

CO₂ レーザを用いた微細三次元形状測定機用 極小径光ファイバスタイラス加工技術の開発

北九州市立大学 国際環境工学部 機械システム工学科

准教授 村上 洋

(平成 28 年度 一般研究開発助成 AF-2016208)

キーワード：CO₂ レーザ，微細形状測定，光ファイバ

1. 研究の目的と背景

近年，微細金型，各種ノズル穴，光通信・医療機器，半導体・MEMS・マイクロマシン等の分野において，立体的で微細な三次元形状部品が増加しており，加工の高精度化・製品の高機能化のためこれらを精密に測定するニーズが増加している．例えば，TSV (Through-Silicon Via，シリコン貫通電極)⁽¹⁾は半導体チップの内部を垂直に貫通する電極用の微細穴（直径 10 μm ，深さ 100～500 μm ）であるが，エッチングによる微細穴加工条件最適化のため，その側壁粗さの測定が要求されている．従来技術では測定が不可能な直径が 10 μm 以下の微小径穴や溝，側壁粗さの測定に対応可能な微細三次元形状測定装置実用化のためには，スタイラスの小型化・小径化（直径 1 μm 以下）と高機能化（高分解能，低測定力）が必要である．そこで我々は，極小径（直径数 μm 以下）の光ファイバスタイラスを用いた微細三次元形状測定機を開発中である．図 1，図 2 に，測定装置の概略図およびスライラスレーザ照射部の概

射部断面図を示し，光ファイバプローブの測定原理を示す．光ファイバの先端を溶融させて製作した接触子が固定されたものをスタイラスとして用いる．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．また，スタイラスに対して約 60 度傾いた位置に波長 405 nm の半導体レーザが設置されており，スタイラスシャフトに向かって XY 方向から集束レーザ光を照射する．レーザ光はプリズム内を通り上方へと反射され，スタイラスシャフトに照射される．スタイラスシャフトを透過した光は，スタイラスを間にして反対側に設置された 2 組の 2 分割型フォトダイオードで受光する．図 2 に示すように集束レーザ光を斜め上方より照射後，プリズムで反射させレーザ光をスタイラスの斜め下方向から照射することで，レーザ光および 2 分割型フォトダイオードをスタイラスのレーザ照射部よりも上方に設置することが可能になり，測定対象物との干渉を回避できる．ここで，スタイラスシ

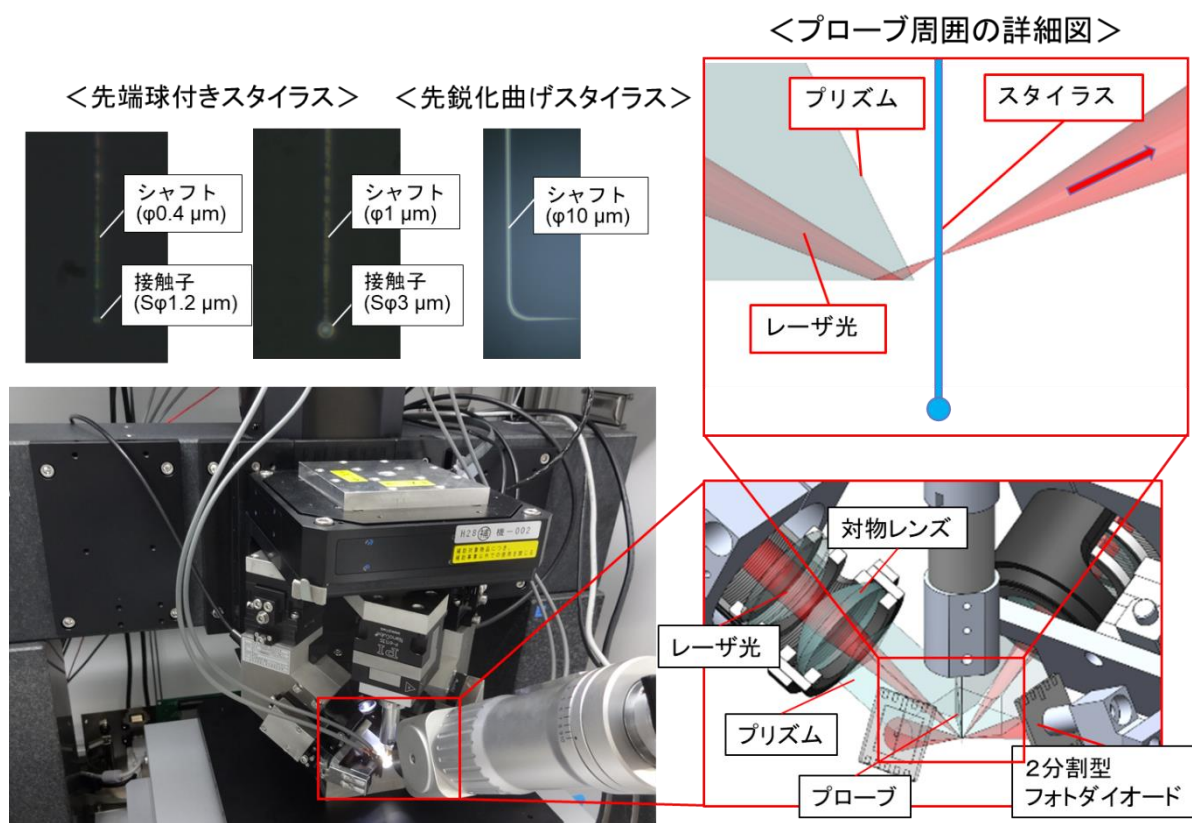


図 1 微細形状測定機概略図

シャフトはロッドレンズとして利用することで、スタイラスの変位を拡大している。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、図3 (a)に示すようにそれぞれ I_{PX1} , I_{PX2} , I_{PY1} , I_{PY2} (V)とする。接触子が測定対象面に接触していない状態では、 I_{PX1} , I_{PX2} および I_{PY1} , I_{PY2} は同一強度に保たれているが、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み、スタイラスシャフトのレーザ照射位置が変位すると 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。例えば、図3 (a)の初期状態では、 $I_{PX1} = I_{PX2}$ および $I_{PY1} = I_{PY2}$ であるが、図3 (b)に示すように X 方向にプローブ用ファイバが変位すると、光ファイバ内部を透過するレーザの屈折方向が変わるため $I_{PX1} = I_{PX2}$ および $I_{PY1} > I_{PY2}$ となる。ここで、 I_{PY1} および I_{PY2} を用いた X 方向変位の出力 I_X (V)、 I_{PX1} および I_{PX2} を用いた Y 方向変位の出力 I_Y (V)を式(1)、(2)で定義する。出力 I_X 、出力 I_Y は、半導体レーザ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。測定対象物表面を XYZ ピエゾステージを用いてスタイラスで順次走査することにより測定する。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であり、高アスペクト比の穴や溝などの測定に対応可能である。

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

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

ここで、上記に記載した微細壁面粗さなどの測定要求に対応するためには、先端が球形状のスタイラスや極小径で先端が曲り鋭利なスタイラスが必要である(粗さ測定機などで一般的に用いられる円錐状のスタイラスでは穴や溝の測定はできない。)そこで、フッ化水素酸によるウェットエッチングとCO₂レーザを用いることで直径が1 μm以下のスタイラスシャフトの先端部を図1に示す形状に短時間で高精度に製作可能な加工方法の開発を行った。

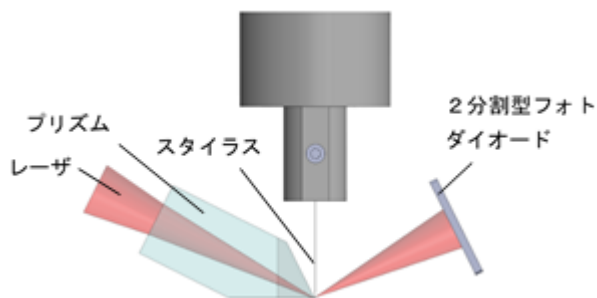


図2 スタイラスレーザ照射部概略図

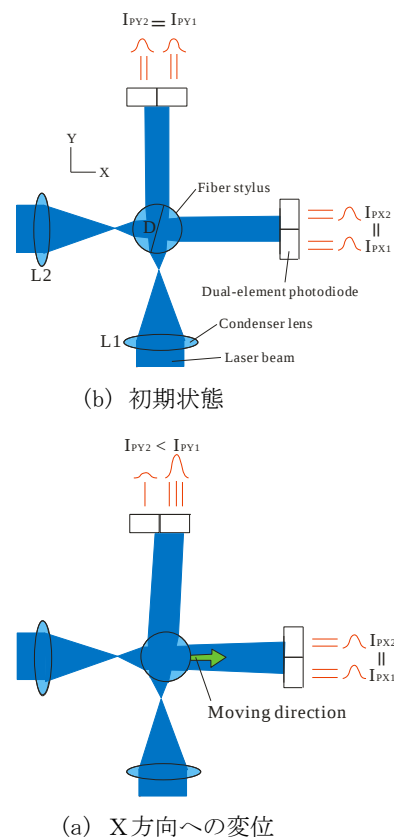


図3 測定原理

2. 実験方法

2・1 スタイラス小径化・先端先鋭化技術の開発

スタイラスシャフトは各種酸を用いたウェットエッチングにより直径 125 μm の光ファイバを小径化し製作している。図4に示すように温調器にエッチング液が入って容器を設置し、光ファイバスタイラスの先端を浸漬してエッチングを行った。

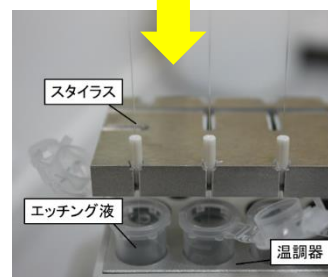


図4 エッチング装置

図5にエッチング温度とエッチング速度の関係を示す。エッチング液の温度と平均のエッチング速度は図4のように指数関数による近似が可能となる。つまり、温度に対して指数関数的に反応速度が上昇しており、アレニウスの式ともよく一致していることが分かる。

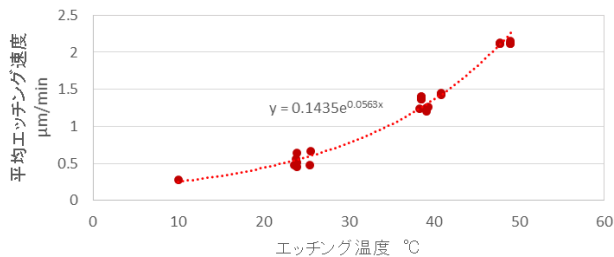


図5 エッチング温度と速度の関係

このエッチング温度および時間を制御することにより、図6に示すように直径が約 $0.4\ \mu\text{m}$ のスタイラスシャフトを製作することができた。また、先端部をエッチング液に浸漬し、表面張力により図7に示す先端半径約 $25\ \text{nm}$ の先鋭化スタイラスを製作可能であることを確認した。

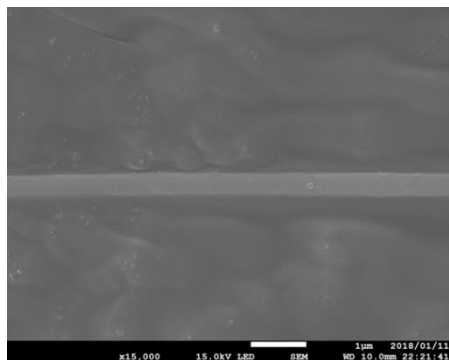


図6 製作したスタイラスシャフト例

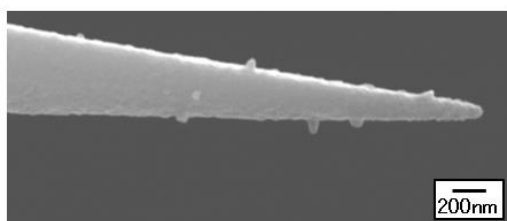


図7 製作した先鋭化スタイラスの例

2・2 CO₂ レーザを用いたスタイラス先端球成形および曲げ加工技術の開発

CO₂ レーザを用いたスタイラス先端球の製作方法および曲げ加工方法について紹介する。図8に CO₂ レーザによる接触子製作装置の概略図を示す。前項記載のエッチング方法で製作したスタイラス先端部に対物レンズによって集光した CO₂ レーザを照射し溶融させ、表面張力により接触子を成形する。スタイラスの鉛直下方向から CO₂ レーザを照射して接触子を形成する。図9に製作したスタイラスの写真を示す。図9 (a)はスタイラスシャフト直径

約 $0.4\ \mu\text{m}$ 、接触子直径約 $1.2\ \mu\text{m}$ 、図9 (b)はスタイラスシャフト直径約 $1\ \mu\text{m}$ 、接触子直径約 $3\ \mu\text{m}$ 、図9 (c)はスタイラスシャフト直径約 $2.5\ \mu\text{m}$ 、接触子直径約 $5\ \mu\text{m}$ 、である。直径約 $0.4\ \mu\text{m}$ の極小径のスタイラスシャフトでも CO₂ レーザを用いることで球形状に成形可能であることを確認した。

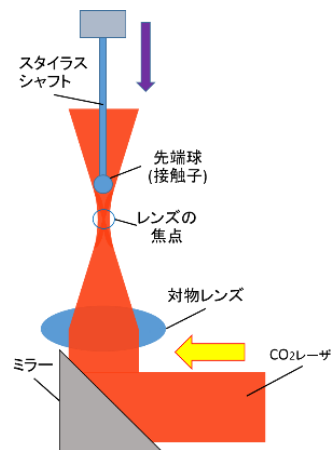
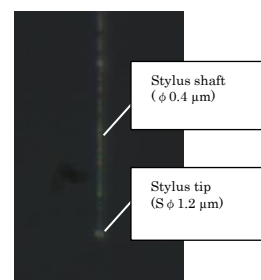
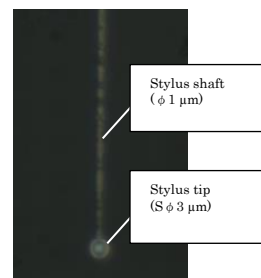


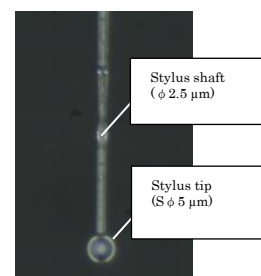
図8 CO₂ レーザによる先端球製作方法



(a)



(b)



(c)

図9 製作したスタイラス

次に、微細壁面粗さなどの測定要求に対応するためには、極小径で先端が曲り鋭利なスタイラスが必要である。2.1項で先鋭化したスタイラスシャフトの一部を CO₂ レーザで加熱することにより先端を曲げることが可能である。図 10 に先端を曲げたスタイラスの写真を示す。

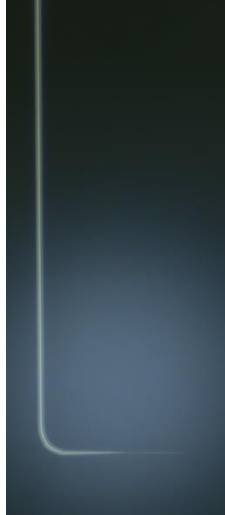


図 10 先鋭化曲げスタイラス

3. 結言

本研究では、ウェットエッチングおよび CO₂ レーザを用いた微細三次元形状測定機用極小径光ファイバスタイラスの製作方法について検討した。その結果、直径約 0.4 μm のスタイラスシャフトや先端球が約 1 μm のスタイラス、および粗さ測定用の先鋭化曲げスタイラスが製作可能であることを確認した。今後は、表面間力によるスタイラス先端球の測定対象面への付着を防止するため、スタイラスへの各種コーティング手法の開発について取り組む予定である。

謝 辞

本研究の一部は公益財団法人天田財団、戦略的基盤技術高度化支援事業、および科学研究費補助金を受けて行ったことを記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) Victor Vartanian, et al., Metrology needs for through-silicon via fabrication, J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS 13 (1) 011206, (2014) 1-9.