

令和 3 年 4 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18803

研究課題名（和文）微小球共振原理を用いたマイクロスケール3次元形状標準計測の原理確立への挑戦

研究課題名（英文）Measurement of 3-dimensional standard shape in micro-scale using whispering gallery mode resonance

研究代表者

道畑 正岐（Michihata, Masaki）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授

研究者番号：70588855

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、従来にない全く新規な測定原理を提案・確立し、従来精度を遥かに上回る1 mm以下のマイクロ球径を10 nm以下の測定不確かさで計測・評価可能な標準計測技術の構築を目指している。本研究では、Whispering gallery mode共振を用いて手法を提案している。本研究課題では、直径計測を行いその性能について評価した。構築したシステムを用いて、複数のWGM共振波長を測定し、それらの波長からモード解析を行った。得られたモード番号から直径を見積もった結果、最大のばらつきは7 nm程度であり、非常に高い精度を示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Whispering gallery modeは非常に小さくまたQ値の高い共振器が得られるため、例えば、センサーやフィルターなどで非常によく用いられる。一方で3次元共振器のため、非常に多くのモードが立ち、そのモード特性を正確に把握することは容易ではない。我々は、半径モード番号の特定手法を新たに提案し、その有効性を示すことができた。これはWGMを用いた研究において非常に重要性が高いと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we propose the novel sphere measurement method using whispering gallery mode resonance. With which, we aim to achieve the 10 nm or better of the measurement uncertainty. In this project, we developed the measurement system first. Using the system, several resonant wavelengths were measured. From these measured wavelengths, the mode numbers were estimated. Accordingly, using the measured wavelengths and the estimated mode numbers, the diameter of the sphere was estimated, which was in a good agreement with the measured result by SEM. The maximum variation of the measurement was around 7 nm.

研究分野：光応用計測

キーワード：WGM 光共振器 球体 直径 テーバ光ファイバー

1. 研究開始当初の背景

製品/部品の微細化に伴って、マイクロメートルスケールの3次元形状計測が求められる。球は、その3次元の形状等方性から3次元形状計測における基準として多用されており、基準となる球の精度が3次元形状の計測精度の根幹を担っている。例えば、3次元形状測定器のスケールを校正するボールプレート、近年では、光学顕微鏡の3次元光伝達特性の校正などにもマイクロ球が使用される。しかし、マイクロ球の測定技術開発は遅れており、実際、マイクロメートルオーダーの3次元形状計測技術の相対精度は 10^{-4} と低く、従来のミリメートルオーダーでの相対精度に比べて約2桁劣っている。マイクロ/ナノスケールの公差体系を整備するため、直径1mmの球形状を1nm以下の精度で保証できれば、 10^{-6} 以上の相対精度が確保でき、マイクロスケール生産技術の飛躍的発展が期待できる。形状標準としてのマイクロ球は、高精度に真球度および直径が既知である必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、Whispering gallery mode 共振を用いた手法を提案しており、本研究課題では、その高度化を目指している。具体的には、下記を実施した。

- (1) 実験的に WGM 共振波長を測定し、その値を解析することで直径計測をする
- (2) 角度モード番号の推定精度を検証するための WGM 表面光強度分布測定のための基礎的な検証を数値解析的に行う。

3. 研究の方法

本研究では、従来にない全く新規な測定原理を提案・確立し、従来精度を遥かに上回る1mm以下のマイクロ球径を10nm以下の測定不確かさで計測・評価可能な標準計測技術の構築を目指している。本研究で目指すマイクロスケールの形状標準の手法として、球内や円筒形状などで特有に発現する光共振現象である Whispering gallery mode (WGM) 共振を用いる。WGM 共振は、球の表層内部を光が周回する光伝搬形態(図1(a))を持ち、伝搬光波長が共振波長に一致すると、球内部に光定在波が発生する(図1(c))。定在波の節の数でモード番号が決定される。測定対象は標準となる真球度の高い球であるため、WGM 共振波長を測定し、その光共振波長とモード番号の積により球の円周長が得られ、最終的に直径を決定できる(厳密には直径と共振波長の関係を示す分散方程式から直径を推定する)。WGM 共振は一般的に、極低損失の共振モードであるため、現状で、1500nmの波長帯の共振波長を0.5pm以下の高い分解能で決定可能であるため、直径1mmの球の測定を想定しても、0.3nm以下の直径測定分解能が達成できる可能性がある。

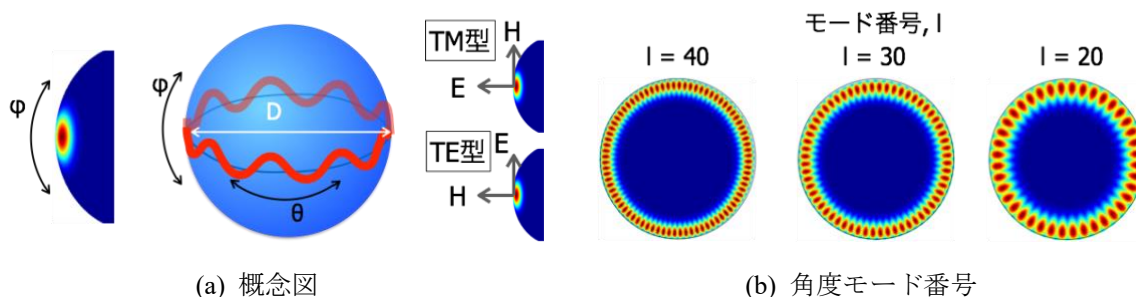


図1 Whispering gallery mode 模式図

4. 研究成果

(1) WGM 共振波長測定による直径計測

本研究では、WGM 共振励起にテーパ光ファイバによるエバネッセント光結合法を用いた。テーパ光ファイバとは、光ファイバを加熱延伸し、部分的に直径数 μm 以下に細径化したものである。光ファイバとマイクロ球を $1\mu\text{m}$ 以下に十分接近させた後、狭線幅(<2kHz)のレーザー光を波長掃引し、WGM 共振波長を探索する。非共振波長で、光はテーパ光ファイバを透過するが、共振波長では光は結合・共振するため、テーパ光ファイバの透過光は減少する。この透過光強度計測より共振波長を測定できる。また、テーパ光ファイバには偏光保持 PANDA 型ファイバを用い、偏光方向をマイクロ球に対して垂直もしくは水平に設定できるように調整しているため、任意の WGM 偏光を励起計測可能である。

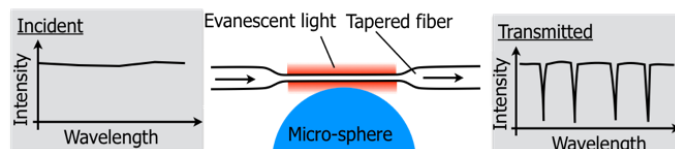


図2: WGM 共振の励起計測

計測原理検証のため、測定対象として光ファイバーを加熱溶融させて表面張力で球状化したマイクロ球 ($\phi 190 \mu\text{m}$) を測定に用いた。共振波長を探索するため入射光波長を 1540 nm から 1560 nm とし、TM の WGM を励起するよう入射光偏光を調整した。まず、測定した透過光強度を図 3 に示す。横軸は掃引波長、縦軸は透過光強度の検出電圧である。高い結合効率のピークのみを測定するため、球-ファイバ間距離を比較的大きく取り計測している。その結果、結合強度の高いモードがピークとして現れており、図 3 のように複数の減衰ピークが見られる。その減衰ピークに Lorentz 分布をフィッティングし、中心波長を共振波長として扱うが、その共振波長計測性能を評価するため、 $\pm 0.2 \text{ nm}$ の範囲の波長特性を計測したものを図 4 に示す。減衰ピーク幅が 1.5 pm 程度であり、約 10^6 の Q 値が得られている。図 4 中、青線が測定値、赤線は Lorentz 分布のフィッティングカーブを示す。1 秒につき 1 回測定し、100 回共振波長を測定した結果、ばらつきの最大値は 0.17 pm および標準偏差は 0.038 pm であった。このようにして得られた各共振波長を表 1 に示す。これらの波長に対してモード番号を決定することにより、式(2)より直径を推定できる。モード番号の決定方法は文献に示し、ここでは説明を省略する。推定した直径を表 1 に示す。結果、平均値として $188.5868 \mu\text{m}$ が得られ、そのばらつきは 7.2 nm 、標準偏差は 1.8 nm であった。同じマイクロ球を SEM 観察像から直径を推定した結果が $188.6 \mu\text{m}$ であり、光学顕微鏡でも $188.8 \mu\text{m}$ が得られ、本手法で計測した結果と良い一致を示した。

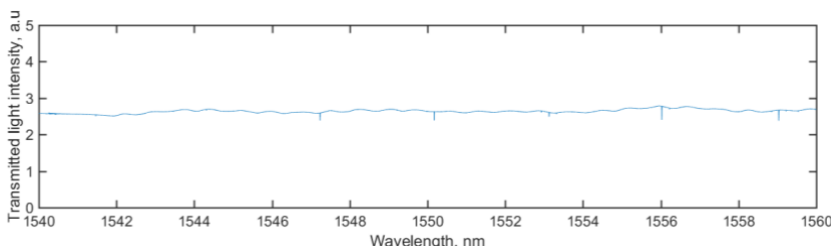


図 3: WGM 共振波長スペクトルの計測結果

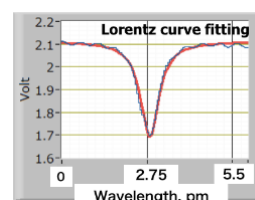


図 4: WGM 共振ピークの結果

表 1: WGM 共振波長の測定値とマイクロ球直径推定値

Resonant wavelength, nm	Estimated diameter, μm	Resonant wavelength, nm	Estimated diameter, μm
1541.5309	188.5858	1550.5796	188.5866
1541.7700	188.5872	1553.3404	188.5854
1544.5085	188.5910	1553.5373	188.5861
1544.6955	188.5870	1556.3395	188.5875
1547.4437	188.5895	1556.5065	188.5857
1547.6303	188.5866	1559.3028	188.5838
1550.3844	188.5872	1559.4893	188.5856
Average diameter		188.5868 μm	
Variation (max.-min.)		7.2 nm	

(2) SNOM プローブ検出特性解析

上記のように直径推定値が、結果が得られた一方で、測定の不確かさを考えた場合、モード番号の推定誤差が最も大きな要素となる。各モード番号の推定手法は提案しているものの、その推定の精度については検証できていない。そこで、本研究では、外部から近接場プローブを用いて WGM 共振の電場を直接測定することで、モード番号を推定することを目指す。そのためのプローブの設計を実施した。

測定のイメージを図に示す。WGM 共振を励起しながら、球の周辺を近接場プローブで測定する。本手法では、球体が共振器として昨日しているため、プローブと電場の相互作用は、共振器の損失に相当する。そこで、プローブによる計測の特性を事前に数値解析によって検証した。

WGM 共振は伝搬型共振であるため、光ファイバーの両方向から光を入射し、定在波とする。プローブ先端と WGM 定在波の強度分布の位置関係は、定在波の空間位相を変化させることで実現する。プローブは散乱型を想定し、タングステン探針 (先端開き角 10°) とした。以降、位相 $\phi=0$ の時、強め合う干渉位置とプローブが同位置であるのに対し、破壊的干渉とプローブが同位置の場合は、 $\phi=\pi$ である。図のように、プローブが急に接近すると、相互作用が大きくなり、Q 値が下がり、共振波長も変化する。その結果、球表面の光強度は劇的に下がり、検出が難しくなる。つまり、プローブが近接場領域より遠方では、WGM による光は検出ができず、プローブが非常に近接すると、共振状態が劣化し、光検出が難しくなる。従って、プロービングの最適距離が存在することがわかる。そこで、 $0, 1/2\pi, \pi$ の各定在波位相において、プローブを急

に接近させた時のプローブ先端の光強度をプロットした。やはり上記のような共振状態変化の影響が見られ、プローブと球の距離が $0.1\mu\text{m}$, $0.3\mu\text{m}$ の時が最も SN 比が高く測定ができそうであることがわかる。一方で、 $0.2\mu\text{m}$ の時は、各位相での光強度の差がない。これはつまり、プローブを球表面に沿って走査しても強度の変化が得られないことを示しており、この場合も測定が難しい。つまり、近接場プローブで測定する場合、球に対して最適な距離が存在することが明らかになった。実験において測定する場合は、球との距離を変化させながら走査し、最適な距離を推定したのちに測定する必要がある。

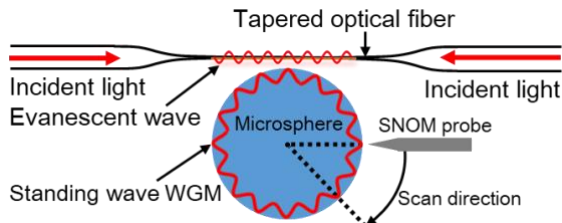


図 5 SNOM プローブによる WGM 表面電場計測

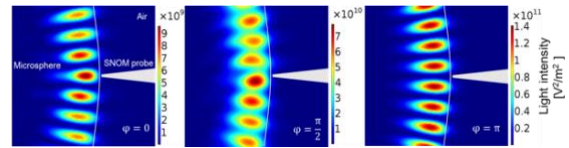


図 6 表面走査の解析結果例

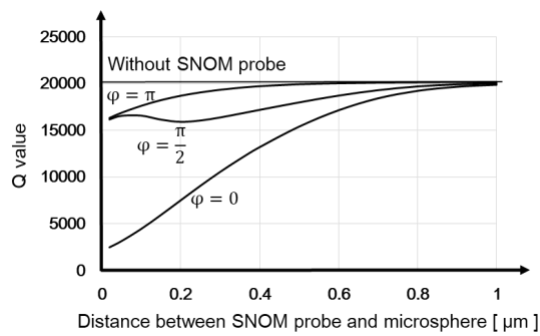


図 7 SNOM プローブ接近による Q 値変化

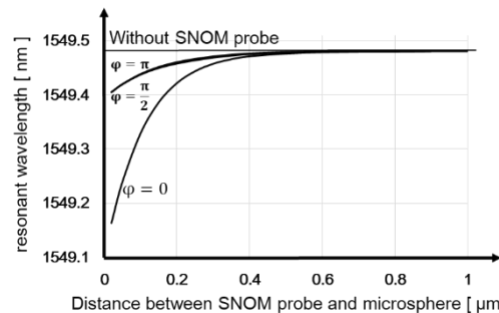


図 8 SNOM プローブ接近による共振波長変化

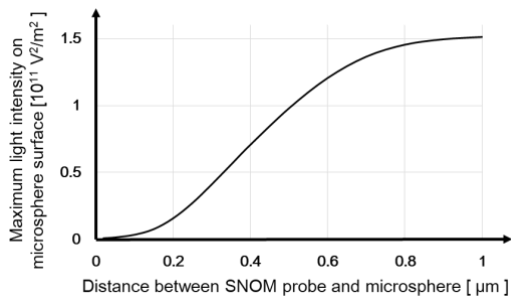


図 9 SNOM プローブ接近による球内電場強度最大値の変化

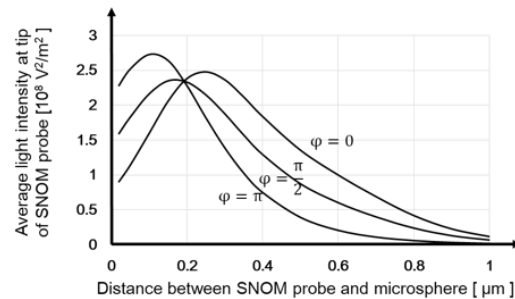


図 10 SNOM プローブ位置によるセンシング感度

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 MICHIHATA Masaki, KOBAYASHI Yumeki, CHU Bohuai, TAKAMASU Kiyoshi, TAKAHASHI Satoru	4. 巻 85
2. 論文標題 Development of measuring system of whispering gallery mode resonances for evaluating a diameter of microsphere	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 19-00226
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.19-00226	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kobayashi Yumeki, Michihata Masaki, Zhao Zheng, Chu Bohuai, Takamasu Kiyoshi, Takahashi Satoru	4. 巻 30
2. 論文標題 Radial mode number identification on whispering gallery mode resonances for diameter measurement of microsphere	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 065201 ~ 065201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6501/ab1241	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Michihata Masaki, Zheng Zhao, Funaiwa Daiki, Murakami Sojiro, Kadoya Shotaro, Takahashi Satoru	4. 巻 4
2. 論文標題 In-Process Diameter Measurement Technique for Micro-Optical Fiber with Standing Wave Illumination	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanomanufacturing and Metrology	6. 最初と最後の頁 28 ~ 36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s41871-020-00081-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 5件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Bohuae Chu, Masaki Michihata, Kiyoshi Takamasu, Satoru Takahashi
2. 発表標題 Sensing near-field light distribution for microsphere measurement based on whispering gallery mode
3. 学会等名 ISMTI12019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaki Michihata, Zheng Zhao, Kiyoshi Takamasu, Satoru Takahashi
2. 発表標題 In-process measurement technique of micro-fiber diameter with interfered scattering pattern of two beam irradiation
3. 学会等名 ISMTI12019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaki Michihata, Yumeki Kobayashi, Bohuai Chu, Kiyoshi Takamasu, Satoru Takahashi
2. 発表標題 System development for microsphere measurement based on whispering gallery mode resonance
3. 学会等名 ISMQC2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Bohuai Chu, Masaki Michihata, Kiyoshi Takamasu, Satoru Takahashi
2. 発表標題 Numerical analysis of near-field light intensity of whispering gallery mode on microsphere surface with SNOM probe
3. 学会等名 OPTM2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 津田信道, 儲博懐, 増井周造, 道畑正岐, 高増 潔, 高橋 哲
2. 発表標題 光共振損失を用いたSPMプローブチップ評価に関する研究
3. 学会等名 2020年度精密工学会学術講演会春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 船岩大輝, 道畑正岐, 高増 潔, 高橋 哲
2. 発表標題 定在波照明を用いたマイクロ光ファイバのインプロセス直径計測(第2報) -計測精度改善の検討-
3. 学会等名 2020年度精密工学会学術講演会春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 道畑正岐, 趙 正, 高増 潔, 高橋 哲
2. 発表標題 2光束照明における光散乱検出に基づくマイクロ光ファイバー直径計測の基礎的研究
3. 学会等名 日本機械学会 2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 道畑正岐
2. 発表標題 微小球光共振を用いた形状標準のナノ精度計測
3. 学会等名 第153回微小光学研究会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaki Michihata, Yumeki Kobayashi, Zheng Zhao, Bouhai Chu, Kiyoshi Takamasu, Satoru Takahashi
2. 発表標題 Ultra high precision diameter measurement of a microsphere based on whispering gallery mode resonances
3. 学会等名 The 1st JSPE affiliate workshop -Metrology and measurement(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaki Michihata
2. 発表標題 Dielectric microsphere measurement using whispering gallery mode resonance
3. 学会等名 10th International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrument (ISPEMI 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaki Michihata
2. 発表標題 Measurement of a microsphere diameter with a picometer resolution using whispering gallery mode resonances
3. 学会等名 International Symposium on Optoelectronic Technology and Application (OTA 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 道畑正岐, 小林夢輝, 趙 正, 儲 博懐, 高増 潔, 高橋 哲
2. 発表標題 光共振を利用したマイクロ球形状のナノ精度計測
3. 学会等名 レーザー学会第39回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林夢輝, 儲 博懐, 道畑正岐, 高増 潔, 高橋 哲
2. 発表標題 WGM共振を利用した微小球の直径計測(第12報) -共振波長計測安定化に向けた測定装置の高度化-
3. 学会等名 2018年度精密工学会学術講演会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 道畑正岐, 小林夢輝, 儲 博懐, 高増 潔, 高橋 哲
2. 発表標題 Whispering gallery mode 共振を用いたマイクロ球径計測 - 比較計測による計測精度評価 -
3. 学会等名 第12回日本機械学会生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林夢輝, 趙 正, 儲 博懐, 道畑正岐, 高増 潔, 高橋 哲
2. 発表標題 WGM共振を利用した微小球の直径計測(第11報) -共振波長解析に基づく半径モード番号の推定-
3. 学会等名 2018年度精密工学会学術講演会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yumeki Kobayashi, Zheng Zhao, Bohuai Chu, Masaki Michihata, Kiyoshi Takamasu, Satoru Takahashi
2. 発表標題 Analyzing tapered fiber - microsphere coupling for diameter measurement of microsphere using whispering gallery mode resonance
3. 学会等名 International Conference on Precision Engineering (ICPE) 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 劉 羽辛, 門屋祥太郎, 道畑正岐, 高橋 哲
2. 発表標題 WGM共振を利用した微小級の直径計測(第14報) -WGM光強度分布センシングのためのガラスプローブ先端形状の検討-
3. 学会等名 2021年度精密工学会学術講演会春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村上宗二郎, 門屋祥太郎, 道畑正岐, 高橋 哲
2. 発表標題 定在波照明を用いたマイクロ光ファイバのインプロセス直径計測(第3報) -サブマイクロ光ファイバの計測のための測定原理の拡張-
3. 学会等名 2021年度精密工学会学術講演会春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 劉 羽辛, 門屋祥太郎, 道畑正岐, 高増 潔, 高橋 哲
2. 発表標題 WGM共振を利用した微小球の直径計測(第13報) -光損失が共振波長に及ぼす影響の検討-
3. 学会等名 2020年度精密工学会学術講演会秋季大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

https://masakimichihata.weebly.com

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	高橋 哲 (Takahashi Satoru) (30283724)	東京大学・先端科学技術研究センター・教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------