

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656102

研究課題名(和文) 球内周回光伝搬モード観測によるマイクロ球形状のスキャンレス計測

研究課題名(英文) Sphere measurement using whispering gallery mode

研究代表者

道畑 正岐(Michihata, Masaki)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：70588855

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：近年、微細部品の形状測定のために開発盛んな超高精度座標測定器(マイクロCMM)の主要デバイスである位置検出プローブに関して、そのプローブ探針の直径を測定する新規な技術を提案するものである。プローブ探針の直径を数nmの精度で測定可能な技術の開発が求められている。本研究では、Whispering gallery mode(WGM)という光伝搬モードを利用した直径計測手法を提案している。本研究課題では、WGMの波長スペクトルを測定する装置の構築、球内に光結合するためのテーパファイバ加工システムの構築、およびマイクロ球の直径計測の基礎原理の構築を遂行した。結果、測定のパラッキ±1nm以下を達成できた。

研究成果の概要(英文)：Probe calibration contributes measurement uncertainty of micro-coordinate measuring machine (micro-CMM). This study proposes a new method of measuring the diameter of a stylus sphere for micro-CMM based on analysis of the whispering gallery modes (WGMs). Depending on incident wavelength, different WGMs will be excited in the probe-stylus. This wavelength spectral fingerprint is also sensitive to the diameter of a sphere. The diameter of the micro-probe stylus sphere was determined by means of least square method between theoretical and measured spectra of WGMs. Measurement results showed that precision of the proposed method was 1 nm.

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：生産工学・加工学

キーワード：マイクロCMM 直径計測 Whispering gallery mode テーパファイバ

1. 研究開始当初の背景

幾何形状、寸法 ( Geometrical dimension ) は機械、光学、電気などの部品や製品において、それらの特徴を示す最も基礎的なパラメータの一つである。特に、光学および機械部品において、それらの設計機能と形状精度は直接関係する。現在、幾何形状や寸法の測定器として座標測定器 ( CMM ) が標準となっている。しかし、1 mm 以下の部品に対して、数十 nm 程度の精度で計測可能な CMM は開発されておらず、また他にも、立体的な幾何形状を高精度に計測可能な装置は開発されていない。そこで、マイクロ部品に対応可能な CMM であるマイクロ CMM の開発が注目されている。CMM では、スタイラスと呼ばれる先端の球状接触子で測定物の表面を検出し、スタイラスを移動させるステージの移動量を基に、検出点に空間的な座標を値付ける。その際、有限径 ( マイクロ CMM の場合 500 ~ 50 μm ) を持つ接触子の形状が測定結果に転写されるため、球状スタイラスの形状を高精度に測定する技術が要求される。

2. 研究の目的

現状のマイクロ CMM の測定不確かさの要因を表 1 にまとめる。このように、スタイラスの形状測定技術の未熟さ故に、不確かさが桁違いに大きくなっている。

表 1 マイクロ CMM の不確かさ要因

測定不確かさ要因	不確かさ
ステージ	25 mm(x) × 25 mm(y) × 5 mm(z) の領域に対して 5 nm <sup>[1]</sup>
表面検出精度	φ120 μm のスタイラスを用いた時 5 nm <sup>[2]</sup>
スタイラス形状	φ50 μm のスタイラスに対して 150 nm <sup>[3]</sup>

[1] G. Jäger, Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 46 (2010) 318,  
 [2] E.J.C. Bos, Precision engineering, 35 (2011) 228  
 [3] Gannan XM from Xpress precision engineering [http://www.xpresspe.com]

本研究は、スタイラス径の測定に Whispering gallery mode ( WGM ) と呼ばれる光伝搬モードを利用した手法を提案している。WGM とは、光ファイバを介して入射した光が球表面内側を伝搬する光伝搬モードである。球の円周 ( πd ) と入射光波長 λ の整数倍が一致する時のみ ( πd ≈ aλ/n : a は整数、n は屈折率 )、光結合され、球内で光が共振する。つまり、この共振波長を測定することで、球の直径を測定出来る。一般的に WGM が発生する光波長幅は非常に小さく、数 nm 以下の測定分解能が期待できる。本研究ではこの WGM を用いて、直径が 1 mm から 10 μm の球状スタイラスに対して、その直径を 1 nm の精度で計測可能な測定技術の開発を目指している。

3. 研究の方法

(1) 直径計測原理

光が球の形状中を伝搬する時、WGM と呼ばれる伝搬モードが存在する。WGM では光は球内の円周上を伝搬し、円周長と波長の整数倍が一致するとき光共振状態となる。円周

が一定の時、WGM が発生する波長は離散的に存在し、その波長は以下の式によって与えられる。

$$\lambda = \pi d_s n_s \left[ l + \frac{1}{2} + \alpha_q^3 \sqrt{\left( l + \frac{1}{2} \right)^2 - \Delta \pm \varepsilon^2 \frac{l - |ml|}{2}} \right]^{-1} \quad (1)$$

$d_s$  は球半径、 $n_s$  は球の屈折率、 $n_0$  は周囲の屈折率、 $l$  は極モード番号、 $q$  は半径モード番号、 $m$  は方位モード番号、 $\alpha_q$  はエアリー関数の  $q$  番目のゼロ点の絶対値、 $\varepsilon$  は離心率、 $\Delta$  は電界型 WGM の場合  $\gamma^1(\gamma^2-1)$ 、磁界型の場合  $\gamma(\gamma^2-1)$  である。ただし  $\gamma = n_0/n_s$  である。

球内で発生する WGM は極、半径、方位の 3 次元のモードを持ち、これらのモードに対応した複数の WGM 波長が存在する。この中で特に最も基本的な伝搬モードとなる方位モードが極モードと等しい ( $m=l$ )、半径モードが 1 ( $q=1$ ) となるモードを基本モードと呼ぶ。この場合、式(1)の最後の項は無視することができ、基本モードを励起・検出することで、球の離心率  $\varepsilon$  を無視でき、残りは極モードのみを考えればよいことになる。

そこで、直径の推定方法としては、WGM 波長  $\lambda_{m,n}$  を測定する。 $\lambda_m$  は測定波長、 $n$  は得られるピーク全数である。ここには基本モード以外も含まれる。次に、連続した一連の極モード  $l$  に対して、式(1)の  $d_s$  をパラメータに WGM の基本モードの理論波長  $\lambda_{c,N}$  を求める。 $\lambda_c$  は理論波長、 $N$  は計算波長域内の WGM の基本モードの全ての波長数である。その後、理論波長  $\lambda_{c,i}$  に最も近い波長を実験的に得られた  $\lambda_m$  の中から選択し  $\lambda_{m,i}$  とする。その理論波長と実験波長の残差  $\delta d$  を式(2)のように計算し、 $\delta d$  が最小となる  $d_s$  を探索する。これを  $l$  の組み合わせを変更させていき、最小の  $\delta d$  となる直径  $d_s$  を求める。

$$\delta_d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |\lambda_{c,i} - \lambda_{m,i}| \quad (2)$$

(2) 光結合効率の解析

WG モードの選択的励起のため、光ファイバとマイクロ球の結合効率を Maxwell の方程式と光結合理論より解析した。理想的な状況において、方位角モード、半径モードともに F-WGM が他のモードに比べ数倍以上の高い結合効率を示すことがわかった。

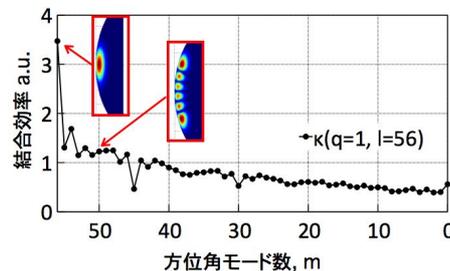


図 1 方位角モードに関する結合効率

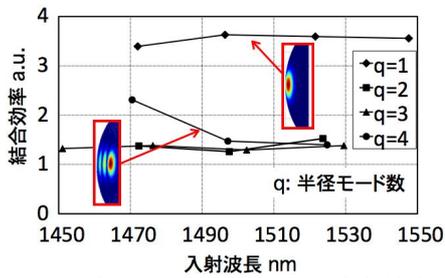


図2 半径モードに関する結合効率

### (3) 光結合の位相整合条件

高効率な光結合には光ファイバと球の位相整合条件を整える必要がある。位相整合とはつまり、両者の光伝搬速度を一致させることであり、測定対象の球径に対して光ファイバ径を調整する必要がある。F-WGMの位相整合条件を計算した結果を図3に示す。本研究では直径1 mmから10  $\mu\text{m}$ の球を測定対象としているため、1~6  $\mu\text{m}$ と広い範囲でファイバの径を調整する必要があることがわかる。また、微小な直径数10  $\mu\text{m}$ の球を測定する時、最適ファイバ径は急激に変化する。これより50 nm以下の高分解能にファイバ径を形成する加工技術が求められることがわかる。

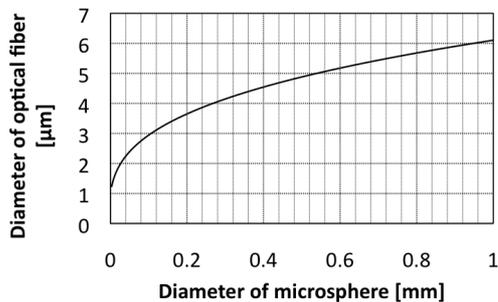


図3 位相整合満足する光ファイバ径

位相整合条件を満足させ、F-WGMの選択的励起にはファイバ径を調整する必要がある。ファイバ径を加工可能な加工システムを構築する。従来はバーナーで光ファイバを加熱延伸するが、これでは加熱部が数 mmと大きく光ファイバの細部が長くなり過ぎる。その結果、光強度ロスの増加し、外乱ノイズに弱くなる等の影響は発生する。そこで本研究ではCO<sub>2</sub>レーザを用い加熱延伸を行う。CO<sub>2</sub>レーザによる局所加熱で、数10  $\mu\text{m}$ と狭い範囲で高分解能な加工を実現する。

## 4. 研究成果

### (1) テーパファイバ加工システムの構築

テーパファイバは、光ファイバに熱を加えながら延伸を行う。作成したファイバ延伸装置では、ファイバに熱を加える手段としてCO<sub>2</sub>レーザを使用し、ファイバの延伸はステップングステージを用いる(図4)。本光学系ではステージを2つ用いることによりファイバを両側から延伸することで形状が左右対称となるテーパファイバを作製できるよう

にする。CO<sub>2</sub>レーザの集光にはレンズを使用し、このレンズをレーザの進行方向に移動させることで焦点の位置を調整できるようにする。延伸中に発生するファイバのずれを抑えるための治具を新たに作成し(図5)、これを光学系に組み込むことでより確実に真っ直ぐなテーパファイバを作製できるようにした。作製したテーパファイバの直径は光学顕微鏡(図6)を用いて行う。

たとえば直径126  $\mu\text{m}$ のガラス球と位相整合条件を満たすテーパファイバの直径は3.1  $\mu\text{m}$ である。この直径を目標値として延伸実験を行った結果、3.0  $\mu\text{m}$ の直径のテーパファイバを作製することができた。図7のように、このテーパファイバの径分布を計測した結果、250  $\mu\text{m}$ にかけて直径が0.3  $\mu\text{m}$ 変化していることが確認できた。このように、直径数  $\mu\text{m}$ のテーパファイバを作成可能な装置を構築した。

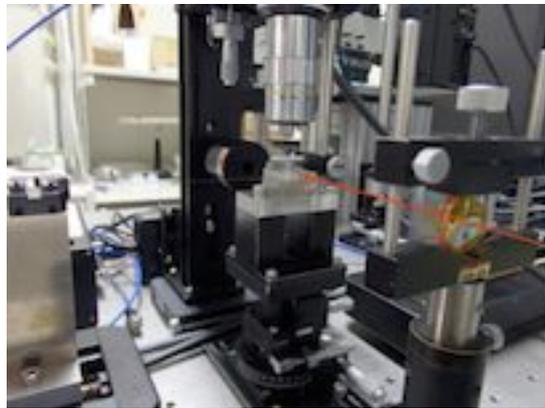


図4 テーパファイバ加工装置 (赤線がCO<sub>2</sub>レーザの光路)

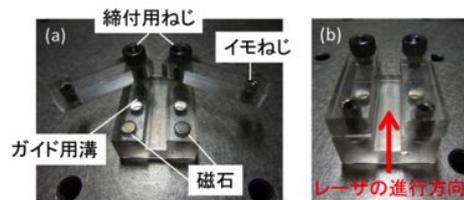


図5 ファイバ固定治具



図6 作成されたテーパファイバ

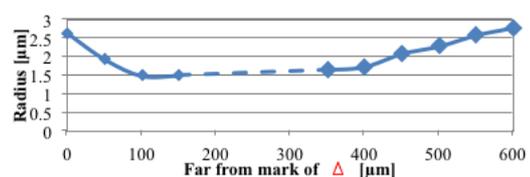


図7 テーパファイバの半径分布

### (2) WGM励起・測定装置の開発

WGMを球内に発生させるために高効率な

光入射が必要となる。いくつかの手法が提案されているが、光ファイバ結合が最も効率良く光入射可能である。WGM 伝搬波長を同定するため、入射光波長を掃引しながら、光ファイバ透過光を測定する。入射波長が WGM 伝搬波長と一致する時、光は強く結合し球内に留まるため、光ファイバの透過光は激減する。この光ファイバを用いた WGM の励起・計測可能な装置を構築した。実験装置の概略を図 8 に、写真を図 9 に示す。波長可変レーザ(波長変化の分解能 0.02 nm、線幅 300kHz)から偏光ローテータを介してテーパファイバに入射する。テーパファイバの他端ではパワーメータによって透過光強度を測定する。光ファイバはアクリル基板に樹脂を用いて固定される。プローブ球はピエゾステージに取り付けられる。プローブ球をテーパファイバに接近させ、その様子は顕微鏡ユニットによって観察できる。入射波長は 1470 nm から 1545 nm の 75 nm の範囲で可変であり、光ファイバの直径は 1  $\mu\text{m}$  と 2  $\mu\text{m}$  の 2 種類とした。

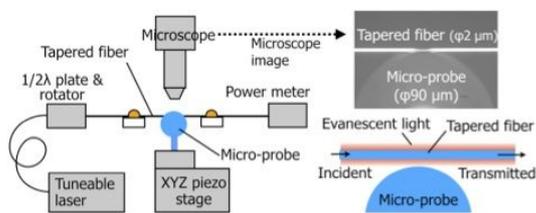


図 8 WGM の励起装置

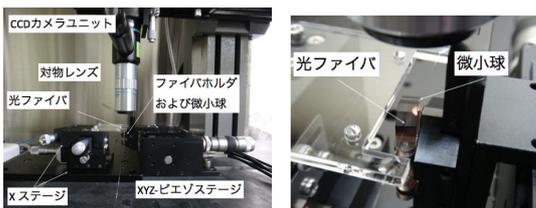


図 9 装置写真

### (3) マイクロ球の直径計測

構築した装置とファイバを用いて、WGM の波長スペクトルを測定し、ガラスマイクロプローブの直径推定によって、本研究で提案する手法を検証した。

テーパファイバをプローブに接近させ、入射光の波長を掃引させたときの透過光強度を測定した。波長掃引の範囲は 1500 nm から 1530 nm とし、入射強度は 15 mW とした。ファイバとプローブ球の距離はピエゾステージの移動量で 200 nm 程度に設定し、1 回測定した後、ファイバを一旦離し、再度接近させて測定を 4 回繰り返した。各測定約 10 分程度であった。そのときの結果を図 10 に示す。図中の黒矢印はのちに行うプローブ径の推定時に検出された WGM の基本モードの波長位置を示している。測定の結果、回数を重ねるに従いピエゾステージのドリフトなどによりピークの強弱が見られるものの、強いピークは同波長で見られ、測定の再現性が確認された。

最後に得られた WGM 波長に対してプローブの径を推定した。検出された基本モードの波長とそれによって推定された球の直径を表 1 に示す。3, 4 回目の測定では 1503 nm 近傍の波長を検出することは出来なかった。測定された WGM 波長に対して偏光に関するモードを特定することが出来ていないため、TE、TM の両方のモードに対して直径を計算した。その結果、2 回目の測定では 300 nm 程度異なる波長を示したが、その他測定ではどちらの偏光に対しても測定値のばらつきは  $\pm 1$  nm と高い可能性を示した。

この 300 nm の違いは直径推定時に起こる。プローブ径は、測定された複数の WGM 波長の値とそれらのフリースペクトルレンジから、半径モード  $l$  を決定することで最終的にその直径を推定する。しかし、測定波長幅 30 nm という測定範囲では、5 つの検出 WGM 波長に対して割り当てられる半径モード数が 1 つ異なっても  $\delta_d$  の違いが小さく、誤検出により今回の場合のように数 100 nm ずれる。また、偏光に関して、約 80 nm の偏差を生じており、今後半径モードおよび偏光の特定方法が必要である。

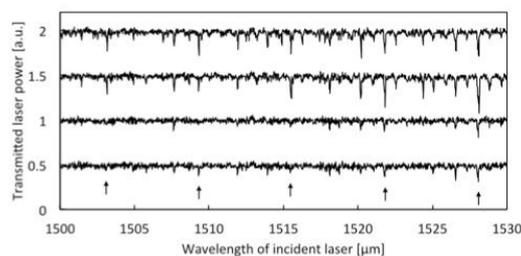


図 10 WGM の波長スペクトル

表 1 検出した WGM 波長と対応する直径

	Detected resonant wavelengths of fundamental WGMs [nm]					Estimated diameter, $d_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	
	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	TE mode	TM mode
1st	1528.08	1521.80	1515.52	1509.34	1503.18	78.609	78.521
2nd	1528.10	1521.82	1515.52	1509.30	1503.16	78.282	78.195
3rd	1528.04	1521.78	1515.48	1509.30	-	78.607	78.520
4th	1528.06	1521.80	1515.48	1509.30	-	78.608	78.521

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 1 件)

M. Michihata, T. Hayashi, A. Adachi, Y. Takaya: "Measurement of stylus-probe sphere diameter for micro-CMM based on spectral fingerprint of whispering gallery mode, CIRP Annals, 査読有り, vol. 63, no. 1 (2014) (in press).

[学会発表](計 6 件)

M. Michihata, R. Gake, T. Hayashi, Y. Takaya: "Fundamental verification of diameter measurement of a micro-CMM probe by using whispering gallery mode resonance", Proc. the 11th international symposium on measurement technology and intelligent instruments, 1-5 July, 2013,

Aachen/Braunschweig, Germany  
A. Adachi, M. Michihata, T. Hayashi, Y. Takaya: "Optimization of coupling condition in distance between the sphere and the tapered fiber for diameter measurement of microsphere by using WGM resonance" International symposium on optomechatronic technologies, Oct. 28 - 30, 2013, Jeju island, South Korea, MIC-3  
峨家諒介, 道畑正岐, 林 照剛, 高谷裕浩: "CMMによる高精度測定のための微小球共振を用いたプローブ球の直径測定", 2013年度精密工学会学術講演会春季大会講演論文集, 東京工業大学(2013) pp.897-898.

足立 篤, 道畑正岐, 林 照剛, 高谷裕浩: "WG モード解析に基づくマイクロプローブの直径計測原理に関する研究", 2012年度日本機械学会関西学生会卒業研究発表講演会, 大阪工業大学, (2013) pp.17-13.  
足立 篤, 道畑正岐, 林 照剛, 高谷裕浩: "WGM共振を利用した微小球の直径計測(第1報)-結合条件が共振ピークに与える影響-", 2013年度精密工学会学術講演会秋季大会講演論文集, 関西大学(2013) pp.67-68.

道畑正岐, 足立 篤, 林 照剛, 高谷裕浩: "WGM共振を利用した微小球の直径計測(第2報)-WGM波長スペクトルを用いた球径の推定方法-", 2014年度精密工学会学術講演会春季大会講演論文集, 東京大学(2014) pp.79-80.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www-optim.mech.eng.osaka-u.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

道畑 正岐 (MICHIHATA, Masaki)  
大阪大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 70588855

### (2)研究分担者

高谷 裕浩 (TAKAYA, Yasuhiro)  
大阪大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 70243178

林 照剛 (HAYASHI, Terutake)  
大阪大学・大学院工学研究科・準教授  
研究者番号: 00334011