

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 15 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560443

研究課題名（和文）斜め入射多波長レーザ干渉法による円筒内面形状計測方法の開発

研究課題名（英文）Inner surface profile measurement of a cylindrical object by an oblique incidence and multiple-wavelength interferometer

研究代表者

佐々木 修己 (SASAKI OSAMI)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：90018911

研究成果の概要（和文）：

外部共振器型半導体レーザからの線状平行光を内径 3mm、長さ 3.5mm の流体軸受の円筒内面に斜め入射させ、円周方向に対し 3 $\mu$ m の幅からほぼ正反射する光をスリットによって取り出した。2次元 CCD イメージセンサ面上に円筒内面の光場を形成し、参照光と干渉させ干渉信号を得た。中心波長 775 nm、波長幅 20 nm での複数波長について干渉信号の位相を正弦波位相変調干渉法で検出することによって、深さ 5~6 $\mu$ m の溝を有する内面形状を測定誤差 0.3 $\mu$ m 以下で測定することができた。

研究成果の概要（英文）：

A collimated line beam is incident at an oblique incident angle into an inner surface of a hydrodynamic bearing whose inner diameter and length are 3 mm and 3.5 mm, respectively. Lights reflected in specified directions from the inner surface are selected to obtain an optical field whose phase distribution is proportional to the inner surface profile. This optical field interferes with a reference optical field in a multiple-wavelength interferometer using a tunable external cavity laser diode. Shapes of grooves with depth of about 5  $\mu$ m on the inner surface can be measured with an error less than 0.3  $\mu$ m.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010 年度	900,000	270,000	1,170,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、計測工学

キーワード：光干渉計測、円筒内面形状、多波長干渉計、斜め入射干渉計、正弦波位相変調、流体軸受、計測機器

## 1. 研究開始当初の背景

電子光情報機器の高精密小型化に伴い、ここで使用される部品・デバイスの形状は高い加工精度が求められおり、レーザ干渉計などによって測定が行われている。部品・デバイスの表面形状の測定に対しては、多くの研究開発がなされ、満足する特性を有するレーザ干渉計が市販されている。しかし、円筒物体の内面形状を測定しようとする場合、レーザ干渉法を用いた測定器は見当たらない。近年、ハードディスク装置のモータ軸受には流体動圧軸受が用いられており、内径 3 mm 程度の円筒内面に施された深さ 5  $\mu\text{m}$ 、幅 0.5 mm 程度の溝形状の精密測定が必要となっている。ところが、生産現場では触針による測定方法しかなく、また研究段階では触針を光ビームに置き換えた光プローブ法が存在するが、触針と同様に 1 点測定であるため満足する測定法とはなっていない。このような状況の中で、レーザ干渉による高精度・高速な内面形状測定法が要求されている。

## 2. 研究の目的

レーザ干渉法で表面形状を測定する場合には、測定対象の表面に対し垂直方向からレーザ光を入射させるため、測定対象表面の光場を結像系で検出器前面（像面）に正確に形成することができる。すなわち、像面に対する物体面が測定対象表面と正確に一致している。これに対し、円筒内面形状の場合は、レーザ光を測定対象面に対して斜めに入射させる必要があるため、物体面は円筒内面と一致しない。このため、結像系に何らかの工夫が必要となってくる。また、溝の深さが 5  $\mu\text{m}$  程度であるため、1 つの光波長を用いるレーザ干渉法では測定が不可能であり、2 つ以上の光波長が必要となってくる。これらの問題を解決するために、以下の 2 つの工夫を施し、高精度に流体軸受内面の溝形状を測定する。(A) アフォーカル結像系を用い、レンズ焦点面でスリットなどによって空間周波数フィルタリングを行う。これによって、円筒の長さ方向に沿った 1 つの直線状の内面からの反射光を取り出し、同時に、内面からの正反射方向近傍の反射光だけを取り出す。このように取り出された反射光による像面上の光場と参照光を干渉させて、像面上すなわち物体面上の光場の位相分布を検出する。この光位相分布から内面形状が得られるようになる。(B) 波長走査光源によって多波長干渉法を用いる。2 波長干渉法のように測定範囲を拡大でき、深さ 5  $\mu\text{m}$  程度の溝形状を測定することができる。2 波長だけの場合より、更に高精度の内面形状計測が行える。

## 3. 研究の方法

### (1) 波長走査光源と入射レーザ光形状の決定

多波長の光を発生する波長走査光源として、外部共振型半導体レーザ光源が光出力、波長走査幅の特性から有用であること、また円筒内面に入射させるレーザ光は線状の平行光が最適であることを確認する。そして、この入射レーザ光を作り出す光学系について検討する。

### (2) 干渉計の全体構成

測定対象を流体動圧軸受とする。上記(1)で決定された入射光による測定対象への入射角を決定し、以下の (a) (b) の条件を考慮し干渉計の全体構成を検討する。(a) 干渉信号の位相検出には正弦波位相変調法を用いるため、振動ミラーによる参照光への正弦波位相変調が必要である。(b) 検出器には 2 次元 CCD イメージセンサを用いるため、像面の光強度によって最適な正弦波位相変調周波数が決まる。

### (3) 内面形状の画像形成過程の解析

アフォーカル結像系で空間周波数フィルタリングを行わずに、流体動圧軸受の円筒内面からの反射光すべてで形成される像面での画像を観察する。物体面の位置の移動によって変化する画像を解析することによって、軸受内面からの反射光がこの結像系によって受ける作用および像形成の過程を明らかにする。

### (4) 空間周波数フィルタリング方法の決定

上記(3)の結果に基づき、円筒の長さ方向に沿った 1 つの直線状の内面からの反射光を取り出し、同時に、内面からの正反射方向近傍の反射光だけを取り出すことのできる空間周波数フィルタリングの方法を決定する。

### (5) 2 波長干渉法による流体動圧軸受内面形状測定

流体動圧軸受内面の溝形状を測定できるようにする 2 つの波長を、波長走査光源の特性を考慮して決定する。物体面と円筒内面が一致していないが、上記(4)の空間周波数フィルタリングで内面からの正反射方向近傍の反射光だけを取り出していることによって、物体面の位相分布は内面形状にほぼ比例していることを確認する。また、物体面の位置による位相分布の差異を明らかにし、この内面形状の測定特性を明らかにする。

### (6) 多波長干渉法による流体動圧軸受内面形状測定

複数の波長について得られる干渉信号の位相から光路差を決定する方法について検討する。上記(5)の場合と比較し、本測定方法の利点、特性を明らかにする。

## 4. 研究成果

### (1) 干渉計の全体構成

図1に示すように、外部共振器型半導体レーザーからの平行光を2つの円筒レンズで線状平行光とし、ビームスプリッターで2つの光に分け、それぞれを物体光および参照光とした。図2に示すように、測定物体は内径3mm、長さ3.5mmの流体軸受であり、円筒内面に深さ5~6 $\mu\text{m}$ の溝が円周方向に対してV字型に刻まれていた。この円筒内面の長さ方向に沿っての1つの直線をx軸とした。幅1mmの平面状の物体光はx軸を平面内に含み、x軸に対して角度 $\theta=0.61\text{rad}$ で円筒物体に斜め入射させた。x軸上の溝形状が円筒内面からの反射光の位相に反映されるように、焦点距離50mmのレンズの焦点面に、すなわち反射光の空間スペクトル面上に幅200 $\mu\text{m}$ 、長さ1mmのスリットを置いた。スリット長さ1mmによって円筒内面から正反射方向付近に反射する光を取り出し、およびスリット幅200 $\mu\text{m}$ によって円周方向に対し3 $\mu\text{m}$ の幅から反射する光を取り出した。このような空間周波数フィルタリングを含むアフォーカル結像系を用い、光検出器である2次元CCDイメージセンサ面上に反射光の像面光場を形成し、参照光と干渉させ干渉縞強度分布、すなわち干渉信号を得た。正確に干渉信号の位相を検出するために、圧電素子により正弦波振動しているミラーによって参照光に正弦波位相変調を与えた。

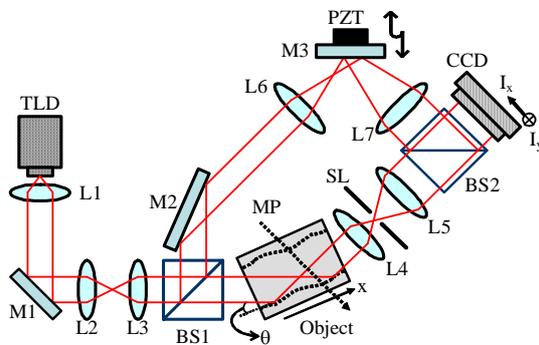


図1 干渉計の全体構成

### (2) 内面形状の画像形成過程と空間周波数フィルタリング

図1の干渉計のアフォーカル結像系に関する特性を調べた。焦点距離50mmと100mmのレンズによる像倍率2倍のアフォーカル結像系の中に置かれた幅200 $\mu\text{m}$ のスリットによる空間フィルタで、図2に示すように、円筒内面のある1つの円周方向で奥行き方向に沿ったx方向の直線上において内面形状を測定した。図3(a)にスリットのない場合、図3(b)にスリットのある場合にCCDで検出された物体光の光強度分布を示す。図3(b)

の光強度分布はシンク関数に従ってy方向に広がっている。よって、CCDのy方向のどの位置でもx方向に沿った光場の位相分布は同じである。これについてy方向の3つの位置で確かめた結果、ほとんど等しい位相分布すなわち内面形状が得られた。次に、アフォーカル結像系においてCCD検出面に対する物体面は、円筒内面の奥行き方向に沿ったx方向ではなく、x方向と角度 $\beta=0.96\text{rad}$ をなす。そこで、CCDの位置を光軸に平行に0.5mm間隔で移動させて、物体面の位置、すなわち物体面と円筒内面のx方向との交点の位置を変化させ、CCD検出面における光場の位相分布の変化の様子を調べた。その結果、位相分布の変化はほとんどないことが確認された。以上の結果から、CCDの検出位置に対する位置精度は厳しくないことが分かり、内面形状測定が正確に行えることが明らかになった。

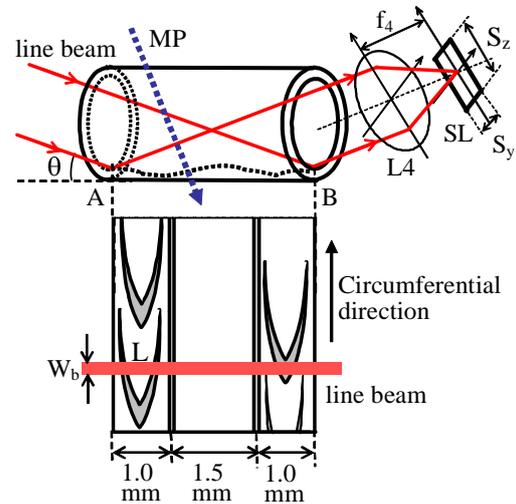


図2 円筒内面からの反射光と内面溝形状

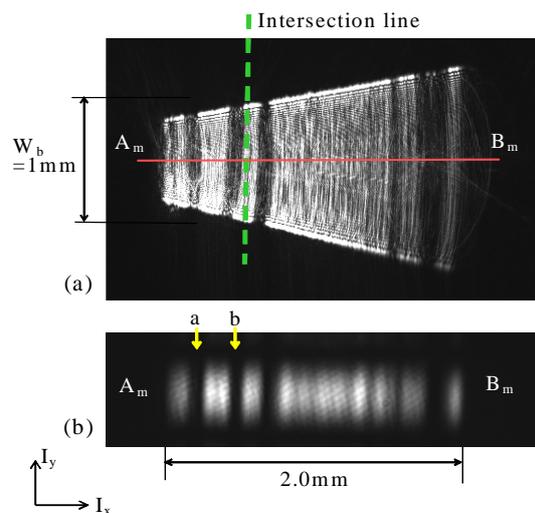


図3 CCD検出面上の物体光の強度分布

### (3) 2波長干渉法による流体動圧軸受内面形状測定

図3 (b)の物体光に参照光を重ねた時に得られた波長 $\lambda_1=785\text{nm}$ での干渉縞強度分布を図4に示す。この干渉縞の位相すなわち干渉信号の位相と干渉信号の振幅を正弦波位相変調干渉法で求めた。その結果を図5に示す。異なる2つの波長 $\lambda_1=785\text{nm}$ と $\lambda_2=762\text{nm}$ での干渉信号の位相を検出することによって、図6に示すように等価波長 $24\mu\text{m}$ に対する位相分布が得られ、深さ $5\sim 6\mu\text{m}$ のx軸上のV字型の溝形状を測定することができた。測定点間隔は $6.46\mu\text{m}$ 、測定点数は200点であった。x軸上で $0.5\text{mm}$ 程度離れた2つの溝形状を測定することができ、その繰り返し測定精度は $0.3\mu\text{m}$ 以下であった。

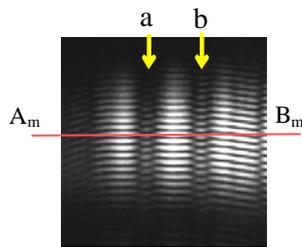


図4 CCD検出面上の干渉縞強度分布

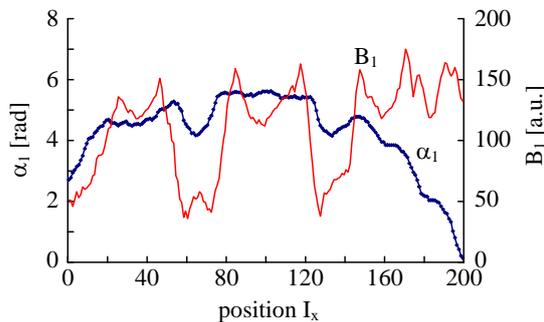


図5 干渉信号の振幅 $B_1$ と位相分布 $\alpha_1$

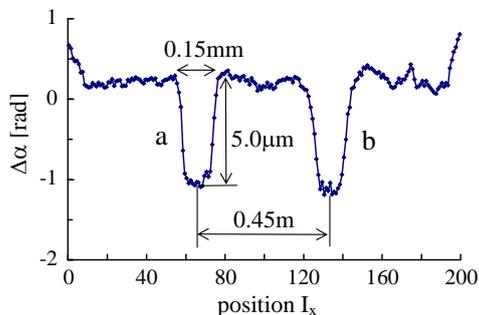


図6 円筒内面溝形状の測定結果

次に、円筒物体を回転させることによって円周方向に沿っての内面形状の変化を測定

した。図2に示すように円筒内面に円周方向に沿ってV字型をした深さ $5\sim 6\mu\text{m}$ の溝が加工されている。5つの円周方向の位置で測定した形状分布結果から、溝深さ方向の測定精度 $0.3\mu\text{m}$ でV字型の形状を測定できた。

### (4) 多波長干渉法による流体動圧軸受内面形状測定

測定誤差をより小さくすることを目指して、 $778\text{nm}$ から $765\text{nm}$ 間の5つの波長を用いた。5つの波長で検出された位相は、波長の逆数に比例して変化し、その変化率が円筒内面の位置に比例することから、測定誤差を含む5つの位相の測定値に対し最小二乗法で近似直線を求め、その直線の傾きから内面形状を求めた。この際、干渉信号の振幅が小さい測定点の位相は大きな誤差を含むため、測定値から除外した。また、ある波長の位相が他の波長の位相から求めた最小二乗近似直線上の値と大きく異なる場合があり、かつすべての測定点でほぼ一定値だけ異なっていることを他の波長の位相と比較することから判別できたので、このようにある波長だけで一定値の測定誤差が生じている場合は、この一定値を測定値に加えて測定値を補正した。以上の5波長を用いる方法によって得られた繰り返し測定誤差は溝部分に対し $0.8\mu\text{m}$ 、平坦部に対し $0.3\mu\text{m}$ であった。 $778\text{nm}$ と $765\text{nm}$ の2波長だけを用いた場合の溝部分に対する繰り返し測定誤差は $1.2\mu\text{m}$ であったので、5つの波長を用いることによって高精度の測定が行われることが分かった。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計2件)

①森松孝文、佐々木修己、崔森悦、鈴木孝昌：  
「多波長レーザ干渉計を用いた円筒内面形状計測」、電子情報通信学会信越支部大会、講演予稿集 98頁、(2011)。

②O. Sasaki, R. Yamamura, K. Yokoyama, and T. Suzuki, “Inner surface profile measurement of a hydrodynamic bearing by an oblique incidence and two-wavelength interferometer,” Optics+Photonics 2009, Optical Inspection and Metrology for Non-Optics Industries, San Diego, USA, Proc. SPIE, Vol. 7432, 74320J (2009).

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 修己 (SASAKI OSAMI)  
新潟大学・自然科学系・教授  
研究者番号：90018911

(2) 研究分担者

鈴木 孝昌 (SUZUKI TAKAMASA)  
新潟大学・自然科学系・教授  
研究者番号：40206496