

平成 22 年 3 月 11 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007 ～ 2009

課題番号：19760096

研究課題名（和文）：V溝加工光ファイバプローブを用いた微小深穴内径測定器の開発

研究課題名（英文）：Development of a Micro Hole Measuring System Using an Optical Fiber Probe

研究代表者

村上 洋 (MURAKAMI HIROSHI)

鹿児島大学・大学院理工学研究科（工学系）・助教

研究者番号：00416512

研究成果の概要（和文）：

微細径の光ファイバプローブを用いた低測定力で高精度な微小径穴形状精度測定システムの開発を目的とする。プローブが穴内壁に接触した際のプローブのたわみを光学的手法により検出する。本研究では、基礎実験を行い本装置の測定精度を検証し、また直径 100 μm の微小径穴を測定することで本装置の有用性を確認した。

研究成果の概要（英文）：

This paper presents a system for measuring micro holes that makes use of an optical fiber probe. The probe is deflected when it comes into contact with a hole surface, and this deflection is measured optically. In this research, its measuring accuracies are examined by using the basic experimental apparatus. Also, the utility of this system is confirmed by measuring the shape of a 100 μm diameter micro hole.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度			
2006年度			
2007年度	900,000	0	900,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
総計	2,900,000	600,000	3,500,000

研究分野：精密測定

科研費の分科・細目：生産工学・加工学

キーワード：微小径穴，深穴，測定，光ファイバプローブ，レーザー

1. 研究開始当初の背景

近年の精密微細加工技術の進歩に伴い、微細な穴形状を測定する重要性は増加している。特に、燃料噴射ノズルや化繊ノズルなど各種ノズル穴、フェルルールなどの光通信機器、医療機器などの微小径深穴や深溝の高アスペクト比形状の測定技術が各機器の高機能

化を目的とした加工技術向上のために要望されている。また、最近のマイクロマシン技術の発展により、これらを構成するマイクロ部品の形状や寸法を測定するニーズが増加している。このような微小径穴の測定ニーズに対し、これまでは一般に各種光学式顕微鏡による測定が行われてきた。しかし、これは

上面からの測定であるために、穴の入口部あるいは出口部形状のみの測定であり、穴内部の真円度や真直度、円筒度、表面粗さなどは評価できない。穴内部形状の測定には、従来穴断面の切断による破壊検査が行われてきた。しかし、破壊検査は一度実行するとその測定対象物は利用できないという問題があり、実際の加工物の品質を保証するためには非破壊での測定が不可欠である。非破壊でこのような高アスペクト比を持つ微小径穴形状を精度よく測定するためには、測定力が低く小径で高アスペクト比のプロープが必要である。

2. 研究の目的

本研究では、直径 100 μm 以下の微小径穴内壁の表面粗さや真円度、真直度、円筒度、穴径などの形状精度を高精度に測定することを目的とし、微小径・低測定力・高アスペクト比のプロープが容易に得られ、測定範囲が広く走査プロープとして利用可能な光ファイバを用いた新しい測定原理を提案する。提案プロープでは接触子の穴壁接触に伴う変位をレーザーで非接触計測するために、プロープシャフトの弾性の影響がなく、微細径で剛性が低いプロープでも接触検知・変位量の測定が可能である。

3. 研究の方法

図1に、光ファイバプロープの概略図およびプロープを顕微鏡で撮影した写真を示す。今回の実験では、直径が 30 μm の光ファイバに直径が 50 μm のガラス製の接触子が固定されたものをプロープ用ファイバ(Fiber probe)として用いる。また、プロープ用ファイバ上方には、プロープ用ファイバに向かってレーザー光を照射するシングルモード(コア径 4 μm)の光ファイバ(FPX, FPY)が設置されている。プロープ用ファイバを透過した光は、プロープ用ファイバを間にして反対側に設置された2本2組のマルチモード(コア径 105 μm)の光ファイバ(FX1, FX2 および FY1, FY2)で受光する。ここで、プロープ用ファイバはロッドレンズとして利用することで、プロープ用ファイバの変位を拡大している。投光用の光ファイバ(FPX, FPY)には、半導体レーザー(LDP-6535PA, NEO ARK)が接続されており、受光用の光ファイバ(FX1, FX2, FY1, FY2)には、レーザー光の検出素子としてフォトダイオード(C5460-01, 浜松ホトニクス(株))が接続されている。ここで、各フォトダイオードで検出する光強度値は電圧値に変換され、それぞれ I_{FX1} , I_{FX2} , I_{FY1} , I_{FY2} (V)とする。ここで、半導体レーザーの仕様は、波長 650nm, パワー35mW, フォトダイオードの仕様は、受光感度 0.5A/W である。

図2は図1に示したレーザー照射箇所のプロープ用ファイバおよび投光用、受光用ファイバのxy平面の断面図で、光ファイバプロープの測定

原理を示す。接触子が測定対象面に接触していない状態では、各フォトダイオードで検出する光強度値 I_{FX1} , I_{FX2} および I_{FY1} , I_{FY2} は同一強度に保たれているが、接触子が測定対象面に接触し、プロープ用ファイバが変位すると I_{FX1} , I_{FX2} および I_{FY1} , I_{FY2} の光強度に差が生じ、接触方向を検出できる。例えば、図2(a)に示すように接触子が測定対象面に接触していない初期状態では、 $I_{FX1} = I_{FX2}$ および $I_{FY1} = I_{FY2}$ であるが、図2(b)に示すように+X方向にプロープ用ファイバが変位すると、 $I_{FX1} = I_{FX2}$ および $I_{FY1} > I_{FY2}$ となり、プロープ用ファイバの変位量および接触方位を求めることができる。同様に、図2(c)に示すように+Y方向にプロープ用ファイバが変位すると、 $I_{FY1} = I_{FY2}$ および $I_{FX2} > I_{FX1}$ となり、プロープ用ファイバの変位量および接触方位を求めることができる。測定対象物を精密ピエゾXYZステージ(P-611.3S, PI Co., Ltd)を用いて移動させ、プロープで穴内壁を順次走査することにより、穴精度を測定する。ここで、 I_{FY1} および I_{FY2} を用いたX方向変位の出力 I_x 、 I_{FX1} および I_{FX2} を用いたY方向変位の出力 I_y を式(1)、(2)で定義する。

$$I_x = I_{FY1} - I_{FY2} \quad (1)$$

$$I_y = I_{FX1} - I_{FX2} \quad (2)$$

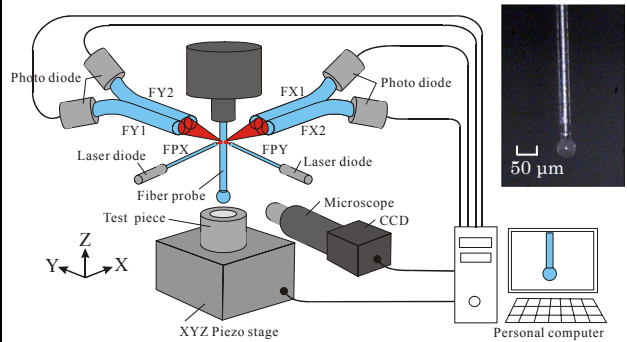


Fig.1 Optical system and photograph of fiber probe

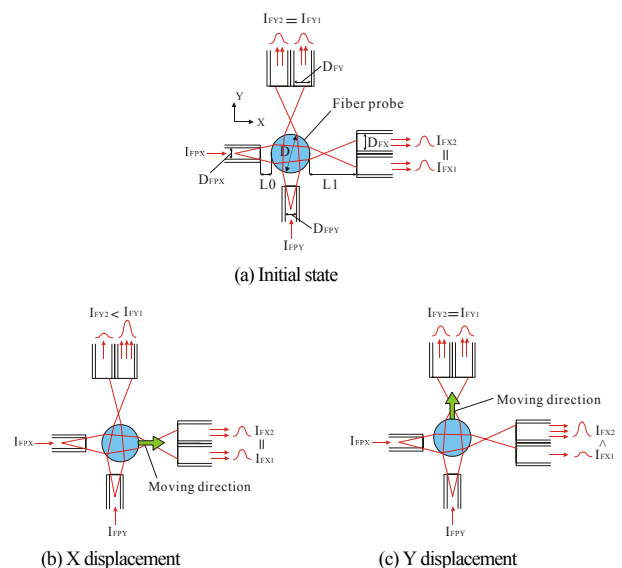


Fig.2 Measuring principle

4. 研究成果

(1) 測定分解能の方向依存性評価

プローブ用ファイバ先端に変位を与えると出力 I_X, I_Y に変化が生じるが、プローブ先端球と測定対象面の接触方位角度により同じ変位量でも出力 I_X, I_Y の変化量はそれぞれ異なる。そこで、実際の穴測定を想定し、プローブ先端球と測定対象面の接触方位角度による測定分解能の違いを評価するために次の実験を行う。図3に示すように、プローブ先端球と測定対象面の接触方位角度 θ を 15° ピッチで変化させた際の測定分解能を評価する。

基礎実験装置を用いて、プローブ先端球に精密ピエゾステージに取り付けたジグの穴壁をあて、一定ステップでプローブ先端に角度 θ 方向の変位を与えた際の、 X, Y 方向変位の出力 I_X, I_Y の変化量 $\Delta I_X, \Delta I_Y$ を測定する。接触方位角 θ 方向出力の変化量を $\Delta I = \sqrt{\Delta I_X^2 + \Delta I_Y^2}$ とする。図4~6に、プローブ先端変位量 15, 30, 50 nm ステップの場合の、 ΔI の変化を示す。横軸は測定時間、縦軸は出力 ΔI の変化量を示す。また、各種ノイズによる電圧値のばらつき量を I_D (Vp-p) とし図4に示す。図12から、15nm ステップの区別が明らかになり、測定分解能が約 15nm であることが確認できる。

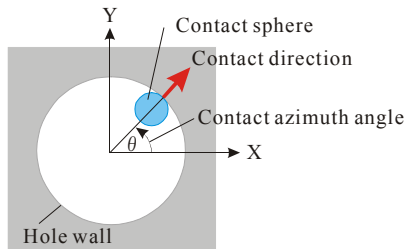


Fig.3 Schematic diagram for evaluating the measurement resolution

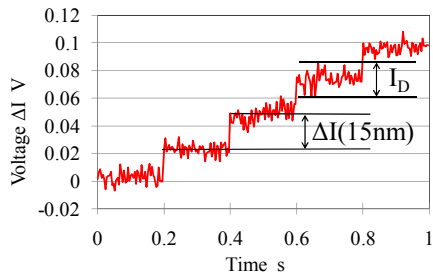


Fig.4 Output voltage ΔI induced by the displacement of step feeding 15nm

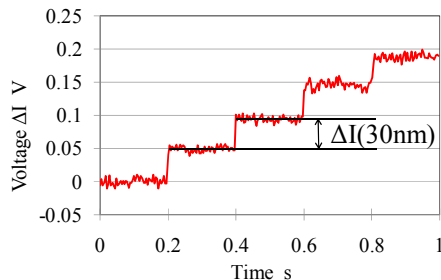


Fig.5 Output voltage ΔI induced by the displacement of step feeding 30nm

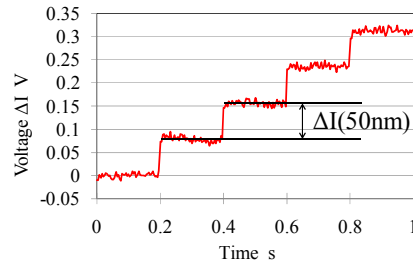


Fig.6 Output voltage ΔI induced by the displacement of step feeding 50nm

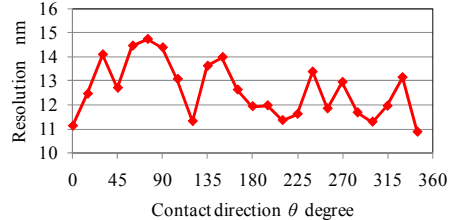


Fig.7 Measurement resolution in changing contact direction θ

図7に各接触方位角度における測定分解能を示す。横軸は接触方位角度（ステージの移動方位角度）、縦軸は測定分解能を示す。方向には依存せず、測定範囲 360° において、測定分解能は最大約 15nm である。

(2) 測定実験

測定システムの測定精度や繰返し性などの性能評価を行うため、市販の測定器を用いて校正用の標準粗さ片の比較測定を行う。また、実際に直径 $100 \mu\text{m}$ のドリルを用いてアクリルに加工した穴の測定実験を行う。

① 標準粗さ片の測定 (タッチトリガモード)

測定システムの測定精度および繰返し誤差を評価するため、市販の測定器を用いて標準粗さ片 ($R_a=2.94 \mu\text{m}$, $R_z=9.3 \mu\text{m}$) の比較測定を行う。ここでは、タッチトリガモードとスキニングモードの2つのモードで測定を行う。タッチトリガモードでは、光ファイバプローブの出力 I_X, I_Y がある閾値と等しくなるように精密ピエゾXYZステージを制御し、そのステージ座標を記録していくことで測定を行う。また、スキニングモードでは、一方向に測定試料を走査し、光ファイバプローブのたわみ量 (出力 I_X, I_Y) を基に測定を行う。

図8に測定の概略図を示す。精密ピエゾXYZステージを用いて出力 I_X, I_Y が閾値 (0.015V) と等しくなるように、 $-X$ 方向に標準粗さ片を移動させる。閾値と等しくなったらその点のステージ座標を記録し、 $-Z$ 方向 (測定方向) に標準粗さ片を $1 \mu\text{m}$ 移動させる。次に同様に X 方向にステージを制御し出力が閾値と等しくなるように制御する。この操作を順次繰り返すことで標準粗さ片を測定する。 $-Z$ 方向に送り速度約 $10 \mu\text{m/s}$ で走査し、データを $1 \mu\text{m}$ ピッチで取得した。測定長さはステージ稼働範囲の制限から $100 \mu\text{m}$ とした。図9(a)に市販の表面粗さ測定器 (CS-5000, Mitutoyo) を用いた測定結果を、図9(b)に本測定

システムを用いた測定結果を示す。標準粗さ片の全く同一箇所の測定ではないため詳細な比較はできないが、本測定システムと表面粗さ測定器による測定結果は山の波長や形状、振幅の絶対値ともによく対応している。また、図 9(c)は同じ条件で 10 回測定したデータを重ね合わせて表示したもので、図 9(d)は 10 回測定し平均値からの差 (ばらつき) を重ね合わせて表示したものである。これらの結果から、繰返し誤差を算出すると最大で $\pm 0.1 \mu\text{m}$ となる。

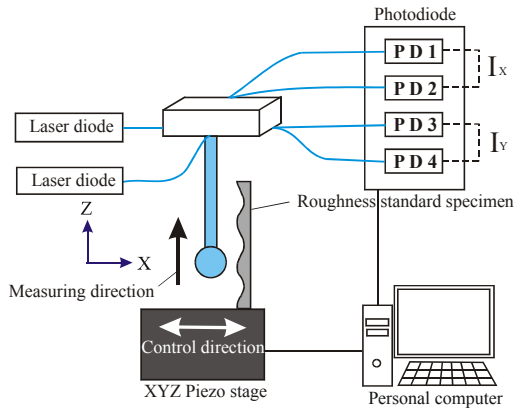


Fig.8 Experimental apparatus used to measure the roughness standard specimen

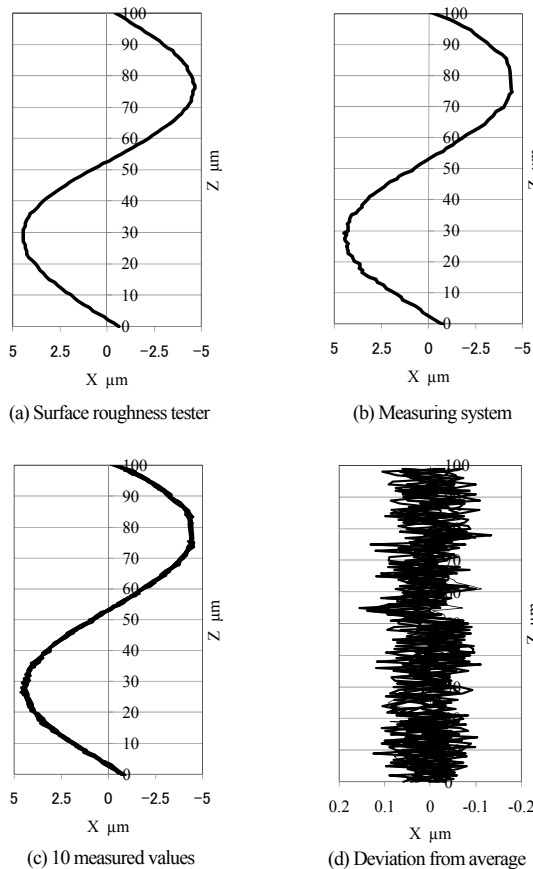


Fig.9 Comparison of the cross-sectional shape of the roughness standard specimen ascertained using a surface roughness tester and the measuring system with a touch trigger mode

②標準粗さ片の測定 (スキヤニングモード)

スキヤニングモードでは、 XY 方向にはステージを移動させずに Z 軸方向の一方向に標準粗さ片を走査し、光ファイバプローブのたわみ量 (出力 I_x , I_y) を基に測定を行う。ただし、光ファイバプローブの測定範囲 (プローブ先端部たわみ量の測定範囲) は、約 $\pm 4 \mu\text{m}$ 程度であるために、標準粗さ片の凹凸全ての測定はできないので凸部の一部の測定を行う。 $-Z$ 方向に送り速度約 $20 \mu\text{m/s}$ で走査し、データを $1 \mu\text{m}$ ピッチで取得した。測定長さは $36 \mu\text{m}$ である。図 10(a)に市販の表面粗さ測定器 (CS-5000, Mitutoyo) を用いた測定結果を、図 10(b)に本測定システムを用いた測定結果を示す。標準粗さ片の全く同一箇所の測定ではないため詳細な比較はできないが、本測定システムと表面粗さ測定器による測定結果は山の波長や形状、振幅の絶対値ともによく対応している。図 10(c)は同じ条件で 10 回測定したデータを重ね合わせて表示したもので、図 10(d)は 10 回測定し平均値からの差 (ばらつき) を重ね合わせて表示したものである。これらの結果から、繰返し誤差を算出すると最大で $\pm 0.03 \mu\text{m}$ となり、タッチトリガモードよりも繰返し性は良いことが確認できる。この理由として、タッチトリガモードでは、光ファイバプローブの出力がある閾値と等しくなるように XYZ 方向にステージを制御しており、ステージの位置決め誤差が繰返し誤差に含まれてしまうが、スキヤニングモードでは、ステージを一方向 ($-Z$ 方向) に一定速度で移動させるためにステージ位置決め精度の影響が少なく、繰返し性が良くなると考えられる。また、 $-Z$ 方向への送り速度はスキヤニングモードで約 $20 \mu\text{m/s}$ 、タッチトリガモードで約 $10 \mu\text{m/s}$ であり、スキヤニングモードの方が測定時間が短く、ステージの温度ドリフトの影響が軽減され繰返し性が良くなることも一因として考えられる。本研究では、直径 $100 \mu\text{m}$ 以下の微小径穴内壁の表面粗さや真円度、真直度、円筒度などの形状精度、穴径を繰返し誤差 $\pm 0.05 \mu\text{m}$ 以下で高精度に測定することを目的としている。スキヤニングモードの場合には、繰返し誤差は $\pm 0.03 \mu\text{m}$ であり、目的とする繰返し誤差 $\pm 0.05 \mu\text{m}$ 以内に行うことができる。しかし、プローブの測定範囲 (プローブ先端部たわみ量の測定範囲) は、約 $\pm 4 \mu\text{m}$ に制限されるため、穴の曲がり量や穴壁の凹凸が $\pm 4 \mu\text{m}$ 以上になると測定不可能となる。また、タッチトリガモードの場合には、繰返し誤差は $\pm 0.1 \mu\text{m}$ であり、目的を達成することができない。タッチトリガモードにおける測定精度の向上は今後の課題である。

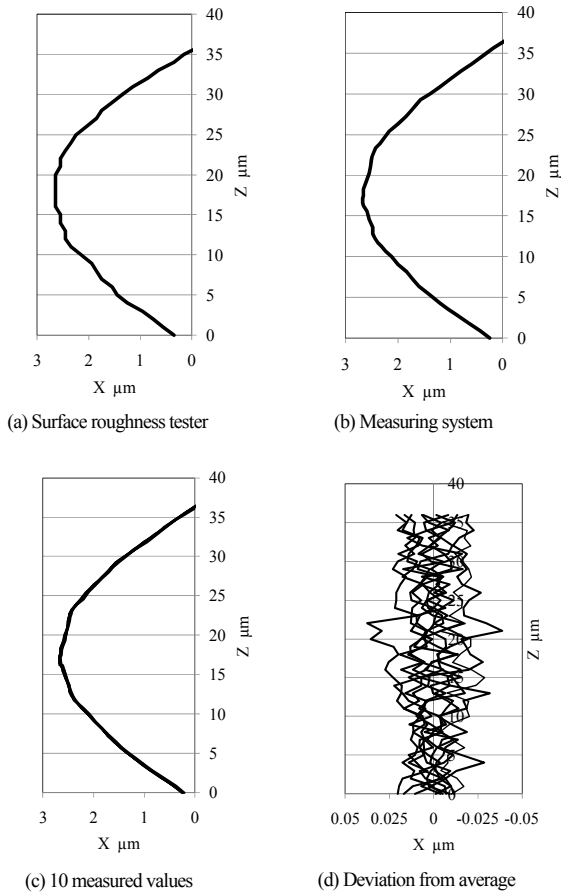


Fig.10 Comparison of the cross-sectional shape of the roughness standard specimen ascertained using a surface roughness tester and the measuring system with a scanning mode

③小径穴 ($\phi 100 \mu\text{m}$) の測定

測定システムの性能を評価するため、小径穴の真直度測定における繰り返し誤差の評価を行う。直径 $100 \mu\text{m}$ のドリルを用いてアクリルに加工した穴を測定する。図 11 に測定時のマイクロ스코プ画像(軸の定義)および測定の概略図を示す。ここでは、 X 軸の+方向の真直度を測定する。測定穴深さ(Z 方向)は約 $70 \mu\text{m}$ である。 $+Z$ 方向(穴の深さ方向)にスキャニングモードの送り速度 $20 \mu\text{m/s}$ で走査し、データを $1 \mu\text{m}$ ピッチで取得した。図 12 に測定結果を示す。また、図 13 は同じ条件で真直度を 10 回測定し平均値からの差(ばらつき)を重ね合わせて表示したものである。これらの結果から、真直度の繰り返し誤差を算出すると最大で $\pm 0.03 \mu\text{m}$ となる。なお、穴入口部では繰り返し誤差は最大で $\pm 0.03 \mu\text{m}$ であるが、穴内部では繰り返し誤差は $\pm 0.01 \mu\text{m}$ 以下となっている。

また、図 14 に示すようにプローブ先端球と測定対象面の接触方位角度 $\theta = 15^\circ$ 毎に $+Z$ 方向に $1 \mu\text{m}$ ピッチで走査した結果(三次元形状の表示)を図 15 に示す。 $+Z$ 方向に穴が拡大しているのが確認できる。測定範囲での穴径の最大値は $105.53 \mu\text{m}$ である。

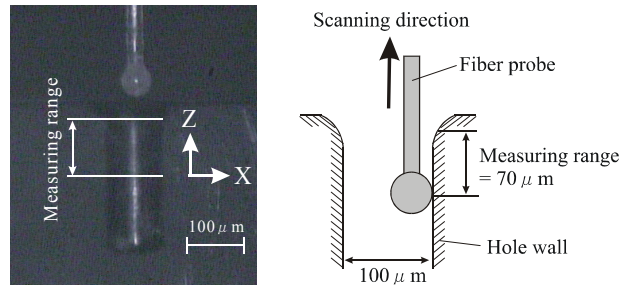


Fig.11 Photograph and schematic diagram of the measuring experiment

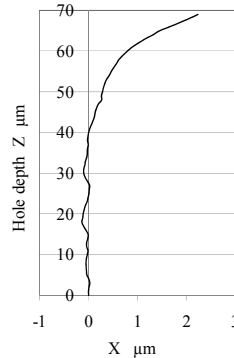


Fig.12 Straightness of micro hole

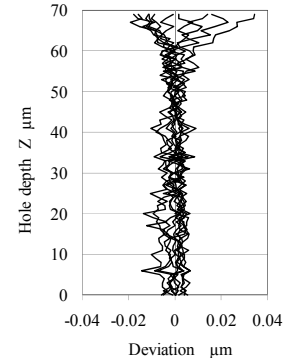


Fig.13 Deviation from average (10 measured values)

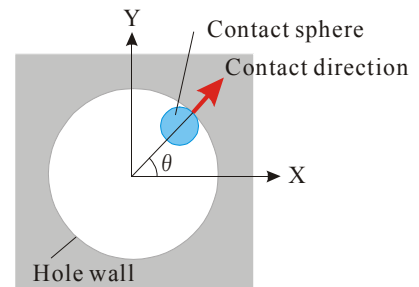


Fig.14 Schematic diagram for measuring the micro hole

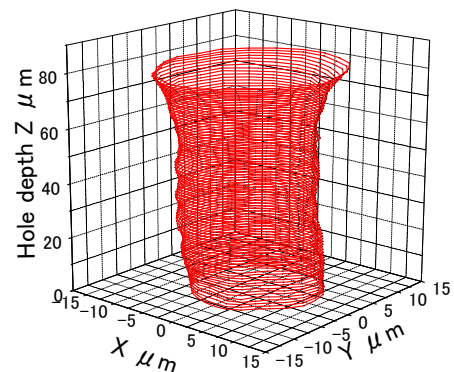


Fig.15 Form measurement of $\phi 100 \mu\text{m}$ micro-hole

④直径 $5 \mu\text{m}$ の極小径プローブの製作

ウェットエッチングにより直径 $5 \mu\text{m}$ の極小径の光ファイバプローブを製作した。図 16 にマイクロ스코プの写真を示す。現在、このプローブを用いて直径 $10 \mu\text{m}$ の小径穴の測

定を実施中である。

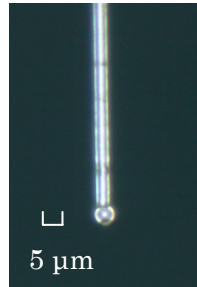


Fig.16 photograph of fiber probe ($\phi 5\mu\text{m}$)

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 7 件)

- ① 村上 洋, 甲木 昭雄, 鬼鞍 宏猷, 佐島 隆生, 皮籠石紀雄, 近藤英二, 光ファイバプローブを用いた微小径穴の形状精度測定技術, 光アライアンス, 査読無, 21 巻・2 号, 2010, pp. 55-58
- ② 村上 洋, 甲木 昭雄, 鬼鞍 宏猷, 佐島 隆生, 近藤英二, 光ファイバプローブを用いた微小径穴形状精度測定システムの開発 (第 1 報) - 光学的解析および精度評価 -, 精密工学会誌, 査読有, 75 巻・12 号, 2009, pp. 1476-1481,

[学会発表] (計 8 件)

- ① Hiroshi MURAKAMI, Akio KATSUKI, Hiromichi ONIKURA, Takao SAJIMA, Norio

KAWAGOISHI, Eiji KONDO, Tomohiro HONDA : Development of a Measuring System for Micro Hole Accuracy Using an Optical Fiber Probe -Evaluation of Measurement Repeatability-, 5th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century(LEM21), 2009 年 12 月 3 日, 大阪大学

- ② 村上 洋, 甲木 昭雄, 鬼鞍 宏猷, 佐島 隆生, 近藤 英二, 光ファイバプローブを用いた微小径穴形状精度測定システムの開発 - 測定の繰り返し性評価 -, 2009 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2009 年 9 月 11 日, 神戸大学

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称 : 形状測定装置および測定方法

発明者 : 村上 洋, 林 宏光

権利者 : 同上

種類 : 特許

番号 : 特願 2007-269005

出願年月日 : 2007 年 10 月 16 日

国内外の別 : 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村上 洋 (MURAKAMI HIROSHI)

鹿児島大学・大学院理工学研究科 (工学系)・助教

研究者番号 : 00416512