

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360075

研究課題名(和文) レーザ走査干渉技術を用いたトライボ要素円筒表面ナノレベル観察装置の研究

研究課題名(英文) Nanoscale measurement of cylinder surfaces of tribo-elements using a laser scanning interferometry with a wide field of view

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) 14,000,000円、(間接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：横方向空間分解能が高い広視野レーザ顕微鏡は、高さ方向の分解能は数 μm にとどまっている。そこで、高さ方向の分解能をnmレベルに向上させるため、レーザ光の位相を利用できるように装置を改良した。試作した装置を用いてSUS304製円筒試験片の表面観察を行った。その結果、円筒面全面にわたり明瞭な干渉縞を得ることに成功した。円筒の表面形状を決定するために、干渉縞の画像解析手法を開発した。その結果、円筒面の表面形状を3次元表示することができた。これにより、短時間で円筒面全面の形状を計測する手法が開発できた。

研究成果の概要(英文)：In a previous study, we have developed a new type laser microscope with a wide field of view. There is a trade-off between the resolution and the field of view. We sacrificed the resolution of the laser microscope in the depth direction to get the wide field of view. To achieve a nano-level measurement of the whole shape of a cylindrical object, two-beam interferometry was introduced to the laser microscope with wide field of view. Among the various forms of interferometry, two-beam interferometry is especially simple and straightforward in principle, as well as practice, and is therefore utilized for a broad range of applications. In this work, we have acquired interference images of the whole cylinder surface with the aid of a reference flat. As a result, fringe patterns over the whole cylinder surface could be obtained. From image processing of the fringe patterns, we calculated the surface profile of the cylinder on a nano scale.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学，機械機能要素，トライボロジー

キーワード：トライボロジー 機械要素 円筒表面 欠陥検査 レーザ干渉 レーザ走査 ナノレベル シュリンク
フィット

1. 研究開始当初の背景

平面同士の接触においては、その表面に存在する粗さやうねりの影響で、全面が均一に接触しない。この事実が、トライボロジーにおける接触問題を複雑にしている。固体表面の接触解析においては、表面微小突起先端の存在確率密度関数を考慮する手法が一般的である。しかし、計測時間の制約で表面全体の形状を計測することはできず、接触面の一部の計測データを基にした統計量を接触面全体に適用する考え方が支配的である。そのため、確率論による予測値は、摩擦力にしる、すきまからの漏れ速度にしる、定性的な予測は可能でも、定量的な予測には至らなかった。このような不十分な解析に基づく予測値を実験値に一致させるためには、実験定数なるものが必要であった。筆者らはこの原因は、表面のうねりを無視することにより生じていると考えている。接触面の全面を観察することができれば、そこで生じている現象をこれまで以上に正しく理解できるはずである。既に、ゴムローラの接触面全面を観察することにより、真実接触面積と摩擦力が比例す

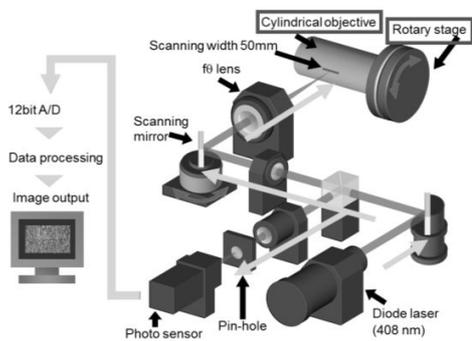


図1 広視野レーザー顕微鏡による円筒面観察の概略図

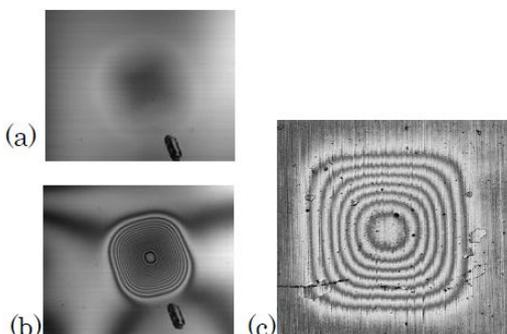


図2 SiCの鏡面を広視野レーザー顕微鏡の干渉法で観察した例(観察領域(4×4mm))、(a)干渉法を用いていない場合、(b)干渉法を用いた場合、(c) TiN表面を研磨したもの、上下方向に研磨キズは見られるが、このように粗い面でも干渉縞は出現する。

ること、しかも紙粉が付着してもその関係が変わらないことを明らかにした。また、金属ガasketの漏れ特性も、接触面の全面観察により漏れ流路が特定でき、漏れ予測の精度を向上することができた。これらの観察には、広視野レーザー顕微鏡を使用した。広視野レーザー顕微鏡の視野は、同倍率の光学顕微鏡に比べて約400倍広いことから、これまでは計測時間の点であきらめていた接触面全面の観察が可能となる。

上記の平面観察の次に、観察難易度の高い円筒面観察に挑戦した。広視野レーザー顕微鏡は、レーザーを水平方向に走査するので、水平方向に設置した円筒面の母線に沿うようにレーザーを走査するようすれば、円筒面を一回転させるだけで、その表面画像がびずみなく取得できる(図1)。円筒面の全面観察は通常の顕微鏡では難しく、報告例はほとんど存在しない。申請者は、これまでにエンドミルを含む各種の円筒の刃物や機械要素を観察してきた。

さて、広視野レーザー顕微鏡はレーザー走査型の顕微鏡であり、視野を広げるために高さ方向の分解能を犠牲にしているところがある。そこで、レーザー干渉技術を組み込むことで、高さ方向の分解能を向上させることを試みている。一般的なレーザー干渉計は、干渉縞のみを取得することに重点を置いている。これに対して、広視野レーザー顕微鏡は元来が顕微鏡ということで、表面画像に干渉縞を重ね合わせて取得することができる。その例を図2に示す。顕微鏡タイプの干渉計も存在するが視野が狭いので、広い表面を観察するのは複数回の計測が必要となる。計測時間が長くなることや、ナノレベルで形状データをつなぎ合わせるのが難しい。

今回は円筒面のナノレベル形状計測を行うことを試みた。さらに、通常の測定では難しいとされるシリンドリカルレンズの計測も試みた。

円筒面の形状計測の先行研究としては、通常の白色干渉計に円錐形の参照板を組み合わせる手法で、円筒の外径と内径を測定したものがある。この方法では、形状精度の高い円錐面を準備する必要があり、その形状が計測精度に強く影響を及ぼす欠点がある。

2. 研究の目的

申請者は、独創的な広視野レーザー顕微鏡を用いて、円筒面の全面を短時間で高精度に観察できる手法を世界ではじめて開発した。この装置は広い視野を観察することを主眼としたシュリンクフィット技術援用レーザー走査方式を用い、微細レーザースポット光の反射光強度のみを利用している。そのため、横方向の空間分解能は高いが、高さ方向の分解能は数μmにとどまっている。そこで、高さ方向の分解能を向上させるために、レーザー光の位相を利用する独自のレーザー走査干渉法を用いることを立案した。これまでの高い横方

表 1 広視野レーザー顕微鏡諸元

レーザー発振器	固体レーザー(488[nm])
視野 (平面観察時), mm ²	10 × 8
解像度, μm	2.5
画素数, pixels	20000 × 16000
レーザー走査速度, Lines/min	9000

表 2 空気静圧軸受諸元

	半径方向	軸方向
軸受剛性	25 N/mm 以上	N/mm 以上
許容荷重	60 N	289 N
回転ふれ	20 nm 以下	20 nm 以下

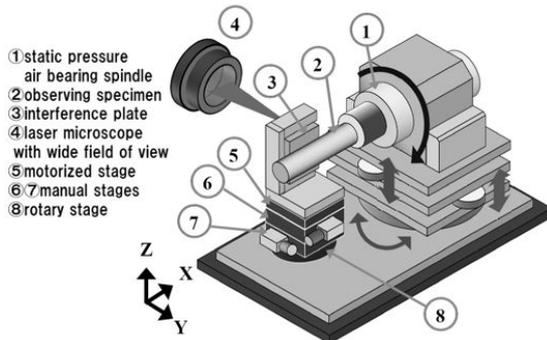


図 3 観察円筒試験片の支持方法．空気静圧軸受で円筒面を保持している，参照板に対して円筒は姿勢調整ができる．

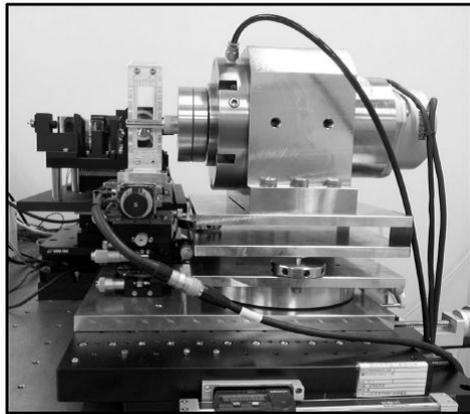


図 4 図 3 の外観写真

向分解能と併せて，高さ方向も nm レベルの高分解能を実現できる画期的な観察装置の開発を目指す．これにより，円筒面などの転がり要素全面の表面形状を高い分解能で観察する手法を実現することが研究目的である．

■ SUS304 cylinder

- 10mm in diameter
- mirror surface by mechanical and electrolytic polishing



■ Cylindrical lens

- D-shaped surface
- difficult to observe by conventional microscope
- adhered to a special jig



図 5 観察に使用した 2 種類の試験片，鏡面加工した SUS 304 ステンレス丸棒 とシリンドリカルレンズ

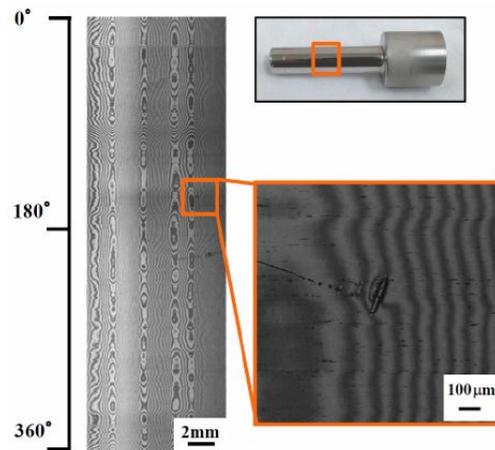


図 6 ステンレス丸棒の観察結果，観察領域は長さ 31.4mm で幅 10mm

3. 研究の方法

3.1 広視野レーザー顕微鏡の概要

使用した広視野レーザー顕微鏡のレーザー波長は 488nm である．図 1 の光路図に示すように，レーザー発振器から射出されたレーザー光はコリメートされて，反射ミラーで直角方向に偏向された後，偏光ビームスプリッタと 1/4 波長板を通して，回転している平面ミラーに導かれる．その後，fθ レンズを通り，円筒面に集光する．円筒面で反射したレーザー光は，往路を偏光ビームスプリッタまで戻り，集光レンズとピンホールを通り，受光素子に達する．受光素子の反射光強度は，12 ビット A/D 変換器でデジタルデータに変換され，パソコンに取り込まれる．各点毎の反射光強度を並べ直すことで，ディスプレイ上に画像を構成する．広視野レーザー顕微鏡の主な諸元を表 1 に示す．広視野レーザー顕微鏡の平面ミラーは空気動圧軸受で支持されているので，顕微鏡

のジッターは低い値に抑えられている．本研究では2光束干渉の原理を利用した．円筒試験片の手前に配置した参照板の裏面で反射した光強度と円筒面表面で反射する光強度が干渉するため，その光強度は両者の距離 h に対応して，余弦関数的に変化する．広視野レーザ顕微鏡で使用しているレーザ光の半波長変化する毎に暗い干渉縞が出現することになる．

図3は広視野レーザ顕微鏡で2光束干渉を使用するための参照板の配置を示している．観察する円筒面に接するほど近づけて配置している．円筒面の母線と参照板は平行にならないと安定して干渉縞が生成できないので，参照板の姿勢が調整できるように手動ステージを取り付けている．

観察用の円筒は心ぶれなしで高精度に回転しないと安定した干渉縞が得られないので，その支持用軸受は空気静圧タイプのもので使用した．空気静圧軸受の諸元を表2に示す．半径方向の軸ぶれは20nm以内となっている．

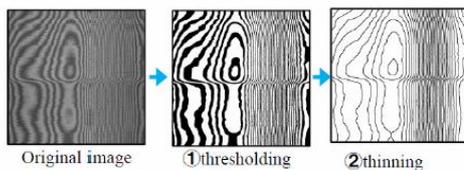
図4は，広視野レーザ顕微鏡の反対側から見た装置の外観である．空気静圧軸受にも姿勢調整機構が備えられており，2軸方向のありと，鉛直軸周りの回転ができるようになっている．

3.2 観察用試験片

図5に円筒面観察用の試験片を示す．SUS304円筒は，段付き円筒で直径の大きい方を空気静圧軸受に取り付け，直径の小さい10mm部分を計測した．観察部分は，複合電解研磨で鏡面に仕上げられている．シリンドリカルレンズは，平凸シリンダーレンズ

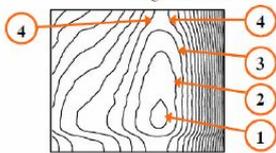
■ Flow chart of image processing

①thresholding → ②thinning → ③numbering → ④interpolating



③numbering

Height of ① is considered to be 0



④interpolating between fringes

$$Z = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 + \dots + a_{\Sigma(n+1)} - 3x^3y^{n-3} + a_{\Sigma(n+1)-2}x^2y^{n-2} + a_{\Sigma(n+1)-1}xy^{n-1} + a_{\Sigma(n+1)}y^n$$

In this work, $n=12$

図7 干渉縞を等高線とするための画像処理，2値化，細線化，ナンパリング，および等高線を元にした多項式近似

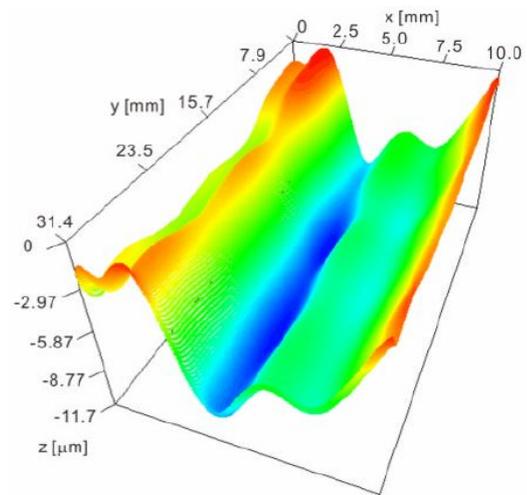


図8 干渉縞像から計算された円筒面の3次元形状，中央部に深い谷が認められる

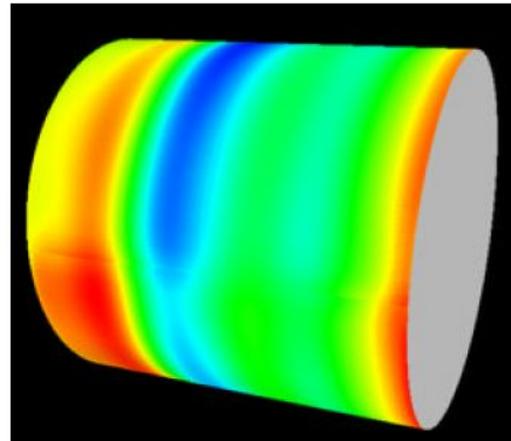


図9 干渉縞画像から計算された表面形状コンターマップを幾何学的に完全な円筒に巻き付けて表示した図，円筒面形状がよりよく理解できる，赤は高い所，青は低い所，将来的には凹凸形状に合わせて円筒を変形させて表示したい．

12.5×12.5×25である．平面部の寸法が12.50mm×25.00mmであり，凸面の曲率半径が12.92mmである．シリンドリカルレンズの形状測定は，専用の測定装置がほとんど存在せず難しいとされている．そのままでは計測できないので，直径が12.92mmと同じ曲率半径を持つ円筒の一部を切り欠いた治具を製作し，その切り欠き部にシリンドリカルレンズを接着した．

3.3 観察結果

SUS304円筒の観察結果を図6に示す．円筒面上の四角い枠で囲った部分を一周分観察した．干渉縞は，円筒の展開図として表示

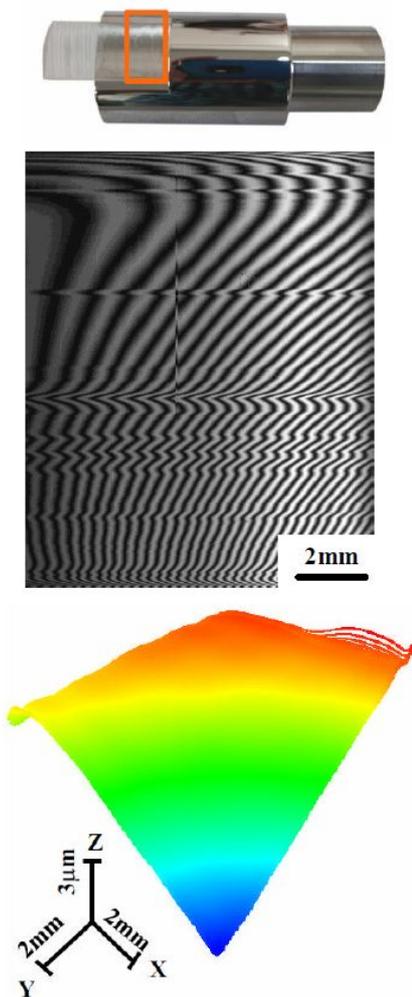


図 10 シリンドリカルレンズの干渉縞計測と、干渉縞から計算した表面形状、理想的な円筒面から約 $3\mu\text{m}$ 表面形状が偏っている

した。展開図の横は 10mm で、縦は 31.4mm である。木目調の模様が干渉縞である。干渉縞が密に生じているが、広視野レーザー顕微鏡の横方向の分解能が高いために、細かな干渉縞でも明瞭に識別できている。

図 7 は、干渉縞の分布を高さデータに変換する方法である。干渉縞を等高線と考えて、等高線間の高さを内挿関数で近似する手法である。この手法では、観察画像を順に、二値化、細線化、番号付けしていく。一枚の観察画像は、横 2 万ピクセル、縦 1 万 6 千ピクセルであり、画像処理を行うには時間がかかった。求めた等高線の高さは既知であるので多項式関数で近似できる。等高線間の高さはこの関数で計算している。

図 8 は、このようにして求めた円筒面の形状を 3 次元的に表示したものである。円筒面中央部が約 $10\mu\text{m}$ 程度くぼんだ形状になっている。

図 9 は、カラーチャートを円筒面に巻き付けて表示したものである。このように円筒面に巻き付けて表示することで形状の理解が進むことが分かる。

図 10 はシリンドリカルレンズの形状を計測した部分を示すものである。四角の枠で囲まれた部分を計測した。観察した干渉縞分布を展開図として示す。主に縦方向に干渉縞が観察された。所々で干渉縞が横方向に変化しているところが認められる。これよりシリンドリカルレンズの表面は、所々で数百 nm 程度の凹凸が存在することが分かる。この干渉縞を基にして求めた表面形状も示す。円筒面全面に亘っておよそ $3\mu\text{m}$ の凸面形状であることが分かる。

4. 研究成果

従来の顕微鏡に比べて約 400 倍広い視野を持つ広視野レーザー顕微鏡を用いて、円筒面全面のナノレベルの形状計測装置を試作した。円筒面全面の干渉縞を取得し、その干渉縞を解析することで、円筒面の高さ分布を求めている。金属円筒全面とシリンドリカルレンズ全面を観察し、本手法が nm レベルの測定に使用できることを確認した。これにより、本研究の目的は達成された。

今回の計測では、干渉縞取得後にその縞解析の画像処理はまだ完成度が低い。計測ハードウェア以外の画像処理ソフトウェアシステムの完成度を上げることが今後の課題となる。それに併せて、今後は計測精度について詳しく調べていく計画である。

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)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Isami Nitta, Yosuke Tsukiyama, Tsuyoshi Tsukada, Hiroto Terao, Evaluation of tribological properties of pick up roller measured using a laser microscope with a wide field of view, Tribology International, 査読有, Vol.67 (2013) pp.182–190.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2013.07.014>

〔学会発表〕(計 2 件)

1. 佐久間俊介, 関健作, 月山陽介, 新田勇, 広視野レーザー顕微鏡による円筒表面形状のナノレベル測定, 2013 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会(福井)講演番号 B07, 2013 年 11 月 23 日発表。

2. 佐久間俊介, 福島直幸, 月山陽介, 新田勇, 広視野レーザー干渉計を用いた円筒形状の高精度測定法の開発, 日本トライボロジー学会 トライボロジー会議 2013 (東京) 講演番号 B35, 2013 年 5 月 22 日発表。

〔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