微細穴加工と計測の最前線*

Forefront of Micro-hole Machining and Measurement

増沢隆久** 高増 潔***

Takahisa MASUZAWA and Kiyoshi TAKAMASU

Key words microhole, minute hole, nozzle, machining, drilling, aspect ratio, measurement, micro CMM, probe

1. 微細穴加工—はじめに

「微細」も「穴」も極めてあいまいな概念なので、「微細穴」も最近広く使われる言葉でありながら、その意味するところは対象とする事項によってさまざまである。加工の分野では通常材料を貫通した空間または比較的アスペクト比（深さ/直径）の大きいくぼみを「穴」とみなしている。「微細」に関しては、現場では、従来用いてきた装置で加工するのに小さすぎれば5 mm ぐらいでも「微細穴」とされることがあるが、本稿では「穴」のさしわたし（直径相当）が500 μm 以下の場合を想定して述べることにする。

2. どんな加工法があるか

微細加工を可能とする必要条件は、加工単位（一つの加工現象で除去/付加される材料の量）を小さくすることと、除去/付加位置の精度を高くすることであるから、適用可能な加工法は数限りなくある。本特集で詳しく取り上げることのできる加工法はわずかであるが、この分野の現状と将来について考える場合には、一応主要な加工法の全体像を把握しておくことが必要なので、その概略を記しておく。

微細加工に現に適用されているか、適用研究が進んでいる加工法には大きく分けて次の三系統がある。

A. 工具を使う加工法

これは加工における形状指定要因（SSF, Shape

Specification Factor）として工具（の形状と移動軌跡）を用いるもので、切削をはじめとする多くの手法が含まれる。レーザのような映像工具もここに含めることにする。

B. マスクを使う加工法

これはSSFとしてマスク（加工しない部分を覆い隠す）を用いるもので、半導体製造工程などに多用される手法である。マスクでは穴の（材料表面における）2次元の形状のみを指定するので、穴の内部形状等を指定するには何らかの工夫を要する。

C. 特殊な加工法

穴を掘るという感覚とは異なるやり方で最終的に穴を入手できる方法もいくつかあり、用途によっては有用である。

2.1 工具を使う加工法

2.1.1 切削

穴加工の最も一般的な手法はドリルを用いる切削である。細いドリルを入手できれば微細穴加工が可能となる。ただし、切削の加工原理より、材料を塑性変形により破壊に至らせるので、微小寸法になるほど転位による変形寄与が減少するため、ドリルの素材は被加工物の素材よりせん断弾性係数の大きい材料でなければならない。このため超硬合金など、高硬度材料のドリルが多用される。

ドリルは複雑な形状をしているので、いかに微細なドリルを実現するかが技術上のポイントとなる。現在では研削技術の向上により微細なドリルが入手でき、セラミック¹⁾、ガラス²⁾、Ti²⁾、SUS²⁾などに直径10~30 μm 程度の穴加工が可能である。

2.1.2 放電加工

放電加工では工具形状が単純なので切削より微細加工への適用が容易である。しかし、一般の放電加工機では放電のエネルギーが大きすぎ、微細加工には適していない場合がある。特に100 μm 以下の穴加工では、パルスエネルギーを絞った放電加工機でないと対応できない。そのような専用機であれば直径10~20 μm の穴加工は容易である³⁾⁴⁾、簡易なものでも30 μm 程度まで対応できる⁵⁾。ただし、今のところ導電性材料が対象である。

*原稿受付 平成24年3月6日

**正会員 MMTC（増沢マイクロ加工技術コンサルティング）（神奈川県相模原市南区相模大野3-11-17-403）

***正会員 東京大学大学院工学系研究科（東京都文京区本郷7-3-1）

増沢隆久

1971年東京大学大学院精密機械工学専攻修了、工学博士。各種手法によるマイクロ加工と計測

の研究・教育に従事。著書等は「やさしいマイクロ加工技術」（日刊工業新聞社）、「マイクロ加工技術【第2版】」（日刊工業新聞社（共著））など。

高増 潔

1982年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。工学博士。東京電機大学工学部助教授を経て、現在は東京大学大学院工学系研究科教授。

2.1.3 電解加工

電解現象を用いて材料を溶出させるのが電解加工である。加工の際に力が加わらないことと加工面が滑らかなことなどが特長で、パイプ状の工具電極を用いると非常に深い微細穴の加工が可能である。最近では極短パルス ($\mu\text{s}\sim\text{ns}$ オーダーのパルス幅) の電解加工技術が発展しつつあり、直径数十 μm ほどの穴加工も可能となっている⁶⁾。

2.1.4 打ち抜き

上述のような穴加工技術でダイを作れば微細な打ち抜きも可能となる。型合わせには高い技術・技能を要するが、比較的軟質な金属やプラスチックであれば直径数十 μm の打ち抜きが可能である⁷⁾。

2.1.5 レーザ加工

レーザ加工はエネルギーの集中注入が可能なので、高速の穴加工に向いているが、微細加工の場合、熱影響層やドロスの付着が難点とされてきた。しかし紫外レーザや超短パルスレーザではこうした欠点が少ないので、微細穴加工への適性が高まりつつある。

2.1.6 超音波加工

超音波加工は遊離砥粒を用いる加工であり、振動雰囲気であることから加工くずの排出が容易であり、微細加工に適している。セラミックなどの硬脆材料に対しては有力な手法となっており、直径数十 μm の穴加工が可能である。

2.2 マスクを使う加工法

2.2.1 エッチング

加工しない領域をマスクで覆って、露出した部分のみを腐食除去するのがエッチングである。液中で溶出させる方法、真空中でスパッタさせる方法 (ドライエッチング) などがあり、加工単位を極めて小さくできることから、超微細な穴加工が可能である。一方、原子レベルの反応に基づくため、加工しやすい材料は限定される。半導体素子の開発により発展してきた手法であることから、シリコン等の加工で特に重要な位置を占めている。

2.2.2 電解加工

材料除去を電気化学的現象により行うのが電解加工である。導電性材料に限られるが、ウエットエッチングと似た特徴をもつ。

2.2.3 プラスト加工

砥粒を吹き付けることにより材料除去を行う手法である。従来比較的大きな対象が主であったが、最近では微細な砥粒を用いる技術も向上しつつあり、直径数十 μm の穴加工も可能になっている⁸⁾。

2.3 特殊な加工法

2.3.1 パイプの利用

ガラスや金属のパイプは加熱や伸延により非常に細くすることができる。その際、内径も微細寸法になるので、これを他の材料の中に埋め込めば微細な穴を得ることができる。

2.3.2 電鑄

細いピン、ワイヤなどは比較的容易に入手できる。その

まわりにメッキによる金属層を成長させ、後からピンやワイヤを引き抜けば結果として細穴を形成することができる。ピン材料としてはステンレス鋼など後で引き抜きが可能なもの、あるいはエッチングや加熱・蒸発などで除去できるものを選ぶ必要がある。

3. 微細穴加工の現状と将来の方向

3.1 微細化

細穴加工技術は長年にわたりさらなる微細化を追求してきた。今後もその傾向は続くものと思われる。

上述のように多くの加工法ですでに直径数十 μm の加工が容易に行えるレベルに到達している。基本的には工具の微細化によりさらに一桁の微細化は達成されることがほぼ確実である。実際、放電加工^{9)~11)}および切削¹²⁾では数 μm の穴加工が実用となっている。もちろん、エッチングにおいては従来より数 μm の加工が普通に行われており、最近ではサブミクロンの加工も広く行われるようになった。また、塑性加工で凹みを作り、後処理を施すことで数 μm 径の穴を得るという複合的手法も、紡糸ノズルを生産する工程としてすでに確立している¹³⁾¹⁴⁾。

切削では切刃の先鋭化、放電加工ではパルスエネルギーの微小化、砥粒利用の手法では砥粒の微細化とその取り扱い手法の開発、などにより、さらに微細化が進むものと思われる。

3.2 高精度化

穴径が小さくなるほど加工誤差の絶対値が大きく影響するようになる。丸穴であれば直径と真円度、貫通穴では上下の直径差、また多数穴であれば穴相互間の位置誤差などが重要である。

工具を回転させるタイプの加工法では偏心、振動等を抑えて真円度を上げ、直径増大を抑えなければならない。放電加工では工具の入り側と出側の直径差を抑える工夫が必要である。また、ドリル加工では返りを抑制または除去する技術を向上させる必要がある。

どの手法においても、工具の位置決めやパターン寸法・配置においてサブミクロンの精度を確保することが必須である。また工具自体の寸法精度も当然サブミクロンレベルでなければならない。

逆に、微細穴加工で有利な点として、加工に際して主軸の動力が微小でもよいこと、また、全てにおいて機構が小型でよいことが挙げられる。これらを精度向上に活用していくことが重要であろう。

3.3 高速化

微細穴の場合、配列された穴など、多数穴加工が必要となることも多い。したがって加工時間短縮は重要な課題である。レーザ加工など高速加工向きの加工法の精度向上による適用、あるいは切削や放電加工などの高精度加工法の高速度化による適用などのアプローチが考えられる。

3.4 深穴化

タービンプレードの冷却孔に代表される微細深穴加工は

引き続き重要な技術である。より広い方面で深穴加工の要求は高まりつつある。

深穴加工での一般的な課題は加工くずの除去である。穴が深くなるほど、加工により生じたチップを外部に排出するのが困難になる。ドリルにおいても、放電加工においても、深穴加工では間欠的に工具を引き戻してチップ排出を行うことが広く行われている。このような工具引き戻しを行わなくてよいのはパイプ電極で加工液を強制循環させる電解加工や放電加工である。しかし、あまり小径になると流量が激減し、噴流の効果が得られない。パイプが使えない場合、工具に超音波などの振動を与えると効果があり、最近ではドリル加工¹⁵⁾、電解加工¹⁶⁾などにおいて超音波振動の付与に関する研究が進みつつある。また、放電加工においてはパルス電源の改良による深穴対応も進められている¹⁷⁾。

3.5 難加工材料対応

微細穴はわずかな酸化、汚染、傷などで機能不良に陥りやすい。したがって、耐薬品性や機械的強度の高い材料が適する場合が多い。こうした材料は一般に加工し難いことが多いという問題がある。また、複合材、アモルファスなどへの微細加工も徐々に必要性が高まりつつある。

難加工材料はそれぞれ個性が強いので、従来微細加工に適用されたことがないような加工法も含め、各手法における微細寸法への適用技術を切り開いていく必要がある。

3.6 形状の多様化

穴加工といえばドリルなどの回転工具で加工することが多かったため、ストレートな丸穴のイメージが強いが、設計上そのような穴が最適でない場合も少なくない。角穴、楕円形穴、斜め穴、テーパ穴など、形状の次元数の高い穴への要求も少しずつ高まることが予想される。

異形穴に対応するには、より直径の小さい工具、または微細かつ異形の工具が必要となる。つまり、異形穴の微細加工は丸穴加工よりさらに微細な加工技術の領域となる。研究、実用の両面で課題は山積しているといえよう。

4. 微細穴の計測

微細穴の計測は、古くて新しいテーマであり、現在でも重要な研究課題となっている。これは、微細穴の内面の計測は本質的な難しさをもっているためである。穴の外側からの計測には限界があり、内側から計測するには穴の直径より小さいセンサまたはプローブヘッドしか、穴の中に入ることにはできない。特に、アスペクト比が大きい場合は、外側からの計測が難しく、内面にセンサを入れる必要がある。これを解決するには、穴を切断して測定する方法や、穴に樹脂などを挿入しレプリカを取る方法などもあるが、本解説では対象外とする。

5. どんな計測法があるか

微細穴計測は、測定対象とする穴の仕様に依存している。直径が1 mm 以下であるか、アスペクト比がどのくら

いか、穴の底面が通し穴になっているか止まり穴になっているかによって、適用できる計測方法が変わってくる。また、内径計測だけを行うか、内面の形状計測が必要かによっても対応する手法が変わってくる¹⁸⁾。

以上に対応した測定手法の分類としては、以下の3つの系統がある。

A. プローブを使う方法

これは、小さなプローブを微細穴に挿入する方法である^{19)~23)}。微細穴側面への接触については、プローブの付け根などに設置した検出器で検出する。このタイプでは、接触式のプローブを用いる場合が多く、測定対象の影響を受けにくい汎用的な計測方法である。測定可能な穴の内径およびアスペクト比は、プローブの大きさに依存するが、かなり小型のプローブが開発できている。

B. 検出器を挿入する方法

これは、検出器を微細穴に挿入する方法である。検出器としては非接触の光センサが使われることが多い²⁴⁾²⁵⁾。検出器のサイズの制限により、測定できる微細穴の内径が制限される。一方、アスペクト比については、大きなものも測定可能である。

C. 外部から測定する方法

これは、微細穴の外部から光線を照射し、小穴の内面を測定する方法である²⁶⁾。この方法では非接触で測定可能であるが、一般的に通り穴が対象となり、アスペクト比などの制限も大きい。最近では、X線CTを工業分野で使う方法も用いられるようになっている⁹⁾。

5.1 プローブを使うタイプ

5.1.1 機械的な計測

接触的なプローブを使う方法では、1 mm 以上の内径については、二点式および三点式内側マクロメータ、球を2つに割った形の端子を使うシリンダゲージなどの一般的な機械計測¹⁸⁾が適用できる。

5.1.2 マイクロ CMM

マイクロ CMM (Coordinate Measuring Machine : 三次元測定機) といわれるタイプの測定機の開発、商用化が行われている。これらの測定機は、一般的な三次元測定機を高精度化すると同時に、微細構造が測定できるプローブシステムを導入したものであり、プローブシステムの開発が重要となっている。

IBS 社が開発したマイクロ CMM の ISRA400 では、400 mm までの測定対象に対して、サブマイクロメートルの精度で三次元測定が可能となっている²³⁾。プローブシステム triskelion は直径 70 μm 、長さ 6 mm のプローブが、半導体プロセスで加工され、複数の力センサをもつ検出部に接続されている。プローブは三次元的な接触が検出可能で、分解能 3 nm、測定不確かさ 20 nm の測定が可能である。

同様のコンセプトのマイクロ CMM、ミットヨ M-NanoCord では、超音波微細プローブ UMAP103 を用いている²²⁾。これは、直径 30 μm のスタイラスで、繰り返し精度 70 nm での測定が可能である。このプローブは、共

振周波数で振動していて、測定物に接触した場合の周波数変化を検出している。

5.1.3 その他のプローブ

その他のプローブとして、放電加工によって作った直径数十 μm のプローブを使用した測定器の開発例がある²⁰⁾。放電加工を利用することで、複雑で微細なプローブを加工することが可能となっている。光トラップを利用したプローブも提案されている²⁸⁾。直径 8 μm のガラス球を、レーザーでトラップして測定対象に近づけることで、測定を行っている。トラップの条件などに制限があるが、非常に小さな球で、非常に力の小さい測定ができる可能性がある。

5.2 検出器を挿入するタイプ

光センサをもつ検出器によって、非常に深い穴を測定可能としている方法が提案されている²³⁾。しかし、検出器の大きさから内径 30 mm 以上の穴が対象であるが、長さ数 m の深穴が測定可能である。このように検出器挿入タイプでは、検出器の大きさに依存するため、1 mm 以下の内径の測定は難しい。一方、検出器の自由度が大きいため、非常に深い穴、内面の形状などの測定が可能である。

先端を 45 度に研磨した光ファイバーを、検出器として利用する内径計測システムが提案されている²⁵⁾。内径の検出は、光ファイバーと内面それぞれからの光反射を、絶対測長できる干渉システム（低コヒーレンス干渉）で行っている。検出器を挿入するタイプであるが、プローブタイプと同じように、検出器の本体を外部に置くことができ、小型化が可能となる。この研究では、光ファイバー径が 30 μm のものが試作されている。

5.3 外部から測定するタイプ

5.3.1 光線タイプ

光線タイプの例として、光ファイバーを光源として微細穴の内面を照射し、反射光を CCD カメラで検出するタイプが提案されている²⁵⁾。この方法を利用することで、内径 125 μm のフェルールの内面の測定を精度 0.1 μm 程度で可能としている。光線タイプでは、対象は限定されるが高速な非接触測定が可能となる。

5.3.2 X 線 CT

X 線を使った非破壊検査は、従来は欠陥検査を目的に使用することが多かったが、最近は、工業用の X 線 CT（X 線コンピュータトモグラフィ）が普及し、欠陥検査だけでなく、寸法などの計測が可能なシステムとしてメトロロジー CT が市販されている。Zeiss 社の X 線 CT 装置では、データを従来の三次元測定機と同様のソフトウェアで計算が可能なシステムとなっている²⁷⁾。測定範囲は径 300 mm × 350 mm で、マイクロメートルオーダーの小穴の内径や内面の断層写真および形状が測定可能である。X 線 CT は、高分解能で広い寸法の範囲、アスペクト比の大きな測定が可能であり、今後の有力な手法となると考えられる。

6. 微細穴計測の現状と将来の方向

6.1 より微細穴への対応

より微細穴への対応については、プローブタイプではプローブが接触することから強度などの問題で 10 μm 以下のプローブの開発は難しい。有力な方法としては、光ファイバーを用いる方法と、X 線 CT を利用する方法である。通し穴で素材や直径などが限定されている場合には、光線タイプなどを利用して高感度な方法が実現できる。

6.2 高精度化と標準

素材や直径などが限定されている場合には、比較測定などの相対的な手法による高精度化が可能となる。プローブタイプの場合には、方向性やプローブの真球度などが問題となる。X 線 CT の場合には、素材やデータ処理の問題からやはり、絶対精度を向上させるのは難しい。

どの手法においても、精度評価が重要となる。精度評価には、トレーサビリティが取れている標準が必要である。内径の場合にはリングゲージが標準となるが、一般に供給されているリングゲージは直径が 1 mm くらいからであり、内径の校正精度もサブマイクロメートルくらいとなっている。より小さな内径で、高精度な標準の開発が重要となる。

6.3 形状測定への対応

内径だけでなく、形状を測定する要求も多くなっている。これには、必要とする分解能によって対応が違ってくる。粗さなどの非常に細かい分解能で測定が要求される場合への対応は、かなり難しい。プローブタイプではプローブの直径、光線タイプでは光のスポット径、X 線 CT ではボクセルサイズが問題となり、簡単な解決方法はない。汎用的な形状測定では、プローブタイプが対象の表面性状の影響を受けにくく有利であるが、分解能は高くできない。全体の形状を高速に測定するには光線タイプ、X 線 CT が有利である。

6.4 今後の方向性

微細穴計測手法について、機械的な手法から最新の X 線 CT まで、いくつかの手法について概要を説明した。微細穴計測は、まだ多くの課題が残っていて、汎用的な手法が存在しない。小型プローブを微細加工技術で作成し、マイクロ CMM などで活用する方向が一つの有力な方法であり、うまく普及が進めばプローブを安価で提供できる可能性がある。一方、光センサを利用した方法は、汎用的よりは、限定された部品に対して高速、高精度を目指す方法として、個別な開発が期待される。最後に、X 線 CT は有力な手法で、今後データ処理ソフトウェアの開発が進み、精度評価ができるようになれば、工業的な利用が多くなる。微細部品に対して行われるようになると思われる。

参 考 文 献

(実用状況を示すためカタログなども含めた。カタログの最新情報はホームページ等で確認されたい。)

- 1) 伊藤精工(株), カタログ, (2006).
- 2) (株)信栄テクノ, カタログ, (2010).
- 3) (株)エレニックス, ホームページ, (2012).
- 4) SARIX SA, カタログ, (2006).
- 5) MMTC, ホームページ, (2012).
- 6) B.J. Park, B.H. Kim and C.N. Chu: The Effects of Tool Electrode Size on Characteristics of Micro Electrochemical Machining, *Annals of the CIRP*, **55**, 1 (2006) 197-120.
- 7) (株)ピーエムティー, カタログ, (2009).
- 8) 新東ブレーター(株), カタログ, (2006).
- 9) (株)ソディック, カタログ, (2009).
- 10) 大和テクノシステムズ, カタログ, (2007).
- 11) SmalTec International, カタログ, (2009).
- 12) 中田製作所(株), ホームページ, (2012).
- 13) (株)化繊ノズル製作所, カタログ, (2009).
- 14) 東レ・プレシジョン(株), カタログ, (2007).
- 15) M. Aziz, O. Ohnishi and H. Onikura: Novel Micro Deep Drilling Using Micro Long Flat Drill with Ultrasonic Vibration, *Precision Engineering*, **36** (2012) 168-174.
- 16) I.S. Yang, M.S. Park and C.N. Chu: Micro ECM with Ultrasonic Vibrations Using a Semi-cylindrical Tool, *Int. J. Prec. Eng. and Manufacturing*, **10**, 2 (2009) 5-10.
- 17) 浅井巖慶, 岡根正裕: 最新細穴放電加工機の新技術, 型技術, **26**, 7 (2011) 96-97.
- 18) 高増潔: 微細管内径および内面の計測, 砥粒加工学会誌, **56**, 2 (2012) 94-97.
- 19) 二点式/三点式内側マイクロメータ, シリンダゲージ, ミットヨホームページ <http://www.mitutoyo.co.jp/>
- 20) 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) 251-255.
- 21) 村上洋, 甲木昭雄, 鬼鞍宏猷他: 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), 精密工学会誌, **75**, 12 (2009) 1476-1481.
- 22) 微細形状計測システム M-NanoCoord シリーズ, ミットヨホームページ <http://www.mitutoyo.co.jp/>
- 23) ISARA400, IBS 社ホームページ <http://www.ibspe.com/>
- 24) 甲木昭雄, 村上洋, 鬼鞍宏猷他: オートコリメーション方式深穴形状精度測定システムの開発 (第1報), 精密工学会誌, **73**, 7 (2007) 813-817.
- 25) 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3報), 2011 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 2011, N63.
- 26) 秋山伸幸, 小林典之他: 小径穴内面形状計測装置の開発, 精密工学会誌, **68**, 7 (2002) 967-971.
- 27) X 線 CT 三次元測定機 METROTOM, Zeiss 社ホームページ <http://www.zeiss.co.jp/>
- 28) 高谷裕浩, 佐藤憲章, 高橋哲, 三好隆志, 清水浩貴, 渡辺万次郎: ナノ CMM レーザトラッキングプローブに関する研究 (第1報), 精密工学会誌, **66**, 7 (2000) 1081-1086.