

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：13101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630037

研究課題名(和文) 広視野レーザ顕微鏡に適した位相シフト法のための疑似位相像出現メカニズムの解明

研究課題名(英文) Elucidation of quasi phase image appearance for phase shifting method suitable for wide-field laser microscope

研究代表者

新田 勇 (NITTA, ISAMI)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：30159082

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：広視野レーザ走査干渉計で、レーザ干渉像を取得した場合、10mm四方の領域の高低差をナノレベルで計測できる。しかし、通常の干渉計測では位相シフト法を使用するために、参照板の高さ位置を変えながら同一箇所の画像を4～5枚取得しなければならず、計測時間が長くなる欠点を有していた。申請者は、参照板に特殊なコーティングを施すことにより、1回の画像取得で擬似的な位相シフト像が取得できる現象を発見した。本研究において疑似位相像が生じる原因は、参照板と観察物の多重反射であることを明らかにした。また、この疑似位相像を使うことで測定対象の形状が計算可能であることを示すと共に、そのための解析プログラムを開発した。

研究成果の概要(英文)：With a Cr coated reference plate, strange interference fringe patterns were measured, which were saw-tooth waveforms rather than sinusoidal ones. By using this phenomenon, we tried to develop a new non-contact measurement method for precision molds, without phase shift technique, from the one-time measurement by using the metal-coated interference plate. Materials coated on the reference plates and their thicknesses affected the brightness distributions. A multiple reflection of the laser beam between the reference plate and the mold surface was considered to be a cause of the saw-tooth waveforms. We investigated the basic characteristic of the brightness distribution of the saw-tooth waveforms. Since the saw-tooth waveforms also convey information on tilt directions of mold surfaces, the 3 dimensional shape of the mold of the optical lens can be determined from one-time measurement. A software program to interpret the fringe patterns as 3 dimensional shapes was also developed.

研究分野：機械工学

キーワード：機械要素 広領域 レーザ走査干渉計 位相シフト法 広視野レーザ顕微鏡 シュリンクフィッタ ナノ計測

### 1. 研究開始当初の背景

申請者は、これまでにトライボロジー分野で固体表面の接触に関する基礎研究を精力的に行い、シュリンクフィッタ技術を生み出した。この技術を基に、レーザ走査用レンズを組み立てることで、レーザ走査の光学性能を飛躍的に向上できることを明らかにした。次いで、応用研究として広視野レーザ顕微鏡を開発した。従来のレーザ顕微鏡と同一倍率で比べた場合、数百倍以上の広視野を確保できるものである。広い面積を観察する際に、従来行われていた複数枚の画像をスタッチング接続する煩わしさが解消できる。これまでに、円板、円筒、球などの通常では測定しがたい表面に本技術を適用し、短時間で全面にわたり表面観察ができることを明らかにしてきた。

現在、この技術にレーザ干渉技術を加えることにより表面性状をナノレベルで計測できる手法の開発を行っている。一般に、レーザ干渉では位相シフト法という手法を用いて高さデータを解析する。これは同一箇所を参照板の高さを変えて複数回計測するものである。本研究のように一度に広大な表面を計測する手法では、複数回の計測は計測時間の点から望ましくない。最近申請者は、特殊な参照板を用いることにより1回の計測で擬似的な位相シフト像を得ることに成功しているが、本手法の物理的解釈は未解明であった。そこで、この疑似位相シフト法の明快な物理的解釈を行うことを着想した。

### 2. 研究の目的

広視野レーザ顕微鏡は、同じ倍率で比較すると光学顕微鏡の数百倍広い視野を持つレーザ走査型の新しい顕微鏡である。この顕微鏡を用いて、レーザ干渉像を取得した場合、10mm四方の領域の高低差をナノレベルで計測できる。しかし、通常の干渉計測では位相シフト法を使用するために、参照板の高さ位置を変えながら同一箇所の画像を4~5枚取得しなければならず、計測時間が長くなる欠点を有していた。申請者は、参照板に特殊なコーティングを施すことにより、1回の画像取得で擬似的な位相シフト像が取得できる現象を発見した。複数枚の干渉画像を演算することでしか求められない位相像が、なぜ一度の観察で求まるかは現在のところ不明である。本研究ではこの新規な現象がなぜ生じるかについて、その原理を解明することを研究目的とする。

### 3. 研究の方法

(1) 実験装置 干渉縞の観察には、前述の広視野レーザ干渉計を用いた。装置の概要を図1に示す。レーザ走査用  $f\theta$  レンズの締結にはシュリンクフィッタ法を用いているため視野は広く、かつ視野全域において分解能の高い観察が可能である。レーザ波長は 650 nm、分解能はレンズ中央付近で  $2.5\mu\text{m}$ 、

視野は平面観察時で  $10\text{mm}\times 8\text{mm}$  である。

観察対象である銅円板の前面に参照板を設置した。図2は試験片取付治具であり銅円板と参照板がセットされている。参照板が取り付けられた板が、マイクロメータスピンドルの送りで水平軸と垂直軸周りに微小回転できる。これにより、銅円板に対して参照板を垂直軸周りにだけ微小角度傾いたように調整し、出現する干渉縞が可能な限り縦縞となるようにした。したがって、取得される干渉縞画像では、左から右に向かって光路差(参照板と観察面の面間距離)が小さくなっている。参照板は、光学顕微鏡用のスライドガラスに金属薄膜を成膜したものである。成膜には ECR イオンシャワー成膜装置 EIS-220ER を用いた。

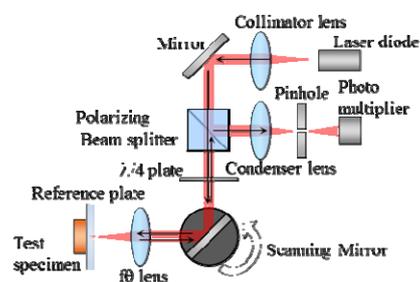


図1 広視野レーザ走査干渉計

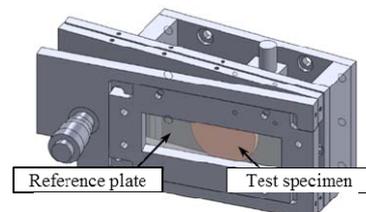
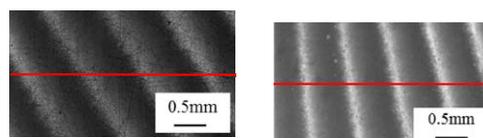


図2 観察用の試験片取付治具



図3 Crを成膜した参照板



(a) Cr成膜2分間 (b) Cr成膜8分間  
図4 干渉縞画像に及ぼす成膜時間の影響

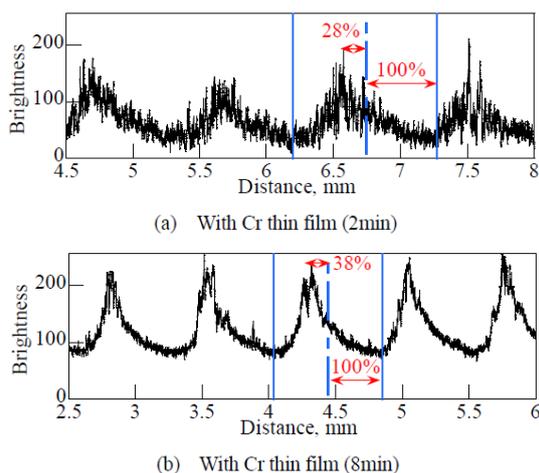


図5 輝度分布に及ぼす成膜時間の影響

(2) 試験片 観察用の試験片は、バフ研磨した直径 32mm の銅円板である。金属薄膜材料の影響を調べるために Au, Cu, Ni, Ti, Fe, Cr の 6 種類の金属を平面ガラス板に成膜したものを参照板として用いた。これらの成膜に用いた金属ターゲットは、成膜装置メーカーから購入したものである。以下では、そのうちの Cr 薄膜と Cu 薄膜を成膜して観察した結果について述べる。また、膜厚の影響を調べるために、Cr については成膜時間を 2 分、8 分、および 10 分と変えたものの観察結果を比較した。平面ガラス板は厚さが 1.2 ~ 1.5 mm で、サイズは 76mm×26mm である。参照板の反射率と透過率は、紫外可視近赤外分光光度計 UV-3150 により測定した。

(3) 観察結果 参照板を用いて観察した干渉縞画像を図 4 に示す。干渉縞は可能な限り縦方向に並ぶように、また、干渉縞が等間隔になるように治具ですきまを調整した。図 4(a) は成膜時間が 2 分間と短いもので、金属膜厚さが約 2nm である。薄膜が薄いために干渉縞の明るい部分には銅円板についた傷も見ることができ、観察装置の元となっている広視野レーザ顕微鏡の横方向分解能が高いために、これまでもガラス参照板を用いたときには、干渉縞と観察対象物の表面画像を同時に取得することができている。成膜厚さが薄い場合はこの特徴が消えないで残っていることが分かった。図 4(a),(b) と成膜時間が長くなると、試験片の表面画像は見えなくなり、干渉縞のみの画像となる。さて、図 4 内の赤線の輝度分布を図 5 に示す。以降、輝度分布の輝度値が高い点を明部、低い点を暗部とする。一般的に干渉縞の輝度分布は正弦波状になることが知られている。すなわち、暗部の中間に明部が現れることになる。しかし、図 5 を見ると輝度分布は正弦波状というよりも左右非対称の輝度分布を示し、むしろノコギリ刃状の波形となっていることが分かる。さらに、図 5(a)(b) を比較すると、薄膜

の厚さによってノコギリ刃状の波形が異なっている。ここで、ノコギリ刃状の度合いの数値化を行った。すなわち、隣り合う暗部の中間の位置を波形の中心とし、明部と中心との距離を求め、これを暗部から中心までの距離で正規化し、ノコギリ度と定義した。その結果の一部を図 5 に示した。2 分、8 分および (図としては示していないが) 10 分に対するノコギリ度は 28%、38%、および 60% と変化した。このように、薄膜が厚くなるほどノコギリ度が大きくなることが分かった。なお、Cr 以外の全ての金属でも、薄膜が厚くなるほどノコギリ度は大きくなった。

このようなノコギリ刃の向きは Cr 薄膜と Cu 薄膜とで異なることがわかった。すなわち、Cr 薄膜の場合は光路差が小さくなる (横軸を左から右に移動する) につれて暗部から明部への遷移が鋭くなっている。これに対して、Cu 薄膜の場合は光路差が小さくなるにつれて明部から暗部への遷移が鋭くなった。したがって、ノコギリ刃状の向きを知ることによって、干渉縞相互の高さ関係を把握できる可能性がある。通常の干渉縞では輝度分布が左右対称の正弦波状となるので、干渉縞相互の高さ関係を求めることができず、参照板を移動させながら 3~5 枚の干渉像を取得しそれらの関係から各点の位相を計算する位相シフト法を用いなければならない。しかし、金属成膜した参照板を用いることで、ノコギリ刃状の輝度分布が取得できれば、1 枚の干渉縞像から画像内の高さ分布を求めることができるようになると思われる。

Cr と Cu も含む全ての金属の場合の結果では、輝度分布は上述の 2 つのパターンのうちどちらかを示した。ガラスの屈折率 1.5 より金属薄膜の屈折率が大きい小さいにより、輝度分布のパターンが分けられることが分かった。すなわち、Au と Cu は屈折率がガラスのものよりも小さいので、同じパターンを示している。これに対して、Ni, Fe, Cr, Ti の屈折率はガラスのものより大きいので、逆のパターンとなった。

(4) 金属薄膜材料の影響 観察された干渉縞輝度分布の波形はノコギリ刃状になり、しかもその波形の傾きは金属薄膜材料によって異なった。この原因として、レーザ光が参照板で反射する際の位相変化が考えられる。レーザ光がガラス板に入射して金属薄膜で反射する際、金属薄膜材料の屈折率がガラスの屈折率より大きい場合は Fresnel の公式より反射光の位相が反転するが、金属薄膜材料の屈折率がガラスの屈折率より小さい場合は位相の変化はない。ガラスの屈折率はおよそ 1.5 であり、これに対する金属薄膜材料の屈折率の大小によって参照板でのレーザ反射光の位相反転の有無が決まる。したがって、金属薄膜材料の屈折率が輝度分布の波形を特徴づける一因であると考えられる。

(5) 輝度分布の解析 図 5(b) に示した輝度分布に対してフーリエ変換を適用した。

フーリエ変換で得られた複素数の絶対値を波数に対して示した関係を図6に示す。フーリエ変換では、データ数が2のべき乗(16384ピクセル)分の輝度分布波形を使用した。図6ではピークが波数の整数倍の周期で3~4カ所出現しており、ピークの高さは指数関数的な減少を示している。このピークの減少をレーザ光の反射による減衰だとすると、図7に示すように、レーザ光が試験片と参照板との間で多重反射していると予想される。ここで、参照板底面での反射光に対する各反射光の光路差は、参照板と試験片表面の距離を $d$ とすると、試験片表面で1回反射した反射光 $I_1$ は $2d$ のすきまを移動し、2回反射した反射光 $I_2$ は $4d$ のすきまを移動し、3回反射した反射光 $I_3$ は $6d$ のすきまを移動することになる。反射光 $I_0$ と $I_1$ の干渉縞は正弦波であり、図8のような輝度変化をするものと考えられる。また、反射光 $I_0$ と $I_2$ の干渉縞は先のものよりその間隔が半分の輝度分布である。同様に、反射光 $I_0$ と $I_3$ の干渉縞はその間隔が1/3となる。参照板底面での反射光 $I_0$ と各反射光 $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ による干渉縞が組み合わさることで、ノコギリ刃状の輝度分布が生成されると考えられる。

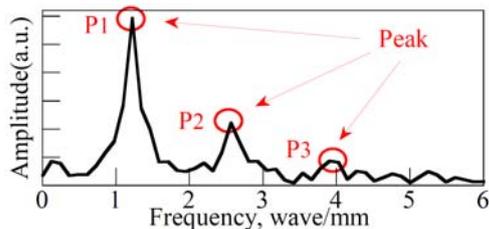


図6 干渉縞輝度分布のフーリエ変換

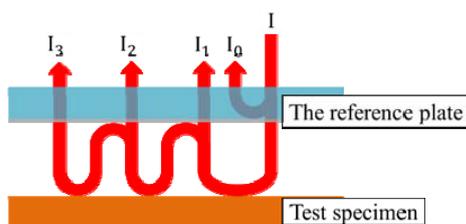


図7 レーザの多重反射の様子

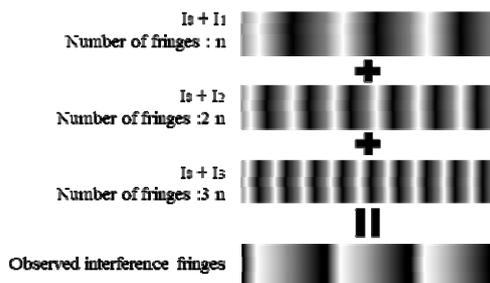


図8 多重反射によるノコギリ刃生成

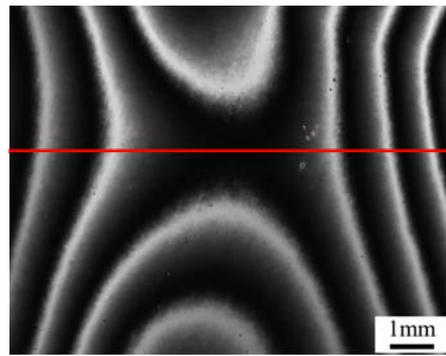


図9 1回の画像取得で得た干渉縞

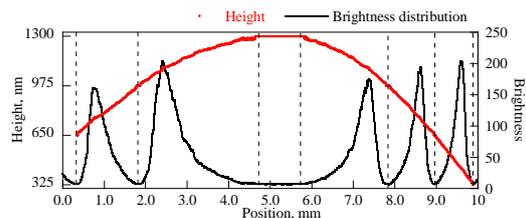


図10 図9の赤線の輝度分布と高さ分布

(6) 本方法による形状計測結果 図9はこれまで説明してきた方法により計測した干渉縞造である。参照板にはFeを成膜している。1回の観察でも疑似位相像のような輝度分布になっている。図10は図9の赤線の輝度分布である。詳細は省くが、この輝度分布から高さ分布を求めることができる。図中の赤線が求めた高さ分布である。本手法によれば、1回の観察でナノメートルオーダーの高さ分布が決定できることが分かる。

#### 4. 研究成果

本研究で求められた研究成果を以下にまとめる。

- (1) 広視野レーザ走査干渉計と金属薄膜の組み合わせでは、1回の観察でも疑似位相像を取得することができる。
- (2) この疑似位相像は、観察面と参照板の多重反射により生成される。
- (3) 参照板に成膜する金属材料の屈折率により、すきまとノコギリ刃の向きとの関係が決まる。したがって、ノコギリ刃の向きですきまの向きが分かる。
- (4) 本手法で求めた疑似位相像(ノコギリ刃)から観察面の形状が決定できた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計4件)

- ① 大原佑太, 加藤桂介, 月山陽介, 新田勇, 広視野レーザ走査型干渉計を用いたナノ

形状計測手法の開発－新規干渉縞パターン  
の観察－, 2015 年度精密工学会北陸信  
越支部学術講演会, 2015 年 11 月 14 日発  
表, 金沢工業大学 (石川・野々市), 講演  
番号 D33.

- ② 大原佑太, 宮田晃輔, 月山陽介, 新田勇,  
広視野レーザ走査干渉計を用いた新規干  
渉縞パターンの観察, 日本トライボロジ  
ー学会 トライボロジー会議 2015 春姫  
路, 2015 年 5 月 27 日発表, 姫路商工会  
議所 (兵庫・姫路), pp.526-527.
- ③ 宮田晃輔, 大原佑太, 横山大地, 月山陽  
介, 新田勇, 広視野レーザ干渉計による  
ナノ形状の新規計測手法の開発－参照板  
に成膜する金属材料の影響－, 日本機械  
学会北陸信越支部第 52 期総会・講演会,  
2015 年 3 月 7 日発表, 新潟工科大学 (新  
潟・柏崎), 講演番号 1018.
- ④ 大原佑太, 横山大地, 鈴木天, 月山陽介,  
新田勇, ECR スパッタ成膜参照板による  
新規干渉縞パターンの観察, 日本機械学  
会年次大会 2014, 2014 年 9 月 8 日発表,  
東京電機大学(東京), 講演番号 S1110205.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: レーザ走査型干渉計及び表面形状の計  
測方法

発明者: 新田勇, 月山陽介

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特許願 2014-109489 号

出願年月日: 平成 26 年 5 月 27 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://tribo.eng.niigata-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

新田 勇 (NITTA, Isami)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号: 30159082

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし