

光ファイバスタイラスを用いた微細三次元形状測定機の開発 —スタイラスに付着した異物の洗浄方法に関する研究—

研究報告者 村上 洋

プロフィール



最終学歴 平成20年3月
九州大学大学院工学府
知能機械システム専攻 博士後期課程 修了

専門分野 加工計測

学 位 博士 (工学)

所属団体 北九州市大学
国際環境工学部 機械システム工学科

役 職 名 准教授

今後の抱負

近年、微細金型、各種ノズル穴、半導体等の分野において、立体的で微細な三次元形状部品が増加しております。微細形状測定で使用するスタイラスの接触子と測定対象物の間に異物が位置している場合、その異物の厚みの分だけ測定誤差となります。本研究では超音速流れを用いることで効率的かつダメージレスで微細形状測定用スタイラスに付着した異物を除去することを目的として超音速ノズル形状を設計製作後、性能評価試験を実施しました。その結果、超音速ノズルを用いることでスタイラスに付着した異物をほぼ除去可能であることを確認しました。しかし、一部でスタイラス接触子表面にダメージが見られたため、今後は接触子表面の損傷を回避する方法を検討すると同時により直径の小さい異物についても評価し本手法の有用性を確認する予定です。

1. はじめに

近年、微細金型、各種ノズル穴、半導体等の分野において、立体的で微細な三次元形状部品が増加しており、これらの計測技術の進展なしでは微細加工技術の高度化は実現できないことから、これらを精密に測定する重要性・ニーズは増加している。例えば、半導体チップの内部を垂直に貫通する電極用の微細穴であるTSV（直径10 μm以下、深さ100～500 μm）では、エッチングによる微細穴加工条件や、穴あけ後のめっき条件最適化のため、その側壁粗さや穴内部形状の非破壊での測定が要求されている。微細形状の測定法に関しては国内外で様々な方法が提案されているが、現状では、上記要求を満たす直径が数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形状の計測技術は確立されておらず、特に深穴や深溝を有する形状になると測定は極めて困難となる。マイクロ部品の精度測定では、スタイラスと測定対称面との接触をいかに検知するか、また、微小なスタイラスをいかに加工するか、ということが、最も重要な要素技術として挙げられる。（この他にも測定対象物を走査する位置決めステージなどが要素技術として挙げられるが、開発が進み現状では十分な精度を達成しつつある。）

我々の研究室ではこれまでに、エッチングにより小径化した直径2 μmのガラス製光ファイバの端面に直径5 μmの接触子をレーザ加工により成形したものをスタイラスとして用いた微細形状測定機を試作し、約3 nmの測定分解能で直径7 μmの微細穴の測定が可能であることを確認した。図1に測定機の概略図を示す。光ファイバスタイラスをロッドレンズとして用いて、シャフト側面に2方向からレーザを照射する。スタイラス接触子（先端）が測定対称面へ接触すると、シャフトがたわみ、その結果シャフト内部を透過する光の屈折角が変化し、レーザの射出方向が変わる。この変化を2分割型フォトダイオードで検出することで、微細形状を測定する。本手法を用いたこれまでの研究結果により、スタイラスと測定対称面との接触をいかに検知するか、のセンシング技術については確立した。

しかし、本スタイラスを実用化するにあたりスタイラス接触子（測定の際に実際に測定対象物と接触する部位）への異物の付着を考慮する必要がある。スタイラス製作（光ファイバをエッチングにより小径化し、接触子はレーザで溶融し表面張力により丸く成形）直後は図2に示すようにスタイラスへの異物の付着は見られないが、スタイラス運搬の際や測定中に空気中や測定対象物からの異物が付着する。図3に異物が付着したスタイラスの写真を示す。図4に示すように、異物が付着したスタイラスで測定を行うとスタイラス接触子と測定対象物の間に異物が位置している場合、その異物の厚みの分だけ測定誤差となる。また、このような異物は校正では補正できない（異物の位置は移動、分離、再付着により安定しない）。

このような異物の付着は未使用のスタイラスでも測定環境によってはスタイラス設置の際に付着する可能性があるため、測定直前に洗浄する必要がある。一般の三次元測定機のスタイラスは超音波洗浄機等を使用してスタイラスの異物を除去することが多いが、このように小径のスタイラスの場合、付着した異物は超音波洗浄機で除去することはできない。また、本スタイラスは直径が数 μm と小径で剛性が小さいため洗浄方法にも工夫を要する。他にも凍結微粒子をスタイラスに衝突させ、その運動エネルギーにより除去する方法なども提案されているが、本スタイラスは小径で剛性が低いため適用することができない。そこで、本研究では超音速流れを用いることで効率的かつダメージレスで異物を除去することを目的とし、ノズル形状を設計製作後、性能評価試験を実施した結果について報告する。

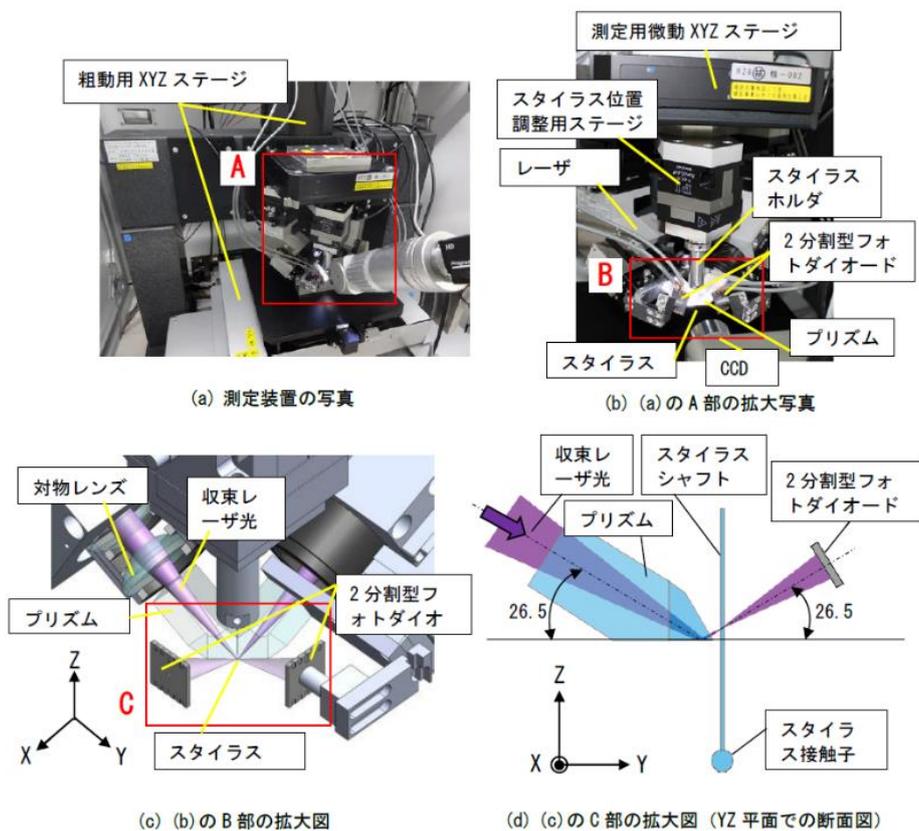


図 1 微細三次元形状測定機

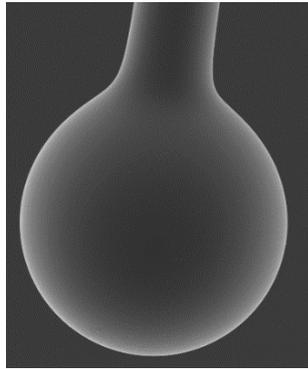


図2 製作直後のスタイラス接触子

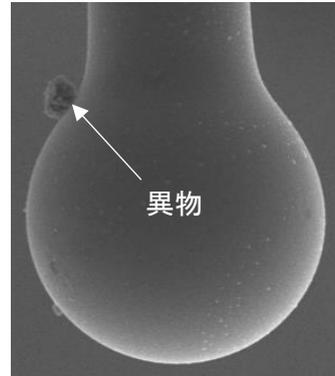


図3 異物が付着したスタイラス接触子

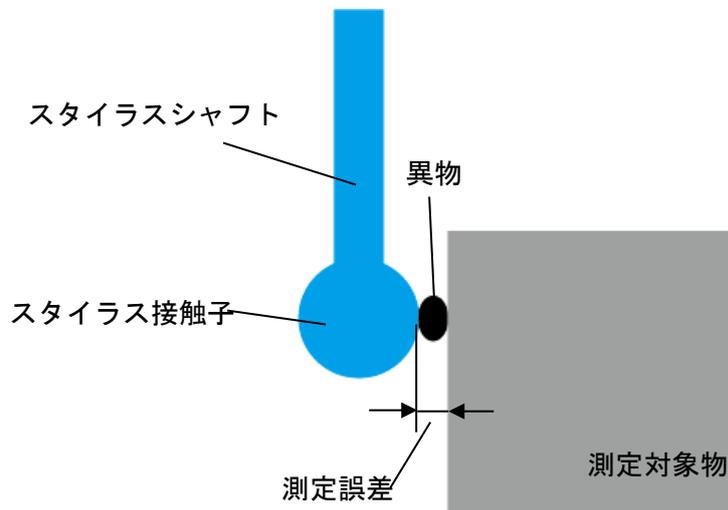


図4 スタイラスに付着した異物が測定精度に与える影響

2. 超音速ノズルの設計および製作

異物の直径が数十 μm 以下になると、ファンデルワールス力、静電気力、液架橋力などの表面間力の影響が強くなり、この表面間力が重力よりも大きくなる。微粒子や繊維などはこの大きさよりも小さいため、容易にスタイラスに付着する。この表面間力は湿度などの環境要因や測定面の粗さに影響される。超音速流れでスタイラスから粒子を除去するためには、まず表面間力による付着力の大きさを知る必要がある。図5に微粒子（異物）の直径と表面間力（ファンデルワールス力： F_v 、静電気力： F_e 、液架橋力： F_l 、の合計）との関係を示す。次に微粒子をスタイラスから引き離すために必要な力を考える。単純化のため、球状の粒子と平面の基板の場合を考えると、図6に示すように流れ場にある微粒子には揚力が働き、この

揚力が表面間力よりも大きくなると微粒子を壁面（スタイラス表面）から引き離すことができる。この揚力はベルヌーイの定理より計算することができ、図5に各流速の揚力を示す。流速が300 m/s以上の場合、直径10 nm以上の粒子に働く揚力が表面間力よりも大きくなるため直径10 nm以上の粒子はスタイラスから剥離させることができると考えられる。スタイラスの測定の繰り返し性は約30 nmであることから直径10 nm程度以上の微粒子が除去することを目標とする。そこで、今回は余裕をみて直径6 nm以上の微粒子を除去可能となる流速約400 m/s以上の超音速ノズルを設計する。特性曲線法を用いてノズル内流れ場を解析し、ノズル輪郭形状を決定した。

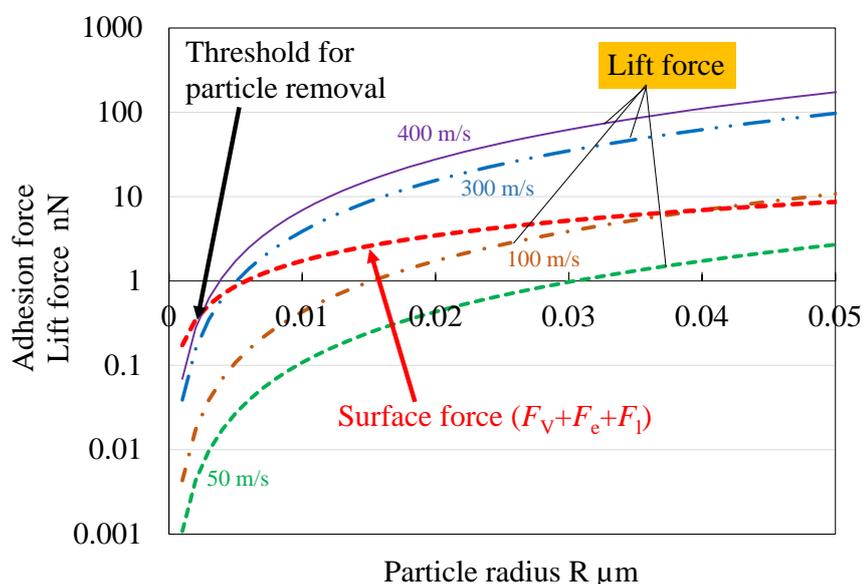


図5 微粒子直径と表面間力，揚力の関係

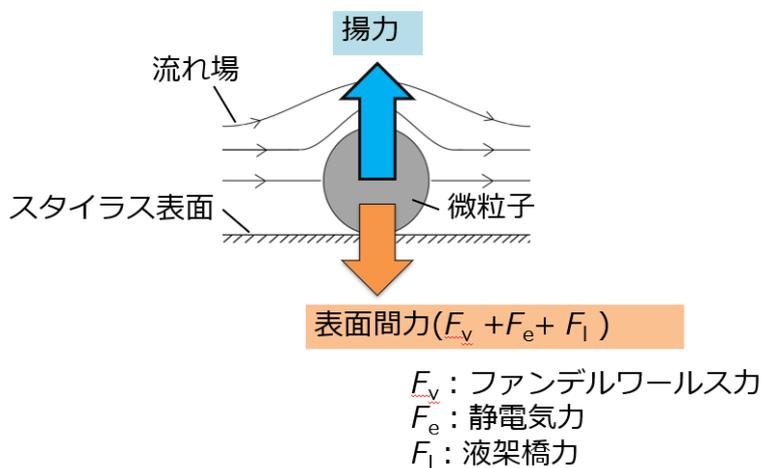


図6 表面間力と揚力の関係

図7に製作したノズルの形状を示す。円形状のスロート部直径は5 mmであり、スロート部中心を原点とする。図8に数値流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）解析結果を示す。スロート部より下流側では400~500 m/s程度の流速が得られていることが確認できる。次に製作したノズル内部の流速を測定するため、ノズル内部の全圧を図9に示す直径1 mmのピトー管を用いて測定した。ピトー管はノズル穴中心軸上に配置した。測定後、レイリーのピトー管公式を用いて速度を算出した。Z=5 mm付近で約430 m/sの流速となっており、目標とする流速は得られていることが確認できた。

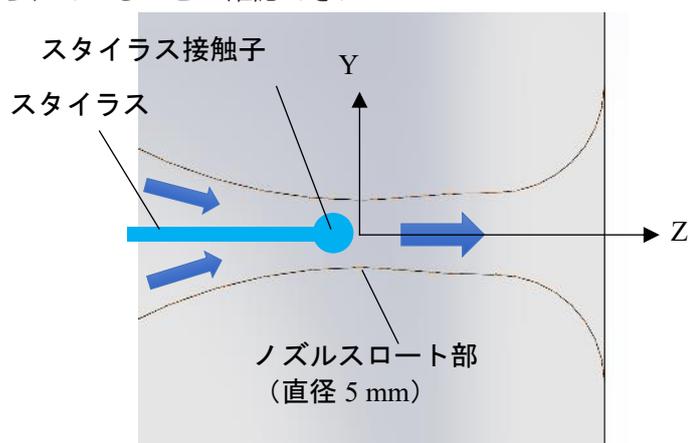


図7 超音速ノズル

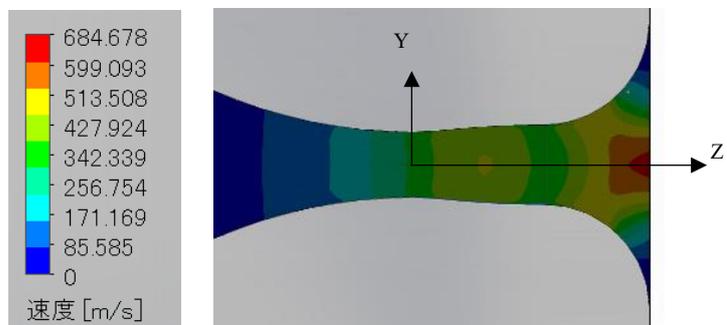


図8 CFD 解析結果

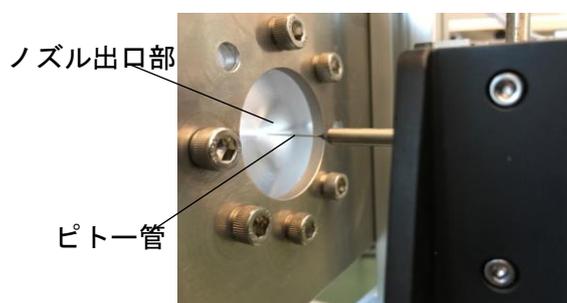


図9 ピトー管を用いた流速測定

3. 洗浄方法および結果

次に実際に直径 $2\ \mu\text{m}$ の微粒子を接触子付着させた直径 $30\ \mu\text{m}$ のスタイラスを図10に示すように固定し、最大流速で10秒間空気を流した後のスタイラスの状態を確認した。スタイラス接触子の位置 $Z=-4\sim 2\ \text{mm}$ の範囲では破損は見られなかったが、図10に示すように $Z=2\ \text{mm}$ 以上ではスタイラス先端部に破損が確認された。これはノズルスロート部より下流側で発生する衝撃波の影響、スロート部より下流側では流れが複雑化しスタイラスに振動が発生、流速の増加によるスタイラス接触子へかかる力が増加したことなどが原因であると考えられる。

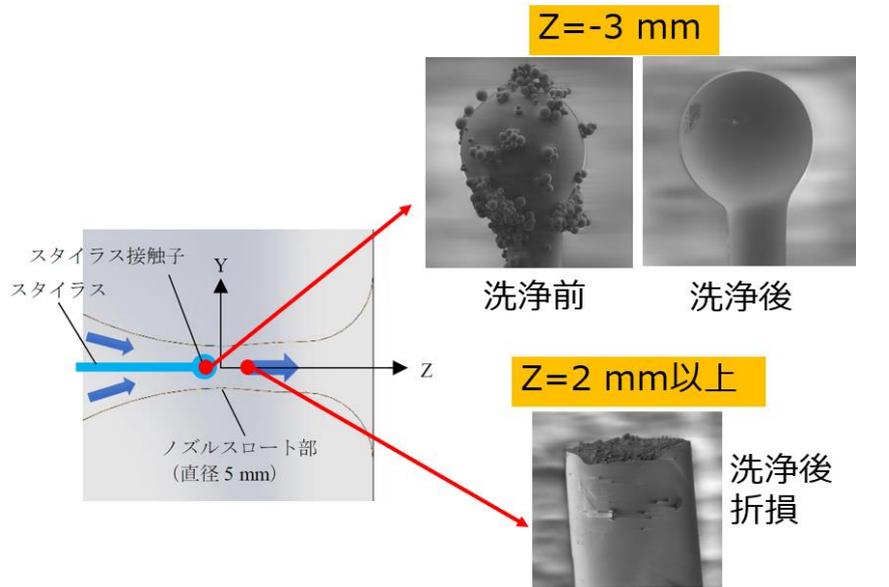


図10 洗浄結果（ノズル直径5 mm）

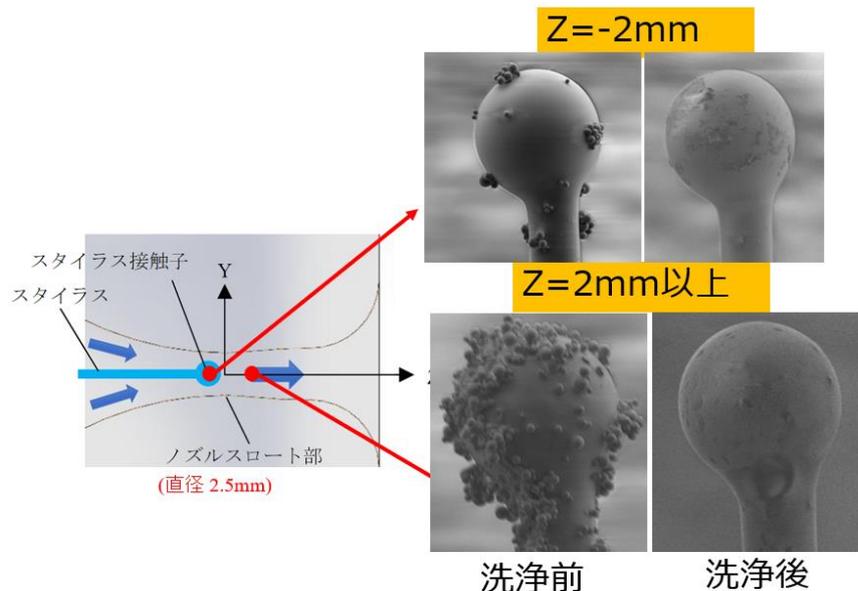


図11 洗浄結果（ノズル直径2.5 mm）

また、ノズル直径が洗浄に与える影響を調べるために直径2.5 mmのノズルを製作し、同様の実験を行った。図1 1に洗浄結果を示す。直径2.5 mmのノズルでは折損することなく洗浄が可能であったが、一部でスタイラス接触子表面に損傷が見られた。

4. その他の洗浄方法の検討結果

超音速ノズルによる洗浄以外にも、超音波洗浄、マイクロナノバブル、超音波加振による方法に関して洗浄試験を実施したが超音速ノズルを超える洗浄効果を得られなかったため詳細は省力する。

5. まとめ

本研究では超音速流れを用いることで効率的かつダメージレスで微細形状測定用スタイラスに付着した異物を除去することを目的とし、ノズル形状を設計製作後、性能評価試験を実施した。その結果、超音速ノズルを用いることで異物（直径2 μm の微粒子）をほぼ除去可能であることを確認した。しかし、一部でスタイラス接触子表面にダメージが見られたため、今後は接触子表面の損傷を回避する方法を検討する必要がある。また、より直径の小さい異物についても評価する予定である。

6. 謝辞

本研究は、公益財団法人三井金型振興財団による研究助成により実施されたことを記し、謝意を表す。