

平成26年度研究助成対象・研究成果

レーザー光を用いた非接触マイクロパターン金型の表面形状精度の適正評価法

研究報告者 カチョーンルンルアン パナート

プロフィール



最終学歴 2005年3月
大阪大学大学院 工学研究科
機械システム工学専攻 博士後期課程

専門分野 ナノスケール加工・計測

学 位 博士(工学)

所属団体 九州工業大学 大学院情報工学研究院
機械情報工学研究系

役 職 名 准教授

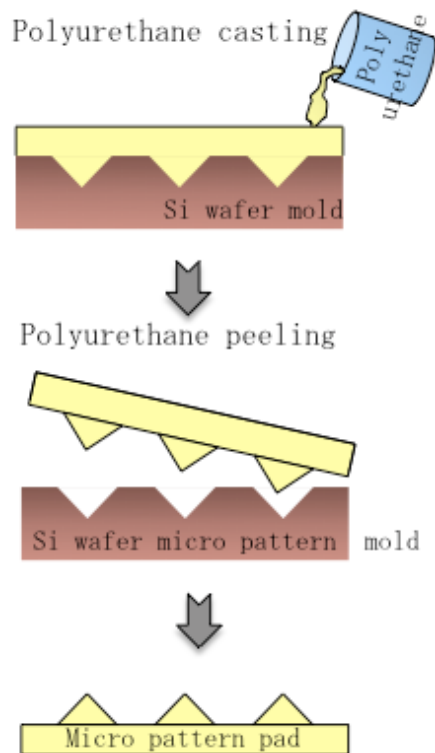
今後の抱負

私は、来日後、学部生時代(機械工学科在学中)に自然現象(特に「光」)に関心をいただきました。光が様々な物理的情報を伝播し、あらゆる現象に関わっていることに気づいた事が、光学応用精密加工・計測の研究を目指すきっかけとなりました。本研究開発は、まさしく私が配属となった研究室で学んだ卒業研究のテーマ(光の波動性のFraunhofer回折現象を用いた精密形状計測法)に基づいたもので、これを更に展開した応用研究になります。本報告内容は理論・実験両面からの評価法の有効性を検証したことについて述べています。今後、実用性を高めるために、細いレーザービーム径を用いることによって観測範囲が縮小されてしまう弱点を、そのレーザー光をライン状に形成することにより、観測範囲を拡大させることなどで学生たちと一緒に克服していきたいと思います。

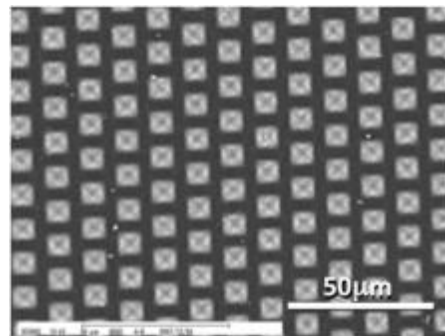
1. はじめに

本研究開発は、近年の需要が高まってきているマイクロパターン金型およびその成形が背景にある。図1はマイクロパターン製作の一例で、MEMSの加工技術に応用したマイクロパターンパッドの製作法を示す^[1-2]。このようにパターンのピッチが数十 μm 以下の場合では、その微細表面形状を観測するのに真空の環境が必要とする電子顕微鏡や、大気中の環境では走査型共焦点レーザー顕微鏡により、手間と時間のかかる手法が一般的に使われている。そこで、本研究開発ではそのマイクロパターンの特徴を活用して図2に示すように、レーザー光をマイクロパターンの表面形状に照射して発生する回折光強度分布を取得する。この回折光強度分布により、生産現場において適用可能な、マイクロパターンの表面形状精度（良好、不良など）の適正評価法の研究開発を目的とする。本手法は、非接触の評価手法のため、例えば、成形後のマイクロパターンの形状不良や使用中の金型の変形・消耗・欠損・異物を瞬時に検出することなどへの適用が考えられる。

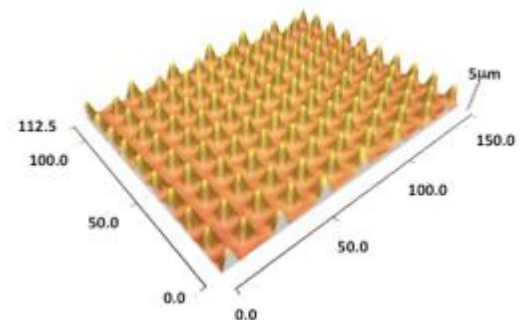
今回はレーザー光を用い、成形された製品のマイクロパターンの形状精度（不良検査）を非接触かつ高速度化に対応可能な回折光強度分布による評価法の提案、そしてその適用性を検証したので報告する。



(a) マイクロパターンパッドの成形



(b) 電子顕微鏡による成形後の形状観察



(c) 三次元表面形状の鳥瞰図

図1： Si モールドを用いたマイクロパターン形状の成形例

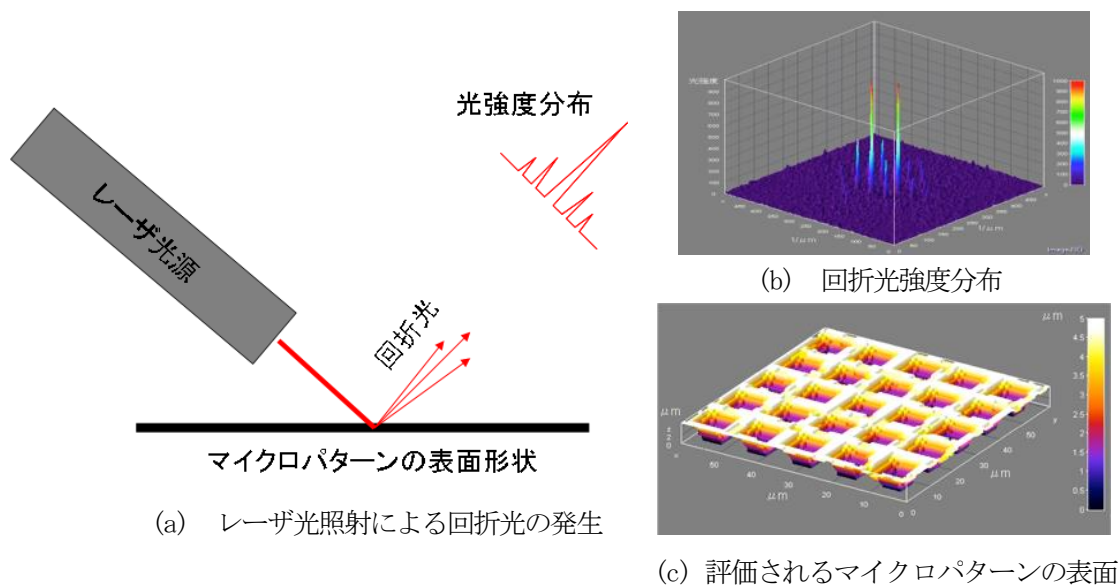


図2：マイクロパターン表面形状における回折光の発生

2. 回折光とマイクロパターン形状

これまでマイクロパターンの表面形状の評価法として共焦点顕微鏡を用いて表面凹凸を計測する手法が用いられてきた。共焦点顕微鏡では、マイクロパターンの表面形状の定量的高さデータが得られる反面、瞬時に観測ができないため、ex-situ の評価にならざるを得ない。そこで、研究室では、in-situ によるマイクロパターンパッドの表面形状評価法として、光学的フーリエ変換に基づいた手法を提案してきた。

光学的フーリエ変換を用いた手法^[3-8]では、微細表面形状からの回折光の強度分布(パワースペクトル)を測定することによりその表面形状の評価を行う。図3に回折光測定装置の概略図を示す。被測定試料表面にレーザー光を入射したとき、得られた表面形状からの回折光の強度分布(回折像)は、表面形状(開口関数として)を空間的にフーリエ変換された姿で現われる。CMOSカメラで得られる回折光強度分布は、空間的フーリエ変換された被測定試料のマイクロ表面形状の開口関数のスペクトルを示すことになる。例えば、図4には、ピッチ $12\mu\text{m}$ のマイクロピラミッド形状パターン(図の左半分)からの回折光強度分布(図の右半分)は、マイクロパターンのピッチ $12\mu\text{m}$ の空間スペクトルを示している。また右半分の強度分布2次元プロファイル曲線図には、破線がピッチ $12\mu\text{m}$ の空間的フーリエ変換の解析した結果を示し、回折光強度分布のプロファイルによく一致していることがわかる。

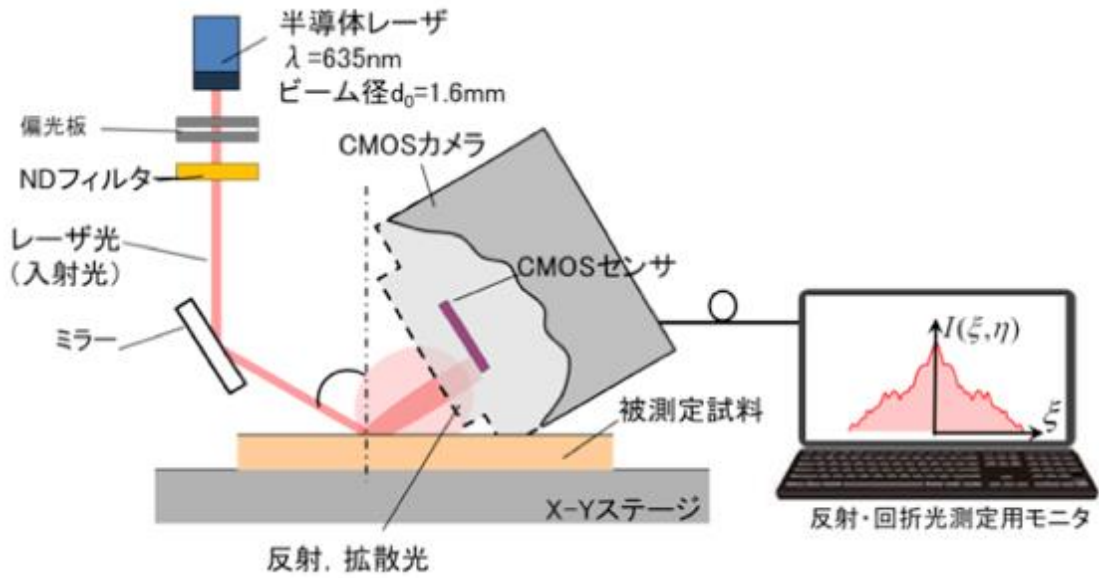


図3：マイクロパターン表面形状からの回折光強度分布測定光学系

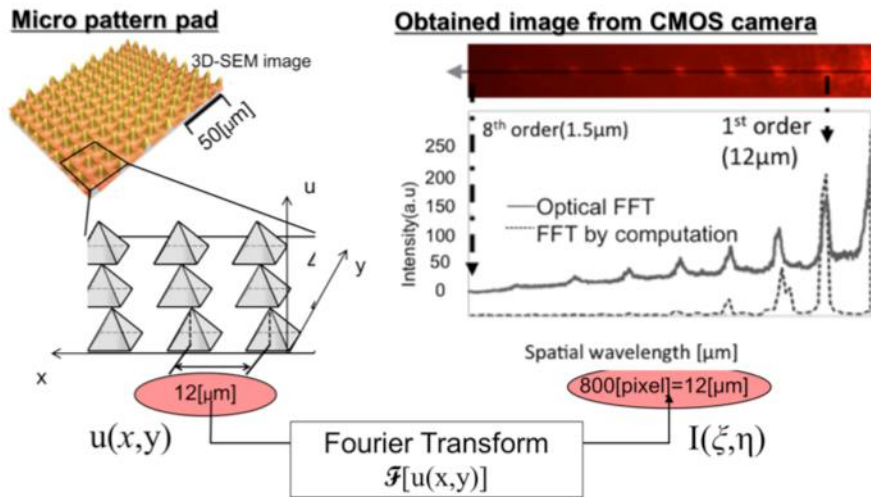
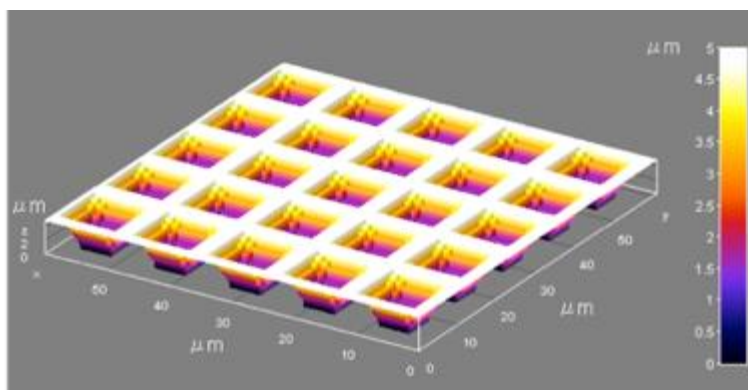


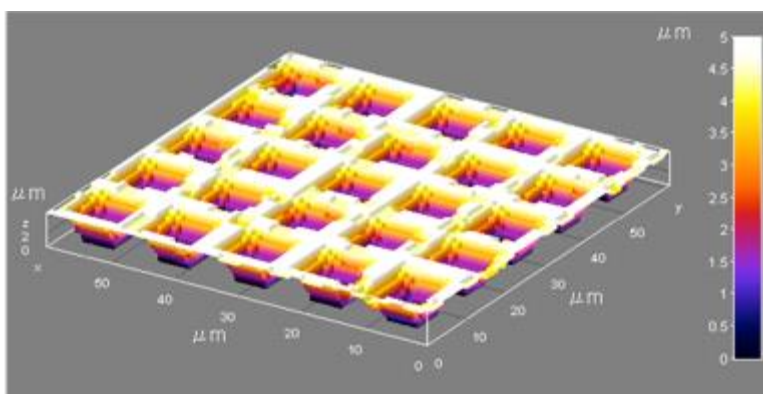
図4：マイクロパターン形状と光学的フーリエ変換

3. 照射レーザービーム径の違いによる不良マイクロパターン形状からの回折光分布（シミュレーションによる検討）

図5は、ポケット幅 $7\mu\text{m}$ 、深さ $5\mu\text{m}$ 、ピッチ $12\mu\text{m}$ のマイクロパターン形状を示す。図5(b)に示すように不良のマイクロパターン形状における回折光強度分布を以下のシミュレーション結果（図6, 図7）に示した。不良形状から拡散反射した光は、回折光強度分布のスペクトルピーク以外の箇所にランダムに現れるが、一般のレーザービーム径（約 $500\mu\text{m}$ 以上）の使用では、非常に微弱であり、検知されにくく、実用性に欠ける（図6(c)）。一方、図7(c)に示すようにレーザービーム径を $100\mu\text{m}$ 程度まで細くすれば、サイズ $1\mu\text{m}$ の不良形状からの拡散反射光が顕著に現れ、飛躍的に検知がされやすくなり、実用性が高まる。これらのシミュレーション結果より、不良のマイクロパターンを検出するためには、 $100\mu\text{m}$ の細かいレーザービームを採用することが一つの条件であることが示された。



(a)良好なマイクロパターン形状

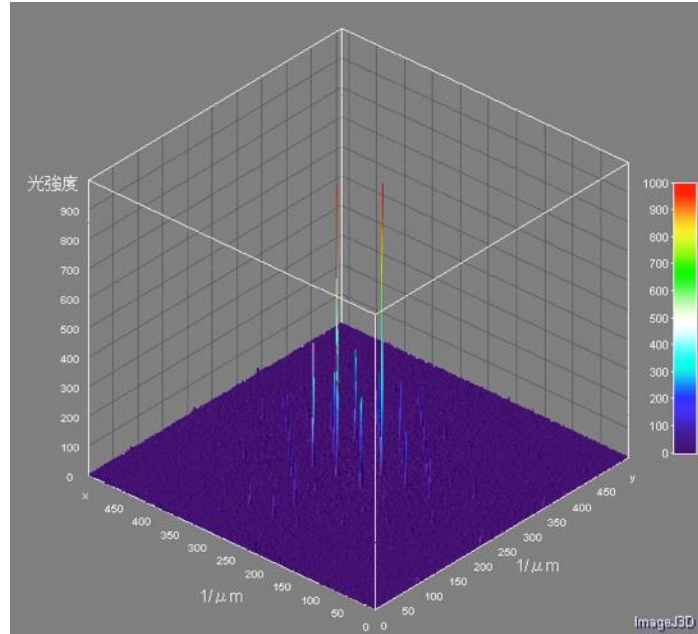


(b)不良サイズ $1\mu\text{m}$ のマイクロパターン形状

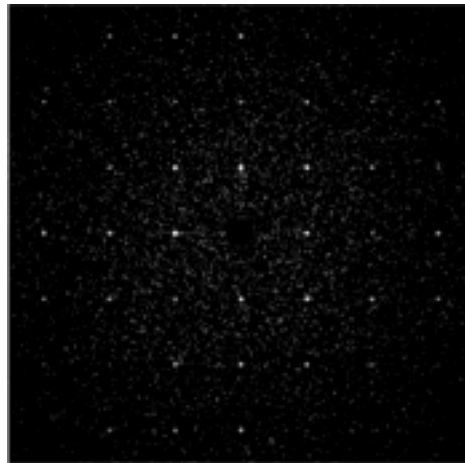
図5：シミュレーションに用いられるマイクロパターン形状
(ポケット幅 $7\mu\text{m}$ 、深さ $5\mu\text{m}$ 、ピッチ $12\mu\text{m}$)



(a) 一般的なレーザービーム径 (約 $500 \mu\text{m}$)

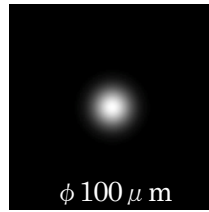


(b) 得られる回折強度分布

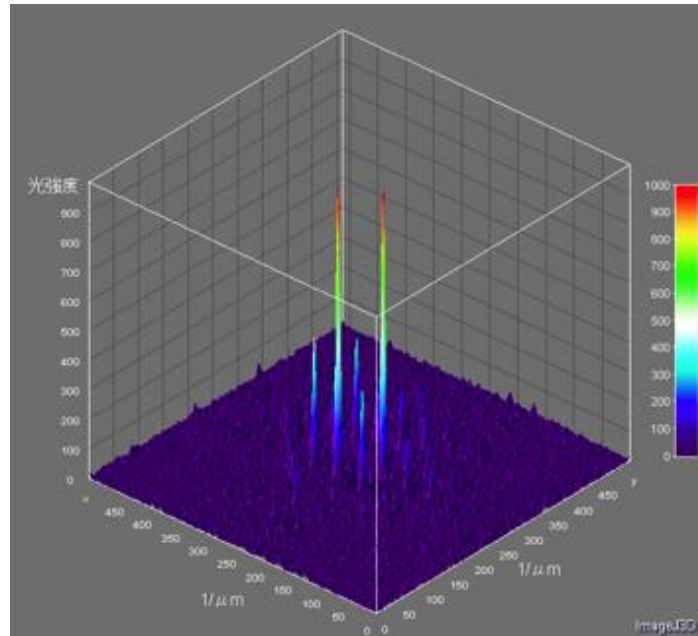


(c) 回折強度分布観察像

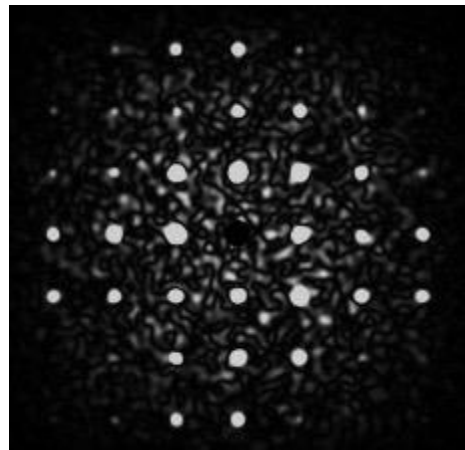
図6 : 不良サイズ $1 \mu\text{m}$ のマイクロパターン形状に一般的なレーザービーム径 (約 $500 \mu\text{m}$) を照射した場合に発生する回折光強度分布のシミュレーション結果



(a) 細いレーザービーム径 ($\phi 100 \mu\text{m}$)



(b) 得られる回折強度分布



(c) 回折強度分布観察像

図7 : 不良サイズ $1 \mu\text{m}$ マイクロパターン形状に細いレーザービーム径 ($\phi 100 \mu\text{m}$) を照射した場合に発生する回折光強度分布のシミュレーション結果

4. マイクロパターン試料からの回折光分布の観察による実証実験

次に細いレーザービームによる不良マイクロパターン形状検出の効果を検証するため、図8の光学系を構築し、回折光強度分布の観測実験を行った。レーザービーム径を400, 250, 100 μm になるようレンズと照射距離を調整した。被測定試料(図9, 図10(a))はピッチ10 μm 高さ1 μm ののこぎりパターン形状の透明樹脂シートが採用された。マイクロパターン形状により発生して試料を通過した回折光は、拡散板(スクリーン)に現れ、カメラ(エアラセンサー)で観察した。また、異なる不良形状サイズを再現するため、今回は粒径6 μm および0.5 μm のダイヤモンド粒子をマイクロパターン表面上に塗布した。形成した不良サイズ6 μm と0.5 μm のマイクロパターン表面形状をそれぞれ図10(b)と図10(c)に示す。

ϕ 400, 250, 100 μm のレーザービーム径による回折光強度分布の違いをそれぞれ図11, 図12, 図13に示す。レーザービーム径400 μm および250 μm を照射した場合には、マイクロパターンの表面形状不良あり/なしでは、観察された回折光強度分布には顕著な違いが見られなかった。一方、レーザービーム径100 μm を照射したとき、スペクトルピークの箇所以外に不良マイクロパターン形状からの拡散光が顕著に観察された(図13(b), (c))。これらより、シミュレーションした結果(図6と図7)と同様な結果が得られたので、 ϕ 100 μm のレーザービーム径による不良マイクロパターン形状の検出効果が実証された。

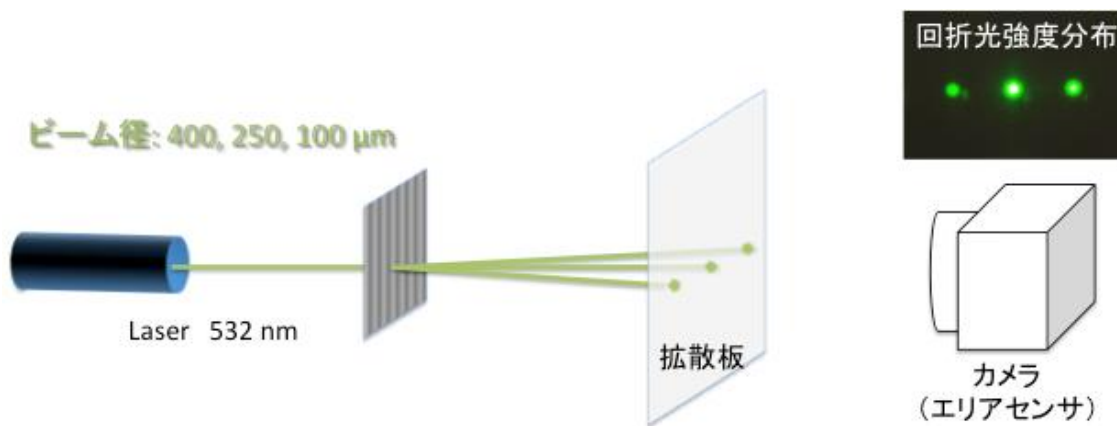


図8：成形されたマイクロパターン形状による回折光強度分布観測実験装置の構成

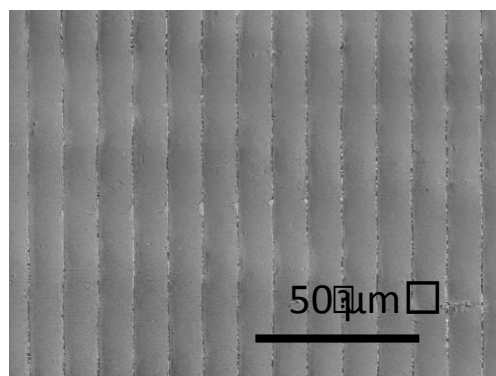
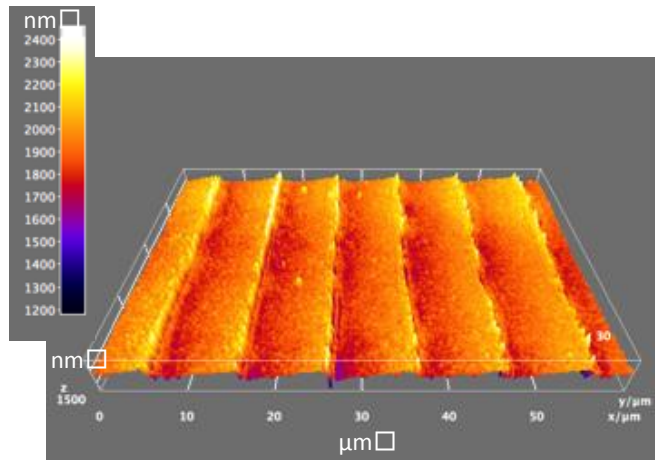
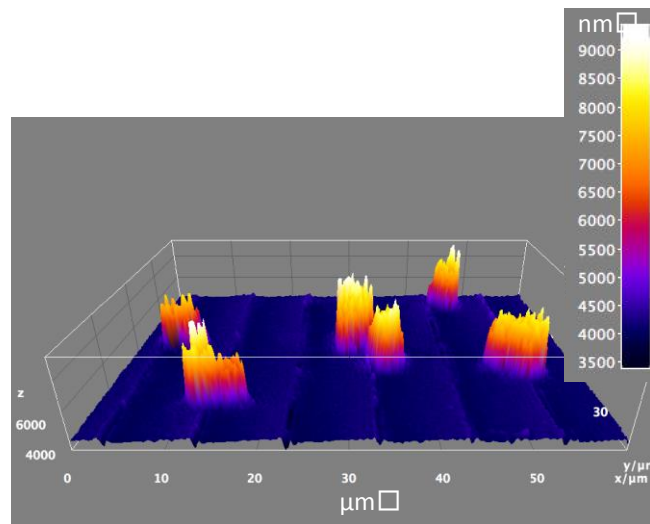


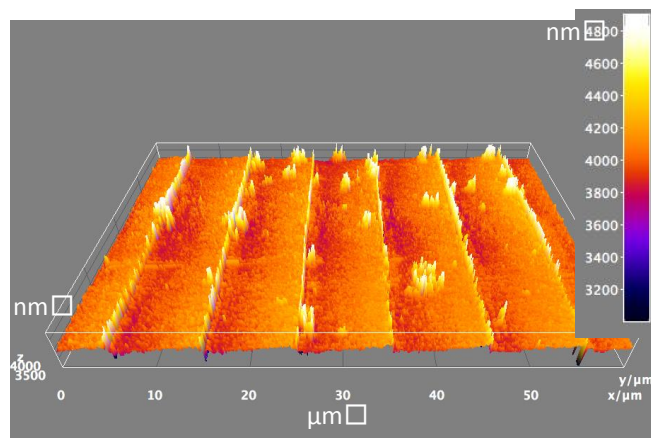
図9：被測定試料(成形品のマイクロパターン形状；のこぎり状, ピッチ10 μm , 高さ1 μm)



(a) 良好なマイクロパターン試料形状

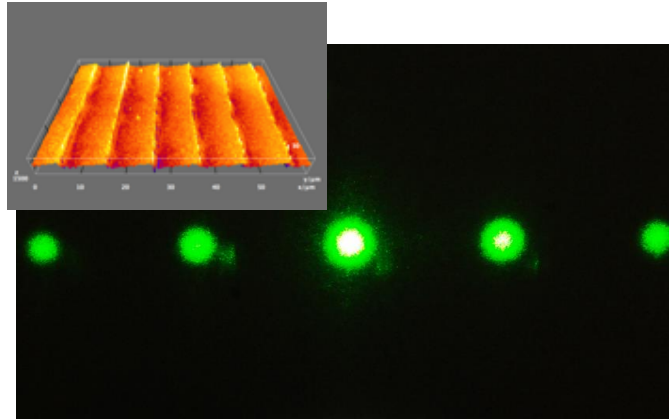


(b) 不良サイズ $6\mu\text{m}$ のマイクロパターン試料形状

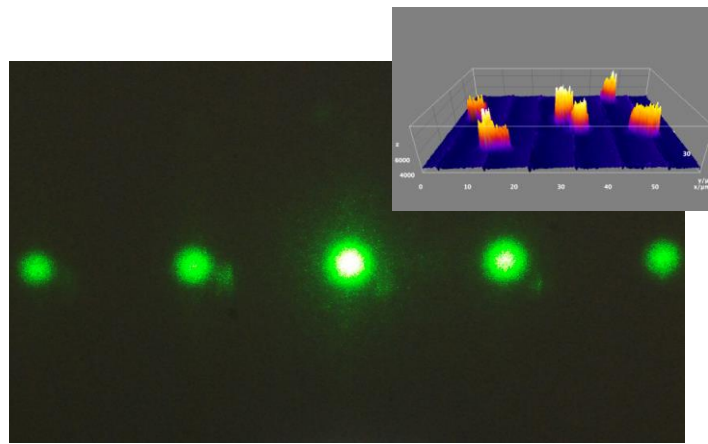


(c) 不良サイズ $0.5\mu\text{m}$ のマイクロパターン試料形状

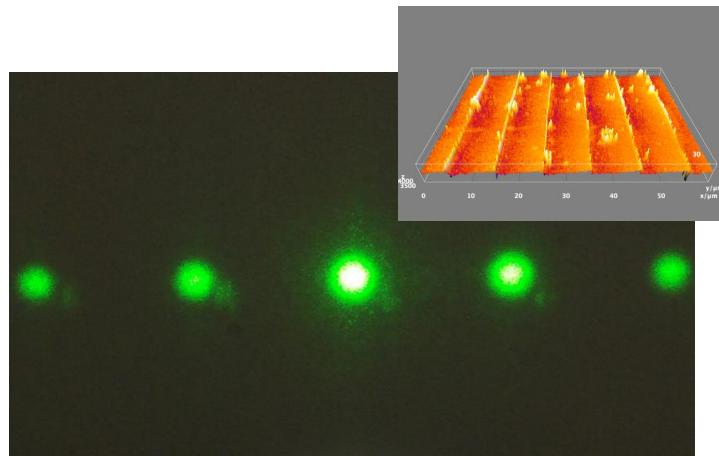
図 10 : 被測定マイクロパターンの表面形状



(a) 良好なマイクロパターン形状の場合

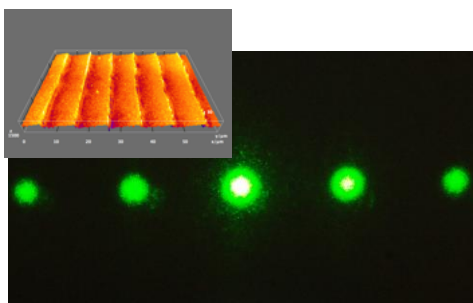


(b) 不良サイズ $6\mu\text{m}$ のマイクロパターン形状の場合

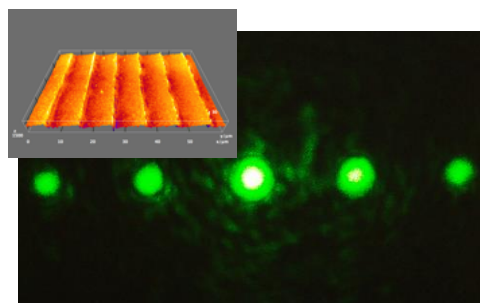


(c) 不良サイズ $0.5\mu\text{m}$ のマイクロパターン形状の場合

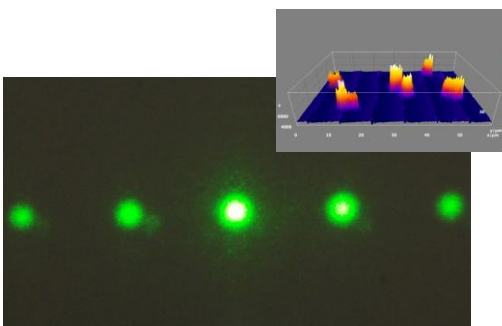
図 11 : レーザービーム径 $400\mu\text{m}$ 照射による回折光強度分布



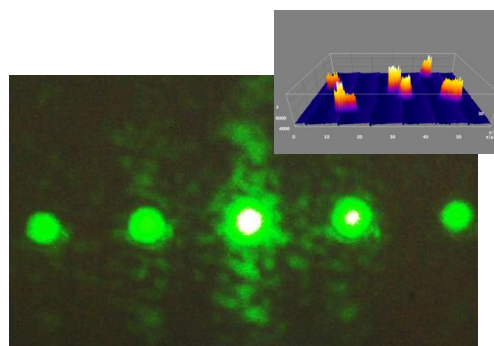
(a) 良好なマイクロパターン形状から



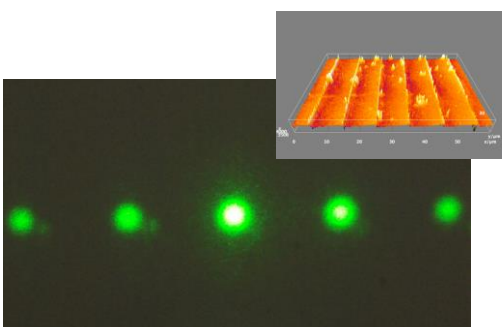
(a) 良好なマイクロパターン形状から



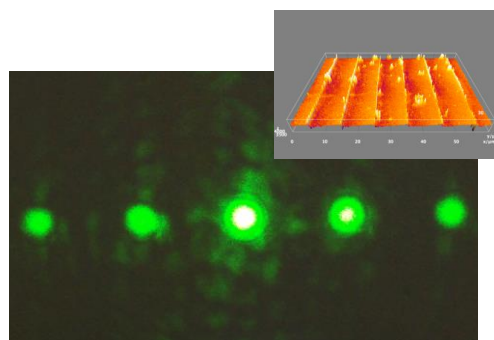
(b) 不良サイズ $6\mu\text{m}$ のマイクロパターン形状から



(b) 不良サイズ $6\mu\text{m}$ のマイクロパターン形状から



(c) 不良サイズ $0.5\mu\text{m}$ のマイクロパターン形状から

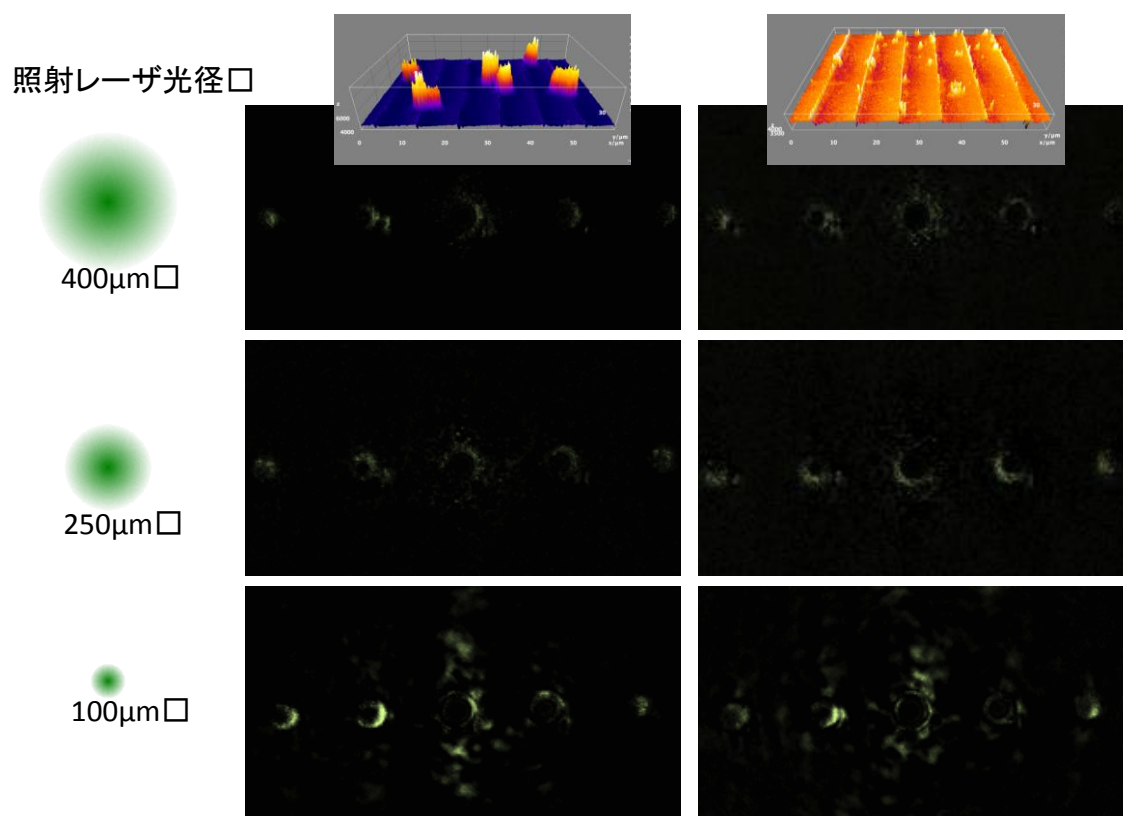


(c) 不良サイズ $0.5\mu\text{m}$ のマイクロパターン形状から

図 12 : レーザビーム径 $250\mu\text{m}$ 照射による
回折光強度分布

図 13 : レーザビーム径 $100\mu\text{m}$ 照射による
回折光強度分布

最後に、実用化への検討を行った。自動評価に本手法を採用する際、観察された回折光強度分布のままでは不良パターン形状を検出するよりは、図 14 に示したように変化分のみを算出する手法を提言する。不良形状のない良好なマイクロパターン形状からの回折光強度分布をあらかじめ取得しておいてから、そのまま検出し続けられた回折光強度分布を良好な表面形状からの回折光強度分布を削除すれば、図 14 の $\phi 100 \mu\text{m}$ のレーザビーム径の条件では、観察像の変化分（明るくなる範囲）だけが比較的容易に得られる。このようにして、良好なマイクロパターン形状からの回折光強度分布と変化分により、マイクロパターン表面形状精度の適正が可能であると考えられる。



(a) レーザビーム径 (b) $6 \mu\text{m}$ の不良サイズ (c) $0.5 \mu\text{m}$ の不良サイズ

図 14：良好な表面形状からの回折光強度分布を削除した観察像（変化分を強調するため）

5. まとめ

近年マイクロパターンの成形の需要が増加してきているなか、マイクロパターンに細いレーザ光照射して発生した回折光強度分布を調べることで、それらのマイクロパターンの形状精度の適正を非接触で評価する手法を提案した。シミュレーション結果と同様、照射レーザビーム径を、 $100 \mu\text{m}$ 程度にすることにより、回折光分布の変化分が適正判断に用いられることがわかった。また、実験結果から、ピッチ $10 \mu\text{m}$ のマイクロパターンにおけるサイズ $0.5 \mu\text{m}$ 以上の無作為不良形状が実験的に検出可能であることがわかった。

参考文献

- [1] 高橋直亮, 木村景一, カチョールンルアン パナート, 安田佳祐, 馬場昭好: MEMS 技術を応用した CMP 用マイクロパターンパッドの研究 (第 1 報) 微小ピラミッド型パターンパッドの製法, 2008 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 843-844 (2008).
- [2] Khajornrungruang P., Kimura K., Baba A., Yasuda K., Tanaka A.: Development of Orderly Micro Asperity on Polishing Pad Surface for Chemical Mechanical Polishing (CMP) Process using Anisotropic Etching, Asian International Journal of Science and Technology in Production and Manufacturing Engineering Vol. 3, No.3, pp. 29~34 (2010) .
- [3] 高谷裕浩, 三好隆志, 齋藤勝政: Fraunhofer 回折による超精密加工面粗さの測定評価に関する研究, 精密工学会誌 56 (2), pp. 373-380 (1990).
- [4] 田口敦清, 三好隆志, 高谷裕浩, 高橋哲: 光逆散乱位相法による三次元微細加工形状計測に関する研究 (第 3 報) - 回折光測定法の改良による精度の向上 -, 2000 年度関西地方定期学術講演会, B23 (2000).
- [5] 奥園貴久, 木村景一, カチョールンルアン パナート, 鈴木恵友, 櫛田高志: FFT 解析に基づいたポリシングパッドの表面形状評価とその研磨性能に関する研究, 2011 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 341-342 (2011).
- [6] Panart Khajornrungruang, Keiichi Kimura, Takahisa Okuzono, Keisuke Suzuki and Takashi Kushida: Spatial Fourier Transform Analysis of Polishing Pad Surface Topography, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 51, Number 5S (2012).
- [7] 櫛田高志, 木村景一, カチョールンルアン パナート, 鈴木恵友: 光学的フーリエ変換に基づいた CMP ポリシングパッドの表面形状評価に関する研究, 2013 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 pp. 617-618 (2013).
- [8] Joseph W. Goodman: Introduction to Fourier Optics, McGraw-Hill(1968).