

# 微細三次元形状測定用極小径光ファイバスタイラスの製作

藤吉 国孝<sup>\*1</sup> 永田 良介<sup>\*2</sup> 山本 隆彦<sup>\*2</sup> 内山 晃介<sup>\*3</sup> 村上 洋<sup>\*3</sup>

## Fabrication of an Optical Fiber Stylus for 3D Micro Metrology

Kunitaka Fujiyoshi, Ryosuke Nagata, Takahiko Yamamoto, Kosuke Uchiyama and Hiroshi Murakami

高アスペクト比の微細深穴の内部形状を非破壊で測定可能な微細三次元測定装置に使用する、石英ガラス製スタイラスの作製方法について検討した。市販の石英ガラス製光ファイバの被覆樹脂を剥離後、先端をフッ化水素酸水溶液に浸漬溶解させることで、極細のスタイラスシャフトが作製できた。また、フッ化水素酸水溶液よりも安全で濃度の経時変化が少ないエッチング液についても検討し、温度を変えることでエッチング速度の制御が可能であることが明らかとなった。その後、CO<sub>2</sub>レーザを照射して先端を溶融させて先端球を形成させることで、微細三次元測定装置用の先端球付き極小スタイラスが製作できた。

### 1 はじめに

近年の微細加工技術の進歩に伴い、微細形状測定に対する重要性が増している。例えば、微細金型や各種ノズル穴、半導体Si貫通電極（through-silicon via ; TSV）、MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）、マイクロマシン等のマイクロ部品、光通信機器、医療機器などの微細形状の測定が、各機器の高機能化のために要望されている。

特に、高アスペクト比の微細な深穴の内部形状は、非破壊では測定する手段が無い場合、測定対象物を破壊し、原子間力顕微鏡や表面粗さ計を用いることで測定している。

これに対し、村上らは、微細形状が測定可能な装置、特に、高アスペクト比の微細深穴の内部形状を、非破壊で測定可能な測定装置を考案した<sup>1)</sup>。この微細三次元測定装置の概念図を図1に示すが、先端球が測定対象物に接触した時のスタイラスシャフトの変位をレーザ光によって検知する。この微細三次元測定装置では、先端に球を形成させた屈曲性に富むスタイラスを使用しており、このスタイラスは、微細深穴の内部形状の測定に適した、微小径で高アスペクト比形状である。村上らは、石英ガラス製の光ファイバを加工することで、このスタイラスを製作し、実際に3次元形状の測定が可能であることを確認したものの、スタイラスの作製時に、毒物であるフッ化水素酸を使用する必要があっ

た<sup>2)</sup>。

そこで本研究では、フッ化水素酸よりも安全な薬液を用いて微細三次元測定機用のスタイラスを作製することを目的とした。

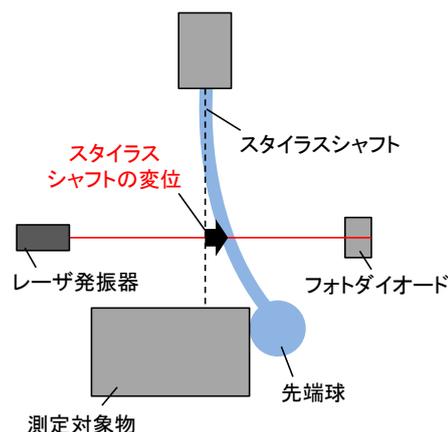


図1 微細三次元測定機概念図

### 2 測定原理

図2に測定装置の概略図を示す。本装置では、X方向、Y方向それぞれに、位置検出用のレーザ発振器及び2分割型フォトダイオード(PX, PY)を設けており、Z方向は精密ステージによって計測する。スタイラスシャフトは姿勢調整用のチューブ型ピエゾ駆動素子に固定されている。スタイラスシャフトに向かってXY方向から波長405 nmの集束レーザ光を照射する。スタイラスシャフトを透過したレーザ光は、スタイラスを間にして反対側に設置された2分割型フォトダイオードで受光する。

\*1 化学繊維研究所  
\*2 株式会社稲築サイエンス  
\*3 北九州市立大学

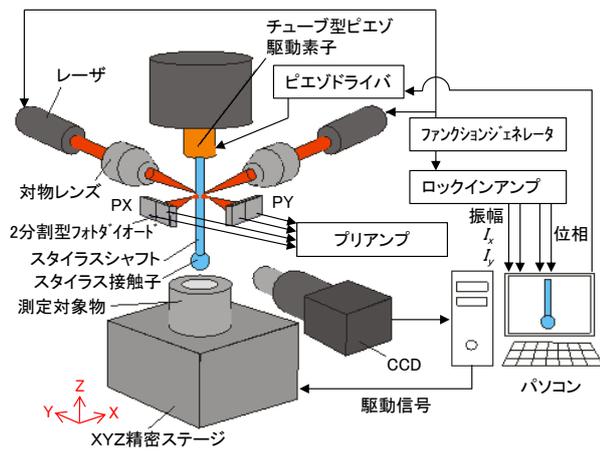


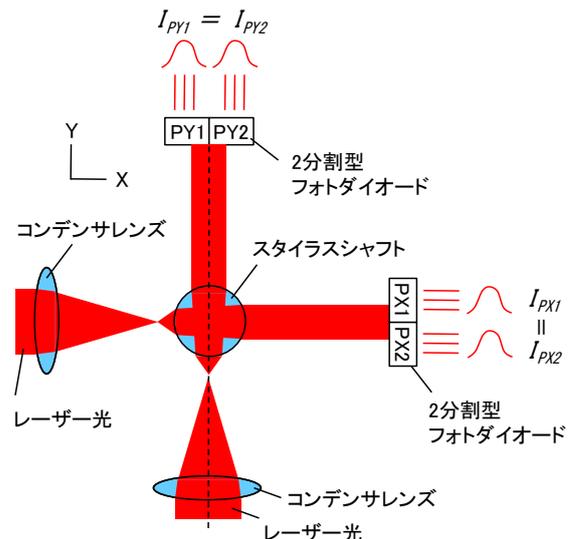
図2 微細3次元測定装置の概略図

図3は、図2のXY平面のスタイラスレーザー照射部の断面図を基に、微細3次元測定装置の測定原理を示した図である。スタイラスシャフトを透過したレーザー光は、スタイラスを通して反対側に設置された2分割型フォトダイオードで受光し、電圧値に変換される。なお、この際に、スタイラスシャフトはロッドレンズとして作用しており、スタイラスの変位を拡大する効果がある。X方向の2分割フォトダイオードで受光した光量を  $I_{PX1} \cdot I_{PX2}$ 、Y方向の2分割フォトダイオードで受光した光量を  $I_{PY1} \cdot I_{PY2}$  とすると、接触子が測定対象面に接触していない初期状態では、 $I_{PX1}$ 、 $I_{PX2}$  および  $I_{PY1}$ 、 $I_{PY2}$  は同一強度に保たれている (図3(a))。一方、接触子が測定対象面に接触し、スタイラスシャフトがたわんで変位すると  $I_{PX1}$ 、 $I_{PX2}$  および  $I_{PY1}$ 、 $I_{PY2}$  の光強度に差が生じ、接触方向を検出できる (図3(b))。ここで、X方向変位の出力  $I_x$ 、Y方向変位の出力  $I_y$  を式(1)、(2)で定義する。

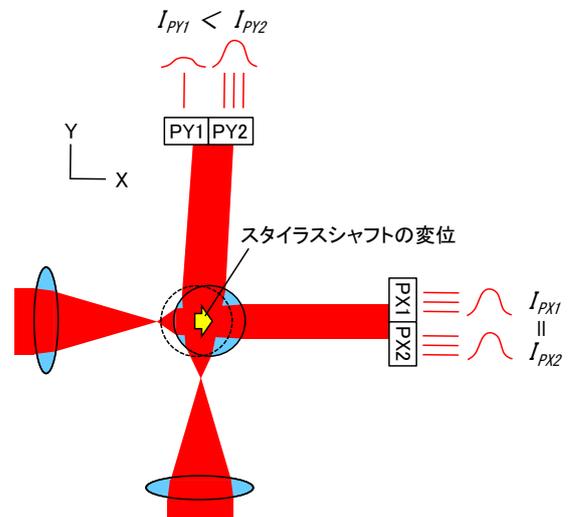
$$I_x = I_{PY1} - I_{PY2} \quad (1)$$

$$I_y = I_{PX1} - I_{PX2} \quad (2)$$

出力  $I_x$ 、出力  $I_y$  は、半導体レーザーを変調するファンクションジェネレータの信号を参照信号とし、ロックインアンプを用いて同期検波することで各種ノイズを取り除いている。一般的にはスタイラス接触子の測定対象面への接触を検知するセンサ機構に力を伝えるためにスタイラスシャフトの剛性を高くする必要があるが、本測定原理ではスタイラスシャフトのたわみを、レーザーを用いて非接触で間接的に検出する方式であるため、剛性が低く小径で長いスタイラスを使用可能となり、高アスペクト比の穴や溝などの測定に対応可能である。



(a) 初期状態



(b) X方向にスタイラスが変位した状態

図3 微細3次元測定装置の測定原理

### 3 スタイラスの製作

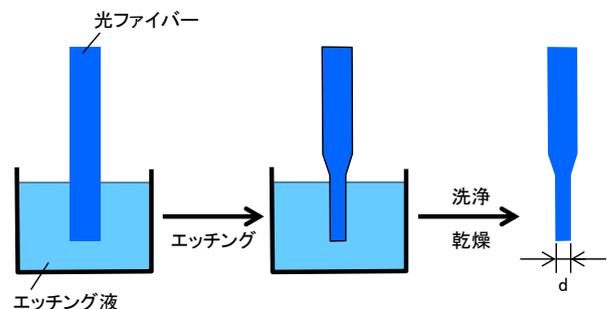


図4 ウェットエッチングによるファイバの小径化

微細3次元測定装置で使用するスタイラスは、図4に示した模式図のように石英ガラス製光ファイバをウェットエッチングにより小径化し<sup>2)</sup>、その後、図5のよ

うにCO<sub>2</sub>レーザを照射して先端を溶融させ、先端球を形成させることで製作する<sup>3)</sup>。本研究では、エッチング液の種類と温度について検討した。

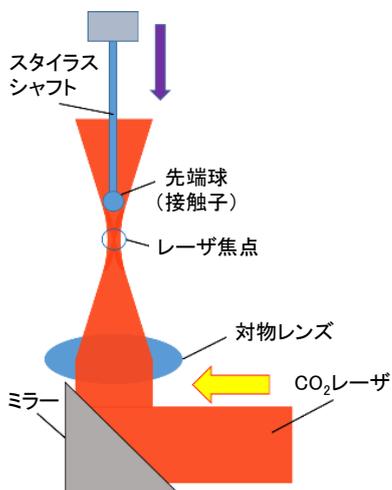


図5 CO<sub>2</sub>レーザ照射による先端球の形成

### 3-1 エッチング液の検討

石英ガラス製光ファイバ（ソーラボ製FG105LCA）の被覆樹脂を剥離し、光ファイバースライドカッターを用いて切断した。この光ファイバの先端約1 mmを常温のフッ化水素酸12%水溶液に浸漬させた。所定時間(60, 120, 180, 240, 300, 360 min)後に光ファイバを引き上げ、純水にて洗浄・自然乾燥後、ハイロックス製マイクロスコープKH-7700を用いて、スタイラスシャフトの直径(図4中dの長さ)を計測した。

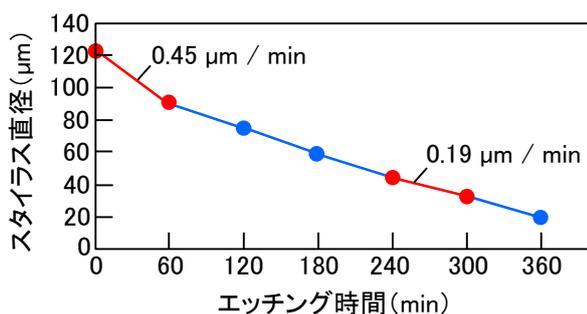


図6 濃度12%のフッ化水素酸でのエッチング結果

次に、フッ化水素酸よりも安全性に優れたエッチング液として、毒物及び劇物に該当しない、フロステック製のQE-CL3Nを用いてエッチングを行った。フッ化水素酸水溶液の代わりに40℃に保持したQE-CL3Nを用い、前節と同様に光ファイバの小径化について検討した。その結果、開始から30 minまでの平均のエッチング

速度は約1.3 μm/minであるが、75 minから85 minまでの平均エッチング速度は1.2 μm/minと約8%の低下に過ぎなかった。このことからQE-CL3Nは時間経過による濃度変化が少ないと予想され、エッチングの制御がしやすい安定した液体であることが分かった。

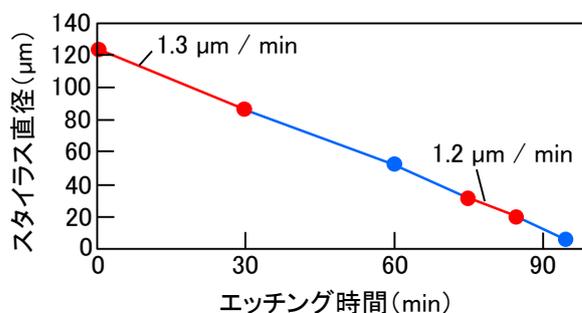


図7 温度40℃のQE-CL3Nでのエッチング結果

### 3-2 エッチング液温度の検討

エッチング速度は温度に依存すると考えられるが、フッ化水素酸水溶液を加温すると有害性のガスが発生するため、通常加温して使用しない。一方、QE-CL3Nは安定したエッチング液であり、加温が可能であることから、エッチング温度とエッチング速度の関係について検討した。

図8にQE-CL3Nのエッチング温度とエッチング速度の関係を示す。エッチング速度が液温に対して指数関数的に変化しており、アレニウスの式とよく一致することが明らかとなった。よって、QE-CL3Nを用いることで、エッチング温度を変えることによりエッチング速度を制御できること考えられる。

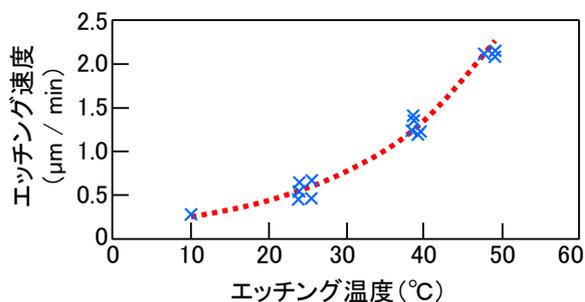


図8 QE-CL3Nのエッチング温度と速度の関係

### 3-3 CO<sub>2</sub>レーザ照射による先端球の製作

前節と同様の方法で石英ガラス製光ファイバの先端をエッチングし、直径10 μm, 5 μm, 2.5 μmの3種のスタイラスシャフトを製作した。

既報<sup>3)</sup>に従い、この小径化したスタイラスシャフト

の先端にCO<sub>2</sub>レーザを照射し、先端部を熔融させた。すると、熔融した石英ガラスが表面張力によって球を形成し、先端球付きのスタイラスが製作できた。

of The Thirty-Second Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering, Vol. 67, pp. 305-310(2017)

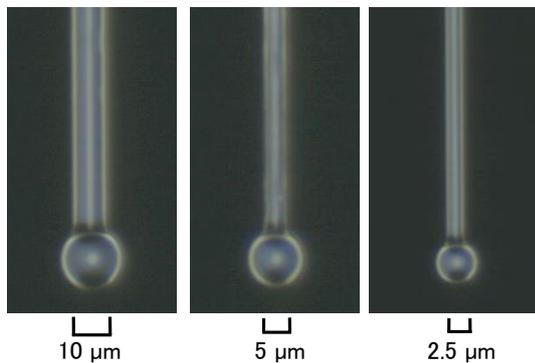


図 9 製作した微細3次元測定装置用スタイラスのマイクロスコープ像

#### 4 まとめ

高アスペクト比の微細深穴の内部形状を非破壊で測定可能な微細3次元測定装置に使用する、石英ガラス製スタイラスの作製方法について検討したところ、市販の石英ガラス製光ファイバの被覆樹脂を剥離後、先端をフッ化水素酸水溶液に浸漬させることで小径化し、極細のスタイラスシャフトが作製できた。また、フッ化水素酸水溶液よりも安全で濃度の経時変化が少ないエッチング液についても検討し、温度を変えることでエッチング速度の制御が可能であることが明らかとなった。その後、CO<sub>2</sub>レーザを照射して先端を熔融させて先端球を形成させることで、微細3次元測定装置用の先端球付き極小スタイラスが製作できた。

#### 謝辞

本研究の一部は、戦略的基盤技術高度化支援事業にて実施した。

#### 5 参考文献

- 1)H Murakami, A Katsuki, T Sajima, T Suematsu : Meas. Sci. Technol, 25, pp. 1-7 (2014)
- 2)H Murakami, A Katsuki, T Sajima, K Uchiyama : Int. J. of Automation Technology, Vol. 11, No. 5, pp. 699-706(2017)
- 3)K Uchiyama, H Murakami, A Katsuki, T Sajima, T Yamamoto, T Nagata, K Fujiyoshi : Proceedings