微小径穴の内壁・直径精密計測*

Precise Measurement of Micro Hole Accuracy

村上 洋** 甲木昭雄*** 鬼鞍宏猷**** 佐島隆生***

Hiroshi MURAKAMI, Akio KATSUKI, Hiromichi ONIKURA and Takao SAJIMA

Key words measurement, micro hole, diameter, roundness, straightness, cylindricity, surface roughness

1. はじめに

直径が 100 μm 以下の微小径穴は、自動車用の燃料噴射ノズル、インクジェットノズル、化繊ノズルなど各種ノズル穴、プリント基板穴などの電子関連製品、フェルルなどの光通信機器、マイクロニードルアレイ、注射針などの医療機器などに使用されている。これら微小径深穴の高アスペクト比（穴深さ/穴径）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。例えば、穴直径が 70~200 μm の自動車用燃料噴射ノズル穴は現在主に放電加工を用いて加工されており、穴の形状や穴内壁の表面粗さなどが噴霧化・燃焼に大きく影響する。また、インクジェットノズル穴では同じ直径でもインクの出方が異なるため詳細な穴内部形状の測定が要求されている。

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、真直度、円筒度、表面粗さなどは評価できない。また、穴入口部の測定においてもバリや面とり、加工に伴う穴入口部拡大、照明手法などの影響により輪郭画像が不明瞭となり測定精度が悪化する。

これまで微小径穴内部形状の測定には、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ず、また穴形状の全てを測定することは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も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ブが必要となる。しかし、プロブが小径化するとその製作が非常に難しく高価なものとなり、またプロブ先端球の測定対象面への接触に伴う微小力を検出するセンサ機構の開発が非常に困難となる。また、プロブの小径化によりスタイラスシャフトの剛性が低下し、測定精度が低下する。

このような問題点を解決するためこれまでに直径 100 μm 以下の微小径穴を測定するさまざまな手法が考案されている。本稿では、これまでに提案された研究開発事例について筆者らの研究成果も含めて紹介する。

2. 微小径穴測定法の研究開発状況

2.1 非接触式測定

非接触式の微小径穴測定に関してはこれまでに、丸山、秋山らにより通り穴の測定では光を穴内壁に反射させその反射光を穴出口で検出する光学的方式¹⁾²⁾が報告されている。また、近年では松井らにより図 1 に示すタンデム低コヒーレンス干渉および直径 30 μm の 45° カットファイバを用いた内径の非接触測定手法³⁾が提案されている。遠隔操作により測定が可能のため、製造現場の校正などへの応用も想定されている。この他、流量センサや音響センサを用いた穴径の測定手法が提案されている。

2.2 接触式測定技術

振動させたスタイラスを接触検知に用いた技術として、

*原稿受付 平成 24 年 3 月 22 日

**正 会 員 北九州市立大学国際環境工学部（福岡県北九州市若松区ひびきの 1-1）

***九州大学大学院工学研究院（福岡県福岡市西区元岡 744）

****正 会 員 株式会社キラ・コーポレーション（愛知県西尾市吉良町富好新田中川並 39-1）

村上 洋

2001 年九州大学大学院修士課程修了。富士写真フイルム株式会社、福岡県工業技術センター、鹿児島大学、九州産業大学を経て 2012 年より北九州市立大学国際環境工学部准教授。微小径穴計測、加工計測の研究に従事。博士（工学）。技術士（機械部門）。

甲木昭雄

1974 年熊本大学大学院修士課程修了。同年九州大学助手。2008 年同助教。時系列信号による計測技術、精密深穴加工、深穴加工工具の知能化、深穴計測技術の研究に従事。工学博士。

鬼鞍宏猷

1971 年九州大学大学院修士課程修了。同年、日本電信電話公社武蔵野電気通信研究所。1987 年九州大学教授。2010 年名誉教授。2011 年より株式会社キラ・コーポレーション顧問。穴加工、マイクロ加工、超音波振動加工の研究に従事。工学博士。

佐島隆生

1989 年九州大学大学院修士課程修了。同年九州大学助手。2008 年同助教。加工計測（画像処理、ニューラルネットワーク、GA 応用）、CFRP 製造技術の研究に従事。博士（工学）。

図1 タンデム低コヒーレンス干渉および45°カットファイバを用いた測定装置模式図³⁾

図2 Opto-Tactile Sensor¹¹⁾

増沢, 山本らによりバイブロスキャニング方式のプロブを用いた研究⁴⁾⁵⁾が報告されている。振幅数 μm で加振させたスタイラスと測定対象面間に電圧を印加した状態で電流を監視することで接触を検知できる。接触時間の振動周期に対するデューティ比を求めることによりスタイラスと測定対象面間の距離が算出可能である。接触子直径 $34\mu\text{m}$ のスタイラスを使用して、最小穴径 $40\mu\text{m}$ までの測定が可能であることが確認されている。さらに、非導電体の測定が可能なるプロブ⁶⁾も開発されている。測定力は 0.8mN ⁵⁾である。また、日高らにより超音波振動させたプロブの接触に伴う振幅変化を用いた研究⁷⁾が報告されている。スタイラスを振動させる加振回路と振動状態をモニタリングする検出回路から構成されており、接触に伴う振動状態の変化を検出回路により検知する原理となっている。スタイラス接触子の直径は $30\mu\text{m}$ 、長さは 3mm であり高アスペクト比の微小径穴測定に対応している。また、 $0.15\mu\text{N}$ と低測定力であり測定対象面を傷つけることなく三次元形状の測定が可能である。他の加振スタイラスを用いた例として、Bauza らは、直径 $7\mu\text{m}$ の炭素繊維(長さ 5mm)をスタイラスとして用いたプロブを開発してい

図3 Fiber optical trapping probe¹³⁾

る⁸⁾。スタイラスに接触子はなく、1軸方向(測定対象面の法線方向)に加振させ、その振幅量($7\mu\text{m}$ 以下)を仮定の接触子半径として利用している。Claverley らはスタイラスが取り付けられたはりのたわみ部に加振用と検出用の piezo 素子を設置したプロブ(スタイラス接触子直径 $70\mu\text{m}$ 、長さ 2mm)を提案している⁹⁾。

画像を用いた例では Schwenke らがスタイラス接触子にレーザー光を照射し、その反射光を CCD センサで測定するプロブを開発している¹⁰⁾。図2にその原理図を示す。接触子直径 $10\sim 100\mu\text{m}$ 、測定力 $1\sim 10\mu\text{N}$ での測定が可能である¹¹⁾。しかし、穴が深くなると反射光が CCD センサまで戻らなくなるので深穴の測定はできない(直径 $214\mu\text{m}$ の穴で深さ $800\mu\text{m}$ まで)。同一点測定の繰り返し精度は 50nm である。また、スタイラスシャフトのひずみを CCD 画像センサで測定するプロブ¹²⁾が Muralikrishnan らにより報告されている。スタイラスシャフト直径 $50\mu\text{m}$ 、長さ 20mm 、接触子直径 $75\mu\text{m}$ 、接触力 $0.2\mu\text{N}$ である。直径 $100\mu\text{m}$ 穴測定において拡張不確かさは 70nm ($k=2$)である。

Eom らにより図3に示す光ファイバを用いて接触子をレーザトラッピングする方式¹³⁾の測定手法が考案されている。直径 $8\mu\text{m}$ の接触子は光ファイバから照射される光によりトラッピングされているため低測定力で測定対象面への接触が可能である。

八日市屋らによりスタイラスを固定した揺動部にミラーを取り付け、ミラーの傾きおよび変位をレーザーを用いて検出するプロブが開発されている¹⁴⁾。スタイラスの直径は $30\mu\text{m}$ であり、最小内径 $50\mu\text{m}$ 、深さ $500\mu\text{m}$ までの穴を測定力 0.3mN で三次元形状の測定が可能である。

図4 微小径穴測定装置概略図

図5 スタイラス写真

図4は筆者らが開発に取り組んでいる光ファイバプローブの概略図およびスタイラスの写真¹⁵⁾である。直径が3 μm の光ファイバに直径が5 μm のガラス製の接触子が固定されたもの(全長2mm)をスタイラスとして用いる。スタイラスシャフトは鉛直方向に配置するため、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、スタイラス接触子上方1mmの位置には半導体レーザーが設置されており、スタイラスシャフトに向かってXY方向から集束レーザー光を照射する。図5にレーザーが照射されたスタイラスの写真を示す。レーザー光の光強度はファンクションジェネレータを用いて100 kHzで変調する。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(PX, PY)で受光する。ここで、スタイラス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。接触子が測定対象面に接触していない状態では、2分割型フォトダイオードで受光する各光強度値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

図6 直径10 μm の微小径穴および測定中の写真

イルスシャフトが変位すると光強度値に差が生じ、接触方向および接触変位量を検出できる。出力信号は、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。一般に接触式のプローブを用いる場合、接触を検知するためにはスタイラス接触子の測定対象面への接触を接触検知部まで伝達するためにスタイラスシャフトに剛性が必要であるが、本方式ではスタイラスシャフトの変位を非接触で検出しているため、さらなるスタイラスシャフト小径化の可能性を有する。また、プローブ検出機構が簡便であり製作も容易¹⁶⁾で、微小径(5 μm 以下)の高アスペクト比プローブが製造できる。測定分解能は約3 nmである。

図6に直径10 μm の微小径穴(穴深さ45 μm)および直径5 μm の接触子を用いて微小径穴を測定している写真を示す。接触子が穴壁に接触する際のステージ移動速度は1 $\mu\text{m}/\text{s}$ 、測定穴深さは40 μm である。接触子と穴壁の接触方位角度10°ごとに+Z方向に5 μm ピッチで走査した結果(三次元形状の表示)を図7に示す。測定時間は約15分であり、測定範囲での穴径の最大値は10.45 μm である。

図8に直径100 μm の微小径穴の入り口部形状写真およ

図7 直径10 μm の微小径穴の測定結果 図8 直径100 μm の微小径穴および穴入り口部断面の測定結果

び入り口部断面の測定結果を示す。穴入り口部が少し拡大しており、バリ高さが約5 μm であることが確認できる。

3. お わ り に

本稿では、直径100 μm 以下の微小径穴形状測定ニーズ、問題点、現状の開発動向などについて紹介した。今回紹介した技術は主にプローブに関するものであるが、同時にプローブの校正に使用する標準試料や測定時のスタイラスや穴の簡便な観察方法のニーズも増加している。また、穴の直径、真円度、真直度および円筒度の測定だけではな

く、ノズル穴などのテーパ・穴入り口部・出口部形状、プリント基板穴のレーザ加工後の止まり穴底粗さ、マイクロリアクタなどの微細溝の側壁粗さ、注射針穴内壁の粗さなどの多様な測定技術が要求されており、各要求に応じたスタイラス先端形状および測定方法の開発が今後要求されていくものと思われる。

参 考 文 献

- 1) 丸山六男：光学的方法による小穴内径測定装置の開発，精密工学会誌，**62**，1 (1996) 145.
- 2) 秋山伸幸，北野哲彦，吉田昌弘，藤本頼助，幸平博喜，福島忠雄：微小径深穴用光学式内径測定装置の開発，精密工学会誌，**62**，4 (1996) 584.
- 3) 松井健太，高橋哲，高増潔，松本弘一：タンデム低コヒーレンス干渉を用いた微小内径の非接触測定技術の開発（第4報）—誤差解析と内径測定実験—，2012年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(2012) 459.
- 4) T. Masuzawa, Y. Hamasaki and M. Fujino: Vibroscanning Method for Nondestructive Measurement of Small Holes, Annals of the CIRP, **42**, 1 (1993) 567.
- 5) 山本正樹，山口恵作，青木新一郎：バイプロスキヤニング法を用いた微細形状測定システムの開発，精密工学会誌，**67**，2 (2001) 251.
- 6) T. Masuzawa, B.J. Kim, C. Bergaud and M. Fujino: Twin-Probe Vibroscanning Method for Dimensional Measurement of Microholes, Annals of the CIRP, **46**, 1 (1997) 437.
- 7) K. Hidaka: Study of a Small-Sized Ultrasonic Probe, Annals of the CIRP, **55**, 1 (2006) 567.
- 8) M.B. Bauza, R.J. Hocken, S.T. Smith and S.C. Woody: Development of a Virtual Probe Tip with an Application to High Aspect Ratio Microscale Features, Review of Scientific Instruments, **76**, 095112 (2005) 76.
- 9) J.D. Claverley and R.K. Leach: A Vibrating Micro-scale CMM Probe for Measuring High Aspect Ratio Structure, Microsystem Technologies, **16** (2010) 1507.
- 10) H. Schwenke, F. Wäldele, C. Weiskrich and H. Kunzmann: Opto-Tactile Sensor for 2D and 3D Measurement of Small Structures on Coordinate Measuring Machines, Annals of the CIRP, **50**, 1 (2001) 361.
- 11) M. Wissmann, H. Schwenke and U. Neuschaefer-Rube: Speckle Correlation Method for 3D-Deflection Measurement of the Tactile-Optical Microprobe, Proceedings of the ASPE Annual Meeting 2006, Monterey, USA, (2006) 79.
- 12) B. Muralikrishnan, J.A. Stone and J.R. Stoup: Fiber Deflection Probe for Small Hole Metrology, Precision Engineering, **30** (2006) 154.
- 13) S.I. Eom, Y. Takaya and T. Hayashi: Novel Contact Probing Method Using Single Fiber Optical Trapping Probe, Precision Engineering, **33** (2009) 235.
- 14) 八日市屋元夫，舟橋隆憲，高谷裕浩：超高精度形状測定器UA3Pシリーズによる微細形状の高精度測定，2011年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(2011) 878.
- 15) 村上洋，甲木昭雄，鬼鞍宏敏，佐島隆生，近藤藤二：光ファイバプローブを用いた微細三次元形状精度測定システムの開発—測定対象面傾斜角度の影響—，2011年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(2011) 811.
- 16) H. Murakami, A. Katsuki, H. Onikura, T. Sajima, N. Kawagoishi and E. Kondo: Development of a System for Measuring Micro Hole Accuracy Using an Optical Fiber Probe, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, **4**, 5 (2010) 995.