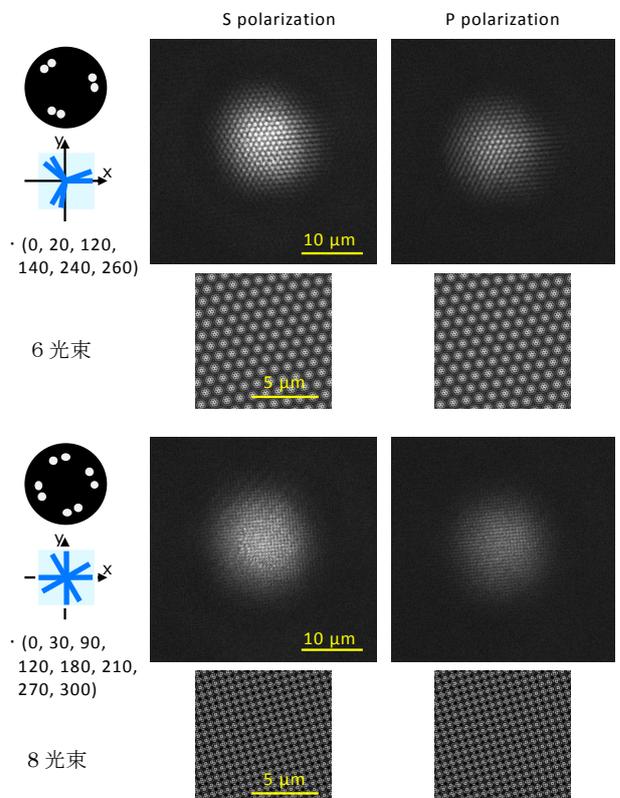


図11. 多光束干渉によるエバネッセント光強度分布のインプロセス観察（6光束, 8光束）[S偏光入射とP偏光入射]

2 光束 4 方位入射干渉による結果 (図 13) については、トポグラフィ像から xy 方向に干渉縞が確認できた。これはフーリエ変換面におけるより中心に近い 4 つの輝点に表れている 600 nm 程度の干渉縞であり、これは対向角 30° の干渉における縞間隔 584 nm と一致する。一方、フーリエ変換像について、その外側にも干渉縞を示すと思しき輝点が存在し、これらは約 300 nm の間隔であると計算される。これは、対向角 60° の干渉条件である 302 nm と一致する。

3. 結言

生物の持つ機能性表面微細構造などの複雑な微細周期構造の創製を目指して、本研究では、エバネッセント波を多光束で干渉することで生成される複雑微細光強度分布の加工エネルギーへの適用を行った。具体的には、多光束エバネッセント波で生成可能な複雑な微細構造分布を可視化可能な数値シミュレータを構築するとともに、簡単なフィルタ交換だけで全方位多光束エバネッセント波干渉を実現可能な一括制御型マイクロ光造形装置の開発した。実際に光硬化性樹脂に対して露光実験を行い、複数の周期構造が合成された複雑微細周期構造が生成できる⁷⁾ことを示した。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、多大なご支援を頂いた公益財団法人 天田財団に心より感謝申し上げます。また東京大学大学院精密工学専攻、鈴木裕貴氏、増井周造氏には多大な貢献をいただいた。この場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- 1) T. Jiang, et.al.: Biomimetic superoleophobic surfaces: focusing on their fabrication and applications, *J. Mater. Chem. A*, 3 (2015), 1811.
- 2) X. Gao, et.al.: The Dry-Style Antifogging Properties of Mosquito Compound Eyes and Artificial Analogues Prepared by Soft Lithography, *Adv. Mater.*, 19, (2007) 2213.
- 3) Z. Guo, et.al.: Biomimic from the superhydrophobic plant leaves in nature: Binary structure and unitary structure, *Plant Science*, 172 (2007), 1103.
- 4) Martinez-Anton, J. C.: Surface relief subwavelength gratings by means of total internal reflection evanescent wave interference lithography. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 8-4 (2006), S213.
- 5) 梶原, 高橋他: 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), 精密工学会誌, 73-8 (2007), 934.
- 6) 鈴木, 高橋他: エバネッセント露光型ナノ光造形法に関する研究 (第 26 報)-多光束干渉によるミリオーダ領域のサブミクロン表面微細構造創製-, 2017 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2017), 859

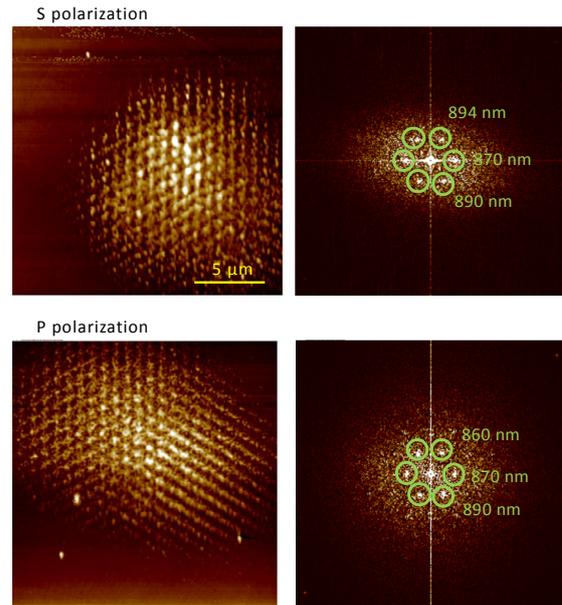


図 12. 6 光束エバネッセント波干渉 (0, 20, 120, 140, 240, 260) による樹脂硬化物の AFM トポグラフィ像および二次元フーリエ変換像 [S 偏光入射と P 偏光入射]

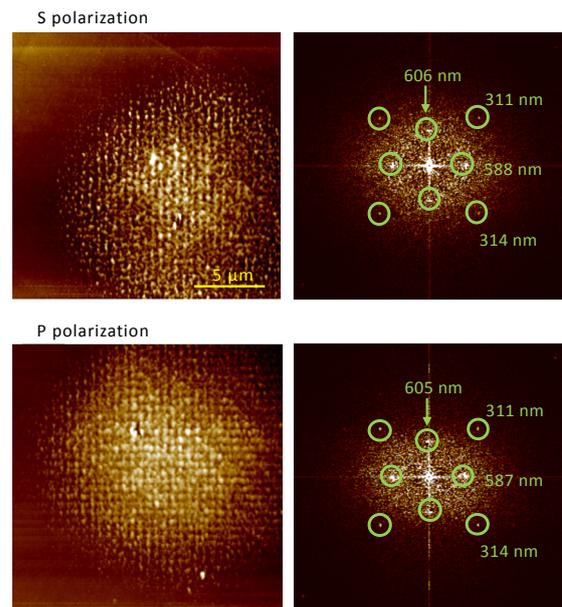


図 13. 8 光束エバネッセント波干渉 (0, 30, 90, 120, 180, 210, 270, 300)による樹脂硬化物の AFM トポグラフィ像および二次元フーリエ変換像 [S 偏光入射と P 偏光入射]

- 7) S. Masui, S. Takahashi, et.al.: Fabrication of nano/micro dual-periodic structures by multi-beam evanescent wave interference lithography using spatial beats, *Optics Express*, 27-22 (2019), 31522.